

蓄熱槽を有する空調用熱源プラントの最適運転制御

中村安弘*¹ 栗山 憲*¹
山本正幸*¹ 吉本康申*²
朝野佳伸*³

蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転制御問題は、本来大規模な混合整数計画問題であるが、ここでは、近似解を短時間で比較的簡単に求めることのできる実用的な近似解法を提案した。この手法は、まず第一ステップで線形計画法が適用できるところまで問題を単純化し、2段階シンプレックス法を用いて近似最適解を求め、第二ステップでその解を現実問題に適合するように補正して近似解を求めるものである。この近似最適運転制御法を実際の施設の空調用熱源プラントに適用し、運転シミュレーションを行った結果、現状よりも低コストでの運転が可能であることが示され本手法の有効性が確認された。

キーワード：最適制御手法・空調用熱源プラント・蓄熱槽・線形計画法・近似解法

はじめに

近年、地球温暖化対策、電力負荷平準化、省エネルギー、省コストなどを目的として蓄熱式空調用熱源プラントの導入が増加している。周知のごとく、このプラントの最大の長所は、夜間電力の利用や契約電力量の低減などによる省コストが期待できることである。しかし、蓄熱槽と複数の熱源機器を有する複雑化した熱源プラントを、一日の負荷変動に合わせて効率良く運転するためには、熟練したオペレータの経験に頼るだけでは不十分であり、合理的な運転支援システムの開発が重要となっている。例えば冷房期にあつては、空冷式冷凍機は外気温が低く冷凍機効率が高くなる時間帯にできるだけ運転し、外気温が上昇する昼間の時間帯には蓄熱槽からの放熱で対応して、一日全体でのプラントの運転費、消費エネルギーあるいは地球温暖化ガス排出量が最小となるような最適運転計画を立てねばならない。また、蓄熱槽に蓄えられた熱量を翌日に持ち越さないようにする配慮も必要である。

このような蓄熱式空調用熱源プラントに関し、筆者らは次の流れによる最適運転制御手法の開発を目指している。

- 1) 過去の外気温のデータより、運転対象日の最高気温と最低気温を予測し、これと過去の統計データより翌日一日の気温変化を予測する。
- 2) 運転対象日の最高気温と最低気温の予想値と過去の熱負荷や曜日情報などから、翌日一日分の熱負荷の予測を運転対象日の前夜に行う。
- 3) 予測された熱負荷に対して熱源プラントの運転経費が最小になるように、熱源機器および蓄熱槽の翌日一日分の運転計画を前夜に立案する。
- 4) 運転対象日になったら、30分程度先の熱負荷を精度良く予測し、3)で求めた運転計画を随時修正しながら熱需要を満たす最適運転を行う。このとき、蓄熱槽に蓄えられた熱量を翌日に持ち越さない工夫も施す。

上記1)、2)に関しては、筆者らは既にニューラルネットワークと統計データを用いて一日の外気温変化を予測する手法^{1, 2)}とカルマンフィルタ、時系列モデル、ニューラルネットワークなどによる熱負荷の予測手法^{1, 2, 3, 4)}を提案している。本報では3)に焦点を当て、運転対象日一日分の熱負荷の時間変化が与えられたときの蓄熱式空調用熱源プ

*¹ 山口大学工学部 正会員

*² 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程

*³ 関西電力(株)

ラントの実用的な最適運転制御法について述べる。

非蓄熱式空調用熱源システムの場合、各時刻ごとの熱需要を満たすような熱源機器の最適運転制御問題として扱うことができるため、各時刻での運転費が最小となるように時刻ごとに独立した小規模な混合整数線形計画問題を解けばよい。この問題は例えば分枝限定法あるいは総組み合わせ法によって解を求めることが可能である。この種の解法については既に幾つか報告が成されている^{5, 6, 7)}。

一方、運転効率が外気温に依存する熱源機器を有する蓄熱式空調用熱源プラントの場合には、夜間の最適蓄熱運転計画問題と昼間の最適放熱運転計画問題が、各時刻ごとに独立した混合整数計画問題ではなく、一日を通しての大規模な混合整数計画問題となるため、解を求めるのに膨大な時間を要するという困難性が生じる。この困難性を回避するための研究としては、例えば動的計画法と混合整数計画法を結合して多段決定過程問題に変換して解く方法⁸⁾、蓄熱槽のエネルギー・バランス式のように異なる時刻の物理量を関係づける制約条件式と時刻ごとに独立した制約条件式を時刻ごとの部分問題の制約条件式として元の問題を分解して解くいわゆる分解法に基づく手法⁹⁾が提案されている。しかし、いずれも蓄熱槽が複数存在するようなシステムでは、計算時間の面で十分実用的であるとは言い難い。このほか、ニューラルネットワークと混合整数計画法を結合させた方法¹⁰⁾や蓄熱槽の蓄熱または放熱の意志決定の判断基準を、単位蓄熱量あたりのコスト増分として感度解析に基づき行う手法¹¹⁾が提案されている。前者は代表的な蓄熱槽の最適運用方策をニューラルネットワークに学習させておき、システム運転支援時にはまずニューラルネットワークにより蓄熱槽運用方策を決定し、各時間ごとのシステム構成機器の運用方策のみを小規模な混合整数線形計画法に基づき決定するものであるが、精度の高い代表的な蓄熱槽の最適運用方策の用意が課題であり、後者では、感度解析に用いる判断基準の合理的決定法が課題といえる。また、大規模な原問題を多数の小規模な最適化問題に分解し、それらの結果を統合化することにより準最適解を求める階層的な最適化法¹²⁾では、計算時間の短縮に成功しているが、計算過程のステップ I で最適解の存在を形式的に保証するための仮想入力や廃棄エネルギーベクトルを想定するなど、やや難解で複雑な手法となっている。本論文では、大規模な混合整数計画問題を、市販のパソコンを用いて短時間で簡単に求めることのできる実用的な近似解法を提案し、その有効性を実プラントで検証する。

記号

- a : 冷凍機の性能特性式を線形近似した時の傾き [-]
- b : a と外気温の関係を線形近似した時の傾き [-]
- c : a と外気温の関係を線形近似した時の定数項 [-]

| | |
|---|------------|
| C_D : 電気の従量料金単価(昼間) | [円/(kW・h)] |
| C_N : 電気の従量料金単価(夜間) | [円/(kW・h)] |
| $E_R(j, i)$: 時刻 i における冷凍機 j の消費電力量 | [kW・h] |
| $E_{PR}(j, i)$: 時刻 i における冷凍機 j のポンプ動力 | [kW・h] |
| $E_{PS}(k, i)$: 時刻 i における蓄熱槽 k のポンプ動力 | [kW・h] |
| $E_{CT}(i)$: 時刻 i における冷却塔の消費電力 | [kW・h] |
| HE_{kmax} : 熱交換器 k の最大熱交換速度 | [kJ] |
| i : 22:00~翌日 21:00 までを 10 分刻みに分けた時刻番号 (1~138) | |
| j : 冷凍機番号(1~6) | [-] |
| J : 空調用熱源プラントの運転費用 | [円] |
| k : 蓄熱槽番号(1~5) | [-] |
| P_i : 時刻 i における熱負荷 | [kJ] |
| $Q_s(k, i)$: 時刻 i での蓄熱槽 k への蓄熱量 | [kJ] |
| $Q_{s,max}$: 蓄熱槽 k の最大蓄熱速度 | [kJ] |
| $Q_{s,total}$: 蓄熱槽 k の最大蓄熱容量 | [kJ] |
| $Q_r(k, i)$: 時刻 i における蓄熱槽 k からの放熱量 | [kJ] |
| $Q_{r,max}$: 蓄熱槽 k の最大放熱速度 | [kJ] |
| $R(j, i)$: 時刻 i における冷凍機 j の冷房負荷処理熱量 | [kJ] |
| $R_{j,max}$: 冷凍機 j の最大出力 | [kJ] |
| t_i : 時刻 i の外気温 | [°C] |
| α : 放熱モード時に蓄熱槽からの放熱のみで熱負荷に対応できるようにするための安全率 | [-] |

1. 最適制御の対象施設

1.1 熱源システムと運転モード

本研究では、複数の蓄熱槽と複数台の熱源機器が設置されている実在する施設の空調用熱源プラントを研究対象とした。本施設は地下 1 階・地上 3 階の RC 造で総延べ床面積が約 9000m² の研究所で、熱源プラントには、図-1 に示すように 6 台の電気駆動式冷凍機と 5 槽の蓄熱槽が設置されている。具体的には、アンモニア氷蓄熱ヒートポンプチラー 1 台、氷蓄熱空冷ヒートポンプブラインチラー 1 台、空冷ヒートポンプチラー 3 台、氷蓄熱水冷ブラインチラー 1 台が設置され、水蓄熱槽と潜熱蓄熱槽にはそれぞれ 1 台の空冷ヒートポンプチラーが設置されている。各冷凍機と各蓄熱槽の仕様を表-1 と表-2 に示す。研究用を兼ねて導入された熱源プラントであることから通常のものに比べ、小容量の数種類の蓄熱槽が導入されるなど装置構成が複雑で熱負荷に対する熱源機器容量も大きくなっているが、最適制御の対象施設としては興味深いものとなっている。

また、本研究では、研究対象とした熱源プラントの運転実態に合わせ、1 日を以下に示す 5 つの時間帯に分け (図-2 参照)、各時間帯の運転モードに従い蓄熱槽および冷凍機の運転計画を立てることにする。本施設では、24 時間空調はご

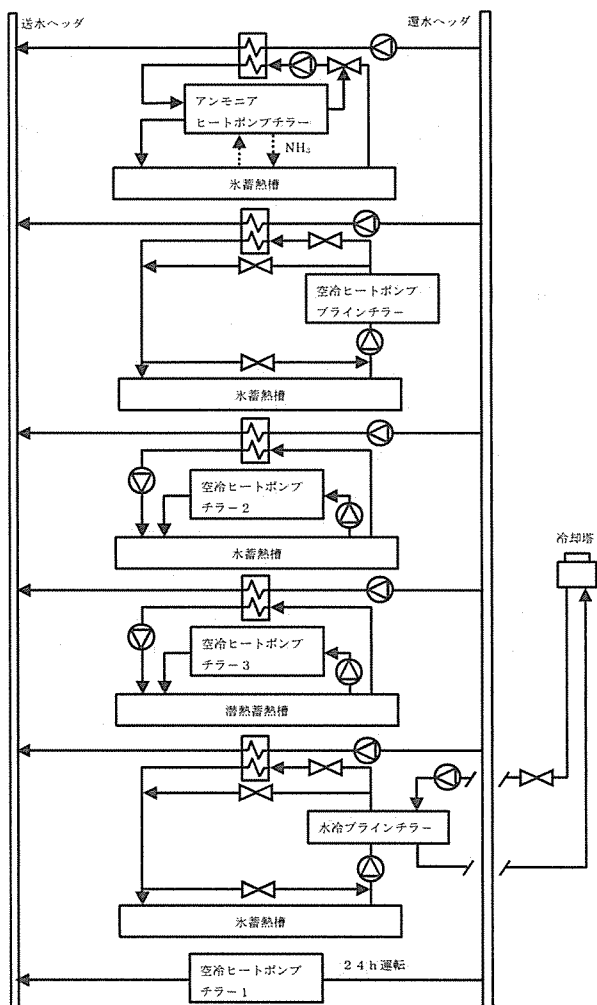


図-1 対象施設の空調用熱源システム

く一部の室に限定され大部分の室が昼間のみの冷暖房となっており、また、電力負荷平準化への寄与とピークカットを目的として午後の時間帯に熱源機器の運転を行わない放熱モードが設定されていることが特徴である。以下に示す各モード中の記号 i は24時間を10分刻みに分け、22:00を $i=1$ としたときの時刻番号である。

- 1) 22:00~翌朝 8:00 (蓄熱モード : $i=1 \sim 60$)
夜間電力を用いて蓄熱槽に蓄熱を行う時間帯である。ただし、空冷ヒートポンプチラー1は夜間空調用として運転される。
- 2) 8:00~13:00 (追従モード1 : $i=61 \sim 90$)
蓄熱槽からの放熱と熱源機器からの供給熱により熱負荷を賄う時間帯である。
- 3) 13:00~16:00 (放熱モード : $i=91 \sim 108$)
対象施設の熱負荷をすべて蓄熱槽からの放熱で賄う時間帯である。この時間帯には、電力負荷平準化のために熱源機器を運転してはならない。
- 4) 16:00~21:00 (追従モード2 : $i=109 \sim 138$)
蓄熱槽からの放熱と冷凍機からの供給熱により熱負

表-1 各冷凍機の仕様

| | 定格能力 (kW) | 冷却方式 | 段階運転数 |
|-----------------|-----------|------|-------|
| アンモニアヒートポンプチラー | 33.7 | 空冷式 | 2段階 |
| 空冷ヒートポンププラインチラー | 197.1 | 空冷式 | 4段階 |
| 空冷ヒートポンプチラー1 | 377.9 | 空冷式 | 4段階 |
| 空冷ヒートポンプチラー2 | 352.3 | 空冷式 | 4段階 |
| 空冷ヒートポンプチラー3 | 201.2 | 空冷式 | 4段階 |
| 水冷プラインチラー | 211.0 | 水冷式 | 無段階 |

表-2 各蓄熱槽の仕様

| | 最大蓄熱容量 (MJ) | 最大蓄熱速度 (kW) | 最大放熱速度 (kW) |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| アンモニア氷蓄熱 | 911.3 | 35.1 | 63.3 |
| 空冷ヒートポンププラインチラー氷蓄熱 | 3987.6 | 133.6 | 210.9 |
| 水蓄熱槽 (16槽) | 6683.8 | 358.6 | 492.3 |
| 潜熱蓄熱槽 (8槽) | 4506.2 | 189.9 | 105.5 |
| 水冷プラインチラー氷蓄熱 | 4329.2 | 144.1 | 214.5 |

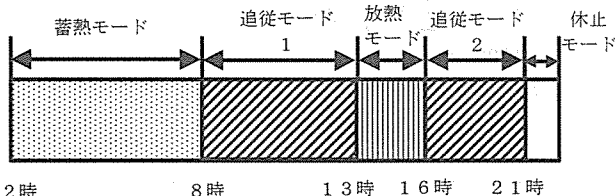


図-2 各運転モードと時間帯

荷を賄う時間帯である。

5) 21:00~22:00 (休止モード)

夜間空調用に空冷ヒートポンプチラー1のみを運転し、他の熱源機器の運転は停止する。この時間帯に翌日1日の最適運転計画を立案する。

1.2 対象施設の冷房負荷特性と熱源プラントの運転状況

図-3は、この対象施設の1999年8月1日の22:00から翌日8月2日の21:50までの冷房負荷の変化である。午前8時の冷房運転開始時の冷房負荷が最も大きく、その後は、17時頃までは変動しながらもほぼ一定値で推移し、17時以降は21時の冷房運転停止時刻まで減少の傾向にある。21時以降の夜間は小さな負荷で小刻みな変動はあるがほぼ一定で推移している。また、この日の総冷房負荷は38.5GJで、この施設に設置されている蓄熱槽の総蓄熱容量20.4GJを上回っている。他の週日も天候の違いによる多少の相違はあるもののほぼ同様な負荷パターンとなっている。このように、冷房負荷の大きい夏季には夜間電力を使って蓄熱槽に100%

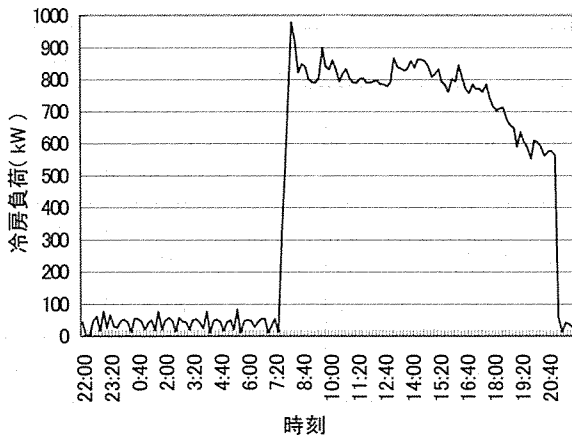


図-3 1999年8月2日の一日の冷房負荷パターン

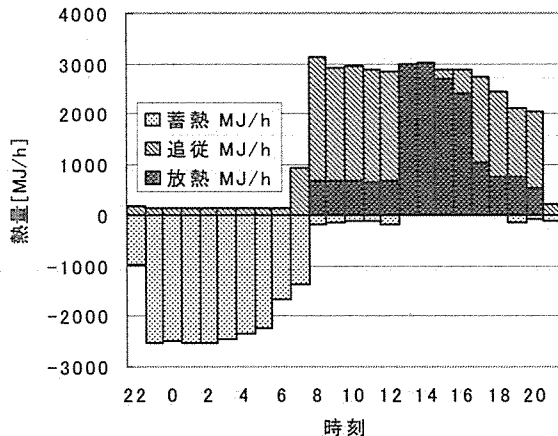


図-4 蓄熱・放熱・追従運転状況

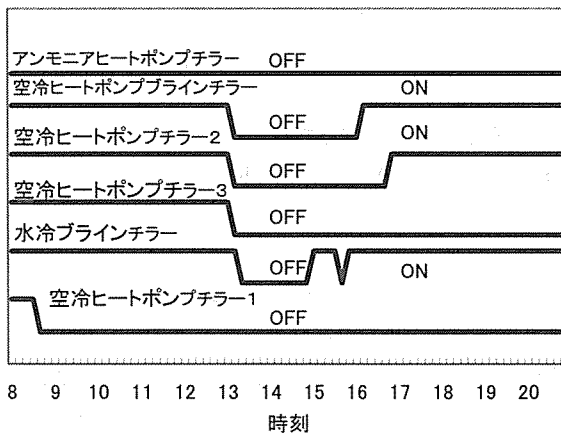


図-5 ヒートポンプの作動状況

蓄熱を行っても、追従運転モードの時間帯には冷凍機の運転が必要となる。最適制御の観点からはこのような時期が最も制御が複雑なることから、本報ではこの時期に焦点を当てた最適制御手法について議論する。

図-4、図-5は8月2日の負荷変動に対するこの施設の熱源プラントの運転状況を示したもので、図-4は時刻別の蓄熱量（負の値で表示）、放熱量、追従運転による冷熱供給量を、図-5は昼間の各冷凍機の稼働状況を示したものであ

る。これらの図から、省エネルギー、省コストを図る上での留意点として次のことが挙げられる。

(1) 夜間の蓄熱運転は、まだ外気温が十分下がっていない深夜ほど大きな出力で運転されているが、これを外気温が下がり空冷式ヒートポンプチャラーの COP が向上する明け方に集中する。

(2) 蓄熱槽からの放熱は放熱モード時間帯の 13:00~16:00 以外に、追従モードの時間帯すべてにわたり行われているが、蓄熱槽からの放熱は放熱モード時間帯付近に集中させ、空冷式ヒートポンプチャラーの追従運転は外気温が低い午前中あるいは夕方以降にできるだけ行う。

(3) この日の総蓄熱量 22,165 MJ に対し総放熱量は 17,592 MJ で、冷房運転が終了する 21:00 の残存蓄熱量は 4,573 MJ と約 21%の冷熱が未利用のまま残る運転となっていた。この残存蓄熱量が 0 となるような運転制御を行う。

(4) 図-5に示すように、8:00~13:00 と 16:00~21:00 の追従モード時間帯では、一般に複数台の冷凍機が同時に運転されるので、各冷凍機の COP を考慮した最適組み合わせ運転を行う。

(5) 放熱モード時間帯に運転されている熱源機器が存在するが、この時間帯の運転は行わないという制約条件を遵守する。

2. 最適制御アルゴリズム

2.1 2ステップによる最適運転制御

ここでは、図-3に示す熱負荷が与えられたものとして、この熱需要を満たすための冷凍機6台と蓄熱槽5槽の最適運転制御手法について述べる。この最適化問題は本来大規模な混合整数計画問題であるが、ここでは近似解を市販のパソコンを用いて短時間で簡単に求めることのできる実用的な近似解法を提案する。そのために、まず第一ステップで問題を線形計画法が適用できるところまで単純化し、線形計画法により求めた解を、第二ステップで現実問題に適合するように補正して近似解を求める手法をとることとする。

2.2 第一ステップ

(1) 冷凍機特性の線形化

熱源プラントに設置されている冷凍機の中で氷蓄熱水冷ラインチャラーは無段階制御方式であるが、アンモニアヒートポンプチャラーは2段階制御、他の4台は4段階制御となっている。段階制御方式の冷凍機は、投入電力も冷凍機出力も離散的な値を取るため、このままでは線形計画法を適用できない。そこで、すべての冷凍機が無段階制御であると仮定して、性能特性式に対して線形近似を行うことで線形計画法を適用する。

図-6は、定格能力が 377.9 kW の空冷ヒートポンプチ

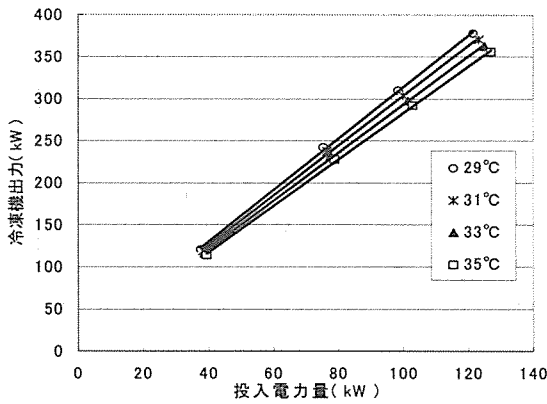


図-6 各外気温における投入電力量と出力量の関係

ラー1の出力特性を示したものである。この冷凍機は25%、50%、75%、100%の4段階制御であり、また空冷式であるため出力は外気温に依存している。第一ステップでは、このような離散的な運転状態点を持つ冷凍機に対して線形計画法を適用するために、以下の手順で冷凍機の性能特性式を連続的な線形式で近似する。

- 1) 実機の出力特性のデータより各外気温ごとの投入電力と冷凍機出力の関係を図-6のように最小二乗法を用いて線形式で近似する。
- 2) 投入電力が0の際には冷凍機出力が0でなければ物理的に矛盾が生じるので、求める線形式は原点を通る一次式で近似する。
- 3) 上記で得られた各外気温ごとの近似式の傾き a と外気温 t_i の関係式 $a = b \times t_i + c$ を最小二乗法により求める (図-7)。

この手順により、時刻 i の外気温 t_i における性能特性直線の傾き $a(t_i)$ は式 (1) から求まり、温度依存性を考慮した冷凍機の入出力特性は式 (2) のように線形近似できる。

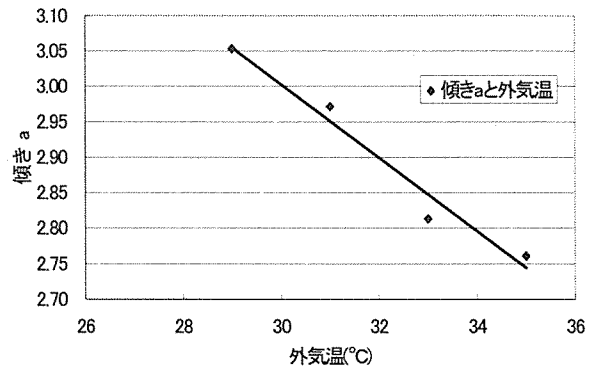
$$a(t_i) = b \times t_i + c \quad \dots\dots (1)$$

$$R(j, i) = a(t_i) \times ER(j, i) \quad \dots\dots (2)$$

(2) 線形計画法の目的関数

最適化の目的関数としては、「はじめに」で述べたように運転費、消費エネルギー、地球温暖化ガス排出量などが考えられるが、一般に民間では、運転コストが最重要関心事の一つであることから、ここでは、運転費を目的関数として取り上げた。本論文で対象としている熱源機器は、すべて電気駆動式であるため、運転コストを最小にする線形計画の目的関数は次式で表され、これを最小にするように運転計画を立案する。

$$J = \sum_{i=61}^{138} \left\{ \sum_{j=1}^6 ER(j, i) + \sum_{j=1}^6 EPR(j, i) + \sum_{k=1}^5 EPS(k, i) + ECT(i) \right\} \times CD + \sum_{i=1}^{60} \left\{ \sum_{j=1}^6 ER(j, i) + \sum_{j=1}^6 EPR(j, i) + \sum_{k=1}^5 EPS(k, i) + ECT(i) \right\} \times CN \quad \dots\dots (3)$$

図-7 傾き a と外気温の関係

しかし、オン・オフ制御のポンプは連続関数の線形計画法では扱えないことと、本報で制御対象としているポンプ動力は冷凍機動力のほぼ0.37~0.41程度であることから、第一ステップでは考慮せずに第二ステップで考慮することにする。また、冷却塔の消費電力も同様の理由で第一ステップでは考慮しない。すなわち、第一ステップの目的関数は式 (4) で表され、これを最小にするようにシンプレックス法を適用して解を求める。

$$J = \left(\sum_{i=61}^{138} \sum_{j=1}^6 ER(j, i) \right) \times CD + \left(\sum_{i=1}^{60} \sum_{j=1}^6 ER(j, i) \right) \times CN \quad \dots\dots (4)$$

このことから分かるように、第一ステップは最も消費電力の大きい冷凍機に着目し、冷凍機の最適運転計画を求める過程となっている。シンプレックス法としては可能基底解の初期値を求めることが容易な2段階シンプレックス法を採用した。

(3) 線形計画法の制約条件式

線形計画法を適用するにあたり、各運転モードに対応した制約条件式を設定し、その条件下で目的関数である式 (4) を最小にする解を求める。以下に各運転モードごとの制約条件式の設定方法について述べる。

1) 蓄熱モード (22:00~8:00 : $i=1 \sim 60$)

時刻 i の蓄熱槽 k への蓄熱量 Q_s は、蓄熱槽 k の最大蓄熱速度 Q_{skmax} を超えられないため、式 (5) の制約条件式を設定する。

$$0 \leq Q_s(k, i) \leq Q_{skmax} \quad (k=1 \sim 5) \quad \dots\dots (5)$$

また、蓄熱モードにおける蓄熱槽 k に蓄熱される熱量の総和は、その蓄熱槽の最大蓄熱容量 $Q_{sktotal}$ まで蓄熱されるため式 (6) を設定する。

$$\sum_{i=1}^{60} Q_s(k, i) = Q_{sktotal} \quad (k=1 \sim 5) \quad \dots\dots (6)$$

さらに、蓄熱モード時の夜間空調用には1台の冷凍機のみで対応し、残りの5台は蓄熱槽への蓄熱運転に使用され

ている。従って、蓄熱用の冷凍機番号を $j=1\sim 5$ とし、夜間空調用の冷凍機番号を $j=6$ とすると、

$$R(j, i) = 0 \quad (j=1\sim 5) \quad \dots\dots (7)$$

$$R(6, i) = P_i \quad \dots\dots (8)$$

と表される。また、蓄熱モードでは、各蓄熱槽からの放熱量は 0 であるから、

$$Q_r(k, i) = 0 \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (9)$$

と設定する。

この運転モードでは、冷凍機 $j=1\sim 5$ の生成熱量はすべて蓄熱槽への蓄熱に用いられるので蓄熱槽 k への蓄熱量は外気温を考慮した線形近似式を用いて以下のように表される。

$$Q_s(k, i) = a(t_i) \times E_R(k, i) \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (10)$$

2) 追従モード (8:00~13:00 および 16:00~21:00 : $i=61\sim 90, 109\sim 138$)

放熱モードの前後の時間帯に設定されている追従モードでは、冷凍機からの供給熱量 R と蓄熱槽からの放熱量 Q_r によって時刻 i の冷房負荷 P_i を賄う。従って、

$$\sum_{j=1}^6 R(j, i) + \sum_{k=1}^5 Q_r(k, i) = P_i \quad \dots\dots (11)$$

そして、冷凍機 j の出力は定格能力 R_{jmax} を超えられないので、すべての j に対して以下の式が成立する。

$$0 \leq R(j, i) \leq R_{jmax} \quad (j=1\sim 6) \quad \dots\dots (12)$$

同様に、蓄熱槽 k からの放熱量 Q_r も最大放熱速度 Q_{rkmax} を超えられないので式 (13) が成立する。

$$0 \leq Q_r(k, i) \leq Q_{rkmax} \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (13)$$

また、この熱源プラントにおいては冷凍機と蓄熱槽は同じ熱交換器によって対象施設に熱量を供給しているので、熱交換器の最大熱交換速度 HE_{kmax} に対し、以下の制約条件式が必要である。

$$R(k, i) + Q_r(k, i) \leq HE_{kmax} \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (14)$$

そして追従モードでは蓄熱を行わないため、全時点の蓄熱槽への蓄熱量 Q_s は 0 に設定する。

$$Q_s(k, i) = 0 \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (15)$$

さらに、冷凍機性能特性の線形近似式を用いて冷凍機の冷房負荷処理熱量 R を式 (16) で表す。

$$R(j, i) = a(t_i) \times E_R(j, i) \quad (j=1\sim 6) \quad \dots\dots (16)$$

3) 放熱モード (13:00~16:00 : $i=91\sim 108$)

放熱モードでは、電力のピークカットと電力負荷平準化のために全冷凍機を停止し、蓄熱槽からの放熱のみによって熱負荷を賄う。従って、式 (17) が成り立つ。

$$\sum_{k=1}^5 Q_r(k, i) = P_i \quad \dots\dots (17)$$

また、追従モードと同様に蓄熱槽からの放熱量 Q_r は最大

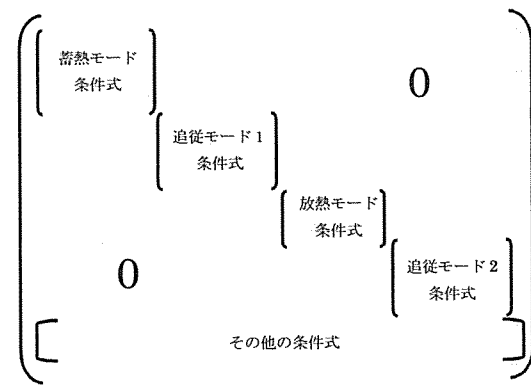


図-8 制約条件式の係数行列 A の構造

放熱速度を超えられないので、

$$0 \leq Q_r(k, i) \leq Q_{rkmax} \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (18)$$

と設定する。

また、蓄熱量 Q_s および冷凍機からの供給熱量は 0 であるから、式 (19) と式 (20) を設定する。

$$Q_s(k, i) = 0 \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (19)$$

$$R(j, i) = 0 \quad (j=1\sim 6) \quad \dots\dots (20)$$

4) その他

ここでは、各モードごとの運転制約ではなく、全体を通して設定しなければならない制約条件式について述べる。

まず、蓄熱槽へ蓄熱した熱量は一日のうちにすべて使い切るという条件を設定する。つまり、以下のように蓄熱モード時に各蓄熱槽へ蓄熱した総蓄熱量と一日を通して各蓄熱槽から放熱した総放熱量は等しいという制約条件式を立てる。

$$\sum_{i=1}^{60} Q_s(k, i) = \sum_{i=91}^{138} Q_r(k, i) \quad (k=1\sim 5) \quad \dots\dots (21)$$

また、負荷予測に基づく最適制御手法の開発に備えて安全率の概念を導入しておく。すなわち、前日に予測された熱負荷よりも当日の熱負荷が大きすぎた場合、前半の追従モード 1 で放熱量を使いすぎると放熱モード時に必要な放熱量を確保できない可能性がある。そこで、安全率 α を導入し、放熱モード時に予定されている総放熱量の α 倍の蓄熱量を後半の追従モード 2 に必ず残すように式 (22) の制約条件式を設定する。ここでは、 $\alpha=0.2$ と設定した。

$$\alpha \sum_{i=91}^{108} Q_r(k, i) \leq \sum_{i=109}^{138} Q_r(k, i) \quad \dots\dots (22)$$

以上の制約条件式をまとめると式 (23) のように表すことができる。

$$Ax = d \quad \dots\dots (23)$$

A は図-8 に示されるような構造を有する 3321 行 4283 列の制約条件式の係数行列、 x は $R(j, i)$, $Q_s(k, i)$, $Q_r(k, i)$

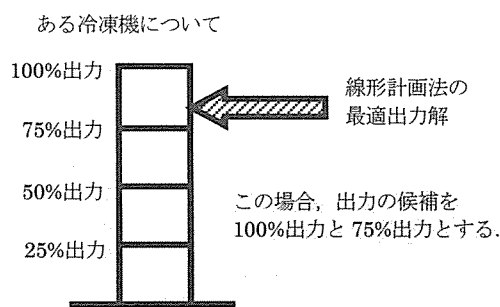
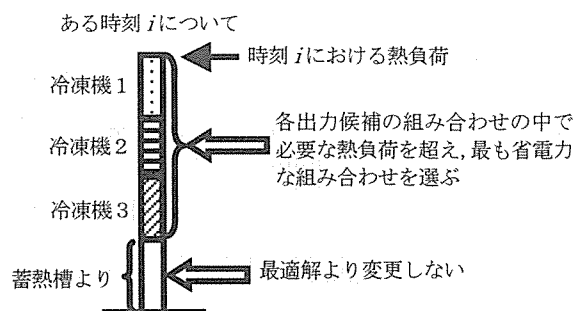


図-9 冷凍機出力候補の選定

図-10 時刻*i*における冷凍機出力の決定

など2928の実変数と1355のスラック変数からなる4283次元の変数ベクトル、 d は3321次元の定数ベクトルである。これらの行列に対し、2段階シプレックス法を用いて最適化問題の解をパソコンによって求める。

2.3 第二ステップ

第一ステップで得られた運転条件は線形近似した無段階出力特性式でモデル化された冷凍機に対してであり、一般には段階制御方式の冷凍機では運転できない条件となる。そこで、仮想的に無段階制御として扱った冷凍機に対して、第一ステップで求めた解を基に、以下の要領で実際の段階制御運転点を求める。また、各冷凍機、各蓄熱槽の運転と連動して運転されるポンプ動力や冷却塔動力もこの段階で考慮し、冷熱を得るために必要な総電力量を算出する。また、各冷凍機、各蓄熱槽を運転する時に必要なポンプ動力もこの段階で考慮し、冷熱を得るために必要な総電力量を算出する。

1) 蓄熱モード時の冷凍機の運転

できるだけ線形計画法で得られた解に近づけるように実際の運転状態を決定する。すなわち、線形計画法で得られた冷凍機の運転条件と一番近い実際の運転出力を選択する。このとき、単位時間あたりの蓄熱槽の最大蓄熱容量 Q_{skmax} を超えないように注意し、また、最終的に蓄熱槽が100%蓄熱になるように調整を行う。

2) 追従モード時の冷凍機の運転

蓄熱槽からの放熱量は、第一ステップで求めた放熱量のままとし変更しない。冷凍機に関しては、図-9に示すように第一ステップで求めた最適解を挟む段階制御の2つの運転状態点を、運転予定の各冷凍機ごとに選び、運転予定の全冷凍機の総出力が熱負荷を上回る組み合わせのうち最も省電力となる組み合わせを総当りで検索する(図-10)。ただし、所要電力量の計算には、冷凍機と連動して動くポンプや冷却塔の動力も考慮する。

3) 放熱モード時の蓄熱槽の運転

放熱モードでは、冷凍機の運転を一切行わず、すべて蓄熱槽からの放熱によって熱負荷を賄う。蓄熱槽からの放熱量は、本報では第一ステップで求めた値のままとし変更しない。

3. 最適制御結果

これまで述べてきた最適運転制御法を用い、1999年8月2日(実際には8月1日22時~8月2日21時)の実際の冷房負荷に対してシミュレーションを行った。また、このシミュレーションでは前述した式(22)の安全率 α を0.2とした。

3.1 蓄熱空調システムの運転状況

図-11に1999年8月1日の22時から翌8月2日21時までの第一ステップ時の最適運転制御結果を示し、図-12に実際には段階制御の冷凍機が存在やポンプ動力などを考慮した第二ステップの最適運転制御結果を示す。凡例中の Q_s は蓄熱槽への蓄熱量、 Q_r は蓄熱槽からの放熱量、 R は冷凍機単体からの供給冷熱量、 R_6 は24時間空調用冷凍機からの供給冷熱量を示す。蓄熱槽からの放熱量 Q_r は、第一ステップから第二ステップにかけて変更しないとしているため図-11と図-12間で変化はない。

放熱モードの時間帯には蓄熱槽からの放熱量 Q_r のみで熱負荷に対応するという制約条件式が守られており、図-5の15時台に見られた混乱は解消されている。また、潜熱蓄熱槽では8:30頃から20:00頃にかけて常に63.3MJ程度の放熱を行っているが、これはその最大放熱量が105.5kWであるため式(13)の制約条件式によって放熱速度が制限されているためである。しかし、蓄熱量は必ず一日で使い切るという式(21)の制約条件式はすべての蓄熱槽について成立していることを確認している。

また、最適運転制御の結果である図-12と実運転状況を示した図-4を比較して分かるように、最適運転制御では、追従モードの時間帯においては外気温が低く空冷式ヒートポンプチャラーの運転効率が高くなる8:00~10:30頃と17:30頃以降において冷凍機の追従運転による熱供給の割合が高く、逆に外気温が上昇し冷凍機効率が悪くなる10:30~13:00、16:00~17:30では蓄熱槽からの放熱の寄与率が高くなっており、最適運転制御の効果が現れている。しかし、各冷凍機の運転状態を示した図-13から分かるように十分な間を置かず冷凍機の起動・停止が頻繁に生じるところが見られる。この問題の解決法については次報で報告したい。

夜間の蓄熱モードにおける単位時間あたりの蓄熱量 Q_s は、

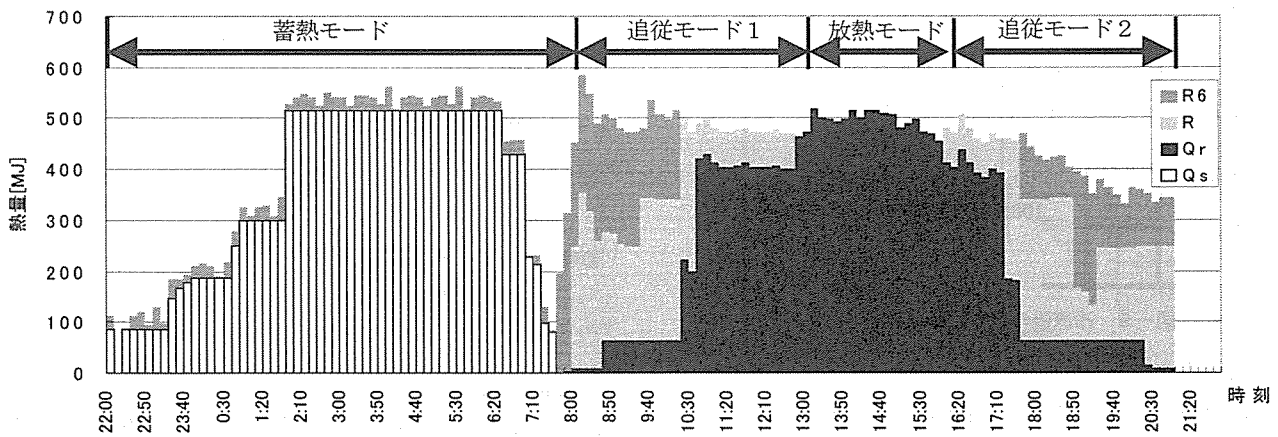


図-1 1 第一ステップにおける線形計画法に基づく運転状況(1999年8月2日)

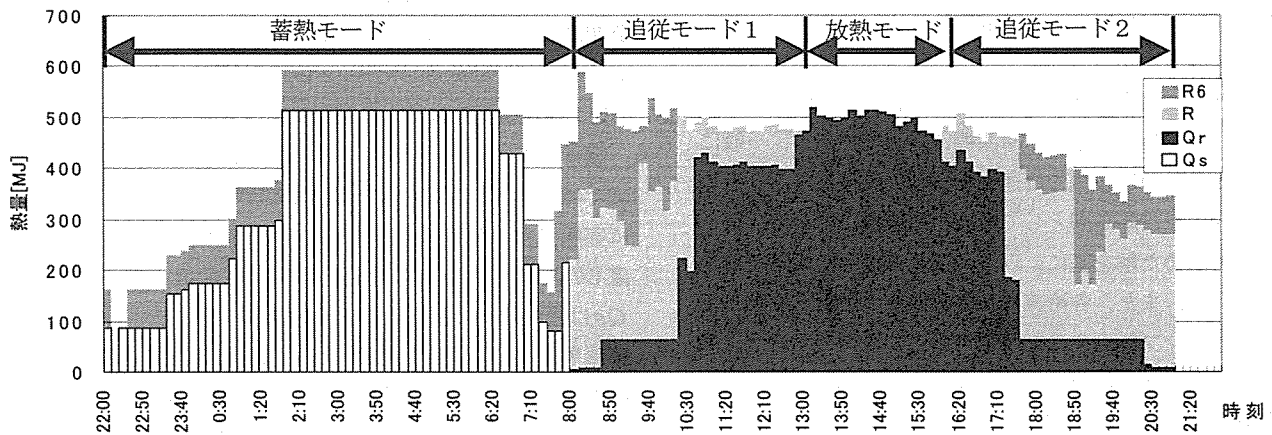


図-1 2 第二ステップにおける実際の運転に基づく各運転状況(1999年8月2日)

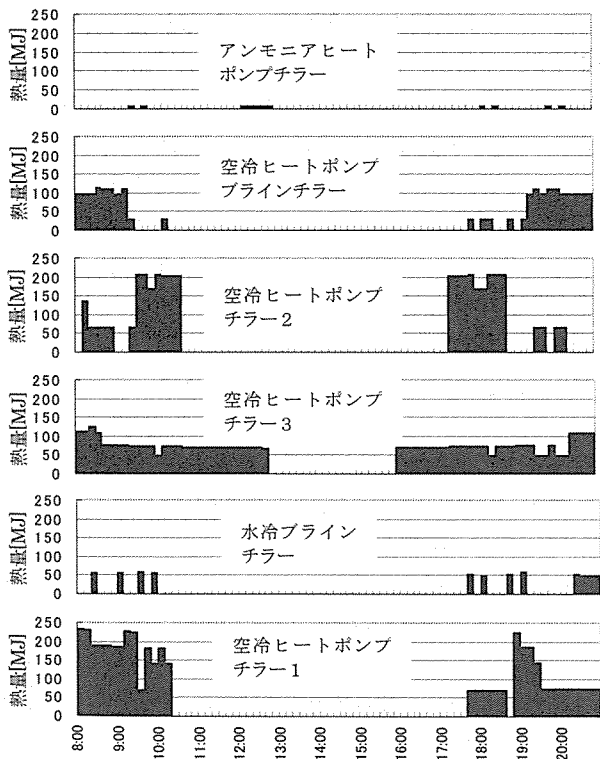


図-1 3 第二ステップにおける各冷凍機の運転状態 (1999年8月2日)

22:00~1:00頃にかけて徐々に増加し2:00~7:00頃にかけては冷凍機の最大出力による定格運転で行われている。これも、外気温が低いほど空冷式冷凍機の効率が向上するという条件を反映したもので、図-4の実運転に比較して改善が見られる。

蓄熱モードにおける24時間空調用冷凍機R6の第二ステップでの出力は第一ステップでの出力より大きくなっている。これは、第一ステップでは、仮想的に無段階制御の冷凍機として扱っているため、冷房負荷に合わせた冷凍機出力が可能であったのに対し、第二ステップでは、現実にはこの冷凍機が段階制御方式であることを考慮し、負荷を満たす最低の段階制御点での運転となるためである。

3.2 消費電力に対する最適制御の効果

図-1 4, 図-1 5は対象施設の蓄熱空調プラントに、本研究で開発した2ステップによる最適制御を行った場合と実運転でのプラントの10分ごとの時刻別消費電力量を示したもので、表-3は最適制御時と実運転時の積算消費電力の比較を行ったものである。実運転における一日の熱源機器の総消費電力量5,085 kW・hに対し、最適制御時の消費電力は1,657 kW・h 少なくなっており、最適制御の導入効果が現れている。夜間の消費電力が少なくなる理由は、図-4と図-

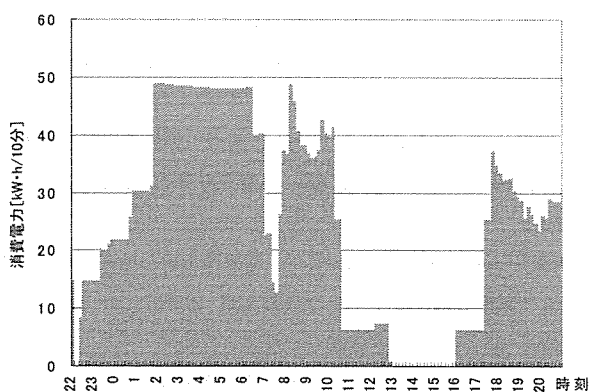


図-14 2ステップの最適制御による時刻別消費電力

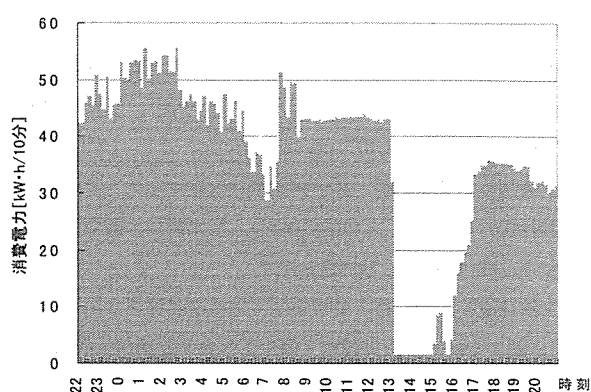


図-15 実運転による時刻別消費電力

1 2の比較から分かるように、最適制御により蓄熱運転が空冷式ヒートポンプチラーの性能が向上する明け方に集中的に行われることによる。昼間消費電力が少なくなる理由については主に三つの理由が挙げられる。一つは 図-4と 図-1 2の比較から分かるように、最大放熱速度の制約を受ける潜熱蓄熱槽を除くと、蓄熱槽からの放熱は気温の高い放熱モード時間帯の前後に集中し、熱源機器の追従運転は主に外気温の低い午前中と夕方以降に行われることによる。二つ目は、図-5と図-1 3の比較から分かるように、追従モード時に、水冷ブラインチラーなどの COP の低い機器に代わり COP の高い空冷ヒートポンプチラー1, 3などが優先的に運転される効果である。第三は、この日の実運転では総蓄熱量の約 21%が未利用のまま残り、これに相当する熱量が昼間の追従運転で補われている。これに対し、最適運転制御結果では夜間蓄熱はすべて使い切るため、余分な追従運転がないことである。この第三の残蓄熱量は翌日に持ち越されるため、すべて損失になるわけではないが、蓄熱槽からの無用な熱損失を防止する上でも残蓄熱量は 0 にすることが望ましい。

なお、ここでは蓄熱槽からの熱損失、配管系統からの熱損失などを考慮していないことと、特殊用途のダイナミック型氷蓄熱（電動機定格出力 8.95kW）関係の所要動力を考慮していないため、実際には差はもう少し少なくなると予想される。

まとめ

蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転制御問題は本来大規模な混合整数計画問題であるが、ここでは、問題を単純化し線形計画法を適用して近似最適解を求める第一ステップと、第一ステップで求めた解を現実と合致するように修正する第二ステップから構成される実用的な近似解法を提案した。その特徴は、以下のとおりである。

- 1) 第一ステップでは、蓄熱槽の存在により、本来大規模な混合整数計画問題となる最適化問題を線形計画法で適

表-3 消費電力量の比較 (単位: kW・h)

| | 実績値 | 最適制御時 | 差 |
|----|-------|-------|--------|
| 夜間 | 2,739 | 1,971 | -768 |
| 昼間 | 2,346 | 1,457 | -889 |
| 合計 | 5,085 | 3,428 | -1,657 |

用できるように問題を単純化する。すなわち、段階制御の冷凍機の性能特性を連続関数として線形近似し、ポンプ動力、冷却塔動力などの非線形要素は考慮せずに近似解を求める。この際に空冷式の冷凍機性能への外気温の影響も考慮する。

- 2) 第二ステップにおいて、冷凍機が実際には段階制御であることやポンプなどの補機動力を考慮して第一ステップで得られた解を現実問題に適合するように補正して近似解を求める。

この近似最適運転制御法を実際の施設の空調用熱源プラントに適用してシミュレーションを行った結果、実際の運転費よりも低コストでの運転となり本手法が有効であることを確認した。今後の課題としては、冷凍機の起動・停止が頻繁に生じることにに対する対策の導入、予測負荷と実負荷が異なる場合の処置等があり、引き続き研究に取り組みたい。

尚、本論文は 2001 年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集で発表したものに加筆し詳細に論じたものである¹³⁾。

参考文献

- 1) 中村安弘・朝野佳伸：複数熱源を有する蓄熱空調システムの最適制御に関する研究（第2報）冬季の冷暖房負荷予測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，III（2000-9），pp.1361~1368
- 2) S.Takeuchi, M.Mizuno and Y.Nakamura: Load Forecasting for District Cooling with Kalman Filter, Proceedings of the International District Heating and Cooling Association, Vol.82(1991-6), pp.441~455
- 3) 中村安弘・水野 稔・三島憲明：複数熱源を有する蓄熱空調システムの最適制御に関する研究（その1：ニューラルネットワーク

- クによる負荷予測, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, II (1999-9), pp. 873~876
- 4) 水野 稔・中村安弘・塚原 研：各熱負荷予測システムの詳細と予測結果 (時系列モデルによる熱負荷予測), 空気調和・衛生工学誌, 67-8 (1993-8), pp. 43~47
- 5) 伊藤弘一・横山良平：コージェネレーションシステムの最適運用計画法 (第1法 方法論の検討), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 42 (1990-2), pp. 59~67,)
- 6) 大佛達哉・水野 稔・中村安弘：地域冷暖房プラントの最適運用に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (1997-8), pp. 1229~1232
- 7) 横山良平・伊藤弘一・神村一幸・宮坂房千加：機器の起動・停止費用を考慮したエネルギー供給システムの最適運用計画法, 日本機化学会論文集 (C編), 63 巻 609 号 (1997-5), pp. 1595~1602
- 8) 伊藤弘一・横山良平・斯波 敬：コージェネレーションシステムにおける蓄熱層の経済性評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 42 (1990-2,), pp. 69~78
- 9) 横山良平・伊藤弘一：蓄熱層を有するコージェネレーション・システムの最適運用計画法 (分解法に基づくアプローチ) 日本機化学会論文集 (C編), 59 巻 562 号 (1993-6), pp. 1817~1823
- 10) 伊藤弘一・斯波敬・横山良平：ヒートポンプ蓄熱システムの運転支援 (ニューラルネットワークに基づく手法の構築とその検証), 日本機化学会論文集 (C編), 61 巻 590 号 (1995-10), pp. 3909~3915
- 11) 伊藤弘一・下田 誠・横山良平：蓄熱槽を含む地域冷暖房システムの運用計画, 日本機化学会論文集 (C編), 61 巻 592 号 (1995-12), pp. 4614~4620
- 12) 伊藤弘一・斯波 敬・横山良平：蓄熱槽を含むエネルギー供給システムの最適運用計画問題に対する近似解法, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 63 (1996-10), pp. 29~37
- 13) 吉本康申・中村安弘・栗山 憲・山本正幸・朝野佳伸：複数熱源を用いた蓄熱空調システムの最適制御に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (2001-9), pp. 277~280
(2003年3月18日 原稿受付)

Optimum Control of Heating and Cooling Plant with Thermal Storage Tanks

by Yasuhiro NAKAMURA*¹, Ken KURIYAMA*¹, Masayuki YAMAMOTO*¹,
Koshin YOSHIMOTO*² and Yoshinobu ASANO*³

Key Words: optimum control, heating and cooling plant, thermal storage tank, linear programming, approximate solution

Synopsis: An optimum control of heating and cooling plant with thermal storage tanks comes to essentially large-scale mixed integer programming problem. It is very difficult to obtain the optimum solution of such problem in a short time enough to control the plant on real time. Here, we proposed a practical method to get approximate solution of the large-scale mixed integer programming problem in a short time. The method

consists of two steps; that is, at the first step, the mixed integer programming problem is simplified to a linear programming problem excluding some nonlinear factors and the simplified linear programming problem is solved using two phase simplex method. At the second step, the optimum solution obtained at the first step is modified to satisfy the real condition by taking the factors excluded at the first step into consideration. Simulation of operation of a real plant showed that our practical method was effective to reduce the running cost of heating and cooling plant.

(Received March 18, 2003)

*¹ Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Member

*² Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

*³ THE KANSAI ELECTRIC POWER Co., INC.