密閉式冷却塔によるフリークーリングの実験と計算方法に関する研究

STUDY ON THE EXPERIMENT AND CALCULATION METHOD OF FREE COOLING SYSTEM WITH EVAPORATIVE COOLING TOWER

ヤン イェンリン^{*1}, 狩野 直樹^{*2}, 水野 慶蔵^{*3}, 川津 行弘^{*1}
横尾 昇剛^{*4}, 岡 建雄^{*5}

YAN Ying Lin, Naoki KARINO, Keizou MIZUNO,
Yukihiro KAWADU, Noriyoshi YOKOO and Tatsuo OKA

Free cooling system is an energy saving system without chiller operation when the ambient temperature is relatively low and building needs the chilled water for cooling. The prediction method for free cooling performance is described in this paper with the theoretical formulae. The water temperature and the quantity of flow were measured in summer and winter in order to derive the parameters of the evaporative cooling tower. The predicted inlet and outlet water temperatures were agreed well with the measurement and it also shows the free cooling system with evaporative cooling tower may be available in Japan.

Keywords: Experiment, Analysis, Free Cooling, Evaporative Cooling Tower, Cooling Water Temperature
実験, 理論解析, フリークーリング, 密閉式冷却塔, 冷却水温度

1. はじめに

冬季や中間季においても相当量の冷房負荷が発生する建物では冷却塔だけを運転して冷却水を直接、冷房に使用するフリークーリングシステムは省エネルギー効果の大きい手法である。

フリークーリングは電算センター等で実施された経緯が多くあり、矢崎、武田、龍、松本、清水、村上、吉田、八乙女、野部らはフリークーリングシステムに関する研究成果を報告している^{(1)~(5)}。この中で矢崎らは外気湿球温度と冷却水の温度を求め、実測値と計算値を比較している。龍はフリークーリングの電力量を冷凍機と比較して、その省エネルギー量を求めている。清水らは外気湿球温度と冷却水の実測温度を比較し、一次式の関係にあることを示している。また、八乙女、野部らの研究はフリークーリングシステムを空調システムに組み入れ、総合的な省エネルギー効果を試算している。西村は密閉式冷却塔を対象にフリークーリングの冷却水温度を予測できる推定表を経験値として提案している⁽⁶⁾。

冷却塔に関する理論研究、実験研究は井上市市、内田秀雄らにより成し遂げられてきたが^{(7),(8)}、手塚俊一は藤田稔彦らとの共著で我が国における冷却塔の理論と実験の体系を完全な形でまとめ上げている⁽¹²⁾。本報告もこの理論体系に従って、市販冷却塔の実験、分析を行い、密閉式冷却塔によるフリークーリングの適用性

を論じたものである。

筆者らはこれまで開放向流型冷却塔によるフリークーリングの実験と計算方法を研究してきた⁽¹³⁾。本研究は、市販の密閉式冷却塔を対象に、①冷却塔の定格時の仕様（カタログ値）から必要な定数を算出し、任意の外気温湿度、冷却負荷、冷却水量が与えられた場合の冷却水温度を予測する計算方法を示す、②実験値と計算値を比較し、計算方法の妥当性を明らかにする、③外気湿球温度と建物負荷から冷却水温度を求める簡易式を提案すると共に、フリークーリングによる省エネルギー効果を試算する、ことを目的とした。

本実験はフリークーリングを目的とした研究であるが、カタログ値以外の夏季における外気条件、冷却熱量においても実験値に追従できるかどうか確認するために夏季実験を10ケース行い、採用した実験定数の妥当性を検討した。冬季における実験では異なった外気条件や冷却熱量による実験6ケースの他、5時間連続したフリークーリングの実験を行い、計算値と比較した。

なお本実験は京都市で行ったため、フリークーリング時の氷結は実験的には観察されなかった。氷結は準寒冷地、寒冷地では大きな問題であるが、本実験で扱えなかった事象であり、今後の大

^{*1} 宇都宮大学工学部研究科

^{*2} (株)きんでん 工博

^{*3} (株)きんでん

^{*4} 宇都宮大学工学部 准教授・工博

^{*5} 宇都宮大学工学部 教授・工博

Candidate for the Ph. D., Utsunomiya University

Kinden, Ph. D.

Kinden

Assoc. Prof., Utsunomiya University, Ph. D.

Prof., Utsunomiya University, Ph. D.

きな課題である。本実験機の循環水部分は閉回路であるが、散布水部分は開放となっており、準寒冷地、寒冷地では氷結の問題は大きく、幅広くフリークーリングの普及を図るには今後、準寒冷地での実験が必要不可欠である。

2. 実験概要

2-1 実験装置

22.7kWの冷却能力を持つ密閉式冷却塔を実験に使用した(図1、表1)。模擬冷却負荷として、最大出力42kWの電気ヒータを組み込んだ縦型水槽を設置し、実験条件に従って制御した。なお冷却塔循環水は水道水を使用した。散布水も含めて、不凍液を使用することもあるが、近隣への飛散等で市街地地域では使用が制限されることが多いのが実情である。

2-2 実験条件

(1) 夏季

夏季実験における実験条件を示す。各測定時間は1時間である(表2、3、図3に対応)。

①循環水量：定格3900、3120kg/h

②冷却塔入口水温：39、37、36℃

(2) 冬季

冬季実験において循環水量と模擬冷却負荷を変化させた場合の実験条件を示す。各測定時間は1時間であり、冷却塔入口、出口水温を測定した(表4、図4に対応)。

①循環水量：定格3900、3120kg/h

②模擬冷却負荷：12、18kW

冬季実験において循環水量と模擬冷却負荷を固定させ、外気条件の変動に従った場合の実験条件を示す。各測定時間は6時間であり、冷却塔入口、出口水温を測定した(図5、6、7に対応)。

①循環水量：3900kg/h

②模擬冷却負荷：18kW

3. 冷却水温度の計算

3-1 記号一覧

下記に記号一覧を示す。図2には冷却水温度とエンタルピの状態変化と使用した記号の関係を示す。

A：充てん材の断面積 (m²)

C₁、α₁、α₂、α₃、β：実験定数 (—)

C_p：空気比熱 (kJ/kg℃)

C_w：冷却水比熱 (kJ/kg℃)

h₁：空気エンタルピ (kJ/kg)

G：冷却塔風量 (kg/h)

h₁、h₂：冷却塔出口、入口の空気エンタルピ、(kJ/kg)

L：散布水流量 (kg/h)

q：冷却塔負荷 (kJ/h)

t_a：外気温度 (℃)

t_w：冷却水温度 (℃)

t_{w1}、t_{w2}：冷却塔入口出口水温 (℃)

W：冷却水流量 (kg/h)

xa：充填材容積当たりの熱伝達係数 (kJ/h m³ Δh)

Z_a：充てん材の高さ (m)

γ：空気比重量 (kg/m³)

3-2 計算式

文献⁽⁹⁾によると、密閉式冷却塔の場合も近似的には開放式冷却塔と同様の式が使用できるとされており、手計算による近似解法として次式が提案されている(記号は図2を参照)。

$$xa = G / AZd \int_{h_1}^{h_2} dh(hw - h) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$xa \div W / AZd \int_{hw1}^{hw2} -Cwdtw / (hw - h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

xaの実験結果から、散布水量 (L/A)、風量 (G/A)、冷却水量 (W/A)、冷却入口水温 (t_{w1}) の関数として、熱交換器の形式ごとに式(3)で表されるとしている^{(10)~(12)}。

$$xa = C_1 (L/A)^{\alpha_1} (G/A)^{\alpha_2} (W/A)^{\alpha_3} t_{w1}^{\beta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

文献^{(10)~(12)}に従い、α₁=0.45、α₂=0.3、α₃=0.25とする。文献^{(10)~(12)}では冷却水温度29～35℃の実験結果からβ=-0.75としているが、冷却水出口温度が5.4℃まで低下する本実験におけるフリークーリングの温度範囲では、β=-0.25とした方が実験結果によく追従できたので、本研究ではβの数値のみ-0.25として計算を行っている。βの値を実験に基づいて直接、導くのは難しいので、本研究では実験値と計算値が最も一致する値として求めた。参考資料として巻末にβの値を変化させた場合の冷却塔入り口、出口水温の変化を示す。xaは式(2)から求められているので、式(3)から定数C₁を計算できる。ただし本実験においてはL、Aは固定であり、Wの変化も小さいために、(L/A)^{α₁}、(G/A)^{α₂}、(W/A)^{α₃}の項はほとんど定数に近い数値となっている。

3-3. 計算方法

(1) 市販の冷却塔の xa 値の計算

本計算手法においては、冷却塔の仕様から xa を逆算し、その xa を使用して気象条件や負荷率等の与条件が変化した場合の冷却塔入口水温および出口水温を予測する。

$$h_1 = q / (C_p \gamma G) + h_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで計算する冷却水温度の温度幅を0.05℃として、式(2)の右辺を計算する。式(5)は式(2)に相当している。

$$xaZd / (W/A) = \sum_{i=1}^{i=i_{max}} -Cw \Delta tw / (hwi - hi) \quad \dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} i_{max} &= (t_{w1} - t_{w2}) / 0.05 \\ \Delta t_w &= (t_{w1} - t_{w2}) / i_{max} \end{aligned}$$

A、Zd、Wはカタログ値から得られ、式(5)から xa の値が得られる。次いで式(3)から C₁ が得られる。

(2) 与条件が変化する場合の計算

冷却塔の熱平衡式では、冷却塔の出口水温 t_{w2} [℃] を仮定する。

ただし、

$$t_a - 5 < t_{w2} < t_a + 10 \quad \dots\dots (6)$$

の範囲とする。t_aは外気温度[℃]である。熱負荷qからt_{w1}は以下の数式で求められる。

$$t_{w1} = t_{w2} + q/CwW \quad \dots\dots (7)$$

式(6)、(7)によって計算されたt_{w1}、t_{w2}を使用して、式(5)の右辺を計算し、新しい与条件で式(3)から計算されたxaを使用した左辺の値と比較する。左辺の値が大きければ、t_{w1}、t_{w2}を小さく想定し直す。右辺の値が大きければ、t_{w1}、t_{w2}を大きく想定し直す。このように収束法で冷却負荷が、空気側から計算した値と冷却水側から計算された値

図1 実験装置（冷却塔と電気ヒータ）

表1 冷却塔仕様

冷却能力(kW)	22.7
入口水温(℃)	37
出口水温(℃)	32
外気湿球温度(℃)	27
冷却水量(kg/h)	3900
送風機(kW)	2
風量(m ³ /h)	7300
散布水ポンプ(kW)	0.5
高さ(m)	1.79
奥行×巾(m)	1.27

図2 t-h線図上の状態変化と記号

表2 夏季における実験値と計算値の比較
(冷却塔循環水量3900kg/h)

冷却塔能力 (KJ/h)	43198	64797	111386	109745	83537
外気温度 (℃)	32.6	31	29.4	28.6	34
冷却塔入口水温 (実験値、℃)	30.9	33.8	39	37.8	35.6
冷却塔入口水温 (計算値、℃)	30.4	32.9	39.3	38.2	35.5
冷却塔出口水温 (実験値、℃)	28	29.5	32.2	31	30.5
冷却塔出口水温 (計算値、℃)	27.8	28.9	32.5	31.5	30.4
入口空気エンタルピ (KJ/kg)	76.6	75.3	78.7	73.3	76.6

表3 夏季における実験値と計算値の比較
(冷却塔循環水量3120kg/h)

冷却塔能力 (KJ/h)	64797	43198	110071	91729	78623
外気温度 (℃)	32.2	36	33	35.4	32
冷却塔入口水温 (実験値、℃)	35.5	31.7	40	37	36
冷却塔入口水温 (計算値、℃)	34.1	32.2	40.4	37.6	35.8
冷却塔出口水温 (実験値、℃)	30.1	27.9	31.6	30	30
冷却塔出口水温 (計算値、℃)	29.2	28.9	32	30.6	29.8
入口空気エンタルピ (KJ/kg)	77.0	82.0	76.6	74.9	75.3

図3 冷却塔出入口水温に関する計算値と実験値との比較（夏季）

表4 冬季における実験値と計算値の比較

冷却塔能力 (KJ/h)	58320	58320	58320	38880	38880	38880
外気温度 (℃)	13.8	6.6	6.7	4.6	5.7	3.7
冷却塔入口水温 (実験値、℃)	17.7	14.0	15.1	8.9	8.4	8.5
冷却塔入口水温 (計算値、℃)	18.1	14.2	14.6	9.2	8.9	8.8
冷却塔出口水温 (実験値、℃)	14.1	10.4	10.6	6.4	6.0	5.6
冷却塔出口水温 (計算値、℃)	14.1	10.1	9.5	6.9	6.4	5.4
入口空気エンタルピ (KJ/kg)	20.9	12.1	10.5	10.0	9.6	7.5
冷却水量 (kg/h)	3900	3900	3120	3900	3900	3120

図4 冷却塔出入口水温に関する計算値と実験との比較 (冬季)

図5 外気温が高い日の実験 (2002/12/24)

図6 外気温が変化した日の実験 (2002/12/26)

図7 外気温が低い日の実験 (2003/1/15)

図8 外気湿球温度、負荷率と冷却塔出口水温

が一致するように冷却水出入口水温を求めていく。経験的なことではあるが、安定した解を得るには Δt_w を 0.05°C 以下にし、収束方法も水温想定値を少しずつ変化させていくと、本実験の範囲においては常に安定した解を得ることが可能になった。

4. 実験値と計算値の照合

4.1 夏季

カタログ値から冷却塔緒元を計算すると、 $x_a=13.4 (\text{kJ/h m}^3 \Delta h)$ 、冷却塔断面積 $=1.10 \text{ m}^2$ 、高さ $=0.68 \text{ m}$ となった。夏季における冷却水の出入口水温を計算し、実験値と比較した結果を表2～3に示す。計算値は設計実務に用いるのに概ね十分な精度で実験値に追随している結果が得られた。

夏日を外気温 25°C 以上の天候とすると、本実験では 28.6°C までの外気温度までの実験となっているので、データとしては不足するが、図3から外気温 28.6°C から 36°C の範囲で、実験と計算値は実用上一致しているので、外気温 25°C においても一致すると推定した。

4.2 冬季

冷却水の出入口水温を計算し、実験値と比較した(表4)。図4は冷却塔出入口水温の実験値と計算値を比較したものである。実験値と計算値は概ね一致している。

図5～7は冷却水量 3900 kg/h 、模擬冷却熱量 18 kW として、外気温に従って6時間フリークーリングの実験を行った結果である。図5は外気温と冷却塔水温が高い場合、図6は外気温が実験途中で大きく変化した場合、図7は外気温と冷却塔水温が低い場合のものである。いずれも実験値と計算値は概ね一致しており、計算式は実用に耐えるものと判断した。

5. 密閉式冷却塔の冷却負荷率、冷却水量と冷却水温度

図8は冷却水循環水量を定格(100%)とした場合の外気湿球温度と冷却水出口温度の関係を計算したものである。表5に示す係数と簡易計算式により、外気湿球温度、部分負荷率、冷却水量から冷却塔出口水温が計算できる。精密な計算結果と比較して、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の誤差があるが、実用上は十分な精度である。文献⁽⁹⁾に密閉式冷却塔の出口水温に関する経験的な推定表が示されている。本研究は1例の実験結果であったので、他の冷却塔にも使用できるかどうかを確認するために推定表と比較した(表6)。その結果、両者は $-0.7 \sim +1.2^\circ\text{C}$ の差異に収まり、本計算式は他の冷却塔にも実用上、使用できると推定した。

6. フリークーリングの効果試算

年間24時間運転を行う $4,995 \text{ m}^2$ の事務所ビルを大阪に建設したと想定して、熱負荷計算を行い、フリークーリングの効果を試算した。内部負荷は照明 20 W/m^2 、機器 15 W/m^2 とし、負荷計算にはHASP/ACLDを使用した。表7に建物の前提条件概要を示す。熱源はCOP1.35のガス吸収冷凍機と密閉式冷却塔を組み合わせたシステムとした。表7に冷却塔出口水温と相当する年間の時間数、冷房負荷を示す。表8に対象とした事務所ビルの月別熱負荷とフリークーリングによる冷却負荷を示す。主として冬季なのでフリークーリングが可能であるとした冷却水出口温度上限を 12°C とした。この場合、表9から年間冷房負荷の24%をフリークーリングで賄う可能性があることが示された。

表5 冷却塔出口水温の簡易計算式と定数

冷却水量	F1		F2	
	a1	b1	a2	b2
100%	-0.34	1.12	10.9	-0.66
75%	-0.38	1.11	12.0	-0.55
50%	-0.45	1.11	13.5	-0.25

$F1=a1 \times \text{負荷率} + b1$ $F2=a2 \times \text{負荷率} + b2$ 負荷率: 0~1 の値
(簡易計算式) 冷却水出口水温 $t_{w2} = F1 \times \text{外気湿球温度} + F2$

表6 本研究と推定表⁹⁾の冷却塔出口水温の比較

外気温(°C)	1	3	5	7	9	11	13	15
本研究(負荷率100%)	8.6	9.9	11.3	12.6	13.9	15.1	16.4	17.6
推定表(負荷率100%)	9.8	11	12.1	13.6	14.5	16	-	-
本研究(負荷率60%)	3.9	5.6	7.2	8.8	10.3	11.7	13.2	14.6
推定表(負荷率60%)	-	-	-	8.1	10.9	12.2	13.6	14.8

表7 建物負荷計算の前提条件概要

建物用途	事務所
延べ床面積	4,995m ²
空調時間	年間24時間運転
外気導入量	4m ³ /m ²
人体	0.1人/m ²
照明発熱	20W/m ²
器具発熱	15W/m ²
夏季室内条件	26°C50%
中間期室内条件	24°C50%
冬季室内条件	22°C50%

表8 冷却塔出口水温とフリークーリングの時間数、処理負荷

冷却塔出口水温(°C)	時間数(h)	負荷(GJ)
~6	1217	395
6~7	695	278
7~8	248	92
8~9	248	107
9~10	310	153
10~11	306	146
11~12	210	87
12~	5526	4082
計	8760	5340

表9 月別冷房負荷とフリークーリングの処理負荷

(単位: GJ)		
月	冷房負荷	フリークーリング負荷
1	271	271
2	245	245
3	316	316
4	386	0
5	494	0
6	533	0
7	675	0
8	710	0
9	579	0
10	480	0
11	357	133
12	294	294
計	5340	1259

7. 結論

本研究はフリークーリングを対象として、実験と理論計算により密閉式冷却塔の仕様からフリークーリングの冷却性能を計算することを目的にしたものである。得られた結果を要約すると、

- 1) 密閉式冷却塔に関する理論式をフリークーリングに適用し、冷却塔出入口水温を計算する手法を示した。外気条件、冷却水循環水量、冷却塔出入口水温、冷却熱量を測定して、密閉式冷却塔に必要な実験定数を得た。この実験定数と計算式から冷却水出口温度を予測できることを示した。
- 2) 冬季におけるフリークーリングを模擬した実験値を計算値と比較すると、誤差はほぼ1°C以下に収まり、実用上の精度は確保されたと考えた。推定表による冷却水温度とも比較し、本計算方法による冷却水出口水温の予測が精度上、実用的であると推定した。
- 3) 外気湿球温度と負荷率から冷却塔出口水温を実用的に計算する簡易式を示した。
- 4) 年間24時間運転の事務所ビルを対象にフリークーリングの効果を試算したところ、年間冷房負荷の24%を賄うことができると予想された。

今後は実際の建物に設置されたフリークーリングの性能についてまとめていく予定である。また本実験においては氷結は観察されず、本論文でも扱うことができなかったが、氷結はフリークーリングの最大の問題でもあり、今後の課題として研究していく予定である。

謝辞

本実験を行うに当たり、実験装置の製作、運転を行って頂いた鈴木亮二先生(当時(株)きんでん、故人)に深謝致します。

参考文献

- 1) 矢崎他: 都市型地域冷暖房に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1109-1112、1992
- 2) 龍他: 密閉式冷却塔を用いたフリークーリング実施例、空気調和・衛生工学、第63巻、第7号、1989
- 3) 清水等: 中日新聞社豊田印刷工場のフリークーリングと温悦環境の評価、第68巻、第12号、1992
- 4) 八乙女他: 電算室の省エネルギー手法に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.197-200、1996
- 5) 野部等: オフィスのフリーエアクーリングについての考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、D、pp.579-580、1986
- 6) 西村辰朗: 密閉式冷却塔による冷水発生運転、日本BAC株式会社、2000、6
- 7) 井上市市: 空気調和ハンドブック、丸善、pp.254-259、1982
- 8) 内田秀男: 「湿り空気と冷却塔」裳華房、1981
- 9) 手塚俊一、藤田稔彦等: 空気調和・衛生工学便覧、空気調和・衛生工学会、オーム社、pp. II 488-510、1991
- 10) 手塚俊一他: 蒸発冷却器の性能(第1報)、冷凍、第47巻第538号、1972.8
- 11) 手塚俊一: 蒸発冷却器の性能(第2報)、冷凍、第47巻第541号、1972.12
- 12) 手塚俊一: 蒸発冷却器の性能(第3報)、冷凍、第48巻第546号、1973.4
- 13) 狩野、岡他: 開放式向流型冷却塔によるフリークーリングに関する研究、空気調和衛生工学会論文集、No.94、pp43-50、2004.7

参考: β を -0.25 ~ -0.75 に変化させた場合の冷却水温度の計算値を表(参考-1)に示す。 $\beta = -0.25$ の場合に実験値と計算値が比較よく一致するので、 $\beta = -0.75$ とすると、フリークーリング時の計算値が実験値より1.5~2°C程度低くなることになる。

表(参考-1)

外気条件	β 値	-0.25	-0.50	-0.75
36°C50%	入口水温(°C)	37.0	37.0	37.0
	出口水温(°C)	32.0	32.0	32.0
30°C50%	入口水温(°C)	26.2	26.0	25.8
	出口水温(°C)	24.6	24.4	24.1
20°C50%	入口水温(°C)	18.8	18.2	17.7
	出口水温(°C)	17.2	16.6	16.1
15°C50%	入口水温(°C)	15.1	14.3	13.6
	出口水温(°C)	13.5	12.7	12.0
10°C50%	入口水温(°C)	11.3	10.2	9.2
	出口水温(°C)	9.7	8.6	7.6

(2007年5月9日原稿受理、2007年11月19日採用決定)