

工業用冷却塔

Cooling Tower for Industrial Use

(冷)生産部 技術課
吉川 洋 征
Hiroyuki Yoshikawa

This paper describes the basic theory and changes of cooling tower and will continue 2 or 3 times in series.

A basic principle of cooling water by ambient air is common to counterflow and crossflow cooling tower. It is possible to calculate tower characteristics of counterflow cooling tower by simple numerical integral method. On the other hand, characteristics of crossflow cooling tower is calculated 2 dimensionally using FEM method and consequently an electronic computer is used.

まえがき

当社が冷却塔の製造販売を開始してから25年になる。この間、石油化学、鉄鋼などを中心としたユーザニーズとも合致して当社の冷却塔は販売を伸ばしてきたが、重厚長大の製造業の例にもれずオイルショック、ドルショックさらには円高と次々とおしよせる荒波にも、もまれてきた。

冷却塔の生命の一つである充填材も、木製からプラスチックシートによる高能率なものへ、さらに騒音対策を施した冷却塔から最近では白煙対策も考慮したものまでと、その要求も多様化し、またこれらに答えるべく当社も経験を重ね、技術を蓄積してきた。

そこで25年の経過を振り返って、もう一度冷却塔の技術を基礎から見つめなおし、今回、冷却塔の発展、現状についてまとめて紹介する。

1. 冷却塔の基礎概念

1.1 水を冷やす原理

冷却塔は冷凍機用冷却水あるいは各種産業プロセス用冷却水を空気により冷却する熱交換器の一種で

- (1) 水の蒸発による潜熱移動 (全体の約75~80%)
- (2) 空気との温度差による顕熱移動 (全体の約20~25%)

により水を冷却する装置で、わかり易く言えば熱いお茶を息を吹きかけて冷やす原理を応用した装置と言える。

この原理は冷却塔の中核をなすもので冷却塔はいかに効率良く水と空気を熱交換させるかに腐心してきたわけである。

1.2 湿球温度

湿球温度は通常第1図に示すような乾球温度と湿球温度を計る2つの温度計のついた計器、乾湿球温度計で測定される。湿球温度計下部の湿球部はその名のごとく水をしみこませた薄いガーゼでくるまれているが、よく見ると常に乾球温度計より低い値を示している。

湿球部の水分が蒸発することにより湿球部は周囲より温度が下り、今度は湿球部より高温の周囲空気より熱供給を受け、この熱授受が釣りあいを保った状態が湿球温度である。(第2図の t' °C)

但し乾湿球温度計預部のゼンマイまたはモータによりファンをまわし湿球部の通過空気速度を2.5 m/s以上(計

器メーカーにより多少異なる)に保たないと正しい湿球温度を示さないのに注意を要する。

1.3 周囲空気より低い温度まで冷却可能な理由

冷却塔を用い、例えば周囲空気が33°Cの時でも30°Cまで水を冷却できる場合がある。

冷却塔循環水の一部が蒸発すると、蒸発熱によりその温度が下るが、非常に長時間空気と接触を続けると、湿球温度計の湿球部と同じ原理で湿球温度まで冷却され、空気と熱授受の釣りあいを保つ。実際は経済的観点から水と空気の割合、冷却塔の大きさを選び設計するので、接触時間も限られ湿球温度までは冷却されない。

わが国の夏季で周囲空気が33°C、湿度63%の状態は湿球温度が27°Cとなり、この空気に冷却される水は27°C近く30°C程度まで冷却可能なわけである。

1.4 冷却塔熱交換式

$$C_e \cdot L \cdot \Delta T_w = G \Delta i \quad (1)$$

$$G \Delta i = K_a \cdot (i_w - i) \cdot V \quad (2)$$

$$K_a V / L = \int \frac{dT_w}{i_w - i} \quad (3)$$

ここに

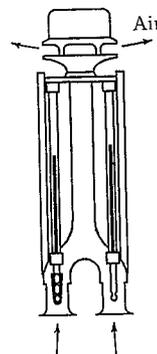
C_e : 水の比熱 kcal/kg °C

L : 水量 kg/h

G : 乾き空気量 kg/h

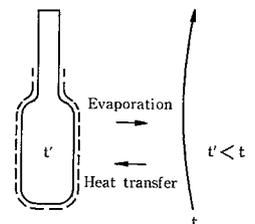
$i, \Delta i$: 空気のエンタルピおよび増加量 kcal/kg

$T_w, \Delta T_w$: 水温および降下度 °C



第1図
アスマン式乾湿球温度計

Fig.1
ASSMANN'S aspirated psychrometer



第2図
湿球周囲の熱平衡

Fig.2
Heat balance between wet bulb and ambient air

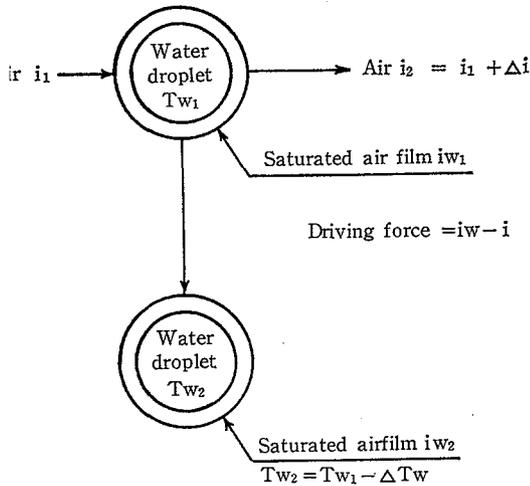


Fig. 3 Driving force for water cooling

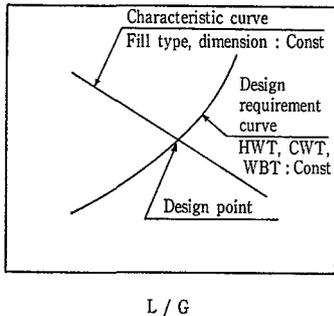


Fig. 5 Decision of design point

i_w : 水温 T_w の水滴周囲の飽和空気
のエンタルピー kcal/kg
 V : 充填材容積 m^3
 K : エンタルピー基準全熱伝達率
kcal/ $m^2 \cdot h \cdot \Delta i$
 Ka : エンタルピー基準総括熱伝達係数
kcal/ $m^3 \cdot h \cdot \Delta i$
 KaV/L : 塔特性値

(1)式は水の失う熱量と空気を得る熱量(エンタルピー増加量)が等しいことを示す。
(2)式は物質伝達(水分の交換)を伴う熱伝達における全伝熱量は、比例係数を Ka として水の周りの飽和空気のエントルピーと接する空気のエントルピーとの差 $i_w - i$ に比例することを示す。(第3図参照)

(3)式は、(1)式、(2)式より導かれるが、冷却塔設計上、重要なものである。充填材部の熱交換において Ka を一定と取り扱えることから KaV/L も運転状態が定まれば定値として定まることを示す。

5 向流式冷却塔の塔特性の計算 (CTIの方法)

当社における向流形冷却塔の性能解析においては、広域的にも用いられているCTIの方法によっているので、この方法を簡単に示す。

塔特性値 KaV/L は(3)式の右辺を積分すれば求められる、その数値積分の近似解法の一つがCTIの方法である。計算の具体例を第1表に示す。

1.6 直交流冷却塔の塔特性の計算 (当社開発の方法)

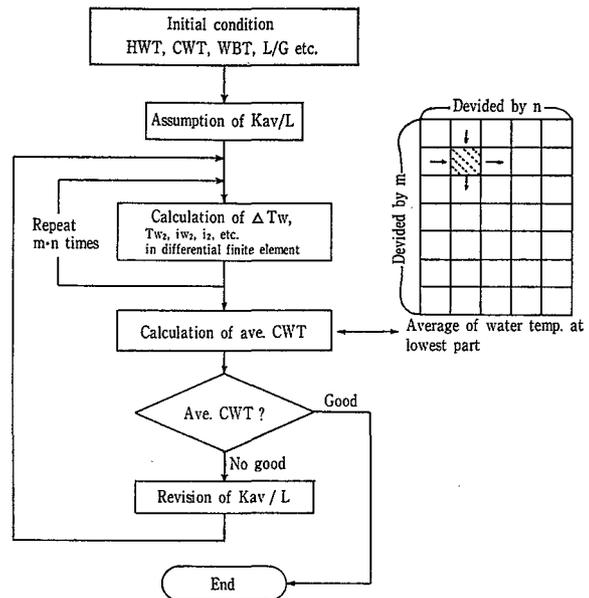


Fig. 4 Calculation method of KaV/L in crossflow cooling tower

第1表 向流形冷却塔における KaV/L の計算法

Table 1 Calculation method of KaV/L in counterflow cooling tower

$T(^{\circ}C)$	i_w	i_a (kcal/kg)	$\Delta i = i_w - i_a$
$T_2 = 32.00$		$i_1 = 20.297$	
$T_2 + 0.1 \cdot R = 33.05$	27.873	$i_1 + 0.1 \cdot R \cdot L/G = 21.452$	$\Delta i_1 = 6.421$
$T_2 + 0.4 \cdot R = 36.20$	32.729	$i_1 + 0.4 \cdot R \cdot L/G = 24.917$	$\Delta i_2 = 7.812$
$T_1 - 0.4 \cdot R = 38.30$	36.391	$i_2 - 0.4 \cdot R \cdot L/G = 27.227$	$\Delta i_3 = 9.164$
$T_1 - 0.1 \cdot R = 41.45$	42.624	$i_2 - 0.1 \cdot R \cdot L/G = 30.692$	$\Delta i_4 = 11.932$
$T_1 = 42.50$		$i_2 = 31.847$	

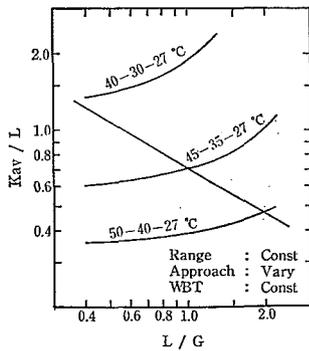
$$KaV/L = (T_1 - T_2) \cdot (1/\Delta i_1 + 1/\Delta i_2 + 1/\Delta i_3 + 1/\Delta i_4) / 4 = 1.251$$

$T_1 = 42.50^{\circ}C$ (HWT) $T_2 = 32.00^{\circ}C$ (CWT)
 $R = T_1 - T_2 = 10.50^{\circ}C$ $i_1 = 20.297$ kcal/kg
 $T_1 = 27.00^{\circ}C$ (WBT) $i_2 = i_1 + R \cdot L/G = 31.847$
 $L/G = 1.100$

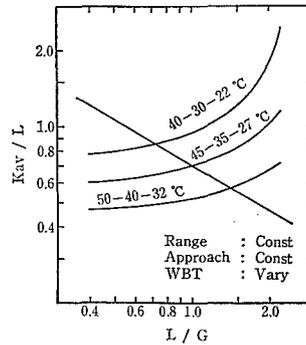
直交流冷却塔の塔特性値は充填材部を微小単位に分割し、各分割単位に基礎式を適用すれば良いが、境界の連続性を保つために二次元的に繰返し計算が必要である。したがって計算は電算機に頼らざるを得ない。電算機の普及以前は直交流熱交換器の設計手法を借用して近似的に計算された時期もあったが、現在は全て第4図に示す方法によっている。

1.7 冷却塔設計法

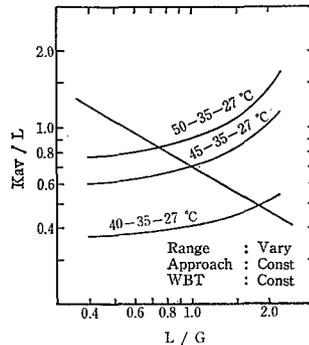
冷却塔を設計する場合、通常、次の4条件、すなわち循環水量、温水温度、冷水温度、湿球温度が基本条件として、客先より与えられ、これを満足する冷却塔の大きさ、送風機仕様等をメーカーが定めるのが一般的である。



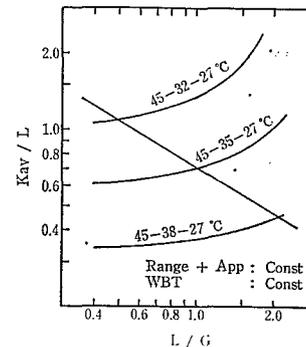
第6-1図
設計温度条件によるL/G変化
例1
Fig. 6-1
Relation-1 between L/G &
design temperature



第6-3図
設計温度条件によるL/G変化
例3
Fig. 6-3
Relation-3 between L/G &
design temperature



第6-2図
設計温度条件によるL/G変化
例2
Fig. 6-2
Relation-2 between L/G &
design temperature



第6-4図
設計温度条件によるL/G変化
例4
Fig. 6-4
Relation-4 between L/G &
design temperature

設計は、まず上の温度条件より水空気比L/Gを種々変化させてKaV/Lを求めると第5図の右上りの曲線が求められる。これを所要性能曲線と称している。一方、充填材の種類、大きさを定めて種々の温度条件、L/Gのもとで実験すると図の右下りの曲線が求められる。これを塔特性曲線と称しており、図の交点は設計条件を満足する水空気比を示す。上述のようにLは与条件として定まっているので、L/Gが求められるとGが決まり送風機仕様が定められる。この時、種々の塔要素の空気抵抗はやはり実験で求められている。

設計結果がほかの設地面積、騒音等の条件を満たさなければ、充填材仕様などを変更しチェックを繰返すことになる。この設計要領は向流形、直交流形とも変わらないが前述のようにKaV/L値の計算法はかなり異っている。

1.8 設計条件選定に際しての留意点

前述の方法で冷却塔が設計されるが、条件の選定に際して留意すべき点を設計温度条件45—35—27°Cを中心に向流形を例にとって説明する。但し以下の傾向は直交流の場合も変わらない。

第6-1~6-4図は、それぞれレンジ、アプローチ、湿球温度などの一部を固定し、一部を変化させた場合の設計点の変化を見るものである。これより経済設計の観点から冷却塔は

- (1) アプローチは大きい程良い。(最小3°C, 通常5°C以上)
- (2) レンジは水量一定ならばもちろん小さい方が良いが、熱負荷一定時も、レンジを小さく水量を大きくとる方がやや有利である。但し実用上は空気抵抗が増すので過度に水量は大きくとれない。
- (3) 湿球温度はアプローチ一定ならばむしろ高い方が良い。これは全体に温度の高い領域ほど、同じレンジに

対してもエンタルピー差、すなわち冷却推進力が大きいためである。

このほか、図には示されていないが、大気圧は低い方が水の蒸発が活発となり冷却性能上有利となるが、その程度は少ない。

以上のような性能上の特長があるので、夏場を考慮して設計した冷却塔は、冬期に余裕が生じる傾向があり(都市ガス用の場合は冬期に高負荷となる)、省エネ対策を施すことも多い。省エネに関しては後述する予定である。

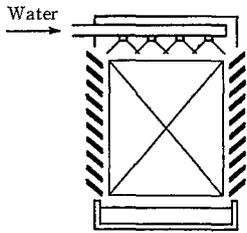
2. 冷却塔の種類と変遷

2.1 冷却塔の分類

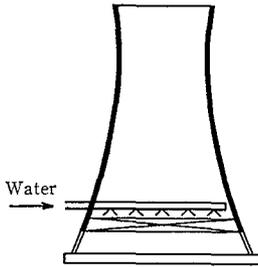
冷却塔を分類する時、種々の観点から分類することができるが、代表的な分類により冷却塔を見てみると

- (1) 通風方式により
 - 自然通風冷却塔
 - 強制通風冷却塔
- (2) 送風機の位置により
 - 吸引通風式冷却塔
 - 押込通風式冷却塔
- (3) 水と空気の流れの方向により
 - 向流冷却塔
 - 直交流冷却塔
 - 斜交流冷却塔
- (4) 水と空気の接触方法により
 - 湿式冷却塔
 - 密閉式または間接冷却塔
 - 空冷熱交換器または乾式冷却塔
- (5) 特殊な併用形冷却塔
 - 乾湿式併用冷却塔

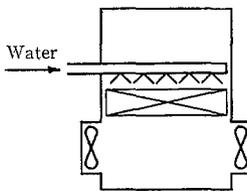
以上のように分類され、その他、構造材料により鋼製、木製、コンクリート製、外観により丸形、角形、大きさに



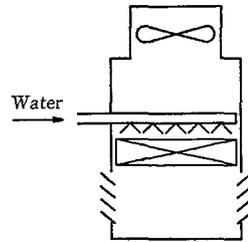
第7-1図
大気式スプレー塔
Fig. 7-1
Atmospheric spray tower



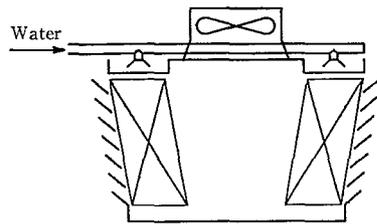
第7-2図
双曲線形自然通風向流形冷却塔
Fig. 7-2
Hyperbolic natural draft counterflow cooling tower



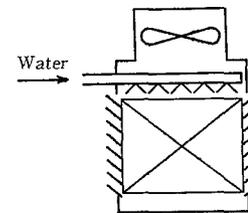
第7-3図
押し込み通風式向流形冷却塔
Fig. 7-3
Forced draft counterflow cooling tower



第7-4図
吸引通風式向流形冷却塔
Fig. 7-4
Induced draft counterflow cooling tower



第7-5図
吸引通風式直交流形冷却塔
Fig. 7-5
Induced draft crossflow cooling tower



第7-6図
吸引通風式混合流形冷却塔
Fig. 7-6
Induced draft mixedflow cooling tower

大形、小形、用途により空調用、工業用のように分類される。
次に代表的な分類の組み合わせ例を模式的に第7-1～7-6に示す。

冷却塔の発展

通常、冷却塔と言えば湿式冷却塔を言い、密閉式冷却塔の場合は“密閉式”と断わるのが普通で、空冷式熱交換器のように称するか“乾式”と断わるのが普通である。そこで、ここでは湿式冷却塔についてその発展を追いながら、主な形状の冷却塔について説明する。

貯水池、冷却噴霧池

冷却塔ではないが工業用冷却水確保のための最も古い方法で、貯水池を設けたり、その一部をスプレーで噴霧、循環することにより冷却効果を得るものである。この方法は効果は少なく大規模な設備となりがちであり、公共用水池を除き私企業用としては冷却塔に替っている。

大気式冷却塔

自然通風冷却塔の一種で第7-1図に示すような構造である。冷却性能は自然風により大きく左右される。最近ではほとんど見かけなくなった形式である。

自然通風冷却塔

通常、第7-2図に示すような双曲線形の大きな煙突状構造のもち、送風機がないので通風効果を得るための動力費は不要であるが、初期費は他の冷却塔に比べ大きなものとなる。

効果は煙突効果すなわち空気出入口の密度差により得る

ため、湿球温度27°C前後で冷却塔を設計するわが国では、19～21°Cの多い欧米に比べ、“煙突”が大きくなりがちである。またわが国では耐震、耐風強度を懸念する声も強く（イギリスにおいて風により倒壊した例もある。）実施例も欧米に比べ小容量、小規模なものが数例にすぎないが、欧米では高さ150 m程度のものまで建設されている。構造材もコンクリートから、鋼製ネット形状（土産品のミカン用ネットに鋼板を取りつけた形状）もあり、現在でも盛んに研究され、設置されている。

また、強制通風冷却塔と同様にヨーロッパでは向流形が多いが、米国では直交流のものも設けられている。

4) 強制通風向流冷却塔、直交流冷却塔

工業用冷却塔では古くは大部分、向流形でコンクリート製のものが多かった。送風機も押し込みのものがあったが現在、一部の小形冷却塔を除き吸引形が一般的である。

押し込み形は電動機、減速機が飽和状態の湿り空気に曝されないとはいふ長所があるが、空気流の偏流を生じやすい欠点があり設計上注意を要する。最近では電動機等の品質向上もあり吸引式が一般であり、当社の向流および直交流冷却塔とも特別に設計、製作する場合を除き吸引形を標準としている。

木製を主とする直交流冷却塔は向流冷却塔の後に出現し、高度成長期のニーズと合致し、わが国においては大勢を占めるようになった。当社も木製直交流冷却塔を主力製品として販売してきたが、最近では向流形、直交流形、木製、鋼製を問わず、その特質を生かして標準製品メニュー

冷却方式		クロスフロー型	カウンターフロー型
項目			
(1) 効 率		<ul style="list-style-type: none"> 理論解析がむづかしい。 水量と熱交換係数が同一であると仮定すればカウンターフロー型より充填物容積を若干大きくする必要がある。 近年実用化されている樹脂製充填物の場合、熱交換係数の極限值が水負荷によって異なり、クロスフローの場合、水負荷を大きく採れるので実際の容積差がほとんどなく、充填物を最高の効率状態で使用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 理論解析が簡単である。 水量と熱交換係数を同一と仮定するとクロスフロー型より充填物体積が若干小さくてすむ。 飛沫による水損失を少なくするには充填物を通過する空気の色度を低くする必要があり、水負荷を大きく採れない。また同一空気速度では水にさからって空気を吸出するためドリフトロスが大である。
(2) 散 水 装 置		<ul style="list-style-type: none"> 送風機の動力とは関係なく簡単な構造にできる。 温水槽が外部に露出しているため点検、清掃、補修が極めて簡単である。 	<ul style="list-style-type: none"> 温水配管が塔内の気流中にあるため抵抗となり、送風機の馬力が大きくなる。 また保守点検が不便で運転中の点検、補修は全て温水噴霧の中で行わねばならない。
(3) 給 水 圧 力		<ul style="list-style-type: none"> 塔体が低く散水が重力式であるので所要給水圧力が少なくてすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> 塔体が高くなるだけにより高い給水圧力を必要とする。特にスプレー式の散水装置では更に噴霧圧力を必要とする。
(4) 塔内気流分布		<ul style="list-style-type: none"> 空気の取入口が塔の全高にわたるため偏流の影響が少い。 	<ul style="list-style-type: none"> 空気の取入口が塔の下部のみであるので取入部の風速が高く、かつ流れの方向をかえる必要があるため気流分布の不均一をまねきやすい。
(5) 送 風 機 馬 力		<ul style="list-style-type: none"> 直交しつつ水と空気が接触するため抵抗が少く所要動力は小さくてすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> 水と空気の相対速度が向流であるので大きく、空気の側の抵抗が大きく所要動力が多くなる。
(6) 塔 の 高 さ		<ul style="list-style-type: none"> 充填部の高さがそのまま塔高となり低くてすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> 空気取入口、エリミネータ等のために全体的に高くなる。
(7) 床 面 積		<ul style="list-style-type: none"> 塔断面積に送風機の部分が含まれるのでカウンターフロー型に比し大きくなるが、水負荷を大きく採ることによりカウンターフロー型と略同等にすることができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 塔の断面積はそのまま充填部の有効断面積となり、せまくてすむ。
(8) 吐 出 空 気 の 再 循 環		<ul style="list-style-type: none"> 空気の取入口での速度が低いので再循環の傾向が少く、かつ再循環をおこしても充填物上部の高温部に限られるため性能低下が少い。 	<ul style="list-style-type: none"> 空気の取入口での速度が大きいので再循環の傾向が大きく、かつ一旦再循環を起すと充填物全高にわたり被害をおよぼす。
(9) ドリフトロス		<ul style="list-style-type: none"> カウンターフロー型に比しドリフトロスが少い。 	<ul style="list-style-type: none"> 水にさからって空気を吸出するため一般的にドリフトロスが多い。

として、市場の国際化、ニーズの多様化に対応している。向流形、直交流形の特長の比較を上記する。

む す び

今回は、水冷却の原理、設計法、冷却塔の種類についてその変遷もまじえ紹介した。

次回以降には、冷却塔の構成要素、設計上の留意事項にも言及したいと考えている。

このシリーズが冷却塔全般の理解に役立てば幸甚と考えている。