

## 設置者の稼働時間を考慮した止水板最適設置順序の算出

システム最適化研究室  
都 14-86 竹内 美紗

# 目次

1	はじめに	1
2	準備	2
2.1	数理計画問題	2
2.2	最適化ソルバ	2
2.3	ネットワーク上でのフロー保存則	3
3	研究の背景と目的	5
3.1	背景	5
3.2	本研究の目的	7
4	止水板最適設置問題の定式化の改良	8
4.1	最適性の基準	8
4.2	定式化に用いられるネットワーク	8
4.3	本研究で用いる最適化問題	10
4.3.1	集合・パラメータ・変数	10
4.3.2	制約条件	11
4.3.3	目的関数	14
5	数値実験	15
5.1	実験条件と実験環境	15
5.2	実験内容	16
5.3	実験 1: 止水板の設置に必要な設置チーム数の算出	16
5.3.1	実験結果	17
5.3.2	考察	17
5.4	実験 2: 設置開始時刻と流入時間の合計の関係	18
5.4.1	実験結果	18
5.4.2	考察	20
5.5	実験 3: 設置チーム数と流入時間の合計の関係	20
5.5.1	実験結果	21
5.5.2	考察	22
6	おわりに	25
A	本研究で使用したモデルファイル	29
B	全実験結果	31

# 1 はじめに

日本は、地震や火山の噴火など、世界的に見ても災害の非常に多い国である。その中でも、大雨による被害は、我々の先祖を常に苦しめてきた。日本の急峻な地形は、雨が降り注いでから海に到達するまでの時間を短くし、川の流れを激しくする。山間部から流された土が下流に肥沃な大地を作って農業が盛んになる反面、それができるまでの過程で多くの人命が危険にさらされた。

近年、日本では大雨の発生数が増加しており、甚大な被害を招いている。最近も、2017年7月に九州北部地方で発生した豪雨は、福岡県・大分県で37名もの死者を出した。大雨や降水量への影響に関する研究は国土交通省、気象庁、文部科学省などで広く行われており、大雨の発生数の増加傾向には地球温暖化が影響している可能性も指摘されている。また、1時間の降水量が50 mm以上の短時間強雨の発生回数も増加傾向にある[11]。以下に集中豪雨の例を挙げる。

- 岡崎豪雨 [14]

- 2008年8月28日から29日にかけて、愛知県を中心に局地的な大雨となり、各地で浸水や土砂災害が発生した。1時間最大雨量は146.5 mmの猛烈な雨を観測した。名古屋市の浸水が10,000棟、岡崎市でも2,130棟が浸水した。被災による死者は2名と甚大な被害が出た。

- 東海豪雨 [12]

- 2000年9月11日から12日にかけて東海地方を中心に豪雨が発生した。名古屋では1時間最大雨量97 mm、東海市では1時間最大雨量114 mmを記録した。茨城県から沖縄県までにおよぶ被害総計は、床上浸水27,180棟、床下浸水44,111棟、死者10名であった。

本研究では、このような豪雨が都市部に降り注いだ時のことを考える。都市部では土地の高度利用が進み、地下街や地下室の設置が増加している。地下街等の地下施設は、このような集中豪雨によって短時間に浸水する危険性をはらんでおり、逃げ遅れや閉じ込め等によって財産のみならず人命までもが危険にさらされる可能性がある。雨の降り始めから浸水発生までの時間が短いことや地下空間の閉鎖性を考えると、人的被害を減らすためには、適切な行動を取ることが必要である。

このような状況を踏まえ、馬谷 [2] は水害発生時の浸水対策の1つとして梅田地下街全域を対象とした止水板の最適設置順序の算出を行った。しかし [2] を子細に読み解くと、現実的な条件からやや乖離した設定が行われていたことがわかった。そこで本研究では、より現実に即した条件、例えば止水板設置チームの稼働時間や、梅田地下街の管理施設などを考慮して、止水板の最適設置順序を算出することを目指す。

## 2 準備

本章では、本研究で必要になる事項について説明する。

### 2.1 数理計画問題

数理計画問題 [15] は一般に次のように表すことができる。

目的関数:  $f(x) \rightarrow$  最小 (あるいは最大)

制約条件:  $x \in S$

ここでは、変数  $x$  は  $n$  次元のベクトルであり、目的関数  $f$  は  $R^n$  ( $n$  次元実ベクトル空間) 上で定義された実数値関数である。また、制約条件を満たす  $x$  を実行可能といい、その集まりである集合  $S \subseteq R^n$  を実行可能領域、実行可能解の中で目的関数が最小 (あるいは最大) となるものを最適解という。

### 2.2 最適化ソルバ

最適化ソルバは、最適化問題の最適解を得るためのソフトウェアである。これを利用するためには、まず、最適化問題の定式化を行い、次に定式化した問題をモデリング言語で記述する。ここで最適化ソルバによって利用できるモデリング言語は異なることに注意する必要がある。そして、記述した問題を最適化ソルバで読み込み、内部で求解アルゴリズムを実行することによって、最適解を得る。ここで本研究で用いた最適化ソルバである GLPK, Gurobi について説明する。

- GLPK[4]
  - GLPK とは GNU Linear Programming Kit の略で、GNU が無料で配布しているソルバである。このソルバは最適化計算を行うだけでなく、AMPL で書かれたモデルとデータを用いて、LP 形式のファイルを作成することができる。
- Gurobi[6]
  - Gurobi とは、線形計画問題 (LP)、二次計画問題 (QL)、二次制約 (QCP)、混合整数計画 (MIP) を解くことができるソルバの 1 つである。

本研究では、Gurobi によって計算を行っている。

## 2.3 ネットワーク上でのフロー保存則

最適化問題を定式化するためには、対象となる問題をよく観察し、それを表現するための数式を準備する必要がある。これは個々の問題に即して行われるべき作業ではあるが、複数の問題に共通して現れるパターンも存在する。その中でも、グラフを用いて対象を表現できる場合が多く存在する。グラフは節点の集合  $V$  と節点間をつなぐ枝の集合  $E$  を用いて  $G = (V, E)$  と表現することができる。例えば図 1 は

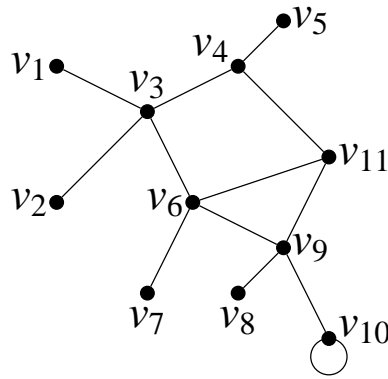


図 1: グラフの例

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}\},$$
$$E = \{(v_1, v_3), (v_2, v_3), (v_3, v_4), (v_4, v_5), (v_4, v_{11}), (v_3, v_6),$$
$$(v_6, v_7), (v_6, v_9), (v_6, v_{11}), (v_8, v_9), (v_9, v_{10}), (v_9, v_{11}), (v_{10}, v_{10})\}$$

であるようなグラフの例である。

グラフを用いて表現できるものの一つに、ネットワーク上のフローがある。ここでいうネットワークとは、例えば道路網や上下水道網などのことで、そこでのフローとは交通流や水の流れを表している。このようなフローを考える際には、フロー保存則と呼ばれるルールを適用することが多い。これは、

グラフ上のフローは各節点で保存される

という単純なものである。例えば、グラフが水道管網を表しており、枝の上を水が流れていく場合、「節点で水漏れしない」ということがフロー保存則に対応する。言い換えれば、「節点に流れ込む量と節点から流れ出る量が等しい」ということができる、直感的にもイメージしやすいルールである。ただし、フローの始点となる節点（ソース）と終点となる節点（シンク）ではこのルールは適用されないことに注意する。

グラフ  $G = (V, E)$  上でのフロー保存則を定式化すると、次のようになる。

$$\sum_{(i,v) \in E} x_{iv} = \sum_{(v,j) \in E} x_{vj}, \quad (v \in V, v \neq s, t) \quad (1)$$

$$\sum_{(s,j) \in E} x_{sj} = f \left( = \sum_{(j,t) \in E} x_{jt} \right) \quad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad ((i, j) \in E) \quad (3)$$

ここで  $s$  はソース、 $t$  はシンクを表しており、 $x_{ij}$  は枝  $(i, j) \in E$  の上を流れるフローの量、 $f$  はフローの全量とする。

(1) は、ソースあるいはシンクでない節点  $v \in V$ ，すなわちにフローを中継する節点に適用される式である。(1) の左辺は節点  $v$  に入る枝を流れるフローの和を、右辺は節点  $v$  から出て行く枝を流れるフローの和を表しており、これらが等しくなるということが、フロー保存則に他ならない。フローの量は、それが連続的に分割可能なもの（例えば水など）であれば連続変数で表現すればよいし、分割できないものであれば整数変数で表現することになる。

また (2) の左側の等号は、ソース  $s$  から流れ出るフローの量が  $f$  であることを表している。そして、フロー保存則の下ではフローがどこかに消えるようなことはないため、このフローは全てシンク  $t$  に到達することになる。それが (2) の右側の等号で表現されている。

最後に (3) は、フローの量が非負であることを表している制約である。もしこの制約がなければ、フローの量が負になってしまう可能性がある。

その他に、各枝にフローの容量に関する制約が付加される場合がある。これは、例えば、水道管の直径に応じて流す事が可能な容量を定めるような場合などである。その場合は、枝  $(i, j) \in E$  の容量を  $c_{ij} (\geq 0)$  とすると、

$$x_{ij} \leq c_{ij} \quad (4)$$

とすることができる。

### 3 研究の背景と目的

本章では本研究の背景と目的について説明する。

#### 3.1 背景

近年、我が国では都市部において局地的・集中的な豪雨による水害が発生している。特に、1時間に100mmを超える局地的な豪雨がしばしば観測されるようになっており、地下空間における短時間集中型の豪雨への対策が求められている。地下空間の浸水は人命にかかわる深刻な被害につながる可能性が高いため、その対策は重要な課題である[8]。以下は、豪雨によって地下空間に甚大な被害が出た例である。

- 福岡水害 [7]
  - 1999年6月29日、福岡市を流れる三笠川があふれて市中心部が冠水し、博多駅や地下施設に水が流入した。1時間雨量は79.5 mmを観測した。
  - 駅周辺で地下施設を持つビル182棟のうち、地下が浸水したビルは71棟に上り、そのうち地下3階まで浸水したビルが3棟、地下空間が完全に水没したビル10棟あった。地下階の総浸水面積は約5万 $\text{m}^2$ となった。
  - 地下鉄については、道路の水が出入り口階段5ヶ所から流入し、最大25 cm浸水した。この水は地下ホーム、線路へと流れ込み線路の冠水が発生した。
  - 人的被害については37人の死亡、4人の行方不明が確認された。

このような大規模な都市型水害が、近年多発している。そのため地下空間の水害の軽減に着目した研究が多く行われている。

先行研究[16, 1]では、梅田の地下街を対象として、下水道施設を考慮した内水氾濫解析が行われている。具体的には、岡崎豪雨や東海豪雨を外力と設定し、雨水流出解析モデルとして下水施設および地表面の氾濫解析を同時に実施した。その結果、地下空間に流入する出入り口の場所、流入順序、流入時間、流入量を推定することができ、事前に止水活動や避難誘導が可能であることが示された。

そして、[16, 1]をもとに、止水活動を円滑に行うための研究が行われている。例えば武田の研究[10]では、地下空間の浸水対策としてホワイティうめだを対象とし、内水氾濫シュミレーションが行われた。外力を短時間集中豪雨とした場合に、地下街の管理者は十分な対策がとれず、人員を十分確保できないリスクや、止水板の設置途中で浸水が始まる可能性を考慮して止水板設置順序や設置タイミングなどが検討された。[10]では、止水板の設置タイミングとして以下の3つが挙げられた：

- 地下への流入が始まったとき
  - － 先行研究 [5] で計算された地下街での流入開始時刻をもとに，設置のタイミングを知る．
- 地上監視カメラより判断
  - － 最も越水が早いとされている泉の広場地上に監視カメラを設置することで，設置のタイミングを知る．
- 水位計より判断
  - － 最も浸水が早いとされている管渠に水位計を設定することで，設置のタイミングを知る．

その結果，水位計によって判断した場合，止水板の設置が全て可能であり，流入量が大幅に削減できることが分かった．

一方，馬谷の研究 [2] も止水板の設置について考察しているが，[10] では内水氾濫シミュレーションで止水板の設置順序を検討していたのに対し，馬谷はこの問題を最適化問題として定式化を行い，ソルバを用いて解くことで最適な設置順序を算出した．なお [2] では，対象地区をホワイティうめだに限定するのではなく，梅田地下街全域を対象としている．具体的には表 4 に示した条件で計算を行った．

表 1: [2] で設定された条件

1 時間あたりの降雨量	60mm
排水用ポンプ	機能停止
雨水が流入する出入り口の数	24 箇所
止水板設置チーム数	6 チーム
止水板設置チームの歩行速度	66 m/分
降雨開始から止水板設置開始までの時間	60 分
止水板 1 箇所の設置に要する時間	3 分

[2] では止水板を設置するチームの数や，降雨開始から止水板を設置し始めるまでの時間，設置チームの移動速度，止水板の設置に要する時間などを変化させて計算を行った．その結果として，

- 止水板設置チームが増えるほど水の流入時間の合計は短くなるが，ある一定の数まで増えると流入する時間の合計に変化はなくなる



- 降雨開始から止水板設置開始の時間を遅くすると、水の流入時間の合計は遅くした時間よりも大幅に長くなる
- 設置チームの移動速度を速くすると流入時間は短くなるが、徐々に流入時間の変化が小さくなる
- 設置に要する時間が長くなると流入時間は長くなり、設置順序も変化する

ということがわかった。

### 3.2 本研究の目的

馬谷の研究 [2] では梅田地下街全域の全出入り口を対象として止水板の設置順序を算出しているが、梅田地下街には複数の管理主体が存在し、それぞれの地区に管理施設をもつ。そのため、豪雨時には、各管理主体がそれぞれの地区の管理施設に存在する流入する可能性のある出入り口に止水板を設置することになるはずである。また、[2] では、止水板を設置するときに各設置チームの稼働時間は制限されていなかった。しかし、止水板の設置に要する負荷は相当大きいものであるため、設置チームの稼働時間には限界があると考えるのが自然である。

そこで本研究では、管理主体を考慮しつつ、設置チームの稼働時間に上限を設けた場合の最適な止水板設置順序を算出する。また、設置チームの稼働時間を考慮しなかった場合の最適な設置順序も算出し、これらの比較を行う。なお、本研究での最適な設置順序とは、[2] と同様、止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差の合計が最小となるような設置順序を指すものとする。

## 4 止水板最適設置問題の定式化の改良

本研究では，馬谷の研究 [2] に用いられた定式化に訂正と追加を加えたモデルを用いて最適化計算を行った．本章では，[2] で提案されたモデルと，本研究での改良点について説明する．

### 4.1 最適性の基準

ここでは最適化モデルの目的関数を構築する上で重要な，最適性の基準について説明する．馬谷の研究 [2]，また本研究では，推定された各出入り口への流入開始時刻を考慮した止水板の最適な設置計画を最適化問題として定式化する．そこで，最適性の基準として，各出入り口について，止水板の設置が完了するまでに水が流入した時間，すなわち

$$\max\{\text{止水板設置完了時刻} - \text{流入開始時刻}, 0\}$$

を算出し，これらの和が最小になるような定式化を行う．

### 4.2 定式化に用いられるネットワーク

馬谷の研究 [2]，また本研究では，地下空間の広がりと時間の経過を同時に表現するネットワークを利用して最適化モデルを構築している．ここでは，そのネットワークの特徴について説明する．図 2 は，地下街を想定したネットワークを表している．

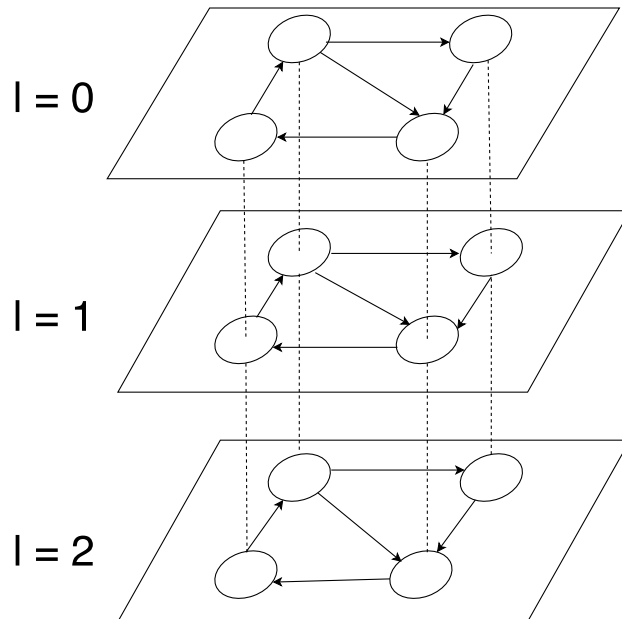


図 2: 地下街のネットワーク

止水板を設置する出入口に相当する節点を  $v \in V$ ，出入口間の移動に相当する枝を  $(v_1, v_2) \in E$  で表す．本研究で扱う最適化問題では，止水板を設置する各チームの動きを時間を追って表現する必要がある．そこで，このような問題を解く手段として広く用いられている時空間ネットワークを用いる．

時空間ネットワークとは，空間の形状を表すネットワークに時間軸を加えて拡張したネットワークである．すなわち時空間ネットワーク上では場所と時間が同時に表現できる．そのため，最初に出発する場所と時刻から，目的となる場所と時刻までの移動経路がリンクをたどることで求められる [9]．

地下街を想定した時空間ネットワークを図 3 に示す．

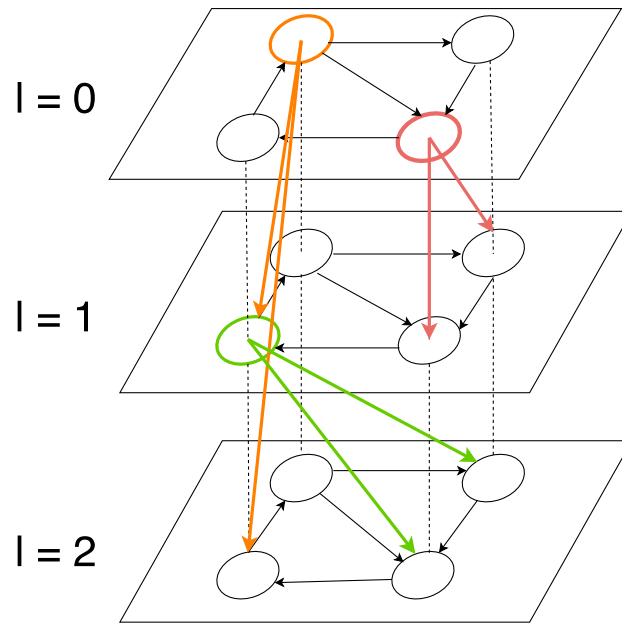


図 3: 時空間ネットワーク図

図 2 と図 3 では，止水板を設置する各チームの移動回数を  $l = 0, 1, 2, \dots$  とし，これを時空間ネットワークにおけるレイヤに対応させる．

### 4.3 本研究で用いる最適化問題

本節では、本研究で止水板の設置順序を決めるために用いる最適化問題について説明する。なお、本問題は、[2] で提案された問題に一部修正，追加を行ったものである (表 2)。

表 2: 先行研究 [2] からの制約条件の訂正と追加

[2] で提案された制約	制約条件 1~7, 9, 10
[2] で提案された制約を修正	制約条件 8
新たに追加する制約	制約条件 11

#### 4.3.1 集合・パラメータ・変数

- 集合

- $V$  : 節点 (出入り口) の集合
- $E$  : 枝 (経路) の集合
- $L$  : レイヤの集合
- $P$  : 設置チームの集合

- パラメータ

- $w_e$  : 枝の重み (移動時間)
- $f_v$  : 節点の流入開始時刻
- $s$  : スタート地点
- $M$  : 十分大きな正の定数
- $u$  : 止水板設置に要する時間
- $a$  : 止水板設置開始時刻
- $l_m$  : 設置チームが最後に存在するレイヤ
- $T$  : 各設置チームの稼働時間の上限 (分)

- 変数

- $x_{v,l,p}$  : レイヤ  $l$  において，設置チーム  $p$  が節点  $v$  に存在するかどうかを表す 0-1 変数

$$x_{v,l,p} = \begin{cases} 1, & \text{レイヤ } l \text{ において，設置チーム } p \text{ は節点 } v \text{ に存在する} \\ 0, & \text{レイヤ } l \text{ において，設置チーム } p \text{ は節点 } v \text{ に存在しない} \end{cases}$$

- $y_{e,l,p}$  : レイヤ  $l$  からレイヤ  $(l+1)$  にかけて, 設置チーム  $p$  が枝  $e$  を通過するかどうかを表す 0-1 変数

$$y_{e,l,p} = \begin{cases} 1, & \text{レイヤ } l \text{ から他 } (l+1) \text{ にかけて, 設置チーム } p \text{ が枝 } e \text{ を通過する} \\ 0, & \text{レイヤ } l \text{ から他 } (l+1) \text{ にかけて, 設置チーム } p \text{ が枝 } e \text{ を通過しない} \end{cases}$$

- $t_{l,p}$  : レイヤ  $l$  における設置チーム  $p$  の設置完了時間
- $\bar{t}_{l,p}$  : レイヤ  $l$  において設置チーム  $p$  が止水板を設置する出入口の流入開始時刻
- $d_{l,p}$  : レイヤ  $l$  において設置チーム  $p$  が止水板を設置する出入口の設置完了時刻と流入開始時刻の差

#### 4.3.2 制約条件

本研究で用いる制約条件について説明する.

**制約条件 1** 全止水板設置チームはレイヤ 0 ではスタート地点に存在する

$$x_{s,0,p} = 1 \quad (p \in P) \quad (5)$$

**制約条件 2** 全出入口にはいずれかの設置チームが 1 度だけ存在する (= 全出入口に止水板が設置される)

$$\sum_{l \in L, p \in P, l \geq 1} x_{v,l,p} = 1 \quad (v \in V) \quad (6)$$

**制約条件 3** 各設置チームはそれぞれのレイヤで高々 1 つの節点  $v$  に存在する

$$\sum_{v \in V} x_{v,l,p} \leq 1 \quad (l \in L, p \in P) \quad (7)$$

**制約条件 4** いずれかのレイヤでいずれかの設置チームが 1 度だけ節点  $v$  に移動する

$$\sum_{(\bar{v},v) \in e, l \in L, p \in P, l \geq 1} y_{\bar{v},v,l-1,p} = 1 \quad (v \in V) \quad (8)$$

**制約条件 5** 枝と節点の関係性 1

レイヤ  $(l-1)$  から レイヤ  $l$  にかけて, 止水板設置チーム  $p \in P$  が節点  $v_1$  から  $v_2$  に移動する場合を考える. 0-1 変数  $x_{v_1,l,p}$  と  $y_{v_1,v_2,l-1,p}$  の組み合わせのうち 可能なものは以下のとおりである:

- 止水板設置チーム  $p_1$  が  $v_1$  に存在すると時
  - $x_{v_1,l-1,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$  の場合
  - $x_{v_1,l-1,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$  の場合
- 止水板設置チーム  $p_1$  が  $v_1$  に存在しな時
  - $x_{v_1,l-1,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$  の場合

これらの条件を満たすために式 (9) のように定式化を行う.

$$x_{v_1,l-1,p} \geq y_{v_1,v_2,l-1,p} \quad ((x_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (9)$$

#### 制約条件 6 枝と節点の関係性 2

本制約では到着する節点  $v_2$  について場合分けを行う. 0-1 変数  $x_{v_2,l,p}$  と  $y_{v_1,v_2,l-1,p}$  の組み合わせうち可能なものは以下の通りである:

- 止水板設置チーム  $p_2$  が  $v_2$  に存在する場合
  - $x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$  の場合
  - $x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 1$  の場合
- 止水板設置チーム  $p_2$  が  $v_2$  に存在しない場合
  - $x_{v_2,l,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$  の場合

これらの条件を満たすために式 (10) のように定式化を行う.

$$x_{v_2,l,p} \geq y_{v_1,v_2,l-1,p} \quad ((v_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (10)$$

#### 制約条件 7 枝と節点の関係性 3

制約条件 5 と制約条件 6 では 3 つの変数が存在する. その 3 つの変数を場合分けすると 8 つの場合が考えられるが以下の場合のみ制約条件 5 と制約条件 6 では満たされていない.

- $x_{v_1,l,p} = 1, x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$

この場合を満たすために式 (11) のように定式化を行う.

$$x_{v_1,l-1,p} + x_{v_2,l,p} - y_{v_1,v_2,l-1,p} \geq 1 \quad ((v_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (11)$$

#### 制約条件 8 各出入り口の止水板設置完了時刻

変数  $y_{v_1,v_2,l,p}$  を用いると, 出入り口間の移動時間  $t_{l,p}$  は式 (12) のように書くことができる

$$t_{l,p} = \sum_{l \in L, (v_1, v_2) \in E, \bar{l} < l} y_{v_1, v_2, l, p} w_{v_1, v_2} / 66.0 + u \sum_{v \in V, l \in L, l \geq L, l \leq 1} x_{v, l, p} \quad (l \in L, p \in P, l \leq L) \quad (12)$$

ここで、枝の重み  $w_{v_1, v_2}$  は各出入口間の移動距離を表している。また、ここでは各設置チームが分速 66.0m (時速 4 km に相当) で歩行することを想定している。

次に示している式 (13) は訂正前の制約条件 8 である。

$$t_{l,p} = \sum_{l \in L, (v_1, v_2) \in E, \bar{l} < l} y_{v_1, v_2, l, p} w_{v_1, v_2} / 66.0 + lu \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (13)$$

[2] で提案されていた制約条件 8 では、式 (13) に示したように  $u \sum_{v \in V, l \in L, l \geq L, l \leq 1} x_{v, l, p}$  の部分が  $lu$  となっていた。しかしこれは誤りである。以下、そのことを説明するため例を挙げる。設置チーム  $p_1, p_2$  の 2 チームで 5 箇所の出入口に止水板を設置する場合を想定する。例えば設置チーム  $p_1$  は 3 箇所、 $p_2$  は 2 箇所に設置するならば、3 枚のレイヤが必要となる。しかし式 (13) の項  $lu$  は単に存在するレイヤの数に設置に要する時間を乗じたものである。すると設置チーム  $p_2$  は 2 箇所しかないにもかかわらず、3 箇所の出入口に止水板を設置しただけの時間が加えられてしまう。つまり、式 (13) では、設置の有無にかかわらず、レイヤの存在している数だけ設置に要した時間が足されていた。これを式 (12) のように修正することにより、各チームが設置した止水板の数に応じた設置時間だけが加えられるようになった。

#### 制約条件 9 流入開始するまでの時間

本制約では設置チーム  $p \in P$  がレイヤ  $l$  において止水板を設置する出入口に、雨水が流入する時間を求めている。ただし、降雨開始後  $a$  分の時点を時刻 0 (= 止水板の設置開始時刻) と定めている。これは雨が降り始めても、管内水位が上昇し始め、地下出入口の地盤高に達するまでに時間を要するためである。この条件は式 (14) で表すことができる。

$$\bar{t}_{l,p} = \sum_{v \in V} x_{v, l, p} (f_v - a) \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (14)$$

#### 制約条件 10 止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差

本制約では、設置チーム  $p \in P$  がレイヤ  $l$  で止水板を設置する出入口において、止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差がどの程度あるかを求めている。これは式 (15) のように表すことができる。

$$d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p} - M(1 - \sum_{v \in V} x_{v, l, p}) \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (15)$$

レイヤ  $l$  のとき，設置チームが出入り口  $v$  に止水板を設置しているかどうかの場合分けを行う．

- $x_{v,l,p} = 1$  となるような  $v$  が存在しないとき：  $d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p} - M$ 
  - $M$  は十分大きな正の値であるため  $t_{l,p}$ ,  $\bar{t}_{l,p}$  がどんな値であろうと常に負の値となる．つまり， $d_{l,p} \geq 0$  であるため事実上意味を持たない制約となる．
- $x_{v,l,p} = 1$  となるような  $v$  が存在するとき：  $d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p}$ 
  - (止水板設置チームの設置完了時間) – (流入開始時刻) を表しており，この値が負であれば流入開始時刻に間にあっているので流入時間は 0，値が正であれば流入開始時刻に間に合わなかった時間を算出する．

#### 制約条件 11 各設置チームの稼働時間の制限

この制約条件は各設置チームの稼働時間を制限している．

$$t_{l_m,p} \leq T \quad (p \in P) \tag{16}$$

この制約条件を追加するまでは各チームの稼働時間は無制限であった．これを追加することによって各チームの稼働時間が  $T$  分に制限される．

#### 4.3.3 目的関数

本研究の目的関数は各出入り口の設置完了時刻と流入開始時刻の差の合計が最小になる値を目的関数とする．

$$\text{minimize} \quad \sum_{l \in L, p \in P, l \geq L} d_{lp}$$



## 5 数値実験

本章では、前章で提案した数理計画モデルと、梅田地下街の流入データを用いて様々な状況下での止水板の設置について行った実験内容と結果について述べる。

### 5.1 実験条件と実験環境

ここでは、止水板の設置順序を算出する対象として、梅田地下街のホワイティうめだを取り上げる。[3]によると、梅田地下街において、集中豪雨時に越水の危険のある出入り口はホワイティうめだ周辺に多いことがわかっている。本研究では、管理区分にも配慮し、ホワイティうめだが管轄する出入り口について、最適な設置順序を考察することとした。その際、各出入り口の越水の有無、また越水する場合にはどのタイミングで越水が始まるかについては、[3]の研究で得られたデータを利用した。

本実験で用いた計算環境と使用したソルバを表 3、基礎となる条件を表 4 に示す。なお、本研究では、1 時間 (= 3600 秒) 経過しても計算が終わらなかった場合は、その時点で得られている最良の暫定解を最適解と解釈することとした。

表 3: 計算環境

OS	Microsoft Windows 10 Home
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6600U CPU @ 2.60GHz 2.81GHz
メモリ	16.0GB
ソルバ	Gurobi Optimizer

表 4: 基礎となる条件

1 時間当たりの降雨量	120mm
排水用ポンプ	稼動
雨水が流入する出入り口の数	21 箇所
止水板設置チーム数	2 ~ 6 チーム
止水板設置チームの歩行速度	66 m/分 [13]
降雨開始から止水板設置開始までの時間	64 分
止水板 1 箇所の世知に要する時間	5 分
スタート地点のメッシュ番号	15728
1 チームの稼働時間の制限	30 分

## 5.2 実験内容

本章では，以下の実験を行う：

- 実験 1: 止水板の設置に必要な設置チーム数の算出
  - － 止水板設置チームの稼働時間に上限がある状況下で，越水する（であろう）全ての出入り口に止水板を設置するために必要な設置チーム数を算出する．
- 実験 2: 設置開始時刻と流入時間の合計の関係（稼働時間に上限がある場合）
  - － 設置開始時刻が遅くなれば，各出入り口からの流入時間の合計は大きくなるが，この関係を定量的に評価する．
- 実験 3: 設置チーム数と流入時間の合計の関係（稼働時間に上限がない場合）
  - － 稼働時間に上限がない場合，設置チーム数が少なくとも全ての出入り口に止水板を設置することができるが，流入時間の合計は大きくなるはずである．この関係を定量的に評価する．

## 5.3 実験 1: 止水板の設置に必要な設置チーム数の算出

本節では，止水板設置チームの稼働時間に上限がある状況下で，[3] のデータで越水するとされる全ての出入り口に止水板を設置するために必要な設置チーム数を算出する．ここでは，以下の条件で計算を行う：

- 止水板設置開始時刻: 64 分
- 設置チーム数: 2, 3, 4, 5, 6 チーム
- 設置チームの稼働時間の上限: 30, 40, 50, 60 分

ここで，止水板設置開始時刻の 64 分とは，[3] で想定される豪雨（120mm/hr）が降り始めてから，ホワイティうめだの出入り口で最初に越水が始まるとされる時刻である．

また，実験ケースの組合せとしては，設置チーム数が 5 通り，稼働時間の上限が 4 通りなので合計  $5 \times 4 = 20$  通りあるが，最適化計算が合理的に不要であるとわかるケースについては，最適化計算を行わなかった．例えば，設置チーム数を 6 に限定するとき，稼働時間の上限が 30 分で対象となる全ての出入り口に止水板を設置することができるのであれば，上限がそれより大きい 40, 50, 60 分の場合にも設置可能なはずである．このようなケースについては，最適化計算を省略している．

### 5.3.1 実験結果

表 5: 設置チーム数・設置チームの稼働時間上限と設置可能性の関係

稼働時間 チーム数				
	30	40	50	60
6	可能	可能	可能	可能
5	暫定解なし	可能	可能	可能
4	不可能	可能	可能	可能
3	不可能	不可能	暫定解なし	可能
2	不可能	不可能	不可能	不可能

計算結果を表 5 に示す。表 5 での「可能」「不可能」「暫定解なし」はそれぞれの以下の意味である：

- 「可能」：設置チームが稼働時間の上限を守りながら，越水するとされる全ての出入り口に止水板を設置することができる。
- 「不可能」：設置チームが稼働時間の上限を守りながら，越水するとされる全ての出入り口に止水板を設置することができない。
- 「暫定解なし」：最適化計算によって，所定の時間（3600 秒）内に暫定解を得ることができなかった。これは，「可能」「不可能」を判断できるような結果を得られなかったことに相当する。

### 5.3.2 考察

本実験からわかるのは次のことである：

- 設置チーム数が 6 のときは，稼働時間の上限が（最短の）30 分であっても，越水する全ての出入り口に止水板を設置可能である。
- 設置チーム数が 5 のときは，稼働時間の上限が 40 分以上であれば，越水する全ての出入り口に止水板を設置可能である。また，今回の実験では，稼働時間の上限が 30 分の場合に設置可能であるかどうかは判定することができなかった。
- 設置チーム数が 4 のときは，稼働時間の上限が 40 分以上であれば越水する全ての出入り口に止水板を設置可能，30 分の場合には設置不可能であることがわかった。

- 設置チーム数が 3 のときは、稼働時間の上限が 60 分以上であれば、越水する全て出入り口に止水板を設置可能である。また、今回の実験では、稼働時間の上限が 50 分の場合に設置可能であるかどうかは判定することができなかった。さらに、40 分以下の場合には設置不可能である。
- 設置チーム数が 2 のときは、稼働時間の上限が（最長の）60 分であっても、越水する全て出入り口に止水板を設置することはできない。

## 5.4 実験 2: 設置開始時刻と流入時間の合計の関係

ここでは、設置開始時刻と流入時間の合計の関係について調べるための実験を行う。一般に、設置開始時刻が遅くなれば、各出入り口からの流入時間の合計は大きくなるはずである。ここでは、この関係を定量的に評価するために、以下の条件で計算を行う：

- 止水板設置開始時刻: 43, 57, 64 分
- 設置チーム数: 6 チーム
- 設置チームの稼働時間の上限: 30 分

ここで、3 種類の止水板設置開始時刻について説明する。3.1 節でも述べたように、先行研究 [10] では、止水板設置のタイミングとして、「水位計より判断」した時間、「地上監視カメラより判断」した時間、「地下への流入が始まった」時間の 3 種類が挙げられている。ここでの実験設定では、これら 3 つの時間が、それぞれ 43, 57, 64 分となっている。

### 5.4.1 実験結果

それぞれの設置開始時刻における各設置チームの最適な移動経路、すなわち最適な止水板の設置順序は図 4, 5, 6 の通りである。

また、それぞれの場合の流入時間の合計を表 6 に示す。

表 6: 実験 2 の結果

設置開始時刻 (分)	設置チーム数	稼働時間の上限 (分)	流入時間の合計 (分)
43	6	30	0.00
57	6	30	6.03
64	6	30	13.91

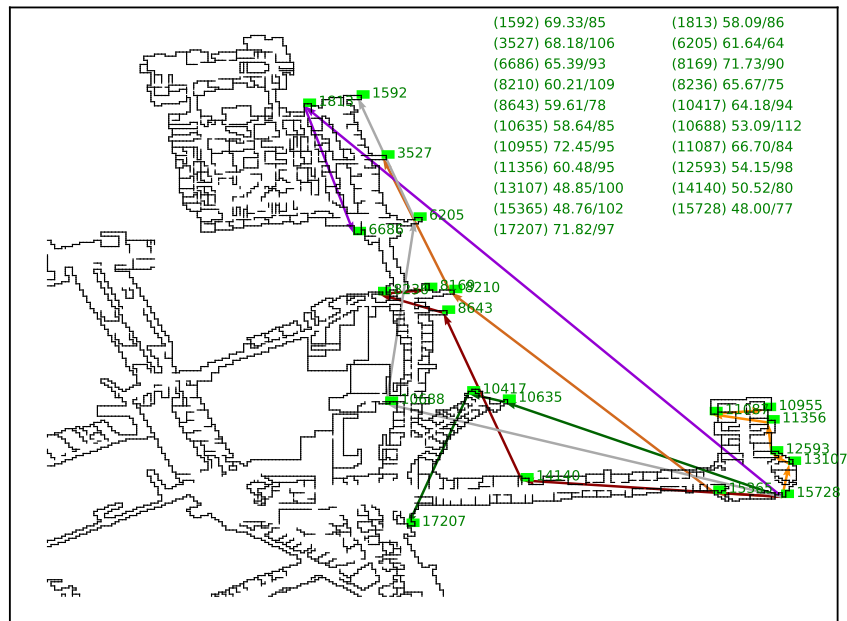


図 4: 設置開始時刻 43 分，設置チーム数 6，稼働時間上限 30 分での最適な止水板設置順序

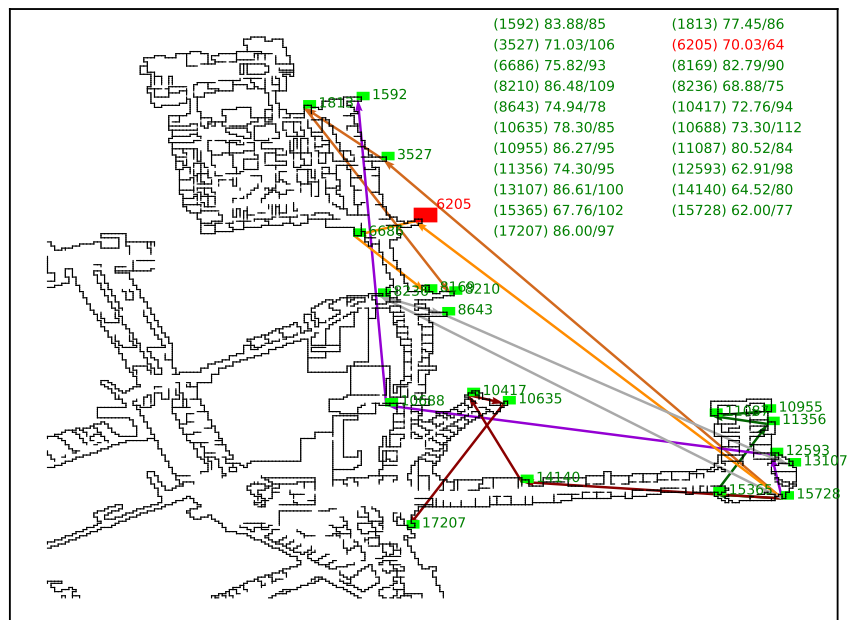


図 5: 設置開始時刻 57 分，設置チーム数 6，稼働時間上限 30 分での最適な止水板設置順序



### 5.5.1 実験結果

止水板設置開始時刻と設置チーム数の変化に伴って、流入時間の合計がどのように変化するかをまとめたものが表 7 である。

表 7: 設置チーム数・止水板設置開始時刻と流入時間の合計の関係

止水板設置開始時刻 設置チーム数			
	43	57	64
6	0.00	6.03	13.91
5	0.00	6.03	13.91
4	0.00	6.03	24.21
3	0.00	34.73	138.82
2	66.76	203.70	288.33

また、止水板設置開始時刻が 64 分のとき、設置チーム数別に最適な移動経路、すなわち最適な止水板の設置順序がどのように変化するかを図 7 から図 11 に示す。

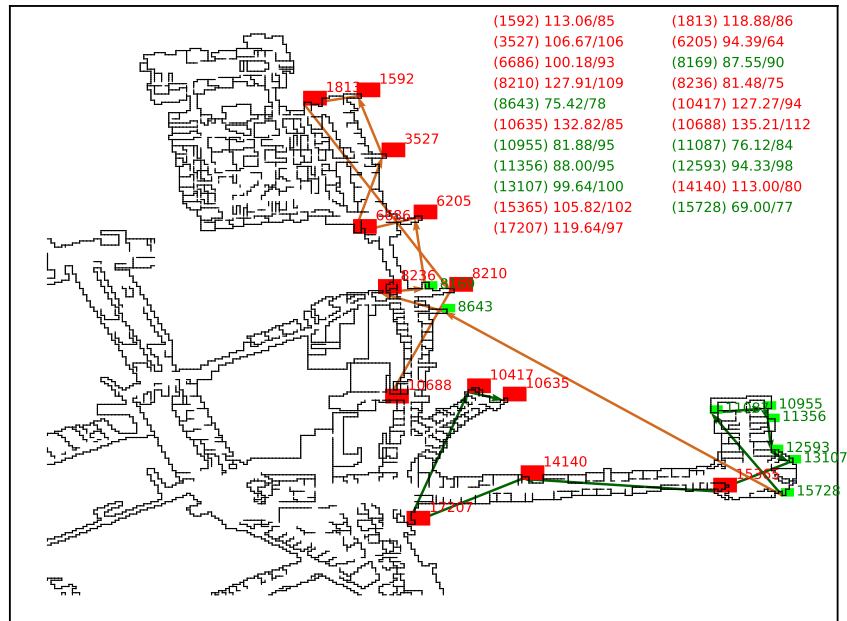


図 7: 設置開始時刻 64 分、設置チーム数 2、稼働時間上限なしでの最適な止水板設置順序

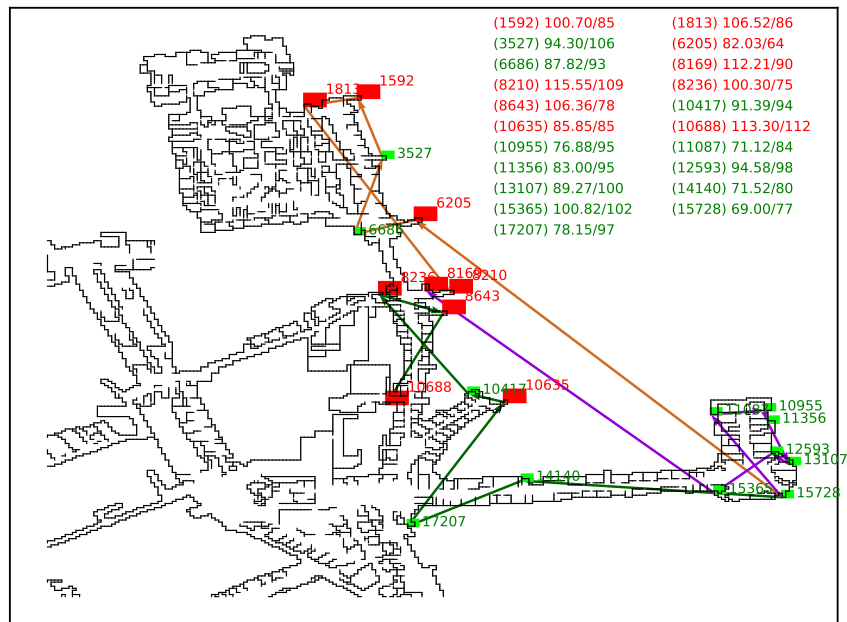


図 8: 設置開始時刻 64 分、設置チーム数 3、稼働時間上限なしでの最適な止水板設置順序

### 5.5.2 考察

表 7 からわかるように、いずれの設置開始時刻の場合も、設置チーム数が少なくなるとつれて、流入時間の合計が急激に増加する。すなわち、防災・減災の観点からは、一定以上の設置チーム数を確保しておくことが必須である。

しかしながら、例えば夜間などのことを想定すると、設置チーム数が潤沢に準備できない状況も想定される。そのような場合には、本計算で得られた最適な設置順序を用いるこ



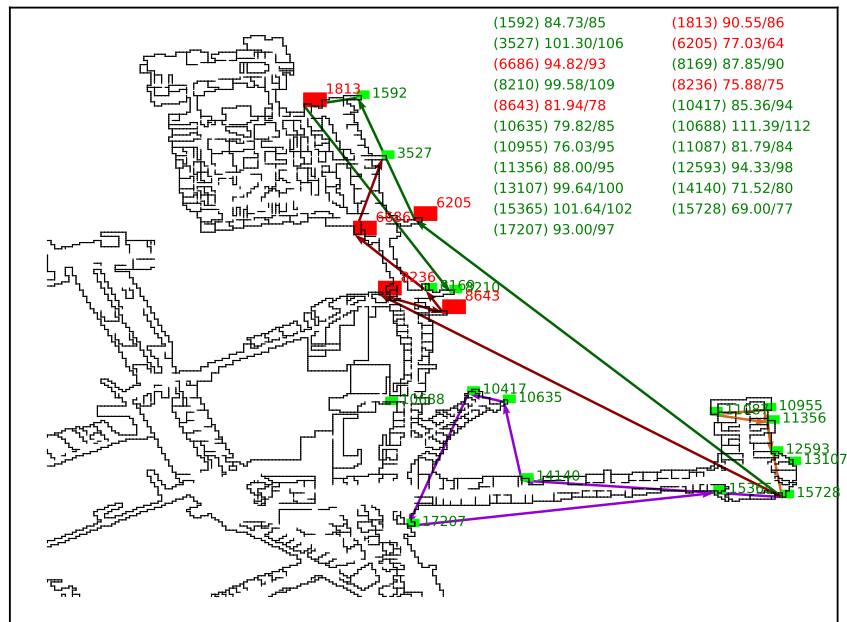


図 9: 設置開始時刻 64 分，設置チーム数 4，稼働時間上限なしでの最適な止水板設置順序

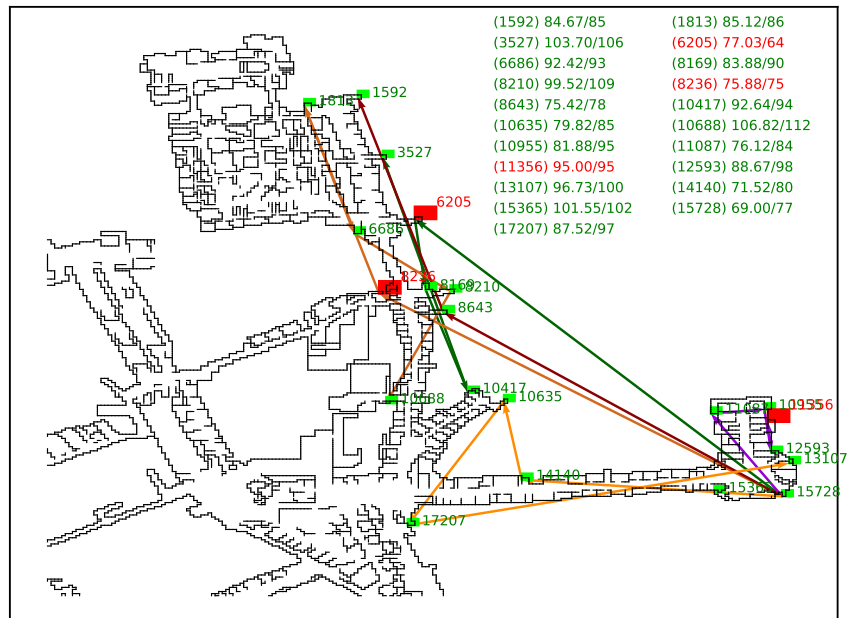


図 10: 設置開始時刻 64 分，設置チーム数 5，稼働時間上限なしでの最適な止水板設置順序

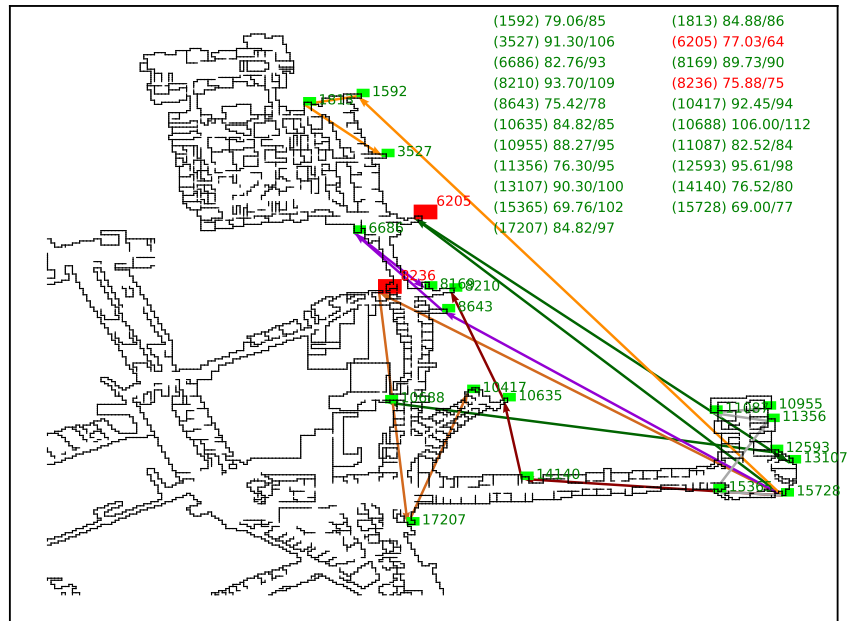


図 11: 設置開始時刻 64 分，設置チーム数 6，稼働時間上限なしでの最適な止水板設置順序

とによって，被害を最小限に食い止めることができるであろう。

## 6 おわりに

本研究では、梅田地下街のそれぞれの管理主体と設置チームの稼働時間を考慮して止水板の最適設置順序の算出を行うことができた。多くのケースの実験を行うことができ、その結果を比較することができた。

本研究では流入する出入り口が一番多いホワイティうめだのみに限定して実験を行ったが、梅田地下街全域に流入する出入口は存在する。今後の課題としては、ホワイティうめだ以外の管理主体についても最適な止水板設置順序を検討する必要がある。また、1時間の降雨量 120mm、排水ポンプ稼働の場合のみの実験しか行っていないので、降雨量を変化させたときや排水用ポンプが停止している場合の止水板の設置順序を検討する必要がある。

また、現在用いている最適化モデルでは、表 5 でもあったように、一定の計算時間を確保しても暫定解が得られないなど、計算時間が長くなる傾向がある。これを改良することも今後の課題である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，忙しい中，丁寧かつ熱心にご指導いただいた檀寛成教授に深く感謝いたします。

また，日頃からお世話になったシステム最適化研究室皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げて，謝辞にかえさせていただきます。

平成 30 年 2 月 12 日

## 参考文献

- [1] 井上 和美, 川中 龍児, 石垣 泰輔, 尾崎 平, 戸田 圭一, 内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討, 水工学論文集, 55,s973 – s978 (2011).
- [2] 馬谷 慎太郎, 流入開始時刻を考慮した地下街出入り口への最適な止水板設置順序の算出, 関西大学環境都市工学部 2016 年度卒業論文 (2017).
- [3] 岡部 良治, 内水・外水氾濫時における地下鉄浸水に関する研究, 関西大学大学院理工学研究科 2016 年度修士論文 (2017).
- [4] 岡本 聡, 使ってみよう GLPK  
[http://www.yamanaka.ics.keio.ac.jp/wp-content/uploads/2017/04/17Traffic\\_07-08.pdf](http://www.yamanaka.ics.keio.ac.jp/wp-content/uploads/2017/04/17Traffic_07-08.pdf)  
(2018 年 2 月 4 日確認).
- [5] 尾崎 平, 浅野 統弘, 石垣 泰輔, 戸田 圭一, 短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1, 70,4 (2014).
- [6] 株式会社 オ ク ト ー バ ー ・ ス カ イ, Gurobi – フォーカスシステムズ  
<http://www.focus-s.com/focus-s/media/1-Gurobi.pdf>(2018 年 2 月 4 日確認).
- [7] 国土交通省, 大都の無防備な地下空間を襲った集中豪雨  
[http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/bousai/saigai/1999/html/e001.htm](http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/1999/html/e001.htm)  
(2018 年 1 月 22 日確認).
- [8] 国土交通省, 地下空間における浸水対策ガイドライン  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyo\\_keikaku/saigai/tisiki/chika/pdf/honpen.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/saigai/tisiki/chika/pdf/honpen.pdf)  
(2018 年 1 月 22 日確認).
- [9] 鈴木 敦夫, 秋田 大輔, 加藤 遥, 森口 元気, 時空間ネットワークを用いたフライトパターンの列挙について <http://www.st.nanzan-u.ac.jp/info/gr-thesis/2012/09se004.pdf>(2018 年 1 月 25 日確認).
- [10] 武田 侑也, 大規模地下空間における内水氾濫による浸水対策の検討, 関西大学環境都市工学部 2015 年度卒業論文 (2016).
- [11] 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社, 集中豪雨の増加傾向と水害への対応  
[http://www.tokiorisk.co.jp/risk\\_info/up\\_file/201306171.pdf](http://www.tokiorisk.co.jp/risk_info/up_file/201306171.pdf)(2018 年 2 月 11 日確認).
- [12] 東京大学社会情報研究所, 2000 年東海豪雨災害における災害情報の伝達と住民の対応  
<http://www.hiroi.iii.u-tokyo.ac.jp/index-houkokusho-rist-tokaigou.pdf>(2018 年 2 月 11 日確認).
- [13] 内閣府 (防災担当), 平成 20 年 4 月 2 日, 帰宅行動シュミレーション結果について (概要)  
[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/shiryo\\_1.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/shiryo_1.pdf)  
(2018 年 2 月 1 日確認).

- [14] 名古屋地方気象台, 平成 20 年 8 月末豪雨により被災した自治体への聞き取りから得られた課題  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/77/vol77p115+.pdf>(2018 年 2 月 11 日確認).
- [15] 福島 雅夫, 新版 数理計画入門, 朝倉書店 (2011).
- [16] 森兼 政行, 石垣 泰輔, 尾崎 平, 戸田 圭一, 大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内  
水氾濫の流入特性とその対策, 水工学論文集, 55,s967 – s972 (2011).

## A 本研究で使用したモデルファイル

5 章で行った数値実験で用いたモデルファイルは以下の通りである（実験設定に応じて多少変更しながら計算を行った）。

```
set V;          # Vertex
set E dimen 2;  # Edge
set L;          # Layer {0, 1, ...}
set P;          # Team

param f{V};     #
param w{E};     # Weight of edge
param s;        # Start
param u;        # Installing time for one waterstop
param M;        # Big-M
param lm;       # num of layer
param speed;    # 66.0
param st;       # start time, 60?

var x{V, L, P}, binary; #
var y{E, L, P}, binary; #
var t{L, P};         # Time
var t_{L, P};        # Ideal Time
var d{L, P}, >= 0.0; # Delay

#####

minimize Objective:
    sum {l in L, p in P: l >= 1} d[l, p];
#sum{p in P}t[lm,p];

subject to InitialPosition {p in P}:
    x[s, 0, p] == 1;

subject to AllWaterstop {v in V}:
    sum {l in L, p in P: l >= 1} x[v, l, p] == 1;
```

```

subject to OneByOne {l in L, p in P}:
    sum {v in V} x[v, l, p] <= 1;

subject to SequentialInstall {v in V}:
    sum {(v_, v) in E, l in L, p in P: l >= 1} y[v_, v, l - 1, p] == 1;

subject to UsingEdge_1 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v1, l - 1, p] >= y[v1, v2, l - 1, p];

subject to UsingEdge_2 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v2, l, p] >= y[v1, v2, l - 1, p];

subject to UsingEdge_3 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v1, l - 1, p] + x[v2, l, p] - y[v1, v2, l - 1, p] <= 1;

subject to InstallingTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    t[l, p]
        == sum {l_ in L, (v1, v2) in E: l_ < l} y[v1, v2, l_, p] * w[v1, v2] / speed
        + (sum {v in V, l_ in L: l_ <= l && l_ >= 1} x[v, l_, p]) * u;

subject to IdealInstallingTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    t_[l, p] == sum {v in V} (x[v, l, p] * (f[v] - st));

subject to DelayTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    d[l, p] >= t[l, p] - t_[l, p] - (1 - sum {v in V} x[v, l, p]) * M;

subject to TimeLimit {p in P}:
    t[lm, p] <= 50;

```



## B 全実験結果

本章では、5 章で行った数値実験結果のうち、実行可能であった全ての実験について、各設置チームの訪問経路と、各出入り口における設置完了時刻ならびに流入開始時刻を図 12 から図 35 に示す。

また、これらの結果における目的関数値（＝各出入り口での流入時間の合計），ならびに最適化計算に要した時間（3600 秒を上限として実行），計算終了時点での目的関数値が含むうるギャップを表 8 に示す。

整数変数を含む最適化問題をソルバで解く際には、計算終了時点でのギャップに注意する必要がある。もし計算時間が事前に設定した打ち切り時間に達すると、ソルバは最適化計算を終了し、その時点で得られている最良の実行可能解を暫定解として出力する。この場合、計算終了時点での目的関数値を  $f$ ，ギャップを  $g(\%)$  とすると、真の最適解における目的関数値は  $(1 - g/100)f$  以上  $f$  以下であることが保証されている（最小化問題の場合）。

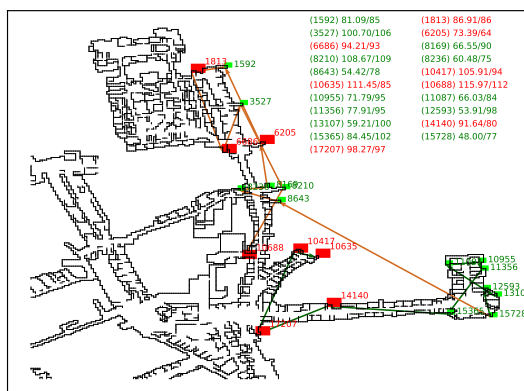


図 12: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 2, 稼働時間上限なし

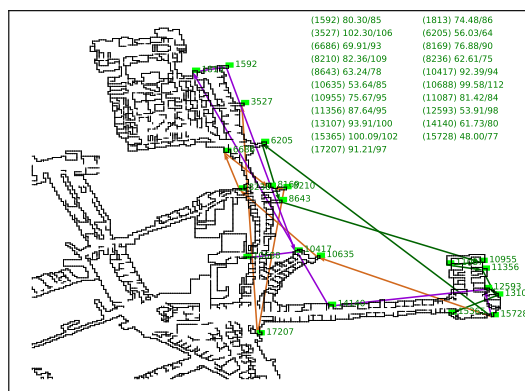


図 13: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 3, 稼働時間上限なし

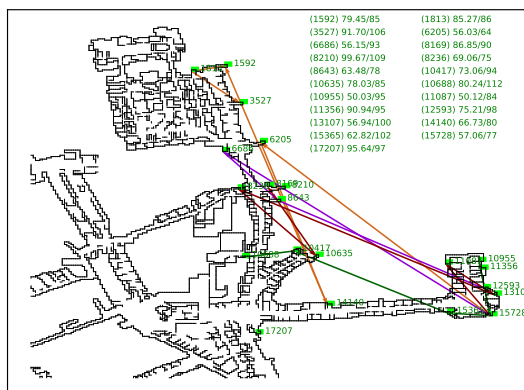


図 14: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 4, 稼働時間上限なし

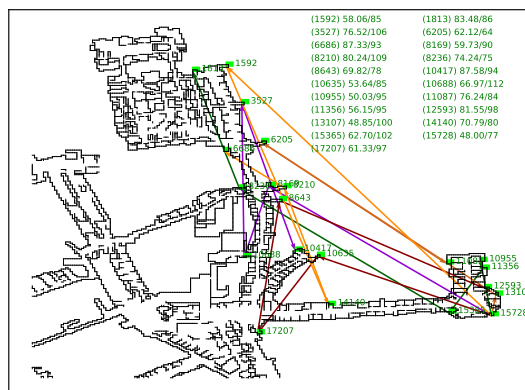


図 15: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 5, 稼働時間上限なし

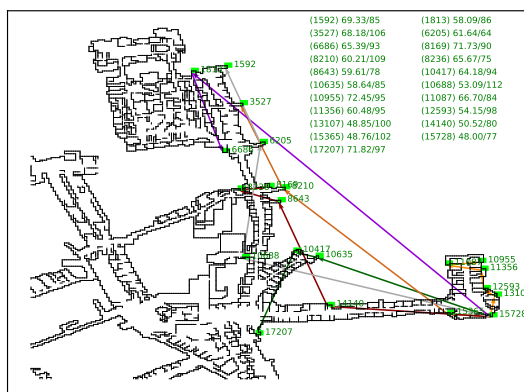


図 16: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限 30 分

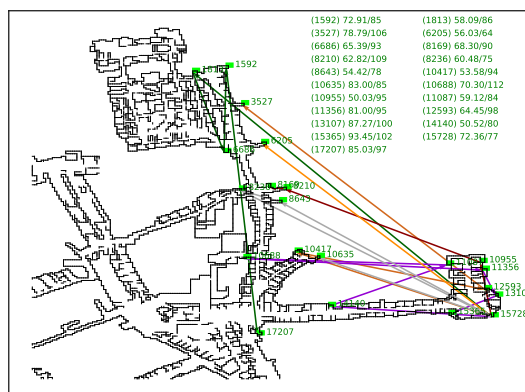


図 17: 設置開始時刻 43 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限なし

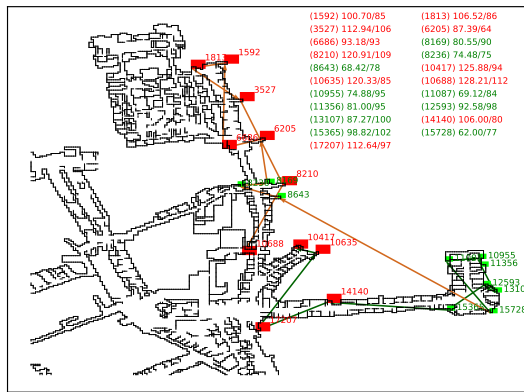


図 18: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 2, 稼働時間上限なし

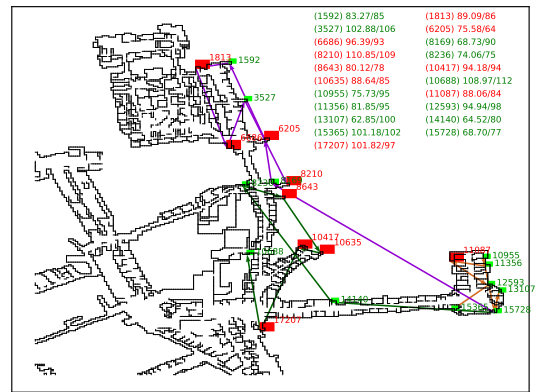


図 19: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 3, 稼働時間上限なし

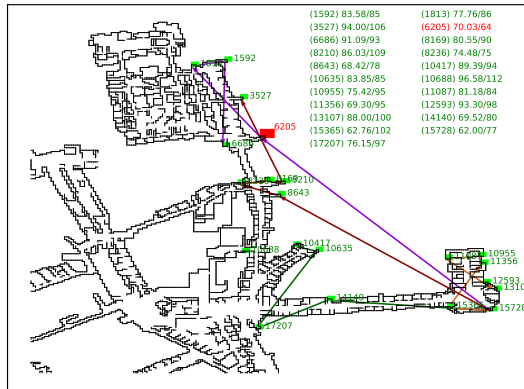


図 20: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 4, 稼働時間上限 40 分

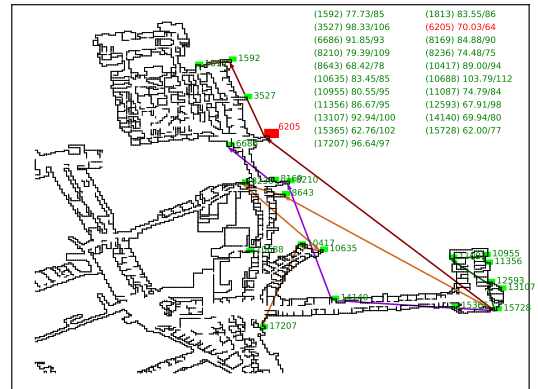


図 21: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 4, 稼働時間上限なし

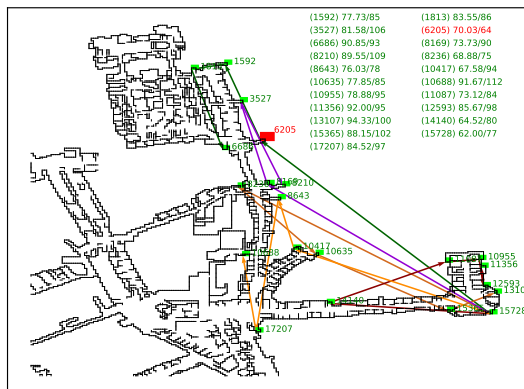


図 22: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 5, 稼働時間上限 40 分

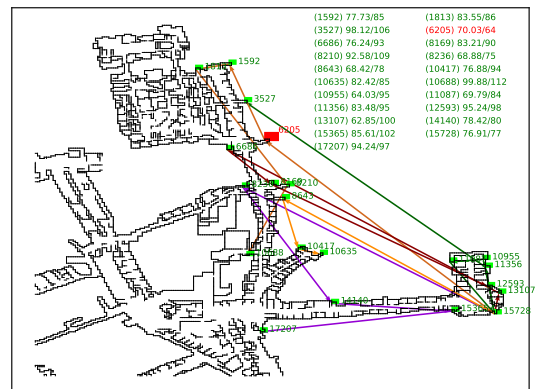


図 23: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 5, 稼働時間上限なし

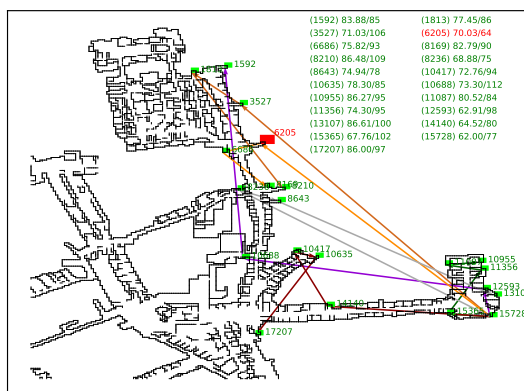


図 24: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限 30 分

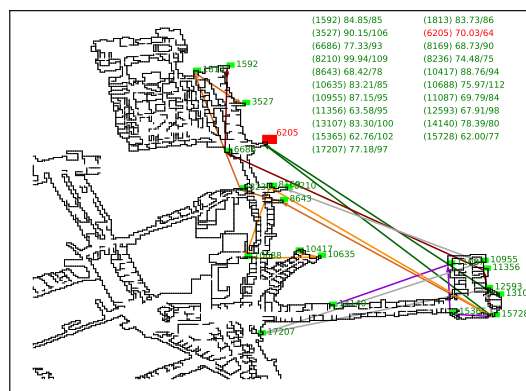


図 25: 設置開始時刻 57 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限なし

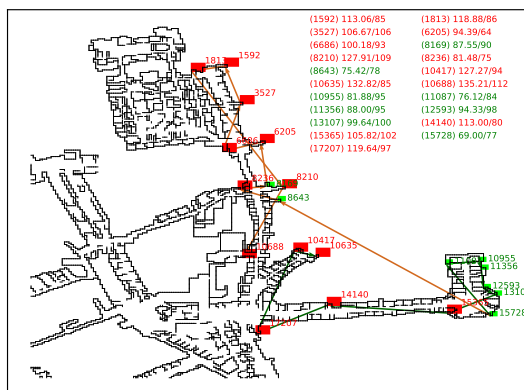


図 26: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 2, 稼働時間上限なし

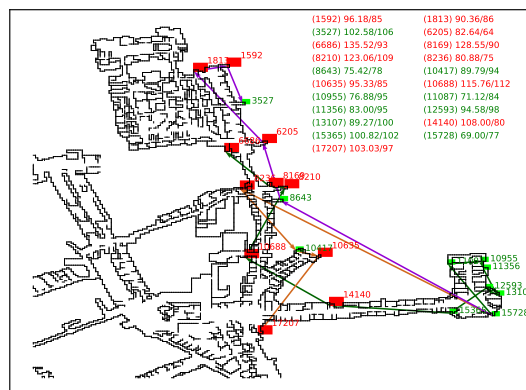


図 27: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 3, 稼働時間上限 40 分

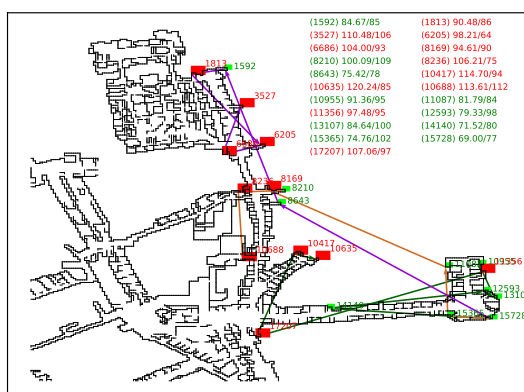


図 28: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 3, 稼働時間上限 50 分

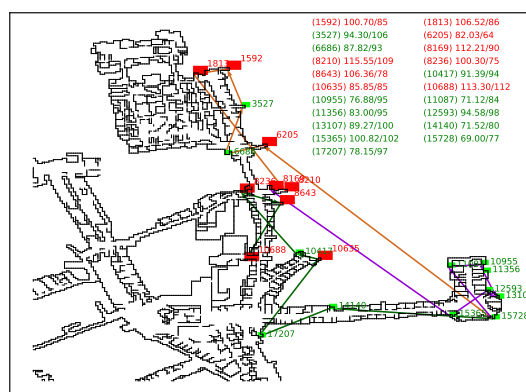


図 29: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 3, 稼働時間上限なし

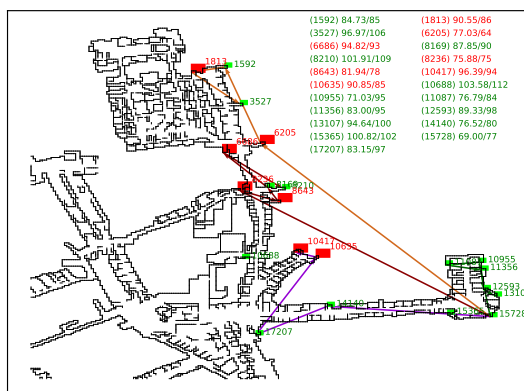


図 30: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 4, 稼働時間上限 40 分

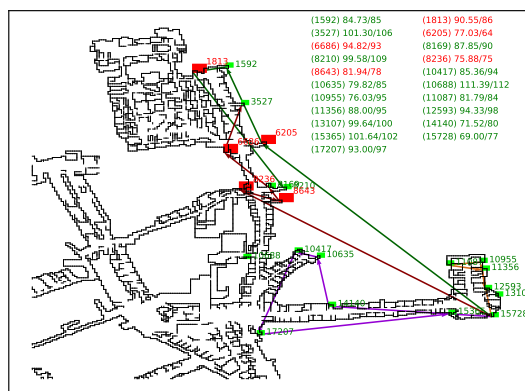


図 31: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 4, 稼働時間上限なし

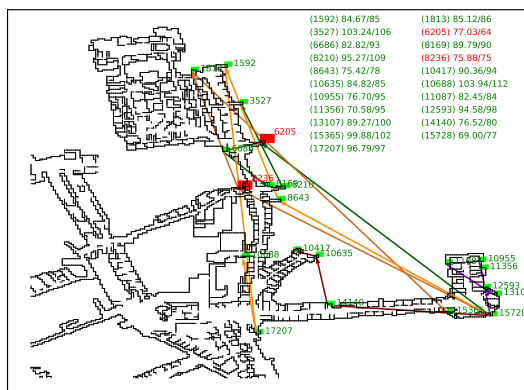


図 32: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 5, 稼働時間上限 40 分

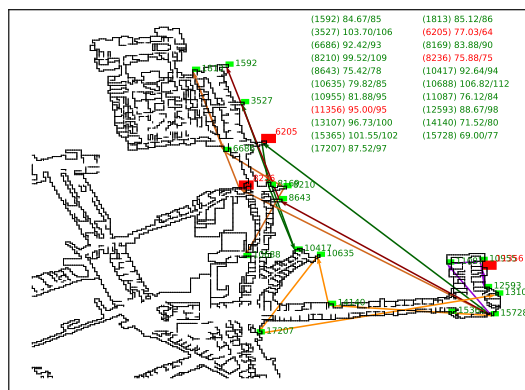


図 33: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 5, 稼働時間上限なし

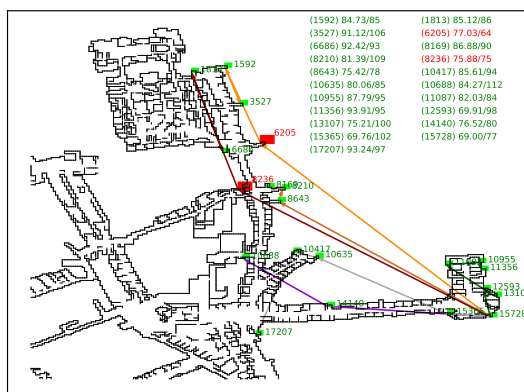


図 34: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限 30 分

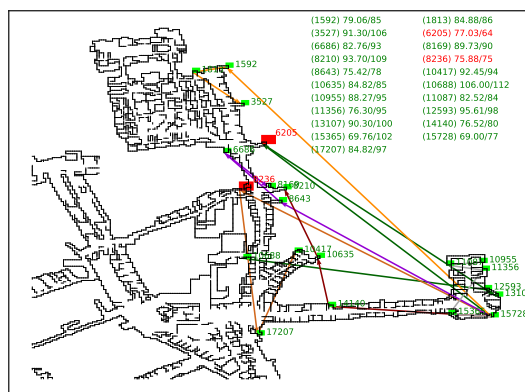


図 35: 設置開始時刻 64 分,  
設置チーム数 6, 稼働時間上限なし

表 8: 各実験における目的関数値等

設置開始時刻 (分)	設置チーム数	稼働時間上限 (分)	流入時間合計 (分)	計算時間 (秒)	GAP(%)
43	2	設定なし	66.76	3600.06	100.00
43	3	設定なし	0.00	3186.69	–
43	4	設定なし	0.00	4.64	–
43	5	設定なし	0.00	402.29	–
43	6	30	0.00	31.45	–
43	6	設定なし	0.00	230.62	–
57	2	設定なし	203.70	3600.28	100.00
57	3	設定なし	34.73	3600.08	100.00
57	4	40	6.03	539.69	–
57	4	設定なし	6.03	427.98	–
57	5	40	6.03	171.66	–
57	5	設定なし	6.03	89.58	–
57	6	30	6.03	409.37	–
57	6	設定なし	6.03	59.94	–
64	2	設定なし	288.33	3600.09	–
64	3	40	183.30	3600.08	96.84
64	3	50	160.09	3600.35	96.88
64	3	設定なし	138.82	3600.14	96.40
64	4	40	32.45	3600.08	59.85
64	4	設定なし	24.21	3600.03	46.18
64	5	40	13.91	1300.32	–
64	5	設定なし	13.91	939.54	–
64	6	30	13.91	1540.24	–
64	6	設定なし	13.91	588.00	–