

2018年度
卒業論文

ティルトロータ型UAVにおける
低速飛行特性の解析

神戸大学工学部情報知能工学科

弓場 洋輝

指導教員 玉置 久 教授, 浦久保 孝光 准教授

2019年2月13日



Copyright © 2019, Hiroki Yuba

ティルトロータ型UAVにおける 低速飛行特性の解析

弓場 洋輝

要 旨

貯水施設や発電機がある放流路など様々な放流路から構成される水系の運用について、水系に存在する種々の制約を満たしつつも、効率的に水資源を利用する水系運用計画を作成することが肝要である。本研究では、効率的かつ実用的な水系運用計画の作成問題を対象として、数理計画モデルの一構成法を示すとともに、その妥当性について検討する。

現状では、水系支援システムは種々の制約の充足などの機能が十分ではなく、実用的なものではない。そのため、運用計画の作成は現場の人手による対応に委ねられる部分が多くなっている。本研究では、まず水系運用最適化問題を一般的に定義し、その定義に基づき、数理計画モデルとして定式化を行なう。構成した数理計画モデルを現実的な水系を対象とした計算例を通して、モデルの妥当性について検討する。

計算例より、制約を満たしつつ、水の効率的な運用がなされていることが確認できた。この結果より提案モデルが一定の妥当性を有するものと考えられる。水系運用計画を現実の運用に耐え得るものとするための、モデルのさらなる拡充・改良が今後の課題となる。

目 次

第 1 章	序論	1
第 2 章	実験機体	2
2.1	問題の概要	2
2.2	問題の記述	2
2.2.1	基本要素	2
2.2.2	制約条件	3
2.2.3	評価指標	5
2.3	まとめ	5
第 3 章	機体モデル	6
3.1	基本要素	6
3.2	制約条件	10
3.3	目的関数	14
3.4	まとめ	14
第 4 章	システム同定	15
4.1	問題設定	15
4.2	計算結果および考察	19
4.3	まとめ	25
第 5 章	まとめ (仮)	26

第 6 章 結論	27
謝辭	28
参考文献	29
付録	

第1章 序論

電力の消費は、季節によっても、また、1日の中でも昼間と夜間では大きな差がある。このような電力需要の変化に対応するために、様々な電源をバランスよく組み合わせる必要となる。水力発電は他の電源と比較して、短い時間で発電開始が可能であり、また、発電機出力の安定性や負荷変動に対する追従性の面で優れており、1日の電力需要のピークを支える役割が期待される。その一方で、水力発電は上流の貯水施設でせき止めた水を放流することによって行なわれるため、周辺の自然環境や生活環境に及ぼす影響にも配慮する必要がある。そのため、環境の維持などの条件を満たしつつ、貯水施設や発電機から成る水系を効率良く運用する計画の立案が肝要である。

水系運用に関する研究・開発についてみると、水系運用を支援する方策・システムに関するものが数多く報告されているものの [1, 2, 5]，水系運用計画を取り扱ったものはほとんどない [3, 4]。また、現状の水系運用計画・支援システムでは種々の制約の充足が不十分であり、運用（計画）の良し悪しは現場の人手に委ねられる部分が多く、計画の作成に時間を要する上に、必ずしも水資源が効率良く運用されているとはいえないという問題点がある。

そこで、本研究では水資源の効率的な運用を目的とし、必要となる制約をすべて盛り込んだ数理計画モデルを構築する。さらに、構築した数理計画モデルを例題に適用した結果を示し、構築したモデルの妥当性について検討する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第2章では本研究で対象とする水系運用計画最適化問題の一般的な定義を行なう。第3章では、第2章で示した定義に基づいて、水系運用計画最適化問題の数理計画モデル化を行なう。第4章では計算例を通して、第3章で記述したモデルの妥当性を検討する。第5章では、結論として本研究で得られた成果と今後の課題を要約する。

第2章 実験機体

本章では，水系運用計画最適化問題について記述する．まず，水系運用計画最適化問題の概要について記述し，問題の基本要素と制約条件を述べる．

2.1 問題の概要

水系運用計画最適化問題とは，貯水施設と種々の放流路によって構成される水系において，各時間帯における放流路への放流量，特に，発電機が存在する放流路と貯水施設から水が溢れること（溢水）を防ぐために放流を行なう放流路への放流量を決定する問題である．水系運用計画の作成には，貯水施設や各種放流路に存在する様々な制約を満たす必要がある．

2.2 問題の記述

水系運用計画最適化問題の基本要素，制約条件および評価指標を示す．

2.2.1 基本要素

水系運用計画最適化問題における基本要素を列挙する．

ダム

ダムは放流路への水の放流を行なうものである．ダムには貯水機能を持つ通常のダムと持たないものがあり，貯水機能を持たないものを特に分流施設と呼ぶこととする．通常のダムは上流から流入する水を蓄え，任意の時間帯に放流を行なうことができるが，分流施設は上流から流入する水をそのまま下流へと流すこととなる．

発電放流路

発電放流路は発電機が存在する放流路である。この放流路に放流がなされることによって、発電が行なわれる。

ゲート放流路

ダムからの溢水を防ぐための放流を行なう放流路である。

バイパス放流路

主に周囲の環境の維持を目的として放流が行われる放流路である。

スイッチ放流路

特定の発電機群の運転状況に応じて放流が行なわれる放流路である。発電機群が運転していれば放流が行なわれる放流路と停止していれば放流が行なわれる放流路の2つが存在する。

特別放流路

以上の放流路のいずれにも属さず、発電・ゲート放流量を決定することにより、放流量が定まる放流路である。

2.2.2 制約条件

水系運用計画最適化問題における制約条件を要素ごとにまとめる。

ダム

- 貯水量制約

ダムの貯水量が許容範囲内にならない。

- 最終貯水量制約

ダムの貯水量の最終値が許容範囲内にならない。

発電放流路

- 水量制約
発電機の運転時には使用水量が許容範囲内にならない。
- 電水比制約
電水比により，発電機の使用水量と発電電力量が規定される。
- 計画運転・停止制約
計画運転・停止期間において発電機は運転，または停止状態にならない。
- 短時間運転・停止制約
短時間の間に発電機の運転と停止を切り替えるのは望ましくなく，停止している発電機を起動すると，一定時間は運転を継続する必要がある。また，発電機を停止すると，起動には一定時間間隔を空ける必要がある。
- ALL 制約
周囲の環境への影響を抑えるため，発電所（特定の発電機の組）に使用する水量は段階的に上昇させなければならない。
- 夜間出力増制約
発電機の出力増加には騒音が伴うため，夜間の時間帯では発電機の出力を増加させてはならない。

スイッチ放流路

- 分流制約
スイッチ放流路は特定の発電機群の運転状況によって，放流を行なうかどうかが決まる。発電機群が運転しているときに放流を行なう放流路と停止しているときに放流を行なう放流路の2つがある。

ゲート放流路，スイッチ放流路，特別放流路

- 放流量制約
すべての放流路について，放流量は許容範囲内にならない。

2.2.3 評価指標

時間帯ごとの発電価値の総和最大化とゲート放流量の総和最小化を評価指標とする.

2.3 まとめ

本章では, 水系運用計画最適化問題の概要を述べ, 問題の基本要素, 制約条件ならびに評価指標について記述した. 次章では, 本章での記述に基づいた数理計画モデルを示す.

第3章 機体モデル

??章で述べた水系運用計画最適化問題の記述に基づき，数理計画モデルを構築する．まず，問題の基本要素と属性を表す記号を導入した上で，目的関数および制約条件を形式的に記述する．

3.1 基本要素

水系運用計画最適化問題の基本要素とその属性を示す．なお，以下で各要素の先頭に付した記号は★：決定変数，○：従属変数，●：定数，をそれぞれ意味する．

(1) ダム D_i ($i \in \mathcal{D}$)

- 貯水量： $s_i(k)$
- 許容貯水量の上限値： s_i^{Max}
- 許容貯水量の下限値： s_i^{Min}
- 最終貯水量の上限値： $s_i^{\text{Last,Max}}$
- 最終貯水量の下限値： $s_i^{\text{Last,Min}}$
- 渓流量： $a_i(k)$

ただし，

- 貯水量：ダム i の第 k 時間帯初頭における貯水量 $[\text{m}^3]$.
- 貯水量上限値：ダム i の許容貯水量の上限値 $[\text{m}^3]$.
- 貯水量下限値：ダム i の許容貯水量の下限値 $[\text{m}^3]$.
- 最終貯水量上限値：ダム i の貯水量の最終値の上限値 $[\text{m}^3]$.
- 最終貯水量下限値：ダム i の貯水量の最終値の下限値 $[\text{m}^3]$.
- 渓流量：第 k 時間帯にダム i に流入する雨水などの水量 $[\text{m}^3]$.

(2) 発電放流路 $G_{ii'j}$ ($(i, i') \in \mathcal{P}^G \Gamma j \in \mathcal{J}_{ii'}, \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{P}^G \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{J}_{ii'} \Gamma \Gamma \Gamma ii' \Gamma$

- ★ 発電放流量 : $q_{ii'j}^G(k)$
- 発電量 : $y_{ii'j}^G(k)$
- 流下時間帯数 (上部) : $\tau_{ii'j}^{G,Up}$
- 流下時間帯数 (下部) : $\tau_{ii'j}^{G,Down}$
- 最大水量 : $q_{ii'j}^{G,Max}$
- 最小水量 : $q_{ii'j}^{G,Min}$
- 電水比 : $\alpha_{ii'j}$
- 運転フラグ : $z_{ii'j}^G(k) \in \{0, 1\}$
- ★ 停止フラグ : $z_{ii'j}^{G,OFF}(k) \in \{0, 1\}$
- ★ 起動フラグ : $z_{ii'j}^{G,ON}(k) \in \{0, 1\}$
- 停止期間 : $\tau_{ii'j}^{G,OFF}$
- 運転期間 : $\tau_{ii'j}^{G,ON}$
- 計画停止期間 : $\mathcal{K}_{ii'j}^S$
- 計画運転期間 : $\mathcal{K}_{ii'j}^R$

ただし、

- 発電放流量：第 k 時間帯に放流される水量 [m^3] ($k \leq 0$ TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTT).
- 発電量：第 k 時間帯に発電される発電電力量 [kWh].
- 流下時間帯数（上部）：上流ダムから放流した水が発電機に到達するのにかかる時間帯数.
- 流下時間帯数（下部）：発電機から流下した水が下流ダムに到達するのにかかる時間帯数.
- 最大水量：発電に使用可能な最大水量 [m^3].
- 最小水量：発電に使用可能な最小水量 [m^3].
- 電水比：発電電力量と使用水量の比率 [kWh/m^3].
- 運転フラグ：発電機が第 k 時間帯に運転していれば 1，停止していれば 0 となる ($k < 0$ TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTT).

- 停止フラグ：第 k 時間帯初頭 (第 $(k-1)$ 時間帯末尾) に発電機を停止するとき 1, そうでないとき 0 となる ($k \leq 0$ のとき).
- 起動フラグ：第 k 時間帯初頭 (第 $(k-1)$ 時間帯末尾) に発電機を起動するとき 1, そうでないとき 0 となる ($k \leq 0$ のとき).
- 停止期間：発電機を停止させた際に, 最低限停止させておくべき時間帯数.
- 運転期間：発電機を起動させた際に, 最低限運転を継続させるべき時間帯数.
- 計画停止期間：発電機を停止させる時間帯.
- 計画運転期間：発電機を起動させる時間帯.

(3) ゲート放流路 $F_{ii'}$ ($(i, i') \in \mathcal{P}^F, \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{P}^F \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma (\Gamma \Gamma \Gamma) \Gamma \Gamma \Gamma$)

- ★ ゲート放流量： $q_{ii'}^F(k)$
- 放流量上限値： $q_{ii'}^{F, \text{Max}}$
- 流下時間帯数： $\tau_{ii'}^F$

ただし,

- ゲート放流量：第 k 時間帯に放流される水量 [m^3].
- 放流量上限値：ゲート放流量の上限値 [m^3].
- 流下時間帯数：上流ダムから放流した水が下流ダムに到達するのにかかる時間帯数.

(4) バイパス放流路 $B_{ii'}$ ($(i, i') \in \mathcal{P}^B, \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{P}^B \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma (\Gamma \Gamma \Gamma) \Gamma \Gamma \Gamma$)

- 放流量： $q_{ii'}^B(k)$
- 流下時間： $\tau_{ii'}^B$

ここで,

- 放流量：第 k 時間帯に放流される水量 [m^3].
- 流下時間帯数：上流ダムから放流した水が下流ダムに到達するのにかかる時間帯数.

(5) スイッチ放流路 $Y_{ii'}$ ($(i, i') \in \mathcal{P}^Y, \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{P}^Y \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma (\Gamma \Gamma \Gamma) \Gamma \Gamma \Gamma$)

- スイッチ放流量 : $q_{ii'}^Y(k)$
- 放流量上限値 : $q_{ii'}^{Y, \text{Max}}$
- 流下時間帯数 : $\tau_{ii'}^Y$
- 対応発電放流路群 : $C_{ii'}^D$
- 分流条件 : $c_{ii'}^S$
- 流下時間帯数 (発電機) : $\tau_{ii'}$

ただし,

- 放流量上限値 : スイッチ放流量の上限値 $[\text{m}^3]$.
- 流下時間帯数 : 上流ダムから放流した水が下流ダムに到達するのにかかる時間帯数.
- 対応発電放流路群 : スイッチ放流量に関する条件が規定される発電放流路群
- 分流条件 : 対応発電放流路群中の発電放流路が 1 つでも運転しているときにスイッチ放流量が 0 となるととき 0 となり, すべて停止しているときに 0 となるととき 1 となる.
- 流下時間帯数 (発電機) : 上流ダムから放流した水が対応する発電放流路に到達するのにかかる時間帯数.

(6) 特別放流路 $X_{ii'}$ ($((i, i') \in \mathcal{P}^X, \Gamma \Gamma \Gamma \mathcal{P}^X \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma (\Gamma \Gamma \Gamma) \Gamma \Gamma \Gamma)$)

- 放流量 : $q_{ii'}^X(k)$
- 放流量上限値 : $q_{ii'}^{X, \text{Max}}$
- 流下時間帯数 : $\tau_{ii'}^X$

ただし,

- 特別放流路 : 第 k 時間帯に放流される水量 $[\text{m}^3]$.
- 放流量上限値 : 特別放流量の上限値 $[\text{m}^3]$.
- 流下時間帯数 : 上流ダムから放流した水が下流ダムに到達するのにかかる時間帯数.

(7) その他

- 時間帯 : $\mathcal{K} = \{1, \dots, n^K\}$
- 時間帯（過去） : $\mathcal{K}^P = \{0, -1, \dots, n^P\}$
- 時間帯（夜間） : \mathcal{K}^N
- 発電価値 : $\varphi(k)$
- 発電所 : \mathcal{G}_n ($n \in \mathcal{N}$, ただし \mathcal{N} は後述する ALL 制約の対象となる発電放流路群の集合)
- 段階的最大水量 : \hat{q}_n^m
 - 稼働段階 : $\hat{z}_n^m(k) \in \{0, 1\}$ ($m \in \mathcal{M}_n = \{1, \dots, |\mathcal{M}_n|\}$)
- 待機時間 : $\hat{\tau}_n^m$

ここで,

- 時間帯 : 水系運用の対象となる期間.
- 時間帯（過去） : 過去の放流実績などが含まれる時間帯.
- 時間帯（夜間） : 夜間に含まれる時間帯.
- 発電価値 : 第 k 時間帯における単位量当たりの発電価値 [1/kWh].
- 発電所 : 後述する ALL 制約の対象となる発電放流路の組.
- 段階的最大水量 : 発電所 n において第 m 段階で発電に使用可能な最大水量 [m^3].
- 稼働段階 : 第 k 時間帯の発電機の稼働段階. 第 m 段階のとき 1 となり, そうでないとき 0 となる.
- 待機時間 : 発電機の稼働段階が第 m 段階から次の段階に移るまでの時間帯数.

3.2 制約条件

制約条件を以下に示す.

- 貯水量制約

ダム貯水量が許容範囲内になければならない.

$$s_i^{\text{Min}} \leq s_i(k) \leq s_i^{\text{Max}} \quad (\forall i \in \mathcal{D}, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.1)$$

- 最終貯水量制約

ダム貯水量の最終値が許容範囲内になければならない.

$$s_i^{\text{Last,Min}} \leq s_i(|\mathcal{K}| + 1) \leq s_i^{\text{Last,Max}} \quad (\forall i \in \mathcal{D}) \quad (3.2)$$

- 貯水量の推移式

第 k 時間帯に D_i から流出する水量の総和を $O_i(k)$, 流入する水量の総和を $I_i(k)$ とすると, D_i の貯水量は次式に従って推移することになる.

$$s_i(k+1) = s_i(k) + a_i(k) - O_i(k) + I_i(k) \quad (\forall i \in \mathcal{D}, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.3)$$

ここで, D_i の直前にあるダム群および直後にあるダム群を, それぞれ \mathcal{P}_i および \mathcal{S}_i とすると, $O_i(k)$ と $I_i(k)$ は以下ようになる.

$$O_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{J}_{ii'}} \sum_{i' \in \mathcal{S}_i} \{q_{ii'j}^G(k) + q_{ii'}^F(k) + q_{ii'}^B(k) + q_{ii'}^X(k) + q_{ii'}^Y(k)\} \quad (3.4)$$

$$I_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{J}_{ii'}} \sum_{i' \in \mathcal{P}_i} \{q_{i'ij}^G(k - \tau_{i'ij}^{\text{G,Up}} - \tau_{i'ij}^{\text{G,Down}}) + q_{i'i}^F(k - \tau_{i'i}^F) + q_{i'i}^B(k - \tau_{i'i}^B) + q_{i'i}^X(k - \tau_{i'i}^X) + q_{i'i}^Y(k - \tau_{i'i}^Y)\} \quad (3.5)$$

- 水量制約

発電機の運転時には使用水量が許容範囲内になければならない.

$$z_{ii'j}^G(k) q_{ii'j}^{\text{G,Min}} \leq q_{ii'j}^G(k) \leq z_{ii'j}^G(k) q_{ii'j}^{\text{G,Max}} \quad (3.6)$$

$$(\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K})$$

- 電水比制約

電水比により, 発電機の使用水量と発電電力量が規定される.

$$y_{ii'j}^G(k) = \alpha_{ii'j} q_{ii'j}^G(k - \tau_{ii'j}^{\text{G,Up}}) \quad (\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.7)$$

- 計画運転・停止制約

計画運転・停止期間において発電機は運転, または停止状態になければならない.

$$z_{ii'j}^G(k) = 1 \quad (\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K}_{ii'j}^R) \quad (3.8)$$

$$z_{ii'j}^G(k) = 0 \quad (\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K}_{ii'j}^S) \quad (3.9)$$

Table 3.1: Relation of flags

	$z_{ii'j}^G(k-1)$	$z_{ii'j}^G(k)$	$z_{ii'j}^{G,ON}(k)$	$z_{ii'j}^{G,OFF}(k)$
Start up	0	1	1	0
Stop	1	0	0	1
Continuation of stop	0	0	0	0
Continuation of run	1	1	0	0

- 短時間運転・停止制約

発電機を運転させると、期間 $\tau_{ii'j}^{G,ON}$ は運転を継続する必要がある。また、停止させると期間 $\tau_{ii'j}^{G,OFF}$ の間を空ける必要がある。

$$z_{ii'j}^G(k') \geq z_{ii'j}^{G,ON}(k) \quad (3.10)$$

$$(\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P, k' \in \{k, \dots, k + \tau_{ii'j}^{G,ON} - 1\})$$

$$z_{ii'j}^G(k') \leq 1 - z_{ii'j}^{G,ON}(k) \quad (3.11)$$

$$(\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P, k' \in \{k, \dots, k + \tau_{ii'j}^{G,OFF} - 1\})$$

ここで、各フラグには Table. 3.1 に示す関係が成り立つ。

$z_{ii'j}^G(k), z_{ii'j}^G(k-1), z_{ii'j}^{G,ON}(k)$ について、この関係を線形の式で表す。

$$z_{ii'j}^{G,ON}(k) \geq z_{ii'j}^G(k) - z_{ii'j}^G(k-1) \quad (3.12)$$

$$z_{ii'j}^{G,ON}(k) \leq \frac{z_{ii'j}^G(k) - z_{ii'j}^G(k-1) + 1}{2} \quad (3.13)$$

同様に、 $z_{ii'j}^G(k), z_{ii'j}^G(k-1), z_{ii'j}^{G,OFF}(k)$ についても、線形の関係式で表す。

$$z_{ii'j}^{G,OFF}(k) \geq z_{ii'j}^G(k-1) - z_{ii'j}^G(k) \quad (3.14)$$

$$z_{ii'j}^{G,OFF}(k) \leq \frac{z_{ii'j}^G(k-1) - z_{ii'j}^G(k) + 1}{2} \quad (3.15)$$

発電機の起動と停止が同時に行なわれることはないので、

$$z_{ii'j}^{G,ON}(k) + z_{ii'j}^{G,OFF}(k) \leq 1 \quad (3.16)$$

$$(\forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall (i, i') \in \mathcal{P}^G, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P)$$

- ALL 制約

発電所（特定の発電機の組）に使用可能な最大水量について、段階的に最大

水量が上昇する.

発電所へ使用する水量は特定の発電放流路への放流量の和として表される.

$$\hat{q}_n^G(k) = \sum_{((i,i'),j) \in G_n} q_{ii'j}^G(k) \quad (\forall n \in \mathcal{N}, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P) \quad (3.17)$$

発電所へ使用可能な最大水量は稼働段階に応じた値になる.

$$\hat{q}_n^G(k) \leq \sum_{m \in \mathcal{M}_n} \hat{q}_n^m z_n^m(k) \quad (\forall n \in \mathcal{N}, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P) \quad (3.18)$$

稼働段階はいずれか1つのみが1になる.

$$\sum_{m \in \mathcal{M}_n} z_n^m(k) = 1 \quad (\forall n \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}_n, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P) \quad (3.19)$$

段階 m にある発電所への放流量が最大水量 \hat{q}_n^m に達したとき, 待機時間 $\hat{\tau}_n^m$ をおいて段階 $m+1$ に移ることができる.

$$\hat{q}_n^G(k - \hat{\tau}_n^m) \geq \hat{q}_n^m z_n^{m+1}(k) \quad (\forall n \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}_n, \forall k \in \mathcal{K} \cup \mathcal{K}^P) \quad (3.20)$$

- 夜間出力増制約

夜間の時間帯では発電機の出力を増加させてはならない.

$$y_{ii'j}(k-1) \geq y_{ii'j}^G(k) \quad (\forall (i,i') \in \mathcal{P}^G, \forall j \in \mathcal{J}_{ii'}, \forall k \in \mathcal{K}^N) \quad (3.21)$$

- 放流量制約

それぞれの放流量は許容範囲内になければならない.

$$0 \leq q_{ii'}^F(k) \leq q_{ii'}^{F, \text{Max}} \quad (\forall (i,i') \in \mathcal{P}^F, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.22)$$

$$0 \leq q_{ii'}^Y(k) \leq q_{ii'}^{Y, \text{Max}} \quad (\forall (i,i') \in \mathcal{P}^Y, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.23)$$

$$0 \leq q_{ii'}^X(k) \leq q_{ii'}^{X, \text{Max}} \quad (\forall (i,i') \in \mathcal{P}^X, \forall k \in \mathcal{K}) \quad (3.24)$$

- 分流制約

放流路 ll' に存在する発電機の運転状況に応じて, D_i で水の流れを切り替える. 対応する発電機群が1つでも運転していれば, 分流条件が1のスイッチ放流路に放流を行ない, 運転しているものがなければ分流条件が0のスイッチ

放流路に放流を行なう．

分流条件が1のスイッチ放流路の放流量への制約は次式のようになる．

$$q_{ii'}^X(k) \leq q_{ii'}^{X, \text{Max}} \sum_{((l, l'), j) \in \mathcal{C}_{ii'}^D} z_{ll'j}^G(k + \tau_{ii'}) \quad (3.25)$$

$$(\{(i, i') | c_{ii'}^S = 1, (i, i') \in \mathcal{P}^Y\}, \forall k \in \mathcal{K})$$

分流条件が0のスイッチ放流路の放流量への制約は次式のようになる．

$$q_{ii'}^X(k) \leq (1 - z_{ll'j}^G(k + \tau_{ii'})) q_{ii'}^{X, \text{Max}} \quad (3.26)$$

$$(\{(i, i') | c_{ii'}^S = 0, (i, i') \in \mathcal{P}^Y\}, ((l, l'), j) \in \mathcal{C}_{ii'}^D, \forall k \in \mathcal{K})$$

3.3 目的関数

発電価値の総和最大化とゲート放流量の総和最小化を統合したものを用いる．

$$\max \quad z = \sum_{j \in \mathcal{J}_{ii'}} \sum_{(i, i') \in \mathcal{P}^G} \sum_{k \in \mathcal{K}} \varphi(k) y_{ii'j}^G(k) - w \sum_{(i, i') \in \mathcal{P}^F} \sum_{k \in \mathcal{K}} q_{ii'}^F(k) \quad (3.27)$$

ここで、 w はゲート放流量の総和に応じたペナルティの重み係数である．

3.4 まとめ

本章では、??章の水系運用計画最適化問題の定義に基づき、数理計画モデルの定式化を行なった．次章では、計算例を用いて、このモデルの妥当性について検討する．

第4章 システム同定

本章では、に示した数理計画モデルによる、実際の水系に準ずる例題を用いた計算例を示し、構築したモデルの妥当性について検討する。なお、求解には数理計画パッケージ CPLEX12[6] を用いた。

4.1 問題設定

計画期間を 24 時間、時間帯幅を 10 分とした問題を考える。Fig. 4.1 および Fig. 4.2 に対象とする水系と各時間帯における発電価値を示す。発電価値は需要が多い時間帯に高くなることから、今回は需要曲線を元に作成したものを使用した。Fig. 4.1 における、台形、長方形および円形のシンボルがそれぞれダム、分流施設、発電放流路を表している。

また、Tables. 4.6～4.6 に水系の基本情報などのパラメータの設定値を示す。問題の設定として、以下を想定する。

- スイッチ放流路 $Y_{5,6}$ $\Gamma Y_{5,7}$ は発電機 G_{810} 系と対応しており、 G_{810} 系の運転時には $Y_{5,7}$ に放流を行ない、停止時には $Y_{5,6}$ に放流を行なう。
- 目的関数については $w = 100,000$ とし、ゲート放流に対するペナルティが大きくなるようにすることで、ゲート放流量を可能な限り抑える。
- 短時間運転・停止制約における連続運転・停止期間を 1 時間として設定する。
- 20 時から 6 時を夜間とする。
- 計画運転・停止期間は設定しない。
- D_2 については、そこからの発電放流量はすべて予め計画されているものとする。
- バイパス放流量および溪流量はそれぞれの放流路やダムで常に一定とし、1 時間帯当たりの水量を Table. 4.7 および 4.8 に示す。

Figure 4.1: Water system

Figure 4.2: Value of electric energy

Table 4.1: Storage of dam				
Number	1	2	3	4
s^{Min}	142,707	0	625,409	1,152,112
s^{Max}	553,791	117,935,420	1,370,298	2,698,099

Table 4.2: Generator Data

Generator Number	131	132	231	341	451	8101	8102	9101
$q^{G,Max}[m^3]$	20640	20640	39000	22200	23640	13080	13080	3000
$q^{G,Min}[m^3]$	5400	5400	8520	7041	8006	1344	1344	124
$\alpha[kWh/m^3]$	0.0788	0.0786	0.6069	0.0583	0.1680	0.3250	0.3222	0.6888
$\tau^{G,Up}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\tau^{G,Down}$	2	2	1	2	2	0	0	0

Table 4.3: Gate waterway Data

Number	13	23	34	46
$q^{F,Max}[10^{-4} \cdot m^3]$	138	102	174	180
τ^F	0	0	0	0

Table 4.4: Special waterway Data

Number	67	78	710	610	910
$q^{X,Max}[m^3]$	24,000	24,000	24,000	2,100,000	300,000
τ^X	0	0	0	0	0

Table 4.5: Switch waterway Data

Number	56	57
$q^{Y,Max}[m^3]$	23,700	23,700

Table 4.6: First and last storage of dam

Number	1	2	3	4
$s^{Last,Min}$	409,419	26,340,350	1,156,164	2,247,878
first	409,419	73,786,986	1,156,164	2,247,878
$s^{Last,Max}$	409,419	117,935,420	1,156,164	2,247,878

Table 4.7: Bypass discharge

B ₁₃	B ₂₃	B ₄₆	B ₇₁₀	B ₉₁₀
0	360	0	3,339	0

Table 4.8: Mountain stream

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,000	3,000	1,200	3,000	0	0	0	0	1,440

4.2 計算結果および考察

Figs. 4.3～4.8 に、結果として得られた各ダム貯水量の推移とそのダムからの発電放流量を示す (Figs. 4.3～4.6 においては上下限貯水量も示している)。ただし、 D_8 および D_9 は分流施設であり、貯水機能を持たないので、 $G_{8,10,1}$, $G_{8,10,2}$, $G_{9,10,1}$ への発電放流量のみ Fig. 4.7 および Fig. 4.8 に示している。

Figs. 4.3～4.7 の結果より、いずれの発電放流路においても、発電価値の高い時間帯での可能な限りの放流が行なわれる結果となっていることが確認できる (D_9 は溪流のみが流れ込む分流施設であるため、常に一定の発電放流を行なっている (Fig. 4.8))。また、貯水量および放流量の上下限等の制約も満たされていることがわかる。これらより、本研究で構成した数理計画モデルは妥当なものであると考えられる。

Figure 4.3: Storage in D_1 and Generation Discharge

Figure 4.4: Storage in D_2 and Generation Discharge

Figure 4.5: Storage in D_3 and Generation Discharge

Figure 4.6: Storage in D_4 and Generation Discharge

Figure 4.7: Discharge from D_8

Figure 4.8: Discharge from D_9

4.3 まとめ

本章では、実際の水系に準ずる例題を用いた計算例を示し、その結果から提案モデルの妥当性を確認した。次章では、結論として本研究で得られた成果と今後の課題を要約する。

第5章 まとめ（仮）

第6章 結論

本研究では、より効率的な水資源の活用を目的とした、水系運用計画最適化問題に対する数理計画モデルの一構成を示した。

第??章では、水系運用計画最適化問題の概要と問題の定義について記述した。第3章では、問題を第??章で述べた定義に基づいて、数理計画モデルとして定式化を行なった。第??章では、現実的な水系を対象とした計算例を通してモデルの妥当性を確認した。以上、構成したモデルについて、各種の制約を満たしつつ、発電価値の高い時間帯での可能な限りの放流が行なわれる結果が得られた。これにより、このモデルの一定の妥当性が確認された。

今後の課題としては、

- 計算時間の短縮,
- 時間帯幅の短縮, 計画期間の長期化,

などによって、最適化モデルを現実の運用に適用できるものとする等が挙げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始適切な御指導，御助言を賜りました，玉置久教授に感謝，尊敬の念とともに厚く御礼申し上げます．

また，様々な貴重な御意見，御指導を頂きました太田能准教授，高木由美助手に感謝の意を表します．

さらに，本研究に関して多くの有益な御助言を頂きました関西電力株式会社 牛尾剛氏，竹ノ下経氏に心から感謝の意を表します．

研究室生活を有意義なものとしていただいた，神戸大学大学院システム情報学研究科情報科学専攻玉置研究室の諸先輩方，および同回生諸氏に感謝いたします．

最後に，私を支えてくださった家族に心から感謝いたします．

参考文献

- [1] 細江, 他 : “水系運転業務支援機能の開発,” 中部電力技術開発ニュース, no. 117, pp. 17-18 (2005)
- [2] 鳩野, 他 : “水力発電システム及びその運転計画方法,” 特開 2010-1669, (2010)
- [3] Shyh-Jier Huang : “Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 3, pp.296-301 (2001)
- [4] Shi-Chung Chang, Chun-Hung Chen, I-Kong Fong, Luh, P.B. , ”Hydroelectric generation scheduling with an effective differential dynamic programming algorithm,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 3, pp. 737-743 (1990)
- [5] JAN C. GRYGIER, JERY R. STEDINGER, “Algorithms for Optimizing Hydropower System Operation,” Water Resources Research, vol. 21, no. 1, pp. 1-10 (1985)
- [6] IBM ILOG, “CPLEX 12,” <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/> (2010)

付録

付録です.