

東京電機大学

博 士 論 文

需要予測の不確実性を考慮した  
熱源・電気機器の運用最適化に関する研究  
A Study on Optimizing the Operation  
of Heat Source and Electric Equipment  
Considering Uncertainty of Demand Forecast.

齋藤 正明

2023 年 3 月

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>3</b>
1.1. 研究の背景	3
1.2. 従来研究の課題	5
1.3. 本研究の目的	6
1.4. 本論文の構成	7
1.5. 参考文献	8
<b>第 2 章 熱源・電気機器の最適運用問題</b>	<b>10</b>
2.1. 最適運用を実現するための要素技術	10
2.2. 最適運用計画の先行研究事例	12
2.2.1. デマンドレスポンス（DR）の概要	12
2.2.2. ネガワットの定義とインセンティブの発生要件	13
2.2.3. デマンドレスポンスの対応に必要なとなる需要家側の機能	14
2.2.4. 先行研究事例の課題	15
2.3. 参考文献	16
<b>第 3 章 需要予測手法</b>	<b>17</b>
3.1. 概要	17
3.2. 翌日予測手法	18
3.2.1. 翌日予測の概要	18
3.2.2. 時刻別需要の予測モデル	19
3.2.3. 日積算需要量予測による補整	20
3.3. 当日再予測手法	24
3.3.1. 予測モデル	24
3.3.2. 異手法とのベンチマークによる比較評価	25
3.4. 提案する需要予測方式の精度評価	28
3.4.1. 評価方法	28
3.4.2. 結果Ⅰ 一年間の予測精度	29
3.4.3. 結果Ⅱ 代表日の予測精度	31
3.5. 参考文献	34
<b>第 4 章 再予測・再計画手法を用いた運用評価</b>	<b>35</b>
4.1. 再予測・再計画と運用シミュレーションの関係	35
4.2. 対象システム	36
4.3. 機器特性の定式化	38
4.3.1. CGS 特性	39
4.3.2. ABR 特性	40

4.3.3.	EHP 特性 .....	41
4.3.4.	温水槽・冷水槽・蓄電池特性 .....	42
4.4.	需要予測に基づく最適運用計画 .....	43
4.5.	最適運用計画に基づく運用シミュレーション .....	50
4.6.	経済性評価 .....	54
4.6.1.	方法 .....	54
4.6.2.	結果Ⅰ ー運用シミュレーション手法の評価ー .....	56
4.6.3.	結果Ⅱ ー翌日予測・当日再予測のポテンシャル評価ー .....	58
4.7.	提案手法の改善余地の考察 .....	61
4.8.	参考文献 .....	68
<b>第 5 章</b>	<b>再予測・再計画に対する需要予測誤差の確率的評価 .....</b>	<b>69</b>
5.1.	確率計画法の概要 .....	69
5.2.	需要予測誤差の確率的評価の導入方法 .....	70
5.2.1.	全体の計算手順 .....	70
5.2.2.	予測需要への誤差の反映方法 .....	72
5.3.	需要予測誤差の評価 .....	74
5.3.1.	冷温水需要予測誤差の周辺確率 .....	74
5.3.2.	冷温水需要予測誤差の同時確率 .....	76
5.4.	経済性評価 .....	80
5.4.1.	方法 .....	80
5.4.2.	結果 .....	81
5.4.3.	考察 .....	85
5.5.	参考文献 .....	90
<b>第 6 章</b>	<b>結論 .....</b>	<b>91</b>
	<b>謝辞 .....</b>	<b>94</b>
	<b>付録 .....</b>	<b>95</b>
1.	最適制御の先行研究事例 .....	95
2.	LASSO 回帰の概要 .....	100
3.	LASSO 回帰による当日再予測モデル .....	102
4.	当日再予測の月毎の適用限界時間長 .....	103
5.	運用評価における対象システムの設定について .....	104

## 本論文に付随する研究論文

1) 齋藤正明、加藤政一「蓄熱空調設備を有するビル施設の需要再予測・機器運用再計画による運用手法の評価」, 電学論 C, Vol.142, No.10, pp.1123-1134 (2022)

# 第1章 序論

## 1.1. 研究の背景

地球温暖化防止に向けて、温室効果ガスの削減が差し迫った課題である。世界的なエネルギー需要の増加が見込まれる中、持続可能な社会を構築していくためには、再生可能エネルギーへの大胆な転換等に加えて、省エネルギーの推進が依然として重要なテーマである。

国際エネルギー機関（International Energy Agency）が2021年10月に発表した「世界のエネルギー見通し2021版」<sup>(1-1)</sup>では、2100年までの世界平均気温の上昇を1.5℃以下に抑えるために、2050年にCO<sub>2</sub>排出を実質0化するには、2010年とほぼ同等まで1次エネルギー総供給量の抑制が必要としている（図1-1）。我が国でも、同時期に閣議決定された「第6エネルギー基本計画」にて、2050年カーボンニュートラル実現のためには、2030年に18%程度（対策前比）の徹底した省エネが必要とされている（図1-2）。

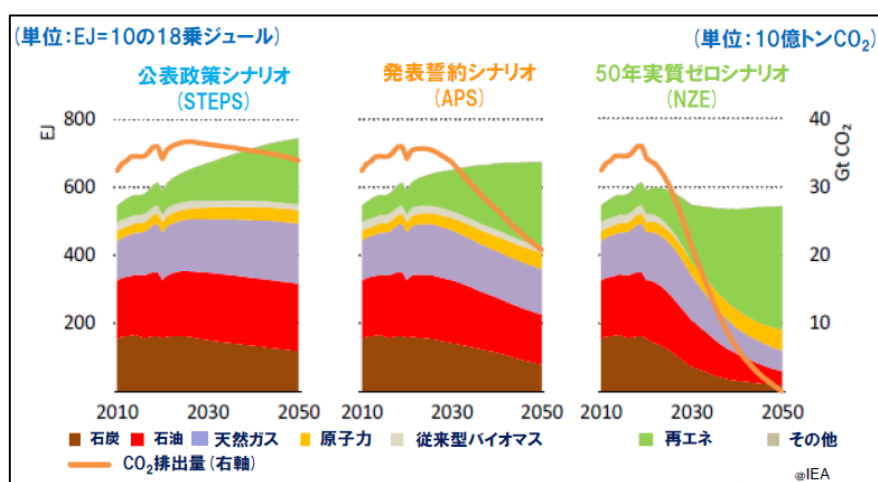


図 1-1 世界の1次エネルギー総供給の推移（燃料別／シナリオ別）<sup>(1-2)</sup>

一般社団法人 日本原子力産業協会「世界エネルギー見通し2021年版概要紹介」, pp.10より引用

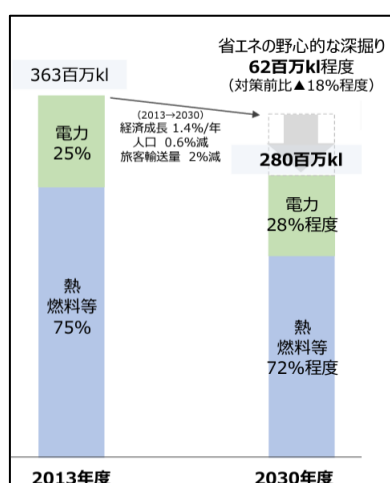


図 1-2 国内におけるエネルギー需要の目標<sup>(1-3)</sup>

経済産業省 資源・エネルギー庁「エネルギー基本計画について 第6次エネルギー基本計画

2030年度におけるエネルギー需給の見通し」, pp.68より引用



ここで、オフィスビルや病院、工場などの建物で使用されるエネルギーは、米国では国全体の約 42% を占めるといわれている<sup>(1-4)</sup>。一方、図 1-3 に示すように国内の最終エネルギー消費でも、業務他部門は 2019 年時点で全体の 16.6% を占めており、1970 年代から約 2 倍の増加率である<sup>(1-5)</sup>。このため、これからセクターでの更なる省エネルギーの推進が重要である。図 1-4 に示すオフィスビルの用途別エネルギー消費では、空調用途等の冷温水を供給する集中式熱源システムの使用エネルギー（図中の熱源と熱搬送）が、建物全体の 4 割強に及ぶ<sup>(1-6)</sup>。このような背景から、建物で使用される冷温水や電力などのエネルギー需要量を予測した上で、事前に導出した最適な運用計画に基づき、熱源・電気設備を構成する集中設置された大型機器を効率的に運用する試みが、これまでも盛んに行われてきた<sup>(1-7) ～ (1-10)</sup>。

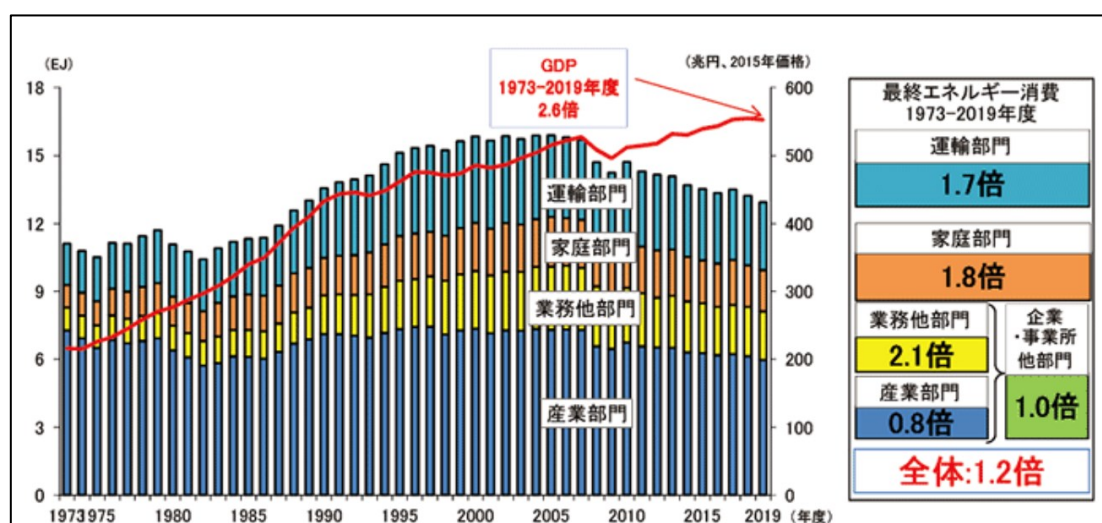


図 1-3 国内の最終エネルギー消費と実質 GDP の推移<sup>(1-5)</sup>

経済産業省 資源・エネルギー庁「エネルギー白書 2021」, pp.82 より引用

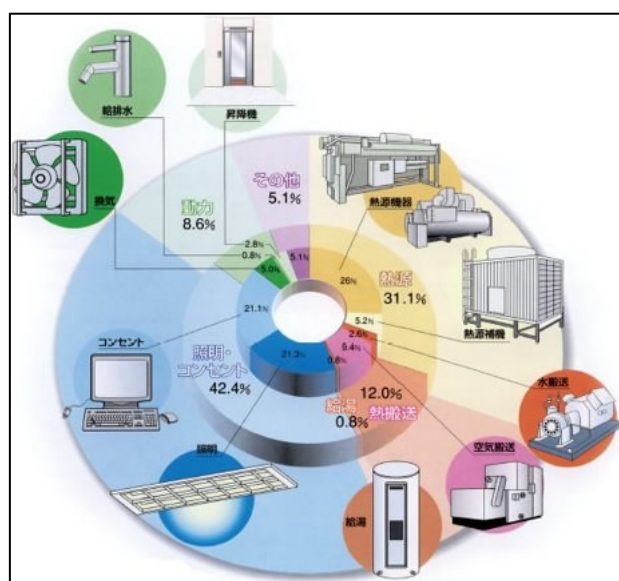


図 1-4 オフィスビルの用途別エネルギー消費<sup>(1-6)</sup>

省エネルギーセンター「オフィスビルの省エネルギー」より引用

## 1.2. 従来研究の課題

一般に、需要予測では一定の誤差が生じることが避けられず、特に冷温水では、誤差 10%を下回る程度が実用的な予測精度とされている<sup>(1-11)</sup>。今後、太陽光発電に加えて、冷温水等の熱供給用途においても自然エネルギーが積極的に活用されることで、熱源システムが供給を担う正味の熱需要量においても、天候等に起因する不確実性が増すものと想定される。このため、これら予測誤差への対処は、将来に渡る重要な課題である。予測誤差の影響を軽減するため、予測手法自体の改良による精度向上はもとより、直前の需要実績値を用いて逐次的に需要予測と運用計画を見直す再予測・再計画法の適用、予測誤差の発生確率を予め考慮した確率計画法の適用などが、これまで提案されてきた<sup>(1-12~17)</sup>。

再予測・再計画法はその基本的な仕組みが導入されてさえいれば実施が容易であるため、実務レベルでは多用されているものの、その定量的効果や適用限界については十分に検討されているとはいえない。例えば文献<sup>(1-12)</sup>においては、朝 8 時時点による予測・計画、毎時の再予測・再計画によるエネルギー利用効率などをそれぞれ比較、評価しているが、検証期間が 1 日であること、また、一般に予測精度が悪化する翌日分の需要予測が求められる蓄熱機器を対象に含めていないなど、検討範囲が限定的である。

一方、確率計画法の適用は、需要予測が困難な住宅用途での検討が先行しており<sup>(1-13~15)</sup>、相応の精度で予測が可能なビル・工場等の中・大規模施設を対象とした事例は少ない。それら数少ない文献においても、離散化した予測誤差の確率分布を 1 日の全時間で共通的に使用する<sup>(1-16)</sup>、予測値が最大になるワーストケースのみを考慮するなど<sup>(1-17)</sup>、予測誤差の組み合わせ数を削減する近似を行った上で、提案する確率計画法の効果を訴求する内容に留まっている。確率計画法では、現実に多用されている直前の需要実績を参照した再予測・再計画による“事後”的対応では不十分な場合に、“事前”にその不確実性を考慮できることに大きな利点があるが、これらの従来研究においても、再予測・再計画の適用限界を明らかにした上での検討は示されていない。

今後、更にエネルギー利用効率を向上していくためには、一般に広く用いられている再予測・再計画法の適用限界を見極めた上で、確率計画法などの需要予測誤差に対する確率的評価を有効に組み合わせ使用していくことが重要と考えられる。しかし、これら需要予測の不確実性に対する包括的な検討は、依然として不足しているというのが現実である。

### 1.3. 本研究の目的

先述の従来研究の課題を受けて、本研究では需要再予測、運用再計画、予測誤差の確率的評価の一連を考慮した、需要予測の不確実性に対する包括的な解決策を提案することを目的とする。これに対する本研究のアプローチを図 1-5 にまとめる。主に三つのステップに分類される。まず、再予測を含む独自の予測手法を立案し、需要予測精度の向上を検討する。次に、提案予測手法を用いて再計画を含む熱源・電気機器の運用シミュレーションを行い、再予測・再計画法の現状性能およびポテンシャル性能を定量化する。さらに、再予測・再計画法の定量的効果や適用限界などに基づき、提案手法の改善余地を考察する。最後に、この改善余地に対して需要予測誤差の確率的評価も加味した統合的な運用計画手法を立案し、効果検証を行う。以上の一連のプロセスを経て、需要予測の不確実性に対する包括的解決策の提案を目指す。



図 1-5 需要予測の不確実性に対する本研究のアプローチ

#### 1.4. 本論文の構成

第1章「序論」では、国内外のエネルギー戦略、消費の実態を概観したのち、大規模なビルや工場などの省エネルギー達成において重要となる需要予測に基づく熱源・電気機器の最適運用について、従来研究の課題と本研究の目的を述べる。

第2章「熱源・電気機器の最適運用問題」では、本研究のテーマである機器の最適運用を実現するために必要となる要素技術を俯瞰し、先行研究の一例を紹介するとともに、本研究の位置付けを述べる。

第3章「需要予測手法」では、本研究で立案した需要予測手法について述べる。まず、概要にて前日夜間のうちに翌日1日分の需要予測を行う翌日予測手法と、当日の最新需要実績値に基づき逐次的に需要予測を更新する当日再予測手法の関係について述べる。次に、翌日予測について、予測モデルと1日の積算需要量（以降、日積算需要量と表現する）を用いた補整による精度向上策を述べる。続いて、当日再予測の予測モデル、異手法とのベンチマーク評価について述べる。最後に、立案した需要予測手法の年間および各季節代表日の予測精度評価について論じる。

第4章「再予測・再計画手法を用いた運用評価」では、提案予測手法を用いた熱源・電気機器の運用評価について述べる。エネルギー利用効率の評価指標として、建物の電力、ガスの購入費用に着目した経済性を評価する。まず、前夜に行う翌日の予測・計画と、当日の再予測・再計画、運用シミュレーションの関係性ならびに計算手順を述べたのち、運用計画と運用シミュレーションの導出方法を記す。続いて、2種類の運用シミュレーション手法の経済性評価、予測誤差を含む翌日予測・当日再予測の運用と、需要予測が完全に真値と一致した場合（予測誤差を含まない場合）のポテンシャル運用との比較評価についてまとめたのち、再予測・再計画に基づく提案手法の改善余地を考察する。

第5章「再予測・再計画に対する需要予測誤差の確率的評価」では、前章までに示した提案手法の改善余地に対して、需要予測誤差の確率的評価を導入する。まず、再予測・再計画法と上記の確率的評価を統合するための計算方法と、確率的評価にて加味する予測誤差の反映方法について述べる。次に、冷温水需要予測誤差の周辺確率と同時確率についてまとめる。最後に経済性評価の方法、結果、および考察を述べる。

第6章「結論」では、これまでに得られた需要予測の不確実性に対する包括的解決策をまとめるとともに、今後の更なるエネルギー利用効率の向上に向けた課題をまとめる。

## 1.5. 参考文献

- (1-1) IEA 「World Energy Outlook 2021」 (online)、 <https://www.ica.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- (1-2) 一般社団法人 日本原子力産業協会「世界エネルギー見通し 2021 年版概要紹介」 (online), pp.10, [https://www.jaif.or.jp/weo\\_2021](https://www.jaif.or.jp/weo_2021)
- (1-3) 経済産業省 資源・エネルギー庁「エネルギー基本計画について 第6次エネルギー基本計画 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」 (online), pp.68, [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)
- (1-4) Amory B. Lovins, Rocky Mountain Institute : “Reinventing Fire : Bold Business Solutions for the New Energy Era”, pp.182, (2012) (in Japanese)  
エイモリーB.ロビンズ・ロッキーマウンテン研究所:「新しい火の創造: エネルギーの不安から成果を解放するビジネスの力」山藤泰訳 (ダイヤモンド社), pp.182 (2012)
- (1-5) 経済産業省 資源・エネルギー庁「エネルギー白書 2021」 (online), pp.82  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>
- (1-6) 省エネルギーセンター「オフィスビルの省エネルギー」 (online), [https://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/index.html](https://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html)
- (1-7) A. Kinbara, S. Kurosu, F. Miyasaka, and K. Kamimura : “Prediction for Energy Loads of Air Conditioning System”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.26, No.6 pp.721-728 (1990) (in Japanese)  
金原昭臣・黒須茂・宮坂房千加・神村一幸:「ARIMA モデルによる空調熱負荷予測」, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.6 pp.721-728 (1990)
- (1-8) K. Kamimura, N. Suzuki, A. Kinbara, and S. Kurosu: “Prediction for Energy Loads of Air-Conditioning System”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.27, No.7 pp.827-833 (1991) (in Japanese)  
神村一幸・鈴木信康・金原昭臣・黒須茂:「空調熱負荷予測の実用化」, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.7 pp.827-833 (1991)
- (1-9) Y. Toda, and M. Kawashima: “Optimal Control with Thermal Load Prediction”, Technical papers of annual meeting, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, pp.1389-1392 (2005) (in Japanese)  
戸田芳信・川島実:「負荷予測制御を伴う最適制御」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1389-1392 (2005)
- (1-10) K. Kawai, N. Sagara, H. Takeda, T. Ueki, and A. Matsuda: “The Influence of Accuracy of Heat Load Prediction Algorithms on the Electric Consumption and Charge of Chillers Installed in Thermal Storage Systems”, Transactions of AIJ. Journal of architecture, planning and environmental engineering, No.537 pp.77-84 (2000) (in Japanese)  
河合和彦・相楽典泰・武田仁・植木智之・松田聡浩:「蓄熱式空調システムの熱負荷予測精度が熱源機器の電力消費量および電力料金に及ぼす影響」, 日本建築学会計画系論文集, No.537 pp.77-84 (2000)
- (1-11) Upali Samarasinghe HERATH KUMARAGE, S. Hashimoto, and H. Kawaguchi: “Examination of Essential Factors for Chilled and Hot Water Demand Load and Adaptive Load Prediction Using Neural Networks”, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.24, No.74 pp.13-21 (1999) (in Japanese)

Upali Samarasinghe HERATH KUMARAGE・橋本周司・川口 八郎：「冷温水需要負荷の決定要因の検討とニューラルネットワークを用いた適応予測」, 空気調和・衛生工学会 論文集、Vol.24, No.74 pp.13-21 (1999)

- (1-12) A. Wada, Y. Akashi, D. Sumiyoshi, and T. Hayashi: “Development of Optimization Method for Air-Conditioning System Operation with Considering Thermal Load Prediction Error”, Technical papers of annual meeting, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, pp.393-396 (2005) (in Japanese)

和田晃史・赤司泰義・住吉大輔・林徹夫：「負荷予測の誤差を考慮した空調システム運用の最適化手法の開発」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.393-396 (2005)

- (1-13) H. Kuraishi, T. Hayashi, Y. Fujii, K. Yamaji, and A. Yokoyama: “Optimum Operating method of a Small Scale Cogeneration System for Home Use with Stochastic Dynamic Programming”, The papers of Technical Meeting on Power Systems Engineering, IEE Japan, Vol. PE-04, No.86-100 pp.51-56 (2004) (in Japanese)

倉石英明・林武人・藤井康正・山地憲治、横山明彦：「確率動的計画法を用いた家庭用 CGS の最適運用」, 電気学会電力技術研究会資料, Vol. PE-04, No.86-100 pp.51-56 (2004)

- (1-14) Y. Tanaka, and M. Fukushima: “Optimal Operation of Cogeneration Systems by Stochastic Programming”, IEEJ Trans. B, Vol. PE-04, No.86-100 pp.51-56 (2004) (in Japanese)

田中洋一・福島雅夫：「確率計画法によるコージェネレーションシステムの運用最適化—リコースと機会制約を用いた定式化—」, 電学論 B, Vol.129, No.6 pp.765-775 (2009)

- (1-15) S. Ozoe, Y. Tanaka, and M. Fukushima: “A Two-Stage Stochastic Mixed-Integer Programming Approach to the Smart House Scheduling Problem”, IEEJ Trans. B, Vol.131, No.11 pp.885-895 (2011) (in Japanese)

尾添俊介・田中洋一・福島雅夫他：「リコース付き確率混合整数計画法によるスマートハウスの運用最適化」, 電学論 B, Vol.131, No.11, pp.885-895 (2011)

- (1-16) S. Kitamura, K. Mori, Y. Izui, T. Miyamoto, and S. Takai: “Operation Optimization of Factory Power Generation Plant Considering an Uncertainty”, IEEJ Trans. C, Vol.133, No.4 pp.822-830 (2013) (in Japanese)

北村聖一・森一之・泉井良夫・宮本俊幸・高井重昌：「不確実性を考慮した工場自家発プラントの運転最適化」, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.4 pp.822-830 (2013)

- (1-17) J. Nishiguchi, A. Kurosaki, and C. Kaseda: “Robust Optimal Operation for Building HVAC Systems with Uncertainty in Demand Prediction”, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers , Vol.27, No.5 pp.200-206 (2014) (in Japanese)

西口純也・黒崎淳他・総田長生：「需要予測の不確実性を考慮したロバスト運転計画」, システム制御情報学会論文誌, Vol.27, No.5 pp.200-206 (2014)

## 第2章 熱源・電気機器の最適運用問題

### 2.1. 最適運用を実現するための要素技術

本章では、本研究のテーマである熱源・電気機器の最適運用を実現するために必要となる要素技術を俯瞰し、先行研究の一例を紹介するとともに、本研究の位置付けを述べる。

最適運用を実現するための要素技術を表 2-1 にまとめる。この表は対象の機器構成や制約条件別に、要素技術の要否をまとめたものである。要素技術は需要予測、運用計画、最適制御に分類した。需要予測は運用計画の導出に必須である。また、運用計画は後述のように、複数時断面の機器運用を最適化する場合や、予め運用状態を把握する必要がある場合には必須である。ここで、運用計画では評価する対象が最低でも数時間以上に及ぶため、機器の運転/停止状態を決定変数に含む場合が多い。この状態は、運転(1)、停止(0)といった離散変数にて表現されるため、このような離散変数を含む運用計画は、混合整数計画問題となる。混合整数非線形計画問題は一部の例を除き、統一的な解法は知られていないため、通常は機器性能などを線形近似したうえで、上記計画を導出するのが一般的である。このため、事前の計画で考慮できない機器の非線形特性、需要や気温などの実績値などを参照して、時々刻々の状況にあわせて、より細かな制御設定値を最適化する最適制御も必要な要素である（最適制御では、事前計画で求めた機器の運転/停止状態を前提条件とすることで、離散変数を含まない連続値最適化問題として取り扱える。このため、機器の非線形特性なども考慮が可能である）。以上のように、熱源・電気機器の最適運用を実現するためには、需要予測、運用計画、最適制御を組み合わせた階層的な運用支援が必要である。なお、表 2-1 には該当する先行研究事例の記載箇所を付記した。本研究との関連性が比較的低いため、予測・計画を用いない最適制御の事例については付録「1. 最適制御の先行研究事例」にまとめる。

表 2-1 において、蓄熱槽などのエネルギー貯蔵機器が存在する対象では、何時にどれだけの量を貯蔵/放出するといった事前決定が必要となるため、一般には1日単位以上の需要予測、運用計画が必要

表 2-1 最適運用の実現に必要な要素技術

要素技術	機器構成		その他
	エネルギー貯蔵機器有	エネルギー貯蔵機器無 <small>                     瞬時断面のみでは考慮できない                      機器の運用制約あり                 </small> <small>                     瞬時断面のみでは考慮できない                      機器の運用制約なし                 </small>	
需要予測 (数時間以上)	○	○	○
運用計画 (数時間以上)	○	○	○
最適制御 (瞬時)	○	○	○

本研究の応用可能範囲

付録1  
最適制御の先行研究

2.2.  
最適運用計画の先行研究

となる（当然、最適制御も運用計画に基づき機器を実際に最適運用するうえで必要な要素である）。一方、エネルギー貯蔵機器が存在しない場合でも、起動時間が長い（例えば吸収式熱源機）、1日の発停回数に上限がある、一定時間内の出力変化の許容量が小さいなど、瞬時断面のみでは考慮できない機器の運用制約が課される場合には、需要予測や運用計画が必要となる。ただし、この場合にはエネルギー貯蔵機器を有する事例に比べて、予測・計画の対象時間長が短くても構わない場合が多い。エネルギー貯蔵機器が存在しない、かつ上記の運用制約がない一部の対象においては（例えば、起動停止が早い電気駆動のヒートポンプのみで構成される場合など）、需要予測、運用計画といった要素がなくても、時々刻々の状況に基づく最適制御のみで、運用の最適性を担保できる場合がある。また、上記の機器構成や制約による区分以外でも、例えば契約電力の超過を抑止する、その他の運用面での制約がある場合には、需要予測や運用計画が必要となる場合がある。特に、近年取り組みが進んでいる広域的なエネルギー融通を理想的に実現するには、事前にこれらの見積りが可能な予測・計画が重要な要素となる（この事例については次節で述べる）。

以上、需要予測、運用計画、最適制御に分類して、最適運用を実現するための要素技術について論じた。前章で述べたように、本研究の目的は需要予測の不確実性に対して包括的な対策を提案することである。また、第4章で述べる運用シミュレーションは、事前に導出した運用計画を前提条件として、時々刻々の需要実績値を反映した最適制御に一部応用が可能である。このため、本研究の応用可能範囲は需要予測が必要となる事例、ならびに最適制御の一部を含む範囲となる。なお、ここで一部としたのは、本研究の運用シミュレーションでは機器性能を線形近似しており、この非線形特性や、外気温などによる性能変化までは定式化に含めていないためである。これを実現するには、本研究の運用シミュレーション手法に対して、付録「1. 最適制御の先行研究事例」に示す粒度の定式化を統合する必要がある。しかし、これについては本研究の主旨から逸脱するため、本論文ではこれ以上の言及は行わない。



## 2.2. 最適運用計画の先行研究事例

本節では、最適運用計画の先行研究事例を紹介する<sup>(2-1)</sup>。広域的なエネルギー融通の一例として、需要家の電力削減量を仮想的な発電量（ネガワットと呼ばれる）とみなして、電力系統内で融通するデマンドレスポンス（Demand Response：以降 DR と略す）を対象とした先行研究事例である。近年では、このような取り組みを VPP（Virtual Power Plant）とも呼ぶ。

### 2.2.1. デマンドレスポンス（DR）の概要

DR には、時間帯別に電力単価を変更する料金型メニューと、需要家が創出したネガワットに対してインセンティブが付与されるインセンティブ型メニューが想定されている。インセンティブ型メニューのひとつである CCP（Capacity committed program）は、需要家がネガワットと、その対価であるインセンティブを事前に入札する方式で、各需要家に分散したネガワットを取りまとめて上位の系統運用者と調整を行うアグリゲーターがこれらの情報を予め把握できる点で、電力利用の全体的な最適化に有効な方法である。

図 2-1 に、CCP における関係者間の情報の流れを示す。系統運用者からの DR 要請に応じて、アグリゲーターは需要家から入札されたネガワットを、インセンティブの入札価格（需要家が 1kWh のネガワットコミットに求める対価）が安い順に DR 要請に見合う量まで加算して、最終的な約定価格と、各需要家の入札に対する約定可否を判定する。ここで、需要家側では BEMS（Building and Energy Management System）を用いて、アグリゲーターに対する入札条件の決定、約定結果に基づく最適運用計画、DR 実施時間中のネガワットの制御などを行う。

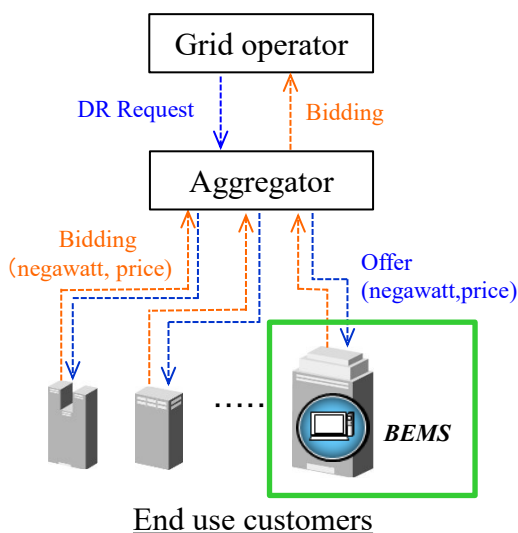


図 2-1 CCP における関係者間の情報の流れ

### 2.2.2. ネガワットの定義とインセンティブの発生要件

CCPにおけるネガワットの定義を図 2-2 に示す。棒グラフは DR 対象需要家の時刻別受電量の一例である。CCP では、DR 非実施日の平均受電量に基づくベースラインが、各需要家および各時間帯で定義される。ベースラインはネガワット算出の基準値であり、実際の受電量との差がネガワットとして認定される。

時刻 T1 は受電量が目標値（ベースラインから約定したネガワット量を差し引いた値）を若干下回っているため、この場合にはインセンティブを受け取れる。逆に、時刻 T2 では受電量が目標値より多い。この場合は事前にコミットした量のネガワットを満たしていないため、一切のインセンティブが受け取れない。さらに、時刻 T3 は目標値に対して過剰に受電量を削減してしまった例である。このような場合でも、需要家は事前に約定した量のネガワットに応じた額のインセンティブしか受け取れない。平時の平均的な受電量がベースラインであり、これより受電量を減少させることでネガワットを創出できるため、この対応には負荷の抑制や非電気式熱源を稼働するなど、平時に比べて追加のコスト（負荷抑制等に伴う金銭面以外での負担も含む）を要するのが一般的である。このため、上記の目標値に対する受電削減量の未達（時刻 T2 の例）、または過剰な受電量の削減（時刻 T3 の例）は、全体のコスト悪化を引き起こす要因となる。従って、CCP では目標値に対して過不足なくネガワットを創出するために、受電量の正確な予測と管理が必要となる。

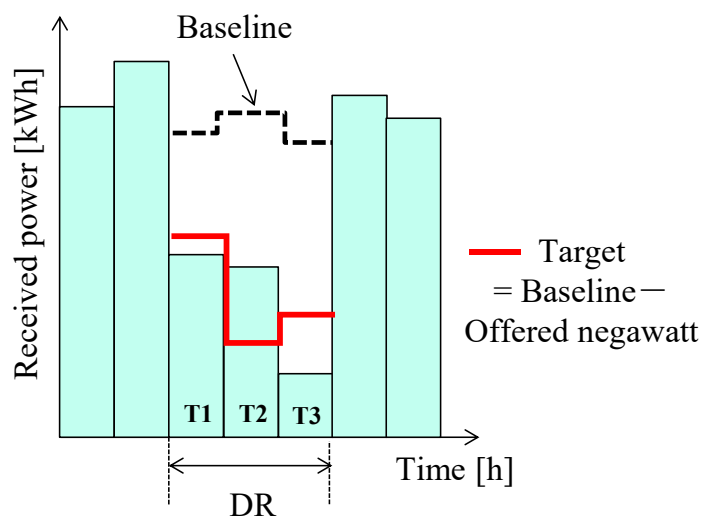


図 2-2 ネガワットの定義

### 2.2.3. デマンドレスポンスの対応に必要な需要家側の機能

DR のタイムスケジュール例を図 2-3 に示す。これは、経済産業省「次世代エネルギー・社会システム実証地域 横浜スマートシティプロジェクト (YSCP)」の DR 実証事業にて、実際に採用されたものである<sup>(2-2)</sup>。以下に、CCP 実施に向けて需要家側 BEMS で必要となる機能をまとめる。

(1) 最適入札支援機能 DR 実施の前日 9 時頃に、アグリゲーターから各需要家 BEMS に翌日のベースラインが通達される。各需要家 BEMS の最適入札支援機能では、翌日需要の予測、運用計画によるネガワットと運用コストの評価を行い、最適な入札条件を算出する。この結果に基づき、前日 12 時まで

(2) 運用計画機能 DR 実施の前日 14 時頃までに、アグリゲーターから各需要家 BEMS に約定可否と約定価格が送信される。各需要家 BEMS では、最新の気象予報値に基づき翌日需要の予測を更新し、約定条件を満たしつつ、1 日の運用コストを最小とする翌日の運用計画を導出する。

(3) 受電量制御機能 当日は各需要家で計画に基づく運用を実施、17 時から 20 時までの DR 対象時刻で需要増加などが生じた場合には、BEMS の受電量制御機能によって約定したネガワットを確保する。

DR に参加して、電力の広域融通に貢献しつつ需要家の利益を最大化するには、上記の機能が必要となる。また、これらを実現するためには、需要予測や運用計画といった要素技術が必須である。特に、CCP ではネガワットの目標値を確実に満たしつつ、かつ過剰なネガワットを創出しないように、前日からの受電量の予測と運用計画による精度の高い入札、当日の計画と制御による受電量の厳格な管理と調整が必要となる。

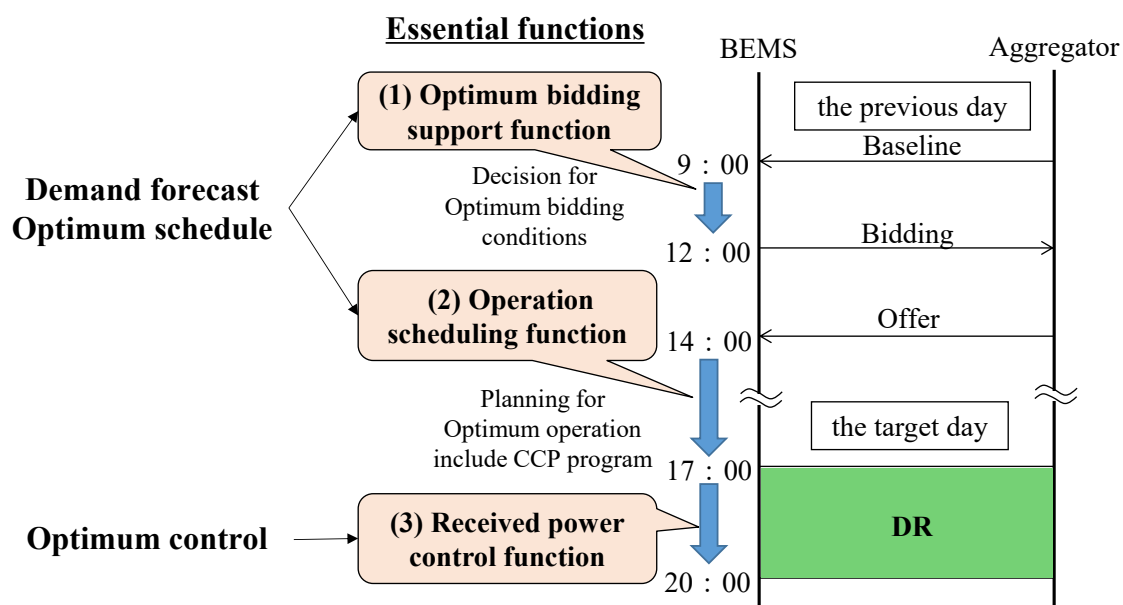


図 2-3 DR のタイムスケジュール例

#### 2.2.4. 先行研究事例の課題

ここでは、これまでに述べた先行研究事例の課題について述べる。図 2-4 に需要予測誤差がある場合の必要削減量を示す。同図の破線は前日の入札時に予測した電力需要、赤い実線はこれに基づき入札した受電量の目標値、黒い実線は当日の実績需要を表している。図示したように、実績需要が入札時の予測需要を上回る場合、目標値を満たすためには、より多量の電力を削減する必要が生じる。先述のように電力の削減には追加のコストを要するため、仮に目標値を満たしてインセンティブを享受できた場合でも、実績需要の増加度合いによっては全体的なコストは悪化してしまう可能性もある。また、逆に実績需要が入札時の予測需要より低下した場合には、実際にはより多量のネガワットが創出でき、より多額のインセンティブを取得できた可能性もあるため、この機会損失が生じる。このように、入札時には電力需要の予測誤差も加味した上で、最適な入札戦略を決定することが重要である。

一方、当日の運用再計画時点においては、仮に電力需要の増加傾向が予見できた場合には、事前に運用戦略を変更することも可能である（例えば、エネルギー貯蔵機器を活用して電力削減量を増加するなど）。しかし、この場合には、当日の直前実績値を加味した再予測手法を適用する必要がある。仮に直前実績値を用いない予測の場合、一般には再予測時に更新される情報は予報気温などの気象予報値のみとなるため、当日の需要変化に即応した予測需要の更新は困難である。

以上、本節では最適運用計画の先行研究事例として、DR による広域的なエネルギー融通の一例を紹介した。この事例においても、需要再予測、運用再計画、予測誤差の確率的評価といった、本研究の主題である需要予測の不確実性に対する包括的な対応が重要となる。

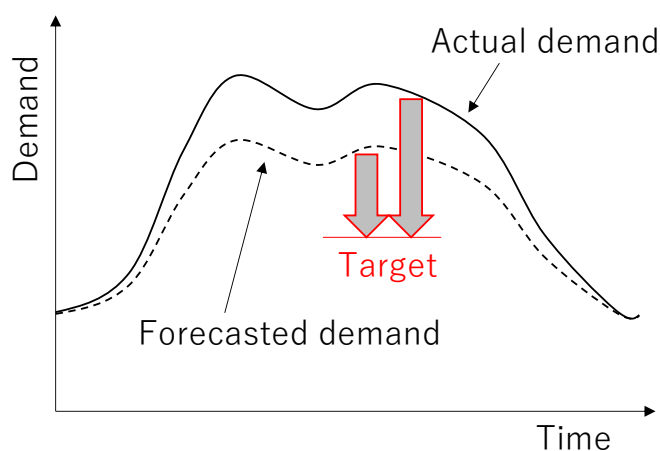


図 2-4 需要予測誤差がある場合の必要削減量

### 2.3. 参考文献

- (2-1) M. Saito, D. Murayama, M. Murai, Y. Iino, N. Hisada, H. Koyanagi, and N. Kobayashi: “Development of Building Energy Management System for Demand Response”, Proceedings of annual conference of Electronics, Information and Systems Society, I.E.E. of Japan, GS2-6, pp.1456-1461 (2014) (in Japanese)  
齋藤正明・村山大・村井雅彦・飯野穰・久田永子・小柳秀光・小林信郷：「デマンドレスポンスに向けたビル・エネルギー管理システムの開発」，平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, GS2-6, pp.1456-1461 (2014)
- (2-2) 横浜市ホームページ：「横浜スマートシティプロジェクト（Y S C P）」(online)  
<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/ondanka/etc/yscp/>

## 第3章 需要予測手法

### 3.1. 概要

需要予測手法の概要を図 3-1 に示す。提案予測手法は、翌日 1 日分の需要予測を行う「翌日予測」、当日の直前需要実績も参照して逐次的に以降の予測値を見直す「当日再予測」に分類される。本研究では、1 日の始点は一般に電力単価が夜間単価に移行する 22 時とし、時刻の最小単位は 30 分とする。

翌日予測では、時刻別、日種別に構成される重回帰式を用いて、予測対象時刻の予報気温、同時刻の前回需要実績値（前日は必ずしも予測対象日と同一日種とは限らないため、日種が同じ「前回」の日の意味）を参照して、翌日 1 日分の時刻別の需要予測を行う。なお、一般に年始などの長期間の休日明けは特異な需要になりやすい傾向があるが、この該当日は少なく、また本研究では、この評価に足る複数年の需要データを入手できなかったため、上記の日種は「平日」と「休日」に限定する。翌日予測では、さらに翌日 1 日分の需要量を積算した日需要量予測により、上記の時刻別の需要予測値を補整することで、最終的な翌日 1 日分の需要予測値を得る。この日需要量予測は、スパースモデリングの一種である LASSO 回帰（Least Absolute Shrinkage and Selection Operator）をはじめ、複数の手法を用いて比較を行った（LASSO 回帰については付録「2. LASSO 回帰の概要」を参照されたい）。なお、翌日予測は説明変数に予報気温等の気象予報値を使用するため、これら値の更新に連動して新しい予測値が得られる。しかし、本研究では需要が立ち上がり始める翌朝（本研究で利用したデータでは 6 時）以降は、後述する当日実績値を用いた当日再予測にて予測見直しが可能となるため、翌日予測は前夜に 1 回のみ実行することを基本とする。詳細については「3.2 翌日予測手法」にて後述する。

一方、当日再予測には、予測実行時点から過去 48 時間分の需要実績値、実績・予報気温、日種等を説明変数とする多変数の時系列モデルを採用する。LASSO 回帰を用いて、回帰係数の同定に加えて説明変数を取捨選択する。この当日再予測では、説明変数に使用する過去 48 時間分の需要実績値が逐次更新されるため、任意の時刻に実行することで新しい予測値が得られる（本研究では時刻単位を 30 分としているため、最短で 30 分間隔で実行）。詳細については「3.3 当日再予測手法」にて後述する。

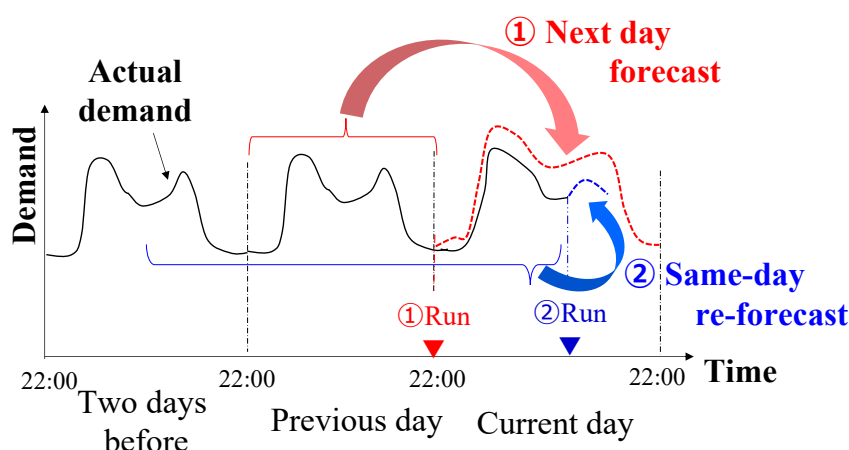


図 3-1 需要予測手法の概要

## 3.2. 翌日予測手法

### 3.2.1. 翌日予測の概要

図 3-2 に翌日予測のフローを示す。まず、一般的に用いられる簡易な重回帰式を使用して、翌日 1 日分の時刻別の需要予測値 $F_{d,t}$ を得る。次いで、上記の重回帰式とは異なる手法で翌日 1 日分の日積算需要量 $F_{sum}$ を予測したのち、以下の式(3-1)により、補正後の時刻別需要予測値 $F'_{d,t}$ を得る。

$$F'_{d,t} = F_{sum} / \sum_{t=1}^{48} F_{d,t} \cdot F_{d,t} \dots \dots \dots (3-1)$$

$F'$ ：時刻別需要予測値（補正後）、 $F$ ：時刻別需要予測値（補正前）、

$F_{sum}$ ：日積算需要量予測値、 $d$ ：日種（平日、休日）、

$t$ ：1 日分の時刻ステップ（1：22:00～22:30、2：22:30～23:00、…、48：翌日 21:30～22:00）

式(3-1)の補正により、日積算需要量は予測精度の向上が見込める反面、時刻別需要については予測精度が悪化する恐れもある。しかし、本研究では需要が立ち上がり始める翌朝以降は後述する当日再予測により予測値を更新するため、翌日予測では前夜から翌朝までのエネルギー貯蔵量を最適化するために、翌日の日積算需要量を正確に予測することが主眼となる。このため、本研究では新たに式(3-1)に示す、時刻別需要予測値を翌日積算需要にあわせて同一比率で補正する方法を採用した。また、需要が極端に少ない日の過剰補正を避けるため、1 日のうち、補正前の時刻別需要予測値が非零となるのが 5 時間以上（通常、冷温水需要であれば 1 日のうち深夜帯を除く 20 時間程度で需要が存在するため、この 1/4 以上）であれば相応の需要が存在する日と考え、これに該当する日のみに限定して補正を行う。

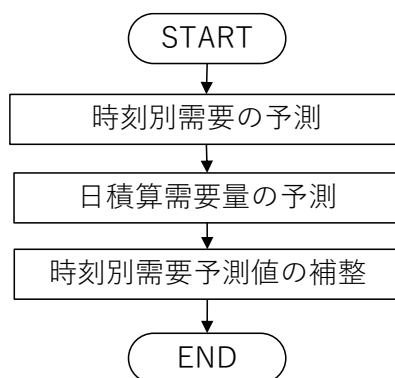


図 3-2 翌日予測のフロー

### 3.2.2. 時刻別需要の予測モデル

翌日予測で使用する時刻別需要の予測モデルを式(3-2)に示す。

$$F_{d,t} = a_{d,t} \cdot A_{d,t} + b_{d,t} \cdot T_t + c_{d,t} \dots\dots\dots (3-2)$$

$F$ ：需要予測値、 $A$ ：前回需要実績値、 $T$ ：予報気温

$a \cdot b \cdot c$ ：回帰係数、 $d$ ：日種（平日、休日）、 $t$ ：1日分の時刻ステップ（30分単位で1～48）

上記の予測モデルは、時刻別の需要予測値を目的変数として、当該時刻の前回需要実績値と予報気温を説明変数とする簡易な重回帰式である。翌日予測では時刻別、日種別に上記の予測モデルを構築する。なお、予測モデルを曜日毎に分割すると、回帰に必要となる学習データを長期間にせざるを得ない（1か月のうち、同一曜日は4、5日程度しか存在しないため）。一般に、冷温水需要は季節変化が大きいいため、異なる季節が含まれる長期間のデータでモデルを学習すると、逆に予測精度が悪化する傾向がある。このため、本研究の翌日予測モデルでは曜日は考慮せず、上記の日種は平日と休日に代表することにした。また、重回帰式の説明変数を不必要に増やすと、特に発生頻度が少ない休日のモデル学習時において長期間の過去実績値が必要となり、上記と同様の問題が生じる。さらに、多重共線性として知られる互いに相関の強い説明変数が共存することで、モデルの挙動が不安定となる問題も生じやすい。そのため、本研究の時刻別需要の予測では「前回需要実績値」、電力および冷温水需要の予測に共通して採用される「予報気温」のみを説明変数に用いる方針とした。なお、モデル学習（上式の回帰係数の同定）に用いるデータは季節変化を考慮して、過去35日分の実績データとした。



### 3.2.3. 日積算需要量予測による補整

前項の時刻別の需要予測では、日積算需要量の合わせこみは考慮できていない。先述のように、本研究では運用当日には再予測により予測値を更新し、これに基づき運用計画を修正する。このため、翌日予測時点では前夜から翌朝までにおける蓄熱槽などのエネルギー貯蔵機器の最適な貯蔵量を決定するために、上記の翌日1日分の日積算需要量を正確に予測することが主眼となる。そこで、翌日1日分の日需要量予測を行い、時刻別需要予測値を補整する。

首都圏大規模ビルの1年間分(平日)の冷水日積算需要量と各気象条件の相関例を図3-3に示す。同図にて「平均」と記されている気象条件は、1日の平均値の意味であり、目視にて相関が確認できた気象条件には3次多項式にて回帰した曲線と、その決定係数 $R^2$ もあわせて記す。図3-4は温水日積算需要量の相関例である。こちらは暖房需要の有無に応じて不連続に日積算需要量が増加するため、回帰曲線の図示は省略する。なお、これらのデータは「3.4 提案する需要予測方式の精度評価」以降で用いるものと同じであるため、詳細についてはそちらで後述する。

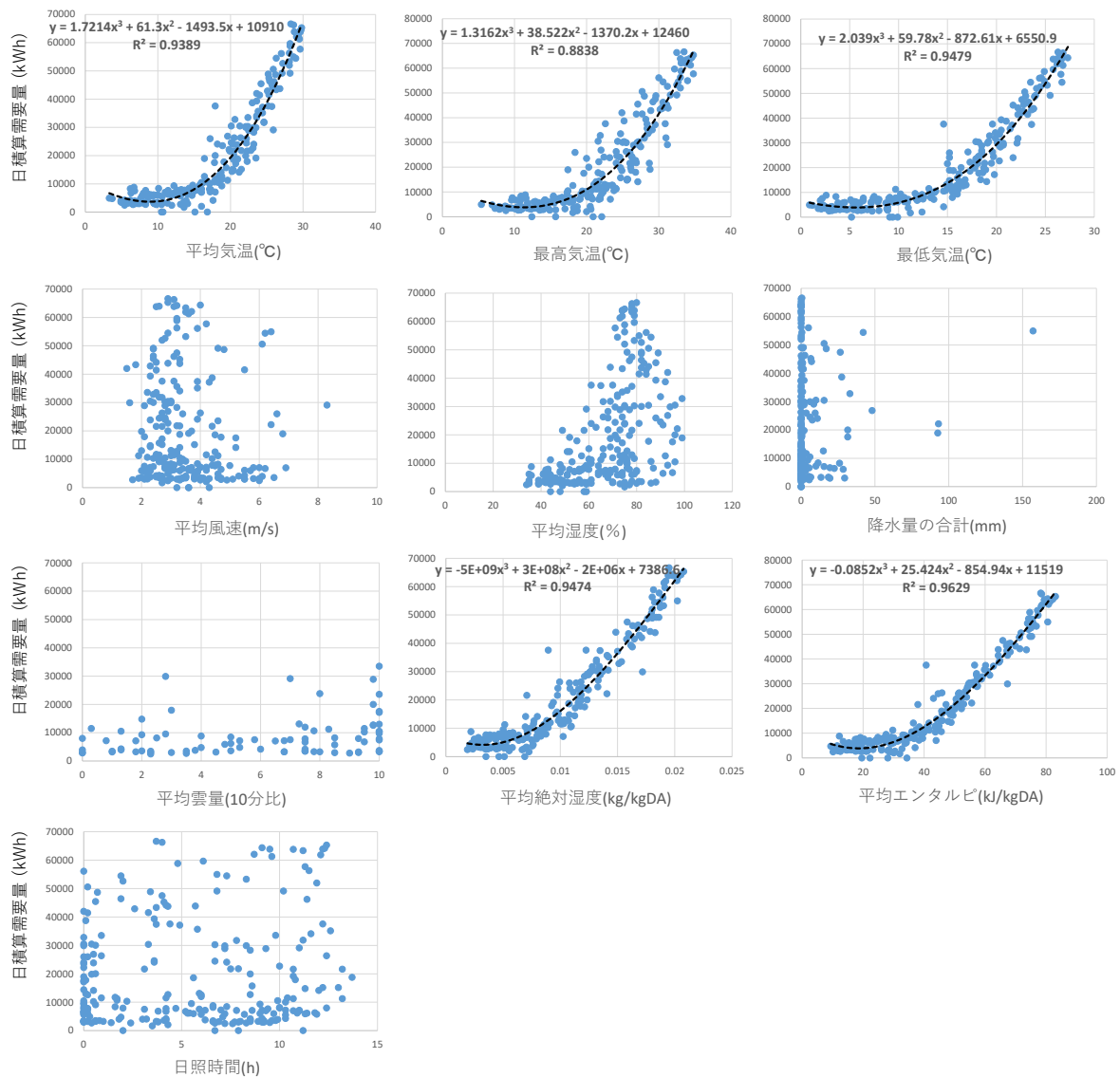


図 3-3 冷水日積算需要量と各気象条件との相関例

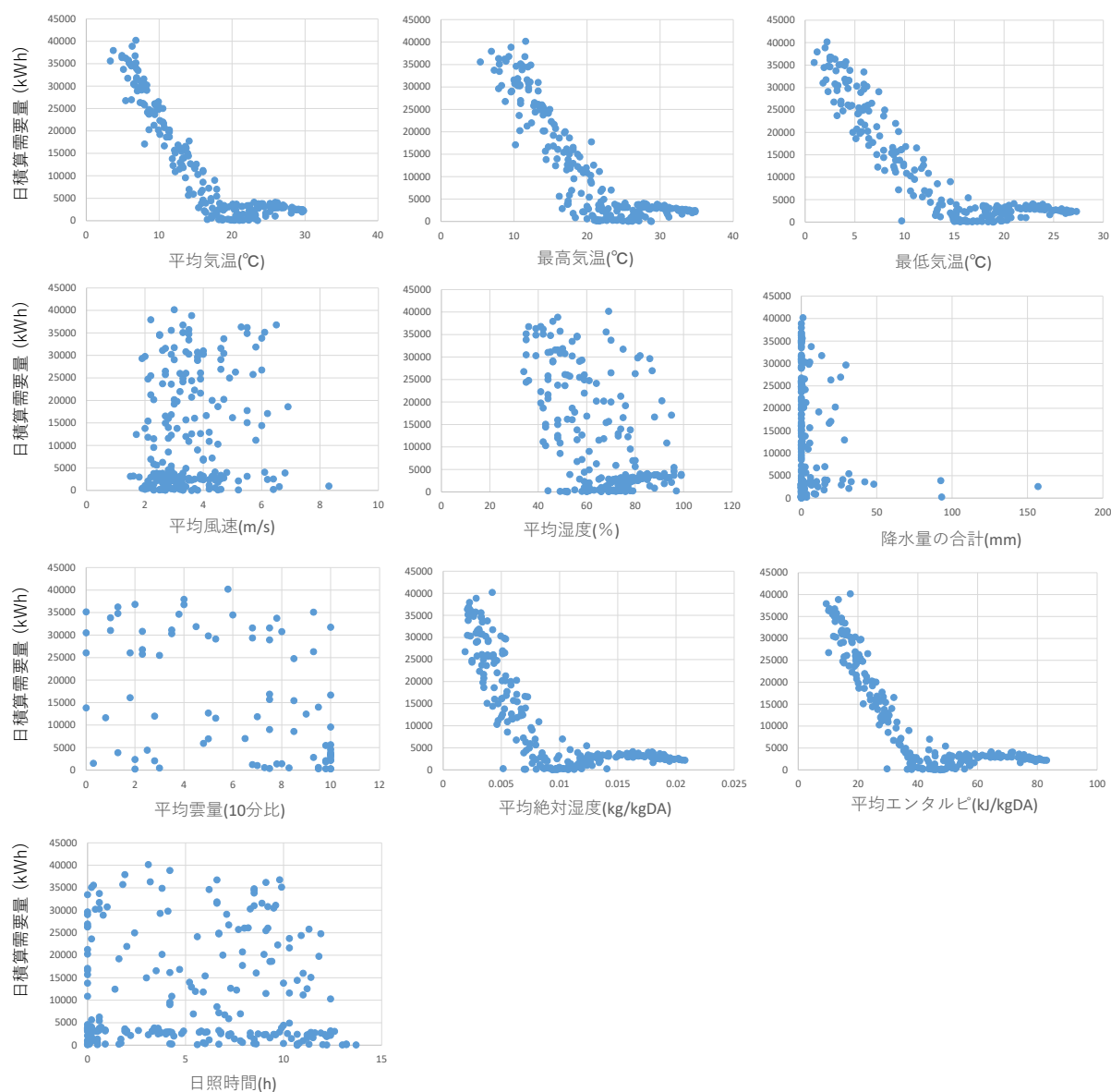


図 3-4 温水日積算需要量と各気象条件との相関例

各気象条件は対象ビルに最も所在地に近い気象台のデータを気象庁<sup>(3-1)</sup>より入手し、平均エンタルピについては、ウェクスラーハイランド式<sup>(3-2)</sup>から算出した水蒸気分圧と平均湿度を用いて、式(3-3)により絶対湿度を算出後、式(3-4)を用いて算出した。

$$X = 0.62198 \cdot pwtr / (p - pwtr) \dots\dots\dots (3-3)$$

$$E = [C_{pa} \cdot T_{db} + (C_{pw} \cdot T_{db} + r_0) \cdot X] / 1000 \dots\dots\dots (3-4)$$

$X$ ：絶対湿度(kg/kgDA)、 $pwtr$ ：水蒸気分圧(kPa)、 $p$ ：大気圧(kPa)

$E$ ：平均エンタルピ(kJ/kgDA)、 $C_{pa}$ ：乾き空気の定圧比熱(J/(kg・K))

$C_{pw}$ ：水蒸気の定圧比熱(J/(kg・K))、 $T_{db}$ ：平均気温(°CDB)、 $r_0$ ：0°Cにおける水の蒸発熱(J/kg)

図 3-3 の冷水需要では平均エンタルピの相関が最も強く、最低気温、平均絶対湿度、平均気温らが次点である。図 3-4 の温水需要でも、平均エンタルピ、平均気温で最も強い相関が見られる。このため、以下 3 種類の日積算需要量予測の回帰式を日種別に構築し、式(3-1)の日積算需要量の補整による予測精度を評価した。式(3-5)に日積算需要量の予測モデル、表 3-1 に各日積算需要量予測における回帰係数の同定対象を示す。

<試行した日積算需要量予測の回帰式>

- ・平均エンタルピによる単回帰式
- ・平均気温、平均湿度による重回帰式
- ・平均エンタルピ算出に用いた平均気温、湿度を除く、全気象データを用いた LASSO 回帰

$$F_{sum,d} = \alpha_{0,d} + \alpha_{1,d} \cdot E_{ave} + \alpha_{2,d} \cdot T_{ave} + \alpha_{3,d} \cdot RH_{ave} + \alpha_{4,d} \cdot T_{max} + \alpha_{5,d} \cdot T_{min} + \alpha_{6,d} \cdot W_{ave} + \alpha_{7,d} \cdot R_{sum} + \alpha_{8,d} \cdot C_{ave} + \alpha_{9,d} \cdot X_{ave} + \alpha_{10,d} \cdot DL_{sum} \dots\dots\dots(3-5)$$

$F_{sum}$  : 日需要量予測値(kWh)、 $E_{ave}$  : 平均エンタルピ(kJ/kgDA)、 $T_{ave}$  : 平均気温(°C)  
 $RH_{ave}$  : 平均相対湿度(%),  $T_{max}$  : 最高気温(°C)、 $T_{min}$  : 最低気温(°C)、 $W_{ave}$  : 平均風速(m/s)  
 $R_{sum}$  : 合計降水量(mm/日)、 $C_{ave}$  : 平均雲量、 $X_{ave}$  : 平均絶対湿度(kg/kgDA)  
 $DL_{sum}$  : 日照時間(h/日)、 $\alpha$  : 回帰係数 ( $\alpha_0$ は定数項)、 $d$  : 日種 (平日、休日)

表 3-1 回帰係数の同定対象

	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$
エンタルピ補整	○	○									
温湿度補正	○		○	○							
LASSO補整	○	○			○	○	○	○	○	○	○

なお、各気象条件については過去の予報値を入手できなかったため、以降の評価では実績値で代用する。このため、気象予報は誤差を含まない理想的な予測条件であるので、実適用の際には気象予報誤差に応じた精度低下が見込まれることに注意を要する。本研究では異なる複数施設の需要データを取り扱うため、期間の最大需要に対する予測値の平均二乗誤差平方根の割合を、百分率で表した式(3-6)に記す EEP(Expected error percentage) を予測誤差の評価指標に採用した。

$$EEP = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (F_i - A_i)^2} / A_{max} \dots\dots\dots(3-6)$$

$F$  : 予測値、 $A$  : 実績値 (真値)、 $A_{max}$  : 実績値の期間最大値、 $n$  : サンプル数

図 3-5 に、補整有無による日積算需要量の予測誤差を示す。なお、これらは式(3-6)において、予測値  $F$  を補正後の時刻別需要予測値の日積算量、実績値  $A$  を日積算需要量の実績値、実績値の期間最大値  $A_{max}$  を日積算需要実績値の年間最大値にして評価したものである。

図 3-5 より、冷温水需要ではいずれの補正方法でも顕著に予測誤差を低減できていることがわかる。一方、電力需要は補整による効果が見受けられない。これは、次章以降の運用評価において集中式熱源システムを対象とするため、電力は実データから個別空調用の電力を省いて温水および冷水需要に換算した結果、電力需要は気象条件との相関が弱まり、補整による効果が生じなかったと考えられる。各補整方法による差異は小さいものの、運用コストが最も高額になると見込まれる夏季（冷水需要が主）の予測精度を重視するため、本研究では LASSO 回帰による補整を冷水・温水予測に共通して使用し、電力予測については補整なしとした。

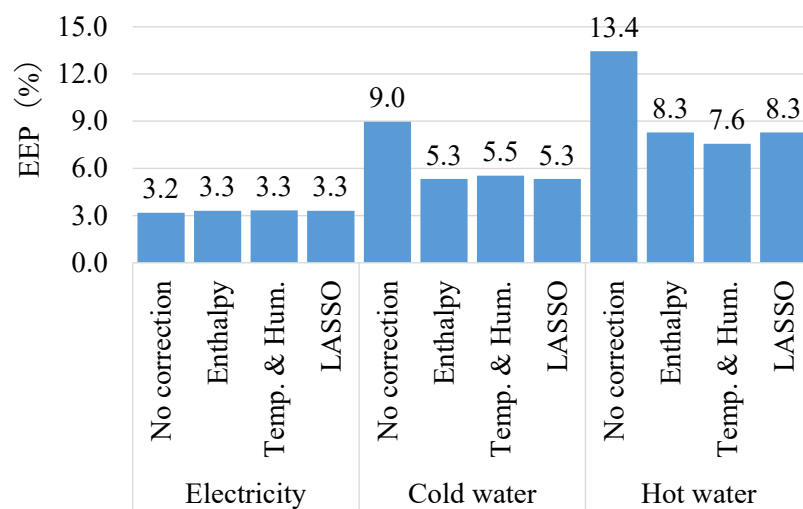


図 3-5 日積算需要量の予測誤差

### 3.3. 当日再予測手法

#### 3.3.1. 予測モデル

当日再予測に用いる予測モデルを式(3-7)に記す。

$$F_{tp} = \beta_0 + \sum_{i=te-97}^{te-1} (\beta_{1,i,tp} \cdot A_i + \beta_{2,i,tp} \cdot T_{a,i}) + \sum_{j=te}^{te+n} (\beta_{3,j,tp} \cdot T_{p,j}) + \sum_{k=1}^7 \beta_{4,k,te,tp} \cdot DW_{tp} + \beta_{5,te,tp} \cdot DT_{tp} \quad (3-7)$$

$F$ ：需要予測値、 $A$ ：需要実績値、 $T_a$ ：気温実績値、 $T_p$ ：気温予報値

$DW$ ：曜日（該当する場合には 1、それ以外は 0）、 $DT$ ：日種（休日の場合は 1、それ以外は 0）

$tp$ ：再予測対象時刻、 $te$ ：再予測実行時刻（ここで  $te \leq tp$ ）

$n$ ：再予測対象時刻の終端（ここで  $tp \leq n$ ）、 $\beta$ ：回帰係数（ $\beta_0$  は定数項）

当日再予測では、予測実行時刻から過去 48 時間分（本研究では時間の最小単位を 30 分としているため、これは 96 サンプルに相当）の需要実績値と気温実績値、予測対象時刻終端までの気温予報値、予測対象時刻の曜日と日種（該当日のみ“1”、それ以外を“0”とすることで補整項として寄与する）を説明変数とする多変数の時系列モデルを採用する。この多変数の時系列モデルに対して LASSO 回帰を適用し、回帰係数の同定に加えて説明変数を取捨選択する。なお、先述の翌日予測では日種に応じて予測モデルを切り替える方針としたが、当日再予測では使用する過去 48 時間分の時系列データが異なる日種の日をまたぐ可能性もある。厳密に同一日種のデータのみを抽出して、日種毎の独立した予測モデルを構築しようとする、学習データが不連続な（異なる日種の日を飛ばした）時系列データにならざるを得ない問題が生じる。このため、当日再予測においては日種に応じた予測モデルを切り替えは行わず、式(3-7)に示すように、日種（曜日も同様）は説明変数の一つとして取り扱う。この当日再予測モデルは、需要や気温の実績値、気温予報値、予測対象日の属性情報（曜日、日種）といった必要最低限のデータしか用いないため、その他の特殊なデータは必要としない。更に、LASSO 回帰を適用することで、対象にあわせた予測モデルが自動的に構築される。このため、対象を限定しない高い汎用性が期待できる。

本研究では上記の回帰係数  $\beta$  を予測実行時刻毎、予測対象時刻毎に学習して使用する。例えば、13 時に予測実行する場合、13 時～13 時半の需要と 13 時半～14 時の需要を予測するモデルの係数が異なるのは当然であるが、予測対象時刻が仮に 13 時半～14 時で同じであっても、13 時に予測実行する場合と 13 時半に実行する場合とでは、異なる値に学習されたモデル係数を用いる。また、学習データは長期間の方が若干の精度向上が見られたため、本研究では同一季節と見なせる最長期間として、過去 84 日分（12 週間分で 3 か月弱）の実績値を使用した。

なお、式(3-7)の当日再予測モデルは、予測対象時刻終端までの気温予報値を含んでいる。しかし、別途評価した結果では、再予測結果を反映する時間長が再予測実行時点から 2 時間先程度であれば（すなわち、再予測実行時刻から 2 時間先までの需要のみを再予測で更新する場合）、気温予報値を削除しても、予測誤差率の悪化は僅か 0.03 ポイントであった。また、この場合に教師データ期間を過去 1 か月に短縮しても、予測誤差率の悪化は 0.1 ポイント程度であった（本研究では、以降で当日再予測結果の反映可能時間長も評価するため、あえて式(3-7)に示す気温予報値を説明変数に組み込んでいる）。

### 3.3.2. 異手法とのベンチマークによる比較評価

提案する LASSO 回帰による当日再予測手法の有効性を検証するため、異手法とのベンチマークによる比較評価を実施した。この評価には図 3-6 に示すピーク発生時刻、夜間需要の有無など、各々異なる特徴を有する計 3 施設（需要種別として 4 種類）の冷水・温水需要データを使用した。表 3-2 に検証用データの期間を示す。なお、図 3-6 に示した同色の 1 本の折れ線は、それぞれ 1 日分の 30 分単位の時刻別需要を表しており、これを表 3-2 に示すデータ日数分だけ図示している。病院 2（冷水）を除き、入手できたデータ期間が 2 か月弱であったため、ここでは予測モデル学習時の教師データ期間を約 1 か月に短縮して評価した。比較対象とした手法は下記の 3 つである。

#### ・パターンマッチング（Pattern Matching、以降 PM と略す）

同一日種の過去需要を参照して、予測実行時刻～3 時間前までの需要絶対差の合計により類似日を抽出、類似日の予測実行時刻と以降の時刻の需要差分を直近実績値に加算することで予測値とした。なお、類似日抽出ならびに予測値作成方法は複数を試行し、上記方法が図 3-6 に示した評価対象の計 4 種類の需要データに対して最も高精度であったため、これを採用した。

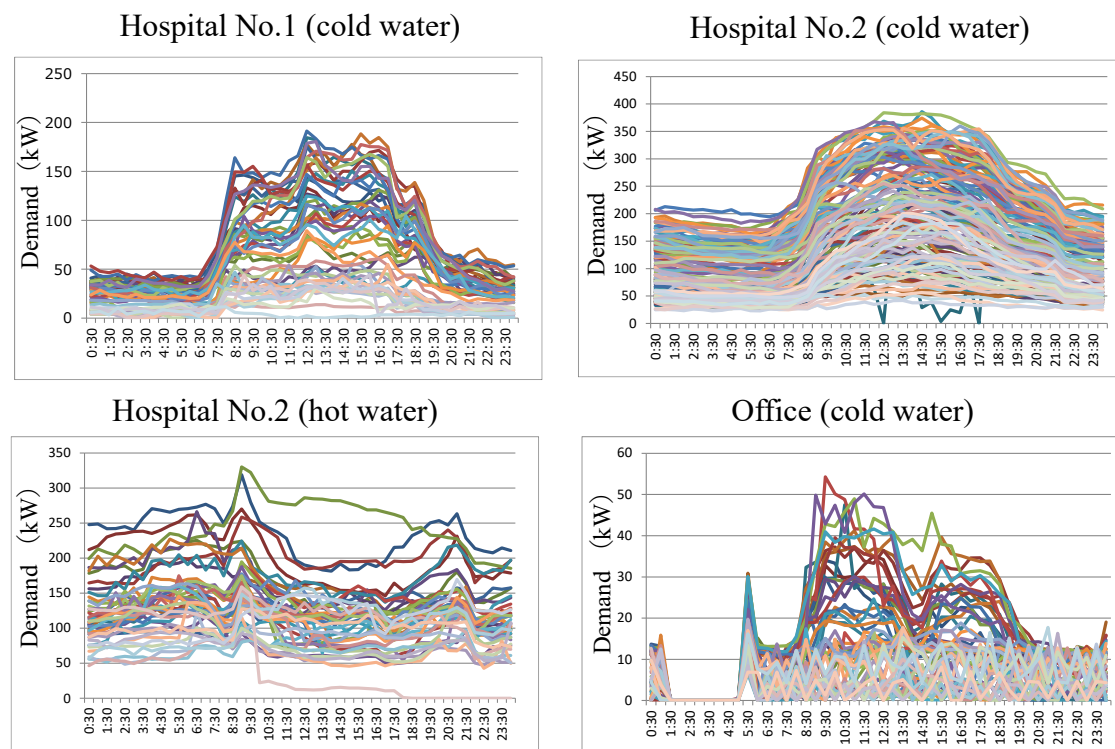


図 3-6 当日再予測手法の検証用データ

表 3-2 検証用データの期間

対象	データ期間（データ日数）	予測期間（予測日数）
病院1（冷水）	9月15日～10月31日（46日間）	10月15日～10月30日（15日間）
病院2（冷水）	5月21日～10月12日（144日間）	6月29日～10月11日（105日間）
病院2（温水）	4月3日～5月16日（43日間）	5月3日～5月15日（13日間）
事務所（冷水）	9月15日～11月13日（59日間）	10月15日～11月12日（29日間）

# ・ SARIMA、 SARIMAX

文献<sup>(3-3),(3-4)</sup>に記載の代表的な時系列モデルである ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) モデルの発展形である。SARIMA (Seasonal-ARIMA) は ARIMA に対して周期成分を取り入れたもので、本研究では周期 1 日とする。SARIMAX は SARIMA に外生変数として予測対象時刻の予報気温を加えたものである。これらモデルのパラメータは、1 日毎に自動調整されたものを用いる。SARIMA、SARIMAX では、予測実行時刻の直後 30 分間の需要をまず予測し、以降、次 30 分間の予測値は前 30 分間の予測値を基準値に使用することで、順次、予測対象時刻全体の予測値を再帰的に算出する方法とした。

図 3-7 に各手法の当日再予測誤差を示す。これは予測実行時刻から 2 時間先まで（すなわち式(3-7)にて  $n=4$ ）の再予測誤差を集計したものである。総じて LASSO 回帰が最も好成績であり、次点は SARIMA であった。両者の差が最も大きかった病院 2（冷水）の各手法による需要予測値と需要実績値を図 3-8 に示す。

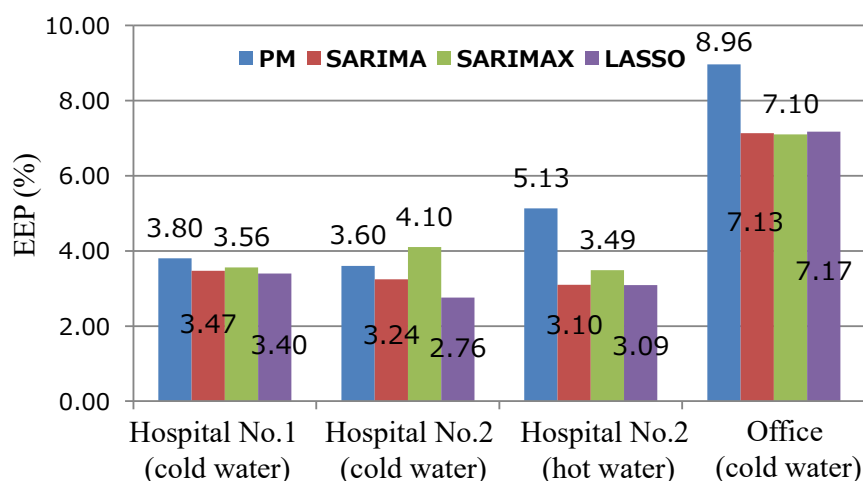


図 3-7 各手法の当日再予測誤差



図 3-8 は、各予測手法により 30 分前と 2 時間前に予測された需要予測値を、需要実績値と同時刻上に描いたものである。また、期間中の 30 分前予測と 2 時間前予測の RMSE（Root Mean Squared Error）をあわせて記す。なお、RMSE は式(3-6)の平方根部分である。

PM は 2 時間前の予測が大きく外れる箇所があり、30 分前予測の RMSE も最大である。SARIMA と SARIMAX は 30 分前予測では精度が高いものの、2 時間前予測値に一部位相遅れが見られるため、LASSO 回帰に比べて精度が悪化している。この理由は、ARIMA 系モデルでは自動選択されたモデル構造が 1 サンプル前のデータを参照する場合が多く、直前の誤差が累積し易い特徴があるのに対して、LASSO 回帰ではより多変数の時系列要素に対しての回帰モデルとなっているため、結果として、直前誤差に対してのロバスト性を有するためと考えられる。提案する LASSO 回帰では、2 時間前予測の RMSE が最小であった。以上のことから、提案する LASSO 回帰による当日再予測の有効性を確認できた。

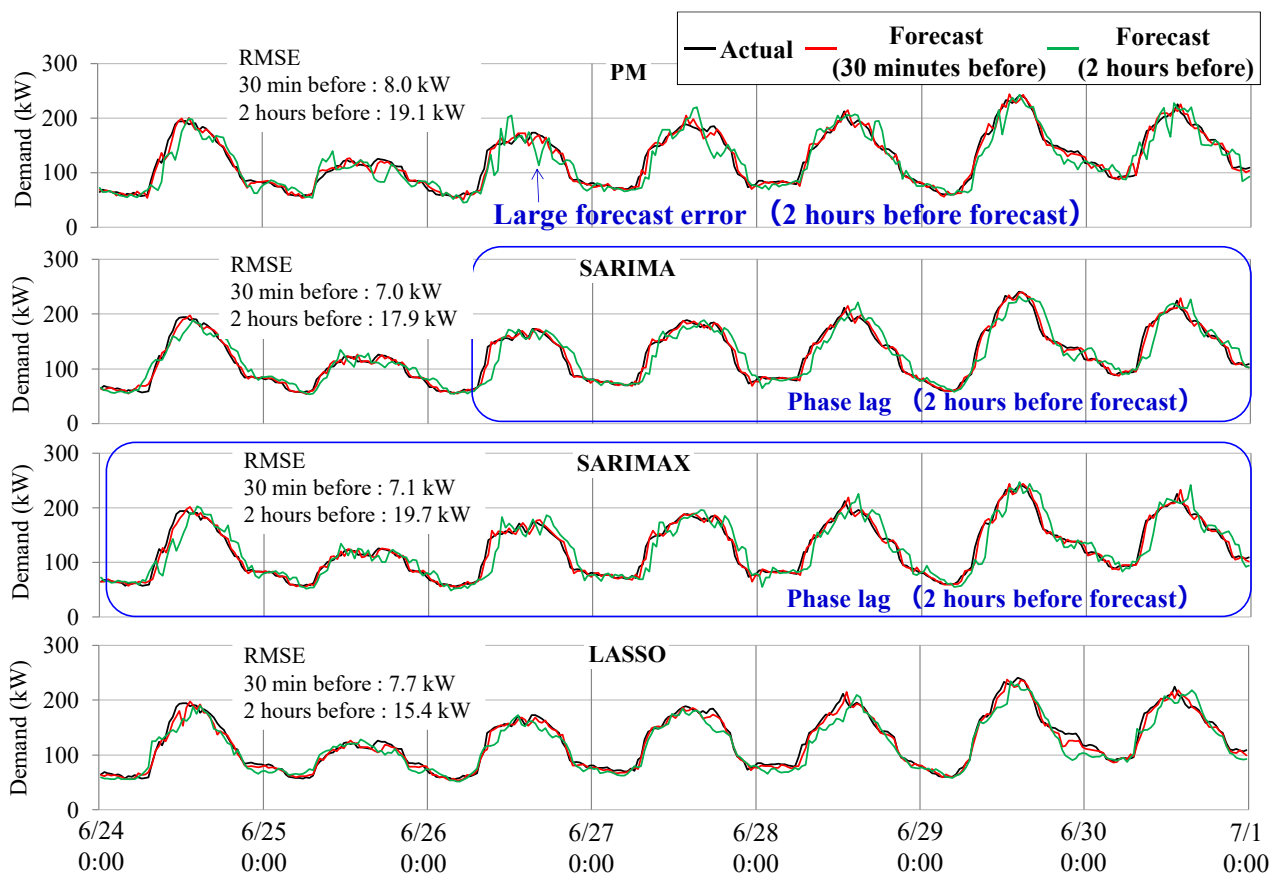


図 3-8 各手法による需要予測値と需要実績値（病院 2、冷水）



### 3.4. 提案する需要予測方式の精度評価

#### 3.4.1. 評価方法

以降では、これまでに述べた翌日予測、当日再予測を組み合わせた提案方式の予測精度を評価する。本節以降、共通して使用する首都圏大規模ビルの年間需要データの傾向を図 3-9 に示す。次章以降の運用評価では集中式熱源システムを対象とするため、電力需要については実データから個別分散型空調機 VRF(Variable Refrigerant Flow)の使用電力を省き、この成績係数（投入エネルギーに対して何倍の熱量を生産できるかを表す機器性能指標）である COP（Coefficient Of Performance）は“3”と仮定して、省いた使用電力の 3 倍を温水または冷水需要に加算した（温水または冷水のどちらに割り分けるかは、VRF の運転モードに応じて選択した）。このため、電力需要の季節変化はほぼ見受けられない。温水は、夏季も空調再熱(冷却後の飽和空気を所定の相対湿度に調湿して給気するための再加熱)用の需要が僅かにある。冷水も冬季に建物インテリア部分の空調のため、若干の需要が存在する(近年の気密性が高いビルなどでは、外気の影響が少ないインテリア部分では通年冷房が必要なケースが多い)。本研究では提案する需要予測方式の精度検証として、以下の 2 種類を実施した。

#### ・年間における予測精度評価

評価期間を 1 年間として、翌日予測は前夜 22 時に 1 回、当日再予測は午前 6 時以降 30 分おきに実施する前提とする。ここでは、当日再予測の対象時刻終端を 24h 先までとして対象時間長別の精度評価を行い、当日再予測において直近何時間の予測値を更新するのが適切なのかを検証する。

#### ・代表日における予測精度評価

「第 4 章 再予測・再計画手法を用いた運用評価」で対象とする各季節の代表日に限定して精度評価を行う。ここでは、上述の年間評価で決定した当日再予測の反映時間長も加味して、当日再予測により 1 日の予測精度がどのように改善するのか、時系列での検証を行う。

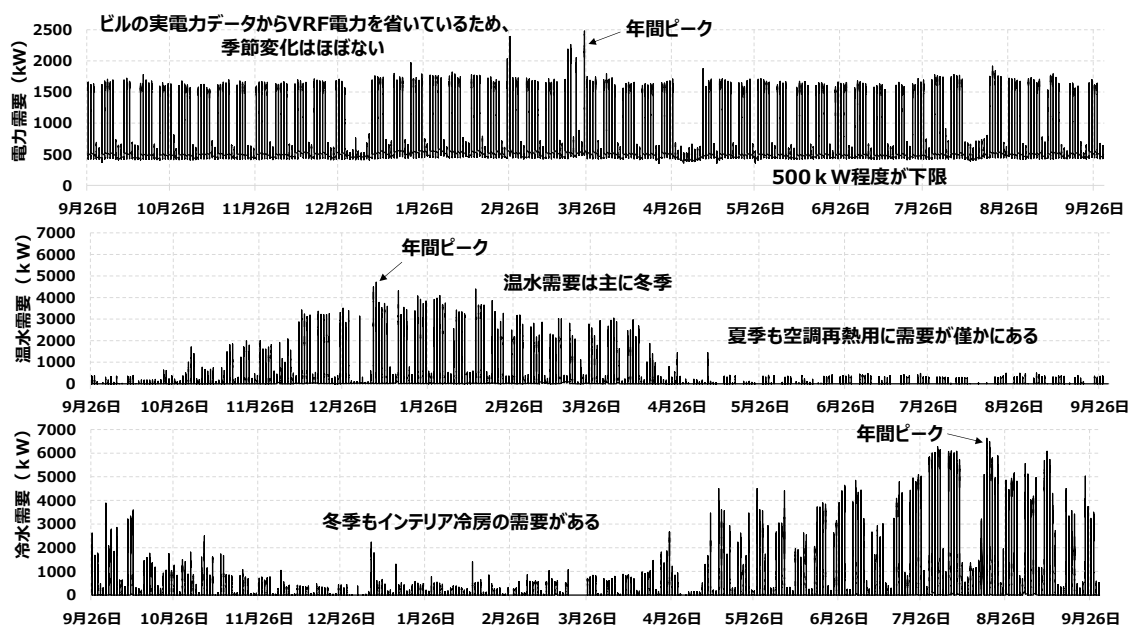


図 3-9 使用する大規模ビルの年間需要傾向

### 3.4.2. 結果 I — 年間の予測精度 —

図 3-10 に当日再予測の予測対象時間長別の予測誤差を示す（このときの LASSO 回帰モデルの傾向については、付録「3. LASSO 回帰による当日再予測モデル」に記す）。棒グラフは予測実行時刻を限定せず、1 日の全時刻における再予測結果を対象にして、予測実行時刻から 0.5h 先、1h 先、以降 30 分毎に 24h 先までを再予測をした場合（すなわち P.27 の式(3-7)において、 $n=1,2,\dots,48$  の場合）の RMSE を評価した結果である。併記した破線は翌日予測の RMSE である。同図より、以下のことがわかる。

- ・予測対象時間長を長くすると、当日再予測の誤差は悪化する

これは、そもそもの需要変化が時間を隔てるほど大きくなることが原因である。例えば、予測実行から 12 時間後の需要は、一般に予測実行から 30 分後の需要より大きく変化する。このため、これに応じて予測誤差も時間を隔てると拡大する傾向にある。

- ・一定の時間を隔てると、当日再予測の誤差は翌日予測の誤差より大きくなる

当日再予測には式(3-7)記載のように、過去 2 日分の需要、気温実績値ならびに予測対象時刻の気温予報値等による時系列モデルを使用した。ある一定の時間を隔てると当日再予測の誤差が翌日予測より大きくなるのは、当日再予測で使用する過去 2 日分の実績値に対する相関よりも、翌日予測における同時刻の過去需要に対する相関の方が、強く影響するためであると考えられる。

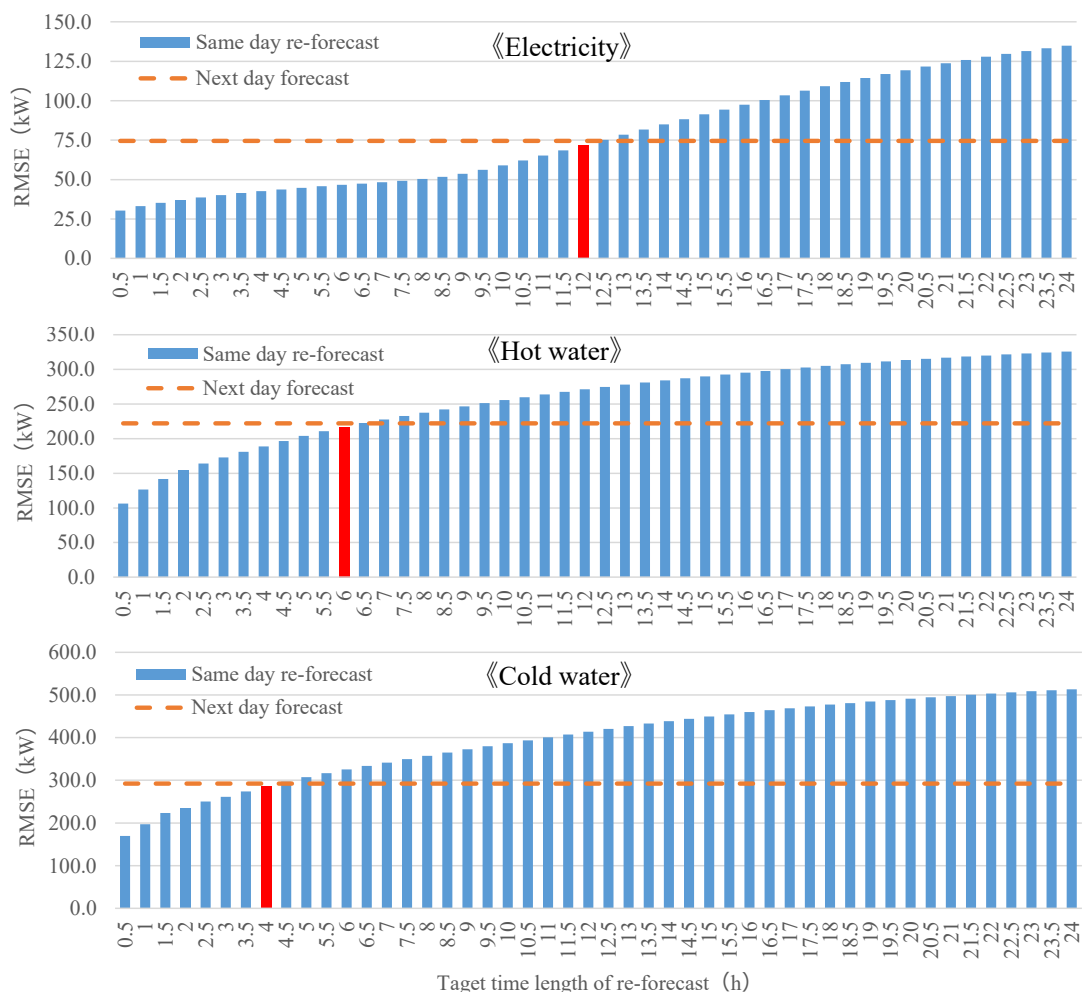


図 3-10 対象時間長別の当日再予測誤差

図 3-10 より、当日再予測の RMSE が翌日予測を下回る時間長は、予測実行時点から見て電力では 12(h)、温水では 6(h)、冷水では 4(h)先までである。このため、本研究では最も厳しい結果であった冷水に合わせて、当日再予測では予測実行時点から 4h 先までの予測値のみを更新する方針とした（この適用限界時間長を月毎に分割して評価した事例は、付録「4. 当日再予測の月毎の適用限界時間長」に記す）。

以上のように、当日再予測では直前実績値を参照することで、予測実行直後の時刻に対する予測精度は向上する半面、時間を隔てた場合には、逆に予測精度が悪化する傾向があることがわかった。従って、翌日予測結果に対して、当日再予測では精度改善が見込める直近時刻（本研究の事例では再予測実行から 4 時間先まで）の予測需要のみを逐次的に更新する両需要予測の組み合わせ方法が、1 日全体に渡る予測精度の向上に効果的であると言える。

### 3.4.3. 結果Ⅱ — 代表日の予測精度 —

本研究では、次章以降で提案予測手法を用いた熱源・電気機器の運用評価を行う。そのため、以降では先述の年間需要データから、各季節の代表 14 日×4 季節＝56 日分を抽出して評価を進めた。なお、各季節の代表日を 14 日（2 週間）分とした理由は、平日と休日の双方を評価するためには最低でも 1 週間以上の期間が必要であり、また日数の少ない休日において特異日を抽出してしまう可能性を考慮したためである。これら代表日の詳細については、「第 4 章 再予測・再計画手法を用いた運用評価」を参照されたい。翌日予測は前夜 22 時に実行する前提とした。また、当日再予測の反映時間長は、前項の結果より再予測実行時点から 4 時間先までとし、再予測の開始時刻は冷水・温水需要が立ち上がり始める午前 6 時とし、以降 30 分毎に再予測を行うことで、1 日の経時的な予測誤差の変化を評価した。

経時的な予測誤差を評価するにあたり、1 日の需要予測値データの作成方法を表 3-3 にまとめる。当日再予測では予測実行時点から 4 時間先までの予測値のみを更新するため、当然ながら、予測の実行時刻によって予測対象時刻は異なる。対象時刻の異なる予測結果は、そもそもの需要の大小が時刻に応じて異なるため、単純な比較では公平に評価できない。そこで、表 3-3 に示す方法により、1 日分を通した需要予測値を設定して予測実行時刻による経時的な予測誤差を評価した。

表 3-3 の上段は、22 時～5 時半時点の予測誤差評価時に使用するデータを示す。これらの時間帯では当日再予測を開始する午前 6 時より前であるため、評価する予測データは前日 22 時に実行した 1 日分の翌日予測の結果である。一方、表 3-3 の下段は、当日再予測を開始する午前 6 時以降の予測誤差を評価する際に設定する 1 日の予測データを示している。説明の一例として、ここでは予測誤差評価時刻 10 時とする。時間帯④の予測値は 10 時に実行した以降 4 時間分、すなわち 14 時までの当日再予測の結果とする。すでに経過した時間帯①～③については、過去の各々の時点で最新であった予測値を用いる。すなわち、時間帯①では前日 22 時に実行した翌日予測の結果、時間帯②では 6 時に実行した再予測の結果、時間帯③では 6 時 30 分に実行した再予測の結果とする。時間帯⑤については 10 時時点の再予測では結果がまだ存在しないため、前日 22 時に実行した翌日予測の結果を予測値とする。このようにして、1 日を通した需要予測値を設定して、経時的な予測誤差の変化を検証した。

表 3-3 1 日分の需要予測値データの設定方法

22時～5時30分 予測誤差評価					
22時 ～ 22時					
翌日予測（前日22時実行）					
6時以降 予測誤差評価					
① 22時 ～ 6時	② 6時 ～ 6時30分	③ 6時30分 ～ 7時	・・・	④ 10時 ～ 14時	⑤ 14時 ～ 22時
翌日予測 （前日22時実行）	当日再予測 （当日6時実行）	当日再予測 （当日6時30分実行）	・・・	当日再予測 （当日10時実行）	翌日予測 （前日22:00実行）

予測誤差の経時変化を図 3-11 に示す。同図は、季節毎に代表 14 日分（休日も含む）の各時刻における予測誤差を評価したものである。翌日予測の対象時刻である 22 時～6 時では、最大需要季節（温水は冬季、冷水は夏季）であっても予測誤差は最大で 6% 弱であり、良好な精度である。午前 6 時からの当日再予測により、1 日の終端に近づくにつれて徐々に予測誤差が低下し、最終的には 3.5% 程度まで改善している。一方、冷水（夏季、秋季）や温水（冬季）では、午前 6 時の再予測開始直後に一時的に誤差が増加する傾向がある。また、秋季は全ての需要で再予測による精度の改善が小さい。

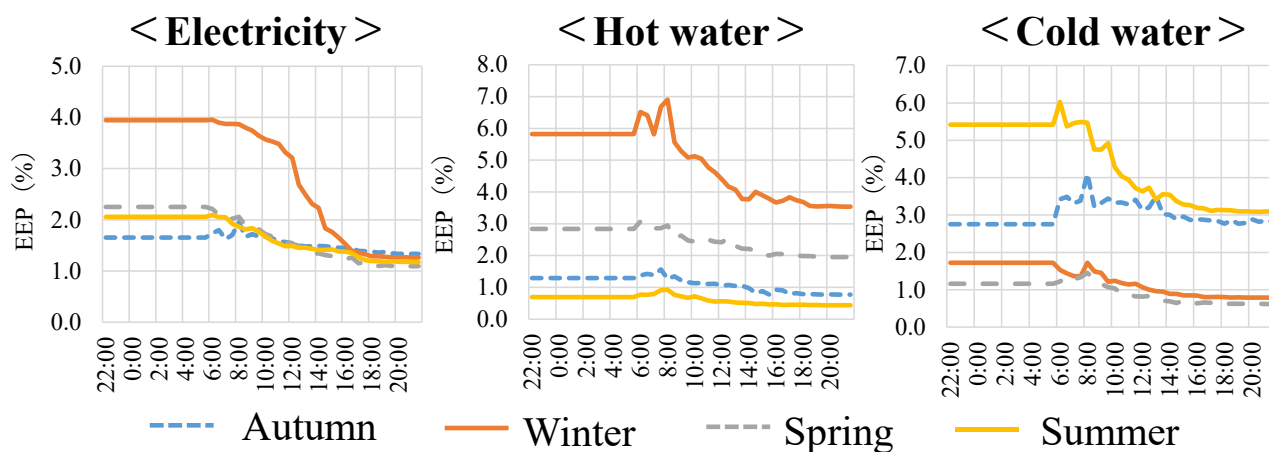


図 3-11 1 日の予測誤差の経時変化

図 3-12 に夏季、秋季の 1 日の冷水需要予測値の一例を示す。時刻が経過するにつれて、再予測結果が実績（真値）に追従していく様子がわかる。夏季の実績需要は日中、比較的平坦である。一方、秋季は 1 時間周期の細かな変動があり、これが同季節における再予測の精度改善を阻害している一因であると考えられる。本研究で秋季の代表日としたのは、冷水需要が急減する 10 月中旬頃のデータである。このため、日中は冷水需要に換算した個別空調が間欠運転することで、この短周期の変動が生じていると考えられる。

また、秋季 8 時実行の再予測では実績からの乖離が大きい。これはひとつ前の時刻の 7 時 30 分時点で、予測に比べて実績の立ち上がりが遅れたことで、予測を大幅に下回る実績を参照して再予測を行ったことが原因である。図 3-11 にも表れている再予測開始直後、午前 8 時程度まで続く当日再予測の一時的な精度悪化は、このような明け方の需要増加タイミングのズレによる影響と考えられる。この過渡的な需要増加は、設備運用者が建物の利用開始時刻（テナントオフィスビルであればテナント入居者が業務を開始する時刻）に先立ち、熱源・空調システムを立ち上げる際に生じる起動時需要が主であるため、その増加タイミングは、システム立ち上げ時刻のばらつきに起因する。また、需要発生メカニズムも、夜間帯の気温による建物の蓄熱効果や前夜の運用終了状態など、種々の外部環境要因などによって大きく異なるため、日中の需要とは性質を異にするものである。このため、この明け方の需要に対してはこれに特化した需要予測手法を別途確立し、さらに、その予測に基づきシステムの起動を行う最適起動制御を併用していくことが、理想的な対策であると考えられる。しかし、これは本研究の範疇を逸脱するため、ここでは課題があることを述べるに留める。本章の結果を以下にまとめる。

- ・翌日予測では、時刻別の需要予測値を日積算需要量予測に基づき補整することで、冷温水需要の予測精度向上を確認できた。一方、当日再予測は ARIMA 等との性能比較の結果、提案する LASSO 回帰が最も好成績であった。
- ・予測誤差はピーク需要季節の翌日予測で最大 6% 弱、当日再予測により最終的には 3.5% 程度まで改善し、これらを組み合わせた予測方式が有効であることを確認した。しかし、当日再予測では明け方の需要立ち上がり時に予測精度が悪化する傾向が一部に見られたため、これらの精度向上は今後の課題である。

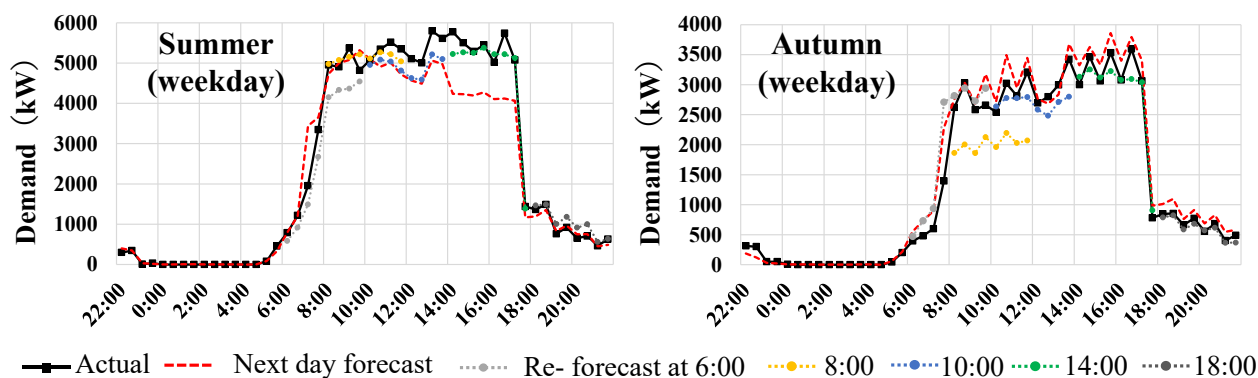


図 3-12 夏季、秋季の 1 日の冷水需要予測値

### 3.5. 参考文献

- (3-1) 国土交通省 気象庁ホームページ (online) : <https://www.jma.go.jp/jma/index.html/>
- (3-2) 社団法人空気調和・衛生工学会:「第 14 版空気調和・衛生工学便覧 1 基礎編」(丸善), pp.39-44 (2010)
- (3-3) A. Kinbara, S. Kurosu, F. Miyasaka, and K. Kamimura : “Prediction for Energy Loads of Air Conditioning System”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.26, No.6 pp.721-728 (1990) (in Japanese)  
金原昭臣・黒須茂・宮坂房千加・神村一幸:「ARIMA モデルによる空調熱負荷予測」, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.6 pp.721-728 (1990)
- (3-4) K. Kamimura, N. Suzuki, A. Kinbara, and S. Kurosu: “Prediction for Energy Loads of Air-Conditioning System”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.27, No.7 pp.827-833 (1991) (in Japanese)  
神村一幸・鈴木信康・金原昭臣・黒須茂:「空調熱負荷予測の実用化」, 計測自動制御学会論文集、Vol.27, No.7 pp.827-833 (1991)

## 第4章 再予測・再計画手法を用いた運用評価

### 4.1. 再予測・再計画と運用シミュレーションの関係

本章以降では、提案する需要予測方式を使用して、熱源・電気機器の運用評価を行う。本運用評価の手順の概要を図 4-1 に示す。まず、需要予測値に基づき、1 日の終わりである翌日 22 時までの運用計画を導出する。しかし、需要予測には誤差が含まれるため、実際の機器運用とは差異が生じる。そこで、直近 30 分間の需要実績値、ならびに当該時刻における最新の運用計画に基づき、熱源・電源機器の運用実態をシミュレーションする。これを、以降「運用シミュレーション」と呼ぶ。このとき、計画時の需要予測値に対して需要実績値が低下したと仮定すると、熱源システムの需給バランスを保つためには、計画から蓄熱槽の放熱量を低下させる、もしくは熱源機の出力を低下させるといった 2 種類の対応方法がある。以降では前者を「蓄熱槽調整運用」、後者を「熱源機調整運用」と表現する。これらの運用シミュレーションの詳細は、「4.5 最適運用計画に基づく運用シミュレーション」にて後述する。

次に、以降の需要予測値を、上記の直近 30 分の実績値も参照した最新の再予測結果に更新し、更に上記の運用シミュレーションで得られた直近 30 分間の結果（機器の運転／停止状態、蓄電池・蓄熱槽の貯蔵残量）を初期値として、次時刻以降の運用計画を修正する。以降、これを「再計画」と表現する。

以上の流れを逐次的に繰り返すことで、再予測・再計画に基づく 1 日分の運用シミュレーション結果を導出する。なお、図 4-1 や上記の説明では、再予測、再計画を 30 分毎に必ず実行する前提で記載したが、実際には「4.6.1 方法」にて後述する評価ケースに合わせた任意の周期で実行する。また、これまでも述べたように、本研究では最小時間単位を 30 分としている。計画で考慮する熱需給に関係する熱源から末端の空調機等も含めた一連の空調温度制御プロセスの時定数は 15～30 分と遅く<sup>(4)</sup>、また、仮に数分程度の熱需給不整合が生じて、現実には温度が所定値より若干変動する程度であるため、このような短時間変動の影響は大きくない。なお、電力についても、短時間の需給アンバランスは電力系統からの供給電力で吸収される。以上のことから、本研究では予測・計画の最小時間単位を 30 分に設定している。

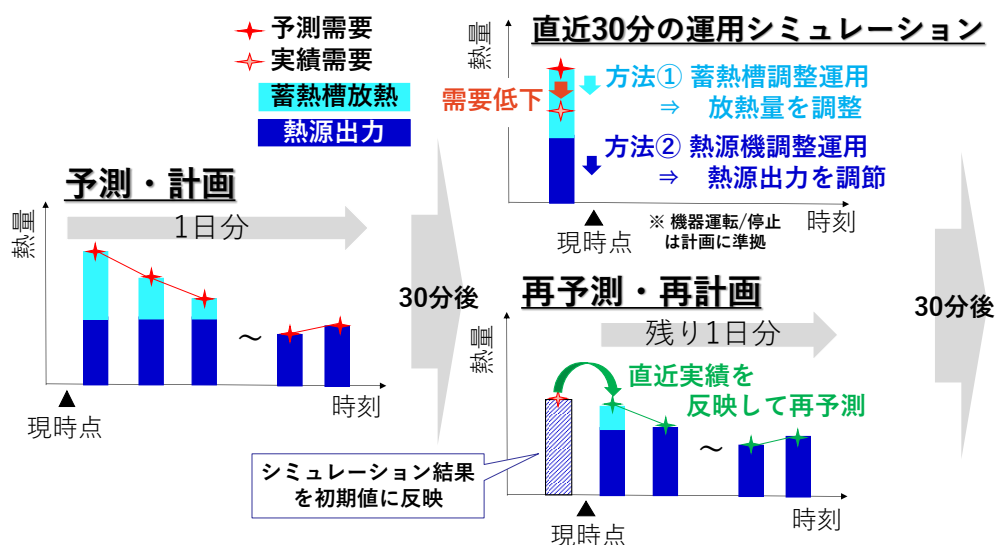


図 4-1 運用評価手順の概要



## 4.2. 対象システム

対象システムの構成を図 4-2 に示す。これは使用する大規模ビルの需要データに合うように、各機器の台数や容量等を選定した仮想的なシステムである。機器諸元を表 4-1 にまとめる。電力供給は電力系統からの受電電力と CGS（Co-Generation System）を想定した。熱源は吸収式冷凍機（Absorption Refrigerator）と電気式ヒートポンプ（Electric Heat Pump）である（以降 ABR、EHP と表現する）。ABR は 2 台とも冷水製造専用とし、1 台は CGS 排熱駆動専用（ただし起動時のみガス使用を見込む）、1 台はガス駆動専用とした。これらは現実的に 1 台の装置で賄われることも多いが、後述する運転計画の最適化を混合整数線形計画法 MILP（Mixed-integer linear programming）にて求解するため、特性を線形化するために疑似的に 2 台に分割した。EHP は、容量や COP（Coefficient Of Performance）が異なる 3 台を想定し、表 4-2 に示すように、月毎に冷水/温水の運転を切り替える前提とした。これらは長期間の運用決定においては最適化の決定変数になり得るが、現実には配管の手動弁操作を必要とする場合が多く、1 日単位の運用では現実的に切り替えが困難であるため、ここでは前提条件に固定とする。エネルギー貯蔵機器は温水槽、冷水槽、蓄電池を想定し、温水や冷水の余剰発生時には熱廃棄可能とした（ただし、後述する運用評価においては冷水の熱廃棄は一切確認されなかった）。

上記機器（蓄電池を除く）は補機類の使用電力を見込み、CGS、ABR、EHP に関しては定常運転時以外でも起動/停止時の使用エネルギーを考慮した<sup>(4-2)~(4-6)</sup>。なお、一般的に蓄熱槽容量は年間の日積算需要量最大値の約 3、4 割程度と言われているが、今回の評価対象データは大規模高層ビルであるため、現実的な床面積を考慮して、日積算需要量最大値の約 2 割に設定した。これらの対象システムの設定根拠については、付録「5. 運用評価における対象システムの設定について」を参照されたい。

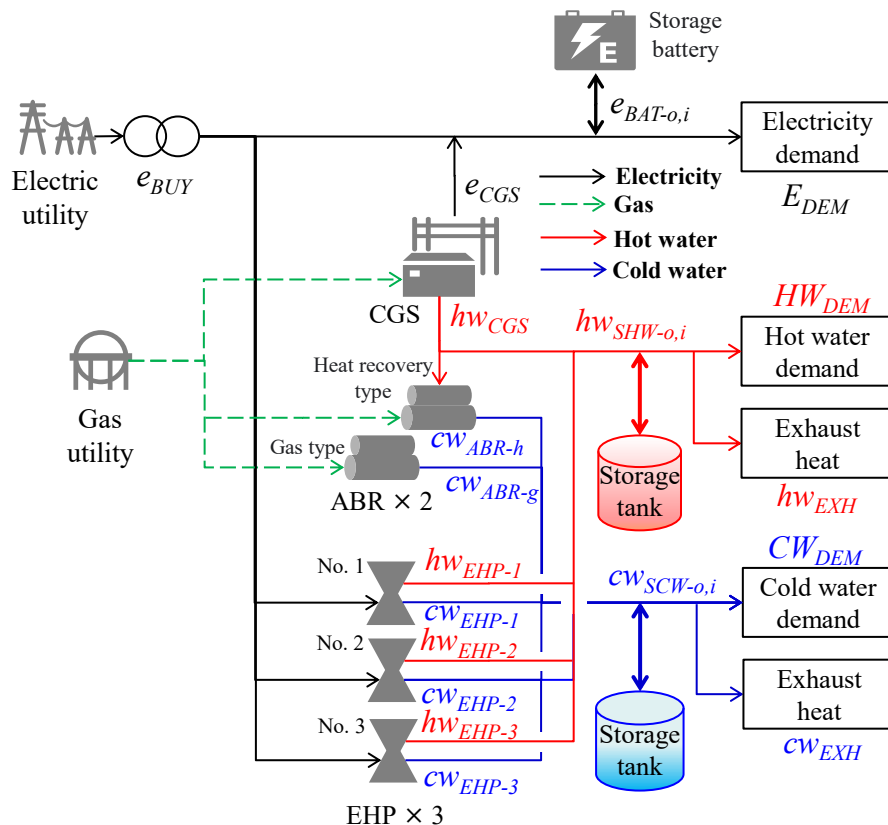


図 4-2 対象システムの構成

表 4-1 機器諸元

機器	記号	説明	値	備考
CGS	$E_{CGS-MAX/MIN}$	定格 / 下限電気出力	1000 / 300 (kW)	
	$HW_{CGS-MAX}$	定格温水出力	1025 (kW)	熱電比一定、下限出力は電気出力側で定義
	$E_{CGS-sub}$	補機電力係数	0.06	電気出力の6%とする
	$G_{CGS-on}$	運転移行時ガス使用量	313 (kWh)	定格使用量（30分運転）の25%
	$E_{CGS-off}$	停止移行時電力使用量	5 (kWh)	補機のみ5分間の残留運転
	$MT_{CGS}$	最小運転・停止時間	2 (h)	
	-	総合効率	81 (%)	定格出力時
	-	発電効率	40～30 (%)	定格出力時～下限出力時
ABR	$CW_{ABR-MAX-h/g}$	定格冷水出力（排熱 / ガス）	922.5 / 2080 (kW)	
	$CW_{ABR-MIN-h/g}$	下限冷水出力（排熱 / ガス）	277 / 624 (kW)	
	$G_{ABR-h/g-on}$	運転移行時ガス使用量（排熱 / ガス）	131 / 240 (kWh)	定格使用量（30分運転）の30%
	$E_{ABR-h/g-off}$	停止移行時電力使用量（排熱 / ガス）	23 / 52 (kWh)	補機のみ15分間の残留運転
	$E_{ABR-sub}$	補機電力係数	0.1	冷水出力の10%とする
	$MT_{ABR-h/g}$	最小運転・停止時間	2 (h)	
	-	成績係数COP（排熱 / ガス）	0.9～0.7 / 1.3～0.9	定格出力時～下限出力時
EHP	$CW_{EHP-MAX-1/2/3}$	定格冷水出力（No,1 / 2 / 3）	2080 / 1440 / 800 (kW)	定格出力は冷水/温水で同じとする
	$HW_{EHP-MAX-1/2/3}$	定格温水出力（No,1 / 2 / 3）		
	$CW_{EHP-MIN-1/2/3}$	下限冷水出力（No,1 / 2 / 3）	624 / 432 / 240 (kW)	下限出力は冷水/温水で同じとする
	$HW_{EHP-MIN-1/2/3}$	下限温水出力（No,1 / 2 / 3）		
	$E_{EHP-1/2/3-on}$	運転移行時電力使用量（No, 1 / 2 / 3）	19.4 / 13.7 / 7.8 (kWh)	定格使用量（30分運転）の8%
	$E_{EHP-1/2/3-off}$	停止移行時電力使用量（No, 1 / 2 / 3）	9.7 / 6.9 / 3.9 (kWh)	定格使用量（30分運転）の4%
	$E_{EHP-sub}$	補機電力係数	0.03	冷温水出力の3%とする
	$MT_{EHP-1/2/3}$	最小運転・停止時間	1 (h)	
蓄熱槽	-	成績係数COP（No,1 / 2 / 3）	4.3～3.0 / 4.2～2.9 / 4.1～2.8	定格出力時～下限出力時
	$S_{SCW-MAX/SHW-MAX}$	蓄熱容量（冷水槽 / 温水槽）	13000 / 8000 (kWh)	年間最大日需要量の20%
	$E_{SCHW-sub}$	ポンプ電力係数	0.03	冷温水出力の3%とする
	$\eta_{st_{SCW/SHW}}$	30分貯蔵効率（冷水槽 / 温水槽）	99.83 / 99.81 (%)	24時間で92% / 91%の貯蔵効率に相当
	$\eta_{tr_{SCW/SHW}}$	入力効率	100 (%)	入力時の損失なし
蓄電池	$S_{BAT-MAX}$	蓄電容量	100 (kWh)	放電端基準
	$E_{BAT-+MAX}$	最大充電電力	300 (kW)	
	$E_{BAT-0-MAX}$	最大放電電力	300 (kW)	
	$\eta_{st_{BAT}}$	30分貯蔵効率	100 (%)	貯蔵時の損失なし
	$\eta_{tr_{BAT}}$	入力効率	85 (%)	
その他	$E_{EXH}$	熱廃棄電力係数	0.03	熱廃棄量の3%とする

表 4-2 EHP の運転モード

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
EHP1	温水	温水	温水	温水	温水	冷水	冷水	冷水	冷水	温水	温水	温水
EHP2	温水	温水	温水	温水	冷水	冷水	冷水	冷水	冷水	冷水	温水	温水
EHP3	冷水	冷水	冷水	冷水	冷水	温水	温水	温水	温水	冷水	冷水	冷水

※ 太字は評価対象の各季節代表日が含まれる月である

なお、昨今の地域熱供給事業用などの大規模蓄熱槽では、容量に対して表面積の割合が減少することで貯蔵時の損失は1日1%未満となり、常時満蓄状態を維持しながら、いわばバッファとして蓄熱槽を運用する事例もある。しかし、本研究ではビルなどの個別需要家に設置されたより小容量の蓄熱槽を想定する。このため、損失が多い（これについては後述する）、上述のように1日の需要の2割程度の容量しかないため限られた蓄熱資源を1日の中で最も効果的に分配する必要がある、後述する運用評価でエネルギー単価が時刻毎に異なる経済運用を対象とする、といった理由により、蓄熱槽についても運用計画の対象に含めることとする。

#### 4.3. 機器特性の定式化

本節では、以降の運用計画（再計画も含む）と運用シミュレーションで用いる機器特性の数理モデルについて述べる。問題全体の定式化については、「4.4 需要予測に基づく最適運用計画」を参照されたい。本研究では、先述のように上記の運用問題を混合整数線形計画問題 MILP として定式化する（MILP の概要については、数理計画法の専門書籍等を参照されたい）。すなわち、機器特性は当該機器の出力を表す連続変数と、運転／停止を表す離散変数の組み合わせで定式化し、これら決定変数同士の乗除は含まない。従って、機器特性は線形近似された数理モデルとなる。

一般に EHP などの熱源機器では、機器出力に対する COP は、非線形的に変化することが知られている。しかし、以降の運用評価においては、提案する再予測・再計画や予測誤差に対する確率的評価の効果の有無、大小などの大まかな定量的傾向を主に論じるため、上記の近似誤差は本研究の結論に影響を与えるものではない。また、後述の運用シミュレーションでは、機器の運転/停止状態を運用計画の結果に拘束したうえで直近時刻の運用のみを導出するため、非線形計画法を用いることで、原理的には上記の非線形特性も加味したシミュレーションも可能である。しかし、このようなシミュレーション方法を採用した場合、得られる結果は需要予測誤差の影響に加えて、運用計画のモデル近似誤差の影響が含まれてしまうため、本研究の目的に対して不適切な評価となってしまう。以上より、本研究では研究目的に対する十分性や適切性を考慮したうえで、機器特性には線形近似モデルを統一して使用することとした。

### 4.3.1. CGS 特性

定格出力時の総合効率 81%、発電効率 40%として、これを満たすように定格温水出力を設定、また下限出力は負荷率 30%として、このときの発電効率は 10 ポイント低下すると仮定した<sup>(4-4)</sup>。CGS のガス使用は式(4-1)、温水出力は式(4-2)にて定式化した。これらの特性を図 4-3 示す。

$$gas_{CGS} = 2.1429 \cdot e_{CGS} + 357.1429 \cdot u_{CGS} \dots\dots\dots(4-1)$$

$$hw_{CGS} = \frac{HW_{CGS-MAX}}{E_{CGS-MAX}} \cdot e_{CGS} \dots\dots\dots(4-2)$$

$gas_{CGS}$  : ガス使用(kW)、 $e_{CGS}$  : 電気出力(kW)、 $u_{CGS}$  : 運転/停止、 $hw_{CGS}$  : 温水出力(kW)

$HW_{CGS-MAX}$  : 最大温水出力(kW)、 $E_{CGS-MAX}$  : 最大電気出力(kW)

※ 太字は定数を表す

CGS の運用決定変数は電気出力 $e_{CGS}$ 、運転/停止 $u_{CGS}$ である。温水出力 $hw_{CGS}$ は、式(4-2)のように電気出力 $e_{CGS}$ の従属変数として扱い、出力熱電比は全運転範囲で一定である。電気出力 $e_{CGS}$ は、CGS 運転中であれば表 4-1 記載の上下限值を持つ。一方、CGS 停止中であれば「0」に固定されるように、後述する「4.4 需要予測に基づく最適運用計画」にて制約条件を定式化する。

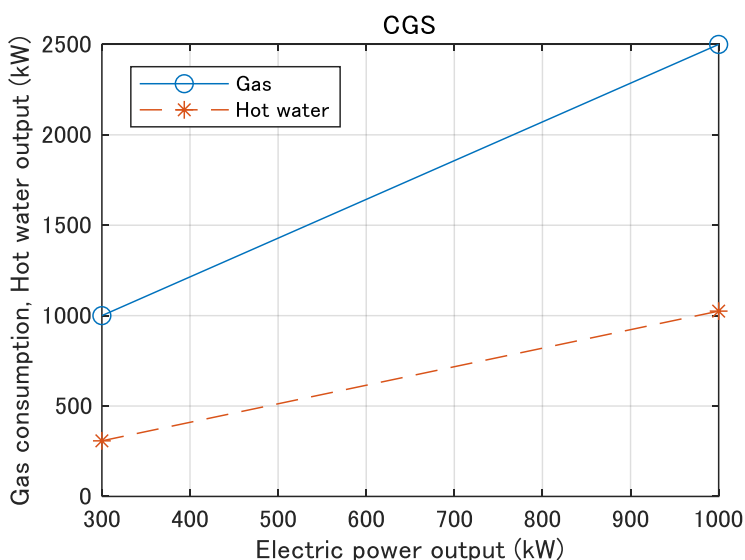


図 4-3 CGS のガス使用、温水出力特性

### 4.3.2. ABR 特性

ABR は CGS 排熱駆動機とガス駆動機を想定した。排熱駆動機は定格出力時の COP を 0.9 に設定、このときの温水使用量が CGS 定格温水出力と等しくなるように定格冷水出力を、下限出力では COP が 0.2 低下すると仮定して温水使用量を決定した。一般には、CGS 排熱駆動機であっても起動時ならびに高負荷域ではガスによる追い炊きを併用することで出力を増加するが多いが、この場合の特性は厳密には温水使用量とガス使用量に応じた非線形の入出力特性にならざるを得ない。本研究では、混合整数線形計画法 MILP にて運転計画を導出するため、この特性を線形化するために、運転中は排熱単独運転可能な運転範囲に限定し、起動時のみガス使用を考慮することとした。この排熱駆動機の温水使用特性は式(4.3)にて定式化した。

$$hw_{ABR-h} = 0.9751 \cdot cw_{ABR-h} + 125.5102 \cdot u_{ABR-h} \dots\dots\dots(4-3)$$

$$gas_{ABR-g} = 0.6227 \cdot cw_{ABR-g} + 304.7619 \cdot u_{ABR-g} \dots\dots\dots(4-4)$$

(排熱駆動機)  $hw_{ABR-h}$  : 温水使用(kW)、 $cw_{ABR-h}$  : 冷水出力(kW)、 $u_{ABR-h}$  : 運転/停止

(ガス駆動機)  $gas_{ABR-g}$  : ガス使用(kW)、 $cw_{ABR-g}$  : 冷水出力(kW)、 $u_{ABR-g}$  : 運転/停止

ABR の運用決定変数は冷水出力 $cw_{ABR-h/g}$ 、運転/停止 $u_{ABR-h/g}$ である。先述の CGS 同様、冷水出力 $cw_{ABR-h/g}$ は、運転中であれば表 4-1 記載のように上下限值を持つが、停止中であれば「0」に固定されるように、後述する「4.4 需要予測に基づく最適運用計画」にて制約条件を定式化する。

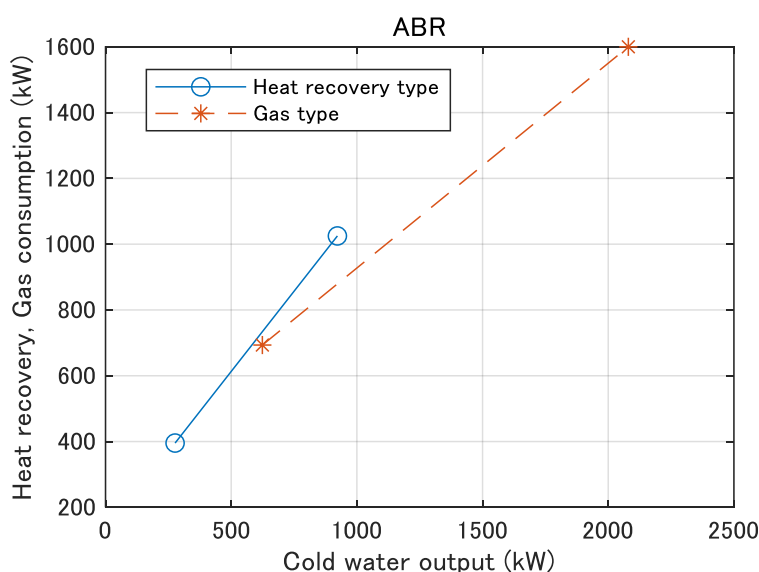


図 4-4 排熱駆動機の排熱使用、ガス駆動機のガス使用特性

### 4.3.3. EHP 特性

EHP は定格出力、COP の異なる 3 台を想定し、下限出力では COP が定格運転時の 7 割程度に低下すると仮定して、その間の部分負荷運転時では線形的に COP が低下する前提とした。この COP 低下により、一般的には大容量機を部分負荷で運転するよりも、小容量機に分割したほう全体の運用効率は向上するため、本研究においてもこれを満たす性能条件を設定した。各々の使用電力特性は式(4-5)～(4-7)にて定式化した。これらの特性を図 4-5 に示す。

$$e_{EHP-1} = 0.2148 \cdot (cw_{EHP-1} + hw_{EHP-1}) + 36.9904 \cdot u_{EHP-1} \dots\dots\dots(4-5)$$

$$e_{EHP-2} = 0.2193 \cdot (cw_{EHP-2} + hw_{EHP-2}) + 27.1226 \cdot u_{EHP-2} \dots\dots\dots(4-6)$$

$$e_{EHP-3} = 0.2239 \cdot (cw_{EHP-3} + hw_{EHP-3}) + 15.9869 \cdot u_{EHP-3} \dots\dots\dots(4-7)$$

$e_{EHP-1/2/3}$  : No.1/2/3 使用電力 (kW)、 $u_{EHP-1/2/3}$  : No.1/2/3 運転/停止

$cw_{EHP-1/2/3}$  : No.1/2/3 冷水出力(kW)、 $hw_{EHP-1/2/3}$  : No.1/2/3 温水出力(kW)

EHP の運用決定変数は冷水出力 $cw_{EHP-1/2/3}$ 、温水出力 $hw_{EHP-1/2/3}$ 、運転/停止 $u_{EHP-1/2/3}$ である。上式からわかるように、出力に対する使用電力は、冷水出力時と温水出力時で同一とした。これらの冷温水モードの切り替えは先述の表 4-2 に準じ、例えば「冷水」であれば冷水出力 $cw_{EHP-1/2/3}$ の上下限に表 4-1 記載の定格値と下限値を設定、温水出力 $hw_{EHP-1/2/3}$ の上下限を「0」とすることで、モード切り替えに対応する。

なお、EHP においては内蔵する圧縮機の回転数をインバータで制御する機器の場合には、一般に部分負荷時の COP が顕著に高く、この変化が大きいいため、上記の線形近似では実機との性能誤差が大きくなる場合もある。このような場合には、全運転範囲の特性を複数の折れ線で表現する区分線形近似による数理モデルの採用を検討すべきである（この場合にも、本研究で用いる混合整数線形計画法による運用計画の導出は可能である）。

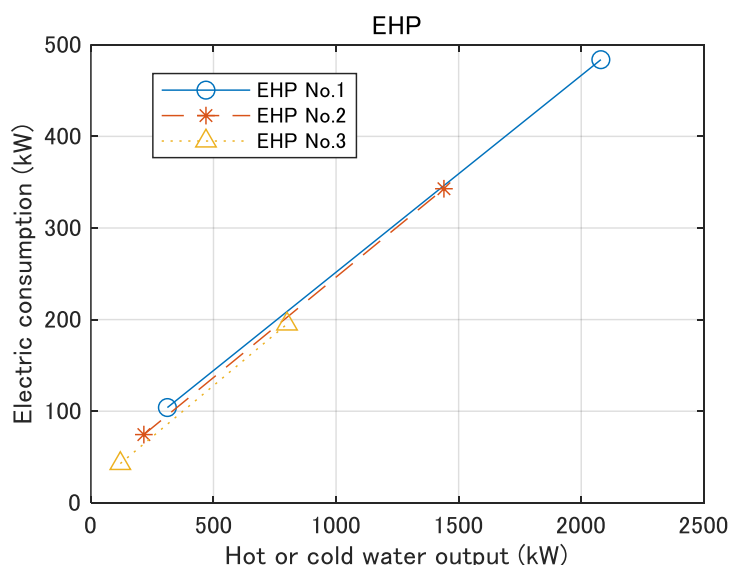


図 4-5 EHP の使用電力特性

#### 4.3.4. 温水槽・冷水槽・蓄電池特性

蓄熱槽（断熱有）では 24 時間で冷水貯蔵時 8%、温水貯蔵時に 7%～9%程度 of 自然放熱が発生するとされている<sup>(4-7),(4-8)</sup>。また、昨今普及が進んでいるリチウムイオン蓄電池では、一般に貯蔵時に自己放電は少なく、充放電サイクル効率は 80～90%程度である。このため、本研究では表 4-1 記載のように、冷水槽では 24 時間で 92%程度、温水槽では 91%程度に相当する貯蔵効率を、蓄電池では 85%に相当する充放電サイクル効率を加味した。なお、大規模蓄熱槽（数万 m<sup>3</sup> 以上）では損失が 1%未満の例もあることを先述したが、本研究の対象はオフィスビルとしているため、数千 m<sup>3</sup> 程度の中規模蓄熱槽を想定し、上記のやや大きめの損失を見込んだ。温水槽、冷水槽、蓄電池の時刻  $T=1$  におけるエネルギー貯蔵残量を式(4-8)に示す。なお、蓄電池充放電サイクル効率に相当する $\eta_{tr-ES}$ は、エネルギー投入/放出とエネルギー貯蔵残量との定量的な関係性を評価し易くするため、エネルギー投入の項にのみ乗じる。時刻  $T=2$  のエネルギー貯蔵残量は、 $T=1$  のエネルギー貯蔵残量である式(4-8)を代入することで、式(4-9)となる。これを一般化して、温水槽、冷水槽、蓄電池のエネルギー貯蔵残量は、式(4-10)にて定式化した。

$$S_{ES}^1 = S_{ES}^0 \cdot \eta_{st-ES} + k \cdot (in_{ES}^1 \cdot \eta_{tr-ES} - out_{ES}^1) \dots\dots\dots(4-8)$$

$$\begin{aligned} S_{ES}^2 &= S_{ES}^1 \cdot \eta_{st-ES} + k \cdot (in_{ES}^2 \cdot \eta_{tr-ES} - out_{ES}^2) \\ &= S_{ES}^0 \cdot (\eta_{st-ES})^2 + k \cdot (in_{ES}^1 \cdot \eta_{tr-ES} - out_{ES}^1) \cdot \eta_{st-ES} + k \cdot (in_{ES}^2 \cdot \eta_{tr-ES} - out_{ES}^2) \dots\dots\dots(4-9) \end{aligned}$$

$$\therefore S_{ES}^T = S_{ES}^0 \cdot (\eta_{st-ES})^T + k \cdot \sum_{t=1}^T [(in_{ES}^t \cdot \eta_{tr-ES} - out_{ES}^t) \cdot (\eta_{st-ES})^{T-t}] \dots\dots\dots(4-10)$$

$S_{ES}$  : エネルギー貯蔵残量(kWh)、 $in_{ES}$  : エネルギー投入(kW)、 $out_{ES}$  : エネルギー放出(kW)

$S_{ES}^0$  : 初期エネルギー貯蔵残量、 $\eta_{st-ES}$  : エネルギー貯蔵効率、 $\eta_{tr-ES}$  : エネルギー入力効率

$k$  : 単位換算係数(本研究では時間単位 30 分であるため  $k=0.5$ )、 $T$  : 貯蔵経過時間ステップ

このように定式化した温水槽、冷水槽の熱貯蔵残量の推移を図 4-6 に示す。これは、時刻  $T=0$  の初期値を表 4-1 記載の設備容量に等しい満蓄状態とし、以降の時刻の計画的なエネルギー投入およびエネルギー放出が一切ないと仮定した場合の、自然放熱による蓄熱残量の推移である。

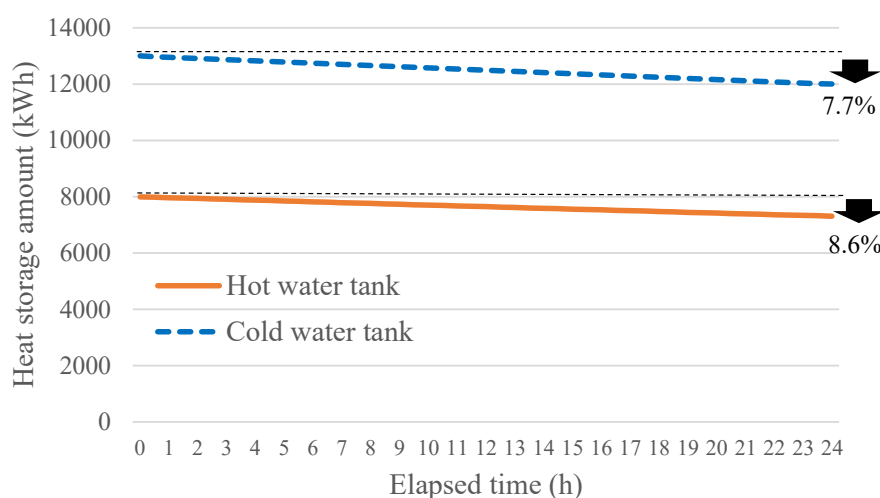


図 4-6 温水槽、冷水槽の蓄熱残量の推移



#### 4.4. 需要予測に基づく最適運用計画

ここでは、需要予測に基づく最適運用計画の定式化方法を述べる。なお、再計画についても計画時点の初期値と計画対象の時間長が異なるのみで、本節に記載する同様の方法で行う。先述のように、本研究では運用計画を混合整数線形計画問題（MILP）として定式化するため、運用計画の決定変数は連続値と離散値の両方を含む。運用計画の決定変数を、表 4-3 に示す。

離散変数は CGS、ABR（排熱駆動型、ガス駆動型）、EHP（No.1,2,3）の運転(1)/停止(0)状態である。これら以外は全て連続変数である。運転/停止移行は離散変数として定式化しても構わないが、連続変数とした方が計算時間の若干の短縮が見られたため、ここでは連続変数として定式化した（このような連続変数化は、例えば文献(4-9)でも見られる一般的な定式化方法である）。これらの運転/停止移行変数は機器が停止から運転、または運転から停止に移行する時刻にのみ「1」となるように、後述の制約式にて制限する。その他の決定変数とシステム構成との対応関係は、図 4-2 を参照されたい。熱廃棄以外の変数については、表 4-1 記載の上限を設ける。なお、CGS、ABR、EHP の運転時は最小出力の制限が存在するため、これらについては後述の制約式にて考慮する。表 4-3 記載の計 36 個の決定変数が、前日 22 時時点の計画では 48 時刻サンプル分存在するため、全体の決定変数は計 1728 個となる。

表 4-3 運用計画の決定変数

記号	説明	変数種別	単位	上下限	決定変数の数	備考
$u_{CGS}$	CGS運転 / 停止					
$u_{ABR-h/g}$	ABR(排熱 / ガス)運転 / 停止	離散値	-	0 / 1	6	
$u_{EHP-1/2/3}$	EHP No.1 / 2 / 3 運転 / 停止					
$on_{CGS}$	CGS運転移行					
$off_{CGS}$	CGS停止移行					
$on_{ABR-h/g}$	ABR(排熱 / ガス)運転移行	連続値	-	$0 \leq X \leq 1$	12	離散値でも構わない が計算時間短縮のため連続値とした
$off_{ABR-h/g}$	ABR(排熱 / ガス)停止移行					
$on_{EHP-1/2/3}$	EHP No.1 / 2 / 3 運転移行					
$off_{EHP-1/2/3}$	EHP No.1 / 2 / 3 停止移行					
$e_{BUY}$	受電電力					
$e_{CGS}$	CGS電気出力					
$cw_{ABR-h/g}$	ABR(排熱 / ガス)冷水出力					
$cw_{EHP-1/2/3}$	EHP No.1 / 2 / 3 冷水出力	連続値	kW	$0 \leq X \leq MAX$	16	
$hw_{EHP-1/2/3}$	EHP No.1 / 2 / 3 温水出力					
$e_{BAT-o/i}$	蓄電池 放電 / 充電					
$hw_{SHW-o/i}$	温水槽 放熱 / 蓄熱					
$cw_{SCW-o/i}$	冷水槽 放熱 / 蓄熱					
$hw_{EXH}$	熱廃棄 (温水)	連続値	kW	$0 \leq X$	2	上限なし
$cw_{EXH}$	熱廃棄 (冷水)					



最適運用計画の目的関数ならびに制約条件を以下にまとめる。下記において太字は定数であり、これらの詳細は先述の表 4-1、または表 4-4 を参照されたい。

< 目的関数 >

◆ 運用コスト（電力、ガス従量料金）

$$\min \text{obj.} = \sum_{t=n}^{48} (C_{E-BUY}^t + C_{G-BUY}^t) \dots \dots \dots (4-11)$$

ここで、

$$C_{E-BUY}^t = EC^t \cdot e_{BUY}^t \dots \dots \dots (4-12)$$

$$C_{G-BUY}^t = GC^t \cdot (gas_{CGS}^t + gas_{ABR-g}^t + G_{on}^t) \dots \dots \dots (4-13)$$

$$G_{on}^t = G_{CGS-on} \cdot on_{CGS}^t + G_{ABR-h-on} \cdot on_{ABR-h}^t + G_{ABR-g-on} \cdot on_{ABR-g}^t \dots \dots \dots (4-14)$$

$C_{E-BUY}$ ：電力従量料金(円)、 $C_{G-BUY}$ ：ガス従量料金(円)、 $G_{on}$ ：運転移行時ガス使用量(kWh)  
 $e_{BUY}$ ：受電量(kWh)、 $gas_{CGS}$ ：CGS ガス使用量(kWh)、 $gas_{ABR-g}$ ：ABR(ガス駆動機)ガス使用量(kWh)  
 $on_{CGS}$ ：CGS 運転移行、 $on_{ABR-h}$ ：ABR(排熱駆動機)運転移行、 $on_{ABR-g}$ ：ABR(ガス駆動機)運転移行  
 $EC$ ：電力従量料金単価(円/kWh)、 $GC$ ：ガス従量料金単価(円/kWh)  
 $G_{CGS-on}$ ：CGS 運転移行時ガス使用量(kWh)、 $G_{ABR-h-on}$ ：ABR(排熱駆動機)運転移行時ガス使用量(kWh)  
 $G_{ABR-g-on}$ ：ABR(ガス駆動機)運転移行時ガス使用量(kWh)  
 $t$ ：時刻ステップ、 $n$ ：計画の起点時刻ステップ

運用計画で最小化する目的関数は、1 日分の電力・ガス従量料金からなる運用コストである。ここで、式(4-12)と式(4-13)の料金単価を CO<sub>2</sub> 排出係数や 1 次エネルギー係数に変更することで、これら環境負荷の最小化を目的にすることも可能である<sup>(4-10)</sup>。再計画時では、再計画実行時刻を計画の起点時刻として、以降、同日 22 時までの 1 日の残り時刻までの運用コストを最小化する。電力従量料金は電力系統からの受電量、ガス従量料金は CGS と ABR(ガス駆動機)の運転時のガス使用量と、CGS と ABR(排熱駆動機・ガス駆動機)の運転移行時のガス使用量から計算される。CGS と ABR(ガス駆動機)の運転時のガス使用量は、先述の式(4-1)、(4-2)である。なお、表 4-4 記載の料金単価は、研究着手時点（2020 年初頭）での一般的な値を採用した。

表 4-4 その他の定数

記号	説明	値	単位	備考
$EC$	電力従量 料金単価	ピーク：17.71	JPY/kWh	
		昼間：17.10(夏季),15.95(その他季)		
		夜間、日曜：12.54		
$GC$	ガス従量 料金単価	58.74	JPY/Nm <sup>3</sup>	発熱量 45MJ/Nm <sup>3</sup>
$E_{DEM}$	電力需要	計画時：予測値	kW	30分平均値
$HW_{DEM}$	温水需要	運用シミュレーション時：実績値		
$CW_{DEM}$	冷水需要			

<制約条件>

◆ 電力需給バランス

$$e_{BUY}^t + e_{CGS}^t + e_{BAT-o}^t - e_{BAT-i}^t - \sum_{k=1}^3 e_{EHP-k}^t - E_{EXH} \cdot (hw_{EXH}^t + cw_{EXH}^t) - E_{sub}^t - E_{on}^t - E_{off}^t = E_{DEM}^t \quad (4-15)$$

$e_{BUY}$  : 受電電力(kW)、 $e_{CGS}$  : CGS 電気出力(kW)、 $e_{BAT-o}$  : 蓄電池放電(kW)、 $e_{BAT-i}$  : 蓄電池充電(kW)

$e_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 使用電力 (kW)、 $hw_{EXH}$  : 温水熱廃棄 (kW)、 $cw_{EXH}$  : 冷水熱廃棄 (kW)

$E_{sub}$  : 補機使用電力 (kW)、 $E_{on}$  : 運転移行時使用電力 (kW)、 $E_{off}$  : 停止移行時使用電力 (kW)

$E_{EXH}$  : 熱廃棄電力係数、 $E_{DEM}$  : 電力需要(kW)

ここで、

$$E_{sub}^t = E_{CGS-sub} \cdot e_{CGS}^t + E_{ABR-sub} \cdot (cw_{ABR-h}^t + cw_{ABR-g}^t) + \sum_{k=1}^3 E_{EHP-sub} \cdot (cw_{EHP-k}^t + hw_{EHP-k}^t) + E_{SCHW-sub} \cdot (cw_{SCW-o}^t + hw_{SHW-o}^t) \quad (4-16)$$

$$E_{on}^t = \sum_{k=1}^3 E_{EHP-k-on} \cdot on_{EHP-k}^t \quad (4-17)$$

$$E_{off}^t = E_{CGS-off} \cdot off_{CGS}^t + E_{ABR-h-off} \cdot off_{ABR-h}^t + E_{ABR-g-off} \cdot off_{ABR-g}^t + \sum_{k=1}^3 E_{EHP-k-off} \cdot off_{EHP-k}^t \quad (4-18)$$

$e_{CGS}$  : CGS 電気出力(kW)、 $cw_{ABR-h/g}$  : ABR(排熱駆動機/ガス駆動機)冷水出力(kW)

$cw_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 冷水出力(kW)、 $hw_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 温水出力(kW)

$cw_{SCW-o}$  : 冷水槽放熱(kW)、 $hw_{SCW-o}$  : 温水槽放熱(kW)、 $on_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 運転移行

$off_{CGS}$  : CGS 停止移行、 $off_{ABR-h/g}$  : ABR(排熱駆動機/ガス駆動機)停止移行

$off_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 停止移行

$E_{CGS-sub}$  : CGS 補機電力係数、 $E_{ABR-sub}$  : ABR 補機電力係数、 $E_{EHP-sub}$  : EHP 補機電力係数、

$E_{SCHW-sub}$  : 蓄熱槽ポンプ電力係数、 $E_{EHP-1/2/3-on}$  : EHP No.1/2/3 運転移行時使用電力(kW)

$E_{CGS-off}$  : CGS 停止移行時使用電力(kW)、 $E_{EHP-1/2/3-off}$  : EHP No.1/2/3 停止移行時使用電力(kW)、

$E_{ABR-h/g-off}$  : ABR (排熱駆動機/ガス駆動機)停止移行時使用電力(kW)

電力需給バランス制約式(4-15)では、受電電力、CGS 電気出力、蓄電池放電からなる電力供給が、電力需要（計画対象の機器運用に依存しない固定分の電力需要）と機器使用電力を合わせた正味の電力需要に等しいとする。上記の機器使用電力は、蓄電池充電、EHP 運転時の使用電力、熱廃棄に伴う使用電力、各機器の補機使用電力および運転/停止移行時の使用電力である。運転時の EHP 使用電力は、先述の式(4-5)～式(4-7)である。補機使用電力は式(4-16)である。これらは CGS、ABR、EHP、蓄熱槽の補機類が使用する電力であり、各々の出力に比例するとした。運転/停止移行時の使用電力は式(4-17)と式(4-18)である。運転移行時では、補機類の使用電力は式(4-16)に包含されているため、その他の機器立ち上げ時に必要となる各機器の主たるエネルギー源の追加使用量を考慮する。このため、運転移行時使用電力の式(4-17)では、電気駆動の EHP 分のみが考慮されており、CGS と ABR について

ては式(4-14)で機器立ち上げ時のガス使用を見込んでいる。式(4-18)の停止移行時の使用電力は、補機類の残留運転（機器停止時には本体は即時停止されるが、プラント運用への影響緩和、機器自体の保護等のため、補機類は一定時間の残留運転が行われる）で必要となる電力である。

#### ◆ 温水需給バランス

$$hw_{CGS}^t + \sum_{k=1}^3 hw_{EHP-k}^t + hw_{SHW-o}^t - hw_{SHW-i}^t - hw_{ABR-h}^t - hw_{EXH}^t = HW_{DEM}^t \quad (4-19)$$

ここで、

$$hw_{CGS}^t \geq hw_{ABR-h}^t \quad (4-20)$$

$hw_{CGS}$  : CGS 温水出力(kW)、 $hw_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 温水出力(kW)、

$hw_{SHW-o/i}$  : 温水槽放熱/蓄熱(kW)、 $hw_{ABR-h}$  : ABR（排熱駆動機）温水使用(kW)

$hw_{EXH}$  : 温水熱廃棄(kW)、 $HW_{DEM}$  : 温水需要(kW)

温水需給バランス制約式(4-19)では、CGS 温水出力、EHP 温水出力、温水槽放熱からなる温水供給が、温水需要（計画対象の機器運用に依存しない固定分の温水需要）と機器の温水使用を合わせた正味の温水需要に等しいとする。上記の機器温水使用は、温水槽蓄熱、ABR（排熱駆動機）温水使用、温水熱廃棄である。CGS 温水出力は式(4-2)、ABR（排熱駆動機）温水使用は式(4-3)である。なお、ここでは式(4-20)のように、CGS 温水出力は ABR（排熱駆動機）温水使用より多いと制約する。ABR の運転には、CGS が出力する高温の温水が必要なためである（一般に EHP や温水槽からの温水は、ABR の運転に足る温度ではない）。

#### ◆ 冷水需給バランス

$$\sum_{k=1}^3 hw_{EHP-k}^t + cw_{ABR-h}^t + cw_{ABR-g}^t + cw_{SCW-o}^t - cw_{SCW-i}^t - cw_{EXH}^t = CW_{DEM}^t \quad (4-21)$$

$cw_{EHP-1/2/3}$  : EHP No.1/2/3 冷水出力(kW)、 $cw_{ABR-h/g}$  : ABR（排熱駆動機/ガス駆動機）冷水出力(kW)

$cw_{SCW-o/i}$  : 冷水槽放熱/蓄熱(kW)、 $cw_{EXH}$  : 冷水熱廃棄(kW)、 $CW_{DEM}$  : 冷水需要(kW)

冷水需給バランス制約式(4-21)では、EHP 冷水出力、ABR 冷水出力、冷水槽放熱からなる冷水供給が、冷水需要（計画対象の機器運用に依存しない固定分の冷水需要）と機器の冷水使用を合わせた正味の冷水需要に等しいとする。機器の冷水使用は冷水槽蓄熱、冷水熱廃棄である。

ここで、式(4-19)と式(4-21)では冷温水の熱量バランスのみを考慮しており、これらの流量バランスは含まれていない。しかし、一般に空調機などの負荷機器の流量と熱量はほぼ比例関係にあり、温度一定を仮定すれば、熱量バランスのみでも大きな齟齬は生じない（従来研究でも、運用計画では熱量のみを考慮する事例が多い）。仮に、流量を加味する場合には、式(4-19)と式(4-21)と同様に供給側と需要側の流量バランス制約を追加すればよい。また、もし予測需要に応じたシステム各所の流量が事前に不確定の場合は、付録 1 に示すような最適制御にて、流量の制約を加味すればよい（実行時には各流量実績値をフィードバックして最適制御を行う）。

◆ 運転/停止移行制約

$$on_{CGS}^t \geq u_{CGS}^t - u_{CGS}^{t-1}, off_{CGS}^t \geq u_{CGS}^{t-1} - u_{CGS}^t \dots\dots\dots(4-22)$$

$$on_{ABR-h/g}^t \geq u_{ABR-h/g}^t - u_{ABR-h/g}^{t-1}, off_{ABR-h/g}^t \geq u_{ABR-h/g}^{t-1} - u_{ABR-h/g}^t \dots\dots\dots(4-23)$$

$$on_{EHP-1/2/3}^t \geq u_{EHP-1/2/3}^t - u_{EHP-1/2/3}^{t-1}, off_{EHP-1/2/3}^t \geq u_{EHP-1/2/3}^{t-1} - u_{EHP-1/2/3}^t \dots\dots\dots(4-24)$$

CGS	$on_{CGS}$ : 運転移行、 $off_{CGS}$ : 停止移行、 $u_{CGS}$ : 運転/停止
ABR (排熱/ガス)	$on_{ABR-h/g}$ : 運転移行、 $off_{ABR-h/g}$ : 停止移行、 $u_{ABR-h/g}$ : 運転/停止
EHP No,1/2/3	$on_{EHP-1/2/3}$ : 運転移行、 $off_{EHP-1/2/3}$ : 停止移行、 $u_{EHP-1/2/3}$ : 運転/停止

表 4-3 で示したように、各機器の運転/停止移行は上下限「1～0」の連続変数にて定式化した。この上下限と上記の式(4-22)～(4-24)を併用することで、運転移行は各機器が停止から運転に移行する時刻にのみ「1」、停止移行は運転から停止に移行する時刻にのみ「1」になる。厳密には、機器の運転/停止状態が変化しない場合、上記の運転移行変数または停止移行変数は上下限「1～0」内の任意の値を取り得るが、これまで述べた通り、機器の運転/停止には追加でガスや電力の使用が発生するため、目的関数である運用コストを最小化するために、上記の条件下ではこれらの変数は「0」に自ずと収束する。しかし、ソルバーの収束判定閾値を満たす微小な値が残存するリスクなども考慮して、念のため本研究ではソルバー算出解を離散化し直し、再計算した運用コストの結果を用いる。

◆ 最小運転・停止時間制約

$$\sum_{t=i}^{\min(48, i+MT_{CGS} \times \frac{60}{30} - 1)} (on_{CGS}^t + off_{CGS}^t) \leq 1 \dots\dots\dots(4-25)$$

$$\sum_{t=i}^{\min(48, i+MT_{ABR-h/g} \times \frac{60}{30} - 1)} (on_{ABR-h/g}^t + off_{ABR-h/g}^t) \leq 1 \dots\dots\dots(4-26)$$

$$\sum_{t=i}^{\min(48, i+MT_{EHP-1/2/3} \times \frac{60}{30} - 1)} (on_{EHP-1/2/3}^t + off_{EHP-1/2/3}^t) \leq 1 \dots\dots\dots(4-27)$$

CGS	$on_{CGS}$ : 運転移行、 $off_{CGS}$ : 停止移行、 $MT_{CGS}$ : 最小運転・停止時間
ABR (排熱/ガス)	$on_{ABR-h/g}$ : 運転移行、 $off_{ABR-h/g}$ : 停止移行、 $MT_{ABR-h/g}$ : 最小運転・停止時間
EHP No,1/2/3	$on_{EHP-1/2/3}$ : 運転移行、 $off_{EHP-1/2/3}$ : 停止移行、 $MT_{EHP-1/2/3}$ : 最小運転・停止時間
$i$ : 計画の起点時刻ステップ、計画の起点時刻ステップ+1、計画の起点時刻ステップ+2、・・・、48	

式(4-25)～(4-27)が各機器の最小運転・停止時間制約式である。運転/停止移行制約で述べたように、各機器の運転移行変数は停止から運転に移行する時刻にのみ「1」、停止移行は運転から停止に移行する時刻にのみ「1」となる。これらの変数を利用して、表 4-1 に記載した各機器の最小運転・停止時間以内に、運転移行と停止移行が2回以上発生しないように制限する。

◆ 出力上下限制約

$$E_{CGS-MIN} \cdot u_{CGS}^t \leq e_{CGS}^t \leq E_{CGS-MAX} \cdot u_{CGS}^t \dots\dots\dots(4-28)$$

$$CW_{ABR-MIN-h/g} \cdot u_{ABR-h/g}^t \leq CW_{ABR-h/g}^t \leq CW_{ABR-MAX-h/g} \cdot u_{ABR-h/g}^t \dots\dots\dots(4-29)$$

$$CW_{EHP-MIN-1/2/3} \cdot u_{EHP-1/2/3}^t \leq CW_{EHP-1/2/3}^t \leq CW_{EHP-MAX-1/2/3} \cdot u_{EHP-1/2/3}^t \dots\dots\dots(4-30)$$

$$HW_{EHP-MIN-1/2/3} \cdot u_{EHP-1/2/3}^t \leq HW_{EHP-1/2/3}^t \leq HW_{EHP-MAX-1/2/3} \cdot u_{EHP-1/2/3}^t \dots\dots\dots(4-31)$$

CGS	$e_{CGS}$ : 電気出力(kW)、 $u_{CGS}$ : 運転/停止、 $E_{CGS-MAX/MIN}$ : 定格/下限電気出力(kW)
ABR (排熱/ガス)	$CW_{ABR-h/g}$ : 冷水出力(kW)、 $u_{ABR-h/g}$ : 運転/停止 $CW_{ABR-MAX-h/g}$ : 定格冷水出力(kW)、 $CW_{ABR-MIN-h/g}$ : 下限冷水出力(kW)
EHP No,1/2/3	$CW_{EHP-1/2/3}$ : 冷水出力(kW)、 $HW_{EHP-1/2/3}$ : 温水出力(kW)、 $u_{EHP-1/2/3}$ : 運転/停止 $CW_{EHP-MAX-1/2/3}$ : 定格冷水出力(kW)、 $CW_{EHP-MIN-1/2/3}$ : 下限冷水出力(kW) $HW_{EHP-MAX-1/2/3}$ : 定格温水出力(kW)、 $HW_{EHP-MIN-1/2/3}$ : 下限温水出力(kW)

式(4-28)～(4-31)が各機器の出力上下限制約式である。表 4-1 記載の各機器の定格/下限出力と運転/停止状態の積にて上下限を定義することで、機器の運転中 ( $u = 1$ ) であれば出力は上記の指定した上下限範囲内に制限され、一方、機器の停止中 ( $u = 0$ ) であれば出力は「0」に固定される。なお、先述の流量バランス制約を加味する場合には、同様の方法で機器の流量上下限制約を追加する。

◆ エネルギー貯蔵残量上下限制約

$$0 \leq S_{SCW}^T \leq S_{SCW-MAX} \dots\dots\dots(4-32)$$

$$0 \leq S_{SHW}^T \leq S_{SHW-MAX} \dots\dots\dots(4-33)$$

$$0 \leq S_{BAT}^T \leq S_{BAT-MAX} \dots\dots\dots(4-34)$$

$S_{SCW}$ : 冷水槽貯蔵残量 (kWh)、 $S_{SHW}$ : 温水槽貯蔵残量 (kWh)、 $S_{BAT}$ : 蓄電池貯蔵残量 (kWh)
$S_{SCW-MAX}$ : 冷水槽蓄熱容量 (kWh)、 $S_{SHW-MAX}$ : 温水槽蓄熱容量 (kWh)、 $S_{BAT-MAX}$ : 蓄電池蓄電容量 (kWh)

式(4-32)～(4-34)が冷水槽、温水槽、蓄電池のエネルギー貯蔵残量の上下限制約式である。式中の貯蔵残量は先述の式(4-10)で計算される。

再計画を含む運用計画では、式(4-15)、(4-19)、(4-21)にある電力、温水、冷水の各需要に、計画時点の需要予測値が代入される。運用計画の初期条件を表 4-5 に示す。これらの初期条件は、初回計算時には任意の値に設定、以降は次節「4.5 最適運用計画に基づく運用シミュレーション」で述べる運用シミュレーションの結果を反映して、逐次、運用計画を導出していく。なお、本研究では運用計画の導出と次節の運用シミュレーションに、MATLAB®の混合整数線形計画ソルバーである「intlinprog」を使用した。

表 4-5 運用計画の初期条件

記号	説明	単位	備考
$u_{CGS}^0$	CGS運転/停止 初期状態		
$u_{ABR-h/g}^0$	ABR(排熱/ガス)運転/停止 初期状態	-	過去5時間分
$u_{EHP-1/2/3}^0$	EHP No.1 / 2 / 3 運転/停止 初期状態		
$s_{SCW/SHW}^0$	冷水槽/温水槽 初期貯蔵残量	kWh	
$s_{BAT}^0$	蓄電池 初期貯蔵残量	kWh	

#### 4.5. 最適運用計画に基づく運用シミュレーション

ここでは、先述の最適運用計画に基づく熱源・電気機器の運用をシミュレーションとして評価する。本運用シミュレーションでは、当該時刻の一部の運用条件を運用計画に固定したうえで、式(4-15)、式(4-19)、式(4-21)の各需要を実績値に置き換えて、前節「4.4 需要予測に基づく最適運用計画」で述べた運用計画最適化問題を直近時刻分（本研究では直近 30 分単位）のみ求解して、これをシミュレーション結果とする。

ここで、計画時の需要予測値と需要実績値に乖離がある場合、熱源システムの運用調整に蓄熱槽調整運用、熱源機調整運用の 2 種類の対応方法があることを「4.1 再予測・再計画と運用シミュレーションの関係」で述べた。これらの運用調整を、図 4-7 の熱源システムの簡易構成図を参照して説明する。複数の熱源機が蓄熱槽に接続される場合には、実際には図 4-7 のように、全ての熱源機が蓄熱槽を介して、並列に接続される形態を取る。需要端へは熱交換器を介して供給される場合が多く、蓄熱槽から流出する冷温水量は、需要端の要求熱量（需要実績値）に応じて自動制御される。

①蓄熱槽調整運用とは、需要実績値に乖離が生じた場合でも、熱源機出力を事前に求めた計画値のまま固定し（以下、計画に拘束と表記する）、蓄熱槽の運用変化（正味の蓄熱量/放熱量の変動）を許容する方法である。一方、②熱源機調整運用は、正味の蓄熱量/放熱量は計画値に拘束の上、過不足分を熱源機出力の調整により補填する方法である。

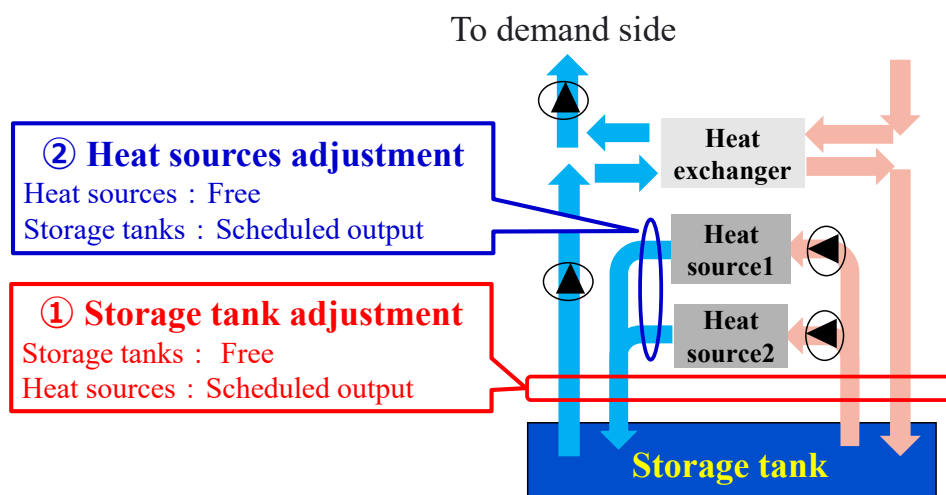


図 4-7 熱源システムの運用調整方法

図 4-8 に蓄熱槽調整運のシミュレーションフローを示す。蓄熱槽調整運用では、熱源機出力は事前に求めた運用計画値に拘束したうえで、需要実績値を反映した全体の需給バランスである式(4-15)、式(4-19)、式(4-21)を満たすように、蓄熱槽の蓄熱量/放熱量を改めて算出する。このとき、需給バランスを満たすための蓄熱槽の要求熱出力変化量  $\Delta H$  が蓄熱槽の放熱/蓄熱可能量が超過してしまうと、需給バランスを満たせず、実行不可能となってしまう。これを回避するため、上記の蓄熱槽の放熱/蓄熱可能量を超過する需要変動が生じた場合には、蓄熱槽は完全放熱/蓄熱としたうえで熱源機出力の計画値への拘束条件を緩和することで、全体としての需給バランスを維持する。

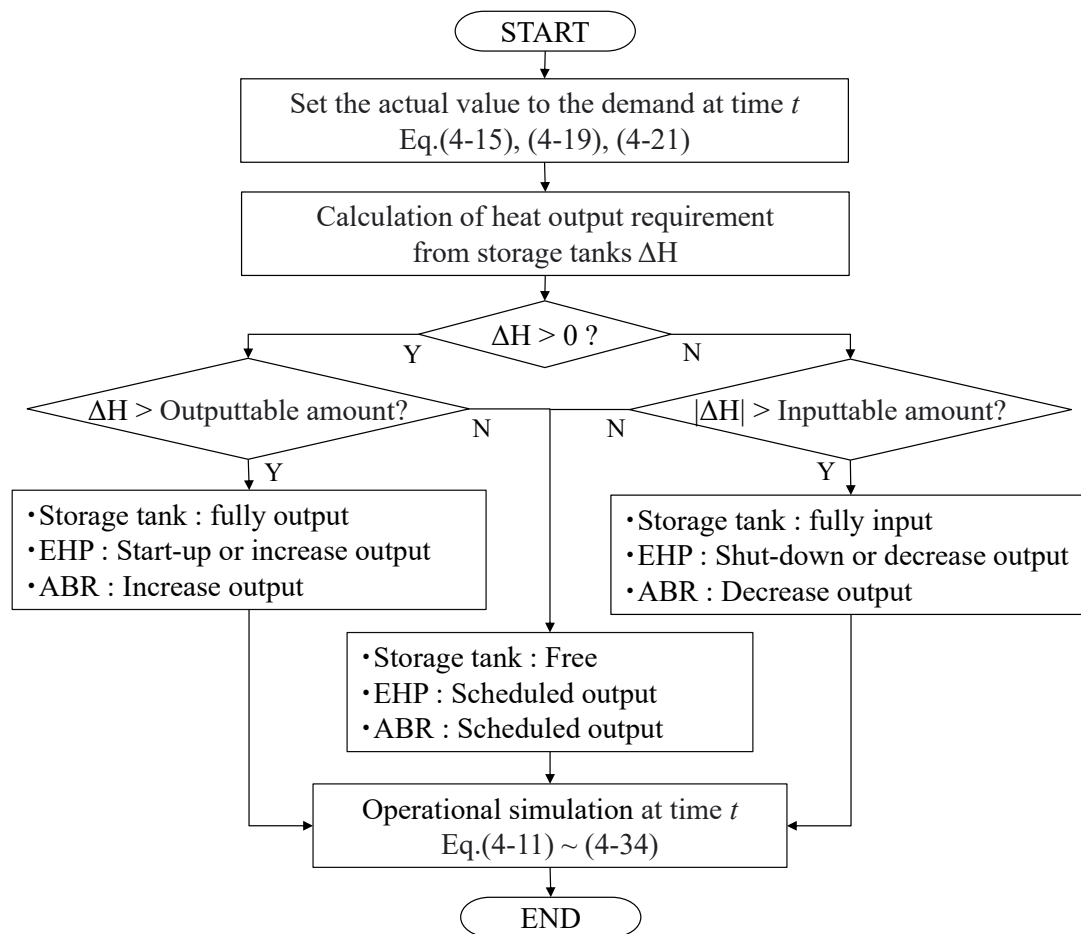


図 4-8 蓄熱槽調整運用のシミュレーションフロー



図 4-9 に熱源機調整運用のシミュレーションフローを示す。こちらの運用調整方法は、図 4-7 に示す蓄熱槽の蓄熱量/放熱量を事前に求めた計画値に拘束し、需要実績の変動に対しては熱源機の実出力調整で追従する（運転/停止状態は計画値に固定する）。このとき、需要変動が熱源機出力の増加調整余力  $Bub$  または低下調整余力  $Blb$  を超過すると、需給バランスが満たせずに実行不可能になってしまう。そこで、この場合には熱源機を最大/最小出力としたうえで、蓄熱槽の放熱量/蓄熱量に対する拘束条件を緩和することで、全体の需給バランスを維持する。なお、ここで上記の熱源機調整余力  $Bub$  と  $Blb$  の計算には、CGS 温水と ABR（排熱専用機）は含まないこととした。CGS は電力も併給するため、熱需給の観点のみでは調整余力を定義できないためである。また、ABR（排熱専用機）も機器の特性上、ならびに温水系への広範な影響を加味すると、計画外の実出力調整を行うのは現実的には難しい。従って、ABR（排熱専用機）の実出力は計画出力に固定とする。

また、熱源機調整運用は熱源機の実出力調整を行うことで、蓄熱槽を極力計画に沿って運用することを目的としているが、CGS 温水を蓄熱してもなお余剰となる場合には、温水熱廃棄が発生する可能性もある。このような場合には、温水槽を厳密に計画値に拘束して運用する必要性は乏しい。従って、22 時時点の最終蓄熱残量の計画値が満蓄の場合には、温水系の計画拘束は緩和する。同様に、夜間需要に移行した後の 1 日の終盤においても、蓄熱槽を厳密に計画通りに運用する有益性は乏しい。このため、熱源機調整運用における蓄熱槽運用の拘束は、本研究の対象需要データにおいて需要が大きく低下し、夜間需要への移行が完了する 18 時までとした。

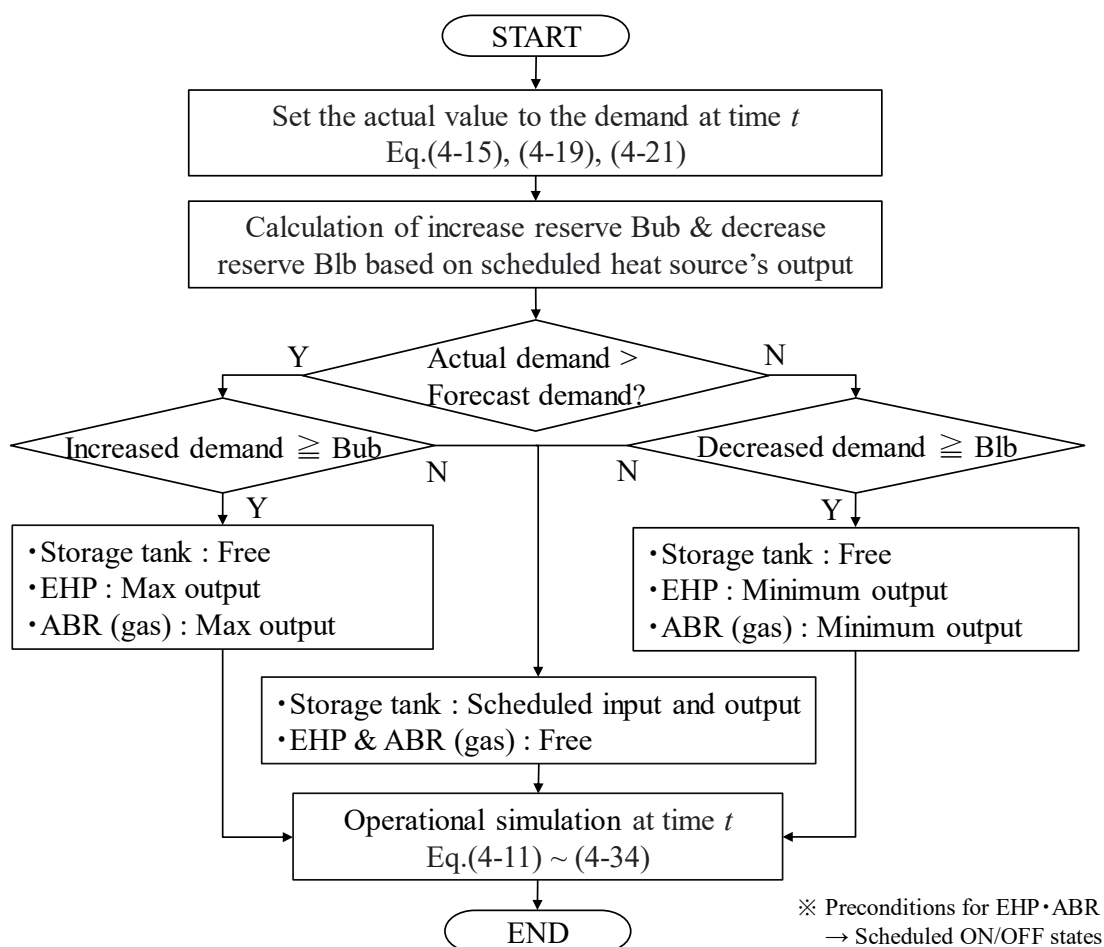


図 4-9 熱源機調整運用のシミュレーションフロー

以上、熱源システムの運用シミュレーションの方法について述べたが、第2章「熱源・電気機器の最適運用問題」でも述べたように、この運用シミュレーションは事前に導出した運用計画を前提条件として、実績需要に対する機器の最適制御手法としても応用可能である。

熱源以外の電気機器については、CGS は計画からの出力変更のみを許容する。蓄電池については、充電は CGS 余剰発電が発生する可能性を考慮して計画充電量以上を拘束条件として、放電については計画放電量に拘束することとした。これらは熱源システムの調整運用手法に依らず共通の条件である。本研究では、以上の条件を加味して運用シミュレーションを実施するが、図 4-8 と図 4-9 の手順を踏んでもなお実行不可能となる場合には（例えば、後述の図 4-17 に示すように実績需要の増加が EHP の調整余力を超過し、ABR を計画外起動せざるを得ない場合など）、以下の手順に沿って徐々に制約条件を緩和して、実行可能解を導出する。

- (1) 図 4-8、図 4-9 に従いシミュレーションを実施
- (2) 図 4-8、図 4-9 記載の計画に対する拘束を緩和してシミュレーションを実施  
(ただし、起動停止に時間を要する CGS、ABR は計画運転/停止状態を維持)
- (3) 全熱源の計画外運転/停止を許容してシミュレーションを実施  
(ただし、最小・運転停止時間制約は順守する)
- (4) 最小運転・停止時間制約も緩和してシミュレーションを実施

なお、上述の2種類の運用調整方法を時刻別に切り替えるなど、組み合わせて使用することで、最適性が向上する余地はある。しかし、1日の大枠の最適性は運用計画にて担保されるため、30分断面内の運用調整においては、計画からのマイナーチェンジに留めて、その追従変化を扱いやすくするため、本研究では上記の運用調整方法の組み合わせは考慮しないこととした。すなわち、全評価期間において蓄熱槽調整運用または熱源機調整運用のいずれか一方のみを統一して用いる、準最適な運用シミュレーションとして評価を進めた。

## 4.6. 経済性評価

### 4.6.1. 方法

提案予測手法と計画手法を用いた経済性評価の方法について述べる。下記の 2 種類の評価を行った。

#### (1) 運用シミュレーション手法の評価

前節で述べた蓄熱槽調整運用、熱源機調整運用の 2 種類の運用シミュレーション手法の経済性を評価し、次の「翌日予測・当日再予測のポテンシャル評価」で使用する手法を決定する。ここでは、前日 22 時に翌日予測に基づき翌日運用計画を実施し、翌朝午前 6 時までは翌日運用計画に基づく運用を行う。冷温水需要が立ち上がり始める午前 6 時以降は、30 分毎に再予測・再計画を実施して運用を行う。なお、午前 6 時までの間に計画外の機器運転/停止が生じた場合は、次時刻で再計画を実施する。

#### (2) 翌日予測・当日再予測のポテンシャル評価

上述の評価で決定した運用シミュレーション手法を使用して、需要予測が需要実績に完全に一致した場合とのコスト差をポテンシャルとして、以下の 4 種類の経済性を評価する。

- ・ A : 前日 22 時の翌日予測・計画のみを実施し、以降は再計画を基本的に実施しない
- ・ B : 翌朝午前 6 時以降は 30 分毎に再予測・再計画を実施する
- ・ C : 当日再予測のみ実績に一致（当日再予測が精度 100% の場合）
- ・ D : 翌日予測、当日再予測が実績に一致（翌日予測、当日再予測が精度 100% の場合）

上記 A は前日 22 時の翌日予測に基づく翌日運用計画のみを実施、以降は基本的に再計画を実施しないケースであり、運用シミュレーションにより計画外の機器運転/停止が生じた場合にのみ、次時刻で再計画を実施する。B は上記「(1) 運用シミュレーション手法の評価」における条件と同一である。

C は当日再予測が始まる午前 6 時以降に実施する再予測需要を実績値に置き換える。すなわち、当日再予測の精度が 100% であった場合に、当日再予測によって低減できる運用コストのポテンシャルを評価する。さらに、D では前日 22 時から開始される翌日予測分も含め、全ての予測需要を実績値に置き換える。すなわち、ここで得られるのは翌日予測と当日再予測の双方の精度が 100% と仮定した場合の、理想的な運用コストである。ここで、C と D の差は翌日予測の成否によって低減できる運用コストのポテンシャルと解釈できる。翌日予測は夜間の蓄熱運用を決定するのに用いられるため、双方を比較評価するのは、理想的な蓄熱を行った場合と、そうではない場合とのコスト差を評価する意図がある。

上記の経済性評価は、「3.4 提案する需要予測方式の精度評価」で述べた各季節の代表 14 日、合計 56 日分を評価対象とする。代表日に限定した理由は、以降の評価で毎日の運用詳細を確認し、再予測・再計画の課題を考察するためである（各季節 14 日分とした根拠は P.31 を参照されたい）。評価対象日の概要を表 4-6 に示す。各季節の代表日は月曜日から始まる 2 週間分であり、使用した需要データの建物における実際の日種を設定し、各季節 4～6 日の休日を含む。冬季と夏季については、温水と冷水の年間ピーク需要が発生する長期連休後の期間を設定した（P.28 の図 3-9 を参照）。なお、初回の翌日予測・計画については、第 1 日目の前夜（日曜日）22 時に実行する。

表 4-6 評価対象日の概要

日数	秋季					冬季					春季					夏季				
	日種					日種					日種					日種				
	月	日	0：平日	曜日		月	日	0：平日	曜日		月	日	0：平日	曜日		月	日	0：平日	曜日	
			1：休日					1：休日					1：休日					1：休日		
1	10	1	0	月		1	7	0	月		4	1	0	月		8	19	0	月	
2	10	2	0	火		1	8	0	火		4	2	0	火		8	20	0	火	
3	10	3	0	水		1	9	0	水		4	3	0	水		8	21	0	水	
4	10	4	0	木		1	10	0	木		4	4	0	木		8	22	0	木	
5	10	5	0	金		1	11	0	金		4	5	0	金		8	23	0	金	
6	10	6	1	土		1	12	1	土		4	6	1	土		8	24	1	土	
7	10	7	1	日		1	13	1	日		4	7	1	日		8	25	1	日	
8	10	8	1	月		1	14	1	月		4	8	0	月		8	26	0	月	
9	10	9	0	火		1	15	0	火		4	9	0	火		8	27	0	火	
10	10	10	0	水		1	16	0	水		4	10	0	水		8	28	0	水	
11	10	11	0	木		1	17	0	木		4	11	0	木		8	29	0	木	
12	10	12	1	金		1	18	0	金		4	12	0	金		8	30	0	金	
13	10	13	1	土		1	19	1	土		4	13	1	土		8	31	1	土	
14	10	14	1	日		1	20	1	日		4	14	1	日		9	1	1	日	

#### 4.6.2. 結果 I ―運用シミュレーション手法の評価―

運用シミュレーション手法別の運用コストを図 4-10 に示す。同図は、評価対象全 56 日分の電力・ガス従量料金の合計を表している。熱源機調整運用のほうが僅かにコスト安であるものの、両者の差は 0.083%程度であり、実質的に大差はない。図 4-11 に、蓄熱槽調整運用に対する熱源機調整運用のコスト削減額を示す。秋季と冬季に若干のコスト差が発生しており、春季と夏季は両者にほぼ差はない。評価対象全 56 日で、両者のコスト差が最も大きかったのは秋季第 3 日目（10 月 3 日）であった。同日における冷水系の運用シミュレーション結果を図 4-12 に示す。同図は、需要（実線）に対する機器別の供給量を棒グラフで表しており、需要を超過する供給量は冷水槽への蓄熱量である。

同日では、熱源機調整運用のほうが 1.8%程度のコスト削減となっている。両者の主だった運用の差異は、同図の赤枠で囲った朝方と夕方である。朝方 7:30～8:00 では、予測需要が実績需要を大きく超過している。蓄熱槽調整運用では、熱源機出力（ここでは EHP2,3）を事前計画値に拘束するため、実績需要の減少分だけ大量の蓄熱が発生している。一方、熱源機調整運用では、事前計画値の蓄熱量を確保できる分だけ実績需要の減少に応じて上記 EHP 出力を低下できるため、この使用電力分だけコスト差が発生している。一方の夕方では、蓄熱槽調整運用は 16 時に EHP3 を停止したため、次時刻で需要増加があっても最小停止時間制約のため EHP3 を再起動できず、高価な ABR（ガス）を運転することで運用コストが増加している（なお、表 4-2 より EHP1 は温水モードであるため使用できない）。

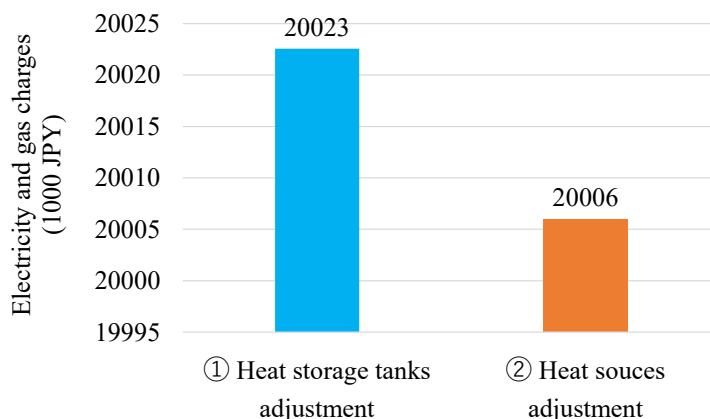


図 4-10 運用シミュレーション手法別の運用コスト

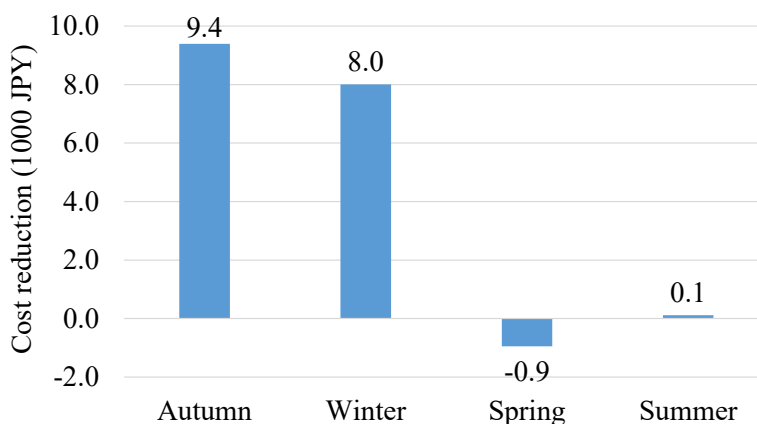
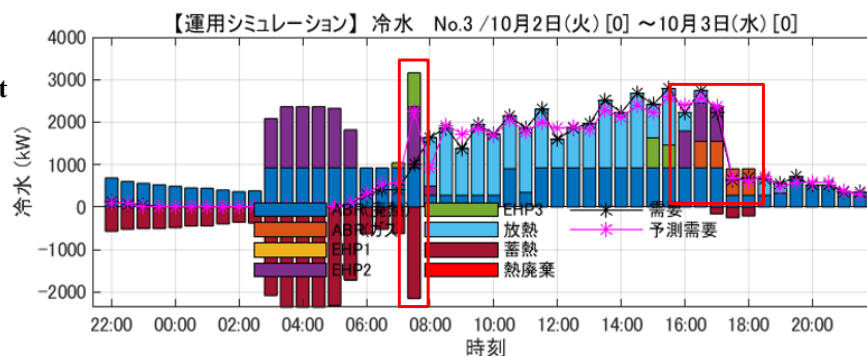


図 4-11 熱源機調整運用のコスト削減額（対 蓄熱槽調整運用）

① Heat storage tanks adjustment

411610 JPY



② Heat sources Adjustment

404203 JPY

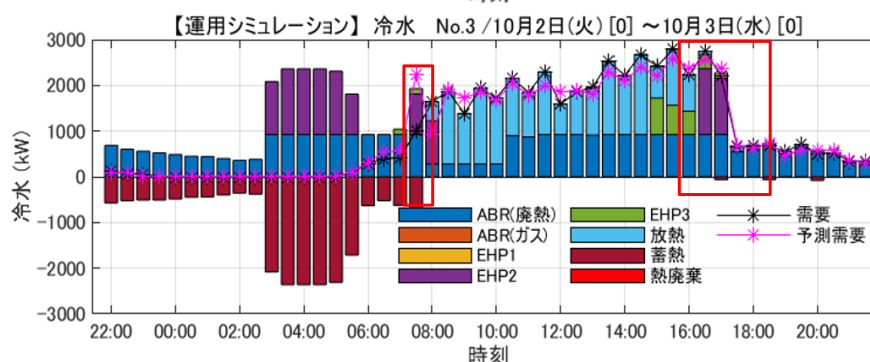


図 4-12 秋季第3日目の運用シミュレーション結果（冷水系）

ここで、冷水の日積算需要量の平均予測誤差を図 4-13 に示す。なお、ここでの予測誤差は、P.31 にある表 3-3 の方法により作成した1日の予測需要に基づき算出している。図 4-13 より、秋季と冬季は予測需要が実績需要を超過する傾向がある。熱源機調整運用では、これらの季節において実績需要の減少に応じて熱源機出力を低下させることで、図 4-11 に示したコスト削減効果を生み出していると考えられる。以上、運用調整方法の評価では僅かに熱源機調整運用の方が良好な結果であったため、以降では本手法を用いて評価を進める。

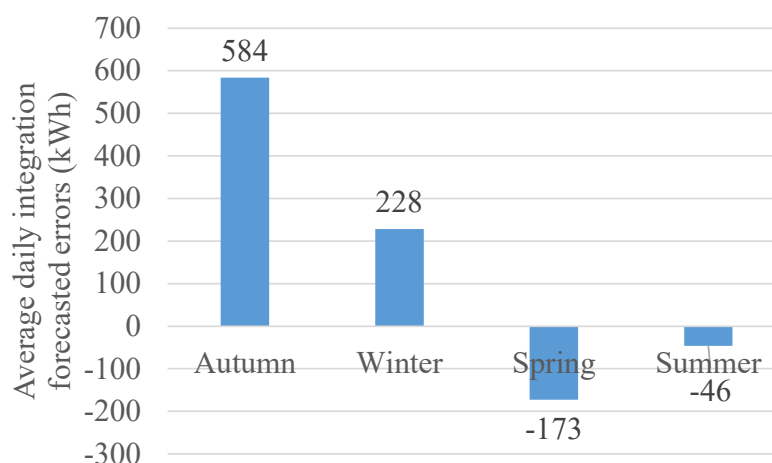


図 4-13 日積算需要量の平均予測誤差（冷水）

#### 4.6.3. 結果Ⅱ — 翌日予測・当日再予測のポテンシャル評価 —

評価ケース別の運用コスト削減率を図 4-14 に示す。同図はケース A（前日 22 時の翌日予測・計画のみを実施し、以降は再計画を基本的に実施しない）を基準にした評価対象 56 日分の運用コスト削減率であり、あわせてケース A に対するケース D（翌日予測、当日再予測の精度 100%とした理想ケース）のコスト削減額を 100%とした場合のコスト削減達成率を示す。

コスト削減率としては、ケース D においても 1.36%にとどまり、その効果はあまり大きくない。これは、本研究で設定したメーカ公称値に準じた機器性能のばらつき（例えば、主要な計画外調整要素である EHP 部分負荷時の性能低下や容量が異なる 3 台の性能差など）が、比較的小さかったことが原因と考えられる（実際、後述する夏季の事例では、高価な ABR が運用に組み込まれることで、コスト削減率は増加する）。現実には老朽機器が混在する、種々の悪条件により機器メーカ提示の性能が出ないなど、機器性能のばらつきは大きくなる傾向がある。従って、コスト削減の多寡は対象に応じて異なるため、需要予測誤差を完全に解消したとしても、運用改善の効果が小さいと断定するのは早計である。ここで、ケース B（30 分毎に再予測・再計画を実施）のコスト削減達成率は 28%程度であるため、まだ改善余地が大きい。一方、ケース C（当日再予測の誤差 0%）のコスト削減達成率は 74%に上るため、当日再予測誤差を低減することのコスト削減効果は大きいと言える。図 4-15 に季節別の運用コスト削減額

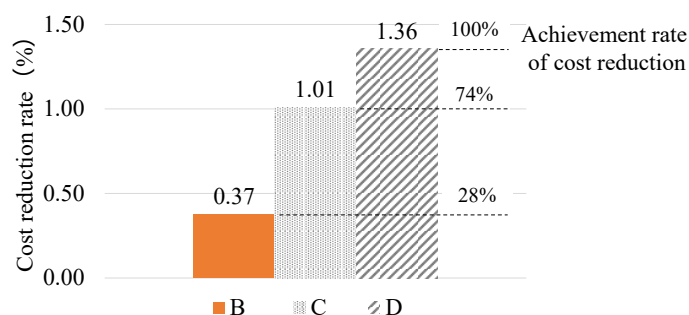


図 4-14 運用コスト削減率

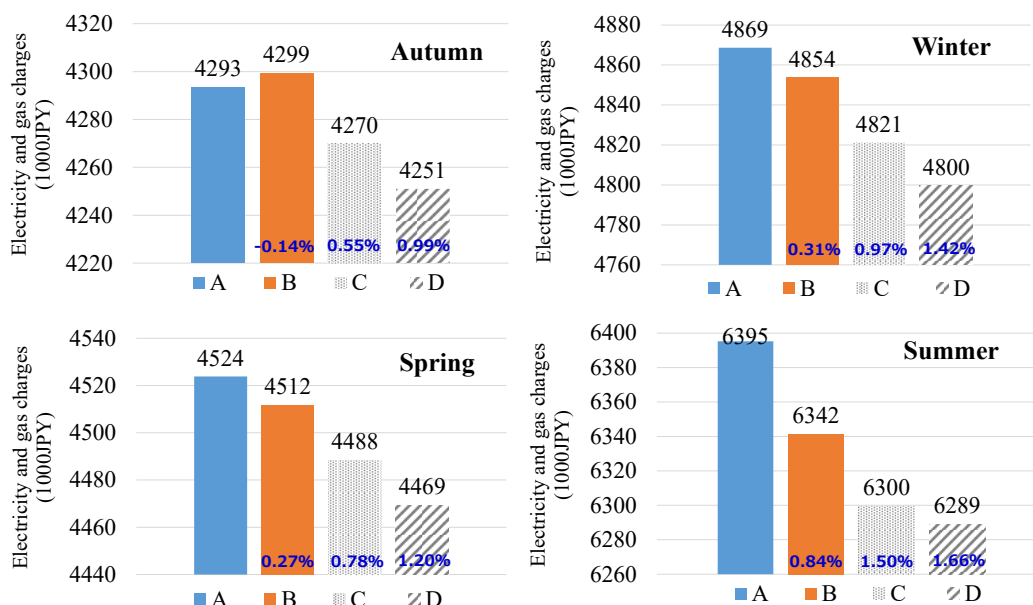


図 4-15 季節別の運用コスト削減額

減額をまとめる。同図の棒グラフ内に記載した割合は、評価ケース A を基準にしたコスト削減率である。主だった特徴を以下にまとめる。

- ・コスト削減率は熱需要が大きい夏季、冬季に比較的大きくなる傾向がある
- ・ケース B（30 分毎に再予測・再計画を実施）のコスト削減率は夏季が 0.84%と比較的大きく、一方、秋季では-0.14%のコスト悪化となっている。
- ・夏季は評価ケース C と D の差が小さい（翌日予測のポテンシャル効果が小さい）

上記結果の詳細については、次節で考察を交えて再度論じる。ここで、再予測・再計画を実施しないケース A の CGS、ABR 計画外起動回数を図 4-16 に示す。これは、30 分間隔で実施する運用シミュレーションにおいて、式(4-15)～(4-34)の制約条件を満たすために、停止する計画であった CGS、ABR を計画外に起動せざるを得なかった回数である。夏季では、この計画外起動が 10 回発生した。1 日の運用シミュレーション回数は 48 回であるため、各季節の運用シミュレーション総数は 672 回（48 回/日×代表 14 日間）であり、これは平均的に約 68 回に 1 回（約 1 日半に 1 回）、CGS および ABR の計画外運転が発生したことを意味する。CGS および ABR は起動時に定格出力に達するまでに 10～25 分ほどの時間を要するため、上記の計画外運転の発生は、現実の運用ではエネルギー供給力の不足を引き起こす懸念もある。一方、30 分毎に再予測・再計画を実施したケース B では、これらの CGS、ABR 計画外起動は一切生じなかった。ケース A において、CGS と ABR の計画外起動が最も多かった夏季第 2 日目の運用シミュレーション結果（冷水系）を図 4-17 に示す。

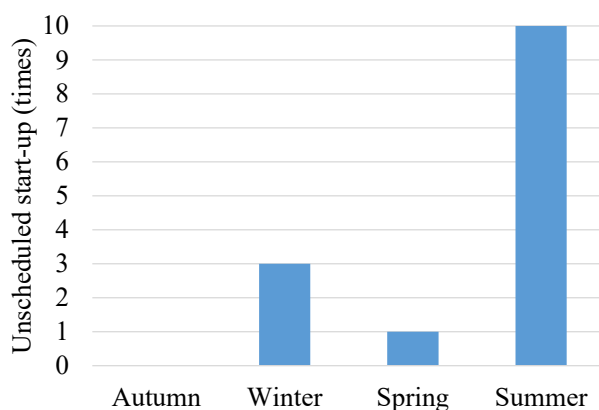


図 4-16 評価ケース A（翌日予測・計画のみ）の CGS、ABR 計画外起動回数



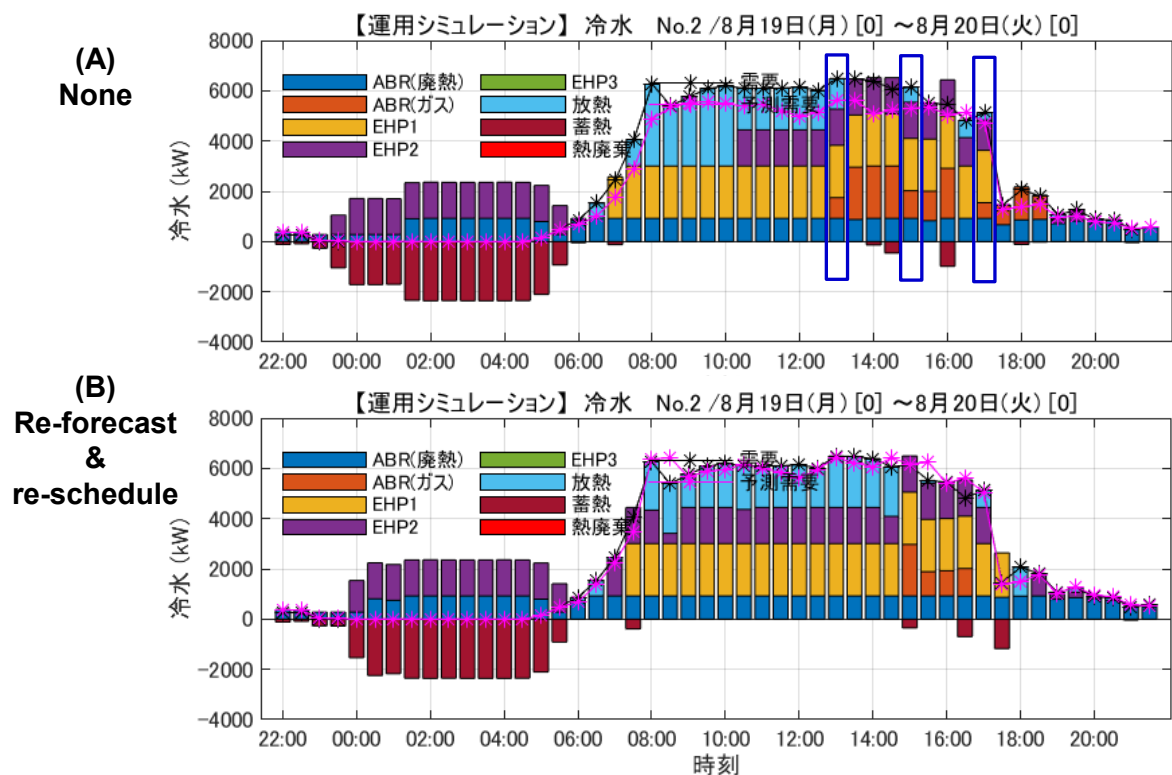


図 4-17 夏季第 2 日目の運用シミュレーション結果（冷水系）

図 4-17 の上段はケース A（翌日予測・計画のみ実施）、下段はケース B（30 分毎に再予測・再計画を実施）の運用シミュレーション結果である。同日において、ABR（排熱駆動機）と CGS（図中に表記はない）は終日運転であり、計画外起動が発生したのは、全て ABR（ガス駆動機）である。該當時刻を図中に四角で囲った。ケース A では、翌日予測結果である予測需要に対して、実績需要が増加傾向にあることがわかる。このため、冷水供給能力が足りず、13:00～13:30 に ABR（ガス駆動機）の計画外起動が発生する。計画外起動が生じたために再計画を実施し、以降 15 時までは ABR 最小運転時間 2h（表 4-1 を参照）を満たすために継続運転、この制約が終了した 15:00～15:30 に 2 回目の ABR（ガス駆動機）の計画外起動が発生する。最後の 17:00～17:30 で、16:30～17:00 に実績需要の低下に応じて停止した ABR（ガス駆動機）を再起動し、3 回目の計画外起動が発生している（加えて、これは最小停止時間制約の違反でもある）。一方、図 4-17 下部のケース B では、30 分毎の再予測により予測需要は実績需要に近づき（同図の予測需要は P.31、表 3-3 の方法を踏襲し、各時刻の運用シミュレーション時点で最新であった需要予測結果をプロットしている）、これを用いた再計画により、上記の一切の ABR 計画外起動を回避できている。また、図 4-17 に示した夏季第 2 日目は、評価した年間代表日のうちで、ケース A に対するケース B のコスト削減額が最も大きい 1 日であった。高価な ABR（ガス駆動機）の起動回数ならびに運転時間を最小化することで、その起動停止費用と運転費用の削減により、1 日全体のコスト削減を達成している。

以上のように、本研究の評価条件下においては、再予測・再計画の適用による年間の経済的効果は限定的であったが、CGS、ABR の計画外起動を回避するといった運用安定性の観点では、現状精度の再予測・再計画においても十分に高い有用性が確認できた。

#### 4.7. 提案手法の改善余地の考察

前節の翌日予測・当日再予測のポテンシャル評価の結果を踏まえて、当日再予測・当日再計画からなる提案手法の改善余地を考察する。季節別のコスト削減達成率を図 4-18 に示す。コスト削減達成率の定義は図 4-14 と同様である。なお、電力需要については、いずれのケースでも特徴的な差異は生じなかったため、以降は冷温水需要に特化して考察を進める。

##### (1) 翌日予測・翌日計画について

ここでは、図 4-18 の C、D に着目して翌日予測・計画の効果を分析する。両者の差に着目すると夏季が顕著に小さく、9.8 ポイントのコスト改善に留まっている。これが、全体の運用コスト削減率を示した図 4-14 において、翌日予測のポテンシャル効果が小さかったことの一因である。一方、冬季では約 32 ポイントの運用コスト改善となっている。ここで、冬季における冷水供給の一例を図 4-19 示す。同図の下段に挿入したグラフは、冷水槽の蓄熱残量トレンドである。ケース C では、翌日予測における

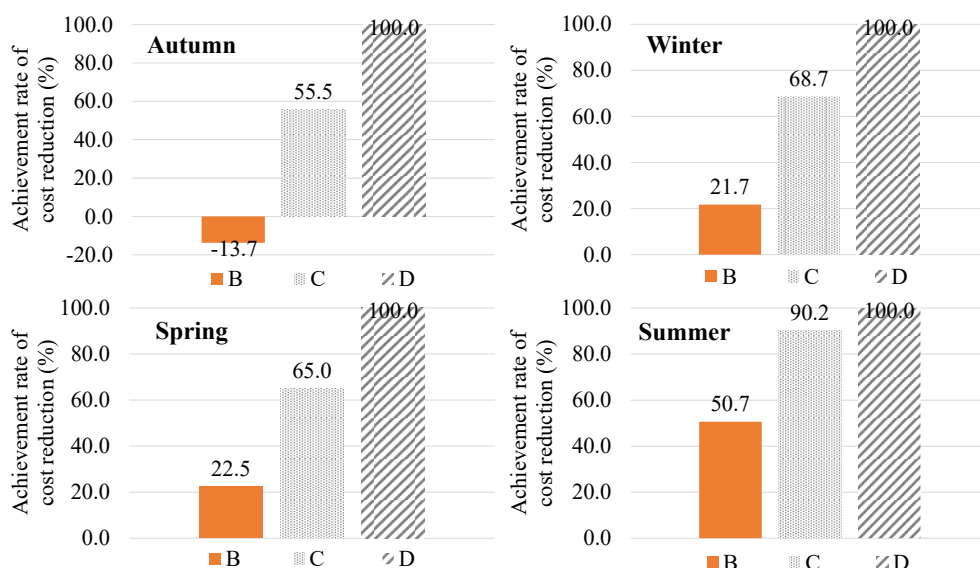


図 4-18 季節別のコスト削減達成率

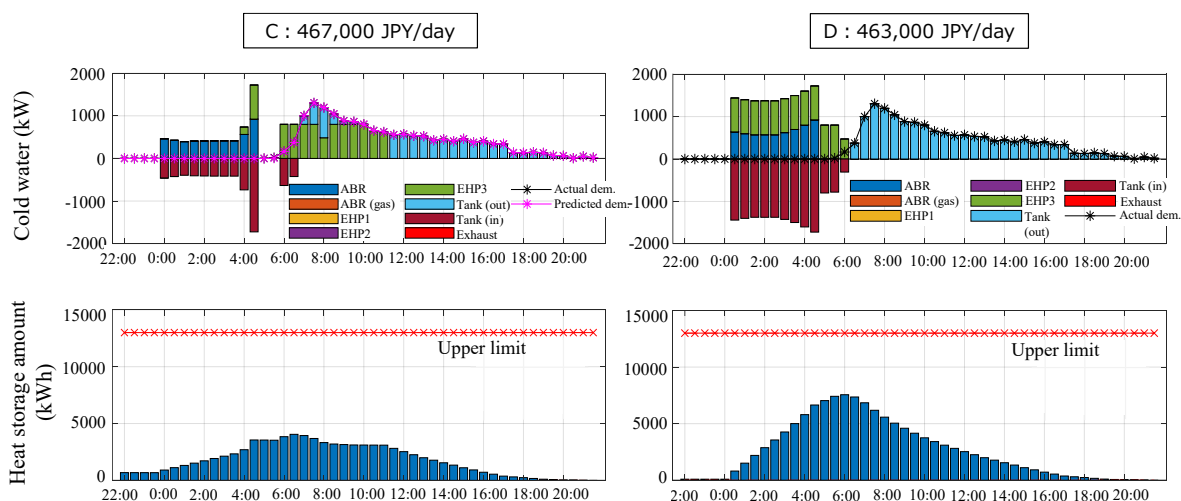


図 4-19 冬季第 9 日目の運用シミュレーション結果（冷水系）

予測需要が小さかったため、夜間蓄熱が十分ではなく、正午頃まで EHP を運転している（同図に示した午前 6 時以降の予測需要は、誤差 0%とした再予測値に置き換わっているため、実際の翌日予測結果とは異なることに注意されたい）。一方、翌日予測の精度を 100%としたケース D では、夜間に ABR（排熱駆動）に加えて、安価な電力を用いて EHP を運転することで、日中需要分の全てを夜間蓄熱で賄っており、これにより 1%ほど運用コストが改善している。

図 4-20 に冬季、夏季の蓄熱残量トレンドを示す。上段が冷水槽、下段が温水槽の蓄熱残量である。冷水槽に着目すると、夏季は休日を除く平日の全てで、C と D の両ケースで満蓄（容量 13,000kWh）状態まで蓄熱を行っていることがわかる。同季節の冷水需要が十分に大きいため、翌日予測に多少の誤差が生じて、蓄熱槽を満蓄とする運用に変化が生じないためであり（先述のように、非ピーク季節も含めた設備利用率の観点から、蓄熱槽容量はピーク季節の日積算需要の 3～4 割程度に設計されるのが普通であるため、上記の事象は一般的に生じ得る）、これが、図 4-18 に示したケース D の夏季のコスト改善効果が小さい原因である。同様に、温水槽でもピーク需要がある冬季の平日では、C、D の両ケースにおいて蓄熱残量の差異は小さい。しかし、図 4-18 において相応のコスト改善効果が見受けられるのは、上述の図 4-19 で示した冷水側の運用最適化による効果があるためである（同様に考えれば、夏季においても温水側の運用最適化による効果が生じると考えられるが、この寄与は図 4-18 では小さい。少ない需要に対して、発電価値に依存して運転が決定される CGS による潤沢な温水供給があるため、これらの違いはコスト差に大して寄与しないためと考えられる）。

以上より、冷水/温水需要の各々のピーク季節では、翌日予測の誤差は運用コストに与える影響が小さく、一方、需要の減少に応じて蓄熱槽容量を部分的にしか使用しない季節においては、翌日予測の誤差が運用コストの悪化に直結する傾向が確認できた。従って、これら季節における翌日予測誤差の低減、または影響を軽減することが、提案手法の改善余地の一つであると言える。

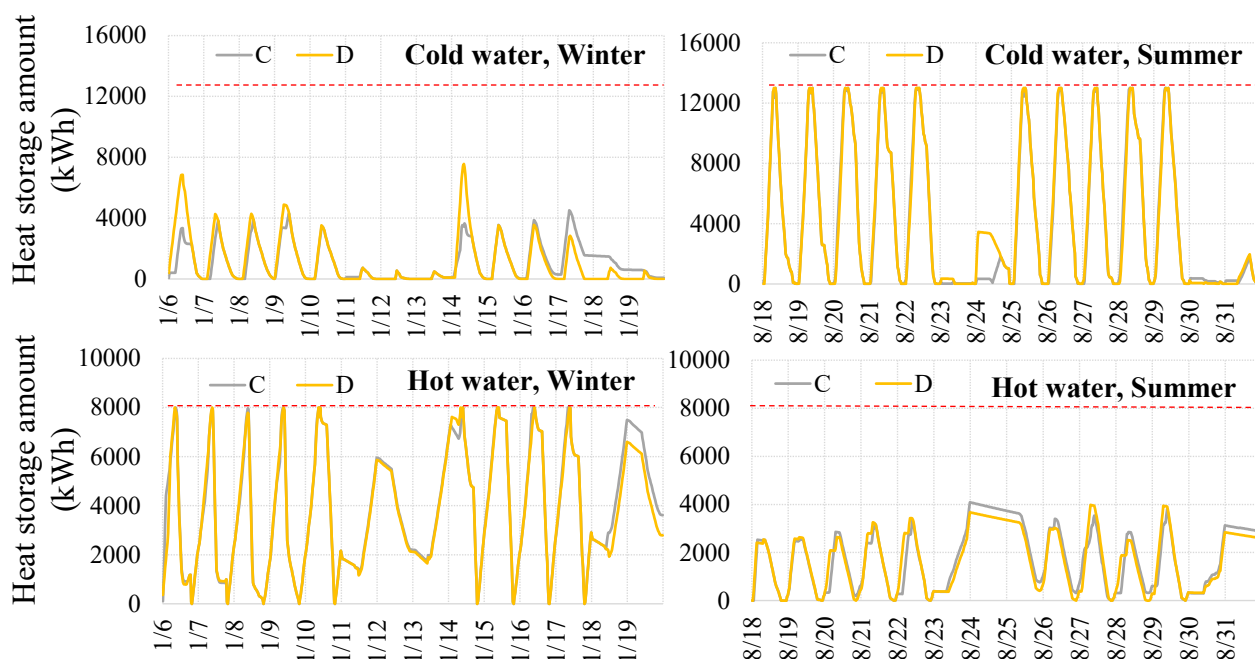


図 4-20 ケース C および D の蓄熱残量トレンド（冬季、夏季）

## (2) 当日再予測・再計画について

ここでは図 4-18 の B、C に着目して、当日再予測・再計画の効果を考察する。まず、B の再予測・再計画ケースは夏季に 50.7%、冬季・春季に 22%程度のコスト削減達成率である。一方、秋季では-13.7%と逆にコストが悪化した。この秋季におけるコスト悪化は、P.32 の図 3-11 に示した同季節の朝方における当日再予測の精度悪化が原因であると考えられる。コスト削減額が最も大きかったのは、先述の図 4-17 に示した夏季第 2 日目であり、その削減率は 1.3%であった。ここでは、先述のように高価な ABR（ガス駆動機）の運転を極力短くすることで、その運転費用と起動停止費用を削減している。一般に、需要が大きい季節では、運転優先順位が低い高価な熱源機を運転せざるを得ない状況が発生しやすいため、再予測・再計画の導入効果は比較的大きくなると言える。

同様に、当日再予測の精度を 100%とした評価ケース C では、夏季に上記の ABR（ガス駆動機）の運用最適化を更に推し進めることで、コスト削減達成率は 90.2%にも上り、その他の季節においてもコスト削減達成率は 56~69%程度である。現状の再予測・再計画ケース B との差は 39.5~69.2 ポイントにものぼるため、当日再予測誤差を低減、または計画時にその予測誤差確率を考慮して影響の軽減を図ることは、通年に渡り効果が期待できる現行手法の大きな改善余地であると言える。

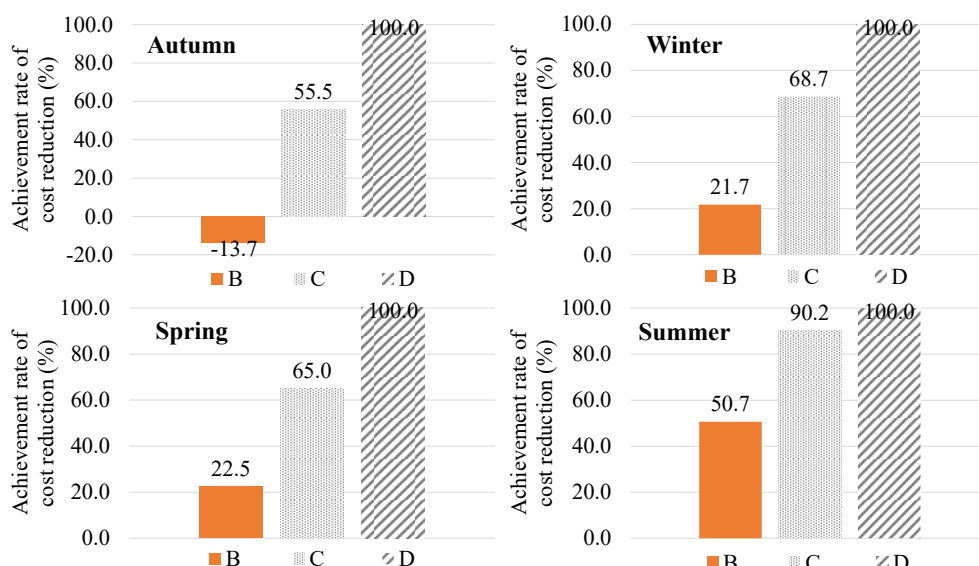


図 4-18 季節別のコスト削減達成率（再掲）

### (3) 当日再予測・再計画の開始時刻について

図 4-18 の秋季では、再予測・再計画を適用することで-13.7%と逆にコストが悪化した。この原因は、図 3-11 に示した同季節朝方の当日再予測の精度悪化であると考えられる。そこで、当日再予測・再計画の開始時刻を午前 6 時から 9 時に変更して、改めて評価を行った。結果を図 4-21 に示す。

当日再予測・再計画の開始時刻を午前 6 時から 9 時に変更した場合、秋季と春季においてはコスト改善が見られるが、逆に冬季と夏季ではコスト削減効果が悪化する結果となった。コスト改善が大きかった秋季、コスト悪化が大きかった夏季の最もコスト差を生じた日の運用シミュレーション結果を図 4-22 と図 4-23 に示す。

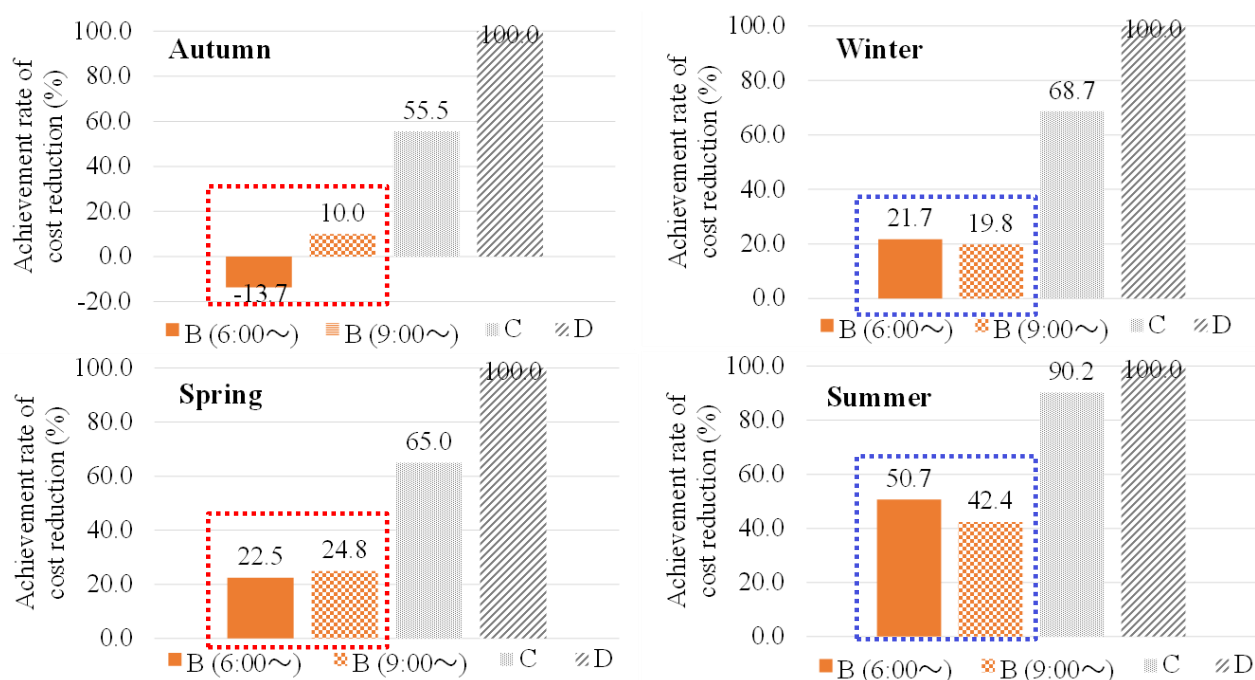


図 4-21 再予測・再計画開始時刻を変更した場合のコスト削減達成率



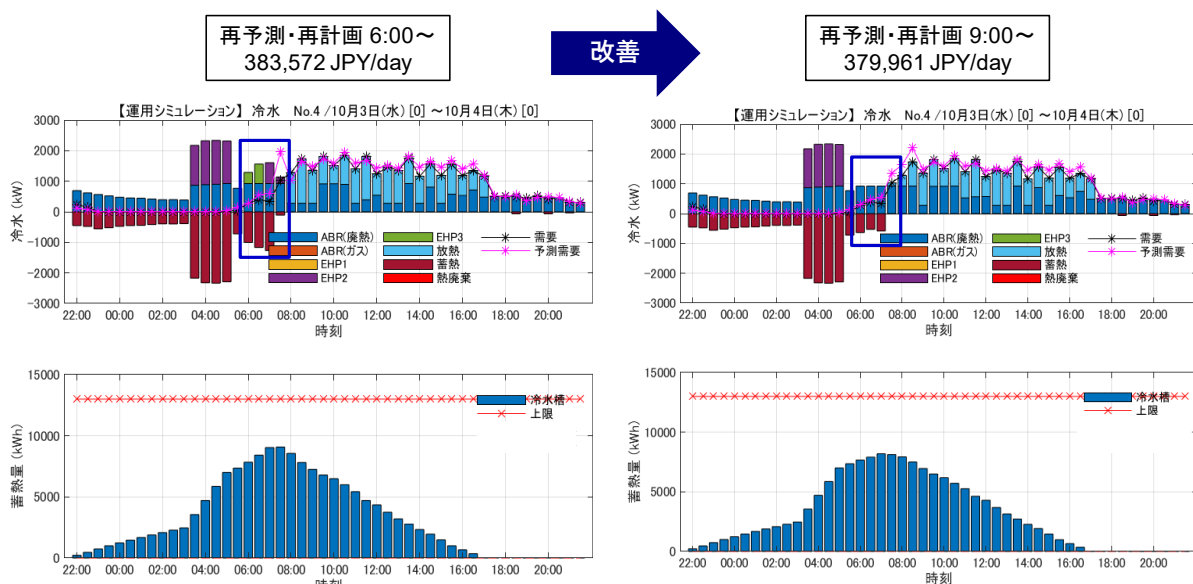


図 4-22 秋季第 4 日目の運用シミュレーション結果（冷水系）

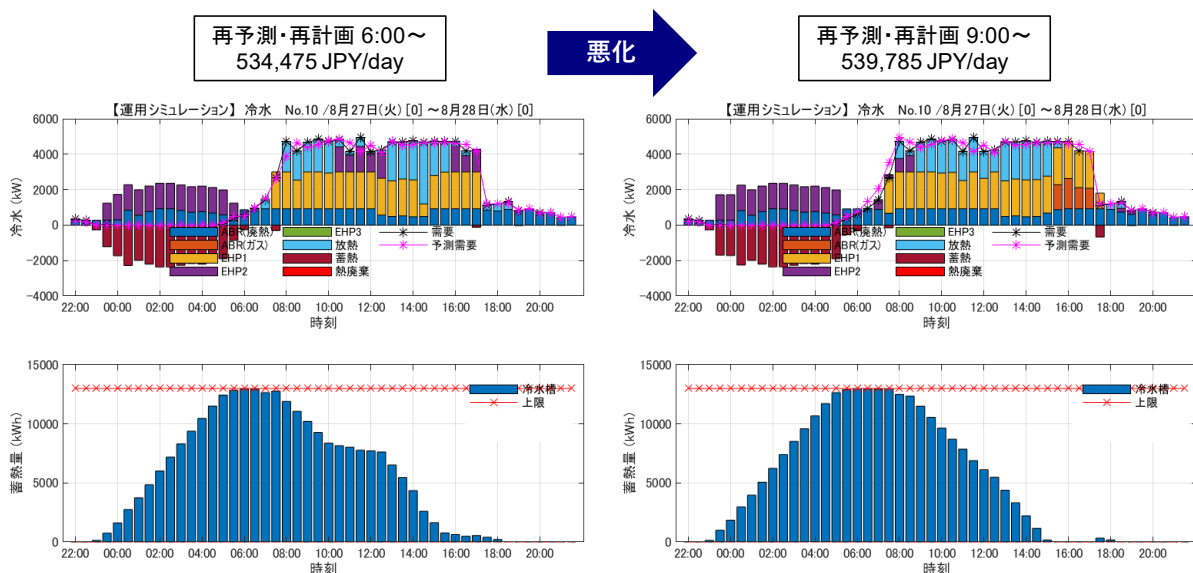


図 4-23 夏季第 10 日目の運用シミュレーション結果（冷水系）

図 4-22 の秋季では、再予測開始 6 時のケースは再予測開始直後の予測誤差により、EHP を起動して余分に蓄熱をしているが、再予測開始 9 時のケースではこれを回避することで、結果として 1 日のコストを 0.94%ほど改善している。一方、図 4-23 の夏季では、明け方のみならず、1 日を通して EHP、ABR(ガス)の運用が異なっている。特に再予測開始 9 時のケースでは、15:30 の計画で 15:30～16:00 に蓄熱残量を使い切ってしまう、16:00～16:30 に安価な EHP2 の追加起動では需給バランスを満たせないことを予見して、結果として 15:30 以降は高価なガス炊き ABR（容量が EHP2 より大きいため、需給バランスを満足できる）を起動している（なお、ABR 運転が 15:30～17:30 で継続するのは最小運転時間制約のためである）。この結果、1 日のコストは逆に 0.99%ほど悪化している。再計画開始 6 時のケースでは明け方から予測需要が実績に良く一致しており、蓄熱を活用することで上記の ABR 起動を回避している。

ここで、秋季と夏季における冷水槽蓄熱残量と、再予測・再計画開始を9時に後ろ倒したことによるコスト削減額の関係を図 4-24 に示す。同図の縦軸は6時再予測・再計画開始ケースに対する9時開始ケースのコスト削減額であり、横軸は両ケースの6時時点における冷水槽の蓄熱残量である（6時時点の蓄熱残量は、6時開始ケースと9時開始ケースの双方で同じである）。左側の秋季平日では、6時時点の蓄熱残量が小さいほど、9時開始ケースのコスト削減額が大きくなる傾向がある。これは、図 4-22 の事例にあるように、明け方に蓄熱残量が満蓄に達していない場合、再予測開始直後の予測誤差に即応して蓄熱運用を変化させてしまうことで、6時開始ケースのコストが逆に悪化してしまうためと考えられる。蓄熱残量が満蓄に近づくにつれてコスト差は小さくなる。これは仮に再予測開始直後に誤差が生じて、蓄熱残量がほぼ満蓄状態であるため、これによる蓄熱運用の変化が小さいためであると考えられる。

一方、右側の夏季平日では、蓄熱残量は全ての日においてほぼ満蓄状態であり、そのコスト削減額は1日を除き負である（すなわち大半の日は6時開始ケースの方が良好な結果であった。なお、この1日の特異日は6時の再予測・再計画開始により、結果的に高価なガス駆動 ABR が起動してしまうことでコスト悪化となったレアケースである）。夏季では、仮に明け方6時の再予測開始直後に誤差が生じて、ほぼ満蓄状態であるために蓄熱槽運用に変化が生じず、逆に再予測の開始時刻を早めた方が、1日全体の運用を早期に合理化できるメリットが上回るためと考えられる。

以上をまとめると、需要が小さい中間期などの季節は部分的な蓄熱運用に留まるため、早朝の予測精度悪化のデメリットが影響し易く、従って、再予測・再計画の開始時刻は遅めのほうが良い。逆に、ピーク需要期では早朝に蓄熱槽は満蓄状態であるため、早朝の予測精度悪化のデメリットより以降の予測精度向上のメリットが上回り、従って、再予測・再計画の開始時刻は早めのほうが望ましいと言える。

なお、実際の機器運用時には、翌日計画の結果を参照することで前夜のうちに上記の判断が可能である。すなわち、翌日予測において再予測開始時刻の蓄熱量が満蓄予定の場合にはそのままとし、一方、部分的な蓄熱に留まる場合には、翌朝の再予測・再計画開始を、予め図 3-11 などにに基づき定義した再予測誤差の低下が見込める遅めの時刻に変更すれば良い。

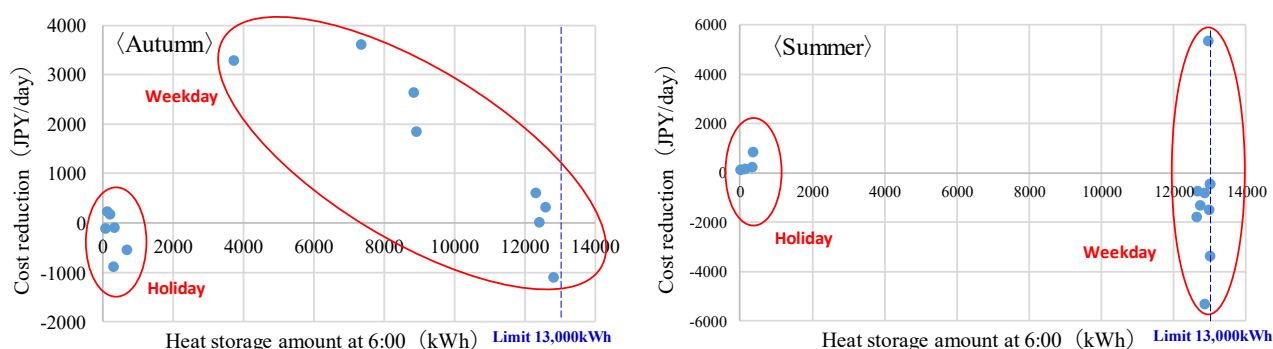


図 4-24 冷水槽蓄熱残量と9時再予測・再計画開始によるコスト削減額

#### (4) まとめ

これまでに述べた再予測・再計画を含む提案手法の改善余地を、運用の時系列順に以下にまとめる。

##### ・翌日予測・翌日計画時

本研究では予測誤差を低減するべく当日再予測・再計画法を適用した。しかし、「3.4 提案する需要予測方式の精度評価」にて触れたように、当日再予測は予測実行時刻から時間を隔てた長期の予測になるほど精度が悪化するため、翌日予測への適用は望ましくない。翌日予測・翌日計画では前夜における蓄熱槽運用の最適化が重点的な対象であり、需要が小さく、蓄熱槽容量を部分的にしか使用しない季節においては、翌日予測の誤差が運用コストの悪化に直結する傾向があることを示した。このため、これから季節における翌日予測の精度向上、または誤差に対する確率的評価の適用が提案手法の改善余地であると言える。

##### ・当日明け方の再予測・再計画開始直後

明け方の再予測開始直後では、直前の冷温水需要実績がほぼ存在しないため、再予測の挙動が不安定となり、逆にコスト悪化に繋がる可能性があることを述べた。これに対しては、考察で述べた再予測・再計画開始時刻のチューニングが必要である。一方、本来的には当日明け方の需要立ち上がりは、熱源システムなどの起動時刻に依存し、また建物自体の夜間蓄熱効果や前夜の運用終了状態などの外部環境要因によって必要となる熱量は大きく異なる。これらの需要発生メカニズムは、日中における需要発生のそれとは大きく異なるため、これに特化した需要予測手法の確立、ならびにこの予測を用いたシステムの最適起動制御手法の併用が理想的な対策である。

##### ・当日の明け方以降

当日再予測・再計画のポテンシャル評価とその考察を通して、当日再予測誤差への対策を進めることは、年間に渡り大きな改善効果が見込めることを示した。上述のように、当日再予測は予測実行時刻から時間を隔てるほど精度が悪化するため、本研究では、直近4時間分のみを当日再予測により更新する方針とした。このため、当日再予測の効果が及ばない直近4時間以降の予測誤差に対する確率的評価の適用が提案手法の大きな改善余地である。



#### 4.8. 参考文献

- (4-1) 中村政治：「IT 時代の計測・制御技術の動向 (5)IT 時代の空調制御理論と制御系設計ツール」, 空気調和・衛生工学会誌, Vol.80, NO.7, pp.533-541 (2006)
- (4-2) 空気調和・衛生工学会：「セントラル空調システムの最適化 機器相互の統合的最適設計と運転の手引き」(2013)
- (4-3) 三菱重工サーマルシステムズ (online) 、<https://www.mhi-mth.co.jp/catalogue/list.html#heatpump>
- (4-4) D. Sumiyoshi, H. Okamoto, M. Nakamura, T. Tsurusaki, M. Miyata, T. Sawachi and Y. Kuwasawa: “Research on Improvement of Performance Evaluation Method of Cogeneration Systems in Commercial Buildings”, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers , Building Research Institute, No.191 (2019) (in Japanese) (online)  
住吉大輔・岡本洋明・中村美紀子・鶴崎敬大・宮田征門・澤地孝男・桑沢保夫：「業務用コージェネレーション設備の性能評価手法の高度化に関する研究」, 国立研究開発法人 建築研究所, No.191 (2019) (online)、<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/191/index.html>
- (4-5) 国立研究開発法人建築研究所：「コージェネレーションシステムの評価方法」(online) 、  
[https://www.kenken.go.jp/becc/documents/building/Definitions/Webpro\\_Specification\\_06CGS\\_180402.pdf](https://www.kenken.go.jp/becc/documents/building/Definitions/Webpro_Specification_06CGS_180402.pdf)
- (4-6) 一般財団法人コージェネレーション・エネルギー高度利用センター：「コージェネレーションの現状と今後の動向について」(online) 、  
[http://www.sba.hub.hit-u.ac.jp/assets/files/research/past\\_project/gas/3\\_koushi\\_ishi.pdf](http://www.sba.hub.hit-u.ac.jp/assets/files/research/past_project/gas/3_koushi_ishi.pdf)
- (4-7) J. Takahashi, M. Kondou, N. Yokoo, and T. Oka: “Analysis on the Co-efficient of Performance of Air Source Heat Pump Chiller System with Thermal Storage”, Technical papers of annual meeting, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.75 pp.71-80 (1999) (in Japanese)  
高橋純一・近藤雅史・横尾昇剛・岡建雄：「水蓄熱システムの熱源機器効率解析」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.75 pp.71-80 (1999)
- (4-8) 関根秀弥・城所義雄：「温度成層型蓄熱槽空調システムの運転実績 —空調システムの概要と評価—」, 五洋建設技術年報, Vol.28 pp.141-144 (1998)
- (4-9) Y. Tanaka, and M. Fukushima: “Optimal Operation of Cogeneration Systems by Stochastic Programming”, IEEE Trans. B, Vol. PE-04, No.86-100 pp.51-56 (2004) (in Japanese)  
田中洋一・福島雅夫：「確率計画法によるコージェネレーションシステムの運用最適化—リコースと機会制約を用いた定式化—」, 電学論 B, Vol.129, No.6 pp.765-775 (2009)
- (4-10) M.Sasozaki, and M. Kato: “Evaluation of environmental performance of cogeneration system in an urban area”, Proceedings of annual conference of Power and Energy Society, I.E.E. of Japan, No.265 pp.25-26 (2007) (in Japanese)  
冨崎正浩・加藤政一：「地域熱電供給システムの環境負荷評価」, 平成 19 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, No.265 pp.25-26 (2007)

## 第5章 再予測・再計画に対する需要予測誤差の確率的評価

### 5.1. 確率計画法の概要

本章では、前章で述べた現行提案手法の改善余地に対して、需要予測誤差の確率的評価を導入することで、更なるエネルギー利用効率の向上に取り組む。本節では、まず確率計画法の簡単な概要を述べる<sup>(5-1)</sup>。数理最適化問題において、目的関数や制約条件の係数に確率的に変動する要素を含む場合を確率計画（Stochastic Programming）と呼び、1950 年代に G.B. Dantzig、M. Beale らによって始められたとされている。確率計画では確率変数を含まない問題（等価確定問題）に変換して解くのが一般的であり、その代表的なものが償還請求問題（2 段階確率計画問題とも呼ばれる）である。制約条件の係数が、確率事象  $w$  に対する確率変数となっている確率計画問題を、式(5-1)～(5-3)に示す。

$$\min. \quad c^T x \quad \dots\dots\dots(5-1)$$

s.t.

$$T(w)x = h(w) \quad \dots\dots\dots(5-2)$$

$$Ax = b, \quad x \geq 0 \quad \dots\dots\dots(5-3)$$

$x$  : 決定変数、 $c$  : 目的関数の係数ベクトル、 $A, b$  : 制約条件の係数ベクトルまたは行列、

$T(w), h(w)$  : 確率事象  $w$  に対する制約条件の係数ベクトルまたは行列

ここで、確率変数を含む制約条件が全ての実現値に対して満たされるとは限らない。そこで、この確率変数を含む制約条件式(5-2)において、両辺の差に対して、その外れ具合を矯正するための償還請求（リコース）を導入し、以下の式（5-4）のように変形する。

$$Wy(w) = h(w) - T(w)x \quad \dots\dots\dots(5-4)$$

$W$  : リコース行列、 $y(w)$  : 確率事象  $w$  に対するリコース変数

以上より、償還請求問題は以下の式(5-5)～(5-7)で定式化される。目的関数である式(5-5)は、元の式(5-1)に加えて（1 段目の最適化問題）、新たに導入した確率事象  $w$  に対する償還請求（2 段目の最適化問題）の期待値の和となる。

$$\min. \quad c^T x + E[\min q(w)^T y(w)] \quad \dots\dots\dots(5-5)$$

s.t.

$$T(w)x + Wy(w) = h(w) \quad \dots\dots\dots(5-6)$$

$$Ax = b, \quad x \geq 0, \quad y(w) \geq 0 \quad \dots\dots\dots(5-7)$$

$q(w)$  : 確率事象  $w$  に対するリコース変数  $y(w)$  のペナルティ係数

## 5.2. 需要予測誤差の確率的評価の導入方法

### 5.2.1. 全体の計算手順

これまで述べた式(4-11)～(4-34)の運用計画においては、電力、冷水、温水需要の予測値を確定的な値として問題に取り込み、確率的に変動する要素は含まれていなかった。本章では、これら予測誤差の確率的評価をこれまで述べてきた再予測・再計画法に統合する。

確率計画では、個別の予測誤差の確率事象に対して、各々の事象に対応した機器出力の「調整しろ」をリコース変数  $y$  として定式化する場合が多い<sup>(5-2)～(5-4)</sup>。しかし、本研究の運用計画問題は、機器の運転/停止状態を表す離散変数を含む組み合わせ最適化問題であり、このような離散変数を含む確率計画の取り扱い、一般的には困難であると言われている。加えて、式(4-25)～(4-27)の最小運転・停止時間制約、エネルギー貯蔵機器を計画対象に含めているため、これらを厳密に定式化するには、時系列、確率事象別に膨大の場合分けが必要になり、組み合わせ爆発が予想される。従って、前節の概要で述べた2段階確率計画問題として、一括して求解することは実質的に困難である。そこで、本研究では前章で述べた運用シミュレーションを活用して、予測誤差の確率的評価を組み込む方式を採用した。

全体の計算手順を図 5-1 に示す。同図の左側は前章の評価手順と同様であり、1日を30分単位の48時断面として、時刻ステップ毎に予測・計画の実行時刻であればこれらを行い(S2、S3)、得られた最新計画と実績需要に基づき時刻  $t$  の運用シミュレーションを実施(S5)、次時刻ステップの計画で参照する

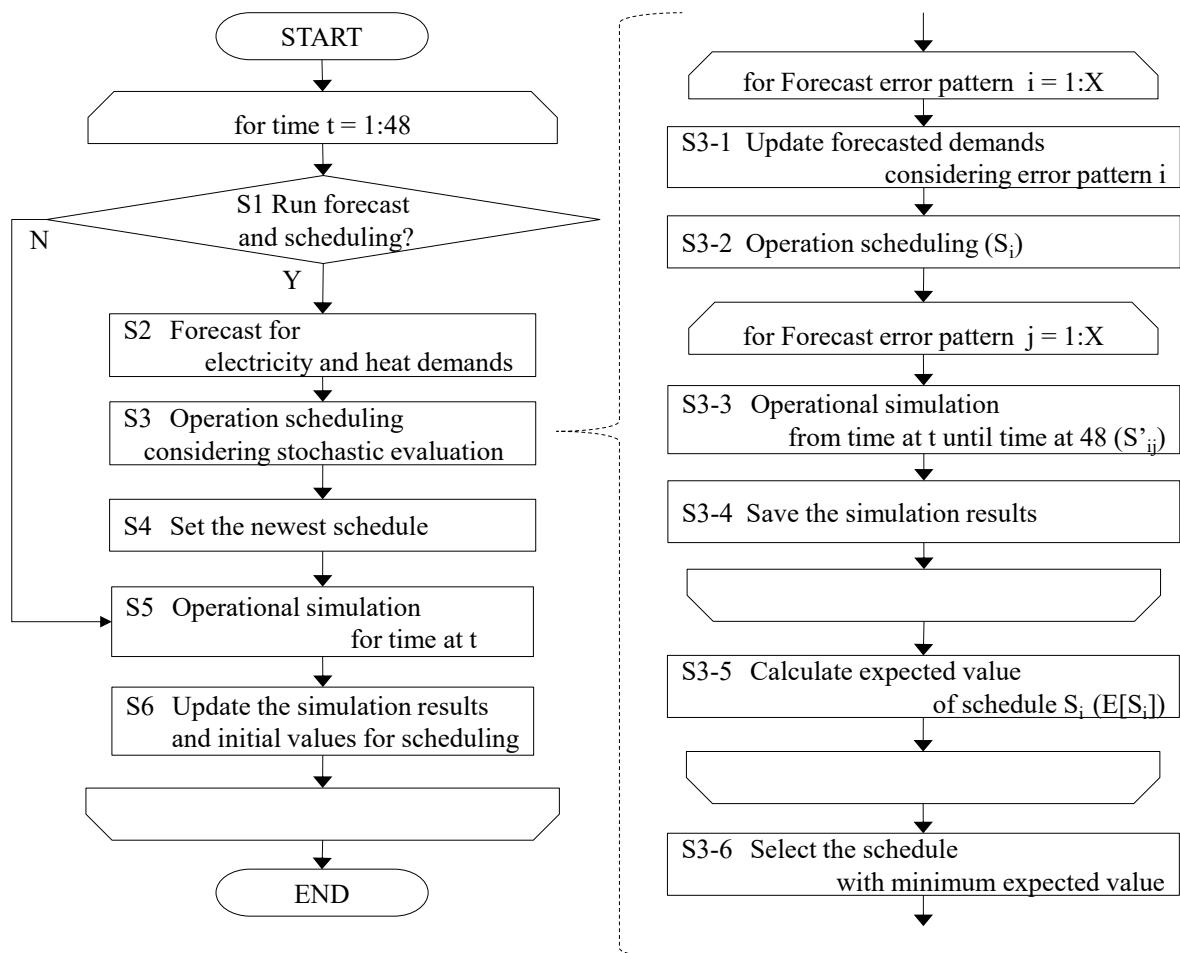


図 5-1 全体の計算手順

初期値を更新する (S6)。予測・計画を実行しない時刻であれば、過去に求めた最新計画に基づき時刻  $t$  の運用シミュレーションを即時実施する。

一方、同図の右側は予測誤差の確率的評価を組み込むために追加した部分であり、運用計画 (S3) の内部手順である。まず、評価する予測誤差パターン  $i$  に応じた予測需要に更新 (S3-1)、運用計画  $S_i$  を算出する (S3-2)。次に、得られた運用計画  $S_i$  に基づき、異なる予測誤差パターン  $j$  に応じた需要条件下で、時刻  $t$  から 1 日分の運用シミュレーション  $S'_{ij}$  を算出する (S3-3)。これを全ての予測誤差パターンに対して実施し、運用計画  $S_i$  の期待値を以下の式(5-8)で算出する (S3-5)。

$$E[S_i] = \sum_{j=1}^X p_j \cdot S'_{ij} \dots\dots\dots (5-8)$$

$E[S_i]$  : 運用計画  $S_i$  の期待値、 $S'_{ij}$  : 運用計画  $S_i$  を用いた予測誤差パターン  $j$  の運用シミュレーション  
 $p_j$  : 予測誤差パターン  $j$  の発生確率

上記の演算を全ての運用計画  $S_{i=1,2,\dots,X}$  で行い、期待値が最小となる運用計画を選出する (S3-6)。以降は図 5-1 の左側に戻り、得られた最新計画と実績需要に基づき、時刻  $t$  の運用シミュレーションを実施する (S5)。以上の流れを時刻ステップ毎に繰り返すことで、再予測・再計画に加えて、予測誤差の確率的評価を加味した 1 日の運用シミュレーション結果を得る。

### 5.2.2. 予測需要への誤差の反映方法

ここでは予測誤差パターンに応じた予測誤差の反映方法について述べる。表 5-1 に、冷水需要と温水需要で考慮する予測誤差が各々3 水準（A、B、C）の場合の予測誤差パターンを示す。この場合、予測誤差パターンは冷水と温水の各々の予測誤差の組み合わせである計 9 パターンとなる。本研究では、冷温水需給の双方の影響を受ける電力需給も評価対象に含めている。また、ABR は CGS から供給される温水を使用して冷水を供給する機器であり、この運用は冷水と温水の双方に影響を与える。このため、冷水需要と温水需要の誤差を独立に評価することはできず、表 5-1 に示した双方の組み合わせを考慮した予測誤差パターンを用いて評価する必要がある。

図 5-2 を用いて、予測需要に対する誤差の反映方法を説明する。これは、前章末尾のまとめで述べた確率的評価の導入が有望と考えられる翌日予測、ならびに当日再予測時の予測値更新範囲外である直近 4 時間以降の予測需要への誤差反映を主眼としたものである。同図の上段は、前日 22 時に実施する翌日予測時、下段は当日の再予測時を表している。翌日予測時には、予測需要  $NF$  に対して予測誤差パターン  $i$  の需要  $NF_i$  は、以下の式(5-9)で表されるものとする。これは想定する誤差  $a$  を、全ての時間の需要に等比率で分配するものである。

$$NF_i^t = (1 + a) \cdot NF^t \dots\dots\dots(5-9)$$

$NF_i$ ：予測誤差パターン  $i$  の需要、 $NF$ ：翌日予測需要、 $a$ ：考慮する誤差（30%であれば  $a=0.3$ ）、 $t$ ：時刻

一方、当日再予測時には、予測需要  $SF$  に対する予測誤差パターン  $i$  の需要  $SF_i$  は、以下の式(5-10)で表されるものとする。

$$SF_i^t = \left(1 + a \cdot \frac{l-1}{m}\right) \cdot SF^t \dots\dots\dots(5-10)$$

$SF_i$ ：予測誤差パターン  $i$  の需要、 $SF$ ：再予測需要、 $a$ ：考慮する誤差（30%であれば  $a=0.3$ ）、  
 $l$ ：再予測実行時点からの時刻ステップ、 $m$ ：再予測を反映する時刻ステップ数、 $t$ ：時刻

表 5-1 予測誤差パターン（誤差が 3 水準 A、B、C の場合）

予測誤差パターン	冷水需要	温水需要
1	A	A
2	A	B
3	A	C
4	B	A
5	B	B
6	B	C
7	C	A
8	C	B
9	C	C

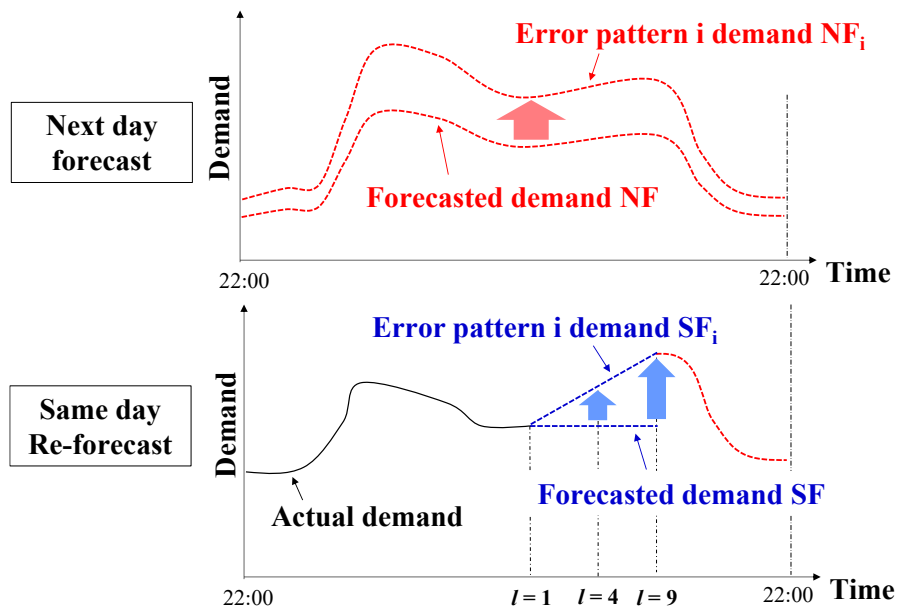


図 5-2 予測誤差の反映方法

再予測時には、図 5-2 のように再予測実行時点から傾斜的に誤差を分配する。すなわち、直後の需要は式(5-10)で  $l=1$  を代入すると再予測需要そのものとなり、以降は時間を隔てるごとに、分配する誤差の割合を大きくしていく。式(5-10)に表れる  $m$  は、本研究では再予測の反映時間長を再予測実行後 4(h) までとしたため、30 分単位の時刻ステップで表すと  $m=8$  となる。従って、 $l=9$  の時点で式(5-10)は翌日予測時の式(5-9)と等価となるため、以降の時刻では式(5-9)で表す誤差を反映した予測需要とする。

### 5.3. 需要予測誤差の評価

#### 5.3.1. 冷温水需要予測誤差の周辺確率

ここでは各季節代表日における冷温水需要の予測誤差について述べる（これらの代表日は前章の運用評価で用いたものと同一である。詳細は P.55 の表 4-6 を参照されたい）。予測誤差は、前節の図 5-2 で示した誤差の反映方法と整合するように、以下の式(5-11)で表される 1 日の実績需要に対する翌日予測需要の相対的な誤差率とする。

$$ERR = \sum_{t=1}^{48} (F^t - A^t) / \sum_{t=1}^{48} A^t \dots\dots\dots (5-11)$$

$F$ ：翌日予測需要、 $A$ ：実績需要、 $t$ ：サンプル数

ところで、計画の実行時点においては以降の時刻の実績需要はまだ判明しておらず、使用できるのはあくまで予測値のみである。従って、実績需要を基準にして予測需要がどれだけ異なるかを評価した式(5-11)を、図 5-2 で示した計画時の予測誤差の指標にそのまま当てはめるには、厳密にはやや飛躍がある。しかし、ここでは計画時点において、まずは実績需要に最も近いであろう予測値を実績値と見なすことで、式(5-11)に示す誤差指標をそのまま適用する（本来であれば、計画時には式(5-11)の分母を予測値として、予測需要を基準にして実績需要がどれだけ異なるかを評価した誤差指標を用いる必要がある。この事例は「5.4.3 考察」で述べる）。

過去 30 日間の同一日種を対象にした、冷温水需要予測誤差の周辺確率分布（Marginal probability distribution）を図 5-3 および図 5-4 に示す。周辺確率とは、ある単一の事象のみが起こる確率の意味であり、例えば冷水予測誤差の確率を評価する際には、温水予測誤差の確率については考慮しない（両者の同時確率については次項で述べる）。運用評価での演算時間を考慮して、ここでは予測誤差の水準を-5%超、-5%～5%、5%超の 3 水準にて評価した。なお、グラフ上部に記載しているのは評価対象日、曜日、需要種別であり、括弧内に記載された数字は“0”で平日、“1”で休日である。これらの図は各季節代表日のうち、平日と休日の双方が含まれるように連続した適当な 4 日間を抽出したものである（ただし、グラフからもわかるように、日毎の確率分布の変化は小さい）。冷温水需要予測誤差の周辺確率分布の特徴を以下にまとめる。

#### ■ 秋季

- ・ 平日の冷水需要予測誤差は-5%～5%の確率が一番高い
- ・ 休日の冷水需要予測誤差は 5%超の確率が一番高い
- ・ 平日の温水需要予測誤差は-5%超の確率が一番高い
- ・ 休日の冷水需要予測誤差は 5%超の確率が一番高い

#### ■ 冬季

- ・ 冷水需要予測誤差については平日、休日ともに 5%超の確率が一番高い
- ・ 温水需要予測誤差については平日、休日ともに-5%超の確率が一番高い

#### ■ 春季

- ・ 平日の冷水需要予測誤差は-5%超の確率が一番高い

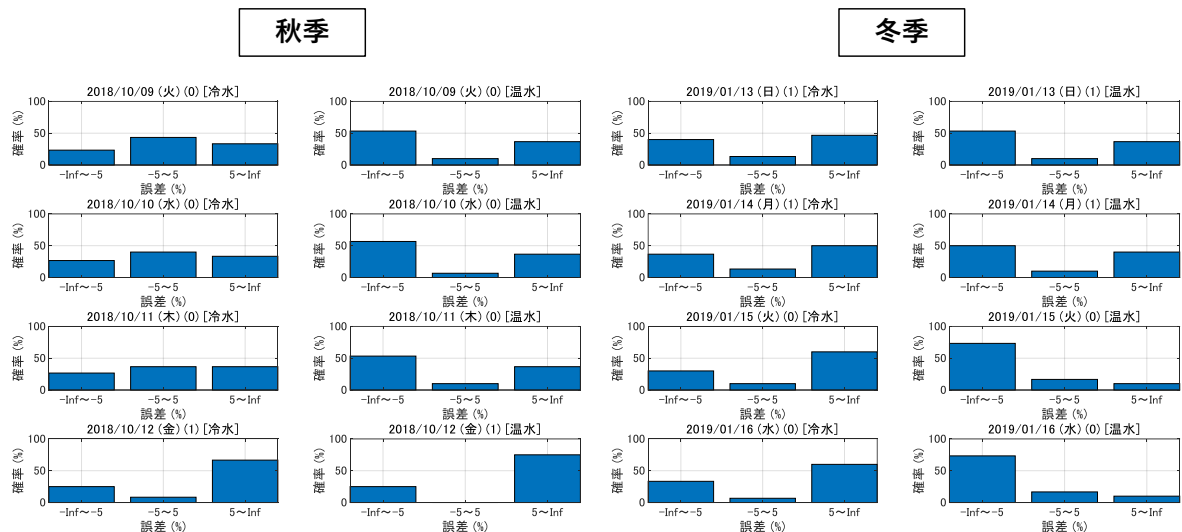


図 5-3 秋季、冬季の冷温水需要予測誤差の周辺確率分布

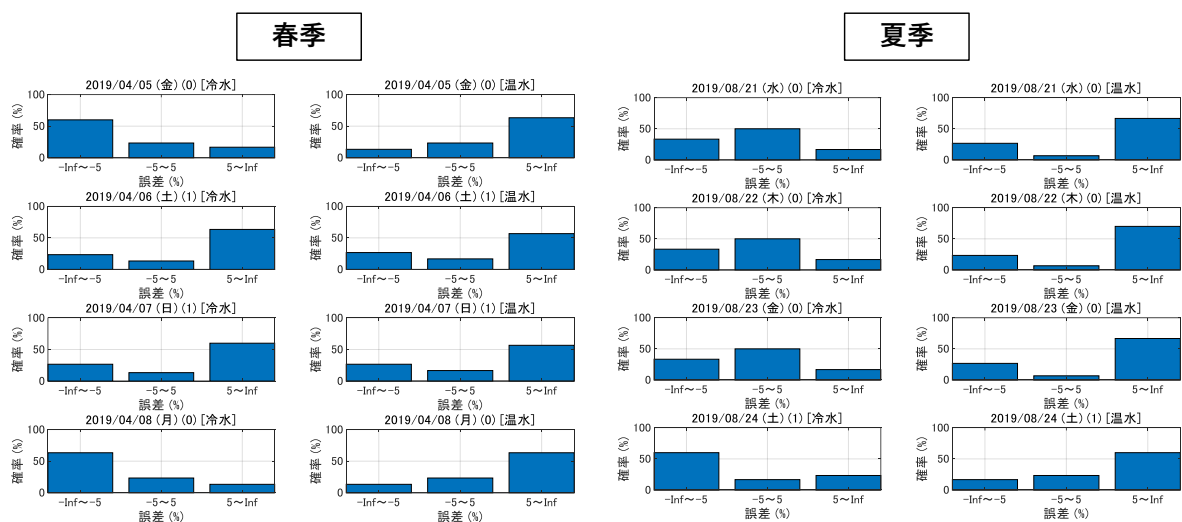


図 5-4 春季、夏季の冷温水需要予測誤差の周辺確率分布

- ・ 休日の冷水需要予測誤差は 5%超の確率が一番高い
- ・ 温水需要予測誤差は平日、休日ともに 5%超の確率が一番高い

#### ■夏季

- ・ 平日の冷水需要予測誤差は-5%～5%の確率が一番高い
- ・ 休日の冷水需要予測誤差は-5%超の確率が一番高い
- ・ 温水需要予測誤差については平日、休日ともに 5%超の確率が一番高い

なお、一部のケースにおいて-5%～5%の確率が一番高くないのは、予測誤差を 3 水準と比較的に設定したからである（例えば、5%超の確率が一番高くなる場合、実際には+側にすそ野が広い誤差分布が形成されている）。上記の結果より、冷温水需要予測誤差の周辺確率分布は季節や日種により大きく異なるため、これらを加味した評価が不可欠である。



### 5.3.2. 冷温水需要予測誤差の同時確率

ここでは冷温水需要予測誤差の同時確率分布 (Simultaneous probability distribution) について述べる。冷水需要予測、温水需要予測の誤差の独立性の有無に応じて、下記の 2 種類で同時確率を評価した<sup>(5-5)</sup>。

- ・両予測誤差が独立であると仮定

$$P(X \cap Y) = P(X) \cdot P(Y) \dots\dots\dots(5-12)$$

- ・両予測誤差が独立ではないと仮定

$$P(X \cap Y) = P(Y) \cdot P(X|Y) \dots\dots\dots(5-13)$$

$P(X)$ ：事象 X が起こる確率、 $P(Y)$ ：事象 Y が起こる確率、  
 $P(X|Y)$ ：事象 Y が起こったうえで事象 X が起こる条件付き確率

ここでは前項の周辺確率の評価結果を参考に、過去 30 日間の同一日種を対象に、季節別および日種別に同時確率を評価した。冷温水需要予測誤差の同時確率分布を図 5-5～図 5-8 に示す。これらの図は、各季節の代表日のうち最初の平日と休日における同時確率分布を描いたものである。冷水、温水予測単体の誤差は各々3水準であるため、これらは表 5-1 に示した計9個の同時確率から作成した分布である。独立性の有無により、細部において以下の違いが見られる。

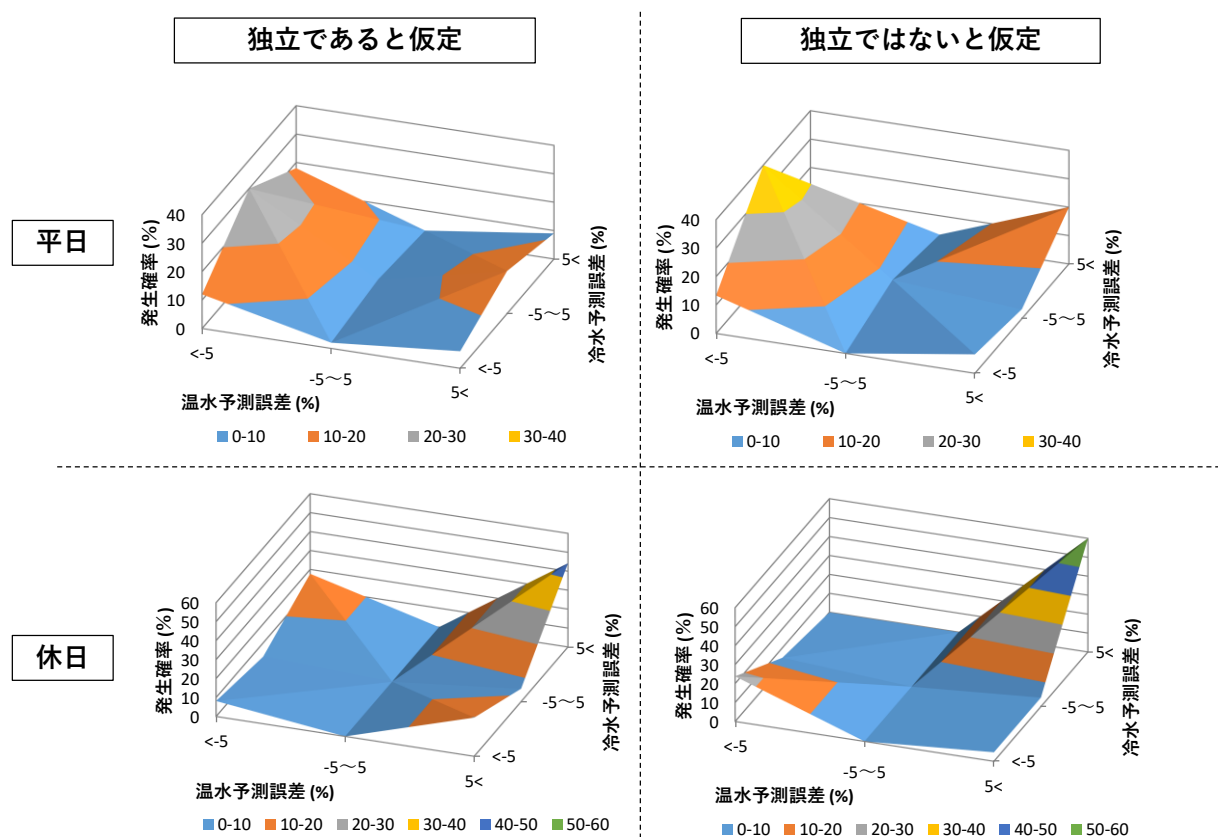


図 5-5 秋季の冷温水需要予測誤差の同時確率分布

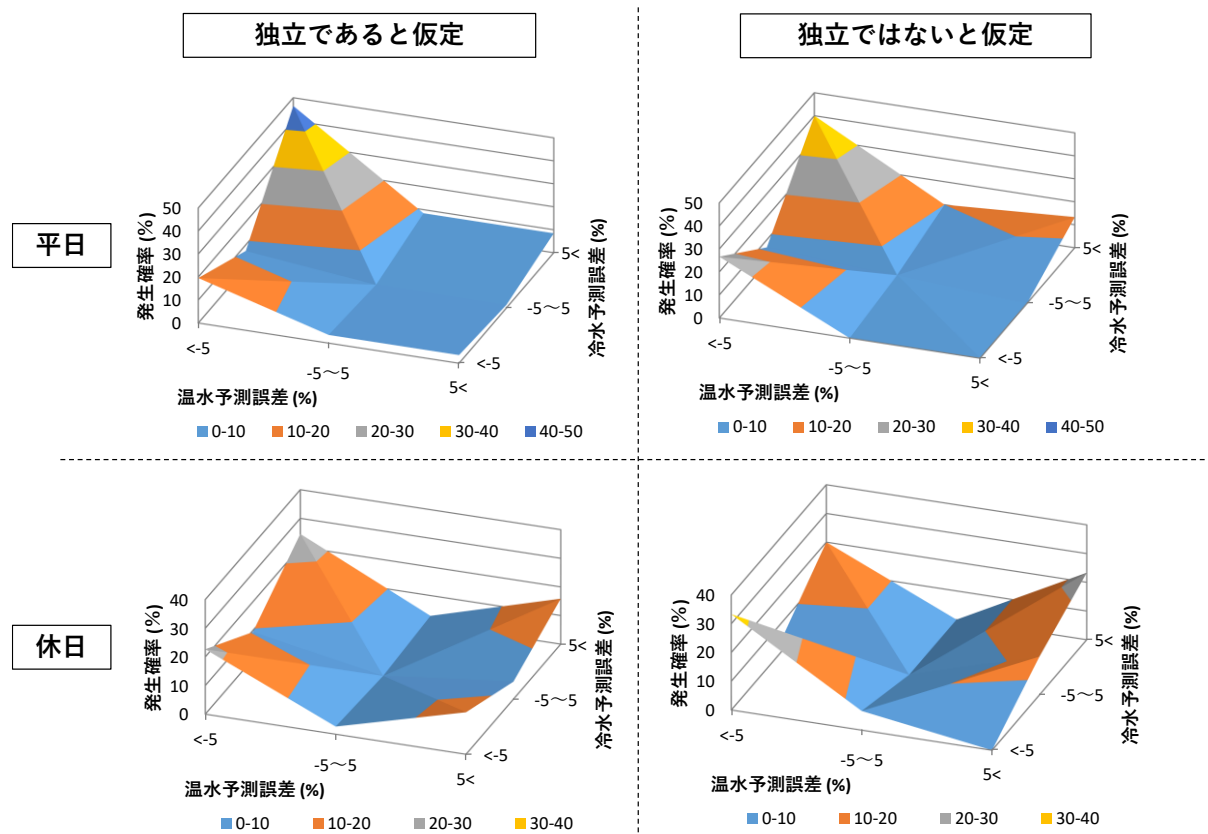


図 5-6 冬季の冷温水需要予測誤差の同時確率分布

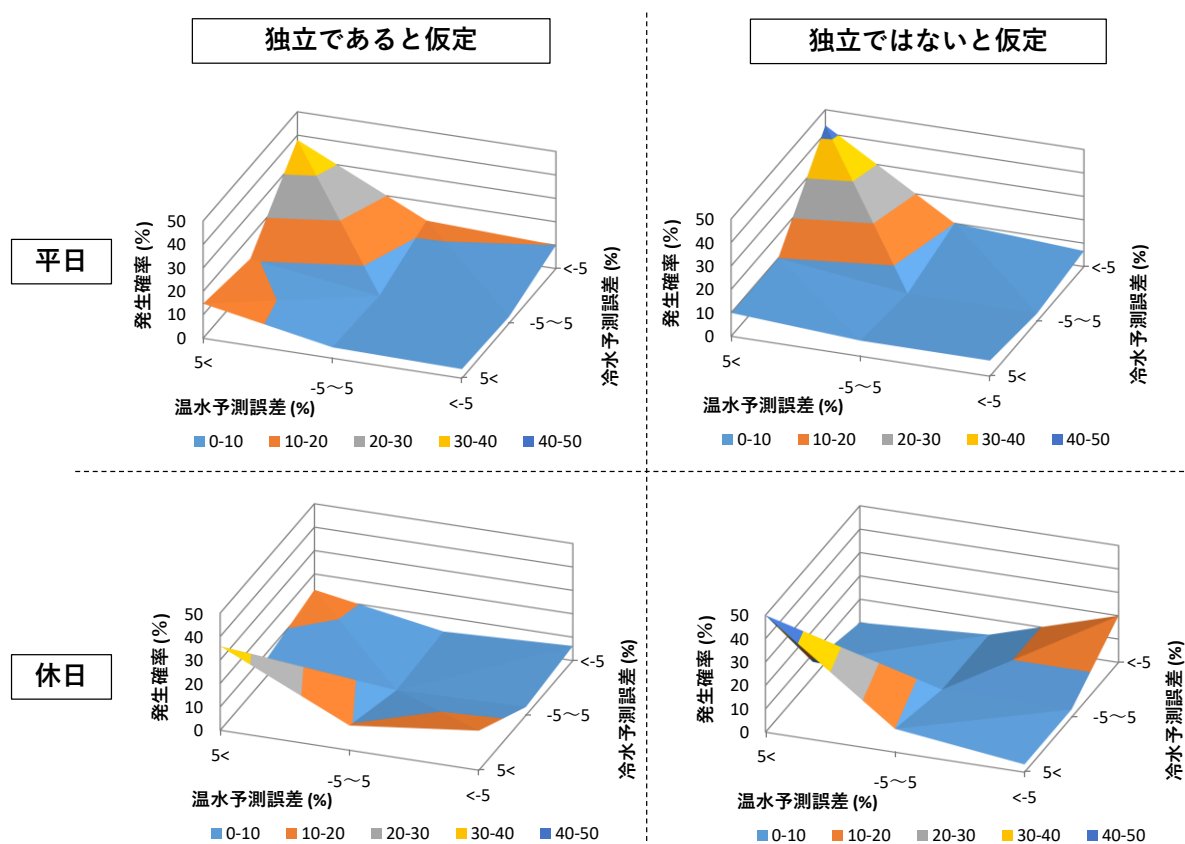


図 5-7 春季の冷温水需要予測誤差の同時確率分布

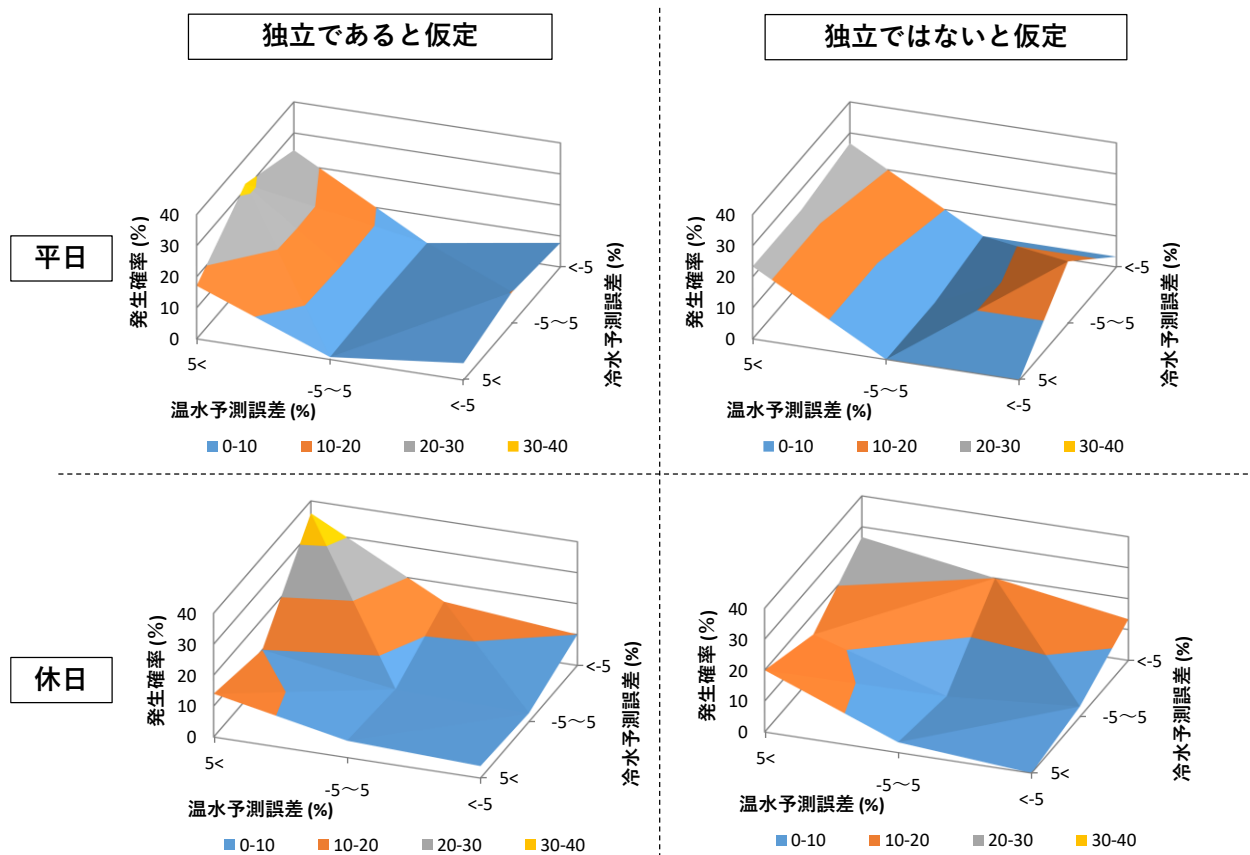


図 5-8 夏季の冷温水需要予測誤差の同時確率分布

#### ■ 秋季

- ・ 平日の場合、温水需要予測誤差-5%超、冷水需要予測誤差-5%～5%に表れるピーク確率は、独立ではないと仮定した方が高くなる
- ・ 休日の場合、温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差 5%超に表れるピーク確率は、独立ではないと仮定した方が高くなる
- ・ 一方、休日の温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差-5%超などの領域では、独立ではないと仮定した方が発生確率は低くなる

#### ■ 冬季

- ・ 平日の場合、温水需要予測誤差-5%超、冷水需要予測誤差 5%超に表れるピーク確率は、独立であると仮定した方が高くなる
- ・ 休日の場合、温水需要予測誤差-5%超、冷水需要予測誤差-5%超の発生確率、ならびにこの対角にある温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差 5%超の発生確率は、独立ではないと仮定した方が高くなる

#### ■ 春季

- ・ 平日の場合、温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差-5%超に表れるピーク確率は、独立ではないと仮定した方が高くなる（同図は視認性を高めるため、秋季と冬季の図から軸の向きを反対にしている）
- ・ 休日の場合、温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差 5%超に表れるピーク確率は、独立ではないと仮定した方が高くなる

## ■夏季

- ・平日の場合、温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差-5%～5%に表れるピーク確率は、独立であると仮定した方が高くなる
- ・休日の場合、温水需要予測誤差 5%超、冷水需要予測誤差-5%超に表れるピーク確率は、独立であると仮定した方が高くなる

冷温水需要が真に独立である場合には、式(5-12)と式(5-13)で述べた独立性の仮定の有無に依らず、両者の確率分布はほぼ同じ分布形状になる。しかし、独立性の仮定の有無により、両者の同時分布は全体的な傾向にこそ大きな変化はないが、ピーク確率については上記の差異が見られた。なお、式(5-8)に示したように、本章の運用評価は各予測誤差パターンの期待値を評価関数とするため、同時確率分布のピーク値を正しく定量化することは重要である（発生確率が高い事象の方が評価関数により影響を与えるため）。以上の理由より、冷温水需要予測誤差は互いに独立ではないと考えられるため、この仮定に基づく式(5-13)で算出した同時確率分布を以降の評価で使用する。

## 5.4. 経済性評価

### 5.4.1. 方法

以降では、需要予測誤差の確率的評価を加味した経済性評価について述べる。対象システム、予測誤差を加味した予測需要を設定したのちの計画、運用シミュレーション方法は第4章と同様である。評価するケースは以下の5種類である。

- ・A：前日 22 時に翌日予測、予測値を確定した計画のみを実施し、以降は再計画を基本的に実施しない
- ・A'：前日 22 時に翌日予測、予測誤差の確率的評価を加味した計画のみを実施し、以降は再計画を基本的に実施しない
- ・B：翌朝 6 時以降は 30 分毎に再予測、予測値を確定した再計画を実施する
- ・B'：翌朝 6 時以降は 1 時間毎に再予測、予測誤差の確率的評価を加味した再計画を実施する
- ・C：翌日予測、当日再予測が実績に一致（翌日予測、当日再予測の精度 100%の場合）

上記の A、B、C は第4章の評価と同じ条件である（C は第4章での評価では D と表記している）。A' は A に対して、B' は B に対して確率的評価を加味した計画を行う。なお、計算時間を短縮するため、上記の確率的評価の適用は 14 時 30 分までとして、B' では再計画周期を 1 時間とした。なお、ここで確率的評価の適用を 14 時 30 分までとした理由は、本研究で使用した冷温水需要データは 17 時過ぎから需要が低下して夜間需要に移行するため、14 時 30 分までであれば、以降 4 時間分を対象とした再予測を加味して、日中分の適切な計画を算出可能と考えたためである。従って、A' では前日 22 時に翌日予測誤差の確率的評価を加味した計画のみを実施、以降は運用シミュレーション（こちらは 30 分周期で実施）にて計画外の機器起動・停止があった場合にのみ 14 時 30 分までは次時刻で確率的評価を加味した再計画を実施、15 時以降は予測需要に基づく通常の再計画（すなわち需要を予測需要に確定した計画）を実施する。計画外の機器起動・停止がなかった場合には、前日 22 時の確率的評価を加味した計画にのみに基づいて、1 日分の運用シミュレーションを行う。

一方、B' では前日 22 時に翌日予測誤差の確率的評価を加味した計画を実施、以降は再予測・再計画開始時刻から 14 時までは 1 時間毎に上記の確率的評価を加味した再計画を実施、15 時以降は予測需要に基づく通常の再計画を 1 時間毎に実施する。なお、再予測・再計画開始時刻までの間、ならびに 1 時間周期の計画の間に運用シミュレーションにて計画外の機器起動・停止があった場合には、上記の A' と同様、14 時 30 分までは次時刻で確率的評価を加味した再計画を実施、15 時以降は予測需要に基づく通常の再計画を実施する。ここで、再予測・再計画開始時刻を表 5-2 にまとめる。前章での評価結果に基づき、秋季・春季は開始時刻を遅めの午前 9 時として、冬季・夏季のピーク季では開始時刻を午前 6 時とした。

表 5-2 各季節における再予測・再計画の開始時刻

秋季	冬季	春季	夏季
9 : 00	6 : 00	9 : 00	6 : 00

#### 5.4.2. 結果

運用コストの削減達成率を図 5-9 に示す。コスト削減達成率は  $A' < B < B'$  という順であった。これより、再予測・再計画と予測誤差の確率的評価を統合することで、更に運用効率を向上できるとした本研究主題の正当性を確認できた。また、確率的評価を加味した  $A'$ 、 $B'$  は、それぞれ確定的な予測需要・計画による  $A$ 、 $B$  に比べて、コスト削減達成率が向上している。この結果より、前章末尾で述べた提案手法の改善余地、すなわち翌日予測、ならびに当日再予測時の予測値更新範囲外である直近 4 時間以降の予測需要に対して、需要予測誤差の確率的評価を導入することの妥当性を確認できた。

一方、ケース  $B'$  であってもコスト削減達成率は 38.7% に留まり、理想ケース  $C$  に対して 61.3 ポイントの乖離がある。このため、未だ改善の余地は大きく残されていると言える。図 5-10 に、季節別の運用コスト削減達成率をまとめる。各季節の主だった特徴を以下にまとめる

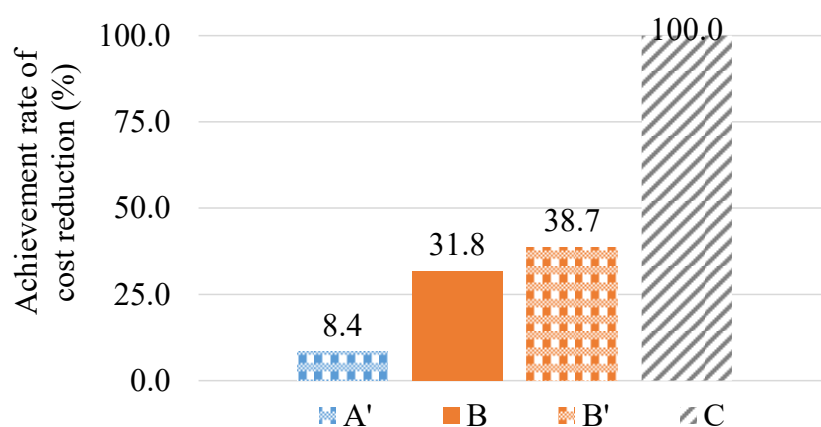


図 5-9 運用コストの削減達成率

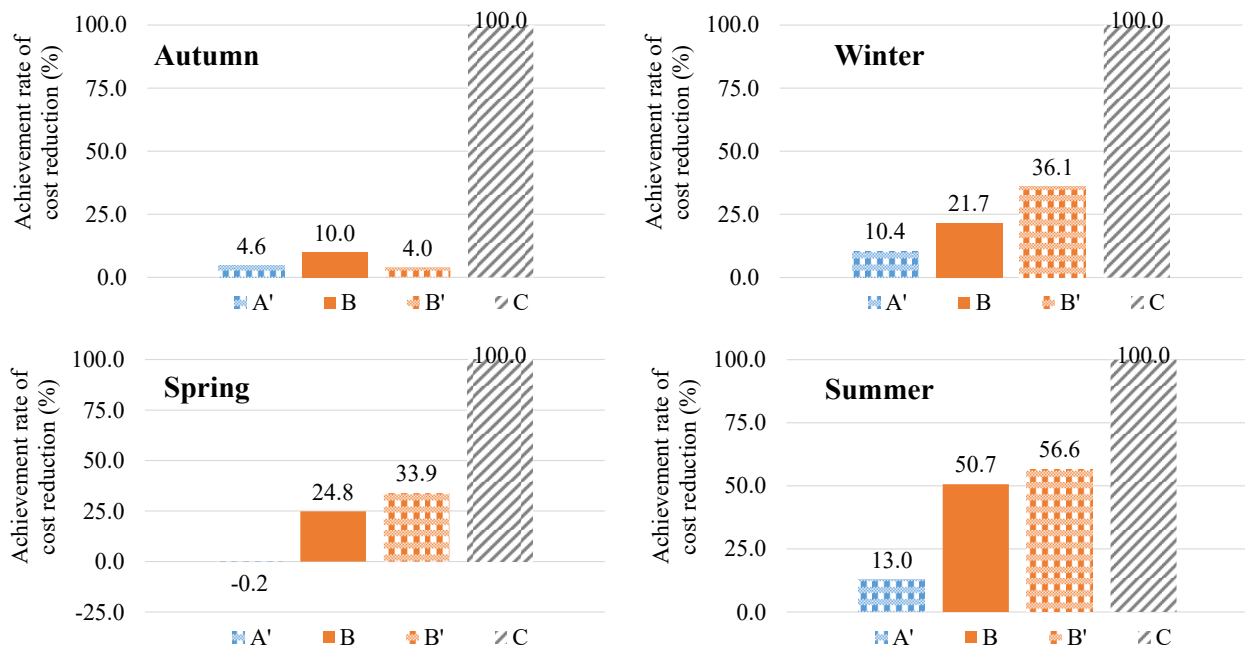


図 5-10 季節別の運用コスト削減達成率

#### ■ 秋季

- ・評価ケース A'のコスト削減達成率は 4.6%であり、冬季と夏季に比べて確率的評価による効果は小さい
- ・評価ケース B'のコスト削減達成率は 4.0%であるため、通常 of 確定的な再予測需要・再計画による B のコスト削減達成率 10.0%より悪化している

#### ■ 冬季

- ・評価ケース A'のコスト削減達成率は 10.4%であり、確率的評価による効果は比較的大きい
- ・評価ケース B'のコスト削減達成率は 36.1%であり、通常 of 確定的な再予測需要・再計画による B より 14.4 ポイント向上し、年間で最大の効果である

#### ■ 春季

- ・評価ケース A'のコスト削減達成率は-0.2%であるため、通常 of 確定的な翌日予測需要・計画による A より僅かに悪化している（これは再予測・再計画がないため、1 日の終盤に需給バランス維持のため、散発的にガス炊き ABR を運転してしまうことがコスト悪化の原因であった。従って、確率的評価の導入に起因する問題ではない）
- ・評価ケース B'のコスト削減達成率は 33.9%であり、通常 of 確定的な再予測需要・再計画による B より 9.1 ポイント向上のため、確率的評価導入による効果は比較的大きい

#### ■ 夏季

- ・評価ケース A'のコスト削減達成率は、通常 of 確定的な翌日予測需要・計画による A に対して 13 ポイント向上し、年間で最大の効果が生じている
- ・評価ケース B'のコスト削減達成率は 56.6%であり、通常 of 確定的な再予測需要・再計画による B より 5.9 ポイント向上のため、確率的評価による若干の効果がある

次に、通常の確定的な再予測需要・再計画による評価ケース B に対して、確率的評価による再計画を適用した評価ケース B' の日毎のコスト削減額を図 5-11 に示す。まず目につくのは、秋季第 10 日目の大きなコスト悪化である。この特異日の影響のため、同季節では図 5-10 に示したように、確率的評価を加味した評価ケース B' の方が、通常の評価ケース B に比べて運用コストが悪化している。この原因は次項で考察する。また、確率的評価を導入した場合にコストが改善する日数は半分より少し多い程度であるが、コスト削減額（青色の棒グラフ）に比べて、コスト悪化額（赤色の棒グラフ）が比較的小さく抑えられている。このため、全体としては確率的評価の導入時にコストが改善している。上記を確認するため、表 5-3 に確率的評価の有無によるコスト削減日数と平均コスト削減額を示す。

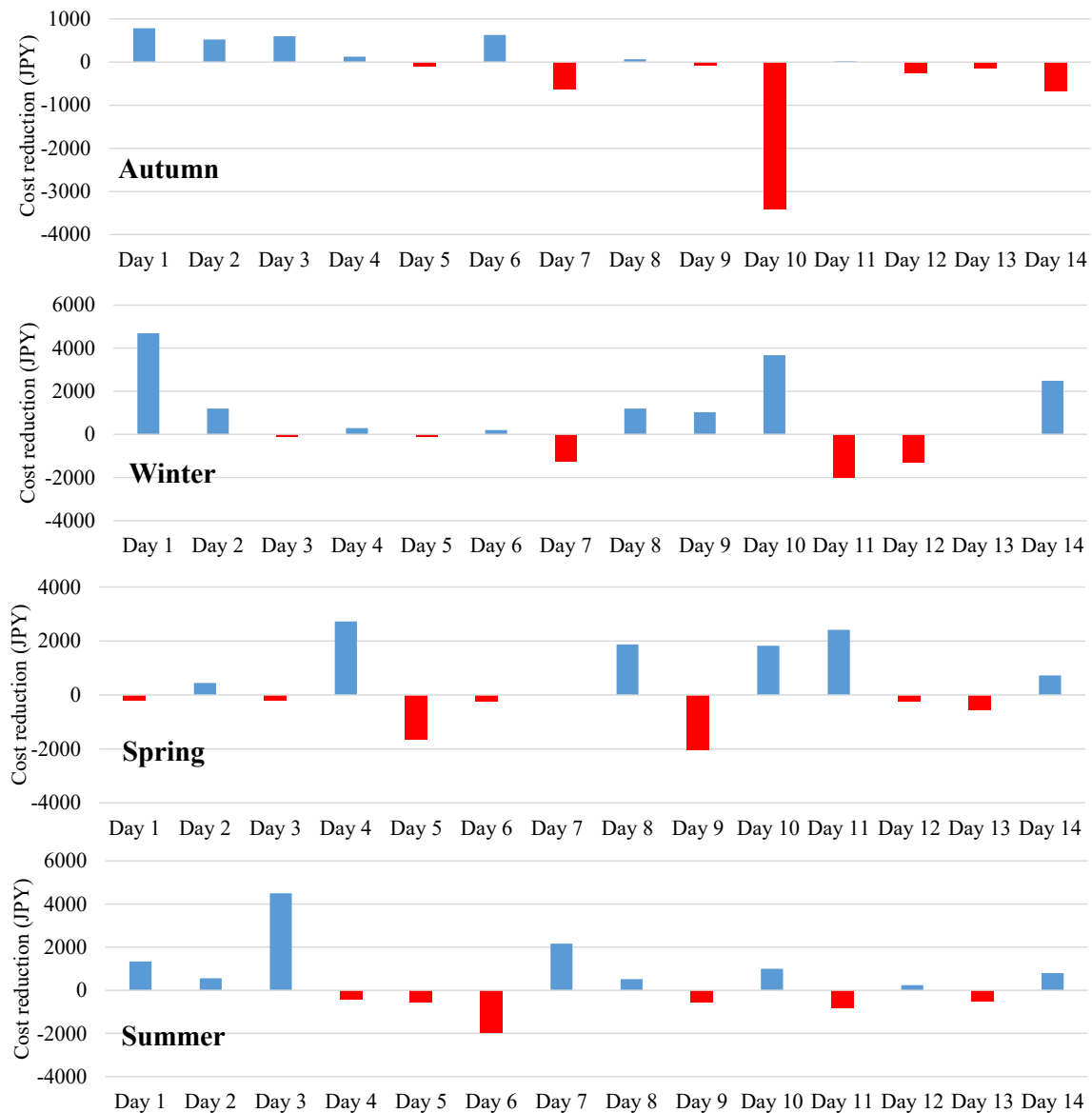


図 5-11 評価ケース B に対する評価ケース B' のコスト削減額



表 5-3 確率的評価の有無によるコスト削減日数と平均コスト削減額

	コスト削減日数	平均コスト削減額（円/日）
B 確定計画	25 (46.3%)	799
B' 確率計画	29 (53.7%)	1332

コスト削減日数については評価ケース Bの方がコスト安となる日数(図 5-10 の赤色の棒グラフの数)が 25 日、評価ケース B'の方がコスト安となる日数(図 5-10 の青色の棒グラフの数)が 29 日であるため、確かに、全体の評価日のうち 54%程度の日で、確率的評価を加味した評価ケース B'の方がコスト改善するに過ぎない(なお、評価した年間代表日が 56 日間に対して上記の合計日数が 54 日間となるのは、コスト差が全く生じなかった 2 日間を集計から除外したためである)。一方、各々の評価ケースでコスト安となった日の平均コスト削減額は、評価ケース B で 799 円/日、一方の評価ケース B'では 1322 円/日であるため、こちらは 1.7 倍程度の違いがある。以上より、確率的評価の適用時には、コスト悪化となる日は多々存在するものの、そのコスト悪化額がコスト改善額より平均的に低く抑えられているため、全体としてコスト改善の効果が表れていると言える。

### 5.4.3. 考察

先述の秋季第 10 日目に着目して、確率的評価適用時のコスト悪化の原因と改善に向けた課題の考察を行う。次に、予測誤差の評価指標を変更した場合に、運用コストに与える影響を考察する。

#### <確率的評価適用時のコスト悪化の原因と改善に向けた課題>

確率的評価の適用により、逆に大きなコスト悪化となった秋季第 10 日目の運用シミュレーション結果を図 5-12 に示す。同日は温水需要が小さく、温水槽ならびに CGS による潤沢な供給があるため、温水需給は運用コストに支配的な影響を与えない。従って、図 5-12 では上段に冷水需給パターン、下段に冷水槽の蓄熱残量のトレンドのみを示す。確率的評価を適用した評価ケース B' のコスト悪化の原因は、同図にて赤枠で囲った日中の EHP 運転増である。需要が立ち上がる 8 時から 10 時半まで EHP2 の供給量と運転時間が評価ケース B に比べて増えており、このため冷水槽の蓄熱残量が増加するものの、12 時から 13 時半で放熱量を増加することで前記の蓄熱残量の増加を相殺してしまい、結果的に 16 時以降に EHP2 の再運転が生じてしまっている。このような EHP の非効率な運用に至った理由は、下記の二つが考えられる。

まず、同図に図示した予測需要の折れ線は、確率的評価で加味する仮想的な予測誤差を含まない、各時刻の運用シミュレーション時点で得られている最新の予測需要値そのものである。13 時 30 分以降に着目すると、確率的評価を適用した評価ケース B' の予測需要は、評価ケース B のそれと比べて、実績需要（同図の黒線）との乖離が大きく見受けられる。評価ケース B では 30 分毎に再予測・再計画を実施しているため、予測需要が 30 分毎の実績需要の上下動に良く追従しているのに対して、評価ケース B' では確率的評価を適用するため、再予測・再計画を 1 時間周期に間引いてしまったことが原因と考えられる。本研究の評価環境（ノートパソコン、CPU1.9GHz、メモリ 4GB）では、P.70 の図 5-1 に示した 1 日分の計画および運用シミュレーションに約 2~3 時間要するため、各季節代表 14 日分では、1 日以上 の計算時間を要する。再予測・再計画を 30 分周期とする場合には、さらに数日以上 の計算時間を要するため、本研究では 1 時間周期に間引いて評価を行った。しかし、これにより上記の悪影響が確認されたため、実際の運用では再予測・再計画周期を 30 分に戻すほうが望ましい。図 5-1 の右側に示した 1

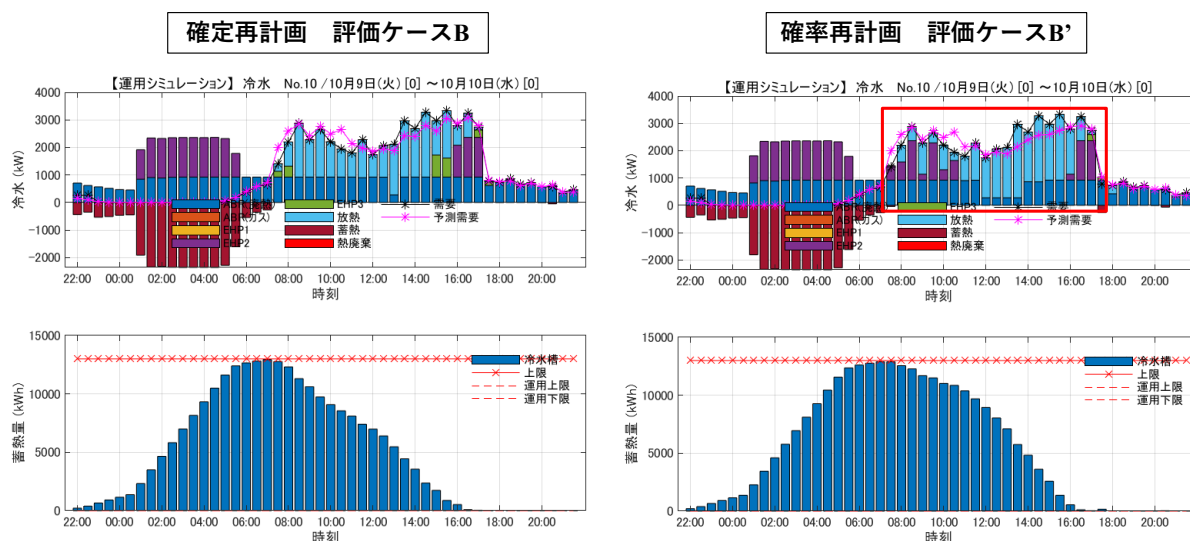


図 5-12 秋季第 10 日目の運用シミュレーション結果

回の確率計画に要する計算時間は、最長となる翌日計画時においては 30～40 分程度、当日計画においては計画対象時間長が短くなるため十数分程度である。このため、翌日計画時は上記の計算時間を見込んで前倒しで計画を実施し、当日は 30 分の周期間隔のなかで再計画に基づく運用が可能である（実際には、これらのアルゴリズムはよりスペックの高い産業用パソコン上で実行される場合が多いため、上記の想定はさらに緩和される）。

二つ目の原因は、評価ケース B' の確率的評価で使用する予測誤差パターンの不備である。図 5-13 に、評価ケース B' における予測需要に対する実績需要の増減を示す。図中の折れ線が予測需要に対する実績需要の増減であり、これは横軸に記載された時刻以降の 1 日の予測需要の積算値に対して、同じく実績需要の積算値がどれだけ増減していたかを示している。例えば 13 時においては実績需要の増減率は 32.5% であるため、この時点の 1 日の予測需要の積算値に対して、実績需要の積算値は 32.5% 多いことを表している（この傾向は図 5-12 とも整合している。ただし、図 5-12 では次の再予測・再計画タイミングである 14 時以降は、その時点における最新の予測値に置き換わって図示されているため、両者の差は 32.5% より小さく見える）。なお、ここで取り上げた秋季第 10 日目は、同季節において最も予測需要が実績需要を大きく下回った日である。

一方、図 5-13 の棒グラフは、同時刻時点の確率的評価を加味した再計画で、最終的に採用した予測誤差パターンである。その傾向は 13 時を除き、実績需要の増減率と一致している。確率的評価は、予測誤差が生じた際の評価関数への影響を評価するものであり、採用する戦略は、必ずしも予測誤差が生じる傾向と一致するものではない。しかし、図 5-13 からわかるのは、奇しくも確率的評価を加味した計画で採用した予測誤差の戦略は、13 時を除き正しかったということである。このため、残る課題は予測誤差パターンで考慮する誤差の階級値が、実績需要の増減率と乖離している（図 5-13 の棒グラフと折れ線の値の差が大きい）ことである。

「5.3 需要予測誤差の評価」で述べたように、本研究では需要予測誤差の確率分布を 1 日で固定としており、また誤差分布の階級値も 5% 超、5～-5%、-5% 超の 3 水準で全評価期間に渡り固定とした。一方、図 5-13 に示したように、実際の実績需要の増減率は 1 日の中でも時刻に応じて大きく変化するため（特に、図示した日は午後から実績需要が急増することで、この変化が大きい）、需要予測誤差の確率分布は、時刻毎に独立して評価する必要があると言える。さらに、分布形状についても大きく変動する予測誤差に対応するため、水準数を増やす、または時刻毎に階級値を動的に調節する方法が考えられる。しかし、前者を採用した場合、水準数の増加に比例して最適化問題の規模が拡大するため、計算時間の増加を引き起こす。例えば、本研究で採用した予測誤差の確率的評価をシミュレーションで代用する解

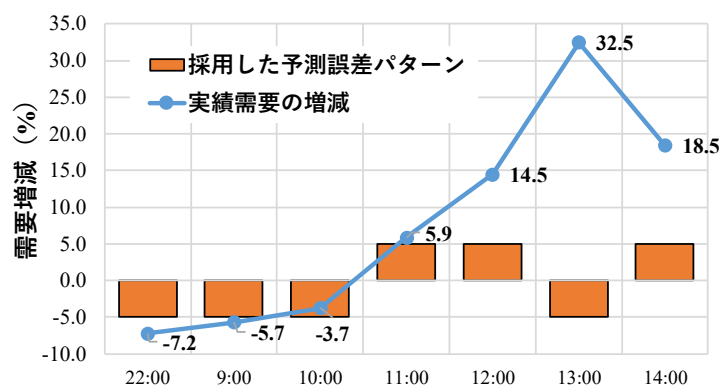


図 5-13 評価ケース B' の予測需要に対する実績需要の増減

法においては、水準数を増加に応じて、以下のように計算回数が増加する。

- ・水準数 3  $\Rightarrow$  同時確率のケース数 9  $\Rightarrow$  9 計画  $\times$  9 シミュレーション = 81 回の計算が必要
- ・水準数 6  $\Rightarrow$  同時確率のケース数 36  $\Rightarrow$  36 計画  $\times$  36 シミュレーション = 1296 回の計算が必要
- $\therefore$  水準数  $n$  倍  $\Rightarrow$  同時確率のケース数  $n^2$  倍  $\Rightarrow$  計算  $n^4$  倍

また、「5.3.2 冷温水需要予測誤差の同時確率」で述べたように、相互に影響する冷温水需要誤差は条件付き確率による同時確率分布で評価する必要がある。水準数を増加する場合、需要予測誤差の同時確率分布が粗となっていくため、この評価に用いる過去データ日数も増加させる必要がある（これは、条件付き確率を採用したときのほうが誤差条件を満たす日数が減少するため、顕著な問題となる）。しかし、季節に応じて変化する冷温水需要では、この過去データ日数も同一季節とみなせる期間に限定する必要がある。

以上の理由により、上記課題に対して水準数の増加のみで対応するのは限界がある。このため、後者に挙げた階級値を時刻毎で動的に調節する方法の採用が望ましい。時刻毎の需要予測誤差の大小に応じて、3 水準に分割した階級値を動的に変化させれば良い。例えば、図 5-13 の 13 時の階級値は 5% より大きな値を採用し、この値に応じて、P.73 の図 5-2 に示した方法により誤差を加味した予測需要を定義し直す。そのようにすることで、実績需要が予測を大きく上回るケースの計画を、確率的評価に組み込むことができる。この方法によれば、近似的ではあるものの、上記の計算時間の増加や過去データ日数の制限を回避して、時刻毎の需要予測誤差の大小に応じた運用計画の適切な確率的評価が可能となる。

### <予測誤差の評価指標を変更した場合の運用コストに与える影響>

「5.3 需要予測誤差の評価」では、予測誤差を以下の式(5-11)で評価した。

$$ERR = \sum_{t=1}^{48} (F^t - A^t) / \sum_{t=1}^{48} A^t \dots\dots\dots (5-11) \text{ 再掲}$$

$F$ ：翌日予測需要、 $A$ ：実績需要、 $t$ ：サンプル数

計画の実行時点においては、以降の時刻の実績需要はまだ判明しておらず、使用できるのはあくまで需要の予測値のみである。従って、式(5-11)で表される実績需要に対する予測誤差を計画時に適用するのは、やや飛躍があることは先述した。上記の辻褄が一致するように、以下の式(5-14)に基づき、予測誤差（厳密に言えば、これは予測需要に対する実績需要の増減率である）を定量化する方法も考えられる。

$$ERR = \sum_{t=1}^{48} (A^t - F^t) / \sum_{t=1}^{48} F^t \dots\dots\dots (5-14)$$

ここでは、上記の式(5-14)に基づく需要予測誤差の確率分布を用いた場合の運用コストの結果のみを示す。図 5-14 に、予測誤差の評価指標を変更した場合の運用コスト削減達成率を示す。運用コスト削減達成率の定義はこれまでと同様、確定的な翌日予測需要に基づき翌日予測のみを行う評価ケース A に対して、予測精度 100%とした理想ケースのコスト削減額を 100%とした場合の運用コストの削減達成率である。同図に示したのは、翌日計画時に確率的評価を加味した計画を適用し、以降は再計画を実施しない評価ケース A'において、予測誤差の評価指標をこれまでの式(5-11)で評価した場合と、上記の式(5-14)で評価した場合のコスト削減達成率である。同図より、式(5-14)で評価した場合のコスト削減達成率は、逆に悪化する結果となった。これは式(5-14)において、予測需要を基準値として分母に使用することで予測誤差が大きくばらつくことが一因と考えられるが、正確な原因については予測から計画の一連の詳細な検証が必要である。

ここで言及したいのは、採用する予測誤差の評価指標一つを取ってみても、最終的な運用コストに少なからず影響を与えるということである。式(5-11)、式(5-14)のいずれの場合でも、相対的な誤差評価指標であるため、分母の値が小さくなる場合（需要が少ない季節や休日）には予測誤差が大きくなり、

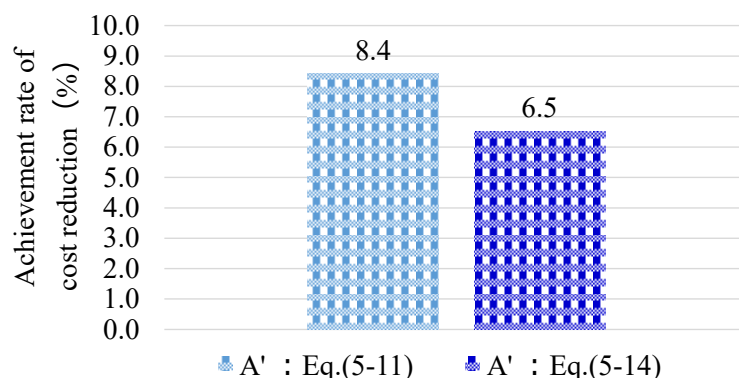


図 5-14 予測誤差の評価指標を変更した場合の運用コスト削減達成率

ばらつきも大きくなる。従って、P.22 の式(3-6)に示した年間の需要最大値で正規化した EEP を用いて予測誤差を評価するなど、種々の評価指標による試行錯誤が必要であると思われる。本章を結ぶにあたり、まだ検証は不足しているものの、今後の改善要素の一つとして記しておく。

## 5.5. 参考文献

- (5-1) 田中誠・高嶋隆太・島海重喜：「エネルギー・リスクマネジメントの数理モデル」(朝倉書店) ,(2018)
- (5-2) Y. Tanaka, and M. Fukushima: “Optimal Operation of Cogeneration Systems by Stochastic Programming”, IEEJ Trans. B, Vol. PE-04, No. 86-100 pp. 51-56 (2004) (in Japanese)  
田中洋一・福島雅夫：「確率計画法によるコージェネレーションシステムの運用最適化—リコースと機会制約を用いた定式化—」, 電学論 B, Vol. 129, No. 6 pp. 765-775 (2009)
- (5-3) S. Kitamura, K. Mori, Y. Izui, T. Miyamoto, and S. Takai: “Operation Optimization of Factory Power Generation Plant Considering an Uncertainty”, IEEJ Trans. C, Vol. 133, No. 4 pp. 822-830 (2013) (in Japanese)  
北村聖一・森一之・泉井良夫・宮本俊幸・高井重昌：「不確実性を考慮した工場自家発プラントの運転最適化」, 電気学会論文誌 C, Vol. 133, No. 4 pp. 822-830 (2013)
- (5-4) J. Nishiguchi, A. Kurosaki, and C. Kaseda: “Robust Optimal Operation for Building HVAC Systems with Uncertainty in Demand Prediction”, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers , Vol. 27, No. 5 pp. 200-206 (2014) (in Japanese)  
西口純也・黒崎淳他・総田長生：「需要予測の不確実性を考慮したロバスト運転計画」, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 5 pp. 200-206 (2014)
- (5-5) 涌井貞美：「図解・ベイズ統計「超」入門」(SB クリエイティブ) ,(2013)

## 第6章 結論

世界的なエネルギー需要の増加が見込まれる中、持続可能な社会を構築していくためには、再生可能エネルギーへの大胆な転換等に加えて、省エネルギーの推進が必須である。エネルギー消費の伸びが著しいオフィスビルなどの建物においては、エネルギー需要量を予測したうえで、最適な運用計画に基づき大型機器を効率的に運用することが重要となる。

そこで、本研究では従来検討が不足していた需要予測の不確実性に対して包括的な解決策を提案するため、三つのステップに分類して検討を進めた。まず、再予測を含む予測手法を立案し、需要予測精度の向上を検討した。次に、提案予測手法を用いて再計画を含む機器運用のシミュレーション評価を行い、再予測・再計画法の現状性能、ポテンシャル性能を定量化し、これらの考察を経て、再予測・再計画に基づく提案手法の改善余地を明らかにした。最後に、上記の改善余地に対して予測誤差の確率的評価と再予測・再計画法を併用した統合的手法を立案し、効果検証を行った。以下に、需要予測の不確実性に対する包括的解決策をまとめるとともに、今後のエネルギー利用効率の向上に向けた課題をまとめる。

### <需要予測について>

- ・当日再予測を併用する場合、翌日予測では前夜から翌朝までのエネルギー貯蔵機器の最適な貯蔵量を決定するために、翌日1日分の積算需要量を正確に予測することが重要となる。これを実現するため、各種の気象予報に応じて積算需要量の予測し、時刻別予測需要を補整する方式が有効である。
- ・時系列モデルによる当日再予測では、直前実績値を参照することで予測実行直後の時刻に対する予測精度は向上する半面、時間を隔てるほど、逆に予測精度が悪化する傾向がある。従って、異なる手法の翌日予測と当日再予測を組み合わせたハイブリッド予測方式の採用が、1日全体に渡る予測精度の向上に効果的である。

### <運用計画について>

- ・運用計画に対して実績の需要が変動した場合の熱源システムの対応は、熱源機出力を事前に求めた計画値のまま固定し、蓄熱槽運用の変化を許容する運用調整方法と、正味の蓄熱量/放熱量は計画値に固定の上、過不足分を熱源機出力の調整により補填する2種類の運用調整方法が考えられる。しかし、再予測・再計画を伴う本研究の評価条件下においては、両者に大差は生じなかった。
- ・需要予測誤差を0%とした理想的運用に対して、現状の再予測・再計画適用時のコスト削減の割合は28%程度であるため、未だ改善余地は大きい。一方、当日再予測の誤差を0%にできた場合、理想的運用に対してコスト削減の割合は74%程度に上るため、当日再予測の誤差を低減、もしくはこの影響を軽減することの運用改善効果は大きい。
- ・翌日予測の誤差は、冷温水需要の各々のピーク季節においては運用コストに与える影響が小さい。一方、需要の減少に応じて蓄熱槽容量を部分的にしか使用しない季節においては、翌日予測の誤差が運用コストの悪化に直結する傾向がある。従って、これら需要減少期の翌日予測誤差への対処を進めることで、運用改善が見込める。



- ・翌日予測、計画のみに基づく運用では、多い季節で約1日半に1回、CGS および ABR の計画外運転が発生し、エネルギー供給力の不足を引き起こす懸念がある。再予測・再計画ではこれら一切の計画外起動を回避できたため、運用安定性の観点においては、現状精度の再予測・再計画でも十分に高い有用性がある。
- ・需要が小さい季節では蓄熱槽容量を部分的に使用する運用に留まるため、早朝に再予測の精度悪化によるデメリットが顕在化し易く、従って再予測・再計画の開始時刻は遅めのほうが望ましい。一方、ピーク需要期には早朝に蓄熱槽は満蓄状態である場合が多いため、予測精度悪化のデメリットより以降の予測精度向上によるメリットのほうが大きくなる。従って、再予測・再計画の開始時刻は早めのほうが望ましい。

#### ＜予測誤差の確率的評価を加味した運用について＞

- ・冷温水需要予測の誤差確率分布は、季節や日種により大きく形状が異なるため、これらを加味した評価が不可欠である。また、同一建物内に複数種別のエネルギー需要がある場合、これらの予測誤差が互いに独立であると仮定すると、期待値評価に大きな影響を与える確率分布のピーク値を正確に定量化できない場合がある。このため、これらの予測誤差は非独立を前提とした条件付き確率を用いた同時確率分布で評価する必要がある。
- ・上記の再予測と再計画を含む提案手法の改善余地に対して、需要予測誤差の確率的評価を組み込むことで、運用改善の効果が見られることを立証した。従って、需要減少期の翌日予測、当日再予測の適用範囲外（本研究では再予測実行時点から4時間後以降）の需要予測誤差に対して確率的評価を組み込み、当日再予測と再計画に統合する方式が有効である。

#### ＜更なるエネルギー利用効率の向上に向けた課題＞

- ・明け方の再予測開始直後では、冷温水需要の直前実績値がほぼ存在しないため、再予測の挙動が不安定となり、逆にコスト悪化に繋がる可能性がある。これに対しては、上記のように再予測・再計画の開始時刻を季節などに応じてチューニングする必要がある。また、明け方の需要立ち上がりは熱源等のシステム起動時刻に依存し、また建物自体の夜間蓄熱効果、前夜の運用終了状態などの外部環境要因によって必要な熱量は大きく異なる。これらの需要発生メカニズムは、日中における需要発生のもので大きく異なるため、これに特化した新たな需要予測手法の確立、ならびにこの予測を用いたシステムの最適起動制御手法の併用が理想的な対策である。
- ・固定的に使用する予測誤差の確率分布が実態と大きくかけ離れた場合には、逆にコスト悪化となってしまう場合も生じ得る。確率分布の自由度を高めるため、分布の水準数を増やすと計算時間や最適化問題規模の増加を引き起こす。従って、時刻毎に定量化した予測誤差確率分布における階級値を、動的かつ最適に調節することが重要である。
- ・需要予測誤差の確率的評価を運用に組み込む場合、予測誤差指標の選定が運用効率に影響を与える。特に、相対的な予測誤差指標は、需要が減少する季節において予測誤差の変動が大きく不安定とな

るため、EEP などの絶対的評価に基づく誤差指標を採用するなど、試行錯誤が必要である。

以上、本研究では再予測・再計画、更に提案手法の改善余地に対して予測誤差の確率的評価も加味することで、エネルギー効率の向上を確認できた。しかし、確率的評価を併用した場合であっても、予測精度 100%とした理想ケースに対して、運用コストの削減は約 4 割程度に留まる。従って、未だ改善の余地は多く残されていると言える。なお、本研究の事例では、設定した機器性能のばらつきが小さかったため、上記の運用効率の向上に伴う絶対値としての運用コスト削減額は比較的小さかった。しかし、評価対象に依ってはこの限りではないことは、先述の通りである（実際、本研究の事例でも需要が増加する夏季には高価なガス熱源が運用に組み込まれるため、提案手法のコスト削減額は増加する）。従って、上記の理想的なエネルギー利用効率に限りなく近づけていく取り組みが、今後も重要である。

昨今の省エネルギー化の要請を受けて、ビルや工場の監視制御システムである BEMS (Building Energy Management System) においては、基本的な需要予測や運用計画機能の導入が進んできている。しかし、本研究で取り扱った、再予測・再計画と需要予測誤差の確率的評価を統合した高度な運用アルゴリズムの導入は、著者が知る限りまだ行われていない。今後、パッケージ化した機能を BEMS に実装し、需要予測の不確実性を考慮した機器の運用チューニングや自動運用を実現することで、エネルギー利用効率のさらなる向上が期待できる。本研究の成果が、その一助となれば幸いである。

## 謝辞

東京電機大学 加藤政一教授には、修士課程からの長きに渡り、大変お世話になりました。今回の博士課程においても、本研究を行う機会を与えてくださり、多大なるご指導をいただきましたことに、心より感謝申し上げます。

東京電機大学エネルギー環境システム研究室の先輩である職業能力開発総合大学校 小林浩昭准教授には、研究の進め方、スケジュール、論文のまとめ方など、多くのアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。

社会人博士課程への入学をご快諾いただき、研究を進める上で多くのご支援ならびに業務面でご迷惑をおかけしました東芝インフラシステムズ株式会社 インフラシステム技術開発センターの皆様、ファシリティソリューション技術部の皆様に、心より御礼申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり、長期間にわたりご迷惑をおかけしながらも、身近なところから実務面や精神面においても多大なご支援をいただきました皆様に感謝申し上げます。

本論文は多くの方々のご支援、ご協力により完成することができました。心より厚く御礼申し上げます。

## 付録

### 1. 最適制御の先行研究事例

ここでは熱源システムの最適制御で必要となる機器特性モデルの先行研究事例を紹介する<sup>(1)</sup>。

#### <対象とする熱源システム>

図1に熱源システムの概略構成を示す。この熱源システムは冷房等に用いる冷水を生成・搬送する冷熱源システムであり、冷水を所定温度まで冷却する冷凍機を主として、冷凍機自体を冷却するための冷却水を生成する冷却塔、冷却水を循環させる冷却水ポンプ、冷水を循環させる冷水1次、2次ポンプなどから構成される（図1は簡略化した構成であり、実際の冷熱源システムは多数の冷凍機・冷却塔などから構成される）。

冷却塔では内蔵するファンの強制通風により冷却水の一部を蒸発させ、その蒸発潜熱により所定温度の冷却水を得る方式が一般的である。空調機での熱交換後、温度が上昇した冷水は冷凍機により冷却されて再度空調機に送られる。一方、冷水が保有していた熱は冷凍機内部で冷却水に移動、最終的には冷却塔を介して外気に放出されることで、冷熱源システム全体としては、冷房対象空間の熱を外気まで移動する働きをする。

ここで、運用設定値の一つである冷却水温度を低下させると、冷凍機では圧縮機の圧力が低下するため使用エネルギーが低下する。一方、冷却塔では冷却水温度を低下させるためにファンの風量を増加させることで使用エネルギーが増加する。冷熱源システム全体の使用エネルギーを最小化するには、このようなトレードオフ特性を考慮した運用設定値の最適化も重要となる。このような最適制御を実現するためには、熱源システムの使用エネルギー特性を精緻に表現する数理モデルが必要となる。

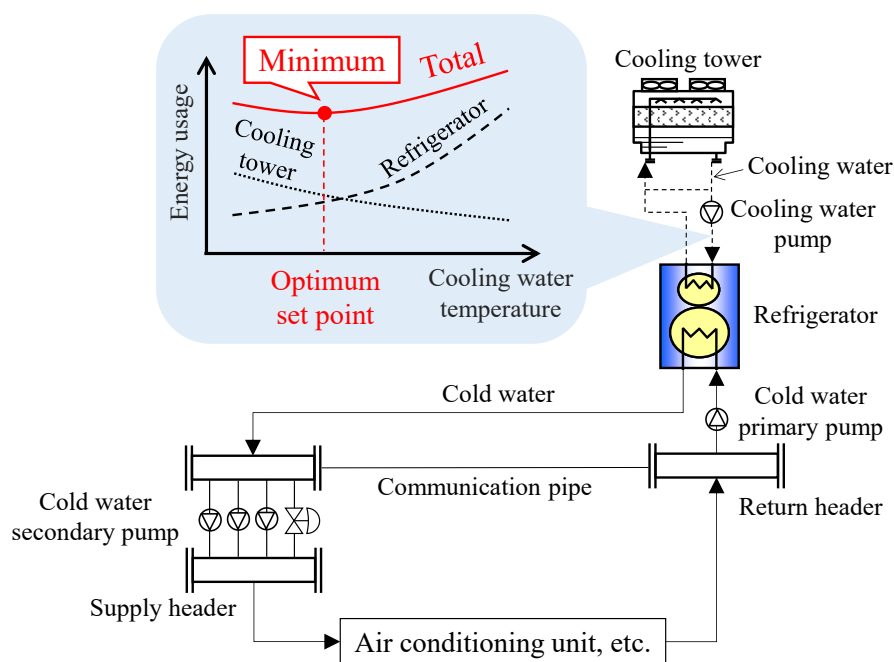


図1 熱源システムの概略構成

### <特性モデリングの事例>

上述のトレードオフを厳密に考慮した最適制御を実現するため、図2に示す要素毎に冷熱源システムを分解し、各々の特性を定量化する回帰モデルを構築した。これらは冷凍機、冷却塔、冷水2次ポンプ、負荷の4種類に大別される。各回帰モデルの目的変数と説明変数を同図にあわせて記す。なお、冷水1次ポンプと冷却水ポンプは接続される冷凍機に同期して起動停止するため、冷凍機モデルではそれらを包含した使用電力の実績値を用いて成績係数（Coefficient of performance：COP）を同定する。以降では、冷熱源システムの主たるエネルギー使用源である冷凍機を対象に、特性モデリングの詳細を紹介する。

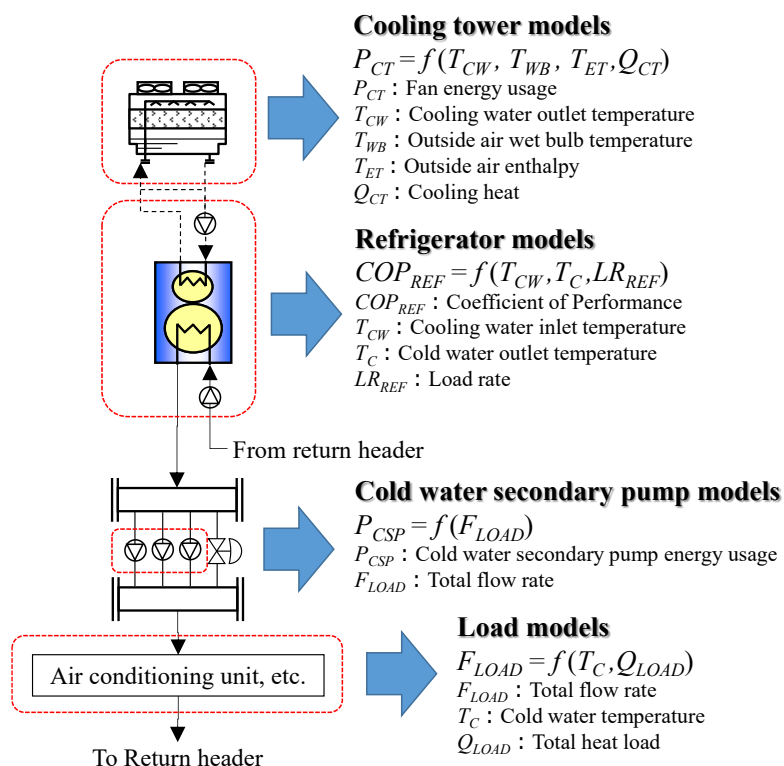


図2 特性モデルの分類

(1) 冷凍機モデル 冷凍機には様々な種類があり、各々の特性には異なる特徴がある。冷凍機の代表的な特性例を図3に示す。同図は4種類の異なる冷凍機の代表的な性能曲線を示している。Aは冷凍機内部の圧縮機回転数を一定で運用する冷凍機、Bはインバータにより圧縮機回転数を変化させる冷凍機（一般に冷却水温度低下時のCOPの変化が大きい）、Cは回転数一定の圧縮機を2台搭載した冷凍機、Dは更に多数の圧縮機を搭載した冷凍機の一例である（C、Dでは圧縮機運転台数の変化点でCOPが不連続的に変化する）。このような様々な特性に対して、対象個別にモデルの合わせこみが必要となり、これが最適運用を実現する上での実務面での課題となっていた。最適運用を広く普及して省エネを図るためには、対象に依存しない汎用的なモデリング手法の確立が必要である。

そこで、本研究事例では冷凍機の運転領域を細かく分割する区分近似手法を適用した回帰モデリング手法を立案した。上記の様々な特性を有する冷凍機に対して、式(1)、式(2)に示す冷凍機の負荷率2.5%毎の微小区間を単位区分とする計40個の区分線形近似式により、冷凍機モデルを構築した。なお、この微小区間を粗くし過ぎると精度は悪化してしまい、逆に細かくし過ぎると一区分に含まれるデータ数が減少するため、場合によっては回帰モデルが不安定となる。上記の区分数は、事前の検討により40分割程度であれば上記Aタイプの冷凍機に対して従来の非線形関数による近似と同等の精度になるために設定した。負荷率に対して区分線形近似を適用することで、上述の固体差が大きい部分負荷特性の関数近似が不要となり、汎用性の向上が期待できる。

$$COP_{REF} = a_{REF,i} \cdot \Delta T_{REF} + b_{REF,i} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta T_{REF} = T_{CW} - T_C \dots \dots \dots (2)$$

$COP_{REF}$ ：成績係数、 $\Delta T_{REF}$ ：冷却水-冷水温度差(°C)、 $T_{CW}$ ：冷却水入口温度(°C)

$T_C$ ：冷水出口温度(°C)、 $a_{REF,i}$ 、 $b_{REF,i}$ ：冷凍機モデルの回帰係数

$i$ ：冷凍機負荷率の区分（1,2,3,⋯,40、例えば  $i = 40$  は負荷率 97.5～100%のモデル）

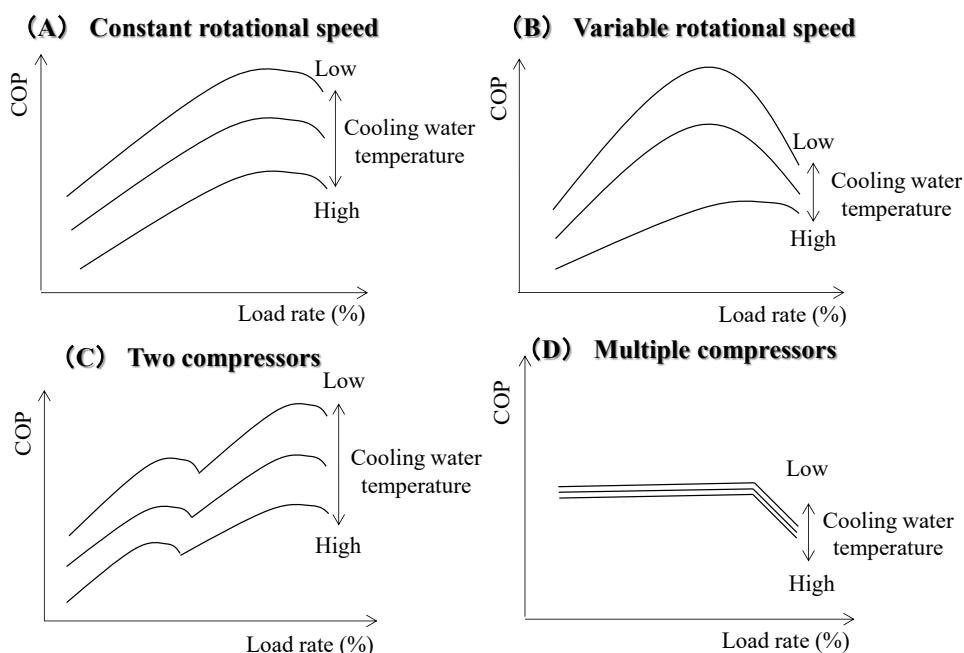


図3 冷凍機の代表的な特性例

以降では、図3のBに該当するインバータにより圧縮機回転数を変化させるタイプの複数の冷凍機データに、提案手法を適用した事例を述べる。提案手法との比較として、冷凍機負荷率の三次項ならびに冷却水-冷水温度差の交互作用項を含む、以下の式(3)に示す多項式近似を従来モデルとした。

$$COP_{REF} = a_{REF} \cdot LR^3 + b_{REF} \cdot LR^2 + c_{REF} \cdot LR + d_{REF} \cdot (T_{CW} - T_C)^2 + e_{REF} \cdot (T_{CW} - T_C) + f_{REF} \cdot LR \cdot (T_{CW} - T_C) + g_{REF} \dots \dots \dots (3)$$

$COP_{REF}$ ：成績係数、 $T_{CW}$ ：冷却水入口温度(°C)、 $T_C$ ：冷水出口温度(°C)  
 $LR$ ：冷凍機負荷率(%),  $a_{REF,i} \sim g_{REF,i}$ ：比較する冷凍機モデルの回帰係数

図4が両手法を適用して構築した冷凍機特性モデルである。提案手法では強い非線形状のCOP変化に対応して、モデル特性を表す曲面が歪んでいるのがわかる。誤差の評価指標は、異なる容量の機器を横並びで評価できるため、百分率を単位に持つ指標の採用が望ましい。ただし、MAPE (Mean absolute percentage error) などはモデルの目的変数値が小さい領域の誤差を過大に評価してしまう傾向があり、熱源最適運用で重要となる機器の定格運転点近傍での誤差評価を適切に行えるとは言い難い。そこで、ここでは誤差の評価指標に以下の式(4)に示すWAPE (Weighted Absolute Percentage Error) を採用した。

$$WAPE = \frac{\sum_{j=1}^n |f_j - y_j|}{\sum_{j=1}^n y_j} \dots \dots \dots (4)$$

$WAPE$ ：加重絶対誤差率(%),  $n$ ：サンプル数、 $y_j$ ：実績値、 $f_j$ ：モデル計算値

上記の加重絶対誤差率では、従来モデルが1.42～4.75%であったのに対して、提案モデルでは0.91～2.92%に低減し（複数台の冷凍機データで評価した）、提案モデルの有効性を確認できた。

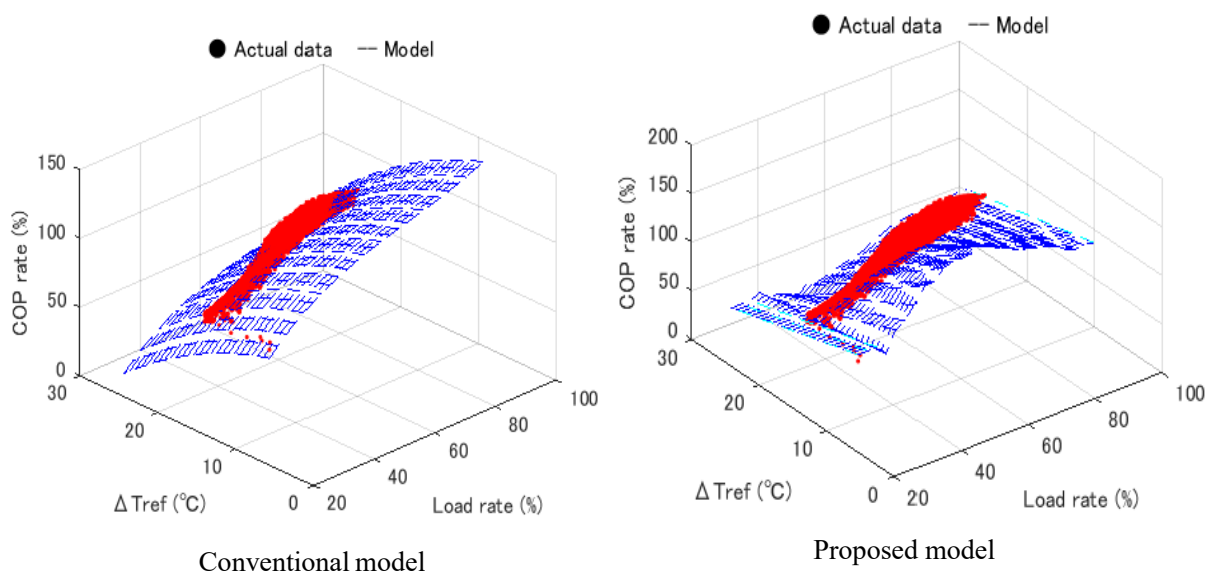


図4 冷凍機の数理モデル

以上のように、最適制御を行うには連続的な温度等に応じて変わる特性を精緻に表現する数理モデルが必要であり、これは一般には非線形モデル、または本事例で述べたような運転範囲を多数に分割した区分線形モデルにて定式化される。仮に、この粒度のモデルを運用計画で採用した場合には、機器の運転／停止を表す離散変数も含めることで、求解が困難な非線形の組み合わせ最適化問題となる。また、本事例で述べた区分線形モデルにて非線形性を回避できた場合でも、運転範囲の区分数に応じた決定変数の考慮が機器台数分に応じて必要となり、更にはこれが計画対象の時間長分だけ倍増するなど、問題が極めて大規模となる。加えて、本研究の主題である予測誤差の不確実性を加味する場合、予測誤差パターンに応じて上記の決定変数がさらに倍化することになり、現実的にはこれらの一括求解は極めて困難である。従って、「第2章 熱源・電気機器の最適運用問題」で述べたように、近似した特性等を用いて多時間断面の機器運用を決定する最適運用計画と、更に細かい粒度の数理モデルを活用して温度等の運用設定値も含めた最適制御、これら両者の協調により、機器運用の全体最適を実現するのが現実的なアプローチである。

## ■ 参考文献

- (1) M. Saito, Y. Kubo, Y. Hanada, T. Kinoshita, and K. Yokokawa: “A Study on Regression Modelling Methods for Heat Source Systems and Effects of Performance Changes on the Optimum Operations”, IEEJ Trans. C, Vol.140, No.2, pp. 145-155 (2020) (in Japanese)

齋藤正明・久保雄貴・花田裕一・木下朋行・横川勝也：「熱源システムの回帰モデリング手法と性能変化が最適運用に与える影響の一考察」，電気学会論文誌 C, Vol.140, No.2, pp.145-155 (2020)



## 2. LASSO 回帰の概要

ここでは LASSO 回帰についての一般的な概要を述べる<sup>(2)</sup>。LASSO 回帰は RIDGE 回帰、ELASTIC NET とあわせて、線形回帰モデルの正則化手法の一つである。ここで正則化とは、説明変数間に多重共線性がある、説明変数の数がサンプル数より多い場合に、回帰係数が不安定、または算出できないといった最小二乗法の課題を解決するため、ペナルティ項を加味した回帰係数の導出を行う方法である。式(5)に、正則化法における回帰係数同定時の誤差評価関数を記す。右辺第 1 項は真値とモデル計算値の誤差二乗和であり、この項のみを評価関数として回帰係数  $\beta$  を同定するのが最小二乗法である。正則化法では、右辺第 2 項の正則化項が評価関数に加えられる。 $\alpha$  の値に応じて、表 1 に示すように LASSO 回帰、RIDGE 回帰、ELASTIC NET に分類される。

$$E_{\lambda,\alpha} = \underbrace{\sum_i \left| y^{(i)} - \sum_p \beta_p x_p^{(i)} \right|^2}_{\text{誤差二乗和}} + \underbrace{\lambda(\alpha \|\beta\|_1 + (1-\alpha) \|\beta\|_2^2)}_{\text{正則化項}} \rightarrow \min \cdots \cdots (5)$$

真値    係数×説明変数  
誤差二乗和                      正則化項

表 1 線形回帰モデルにおける主要な正則化法

$\alpha$	名称	利点	欠点
0	RIDGE回帰	係数 $\beta$ の導出が容易 (解析的に求解できる)	説明変数の自動選択は不可
1	LASSO回帰	説明変数の自動選択が可能 (モデルを低次元化できる)	係数 $\beta$ の導出が複雑 (数値的な反復演算が必要)
0~1	ELASTIC NET	LASSOの変数選択の課題を解決 (相関の高い複数の変数を抽出、サン プルサイズ以下まで変数選択が可能)	上記LASSOの欠点に加えて、 調整要素 $\alpha$ が増える

LASSO 回帰は  $\alpha = 1$  とすることで、式 (5) の  $\|\beta\|_1$  をペナルティに含めて回帰係数を同定する方法である。一方、RIDGE 回帰は  $\alpha = 0$  とすることで、 $\|\beta\|_2^2$  をペナルティに、ELASTIC NET は  $\alpha = 0 \sim 1$  とすることで両者をペナルティに含めて回帰係数を同定する方法である。表 1 には各手法の利点、欠点を併せて記す。RIDGE 回帰は  $\|\beta\|_2^2$  が含まれる事で、誤差評価関数  $E$  が最小（極値）となる回帰係数  $\beta$  を、式(1)を各説明変数で偏微分して、これらが全て 0 と置いた連立方程式から解析的に求める事が出来る。一方、LASSO 回帰は  $\|\beta\|_1$  をペナルティに含むため、上記の微分による求解はできず、数値的な反復演算によって、回帰係数  $\beta$  を求めざるを得ない。しかし、説明変数の自動選択が可能といった RIDGE 回帰にはない利点を有する。ELASTIC NET は双方の特徴を有し、LASSO 回帰における変数選択の課題が解決できる反面、調整要素として  $\alpha$  が増えてしまう。

ここで各手法の実行可能領域と、式(5)右辺第1項のモデルの誤差二乗和の関係を図5に示す。誤差評価関数  $E$  は、正則化パラメータ  $\lambda$  (正則化作用の重みを決めるハイパーパラメータ) を未定乗数としたラグランジュの未定乗数法の形式をしており、正則化項を制約条件、式(5)右辺第1項のモデル誤差二乗和のみを目的関数とした等価な最適化問題に書き換え可能である。図5は同定する回帰係数が  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  の2つ(説明変数が2つ)を例に、各手法の制約条件(最適化問題の実行可能領域)、目的関数であるモデル誤差二乗和の等高線を示している。

RIDGE 回帰では  $\|\beta\|_2^2$  が所定値以下となる事が制約条件となるため、実行可能領域は図1に示すように円状になる。一方、LASSO 回帰は  $\|\beta\|_1$  を所定値以下とするため、実行可能領域は一方の回帰係数が「0」となる点を頂点とした、ひし形になる。ELASTIC NET では、RIDGE 回帰と LASSO 回帰の両者を組み合わせた実行可能領域となる。誤差二乗和の等高線の中心点が、最小二乗法で同定される誤差最小の回帰係数値である。従って各手法における回帰係数の最適値は、上記の各実行可能領域の境界と、モデル誤差二乗和の等高線の接点となる。この接点は、LASSO 回帰では一方の回帰係数が「0」となる軸上(すなわち、ひし形の頂点)となり、RIDGE 回帰ではこれ以外となる。この特性により、LASSO 回帰(ELASTIC NET も同様)では、不要な変数の係数が「0」に収縮することで、説明変数の自動選択が可能となる。

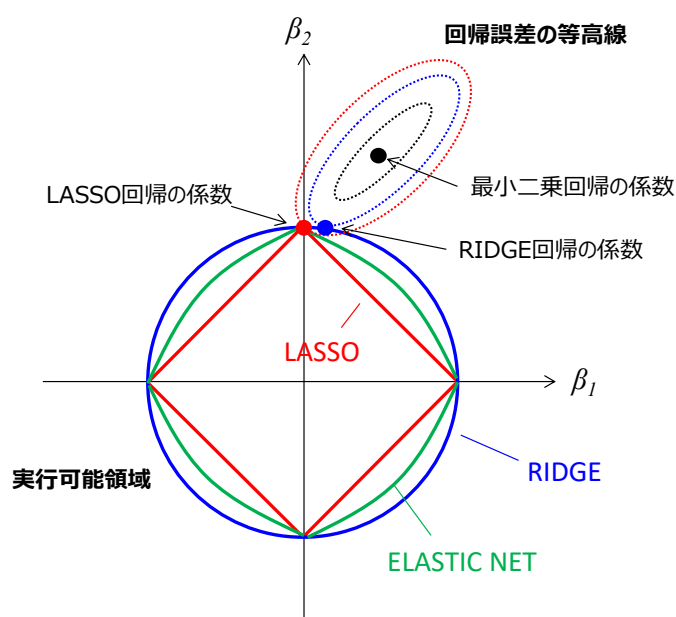


図5 各正則化手法の実行可能領域と回帰誤差の関係

## 参考文献

- (2) 川野秀一・松井秀俊・廣瀬慧:「スパース推定法による統計モデリング」、共立出版 (2018)

### 3. LASSO 回帰による当日再予測モデル

ここでは当日再予測モデルに対して LASSO 回帰を適用することで、どの説明変数を選択する傾向があるかを確認する。図 6 に、LASSO 回帰における説明変数の選択割合を示す。上段は 30 分先の需要を予測するモデルの場合、下段は 2 時間先の需要を予測するモデルの場合である。同図は、1 年間分の全時刻を対象とした予測モデルにおいて、各々の説明変数が選択された回数（説明変数係数の絶対値が非零の回数）の割合を表す。なお、日中時間帯に対する予測モデルのみで集計しても、全体的な傾向は図 6 と大差は生じなかった。

30 分先の予測モデルでは直前の実績需要、日種が選択される割合が多い。一方、2 時間先の予測モデルでは直前実績需要、日種の選択割合が減少し、曜日と予報気温の選択割合が増加している（これは電力、温水、冷水において共通の傾向である）。直後である 30 分先の予測では直前実績の選択割合が多く、2 時間先の予測ではこの傾向が減少して、予報気温の選択割合が増加することは妥当な結果である。しかし、2 時間先の予測で最も選択されるのが、予測実行から 24 時間後の予報気温であるのは意外な結果である。これは、通常の時系列の因果関係からは発想し難いものの、未来（24 時間後）の気温を用いて過去（2 時間後）の需要を予測することで、誤差が低減できることを示唆している。なお、図 6 では確認できないが、2 時間先の予測モデルは 30 分先と比べて選択される説明変数の数が減少し、よりスパースなモデルが構築される傾向があった。

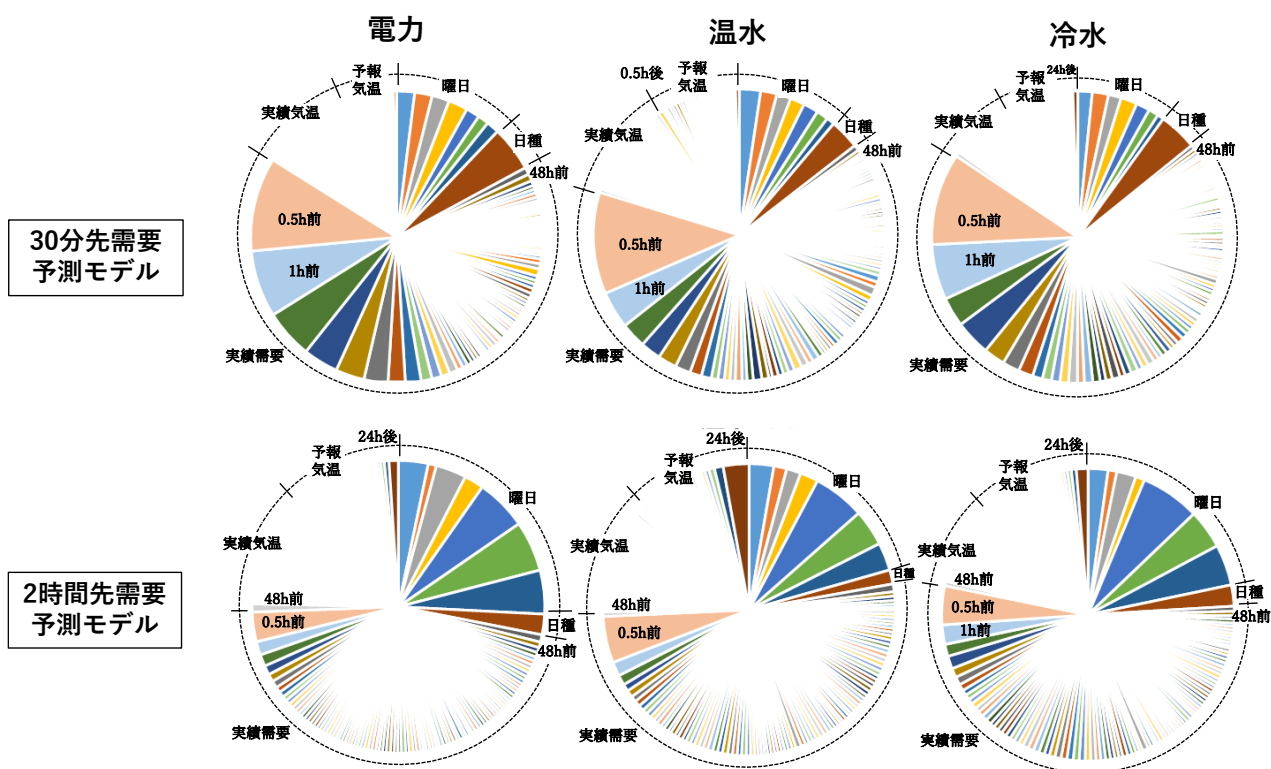


図 6 LASSO 回帰における説明変数の選択割合

#### 4. 当日再予測の月毎の適用限界時間長

当日再予測の適用限界時間長を月毎に分割して評価した。結果を図7に示す。棒グラフは当日再予測のRMSEが翌日予測と拮抗する適用限界時間長を示しており、24hとなっている箇所は、予測対象を最大の24hとしても、当日再予測のRMSEが翌日予測を下回った月である。同図には、各季節の需要大小を確認するため、参考として翌日予測の月別のRMSEを併記した。

冷水は需要が減少する冬季は適用限界時間長が長くなり、夏季は需要の増加に反して適用限界時間長が短くなる傾向がある。一方、温水は冷水のような明確なパターンは確認できない。電力については、当日再予測の適用時間長が翌日予測RMSEに比例する傾向を確認できた。当日再予測の反映時間長を月毎に変化させる場合、翌月の反映時間長については予め決定しなければならない課題がある。さらに、翌日予測と当日再予測の組み合わせからなる1日の予測需要の作成方法や、これに応じて、確率的評価における予測誤差の反映方法などが月毎に変化して複雑となる。このため、本研究では年間一括の評価により、当日再予測の反映時間長は4hで固定とした。しかし、上記の課題を解決できる環境下（例えば、推定した翌月の再予測反映時間長を考慮したうえで、過去の予測誤差データの再集計やこの確率的評価が可能な環境）においては、ここで述べた当日再予測の反映時間長を、月毎や季節毎にチューニングすることも可能である。

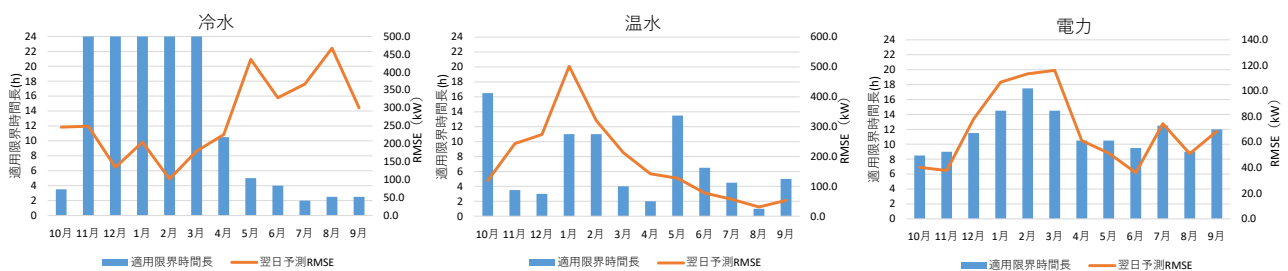


図7 再予測の適用限界時間長（月別）

## 5. 運用評価における対象システムの設定について

本研究で採用した熱源・電源の対象システムを設定するにあたり、実際の建物における設備構成を参考にした。表2に一般建物の熱源構成例<sup>(3)</sup>、表3にZEB（Zero Energy Building）における設備構成例を示す<sup>(4)</sup>。ここでZEBとは、年間のエネルギー消費量と生産量がほぼ等しい建物のことであり、カーボンニュートラル等の社会課題解決に向けて、建設業界などで近年注目を浴びている概念である。

表2 一般建物の熱源構成例

業種	建物規模		CGS		ABR		ボイラ		他熱源1		他熱源2		機器 合計台数
	延べ床面積	階数	電気出力	台数	容量	台数	容量	台数	容量	台数	容量	台数	
老人ホーム	3709	3	32	1	175	1	197	3	105 ABR	1	22.4-50 GHP	3	9
研修施設	9000	5+1	135	1	482	2	135	1	349 温水ヒーター	2			6
ホテル	25860	26+1	225	1	633	2	116	1	1919 温水ヒーター	2			6
商業施設	53800	8	490	3	1617	1			1231 ABR	1			5
商業施設	60000	4	640	3	1758	3			1407 ABR	2			8
商業施設	63000	8	580	4	1580	3							7
商業施設	68837	5	490	4	1673	1			2461 ABR	1			6
病院	76319	6+1	645	2	984	1	2000kg/h	8	461 水冷チラー	1	4219 ABR	2	14
商業施設	98000	5	750	4	2110	2			1899 ABR	1	450 GHP	41	48
商業施設	100000	33	1500	3	900RT	3	4.5t/h	3	500RT ABR	1	900RT ターボチラー	3	13
事務所ビル	104594	15							1165×3, 537×1 HPCR	4	1165×4, 730×1 HPCR	5	9

表3 ZEBにおける設備構成例

名称/所在	建物規模		自然エネルギー		エネルギー貯蔵	備考
	延べ床面積	階数	1次側	2次側（負荷側）		
市庁舎	7630	5	木質チップボイラ 井戸水熱 PV20kW（休日逆潮）	高効率パッケージ空調 デシカント空調（バイオマス再生） 自然換気（ナイトバージ） 自然採光		主温熱源は木質チップボイラ 主冷熱源は地下水熱
事務所ビル	51356	22+3	壁面PV（昼間のLED照明分に相当、全体の1%） 地冷より熱供給	デシカント・放射空調 タスクアンビエント		
事務所ビル	1277	3	壁面PV（全体の27%?） FC-CGS4.2kW、ガスエンジンCGS5kW 吸着式冷凍機	自然採光・換気 タスクアンビエント空調	蓄電池（22kWh） 貯湯槽	
事務所ビル	1318	2	PV（ほぼ全量） 太陽熱集熱、HP温水器 空冷HP、水冷HP（地中熱利用）	デシカント空調 自然換気	貯湯槽	貯湯槽は太陽熱変動吸収
研究所	5536	3+1	PV（ほぼ全量） CGS排熱の建物間融通 水冷HPチラー2台（地中熱利用）	自然採光・換気 タスクアンビエント空調 デシカント空調	潜熱、水蓄熱槽	蓄熱はHP運転と需要の時間差 吸収
大学校舎	4477	5+1	PV（夏期ピーク時の10%） 空冷ヒートポンプ 水冷ダブルバンドルヒートポンプ（地中熱、地下水利用）	デシカント空調 自然換気	蓄熱槽	蓄熱はHP運転と需要の時間差 吸収
事務所ビル	10603	5	PV 太陽熱集熱 ガスCGS 吸収冷温水機 GHPチラー	デシカント空調		太陽熱集熱とガスCGSによる吸 収冷温水機運転

表 2 は上から延べ床面積が小さい順に並んでいる。表の右側には合計の熱源台数を付記した。一部の延べ床面積がかなり大きな建物を除き、熱源台数は概ね 5 台から 10 台程度に分割するのが一般的であると考えられる。また、表 3 では太陽光発電 (PV)、蓄熱槽、CGS もしくは地中熱等の未利用熱を活用したヒートポンプ (デシカント空調の熱源用途) の組み合わせが多い。以上を踏まえて、本研究では以下の方針に基づき、熱源・電源の対象システムを定義した。

- ・ CGS、ABR (吸収式冷凍機)、EHP (電気式ヒートポンプ) による電気・ガスのハイブリッド熱源構成とする (近年、重要性が増している災害時やエネルギー価格高騰などのリスクを考慮すると、複数種別のエネルギーを組み合わせたハイブリッド構成が望ましいと考えるため)
- ・ CGS の供給と需要のアンバランスを解消するため、冷水・温水蓄熱槽を対象に含める
- ・ 電力供給には蓄電池を対象に含める
- ・ 蓄電池は価格の観点から、容量は相対的に小さいと仮定する
- ・ EHP は地中熱利用 (起動停止は 1 日 1 回の制約あり) を仮定しても良いが、本研究では通常の外気利用の EHP を想定する

#### ■ 参考文献

- (3) 日本エネルギー学会:「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2000」、日本工業出版 (2000)
- (4) 空気調和・衛生工学会:「ZEB のデザインメソッド」、技報堂出版 (2019)