

# 蓄熱空調システムの最適運転法 (第5報) 実建物への適用と運転実績の評価

## Development of Optimal Operation Schemes for HVAC Systems with a Thermal Storage Tank Part5 : Application to Real Building and the Result of Optimal Operation

正会員 松下直幹 (アレフネット)

正会員 山口弘雅 (関西電力)

正会員 木虎久隆 (関西電力)

正会員 吉田治典 (京都大学)

Naoki MATSUSHITA<sup>\*1</sup> Hiromasa YAMAGUCHI<sup>\*2</sup> Kitora HISATAKA<sup>\*2</sup> Harunori YOSHIDA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Aleph Networks Corporation <sup>\*2</sup> The Kansai Electric Power Co., Inc. <sup>\*3</sup> Kyoto University

Synopsis: Thermal storage systems used in a building HVAC system is considered to be an important technology for energy conservation in building sectors as well as for reduction of CO<sub>2</sub> gas emission coupling with the current global warming issues. It is reported, however, that the energy conservation is not achieved in the real field due to lack of proper operation of the system. In this study, optimal operation scheme developed in previous report was applied to thermal storage systems used in a real building. And the result of trial operation is shown. The expected error percentage (EEP) of the daily summed cooling load was 9.8%, which shows the cooling load prediction method is accuracy enough for practical use. System COP was improved about 13% by optimal operation.

### はじめに

近年 夜間電力の利用によるCO<sub>2</sub>削減策の一つとして、蓄熱式空調システムの利用が注目されている。しかしながら、蓄熱式空調システムでは、翌日に利用する熱を夜間に蓄える必要があるため、蓄熱量の判断を運転管理者に依存する場合や、自動制御にある程度の経験的な調整が必要な場合が多い。これらの判断や調整が適切に行われていない場合には、蓄熱式空調システムの設計性能が十分に発揮されないことも考えられる。このような背景から、筆者らは、既報<sup>1)</sup>において、熱負荷予測情報を基に水蓄熱式空調システムを運転する手法を提案し、シミュレーションによりその効果を示した。また、全蓄熱システムを対象とし、実熱負荷を用いて現実的な運転をシミュレートすることで、最適化の目的関数が蓄熱システムの運転に与える影響、熱負荷の予測誤差がシステムの挙動に与える影響などを分析した。

本研究では、既報<sup>1)</sup>で述べた水蓄熱式空調システムの最適運転法を実建物に適用し、その効果を検証する。本報では、適用した最適運転法の概要と、適用後の運転実績について報告する。

### 1. 対象建物及び設備概要

対象建物は、福井県美浜町に建つ地下1階、地上5階の延床面積10,724m<sup>2</sup>の事務所ビル(1999年竣工)である。熱源設備は、水蓄熱式空調システムを持つ共用・執務室系統と非蓄熱系統である通信機械室系統に分かれる。共

用・執務室系統は、多槽連結式完全混合型水蓄熱槽(22槽、計700m<sup>3</sup>)と空冷ヒートポンプチラー(236kW)、水冷チラー(200kW)とを組み合わせたシステムである。本系統の空調方式は、単一ダクト+VAV方式である。

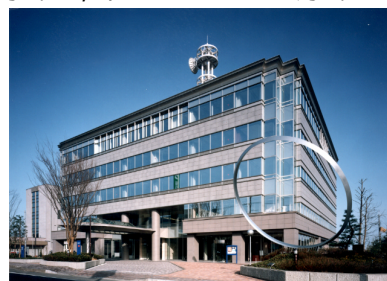


図-1 対象建物の外観

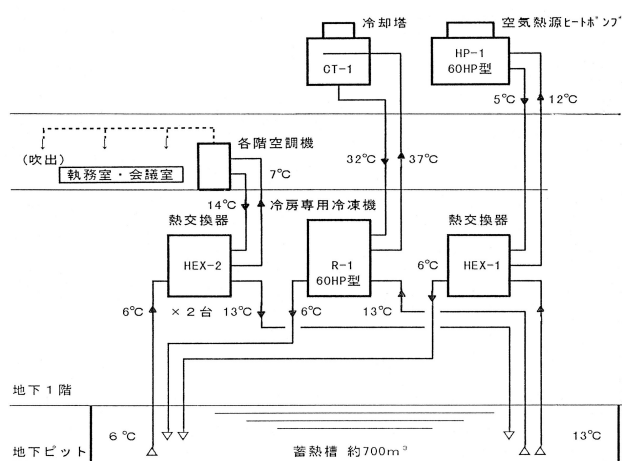


図-2 熱源・空調システム系統図

## 2. 最適運転法の概要

水蓄熱式システムの最適運転法は、空調熱負荷を予測する「熱負荷予測ブロック」、予測熱負荷をもとに要求される蓄熱量を見いだす「要求蓄熱量ブロック」、空調システムの運転シミュレーションを行う「システムシミュレーションブロック（システムの運転をシミュレートし消費電力量などの結果を得る計算ブロック）、ならびに、消費電力量を目的関数として、最適運転を見いだす「運転最適化ブロック」という4つのブロックで構成される。

### 2.1 熱負荷予測ブロック

熱負荷予測ブロックでは、吉田の手法<sup>2)</sup>に基づく建物空調熱負荷予測法に、翌日空調稼働率と予測開始直近の絶対湿度を利用するという改善を施したものをを用いる。詳細については、既報<sup>3)</sup>を参照頂きたい。

### 2.2 要求蓄熱量ブロック

日積算熱負荷の予測結果に、蓄熱槽やパイプ・ダクトなど搬送系からの伝熱損失、ポンプやファンなどによる加熱量、槽内平均温度を一定レベルに回復するための熱量を加えて要求蓄熱量を求める。

### 2.3 システムシミュレーションブロック

各機器の特性を数式化したモデルをつなぎ合わせて構築した対象建物の熱源・空調システムモデルを用いて消費電力量を求める。なお、蓄熱槽以外の各機器特性は動特性を考慮せず、いわゆる瞬時定常モデルとする。熱源・空調システムモデルの詳細は次報に述べる。

### 2.4 運転最適化ブロック

運転最適化ブロックでは、システム全体の消費電力量を最小にする熱源入口温度設定値（set）と蓄熱運転時間（Topt）の組合せを図-3に示すフローにより決定する。既報<sup>1)</sup>では熱源出口温度設定値を最適化の変数としたが、対象の熱源が出口温度の設定機能を持たないため、入口三方弁の制御設定値を最適化の変数 set とした。

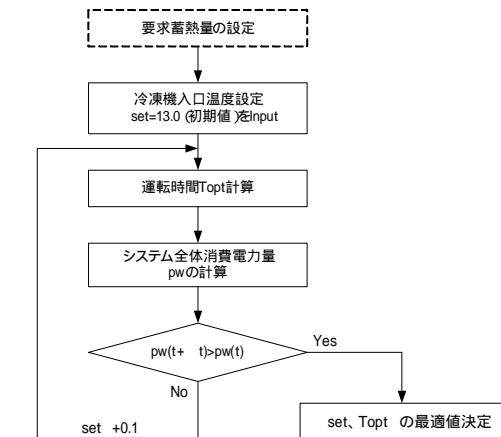


図-3 運転最適化ブロックの計算フロー

具体的な計算方法を以下に示す。

1) set を初期値の 13.0 として、22時から蓄熱を開始する先詰運転により、要求蓄熱量を蓄熱するのに必要

な運転時間 Topt を計算する。実際の運転では、空調開始1時間前の7時から Topt だけ遡って蓄熱を開始した後詰運転を行うが、この時点では Topt が不明なため、先詰運転としている。

2) Tope を用いた後詰運転をシミュレートし、システム全体の消費電力量を算出する。

3) set を 0.1 ずつ変化させながらこの計算を繰り返すし、set、Topt の最適解を得る。

なお、計算時間を短縮するために、熱源2台の set、Topt は同じ値とする。最適化に要する時間は約 15 分である。

## 3. 実建物における熱負荷予測の実績

### 3.1 改善手法による予測結果

吉田の手法<sup>2)</sup>に空調稼働率による補正、直近の絶対湿度利用という2つの改善を適用した熱負荷予測システムを実建物に実装し、2007年よりオンライン試験を開始した。空調稼働率は、運転管理者が予め入力した運転スケジュールに基づき演算した値を用いている。図-4~6に6/1~8/27の予測結果を月別に示す。休日のうち6/2、6/30、7/1、7/7、7/8の5日は熱負荷が0という予測結果になった。これは、休日前日に運転管理者が空調スケジュールを入力しなかったことが原因である。これら5日間を除く期間の予測精度は日積算熱負荷 EEP で 9.8%、時間積算熱負荷 EEP で 12.7%と 2006 年度に実施した予想シミュレーションとほぼ同等の結果が得られた。当日の建物利用状況により、空調スケジュールが変更されるため、空調稼働率は予測時点と実際では異なり、これが予測精

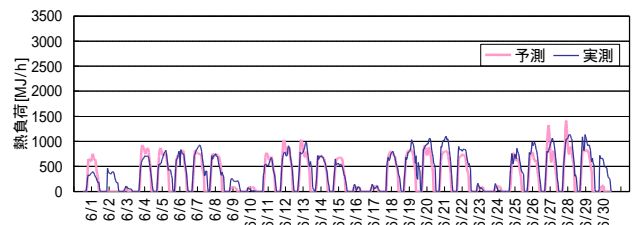


図-4 実建物における予測結果（2007年6月）

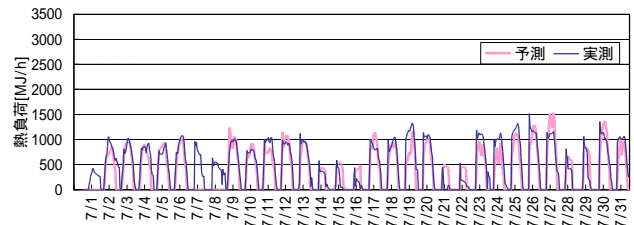


図-5 実建物における予測結果（2007年7月）

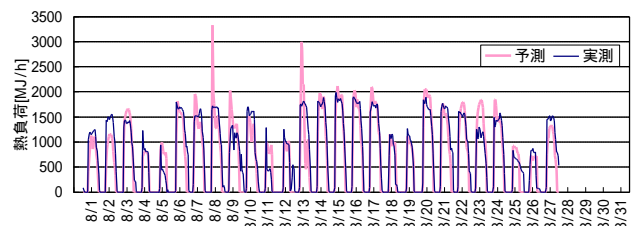


図-6 実建物における予測結果（2007年8月）

度低下の要因となる。一方で熱負荷予測の入力条件である気象予報の精度が2006年度よりも高かったことが精度向上の要因となり効果が相殺したものと考えられる。

### 3.2 改善効果の分析

システム改善効果の実績を分析するため、表-1に示すケースを設定し、予想シミュレーションを行った。case4-1は実際に対象建物で予測を実施した結果である。case4-2は改善策を適用しなかった場合、case4-3は外気湿度予報値を用いた場合、case4-4は空調稼働率の実績値を用いた場合を想定した熱負荷予測シミュレーションの結果である。事前に空調スケジュールが設定されていなかった5日間は除外してEEPを算出している。

改善策を適用しなかった場合を想定したcase4-2では、日積算熱負荷EEPで22.2%、時間積算熱負荷EEPで25.2%と、2006年度の精度をやや上回った。これと実際の予測結果であるcase4-1を比較すると、システム改善の効果は日積算熱負荷EEPで12.4ポイント、時間積算熱負荷EEPでは12.5ポイントと推定できる。また、予定通りの空調スケジュールで運転されたと想定したcase4-4では、日積算熱負荷EEPで9.1%、時間積算熱負荷EEP11.6%となった。case4-1との差は日積算熱負荷EEPで0.6ポイント、時間積算熱負荷EEPで1.0ポイントであり、空調スケジュールの予定によほどの変更にならなければ、予測精度はそれほど低下しないことが分かる。直近6時間平均の絶対湿度ではなく、外気湿度の予報値をそのまま用いたcase4-3では、case4-1よりも高い精度が得られた。これは、外気湿度の予報精度が2006年度に比べて高かったためと考えられる(図-7)。case4-1の結果は、公

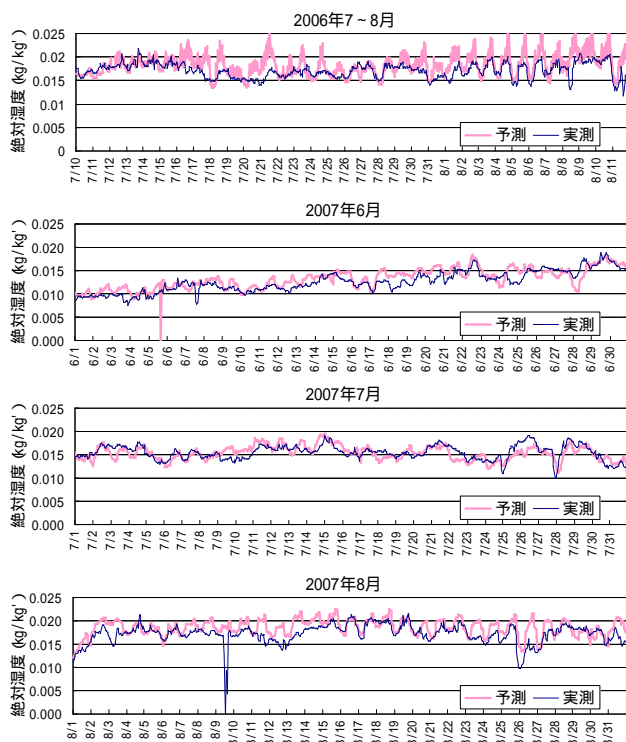


図-7 外気湿度の予報精度比較

開ベンチマークテスト<sup>4)</sup>の結果と比較しても遜色の無いものであり、蓄熱式空調システムの最適運転計画に十分な精度と考えられる。

表-1 改善効果の予想シミュレーション結果

case	外気温度	外気湿度	日射	休日稼働率	平日稼働率	実現性	EEP (時間積算)	EEP (日積算)
4-1	気象予測	直近6時間	気象予測	有(予定)	有(予定)	可	12.7	9.8
4-2	気象予測	気象予測	気象予測	無	無	可	25.2	22.2
4-3	気象予測	気象予測	気象予測	有(予定)	有(予定)	可	12.6	7.9
4-4	気象予測	直近6時間	気象予測	有(実績)	有(実績)	不可	11.6	9.1

## 4. 実測による最適運転効果の検証

### 4.1 検証方法について

最適運転と満蓄運転を1週間単位で切り替え実施し、運転結果を比較した。運転方法の切り替えスケジュールを表-2に示す。

表-2 運転方法の切り替えスケジュール

実験No	運転方法	回数	期間
O-1	最適運転	1回目	7/23 - 7/29
F-1	満蓄運転	1回目	7/31 - 8/6
F-2	満蓄運転	2回目	8/10 - 8/16
O-2	最適運転	2回目	8/17 - 8/23
O-3	最適運転	3回目	8/24 - 8/30
O-4	最適運転	4回目	8/31 - 9/6
F-3	満蓄運転	3回目	9/7 - 9/13
O-5	最適運転	5回目	9/15 - 9/20
F-4	満蓄運転	4回目	9/21 - 9/27
O-6	最適運転	6回目	9/29 - 10/4
F-5	満蓄運転	5回目	10/6 - 10/11

### 4.2 満蓄運転について

従来の運転である満蓄運転では、熱源入口温度設定(set)を13.0、8:00の目標残蓄熱率を100%、22:00の目標残蓄熱率40%に設定し、残蓄熱率が目標値から%下回ると熱源を運転する。は時間帯毎に設定できる。22時の残蓄熱目標を40%にしたのは、熱源能力が蓄熱槽容量に比べて小さく、完全に放熱すると、翌日の蓄熱が100%に達しないためである。

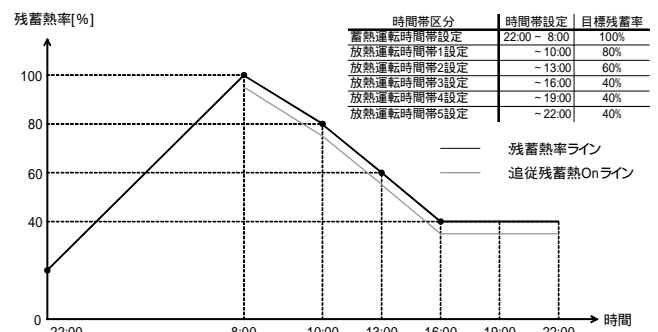


図-8 満蓄運転の制御イメージ

### 4.3 実測結果の比較

#### (1) 入口温度

R-1, HEX-1の入口温度を図-9に示す。満蓄運転期間の設定は、R-1, HEX-1ともに13であり、実測値もほぼ13前後であった。一方、最適運転期間は、13よりも高い値を示し、最適化の効果が現れている。

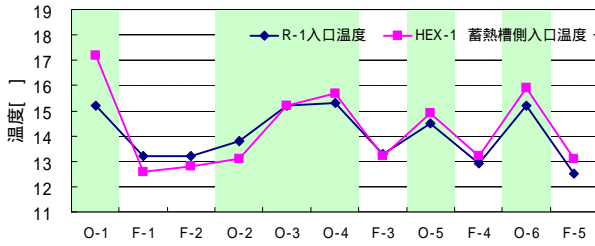


図-9 R-1 入口温度, HEX-1 入口温度比較

(2) 熱源 COP

図-10 に R-1, HP-1, 熱源システムの COP の向上率を期間平均値で示す。向上率とは、最も COP の低い F-2 に対する、各期間の COP の割合を意味する。全期間の平均では、最適運転の熱源システム COP が満蓄運転を約 2.5% 上回ったが、外気温等の影響も含むため明確な差とは言い難い。冷水入口温度と生成熱量、電力量の相関を図-11 に示す。入口温度が上昇すると、生成熱量、電力量ともに増加するが、電力量よりも生成熱量の増加率が大きく、熱源 COP の向上に繋がっている。ただし、R-1 に関しては、その効果は小さい。熱源システム COP の差が明確に現れなかったのはこのためであると考えられる。なお、R-1 は、旧型のレシプロチャラーであり、冷媒圧力制御が細くなくされていない。最新のターボ冷凍機やスクルー-冷凍機を用いた場合は、より高い効果が期待できる。

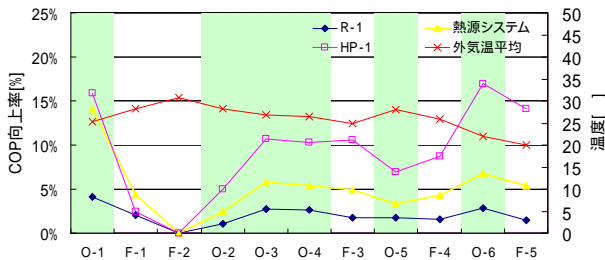


図-10 熱源 COP の向上率 (期間平均値)

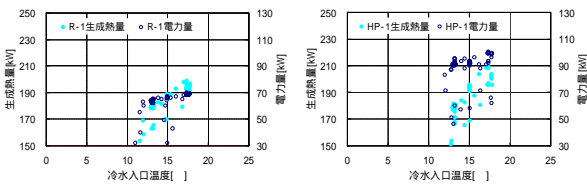


図-11 入口温度と生成熱量・電力量の相関 (0-5 期間)

(3) システム COP

図-12 にシステム COP の向上率の期間平均値、図-13 に槽内平均温度の期間平均値を示す。

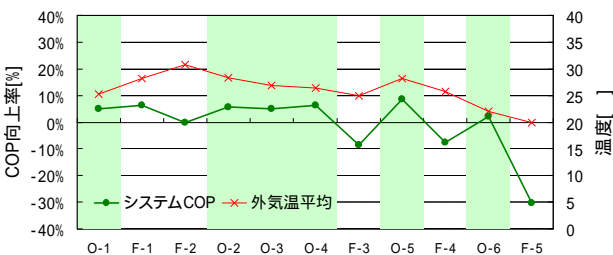


図-12 システム COP の向上率 (期間平均値)

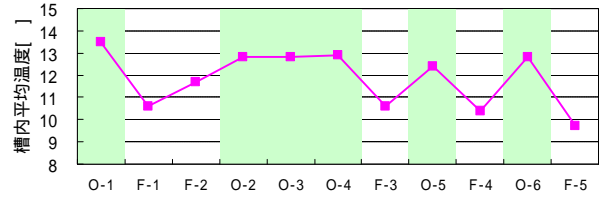


図-12 槽内平均温度の期間平均値

全期間の平均では、最適運転のシステム COP が満蓄運転を約 13% 上回った。入口温度を上昇させたこと、運転を朝方にシフトしたことによる熱源 COP の向上に加え、蓄熱量を必要最低限に留めたことにより槽からの放熱ロスが低減したためである。また、熱源 COP が向上したことで、熱源運転時間が短縮され、補機類の消費電力が削減したことも影響している。しかしながら、全ての期間において明確な違いが生じているとは言いがたい。特に、気温の高い期間には、システム COP の差が不明瞭である。一方、気温の低い期間には、最適運転のシステム COP が、満蓄運転のシステム COP を大きく上回っている。これは、要求蓄熱量の小さい中間期には、熱源入口温度を高く設定でき、槽内平均温度も高く推移するため最適運転の効果が出やすいことを示している。逆に、ピーク負荷の発生時期は、ほぼ満蓄運転と同じ設定値で運転されるため、最適運転の効果が小さいものと考えられる。

結 論

- 1) 既報<sup>1)</sup>に基づく水蓄熱式空調システムの最適運転法を実建物に適用した。最適解を得るのに要する時間は約 15 分と実用化に問題ないことが確認された。
- 2) 最適運転法を対象建物に実装し、試験運転を開始した。熱負荷予測については、2007 年夏期 3 ヶ月の実績で、日積算熱負荷 EEP9.8%、時間積算熱負荷 EEP12.7%と、蓄熱式空調システムの最適運転計画に十分な予測精度を得ることが出来た。最適運転の効果は、熱源システム COP で約 2.5%、システム COP では約 13% となった。

参 考 文 献

- 1) 山口弘雅・吉田治典：シミュレーションを用いた水蓄熱式空調システムの最適運転法，空気調和・衛生工学会論文集，No.105(2005-12)，pp.1~11
- 2) 吉田治典：蓄熱槽の合理的運転のための冷暖房負荷予測，日本建築学会計画系論文集，No.495(1997-5)，pp.77~83
- 3) 松下直幹・山口弘雅・三浦光城・吉田治典：水蓄熱式空調システム最適運転のための負荷予測精度の検証と改善，空気調和・衛生工学会学術講演論文集 E-21(2007-9) pp.1119~1122
- 4) 空気調和・衛生工学会，蓄熱最適化委員会，負荷予測 WG，「熱負荷予測公開ベンチマークテスト結果」，(1998-3)
- 5) 猪岡他「次世代制御・通信システム“TSC21”の開発について」(第 1 報～第 8 報)，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，2000~2005