

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2報——蓄熱槽の放熱運転におけるオン-オフ制御の ポンプ動力の最適性に関する考察

山本正幸*¹ 栗山 憲*²
中村安弘*¹ 松山 健*²

著者らは既報¹⁾において蓄熱式空調用熱源プラントの最適運転制御に関して線形計画法を用いた実用的な近似解法を提案した。しかし、線形計画法では段階制御の冷凍機特性やオン-オフ制御のポンプ動力などの非線形な特性を扱えなかった。そこで、本研究の第1報²⁾では、混合整数計画法を用いて冷凍機に関する非線形性を考慮した最適運転制御法について述べた。第2報である本報では、蓄熱槽の運転に関する非線形性として蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプ動力を考え、既報¹⁾で求めた放熱運転計画が蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプ動力に対して最適化が成されていることを証明する。

キーワード：最適制御・蓄熱式空調用熱源プラント・線形計画法・非線形性・ポンプ動力

はじめに

夜間電力を用いた蓄熱式空調用熱源システムは、省エネルギー、省コスト、省CO₂を実現する目的で導入が進められている。しかし、蓄熱槽を有効に活用するためには、冷凍機の能力と翌日一日の予測負荷に応じて、一日を通じた最適運転計画を求める必要がある。これは、大規模な組み合わせ問題であるが、蓄熱式空調用熱源プラントが複数の冷凍機や蓄熱槽から構成されている場合は、膨大な組み合わせ問題となり、現在のコンピュータでは厳密な最適解を求めることは不可能である。

そこで我々は、既報¹⁾で、複数熱源機器を有する実在の蓄熱式空調用熱源プラントに対して準最適運転計画を求める手法を提案した。この手法は、

- 1) 冷凍機の性能特性を全て線形近似し、また、段階制御の冷凍機は連続制御の冷凍機として扱うことにより、線形計画法を用いて一日を通じた運転計画を求める。
- 2) 段階制御の冷凍機の運転点は、1)で求めた解を挟む

2つの段階制御点の組み合わせの中で、単位時刻ごとの運転コストが冷凍機のポンプ動力も含めて最小となるように定める。

- 3) 2)で求めた冷凍機と冷凍機に付随するポンプ動力の総コストに蓄熱槽を運転するために必要なポンプ動力を加えて一日の総コストとする。
- ものであった。

この手法を用いた結果、実運転と比較して、計算上、20%以上の投入電力を削減できると予測される運転計画を求めることができた。しかし、既報の手法では、段階制御の冷凍機の特長やオン-オフ制御のポンプ動力などの非線形性を示す特性については厳密に扱えなかった。

本論文の目的は、このような既報で扱えなかった蓄熱式空調用熱源プラントの非線形な特性を考慮し、より省コストを実現する運転計画を求めることである。

本論文の第1報²⁾では、冷凍機に関する非線形性について考え、各時刻ごとに混合整数計画法³⁾を用いて段階制御の冷凍機の特長を厳密に扱う手法と、冷凍機に付随するポンプ動力も考慮して省コストである運転計画を求める手法を提案した。この手法により、既報の結果と比べて

*¹ 山口大学工学部 正会員

*² 山口大学工学部 学生会員

表-1 各蓄熱槽の仕様

	最大蓄熱容量[MJ]	最大蓄熱能力[kW]	最大放熱能力[kW]
アンモニア氷蓄熱	911.3	35.1	63.3
空冷ヒートポンプ ブラインチラー氷蓄熱	3987.6	133.6	210.9
水蓄熱槽	6683.8	358.6	492.3
潜熱蓄熱槽	4506.2	189.9	105.5
水冷ブラインチラー 氷蓄熱	4329.2	144.1	214.5

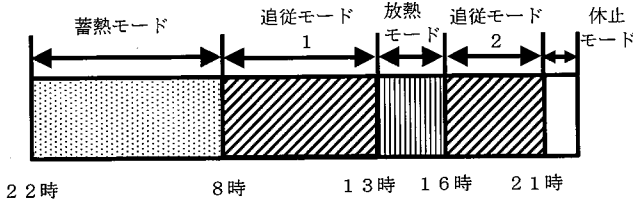


図-1 各運転モードと時間帯

コストが約5.5%削減されると推定できる運転計画が得られた。また、冷凍機の性能特性が強い非線形である連続制御の冷凍機の特性を近似的に混合整数計画法で扱う手法も述べた。しかし、第1報においても、蓄熱槽からの放熱運転計画については、計算時間上の制約から、既報の解をそのまま適用しているため、蓄熱槽からの放熱運転に要するポンプ動力の最適化が実現されているか否かについては未検討のままであった。

この第2報では、蓄熱槽の放熱運転に関する非線形性として蓄熱槽にオン・オフ制御のポンプが設置されている場合を考え、蓄熱槽からの放熱運転に要するポンプ動力の最適化について考察を行う。その結果、既報の解すなわち第1報の放熱運転計画が、蓄熱槽に設置されているオン・オフ制御のポンプ動力に対して効率の良い運転計画となっていることが証明され、第1報において既報の放熱運転計画を利用したことの妥当性を示すことができた。

本報に関連した蓄熱式空調用熱源プラントの最適制御に関する研究はいくつかあるが⁴⁾⁵⁾、複数の蓄熱槽をもつ熱源プラントを対象とし、ポンプ動力まで考慮した蓄熱槽の最適運転制御に関する研究はほとんど見られない。

また、小林らの研究⁶⁾では、熱源プラントに対して分枝限定法による解法と遺伝的アルゴリズムによる解法を比較し、遺伝的アルゴリズムの有用性が示されているが、遺伝的アルゴリズムの各種パラメータを適切に調整する必要があり、実用的な手法ではあるが最適解から大きく外れる可能性もありうるということが述べられている。本研究は、そのような心配がない方法として、熱源プラントの非線形な特性を混合整数計画問題として定式化し、分枝限定法を

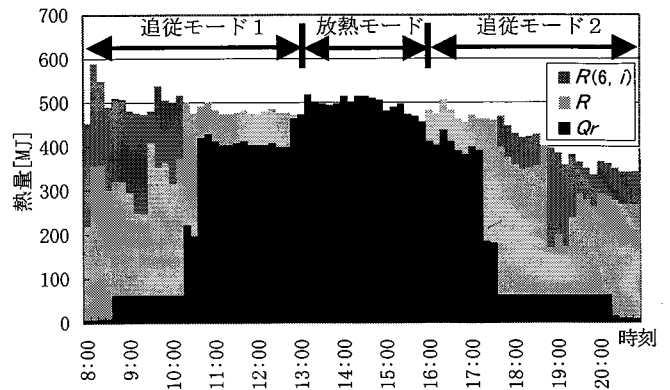


図-2 既報¹⁾で求めた最適運転計画

用いて解を求める手法を提案したものである。

1. 既報¹⁾の線形計画法で用いた蓄熱槽に対する制約条件式と目的関数

1.1 既報で用いた蓄熱槽に対する制約条件式

本報で対象とした蓄熱式空調用熱源プラントは、6台の冷凍機と表-1に示す5槽の蓄熱槽を備えている。本報では、このように通常の空調用熱源プラントと比べて複雑な機器構成の熱源プラントを対象としたが、本手法はより簡易な機器構成の熱源プラントにも適用が可能である。また、対象プラントのような複数の熱源機器を有した空調用熱源プラントの例としては広域の地域冷暖房プラント等が挙げられる。

既報では、対象プラントの熱源機器に対して実際のプラントで設定されている図-1に示す5つの運転モードのうち、休止モードを除く4つの運転モードを設定しており、モード毎の適切な制約条件式を10分刻みで作成して一日の最適運転計画を求めた。

本節では、既報で用いた蓄熱槽の放熱運転に関する制約条件式を説明する。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。

まず、蓄熱槽 k からの i 時刻における放熱量 $Qr(k, i)$ は10分間の最大放熱量 $QrkMAX$ を超えられない条件を次式で与える。

$$0 \leq Qr(k, i) \leq QrkMAX \quad (k=1\sim 5) \dots\dots (1)$$

時刻 i における冷房負荷 Pi を冷凍機 j からの供給熱量 $R(j, i)$ と蓄熱槽 k からの放熱量 $Qr(k, i)$ でまかなうための制約条件式は式(2)で与えられる。ただし、放熱モードの時間帯においては $R(j, i)=0$ とし、蓄熱モードでは $Qr(k, i)=0$ とする。

$$\sum_{j=1}^6 R(j, i) + \sum_{k=1}^5 Qr(k, i) = Pi \quad (i=1\sim 138) \dots\dots (2)$$

また、蓄熱モードにおいて蓄熱された熱量 $Qs(k, i)$

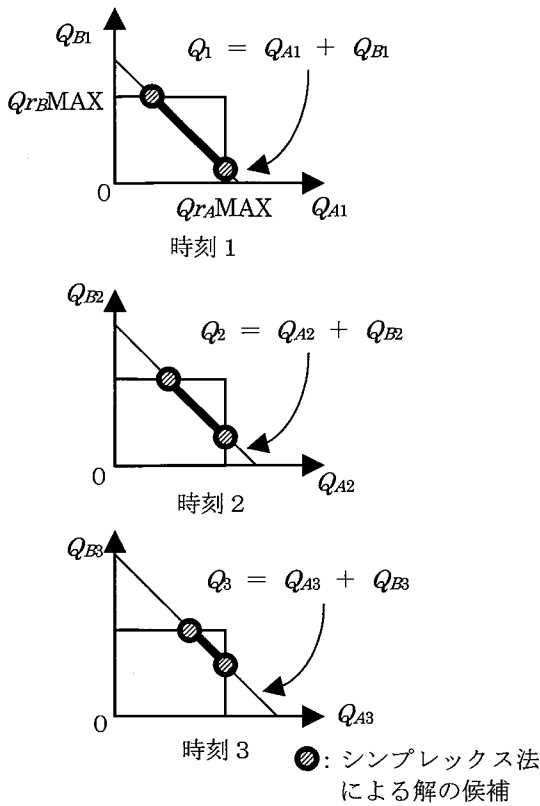


図-3 蓄熱槽 2 台による 3 時刻の運転

の全てを一日で使い切るために式 (3) を設ける。

$$\sum_{i=1}^{60} Q_s(k, i) = \sum_{i=61}^{138} Q_r(k, i) \quad (k=1\sim 5) \dots (3)$$

既報では、このような蓄熱槽に関する制約条件式と冷凍機に関する制約条件式を合わせて、全体で 3321 行 4348 列の制約条件式の係数行列に対してシンプレックス法を適用した。

1.2 既報で用いた目的関数

本報で対象としている熱源プラントは全て電気式の冷凍機を備えているので、最適運転計画に対する目的関数 J は、式 (4) のように昼間電力料金と夜間電力料金を考慮した一日の総電力料金とする。

$$J = \sum_{i=61}^{138} \left\{ \sum_{j=1}^6 E_r(j, i) + \sum_{j=1}^6 E_{PR}(j, i) + \sum_{k=1}^5 E_{PS}(k, i) \right\} \times C_D + \sum_{i=1}^{60} \left\{ \sum_{j=1}^6 E_r(j, i) + \sum_{j=1}^6 E_{PR}(j, i) + \sum_{k=1}^5 E_{PS}(k, i) \right\} \times C_N \dots (4)$$

ここで、 C_D は昼間の電気の従量料金単価、 C_N は夜間の電気の従量料金単価であり、 $E_r(j, i)$ は時刻 i における冷凍機 j への投入電力、 $E_{PR}(j, i)$ は冷凍機 j に付随したポンプの時刻 i における投入電力、 $E_{PS}(k, i)$ は蓄熱槽 k に付随したポンプの時刻 i における投入電力である。

しかし、冷凍機や蓄熱槽にオン-オフ制御のポンプが付随している場合、 $E_{PR}(j, i)$ や $E_{PS}(k, i)$ はゼロか定格電力の値しか取りえないために、線形計画法を適用できない。

そこで既報の線形計画法を解く第一ステップではポンプ動力を考慮せず、次式 (5) により、まず昼間の冷凍機の投入電力と夜間に蓄熱を行うための投入電力に対して最適化を行った。そして、その運転計画を実行する際に必要なポンプ動力を運転コストに加算して一日の運転コストとした。

$$J' = \left(\sum_{i=61}^{138} \sum_{j=1}^6 E_r(j, i) \right) \times C_D + \left(\sum_{i=1}^{60} \sum_{j=1}^6 E_r(j, i) \right) \times C_N \dots (5)$$

この手法により、短時間の計算時間で比較的簡単に翌日一日分の最適運転計画を求めることができ (図-2)、実際の運用実績と比較して、計算上、20%以上の削減効果があると予測される運転計画が得られた。しかし、この手法では、各時刻の全蓄熱槽からの総放熱量 Q_i (図-2の黒い部分) に関しては冷凍機の外気温依存性も考慮されて適切な放熱計画になっているが、蓄熱槽に付随するポンプ動力の最適運転性については未検討であった。

そこで本報では、既報で求めた各時刻の全蓄熱槽からの総放熱量 Q_i を変更しない範囲で、蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプの最適運転性について考える。そして、シンプレックス法によって求めた既報の放熱運転計画は蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプ動力に対して最適化されていることを示す。

2. シンプレックス法による 2 台の蓄熱槽の最適化

2.1 オン-オフ制御のポンプが付随している蓄熱槽の最適運転性

式 (4) の目的関数のように、蓄熱槽の放熱運転に必要なコストは蓄熱槽に付随するポンプへの総投入電力である。対象としている熱源プラントの主なポンプはオン-オフ制御なので、蓄熱槽から放熱を行う際には、バイパスを用いて過剰な放熱量を蓄熱槽に戻している。これらのポンプの運転効率を上げるためには、できるだけバイパスに戻す熱量を減らすために、単位時間あたりの最大放熱量がゼロで放熱運転することが望ましい。

本報では、シンプレックス法で求めた既報¹⁾の結果が、このような運転計画になっていることを示す。

2.2 最大放熱能力と施設の熱負荷の関係

Q_i は各時刻 i における全蓄熱槽からの総放熱量なので次式が成り立つ。

$$\sum_{k=1}^5 Q_r(k, i) = Q_i \quad (i=1\sim 138) \dots (6)$$

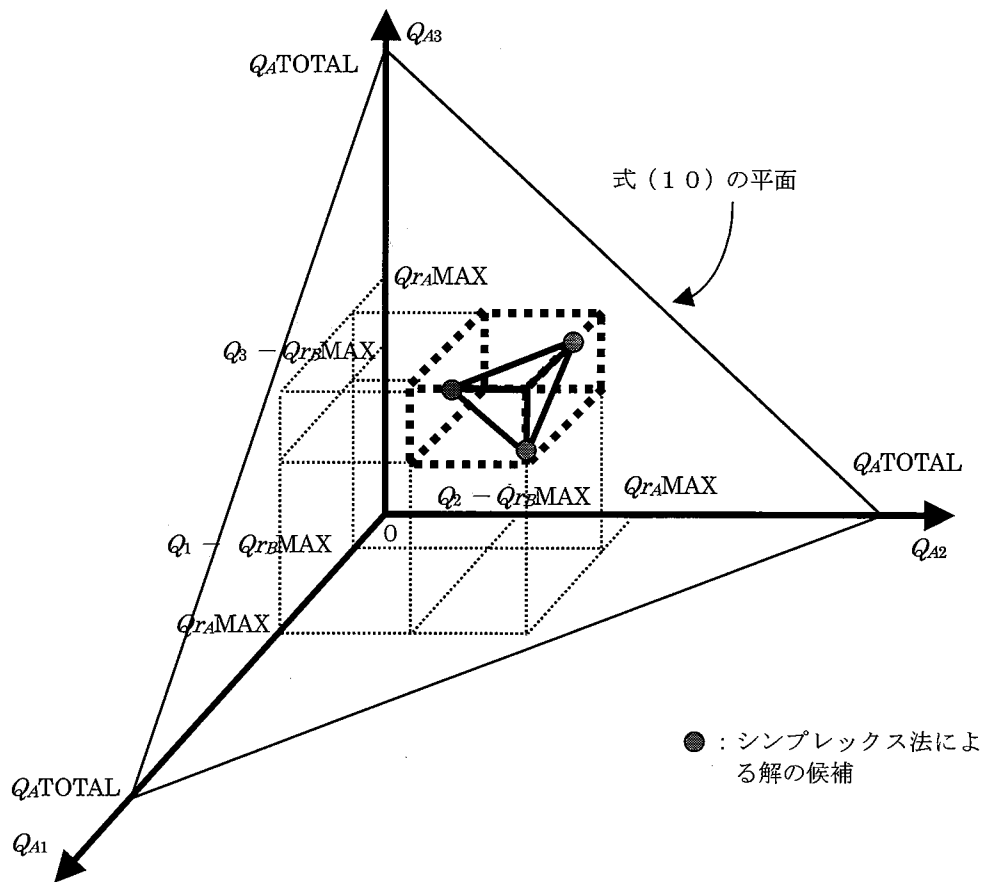


図-4 3時刻の放熱量と総放熱量の関係

本節では、この式(6)と式(1)の条件下で既報の放熱運転計画の検討を行う。

問題の解の特性を理解しやすくするために、まず、蓄熱槽 A, B の2台を3時刻に渡って運転する場合を考える。

図-3において蓄熱槽 A の時刻1での放熱量を Q_{A1} のように表記し、蓄熱槽 B および時刻2, 3に対しても同様の表記を行う。また、各時刻あたりの最大放熱量を Q_{rA_MAX} , Q_{rB_MAX} とする。通常、全蓄熱槽からの総放熱量 Q_i は各時刻あたりの最大放熱量 Q_{rA_MAX} , Q_{rB_MAX} より大きいので、ここでは蓄熱槽1槽のみで Q_i をまかなう状況は考えない。

このとき、式(1)で表される各蓄熱槽の各時刻あたりの最大放熱量と放熱量の関係は、以下の式で与えられる。

$$0 \leq Q_{Ai} \leq Q_{rA_MAX} \quad (i=1\sim3) \quad \dots\dots (7)$$

$$0 \leq Q_{Bi} \leq Q_{rB_MAX} \quad (i=1\sim3) \quad \dots\dots (8)$$

この式(7), (8)を満たす可能領域は、図-3において各時刻の長方形の内側となる。

また、各時刻の総放熱量 $Q_i (i=1\sim3)$ を満たすための式(6)は次式となる。

$$Q_i = Q_{Ai} + Q_{Bi} \quad (i=1\sim3) \quad \dots\dots (9)$$

これらの式(7)~(9)の制約条件式を満たす可能領域は、図-3の太線で表される領域である。この可能領域に対してシンプレックス法を適用すると、解は可能領域の端点から選ばれるために、各時刻で図中の●印のどちらかが選ばれる。これは、式(7), (8)で規定される長方形の辺上にあるため、 Q_{Ai} と Q_{Bi} は決して同時刻に中間値をとらない。

このことから、蓄熱槽2台に対し、式(7)~(9)の制約条件下でシンプレックス法を解くと、各時刻において、どちらかの蓄熱槽は各時刻あたりの最大放熱量で運転されていることが分かる。

2.3 蓄熱量を使い切る条件と施設の熱負荷の関係

放熱量に関する条件は、前節で扱った条件の他に、使用できる蓄熱量の制約条件がある。既報では、蓄熱量と放熱量に関わる制約条件式として式(3)を用いた。本節では、この条件によって前節のシンプレックス法の解がどのように影響されるかを考える。

各蓄熱槽が3時刻で使い切るべき総蓄熱量を Q_{ATOTAL} , Q_{BTOTAL} とすると、蓄熱槽 A の場合は次式が成り立つ。

$$Q_{A1} + Q_{A2} + Q_{A3} = Q_{ATOTAL} \quad \dots\dots (10)$$

また、蓄熱槽 B に対しても同様に

表-2 既報¹⁾で求めた放熱計画(放熱モード) [MJ/10min.]

時刻番号	91	92	93	94	95	96	97	98	99
アンモニア氷蓄熱	37.98	37.98	37.98	15.68	10.80	37.98	37.98	37.98	37.98
空冷HPBC氷蓄熱	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59
水蓄熱槽	117.37	162.52	147.17	295.37	295.37	143.68	158.33	274.47	289.12
潜熱蓄熱槽	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29
水冷BC氷蓄熱	128.70	128.70	128.70	0.00	0.00	128.70	128.70	0.00	0.00

時刻番号	100	101	102	103	104	105	106	107	108
アンモニア氷蓄熱	0.00	37.98	21.27	0.00	5.22	37.98	0.00	0.00	22.98
空冷HPBC氷蓄熱	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	126.59	112.93	126.59
水蓄熱槽	199.10	157.64	295.37	295.00	295.37	141.59	285.04	294.01	244.11
潜熱蓄熱槽	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29	63.29
水冷BC氷蓄熱	128.70	128.70	0.00	0.00	0.00	128.70	0.00	0.00	0.00

$$Q_{B1} + Q_{B2} + Q_{B3} = Q_{BTOTAL} \quad \dots (11)$$

が成り立つが,

$$Q_{ATOTAL} + Q_{BTOTAL} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

の関係があり, 式(9)と式(10)より, 式(11)を導けるので, 式(11)は制約条件式から外しても良い.

ここで, 図-3の Q_{A1} , Q_{A2} , Q_{A3} を3軸として図示し直したものを図-4とする. Q_{Ai} の範囲は, $Q_i - Q_{rBMAX} \sim Q_{rA MAX}$ の間であり, 制約条件式(7)~(9)を満たす可能領域は図-4の中央の太い破線で示す直方体の内側である. ここで, 図-3で示した6点の解の候補は, 図-4で示した中央の直方体の6面と対応している.

この直方体は $(Q_{rA MAX}, Q_{rA MAX}, Q_{rA MAX})$ の頂点を持ち, Q_i によって1辺の長さが決定される. そして, この直方体の面上にある解は, Q_{Ai} か Q_{Bi} のどちらかが各時刻あたりの最大放熱量で運転されていることを表している.

制約条件式(10)は図-4中に示された各軸の値が Q_{ATOTAL} となる大きな3角形の平面として表され, 式(7)~(10)を満たす可能領域は, 式(10)の平面が中央の直方体を切断した面である. したがって, 式(7)~(10)の条件下でシンプレックス法を解いた場合, 解の候補は可能領域の端点である図中の●印の場所となる. これらの候補点は, 直方体の面上にあるため, どの候補点についても, 各時刻における最大放熱量が選ばれやすく中間値で放熱する蓄熱槽は1台のみの計画となる.

本章の例では, 蓄熱槽が2台であるために, 各時刻とも最大放熱量と中間値という放熱運転の組み合わせが解となった. 蓄熱槽が3台以上の複数台になった場合は, 各時刻とも最大放熱量かゼロの運転が行われやすいことを次章で証明する.

3. 複数台の蓄熱槽を用いた場合の最適運転計画

3.1 蓄熱槽 m 台に対する制約条件式

蓄熱槽 m 台を n 時刻に渡って運転する場合を考える.

式(7), (8)にスラック変数 λ を導入し, m 台の蓄熱槽に対して記述する.

$$Q_r(k, i) + \lambda(k, i) = Q_{r k MAX} \quad (k=1 \sim m) \dots (12)$$

ここで, 蓄熱槽の運転状況を考えて $Q_r(k, i)$ がゼロの場合は, 蓄熱槽 k は放熱運転されていないことを表し, $\lambda(k, i)$ がゼロならば, 蓄熱槽 k は各時刻あたりの最大放熱量で運転されていることを意味する.

また, 式(9)を蓄熱槽 m 台, n 時刻に拡張して表記すると次式となる.

$$\sum_{k=1}^m Q_r(k, i) = Q_i \quad (i=1 \sim n) \quad \dots (13)$$

n 時刻を通して蓄熱槽 k から放熱する蓄熱量を $Q_{r k TOTAL}$ とすると式(10)は以下のように表される.

$$\sum_{i=1}^n Q_r(k, i) = Q_{r k TOTAL} \quad (k=1 \sim m) \dots (14)$$

ここで,

$$\sum_{k=1}^m Q_{r k TOTAL} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad \dots (15)$$

の関係があるため, 式(11)と同様に制約条件式(14)の m 式中の1式は自動的に成立する.

したがって, 式の総数を数えると, 式(12)が mn 個, 式(13)が n 個, 式(14)が $m-1$ 個であるので, 合計 $(mn+m+n-1)$ 個となる. また, 変数の数は, 放熱量

$Qr(k, i)$ ($k=1\sim m, i=1\sim n$) が mn 個, 式 (12) のスラック変数 $\lambda(k, i)$ ($k=1\sim m, i=1\sim n$) が mn 個であるから合計 $2mn$ 個となる。

3.2 シンプレックス法で求めた放熱運転の最適運転性

前述した制約条件式 (12) ~ (14) にシンプレックス法を適用した場合を考える。

ここで, 得られた可能基底解のうち, 式 (12) で使われている $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ を対として考える。この $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ の対は, 式 (12) より同時にゼロになることはない。

このとき, 各時刻 i において $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ のどちらかがゼロとなっている蓄熱槽の台数を Z_i と表す。

蓄熱槽が m 台なので Z_i の範囲は次式の範囲となる。

$$0 \leq Z_i \leq m \quad (i=1\sim n) \quad \dots\dots (16)$$

さらに, 次の値を定義する。得られた可能基底解において, $Z_i = m$ となる時刻の個数を α とし, $Z_i = m-1$ となる時刻の個数を β と表す。

ここで, $2\alpha + \beta \geq n-m+1$ であることを背理法で証明する。

$$2\alpha + \beta < n-m+1 \text{ と仮定する。}$$

n 時刻を通して $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ の対のうち, どちらかがゼロになる総数は,

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n Z_i \\ &= (Z_i = m \text{ となる時刻の個数}) \times m \\ & \quad + (Z_i = m-1 \text{ となる時刻の個数}) \times (m-1) \\ & \quad + (Z_i = m-2 \text{ となる時刻の個数}) \times (m-2) \\ & \quad + \dots\dots \\ & \leq \alpha \times m + \beta \times (m-1) + (n-\alpha-\beta) \times (m-2) \\ & = n(m-1) - n + 2\alpha + \beta \end{aligned}$$

前提条件として, $2\alpha + \beta < n-m+1$ であるから,

$$\begin{aligned} \text{前式} & < n(m-1) - n + n - m + 1 \\ & = n(m-1) - (m-1) \end{aligned}$$

したがって, $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ の対のうち, どちらかがゼロになる個数は,

$$\sum_{i=1}^n Z_i < n(m-1) - (m-1) \quad \dots\dots (17)$$

一方, $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ はシンプレックス法の解であり, 変数の数が $2mn$ 個, 式の数 $(mn+m+n-1)$ 個である線形問題の可能基底解は, 変数のうち少なくとも以下に示す個数はゼロの値をとる。

$$\begin{aligned} 2mn - (mn+m+n-1) \\ = n(m-1) - (m-1) \quad \dots\dots (18) \end{aligned}$$

したがって, $Qr(k, i)$ と $\lambda(k, i)$ の対を含む解の全体の

中で, ゼロの値をとる個数は $n(m-1) - (m-1)$ 以上となり式 (17) と矛盾する。すなわち,

$$2\alpha + \beta \geq n-m+1 \quad \dots (19)$$

でなければならない。

ここで, α は $Z_i = m$ となる時刻の個数であった。 $Z_i = m$ となる時刻 i では, 全ての蓄熱槽が最大放熱量か, またはゼロで運転され, かつ, その時刻の総放熱量が Q_i と全く等しいことを意味している。このような状況は極めて特異なので, $\alpha=0$ の場合を考えて式 (20) とする。

$$\beta \geq n-m+1 \quad \dots (20)$$

このとき β は $Z_i = m-1$ となる時刻の個数であり, 全蓄熱槽のうち1台のみが中間的な放熱を行っている状態である。式 (20) より, その状態が少なくとも n 時刻中に $n-m+1$ 時刻は存在することを意味している。

このように, 既報¹⁾ で求めた蓄熱槽の放熱運転計画は, 各時刻あたりの最大放熱量がゼロで運転されやすい計画である。したがって, 蓄熱槽に付随したオン-オフ制御を行うポンプの総稼動時間が少なくなるので省コストを実現している放熱運転計画となっている。

4. シミュレーション結果と考察

表-2に, 既報¹⁾ で求めた放熱モードの時間帯 (13:00 ~ 16:00) の放熱運転計画を示す。ここで, 表中の塗りつぶしたマス目は, 蓄熱槽が中間的な放熱を行う箇所を表す。表-2から分かるように, 18時刻中16時刻において, 1台の蓄熱槽のみが中間的な放熱運転を行っており, 式 (20) の結果と合致する。

各時刻において, 少なくとも1台の蓄熱槽は中間的な放熱を行っているが, 水蓄熱槽の最大放熱能力が他の蓄熱槽に比べて大きいために, 調整用として運転されやすい傾向にある。次に中間的な放熱運転を多く行っている蓄熱槽はアンモニア氷蓄熱槽であるが, この理由は最大蓄熱容量が小さいために, 全蓄熱量を一日で使い切る条件式 (14) の制約が他の蓄熱槽に比べて緩く, 調整用に選ばれたと思われる。

また, 潜熱蓄熱槽は放熱モードの時間帯の全域において各時刻あたりの最大放熱量で運転されているが, これは潜熱蓄熱槽の最大蓄熱容量が大きいのに対して最大放熱能力が小さいので, ほとんどの時間帯において最大放熱量で運転しなければ一日を通して全蓄熱量を使い切れなためである。

ここでは, 放熱モードの時間帯における放熱運転計画を示したが, 追従モードにおいても同様の結果が確認された。

これらのことから, 制約条件式 (12) ~ 式 (14) を満たしている既報の放熱運転計画は, 制約条件式を満たす範囲内で可能な限り各時刻の最大放熱量か, もしくはゼロ

で運転される計画である。つまり、蓄熱槽に付随したオン-オフ制御のポンプについて考えると、ポンプの総稼働時間が短くなる放熱計画であった。

本報では、蓄熱槽にオン-オフ制御のポンプが付随している場合について考えたが、蓄熱槽にインバータ制御のポンプが付随している場合は、今後の課題として検討する。

まとめ

本報では、既報¹⁾で未検討であった蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプに関する最適運転性について考え、既報で求めた放熱運転計画の検討を行った。

本報の第2章では、問題の特性を理解しやすくするために2台の蓄熱槽に対して放熱運転計画の図示を行い、同時に2台の蓄熱槽が中間値的な放熱を行わないことを説明した。

第3章では複数台の蓄熱槽に対して背理法を用いた証明を行った。この証明により、蓄熱槽 m 台、 n 時刻に対して既報の手法を適用した場合、 $n-m+1$ 時刻以上の時刻において、1台を除いて各時刻の最大放熱量がゼロで放熱運転されており、蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプ動力の総稼働時間を短くする放熱運転計画であることを示した。

第4章では、既報の手法で求めた蓄熱槽の放熱運転計画の検討を行い、1台を除いて最大放熱能力がゼロの放熱運転を行っている時刻が18時刻中16時刻あり、第3章の証明と合致していることを確かめた。

これらのことから、既報で求めた放熱運転計画は蓄熱槽に付随するオン-オフ制御のポンプ動力に対して十分に省コストを実現している計画であることを示した。また、第1報で提案した手法において、既報の蓄熱槽の運転計画を利用したことに対する妥当性も示すことができた。

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) 山本正幸・中村安弘・栗山憲・松山健：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，空気調和・衛生工学会学論文集，No.122(2007-5)，pp.9~16
- 3) 坂和正敏：数理計画法の基礎，1999，森北出版株式会社
- 4) 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転計画問題に対する近似解法，空気調和・衛生工学会学論文集，No.63(1996-10),pp.29~37
- 5) 横山良平・伊東弘一：混合整数計画法のための新しい分解法と蓄熱システム最適運用計画への応用，日本機会学会論文集（C編），65巻638号（1999-10），pp.282~289
- 6) 小林主一郎・坂本義行・長岩明弘・中丸正：遺伝的アルゴリズムを適用した地域冷暖房プラントの運転最適化手法，電子情報通信学会論文誌（A編），Vol.J84-A，No.11（2001-11），pp.1346~1355

（2006年9月15日 原稿受付）

Optimum Control of Heating and Cooling Plant with Nonlinear Operation Characteristics

Part 2 — Investigation into Optimization of Heat Supply from Thermal Storage Tanks with ON/OFF Control Pumps

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

Key Words: optimum control, thermal storage system, linear programming, nonlinearity, pump power

Synopsis: Optimum control of pump power is investigated when ON/OFF control pumps are used for the supply of chilled water from thermal storage tanks. However, it is not dealt with linear programming as ON/OFF control pump's power is nonlinear characteristics.

In the previous paper, we proposed a practical approximation method about optimum control of heating and cooling plant with thermal storage tanks using linear programming. This method takes a short time to obtain the solution and we showed

that running cost of the plant was reduced compared to the real operation by applying this method. However, this method excluded pump power because ON/OFF control pump has strong non-linearity.

In this paper, we show that the supply schedule of chilled water from the thermal storage tanks, which was obtained using the previous approximation method, achieves optimization of pump power.

(Received September 15, 2006)

*¹ Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Member

*² Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Student Member