

# 東京都下水道局技術調査年報

## - 2 0 0 4 -

平成 16 年 10 月  
東京都下水道局

# 技術調査年報の発刊にあたって



景気は先行きに不安を残しながらも緩やかな回復が続けています。しかし、都は財政再建の道半ばにあり、厳しい状況が続いています。下水道財政も料金収入の逡減傾向に歯止めがかかりません。

こうした中にあっても、下水道は快適な都民生活を実現するために欠くことのできない重要な社会資本であり、一日たりとも休むことのできないのが下水道事業です。

東京の下水道事業は、老朽化した施設の再構築、浸水被害への対応、快適な水辺空間を目指した合流式下水道の改善、地球温暖化の防止など、なお多くの課題を抱えています。

これまでもこうした課題に積極的に取り組み、成果をあげてきましたが、今後はさらに一層、施設や設備の長寿命化、コスト縮減や費用対効果といった視点に立った事業運営が求められています。加えて、これまで事業の中核を担ってきた団塊の世代が大量に退職する時期を間近に控え、事業そのものの進め方についても見直しが迫られています。

こうした状況において、新技術の開発や導入はもとより、職員一人一人がこれまで培ってきた技術や創意工夫などを十分活用することが必要です。そのため、関係部所の連携が不可欠であり、局の総合的な取り組みが求められています。

本技術調査年報は、局内における平成15年度の技術開発の成果をまとめたものです。その内容は、計画・設計・施工、維持管理、下水の処理、汚泥の処理、雨天時対策、環境対策、資源化・再利用などの広範囲な分野に及んでおり、明日の下水道事業に求められている課題に広く関わりを持つものです。また、そのどれもが、下水道の現場における問題発見とその解決を志向しています。

今後も「お客さまの視点」、「経営の視点」、「環境の視点」を絶えず念頭に置きながら事業運営するとともに、「経営計画2004」、下水道事業における地球温暖化防止計画「アースプラン2004」と「再構築」、「雨水整備」、「合流改善」の3つの新クイックプランの実行に関わる技術開発に取り組んでいきたいと考えます。

この調査年報には、職員の抱えている技術的課題の解決の糸口となる情報が含まれており、技術の向上や継承に役立つものであると確信しています。技術情報の共有という視点で、日々の業務の中で積極的に活用されることを期待しています。

2004年（平成16年）

下水道局長

二 村 保 宏

## 目 次

### 技術調査年報の発刊にあたって

要旨集	1
-----	---

### 1 . 計画・設計・施工

1 - 1 赤羽幹線エアクッションサイフォン管での空気抜き施設の 設計について	31
1 - 2 下水道用監視制御システム標準化調査（その2）	37

### 2 . 維持管理

2 - 1 耐酸性モルタル及び耐食性 FRP 補強材による 下水道施設における劣化コンクリート補修工法の開発	49
2 - 2 分光光度計の積分値による放流水着色連続監視	63
2 - 3 下水道管きょシステムの安全機能向上調査（その2）	71
2 - 4 ディーゼルエンジン排ガス除塵・脱臭用触媒フィルタ等の 開発に関する共同研究	81
2 - 5 硫黄固化体の耐腐食性能調査	89

### 3 . 下水の処理

3 - 1 標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合処理による りん除去効果と数値化による評価	99
3 - 2 溶解性りん再溶出に関する調査	105
3 - 3 晶析法を適用した汚泥集約処理施設からのりん除去 （最終報告）	115
3 - 4 高度処理における効率的な栄養塩除去の機構解明と 下水処理施設の評価手法に関する研究	129
3 - 5 A <sub>2</sub> O 法処理施設の最適運転手法の検討	137
3 - 6 りん除去メカニズムからみた A <sub>2</sub> O 法の りん処理対策について	147
3 - 7 砂ろ過（固定床型・移床型）施設の機能向上技術の開発	155

### 4 . 汚泥の処理

4 - 1 汚泥からの有機酸回収と活用技術の開発	171
--------------------------	-----

### 5 . 雨天時対策

5 - 1 下水中における白色固形物の生成に関する調査	183
5 - 2 吹流し状の油吸着材を活用した 管路内の白色固形物対策に関する調査	191

5 - 3	二段造粒式沈殿濃縮装置の技術開発	203
5 - 4	汐留地区における雨天時の路面流出水汚濁負荷量等調査	211
5 - 5	移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の 高度除去に関する技術調査	223
<b>6 . 環境対策</b>		
6 - 1	污泥処理における温室効果ガス排出量削減調査	241
6 - 2	お台場海浜公園における海域浄化実験	253
<b>7 . 資源化・再利用</b>		
7 - 1	オートクレーブを用いた焼却灰無害化技術と資源化調査	267
7 - 2	重金属類を溶出抑制した下水污泥焼却灰の資源化調査	273
7 - 3	低コストマイクロ水力発電設備の実用化研究	285
<b>8 . 国際論文</b>		
8 - 1	INNOVATION OF ACTIVATED SLUDGE MODEL DEVELOPED BY IWA	295

Copyright©(2004) by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government  
All rights reserved. No Parts of this report may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.

The mention of trade names or commercial products in this report is for illustrative purposes and does not constitute endorsement of recommendation for use by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.

この報告書に関する権利は、東京都下水道局にあります。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、東京都下水道局長の文書による承認が必要です。また、この報告書の中の商品名又は製品名は、事例として示したものであり、東京都下水道局が使用上の性能を確認したり、推奨したりするものではありません。

#### 用語の使用

本文中の用語は、「下水道用語集 2000 年版」( (社)日本下水道協会 )( 以下「用語集」) によった。

なお、以下の用語は、東京都下水道局で使用している用語に従った。

人孔(マンホール)

ポンプ所(ポンプ場)

水再生センター ( 処理場 )

第一沈殿池(最初沈殿池)

第二沈殿池(最終沈殿池)

# 要 旨 集

# 1 - 1 赤羽幹線エアクッションサイフォン管での空気抜き施設の設計について

建設部 土木設計課

## 1. 調査目的

本調査は、赤羽幹線エアクッションサイフォン管の安全対策として、新たな空気抜き施設を検討することを目的とした。

## 2. 調査内容

赤羽幹線は、板橋区志村三丁目付近で新河岸川を下越しし、浮間水再生センターの主ポンプ室へサイフォン構造で流入する遮集幹線である。晴天時の少流量による固形物堆積を防止するため、エアクッションサイフォン施設とした。雨天時には、エアクッションサイフォン内の圧縮空気を下流側の浮間水再生センター主ポンプ室で排出して遮集流量を収容する。

調査では、圧縮空気排出のバックアップとして上流側の志村ポンプ所への空気抜き施設を3次元FEM解析による数値シミュレーションによって検討した。

## 3. 調査結果と考察

志村ポンプ所へ圧縮空気を排出するよう3次元FEM解析による数値シミュレーションを行った結果、志村ポンプ所への空気抜き施設の開口面積が $9\text{m}^2$ 以上であれば、安全に圧縮空気を排出できると分かった。FEM解析概要を図1に、空気抜き施設の概要を図2に示す。

## 4. 今後の対応

平成16年12月の完成を目標に空気抜き施設を施工中である。施工状況を図3に示す。

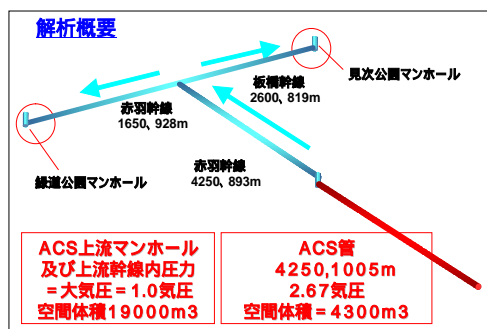


図1 FEM解析概要

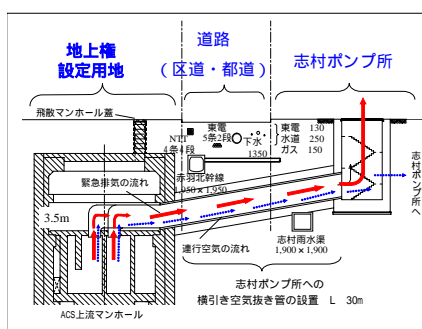


図2 空気抜き施設の概要



図3 施工状況

(キーワード) エアクッションサイフォン、FEM解析、空気抜き施設

## 1 - 2 下水道用監視制御システム標準化調査（その２）

建設部 設備設計課

### 1 調査目的

水再生センター・ポンプ所の監視制御システムは、大規模かつ複雑なゆえに、それに対応できるシステム構築者（メーカ）固有の装置及び技術を駆使して構築されている。このためメーカ間での互換性、拡張性等、柔軟性の乏しいシステムとなっている。

一方、昨今の情報通信技術の発展は目覚ましく、計算機及び通信装置において処理能力と信頼性が大幅に向上している。また、監視制御用ソフトウェアにおいては、通信・電力の分野で、共通のソフトウェアを利用しながらシステムを構築する手法が広まりつつある。

本調査は、下水道監視制御システムが現在有する高信頼性を維持しつつ、基本ソフト（OS:Operating System）を含む中央・ローカル監視制御装置に対するオープン（汎用）技術の適合性、監視制御用ソフトウェアの標準的構成、汎用通信プロトコルの適合性等に関する調査・分析・検討をし、下水道用監視制御システムの標準的な仕様を定めるために行っている。

### 2 調査内容

(1) ハードウェア及び制御 LAN の標準化調査 (2) 監視制御装置のソフトウェア構成標準化調査

### 3 調査結果と考察

#### (1) 調査結果

ア 中央監視制御設備は、処理能力と信頼性が大幅に向上した汎用計算機が使用可能と思われる。

また、監視制御用ソフトウェアの互換性を確保するため、POSIX.1 準拠の OS が動作する汎用計算機とする。（POSIX.1：OS がアプリケーションプログラムに対して提供する機能と呼び出すための方法に関する IEEE 規格。）

イ ローカル制御装置は、JIS B3501～3503 に準拠した汎用 PLC（Programmable Logic Controller）が使用可能と思われる。

ウ 制御 LAN のプロトコルには、Ethernet と TCP・UDP/IP が使用可能であり、構成機器はイーサネットスイッチが有効である。

エ 監視制御用ソフトウェアの仕様として、下水処理を行う電動機やポンプなどを表す情報モデルを作成した。情報モデルとは、再利用や拡張の容易な方法を提供するオブジェクト指向技術に基づいて表したソフトウェア部品の集まりである。

#### (2) 考察

中央監視設備、ローカル監視設備、監視制御ソフトウェア等の標準化の方向が定まってきたが、実機に適用するには検証試験が必要である。

（キーワード）監視制御システム、PLC、情報モデル



## 2 - 1 耐酸性モルタル及び耐食性 FRP 補強材による 下水道施設における劣化コンクリート補修工法の開発

施設管理部 施設保全課

### 1 調査目的

下水道施設の劣化した鉄筋コンクリート構造物に対して施設の供用環境下での耐食性などの機能を得させて、原設計耐力に回復させるため耐硫酸性モルタル（超微粒子高炉スラグ系）と FRP 補強材による補修工法の開発を行なった。

### 2 調査内容

当開発に係る主な調査内容は、以下のとおりである。

- （１）耐硫酸性モルタルの製品性能及び施工性能の確認を目的として、みやぎ水再生センターで試験施工を行った。また、耐食性の確認として、みやぎ水再生センターで劣化度追跡調査、砂町水再生センターで供試体による曝露試験及び硫酸浸漬試験を行った。
- （２）FRP 補強材の製品性能及び施工性能の確認を目的として、みやぎ水再生センターで試験施工を行った。また、耐食性の確認として、砂町水再生センターで供試体による曝露試験及び耐薬品（硫酸、水酸化ナトリウム）試験を行った。
- （３）耐硫酸性モルタルと FRP 補強材との耐力特性の確認を目的として、鉄筋コンクリート梁の静的載荷試験を行った。
- （４）下水汚泥溶融スラグを利用した耐硫酸性モルタルの開発を行った。

### 3 調査結果と考察

結果は、以下のとおりである。

- （１）耐硫酸性モルタルの実施工による耐久性の確認を行った。供用環境下での耐食試験の結果は、腐食にばらつきがあるものや、予想に反して腐食が進行していないものがあった。
- （２）FRP 補強材の実施工による耐久性の確認を行った。耐食試験では、比較用に試験した鉄筋に腐食があったが FRP 補強材の腐食は確認できなかった。
- （３）耐硫酸性モルタルと FRP 補強材との耐力特性は、橋梁等で用いられているポリマーセメントモルタルと FRP 補強材との耐力特性と同様であった。
- （４）下水汚泥溶融スラグ細骨材についてセメント置換用途及び骨材置換用途の検討を行い、耐硫酸性モルタルの要求性能を確認した。

（キーワード）耐硫酸性モルタル、FRP 補強材、劣化コンクリート補修工法

## 2 - 2 分光光度計の積分値による放流水着色連続監視

北部第二管理事務所  
みやぎ水再生センター

### 1．調査目的

みやぎ水再生センターでは、昭和 40 年代以来、放流水の着色問題に苦慮している。平成 12 年 12 月には東京都公害防止条例が環境確保条例として改正され、処理水にも外観(着色)に対する規制が追加されるなど、益々厳しいものとなっている。

従来、着色の程度を評価するのは、人の感覚に頼った方法であったが、試験結果に個人差が大きかった。そこで、個人差のない機器分析による評価方法について検討した。

### 2．調査内容

排水の着色を評価する方法には、人の感覚による官能測定法(着色度、色度)と、分光光度計等による機器測定法が挙げられる。しかし、官能測定法では測定結果に個人差があること、機器測定法では測定結果が人の色感覚と差があることなど、それぞれ問題がある。

近年、合成化学工業等において、分光光度計による吸光度積分値と人の色感覚である着色度を結び付ける試みが行われている。そこで、下水処理水の着色への評価・監視方法として、機器測定による吸光度積分値(積分着色度)の適用性について検討を行った。

### 3．調査結果と考察

放流水を分光光度計で測定した結果、雨天時の放流水量の増加や処理状況による濁度の上昇により、各波長成分の積分値が高く表示される現象が見られた。この原因は、放流水中の汚濁物質の増加及び分光光度計セルの汚れであった。

汚濁物質の除去及び分光光度計セルの汚れを効果的に除去するために、汚濁物質除去フィルター前の配管を改良するとともに、定期的な次亜塩素酸ソーダの注入を行ってセル中に繁殖するカビ類を殺菌した。測定は、着色の微小変化を詳細に把握できるように、可視部(400nm - 700nm)の波長を 1nm 間隔で測定するように変更し、各波長間隔の吸光度の積分値を着色度とした。

これらの改良の結果、放流水の吸光度を正確に測定することが可能となり、積分着色度と官能試験結果との相関性を向上することができた。

(キーワード) 分光光度計 着色度 積分値

## 2 - 3 下水道管きょシステムの安全機能向上調査（その2）

計画調整部 技術開発課

### 1．調査目的

豪雨時における人孔蓋浮上・飛散現象が顕在化しているが、浮上・飛散の要因が設計強度を上回る降雨流入によるものか、あるいは管渠構造によるものか等を実態調査、現地計測、シミュレーション解析等を基に水理・空気力学的に分析することによって、蓋浮上・飛散の起こりづらい安全で最適な管きょシステムのありかたを見出すものである。

### 2．調査内容

蓋の浮上・飛散要因となる水理作用および圧縮空気発生メカニズム等を明確にするため、昨年度に引き続き、区部における過去13年間の人孔蓋浮上・飛散の実態調査と特性分析、現地計測(2箇所)による水圧・空気圧発生要因分析、昨年度蓋浮上・飛散した地域(熊の木排水区)におけるシミュレーション解析を行い、蓋浮上・飛散防止対策優先度判定式、蓋浮上・飛散防止策の提案を行った。

### 3．調査成果と考察

過去の研究及び経験から蓋の浮上・飛散要因として、管きょ天端からの貯留空気塊噴出、人孔蓋下面空間の水面上昇による圧力上昇、水位急上昇による蓋下面への水激圧の発生の3ケースが考えられるが、どのケースがもっとも大きな浮上・飛散現象をもたらすかは降雨強度、周辺環境、管路敷設状況等さまざまな条件によるものと考えられる。

今回の蓋浮上・飛散実態調査の結果、ポンプ排水区に比べ自然排水区における発生頻度が高い、幹線若しくは幹線に近い位置で多く発生している、内径800mm以上の管径での発生頻度が高い、特殊人孔における発生頻度が高い、人孔間距離が長いほど浮上・飛散しやすい、土被りが大きいほど発生頻度が高い等の特性が判明した。

実態調査及びシミュレーション解析の結果、人孔蓋取替え、人孔内改造、空気抜き管設置等の管路改造案を提案したが、人孔内改造、空気抜き管設置については、現地の周辺環境、管路の敷設状況等を勘案した詳細な水理模型実験を実施する必要があることから、早急に対応するためには人孔蓋の取替えが最も効果的である。特にGLV型(雨水人孔ではGL型)、東一型、都型など設置箇所を考慮しながら蓋取替えを行うことで蓋浮上・飛散現象の多くは避けられると考える。

なお、過去に浮上・飛散した人孔情報等を統計的に処理することで数値化し、蓋浮上・飛散の有無を判断できる判別予測式を提案した。この予測式を用いることにより優先的に対策を施すべき人孔箇所を選定できると考える。

(キーワード) 人孔、人孔蓋浮上・飛散、管路施設の安全対策

## 2 - 4 ディーゼルエンジン排ガス除塵・脱臭用触媒フィルタ等の開発に関する共同研究

施設管理部 施設保全課

### 1 調査目的

当局が使用しているディーゼル機関は、大気汚染防止法の規制対象外となる非常時の使用であるため、ばいじん及び窒素酸化物（以下「NO<sub>x</sub>」という。）の対策は未着手であった。

本研究は、地球環境保全の観点から近年、汚染物質としてクローズアップされているばいじん及びNO<sub>x</sub>を、常用並みの排出基準がクリアできるように抑制することを目的とする。

### 2 調査内容

汐留ポンプ所（ディーゼル機関直結の雨水ポンプ：旭硝子(株)が担当）及び鮫洲ポンプ所（非常用発電機の原動機：日本碍子(株)が担当）において、ディーゼル機関の試運転・負荷運転時に発生するばいじん及びNO<sub>x</sub>を抑制するため、排ガス除塵・脱臭用触媒フィルタ（以下「フィルタ」という。）等を開発し、その効果及び長期耐久性を実機で検証した。

### 3 調査結果と考察

#### (1) ばいじん排出濃度

フィルタの設置により、機関起動直後に発生する黒煙の排出を防止することができた。また、ばいじん排出濃度は、規制値（下表参照）以下に抑えることができた。

#### (2) NO<sub>x</sub> 排出濃度

汐留ポンプ所では、アンモニア（NH<sub>3</sub>）の排ガスへの注入とフィルタの触媒効果により、機関起動後 10～15 分程度で NO<sub>x</sub> 排出濃度を規制値以下に抑えることができた。

また、鮫洲ポンプ所では、排気管が長いことによる排ガス温度の減衰をフィルタの熱風加熱（200 程度）により補い、汐留ポンプ所と同等の脱硝効果を得ることができた。

#### (3) フィルタの長期耐久性

フィルタの圧力損失を熱処理等で回復させることにより、10 年以上の寿命が期待できる。

表 排出濃度規制値

項目	規制値（非常用は適用外）	根拠法令等
ばいじん排出濃度	80mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> 以下	大気汚染防止法
NO <sub>x</sub> 排出濃度	110 ppm 以下	都民の健康と安全を確保する環境に関する条例

（キーワード）ディーゼル機関の環境対策、排ガスフィルタ開発、大気汚染防止

計画調整部 技術開発課  
西部第二管理事務所  
新河岸水再生センター

### 1. 調査目的

セメントコンクリートを用いた構造物は、硫化水素が発生する環境下でコンクリートの腐食が進行し、施設の機能及び耐久性の低下が顕在化している。このため、本調査は、セメントコンクリートに比べて高強度で遮水性に優れるとともに、耐硫酸性のある硫黄固化体を用いて下水道腐食性環境下における適用性について研究することを目的とする。

### 2. 調査内容

硫黄固化体の最適な使用材料、配合について検討するため、新河岸水再生センター汚泥濃縮槽の返水ます気相部で、使用材料及び配合を変えた硫黄固化体供試体と対比用のセメントコンクリート供試体を共に暴露し、質量・強度の変化等を調査する。また、二次製品の施工性と耐腐食性能を確認するため、工場製作した硫黄固化体（パネル）を用いて、新河岸水再生センター汚泥濃縮第3号槽返水ますの躯体の試験施工を実施し、一定期間暴露後、コア抜きによる侵食深さ等を調査する。平成15年度は、10月にパネルの設置が完了し、12月から暴露試験を開始した。各種試験は暴露後6ヶ月以降に行う。



図1 供試体暴露状況



図2 硫黄固化体（パネル）

### 3. 調査結果と考察

- (1) 硫黄固化体パネルを組み合わせることで小規模なます構造の施工が可能になった。今後、継ぎ目構造の簡素化や厚みを薄くすることで、施工性の向上やコストダウンにつなげていく。
- (2) 配合等に関する各種調査を実施するとともに、新たな施工技術の開発として吹付け技術の確立、薄型埋設型枠の開発など硫黄固化体の適用拡大に向けた研究を進める。

（キーワード）硫黄固化体、耐腐食性能調査、二次製品

### 3 - 1 標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合処理による りん除去効果と数値化による評価

北部第二管理事務所  
中川水再生センター

#### 1. 調査目的

小菅水再生センターでは、施設の構造の関係からと標準法の活性汚泥とA0法の活性汚泥が混合され返送汚泥となっている。この混合返送汚泥を用いて下水処理を行うことにより、標準法のみの返送汚泥で処理した場合よりも処理水のりん濃度が低下することが確認されている。

そこで、IWA 活性汚泥モデル (ASM) を基に、標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合活性汚泥によるりん処理 (以下「混合処理」) の有効性を証明し数値化すること、また、テーブルテストにより混合処理の効果の詳細を確認することを目的として調査を行った。

#### 2. 調査内容

ASM を用いたりん除去難易度の数値化とテーブルテスト (振とう曝気、14 年度報告) による混合処理の効果を検証した。

#### 3. 調査結果と考察

ASM のパラメータから、冬期の標準法反応タンク出口りん濃度をある程度予測できた。

炭素除去で用いられる BOD-MLSS 負荷の考え方をりん除去に応用し、「りん負荷」という指標を定義した。りん負荷とは、BOD の代わりに嫌気槽末端でのりん濃度 (A) を、MLSS の代わりに嫌気槽内りん蓄積細菌推定濃度 (B) を用い、りん-りん蓄積細菌比率 (A/B) を計算したものである。このりん負荷を用いて比較したところ、高度処理汚泥と標準法汚泥の混合処理では、活性汚泥混合比から推定されるりん負荷よりも低いりん負荷となり、混合処理が非常に有効であることがわかった。さらに、りん負荷を用いることにより、りん除去の難易度を処理場間で比較することが可能となった。

テーブルテストの結果、標準法活性汚泥と A<sub>2</sub>/O 法、または A0 法活性汚泥の混合処理は、標準法の活性汚泥のみの処理よりもりん除去効果が向上した。また、高度処理法活性汚泥の混合比が高いほど、水温が高いほどりん除去効果があった。

混合処理は、高度処理法と同程度にりん除去が可能な場合がある。その場合、全系列を高度処理施設へ変更しなくてもすむために、りん除去施設建設コストを削減することができる。また、標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥との最適混合比は、りん負荷から求められ、りん負荷 1 程度になる混合比が最適と推測された。

(キーワード) りん負荷、混合処理、振とう曝気

**1. 調査目的**

東陽系第二沈殿池では反応タンクで混合液に吸着したりんが第二沈殿池で再溶出する現象が見られ、当センターの水処理上の課題のひとつとなっている。

そこで本調査では、再溶出が起こるメカニズムを把握し、再溶出量を抑制する手法を検討することにより、さらに安定したりん処理を行うことを目的とした。

**2. 調査内容**

テーブル試験により、りんが再溶出する条件を求めた。

実施にて、年間を通しての再溶出量の変化と再溶出が起こりやすい箇所の特定を行った。

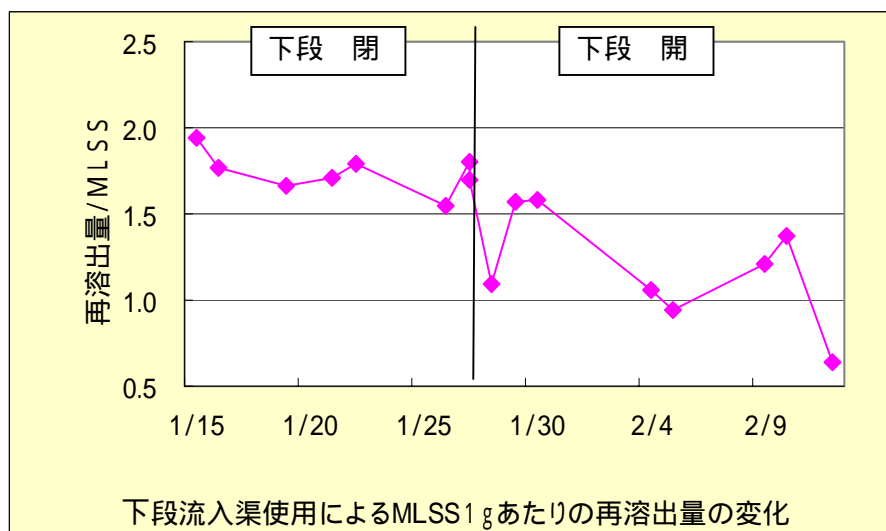
第二沈殿池下段流入渠を使用による再溶出抑制効果について調査を行った。

**3. 調査結果と考察**

再溶出は、嫌気状態に置かれた反応タンク混合液から硝酸性窒素がなくなったときに起こることが確認された。

再溶出は1月、2月に起こりやすく、二階層である東陽系の第二沈殿池では上段に比べて下段の再溶出量が高いことが分かった。

第二沈殿池下段流入渠の使用により、再溶出を抑制する効果が得られた。下図に下段流入渠使用前後の MLSS1 g あたりの再溶出量の変化を示す。



(キーワード) 溶解性りん 再溶出

### 3 - 3 晶析法を適用した汚泥集約処理返流水からのりん除去（最終報告）

東部第一管理事務所

砂町水再生センター

#### 1. 調査目的

砂町水再生センターでは、汚泥集約処理施設である東部スラッジプラントからの汚泥処理返流水を受けている。この返流水のりん負荷は水処理において大きな負担となっており、平成 20 年度より適用される本規制値のりん  $3.0\text{mg/L}$  に対応するためには新たなりん対策が必要である。試算の結果、りんの本規制値に対応するためには、汚泥処理返流水の中でも特にりん負荷の高い遠心脱水分離液のりん酸性りんを 80% 除去することが効率的な方法であることが確認された。そこで遠心脱水分離液を対象として、りんを回収して肥料として活用できる晶析脱りん法の適用について検討を行った。

#### 2. 調査内容

りん除去率の目標値を 80% とし、以下の内容について検討した。

- (1) 小型プラントによる最適晶析プロセスの検討
- (2) 大型プラントによる検討
- (3) 回収物の肥料化の検討

#### 3. 調査結果と考察

- (1) 晶析反応槽前段での pH 前調整、及び二段の晶析反応槽を設けることにより、安定したりん除去を行えることが分かった。
- (2) 処理水量  $576\text{m}^3/\text{日}$  の大型プラントを用いて運転を行った結果、各槽の pH 設定値は pH 前調整 = 6.5、第一晶析反応槽 = 7.5、第二晶析反応槽 = 8.5 が適していることが分かった。この条件で行った連続運転期間中の脱水分離液からのりん酸性りん除去率は、常に目標値の 80% を達成していることが確認された。
- (3) 晶析回収物は肥料としての公定規格を満たし、登録も行われた。このことにより、本法による回収物を肥料として流通させることが可能になった。

（キーワード）晶析法、りんの回収・除去、汚泥処理返流水



### 3 - 4 高度処理における効率的な栄養塩除去の機構解明と 下水処理施設の評価手法に関する研究

計画調整部 技術開発課

#### 1. 調査目的

本研究は高度処理における窒素およびリンの除去に関し、微生物の群集構造解析等を通じて効率的な生物反応条件を提示すると共に、リン除去において栄養源となる有機物の種類と、リン摂取反応の効果を調べる。さらに下水処理場の水処理のためのエネルギー消費、環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を指標にした下水道施設の多面的評価手法の検討を行い、その手法を活用して処理施設の最適運転について解析するために実施したものである。

#### 2. 調査内容

- (1) パイロットプラント、あるいは実処理施設の活性汚泥を対象とした微生物レベルでの窒素およびリン除去の基礎研究。
- (2) リン除去プロセスにおいて、栄養源となる有機物の種類が、リン摂取反応に及ぼす影響についての研究。
- (3) 下水処理システムにおけるエネルギー消費、下水処理による環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を基に下水道施設の評価手法の検討と、その手法を用いて算出した水処理トータルコストの総合的な検討。

#### 3. 調査結果と考察

- (1) 電子受容体として酸素、硝酸、亜硝酸を用いて実下水の処理を行い、ポリリン酸蓄積細菌の挙動を調べた。嫌気好気法では硝酸をほとんど利用できなかったが、嫌気無酸素好気法では硝酸を利用する能力が出現した。これは硝酸を利用する脱窒性ポリリン酸蓄積細菌が増加したことを意味していた。
- (2) 酢酸と実下水(下水のみと下水+懸濁性有機物)を処理する生物学的リン除去プロセスにおいて、生物群集の比較を行ったところ、実下水処理系の生物群集は近似していたが、酢酸を処理した系の生物群集は実下水処理系とは異なる生物群集になっていた。
- (3) 高度処理施設が導入された場合の便益とコストを算出した。  
水質改善の便益、温室効果ガスによる損害費用、電力費用、建設費用を算出し、便益と費用を統合的に比較した。その結果、【環境便益】/【高度処理の導入・運転コスト】は嫌気無酸素好気法で 1.80、嫌気好気法で 6.33 と、高度処理を行うことが有効であることが推察された。

(キーワード) 高度処理、生物学的窒素・リン除去

## 1 調査目的

本調査は、A<sub>2</sub>O法施設の最適な運転方法を確立することを目的とし、平成15年度は、りん除去の安定化とコストの縮減を目標に実施した。

## 2 調査内容

降雨など流入水の有機物濃度が低下したときのりん除去対応として、一沈バイパスや生污泥投入による効果を検証した。また、コスト縮減策として、嫌気槽・無酸素槽の攪拌機を間欠運転したときの電力削減効果と処理水質への影響について調査した。

## 3 調査結果と考察

### 1) 水質安定化

一沈バイパスと生污泥投入は、どちらも降雨など有機物濃度の低下に対して、効果が認められた。しかし、台風などの豪雨時には、有機物濃度が極端に低下するためこれらの対策では効果が小さかった。豪雨時には、硝化液循環を停止し、嫌気 - 好気 (A O) 法運転することにより、りん除去の悪化とその後の回復に要する時間を小さくすることができた。

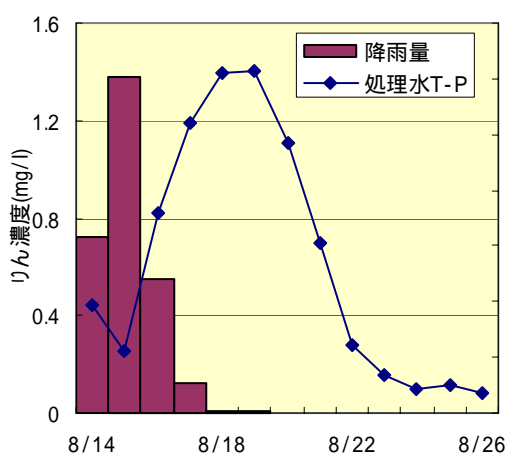


図1 豪雨時に生污泥投入で対応

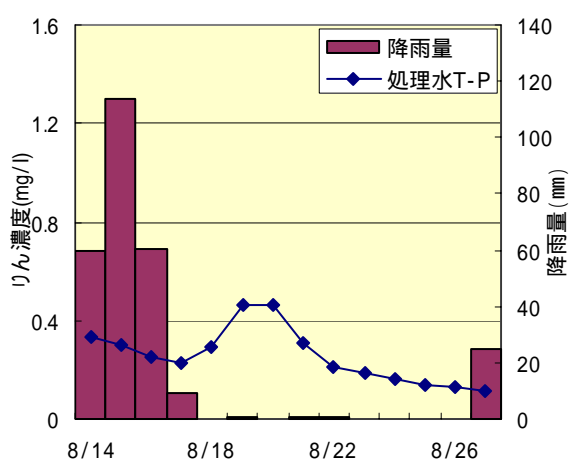


図2 豪雨時にAO法運転で対応

### 2) コスト縮減策

嫌気槽・無酸素槽の攪拌機を間欠運転を試行したところ、処理水質に影響を与えることなく、攪拌機動力の5割程度を削減できることがわかった。しかし、槽内への汚泥の堆積や攪拌機への影響など長期的な経過で現れる影響については継続的に調べる必要がある。

(キーワード) 嫌気 - 無酸素 - 好気法、降雨時の影響、動力費削減

### 3 6 りん除去メカニズムからみたA<sub>2</sub>O法のりん処理対策について

流域下水道本部

北多摩二号水再生センター

#### 1. 調査目的

本調査は、浅川水再生センターのA<sub>2</sub>O系列について、従来の水質分析項目に加えりん蓄積菌のりん処理能力を高めるりん蓄積菌内のPHA（ポリヒドロキシアラカレート）濃度を測定することにより、りん除去対策としての生污泥投入の有効性について明らかにすることを目的とした。

#### 2. 調査内容

A<sub>2</sub>O系列の運転状況、水質状況、改善対策の実績などの実態把握をおこない、生污泥を投入した平成15年度と投入しなかった平成14年度を比較し、PHA等の測定結果から生污泥投入によってりん処理が改善した要因を明らかにした。

#### 3. 調査結果と考察

図1に平成15年度のA<sub>2</sub>O系列の処理水りん濃度の結果を示した。生污泥の投入により、豪雨時と異常流入事故時以外は、すべて高度処理基準値である1mg/l以下であった。そのメカニズム解明のためにPHAを測定し（図2に結果を示した）従来の水質測定項目である嫌気槽でのりん放出濃度や、無酸素槽での脱窒状況等とあわせて解析し以下の結果が得られた。

- (1) 生污泥投入により、MLSS濃度の増加や嫌気槽でのりん放出量の増加があった。
- (2) りん放出量の増加にともない嫌気槽でのりん蓄積細菌のPHAの蓄積量が増えた。
- (3) 菌体内のPHAの蓄積量増加により、好気槽末端で消費されずに菌体内に残留するPHAの量が増加した。
- (4) 残留するPHA量の増加によって、流入負荷変動時や降雨時にも良好なりん除去ができた。

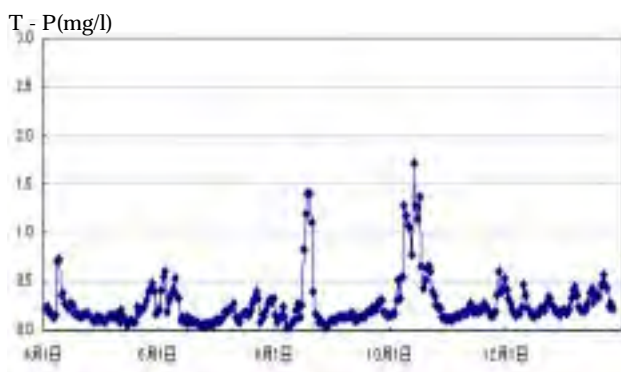


図1 平成15年度処理水りん濃度

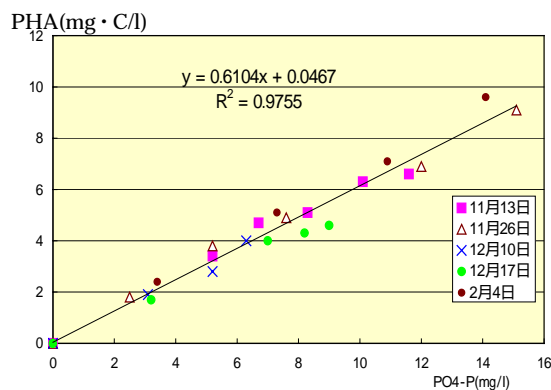


図2 嫌気槽りん濃度とPHA

(キ・ワ・ド) A<sub>2</sub>O法、PHA、生污泥投入

### 3 - 7 砂ろ過(固定床型・移床型)施設の機能向上技術の開発

計画調整部 技術開発課

#### 1. 調査目的

水再生センター放流水の窒素・りんに対する規制は、平成 11 年度からの濃度規制及び平成 16 年度を目標年度とする第五次総量規制が適用されている。また、流域総合計画の見直しや環境基準の設定など、より厳しい規制が検討されている。このため、より効率的で低コストの窒素・りん除去技術の開発が求められている。本研究は、従来 BOD、SS 除去の高度処理施設と位置づけられていた砂ろ過施設に窒素除去機能を付加し、処理水全窒素濃度で 5 mg/l 以下を目指す。

#### 2. 調査内容

落合水再生センター内に上向流固定床型砂ろ過池(図 1)、中野水再生センター内に上向流移床型砂ろ過池(図 2)のパイロットプラントを設置し、D0 除去及び脱窒有機源としてメタノールを添加して窒素除去性能を調査した。

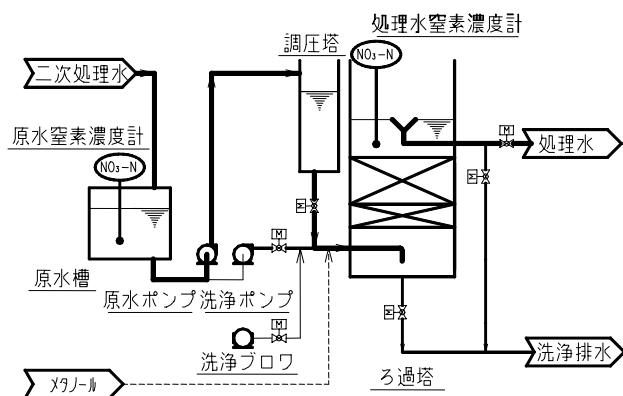


図 1 上向流固定床型フロー

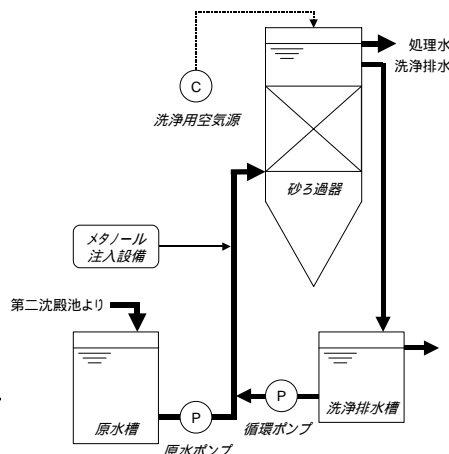


図 2 上向流移床型フロー

#### 3. 調査結果

固定床型：処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が目標値 0.5mg/l となるようフィードバック制御によるメタノール注入を行った。ろ過速度 200m/日の条件で、処理水 T-N 濃度が平均 1.6mg/l、T-N 除去率が平均 85%であった。SS・BOD については対照系と同等の水質であった。

移床型：フィードフォワード制御により原水(二次処理水)  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度に比例するメタノールを注入した。ろ過速度 300m/日の条件で、処理水 T-N 濃度が平均 1.2mg/l、T-N 除去率が平均 89%であった。SS・BOD についてはろ過速度が高かったため、原水と同等の水質であった。

(キーワード)高度処理、砂ろ過、脱窒、固定床、移床型

### 1．調査目的

本調査は、降雨影響時における高度処理施設におけるりん除去悪化を防止するため、第一沈殿池の生汚泥を酸発酵させて高濃度の有機酸を含む発酵汚泥を生成する技術と、その発酵汚泥を高度処理施設に適切に添加してりん除去を安定させる手法を開発するものである。

### 2．調査内容

調査の内容は次のとおりである。

第一沈殿池の生汚泥を効率的に酸発酵させ、有機酸濃度 600mg/L 以上の発酵汚泥を安価に生成させる発酵条件の検討

酸発酵の際に発生する悪臭ガスの処理に関する検討

発酵汚泥を芝浦水再生センター内のステップ流入式嫌気無酸素好気法パイロットプラント(以下「パイロットプラント」)に添加することによるりん除去安定の効果検証

### 3．調査結果と考察

容量 10L の小型発酵装置を用いた実験では、発酵温度が高いほど、発酵時間が長いほど発酵汚泥中の有機酸濃度は高くなった。また、発酵槽内の汚泥濃度が高いほど生成した発酵汚泥中の有機酸濃度は高くなった。この結果を基に実証連続発酵装置を製作し、汚泥発酵時間 2 日間の条件で連続発酵を行った。この実証連続発酵装置において発酵汚泥濃度が約 2% の場合、発酵温度 15℃ において発酵汚泥中の有機酸濃度は約 600mg/L、20～22℃ では有機酸濃度 1000～1200mg/L であった。また発酵槽内汚泥濃度が約 1.5% の場合、発酵温度 20～22℃ において発酵汚泥中の有機酸濃度は約 900mg/L であった。

酸発酵時において pH の制御により有機酸を消費するメタン発酵を抑制できたため、ガスの発生量は少なかった。また、発生したガスの臭気成分はほとんどが硫化水素で、悪臭物質の処理は硫化水素を中心に行う必要があることが分かった。

りん除去の安定効果確認は高濃度の有機酸を含む発酵汚泥を安定的に生成できるようになった後、パイロットプラントを用いて実施した。発酵汚泥を流入水量比で 0.5% 添加することで、通常りん除去が不安定となる降雨影響時においてもパイロットプラントの処理水全りん濃度を 1mg/L 以下に保つことができた。

今後、より一層効率のよい酸発酵条件を検討すると共に、各季節における有機酸の安定した生成と発酵汚泥の貯留、悪臭物質の処理方法について調査を行う。

(キーワード) 高度処理、りん除去、酸発酵

### 1. 調査目的

雨天時に合流式下水道から排出されるいわゆる白色固形物の成分は、パルミチン酸、ステアリン酸、オレイン酸等の高級脂肪酸及びその金属塩を主成分とした生物由来の油脂をベースにしたものである。特に、その多くがパルミチン酸含有比 70～80%と高いのが特徴である。天然の油脂やそれを原料とした石けん等の製品はパルミチン酸含有比が20～30%で、本白色固形物のように含有比が極めて高い物質は既存の油脂製品としては考えにくい。

そこで今回、白色固形物のパルミチン酸含有比が高い原因はなぜか、液状の植物油も白色固形物に変化するのかなど、下水中における白色固形物の生成に関する調査を行った。

### 2. 調査内容

#### (1) 高級脂肪酸構成比の変化に関する調査

市販の食用ラードを複数のガラス板(100×200mm)に薄層状に塗り、第一沈殿池上部の緩やかな水流部に浸せきするように吊るした。調査開始から10,20,30,70日後にガラス板を順次回収し、高級脂肪酸等の測定を行った。

#### (2) 植物油の白色固形物化に関する調査

分液ロート(250mL)に供試下水(ろ過下水、人工下水)(100mL)とサラダ油(10mL)を入れ、供試下水だけを定期的に入れ替えながら、サラダ油の状態変化を目視観察し、70日後に油層部をろ過し、回収物の高級脂肪酸を分析した。対照として全て滅菌状態にしたもので同様の実験を行った。

### 3. 調査結果と考察

#### (1) 高級脂肪酸構成比の変化に関する調査

浸せきラード中のオレイン酸、リノール酸、パルミチン酸等の各高級脂肪酸組成比は時間経過とともに変化し、パルミチン酸は52%に増加していた。

#### (2) 植物油の白色固形物化に関する調査

液状の植物油(サラダ油)は時間経過とともに不透明なゼラチン状物質に変化し70日後に、それをろ過すると白色の固形物が回収された。一方、対照とした滅菌状態の植物油は液状のままで変化は見られなかった。

#### (3) 白色固形物の生成

これまでの調査から、油脂(動物油、植物油いづれも)は、下水中で時間経過とともに、主成分である高級脂肪酸が分解され、その構成比が変化し白色固形物が生成される。この変化には下水中の微生物が関与していることが明らかとなった。

(キーワード) 白色固形物    油脂    パルミチン酸

## 吹流し状の油吸着材を活用した 管路内の白色固形物対策に関する調査

北部建設事務所 工事第一課

### 1. 調査目的

本調査は、タンカー等の重油流出事故に利用される「油吸着材」を下水道用に加工したものをマンホール内に設置することによって、下水道管路に排出され白色固形物の原因になっているとされる油脂類がどの程度捕捉・吸着されるか、その効果を把握することを目的として実施した。

### 2. 調査内容

吸着材を足立区内の合流地域 20 箇所と分流地域 10 箇所の合計 30 箇所のマンホールに設置し、経過観測を行った。吸着材設置後、1 日・3 日・5 日・7 日・10 日・30 日目に回収し、総吸着量やその成分内訳（油分、SS 分、水分）の推移を定量把握した。

### 3. 調査結果と考察

吸着材設置 30 日後の油分吸着量は以下のとおりである。

地域別油分吸着量			吸着材 1 g あたり
	油分吸着量（概ね）	最大油分吸着量	のか所
合流地域	1 g ~ 2 g	5 . 9 g	商業地（飲食店多）
分流地域	1 g 以下	3 . 5 g	商業地

マンホールから取り出した吸着材から絞り出した液分について成分を分析した結果、油分は 50,000 mg/l（当該箇所の下水中の油分濃度に対して 1000 倍以上）と極めて高濃度であり、油吸着材は油分の濃縮能力が優れていることが分かった。

合わせて、故障処理実績を調査したところ、ラードによるものが多く、原因者はラーメン店が全体の半数以上を占めていた。よって、油吸着材はラーメン店などの油分排出量が多い施設に適用することが有効と考えられた。



写真1 油吸着材の概観

写真2 管路内の設置状況

（キーワード）

合流改善

白色固形物対策

## 5 - 3 二段造粒式沈殿濃縮装置の技術開発

計画調整部 技術開発課

### 1. 調査目的

本調査は、合流式下水道の雨天時汚濁水の高速処理を目標に、既存の高速凝集沈殿技術を基に民間企業が開発した二段造粒式沈殿濃縮装置と即効性消毒剤処理を組合わせた装置の処理性能を評価することを目的とする。

### 2. 調査内容

平成15年度は開発目標の見直しを行い、これまで「合流式下水道改善対策指針と解説」に基づき処理性能を処理水質で評価していたものをBODとSSの汚濁負荷除去率を評価指標とした。また、水面積負荷の最大値を見直して $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$ とした。表1に目標性能を示す。この条件のもと、平成15年度は雨天時性能確認試験を7回行い、平成14年度の試験結果と合わせた計13回の処理性能を評価した。さらに、実用化に向け、凝集剤の最適添加量の検討、迂流式混合槽での攪拌条件の検討、起動方法と起動時の処理性能の確認及び処理水量変動時の処理性能評価を行った。なお、は雨天時性能確認試験時のデータに基づく評価で、はいずれも晴天時下水を対象に行った。

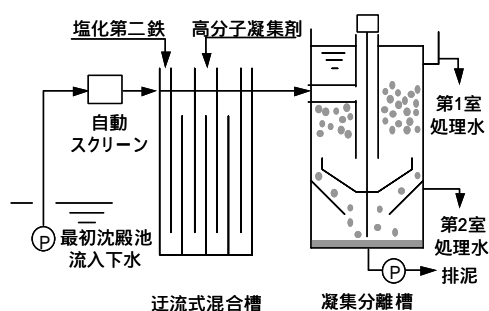


図1 処理フロー

表1 処理性能の評価

項目		評価	目標
処理水 目標値	一降雨当たりの負 荷量削減率(%)	SS	80以上
		BOD	65以上
運転条件	最大水面積負荷 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$ )		50
	無機凝集剤添加量 (mg/L)		10 - 50
	高分子凝集剤添加量 (mg/L)		1 - 2

### 3. 調査結果と考察

- (1) 計13回の試験における降雨ごとのSSとBODの負荷量除去率は、水面積負荷 $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$ において、78 - 91% (平均84%)、64 - 85% (平均76%)であり、新たに設定した目標値を満足した。
- (2) 運転管理を簡素化する観点から一定添加量で低薬注処理を検討した結果、 $\text{FeCl}_3$ 添加量20 - 30mg/L、ポリマ添加量1.0 - 1.5mg/Lの範囲で一定添加量処理が可能だった。この場合、原水SSに関わらず、目標処理性能を満足することができた。
- (3) 流入水量の減少に伴い水面積負荷を減少させると凝集剤の攪拌が不足するため、凝集剤添加直後に機械攪拌を行うことで対応した。また、流入水量増加に伴い水面積負荷を急激に増加させると処理水水質の悪化を招くため、増加量を制御し、目標水質を確保した。

(キーワード) 合流改善、迂流式混合槽、凝集分離槽



## 5 - 4 汐留地区における雨天時の路面流出水汚濁負荷量等調査

計画調整部 技術開発課

### 1. 調査目的

本調査は、保水性舗装が実用規模で施工される汐留地区において、散水による路面清掃効果の確認や再生水散水時の問題点等について把握、ヒートアイランド対策の効果の確認など、再生水の新たな利用拡大を目的に平成15年度から平成16年度まで実施する。

### 2. 調査内容

平成15年度は、汐留地区の第二ブロックで、夏に3回、春と秋に1回ずつ、3日間晴天が続いた4日目以降に散水を実施し、路面堆積物の実態や散水による周辺への影響等を確認した。芝浦水再生センターより供給される片側延長72mの散水管 50mm に散水ノズルを1m間隔で設置し、風力と太陽光発電を利用して毎分3～5リットル散水した。また、路面温度の測定は建設局土木技術研究所と連携して実施した。



図1 調査箇所案内図



図2 散水調査状況

### 3. 調査結果と考察

- (1) 散水した水質は散水用水の基準と比較しても特に問題になるものではなかった。
- (2) 回収水水質は、散水直後に最も高い濃度となり、散水時間の経過とともに減少した。この結果、散水によって、一定の路面堆積物清掃効果があることがわかった。
- (3) 散水による臭気や車による水跳ねは、今後エアロゾル等について確認する必要があるが、大腸菌群数調査等では特に通行人に影響を及ぼすものでなかった。
- (4) 散水することにより、40℃以上あった路面温度が30℃前後まで低下した。また、散水前後を通して保水性舗装のほうが密粒舗装より低温であることがわかった。

(キーワード) 下水再生水、路面堆積物、ヒートアイランド現象

## 5 - 5 移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の 高度除去に関する技術調査

計画調整部 技術開発課

### 1. 調査目的

処理場の合流改善対策としてSS・SOD・CODの効率的な除去方法が求められている。

そこで、浮上ろ材を使用した移動床式ろ過装置の除去性能を向上させる条件を調査し、本技術の確立を図ることを目的とした。また、同装置に生物膜を形成することで、ポンプ所における雑用水製造技術の確立も目的とする。

### 2. 調査内容

- (1) 雨天時合流改善対策として、装置に汚水を流入させ、ろ過速度を 40m/h～80m/h と変化させたときの処理性能を調査する。目標はSS除去率 85%以上とする。
- (2) 生物膜ろ過と電解滅菌処理の併用により、大腸菌類がほとんど存在しない雑用水(SS mg/l 程度、BOD mg/l 程度)を製造する条件を確立する。

### 3. 調査結果と考察

(1) 雨天時用としては、ろ過速度 60m/h において凝集剤(無機凝集材+高分子凝集材)添加時のSS除去率について平均 83%と目標に近い結果を得ることが出来たが、維持管理性やスケールアップに関して課題が残っている。

(2) 生物膜ろ過装置(ろ過速度 1.5mg/l)と電解滅菌装置(10mA/cm<sup>2</sup>)の組み合わせにより、大腸菌類が検出されず、平均SS濃度が20mg/l程度の雑用水を安定的に得る条件を見出すことができた。臭気や色度の低減できるため、ポンプ所等において下水から雑用水を得るための手法として有効であると考えている。



図1 ろ過槽



図2 電解滅菌装置

(キーワード) 合流改善、雑用水製造、電解滅菌

## 6 - 1 汚泥処理における温室効果ガス排出量削減調査

施設管理部 施設管理課・施設保全課

### 1．調査目的

当局において重要な課題となっている温室効果ガス削減対策を推進するため、汚泥焼却炉から発生する一酸化二窒素（以下  $\text{N}_2\text{O}$ ）の削減方法として有効とされている汚泥焼却温度の高温化（高温焼却）について実証実験を行い、効果の検証及び課題の整理を行うことを目的とした。

### 2．調査内容

調査対象として製造社の異なる四焼却炉を選定し、高温焼却時及び低温焼却時における  $\text{N}_2\text{O}$  排出量を比較することで高温焼却による  $\text{N}_2\text{O}$  削減効果を検証した。また、葛西 4 号炉において高温焼却を約二ヶ月間実施し、補助燃料の増加量や熱負荷が設備に与える影響を調査するとともに、他施設における高温焼却実施に向けた設備改善の必要性を検討した。さらには、メーカーの実験炉において、 $\text{N}_2\text{O}$  生成メカニズムの解析や高温焼却以外の  $\text{N}_2\text{O}$  排出抑制の検討を行った。

### 3．調査結果と考察

#### （1）高温焼却による $\text{N}_2\text{O}$ 削減効果

各施設とも炉内温度の上昇とともに  $\text{N}_2\text{O}$  排出量は直線的に減少し、燃焼温度の高温化が  $\text{N}_2\text{O}$  削減に対して有効であることを確認した。フリーボード上部温度が 810 と 850 の状態を比較するとその排出量は 21～43%に低減される。

#### （2）高温連続運転調査

葛西 4 号炉における約二ヶ月間の調査期間中、補助燃料使用量は通常運転時の 1.22 倍、電力使用量は同 1.06 倍であり、それぞれ使用量の増加が認められた。また、熱負荷の影響が最も大きいと予想された空気予熱器に対して、各部の温度及び歪みを測定し FEM 強度解析を行った結果、設備の昇温及び降温による熱応力発生の繰返し回数に対する機器寿命の低下が予測された。

#### （3）高温運転に対する既設炉調査

高温焼却に対する各焼却炉設備の適合性を調査したところ、安定的に高温焼却を行うためには、空気予熱器、白煙防止器、排ガス処理設備、及びブロウ・ファンなどの設備の更新、並びに各プロセス設定値や制御方法の変更の検討を必要とする施設も多かった。

#### （4） $\text{N}_2\text{O}$ 生成メカニズム解明及び $\text{N}_2\text{O}$ 排出抑制方法検討

焼却炉メーカーの実験炉において調査を行ったところ、砂層部における汚泥の熱分解に伴う生成物が、フリーボード部において一酸化二窒素（ $\text{NO}$ ）と気相反応することにより  $\text{N}_2\text{O}$  を生成していることが判明した。熱分解生成物のうち特にシアン化水素（ $\text{HCN}$ ）が  $\text{N}_2\text{O}$  生成に強く寄与していることが推察された。

（キーワード） 温室効果ガス、一酸化二窒素、汚泥焼却炉

## 1. 調査目的

お台場海浜公園を安心して遊べる水辺空間とすることを目標に、3 ヶ年にわたる海域浄化実験を開始した。初年度である平成 15 年度は、7 月 18 日から 10 月 31 日の計 106 日間、5,000m<sup>3</sup>/日の浄化海水を浄化エリアに放流し、浄化効果を検証した。

## 2. 調査内容

- 1) 日常調査... プラント各工程及び浄化エリア内外の水質（COD・ふん便性大腸菌群数等）調査
- 2) 生物調査... 浄化エリア内外における底質、底生生物、魚類調査
- 3) 高度処理水添加調査... ろ過海水 4,000m<sup>3</sup>に有明水再生センターの高度処理水 1,000 m<sup>3</sup>を添加し、プラントの消毒性能や浄化効果に与える影響を調査

## 3. 調査結果

### 1) 日常調査

- ・ 海水浄化プラントは実験期間を通して、良好な浄化海水を作ることができた。
- ・ 浄化エリア内のふん便性大腸菌群数、COD は浄化エリア外と比較して良好であった。なお、降雨時にはエリア外の影響を受けていた。
- ・ 浄化エリア内の透視度、濁度、SS は浄化エリア外と比べて、新たに投入した砂のシルト分の洗い出し、底泥の巻き上げ等により若干低下した。

### 2) 生物調査

浄化実験による生物相の差異は認められず、浄化エリアの内外で多くのアサリやボラ、ハゼ等の稚魚が採取された。

### 3) 高度処理水添加調査

UV 透過率は多少低下したが、ふん便性大腸菌群数は定量下限値未満であった。浄化エリア内外で電気伝導度、COD に目立った差は見られず、高度処理水の影響は見られなかった。

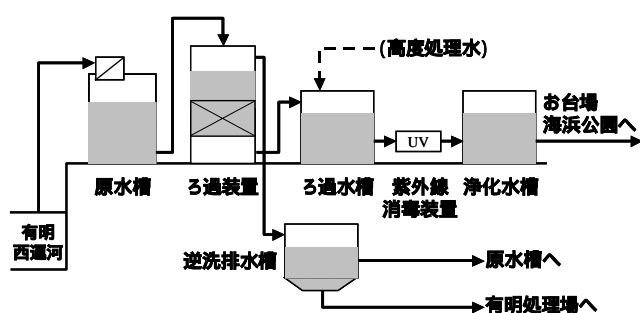


図1 海水浄化プラント（有明水再生センター内）



図2 浄化エリア（お台場海浜公園南東部）

（キーワード）海水浄化、生物膜ろ過、紫外線消毒

## 7 - 1 オートクレーブを用いた焼却灰無害化技術と資源化調査

計画調整部 技術開発課

### 1．調査目的

下水污泥焼却灰の土壌としての利用を想定した場合、土壌環境基準を遵守する必要があるが、砒素やセレンの溶出が基準を超える恐れがある。そこで、酸性雨等の長期曝露によってもこれら重金属類が溶出しにくい溶出抑制処理方法を開発することを目的として調査を行った。

### 2．調査内容

処理方法として、オートクレーブ中で水熱反応（臨界点以下の高温・高圧条件による水溶液中の反応）により焼却灰の表面に結晶を生成させ、その中に重金属等を封じ込める方法を用いた。

反応条件としては、反応時間（5～20時間）、反応温度（180～200℃）、消石灰添加量（3～15%）等のパラメータを変化させ、それらの処理効果に対する影響を検討した。

次に、溶出抑制処理を行った焼却灰について、植栽基盤、クッション材として活用することを想定した資源化適用調査を行った。

また、重金属類溶出抑制処理に必要な施設やコストを検討した。

### 3．調査結果と考察

葛西処理場、新河岸処理場、東部スラッジプラントの污泥焼却灰について上記の処理を行ったところ、10時間以上の反応時間、反応温度200℃、10%以上の消石灰添加量、という条件において、溶出濃度が土壌環境基準以下となり、焼却灰からの重金属類の溶出を抑制することができた。ただし、砒素やセレンの溶出濃度が高い（0.5mg/L程度）焼却灰についてはこの条件では十分に溶出を抑制できなかった。このような焼却灰に対しては石粉等の添加により、結晶生成に必要なケイ素を確保することが必要である。

資源化適用調査については、処理灰と基準土である赤玉土の混合した土壌において、コマツナ等の生育調査を行ったところ、透水性、養分量等の項目で良好な植栽基盤の範囲内となり、コマツナ等の生育状況は基準土を上回った。これは、処理灰に含まれるリンやカリウム等が溶出して養分として機能したためであると考えられる。

また、クッション材への適用性を調査した。腐食性試験を行ったところ、良好な結果であった。

以上のように、今回調査した処理方法により焼却灰からの重金属類の溶出を抑制することができ、処理灰は植栽基盤等様々な用途に活用できる可能性を有することが分かった。

（キーワード）オートクレーブ、水熱反応、污泥焼却灰、重金属類の溶出抑制

## 7 - 2 重金属類を溶出抑制した下水汚泥焼却灰の資源化調査

計画調整部 技術開発課

### 1. 調査目的

下水汚泥の焼却灰からは、重金属類（特にヒ素及びセレン）が土壤環境基準を越えて溶出する場合があります、有効利用促進を図るうえでの障害となっている。これまでの調査で、『薬品（硫酸第一鉄 + チオ硫酸ナトリウム）添加 + 加熱処理』により溶出抑制が可能となることを明らかにしている。引き続き、実証設備による実用化に向けた検討を目的として調査を実施した。

### 2. 調査内容

葛西処理場内に溶出抑制灰を製造する小規模プラント（容器を回転させることで内容物を攪拌しながら外部より加熱する横軸回転型を採用し、目標処理能力を 30～50kg/h とした）を建設し、処理する焼却灰、薬品添加量、加熱条件、処理量など各種の処理条件を変化させて実証試験を行い、当技術の実用化に向けた検討を行った。また、製造した溶出抑制灰を建設発生土に混合した土壌について、植栽試験を行い植栽基盤への適用性を調査した。

### 3. 調査結果と考察

#### （1）小規模プラントによる実証試験

- ・過度に硫酸第一鉄添加量を低減させた場合を除き、環境基準を超える溶出はなく、実証設備では 50kg/h 程度まで処理が可能であった。
- ・加熱温度については、温度が高いほうが処理時間を短縮でき、250 程度までなら温度を上げた場合でも溶出抑制処理は可能であった。
- ・焼却灰と薬品を十分に攪拌することがで、これまでの調査結果と比較して低い薬品添加量（硫酸第一鉄 1.5～2% + チオ硫酸ナトリウム 0.5%）で処理が可能であった。

#### （2）小規模プラントによる連続運転調査

48 時間の連続運転でも、設備停止などの大きなトラブルはなく、1700kg（35kg/h）の焼却灰の処理を行うことができた。ただし、処理灰のうち一部の試料については環境基準を超える水銀の溶出がみられたため、再検証が必要である。

#### （3）植栽基盤への有効性調査

建設発生土に溶出抑制灰を 10% 混合した土壌は、全炭素、全窒素等の有機質成分は乏しいが、可給態リン酸濃度が 6000mg/kg 以上と高いなど十分な植栽機能があり、パンジー等の生育性も良好であった。4 ヶ月の調査期間中、土壤環境基準を満足していたことから、植栽基盤として有効利用できるといえる。

（キーワード） 下水汚泥焼却灰、重金属類、土壤環境基準

## 7 - 3 低コストマイクロ水力発電設備の実用化研究

施設管理部 施設保全課

### 1 調査目的

本研究は、水再生センターにおける放流時の落差を利用したマイクロ水力発電に関する技術開発を行い、未利用エネルギーであったクリーンで循環利用が可能な自然エネルギーを有効活用することにより、環境負荷への低減や電力使用量の削減に寄与することを目的とする。

### 2 調査内容

本研究内容は、(1) 既設土木構造物の改造を最小限とする取水、放流方式の検討、(2) 施工、維持管理の簡素化、(3) 潮位変動と流量変動に応じた運用の最適化について調査し、マイクロ水力発電設備の実用化に向けた適用可能性について検証した。

### 3 調査結果と考察

葛西水再生センターに、有効落差 5.05m、最大使用水量 0.93m<sup>3</sup>/s、定格出力 37kW の水力発電機を設置し、フィールド調査を実施した。

- (1) サイホン取水方式を採用することにより、既設土木構造物に特別な補強や改造を行うことなく、また、放流にも影響を与えることがなかった。
- (2) 水処理施設の運転を停止することなく施工できた。また、汎用の監視システムの適用により維持管理の簡素化及び省力化が可能であった。
- (3) 処理水量の変動及び潮位変動が水車に与える影響は予想以上であり、当初、連続運転ができなかった。このため、水車を可動翼構造に改造し、これらの変動に対応できる構造とし、連続運転による検証を行った。

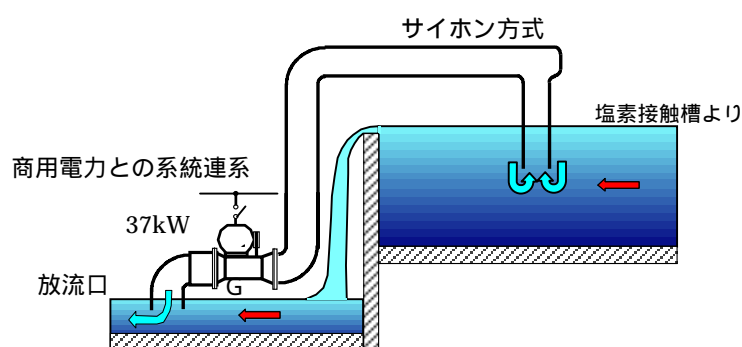


図1 マイクロ水力発電の原理

（キーワード）マイクロ水力発電、サイホン、水車、未利用エネルギー

## **8 - 1 INNOVATION OF ACTIVATED SLUDGE MODEL DEVELOPED BY IWA**

Kiyoaki Kitamura and Masami Abisawa

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

8 - 1, Nishi - Shinjuku 2 - chome, Shinjuku - ku, Tokyo 163 - 8001 JAPAN

Kiyoaki\_Kitamura@member.metro.tokyo.jp

### **ABSTRACT**

TMG(Tokyo Metropolitan Gavernment) needs to remove nitrogen and phosphorus to meet the regulatory requirements and mitigate the eutrophication of Tokyo Bay, which is the receiving waters of the effluents.

It has to be done efficiently under the tight budget. For this purpos, efficient operation of the biological nutrients removal processes is needed.

TMG built new software to innovate Activated Sludge Model developet by Internation Water Association for its practical use.

The new software is now under use at wastewater treatment plants in the downtown of Tokyo.

### **KEYWORDS**

Activated Sludge Model (ASM), nitrogen moval, phosphorus moval, simulation



# **1 . 計画・設計・施工**

- 1 - 1 赤羽幹線エアクッションサイフォン管での空気抜き施設の設計について**
- 1 - 2 下水道用監視制御システム標準化調査その2**

## 1 - 1 赤羽幹線エアクッションサイフォンでの空気抜き施設の設計について

建設部 土木設計課 鈴木 建

寺本 康宏

(現) 北部第一管理事務所 施設課 下田 哲

### 1. はじめに

平成 14 年 6 月 13 日、板橋区前野町の見次公園付近等で下水道のマンホール蓋が飛散する事故が発生した。事故発生直後に設置した「マンホール蓋飛散事故対策検討委員会」(以下「委員会」)では、原因究明及び再発防止策の検討を行った。その結果、事故原因を「赤羽幹線エアクッションサイフォンシステム(以下「ACS」)からの空気抜け」と特定し、再発防止策として ACS の「運転方法の改善」、「自動制御方式の改造」及び「マンホール蓋を圧力開放型とする」案をまとめ、10 月までに対策を実施した。

ACS は、赤羽幹線が新河岸川を通過し浮間水再生センターの主ポンプ室へ到達する延長約 1km の区間、地下約 40m の大深度に布設したサイフォン部に導入した技術である。この技術は、サイフォン部に空気を導入して管内の流水断面を自由に設定することができるため、遮集幹線である赤羽幹線のサイフォン部の晴天時における流速を増して土砂等の堆積を防止できるという特徴がある。

本報告は、ACS のより一層の安全管理に万全を期すため行った、上流マンホールから圧縮空気を地上に解放する施設の設計を報告するものである。

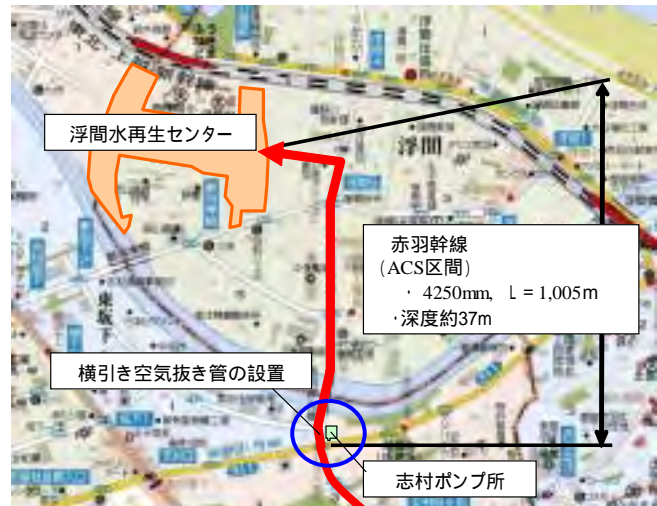


図 1 案内図

### 2. 赤羽幹線 ACSの概要

#### 2. 1 導入の経緯

浮間水再生センターへ流入する赤羽幹線は、次の特徴がある。

新河岸川にかかる新河岸橋の橋台基礎杭の下を通過する地下 37m の大深度施設である。

伏せ越し区間の管路延長が約 1km と長い。

遮集管きよであるため、雨天時に比べ晴天時流量が少ない。

このため、赤羽幹線のサイフォン部の建設に際しては、以下の課題があった。

下水管路施設のサイフォン部は、常時満流で流れ、流量が少ない晴天時に流速が遅くなることから、土砂等が堆積し、放置すると管閉塞や臭気等の問題が発生する。

布設深度が地下 37m と深いことに加え管路延長が約 1 km と長いことから、現在の清掃技術では幹線に堆積した土砂等の清掃が困難である。

これらの問題を解決するため、流量にかかわらずサイフォン部に一定流速を確保して土砂等の堆積を軽減できる ACS を採用した。

採用に当たっては、ドイツ等、海外の事例を調査するとともに、模型による実証実験を行った。

## 2.2 ACSの仕組み

赤羽幹線 ACS 概略図を図2に示す。

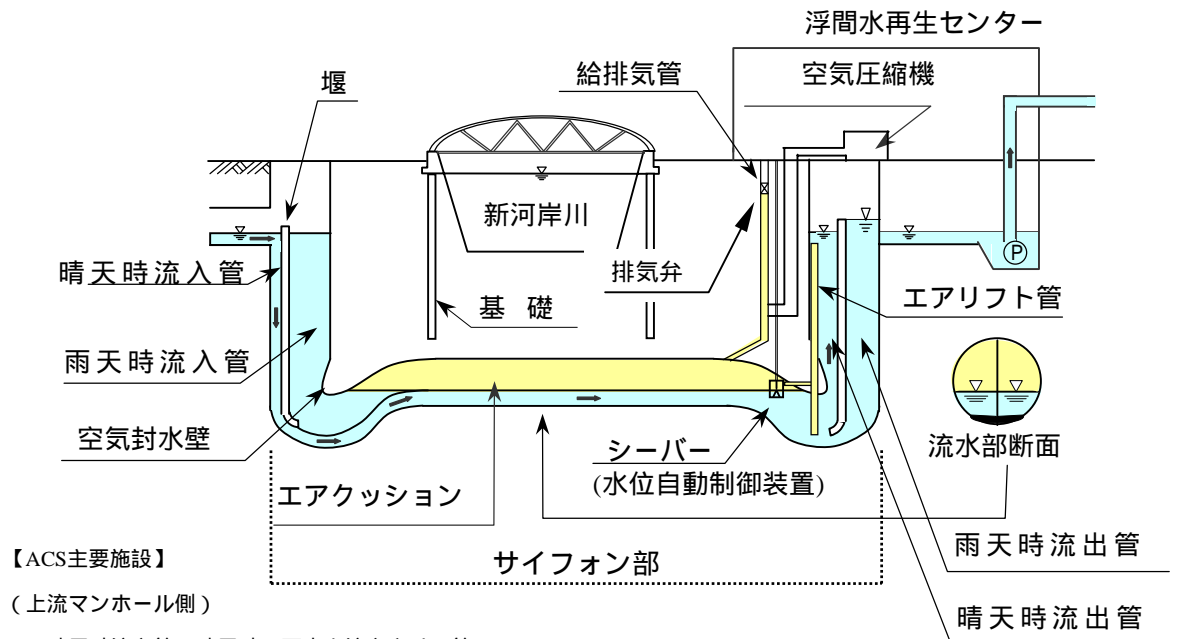
図2に示すとおり、流量が少ない晴天時にサイフォン部に空気を導入してエアクッションを形成し、流水断面を縮小して土砂等が堆積しない流速を確保する仕組みとなっている。流量が増える雨天時は、空気を抜いて流水断面積を拡大し、多くの下水を流す。

## 2.3 運転方法

晴天時に赤羽幹線を流下する下水は、上流側マンホールの晴天時流入管からエアクッションが形成されているサイフォン部流れ、下流側浮間水再生センターの晴天時流出管から主ポンプ室へ流入する。

雨天時に下水量が増加し赤羽幹線上流側の水位がある一定以上になると排気弁が開き、エアクッションを形成している空気が給排気管から排出され、サイフォン部は下水で満流状態になる。下水は、上流側マンホールの堰を越え雨天時流入管と晴天時流入管の両方を通り、満流のサイフォン部流れ、同様に下流側の雨天時流出管と晴天時流出管の両方から浮間水再生センターの主ポンプ室へ流入する。

下水量が少なくなると流速が遅くなるため、土砂等が堆積しないように空気を導入し、エアクッションを形成する。空気の導入は、下水の流入時に連行される「自然流入」と浮間水再生センター内の空気圧縮機を使用する「強制導入」による。上流マンホールにおける自然流入分が常にエアクッション内部に入り込むため、下流側の水再生センターに設置した水位自動制御装置であるシーバーから余剰空気を排出する。また、シーバーを上下させることによって水位を調整し流水断面積を任意に設定できる。



### 【ACS主要施設】

（上流マンホール側）

- ・晴天時流入管：晴天時に下水を流入させる管。
- ・雨天時流入管：雨天時には、流量が多くなるため、晴天時流入管とこの管を使用。

（浮間水再生センター側）

- ・空気圧縮機：伏越管内に空気を導入するための装置。
- ・給排気管：エアコンプレッサーからの空気供給と雨天時の排気を兼用。
- ・シーバー：エアクッション内の余剰空気を排出する装置。上下にレベルを変化させることにより、管内水位を任意に調節可能。
- ・晴天時流出管：晴天時に下水を流出させる管。
- ・雨天時流出管：雨天時には、流量が多くなるため、晴天時流出管とこの管を使用。
- ・エアリフト管：シーバーの余剰空気排気時に、この管に空気を混入させることにより、流出側下部の堆積物等を浮上させる。
- ・空気封水壁：この壁によりサイフォン部の空気を封じ込めている。

図2 赤羽幹線ACS概略図

### 3. マンホール蓋飛散の原因と対策

#### 3.1 マンホール蓋飛散の概要

平成14年6月13日、ACS管内の圧縮空気が流出し、板橋区東坂下一丁目1番地先及び板橋区前野町四丁目59番地先の2箇所でそれぞれ赤羽幹線及び板橋幹線のマンホール蓋が飛散した。マンホール蓋飛散箇所を図3に、マンホール蓋飛散状況を図4に示す。マンホール蓋、鉄棒とともに周辺のアスファルトや土砂等が飛散している。

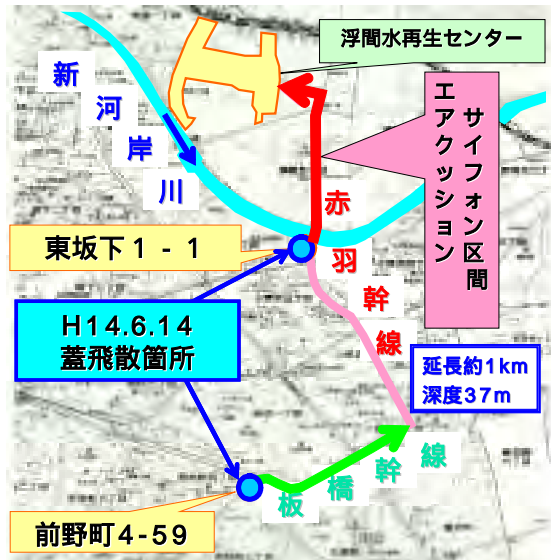


図3 マンホール蓋飛散箇所



図4 マンホール蓋飛散状況  
(板橋区前野町4-59)

#### 3.2 発生原因

事故発生後、直ちに局内関係部所、建設局及び板橋区を構成メンバーとする「マンホール蓋飛散事故対策検討委員会」(以下「委員会」)を設置し、圧縮空気流出の再発防止を図るため、原因の究明と対策の検討を行った。

検討の結果、圧縮空気の流出は、下記 ~ の過程を経て発生したことがわかった。

時間変動が大きい浮間水再生センターの処理水量を平準化して良好な処理水質を確保するため、流入汚水量の多い時間帯の汚水を第一沈殿池下部の雨天時貯留池に一時貯留  
流入汚水量の少ない時間帯に貯留汚水を貯留池から赤羽系沈砂池に返水

赤羽系沈砂池の水位が上昇  
ACS 上流マンホールと下流側沈砂池水位が逆転し逆流現象が発生

管内空気圧が上流側封水圧を上回り、圧縮空気が流出

圧縮空気の流出状況を図5に示す。

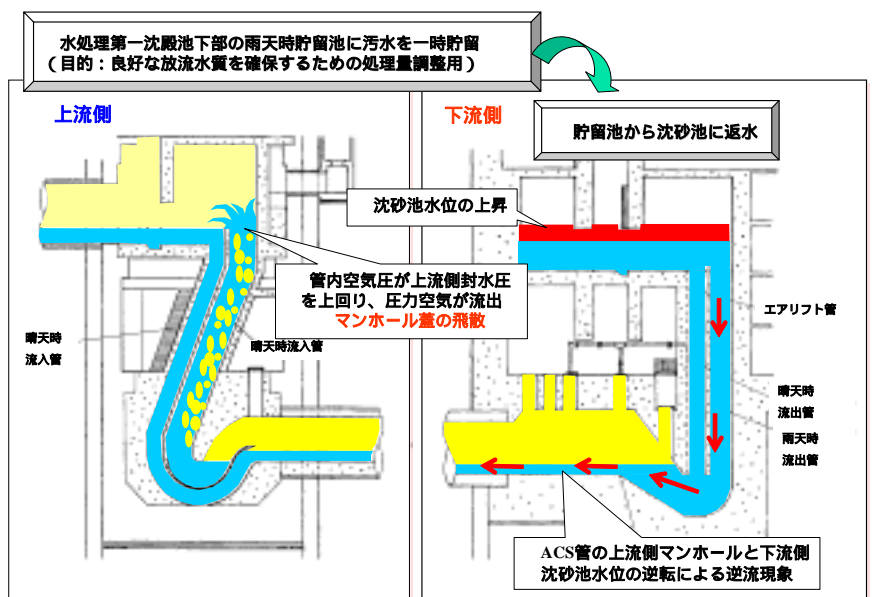


図5 圧縮空気流出状況

#### 3.3 再発防止策



委員会で取りまとめた再発防止策は、以下のとおりである。

第一に、第一沈殿池下部に貯留した汚水の水処理施設への送水ルートを別途設置し、沈砂池への返水を止めてACSの運転に安定性を確保するよう「運転方法の改善」を行うこととした。

第二に、上下流の異常水位に対応して圧縮空気の排気及び加圧停止を行う「自動制御装置の改造」を行うこととした。

第三に、万一、ACS 管内から圧縮空気が上流の赤羽幹線内へ流出した場合でも、空気を安全に逃がすことができるよう「マンホール蓋を圧力開放型とする」こととした。

上記の第一及び第二の対策は、「空気の流出防止対策」、第三の対策は、「バックアップ対策」となる。さらに、より一層の安全管理に万全を期すため、「その他の対策」として ACS 上流側に空気抜き施設を設置することにより、二重のバックアップ対策を図っていくこととした。

再発防止策の概要を図6に示す。

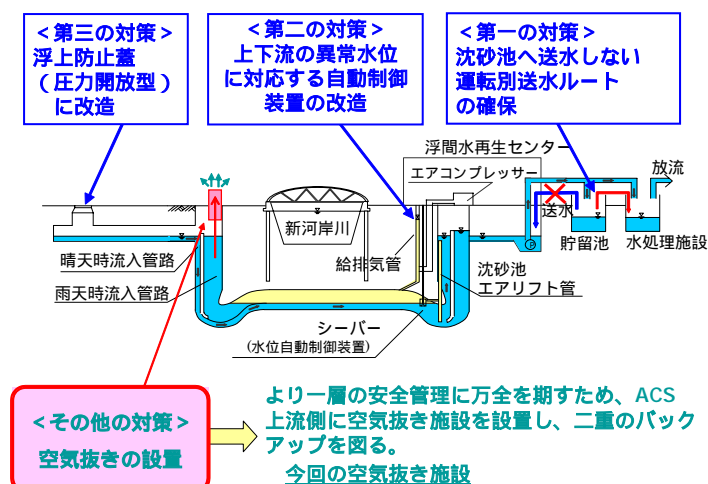


図6 再発防止策の概要

#### 4. 空気抜き施設の設計

##### 4. 1 空気抜き施設の設計の考え方

「その他の対策」として取り上げた空気抜き施設は、ACS 上流側マンホールから志村ポンプ所へカルバートを布設し、万一 ACS 内の圧縮空気が流出することになっても、カルバートを通して志村ポンプ所内で大気開放してしまうことにより、上流への空気圧力の伝播を阻止し、マンホール蓋の飛散を防止するものである。赤羽幹線から横引きで空気を抜くことから「横引き空気抜き施設」と呼ぶ。

横引き空気抜き施設のイメージを図7に示す。

空気抜き施設の検討に当たっては、ACS から流出した圧縮空気を空気抜き施設のみに導き大気開放させる必要がある。しかし、ACS 上流マンホールには赤羽幹線上流部が接続しており、ここに圧縮空気が流出してしまえば、空気抜き施設の効果が十分に得られない結果となる。

空気の流れは、流れの抵抗がより低い方へ導かれることから、空気流出口となる空気抜き施設及び上流幹線の開口部の面積に着目し、3次元 FEM 流体解析による数値シミュレーションを実施した。

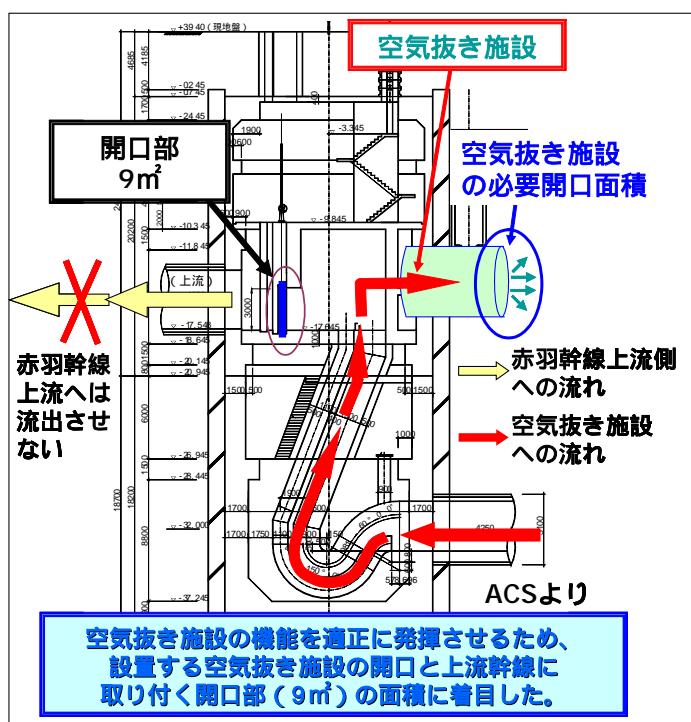


図7 横引き空気抜き施設のイメージ

## 4.2 必要開口面積の算定

### (1) 解析概要

空気抜き施設の必要開口面積を検討するため行った 3 次元 FEM 流体解析の概要を図 8 に示す。

ACS (4,250mm, L=1,005m) 上流マンホールから赤羽幹線の緑道公園内特殊マンホールまで及び板橋幹線の見次公園内特殊マンホールまでの区間をモデル化して解析メッシュを設定した。解析条件として、事故当時の ACS 内状況 (管内圧力=2.67 気圧、空間体積=4,300m<sup>3</sup>)、上流マンホール及び上流側幹線状況 (管内圧力=1.0 気圧、空間体積 19,000m<sup>3</sup>) を用いた。

次に、空気抜き施設の開口面積が

上流幹線部より小さい場合

上流幹線部と等しい場合

の 2 ケースについて解析し、その効果を検証した。

対策案の検証のための FEM 解析概要を図 9 に示す。

図 9 に示すように、空気抜き施設の開口部として解析モデル上に圧縮空気の仮想解放領域を設定して解析した。

### (2) 解析結果と考察

解析結果を表 1 に示す。

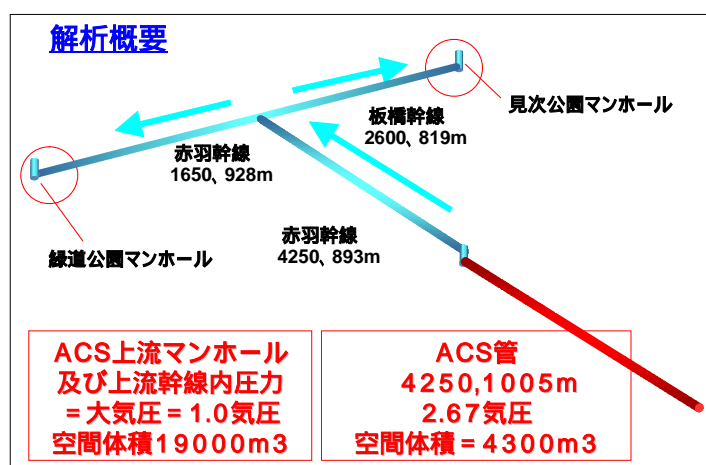


図 8 3次元FEM流体解析の概要

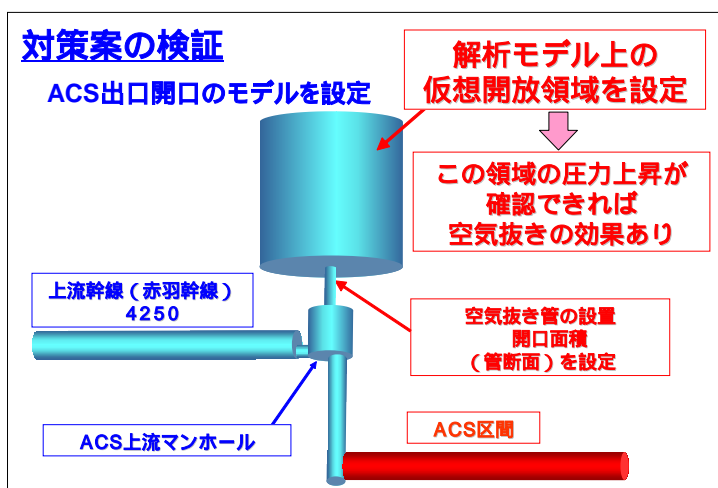


図 9 FEM解析概要（対策案の検証）

表 1 FEM解析結果

解析ケース	時間 (sec)	解析結果（圧力状況）				考察
		上流幹線部	見次公園内特殊 マンホール部	緑道公園内 特殊マンホール部	仮想圧力 開放領域	
空気噴出時の再現	3	上流幹線中間部において1.1気圧	圧力上昇なし	圧力上昇なし	-	-
	12	1.1～1.3気圧	1.3気圧	1.2気圧	-	マンホール蓋の浮上抵抗力を上回りマンホール蓋が飛散　空気噴出時の状況を適正に再現している。
対策案						
空気抜き開口規模 6m <sup>2</sup> (上流部開口面積より小さい場合)	12	1.1～1.3気圧	1.3気圧	1.1気圧	1.1気圧（流出圧力空気の一部が大気開放）	空気抜き施設の開口面積が十分でないと抵抗の少ない上流幹線側に圧力伝播し、空気抜き施設としての効果は薄い
空気抜き開口規模 9m <sup>2</sup> (上流部開口面積と等しい場合)	3	1.0気圧 （圧力上昇なし）	1.0気圧 （圧力上昇なし）	1.0気圧 （圧力上昇なし）	1.1気圧	-
	12	1.1気圧(ほとんど圧力上昇なし)	1.1気圧(ほとんど圧力上昇なし)	1.1気圧(ほとんど圧力上昇なし)	1.3気圧(流出圧力空気ほとんどが大気開放)	空気抜き施設の開口面積が上流幹線のそれに対して同等以上であれば、圧力空気は空気抜き施設を通して大気開放される。

圧縮空気流出時の再現解析においては、3 秒後に上流幹線中間部において圧力が 1.1 気圧となっており、大気圧に比して 0.1 気圧の圧力上昇が見られた。12 秒後には、上流幹線全般において、圧力は、1.1 ~ 1.3 気圧となるとともに、緑道公園内特殊マンホールにおいては、1.2 気圧、見次公園内特殊マン

ホールにおいて 1.3 気圧の圧力となった。

マンホール蓋の浮上抵抗について、浮上飛散事故当時の鉄蓋、土砂、アスファルトコンクリートの重量等を考慮するとその耐圧力は、大気圧換算で約 1.2 気圧であることがわかっている。空気流出時の 12 秒後の見次公園内特殊マンホールにおける圧力が 1.3 気圧となっていることから、この時点で当該マンホール蓋が飛散したものと考えられ、実際の空気流出・マンホール蓋飛散時の状況とほぼ合致していた。

圧縮空気が流出しマンホール蓋が飛散した時の ACS の状況が再現できることから、解析モデルの設定が妥当であると判断した。

対策案の検証については、空気抜き開口面積が上流部開口面積より小さい  $6\text{m}^2$  の場合は、12 秒後に上流幹線部において圧力が 1.1～1.3 気圧、緑道公園内特殊マンホール部で 1.1 気圧、見次公園内特殊マンホール部において 1.3 気圧となっている。見次公園内特殊マンホール部においては、マンホール蓋の耐圧力である 1.2 気圧を上回っている。また、仮想開放領域における圧力は、1.1 気圧程度である。

このことは、空気抜き施設の開口面積が上流幹線の開口部と比べて小さいと抵抗の少ない上流幹線側に圧縮空気が流出してしまい、空気抜き施設が有効に機能しないことを示している。

空気抜き開口面積が上流部開口面積と同等の  $9\text{m}^2$  の場合は、上流幹線部、緑道公園内特殊マンホール部、見次公園内特殊マンホール部でほとんど圧力上昇がみられないのに対して、仮想開放領域における圧力が 3 秒後に 1.1 気圧へ、12 秒後に 1.3 気圧へ上昇している。

このことは、空気抜き施設の開口面積が上流幹線の開口面積と同等以上あれば、空気抜き施設が有効に機能して、流出空気が上流幹線側に圧力伝播することなく空気抜き施設を通して大気開放されることを示している。

以上、3 次元 FEM 流体解析の結果、空気抜き施設の必要開口面積は、上流幹線開口面積である  $9\text{m}^2$  と同等以上の断面積が必要であることがわかった。

## 5．空気抜き施設

横引き空気抜き施設の概要を図 10、図 11 に示す。

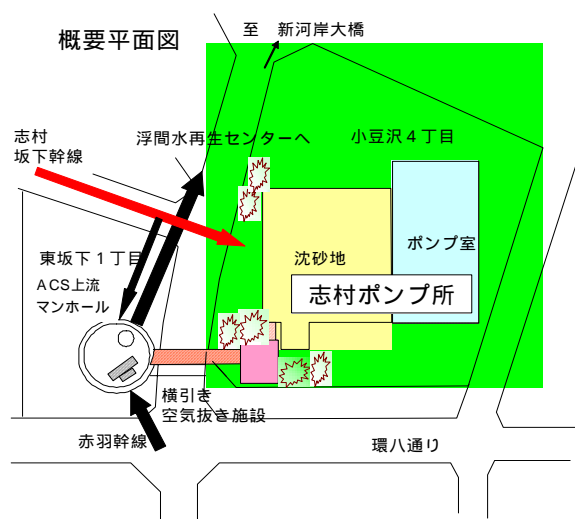


図 10 横引き空気抜き施設の概要

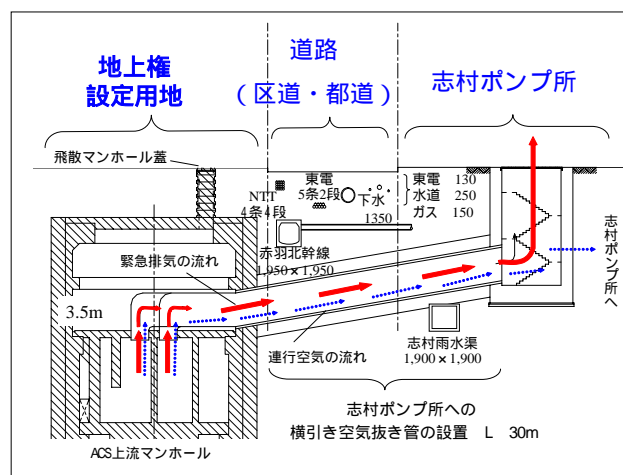


図 11 横引き空気抜き施設の概要（断面図）

ACS 上流マンホール上部は、地上権設定用地となっており、マンホール直上への空気抜き開口の設置が困難であることから、隣接する志村ポンプ所内へ空気抜き施設の排気口を設置した。

横引き空気抜き施設ルートは、環状八号線の巻込部で、地下には、東電、ガス、水道、下水、NTT な

どの供給施設が幅そうしている。上記条件並びに管渠必要断面が  $9 \text{ m}^2$ 、線路延長が  $30\text{m}$  程度と短距離であることから、施工性、経済性について検討した結果、内法  $3,200 \times 3,200\text{mm}$  の既成ボックスカルバートによる刃口推進工法を採用することとした。

ACS 上流マンホールにおいては、志村坂下幹線から赤羽幹線への高落差流入に伴う臭気が発生している。当該ボックスカルバートの設置に併せて、マンホールから志村ポンプ所まで脱臭ダクトを敷設し脱臭設備を設置することとした。

また、ACS 上流マンホール内の維持管理作業用の換気設備として、志村ポンプ所内に換気ファン、ボックスカルバート内に換気ダクトを設置することとした。

万一の対策として、板橋幹線上流の見次公園内マンホールにおける既存空気抜き室についても、今回の開口面積決定と同様の判断を行い、開口面積を  $5.3\text{m}^2$  に拡張し、併せて脱臭設備を設置した。

刃口推進工法の施工状況を図 1 2 に、見次公園内マンホール空気抜き施設を図 1 3 に示す。



図 1 2 施工状況



図 1 3 見次公園内マンホール空気抜き施設

## 6. おわりに

2つの流出口がある場合の圧縮空気の挙動を開口面積の大小に着目した3次元FEM流体解析により解析し、ACS上流マンホールに設置する横引き空気抜き施設の必要開口面積を定めた。

平成14年6月の空気流出に伴うマンホール蓋の飛散事故以来、ACSの安全な運転の確保に向けて実施した様々な再発防止対策に加え、平成16年12月に横引き空気抜き施設関連工事が完了することにより、ACSのより一層の安全管理に万全を期すことができている。



## 1 - 2 下水道用監視制御システム標準化調査その2

建設部 設備設計課 吉田 典生  
高橋 肇

### 1. はじめに

水再生センター・ポンプ所用の下水道用監視制御システムは、制御対象となる揚水・水処理設備に合わせて、システム設計・仕様作成・発注をしている。また、監視制御システムは大規模かつ複雑なシステム構成なため、それに対応できる固有の装置（制御装置、構内通信装置及び監視制御プログラム）及び技術を駆使して構築されている。このためにメーカー間での互換性や拡張性等、柔軟性に乏しいシステムとなっている。

一方、昨今の情報通信技術の発展は目覚ましく、計算機及び通信装置において、処理能力と信頼性が大幅に向上している。また、監視制御用のソフトウェアにおいては、共通のソフトウェアを利用しながらシステムを構築する手法が広まりつつある。通信網や電力系統の監視制御が、その主な先行事例である。これらの分野では情報モデルが共通化対象の1つとなっている。情報モデルとは、監視制御対象（例：水再生センターにおけるポンプ）を部品化しソフトウェアの仕様として表したものである。このような状況から、汎用の装置あるいは共通的なソフトウェア仕様を利用することで、より簡潔で効率的なシステム構築が期待できる。

本調査は、下水道用監視制御システムが現在有する信頼性を維持しつつ、基本ソフトウェア（OS:Operating System）を含む中央・ローカル監視制御設備に対するオープン（汎用）技術の適合性並びに監視制御用ソフトウェアの標準的構成、汎用標準通信プロトコルの適合性等に関する調査・分析・検討し、下水道用監視制御システムの標準的な仕様を定めるものである。

### 2. 調査概要

本調査は、平成14年度から16年度にかけて行うものである。本章では、平成14、15年度に行った、水再生センターにおける揚水・水処理施設用監視制御システムの調査・検討を以下に示す。

#### 2.1 平成14年度の調査概要

##### (1) 要求条件の整理

監視情報の伝送や制御操作の応答時間、処理時間、また信頼性、保守性、拡張性などに関して、下水道用監視制御システムへの要求条件を整理し、明確化した。

##### (2) 技術動向調査

監視制御システムに関わる一般的技術（コンピュータ技術、デジタル計装制御技術、通信技術、ソフトウェア技術など）について、標準化及び製品動向を調査し、下水道用監視制御システムへの適用可能性を評価した。

##### (3) 下水道用監視制御システムの現状

納入実績のあるメーカ及び各水再生センターに対しアンケート調査を行い、下水道用監視制御システムの運用状況や新技術適用状況などを把握した。

##### (4) ハードウェア・ソフトウェア・構内通信網のオープン化に関する検討

監視制御システムにおける中央監視制御設備（クライアント/サーバやパーソナルコンピュータ（PC）水平分散方式などの計算機システム構成、入出力・表示装置、OSを含む）やローカル制御設備（プロセスコントローラ、シーケンサ）のオープン化の方向性を明らかにした。

ソフトウェアについては、中央監視制御設備及びローカル制御設備それぞれにおける監視データの標準化や、ソフトウェア部品の共通化の方向性について明らかにした。

構内通信網については、汎用の標準通信プロトコルと通信装置の妥当性をオープン化の観点から確認し、適用範囲を定めた。

## 2.2 平成15年度の調査概要

### (1) ハードウェア及び制御LANの標準化調査

デジタル計装制御技術の動向を踏まえ、汎用ハードウェアや汎用プロトコルの活用など、水再生センター・ポンプ所への適合性を標準化の視点から調査した。

### (2) 監視制御装置のソフトウェア構成標準化調査

水再生センター・ポンプ所の典型的な仕様を整理し、オブジェクト指向に基づいたソフトウェアを設計した。設計にあたっては、標準的な記述法を使用した。

また、人間にとって可読性があり、かつ、コンピュータにも取り扱いが容易なデータ記述形式であるXML（eXtensible Markup Language）について、監視制御分野での適用事例を調査した。

### (3) 監視制御システム標準仕様の調査

上記(1)及び(2)の調査結果に基づき、下水道用監視制御システムにおける標準仕様を策定した。

## 3. 下水道用監視制御システム標準化調査

本章では、水再生センターにおける監視制御システムの全体構成を説明した後に、平成15年度に調査・検討した、各構成要素において汎用装置あるいは技術が適用可能であるかについて述べる。

### 3.1 監視制御システムの構成

水再生センターにおける監視制御システムの一般的な構成を図1に、各構成要素の概要を表1にそれぞれ示す。

近年構築されたシステムでは、中央監視制御設備にUNIXワークステーションと同等な仕様をもつ機器が使用されている。そこで利用されているソフトウェアは、水再生センターごとに設計されている。プロセスコントローラは、要求される処理能力の高さや入出力点数の多さに対応するように設計された装置が用いられている。シーケンサは、汎用のPLC（Programmable Logic Controller）と呼ばれる装置が主に用いられている。

一方、ネットワークは、メーカー独自の様々な通信方式が使用されている。

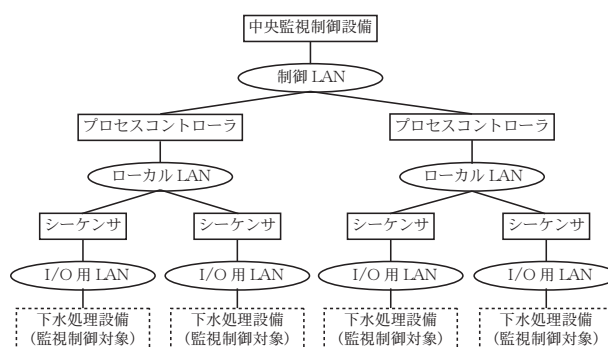


図1 監視制御システムの構成

表 1 監視制御システムを構成する要素（機器）の概要

要素	概要
中央監視制御設備	集中管理を行うための設備。監視用画面・計算機・ソフトウェアから構成される。
プロセスコントローラ	まとまった単位における下水処理設備の監視制御を担う。
シーケンサ	下水処理用の装置に対するシーケンス制御を担う。
制御 L A N	中央監視制御設備とプロセスコントローラ間の通信を担う。
ローカル L A N	プロセスコントローラとシーケンサ間の通信を担う。
I / O 用 L A N	シーケンサと下水処理設備間の通信を担う。

### 3.2 汎用技術の適用調査

ここでは、前節で紹介した構成要素ごとに、汎用装置／技術の適用可能性を示す。

中央監視制御設備では、現在でも UNIX ワークステーションと同等な仕様をもつ機器が採用されていることに加え、工業規格に準拠していない汎用計算機でも 24 時間 365 日連続稼働をうたった製品が登場しているため、基本ソフトウェア（OS）を含めたハードウェアに対し、汎用装置及び技術を適用できる環境が整っている。一方、ソフトウェアについては、汎用的な製品が存在するわけではないが、1 章で述べたように、他分野において監視制御用情報モデルを活用した実績があることから、下水道分野での情報モデルを確立することができれば、共通的な仕様を指定することが可能な状況にある。

プロセスコントローラのハードウェアに関しては、汎用 P L C の性能が向上していることから、処理能力及び入出力点数に応じて、汎用 P L C を利用できる場合がある。シーケンサにおいても同様に、汎用 P L C を指定できるが、より汎用的な指向を目指すために、P L C に関する規格、P L C の一般情報（JIS B3501）、装置への要求事項及び試験（JIS B3502）、プログラミング言語（JIS B3503）を採用することも視野に入る。ここでは、仕様が定められている。ただし、P L C に搭載される具体的なソフトウェアについては、処理内容が下水処理設備の特徴に依存すること、異なるベンダの P L C 間で相互運用性が確保されていないことから、共通的な仕様を規定することが困難である。

制御 L A N については、T C P / I P（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）や Ethernet といった汎用通信プロトコルを活用することが可能である。これは、情報の送受信端となる汎用の計算機と P L C が対応可能であることや、監視制御用として規格化され支配力を持っている技術が存在しないことによる。一方、ローカル L A N 及び I / O 用 L A N については、現在様々な規格が乱立しており、しかもシステム構築者によって得意とする技術が異なることから、汎用技術を特定することが得策ではない状況にある。

以上をまとめると、汎用技術や共通的な仕様を指定可能な領域は次の 4 つに絞ることができる。

#### (1) 中央監視制御設備のハードウェア

- (2) プロセスコントローラ及びシーケンサ（以下、併せてローカル制御設備という）のハードウェア
- (3) 制御 L A N
- (4) 中央監視制御設備のソフトウェア（情報モデル）

#### 4．汎用技術に基づく仕様の方向性

ここでは、3．2 節で示した 4 つの構成要素について、汎用技術に基づいた仕様の方向性について述べる。

##### 4．1 中央監視制御設備のハードウェア

中央監視制御設備のハードウェアについては、基本ソフトウェア（OS）が備えるべき A P I（Application Programing Interface）と信頼性に関する要求事項を定める。A P I を指定するのは、将来的な監視制御用ソフトウェアの互換性を確保する基盤とするためである。

一方、信頼性については、適切な部品及び構成を採用した計算機を導入できるような指標を与える点が必要である。

なお、C P U やメモリ容量等処理能力については、技術革新が早いことと使用するソフトウェアによって要求される能力が異なることから、設計段階でシステム構築者が自由に選択できるよう、詳細仕様には含まないこととした。

基本ソフトウェア（OS）の A P I については、1996 年版の POSIX.1 の準拠を指定することが有望である。POSIX.1 とは、基本ソフトウェア（OS）がアプリケーションプログラムに対して提供する機能と呼び出すための方法（API:Application Programming Interface）に関する規格である。1996 年版の POSIX.1 では、（アプリケーションに対する）システムインタフェース、リアルタイム拡張、スレッドに関する規格が定められている。これによって、商用 UNIX 及び大半の Linux については採用可能となる。Microsoft Windows についても、POSIX.1 対応のためのパッケージである S F U（Windows Servicesfor Unix）を利用することによって、採用可能な選択肢となる。したがって、システム構築者は得意とする技術を活かせる基本ソフトウェア（OS）が選択可能となる。

一方、信頼性については、M T B F（平均故障間隔:Mean Time Between Failure）を定める。例えば、10,000 時間を超える製品であれば利用可能とする。近年では、ビジネスサーバ用に設計された汎用計算機であれば、この程度の M T B F を実現することが可能であるため、導入可能な機種が増加する。

##### 4．2 ローカル制御設備のハードウェア

ローカル制御設備に用いるハードウェアに対しては、JIS B3501～3503 の適用指定が有力である。これによって、使用環境に対する特性やプログラミング言語が指定される。現在国内では、JIS B3501～3503 に準拠した様々な P L C が製造・販売されている。したがって、システム構築者は適切な規模及び特性を持った P L C を選択することが可能となる。

また、プロセスコントローラやシーケンサとして用いるべき P L C のグレードを指定することが考えられる。これにより、プロセスコントローラといえども、処理能力及び入出力点数などの条件が満たされれば、汎用的な P L C を用いることも視野に入る。

##### 4．3 制御 L A N

制御 L A N のプロトコルには、T C P ・ U D P / I P / Ethernet の活用が有力である。これらの技術はインターネットにて広く普及しているため、豊富な選択肢を実現すること

が可能である。これらは、監視制御用の通信技術としても適用検討が進められている。

一方、制御LANの構成装置には既に様々な選択肢が存在する。しかも、技術革新の早い分野であることから、排他的な指定を行うべきではない。参考までに、現時点ならば、制御LANの規模・利用方法・トラフィックの点から、STP（Spanning Tree Protocol）または、高速STPを備えるイーサネットスイッチによってネットワークを構成することが、費用対効果の点から優れている。

#### 4.4 中央監視制御設備のソフトウェア

監視制御用ソフトウェアの仕様として、下水処理を行う電動機やポンプなどを表す情報モデルを作成した。図2には、一例として、汚水ポンプ設備向けに設計されたオブジェクトとその包含関係を示す。本モデルの設計にあたって配慮した点とその方策は、以下のとおりである。

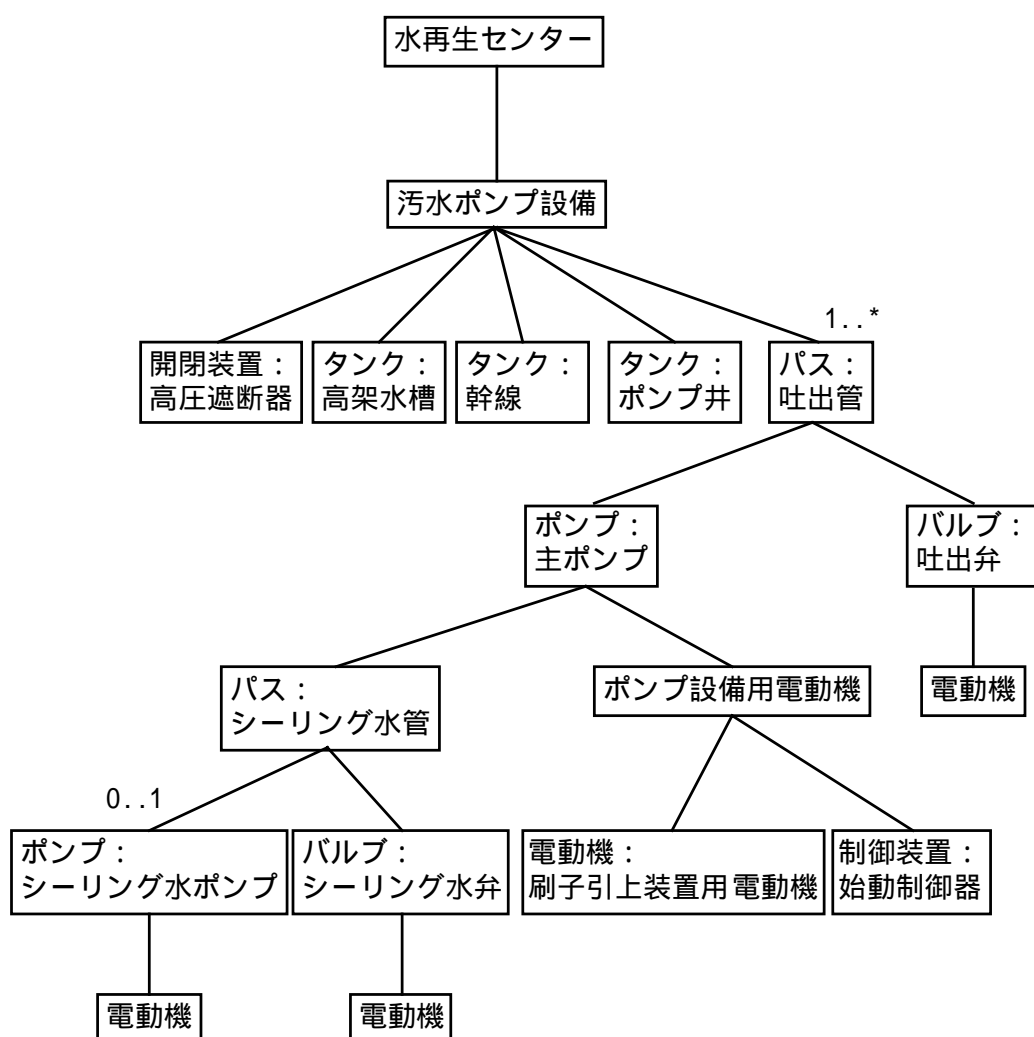


図2 汚水ポンプ設備における包含関係

- (1) 異なる水再生センターでも共通に利用できるよう、変更が頻繁に発生する部分（変更可能なオブジェクト）と、長期間再設計が不要な部分（持続的オブジェクト）を分離し、持続的オブジェクトに対し影響なく、変更可能なオブジェクトの再設計を可能とした。
- (2) 情報モデルの成熟度を高めるために、電力系統の監視制御に用いられる情報モデルを可能な限り利用した。
- (3) ソフトウェア開発者によって仕様の解釈が異なることを最小限にするため、オブジェクトの検索や命名に関する方法を指定した。
- (4) 今回の下水道用監視制御における情報モデルにおいては、包含木の構成及びオブジェクトの特定方法を共通化の対象とし、基本機能の開発量削減を目指した。

本節では、情報モデル一般の概要を示すとともに、標準的な仕様を作成する対象を整理する。続いて、下水道用情報モデルの設計方針を示し、今回設計した代表的な下水道用情報モデルについて述べる。

#### 4.4.1 情報モデル

監視制御対象となる設備などをオブジェクト指向に基づいて表したソフトウェア部品の集合を情報モデルと呼ぶ。情報モデルの設計には、再利用や拡張の容易な方法を提供するオブジェクト指向技術を活用する。

標準的な仕様を作成する対象を明確にするために、中央監視制御設備に用いられる監視制御プログラムを、図3に示すような4種類に分類する。

- (1) 「画面」用ソフトウェア：ディスプレイや監視盤上に図面・ボタン・メニューなどを表示し、運転員からの操作を受け付ける。
- (2) 「監視制御処理」用ソフトウェア：運転員の業務に即した処理手順を有し、画面からの指示や通信部からの情報に基づく処理を行う。
- (3) 「内部データ管理」用ソフトウェア：中央監視制御設備用コンピュータにおけるデータを保存・管理する。
- (4) 「通信部」用ソフトウェア：ローカル制御設備との通信を担う。

上記のような分類とした理由は、ソフトウェアの変更・拡張範囲を限定することにある。すなわち、長期間固定的に利用できるソフトウェアと短期間で変更される可能性のあるソフトウェアを分離することによって、ソフトウェアの変更や拡張を短期間で変更されるソフトウェアでのみ実現することとする。さらに、運転員の業務に関する要求に基づいて構築できるソフトウェアと、共通化されないシ

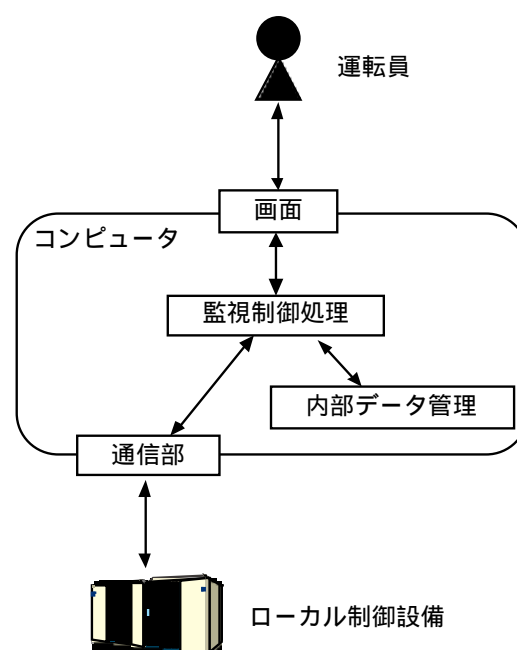


図3 中央監視制御設備用コンピュータにおけるソフトウェアの分類

システム構築者依存の) 技術を考慮して構築されるソフトウェアを整理することによって、システム構築者固有の技術へ対応可能とするとともに、業務の立場から設計したソフトウェアが、複数のメーカーに対応できるようにする。

この考え方は、I. ヤコブソンによって考案されたBCEモデル(Boundary-Control-Entity model)に基づいている。基本思想としてBCEモデルを採用することにより、設計変更に対する柔軟性を確保しやすくする。BCEモデルとは、以下の3種類にオブジェクトクラスを分類して設計するモデルである。

- (1) Boundary : 設計対象と外部との境界に位置し、情報交換の役割を担う。再設計が最も頻繁に発生する。
- (2) Control : オブジェクトの連携にかかわり、具体的な機能を提供する。機能変更に伴う再設計要求が発生する。
- (3) Entity : 設計対象内部で用いられる実体を表す。一度設計されると長期間利用される。

このBCEモデルを中央監視制御設備の情報モデルに適用すると、図4に示すような構成となることが考えられる。

各クラスの概要は、次のとおりである。

- (1) 境界クラス: Boundaryに対応する。ユーザインタフェースや他システムとのデータ交換を担う。
- (2) 制御クラス: Controlに対応する。監視制御機能を実現する。
- (3) 内部クラス: Entityに対応する。監視制御対象となる装置の特徴をモデル化する。
- (4) 通信モジュールクラス: EntityとBoundaryの2つに対応する。ローカル制御設備との通信を担う。

このうち、内部クラスにおいて、属性(オブジェクトクラスが有するデータ)及びメソッド(オブジェクトクラスが提供する処理)について、詳細仕様を定めるべきである。制御クラス及び通信モジュールクラスは、運転業務や監視制御対象の違いにより具体的な処理内容が異なることから、最低限備えるべきメソッドとその書式が仕様作成の対象となる。一方、境界クラスの共通的な仕様を定めるためには、入出力の整理が必要である。

図5に、試作した中核となるオブジェクトクラスを、標準的な記述法であるUML(Unified Modeling Language)のクラス図によって示す。ここでは、四角が1つのオブジェクトを表す。実線や破線はクラス間の関係を表す。クラスにおいて「<<内部>>」や「<<制御>>」等と示されているのは、BCEモデルとの対応を示している。

監視制御対象となる下水処理装置は、すべて下水道用装置クラスから派生する。他の装置を内包したり従属させたりする場合には、下水道用装置収容クラスから派生する。

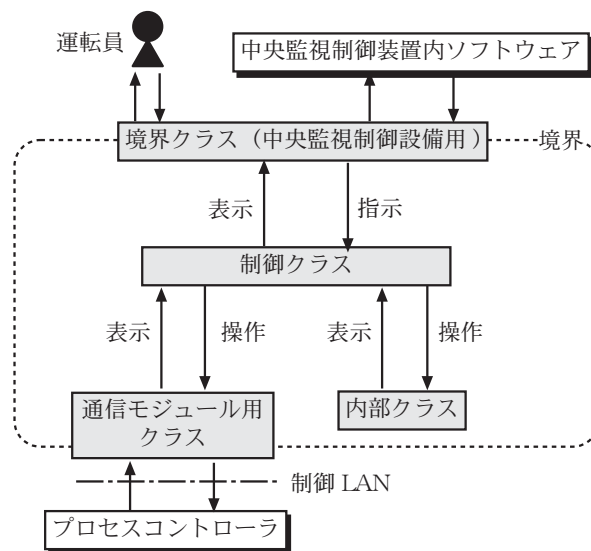


図4 クラス設計に対するBCEモデルの概要

このとき、下水道用装置収容クラスのオブジェクトが他のクラスのオブジェクトを包含するという。この包含関係をつなげると、全体としては木構造が形成される。この木構造を用いることによって、対象となる装置を特定する。

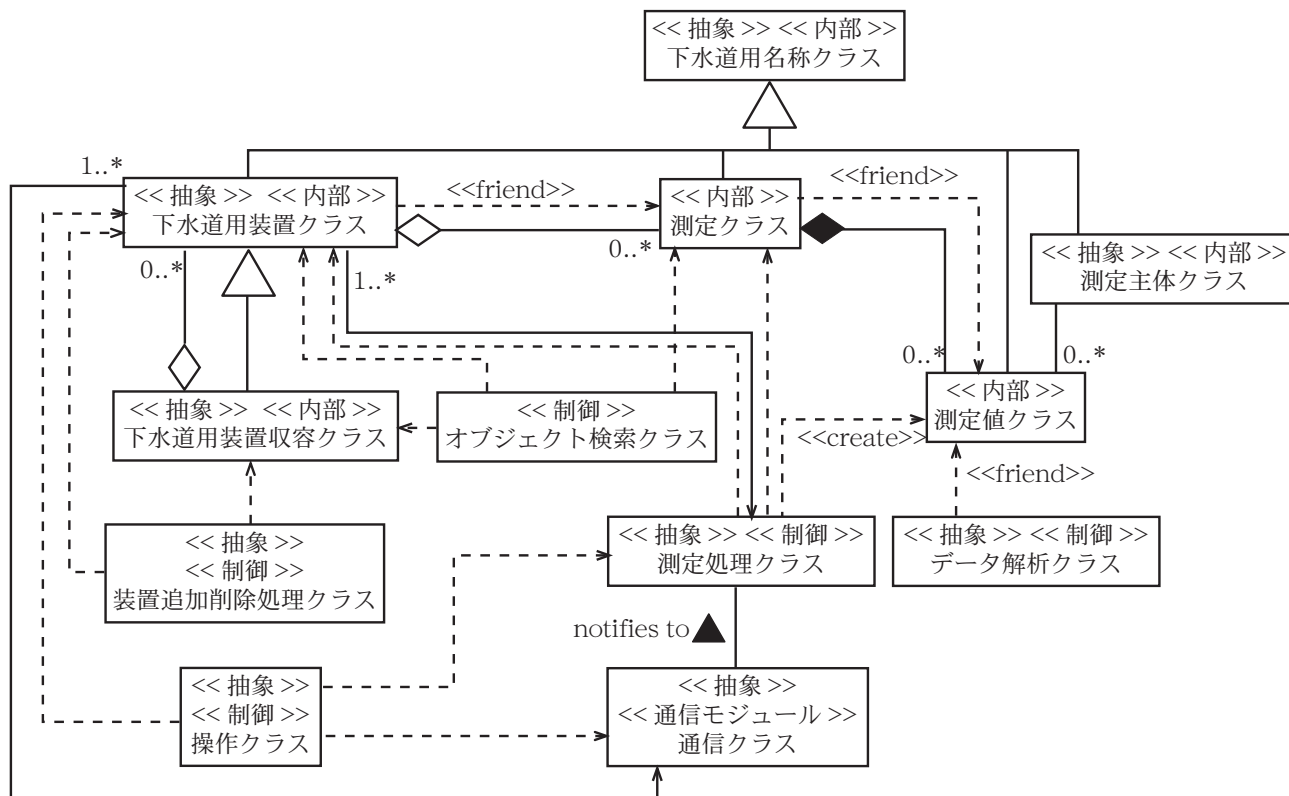


図5 中核となるオブジェクトクラス

## 5. むすび

本報告では、平成15年度に行った、水再生センターにおける監視制御システムについて、汎用装置や技術が適用可能な範囲を示し、それらに対する標準化の方向性について述べた。このうち、ハードウェア及び制御LANについては、処理能力や対象設備の入出力点数などの条件が満たされれば、汎用の機器が使用可能と考えられる。ソフトウェアについては、下水処理に用いられる装置を対象とした情報モデルを新たに作成した。

今後は本調査に基づき、下水道用監視制御システムの共通的な仕様を取りまとめるとともに、実際の監視制御システムを対象にしたモデルを構成し、有効性を検証していくことが必要である。



## **２．維持管理**

- ２－１ 耐酸性モルタル及び耐食性 FRP 補強材による下水道施設における劣化コンクリート補修工法の開発**
- ２－２ 分光光度計の積分値による放流水着色連続監視**
- ２－３ 下水道管きょシステムの安全機能向上調査その２**
- ２－４ ディーゼルエンジン排ガス除塵・脱臭用触媒フィルタ等の開発に関する共同研究**
- ２－５ 硫黄固化体の耐腐食性能調査**

## 2 - 1

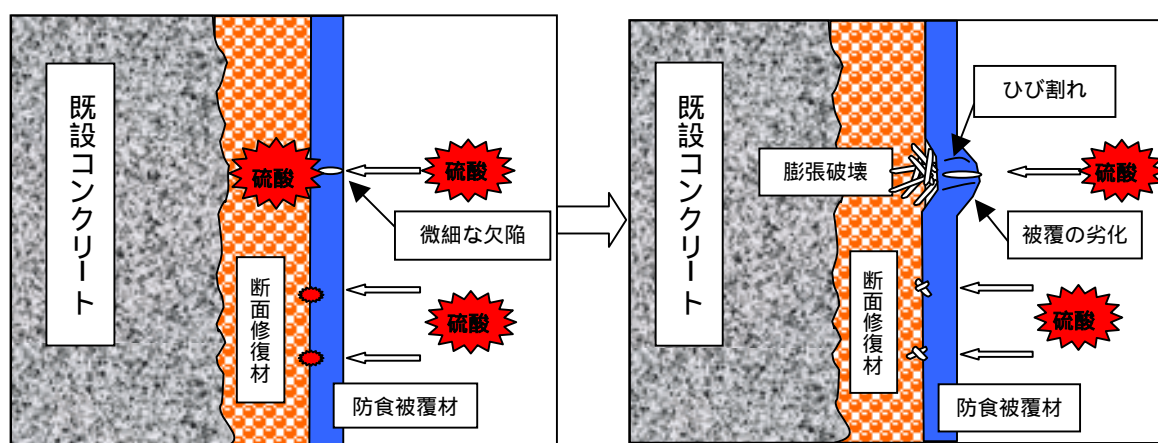
# 耐酸性モルタル及び耐食性 FRP 補強材による 下水道施設における劣化コンクリート補修工法の開発

施設管理部 施設保全課 小澤 孝吉  
計画調整部 事業調整課 安藤 太郎

### 1. はじめに

下水道施設の劣化コンクリート補修工事において、従来使用されていた断面修復材は、高強度及び早強型であるが耐酸性を有していないため、形成された防食被覆材のピンホール等のわずかな欠陥箇所からでも硫酸が浸透した場合には、断面修復材が容易に腐食する。さらに、断面修復材の腐食過程で生じる体積膨張により防食被覆材が損傷を受け劣化が加速するため、耐用年数を短命化させる要因となっている。(図1参照)

本研究は、下水道施設を維持管理していく上で、劣化した鉄筋コンクリート構造物を原設計耐力に回復させるとともに、施設の供用環境下で耐食性などの機能を恒久的に保持し得る補修工法の開発を目的に、平成12年度から平成15年度にかけて実施した、日本ジコウ株式会社とのノウハウ+フィールド提供型共同研究である。



#### 〔説明〕

防食被覆材に微細な欠陥(ピンホール、膜厚不足)が生じている場合、防食被覆材を透過した硫酸は断面修復材に到達する。

なお、防食被覆材に微細な欠陥がない場合でも、長期的には微量の硫酸が防食被覆材を浸透拡散し、断面修復材まで到達する。

#### 〔説明〕

断面修復材まで到達した硫酸により、耐酸性のない断面修復材は、コンクリートと同様にセメント硬化体が分解され、膨張崩壊し、ひび割れを発生させる。

図1 硫酸によるコンクリートの劣化進行状況

### 2. 技術概要

本技術は、超微粒子高炉スラグ系及び汚泥溶融スラグ系の耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材を組み合わせ使用する工法である。また、従来の高強度モルタルと鉄筋とを使用する工法と比較して、より耐酸性、高い強度特性及び耐久性が得られる工法である。

- (1) 超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタルは、超微粒子高炉スラグ(比表面積  $8,000 \sim 10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ )の持つ潜在水硬性を利用する。潜在水硬性とは、水酸化カルシウム等のアルカリ性物質の刺激により、高炉スラグ自体が水和し粒子の周囲にケイ酸カルシウムやアルミン酸カルシウム等の水和物を

形成する性質である。つまり、スラグの一部と水酸化カルシウムが化合して不溶性のケイ酸カルシウムやアルミン酸カルシウム等の水和物を生成する。長期強度の増進、組織の緻密化（水密性の向上）を図るとともに、水酸化カルシウム生成量の抑制による化学抵抗性（耐酸性）を増強させたものである。

- (2) 汚泥溶融スラグを利用する耐酸性モルタルは、スラグ微粉の細骨材への置換（50%程度）によりスラグの持つ潜在水硬性を利用し、長期強度の増進、組織の緻密化、化学抵抗性（耐酸性）を増強させたものである。
- (3) 耐食性 FRP 補強材は、高性能連続炭素繊維をビニルエステル樹脂に含浸させる格子目状（グリッド）及び、エポキシ樹脂に含浸させる棒状（ロッド）の 2 種類があり、耐食性ととも高強度・高弾性を有する。また、軽量であることから運搬や作業性に優れている。
- (4) 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材とによる補修工法は、下水道施設における硫化水素に起因するコンクリート構造物の腐食による耐久性低下に対して、耐酸性を有する断面修復材及び補強材の組み合わせによって、構造物の機能・耐力を回復させ、より一層の耐久性能の向上を図るものである。

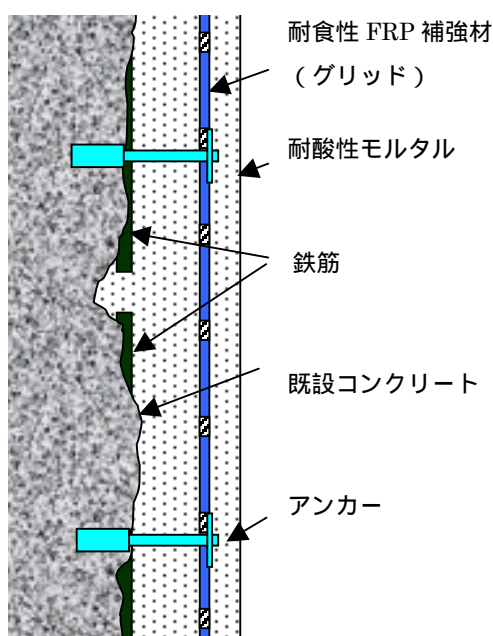


図2 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材（グリッド）

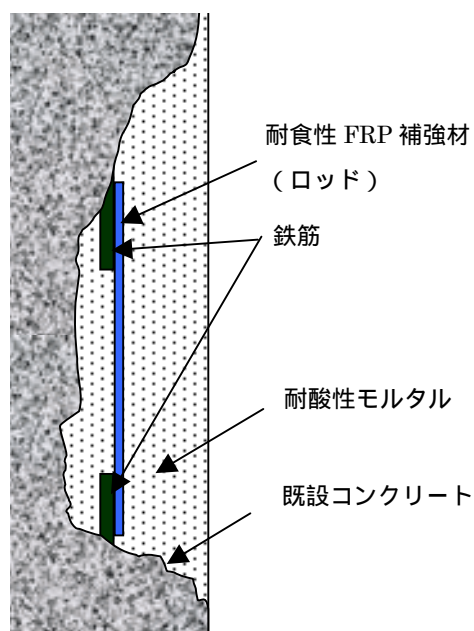


図3 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材（ロッド）

### 3．材料及び調査方法

#### 3．1 使用材料

今回新たに開発したコンクリート補修工法に使用する材料は、超微粒子高炉スラグ系及び汚泥溶融スラグ系の耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材である。なお、比較検討用には従来利用されていた断面修復用のモルタル（高強度）及び補強・補充用の鉄筋（異形棒鋼）を用いた。

##### (1) モルタル類

室内試験及び現場調査に使用するモルタル類の種別及び品質性能は、表 1～2 に示すとおりである。なお、品質性能は、「コンクリート改修技術マニュアル（処理施設編）平成 15 年 3 月 東京都下水道局施設管理部」に定める指標である。

表 1 使用したモルタル類の種別

記 号	種 別	特 徴
C-	コンクリート（セメント量：255kg/m <sup>3</sup> ）	W/C：55%、s/a：47%、スランプ：8cm
NM-	普通モルタル（セメント量：417kg/m <sup>3</sup> ）	コンクリート（C- ）から骨材を除く
M-	高強度モルタル	従来の断面修復材（耐酸性なし）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(0)	従来の断面修復材（耐酸性なし）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(A)	セメント置換率の変化（A 社製品）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(B)	セメント置換率の変化（B 社製品）
SS-	汚泥溶融スラグ系モルタル	汚泥溶融スラグ微粉を細骨材に置換

注） 印が新たに開発した耐酸性モルタルである。

表 2 耐酸性モルタルの品質性能

項 目	単位	品質性能指標	FS-	FS-	SS-
強度特性（圧縮強度）	N/mm <sup>2</sup>	25 以上	34	29 36	
		45 以上	52	68 55	
強度特性（曲げ強度）	N/mm <sup>2</sup>	3.0 以上	4.0	5.5	6.1
		7.0 以上	7.5	8.7	7.2
密度特性（硫黄浸透深さ）	mm	3.0 以下	2.5	2.8	3.0
無収縮性（長さ変化率）	%	- 0.1 以上	- 0.08	- 0.07	7.8
接着安定性（引張強度）	N/mm <sup>2</sup>	平均値 1.5 以上	2.0	2.3	3.0
耐硫酸性（重量変化率）	%	± 10 以内	- 1.3	+7	7.8
施工性（一回の塗り厚）	cm	2 以上	2 が可能	2 が可能	2 が可能

注）強度特性の欄は、上段：材齢 3 日強度、下段：材齢 28 日強度を表す。

## (2) 補強材

室内試験及び現場調査に使用する補強材の種別及び品質性能は、表 3 に示すとおりである。

表 3 補強材の品質性能

種 別	引張強度（N/mm <sup>2</sup> ）	弾性率（kN/mm <sup>2</sup> ）	質 量
FRP グリッド	1,400	100	1,000g/m <sup>2</sup>
FRP ロッド（ 6mm ）	1,700	130	60 g/m
鉄筋（SD295A、D13）	295	200	995 g/m

## 3.2 調査箇所及び調査方法

調査については、下記の場所及び内容で実施した。

みやぎ水再生センター内における試験施工及び施工品質の耐久性確認

## 砂町水再生センター内における供試体の暴露試験

### 室内における硫酸水溶液浸漬試験

#### 3.2.1 みやぎ水再生センター（試験施工及び施工品質の耐久性確認）

##### (1) 試験施工及び調査箇所

施工箇所：汚泥分配槽（1～3槽）

施工面積：1箇所当たり約25m<sup>2</sup>程度

施工位置：気相部（部分的に液相になるものは可）

施工部位：壁面及び天井部

##### (2) 環境調査

施設の環境調査については、気相部（気中）においては硫化水素等がコンクリートの劣化（腐食）に及ぼす影響、液相部（水中）においては水質からの硫化水素発生要因の程度を確認する目的で実施した。

調査項目は、気相部においては表面 pH、温度、湿度、硫化水素濃度（24 時間連続自動測定）、二酸化炭素濃度（24 時間連続自動測定）、液相部では、pH、水温、酸化還元電位（ORP）、溶存酸素量（DO）、溶存硫化物濃度（DS）である。

##### (3) 劣化度調査

劣化度調査は、腐食環境下における断面修復材（モルタル）及び補強材の劣化度を確認することにより、耐久性能を検証した。

調査項目は、劣化現象（目視外観観察）、脆弱深さ、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）である。

#### 3.2.2 砂町水再生センター（供試体の暴露試験）

暴露試験は、供試体（材料）を入れたかごを壁や天井から吊るし、経年変化による劣化度を確認することにより、材料の耐久性能を検証した。

##### (1) 調査箇所

第一沈殿池導水渠及び汚泥濃縮槽（3号槽）

##### (2) 環境調査

施設の環境調査は、気相部（気中）において硫化水素等がコンクリートの劣化（腐食）に及ぼす影響を確認する目的で実施した。

調査項目は、気相部の温度、湿度、硫化水素濃度（24 時間連続自動測定）、二酸化炭素濃度（24 時間連続自動測定）である。

##### (3) 劣化度調査

劣化度調査は、腐食環境下におけるモルタル（供試体）及び補強材の劣化度を確認することにより、耐久性能を検証する。

調査項目は、劣化現象（目視外観観察）、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）、引張強度（引張疲労試験法）、弾性率（ひずみ）、交差強度（交点の固着強度）である。

#### 3.2.3 室内における硫酸水溶液浸漬試験

作製したモルタル用供試体（直径 75mm、高さ 150mm の円柱形）を濃度の異なる 3 種類の硫酸水溶液（1%、5%、10%）に浸漬して耐硫酸性能を検証した。

調査項目は、質量変化率（試験前後の重量変化）、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）である。

供試体及び補強材の硫酸水溶液への浸漬期間は、4 週間（28 日）、8 週間（56 日）、13 週間（91 日）、

17 週間（119 日）、21 週間（147 日）及び 26 週間（182 日）とした。

### 3.2.4 調査時期

調査の実施時期は、表 4 のとおりである。

表 4 調査の実施時期

調査項目		開始	第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回	第 5 回	第 6 回	第 7 回
みやぎ	環境調査	13.3	13.8	13.11	14.4	14.8	14.12	15.6	15.10
	劣化度調査	~ 5	14.5	14.11	15.11				
砂町	環境調査	14.7	14.9	14.12	15.6	15.10			
	劣化度調査		14.11	15.8					

注）表中の数字は、平成年月を示す。

## 4. 調査結果と考察

### 4.1 みやぎ水再生センター（試験施工及び施工品質の耐久性確認）

#### (1) 試験施工

試験施工は、平成 13 年 3～5 月の間に汚泥分配槽で実施した。対象施設の施工前（劣化状況）、施工中（設置状況）及び施工終了後の状況を図 4～6 に示す。



図 4 施工前の状況



図 5 FRP 補強材の設置状況



図 6 施工終了後の状況



## (2) 環境調査

環境調査のうち、汚泥分配槽内( 1～3 槽 )の硫化水素濃度の測定結果を表 5 及び図 7 に示す。  
 なお、図 7 は各調査月の平均値( 1 日 24 時間連続測定 の平均 )を示す。

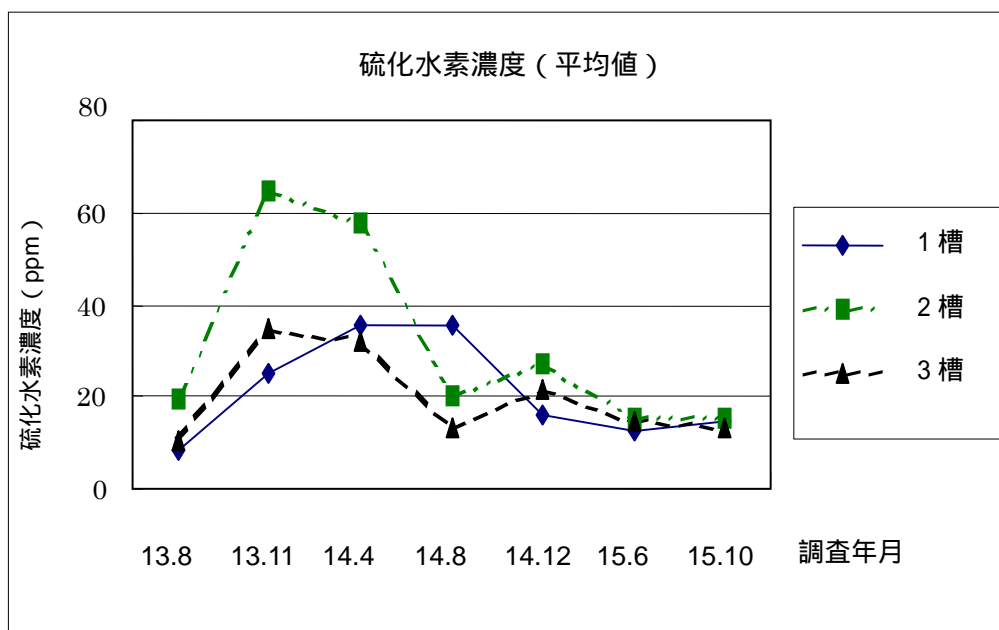
施設内の腐食環境は、硫化水素濃度の平均が 20～30ppm 程度であることから、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル(平成 14 年 12 月) 日本下水道事業団」によると Ⅱ 類(年間平均硫化水素濃度が 10～50ppm の腐食環境)に分類される。

表 5 硫化水素濃度の測定結果

箇 所	注 1) 平均値 ( ppm )	注 2) 最高値 ( ppm )
1 槽	21.0	267.0
2 槽	31.3	455.0
3 槽	19.8	139.7
平 均	24.1	-

注 1) 平均値は、各調査月の平均である。なお、測定は各調査月のうちの  
 1 日( 1 日 24 時間連続測定 )のみである。

注 2) 最高値は、各測定のうち最高値を示した値である。



## (3) 劣化度調査

### 1) 劣化度の指標

下水道施設におけるコンクリート構造物の主な劣化要因は、硫化水素に起因する化学的劣化( 硫酸劣化 )である。劣化度の指標には、脆弱化深さ、中性化深さ、硫黄浸透深さがある。各指標の概念を図 8 に示す。

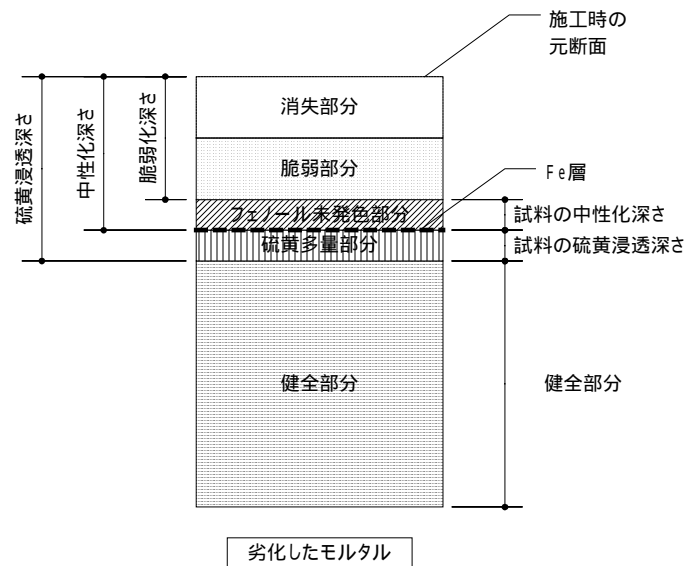


図 8 劣化深さの概念

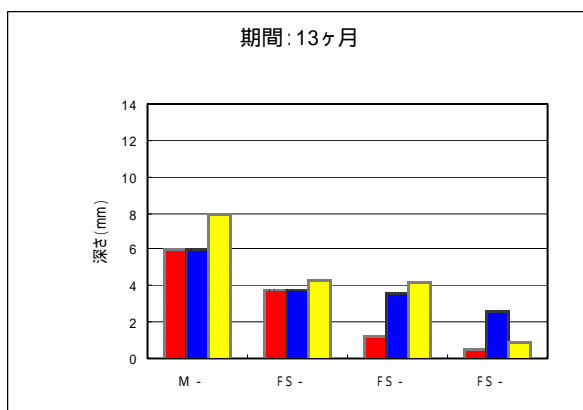
## 2) 劣化度の調査結果

汚泥分配槽内における主な材料の劣化度調査の結果を表 6 及び図 9 に示す。

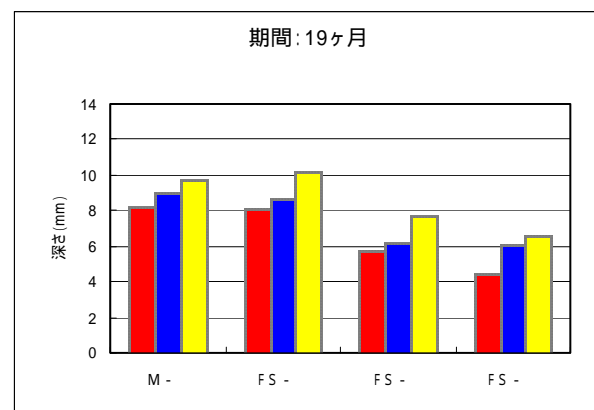
表 6 材料別及び経過年数別の中性化深さ

種 別	1 年後(mm)	1.5 年(mm)	2.5 年(mm)
M-1	6.00 ( 8.00 )	9.05 ( 9.75 )	11.50 ( 11.50 )
FS-	3.87 ( 4.37 )	8.69 ( 10.19 )	8.65 ( 8.65 )
FS-	3.63 ( 4.23 )	6.22 ( 7.72 )	6.13 ( 6.63 )
FS-	2.70 ( 1.00 )	3.96 ( 2.61 )	4.00 ( 4.50 )

注 )( ) 内は、硫黄浸透深さである。

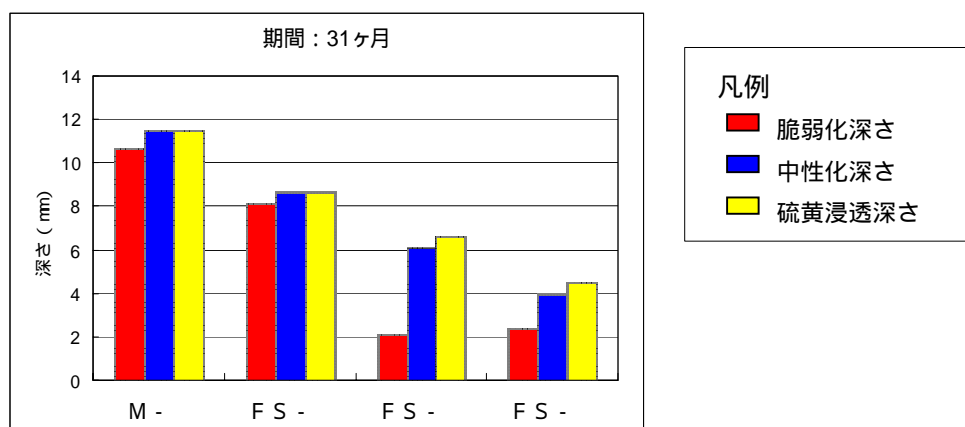


( 1 年後 )



( 1.5 年後 )





(2.5 年後)  
 図9 材料別・経過年数別の劣化度

今回新たに開発した超微粒子高炉スラグ系モルタル（耐酸性モルタル）である FS- 及び FS- の 2.5 年経過した時点での劣化度（中性化深さ）は、断面修復材として一般的に用いられていた高強度モルタル（M-1）と比較して、耐酸性モルタル（FS- ）は約 1/2、耐酸性モルタル（FS- ）は約 1/3 であり、両材料とも良好な耐酸性を示していることが確認された。

3 点（1 年後、1.5 年後、2.5 年後）の実測値から回帰分析により求めた中性化深さの回帰式及び相関係数、回帰式より算出した 5 年後及び 10 年後の予測値を表 7 に示す。

供用 10 年後の中性化深さを予測した結果、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）が 14.3mm、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）が 7.5mm となり、M-1（高強度モルタル）の 31.5mm に対して約 1/2 と約 1/4 である。

また、回帰式による予測値から M-1（高強度モルタル）では年間 3mm 程度、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）及び FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）では年間 1mm 前後の劣化が進行すると推測される。

表 7 供用施設における中性化深さから求めた予測値

種 別	回 帰 式	相関係数	2.5 年後の 実測値(mm)	5 年後の 予測値(mm)	10 年後の 予測値(mm)
M-1	$y = 6.2797 \times x^{0.6998}$	$R^2 = 0.95$	11.5	19.4	31.5
FS-	$y = 4.5763 \times x^{0.8401}$	$R^2 = 0.69$	8.65 ( 75% )	17.7 ( 91% )	31.7 ( 100% )
FS-	$y = 4.0662 \times x^{0.5463}$	$R^2 = 0.67$	6.13 ( 53% )	9.8 ( 50% )	14.3 ( 45% )
FS-	$y = 2.9172 \times x^{0.4115}$	$R^2 = 0.71$	4.00 ( 34% )	5.7 ( 29% )	7.5 ( 23% )

注 1)  $y$  : 中性化深さ ( mm )  $x$  : 供用年数 ( 年 )

注 2) ( ) 内は、M-1 ( 高強度モルタル ) を 100 としたときの比率である。

#### 4.2 砂町水再生センター（供試体の暴露試験）

##### (1) 環境調査

環境調査のうち、施設内における硫化水素濃度の測定結果を表 8 に示す。

表 8 硫化水素濃度の測定結果 ( ppm )

調査箇所	平成 14 年 9 月	平成 14 年 12 月	平成 15 年 6 月	平成 15 年 10 月
汚泥濃縮槽	1.8	10.7	49.7	4.2
導 水 渠	8.5	1.7	0	0.3

(2) 劣化度調査

汚泥濃縮槽と第一沈殿池の導水渠における劣化度調査の結果を表 9、図 10～11 に示す。なお、各劣化度は、暴露試験の開始（平成 14 年 7 月）からの経過時点における測定の結果である。

表 9 材料別及び経時変化別の劣化度

供試体の状況	調査箇所	材料種別	中性化深さ(mm)		硫黄浸透深さ(mm)	
			4 ヶ月後	13 ヶ月後	4 ヶ月後	13 ヶ月後
未被覆	汚泥濃縮槽	C-	0	2.4	4.0 3.4	
		NM-	0	0.7	2.0 9.7	
		M-	0	0 0		1.0
		FS-	0	0	0.2	1.0
		FS-	0	0.5 0 1.0		
		SS-	0	1.0	1.0 2.0	
	第一沈殿池導水渠	C-	0	3.4 0 6.4		
		NM-	0	1.1 0 4.1		
		M-	0	0 0		0.5
		FS-	0	0.4 0 0.9		
		FS-	0	0.7 0 1.2		
		SS-	0	1.0 0 1.0		

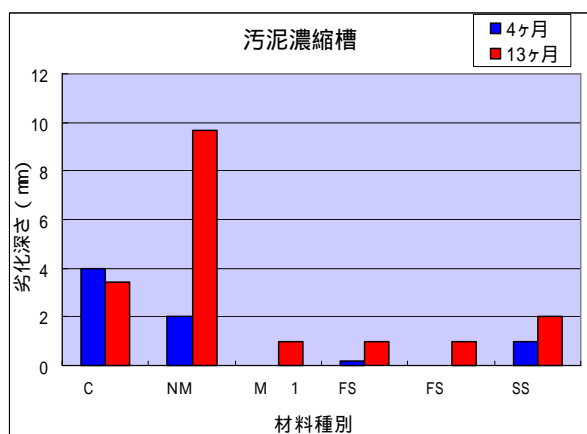


図 10 硫黄浸透深さ（汚泥濃縮槽）

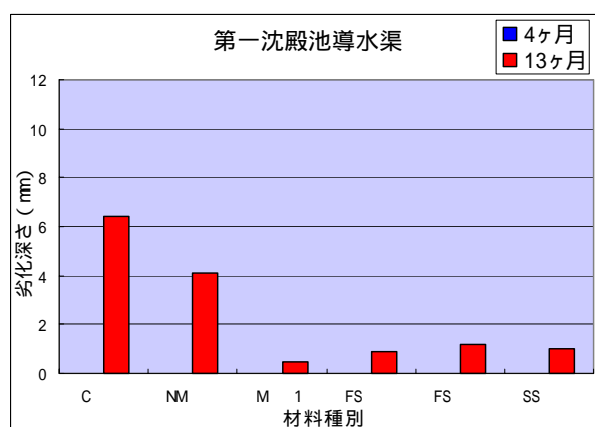


図 11 硫黄浸透深さ（第一沈殿池導水渠）

(3) 補強材の劣化度調査

### 1) FRP グリッド

FRP グリッドにおける引張強さ、弾性率及び交点強さの経年変化を表 10、図 12～13 に示す。  
なお、FRP グリッドの外観には、特に異常は認められなかった。

表 10 FRP グリッドの経年変化（引張強さ、弾性率及び交差強）

調 査 項 目	未曝露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	1,588	1,632	1,584
弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	100.3	99.8	102.7
交点強さ (N/mm <sup>2</sup> )	11.9	11.8	13.3

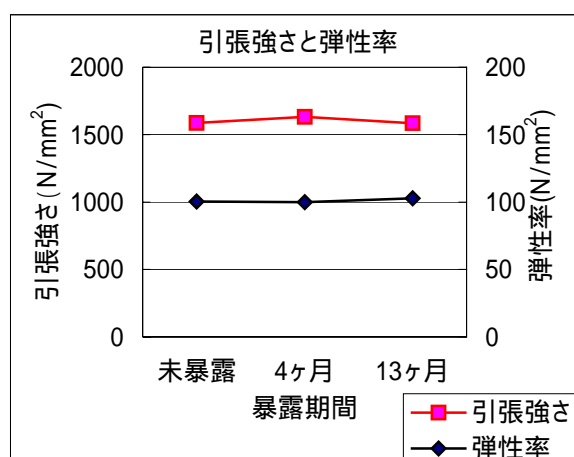


図 12 引張強さ及び弾性率の経年変化

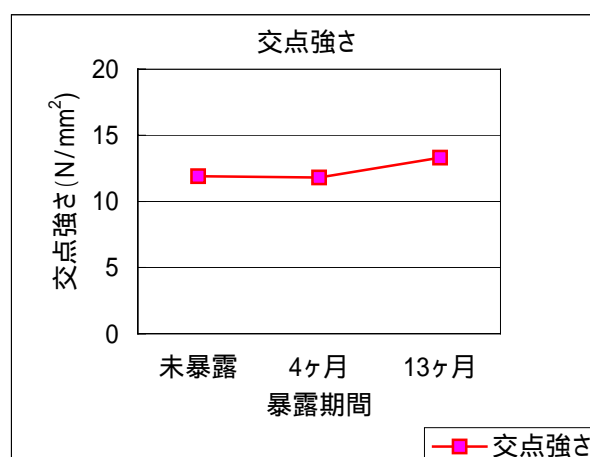


図 13 交点強さの経年変化

### 2) FRP ロッド

FRP ロッドの引張強さ及び弾性率の経年変化を表 11 に示す。なお、FRP ロッドの外観には、特に異常は認められなかった。

表 11 FRP ロッドの経年変化（引張強さ及び弾性率）

調査項目	未曝露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	2,236	2,208	2,251
弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	154	151	152

### 3) 鉄筋（異形棒鋼）

異形棒鋼の経年変化を表 12、図 14 に示す。

曝露 4 ヶ月後において 3 本ある供試体のうち、2 本は全面に赤錆が発生していた。他の 1 本は節部に錆が見られる程度で、発錆率は全体面積の 10%程度であった。

一方、曝露 13 ヶ月後では 3 本の供試体のすべての表面全体に赤錆が発生していた。

表 12 鉄筋の経年変化（引張強さ）

経 年	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
未 曝 露	352	524	27.3
4 ヶ月後	344	519	26.0
13 ヶ月後	302	449	21.0

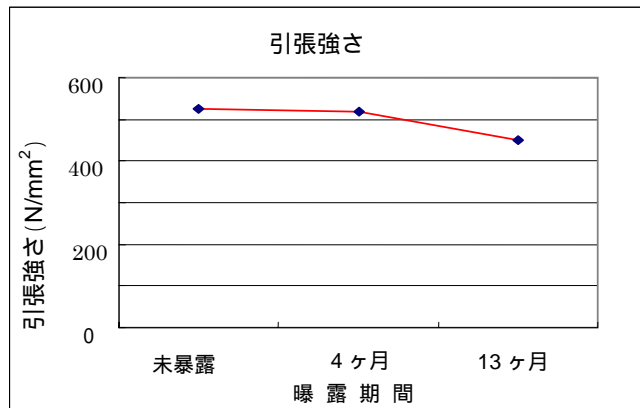


図 14 引張強さの経年変化

#### 4) 補強材の引張強さ

3 種類ある補強材の引張強さの変化率を表 13 及び図 15 に示す。耐食性 FRP 補強材（グリッド、ロッド）は、約 1 年間（13 ヶ月）の曝露試験でも強度の低下は認められなかった。一方、鉄筋（異形棒鋼）については、約 14%の強度低下があった。

表 13 引張強さの変化率 (%)

材料種別	未暴露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
FRP グリッド	0	+ 2.8	- 0.3
FRP ロッド	0	- 1.3	+ 0.7
異 形 棒 鋼	0	- 1.0	- 14.3

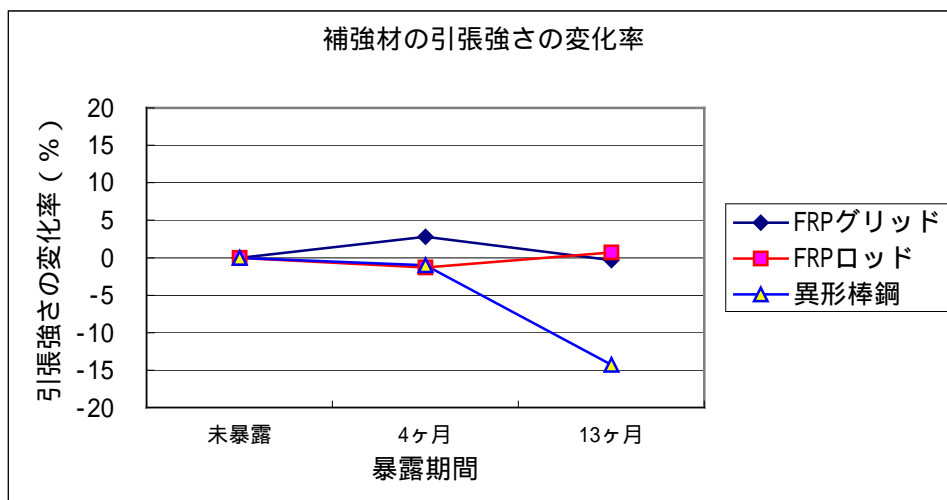
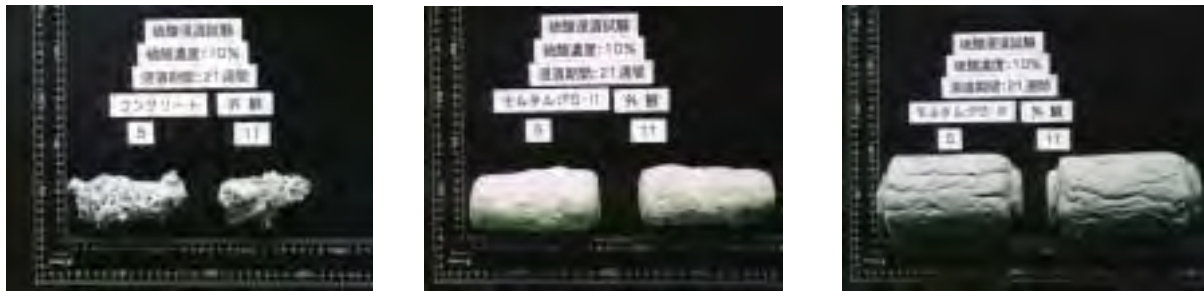


図 15 引張強さの変化率

#### 4.3 室内における硫酸水溶液浸漬試験

##### (1) 試験体の劣化状況

10%の硫酸水溶液に21週間浸漬した後の試験体の劣化状況を図16に示す。



M- (高強度モルタル)

FS- (耐酸性モルタル)

FS- (耐酸性モルタル)

図16 硫酸水溶液浸漬後の劣化状況

##### (2) 劣化度試験

質量変化率(浸漬後質量 - 浸漬前質量) / 浸漬前質量 × 100 及び硫黄浸透深さの結果を表14及び図17に示す。

表14 材料別及び経年変化による質量変化率

(1%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	2.7	6.1 8.5		10.1	11.8	
NM-	2.7	6.2 9.1		11.2	13.7	
M-	0.5	4.1 7.8		12.2	14.1	
FS-	4.1	8.2	11.0	12.9	14.6	
FS-	1.0	3.3 4.3		5.0	5.7	
SS-	3.7	7.5	10.2	11.7	13.0	

(5%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	11.4	20.0	30.0	38.3 47.3		
NM-	25.2	46.1	64.3	75.5 81.7		
M-	19.2	33.3	47.5	56.2 65.3		
FS-	3.4	5.6	7.2	8.7	11.1	
FS-	2.0	3.0	4.7	5.3	5.3	
SS-	3.2	5.0	7.4	10.9	12.9	

(10%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	21.5	38.4	56.3	73.1 81.5	97.6	
NM-	39.1	64.6	87.0	95.3 99.8		消失
M-	40.1	61.5	82.3	93.7 99.2		消失
FS-	6.9	19.4	34.5	44.2 50.3	59.3	
FS-	5.8	9.2	9.0	9.0	7.8	7.0
SS-	6.4	22.6	36.2	45.9 50.6	58.9	

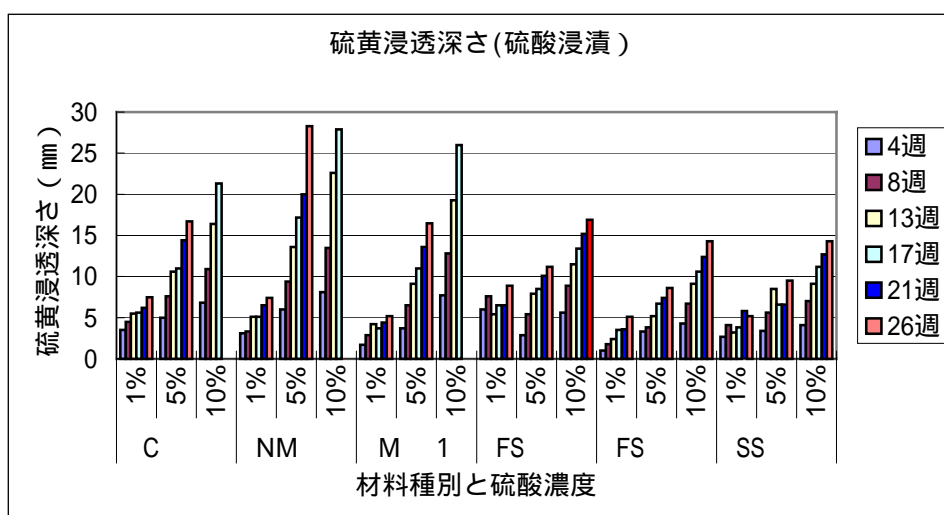


図 17 材料別及び経年変化による硫黄浸透深さ

1%硫酸水溶液浸漬では、質量変化率と硫黄浸透深さとも材料間に有意な差は認められなかった。  
5%硫酸水溶液浸漬では、高強度モルタル(M-1)と比較して超微粒子高炉スラグ系モルタル(FS-、FS-)及び汚泥溶融スラグ系モルタル(SS-)の硫黄浸透深さは、約 2/3 ~ 1/2 (68%、52%、58%) であり、良好な耐酸性能を有している。また、質量変化率についても有意な差がでた。

10%硫酸水溶液浸漬では、コンクリート(C-)や高強度モルタル(M-)は 21 週間目で 30mm 以上の中性化や劣化進行により崩壊した。

なお、各材料の中性化深さは測定値にばらつきがあるものの、硫黄浸透深さよりおおむね 1mm 程度 (0 ~ 3mm) 少ない。

### (3) 劣化度の予測

5%硫酸水溶液浸漬の測定値から、回帰分析 (硫黄浸透深さはばらつきがあったので中性化深さから求めた。)により、回帰式及び 10 年後の予測値を求めた。結果は、表 15 に示すとおりである。

なお、予測には 1%硫酸水溶液浸漬では各材料間に有意な差がないこと、また、10%硫酸水溶液浸漬では試験中に供試体が崩壊したことなどから、5%硫酸水溶液浸漬による測定値を採用した。

表 15 室内 5%硫酸水溶液浸漬における中性化深さから求めた予測値

種 別	回 帰 式	相関係数	0.5 年後の 実測値(mm)	2.5 年後の 予測値(mm)	10 年後の 予測値(mm)
C-	$y = 0.2949 \times x^{0.7506}$	$R^2 = 0.983$	15.2	49.2	139.2
NM-	$y = 0.2164 \times x^{0.9107}$	$R^2 = 0.990$	27.3	107.4	380.0
M-	$y = 0.2718 \times x^{0.7829}$	$R^2 = 0.998$	16.5	56.5	167.2
FS-	$y = 0.3688 \times x^{0.6276}$	$R^2 = 0.988$	10.1 ( 61% )	26.6 ( 47% )	63.5 ( 38% )
FS-	$y = 0.2519 \times x^{0.6687}$	$R^2 = 0.999$	8.2 ( 50% )	24.0 ( 42% )	60.7 ( 36% )
SS-	$y = 0.3237 \times x^{0.6160}$	$R^2 = 0.987$	8.0 ( 48% )	21.6 ( 38% )	50.6 ( 30% )

注 1) y : 中性化深さ (mm) x : 浸漬日数

注 2) ( ) 内は、M-1 (高強度モルタル) を 100 としたときの比率である。

### 5. まとめ

## 5.1 耐酸性モルタル

### (1) 耐酸性モルタル（超微粒子高炉スラグ系）

超微粒子高炉スラグ系の耐酸性モルタル（A、B）は、従来から下水道施設におけるコンクリート構造物の断面修復材として使用されている高強度モルタルと比較して、同等以上の強度特性や施工性を有していることが確認できた。さらに、超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタル（A、B）は、高強度モルタルに対して約2倍程度の耐酸性能を有していた。

なお、超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタル（A、B）の価格は、高強度モルタルと比較して約10%～20%程度割高であるが、耐酸性能や耐久性能の面で優れており、トータル的には高強度モルタルより優位であると言える。

### (2) 耐酸性モルタル（汚泥溶融スラグ系）

汚泥溶融スラグ系耐酸性モルタルは、超微粒子高炉スラグ系耐硫酸性モルタル（A、B）と同程度の性能を有していた。

なお、当局の南部スラッジプラントで製造していた汚泥溶融スラグについては、平成13年度末をもって生産を中止している。

## 5.2 耐食性FRP補強材

耐食性FRP補強材（FRPグリッド、FRPロッド）は、コンクリートやモルタルの補強材として有効な高強度特性を有しており、現在道路橋などの一般コンクリート構造物の補強材料としても広く利用されている。

耐食性FRP補強材は、下水道施設における硫化水素による腐食環境でも強度（引張）の低下や劣化状況の変化は特に認められず、耐久性に優れていた。また、軽量であることから運搬や施工性にも優れている。さらに、加工（切断等）についても特殊な工具を必要としないなど有利な面がある。

## 5.3 劣化コンクリート補修工法の開発と結果

耐酸性モルタル及び耐食性FRP補強材を組み合わせた当工法は、下水道施設特有の劣化状況に対応した補修工法及び補強工法としての優位性があることが確認できた。

当工法は、従来用いられている工法（高強度モルタル＋鉄筋）に比べて工事価格は割高であるが、耐用年数及び維持管理費を含めたトータル的なコストの面で有意である。

## 6. 今後の展開

各腐食環境条件による劣化進行の予測は、施設の維持管理計画の策定においてコンクリート構造物の経年による劣化深さ及び劣化進行速度を推定し、施設の要求品質性能の判定、残存期間の予測、施設調査の要否とその時期の判定、改修工事の要否とその時期の判定等を行う際に重要な指標となる。

このことから、本調査で得られた劣化予測値や実際の施設で行われている定期点検や施設調査で収集されたデータ等を用いて、精度の高い劣化予測診断システムを構築することで、適切な時期での改修工事及び各腐食環境条件の相違や期待残存耐用年数に適合する工法の選定等が可能となる。

この結果、当局における計画的な維持管理計画の策定と、さらには維持管理を含めたコストの縮減を実現させることが可能になるものと考ええる。

本調査は約3年間の実施であったが、耐久性を評価するデータが十分に収集できなかった。今後さらに追跡調査を継続することにより、精度の高い劣化進行の予測が可能になることを期待している。

最後に、本調査に協力して頂いた、みやぎ水再生センター及び砂町水再生センターの関係各位に対し、感謝申し上げます。

## 2 - 2 分光光度計の積分値による放流水着色連続監視

北部第二管理事務所 みやぎ水再生センター水質管理係  
林 紀子 渡部 昇 守屋 文夫 鮫島 和夫

### 1. はじめに

昭和 40 年代の初頭より、みやぎ水再生センターにおいては化学、染料製造業、食品製造業等の事業場排水の流入により放流水が着色するという事態が続いた。

これら法的規制の無い着色物質問題を協議する為、管理事務所を主体とした着色問題協議会を数次にわたり開催した。この活動の中で、着色物質を排出している企業に当センターの実態を知ってもらうための見学会等を行い協力の依頼をするなど行って来た。こうした着色問題への取組みがなされた結果、少しずつではあるが着色問題は確実に改善の傾向にある。

しかし、平成 12 年 12 月に東京都公害防止条例が環境確保条例として改正され、平成 13 年 4 月より放流水にも外観（着色）に対する規制が追加されるなど、水再生センターにとって益々厳しいものとなって来た。そのため、放流水の着色の程度を連続測定し、実態を調べる必要が生じた。

従来、着色の程度を評価するのは人の感覚に頼った方法なので、測定に手間がかかり、また長時間にわたる連続測定は不可能など問題があった。

そこで、従来感覚に頼ってきた処理水の着色具合を分光光度計による機器測定で連続監視出来ないか検討し良好な結果を得たので、検討の経緯と測定結果を報告する。

### 2. 機器測定への試み（積分値と着色度）

排水の色具合を測定する手法として、感覚による測定法〔官能測定法〕や機器測定法など種々考えられて来た。官能測定法である着色度(処理水を順次蒸留水で希釈し、着色状況が確認出来なくなるまで希釈した倍率を放流水の着色度として表示する)や、色度(水に溶存またはコロイド状で存在する物質による淡黄色から黄褐色の程度を示すもので、水に色度標準液を加えたものと比較する。

当水再生センターでは日常試験で採用。)については、それぞれ個人差があることや熟練度を要するなど、人手と時間がかかる。また分光光度計による機器法には実際の感覚と結び付き難いなどの問題がある。

しかし、近年、合成工場等の業種において脱色の過程を詳細に測定調査する中で、実際の脱色感覚を機器測定で代替する試みがなされた。

その手法として分光光度計を使用した吸光度と着色度を結び付ける試みがみられた。

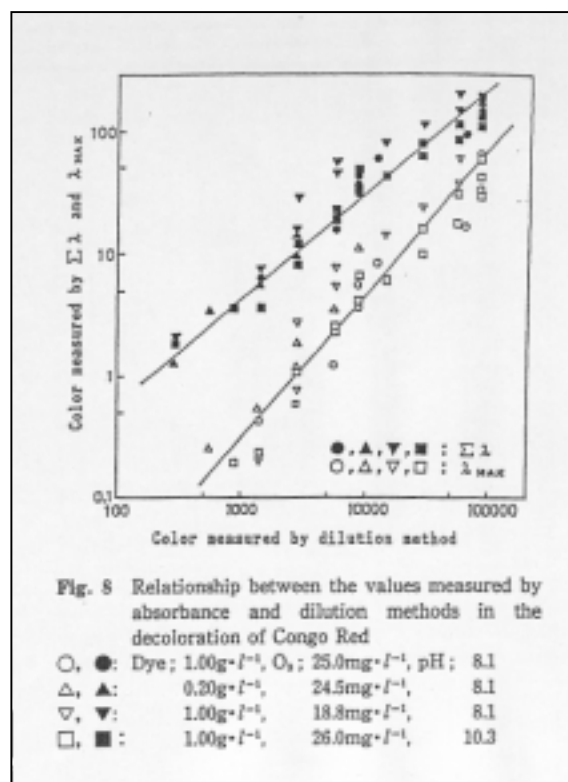


図 1 各種染料の吸光度と着色度  
〔水環境学会誌第 19 巻 4 号 1996〕



ここで、吸光度を色として表現する手法として次のような方法 1.2) が有る。

1 法：分光光度計で波長 ( 400 nm - 700 nm ) を 10 nm おきに吸光度を測定しそれを積分したもの。

OD 法：分光光度計で波長 ( 400 nm - 650 nm ) を 50 nm おきに吸光度を測定し、それを積分したもの。

max 法：物質による極大吸収波長における吸光度を測定したもの。

また、高橋らは Congo Red, Orange などの標準染料 16 種類を使用し、脱色過程における吸光度を測定し、それぞれの減少と着色度の減少に相関性を見つけ、各々の染料の着色度が次の式で関連づけられる事を示した。( 図 1 )

$\text{Log} ( \quad 1 \text{ または } \text{max} ) = A \text{Log } C_m + \text{Log } B$ 、ここで  $C_m = (\text{着色度})$

### 3. 放流水への適用

各種染料を用いた着色度と吸光光度法による積分値には相関関係が有る事が示されたので、種々の着色物質が流入した下水放流水についても同様の相関式が成り立つものと予測した。ここで着色度の測定について、表 1 を基に説明する。パネル

表 1 着色度の測定方法

パ ネ ル	希 釈 段 階 (下段は対数值)						各パネル の閾値 (対数)	上 下 カ ット
	2 (0.301)	4 (0.602)	8 (0.903)	16 (1.204)	32 (1.505)	64 (1.806)		
A						×		カット
B					×		1.355	
C				×			1.054	
D					×		1.355	
E			×					カット

の 5 人は当センター職員。まず放流水を蒸留水で希釈し蒸留水と比較し区別がつかなくなる希釈倍率を求める。この際、5 人の値の中で最大 ( A )、最小 ( E ) の希釈倍率のデータは除く。各パネルの閾値は識別出来た最大希釈倍率の対数值と出来なかった希釈倍率の平均値となる。ここで、B の人の値は識別出来る希釈倍率 16 の対数 1.204 と出来ない希釈倍率 32 の対数 1.505 の平均値 1.355 となる。こうして B , C , D 3 人の閾値の平均値(1.255)を求める。この時の放流水の着色度  $C_m = 10^{1.255}$  より 18 となる。

次に、吸光光度計による積分値については、島津分光光度計 MultiSpec 1500 フロ - セル長さ 50mm を使用し、放流水は図 3 にある様に総量規制 UV モニタ - 測定用ヘッドタンクより分採した放流水 ( 着色度を測定したのと同じ試料 ) を連続測定した。

測定波長の設定については、下水には多くの物質が流入する事より特定波長に限定した OD 法、max 法ではなく 1 法 ( 400 nm - 700 nm ) を採用し、しかもより正確に

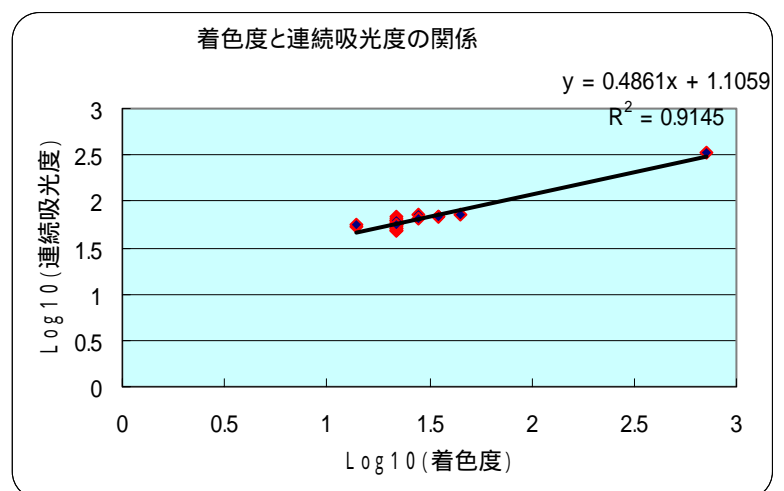


図 2 着色度と連続吸光度

吸収パターンを捉えるために 1nmおきの吸光度を測定した後、その吸光度を積分したものを利用した。こうして着色度と積分値を同時測定した試料 23 件を同様に高橋の手法に従い処理し、 $\text{Log}(\quad) = 0.4861\text{Log } C_m + 1.1059$ 、 $C_m = (\text{着色度})$   $R^2 = 0.9145$  と良好な相関関係を得る事が出来た。(図 2)

放流水の着色度と分光光度計の積分値の間に相関関係が有る事が示され、機器による放流水の連続監視が出来る事と成った。

#### 4. 日常連続測定する場合の改良及び注意点

処理水は放流渠よりヘッドタンクに導かれ、一部は UV 計に一部は分光光度計に導かれる。吸光度を測定する際は、放流水中の細かい汚濁物質 (SS) を除去する必要がある。そのため、分光光度計に処理水が入る前にフィルター (オルガノ P F フィルター model 5 $\mu$ ) を設置した。

更にヘッドタンクからフィルターまでの配管が簡単に洗浄出来る様に途中に水道水の配管を入れた。

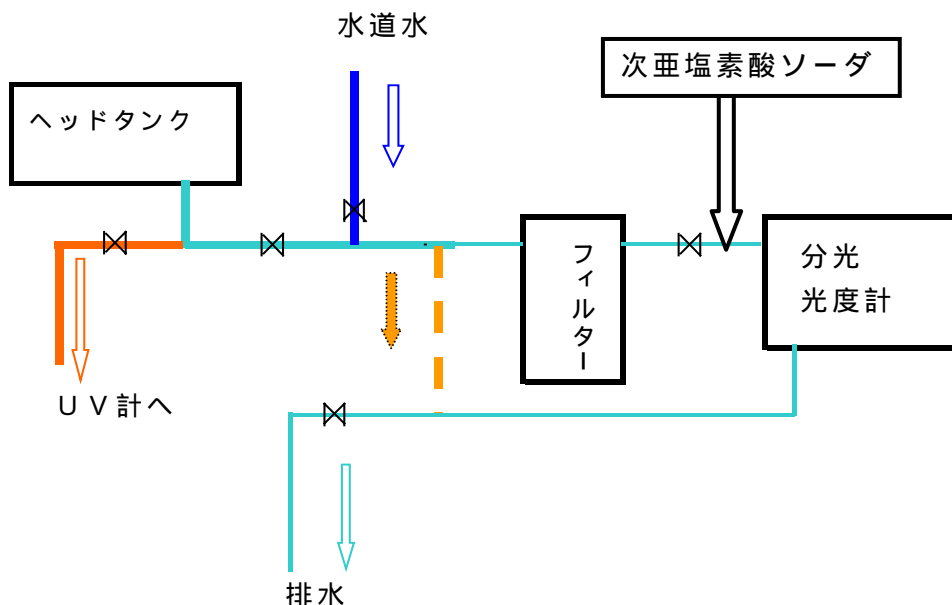


図 3 連続測定における改良点

これにより、洗浄の度に配管を取り外す必要がなくなり、日常上の維持管理が楽になった。また、色度計の測定部であるセル中に繁殖するカビ類を殺菌除去するため週に一度定期的にフィルター以降より次亜塩素酸ソーダ(有効塩素 10% 溶液を 5 倍希釈した物 200ml)の注入を行った。

#### 5. 結果及び考察

平成 15 年 7 月から平成 15 年 12 月の間に測定したデータの解析を行った。

分光光度計による放流水の (400nm ~ 700nm) における吸収測定は約 1 秒で測定出来る事より、放流水の時間的変動の影響を受け難い物となっている。測定間隔は 15 分とし、一日 96 回測定を行った。

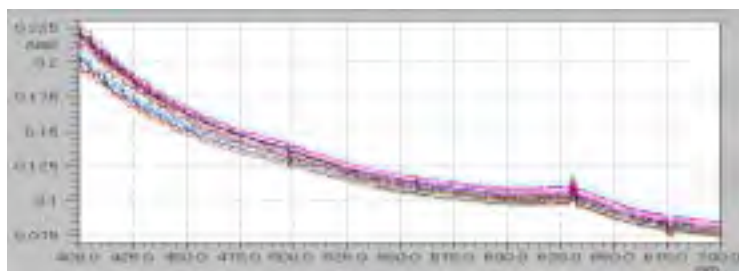


図 4 放流水の吸収パターン

図 4 に晴天時の放流水の吸収パターンを示す。本来ならば 96 本の吸収パターンが有るが、ここでは 24 本を記載した。吸光度 0.07 ~ 0.225 の範囲のなだらかな左肩上がりの曲線を示す。

ここで吸光度の値については、Lambert-Beer の法則より吸光度  $A$ 、セル長  $d$ 、濃度  $c$  とすると  $A = c d$  より、通常 10mm セルの分光光度計に比較し 50mm セルを採用した事により 5 倍高い数値となり、細かい変化をより敏感に捉える事が出来る。これら 1 本 1 本の 400nm ~ 700nm の吸光度を積分したものが図 5 に示した様に積分値（着色度）として記録される。

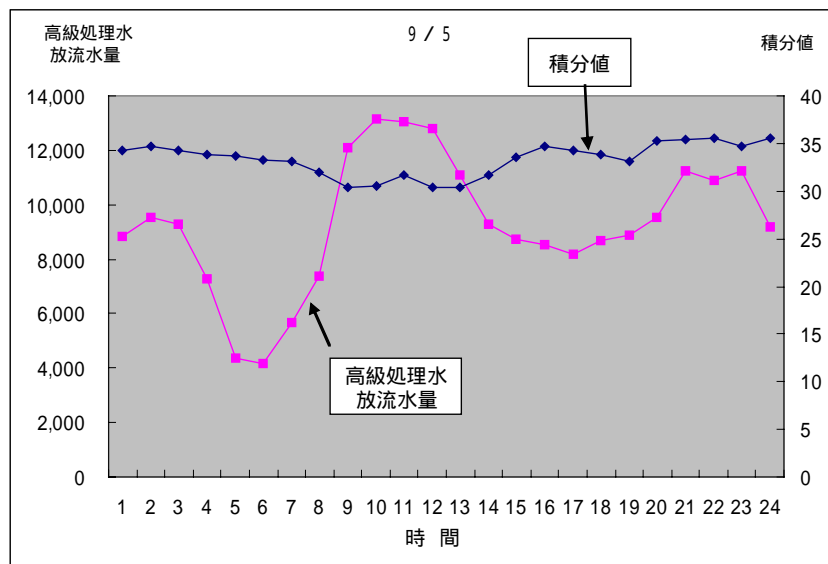


図 5 放流量の日変動と積分値

降雨の無い日であれば、積分値は 30-40 の範囲を示す。ここで、積分値が日常の放流量の変化を受けて変動するかどうか見てみた。まず放流水の変化を見ると、明け方 5 時頃に最低水量 4000m³ 近くになったのち 7 時より急速に増加し 10 時には 3 倍量の 13,000m³ 近くまで達し、そののち少し低下して再び 20 時頃増加している。流量変動に伴い日常試験の 10 時頃、第二沈殿池より SS 分の流出が見られる。SS 分が分光光度計に直接取込まれると透過率の低下を来し、積分値が上昇する事が予測されるが、フィルターの設置により SS 分が除去され日常における放流量変動による影響は無い。

更に、降雨の無い 1 週間の変化を見てみると、フィルターを通してものの、週末にかけて若干積分値の上昇が見られる。

これは、さらに細かい汚れの付着や主に水中のカビ類の繁殖によるものと考えられる。

これ等は次亜塩素酸ソーダの注入によるセルの洗浄操作により除去出来る。途中積分値が途切れているのは、この操作により吸光度の測定が中断されたためである。

洗浄後は元の値に戻っているのが観察される。降雨の無い週はこのパターンの繰り返しである。

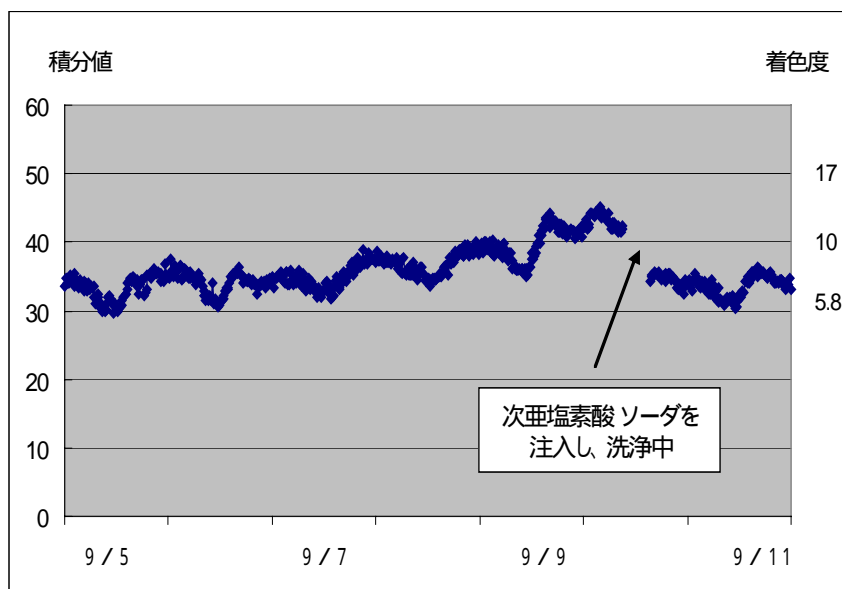


図 6 積分値の週間変動

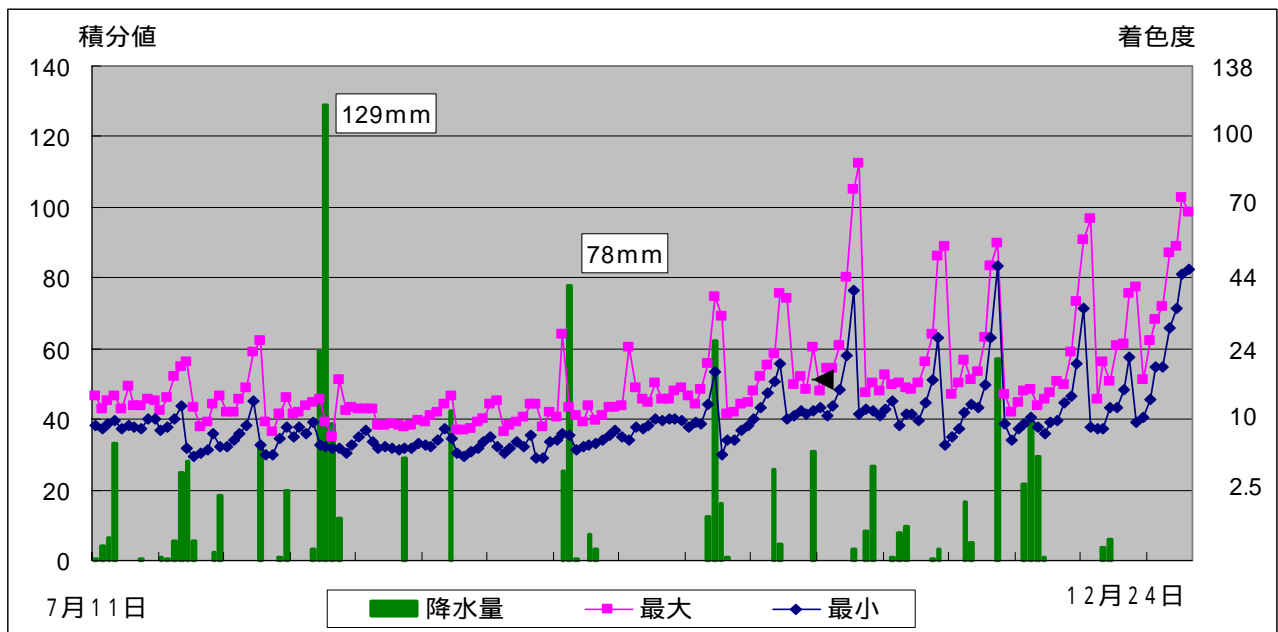


図 7 積分値（着色度）の連続測定値

次に 7 月～12 月の 6 ヶ月間の放流水の積分値の日最大値と最小値の値を時系列で図 7 に表示した。殆どは 40 前後を上下しているのであるが、時として高いピークが見られる事があるので、高い積分値を示す原因を調べた。原因の一つはフィルターを通してるとは言え雨天時の後は細かい SS 分の影響を受けて積分値が増加する事が判った。

具体的には 9 月 20 日降雨後積分値が上昇した事例図 8 で説明する。通常の放流水のパターンが昼ごろまで見られ、この間の積分値については殆ど変化は無い。しかし、12 時頃より降雨が始まり流入水量が急速に増加し、14 時より簡易放流の開始に伴い放流量は高い値のまま推移した。

積分値の上昇は降雨のピーク後の 16 時～20 時にかけて起こっている。その時の吸収パターンの変化を図 9 で見てみる。吸光度が 0.2 以下の一連の値は降雨前の値

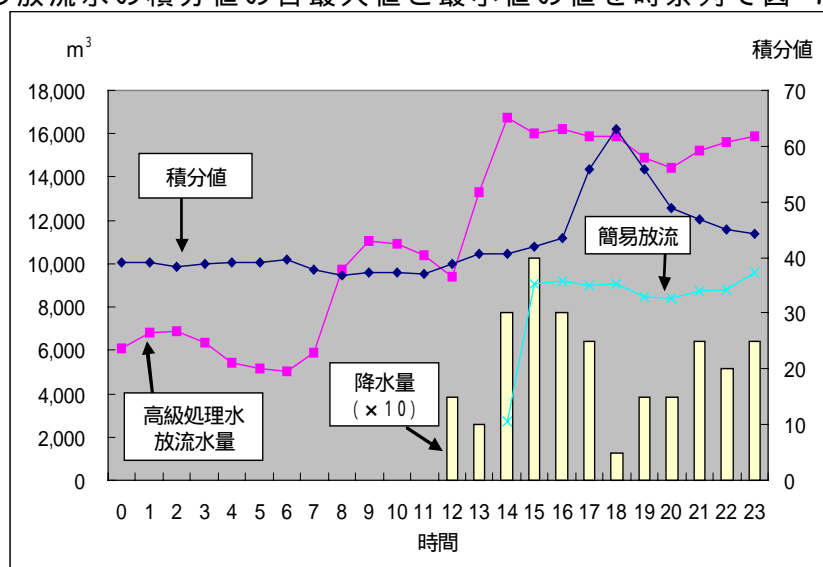


図 8 雨天時放流量の変化と積分値

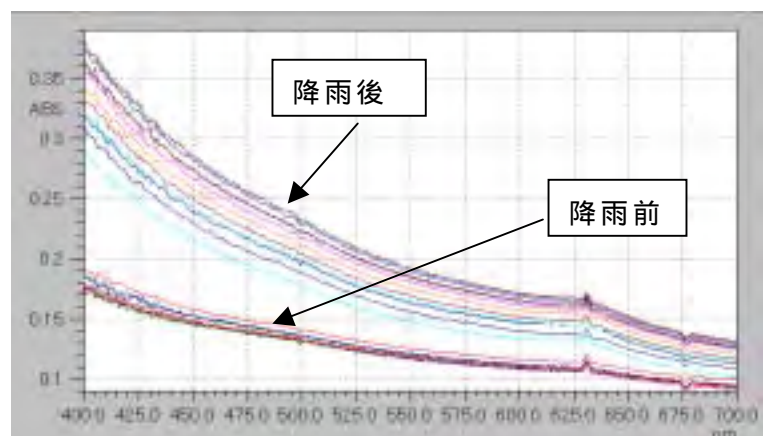


図 9 雨天時における吸収パターンの変動

であり、吸光度が 0.3 から 0.37 付近までの値は 16 時から 20 時に掛けて積分値が上昇した時の吸収パターンである

吸光度の増加が特定波長の吸収によるものではなく、通常の吸収パターン全体が上にシフトした型となっている。

これは、流出した細かい S S 分により吸収が生じたためである。降雨時の後の積分値の上昇は全てこのパターンであった。

次に降雨が無くて積分値が増加した事例（11/2～11/4）を図 10 に示す。

夜中から明け方にかけての放流水のパターンは 9 月 5 日と同じであるが、水量の増加に伴い積分値が増加し、更に次の日にも水量の増加に伴い同様の現象が起きている。原因について、洗浄後通常の値に落ち着いた事より何らかの汚れが短時間にセルに付着したと思われる。

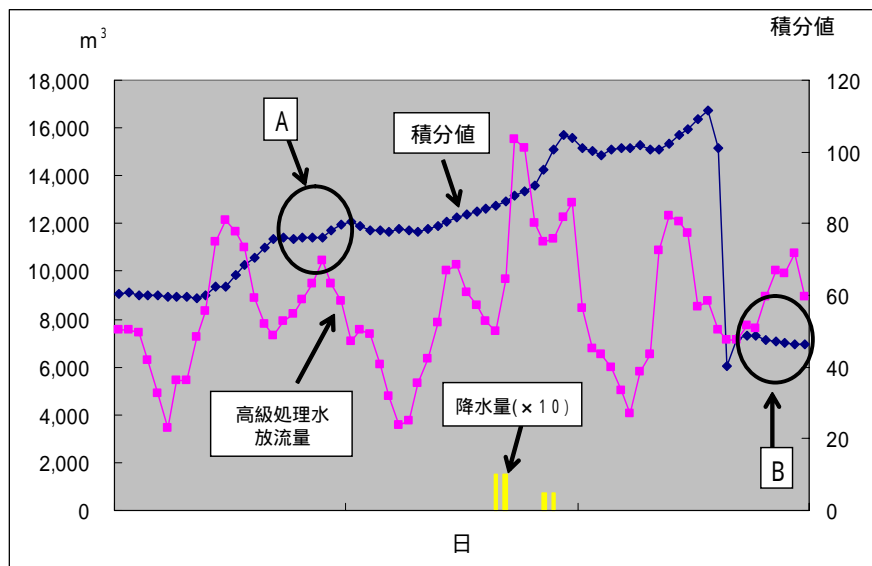


図 10 セルの汚れと積分値の変化

その時の吸収パターンの変化を積分値が上昇した A と洗浄後の B について見てみる。吸光度が 0.38～0.2 の一連の吸収パターンは A の時の値であり、吸光度が 0.25 以下の一連の値は B の時である。雨天時と同様であるが、今回場合も吸光度の増加が特定波長の吸収によるものではなく、通常の吸収パターン全体が上にシフトした型となっている。この吸収パターンの変化により、汚れの吸着で吸光度が上昇したためである事が判った。（図 11）

6 ヶ月にわたり放流水の着色具合を分光光度計による積分値の変化で見てきた。その結果夜間においても高い値は検出されなかった。また、時として高いピークが出現したが、これは降雨後や短時間に付着する汚れによる物であり、高い着色の放流水からきた物ではない事が判明した。

これらの事例を知る事により放流水の着色状況がより正確に判る事となった。

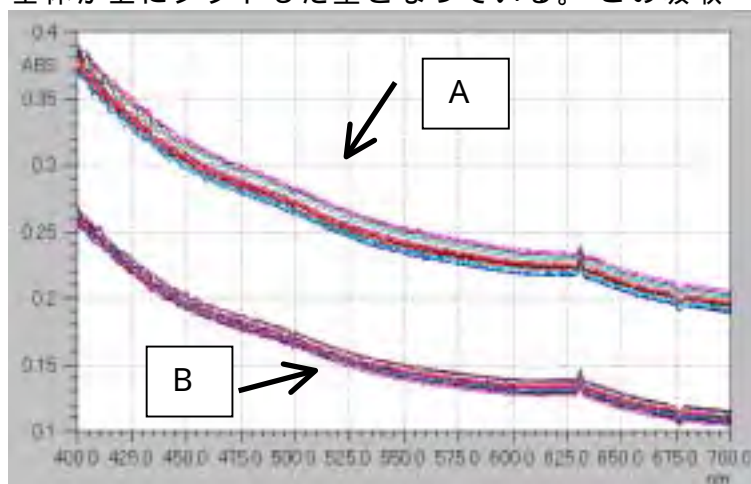


図 11 セルの汚れと吸収パターンの変化

## 6. デ - タの活用

着色問題の解決は当水再生センタ - のみで解決出来る問題ではなく、管理事務所、当該企業を含めた協議会の中で行っている。協議会で放流水の着色について着色度 80、色度 50 を超える物を異常な色とした。今回これを受けて着色度について機器による連続監視を

行う事が出来どうか試みた。測定試料の中に着色度 80 を超える物は無かったが、今後とも連続監視を継続し、放流水の更なる改善に向けて役立てて行きたい。

- 参考文献
- 1) Kuo.W.G. (1992) Wat.Res 26 881-886
  - 2) 山中 信行 (1991) 公害と対策 27 741-745
  - 3) 高橋 信行 (1996) 水環境学会誌 16 vol4 306-314



### 1.はじめに

豪雨時に人孔蓋が浮上・飛散する現象が見受けられる。人孔蓋の浮上・飛散は、近辺を通行する歩行者や車に衝突したり、あるいは人孔内へ転落する危険性もある。当局では、平成14年6月に発生した人孔蓋飛散事故をきっかけに「経営管理会議」の重点項目として「人孔蓋浮上・飛散事故の撲滅」が挙げられ、本調査が開始された。特に、近年の降雨形態が局地集中型に変化していることから蓋浮上・飛散現象を把握し、その要因が設計強度を上回る降雨流入によるものか、あるいは管渠構造の問題が顕在化したものか等について実態調査を基に調査分析を行ない、有効な対応策を講ずる必要がある。

本調査は、管路施設の安全機能向上策を提案することを目的として、平成14年10月～平成16年3月までの期間において実施した。

### 2.調査項目

調査項目は、下記の5項目である。

人孔蓋浮上・飛散に関わる既往文献、既往実験調査による蓋浮上・飛散メカニズムの分析。

区部における人孔蓋浮上・飛散の実態調査。

人孔蓋の浮上・飛散要因の特性分析。

蓋浮上・飛散危険箇所、対策優先度判定式の作成。

蓋浮上・飛散防止策の提案。

### 3.調査内容と結果

#### 3.1 蓋浮上・飛散のメカニズム

既往文献及び既往実験調査から蓋の浮上・飛散は、蓋への水撃作用や圧縮空気の作用が影響していると考えられる。つまり、豪雨時には、動水勾配の上昇や流水阻害地点で発生した段波が上流へ押し寄せするため、人孔天端空間が圧縮されることによる人孔蓋下面への空気圧の発生及び水撃圧の発生による浮上・飛散(図1参照)。

人孔落差部などから発生した空気泡が塊となって管渠天端に貯留され、上流側人孔部へ高速移動し、噴出することによる浮上・飛散(図2参照)。

以上、蓋浮上・飛散現象の原因として2つのケースが考えられるが、どのケースが最も大きな浮上・飛散の引き金になるかは、管きょの布設状況、地形状況、人孔構造等により異なると考えられる。

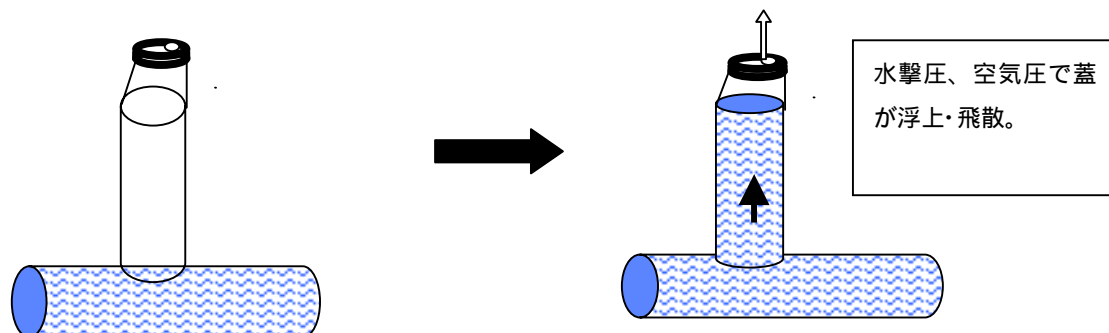


図1 空気圧・水撃圧による蓋浮上・飛散

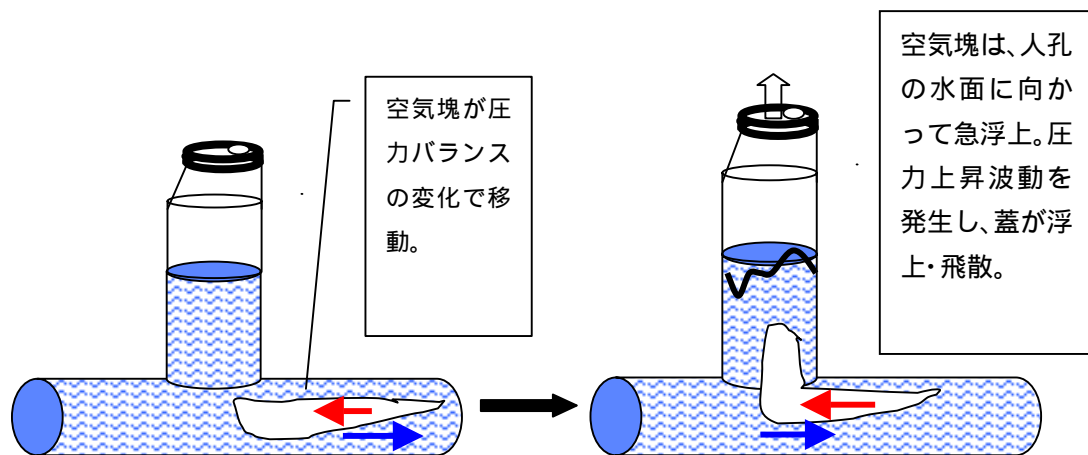


図 2 空気塊による蓋浮上・飛散

### 3.2 区部における人孔蓋浮上・飛散の実態調査

平成 3 ～ 15 年度の間に報告された人孔蓋浮上・飛散実績について、SEMIS データー、各出張所におけるヒヤリング及び現地調査等を基に実態調査を行った。浮上・飛散件数は、平成 3 ～ 15 年度の 13 年間に 308 件報告されており、最近の 5 カ年を見ると 243 件、平均すると約 40 件/年となっている。以下に蓋浮上・飛散状況データーを示す。

蓋浮上・飛散時の降雨強度

- ・ 25mm/hr 未満：28 件(9.1%)、・ 25～49mm/hr：121 件(39.3%)、・ 50～74mm/hr：77 件(25.0%)、
- ・ 75～99 mm/hr：22 件 ( 7.1% )、・ 100 mm/hr 以上：23 件 ( 7.5% )、・ 不明 37 件 ( 12.0% )
- ・ 75mm/hr 未満で全体の約 7 割を占める ( 図 3 - 1 参照 )

排水方式区分 ( 管きょ端末 )

- ・ 自然排水区：120 件(39.0%)、・ ポンプ排水区：172 件(55.8%)、・ 不明 ( 5.2% )

なお、排水方式区分は下水道台帳(SEMIS データ)の“管渠端末データー”による分類とした。ここでは、“管渠端末データー”の大区分で「河川」、「運河」および「東京湾」に分類されているものを自然排水区、「処理場」および「ポンプ所」に分類されているものをポンプ排水区とした。

幹線・枝線区分および管径

- ・ 幹線：112 件(36.4%)、・ 管径 0.8m 以上の主要枝線：108 件(35.1%)、・ 枝線：70 件(22.7%)、
- ・ 不明：3 件 ( 5.8% )

位置的特性

- ・ 幹線およびその近辺に集中
- ・ 急勾配地から平坦地に変化する境界点付近で多く発生

人孔種別

- ・ 特殊人孔：151 件(49.3%)、・ 標準人孔：100 件(32.2%)、伏越し人孔：17 件(5.6%)、
- ・ 分水人孔：7 件(2.3%)、・ 不明：32 件 ( 10.6% )
- ・ 特殊人孔と標準人孔で約 8 割占める

人孔区分

- ・ 中間人孔：141 件(45.9%)、・ 会合人孔：103 件(33.6%)、・ 起点人孔：13 件(4.2%)、・ 不明：50 件( 16.3% )

土被り ( 流出側 )

- ・ 3.0m 以下：137 件 ( 44.9% )、・ 3.0～6.0m：38 件 ( 12.3% )、・ 6.0m 以上：109 件 ( 35.4% )



・不明：24 件（7.4 %）

勾配（流出側）

・2.5‰以下：165 件（53.6 %）・3.0～7.5‰：63 件（20.5 %）・8.0‰以上 46 件（14.9 %）

・不明：34 件（11.0 %）

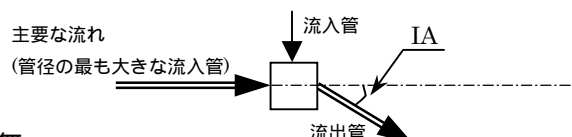
人孔間距離

・流入、流出側共 100m 未満：164 件（53.3 %）・流入側のみ 100m 以上：12 件（3.9 %）

・流出側のみ 100m 以上：22 件（7.1 %）・流入側共 100m 超：46 件（14.9 %）・不明：64 件（20.8 %）

急角の有無（最も管径の大きな流入管と流出管の角度  $\angle A$ ；下図参照）

・90° 未満：186 件（60.4 %）、・90° 以上：57 件（18.5 %）、・不明：65 件（21.1 %）



伏越しの有無

・上流側または下流側伏越し有り：17 件（5.5 %）、・上下流共伏せ越し無し：229 件（74.4 %）

・不明 64 件（20.8 %）

断面縮小（分水、振り分け、管きょ勾配増等による）

・縮小なし：229 件（74.4 %）で、・縮小あり：15 件（4.9 %）、・不明：64 件（20.7 %）

段差の有無（主要な流入管と流出管との管底差  $D - D'$ ； $D'$ ：流出側管径）

・0.5D 未満：192 件（62.4 %）、・0.5D 以上：52 件（16.9 %）、・不明：64 件（20.7 %）

流水阻害の有無（合流、急角、伏越し、断面縮小、段差のいずれが存在する箇所）

・いずれか有り：171 件（55.6 %）、・いずれにも該当しない：73 件（23.7 %）、・不明 64 件（20.7 %）

人孔蓋浮上・飛散後の措置（浮上・飛散後に実施した対応策）

・GLV に変更：161 件（52.3 %）、・都型に変更：27 件（8.8 %）、・GL に変更：15 件（4.9 %）、

・その他の蓋に変更 18 件（5.8 %）・東一型に変更：4 件（1.3 %）・鉄蓋固定金具の締直し：10 件（3.2 %）、

・その他 24 件（7.8 %）・不明 49 件（15.9 %）

蓋再浮上箇所

・2 度以上再浮上箇所：15 件（4.9 %）

一例として、1 度目の蓋浮上・飛散があり、その後緊結型の L1 蓋に変更された。2 度目は L1 蓋に変更されていたため人孔側塊ごと変位し周辺地盤が隆起した。3 度目も 2 度目と同様の現象が発生したため L1 型から圧力調整型の GLV 型蓋に変更している。GLV 型に変更後は浮上・飛散を起こしていない。

この例は、稀な例で蓋浮上・飛散した人孔のほとんどは 1 度目で圧力調整型（GLV 型、都型等）の鉄蓋に変更されており、その後浮上・飛散は起きていない。同一人孔において 2 度目の浮上・飛散を起こした例としては、従来型蓋（旧都型等）のままで、その後蓋取替えを行っていない鉄蓋が再浮上・飛散を起こしたものと考えられる。

### 3.3 蓋浮上・飛散要因の特性分析

3.2 で述べた蓋浮上・飛散の傾向は、浮上・飛散のあった人孔のみからの考察で、必ずしも区部全体の人孔の傾向を反映しているものではないと考える。そこで、浮上・飛散の特性の精度を更に向上させるために、蓋浮上・飛散のなかった人孔を無作為に抽出しサンプル化することで、浮上・飛散のあった人孔と無かった人孔の特性を比較した。なお、抽出サンプルの人孔種別は区部全体の人孔と同傾向であることを確認した。以下の蓋浮上・飛散の要因と考えられる項目別に、蓋浮上・飛散のあった人孔と区部全体の人孔との傾向の違いについて考察を述べるとともに、図 3 に、発生分布図を示す。

#### （1）排水方式区分（管きょ端末）

蓋浮上・飛散人孔箇所数は、自然排水区とポンプ排水区では大きな差は見られないものの、区部全体ではポンプ排水区の人孔が圧倒的に多いことから、逆に自然排水区において浮上飛散の頻度が高い（図 3 - 3 参照）。詳細に述べると、区部全体の自然排水区とポンプ排水区の割合(6%：94%)と、浮上・飛散人孔のその割合(39%：56%)を比べると、自然排水区の人孔はポンプ排水区に比べて約 11 倍発生頻度が高いこととなる。

## （２）幹線・枝線区分および管径

区部全体では枝線(管径 0.8m 未満)が 83%を占めるが、浮上・飛散人孔においては枝線が 23%と少なく、逆の傾向を示す（図 3 - 4 参照）。区部全体の枝線と幹線プラス主要枝線の割合(83%：17%)と蓋浮上・飛散人孔のその割合(23%：71%)を考慮すると、幹線プラス主要枝線は枝線に比べて約 14 倍発生頻度が高いこととなる。

管径別に見ると、区部全体では管径 2.0m 未満が 95%を占めるのに対して、浮上・飛散人孔では 2.0m 以上とそれ未満が約 1：1 の割合となっており（図 3 - 5 参照）。管径 2.0m 以上の発生頻度は約 14 倍高い。

この理由として考えられるのは、人孔種別、土被り、人孔間距離とも関連することであるが、通常、管径が大きな管路は非開削工法により、深い位置に長スパンで施工され、その人孔は特殊人孔となる。このような条件で設置されている管路は、小口径の管路に比べ流入管や取付け管が少ないこともあり、逃げ場を失った貯留空気塊が直近の人孔で噴出することが想定される。

## （３）人孔種別、人孔区分

人孔種別について、区部全体では標準人孔が 91%、特殊人孔が 8%であることに對して、浮上・飛散人孔では標準人孔が 33%、特殊人孔が 49%（図 3 - 6 参照）であり、特殊人孔で浮上飛散を起こす頻度は約 15 倍高い。

この理由としては、管径の大きな管路で特殊人孔が多いという点では(2)で述べた現象が考えられる。

また、特殊人孔では、躯体で貯留されていた空気が、水位上昇とともに躯体部から断面の小さな側塊に達したときに生じる圧力上昇の割合が高くなるため、標準人孔よりも蓋浮上・飛散の発生が多いことも考えられる。

人孔区分別については、区部全体の人孔数の割合(中間 51%、会合 25%、起点 22%)と比べると会合人孔で浮上・飛散が発生する確率が高く、逆に起点人孔では確率が低い（図 3 - 7 参照）。

## （４）土被り

区部全体では土被り 2.0m 以下の管きよが 71%程度を占め、土被りの大きい 6.0m 以上は 2%とわずかであることに對し、蓋浮上・飛散人孔は土被り 2.0m 以下及び 6.0m 以上ともに 30%を超えている（図 3 - 8 参照）。

このことから浮上・飛散する頻度は土被り 2.0m 以下では約 0.3 倍と低く、また、6.0m 以上では約 17 倍と高い。この理由としては、口径の大きな管きよは、土被りが大きいケースが多い点では(2)で述べた現象が生じ易いものと考えられる。

## （５）勾配及び勾配変化率

勾配が 2.5‰以下の比較的緩い区間について見ると、区部全体では 14%と少ないことに對し浮上・飛散人孔では 53%を占め（図 3 - 9 参照）。勾配 2.5‰以下の比較的緩い区間ではそれ以上の勾配の区間より約 8 倍発生頻度が高い。

この理由としては、東京都の設計標準勾配において 2.5‰以下は管径 0.8m 以上の主要枝線・幹線に相当するため、(2)と同様の現象が考えられる。勾配変化率(流入勾配 / 下流勾配)について見ると 1/2 ~ 2 で約 7 割を占める（図 3 - 10 参照）。また、勾配の変化が大きい 5 以上についても発生頻度が多いことも特徴である。

## (6) 人孔間距離

区部全体の98%は流入・流出側共に人孔間距離が100m未満であることに對し、浮上・飛散人孔は53%程度である。蓋浮上・飛散人孔で上流側、下流側もしくは上下流共人孔間距離が100m以上あるものが26%であることから(図3-11参照)上流、下流あるいは上下流共人孔間距離が100m以上の浮上・飛散頻度は52倍となる。

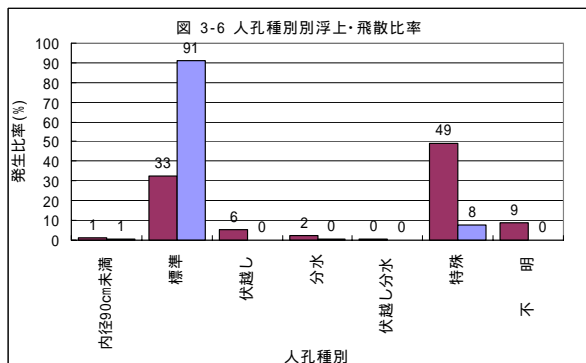
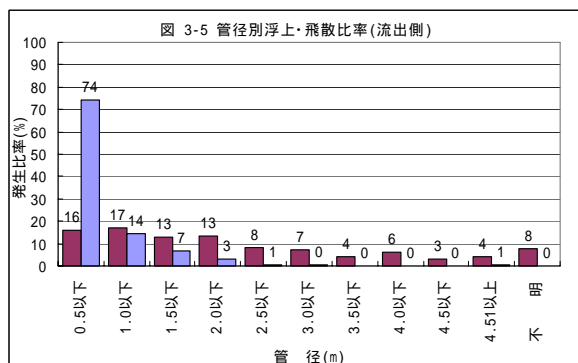
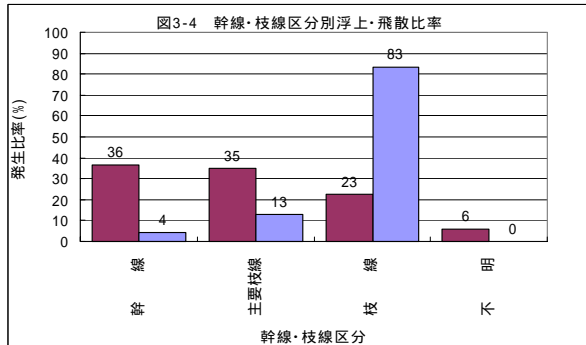
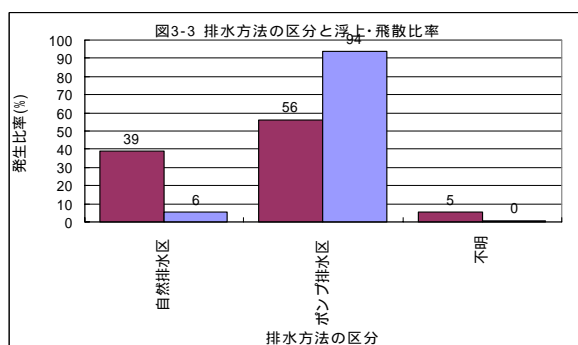
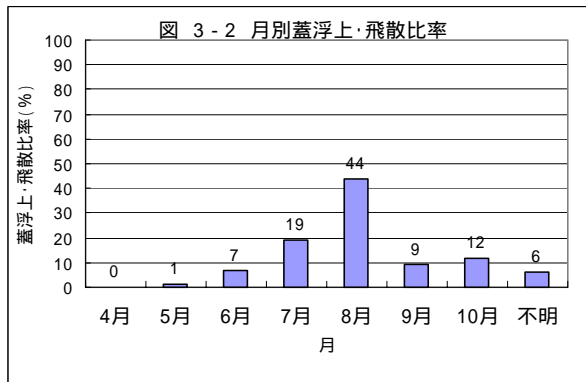
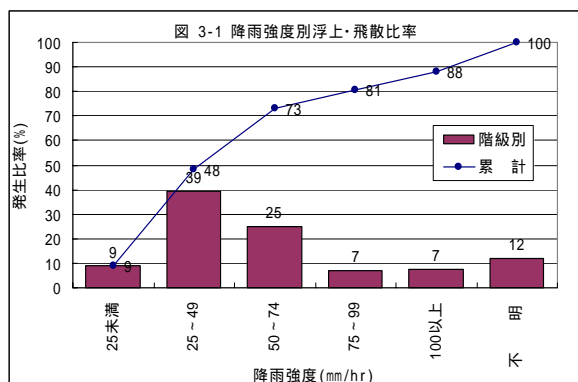
この理由としては、人孔間距離が長い管路は非開削工法にて布設された大口徑管きょがほとんどであるものと想定されるため、現象としては(2)と同様であると考えられる。

## (7) 流水阻害の有無(合流、急角、伏越し、断面縮小および段差の有無)

合流、急角、伏越し、断面縮小および段差は、流水を阻害し管路内に段波を発生させたり、損失水頭の増加を招くことから、今回の調査では56%の蓋浮上・飛散の発生がみられ、これらのいずれも該当しない箇所24%を大きく上回っている(図3-12参照)。

## (8) その他

上記(1)～(7)以外のものは絶対数が少ないこともあり明確な差異は見られない。



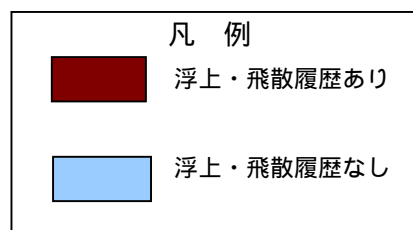
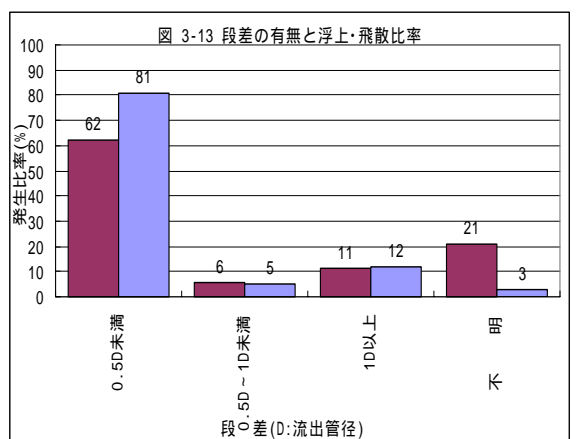
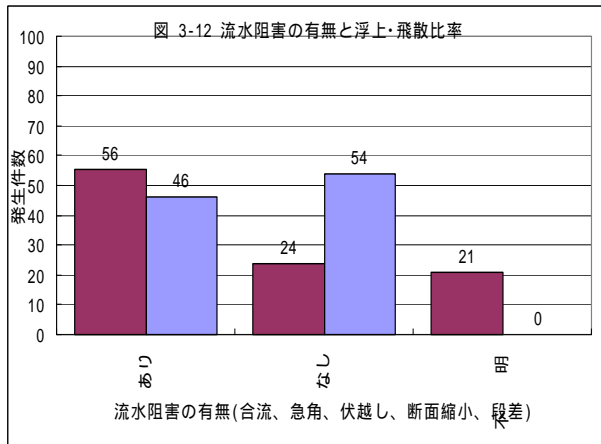
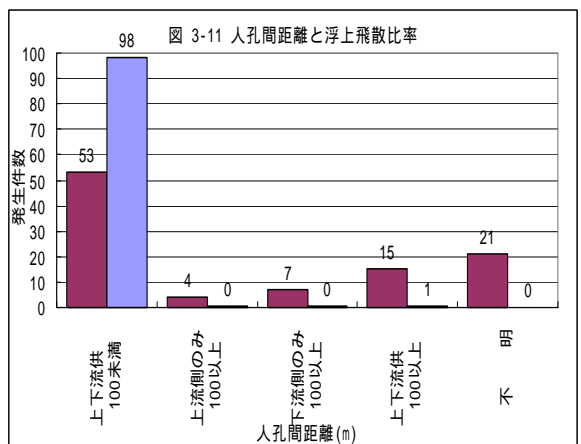
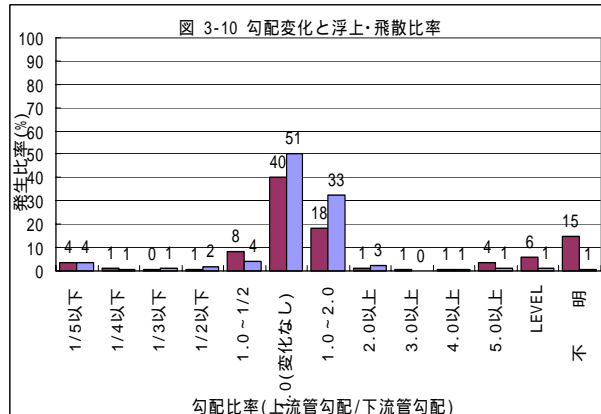
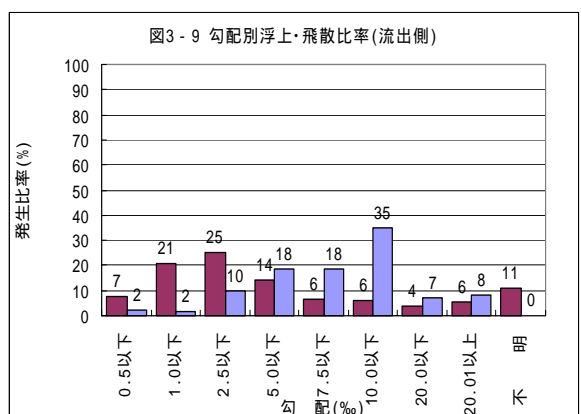
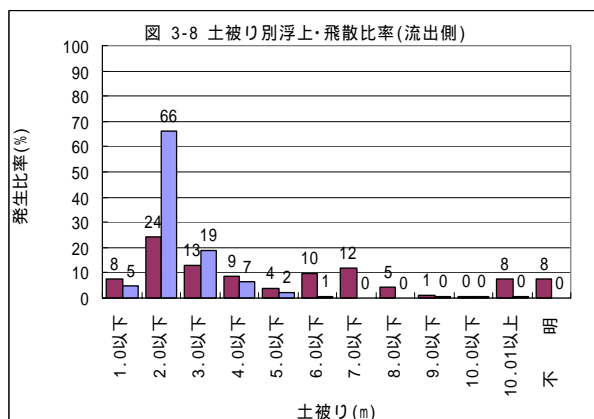
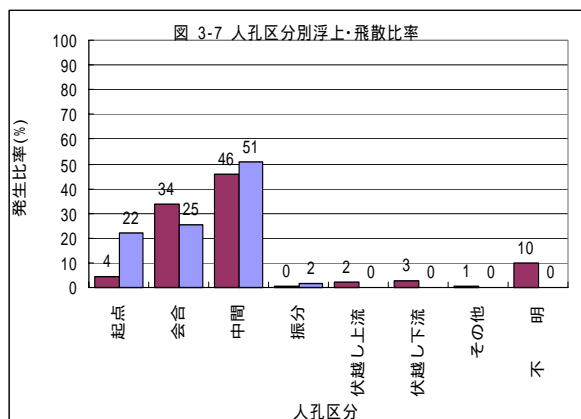


図 3 発生分布図

### 3.4 蓋浮上・飛散の主要因と相関係数

全ての入孔に対し蓋浮上・飛散防止対策を施すには、多大な費用と時間が必要となる。効率的に対策を行うためには、収集された既存のデータをもとに、蓋浮上・飛散に大きな影響を及ぼす要因を特定し、蓋浮上・飛散箇所を推測する必要がある。

このため、3.3 蓋浮上・飛散要因の特性分析を基に統計手法を用い、蓋浮上・飛散の関連性が強い下記9項目を特定し、各々相関の関連度に応じてポイントを求めたものを表1に示す。

排水方式（管きょ端末）、人孔種別、流出管径、流出管土被り、急角の有無（LA°）、断面縮小、段差、人孔間距離、勾配変化率（上流勾配/下流勾配）の9項目である。

これら表中の数値がプラス方向に大きいほど浮上・飛散を起こす可能性が高く、マイナス方向に大きいほど可能性が低いことを示している。

例えば、「人孔種別」について見ると、特殊人孔は平均に比べ蓋浮上・飛散を起こす可能性を約40%高め、逆に標準人孔は20%低める傾向にある。また、「流出管径」については0.5m以下は浮上・飛散を起こす可能性を26%低めるが、それ以上の管径は浮上・飛散の可能性を高くすることがわかる。

### 3.5 蓋浮上・飛散防止対策優先判別式の策定

表1に記載された点数を基に蓋浮上・飛散の確率高さを判断できる判別式を式1のとおり策定した。

$$y = 0.874A1 - 0.241A2 - 0.201B1 + 0.406B2 - 0.264C1 + 0.1135C2 + 0.140C3 + 0.320C4 + 0.177C5 + 0.347C6 + 0.760C7 + 0.602C8 + 0.837C9 + 0.165C10 + 0.231D1 - 0.083D2 - 0.167D3 - 0.166D4 - 0.454D5 + 0.405D6 + 0.658D7 + 0.248D8 - 0.088E1 + 0.158E2 + 0.293E3 + 0.347F1 - 0.015F2 - 0.033G1 + 0.156G2 + 0.132G3 - 0.049H1 + 0.250H2 + 0.261H3 + 0.232H4 + 0.321I1 - 0.088I2 - 0.023I3 + 0.122I4 + 0.681I5 + 0.201I6 - 0.102I7$$

...式1

上式に各条件をあてはめて算出された値yを、以下の基準で判定することで蓋浮上・飛散の確率高さが判断できる。

y > 0 のとき この入孔蓋は浮上・飛散する確率が高い。

y < 0 のとき この入孔蓋は浮上・飛散する確率が低い。

y = 0 のとき 判別不可能。

計算例を下表 2、3 に示す。

表2 浮上・飛散の確率が高い

例1(中部104 2817-3C-011)

	項 目		ポイント
排水方法	A1	自然排水区	0.8741
人孔種別	B2	特殊人孔	0.4058
流出管径(m)	C4	2.0以下	0.3200
流出土被り(m)	D7	7.0以下	0.6576
急角の有無(LA°)	E1	45未満	-0.0883
断面縮小	F2	縮小なし	-0.0152
段 差	G1	0.5D未満	-0.0329
人孔間距離	H4	上下100m以上	0.2323
勾配変化率	I3	1/2 ~ 2.0	-0.0227
y			2.3307

表3 浮上・飛散の確率が低い

例2(浮上飛散なし-53 0716-3B-007)

	項 目		ポイント
排水方法	A2	ポンプ排水区	-0.2407
人孔種別	B1	標準人孔	-0.2010
流出管径(m)	C3	1.5以下	0.1395
流出土被り(m)	D3	3.0以下	-0.1669
急角の有無(LA°)	E1	45未満	-0.0883
断面縮小	F2	縮小なし	-0.0152
段 差	G1	0.5D未満	-0.0329
人孔間距離	H1	上下100m未満	-0.0489
勾配変化率	I3	1/2 ~ 2.0	-0.0227
y			-0.6771

表1 浮上・飛散相関表

	項 目	ポイント
排水方法	A1 自然排水区	0.8741
	A2 ポンプ排水区	-0.2407

人孔種別	B1 標準人孔	-0.2010
	B2 特殊人孔	0.4058

流出管径(m)	C1 0.5以下	-0.2644
	C2 1.0以下	0.1135
	C3 1.5以下	0.1395
	C4 2.0以下	0.3200
	C5 2.5以下	0.1767
	C6 3.0以下	0.3471
	C7 3.5以下	0.7597
	C8 4.0以下	0.6016
	C9 4.5以下	0.8372
	C10 4.51以下	0.1648

流出土被り(m)	D1 1.0以下	0.2310
	D2 2.0以下	-0.0833
	D3 3.0以下	-0.1669
	D4 4.0以下	-0.1663
	D5 5.0以下	-0.4537
	D6 6.0以下	0.4054
	D7 7.0以下	0.6576
	D8 7.01以上	0.2483

急角の有無(IA <sup>+</sup> )	E1 45未満	-0.0883
	E2 45～89	0.1582
	E3 90以上	0.2927

断面縮小	F1 縮小あり	0.3471
	F2 縮小なし	-0.0152

段差(D:流出管径)	G1 0.5D未満	-0.0329
	G2 0.5D～1D未満	0.1563
	G3 1D以上	0.1324

人孔間距離	H1 上下100m未満	-0.0489
	H2 上100m以上	0.2502
	H3 下100m以上	0.2608
	H4 上下100m以上	0.2323

勾配変化率 (上流勾配/下流勾配)	I1 1/5以下	0.3210
	I2 1/2以下	-0.0876
	I3 1/2～2.0	-0.0227
	I4 2以上	0.1221
	I5 5.0以上	0.6809
	I6 level	0.2008
	I7 起点	-0.1021

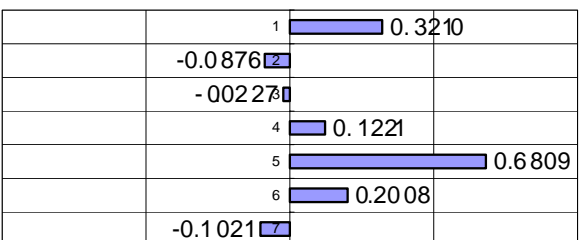
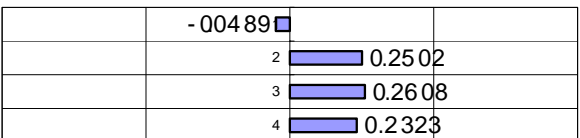
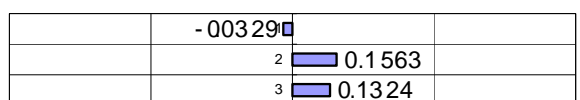
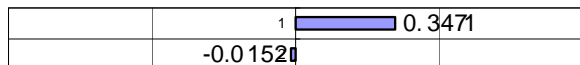
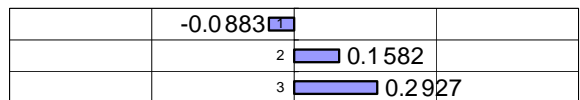
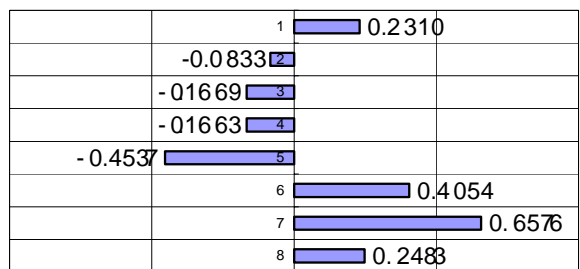
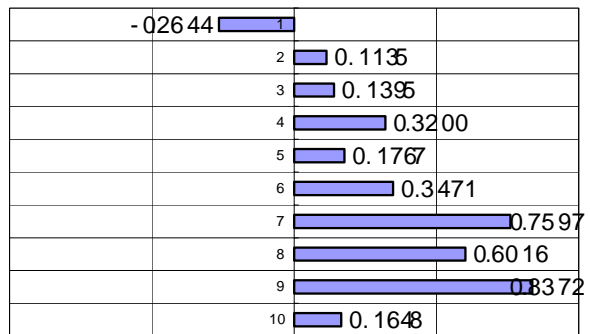
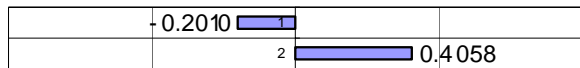
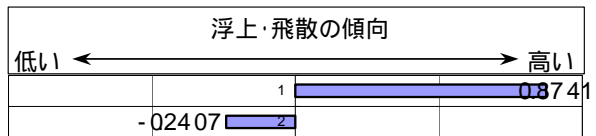


表 2 においては、 $y = 2.3307 > 0$  になるため蓋浮上・飛散の確率が高いと判別できる。同様に表 3 の場合  $y = -0.677 < 0$  になるため浮上・飛散の確率が低いと判別できる。また、式 1 で算出される  $y$  の値の大きな人孔ほど優先的に蓋浮上・飛散防止策を施す必要性が高いと考えられる。

なお、この判別式の精度を確認するために、解析に用いた全人孔(447 点 = 浮上飛散のあった人孔から不明データを含むものを除いた 218 点プラス浮上飛散の無かった人孔 259 点)について判別を行った結果、的中率(判別式による判定結果と実際の浮上飛散の有無が一致する割合) = 86.6% となり、やや精度が良いものであることが確認できた。

### 3.6 蓋浮上・飛散防止策の提案

優先的に蓋浮上・飛散防止策を行うべき人孔箇所を特定後、対策を講じなければならないが、対策としては人孔蓋の取替え、人孔内改造等が挙げられる。しかし、豪雨時には下水道管路内で水と空気の複雑な水理現象が発生していることもあり、人孔内改造については現地の周辺環境、管路の敷設状況等を勘案した詳細な水理模型実験を実施する必要がある。このことを考慮すると、早急に対応するためには人孔蓋の取替えが安価で最も効果的と考える。以下に既往文献・資料に記載されている人孔内改造策及び人孔蓋取替え策の概略図を参考として記載する。

#### 3.6.1 人孔内改造策

蓋浮上・飛散要因として、3.1 で述べたように人孔蓋下面に働く水撃圧、空気圧及び空気塊の噴出が考えられる。

図 4 は、水面急上昇に伴う蓋下面への水撃圧や圧縮空気に対して、パイプ(ライザー管)を設置することで、時間差を利用して水圧、空気圧を吸収し蓋浮上・飛散を防止するものである。

図 5 は、下水管路天端に閉じ込められた空気塊を人孔内で小さくして、エアハンマーを生じさせないように脱気させるものである。水平多孔板(分散板)には 100 程度の小穴をあける。

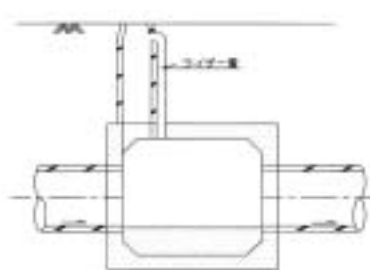


図 4 ライザー管

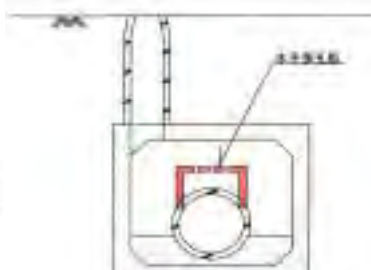


図 5 水平多孔板

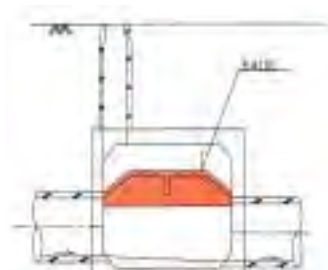


図 6 空気抜きパイプ

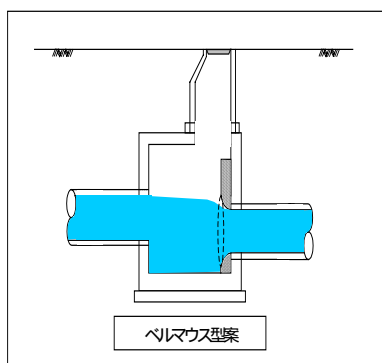


図 7 流出口改造

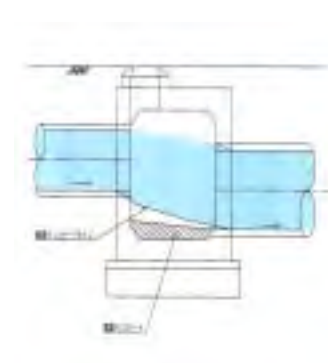


図 8 インバート改造



### 3.6.2 人孔蓋取替え策

前述のように、蓋浮上・飛散防止策を早急に行うためには、人孔蓋の取替えが安価で最も効果的と考える。

現在浮上・飛散防止用人孔蓋として、都型（図9参照）、GLV型（図10参照）そして最近採用され始めた鉄枠からも排気可能な東一型（図11参照）の3種類が多く使用されている。これらについては、維持管理性、道路状況、周辺環境等を考慮し、適切な箇所を選定して据え付ける必要がある。



図9 都型



図10 GLV型

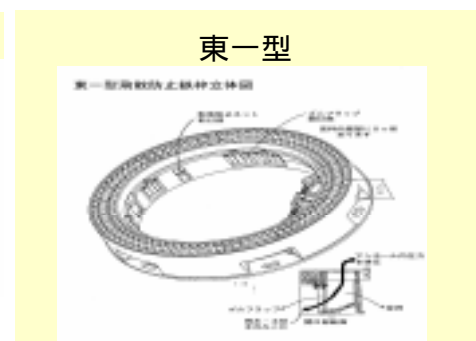


図11 東一型（蓋は都型を

使用）

### 4. まとめ

1990年代以降、区部における夏季の降雨形態は、局地集中型に変化してきており、特に8月にその傾向が強い。その影響もあり今回の調査では、8月の人孔蓋浮上・飛散件数は調査件数全体の4.4%を占めている（図3-2参照）ことは、集中豪雨と蓋浮上・飛散の関連が強く示されている。

また、蓋浮上・飛散の傾向は、SEMI Sデータ上の「自然排水区」が「ポンプ排水区」に比べ発生頻度が高い、幹線若しくは幹線に近い位置で多く発生している、内径800mm以上の管径での発生頻度が高い、特殊人孔における発生頻度が高い、人孔間距離が長いほど浮上・飛散しやすい等の特性が判明した。

これらの傾向を分析し、統計学的に処理することにより数値化し、これを基に蓋浮上・飛散防止策優先判別式を策定した。既に各管理事務所では、蓋浮上・飛散の未然防止策として、対策箇所において圧力開放蓋等への蓋取替え作業を進めているが、対策優先順位の決定にあたって本式の活用が可能と考える。更にSEMI Sと連携することにより対策優先箇所一覧表の作成も可能となり、対策の迅速化が図れるものとする。

また、蓋浮上・飛散防止策として、人孔内改造、人孔蓋取替え等の方策を提案したが、人孔内改造については、現地の周辺環境、管路の敷設状況等を勘案した詳細な水理模型実験の実施が必要となり、多大な費用と時間が必要となる。

安価に、かつ早急に対応するためには人孔蓋の取替えが最も効果的である。特にGLV型（雨水人孔ではGL型）、東一型、都型など設置箇所の周辺環境等を考慮しながら蓋取替えを行うことで蓋浮上・飛散現象の多くは避けられると考える。

なお、本調査にあたって、施設管理部、各管理事務所、中川水再生センター、各出張所の皆様に多大なるご協力を賜り、深く感謝するとともにここに御礼申し上げます。

### 参考文献

下水道管きょシステムの安全機能向上調査（東京都下水道局）

豪雨時下水管渠の過渡現象に関する基礎的研究（東京都立大学 宇井正和）



## 2 - 4 ディーゼルエンジン排ガス除塵・脱臭用触媒フィルタ等の開発に関する共同研究

施設管理部 施設保全課 相原 信二

### 1 共同研究の目的

下水道事業は、下水処理とともに浸水を防ぐ使命がある。そのため、非常時でも確実に雨水を排除できるように、非常用発電機や雨水ポンプの整備を順次行ってきたところであり、原動機にはディーゼルエンジンが多く用いられている。ディーゼルエンジンは、運転時に騒音や振動を発生するとともに、排ガス中のばいじん、窒素酸化物（以下「NO<sub>x</sub>」という。）が多いという短所もある。

当局では、従来から騒音や振動の対策は行ってきたが、非常用のディーゼルエンジンは、大気汚染防止法の規制対象外であり、これまで、ばいじんとNO<sub>x</sub>の対策は未着手であった。ばいじんとNO<sub>x</sub>は近年、地球環境保全の観点から汚染物質として注目されており、非常用のディーゼルエンジンでも常用並みの排出基準値を達成することが望まれている。そこで施設管理部では、ディーゼルエンジンの排ガス中のばいじん、NO<sub>x</sub>を抑制することを研究課題とし、共同研究を実施した。その研究結果について報告する。

なお、本研究では、「除塵」はばいじんの除去を、「脱臭」は排ガス臭気的主要原因であるNO<sub>x</sub>の除去（脱硝）を表すものとする。

### 2 共同研究の概要

本研究は、公募型共同研究として、旭硝子株式会社と日本碍子株式会社の2社を共同研究相手とし、平成14年3月から平成16年3月までの約2年間実施した。

本研究では、当局の標準的なディーゼルエンジンを有している汐留ポンプ所と鮫洲ポンプ所に排ガス除塵・脱硝装置を設置し、長期検証試験を行った。汐留ポンプ所では雨水ポンプ駆動用のエンジンを対象とし、旭硝子株式会社製の装置を、また、鮫洲ポンプ所では非常用発電機のエンジンを対象とし、日本碍子株式会社製の装置を設置した。表1に対象としたディーゼルエンジンの仕様を示す。

表1 ディーゼルエンジンの仕様

施設名	汐留ポンプ所	鮫洲ポンプ所
用途	雨水ポンプ駆動用	非常用発電機駆動用
出力	280PS	1,750PS
燃料	A重油	A重油
製造年	昭和36年製	昭和46年製

### 3 排ガスのフロー

#### 3.1 現状のフロー

両ポンプ所における現状の排ガスのフローを図1に示す。ディーゼルエンジンから排出された排ガスは、サイレンサーで消音された後、排ガス処理されることなく煙突から大気に排出される。一般に、ディーゼルエンジンから排出されるばいじん、NO<sub>x</sub>及び排ガス流量は常に一定ではなく、高濃度のばいじんは起動時に集中し黒煙あるいは白煙として排出される。一方、NO<sub>x</sub>は排ガス温度が高くなってから大量に排出される。また排ガス流量は排ガス温度に比例して増加していく。定格負荷時は、ばいじんは低

濃度、NO<sub>x</sub>濃度は高濃度で安定する。この経時変化を図2に示す。

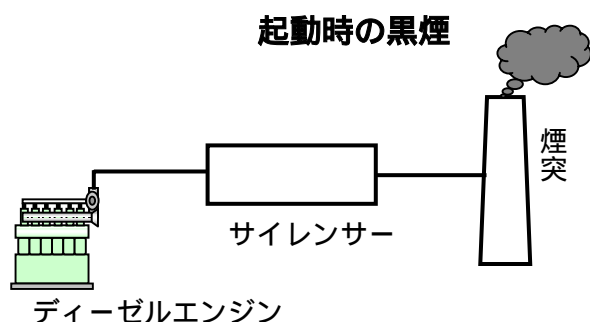


図1 現状のフロー

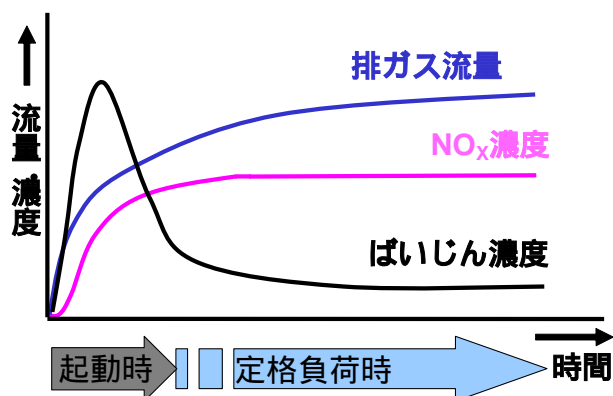


図2 ディーゼルエンジン排ガス特性

### 3.2 共同研究のフロー

現状を改善するため、共同研究では、起動時はばいじんを中心に除去し、定格負荷時に NO<sub>x</sub> を中心に除去することを目的とした。本研究では、既設の排ガス煙道に除塵・脱硝装置を付加する構成とした。また、除塵・脱硝装置はその用途から、長期耐久性、維持管理性が求められるため、この点も研究課題とした。共同研究の装置概略図を図3に示す。

本研究では両フィルタとも、除塵はセラミックフィルタにより行い、また、脱硝はアンモニアの還元反応による選択的接触還元法(1)により行った。

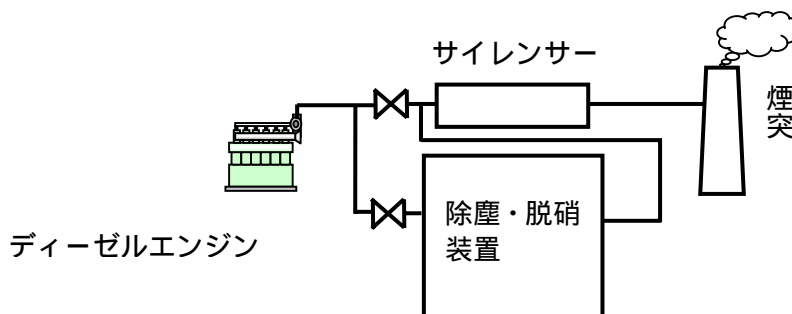


図3 共同研究の装置概略図

1 選択接触還元法とは、高温の排ガス中にアンモニアを注入して、金属触媒と排ガスを接触させることにより脱硝する方法である。

### 3.3 両ポンプ所のフィルタの比較

除塵・脱硝装置の方式は、両フィルタそれぞれ特長があり異なる。汐留ポンプ所の方式は、フィルタ部と触媒部が分離された構造となっている。これに対し、鮫洲ポンプ所の方式は、フィルタ部と触媒部が一体構造となっている。いずれの方式も、ばいじんと NO<sub>x</sub> の両方を除去することを目的としたものである。

両ポンプ所のフィルタの比較を表2に、除塵・脱硝装置の外観を図4及び図5に示す。

表2 両ポンプ所のフィルタの比較

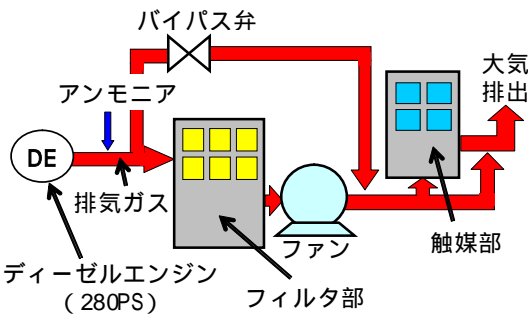
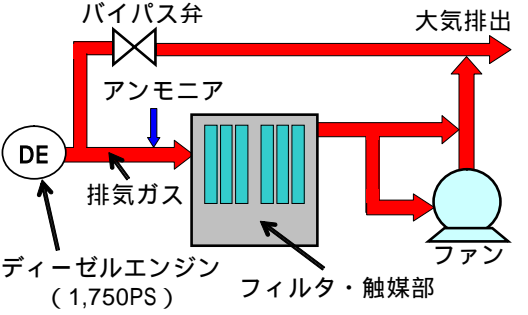
	汐留ポンプ所	鮫洲ポンプ所
方式	 <p>排ガス処理フロー</p> <p>(1)起動時 フィルタ部を通過後、大気へ排出</p> <p>(2)定格負荷時 アンモニア注入 フィルタ部及びバイパス弁を通過後、触媒部を通過して大気へ排出</p> <p>フィルタ・触媒セパレート方式 独立したフィルタ部と触媒部で構成</p>	 <p>排ガス処理フロー</p> <p>(1)起動時 フィルタ・触媒部を通過後、大気へ排出</p> <p>(2)発電機電圧確立後 アンモニア注入 フィルタ・触媒部及びバイパス弁を通過。フィルタ・触媒部を通過した排ガスは、さらにファンを通過後、大気へ排出</p> <p>フィルタ・触媒一体方式 フィルタと触媒を一体化したフィルタ・触媒部で構成</p>
フィルタの材質	セラミックス	同左
触媒の材質	酸化チタン系	五酸化バナジウム系



図 4 汐留ポンプ所装置外観



図 5 鮫洲ポンプ所装置外観

#### 4 脱硝処理の説明

脱硝処理は、アンモニア（ $\text{NH}_3$ ）と排ガスを十分混合させた混合気体を触媒部又はフィルタ・触媒部で反応させ、 $\text{NO}_x$ の90%以上を占める一酸化窒素（ $\text{NO}$ ）を窒素ガスに還元するものである。反応式は次のとおり。



なお、排ガス中に含まれる硫黄酸化物（ $\text{SO}_x$ ）と水分の反応で生じた硫酸（ $\text{H}_2\text{SO}_4$ ）が300℃程度より低い状態でアンモニアと反応すると、次式のとおり硫酸アンモニウム（ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ）を析出する恐れがある。



硫酸アンモニウムの析出は、フィルタの圧力損失上昇（目詰まり発生）を招き、除塵性能を低下させる要因となるので、300℃以下の排ガス温度で脱硝を行う場合はフィルタを通さない工夫が必要である。

#### 5 研究目標

本研究では、フィルタの性能と維持管理性を実証するため、次の目標値及び目標を設定した。

- (1) 大気汚染防止法及び「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例」（環境確保条例）に基づく常用ディーゼルエンジンの排出基準を達成することを研究課題として、ばいじん排出濃度  $0.08\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  以下（集塵除去率80%以上）、 $\text{NO}_x$  排出濃度  $110\text{ppm}$  以下を研究目標値とした。ただし、非常用の運転パターンの特徴を考慮し、ばいじん排出濃度は起動後5分以内の値、 $\text{NO}_x$  排出濃度は、起動後5～15分以降の値とした。
- (2) 容易な維持管理を図るために、フィルタ維持管理性を確認するとともに、触媒に10年以上の長期耐久性をもたすことを研究目標とした。

#### 6 実証試験結果

##### 6.1 汐留ポンプ所の実証試験結果

##### 6.1.1 研究目標値の達成状況

汐留ポンプ所における実証試験の結果、表3に示すとおり、ばいじん排出濃度、集塵除去率及び $\text{NO}_x$  排出濃度について目標値を達成することができた。

表3 汐留ポンプ所方式の達成値

	目標値	達成値
ばいじん排出濃度	$0.08\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下	$0.003\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下
集塵除去率	80%以上	97%
$\text{NO}_x$ 排出濃度	$110\text{ppm}$ 以下 （起動後15分以降）	約 $110\text{ppm}$ （起動後10分程度）

### 6.1.2 脱硝作用

アンモニア注入は、硫酸アンモニウムの析出を回避するため、当初、脱硝装置入口排ガス温度が 320 まで上昇してから行うよう設定していた。しかし、排ガス温度の上昇が鈍く、目標時間内に NO<sub>x</sub> 排出濃度を下げることが不可能なことから、アンモニア注入温度を 270 に設定し、早い段階で脱硝工程に入るように変更した。その結果、起動から約 6 分で脱硝装置入口の排ガス温度が 270 に達してアンモニア注入が行われ、起動後 10 分程度で NO<sub>x</sub> 濃度が目標値の 110ppm となった。

### 6.1.3 フィルタの維持管理性

実証試験を行ったディーゼルエンジンは、多量に白煙を排出する特性を有していたため、白煙に含まれる油分等がフィルタに付着し、通ガスを繰り返すことでフィルタの圧力損失が上昇した。圧力損失で排ガス処理性能を低下させないためには、2 箇月という短期間でフィルタに高温再生処理（ 2 ）を施す必要があった。

この対策として、負荷運転で排ガス量が多いときには、除塵装置をバイパスして運転を行った。この結果、急激な圧力損失の上昇を抑えることができ、長期間の運用が可能となった。

## 2 フィルタを約 650 に加熱し、フィルタに付着、蓄積した物質を焼失させる処理

### 6.1.4 触媒効果の持続性

試験開始前、試験開始後 7 ヶ月、19 ヶ月経過における触媒効果を触媒の温度別に比較した結果を図 6 に示す。図 6 から、触媒効果を示す活性比（ 3 ）は触媒の温度に比例し、使用期間に反比例することがわかった。

3 活性比は、各条件における一酸化窒素濃度を、試験開始前（触媒の温度 300 ）の条件における一酸化窒素濃度で除した値である。一酸化窒素濃度の測定は、触媒の切断加工片に対しアンモニアと一酸化窒素の割合が 1.2 : 1 の模擬ガスを流すことにより行った。

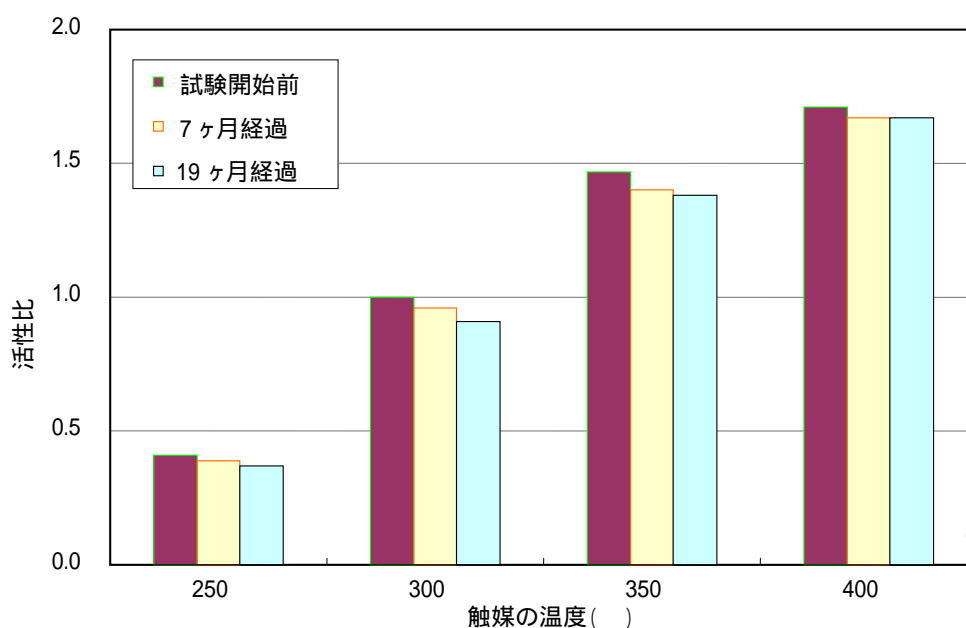


図 6 触媒効果の評価

## 6.2 鮫洲ポンプ所の実証試験結果

### 6.2.1 研究目標値の達成状況

鮫洲ポンプ所における実証試験の結果、表4のとおり、ばいじん排出濃度、集塵除去率及び NO<sub>x</sub> 排出濃度について目標値を達成することができた。また、ディーゼルエンジン起動直後における黒煙除去の状況は、図7及び図8で示すとおりであり、装置導入後はほとんどの黒煙を除去することができた。



図7 除塵・脱硝装置適用前



図8 除塵・脱硝装置適用後

表4 鮫洲ポンプ所方式の達成値

	目標値	達成値
ばいじん排出濃度	0.08g/m <sup>3</sup> N 以下	0.001g/m <sup>3</sup> N 以下
集塵除去率	80%以上	96%
NO <sub>x</sub> 排出濃度	110ppm 以下 (起動後 15 分以降)	110ppm 以下 (起動後 15 分程度)

### 6.2.2 脱硝作用

研究当初は、フィルタ・触媒部入口の排ガス温度が触媒活性温度の 215℃ まで上がるのに時間を要していたため、目標の脱硝効果が得られるまでに約 22 分間かかっていた。これは、ディーゼルエンジンから除塵・脱硝装置までの距離が約 8m あり、ディーゼルエンジンから排出された熱が脱硝装置に入るまでの間で大きく降温することが原因であった。このため、エンジン起動前に熱風炉でフィルタ・触媒部を加熱、昇温することで、排気管が長いことによる熱損失の補償を行った。

また、エンジン起動前にフィルタ・触媒部を約 215℃ まで熱風加熱するとともに、アンモニアの供給を行うことにより、エンジン起動後の早い段階から NO<sub>x</sub> 排出濃度を下げることができた。

### 6.2.3 フィルタの維持管理性

フィルタの耐久性を確認するため、エンジン起動回数に対するばいじんの排出濃度を検証した。その結果、最低でもエンジン起動回数 22 回まではばいじん排出濃度の目標値を達成できることが確認できた。鮫洲ポンプ所のフィルタは除塵と脱硝機能を併せもつため、脱硝機能についての維持管理性（次項 6.2.4）

2.4参照)も考慮しなければならないものの、エンジン起動回数に対するフィルタの除塵性能低下は見られなかった。

#### 6.2.4 触媒効果の持続性

フィルタ・触媒部を熱風加熱しない(コールドスタート)でエンジンの繰り返し運転を行うと、フィルタ触媒層に排ガスの油分が蓄積し、脱硝性能が低下した。しかし、エンジンの起動前に熱風炉等で触媒層を400 程度に加熱(予備加熱)することで、油分の発生が抑えられ、脱硝効果を維持できることが確認できた。(図9)

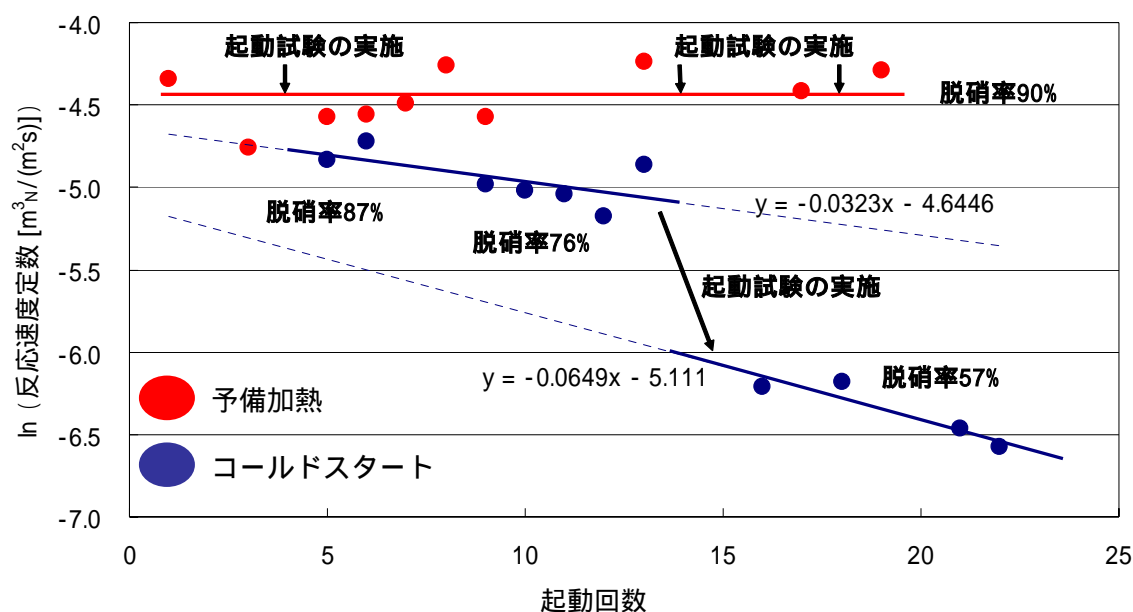


図9 エンジン起動回数に対する脱硝性能の低下

## 7 考察

### 7.1 除塵性能

- (1) 除塵性能は、両ポンプ所のフィルタとも十分に得られたものと判断する。
- (2) 汐留ポンプ所の場合は、ディーゼルエンジンから排出される排ガス中に白煙が多く、黒煙の成分よりも粒子の細かい油分を多量に含んでいるため、フィルタの圧力損失上昇が著しかった。圧力損失除去のために高温再生処理を頻繁に実施することは維持管理負担の増大につながる。本研究によるフィルタは白煙に対しても有効であるが、耐久性の面から、鮫洲ポンプ所のように黒煙を多く排出するエンジンに活用する方が有効であると考ええる。
- (3) 汐留ポンプ所では、硫酸アンモニウムの析出によるフィルタの圧力損失上昇を抑えるために、ばいじん排出濃度をできる限り低下させた状態でアンモニア注入を行うとともに、ばいじん排出濃度が目標値に達成した段階で、排ガスはすべてフィルタ部をバイパスさせることとする。

### 7.2 脱硝性能

脱硝性能は、両ポンプ所とも十分に得られたと考える。しかし、鮫洲ポンプ所では、排気管が長いことから排ガス温度が低下したので、これを補うためフィルタ・触媒部を熱風加熱し触媒を活性化させた。今後、同様の設備を設置する際には、エンジンとフィルタ・触媒部の排気管長を短くし、排ガスを高



い温度で処理できる設備配置とする。

### 7.3 触媒の長期耐久性

図10は、汐留ポンプ所における触媒の経年劣化を示しており、触媒は活性比が0.8まで低下しても十分能力を発揮できる設計となっている。また、図9で示すとおり、鮫洲ポンプ所においても、エンジン起動回数における触媒の劣化は認められなかった。

排ガスの処理温度にもよるが、これらより、触媒には10年以上の長期耐久性があることが予測できる。しかし、触媒の長期耐久性を実証するためには、実際の運用の中で、引き続き検証していくことが必要である。

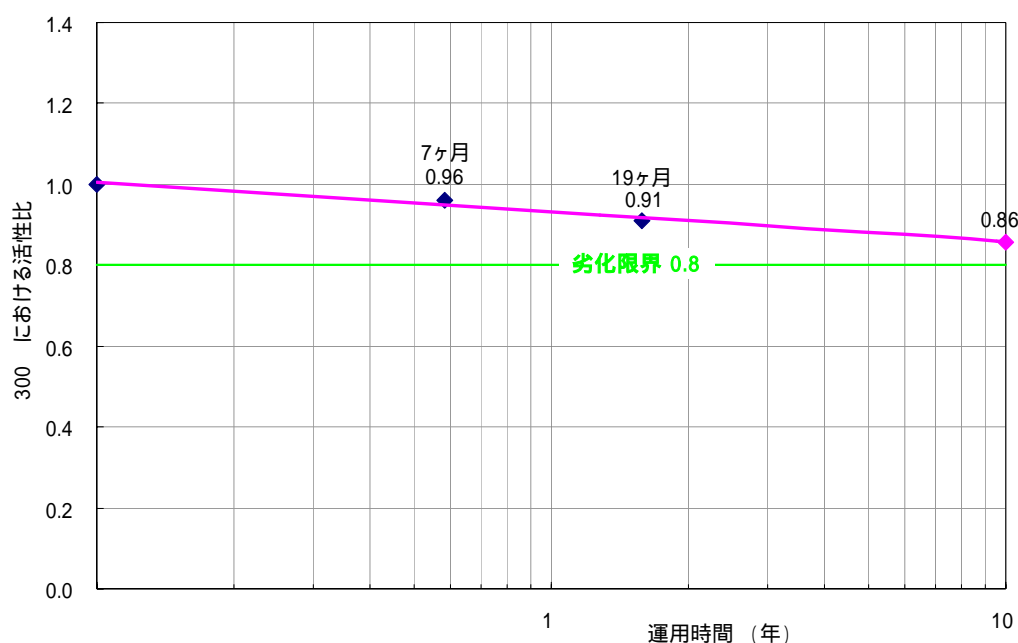


図10 脱硝触媒の寿命予測  
(触媒温度300における活性の変化)

### 8 おわりに

近年、東京における市街化の進展は著しい。当局のポンプ所や水再生センター等においても、建設当時、その多くは周囲には民家も少なく閑散としていたが、急速な市街化により、敷地境界の直近にまで民家が隣接する状況となっている。こうした状況で、非常用発電機や雨水ポンプ駆動用のディーゼルエンジンから排出される排ガスの対策は、緊急に解決すべき重要な課題となっている。

本研究で開発した排ガス除塵・脱臭フィルタは、この排ガス対策に極めて有効であることが判明した。この結果を踏まえ、今後、環境負荷の軽減を図るため、排ガス対策の一手法として実機導入を進めていく。



## 1. 背景

セメントコンクリートは長期の耐久性を有する経済的な構造材料として多く用いられてきたが、下水道施設のコンクリートに早期劣化が見られ、その原因が下水中の細菌の働きで生成された硫酸によるものであることが判ってきた。これらの早期劣化を防止する目的で硫黄固化体の下水道施設への適用性について検討するため、水再生センターの劣化したコンクリート施設改修工事に硫黄固化体パネルを用いた防食被覆工法を適用し、その施工性、耐食性について研究を開始した。

硫黄固化体は 120～150℃ で熔融状態の硫黄と、乾燥した骨材を混合し、自然冷却したもので（図 1）、セメントコンクリート（以下；コンクリートと称す）に比べて高強度で遮水性に優れ、かつ耐酸性の高い材料である。なお、硫黄固化体の下水道腐食性環境での耐食性については平成 15 年度に報告済である。

硫黄固化体に用いる硫黄は石油精製時の副産物として生産されたもので、今後、排気ガス中の硫黄酸化物対策の強化により増加が予想されている（図 2）。

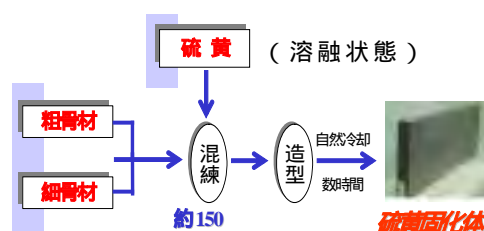
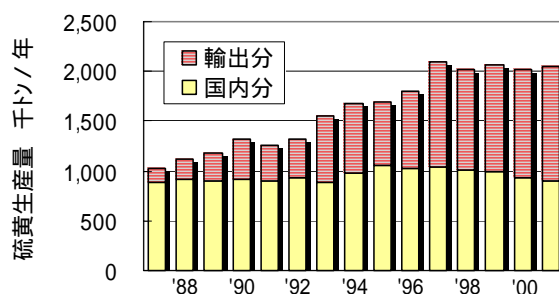


図 1 硫黄固化体の製造方法



< 用途 >  
肥料、繊維、洗剤の原料  
タイヤの加硫材、他

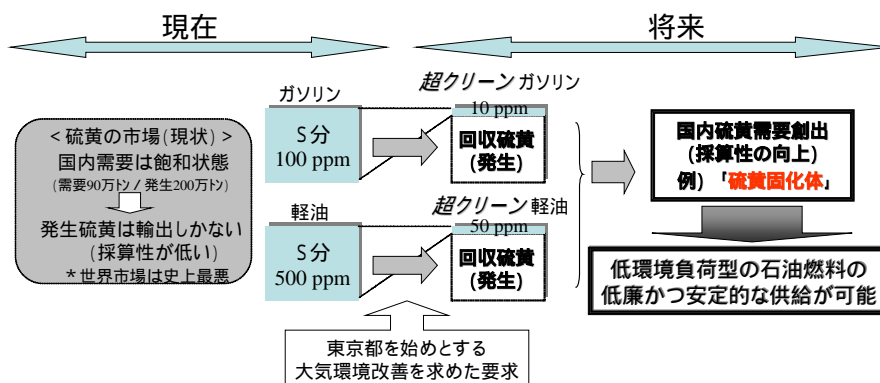


図 2 硫黄を取り巻く状況（上：硫黄の国内生産量の推移、下：現在と将来）

## 2. 研究内容

平成 15 年度に行った新河岸水再生センター汚泥濃縮槽第 4 槽返水ます気相部への暴露試験で、耐食性が確認された配合の硫黄固化体で製造した大型パネルを、同様の腐食性環境である第 3 槽返水ます改修工事に適用した。本報告は改修工事に使用した硫黄固化体パネルの実現場での施工性調査結果と、耐腐食性能調査計画について報告するものである。

### 2.1 改修前の既設構造物(第3槽返水ます)の劣化状況

#### 2.1.1 硫化水素濃度

既設第 3 槽返水ますの劣化状況は第 4 槽返水ますの状況と、ほぼ同様であり、硫化水素濃度は 500ppm に達すると考えられる。

#### 2.1.2 劣化状況

既設第 3 槽返水ます気相部のコンクリート表面は白く変色して軟化し、大きな断面欠損が認められた。

この状況は平成 15 年度報告(既設第 4 槽返水ます)の劣化状況と同様であり、硫化水素に起因する硫酸腐食と考えられる。改修工事では、旧躯体を補修して再使用することが困難で、構造物を取壊して再構築が必要と判定された構造物である。

### 2.2 改修工事

#### 2.2.1 使用した硫黄固化体の基礎物性

使用した硫黄固化体は平成 15 年度報告に記載された硫黄固化体 A 配合であり、耐酸性に優れた物性を有している。

配合：改質硫黄 21、硅砂 69、石炭灰 10(質量の割合)

密度：2.2 (g / cm<sup>3</sup>)

圧縮強度：69.3 (N / mm<sup>2</sup>)

曲げ強度：10.1 (N / mm<sup>2</sup>)

重量変化率：- 0.4% (第 4 槽返水ます、材齢 6 ヶ月、セメントコンクリートは - 34%)

#### 2.2.2 硫黄固化体パネルの製造と運搬

硫黄固化体パネルは北海道室蘭で製造し、船とトラック輸送により新河岸水再生センターに搬入した。パネルの製造にあたっては保温型枠を使用し、熔融硫黄混合物の冷却速度をコントロールして、ひび割れの発生、硫黄固化体パネルの変形(そり等)を防止した。また、運搬にあたっては角欠けやひび割れが発生しないように梱包した。クレーンの吊り上げではワイヤロープによって硫黄固化体パネルの角が欠ける恐れがあったため、アラミド繊維製のロープを使用した。

#### 2.2.3 改修工事の概要

工事は鋼矢板打設による山留めを行って返水ます全体を撤去し、硫黄固化体パネルでコンクリートますを内張りする方式で工事を行った。これは従来のコンクリート構造物の改修工事と同様である。工事期間は 2003 年 9 月～11 月である。

硫黄固化体底版パネル：2100×900 t=100 1枚  
 壁面パネル A：1960×642×100 14枚  
 壁面パネル B：900×643×100 14枚

表 1 汚泥濃縮槽返水ます改修工事使用材料一覧表

工種	種別	形状・寸法	単位	数量
均しコンクリート	18-8-20	高炉 B 種	m <sup>3</sup>	0.16
躯体コンクリート	24-12-20	高炉 B 種	m <sup>3</sup>	5.3
鉄筋	SD295A	D13	t	0.33
接着系あと施工アンカー	SD295A	D13		
ケミカル樹脂カポセル			本	51
型枠工	木製		m <sup>2</sup>	25.0

新河岸処理場3号返水ます改修工事

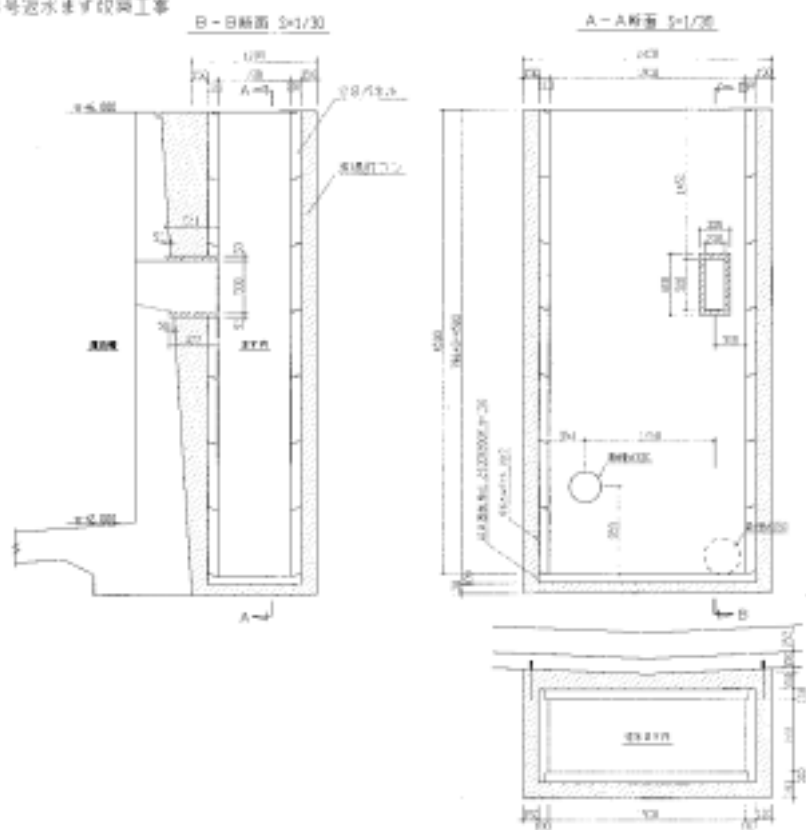


図 3 新河岸処理場 3 号返水ます改修工事



施工場所（新河岸水再生センター）



硫化水素で腐食した構造物



取りこわし



硫黄固化体製品据え付け



完成後の通水状況

図4 硫黄固化体を用いた返水ますの施工フロー

### 3. 追跡調査計画

#### 3.1 硫黄固化体パネルの耐腐食性調査

改造工事を完了した新河岸処理場汚泥濃縮槽第3槽返水ます硫黄固化体パネルの劣化状況を目視観察と超音波伝播速度の測定、硫黄固化体パネル背面からのコアボーリングによって調査する。調査時期は工事完了後、1年および2年とする。

#### 3.2 暴露試験場所と時期

改造工事を完了した新河岸処理場汚泥濃縮槽第3槽返水ますの気相部に供試体を暴露し、定期的に供試体を取り出し、劣化状況を調査する。ます内の暴露場所は濃縮排水が直接接触することはないが、常に霧状の水分が接触する環境である。

##### 3.2.1 暴露供試体

###### (1) 供試体の種類

表2に各供試体の規格と形状寸法を示す。使用材料及び配合を変えた3種類の硫黄固化体供試体と対照用に普通コンクリート供試体を下水道腐食環境下で暴露する。暴露した供試体は測定期間2年間のうち、半年ごとに計5回、外観、中性化深さ、質量変化、圧縮強度変化について調査し耐腐食性能を検討する。

表2 各供試体の規格と形状寸法

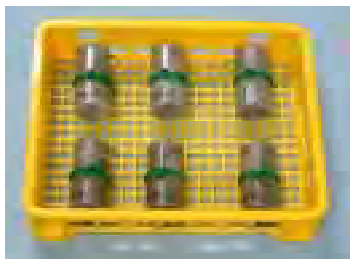
試験の種類	配 合	形 状	試験内容	ケース	本数
配合試験	改修工事用パネルと同配合(硫黄固化体A 配合)	50×100H	圧縮強度	A	12
	改修工事用パネルと同配合(硫黄固化体A 配合)	100×230H	断面形状 圧縮強度	C1	4
	スーパーアッシュ混入(5%)	50×100H	圧縮強度	A	12
	スーパーアッシュ混入(5%)	100×230H	断面形状 圧縮強度	C1	4
	粗骨材 川砂利 25mm	100×230H	断面形状 圧縮強度	C1	4
	普通コンクリート	100×200H	圧縮強度	C2	9
	普通コンクリート	100×200H	断面形状	C2	3
接着耐久性試験	耐酸接着剤塗布	300×300×60mm	接着強度	B	4
鉄筋試験	硫黄固化体ひび割れ無し 被り3,5,7cm	150×150×300mm	断面鉄筋 腐食状況	D	4
	コンクリートひび割れ無し 被り3,5,7cm	150×150×300mm	断面鉄筋 腐食状況	D	4
継続調査(H14.6～)	硫黄固化体A	100×100×200mm	表面観察	C3	1
	硫黄固化体B	100×100×200mm	表面観察	C3	1
合計					62

硫黄固化体A 改質硫黄:珪砂:石炭灰=21:69:10

硫黄固化体B 硫黄:珪砂:石炭灰=22:68:10

## (2) 供試体の寸法と設置方法

暴露試験に用いた供試体は、角柱供試体、円柱供試体、および付着強度試験供試体で、これらを図5のとおり樹脂製ケース内にセッティングし、図6のように暴露した。



**ケースA：4箱**

ケース寸法： 380×300×80mm

サンプル種類 珪砂-石炭灰系

珪砂-スーパ-アッシュ-石炭灰系

サンプル寸法 50mm×100mm

ケース重量： 約3.2kg



**ケースB：4箱**

ケース寸法： 500×380×100mm

サンプル種類 珪砂-石炭灰系

サンプル寸法 300×300×60mm

ケース重量： 約13.2kg



**ケースC1：4箱**

ケース寸法： 560×450×130mm

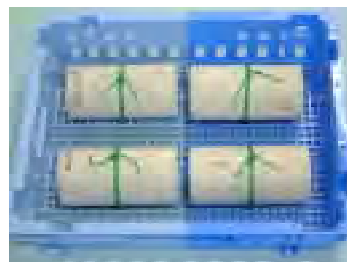
サンプル種類 珪砂-石炭灰系

珪砂-スーパ-アッシュ-石炭灰系

川砂利-川砂-石炭灰系

サンプル寸法 100mm×230mm

ケース重量： 約13.7kg



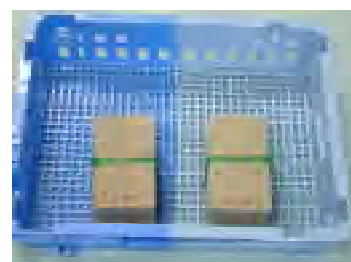
**ケースC2：3箱**

ケース寸法： 560×450×130mm

サンプル種類 コンクリート

サンプル寸法 100mm×200mm

ケース重量： 約16.2kg



**ケースC3：1箱**

ケース寸法： 560×450×130mm

サンプル種類 珪砂-石炭灰系\*

珪砂-石炭灰系\* (純硫黄使用)

サンプル寸法 100×100×200mm

ケース重量： 約9.6kg

\*昨年度暴露試験の継続



**吊るしサンプルD：8本**

サンプル種類 珪砂-石炭灰系

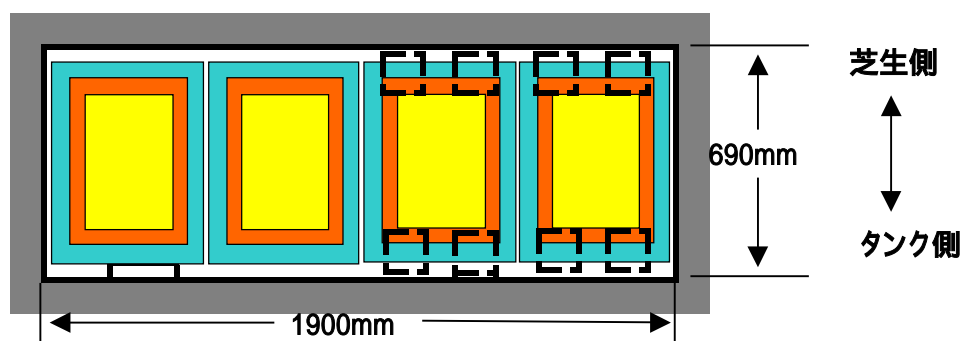
コンクリート

サンプル寸法 150×150×300mm

ケース重量： 約17.2kg

**図5 ケース内の供試体セッティング状況**

< 上 >



< 横 >

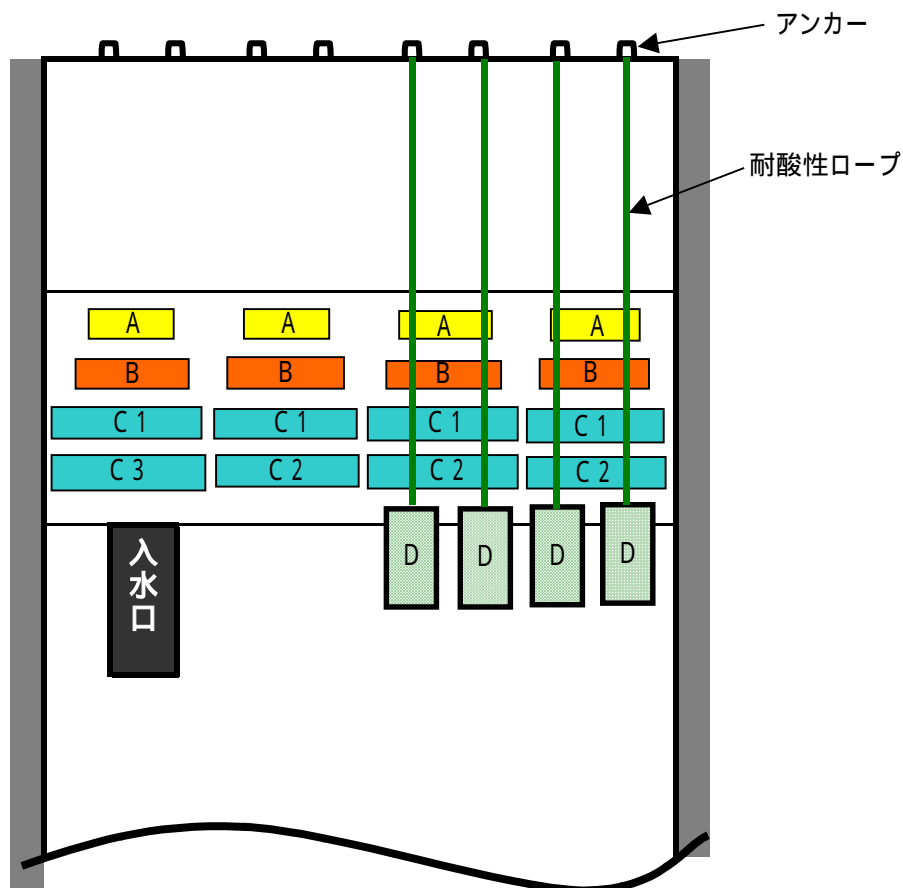


図 6 暴露供試体設置状況

### 3.2.2 暴露環境の調査

平成 14 年度と同様に硫化水素濃度の経時変動を(株)ガステック製拡散式硫化水素測定器 GHS - 7AT {センサー : 0 ~ 1000ppm (精度  $\pm 50$ ppm、分解能 1ppm)} にて連続的 (5 分間隔) に測定する予定である。なお、平成 14 年度の計測ではセンサー部を 500ppm 測定用としたが、硫化水素濃度が 500ppm を超える値を数回測定したため、今回はセンサー部を 1000ppm とした。

#### 4．研究課題

##### 4．1 施工に関する研究課題

硫黄固化体パネルの運搬から現場搬入、現場組み立てと施工現場への吊り込みなど、通常のコンクリートパネルと同様の取扱いで十分施工できることが明らかになった。今回使用したパネルの大きさが練混ぜ容量から現在製造可能な最大のものである。今後は取扱いを含め、現場での施工が容易となる構造、パネル間の接合方法等の開発が必要である。

##### 4．2 その他の研究課題

硫黄固化体は、コンクリートと異なり、バインダーとして使用される改質硫黄および骨材として使用される珪砂が酸による攻撃を受けない材料のため、下水道環境の耐酸性材料として大いに期待できる。

今後の研究課題は以下のとおりである。

##### (1) 使用材料及び配合等の基礎的検討

一般コンクリート用骨材を含め、用途に合った使用材料及び配合を検討する必要がある。鉄筋を用いた場合の硫黄との付着性、ひびわれが生じた場合の耐腐食性能等を確認する必要がある。

##### (2) 適用箇所の検討

補修や防食用の材料として、パネルでの施工が可能であることが確認されたが、さらに、管きょなど適用可能な構造物の範囲の拡大が必要である。

二次製品としてだけでなく、現場での直接吹付けなども研究の対象とすべきである。



## 3 . 下水の処理

- 3 - 1 標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合処理による除去効果と数値化による評価
- 3 - 2 溶解性りん再溶出に関する調査
- 3 - 3 晶析法を適用した汚泥集約処理施設からのりん除去（最終報告）
- 3 - 4 高度処理における効率的な栄養塩除去の機構解明と下水処理施設の評価手法に関する研究
- 3 - 5  $A_2O$ 法処理施設の最適運転手法の検討
- 3 - 6 りん除去メカニズムからみた  $A_2O$  法のりん処理対策について
- 3 - 7 砂ろ過(固定床型、移床型)施設の機能向上技術の開発

### 3 - 1 標準法活性汚泥と高度処理法活性汚泥の混合処理による りん除去効果と数値化による評価

北部第二管理事務所  
中川水再生センター 小林克巳

#### 1. はじめに

中川水再生センターでは、 $A_2O$ 法（嫌気無酸素好気法）処理水りん濃度は夏冬とも良好に維持している。一方、標準法（標準活性汚泥法）処理水りん濃度は夏期以外に上昇が見られることから、標準法汚泥と $A_2O$ 法汚泥の混合処理による、標準法のりん除去効果について夏期以外を対象としてテーブルテストにより検討した。また、りん除去難易度を数値化するため、りん除去の新概念である「りん負荷」の導入を試み、標準法汚泥と高度処理法汚泥の混合処理の比較検討をした。

#### 2. りん除去難易度の数値化の試み

活性汚泥法におけるりん除去は、種類の異なる反応で構成されている。菌体自身の生体構成用にりんを摂取する反応（仮に基本増殖反応）とポリりん酸蓄積細菌（りん蓄積菌）の関与した反応である。後者の反応は、ポリりん酸蓄積反応（仮にりん吸収反応）とりん蓄積菌が増殖する反応（仮にりん増殖反応）に分けられる。なお、考え方はIWA活性汚泥モデル（ASM）による。また、ASMのパラメータ設定値を使用している箇所はアンダーラインした。

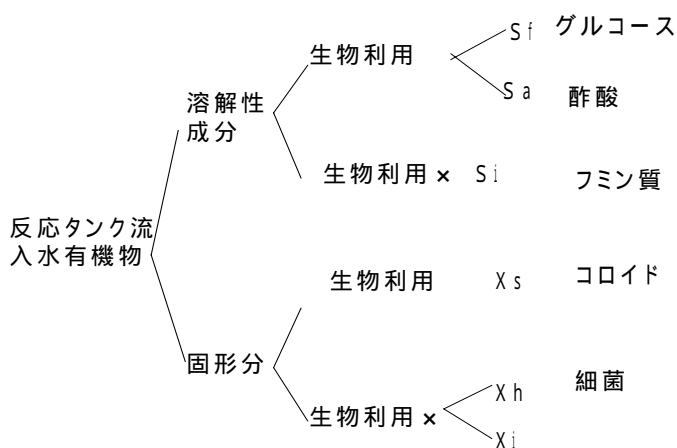


図1 反応タンク流入有機物の構成

表1 反応タンク流入水分画

記号	中川	小菅	有明	りん含有
Sf	13	24	14	<u>0.01</u>
Sa	8	14	11	<u>0</u>
Si	11	16	23	<u>0</u>
Xs	98	93	137	<u>0.01</u>
Xh	23	22	33	<u>0.02</u>
Xi	20	19	26	<u>0.01</u>
T-P	2.5	3.9	4.8	---
PO4	1.4	2.2	2.6	---
P	1.1	1.7	2.2	---
P0	-0.9	-0.7	-0.8	---

りんはH13 水質管理年報の値

#### 2.1 菌体生成時に必要なりん摂取量

基本増殖反応とりん増殖反応合計のりん摂取量を求めてみる。H12 生物学的高度処理法運転支援ソフトの適用性に関する調査委託報告書によると反応タンク流入水有機物は大きく6種類に分画される（表1太線内参照、数値は冬期のCODcr(mg/l)）。そのうち、生物易分解性有機物(Sf)、発酵生成物(Sa)、生物遅分解性の懸濁態有機物(Xs)の3種類（表1網

掛け)は、プロセスには差があるが、最終的にはバイオマスにより菌体となると予想される。この3種類濃度の合計に菌体収率  $0.67(\text{g COD} / \text{g COD})$  を掛けると菌体生成量が求められる。さらに、菌体りん含有率は、 $0.02(\text{gP} / \text{gCOD})$  なので、 $(S_f + S_a + X_s) \times 0.67 \times 0.02$   $0.013(S_f + S_a + X_s)$  が、菌体生成時に必要なりん摂取量となる。

## 2.2 菌体生成時のりんの過不足

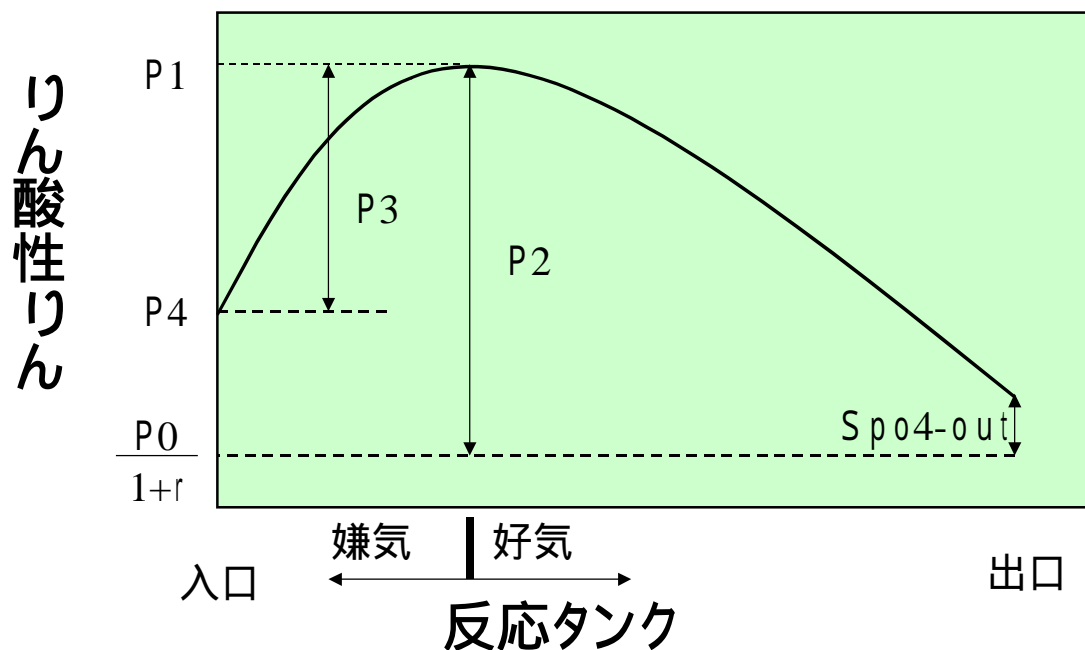


図2 りん吸収過程の概念図

りんは、りん酸性りと有機性りに分けて考えた。反応タンク流入水の全りんからりん酸性りを引いた値 ( $P$ ) が反応タンク流入水有機性りん濃度を表す。反応タンク流入水有機物全6種類とそのうちの菌体となる3種類のりん含有量比 ( $Pr$ ) を  $P$  に乗じれば、 $P$  のうち菌体に取り込まれるりん濃度がわかる。例えば、中川水再生センターの冬期の場合、菌体となる3種類のりん ( $\text{mg} / \text{l}$ )  $= 0.01\text{CODsf} + 0\text{CODsa} + 0.01\text{CODxs} = 0.01 \times 13 + 0 + 0.01 \times 98 = 1.11$  である、同様に考えて、反応タンク流入水有機物全6種類のりん ( $\text{mg} / \text{l}$ )  $= 0.01\text{CODsf} + 0\text{CODsa} + 0\text{CODsi} + 0.01\text{CODxs} + 0.02\text{CODxh} + 0.01\text{CODxi} = 1.77$  である。 $1.11 / 1.73$  を計算すれば  $0.63$  となる。同様の計算から、小菅  $0.65$ 、有明  $0.61$  とほぼ同じ値が得られたので  $Pr$  を  $0.6$  として使用した。好気工程が十分ある場合、菌体構成用のりんの過不足 ( $P_0$ ) は生成菌体に受動的に摂取されるりん  $0.6 P$  から菌対生成時に必要なりん  $0.013(S_f + S_a + X_s)$  の差で求められ、 $P_0 = 0.6 P - 0.013(S_f + S_a + X_s)$  となる。 $P_0$  が  $0$  以下となった場合は、増殖用のりんが不足するので、不足分はりん酸性りを吸収し、 $0$  以上となった場合は、りん酸性りを放出すると仮定した。表1に掲げる三水再生センターとも  $P_0$  は  $0$  以下であった。

## 2.3 標準法反応タンク出口のりん酸性りんの予想と嫌気好気法での必要なりん吸収

返送汚泥率を  $r$ 、反応タンク流入りん酸性りんを  $S_{PO4-in}$ 、返送汚泥りん酸性りんを  $S_{PO4-r}$ 、反応タンク出口りん酸性りんを  $S_{PO4-out}$  とすると、反応タンク流入平均りん酸性りん  $(P_4) = (S_{PO4-in} + r \times S_{PO4-r}) / (1+r)$  に  $P_0 / (1+r)$  を加えた値は、標準法の予想  $S_{PO4-out}$  を表し、中川では  $0.8 \text{ mg/l}$  となり、冬期の実測値とほぼ同一となる。なお、返送汚泥の  $S_f, S_a, X_s$  及び有機性りんは 0 と仮定した。以上の考え方をさらに発展させると、活性汚泥法に嫌気工程がある場合、嫌気後のりん酸性りん  $(P_1)$  を 0 にするためには、りん吸収反応での必要なりん吸収  $(P_2) = P_1 + P_0 / (1+r)$  となる。

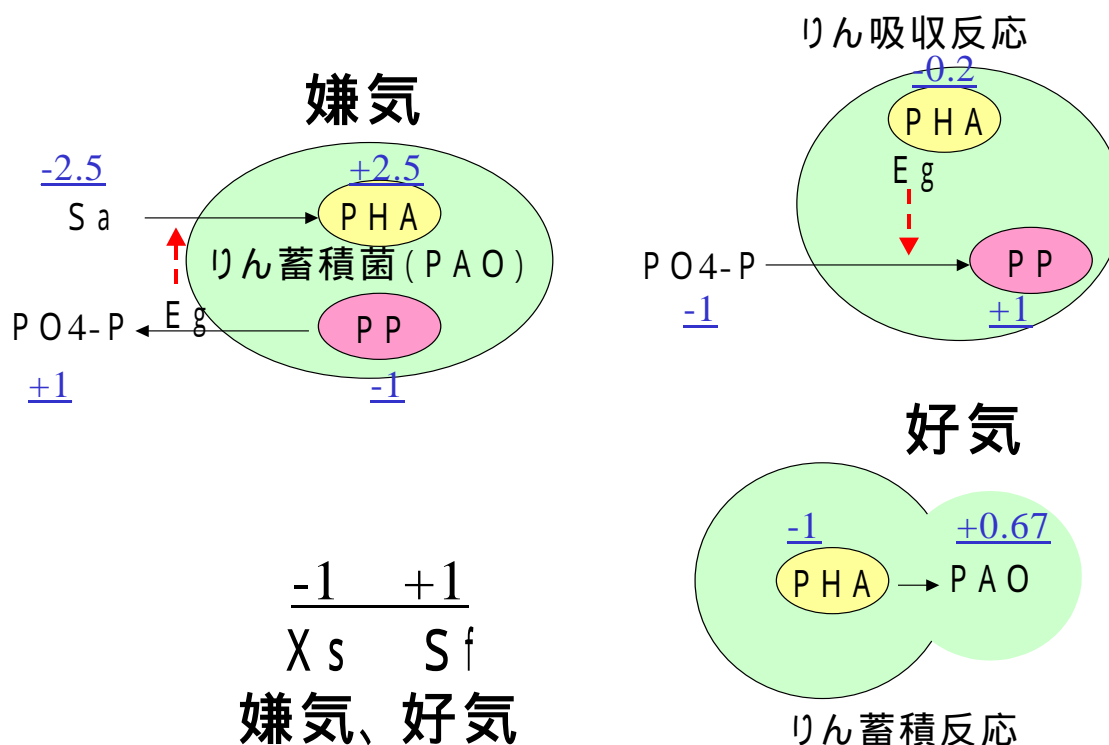


図3 りん除去反応の概念図

## 2.4 りん酸吐き出しと生成 PHA

反応タンク嫌気工程で、主に  $S_a$  から PHA (ポリヒドロキシアルカネート) がりん蓄積菌内に形成される。そのエネルギー源は菌体内のポリりん酸がりん酸になる反応であり、その際、りん酸が吐き出され、りん酸吐き出し 生成 PHA と考えることにした。りん酸吐き出し  $(P_3)$  は  $P_1 - P_4$  で求められる。さらに、反応タンク好気部で、PHA を利用してりん酸性りんが、ポリりん酸としてりん蓄積菌内に取り込まれる (りん吸収反応)。

## 2.5 りん除去難易度の数値化

$P_2$  を生成りん蓄積菌で除した値 (りん生成りん蓄積菌負荷以下「りん負荷」) を求めることにより、りん除去難易度の数値化が可能となる。りん負荷が低い場合は  $S_{PO4-out}$  を 0 にする可能性が高い。この考え方は、BOD-MLSS 負荷と類似しているが、りん蓄積菌の総量は不明なため、反応タンク流入水から生成が予想されるりん蓄積菌で代用している点が異なる。PHA はりん吸収反応とりん増殖反応に利用されるが、PHA 生成は  $P_3 \times 2.5$  であり、りん吸収反応による PHA 使用は  $P_2 \times 0.2$  なので、りん増殖反応でりん蓄

積菌生成に使用される P H A は  $P3 \times 2.5 - P2 \times 0.2$  となる。使用 P H A に収率 0.67 を乗じれば生成菌体量になるので、りん負荷  $= P2 / \{ 0.67 \times ( P3 \times 2.5 - P2 \times 0.2 ) \}$  となる。なお、りん負荷の簡略値は  $0.65(1+r)P1 / \{ (1+r)P1 - \text{Spo4-in} \}$  である。3.2 に後述してあるがりん負荷 1 以下で良好なりん処理が見込めることから、りん負荷  $< 1$  を代入すると  $P1 / \text{Spo4-in} > 3$  という関係式が誘導される。これは、酢酸/りん酸性りん  $> 8$  で良好なりん除去が可能とした報告( H9 技術調査年報 251- )と類似点がある。P H A は備蓄されないと仮定したが、りん負荷が低い時は備蓄があると思われ、りん負荷が計算値より高くなると予想される。

### 3. 実験結果

テーブルテストによる結果を示す。テーブルテストは、実験精度の高い振とう曝気法( H14 水質管理研修参照 ) によった。なお、実施設でも  $A_2O$  汚泥と標準法汚泥の混合によるりん除去効果を確認し、継続調査中である。

#### 3.1 高度処理汚泥と標準法汚泥の混合処理の有効性

表 2 に  $A_2O$  法汚泥と標準法汚泥の混合によるりん負荷の計算結果を示す。中川水再生センターのりん酸性りんは返送汚泥  $A_2O$  法 0.6、標準法 2.0、 $A_2O$  法嫌気後 6.0(mg/l)、返送率は  $A_2O$  法 0.5、標準法 0.3 とし、流入水質は表 1 によった。両汚泥を 1:9 で混合しても中川水再生センターの場合、りん負荷は 10 倍にはならず、計算上は  $2.05 \div 0.73 = 2.8$  倍である。このように、高度処理汚泥と標準法汚泥の混合によるりん除去が、非常に有効であることがわかった。

#### 3.2 りん除去難易度の水再生センター間比較

小菅水再生センターのデータ( H 1 3 水質管理研修 ) を基に、試算した結果を参考まで表 2 に示してある( 返送汚泥 P04-P は中川に等しいと想定 )。このように、りん負荷を用いると、処理場間でりん除去の難易度が対比可能となる。

表 2 高度処理汚泥と標準法汚泥混合によるリン除去効果

センタ ー名	混合比		PHA生成量 / 2.5			嫌気後平均 りん濃度	必要りん 吸収 (P2)	りん 負荷
	高度	標準	高度 + 標準	=P3				
中 川	1	0	4.9	0.0	4.9	6.0	5.4	0.73
	0.1	0.9	0.5	0.0	0.5	2.0	1.3	2.05
小 菅	1	0	16.3	0.0	16.3	18.0	17.5	0.70
	0.25	0.75	4.1	1.4	5.5	7.5	7.0	0.85

たとえば、中川の  $A_2O$  法 : 標準法 = 1:9 の混合処理は小菅の  $A_2O$  法 : 標準法 = 1:3 の混合処理より高いりん負荷の可能性があることなどが推測できる。データ不足だが、りん負荷約 1 以下で  $\text{Spo4-out}$  が 0 になると見込まれる。

#### 3.3 汚泥混合処理のりん除去効果と水温の関係

中川水再生センターの  $A_2O$  法汚泥と標準法汚泥を混合してりん除去効果を調査した。標準法汚泥のみの処理水りん酸性りんから  $A_2O$  法 : 標準法 = 1:9 の混合処理水のりん酸性りんを引くと春期は 0.3mg/l (n=19)、冬期は 0.2mg/l (n=9) であり、水温が高いと混合処理のりん除去効果も高い傾向がある。水温が高いと、醗酵が進みやすく、反応タンク流入水  $S_a$  が高いのが主因と思われる。

#### 3.4 $A_2O$ 法汚泥の好気処理の結果( $A_2O$ 法汚泥混合処理、 $A_2O$ 法汚泥混合処理の比較 )

中川水再生センターの  $A_2O$  法 ( 又は  $A_2O$  法汚泥 ) と標準法汚泥を混合して、回分連続好気処理した結果を図 4 に示す。図 4 から、 $A_2O$  法汚泥のみで処理した場合、嫌気工程がなくても、8 回分以上りん除去ができることがわかる。これは、 $A_2O$  法汚泥の備蓄

P H Aが多く、その結果、好気条件でP H Aを原料とするりん増殖反応が長期間持続されるためと思われる。さらに、反応タンク流入水に返送汚泥を加え好気処理を開始した直後は、反応タンク流入水  $S_a$  を利用する各種反応が競合すると予想され、その競合下でP H Aも若干補給されると想像される。 $A_2O$ 法汚泥と標準法汚泥を混合処理したケースでは、りん除去効果の大きさは $A_2O$ 汚泥混合比により決まる。また、図4 から $AO$ 法汚泥もりん除去効果が高いことがわかる。

### 3.5 りん放出現象の原因

図4 で一時的に、処理水りん酸性りんが高くなるりん放出現象がみられる。 $A_2O$ 汚泥のポリりん酸がりん酸性りんとして溶出すれば、この現象をりん収支上説明できる。ポリりん酸濃度を $X_{pp}$ とすると、別の実験で、嫌気での汚泥からのりん溶出パターンから、 $X_{pp}/X_{pao}$ がかなり低いことが推察された。また、設定上の $X_{pp}/X_{pao}$ 上限は0.34と高いので、りん蓄積菌のりん過食によるバーストがりん放出現象の原因とは考えにくい、さらに、ポリりん酸がりん酸性りに多量に加水分解される際のエネルギーの利用先など不明点が多い。

## 4. まとめ

A S Mのパラメータから、冬期の標準法反応タンク出口りん濃度をある程度予測できた。この考え方をさらに発展させたりん負荷を用いると、高度処理汚泥と標準法汚泥の混合処理では、汚泥混合比よりかなり低いりん負荷となり、混合処理が非常に有効であることがわかった。

りん負荷の計算により、りん除去の難易度を処理場間で対比可能である。

テーブルテストの結果、P H Aを生成する条件が良ければ、 $A_2O$ 法、 $AO$ 法ともに標準法汚泥との混合処理においてりん除去効果があった。また、高度処理汚泥の混合比又は、水温が高いほどりん除去効果が大きかった。

テーブルテストの図4 で見られたりん放出現象の原因は、りん蓄積菌のりん過食によるバーストとは、考えにくかった。

## 5 おわりに

全系列を高度処理法としなくても、標準法との混在とすることにより、全系列高度処理と同じりん除去が可能な場合があり、建設コストの削減に有効である。高度処理法と標準法の最適混合比はりん負荷により求められ、データ不足だが、りん負荷1程度（嫌気槽末端  $P04-P / \text{流入 } P04-P > 3$ ）になる混合比が最適と推測される。

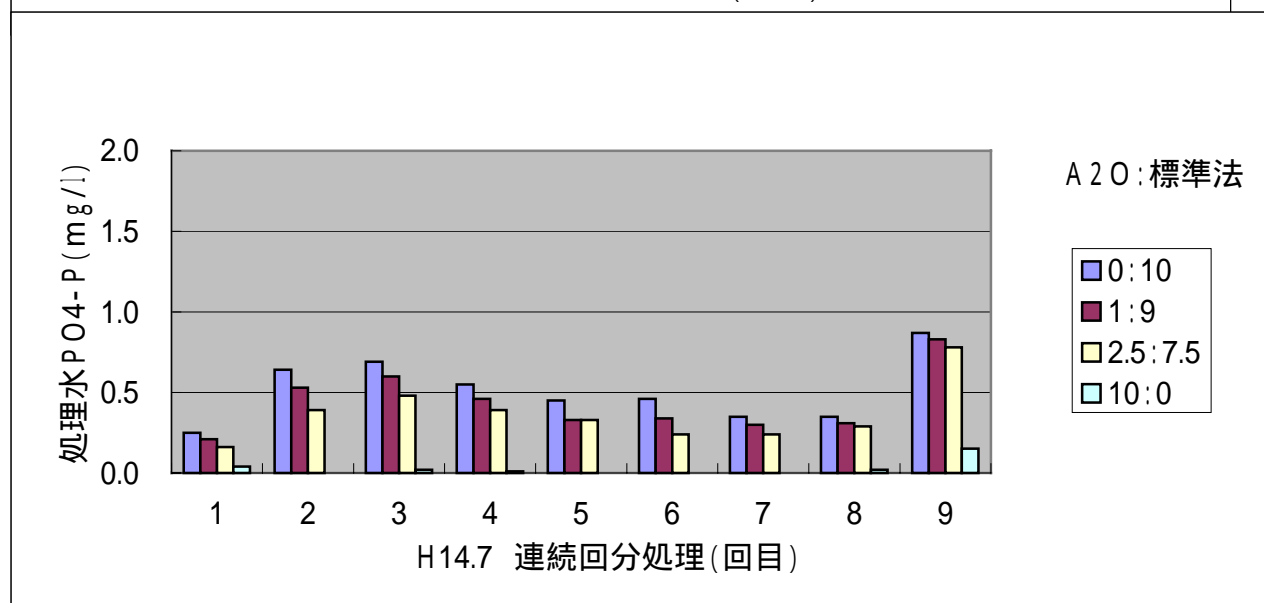
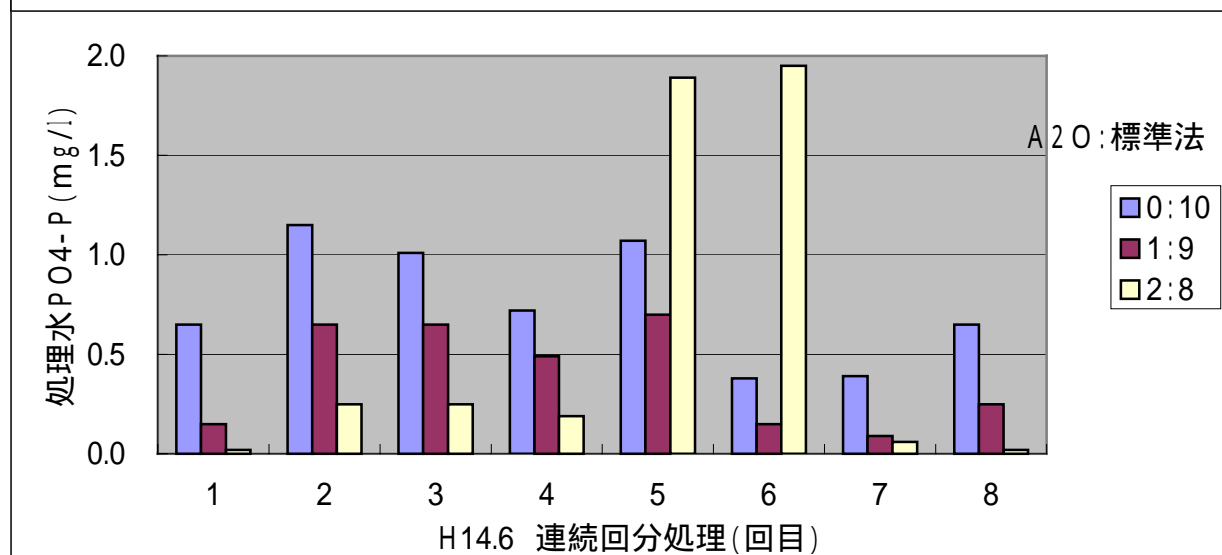
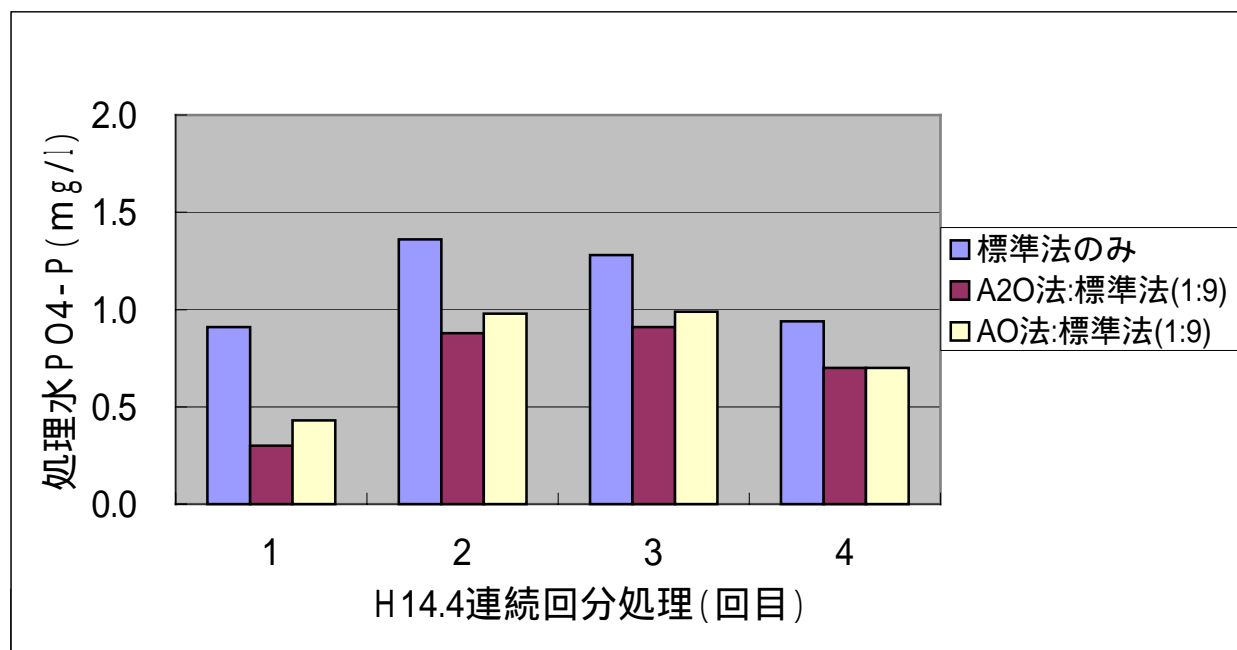


図4 振とう曝気を用いた連続回分好気処理実験



## 3 - 2

## 溶解性りん再溶出に関する調査

東部第一管理事務所 砂町水再生センター

河野里名 鷲巣 清 神谷宇一郎 杉俣哲太郎

石井英俊(現みやぎ水再生センター)

藤田朋洋(現有明水再生センター)

### 1. 概要

砂町水再生センター東陽系水処理施設では、反応タンクで活性汚泥中に取り込まれた溶解性リン(以下、 $\text{PO}_4\text{-P}$ )が第二沈殿池において再溶出することが確認されている。再溶出は系列や運転条件により大きく変動し、当センターにおける水処理上の課題となっている。

このような現象が起きると反応槽試験の結果からはりんの処理性を把握できなくなる。

このことから、リン処理を効率的に行うためには第二沈殿池での再溶出のメカニズムを把握し、抑制できる条件を検討していくことが必要である。

今回、どのような条件下で  $\text{PO}_4\text{-P}$  の再溶出が生じるかについてテーブル実験による基礎調査を行ったところ、混合液中に硝酸性窒素(以下、 $\text{NO}_3\text{-N}$ )が検出されないときに再溶出が起こることが明確となった。

テーブル実験の結果をもとに行った実施設でのフィールド調査では、年間を通してみると第二沈殿池での再溶出量が多くなるのは、硝化が進まなくなる冬場であることが確認された。また、第二沈殿池下段流入渠を用いると再溶出を抑制できることが分かった。

これらの調査結果について報告する。

### 2. テーブルテストによる調査

#### 2.1 調査方法

反応タンク出口の混合液を採水し、図-1に示す実験装置のフラスコに加えた。フラスコ内は嫌気状態を常に保つように攪拌を行った。一定時間ごとにORP値の読み取り、試料採取用の注射筒で装置内の混合液を約10mL採取した。採取した分の混合液はビーカーから補充されるようにし、フラスコ内の嫌気状態を保った。採取後すぐに0.80 $\mu\text{m}$ のフィルターでろ過を行い、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の分析を行った。



図-1 実験装置

#### 2.2 検討内容

テーブルテストでは  $\text{PO}_4\text{-P}$  再溶出について以下のことを調べた。

混合液中の  $\text{NO}_3\text{-N}$  と再溶出の関係

再溶出が限界まで達したときに汚泥中に含まれるリンの割合

再溶出が起きるときの ORP 値の変化

混合液の MLSS 濃度と再溶出速度

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 $\text{PO}_4\text{-P}$ 再溶出と $\text{NO}_3\text{-N}$ の関係

反応タンク出口混合液を図-1の装置に入れ  $\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の変化を調べた。結果を図-2に示す。

実験開始時  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は  $6.0\text{mg/L}$  あったが、しだいに減少して4時間後に  $0.0\text{mg/L}$  となり、その後も検出されなかった。

$\text{PO}_4\text{-P}$  濃度には、実験開始直後は変化が見られなかったが、4時間後から急激に溶出が始まり濃度が上昇した。

溶出が始まった時間は  $\text{NO}_3\text{-N}$  が検出されなくなった時間と同じ実験開始4時間後であったことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の存在下では、 $\text{PO}_4\text{-P}$  は再溶出しないことが明らかになった。

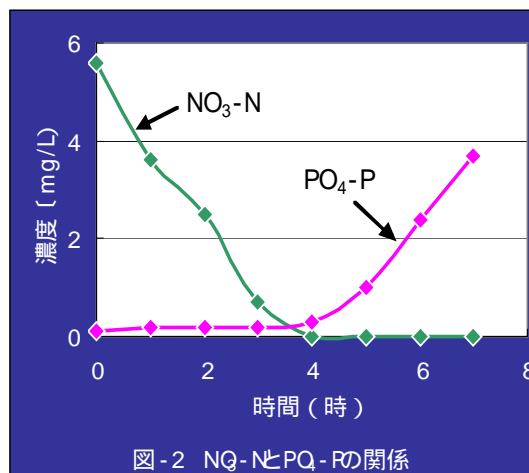


図-2  $\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の関係

### 2.3.2 $\text{PO}_4\text{-P}$ の再溶出量の限界

反応タンク出口の混合液を嫌気状態に長時間放置し、 $\text{PO}_4\text{-P}$  再溶出の限界量を調べた。結果を図-3に示す。

この時の試料は実験開始時から  $\text{NO}_3\text{-N}$  は検出されなかったため、すぐに  $\text{PO}_4\text{-P}$  の溶出が始まり、溶出量は直線的に増加した。

しかし9時間後  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度  $25.0\text{mg/L}$  で溶出は止まり、24時間後もほぼ同じ濃度であった。

この試料はSS中に  $50.3\text{mg/L}$  (MLSS中の含有率3.8%)のりんを保持していたことから、そのうち半分のりん(1.9%)が  $\text{PO}_4\text{-P}$  として溶出し、残りは污泥中に留まり溶出しなかったことになる。

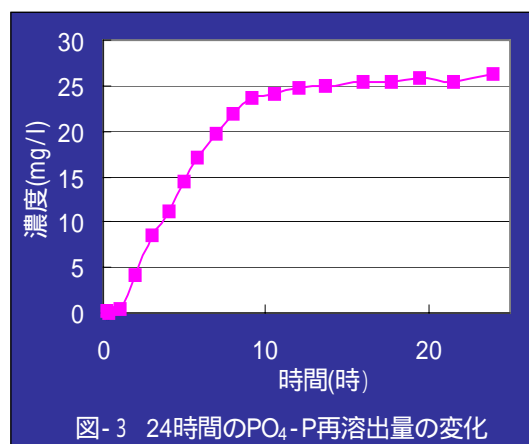


図-3 24時間の $\text{PO}_4\text{-P}$ 再溶出量の変化

同様の実験を2002年11月～2003年3月までの間に系統や槽を変えて行い、24時間後のSS中のりん含有率を求めた。結果を表-1に示す。実験開始時の含有率は2.0～4.0%とばらつきがあるが、24時間後の含有率は1.8～2.1%とほぼ一定の割合であった。

このことから、実験開始時のりん含有量や系統に関わらずMLSSに対して1.9%のりんはSS中に留まり、溶出しないことが分かった。

表-1 24時間後のMLSS中に含まれるりんの割合

系統	東陽系				砂系		平均
槽	8-1	8-2	6-2	4-1	1	1	
実験開始時の りんの含有率(%)	3.9	3.8	4.0	3.0	3.2	2.0	-
24時間後の りんの含有率(%)	2.0	1.9	2.1	1.8	1.8	1.9	1.9

### 2.3.3 ORP 値の変化

PO<sub>4</sub>-P 再溶出と ORP 値の関係について調べた。図-4 に時間ごとの PO<sub>4</sub>-P 溶出量の変化を図-5 に ORP 値の変化を示す。

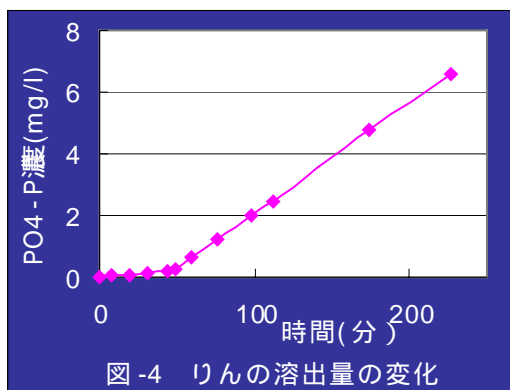


図-4 リンの溶出量の変化

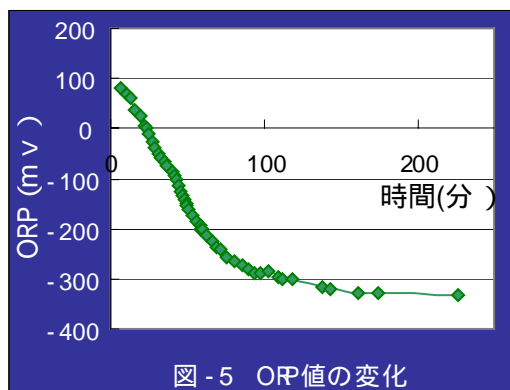


図-5 ORP 値の変化

PO<sub>4</sub>-P の再溶出は実験開始約 50 分後から始まり、200 分後も溶出量は直線的に増加した。

ORP 値は実験開始直後から減少し 25 分で 0 mV 以下になり、100 分を過ぎ -280mV を下回った時点でほぼ一定となった。図 4 のグラフを用いて PO<sub>4</sub>-P の溶出が始まった時間とこの時の ORP 値を求めたところ、溶出開始時間は 47.4 分、ORP 値は -134 mV であった。

同様の実験を 2 回行ったところ溶出開始 ORP 値は -149 mV と -158 mV となり、3 点の平均は -147mV であることから、PO<sub>4</sub>-P の再溶出は ORP 値が -150 mV 付近で始まると考えられる。

また、ORP 値が一定となった 150 分以降も PO<sub>4</sub>-P 溶出速度に変化は見られなかったことから、ORP 値が -150 mV 以下の時 PO<sub>4</sub>-P 溶出速度は一定であると推定する。

### 2.3.4 PO<sub>4</sub>-P 再溶出と MLSS の関係

MLSS 濃度が PO<sub>4</sub>-P の再溶出挙動に与える影響を調べた。

反応タンク混合液をビーカーに 3 本採取し、そのうち 1 本を上澄みと汚泥に分け、残り 2 本に加えた。この時、汚泥を加えたものを A、上澄みを加えたものを B としたところ、MLSS 濃度は A が 1940mg/L、B は 886mg/L となった。この試料を嫌気状態にした時の PO<sub>4</sub>-P の再溶出速度は A が 1.84mg/時、B は 0.79mg/時であった。

この結果から 1 g の汚泥が 1 時間で溶出する PO<sub>4</sub>-P の量を求めると、A は 0.95mg/g・時、B は 0.90mg/g・時となり 1 時間で溶出する量はほぼ同じであった。

このことから、再溶出に影響を与える他の条件（水温や硝化の程度など）が同一の場合 PO<sub>4</sub>-P の再溶出量は MLSS 濃度に比例することが確認された。

## 2.4 テーブルテストのまとめ

混合液中に NO<sub>3</sub>-N が存在するとき PO<sub>4</sub>-P の再溶出は起こらないことが明確になった。

MLSS 中のリンの内、一定割合のりん(含有量 1.9%)は嫌気条件下においても溶出せず、汚泥中に留まることが分かった。

PO<sub>4</sub>-P 再溶出が始まる ORP は -150mV であった。

PO<sub>4</sub>-P の再溶出量は溶出に関する他の条件が同じとき MLSS 濃度に比例することが確認された。

### 3．東陽系第二沈殿池における再溶出の状況

#### 3.1 東陽系第二沈殿池概要

東陽系第二沈殿池は二階層になっており、容量はどちらも同じである。ピットは上段・下段に共通して1つである。流入渠は上段流入渠と下段流入渠があり、上段はピット上部から、下段はピット上を管で通過し第二沈殿池へ流入する。

現在流入渠は上段を開度 100%で使用しており、下段は水量が増加した際に汚泥の巻上げや泥の流出が懸念されるため使用を控えている。

#### 3.2 年間を通した再溶出の状況について

東陽系第二沈殿池での再溶出の調査結果を図-6に示す。これは東陽系6号槽2002年11月～2003年10月までの再溶出量（第二沈殿池末端の上段・下段の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の平均から反応タンク出口の濃度を差し引いたもの）と反応タンク出口の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係を求めたものである。

他の月に比べて1月、2月は高い再溶出が起こっていた。特に2月の再溶出量は $3.0\text{mg/L}$ を超えた。1月、2月とも反応タンク出口で $\text{NO}_3\text{-N}$ は検出されなかったことは先の「 $\text{NO}_3\text{-N}$ が存在しないときには $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が起こる」という結果と一致する。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が検出された3月以降再溶出量は急激に減少し $1.0\text{mg/L}$ を下回るようになった。

東陽二系反応タンク出口の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と第二沈殿池の再溶出量の関係を図-7に示す。これより、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が $0.0\text{mg/L}$ ( $n=16$ )の時は平均で $1.9\text{mg/L}$ 、最大で $3.1\text{mg/L}$ の $\text{PO}_4\text{-P}$ 再溶出が確認された。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が $0.5\sim 1.0\text{mg/L}$ ( $n=9$ )の再溶出量は平均で $0.8\text{mg/L}$ 、最大で $1.2\text{mg/L}$ であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 $0\text{mg/L}$ の時と比べると再溶出量が大幅に少なくなっていた。

このことから、反応タンク出口の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は $1.0\text{mg/L}$ 程度でも $\text{PO}_4\text{-P}$ 再溶出を抑える効果があることが分かった。

また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が $8.0\text{mg/L}$ 以上の時も第二沈殿池で $0.7\text{mg/L}$ ( $n=28$  平均値)の $\text{PO}_4\text{-P}$ が再溶出していることが確認された。

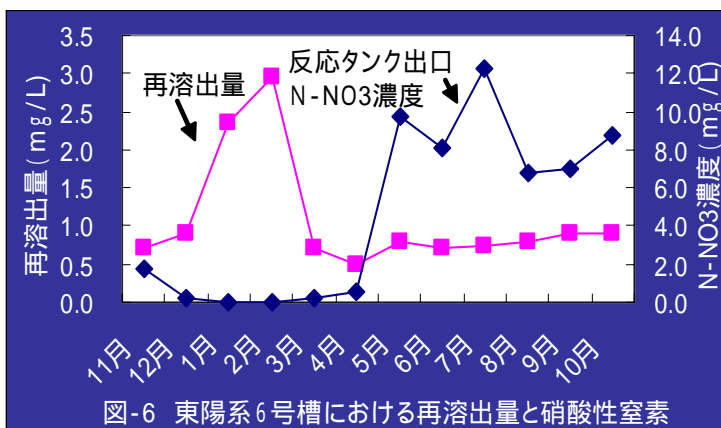


図-6 東陽系6号槽における再溶出量と硝酸性窒素

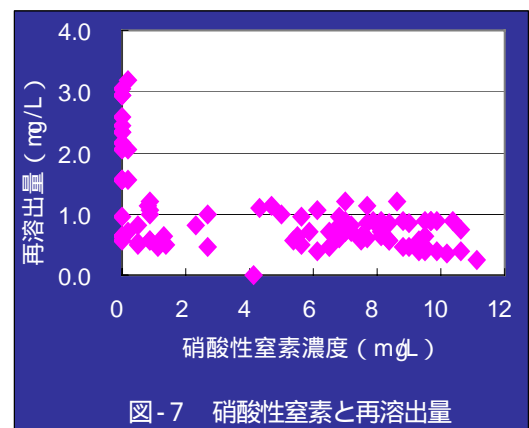


図-7 硝酸性窒素と再溶出量

反応タンク出口及び第二沈殿池上段と下段の $\text{PO}_4\text{-P}$ 分析結果を図-8に示す。

上段の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は再溶出量が多い1月、2月においても $1.0\text{mg/L}$ であり、他の月と大きな差は見られない。しかし下段の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は極端に高くなっており、2月は $4.8\text{mg/L}$ であった。

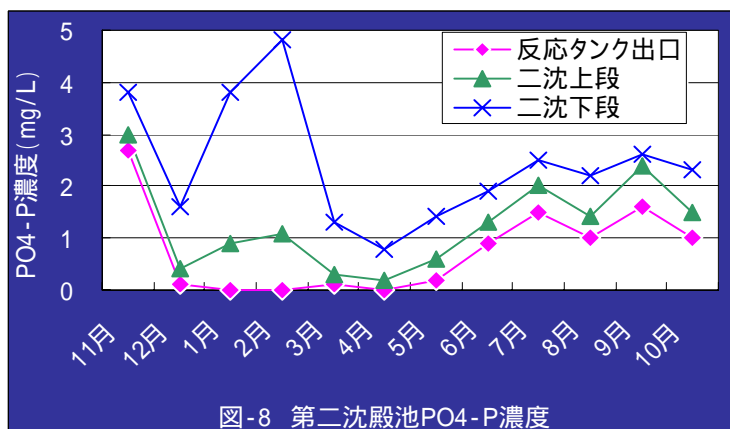


図-8 第二沈殿池PO<sub>4</sub>-P濃度

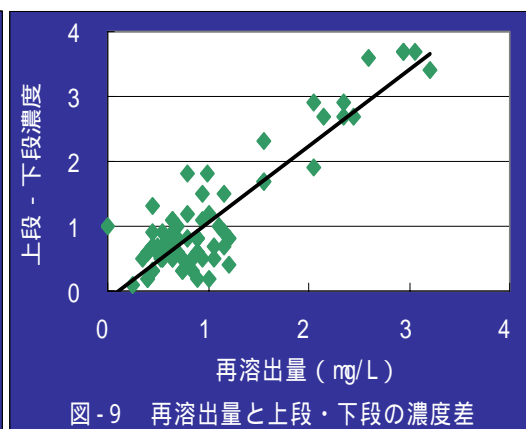


図-9 再溶出量と上段・下段の濃度差

この上段・下段の差と再溶出量の関係を図-9に示す。これより上段と下段の濃度に差があるときには再溶出量が多くなる傾向があり、再溶出量が多い時はほとんどが下段からの溶出であることが確認できた。

以上のことから、当センターのリン除去は第二沈殿池下段における PO<sub>4</sub>-P 再溶出のメカニズムを把握し、コントロールすることが大切であることが分かってきた。

そこで現在使用していない第二沈殿池下段流入渠を用いて再溶出を抑制する効果が得られるか否かを検証した。

### 3.3 再溶出がおこる仕組み

二階層となっている東陽系第二沈殿池の再溶出は下段で起こっていることが多い。その原因の1つに上段で掻き寄せられた汚泥が下段流入水と接触することが考えられる。そのときの状況を表したものを図-10に示す。

現在のように、上段の流入渠のみ使用した場合、上段かき寄せ汚泥と流入水の接触が多いため、第二沈殿池の PO<sub>4</sub>-P 濃度が高くなると考えられる。

上段・下段の流入渠を併用すると、上段流入渠から二沈下段へ流入する水が減少する。

ピット上を通過し下段へと流入する水が少なくなること、かき寄せ汚泥との接触量がへり、結果として再溶出量は抑制されると考えられる。

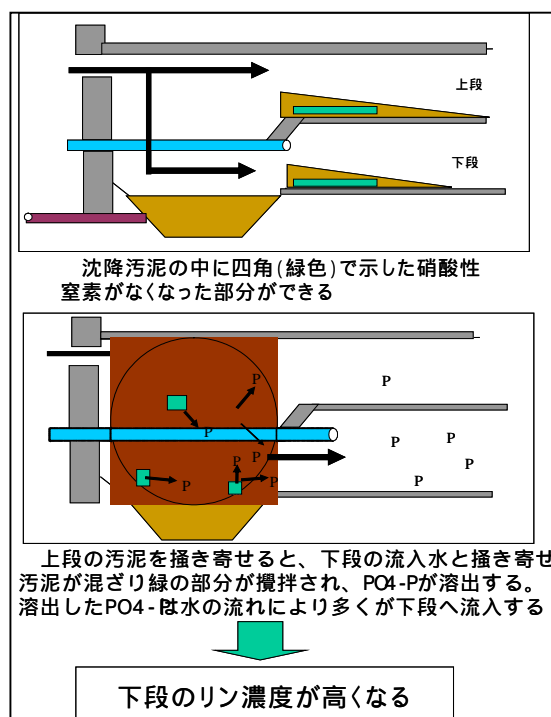


図-10 溶出が起こる状況

## 4 第二沈殿池下段流入渠使用に関する調査

### 4.1 条件

本調査の条件は以下のとおりである。

調査期間：2004年1月15日～2月12日(下段使用は1月27日～2月12日)

調査実施槽：東陽系6号槽      上段流入時開度      上段：450/450      下段：0/450

上段・下段併用時開度      上段：200/450      下段：200/450

対照槽      ：東陽系5号槽      上段開度：450/450      下段開度：0/450



## 高級処理水量

調査期間中の東陽系高級処理水量を図-11に示す。2/2に降雨により $350000\text{m}^3/\text{日}$ を超えた他はおおむね $300000\text{m}^3/\text{日}$ 前後であった。また、5号槽に比べて6号槽の水量が多い傾向があり、晴天時6号は5号の1.1倍の水量が流入していた。

## 反応タンク条件

反応タンク出口のMLSS濃度の変化を図-12に示す。6号のMLSS濃度は常に5号よりも高く、污泥が蓄積しやすい状態にあった。

また、調査期間中の反応タンク出口のD0設定値は $2.5\text{mg/L}$ であった。

## 第二沈殿池

調査期間中の返送率は5・6号ともに32～35%であった。

調査期間中晴天の平日10時の平均滞留時間は3時間8分であった。

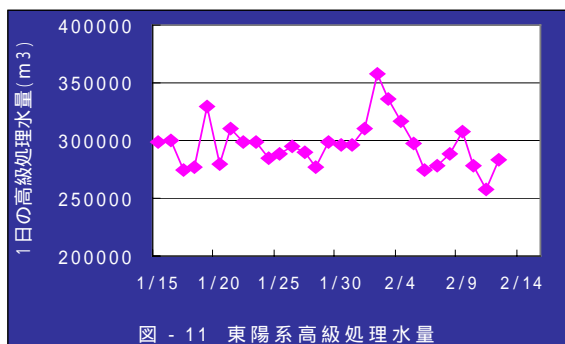


図-11 東陽系高級処理水量

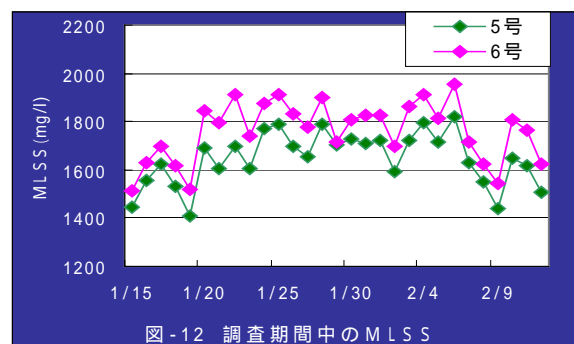


図-12 調査期間中のMLSS

## 4.2 結果と考察

### 4.2.1 下段流入渠使用による再溶出量の変化

上段のみの使用時と上段・下段併用した時の再溶出量の違いを調べた。比較方法は、再溶出量をMLSSで割り、1gのMLSSから溶出する $\text{PO}_4\text{-P}$ 量の日変化とした。下段流入渠を使用した6号槽の結果を図-13、使用していない5号槽の結果を図-14に示す。

図-13の6号槽はグラフ中の破線から左側が上段からの流入、右側が上段・下段を併用したときの結果となっている。

上段の使用時は1gのMLSSから溶出する $\text{PO}_4\text{-P}$ は $1.8\text{mg/g}$  ( $n=5$  1月16日～27日平均値)であった。上・下段併用した時の再溶出量は $1.5\text{mg/g}$ を下回ることが多く、2月4日～12日の再溶出量は平均 $1.1\text{mg/L}$  ( $n=5$ )に減少した。

上段からの流入のみである5号槽は $1.3\text{mg/g}$ 程度の再溶出量で6号槽に比べると少なかった。

再溶出量の平均は6号槽での上段使用期間中は $1.2\text{mg/g}$ 、上段・下段併用期間は $1.1\text{mg/g}$ となり、5号槽では再溶出量に変化は見られなかった。

以上の結果から、第二沈殿池上段・下段流入渠の併用は再溶出量を抑える効果があることが確認された。

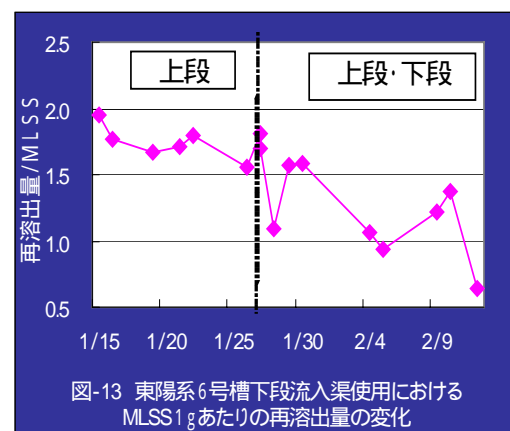


図-13 東陽系6号槽下段流入渠使用におけるMLSS1gあたりの再溶出量の変化

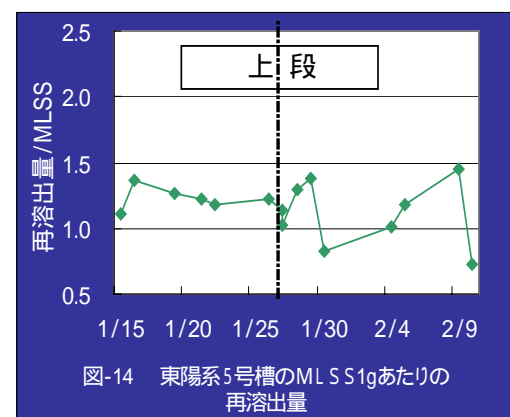


図-14 東陽系5号槽のMLSS1gあたりの再溶出量

#### 4.2.2 下段からの再溶出抑制効果について

再溶出量が多い時は上段の再溶出量濃度はあまり変わらないが、下段の溶出量は増加することを2.3.4で述べた。

このため、下段の再溶出を抑制できれば再溶出量は大幅に減少し、安定したリン処理を行うことができる。

そこで、上段・下段流入渠の併用により下段の再溶出量を抑えることが可能か否かを調べた。

計算方法は下段の  $PO_4\text{-P}$  濃度から上段の濃度を引いたものを MLSS で割って求めた。 $((\text{上段}-\text{下段})/\text{MLSS})$  6号槽の結果を図-15に5号槽を図-16に示す。

6号槽では併用開始5日目から変化が現れた。上・下差を MLSS で割った値は上段からの流入時は  $1.5\sim 2.3\text{mg/g}$  であったのに対し、上段・下段の併用時は  $2.0\text{mg/L}$  を超えることはなく、さらに併用開始1週間後からは  $1.5\text{mg/g}$  を超えなくなった。

5号槽では6号槽上段の流入期間は  $1.5\text{mg/g}$ 、上段・下段併用期間は  $1.4\text{mg/g}$  となり、下段を使用していない5号槽では差は見られなかった。なお、6号の下段流入渠の使用により、水量や水流が変われば当然6号の上段・下段の再溶出の割合も異なり、それでは正確なデータが取れたとは言えない。

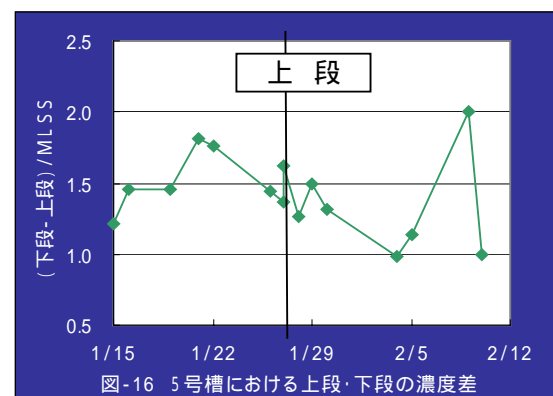
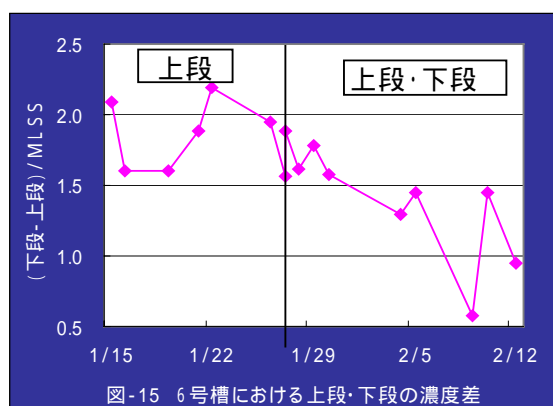
また、5号と6号はばっき槽を出た後に導水渠で一緒になる。そのため6号へ入る水の流れが変わると、5号の水の流れも変わり、再溶出量が変わる。しかしそれ以外にも再溶出した後上段・下段どちらかに進むかが違って来る。

このことより、6号上段と下段の濃度差の減少は下段流入渠を使用したためと考えられ、第二沈殿池下段流入渠の使用は、上段と下段の溶出量の差を減らす効果があることが分かった。

#### 4.2.3 ピット上部の $PO_4\text{-P}$ 濃度について

ピット上の水面を深さ方向に採水を行い、下段流入渠の使用によるピット上部の再溶出量の変化について調べた。第二沈殿池の採水箇所及び深さ関係を図-17に示す。深さはすべて施設床面からの距離を表している。

上段からの流入時の結果を表-2に、上段・下段併用時の結果を表-3に示す。





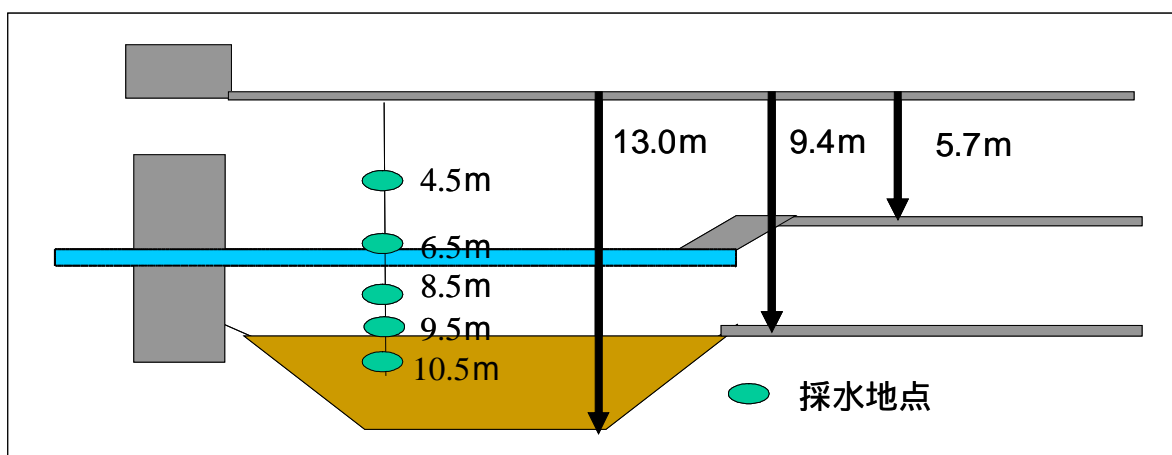


図 - 17 東陽系第二沈殿池の断面図と採水箇所

表 - 2 下段流入渠使用前の結果

	PO <sub>4</sub> -P	MLSS
反応タンク出口	0.0	-
4.5m	0.4	1240
6.5m	0.6	1220
8.5m	3.3	2140
9.5m	6.7	2950
10.5m	6.1	2900

表 - 3 下段流入渠使用時の結果

	PO <sub>4</sub> -P	MLSS
反応タンク出口	0.0	-
4.5m	0.3	1040
6.5m	1.0	1690
8.5m	2.0	2160
9.5m	6.6	3160
10.5m	6.2	3320

どちらも深さが増すごとに PO<sub>4</sub>-P 濃度、MLSS 濃度ともに高くなった。特に PO<sub>4</sub>-P 濃度はピット上部にあたる 9.5m で急激に上昇した。この地点の MLSS 1 g あたりの溶出量は上段流入時 2.1mg、上段・下段併用時は 2.3mg となり、溶出量に差はなかった。

調査時のそれぞれの第二沈殿池再溶出量は、上段流入時が上段 1.3mg/L・下段 5.4mg/L、上段・下段併用時は上段 1.0mg/L・下段 3.3mg/L となり、上段はあまり差が見られなかったが下段は流入渠併用時のほうが 2.1mg/L 低い濃度であった。

ピット上では 1 g あたりの溶出量に違いがないのに第二沈殿池 PO<sub>4</sub>-P 濃度に差がでる理由は、下段流入渠の使用により上段流入渠から下段へ流入する PO<sub>4</sub>-P 濃度の高い水が大幅に減少するためである。PO<sub>4</sub>-P 濃度の高いこの水は、下段流入渠から流出した濃度の低い水に希釈される。この結果、第二沈殿池出口の下段の PO<sub>4</sub>-P 濃度は上段からの流入の時よりも低くなっていると考えられる。

#### 4.3 フィールド調査のまとめ

反応タンク出口で NO<sub>3</sub>-N 濃度が 0.0mg/L の時には第二沈殿池で多量の溶解性リンが溶出していた。

第二沈殿池上段・下段流入渠を併用することで第二沈殿池からの PO<sub>4</sub>-P 再溶出を抑制する効果があることが確認された。

ピット上を深さごとに採水を行った結果では、PO<sub>4</sub>-P 濃度が増加する地点の MLSS 1 g あ

たりの P04-P 溶出量は変わらなかった。しかし下段流入渠を使用することにより  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度の高いピット上を通過する水が少なくなるため、第二沈殿池の再溶出量を抑えることができる。

#### 5．今後の課題

第二沈殿池下段流入渠の使用は増水時に汚泥巻き上がりや流出が起こりやすいという問題を抱えているため、今まで使用を控えてきた。

しかし、第二沈殿池での P04-P 再溶出を抑制するためには大きな効果を現し、安定したリン処理を行うためには欠かせないことが確認された。

そこで今後は、下段流入渠を使用するにあたっての最適な流入渠の開度や MLSS 濃度などの検討を行い、常に良好な水質が維持できる条件の把握に努める予定である。

### 3 - 3 晶析法を適用した汚泥集約処理施設からのりん除去

#### (最終報告)

東部第一管理事務所 砂町水再生センター

安田 勉 柴田 美幸

八木 義樹(現職員部人事課)

石井 英俊(現みやぎ水再生センター)

#### 1. はじめに

東京都では、平成11年度より、東京湾の富栄養化の防止を目的として、環境確保条例に基づく窒素・りんの上乗せ規制が導入されている。汚泥集約処理施設の一つである東部スラッジプラントからの汚泥処理返流水を受け入れる砂町水再生センターでは、現在、窒素 50 mg/L、りん 4.5 mg/Lの暫定規制値が適用されている。しかし、平成20年度からは本規制値の窒素 30 mg/L、りん 3.0 mg/Lへと移行されることとなっている。

当センターでは、汚泥処理返流水のりん負荷が水処理系に多大な負担をもたらしており、今後厳しくなる本規制値に対応するためには、新たなりん対策が必要となっている。

そこで、汚泥処理返流水対策として晶析脱りん法に着目し、平成13年6月から平成16年3月までの期間で、日立プラント建設(株)、前澤工業(株)、三菱マテリアル(株)と共にノウハウ+フィールド提供型共同研究を行った。晶析脱りん法は、数十年後に枯渇が危惧されているりんを、除去するだけでなく回収し、肥料として資源化できるという特長を持っている。本共同研究においては、返流水のなかでも特にりん負荷の高い脱水分離液への適用を試みた。

なお、平成13年度に行った小型パンチプラントを用いた調査については、すでに中間報告として報告を終えているため<sup>1)</sup>、本報告では主に平成14年度からの大型プラントを用いた調査からの内容を中心として調査結果をまとめた。

また、本共同研究の調査内容については、別途、「脱水分離液からのりん除去技術の開発」共同研究成果報告書において報告を行っている。<sup>2)</sup>

#### 2. 砂町水再生センターにおけるりん処理の課題

砂町水再生センターにおけるりん酸性りん(以下 $PO_4$ -Pと示す)の収支を図1に示す。三河島水再生センターから受け入れた汚泥や反応タンクから引き抜かれた汚泥中のりんは、汚泥処理過程の嫌気条件下で $PO_4$ -Pとして再溶出し、汚泥処理返流水に高濃度で含まれる。

この返流水は水処理系へ戻されるため、 $PO_4$ -P負荷が水処理系と汚泥処理系を循環し、一部が活性汚泥に蓄積される状況が生じている(りんの循環蓄積)。活性汚泥にりんを蓄積する余力が無くなると、その負荷が放流水へとかかってしまうため、りんの循環蓄積が放流水りん濃度を上昇させる要因となっている。

東京都では汚泥処理の集約化を進めており、将来的には上流部の落合水再生センターなどの汚泥も東部スラッジプラントにおいて処理する計画となっている。このため、汚泥処理返流水を受ける砂町水再生センターでは、より高負荷のりんを受け入れることとなり、水処理への負担はさらに高まると考えられる。

したがって、放流水りん濃度を平成20年度規制値に十分対応できるレベルまで低減する

ためには、返流水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷を削減し、りんの循環蓄積を解消する必要がある。

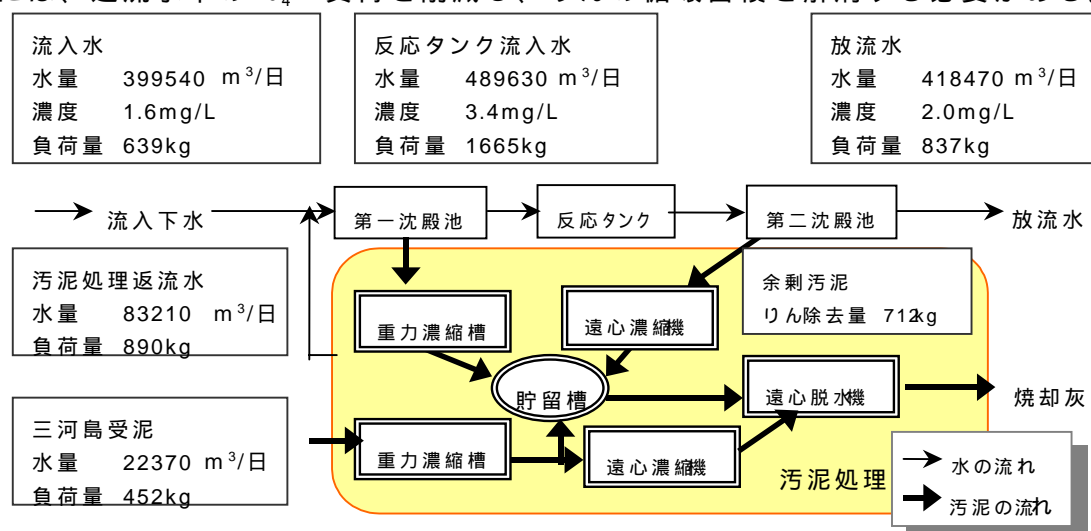


図1 砂町水再生センターの $\text{PO}_4\text{-P}$ 収支図（平成14年度）

### 3. 本共同研究の目標

#### 3.1 りん除去

平成20年度規制値の $3.0\text{mg/L}$ を遵守するためには、水質管理上の安全性を考慮して、放流水における $\text{PO}_4\text{-P}$ の管理目標値を $1.5\text{mg/L}$ 程度に低減する必要があると考えられる。

現在の汚泥処理処分計画では、当センターにおける受泥量は平成25年まで段階的に増加し、それ以降はほぼ一定量となっている。そこで、平成25年度の受泥計画量を基に、当センターにおける $\text{PO}_4\text{-P}$ 収支を試算した。その試算の結果から、汚泥処理返流水の中でも特にりん負荷の高い脱水分離液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ を80%除去することで、当センターの放流水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を $1.5\text{mg/L}$ 程度に低減させることが可能なことが推定された。よって、本共同研究では、晶析脱りん法により脱水分離液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ を80%除去することを目標とした。ただし、遠心脱水分離液の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が低い場合（ $50\text{mg/L}$ 以下）には、その80%を除去しなくともりん負荷は十分に軽減されるため、晶析処理水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を $10\text{mg/L}$ 程度で良いものとした。

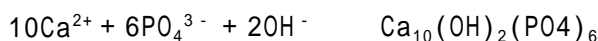
#### 3.2 回収したりんの肥料化

本法により回収したりんは、肥料として資源化することを目標とした。

### 4. 晶析脱りん法について

#### 4.1 晶析脱りん法の原理

晶析によるりん除去の原理は、りんを種結晶上にヒドロキシアパタイト（以下、HApと略す）として晶析させる反応に基づいている。基本的な化学反応式を次式に示す。



HApの溶解度について図2に示す。HApの溶解度積はCa濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度、OH濃度の積で表され、それぞれの濃度によって安定域、準安定域、不安定域に分かれる。不安定域ではHApの微細結晶が急速に析出するため、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の低下に伴い多量のSSが発生する。これに対し、準安定域（溶解度曲線と過溶解度曲線に挟まれる領域）では、種結晶の存在などがない限りHApは析出しないことが知られている。本技術は、種結晶を充填させた晶析反応槽内を準安定域に操作して、種結晶表面にHApを析出（晶析）させ、りんの除去・回収を行うものである。

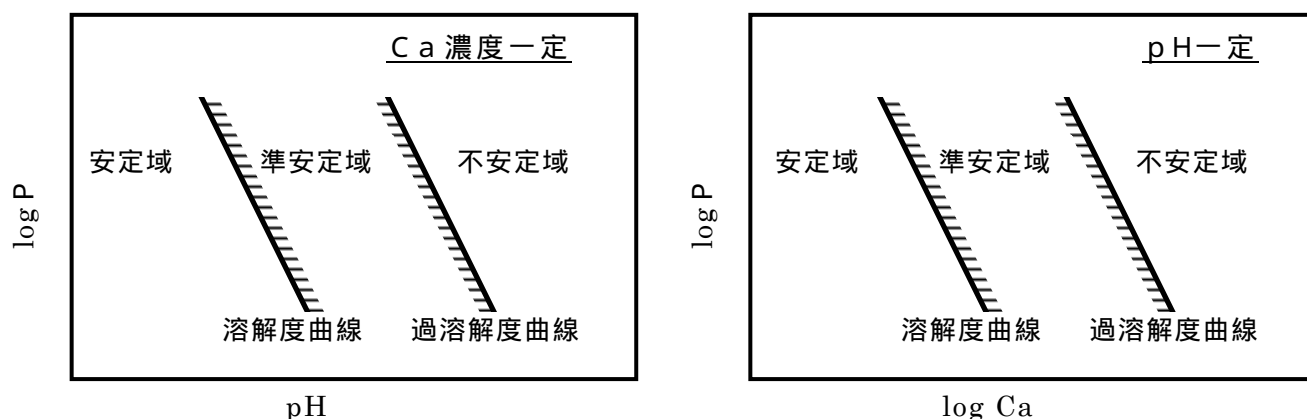


図2 ヒドロキシアパタイトの溶解度積

## 4.2 種結晶の特長

本法で使用した種結晶を図3に示す。本法では人工的に製造した珪酸カルシウム水和物を用いた。原料は珪酸質と石灰質である。これらの原料を調整配合して球状に造粒後、オートクレープ養生を行い製品化した。

この種結晶の特長を下記に示す。

- (1) 工業的に製品化されているため、りん鉱石に比較して品質が均一であり安定供給が可能である。
- (2) 比重、粒径の調整が容易であるため、各種反応槽形式に対応できる。
- (3) 高濃度有機物共存下でも、生物膜、スライムなどが種結晶表面に形成されることがない。このことは、調査に使用した種結晶の表面状態の分析結果からも実証された。
- (4) 種結晶自体が珪酸質肥料であり、種結晶表面に析出したHApは植物が利用可能な形態（く溶性）であることから、りんが析出した種結晶はりん酸質肥料として利用できる。

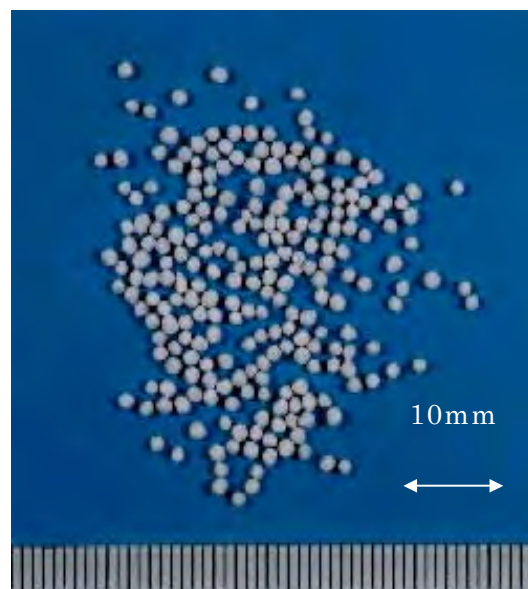


図3 種結晶の外観

## 4.3 従来法との比較

本法と、従来の晶析法との違いを表1に示す。主な相違点は、以下の通りである。

- (1) 本法で使用する種結晶は、人工的に製造する珪酸カルシウム水和物であり、りん鉱石に比べて品質が安定している。
- (2) 本法の晶析反応槽は流動床式であり、晶析反応槽pHも7.5～8.5と低いため、種結晶に炭酸カルシウムの析出や生物膜の付着は見られない。従って、従来法では不可欠であった脱炭酸処理やSSの除去は不要である。
- (3) 本法では、りん濃度が高い返流水からりんの除去・回収を行うので、処理水に適用した従来法に比べ、少ない対象水量から効率よくりんの除去・回収を行うことができる。

表1 本開発技術と従来法との違い

	本開発技術	従来の晶析脱りん法
種結晶	珪酸カルシウム水和物	りん鉱石
晶析反応槽構造	流動床	固定床
晶析反応槽pH	7.5 ~ 8.5	9.0 ~ 10.0
脱炭酸処理	不要	要
SS（有機物）処理	不要	要
対象処理水量	少ない	多い
対象PO <sub>4</sub> -P濃度	~ 150mg/L	2 ~ 5mg/L

#### 4.4 りん除去・回収性能の評価方法

本法により脱水分離液から除去されるりんは、種結晶表面にHApとして析出し回収されるものと、回収されずに凝集物（りん酸カルシウムの微細な析出物）として系外に排出されるものとに区分される。そこで、本法におけるりんの回収・除去の性能評価を行うにあたって、PO<sub>4</sub>-P除去濃度（率）とあわせて晶析濃度（率）、凝集濃度（率）を以下のように定義した。

PO<sub>4</sub>-P除去濃度（mg/L）：処理前後での排水中のPO<sub>4</sub>-P濃度減少量

晶析濃度（mg/L）：PO<sub>4</sub>-P除去濃度のうち種結晶表面に析出した濃度

凝集濃度（mg/L）：PO<sub>4</sub>-P除去濃度のうち微細な析出物として系外に排出された濃度

PO<sub>4</sub>-P除去率（％）：処理前のPO<sub>4</sub>-P濃度に対するPO<sub>4</sub>-P除去濃度の割合

晶析率（％）：処理前のPO<sub>4</sub>-P濃度に対する晶析濃度の割合

凝集率（％）：処理前のPO<sub>4</sub>-P濃度に対する凝集濃度の割合

#### 5. 脱水分離液の性状変化について

大型プラントにおける調査期間中の脱水分離液の水質を表2に示す。晶析反応の要因となるpHやPO<sub>4</sub>-P、及びCa<sup>2+</sup>について水質の変動が大きいことが確認された。

表2 脱水分離液の水質

分析項目	平均値	範囲
水温（ ）	24.3	14.9 ~ 33.2
pH	6.2	5.2 ~ 6.9
PO <sub>4</sub> -P（mg/L）	46.3	11.8 ~ 89.8
Ca <sup>2+</sup> イオン（mg/L）	80.2	29.8 ~ 175

## 6. 小型ベンチプラントによる最適晶析プロセスの検討結果の概要

( 中間報告での報告内容 )

### 6.1 調査概要

小型ベンチプラントによる調査では、晶析反応槽を一槽のみ用いる単段装置 ( 処理水量 10L/h ) と、二槽で行う二段装置 ( 処理水量 50 ~ 150L/h ) を用いて調査を行った。小型ベンチプラントのフロー図 ( 二段装置 ) を図4に示す。

### 6.2 調査内容

最適な晶析条件の把握のために、次の検討項目について取り組んだ。

- ( 1 ) 最適晶析プロセスの把握
- ( 2 ) 薬液の選定
- ( 3 ) 薬液注入方法の検討

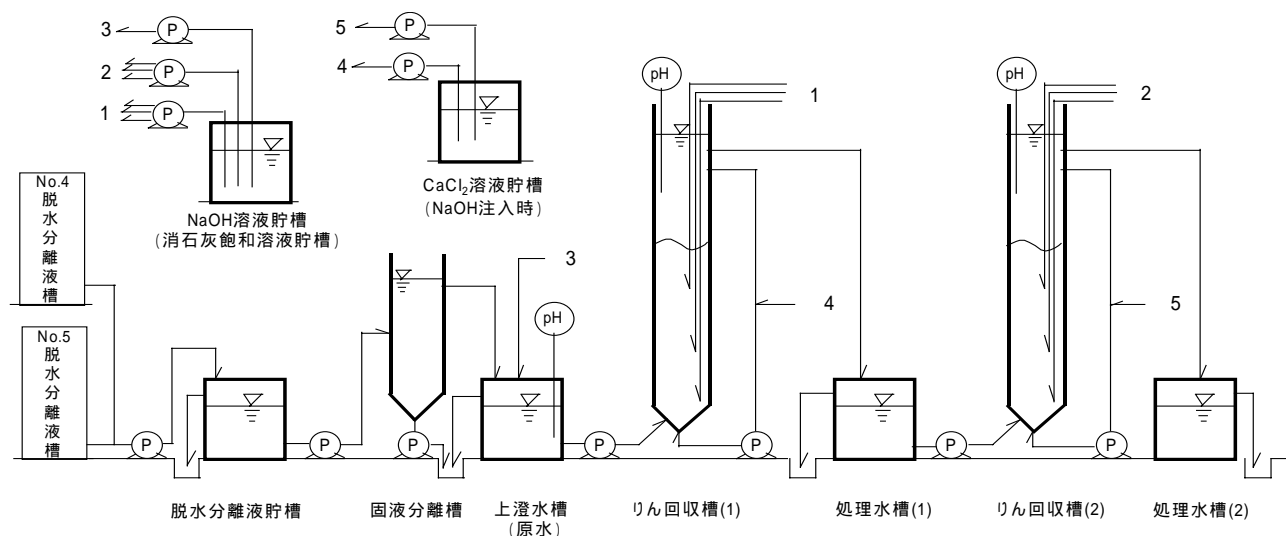


図 4 小型ベンチプラントフロー図

### 6.3 調査結果

単段装置を用いた調査では、脱水分離液の水質の変動に対応できず、脱水分離液からの  $\text{PO}_4\text{-P}$  除去率は 60%、晶析率 50% 程度となった。

二段装置を用いた調査では、 $\text{PO}_4\text{-P}$  除去率及び晶析率が概ね 80% を越える良好な結果が得られた。

調査結果より得られた知見は下記の通りである。

- ( 1 ) 最適晶析プロセスの把握

- 1 ) 晶析反応槽の前段で pH 前調整を行うことにより、反応槽内における晶析反応の安定化が図れる。
- 2 ) 二段晶析プロセスにすることにより、晶析処理水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  を安定して低濃度にすることができる。
- 3 ) 水質の変動のある脱水分離液に対する最適な晶析条件は、晶析反応槽の前段において pH 6.5 になるように前調整を行い、晶析反応槽内の pH を 7.5/8.5 ( 1 段目 / 2 段目 ) に設定し、それぞれの反応槽にカルシウムを添加することである。

- ( 2 ) 薬液の選定

苛性ソーダや塩化カルシウムよりも、薬品コストが安価な消石灰飽和溶液の適用が可能であった。



### (3) 薬液注入方法の検討

薬液注入点の分割により反応槽内の晶析効果が向上させられることが分かった。

## 7. 実用化に向けた大型プラントによる検討

小型プラントでの調査結果をもとに、大型プラント（処理水量 $576\text{m}^3/\text{日}$ ）を用いたスケールアップの検討や、連続運転によるりん除去性能の評価を行った。

### 7.1 調査概要

#### 7.1.1 調査期間

平成14年4月～平成16年3月

#### 7.1.2 大型プラントの装置概要

大型プラントの装置の外観を図5に、フロー図を図6に示す。また、種結晶の仕様を表3に、主要機器の仕様を表4に示した。東部スラッジプラント内の脱水分離液貯槽（1）より水中ポンプにて脱水機分離液を採取し、スクリーンにより夾雑物を除去した後、原水受水槽にてpH前調整を行う。その後、種結晶を充填した晶析反応槽へ流入させて、脱水分離液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ を晶析反応により除去する。晶析反応槽では、循環ポンプにより脱水分離液を循環させ、種結晶を流動させることで反応槽内のSS閉塞を防止する。また、晶析反応槽には、消石灰飽和溶液を注入し、pH調整を行うと共にCa源の供給を行う。



図5 装置外観

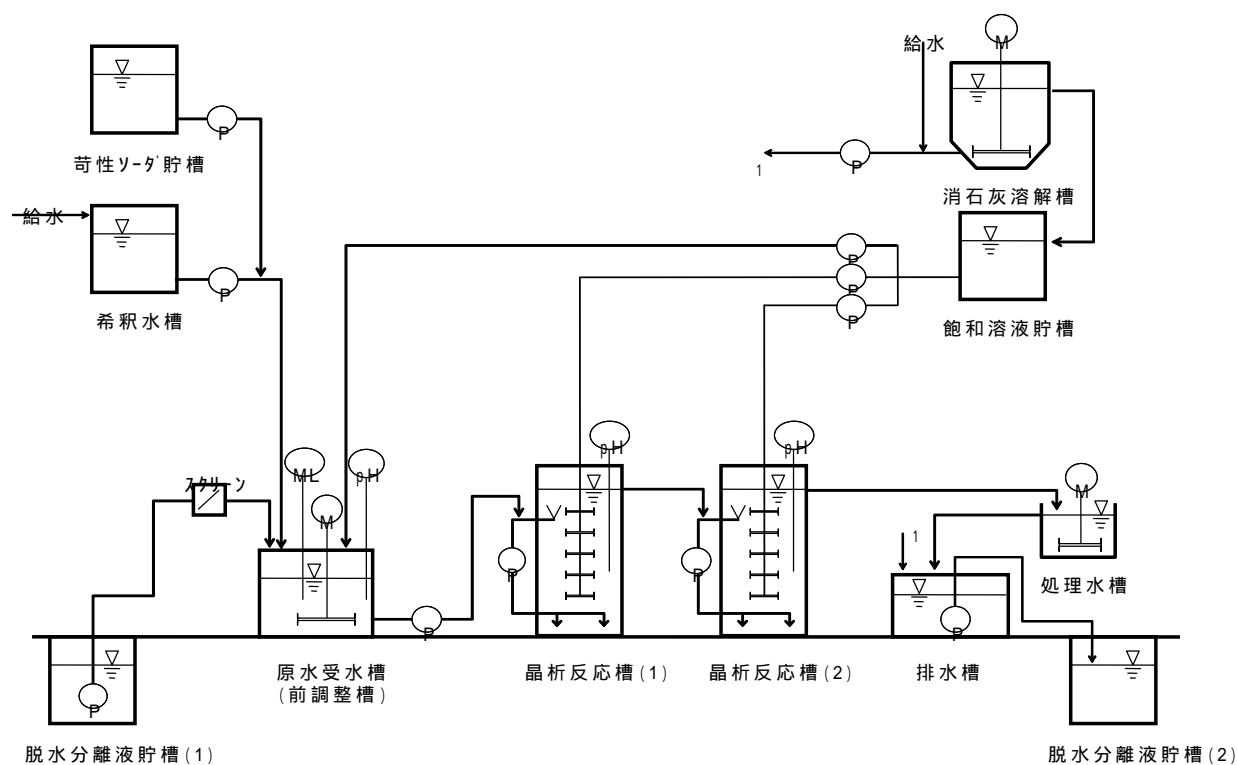


図6 大型プラントフロー図

表3 種結晶の仕様

項 目	仕 様
材質	珪酸カルシウム水和物
粒度範囲	1.0 ~ 1.7 ( mm )
表面の結晶状態	トバモライト

表4 主要機器の仕様

機 器 名	形 式	仕 様
原水送水ポンプ	水中汚水ポンプ	0.3m <sup>3</sup> /min × 20m
原水受水槽（前調整槽）	角形鋼製製	1.2m <sup>3</sup> （1.2m × 1.2m × 1.2mH, 攪拌機付）
流入ポンプ	片吸込渦巻式	0.4m <sup>3</sup> /min × 10m
晶析反応槽	角形鋼製製	2m × 2m × 8mH（充填種結晶 12m <sup>3</sup> ）
循環ポンプ	片吸込渦巻式	8.0m <sup>3</sup> /min × 6m
消石灰溶解槽	角形鋼製製	18m <sup>3</sup> （攪拌機付）
飽和溶液貯留槽	角形鋼製製	10m <sup>3</sup> （攪拌ポンプ付）
苛性ソーダ貯槽	塩ビ製	5000L（防液堤つき）
処理水槽	角形鋼製製	0.2m <sup>3</sup> （0.6m × 0.6m × 0.8mH, 攪拌機付）

## 7.2 調査内容

### 7.2.1 晶析反応槽構造のスケールアップの検討

#### （1）晶析反応槽構造の概要

晶析反応槽の構造を図7に示す。槽内水の一部を循環ポンプにより槽底部から噴出し、上向流で種結晶流動床を形成する。槽底部は1m角でホッパー状に区切られ、それぞれのホッパーに対して循環水を4点で下向きに噴出す。処理水は水面のオーバーフロー管から流出する。また、薬液の注入は、槽上部から挿入した薬液注入管により、高さ方向に1m間隔で多点注入する。

#### （2）検討内容と結果

晶析反応槽構造の検討内容と結果について表5に示す。

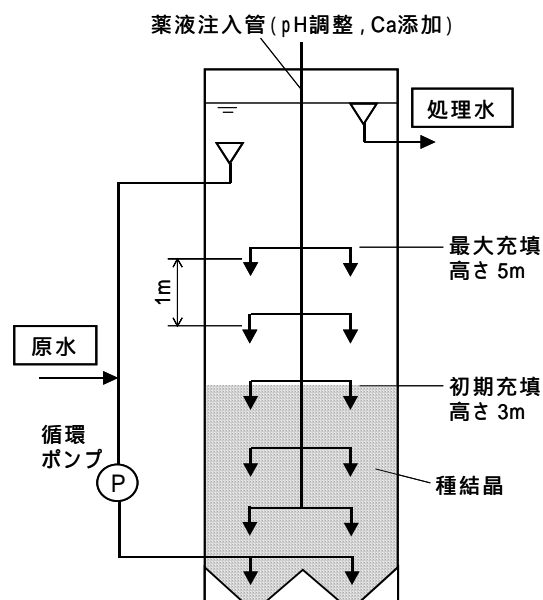
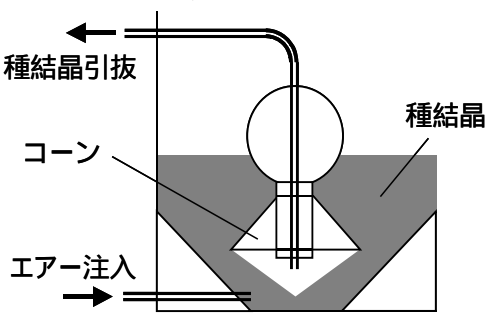


図7 晶析反応槽構造

表5 晶析反応槽構造の検討結果

検討内容	結果
循環ポンプ停止時の循環水噴出し口での種結晶逆流による閉塞	<p>図8のように、循環水噴出し口に「コーン」を設置することで、種結晶閉塞を軽減・防止した。</p>  <p>図8 コーンの設置</p> <p>種結晶が閉塞しても「種結晶引抜き」または「エア注入」手段を設けることで、閉塞を解消できることを確認した。</p> <p style="text-align: right;">[ 特許共同出願済み ]</p>
種結晶の割れ・磨耗の防止	<p>原因は、循環水が下向きに噴出す際に、種結晶が底部に叩き付けられた衝撃で割れるためであったため、循環水噴出し流速を低減することで、割れ・磨耗を防止できた。</p>

## 7.2.2 薬液に関する検討

薬液に関する検討結果について、表6に示す。晶析反応槽への消石灰添加方法及びpH前調整方法に関して、詳細を下記にまとめた。

### (1) 晶析反応槽への消石灰添加方法について

#### 1) 検討内容

小型プラントでの調査結果から、薬液注入点の分割により反応槽内の晶析率が向上することが確認されている。しかし、注入ノズルに対するメンテナンスを考慮すると、注入点数は少ない方が望ましいため、最適な注入点数及び注入位置について検討を行った。

#### 2) 検討結果

調査開始時の薬液注入管は高さ方向に1m間隔であったが、この間隔を0.5m間隔にせばめた。高さ7点、平面16点注入でもっとも良好な晶析性能が得られた。

### (2) pH前調整方法について

#### 1) 検討内容

調査当初はpH前調整には消石灰飽和溶液を使用していたが、脱水分離液のCa濃度の変動が激しいためCa濃度が100mg/L以上になると、pH前調整槽で凝集が起こるという問題が発生した。そのため、pH前調整方法の検討を行った。

#### 2) 検討結果

使用する薬液を苛性ソーダに変更した。濃度1%の苛性ソーダを多点注入し、pHを6.5に調整することでpH前調整槽での凝集を抑制できた。

表6 薬液に関する検討

検討項目	結果
晶析反応槽内の pH 均一性	晶析反応槽内で、設定 pH が $\pm 0.2$ 以内で均一に制御されていることを確認した。
注入ノズルにおける閉塞とその対策	ゴムを利用したノズルを開発し、種結晶の閉塞を防止した。 アルカリ液中でもゴムの弾性の変化は少なく、長期間閉塞防止機能が維持できる見通しを得た。 [ 特許共同出願済み ]
晶析反応槽への消石灰添加方法とその晶析効果	高さ方向 1m 間隔の薬液注入点を 0.5m 間隔とすることで晶析性能はさらに向上した。 高さ方向で均等に薬液注入するため、薬液注入量を ON-OFF 制御とした。
pH 前調整方法	苛性ソーダの希釈・多点注入により、pH 前調整槽での凝集を抑制した。

### 7.3 連続運転によるりん除去性能の評価

#### 7.3.1 連続運転条件

晶析反応槽構造および薬液注入方法の調査結果を基に決定した運転条件で、連続運転を実施し、りん除去性能の検証を行った。連続運転条件および調査期間を表7に示す。

なお、10月22日～11月16日の期間はりんを回収した種結晶の引き抜き試験を行ったため、評価の対象としなかった。

表7 連続運転条件

処理水量 ( $\text{m}^3$ / 日 )	576
接触時間 <sup>注a)</sup> ( h )	0.5
初期種結晶充填高さ	3 m
種結晶展開率 ( % )	約120
前調整槽 pH ( - )	6.5
pH前調整薬液	苛性ソーダ ( 11月5日までは消石灰飽和溶液を併用 )
晶析反応槽No.1 pH ( - )	7.5
晶析反応槽No.2 pH ( - )	8.5
晶析反応槽pH調整薬液	消石灰飽和溶液
晶析反応槽薬液注入点数	平面16点×高さ方向7点 ( 0.5m間隔 )
調査期間	03.7.28 ~ 03.10.21 03.11.17 ~ 04.3.4 ( 合計119日間 )

a ) 接触時間は初期充填した種結晶容量を処理水量で除した値とする

### 7.3.2 調査結果

#### (1) りん除去目標値の達成状況

脱水分離液の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が $50\text{mg/L}$ 以上の場合の晶析率、凝集率、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去率の経日変化を図9に示す。脱水分離液からの $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去率は常に目標値の80%以上を達成した。

また、脱水分離液の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が $50\text{mg/L}$ 未満の場合の脱水分離液と晶析反応槽No.2処理水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の経日変化を図10に示す。処理水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は常に目標値である $10\text{mg/L}$ 未満であった。

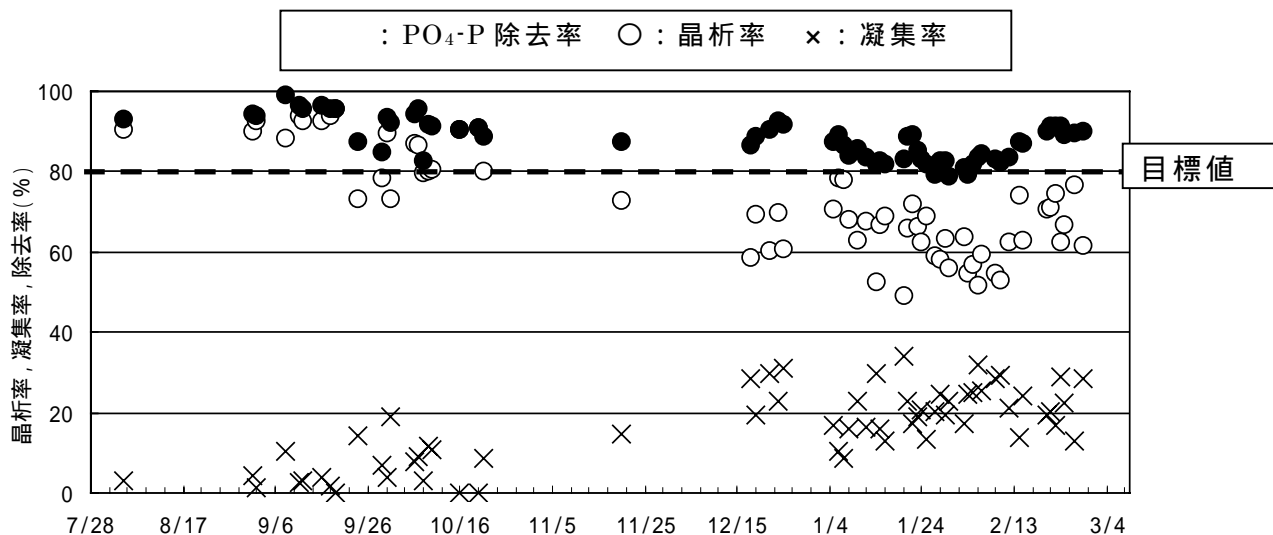


図9 本開発システムの晶析性能（脱水分離液  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度  $50\text{mg/L}$  以上）

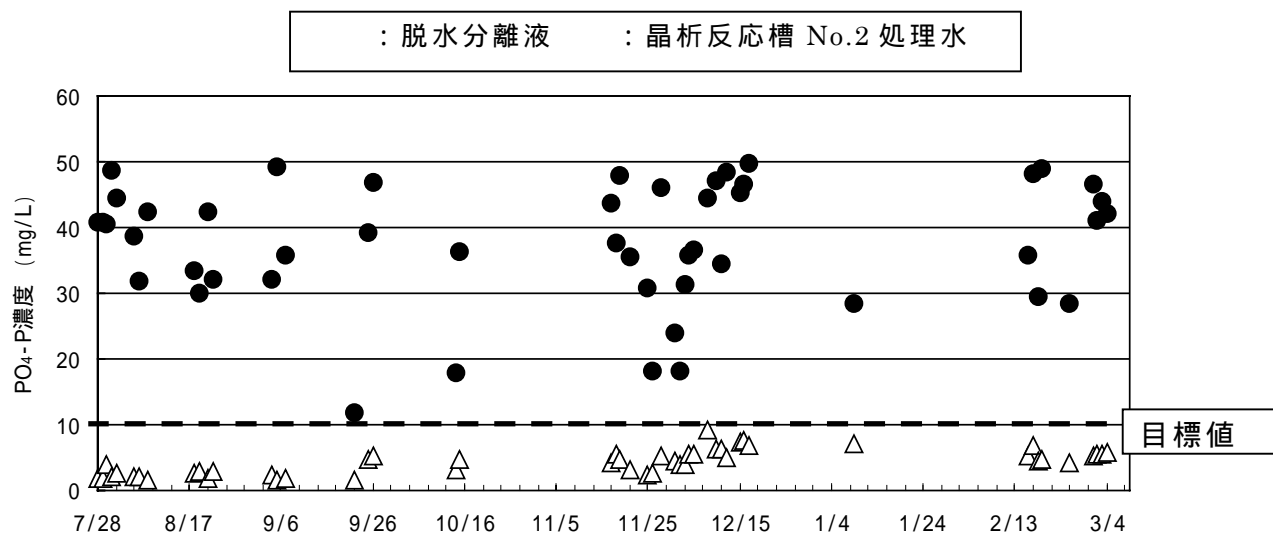


図10 本開発システムの晶析性能（脱水分離液  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度  $50\text{mg/L}$  未満）

## (2) 晶析率について

調査を開始した7月から12月の期間中、晶析率は80%程度で推移した。しかし、りん回収後の種結晶（以下、回収物と示す）の引き抜き試験を行った12月以降は、晶析率が60%程度に低下した。

そこで晶析率が低下した原因について調査を行い、下記に示す知見を得た。

### 1) 種結晶の総表面積と晶析効果の関係

初期充填種結晶の総表面積に対する運転時種結晶の総表面積の割合（以下、表面積初期比と示す）が小さくなるほど晶析率が低下した。良好な晶析率を維持するためには、表面積初期比を1以上に保つ必要がある。

### 2) 水温について

小型ベンチプラントでの補足調査により、晶析性能は水温に影響し、水温の低下に伴い晶析率も低下することが確認された。したがって、水温の低下する冬期に晶析率の低下を防ぐためには表面積初期比を上げる必要がある。

## 8. りんの回収と肥料としての利用について

回収物を晶析反応槽から引き抜き、肥料として再利用するための検討を行った。

### 8.1 回収物の引き抜きと種結晶の補充について

調査の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 回収物の引き抜き方法は、晶析反応槽底部からのジェットポンプによる水移送が適している。
- 2) 回収物に未成長の種結晶が混ざった場合でも、ドラムスクリーンを分級機として用いることで、効率良く成長した回収物だけを取り出すことができる。
- 3) 種結晶には石灰質が配合されているため、pHの過上昇を考慮して種結晶の補充量を制限する必要がある。種結晶補充率の上限は、晶析反応槽No.(1)（設定pH7.5）では1時間当りの流入水量の7~8%、晶析反応槽No.(2)（設定pH8.5）では1時間当りの流入水量の3.5~4%とすることが望ましい。
- 4) 引き抜いた回収物の引取りには、洗浄を行う必要がある。また、流通にあたっては回収物の乾燥工程まで行う必要がある。

### 8.2 回収物の肥料としての利用について

回収物の肥料としての適性を調査した結果、以下の知見を得た。

- 1) 本調査で使用した種結晶には生物膜、スライムおよび炭酸カルシウムの付着は認められなかった。このため、晶析反応に寄与する表面積が減少することなく、長期にわたって安定したりん回収性能を維持した。
- 2) 晶析反応槽で除去された $\text{PO}_4\text{-P}$ は、種結晶の表面にHApを主としたりん酸カルシウム化合物として回収された。
- 3) 種結晶が所定の粒径に成長した場合のりん含有率を試算し、粒径1.7mm以下の種結晶を用いる場合は、回収物の粒径を2.0mm以上とすることで、副産りん酸肥料のく溶性りん酸分の規格を常に満足する。
- 4) 回収したりんは、く溶性りん酸であり、有害成分の含有量は公定規格を十分に満たした。回収物は副産りん酸肥料として2004年3月10日に登録され、肥料としての流通が可能となった。

## 9. ケーススタディ

晶析脱りん法を当センターへ適用した場合と、他技術を採用した場合の試算結果を表8に示す。回収物は、乾燥を行うかどうかで引き取り価格に差が生じるため、回収物乾燥機を設置する場合としない場合の双方について試算した。

他技術としては、凝集剤添加法として、PACを用いた方法と塩化アルミニウム（LAC）を用いた方法について比較した。MAP法についても検討を行ったが、MAP法はアンモニアを添加する必要があるため、処理を行った後の脱水分離液のアンモニア濃度が上昇してしまうことが確認された。よって、窒素負荷の水処理系への悪影響が懸念されることから、比較対象より除外した。

試算の結果から、晶析脱りん法の建設費及び処理コストは、PACやLACを用いた凝集剤添加法に比べて高価となった。しかし、コスト面以外では、晶析脱りん法には、りんの回収が可能であるうえに、凝集剤添加法に比べて発生活泥量が少ないという優れた点がみられた。

**表8 晶析脱りん法と他技術との比較**

（試算条件：処理水量 6530m<sup>3</sup>/日、脱水分離液P04-P 77mg/L、P04-P除去率 88%）

	晶析脱りん法		凝集剤添加法	
	乾燥機を設置する場合	乾燥機を設置しない場合	PAC	LAC
建設費	3,500,000千円	3,390,000千円	334,000千円	334,000千円
運転費	892円/kg - p	1,030/kg - p	1,232/kg - p	759/kg - p
処理コスト （減価償却費）	1,421円/kg - p	1,535円/kg - p	1,292円/kg - p	819円/kg - p
発生活泥量 （脱水汚泥量）	0.34m <sup>3</sup> /日		10.4m <sup>3</sup> /日	8.1m <sup>3</sup> /日

減価償却費の算出

減価償却に達した時点での各設備の残存価格を0%、年利を1.9%。

土木設備と建築設備の減価償却期間を50年、機械設備と電気設備の減価償却期間を20年に設定。

閉鎖性水域である東京湾への放流水りん対策となるため、国土交通省より建設費の補助（50%）が得られるものとした。

## 10. まとめ

晶析法を適用した汚泥集約施設からのりん除去法について検討を行い、以下の知見が得られた。

- （1）本法は、脱水分離液からのりん除去の目標値を達成したことが確認された、よって当センターにおける汚泥処理返流水へのりん対策としての活用が可能である。
- （2）本法による回収物は、肥料としての適性が認められ、流通も可能となった。

本法は、汚泥処理返流水中のりんを除去して水処理のりん負荷を低減するだけでなく、枯渇の懸念されているりん資源を下水から回収し、肥料化することが可能な技術である。

また、処理後の汚泥発生量が少ないという利点もあるため、今後の下水道事業においての活用が期待される。



## 参考文献

- 1) 晶析法を適用した汚泥集約処理施設からのりん除去 平成14年度技術調査年報
- 2) 脱水分離液からのりん除去技術の開発 共同研究成果報告書 平成16年度  
東京都下水道局・日立プラント建設(株)・前澤工業(株)・三菱マテリアル(株)

### 3 - 4 高度処理における効率的な栄養塩除去の機構解明と 下水処理施設の評価手法に関する研究

計画調整部 技術開発課 海老澤 雅美

#### 1. 調査概要

本委託研究は、高度処理施設の運転管理の効率化、処理安定化及び下水処理システムの評価のため、以下の項目について研究を委託したものである。

- (1) 高度処理における窒素およびリンの除去に関し、活性汚泥微生物の群集構造解析等を通じて効率的な生物反応条件の提示。
- (2) リン除去において栄養源となる有機物の種類によるリン摂取反応の効果に関する研究。
- (3) 下水処理場の水処理におけるエネルギー消費、環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を指標にした下水道施設の多面的評価手法の検討と、その手法を活用した処理施設の最適運転についての解析。

研究委託先：東京大学大学院 都市工学研究科

研究期間：平成 14 年度～16 年度

#### 2. 調査内容

2.1 パイロットプラントの運転、あるいは実処理施設を対象とした調査を通じて、微生物レベルでの窒素およびリン除去の基礎研究

2.1.1 活性汚泥モデル No.3 へのリン除去予測モジュールの導入とそのキャリブレーション方法の確立

国際水協会 (International Water Association : IWA) が提唱している活性汚泥モデル (Activated Sludge Model) の ASM No.2d (以下「ASM2d」) には従属栄養細菌、硝化細菌、リン蓄積細菌に関する反応が組み込まれており、有機物、窒素、リン除去の予測が可能である。

一方、ASM2d を修正し、様々な現象を追加するための基本モデルである ASM No.3 (以下「ASM3」) にはリン蓄積細菌に関する反応が組み込まれていない。そこで、活性汚泥モデルの実務利用のためにリン除去モジュールを ASM3 に組み込み、一般の下水処理プロセスに適用できるようなキャリブレーションの方法を開発し、そのキャリブレーション方法を実処理場の処理プロセスに適用し、下水処理プロセスの平均的な挙動の再現性を評価した。

2.1.2 異なる電子受容体を用いた生物学的窒素・リン除去プロセスにおける処理特性および細菌群集に関する研究

生物学的窒素除去は、アンモニアを硝酸へ酸化する硝化反応と硝酸性窒素を窒素ガスに還元する脱窒反応から成り立っている。これらの反応には硝化細菌 (独立栄養細菌) と脱窒細菌 (従属栄養細菌) が関わっている。一方、生物学的リン除去は、従属栄養細菌であるポリリン酸蓄積細菌 (Phosphorus Accumulated Organisms : PAOs。以下「PAOs」) が担っている。脱窒細菌と PAOs が共に従属栄養細菌のため、流入下水中の限られた有機物を取り合う競合関係になっている。このため下水中の窒素、リンに比べて有機物濃度の低い日本の場合、有機物濃度が制限因子となって窒素、リン除去が十分に機能しない。

そこで、生物学的窒素、リン除去が抱える有機物不足という課題に対して、リン除去を担う PAOs が効率よく有機物を利用し、酸素以外に電子受容体 (酸素供給源) としての硝酸性窒素、亜硝酸性窒素を脱窒すると共に、リン除去を同時に行う PAOs に関する研究を行った。

## 2.2 りん除去プロセスにおいて、栄養源となる有機物の種類が、りん摂取反応に及ぼす影響についての研究と効率的な運転管理手法

### 2.2.1 都市下水および合成下水を処理する生物学的りん除去活性汚泥の PCR-DGGE 法と FISH 法を用いた微生物群集解析

SBR (Sequencing Batch Reactor = 回分式反応装置) を用いた嫌気好気の反応条件で、酢酸 (Acetic acid) が有機物源である人工下水を用いた Run-A、都市下水 (Sewage) を用いた Run-S、都市下水に都市下水由来の懸濁物質 (Particulate Organic Matter: POM) を更に加えた Run-SP の3つの系について、りん除去と活性汚泥中の微生物群の関係について PCR-DGGE 法と FISH 法によって解析し、りん除去プロセスにおいて栄養源となる有機物の種類が、活性汚泥の微生物群集構造に及ぼす影響について研究を行った。

- ・PCR-DGGE 法：遺伝子断片を短時間で増やし、その断片を電気泳動によって分離する方法
- ・FISH 法：蛍光物質を用いて特定の遺伝子だけを光らせる方法

### 2.3 下水処理システムにおけるエネルギー消費、下水処理による環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を基に下水道施設の評価手法の検討を行い、その手法を用いて算出した水処理トータルコストの総合的な検討

#### 2.3.1 実際の下水処理システムにおけるエネルギー消費、下水処理による環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を基にした下水処理施設の評価例

東京都下水道局の高度処理運転で得られた処理水質と電力消費量のデータを基に、その処理場に高度処理が導入された場合のコストと環境便益を算出し、高度処施設導入に対する総合的評価を行った。

## 3. 研究結果と考察

### 3.1 パイロットプラントの運転、あるいは実処理施設を対象とした調査を通じて、微生物レベルでの窒素およびりん除去の基礎研究

#### 3.1.1 活性汚泥モデル No. 3 へのりん除去予測モジュールの導入とそのキャリブレーション方法の確立

ASM3d にりん除去モジュールを導入したモデルのキャリブレーション方法の開発にあたり、まず一般の下水処理プロセスを想定した仮想の嫌気 無酸素 好気 SBR を対象に感度解析を行い、下水処理プロセスの挙動に大きな影響を及ぼすパラメータを抽出した。各水質項目に与える影響の大きいパラメータ上位3位を表1に示す。

表1 水質項目への影響の大きいパラメータ

順位	MLSS	$\text{NH}_4^+$ (処理水)	$\text{NO}_3^-$ (処理水)	$\text{PO}_4^{3-}$	
				(処理水)	(嫌気槽)
1	$Y_{\text{PAO}}$	$\mu_A$	$Y_{\text{STO}, \text{NOX}}$	$Y_{\text{STO}, \text{NOX}}$	$Y_{\text{STO}, \text{NOX}}$
2	$Y_{\text{H}, \text{O}_2}$	$K_{\text{A}, \text{NH}_4}$	$Y_{\text{H}, \text{O}_2}$	$Y_{\text{PAO}}$	$Y_{\text{P04}}$
3	$Y_{\text{STO}, \text{O}_2}$	$b_{\text{A}, \text{O}_2}$	$Y_{\text{H}, \text{NOX}}$	$q_{\text{pp}}$	$(S_{\text{A}} + S_{\text{F}}) / X_{\text{S}}$

#### ・MLSS

$Y_{\text{PAO}}$  : 基質 PHA に対する菌体収率 (生物量/PHA)

$Y_{\text{H}, \text{O}_2}$  : 好気条件下での従属栄養細菌の収率

$Y_{\text{STO}, \text{O}_2}$  : 好気状態での貯蔵有機物の生成収率

#### ・ $\text{NH}_4^+$ (処理水)

$\mu_A$  : 独立栄養細菌の最大比増殖速度

- $K_{A,NH4}$  : 独立栄養細菌のアンモニア飽和定数
- $b_{A,O2}$  : 好気状態での独立栄養細菌の比内生速度
- ・  $NO_3^-$  (処理水)
  - $Y_{STO,NOX}$  : 無酸素状態での貯蔵有機物の生成収率
  - $Y_{H,O2}$  : 好気条件下での従属栄養細菌の増殖収率
  - $Y_{H,NOX}$  : 無酸素状態での従属栄養細菌の収率
- ・  $PO_4^{3-}$  (処理水)
  - $Y_{STO,NOX}$  : 無酸素状態での貯蔵有機物の生成収率
  - $Y_{PAO}$  : 基質 PHA に対する菌体収率 (生物量/PHA)
  - $q_{pp}$  : ポリリン酸の蓄積速度定数
- ・  $PO_4^{3-}$  (嫌気槽)
  - $Y_{STO,NOX}$  : 無酸素状態での貯蔵有機物の生成収率
  - $Y_{P04}$  : PHA 蓄積に対するポリリン酸の消費量
  - $(S_A+S_F)/X_S$  : BOD のうち溶解性成分 ( $S_A+S_F$ ) と懸濁性成分 ( $X_S$ ) の比率

キャリブレーションには、水質成分だけでなく、各有機物除去、硝化反応、りん除去にかかわる各微生物群濃度に大きな影響を与えるパラメータを抽出した。抽出したパラメータ以外のパラメータは、IWA の Task group の推奨値で固定した。

抽出したパラメータについて生物学的意味を考慮し、回分試験により推定するもの、処理施設のデータからフィティングにより推定するもの、推奨値で固定するものに分類し、キャリブレーションを行った。

実下水を用いた嫌気好気式 SBR の結果に開発したキャリブレーション方法を適用したところ、推奨値を用いた計算では好気工程で PHA (ポリヒドロキシアルカノエート) が枯渇し、好気工程後半でりんの再放出を生じる結果となり、SBR におけるりん除去の挙動を再現できないため  $K_{PHA}$  (PHA 含有率の半飽和定数) の値を推奨値の 0.01 から 0.2 に変更することが必要であった。

流入水質が大きく変動し、りん除去が不安定な状態の挙動についてキャリブレーションを行ったモデルが実機を再現できるかを検証したところ、ほぼ処理水りん濃度、MLSS 濃度の挙動を再現できた。

また、開発したキャリブレーション方法を中川水再生センター、浅川水再生センターの A<sup>2</sup>/O 法施設に適用したところ、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、リン酸等の水質成分、MLSS、活性汚泥中の全りん濃度、ポリリン酸等の平均的な挙動を再現できた。

しかし、実処理施設においては第二沈殿池で無視できないレベルで脱窒が起きていることが明らかになったが、第二沈殿池での脱窒量の正確な把握が困難なためモデル化できず、硝酸性窒素の挙動を再現できなかった。このことから、ASM の利用には第二沈殿池での脱窒量の把握、硝化反応にかかわる好気槽での DO 濃度の把握が重要であることが示唆された。

### 3.1.2 異なる電子受容体を用いた生物学的窒素・リン除去プロセスにおける処理特性および細菌群集に関する研究

実下水を基質として SBR で、酸素、硝酸、亜硝酸という 3 種類の電子受容体を与えて活性汚泥を馴致した。SBR の運転条件としては、PAOs の集積を目的として嫌気状態で基質 (実下水) を与えて十分に反応させた後、電子受容体を与えて更に反応を進めた。

電子受容体が酸素の場合、嫌気状態の後、曝気によって好気状態にすることで、電子受容体である酸素を供給した。また、電子受容体が硝酸、亜硝酸の場合には、嫌気状態の後、硝酸あ

るいは亜硝酸塩を SBR に添加し、無酸素状態状態で攪拌を行った。本研究において電子受容体が酸素の場合には「嫌気好気法」、電子受容体が硝酸、亜硝酸の場合には「嫌気無酸素法」、嫌気好気法と嫌気無酸素法を組み合わせたものを「嫌気無酸素好気法」と呼ぶ。

SBR の運転を嫌気好気法で開始し、嫌気無酸素好気法、嫌気無酸素法と電子受容体を酸素から硝酸へと置き換えてゆく過程では PAOs が利用できる電子受容体にも変化が見られた。嫌気好気法では硝酸をほとんど利用できなかったが、嫌気無酸素好気法以降の反応条件では硝酸を利用する能力が現れた。活性汚泥の微生物群集としては、酸素だけを利用する好気性の PAOs が減少するのにもとない脱窒性 PAOs が増加したことになる。りん摂取活性の結果から、硝酸の添加を開始（嫌気好気法を嫌気無酸素好気法に変更）後に脱窒性 PAOs が増加し、酸素の供給を停止（嫌気無酸素好気法を嫌気無酸素法に変更）後に好気性 PAOs が減少していた。

各反応条件における活性汚泥の微生物群集解析を PCR-DGGE-Sequencing 法を用いて行った。この方法は活性汚泥中の細菌の遺伝子を抽出し、増幅（PCR 法）した後、ゲル電気泳動で分離（DGGE 法）し、分離されたバンド（細菌）の遺伝子の塩基配列を解析（Sequencing）するものである。

群集解析の結果、硝酸添加によって新たに出現したバンドは紅色細菌（*Proteobacteria*）のサブクラスに分類属する *Aquaspirillum* に近縁な配列、同じく サブクラスに属する *Polyangium* に近縁な配列、同じく サブクラスに属する *Thiothrix* に近縁な配列であった。電子受容体として硝酸を与えることにより、既存の研究で報告されている *Rhodocyclus* 近縁種以外の脱窒性 PAOs の候補を見つけることができた。

一方、酸素を好む傾向のあるバンド（細菌）としては、緑色非硫黄細菌に近縁なもの、*Actinobacteria* に分類されるものが検出された。

硝酸添加による嫌気無酸素法の後、亜硝酸添加による嫌気無酸素法の運転も行った。亜硝酸添加は亜硝酸の毒性が PAOs に与える悪影響が懸念されたが、りん蓄積能力は低いものの、亜硝酸でも PAOs を集積できることを確認した。亜硝酸で馴致した汚泥中の PAOs は電子受容体として亜硝酸の他、酸素の利用も可能で、1 時間ほど馴致すれば硝酸も利用することができた。これらの電子受容体を用いたりん摂取の効率を測定したところ、酸素を利用したときを 1 とした場合、硝酸、亜硝酸では約 0.6 であった。以上のことから、亜硝酸を利用した脱窒と PAOs によるりん除去の両立が可能であることが分かった。

3.2 りん除去プロセスにおいて、栄養源となる有機物の種類が、りん摂取反応に及ぼす影響についての研究と効率的な運転管理手法

3.2.1 都市下水および合成下水を処理する生物学的りん除去活性汚泥の PCR-DGGE 法と FISH 法を用いた微生物群集解析

SBR を用いた嫌気好気の反応条件で、炭素源として酢酸（Run-A）、都市下水（Run-S）を用いて馴致しりん除去が安定した活性汚泥処理系を構築した。その日を 0 日として、都市下水を用いて馴致した系の活性汚泥を分取し、都市下水に都市下水由来の懸濁物質（POM）を徐々に添加した処理系（Run-SP）の 3 つの系を 63 日間運転し、りん摂取や活性汚泥のりん平均含有率について評価を行ったこれらの系の実験条件を表 2 に示す。

Run-A は実験期間を通じて安定したりん除去ができた。また、Run-S、Run-SP についても安定したりん除去ができたが、例外的に、年末年始で前日に大雨が降り流入下水濃度が低下した 42 日目は Run-S、SP の系においてりんの吐き出し、摂取が一時的に観察されなかった。

表 2 実験条件

Run	Run-A	Run-S	Run-SP		
			Phase (0 ~ 20 日)	Phase (21 ~ 42 日)	Phase (43 ~ 63 日)
条件	酢酸ナトリウム りん酸塩、他 ATU(4mg/L)	実下水 (無希釈)	実下水 ( 無希釈 )		実下水(2 倍希釈)
			POM 30mgC/L 添加	POM 30mgC/L 添加	
			ATU(4mg/L)		

実験期間中の各系の活性汚泥りん平均含有率を表 3 に示す。

表 3 活性汚泥のりん平均含有率

系	Run-A	Run-S	Run-SP		
			Phase	Phase	Phase
含有率(%)	8.3	5.4	5.6	4.8	3.2

3 系列の活性汚泥についてポリりん酸染色、FISH 法を組み合わせ、PAOs の検索を行った。

その結果、3 系列とも *Proteobacteria* 群が優占種となっていた。*Proteobacteria* 群の *Rhodocyclus* 近縁種が Run-A で平均 60%、Run-S 及び Run-SP で平均 10% 以上優先していることを確認できた。しかし、Run-S、SP では *Rhodocyclus* 近縁種以外の細菌がポリりん酸を蓄積していることが確認され、*Rhodocyclus* 近縁種以外の細菌もりん除去を担っている可能性が示唆された。

また、PCR-DGGE 法を用いて 3 系列の活性汚泥から検出された DNA バンドから、Run-A では *Rhodocyclus* 近縁種に類似した DNA バンドが検出された。Run-S で検出された DNA バンドのうち、塩基配列解読に成功した DNA バンドは *Proteobacteria* 群、群及び HGC 群に属する細菌のものであった。同様に Run-SP で検出され、塩基配列解読に成功した DNA バンドは *Proteobacteria* 群、群に属する細菌のものであった。しかし、FISH 法では検出されたものの、Run-S、SP で検出された DNA バンドで塩基配列の解読に成功したものからは、*Rhodocyclus* 近縁種の DNA バンドは見つからなかった。

これらより都市下水を処理する生物学的りん除去プロセスにおいては、*Rhodocyclus* 近縁種、他、HGC 群、*Proteobacteria* 群もりん除去を担っていることがわかった。

### 3.3 下水処理システムにおけるエネルギー消費、下水処理による環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を基に下水道施設の評価手法の検討を行い、その手法を用いて算出した水処理トータルコストの総合的な検討

#### 3.3.1 実際の下水処理システムにおけるエネルギー消費、下水処理による環境改善効果、地球温暖化ガスの排出を基にした下水処理施設の評価例

東京都下水道局で行った A<sub>2</sub>O 法、AO 法、制限曝気法、硝化促進法の電力消費量、処理水質、温室効果ガス排出量の実態調査結果を用いて算出したコストと施設建設にかかるコストを合わせた費用と、高度処理施設導入による水質改善効果から得られる便益を金額に換算した結果を比較することで高度処理導入に対する総合評価を行った。

高度処理施設導入による便益は、東京湾の水質改善効果として現れると考え、既存の報告からその便益を金銭に換算した。一方、高度処理に伴う二酸化炭素排出量を算出し、地球温暖化面での損害として計上した。さらに、実際に必要となる経費を算出し、これらを比較した。

環境に対するインパクトを評価すると、水環境改善の便益が二酸化炭素による損害よりも 40

倍以上は大きいという結果が得られた。高度処理による費用と便益の比較を表4に示す。

実際にかかるコストとの比較では、水環境改善便益が全コストを上回り、A<sub>2</sub>O法で1.8倍、A<sub>0</sub>法では6.3倍となり、高度処理の追加的導入は費用便益の面でも有効であると推察された。

表4 高度処理による費用と便益の比較

	A <sub>2</sub> O法	A <sub>0</sub> 法
東京湾水環境改善便益 (円/m <sup>3</sup> )	8.82	5.45
温室効果ガスの損害 (円/m <sup>3</sup> )	0.12	0.13
差し引き環境便益 (円/m <sup>3</sup> )	<b>8.70</b>	<b>5.32</b>
運転時の電力費用 (円/m <sup>3</sup> )	0.25	0.20
建設費用 (円/m <sup>3</sup> )	4.58	0.64
全コスト (円/m <sup>3</sup> )	<b>4.83</b>	<b>0.84</b>
環境便益 - 全コスト (円/m <sup>3</sup> )	<b>3.87</b>	<b>4.48</b>
環境便益 / 全コスト ( - - )	<b>1.80</b>	<b>6.33</b>

注) 硝化促進法を基準とし、その場合との差分を高度処理施設導入による追加分とした。

#### 4. まとめ

- 1) 活性汚泥モデル(ASM)の利用にあたっては流入水分画や有機物除去、窒素除去、りん除去にかかわるパラメータを施設ごとに適切に推測することが精度の高い処理水質予測を行うには不可欠である。また、第二沈殿池で生じている脱窒反応による返送汚泥中の硝酸性窒素濃度低下は、モデルの中で無視できないレベルであることが本委託研究から明らかになった。

ASMの利用にあたっては、第二沈殿池で脱窒量の値を実態に合うように設定することが必要である。

- 2) 生物学的りん除去には複数のPAOsがかかわっており、流入水の有機物濃度が薄くても有機性の懸濁物質があれば、または、有機性の懸濁物質を添加し活性汚泥を馴致すればその環境に適応したPAOsが増殖し、安定したりん除去が可能であることが示された。

このことは、A<sub>2</sub>O法やA<sub>0</sub>法において嫌気槽へ生汚泥投入を投入しても、すぐにはりん除去の効果が現れず、しばらく投入を継続すると効果が現れるという現象と一致する。本研究の知見は、生汚泥投入を行っている施設の運転管理に有用な情報である。

また、除去すべき窒素、りん濃度に比較して流入水の基質(炭素源としての有機物)濃度が薄い日本の下水処理において、効率的に生物学的窒素、りん除去を行う脱窒性PAOsを実処理施設で利用する運転技術の確立が今後の課題である。

- 3) 高度処理運転で得られた処理水質と電力消費量のデータを基に、その処理場に高度処理が導入された場合のコストと環境便益を算出し、高度処理施設導入に対する総合的評価を行った結果、環境便益が高度処理施設導入にかかる全コストを上回り、高度処理の追加的導入は費用便益の面でも有効であるという結果が得られた。

#### 参考文献

- ・花田茂久、味埜俊、佐藤弘泰、: Activated Sludge Model No.3 (ASM3) へのりん除去モジュールの導入とそのキャリブレーション方法の開発, 下水道協会誌, Vol.41.No.496(2004年2月号), pp.114・125, 2004
- ・庄司仁, 佐藤弘泰, 味埜俊: 実下水処理場の生物学的りん除去プロセスにおける脱窒性脱り

- ン細菌の評価，水環境学会誌，Vol.27，No.4，pp.255・260，2004
- ・Tadashi Shoji ,Hiroyasu Satoh ,Takashi Mino:Biological phosphorus removal using nitrite as electron acceptor.Proc.of IWA Asia-Pacific Regional Conf.ASIAN WATERQUAL 2003,Paper No3Q2B16 in CD-ROM
  - ・庄司仁，新田見匡，佐藤弘泰，味埜俊：脱窒機能遺伝子による生物学的窒素・リン除去プロセスの微生物群集解析，第38回日本水環境学会年会
  - ・李美京，古米弘明，中島典之：酢酸，都市下水および懸濁性有機物を添加した都市下水を処理する嫌気好気活性汚泥法の微生物群集構造解析，土木学会論文集，-31（2004年5月号）
  - ・Mikyung Lee,Fumiyuki Nakajima,Hiroaki Furumai:Comparison of microbial community in enhanced biological phosphorous removal process fed with acetate and domestic sewage by PCR-DGGE method ,Proc.of IWA Asia-Pacific Regional Conf.ASIAN WATERQUAL 2003,Paper No.3Q2B17 in CD-ROM.
  - ・花木啓祐：下水道施設の多面的評価手法（未発表）
  - ・Keishiro Hara,Takashi Mino:Energy Consumption analysis in sewage sludge treatment and recycling process-Case study in Tpkyo,Proc.of IWA Asia-Pacific Regional Conf.ASIAN WATERQUAL 2003,Paper No.1QL08 in CD-ROM.



## 1 調査の目的

流域下水道本部では、平成 16 年度当初に、北多摩一号水再生センターの嫌気 - 無酸素 - 好気 (A<sub>2</sub>O) 法施設が稼動したことで、流域の 7 センター全てで A<sub>2</sub>O 法施設が導入された。A<sub>2</sub>O 法では、降雨等の影響によって有機物濃度が低下し、りん除去が悪化する。また、A<sub>2</sub>O 法では機械攪拌機や硝化液循環など標準活性汚泥法 (標準法) にはない設備があるため処理コストが高くなるなどの問題点がある。

本調査は、処理水質とコストについて A<sub>2</sub>O 法施設の最適な運転方法を確立することを目的とし、平成 15 年度には、りん除去の安定化とコストの縮減を目標に実施した。なお、北多摩一号水再生センターは、本格的に稼動したのが 16 年度に入ってからであるため本調査には参加していない。

平成 15 年度の主な調査内容を表 1 に各センターの諸元を表 2 に示す。

表 1 平成 15 年度調査内容

	調 査 内 容	実施したセンター
水再生センター 個別調査	・ 一沈バイパスによるりん除去効果	南多摩、多摩上
	・ 生汚泥投入によるりん除去効果	北二、浅川
	・ 豪雨時の運転方法	浅川、多摩上
	・ 返送汚泥率と処理水質の関係	清瀬
	・ 攪拌機の間欠運転の実施による効果と処理水質への影響	北二、多摩上、八王子、清瀬
水再生センター 共通調査	・ 硝化、脱窒速度の測定	全センター

表 2 各センターの諸元

センター名	計画処理量 m <sup>3</sup> / 日	現有処理能力 m <sup>3</sup> / 日 (内数: A <sub>2</sub> O 施設能力)	下水排除方式
北多摩一号	271,000	271,000 (54,400)	合流式
南多摩	378,000	150,000 (43,600)	分流式
北多摩二号	105,000	77,000 (15,500)	合流式
浅 川	202,000	104,900 (18,200)	分流式
多摩川上流	273,000	273,000 (48,000)	分流式
八王子	372,000	104,000 (14,000)	分流式
清 瀬	535,000	343,200 (35,400)	分流式

## 2 調査の方法

## 2.1 りん除去の安定化

## 2.1.1 一沈バイパスおよび生汚泥投入による効果

降雨等の影響によって有機物濃度が低下したときの対策として、一沈バイパスまたは生污泥投入の２種類がある。各センターではどちらか一方を実施できるよう整備されているのでこれらによるりん除去の安定性を調べた。水質データは、処理水の全窒素・全りん計の測定結果の日平均値を用いた。

#### 2.1.2 豪雨時の運転方法

豪雨時には、有機物濃度がさらに希薄になるため、一沈バイパスや生污泥投入だけではりん除去が悪化することが多い。このため、生污泥投入による対応の限界(浅川水再生センターで実施)と新たな対策として、硝化液循環を停止して嫌気・好気(AO)法とした(多摩川上流水再生センターで実施)ときの効果について調べた。

#### 2.1.3 返送污泥率と処理水質の関係

りん除去の面からは、返送污泥率が低い方が有利であるが、窒素除去の面からは高い方が良いことが知られている。返送污泥率の適正化を図るため、定期的に返送污泥率を変動させ、処理水の窒素およびりん濃度との関係を調べた。

### 2.2 コスト縮減のための取り組み

#### 2.2.1 消費電力量の削減策

A<sub>2</sub>O法施設では、水処理コストの中で攪拌機と送風機の動力費が大きな割合を占めている。清瀬水再生センターで平成15年度に実施した温室効果ガス排出実態調査<sup>1)</sup>の結果では、A<sub>2</sub>O施設の生物反応槽内で使用される電力費に占める攪拌機動力費および送風機動力費の割合は、それぞれ約4割と約5割であった。そこで、15年度は、比較的取り組みやすい攪拌機の動力費削減を試みた。具体的には、嫌気槽・無酸素槽に設置している攪拌機の全部または一部を間欠運転したときの処理水質への影響と電力削減効果を調べた。

#### 2.2.2 硝化速度の測定

平成14年度の調査実績から、各センターともに生物反応槽容積、特に、好気槽の容積に余裕があるように見受けられた。現有施設での処理状況を、今後の反応槽の設計に反映させるため、各センターで硝化速度を測定した。硝化速度の測定は、硝化菌の活性が下がる冬期に実施した。なお、好気槽でのりんの吸収速度は、活性汚泥の性状によって大きく異なるため、本報告では除外した。

測定には、フィルター付自動採水器を用いて、2時間ごとに12回反応槽混合液を採取・ろ過した試料を用いた。図1に、採水場所を示す。

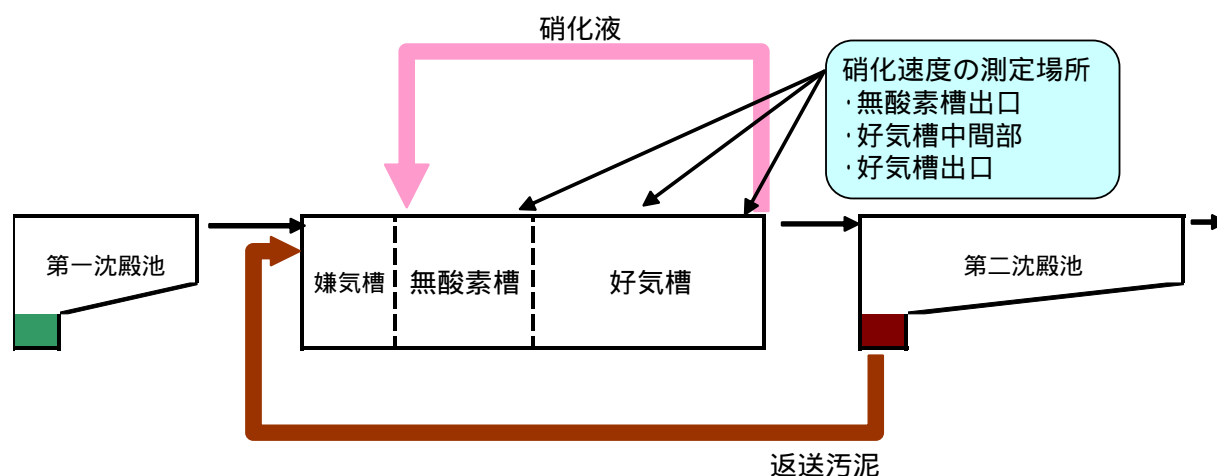


図1 硝化速度調査試料採水場所

採取した試料のろ液を等量または流入水量に応じた比率で混合してサンプルとし、各地点での日平均アンモニア性窒素濃度を測定した。地点間の平均滞留時間から硝化速度を算出した。経験的に、硝化は、溶存酸素（DO）濃度が 0.5mg/l 以上、pH が 6.2 以上、アンモニア性窒素濃度が 1mg/l 以上の条件で水温が一定ならば、反応時間に対して直線的にアンモニア性窒素濃度が減少していく（0 次反応）。逆に、この条件から外れると、アンモニア性窒素濃度の減少が反応時間に対して直線にならない。調査時に実施設での状態がこの条件を満たしているかどうかを把握することができないため、ここでは、無酸素槽出口～好気槽中間部、好気槽中間部～好気槽出口のそれぞれで硝化速度を計算し、両者の平均値を反応槽内での硝化速度とした。

### 3 結果および考察

#### 3.1 りん除去の安定化

##### 3.1.1 一沈バイパスと生污泥投入による効果

豪雨時以外の通常降雨や流入水質の変動など一時的に有機物濃度が低下する場合には、一沈バイパスおよび生污泥投入とともにりん除去の安定化に効果があった。

図 2 および図 3 に一沈バイパスを実施した南多摩および多摩川上流水再生センターでの 15 年度の処理水全りん濃度の変動を示す。また、図 4 および図 5 に生污泥投入を実施した北二および浅川水再生センターでの変動を示す。

有機物対策を実施するタイミングは、南多摩水再生センターでは、15 年度の前半は処理水のりん濃度が上昇してから一沈バイパスを開始し、後半では降雨の影響が予想される前に予め開始する方法を調査し、タイミングの違いによる効果を比較した。他の水再生センターでは、降雨の影響が予想される前から一沈バイパスや生污泥投入を実施した。

投入する固形物量は、各センターで反応槽流入水の COD 濃度や嫌気槽 ORP などの値を参考にして経験的に調整している。

なお、15 年度は、バイパスや生污泥投入に対する評価を対象にし、投入による効果をみているため、投入率等はここでは問題にしない。

また、一年分のデータであり降雨量のグラフを追加すると煩雑になることや、4 水再生センターとも同様の降雨パターンであるため、相互比較では大きな意味がないので、ここでは省略した。

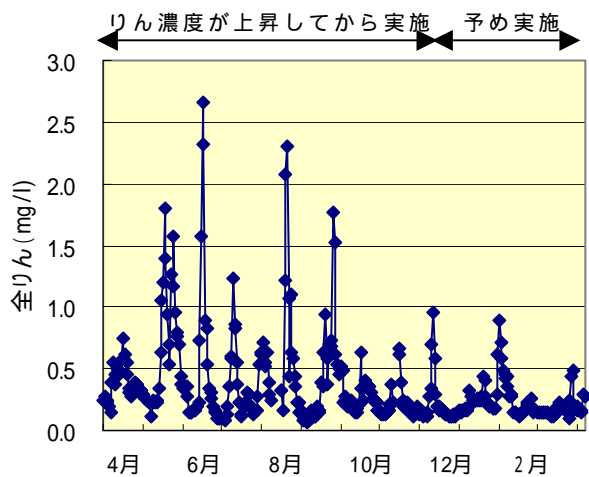


図2 一沈バイパス(分流：南多摩)

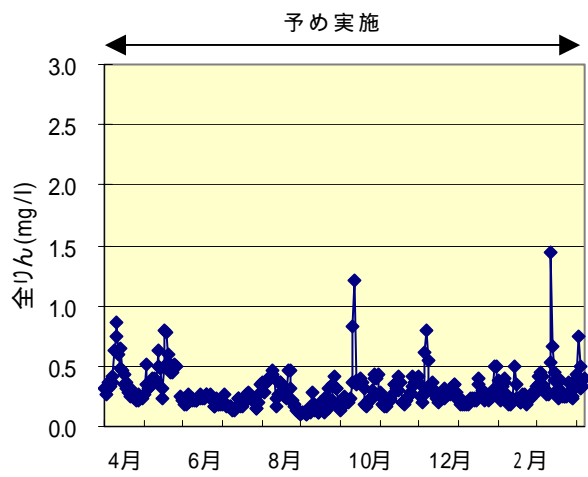


図3 一沈バイパス(分流：多摩上)

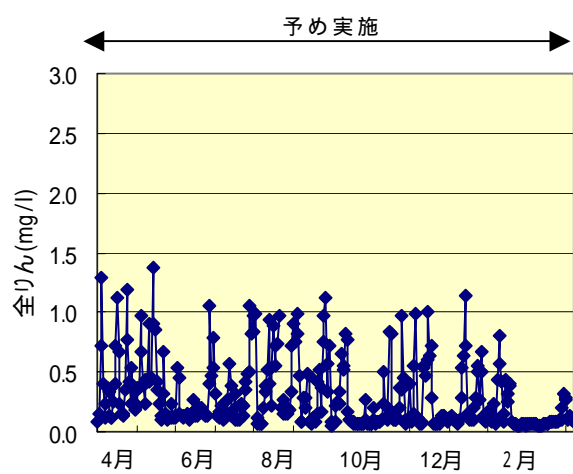


図4 生汚泥投入(合流：北二)

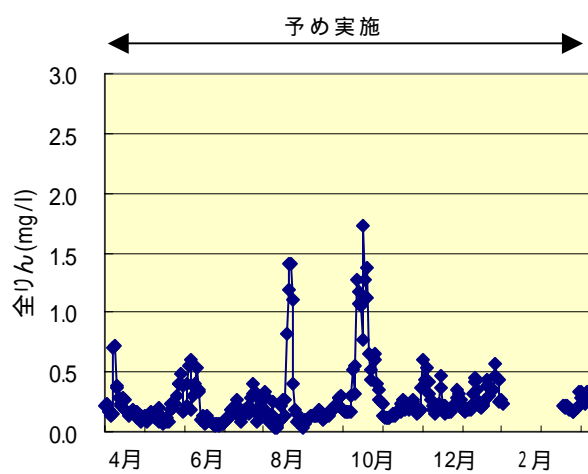


図5 生汚泥投入(分流：浅川)

図2から降雨の影響が予想される場合、事前に有機物対策を実施することでりん除去が安定することがわかる。また、図4で、合流式下水道である北二では、少量の降雨でも影響を受けるためりん濃度が上昇する日数が他のセンターよりも多い。しかし、全ての系列が高度処理施設になったときに放流水に適用される全りん濃度基準値である1mg/lを超える日は1年間のうちで10日程度であった。

分流式である多摩上と浅川水再生センターを図3と図5と比較すると、一沈バイパスと生汚泥投入はりん除去の安定化に同程度の効果があると考えられる。

次に、表3に一沈バイパスと生汚泥投入の維持管理上の比較を示す。

表 3 一沈バイパスと生污泥投入の維持管理上の比較

	一沈バイパス	生污泥投入
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ランニングコストが安い</li> <li>・ 固形物の連続投入が容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固形物投入の制御が容易</li> <li>・ 有機酸の生成が期待できる</li> <li>・ 設備の改良で実施可能</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 専用の水路が必要であり、既存施設での実施が困難</li> <li>・ 固形物流入量の制御が困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 投入回数が多くなるとランニングコストが高い。</li> </ul>

二つの有機物対策の方法に共通する問題点として、一沈バイパスや生污泥投入の実施によって、生污泥として処理されるべき污泥の一部が脱水しにくい余剰污泥に転換されるため、污泥処理への影響が懸念される。平成 15 年度に浅川水再生センターでは、反応槽への生污泥投入量を  $60 \text{ m}^3/\text{日}$  と  $120 \text{ m}^3/\text{日}$  の 2 段階で運転していた。このときの焼却炉のガス消費率（脱水ケーキ 1 t あたりの助燃ガス消費量）の累積頻度分布を図 6 に、脱水ケーキ含水率の累積頻度分布を図 7 に示す。

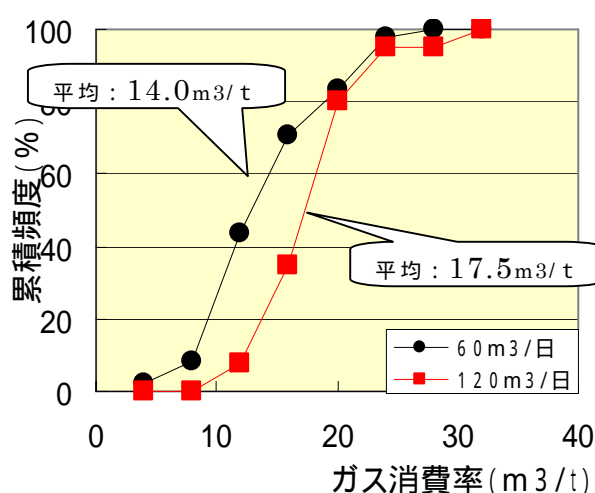


図 6 生污泥投入量と助燃ガス消費率

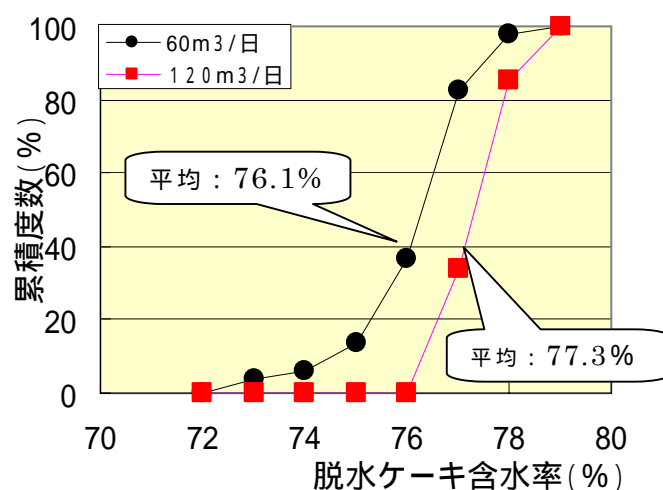


図 7 生污泥投入量とケーキ含水率

浅川水再生センターでは、流入水の約 1 / 4 を  $\text{A}_2\text{O}$  法系列で処理している。この系列への生污泥投入量を  $60 \text{ m}^3/\text{日}$  から  $120 \text{ m}^3/\text{日}$  に変更しただけで（浅川での生污泥発生量約  $1,100 \text{ m}^3/\text{日}$ ）、全系列で発生する污泥を焼却したときのガス消費率の平均が  $14.0$   $17.5 \text{ m}^3/\text{t}$  に増加した。この結果から、有機物対策の実施が污泥処理に与える影響が小さくないことがわかる。

今後は、生污泥投入の量をさらにきめ細かく制御することがコスト縮減策として重要である。

### 3. 1. 2 豪雨時の運転方法

平成 15 年 8 月中旬に台風の影響によって 1 日に  $100 \text{ mm}$  を超える降雨を記録した。このときの浅川水再生センターで実施した生污泥投入の効果を図 8

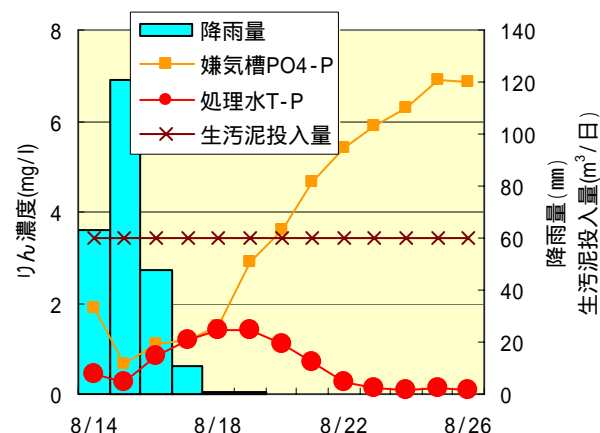


図 8 豪雨時に生污泥投入で対応



なお、ここでは返送汚泥率について問題にしているので、硝化液循環率を変動させたデータは取っていない。

流入下水の有機物濃度を希釈し、りん除去を妨害する性格を持つ。故に、返送汚泥率が高いほど処理水のりん濃度は上昇する。このことから、 $A_2O$  法では、返送汚泥率は低く設定してりん除去を安定させ、硝化液循環率を高くして窒素除去する運転が望ましい。

なお、好気状態でもりん蓄積菌は有機酸を吸収して PHA を合成していることから「りん除去」は有機酸が脱窒に利用される影響は小さいと思われる。

また、硝化液循環率が高くなるとりん除去に悪影響を与えることは間違いありませんが、ここでは、りん除去と窒素除去両方を考えたときの運転として、返送汚泥率を低下させ、硝化液循環を上昇させることとしております。A - HRT は、反応槽容積と流入水量に関係しており、返送汚泥率および硝化液循環で変動しないことから考えていない。

### 3.2 コスト削減のための取り組み

#### 3.2.1 攪拌機の間欠運転

攪拌機の間欠運転は、センターごとに自動運転可能なパターンが異なるため、センターの実状に応じて間欠運転のサイクルを設定した。表 4 には嫌気槽・無酸素槽に設置されている水中攪拌機の間欠運転のパターンを、表 5 には間欠運転の実施前と実施中のときの処理水および嫌気槽のりん濃度を示す。

表 4 センター別攪拌機間欠運転の方法と削減割合

センター名	間欠運転の方法	攪拌機の一消費電力量 (kWh)		削減割合 (%)
北多摩二号	嫌気槽の 2 台を 1 時間ごとに交互運転 無酸素槽は連続運転	1320	1188	10
多摩川上流	7 台の攪拌機で、 40 分運転、20 分停止を 4 台 20 分運転、40 分停止を 3 台	3192	1488	53
八王子	12 台を 1 時間毎に 6 台ずつ交互運転	672	336	50
清瀬	12 台中小型の 4 台を交互運転	2640	2376	10

表 5 間欠運転による処理水等への影響

センター名	処理水全りん濃度 (mg/l)		嫌気槽りん酸性りん (mg/l)	
	間欠運転導入前	実施中	間欠運転導入前	実施中
北多摩二号	0.17	0.19	9.2 12.3	
多摩川上流	0.46	0.28	10.1	12.1
八王子	1.05	1.04	4.9	3.9
清瀬	0.90	0.12	8.5 13.3	

表 5 から処理水のりん濃度や嫌気槽でのりんの吐き出しについては、間欠運転による影響は認められなかった（清瀬水再生センターで間欠運転導入前の処理水が高いのは返送汚泥比が高い状態で降雨の影響を受けているためである）。これにより、攪拌機を間欠運転することによって処理水質に影響を与えることなく、攪拌動力の 5 割程度以上を削減できる



ことがわかった。

しかし、汚泥の堆積や攪拌機の故障など長期的に運転して初めて現れるであろう影響については今後継続的に調査していくことが必要である。特に、生汚泥投入や一沈バイパスを実施している施設では、沈殿しやすい固形物が反応槽に入るため嫌気槽内での汚泥堆積が懸念される。

なお、表 5 で八王子水再生センターが他のセンターよりもりん除去が悪くなっているのは、高濃度の硝酸アンモニウムを含む事業場排水を受け入れている影響によるためである。

ただし、本年報では、高濃度の硝酸アンモニウムを含む排水を受け入れた場合のりん除去障害経過については周知の事実として扱っておりますので改めて述べない。

### 3.2.2 反応速度の測定

実施設での硝化速度の測定結果を表 6 に、硝化速度定数から求めた必要好気槽 HRT(水理学的滞留時間)を表 7 に示す。



表 6 硝化速度測定時の運転状況及び測定結果

センター名	水温 ( )	MLSS (mg/l)	A - SRT (日)	返送汚 泥比	硝化液 循環比	好気槽HRT (日)	硝化速度定数 (mg N/ g MLSS・時)
南多摩	18.2	1,500	5.47	0.5	0.5	9.5	1.45
北 二	19.0	2,065	8.75	0.4	0.5	6.7	2.14
浅 川	18.6	1,730	6.99	0.3	1.0	9.3	1.34
多摩上	18.4	1,740	4.26	0.3	1.0	7.8	2.01
八王子	18.8	1,770	5.14	0.4	0.9	8.0	1.79
清 瀬	20.0	1,539	7.25	0.3	0.6	9.6	1.24
平 均	18.8	1,724	6.31	0.4	0.8	8.5	1.66

表 7 硝化速度定数から求めた完全硝化に必要な好気槽 HRT

センター名	流入NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	MLSS (mg/l)	好気槽HRT (時間)	硝化速度定数 (mg N/ g MLSS・時)	完全硝化に必要な好 気槽HRT (時間)
南多摩	21.3	1,500	9.5	1.45	9.8
北 二	20.8	2,065	6.7	2.14	4.8
浅 川	19.2	1,730	9.3	1.34	9.2
多摩上	15.6	1,740	7.8	2.01	6.1
八王子	27.1	1,770	8.0	1.79	6.7
清 瀬	20.0	1,539	9.6	1.24	11.2
平 均	20.7	1,724	8.5	1.66	7.4

硝化速度は、1.2～2.1mgN/ g MLSS・時であり、このとき全てのセンターで処理水のアンモニア性窒素濃度が 1.5mg/l 以下であった（流域の A<sub>2</sub>O 法施設では、過去の経験からりん除去を安定させる方法の一つとしてアンモニア性窒素を若干残存させる運転を実施しているため 0 mg/l にはなっていない）。表 7 で、好気槽の HRT と硝化速度定数から求めた完全硝化に必要な HRT を比較すると、南多摩、清瀬、浅川を除く 3 センターでは硝化に必要な好気槽容積に余裕があると考えられる。

A<sub>2</sub>O 法運転管理マニュアル<sup>2)</sup>では、完全硝化を維持するために、MLSS を 2,000～3,000mg/l、A-SRT を 10 日程度としている。本調査では、マニュアルより低い値でほぼ完全に硝化していた。これは、マニュアルの水温の設定値が 15 であるのに対し、実施設では 18 を下回る日がほとんどないことが大きな要因と考えられる。

本調査では、各センター 1 回のデータであるため、今後、反応速度のデータを蓄積して反応槽容積等の考え方について検討していくことが必要である。

#### 4 まとめ

本調査は、A<sub>2</sub>O 法施設の処理水質安定化策としてりん除去の安定化と、コストの縮減の 2 つを目標に実施した。

りん除去の安定化として、通常の降雨などによる有機物濃度低下に対しては、一沈バイパスや生污泥投入の実施で効果があった。一沈バイパス方式は、ランニングコストが安いいため固形物を連続投入する場合に効果的な方法である。生污泥投入方式は、既存施設の改

良によって実施可能であり、投入固形物量の制御が容易である。

豪雨時には流入水の有機物濃度が極端に薄くなるため、有機物をりん放出に利用できるAO法運転に切り替え、りん除去を優先させることが望ましい。

コスト縮減策として実施した攪拌機の間欠運転では、攪拌機の運転時間を5割程度にしても処理水質に影響を与えないことがわかった。ただし、槽内への汚泥の堆積や攪拌機への影響など長期的な経過で現れる影響については継続的に調べていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 流域下水道本部技術部施設管理課：温室効果ガス排出実態調査委託報告書、平成16年3月
- 2) 下水道局計画部：嫌気 - 無酸素 - 好気法運転管理マニュアル(案)、平成8年

### 3 - 6 りん除去メカニズムからみたA<sub>2</sub>O法のりん処理対策について

流域下水道本部北多摩二号水再生センタ - 浅川水質管理係  
佐久間真理子 葛西孝司 平地敏真 小池範明

#### 1. 調査目的

平成16年4月より、CODに加えて窒素やりんも対象とした第5次総量規制が施行され、当局でもその対策の一環として、多くの処理場でA<sub>2</sub>O系列やAO系列が稼働している。生物学的窒素りんの同時除去をめざしたA<sub>2</sub>O法は、効率的ではあるが、りん除去の不安定さが指摘されている。

一方その不安定さの原因となっている流入水の有機物不足を補うために、生污泥投入・一沈バイパス等の対策がいくつかのセンターで実施されているが、全ての処理場に同じ対策は適用できない。

本調査は、浅川水再生センタ - のA<sub>2</sub>O系列について、運転状況、水質状況、改善対策の実績などの実態把握をおこない、生污泥を投入した平成15年度と投入しなかった平成14年度を比較し、従来の水質分析項目に加えりん蓄積菌のりん処理能力を高めるりん蓄積菌内のPHA(ポリヒドロキシアラケート)濃度を測定することにより、生污泥投入によってりん処理が改善した要因を明らかにすることを目的とした。

#### 2. 生污泥投入の有無による処理実績の比較

当センタ - では、平成14年4月から3-1系でA<sub>2</sub>O法が稼働した。施設の概要を図1と表1に示す。また運転状況等を表2に、反応タンク流入水質を表3に示す。

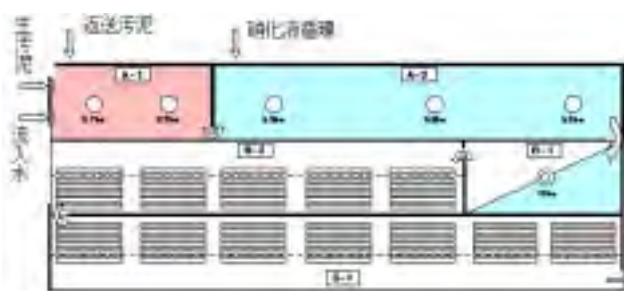


表2 A<sub>2</sub>O施設運転条件

	平成14年度	平成15年度
流入水量(m <sup>3</sup> /日)	約4000	約4000
MLSS(mg/l)	約1000	1300~1800
ARRT(日)	6~7	5.5~6.5
過剰汚泥率(%)	50	30~50
硝化液循環率(%)	100	100
生污泥投入kg/日	0	400~800

図1 処理フロー

表1 施設概要

設計処理能力(m <sup>3</sup> /日)		14,300(日平均下水量、冬季最大) 18,200(日最大下水量)				
設備	項目	一沈	嫌気槽	脱窒槽	好気槽	二沈
	容量(m <sup>3</sup> )	1,435	909	3,181	5,453	3,770
	HRT(hr)	2.4	15	53	31	63

表3 流入水質

項目(mg/l)	平成14年度	平成15年度
BOD	108	91
SS	41	37
全窒素	27.4	26.9
全りん	2.8	2.7

平成14年度の調査により当センタ - ではりん除去が不安定であることがわかったので、平成15年の2月より反応タンクへの生污泥投入を開始し、平成15年4月以降はほぼ年間を通して、反応タンク入り口(嫌気槽)へ生污泥の投入を続けた。その処理実績を図2、図3に示す。

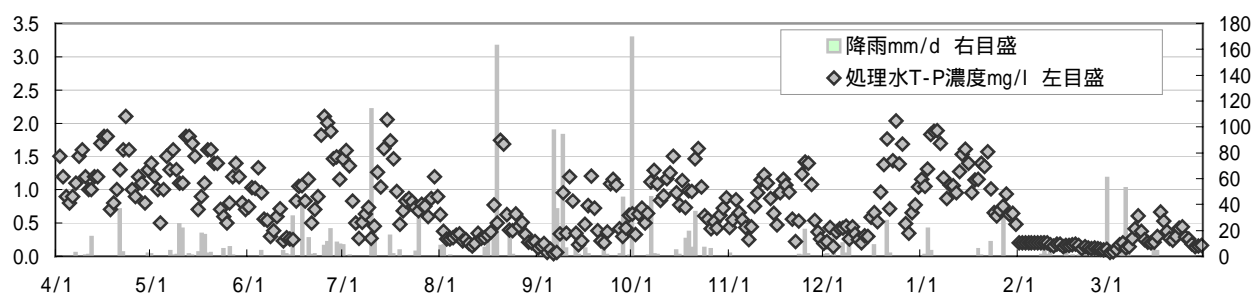


図2 平成14年度A、O系列処理水T-P濃度

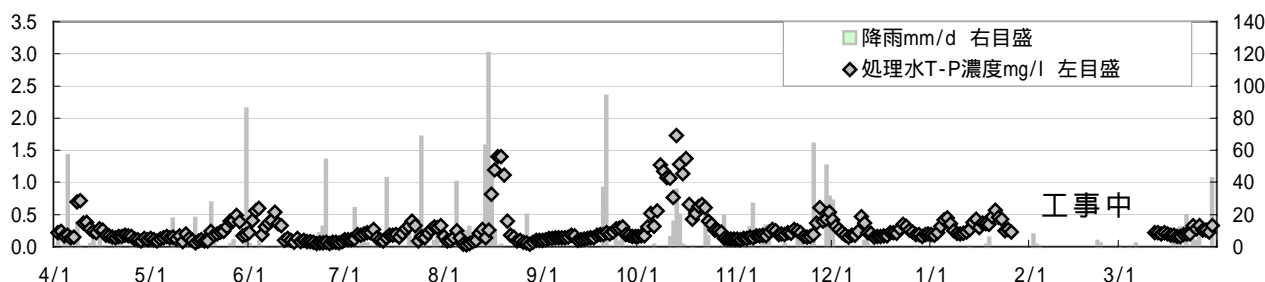


図3 平成15年度A、O系列処理水T-P濃度

図2の生活污水を投入していない平成14年度の特徴としては次の点があげられる。週間変動がある 少量の降雨でもすぐに処理が悪化する 多量の降雨は処理の回復までに時間がかかる。それに対して、図3の生活污水を投入した平成15年度は、週間変動が消えた 晴天が続いたあとの降雨では、かなりの降雨量でもほとんど処理に影響を与えない しかし、連続した降雨には対応できない可能性もある、などの特徴がみられた。

### 3．特徴的な現象の解析 りん除去メカニズムからみて

#### 3．1 りん除去メカニズム

りん除去メカニズムは次のように説明されている。<sup>1)</sup>

(1)嫌気状態とそれに続く好気状態を経て、活性汚泥微生物に摂取された溶解性りんは、細胞中にポリりん酸の顆粒として蓄積される。

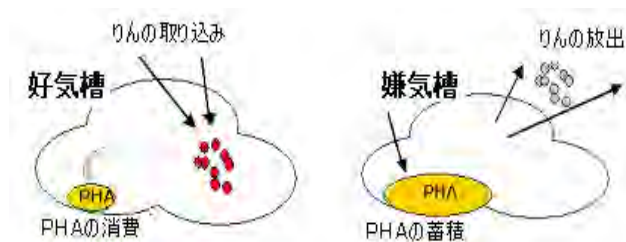


図4 りん蓄積菌の代謝

(2)嫌気状態では、細胞中に蓄積されたポリりん酸は加水分解されて溶解性りんとして混合液中に放出され、混合液中の有機物は細胞内に摂取される。

(3) 嫌気状態での溶解性りん放出に伴い摂取された有機物は、グリコーゲンや PHA (ポリヒドロキシアルカレート) 等の基質として細胞内に貯蔵される。

(4)好気状態では、これらの細胞内貯蔵基質は酸化・分解されて減少する。活性汚泥微生物はこのエネルギーを利用して、嫌気状態で放出した以上の溶解性りんを摂取し、ポリりん酸として再合成する。

(5)上記(1)～(4)の繰り返しにより、活性汚泥微生物のりん除去機能は高まっていく。

まだ明確になっていない面は多く残っているものの、このような挙動を示す活性汚泥微生物群をりん蓄積細菌と呼んでいる。

3.2 細胞内貯蔵基質 PHA の挙動

ここで、2 であげたりん除去に関わる特徴的な現象を、りん除去メカニズムから考察した場合、キーポイントとなるのが、りん蓄積細菌のなかの貯蔵基質、すなわち PHA である。実機での現象の多くは、PHA の量と関わっていると思われたので、各工程の PHA を測定することにより、りん除去能力の程度を知ることができると考えた。

降雨時は嫌気槽でりんの放出がほとんどなくなる。しかし、平成15年度はそのような場合でも好気槽で十分にりんが取り込まれていた。それは嫌気槽でりん放出が無く、新たな PHA の蓄積が無いにもかかわらず、それまでに蓄えていた PHA がまだ残っていたためと思われた。通常 PHA は好気槽でりん摂取のために消費されるが、前述のような現象は好気槽末端で消費されない余分な PHA が残っていたと考えられた。そこで机上実験で嫌気・無酸素・好気の工程を再現し、PHA とりん処理の関係の考察をおこなった。

3.3 PHA の測定

PHA の分析は、東京大学で実施されている方法を基本に、低濃度の PHA に対しても精度の高い結果が得られるよう一部変更して行った。分析フローを図5に示す。この分析の内部標準には安息香酸を用いた。

活性汚泥中の PHA は、硫酸メタノール溶液によって分解・メチル化される。これをクロロホルムで抽出し、GC 分析で定量した。標準溶液は、3 - ヒドロキシ酪酸ナトリウム溶液を凍結乾燥させ、サンプルと同様の操作で作成した。なお、凍結乾燥は、デシケーターに冷凍したサンプルと共に、シリカゲルを入れ、真空ポンプで真空状態にしてから、冷凍庫内で乾燥させる方法をとった。この方法では、乾燥が完了するまでに3日程度要した。

GC 分析では、検出器として FID を用いた。そのときの分析条件を表4に示す。

表4 GC 分析の条件

カラムの種類	GLサイエンス社 NEUTRA BOND-1 30m × 0.25mm
キャリアガス	ヘリウム
スプリット比	1:20
注入口温度	250
検出部温度	280
カラム温度	60 260

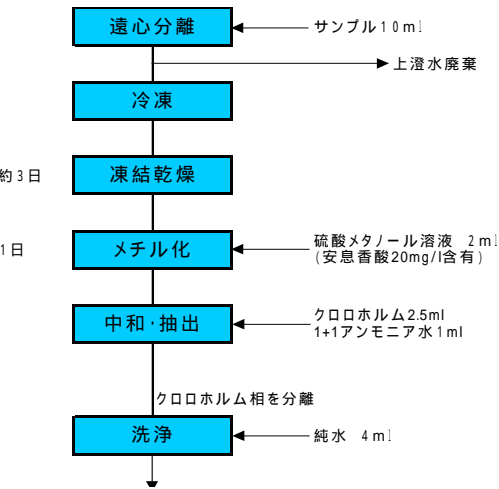


図5 PHA 分析フロー

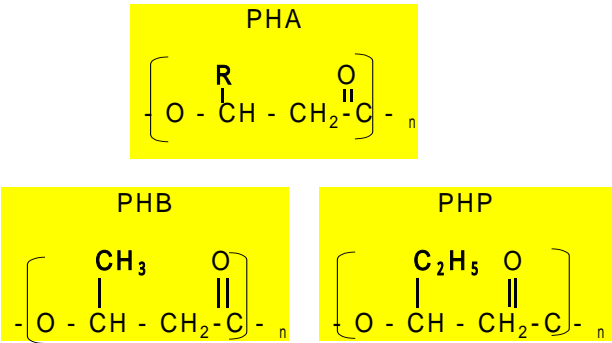


図6 PHA の構造式

3.4 PHA の定量



図 6 に PHA の構造式を示す。

東京大学の実験プラントを用いた研究では、アルキル基の部分がメチル基であるポリヒドロキシ酪酸 (PHB) が測定されている。これは酢酸を添加したときに合成される PHA は、大部分が PHB であるためである。しかし、実施設では流入水の組成が変動することなどから、PHB 以外の PHA の存在が無視できないことが予想された。そこで、嫌気工程と好気工程のそれぞれについて開始時と終了時のクロマトグラムを比較し、PHB のピークと同様の動きをしているピークがあるかどうかについて調べた。クロマトグラム上で PHB に相当するピークの保持時間が 5.4 分付近であるのに対して、9.1 分付近にも同様の動きをするピークが存在しており、これも PHA であると考えられた。分子量が大きくなると保持時間が長くなることから、このピークはポリヒドロキシ吉草酸 (PHP) と推察されたが、標準物質が一般に市販されていないため確認することができなかった。そのため、これを PHP? として取り扱い、定量には PHB の検量線を転用することとした。また、PHA の量として両者の和を用いた。

注：PHA の単位 通常 mg-C/l などの単位を付けるが、本報告では、PHP? と推察した物質の検量線ができていないため、敢えて無単位として記した。

#### 4. 測定結果

##### 4. 1 嫌気工程でのりんと PHA の関係

嫌気工程は次の方法によって行った。

A2O 系列の返送汚泥と反応槽流入水を 3 : 10 の割合 (返送率 30%) で、2 ㍑のビーカーに移し、マグネットを入れて、ビーカーの内径に合わせて円形に切り取ったポリエチレン膜で水面に蓋をした。蓋の外側一ヶ所に約 1 cm 角の穴を空けておき、ここから混合液を採取した。

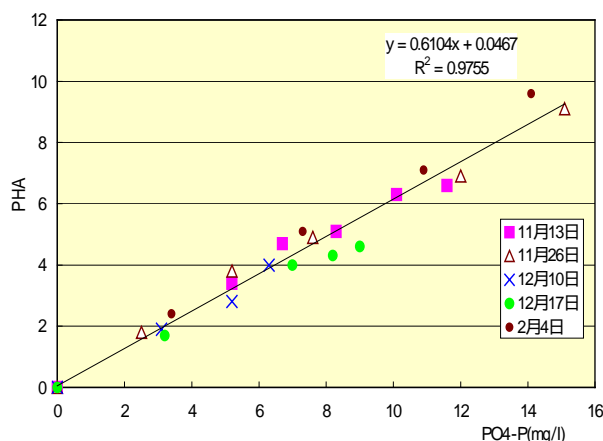


図 7 嫌気工程での PO<sub>4</sub>-P と PHA との関係

嫌気工程での PO<sub>4</sub>-P と PHA との関係を図 7 に示す。

初期濃度が異なるため、グラフでは、実験開始時の PO<sub>4</sub>-P 及び PHA の値を差し引いた量 (PO<sub>4</sub>-P と PHA) で示した。

実験日によって多少の違いがあるが、りんの放出と PHA の増加には相関が認められた。その傾きは、0.61 であった。すなわち、PO<sub>4</sub>-P が 1mg/l 増えると PHA が 0.61 合成されることになる。また、ここでは、(PHA) = (PHB) + (PHP?) としたが、図 7 の近似直線より上にある 11 月 13 日お

よび 2 月 4 日のデータでは PHP? よりも PHB が多く合成されていたことから、PHP? の合成には多くの PO<sub>4</sub>-P の放出が必要だと考えられる。今後、PHB と PHP? を個別に評価できれば、より正確な値が導き出せる。ちなみに、酢酸を多く含む流入水では PHB が、プロピオン酸が多くなると PHP? が主として合成される。

##### 4. 2 無酸素状態での PO<sub>4</sub>-P と PHA の関係

「嫌気-好気法（AO法）」と「嫌気-無酸素-好気法（A<sub>2</sub>O法）」を比較すると、A<sub>2</sub>O法の方が、りん（りん）の除去が不安定になることが知られている。このため、両者の工程でのPO<sub>4</sub>-PとPHAの関係を比較するため次のような実験を行った。

2 ㍑のビーカー 2 個に A<sub>2</sub>O 系列の返送汚泥と反応槽流入水を入れ、嫌気状態にして PHA を蓄積させた。その後、一方には、硝酸カリウム溶液を加えて攪拌を続け、2 時間無酸素状態とした後、蓋を外してエアレーションを開始した。他方は、すぐに蓋を外してエアレーションを開始した。そのときの PO<sub>4</sub>-P と PHA の関係を図 8 に示す。

好気工程のグラフよりも、無酸素-好気工程のグラフの方が下にきていた。すなわち、PO<sub>4</sub>-P 濃度が同一レベルになるのに無酸素-好気工程では、より多くの PHA が消費されていた。次に、無酸素状態での PO<sub>4</sub>-P、PHA と NO<sub>3</sub>-N の関係を図 9 に示す。

図 9 で、NO<sub>3</sub>-N との相関が認められたことから、無酸素状態のりん蓄積菌は、硝酸分子中の酸素を呼吸に利用（硝酸呼吸）しているものと考えられた。硝酸呼吸では、酸素を使った呼吸よりも多くのエネルギーを必要とした（このことは、活性汚泥の混合液中に溶存酸素が少しでも存在する場合、NO<sub>3</sub>-N よりも酸素が消費されることから理解できる）。結果として、PHA が余分に消費されるため、A<sub>2</sub>O 法では PHA の蓄積量が少なくなり、りん除去が不安定になりやすいと考えられた。

#### 4. 3 好気工程での PHA

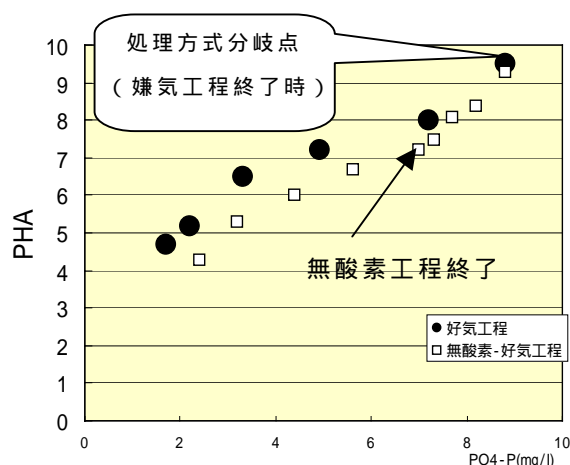


図 8 処理方式別 PO<sub>4</sub>-P と PHA の関係

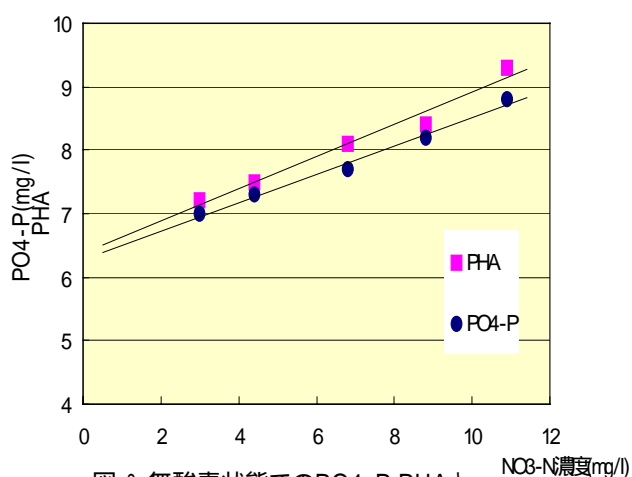


図 9 無酸素状態での PO<sub>4</sub>-P、PHA と NO<sub>3</sub>-N の関係

好気工程での PO<sub>4</sub>-P と PHA との関係を図 10 に示す。

実験日によって程度の差があるもののいずれの場合にも S 字状のカーブを描いていた。このグラフから好気工程に移ってから中程（エアレーション開始 30～120 分程度）で、PO<sub>4</sub>-P の吸収に対して PHA の減少が小さいことがわかる。りん蓄積菌内の PHA は、りん吸収のほかに増殖等にも利用されることから、エアレーション開始から終了までに PHA の主な使われ方が異なっているのかもしれない。また、PHA の変化を好気工程時間の対数に対してプロットした図 11 で、初めは傾きにバラツキがあるが、後半は一様に減少していた。このような工程初期の状況がりん除去の良・不良に影響しているように思われ、りんの過剰摂取メカニズム解明に役立つものと思われた。

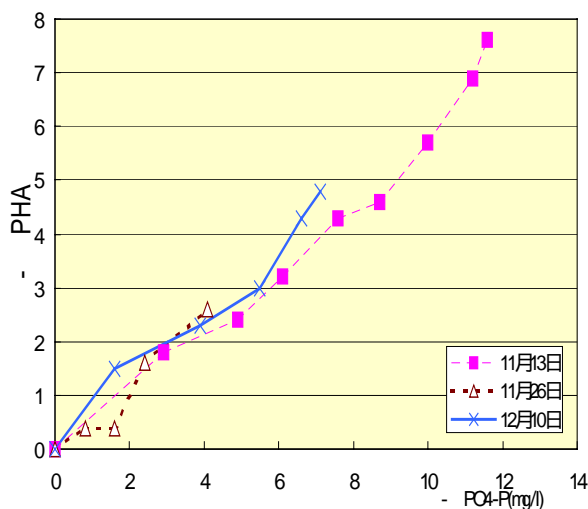


図10好気工程でのPO<sub>4</sub>-PとPHAとの関係

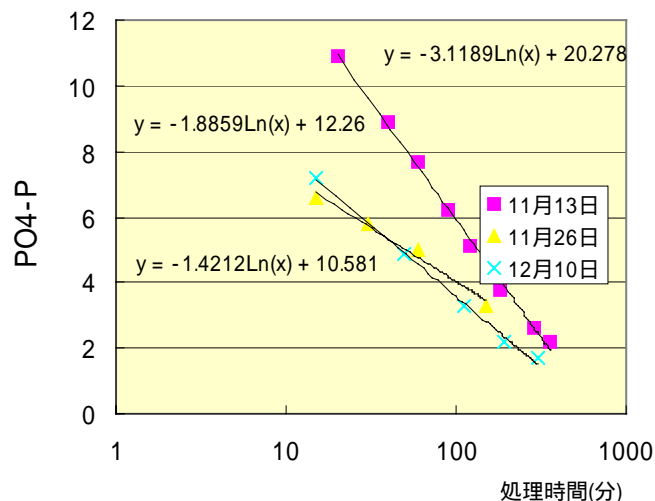


図11 ばっ気時間によるPO<sub>4</sub>-Pの変動

#### 4.4 実機A<sub>2</sub>O系列の状況

実機A<sub>2</sub>O系列の反応タンク処理状況を図12に示す。

机上実験の結果からPHAの重要性、すなわち嫌気槽でいかにPHAを溜め込むかがりん処理の成否を分けていていると考えられた。

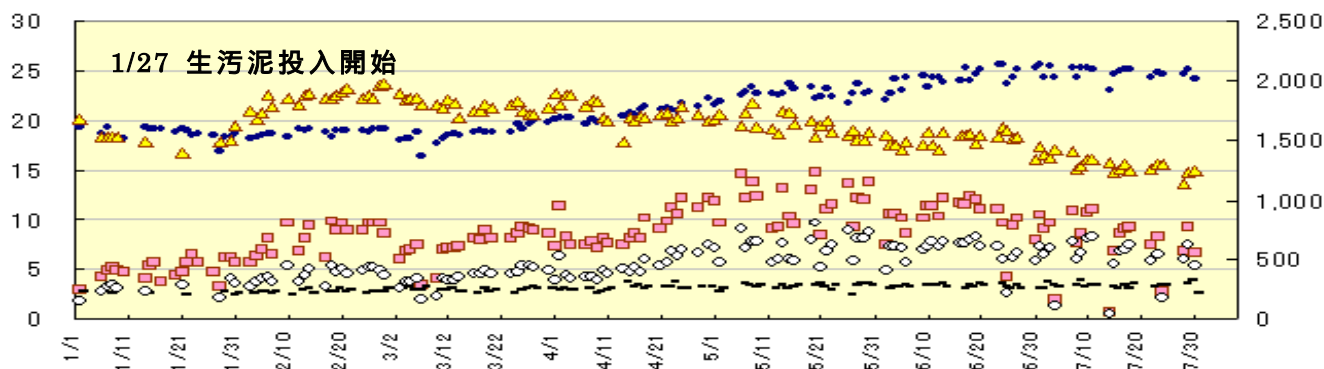


図12 反応タンクの処理状況

- 水温(°C)
- 嫌気層PO<sub>4</sub>-P(mg/l)
- 汚泥中P(%)
- ◇ 単位あたり吐き出しPO<sub>4</sub>-P(mg/MLSS)
- ▲ MLSSmg/l(右目盛)

流入水の有機物がりん除去に大きく影響を与えていることは古くから知られており、BOD/P比で20以上が必要とも言われてきた。<sup>2)</sup>しかし、実機では必ずしもあてはまらないケースも出てきており、近年の研究では、

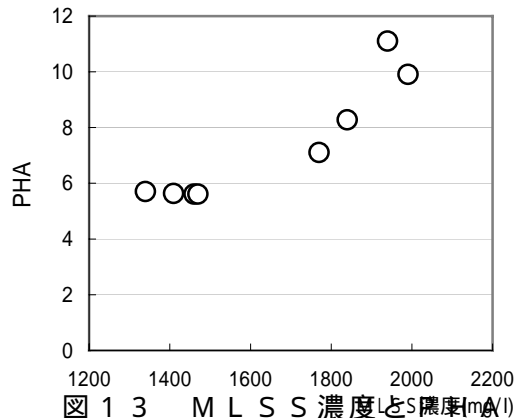
BODのなかでも有機酸、特に酢酸が影響が大きいことがわかってきた。<sup>3)</sup> 流入水の有機物濃度が高ければ、嫌気槽のりん放出濃度は高まり、好気槽でのりん取り込みが大きくなる。したがって良好なりん除去を確保するためには嫌気槽のりん放出量を増やし、できるだけPHAを蓄積することである。

そのために生污泥投入は効果的と思われる。その理由のひとつは投入する生污泥そのものに有機酸が多いことである。<sup>4)</sup>しかし投入量そのものは流入水量に比べればそれほど多くはないため、流入水全体からみた場合、上乘せする有機酸量はせいぜい1～2



mg/l 程度である。<sup>5)</sup> ふたつめは、投入する生污泥と返送污泥によって嫌気槽であらたに有機酸などが供給されるのではないかということである。新たに供給された有機酸は脱窒細菌などの通性嫌気性細菌などによってただちに消費されるため供給量の全体量を把握することは困難である。しかし、新たに供給された有機酸の一部はPHAとしてりん蓄積菌に蓄積されるため、りん放出量の増加を観察することにより、間接的に嫌気槽で供給された有機酸などを知ることができる。つまり、生污泥投入によりりん吐き出しが明らかに増加した場合は、嫌気槽であらたに有機酸などが供給されたと考えてよいと思われる。

また、PHA生産に関する机上実験を行う際に実機の活性污泥(好気槽末端相当)のPHAを測定した結果を図13に示す。



これらの結果とPHAの机上実験の結果より次のことがわかった。

生污泥を添加(平成15年1月27日添加開始)するとMLSS濃度が高まった。(その後、適正な硝化運転のためA-SRTを短縮しMLSS濃度を下げた。)

污泥中りん濃度は高まる傾向であった。3.5%くらいが上限のようである。

MLSS濃度と污泥中りん濃度が高くなるとりん放出量も増加した。PHAも増加した。その後のMLSS濃度の減少に伴いりん放

出量は減少したが、単位MLSSあたりの放出量は減少していない。

処理水のりん濃度はほとんどの場合0.5mg/l以下であった。

これらの結果より、生污泥の投入量を増やせば、より多量の降雨に対応できることが推測された。

## 5. まとめと今後の課題

生污泥の投入により、A<sub>2</sub>O系列の処理水りん濃度は、豪雨時と異常流入事故時以外は、すべて高度処理基準値である1mg/l以下であった。そのメカニズム解明のためにPHAを測定し、従来の水質項目である嫌気槽でのりん放出濃度や、無酸素槽での脱窒状況等とあわせて解析し以下の結果が得られた。

- (1) 生污泥投入により、MLSS濃度の増加や嫌気槽でのりん放出量の増加があった。
- (2) りん放出量の増加にともない嫌気槽でのりん蓄積細菌のPHAの蓄積量が増えた。
- (3) 菌体内のPHAの蓄積量増加により、好気槽末端で消費されずに菌体内に残留するPHAの量が増加した。
- (4) 残留するPHA量の増加によって、流入負荷変動時や降雨時にも、良好なりん除去ができた。

今回の調査結果とあわせて、実機のりん処理に関する反応速度等を正確に測定することにより、今後検討が必要な以下の課題の解決に役立つ。

連続降雨時の予防的対策とその限界の明確化

嫌気槽のHRT算出の理論的根拠の構築

りん除去における流量変動の許容範囲(好気槽のりん摂取必要HRT)の算定手法の確立

## 活性汚泥モデルにおけるりん処理にかかるパラメータの精緻化

### 参考文献

- 1)「高度処理施設設計マニュアル(案)」日本下水道協会 平成6年
- 2)「りん除去設計マニュアル」日本下水道協会訳 昭和63年
- 3)「合流式下水処理場のりん除去に及ぼす流入有機酸濃度の影響」佐久間ら 第39回下水道研究発表会論文集
- 4)「平成14年度流域A<sub>2</sub>O検討会報告書」 流域下水道本部 平成15年3月
- 5)「有機酸添加によるりん除去性能向上に関する実証調査」 下水道局共同研究報告書 平成14年3月

## 3 - 7 砂ろ過（固定床型・移床型）施設の機能向上技術の開発

計画調整部技術開発課

石井 実 森田 健史

### 1. はじめに

近年、処理水質向上を目的として、急速砂ろ過設備が既設処理設備の後段に付加する形で導入されつつある。この急速ろ過設備は、浮遊物質（SS）・有機物（BOD）の除去設備として位置づけられているが、これに改良を加えることで下水処理水中に残存する硝酸性窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）を中心とした窒素成分が低減可能となれば、現有施設を活用した効率的かつ即効性のある SS・窒素同時除去システムの構築が達成できる。

本研究は、平成 14 年度から 3 ヶ年の予定で、公募型共同研究として開始した。2 タイプ（上向流固定床型砂ろ過池、上向流移床型砂ろ過池）の急速ろ過設備に対して、脱窒炭素源としてメタノール（MeOH）を注入して、窒素除去実験を行ったものである。

SS・BOD・窒素の同時除去性能について、本研究における処理水の目標水質を表-1 に示す。全窒素（T-N）濃度については 5 mg/L 以下、SS・BOD については急速砂ろ過と同等を目標とし、低コストで達成することを目指した。

表-1 処理水の目標水質

項目	目標値
T-N	5 mg/L 以下
SS	急速砂ろ過と同等
BOD	急速砂ろ過と同等

注：SS、BOD はろ過速度により異なる

### 2. 調査期間・場所

調査期間：平成 14 年 6 月～平成 17 年 3 月

調査場所

上向流固定床型：落合水再生センター 急速ろ過施設地下 2 階

（栗田工業㈱、㈱荏原製作所、日本碍子㈱）J V との共同研究）

上向流移床型：中野水再生センター 水処理施設地下 3 階

（㈱タクマとの共同研究）

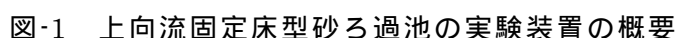
### 3. 上向流固定床型砂ろ過池の調査結果

#### 3.1 実験装置の概要

上向流固定床型砂ろ過池の実験装置の概要を図-1 に示す。実験装置は、調圧塔・砂ろ過塔・MeOH 注入設備から構成されている。ろ過層は支持床とろ材に大別される。

ろ過装置の原水（二次処理水）に MeOH を注入し、下部の支持床にて原水の持ち込み DO を消費するとともに、ろ材下部の無酸素ゾーンにて脱窒を行う。過剰な有機物が残存する場合には、ろ材上部で中間散気を行って有機物を除去し、処理水の BOD 上昇を抑える構成としている。

また実験系列は 3 系列とし、1 系は既設を模擬する対照系、2,3 系は窒素除去を行う MeOH 注入系として調査を行った。



ようになった。しかし 1 日あたりの洗浄時間は改良前 47 分に対して 69 分となるため、水回収率は約 4% 低下し、90% となった。

表-2 改良前後の洗浄工程

	改良前(落合既設と同様)		改 良 後		備 考
工 程	洗浄時間 (分)	洗浄流量 ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{分}$ )	洗浄時間 (分)	洗浄流量 ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{分}$ )	
洗浄回数	1 回 / 日		2 回 / 日		洗浄回数増加
水抜き(1)	7	-	7	-	
気水洗浄(1)	7	0.18	10	0.17	時間延長
水押し出し	-	-	1	0.17	工程追加
水洗浄(1)	5.5	0.88	10	0.78	時間変更
水抜き(2)	7	-	-	-	工程削除
気水洗浄(2)	7	0.18	-	-	工程削除
水洗浄(2)	7	0.88	-	-	工程削除
砂締め	0.5	-	0.5	-	
捨水	6	原水流量	6	原水流量	原水流量はろ過速度により異なる
1 日の洗浄時間	47 分		69 分 ( 34.5 × 2 回 )		
1 日のろ過時間	1,393 分		1,371 分		
水回収率 ( % )	94		90		

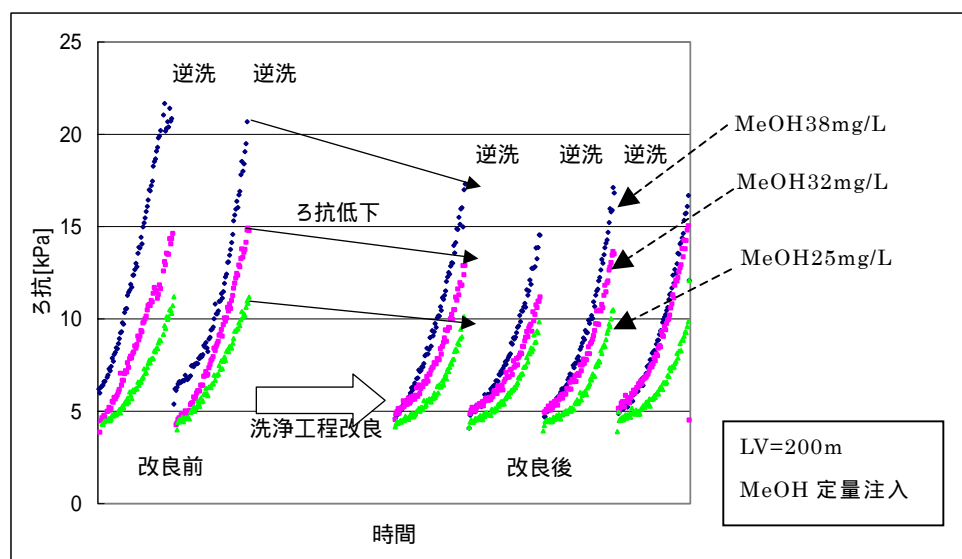


図-2 改良前後のろ抗の変化

## (2) ろ過速度がろ抗に及ぼす影響

ろ過速度 (LV) を 200m/日から 300m/日に変更したときのろ抗の変化を図-3 に示す。

ろ過速度 300m/日では 200m/日に比べてろ抗が約 5kPa 上昇し、MeOH を注入しない場合で最大 12 k Pa、MeOH を制御注入した場合で最大 24 k Pa 程度となった。

ろ過速度 300m/日で MeOH を注入した場合、生物膜の増加によるろ抗の上昇が著しいため、安定した脱窒運転のためには洗浄の頻度、方式等を改善する必要があることが分かった。

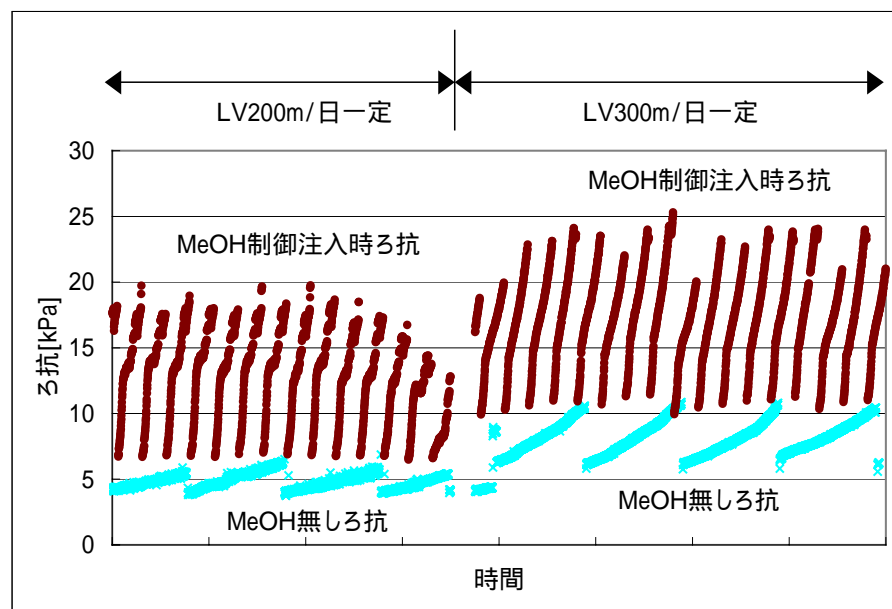


図-3 ろ過速度 (200m/日,300m/日) とろ抗の関係

## (3) メタノール注入方法の検討

### 定量注入運転

MeOH 注入量を一定とした場合の処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化の例を図-4 示す。原水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の時間変動によって、注入不足 (処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  が残る) や注入過多 (処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  がゼロとなり、残存 BOD が検出される) になり、安定した処理が困難であることが分かった。

なお、定期的に  $\text{NO}_3\text{-N}$  が 4 ~ 5mg/L と高くなっている部分は逆洗中の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度である。

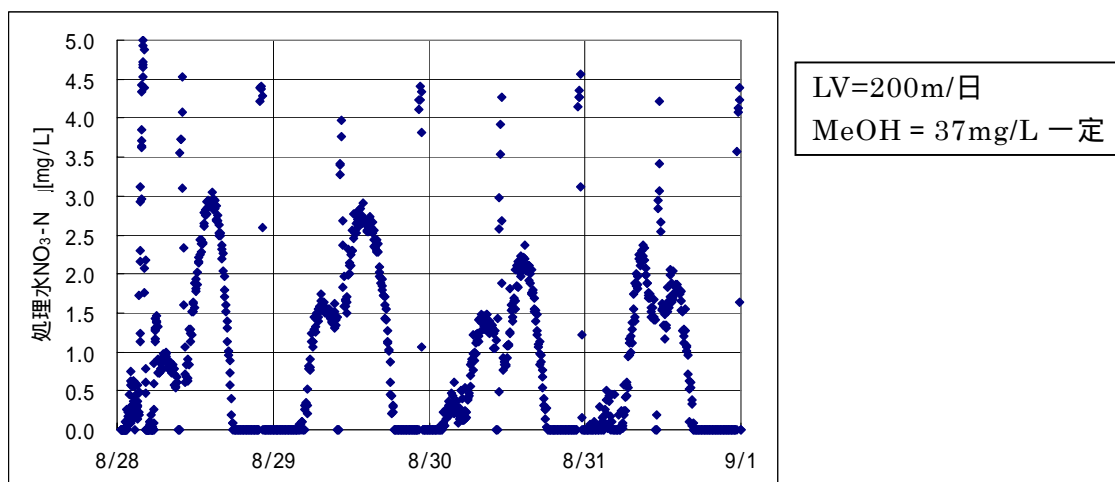


図-4 MeOH 定量注入時の処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  の経時変化

## MeOH 制御運転

窒素除去の安定化、処理水 BOD 上昇防止及び薬品費の低減を図るため、MeOH の注入量を適切に制御する方法を検討した。

理論的な MeOH の必要注入率は、除去した  $\text{NO}_3\text{-N}$  と DO の関数となり、次式で表される。

$$\text{MeOH 必要注入率}[\text{mg/L}] = (\text{原水 } \text{NO}_3\text{-N}[\text{mg/L}] - \text{処理水 } \text{NO}_3\text{-N}[\text{mg/L}]) \times 2.86 + \text{原水 DO}[\text{mg/L}] \times 1.0$$

本実験装置では操作点（薬品の注入点）と制御目標値の観測点（処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  の測定点）が離れている。このため、MeOH の注入量を変動させた影響は、ろ過速度 200m/日の場合で約 15 分の遅れ時間の後に、処理水質として検出される。

通常、応答の遅い系についてはフィードフォワード制御が用いられるが、制御に必要な測定項目が多く煩雑であること、測定誤差の影響を受けるという短所がある。

一方で、フィードバック制御は、遅れ時間が長い場合には急激な変動に追従できないという短所はあるが、測定項目が少なく制御が簡単であるという長所がある。

原水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度及び流量の変動がゆるやかであることから、本調査ではフィードバック制御を採用した。

MeOH 制御運転時における  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度、窒素倍率（理論上脱窒に要する MeOH 量（窒素の 2.86 倍）に対する倍率）の経時変化を図-5 に示す。

原水  $\text{NO}_3\text{-N}$  が 14 ~ 20mg/L の範囲で周期的に変動するのに対して、処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  は概ね 0.5 ~ 1.5 mg/L の範囲に制御することができた（制御目標値 1.0mg/L）。また、窒素倍率は 1.0 程度であり、ほぼ理論値通りに脱窒が行われていた。

定期的に制御値から外れている点は、MeOH が注入されていないろ過塔洗浄工程及び MeOH 注入制御が追従するまでに流出したろ過水によるものである。処理水  $\text{NO}_3\text{-N}$  は洗浄終了後に徐々に低下し、処理水質が安定するのに要する時間は 30 分程度であった。実施設では多数のろ過施設があり、洗浄工程が順番に行われるため、総合処理水質では影響が小さいものと考えられる。

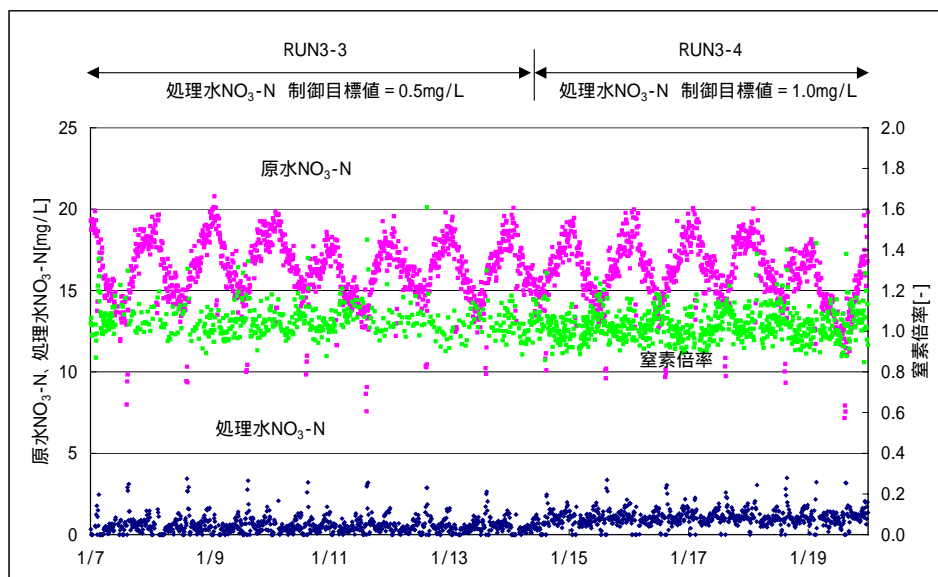


図-5 MeOH 制御運転時における  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度、窒素倍率の経時変化

#### (4) 水質分析結果

各種条件で実験を行ったが、主な RUN における水質状況（平均値，最小値，最大値，除去率）を表-3 に示す。

原水の水質は、以下のとおりであった。

T-N は、14～20mg/L 程度であり、ほとんどが NO<sub>3</sub>-N であった。

SS 及び BOD は、平均で 3～5mg/L 程度であった。

DO は、水再生センター第二沈殿池内においては 1mg/L 程度であるが、その後の堰や導水渠等において酸素が溶解し、ろ過流入部においては 8～9mg/L となっていた。

水温は、雨天時にやや下がるものの、低温時においても 18 程度であった。

これらの原水に対し、MeOH をフィードバック制御注入することで、良好な処理水質が得られ、窒素除去運転が可能であった。

ろ過速度 200m/日、MeOH 制御目標値 0.5mg/L では、処理水の T-N が 0.6～3.4mg/L となり、T-N 除去率では 68%～93%であった。

ろ過速度 300m/日、MeOH 制御目標値 1.0mg/L では、処理水の T-N が 2.2～4.7mg/L となり、T-N 除去率では 61%～83%であった。

これに対して MeOH を注入していない対照系では、窒素は除去されなかった。

また、ろ層内が無酸素状態となっているため処理水 DO は常にゼロであり、SS、BOD、COD に関しては対照系と比べ若干の悪化が見られるものの、ほぼ同等の処理が行えていた。

表-3 主な RUN における水質状況（固定床）

ろ過速度	200m/日				300m/日			
MeOH	制御目標値 0.5mg/L			-	制御目標値 1.0mg/L			-
水温 (    )	22.1 ( 15.7/27.8 )				18.0 ( 17.3/18.8 )			
	原水	処理水		MeOH 注入系 除去率 ( % )	原水	処理水		MeOH 注入系 除去率 ( % )
		MeOH 注入系	対照系			MeOH 注入系	対照系	
T-N (mg/L)	10.6 7.5/13.6	1.6 0.6/3.4	10.3 7.2/12.4	85 68/93	12.3 11.7/12.9	3.0 2.2/4.7	11.6 11.3/12.1	76 61/83
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	9.3 6.4/12.4	0.7 0.0/2.3	9.5 6.5/11.4	92 75/100	10.8 10.2/11.8	1.8 1.2/3.4	10.8 10.4/11.3	83 67/88
SS (mg/L)	3.1 2.0/5.0	0.7 0.5/1.0	0.6 0.1/1.0	76 65/85	4.8 4.0/5.0	1.9 1.0/3.0	1.1 1.0/1.4	61 40/80
BOD (mg/L)	3.3 0.9/7.4	2.5 0.5/5.7	2.3 0.4/5.9	24 - /100	4.8 1.0/11.0	3.4 1.1/6.0	3.4 0.0/5.9	29 - /78
COD (mg/L)	7.5 5.3/10.0	6.9 4.6/9.5	6.8 4.3/11.2	8 0/100	10.0 8.7/13.0	8.6 7.4/9.4	7.5 6.2/8.2	14 - /34
DO (mg/L)	8.5 7.8/9.3	0 0/0	4.3 3.6/4.8	100 100/100	8.8 8.6/9.0	0 0/0	4.5 3.8/5.2	100 100/100

注：表の上段は平均値、下段は最小値 / 最大値である



### 3.3 平成 15 年度の成果と今後の課題

#### 平成 15 年度の成果

- ・ ろ過速度 200m/日において、MeOH 注入時でも、ろ層の乱れが少なく安定したろ過が可能な洗浄方法を見出せた。
- ・ ろ過速度 200m/日、流量一定の条件下において、MeOH 注入量をフィードバック制御することにより、処理水 T-N が 5mg/L 以下、SS、BOD を砂ろ過と同等とすることができた。
- ・ 除去  $\text{NO}_3\text{-N}$  に対する MeOH 消費量は、ほぼ理論値（2.86 倍）であることが確認できた。

#### 平成 16 年度の課題

- ・ 原水流量一定条件におけるフィードバック MeOH 注入の制御性が確認されたが、原水流量を変動させた場合の制御性の確認も必要である。
- ・ ろ過速度 200m/日における洗浄工程の見直しにより、MeOH 注入時でもろ層が乱れず、安定な運転が可能となった。しかし、ろ過速度 300m/日とした時には、ろ抗の上昇が早いため実運転は困難であると考えられることから、より効果の高い洗浄方式の検討が必要である。
- ・ 脱窒に必要な微生物保持量の把握と、その維持に最適な洗浄方法の検討が必要である。

## 4．上向流移床型砂ろ過池の調査結果

### 4.1 実験装置の概要

上向流移床型砂ろ過池の実験装置の概要を図-6 に、砂ろ過塔の概要を図-7 に示す。

砂ろ過塔は、鋼板製円筒型の上向流移床型砂ろ過器を使用し、系列は 1 系列とした。

ろ材は、通常の砂ろ過高度処理で使用されている珪砂としたが、粒径は 1～2mm とやや大きいものを用いた。

ろ過器は、ろ層高さの検討が行えるように、最大 3m まで砂を積層できる構造とした。ろ層内の生物量維持および DO 濃度の低減により脱窒反応を促進させるために、洗浄排水の一部を原水と循環混合させた。

原水には洗浄排水を混合した後、MeOH をライン注入した。

ろ層の洗浄工程は二段階から成っている。一次洗浄は、エアリフト管内で水とろ過砂及び吹き込まれた空気とが激しく攪拌されながら上昇することで、ろ過砂の表面に付着した汚濁物質が剥離洗浄される。

二次洗浄は、ラビリンス構造のサンドウォッシャー内を沈降させる過程で洗浄する。

洗浄工程とろ過工程が常時並行して行われるため、連続ろ過システムとなっている。

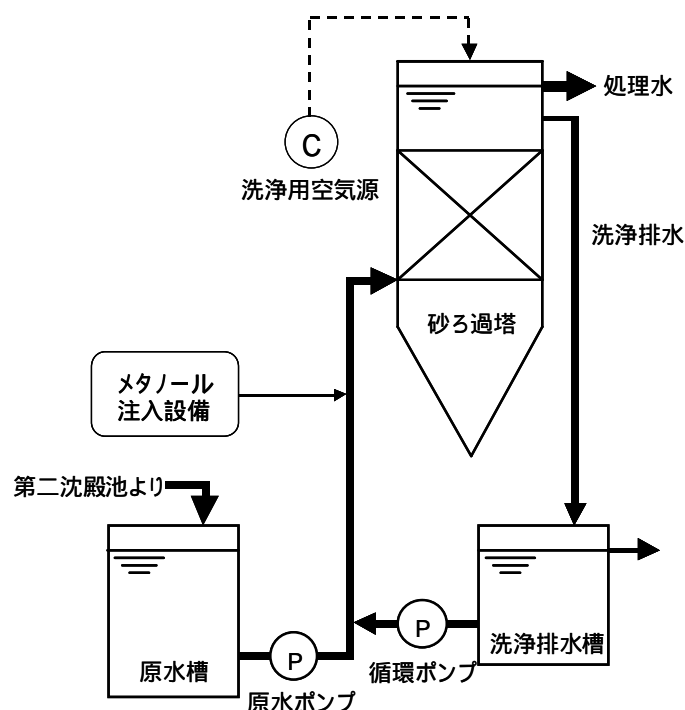


図-6 上向流移床型砂ろ過池の実験装置の概要

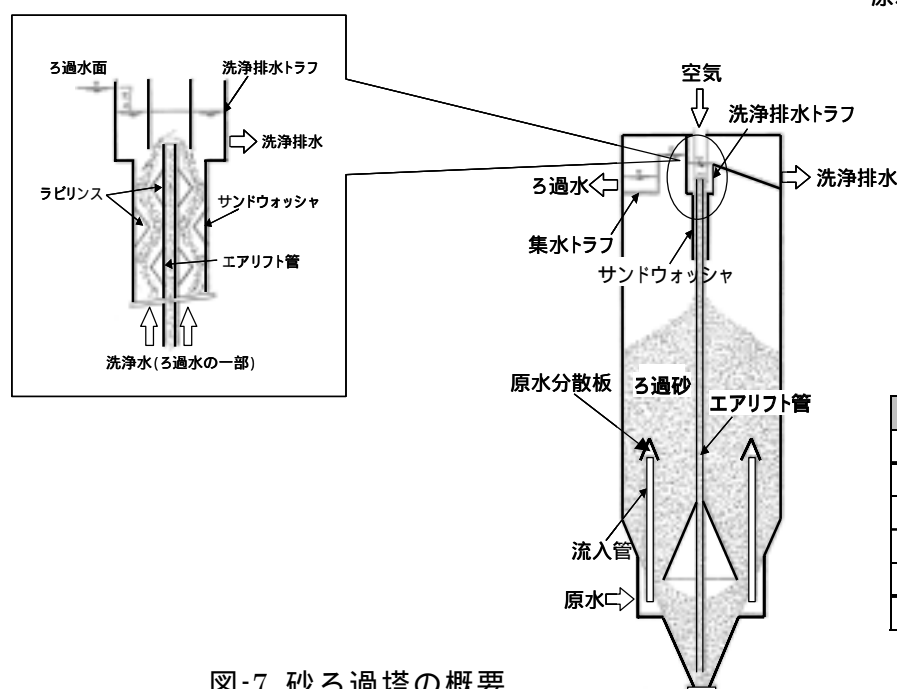


図-7 砂ろ過塔の概要

項目	仕様
ろ過径	800 mm
ろ過面積	0.5 m <sup>2</sup>
ろ過高さ	1.0 m
ろ材の材質	珪砂
ろ材の粒径	約 1～2 mm
ろ材の比重	2.6

## 4.2 調査結果

### 4.2.1 平成 14 年度調査結果

ろ層高さ 1.0m の条件で、ろ過速度 100m/日と 200m/日での低水温期における窒素除去性能の調査を行った結果から、窒素除去及び SS・BOD 処理を安定して行うには、ろ層高さの改善、適正ろ過速度の把握、MeOH 注入方法の検討が必要であることが分かった。

調査の概要を下記に示す。

ろ過速度 100m/日、系外排水比約 5%、排水循環比約 14%、MeOH 定量注入(18～24mg/L)では、T-N 除去率は 66%であった。また、処理水 BOD は残存 MeOH のため原水 2.1mg/L に対して 2.5mg/L に上昇し、処理水 SS は原水と同等の 1.6mg/L であった。

ろ過速度 200m/日、系外排水比 2～7%、排水循環比 7～14%、MeOH 定量注入(24～30mg/L)では、T-N 除去率は 51%に低下した。また、処理水 BOD は原水 2.2mg/L に対して 5.6mg/L となり、処理水 SS は原水 1.5mg/L に対して 3.0mg/L であった。

### 4.2.2 平成 15 年度調査結果

ろ層高さ、ろ過速度、MeOH 注入方法等の各種実験条件を組み合わせ、RUN3～RUN11 の調査を行った。

#### (1) ろ層高さの検討

窒素除去に必要なろ層接触時間の確保と SS 除去性能向上のため、砂ろ過の標準高さである 1m、及び 1.5m、2m の 3 段階でろ層高さの検討を行った。また、ろ過速度は、原水(二次処理水)を基準に 150～300m/日の条件で行った。

ろ層高さとしろ層損失の経時変化を図-8 に示す。

ろ層損失は、ろ層高さ、ろ過速度、流入 SS 濃度によって異なった。ろ過速度が 150～250m/日の場合には、ろ層高さが 1～1.5m でも窒素除去に大きな問題がなかったが、ろ過速度 300m/日ではろ層高さが 2m 必要であることが分かった。

ろ過速度 300m/日の条件におけるろ層損失は、ろ層高さ 1.0m で約 400mmAq、ろ層高さ 1.5m で約 400～600mmAq、ろ層高さ 2.0m で 500～900mmAq であった。ろ過速度 300m/日でも、ろ層損失が運転条件範囲であったのは、ろ材を連続洗浄しているという移床型の特性であると考えられる。

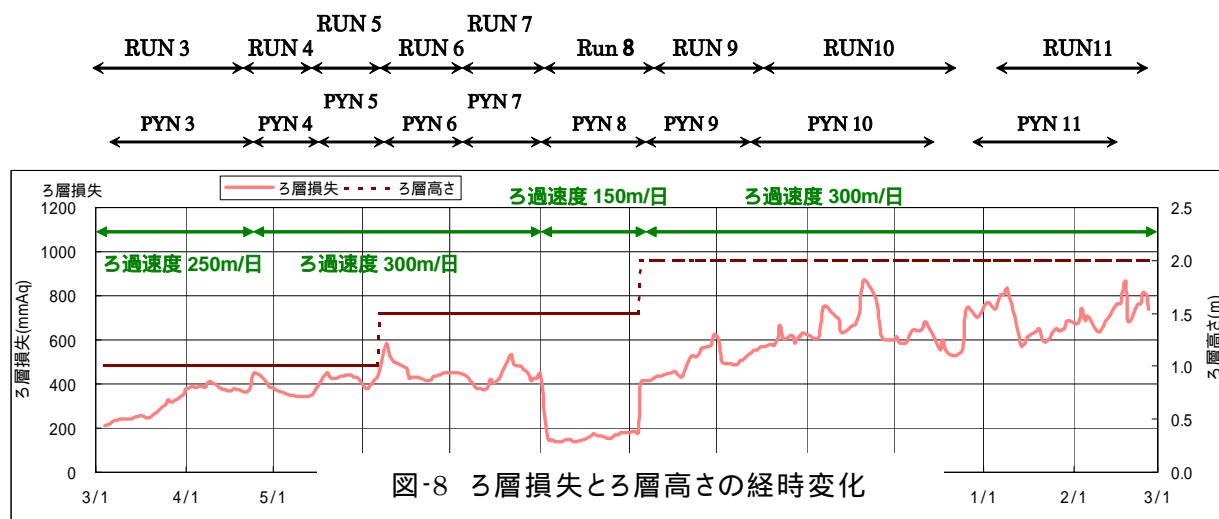


図-8 ろ層損失としろ層高さの経時変化

図 5-2-1 ろ層高さとしろ層損失の経日変化

## (2) MeOH 注入方法の検討

### 定量注入運転

原水 NO<sub>3</sub>-N 濃度を 10mg/L と仮定して、やや過剰添加の条件である MeOH 濃度( 30 mg/L )で定量注入した。

実際の原水 NO<sub>3</sub>-N 濃度には時間及び日変動があるため、原水 NO<sub>3</sub>-N 濃度が 10mg/L 以上だと MeOH が不足して脱窒が不完全となった。一方、10mg/L 未満だと MeOH が過剰となり、処理水 BOD 値を上昇させた。

処理水 BOD 濃度の上昇は、RUN3 で 2.7mg/L ( 平均値 )、RUN4 では 6.6mg/L ( 平均値 ) であった。

### MeOH 制御運転

MeOH 制御運転は、原水の NO<sub>3</sub>-N 濃度と DO 濃度に応じたきめ細かい制御のできるフィードフォワード制御により行った。実験式である Mc Carty 式により NO<sub>3</sub>-N 除去に必要な MeOH 濃度を計算し、「制御比( )」により修正したものを MeOH 必要注入率とした。「制御比( )」は、硝酸センサー測定値の誤差の補正や、MeOH の過不足を調整するため、0.8 ~ 1.2 の範囲で調整した。MeOH 必要注入率は、原水 NO<sub>3</sub>-N 濃度の約 3 倍となる。

$$\begin{aligned}\text{MeOH 必要注入率 ( mg/L )} &= \text{制御比 ( )} \times \text{必要 MeOH 濃度} \\ &= ( 0.8 \sim 1.2 ) \times \left[ 2.47 \text{ NO}_3\text{-N ( mg/L )} + 0.87 \text{ DO ( mg/L )} \right]\end{aligned}$$

Mc Carty 式( 実験式 )

MeOH 制御運転を行うことで、原水 NO<sub>3</sub>-N 濃度の時間的な変動に MeOH 必要注入率が追従し、処理水 BOD 濃度の増加量が安定的に約 1mg/L 程度となった。

脱窒反応が MeOH 律速又は過剰にならずに、注入した MeOH を有効に利用するには、フィードフォワード制御が有効であることが分かった。

## (3) ろ層内水質分布試験

ろ層内における処理状況を把握するために、RUN10 のろ層内水質分布試験を行った結果を図-9 ~ 11 に示す。

窒素除去は、DO 濃度が低下したろ層( 0.5m )から始まり、ほぼ直線的に除去が進行していた。ろ層( 1.0m )の DO が 0.39mg/L ORP が -38mV であり、脱窒反応に適した状態であったことが分かった。

MeOH 濃度は、混合水とろ層( 0.5m )の間で急速に消費されて半減している。これは、原水の持ち込み DO の消費に優先的に利用されたことを示唆している。また、その後は、NO<sub>3</sub>-N 濃度の減少とほぼ一致していることから、MeOH が脱窒炭素源として利用されていると考えられる。

溶解性 BOD ( S-BOD ) は、混合水では MeOH 濃度とほぼ同様であるが、ろ層( 0.5m )では MeOH が半減しているにもかかわらず、大きな変化がなかった。これは、ろ過器流入水には排水循環が含まれているため、SS 成分が一部可溶化して BOD 源となっているものと考えられる。

水温が窒素除去へ与える影響については、水温 16.9 ~ 24.7 の範囲では NO<sub>3</sub>-N 除去速度が大きく変化しなかったことから、確認できなかった。

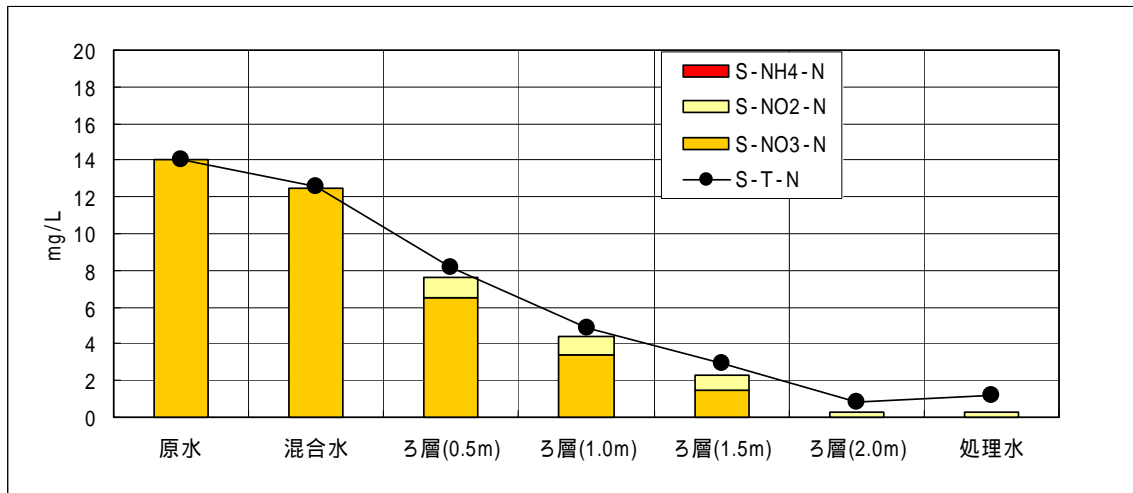


図-9 窒素成分のろ層内水質分布試験結果

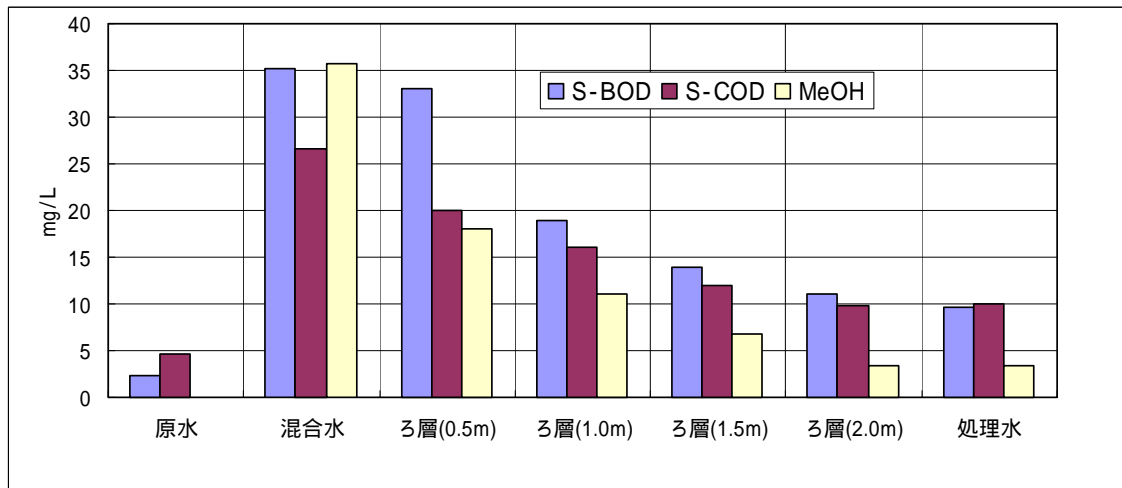


図-10 有機物のろ層内水質分布試験結果

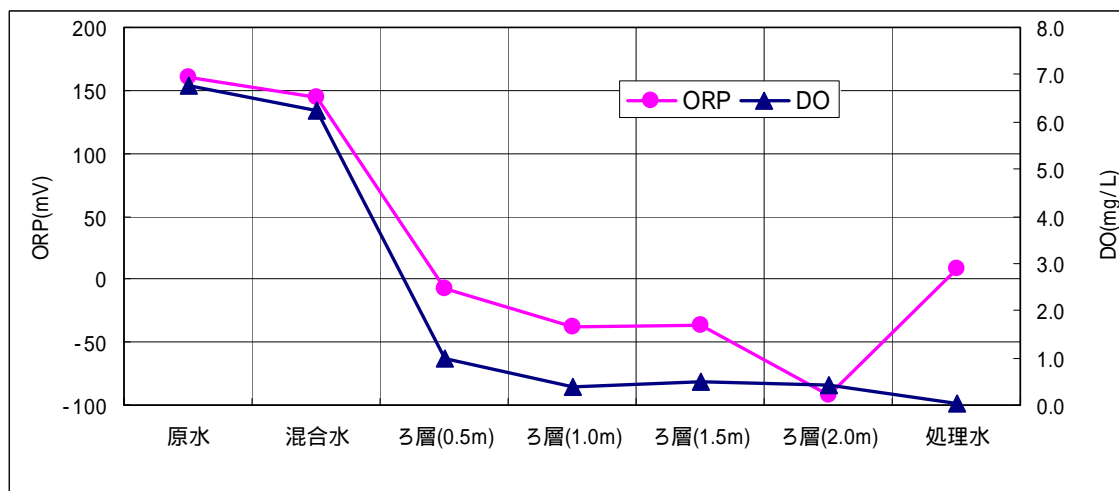


図-11 O R P、D O濃度のろ層内水質分布試験結果

注) 混合水は原水と排水循環の混合液である。

#### (4) 排水循環の検討

生物学的な脱窒反応は還元反応であるため、反応条件として DO 濃度が低い状態であることが必要であり、ろ層内の DO 濃度が高いゾーンは脱窒ゾーンとして有効に使われていない可能性がある。

そこで、原水に有機物を含むろ過器洗浄排水を循環混合させ、ろ層下部の DO 濃度の低減と脱窒細菌の供給を目指した。排水循環 SS 量の制御は、SS 濃度と流量を設定して行った。

##### ろ層内の溶存酸素濃度

原水の DO 濃度は 5～7mg/L と高い値であり、低水温期や降雨時に上昇する傾向がみられた。ろ層下部（0.5m 位置）の DO 濃度は、原水の影響を受けて、最大 4.5mg/L（雨天時）まで上昇した。

ろ層高を 1.0m、1.5m、2.0m の 3 条件において排水循環量を変更した結果、ろ層高が高いほど、また排水濃度が高いほど DO の低減効果があった。

##### 排水 SS 濃度

原水と排水循環を合計したろ過器流入 SS 濃度と  $\text{NO}_3\text{-N}$  除去率の関係を図-12 に示す。

$\text{NO}_3\text{-N}$  除去率は、ろ過器流入 SS 濃度と高い相関がみられ、排水循環によりろ過器流入 SS 濃度を 15mg/L 以上に調整することで  $\text{NO}_3\text{-N}$  除去率が約 80%以上となった。

ろ過器流入 SS 濃度を 20mg/L 以上とした場合には、 $\text{NO}_3\text{-N}$  除去率が 90%～100%と上限に達し、排水濃度が高いときに  $\text{NO}_2\text{-N}$  の発生や処理水 SS の悪化が見られた。

このため、最適な流入 SS 濃度は、15～20mg/L 程度と考えられる。

これらの結果から、排水循環比は約 11～14%、系外排水比は約 1～6%程度が適当であることが分かった。また、原水 DO 濃度の影響を緩和でき、窒素除去のための脱窒ゾーンを十分とるには、ろ層高を 2.0m とすることが適当であることが再確認された。

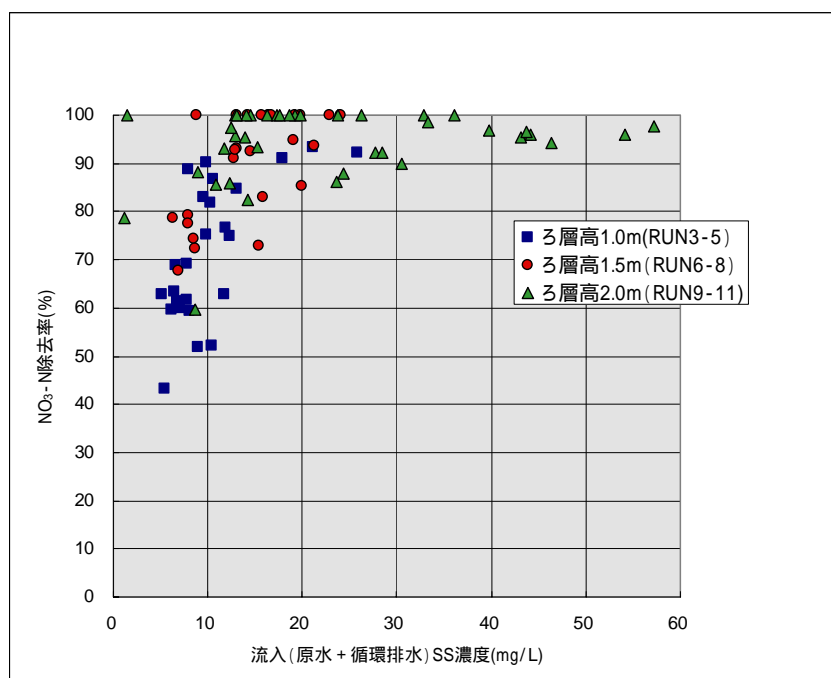


図-12 ろ過器流入 SS 濃度と  $\text{NO}_3\text{-N}$  除去率の関係

## (5) 水質分析結果

主な RUN での水質状況（平均値，最小値，最大値，除去率）を表-4 に示す。

原水の水質は、以下のとおりであった。

T-N は、4.6～17mg/L 程度で、ほとんどが NO<sub>3</sub>-N であった。

BOD は、1.2～5.8mg/L 程度、SS は 1～3.7mg/L 程度であった。

DO は、ろ過流入部においては 6～8mg/L となっていた。

水温は雨天時にやや下がるものの、低温時においても 18 程度であった。

これらの原水に対し、ろ過速度 300m/日で MeOH を定量注入及びフィードフォワード制御注入した結果、以下のとおりであった。

MeOH を定量で注入した RUN4 では、処理水の T-N 濃度が 4.3～5.3mg/L、T-N 除去率が 47%～50%であった。処理水質が目標に達しなかった原因は、MeOH が不足した場合に窒素除去が不十分となったこと、及びろ層高が 1m と低いためであると考えられる。

MeOH をフィードフォワード制御注入した RUN10 では、処理水の T-N 濃度が 0.6～2.3mg/L、T-N 除去率が 80%～94%であり、良好な処理水質となった。ろ層高さが 2m であれば、安定したろ過と窒素除去と SS・BOD 処理の運転が可能であることが示された。

表-4 主な RUN での水質状況（移床型）

ろ層高	1m			2m		
ろ過速度	300 m/日					
MeOH 注入方法	定量注入（ 24mg/L ）			自動制御注入		
水温（℃）	21.8（ 21/22.6 ）			21.0（ 16.4/24.1 ）		
	原水	処理水	除去率	原水	処理水	除去率
T-N (mg/L)	9.1 8.6/10	4.7 4.3/5.3	48 47/50	10.8 7.3/16.0	1.2 0.6/2.3	89 80/94
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	8.6 8.0/9.2	3.4 3.1/3.7	61 59/62	10.3 6.0/16.0	0.2 0.0/1.2	98 88/100
SS (mg/L)	2.2 1.5/3.0	3.8 2.0/5.7	-	1.2 1.0/1.7	1.7 1.0/3.3	-
BOD (mg/L)	3.0 2.6/3.4	9.6 8.7/10	-	2.2 1.3/3.1	3.2 1.8/6.6	-
COD (mg/L)	8.4 7.7/8.8	13.8 13/15	-	6.0 4.4/7.3	7.0 5.5/9.3	-
DO (mg/L)	5.2 4.8/5.7	0.4 0.4/0.6	-	6.1 4.8/8.3	0.5 0.3/1.1	-
ORP (mv)	238 209/289	49 -6/76	-	424 379/473	-35 -115/51	-

注：表の上段は平均値、下段は最小値 / 最大値である

### 4.3 平成 15 年度の成果と今後の課題

#### 平成 15 年度の成果

- ・ ろ層高さを 2.0m、MeOH 注入をフィードフォワード制御とすることで硝酸性窒素除去の性能向上及び SS・BOD 処理の安定化を確認し、ろ過速度 300m/日の条件で完全脱窒を達成できた。
- ・ MeOH 注入制御を行うことで、処理水 BOD 上昇は平均 0.5mg/L (最小：0～最大：1.5mg/L) となり、原水とほぼ同じであった。
- ・ ろ過速度 300m/日、ろ層高さを 2.0m とし、ろ過器流入 SS 濃度が 15～20mg/L 程度になるような排水循環と MeOH 注入制御を行うことで、平均処理水質は、T-N が 1.2mg/L、BOD が 3.2mg/L、SS が 1.7mg/L となり、NO<sub>3</sub>-N 除去率 98.1% (平均値)、T-N 除去率 89.3% (平均値) とすることができた。

#### 平成 16 年度の課題

- ・ 平成 15 年度は水量一定条件で実験を行ったが、平成 16 年度では最適条件である RUN10 の条件において、水量負荷変動による除去性能の安定性を調査する。
- ・ 平成 15 年度では完全脱窒を目標に行ったが、平成 16 年度では目標水質を維持するのに必要最小限の MeOH を添加する経済的な運転についても調査を行う。
- ・ 設計手法を確立するために脱窒速度、排水循環等について整理検討を行う。さらに実施設を想定した設計検討を行うことでシステムの評価と実用化検討を行う。



## **4 . 汚泥の処理**

### **4 - 1 汚泥からの有機酸回収と活用技術の開発**

計画調整部 技術開発課 海老澤 雅美  
北村 清明

## 1 調査の概要

東京湾の水質改善を目的に、水再生センター放流水中の全窒素、全りんに対して濃度規制、総量規制が施行されており、窒素、りんの安定した除去が求められている。

高度処理法として導入が進められている嫌気無酸素好気法（以下「 $A_2O$ 法」）では、晴天時には安定してりん除去ができるものの、合流式下水道ではりん除去が悪化する。これは、生物学的りん除去に必要な有機物が不足することが一因である。そのため、 $A^2/O$ 法施設を有する一部の水再生センターではりん除去が悪化する前に嫌気タンクへ酢酸添加を行い、りん除去の悪化を防止している。

本研究は、 $AO$ 法における流入有機物が不足した場合の有機物源として第一沈殿池の生汚泥に着目し、生汚泥から高濃度の有機酸、易分解性有機物を含む発酵汚泥を効率かつ安価に生産する技術の開発及び発酵汚泥を高度処理施設に適切に添加し、りん除去を安定させる手法を確立するため、住友重機械工業(株)と共同で実施したものである。

技術開発を行うにあたり、次のような目標を設定した。

- (1) 発酵汚泥中の有機酸濃度は 600mg/L 以上。
- (2)  $A_2O$ 法施設に発酵汚泥を投入し、処理水の全りん濃度 1 mg/L 以下を満たす添加手法を確立する。
- (3) イニシャルコスト、ランニングコストを含めた処理コストを、PAC 添加に比較して 20%削減する。

本共同研究の研究期間は平成 15 年 2 月～平成 17 年 3 月である。

## 2 調査内容

### 2.1 生汚泥の組成分析

発酵原料である生汚泥について、酸発酵に利用できる有機物の割合を把握するために組成分析を行った。

### 2.2 効率的な有機酸発酵条件の検討

図 1、2 に示す発酵槽容量 10L の小型発酵装置（回分式、連続式）を用いて発酵条件（pH、発酵時間、発酵温度、汚泥濃度、ORP 等）と有機酸生成の関係について実験を行い、効率的な発酵条件を検討した。連続式は一定時間ごとに所定量の生汚泥を投入すると共に、発酵槽内汚泥濃度を高めるため汚泥濃縮槽で汚泥分（以下「濃縮汚泥」）と上澄み（以下「発酵液」）を分離し、発酵液を取り出した。濃縮汚泥は返送汚泥として発酵槽に戻し、一部は発酵残渣として引き抜いた。また、各装置は ORP（酸化還元電位）制御のため発酵槽へ空気の吹き込みができるようにした。

発酵試験において pH、発酵温度、ORP、供給汚泥濃度、発酵槽内汚泥濃度、 $COD_{Cr}$ 、 $S-COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$ 、有機酸濃度について経時変化を測定した。測定方法は原則として JIS に準拠したが、 $COD_{Cr}$ についてはハック法を用いた。

有機酸は試料を 5C ろ紙でろ過後、1%ギ酸を等量添加し、 $0.45\mu m$  のフィルターで再ろ過したものをイオンクロマトグラフで測定した。測定した有機酸成分は酢酸、プロピオン

酸、ノルマル酪酸、イソ酪酸、ノルマル吉草酸イソ吉草酸の 5 成分である。

これら発酵条件と生成有機酸濃度の測定データを基に有機酸濃度増加予測式を作成し、連続発酵装置の仕様を検討した。

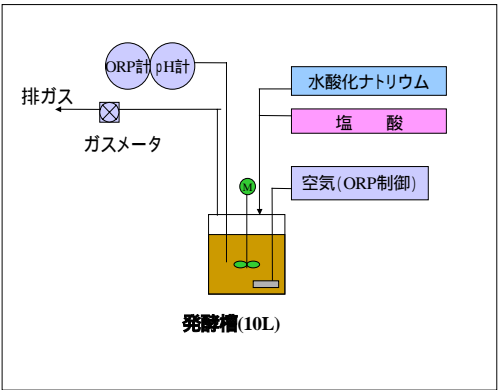


図 1 回分式小型発酵装置

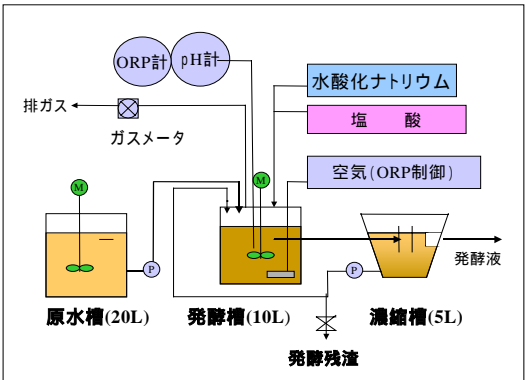


図 2 連続式小型発酵装置

2.3 連続発酵装置による発酵性能実証実験

小型発酵装置による実験結果を基に連続発酵装置を設計、製作し、連続発酵実験を行った。

図 3 に連続発酵装置のフローを、表 1 に連続発酵装置の仕様を示す。連続発酵装置は発酵槽、污泥濃縮槽、発酵液タンク、pH 調整装置、ブロワ等で構成されている。

生活污水は、技術開発課芝浦実験場内のステップ A<sub>2</sub>O パイロットプラントの第一沈殿槽に流入する下水量の 1% に相当する水量を第一沈殿槽底部から 1 時間に 1 回引き抜き、生活污水タンクに貯留した。

生活污水は 20L/時の割合で生活污水タンクから連続発酵装置の発酵槽に供給した。

発酵槽で酸発酵した污泥は污泥濃

縮槽において発酵液と濃縮污泥を分離し、濃縮污泥は発酵槽に返送し、一部は、発酵残渣として系外に排出した。また、分離した発酵液は A<sub>2</sub>O パイロットプラントへの添加実験に用いた。連続発酵装置による発酵実験は平成 16 年 1 月に開始した。

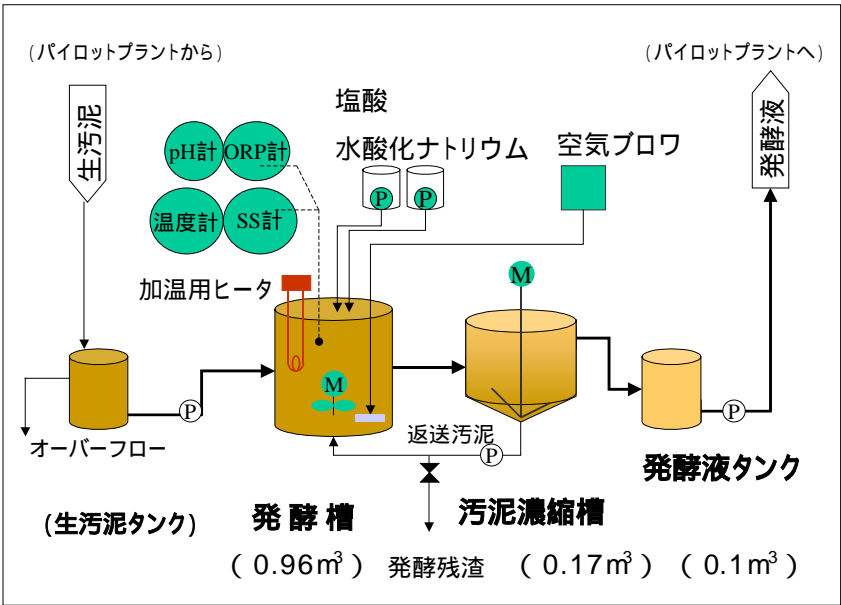


図 3 連続発酵装置のフロー

表 1 連続発酵装置の仕様

名 称	操 作 条 件	寸 法	有効容量
発 酵 槽	供給污泥：0.48 m <sup>3</sup> /日 発酵温度：20～35 滞留時間：2 日間( 48 時間 )	1000*1800H	0.96 m <sup>3</sup>
污泥濃縮槽	固形物負荷：60kg/日以下	500*1600H	0.17m <sup>3</sup>
発酵液タンク	滞留時間：約 5 時間	430* 745H	0.1m <sup>3</sup>

## 2.4 発酵汚泥等の貯留実験

実施での運転管理を想定し、発酵液が  $A_2O$  法施設への添加停止により余った場合、また発酵装置の運転を一時停止した場合に、どの程度の期間有機酸濃度を保持できるかを確認するため発酵液、発酵汚泥の貯留実験を実施した。

## 2.5 ステップ $A_2O$ パイロットプラントへの発酵液添加とりん除去実験

図4にステップ  $A_2O$  パイロットプラントのフローを示す。ステップ  $A_2O$  パイロットプラントの第2系列嫌気槽に発酵液を添加し、第2系列処理水の  $PO_4-P$ （りん酸性りん）濃度、全りん濃度を発酵液無添加の第1系列と比較した。

## 2.6 発酵槽のガス成分調査

酸発酵により発生する悪臭ガスのガス成分分析を行った。

分析にはガスクロマトグラフを用いた。

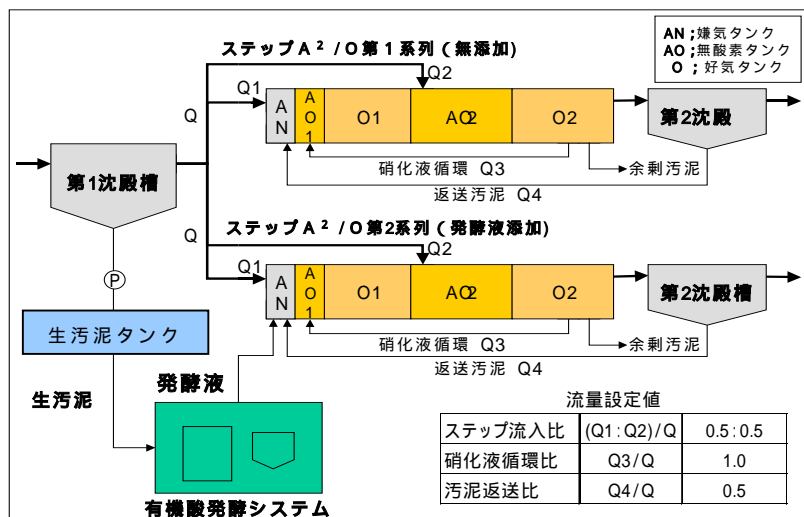


図4 ステップ  $A^2/O$ パイロットプラントのフロー

## 3 結果及び考察

### 3.1 生汚泥の組成分析結果

生汚泥の組成分析は汚泥組成の季節変動を考慮して、平成15年7月、11月、平成16年2月の3回実施した。分析に用いた試料は、ステップ流入式  $A_2O$  パイロットプラントの第1沈殿生汚泥を2時間ごとに等量採取し、混合した試料は3,500rpmで5分間遠心分離し、回収した沈殿物の組成を分析した。

分析項目は乾燥重量、強熱残留物、炭水化物、粗繊維、エーテル可溶分、全窒素である。エーテル可溶分は脂質と等しいとした。タンパク質は全窒素の分析値から換算した。表2と図5に生汚泥の組成分析結果を示す。

酵時間が短い場合、酸発酵に利用できる有機分は約1/2であることが分かった

表2 生汚泥の組成分析結果

成分		含有率 (固形分あたり)
有機物	粗繊維	24～30%
	炭水化物	36～44%
	脂質	7～10%
	タンパク質	11～18%
無機物		9～14%

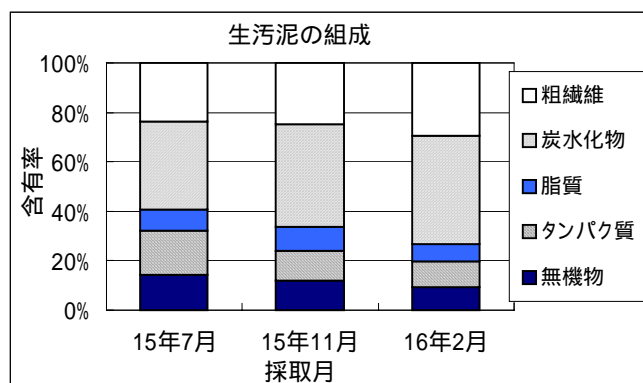


図5 生汚泥の組成分析結果

混合試料の汚泥濃度は4,800～9,400mg/L、生汚泥の組成は有機物が86～91%であった。無機物、タンパク質は冬季より夏季の方が含有率が高く、粗繊維と炭水化物は冬季の方が

多い傾向にあった。有機物のうち酸発酵しにくい粗繊維が 24～30%あり、酸発酵のために有効に利用できる有機物は炭水化物、脂質、タンパク質の合計 60 数%であった。ただし、比較的容易に分解され酸発酵する炭水化物、その次に分解・酸発酵しやすい脂質の合計は 44～51%のため、発酵時間が短い場合、酸発酵に利用できる有機分は約 1/2 であることが分かった

### 3.2 効率的な有機酸発酵条件の検討結果

#### 3.2.1 有機酸濃度増加予測式の作成

発酵槽容量 10L の小型発酵装置（回分式、連続式）を用いて発酵温度、発酵時間、発酵槽内汚泥濃度、pH 等の条件を変えながら実験を行い、発酵条件と有機酸生成の関係について検討した。実験条件を表 3 に示す。

表 3 小型発酵装置を用いた実験条件

回分、連続	回分	連続
発酵温度( )	20、35	20、25、30、35
発酵時間(h)	～188	24～144
ORP(mV)	-200、-300、-400	-300、-340、-400
pH	6.0、6.7	6.0
曝気による ORP 制御	有	有
供給汚泥濃度(mg/L)	5,000、9,000、20,000	4,350～20,000
発酵槽汚泥濃度(mg/L)		5,000、20,000

図 6 に回分式発酵実験の発酵温度と有機酸濃度増加（有機酸濃度増加＝発酵液有機酸濃度－供給汚泥有機酸濃度）の関係を示す。回分式では発酵温度が 20 より 35 の方が有機酸濃度増加が大きいことが分かる。

図 7 に各連続式発酵実験の発酵時間（HRT：24～144 時間）の各データを発酵槽内汚泥濃度と有機酸濃度増加の関係でプロットした関係を示す。pH、発酵温度、ORP 等、実験条件の違いによって有機酸濃度増加に差が生じていることが分かる。また、全体として発酵槽内汚泥濃度が高い方が有機酸濃度の増加が大きい傾向にあった。

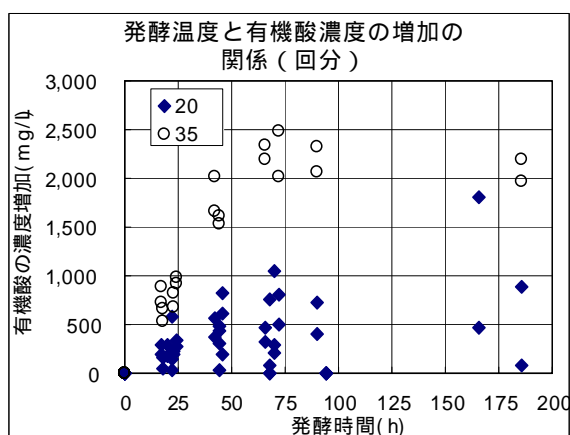


図 6 発酵温度と有機酸濃度の増加の関係（回分）

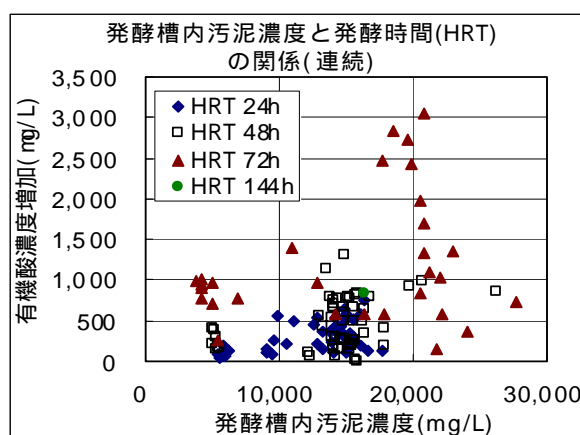


図 7 発酵槽内汚泥濃度、有機酸濃度増加と発酵時間（HRT）の関係（連続）

酸発酵によって生じた有機酸は、酢酸が最も多く全有機酸濃度の 60～90%で、ついでプロピオン酸が 10～30 数%、酪酸、吉草酸はわずかであった。

発酵実験データを用いて有機酸濃度増加の予測式を作成した。

有機酸濃度生成にかかわる因子として、発酵温度、発酵時間、ORP、pH、供給汚泥濃度、発酵槽汚泥濃度の6項目を選定し、重回帰分析(変数減少法)により各因子の係数を決定した。

作成した有機酸濃度増加予測式を次に示す。

【回分発酵の有機酸濃度増加予測式】

$$Y = \exp(-46.5 + 0.112(\text{temp} + 273)) \times (\text{detention})^{0.823} \times (\text{pH})^{3.1} \times (\text{SSi})^{1.17}$$

【連続発酵の有機酸濃度増加予測式】

$$Y = \exp(-39.3 + 0.132(\text{temp} + 273)) \times (\text{detention})^{0.768} \times (-\text{ORP})^{1.48} \times (\text{pH})^{-5.07} \times (\text{SS}_{\text{RT}})^{0.387}$$

ここで、

Y：有機酸増加濃度(mg/L)、temp：発酵槽内温度( )、

detention：発酵時間または汚泥滞留時間(hr) ORP：発酵槽内 ORP(mV)、

pH：発酵槽内 pH、SSi：供給汚泥濃度(mg/L)、SS<sub>RT</sub>：発酵槽内汚泥濃度(mg/L)

有機酸濃度増加に関する因子の寄与率は、回分式、連続式共に発酵温度、発酵時間(汚泥滞留時間)が高く、その他、回分式では供給汚泥濃度、連続式では発酵槽内汚泥濃度の寄与率が高かった。

図8、図9に予測式に発酵実験の設定反応条件、発酵槽内汚泥濃度：15,000mg/L(1.5%)、pH：6.0、ORP：-350mV、発酵温度：(回分発酵)20、35、(連続発酵)20、25、35を入力して求めた計算値と実測値との比較を示す。

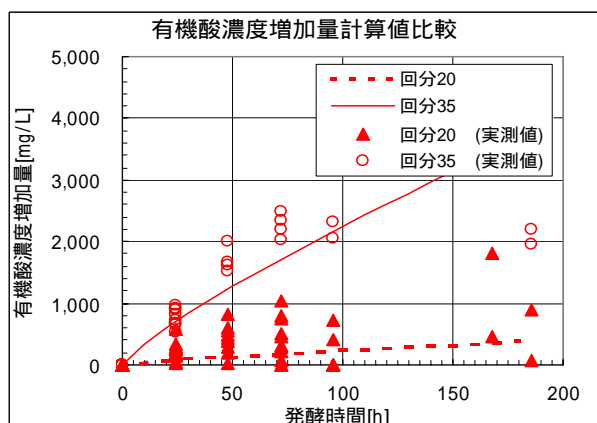


図8 有機酸濃度増加の計算値  
(回分式)

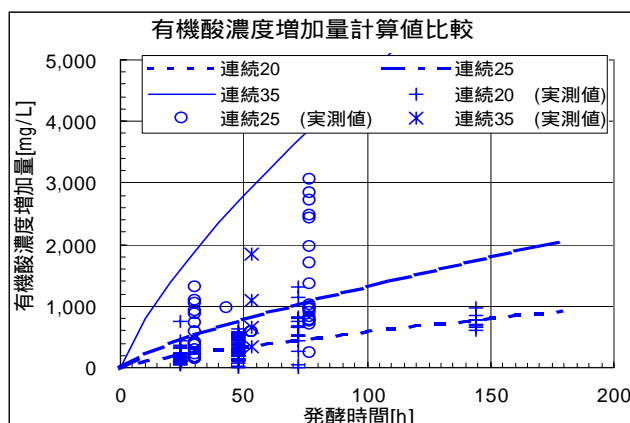


図9 有機酸濃度増加の計算値  
(連続式)

図8の回分式においては100時間程度までは予測値と実測値は近似していたが、35の発酵時間約180時間における実測値が予測値より低くなったのは酢酸をメタンに変えるメタン発酵が生じたためと考えられる。

一方、図9の連続式の場合、20の予測値と実測値はおおむね合っていたが、温度が上がるにつれ予測値と実測値がかい離した。これは作成した有機酸濃度増加予測式は、35のデータが少なくデータ数の多い20、25のデータに予測式作成の係数が影響を受けた、実験においては供給汚泥濃度、反応槽内汚泥濃度、pH等が変動するのに対し、予測値の計算では固定値を用いたこと等が原因と考えられる。ただし、予測式を用いて発酵温度20におけるおよその有機酸濃度増加を表すことは可能と考えられる。

### 3.2.2 メタン発酵抑制条件の検討

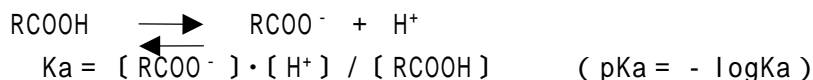
小型発酵装置による回分式発酵実験は発酵時間188時間まで測定したが、長期間にわたって酸発酵を行うと酸発酵と平行して酢酸を消費するメタン発酵が生じる。そこでメタン



発酵を抑制する発酵条件の検討を行った。

文献によるとメタン発酵は酢酸、プロピオン酸、酪酸等の遊離有機酸濃度が酢酸換算で  $12\text{mg/L}^{1)}$  以上もしくは  $10 \sim 25\text{mg/L}^{2)}$  以上の条件で阻害されると報告されている。そこで、酸発酵によって生じる有機酸のうち遊離有機酸がメタン発酵を抑制できる濃度であるかを試算した。

なお、遊離有機酸濃度は下記の式(1)を用いて計算した<sup>3)</sup>。



$[\text{RCOOH}]$ : 遊離有機酸濃度 (mol/L)

$[\text{RCOO}^-]$ : 解離状態の有機酸濃度 (mol/L)

$[\text{H}^+]$ : 水素イオン濃度 (mol/L)

$\text{p}K_a$ : 解離定数

$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[\text{S}^-]}{[\text{HS}]} \quad \dots (1)$$

$[\text{S}^-]$ : 解離状態の有機酸濃度 (mol/L)

$[\text{HS}]$ : 遊離有機酸濃度 (mol/L)

(1)式を遊離有機酸濃度  $[\text{HS}]$  について解くと、

$$[\text{HS}] = \frac{[\text{VFA}]}{(10^{(\text{pH} - \text{p}K_a)} + 1)} \quad \dots (2)$$

( $[\text{VFA}]$ : 有機酸濃度)

図10に式(2)を用い、回分実験結果を基に計算した遊離有機酸濃度(酢酸換算)を示す。(実験条件:  $\text{pH}=6, 7$ 、発酵温度=20、35、汚泥濃度約  $9,000\text{mg/L}$ )

この結果、有機酸濃度増加が少ない回分式においても  $\text{pH}6$  の場合には発酵温度 20 で発酵開始後約 24 時間までを除けば遊離有機酸濃度が  $25\text{mg/L}$  以上あり、メタン発酵は阻害できることが分かった。

### 3.2.3 発酵条件の検討

図11に小型発酵装置における連続式発酵の濃度を参考に、発酵槽内汚泥濃度  $15,000\text{mg/L}$  (1.5%)、 $\text{pH}=6.0$ 、 $\text{ORP}=-350\text{mV}$ 、発酵温度 20、25 の条件で、発酵時間と有機酸濃度増加の予測値をグラフ化したものを示す。

予測式から発酵温度が高いほど有機酸濃度の増加は大きくなるが、加温設備の導入費用と加温のためのランニングコストの追加により経済性では不利になるため、実施設においては加温をしないこととした。そのため、連続発酵装置では発酵温度を流入水温 + 発酵による温度上昇とし、実験開始時の流入水温 ( $18 \sim 20$ ) +  $2 \sim 3 = 20 \sim 23$  に設定した。

小型実験装置(回分、連続)での発酵実験中、発酵装置に供給した生汚泥中の有機酸濃度は  $100 \sim 200\text{mg/L}$  であった。生汚泥中の有機酸濃度を  $100\text{mg/L}$  とすると、目標とした有機酸濃度  $600\text{mg/L}$  以上を達成

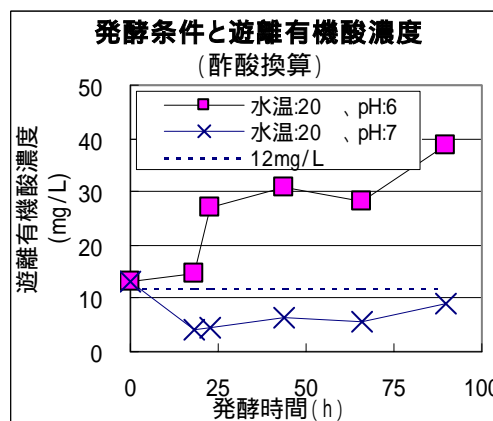


図10 発酵条件と遊離有機酸濃度(酢酸換算)

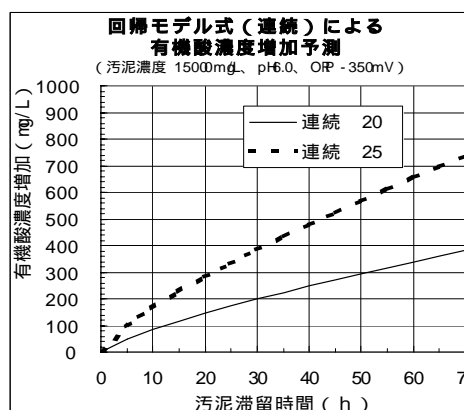


図11 有機酸濃度増加予測

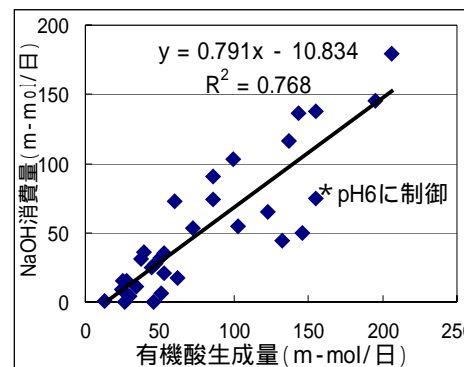


図12 有機酸生成量と水酸化ナトリウム消費量

するには、発酵温度 25 において有機酸濃度の増加は 500mg/L 以上必要となる。図 1 1 から 25 において有機酸濃度増加 500mg/L を確保するためには、発酵時間は 40 数時間必要であることが分かった。

### 3. 2. 4 生成有機酸と pH 調整用水酸化ナトリウム消費量の関係

小型発酵装置を用いた発酵実験において発酵槽内を pH6 に制御する場合、生成した有機酸のモル量と pH 調整に要した水酸化ナトリウム (NaOH) のモル量の関係を図 1 2 に示す。pH 調整には有機酸生成 1 モルあたり、水酸化ナトリウム約 0.8 モルが必要であった。

### 3. 3 連続発酵装置による発酵性能実証実験

小型発酵装置の実験結果に基づき、連続発酵装置を製作した。発酵条件は汚泥滞留時間 (HRT) 2 日、pH6.0、発酵温度 20~23 とした。

図 1 3 に連続発酵装置の発酵温度と発酵液の有機酸濃度の推移、図 1 4 に投入生汚泥濃度、発酵槽汚泥濃度、発酵液 SS 濃度の推移を示す。

連続発酵実験を開始した平成 16 年 1 月 7 日から 1 月 16 日までは、発酵槽を加温せずに発酵を行った。発酵装置は屋外設置のため、発酵槽内温度は 15~16 で流入水温より 2~3 低かった。設定した発酵温度より低い温度であったにもかかわらず、発酵槽内汚泥濃度を 20,000~25,000mg/L に保つことで目標とした有機酸濃度 600mg/L の発酵液を生成できた。また、流入水温が 20 程度を想定し 1 月 16 日午後より発酵槽を 20~23 に加温すると、発酵槽内汚泥濃度約 20,000mg/L では有機酸濃度 1,000~1,200mg/L、発酵槽内汚泥濃度 13,000~15,000mg/L では有機酸濃度 800~1,000mg/L の発酵液を生成できた。

投入生汚泥の有機酸濃度は実験期間を通じてほとんどが 100~200mg/L であった。

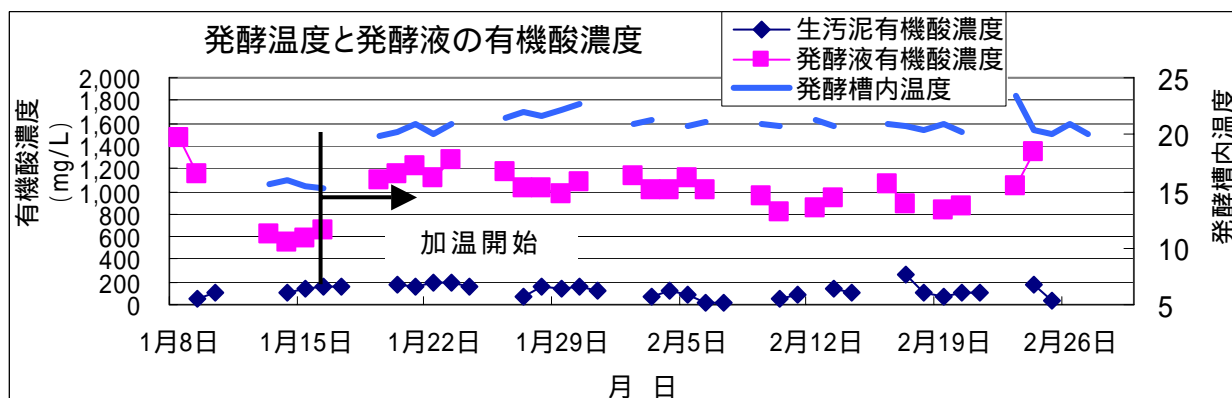


図 1 3 発酵温度と発酵液の有機酸濃度の推移

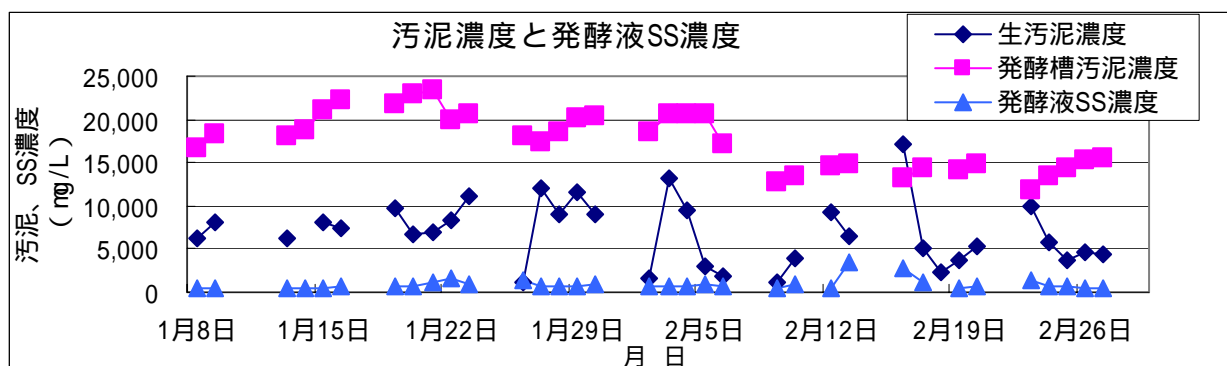


図 1 4 投入生汚泥濃度、発酵槽汚泥濃度、発酵液 SS 濃度の推移

図 1 4 に示すように発酵槽に投入した生汚泥濃度 (午前 9 時、午後 5 時の生汚泥等量混合) は、日によって 1,300~17,000mg/L と大きく変動したが、発酵槽内汚泥濃度は汚泥濃



縮槽の効果で比較的安定していた。このように発酵槽内汚泥濃度を高濃度に保つことにより、安定した酸発酵が可能であった。生成した発酵液のSSの平均濃度は約800mg/Lであった。また、1月下旬には18,000～20,000mg/Lあった発酵槽内の汚泥濃度が2月9日頃より13,000～15,000mg/Lに低下した。これは流入生汚泥濃度が低下したことが原因と考えられるが、生汚泥濃度低下の理由は不明である。

図15に発酵槽内のpHとORPの推移を示す。発酵温度15～23℃では発酵槽内のpHを5.5～6.0に調整することでメタン発酵が抑制され、ORPはおおむね-300～-350mVであった。

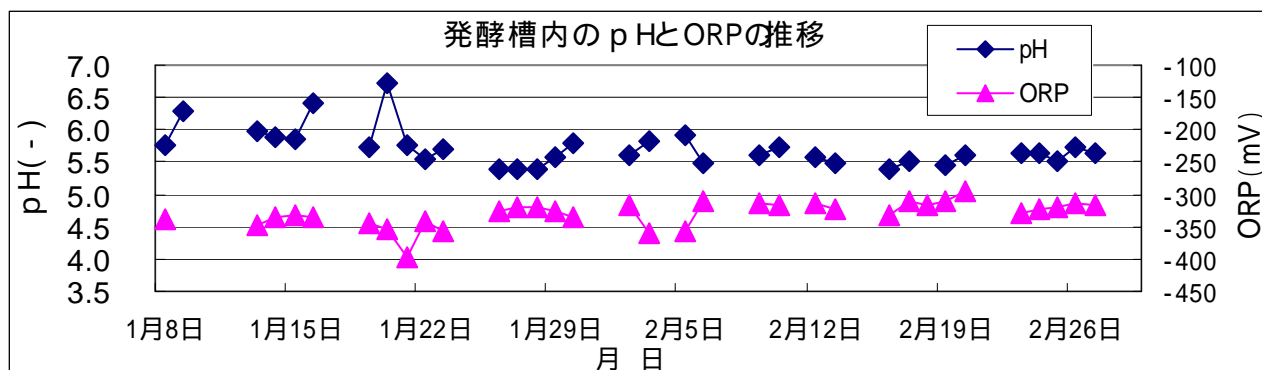


図 1 5 発酵槽内の pH と ORP の推移

### 3.4 発酵汚泥等の貯留実験結果

図16に貯留による有機酸濃度の変化を示す。貯留実験は発酵汚泥と発酵液を対象に、pHとORPは制御せず発酵温度20、30℃の条件で有機酸濃度、S-COD<sub>Cr</sub>、pH、ORPの時間変化を測定した。

発酵汚泥は貯留開始後約90時間まで有機酸濃度が上昇し、酸発酵が継続していた。

一方、発酵液では有機酸濃度はほぼ同程度、または低下した。また、いずれの条件においてもS-COD<sub>Cr</sub>の変化は有機酸濃度変化と似た変化をした。

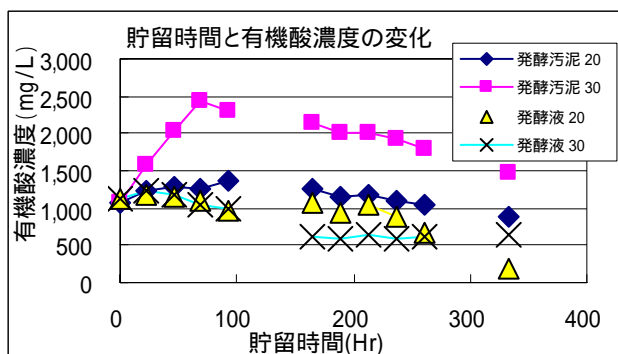


図 1 6 貯留時間と有機酸濃度の変化

発酵液では貯留開始からORPは低下し、pHは上昇した。これはメタン発酵が生じたためと推測された。これらの結果から、貯留は発酵液より発酵汚泥が適当であることが示唆された。

### 3.5 ステップA<sub>2</sub>Oパイロットプラントへの発酵液添加とりん除去実験結果

図17に発酵液添加と処理水PO<sub>4</sub>-P(りん酸性りん)濃度を示す。

A<sub>2</sub>Oパイロットプラントへの発酵液添加は、有機酸濃度が1,000～1,200mg/Lの発酵液を安定して生成できることを確認した平成16年1月27日に開始した。全流入下水の0.5%に相当する量の発酵液をA<sub>2</sub>Oパイロットプラントの第2系列嫌気タンクへ添加した。A<sub>2</sub>Oパイロットプラントはステップ流入式のため、発酵液添加による嫌気タンク流入水の有機酸濃度上昇は8～14mg/L、S-COD<sub>Cr</sub>の上昇は17～25mg/Lである。

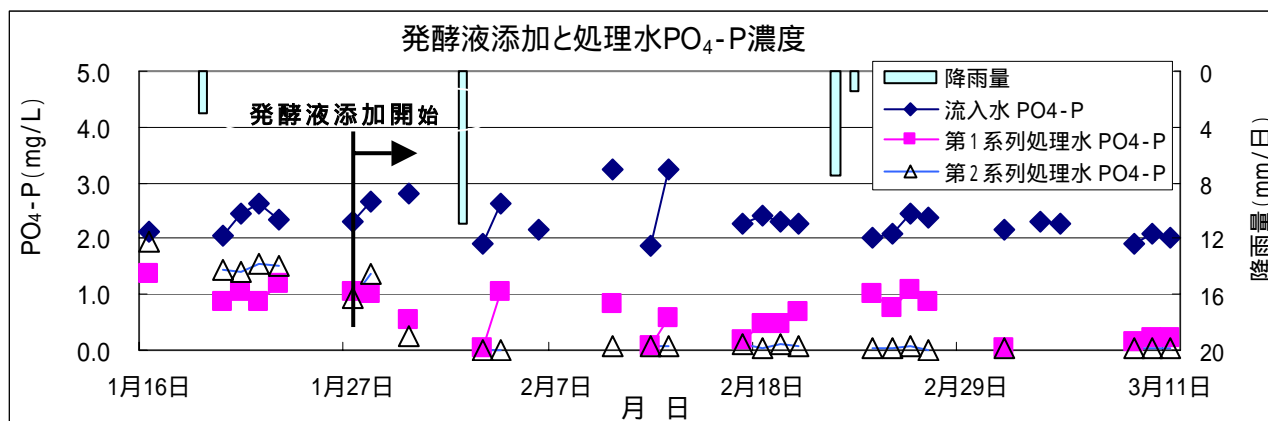


図 1 7 発酵液添加と処理水  $\text{PO}_4$  - P 濃度

表 4 に発酵液添加後の処理水  $\text{PO}_4$ -P 濃度の比較を、表 5 に全りん濃度の比較を示す。

発酵液添加前（～1月27日）は、無添加の第1系列、添加の第2系列ともに処理水  $\text{PO}_4$ -P 濃度は1～1.5mg/Lであった。発酵液添加開始後は第2系列処理水  $\text{PO}_4$ -P 濃度は、ほぼ0.1mg/L以下で推移し、降雨によっても上昇しなかった。また、全りんの最大濃度も1mg/L以下であった。

表 4 発酵液添加後の処理水  $\text{PO}_4$ -P 濃度比較

	第1系列 (無添加系)	第2系列 (添加系)
平均 (mg/L)	0.60	0.05
標準偏差 (mg/L)	0.37	0.03

表 5 発酵液添加後の処理水全りん濃度比較

	第1系列 (無添加系)	第2系列 (添加系)
平均 (mg/L)	0.94	0.46
標準偏差 (mg/L)	0.48	0.17

表 4、表 5 の平均、標準偏差の比較から、発酵液添加により第2系列は処理水の  $\text{PO}_4$ -P 濃度、全りん濃度の変動幅が小さくなり、りん除去が安定したことが分かる。

### 3. 6 発酵槽のガス成分調査

酸発酵に伴い発生する悪臭ガス成分把握のため、連続発酵装置上部のガスを測定した。

連続発酵装置の上部は吸引装置によってガスを吸引し、 $\text{A}_2\text{O}$  パイロットプラントの好気タンクへ吹き込み脱臭処理を行った。平成16年2月に吸引装置運転中と、停止5時間後の発酵槽上部のガス成分測定を行った。悪臭成分は主に硫化水素で、ついでメチルメルカプタンであった。高濃度、少量の硫化水素の脱臭処理は、悪臭ガスを外気で希釈することにより生物処理が可能と考えられる。

また、排気ブローア停止5時間後にメタンガスが0.2%検出されたことから、わずかながらメタン発酵も生じていることが分かった。

## 4 まとめ

実験の結果から、次のことが分かった。

- (1) 有機酸濃度の増加に関する因子の寄与は、発酵温度、発酵時間、発酵槽内汚泥濃度が大きい。これらの因子を用いて、有機酸濃度増加の予測式を作成し、およその有機酸濃度増加を予測できた。
- (2) 発酵槽内温度15～23において、発酵槽内のpHを5.5～6.0に調整することで、ほぼメタン発酵を抑制することができた。発酵温度15～16の低温発酵状態においても汚泥濃縮槽の効果により発酵槽内汚泥濃度を20,000～25,000mg/Lに保つことが

でき、有機酸濃度 600mg/L の発酵液を効率よく生成できた。

- (3) 発酵汚泥、発酵液の貯留試験では、pH 調整を行わない条件では発酵汚泥の状態が有機酸濃度の保持には有利であることが示唆された。発酵汚泥の状態であれば生汚泥の投入を停止した状態で 90 時間（約 4 日間）程度の貯留が可能と考えられる。
- (4) ステップ流入式  $A_2O$  パイロットプラント嫌気タンクへ全流入水比 0.5% の割合で発酵液を添加することでりん除去が安定し、降雨時においても処理水全りん濃度を 1mg/L 以下に保つことができた。発酵液添加によって嫌気タンク流入水の有機酸濃度は 8～14mg/L、S-COD<sub>Cr</sub> は 17～25mg/L 上昇し、りん除去が安定した。発酵液添加前の嫌気タンク流入水の有機酸濃度は 12～86mg/L、S-COD<sub>Cr</sub> は 109～218mg/L で、りん除去の安定には有機酸の他、発酵により生成した溶解性の易分解性物質の効果も大きいと推測される。
- (5) 酸発酵によって発生するガスの悪臭成分は主に硫化水素で、処理は外気で希釈した後、安価な生物処理で対応が可能と考えられる。

## 5 今後の課題

平成 16 年度はこれらの知見を基に、より効率的で安価な酸発酵技術の開発と  $A^2/O$  処理のりん除去安定化手法の確立のために、以下のような実験と検討を行う。

- (1) 夏季におけるメタン発酵抑制条件の検討
- (2) 発酵液添加によるりん除去の安定化手法の検討
- (3) 悪臭ガスの処理方法についての実験と検討

## 参考文献

- 1) 張祖恩, 野池達也, 松本順一郎: 嫌気性消化のメタン生成相に及ぼす pH の影響, 土木学会論文集, No.333, 101-108, 1983.
- 2) Duarte, A.C. and Anderson, G.K.: Inhibition Modeling in anaerobic digestion, Water Science and Technology, Vol.14, 749-763, 1982
- 3) 矢口純一: 嫌気性処理におけるセルロースの分解に及ぼす pH の影響, 下水道協会誌, Vol.38, No.465, 150-163, 2001.
- 4) 松本明人, 野池達也: 嫌気性流動床を用いたデンプンのメタン発酵に及ぼす pH の影響, 下水道協会誌, Vol.36, No.435, 87-94, 1999.

## **５．雨天時対策**

- ５ - １ 下水中における白色固形物の生成に関する調査**
- ５ - ２ 吹流し状の油吸着材を活用した管路内の白色固形物対策に関する調査**
- ５ - ３ 二段造粒式沈殿濃縮装置の技術開発**
- ５ - ４ 汐留地区における雨天時の路面流出水汚濁負荷量等調査**
- ５ - ５ 移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の高度除去に関する技術調査**

## 5 - 1 下水中における白色固形物の生成に関する調査

東部第一管理事務所 砂町水再生センター  
安田 勉

### 1. はじめに

雨天時に合流式下水道から排出される、いわゆる白色固形物の成分はこれまでの調査(芝浦水再生センター分析調査委託)から、表1に示すとおり飽和脂肪酸(パルミチン酸、ステアリン酸等)、不飽和脂肪酸(ミリスチン酸、オレイン酸等)の高級脂肪酸及びその金属塩を主成分とした生物由来の油脂をベースにしたものであることが明らかとなっている。特に、パルミチン酸の含有比が70~80%と高いのが特徴である(低いものも1検体見つかっている)。天然の油脂やそれを原料とした石けん等の製品はパルミチン酸の含有比が20~30%であり、本固形物のように含有比が極めて高い物質は既存の油脂製品としては考えにくい。しかし、一方でこのような物質がどこかで使われている可能性も否定できない。

そこで平成13年2月から平成16年3月の期間において、白色固形物の起源を探るために、下水中における白色固形物の生成に関する調査を何回かに分けて行った(一部2001下水道局技術調査年報掲載)。

本報告書はこれまでの調査をまとめたものである。

表1 白色固形物の脂肪酸塩基組成の一例

試料	脂肪酸基	含有比(%)			
		ステアリン酸	パルミチン酸	オレイン酸	ミリスチン酸
試料 1		16.9	73.2	4.5	5.3
試料 2		6.9	86.4	2.3	4.5
試料 3		10.8	83.0	2.1	4.1
試料 4		10.3	40.0	30.7	2.1

### 2. 調査内容

#### (1) 高級脂肪酸組成比の変化に関する調査

表1から白色固形物のパルミチン酸含有比が高いことがわかる。白色固形物の生成過程に原因があるのかを探るため、市販のラードを使用して高級脂肪酸等の経日変化を調べた。

#### (2) 植物油の白色固形物化に関する調査

液状の植物油も下水中で白色固形物に変化するのを探るため、市販のサラダ油を使用して下水中での経日変化を調べ、最終生成物の高級脂肪酸を分析した。対照として全て滅菌状態にしたもので同様の実験を行った。

### 3. 高級脂肪酸組成比の変化に関する調査

#### 3.1 調査方法

##### 3.1.1 試料の作成

市販の食用ラードを6枚のガラス板(100mm×200mm)に薄層状(厚さ3mm)に塗り、ステンレスのカゴに並べて固定し、第一沈殿池上部の緩やかな水流部分に浸せきするように吊るした。調査開始から10、20、30、70日後にガラス板を順次回収し、ラードの高級脂肪酸等の分析・測定を試料に供した。

### 3.1.2 分析・測定方法

調査項目及び各項目の分析・測定方法を表2に示す。

表2 調査項目と分析・測定方法

調 査 項 目	分 析・測 定 法
油 分 組 成	赤外分光法（IR）
脂 肪 酸 濃 度	ガスクロマトグラフ質量分析法（GC/MS）
高級脂肪酸塩の対イオン分析	プラズマ発光分光分析法（ICP）

### 3.2 調査結果及び考察

#### (1) 浸せきラードの外観

ガラス板に塗ったラードは調査期間を通して、剥がれ落ちることはなく、1週間目頃からラード表面が固くなり始めるという変化がみられた。また、試料の一つにはラード表面にマジックで文字を書いていた。調査期間中その文字が消えることはなかった。すなわち、ラード表面には下水中の油状物質等が付着しなかったことが確認できた。

#### (2) 水温

本調査（平成13年2～4月）期間中の水温は15.2～20.7である。

#### (3) 油脂量の変化

浸せきラードの構成成分の経時変化を図1に示す。

これによれば、ラードの油脂は10日目で約1/2に減少し、時間経過と共にさらに減少し、70日目では8.5%になった。逆に、高級脂肪酸と脂肪酸塩の割合が時間経過と共に増加していくのが分かる。これは油脂が加水分解により高級脂肪酸になり、さらに下水中の金属イオンと反応して脂肪酸塩（金属セッケン）を生成したものと考えられる。このように、下水に浸せきしたラードの成分組成は速やかに変化することが明らかとなった。

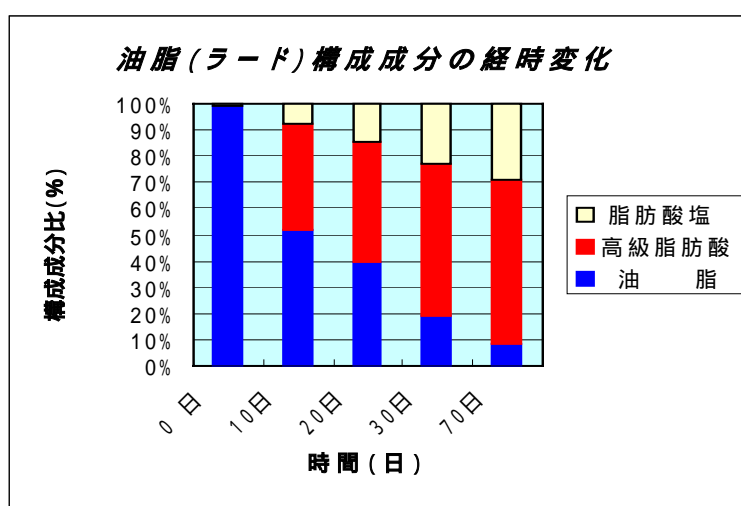


図1 ラードの構成成分の経時変化

#### (4) 高級脂肪酸基組成変化

浸せきラード中のオレイン酸、リノール酸、パルミチン酸、ステアリン酸の各高級脂肪酸基組成比の経時変化を図2に示す。

これによれば、0日目のラードの脂肪酸組成比は一般に云われているラードの組成比である。これが時間経過と共にオレイン酸は減少し、パルミチン酸が増加していることが明

らかとなった。また、これほど顕著ではないが同様にリノール酸は減少し、ステアリン酸は増加している

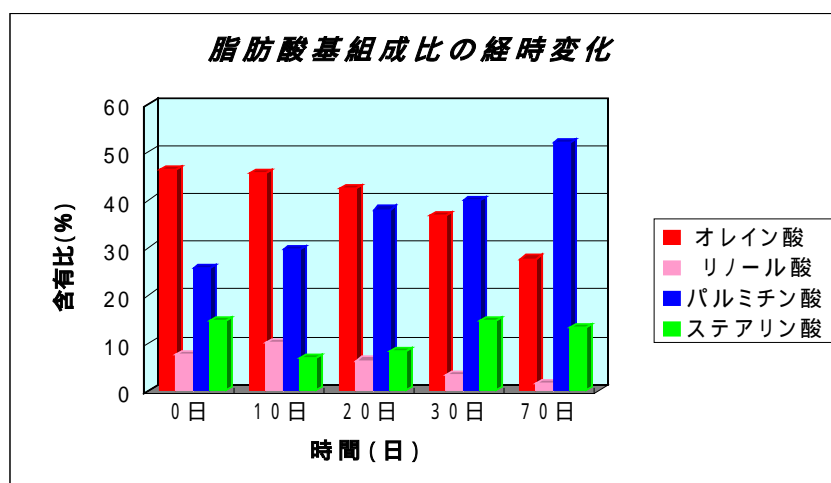


図2 ラード中の脂肪酸基組成比の経時変化

この理由は次のように考えられる。一般に、高級脂肪酸はその化学構造から飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸に分かれる。動物油に多く含まれるパルミチン酸やステアリン酸は飽和脂肪酸で、動物及び植物油の両方に多く含まれるオレイン酸や植物油に多く含まれるリノール酸は不飽和脂肪酸である。飽和脂肪酸は生物分解速度が遅く、不飽和脂肪酸は生物分解速度が速いといわれている。したがって、ラード中のオレイン酸やリノール酸は短時間で生物分解されて減少し、生物分解速度が遅いパルミチン酸の比率が相対的に高くなったものと考えられる。さらに、時間が経てば高級脂肪酸基はパルミチン酸の比率が70%以上という白色固形物に類似した組成にまで達すると思われる。

図3はこれまで各現場で採取した白色固形物のオレイン酸とパルミチン酸の含有比をプロットしたものである。( 印)。さらに、同図に本調査における浸せきラードの経時変化試料のオレイン酸とパルミチン酸の含有比を同様にプロット( 印)したところ、両者は一直線上にきれいに並んだ。このことから、白色固形物の油脂はラードを主成分としたものが下水中で変化した可能性が高いといえる。

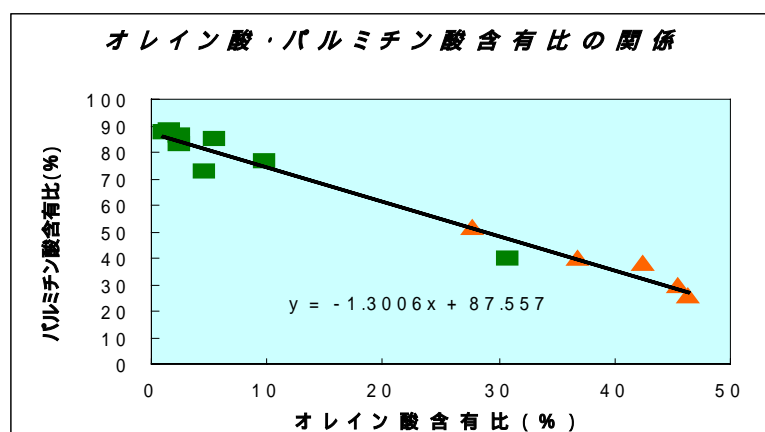


図3 オレイン酸・パルミチン酸含有比の関係

#### (5) 脂肪酸基の対イオン

浸せきラード脂肪酸塩中のイオンの経時変化を表3に示す。



この結果から、脂肪酸塩の対イオンは主にカルシウムで経時変化は見られない。つまり、浸せきラードで生成された金属セッケンは大部分がカルシウムによるものである。これは各現場で採取された白色固形物の高級脂肪酸塩がどれもカルシウム塩であったことと一致している。

表 3 各脂肪酸塩中の対イオン含有量

試料	含 有 量 (wt%)		
	カルシウム	ナトリウム	カリウム
1 0 日後脂肪酸塩	5.4	0.11	0.034
2 0 日後脂肪酸塩	5.8	0.05	0.018
3 0 日後脂肪酸塩	5.8	0.05	0.018
4 0 日後脂肪酸塩	5.6	0.05	0.022
7 0 日後脂肪酸塩	6.5	0.05	0.005

#### 4 . 植物油の白色固形物化に関する調査

##### 4 . 1 調査目的

3で行った調査により、下水中でラード（動物油）の高級脂肪酸基組成比が時間経過と共に変化し、パルミチン酸の比率が非常に高い、いわゆる白色固形物特有の組成比になることを明らかにした。次に本調査では植物油（液状）が下水中で固形化し、白色固形物に変化するのか。その変化に微生物が関与しているのか。を解明するため実験を行った。

##### 4 . 2 調査方法

##### 4 . 2 . 1 調査概要

調査は微生物が関与しているか否かを実証するため、微生物が存在する状態と存在しない状態（滅菌状態）で行う必要がある。そこで、本調査は水質試験室内で行った。

分液ロート（250 mL）に供試下水（100 mL）と植物油（市販のサラダ油：10 mL）を入れる。その後、定期的に植物油は残したまま供試下水を新鮮なものと入れ替えながら、植物油の状態変化（経日変化）を調べた。

図4のとおり、分液ロートは2本用意し、1本は通常の状態のもの（Case 1）、1本は全て滅菌状態のもの（Case 2）とした。

調査期間は平成15年11月14日～平成16年1月26日で行った。

##### 4 . 2 . 2 供試下水

砂町水再生センター東陽・大島系流入下水300 mLを採水し、外部からの微細な白色固形物の流入を遮断するため、ろ紙（5C）でろ過し、ろ液（200 mL）を供試下水とした。



図 4 分液ロート中の下水と植物油（上層）

##### 4 . 2 . 3 滅菌操作

##### 器具の滅菌

Case2 に用いる分液ロート、メスシリンダー、ピペットはあらかじめ乾熱滅菌しておく。



供試下水、植物油（サラダ油）の滅菌

Case2 の供試下水（100 mL）は、その都度高圧蒸気滅菌して（以下、滅菌供試下水という）使用した。植物油は市販のサラダ油を用い、実験前に高圧蒸気滅菌した。

#### 4.2.4 実験操作

実験開始時

東陽・大島系流入水を300 mL 採水し、ろ紙（5C）でろ過し、ろ液を供試下水とし、このうちの100 mL を高圧蒸気滅菌した（滅菌供試下水）。供試下水100 mL を Case1 の分液ロートに、滅菌供試下水100 mL を Case2 の分液ロートに入れ、次に、それぞれの分液ロートに滅菌済みの植物油を10 mL ずつ注入した。実験期間中各分液ロートはBODフラン器（20 ）内に保存した。

実験継続時

分液ロート内では植物油と下水は油層部と水層部の上下二層に分かれている。実験は3～4日に一回の頻度で Case1 及び Case2 の古い供試下水（滅菌供試下水）をロートから排出し、新しい供試下水（滅菌供試下水）をロートに注入した。Case2 の作業には雑菌が入らないように注意して行った。この作業をおよそ70日間継続して行った。

実験終了時

実験最終日に Case1 及び Case2 の油層部をろ紙（5B）でろ過し、ろ紙上に残った白色固形物状の物質を回収し、高級脂肪酸組成比を求めた。

#### 4.3 調査結果と考察

実験の途中経過は目視による観察を行った。実験開始から7日目で Case1 では油層の中に比較的大きな油滴が多く存在するようになる。11日目で油の色が薄黄色から薄茶褐色に変化し、油層下部に白色ヨーグルト状物質が生成され、両者ははっきりと二層に分離している（図5）。20～38日目では油層は茶褐色に変色し、油層下部には不溶性の白色物質が増加している。60日目では白色固形物らしき微小片がみられてきた。一方、Case2 はこの段階でも油層が全体にドロツとした状態になった程度で、Case1 のような大きな変化は見られず、Case1 と2の外観ははっきりと違っている。

70日目に Case1 及び Case2 の各分液ロートの下水を排出し、残った油層部をろ紙（5B）でろ過し、風乾した。その結果、Case1 では外観や硬さが白色固形物と同様な物質が1グラム回収された。一方、Case2 ではろ紙上になにも回収されなかった。



図5 油層下部に生成された白色物質

（注；実験に供した植物油はろ紙（5B）でろ過しても、何も残らない。）

実験に供した植物油及び回収した Case1 の白色固形物様物質の高級脂肪酸組成比を表4に示す。同表には参考のため、一般的な動物油（ラード）と植物油（大豆油）の数値も示した。

これによれば植物油（サラダ油）は当初、飽和脂肪酸が11.1%、不飽和脂肪酸が88.9%

であったものが、70日後には飽和脂肪酸が36.0%に増加し、不飽和脂肪酸が64.0%に減少したため白色固形物様物質が生成された。この物質はいわゆる白色固形物である。

ところで、油脂は大別すると常温（20℃）で液体のものと、固形のものがある。このような状態の相違は主として油脂を構成する全脂肪酸の二重結合の数の合計が多いか少ないかによって左右される。すなわち、不飽和脂肪酸の多い油は液状であり、飽和脂肪酸の多い油は固形状である。

表4を改めてみると、液状の植物油が下水中で固形状の白色固形物に変化したことが理解できる。そして、本調査から滅菌状態にしたCase2では白色固形物が生成しなかったことから、植物油の下水中における白色固形物化には微生物が関与していることが明らかとなった。

表4 植物油（サラダ油）の高級脂肪酸基組成比変化（単位％）

		飽和脂肪酸 パルミチン酸＋ステアリン酸	不飽和脂肪酸 オレイン酸＋リノール酸＋リノレイン酸
Case1 植物油	0日目	11.0	88.9
	70日目	36.0	64.0

参考値 代表的な動物油と植物油の高級脂肪酸基組成比（単位％）

高級脂肪酸 油脂	飽和脂肪酸 パルミチン酸＋ステアリン酸	不飽和脂肪酸 オレイン酸＋リノール酸＋リノレイン酸
動物油（ラード）	30～40	45～70
植物油（大豆油）	10～20	70～90

## 5. 下水中における白色固形物の生成過程

これまでの白色固形物の性状分析や今回の調査結果から、下水中における白色固形物の生成過程は以下のとおりと考えられる。

）事業所等から下水管渠に排出された液状の動物油（ラード等）・植物油（サラダ油等）〔以下油脂類という〕は、流下しながら一部は管壁等に付着したり、流れの緩やかなところでスカムとして堆積する。特に、動物油は管渠内が常温のため短時間で固形化し、粘性が強く他の植物油や夾雑物も取り込んで油塊となりやすい。

）同時に、下水管渠内に付着・滞留した油脂類は下水中の微生物（細菌）の加水分解酵素（リパーゼ等）や一部は酸等の化学物質による触媒作用で加水分解が速やかに進行する。

）このように加水分解された油脂類は高級脂肪酸とグリセリンに分かれる。高級脂肪酸は下水中のカルシウムイオンと反応して容易に金属セッケンを生成するが、この反応は油脂類の表面で起こっている。

）さらに、高級脂肪酸は下水中の微生物（細菌）により生物分解を受けて、白色固形物化していく。この生物分解の速度は高級脂肪酸の種類（化学構造）により異なる。一般に、高級脂肪酸は飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸に分かれる。飽和脂肪酸は生物分解速度が遅く、不飽和脂肪酸は生物分解速度が速いといわれている。飽和脂肪酸にはパルミチン酸やステアリン酸等があり、動物油に多く含まれる。不飽和脂肪酸にはオレイン酸、リノール酸、リノレイン酸等があり、植物油に多く含まれる。このため、白色固形物ではパルミチン酸のように生物分解速度が遅い物質の含有比が相対的に高くなる。

）また、油脂類は大別すると常温（20℃）で液体のものと固形のものがあり、一般に飽和脂肪酸の多い油（動物油）は固形状で、不飽和脂肪酸が多い油（植物油）は液状である。

植物油も下水中で微生物による生物分解を受け、飽和脂肪酸の多い油に変化するため固形物化すると考えられる。

）以上のようにして、下水に流入した油脂類は下水中に滞留しながら微生物の分解を受け、時間経過と共に特有の高級脂肪酸の成分組成を持った白色固形物が形成される。さらに、白色固形物は海水と接触することにより、一層金属セッケン化が進行すると考えられる。

#### 6．おわりに

今回の調査によって、いわゆる白色固形物は既製品としてそのような物質が存在するのではなく、大部分は人々が日常生活で使用している油脂類が下水道に排出され、下水道施設内で時間経過と共に変化して生成されることが明らかとなった。したがって、下水道施設からの現実的な白色固形物流出防止対策は、すでに当局が実施している緊急対策３本柱；雨天時貯留池の整備などの施設改善　ポンプ所・処理場吐口に夾雑物除去施設設置、管渠清掃などの維持管理対策　油脂類の発生源・排出者対策を確実に実行することである。

## 管路内の白色固形物対策に関する調査

北部建設事務所 工事第一課 高橋 利治

## 1. 調査目的

下水道管路に排出された油脂類は、白色固形物（オイルボール）の原因となり、公共用水域汚染のひとつとなっている。

本調査は、タンカー等の重油流出事故の際、用いられている「油吸着材」を下水道用に加工したものをマンホール内に設置することで、油脂類がどの程度補足、吸着されるか、その効果を把握することを目的として実施した。

今回、一定の効果が把握できたので報告する。

## 2. 調査内容

## 2.1 調査期間

予備調査 平成14年10月17日～平成14年11月 6日

本調査 平成14年11月19日～平成15年 1月10日

## 2.2 予備調査

油吸着材を用いた白色固形物対策は、下水道へ排出された油脂類を管路内で固形化する前の液状の状態で、吸着補足するものである。

しかし、実際の下水道環境下では、油脂が液状の状態ではなくラードのように固形化している可能性もあること、さらに SS 等の夾雑物が多く存在するために、油脂のみを選択的に吸着できるかは未知数である。

そこで、下記項目について把握するために、過去に油脂で管路が閉塞（故障処理）したマンホールと比較対照用として比較的油分の少ないマンホール各1箇所にて20日間油吸着材を設置して、予備調査を行った。

SSの付着具合、

ラードの付着状況、

下水の流れを妨げない油吸着材の量と形状、

効果的な設置期間等

## 2.3 本調査

予備調査での知見等をもとに、調査方法を下記のように決定した。

## (1) 油吸着材の仕様

材質；ポリプロピレン製繊維系（下記 2 参照） 形状；吹流し状

## (2) 油吸着材の形状

予備調査の結果から、回収時及び室内分析作業性を考慮、吸着能力の平均化のため油吸着材は50cm長の試験片を前後2連に設置（図1、図2参照）した。

### (3) 試験期間

予備調査の結果、油分吸着量は徐々に増加しているものの性能基準以下の0.5g/g程度であった。調査期間中油分含有量の少ない汚水が排出されていたか不明なため、設置期間については比較的長期のスパンで考える必要がある。このため、試料の回収日時は、当初仕様の1日目、3日目、5日目、7日目、10日目、30日目に加えて、30日目以降でも回収可能な予備日を設けることとし、設置する試料片は、7束とした。なお、予備試料の回収日時は、1～30日目までの分析結果を見て判断するものとした。

### (4) 設置数量

設置する既設管が250と小さい場合も多いため、多量の吸着材を設置すると、管の閉塞要因となること。また、油吸着材の回りに汚物が多量に付着すると、さらに膨化することなど。

予備調査の結果から、分析に必要な数量は、予備調査時(10本を1束)の半分でも十分であることが判明したため、本調査においては、長さ1mの製品を折り返して5本を1束とした。

(図2参照)

なお、製品重量は、3g/mであるため、1束当たり15gとなる。1回に回収する試料片は、前後2連に設置した2束であるため、1回当たり30gの試料片を回収する。

## 2.4 調査地区

北部第二管理事務所で過去に発生した故障処理地区のマンホールを、基本的な性質の把握等が行いやすいように、分流地区と合流地区、住宅地区と商業地区との視点からグルーピングを行い、双方の比較を行うこととした。

また、設置した吸着材の7セットは順次回収可能なものとした。そして、この試料回収時に油吸着材への付着状況等の観察を行い、設置場所や経過日数別に整理した。

表1 油吸着材を設置したマンホール (足立区内)

分流地区	10箇所	合流地区	20箇所
住宅地区	5箇所	住宅地区	5箇所
商業地区	5箇所	商業地区(飲食店多い)	10箇所
		商業地区(飲食店少ない)	5箇所
合 計		30箇所	

## 2.5 設置及び回収方法

マンホール内への設置は、油吸着材を固定したロープをマンホール内のステップに結びつけた。接続するマンホール内ステップでは上下位置を選択可能であるが、上方に設置すると水流により油吸着材が引っ張られた場合、管口付近のロープが浮き上がりやすくなる。そこで、設置位置は、極力下方のステップとした。

また、試料の回収は、一旦マンホール内に作業員が立ち入り、ロープを引き出して上下流二連のリングに設置された吸着材について、インシュロック(図2参照)を切断して回収した。回収した試料片は、マンホール内ステップに一時的に引っ掛けて、5分間の水きりを行った。水切り終了後の試料は、ガラス製のサンプル瓶内に入れて、分析場所まで輸送した。

なお、サンプル瓶をガラス製としたのは、油分の瓶内吸着を防止するためである。

## 2.6 油吸着材

### 2.6.1 油吸着の原理

油吸着材による油脂の吸着作用は、素材の有する油脂との親和力と、繊維構造による毛細管現象に起因する。油吸着材の材質は、ポリプロピレン製解繊系である。解繊系は、直径が数 10 ミクロンの繊維束で構成されている。

基本的なメカニズムは、「毛細管現象」の影響が大きい。繊維間に極微細で、そこに液体（油）が接した場合、繊維間が毛細管の役割を果たし、その中を上昇する現象が起こる。

解繊系は C,H の化学組成で構成されている。一方、油脂も C,H のみで構成されており、親和性が良い。

なお、回収試料は、ポリプロピレン、油の両方とも有機系化合物であることから、完全燃焼させれば水（H<sub>2</sub>O）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）になる。

#### 1 ポリプロピレン (CH<sub>3</sub>CHCH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>

プロピレンの重合体で結晶性が大きく、融点が高い（165～176℃）。比重 0.90～0.91。機械強度、耐摩耗性、透明性に優れているため、各種成形品、フィルム、繊維などに使用されている。

#### 2 解繊系 合成樹脂をフィルム状に形成し、機械的に分繊し（裂いて）幹系と枝系から構成された網目状構造の紐

### 2.6.2 油吸着材の性能基準

油吸着材の性能基準は、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行規則」に規定されており、油の吸着量は 6 g / g 以上、吸水量は 1.5 g / g 以下とされている。

（《参考文献》表 4 参照）

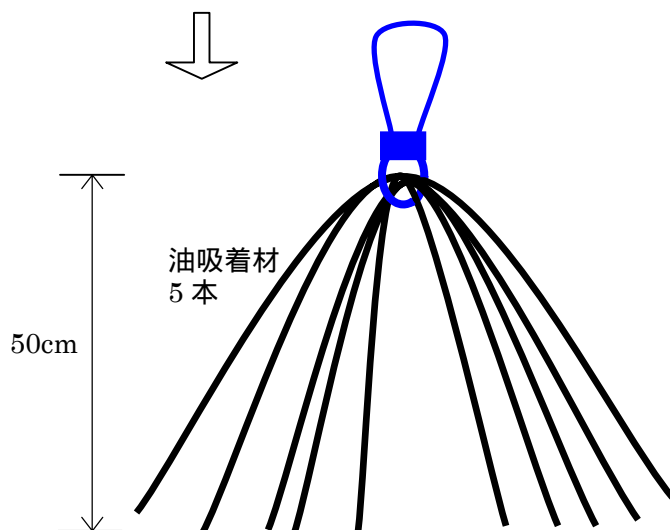
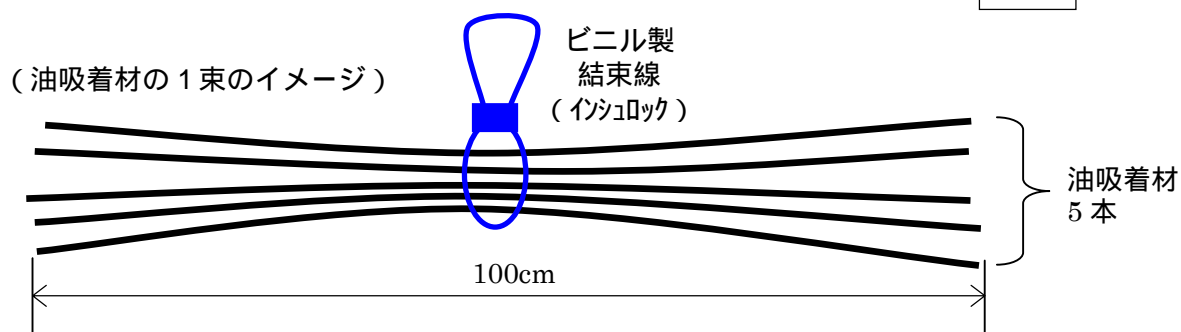
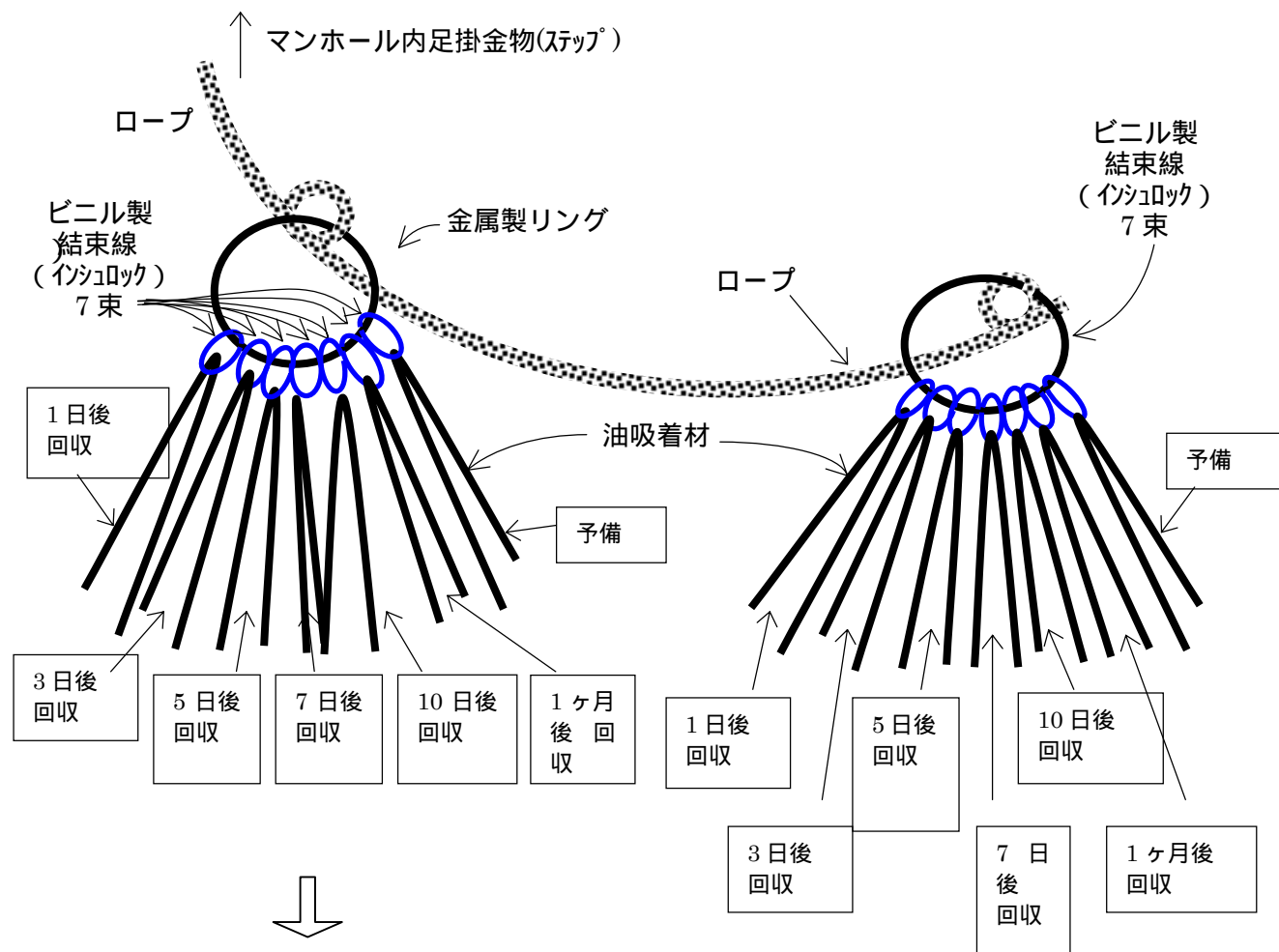
## 2.7 分析方法

回収した試料は、吸着物の総量を計量した後、吸着物の成分を油分（n-ヘキサン抽出物質）、SS、水分の 3 つに分け定量した。そのためには、吸着物を一旦油吸着材と分離する必要がある。試行錯誤の結果、吸着材をガラス棒で挟みこみ強制的に絞り出し、さらに超音波洗浄機を用いて仕上げの絞り出しを行う手法を選定した。吸着材より分離された吸着物について、油分（n-ヘキサン抽出物質）と SS の分析を行い、これらの総和を総重量から控除することで、水分量を測定した。なお、油分（n-ヘキサン抽出物質）の分析試験方法等については、「下水試験方法」（1997 年版、日本下水道協会）に準拠した。



図1 油吸着材概観（上）、マンホール内の設置状況（中）、管路内設置状況（下）

図2 本調査における油吸着材設置方法



油吸着材の重量

1本当り

3g / 本(1本 = 1m)

1束当り

3g / 本 × 5本 = 15g

1人孔当り

15g / 束 × 7束 × 2 = 210g



### 3. 調査結果

#### 3.1 吸着状況

##### 3.1.1 油吸着材と汚水との接触

新品の油吸着材は、大きく膨らんでいるため、管路内水位が少ない場合、水面より上に出ている部分も多く、吸着材の未使用部分が生じている。これを時系列的にみると、1日目では、まだ吸着材の未使用部分がある場合が多く、3日目ないしは、5日目ぐらいから、吸着材全体が水に浸かった状態となっている。吸着材への吸着量を見ると、いずれのマンホールも、1日目が少なくなっているが、やはりこの未使用部分が影響している。

上記に示すような設置初期の状態では、油吸着材への吸着状況が不均一であるが、実際の回収作業では、複数ある試料片の中から、最も吸着量が多いと思われるものを選んで採取している。このため、分析に供する試料片は、現場での平均的な値よりも吸着物量が多い場合もある。

##### 3.1.2 実際の吸着の様子

油吸着材の設置後、日数が経つにつれて、油吸着材へSS分が付着し、特に吸着材の表面が汚物等により覆われていく。油吸着材へ新しい吸着物が付着するという状況よりもむしろ、既に油吸着材に吸着された付着物に対して、新しい吸着物が付着していく状況となっている。

実際の吸着状況を見ると、この吸着物が段々成長し、膨らんでいくケースがあった。このケースのマンホールは、商業地区で認められ、住宅地区では認められなかった。なお、この吸着物が極端に大きく成長すると、降雨により流量が急激に増加する場合に、過剰に付着した吸着物が剥離すると推測される。

一方、住宅地区では、吸着物の量は比較的一定であるが、段々嫌気化し黒くヘドロ状となり悪臭を放つものも見られた。

国土交通省令による油吸着材の性能基準は6g/g以上（《参考文献》表4参照）であるが、現場での実験では5分の水切り後でも20g/g以上吸着しているのも多い。これは、油分以外にSSや水分を含んでいるものと考えられる。今回の調査で平均的な油分吸着量は2g/g程度であり、最大吸着量は、合流地区11マンホールの30日目における5.9g/gである（表2参照）。

室内実験では液状の油分がポリプロピレン繊維の内部に保持されるメカニズムなのに対して、下水道管路内の過酷な条件下における吸着現象は、室内実験における5分間より長時間下水と接触することにより、繊維の内部に油分が保持されるだけでなく、油吸着材表面に対しても油分・SS・水分の付着が卓越した現象であると推察される。

### 3.1.3 吸着量とその内訳

表2 油吸着材の分析結果（抜粋）

吸着材 1 g あたりの吸着量					
マンホール	経過日数	油分 (g)	SS (g)	水分 (g)	合計 (g)
7	1 日目	0.3	0.1	6.4	6.8
(分流)	3 日目	0.7	0.2	17.8	18.7
	5 日目	0.5	0.3	12.3	13.1
	7 日目	0.5	0.4	11.9	12.8
	10 日目	0.4	0.4	11.6	12.3
	30 日目	0.7	0.7	14.6	15.9
1 1	1 日目	1.0	0.1	4.4	5.5
(合流)	3 日目	1.3	0.2	7.6	9.2
	5 日目	1.5	0.6	11.8	13.9
	7 日目	1.8	0.6	13.0	15.4
	10 日目	1.8	0.4	13.1	15.3
	30 日目	5.9	1.6	25.5	32.9
1 2	1 日目	0.5	0.0	5.3	5.9
(合流)	3 日目	0.9	0.4	14.0	15.3
	5 日目	2.0	1.4	31.9	35.2
	7 日目	2.2	0.4	39.6	42.2
	10 日目	0.8	0.1	6.9	7.7
	30 日目	1.2	0.3	12.4	13.9
2 1	1 日目	1.2	1.1	9.3	11.6
(合流)	3 日目	2.5	0.0	22.6	25.1
	5 日目	3.2	1.2	30.2	34.6
	7 日目	2.1	0.8	18.0	20.9
	10 日目	1.7	1.5	29.2	32.4
	30 日目	2.5	1.4	30.6	34.5

#### (1) 総吸着量について

総吸着量（油分 + SS + 水分）についてみると、3 ないし 5 日経過後に概ね 10 g / g に達している。20 g / g を超過している試料も多くみられるが、これらは飲食店が多い流域であり、中には 30 g / g を超えた資料が 9 個あった。

#### (2) 吸着物の内訳

特筆すべき点として、比較的設置初期（例えば、1 日目）の試料における油分含有率が高いことである。吸着材と汚水とが接触した初期には、油吸着材の本来の性能であるポリプロピレン繊維による油との親和力によって油分が比較的多く吸着されている。しかし、日数が経つにつれて油吸着材へ SS が付着していき、油吸着材の表面が汚物等により覆われ、油吸着材へ新しい吸着物が付着するというメカニズムでなく、油吸着材に既に吸着された付着物に新しい吸着物がさらに付着するといったメカニズムになっている。

したがって、設置してからある程度日数が経過した油吸着材では、ポリプロピレン素材が有する油との親和力やポリプロピレン繊維の毛管現象を利用した吸着メカニズムよりも、物理的な接触・絡み付きや下水中の有機物質同士の粘着性による吸着メカニズムになっていると考えられる。

#### (3) SS について

吸着量でみると SS の含有量は油分含有量より低く、最大でも 1.8 g / g である。これにより、油分が卓越して吸着されていることがわかる。

#### (4) 固形分のみに着目した成分比率

吸着物質のうち、水分を除いた固形分のみに着目して成分比率を見てみると、油吸着材を設置したマンホールにより差があるが、油分の比率が高くなっている。特に、設置初期の段階では、80%程度が油分である。

#### (5) 油分濃縮率

吸着物質の成分比率計算の結果、油分比率は5%程度の箇所が多い。これを一般の水質に置き換えてみると、50,000mg/lに相当し極めて高濃度の油分であることがわかる。マンホールごとに下水水質の測定値を元に濃縮率を算出した。その結果、油分は1000倍以上、SSは100倍以上で油吸着材は油分の濃縮率が優れていることが判明した。

### 3.2 降雨による影響

調査期間中の降雨のうち、比較的降雨強度の大きいものに着目してみると、12/4の18.5mm、12/7の9.5mm、12/9の25mm(雪)、12/17の9.5mm、12/21の27.5mmがあった。

実際に、No.1~20では、10日目(12/5)の回収直前の12/4(9日目に相当)に18.5mmの降雨があり、さらに、10~30日目の回収の間に4回の降雨(12、14、22、26日目)があった。

表3 降雨による油吸着量の変化

油吸着材1g当り

	7	11	12	21
5日目				3.2g
				降雨 6日目 9.5mm
7日目	0.5g	1.8g	2.2g	2.1g
降雨 9日目(12/4)	18.5mm			-
10日目	0.4g	1.8g	0.8g	1.7g
30日目	0.7g	5.9g	1.2g	2.5g

したがって、10日目の回収試料の場合、油吸着量は、12については2.2g/g 0.8g/gのように降雨の影響を受けている可能性がある。しかし、11のように1.8g/gで変化が見られない箇所もある。また、30日目の場合、最終降雨日である12/21(26日目に相当)から、回収日まで4日間あったため、この間にある程度吸着された可能性がある。

なお、No.1~10については、分流地区であるため、降雨の影響は合流地区と比べて軽微である。7の例では0.5g/g 0.4g/gであり変化がなかった。

次に、No.21~30では、6日目の12/17に9.5mmの降雨があった。また、10日目の回収後の同日と翌年1/3に16.5mmの降雨(雪)があり、10~30日目の回収の間に2回の降雨があった。

よって、7日目の回収試料の場合、21の例では3.2g/g 2.1g/gに減少しており降雨の影響を受けている可能性がある。また、30日目の場合、最終降雨日である1/3(23日目に相当)から、回収日まで7日間あるため、1.7g/g 2.5g/gのように0.8g/gの吸着量が回復した可能性もある。

以上のことを降雨の影響としてまとめると

12 / 4 の 18.5 mm の比較的大きな降雨では、合流地域のマンホール 20 箇所のうち 11 箇所で吸着量の低下があり、吸着材に吸着した物質が剥離したものと推測される。これは、降雨により流量が急増し、吸着材が洗われるような現象が発生していると思われる。

吸着量自体が少ない場合には、吸着物質は吸着材の内部に保持されている割合が多く、降雨による影響が少ないと考えられるが、吸着量が多い場合は水流により吸着材が洗われるような挙動を呈し、剥離しやすい状態にあるものと推察される。

分流式では污水管に設置しているため、7 のように油吸着量の剥離は降雨による影響が少なくなっている箇所が多いが、地域によっては稀に降雨の影響と思われる吸着量の減少が見られる。

### 3.3 調査結果のまとめ

合流・分流地域における油吸着材 1 g 当りの油分の吸着量は、飲食店が多い地区に設置したケースでは、1~2 g 程度まで増加し、特に合流地域では最大で 5.9 g / g になった箇所があり、油吸着材による油分の捕捉効果があった。

油吸着材の周りには S S が付着し徐々に膨らんでいく現象が見られた。

分流・合流地域の住宅地域では、油吸着材 1 g 当りの油分吸着量は 1 g 以下であり、徐々に嫌気化していく現象が見られた。

なお、室内実験では油吸着材はラード等の固化した油分への吸着能力は少なく、比較的温度的の高い液状の状態か、粘着性のある S S 等の共存下でない限り油分を捕捉できない可能性があることが判明した。

### 3.4 油吸着材による効果

以上の調査結果を踏まえ、油吸着材の効果を整理すると、

- 1) 下水道管路内の白色固形物の原因物質とされる油分を油吸着材で補足することにより白色固形物の総量を減じることができ、公共用水域の水質保全に寄与できる。
- 2) 油分が管路内に付着・停滞する量が減量するため、管閉塞による故障処理の頻度を少なくさせることができる。また、清掃回数を減らすことができる。
- 3) 油吸着材の設置は油分の排出量の多い飲食店の近隣のマンホールに設置するため、店主の排水設備に対する理解の促進が期待でき、グリーストラップ等の除害設備の設置・維持管理が促進される。

## 4. 今後の課題

今後の課題は、(1) 油吸着材自体（素材）に関する事項、(2) 設置及び交換・回収といった維持管理作業に関する事項、(3) 対策効果に関する事項の 3 つに大別することができる。

### 4.1 油吸着材自体（素材）に関する事項

吸着能力が最大限に発揮されるのは、液状油分に対してである。現場調査の結果から油吸着材への吸着物は、流下中の下水と比較して油分が高濃度に濃縮されていた。

しかし、吸着現象としては、油吸着材の繊維構造の内部に油分が保持されるのに加えて、吸着材の表面においても S S が厚く付着する現象が顕著であった。この吸着材の表面に付着する現象の寄与率によ

っては、ポリプロピレン繊維でない別の素材でもある程度の吸着能力が発揮できる可能性もある。

そこで、現行の油吸着材より安価かつ入手しやすい素材（例えば、タオルやロープ等）をいくつか選定し、現場実施調査を行ってその可能性について調査する必要がある。

一方、SSや水の吸着がなく油分のみを選択的に吸着する素材や形状の開発が望まれる。

また、油吸着材が再使用可能であれば、その処分にかかる費用も削減でき、維持管理費低減に大きく役立つことになる。現場調査において、試験的に再使用品を設置してその吸着能力を評価したところ、新品と比べて大差ない結果であった。再使用品では、絞り出し作業後となるため、PP繊維がつぶれたような状態となり、毛細管現象を利用できないことになる。しかし、前述したように表面への吸着現象が卓越しているのであれば、その影響は少ないと予想される。

#### 4.2 対策すべき施設

足立区内での故障処理実績（平成13、14年度）の調査では、原因はラードによるものが多く、飲食店からの排水に起因するものがほとんどであり、ラーメン店によるものが全体の半数を占めていた。また、足立区内をモデル流域（一般住居を含めて約29万棟）とした試算結果から、ラーメン店は棟数で0.2%に過ぎないが、油分排出量では20%を占める。このことから、白色固形物対策として油吸着材を使用する場合以下のことがいえる。

油吸着材は、油分排出量の多いラーメン店等付近の下流側に集中して設置する。

油吸着材は、污水桟近くの管路内に設置する。

#### 4.3 維持管理作業に関する事項

油吸着材による簡易合流改善対策を実運用する場合は、定期的な交換作業が必要となるが、その作業の手間（コストも含む）や方法自体が課題となる。また、回収した油吸着材は、絞り出し作業により吸着物と油吸着材を一旦分離し、吸着物（搾り出し残渣）は、理場のスカム処理系統、油吸着材は裁断後、污泥焼却炉で燃焼させる方法も考えられる。

しかし、実運用では処分すべき大量の油吸着材が発生するために、処理場側の受入れ態勢を十分に協議する必要がある。また、回収した油吸着材をそのまま産業廃棄物として業者での引き取り処分を行うことも可能であるが、コスト面の問題が大きい。

よって、油吸着材による簡易合流改善対策を実運用するに当たっては、回収した油吸着材の再使用を含めた処分方法の確立が課題となる。

#### 4.4 合流改善対策効果に関する事項

油吸着材による簡易合流改善対策としての効果を評価するためには、下水道管路に排出された油分がどの程度あり、油吸着材でどの程度捕捉され、どの程度流出するのか、その収支を把握することが重要である。また、管内に付着する油分量は、何mg/l以上といった濃度項が大きく作用するのか、また、その目安となる濃度はどの程度かが分からないと評価できない。

なお、他の簡易合流改善対策では、装置を分水マンホールに設置し、白色固形物が公共用水域へ流出する直前で捕捉するものが多く、その設置効果は降雨時に分水マンホールで調査（観察やサンプリング）を行うことで把握できる。この点が油吸着材による対策と大きく異なる。

上記の示したような排出油分の行き先別比率等の定量的な調査資料は、現時点ではない。今後、モデ

ル流域での詳細な調査等を通じて明らかにしていく必要がある。

## 5. 実用化に向けて

合流改善対策は、緊急的な課題であり、あらゆる方策を組み合わせる必要がある。通常の簡易合流改善対策とアプローチを異にする油吸着材による手法は、暫定的な対策手法として一定の存在価値を有している。

油吸着材による対策手法の最大の特徴は、その簡便さにある。設置はロープでステップに結び付けるのみであり、これを一定頻度で交換すればよく、特別な設備を必要としない。

実用化に当たっては、さらなるデータや知見を集積していくことが必要不可欠である。今後、モデル流域等を設定し、実運用を通じた追加調査が望まれる。

## 《参考文献》

表4 「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行規則」

(昭和46年運輸省令第38号)

最終改正：平成15年3月20日(国土交通省令第27号)

### 第三十三条の二

- 2 排出油防除資材は、次の各号に掲げる資材ごとに、当該各号の規定に適合するものでなければならない。

#### 三 油吸着材

- イ B重油による吸着量は、吸油量試験開始後、5分で当該油吸着材1gにつき6g以上であり、かつ、当該油吸着材1cm<sup>3</sup>につき0.8g以上であること。
- ロ 吸水量は、吸水量試験開始後、5分で当該油吸着材1gにつき1.5g以下であり、かつ、当該油吸着材1cm<sup>3</sup>につき0.1g以下であること。
- ハ 材質は、通常の保管状態において変化しにくいものであること。
- ニ 特定油を吸着した状態で長時間原形を保つものであること。
- ホ 使用後の回収が容易であること。
- ヘ 焼却が容易であり、かつ、焼却による有害ガスの発生が少ないものであること。

表5 油吸着材の性能試験基準（抜粋）

試験項目	試験方法	判定基準	備考
（１）吸着量の試験	10cm×10cm の試験片を 20 の B 重油の油面に浮かべ、5 分間静置した後、これを金網の上に 5 分間放置した後、その重量を測定する。 試験片 1g 当り及び容積 1cm <sup>3</sup> 当りの吸着量を算定する。	吸着量は、当該油吸着材 1g につき 6g 以上であり、かつ 1cm <sup>3</sup> につき 0.8g 以上であること	試験片は単体又は単体の切片とする 各試験は 3 枚の試験片を用いて個別に行い、それぞれの試験片が判定基準に適合していること
（２）吸水量の試験	10cm×10cm の試験片を 20 の清水面に浮かべ 5 分静置した後、これを金網の上に 5 分間放置し、その重量を測定する。 試験片 1g 当り及び容積 1cm <sup>3</sup> 当りの吸水量を算定する。	吸着量は、当該油吸着材 1g につき 1.5g 以下であり、かつ 1cm <sup>3</sup> につき 0.1g 以下であること	

金網：直径 1mm の針金をふるい目の長さが 17mm のメッシュ状に編んだもの

## 1. 概要

本研究は、合流式下水道雨天時越流水対策として、超高速固液分離処理である二段造粒式沈殿濃縮装置と消毒処理として臭素系速効性消毒装置との組み合わせによる総合技術を確立することを目的に行なった。

本技術は、ノウハウ・フィールド提供型共同研究により平成 13 年 8 月から平成 15 年 8 月までの間に開発したものである。平成 13 年度は、開発目標を達成するための装置を研究することを主眼とした。平成 14 年度は、雨天時下水に対する処理性能の確認と、共同研究の成果を踏まえて実用化に向けた装置の改造と処理性能の確認を行った。平成 15 年度は、雨天時下水に対する処理性能の確認を継続すると共に、薬品使用量の低減、混合槽での攪拌条件の検討、起動方法の検討、処理水量変動時の処理性能確認を行った。

ここでは、平成 15 年度の開発成果について報告する。

## 2. 開発目標

## 2.1 処理水質と運転条件の目標

開発目標は、芝浦処理場(現芝浦水再生センター)内に設置したパイロットプラントを用い、雨天時の第一沈殿池流入汚水を原水として表 1 に示す処理性能を満たす装置を開発することとした。

平成 14 年度までは処理水質を目標値として設定していたが、平成 15 年度は「合流式下水道改善対策指針と解説」に基づいて、合理的な値である汚濁負荷量の削減率を目標値として設定する見直しを行った。合流式下水道の改善目標である放流負荷量を分流式下水道並みとすることは、下水道に流入する BOD の総負荷を雨天時で概ね 65%以上削減して放流することに対応する。このことから、BOD と SS の汚濁負荷除去率を目標値として設定し、性能評価の指標とした。

また、処理方法は無機凝集剤と高分子凝集剤とを併用する 2 液方式とし、最大水面積負荷を  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  とした。

表 1：処理性能の評価

項目		目標値
処理水目標値：1 降雨当たりの負荷量削減率		
	SS (%)	80 以上
	BOD (%)	65 以上
運転条件		
	最大水面積負荷 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$ )	50
	高分子凝集剤添加量 (mg/L)	1 ~ 2
	無機凝集剤添加量 (mg/L)	10 ~ 50

## 2.2 適用方法

図 1 に本処理方法の基本的な適用方法の一例を示す。雨天時に高級処理水量 1Q を超える



下水が処理場へ流入する場合、 $1Q$  を超えて  $3Q$  までの水量である最大  $2Q$  を雨水滞水池へ貯留し、降雨終了後に高級処理を行う。雨水貯留池が満杯になってもなお  $1Q$  を超える下水が流入する場合には、 $1Q$  を超える最大  $2Q$  の水量を本技術で直接処理し、処理水を公共用水域へ放流する。

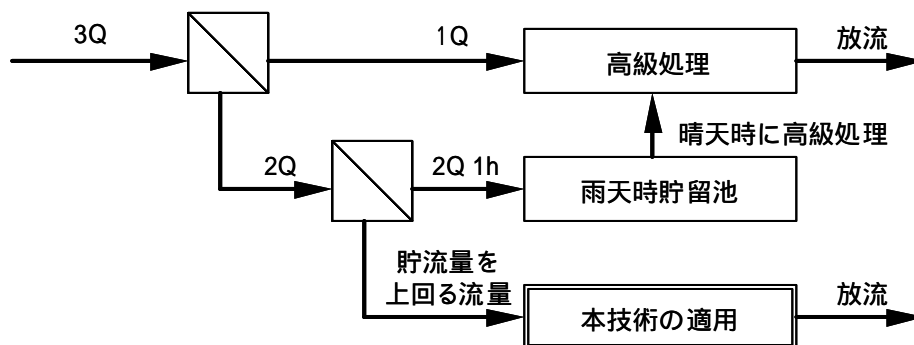


図 1 適用方法の一例

### 3. 雨天時下水の処理実験

#### 3.1 処理フロー

図 2 に実験装置の処理フローを示す。第一沈殿池流入污水を原水とし、目幅 15 mm のスクリーンで夾雑物を除去する。その後、塩化第二鉄とアニオン系高分子凝集剤を順次添加して迂流式混合槽で混合することによって、原水中の汚濁物質(SS)を凝集フロック中に取り込む。凝集フロックを凝集分離槽で合体成長させて沈降分離し、清澄な処理水を得る。沈降したフロックは凝集分離槽の下部から濃縮汚泥として排出する。

#### 3.2 運転条件

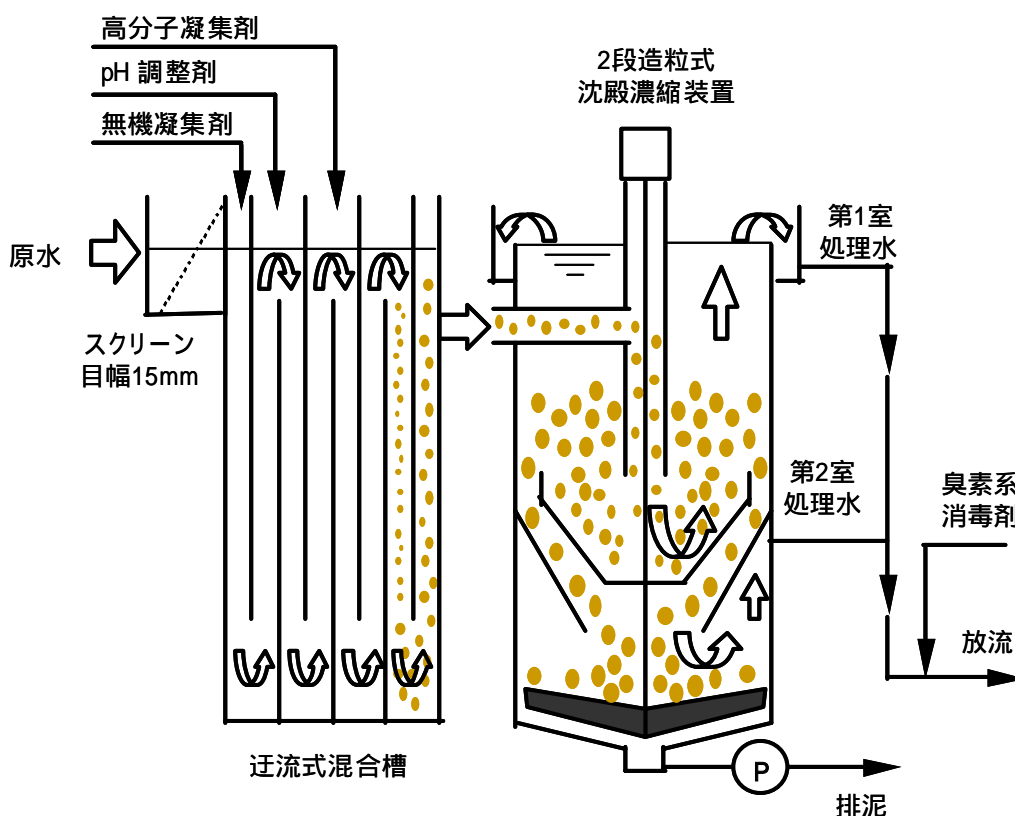


図 2 実験装置の処理フロー

平成 15 年度は 7 月までに 6 回の試験を行った。平成 14 年度に実施した試験も含めて平成 15 年 7 月までに行った 13 回の雨天時下水処理の運転条件を表 2 に示す。無機凝集剤及び高分子凝集剤の添加量は試験と同時にやったジャーテストに基づいて調整し、試験ごとに徐々に低添加量に移行した。無機凝集剤添加後の pH が 6.5 未満となる場合には水酸化ナトリウムを添加して pH6.5～7.0 になるように調整した。

第 1 室におけるフロック層の境界面位置を抑制し処理水質を安定させるために、装置全体の LV を  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  とし、かつ第 1 室 LV を  $25 \text{ m}/\text{時}$  とした。

表 2 運転条件

試験年月日	処理速度 LV $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$	処理水量 $\text{m}^3/\text{時}$	無機凝集剤 $\text{mg/L}$	高分子凝集剤 $\text{mg/L}$
H14.12.4	60	176	30～50	3.0
H15.1.23	50, 60	147, 176	30, 40	2.0～3.0
H15.1.27	50, 60	147, 176	40	1.5～3.0
H15.2.24	50	147	40	2.0, 3.0
H15.3.3	50	147	30, 40	1.5, 3.0
H15.3.6～7	50	147	30, 40	1.5～3.0
H15.3.25	50	147	30, 40	1.0～3.0
H15.4.4～5	50	147	20～40	0.75～3.0
H15.4.8	50	147	30, 40	1.0～3.0
H15.5.20～21	50	147	30	1.0, 1.5
H15.5.31	50	147	20, 30	1.0, 1.5
H15.6.25	50	147	20	1.0
H15.7.4	50	147	20	1.0

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 処理例

図 3 に平成 15 年 5 月 20～21 日の降雨時に実施した試験における SS の経時変化を示す。原水 SS 濃度は 18:00 過ぎから急激に増加して最大値  $755 \text{ mg/L}$  に達し、その後徐々に減少して 2:00 過ぎには  $100 \text{ mg/L}$  を下回った。これに対して処理水 SS 濃度は、20:00 過ぎまで  $46 \sim 73 \text{ mg/L}$  であり、20:45 以降は  $30 \text{ mg/L}$  未満を維持した。6:15 に一時的な原水 SS が上昇したが、処理水 SS は上昇していない。

一方、図 3 の最下段は実験装置への積算流入 SS 量と積算放流 SS 量を除去率と併せ

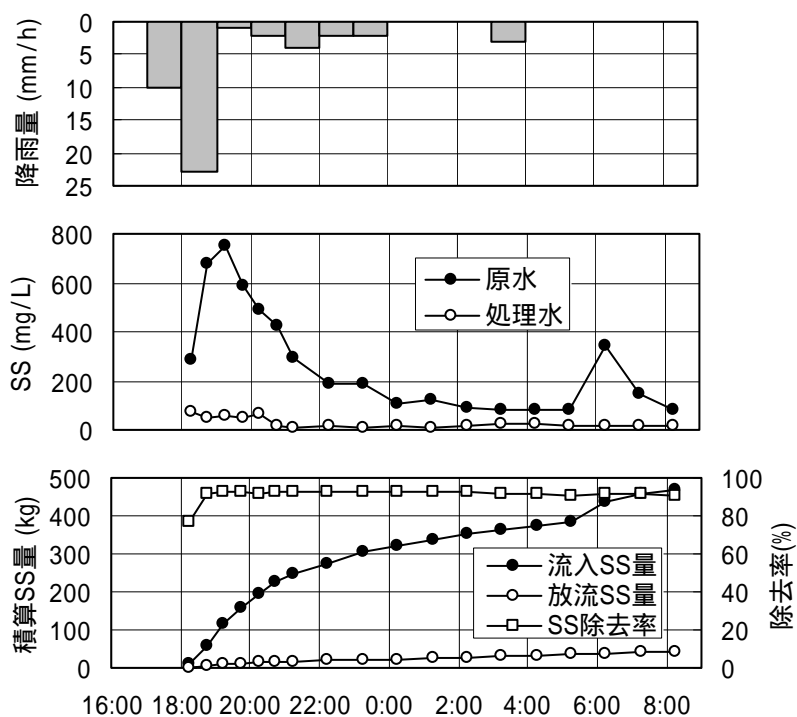


図 3 処理例(平成 15 年 5 月 20～21 日)

て示している。積算流入 SS 量は経時的に増加して試験終了時に 470 kg に達し、これに対して積算放流 SS 量は試験終了時に 42 kg であった。除去率は試験開始後から 80% 以上を維持し、最終的には 91% であった。

### 3.3.2 負荷除去率

図 4 に 13 回の試験で得られた装置流入負荷と負荷除去率の関係を示す。各降雨試験での SS 負荷に対する除去率は 78 ~ 91 % であり、80 % 以上の除去率が安定して得られている。一方、BOD 負荷に対する除去率は 64 ~ 85 % であり、70 % 以上の除去率が安定して得られている。

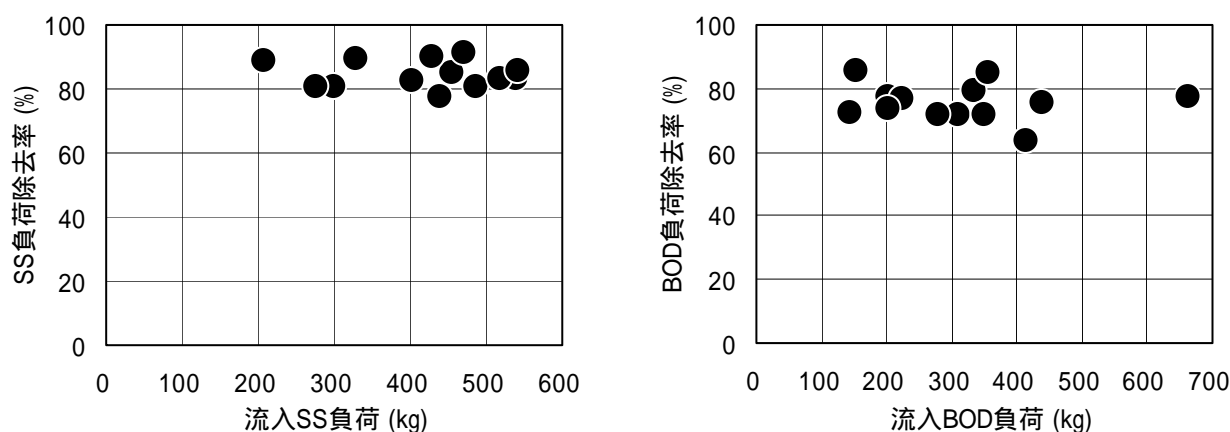


図 4 装置流入負荷と負荷除去率の関係

### 3.3.3 原水水質と除去率

原水濃度と除去性能との関係を確認するために、水面積負荷  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  での処理を対象として、負荷除去率ではなく 13 回の試験のスポットデータに基づいて得られた結果を述べる。

#### (1) SS 除去

図 5 に原水 SS と処理水 SS との関係を示す。原水 SS が  $400 \text{ mg/L}$  以下の場合、処理水 SS は  $70 \text{ mg/L}$  以下となることが多い。一方、原水 SS が  $400 \text{ mg/L}$  を超えると、処理水 SS が  $100 \text{ mg/L}$  を超える頻度が高くなる。

図 6 に SS 除去率の分布を累積頻度図として示す。SS 除去率が 80% 以上である頻度は

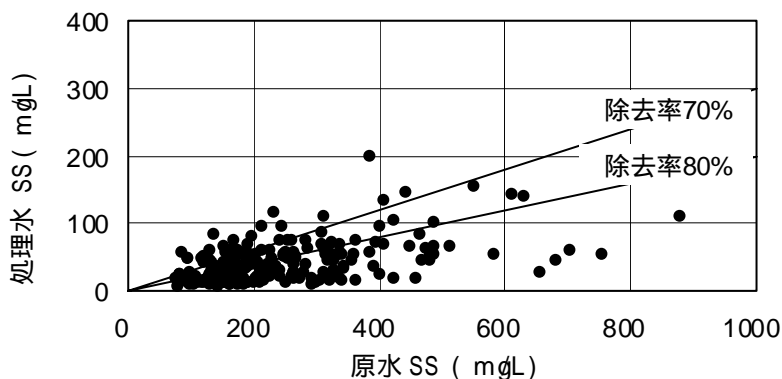


図 5 原水 SS と処理水 SS との関係

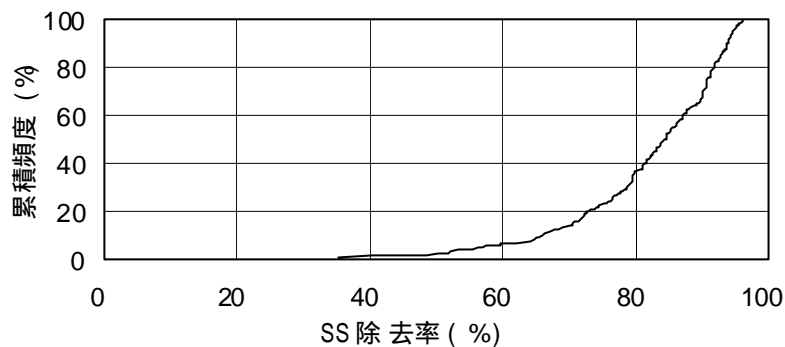


図 6 SS 除去率の分布

64%であり、除去率 60% 以下の頻度は 7% 以下であった。SS 除去率の平均値は 82% であった。

## (2)BOD除去

凝集沈殿処理による BOD の除去は SS 性 BOD の除去によるものであり、溶解性 BOD の除去は期待出来ない。よって、原水 BOD に占める SS 性 BOD の割合が BOD 除去性能に大きく影響する。図 7 に原水 BOD に占める SS 性 BOD の割合の分布を累積頻度図として示す。SS 性 BOD の割合は、地域、季節、時間帯および降雨によって異なると推測されるので、図 7 の分布は今回の 13 回の試験に限って適用されるものである。図 7 の場合、SS 性 BOD の割合が 80% を超える頻度は約 80% であり、平均値は

85% であった。SS 除去率の平均値は 82% であるから、SS 性 BOD が同じく 82% 除去されるとすれば、BOD 除去率の平均値は  $85\% \times 0.82 = 70\%$  と計算される。

図 8 に BOD 除去率の分布を累積頻度図として示す。BOD 除去率が 60% 以上である頻度は 80% であった。BOD 除去率の平均値は 73% であり、SS 除去率と SS 性 BOD の割合から推定された値とほぼ等しくなった。

## 3.4 考 察

### (1) 負荷除去率

雨天時越流水が降雨という自然現象に起因していることを考慮するとともに、汚濁負荷削減という観点に則れば、スポット濃度よりもむしろ負荷に対しての除去率で性能を評価することが合理的である。この観点から、平成 15 年度は汚濁負荷量の削減率を目標値として性能評価を行った。降雨ごとに SS 負荷と BOD 負荷の除去率を算出した結果、どちらに対しても流入負荷量に関わらず安定した除去率を得ることが出来た。

### (2) 原水水質と処理性能

装置の性能を評価する上では、原水水質の特徴を把握して SS 除去率や BOD 除去率をスポット濃度に基づいて評価することも重要である。今回行った試験では、BOD に占める SS 性 BOD の割合は平均 85% であり、SS 除去率を約 80% 除去すれば BOD 除去率が約 70% となることが推定され、実際の実験データからも証明された。

### (3) 原水アルカリ度低下の影響

図 3 では処理水 SS が 20:45 以降に急激に低下している。このように降雨後ある程度の時

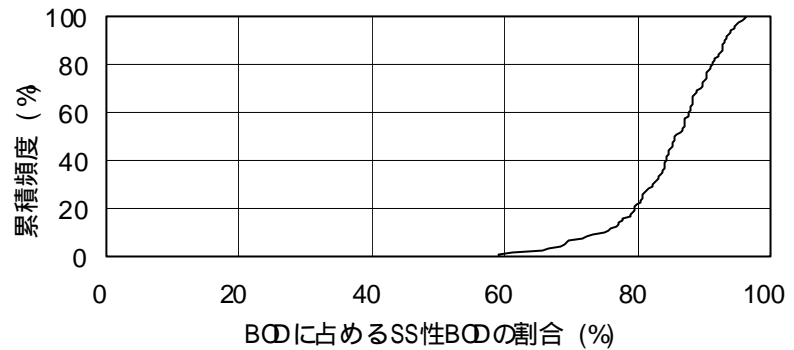


図 7 BOD に占める SS 性 BOD の割合の分布

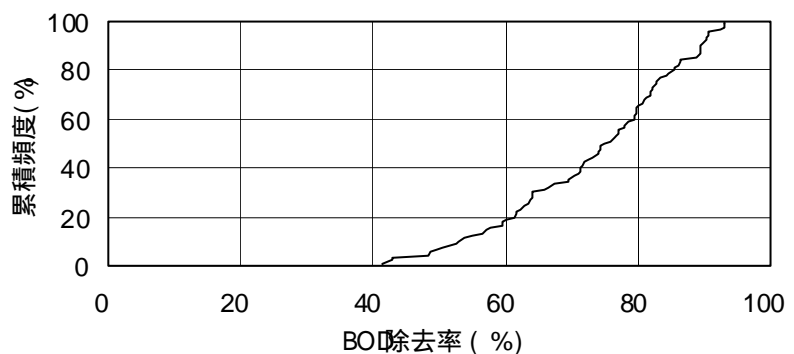


図 8 BOD 除去率の分布

間が経ってから処理水 SS が急激に低下する事象は他の雨天時試験でも認められている。この原因を調査した結果、原水アルカリ度の低下に伴って処理水 SS が低下することが明らかとなった。図 9 に原水アルカリ度と処理水 SS との関係を、原水 SS の範囲に応じてシンボルを変えて示す。処理水 SS は原水 SS よりもむしろ原水アルカリ度に強く依存していることが明らかである。雨水には M アルカリ度がほとんどないことが実測で判っており、雨天時下水のアルカリ度は雨水の混入によって低下する。降雨に伴って下水のアルカリ度は減少し、この結果、処理水 SS が低下することになる。

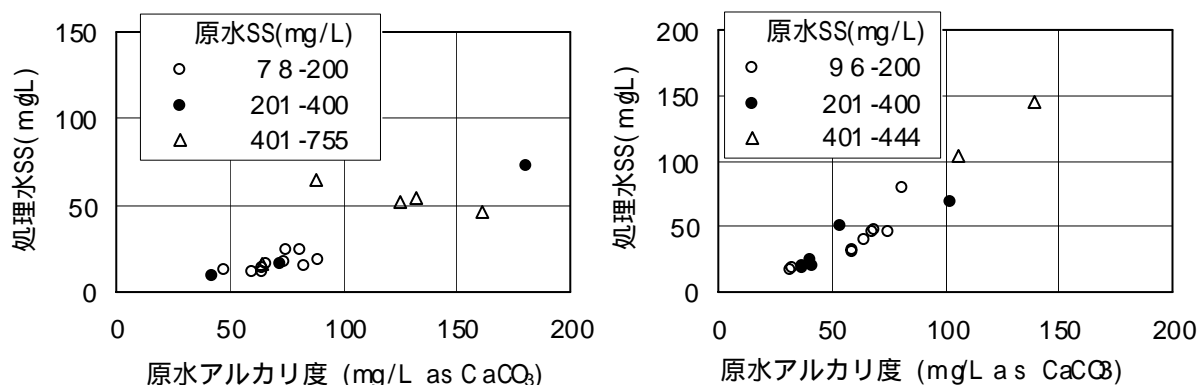


図 9 原水アルカリ度の影響  
(左：平成 15 年 5 月 20～21 日、右：平成 15 年 7 月 4 日)

#### 4. その他の検討

##### 4.1 凝集剤最適添加量の検討

図 9 に示したとおり処理水 SS は原水 SS よりも原水アルカリ度に強く依存する。すなわち、凝集剤添加量を原水 SS の変動に応じて調整することなく、凝集剤添加量を一定として処理することが可能となる。雨天時試験の度に凝集剤添加量を低減した結果、塩化第二鉄を 20～30 mg/L、アニオン系高分子凝集剤を 1.0～1.5 mg/L とし、凝集剤添加量を一定とすることによって十分な処理性能を得られることが分った。

##### 4.2 迂流式混合槽における攪拌条件の検討

本装置では無機凝集剤と高分子凝集剤の混合に迂流式混合槽を用いている。迂流式混合は攪拌動力を低減させ、短絡流防止による均一混合を可能にし、さらに縦長槽が可能であり省用地という利点がある。その一方で、処理水量が低下した場合には混合槽内の流速が低下して混合が不十分になることが考えられた。

雨天時下水を対象として試験を行うことができる機会は天候に左右されるために試験回数に限りがある。よって、雨天時には第 3 項に記載した処理実験を行い、第 4.2 項、第 4.3 項および第 4.4 項の確認は晴天時の汚水を対象として実施した。

晴天時下水を対象にして混合条件の検討実験を行った結果、以下の点が明らかとなった。

処理水量の低下による混合槽流速の低下は、攪拌不足による処理性能の低下を引き起こすことがある。

水量低下時の攪拌不足を補うためには、凝集剤添加直後に凝集剤を原水に素早く分散させることが重要である。

無機凝集剤と高分子凝集剤の両方共に添加直後の攪拌操作を行うことで、水面積負荷

10 ~ 50  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  の範囲で良好な処理が可能である。

#### 4.3 起動方法と起動時の処理性能の確認

晴天時下水を対象にして、起動後の処理水水質を早期に安定させる方法の検討実験を行った。この結果以下の点が明らかとなった。

起動時には混合槽と分離槽に滞留している水が処理水として流出する。水面積負荷  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  の場合の両者の合計滞留時間は 12 分であることから、起動後 12 分経過後から処理水水質は急激に向上する。

起動後処理水水質が安定するまでに要する時間は 30 分である。

#### 4.4 処理水量変動時の処理性能の確認

晴天時下水を対象にして、処理水量の変動に対する処理性能を確認する実験を行った。この結果以下の点が明らかとなった。

処理水量が低下する場合、水面積負荷を  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  から  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  に急激に変化させても処理水水質の悪化は生じない。

処理水量が増加する場合、水面積負荷の減少量を 1 分間あたり  $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  以下とすることにより処理水水質の悪化を抑制できる。

### 5. まとめ

#### 5.1 開発技術に対する性能評価

平成 14 年 12 月から平成 15 年 7 月までの 13 回の降雨時に行った処理実験での性能は、表 3 のとおりである。

表 3：処理性能の評価

項目 \ 評価			目標	結果	評価
処理水 目標値	1 降雨当たりの 負荷量削減率 (%)	SS	80 以上	78 ~ 91 平均 84	
		BOD	65 以上	64 ~ 85 平均 76	
運転 条件	最大水面積負荷 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$ )		50	50	
	高分子凝集剤添加量 (mg/L)		1 ~ 2	1 ~ 1.5	
	無機凝集剤添加量 (mg/L)		10 ~ 50	20 ~ 30	

#### 5.2 本装置の特徴

本装置の特徴を以下に列記する。

凝集剤以外の薬品、担体及びろ材を用いず、処理機構が簡単である。このために、運転操作が容易であり、原水 SS の変動に対応した操作を行う必要がない。初期雨水の汚濁に対して、処理水 SS が一時的に上昇した場合でも、原水 SS の低下に伴って、運転操作を行わなくても処理水 SS は自然に低下する。

装置の構造が簡素であり、維持管理が容易である。大型攪拌機、担体やろ材、ろ材流

出防止スクリーン、傾斜板を用いないので、これらに伴う維持管理や降雨後の維持管理作業が発生しない。

ろ過機構を有しないため、ろ材の洗浄操作やそれに伴う運転の中断がなく、連続運転が可能である。

水面積負荷と  $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  として、従来の高速凝集沈殿処理に比べて数倍の高速処理が可能である。また構造が簡単であり、かつ迂流式混合槽を採用することで凝集分離槽のみでなく装置全体の省用地化が可能である。

無機凝集剤及び高分子凝集剤の混合を迂流式混合槽で行う。この混合は、攪拌動力の低減、装置構造の簡素化、短絡流防止による均一混合、敷地面積の縮小化に有効である。

凝集分離槽は上部の第 1 室と下部の第 2 室に分かれている。混合槽で形成したフロックを第 1 室で大きく成長させてフロックブランケット層を形成し、このフロックブランケット層によって懸濁物質の除去を促進する。

第 1 室のフロックを分離水の一部と共に第 2 室へ強制移送して第 2 室から濃縮汚泥として引き抜く。これと併せて第 2 室からも処理水を得る。

臭素系消毒剤を組み合わせることによって、消毒剤の消費を抑制して、安全かつ合理的な消毒処理を行うことができる。

上記メリットがある反面、以下の点に注意して運用する必要がある。

立ち上げ時には装置内に滞留している水が処理水として流出する。処理水水質が安定するまでには 30 分間を要し、この間の処理水については調整池に貯留する等の対策が必要である。

水面積負荷の変動は、減少時には処理水水質への影響がないが、1 分間あたり  $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  を超える急激な増加は処理水水質悪化を招く。水面積負荷の増加量を 1 分間あたり  $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{時})$  以下に制御することで処理水水質の悪化の抑制が可能である。

本装置の処理原理は凝集沈殿処理であるので、処理可能な原水 SS には上限がある。雨天時試験では最大  $880 \text{ mg/L}$  までの処理を良好に行うことを確認しているが、それを超える高 SS については、処理水水質が悪化する可能性がある。

### 5.3 課題

実験では、直径 2 m、高さ 6 m の円筒形装置を用いた。既存施設に本装置を設置する場合、既存施設に応じた大きさの円筒形または矩形の装置となる。スケールアップした場合、直径と高さのバランス等が変わることがあり、装置内部の構造が適切になるように調整する必要がある。導入前に、雨天時流入下水の水質を調査し、凝集剤の種類と添加量を決めることが重要である。また、二段造粒式沈殿濃縮装置を使用しない時は、計測機器および槽内機器の保護の観点から、二次処理水等を槽内に満たしておくことが望ましい。

## 5 - 4 汐留地区における雨天時の路面流出水汚濁負荷量等調査

計画調整部 技術開発課

平川 正道、藤原 新

### 1. 再生水の利用拡大

東京における再生水利用は、安定した水量、水質が期待できることから新たな利用拡大の可能性を持つ。技術開発課では、再生水の新たな利用拡大を目指して、平成 14 年度に西新宿の都庁舎西側都道(特例都道新宿副都心 12 号線)において再生水の路面散水調査を行い雨天時の路面堆積汚濁物の流出実態把握と都市部におけるヒートアイランド緩和策の効果確認及びの臭気等再生水による様々な影響を把握する実験を実施した。一方、路面からの流出負荷量や臭気といった調査項目は地域特性に大きく影響を受けるものであり、現地の土地利用状況、交通量、といった要素が異なる地域では調査結果に違いが生じることや、散水する再生水の性状によっても調査結果は異なると考えられる。そこで、都の平成 15 年度重点事業である「ヒートアイランド対策モデル事業」対象地域のひとつである汐留地区と芝浦水再生センター(場内道路)において同様の散水実験を行い、散水効果や各種影響を確認した。

### 2. 調査概要

#### 2.1 目的

実用規模で施工された保水性舗装箇所において、以下の項目を調査する。

(1)路面堆積物の実態、(2)再生水の適用性、(3)散水による周辺環境への影響、(4)適切な散水手法の検討

#### 2.2 調査概要

主な調査項目は以下のとおりである。

##### (1)予備的調査

散水実験実施に当たり対象地区内の交通量や再生水配管の圧力変化を予め確認する。

##### (2)路面堆積物の調査分析

路面堆積物の質と量を把握し、合流改善対策の検討資料とする。また、比較のため、雨天時の路面流出物を把握する。

##### (3)再生水の散水用水としての適用性の確認

再生水の水質や臭気等、再生水散水による影響の有無を調査する。

##### (4)再生水の散水手法に関する調査

散水箇所の通過車両による水はね状況、及びその水質を把握する。

##### (5)再生水散水による路面温度の低下効果に関する調査

舗装種別の違いによる散水箇所と非散水箇所の路面温度変化を調査比較する。

##### (6)散水設備の定期点検

実験設備の問題点や故障等について定期的に確認し整理する。

#### 2.3 散水実験方法

##### (1) 汐留地区の調査

散水実験は汐留地区内の都道 4 8 1 号線(区間内全線保水性舗装)で行った。平成 14 年度に調査した都庁舎西側都道では片側 4 車線道路の中央寄り 1 車線のみであったが、汐



留地区では中央分離帯を挟んで4車線全てに施工している。散水配管( 50mm)は中央分離帯内に設置しており、散水エリアについては分離帯の区切りに合わせ1～3ブロックと呼んでいる。散水実権地区案内を図1に、散水実験状況を図2に示す。

今回の実験では新宿での実験結果を踏まえミスト化しにくく、路面に均一に散水できるノズルを新たに開発し設置した( 図3 )。ノズルからの散水能力は実験時の再生水圧力によって3～5リットル/(分・ノズル)である。ノズルには当日の圧力状況に応じて各ノズルの散水量を微調整できるよう調節つまみがついている。散水配管の元バルブの開度調節による散水量の調整も可能である。散水配管は3ブロック合計で約673m( 散水延長3ブロック合計片側266m )あり、この間にノズルを1mピッチで配置し実験を行った。

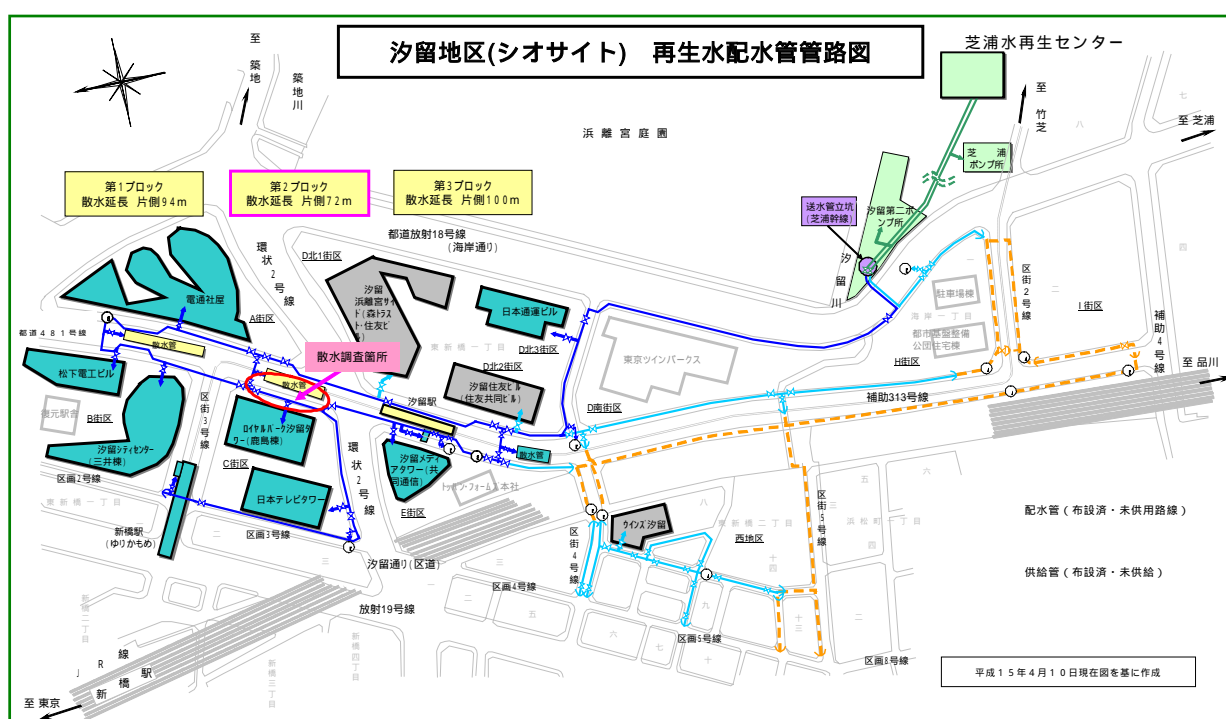


図1 散水実験地区案内図



図2 散水状況



図3 散水ノズル

散水方式はバルブ操作による手動散水とタイマーコントローラーによる自動散水を選ぶことが可能であり、タイマーコントローラーによる自動散水に必要な電力は風力 + 太陽光発電(図4)で賄う設計とした。

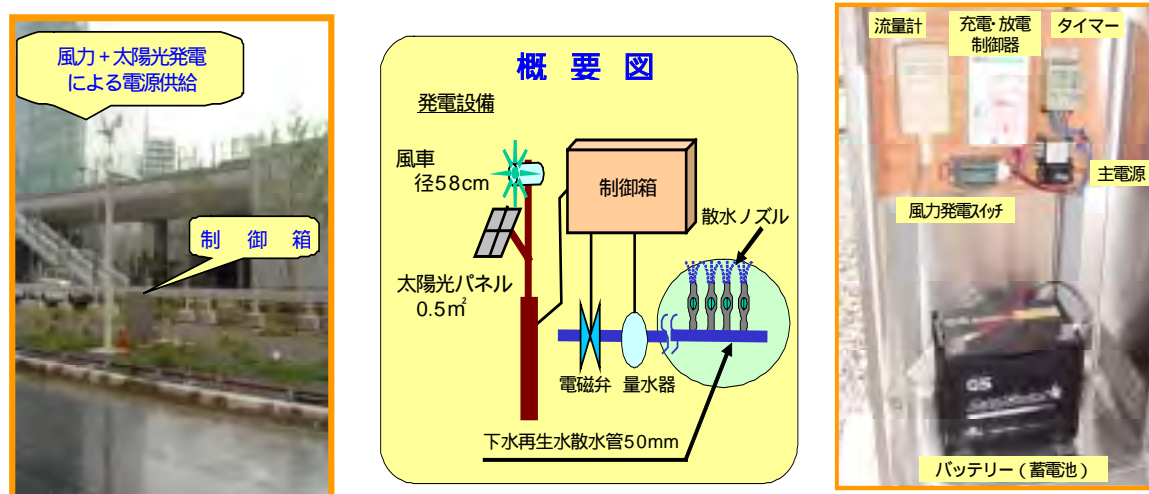


図4 風力 + 太陽光発電設備

## (2) 芝浦水再生センターの調査

本年度調査では、汐留地区に加え芝浦水再生センター内の保水性舗装施工区間においても散水配管を用いた散水実験を行った(図5、図6)。この散水施設は、汐留地区の現場では交通安全等への配慮から十分な実験がしにくいような場合を想定し、汐留地区の実験施設に近いミニ実験施設として作成したものである。配管はコンクリートブロックを利用した簡易な基礎で設置し、ノズルは汐留地区と同じものを使用した。

### < 配管施設諸元 >

- ・ 配管延長：30m (保水性舗装区間は90m)
- ・ 配管材：VP 50mm
- ・ 散水ノズル：汐留と同様 (同じものを同じ間隔(1m間隔))



図5 水再生センター内保水性舗装区間



図6 散水状況

汐留地区と芝浦水再生センターにおける実験区分は以下のとおりである。

表 1 実験項目区分

(1)予備的調査	汐留
(2)路面堆積物の調査分析	汐留
(3)再生水の散水用水としての適合性の確認	汐留、芝浦
(4)再生水の散水手法に関する調査	汐留、芝浦
(5)再生水散水による路面温度の低下効果に関する調査	汐留、芝浦
(6)散水設備の定期点検	汐留

散水設備は当局の実験の他、建設局及び知事本部の実験にも使用した。また、下水道展期間中の公開散水やNPO団体主催の大江戸打ち水大作戦への協力散水も行った。表2に平成15年度の散水回数と散水量について示す。散水時間は公開散水等では約10分間、路面堆積物の調査では約60分間であった。春期(4～6月)は散水設備が工事中であり散水できなかったため、その間に予備的調査を実施した。60分散水した路面堆積物の調査時における散水量は、第二ブロックの平均値で427リットル/分であった。第二ブロックのノズル数は146個であるから単純平均で2.9リットル/分・ノズルということになる。

表 2 散水回数と散水使用量

項目	年度 月	14		15													備考
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
(1)散水設備工事																	
(2)散水調査																	

実施主体	調査目的	回数	再生水使用量
下 水 道 局	路面堆積物の分析を当局単独で実施 下水道展期間中の公開散水 4 日間 ( 1 日 2 回 ) 8 月 2 5 日大江戸打ち水大作戦への 協力 散水車による散水調査	1 回	約 26m <sup>3</sup>
		8 回	約 15m <sup>3</sup>
		1 回	約 6m <sup>3</sup>
		2 回	-
建設局と下 水道局共同	建設局の温度等調査にあわせて下水 道局は路面堆積物の調査を実施	4 回	約 232m <sup>3</sup>
建 設 局	温度等の調査	1 回	約 74m <sup>3</sup>
知 事 本 部	体感調査を実施するための散水 ( 8 月 )	1 回	約 57m <sup>3</sup>
合計		1 8 回	約 410m <sup>3</sup>

### 3. 予備的調査結果

#### 3.1 交通量調査

散水実験を実施するにあたり、交通安全の観点から散水前に簡易な交通量調査を実施した。調査は主な実験エリアとなる第二ブロックを中心に、車両、歩行者、自転車について実施した。下図に調査方法概要を示す。

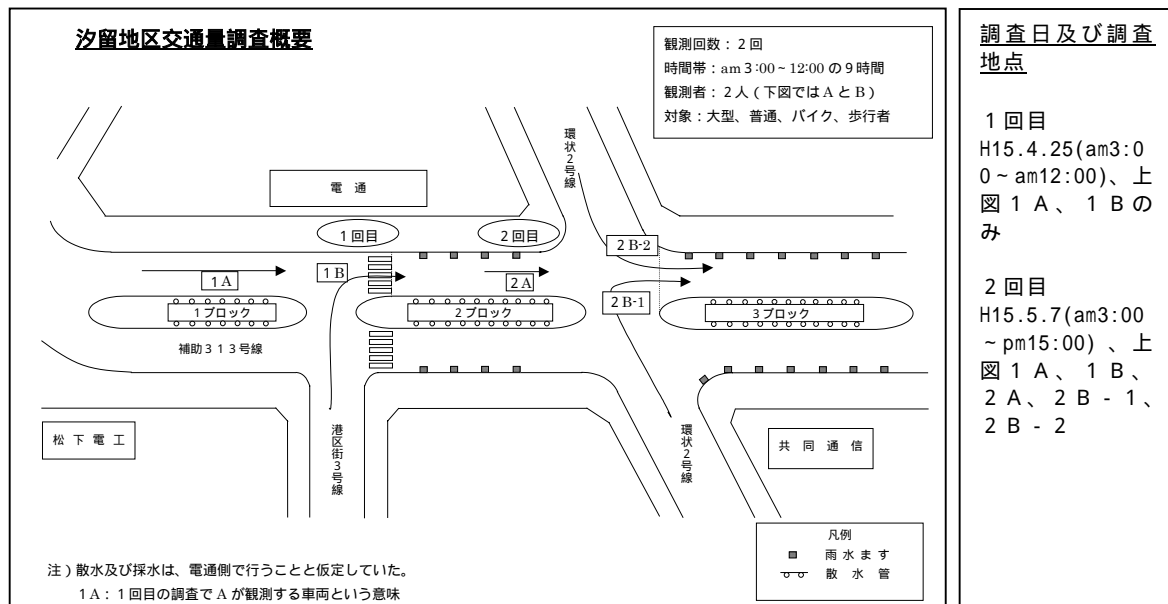


図7 交通量調査概要

調査結果の概要は以下のとおりである。

全体的に交通量は少なく、早朝はほとんどがタクシーである。また、開発中のエリアであるため日中は工事車両が多い。

歩行者の多くは通勤者である。

交通量（大型車と普通車の合計）は、1時間当たり約170台以下であった。

9時～昼頃にかけて車両、歩行者ともに多くなるため、散水時刻は9時より前が適当と考えられる。

#### 3.2 圧力調査結果

再生水を散水する適切な時間帯を把握するため、再生水の圧力変化調査を行った。圧力値は第一ブロック及び第三ブロックの空気弁の値を読みとる方法で確認した。



図8 第1ブロック空気弁



図9 第3ブロック空気弁



調査結果の概要は以下のとおりである。

圧力低下が継続するのは朝 9 時と 13 時～ 14 時にかけてであった。

いずれの時間帯においても圧力変動が 0.2～0.8Mpa 程度生じていた。

散水時間帯としては朝 9 時より前が適切と考えられる。

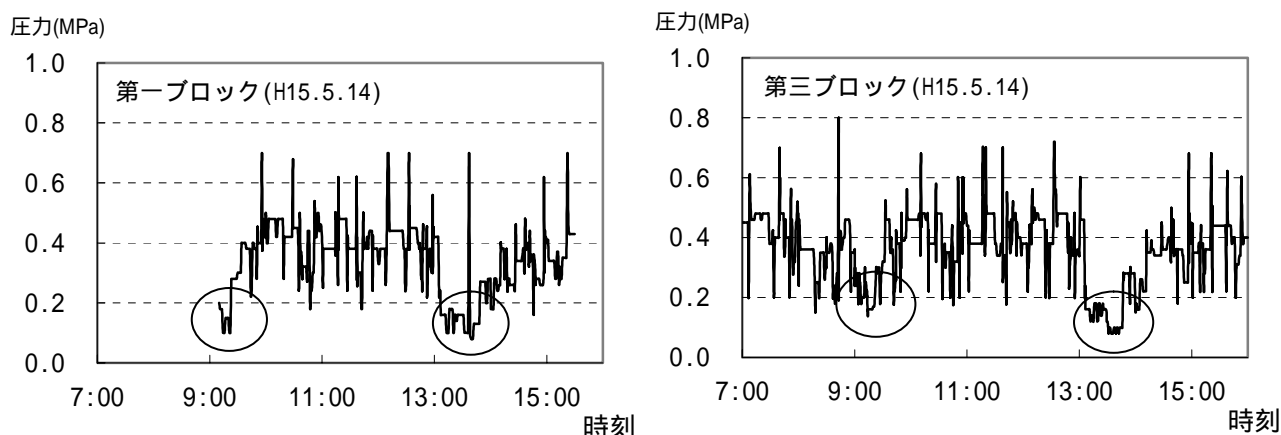


図 10 再生水圧力調査結果

#### 4. 調査結果

##### 4.1 路面堆積物の調査結果

##### (1) 散水ノズルによる散水調査

散水による路面清掃効果を確認するため散水施設を用いた散水調査を実施した。

本調査における散水は、夏のヒートアイランド対策という意味合いもあり夏に多く散水する必要があるため調査日程は夏に 3 回、春と秋は各 1 回ずつとし、交通安全上の理由から冬は行わないこととした。また、降雨による影響を極力排除するため 3 日間の連続した晴天時があった後散水するようにした。採水作業は散水設備向かい側の雨水ますで行った(図 11)。流出水の濁度経時変化を確認しながら水質分析する検体を抽出した。

現地は比較的交通量は少ないが、晴天時に散水することによる交通安全面への配慮から各ブロックの上下線両端に散水時刻の掲示看板(図 12)を設置し注意を促した。年間を通して散水実験中に苦情やトラブルはなかった。



図 11 採水状況



図 12 散水時刻の掲示

5 回行った散水調査にて雨水ますで採取した再生水の水質変化とノズルで回収した再生水の水質変化を表 3 に示す。

表 3 路面堆積物の分析結果（散水調査 5 回の平均値）

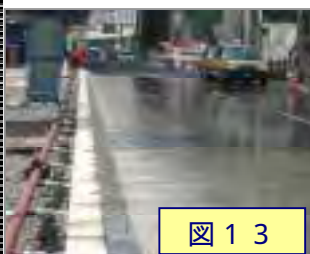
項 目	路面流下後の水を雨水ますで採水した時間			混 合 試 料 <sup>2</sup>	再生水
	30 分後 <sup>1</sup>	60 分後 <sup>1</sup>	90 分後 <sup>1</sup>		
B O D (mg/L)	17.6	2.8	2.4	4.8	< 1
C O D (mg/L)	84.0	14.8	11.8	16.4	6.6
S S (mg/L)	392	39	36	57	< 1
全窒素(mg/L)	16.0	11.7	10.9	12.2	10.3
全りん(mg/L)	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
備考	1：散水開始してからの経過時間。 2：雨水ますで回収した試料（～）を混合。				
	< 調査方法 > 下水再生水を路面へ散水し、路面流下後の水を雨水ますで回収し、その試料を分析した。 調査は、第 2 ブロック山側で行った。				

表 3 から次のことが言える。

- ・ BOD、COD は時間経過とともに減少する傾向がある。
- ・ T-N、T-P は散水後約 30 分で一度減少し、その後、あまり減少しない。
- ・ 再生水の BOD、SS は非常に低い値である。
- ・ T-P、T-N は再生水と回収水でほとんど同じ値である。

その他に下記水質項目について分析を行った。

- ・ 総トリハロメタン生成能は回収水にはほとんど検出されなかったが再生水中には 0.004 ～ 0.270mg / L の範囲で検出された。
  - ・ 大腸菌群数は再生水中にも回収水中にも検出しなかった(デソキシコール酸塩培地法)。
  - ・ 鉛は再生水中にも回収水中にも検出しなかった。
  - ・ 再生水温度は、最高で 29.5 、最低で 22.2 で、気温はそれぞれ 32.0 、22.5 であった。
- なお、3 日以上 の 先行無降雨日数や季節による分析結果の明確な違いは無かった。

## (2) バケツによる散水調査

散水中における通行車両からの汚濁物質供給を遮断し、路面に潜在的に堆積している汚濁物質がどの程度あるかを確認するためバケツによる散水調査を行った。

調査は路面をガムテープで 10m<sup>2</sup> 程度に区切り、現地の再生水 50L をバケツから手で散水し、雨水ますで全量回収した試料水の平均水質を分析する方法とした。水質分析は、回収水のコンポジット検体となるため時系列的な変化は調査できない。図 1 4 にバケツによる散水状況の様子を示す。



図 1 4 バケツ散水状況

3 回行ったバケツ散水調査にて雨水ますで採取した再生水の水質とノズル散水時の水質比較を図 1 5 に示す。図 1 5 から次のように言える。

- ・ いずれの水質項目においてもノズル散水の値が高い値である。
- ・ どちらの散水手法でも S S の値がかなり高い。

ノズル散水の値が高いのは散水中に車両からの汚濁供給があるためと考えられ、S S の値が高いのは保水材成分と思われる微粒子が路面から流出し S S として検出されているためと予想される。

ここでバケツ散水により確認した潜在的な路面堆積負荷量について平成 1 4 年度に調査した新宿地区との比較を図 1 6 に示す。交通量が圧倒的に多い新宿地区の負荷量は全体的に汐留地区よりも大きいですが、S S だけは汐留地区の方が大きな値であることが分かる。

新宿地区では 4 車線中 1 車線のみが保水性舗装であるのに対し、汐留地区は全線保水性舗装であるため、保水材の流出状況に違いが出たと考えられる。

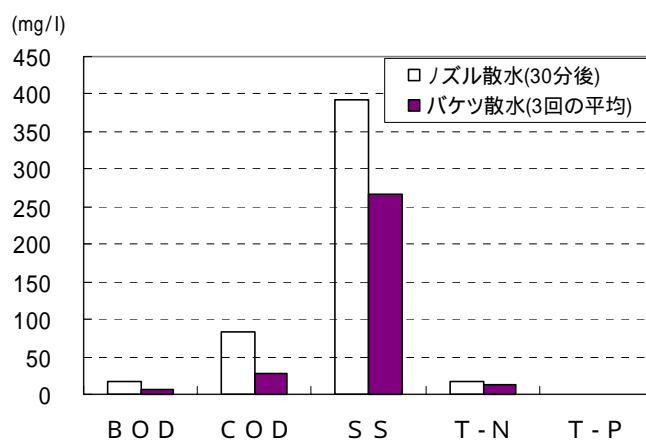


図 1 5 バケツ散水とノズル散水の比較

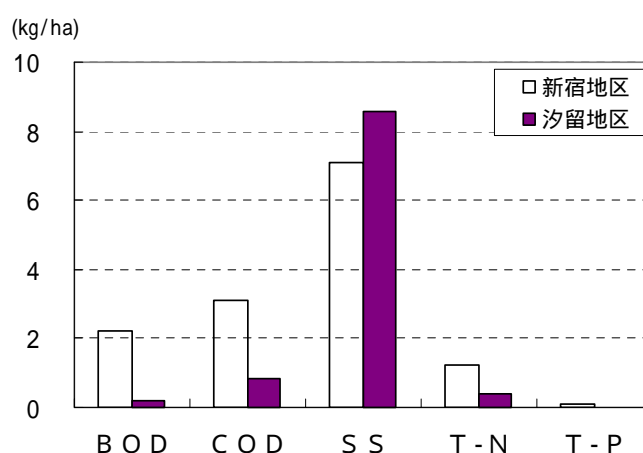


図 1 6 新宿と汐留の負荷量比較

### (3)雨天時調査

路面の洗い流し効果について晴天時散水と比較するため 10mm 程度の降雨が期待できそうな時に現地に待機し、流出初期の採水・水質分析を行った。晴天時調査との比較のため無降雨日が 3 日間継続した後の 4 日目以降に調査を 3 回実施した。表 4 に分析結果を示す。

表 4 再生水と雨水の比較調査結果

項目	単位	晴天時の調査		雨天時の調査	
		再生水	路面流出	雨水自体	路面流出
BOD	(mg/L)	< 1	3 ~ 9	2 ~ 6	2 ~ 43
COD	(mg/L)	5 ~ 9	15 ~ 19	2 ~ 6	4 ~ 67
SS	(mg/L)	< 1	36 ~ 88	4 ~ 11	12 ~ 170
全窒素	(mg/L)	7.4 ~ 16	9.8 ~ 18	1.0 ~ 1.6	1 ~ 20
全りん	(mg/L)	0.13 ~ 0.68	0.18 ~ 0.71	< 0.06	0.08 ~ 0.45
大腸菌群数(MPN 法)	個/100ml	0 ~ 4	-	0 ~ 13	-
大腸菌群数(MF 法)	個/100ml	< 20	-	< 20	-
大腸菌群数(デリ法)	個/ml	-	< 30	-	< 30

表 4 から以下のように言える。

- ・ 雨水自体の B O D、S S の濃度は再生水よりも高く、C O D は両者ほぼ同じである。
- ・ 全窒素は雨水には多少含まれているが再生水に比べると 1/10 程度である。全りんは雨水自体では定量限界未満であったが再生水には 0.13 ~ 0.68 mg / L 検出された。
- ・ 大腸菌群数 (MPN 法) は、再生水にも雨水にも若干含まれており雨水の方が多少高い値であった。なお、MF 法、デソ法の場合には再生水も雨水も大腸菌群数は検出されなかった。
- ・ 路面流出水の水質は雨天時の方が全体的に高く路面洗い流し量が多いと考えられるが、全りんは晴天時散水の方が高い値となっており再生水の影響が表れているといえる。

#### 4.2 再生水の散水用水としての適用性の確認

##### 4.2.1 再生水基本性状調査

散水ノズルから噴出後の再生水を採水し、水質を分析した。表 5 に示す分析結果のとおり、全ての項目において散水用水の基準を満たしている。このことから、散水用水としての適用性があると考えられる。

表 5 再生水の基本性状調査結果

項 目	水洗トイレ用水 洗 浄 用 水 冷 却 用 水 消 防 用 水	散 水 用 水	汐留地区調査結果
大 腸 菌 群 数	10 個 / ml 以下 (デソ法)	50 個 / ml 以下 (メンブレンフィルタ法)	20 未満 (メンブレンフィルタ法)
残留塩素濃度 (mg/L)	保持されていること	0.4 以上 (結合塩素)	0.1 未満 ~ 1.3
色度 (度)	外観が不快でないこと	外観が不快でないこと	1 未満 ~ 10 (不快でない)
濁度 (度)	外観が不快でないこと	外観が不快でないこと	1 未満 (不快でない)
B O D (mg/L)	-	20 以下	1 未満
臭気	不快でないこと	不快でないこと	不快でない
pH	5.8 ~ 8.6	5.8 ~ 8.6	7.0 ~ 7.6
備考	「再生水の利用に係る要領」(平成 11 年 4 月 1 日, 東京都下水道局) より		散水時に採水

##### 4.2.2 臭気調査

散水実験中の現地補修気体の臭気と再生水を加熱濃縮し気化させた時の臭気 (潜在的臭気) について調査した。結果は図 17 に示すとおりであり、臭気指数は比較的小さい結果であった。現地で感覚的に感じる臭気についても特に感じなかった。

注)

再生水自体の潜在的臭気：三比較式フラスコ法

現地捕集した気体の臭気：三比較式臭袋法

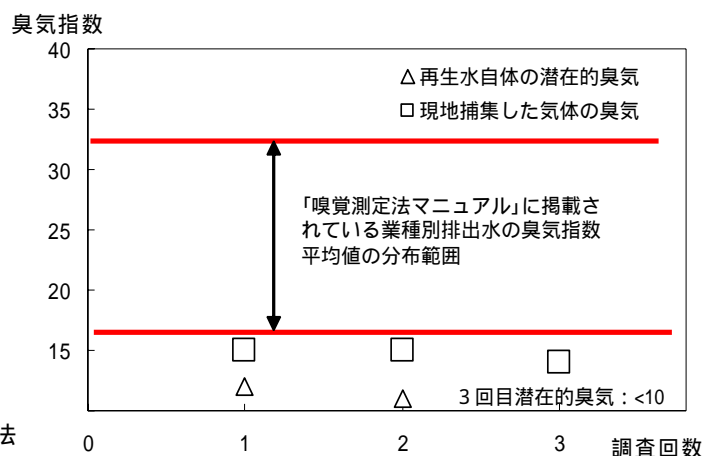


図 17 臭気調査結果




#### 4.3 再生水の散水手法に関する調査

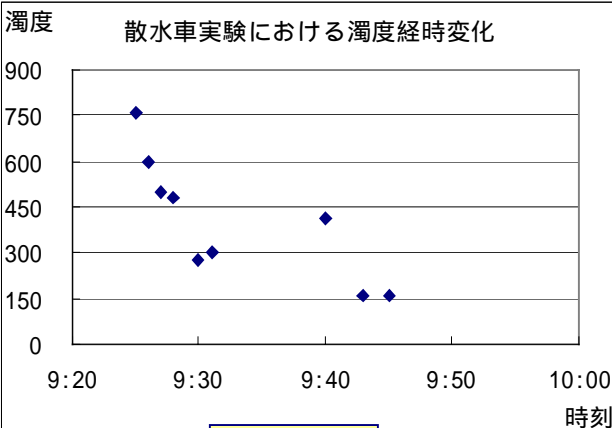

##### 4.3.1 散水車を用いた路面清掃効果の調査

散水配管がない地区における散水手法の一例として散水車による散水実験を行い、雨水ますで回収した試料水の濁度経時変化を調査した。表5に調査の概要を示す。

表6 散水車による路面清掃効果の調査

(1)調査箇所	第2ブロック山側の中央分離帯側車線 散水延長約50m	
(2)散水車の仕様	道路維持作業車、タンク容量7000ℓ	
(3)使用した水	下水再生水	
(4)散水方法	走行速度:約10km/時 散水方法:重力式と圧力式 走行回数:30回	

 <p>図 19</p>	 <p>散水車実験時</p> <p>図 20</p>
--	---

散水直後に採水した試料の濁度は最高で750に達しているが、約30分散水を継続すると150程度まで低下し、散水終了時には約60となった(図19、図20)。このように配管ノズル散水に比べて濁度が高くなるのは、散水車ノズルから噴出する水は、路面を叩きつける面積が配管ノズルより大きくその圧力も高いためと考えられる。また、散水車のノズルには重力式と圧力式があるが(図21)、現地では圧力式の方が舗装表面の保水材を剥離させる傾向が強いように感じられ、濁度も下がりにくかった。このことから、保水材の保護を考えた散水手法とするためには重力式散水の方が望ましいといえる。


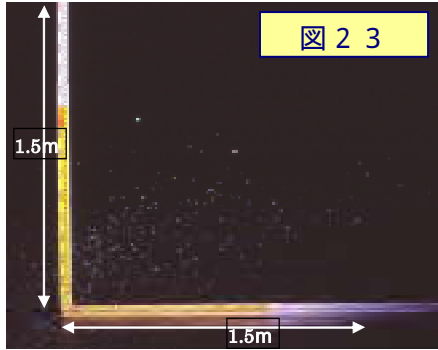


図21 散水ノズルの違い

#### 4.3.2 散水時の水跳ね調査

走行車両により飛散した水滴による他の走行車両への視界障害、通行人への飛散等が考えられるため、散水時の水跳ね状況を調査した。

表7 散水時の水跳ね調査概要

(1)調査箇所	芝浦処理場内保水性舗装施工（施工延長 90m）箇所 走行延長 60m
(2)走行車両	トヨタ ライトエース
(3)使用した水	下水再生水
(4)調査方法	走行速度：30km/時 散水量：1mm/時、10mm/時、30mm/時の3種類 散水方法：1mピッチで延長30m散水 調査方法：水跳ね状況を高感度カメラで撮影し、水の到達高さ、到達距離を調査する。
(5)調査結果	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 2.2</p> <p>調査箇所全景</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2.3</p> <p>水跳ね状況調査（夜間実施）</p> </div> </div>

飛散距離は路面の水膜厚さ，車両速度及び風向・風速に大きく影響を受ける。調査時の現地はほぼ無風状態であったが、散水強度を 30mm/時まで段階的に強めても最大飛散距離及び最大飛散高さは 2 m 未満であった。この程度であれば歩行者への影響は非常に少ないと考えられるが車両速度を上げたケースも今後実施することが望ましい。

#### 4.3.3 再生水散水による路面温度の低下効果に関する調査

再生水散水による路面温度低下効果を確認するため路面表面から 5cm 下に設置した舗装内温度センサー及び赤外線熱画像観測機器を用いて調査散水の有無及び舗装種別による違いを確認した。図 2.4 は芝浦水再生センター内の散水実験エリアにおける路面温度経時変化である。

散水しない場合でも保水性舗装は透水性舗装より 5 程度路面温度は低い。また、散水することで最大 10 以上保水性舗装の温度が下がっている。

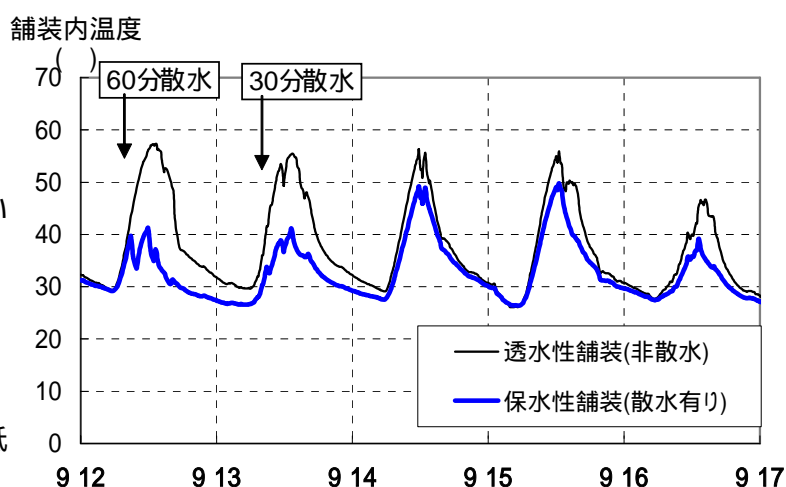


図 2.4 舗装内温度経時変化

温度低下の効果は約 1 日継続しており 30 分散水より 60 分散水の方が夜間の舗装温度は低くなっている。図 25 は汐留地区第二ブロックにおける散水前後の熱画像観測結果である。調査時の気温は約 32℃であったが、散水前の舗装面は 40℃を越えている。散水することにより 30℃前後まで下がっていることが分かる。

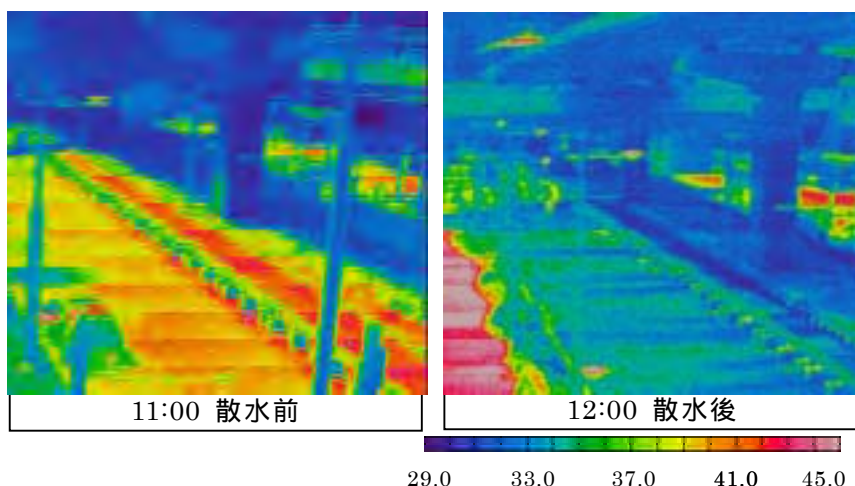


図 25 路面熱画像観測結果

#### 4.4 散水設備の定期点検

今後、実用化を目指していくためには現地で起こりうる問題点を把握しておく必要がある。そこで、年間を通して散水設備の定期点検(1 回以上/2 週間)を行い異常の有無、状態を確認した。主な点検項目は以下のとおりである。

- ・ 散水施設(配管、ノズル、排水バルブ)
- ・ 電気設備(外観、タイマー、バッテリー充電状況、流量計、発電状況、ソーラーパネル)

点検時に最も多く見られた異常はノズルの破損である(図 26)。破損現場を見ることはできなかったが、破損後の状況を見る限り、車両をぶつけたかあやまって蹴り飛ばしたように感じられた。その他では、配管そのものが動かされていたケースやバッテリーの充電が不十分になるといったケースがあった。散水設備の存在を認識しやすくするような工夫や散水実験についての広報も今後重要になると考えられる。



図 26 ノズル破損例

#### 5. まとめ

今回の実験により再生水の安全性から見た散水利用への適用可能性について概ね確認できた。また、路面清掃及び路面温度低下効果について期待できることについても確認できた。

一方、西新宿地区との比較により路面堆積物の実態について地域により大きな違いがあるため、散水手法等の検討時には地域特性の把握が非常に重要であることが分かった。

今後散水利用をさらに推進していくためには以下に示すような課題もある。

- ・ 配管できない地区での散水方法(散水車の活用方法、散水車のノズル改良等)
- ・ 再生水中の水質に関するさらなる安全性確認
- ・ 散水用水質基準の整備
- ・ 気温低下効果の定量的で簡易な確認方法の検討

散水以外の再生水利用率を高めていくためには利用しやすい再生水供給システムの構築や再生水利用料金の低コスト化についても検討する必要があると考えられる。

引き続き、下水再生水の新たな利用拡大について散水システムの実用化も考慮した調査、研究を進めていく予定である。

## 5 - 5 移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の高度除去 に関する技術調査

計画調整部 技術開発課 緒方 孝次，宮本 彰彦，北村 清明  
(現 日本下水道事業団) 杉山 佳孝

### 1 経緯

オイルボール（白色固形物）がお台場に漂着する問題が顕在化したことなどから、合流式下水道の改善に対する社会の要求は近年高まっていた。これに対し、下水道局は平成 13 年 3 月に「合流改善クイックプラン」策定し、短期間で事業効果を挙げることができるよう、対策の内容や対策地区を重点化して事業を実施してきた。しかし、雨天時越流水の処理技術は依然として成熟した方法が少なく、事業として積極的に採用していく状況には至っていない。さらに、平成 16 年 4 月には下水道法の改正により雨天時放流水質基準が設定されたことにより、雨天時越流水の処理技術の開発の必要性はますます高まっている。

そこで下水道局では、平成 13 年度より移動床ろ過装置を用いた新たな雨天時越流水の処理技術の開発を進めてきた。これまで実験機により実際に雨天時に処理実験を行ってきた<sup>1)2)</sup>が、ろ過装置からの汚泥の引き抜き方法、ろ材の移送方法等、様々な課題が残っていた。

一方、本装置では、ろ過速度を低減して曝気を行うとろ材表面に生物膜が生成するため、下水から前処理なしで良好な水質の処理水を簡易に得ることができる。ポンプ所においては水再生センターのように処理水を用いることができないため、各種機械や沈砂池床、しさ等の洗浄に水道水を使用しているが、このような簡易処理装置により製造した洗浄水をこれらの代替として用いることができれば、コストの低減が可能となる。また、一部のポンプ所では生下水を使用して沈砂やしさの洗浄を行っており、衛生的な観点からも課題を抱えている。そこで、この移動床式処理装置と電解消毒装置による消毒技術を組み合わせたシステムをポンプ所において洗浄水製造システムとして用いることを目的とし、平成 14 年度調査において基礎的知見を得ていた。

### 2 調査目的

本調査は、移動床式ろ過装置のシステムを見直し、様々な改良を行った装置を用いて雨天時越流水を処理する技術として確立すること、及び、同じ装置に生物膜を形成して電解消毒装置と組み合わせたシステムについて、平成 14 年度に得た基礎的知見をもとに連続運転調査を行い、ポンプ所において洗浄水を安価に製造する技術として確立するために実用化のための知見を得ることを目的として行った。

### 3 調査期間

平成 15 年 7 月 30 日～平成 16 年 3 月 25 日

### 4 移動床式雨天時越流水ろ過処理性能調査

#### 4.1 調査内容

装置に生下水（晴天時及び雨天時）を通過させ、ろ過速度を 40～80m/h の範囲で変化させたときの、稼働状況及びろ過処理性能を調査した。

#### 4.2 ろ過性能測定項目

流入原水及び処理水の SS、BOD、COD を測定することによりろ過性能を評価した。



#### 4.3 処理目標

安定的に装置の連続運転が可能となり、SS 除去率は 85% 以上となることを目標とした。

#### 4.4 調査場所

東京都下水道局砂町水処理センター内技術開発課実験ヤード（原水は砂系一沈流入水を使用）

#### 4.5 装置の基本原理及び特徴

本システムは、浮上性のある担体（球形または円柱状）をろ材として用いたろ過装置と、ろ過装置から引き抜いたろ材から汚泥を分離するろ材・汚泥分離装置からなる。最大の特徴としてろ過を止めることなくろ材と汚泥の分離が可能であることが挙げられ、ろ過槽は縦型で設置面積が小さい。

ろ材としては、図 1 に示すような親水性を有するエチレン-酢酸ビニル共重合樹脂（EVA）製で円柱状（直径・長さ 7 mm）のものを使用した。



図 1 本システムでの使用ろ材

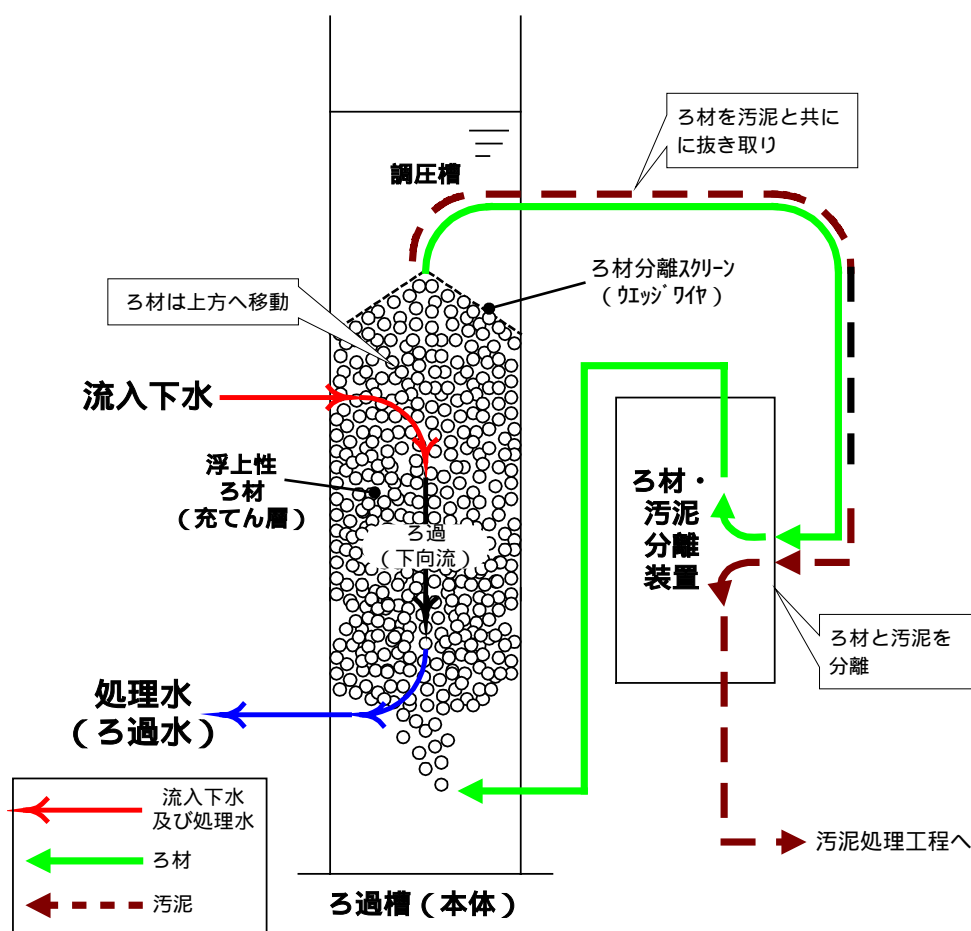


図 2 移動床式ろ過装置原理フロー

図 2 に本システムのフローを、表 1 に装置の仕様を示す。原水はろ層上部から下向流で流入してろ過処理を行い、処理水は下部から引き抜く。ろ過処理により汚泥が付着したろ材は、ろ過槽の頂部付近から引き抜き、ろ材・汚泥分離装置に導く。ろ材・汚泥分離装置にてろ材と汚泥を分離し、分離洗浄されたろ材はろ過槽下部へ返送する。

なお、本システムは平成 14 年度調査時に生じていた課題を解決するため、いくつかの改

良を加えたものである。生じていた課題は以下のとおりである。

原水流入管や処理水引き抜き管がろ材の動きを妨げていた。

ろ材が次第につぶれていき、浮力が低下するためろ材の重みでろ材の浮上が妨げられた。

これらの課題によりろ層の分離が生じ、安定的にろ過を行うことができなくなる現象がしばしば生じた。これに対し、以下のような改良を加えたシステムを本調査では用いた。

原水流入管や処理水引き抜き管をろ過層外周に沿って設置し、ろ材の動きを妨げないようにした。

ろ材のつぶれを防止するため、より強度の高いろ材を用いた。

#### 4.6 調査

##### 4.6.1 調査方法

改良したシステムの基本性能を把握するため、表2に示した条件で、まず、晴天時下水を用いてろ過速度、ろ材循環量を変えて試験を行い、ろ過処理状況を調査した。次に、長時間運転調査、及び、雨天時の原水を用いた調査により、システムの安定性を調査した。

その他、薬品添加方法、汚泥の分離方法等については昨年度とほぼ同様<sup>2)</sup>である。

##### 4.6.2 調査結果及び考察

###### (1)ろ材循環量変化による処理性能

表3にろ材循環量を変化させたときのSSの除去状況を示す。ろ過速度が40、60m/hの場合には、ろ材循環量を原水水量の12%以上に設定すると、ろ層内でろ材の分離現象やろ層中に汚泥フロックの抜け等が観察されなかった。SS除去率については、ろ過速度40m/hでは、ろ材循環

量が原水水量の12%以上の場合に85%以上と良好な結果が得られ、ろ過速度60m/hでもろ材循環量が原水水量の12%以上で80%以上のSS除去率が得られた。従って、必要ろ材循環量は、原水水量の12%以上であると考えられる。しかし、ろ過速度が80m/hの場合には、原水流量14%のろ材循環量において、70～80%程度の高いSS除去率が得られたものの、ろ層の一部で汚泥（フロック）がろ層下方へ流れるような状況が頻繁に観察され、ろ

表1 装置仕様

名称	移動床式ろ過
方式	浮上ろ材式自動連続ろ過方式
原水	砂町水処理センター砂系一沈流入水
ろ過面積	0.2m <sup>2</sup>
ろ過速度	40～80m/h
ろ過方式	下向流
目標除去率	SS:85%

表2 試験条件

調査項目	ろ過速度 m/h	流量 m <sup>3</sup> /h	ろ材循環量 m <sup>3</sup> /h	運転時間 h
ろ材循環量の変化による処理性能 及び ろ過速度の変化による処理性能	40	7.9	0.7	2
			0.9	
			1.1	
	60	11.8	1.4	
			1.7	
			2.2	
長時間運転調査	40	7.9	1.1	4
	80	15.8	2.2	5
雨天時原水処理調査	40	7.9	1.8	4
	60	11.8	2.1	

表3 ろ材循環量変化によるSS除去状況

ろ過速度 m/h	ろ材循環量 m <sup>3</sup> /h	ろ材循環率 %	原水SS mg/L	処理水SS mg/L	除去率 %
40	0.7	9	197	31	84
	0.9	12	115	16	86
	1.1	14	154	19	87
60	1.4	12	92	17	82
	1.7	14	169	29	83
80	2.2	14	145	31	78

SS濃度についてはろ過開始30分から30分おき、計4データの平均値である。

層の分離現象が発生するなど運転が不安定であった。

図 3 に各ろ過速度の、ろ材循環量に対する SS 除去率の変化を示す。ろ材循環量を増加させると SS 除去率が高くなる傾向が見られた。これは、適切なろ材循環量以上では、ろ材あたりの除去できる SS の量に限度があるからと考えられる。

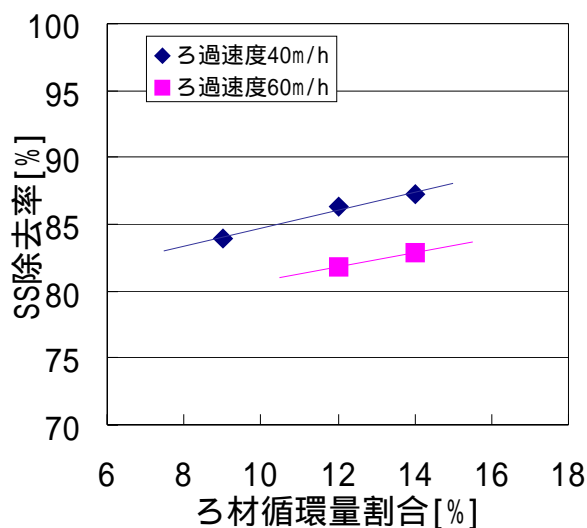


図 3 ろ材循環量と SS 除去率の関係

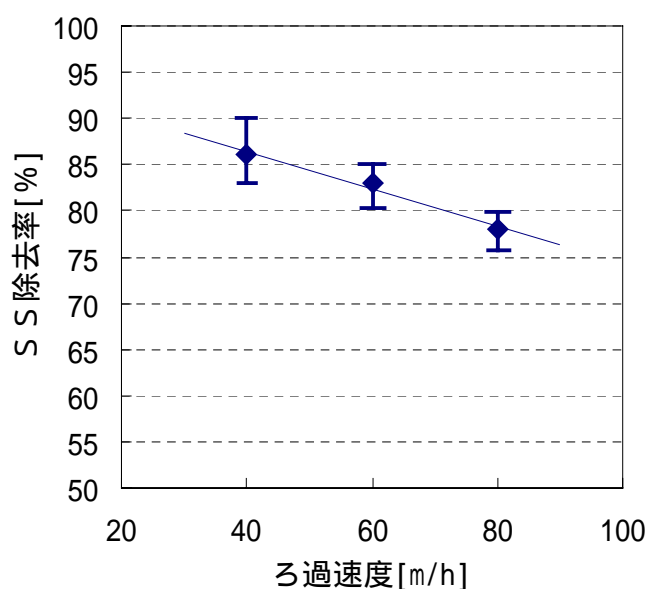


図 4 ろ過速度と SS 除去率の関係

## (2)ろ過速度変化による SS 除去状況

表 3 の結果から、ろ材循環量が原水流量の 14% の条件における、各ろ過速度についての SS 除去率を図 4 に示す。ろ過速度 40m/h では、平均 SS 除去率が 87% (最大 90%) であり、ろ過速度 80m/h でも平均 SS 除去率が 78% と、高除去率のデータが得られた。ろ過速度を増加させるほど、SS 除去率は低下する傾向が見られた。ろ材循環量の影響と併せて考えると、目標水質の処理水を得るための必要ろ材循環量を求めることができる可能性があると考えられる。

## (3) 長時間運転による処理状況

本試験では、最大ろ過速度 80m/h にて、やや運転が不安定であったものの、長時間運転

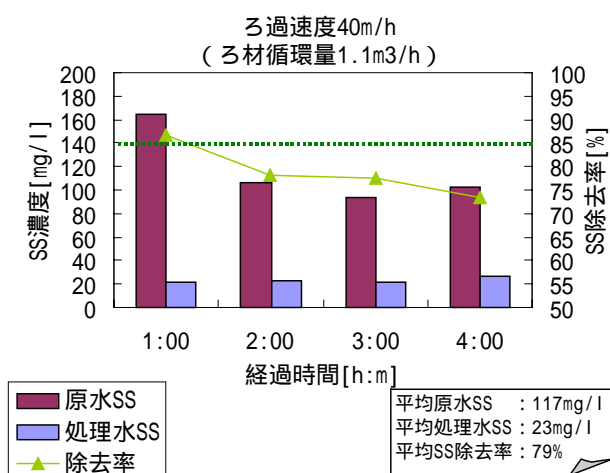


図 5 SS 除去状況 (ろ過速度 40m/h)

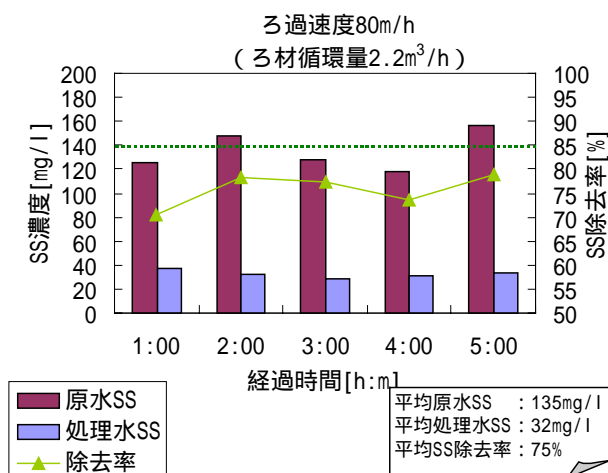


図 6 SS 除去状況 (ろ過速度 80m/h)

が実施できた。図5及び図6に各ろ過速度の4時間以上の長時間連続運転でのSS除去状況を示す。ろ過速度40m/hとろ過速度80m/hの条件でともに平均で80%近い除去率であった。このとき、ろ材循環量は、試験開始時の初期設定のみで運転を行った。図において原水SS濃度は時間と共に変動しているが、ろ材循環量を確保していれば原水SS濃度が多少変動しても、処理水SS濃度はほとんど変動しておらず、長時間運転は可能であった。なお、SS除去率の変動は原水SS濃度の増減に合わせて変動しているものである。

ろ過速度80m/hにおいて、5時間の連続運転が可能であったが、ろ層の分離現象が発生した。原水流入部は槽に対し、4カ所から流入する構造であるため、ろ層の移動具合によっては、原水(SS負荷)の流入バランスが変化する場合がある。このとき、ろ過速度が増加するほどSS負荷が増加し、負荷の高いろ層部分における汚泥の蓄積により、ろ層の分離現象が発生したと考えられる。

このように、ろ過速度80m/hでの本システムの運転は、可能であり十分な処理効果が得られるが、運転を安定させるために、原水の流入方法や流入口の分散化、ろ材の引き抜き位置、形状の工夫が今後必要となると考えられる。

なお、BODの除去率については、ろ過速度40m/hにおいて平均で80%と高かったが、CODでは56%の除去率となった。ろ過速度80m/hでは、BODはろ過速度40m/hとほぼ同等で78%の除去率となり、ろ過速度が増加してもあまり低下していない。CODも同様にほぼ同等の60%であった。

#### (4) 雨天時下水を用いた処理状況

雨天時下水を用いて、ろ過速度40m/hおよびろ過速度60m/hの条件にて本システムを

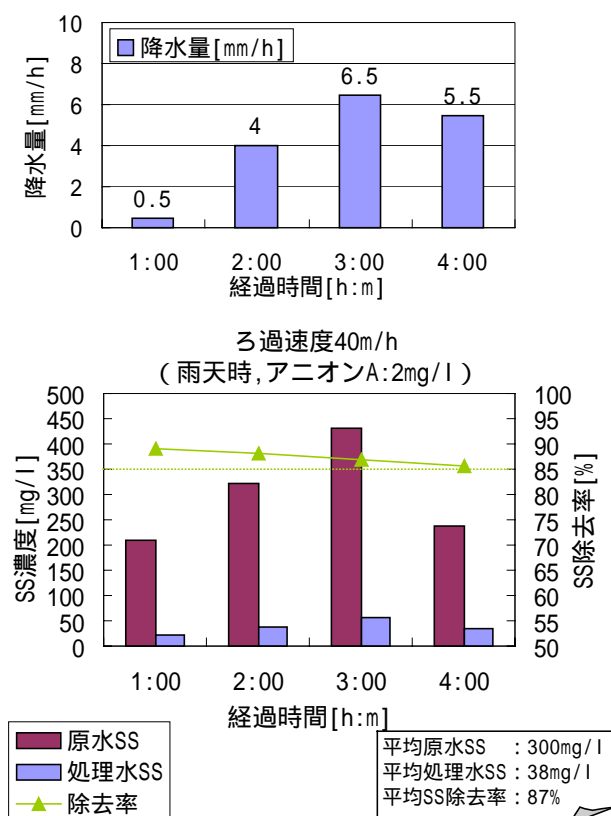


図7 雨天時 SS 除去状況 (40m/h)

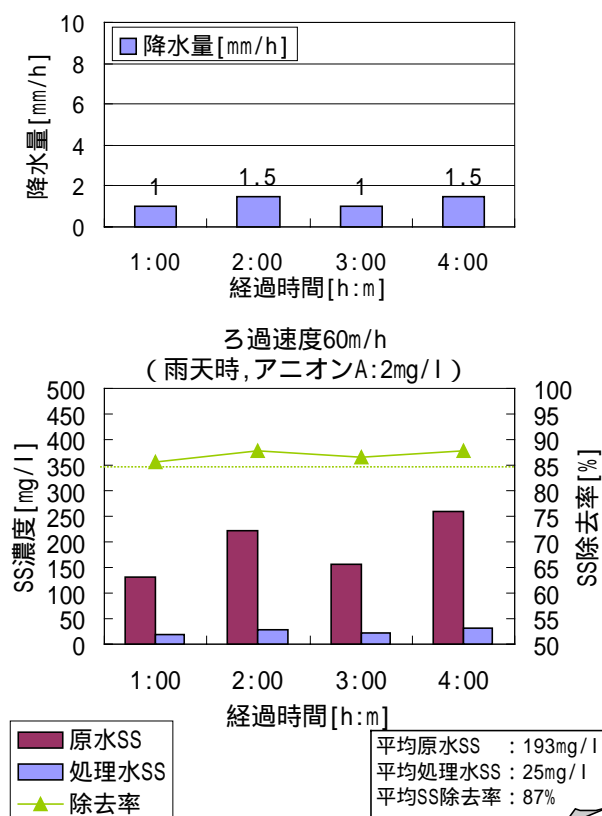


図8 雨天時 SS 除去状況 (60m/h)



用いた処理を行った結果、4時間の運転が可能であった。SSの除去状況について図7及び図8に示した。2条件とも運転時間中安定して85%以上のSS除去率を達成できた。なおSSグラフの上部に、当日の降水量状況を示した。原水SS濃度は晴天時の2～4倍程度に増加しており、降水量に合わせて変動している状況が確認された。

なお、この雨天時下水を用いた処理の際には、ろ材循環量を原水水量の23% (40m/h)、18% (60m/h)としたが、これは、晴天時処理の際の原水SS濃度が最大で150mg/l程度であったのに対し、雨天時処理の際には原水濃度が概ね200mg/lと、流入負荷が大きくなっていたことに対応するためであり、流入原水のSS濃度により運転制御を行う必要性が示唆された。

## 5 洗浄水製造システム処理性能調査

### 5.1 調査内容

移動床式生物膜ろ過装置と電解消毒装置を組み合わせた洗浄水製造システムを用いてポンプ所において洗浄水を製造する技術を確認するため、長期間にわたって装置に原水（合流式汚水）を通過させる連続実証運転を行い、安定性の確認を行った。

### 5.2 ろ過性能分析項目

移動床式生物膜ろ過装置については、原水とろ過処理水のBOD、SS等の測定によりその処理効果を確認した。電解消毒装置については、ろ過処理水と消毒処理水の大腸菌群数、残留塩素等の測定によりその消毒効果を確認した。

### 5.3 目標水質

本システムによる処理水を洗浄水として利用することを目的とするため、当局の再生水利用基準を準用して大腸菌群数は10個/mL、SSは水質汚濁防止法の排出基準である60mg/Lを目標水質とした。

### 5.4 調査場所

東京都下水道局箱崎ポンプ所内

### 5.5 洗浄水製造システムフロー

図9に洗浄水製造システムのフローを示す。移動床式ろ過装置の生物膜ろ過槽上部から下向流で下水を流入させ、浮上ろ材を用いたろ過によるSS除去処理を行うが、曝気を行っているためろ材（移動床式ろ過装置に用いたものと同じろ材）の表面に生物膜が形成され、有機物の生物分解も可能である。SSが付着したろ材は上部から引き抜き、ろ材貯留槽でSS分を分離した後、再び生物膜ろ過槽の下部に返送する。なお、このろ材貯留槽は生物膜ろ過槽の外部にあるため、逆洗等の操作を必要としない。また、スクリーン以外の前処理なしに生物処理が可能、縦型で設置面積が小さい、といった特徴を有している。

生物膜ろ過槽で処理されたろ過水は下部から引き抜き、電解消毒装置に通水する。電解消毒装置においては、ろ過処理水中に含まれる塩化物イオンを利用して陽極において消毒効果の高い次亜塩素酸を生成させる。塩化物イオンの濃度が十分でない場合には食塩を添加する。この消毒方式は、次亜塩素酸ソーダのように薬品の貯蔵、取り扱いや劣化に注意を払う必要がないため、維持管理が容易な方式であると言える。なお、電解消毒装置においては、次の3種類の方式で電解を行った。

- ・ 直接電解方式
- ・ 電解水添加方式
- ・ 上記2方式の組み合わせ

直接電解は被電解水に対して直接電極を挿入して電解を行う方式であり、被電解水中の塩化物イオン濃度が高い場合には食塩の添加を行う必要がない。電解水添加は食塩を添加した上水に対して電解を行ってできる次亜塩素酸溶液を被処理水に添加する方式であり、高濃度の次亜塩素酸溶液を得ることができるため、効率が良い。

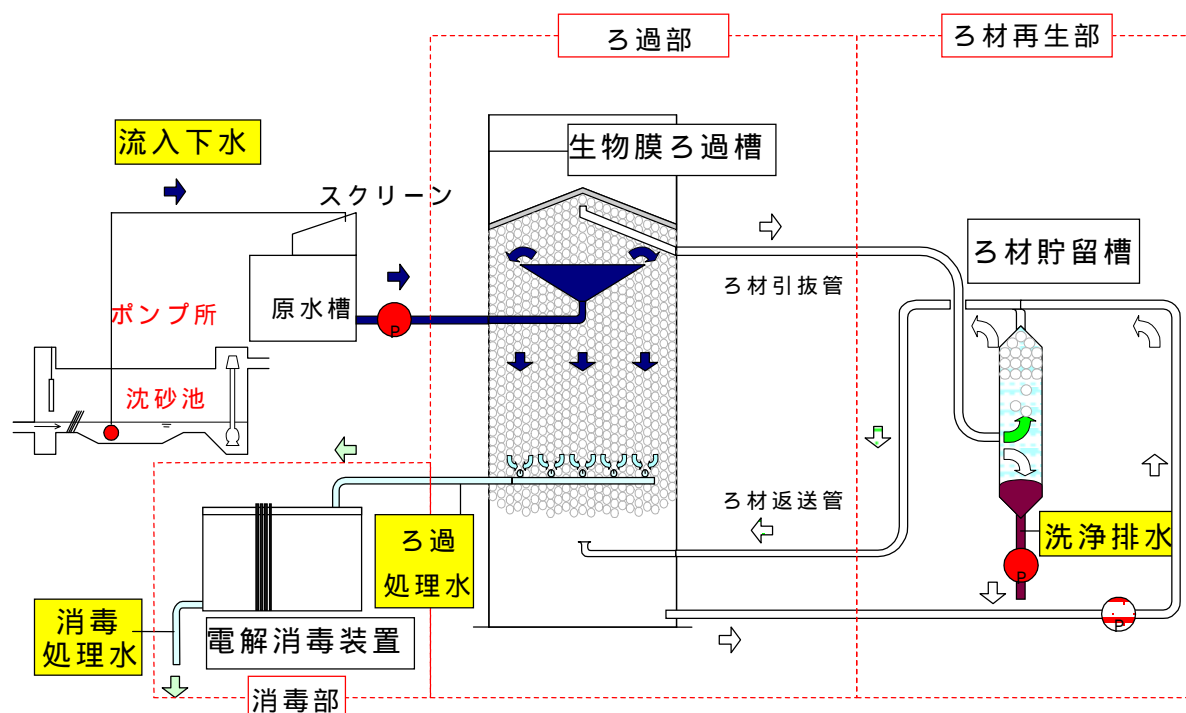


図9 移動床式生物膜ろ過装置と電解消毒装置のフロー

なお、移動床式ろ過装置のろ過面積は 1.0m<sup>2</sup>、ろ材厚が約 2m、電解消毒装置はユニット型で 1300m × 1300m × 950m の大きさである。

## 5.6 調査

### 5.6.1 移動床式生物膜ろ過装置による処理性能の調査方法

移動床式生物膜ろ過装置で用いるろ材の使用開始時には生物膜は形成されていないため、このシステムにより処理効果を最大限発揮するためには生物膜を速やかに形成させる必要がある。そこでまず、表4のテストNo.1の運転条件で移動床式ろ過装置による処理を行い、生物膜養生運転中の各種水質を測定することにより、養生に関する方法、期間等を調査し、養生手順を及び養生完了の判定方法を確立することとした。

次に、生物膜形成後の移動床式生物膜ろ過装置の処理性能を最大限に発揮させる運転条件を確立するため、表4に示した条件で長期連続運転を行い、各種水質の測定により処理性能を確認した。なお、曝気風量は水量の4倍とした。

表4 移動床式ろ過装置の長期連続運転条件

テスト	原水流量 [m <sup>3</sup> /h]	ろ材循環量 [m <sup>3</sup> /d]	主な調査目的
No.1	1.0	9.0	平成14年度調査の再現
No.2	1.5	12.0	高い原水流量での水質の確認
No.3	1.5	9.0	処理水回収率の向上 条件の効率化
No.4	1.5	12.0	冬季における水質の確認

## 5.6.2 電解消毒装置による処理性能の調査方法

電解消毒装置については、まず基本性能を把握するため、移動床式生物膜ろ過装置の処理水を直接電解方式の電解消毒装置に通水し、塩化物イオン濃度や電流密度による残留塩素濃度を調査した。また、電解水添加方式、2方式を組み合わせた場合の消毒性能を調査した。さらに、移動床式生物膜ろ過装置の処理水を長期間消毒することにより、電解消毒装置の処理の安定性を調査した。

## 5.6.3 移動床式生物膜ろ過装置による処理性能の調査結果及び考察

### (1) 生物膜養生手順の確立

昨年度調査<sup>2)</sup>において、生物膜の養生が完了したことを判断する基準として、ろ材 50mL あたりの酸素利用速度が  $15\text{mg/L}\cdot\text{h}$  に達することを定めた。そこで、今年度の調査においてもこの基準を満たすことを生物膜養生完了と判断することとした。

図 10 に養生期間中の酸素利用速度の推移を示す。養生開始 7 日後には酸素利用速度が  $14.9\text{mg/L}\cdot\text{h}$  に達し、ほぼ養生判定基準のレベルにまで達したことが分かった。その後養生開始 14 日後には  $20.0\text{mg/L}\cdot\text{h}$  まで上昇した。表 5 に示すように、この時点での処理水濁度は 80NTU、処理水透視度は 13 度にまで改善した。酸素利用速度の測定は実機において生物膜ろ過の養生を行う際には困難であると考えられるので、図 10 と表 5 の結果より、処理水の濁度が 100NTU 未満、あるいは、透視度が 10 度以上を実機稼動の際の生物膜養生完了と判断することとした。

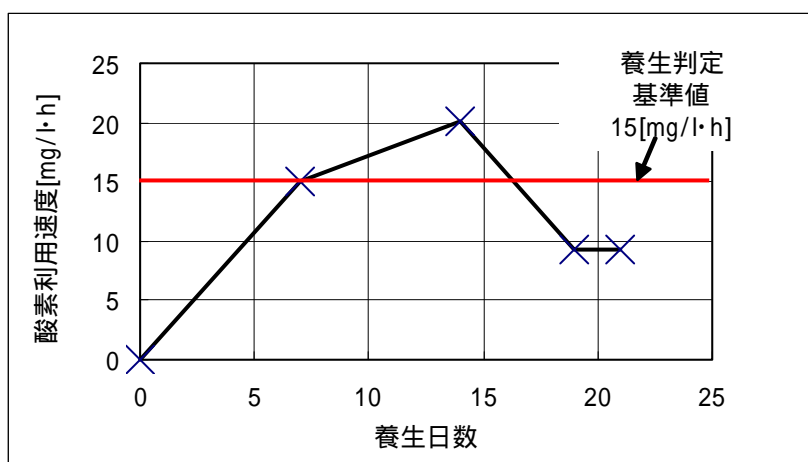


図 10 生物膜養生期間中の酸素移動速度の推移

表 5 生物膜養生期間中の濁度と透視度の推移

養生開始後日数	濁度[NTU]		透視度[度]	
	原水	処理水	原水	処理水
7	305	124	4	7
11	370	181	3	5
14	310	80	3	13
19	230	46	3	13
21	260	136	2	7

なお、養生開始 19 日後、21 日後には酸素移動速度は  $10\text{mg/L}\cdot\text{h}$  以下に低下し、処理水濁度および処理水透視度も悪化したが、これは生物活動が活発になり溶存酸素の消費が増大したのに対して曝気風量の調整を行わなかったため、槽内 DO が極端に低下したことが主要因と考えられる。

### (2) 長期連続運転調査

表 4 の条件で移動床式生物膜ろ過装置を連続運転させた際の処理前後の水質を表 6 に、SS の処理推移を図 11 に示す。SS については処理水質の目標を長期間にわたって達成することができた。また、T-BOD や COD についても処理推移は SS の場合とほぼ同様の傾向であり、安定的に処理されていた。表 7 には各テスト期間における水質項目の除去率を示したが、いずれのテスト条件においても SS、T-BOD、COD の平均除去率はほとんど変

表 6 長期連続運転期間における処理状況

条件	運転 日 数	原水水質			処理水水質		
		SS[mg/l]	T-BOD[mg/l]	COD[mg/l]	SS[mg/l]	T-BOD[mg/l]	COD[mg/l]
テスト No.1	28	52 ~ 98 (79)	170 ~ 200 (185)	56 ~ 86 (72)	6 ~ 19 (12)	17 ~ 37 (27)	14 ~ 18 (17)
テスト No.2	27	58 ~ 150 (104)	130 ~ 280 (218)	51 ~ 120 (95)	7 ~ 26 (18)	14 ~ 56 (36)	11 ~ 40 (27)
テスト No.3	38	71 ~ 250 (123)	220 ~ 380 (286)	100 ~ 130 (116)	9 ~ 44 (20)	26 ~ 86 (41)	23 ~ 50 (32)
テスト No.4	52	54 ~ 320 (156)	210 ~ 420 (322)	83 ~ 220 (136)	9 ~ 42 (22)	27 ~ 61 (41)	19 ~ 42 (31)

わらなかった。原水の水質変動は非常に大きいのにに対して処理水の水質は比較的安定しており、除去率の推移としてはばらつきが大きくなっている。しかし、洗浄水を製造する、という目的からは、システムとしての除去率が安定しているより、システムから供給される水質が安定することが望ましいので、この結果は洗浄水製造という目的にはふさわしいといえる。原水の水質変動にかかわらず処理水の水質が安定する理由としては、システムとしての処理水質には限界があるものの、処理能力には余裕があることが考えられる。従って、洗浄水として要求される水質がより高い、あるいはより低い場合には、ろ層厚を変えること等により、システム自体が有する処理限界を変化させることができる可能性があると考えられる。

なお、この長期連続運転期間における処理水の平均濁度は 62NTU、平均透視度は 17 度であった。

表 7 各テスト条件における水質項目の除去率

条件	SS 除去率 [%]	T-BOD 除去率 [%]	COD 除去率 [%]
テスト No.1	73.6 ~ 93.9 (83.2)	78.2 ~ 91.1 (85.3)	67.9 ~ 81.1 (76.0)
テスト No.2	55.2 ~ 93.6 (79.7)	78.5 ~ 89.2 (83.8)	63.6 ~ 78.4 (72.2)
テスト No.3	46.3 ~ 96.4 (80.3)	70.3 ~ 92.1 (85.1)	54.5 ~ 80.8 (71.6)
テスト No.4	66.7 ~ 97.2 (84.2)	80.3 ~ 92.9 (86.8)	69.1 ~ 85.6 (76.5)

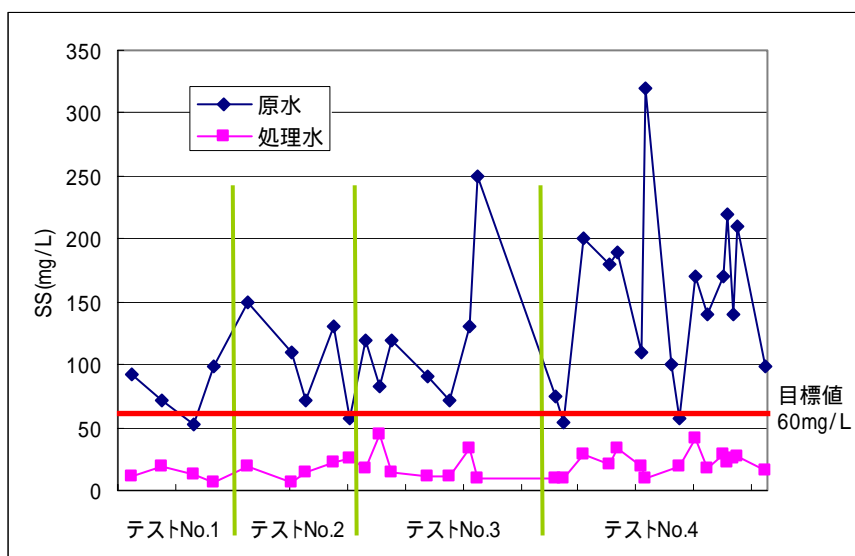


図 1 1 長期連続運転期間中の SS の処理推移

### 5.6.3 電解消毒装置による処理性能の調査結果及び考察

#### (1) 移動床式生物膜ろ過装置の処理水を用いた基本性能調査

電気分解反応は、水溶液中の電子の受け渡しによる酸化還元反応であり、水溶液中に多くの種類の被酸化物質、被還元物質が含まれている場合には目的の反応のみを進行させることは困難であると考えられる。今回の目的である電解消毒装置による次亜塩素酸の生成についても、被電解水の水質により大きく左右される可能性がある。そこでまず、移動床式生物膜ろ過装置の処理水を用いた電解性能の基本的な調査を行うこととした。

塩化物イオン注入濃度と電流密度を変化させた場合の残留塩素濃度の変化を表8及び表9に示す。ここでは全残留塩素の値を示しているが、ほとんど結合残留塩素である。なお、この実験における電極面積は  $1.024\text{m}^2$ 、処理水量は  $7\text{L/min}$  と  $21\text{L/min}$  とした。この被電解水にも塩化物イオンは含まれていたが、注入濃度と比較して低いため、ここでは塩化物イオン濃度は注入した濃度のみを解析の指標とした。

これらの表よりわかるように、塩化物イオン注入濃度が  $400 \sim 500\text{mL}$  程度の場合、電流密度が  $10\text{mA/cm}^2$  以上の場合が残留塩素濃度の値が高い。すなわち、これらの条件の範囲において次亜塩素酸の発生効率が高かったといえる。原理としては塩化物イオン注入濃度が高いほど次亜塩素酸の発生効率は高く、電流密度は発生効率に影響を与えない、と考えられる。実際には電解質濃度が高くなると漏洩電流が発生するため、塩化物イオン濃度が高い場合には次亜塩素酸の発生効率がかえって低くなり、電流密度が低いと副反応が優先するため発生効率が低くなると考えられる。電力量に対して発生する次亜塩素酸の理論量に対し、実際に発生した残留塩素である電流効率に関しても、この範囲の場合が高かった。

表9の条件における大腸菌群数を測定した結果を表10に示す。電流密度が  $5\text{mA/cm}^2$  の場合には残留塩素がほとんど存在しないために消毒が十分行われな

表8 電流密度と塩化物イオン注入濃度を変化させた場合の残留塩素濃度（処理水量  $7\text{L/min}$ ）

		電流密度( $\text{mA/cm}^2$ )			
		5	10	15	20
塩化物イオン注入濃度 ( $\text{mg/L}$ )	0	1.5	-	-	-
	257	2.5	16.4	11.8	-
	514	2.6	15.8	20.3	46.5
	1029	3.2	10.8	20	17

表中-は所定の電流密度を印加できなかったことを示す。  
残留塩素濃度の単位は $\text{mg/L}$ である。

表9 電流密度と塩化物イオン注入濃度を変化させた場合の残留塩素濃度（処理水量  $21\text{L/min}$ ）

		電流密度( $\text{mA/cm}^2$ )			
		5	10	15	20
塩化物イオン注入濃度 ( $\text{mg/L}$ )	0	0.2	-	-	-
	79	0.4	-	-	-
	157	0.2	4.5	-	-
	314	0.5	6.4	9.5	-
	471	0.7	6.1	11.9	19.3

表中-は所定の電流密度を印加できなかったことを示す。  
残留塩素濃度の単位は $\text{mg/L}$ である。

表10 電流密度と塩化物イオン注入濃度を変化させた場合の大腸菌群数（処理水量  $21\text{L/min}$ ）

		電流密度( $\text{mA/cm}^2$ )			
		5	10	15	20
塩化物イオン注入濃度 ( $\text{mg/L}$ )	0	151000	-	-	-
	79	101000	-	-	-
	157	64000	1880	-	-
	314	89000	1360	16	-
	471	80000	313	12	0

表中-は所定の電流密度を印加できなかったことを示す。  
大腸菌群数の単位は $\text{CFU/mL}$ である。

ったと考えられるが、10mA/cm<sup>2</sup> の場合、残留塩素濃度が数 mg/L 残存しているにもかかわらず大腸菌群数が 1,000CFU/mL 程度存在していた。これは、この実験における滞留時間が短いために、残留塩素が十分に存在しながら大腸菌群数を低減できなかったと考えられる。本装置において残留塩素の消毒効果を発揮するための時間等を調査した結果は(3)にて示す。

## (2)水質変動の電流効率に対する影響

前述したように被電解水の水質により、同じ電力量に対して発生する次亜塩素酸、すなわち電流効率は異なることが考えられる。そこで、移動床式ろ過処理装置の処理水の水質変動に対して電解消毒装置の電流効率がどのような影響を受けるかを調査した。

表 1 1 各電流密度における電流効率と各水質項目との相関係数

電流密度 mA/cm <sup>2</sup>	導電率 mS/m	濁度 NTU	透視度 度	COD mg/L
5	-0.671	-0.733	0.365	-0.717
10	-0.507	-0.09	-0.224	-0.219
15	-0.733	-0.028	0.044	-0.313
20	-0.826	-0.137	0.154	-0.394

14 検体について、電流密度ごとに、ろ過処理水の導電率、濁度、透視度、COD と電流効率とのそれぞれの関係の相関係数を算出した結果を表 1 1 に示す。濁度、COD については相関係数は負の値となり、水質悪化により電流効率が低減する傾向は見られるものの、相関係数の絶対値は小さいため、濁度、COD の変動は電流効率に対して影響を与えないと考えてよい。導電率に関しては相関係数の絶対値は小さいとはいえないが、電解を行う際に食塩を加えて塩化物イオン濃度を上げる場合には導電率も大幅に上昇するため、実用面では影響はないと考えられる。従って、移動床式生物膜ろ過装置の処理水を電解消毒装置を用いて消毒する場合には、ろ過処理水の水質の変動に対して電解消毒装置による電解条件を制御する必要はない。

## (3) 電解消毒処理水中の残留塩素の残留性と消毒効果の関係

下水処理に最も一般的に用いられている消毒剤である次亜塩素酸ナトリウムを二次処理水の消毒に用いる場合、混和設備における接触時間は注入後 15 分以上とすることが標準<sup>3)</sup>とされている。従って、本システムにおいても、効果的な消毒を行うためにはある程度の接触時間が必要であると考えられる。そこで、電解消毒を行った処理水を放置し、残留塩素と大腸菌群数の時間変化を調査した。その結果を図 1 2 に示す。電解消毒の条件処理水量 7L/min、電流密度 5mA/cm<sup>2</sup> である。処理直後においては大腸菌群数は 22,400CFU/mL と大きな値であり、一方残留塩素も 3.4mg/L

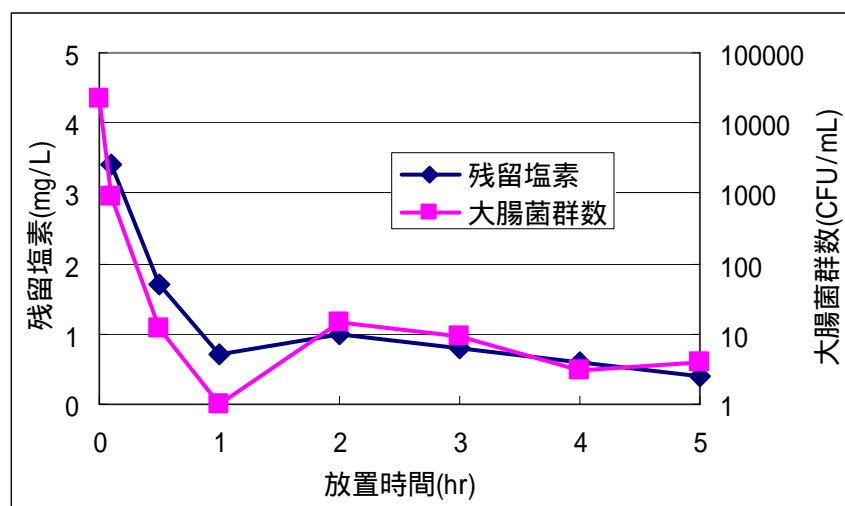


図 1 2 電解消毒後の残留塩素と大腸菌群数の時間変化

果を図 1 2 に示す。電解消毒の条件処理水量 7L/min、電流密度 5mA/cm<sup>2</sup> である。処理直後においては大腸菌群数は 22,400CFU/mL と大きな値であり、一方残留塩素も 3.4mg/L



残存していた。しかし、30 分放置後には残留塩素は 1.7mg/L と半減し、大腸菌群数は 12CFU/mL と大幅に低減し、目標値の 10CFU/mL とほぼ等しい値となった。その後 5 時間後まで放置したが、残留塩素と大腸菌群数に大きな変化は見られなかった。この実験条件は電流効率の低い電流密度の条件であるため、電流効率の良い条件である電流密度 10mA/cm<sup>2</sup> 以上とすることにより、さらに安定した消毒が可能であると考えられる。従って、本システムにおいて大腸菌群数が 10 個/mL 以下の洗浄水を得るためには、電解消毒装置による処理後 30 分以上の滞留時間を設ければよい。

なお、ポンプ所における洗浄水としての利用を想定すると、常時利用ではなく短時間で大量の利用となる。従って、本システムにより製造した洗浄水を貯留槽に長期間滞留させておく必要が生じてくると考えられる。そこで、残留塩素の長期間にわたる推移を調査し、その結果を図 1 3 に示す。この試料の電解処理直後の全残留塩素濃度は 15.8mg/L と高い値のものを用いた。この図からわかるように、電解処理水中の残留塩素は徐々に減少するが、18 日経過後においても 2.2mg/L の残留塩素が残存していた。従って、この試料の場合には 18 日経過後でも衛生学的安全性を確保でき、洗浄水として利用することが可能である。残留塩素が減少する原因としては様々なことが考えられるが、透視度の改善、COD の減少が緩やかながらも見られたことから、電解処理水中の有機物との反応も緩やかに進行していると考えられる。実際の利用においては、電極の面積や電解密度を調整して電解処理直後の残留塩素濃度を制御することにより、洗浄水としての利用形態にあわせた残留塩素の確保が可能であると考えられる。

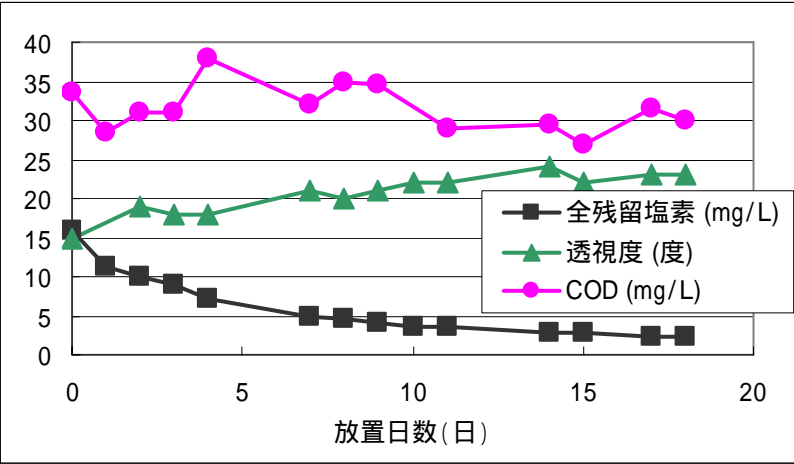


図 1 3 電解消毒後の残留塩素等の長期間にわたる時間変化

電解処理水中の残留塩素は徐々に減少するが、18 日経過後においても 2.2mg/L の残留塩素が残存していた。従って、この試料の場合には 18 日経過後でも衛生学的安全性を確保でき、洗浄水として利用することが可能である。残留塩素が減少する原因としては様々なことが考えられるが、透視度の改善、COD の減少が緩やかながらも見られたことから、電解処理水中の有機物との反応も緩やかに進行していると考えられる。実際の利用においては、電極の面積や電解密度を調整して電解処理直後の残留塩素濃度を制御することにより、洗浄水としての利用形態にあわせた残留塩素の確保が可能であると考えられる。

(4)直接電解方式と電解水添加方式の併用運転調査

直接電解による方式は、電極を被電解水に直接浸して電流をかけるだけで消毒が可能であるため、簡便であり、被電解水の塩化物イオン濃度が高ければ薬品を一切必要としない。一方、食塩水を電解して被電解水に添加する電解水添加方式は、別途電解槽を設ける必要

表 1 2 直接電解方式と電解水添加方式の併用運転時の消毒効果

上段: 残留塩素濃度(mg/L) 下段: 大腸菌群数(CFU/mL)		電解水添加量 (mL/min)			
		[ 塩化物イオン注入率 (mg/L) ]			
		0	5	10	15
直接電解電流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	0	0	1	2.5	4.9
		13900	9900	780	19
	5	(1.0)	1.9	3.9	5.5
		(24200)	620	2	0
	10	印加不可	3.8	9.7	10.6
			0 (*6.9mA/cm <sup>2</sup> )	0 (*8.3mA/cm <sup>2</sup> )	0 (*9.6mA/cm <sup>2</sup> )

\*: 所定の電流密度を印加できなかったため、実際に印加できた電流密度を示した。  
: この実験ではこの条件による実験を行わなかったため、別の調査日のデータを記載した。

があるものの、電流効率が高く、安定して次亜塩素酸水溶液が得られる。そこで、これら 2 方式とそれらを組み合わせた方式における消毒効果を検討する実験を行った。

直接電解に関しては食塩を加えず、添加する電解水中の塩化物イオンを用いた。電解水添加ユニットで製造された電解水の全残留塩素濃度は約 6000mg/L、そのうち、遊離塩素濃度は約 5000mg/L であった。処理水量は 15L/min とした。

電流密度と電解水添加量を変化させた場合の大腸菌群数と残留塩素濃度を表 1 2 に示す。塩化物イオンの注入率が低いため、電流密度 10mA/cm<sup>2</sup> では全ての条件で所定の電流の印加はできなかったが、電解直後にもかかわらず大腸菌群数が不検出であり、残留塩素も残存していた。一方、直接電解や電解水添加単独の場合には電解直後では消毒が十分ではなく、残留塩素濃度も併用の場合と比較すると低かった。この結果から、直接電解方式と電解水添加方式の併用により、使用食塩量や電力量の削減、電解直後からの洗浄水の使用、といった様々な利点があることがわかった。なお、電流密度については前述のように 10mA/cm<sup>2</sup> 以上とすることが望ましいため、そのような条件設定ができれば、さらに効果的な消毒が可能になると考えられる。

#### (5) 連続運転時における電解消毒装置の消毒性能

連続運転時における電解消毒装置の消毒性能を確認するため、3 回にわたって連続運転を行った。その際の電解条件を表 1 3 に示す。なお、処理水量は移動床式生物膜ろ過処理水をそのまま用いた

表 1 3 連続運転の電解条件

	電解条件 その 1	電解条件 その 2	電解条件 その 3
連続運転期間 (日)	10	6	14
直接電解の電流密度(mA/cm <sup>2</sup> )	10	10	7
食塩の添加	あり	なし	なし
電解水添加	なし	なし	5mL/min

電極面積は全て1.024m<sup>2</sup>とした。

ため変動があったが、概ね 10～20L/min の範囲であり、平均処理水量は約 16L/min であった。また、電解条件その 2 とその 3 においては、電極の配線をろ過処理水側が密になるように変更している。電解条件その 3 において 7 日目以降は、電解水製造のために上水の代わりに電解消毒処理水を用いている。

これら 3 条件による処理結果として、処理前後の大腸菌群数を図 1 4 に、消毒処理後の残留塩素濃度を図 1 5 に示す。どの条件も結果はほとんど変わらず、電解消毒直後の大腸菌群数は概ね 1000 個/mL 以下を達成していたものの、目標の 10 個/mL を達成することはできなかった。しかし、残留塩素濃度は 2～8mg/L の範囲で残存していたため、図 1 2 に示した知見から、30 分程度の滞留時間を確保すれば大腸菌群数を 10 個/mL 以下とすることができると考えられる。

他に測定した水質項目のうち、濁度、透視度、色度、s-BOD についてはあまり水質の向上は見られなかったが、SS、COD、BOD、臭気指数については低減が見られた。このうち、3 条件全ての結果を用いた統計処理 (t 検定) により処理前後で有意差が見られた項目は SS と BOD であった。SS に関しては凝集分離した可能性が高く、BOD や COD の低減に関しても SS が低減したことによると考えられる。臭気指数に関しては、ろ過処理水の臭気指数にかかわらず電解消毒処理水ではどのサンプルでも 15 程度の値が得られた。これは、ろ過処理水で感じられた下水臭は除去できたものの、残留塩素によるクロラミン臭が原因であると考えられる。

電解条件その 2 は電極の配線方法を工夫しただけであるが、その 1 の条件では食塩の添加



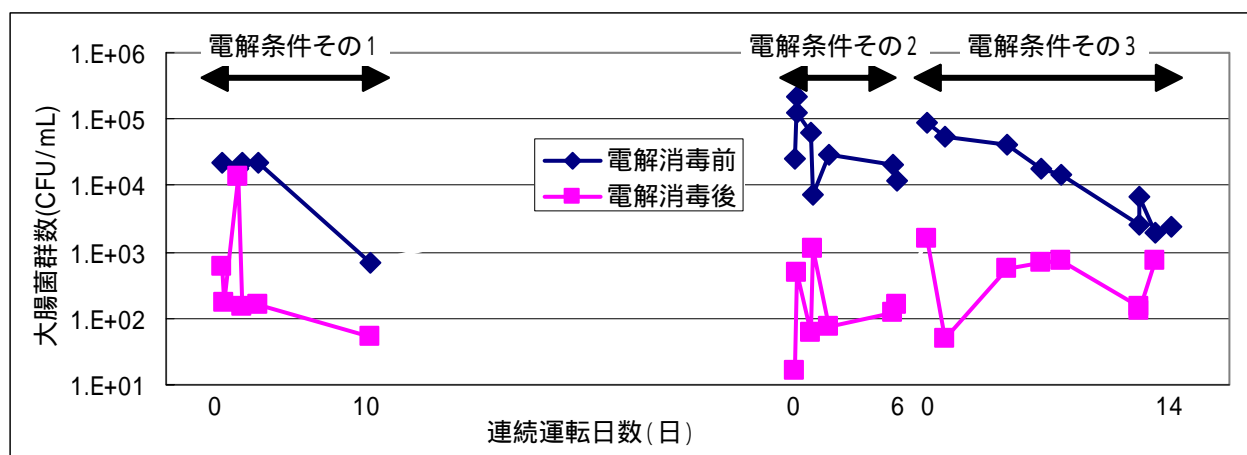


図 1 4 連続運転時における消毒処理結果

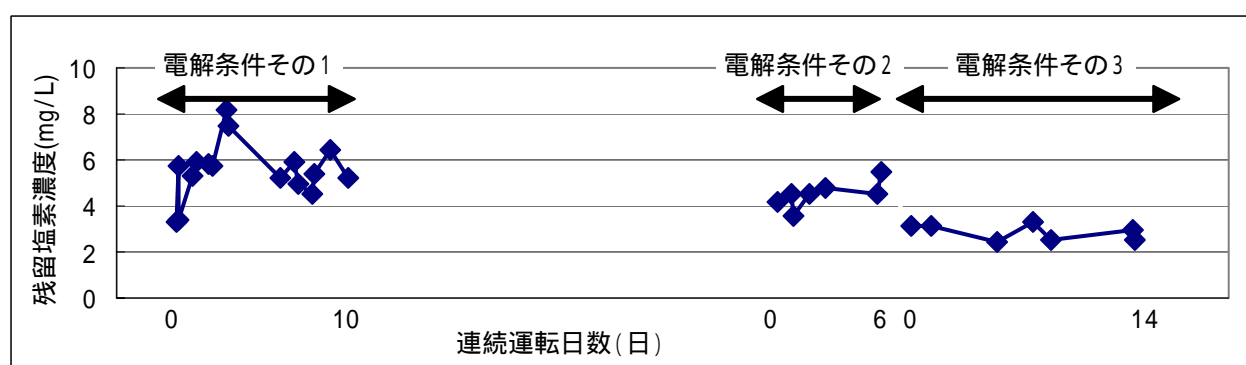


図 1 5 連続運転時の残留塩素濃度

が必要であったのに対しその 2 の条件では食塩の添加なしで同等の消毒効果を得ることができた。電解条件その 3 は食塩を用いる必要があるが、その使用量は 1 週間当たり約 10kg 程度であり、電解条件その 2 と比較すると電流密度が低いため、電気料金の点では有利である。従って、実用化を想定した場合には、実験条件その 2 あるいはその 3 の条件が適切であると考えられる。

なお、洗浄水としての用途を想定した場合、当局の「下水処理水の利用に係る要綱」における雑用水利用の水質基準が目安となる。平成 16 年 4 月より大腸菌群数が大腸菌に変更され、表 1 4 に示す基準となった。本調査においては旧基準を目安として大腸菌群数 10 個/mL 以下を目標とし、他の項目を含め旧基準は全て達成することができたが、現在の基準に適合するかどうかは確認していない。しかし、電極面積や電流密度を制御することにより処理水に残存する残留塩素を増加させることは容易であることから、現在の基準についても適合させることは可能であると考えられる。

表 1 4 雑用水利用の水質基準

項目	基準値
大腸菌	検出されないこと
pH	5.8～8.6
臭気	不快でないこと
外観	不快でないこと
残留塩素	保持すること

## 6 まとめ

移動床式ろ過装置を用いて、雨天時越流水の除去性能を調査した結果、晴天時下水を用いた調査では、処理速度 80m/h において、やや不安定ながらも連続 5 時間の運転が可能であり、SS 除去率は 75～80%と、高い性能を示した。雨天時下水を用いた調査では、処理

速度 60m/h において、連続 4 時間の運転が可能であり、SS 除去率は平均 87%と、非常に高い性能を示した。しかし、この装置による処理には、連続運転によりろ過層におけるろ層の分離、ろ槽内のろ過の不均一化等、運転管理が困難となる可能性のある課題を抱えており、実用化のためにはこれらを解決すること、さらに、スケールアップ対応が必要となる。

移動床式ろ過装置のろ材に生物膜を形成させた移動床式生物膜ろ過装置と電解消毒装置を組み合わせたシステムを用いて、ポンプ所における洗浄水の製造を検討した結果、SS が 20mg/L 程度、大腸菌群数が 10 個/mL 以下の洗浄水を製造することができた。このシステムの数ヶ月に及ぶ連続運転においても維持管理上の大きな問題は見られなかったため、大量の上水や汚水を機器洗浄等に用いているポンプ所において水道料金の節減（上水代替の場合）、あるいは衛生学的安全性の向上（汚水代替の場合）に寄与することができるシステムである。なお、実験装置は 1.5m/h の処理速度の場合 30m<sup>3</sup>/日の処理能力を有しており、この規模は実用規模であるため、このまま実用化が可能であるシステムである。今後、維持管理方法を明らかにしつつ、コスト的に有利と考えられるポンプ所を対象として、導入を検討していきたい。

#### 参考文献

- 1) 坂本達哉、杉山佳孝、北村清明：5 - 2 移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の高度除去に関する基礎調査、東京都下水道局技術調査年報、平成 15 年 1 月、p.261 ~ 268
- 2) 緒方孝次、杉山佳孝、北村清明、坂本達哉：5 - 5 移動床式ろ過装置による雨天時越流負荷の高度除去に関する基礎調査その 2、東京都下水道局技術調査年報、平成 15 年 10 月、p.271 ~ 281
- 3) 下水道施設計画・設計指針と解説 2001 年版後編、社団法人日本下水道協会、平成 13 年 5 月、p.259

## 6 . 環境対策

6 - 1 汚泥処理における温室効果ガス排出量削減調査

6 - 2 お台場海浜公園における海域浄化実験

## 6 - 1 汚泥処理における温室効果ガス排出量削減調査

施設管理部施設管理課 宮本 彰彦  
( 現 計画調整部 技術開発課 )  
坂巻 兵衛  
同 施設保全課 原島 光雄

### 1 . 調査目的

東京都下水道局(以下「当局」という。)では、汚泥の衛生的な処理と埋立処分地の延命化を目的とし、汚泥の全量焼却体制に向けた汚泥焼却炉の整備を行ってきた。しかし、このことが温室効果ガスの排出量をさらに増加させることとなり、温室効果ガスの削減は当局が解決すべき最優先の課題となっている。

下水汚泥を焼却する際に発生する一酸化二窒素(以下「 $N_2O$ 」という。)は、その温室効果が二酸化炭素の310倍と高く、当局で排出する温室効果ガスの約4割を占めている。電力や燃料などに由来する温室効果ガスは大幅な排出量削減が期待できないため、京都議定書などで定められた温室効果ガスの削減目標を達成するためには、汚泥焼却炉における $N_2O$ 削減対策が急務となっている。

既往の文献や当局によるこれまでの調査結果では、流動層式汚泥焼却炉における $N_2O$ の削減方策として焼却温度の高温化(以下「高温焼却」という。)の有効性が指摘されている。

しかし、当局の既存焼却炉の多くは燃焼温度が800で設計されており、高温焼却運転を想定した設計がされていない。高温焼却の実施には、増大する熱負荷による焼却炉本体や排ガス処理装置への影響が懸念されるほか、昇温に必要となる都市ガスなどの補助燃料消費量の増加による運転コスト増が予想されることなど多くの課題も残っている。

本調査では、調査対象として製造社の異なる4焼却炉を選定し、フリーボード上部温度を850及び810とする運転を行い、 $N_2O$ 排出量を比較することで高温焼却における $N_2O$ 削減効果の検証を行った。また、燃焼温度が800で設計されている葛西処理場4号炉においては約2か月間にわたりフリーボード上部850を目安とする高温焼却運転を実施し、補助燃料の増加量や熱負荷が設備に与える影響を調査することで、高温焼却に対する課題を整理するとともに、他施設での高温焼却実施に向けた改善の必要性を検討した。さらには、焼却炉メーカーの実験炉において調査を行い、 $N_2O$ 生成メカニズムの解析や高温焼却以外の $N_2O$ 排出抑制方法等の検討を行った。

### 2 . 調査内容

#### 2 . 1 高温焼却状況調査

葛西処理場4号炉において、フリーボード上部温度850を目標温度とする高温焼却運転を約2か月間実施した。高温焼却運転中は補助燃料の消費量の増加が予想されることや、制御方法における問題点など、高温焼却における課題を整理した。

また、増加する熱負荷が機器に与える影響を調査するため、空気予熱器内部の温度や歪みを計測し、FEM(有限要素法)解析を行うことにより、施設の耐久性や耐熱性を解析した。

#### 2 . 2 $N_2O$ 排出状況調査

製造社がそれぞれ異なる葛西処理場4号炉、5号炉、北多摩一号処理場2号炉、南部ス

ラッジプラント 5 号炉の 4 施設において、高温域と低温域の炉内温度が異なる状態で排ガス中の  $\text{N}_2\text{O}$  濃度を測定することで、高温焼却の  $\text{N}_2\text{O}$  排出量削減効果を検証した。また、補助燃料の消費量増加に伴い増加するエネルギー由来の温室効果ガス量をあわせて、温室効果ガス排出量を総合的に評価した。

### 2.3 汚泥処理運転改善調査

南部スラッジプラント 5 号炉にカロリーメータを設置し、汚泥含水率の変動と運転データの相関関係について調査し、汚泥含水率（発熱量）を用いた焼却炉運転制御の適用可能性について検討した。

### 2.4 $\text{N}_2\text{O}$ 生成・分解調査

焼却炉メーカーの実験炉において脱水汚泥の燃焼実験を行い、流動層式焼却炉の炉内における  $\text{N}_2\text{O}$  発生メカニズムを解析するとともに、高温焼却をはじめとする各種の  $\text{N}_2\text{O}$  抑制技術に対しての検討を行った。

## 3. 測定結果及び考察

### 3.1 高温焼却状況調査

#### 3.1.1 高温焼却運転状況

葛西処理場 4 号炉において実施した約 2 か月間の高温焼却運転中におけるフリーボード上部温度の推移を図 1 に示す。当焼却炉は砂層温度を炉内温度の制御対象としているため、フリーボード上部温度は通常の自動制御運転では一定の温度ではなく成りゆきのまま変動している。そのため、本調査においては運転員が制御対象ではないフリーボード上部温度を監視しながら、目標温度となるように制御対象である砂層温度設定値を適宜変更した。フリーボード上部温度は砂層部とは異なり、入熱量（脱水汚泥投入量、補助燃料供給量等）の変動の影響を大きく受けるため、840～850 を中心として  $\pm 20 \sim 30$  の範囲で変動している。

高温焼却運転後の設備状況は、焼却炉本体などに大きな損傷は無く、空気予熱器において伝熱チューブ数本にリークが見られた程度であった。これは通常運転における補修頻度程度である。

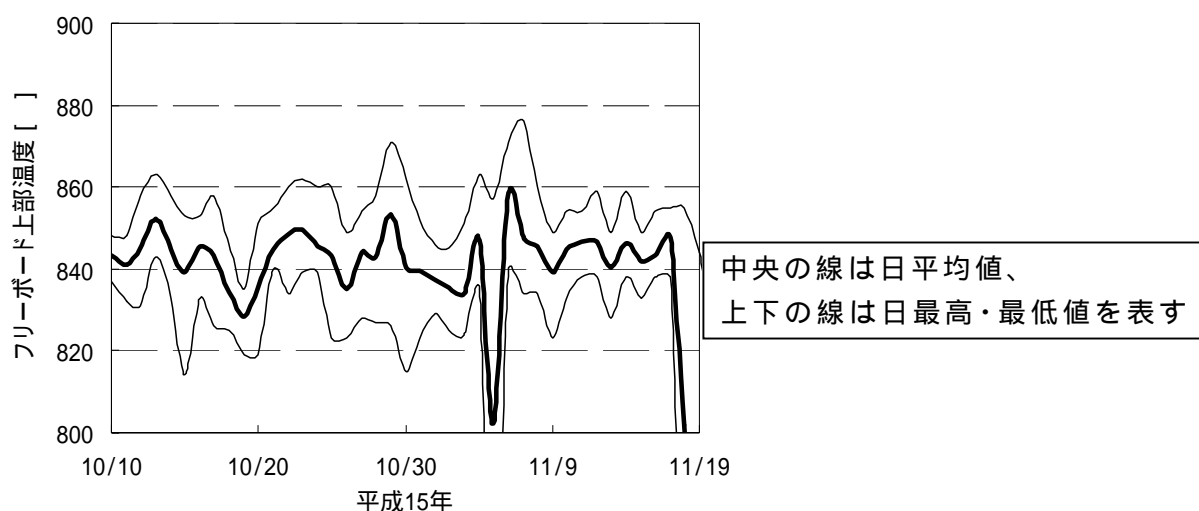


図 1 高温焼却運転状況

### 3.1.2 通常運転と高温焼却運転の比較

通常運転（平成 15 年 6～7 月）と高温焼却運転（平成 15 年 10～11 月）時の運転状況について、運転月報を基に補助燃料及び電力消費量の比較を行った。

これより、通常運転と高温焼却運転時の補助燃料、電力消費量の平均値を表 1 に示す。補助燃料、電力のいずれも高温焼却運転時は消費量が増加していることがわかる。原因として、補助燃料については燃焼温度を高温化させるために必要な熱量を補う補助燃料の増加分が、電力については排ガス温度の高温化と補助燃料増加により排ガス量が増加するため白煙防止ファンおよび誘引ブロワの電力消費量が増加することが考えられる。

表 1 補助燃料、電力量の消費量比較

項目	単位	通常運転	高温焼却	比率	
補助燃料使用量	m <sup>3</sup> /t-ケーキ	8.8	10.7	1.22 倍	
	m <sup>3</sup> /t-DS	38.3	46.5		含水率 77%と仮定
電力消費量	kWh/t-ケーキ	66.2	70.1	1.06 倍	
	kWh/t-DS	287.8	304.8		含水率 77%と仮定

### 3.1.3 脱水ケーキ含水率が補助燃料消費量に与える影響

補助燃料消費量に影響を与える因子としては、焼却炉の燃焼温度のほかに、脱水ケーキの含水率が大きく影響する。そこで、通常運転時と高温焼却運転時における補助燃料消費量を脱水ケーキ含水率の面から比較し、図 2 に示す。

この図からも、高温焼却運転時は通常運転時と比較し補助燃料消費量が増加していることは明らかで、同一の含水率（77%）で比較した場合、約 1.54（m<sup>3</sup>/t-ケーキ）増加している。しかし、脱水ケーキの含水率を 1%低下させることができれば、補助燃料消費量を増加させることなく高温焼却運転が可能であることを示唆している。

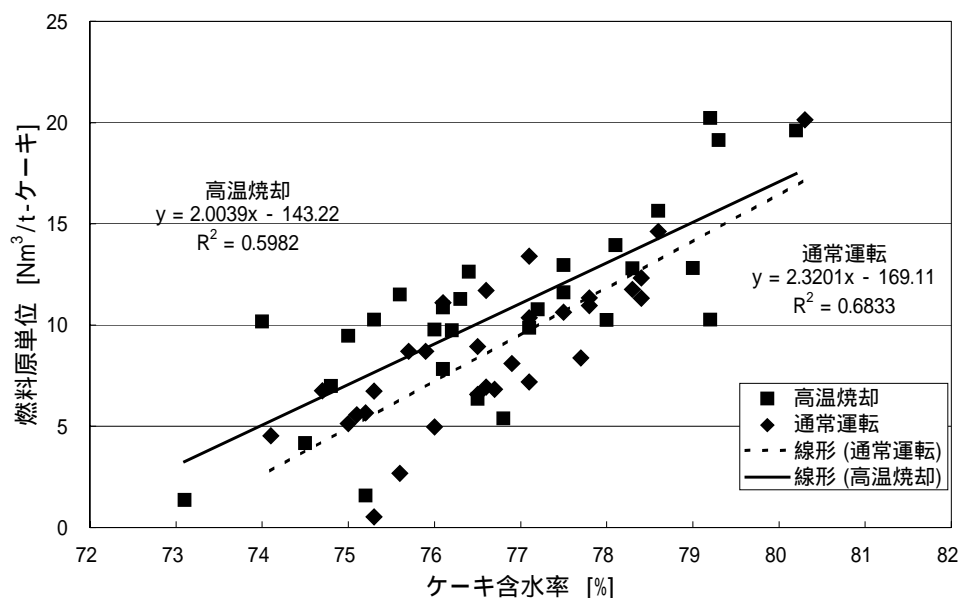


図 2 ケーキ含水率に対する燃料消費量の影響

### 3.1.4 運転管理項目

高温焼却運転は、焼却炉の補助燃料使用量増加による排ガス量増加や排ガス温度の上昇から、通常運転と比較して設備機器容量の余裕率などが減少することが考えられる。高温焼却運転では、焼却設備の安定運転を維持することが通常運転に比べて難しくなる。また、排ガス処理温度が上昇することによって、補機（熱交換器、乾式電気集塵機など）の耐熱性が懸念されるため、排ガス温度・空気温度の監視が重要となる。

高温焼却運転における運転管理項目は通常の運転管理項目に加えて、運転管理及び設備保護の面から表2に示す項目を追加する必要がある。

表2 高温焼却運転管理項目

	項目	内容
焼却炉	フリーボード上部温度	運転目標温度 850
	排ガス O <sub>2</sub> 濃度(乾式EP出口)	高温焼却を維持するために、極力低減させる。
空気予熱器	出口空気温度	720 以下に抑える
白煙防止器	出口排ガス温度	320 以下に制御
白煙防止ファン	空気量	高温時の制御性の確認
誘引ファン	ダンパ開度、回転数	高温時の炉内圧制御性の確認

### 3.1.5 高温焼却運転機器寿命予測

高温焼却運転により増加する熱負荷が空気予熱器に対して与える影響について検討するため、空気予熱器外面の温度・歪み計測及び内面（管板、チューブなど）の温度計測を実施し、この測定結果を基に、空気予熱器の FEM 強度解析を実施し、空気予熱器の強度に関する寿命予測を行った。

#### 3.1.5.1 空気予熱器温度・歪み計測結果

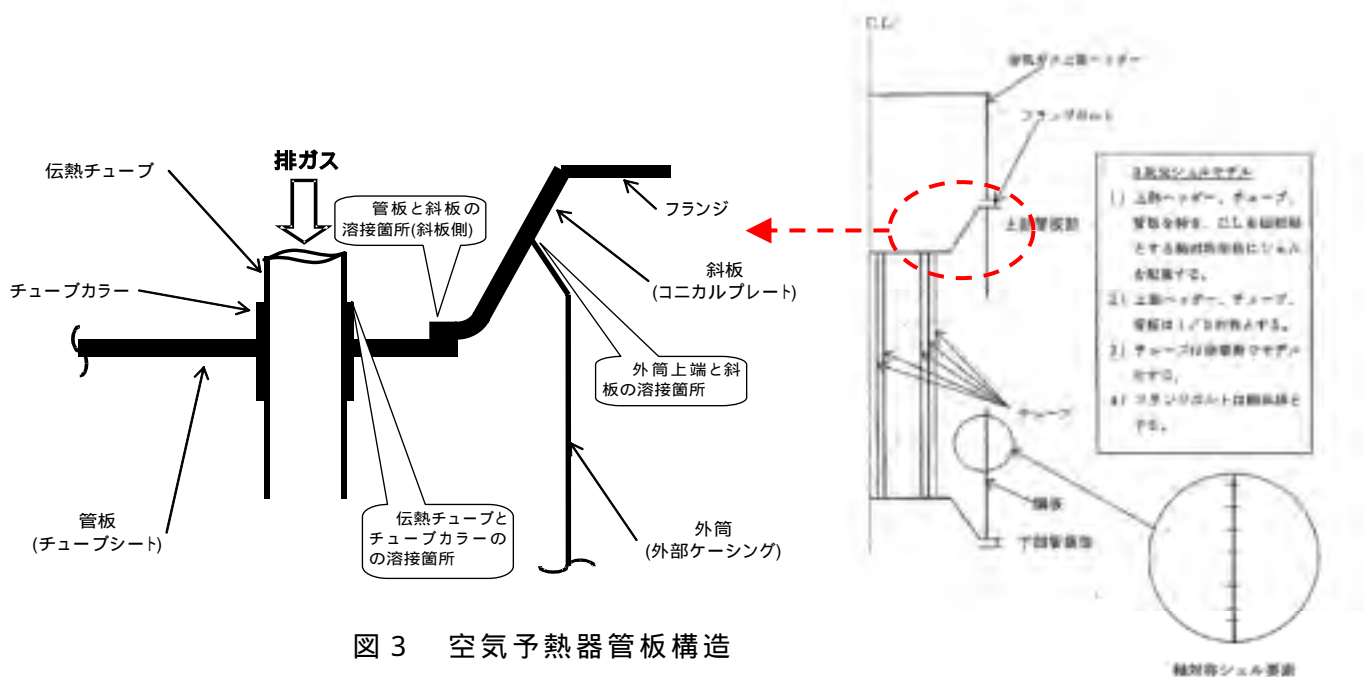
各部測定結果の概要を下記に示す。

- (1) No. 1 空気予熱器の下部管板構造の温度分布は円周方向にほぼ一様であるが、上部管板構造は排ガス・空気の流入方向によって大きな温度差が生じており、円周方向に一様な分布でないことが確認された。なお外筒の温度分布は排ガス流入方向が高い卵形の分布となる。
- (2) 高温焼却運転時（850～855℃）における各管板中央部の温度は、No. 1 上部管板中央部で 715～725℃、下部管板中央部で 740～745℃ 程度となっていることが周辺部温度の計測値から推測される。
- (3) 空気予熱器外筒上端がコニカルプレートに結合する部分には、0°方向（排ガス流入側）で約 140kg/mm<sup>2</sup> という高い熱応力が計測された。ただし、円周方向の異なる位置での計測値はいずれも 0°方向の半分以下である。

#### 3.1.5.2 空気予熱器 FEM 強度解析結果

上記の温度、歪みの計測結果を基に No. 1 空気予熱器管板構造の FEM 強度解析を実施した。No. 1 空気予熱器の上部管板構造の温度は円周方向に一様な分布でないため、3次元シェルモデルを作成し、それに非軸対称温度分布荷重を与えた熱変形・応力解析を行った。

空気予熱器の上部管板構造において、強度上で特に重要な部位は図3で、の箇所である。下部管板構造については、斜板と管板との溶接部と斜板の R 部となる。



### 3.1.5.3 強度解析に基づく空気予熱器の寿命予測

計測結果、FEM 強度解析結果より、高温焼却による空気予熱器への影響について検討した。空気予熱器の管板構造において、強度的に重要な部分は図3に示した箇所であるが、該当箇所を中心として、強度評価(寿命予測)を行った結果を以下にまとめる。

#### (1) 強度評価

解析結果を基に低サイクル疲労寿命評価を行った結果を表3に示す。これより、管板構造は高温焼却によって、短期間で損傷することはないと考えられる。しかし、通常運転に比べて、管板構造の内部の寿命は低下することは間違いのないため、注意を要する。

最も厳しい評価は、位置B(斜板と管板の溶接部の斜板側)で、評価用の温度を実測値よりも高い650と仮定したときのもので、繰返し数が約700回で亀裂が発生するというものである。次は、位置E(外筒と斜板の溶接部)で、実測の熱応力値を用いた場合で、繰返し数が約1,000回となる。

葛西4号炉の場合、運転中はほぼ定格負荷での連続運転であり、現状の運転方法での耐用年数は約14年と想定される。しかし、運転開始から既に10年以上が経過している点を考慮すると、その分を差し引いて考えなければならない。なお、強度評価を行った箇所は空気予熱器管板構造の最も重要な箇所であるため、損傷が発生した場合には焼却炉の運転継続は困難であり、また、容易に補修することができないため長期間の運転停止となる可能性もある。そのため、計画的に高温焼却対応型の空気予熱器への更新を検討する必要がある。また、処理場ごと、焼却炉ごとの運転計画はそれぞれ異なるため、間欠運転を多用する焼却炉では寿命が極端に低下するため、高温焼却対応型の空気予熱器への更新がさらに必要と考えられる。



表 3 高温焼却時の上部管板構造の低サイクル疲労寿命

位置		周方向位置 [°]	材質	板面	熱応力 [kg/mm <sup>2</sup> ]	評価用温度 [ ]	E [kg/mm <sup>2</sup> ]	歪範囲 ε[×10 <sup>-3</sup> ]	繰返し数 Nd[回]
B	斜板と管板の溶接部の斜板側	270	SUS304	表面	53.9[64.7]	560 650	15.8×10 <sup>3</sup> 14.9×10 <sup>3</sup>	3.41～[4.09] 3.62～[4.32]	3000～[2000] 1050～[700]
				裏面	36.86	560 650	15.8×10 <sup>3</sup> 14.9×10 <sup>3</sup>	省略	省略
C	斜板のR部	270	SUS304	表面	48.9	508 590	16.3×10 <sup>3</sup> 15.5×10 <sup>3</sup>	省略	省略
				裏面	49.95	508 590	16.3×10 <sup>3</sup> 15.5×10 <sup>3</sup>	3.06 3.22	4200 30100
E	外筒と斜板の溶接部	0	SUS304	表面	100.2[120.0]	277	18.2×10 <sup>3</sup>	5.51～[6.59]	3000～[1500]
				表面	140(実測)			7.69×10 <sup>3</sup>	1000
				裏面	-101.4 [-120.0]	277	18.2×10 <sup>3</sup>	5.57～[6.59]	3000～[1500]

### 3.2 N<sub>2</sub>O排出状況調査

本調査では、葛西処理場4号炉、5号炉、北多摩一号処理場2号炉、南部スラッジプラント5号炉の4施設に対して炉内温度低温域（フリーボード上部温度の目標 810 ）及び高温域（同目標 850 ）の運転を実施し、各種排ガス測定および設備運転プロセスデータの取得を行うことにより、炉内温度の違いによるN<sub>2</sub>O排出量の調査を実施した。

#### 3.2.1 運転条件

表4に設備の主仕様及び運転条件を示す。

表 4 設備主仕様及び運転条件

対象設備		処理能力	稼働年	メーカー	フリーボード上部目標温度	調査実施日
葛西処理場	4号炉	300t/d	H4	三菱重工	低温域(810 程度)	10月15日
					高温域(850 程度)	10月15日
	5号炉	300t/d	H13	月島機械	低温域(810 程度)	10月16日
					高温域(850 程度)	10月16日
北多摩一号処理場	2号炉	100t/d	H15	三機工業	低温域(810 程度)	11月26日
					高温域(850 程度)	11月27日
南部スラッジプラント	5号炉	300t/d	H13	日本ガイシ	低温域(810 程度)	10月22日
					高温域(850 程度)	10月22日

#### 3.2.2 排ガス測定結果

##### (1) 手分析結果

表5に排ガス測定結果を示す。

表5 排ガス測定結果

	葛西処理場 4号炉		葛西処理場 5号炉		北多摩一号処理場 2号炉		南部スラッジプラント 5号炉	
	低温域	高温域	低温域	高温域	低温域	高温域	低温域	高温域
排ガス温度 ( )	812	848	812	840	795	827	810	850
湿ガス量 ( $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ )	34,600	34,300	43,100	43,800	12,700	13,400	46,200	43,500
乾ガス量 ( $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ )	21,100	19,900	25,800	23,400	7,790	7,750	29,400	26,600
水分量 (%)	39	41.9	40.1	46.5	38.7	42.2	36.4	37.8
CO <sub>2</sub> (vol%)	10.3	10.8	11.7	11.4	10.3	11.5	10.6	11.4
O <sub>2</sub> (vol%)	8.6	8	6.4	6.8	9	6.3	7.9	6.9
CO (vol%)	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
NO <sub>x</sub> (ppm)	18	3	13	15	2	5.5	3	3
N <sub>2</sub> O (ppm)	440	95	370	180	350	86	285	84

(NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O は O<sub>2</sub>=12%換算値)

表より、高温域での運転に対して以下のことがわかる。

- 1) 排ガス温度が上昇する。
- 2) 各設備とも N<sub>2</sub>O 濃度が約 50～80%程度低減している。
- 3) NO<sub>x</sub> には明確な差異が確認されず、本温度領域では高温化に伴って懸念されていた thermal-NO<sub>x</sub> の発生は見られない。
- 4) N<sub>2</sub>O 以外の排ガス組成に大きな変化は見られない。

## (2) 連続分析結果

排ガス連続測定データより求めた N<sub>2</sub>O 排出係数とフリーボード上部温度の関係を図4に示す。

ここで、N<sub>2</sub>O 排出係数 (kg / t-DS) は、

炉出口 N<sub>2</sub>O 濃度 (ppm) × 乾ガス量 ( $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ ) × 比重 / 汚泥処理量 (t-DS/h)

とした。

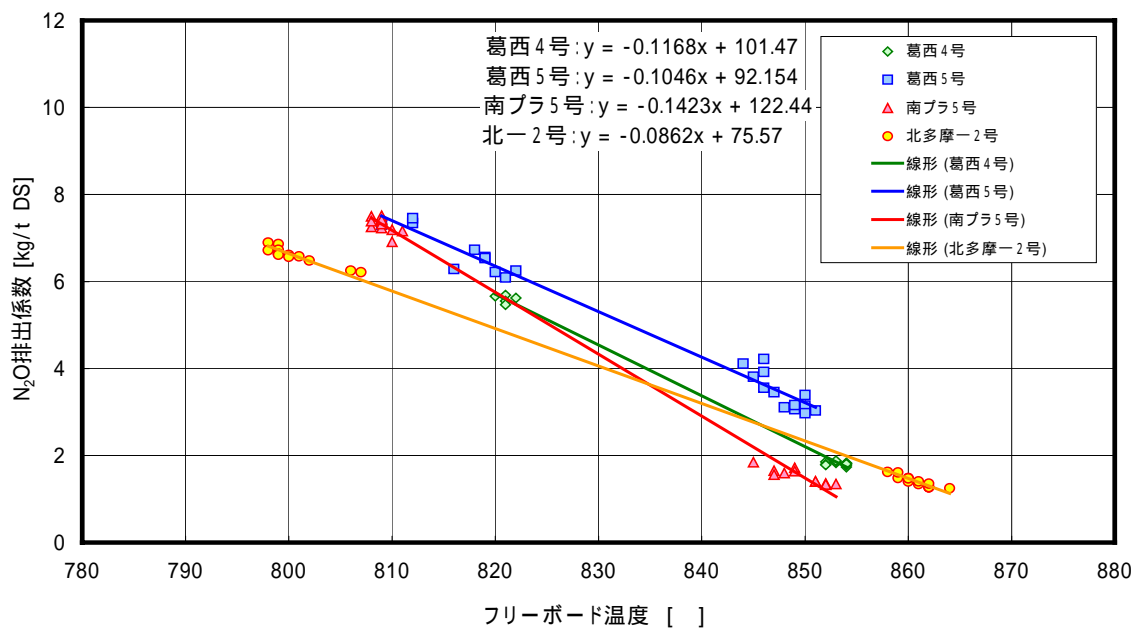
図4 フリーボード温度とN<sub>2</sub>O排出係数との関係

図4より、各施設とも炉内温度の上昇とともに  $N_2O$  排出係数は直線的に減少した。フリーボード上部温度が 810 と 850 の状態を比較すると、その排出量は 21～43%に低減しており、高温焼却が  $N_2O$  排出量削減に対して有効であることが確認された。

### (3) 高温焼却による温室効果ガス排出抑制の試算

高温焼却運転により  $N_2O$  排出量削減の効果が確認された。しかし、補助燃料および消費電力量が増加しており、それらに由来する  $CO_2$  排出量の増加が懸念されるため、今回の調査結果より温室効果ガスの総量に関して評価を行った。葛西4号炉において通常運転時と高温焼却時に排出される温室効果ガスを  $N_2O$  にエネルギー由来の  $CO_2$  を加えて総合的に評価した結果を図5に示す。

図から明らかなように、高温焼却時には補助燃料由来の  $CO_2$  は増加しているが、温室効果ガス全体に占める割合は低いため、温室効果ガス全体としてみると高温焼却時には  $N_2O$  削減効果によって温室効果ガス排出量が抑制されることになる。

本結果を基に高温焼却運転を都内全処理場に適用した場合における温室効果ガス削減効果を試算したところ、年間の温室効果ガス削減効果は、 $CO_2$  換算で約 12 万 t- $CO_2$ /年となる。

また、高温焼却を適用した場合のユーティリティ費は約 8 千万円/年 増加する。

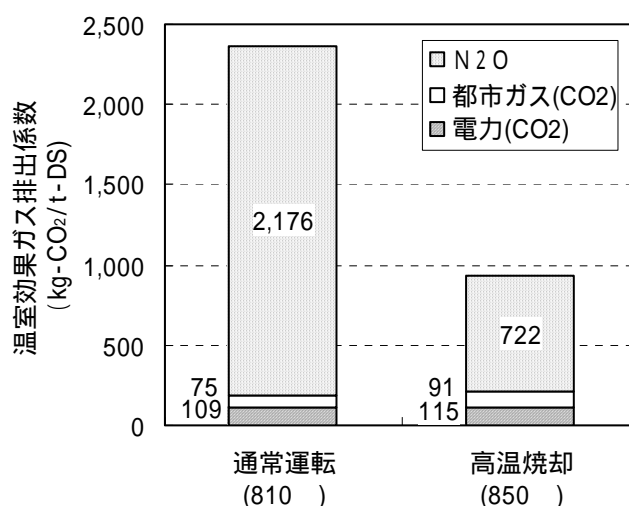


図5 総温室効果ガスの比較

## 3.3 汚泥処理運転改善調査

### 3.3.1 カロリーメータの特徴

汚泥焼却炉に投入される脱水ケーキの含水率と発熱量の連続測定が可能なカロリーメータを用いて、焼却炉に与える熱負荷を常時監視し安定させることにより焼却温度（フリーボード温度）の安定化を図ることが期待できる。そこで本調査ではこのカロリーメータを南部スラッジプラント5号炉に設置し、この測定器を利用した焼却炉燃焼状態の安定性向上の可否について検証した。

調査に使用したカロリーメータには次のような特徴がある

- (1)一つの測定器で含水率と発熱量を同時に測定できる。
- (2)連続測定が可能であるので、リアルタイムで監視ができる。
- (3)非接触で測定が可能であり、測定器の汚れによる測定誤差が少ない。

### 3.3.2 カロリーメータの測定結果と運転データとの関係

気泡型流動床炉の場合は、焼却炉内のフリーボード上部の温度が焼却炉の燃焼状態の安定性を示す指標になる。今回の調査での確認されたように、フリーボード上部温度の低下が  $N_2O$  の発生量の増加にもつながることから、新たな手法によるフリーボード上部温度の管理が求められている。

そこで、フリーボード上部温度と焼却炉投入エネルギーとの関係の有無を検証した。その効果の確認方法として、焼却炉のフリーボード上部温度が大きく変動しているときの事

例を選び、その変動原因がカロリーメータによる測定データから解明できるかを検証した。

カロリーメータから得られた炉内熱負荷とフリーボード上部温度の関係を図6に示す。

図から明らかなように、フリーボード上部温度は炉内熱負荷の変動と同様の時間変動をしており、炉内温度の変動原因をカロリーメータから得られた炉内熱負荷のデータから説明することができた。つまり、カロリーメータを使用して、焼却炉に投入される脱水ケーキの発熱量と含水率を連続測定した値から熱負荷を算出することにより、焼却炉のフリーボード温度を管理できることが確認された。

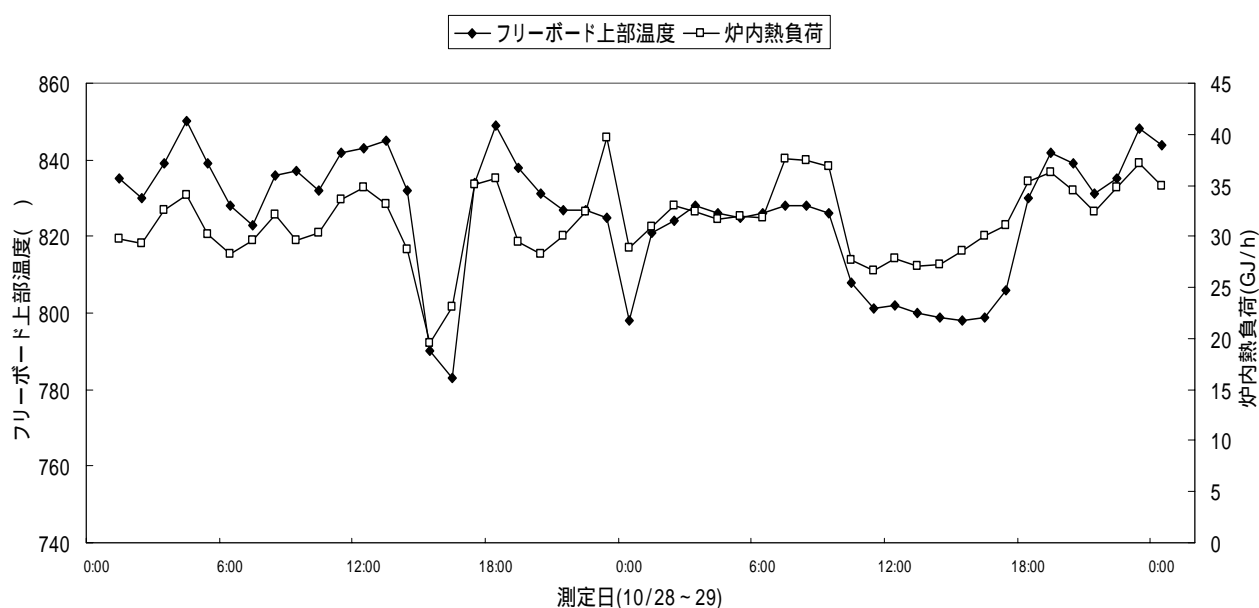


図6 フリーボード上部温度と炉内熱負荷

### 3.3.3 カロリーメータを用いた焼却炉運転制御の検討

カロリーメータを使用した焼却炉運転管理の今後の活用方法案について以下に示す。

#### 3.3.3.1 モニターとしての使用

今回の調査結果からモニターとしての使用価値は十分にあるといえる。脱水ケーキの性状が大きく変化する降雨時には運転管理を補助するものとして有効である。

また、カロリーメータのトレンド記録として保存しておくことにより、過去の運転結果を解析することも期待できる。

#### 3.3.3.2 ファジー制御制御点としての使用

カロリーメータを焼却炉運転制御に使用する場合には、原則としてフィード・フォワード制御を行うこととなる。その場合の制御方法として、炉内熱負荷の一定制御となる。また、その結果としての炉内温度などをフィード・バックする方法の検討など複合的な制御にならざるを得ない。そのことから、ファジー制御が向いていると思われる。

しかし、今回の調査結果ではファジー制御の制御点として有効であることを確認したに留まり、具体的は制御システムを検討するに至るまでの結果は得られていない。これらシステム構築のためにはモニターとして連続監視を行い、運転データとの関係について精度を上げる必要がある。

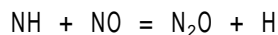
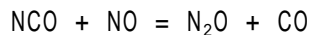
### 3.4 N<sub>2</sub>O 生成・分解調査

気泡流動焼却実験設備を用いて汚泥焼却実験を行い、炉内における N<sub>2</sub>O 発生メカニズムを解明するとともに、高温焼却をはじめとする各種 N<sub>2</sub>O 抑制技術に対しての検討を行った。

#### 3.4.1 N<sub>2</sub>O 生成機構

実験結果から下水汚泥の気泡流動燃焼における N<sub>2</sub>O の生成機構は以下のように考えられる。

炉内に投入された汚泥が砂層にて熱分解され、CO、HCN、NH<sub>3</sub> といった熱分解生成物が生成する。次いでフリーボードにて HCN から生成する NCO、NH<sub>3</sub> より生成する NH と、NO が下式、に示すような気相反応により N<sub>2</sub>O を生成する。



ここで、フリーボード下部での NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O の割合や NH<sub>3</sub> 吹き込み実験の結果から NH<sub>3</sub> の影響は小さいと考えられ、下水汚泥の気泡流動燃焼における N<sub>2</sub>O 生成に関しては HCN の寄与率が高く、主に上記の反応により N<sub>2</sub>O が生成しているものと考えられる。

#### 3.4.2 N<sub>2</sub>O 低減技術

今回検討を行った諸方法については、生成抑制効果及び分解効果により高温焼却技術が N<sub>2</sub>O 低減に有効であることが明らかになった。

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 吹き込みについても NO<sub>x</sub> 排出量を増やすことなく N<sub>2</sub>O 低減効果が得られた。炉全体ではなく局所のみ的高温化を行うことにより、高温焼却に比べ補助燃料使用量が少量で済み、炉に対する影響も小さいものと考えられるが、実設備への対応を行う場合には C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> を炉中心部まで供給できる方策を検討する必要がある。

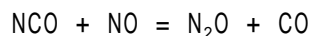
NH<sub>3</sub> 吹き込みに関しては顕著な効果が確認できず、二段燃焼については操炉が不安定になり、条件によっては N<sub>2</sub>O が増加する場合もあった。

#### 3.4.3 N<sub>2</sub>O 生成・分解反応調査のまとめ

下水汚泥に対して気泡流動焼却実験設備を用いて焼却実験を行い、炉内軸方向の排ガス成分の測定を行うことにより以下の知見が得られた。

(1) 下水汚泥の気泡流動燃焼において、砂層部にて熱分解されて生成した熱分解生成物と NO が気相反応により N<sub>2</sub>O を生成する。

(2) 下水汚泥の気泡流動燃焼における N<sub>2</sub>O 生成に関しては HCN の寄与率が高く、主に



の反応により N<sub>2</sub>O が生成しているものと考えられる。

(3) N<sub>2</sub>O 低減技術としては高温焼却技術が有効である。また、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 吹き込みについても N<sub>2</sub>O 低減効果が得られた。

(4) 二段燃焼及び NH<sub>3</sub> 吹き込みに関しては顕著な N<sub>2</sub>O 低減効果が確認できなかった。二段燃焼については操炉が不安定になり、条件によっては N<sub>2</sub>O が増加する場合もあった。

## 4. まとめ

### 4.1 測定結果及び考察

(1) 葛西処理場 4 号炉、5 号炉、北多摩一号処理場 2 号炉および南部スラッジプラント 5 号炉にて炉内温度低温域と高温域の運転を実施し、排ガス中の N<sub>2</sub>O 測定を行ったところ、各設備とも炉内温度の上昇とともに N<sub>2</sub>O 排出量は直線的に減少した。フリーボード

上部温度が 810 と 850 の状態を比較するとその排出量は 21～43%に低減される。

- (2) 葛西処理場 4 号炉において約 2 か月間の高温焼却運転を実施したところ、期間中は焼却炉本体や空気予熱器などに損傷はみられなかった。しかし、熱負荷の影響が最も大きいと予想された空気予熱器に対して、各部の温度及び歪みを測定し、その結果を基に FEM 強度解析を行った結果、設備の昇温及び降温による熱応力発生の一連の繰り返し回数に対する機器寿命の低下が予測された。
- (3) 上記、高温焼却運転期間中は通常運転時と比較して、補助燃料消費量は約 1.22 倍、電力消費量は約 1.06 倍となっており、それぞれ増加が認められた。しかし、投入汚泥の含水率を 1 % 低下させることができれば、都市ガス消費量の増加なしで高温焼却運転が可能であることも示唆された。
- (4) 高温焼却運転の温室効果ガス削減に対する相対的效果について評価を行ったところ、補助燃料及び電力消費量の増加に伴う温室効果ガス増加量に比べて、 $N_2O$  排出量の低減効果は数十倍以上大きく、高温焼却運転が温室効果ガスの総排出量削減に対して大きな効果があることを確認した。
- (5) カロリーメータを南部スラッジプラント 5 号炉に設置し、焼却炉に投入される脱水ケーキの含水率と発熱量を連続測定したところ、測定データから炉内燃焼温度の変動原因が解明できた。特に脱水ケーキの性状が大きく変化する降雨時などにおいては、従来の運転管理を補助するものとして有効であり、モニターとしての使用価値は十分にあることが明らかになった。
- (6) 焼却炉メーカーの実験設備における調査結果から、気泡流動焼却炉における下水汚泥の燃焼では、砂層部にて生成した熱分解生成物と  $NO$  が気相反応により  $N_2O$  を生成しており、特に  $HCN$  が  $N_2O$  生成に強く寄与していることが推察された。また、各種  $N_2O$  低減技術 ( $C_3H_8$  添加、 $NH_3$  添加、二段燃焼) について検討したところ、高温焼却運転が最も有効で実現性が高いことを確認した。

#### 4.2 既存流動焼却炉における汚泥高温焼却実施に関する有効性、考察、課題

本調査における各調査結果から、高温焼却運転は温室効果ガス排出量削減に対して大きな効果がある。試算の結果、局内全焼却炉にて高温焼却運転を実施した場合、年間の温室効果ガス削減効果は約 12 万 t- $CO_2$ /年となる。

一方で既存の焼却設備については 850 運転に対応した設計となっていないものも多く、空気予熱器、白煙防止器等の熱交換設備及び排ガス処理設備、ファン、ブロウ等について設備更新を含めた機器能力アップなど、焼却炉毎に対し設備の改良が必要となる。

#### 参考文献

- 1) 「汚泥処理における温室効果ガス排出量削減調査報告書」東京下水道局施設管理部
- 2) " Proc. 11th Int. Conf. on FBC " Hulgaard,T . Grarborg,P. and Dam-Johansen,K

## 6 - 2

## お台場海浜公園における海域浄化実験

計画調整部 技術開発課  
石井 実、森田 健史

### 1. はじめに

「お台場」は、1853年のペリー来航を契機に江戸を防衛するために構築された砲台である。お台場海浜公園は、そのうち現存する第三台場を生かして新時代にふさわしい公園として整備が進められてきた。現在は近代的なビル群に囲まれ、都内で数少ない砂浜のある景観の優れた水辺空間に生まれ変わり、年間160万人もの人達が訪れる観光スポットとなっている。水辺は家族連れで賑わい、ボードセリングなどの水上スポーツも盛んである。

しかしながらお台場海浜公園の海域は、東京湾が従来から抱えている課題である慢性的な赤潮の発生や、降雨後にゴミやオイルボールが漂着し、ふん便性大腸菌群数が増加するなど、安心して水遊びできる水質にはなっていない。

東京都は平成14年度重要施策の一つとして、「東京湾の水質改善」を掲げた。これを受けて、お台場海浜公園を安心して遊べる水辺空間とすることを目標に、関係する環境局・港湾局・下水道局の3局と、民間会社(株)荏原製作所の共同で、3ヵ年にわたる海域浄化実験を開始した。実験初年度である平成15年度は、7月より10月まで浄化海水の放流を行ない、実験海域の浄化効果を検証した。

### 2. 海域浄化実験概要

#### 2.1 実験概要

実験施設配置図を図-1に示す。有明水再生センター内に海水浄化プラントを設置し、直近の有明西運河から取水した海水を浄化した後、約1km先のお台場海浜公園内の浄化エリアへ放流した。

浄化エリア平面図を図-2に示す。浄化エリアはプラント処理能力等を考慮し、公園南東部角の砂浜の水際線200m、沖合い20～70m、面積約7,000m<sup>2</sup>、水量約10,000m<sup>3</sup>(平均水位時)を対象とした。浄化エリアそばには、来訪者が安心して水遊びができるよう管理室を設置し、シャワー室や水質等の情報提供を行なうための電光掲示板を設けた。また浄化エリア水際には、子供の水遊び場として「ふれあい水路」と名付けた木樋を設置し、浄化海水の一部を目に見える形で放流した。浄化エリアの目標水質は、安心して水遊びができる水質として、環境省の水浴場水質判定基準を参考に表-1の通り設定した。



図-1 実験施設配置図

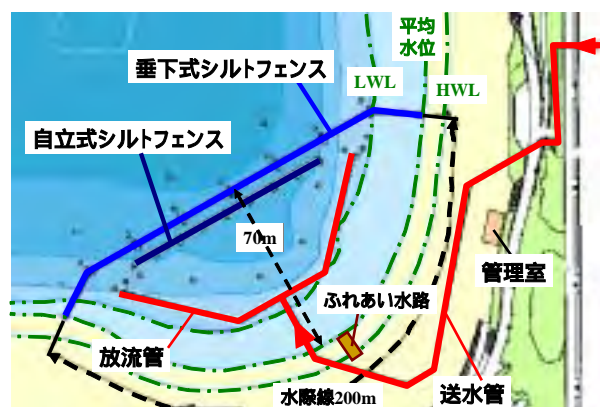


図-2 浄化エリア平面図



表 - 1 浄化エリア目標水質

項目	ランク	水質
ふん便性大腸菌群数	A	100 個 / 100mL 以下
油膜の有無	A	油膜が認められない
COD	B	5mg / L 以下
透明度	A	水深 1m 以上

表 - 2 プラント設計諸元

浄化方式	生物膜ろ過 + 紫外線消毒
処理能力	5,000 ~ 7,500m <sup>3</sup>
送水時間	24 時間連続
生物膜ろ過装置緒元	φ 3.8m × 2 塔 LV:300 ~ 450m/日 ろ材: 3mm 径アンスラサイト ろ過層厚: 2m
紫外線消毒装置緒元	中圧式 (2kw ランプ : 6 本 × 2 ブロック)

## 2.2 海水浄化設備

### 海水浄化プラント

海水浄化プラントのフロー図を図 - 3、プラント設計諸元を表 - 2 に示す。有明西運河より取水した海水は、原水スクリーンで夾雑物を除去した後原水槽に貯えられ、生物膜ろ過装置で SS や COD を除去する。ろ過処理水は、生物膜ろ過装置で消費された DO を補うためろ過水槽で曝気した後、紫外線消毒装置でふん便性大腸菌群等を消毒する。消毒処理水は浄化水槽で一時貯留された後、お台場海浜公園内の浄化エリアに送水される。

なお、ろ過装置の洗浄排水は、逆洗排水槽に一時貯留した後、有明水再生センターへ送泥した。

### 浄化エリア

浄化エリア断面図を図 - 4 に示す。浄化海水は、海底に埋設した 250mm の放流管から、海底の砂を巻き上げないようにゆるやかに放流される。放流管の長さは 136m で、6mm の吹き出し穴が、250 mm ピッチで 544 個設けられている。

浄化エリアとエリア外海の仕切りとして二重構造のシルトフェンスを設置しており、外部からのゴミやオイルボールの流入を阻止するとともに、浄化海水がすぐに流出することを防止している。外側のシルトフェンスは長さ 160m × カーテン丈 2 ~ 3m の垂下式、内側は長さ 80m × カーテン丈 2m の自立式である。

なお、浄化エリアは勾配が急な所があったため、実験開始直前に 2,500m<sup>3</sup> の砂を投入し、整地を行った。

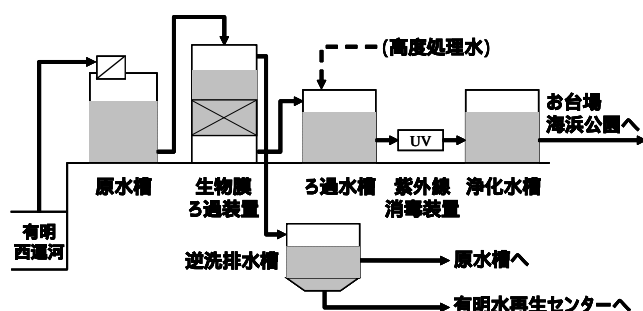


図 - 3 海水浄化プラントフロー図

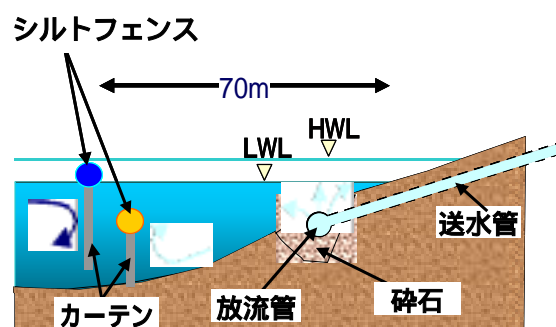


図 - 4 浄化エリア断面図

## 2.3 調査項目

代表的な調査項目を以下に示す。

日常調査・・・放流期間中、毎朝 9 時に浄化プラントの各工程及び浄化エリア内外の水を分析（D0、SS、ふん便性大腸菌群数、COD 等）し、浄化効果を検証した。

生物調査・・・定期的に、浄化エリア内外の底質調査、底生生物調査、小型地引網による稚魚調査、シルトフェンス付着生物調査等を行った。

高度処理水添加調査・・・水遊びシーズンを過ぎた 10 月後半に、浄化海水の一部に淡水である高度処理水を添加し、プラントの消毒性能や浄化効果及び生態系に与える影響について調べた。

衛生学的調査・・・降雨の影響のあった日に 2 回、衛生学的指標である *E.coli*（大腸菌）、病原性大腸菌 0-157、*Enterococci*（腸球菌）の調査を行なった。

## 3．実験結果

### 3.1 条件

#### （1）実験条件

7/18 から 10/31 の計 106 日間、5,000m<sup>3</sup>/日の浄化海水を連続で放流した。実験条件を表 - 3 に示す。Run1 において、外側シルトフェンスの両端部が上げ潮時に水没し、浄化エリア外の海水が流入して水質が悪化することが確認された。そこで Run2、Run3 では、シルトフェンス両端に土嚢で仮壁を設置し、浄化エリア外からの海水流入量を減らすよう試みた。図 - 5 に仮壁設置前、図 - 6 に仮壁設置中の浄化エリアの写真を示す。

また Run3、Run4 では、高度処理水添加調査のため、海水量を 4,000 m<sup>3</sup>/日に落とし、6 時～24 時の間、ろ過水槽に有明水再生センター生物膜ろ過処理後（オゾン処理前）の高度処理水 1,000 m<sup>3</sup>/日を添加し処理を行った。

表 - 3 実験条件

Run 番号	Run1	Run2	Run3	Run4
期間	7/18～9/26	9/27～10/13	10/14～10/23	10/24～10/31
高度処理添加	なし	なし	1,000 m <sup>3</sup> /日添加	1,000 m <sup>3</sup> /日添加
仮壁の有無	なし	あり	あり	なし



図 - 5 仮壁設置前の浄化エリア



図 - 6 仮壁設置中の浄化エリア

## (2) 気象条件

降雨量の経日変化を図 - 7、気温の経日変化を図 - 8 に示す。残暑が厳しかった 9 月を除き、例年より気温が低く日射量が少なかった。そのため赤潮の発生は、気温が高く日射量の多かった 8/25～8/31 の 1 回のみであった。降雨量については例年より多く、集中豪雨も数回起こった。

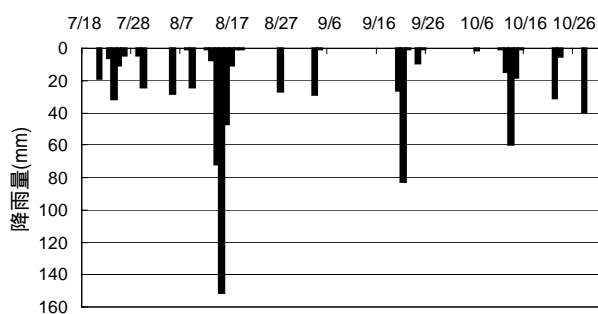


図 - 7 降雨量の経日変化

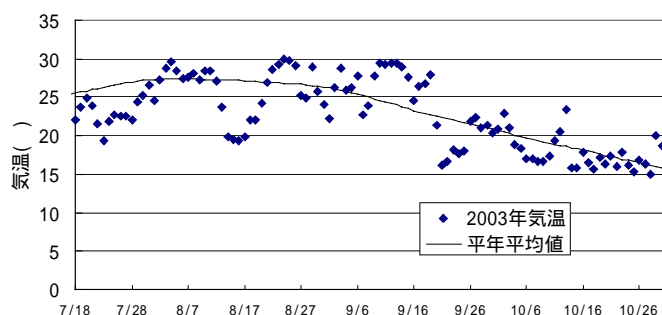


図 - 8 気温の経日変化

## 3.2 海域浄化効果

### (1) 浄化プラントの処理状況

浄化プラントの処理状況を表 - 4 に示す。浄化海水は、各項目とも非常に良好な水質であった。なお平均値の算出にあたっては、ふん便性大腸菌群数については 75% 水質値とし、その他の項目は定量下限値以下の値は 0 として単純平均した。

表 - 4 浄化プラントの処理状況

項目	原水	浄化海水
水温 [ °C ]	22.8	22.9
pH [ ]	7.7	7.3
DO [mg/L]	3.6	6.9
濁度 [度]	2.3	0.5
SS [mg/L]	4.8	0.7
透視度 [度]	141	291
紫外線透過率 [%]	90.6	93.3
ふん便性大腸菌群数 [個/100mL]	176 (<2 ~ 19,800)	<2
COD [mg/L]	3.0	2.5
S-COD [mg/L]	2.6	2.3
NH <sub>4</sub> -N [mg/L]	0.52	0.11
電気伝導度 [S/m]	3.47	

D0

D0 は生物膜ろ過処理の過程で約 1～3mg/L 程度消費されるが、ろ過水槽で曝気を行なったため、原水 3.6mg/L に対し浄化海水 6.9mg/L と高くなった。

#### 濁度・SS・透視度

代表として濁度の経日変化を図 - 9 に示す。原水の濁度・SS・透視度は、降雨や赤潮の影響でたびたび悪化したが、浄化海水が悪化したのは、ろ過塔の逆洗をろ坑で制御していた 8/7～8/11 の期間だけであった。それ以降の原水悪化時には、逆洗を手動に切り替え、洗浄頻度を増やして対応したため、浄化海水の水質悪化を抑えることができた。

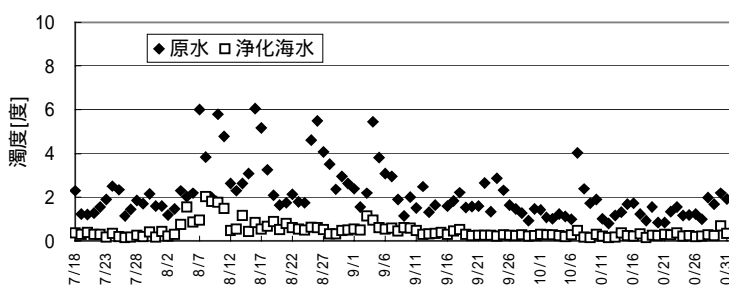


図 - 9 浄化プラント濁度の経日変化

#### ふん便性大腸菌群数

紫外線消毒装置の運転条件を表 - 5 に示す。平成 14 年度に行った予備調査において、30mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線を照射すれば 10,000 個/100mL 程度のふん便性大腸菌群数を 100 個/100mL 以下にできるという知見を得ている。6 本又は 12 本の紫外線ランプを点灯した結果、紫外線照射量は降雨時や高度処理水添加時に低下する傾向があったが、60mJ/cm<sup>2</sup> を越える十分な量であった。紫外線照射量が低下する原因としては、降雨時には濁度の上昇、高度処理水添加時には色度の上昇による紫外線透過率の低下が考えられる。

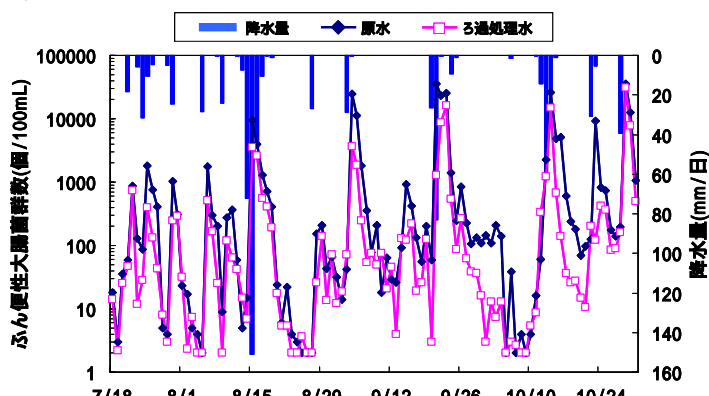


図 - 10 浄化プラントふん便性大腸菌群数の経日変化

ふん便性大腸菌群数の経日変化を図 - 10 に示す。原水のふん便性大腸菌群数は、降雨時に 10,000 個/100mL を越えることがあった。しかし約 7 割は生物膜ろ過で除去され、また紫外線照射量も十分であったことから、浄化海水では常に不検出（2 個/100mL 未満）であった。従って、紫外線ランプは点灯本数をより下げて運転できることが分かった。

表 - 5 紫外線消毒装置の運転条件

Run 番号		Run1 前半	Run1 後半～Run2	Run3～Run4 (高度処理水添加)
期間		8/5～9/1	9/2～10/13	10/14～10/31
紫外線ランプ点灯本数		12 本	6 本	6 本
紫外線透過率[%]		92	94	89
紫外線照射量[mJ/cm <sup>2</sup> ]		166	106	64
ふん便性 大腸菌群数 [個/100mL]	ろ過 処理水	26 ( <2～780 )	75 ( <2～4,600 )	69 ( <2～670 )
	浄化海水	<2	<2	<2

## COD

COD の経日変化を図 - 11 に示す。冷夏で日射量が少なかったため、例年と異なり赤潮の発生が 1 回しかなかった。従って、原水でもほとんど COD が 5mg/L を超えることがなく良好な水質であった。COD は生物膜ろ過により、10 ～ 20% ほど除去されていた。

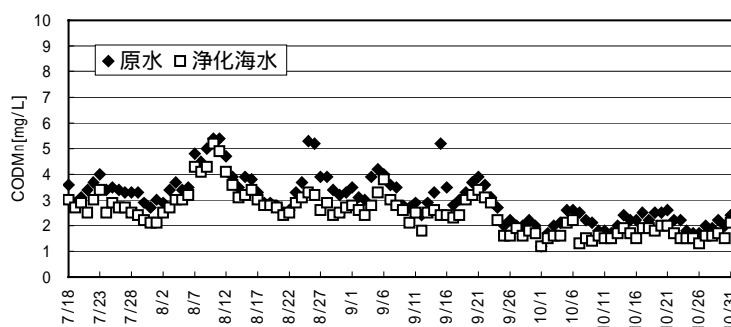


図 - 11 浄化プラント COD の経日変化

## (2) 浄化効果

浄化エリア内外の水質を表 - 6 に示す。浄化エリア内の水質は 3 地点の平均値であり、その他の計算方法は表 - 5 と同じである。

表 - 6 浄化エリア内外の水質

項目	目標値	浄化海水	浄化エリア内	浄化エリア外
DO [mg/L]				
平均値	-	6.9	6.2	5.7
最小～最大			3.8～15.0	3.0～15.7
SS [mg/L]				
平均値	-	0.7	7.1	6.0
最小～最大			1.8～28	2.1～21
透視度 [度]				
平均値	-	291	90	95
最小～最大			12～280	20～250
ふん便性大腸菌群数 [個/100mL]				
75%値	< 100	<2	217	730
最小～最大			2～31,100	<2～35,200
COD [mg/L]				
平均値	< 5.0	2.5	3.4	3.7
最小～最大			1.7～11	1.6～9.9

## DO

浄化海水の効果により、浄化エリア外 5.7 mg/L に対しエリア内 6.2 mg/L と高くなった。

## 濁度・SS・透視度

代表として濁度の経日変化を図 - 12 に示す。各項目とも大きな差は見られなかったが、たびたび浄化エリア内がエリア外より悪化することがあった。放流開始直後は、浄化エリア整地の際に投入した砂からシルト成分が溶出しており、その影響が大きかったものと考えられる。また、浄化エリア利用者の水遊びによる底泥の巻き上がりや、豪雨時に雨水とともに砂浜から流入する砂の影響もあった。特に 8/15～8/17 の大雨時には、砂浜が雨水により浸食され、砂が浄化エリア内に流れ込む現象が見られた。

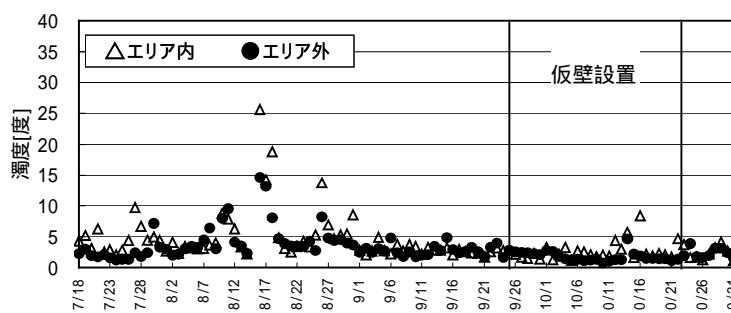


図 - 12 浄化エリア濁度の経日変化

### ふん便性大腸菌群数

ふん便性大腸菌群数の経日変化を図 - 13 に示す。降雨後には浄化エリア内でも 1,000 個/100mL を超えることがあったが、総じてエリア外より低い値となった。また仮壁設置期間はエリア内外の差が顕著になった。

ふん便性大腸菌群数の目標値達成日数割合を表 - 7 に示す。目標値である 100 個/100mL 以下の達成日数割合は、浄化エリア内 64%、エリア外 44%、水浴場水質判定基準で水浴可となる 1,000/100mL 以下の達成日数割合は、浄化エリア内 90%、エリア外 80%であり、いずれもエリア内の達成率が高く、一定の浄化効果が認められた。

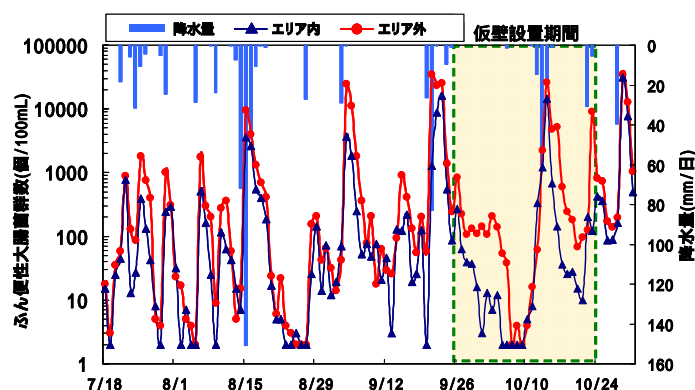


図 - 13 浄化エリアふん便性大腸菌群数の経日変化

表 - 7 ふん便性大腸菌群数の目標値達成日数割合

水浴基準	適 (A)	可 (B・C)	水浴不可
ふん便性大腸菌群数 [個/100mL]	100 以下	101 ~ 1000	1000 超過
浄化エリア内 [%]	64	26	10
浄化エリア外 [%]	44	36	20

### COD

COD の経日変化を図 - 14 に示す。赤潮の発生がほとんどなかったことから、原水同様エリア外も良好な水質であり、顕著な浄化効果とはならなかった。また Run3、Run4 の高度処理水添加時にも目立った上昇は見られなかった。

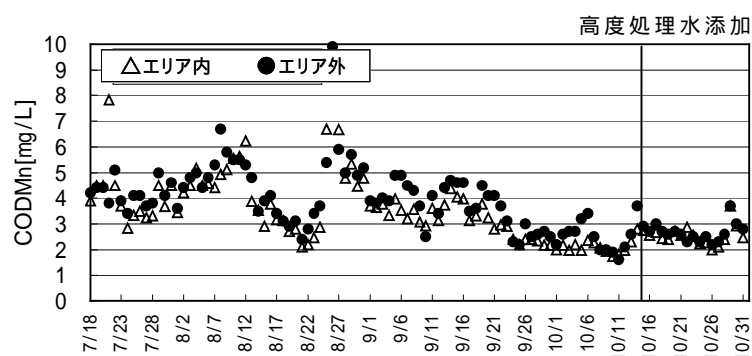


図 - 14 浄化エリア COD の経日変化

### 電気伝導度

塩分濃度と電気伝導度には正の相関がある。降雨や高度処理水の影響を知る目安として、電気伝導度を測定した。経日変化を図 - 15 に示す。高度処理水を添加した Run3、Run4 でも、COD 同様、浄化エリア内外で電気伝導度に見立った差が見られなかった。

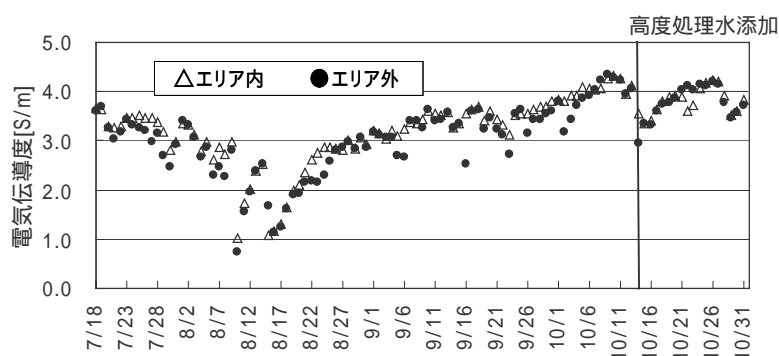


図 - 15 浄化エリア電気伝導度の経日変化



### (3) 仮壁設置効果の検証

Run2、Run3 で行った仮壁設置効果について検証した。

浄化エリア内外のふん便性大腸菌群数を図 - 16 に示す。仮壁なしより仮壁ありの方が相関式の勾配がゆるやかであり、仮壁設置によりふん便性大腸菌群数の浄化エリア内外の差が広がったことが確認できた。

降雨の影響を受けてふん便性大腸菌群数が上昇した後の経日変化を図 - 17、図 - 18 に示す。仮壁がない場合、エリア内外で減衰速度に大きな差は見られなかったが、仮壁を設置した場合、エリア内の減衰速度の増加が認められた。

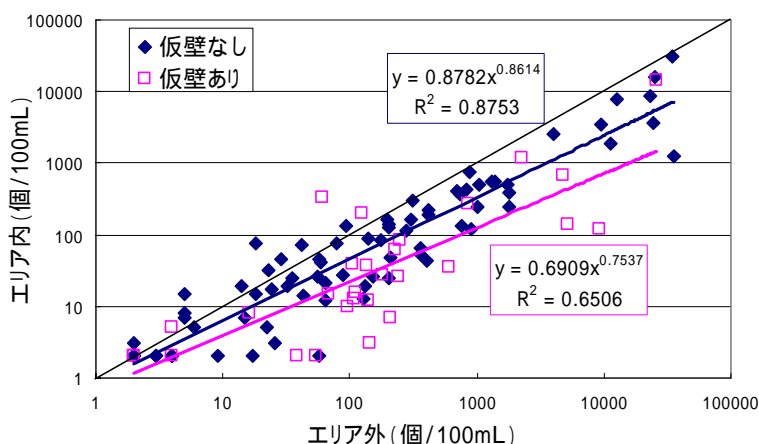


図 - 16 浄化エリア内外のふん便性大腸菌群数

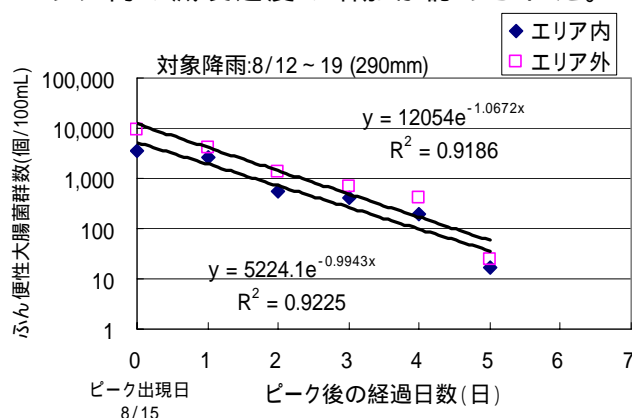


図 - 17 ふん便性大腸菌群数の減衰速度 (仮壁なし)

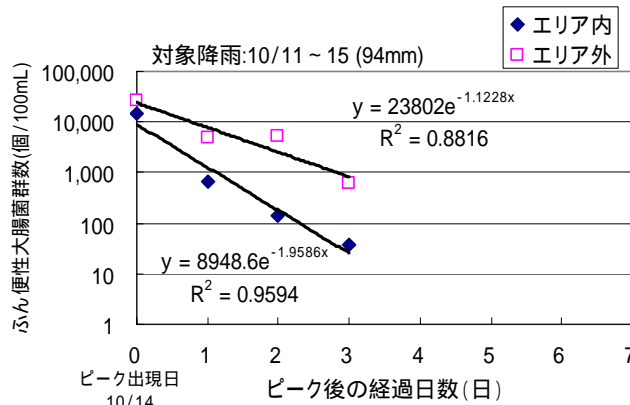


図 - 18 ふん便性大腸菌群数の減衰速度 (仮壁あり)

### (4) 浄化海水寄与率と潮汐との関係

仮壁設置効果の検証からも分かるように、浄化エリアの水質は、エリア外の海水流入による影響を受けやすい。従って、潮の干満の大きい大潮時にはかなり水質が悪化するものと考えられる。これについて定量的に評価するため、時間変動の少ない COD 値をもとに、以下の式で定義した浄化海水寄与率を計算し潮汐の状況と比較した。

$$\text{浄化海水寄与率 (\%)} = 100 \times \left( \frac{\text{エリア外 COD} - \text{エリア内 COD}}{\text{エリア外 COD} - \text{浄化海水 COD}} \right)$$

定義より、浄化エリア内の水質が浄化海水と等しければ 100%、エリア外と等しければ 0% となる。浄化海水寄与率の経日変化を図 - 19 に示す。浄化海水寄与率は 0% から 96% まで大きく変動したが、平均値は 39% であり、浄化エリア内の浄化海水保持率は約 4 割であることが分かった。

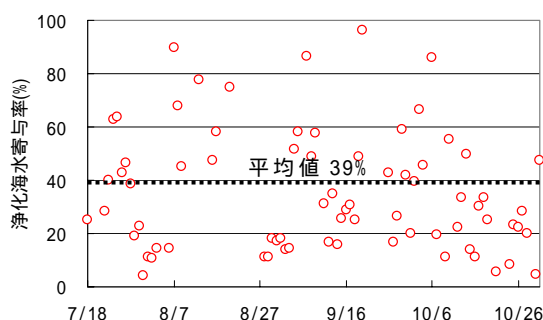


図 - 19 浄化海水寄与率の経日変化



各潮汐における浄化海水寄与率の平均値を表 - 8 に示す。潮位変動の小さい小潮、長潮、若潮においては、浄化海水寄与率（浄化効果）が高く、潮位変動の大きい中潮、大潮になるにつれて、低くなる傾向が見られた。また潮汐ごとに仮壁の有無でデータを比較すると、仮壁ありの方が高くなっており、これからも仮壁の設置効果が確認された。

表 - 8 各潮汐における浄化海水寄与率の平均値

潮汐	小潮	長潮	若潮	中潮	大潮
全データ	46	76	76	33	27
仮壁なし	45	76	73	32	26
仮壁あり	51	-	86	33	30

### 3.3 生物調査

浄化実験による生態系への影響について確認するため、底質調査、底生生物調査、稚魚調査を行った。調査地点を図 - 20 に示す。

また、生物による実験施設への影響等について確認するため、シルトフェンス付着生物調査、プラント付着生物調査を行った。各調査の実施状況を表 - 9 に示す。

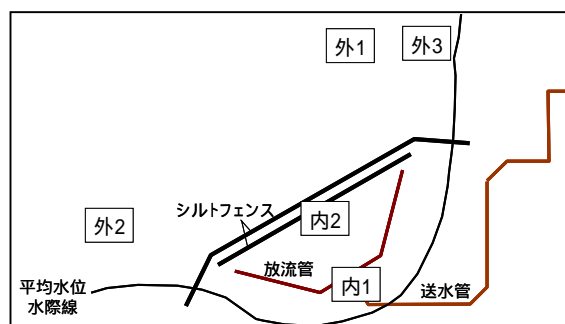


図 - 20 生物調査の調査地点  
（底質・底生生物・稚魚調査）

表 - 9 生物調査の実施状況

項目	4 月	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月
底質調査						
底生生物調査						
稚魚調査						
シルトフェンス付着生物調査						
プラント付着生物調査						

#### （1）底質・底生生物調査

底質調査結果を表 - 10 に示す。水温が高いほど、水深が深いほど嫌気度が高まる傾向が見られ、7月の「内2」が最も高かった。しかし9月調査ではやや改善されており、D0を多く含んだ浄化海水の放流が、浄化区域内の底質を好氣的にしている可能性が示唆された。

底生生物についてはアサリが非常に多く、他にはスピオ科、ゴカイ、イガイなどが見られた。底生生物の種類や個体数は嫌気度と相関があり、嫌気度の高い地点ほど底生生物が少なかった。エリア内外で比較した場合、種類や個体数の差は見られず、浄化実験による影響は確認できなかった。

## (2) 稚魚調査

稚魚調査結果を表 - 11、稚魚の写真を図 - 21 に示す。今回確認した稚魚の種類については、すべて環境局調査で確認されているものであり、特異的な種類は見られなかった。底生生物同様、エリア内外で種類数や個体数の差が見られず、浄化実験による影響は確認できなかった。

また放流休止期間の 1 月に行った調査では、浄化エリア内にアユの稚魚が見られ、東京湾が天然アユのゆりかごとなっていることが確認された。

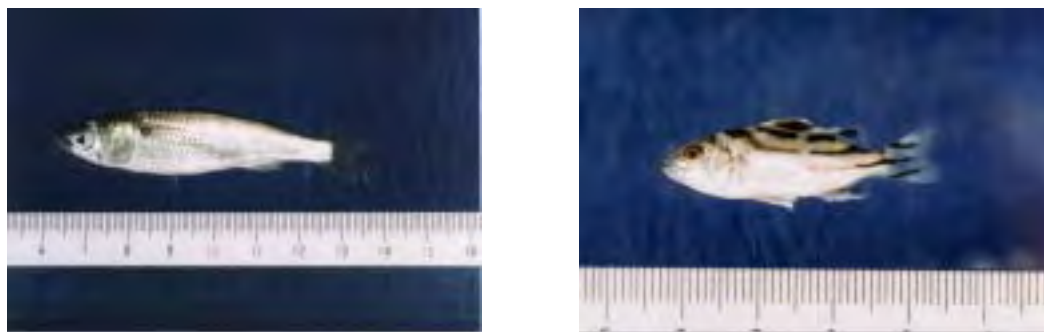


図 - 21 稚魚の写真（左：ボラ，右：コトヒキ）

表 - 10 底質調査結果

月	場所	水深	全硫化物	ORP	強熱減量
		(m)	(mg/g 乾泥)	(mV)	(%)
4月	内 1	1.0	0.01	400	2.4
	内 2	3.5	0.15	95	6.5
	外 1	2.0	<0.01	390	2.6
	外 2	2.0	0.02	169	2.1
	外 3	1.0	<0.01	438	2.3
7月	内 1	1.0	<0.01	85	1.8
	内 2	2.5	0.73	-189	8.7
	外 1	1.6	0.03	24	3.1
	外 2	2.0	0.39	-156	5.9
	外 3	1.0	<0.01	113	2.6
9月	内 1	1.0	<0.01	365	0.9
	内 2	4.3	0.18	23	3.2
	外 1	2.2	0.25	-59	2.4
	外 2	2.0	0.07	76	2.6
	外 3	1.0	<0.01	121	2.1

表 - 11 稚魚調査結果

魚種	個体数(個体/曳網)				
	平成 15 年			平成 16 年	
	4 月	7 月	9 月	1 月	3 月
イシガレイ	2	-	-	-	216
ウキゴリ属	8	-	-	-	-
スズキ	16	1	-	-	3
ヒメハゼ	9	-	-	15	114
アシシロハゼ					70
ボラ科	372	17	-	-	16
マハゼ	-	1	1	-	-
ハゼ科	971	-	-	-	-
ウグイ	-	12	-	-	1
ウグイ属	-	-	5	-	-
コトヒキ	-	-	69	-	-
メナダ	-	-	-	12	-
ビリンゴ	-	-	1	-	-
チチブ	-	-	-	-	3
ギンボ	-	-	-	-	1
アユ	-	-	-	6	-

### (3) シルトフェンス付着生物調査

実験開始直後の7月はシルトフェンスへの付着は少なかったが、9月にはほぼ全域が付着生物に覆われていた。上下層ともコウロエンカワヒバリガイが多く、下層ではヨーロッパフジツボも多かった。これらは潮間帯の汽水域でよく見られる帰化生物である。またフェンス中央下層についてはミドリイガイも多く見られた。生物付着はフェンスを破損させる可能性があるため、継続的な状況確認が必要である。

### (4) プラント付着生物調査

海水浄化プラントは、貝類付着防止のための次亜塩素酸ソーダ注入設備が備わっているが、残留塩素の影響を懸念して使用しなかった。そのため、プラント各部において貝類等の付着が観察された。プラント付着生物を表-12、取水配管の生物付着状況を図-22、ろ過水槽の生物付着状況を図-23に示す。取水配管は管内閉塞には至らなかったが、多量の貝類の付着が確認された。通常時の管内流速は2.0m/sと速いため、貝類の幼生が付着しにくい状況にあるが、原水槽の水位状況によって間欠運転となることがあり、その際に流速が無くなって付着に至ったと考えられる。また、生物膜ろ過後のろ過水槽や紫外線消毒後の処理水槽においても、原水槽ほどではないものの生物の付着が確認された。

実験休止後のメンテナンス時に大規模な洗浄作業が必要であったことから、平成16年度の実験では、音響パルスによる貝類付着抑制を検討している。

表-12 プラント付着生物

場所	優先種
取水部	フジツボ、カキ、ミドリイガイ、ムラサキイガイ
取水配管	フジツボ、ミドリイガイ、ムラサキイガイ
原水スクリーン	ミドリイガイ、コケムシ
原水槽	カキ、ミドリイガイ、ムラサキイガイ
ろ過塔	カキ
ろ過水槽	フジツボ、カンザシゴカイ（底面）
紫外線消毒装置	エビなどの小型の甲殻類
処理水槽	フジツボ、カンザシゴカイ（底面）
送水配管	緑藻類

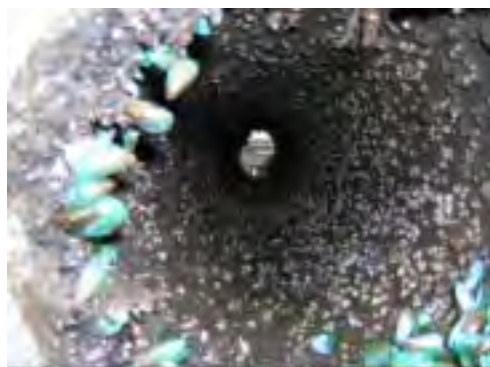


図-22 取水配管の生物付着状況



図-23 ろ過水槽の生物付着状況

### 3.4 衛生学的調査

降雨の影響のあった 8/23 と 9/20 に、衛生学的指標である *E.coli*、0-157、*Enterococci* について調査を行った結果を表 - 13 に示す。

*E.coli*、*Enterococci* の菌体数は、浄化プラントのふん便性大腸菌群数と同様の傾向を示し、浄化海水では不検出であった。0-157 については、全ての地点で不検出であった。

表 - 13 衛生学的調査

日付	項目	原水	ろ過水	浄化海水	浄化エリア内	浄化エリア外
8/23	<i>E.coli</i> [MPN/100mL]	930	23	<3	230	430
	0-157[個/L]	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	<i>Enterococci</i> [MPN/100mL]	43	<3	<3	21	43
9/20	<i>E.coli</i> [MPN/100mL]	43	15	<3	230	120
	0-157[個/L]	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	<i>Enterococci</i> [MPN/100mL]	9	<3	<3	<3	<3

### 4 . まとめ

平成 15 年度は、7/18 から 10/31 までの 106 日間、5,000m<sup>3</sup>/日の浄化海水の放流を行った。実験の結果を以下に示す。

- ・ 海水浄化プラントの浄化機能は十分発揮され、清澄な浄化海水が得られた。
- ・ 浄化エリア内のふん便性大腸菌群数、COD はエリア外に比べて良好であり、一定の浄化効果が得られた。
- ・ 浄化効果は潮汐の影響を受けるが、仮壁は潮汐の影響を軽減するのに有効であった。
- ・ 浄化実験による生態系への影響は確認できなかった。
- ・ 高度処理水添加による消毒性能や浄化効果への影響は確認できなかった。

また、砂浜に設けた「ふれあい水路」は子供たちの格好の水遊び場となり、多くの人手で賑わった(図 - 24)。なお、海浜公園を訪れた人たちを対象にアンケート調査を実施した結果、本実験に対し、期待と好意的な意見が寄せられている。



図 - 24 ふれあい水路

### 5 . 今後の予定

平成 16 年度は、シルトフェンス両端の延長とふれあい水路の拡張を行い、4/23 より 10/31 まで放流を予定している。水遊びシーズンには、放流量を 5,000m<sup>3</sup>/日から 7,500m<sup>3</sup>/日に増やし、さらなる浄化を目指す。

実験と平行して、定期的に外部委員による評価委員会を開いている。そこでの意見や、都民へのアンケート調査結果を取り入れつつ、安心して水遊びできる水辺空間の創造を目指していきたい。なお、実験状況については局ホームページ、日々の水質データについては局内掲示板に掲載している。

## 7 . 資源化・再利用

- 7 - 1 オートクレーブを用いた焼却灰無害化技術と資源化調査
- 7 - 2 重金属類を溶出抑制した焼却灰の資源化調査
- 7 - 3 低コスト小水力発電設備の実用化研究(第1報)

## 7 - 1 オートクレーブを用いた焼却灰無害化技術と資源化調査

計画調整部 技術開発課 緒方 孝次、宮本 彰彦、北村 清明  
( 現 日本下水道事業団 ) 杉山 佳孝

### 1 調査目的

東京都区部における下水汚泥焼却灰の資源化率は約 48% (平成 15 年度) と依然低迷している。その利用用途はセメント原料、粒度調整灰や軽量骨材等の建設資材が主なものとなっている。下水汚泥の有効利用を促進するためには、今後はコストや需要の面から焼却灰の形態での資源化メニューの拡大が有望視されるが、焼却灰にはヒ素やセレン等の重金属類が含まれており、土壤環境基準を超えて溶出する可能性があるため、そのままでは土壤等へ適用することはできない。

これまで用いられている焼却灰からの重金属類の溶出を抑制する技術としては、熔融処理や石灰処理が挙げられるが、熔融処理の場合には高温での処理が必要であるためにコストがかかり、石灰処理の場合には酸性雨等の曝露により溶出抑制効果を確保できなくなる懸念がある。そこで今回、低コストで環境中の曝露によっても焼却灰からの重金属類の溶出を長期間に渡って抑制する新たな技術の開発を行うこととした。その手法としては、オートクレーブによる水熱反応処理を用いた。水熱反応は臨界点 (375℃、22MPa) 以下の高温・高圧条件の水中における反応であり、水と比ベイオン積が非常に大きいため反応性が高くなるという特徴がある。本技術は、焼却灰中のシリカ分と消石灰中のカルシウム分を水熱条件下で反応させることにより、ケイ酸カルシウム (トバモライト) を合成し、物理的に安定した強度の高い結晶に成長させ、重金属類をこの結晶中に閉じ込めることにより溶出を抑えるものである。

本調査においては、この技術による重金属類溶出抑制効果と資源化用途への適用性を検討した。

### 2 調査期間

平成 15 年 8 月 6 日 ~ 平成 16 年 3 月 25 日

### 3 原理

図 1 に本調査で用いた水熱処理の原理を示す。焼却灰に石灰を加えて水熱反応を行うと、焼却灰の表面にケイ酸カルシウムの結晶 (トバモライト) が生成する。一方、重金属類は石灰中のカルシウムとの塩形成により難溶化形態となる。トバモライト生成過程で難溶化した重金属類がトバモライトの結晶中に物理的に封じ込められることにより、重金属類の溶出が抑制されることとなる。トバモライトの結晶構造は石英結晶の基本構造を持つため、単なる消石灰添加処理

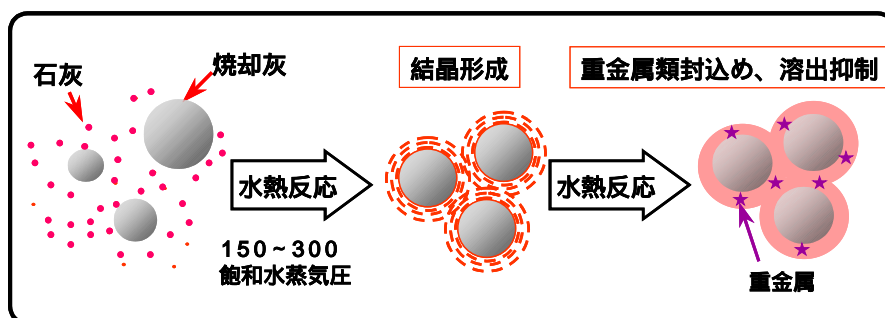


図1 水熱反応による重金属類溶出抑制の原理

により難溶化形態となる。トバモライト生成過程で難溶化した重金属類がトバモライトの結晶中に物理的に封じ込められることにより、重金属類の溶出が抑制されることとなる。トバモライトの結晶構造は石英結晶の基本構造を持つため、単なる消石灰添加処理



に比べ、重金属類を確実に封じ込めることができるとともに、強度も大きいという特徴がある。また、消石灰添加処理の場合には、処理灰を環境中に暴露すると酸性雨等により pH が酸性側に移行する、カルシウムの流出により平衡が移動して重金属類の難溶性塩が溶解性へと転換する、等の危険性があるために長期安定性が確保できない恐れがあるのに対し、水熱処理の場合には重金属類を結晶中に封じ込めているためにこれらの原因による重金属類が溶出する心配がなく、長期間にわたって重金属類の溶出抑制効果を確保することができる手法であると考えられる。

#### 4 調査方法

##### 4.1 水熱反応処理前後の溶出効果の確認及び焼却灰の性状

水熱反応による重金属類の溶出抑制効果は、平成 3 年環境庁告示第 46 号による溶出試験により確認した。また、原灰については化学性状試験、平成 15 年環境庁告示第 19 号による含有量試験も行った。

##### 4.2 水熱反応の実験手順

図 2 に水熱処理の実験手順を示す。まず、焼却灰、消石灰及び水を均一に混合し、その後造粒する。造粒した試料を加圧容器であるオートクレーブに入れる。オートクレーブ底部にはあらかじめ水を入れておき、外部からの加熱により水熱反応条件（温度・圧力）に調整する。本調査では、植栽用土や埋戻土などに焼却灰の利用用途を想定しており、試料の混合・造粒工程

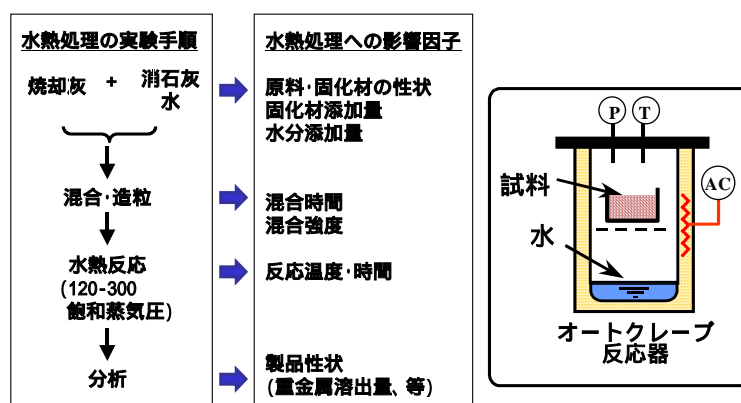


図 2 水熱反応の実験手順

では、5mm 以下程度の造粒品が製造できるような水添加量及び混合・造粒時間を設定した。なお、実験に用いたオートクレーブの内容積は 5L であり、1 回の実験で 1kg の焼却灰を処理した。

水熱反応におけるトバモライトの生成に影響の大きな処理条件としては、反応温度、反応時間、消石灰添加量の影響を調査した。蒸気圧は 16Mpa に設定した。

##### 4.3 植栽基盤適用性調査

焼却灰の水熱処理品及び基準土（赤玉土）を混合して植栽基盤材料を調製し、植栽機能試験（日本造園学会土壌分科会「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル」）、及びコマツナの植栽試験を行った。植栽機能試験としては恒温槽内で発芽させたコマツナの苗を播種から 5 日目にポット試験器に植替えて温室内で生育を観察した。生育状況としては目視や重量測定にて葉長や葉重量等を確認した。

#### 5 結果及び考察

##### 5.1 焼却灰の基本性状

表 1 に焼却灰の基本性状として、化学性状試験、平成 15 年環境庁告示第 19 号による含有量試験及び平成 3 年環境庁告示第 46 号による溶出試験を行った結果を示す。3 ヶ所の汚



泥処理工場の焼却灰の性状はほぼ同様であり、化学組成試験結果からシリカ分を 37～43% 含有していた。水熱反応によるトバモライト生成にはこのシリカ分を用いることになるが、量としては十分であると考えられた。

土壤環境基準については、含有量試験におい

表 1 基本性状試験結果

試験項目	分析項目	単位	A処理場灰 (サンプル A)	A処理場灰 (サンプル B)	B処理場灰	C処理場灰	基準値
化学組成試験	SiO <sub>2</sub>	%	37.65	39.09	40.32	42.68	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		16.67	13.34	14.91	20.75	-
	CaO		10.24	9.11	9.17	5.89	-
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		13.50	17.10	12.73	12.68	-
	K <sub>2</sub> O		1.76	1.90	1.52	1.36	-
	Na <sub>2</sub> O		1.09	1.40	1.39	0.98	-
含有量試験 (環告19号法)	As	mg/kg	4.9	20.0	3.8	2.1	150
	Se		2.6	<5	1.3	2.3	150
	Cd		6.0	5.0	5.0	3.3	150
	Pb		126	140	137	109	150
	Cr6+		0.3	<5	0.3	0.2	250
	T-Hg		0.30	<0.1	0.17	0.04	15
溶出試験 (環告46号法)	As	mg/L	0.018	0.460	0.022	0.017	0.01
	Se		0.258	0.335	0.125	0.250	0.01
	Cd		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
	Pb		<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.01
	Cr6+		0.03	0.02	<0.01	0.02	0.05
	T-Hg		<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	0.0005
	pH	-	7.5	7.0	8.6	7.2	-

ては全ての重金属類について基準を満たす結果となったものの、溶出試験においては砒素の溶出量が 0.017～0.460mg/L、セレンの溶出濃度が 0.125～0.335mg/L と、いずれの焼却灰についても砒素とセレンが基準値を上回る結果となった。

## 5.2 重金属類溶出抑制効果

表 2 に 3 汚泥処理工場の焼却灰に対して消石灰添加量、反応温度、反応時間を変化させて溶出抑制処理を行った場合の重金属類の溶出量を示す。A 処理場のサンプル B 以外の試料については、消石灰添加量を増やすと水熱処理品からの溶出量は低下し、砒素については消石灰添加量 5% 以上、セレンは消石灰添加量 10% 以上であれば環境基準値を概ね満足することが確認できた。しかし、砒素、セレンの溶出量が高い A 処理場のサンプル B については水熱処理により環境基準を満たす焼却灰を製造することはできなかった。この理由としては、処理後の pH が他のサンプルと比較して高いことから、トバモライトの結晶を生

表 2 様々な水熱処理条件における重金属類溶出量

		水熱処理条件			溶出量		pH
		温度	時間	消石灰添加量	砒素	セレン	
			hr	%	mg/L	mg/L	
A 処理場	サンプル A	-	-	-	0.018	0.258	7.5
		200	20	3	0.022	0.022	5.3
				5	0.009	0.031	7.8
				10	0.005	0.007	9.1
				15	<0.001	<0.001	7.4
			10	3	0.017	0.013	6.9
				5	0.007	0.019	7.5
				10	0.003	0.004	7.7
				15	<0.001	0.003	7.8
		180	5	10	<0.001	0.004	9.3
	サンプル B	-	-	-	0.460	0.335	7.0
		200	20	10	0.009	0.011	9.4
				15	0.019	0.015	8.2
			10	10	0.028	0.014	7.5
				15	0.068	0.011	7.1
B 処理場	200	-	-	-	0.022	0.125	8.6
		20	20	5	0.005	0.019	6.8
				10	<0.001	0.002	7.0
				15	0.002	0.002	7.4
C 処理場	200	-	-	-	0.017	0.250	7.2
		20	20	5	0.006	0.02	7.0
				10	0.008	0.011	7.5
				15	0.012	0.003	7.6

注 1) 共通処理条件: 飽和水蒸気圧 1.6MPa

成するための原料のうちシリカ分が不足したために結晶生成が十分に行われず、その結果として石灰が残留したと考えられる。そこで、シリカ分を添加した条件による水熱処理について今後検討を行うこととしている。他の重金属類については、A処理場のサンプルBの場合に一部で環境基準値を超過する鉛の溶出が見られたが、それ以外のサンプルでは他の重金属類については全て環境基準を満たしていた。

反応温度や反応時間については今回行った調査の範囲では溶出抑制結果への影響は見られなかったことから、より低い温度、短い反応時間の条件においても十分な溶出抑制効果が見られる可能性がある。そのようなより温和な条件においては、副反応が抑制される可能性から溶出抑制がより効果的に行われる可能性もあり、実用化の際にはコストの低減に寄与することから、この点についても今後検討を行う予定である。

なお、水熱処理を行った灰の形状は、平均粒径が10～100 $\mu\text{m}$ 程度の原料焼却灰とは異なり、図3に示すように1mm程度の粒状となっている。また、図4には水熱処理前後の電子顕微鏡写真を示した。水熱処理前は表面が滑らかであるが、水熱処理後には表面に繊維状の結晶が見られる。このことから、水熱処理により焼却灰の表面にはトバモライトの結晶が生成され、焼却灰どうしを結晶がつなぎ合わせる役目を果たしていることがわかる。

### 5.3 資源化用途調査

水熱処理品は微粉である焼却灰と異なり、予め造粒してあるため図3に示したような粒径1mm程度の形状を有しており、空隙を多く含み比較的低密度であることなどから、屋上緑化等の用途に適していると考えられる。また、トバモライト結晶の生成により、造粒品の強度を向上させることができる。そこで本調査ではこのような特性を生かせる資源化用途として、植栽土への適用について調査した。

植栽機能試験に用いた植栽用土は、水熱処理品と市販赤玉土の混合土である。水熱処理品は、A処理場のサンプルA焼却灰を消石灰添加量15%、200 $^{\circ}\text{C}$ 飽和水蒸気圧、20時間の条件下で調整した。混合比（重量比）は、水熱処理品／赤玉土＝4/0、2/2、1/3、0/4（試料A、B、C、D）とした。表3に植栽機能試験の結果を示した。

植栽基盤土壌に必要な物理的条件としては、良好な透水性、適度な硬度と保水性があること、また化学的条件としては、植物の生育に障害を与えるような有害物質を含まないこと、酸度（pH）が適当であること、および適度の養分を含んでいることが必



図3 水熱処理灰

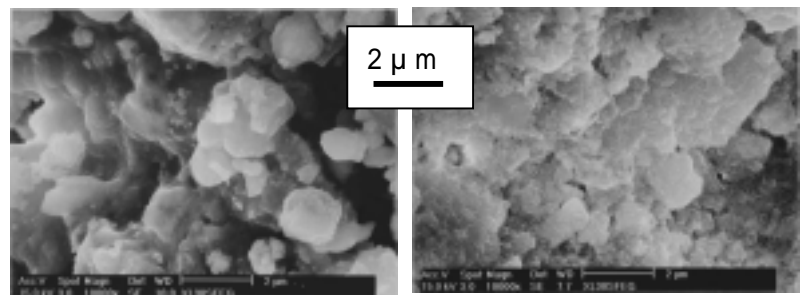


図4 電子顕微鏡写真

（左：焼却灰原灰、右：水熱処理後トバモライト結晶構造）

表3 水熱処理品の植栽機能試験結果

試料			A	B	C	D	良好 範囲 <sup>*1</sup>	
混合比率	水熱処理品	4	2	1	0			
	赤玉土	0	2	3	4			
測定項目	かさ密度	[g/ml]	1.298	1.005	0.925	0.822		
	有効水分保持量	[L/m <sup>3</sup> ]	85.1	61.3	75.4	81.2	>80	
	透水係数	[cm/s]	9.68 × 10 <sup>-4</sup>	2.10 × 10 <sup>-2</sup>	2.02 × 10 <sup>-2</sup>	4.50 × 10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-4</sup>	
	三相分布	固相率	[%]	40.6	29.0	25.0	21.0	<50%
		水分率	[%]	16.1	21.8	25.5	26.7	-
		空気率	[%]	43.3	49.2	49.5	52.3	-
	陽イオン交換容量	[meq/100g]	23.7	14.4	17.6	28.3	>6	
	可給態窒素	[mg/100g]	2.3	1.0	1.4	0.6	-	
	可給態りん酸	[mg/100g]	1200	1450	1270	15.4	>10	
	交換性カリウム	[mg/100g]	566	240	186	16.9	-	
	有機炭素含有量	[%]	0.2	0.3	0.4	0.8	-	
	pH	-	8.3	7.6	7.5	7.1	4.6 ~ 8.0	

\*1: 有効水分保持量、透水係数、固相率、陽イオン交換容量、可給態りん酸については「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル(日本造園学会土壌分科会)」による

要となる。表3からわかるように、水熱処理品単独の試料Aは、透水係数がやや小さくアルカリ性であり、固相率も大きい。アルカリ性であるのは、石灰の添加率が15%とやや多い条件であるためである。一方、水熱処理品を混合した土(試料B、C)の特徴として、養分である可給態リンおよび交換性カリウムが多く、基準土(赤玉土)の約10倍保有している。有効水分保持量はややばらつきがあるものの、水熱処理品を混合しても基準土と比較して大きな変化は無い。これらより、植栽基盤土壌への資源化利用は有効な用途であると考えられる。

試料A、B、C、Dを基盤土壌として用いてコマツナを生育した状況について、草丈、葉数、葉長の推移を図5に示す。また、播種後に刈取って葉重量、根重量及び根長を測定した結果を図6に、播種後41日目の生育状況の写真を図7に示す。これらの図よりわかるように、いずれの指標においても水熱処理品を25%あるいは50%混入した試料B、Cにおけるコマツナの生育状況がよかった。また、基準土壌である試料Dにおける生育状況と水熱処理品100%である試料Aにおける生育状況はほとんど変わらなかった。これは、試料B、Cにおいては可給態りん酸が基準土の100倍程度、交換性カリウムが基準土の10倍程度と多く、これらが養分として寄与したことが考えられる。なお、試料AにおいてはpHが高いため生育がやや阻害されたと考えられる。

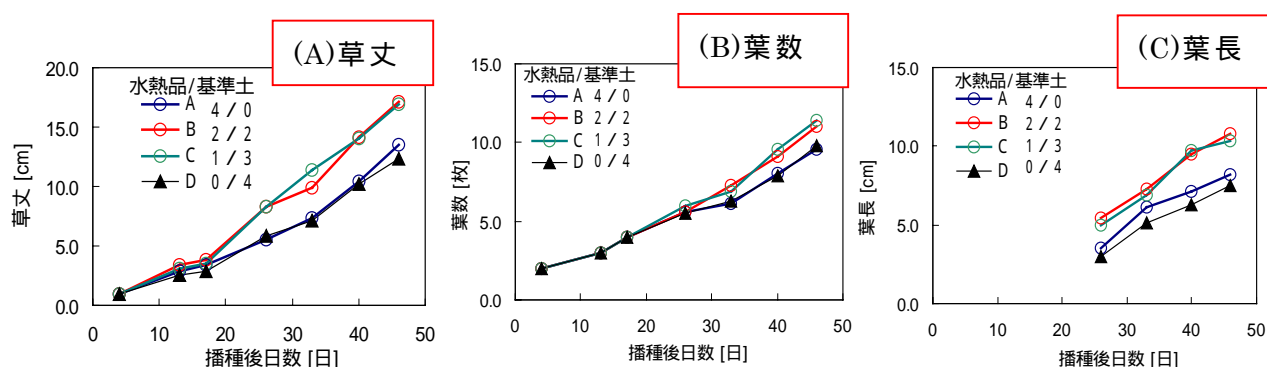
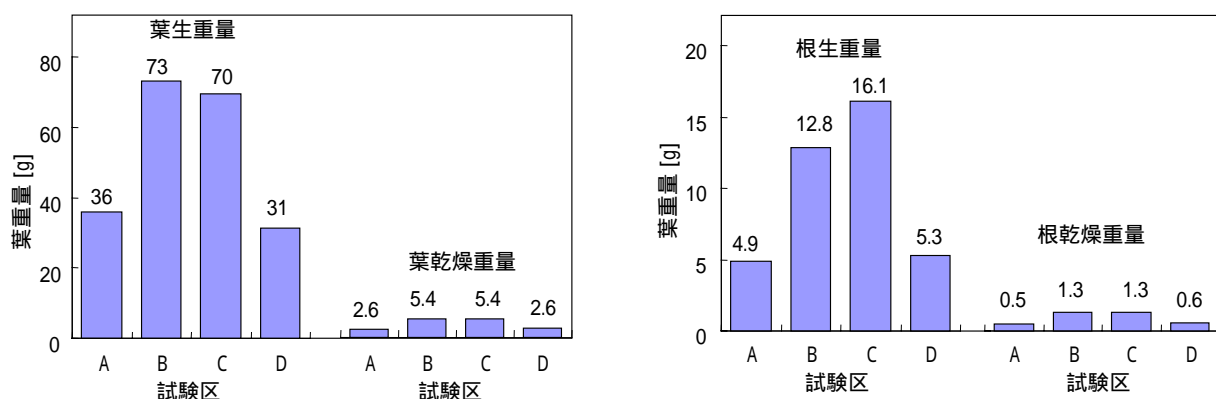


図5 コマツナの生育状況

このように、重金属類の溶出が抑制される一方、りんやカリウムについては高濃度で溶出する結果となっているが、これは、りんやカリウムについては焼却灰中の含有量が大き

いことと、特にカリウムについては水熱反応処理過程において反応に関与していないことが理由として挙げられる。



## 6 まとめと今後の課題

オートクレーブを用いた水熱条件における重金属類溶出抑制処理について検討したところ、消石灰添加量 10%で 200 飽和水蒸気圧 (1.6 MPa) の条件下、20 時間処理することにより、ヒ素、セレンをはじめとする重金属類の溶出を抑制し、環境基準を概ね満足する水熱処理灰を製造することができた。しかし、砒素、セレンの溶出量が 0.3 ~ 0.5mg/L 程度と大きい焼却灰については、上記の処理条件では土壤環境基準を満足できなかった。今後、反応条件の再検討とシリカ分の添加により、原料焼却灰の性状が変化する状況においても溶出抑制処理を適切に行うことができる条件を確立していきたい。また、溶出抑制効果が長期間安定することを確認することも必要であると考えられる。

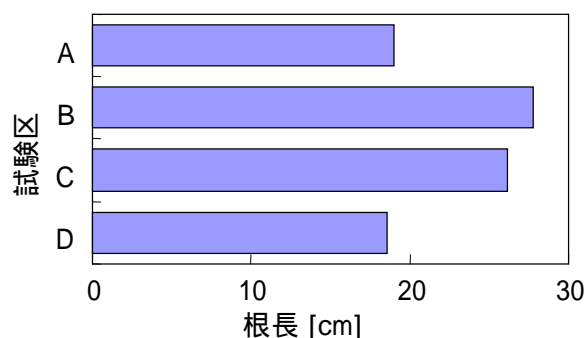


図 6 コマツナ刈取り後の葉重量、根重量及び根長

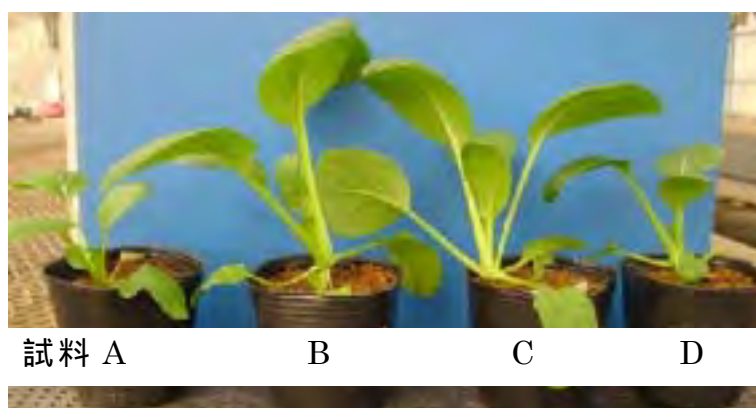


図 7 播種後 41 日目のコマツナの生育状況

水熱処理を行った灰の資源化用途調査として、植栽基盤への適用性を検討した結果、水熱処理灰を 25%あるいは 50%混入させた土壌におけるコマツナの生育状況は基準土である赤玉土における生育状況より良かった。これは、カリウムやリンが豊富に含まれていることにより栄養分として働いたこと、透水性や保水性が一般土壌並みと良好であること等、水熱処理品の特徴が有効に寄与したためと考えられる。今後は形状等水熱処理品の特長を生かした他の資源化用途についての検討も進めていきたい。

## 7 - 2 重金属類を溶出抑制した下水汚泥焼却灰の資源化調査

計画調整部技術開発課 緒方孝次 宮本彰彦 北村清明  
杉山佳孝（現 日本下水道事業団）

### 1 調査目的

汚泥焼却炉の整備により、平成 15 年度から東京都区部の下水道事業では発生する汚泥の全量を焼却処分している。年間約 110 万 t の脱水汚泥焼却量に対し、約 5 万 t の汚泥焼却灰（以下「焼却灰」という）が発生しているが、セメント原料、粒度調整灰、軽量細粒材などの建設資材として利用されているのは約半分で、残りの半分はセメントと混練し、埋め立て処分している。

焼却灰には微量ながら重金属類（砒素、セレン、カドミウム、鉛、六価クロム、水銀等）が含まれており、このうち特に砒素、セレンについて溶出する場合がある。近年、汚泥焼却炉の集じん方式として集じん温度の低いバグフィルターやセラミックフィルターが採用され、この傾向は強くなってきている。

焼却灰の有効利用にあたっては、重金属類の溶出に関する法的な基準等はないが、資源化製品が土壌と直接接触することを考慮すると、利用する際の焼却灰が土壌環境基準（平成 3 年環境省告示第 46 号）を満たすことが望ましい。さらには、平成 15 年 2 月から土壌汚染対策法が施行され、重金属類について溶出量基準に加え含有量基準が定められたほか、土壌の汚染原因者に修復責任が問われることとなるなど、有効利用における安全確保は重要性を増している。

重金属類の溶出を抑制することが可能となれば安全なものとして扱うことができ、有効利用の促進、及び資源化率の向上が期待できる。当課では、焼却灰に硫酸第一鉄とチオ硫酸ナトリウムを添加し、過熱することで重金属類を溶出抑制した焼却灰（以下「溶出抑制灰」という）とする技術の開発に平成 14 年度から取り組んでいる。これまでの試験室レベルでの調査結果では、硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1%を同時に添加し、150 程度で加熱処理を行うことで土壌環境基準を満足する溶出抑制効果を得ている。

引き続き、平成 15 年度の調査では、当技術の実証設備を建設して運用し、実用化に向けた検証と評価を行ったのでここに報告する。

### 2 調査内容

#### 2.1 調査期間

平成 15 年 7 月 30 日から平成 16 年 3 月 25 日まで

#### 2.2 製造技術実証調査

葛西水再生センター内に溶出抑制灰を製造する実験プラント（設計処理能力 30～50kg/h）を設置し、製造技術の実証試験を行うとともに 48 時間にわたる連続運転を実施した。

実証試験にあたっては、薬品添加率や加熱温度等の運転条件を変化させ、処理条件の適正化に対する検討を行った。

なお、調査には集じん方式としてバグフィルターが採用されている葛西水再生センター 5



号炉、及び東部スラッジプラント 3 号炉で発生した焼却灰を用いた。

## 2.3 植栽基盤適用性調査

溶出抑制灰と建設発生土を混合した土壌（以下「灰混合土壌」という）について、植栽を実施し、植栽基盤としての適用性を調査した。調査はパンジー等の草花の生育が順調であるか、また、降雨暴露により重金属類が溶出しないかを 4 ヶ月間にわたり確認した。

なお、建設発生土は東京都下水道局建設発生土改良プラント（以下「発生土改良プラント」という）に搬入された土を使用した。

## 2.4 溶出試験方法について

焼却灰の pH が高い場合、重金属類はカルシウムなどと難溶性塩を形成するため、溶出は抑えられる。しかし、これが酸性雰囲気になると溶出することがある。溶出抑制灰を有効利用する場合、酸性雨等の影響から酸性条件下における利用も想定される。

土壤環境基準に対し重金属類の溶出量を評価する場合、その試験方法には溶媒として脱イオン水を用いる方法（平成 3 年環境省告示第 46 号法（以下、環告 46 号法））が採用される。一方、公定法ではないが土木研究所が提唱している炭酸連続法は、酸性条件下を想定した pH4.0 に調整した炭酸飽和水を溶媒として用いる試験法である。そこで、当技術をより確実性の高い技術するため、炭酸連続法による溶出試験についても行い、溶出処理灰の安全性評価を行った。

表 2.1 溶出試験方法の比較

条 件	環告 46 号法	炭酸連続法
試料性状	5mm 以下に粉砕	有姿のまま
溶 媒	脱イオン水 (初期 pH=5.8 ~ 6.3)	CO <sub>2</sub> 飽和水 (初期 pH=4.0)
pH 調整	溶出試験中は未調整	CO <sub>2</sub> ガスを連続吹込み
溶媒/試料比	10/1	10/1
溶出時間	6 時間連続振とう	24 時間連続攪拌
ろ 紙	1.0 μm	0.45 μm
攪拌方法	水平振とう約 200 回/分	攪拌棒 約 200 回/分

## 3 溶出抑制処理のメカニズム

当処理方法は、汚泥焼却灰に硫酸第一鉄（化学式： $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ）とチオ硫酸ナトリウム（化学式： $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ）を水溶液として添加・混合し、150 程度で加熱することによって、重金属類(主に砒素とセレン)の溶出が抑制される処理プロセスである。

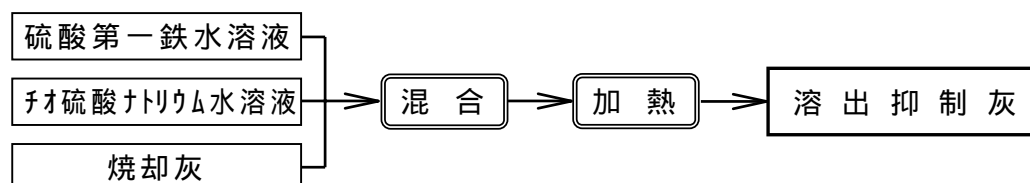


図 3.1 処理フロー

当処理方法のメカニズムは、以下のように推測される。（表 3.1 参照）

### （1）硫酸第一鉄添加

砒素、セレンは陰イオンの形態（ $\text{AsO}_3^{3-}$ 、 $\text{AsO}_4^{3-}$ 、 $\text{SeO}_3^{2-}$ 、 $\text{SeO}_4^{2-}$ ）で溶出するため、陰イオン吸着源となる鉄を硫酸第一鉄水溶液として焼却灰に添加する。硫酸第一鉄は水によく溶けるため、水溶液とすることで  $\text{Fe}^{2+}$  は  $\text{SO}_4^{2-}$  と解離し、粉末試薬の状態よりも拡散される。これを焼却灰と混合することで、 $\text{Fe}^{2+}$  を均一に焼却灰に供給できる。

## (2) チオ硫酸ナトリウム添加

チオ硫酸ナトリウムは、還元剤としての作用を目的として、水溶液として焼却灰に添加する。硫酸第一鉄と同様に水によく溶けるため、水溶液を焼却灰に混ぜることで、チオ硫酸ナトリウムを均一に焼却灰に供給できる。同時に、水は加熱プロセスでチオ硫酸ナトリウムと反応して、硫化水素の発生源となる。

## (3) 加熱

加熱により硫酸第一鉄中の鉄は酸化され、3価の水酸化鉄  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  が生成する。水酸化鉄は水分子を配位することで陰イオンを吸着するため、陰イオン形態で溶出する砒素、セレンが不溶化される。

また、チオ硫酸ナトリウムを水の存在下で加熱すると硫化水素が発生し、これが還元剤として機能するため水酸化鉄では不溶化されにくい6価のセレン( $\text{SeO}_4^{2-}$ )を4価( $\text{SeO}_3^{2-}$ )に、さらには0価にまで還元する。4価のセレンは水酸化鉄により吸着、不溶化され、0価のセレンはそのまま不溶態となる。

なお、カドミウムは、硫酸第一鉄を添加して加熱しただけでは易溶性形態である硫酸カドミウムとなるため、新たなカドミウム溶出が懸念される。しかし、硫酸第一鉄とチオ硫酸ナトリウムを同時に添加し、加熱することで、易溶性形態である硫酸カドミウムが還元されて難溶性の亜硫酸カドミウムが生成するため、溶出が抑制される。

表 3.1 砒素・セレンの溶出抑制処理メカニズム

	硫酸第一鉄溶液 + チオ硫酸ナトリウム溶液添加	加熱
反応模式図	<p>As, Se はフリーに存在</p> <p>△: <math>\text{AsO}_3^{3-}</math>, <math>\text{AsO}_4^{3-}</math>          〇: <math>\text{SeO}_4^{2-}</math>          ⊙: <math>\text{SeO}_3^{2-}</math></p>	<p>Fe(OH)<sub>3</sub> に As, Se 吸着</p> <p>H<sub>2</sub>S による Se(VI)還元</p> <p>●: Se(0) (難溶性)      ⊙: 多数の水分子 (Fe 周囲に存在)</p>

## 4 製造技術実証調査

### 4.1 実証設備

当技術の実証設備の装置化に当たっては、薬品の添加、過熱の処理操作が連続的に実行することを前提として設計した。

実証設備のシステム構成を図4.1に、外観を図4.2示す。灰供給フィーダから焼却灰を定量的に切り出し、処理装置に送り込む過程で薬品溶液を定量的に添加、混合する。処理装置内部では、薬品と混合した焼却灰を加熱しながら攪拌することで、溶出抑制反応を進行させる。処理が完了した溶出抑制灰は溶出抑制処理装置から払い出される。また、処理装置から抜き出した排ガスは、排ガス処理装置でばいじんの除去、水蒸気の除湿、及び有害ガス( $\text{H}_2\text{S}$  など)の吸収を行い大気に放出される。

処理装置本体の構造には、加熱と混合を効率良く行えるよう容器回転型として、外部加熱を行えるジャケットを有した「横型回転ドラム式」を採用した。1時間あたりの焼却灰処理量 30～50kg、容器内滞留時間 20～30分、ドラム内充填率 10～20%、以上を設計条

件とした結果、処理装置の回転ドラムの寸法は  $400 \times 1600\text{mm}$  ( $0.2 \text{ m}^3$ ) となった。

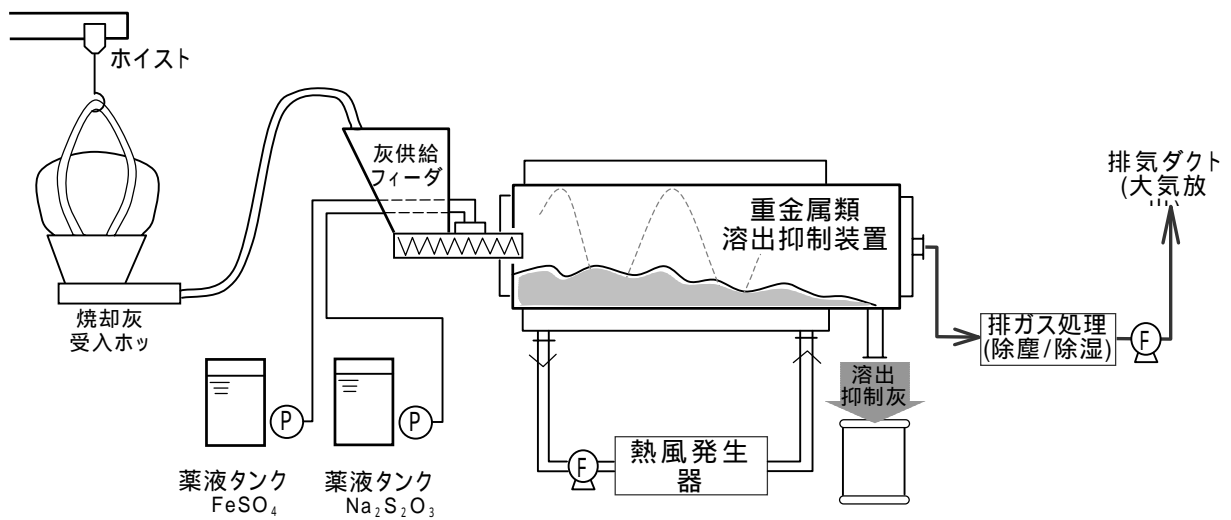


図 4 . 1 システムフロー



図 4 . 2 実証設備外観

#### 4 . 2 実証実験における運転条件

各処理条件の変更は以下の操作によって行った。

##### ( 1 ) 処理量

溶出抑制装置への原灰の切り出しは、灰供給フィーダによって行われる。スクリーンの回転による灰の切り出しについては、回転速度と切り出し量に高い相関があるため、回転数を調節することで処理量を設定した。

##### ( 2 ) 薬品添加率

薬品（溶液）の添加率は、ダイヤフラム式の容積型ポンプのストローク調整を行うことで設定した。

##### ( 3 ) 加熱温度



処理プロセスにおける加熱操作は処理装置の加熱ジャケットへの熱風通風による。熱風発生器出口には調節計を介した温度計を設け、加熱温度を設定した。

#### (4) 処理時間

溶出抑制装置のドラム回転速度によって滞留時間を調節できるので、粉体の投入から排出ピークがあるまでの時間を平均滞留時間として、これを処理時間とした。

#### (5) 排ガス誘引量

排ガス抜き出しファン入口に設けたダンパの開度により、排ガスの誘引量を調節した。

### 4.3 運転条件の最適化調査結果

実証設備の基礎的な特性を把握するために、各処理条件が処理特性に与える影響を調査した結果を以下に示す。

#### 4.3.1 加熱温度の影響

加熱温度を上げることにより処理時間が短縮できると予想される一方で、加熱温度が高過ぎた場合には運転コストが上昇するだけでなく、溶出抑制効果が悪化することも懸念される。

そこで、処理条件のうち加熱温度のみを 150～250 に変化させ、各条件における処理灰の重金属類溶出量を調査した。その結果を表 4.1 に示す。

前述のように、チオ硫酸ナトリウムを加熱することで発生する硫化水素が溶出抑制に作用していることから、加熱温度を高くすることで硫化水素の発生が促進され、理論的には溶出抑制効果は高くなると考えられる。しかし、当結果では、150 から 250 の範囲では加熱温度による溶出量の大きな違いは見られなかった。

一方では、150 の運転では装置内部への処理灰付着量が多くなり、安定運転を行うことが難しくなった。加熱温度を上げることにより処理灰の乾燥が促進し、装置内部への粉体の付着や閉塞が解消されるなど設備の安定性が向上した。

表 4.1 加熱温度の影響

条件	重金属類溶出量 mg/L		
	As	Se	Cd
原灰(未処理)	0.49	0.84	<0.01 (0.002)
加熱温度 150	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	0.01 (0.012)
加熱温度 200	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	<0.01 (0.006)
加熱温度 250	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)
環境基準	0.01	0.01	0.01

備考) 薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

#### 4.3.2 処理時間の影響

溶出抑制処理が装置内で行われるために必要な時間を確認するため、溶出抑制装置のドラム回転速度を変化させ、各条件における処理灰の重金属類溶出量を調査した。回転速度を、2、3rpm の各条件とした場合、焼却灰の装置内における平均滞留時間はそれぞれ 20、15 分程度である。

結果を表 4.2 に示すが、当結果からは各溶出量に処理時間の影響はみられていない。

表 4.2 処理時間の影響

条件	重金属類溶出量 mg/L		
	As	Se	Cd
原灰(未処理)	0.49	0.84	<0.01 (0.002)
処理時間 20 分 (2rpm)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)
処理時間 15 分 (3rpm)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.01 (0.010)
環境基準	0.01	0.01	0.01

備考) 薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

### 4.3.3 薬品添加率の適正化

昨年度までのビーカーテストによる結果では、1 mg/L 程度の砒素、セレンを溶出する焼却灰に対して、溶出抑制処理に必要な薬品添加率は「硫酸第一鉄 3% + チオ硫酸ナトリウム 1%」であると考えていた。処理装置化によって薬品の反応性が低下して、必要薬品量が増加することも懸念されたため、薬品添加率を変化させ溶出抑制効果を確認した。

分析値の一例を図4.3に示すが、薬品添加率の違いを比較した試験の結果からは、Run 2 (硫酸第一鉄 1.0% + チオ硫酸ナトリウム 0.5%)の溶出抑制灰の砒素溶出量が土壤環境基準を超過する結果となった。硫酸第一鉄由来の鉄を核とする水和物が砒素、セレンを固定化することから、硫酸第一鉄の添加量を減らしたことで固定化しきれなかった砒素が溶出してきたものと推察される。また、チオ硫酸ナトリウムについては添加率の相違による溶出抑制効果の違いは確認できなかった。

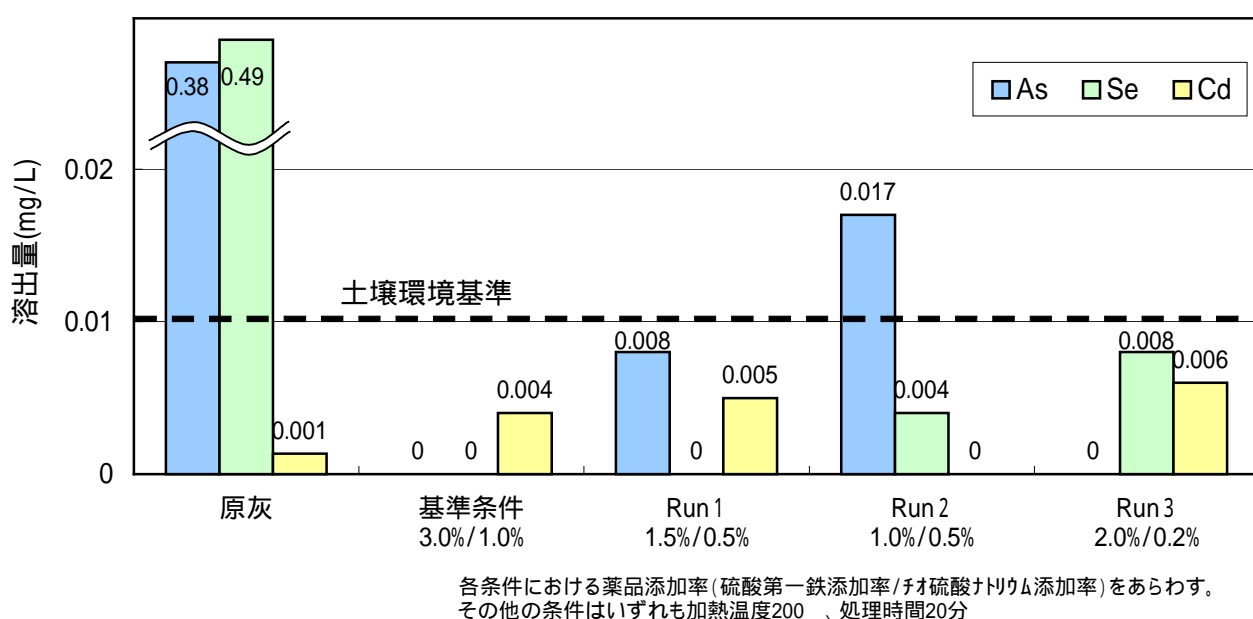


図4.3 薬品添加率による影響

今回試験に使用した程度の性状の焼却灰であれば、目安として硫酸第一鉄は 1.5% ~ 2.0%、チオ硫酸ナトリウムは 0.5% 程度の添加率で溶出を抑制でき、ビーカーテストよりも少ない薬品添加率で溶出抑制が可能であることが確認できた。この要因として、実証設備においてはドラムの回転により焼却灰と薬品が効果的に攪拌され、薬品が効果的に反応したためと考えられた。

### 4.3.4 酸性条件下での溶出特性

土壤環境基準と比較して溶出量を評価する場合、その試験方法には溶媒として脱イオン水を用いる試験法(環告 46 号法)が採用される。一方、炭酸連続法は酸性条件下を想定した pH4.0 に調整した炭酸飽和水を溶媒として用いる試験法である。

そこで、同一試料を環告 46 号法、炭酸飽和法の両試験法による溶出試験を行い、結果を比較することで、溶出抑制灰の安全性評価を行った。結果を図4.4に示すが、原灰に対する試験結果では、炭酸連続法による試験を行うことで砒素、セレンの溶出量が増加しており、これは、酸性条件下において溶出量が増加することを示唆する。

一方、溶出抑制灰においては、炭酸飽和法による試験結果においても溶出量は増加していない。つまり、溶出抑制処理を行った焼却灰は、酸性環境中においても重金属類を溶出させず、当溶出抑制手法が酸性条件下における溶出抑制についても有効であることが確認できる。

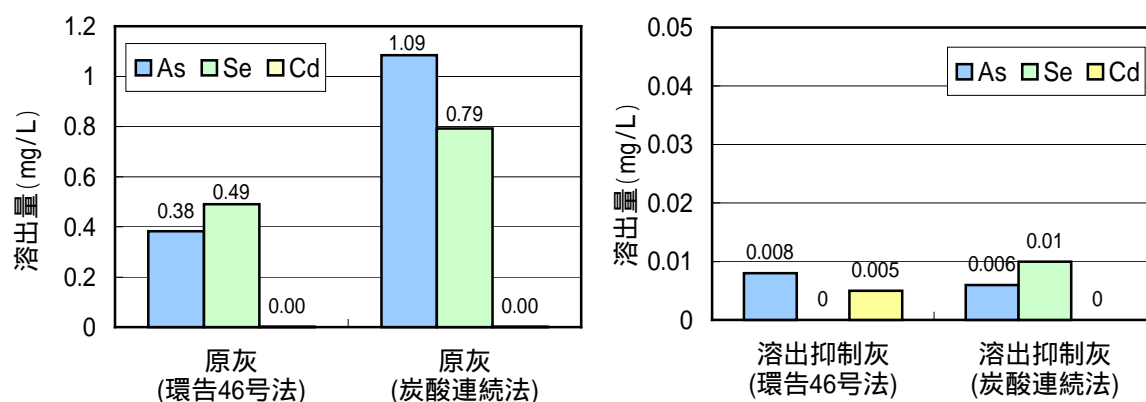


図4.4 溶出試験方法の相違による溶出量の違い

#### 4.3.5 その他の重金属類の溶出量

これまで、砒素、セレン、及びカドミウムについて、溶出抑制の効果を確認してきたが、その他の重金属類に対する溶出抑制効果を確認するため、一部の試料については鉛 Pb、六価クロム  $\text{Cr}^{6+}$ 、水銀 T-Hg を含む 6 成分の溶出量を測定した。その、結果を表 4.5 に示すが、カドミウム、鉛、六価クロムについては、未処理の焼却灰（原灰）においても溶出量は環境基準以下であり、溶出抑制灰についても同様の結果である。

表 4.5 重金属類の溶出量

条件	重金属類溶出量 mg/L						備考
	As	Se	Cd	Pb	$\text{Cr}^{6+}$	T-Hg	
原灰 A (未処理)	0.49	0.84	<0.01 (0.002)	-	-	-	
Run 4	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
原灰 B (未処理)	0.47 (0.468)	0.78 (0.780)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.0005 (0.0000)	
Run 5	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	<0.01 (0.006)	<0.01 (0.005)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0003)	
Run 6	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0003)	
原灰 C (未処理)	0.11 (0.110)	0.39 (0.390)	<0.01 (0.001)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	0.0006	
Run 7	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	0.0065	
環境基準	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.0005	

各 Run の処理条件は以下のとおり

Run4: 加熱温度 200 、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%  
 Run5: 加熱温度 200 、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 2.5%、チオ硫酸ナトリウム 0.7%  
 Run6: 加熱温度 250 、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1%  
 Run7: 加熱温度 200 、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

しかし、水銀については、原灰 C に対して処理を行ったところ、溶出量が増加し、環境基準を超過している。

#### 4.4 長時間連続運転調査

実証設備を連続して稼動することにより、長時間運転時の設備の状態を把握し、実設備化するにあたっての課題を抽出するとともに、運転管理手法を確立することを目的として、48 時間にわたる連続運転を行った。

連続運転期間中の運転条件は表 4.6 のとおりとし、焼却灰供給量は、焼却灰の消費量及び切り出し重量を実際に計量し、変動が見られた場合にはフィーダ回転数を調節した。

表 4.6 連続運転条件

項目	設定値
原灰供給量	40kg/h
薬品添加率	硫酸第一鉄 3% チオ硫酸ナトリウム 1%
加熱温度	200
処理時間	平均 20 分

##### 4.4.1 運転状況

連続運転期間中、施設が緊急停止するような大きな問題はなく、48 時間で計 1700kg の焼却灰について処理を行うことができた。

以下に示すようなトラブルが発生したが、装置のシステム構成や仕様の見直しが必要となるような問題ではなく、このまま実用運転を行った場合でも装置として実用に耐え得るものとする。

##### (1) 薬品添加量の低下

運転開始から 10 時間経過後、硫酸第一鉄供給ポンプの吸い込み部にあるフィルタに目詰まりが発生し、一時的に添加量が低下した。薬液タンク液面レベル及び薬液タンク重量の推移から添加量の低下を確認できたため、焼却灰と薬品の供給を停止し、フィルタ洗浄などの処置を行って不具合を解消した後に供給を再開した。薬品残量などから薬品添加量の低下時間は約 2 時間程度と推定される。

これは、実証試験を通じて初めての現象であり、その間フィルタ部の洗浄は行っていなかったため起こったもので、連続運転を行ったために生じたトラブルではないと考えられた。実設備においては、定期的な清掃を行い、設置環境に配慮して砂塵の浸入などが起こらないような対策を講じる必要がある。

##### (2) 焼却灰供給量の低下

運転開始から 35 時間経過した頃から、焼却灰供給量の低下（最終的には約 15%減）が発生した。これは、原因は不明であるが一時的に焼却灰の切出し量が低下し、相対的に溶媒（水）添加率が増えたことがフィーダ内に焼却灰が付着する原因となり、フィーダ内が閉塞したためさらに切出し量が低下したと考えられる。

なお、事前調査の過程においても、溶媒添加量を減らすことでフィーダ内部への灰付着量が低下することを確認しており、実設備化にあたっては、原料の切り出し装置に制御系（例えばロードセルと自動可変速モータの組み合わせなど）を設置し、供給量の変動を防止するなど、切り出し量の調整機構を設けて常に供給量の適正化を図ることで、トラブルを防止する必要がある。

##### 4.4.2 測定結果

##### (1) 土壤環境基準との比較

連続運転処理を行った溶出抑制灰に対し、溶出試験を行った結果を表4.7に示す。水銀を除く各項目については、環境基準を超える溶出はみられていない。

一方、水銀については「4.3.5 その他の重金属類の溶出量」における結果と同様に、環境基準を超過する試料がある。

なお、これらの試料に対しては再分析を行ったが、結果は同様であった。

#### (2) 水銀の溶出

この原因の一つとして、原灰に含まれる水銀が多いことが考えられる。水銀の沸点は357℃であり、従来の排ガス処理装置（サイクロン＋電気集塵機）においては気化したまま通過し、ほとんど捕捉されていなかった。しかし、近年は集塵装置としてバグフィルタ等が採用され、集塵温度が低くなっているため（200～250℃）、焼却灰に付着、移行している割合が増えていると考えられる。しかし、原灰において溶出を検出していない一方で、処理後に溶出が起きていることから、処理プロセスに要因があると考えられる。

焼却灰の成分や処理条件などから存在する可能性のある水銀化合物について、表4.8に示す。溶出抑制処理は還元反応であることから、Hg(0)の生成が溶出要因と考えられる。

なお、溶解度が高く溶出が懸念されるHgOやHg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>については存在する可能性が低く、その他の化合物についても環境基準を大きく超えて溶出する可能性は低いと考えられる。

表4.8 水銀の溶出形態

	溶解度 [g/dm <sup>3</sup> ]	溶出の可能性について
Hg(0)	$2.5 \times 10^{-5}$	0.025mg/L までなら溶出する可能性がある
Hg( )O	$5.2 \times 10^{-2}$	原灰の方がHgOの存在する可能性が高い
Hg( )SO <sub>4</sub>	-	溶出しない
Hg( ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.35～0.47	Cdについても同様の反応により溶出する可能性がある 処理プロセスを経てHg <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> になる可能性が高い
Hg( ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	$1.5 \times 10^{-11}$	溶出しない
Hg( )S	$1.25 \times 10^{-5}$	処理プロセスを経てHg <sub>2</sub> Sなどになる可能性が高い 0.013mg/L までなら溶出する可能性がある
Hg( ) <sub>2</sub> S	$2.8 \times 10^{-23}$	溶出しない

#### (3) 炭酸連続法による溶出量

酸性条件下における溶出特性を確認するため、炭酸連続法による溶出試験を行った結果

表4.7 溶出抑制灰溶出量

採取時刻	重金属類溶出量 mg/L					
	As	Se	Cd	Pb	Cr <sup>6+</sup>	T-Hg
原灰 (未処理)	0.16 (0.159)	0.49 (0.492)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (N.D.)
4時間後	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0009
16時間後	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0008
28時間後	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0011
40時間後	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.00044)
46時間後	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.00047)
環境基準	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0005

採取時刻は連続運転開始後の経過時間

を表 4.9 に示す。

前述の「4.3.4 酸性条件下での溶出特性」における結果と同様、原灰においては砒素、セレンの溶出量が大きく増加しているが、溶出抑制灰に対しては溶出量に変化がみられず、再度、酸性条件における砒素、セレンの溶出に対する安全性が確認できた。

表 4.9 炭酸連続法による溶出試験結果

	環告 46 号法				炭酸連続法			
	pH	As	Se	Cd	pH	As	Se	Cd
原灰 (未処理)	8.4	0.16 (0.159)	0.49 (0.492)	<0.01 (0.000)	6.1	0.24 (0.240)	0.68 (0.68)	<0.01 (0.002)
28 時間後	5.6	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	5.1	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)
46 時間後	5.7	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	5.5	<0.01 (0.001)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)
環境基準	-	0.01	0.01	0.01				

## 5 植栽基盤適用性調査

溶出抑制処理灰の資源化用途のひとつとして、植栽基盤としての適用性を調査した。

建設発生土に溶出抑制灰を 10% 混合した土壌と、比較のため黒ぼく土、建設発生土（単体）を検査対象とした。

植栽機能試験の結果、灰混合土壌は全炭素、全窒素等の有機質成分が乏しい一方で、植物の生理活動に關与する交換性カリウムや、エネルギー代謝や物質合成に欠くことのできない可給態リン酸が高いなどの特長があった。（表 5.1 参照）

表 5.1 植栽基盤適用調査における検査土壌

検査土壌	植栽機能試験結果
灰混合土壌	10mm 以下にスクリーニングした建設発生土に、溶出抑制灰を重量比で 10% 混合した土壌。 固相率は高いが、有効水分保持量、及び透水係数は概ね良好である。土壌 pH は 7.5 の微アルカリ性である。全炭素、全窒素等の有機質成分に乏しいが、交換性カリウムは多く、可給態リン酸は 6280mg / kg と非常に多い土壌である。
黒ボク土	比較対照用の土壌。千葉県八街市で採取した黒ぼく土を 10mm 以下にスクリーニングしたもの。 透水係数、有効水分保持量、三相分布等の土壌物理性は良好である。養分性は、有機質成分、交換性カリウムは良好範囲であるが、可給態リン酸が少ない土壌である。pH は 6.9 とほぼ中性である。
建設発生土	発生土改良プラントに搬入された石灰添加前の原料土を 10mm 以下にスクリーニングしたもの。 固相率は高いが、有効水分保持量、及び透水係数は概ね良好である。土壌 pH は 8.1 のアルカリ性であり、良好範囲を若干超える。全炭素、全窒素等の有機質成分に乏しいが、可給態リン酸、交換性カリウムは多い土壌である。

調査は、図 5.1 に示す構造の植栽枡を複数個設置し、各検査土壌を 180kg 入れて敷きならし、窒素、リン、カリウムを各々 20g/m<sup>2</sup> 施肥したものに、パンジーなどの草花を植栽し、草花の生育が長期に渡り順調であるかを確認した。植栽枡は、後方の脚を 5cm 程高くして、前方から滲出水が採取できる構造としている。

約 4 ヶ月間の調査期間中、定期的に花径、草丈、葉張りを測定し、これらを生育指数（植

栽当初の数値を 100 として数値化した値)として評価を行った。このうち、パンジーの花径、及び草丈の各指数の経過を図 5.2 に示す。各検査土壌とも、安定した生育をみせているが、灰混合土壌は、特に花径育指数において大きな数値となっているなど、他の検査土壌と比較して良好な発育をみせていることがわかる。

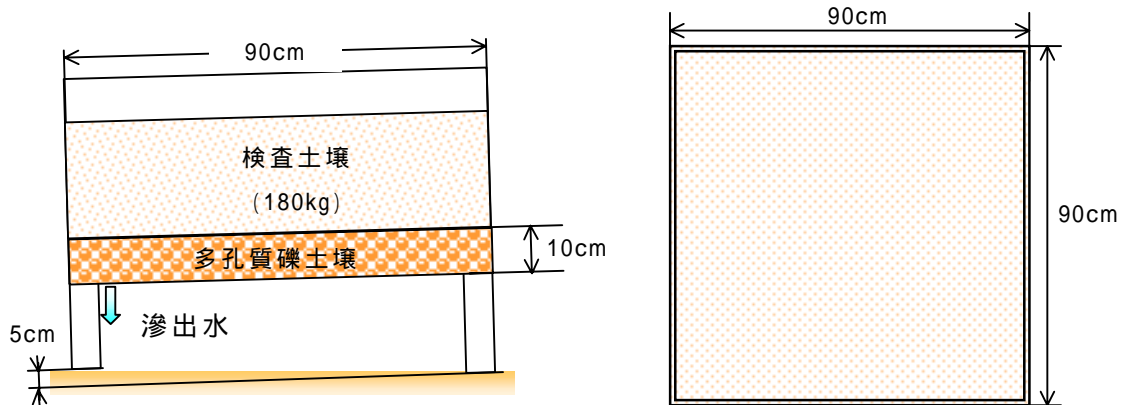


図 5.1 植栽試験柙の構造

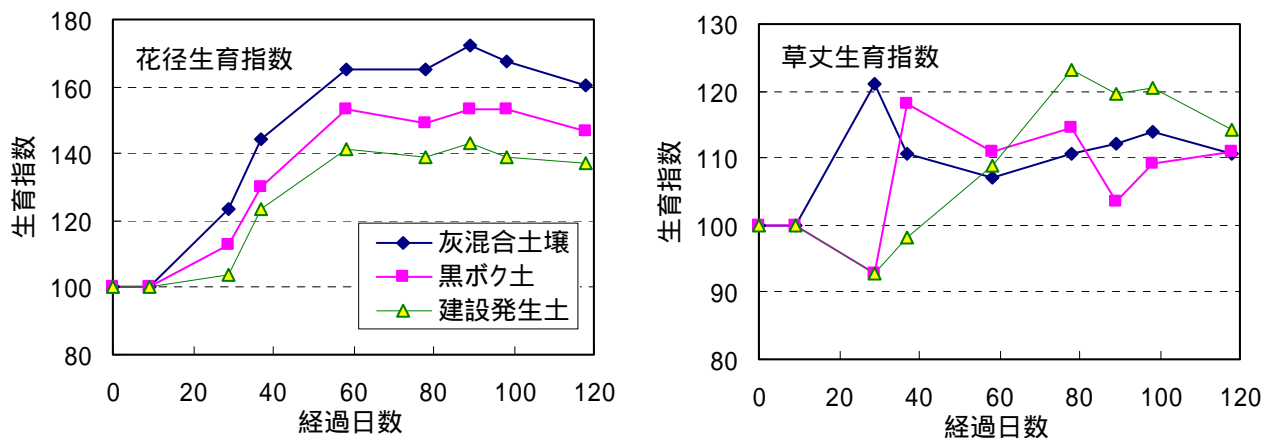


図 5.2 パンジーの各生育指数

さらには、灰混合土壌の降雨時などの排水の安全性を確認するため、植栽柙からの滲出水を採取し、重金属類濃度を確認するとともに、灰混合土壌に対する溶出試験を行った。結果を表 5.2 に示す。

土壌及びその滲出水は、時間の経過とともに重金属類の溶出量、及び濃度が増加することなく、4 ヶ月間の調査期間中、土壌環境基準を満足していることから、植栽基盤として有効利用するうえで問題はないと考えられる。

表 5.2 灰混合土壌の安全性評価試験

	経過 日数	pH	重金属類濃度及び溶出量 mg/L						備考
			As	Se	Cd	Pb	Cr <sup>6+</sup>	T-Hg	
滲出水 における濃度	29 日	7.2	<0.01 (0.008)	<0.01 (0.009)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	58 日	7.4	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	6.7	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
土壌に 対する 溶出試 験	0 日	7.6	0.01 (0.012)	<0.01 (0.009)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	環 告 46 号 法
	58 日	6.5	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	8.1	<0.01 (0.007)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	6.8	0.01 (0.011)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	炭 酸 飽 和 法

## 6 まとめと今後の展望

下水汚泥焼却灰からの重金属類の溶出抑制技術について、実証設備に展開して試験を行った結果、加熱温度 200℃、硫酸第一鉄 1.5～2.0%、チオ硫酸ナトリウム 0.5%程度の処理条件で砒素、セレンなどの重金属類を溶出抑制できることが判明した。

しかし、一部の試料については水銀の溶出量が土壌環境基準を超過することがあった。

今回、設置した横型回転ドラム式の実証装置は、大きなトラブルもなく 48 時間の連続運転を行うことができ、将来の実施設化に向けて、本方式を採用できることが確認できた。

また、建設発生土に溶出抑制灰を 10%混合した灰混合土壌について、植栽基盤としての適用性を調査するため、パンジーなどの生育試験を行ったところ、約 4 ヶ月の調査期間を通じて良好な生育を示した。土壌及び滲出水は時間の経過とともに、重金属類が溶出することなく、植栽基盤として有効利用できることが判明した。

今後については、水銀の溶出原因を調査するとともに、溶出抑制灰の具体的な有効利用用途について検討を進めていく予定である。



## 7 - 3 低コストマイクロ水力発電設備の実用化研究

施設管理部 施設保全課 菅野 雅春

### 1 はじめに

近年、地球規模での環境保全が叫ばれており、地球温暖化対策はその代表例である。エネルギーに関しては、化石燃料を消費する従来のエネルギー利用に対し、二酸化炭素等の地球温暖化ガスを発生しない自然エネルギーの導入が進められている。

自然エネルギーはクリーンで再生可能なエネルギーであり、風力発電、太陽光発電、バイオマス発電等に活用されているが、本研究では、技術的にも成熟し安定した電源が得られる水力発電に着目した。下水道事業では、下水処理の後、河川や海に放流される豊富な水量の処理水があるが、当局ではこれまで再生水利用や処理水のもつ熱エネルギーの利用等を行ってきた。今回、処理水の持つ流量と落差という未利用エネルギーを利用した水力発電に取り組むこととした。

本研究は、未利用水力源の掘り起こしと経済性に見合う設備構築のための技術開発に取り組んだものであり、下水処理水で発電する低コストマイクロ水力発電設備として実用化を進め、環境対策に貢献するものである。

### 2 マイクロ水力発電の特徴

水力発電はその発電規模により、大水力発電、中水力発電、小水力発電、ミニ水力発電、マイクロ水力発電に分類される。このうち、出力 100kW から 1,000kW 程度がミニ水力発電、100kW 程度以下がマイクロ水力発電と呼ばれている。

マイクロ水力発電の主な特徴を以下に示す。

- (1) 発電時に二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物等を発生しないクリーンなエネルギーである。
- (2) 水は循環しており、繰り返し使える再生可能なエネルギーである。
- (3) 他の発電システムに比較し、発電効率が 80～90%もあり、エネルギー変換効率が非常に高い。
- (4) 太陽光発電や風力発電のような他の自然エネルギーと異なり、日照や風の影響を受けることなく、安定した発電が可能である。
- (5) ダムを造ることなく発電ができる。
- (6) 比較的簡易な設備のため、短期間の施工が可能であり、維持管理も容易である。

### 3 研究の概要

本研究は、ノウハウ＋フィールド提供型共同研究として、東京電力株式会社との間で実施した。この研究は、葛西水再生センター南系施設にマイクロ水車発電設備を設置し、水再生センターにおける放流時の落差を利用したマイクロ水力発電に関して、実用化に向けた技術開発及び検証確認を目的とした。

本研究では、次の 3 項目の内容について検証確認を行った。

- (1) 既設土木構造物の改造を最小限とする取水方式の適応性の実証
- (2) 施工及び維持管理の簡素化
- (3) 潮位変動と流量変動に応じた運用の最適化

図 1 にマイクロ水力発電の全景を、図 2 にマイクロ水車発電設備を示す。



図1 マイクロ水力発電の全景



図2 マイクロ水車発電設備

#### 4 マイクロ水力発電設備の諸元

本研究のマイクロ水力発電設備の諸元は次のとおりである。

##### (1) 発電所の諸元

ア 設置場所：葛西水再生センター南系処理施設

イ 出力：最大 37kW

ウ 使用水量：大開度 0.93m<sup>3</sup>/s

中開度 0.45m<sup>3</sup>/s

小開度 0.34m<sup>3</sup>/s

エ 有効落差：5.05m

オ 総合効率：大開度 0.81

中開度 0.75

小開度 0.61

##### (2) 水車設備

ア 種類：横軸プロペラ水車（マイクロ水車）

イ 水圧管路

圧力：0.92MPa、全長：16.37m、口径：700mm

##### (3) 発電機設備

ア 種類：三相交流誘導発電機

イ 定格

容量：37kW、力率：82%、電圧：400 V、周波数：50Hz、回転数：1500rpm、

結線：星型結線、冷却方式：空冷

#### 5 水力発電の発電出力

水力発電の発電出力は、原動機である水車に流れ込む水の流量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) と水の流れ落ちる有効落差  $H$  (m) との積で求められる。この算出式を次式に示す。

$$P = 9.8 \times \eta_w \times \eta_g \times Q \times H$$

$P$ ：発電出力 (kW)     $\eta_w$ ：水車効率、     $\eta_g$ ：発電機効率、 $Q$ ：流量 (m<sup>3</sup>/s)  $H$ ：有効落差 (m)

ここに示す有効落差とは、配管ロス等を除いた水車の運転に利用される全水頭を意味する。

葛西水再生センターにおける落差が 5m 程度であるように、水再生センターの放流落差は一般的に小さい。しかし、流量に相当する放流量は豊富に得ることができ、水力発電は十分可能である。

## 6 実施結果

### 6.1 既設土木構造物の改造を最小限とする取水方式の適応性の実証（サイホン取水方式の導入）

取水方式では、次の条件を満足することを検証した。

- (1) 施工時、下水処理機能に影響を与えないこと
- (2) 計量槽に大規模な改造を加えないこと
- (3) 水路の施工費用を可能な限り安価にすること

取水位置により様々な取水方式があるが、その中でサイホン取水方式は、既設土木構造物に対し、最小限の改造で取水管等の設置が可能であり、構造物に特別な補強等を行う必要がないという利点がある。このため、本マイクロ水力発電には最適と考え採用することとした。しかし、サイホン取水方式は、農業用水等に採用実績があるものの、本水力発電設備のように、農業用水等に比べ口径の大きい配管を使用する設備での採用実績はこれまでなかった。そこで、本研究では、サイホン取水方式のマイクロ水力への適応性について検証確認をした。

検証内容として、次の事項について確認した。

#### (1) 充水確認

真空ポンプによる管内充水の確認

#### (2) サイホン効果の確認

管内に流れが生じたときに継続してサイホン効果が維持できることを確認した。

サイホン管の取付けについては、下水処理施設を停止することなく、また、計量槽に大規模な改造や補強を加えることなく、工期内に順調に施工することができた。

サイホン取水方式の適応性については、真空ポンプの引抜による充水が確認でき、また、一旦確立したサイホン効果は安定して維持継続できた。

図3に、サイホン取水方式による発電原理を示す。

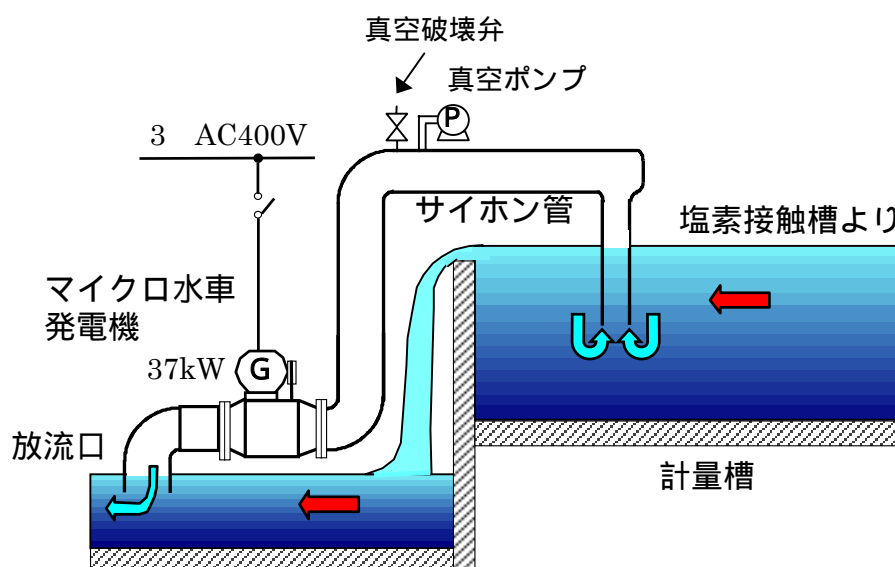


図3 サイホン取水方式による発電原理

## 6.2 施工及び維持管理の簡素化

### 6.2.1 施工の簡素化

流水内に配管を設置する場合、流水による振動が配管に加わり、さらに水車の振動がこれに加わるため、配管に振動が生じないようにする必要がある。本研究でも、放水管振動防止対策として、当初は管を固定する予定であった。しかし、この固定作業を行うためには水路を空にする必要がある。ところが、水路内を排水するためには、長時間下水処理施設を停止しなければならず、固定作業は事実上不可能であった。そこで、本研究では、固定しなくても、放水管に生じる振動が水車に伝搬しないように、伸縮継手を採用する工夫を施した。

この伸縮継手を用いた結果、始動時や無負荷運転時にやや振動が生じたものの、水車設備に影響を与える程ではなかった。これにより、振動対策（施工）の簡素化が図れ、工程短縮効果も得られた。

### 6.2.2 維持管理の簡素化

維持管理の簡素化を図るため、水車の自動運転化並びに監視システムのスリム化を実施した。

水車の運転については、真空ポンプによるサイホン確立の起動時を除き自動運転とした。異常時に動作する電力系統の保護継電器の設置や水車の流量が最低流量以下になったとき水車が安全に停止する保護回路等を設けた。

監視システムでは、汎用遠方監視システムを導入することとした。本監視システムは、低コスト化の観点から、低価格な汎用品によるシンプルなシステムの採用、通信網に公衆回線の活用、監視項目数を集約化するなどにより維持管理の簡素化を図った。

この結果、通信速度は高速とは言えないが、実用上、支障を生じる程ではなく、遠方監視システムとして十分機能を発揮している。図4に監視システムの構成を示す。

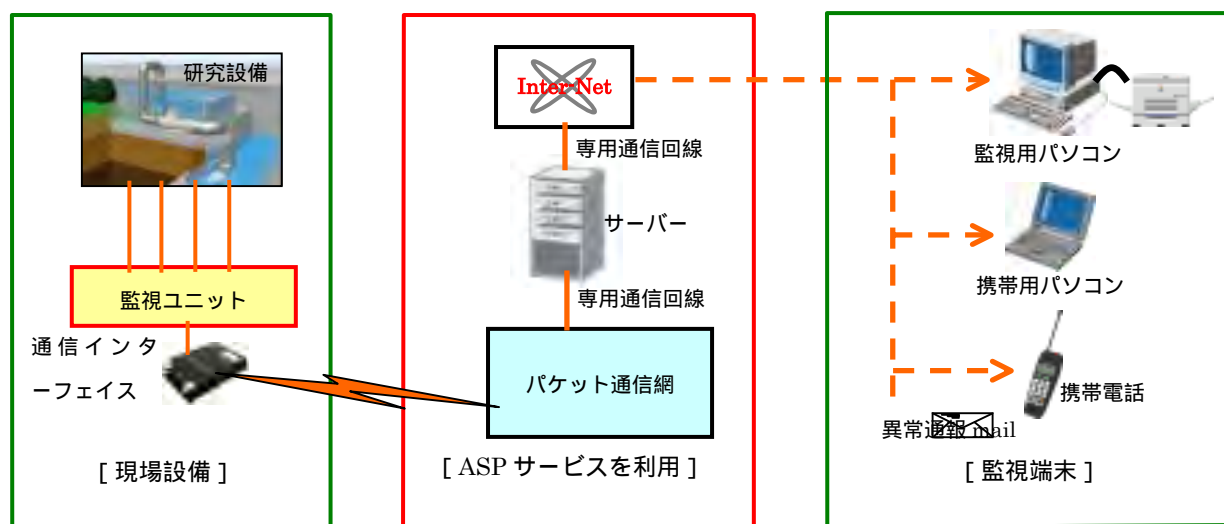


図4 監視システムの構成

## 6.3 潮位変動と流量変動に応じた運用の最適化

### 6.3.1 潮位変動

葛西水再生センターは、河口部に位置するため潮位の変動に伴い、放流水位に変動が生じる。このため、潮位変動に対しても安定した運転が継続できるよう、放水管先端にU字管工法を採用した。

放流水位が変動する地点では、それに伴い落差も変動する。図5に示すように、放水管先端が水没状態である場合の落差は「 $H_0$ 」である。これが、放流水位が低下し、放水管先端が大気開放状態になると、図6に示すように、落差は水車中心である「 $H_1$ 」まで減じ、発電出力も減じる。

安定した発電出力を得るため、図7に示すように、放水管の先端をU字に加工した。この効果で、放水管先端部が大気開放状態となった場合でも、管内は常に満管の状態の水が流れ、落差「 $H_0$ 」を確保することが可能となった。

図8に、平成14年8月13日の潮位変動と落差の時間変動を示す。葛西水再生センターの場合、潮位がおおむね-0.1mTP以下となると放水管の先端が露出する。しかし、この図からも明らかなように、潮位が-0.1mTP以下となっても有効落差は4.6mと一定で推移しており、U字管の効果が顕著であることが検証できた。

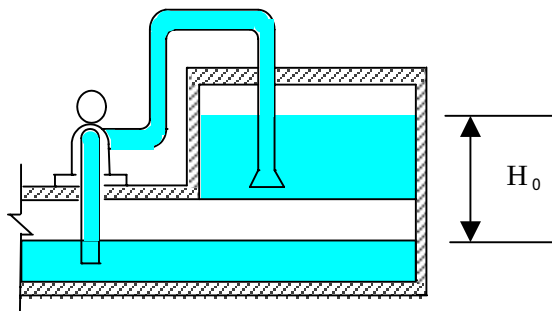


図5 落差「 $H_0$ 」

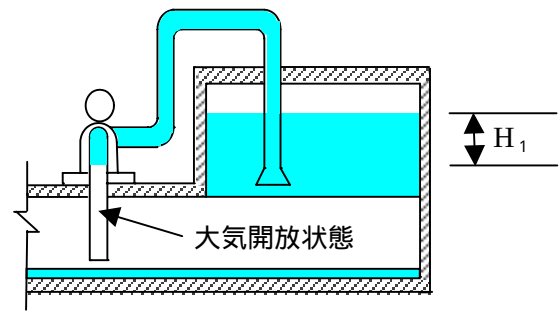


図6 落差「 $H_1$ 」

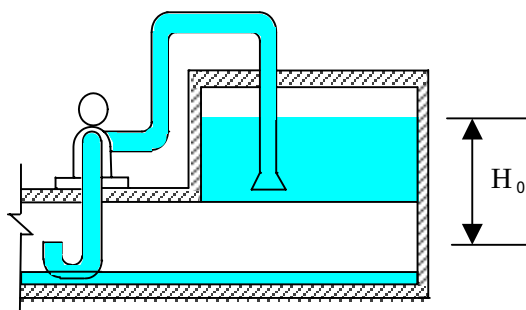


図7 U字管

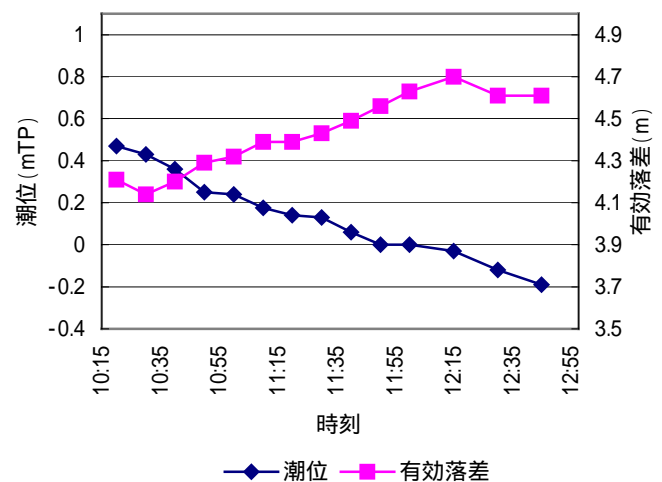


図8 潮位変動と落差

### 6.3.2 流量変動

マイクロ水車に多く使用されている固定羽根プロペラ水車は、フランス水車等の他の水車と比較し、落差変動に対する使用水量の変動が小さく、条件によらずほぼ一定量を導水する定流量特性という特徴がある。葛西水再生センターでは、大雨等の特殊事情を除き、年間を通じて安定した流量が得られるとの予想から本研究で用いたマイクロ水車は、当初、ランナベーン、ガイドベーンを半可動翼構造とし、一旦開度調整を行った後は固定した状態で運転を行うものであった。しかし、実際には、

短時間に大きな変動で流量が変動することが判明した。その流量の状況の特徴は、1 日の中での時間的な変動が非常に大きいという点である。

このように、短時間に大きな流量変動を伴う場合、従来の半可動翼構造の水車を適用すると、計量槽への流入水量が少ない場合、水車の定流量特性から計量槽の水位低下を招く。水位低下がさらに進むと流入管にエアが混入してサイホン効果が消滅し水車の停止を伴うことになる。

この課題を解決するため、ランナベーン可動方式を採用した。マイクロ水車には、水車の使用水量を調整するガイドベーンと、水車に流入する水のエネルギーを効率良く水車の軸動力に変換するランナベーンとがある。流量の変動に伴う可動翼制御としては、両方のベーンを可動し、協調制御を行うことが最も効率の高い方法である。しかし、その反面、制御装置や機構部が複雑となり、コストも高くなる。このため、今回は、ランナベーンのみを可動翼とした。これは、ガイドベーンを可動とするよりも、ランナベーンを可動とする方が、流量変動に対する運転可能範囲が広く、また、設計点から離れた運転点における効率低下がゆるやかなことによる。さらに、本研究では、コスト増を極力押さえるため、流量に応じた連続的な開度調整ではなく、3 段階の開度による段階制御方式とした。

本設備におけるランナベーンの各開度における設定流量は以下のとおりである。

- (1) 大開度：3,348 m<sup>3</sup>/h (0.93m<sup>3</sup>/s:発電機の最大能力である 37kW の出力が可能な流量)
- (2) 中開度：1,620 m<sup>3</sup>/h (0.45m<sup>3</sup>/s)
- (3) 小開度：1,224 m<sup>3</sup>/h (0.34m<sup>3</sup>/s:水車の運転可能な最低限界流量)

図 9 に、本マイクロ水車の断面の構造を示す。

水車の改造は、平成 15 年 1 月に完了した。その後、2 月より調整運転に入り、3 月より連続運転を開始した。

ランナベーンを可動翼に改造した効果を示す指標のひとつに、稼働率がある。稼働率は、次式により求められる。

$$\text{稼働率}(\%) = \frac{\text{運転時間}(\text{h})}{\text{期間中総時間}(\text{h})} \times 100$$

稼働率が高いことは、長期間安定した運転が継続できていることを示している。水車改造前には、水車の定流量特性のため、度々計量槽の水位低下を招き、長期連続試験そのものができなかった。水車改造後に連続運転が可能となり、稼働率は、3 月は 91%、4 月以降は 100%と、安定した運転が継続できていることが検証できた。

図 10 に、平成 15 年 2 月 14 日の流量変動に対する発電出力の変動を示す。この図から、流量変動に対し、おおむね 3 段階の発電出力が得られていることがわかる。ランナベーンの段階制御が十分機能していることが明らかであり、流量に応じた効率的な運転が行われていることが検証できた。

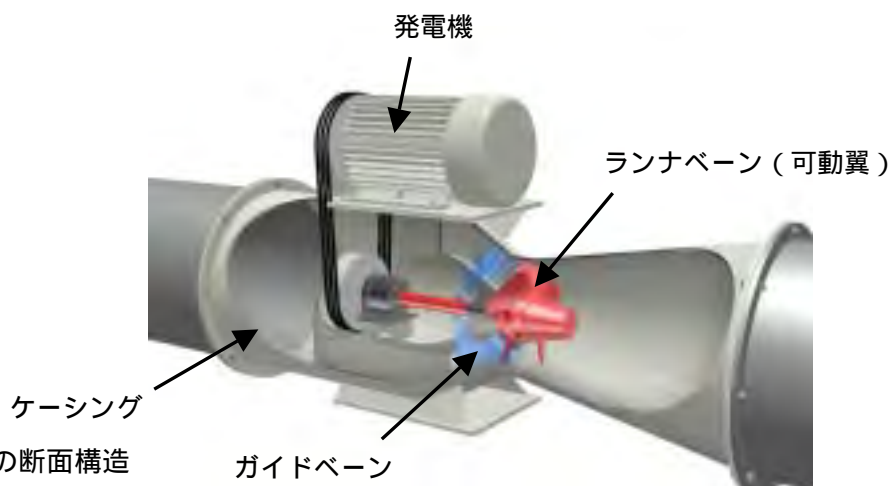


図 9 マイクロ水車の断面構造



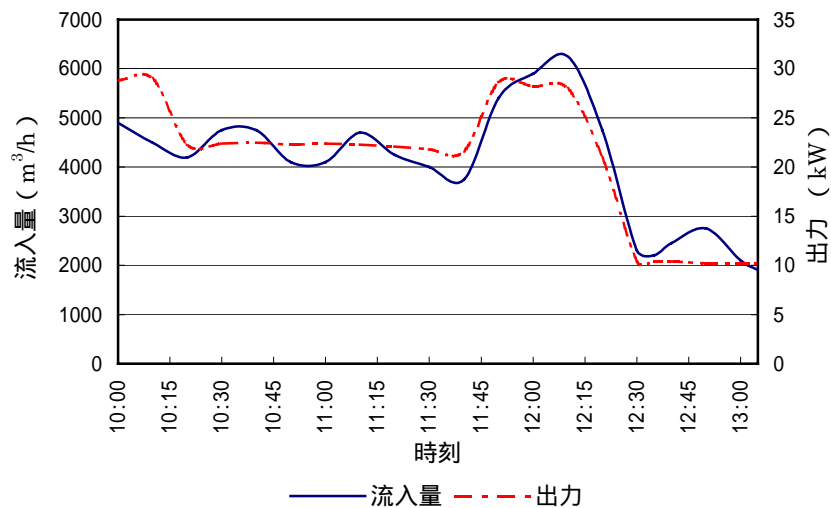


図 1 0 流量変動と発電出力

## 7 おわりに

当局では、これまで、水再生センターの放流落差を活用した水力発電について様々な検討を行ってきた。しかし、何れの検討でも、建設コストに見合うだけの発電量が得られず、実機導入までには至らなかった。そのため、本研究ではこのコスト面を重要視し、導入可能な技術開発を進めた。その結果、サイホン取水方式の導入、伸縮継手の採用、汎用監視システムの活用等により低コスト化が実現できた。また、U 字管の採用、ランナベーンの可動化等により、安定した効率的な運転が可能となった。

水再生センターにおけるマイクロ水力発電は、太陽光発電や風力発電等の自然エネルギーを活用した他の発電と異なり、下水処理が続く限り 24 時間連続運転が可能であり、大変魅力ある発電システムである。



## 8 . 国際論文

### 8 - 1      **Innovation of Activated Sludge Model** Developed by IWA

## **8 - 1      INNOVATION OF ACTIVATED SLUDGE MODEL DEVELOPED BY IWA**

Kiyoaki Kitamura and Masami Ebisawa

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government  
8-1, Nishi-Shinjuku 2-chome, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8001 JAPAN  
Kiyoaki\_Kitamura@member.metro.tokyo.jp

### **ABSTRACT**

TMG (Tokyo Metropolitan Government) needs to remove nitrogen and phosphorus to meet the regulatory requirements and mitigate the eutrophication of Tokyo Bay, which is the receiving waters of the effluents. It has to be done efficiently under the tight budget. For this purpose, efficient operation of the biological nutrients removal processes is needed. TMG built new software to innovate Activated Sludge Model developed by International Water Association for its practical use. The new software is now under use at wastewater treatment plants in the downtown of Tokyo.

### **KEYWORDS**

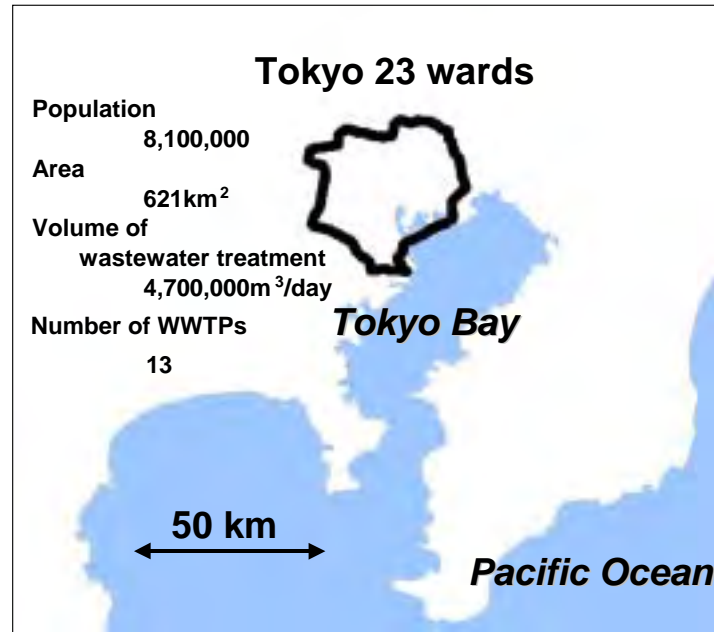
Activated Sludge Model (ASM), nitrogen removal, phosphorus removal, simulation

### **INTRODUCTION**

Water pollution of enclosed Tokyo bay has been problematic, in spite of the achievement of full coverage of sewage system in Tokyo 23 wards in 1994, which is downtown of Tokyo and the most urbanized area in Japan. Especially in summer period, there occurs red tide phenomenon frequently. This phenomenon is considered to be eutrophication caused by pollution of nitrogen and phosphorus. These nutrients are partly coming from wastewater treatment plants (WWTPs). In order to meet public request and new strict regulation of nitrogen and phosphorus to WWTPs, TMG has to deal with the problem efficiently under the tight budget control.

Removal of nitrogen and phosphorus at WWTPs is commonly carried out with advanced biological treatment processes. However, they need longer hydrodynamic retention time (HRT) than conventional activated sludge processes. It is difficult to find extra-sites for introducing advanced treatment processes at WWTPs in urbanized areas such as Tokyo 23 wards.

TMG is now experimenting new technologies to remove nitrogen and phosphorus efficiently, while constructing full scale new advanced WWTPs using verified technologies. One of the new technologies is practical use of ASM (developed by IWA in 1993), which is referred in this article. ASM is applicable not only to advanced biological treatment processes but also to conventional activated sludge processes, if aeration is restricted at the beginning part of aeration tanks or if nitrification is enhanced.



**Figure 1 Outline of Tokyo 23 wards**

At first, TMG regarded that practical use of ASM was impossible because of its complexity. However, ASM can be useful tool for efficient and effective removal of nitrogen and phosphorus because it enables operators to predict effluent water qualities by setting data on structures of bioreactors, water qualities of influent, and operational conditions. Therefore, TMG decided to adopt it by making innovation with new software for adaptation to the local and practical use.

## **METHODS**

In order to utilize ASM at WWTPs regularly for operational purposes, the following requirements have to be satisfied.

The new software needs to be,

- (i) operated in Japanese,
- (ii) handled by operators with no knowledge about ASM,
- (iii) based on the measured daily water qualities data,
- (iv) and compatible with personal computers.

For the first requirement, graphical user interface (GUI) was developed. It evokes process control to the operators in a schematic way. Many commercial available software products based on ASM adopt CUI (character user interface) or poor GUI. This is one reason to avoid ASM software to be used by general engineers at WWTP.

Another reason for preventing practical use of ASM was the technical difficulties of ASM for ordinary operators of WWTPs. Operators have to understand and interpret the meanings of various equations and parameters and enter values in order to predict effluent qualities when they use commercially available software of ASM. It is impractical for operators to do so. These equations and parameters are incorporated into the software. Therefore, operators of WWTPs are free from setting of complicated parameters. All operators have to do is to enter measured water qualities and operational conditions. For advanced operators, functions to set the detailed parameters remain optional.

TMG have carefully considered in detail to establish the third requirement. The index for the organic components used in ASM is  $COD_{Cr}$ . However,  $COD_{Mn}$  and BOD are usually monitored as the index of organic compounds in Japan. The method for measuring  $COD_{Cr}$  can detect almost all of organic compounds while  $COD_{Mn}$  and BOD only detect readily degradable compounds. Moreover,  $COD_{Cr}$  has to be fractionated to six organic variables defined in ASM. In order to obtain the variables from  $COD_{Mn}$  or BOD, influent samples are examined through two steps. The first step is to convert measured  $COD_{Mn}$  or BOD into  $COD_{Cr}$ . The second step is the fractionation of  $COD_{Cr}$  to six organic variables. Some of investigated ways to convert measured data into ASM variables are taken in by the software.

The fourth strategy is also needed to be used the software widely in Tokyo 23 wards for improvement of water quality. As the performance of general purpose personal computers has been improved in a recent few years, special technologies are not needed for developing the software.

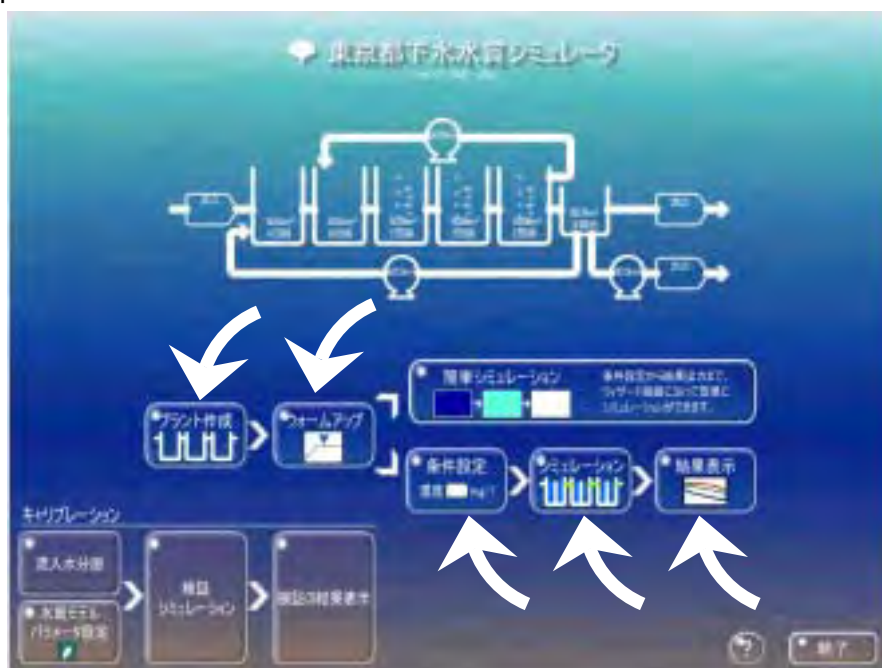
The simulation software predicting water quality of treated wastewater was built. Characteristic functions of the software are described in RESULTS section.

## RESULTS

Characteristic functions and user-friendly operation screen equipped with the software are described below. These functions were built so that they are associated with demands of job sites. Comparisons between actual data and calculated data about WWTP are carried out to enhance the predictive accuracy.

### The outline of the software operation method

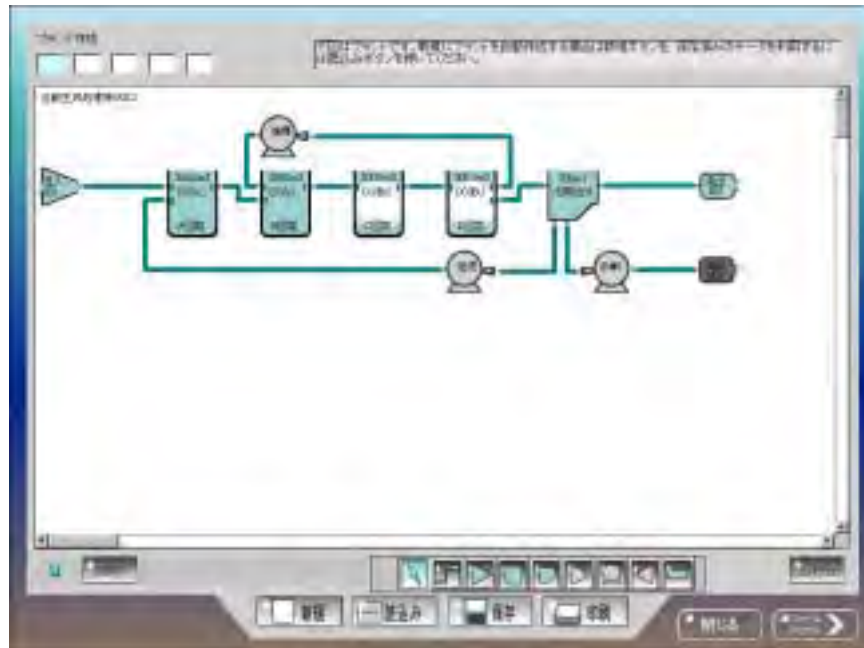
The software has been built so that the general sewage engineers can operate easily only by watching its screen. The screenshot at the time of starting is shown in Figure 2. Pushing buttons can start each simulated processes, such as setting up, start-up and operation of an imaginary WWTP. The data needed for the simulation are promoted to input and the simulation is suspended if data are blanked. Thus, the simulation can be completed without any operational difficulties.



The arrows show buttons to start each simulated processes.

Figure 2 The screenshot at the time of starting

Figure 3 is a screenshot of an imaginary WWTP set up. The operation is very easy just like graphic software. It is possible to not only recreate actual WWTP but also design new type of WWTP which does not exist.



**Figure 3 A screenshot of an imaginary WWTP**

The data of water quality of influents and operational conditions can be input in spreadsheet form.

The simulation proceeds with calculated water qualities displayed. Once a certain condition of simulation is finalized, the required parts of the predicted water qualities as spreadsheet form can be retrieved.

If predicted data is far from actual data, recalculation is required with adjusted ASM parameters. However, much knowledge about ASM is needed to estimate what parameters should be adjusted and how much the numerical values of parameters should be increased or decreased. This software has a function that calibrates the parameters automatically for ordinary users. It is required just to input the measured data of effluent additionally.

### **The way converting measured data to ASM variables**

In order to predict water quality of the effluent based on the daily measuring influent such as  $COD_{Mn}$  or BOD, it is needed to clarify the relationship between  $COD_{Cr}$  and  $COD_{Mn}$  or BOD and to establish the way to convert  $COD_{Mn}$  or BOD into  $COD_{Cr}$ . As results of studies of many samples at various WWTP, five ways to enter measured water qualities are provided to the software. The ways set up are as follows:

If measured data are  $COD_{Mn}$ , BOD or TOC, it is needed to convert these values into  $COD_{Cr}$ . As a result of the investigation at some WWTPs, conversion factors from  $COD_{Mn}$ , BOD and TOC to  $COD_{Cr}$  were obtained. According to the calculated results, these factors are applicable at WWTPs in Tokyo 23 wards.

Measured or converted  $COD_{Cr}$  has to be fractionated to six ASM variables at the next step. As the easiest way for users, fraction coefficients to six variables were established by the result of the investigation at some WWTPs. Just input of measured  $COD_{Mn}$ , BOD or TOC is

needed in this way. Contrary, the function to enter six ASM variables directly was also prepared. And the third way was equipped. This way has high accuracy same as entering ASM variables directly although the data needed to input is measured easily. The method is modified one of STOWA's. The fractionation method proposed by STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, English name is "Dutch acronym for the Foundation for Applied Water Research") is the method of not performing the complicated OUR (oxygen usage rate) measurement. The new method eliminates some measurements from STOWA method to use practically. Only the input of  $COD_{Mn}$ ,  $s-COD_{Mn}$ , BOD and concentration of acetic acid can obtain the prediction results with high accuracy by the modified method of STOWA's.

Thus, five input methods have been finally equipped, i.e. input of  $COD_{Mn}$ , BOD, TOC or ASM variables directly and the modified method of STOWA's.

### **The estimation of aeration rate for cost reduction**

ASM model only deals with biological treatment processes. Other reliable models can be introduced additionally into the ASM software. The models for sedimentation tank are often introduced. The model to estimate the aeration rate was introduced considering the demands of job site, the accuracy of the model and the increase in calculation time after some studies of already confirmed models.

Since actual oxygen requirement (AOR) is calculated from ASM, defined value of either oxygen-solution rate or dissolved oxygen (DO) can yield another one. Comparing these values at WWTPs with calculated ones, the calculated aeration rate almost corresponded with the actual value in case of DO control. On the contrary, DO did not agree well with measured data in case DO is not controlled. As a result of these studies, the function to estimate the aeration rate was equipped, while the investigation to estimate DO has been continuing. An example of the calculation of the aeration rate will be shown at latter section.

### **Other functions of the software**

Two more functions of the software will be described. The first one is the setting of "anoxic zone" at aerobic stage. More excess denitrification than theoretical calculation is often observed. If this phenomenon has occurred, the predicted result becomes less accurate. Because the phenomenon is probably caused by unevenness of DO observed occasionally at aerobic stage, the concept of "anoxic zone" can reproduce more accurate calculation.

The another one is the setting the concentration of nitrate reduced in return sludge. Denitrification at final sedimentation tank often occurs even though the phenomenon has been rarely regarded. This leads to more release of phosphate at anaerobic stage and sequential more ingestion at aerobic stage. This function can enhance accuracy for prediction of phosphorus removal.

TMG is still trying to introduce other functions to enhance the prediction accuracy.

### **Reproduced examples to improve water quality**

Practical use of this software has been just started all WWTPs in Tokyo 23 wards. Therefore, there are no practical examples to change operational conditions and to improve the water quality of effluent on the basis of simulation results. Reproduced examples of the actual improvement with this software are shown in this section.

Phosphorus removal is difficult even with  $A^2/O$  process when the concentration of soluble organic compounds in influent to bioreactor is low. Actually, phosphorus concentration of

effluent was found relatively high at a certain WWTP with A<sup>2</sup>/O process in Tokyo 23 wards. The observed and calculated phosphates in a certain period are shown in Figure 4. The calculated data are nearly in agreement with the measured ones. The average concentration is approximately 1.0 mg-P/L in this period. However, the desirable maximum concentration is also 1.0 mg-P/L. Some operational conditions have been changed for efficient phosphorus removal as a result after various attempts; those are the ratio of recycled nitrate, the ratio of return sludge, the volume of excess sludge to be excluded and the HRT at each stage. The ratio of recycled nitrate has been reduced, while the ratio of return sludge, the volume of excess sludge and the HRT at anaerobic stage have been increased. The calculated data using current average operational conditions is also shown in Figure 4. The predicted data are dramatically improved by changing operational conditions. Current water qualities are also around this level.

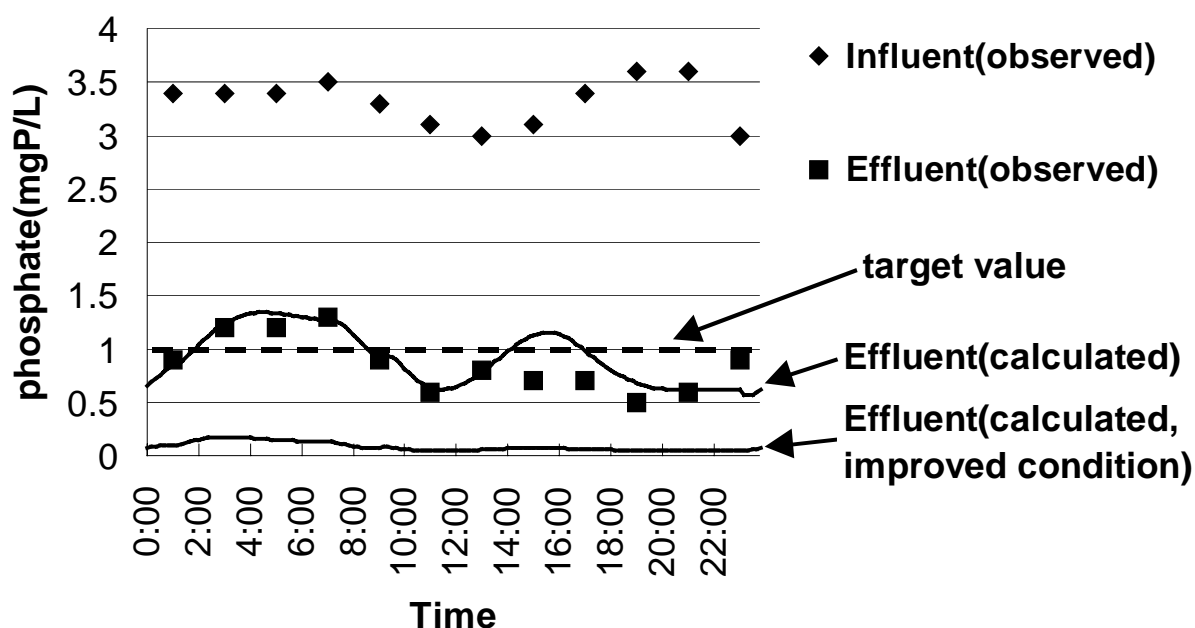


Figure 4 The observed and calculated phosphates

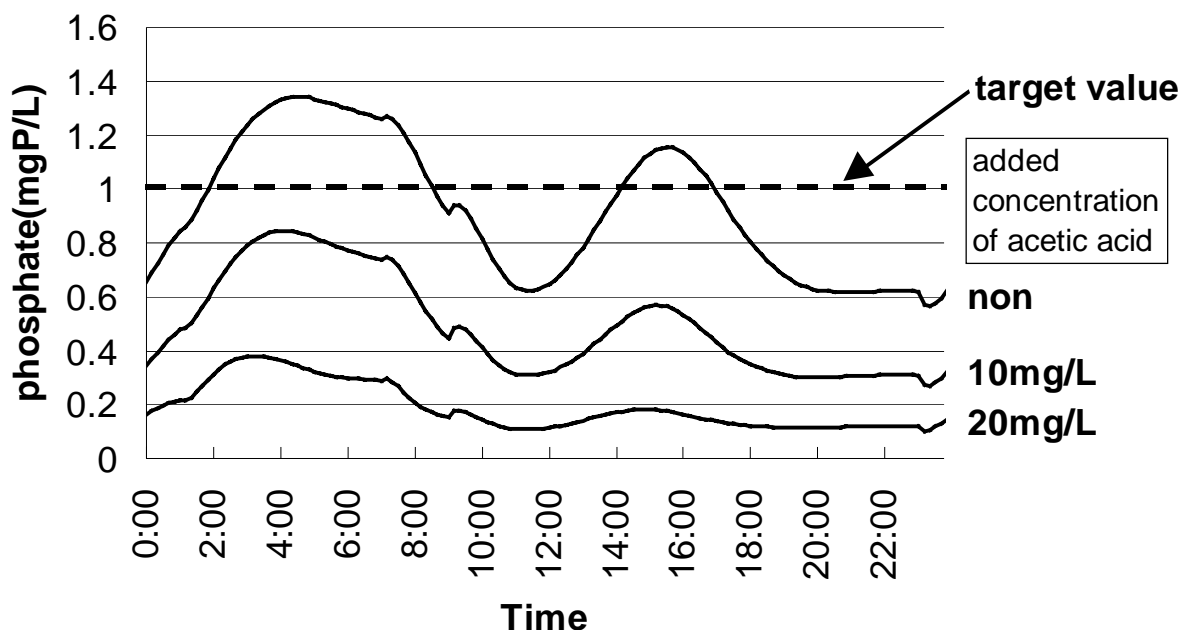


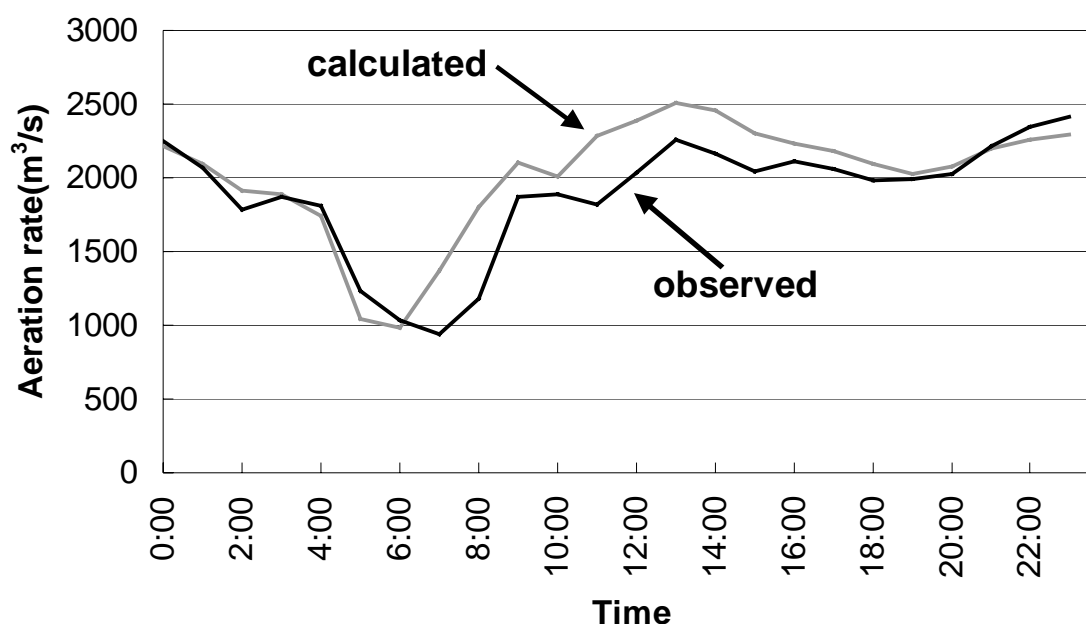
Figure 5 Predicted effect of acetic acid addition



The optimum operational condition can be also estimated when removal of both phosphorus and nitrogen is required. Water quality of ammonium is not so good in the improved case shown in Figure 4. If 1.0mg/L is demanded as maximum concentration about both phosphorus and ammonium, the software can confirm that medium condition of improved and unimproved conditions is recommended.

Another attempt can be also reproduced. Figure 5 shows the predicted data in case acetic acid is added at the inlet of the bioreactor. Addition of acetic acid at a concentration of only 10mg/L is also recommended when acetic acid is readily available.

This software also can be used to attempt cost reduction. The predicted and measured aeration rate at another WWTP is shown in Figure 6.



**Figure 6 An example of aeration rate simulation**

Additional calculation can be done at the WWTP for another challenge. The calculation results of various DO are shown in Table 1.

**Table 1 Calculation results for cost reduction**

DO (mg/L)	ratio of aeration rate	total nitrogen in effluent (mg/L)	phosphate in effluent (mg/L)
4.3	1	16.3	0.32
3.5	0.82	16.3	0.29
2.5	0.67	16.2	0.26

The results suggest that it is possible to reduce cost of aeration hugely by lowering DO without deterioration of nitrogen and phosphorus in effluent. This is because of lower actual oxygen-solution rate at higher DO.

It is not checked that all of these calculation results are right. However, the results described in this section indicate that the actual improved water qualities and the calculated ones with the software are very resemblance.

## **DISCUSSION**

The outline of the software of innovated ASM of IWA for practical use and the way of forthcoming practical use are described in this article. The newly developed software has fewer functions. For example, the software does not equip the models for sedimentation tank, program languages, and so on. However, the functions of the software are enough for daily practical use at WWTPs. Other functions should be rather equipped, such as the function to predict appropriate volume of excess sludge in order to maintain desirable MLSS, DO of each tanks in case of no DO control and the concentration of denitrified nitrogen at sedimentation tank. These functions have been studied for introduction into the updated version of the software.

European countries have been utilizing ASM actively for designing and optimizing of WWTPs. Especially in the Netherlands, over 100 WWTPs have been optimized in detail. However, ASM has not been utilized by average operators for daily practical use at WWTPs. TMG led to build the software which can be used for the operators because TMG manages a lot of job sites by itself. TMG will face the extensive and unprecedented challenge to utilize ASM practically.

## **CONCLUSIONS**

TMG have built the software for general engineers at WWTPs to predict water quality in effluent after bio-treatment. This software has functions to provide the information to improve water quality of nitrogen and phosphorus concentration. TMG has just started daily practical use of the software and enhances use of this software for daily management at WWTPs.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

This software is built by TMG in partnership with two private enterprises; Nihon Suido Consultants Co., Ltd. and Yaskawa Electric Corporation.

## **REFERENCES**

The IWA Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (2000) Activated Sludge Models, International Water Association