

2021 年度 博士論文

導送配水システムにおける運転実績データを
活用した運用管理の高度化に関する研究

足立 進吾

2021 年 9 月

東京都立大学

導送配水システムにおける運転実績データを活用した 運用管理の高度化に関する研究

目 次

第1章 序論.....	1
第1節 日本の水道の現状と課題.....	1
第2節 導送配水システムの運用管理.....	6
第3節 本研究の目的と構成.....	11
参考文献.....	13
第2章 既往研究レビューと本研究の位置づけ.....	15
第1節 レビュー観点と構成.....	15
第2節 安定的かつ効率的な水運用.....	16
第3節 漏水事故発生 of 監視.....	26
第4節 本研究の位置づけ.....	30
参考文献.....	33
第3章 運転実績データの分析に基づく配水池運用の最適化.....	37
第1節 緒言.....	37
第2節 対象システムと従来運用.....	38
第3節 配水池運用計画の立案方法.....	47
第4節 有効性の評価.....	56
第5節 結言.....	71
参考文献.....	72
第4章 運転実績データの再現を基準とする配水池運用モデルのパラメータ決定.....	73
第1節 緒言.....	73
第2節 対象システムの従来運用と最適運用モデル.....	75
第3節 パラメータ決定手法.....	79
第4節 有効性の評価.....	82
第5節 結言.....	100
参考文献.....	101

第5章 配水流量予測モデルを複数併用する漏水事故発生の監視	103
第1節 緒言	103
第2節 配水流量の監視手法	105
第3節 模擬漏水事故データを用いた評価	111
第4節 結言	130
参考文献	131
第6章 結論	133
第1節 研究の成果	133
第2節 今後の課題	135
付録	137
主な記号の一覧	137
数理最適化問題の定式化	139
参考文献	141
謝辞	143

第1章 序論

第1節 日本の水道の現状と課題

水道は、市民生活や都市活動を維持するための清浄にして豊富低廉な水の供給を目的とし、河川や地下水などの原水を浄水場へと導水し、浄水場で処理した上で、送水管・配水池・配水管を通じて浄水を需要者へと供給する。日本の水道は、高度経済成長期を通じて整備が進められ、普及率は2019年度末時点で98.1%まで向上した（図1-1）¹⁾。現在では、日本のほぼ全域で水道を利用できる環境が整っているといえる。

水道を構成する主な施設は、貯水施設、取水施設、導水施設、浄水施設、送水施設、配水施設である²⁾。各施設には、土木構造物・管路や、建築物、機械から、電気・計装にわたる各分野の設備が含まれる。図1-2に主な水道施設と、各施設・設備における計測・制御項目の例を示す。なお、広域に配置された各施設・設備は、監視制御システムを通じて中央監視室等に情報を集約し、遠隔で監視・制御することが一般的である。

導送配水システムは導水・送水・配水の各施設からなり、水源から需要者へと必要な量の水を運び届ける機能を果たす。導水・送水・配水施設は、図1-2の通り、浄水施設と配水池を境界に区分される²⁾。導水施設は、河川や地下水などの水源から取水施設で取り入れた原水を浄水施設まで導く施設である。導水管や導水渠、ポンプ設備等からなる。導水流量が主な制御項目となる。送水施設は、浄水施設で処理した浄水を配水池まで送水する施設である。送水管に加えて、送水ポンプ、バルブ等の設備を含む。送水ポンプの台数や送水流量、送水先の配水池の水位が主な制御項目である。配水施設は、時間的に変動する水需要に対応するよう浄水を貯留するとともに、必要な水量を適正な圧力で、必要な場所に浄水を輸送する施設である。具体的には、配水池、配水塔や高架タンク、配水管、配水ポンプ・バルブ等の設備が挙げられる。配水ポンプの台数や回転数、配水流量、配水圧力が主な制御項目となる。図1-3の導水・送水系統の例³⁾のように、一つの配水池から別の配水池へと送水する階層構造の構成も一般的である。また、同図のc配水場がB浄水場とb配水場の両方から送水を受けているように、導送配水システムの水の流れは、上流から下流に樹枝状に分岐するだけではなく、導水・送水・配水の過程で水を相互融通できるようネットワーク状に構成されることもある。

導送配水システムによる安全な水の安定した供給は、施設の適切な設計²⁾・維持・更新と、システム全体としての運用管理⁴⁾が両輪となって支えている。設計・維持・更新については、水源や地形などの自然条件、水需要量やその中長期的な変化の見通しなどの社会的条件をふまえて、地域特性にあった施設の整備が重要である。一方、運用管理の面では、市民生活や

都市活動の状況に応じて時間的に大きく変動する水需要に応じて、安全な水を安定的かつ効率的に輸送・分配することが求められる。必要な水量を適正な圧力で、必要な場所に輸送・分配するには、配水池の水位や、主要管路の流量や圧力の情報を集めて監視するとともに、それらの情報に基づいてポンプ・バルブ等の設備を適切に制御することが重要である。

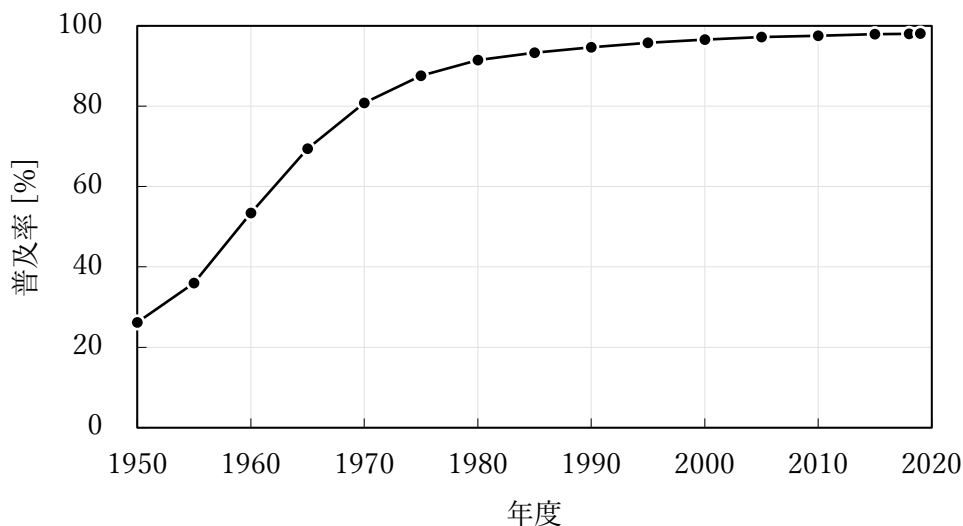


図 1-1 日本の水道普及率の推移¹⁾

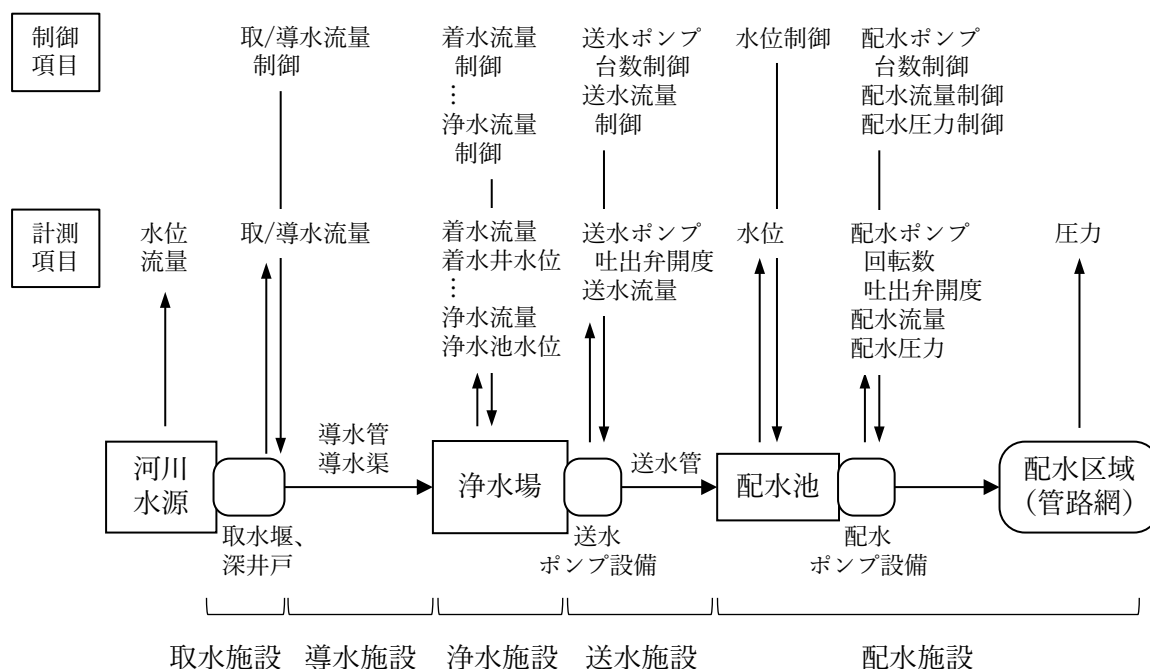


図 1-2 水道を構成する主な施設と計測・制御項目の例

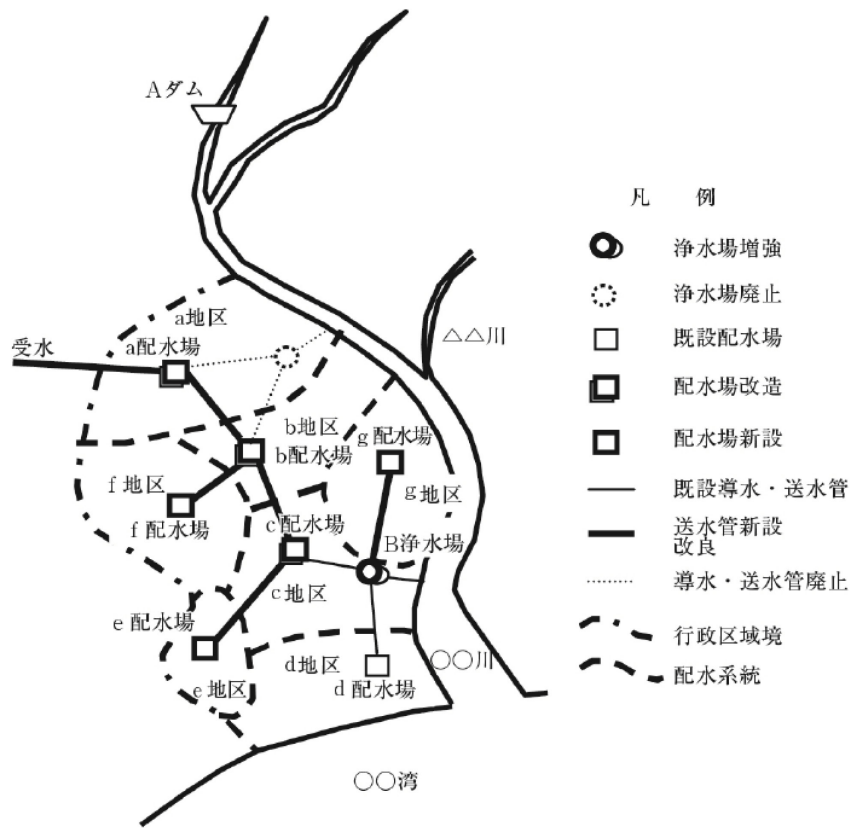


図 1-3 水道施設の配置と導水・送水系統の例³⁾

日本の水道事業の課題として、人口減少に伴う水需要の減少、施設の老朽化、深刻化する人材不足などが挙げられる^{5),6),7)}。

図1-4に給水人口と1人あたり水使用量（有収水量）の推移⁸⁾を示す。給水人口は人口増加と普及率向上により継続して増加してきたものの、人口減少の影響を受けて2010年をピークに減少に転じた。一人あたりの水使用量も減少傾向にあり、引き続き給水量は減少していく見通しである。水道料金収入も減少し、水道事業の経営は一層厳しくなると予想される。

図1-5には、資産規模の点で水道施設の大きな割合を占める管路について、経年化率と更新率の推移⁹⁾を示す。法定耐用年数（40年）を超えた管路の延長割合である経年化率は年々上昇し、老朽化が進行している。一方で管路更新の延長割合である更新率は低く、更新は進んでいない。

図1-6に水道事業の職員数の推移¹⁰⁾を示す。行政組織の人員削減、団塊世代の退職などにより、1980年度のピークに比べて職員数は約4割減少した。特に小規模事業において職員数が著しく少ない状態である。広域連携・広域化^{11),12)}や官民連携などによる従事体制の見直し施策が進められているものの、生産年齢人口の減少の影響により民間事業者を含めて水道に携わる技術者の確保は難しくなっていくと考えられる。

科学技術政策においては、サイバー空間で情報を分析して実世界の問題解決に活用するCyber Physical System (CPS)や、モノがつながり高度なサービスを実現する基盤となるInternet of Things (IoT)と呼ばれる領域の技術¹³⁾の活用が注目されている。第5期科学技術基本計画¹⁴⁾で提唱された「超スマート社会」(Society 5.0)のコンセプトの下、第6期科学技術・イノベーション基本計画¹⁵⁾においても「デジタル化等による効率的なインフラマネジメント」の取組みが示されている。水道分野においても、デジタル技術の活用によって水道業務の効率化や付加価値の創出が進み、運営基盤の強化につながることで国内外で期待されている¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。

以上のように、日本の水道事業は、減少する水需要に対して、老朽化した施設を限られた人員で維持、運用していくことが求められている。広域連携・広域化の進展により、1人の運転員が維持、運用する施設の数が増えることも想定される。こうした状況下で安定した水供給を持続していくには、情報技術やデータの活用を通じて人材不足を補う方策が一層重要になる。

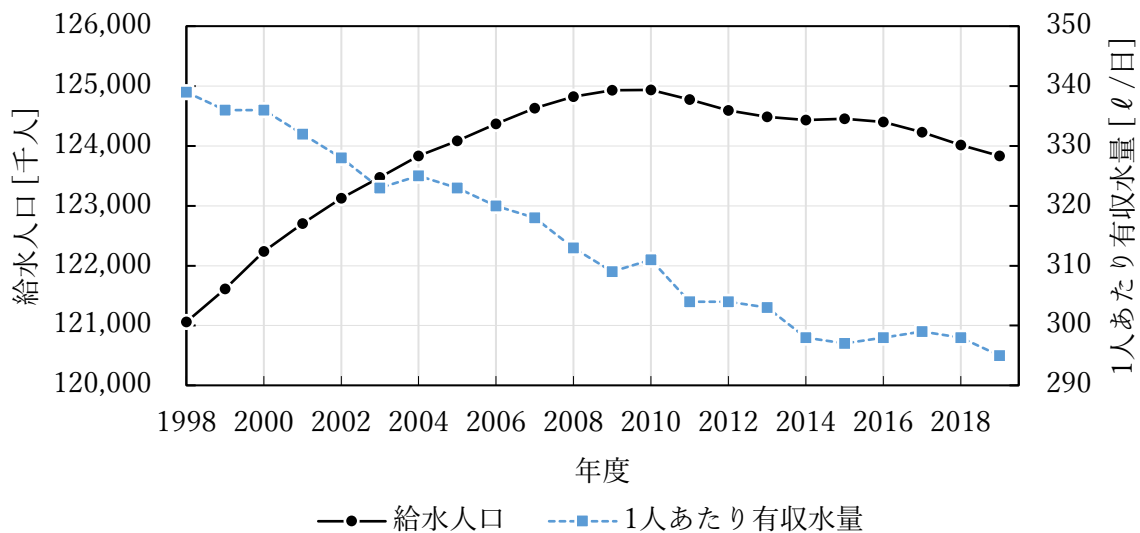


図 1-4 給水人口と 1 人あたり有収水量の推移⁸⁾

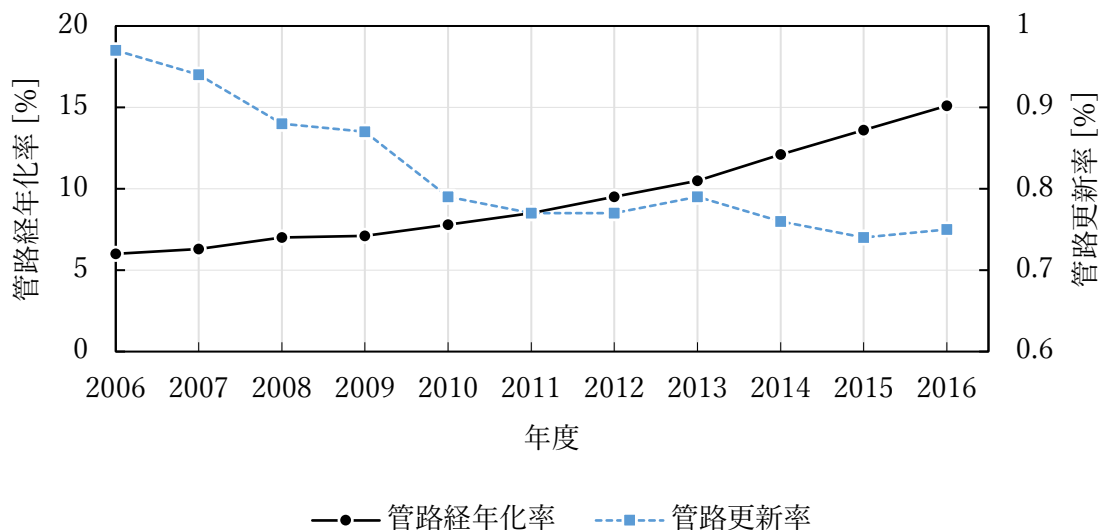


図 1-5 管路経年化率と更新率の推移⁹⁾

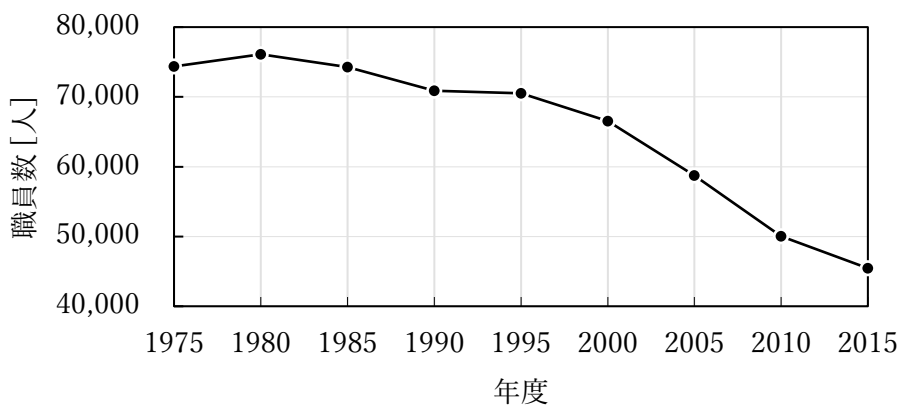


図 1-6 水道事業に携わる職員数の推移¹⁰⁾

第2節 導送配水システムの運用管理

(1) 概要

導送配水システムの運用管理の主要項目とその対象施設を図1-7に示す。最も重要な項目は、取水から配水まで導送配水システム全体で輸送・貯水・供給する水量を過不足なく管理する安定的かつ効率的な水運用である。また、配水施設においては水需要変動に応じてポンプ運転やバルブ操作により配水圧力を制御する配水調整が求められる。加えて、漏水事故や水質異常の発生を迅速に判定して対応を図るための監視も必要となる。

本研究では、図中網掛けで示した、安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生時の監視を取り上げる。以下、各項目の現状と課題について述べる。

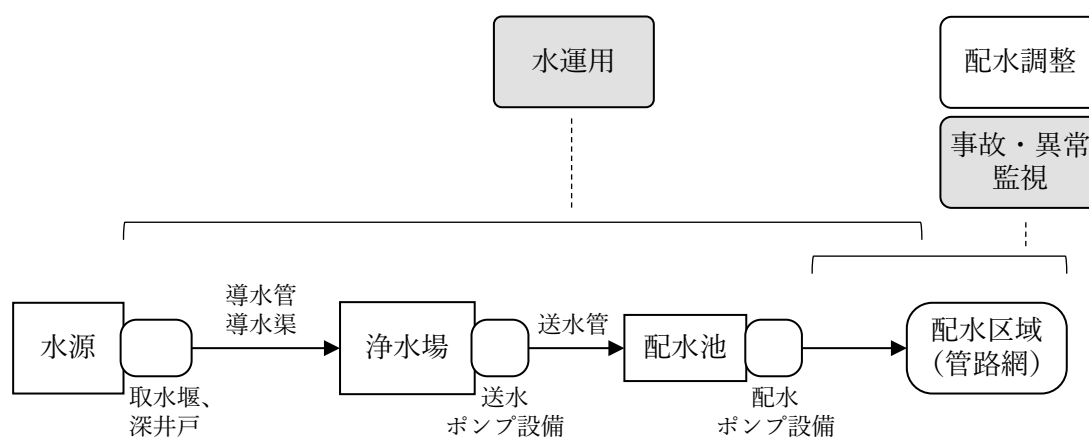


図1-7 導送配水システムの運用管理の主要項目とその対象施設

(2) 安定的かつ効率的な水運用

水源から需要者まで必要な量の水を運び届けるには、水量の点で取水、導水、浄水、送水、配水の全ての施設が相互に連携した運用が必要となる。水運用には以下2点の調整の自由度がある。いずれも配水池が重要な役割を担っており、導送配水システム全体の連携をとる上で配水池の運用が水運用の要となる。

- (i) いつ水を輸送するか：水需要は大きく時間変動する一方で、浄水施設の処理量はできるかぎり一定に保つ必要がある。配水池は、貯水量の変化によりこれらを両立させるバッファの役割（時間変動調整機能）を担い、いつ水を輸送するかを自由度を確保する。

-
- (ii) どの経路で水を輸送するか：複数水源間での水の相互融通のように、複数の輸送経路を持つ導送配水システムでは、どの経路で水をどれだけ輸送するかに自由度がある。配水池が複数の輸送経路の結節点となることが一般的である。

水運用における代表的な要件を模式的に図 1-8 に示す。安定的な運用の点では、時々刻々と変動する水需要を満足する水供給が第一に求められる。配水池の水位は、最低配水圧や非常時給水量の確保、越流防止のための管理範囲内で変動するように運用する必要がある。導水量（浄水量）や送水量は、安定した浄水処理や、ポンプ・バルブ設備の過度の運転変更の抑制のため、流量の切り替え回数やその変更幅を減らし、なるべく一定の流量に保つよう平準化することが求められる。水源間で相互融通できるシステムでは、水利権や貯水池状況などを勘案して水源間の取水量のバランスを保つ必要がある。一方、効率的な運用の点では、貴重な水を排水・溢水等の無駄なく活用した上で、さらに導水・送水・配水ポンプなどでの消費電力量や電気料金の低減を図ることが求められる。原水の有効利用や、薬品使用量の最小化、トリハロメタンなどの消毒副生成物の生成抑制などの観点も考慮することが望ましい。

各施設・設備の運用は、その施設・設備単体としての要件や制約を満たすだけでなく、隣接する施設・設備やその上流・下流の施設・設備の運用との相互作用をふまえて定める必要がある。この意味で、導送配水システムは多数の要素が相互作用する複雑なシステム²⁰⁾であると言える。例えば、浄水場の処理水量は、供給先である下流側の水需要量や配水池の運用と整合的でなければならない。複数の水源間で相互融通する導送配水システムの場合は、水需要量に加えて別の浄水場の処理水量との整合性を取る必要がある。

一般に、前述した要件の間には一方を改善すると他方が悪化する、互いに相反するトレードオフ関係がある。すなわち、水運用方法の策定は満たすべき目標が複数ある多目的最適化問題²¹⁾であり、対象システムの特성에基づいて各目標の間でバランスをとった運用が求められる。ポンプ消費電力量の低減に代表される運用の効率化を追求せず、安定的な運用をめざすだけであっても、目標間のバランスをとった最適な運用を模索する必要がある。

水運用に対する運転員の判断プロセスと参照する情報の例を図 1-9 に示す。運転員は、配水量の実績や天気予報、イベント情報などに基づいて水需要量を予測し、予測に基づいて導水（浄水処理）・送水・配水の運用計画を立案する。平日・休日や季節の影響は、水需要量の予測値の変化を通じて運用計画へと反映される。施設・設備の制御（運転操作）は、運用計画と実績を比較して行う。本研究では、図中網掛けで示した運用計画の立案に着目する。運用計画の中心は、時間変動調整機能を担い、複数の輸送経路の結節点となる配水池の運用を定めることである。ここで運用計画とは、将来一定期間（例えば 24 時間）における施設・設備の主要運用項目の目標値を定めた計画である。例えば配水池の運用計画としては、将来 24

時間における15分～1時間単位での配水池の流入量，流出量と水位の時系列を定める。

水需要予測や運用計画の立案，運用計画に基づく制御・監視の機能を備え，図1-9の判断プロセスに沿って水運用を支援する監視制御システムは，水運用システムや，水運用支援システム等と呼ばれる⁴⁾。こうしたシステムは大規模の水道事業体で導入実績が多いものの，中小規模事業体では導入は進んでいない²²⁾。

水運用システムが未導入の水道事業体を中心に，熟練運転員がポンプの始動・停止などの運転操作を日常的に行う導送配水システムは今なお多い。水道の広域連携・広域化の検討が進む中で，自動化による業務負荷の軽減がより一層求められる。

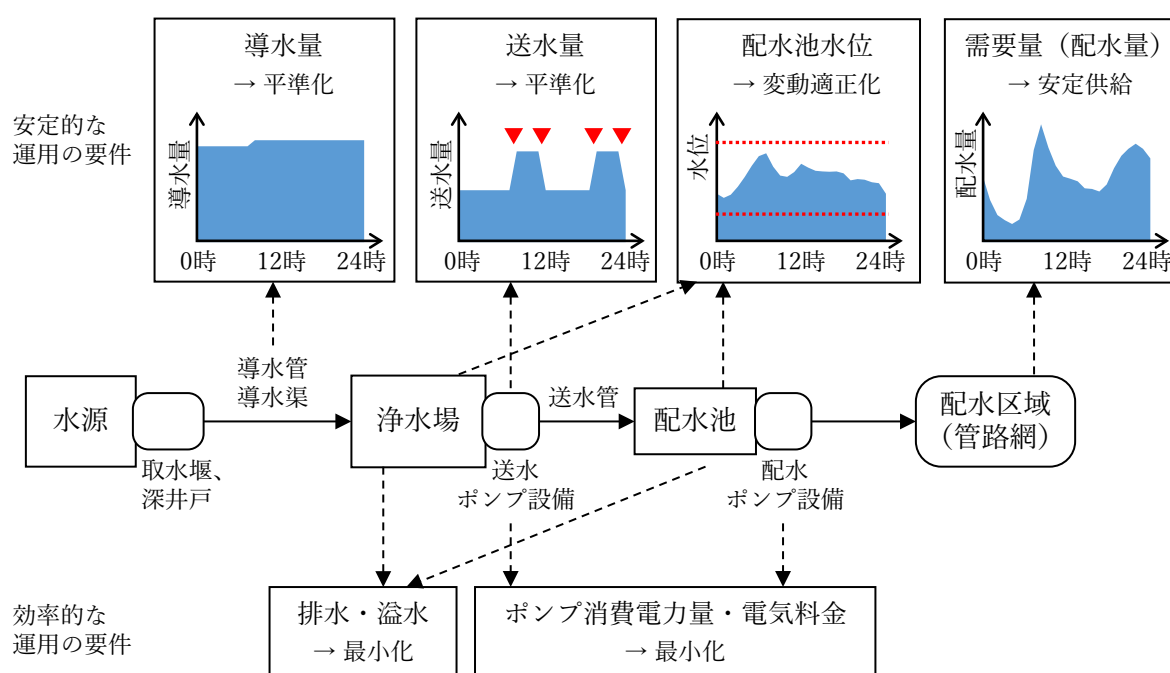


図1-8 水運用に関わる主な設備と運用上の要件の例

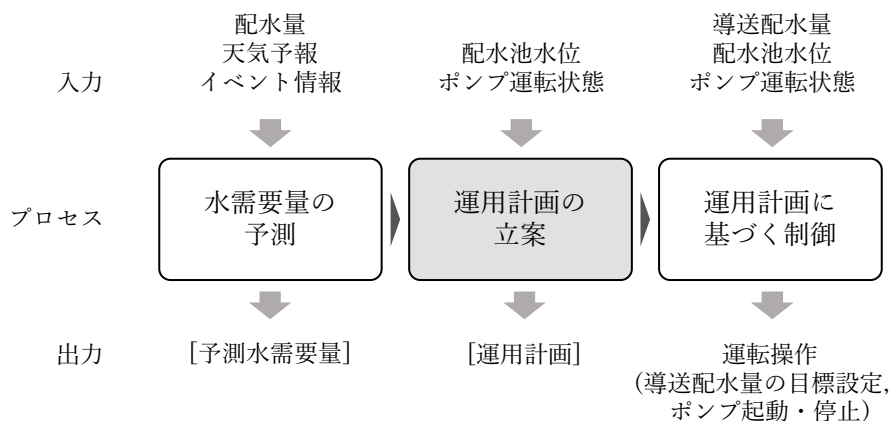


図1-9 水運用に対する運転員の判断プロセスと参照する情報（入力）の例

(3) 漏水事故発生 の 監視

管路や付帯設備の腐食や劣化などが原因となる漏水事故は、周辺地域での断水や濁水の発生、さらには道路の冠水や浸水を引き起こすことがあり²³⁾⁻²⁶⁾、迅速な対応が求められる。図 1-10 に、国内における管路事故・給水管事故の件数の推移²⁷⁾を示す。近年の事故件数は横ばいとなっているものの、管路の老朽化（図 1-5）に伴い、今後は事故件数の増加が懸念される。漏水事故の分類の例として、管口径と物理現象に基づく単純化した分類を表 1-1 に示す。管口径と物理現象によって、漏水の規模、すなわち、漏水事故によって増加する流量は異なると考えられる。

水道技術者の確保が難しくなるなかで、事故発生時には限られた人員で対応する必要がある。このため、漏水事故発生の疑いを認知（判定）し、事故位置を特定して止水・修理にあたるプロセス²⁸⁾⁻³⁰⁾を迅速化する方策が重要性を増している。漏水事故の発生から修理完了（復旧）に至る過程の区分の例³¹⁾を図 1-11 に示す。なお、各区分に要する時間は等しいわけではなく、事例によって様々である。図中網掛けで示した区分のように、漏水事故の発生から、水道事業者が漏水事故を認知するまでもに一定の時間がかかる。この区分を含めた漏水事故発生から止水までの期間は、先述した断水・濁水・浸水等の悪影響の発生や拡大の懸念が大きいため、できるだけ短縮することが望ましい。

漏水事故は、道路等の地上に現れた漏水を住民、警察、道路管理者等が発見した上での通報や、水道設備における流量や水圧等の計測値の異常の発見によって認知される²⁹⁾。後者の計測値監視では、中央監視室で監視制御システムを通じて水道施設の運転管理にあたる運転員が漏水事故発生の疑いを判断する。例えば、計測値の正常範囲（予め設定した固定の上下限値の内部）からの逸脱³²⁾に対して警報が発報された場合や、運転員が定期的に計測値トレンドグラフを確認した際に、経験に基づいて通常時の計測値トレンドからのずれを発見する場合がある。

流量や圧力の計測値は、水需要量の変動の影響を受けるため、通常の変動範囲内での変動なのか、漏水事故の発生が疑われる変化なのか判別するのは必ずしも容易ではない。漏水事故が発生すると配水流量の増加が見込まれるものの、需要家による受水槽や高架水槽への水道水の引き入れや、気象の影響による水需要増加を原因とする配水流量の増加と見分ける必要がある。こうした通常時における計測値の変動の特徴は、配水区域によって異なるため、熟練運転員が計測値を確認してきた経験に基づいて判断していることが一般的である。

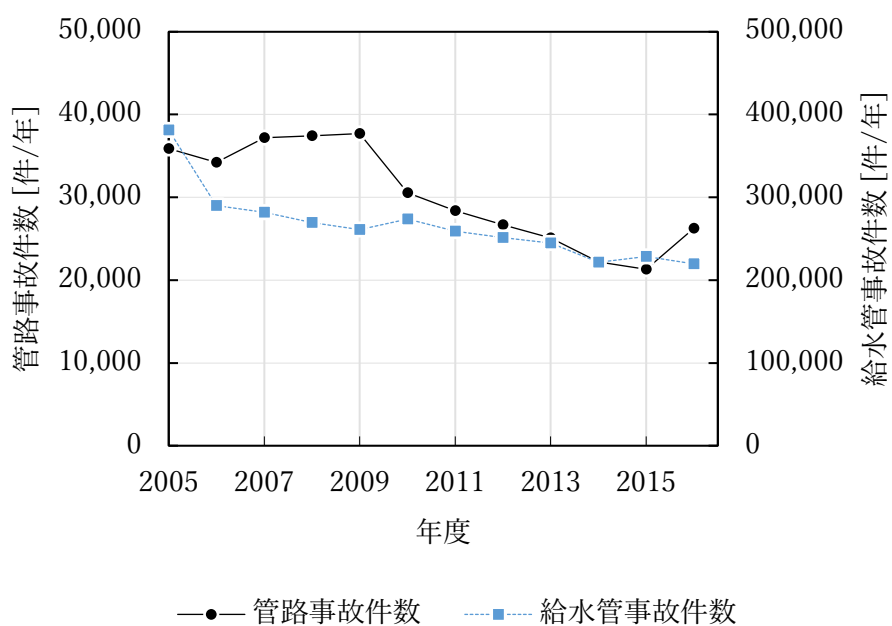


図 1-10 管路事故・給水管事故の件数推移²⁷⁾

表 1-1 漏水事故の分類と想定される漏水規模

		管口径	
		小	大
物理現象	管体部 亀裂・孔	小～中規模	大規模
	継手部 劣化	小規模	中～大規模

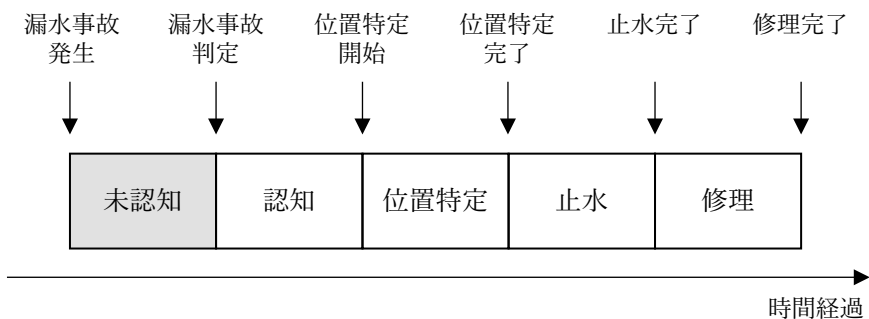


図 1-11 漏水事故の発生から修理完了までの時間区分³¹⁾

第3節 本研究の目的と構成

導送配水システムの運用管理では、運転操作や設備監視を熟練運転員に頼る部分があり、安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生の監視の両項目において、引き続き自動化の余地が残る。熟練運転員は、過去の経験やノウハウをふまえた上で運転操作や事故監視における判断を行っている。対象システムの特徴に関する熟練運転員の経験やノウハウは明文化されていないことが多く、短期間のヒアリングで網羅することも困難である。そこで、本研究では、熟練運転員の判断に基づく運転操作や、対象システムの特徴が記録された運転実績データに着目した。運転実績データを体系的に分析し、運用管理における熟練運転員の知見や対象システムの特徴を抽出することで、熟練運転員の知見を継承する運用管理の高度化が期待できると考える。

本研究では、運転実績データの活用可能性を示すとともに、運転実績データを活用した運用管理手法を提案する。具体的には、水運用の中心となる配水池の運用計画を立案する配水池運用モデルと、そのモデルに含まれるパラメータの決定手法、および、漏水事故発生を早期に判定する配水流量の監視手法を提案する。

以下、本研究の構成を述べる。章構成の流れを図 1-12 に示す。

第2章では、導送配水システムの運用管理について、安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生に備えた配水系計測データの監視に関する既往研究をそれぞれレビューし、本研究の位置づけを明らかにする。

第3章では、水運用において導送配水システム全体の連携をとる上で中心となる配水池の運用計画の立案に関して、運転実績データから配水池水位の望ましい変動範囲を定める配水池運用モデルを検討する。配水池の特性が水位実績データのヒストグラムや分位値に与える影響を踏まえて、水位実績データの分位値により水位の日常的な変動範囲を定め、その範囲からの逸脱を抑制する配水池運用モデルを提案する。ケーススタディを通じて、配水池の水位変動の範囲や、配水池の水位・流入出水量のトレンドの点で運転実績データと提案モデルで立案した運用計画を比較評価し、提案モデルが実用的な運用計画を立案できることを確認する。

第4章では、前章で提案した配水池運用モデルに含まれるパラメータを運転実績データの再現を基準として決定する手法を検討する。配水池の水位変動は、流入出水量の平準化とトレードオフ関係にあり、対象モデルでは両者のバランスに関するパラメータを決定する必要がある。バランスを熟練運転員の判断に基づく運用に近づけるように、立案する運用計画が運転実績データを再現するパラメータの決定手法を提案する。トレードオフ関係にある配水池水位の変動範囲とポンプ配水量の平準化のバランスの点で、提案手法で決定したパラメー

たと、簡易な手法で定めたパラメータを比較評価する。また、提案手法で定めたパラメータによって、運転実績データに近い実用的な運用計画を立案できる期間について検討する。

第5章では、配水管網に焦点をあてて漏水事故の発生を判定する配水流量の監視手法を検討する。漏水事故発生時における漏水流量の増加には、急速な増加から緩やかな増加まで多様な事例が見られる。一方で、監視手法に用いる配水流量予測モデルの予測ラグが短い場合は急速に増加する漏水、逆に予測ラグが長い場合は緩やかに増加する漏水の判定により適することから、予測ラグの異なる複数の配水流量予測モデルを併用することで、多様な漏水事故を早期判定する監視手法を提案する。運転実績データから多様な配水流量の予測モデルや事故疑いの判定しきい値を学習することで、対象区域の特徴をきめ細かく捉えた監視を可能とする。小規模配水区域を対象に、様々な規模、増加の緩急、発生時刻の漏水事故発生を模擬するデータを生成し、提案手法や従来手法を適用することで、判定の見落とし割合や判定に要する時間を評価する。

最後に第6章では、上述した研究成果を総括して導送配水システムの運用管理において運転実績データを活用する手法の有用性を示し、今後の研究の課題について述べる。

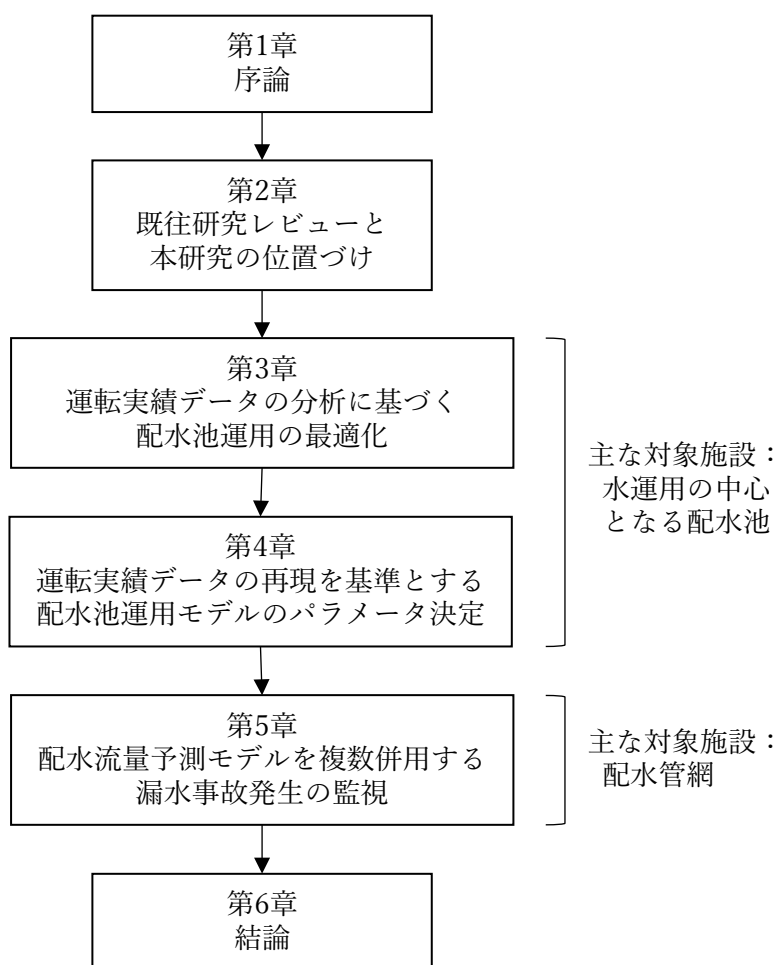


図 1-12 本研究の章構成

参考文献

- 1) 厚生労働省：水道の基本統計，水道普及率の推移，
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/database/kihon/index.html>. (アクセス日: 2021.04.01)
- 2) 日本水道協会：水道施設設計指針 2012 年版, 2012.
- 3) 日本水道協会：参考図-1.3.2, A 市水道施設整備計画図，水道施設設計指針 2012 年版, p.29, 2012.
- 4) 日本水道協会：水道維持管理指針 2006 年版, 2006.
- 5) 厚生労働省：水道法の改正について，
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/suishitsu/index_00001.html. (アクセス日: 2021.04.01)
- 6) 日本政策投資銀行：水道事業の将来予測と経営改革, 2017.
- 7) 日本政策投資銀行：わが国水道事業者の現状と課題 [最終報告], 2015.
- 8) 総務省：地方公営企業年鑑.
- 9) 日本水道協会：水道統計.
- 10) 総務省：地方公営企業決算状況調査.
- 11) 伊藤志のぶ：水道事業広域化の可能性と課題，名城論叢, Vol.12. pp.155–176, 2012.
- 12) 総務省，厚生労働省：水道広域化推進プラン策定マニュアル，2019.
- 13) 山田直史，高島洋典，木村康則：超スマート社会（Society5.0）実現に向けて — CPS/IoT とその後，情報管理, Vol.60, No.5, pp.325–334, 2017.
- 14) 内閣府：第 5 期科学技術基本計画, 2016.
- 15) 内閣府：第 6 期科学技術・イノベーション基本計画, 2021.
- 16) 厚生労働省：水道対策 — CPS/IoT の活用，
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/seibi/index_00002.html. (アクセス日: 2021.04.01)
- 17) 経済産業省，厚生労働省：水道情報活用システム導入の手引き～水道事業等の持続的な運営基盤の強化に向けた CPS/IoT の活用～，2019.
- 18) Keck, J. and Lee, J: Embracing analytics in the water industry, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.147, No.5, 02421002, 2021.
- 19) 東京都水道局：東京水道経営プラン 2021～お客さまとの信頼で築く強靱な東京水道～，2021.
- 20) Crawley, E., Cameron, B. and Selva, D.: *System Architecture*, Pearson, 2016.
- 21) 中山弘隆，谷野哲三：多目的最適化の理論と応用，コロナ社，1994.

- 22) 電気学会 上下水道施設における制御技術の変遷と最新動向調査専門委員会：上下水道施設における制御技術の変遷と最新動向，技術報告 1503, 2020.
- 23) 川口智哉，渡辺晴彦，小泉明，碓智：水道管路事故に伴う地上漏水による浸水危険度の評価，日本リスク研究学会誌，Vol.23, No.2, pp.95–103, 2013.
- 24) 板谷秀史：大口径配水管におけるバルブの破損事故の事例から，想定される破損の原因とそれらの対応策の方向性（横浜市水道局），水道技術ジャーナル，No.89, pp.14–17, 2018.
- 25) 横浜市水道局：水道管の漏水事故について（最終報），https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/koho-kocho/press/suidou/2019/20200110saishu.files/0001_20200110.pdf，2020.01.10.（アクセス日: 2021.04.01）
- 26) 東京都水道局：水道管の漏水事故について（最終報），<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/press/r02/press-201030-01.html>，2020.10.30.（アクセス日: 2021.04.01）
- 27) 水道技術研究センター：水道における事故件数の推移（1）－水道統計に基づく試算結果－，水道ホットニュース，No.669. 2019.
- 28) 難波豪：管路の漏水事故対応はどのように行っているのか（千葉県水道局），水道技術ジャーナル，No.87, p.24, 2018.
- 29) 浅岡祥吾：配水管の突発破裂事故時の緊急対応（横浜市水道局），水道技術ジャーナル，No.87, p.25, 2018.
- 30) 厚生労働省：管路事故・給水凍結事故対策マニュアル策定指針，改訂版，2020.
- 31) Bakker, M., Vreeburg, J. H. G., Rietveld, L. C. and van de Roer, M.: Reducing customer minutes lost by anomaly detection?, *Proc. 14th Water Distribution Systems Analysis conf. 2012*, 2012.
- 32) 香川弘宣：福岡市水道局における配水調整システムについて，第5回水道分野におけるスマートメーターに関する勉強会，水道技術研究センター，<http://www.jwrc-net.or.jp/kenshuu-koushuu/handout/sm5-3.pdf>，2015.（アクセス日: 2021.04.01）

第2章 既往研究レビューと本研究の位置づけ

第1節 レビュー観点と構成

本章では、研究対象とする導送配水システムの運用管理について、既往研究をレビューし、本研究の位置づけを示す。導送配水システムの運用管理のうち、本研究で着目する安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生の監視に分けて既往研究をレビューする。

第2節では、安定的かつ効率的な水運用について既往研究のレビューを示す。安定的な運用としては、水需要の予測を前提として、時々刻々と変化する水需要を満足しつつ、安定した浄水処理や設備運転に向けて導水量・送水量を平準化することが求められる。効率的な運用としては、貴重な水を無駄なく活用した上で、さらに導送配水に要するポンプの消費電力量や、電気使用量の低減が求められる。まず、前提となる配水池の果たす時間変動調整機能について、例を用いて概要と課題を示す。続いて配水池を中心とする導送配水システムの最適な運用計画の立案について、数理最適化問題としての定式化と、最適化アルゴリズムに関する既往研究をレビューする。また、既往研究の定式化には、一般に運用計画に影響を与えるパラメータが含まれる。こうしたパラメータの決定方法について既往研究の取り組みを整理する。

第3節では、配水管網からの漏水事故の発生に備えた配水系計測データの監視について、文献に基づいて漏水事故の多様性を確かめた上で、漏水事故発生の疑いをいち早く判定する手法の既往研究をレビューする。

最後に第4節では、上記観点での既往研究レビューをふまえて本研究の位置づけを示す。

第2節 安定的かつ効率的な水運用

(1) 配水池運用におけるトレードオフ

配水池は、時間変化する水使用量（配水量）と送水量との差分を貯水量の増減により均衡させることで、送水量を平準化する時間変動調整機能を持つ¹⁾。水運用の中心となる施設である。また、非常時には貯水量を利用して給水を継続する役割を果たす。

配水池の水位は、流入量と流出量のバランスを受けて変化する。水位と流入出量の関係は、式(2-1)で表せる。配水池に関わる記号の関係を模式的に図 2-1 に示す。

$$A \frac{dL}{dt} = p - q \quad (2-1)$$

L : 配水池の水位 [m]

p : 配水池への流入量（送水量） [m³/h]

q : 配水池からの流出量（配水量） [m³/h]

A : 配水池の底面積 [m²]

t : 時刻

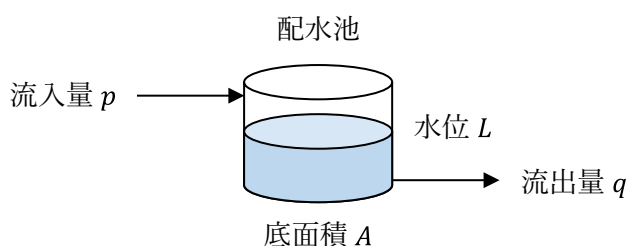


図 2-1 配水池の模式図

配水池の容量は、計画一日最大給水量の 12 時間分を標準¹⁾として、地域特性や施設の規模等を総合的に検討して定められる。図 2-2 に示す通り、配水池の有効容量、すなわち、低水位から高水位の間の容量は、配水量と送水量の差分を調整する時間変動調整容量と、消火用水や事故時等の非常時に対応するための備蓄容量（非常時対応容量）に区分される²⁾。各容量の大きさは施設によって異なるものの、一般的には時間変動調整容量が一日最大給水量の 4-6 時間分程度²⁾であり、備蓄容量には残りの 6-8 時間分が確保されているとされる。

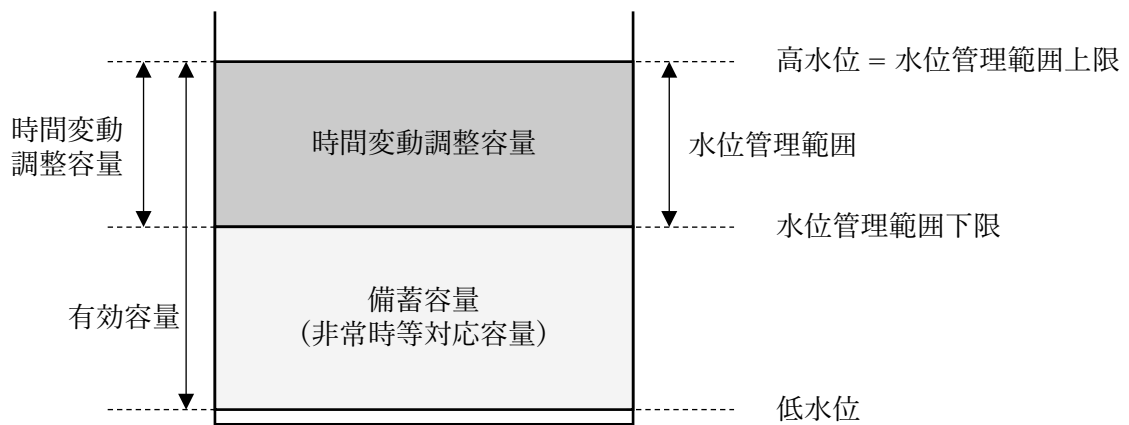


図 2-2 配水池容量の区分との基準水位

各配水池には、日々の運用で時間変動調整機能に利用できる水位管理範囲（上下限值）が定められている。時間変動調整容量が配水量の規模や変化幅に対して大きければ、送水量（ないしは導水量、浄水量など）を効果的に平準化でき、送水量を変更する幅や頻度は小さく済む。一方、時間変動調整容量が相対的に小さい配水池では、送水量の平準化には限界がある。

図 2-3 に示すシンプルな 1 配水池の送配水システムを例として、式(2-1)によって 24 時間の配水池の水位変動をシミュレーションし、送水量の平準化と配水池水位変動の関係について示す。同一の配水量に対して送水量の異なる以下の 3 つのシナリオ³⁾を用意し、送水量の平準化と配水池水位変動の関係を考察する。なお、どのシナリオにおいても平均水位は 2.0 m とし、24 時間後の水位は元の水位と同じ値に回復させる。

1. 送水量の平準化を最優先して一定量で送水する運用
2. 水位変動の抑制を最優先して送水量を配水量と同量とする運用
3. 両者の中間として送水量を 2 段階で切り替えてバランスを取る運用

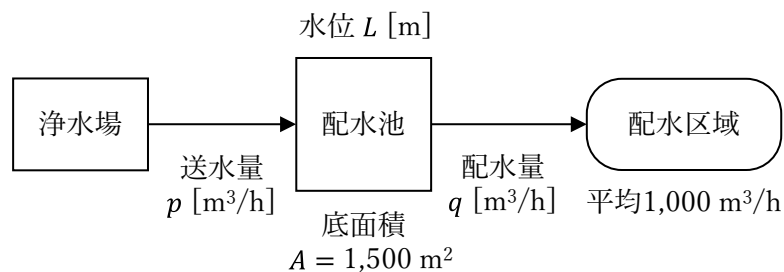


図 2-3 1 配水池の送配水システムの例

図2-4は、シナリオ1として、送水量の平準化を最優先して一定量で送水する運用について、送水量、配水量と水位を表すグラフである。送水量と配水量は各時刻台中の平均水量、水位は各時刻正時の水位を示す。水位の最小値は0時における1.0 m、最大値は7時における3.2 mとなり、それらの差として2.2 mの変動がある。送水量を一定とすることで水位の変動は大きい運用シナリオである。

図2-5は、シナリオ2として、水位変動の抑制を最優先して一定の水位を保つため、送水量を配水量と同量とする運用について、送水量、配水量と水位を表すグラフである。送水量は配水量と同様に水需要の影響を直接受けて変化が大きい運用シナリオである。

図2-6は、シナリオ3として、両極端なシナリオ1と2の中間として送水量の平準化と水位変動のバランスをとる運用について、送水量、配水量と水位を表すグラフである。具体的には、配水量に応じて送水量を800, 1,400 m³/hの2段階で切り替える運用を設定した。水位の最小値は1時における1.3 m、最大値は7時における2.7 mとなり、それらの差として1.4 mの変動がある。

図2-7は、図2-4～図2-6に示した3つのシナリオの送水量と水位を重ねて比較するグラフである。シナリオによって、送水量の変化と配水池水位の変動に大きな差があることが見て取れる。

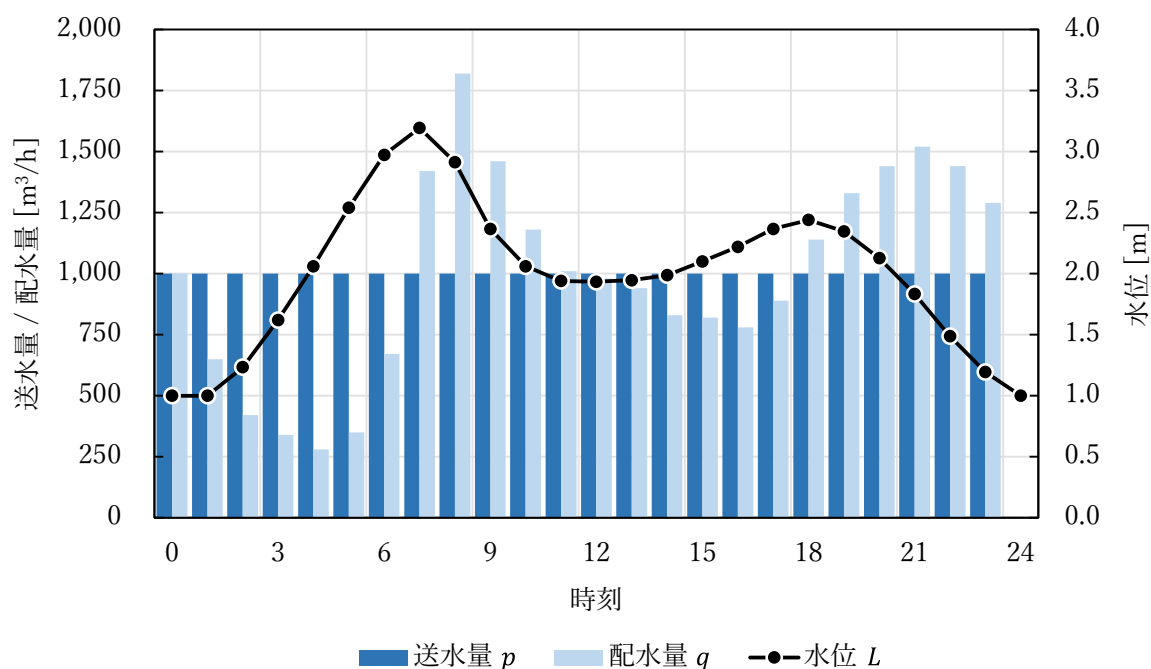


図2-4 配水池運用のシナリオ1：一定送水

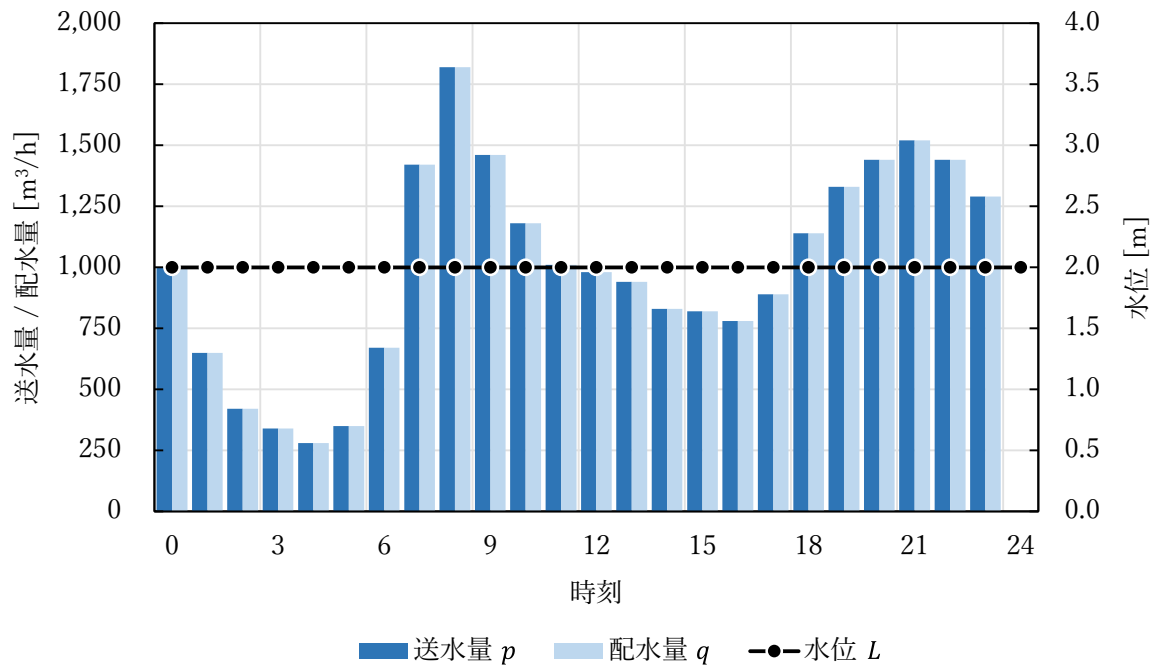


図 2-5 配水池運用のシナリオ 2：送水 = 配水

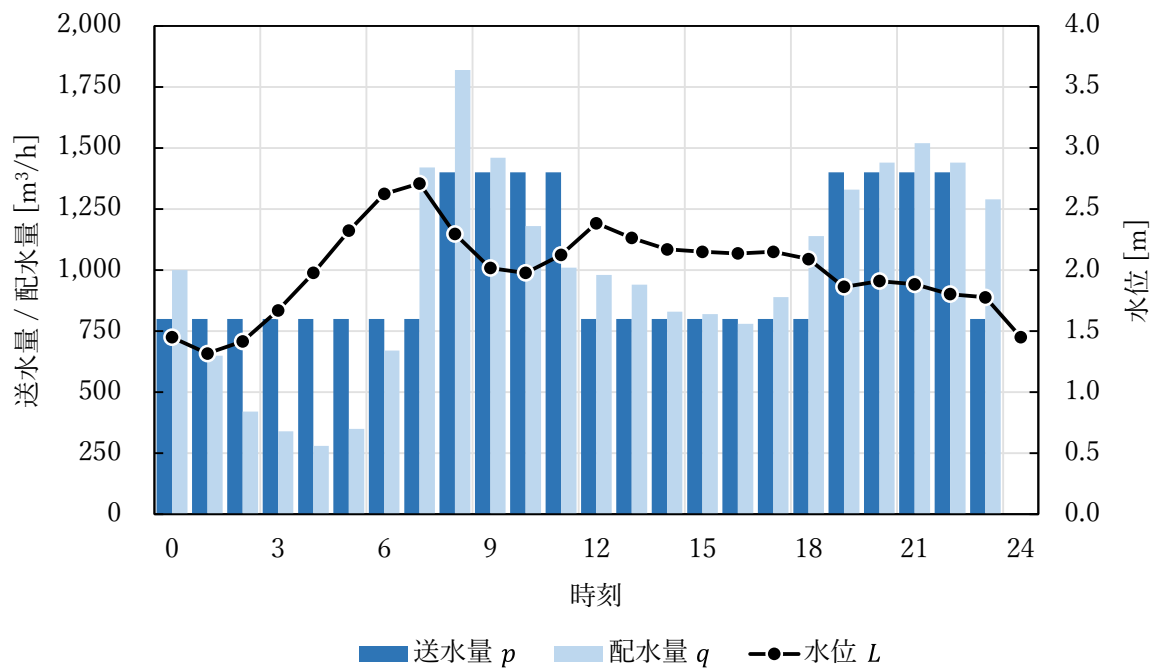


図 2-6 配水池運用のシナリオ 3：2 段階切替

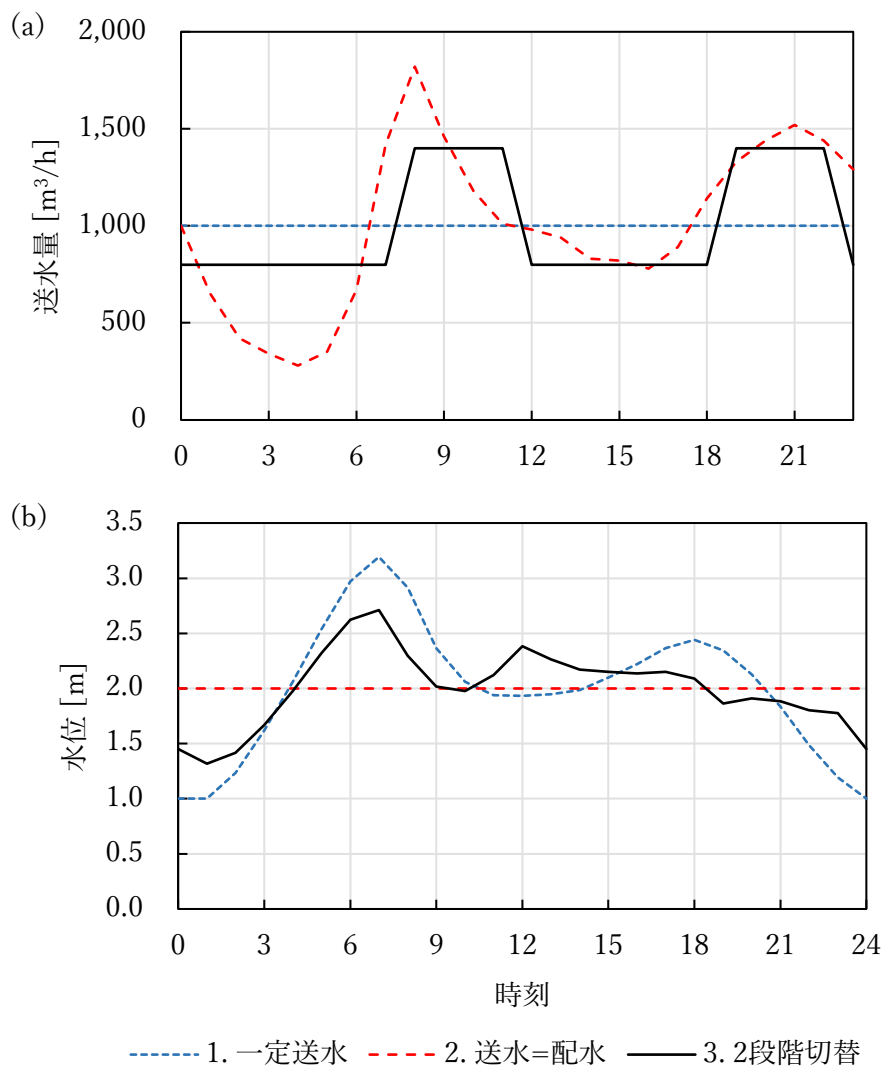


図 2-7 各配水池運用のシナリオにおける(a)送水量と(b)水位

図 2-8 は、図 2-4～図 2-6 に示した 3 つのシナリオについて、送水量平準化と、配水池水位変動の指標を示す散布図である。横軸には、送水量平準化の指標 J_1 として、送水量変化の絶対値の平均値、縦軸には水位変動の指標 J_2 として最大水位と最小水位の差を選んだ。送水量平準化と、配水池水位変動の間のトレードオフ関係を確認できる。

$$J_1 = \frac{1}{\#T} \sum_{t \in T} |p[t+1] - p[t]| \quad (2-2)$$

$$J_2 = \max_{t \in T} L[t] - \min_{t \in T} L[t] \quad (2-3)$$

t : 時刻

T : 時刻の集合

$\# \cdot$: 集合の要素数

上記のシナリオ 1, 2 のように、時間変動調整容量の大きい配水池や、送水量の平準化が求められない配水池では、送水量の決定は簡便な自動制御に任せられる。一方、時間変動調整容量が小さく、同時に送水量の平準化も求められる配水池では、水位変動と送水量の平準化のバランスをとる操作を熟練運転員に頼る必要性が高まる。

熟練運転員の配水池運用では、水位を日常的には管理範囲の上下限值に近づけず、上下限值に対して余裕を設けたより狭い範囲のなかで変動させることもしばしば見られる。こうした水位の日常的な変動範囲は、厳守する必要はなく、時には逸脱を許容する緩やかな目標として位置づけられる。このような運転は、水需要が例外的に多い／少ない日や、水需要が予想から外れた場合などの運用の難しい日においても配水池水位を管理範囲内に留めるための工夫として行われている。こうした工夫は、実質的な時間変動調整容量をより小さくすることに相当し、簡便な制御や配水池運用モデルでは対応が難しい。

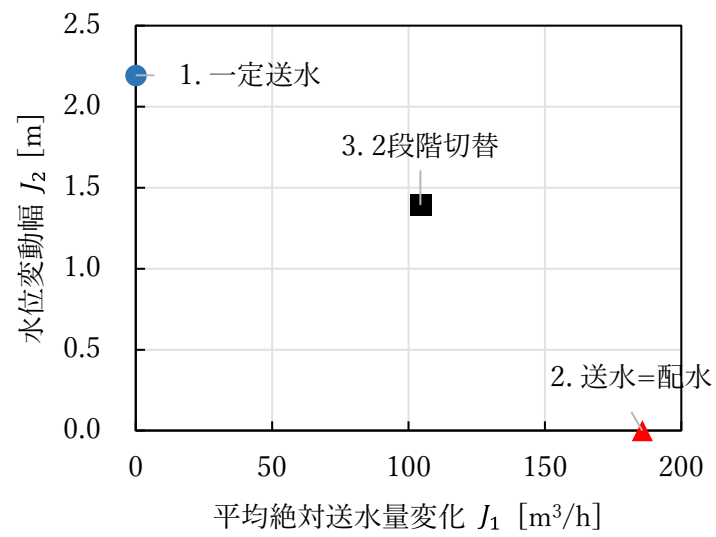


図 2-8 各配水池運用のシナリオの送水量変化と水位変動

(2) 最適運用モデルと最適化アルゴリズム

配水池運用を中心とする水運用を提案する手法として、水需要予測^{4),5)}の結果を前提に、数理最適化問題として最適な運用計画（ポンプ運転やバルブ操作等のスケジュール）の立案問題を定式化し、最適化アルゴリズムによって最適運用計画を定める手法が数多く提案されてきた⁶⁾⁻²⁷⁾。適用形態としては、典型的な水需要や状況（配水池の水位など）のシナリオに対して事前（オフライン）に運用計画を立案する場合と、最新の情報をふまえた水需要の予測と状況に基づいてオンラインで運用計画を立案する場合に区分できる。なお、数理最適化問題としての定式化によらずに運用を定める手法も提案されている。小規模システムへの適用に留まるものの、数理最適化問題としての定式化によらず、過去の運転実績データから学習した回帰モデルによって運用計画を提案する手法^{28),29)}、深層強化学習を活用して試行を通じて最適な運用を学習していく手法³⁰⁾が提案されている。

最適運用モデルでは、24-48時間の長さの期間を対象に、15分～1時間のステップ単位での運用計画を立案することが一般的である。数理最適化問題の目的関数は、運用の安定性の指標であるポンプ起動・停止や送水量の切替回数、効率性の指標であるポンプ電力のコストなどで構成される。複数の運用目標からなる多目的最適化問題となることが一般的である。制約条件には、配水池水位の上下限值、送配水量やその変化量への上限設定などが挙げられる。その他、送配水未分離のシステムにおける管網解析シミュレーションで推定した配水圧力の下限^{22),23)}や、水需要予測の不確かさに対するロバスト性²⁴⁾を制約条件とする報告もある。決定変数は、各時間ステップにおける送配水量や、ポンプの起動・停止状態などが用いられる。

複数の配水池や水源を持つ導送配水システムの最適運用を求める最適化問題は、一般的に離散変数を含む大規模で非凸な組合せ最適化問題となるため、厳密解を求めることは計算量の点でしばしば困難である。このため、ポンプ消費電力量のモデル化^{11),14),17)}などの最適運用の定式化と、定式化や対象システムに応じて近似最適解を求めるアルゴリズムの開発が対となって研究が進められてきた²⁶⁾。特にオンライン適用を想定する場合、最適化アルゴリズムの計算時間の短縮が重要な要素となってきた^{7)-12),15),21),23),26)}。最適化アルゴリズムは、遺伝的アルゴリズム^{9),10),22),23)}、特に多目的最適化問題に特化した遺伝的アルゴリズム^{8),25)}や、分枝限定法¹⁶⁾などをモデルに合わせてカスタマイズする報告が多い。一方で、性能が大きく向上してきた数理最適化の汎用ソルバーを適用する研究^{13),17)-21)}もある。

以下、主要な既往研究についてレビューする。

坂本ら⁹⁾は、送水ポンプ運転計画の立案問題を対象とし、送水量の平準化、夏季の電力ピーク時間帯の送水ポンプ運転台数の最小化、配水池水位の特定時間帯における目標水位への

追従など、運転計画の要件を最適化問題として定式化するとともに、遺伝的アルゴリズムを適用した近似的最適化手法を提案している。分枝限定法や遺伝的アルゴリズムの単純な適用方法と比較して提案手法の最適化精度や計算時間を評価している。

Ocampo-Martinez et al.¹²⁾は、大規模な送配水システムをグラフアルゴリズムを用いて互いに接続関係の少ないサブシステムへと分割し、分割されたサブシステムに対して階層的に水処理やポンプ動力コストの削減を目的とする運用計画の立案を適用する手法を提案している。相互依存の小さいサブシステムへと分割することにより、運用計画立案の計算量を低減しつつコスト低減できる見通しを得たと報告している。

大島・鮫島¹³⁾は、水需要の予測量を最新の配水量データを用いて逐次的に更新する手法を提案するとともに、3系統の配水池から配水し、固定速と可変速の送水ポンプが混在する送配水システムを対象とし、電気料金を最小化する送水ポンプ運転計画を混合整数線形計画問題として定式化して得られた運用計画について報告している。

上野・森¹⁵⁾は、複数の浄水場が組み合わさった複雑な送水系における送水ポンプ運転計画の立案を対象とし、実運用上に許容できる時間内に適切な運用計画を立案できる最適化アルゴリズムを提案している。計画立案問題には、送水量の平準化と電気料金の最小化を目的関数とし、配水池が直列に並んだ系統と、分岐・合流を含む複雑な系統の例に適用している。送水計画問題を経路探索問題と捉えてA*探索アルゴリズムを用いることで探索範囲を限定する手法を提案し、最適化アルゴリズムの精度と計算時間を評価して報告している。

竹内ら¹⁶⁾は、配水池1つからなる送水系における送水ポンプ運転計画の立案問題を対象とし、分枝限定法を適用する際の終端条件を工夫することで探索を効率化する手法を報告している。

荒井ら^{17)–20)}は、大規模な送配水システムにおける電力使用量の削減を目的に、送配水量からのポンプ電力使用量の推定手法を提案するとともに、送配水ネットワークを階層構造分析に基づいて簡略化し、配水池の滞留時間に関する制約を設定した上で、取水・導水・浄水過程を含めて電力使用量を最小化する最適化モデルを構築した。現状と将来のネットワークでの最適運用を試算評価した結果を報告している。

高橋ら²¹⁾は、電力需給の逼迫時に電力需要家が消費電力を削減することで対価を受け取る電力デマンドレスポンスを対象に、水道ポンプ運用計画を応用してデマンドレスポンス要請時間帯の電力需要を最小化し、獲得対価を最大化する手法を提案している。

van Zyl et al.²²⁾は、上流のポンプ運転状態と需要量に応じて流入出が変わるタンクを含む送配水システムを対象に、各時刻におけるタンク流入出水量を管網解析シミュレーションにより計算した上で、ポンプの起動停止回数を低減しつつ電気料金を最小化するポンプ運転計画を立案する手法を提案している。遺伝的アルゴリズムによる大域的な探索と、局所探索を

組み合わせたハイブリッド型の探索アルゴリズムを提案し、シンプルな遺伝的アルゴリズムと比べた探索効率の向上を報告している。

Behandish & Wu ²³⁾は、van Zyl et al. ²²⁾と同様にタンクを含む送配水システムを対象に、Artificial Neural Network モデルを用いて管網解析シミュレーションで計算するポンプ運転変更のタンク流入出力への影響を学習することで、目的関数の評価に要する計算時間を短縮して遺伝的アルゴリズムによる最適運用計画を高速化する手法を提案している。

(3) 最適運用モデルのパラメータ決定

水運用は本質的に多目的最適化問題であることから、多くの最適運用モデルは複数の運用目標間のバランスに影響するパラメータを含む。例えば送水量の平準化と動力コストのように、トレードオフ関係にある目的関数の重み係数が挙げられる ¹⁵⁾。こうしたパラメータは具体的な設備の運用条件として直接的に意味づけすることが困難であり、決定が難しい。

坂本ら ⁹⁾は、目的関数の重みパラメータを試行錯誤により定めたと報告している。

上野・森 ¹⁵⁾は、目的関数の重みパラメータを変化させた場合の運用計画への影響を分析している。

加藤ら ³¹⁾は、複数水源からの取水量のバランス調整を対象に、多目的最適化手法を応用して計画立案者のトレードオフ関係への選好を対話的に引き出す計画立案手法を提案している。判断を計画立案者に委ねている点においては、試行錯誤の支援に留まっている。

水道分野から離れると、例えば西 ³²⁾は逆最適化（最適化問題を順問題とする逆問題）によってスケジューリング問題の目的関数の重み係数を推定する手法を紹介している。また、管網解析モデルのキャリブレーション ³³⁾のように、現象をシミュレーションするモデルのパラメータ決定では実績値と予測値の差分である予測誤差が最小となるようにパラメータを定める手法が広く用いられている。

第3節 漏水事故発生の監視

(1) 漏水事故の多様性

漏水事故による配水流量の増加については、規模・増加の緩急の点で多様な事例が報告されている^{34)–37)}。

Bakker et al.³⁴⁾はオランダの5地域（平均配水量 85–730 m³/h）を対象に2年間の漏水事故履歴と配水流量・圧力実績データ（10秒周期）を分析している。漏水事故履歴に記録された142件の事故のうち、常設機器で計測している配水流量や圧力に観測可能な影響を与えたのは44件であった。これらの漏水事故44件について、漏水流量の規模と、漏水流量の増加に要した時間の分布を図2-9および図2-10に示す。対象事例においては、規模が50–800 m³/h、2分以下に急速に流量増加する事例がそれぞれ約75%程度と多くを占めている。なお、44件中24件は道路上の冠水や水圧の低下などにより通報があったと報告されている。

豊中市の資料^{35),36)}では、水需要の少ない深夜時間帯における配水流量の最小値（夜間最小流量）の推移と、漏水事故の事例が報告されている。平均配水量 110 m³/h の配水ブロックにおいて、夜間最小流量が約4日かけて緩やかに約20 m³/h程度増加した事例³⁵⁾が示されている。なお、この事例の原因は呼び径 13 mm のポリ塩化ビニル管の抜出と記載されている。また、平均配水量 100 m³/h の配水ブロックで、夜間最小流量が数週間かけて4–5 m³/h増加した事例も報告されている³⁶⁾。

他にも、配水流量が数時間の間隔をあけて多段階で増加した事例³⁷⁾があり、漏水流量が複数の段階を経て断続的に増加した例と考えられる。

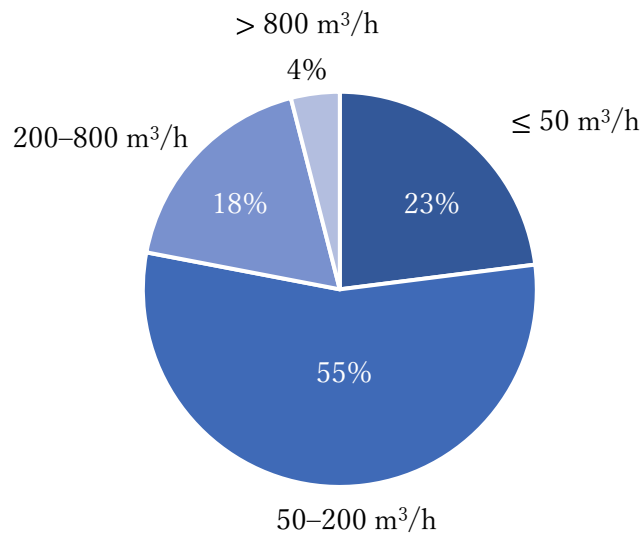


図 2-9 漏水事故 44 件の規模 (漏水流量) の分布 ³⁴⁾

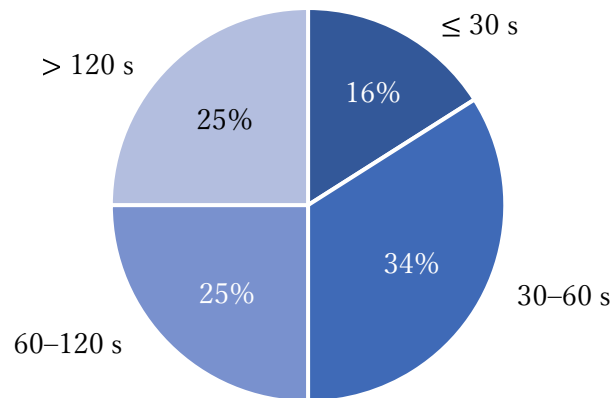


図 2-10 漏水事故 44 件の流量増加に要した時間の分布 ³⁴⁾

(2) 配水系計測データの監視

漏水事故発生の疑いをいち早く判定する方策として、配水区域の流入部の流量計や、区域内の圧力計の計測値を監視し、漏水事故発生にともなう異常な流量増加や圧力低下を判定する手法が提案されてきた^{37)–50)}。配水流量は、市民生活や都市活動に応じて、気象やイベントなどの影響を受けつつ変動する。既往研究では、監視制御システム等に収集される配水流量・圧力の計測値に基づいて、配水流量の予測値を5–15分程度の周期で更新した上で、流量計測値が予測値よりも継続して大きい場合などに漏水事故発生の疑いを判定する手法が提案されている。研究ごとに、監視・分析する計測データの項目と組み合わせ、予測の手法、計測値と予測値の比較判定手法などに特徴がある。また、250 Hz⁵¹⁾や1秒未満⁵²⁾の短い周期で計測・収集した圧力計測値を用いて、漏水事故発生の疑いの判定や管網中の事故発生位置の推定を行う手法も提案されている。

流量を監視・分析する手法は、流量計の下流における漏水事故発生の判定に留まる。ただし、配水区域をブロックに細分化して流入流量を計測していれば、漏水事故発生の範囲をブロックの単位まで絞り込めると言える。一方で、圧力を監視・分析する手法は、複数の圧力計が設置された配水区域において、各圧力計への影響の大きさ・時間遅れ等から事故の発生地域を絞り込める可能性がある。

監視・分析対象の計測データについて、国内水道事業者を対象としたアンケート調査の結果⁵³⁾では、配水流量は配水区域の流入口で幅広く計測されているものの、配水管網中の圧力を計測している箇所数は少ない。計測機器の設置状況は水道事業者や配水区域の特徴に依存するものの、配水流量を監視する手法のほうが幅広い配水区域に適用できると考えられる。

以下、主要な既往研究についてレビューする。

Mounce et al.^{37),38)}は、流量・圧力などの計測値の監視に基づく突発漏水事故の発生判定手法の提案・実証を報告している。適用対象としては、漏水管理のために1,000戸程度の地域に対して配水管網への流入を1ヶ所に限定して流入流量を計測するDMA (District Metered Area) の構成を前提としている。一般的な漏水管理の取り組みである深夜の流量計測値の分析に加えて、15分単位で常時流量を監視・分析することで、突発漏水事故の疑いを早期に発見して警報を発することをねらいとしている。分析には、Artificial Neural Networkを応用して計測値の予測と異常判別モデルを構築して利用する手法を提案し、突発漏水事故事例を提案手法で発見した事例や、提案手法の発した警報のうち突発漏水事故が確認できた割合を評価し、報告している。

Ye & Fenner⁴⁰⁾は、Kalman Filterを用いて通常時の水需要のモデルを構築し、予測偏差が大きいときに突発漏水事故の疑いを発する手法を提案している。実際のDMAでの漏水事故

事例や、消火栓からの放水で漏水事故発生を模擬した実験のデータを用いて、提案手法による流量・圧力の計測値を用いた漏水事故発生の判定結果を報告している。

Bakker et al.⁴³⁾ は、最適運用のために構築した水需要予測モデルの配水流量予測値と実測値の偏差を比較し、過去の偏差の大きさとその継続時間との関係から異常と判定すべき配水流量のしきい値を算出する漏水事故判定手法を提案している。提案手法を過去の漏水事故事例のデータに適用し、漏水事故の規模で区分した判定可否の割合や判定までに要する時間を評価し報告している。

Romano et al.⁴⁴⁾ は、Wavelet 解析に基づいて流量・圧力計測値のノイズを除去し、計測値の長期的な変化トレンドに対して統計的プロセス管理 (Statistical Process Control) 手法を適用するとともに、長期変化トレンドの分析結果と、短期的な予測値からの逸脱を Bayesian Belief Network によって統合する推論手法を提案し、漏水事故発生判定の信頼性と判定に要する時間の性能を改善したと報告している。

Wu et al.^{47),48)} は複数センサ間の計測値の相関関係に着目し、通常時における相関関係からの逸脱を分析することで漏水事故発生を判定する手法を提案している。また、Wang et al.⁴⁹⁾ は Recurrent Neural Network の 1 種である LSTM (Long Short Term Memory) を用いて配水流量の予測モデルを構成し、予測値と計測値を比較することで漏水事故発生を判定する手法、Wu & Liu⁵⁰⁾ は、計測値時系列データの短期的な変化パターンを過去実績の変化パターンと比較することで漏水事故発生を判定する手法を提案している。

第4節 本研究の位置づけ

(1) 配水池運用モデルとそのパラメータ決定

既往研究の多くは、ポンプ消費電力量などの運用効率化を追求する最適運用モデルと、その最適化アルゴリズムを提案している。すなわち、既往研究の多くは、運用の効率化に焦点をあててその期待効果を算出している。一方で、熟練運転員が暗黙的に配慮している項目、例えば、需要変動に対してロバストな配水池の水位変動や、ポンプ・バルブ操作や流量の変化範囲を限定することによる配水管網中での赤水発生を抑止などについては、最適運用モデルの定式化に必ずしも取り込んでおらず、これらの点を含めて実用に適した運用計画であるかどうかは確認されていない。

そこで、図 2-11 に示すようにステップを分け、まず運用の自動化に主眼をおき熟練運転員による現行運用を再現することで立案する運用計画の実用性を担保し、その後運用の効率化へと発展させることが有効と考えられる。本研究では、需要変動に対するロバスト性や安定水質を確保する操作などを取り込むように、熟練運転員の運用を再現する実用に適した最適運用モデルの確立に注力する。

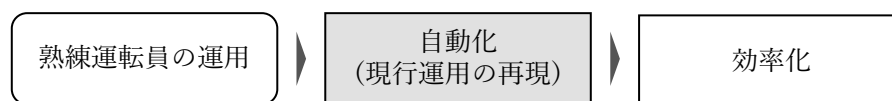


図 2-11 水運用の自動化・効率化のステップ

配水池運用において、水位変動と送水量の平準化はトレードオフの関係にある。例えば上野・森¹⁵⁾などの既往研究の配水池運用モデルでは、管理範囲内で配水池の水位が自由に変動することを許す。このため立案される運用計画では送水量の平準化が優先され、配水池水位がしばしば管理範囲の上下限值に近づく。一方で、熟練運転員の操作では、日常的には配水池水位をより狭い範囲で運用し、例外的な条件でのみ管理範囲の上下限值に近づくことを許容することが一般的である。日常的に管理範囲の境界まで水位を変動させると、水需要が例外的に多い／少ない日や、水需要が予想から外れた場合などに管理範囲を逸脱する可能性が高いためである。しかし、既往研究の配水池運用モデルで単純に配水池水位の管理範囲を狭めると、水需要が多い／少ない日などに水位管理範囲の制約条件を満たせず、運用計画を立案できない問題がある。

そこで本研究では、第3章において、配水池の水位変動について、逸脱を一定程度許容する範囲設定を課す配水池運用モデルを提案する。配水池水位の変動範囲から逸脱する運用に対してペナルティを課すことで、継続的かつ大きな逸脱を抑制する最適運用モデルを定式化

する。水位の変動範囲は、熟練運転員の運用を記録した配水池水位の運転実績データを分析に基づいて定める。ケーススタディの対象には、広域連携・広域化の流れの中で重要性を増す水道用水供給事業からの受水があり、さらに複数水源間で相互融通が可能なシステムを選定する。対象システムの特徴をふまえて、配水池水位変動の適正化に加えて、用水系配水量の平準化を考慮する配水池運用モデルを提案する。

また、第3章の配水池運用モデルは、上野・森¹⁵⁾などの既往研究と同様に、目標間の優先度バランスに関するパラメータを含む。これらのモデルでは、上野・森¹⁵⁾で報告されている通り、パラメータ設定によって運用のバランスが大きく変化する。このため、実運用に適したパラメータの決定が重要な課題である。既往研究ではパラメータ変更の影響分析¹⁵⁾や、対話的調整手法の提案³¹⁾があるものの、決定は運用モデルの構築者や運用計画の立案者に委ねており、体系的な決定手法は提案されていない。

そこで本研究では、第4章において、配水池運用モデルの立案する運用計画が、熟練運転員の運転実績データを再現するようにモデルのパラメータを決定する手法を提案する。管網解析モデルのキャリブレーション³³⁾のように、現象をシミュレーションするモデルのパラメータ決定では実績値と予測値の差分である予測誤差が最小となるようにパラメータを定める手法が広く用いられている。本研究では、このアプローチを最適運用モデルのパラメータ決定に適用し、熟練運転員の判断結果が残る運転実績データの再現を基準とすることで、実運用に適したバランスのパラメータを定めることをねらいとする。提案手法は、運用計画による運転実績データの再現度を定義し、再現度を最大化するパラメータを選択する。

(2) 漏水事故発生監視

既往研究の監視手法の多くは、漏水流量が急速に増加する事故に適した構成となっており、緩やかに増加する事故は、判定を見落とすことや、判定まで時間を要することがある。実際、配水流量の予測に直前の計測値を用いる手法^{40),43),44)}、すなわち、予測ラグの短い予測モデルに基づく手法は、直前の流量計測値を用いることで、通常時の予測精度が高く、急速に増加する漏水事故を速やかに判定できる。しかし、緩やかに増加する漏水事故については、気象の影響による通常の水需要増加と混同し、判定の見落としや判定に時間を要する傾向がある。既往研究では、急速に流量増加する漏水事故に対して判定の見落とし (False Negative) や誤判定 (False Positive) の比率によって手法を評価しており、緩やかに増加する漏水の判定については議論されていない。なお、予測ラグの長い予測モデルに基づく手法^{37),38)}は、ラグの短いモデルに比べて流量の予測精度が低いために急速に増加する漏水事故の判定に時間を要する。

本研究では、第5章において、漏水流量が急速に増加する事故と、緩やかに増加する事故の両方を確実かつ速やかに判定する配水流量の監視手法を提案する。幅広い配水区域への適用を意図し、配水流量を監視・分析の対象とする。漏水増加の緩急によって判定に適する予測ラグが異なることを踏まえて、提案手法では、異なる予測ラグの配水流量予測モデルを複数併用する。急速に増加する漏水は短い予測ラグのモデル、緩やかに増加する漏水は長い予測ラグのモデルが寄与することにより、漏水事故発生の疑いを早期に判定することをねらう。配水流量の予測モデルや事故疑いの判定しきい値は、運転実績データから学習することにより、対象区域の特徴をふまえた監視を可能とする。

参考文献

- 1) 日本水道協会：7. 配水施設，水道施設設計指針 2012 年版，2012.
- 2) 紀谷文樹(監修)，竹村公太郎(編)，小泉明(編)，市川憲良(編)，小瀬博之(編)：配水池，第 5 編 上水道のプロセス，水環境設備ハンドブック，オーム社，p.212, 2011.
- 3) 足立進吾，荒井康裕，小泉明，高橋信補，武本剛：運転記録の分析に基づく配水池運用の最適化手法，土木学会論文集 G (環境)，Vol.75, No.6, pp.II_197-II_208, 2019.
- 4) Donkor, E. A., Mazzuchi, T. A., Soyer, R. and Roberson, J. A.: Urban water demand forecasting: Review of methods and models, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.140, No.2, pp.146–159, 2014.
- 5) de Souza Groppo, G., Costa, M. A. and Libânio, M.: Predicting water demand: a review of the methods employed and future possibilities, *Water Supply*, Vol.19, No.8, pp.2179–2198, 2019.
- 6) Jowitt, P. W. and Germanopoulos, G.: Optimal pump scheduling in water supply networks, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.118, No.4, pp.406–422, 1992.
- 7) 栗栖宏充，西谷卓史，舘仁平，安達弘：数理計画法とヒューリスティック法を組み合わせた動的配分計画技法の上水道運用計画問題への適用，計測自動制御学会論文集，Vol.30, No.2, pp.198–207, 1994.
- 8) Savić, D. A., Walters, G. A. and Schwab, M.: Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply, In *Evolutionary Computing. AISB EC 1997, Lecture Notes in Computer Science*, Vol.1305. Springer, pp.227–235, 1997.
- 9) 坂本義行，黒川太，佐野方俊，山田毅，芦木達夫，結城博司：GA による送水計画の近似的最適化手法，電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)，Vol.120, No.8-9, pp.987–999, 2000.
- 10) 横川勝也，坂本義行，八重樫淳，川田行彦：水道広域化に対応する水運用最適化システム，*EICA*, Vol.8, No.2, pp.37–41, 2003.
- 11) Bunn, S. M. and Reynolds, L.: The energy-efficiency benefits of pump-scheduling optimization for potable water supplies, *IBM J. Res. Dev.*, Vol.53, No.3, pp.5:1–5:13, 2009.
- 12) Ocampo-Martinez, C., Bovo, S. and Puig, V.: Partitioning approach oriented to the decentralised predictive control of large-scale systems, *J. Process Control*, Vol.21, No.5, pp.775–786, 2011.
- 13) 大島信夫，鮫島正一：水とエネルギーの最適化を図る“カオス水需要予測”制御，*EICA*, Vol.17, No.1, pp.17–21, 2012.
- 14) 足立進吾，河原林雅，高橋信補，田所秀之：配水ポンプ施設のエネルギー特性のモデル化と水運用計画立案での活用，水道協会雑誌，Vol.82, No.6, pp.3–12, 2013.
- 15) 上野洋平，森一之：大規模送水系統向け送水ポンプ運転計画手法の提案，電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)，Vol.133, No.8, pp.780–785, 2013.

- 16) 竹内一生, 小坏成一, 岡本卓, 伊藤 智義, 下馬場朋禄: 分枝限定法を用いた上水道ポンプ運用計画問題の最適化, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.138, No.10, pp.1287–1288, 2018.
- 17) 荒井康裕, 堀江俊樹, 小泉明, 稲員とよの, 増子敦, 田村聡志, 山本孝: 混合整数線形計画モデルによる送配水システムの電力使用量の最小化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.6, pp.II_273–II_281, 2012.
- 18) 荒井康裕, 西江光司, 小泉明, 稲員とよの, 石田紀彦, 山崎千秋, 守安純三郎: 電力使用量の削減を目的とした大規模な送配水システムへの MILP モデルの適用, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_149–II_156, 2013.
- 19) 荒井康裕, 浅野弘樹, 小泉明, 稲員とよの, 細谷昌平, 山崎千秋, 松葉香奈: 配水池における貯水量変動を考慮した送配水システムの電力使用量の最小化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_403–II_409, 2014.
- 20) 荒井康裕, 尾崎和信, 小泉明, 稲員とよの, 細谷昌平, 戸張岳史, 松葉香奈, 村山聖: 将来の水道システムを想定した電力使用量最小化シミュレーション, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No.6, pp.II_195–II_203, 2016.
- 21) 高橋信補, 鯉淵裕史, 足立進吾, 武本剛, 小泉賢司: 水道送水システムにおける電力デマンドレスポンスのためのポンプ運転スケジューリング方式, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.136, No.8, pp.1200–1208, 2016.
- 22) van Zyl, J. E., Savić, D. A. and Walters, G. A.: Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.130, No.2, pp.160–170, 2004.
- 23) Behandish, M. and Wu, Z. Y.: Concurrent pump scheduling and storage level optimization using meta-models and evolutionary algorithms, *Procedia Eng.*, Vol.70, pp.103–112, 2014.
- 24) Hirano, T., Ashida, Y., Yu L., Izukura, S., Nishioka, I. and Fujimaki, R.: Stable and energy efficient operation in a larger-scale water distribution network, *IPSS TOM*, Vol.10, No.2, pp.33–42, 2017.
- 25) Makaremi, Y., Haghghi, A. and Ghafouri, H. R.: Optimization of pump scheduling program in water supply systems using a self-adaptive NSGA-II; a review of theory to real application, *Water Resour. Manage.*, Vol.31, No.4, pp.1283–1304, 2017.
- 26) Sunela, M.: Real-time control optimization of water distribution system with storage, Ph.D. Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
- 27) Tadokoro, H., Koibuchi, H., Takahashi, S., Kakudou, S., Takata, Y., Moriya, D. and Sasakawa, M.: Water supply control system for smarter electricity power usage adopting demand-response scheme, *Water Supply*, Vol.20, No.1, pp.140–147, 2020.
- 28) 松木洋, 藤本康孝: SVM および PCA を用いた運転ノウハウの抽出による上水送水系の運転支援システム, 電気学会論文誌 D (産業応用部門), Vol.132, No.10, pp.990–996, 2012.

-
- 29) 松木洋, 藤本康孝: K 平均法および PLS 回帰分析を用いた運転ノウハウの抽出による運転支援の為に上水送水系運転システム, 電気学会論文誌 D (産業応用部門), Vol.134, No.3, pp.301–307, 2014.
 - 30) Hajgató, G., Paál, G. and Gyires-Tóth, B.: Deep reinforcement learning for real-time optimization of pumps in water distribution systems, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.146, No.11, 04020079, 2020.
 - 31) 加藤博光, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 館仁平: 広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.2, pp.280–287, 1999.
 - 32) 西竜志: 機械学習と最適化の融合による共進化システム設計, 計測と制御, Vol.59, No.12, pp.992–925, 2020.
 - 33) Savić, D. A., Kapelan, Z. S. and Jonkergouw, P. M. R.: Quo vadis water distribution model calibration?, *Urban Water J.*, Vol.6, No.1, pp.3–22, 2009.
 - 34) Bakker, M., Trietsch, E. A., Vreeburg, J. H. G. and Rietveld, L. C.: Analysis of historic bursts and burst detection in water supply areas of different size, *Water Sci. Technol. Water Supply*, Vol.14, No.6, pp.1035–1044, 2014.
 - 35) 豊中市水道局: 漏水防止基本計画, 2007.
 - 36) 豊中市上下水道局: 漏水防止基本計画 (第 3 版), 2018.
 - 37) Mounce, S. R., Day, A. J., Wood, A. S., Kahn, A., Widdop, P. D. and Machell, J.: A neural network approach to burst detection, *Water Sci. Technol.*, Vol.45, No.4-5, pp.237–246, 2002.
 - 38) Mounce, S. R., Boxall, J. B. and Machell, J.: Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.136, No.3, pp.309–318, 2010.
 - 39) Mounce, S. R., Mounce, R. B. and Boxall, J. B.: Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines, *J. Hydroinformatics*, Vol.13, No.4, pp.672–686, 2011.
 - 40) Ye, G. and Fenner, R. A.: Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems, *J. Pipeline Syst. Eng.*, Vol.2, No.1, pp.14–22, 2011.
 - 41) Armon, A., Gutner, S., Rosenberg, A. and Scolnicov, H.: Algorithmic network monitoring for a modern water utility: a case study in Jerusalem, *Water Sci., Technol.*, Vol.63, No.2, pp.233–239, 2011.
 - 42) Bakker, M., Vreeburg, J. H. G., Rietveld, L. C. and van de Roer, M.: Reducing customer minutes lost by anomaly detection?, *Proc. 14th Water Distribution Systems Analysis conf. 2012*, 2012.
 - 43) Bakker, M., Vreeburg, J. H. G., van de Roer, M. and Rietveld, L. C.: Heuristic burst detection method using flow and pressure measurements, *J. Hydroinformatics*, Vol.16, No.5, pp.1194–1209, 2014.

- 44) Romano, M., Kapelan, Z. and Savić, D. A.: Automated detection of pipe bursts and other events in water distribution systems, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.140, No.4, 0000339, 2014.
- 45) Bakker, M.: Optimised control and pipe burst detection by water demand forecasting, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2014.
- 46) Wu, Y. and Liu, S.: A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems, *Urban Water J.*, Vol.14, No.9, pp.972–984, 2017.
- 47) Wu, Y., Liu, S., Smith, K. and Wang X.: Using correlation between data from multiple monitoring sensors to detect bursts in water distribution systems, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.144, No.2, 04017084, 2018.
- 48) Wu, Y., Liu, S. and Wang X.: Distance-based burst detection using multiple pressure sensors in district metering areas, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.144, No.11, 06018009, 2018.
- 49) Wang, X., Guo, G., Liu, S., Wu, Y., Xu, X. and Smith, K.: Burst detection in district metering areas using deep learning method, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.146, No.6, 04020031, 2020.
- 50) Wu, Y. and Liu, S.: Burst detection by analyzing shape similarity of time series subsequences in district metering areas, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.146, No.1, 04019068, 2020.
- 51) Srirangarajan, S., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Lim, H. B. and Whittle, A.J.: Wavelet-based burst event detection and localization in water distribution systems, *J. Signal Process. Sys.*, Vol.72, No.1, pp.1–16, 2013.
- 52) 横川勝也, 稲員とよの, 小泉明, 難波諒, 杉野寿治: 配水管網における漏水事故の位置推定に関する研究, 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_433–II_440, 2015.
- 53) 水道技術研究センター: 6.3.1. Rainbows プロジェクトアンケート結果の再分析, 人口減少社会における水道管路システムの再構築及び管理向上策に関する研究(Pipe Σ プロジェクト) 報告書, 2020.

第3章 運転実績データの分析に基づく配水池運用の最適化

第1節 緒言

水道の運用では、多くの場合、熟練運転員が日々変化する水需要や原水水質に対応した運転操作を担っている。熟練運転員の経験やノウハウは明文化されていないことが多く¹⁾、短期間のヒアリングで網羅することも困難である。将来にわたり安定した水供給を持続するには、熟練運転員が有する知見を多様な手段で受け継ぎ、運転員の判断を支援していく仕組みや技術が求められる。水源から浄水場、配水池を経て需要者まで水を送り届ける取水、導水・送水・配水システムの運用（以下、水運用）においても、熟練運転員がポンプの始動・停止などの運転操作を日常的に行う水道は多い。現在、熟練運転員による操作の多くは監視制御システムに運転実績データとして蓄積されている。つまり、運転実績データには熟練運転員が知見に基づき判断した結果が含まれている。従って、運転実績データを分析することにより、熟練運転員の知見を抽出できることが期待される。

一般に、配水池の水位変動と送水量の平準化はトレードオフの関係にある。ところが既往研究^{2)~6)}の配水池運用モデルでは、管理範囲内で配水池の水位が自由に変動することを許す。このため立案される運用計画では送水量の平準化が優先され、配水池水位がしばしば管理範囲の上下限值に近づく。一方で、熟練運転員の操作では、日常的には配水池水位をより狭い範囲で運用し、例外的な条件でのみ管理範囲の上下限值に近づくことを許容することが一般的である。日常的に管理範囲の境界まで水位を変動させると、水需要が例外的に多い／少ない日や、水需要が予想から外れた場合などに管理範囲を逸脱する可能性が高いためである。しかし、既往研究の配水池運用モデルで単純に配水池水位の管理範囲を狭めると、水需要が多い／少ない日などに水位管理範囲の制約条件を満たせず、運用計画を立案できない問題がある。

そこで本章⁷⁾では、配水池の水位変動に着目し、運転実績データの分析を通じて熟練運転員の知見を抽出し、その知見に基づいて将来の適切な水道ポンプの運転操作の予定（運用計画）を立案する手法を検討する。熟練運転員による運転実績を水位変動が適正にコントロールされた手本と見なし、運転実績データの分析を通じて日常的な水位変動の目標範囲を抽出する。そして、配水池運用モデルでは配水池水位の目標範囲からの逸脱を抑制するよう定式化することで、熟練者の運転に近い水位変動となる運用計画を立案する。

以下、第2節では本章で対象とする導送配水システムについて述べる。続いて第3節で配水池運用の最適化手法を提案する。第4節ではケーススタディとして対象システムの1か月のデータに対して提案手法を適用し、有用性を評価する。

第2節 対象システムと従来運用

(1) 設備構成

本章で対象とする導送配水システムを図3-1に示す。本システムは、自己水源からの取水（導水）、水道用水供給事業からの送水を受けて、4つの配水池からポンプ加圧により単一の配水区域の管網に配水する。このシステムの特徴として、広域連携・広域化の流れの中で重要性を増す水道用水供給事業から受水があること、配水区域において浄水の相互融通が可能であることが挙げられる。対象システムの主な諸元を表3-1に示す。相互融通が可能なシステムは、更新工事などにより一系統の設備能力が低下した際には他系統からバックアップできる一方、既往研究³⁾で複雑な施設の例題として取り上げられている通り、水運用の自由度が高まるため、最適な運転方法の決定が難しく、熟練運転員に頼ることが多い。

水源と運用の違いを表すため、水道用水供給事業のみから受水する用水系の配水池 A, D は大文字の記号、自己水（地下水）系の配水池 b, c は小文字の記号で表記する。配水池 $r = A, b, c, D$ の水位を L_r [m]、受水量・取水量を p_r [m³/h]、配水量を q_r [m³/h] と書く。ただし、配水池 c は自己水を主とする配水池であるが、一部用水からの供給も受けているため、用水からの受水量を大文字の記号 C を用いて p_C [m³/h] と書く。

図中 P はポンプ設備を示し、表記 $n \times$ は n 台の並列ポンプがあること、カッコ中の表記は平常運転時に選択する並列ポンプの同時運転台数を表す。

対象システムは、1つの配水区域に各配水池からポンプで配水する。配水区域の水需要量 E は、各配水池からの配水量の和となる。

$$E = q_A + q_b + q_c + q_D \quad (3-1)$$

自己水系の配水量 q_b, q_c は、配水ポンプグループの運転台数を 0-2 台の間で切り替えることで、各台数に応じた値に制御できる。用水系の配水量 q_A, q_D の合計は、式(3-1)、水需要量 E 、自己水系の配水量 q_b, q_c から定まる。配水量 q_A, q_D の間の配分は、配水管網の構造・配水ポンプの性能曲線、配水池 D の配水ポンプの回転数調整により定まる。この関係は、運転実績データから推定できる式(3-2)で表せる。

$$c_{FL} \leq c_A \cdot q_A + c_D \cdot q_D \leq c_{FU} \quad (3-2)$$

c_k : 運転実績データから推定できる係数 ($k = A, D, FL, FU$)

なお、FL, FU は、配水池 D のポンプ回転数調整による変更余地の下限・上限を表す。

各配水量には設備能力に起因する上下限值がある。

地下水の取水にはポンプが用いられる。配水池 b, c それぞれ 1 つのポンプグループを始動・停止して取水量 p_b , p_c を制御する。水利権により、各配水池の 1 日の総取水量には上限がある。一方、用水の受水 p_r ($r = A, C, D$) は常時一定量である。

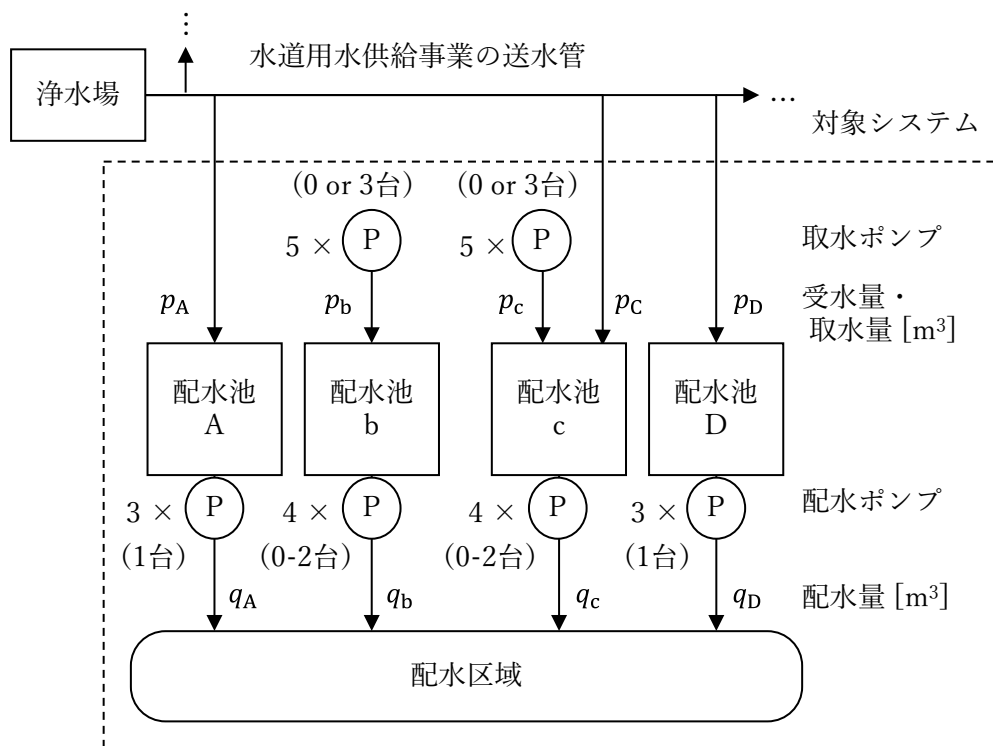


図 3-1 対象とする導送配水システム

表 3-1 対象システムの諸元

項目	数値	
平均配水量	約 45,000 m ³ /d (約 1,900 m ³ /h)	
区域内人口	約 14 万人	
配水池全容量	A	15,000 m ³
	b	3,200 m ³
	c	3,600 m ³
	D	7,500 m ³

配水池の水位は式(3-3)-(3-4)に示すように流入（受水・取水量）と流出（配水量）の差に応じて変動する。運用面では、配水量の変化に対応して水位が変動することで受水・取水量をなるべく一定に保つバッファの役割（送水量を平準化する時間変動調整機能）を果たす。

$$A_r \frac{dL_r}{dt} = -q_r + p_r \quad (r = A, b, D) \quad (3-3)$$

$$A_c \frac{dL_c}{dt} = -q_c + p_c + p_C \quad (3-4)$$

A_r ：配水池 r の底面積

各配水池には、管理範囲として水位変動の上下限値の目安が定められている。なお、管理範囲は設備設計上の水位上下限値よりも狭く、管理範囲からの水位の一時的な逸脱は許容される。

各ポンプ設備には同時運転台数や運転順序の制約があるため、ポンプの始動・停止操作は表3-2に示す6つのグループを単位として行う。これらのポンプグループの始動・停止操作を適切なタイミングで行うことが対象システムの運用の要点となる。各ポンプグループについて、朝と夕の水需要のピーク時間帯に起動・停止操作を行うため、1日に延べ $6 \times 2 \times 2 = 24$ 回の操作について、操作タイミングを決める必要がある。ポンプグループの始動・停止操作に加えて、補助的な調整として可変速ポンプの回転数変更が可能である。

表3-2 ポンプ始動・停止操作の単位となるグループ

#	配水池 b	配水池 c
1	配水ポンプ 1 台目 (可変速)	配水ポンプ 1 台目 (可変速)
2	配水ポンプ 2 台目 (固定速)	配水ポンプ 2 台目 (固定速)
3	取水ポンプ (固定速) [所定の 3 台を同時に操作]	取水ポンプ (固定速) [所定の 3 台を同時に操作]

(2) 熟練運転員による従来運用

熟練運転員は、用水系配水量の平準化と、配水池水位の変動範囲の適正化の2つの目標のバランスをとりながら対象システムを運用している。

a) 用水系配水量の平準化

送水量や配水量の平準化とは、送・配水量の時間変化を小さくすることである。多くの水道システムでは、安定的な浄水処理や、ポンプ設備の機械的な負荷の抑制のために配水池に流入する送水量を平準化する運用が一般的である。一方、対象システムでは同じ配水区域に4つの配水池から供給する構造から、配水池間の相互融通によって用水系配水量の平準化が可能である。対象システムでは用水系配水ポンプからの配水量が水需要量の約8割を占め、用水系配水ポンプの重要度が高いことから、配水池A、Dの配水量 q_A 、 q_D を平準化し、用水系配水量の過剰な変化を抑制し、配水ポンプの機械的負荷を抑制している。

配水量の時間変動の例を図3-2に示す。用水系配水池A、Dからの配水量 q_A 、 q_D をベースに配水しており、朝夕の水需要ピークを含む時間帯に配水池b、cの配水ポンプを運転して配水量 q_b 、 q_c を追加している。水需要量ピークである8、21時台の前後に自己水系配水量 q_b 、 q_c を増やすことで、用水系配水量 q_A 、 q_D の変化を抑制できていることがわかる。図3-3は、同日17～24時の配水量の1時間ごとの変化($q_r[t] - q_r[t-1]$) ($r = A, b, c, D$)を示す。配水池b、cの配水ポンプの始動・停止時刻を適切に定めることで、用水系配水量 q_A 、 q_D は自己水系配水量 q_b 、 q_c よりも変化の絶対値が小さく、平準化されていることが読み取れる。

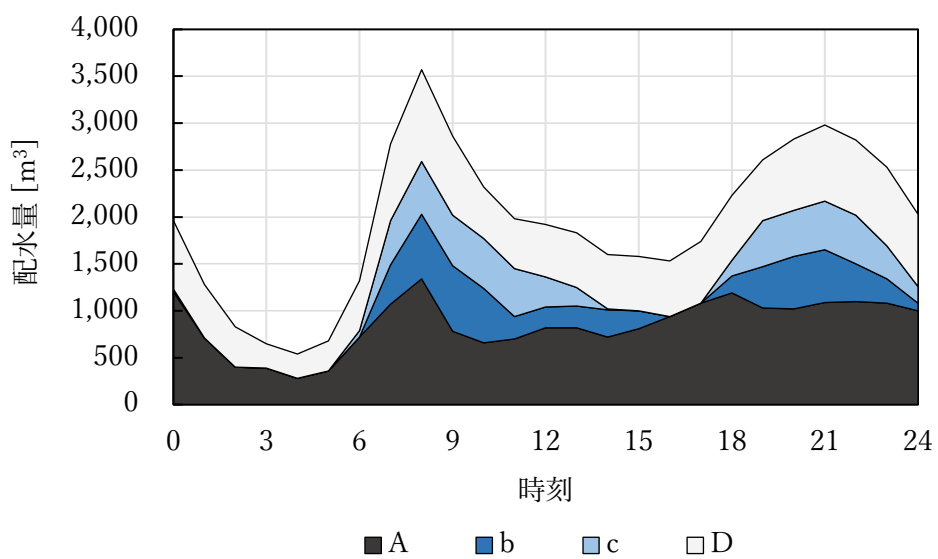


図 3-2 配水量の時間変動の例

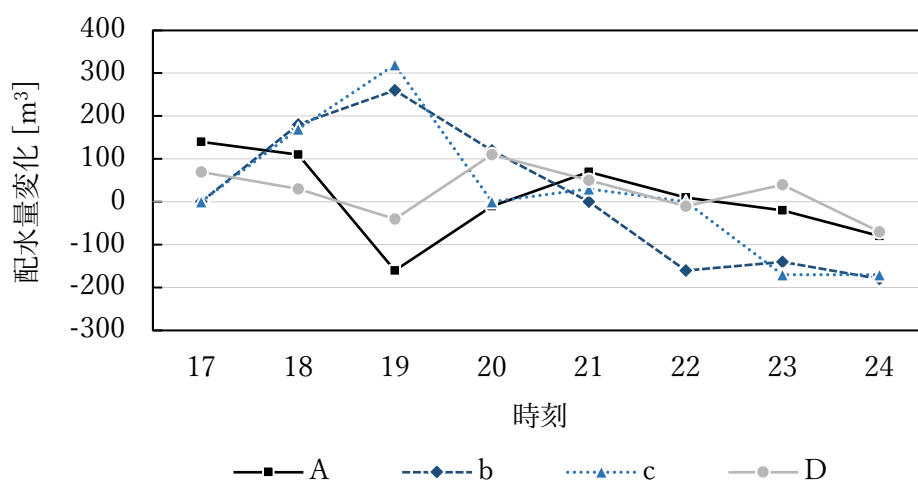


図 3-3 配水量変化の例

b) 配水池水位の変動範囲の適正化

配水池水位変動の適正化とは、配水池水位をできる限り管理範囲の中で運用することである。対象システムでは、用水系配水池の水位制御が難しいため、水需要が想定から外れた場合などに水位を管理範囲から逸脱する可能性が高い。逸脱を減らすために、熟練運転員は管理範囲の上下限值付近での水位変動を避ける運用を行っている。用水系配水池の水位制御が難しい理由は、用水系配水池 A,D は流入量が一定で変更できず、更に流出量も主に自己水系配水池 b,c の配水量の変更を通じた間接的な制御に限定されているためである。

加えて、配水池 A は平均配水量に比べて時間変動調整容量が小さい。配水量の平均的な比率はおよそ $A:b:c:D = 5:1:1:3$ である。配水池の時間変動調整能力を示す指標として、時間変動調整容量（水位管理範囲内の容量）を平均配水量で割った値を運用貯留時間 [h] と定義し、全容量（有効容量）とあわせて図 3-4 に示す。配水池 A の全容量は配水池 D の 2 倍あるが、運用貯留時間では配水池 D を下回る。この意味で、配水池 A は配水池 D よりも時間変動調整能力が低いことが確かめられる。

従来運用における配水池水位の特徴を把握するため、水位運転実績データのヒストグラムを分析する。図 3-5～図 3-8 は、2016 年 10 月の 1 か月間における各配水池の水位運転実績データ（1 時間値； $n = 24 \times 31 = 744$ ）の累積相対度数分布およびヒストグラム（度数分布）である。縦点線は α 分位値、すなわち、 n 個のデータを小さい順に並べて $n \cdot \alpha$ 番目に相当する値である。下側は $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$ 、上側は $\alpha = 0.90, 0.95, 0.99$ の各分位値を示す。一方、縦破線は各配水池で定められた水位管理の上下限值であり、運転員は水位がこの範囲に収まるよう運転管理することが求められる。

図 3-5 より、日常的な水位変動は、管理範囲に対して余裕を設けた、より狭い大きさの範囲内で行われていることが確かめられる。実際、日常的な水位変動の範囲を 0.01 分位値～0.99 分位値の間と定め、その大きさ（0.99 分位値と 0.01 分位値の差）の水位管理範囲の大きさに対する比を求めると、配水池 A,b,c,D でそれぞれ 84, 82, 69, 62% となった。また、配水池 A の上限を除いて、日常的な水位変動の範囲は水位管理範囲に一定の余裕をとって含まれていることがわかる。

用水供給を水源とする配水池 A,D について比較する。図 3-5 から、配水池 A では 0.99 分位値が管理目標上限値(11.5 m)を上回っていることがわかる。また、配水池 A の上側分位値は全て管理目標上限に近く、互いの間隔が小さい（0.95 分位値と 0.90 分位値の差は 0.05 m）。これは、運用貯留時間が小さいなかで管理目標上限水位をできるだけ守るように運用したことが現れていると考えられる。他方、図 3-6 から、配水池 D では上側分位値の互いの間隔がより大きく（0.95 分位値と 0.90 分位値の差は 0.20 m）、水位の上限側での運用に

余裕があることが読み取れる。

図 3-7, 図 3-8 より, 朝夕の需要ピーク時に取水・配水ポンプを運転する自己水源系の配水池 b,c では, 常時一定量の用水供給受水の有無がヒストグラムの形状の違いとして現われている。受水がなく, 運転員が制御できる取水のみが流入する配水池 b では, 約 4.5 m の水位である度数が顕著に高い。配水池 b では, 配水ポンプを停止した後, 配水池を満水(4.5 m)にしてから取水ポンプを停止し, 次の水需要ピークに備える運用としている。このため取水・配水ポンプが停止している時間帯は原則満水(4.5 m)であり, 水位が約 4.5 m である度数が顕著に高いヒストグラムとなっている。一方, 取水だけでなく受水も流入する配水池 c では, 配水池 b に比べてヒストグラムのピーク (水位約 3.9 m) の高さは低い。配水池 c では取水・配水ポンプが停止している時間帯でも常時一定量の受水で水位が上昇し続けるため, 配水池 b の満水水位のように長時間同じ水位となることがないためである。

以上のように, 配水池水位記録のヒストグラムや分位値は, 配水池の時間変動調整容量, 流入出量の調整可否などの配水池の特性や熟練運転員の運用を反映していることがわかる。運転実績データから水位変動の日常的な目標範囲を定める場合, こうした情報が反映されたヒストグラムや分位値に基づいて設定することが有効と考えられる。

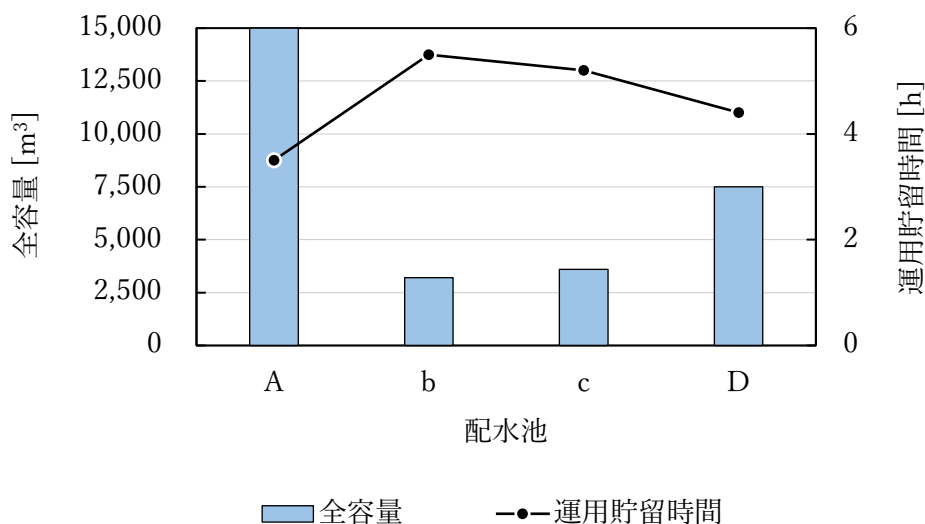


図 3-4 各配水池の全容量と運用貯留時間

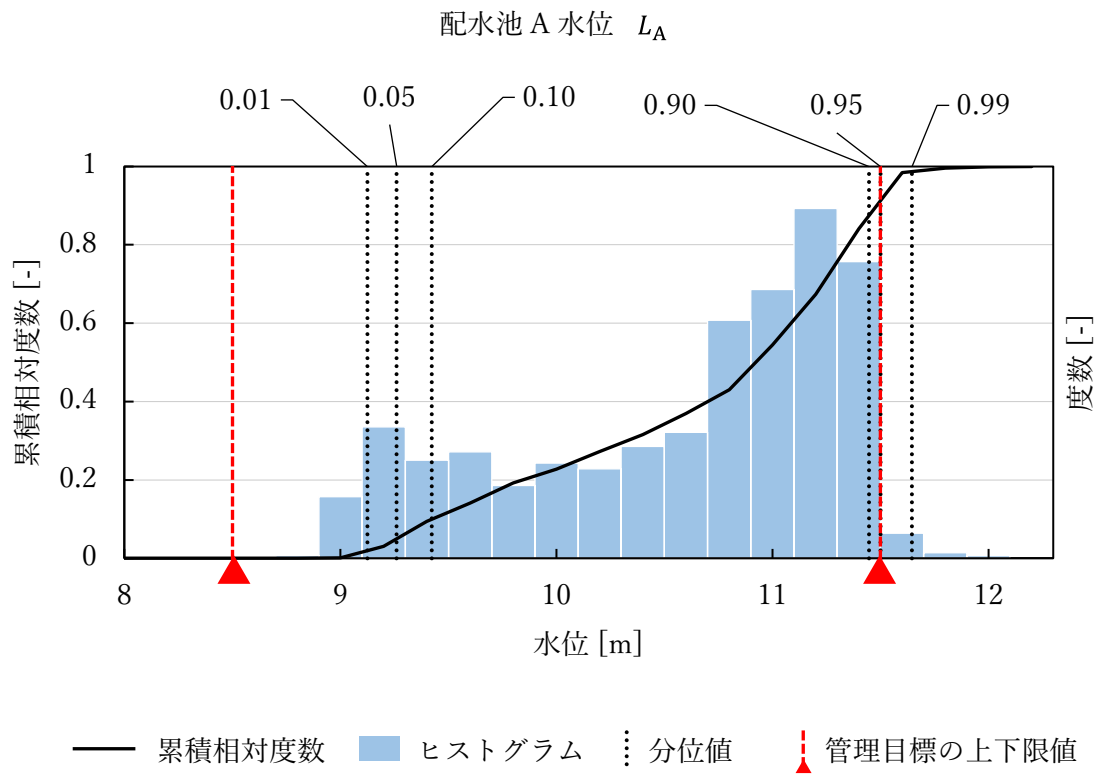


図 3-5 配水池 A の水位ヒストグラムと分位値

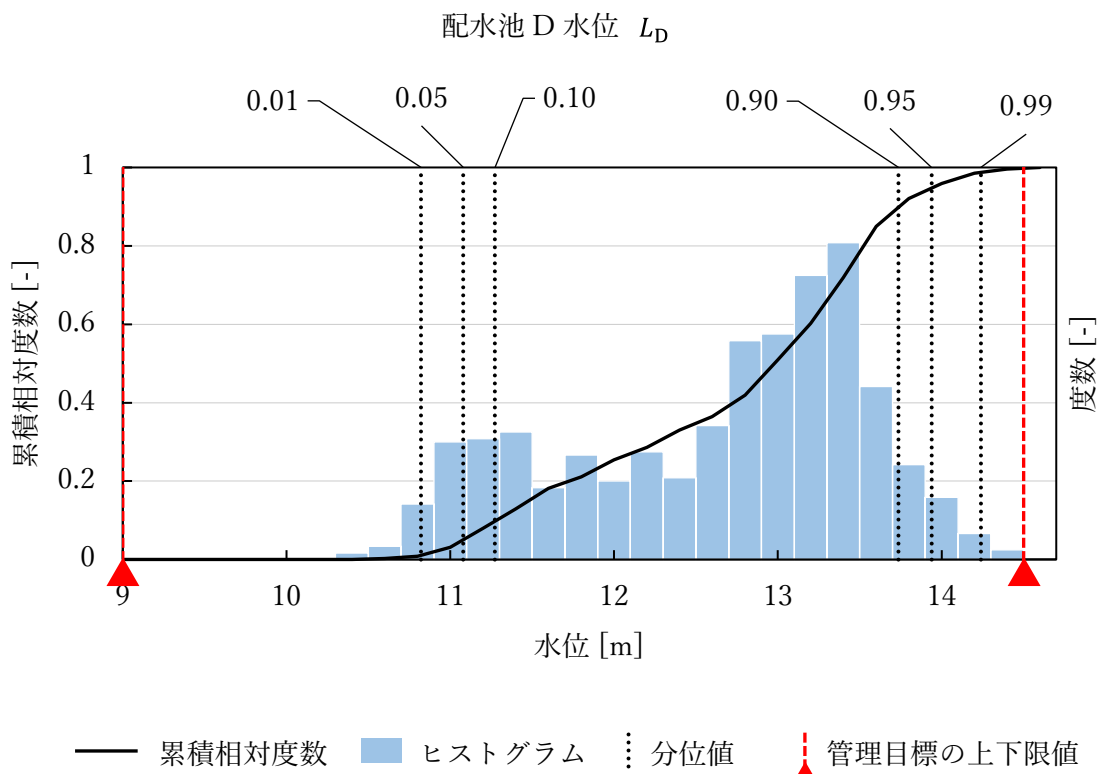


図 3-6 配水池 D の水位ヒストグラムと分位値

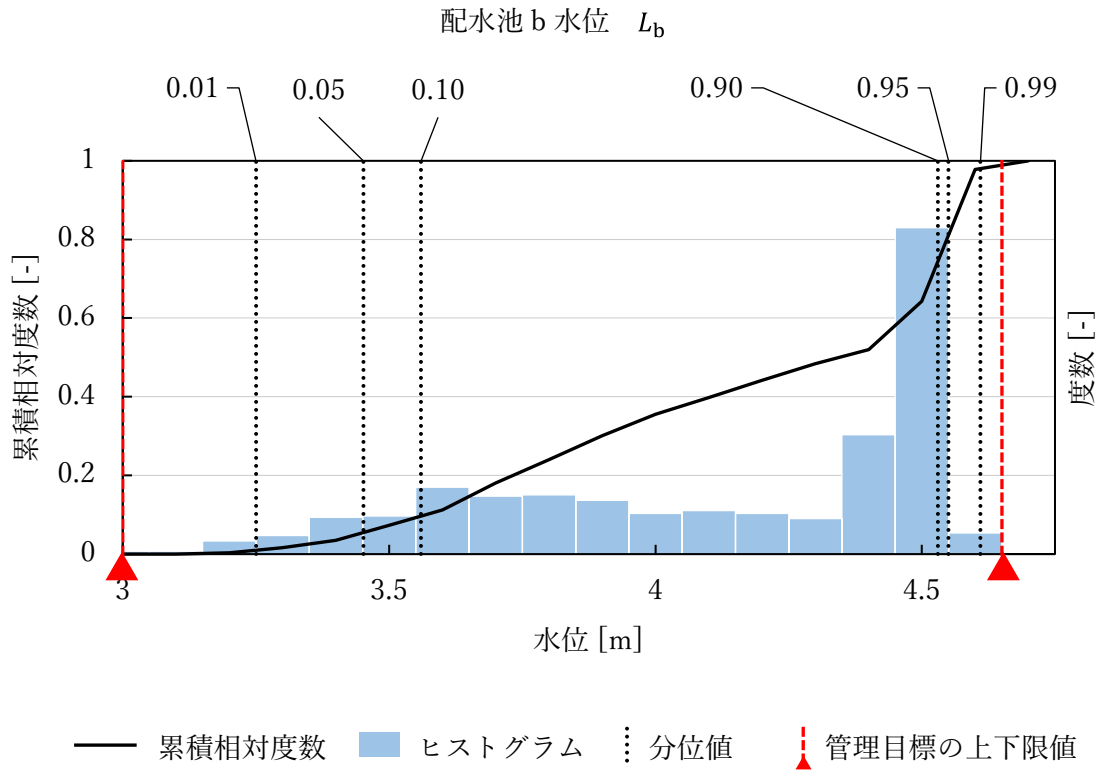


図 3-7 配水池 b の水位ヒストグラムと分位値

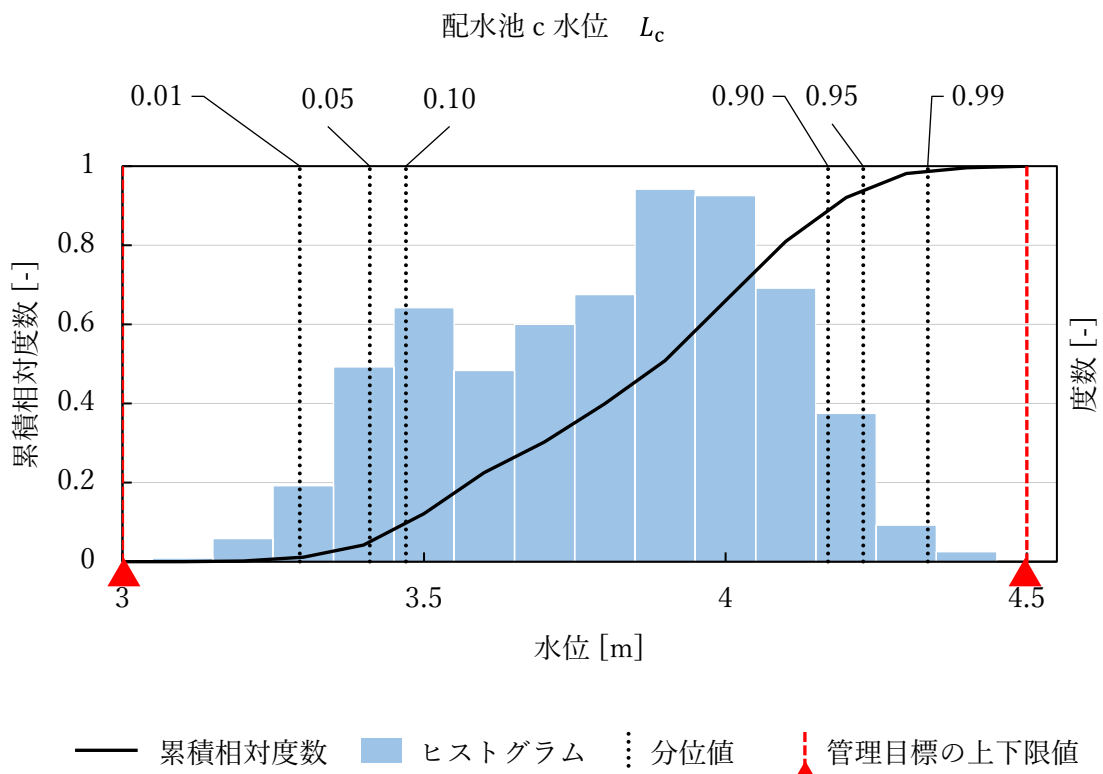


図 3-8 配水池 c の水位ヒストグラムと分位値

第3節 配水池運用計画の立案方法

既往の配水池運用モデル¹⁾では、対象システムで用水系配水量の平準化の目標に偏った運用となる。そこで本章では、配水池水位変動の適正化と、用水系配水量の平準化の2つの目標を取り扱う配水池運用モデルを提案する。

提案手法の機能構成を図3-9に示す。提案する配水池運用モデルでは、配水池水位変動の適正化と、送水量などの平準化の両方を追求する多目的最適化問題を解くことで配水池の運用計画を立案する。なお、配水池水位変動の適正化は、熟練運転員による運転実績を水位変動が適正にコントロールされた手本と見なして、日常的な水位変動の目標範囲を抽出し、目標範囲からの逸脱を抑制するよう定式化することで実現する。図中網掛けで示した水位目標範囲と水量平準化の重みは、配水池運用モデルの調整パラメータである。

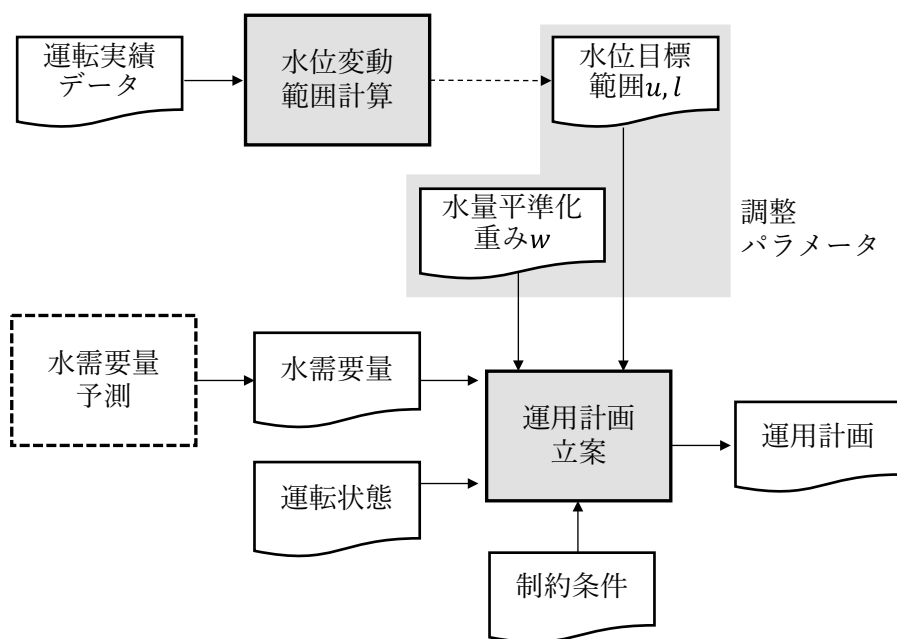


図3-9 提案手法の機能構成

(1) 配水池水位変動の目標範囲

熟練運転員による運転実績を水位変動が適正にコントロールされた手本と見なして、日常的な水位変動の目標範囲を計算する。第2節で検討したように水位運転実績データのヒストグラム形状や分位値は配水池の特性や熟練運転員の運用ノウハウを反映しているため、分位値によって目標範囲の上下限値を定める。下限は $l = 0.01, 0.05, 0.10$ 分位値、上限は $u = 0.90, 0.95, 0.99$ 分位値を候補とし、具体的な u, l の選択は調整パラメータとする。

配水池 r の水位運転実績データ L_r から分位値 $b_{r,\alpha}$ [m] を計算するには、計算に用いるデータの期間を定める必要がある。予備検討としてデータ期間の長さが分位値のばらつきに与える影響を分析する。まず2015年10月～2016年9月のうち4, 8, 16, 32, 64, 128日間の期間を表3-3の通り抽出した。例えば、2016年9月27日～同年9月30日の4日間を1つの期間として抽出した。配水池 c を例として、各期間のデータでの水位の上側の分位値 $b_{c,u}$ ($u = 0.90, 0.95, 0.99$) を計算した結果を図3-10に示す。データ期間が長いほど、別のデータ期間で計算した分位値のばらつきが小さくなることを見て取れる。一方で、32日間(約1か月間)以上ではデータ期間をより長くしてもばらつきの更なる低減効果は小さい。従って、分位値計算に用いるデータ期間は1か月間以上とする。

表 3-3 予備検討におけるデータ期間の抽出方法

データ期間の長さ [d]	データ期間の最終日	同じ長さの 期間数
4, 8, 16, 32	2015 年 10 月～2016 年 9 月の 各月の末日	12
64	2015 年 11 月, 2016 年 1, 3, 5, 7, 9 月の末日 *	6 *
128	2016 年 1, 5, 9 月の末日 *	3 *

* : 期間同士の重なりを少なくするため、数を減らし間隔を広げた

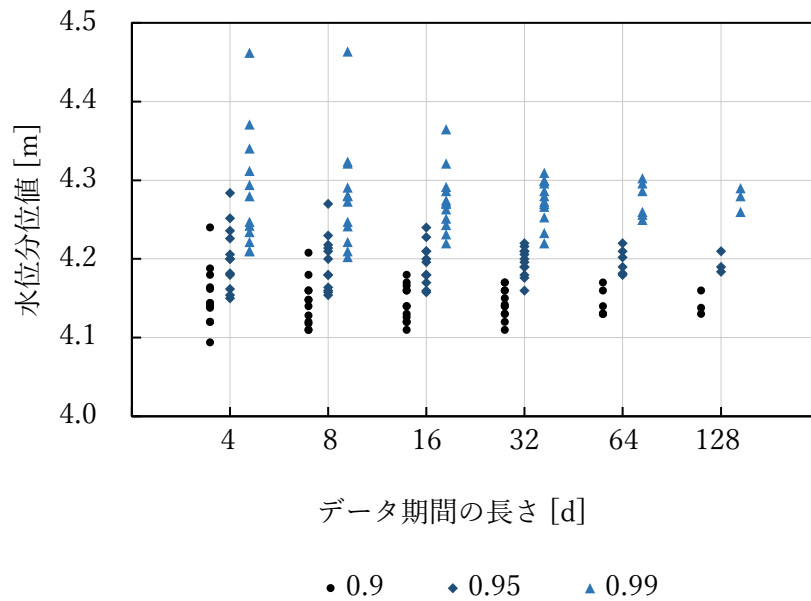


図 3-10 分位値計算のデータ期間の長さ と分位値 $b_{c,u}$ のばらつき

(2) 配水池運用モデル

提案する配水池運用モデルは、a) 配水池水位変動の適正化に関する目的関数 f_R と、b) 用水系配水量の平準化に関する目的関数 f_F の両方を小さくする運用計画を求める最適化モデルである。配水池水位変動の適正化は、水位の目標範囲からの逸脱にペナルティを課すことで実現する。目標範囲の上下限は、それぞれ調整パラメータ u, l を通じて定める。また、これらの目的関数の間には、第2章 第2節 (1) で述べたのと同様に、一方を小さくすると他方が大きくなるトレードオフの関係がある。そこで、目的関数間のバランスを調整するパラメータとして重み係数 w を用意する。そして、2つの目的関数の重み付き和である全体目的関数 f を最小化する運用計画 \mathbf{X} を最適な運用計画とする。

$$f(\mathbf{X}; u, l, w) = f_R(\mathbf{X}; u, l) + w \cdot f_F(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (3-5)$$

\mathbf{X} : 運用計画

u, l : 配水池水位の目標範囲の調整パラメータ [-] ($0 \leq l < u \leq 1$)

w : 重み係数パラメータ [h/m^2]

f_R : 配水池水位の目標範囲の逸脱ペナルティ [m]

f_F : 用水系配水量変化の絶対値の総和 [m^3/h]

対象システムにおける運用計画 \mathbf{X} は、水使用量 E の予測と受水量 p_A, p_C, p_D を前提として、各配水池の配水量 q_r ($r = A, b, c, D$) と取水量 p_r ($r = b, c$)、および各配水池の水位 L_r ($r = A, b, c, D$) の計画と定められる。

この最適化問題の目的関数と対象システムの制約条件はいずれも線形式の組み合わせとして定式化できる(目的関数に含まれる最大値と絶対値の定式化の手法については付録を参照)。また、変数は取水量・配水量や配水池水位を表現する連続変数と、ポンプの運転・停止状態を表現する離散バイナリ変数(0か1のどちらか一方の値をとる変数)の両方を含む。このため、上記の最適化問題は混合整数線形計画問題^{8),9)}であり、汎用的な混合整数線形計画ソルバー(例えば文献¹⁰⁾)を用いて求解できる。

以下、2つの目的関数と制約条件について説明する。

a) 配水池水位変動の適正化に関する目的関数

この目的関数は、運用計画における配水池水位を適正化するため、水位が目標範囲から逸脱するとき、逸脱幅が大きいほど大きな値を取るよう定義する。そこで、図 3-11 (a)に示すように水位の目標範囲からの逸脱ペナルティを定める。ペナルティ値は、水位が目標範囲内であるときは 0、目標範囲から逸脱するときはその逸脱幅に比例する折れ線関数とする。目標範囲の上下限值は、同図 (b)のように、図 3-5～図 3-8 に示した配水池 r の水位運転実績データの分位値を用いる。

目的関数は、各配水池と運用計画を立案する各時刻について上記の逸脱ペナルティの和として下記の通り定式化する。この目的関数は目標範囲の上下限を定める 2 つのパラメータとして u, l ($0 \leq l < u \leq 1$) を含む。

$$f_R(\mathbf{X}; u, l) = \sum_{r \in \{A, B, C, D\}} \sum_{t \in T} \max(b_{r,l} - L_r[t; \mathbf{X}], 0, L_r[t; \mathbf{X}] - b_{r,u}) \quad (3-6)$$

$L_r[t; \mathbf{X}]$: 運用計画 \mathbf{X} の配水池 r の時刻 t での水位

T : 運用計画の立案期間

$b_{r,\alpha}$: 配水池 r の水位運転実績データ L_r の α 分位値 ($\alpha = u, l$)

図 3-12 に配水池 A における水位変動と逸脱ペナルティ値の関係の例を示す。水位が目標範囲の上限を上回るか、下限を下回るときに、その逸脱幅が逸脱ペナルティ値となる。運用計画において、全ての配水池で常に水位が目標範囲内であれば、 $f_R = 0$ となる。一方で、水位が目標範囲を大きく逸脱するほど、また、逸脱する時間が多いほど、 f_R の値は大きくなる。

表 3-4 の上段に示すように、下限を定める l が小さく、上限を定める u が大きいほど、目標範囲は大きくなる。このため、同じ水位変動 $L_r[t; \mathbf{X}]$ に対する f_R の評価値は小さくなる。結果として、こうした設定では大きな水位変動を許容する運用計画が得られる。逆の設定については同表下段に示す。

この目的関数は既往研究²⁾⁻⁶⁾には含まれておらず、本提案モデルの特徴である。

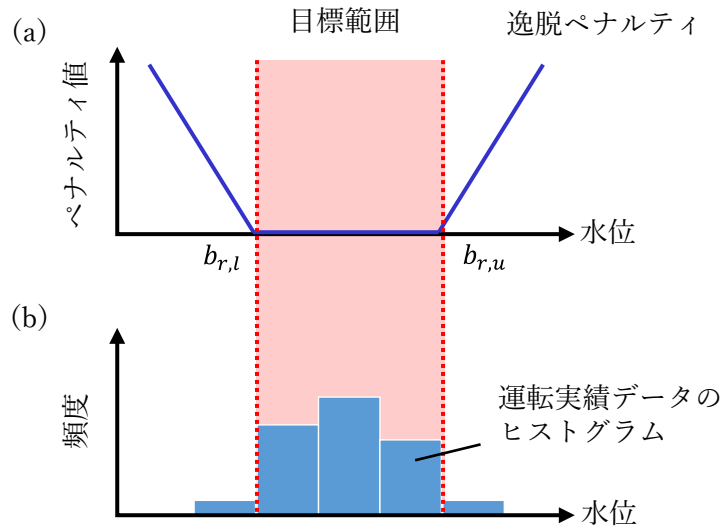


図 3-11 水位目標範囲からの逸脱ペナルティ

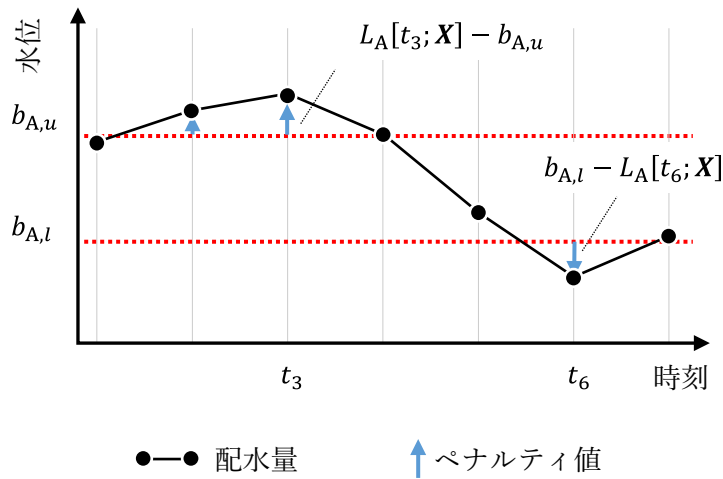


図 3-12 水位変動と逸脱ペナルティの関係

表 3-4 水位変動に関する目的関数のパラメータの影響

パラメータ設定	目標範囲の大きさ	同じ水位変動に対する値 f_R	最適な運用計画の水位変動
l :小, u :大	大	小	大
l :大, u :小	小	大	小

b) 用水系配水量の平準化に関する目的関数

この目的関数は、用水系配水量が変化の少ない平準化された時系列のときに小さい値、逆に増減が多い時系列のときに大きな値となるよう定める。そこで、図 3-13 のように、用水系配水量の時間変化量の絶対値（絶対変化量）を用いる。

本目的関数は、用水系配水量の絶対変化量の和として下記の通り定式化する。和は、平準化対象の各管路と、運用計画を立案する各時刻について取る。

$$f_F(\mathbf{X}) = \sum_{r \in \{A, D\}} \sum_{t \in T} |q_r[t; \mathbf{X}] - q_r[t-1; \mathbf{X}]| \quad (3-7)$$

$q_r[t; \mathbf{X}]$: 運用計画 \mathbf{X} の配水池 r からの時刻 t での配水量

運用計画において、仮に平準化対象の用水系配水量が全て常時一定であれば、 $f_F = 0$ となる。一方で、用水系配水量が時間的に増減を繰り返すような運用計画であるほど、 f_F の値は大きくなる。

式(3-5)の通り、最適化モデルの全体目的関数 f に対して本目的関数は重み係数 w をかけた項 $w \cdot f_F$ として寄与する。重み係数 w は、本目的関数の値 f_F [m³/h]を規格化し、もう一方の項である水位変動の目的関数の値 f_R [m]と単位をそろえる役割を有する。その上で、重み係数 w は、式(3-5)の2つの項の値が同じオーダーになる値を基準として、2つの目的関数間のトレードオフを勘案して定める。表 3-5 の下段に示すように、重み係数 w が大きいほど、同じ配水量変動 $q_r[t; \mathbf{X}]$ に対する $w \cdot f_F$ の評価値は大きくなる。結果として、こうした設定では水位変動適正化よりも本目的関数を重視することになり、最適な運用計画では用水系配水量の変動が小さく、平準化された用水系配水量の時系列が得られる。逆の設定については同表上段に示す。

なお、送水量を平準化する一般的な水道システムにおいては、式(3-7)の用水系配水量を送水量に置き換えることで本目的関数を利用できる。

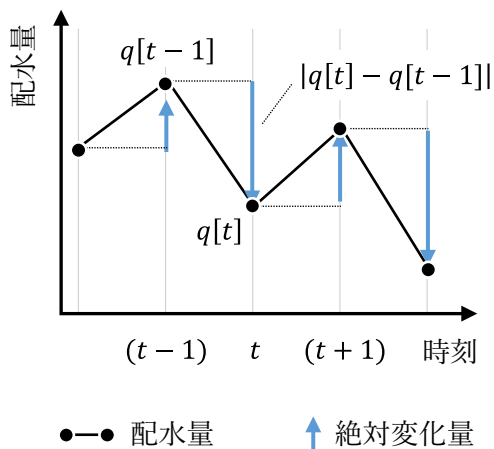


図 3-13 配水量の時間変化量の絶対値（絶対変化量）

表 3-5 配水量平準化の目的関数の重みパラメータの影響

パラメータ設定	同じ配水量変動に対する重みつきの値 $w \cdot f_F$	最適な運用計画の配水量変動
w :小	小	大
w :大	大	小

c) 制約条件

対象システムにおいて運用計画が満たすべき主な制約条件とその概要を表 3-6 に示す。

表 3-6 主な制約条件の一覧

#	項目	概要	数式
1	配水池の水量収支	各配水池で水位変化と流入流出の収支が釣り合う。	$A_r \cdot (L_r[t] - L_r[t - 1]) = p_r[t] - q_r[t] \quad (r = A, b, D)$ $A_c \cdot (L_c[t] - L_c[t - 1]) = p_c[t] + p_c[t] - q_c[t]$ $A_r: \text{配水池の底面積} \quad (r = A, b, c, D)$
2	配水池の水位回復	需要ピーク前の所定時刻に配水池水位を回復させる。	$L_r[v] \geq L_{r,v}^\# \quad (r = A, b, c, D)$ $v: \text{需要ピーク前の時刻}, L_{r,v}^\#: \text{回復目標水位}$
3	各ポンプグループの運転状態と取水量・配水量の関係	自己水源系（配水池b,c）の取水量・配水量は、対象システムの水運用の要点である各ポンプグループの運転状態によって定まる。	$p_r[t] = s_{i,r}[t] \cdot V_{i,r} \quad (r = b, c)$ $q_r[t] = s_{d1,r}[t] \cdot V_{d1,r} + s_{d2,r}[t] \cdot V_{d2,r} \quad (r = b, c)$ $s_{d1,r}[t] \geq s_{d2,r}[t] \quad (r = b, c)$ $s_{\tau,r}[t]: \text{各グループが運転中のとき 1 となるバイナリ変数}$ $V_{\tau,r}: \text{各ポンプの運転による取水量・配水量の増加量} (\tau = i, d1, d2; r = b, c)$ $i: \text{取水ポンプ}$ $d1: \text{配水ポンプ 1 台目}, d2: \text{同 2 台目}$
4	累積取水量の上限	自己水源系の累積取水量には、水利権で定められた上限値以下とする。	$\sum_{t \in T'} p_r[t] \leq P_{r,T'} \quad (r = b, c)$ $P_{r,T'}: \text{期間} T' \text{における累積取水量の上限値} \quad (r = b, c)$
5	受水量の固定	受水量は用水供給事業者と合意した一定値とする。	$p_r[t] = p_r \quad (r = A, C, D)$ $p_r: \text{用水供給事業者と合意した受水量} \quad (r = A, C, D)$
6	水使用量と配水量	各配水池の配水量の和は、配水区域全体の水使用量 $E[t]$ に等しい。	$q_A[t] + q_b[t] + q_c[t] + q_D[t] = E[t]$
7	配水量間のバランス	配水池A,Dの配水量の間にある水理特性に起因するバランス関係を満たす。	$c_{FL} \leq c_A \cdot q_A[t] + c_D \cdot q_D[t] \leq c_{FU}$ $c_k: \text{運転実績データに基づいて調整した係数} \quad (k = A, D, FL, FU)$

第4節 有効性の評価

(1) 方法

対象システムへと提案手法を適用し、配水池水位変動の適正化の効果を評価する。提案法と既往研究に相当する比較法でそれぞれ立案した運用計画と、運転実績とを比較する。比較法は、式(3-7)を目的関数とした配水池運用モデルである。評価期間は2016年10月の1か月間とし、特に配水量が平均的な日（10月10日16時～翌16時）と特異的に少ない日（10月22日16時～翌16時）の結果を検討する。加えて、評価期間1か月間を通じた配水池運用の傾向を比較する。なお、計画期間の始点は、夕方の需要ピークを迎えるに当たり配水池水位の回復目標値を設定している時刻として16時を選んだ。運用計画の立案条件となる水使用量には実績総配水量を使用し、需要予測誤差がない条件での比較とした。

提案法の調整パラメータは、配水池水位変動の適正化と水量平準化のバランスをとった運用計画が立案されるように定めた。なお、第3節(1)の検討結果を踏まえて、水位目標範囲の分位値計算には2016年10月の1か月間のデータを用いた。選択したパラメータ値を表3-7、各配水池の水位目標範囲の上下限界を表3-8に示す。重み係数 w を変えたときの目的関数値の例として、10月10日16時～翌16時の運用計画を立案した場合を図3-14に示す。水位変動の目的関数 f_R と、水量平準化の目的関数に重み係数をかけた $w \cdot f_F$ は $w = 10^{-4} \text{ h/m}^2$ で同じオーダーの値となる。また、 w を小さくするほど f_R が小さく、 f_F が大きくなる。ただし、 $w \geq 10^{-4} \text{ h/m}^2$ では水位変動の目的関数 f_R はほぼ変わらない。以上を勘案し、両目的関数のバランスを取りつつ、水位変動の適正化をやや優先する重み係数の値として $w = 10^{-5} \text{ h/m}^2$ を選択した。

提案法と比較法を定量的に比較するため、水文学などの分野でモデルの観測値への適合性を表す指標として用いられる Nash-Sutcliffe 係数¹¹⁾⁻¹³⁾ (NSE) と、パーセントバイアス^{12),14)} (PBIAS) を用いる。NSE は観測値のばらつきを考慮してモデル精度を評価する指標、PBIAS は観測値に比べてモデルの一貫した偏りを評価する指標である。それぞれ、各配水池における水位、配水量、取水量の項目ごとに、以下で定義される。

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_t (\lambda[t] - \rho[t])^2}{\sum_t (\lambda[t] - \bar{\lambda})^2} \quad (3-8)$$

$$\text{PBIAS} = 100 \times \frac{\sum_t (\lambda[t] - \rho[t])}{\sum_t \lambda[t]} \quad (3-9)$$

ここで、 $\lambda[t]$ は運転実績データ（観測値）、 $\rho[t]$ は運用計画（モデル結果）であり、 $\bar{\lambda}$ は $\lambda[t]$ の t に関する平均値を表す。NSE は、取りうる最大値である 1 に近い値であるほどモデルの精度が高い。水文分野では 0.7 以上の値で再現度が高い¹³⁾とされている。一方、PBIAS は 0 に近いほど、モデル結果の観測値からの一貫した偏りが小さいことを表す。

表 3-7 選択した提案法のパラメータ値

項目	細目	設定値
配水池水位 目標範囲	上限 u	0.90
	下限 l	0.05
水量平準化 重み係数 w		10^{-5} h/m^2

表 3-8 提案法の目標範囲の上下限值

配水池	下限値 $b_{r,l}$ [m]	上限値 $b_{r,u}$ [m]
A	9.26	11.45
b	3.45	4.53
c	3.41	4.17
D	11.08	13.74

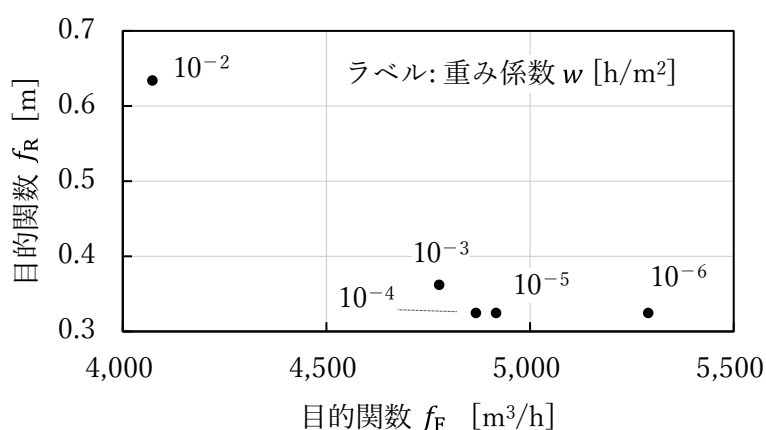


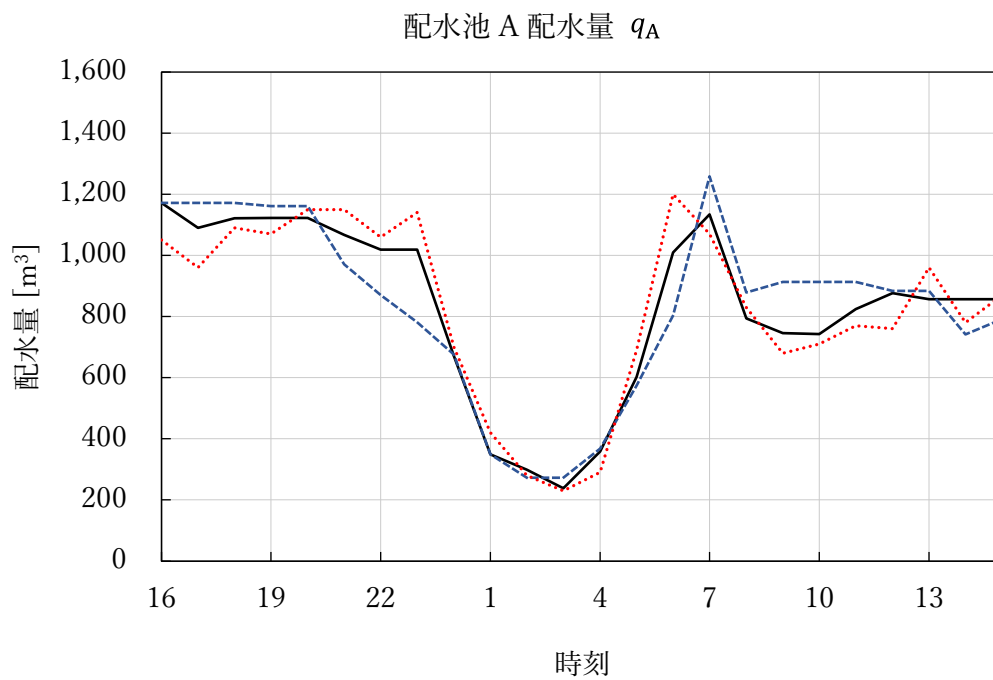
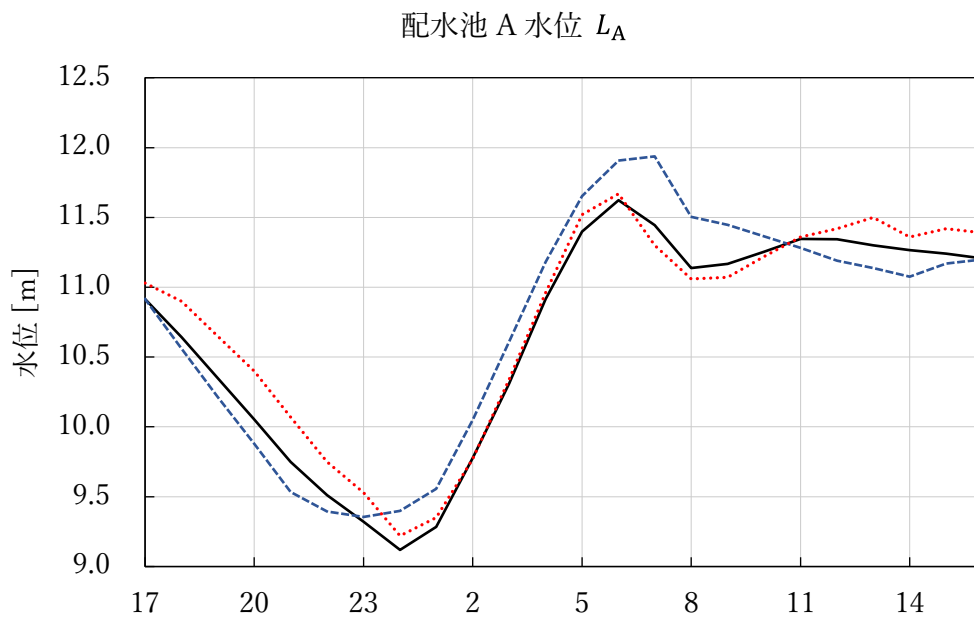
図 3-14 重み係数を変えたときの目的関数値の例

(2) 水位変動適正化と水量平準化のバランス

配水量が $45,920 \text{ m}^3$ と平均的な日である 2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時について、提案法および比較法を用いて立案した運用計画と、運転員の判断に基づく実際の運転実績データを図 3-15～図 3-18 に示す。グラフで示す項目は順に配水池 A, D, b, c の水位と配水量である。実線・破線は提案法・比較法の運用計画、点線は運転実績データを示す。

同図より、提案法の運用計画は、配水池水位、配水量ともに運転実績データと近い値となっている。一方、比較法の運用計画は、配水池 A, D で運転実績データよりも約 0.5 m 高い水位となる時間帯がある。要因として、比較法での運用計画は夜間 22～24 時に配水池 c からの配水量 q_c が多い（配水ポンプの停止が遅い）ために、配水池 A, D の配水量が減ったことが挙げられる。また、比較法の運用計画は、提案法や運転実績データと比べて配水池 A, D の配水量の凹凸が小さく、より平準化されていることが見て取れる。つまり、比較法は用水系配水量の平準化を優先することで配水池の水位変動が大きい運用となった。以上より、配水池水位変動の適正化と、用水系配水量の平準化のバランスの点で、提案法は比較法よりも運転実績データをよく再現する運用計画を立案したと言える。

表 3-9 に図 3-15～図 3-18 と同じ期間における NSE, PBIAS の計算結果を示す。NSE は全ての項目で提案法が比較法を上回り、提案法では配水池 b, c の水位を除いて 0.8 以上の値となった。定量的にも提案法は比較法よりも運転実績データをよく再現することが確かめられる。また、PBIASについても、提案法は全ての項目で 10%内の値となり、運転実績データからの一貫した偏りは小さい。



—— 提案法 (計画) - - - - 比較法 (計画) 実績

図 3-15 配水池 A の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

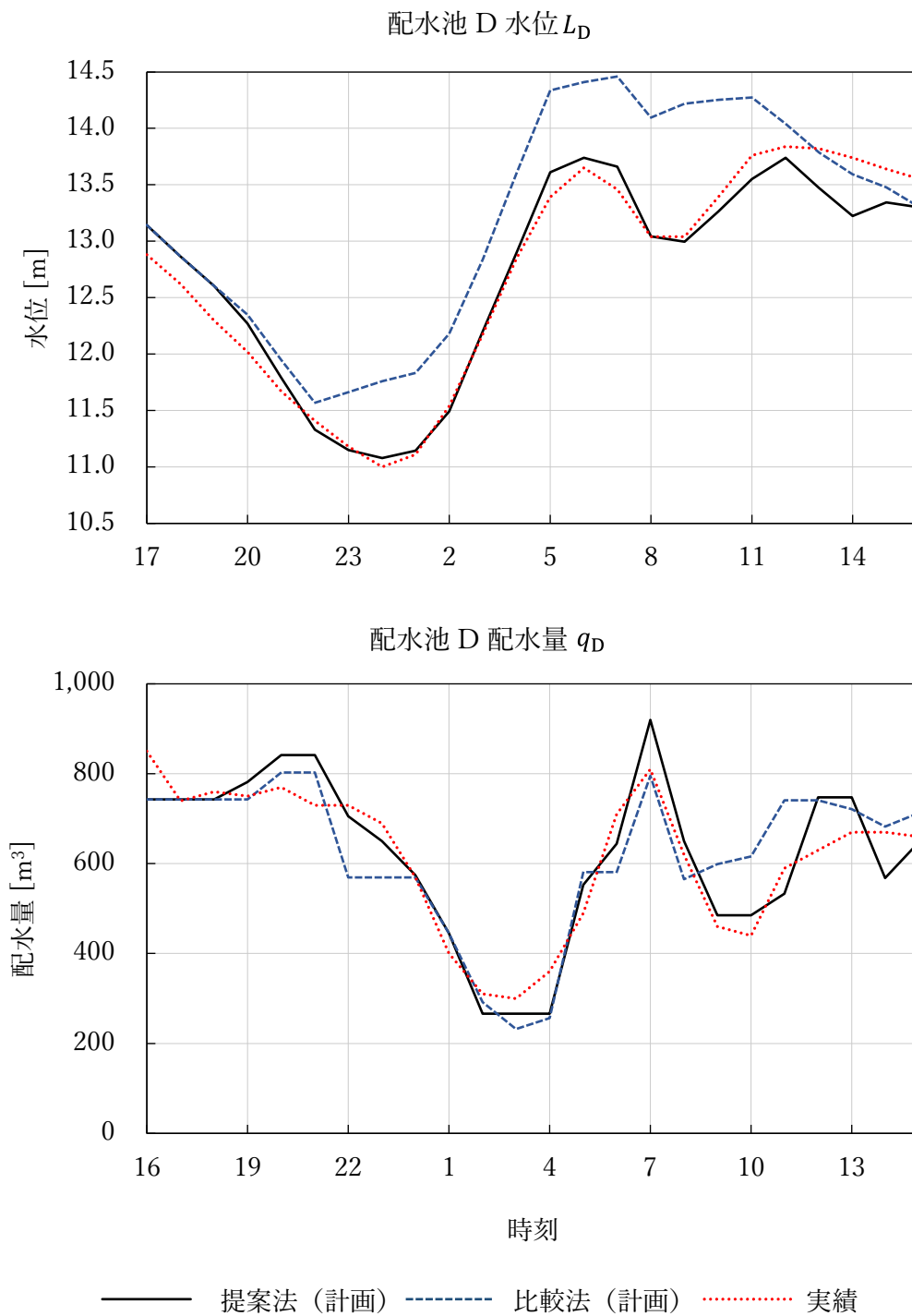


図 3-16 配水池 D の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

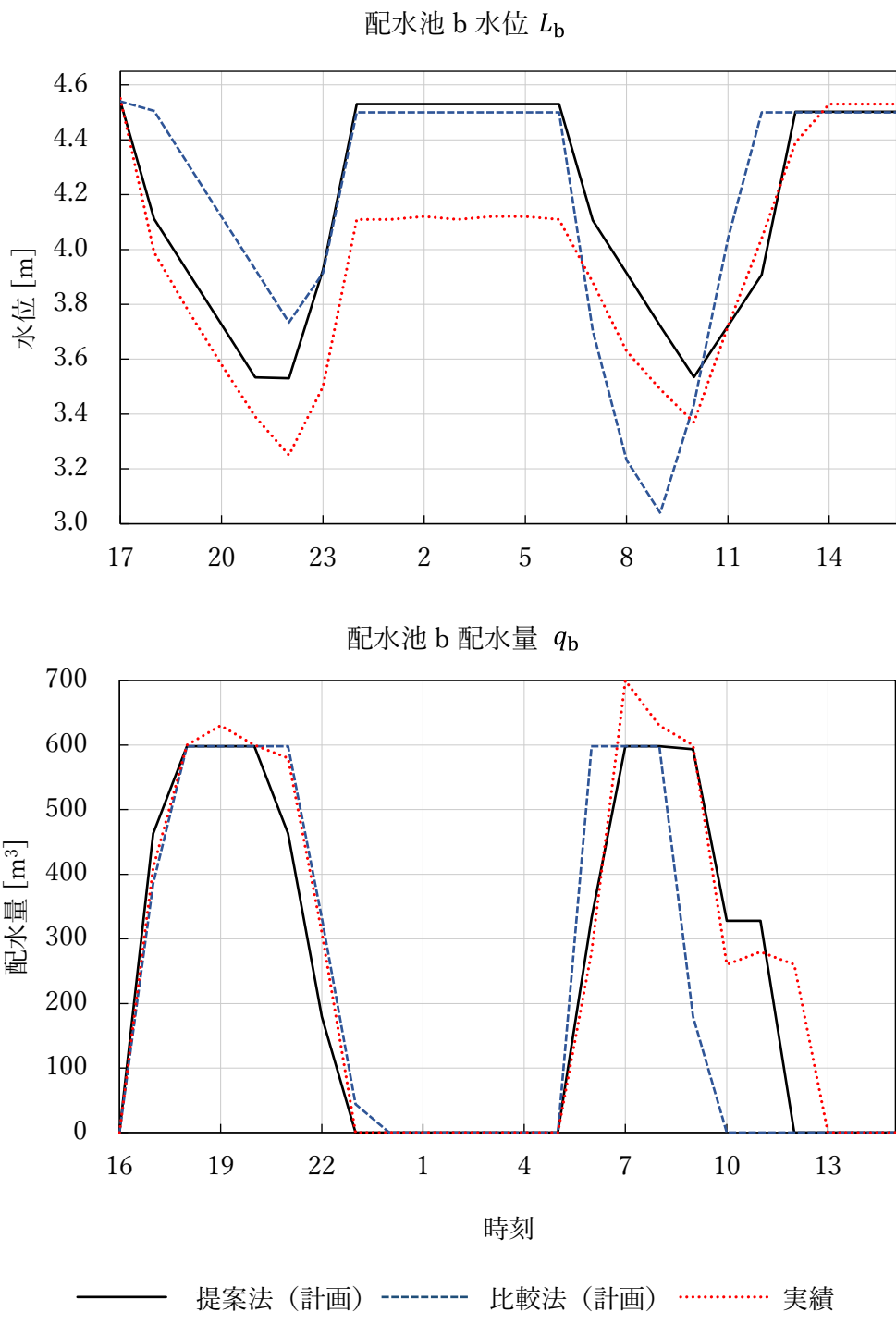


図 3-17 配水池 b の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

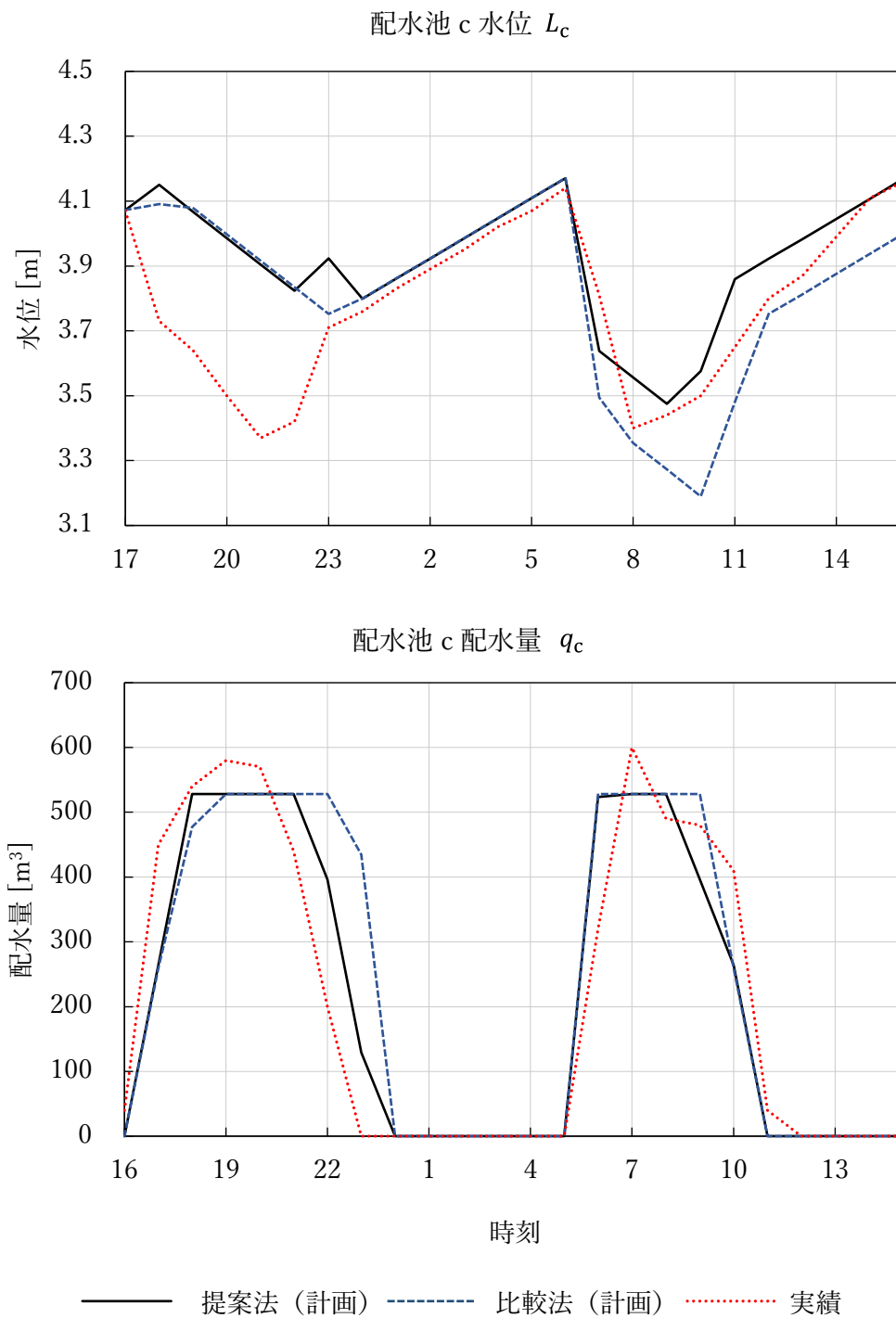


図 3-18 配水池 c の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

表 3-9 運用計画と運転実績データの定量比較 (2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

項目 / 配水池		NSE [-]		PBIAS [%]	
		提案法	比較法	提案法	比較法
水位	A	0.95 *	0.81 *	1.00	0.29
	b	0.51	0.09	-5.23	-5.85
	c	0.16	0.06	-3.66	-1.08
	D	0.95 *	0.57	0.05	-3.78
配水量	A	0.92 *	0.67	-0.19	-0.22
	b	0.93 *	0.70 *	7.51	16.47 †
	c	0.87 *	0.69	0.37	-9.59
	D	0.83 *	0.67	-0.94	-0.94
取水量	b	0.95 *	0.62	9.90	18.78 †
	c	0.94 *	0.79 *	0.45	-8.71

* : 0.7 以上

† : ± 10% 以上

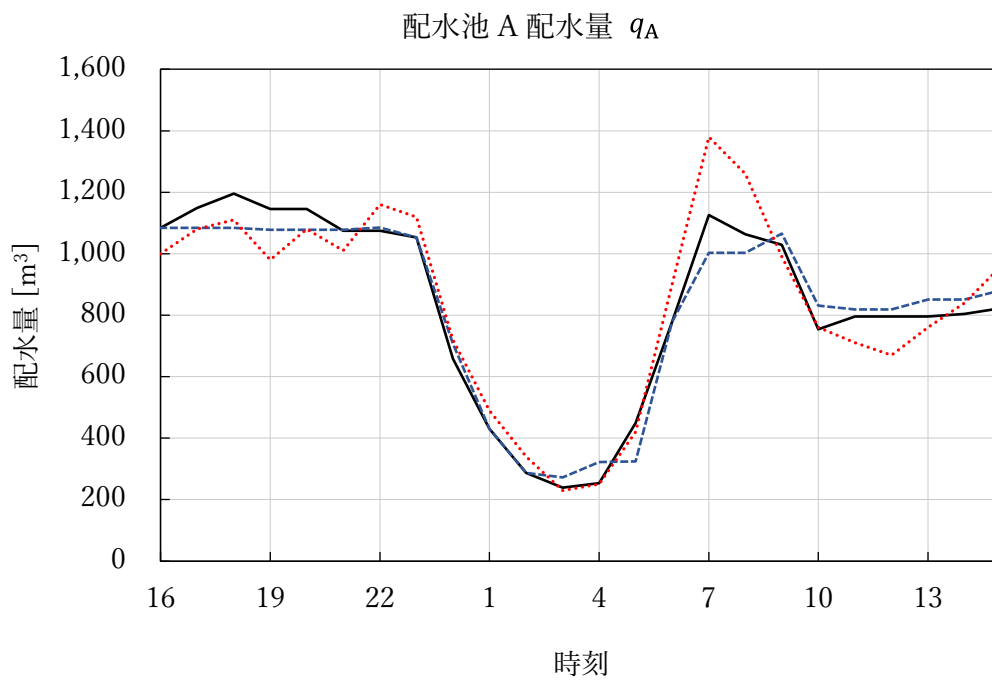
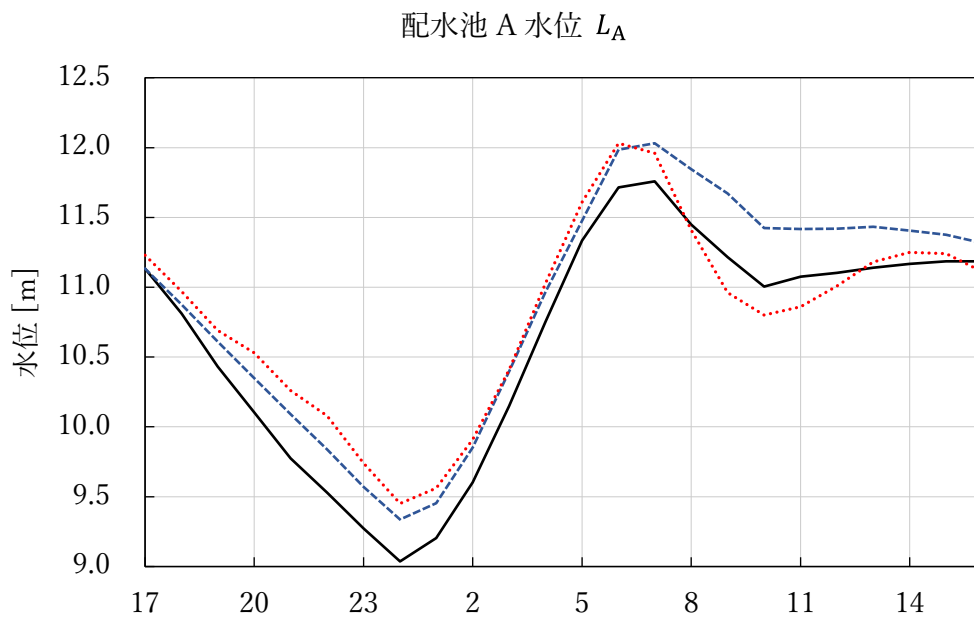
(3) 配水池の水位変動の適正化

続いて配水量が 43,900 m³ と特異的に少ない日である 2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時について、提案法および比較法を用いて立案した運用計画と実際の運転実績データを比較する。配水量が少ない日は、自己水系の配水池 b, c における配水ポンプ 2 台目の運転判断がポイントとなる。運転すると配水池 A, D の配水量が減り、配水池 A, D の水位が高くなることが懸念される。

図 3-19～図 3-22 に示すように、実績では 22 日夜に配水池 c の配水ポンプ 2 台目を運転し、結果として配水池 A の水位が 23 日朝に管理目標の上限 11.5 m を上回り、一時的には 12 m を超えた。比較法の計画も、同様に配水ポンプ 2 台目を運転し、配水池 A の水位が高まるとともに、さらに配水池 D の最大水位が管理目標の上限値 14.5 m まで高まる実適用に適さない運用となった。一方、提案法の計画では、同配水ポンプ 2 台目を始動せず、23 日朝の配水池 A の水位を実績よりも約 0.3 m 低くおさえた。水位変動の適正化の点で、提案法の運用計画のほうが運転実績データや比較法の運用計画よりも優れた運用だと言える。

表 3-10 に図 3-19～図 3-22 と同じ期間における NSE, PBIAS の計算結果を示す。NSE は配水池 A の水位を除き、提案法が比較法を上回った。また提案法では配水池 b, c の水位、取水量を除いて 0.7 以上の値となった。ここでも、提案法は比較法よりも運転実績データに近い運用計画を立案したことが確かめられる。先述した通り、提案法は配水池 c の配水量を運転実績データよりも減らしたため、同配水量および取水量で PBIAS が 10% を上回った。その他の項目は±10%内の値であり、運転実績データからの一貫した偏りは小さい。

配水ポンプ 2 台目の運転有無による影響を別の観点から分析するため、提案法の計画と実績について、22 日夜 17 時～23 時における各配水池からの累積配水量の比率を図 3-23 に示す。実績と比べて、提案法の計画は配水池 c からの配水量を 3% 減らし、代わりに配水池 A, D からの配水量をそれぞれ 2%, 1% 増やしている。比率の差は小さく見えるものの、これらの差が翌 23 日朝の配水池水位の抑制に貢献している。



提案法 (計画)

 比較法 (計画)

 実績

図 3-19 配水池 A の運用計画と運転実績データの比較
 (2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時)

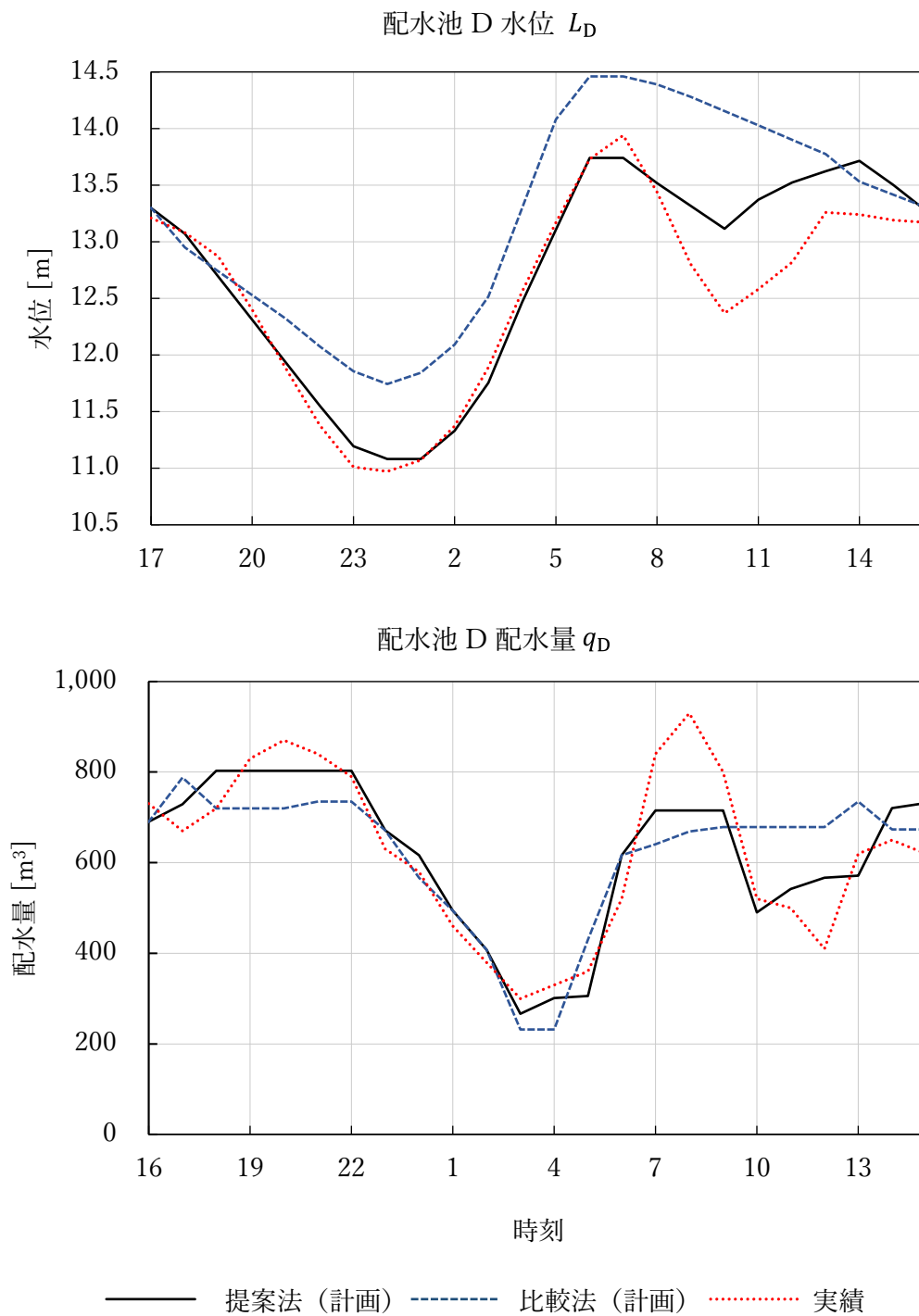


図 3-20 配水池 D の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時)

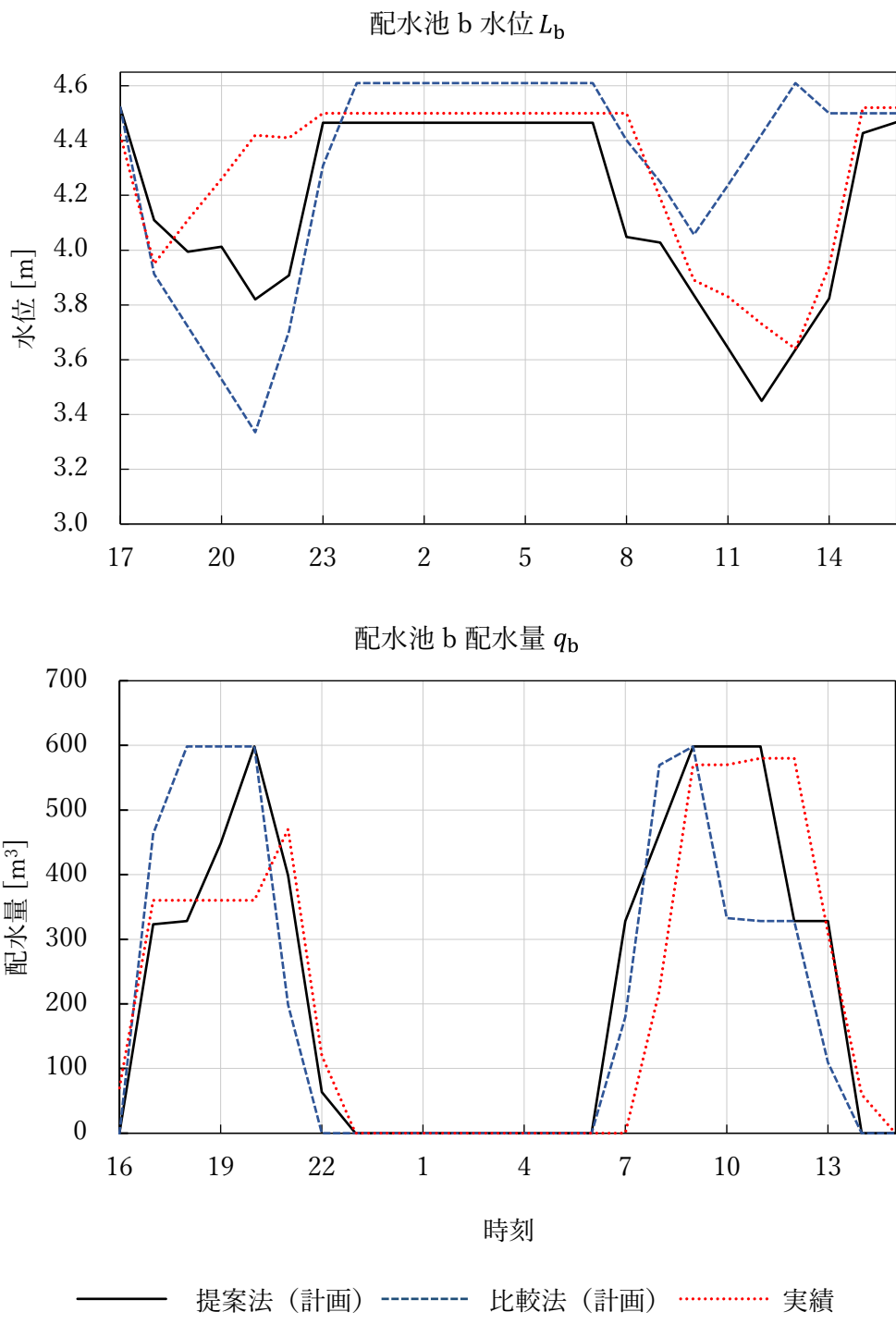


図 3-21 配水池 b の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時)

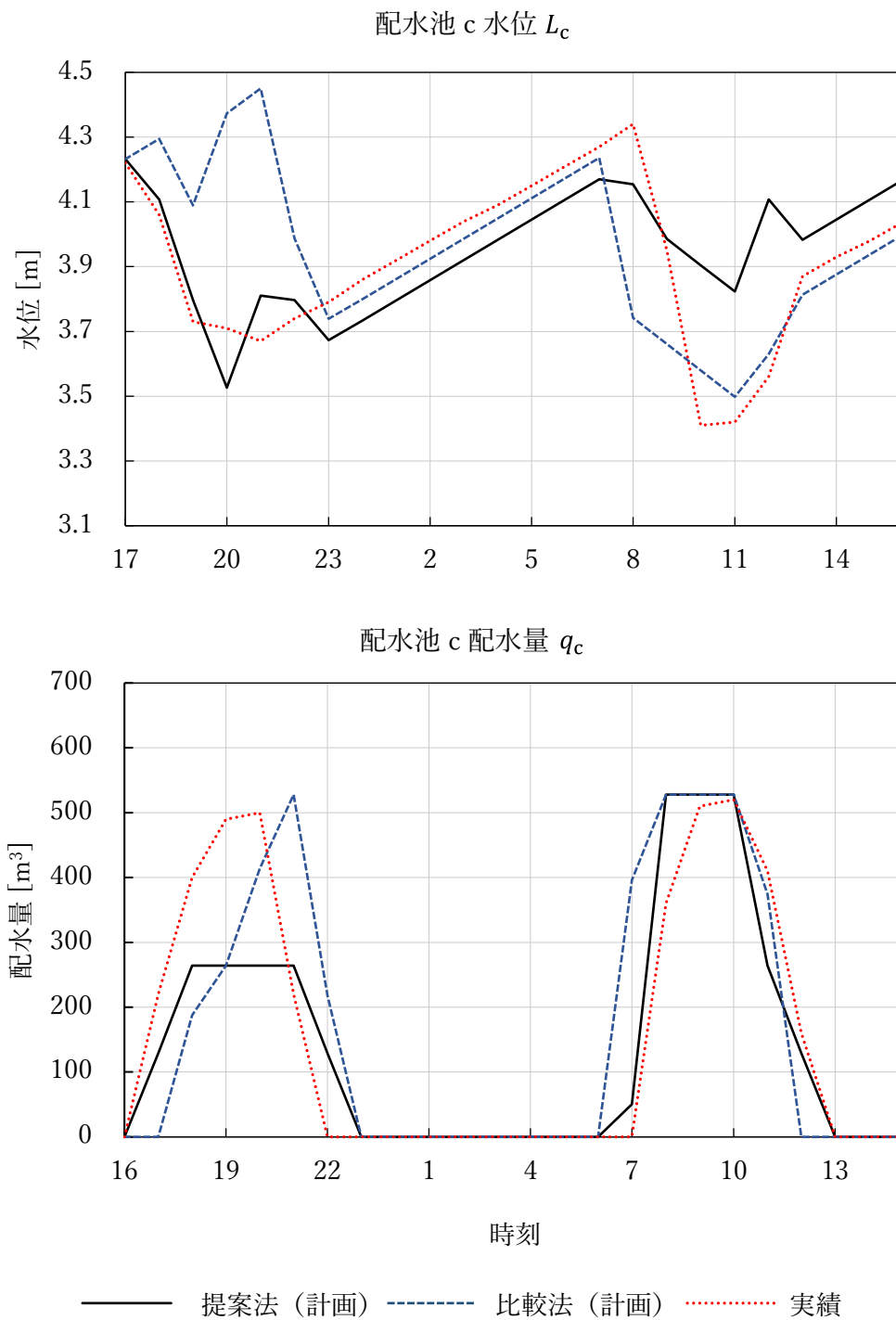


図 3-22 配水池 c の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時)

表 3-10 運用計画と運転実績データの定量比較 (2016 年 10 月 22 日 16 時～翌 16 時)

項目 / 配水池		NSE [-]		PBIAS [%]	
		提案法	比較法	提案法	比較法
水位	A	0.82 *	0.83 *	1.60	-0.77
	b	0.44	-1.24	2.84	-0.54
	c	0.32	-0.25	-0.96	-1.18
	D	0.85 *	0.13	-1.29	-5.19
配水量	A	0.89 *	0.85 *	1.06	1.69
	b	0.73 *	0.45	-8.24	1.78
	c	0.79 *	0.49	11.83 †	-4.66
	D	0.81 *	0.55	0.14	0.25
取水量	b	0.72 *	0.36	-4.65	4.75
	c	0.24	0.45	12.69 †	-5.68

* : 0.7 以上

† : ± 10% 以上

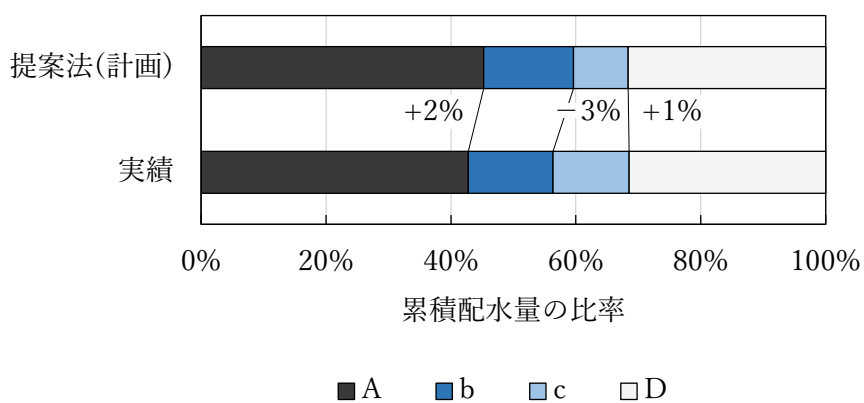


図 3-23 運用計画と運転実績データの累積配水量の比率
(2016 年 10 月 22 日 17 時～23 時)

1 か月間の評価期間を通じて、提案法と比較法の運用計画および運転実績データのそれぞれで配水池水位が目標範囲から逸脱した割合を図3-24 (a) および (b) に示す。目標範囲は運転実績データの分位値により定めたことから、運転実績データの逸脱割合は下限(0.05分位値)で約5%、上限(0.90分位値)で約10%である。上限の逸脱割合では、提案法が全ての配水池で運転実績データの約6割以下であるのに対して、比較法は運転実績データの2倍以上となった。下限の逸脱割合でも、提案法が全ての配水池で運転実績データを下回る一方で、比較法は配水池bで運転実績データを上回った。提案法は運転実績データよりも水位の目標範囲からの逸脱を抑制する運用計画を立案できること、逆に比較法の立案した運用計画は運転実績データよりも頻繁に目標範囲を逸脱することがわかる。なお、配水池Aでは目標上限(0.90分位値)だけでなく水位の管理目標上限値(11.5 m)についても提案法の運用計画の方が運転実績データよりも違反割合が少なかった。これらの結果が示すように、提案法は、式(3-6)の目的関数により配水池水位の目標範囲からの逸脱にペナルティを課すことで、比較法よりも配水池の水位変動を適正化できる。また、運転実績データとの比較から、提案法は運転員よりも水位変動を適正化できる可能性がある。

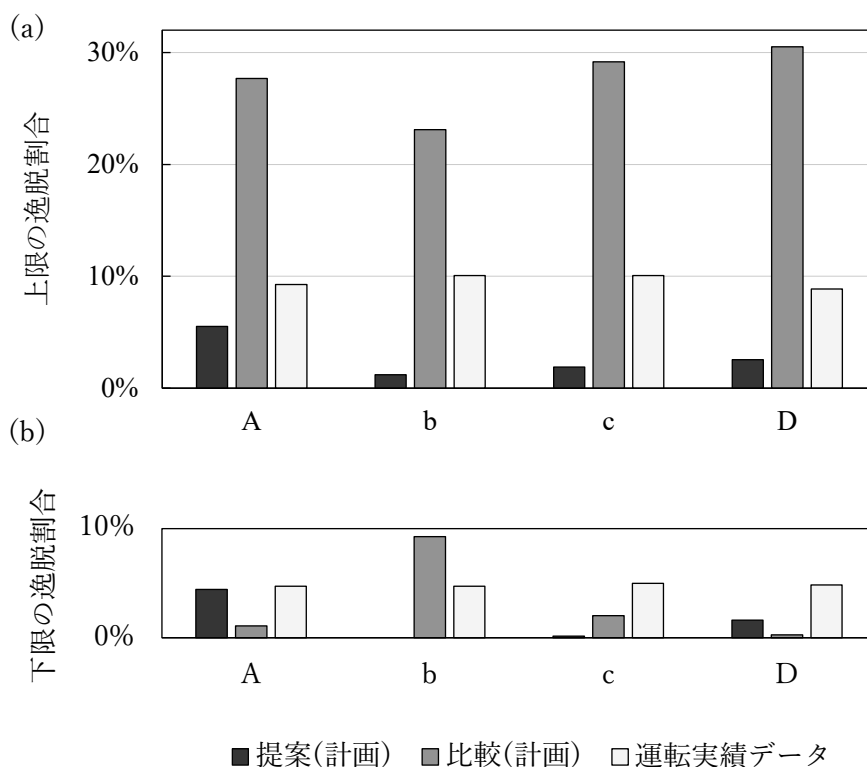


図3-24 配水池水位が目標範囲から逸脱した割合

第5節 結言

本章では、熟練運転員による運転実績を配水池水位変動が適正にコントロールされた手本と見なすことで、運転実績データから配水池水位の日常的な目標範囲を抽出し、目標範囲からの水位逸脱を一定程度許容しつつも抑制し、用水系配水量の平準化などの他の運用条件とバランスを取った運用計画を立案する手法を提案した。

対象システムの運転実績データを分析し、配水池水位記録のヒストグラムおよび分位値に対して配水池の時間変動調整容量、流入量の調整可否などの特性や運用方法が与える影響を論じた。

配水池運用モデルを配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化の両方を考慮する多目的最適化問題として定式化した。配水池水位変動の適正化に関しては、水位記録の分析に基づいて、目標範囲の境界値の候補を水位ヒストグラムの分位値で定める手法を提案した。

ケーススタディとして、提案手法と既往研究の手法で立案した運用計画、および運転員の判断に基づく運転実績データとを比較した。提案手法の運用計画は、定性的には水位変動の適正化と用水系配水量の平準化のバランスの点で、定量的には Nash-Sutcliffe 係数の比較の点で、既往研究の手法よりも運転実績データをよく再現することを確認した。また、提案手法の運用計画は、運転実績データよりも配水池の水位変動を適正化することが示された。例えば時間変動調整容量の小さい配水池において、水位が目標範囲上限値を超える時間数を運転実績データの約 6 割に低減した。

なお、提案手法に基づく水運用支援システムを試作し、対象システムの運用に活用する実証試験を行った。冬季と夏季の各 1 ヶ月間、提案法の運用計画に沿ってポンプを操作し、安定した運用を行えることを確認した。

提案手法の汎用性に関して、用水系配水量の平準化は対象システムに特徴的な運用目標であるが、定式化はより一般的な送水量の平準化に対しても適用できる。提案手法は、水道用水供給事業からの受水や、相互融通が可能なシステムに幅広く適用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 松本純, 田村繁生, 栗原潮子, 市川学, 佐々木史朗, 堤行彦, 伊藤雅喜: 浄水技術継承支援システムの開発—変化に対応した浄水技術の構築に関する研究 (A-Batons) の取組み (Ⅷ) 一, 平成 30 年全国水道研究発表会予稿集, pp.228–229, 2018.
- 2) 上野洋平, 森一之: 大規模送水系統向け送水ポンプ運転計画手法の提案, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.133, No.8, pp.780–785, 2013.
- 3) 大島信夫, 鮫島正一: 水とエネルギーの最適化を図る“カオス水需要予測”制御, *EICA*, Vol.17, No.1, pp.17–21, 2012.
- 4) 坂本義行, 黒川太, 佐野方俊, 山田毅, 芦木達夫, 結城博司: GA による送水計画の近似的最適化手法, 電気学会論文誌 D (産業応用), Vol.120, No.8-9, pp.987–999, 2000.
- 5) van Zyl, J. E., Savić, D. A. and Walters, G. A.: Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.130, No.2, pp.160–170, 2004.
- 6) Ocampo-Martinez, C., Bovo, S. and Puig, V.: Partitioning approach oriented to the decentralised predictive control of large-scale systems, *J. Process Control*, Vol.21, No.5, pp.775–786, 2011.
- 7) 足立進吾, 荒井康裕, 小泉明, 高橋信補, 武本剛: 運転記録の分析に基づく配水池運用の最適化手法, 土木学会論文集 G (環境), Vol.75, No.6, pp.II_197–II_208, 2019.
- 8) 梅谷俊治: しっかり学ぶ数理最適化—モデルからアルゴリズムまで, 講談社, 2020.
- 9) 藤江哲也: 最近の混合整数計画ソルバーの進展について, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.56, No.5, pp.263–268, 2011.
- 10) Gurobi Optimizer Reference Manual, Version 8.1, Gurobi Optimization, LLC, 2018.
- 11) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models, Part I—A discussion of principles, *J. Hydrol.*, Vol.10, No.3, pp.282–290, 1970.
- 12) Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L.: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Trans. ASABE*, Vol.50, No.3, pp.885–900, 2007.
- 13) 奥泉宗一郎, 中津川誠, 白谷友秀: GIS を用いた汎用的な流出計算手法の提案, *水文・水資源学会誌*, Vol.29, No.1, pp.32–43, 2016.
- 14) Samuelsen, A., Hansen, C. and Wehde, H.: Tuning and assessment of the HYCOM-NORWECOM V2.1 biogeochemical modeling system for the North Atlantic and Arctic oceans, *Geosci. Model Dev.*, Vol.8, No.7, pp.2187–2202, 2015.

第4章 運転実績データの再現を基準とする配水池運用モデル のパラメータ決定

第1節 緒言

日本の水道事業の課題の一つに、深刻化する人材不足が挙げられる¹⁾。水道事業体の職員数の減少に加えて、就業年齢人口の減少により、今後は民間事業者を含めて水道に携わる技術者の確保が難しくなると考えられる。水道事業の持続的な運営には、情報技術やデータの活用を通じて人材不足を補う方策が一層重要になると考えられる²⁾。

本章では、第3章に引き続いて、水源から浄水場、配水池を経て需要者まで水を送り届ける取水、導水・送水・配水プロセス全体の水運用、特に配水池運用に着目する。配水池運用においては、ポンプ運転台数・流量の変更回数の抑制^{3),4)}や、配水池の目標水位への回復³⁾および水位変動範囲の限定⁵⁾のように、運用上の目標が複数ある。一般的に、これらの目標は互いにトレードオフの関係がある^{3),5)}。水需要と設備能力とのギャップなどにより全ての目標の達成が難しい水道システムの場合、目標間での優先度のバランス調整が必要となり、熟練運転員が経験に基づいて判断し運用している⁵⁾。バランス調整には水道システム全体の特徴をふまえた判断が必要なため、各設備能力の情報などから基準を定めることは難しい。このため、実運用に適したバランス調整を行うには、熟練運転員に倣った運用を行うことが重要である。

第3章では、配水池水位変動の管理範囲が狭い水道システムを対象に、トレードオフ関係にある配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化のバランスをとる配水池運用モデルを提案した。この配水池運用モデルは、既往研究³⁾⁻¹⁰⁾と同様に、目標間の優先度バランスに関するパラメータを含む。これらのモデルでは、パラメータ設定によって運用のバランスが大きく変化する³⁾ため、実運用に適したパラメータの決定が重要な課題である。既往研究ではパラメータ変更の影響分析³⁾や、対話的調整手法の提案¹⁰⁾があるものの、決定は運用モデルの構築者や運用計画の立案者に委ねており、体系的な決定手法は提案されていない。

そこで本章¹¹⁾では、この課題への対応策として、配水池運用モデルにより立案される運用計画が、熟練運転員の運転実績データを再現するようにモデルのパラメータを決定する手法を提案する。熟練運転員の判断結果が残る運転実績データの再現を基準とすることで、実運用に適したバランスのパラメータを定めることをねらいとする。提案手法は、運用計画による運転実績データの再現度を定義し、再現度を最大化するパラメータを選択する。本章では、第3章と同じく、水道用水供給事業から受水があり、また、配水区域で浄水の相互融通が可能な導送配水システムを対象とする。

以下、第2節では、対象システムの熟練運転員による従来運用と、第3章で提案した配水池運用モデルの概要を述べる。第3節で配水池運用モデルのパラメータ決定手法を提案し、第4節で実データを用いて評価し、提案手法の有効性を検証する。

第2節 対象システムの従来運用と最適運用モデル

(1) 熟練運転員による従来運用の再現

第3章と同じ対象システムにおいて、熟練運転員は、配水池水位の変動範囲の適正化と、用水系配水量の平準化との2つの目標のバランスをとりながらシステムを運用している。

配水池水位変動の適正化とは、配水池水位をできる限り管理範囲の中で運用することである。対象システムでは、水需要量の約5割を供給する配水池Aの管理範囲内の容量が、平均配水量の4時間分未満であり、他の配水池よりも小さい(図3-4)。このため、水需要が想定から外れた場合などに配水池Aの水位を管理範囲から逸脱させずに運用することが難しい。逸脱を減らすために、熟練運転員は管理範囲の上下限值付近での水位変動を避ける運用を行っている。

送水量や配水量の平準化とは、送・配水量の時間変化を小さくすることである。多くの水道システムでは、安定的な浄水処理や、ポンプ設備の機械的な負荷の抑制のために配水池に流入する送水量を平準化する運用が一般的である。一方、対象システムでは、用水系配水ポンプからの配水量が水需要量の約8割を占め、用水系配水ポンプの重要度が高いことから、用水系配水量を平準化して機械的負荷を抑制している。実際、第3章の図3-2より、水需要量ピークである8,21時台の前後に自己水系配水量 q_b 、 q_c を増やすことで、用水系配水量 q_A 、 q_D の変化を抑制できていることがわかる。また図3-3で配水量の変化の例からも、用水系配水量 q_A 、 q_D の変化は、自己水系配水量 q_b 、 q_c の変化に比べて小さいことが確かめられる。

両目標のバランスが求められる例に、早朝需要ピーク時における配水池Aの水位と配水量の運用がある。水位変動の適正化のためには、需要ピークに備えて高めた水位の高止まりを防ぐように、配水量を速やかに増やして水位を下げるのが望ましい。逆に用水系配水量の平準化のためには配水量の増加は緩やかに抑えるのが望ましい。

本章では、運用が目標間のバランスの点で実運用に適しているか評価する基準として、熟練運転員による従来運用の再現度を用いる。バランス調整には水道システム全体の特徴をふまえた判断が必要であり、個別の設備能力の情報から基準を定めることは難しいためである。ここで、従来運用の再現とは、表4-1に示す各運用項目の時系列が従来運用の実績と近いこと、と定義する。配水池水位変動の適正化と、用水系配水量の平準化は、配水池水位と用水系配水量の時系列に関する評価観点であるため、上記の意味で従来運用を再現する運用は、両目標のバランスについても熟練運転員の運用を再現すると言える。

表 4-1 対象システムにおける運用計画の立案対象

項目	配水池	記号	備考
配水池水位 [m]	A	L_A	—
	b	L_b	
	c	L_c	
	D	L_D	
配水量 [m ³ /h]	A	q_A	平準化の対象
	b	q_b	直接制御可能
	c	q_c	
	D	q_D	平準化の対象
取水量 [m ³ /h]	b	p_b	直接制御可能
	c	p_c	

(2) 配水池運用モデル

対象システムにおいて、既往の配水池運用モデル³⁾では用水系配水量の平準化の目標に偏った運用となるため、第3章において配水池水位変動の適正化と、用水系配水量の平準化の2つの目標を取り扱う配水池運用モデルを提案した。改めてこのモデルの概要を説明する。

数理最適化問題の目的関数を式(4-1)に示す。目的関数は、配水池水位変動の適正化の項 f_R [m] と、用水系配水量の平準化の項 f_F [m³/h]の重み付きの和である。配水池水位変動の適正化は、式(4-2)の通り、配水池ごとに水位の目標範囲（maxが0となる範囲）を定め、その範囲からの水位逸脱に対してペナルティを課す。一方、用水系配水量の平準化は、式(4-3)の通り、配水量変化の絶対値の総和をペナルティとする。

$$f(\mathbf{X}; u, l, w) = f_R(\mathbf{X}; u, l) + w \cdot f_F(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (4-1)$$

$$f_R(\mathbf{X}; u, l) = \sum_{r \in \{A, B, C, D\}} \sum_{t \in T} \max(b_{r,l} - L_r[t; \mathbf{X}], 0, L_r[t; \mathbf{X}] - b_{r,u}) \quad (4-2)$$

$$f_F(\mathbf{X}) = \sum_{r \in \{A, D\}} \sum_{t \in T} |q_r[t; \mathbf{X}] - q_r[t-1; \mathbf{X}]| \quad (4-3)$$

ここで、 $0 \leq l < u \leq 1$ を満たす u, l [-]は配水池水位の目標範囲の調整パラメータ、 w [h/m²]は重み係数のパラメータである。 \mathbf{X} は運用計画、 T は計画立案期間であり、 $L_r[t; \mathbf{X}]$ [m]、 $q_r[t; \mathbf{X}]$ [m³/h]はそれぞれ配水池 r の時刻 t における水位、配水量の運用計画を表す。配水池 r の目標範囲は、配水池の特性や運用の工夫が反映される水位運転記録の分位値を用いて $b_{r,l}$ から $b_{r,u}$ と定めた。なお、 $b_{r,\alpha}$ [m]は配水池 r の水位運転記録の α 分位値を表し、約1か月間以上の期間の運転記録から計算する（第3章 第3節 (1)を参照）。

この運用モデルには、配水池水位の適正化と、用水系配水量の平準化のトレードオフに関わるパラメータ u, l, w を含み、熟練運転員の判断を反映するにはパラメータの選定が重要となる。各パラメータ u, l, w の値の変更が運用に与える影響の方向を表4-2に示す。パラメータ u, l の調整で水位目標範囲を広げれば、水位変動は大きく、用水系配水量はより平準化された運用計画となる。パラメータ w を大きくしても、目的関数において水位逸脱ペナルティ値が相対的に小さくなり、同じ方向の影響がある。逆に u, l で目標範囲を狭めるか、 w を小さくすれば、水位変動は小さく、用水系配水量の変化は大きくなる。

表 4-2 パラメータ変更の運用目標への影響

パラメータ		運用目標への影響	
項目	変化方向	配水池水位変動	用水系配水量変化
配水池水位の 目標範囲上限 u	大きく	高水位の時間増	小さい
	小さく	高水位の時間減	大きい
配水池水位の 目標範囲下限 l	大きく	低水位の時間減	大きい
	小さく	高水位の時間増	小さい
重み係数 w	大きく	高・低水位の時間減	小さい
	小さく	高・低水位の時間増	大きい

第3節 パラメータ決定手法

(1) アプローチ

配水池運用モデルを対象に，運転実績データの再現を基準とするパラメータの決定手法を提案する．トレードオフ関係にある配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化について，実運用に適したバランスとなるパラメータを定める．決定対象のパラメータは，配水池水位変動の目標範囲の上下限を調整する u, l と，目的関数の重み係数 w である．

提案手法の概要を図 4-1 に示す．様々なパラメータ候補を用いて運用計画を立案し，候補の中で運転実績データの再現度が高い運用計画を立案するパラメータを選ぶ．

運用計画による運転実績データの再現度には，取水量，配水量，配水池水位の各項目の時系列としての再現度を統合する指標を用いる．各項目については，水文学などの分野で予測モデルの観測値への適合性の評価に利用される無次元指標 Nash-Sutcliffe 係数^{15),16)}で再現度を計算する．全項目の統合指標は，各項目の Nash-Sutcliffe 係数の平均値を用いる．

配水池運用モデルは非線形な最適化計算を含むため，1 つのパラメータ候補での運用計画立案に要する計算時間が長く，またパラメータ変更が運用計画や評価指標におよぼす影響を勾配として正確に定量化することが難しい．こうした特性をふまえて，評価指標を最大化するパラメータ候補の探索には，パラメータ変更の影響が定量化しにくい場合でも利用できるグリッド・サーチ¹⁷⁾によって行う．

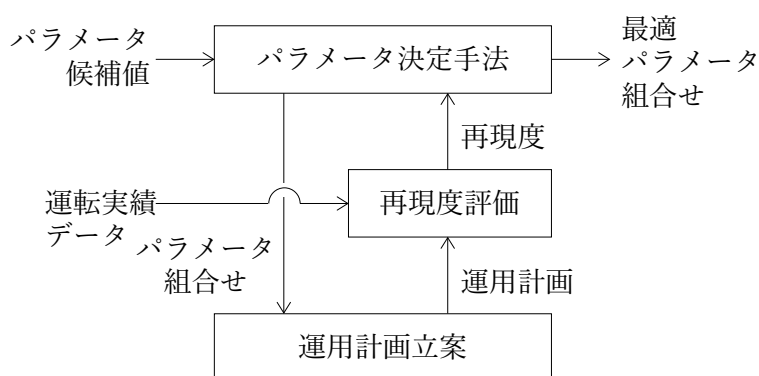


図 4-1 パラメータ決定手法の概要

(2) 運用計画による運転実績データの再現度の指標

再現度の評価指標 AvgNSE を式(4-4)で定義する. 項目 y の Nash-Sutcliffe 係数 NSE_y は式(4-5)で定義される.

$$\text{AvgNSE} = \frac{1}{\#Y} \sum_{y \in Y} NSE_y \quad (4-4)$$

$$NSE_y = 1 - \frac{\sum_t (\lambda_y[t] - \rho_y[t])^2}{\sum_t (\lambda_y[t] - \bar{\lambda}_y)^2} \quad (4-5)$$

Y : 運用計画の項目の集合 (表 4-1)

$\rho_y[t]$: 項目 y の運用計画 (例えば配水池 A の水位 $L_A[t; X]$)

$\lambda_y[t]$: 項目 y の運転実績データ (実績値)

$\bar{\lambda}_y$: $\lambda_y[t]$ の時刻 t についての平均値

$\# \cdot$: 集合の要素数

NSE は, 取りうる最大値である 1 に近い値であるほど適合性が高い. 水文分野では 0.7 以上の値で再現度が高いとされている¹⁶⁾. AvgNSE としても同様に最大値である 1 に近い値であるほど適合性が高いと言える.

パラメータ決定のために AvgNSE を計算する期間 (学習期間) は, 1 か月間以上とする. 配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化のバランスを学ぶために, 短期的に生じた特殊事情への対応を過学習することがないようにする. 期間の長さは, 第3章 第3節 (1)での検討の通り, 式(4-2)に含まれる配水池水位の運転実績データの分位値 $b_{r,\alpha}$ の計算で約 1 か月間以上の期間が望ましいことに合わせて設定した.

運用計画は計画立案の一般的な長さである 24 時間ごとに立案し, 配水池水位やポンプ運転状態などの初期条件は運転実績データから与える. 計画期間の配水量は運転実績データの実績値を用い, 需要予測誤差がない条件で運用計画を立案する.

(3) パラメータの探索

パラメータの探索は、前述の通りグリッド・サーチ¹⁷⁾により行う。各パラメータ u, l, w の候補値を定めた上で、それらの全ての組み合わせの中で AvgNSE を最大にする候補を選択する。

パラメータの候補は、配水池水位の目標範囲内に主要な運転実績データが入るように、 u は 0.85, 0.90, 0.95, 0.99, l は 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 を候補値とする。重み係数 w は、式(4-1)の目的関数の 2 項が同じオーダーの大きさとなる値を含めた上で、その 10 倍、1/10 倍のように指数スケールで候補値を設定する。

探索は下記の 3 ステップで行う。

(i) パラメータ値の組み合わせの生成

パラメータ u, l, w の各候補値の組み合わせを生成する。 -

(ii) 運用計画の立案と評価指標の計算

各パラメータ組み合わせを用いて配水池運用モデルにより運用計画 X を立案し、運転実績データと比較して評価指標 AvgNSE を計算する。

(iii) 最適なパラメータの決定

前組み合わせのうち、評価指標 AvgNSE が最大となったパラメータ値の組み合わせを最適パラメータとする。

第4節 有効性の評価

(1) 方法

実データを用いて提案手法で配水池運用モデルのパラメータを決定し、比較手法で定めたパラメータとの比較を通じて提案手法の有効性を評価する。

各パラメータの候補値は表 4-3 の通りとし、計 $4 \times 4 \times 5 = 80$ 通りの組み合わせを候補とした。学習期間として 2016 年 10 月の 1 か月間を選び、提案手法により配水池運用モデルのパラメータを定めた。計算時間は、CPU: Intel Xeon[†] E5-2643 v3 3.40 GHz の 4 コア 8 スレッド、メモリ: 16 GB の計算機で 18.6 時間であった。定めたパラメータが長期的に利用できるならば十分に許容できる計算時間と考えられる。

比較対象には、次の 2 種類のパラメータ組み合わせを用いる。

- (i) ベースライン：対象モデルの標準的な設定を選ぶ。パラメータ u, l は、上側・下側のパーセンタイル幅が等しく、水位目標範囲に運転実績データの 90% を含む $u = 1 - 0.05 = 0.95, l = 0.05$ とする。重み係数は式(4-1)の 2 項が同じオーダーの値となる $w = 10^{-4} \text{ h/m}^2$ とする。
- (ii) 平準化類似：既往研究のモデル³⁾のように用水系配水量の平準化への偏重を防ぐ方策として、用水系配水量の平準化の度合いが運転実績に近いと期待されるパラメータ組み合わせを選ぶ。具体的には、用水系配水量平準化の目標達成度の指標（式(4-8)）が運転実績データに最も近いパラメータ組み合わせとする。

以下、(2)では提案手法によるパラメータ決定プロセスについて、パラメータ組み合わせ候補における再現度の分布を確認して評価する。(3)では、運用目標の達成度を定義してパラメータ組み合わせ候補と運転実績データを比較し、目標間のバランスの点で提案手法の有効性を確認する。(4)では、学習期間より後の 7 か月間についてパラメータ組み合わせ候補の再現度を評価し、提案手法で決定したパラメータの時間経過への耐性について確認する。

[†] Intel および Xeon は、Intel Corporation の商標である。

表 4-3 各パラメータの候補値

項目	候補値	備考
水位目標上限 u [-]	0.85, 0.90, 0.95, 0.99	分位値の計算期間は 2016年10月
水位目標下限 l [-]	0.15, 0.10, 0.05, 0.01	
水量平準化重み w [h/m ²]	$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}$	式(4-1)の2項の値は 10^{-4} h/m ² で同じオーダー

(2) 再現度の分布

表 4-4 には、パラメータ候補を提案手法が用いる学習期間の AvgNSE の高い順に並べて抜粋して示す。以下、提案手法が選択する AvgNSE 最大の組み合わせはベスト、AvgNSE 最小の組み合わせをワーストと呼ぶ。上位候補の AvgNSE は 0.7 以上であり、再現度が高いとされる水準¹⁶⁾を平均で上回る。一方、下位の候補は AvgNSE が 0.6 未満であり、パラメータ組み合わせの選択により再現度に差が生じている。なお、比較対象（ベースライン、平準化類似）の AvgNSE は約 0.67 であり、全 80 通りの候補のうちの中央付近に位置する。

図 4-2 (a)-(c)に、パラメータ u, l, w のうち 1 つを固定した場合の再現度 AvgNSE の分布を箱ひげ図で示す。同図(d)は全パラメータ組み合わせでのヒストグラムである。水位目標範囲の上限 u は小さいほど再現度が高い。目標範囲下限 l や重み係数 w は値を変えても分布の重なりが大きいものの、 $l = 0.05, w = 10^{-5}, 10^{-4} \text{ h/m}^2$ の再現度が高い。表 4-4 の上位 5 候補は、主に図 4-2 で再現度の高いパラメータ値($u = 0.85, l = 0.05, w = 10^{-5}, 10^{-4} \text{ h/m}^2$)を用いた組み合わせとなっている。

表 4-4 AvgNSE でランク付けしたパラメータ候補

ランク	u [-]	l [-]	w [h/m ²]	AvgNSE [-]	呼称
1	0.85	0.05	10^{-5}	0.715	ベスト
2	0.85	0.01	10^{-4}	0.713	—
3	0.85	0.10	10^{-4}	0.710	—
4	0.85	0.05	10^{-4}	0.709	—
5	0.90	0.10	10^{-5}	0.709	—
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
37	0.90	0.15	10^{-7}	0.675	平準化類似
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
41	0.95	0.05	10^{-4}	0.673	ベースライン
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
80	0.99	0.15	10^{-6}	0.566	ワースト

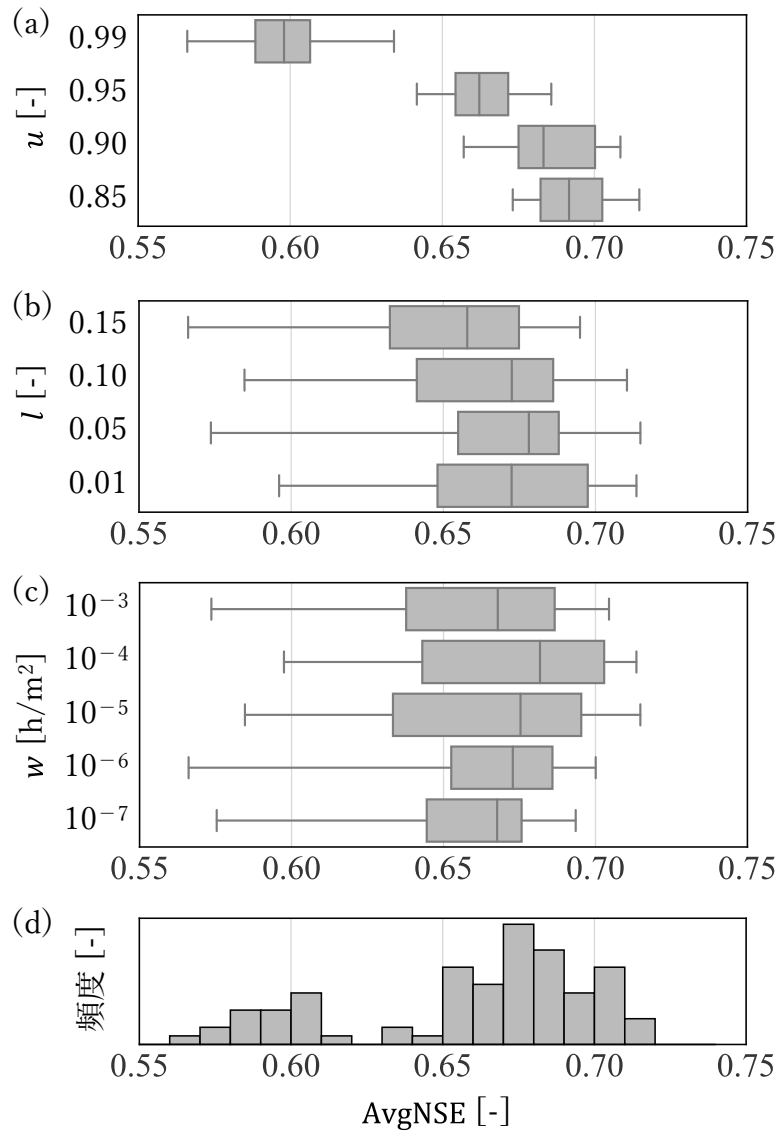


図 4-2 各パラメータ値による AvgNSE の分布
 [各箱ひげ図につき(a), (b) $n = 20$, (c) $n = 16$, (d) $n = 80$]

(3) 目標達成度の比較

配水池水位変動の適正化と、用水系配水量の平準化の両目標について達成度の指標 J_G (G は目標を表す添え字)を定義し、運用における目標間のバランスを比較する。提案手法の用いる再現度の評価指標 AvgNSE とは別の観点から運用を評価する。

配水池水位変動の適正化の達成度 J_{RU} , J_{RL} は、用水系配水池のうちで水位が所定値より高い配水池・時間の割合（高水位割合; RU）と、低い割合（低水位割合; RL）をそれぞれ指標とする。ともに指標値が小さいほど達成度が高い。

$$J_{RU}[\mathbf{X}] = \frac{1}{2 \#T'} \sum_{r \in \{A,D\}} \sum_{t \in T'} \text{Step}(L_r[t; \mathbf{X}] - \bar{B}_r) \quad (4-6)$$

$$J_{RL}[\mathbf{X}] = \frac{1}{2 \#T'} \sum_{r \in \{A,D\}} \sum_{t \in T'} \text{Step}(\underline{B}_r - L_r[t; \mathbf{X}]) \quad (4-7)$$

T' : 評価期間の時間ステップの集合

$\underline{B}_r, \bar{B}_r$: 配水池 r の低水位・高水位のしきい値 [m]

Step(v): ステップ関数 ($v > 0$ のとき 1, $v \leq 0$ のとき 0)

表 4-2 の記載の通り、パラメータ u と J_{RU} は正の相関、 l と J_{RL} は負の相関がある。パラメータ u, l が異なる運用計画を比較するため、運用モデルの目的関数の構成式(4-2)より解釈しやすい指標を採用した。しきい値 $\underline{B}_r, \bar{B}_r$ は、パラメータ u, l のどの候補値についても式(4-2)の目標範囲に含まれる値として、分位値を用いて $\bar{B}_r = b_{r,0.8}$, $\underline{B}_r = b_{r,0.2}$ と設定した。

用水系配水量の平準化の達成度 J_F は、配水量の絶対変化量の平均を指標とする。運用モデルの目的関数の構成式(4-3)を規格化した指標であり、値が小さいほど達成度が高い。

$$J_F[\mathbf{X}] = \frac{1}{2 \#T'} \sum_{r \in \{A,D\}} \sum_{t \in T'} |q_r[t; \mathbf{X}] - q_r[t-1; \mathbf{X}]| \quad (4-8)$$

表 4-4 で呼称をつけた 4 つのパラメータの組み合わせについて、運用計画の目標達成度のバランスを比較する。各パラメータ組み合わせについて、運転実績データについて計算した指標値を基準とする目標達成度の指標の相対値を図 4-3 に示す。指標の相対値が 1 に近いと、その目標達成度が運転実績データに近い運用であることを意味する。

配水池高水位割合の指標 J_{RU} は、ベスト、平準化類似、ベースライン、ワーストの順に達成度が高く、そのうちベストのみ、運転実績データを基準とする相対値が 1 を下回る。指標相対値のばらつきが大きいものの、指標相対値が 1 に近いパラメータ組み合わせをあえて選

ぶとすればベストと平準化類似の2つが挙げられる。

配水池低水位割合の指標 J_{RL} は、ワースト、ベースライン、平準化類似、ベストの順に達成度が高い。ワーストとベースラインは実績データを基準とする相対値が約 0.7 と小さく、平準化類似とベストは相対値が 1 に近い。

用水系配水量平準化の指標 J_F は、ベースライン、ワースト、ベスト、平準化類似の順に達成度が高い。平準化類似はパラメータ選定の定義によって相対値がほぼ 1 である。他の 3 つのパラメータ組み合わせは、相対値が約 0.85 と相互に近い値を取る。

3 つの指標を総合的に評価すると、4 つのパラメータ組み合わせのなかではベストが最もバランスの取れた運用であると考えられる。ベストは、配水池高水位割合の指標 J_{RU} と用水系配水量平準化の指標 J_F は実績データよりも達成度が高く、配水池低水位割合の指標 J_{RL} についても実績データに近い。すなわち、ベストは 3 つの指標の全てで実績データと概ね同等以上の達成度となっており、少なくとも配水池高水位割合の指標 J_{RU} で実績データよりも達成度が低い他の組み合わせよりもバランスが取れている。

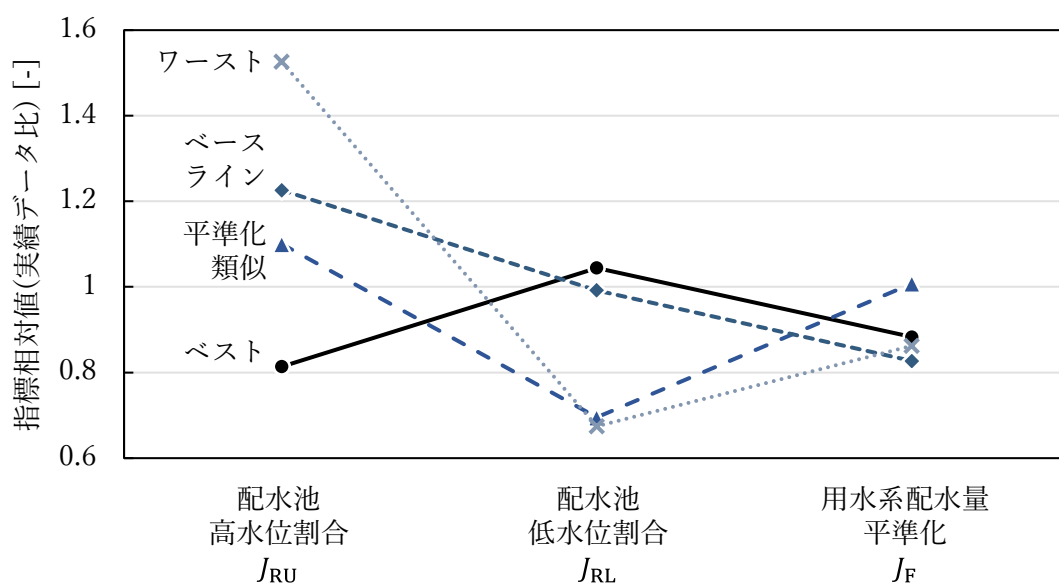


図 4-3 各パラメータ組み合わせで立案した運用計画の目標達成度指標

全80通りのパラメータ組み合わせについて、再現度の指標 AvgNSE と目標達成度の指標との関係を確認する。図4-4は、80通りの各パラメータで立案した学習期間の運用計画について、共通の横軸 AvgNSE に対して式(4-6)–(4-8)の指標値 J_{RU} , J_{RL} , J_F を縦軸とする散布図である。マーカーは、各指標値と直接関係するパラメータの値を示す。また、運転実績データで計算した目標達成度の値を緑点線で示す。パラメータのうち、ベスト、ベースライン、平準化類似、ワーストを示す点を吹き出しで示す。選定方法から、ベスト・ワーストは横軸の再現度 AvgNSE が最大・最小の点、平準化類似は同図(c)の縦軸 J_F の値が運転実績データに最も近い点である。

各指標 J_{RU} , J_{RL} , J_F の値は、直接関係するパラメータ u , l , w の値の大小と相関が強い。ただし、目標間のトレードオフや他のパラメータ値を反映して、直接関係するパラメータの値が同じでも指標値にはばらつきがある。

提案手法によるベストの運用計画と運転実績データの指標値を比べると、 J_{RL} はほぼ同じ値だが、 J_{RU} や J_F はベストのほうが小さく、差がある。理由は、運転実績データと運用計画で需要の不確かさに関する前提の違いが挙げられる。運転実績データは需要の不確かな状況で運転員が判断した運用である一方、運用計画は需要予測の誤差がない条件で最適化モデルにより立案した計画である。需要の不確かさのない条件では、より目標達成度の高い運用を立案できるためと考えられる。

再現度が上位のパラメータ ($\text{AvgNSE} \geq 0.71$) は指標値もベストに近く、提案手法は目標達成度の点で一貫したパラメータを決定している。再現度 $\text{AvgNSE} \leq 0.7$ には、ベースラインと平準化類似を含む多様なパラメータ値が含まれており、各指標値のばらつきが大きい。

ベストに比べて、ベースラインは J_{RU} が大きく、高水位となる割合が高い。また、 J_F が小さく、用水系配水量の変化が小さい運用であることが読み取れる。平準化類似は、選定方法通り J_F が運転実績データとほぼ同じ値でベストに比べて大きく、用水系配水量の変化が大きい。また、 J_{RL} が小さく、低水位となる割合が低い。

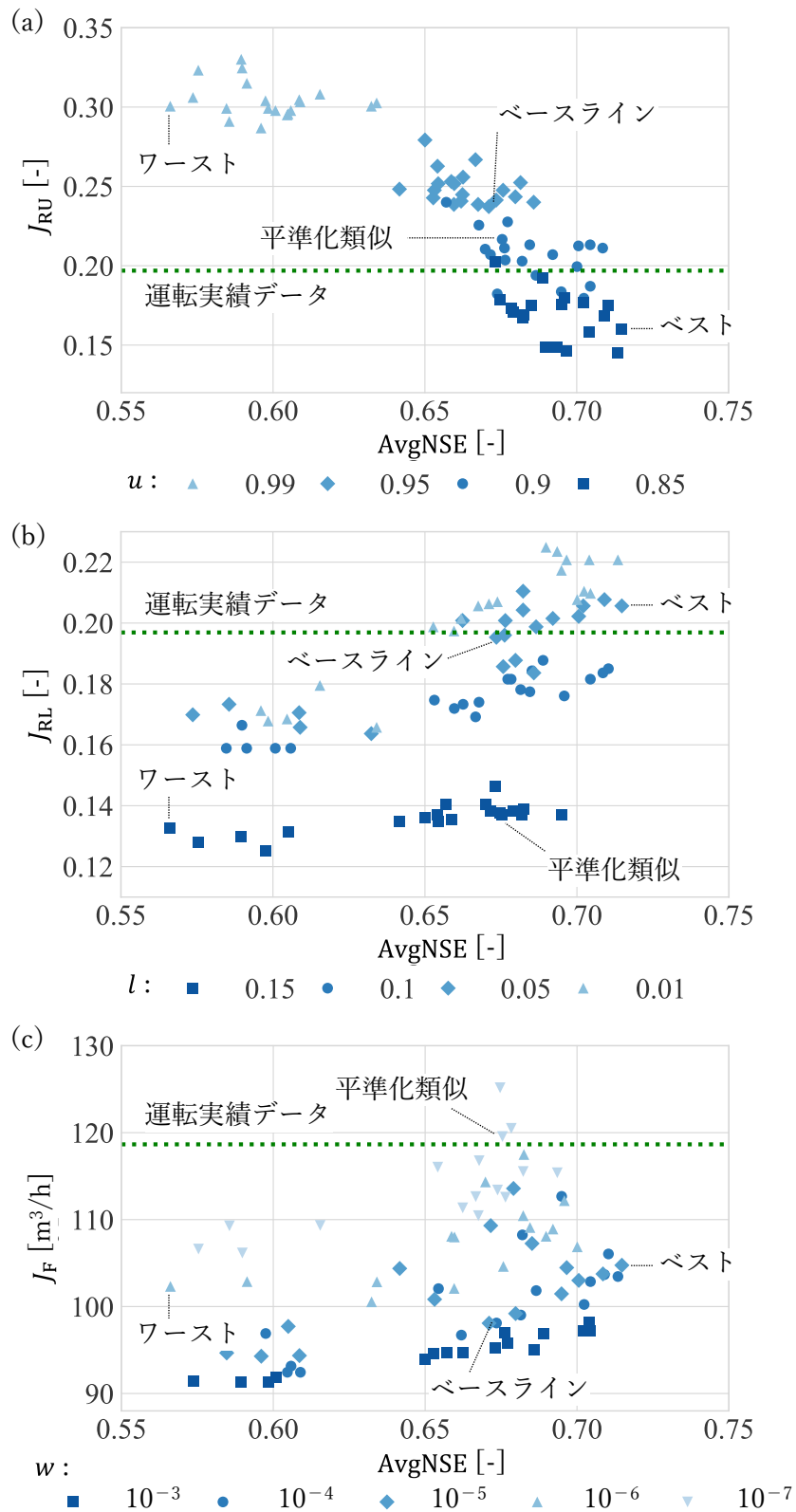


図 4-4 各パラメータ組み合わせで立案した運用計画の目標達成度指標と AvgNSE

具体例で運用計画の詳細を確認する。計画期間は、学習期間の平均的な配水量の日である2016年10月10日の16時から翌16時までの24時間とする。計画期間の始点は、夕方の需要ピーク前に配水池水位の回復目標値を設定している時刻として16時を選んだ。配水量の大きい順に配水池 A, D, b, c の水位と配水量について、運転記録と、ベスト、ベースライン、平準化類似のパラメータ組合せで立案した運用計画を図4-5～図4-8に示す。

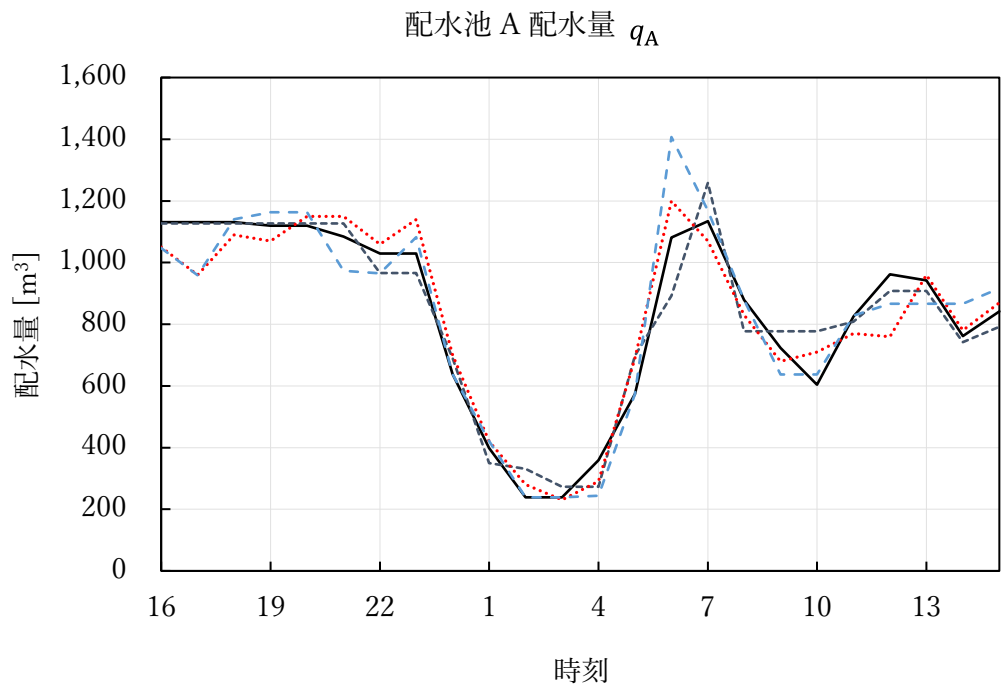
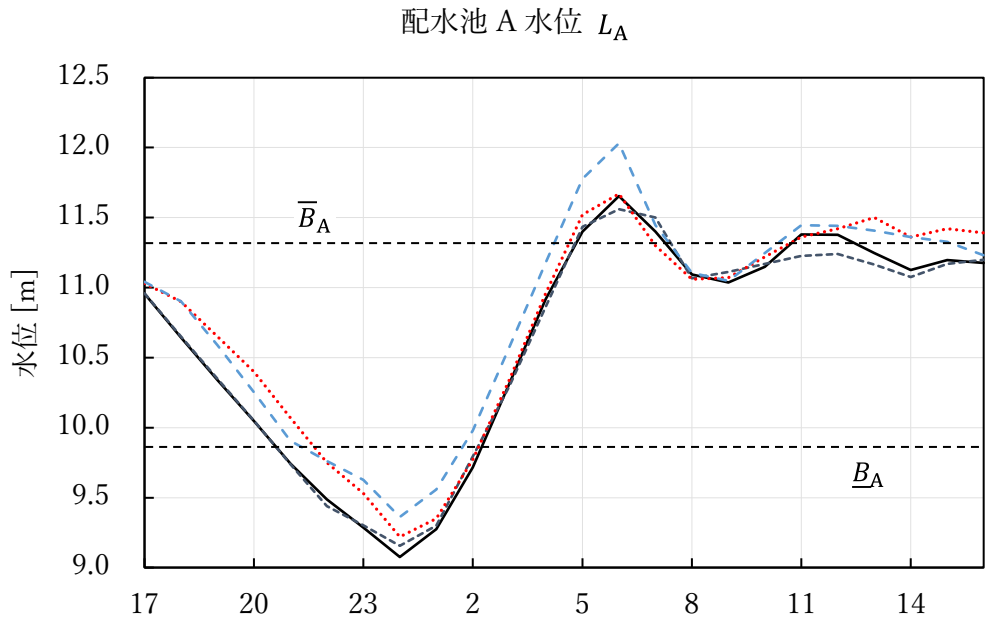
図4-4(a)–(c)の指標値の大小関係と具体的な運用との対応を確認する。まず図4-4(a)と関わる配水池 A, D の高水位に着目する。図中破線で示した高水位のしきい値を上回る割合は、図4-4(a)の J_{RU} の順序の通り、ベストが最も低く、ベースラインが最も高い。なお、平準化類似は朝6時ごろの水位が高いことに留意する。続いて、図4-4(b)に関わる配水池 A, D の低水位に着目する。図4-4(b)で J_{RL} が最も小さい平準化類似は、 $l = 0.15$ と目標範囲の下限が高いため、ベストやベースラインに比べて低水位となる割合が低く、特に0時ごろの最低水位が高い。水需要の少ない夜間は水位変化の制御が難しく、先述の通り翌朝の配水池水位が高くなる。最後に図4-4(c)に関わる配水池 A, D の配水量変化に着目する。配水量変化の大きい時間帯である16–23時や7–13時に、配水量の変化は図4-4(c)の J_F の大小と合致している。特に平準化類似は、指標 J_F の値に近い運転実績データよりも配水量の変化が大きい。

ベースラインの運用計画は、運転実績データよりも用水系配水量の平準化の達成度が大きく改善する一方で、配水池が高水位となる割合が高い。このため、ベースラインの運用計画では、水需要が想定よりも多い／少ないなどの外乱があった場合に、配水池水位が管理範囲から外れるリスクが高まると考えられる。

平準化類似の運用計画は、他の運用計画だけでなく、運転実績データと比べても用水系配水量の変化が大きい。指標 J_F の値に基づく方法では、期待とは異なり平準化の度合いが運転実績に近いパラメータを選べなかったと言える。実運用に適用すると、需要の不確かさの影響を受けて、用水系配水量はより大きく変化するリスクが高いと考えられる。

ベストの運用計画は、これらの他の運用計画に比べて、配水池水位の適正化と、用水系配水量の平準化の両面でバランスの取れた運用計画となっている。

以上のように、提案手法は実運用に適したパラメータを選択できると言える。一方で、より簡便な手法で定めたパラメータは、運転実績データと比べて目標間のバランスが偏る可能性がある。



-
-
-
-

図 4-5 配水池 A の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

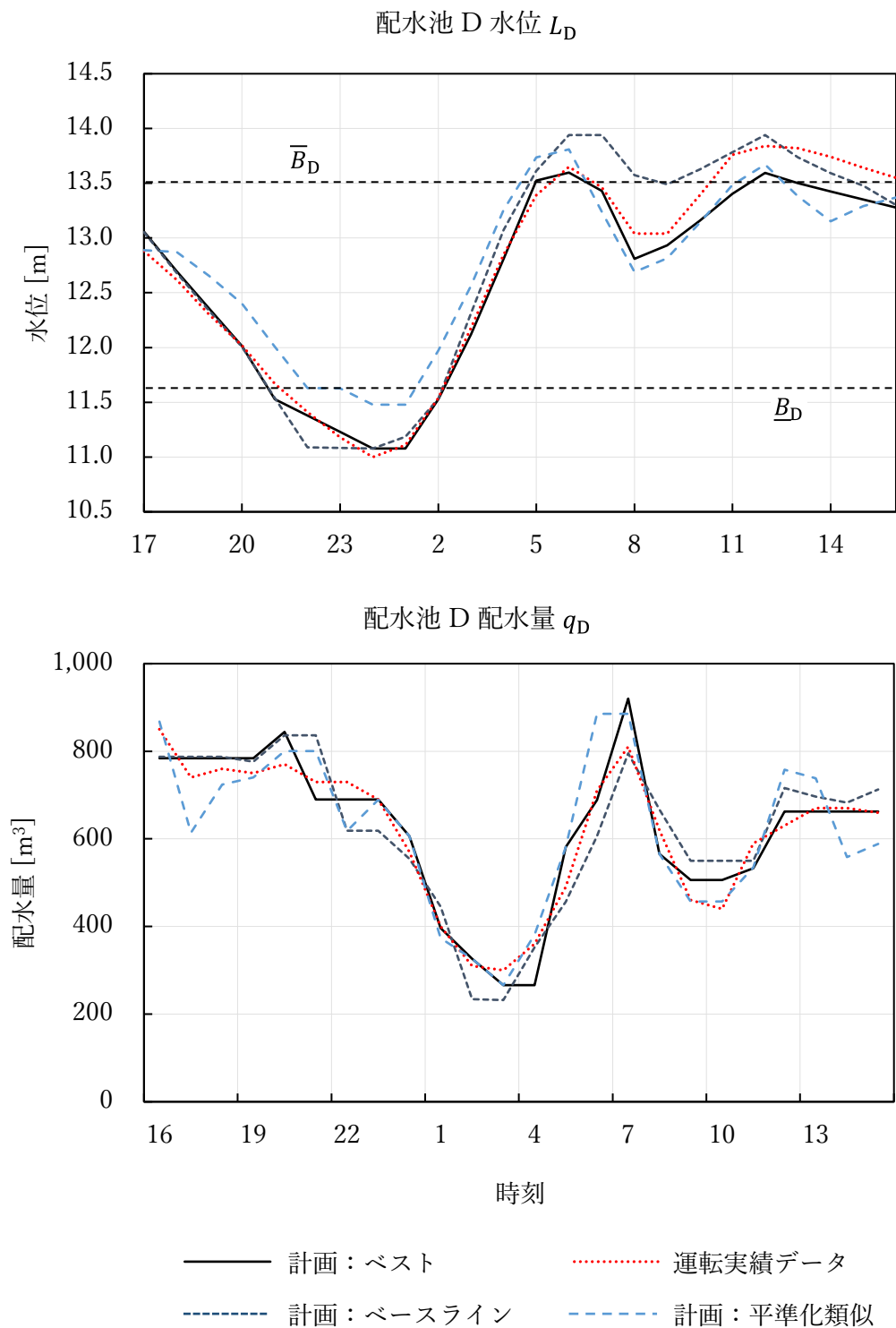


図 4-6 配水池 D の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

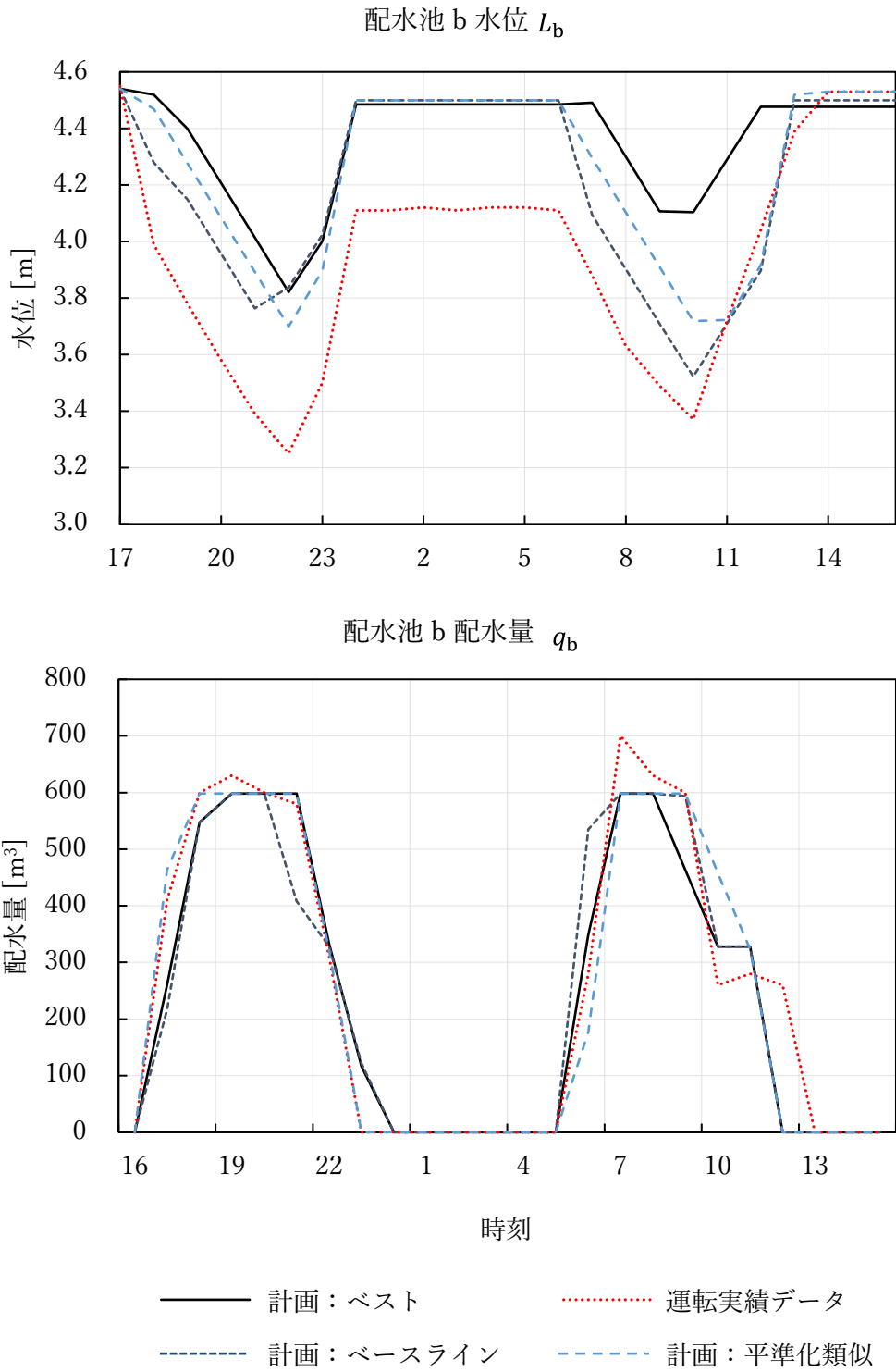


図 4-7 配水池 b の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

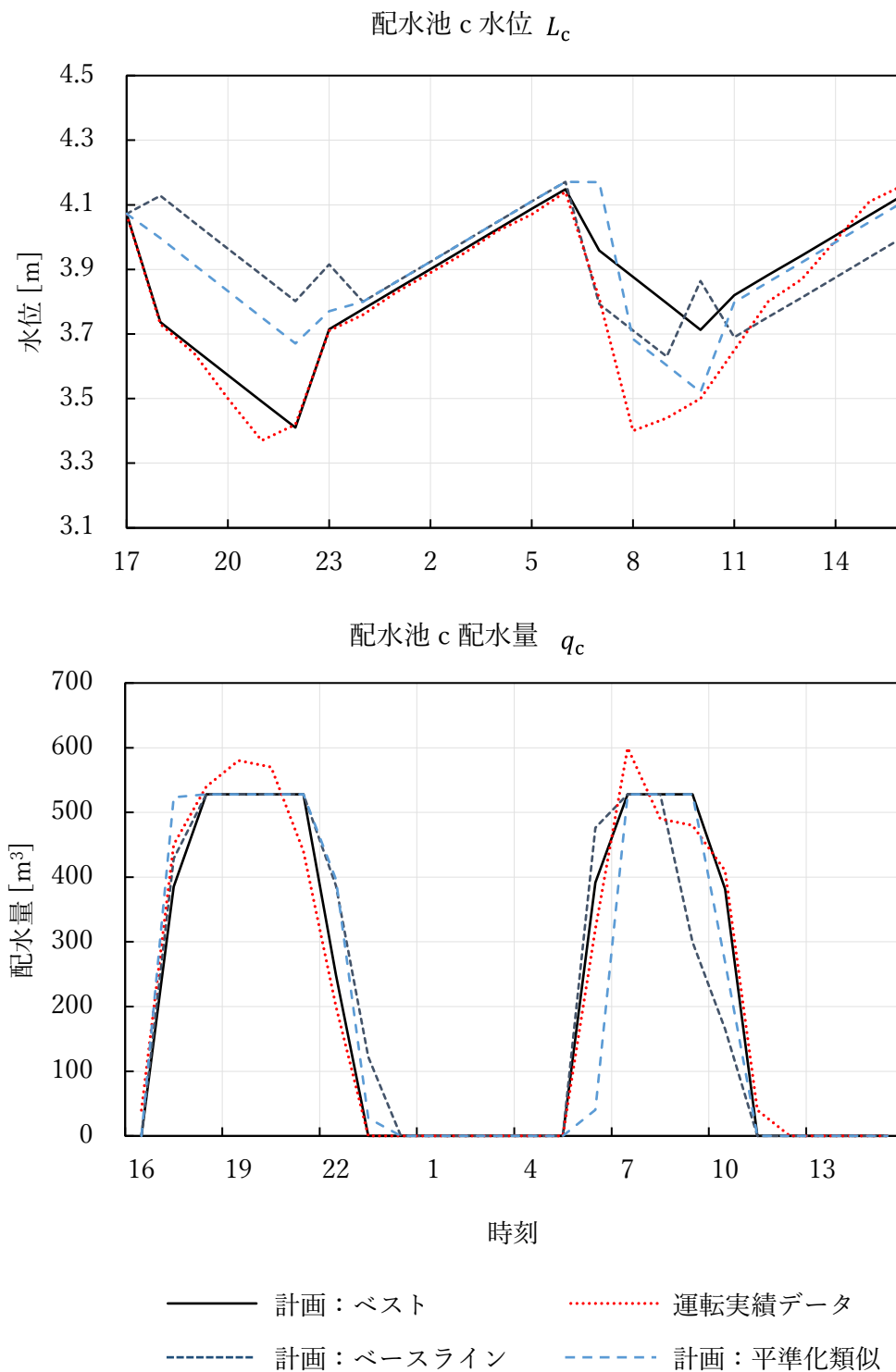


図 4-8 配水池 c の運用計画と運転実績データの比較
(2016 年 10 月 10 日 16 時～翌 16 時)

(4) 時間経過の影響

最適パラメータは学習期間のデータに基づいて定めるため、時間経過に伴い運用計画と運転実績データの差は次第に大きくなると推測される。この影響を評価するため、学習期間より後の2016年11月から2017年5月までの7か月間を評価期間として、各月ごとに各パラメータの AvgNSE を計算した。

図4-9～図4-12は、横軸に学習期間(2016年10月)の AvgNSE、縦軸に評価期間の隔月での AvgNSEをとった散布図である。特にベスト、ベースライン、平準化類似、ワーストを強調して示す。学習期間と評価期間の AvgNSE は相関が高い。ただし、ベースラインと平準化類似のように、評価期間の月によって学習期間と AvgNSE の順序が入れ替わることもある。そうした中でも、ベストはどの月でも最上位に近い AvgNSE となっている。同図(a)–(d)を比較すると、時間が経過するにつれて AvgNSE の値は小さくなる、すなわち、運用計画による運転実績データの再現度は下がる傾向が確かめられる。

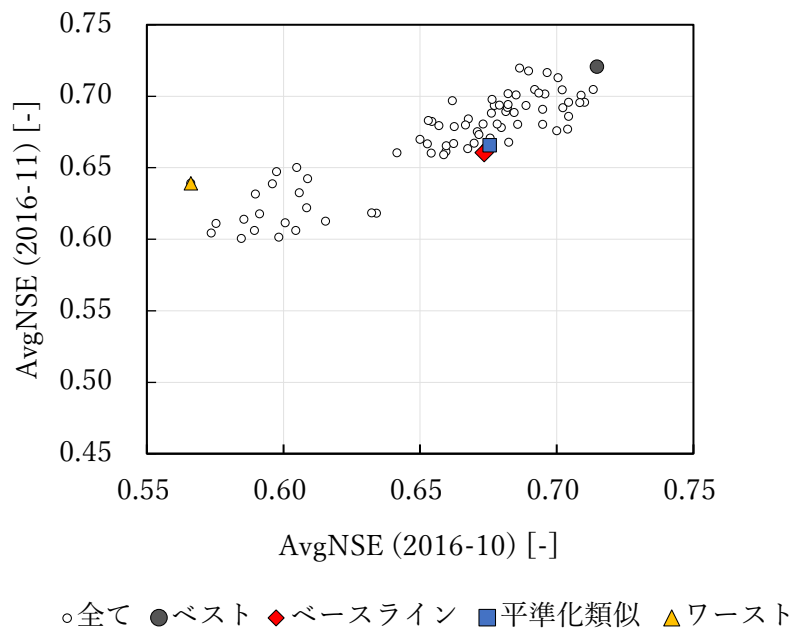


図 4-9 学習期間(2016-10)と評価期間(2016-11)における AvgNSE の関係

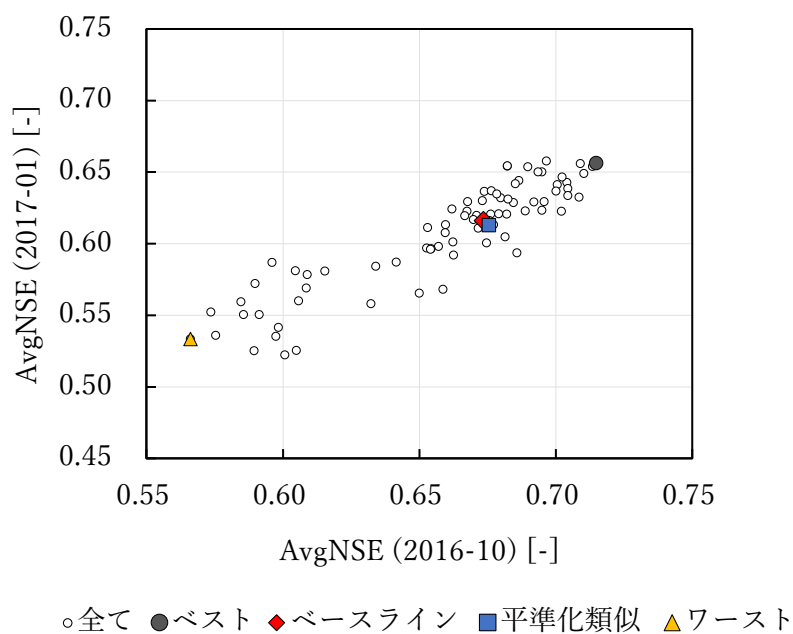


図 4-10 学習期間(2016-10)と評価期間(2017-01)における AvgNSE の関係

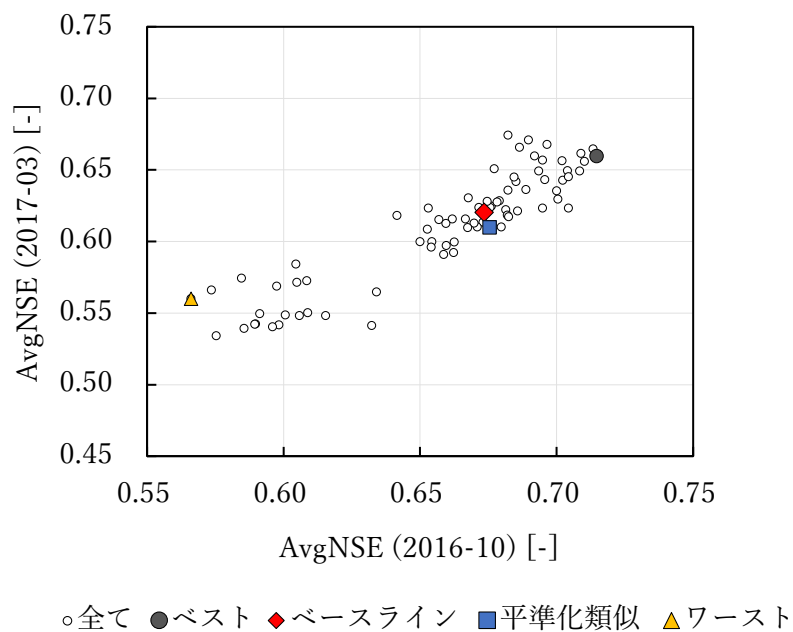


図 4-11 学習期間(2016-10)と評価期間(2017-03)における AvgNSE の関係

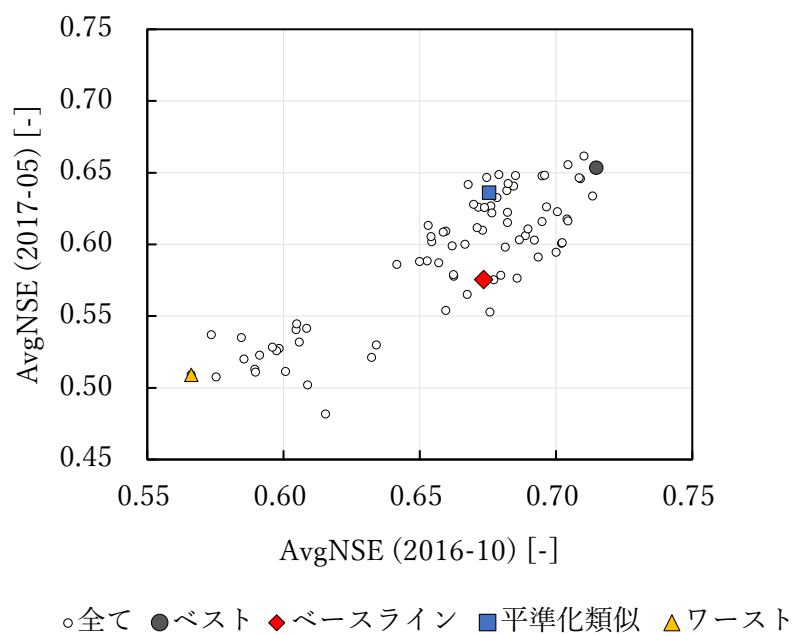


図 4-12 学習期間(2016-10)と評価期間(2017-05)における AvgNSE の関係

時間経過に伴う AvgNSE の変化を確認するため、ベスト、ベースライン、平準化類似、ワーストについて、学習期間～評価期間の月別の AvgNSE の変化を図 4-13 に示す。AvgNSE の低下は、ベースラインやワーストに比べてベストではややゆるやかである。評価期間の終わりでベストは $\text{AvgNSE} = 0.65$ と、評価期間始め時点でのベースラインの $\text{AvgNSE} = 0.66$ とほぼ同じ値であり、評価期間の最後まで運転実績データに近い運用計画を立案できていると言える。

なお、時間経過に伴って AvgNSE が低下する要因として、水需要ピーク前の配水池の回復目標水位の変化が挙げられる。図 4-14 に夕方の水需要ピーク前 16 時における配水池 A, D 水位の月平均値の学習期間との差を示す。時間経過に伴い学習期間の値から外れていく傾向が見て取れる。配水池運用モデルに設定する水位回復目標値は学習期間・評価期間ともに一定としたため、16 時の水位で運転実績データと計画の差がつき、AvgNSE 低下の要因となった。

以上より、提案手法で定めた最適パラメータにより、半年間以上の長期間にわたって運転実績データに近い運用計画を立案できると期待される。

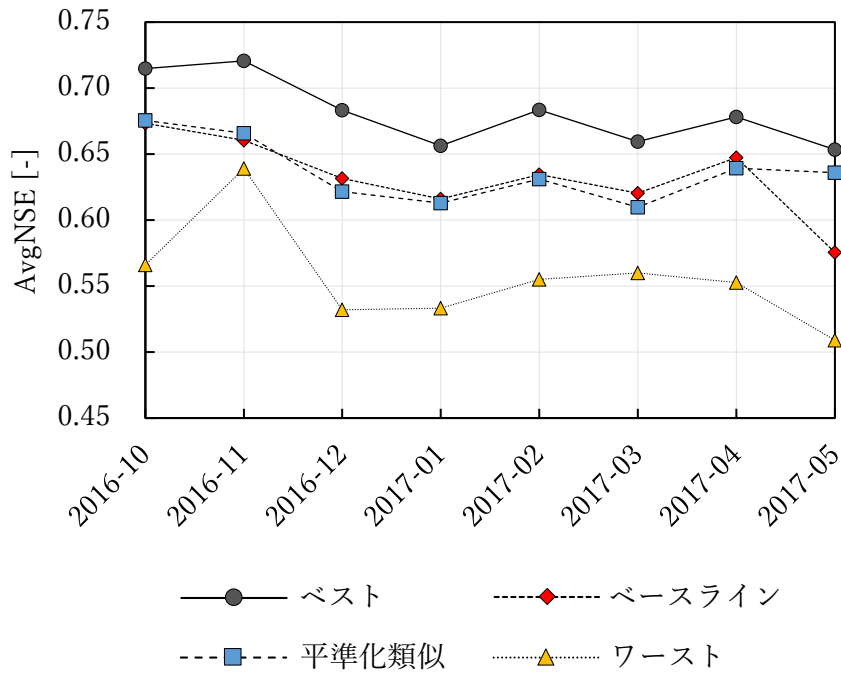


図 4-13 学習期間～評価期間における AvgNSE の変化

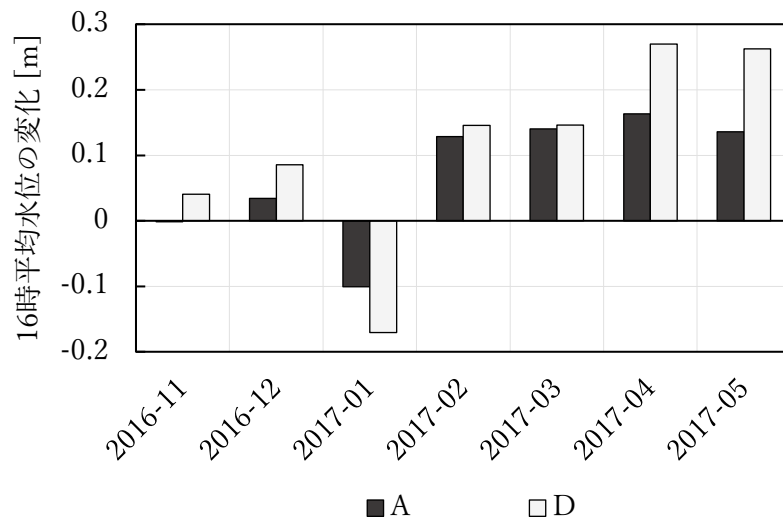


図 4-14 運転実績データの 16 時における配水池平均水位の変化
(基準：学習期間の平均水位)

第5節 結言

本章では、配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化の目標間のバランスに関するパラメータを有する配水池運用モデルを対象に、実運用に適したバランスの運用を実現するために熟練運転員の運用を再現するようにパラメータを決定する手法を提案した。

実データを用いた評価の結果、提案手法は、配水池水位の適正化と、用水系配水量の平準化の両方の点で、バランスの取れた運用計画を立案できることを確かめた。簡便なパラメータ選定手法では、いずれかの目標に偏った運用計画となることが多いという点で、提案手法によるパラメータ決定の有効性を確かめられた。

提案手法で決定したパラメータで立案した運用計画を、他パラメータで立案した運用計画や、運転実績データと比較することで、パラメータに対する時間経過の影響を評価した。提案手法で決定したパラメータは半年間以上の長期間にわたって運転実績データに近い運用計画を立案できることを確かめた。

提案手法の用いる再現度は、対象システムの運用目標に依存しない汎用的な定義であり、運用上の目標が複数ある他の水道システムや運用計画モデルのパラメータ決定にも適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 厚生労働省：「水道法の一部を改正する法律（平成 30 年法律第 92 号）の背景・概要」, 2018.
- 2) 電気学会 上下水道施設における制御技術の変遷と最新動向調査専門委員会：「上下水道施設における制御技術の変遷と最新動向」, 電気学会技術報告 1503, 2020.
- 3) 上野洋平, 森一之：大規模送水系統向け送水ポンプ運転計画手法の提案, 電気学会論文誌 D (産業応用), Vol.133, No.8, pp.780–785, 2013.
- 4) 坂本義行, 黒川太, 佐野方俊, 山田毅, 芦木達夫, 結城博司：GA による送水計画の近似的最適化手法, 電気学会論文誌 D (産業応用), Vol.120, No.8-9, pp.987–999, 2000.
- 5) 足立進吾, 荒井康裕, 小泉明, 高橋信補, 武本剛：運転記録の分析に基づく配水池運用の最適化手法, 土木学会論文集 G (環境), Vol.75, No.6, pp.II_197–II_208, 2019.
- 6) van Zyl, J. E., Savić, D. A. and Walters, G. A.: Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.130, No.2, pp.160–170, 2004.
- 7) Ocampo-Martinez, C., Bovo, S. and Puig, V.: Partitioning approach oriented to the decentralised predictive control of large-scale systems, *J. Process Control*, Vol.21, No.5, pp.775–786, 2011.
- 8) 大島信夫, 鮫島正一：水とエネルギーの最適化を図る“カオス水需要予測”制御, *EICA*, Vol.17, No.1, pp.17–21, 2012.
- 9) 竹内一生, 小坪成一, 岡本卓, 伊藤 智義, 下馬場朋禄：分枝限定法を用いた上水道ポンプ運用計画問題の最適化, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.138, No.10, pp.1287–1288, 2018.
- 10) 加藤博光, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 館仁平：広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.2, pp.280–287, 1999.
- 11) 足立進吾, 荒井康裕, 小泉明, 小泉賢司, 高橋信補, 横井浩人：運転記録の再現を基準とする配水池運用モデルのパラメータ決定手法, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.142, No.1 (予定), 印刷中.
- 12) 梅谷俊治：しっかり学ぶ数理最適化—モデルからアルゴリズムまで, 講談社, 2020.
- 13) 藤江哲也：最近の混合整数計画ソルバーの進展について, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.56, No.5, pp.263–268, 2011.
- 14) Gurobi Optimizer Reference Manual, Version 9.0, Gurobi Optimization, LLC, 2020.
- 15) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models, Part I — A discussion of principles, *J. Hydrol.*, Vol.10, No.3, pp.282–290, 1970.
- 16) 奥泉宗一郎, 中津川誠, 白谷友秀：GIS を用いた汎用的な流出計算手法の提案, *水文・水*

資源学会誌, Vol.29, No.1, pp.32-43, 2016.

- 17) Bergstra, J. and Bengio, Y.: Random search for hyper-parameter optimization, *J. Mach. Learn. Res.*, Vol.13, pp.281-305, 2012.

第5章 配水流量予測モデルを複数併用する漏水事故発生の監視

第1節 緒言

安定した水道サービスを持続する課題に、管路の老朽化と、職員・人員数の減少がある^{1),2)}。老朽化による管路破断などによって漏水事故の増加が懸念される一方、事故発生時には限られた人員で対応することが見込まれる。漏水事故は、周辺地域での断水や濁水の発生、さらには道路の冠水や浸水を引き起こすこともあり、迅速な対応が求められる。このため、漏水事故発生の疑いを認知（判定）し、事故位置を特定して隔離・修理にあたるプロセスを迅速化する方策が重要性を増している。

漏水事故発生の疑いをいち早く判定する方策として、配水区域の流入部の流量計や、区域内の圧力計の計測値を監視し、漏水事故発生にともなう異常な流量増加や圧力低下を判定する手法が提案されてきた。既往研究には、Artificial Neural Network や Kalman Filter を用いて配水流量の予測値を 15 分程度の周期で更新した上で、流量計測値が予測値よりも継続して大きい場合に漏水事故発生の疑いを判定する手法³⁾⁻⁷⁾が挙げられる。

漏水事故による流量増加は、多様な規模・増加の緩急の事例が報告されている。例えば配水流量の増加を認めた漏水事故事例 44 件の分析⁸⁾では、規模は 50–800 m³/h、2 分以下で急速に流量増加する事例が多くを占めた。一方、数時間の間隔をあけて多段階で漏水流量が増加する事例³⁾や、5–20 m³/h 規模の漏水が数日～数週間をかけて緩やかに増加した事例^{9),10)}も報告されている。漏水事故発生の監視手法には、こうした多様な規模や増加の緩急の漏水事故を確実にかつ速やかに判定できることが求められる。

既往研究の監視手法の多くは、漏水流量が急速に増加する事故に適した構成となっており、緩やかに増加する事故は、判定を見落とすことや、判定まで時間を要することがある。実際、配水流量の予測に直前の計測値を用いる手法^{4),6),7)}、すなわち、予測ラグの短い予測モデルに基づく手法は、直前の流量計測値を用いることで、通常時の予測精度が高く、急速に増加する漏水事故を速やかに判定できる。しかし、緩やかに増加する漏水事故については、図 5-1 に示すような気象の影響による通常の水需要増加と混同し、判定の見落としや判定に時間を要する傾向がある。既往研究では、急速に流量増加する漏水事故に対して判定の見落とし（False negative）や誤判定（False positive）の比率によって手法を評価しており、緩やかに増加する漏水の判定については議論されていない。なお、予測ラグの長い予測モデルに基づく手法^{3),5)}は、ラグの短いモデルに比べて流量の予測精度が低いために急速に増加する漏水事故の判定に時間を要する。

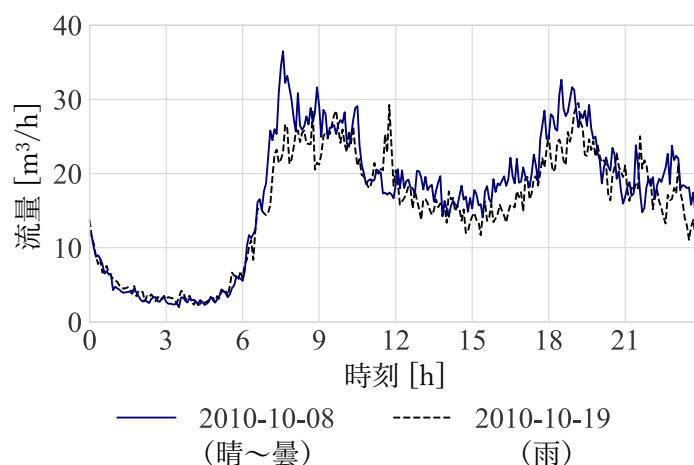


図 5-1 気象と配水流量（水需要）の関係の例（データセット¹²⁾）

本章¹¹⁾では、配水流量の監視に基づき、漏水流量が急速に増加する事故と、緩やかに増加する事故の両方を確実かつ速やかに判定することを目的とする。漏水増加の緩急によって判定に適する予測ラグが異なることを踏まえて、異なる予測ラグの配水流量予測モデルを複数併用する流量監視手法を提案する。急速に増加する漏水は短い予測ラグのモデル、緩やかに増加する漏水は長い予測ラグのモデルが寄与することにより、漏水事故発生の疑いを早期に判定することをねらう。別の予測アルゴリズムを用いる場合はもちろん、同じ予測アルゴリズムに別の予測ラグのパラメータ値を設定する場合についても別の予測モデルとして扱う。

以下、第2節でアプローチと提案する流量監視手法を説明する。第3節では、研究用の公開データセット¹²⁾を活用して生成した、規模・増加の緩急の漏水事故を模擬したデータへの適用を通じて、提案手法の有効性を評価する。特に、漏水事故の判定に要する時間の短縮効果に着目して評価する。

第2節 配水流量の監視手法

(1) アプローチ

提案する監視手法の概要を図 5-2 に示す。提案手法は、予測ラグの異なる複数（図の例では 3 つ）の配水流量予測モデルを併用する。予測ラグとは、説明変数とする配水流量計測値のうちの最後の日時から、予測対象の日時までの間隔である。先述の通り急速に増加する漏水は短い予測ラグ、緩やかに増加する漏水は長い予測ラグのモデルが判定に適する傾向にあることから、予測ラグの異なるモデルを複数併用することで、様々な増加の緩急の漏水事故に対して判定性能を高める。学習フェーズでは実績データを利用し、配水流量予測モデルと、漏水事故発生の疑いの判定しきい値を学習する。適用フェーズでは、各予測モデルの流量予測値を更新し、計測値と各予測値の比較に基づいて判定を行う。提案手法の判定結果は、いずれかの予測モデルで漏水事故発生の疑いありと判定された場合、その結果を採用する。すなわち、提案手法は最も早く判定した予測モデルと同時に事故発生の疑いありと判定する。

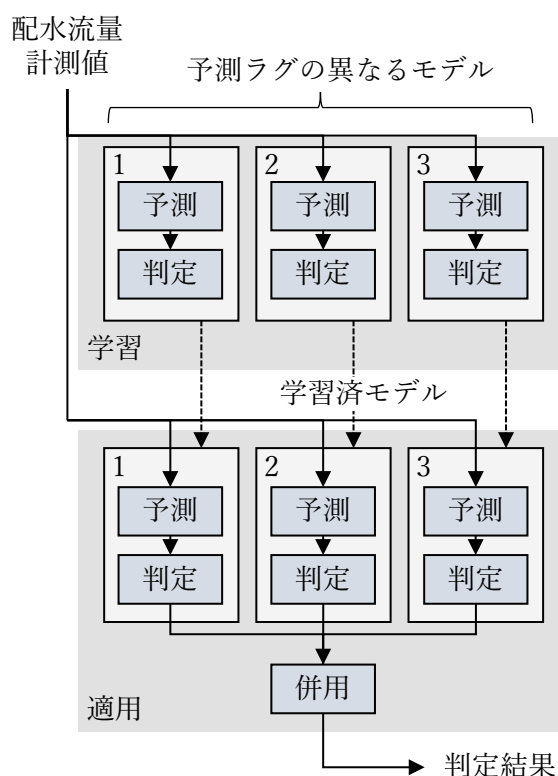


図 5-2 提案手法の概要

配水流量の予測モデルは、予測ラグを調整パラメータとし、説明変数には過去の配水流量の計測値と、予測する日時の平日・休日区分、時刻を用いる。配水池運用を目的とする配水流量予測^{13),14)}では、降水の有無や気温などの気象予報も用いることが一般的なものの、既往研究³⁾⁻⁷⁾と同様にこれらの情報は利用しない。理由は、水利用者の行動を通じて配水流量の計測値に気象の情報が間接的に含まれること、また、気象情報を入力する運用上の負担を軽減するためである。

漏水事故発生の疑いの判定は、計測値が予測値から継続して大きく逸脱する場合に行う。漏水事故発生のない通常時においては、大きな逸脱ほど継続時間が短く⁴⁾、また、予測のばらつきが小さければ同じ大きさの逸脱でも継続時間が短い傾向がある。実績データに基づくこの関係を上回る逸脱を漏水事故の発生疑いと判定する。学習フェーズでは、通常時における逸脱の大きさと継続時間との関係を予測の標準偏差のレベルごとに抽出し、逸脱の大きさについて継続時間ごとの判定しきい値を構成する。適用フェーズでは、しきい値を上回る逸脱がある場合に漏水事故の発生疑いと判定する。

監視手法は、漏水事故発生の見落とし (False negative) が少なく、同時に誤判定 (False positive)、言い換えれば誤報も少ないことが望ましい。提案手法は予測モデルごとに判定パラメータがあり、見落としと誤判定のトレードオフを定める。既往研究⁴⁾と同様に、誤判定の割合が所定値以下となるようパラメータを調整する。まず基準とする予測モデルで判定パラメータを定め、他の予測モデルは誤判定事例が基準モデルの誤判定事例に含まれるように判定パラメータを決める。

(2) 配水流量の予測モデル

配水流量の予測モデルは、予測ラグ、すなわち、図 5-3 に示す通り予測する時刻から説明変数とする計測値の期間までの時間間隔 h をパラメータとする。

日時 t の配水流量の予測値 $\hat{q}_t^{(h)}$ の予測式は、

$$\hat{q}_t^{(h)} = f^{(h)}(q_{t-h}, q_{t-h-\tau}, \dots, q_{t-h-l}, wd_t, time_t) \quad (5-1)$$

とする。 $f^{(h)}$ は過去の計測値を用いて定める関数である。関数 $f^{(h)}$ は予測ラグ h が有限の場合と無限大の場合で別の構成を用意する。 q_s は日時 s における配水流量の計測値、 τ は時間ステップ、 m は説明変数とする計測値の期間の長さ、 wd_t は日時 t の平日・休日を示す 0-1 変数、 $time_t$ は日時 t の時刻である。合わせて、予測の標準偏差を学習期間 S の同じ平日・休日区分と時刻の実績・予測から推定する。

$$\hat{\sigma}_t^{(h)} = \sqrt{\frac{1}{\#S_t} \sum_{s \in S_t} (q_s - \hat{q}_t^{(h)})^2} \quad (5-2)$$

ただし、 $S_t = \{s \in S; wd_t = wd_s, time_t = time_s\}$ である。

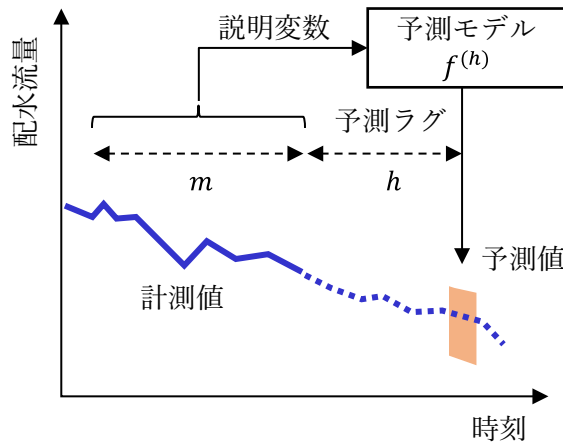


図 5-3 予測モデルの概要

併用する配水流量予測モデルを増やすと、判定性能の補完が期待される一方で、予測精度や判定性能の管理が複雑化する。多様な予測ラグを備えつつモデル数を抑えるため、短い予測ラグ ($h = 15\text{--}30 \text{ min}$)、長い予測ラグの極限 ($h = \infty$) と、それらの中間 ($h = 6\text{--}12 \text{ h}$) の3つを組み合わせることを基本とする。中間の予測ラグのモデルを複数採用することも可能であるが、それらのモデル間で予測ラグの値が近いと説明変数の重複が多く予測結果も近い値となるため、モデル数を増やしても提案手法の性能向上は小さいことが見込まれる。

関数 $f^{(h)}$ は予測ラグ h が有限の場合と無限大の場合で別の構成を用意する。有限の予測ラグ h には、説明変数と予測値の間の非線形性に対応し、また学習データへの過学習を抑制するシンプルな手法であるカーネルリッジ回帰¹⁵⁾を用いる。式(5-1)の説明変数を ξ として、これらのデータの非線形な特徴を表す特徴空間 H において回帰分析を行う。特徴空間 H は、2つのデータの内積を定める RBF (Radial Basis Function)カーネル

$$k(\xi, \xi'; \gamma) = \exp(-\gamma \|\xi - \xi'\|^2) \quad (5-3)$$

により決まる。ここで γ はパラメータである。回帰分析は、過去の計測値 q_t と、対応する説明変数 $\xi_t^{(h)}$ を学習データとして、以下を最小化する「関数」 $f^{(h)} \in H$ を求める。

$$\min_{f^{(h)}} \left[\sum_t |q_t - f^{(h)}(\xi_t^{(h)})|^2 + \mu \|f^{(h)}\|_H^2 \right] \quad (5-4)$$

ここで λ は、過学習抑制 (正則化) のパラメータであり、 $\|\cdot\|_H$ は特徴空間 H におけるノルムである。なお、正則化パラメータ μ と、RBFカーネルのパラメータ γ は、学習データを用いた交差検証¹⁶⁾によって予測精度が高くなる組み合わせを選ぶ。

長い予測ラグの極限 $h = \infty$ に対する関数 $f^{(h)}$ の構成は、予測ラグが長いと計測値と予測値との相関が小さくなることから、シンプルに平日・休日区分と時刻が同じ日時の計測値の平均値を予測とする。

$$\hat{q}_t^{(\infty)} = f^{(\infty)}(\text{wd}_t, \text{time}_t) = \frac{1}{\#S_t} \sum_{s \in S_t} q_s \quad (5-5)$$

両方の構成ともに、学習期間は1ヶ月間以上とする。学習期間は、漏水事故の発生が確認された期間を除外して設定する。除外しない場合、漏水事故発生に伴う配水流量の増加に類する予測をするモデルとなり、漏水事故発生に対する判定性能の低下が懸念される。

(3) 漏水事故発生疑いの判定

判定は、計測値 q_t の予測値 $\hat{q}_t^{(h)}$ からの逸脱 $D_t^{(h)} = q_t - \hat{q}_t^{(h)}$ に基づき、逸脱の継続時間 K と予測の標準偏差 σ を踏まえて行う (図 5-4)。学習フェーズでは、漏水事故発生のない期間の実績データから、予測の標準偏差 σ の段階ごとに逸脱事例の大きさと継続時間との関係を抽出する。データセット¹²⁾の例における、各逸脱の大きさに対する最大継続時間を図 5-5 に示す。大きな逸脱ほど最大継続時間は短く、また、予測の標準偏差 σ' が小さいときには、同じ大きさの逸脱でも最大継続時間はより短くなることが読み取れる。

上記の関係を踏まえて、継続時間 K と予測の標準偏差 σ の組み合わせに対して、逸脱の大きさの判定しきい値 $\theta_D^{(h)}$ を定める。

$$\theta_D^{(h)}[K, \sigma; \delta] = D'[K, \sigma] + \sigma \cdot \delta \quad (5-6)$$

ここで $D'[K, \sigma]$ は、実績より抽出した図 5-5 の関係において、予測の標準偏差が σ 以下かつ最大継続時間が K 以下のうちで最大の逸脱の大きさである。また、 δ は判定性能を調整する無次元のパラメータである。予測の標準偏差 σ が大きいほど逸脱も大きくなる傾向から、第 2 項の積で判定しきい値を調整する。パラメータ δ を小さく設定すると、判定の見落としが減り、判定時間は短くなる一方、漏水事故ではない逸脱に対して誤判定 (誤報) する可能性が高まる。既往研究⁴⁾と同様、許容できる誤判定の頻度 (例: 月 1 回程度) となるように調整する。

適用フェーズでは、各継続時間のしきい値を上回る逸脱がある場合に漏水事故の発生疑いと判定する。 $h = \infty$ の予測モデルについて、配水流量の予測値と、判定しきい値となる配水流量の例を図 5-6 に示す。判定しきい値となる配水流量は、短い継続時間であるほど大きくなる。

判定性能のパラメータ δ は、以下の手順により予測モデルごとに定める。まず、実績データに対して基準とする予測モデル (例: $h = \infty$) による予測・判定を適用し、誤判定の頻度に基づいてパラメータ δ を調整する。他の予測モデルについては、誤判定事例が先にパラメータ調整した予測モデルの誤判定事例に含まれるような最小のパラメータ δ を選ぶ。この手順によって、提案手法の誤判定を基準の予測モデルで調整した頻度に抑えるとともに、複数のパラメータの調整を簡便化できる。

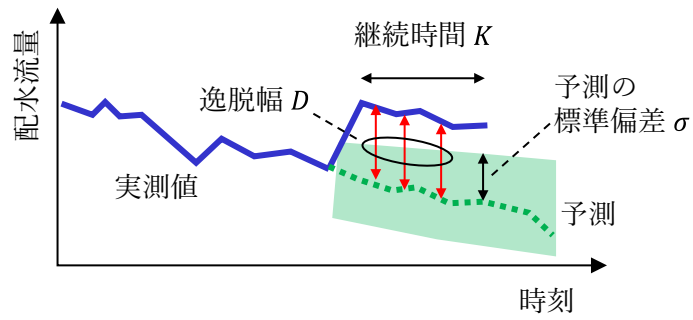


図 5-4 漏水事故発生疑いの判定の要素

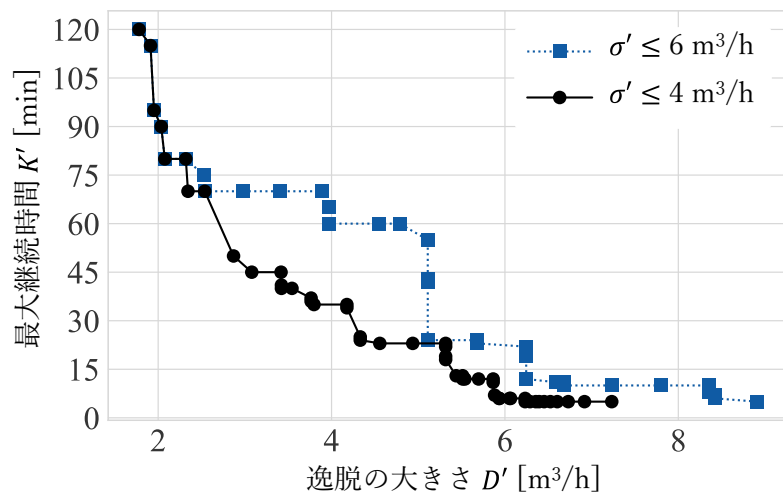


図 5-5 予測からの逸脱の大きさと継続時間 (例)

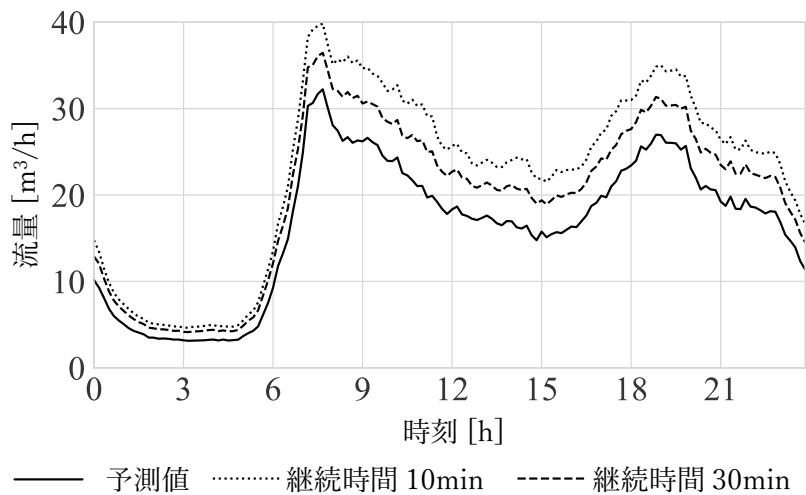


図 5-6 判定しきい値となる配水流量 (例)

第3節 模擬漏水事故データを用いた評価

(1) 方法

漏水流量が急速に増加する事故と、緩やかに増加する事故を含む様々な条件に対して、提案手法の判定性能を評価する。漏水事故発生のない配水流量をベースとして、漏水の規模、増加の緩急、発生時刻を変えた様々な条件の漏水事故発生を模擬したデータを生成して提案手法を適用する。判定性能の指標には、主に漏水事故発生から監視手法による機械的な事故発生疑いの判定までに要する時間（以下、判定時間）を用いる。判定時間は短いほど望ましいものとする。利用する配水流量予測モデルの数を変えたときの判定時間を比較することで、予測モデルを複数併用する効果を評価する。

漏水事故発生を模擬したデータは、漏水事故発生のない配水流量の実績値に対して、漏水流量の増加を模擬する値を加算することで生成する。日時 t における漏水流量を模擬する関数 $\ell[t]$ として、図 5-7 および式(5-7)に示す S 字状カーブを用いる。多様な規模の大小・増加の緩急の漏水に対する一つの類型として、単調かつなめらかに増加し、所定時間の経過後は一定流量となる S 字状カーブを選択した。

$$\ell[t] = \frac{\ell}{1 + \exp\left[-6 \frac{t - t_H}{g}\right]} \quad (5-7)$$

ここで、 ℓ [m³/h] は漏水事故の規模である流量増加が飽和したときの漏水流量、 g [h] は漏水流量増加の緩急を定める漏水増加時間である。漏水増加時間 g が大きいほど緩やかに増加する漏水となる。また、 t_H は漏水事故の発生日時に関するパラメータである。正確には、漏水流量の S 字状カーブが変曲点をとる日時、すなわち、漏水流量の増加が鈍化する日時であり、以降は漏水事故発生の中間日時と呼ぶ。共通の $t_H = 12:00$ を用いて具体的な漏水の流量、増加の緩急の 3 パターンの例を図 5-8 に示す。

漏水事故発生の判定性能の指標とする判定時間は、中間日時から監視手法による漏水事故発生疑いの判定までの時間と定義する。なお、中間日時の定義から、漏水流量は中間日時よりも前から生じているため、事故発生疑いの判定は中間日時より前となる（判定時間は負の値となる）ことがある。

現実の漏水事故の漏水流量は、S 字状の模擬カーブとは異なる変化をされると考えられる。模擬カーブのなめらかな流量増加に対して、現実には断続的な流量増加の繰り返しや、一時的な流量の減少などが起こりえる。また、模擬カーブの一定流量への収束に対して、現実には水圧のべき乗への比例（文献¹⁷⁾によれば指数は 0.5–2.8 程度）で近似される流量の増減が加わる。こうした要因は、漏水流量が模擬カーブによる近似よりも多い時間帯を生じさせる

ことから、模擬カーブのほうが漏水事故発生の判定はより難しいと考えられる。

様々な漏水事故発生の条件 ℓ , g , t_H について生成した模擬データに対して提案手法を適用する。対照実験として、模擬漏水流量を加算しない条件 $\ell = 0$ を含める。適用結果について、漏水事故発生の中間日時 t_H から判定までに要する判定時間の短縮にどの予測ラグの予測モデルが寄与したか、判定時間がどの程度短縮されたかを分析し、複数予測モデルの併用の効果を評価する。

以下、(2)で評価対象と提案手法の適用条件について述べる。(3)では緩やかに漏水流量が増加する事例を取り上げて、各予測モデルによる判定時間の差異を確認する。続いて(4)では各条件への適用結果を分析し、提案手法の有効性と漏水発生の条件が判定性能に与える影響について評価する。

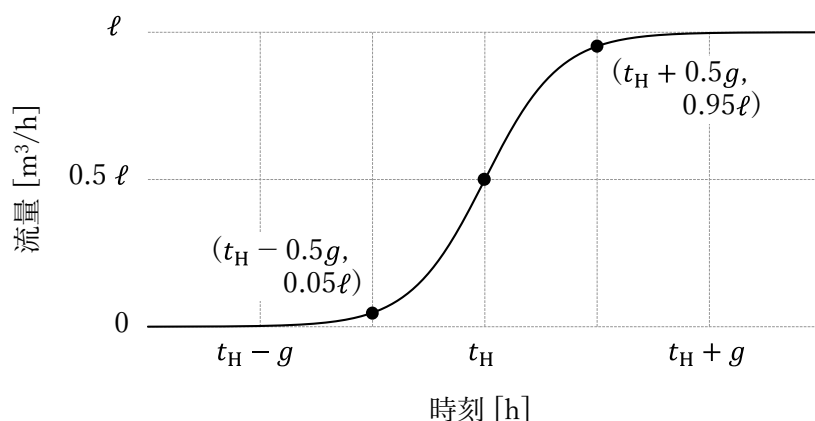


図 5-7 模擬漏水流量の形状とパラメータの関係

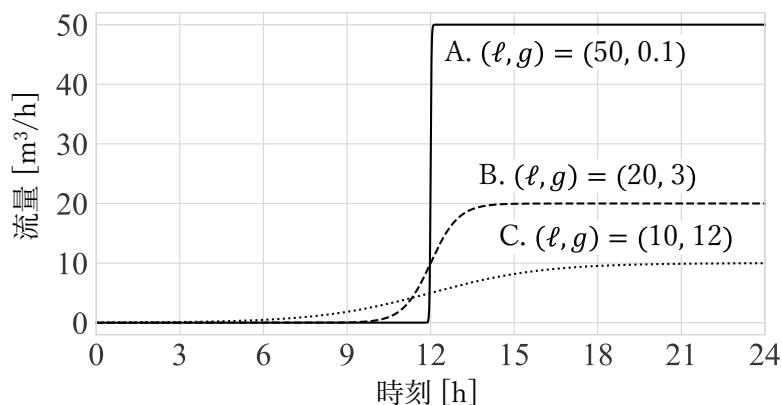


図 5-8 様々な規模・増加の緩急の漏水流量の例

(2) 対象・評価条件

模擬データ生成のベースには、Bakker が収集・公開した配水流量のデータセット¹²⁾を用いる。配水流量のパターンは地域特性によって異なるため、提案手法の汎用性を確認するねらいで、先行適用事例¹⁸⁾とは異なる国・地域のデータを選択した。その中で平均配水量が小さく、運転員による定常的な監視が難しい対象として Hulsberg 地域を選定した。対象データの概要を表 5-1 に示す。平均配水量の小さい配水区は、各需要者の偶発的な水使用が配水流量に大きく影響するため、平均配水量に比べて配水流量のばらつきが大きい。この意味で漏水事故発生の判定が難しい対象である。評価期間には、配水流量が年間の平均的なレベルとなる秋のうち、水使用量の少ない深夜の配水流量最小値の変化がなく、漏水事故の発生がないと考えられる 2010 年 10 月 16 日～22 日の 7 日間を選んだ。

表 5-1 ベースとする対象データの概要

項目	数値
区域名	Hulsberg (オランダ)
平均配水量	約 18 m ³ /h
区域人口	約 2,400 人
データ周期	5 min
データ期間	2006 年～2011 年

提案手法を対象地域に適用するときのパラメータと、評価期間における配水流量予測モデルの精度を表 5-2 に示す。共通のパラメータとして、説明変数とする計測値の期間の長さは $m = 24$ h とした。モデル 1 の短い予測ラグは、データ収集～予測処理に余裕をもたせた 0.5 h とした。モデル 2 の予測ラグは、配水流量時系列の標本自己相関 (図 5-9) で時間差最小の極小値と時間差 24 h の極大値を説明変数に含むパラメータ値として 6.0 h を選択した。各モデルは、直前 1 か月間の実績値を用いて学習した。パラメータ h の小さいモデルほど、平均絶対誤差 MAE や二乗平均平方根誤差 RMSE が小さく、また決定係数 R^2 が大きくなっており、予測精度が高いことが確かめられる。判定性能のパラメータ δ は、予測ラグ $h = \infty$ のモデル 3 で誤判定頻度を月 1 回程度に調整し、その誤判定事例に基づいて他のモデルのパラメータを定めた。

表 5-2 提案手法のパラメータと評価期間の予測モデル精度

#	パラメータ		予測精度		
	h [h]	δ [-]	MAE [m^3/h]	RMSE [m^3/h]	R^2 [-]
1	0.5	0.9	1.5	2.0	0.95
2	6.0	1.3	1.7	2.3	0.93
3	∞	0.5	1.8	2.6	0.91

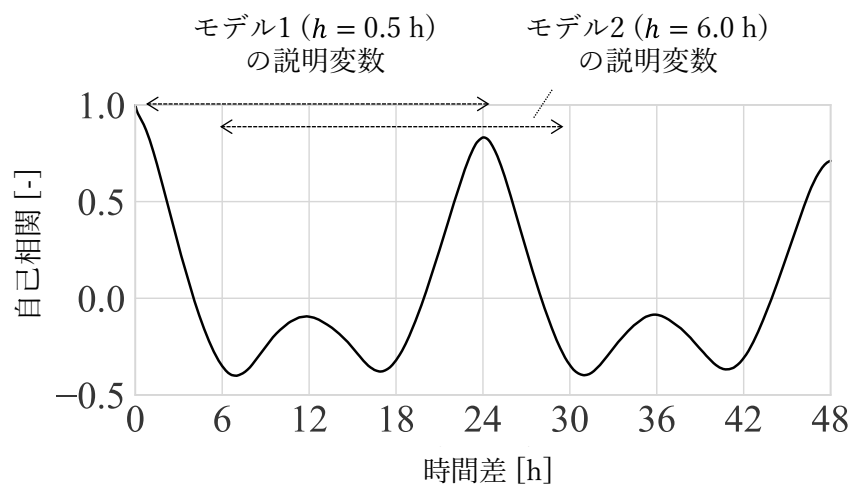


図 5-9 配水流量の自己相関と予測モデルの説明変数範囲

漏水事故発生 of 模擬データの生成条件を表 5-3 に示す。漏水規模 l について 7 通り、増加時間 g について 5 通り、中間日時 t_H について 100 通りの条件を組み合わせ、合計で $7 \times 5 \times 100 = 3,500$ 通りの模擬データを準備した。対照条件である $l = 0$ と合わせて計 3,501 通りのデータに対して提案手法を適用した。

表 5-3 模擬データの生成条件

項目	数値・条件
漏水規模 l	1, 2, 3, 6, 9, 12, 17 m ³ /h の 7 通り (平均配水量の約 5-95%)
増加時間 g	0.1, 1.5, 3, 6, 12 h の 5 通り (瞬時～半日かけて増加)
中間日時 t_H	7 日間の評価期間内を等分した 100 通り (異なる時刻・水需要での 漏水発生を模擬する意図)

(3) 判定事例

需要変化との判別が難しい、緩やかに増加する漏水を模擬するデータの判定事例を図5-10に示す。この事例の漏水流量のパラメータは、漏水規模 $l = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ (平均配水流量の約50%)、増加時間 $g = 3 \text{ h}$ 、中間日時 $t_H = 2010 \text{ 年 } 10 \text{ 月 } 19 \text{ 日 (土) } 16:30$ である。図中の黒い点は漏水流量を加算した模擬データの配水流量である。漏水流量は、破線とともに、黒い点の下に灰色の縦線として示した。各モデルの予測値を色の異なる実線で示した。特に漏水事故発生の疑いと判定した時間帯では、予測値を太線で示した。また、各モデルで漏水事故発生の疑いと判定した時刻を図中に三角形で注記した。提案手法の判定時刻は、最も早いモデルの判定時刻である。

この日の配水流量は、週末同時刻の平均値であるモデル3の予測値と比べて小さい傾向にある。モデル1, 2は、説明変数の配水流量からこの傾向を捉え、特に15時ころからはモデル3より小さい予測値となっている。しかし、モデル1 ($h = 0.5 \text{ h}$) は、説明変数の値に漏水を含む配水流量が含まれることで17時ごろより予測値が徐々に大きくなり、18時ごろにはモデル3の予測値を上回った。一方、モデル2 ($h = 6.0 \text{ h}$) は、19時ごろまで他モデルよりも小さい予測値となった。予測値が小さいほど、漏水を含む配水流量との差が大きく、漏水事故発生の疑いを判定しやすい。実際に、漏水事故発生の判定はモデル2が18:10と最も早く（判定時刻は1時間40分）、モデル1, 3は19:10（判定時刻は2時間40分）とモデル2から1時間遅れた。提案手法の判定時刻は最初に判定するモデル2と同じ18:10となる。

この事例は、夕方の水需要の増加にやや先行して漏水が増加するため、水需要が多いためなのか、漏水事故発生の疑いがあるのか判別しにくい。提案手法は、当日の配水量が少ない傾向を捉えつつも、長い予測ラグにより漏水流量増加の影響を受けにくいモデル2が他モデルよりも早く漏水事故発生の疑いを判定した。

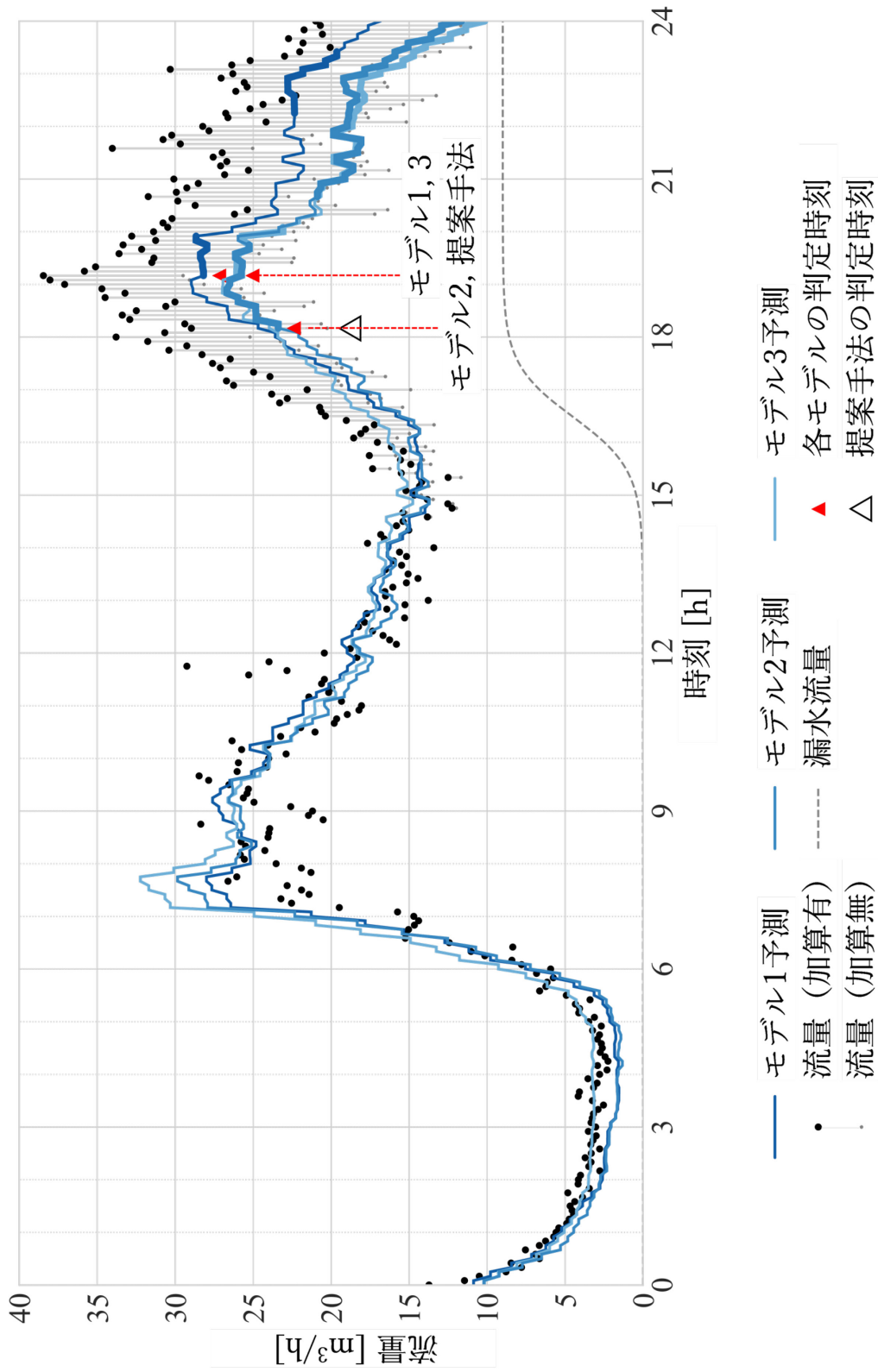


図 5-10 緩やかに増加する漏水の判定事例

($\ell = 9 \text{ m}^3/\text{h}$, $g = 3 \text{ h}$, $t_H = 2010 \text{ 年 } 10 \text{ 月 } 19 \text{ 日 (土) } 16:30$)

(4) 結果

配水流量予測モデルを併用する効果を評価するため、表 5-3 の通り生成した模擬漏水事故データに対して提案手法を適用した結果を示す。なお、対照条件である模擬漏水流量を加算しない ($\ell = 0$) 配水流量データに提案手法を適用したところ、7 日間の評価期間において全ての予測モデルで漏水事故発生の判定はなかった。短期間の評価ではあるものの、複数の予測モデルを併用することによる誤報の増加はパラメータ調整により抑制できていると考えられる。

以下、a) では判定見落としの割合、b) では判定時間の短縮に寄与した予測モデル、c) では判定時間の短縮について分析する。

a) 判定見落としの割合

急増する漏水（増加時間 $g = 0.1$ h）について、100 通りの中間日時 t_H の中での判定見落としの割合（判定時間 24 h 以内の判定がなかった割合）を表 5-4 に示す。各モデル単独での割合に加えて、全 3 モデルの判定結果を併用した提案手法の割合を併用の列に示す。各予測モデルの MAE（表 5-2 参照）よりも大きい $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上の漏水ではほぼ見落としはない。しかし、MAE よりも小さい規模 $\ell = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ の漏水では判定見落としがあり、特に MAE の最も大きい予測モデル 3 は全く判定できていない。この結果の通り、提案手法では複数予測モデルの併用により判定見落としを低減できることが示唆される。ただし、規模 $1\text{--}2 \text{ m}^3/\text{h}$ の小さな漏水については、判定は配水流量が少なくばらつきも小さい深夜となり、判定時間は長い。

緩やかに増加する漏水（増加時間 $g = 6$ h）の判定見落としの割合を表 5-5 に示す。規模 $1\text{--}2 \text{ m}^3/\text{h}$ の小さな漏水は判定できず全て見落とししたものの、規模 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ では見落としの割合は低く、また予測モデル間で判定見落としの割合に差は小さい。急増する漏水の場合と同様に、規模 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ の結果からは複数予測モデルの併用によって判定見落としを低減できたことが確かめられた。

表 5-4 急増する漏水 ($g = 0.1 \text{ h}$) の判定見落としの割合

ℓ [m^3/h]	併用	モデル 1	モデル 2	モデル 3
1	0.16	0.27	0.16	1.00
2	0.00	0.01	0.03	0.00
≥ 3	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5-5 緩やかに増加する漏水 ($g = 6 \text{ h}$) の判定見落としの割合

ℓ [m^3/h]	併用	モデル 1	モデル 2	モデル 3
≤ 2	1.00	1.00	1.00	1.00
3	0.02	0.06	0.05	0.08
≥ 6	0.00	0.00	0.00	0.00

b) 判定時間短縮に寄与した予測モデル

漏水規模 l 、増加時間 g を固定した 100 通りの中間日時 t_H に対して、各予測モデルが判定時間の短縮に寄与した割合、すなわち、判定時間が最短だった割合を分析する。漏水規模による割合の変化が大きい $l = 6, 9, 12 \text{ m}^3/\text{h}$ での結果について、各予測モデルの判定時間が他モデルと同時の場合を含めて最短だった割合を図 5-11 に示す。

図 5-11 より、モデル 1, 2, 3 の各単独と、モデル 1, 3 同時の 4 通りがほとんどの割合を占める。同時を含めるとモデル 3, 1, 2 の順に平均的な割合が大きい。これは判定性能のパラメータ δ の小さい順序 (表 5-2) と一致している。誤判定抑制のためにパラメータ δ を大きくすると判定時間が長くなる影響と考えられる。

漏水規模と増加時間の割合への影響を確認する。平均的な割合が最も大きいモデル 3 は、規模・増加時間の影響が小さく、どの条件でも 0.7 前後の割合を占める。予測ラグの短いモデル 1 は、増加時間の小さい漏水ほど割合が大きく、増加時間が長いほど小さい。また、漏水規模が大きいほど割合が大きい傾向にある。一方、予測ラグのより長いモデル 2 は、逆に増加時間の大きい漏水ほど割合が大きく、増加時間が小さいほど小さい。全体としては、平均的に割合の高いモデル 3 による判定をベースに、急速に増加する漏水は主に予測ラグの短いモデル 1 が、緩やかに増加する漏水は主に中間的な予測ラグのモデル 2 が補って判定時間を短縮している。規模の小さい漏水、増加時間の大きい漏水は、通常時の配水流量の変化と類似しており判定時間は長くなる傾向にあり、この意味で判定の難しい漏水事故であると言える。こうした条件において、予測ラグの長いモデル 2, 3 が判定時間の短縮に寄与している。

図 5-12 に図 5-11 と同じデータを判定時間が複数の予測モデルで同時だった場合は予測モデルの組み合わせとして整理した割合を示す。全 7 通りの予測モデルの組み合わせのうち、どの条件においてもモデル 1, 2, 3 の各単独と、モデル 1, 3 同時の 4 通りがほとんどの割合を占める。3つのモデルのなかで平均的な割合が最も小さいモデル 2 についても、最大 2 割強の割合で判定時間が単独で最短となっており、判定性能の向上に一定の貢献をしていると言える。

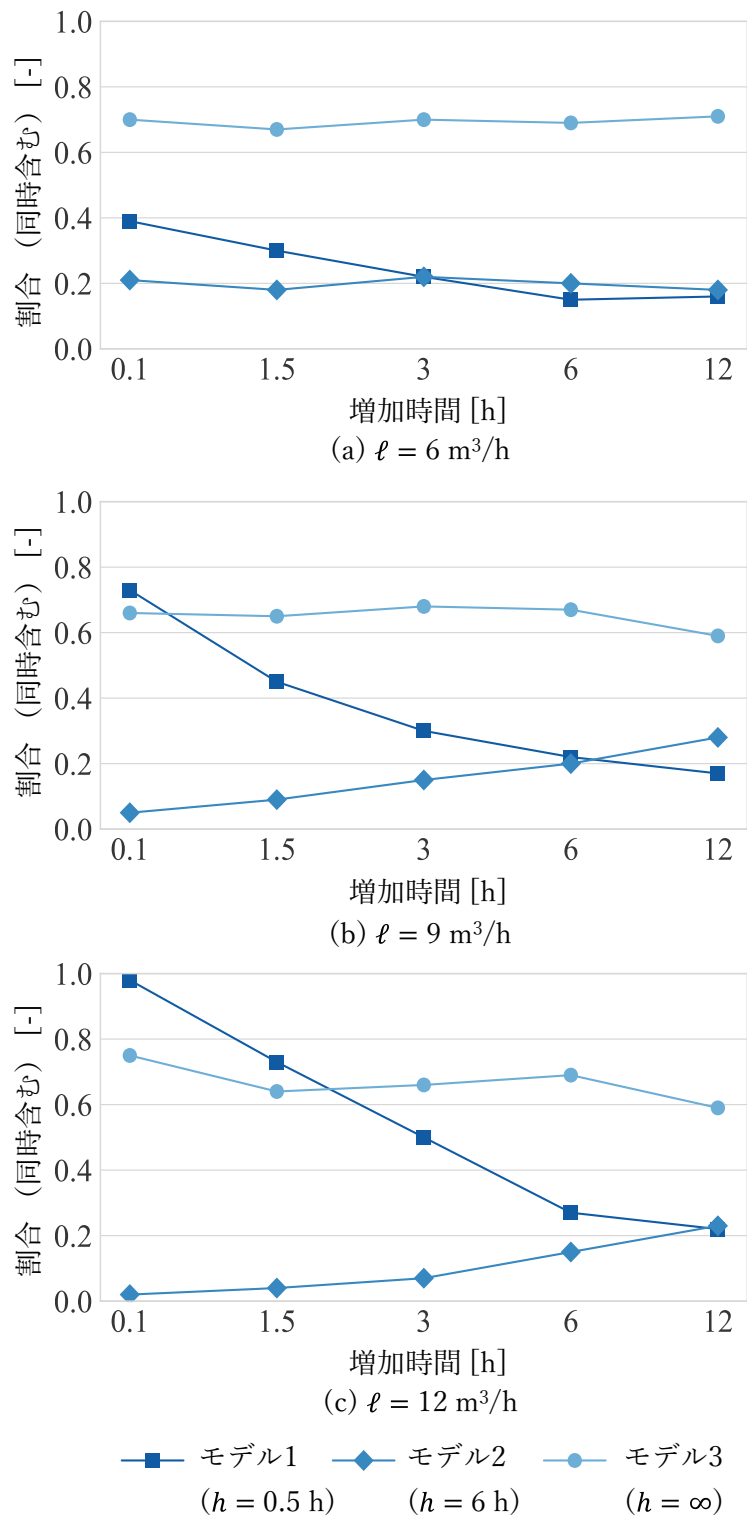


図 5-11 判定時間が最短の予測モデル ($\ell = 6, 9, 12 \text{ m}^3/\text{h}$)

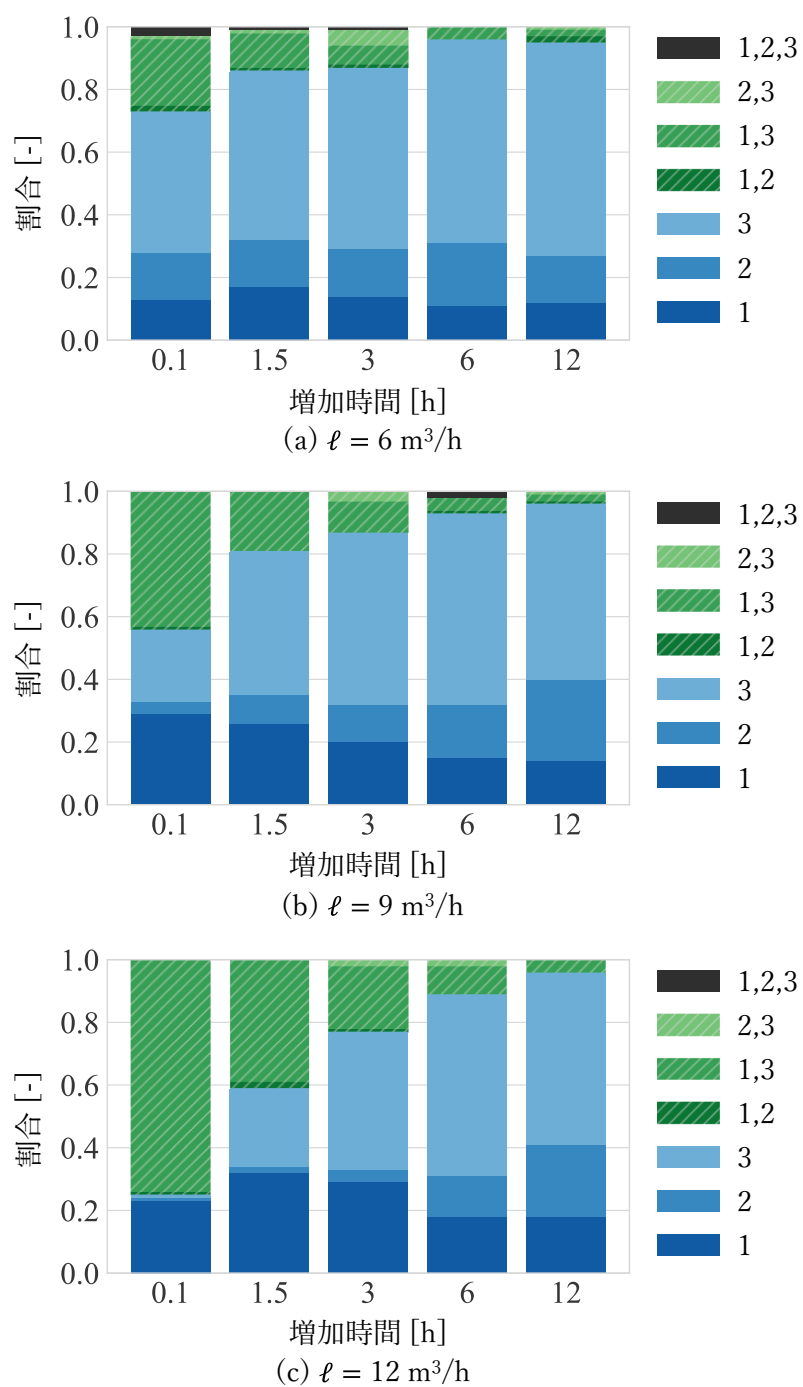


図 5-12 判定時間が最短の予測モデルの組み合わせ ($\ell = 6, 9, 12 \text{ m}^3/\text{h}$)

漏水事故の発生時刻と判定性能の関係を分析する。緩やかに増加する漏水を例に、漏水発生の中間時刻（中間日時の時刻）と判定時間の関係を図 5-13 に示す。同図 (a) には、図 5-10 の事例の条件を含む漏水規模 $l = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ 、増加時間 $g = 3 \text{ h}$ における 100 通りの中間日時について、中間時刻を横軸、提案手法での判定時間を縦軸にプロットした。なお、判定時間が最短の予測モデルをマーカーで示した。図右側には、判定時刻の分布をヒストグラムと箱ひげ図で示す。判定時間の最頻値と中央値は約 1 h である。また、参考として同図 (b) に各時刻の配水流量の平均値±標準偏差の範囲を示す。

短い判定時間（分布の下位 25%となる約 0.5 h 以下）は、中間時刻が深夜～早朝（0-6 時）のときに多い。この時間帯は配水流量とそのばらつきが小さいことから速やかな判定が行えている。予測ラグの短いモデル 1 が最短となった事例が多い。逆に長い判定時間（分布の上位 25%となる約 1.6 h 以上）は、配水流量の増加する時間帯（6-9 時、16-18 時）や、配水流量のばらつきが大きい時間帯（18-20 時）が中間時刻のときであり、水需要の増加と漏水事故発生による流量の増加との区別が難しい時間帯である。予測ラグの長いモデル 2, 3 の判定時間が最短となった事例が多い。漏水の発生時刻についても、予測ラグの短いモデル 1 は速やかな判定が可能な条件の判定に適し、予測ラグの長いモデル 2, 3 は判定の難しい条件の判定により適していると言える。

漏水事故の発生時刻と提案手法としての判定性能の関係をまとめる。配水流量とそのばらつきが小さい深夜～早朝に発生する漏水事故は早期に判定できる一方で、配水流量の増加する時間帯や配水流量のばらつきが大きい時間帯に発生する漏水事故は判定に時間がかかる傾向にある。

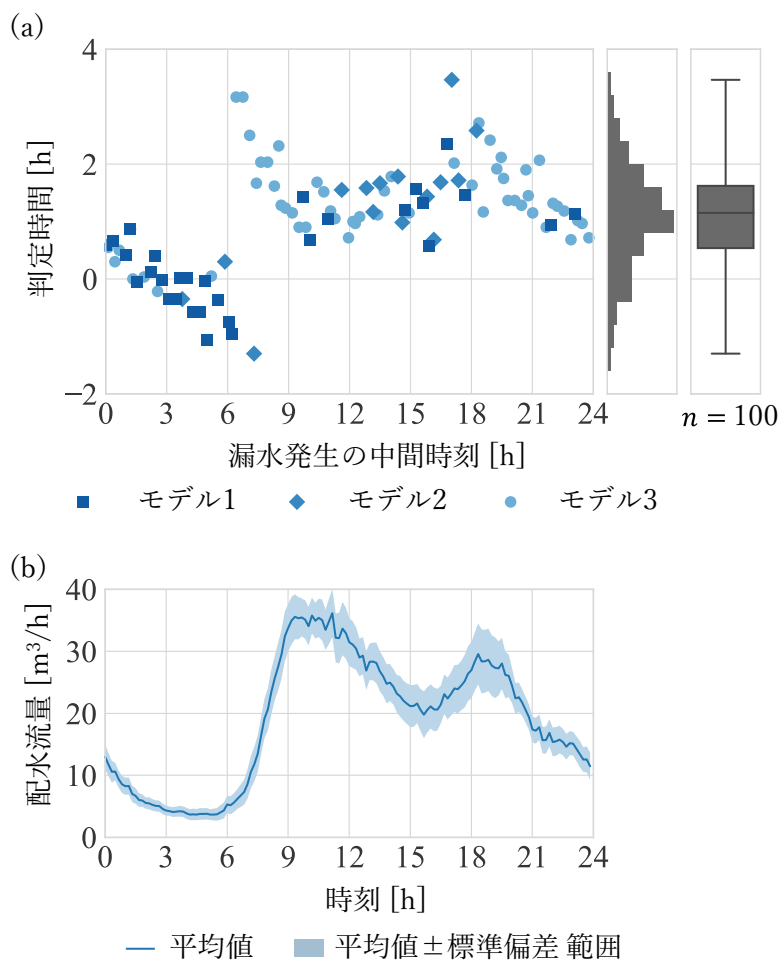


図 5-13 漏水発生の時刻と判定時間の例 ($\ell = 9 \text{ m}^3/\text{h}$, $g = 3 \text{ h}$)

(a) 判定時間とモデル (b) 配水流量の平均値±標準偏差

c) 判定時間の短縮幅

配水流量予測モデルの併用による判定時間の短縮効果を分析する。先に図 5-13 で見た通り、判定時間には漏水発生時刻などを要因とするばらつきがあることから、100 通りの中間日時に対する分布、特に中央値や四分位数などの分位値を比較する。

図 5-14 は、漏水規模 $l = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ の各増加時間に対する提案手法、すなわち 3 モデルの判定結果の併用と、予測モデル 1-3 各単独での判定時間の分布を示す箱ひげ図である。表 5-6 には特に判定時間の $\alpha = 0.25, 0.5, 0.75$ 分位値を示す。

提案手法（併用）による判定時間の分位値は、各予測モデル単独の対応する分位値以下となる。例えば判定時間の最大値（図 5-14 の箱ひげ図の上端）では提案手法（併用）はモデル 1 よりも 3-9 時間程度短い。別の例として表 5-6 中の $\alpha = 0.75, g = 12 \text{ h}$ では、併用の値 2.6 h はモデル 1-3 の値 3.0-5.9 h よりも 0.4-3.3 h 小さい。提案手法（併用）は複数の予測モデルで補いあうことでこうした判定時間短縮を実現している。また、この例のように、提案手法の分位値は各モデル単独のなかで最も小さい分位値よりも小さいことがある。100 通りの中間日時で判定時間がそれぞれ短縮され、各中間日時の判定時間による順序も変化した結果である。

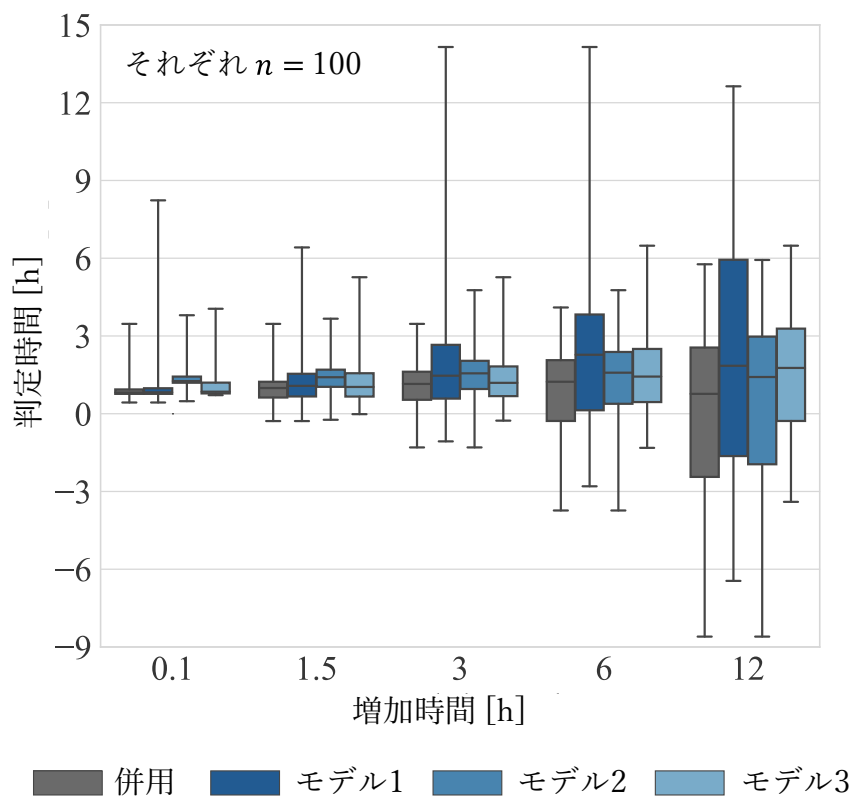


図 5-14 増加時間別での判定期間の分布 ($\ell = 9 \text{ m}^3/\text{h}$)

表 5-6 増加時間ごとの判定期間の分位値 ($\ell = 9 \text{ m}^3/\text{h}$)

α	モデル	増加時間ごとの分位値 [h]				
		0.1 h	1.5 h	3 h	6 h	12 h
0.75	併用	0.9	1.2	1.6	2.1	2.6
	1	1.0	1.5	2.7	3.8	5.9
	2	1.4	1.7	2.0	2.4	3.0
	3	1.2	1.6	1.8	2.5	3.3
0.5	併用	0.8	1.0	1.2	1.2	0.8
	1	0.8	1.1	1.5	2.3	1.9
	2	1.3	1.4	1.6	1.6	1.4
	3	0.9	1.0	1.2	1.4	1.8
0.25	併用	0.8	0.6	0.5	-0.3	-2.4
	1	0.8	0.7	0.6	0.1	-1.6
	2	1.2	1.0	1.0	0.4	-2.0
	3	0.8	0.7	0.7	0.5	-0.3

提案手法（併用）とモデル 1, 3 単独の判定時間の $\alpha = 0.25, 0.75$ 分位値の差を漏水規模ごとに図 5-15 に示す。各グラフの横軸は増加時間 g 、縦軸はモデル単独と提案手法（併用）との判定時間の分位値の差であり、予測モデル併用による判定時間の短縮幅を示す。同図 (a) $\ell = 6 \text{ m}^3/\text{h}$ の例外を除き、漏水の規模が平均配水量と比べて小さい条件 ($\ell = 3, 6 \text{ m}^3/\text{h}$) や、増加時間が大きい条件 ($g = 6, 12 \text{ h}$) において時間短縮幅は大きい。こうした条件では、提案手法によって判定時間を 1-2 h 程度短縮できる可能性が示唆される。漏水が地表に出ないケースや、地表に出たとしても夜間で通報が遅れる場合などにおいて、漏水事故への対応を早めることで被害低減に貢献しうる水準の短縮だと考えられる。なお、例外的な同図 (a) $\ell = 6 \text{ m}^3/\text{h}$ の条件は、モデル 1 では漏水発生の中間時刻の次の夜間 24 時以降に判定する漏水を、併用モデルのなかでモデル 2 で約 8 時間前の 16 時ごろに判定する事例が多いことに起因する。増加時間が大きくなると、中間日時よりも前に判定する事例の割合が増える影響で時間短縮幅が小さくなっている。

モデル 1, 3 からの短縮幅を比較すると、判定時間がやや長い $\alpha = 0.75$ 分位値（図 5-15 (a), (c)）ではモデル 1 単独からの時間短縮幅が大きく、逆に判定時間がやや短い $\alpha = 0.25$ 分位値（同図(b), (d)）ではモデル 3 単独からの時間短縮幅が大きい。短縮幅が小さい側に着目すれば、モデル 1 は速やかに判定できる漏水事故、モデル 3 は判別に時間を要する漏水事故にそれぞれ優れていると言える。

提案手法（3 モデル併用）の判定時間の分布を漏水規模・増加時間別で図 5-16 に示す。漏水規模が大きいほど、判定時間が短く、ばらつきが小さくなる。また、増加時間が大きいほど、ばらつきは大きい。一般に規模の大きい漏水ほど、影響が甚大で迅速な事故対応が求められる。提案手法の判定時間は、事故対応のための必要性に合致する変化となっていることが確かめられた。なお、漏水規模 $\ell \geq 6 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合、判定時間の中央値ほどの増加時間でも概ね 0-3 h の範囲にある。すなわち、漏水が緩やかに増加する事故では、漏水流量の増加ペースが衰えるころになってから判定できることが多いことを意味する。漏水の規模が小さい、増加が緩やかななどの難しい条件では判定まで一定の時間がかかるものの、認知されないまま週単位で漏水が継続し、多大な浄水の損失につながるケースもある⁸⁾ことから、少しでも早期に判定することは重要であり、提案手法が貢献できると考える。

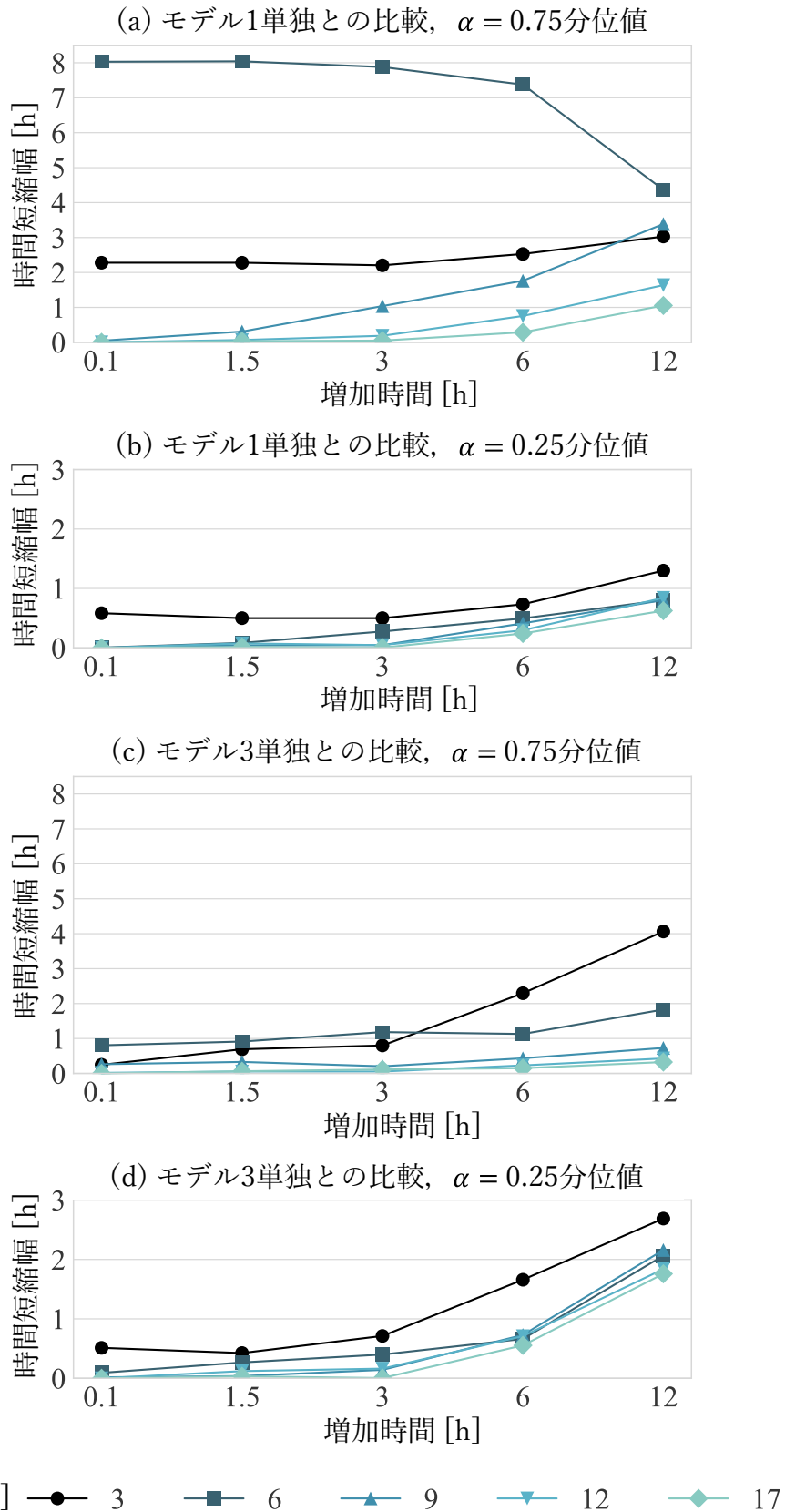


図 5-15 予測モデル併用による判定時間分位値の短縮幅

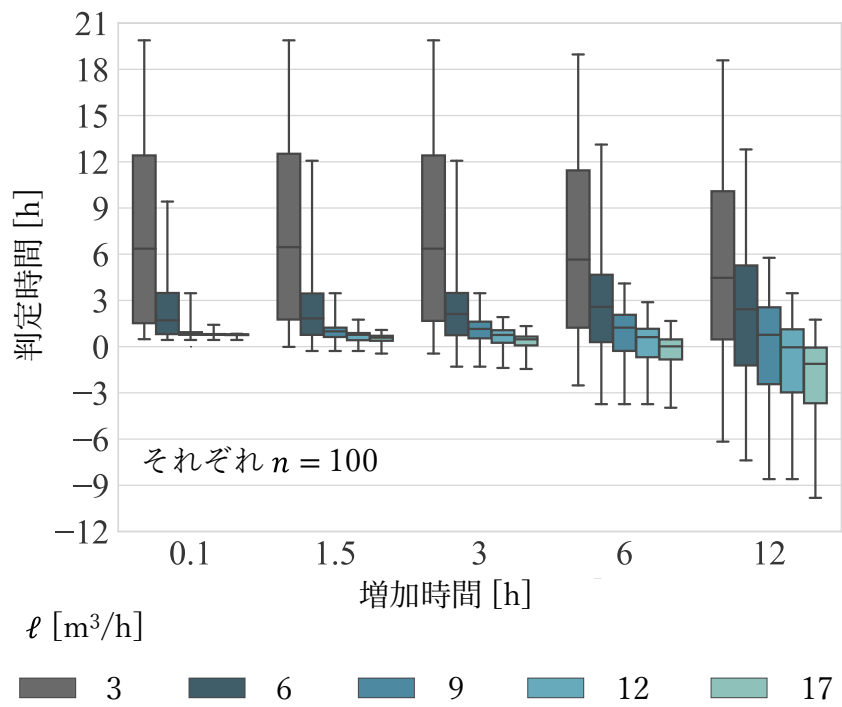


図 5-16 漏水規模・増加時間ごとの判定時間の分布

第4節 結言

本章では、予測ラグの異なる複数の配水流量予測モデルを併用し、配水流量の計測値を複数の予測値と並行して比較することで漏水事故発生に伴う配水流量の増加を早期に判定する手法を提案した。提案手法の有効性は、漏水流量を漏水規模・増加時間・中間日時をパラメータとするS字状カーブと仮定して配水流量の実績値に加算した模擬データに適用して評価した。

単独の予測モデルに基づく手法と比べて、提案手法は漏水事故発生の判定見落としを低減するとともに、判定に要する時間を短縮する効果が見込まれた。具体的には、平均 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ の小規模な配水区域を対象とした評価にて、漏水規模が $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下の小さい場合、増加時間が6 h以上の大きい場合を中心に、提案手法は単一の予測モデルを用いる手法と比べて判定時間を1-2時間程度短縮する効果が見込まれた。

一般的に、提案手法は平均配水量と比べて相対的に規模の小さい漏水や、緩やかに増加する漏水などの発生する事故を従来手法よりも早期に判定できると考えられる。漏水事故への対応を早めることで被害低減に貢献しうると考えられる。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局：新水道ビジョン，2013.
- 2) 厚生労働省：水道法の改正について，
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/suishitsu/index_00001.html. (アクセス日: 2021.04.01)
- 3) Mounce, S. R., Day, A. J., Wood, A. S., Kahn, A., Widdop, P. D. and Machell, J.: A neural network approach to burst detection, *Water Sci. Technol.*, Vol.45, No.4-5, pp.237–246, 2002.
- 4) Bakker, M., Vreeburg, J. H. G., van de Roer, M. and Rietveld, L. C.: Heuristic burst detection method using flow and pressure measurements, *J. Hydroinformatics*, Vol.16, No.5, pp.1194–1209, 2014.
- 5) Mounce, S. R., Boxall, J. B. and Machell, J.: Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.136, No.3, pp.309–318, 2010.
- 6) Ye, G. and Fenner, R. A.: Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems, *J. Pipeline Syst. Eng.*, Vol.2, No.1, pp.14–22, 2011.
- 7) Romano, M., Kapelan, Z. and Savić, D. A.: Automated detection of pipe bursts and other events in water distribution systems, *J. Water Res. Plan. Man.*, Vol.140, No.4, 0000339, 2014.
- 8) Bakker, M., Trietsch, E. A., Vreeburg, J. H. G. and Rietveld, L. C.: Analysis of historic bursts and burst detection in water supply areas of different size, *Water Sci. Technol. Water Supply*, Vol.14, No.6, pp.1035–1044, 2014.
- 9) 豊中市水道局：漏水防止基本計画，2007.
- 10) 豊中市上下水道局：漏水防止基本計画（第3版），2018.
- 11) 足立進吾，荒井康裕，小泉明，高橋信補，小熊基朗：配水流量予測モデルを複数併用する漏水事故発生の監視手法，土木学会論文集 G（環境），Vol.77, No.2, pp.49–59, 2021.
- 12) Bakker, M.: Optimised control and pipe burst detection by water demand forecasting; case studies in six locations in the Netherlands, Delft University of Technology, Dataset, [doi:10.4121/uuid:ecea5d52-36a0-40dc-8f95-07e065a1b24c](https://doi.org/10.4121/uuid:ecea5d52-36a0-40dc-8f95-07e065a1b24c), 2015. (アクセス日: 2021.04.01)
- 13) 丸山友希夫，清吾彰之，開沼泰隆，山本久志：東京都水道局における水需要予測に関する研究，日本経営工学会論文誌，Vol.59, No.1, pp.74–84, 2008.
- 14) 服部大，久保貴恵，難波諒：上水道施設の省エネ・省コスト運用に貢献する技術，東芝レビュー，Vol.69, No.5, pp.16–19, 2014.
- 15) 福水健次：カーネル法入門—正定値カーネルによるデータ解析—，朝倉書店，2010.
- 16) Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*, 2nd ed., Springer, 2011.
- 17) Farley, M. and Trow, S.: *Losses in Water Distribution Networks, A Practitioner's Guide to*

Assessment, Monitoring and Control, IWA Publishing, 2003.

- 18) Adachi, S., Takahashi, S. and Takemoto, T.: Online burst detection in water networks with an ensemble of flow prediction models, *15th Computing & Control for the Water Industry conf. 2017*, doi:10.15131/shef.data.5363854.v1, 2017.

第6章 結論

第1節 研究の成果

本研究では、熟練運転員の判断に基づく運転操作や、対象システムの特徴が記録された運転実績データに着目し、水運用の中心となる配水池の運用計画を立案する配水池運用モデル（第3章）と、そのモデルに含まれるパラメータの決定手法（第4章）を提案するとともに、漏水事故の発生を早期に判定する配水流量の監視手法（第5章）を提案した。

以下に本研究で得られた知見と成果を述べる。

第1章「序論」では、水道の現状と課題、特に減少する水需要に対して、老朽化した施設を限られた人員で維持、運用していくことが求められており、情報技術やデータの活用を通じて人材不足を補う方策が求められていることを述べた。水源から需要者へと必要な量の水を運び届ける導送配水システムの運用管理について、安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生の早期判定の課題を整理し、本研究の構成を示した。

第2章「既往研究レビューと本研究の位置づけ」では、安定的かつ効率的な水運用と漏水事故発生の監視に関して、既往研究をレビューした。安定的かつ効率的な水運用については、配水池の流入出量と水位の関係式に基づき、例を用いて流入量の平準化と水位変動の適正化の間のトレードオフ関係を示すとともに、こうしたトレードオフ関係を含む最適運用モデルの定式化と最適化アルゴリズム、モデルのパラメータ決定に関する既往研究を整理した。漏水事故発生の監視については、漏水事故の多様性と、配水系計測データの監視に基づく漏水事故発生の早期判定に関する既往研究を整理した。これらの既往研究のレビューに基づき、本研究の位置づけを示した。

第3章「運転実績データの分析に基づく配水池運用の最適化」では、需要変動に対するロバスト性確保に向けて配水池の水位変動に着目した。熟練運転員による運転実績を配水池水位変動が適正にコントロールされた手本と見なし、日常的な目標範囲を抽出した上で、目標範囲からの水位逸脱を一定程度許容しつつも抑制し、用水系配水量の平準化など他の運用条件とバランスを取る運用計画を立案する手法を提案した。ケーススタディの結果、配水池の水位変動や、水位変動と水量平準化のバランスの点で提案手法は既往研究の手法に比べて運転実績データをよく再現する運用計画を立案することを確認できた。また、提案手法は運転員よりも配水池の水位変動を適正化できる可能性が示唆された。

第4章「運転実績データの再現を基準とする配水池運用モデルのパラメータ決定」では、第3章の配水池運用モデルにおける配水池水位変動の適正化と用水系配水量の平準化の優先

度に関わるパラメータについて、両目標のバランスが実運用に適する運用計画を立案するよう、熟練運転員による運転実績データの再現を基準としてパラメータを決定する手法を提案した。実データを用いた評価の結果、簡便なパラメータ選定では配水池水位の適正化と用水系配水量の平準化のいずれかの目標に偏った運用計画となる一方、提案手法で定めたパラメータではバランスの取れた運用計画を立案できることを確認した。また、提案手法で決定したパラメータによって、半年間以上の長期間にわたって運転実績データに近い運用計画を立案できることが確かめられた。

第5章「配水流量予測モデルを複数併用する漏水事故発生の監視」では、予測ラグの異なる複数の配水流量予測モデルを併用し、配水流量の計測値を複数の予測値と並行して比較することで漏水事故発生に伴う配水流量の増加を早期に判定する手法を提案した。配水流量の予測モデルや、事故発生疑いの判定しきい値は、運転実績データから学習することで、対象区域の特徴をふまえた監視を実現する。漏水流量を漏水規模・増加時間・中間日時をパラメータとするS字状カーブと仮定して配水流量の実績値に加算した模擬データを生成し、提案手法を適用して有効性を評価した。提案手法は、漏水事故発生の判定見落としを低減するとともに、平均配水量と比べて相対的に規模の小さい漏水や、緩やかに増加する漏水などの発生を従来手法よりも早期に判定できることが示唆された。

以上、本研究では、導送配水システムの運転実績データを活用することで、安定的かつ効率的な水運用と、漏水事故発生の監視において運用管理を高度化する有用な知見が得られたと考える。提案した手法が、配水池運用モデルや漏水事故発生監視モデルの構築を通じて熟練運転員の経験に基づく知見を継承する方策となり、老朽化した施設を限られた人員で運用する一助になるものと考えられる。

第2節 今後の課題

今後の水道運営は、減少する水需要に対して老朽化した施設を限られた人員で維持、運用することが求められる。広域連携・広域化の進展により、運転員がこれまでよりも多くの施設を維持、運用する可能性が高い。こうした状況下で安定した水供給を持続していくためには、データ活用などを通じて人材不足を補う必要性がますます高まると考えられる。導送配水システムを中心とした水道の運用管理における今後の研究課題について述べる。

(1) 適用範囲の拡大

本研究では、安定的かつ効率的な水運用および漏水事故発生の監視について論じた。それぞれの提案手法について適用範囲を拡大する方向性が考えられる。

第3章および第4章で提案した運転実績データに基づく配水池運用モデルの構築とパラメータ決定手法については、本研究で取り扱った現行運用の再現・自動化だけでなく、再現を起点として運用の効率化・改善を志向する拡張が考えられる。運用の効率化・改善の項目としては、効率的な運用をねらいとするポンプ消費電力量や電力コストの低減、おいしい水の実現に向けた配水池における滞留時間の低減などが挙げられる。第2章の本研究の位置づけで論じた通り、現行運用を再現するステップを経た上で、次のステップとして運用改善を図ることで、実用に適した運用と効率化・改善効果の両立が期待される。また、別の方向性として、浄水施設内の水量管理への対象項目の拡大が考えられる。導送配水システムにおける送水量の平準化と同様に、浄水処理においても凝集沈殿や砂ろ過プロセスの安定的な運用のために浄水流量の平準化が求められる。一方で、急速ろ過方式ではろ過層の洗浄、緩速ろ過方式では砂層表面の削り取りなどのろ過池の定期的なメンテナンスをふまえて水量管理を行う必要がある。また、配水池と同様に浄水池の水位変動も管理対象である。導送配水と浄水の両面から水量管理を一貫して提案することで、効果的な水道の運用管理につながると考えられる。

第5章では、送水と配水は分離されている水道の配水系を対象とし、水需要量の変化に伴う配水流量の変化を予測した上で、予測からの逸脱として観測される漏水事故発生の監視を論じた。送水と配水が未分離の水道に対しても、送水流量に相当する変化を計測・推定して正味の配水流量を推定することで適用が可能と考えられる。

(2) データの統合活用

本研究では、監視制御システムに蓄積された運転実績データの活用方法を提案した。運転実績データは、膨大な水道施設のなかで特に重要度の高い箇所限定して常時設置されたセ

ンサの計測値が主である。今後は、監視制御システムの監視端末の操作履歴や、近年拡充されつつあるセンシングの結果、各種情報システムなどの他データと組合せた統合的な分析を通じて一層の活用を図る方向性が考えられる。

監視制御システムの監視端末の操作履歴には、熟練運転員が判断に至る過程で、いつ、どのデータを確認したか、に関する情報を含む。運転実績データに残る判断結果と組み合わせることで、熟練運転員のノウハウをより正確に把握するための重要な情報源になると考えられる。センシングの拡充の例としては、近年活用が進む配水管網における音圧監視や、試験的な導入と効果検証が進みつつある水道スマートメーターなどが挙げられる。監視制御システムの蓄積データの他にも、配水管路を含む各種施設・設備の設計情報、点検・修繕記録や、消火用水等を含めた水使用の実績、住民・使用者からの問い合わせなどのデータは、水道施設の設計・維持・運用の結果を含んでおり、運転実績データと組み合わせることにより水道施設の運用に活用できる可能性がある。

こうした新たな活用可能性のあるデータは、運転実績データに比べて水道施設の運用の細部に関する情報である。詳細な情報であるために、運転実績データに比べてデータが欠測する可能性や、計測のばらつきが大きいなどの不確かさもある。運転実績データで運用の全体像を捉えつつ、不確かさを考慮した上で細部に関するデータを統合して活用する方策の研究が求められる。

(3) 施設再構築への対応

水需要の減少と施設の老朽化と、広域連携・広域化の検討動向を受けて、水道施設のダウンサイジングや統廃合による施設再構築が進むことが想定される。

施設の再構築は、施設の大規模更新の場合と同様に、段階的に進められる可能性が高い。このため、これまで運転実績のある施設と、役割の変化した施設・新設された施設が組み合わさったシステムを運用していくことが求められる。こうした状況において、安定的かつ効率的な水運用や漏水事故発生の監視の両面において可能な範囲で再構築前の運転実績データを有効活用する方策が重要となると考えられる。システム全体や、役割の変化した施設において、新たな構成の下でも引き続き有効な知見を運転実績データから導出し、運用に活用する手法の構築が今後の課題といえる。

付録

主な記号の一覧

本研究で用いる主な記号とその意味を以下に示す．本文中では，各記号に添字等を付け加えて対象を明示することがある．例えば， $q_r[t]$ で配水池 r の時刻 t における配水量を示す．

q	配水量・配水流量 [m^3/h]
p	送水量，取水量，導水量 [m^3/h]
L	配水池水位 [m]
A	配水池の底面積 [m^2]
E	配水区域の総水使用量 [m^3/h]
r	配水池
t	時刻，時間ステップ
T	運用計画の立案対象の期間（時刻，時間ステップの集合）
y	運用計画立案の対象項目
Y	運用計画立案の対象項目の集合
X	運用計画を表すベクトル
w	配水池運用モデルの目的関数の重み係数 [h/m^2]
u	配水池水位目標範囲の上限パラメータ（分位点） [-]
l	配水池水位目標範囲の下限パラメータ（分位点） [-]
f_R	配水池運用モデルの目的関数を構成する 配水池水位の目標範囲の逸脱ペナルティ [m]
f_F	配水池運用モデルの目的関数を構成する 用水系配水量変化の絶対値の総和 [m^3/h]
α	分位点 ($0 \leq \alpha \leq 1$) [-]
$b_{r,\alpha}$	配水池 r の水位運転実績データ L_r の α 分位値 [m]
NSE	Nash-Sutcliffe 係数 (Nash-Sutcliffe Efficient) [-]
PBIAS	パーセントバイアス (Percent Bias) [%]

$AvgNSE$	運用計画立案の対象項目の Nash-Sutcliffe 係数の平均値 [-]
J_{RU}	水位変動適正化の達成度指標値（高水位の割合） [-]
J_{RL}	水位変動適正化の達成度指標値（低水位の割合） [-]
J_F	用水系配水量平準化の達成度指標値 [m^3/h]
h	配水流量予測モデルの予測ラグの調整パラメータ [h]
m	配水流量予測モデルの説明変数期間の調整パラメータ [h]
σ	配水流量予測モデルによる予測の標準偏差 [m^3/h]
δ	判定性能の調整パラメータ [-]
D	漏水事故発生疑いのある流量増加の予測からの逸脱幅 [m^3/h]
K	漏水事故発生疑いのある流量増加の継続時間 [min]
$\ell[t]$	時刻 t における模擬漏水流量 [m^3/h]
ℓ	模擬漏水流量の最大値 = $\ell[\infty]$ [m^3/h]
g	模擬漏水流量の増加時間 [h]
t_H	模擬漏水流量の発生時刻
MAE	平均絶対誤差 (Mean Average Error)
RMSE	二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error)
R^2	決定係数 [-]

数理最適化問題の定式化

本項では、第3章および第4章の運用計画立案モデルを数理最適化問題で定式化する手法について補足する。

数理最適化問題の代表的なクラスである混合整数線形計画(MILP; Mixed Integer Linear Programming)問題は、例えば下記の標準形で記述される問題である¹⁾。線形計画問題に対して、決定変数の一部に離散的な整数値のみをとる変数を含むことが特徴である。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ & \text{subject to} && \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & && x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n-k \\ & && x_j \in \mathbb{Z}_+, \quad j = n-k+1, \dots, n \end{aligned}$$

n : 決定変数の数

k : 決定変数のうち整数変数の数 ($k \leq n$)

m : 制約式の数

x_j : 決定変数 ($j = 1, 2, \dots, n$)

a_{ij}, b_i, c_j : 定数 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)

\mathbb{Z}_+ : 非負整数の集合

目的関数と制約式は全て線形式であるという厳しい条件が課されるものの、定式化の表現力は高く、多岐にわたる問題を記述できることが知られている^{2),3)}。非線形の目的関数や制約条件に対しても、しばしば実用的な近似が可能である。

以下、本研究で用いる最大値と絶対値の定式化手法について説明する。最大値 \max は式(3-6)、絶対値 $|\cdot|$ は式(3-7)において配水池の最適運用モデルの目的関数の定義に利用する。なお、これらの手法は変数の整数制約を含まない線形計画問題でも共通して利用できる手法である。

最大値 \max を目的関数に含む次の最適化問題を考える。ここで、 \mathbf{expr}_s ($s = 1, 2, 3$) は決定変数の線形式を表す。

$$\text{minimize } \max(\mathbf{expr}_1, \mathbf{expr}_2) + \mathbf{expr}_3$$

最大値の定義から、この問題は決定変数 z と制約式を追加した下記の最適化問題と同等であることが確かめられる。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } z + \mathbf{expr}_3 \\ &\text{subject to } z \geq \mathbf{expr}_1 \\ &\quad z \geq \mathbf{expr}_2 \end{aligned}$$

続いて、絶対値 $|\cdot|$ を目的関数に含む次の最適化問題を考える。 \mathbf{expr}_s ($s = 1, 2$) は決定変数の線形式である。

$$\text{minimize } |\mathbf{expr}_1| + \mathbf{expr}_2$$

この問題は、2つの非負決定変数 z_1, z_2 と制約式を追加した下記の最適化問題と同等である。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } z_1 + z_2 + \mathbf{expr}_2 \\ &\text{subject to } z_1 - z_2 = \mathbf{expr}_1 \\ &\quad z_1, z_2 \geq 0 \end{aligned}$$

なお、絶対値は、 $|\mathbf{expr}| = \max(+\mathbf{expr}, -\mathbf{expr})$ と定義できるため、先述した最大値と同じアプローチにより問題を書き換えることもできる。

参考文献

- 1) 梅谷俊治：しっかり学ぶ数理最適化—モデルからアルゴリズムまで，講談社，2020.
- 2) 藤江哲也：整数計画法による定式化入門，オペレーションズ・リサーチ，Vol.57, No.4, pp.190–197, 2012.
- 3) Williams, H. P.: *Model Building in Mathematical Programming*, 5th ed., Wiley, 2013.

謝辞

本論文は、筆者が（株）日立製作所で従事した水道分野における情報制御システムの研究開発の経験に基づき、東京都立大学大学院都市環境科学研究科で行った導送配水システムの運用管理の高度化に関する研究成果をまとめたものです。東京都立大学ならびに（株）日立製作所をはじめとする多くの関係者の皆様にご協力、ご支援を賜りました。ここに深く御礼を申し上げます。

東京都立大学大学院都市環境科学研究科准教授の荒井康裕先生には、本研究の全過程を通じて終始懇切なご指導とご鞭撻を賜りました。深く感謝を申し上げます。東京都立大学都市環境学部特任教授の小泉明先生には、研究者としての姿勢や考え方を含めて温かくご指導をいただきました。深く感謝を申し上げます。東京都立大学都市環境科学研究科教授の小根山裕之先生、同准教授の酒井宏治先生には、学位論文の審査におきまして、有益なご助言とご討論を賜りました。謹んで感謝を申し上げます。東京都立大学の稲員とよの先生、國實誉治先生（特任准教授）、山崎公子先生には、社会人学生である筆者に対し、親身にご助言、ご支援を頂きました。心より感謝を申し上げます。

本研究の機会を与えて頂くとともに、温かいご指導、ご配慮と多大なるご支援を賜りました（株）日立製作所の鮫嶋茂稔博士、西澤格博士、池田尚司博士、加藤博光博士、谷繁幸博士、佐藤達広博士、志村明俊博士、崎川修一郎氏、高橋由泰博士、森部博貴氏に心から感謝を申し上げます。（株）日立製作所 研究開発グループの水道数理研究チームの高橋信補博士、小泉賢司博士、藤井健司氏には、研究推進におけるご指導、ご助言と多大なるご支援をいただきました。深く感謝を申し上げます。（株）日立製作所の水事業に関わる皆様には、技術の実用化の観点からのご討論、ご助言や、評価実験へのご協力など多大なるご支援を賜りました。依田幹雄氏、早稲田邦夫氏、田所秀之氏、館隆広氏、武本剛氏、安富弘泰氏、小熊基朗氏、中村信幸氏、横井浩人氏、黒津健之氏、齊藤晴茂氏、栗栖宏充博士に厚く御礼を申し上げます。

本研究にあたり、運転実績データをご提供いただいた水道事業者の皆様、水道施設の運用管理業務についてご教示いただいた運転員の皆様に感謝を申し上げます。

最後に、この活動を理解し、常に支えてくれた家族に心より感謝いたします。

