

# 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究 (第5報) 集合型冷却塔における冷却水システムの最適制御方法の検討

○矢島 和樹 (新菱冷熱工業)  
尾形 甫 (新菱冷熱工業)

福井 雅英 (新菱冷熱工業)

熱源システムの最適制御技術の構築において、既報にて1台の熱源機に対して1台の冷却塔で構成されたシステムにおける冷却水温度の最適制御方法を確立し、実在の熱源システムに考案した制御方法を導入した。一方で、地域冷暖房施設や中央式熱源方式を採用した建物では、複数の熱源機と複数の冷却塔が一つの系統で接続されたシステム (以下、集合型冷却塔システム) が一般的である。そこで本報では、集合型冷却塔システムにおける最適な冷却水温度を探索するとともに冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御を含めて体系的に最適な制御方法をシミュレーションにより検討した。

空調システムシミュレーション (LCEM ツール) を用いて、集合型冷却塔システムにおける冷却水温度の最適値探索とその効果の試算を行った。その結果、最適な冷却水温度をシミュレーションで求めることはできるが、運転条件によって複数の制御式を作成する必要があり、制御は複雑であることが判明した。一方、効果の試算では、1対1のシステムと比較して、冷却水温度を最適に制御する効果が大きいことがわかった。

## 1. はじめに

既報<sup>1,2)</sup>において、1台の熱源機に対して1台の冷却塔で構成されたシステムにおける冷却水温度の最適制御方法についてまとめ、実在の熱源システムに考案した制御方法を導入した。しかし、地域冷暖房施設や中央式熱源を採用した建物では、複数の熱源機、冷却塔が設置されていることが多い。このとき、熱源機と冷却塔が1対1で構成されている場合もあるが、複数の熱源機に対して複数の冷却塔が同時に接続されたシステム (以下、集合型冷却塔) のほうが熱源機の運転台数にかかわらず、すべての冷却塔を活用することができ合理的である。

そこで、集合型冷却塔における最適な冷却水温度を探索するとともに冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御を含めて体系的に最適な制御方法をまとめることを目的としてシミュレーションによる検討を行った。

なお、本報における最適制御、最適値とは、システム全体の消費電力が最小となる制御方法または設定値とする。

## 2. 対象システムと計算条件

インバータターボ冷凍機3台と冷却塔6台で構成されたシステムを対象とした。検討に使用したシミュレーションモデルは、LCEM ツール (Ver310) にて作成した。機器仕様の詳細と検討するシステムの冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御方法を次に示す。

### 2.1 対象システムの機器仕様

対象システムを構成する機器の仕様を表-1に、概略フ

ローを図-1に示す。冷却塔とポンプの仕様はインバータターボ冷凍機の能力 (290 USRt × 3) に合わせて選定し、各機器のモデルは LCEM ツール内のオブジェクトの部分負荷特性などを変更せずに使用した。

表-1 機器の定格仕様一覧

インバータターボ冷凍機	3 台
定格冷凍能力	290 USRt (1,020) kW
定格消費電力	197 kW
定格冷水流量	2,917 L/min
定格冷却水流量	3,500 L/min
冷却塔	6 台
定格消費電力	3.7 kW
定格冷却水流量	1,750 L/min
冷却水ポンプ	3 台
定格消費電力	18 kW
定格冷水流量	3,500 L/min
定格揚程	196 kPa
冷水ポンプ	3 台
定格消費電力	15 kW
定格冷却水流量	2,917 L/min
定格揚程	196 kPa

†TR: 冷凍機、CT: 冷却塔

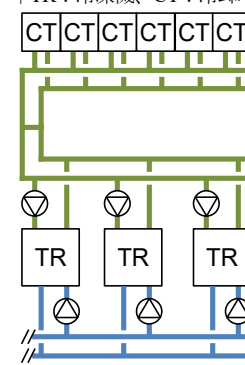


図-1 熱源フロー図

### 2.2 検討した各種制御方法の計算条件

#### (1) 冷却塔ファンの風量制御方法

ON/OFF 制御、極数変換 (4P/8P の2速) モータ、インバータの3種類の冷却塔ファン制御を対象とした。ON/OFF 制御の冷却塔のシミュレーションモデルは、LCEM ツールのオブジェクトを使用し、インバータ制御に関しては既報<sup>3)</sup>の変風量対応オブジェクトの計算方法を用いた。極数変換はインバータ制御と同じオブジェクトで、4Pはファン風量比1.0、8Pはファン風量比0.5、散水はファン風量比0.03で計算することで対応した。

## (2) 冷却塔の台数制御方法

全台数運転と流量対応運転（流量により運転台数を可変）の2種類の冷却塔台数制御を対象とした。全台数運転は、冷凍機の運転台数、負荷率や冷却水流量にかかわらず6台すべてに通水する方法である。流量対応運転は、冷却水流量が冷却塔の定格流量を超えたとき通水する冷却塔の台数を増やす方法である。つまり、0~1,750 L/min までは冷却塔は1台通水で、1,750~3,500 L/min までは2台通水する。

## (3) 冷却水流量の制御方法

定流量制御（CWV）と変流量制御（VWV）の2種類の冷却水流量制御方法を対象とした。CWVは冷凍機の定格流量とし、VWVは冷却水の往還温度差が一定となるように冷凍機の負荷率に比例して制御する方法とした。なお、VWVの冷凍機下限流量は、定格の50%とした。

## (4) その他の制御方法

冷凍機の増減段閾値は、増段・減段ともに定格冷凍能力の90%とした。冷水出口（行き）温度は7℃一定、冷水流量は冷凍機の定格流量一定とし、負荷は冷水流量と冷水還り温度を境界条件として与えて計算した。

## 3. 冷却水温度の最適値探索

2.2節の(1)から(3)に示した各種制御方法の組合せ12通りのシステムに対して、次に示す条件で最適値探索を行った。

- 目的関数：システム合計の消費電力を最小
- 設計変数：冷却水温度の設定値 12℃~32℃ 1℃刻み
- 外気条件：外気湿球温度 0℃~30℃ 1℃刻み
- 負荷条件：システム負荷率\* 1%~100% 1%刻み

\* (冷凍機3台の製造熱量の合計) / (冷凍機3台の定格冷凍能力)

計算条件とした各種制御方法や最適値探索の組合せ数が多いので一部抜粋した結果を示す。インバータ、全台数運転、CWV、外気湿球温度10℃における冷却水設定温度別の消費電力の計算結果を図-2、図-3に示す。

図-2のシステム負荷率20%は、冷凍機が1台で運転（冷凍機1台の負荷率は60%）しており、それに対して冷却塔は全台数の6台運転している条件である。冷却水温度の設定値は、14℃が最適という結果であった、冷却水温度の設定値を14℃からさらに下げると冷却塔の消費電力が増加し、システム全体の消費電力も増加に転じる。この条件では負荷率が低く冷凍機の消費電力が小さいため、システム全体の消費電力に占める冷却塔の割合が大きい。そのため、冷却水温度の設定値を下げすぎると冷却塔の消費電力が増加し、システム全体の消費電力も大きくなると考えられる。

一方、図-3のシステム負荷率70%は、冷凍機3台（各冷凍機の負荷率は70%）に対して冷却塔が6台運転している条件であり、冷却水温度の設定値は、17℃が最適と

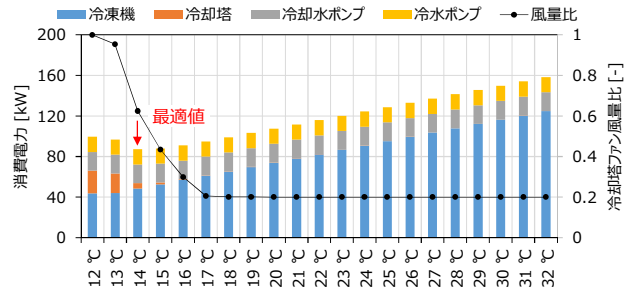


図-2 冷却水設定温度別の消費電力（システム負荷率20%）

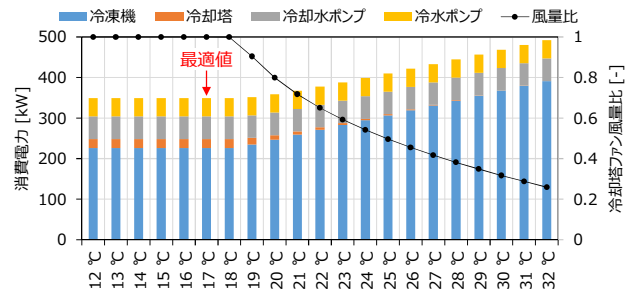


図-3 冷却水設定温度別の消費電力（システム負荷率70%）

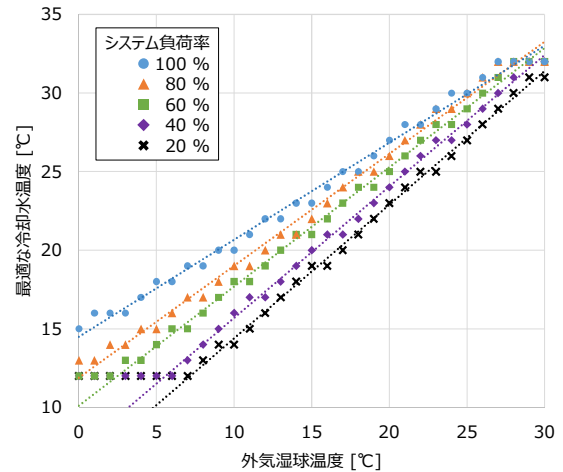


図-4 外気湿球温度と最適な冷却水温度の関係

いう結果であった。冷却水温度の設定値を17℃から下げても大きく増加に転じることはなかった。この条件では、ファン風量比1.0のときのシステム全体の消費電力に占める冷却塔の消費電力の割合が、20%の条件と比較して小さい。そのため、冷却水温度を可能な限り下げても冷凍機の効率を上げるような設定温度が最適となった。

図-2と図-3のように得られた最適な冷却水温度をすべての外気湿球温度とシステム負荷率で求めた結果を図-4に示す。図-4の各種制御方法は、インバータ、全台数運転、CWVであり、またシステム負荷率は1%刻みで求めているが、視認性を高めるため20%刻みでプロットした。図-4から、システム負荷率によって最適な冷却水温度が異なることがわかった。システム負荷率20%と100%では最大7℃最適な冷却水温度が異なる条件も存在した。

これらを既報<sup>1),2)</sup>で示した外気湿球温度の一次式(式(1))で表現することは困難であり、この方法で制御すると期待したエネルギー削減効果を得られない。

$$T_{CT} = aT_{WB} + b \quad \dots\dots (1)$$

$T_{CT}$  : 冷却水温度の設定値 [°C]  
 $T_{WB}$  : 外気湿球温度 [°C]  
 $a, b$  : 定数 [-]

図-4の条件ではシステム負荷率が大きいほど最適な冷却水温度が高くなる傾向にあり、システム負荷率を変数に加味して、既報で示した式(2)のような重回帰式で表現することができると考えられる。

$$T'_{CT} = (a_{11}q_r^2 + a_{12}q_r + a_{13})T_{WB}^2 + (a_{21}q_r^2 + a_{22}q_r + a_{23})T_{WB} + (a_{31}q_r^2 + a_{32}q_r + a_{33}) \quad \dots\dots (2)$$

$T'_{CT}$  : 冷却水温度の設定値 [°C]  
 $q_r$  : システム負荷率 [%]  
 $a_{ij}$  : 定数 [-]

つぎに図-4の各種制御方法は、インバータ、全台数、CWVであったが、インバータ、台数流量対応運転、CWVの条件に変えた結果を図-5に示す。冷却塔の台数制御を全台数運転から流量に対応させて台数を変える方法に変えただけであるが、システム負荷率ごとの最適な冷却水温度は、100% > 60% > 80% > 40% = 20%と非線形の関係であり、式(2)では表現できない。このように、冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御の条件によっては、システム負荷率が高いほど最適な冷却水温度が高くなるというわけではなく、傾向がより複雑な条件があった。そのような条件では、冷凍機の台数や冷却塔の運転台数によって回帰式を分ける必要がある。

よって、集合型冷却塔のシステムにおいては、シミュレーションの結果をリアルタイムに制御に反映させるなどの方法を採用せずに事前に制御方法を導出する場合、システムの構成や制御方法に合わせて、最適な冷却水温度を求める回帰式の係数だけでなく、回帰式を運転条件ごとに分けるなど表現方法も検討する必要がある。なお、回帰式のほか、設定値を表形式にする方法でも同様である。

#### 4. 冷却水温度を可変することによる効果の試算

システム合計の年間電力消費量を冷却水温度の設定値を変えて計算し、冷却水温度制御の効果を算出した。冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御別に算出し、各種制御方法による違いも比較した。外気・負荷条件は、実在の建物のデータを用い、負荷は対象システムの定格能力に合わせ定数を乗じて調整して用いた。月代表日の24時間(288h=24×12)で計算し、計算結果に月別の日数をかけて年間電力消費量を算出した。

なお、冷却塔ファン制御が極数変換の条件では、冷却

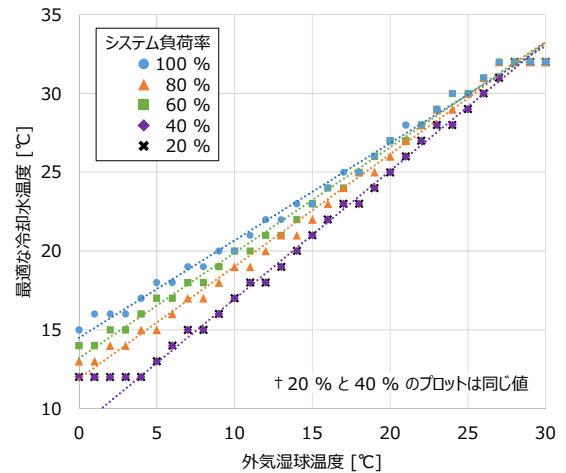


図-5 別条件の外気湿球温度と最適な冷却水温度の関係

表-2 極数変換における冷却塔ファン制御の組合せ

No.	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT6
1	散水	-	-	-	-	-
2	散水	-	-	-	-	-
3	散水	散水	散水	-	-	-
4	散水	散水	散水	散水	-	-
5	散水	散水	散水	散水	散水	-
6	散水	散水	散水	散水	散水	散水
7	8P	8P	散水	散水	散水	散水
8	8P	8P	散水	散水	散水	散水
9	8P	8P	8P	散水	散水	散水
10	8P	8P	8P	8P	散水	散水
11	8P	8P	8P	8P	8P	散水
12	8P	8P	8P	8P	8P	8P
13	4P	8P	8P	8P	8P	8P
14	4P	4P	8P	8P	8P	8P
15	4P	4P	4P	8P	8P	8P
16	4P	4P	4P	4P	8P	8P
17	4P	4P	4P	4P	4P	8P
18	4P	4P	4P	4P	4P	4P

表-3 システム合計の年間消費電力量の比較 単位 [MWh]

冷却塔ファン制御	冷却塔台数制御	冷却水流量制御	32 °C		12 °C		固定値	外気湿球温度 +0 °C	
			1,785	1,334	1,334	1,334		1,334	1,334
ON/OFF	流量対応	CWV	1,785	1,334	1,334	1,334	1,334	1,334	
極数変換	流量対応	CWV	1,761	1,334	1,333	1,334	1,332	1,332	
インバータ	流量対応	CWV	1,756	1,328	1,328	1,328	1,326	1,326	
ON/OFF	全台数	CWV	1,796	1,333	1,333	1,332	1,332	1,332	
極数変換	全台数	CWV	1,756	1,314	1,314	1,277	1,261	1,261	
インバータ	全台数	CWV	1,755	1,306	1,306	1,265	1,253	1,253	
ON/OFF	流量対応	VWV	1,712	1,267	1,267	1,267	1,267	1,267	
極数変換	流量対応	VWV	1,695	1,267	1,267	1,267	1,267	1,267	
インバータ	流量対応	VWV	1,685	1,265	1,265	1,265	1,264	1,264	
ON/OFF	全台数	VWV	1,736	1,223	1,223	1,223	1,223	1,223	
極数変換	全台数	VWV	1,684	1,200	1,200	1,164	1,144	1,144	
インバータ	全台数	VWV	1,684	1,191	1,191	1,150	1,137	1,137	

水の設定温度に沿って温度制御をしているわけではなく、表-2のように散水と極数の組合せごとに計算し、算出された冷却水温度が設定温度にもっとも近い組合せを選択した。

冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御、冷却水温度の設定値ごとの年間消費電力量の計算結果を表-3に示す。冷却水温度の設定値の項目のうち、32°Cは年間常に32°C設定であり、12°Cも同様である。固定値は、年間通して同じ温度を設定値とするが、12°Cから32°Cまで1°C刻みの中でもっとも年間消費電力量が小さい冷却水温度を設定値とする方法である。外気湿球温度+



〇℃は、たとえば+3℃のとき外気湿球温度の値に3℃加えた値を設定値とする方法で、〇内の数値は0℃から10℃まで1℃刻みの中でもっとも年間消費電力量が小さい値とする。最適値は、計算した288hすべての時間ごとに12℃から32℃まで0.1℃刻みでもっとも年間消費電力量が小さい冷却水温度を設定値とする方法である。

表-3の計算結果の傾向として次のことが読み取れる。

- ・冷却塔ファン制御は、インバータ < 極数変換 < ON/OFF である。
- ・冷却塔台数制御は、全台数運転 < 流量対応運転である。
- ・冷却水流量制御は、VWV < CWV である。
- ・冷却水温度制御は、最適値  $\equiv$  WB+〇  $\equiv$  固定値  $\equiv$  12℃ < 32℃ である。ただし、極数変換とインバータの全台数（流量制御問わず）は、最適値 < WB+〇 < 固定値  $\equiv$  12℃ < 32℃ である。

多くのケースにおいて、冷凍機の冷却水温度下限である12℃設定またはそれに近い値で年間消費電力量が最小となっており、冷却塔を最大限使用して冷却水温度を下げるほうがよいという結果になった。

冷却塔ファンを変風量制御でき、全台数運転する（冷凍機に対して冷却塔の能力が過大の状態が発生する）ケースでは、最適値や外気湿球温度+〇℃など冷却水温度を適切に設定することで年間消費電力量を小さくすることができる。

## 5. 冷却塔の仕様を変更した場合の効果追加検討

表-3の結果で多くのケースにおいて、下限である12℃設定で年間消費電力量が最小となった。この理由として、冷却水温度が冷凍機の消費電力の変化に及ぼす影響が大きいことと、冷却塔の容量、定格消費電力が冷凍機に対して小さいことなどが考えられる。地域冷暖房施設や中央式熱源など複数の熱源機、冷却塔が設置されている大規模な設備では、将来対応や機器の入替などで冷却塔の放熱能力に余裕がある場合がある。そこで、冷却塔の容量、定格消費電力を表-1の条件から1.5倍に変更して（表-4）、その他の機器の仕様は変えずに年間消費電力量を再計算した。冷却水温度の設定値、冷却塔ファン制御、冷却塔台数制御、冷却水流量制御ごとの年間消費電力量の計算結果を表-5に示す。

表-3では、冷却塔ファンを変風量制御でき、全台数運転するケース以外では、12℃設定で年間消費電力量が最小となったが、表-5ではそれ以外のケースでも12℃設定と最適値で年間消費電力量に違いがみられるような結果となった。これは、図-2のように冷凍機の冷凍能力に対して冷却塔の容量および消費電力が過大である運転が増え、冷却水温度の設定値に関して冷凍機と冷却塔の消費電力のトレードオフによる極小値が多く発生したと考え

られる。

表-3と表-5の消費電力量の絶対量の比較では、冷却塔を全台数運転かつ12℃設定のような冷却塔を最大限使用するようなケースでは、冷却塔容量を1.5倍にした表-5のほうが大きかった。しかし、外気湿球温度+〇℃や最適値では表-5の年間消費電力量のほうが小さかった。

よって、冷却水温度の設定値を固定するのであれば、冷凍機の冷凍能力に合わせた冷却塔容量の選定や冷却塔の台数制御を行うほうがよく、冷却水温度を最適値など適切に設定するのであれば、冷凍機に対して冷却塔の能力が過大の状態設計・制御することでシステム合計の消費電力量をより小さくすることができる。

表-4 追加検討で変更した冷却塔の定格仕様

冷却塔	6台
定格消費電力	5.5 kW
定格冷却水流量	2,625 L/min

表-5 冷却塔容量を変更したシステム合計の年間消費電力量の比較 単位 [MWh]

冷却塔ファン制御	冷却塔台数制御	冷却水流量制御	32℃	12℃	固定値	外気湿球温度+〇℃	最適値
			ON/OFF	流量対応	CWV	1,787	1,314
極数変換	流量対応	CWV	1,755	1,310	1,309	1,308	1,305
インバータ	流量対応	CWV	1,755	1,302	1,302	1,296	1,290
ON/OFF	全台数	CWV	1,809	1,365	1,365	1,358	1,354
極数変換	全台数	CWV	1,752	1,333	1,333	1,247	1,228
インバータ	全台数	CWV	1,753	1,326	1,326	1,232	1,219
ON/OFF	流量対応	VWV	1,714	1,228	1,228	1,228	1,228
極数変換	流量対応	VWV	1,697	1,226	1,226	1,226	1,226
インバータ	流量対応	VWV	1,684	1,223	1,223	1,222	1,220
ON/OFF	全台数	VWV	1,755	1,265	1,265	1,265	1,263
極数変換	全台数	VWV	1,681	1,227	1,224	1,144	1,117
インバータ	全台数	VWV	1,683	1,216	1,216	1,125	1,110

## 6. まとめ

集合型冷却塔のシステムにおいて、冷却水温度の最適値探索とその効果の試算を行った。

最適値探索では、熱源機と冷却塔が1対1のシステムと同様に最適な冷却水温度をシミュレーションで求めることはできるが、それを定式化して制御するのはより複雑になることが確認できた。

集合型冷却塔では1対1のシステムと比較して冷凍機の冷凍能力に対する冷却塔の容量および消費電力が過大となる運転条件が多く発生し、冷却水温度を最適に制御する効果が大きいことがわかった。

今後は、本報で計算条件として与えた冷却塔台数制御の最適化や、インバータターボ冷凍機とは部分負荷特性の異なる吸収式冷凍機などでの検討を行う。また、ターボ冷凍機（インバータ、定速）と吸収式冷凍機が混在しているシステムでの検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 矢島, 他. (2014~2016). 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究 (第1報~第3報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.
- 2) 矢島, 他. (2017, 2018). 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究 (第1報, 第2報). 空気調和・衛生工学会論文集. No.248, No.254.
- 3) 田中, 他. (2021). ライフサイクルエネルギー管理のための空調システムシミュレーションツール (LCEM ツール) の機能拡張に関する研究 (第1報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.