OS-37

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 72）冷却塔の機器特性

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST(Part72) Equipment Characteristics of Cooling Towers

正 会 員　○伊藤　祥一（日建設計）　特別会員　村上　周三（建築研究所）
正 会 員　石野　久彌（首都大学東京名誉教授）　正 会 員　助飛羅　力（三機工業）
正 会 員　植田　俊克（新菱冷熱工業）　正 会 員　伊東　民雄（高砂熱学工業）
正 会 員　菊池　宏成（日立ﾌﾟﾗﾝﾄﾃｸﾉﾛｼﾞｰ）　正 会 員　柳井　崇（日本設計）

Shoichi ITO *1　Shuzo MURAKAMI*2　Hisaya ISHINO*3　Chikara SUKEHIRA*4
Toshikatsu UEDA*5　Tamio ITO *6　Hiroshige KIKUCHI*7　Takashi YANAI*8
Nikken Sekkei *1 Chief Exective, Building Research Institute, Dr. Eng. *2
Emeritus Prof., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng. *3 Sanki Engineering Co., Ltd. *4 Shinryo Corpolation *5
Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. *6 Hitachi Plant Technologies, Ltd. *7 Nihon Sekkei*8

In this part, progresses of characterization of Cooling Towers are reported. Characterization frame for each category are defined for this work. Cooling Towers are characterized by motor, inverter, and components of blade and casing. And air conditioners are characterized by water coil, humidifier, and total heat exchanger A continuous characterization of the rest of appliances would fill up the frames and expand the versatility of the BEST program.

はじめに

本報では、BEST 機器特性 SWG 熱源補機分科会において検討を進めた冷却塔について、機種構成及び機器モデルと特性式の概要について報告する。

既報 1)では近似式モデルの入口温度特性、変流量特性について述べた。本報では、新たに変風量特性の定式化を行ったのでその概要について報告する。

また、近似式モデルの課題である塔特性への対応や将来的な拡張を視野に入れ、新たに物理モデルの検討を行ったので、その概要および近似式モデルとの比較検討内容についても報告する。

1．冷却塔のモデル化

1.1 冷却塔の基礎理論 2),3)

直交流型の基礎式は図 1 に示す座標系で下式のように表される。

$$C_l \frac{L}{A}\frac{\partial t_l}{\partial z} = -\frac{G}{A'}\frac{\partial h}{\partial x} = -Ka(h_l - h) \quad \cdots(1)$$

$$N = \frac{L}{G} \quad \text{（水空気比）} \quad \cdots(2)$$

$$\frac{U}{N} = \frac{KaZd}{L/A} = \frac{KaV}{L} \quad \text{（塔特性、NTU）} \quad \cdots(3)$$

ここで、C_l : 水の比熱 (=4.2[kJ/(kg・K)])、L : 冷却水量[kg/h]、G : ファン風量[kg/h]、A : 冷却水の流れに直角方向の充填材断面積（図 1 参照）[m^2]、A' : 空気の流れに直角方向の充填材断面積（図 1 参照）[m^2]、t_l : 冷却水温度[℃]、h : 空気の比エンタルピー[kJ/kg]、h_l : 冷却水温度 t_l と同じ温度の飽和空気の比エンタルピー[kJ/kg]、x : 空気の流れ方向の座標軸（図 1 参照）、z : 冷却水の流れ方向の座標軸（図 1 参照）、Ka : エンタルピー基準総括容積伝熱係数[kJ/m^3・h・⊿h]、V : 体積[m^3]

塔特性は充填材の熱交換能力を示す。例えば、水量に対して空気量が少なくなれば、それに対する熱交換能力は下がる。

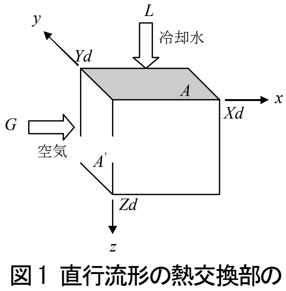

図 1 直行流形の熱交換部の座標と流れ方向

1.2 近似式モデル

近似式モデルは主として以下の改良を行った。

(1) ファン変風量時の特性定式化

(2) ファン停止時の特性定式化

変風量特性式については、メーカーヒアリングにより得られた実験データを基に、以下の関係を求めて既往の特性式に追加した。ファン台数制御時など冷却水循環中

にファンが停止した場合についても同様に検討した結果、共通の特性式として取り扱うこととした。

$$Tout_ct = (a_1 \cdot TWB_{in}^2 + b_1 \cdot TWB_{in} + c_1) \cdot e_2 \quad \cdots(4)$$

ここで、a_1, b_1, c_1 : 冷却水入口温度の関数、e_2 : 冷却水入口温度、風量、外気湿球温度の関数、TWB_{in} : 外気湿球温度、$Tout_ct$: 冷却水出口温度。e_2 は定格風量に対する風量比によって異なる。

1.3 近似式モデルの計算例

計算結果の例を図 2、図 3 に示す。図 2 はファン風量が変動した場合の外気湿球温度と冷却水出口温度の関係を示している。出口水温は湿球温度の低下に伴って低下し、風量の増大と共に低下する。図 3 はファン停止時に入口冷却水温度が変動した場合の外気湿球温度と冷却水出口温度の関係を示す。出口水温は湿球温度の低下に伴って低下するものの冷却水温度空気と冷却水の熱交換が自然対流分のみとなり、ほとんど変化しない。これらの結果は実機と同様であり、妥当な結果が得られた。

1.4 近似式モデルの塔特性

近似式モデルは、ある平均的な冷却塔の塔特性が、冷却塔の大きさによらず、開放型で 1.0 前後、密閉型で 0.8 前後であることに着目して近似式を作成したもので、定格の設計仕様を入力せずに、冷却塔のタイプのみで計算を行うところに特徴がある。計算が容易となるが、近似式の基にした冷却塔と仕様の違いが大きくなるほど塔特性にずれが生じる。また、冷却塔の場合、設計条件に併せて形状や機能を設計する場合が多いため、熱源機のようにラインナップ毎の特性を揃えておくことは難しい。

1.5 物理モデル

1.4 節の課題の解決策として物理モデルの検討を行った。図 4 に物理モデルのイメージを示す。物理モデルは計算開始時に設計仕様から塔特性を算出する塔特性算出部と計算時間間隔毎に計算を行う差分による演算部から構成される。塔特性算出部では(3)式より冷却水出入口温度、外気湿球温度、水空気比により塔特性を算出する。

差分による演算部では、(5)式を差分法で解くことにより、出口水温及び出口空気エンタルピーを算出する。

$$C_l \frac{\partial t_l}{\partial \xi} = -\frac{1}{N}\frac{\partial h}{\partial \varsigma} = -\frac{U}{N}(h_l - h) \quad \cdots(5)$$

ここで、$\xi = x/Xd$、$\varsigma = z/Zd$

物理モデルは流量・変風量制御に柔軟に対応可能で、かつ白煙防止タイプなど将来のモデル化も可能と思われる。また、将来充填材の性能向上により、塔特性が大きく向上した場合でも物理モデルは対応可能であることから汎用性が高いモデルといえる。

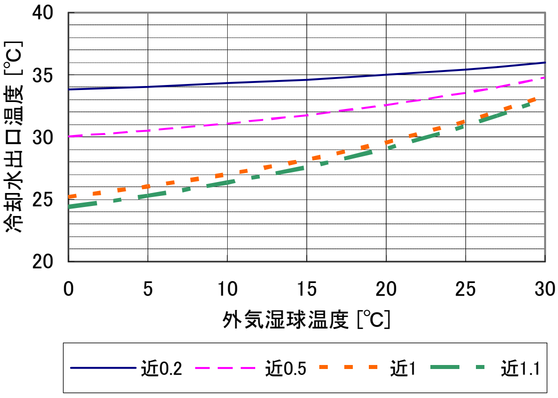

図 2 変風量時の冷却水出口温度

（圧縮用、開放型、冷却水入口温度 37℃）

※凡例は、近 : 近似式モデル、数字は定格に対する風量比

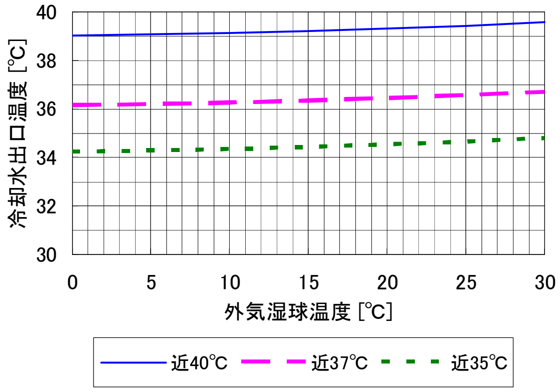

図 3 ファン停止時の冷却水出口温度（圧縮用、開放型）

※凡例は、近 : 近似式モデル、温度は冷却水入口温度

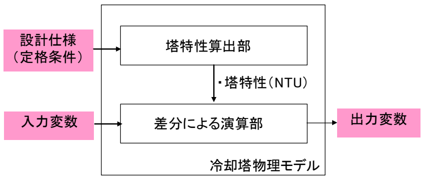

図 4 物理モデル計算イメージ

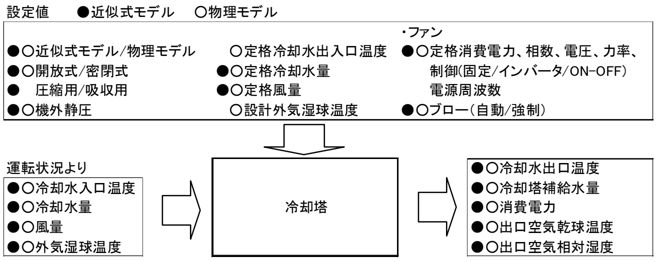

図 5 冷却塔モデルの入出力

2. 入出力項目

冷却塔モデルの入出力項目を図 5 に示す。物理モデルでは塔特性を決定する計算のため、冷却水量や風量など

の定格条件が必要となる。近似式モデルでも定格値に対する風量比、水量比の算出等に定格条件を用いるため、入出力項目については近似式モデルの場合と同様となる。

３．物理モデルの精度検証

物理モデルの計算精度を確認するため、近似式モデルとの比較を行った。計算ケースはこれまで特性式化した定格時、変流量時、変風量時、ファン停止時の４ケースについて検討を行った。近似式モデル、物理モデル共通の計算条件を**表１**に示す。なお、**表１**の冷却塔は１.４節で述べた平均的な冷却塔と仕様が一致しており、塔特性も近似式の固定値と等しい。

表１　計算条件

項　目	仕　様	単位
熱交換方式	直交流型	―
冷却能力	680	(kW)
循環水温度条件 （設計入口温度－設計出口温度）	37.0-32.0	(℃)
設計外気温度条件	27	(WB　℃)
循環水量	117	(m^3/h)
塔内損失水頭	40	(kPa)
ファン風量	1020	(m^3/h)
ファン台数(台)	1	(台)
電動機消費電力	3.8	(kW)
循環水保有水量	1.26	(m^3)

図６に冷却水入口温度が変動した場合の湿球温度と出口水温の関係を示す。物理モデルで算出した冷却水出口温度が近似式モデルの計算結果とほぼ一致しており、と高い相関を示した。**図７**は冷却水流量が変動した場合、**図８**はファン風量が変動した場合の計算結果である。計算結果のずれは最大 0.6℃程度と定格時に比べてやや大きいが、十分な精度であることを確認した。定格時に比べて計算結果のずれが大きくなるのは、定格時に塔特性が一定であるのに対して変流量、変流量には塔特性も変動するためと考えられる。**図９**はファン停止時の湿球温度と出口水温の関係を示す。物理モデルの風量を０とした場合、全体的に冷却水出口温度の値がずれてしまうが、冷却塔への外気流入を定格風量の 3%程度見込んだ場合、近似モデルの計算結果にほぼ一致した（**図９**は 3%とした計算結果）ため、自然対流分として 3%を見込むこととした。

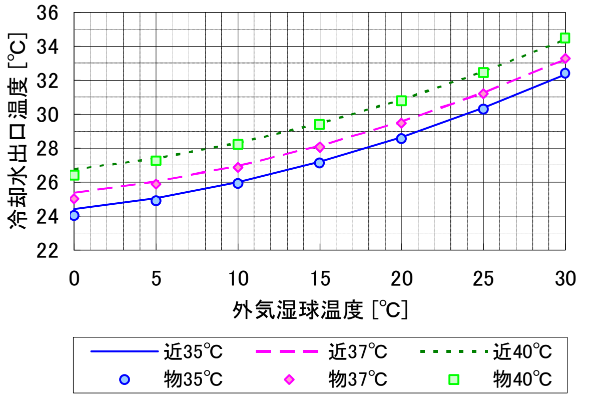

図６ 定格時の冷却水出口温度（圧縮用、開放型）

※ 凡例は、近：近似式モデル、物：物理モデル、温度は冷却水入口温度

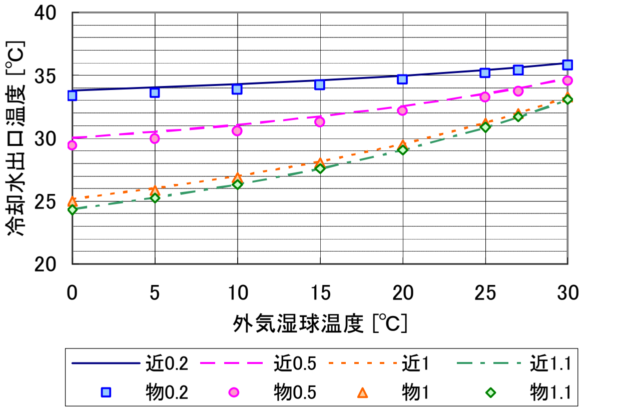

図８ 変風量時の冷却水出口温度

（圧縮用、開放型、冷却水入口温度 37℃）

※凡例は、近：近似式モデル、物：物理モデル、数字は定格に対する風量比

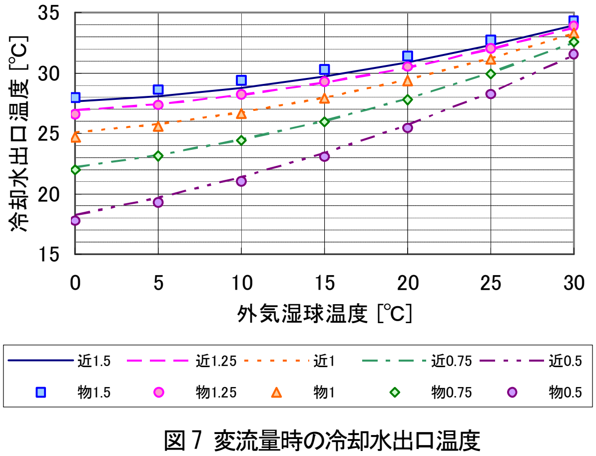

図７ 変流量時の冷却水出口温度

（吸収用、開放型、冷却水入口温度 37.5℃）

※凡例は、近：近似式モデル、物：物理モデル、数字は定格に対する流量比

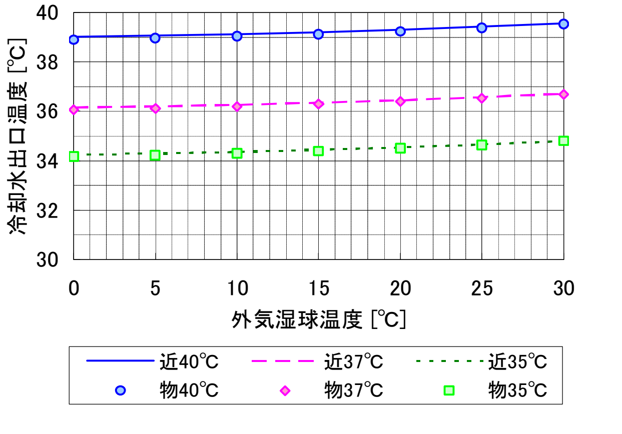

図９ ファン停止時の冷却水出口温度（圧縮用、開放型）

※凡例は、近：近似式モデル、物：物理モデル、温度は冷却水入口温度

４．定式化状況

冷却塔の定式化項目と状況を表２に示す。

計算が容易な近似式モデル、詳細検討を行う物理モデルを並行して定式化を行っており、直交流型の主要な４タイプについては既に定式化を終了した。ある程度汎用的な検討が現段階でも対応可能であるが、未対応となっている白煙防止タイプや寒冷地型の定式化についても今後整備を進める予定である。

また、冷却塔は設置位置や遮音壁・スタックの有無によってショートサーキットが生じ性能が大きく変化するため、それらの影響を加味した定式化が必要である。今後、表３に挙げた項目についても物理モデルを用いたCFD検討等により、拡充を行う予定である。

表２ 冷却塔特性定式化のフレーム構成と状況

タイプ			運転制御	状況※1
開放式	遠心冷凍機用	超低騒音型	定格	●○
			変流量	●○
			変風量	●○
			ON/OFF	●○
		白煙防止型	4制御※2	△
		寒冷地型	4制御※2	△
	吸収冷凍機用	超低騒音型	定格	●○
			変流量	●○
			変風量	○
			ON/OFF	●○
		白煙防止型	4制御※2	△
		寒冷地型	4制御※2	△
密閉式	遠心冷凍機用	超低騒音型	定格	●○
			変流量	●○
			変風量	○
			ON/OFF	●○
		白煙防止型	4制御※2	△
		寒冷地型	4制御※2	△
	吸収冷凍機用	超低騒音型	定格	●○
			変流量	●○
			変風量	○
			ON/OFF	●○
		白煙防止型	4制御※2	△
		寒冷地型	4制御※2	△

※1 ●近似式モデル定式化終了、○物理モデル定式化終了
△物理モデルにて検討中（2010年5月現在）

※2 4制御：定格、変流量、変風量、ON/OFFの4つ

表３　設置状況を考慮したショートサーキット率の定式化項目

高層棟屋上/低層棟屋上
遮音壁の有/無
ルーバーの有/無
ファンスタックの有/無
上記4項目それぞれにおける風向・風速の影響

まとめ

BEST における冷却塔の機器特性の定式化について報告した。

変風量特性を追加し、ある程度汎用性の高い検討が可能となったが、白煙防止型などニーズの高い特性が未だ未整備となっている。冷却塔の高効率な運用は、熱源システムのCOP向上に大きく貢献するため、引き続き冷却塔のタイプと機能の拡張を実施する予定である。

また、本報では従来の近似式モデルの課題を解決案として物理モデルを新たに検討した。詳細計算の精度を高めたい場合は物理モデルには有効であると考えられるが、ある程度の精度があれば良い場合は、今後も近似式モデルが重宝されると考えられる。それぞれのモデルの長所、短所を見極めながら、どのような使い方をしていくか、検討を重ねる必要がある。

【参考文献】

1) 丹羽勝巳ほか，外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その32）機器特性の概要，平成19年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集，2008.8

2) 手塚俊一、藤田稔彦：湿り空気線図とその応用(4)冷却塔(その1)、空気調和・衛生工学 第58巻 第3号、(1984)、pp.65-66

3) 手塚俊一：冷却塔概論、空気調和・衛生工学 第52巻 第4号、(1978) 、pp.5-6

【謝辞】

本報は、(財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BESTコンソーシアム」・「BEST企画委員会(村上 周三委員長)」および専門版開発委員会(石野 久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本 雄三委員長)、機器特性SWG(柳井崇主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。機器特性SWG名簿(順不同)　主査：柳井崇(日本設計)、幹事：藤居 達郎(日立製作所)　委員：阿部 裕司(竹中工務店)、石野 久彌（首都大学東京大学院)、工月 良太（東京ガス)、熊谷 雅彦（東京電力)、後藤 裕（三機工業)、品川 浩一（日本設計)、丹羽 勝巳（日建設計)、野原 文男（日建設計)、助飛羅　力（三機工業)、伊藤 祥一（日建設計)、村上 高（東京ガス)、オブザーバー：三沢 健(日本設計)、事務局：生稲 清久 (財)建築環境・省エネルギー機構

また、各種機器特性のデータ収集、モデル化に当たっては、日本冷却塔工業会技術委員会の協力を得た。