

非線形性を有する空調用熱源プラントの 最適運転制御に関する研究

第1報——冷凍機とポンプ動力の非線形性を線形計画法で扱うための 手法とその効果

山本正幸*¹ 中村安弘*¹
栗山憲*¹ 松山健*²

段階制御の熱源機器を有する蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転制御問題は、通常、大規模な混合整数計画問題である。著者らは既報¹⁾において、実用的な近似解法による最適運転制御法を提案した。しかし、この近似解法は、非線形性を有する段階制御の冷凍機を厳密に扱えておらず、また、強度な非線形性を有するオン・オフ制御のポンプ動力を最適運転計画問題の中に全く取り込めていなかった。本研究ではこれらの問題について検討し、現在のコンピュータの性能面からみて実現可能な改良を既報¹⁾の手法に加え、既報¹⁾よりもさらに省エネルギーを達成できる最適運転制御法を提案した。

キーワード：混合整数計画法・最適制御・空調用熱源プラント・蓄熱槽

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、省コストなどの面から蓄熱式空調用熱源プラントの導入が進められている。しかし熱源プラントが複雑化するにつれて、省エネルギーや省コストの効果を上げるためには、熱源プラントの最適運転が重要となっている。複数の熱源機器を有する蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転を行うためには、翌日の熱負荷を精度よく予測し、それに基づいた夜間の最適蓄熱運転と翌日になっての蓄熱槽からの最適放熱計画およびヒートポンプや冷凍機の最適追従運転計画を立てる必要がある。

これまで筆者らは、翌日一日の外気温と地域冷暖房や対象施設の冷暖房負荷を精度よく予測する手法として、ニューラルネットワークやカルマンフィルターなどを用いた手法を提案し^{2~5)}、また複数の熱源機器を有する蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転問題に対する実用的な

近似解法の提案を行ってきた¹⁾。この近似解法の主たる特徴は、段階制御の冷凍機を連続制御の冷凍機と仮定し、オン・オフ制御など非線形性の強いポンプ動力は最適計画問題から除外することにより、線形計画法の適用を可能にして解を求め、この解をもとに段階制御の冷凍機の特性を線形計画法とは無関係に近似的に考慮した点である。この手法により翌日一日分の最適運転計画の近似解を簡単に求めることができ、夏季の代表的な1日に対してこの手法を適用したところ、実運転と比較して電力を約20%以上節減できることが示された。

しかし、この近似解法では、非線形性を有する段階制御の冷凍機を厳密な線形計画問題として扱えていないことと、強度な非線形性を有するオン・オフ制御のポンプ動力を熱源プラントの最適運転計画問題の中に全く取り込めていないという問題があった。本研究の目的はこれらの問題について検討し、現在のデスクトップタイプコンピュータの性能面からみて実現可能な改良を既報¹⁾の手法に加え、既報¹⁾よりもさらに省エネルギーを達成できる最適運転手法を提案することである。

本研究は第1報と第2報からなっている。第1報では、

*¹ 山口大学工学部 正会員

*² 山口大学工学部 学生会員

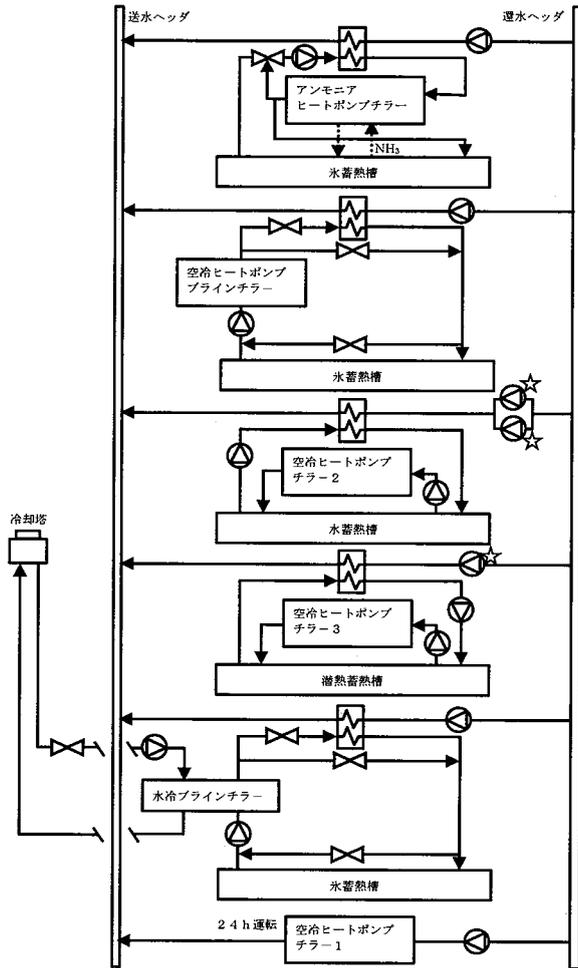


図-1 対象施設の空調用熱源システム

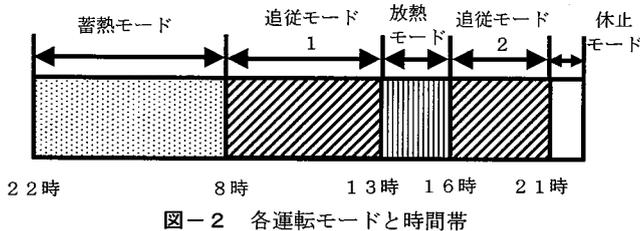


図-2 各運転モードと時間帯

非線形性を有する冷凍機を混合整数計画法で取り扱う手法について述べる。また、既報¹⁾においては、ポンプ動力の最適制御に関しては取り扱うことができなかったが、第1報では、冷凍機に付随するポンプ動力も含めた最適制御についても述べる。

第2報では、蓄熱槽の放熱運転におけるオン・オフ制御のポンプ動力に対する最適性について考え、既報¹⁾で求めた蓄熱槽の放熱運転計画はオン・オフ制御のポンプ動力に対して最適化が達成されていることを証明する。

このような蓄熱式空調用熱源プラントに対する最適運転計画を求める手法としては、伊東らが報告している階層的な最適化法⁶⁾があるが、この手法も準最適解を求める

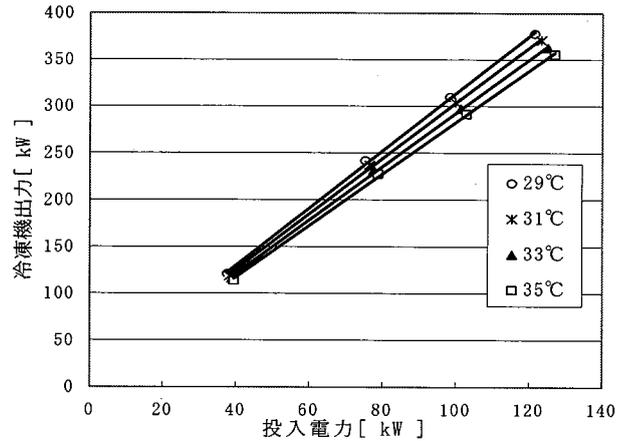


図-3 各外気温における投入電力と出力量の関係

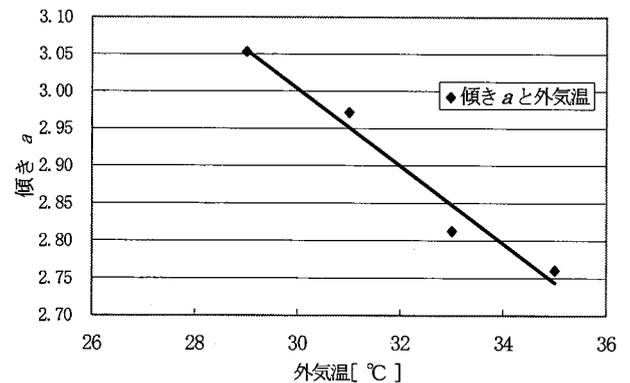


図-4 傾き a と外気温の関係

手法であり、また、初期計算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。

また、熱源プラントに対して混合整数計画法による定式化を行っている研究は、赤木らの最適設計計画法⁷⁾など幾つかあるが、いずれも起動・停止や温水・冷水切り替えに混合整数計画法を用いており、段階的な出力特性を持つ冷凍機に対しては適用されていない。

冷凍機に付随するポンプ動力も含めた最適化手法は、伊東らも提案している⁸⁾が、基本的には連続制御の冷凍機に対する定式化手法であり、離散点でしか運転できない段階制御の冷凍機特性を考慮した定式化手法ではない。また、冷凍機に付随するポンプの投入電力は、冷凍機の投入電力に比例する形で定式化されているため、2乗項や3乗項のような非線形の特性をもちポンプは扱えない。

本報で述べる最適運転制御法は、離散点でのみ運転を行う段階制御の冷凍機を対象とし、ポンプ動力の線形性・非線形性に拠らず、いかなる種類のポンプ動力も含めて省エネルギーとなる運転計画を求める手法である。さらに、本手法を実在する施設に適用した場合の運転シミュレーションを行い、本手法の有効性を確かめた。

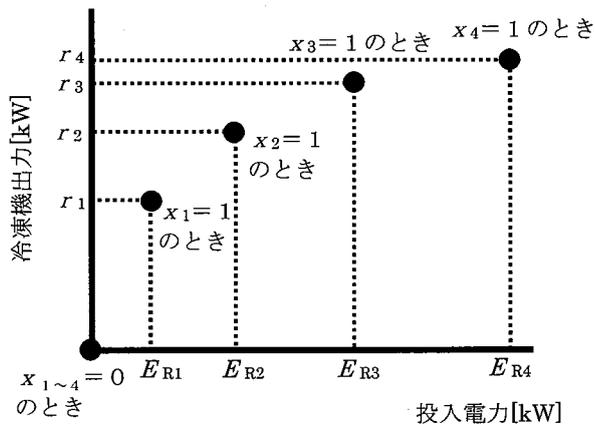


図-5 4段階の離散的出力をもつ冷凍機の出力特性

1. 最適制御の対象とする熱源システム

1.1 熱源システムと運転モード

本研究では、図-1のように6台のヒートポンプチラーと5槽の蓄熱槽が設置された実在する施設の空調用熱源プラントを研究対象としている。また、本プラントの主要なポンプは15台設置されており、そのうち3台がインバータ制御のポンプ(図-1中で☆印がついたポンプ)で、残り12台がオン-オフ制御のポンプである。本施設の熱源プラントは図-2に示す5つのモードで運転されている。ここで、放熱モードは熱負荷を蓄熱槽からの放熱のみでまかない、追従モードでは熱源機器と蓄熱槽の両方から熱量の供給を行う時間帯である。

既報¹⁾の手法はシンプレックス法を用いた複数の熱源機器に対する最適運転制御法であり、この4モード毎に適切な制約条件式を設定し、1日を通して運転コストが最小になるように10分毎の運転計画を計算した。

1.2 既報¹⁾で行った冷凍機出力に対する線形近似

段階的で離散的な出力を行う冷凍機の出力は、線形計画法では扱えない。したがって、既報¹⁾では、すべての冷凍機を連続制御の冷凍機と仮定して線形近似を行い、線形計画法を適用した。

図-3は、定格能力が370.6kWの空冷ヒートポンプチラー1の出力特性を示したものである。この冷凍機の出力は25%、50%、75%、100%の4段階制御であり、空冷式であるために出力は外気温に依存している。このような離散的な運転を行う冷凍機に対して、既報¹⁾では、以下の手順で冷凍機の性能特性を連続的な線形式で近似した。

- 1) 実機の出力特性のデータより各外気温の投入電力と冷凍機出力の関係を図-3のように最小二乗法を用いて直線で近似する。
- 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直

線で近似する。

3) 上記の手順で求められた近似式の傾きを a とし、外気温 t_i との関係式 $a(t_i) = b \times t_i + c$ を最小二乗法で求める(図-4)。

上記の手順で各冷凍機 j に対して $a(j, t_i)$ を求め、冷凍機 j の出力 $R(j, i)$ と冷凍機 j の消費電力 $E_R(j, i)$ の関係を次式で示す。

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

ここで、 i は 22:00 ~ 翌日 21:00 までを10分刻みに分けた時刻番号($i=1 \sim 138$)とする。

この手順により、既報¹⁾では、空冷式冷凍機性能の外気温依存性を考慮して蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転計画を求め、得られた解より段階制御を行う冷凍機の運転点の推測を行った。しかし、この手法は段階制御の冷凍機に対して厳密な最適制御とはなっていない。そこで、次章より混合整数計画法を用いて段階制御の冷凍機に対して厳密に定式化を行う手法について述べる。

2. 段階制御の冷凍機に対する混合整数計画法

2.1 混合整数計画法による段階制御の冷凍機の定式化

図-5のように、段階制御を行う冷凍機の投入電力と冷凍機の出力の関係は離散値であり、本来、線形式で表すことはできない。また、離散的な制御点における投入電力の間隔や冷凍機出力の間隔も等間隔ではない場合が多い。本章では、このような段階制御の冷凍機特性を混合整数計画法で取り扱うための定式化手法について述べる。

図-5に示すような4段階制御の冷凍機を考えると、冷凍機の出力 R は、運転時であれば定格能力まで4つの離散値をとる。このような4段階制御の冷凍機の運転状態を表現するために、それぞれの段階の出力を定格能力とする4台のオン-オフ制御の冷凍機を仮定する。この4台の仮想的な冷凍機群に対して、この中の1台が運転状態になったときに、他の冷凍機群を稼働させないように制約を行うと、仮想的な冷凍機群のオン-オフの状態が、そのまま本来の冷凍機の段階運転の状態に対応する。

仮想的な冷凍機の運転状態を $0-1$ で表す整数変数 $x_1 \sim x_4$ を導入し、仮想的な冷凍機のオンの状態を1、オフの状態を0とすると、これらの冷凍機群の中で同時に2台以上を稼働させない制約条件式は次式で表される。

$$0 \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 1 \quad \dots (2)$$

ここで、一段階めの出力から各段階の冷凍機の出力を $r_1 \sim r_4$ とすると、本来の冷凍機の出力 R は、

$$r_1 x_1 + r_2 x_2 + r_3 x_3 + r_4 x_4 = R \quad \dots (3)$$

と表す事ができる。この $x_1 \sim x_4$ は、 $0-1$ 変数であり、式(2)より、全て0か、少なくとも1つの変数しか1の

表-1 各冷凍機の仕様 (外気温 31℃の場合)

	図-6,7で 表現された 記号	投入 電力 [kW]	定格 能力 [kW]	成績 係数 [-]	冷却 方式	制御 方法	オン-オフ制御の ポンプ群の総定格動力 [kW]	インバータ制御の ポンプ群の総定格動力 [kW]
アンモニア ヒートポンプチラー	R 1	10.7	29.3	2.74	空冷	2段階	0.74	
空冷ヒートポンプ ブラインチラー	R 2	64.4	182.7	2.84	空冷	4段階	2.75	
空冷ヒートポンプ チラー2	R 3	114.9	346.6	3.02	空冷	4段階	4.33	3.67
空冷ヒートポンプ チラー3	R 4	62.5	195.4	3.13	空冷	4段階	2.75	1.83
水冷ブライン チラー	R 5	72.0	211.0	2.93	水冷	連続	2.17	
空冷ヒートポンプ チラー1	R 6	123.3	370.6	3.01	空冷	4段階	2.50	

値をとれないために R の値は, $0, r_1, r_2, r_3, r_4$ の離散値しか可能解になりえない. したがって, 既報¹⁾ のように 1.2 節で述べた線形近似を行うことなく, 段階制御の冷凍機に混合整数計画法を適用できる.

また, 一般的に段階制御を行う冷凍機の各段階の効率 (= 冷凍機出力 / 投入電力) は一定ではなく, 既報¹⁾ のように線形近似することは厳密性を損なうものであった. しかし, 上記の手法を用いれば, 仮想的な冷凍機の定格能力 $r_1 \sim r_4$ と, それに対応する投入電力 $E_{R1} \sim E_{R4}$ の組み合わせは自由に決められるため, どのような段階制御の冷凍機の特長も厳密に表現することが可能である.

このようにして設定した制約式や目的関数を分枝限定法⁹⁾ による混合整数計画法によって段階制御を行う冷凍機の最適運転計画を求める.

2.2 段階制御の冷凍機に付随するポンプ動力の最適化

冷凍機に付随しているオン-オフ制御のポンプの投入電力は, 冷凍機の運転状態に依存する. 本報では, 冷凍機の運転段階によらず稼動状態であれば, 定格の投入電力を消費するとして取り扱う. しかし, この関係は線形ではないので, 既報¹⁾ のような線形計画法では扱うことができなかった. そのため, 既報¹⁾ ではポンプ動力を考えず, 冷凍機の投入電力のみに着目して最適化を行い, 得られた運転計画に対して稼動すべきポンプ動力をコストに加算した.

しかし, 前節の整数変数 $x_1 \sim x_4$ を用いれば, 段階制御の冷凍機に付随するオン-オフ制御のポンプ動力も含めて最適化を行えることを示す.

この整数変数 $x_1 \sim x_4$ は, 仮想的な冷凍機のオン-オフを表す 0-1 変数であり, 式 (2) のように一箇所しか 1 の値をとることができない. つまり, 本来の冷凍機が稼動状態であれば, $x_1 \sim x_4$ のうち, どれかひとつが 1 の値をとる. したがって, 段階制御の冷凍機の各段階にお

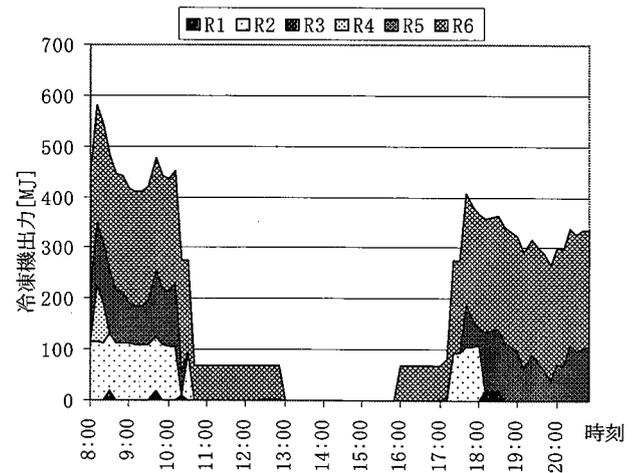


図-6 混合整数計画法で計算した各冷凍機の運転状況

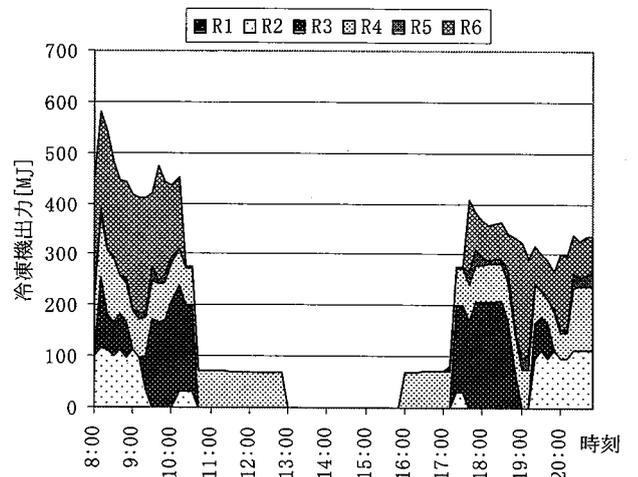


図-7 既報¹⁾ による各冷凍機の運転状況

る投入電力 $E_{R1} \sim E_{R4}$ と, それに付随するオン-オフ制御ポンプの投入動力 P_R を合わせた総投入電力 J_R は,

$$J_R = E_{R1} \cdot x_1 + E_{R2} \cdot x_2 + E_{R3} \cdot x_3 + E_{R4} \cdot x_4 + P_R (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \quad \dots (4)$$

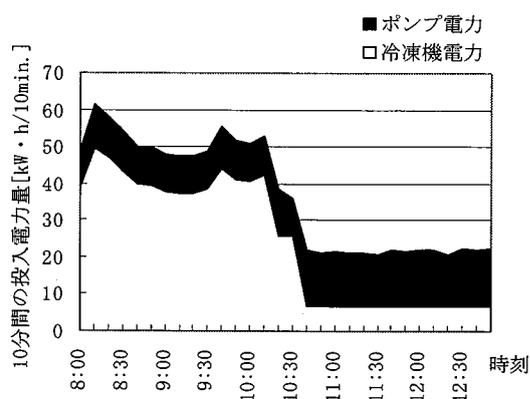


図-8(a) 追従モード1における各時刻の総投入電力量

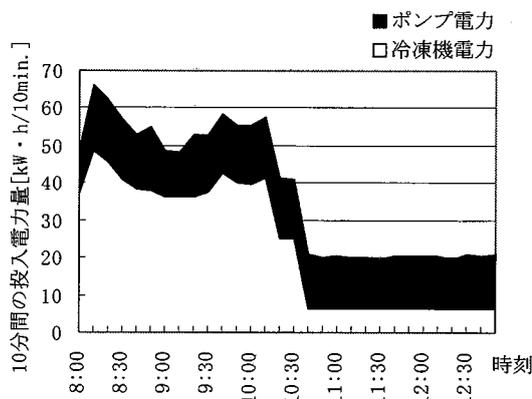


図-9(a) 追従モード1における各時刻の総投入電力量

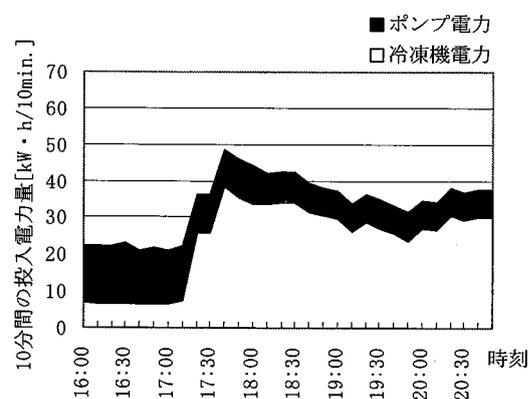


図-8(b) 追従モード2における各時刻の総投入電力量

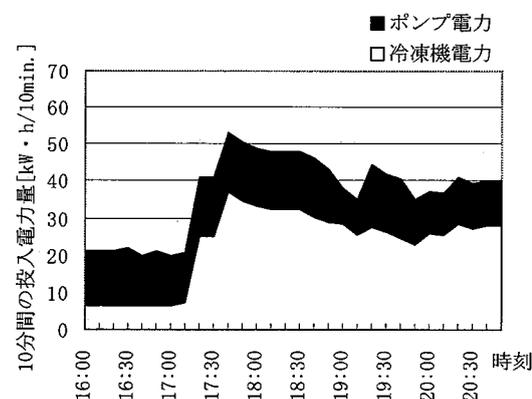


図-9(b) 追従モード2における各時刻の総投入電力量

図-8 本手法による冷凍機電力とポンプ電力の推移

図-9 既報¹⁾による冷凍機電力とポンプ電力の推移

となる。これを冷凍機の台数分だけ合計して最終的な目的関数とし、冷房負荷をまかなう制約条件式の下で混合整数計画法を適用することで、オン-オフ制御のポンプまで考慮した最適運転計画が得られる。

また、式(4)は段階制御の冷凍機に非線形性を有するインバータ制御のポンプを設置した場合にも応用できる。

段階制御の冷凍機にインバータ制御のポンプを付随させた場合、あらかじめ冷凍機の各段階運転時におけるポンプの投入電力を求めておき、式(4)を式(5)のように書き直せば良い。

$$J_R = (E_{R1} + P_{R1})x_1 + (E_{R2} + P_{R2})x_2 + (E_{R3} + P_{R3})x_3 + (E_{R4} + P_{R4})x_4 \dots (5)$$

ここで、 $P_{R1} \sim P_{R4}$ は冷凍機の各段階におけるインバータ制御のポンプの投入電力を表す。 $P_{R1} \sim P_{R4}$ は自由な値が取れるため、非線形であるインバータ制御のポンプも表現できる。

2.3 既報¹⁾と本手法による冷凍機の稼動状態の比較

前節の手法を既報¹⁾のように一日を通して計画を立てれば、冷凍機とポンプ動力の非線形性を厳密に扱った最適な運転計画が求められる。しかし、大規模な混合整数計画問題となるため、現在のデスクトップPCの能力では実用

的な計算時間内に解を求めることができない。そこで、本手法と既報¹⁾の運転計画を比較するにあたり、蓄熱槽の運転計画は、どちらも既報¹⁾の運転計画を採用して運転することとし、冷凍機の運転状態と投入電力に対して本手法の結果と既報¹⁾の結果を比較する。このように蓄熱槽の運転計画を既知とすることで、蓄熱槽に対する一日を通じた制約条件式が省けるので、本手法は冷凍機に対する各時刻あたりの小規模な混合整数計画問題に帰着でき、大幅な計算時間の短縮が可能となる。

対象とした熱源プラントでは、表-1にあるように6台の冷凍機が設置されており、段階制御の冷凍機5台に連続制御の冷凍機が1台で構成されている。図-6に本報で提唱した混合整数計画法によって得られた運転計画を示し、図-7に既報¹⁾で求めた運転計画を示す。ここで、R1がアンモニアヒートポンプチャラー、R2が空冷ヒートポンプチャラー、R3が空冷ヒートポンプチャラー2、R4が空冷ヒートポンプチャラー3、R5が水冷チャラー、R6が空冷ヒートポンプチャラー1を表している。

R5は連続制御の冷凍機であるため、前節までに述べた定式化手法は使えない。そのため、R5が稼動している場合と稼動していない場合の2通りについて解を求め、総投

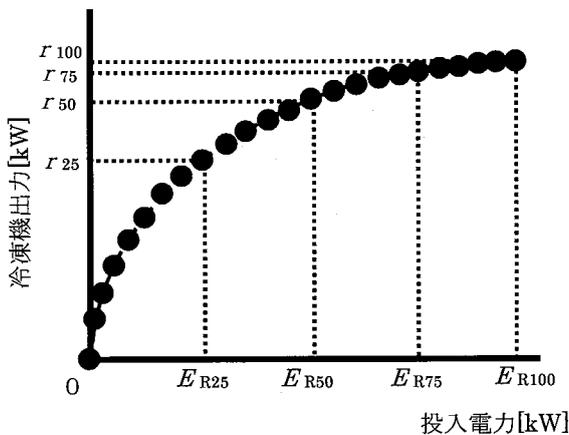


図-10 連続制御の冷凍機を投入電力に対して100段階制御の冷凍機と仮定した場合

入電力が少ない方を最適解とした。

既報¹⁾の結果を示した図-7では、表-1にあるように冷凍機の成績係数の良いR3, R4, R6が優先的に稼働する計画となっている。それに対し、本手法は冷凍機に付随するポンプ動力も含めた最適化を行っているため、図-6では、付随するポンプの総動力が大きいR3, R4の冷凍機が停止し、代わりにR2, R5が稼働されやすいように計画されている。

次に、時刻毎に冷凍機への投入電力とポンプに対する投入電力を既報¹⁾と比較する。図-8は、本報の手法による時刻毎の投入電力、図-9は既報¹⁾による時刻毎の投入電力を時刻毎に示した図である。

追従モード1の図-8(a)と図-9(a)の8:00~10:50までを比較すると、図-8(a)で示されたポンプの投入電力が図-9(a)のポンプの投入電力よりも少なくなっていることがわかる。追従モード1において本手法と既報¹⁾の手法の総投入電力を比較してみると、冷凍機群に対する投入電力は本手法の方が既報¹⁾の結果に比べて27[kW・h]増加したが、冷凍機に付随するポンプ群に対する投入電力は63[kW・h]削減され、全体として36[kW・h]の削減効果があった。

一方、追従モード2の図-8(b)と図-9(b)の17:20~20:50までを比べると、図-8(b)で示されたポンプの投入電力が図-9(b)のポンプの投入電力よりも少なくなっている。追従モード2における総投入電力を比較してみると、本手法を適用した場合は、冷凍機群に対する投入電力は30[kW・h]増加したが、ポンプ群に対する投入電力は117[kW・h]削減されて、全体として87[kW・h]が削減されている。

追従モード1, 2における冷凍機とポンプに対する総投入電力を比較すると既報¹⁾による計算では2244[kW・h]、混合整数計画法による計算では2121[kW・h]となり、約

5.5%の削減効果があった。

3. 非線形性の強い連続制御の冷凍機に対する混合整数計画法

3.1 連続運転の冷凍機を多段階制御の冷凍機と仮定する定式化法

連続的な出力特性をもつ冷凍機でも、投入電力と出力の関係が強い非線形性を示す場合は、線形計画法では扱えない。その場合、既報¹⁾のように全出力範囲に対して線形近似を行うと近似誤差が大きくなってしまふ。そこで、非線形性の強い連続制御の冷凍機を多段階制御の冷凍機と仮定して2.1節の手法を適用する(図-10)。この場合、各段階における出力値は自由に設定できるため、どのような出力特性をもつ冷凍機であろうと表現が可能であり、また、段階数を細かくすることにより近似誤差を抑えることができる。また、この冷凍機に付随するポンプ動力も2.2節と同様に扱うことができる。

しかし、この手法は簡単に非線形な連続制御の冷凍機を扱うことができるが、仮定の段階数を増やすほど制約条件式や整数変数の数が大きくなり、連続制御の冷凍機が複数台になると、多大な計算時間と十分なPCの演算処理能力が必要となる。そこで、次節では既報¹⁾の熱源プラントに非線形性の強い連続制御の冷凍機を仮想的に複数台設置したときの計算時間の検討を行った。

3.2 連続制御の冷凍機を多段階制御の冷凍機と仮定した場合の計算時間の検討

連続制御の冷凍機を定格能力までの投入電力に対して100等分し、100段階制御の冷凍機と仮定する。既報¹⁾の熱源プラントでは水冷ブラインチラーが連続制御の冷凍機であるため、投入電力0.72[kW]ごとに制御を行うことになる。この冷凍機と、他の5台の段階制御を行う冷凍機と組み合わせて各時刻の運転計画を混合整数計画法で求めた。計測時間は、Pentium4, 1.8GHz, メモリ512MBのデスクトップPCで単位時刻あたり最大2分、最小2秒、平均44秒であった。

また、6台の冷凍機のうち、空冷ヒートポンプチラー1を仮想的に連続制御の冷凍機として、100段階制御の冷凍機を2台としたときの計算時間も調べた。この場合、各時刻あたりの計算時間は最大3分30秒、最小10秒、平均1分42秒であった。

さらに、アンモニアヒートポンプチラーも連続制御の冷凍機と仮定して、6台中の3台を100段階制御の冷凍機とした場合の計算時間は、最大20分30秒、最小30秒、平均5分34秒であった。

このことにより、空調用熱源プラントの構成要素として連続制御の冷凍機が3台程度であるならば、十分に本手法

を用いてポンプ動力も含めた最適運転制御計画を求めることを示せた。

まとめ

本報では、段階制御の冷凍機を厳密に定式化し、それに付随するオン・オフ制御のポンプやインバータ制御のポンプの動力まで含めた混合整数計画法による単時刻毎の最適化手法を提案した。そして、既報¹⁾で求めた運転計画の総投入電力と比較し、約5.5%の削減効果を実現して本手法が有効であることが確認できた。

また、段階制御の冷凍機に対する定式化を連続制御の冷凍機まで拡張することで、非線形性をもつ連続制御の冷凍機に対する定式化も行え、それに付随するポンプ動力も含めた定式化が可能となった。このシミュレーションでは、非線形性をもつ連続制御の冷凍機が3台までなら現行のPC能力で十分に計算可能であることを示した。

参考文献

- 1) 中村安弘・栗山憲・山本正幸・吉本康申・朝野佳伸：蓄熱槽を有する空調用熱源プラントの最適運転制御，空気調和・衛生工学会論文集，No.90(2003-7),pp.121～130
- 2) 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

- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 伊東弘一・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
- 7) 赤木新介・横山良平・伊東弘一：混合離散変数線形計画法に基づくプラントの最適設計計画，日本機化学会論文集(C編)，53巻487号（1987-3），pp.792～799
- 8) 伊東弘一・横山良平：コージェネレーションの最適計画—インテリジェント・フレキシブル・コージェネレーションを目指して—，1990，pp.111～132，産業図書
- 9) 坂和正敏：数理計画法の基礎，1999，pp.111～132，森北出版株式会社

（2006年9月15日原稿受付）

**Optimum Control of Heating and Cooling Plant
with Nonlinear Operation Characteristics
(Part 1) Optimum Control of Refrigerators Operated at Discrete Points
Calculated by Linear Programming**

By Masayuki YAMAMOTO*¹, Yasuhiro NAKAMURA *¹,
Ken KURIYAMA *¹, and Takeshi MATSUYAMA *²

Key Words: mixed integer programming, optimum control, heating and cooling plant, thermal storage tank

Synopsis: An optimum control of heating and cooling plant with thermal storage tanks and refrigerators operated at discrete points is a large-scale mixed integer plan problem. In the previous paper, we proposed a practical approximation method using the linear programming. However, in the previous method, we could not deal with nonlinear operation characteristics about refrigerators operated at discrete points and ON/OFF control pump.

In this paper, we propose a method to get a strict optimal solution using the mixed integer programming by replacing refrigerator operated at discrete points with two or more virtual refrigerators. And we describe the optimum control of heating and cooling plant including pump power.

We compared the simulation results of this method and those of the previous method and showed the advantages of the new method presented in this paper.

(Received September 15, 2006)

*¹ Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Member

*² Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Student Member