

# 冷却塔における再循環の予測

## Predicting Recirculation in Cooling Towers (Numerical Simulation)



冷却塔事業部 生産部 那須 深  
Kiyoshi Nasu

Cooling capacity of cooling tower depends upon the temperature/Humidity of the inlet air. However, the calculation method for the inlet air condition (Temperature/Humidity) in consideration of environmental conditions at installation site has not yet been established. On the other hand, cooling tower installation sites are in the condition in which recirculation might occur, as seen in cooling towers for district heating and cooling uses such as cooling towers installed additionally near the existing cooling towers or buildings, or those provided with soundproof walls and the like. We have attempted to predict the occurrence of such recirculation by means of the numerical simulation, which has been greatly advanced in recent years.

### まえがき

冷却塔の冷却方法は、冷却塔内部へ外気を導入し充填材部において、外気と被冷却水の直接接触による熱交換（顕熱、潜熱による熱交換）を行っている。したがって、冷却塔における交換熱量は、冷却塔へ流入する空気により変化する。冷却塔への流入空気温度、湿度を把握することが重要ではあるが、外気風向、風速・冷却塔周囲条件（冷却塔記別、壁など）などによる流入空気温度、湿度変化を考慮した設計法は確立されていない。

一方、冷却塔の設置場所は、既設冷却塔近くへの増設、冷却塔の周囲への壁の設置、また近年の都市再開発時の地域冷暖房用冷却塔においては、ビル近くへの設置など冷却塔から排出される高温多湿空気が自己の吸気面へ、あるいは他の冷却塔の吸気面へ流入（再循環）する可能性のある場所への設置計画が多い。

したがって、計画どおりの熱交換を行うためには、冷却塔周囲の空気流れを把握し、熱交換の阻害要因を考慮した冷却塔の設計が不可欠となってきている。

近年コンピュータの発達に伴い数値解析が発達し、流体力学においても数値シミュレーションが可能となってきている。当社において熱流体解析プログラム“STREAM”により行った、冷却塔周りの空気流れに関する計算結果を次に紹介する。

### 1. STREAM の概要

基礎方程式

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

運動量保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \partial u_r}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f - g_i \beta (T - T_{ref})$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

乱流エネルギー・乱流消失率

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s + G_T - \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ &+ C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

- ここに
- $\rho$  : 流体密度
  - $\beta$  : 体膨張率
  - $\nu$  : 動粘性係数
  - $T_{ref}$  : 流体基準温度
  - $f$  : 体積力
  - $C_p$  : 定圧比熱
  - $K$  : 熱伝導率
  - $g$  : 加速度
  - $k$  : 乱流エネルギー
  - $\epsilon$  : 乱流消失率

添字は、Einstein の総和規約に従うものとする。差分化には移流項は風上差分、時間については後退差分とし、スタッガート格子によるコントロールボリューム法としている。計算は、半陰解法 (Semi-Implicit) を用いている。

### 2. 計算例

#### 2.1 壁に囲まれた2列の冷却塔（第1図～第3図参照）

周囲を壁で囲まれた2列の冷却塔における再循環について検討を行った。第2図に速度ベクトル図を第3図に温度コンターを示す。数値計算あるいは、風洞実験による以外にも、第2図および第3図に示すように風上側の冷却塔より排出された高温の空気が風下側の冷却塔へ流入するであろうとの予測は容易と思われるが、風速に対する排気空気の風下側冷却塔への流入割合の予測は、容易ではない。また、再循環についての対策の有効性についての評価は全く予測しえないので、数値計算による予測を試みた。

計算結果は、計算モデルが実物と一致しないため、当然実測値と計算値には差があるものの、冷却塔吸気面の流入温度において、両者は比較的良好な一致をみた。また計算

結果は誤差を含むものの、冷却塔の冷却性能評価においては非常に有効であった。

## 2. 2 風上にビルのある冷却塔 (第4図～第5図参照)

第4図に示すように高層ビルと周りを壁で囲まれた冷却塔において、冷却塔からの排出空気の方角変更、壁の一部に開口部を設けることによる冷却塔への流入空気温度変化を推定し、冷却性能の変化の推定を試みたものである。

予測は、2.1と同様数値計算あるいは、風洞実験による以上上記の再循環の対策に対する効果の予測は困難である。計算より、排出空気の排出方角変更による効果より、壁に開口を設けることによる効果大との結果を得た。一般には、排出方角変更は比較的容易に行えるが、壁に開口を設けることは工事期間、費用共に要するため実行されにくい。計算結果に基づき開口を設ける工事が行われ冷却塔の冷却能力の改善が行われた。なお、ビルの風下の流れは、複雑で計算結果が実情を的確には表し得ないと思われるが、再循環改善の一評価法としては有効と思われる結果をえた。

## 2. 3 高層ビルに隣接する冷却塔 (第6図～第11図参照)

第7図に示すように、ビルと冷却塔が風向に対して平行位置にあるため、2.2の様なビル後流の複雑な流れはないものの、ビル風(剥離流等による風速加速など)の影響を受けることが予想される。さらに、冷却塔風上に煙突が位置するため、煙突からの排出される高温の排出ガスの影響の有無についても考慮する必要がある。

したがって、これら冷却塔に影響を及ぼすであろう要素を考慮し、冷却塔周りの流れを解析し冷却塔への影響(冷却塔への流入空気温度および冷却性能)について推定を試みた。

このように冷却塔に影響を及ぼすと考えられる要素の多い場合、数値計算あるいは風洞実験以外には評価法は無きに等しく、これらの方法を用いなければ、ビル風などの影響を過大あるいは過少評価する結果となると考えられる。

一方、数値計算においても、冷却塔の設置場所のごく近くのみを対象としさらに計算モデルは実物を簡略化して計算を行うため、実情を正確に表わすとは考えられない。したがって、冷却塔の冷却能力の評価時において誤差を考慮し評価する必要がある。

## 2. 4 既設冷却塔の近くへの建設 (第11図～第15図参照)

第11図に既設および新設冷却塔の位置を示す。図に示すように、新設冷却塔側より風が吹けば、新設冷却塔より排出された空気が既設冷却塔へ流入することは、容易に想像される。したがって、このような冷却塔配置は避けるべきではあるが設置場所が限られている場合、既設冷却塔への影響の最も少ない場所および、冷却塔規模の決定が必要となる。そのため位置および規模を決定すべく数値計算を行い、第12図に示すような冷却塔配置となった。第13図～第15図に示されるように既設冷却塔への影響がみられるが、冷却塔の規模(一基当たり)を小さくすれば設置面積が増加し、新設・既設冷却塔間が狭まるため、既設冷却塔へさらに影響を及ぼす。また設置面積が増すため、一列の配置が不可能となり二列配置となる場合、新設冷却塔内での再循環をも引き起こすこととなる。

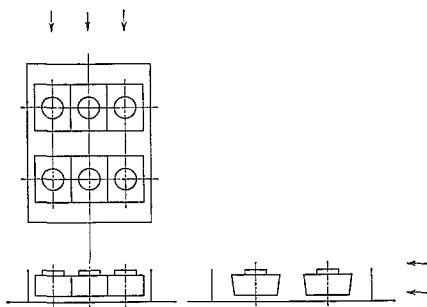
一方、規模を大きくする場合は、冷却塔重量・冷却能力・設置面積などの諸条件により制限されており、第11図の配置・規模となった。

数値シミュレーションを行うことにより既設冷却塔冷却能力低下を考慮した冷却塔新設計画が可能となった。

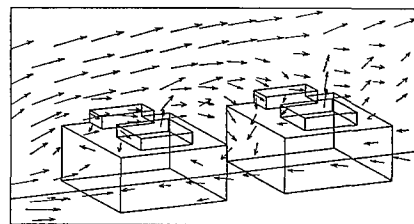
## 3. 数値計算による冷却塔再循環に関する予測評価

冷却塔の再循環(Recirculation, interference)に関する冷却性能への影響について、CTI(PFM-110)に記載されているが冷却塔の配置と風向に関し言及されているにとどまり、壁あるいは、隣接するビルによる影響は考慮されていない。したがって現在、冷却塔が設置される周囲条件とは異なるため有効な計算法に成りえない。

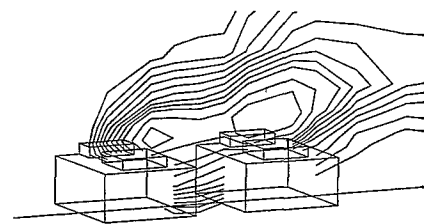
最も有効な方法は、冷却塔の吸排気を考慮した風洞実験による予測と思われる。ビル建設時には、環境影響事前評価(環境アセスメント)のため、風洞実験は行われているが、冷却塔の吸排気を考慮するには、冷却塔の排気空気の代わりにトレーサガスの使用、空気密度調整、トレーサガスの分析など装置、時間、費用を要するため、実施は難しい。数値計算による予測は、結果の精度について議論の余地を残しており、また計算機的能力、ビルなどの条件のモデル化時の簡素化、計算法などにより現実とは異なった結果となる可能性はあるものの、冷却塔の再循環に関しては最も簡便、かつ有効な方法と思われる。



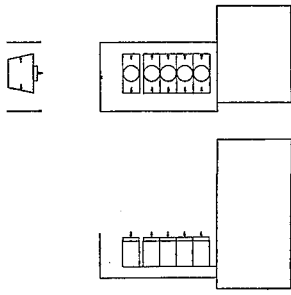
第1図 計算モデル (I)  
Fig. 1 Simulation model (I)



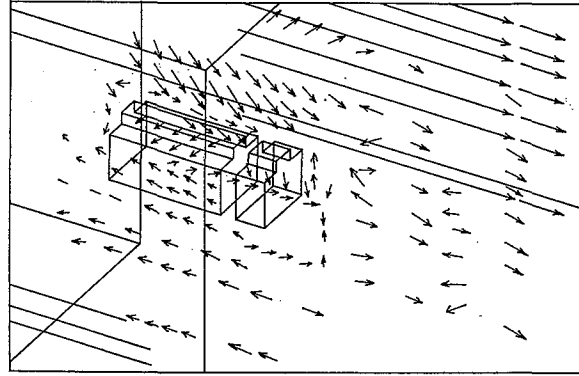
第2図 速度ベクトル  
Fig. 2 Velocity vectors



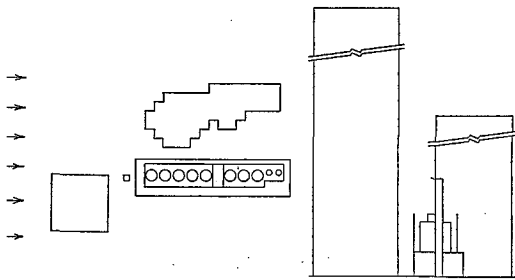
第3図 温度コンタ  
Fig. 3 Temperature contours



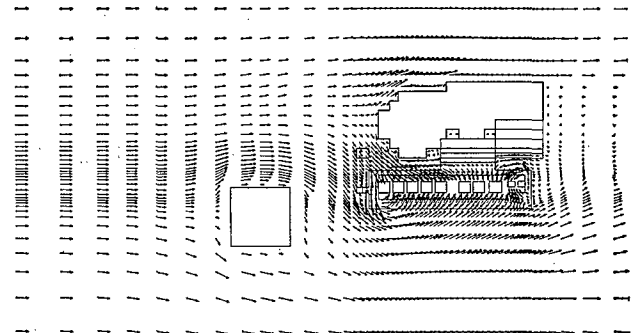
第4図  
計算モデル (I)  
Fig. 4  
Simulation model (I)



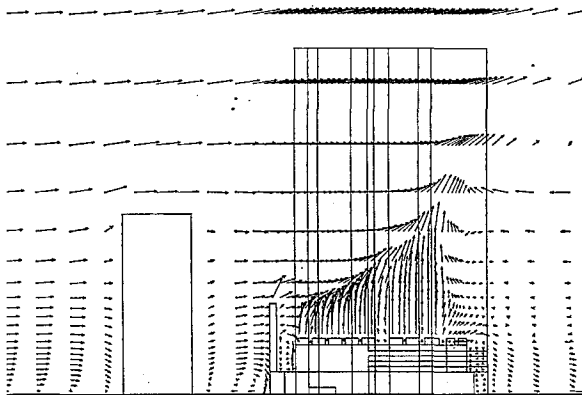
第5図 速度ベクトル図  
Fig. 5 Velocity vectors



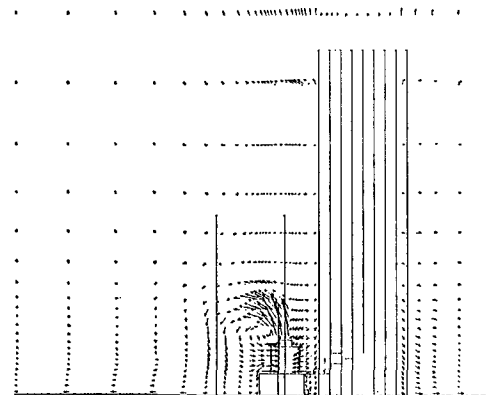
第6図 計算モデル (II)  
Fig. 6 Simulation model (II)



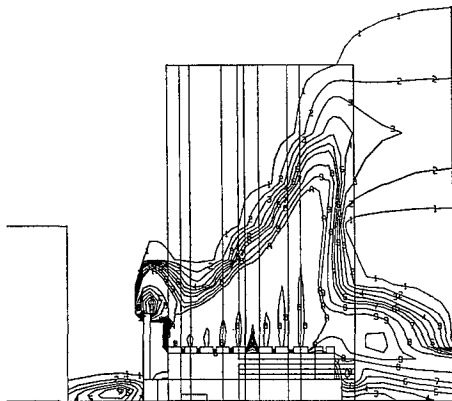
第7図 速度ベクトル図 (X-Y面)  
Fig. 7 Velocity vectors (X-Y)



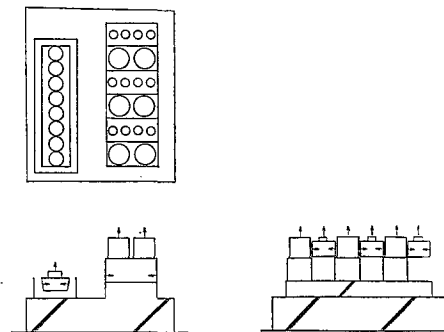
第8図 速度ベクトル図 (X-Z)  
Fig. 8 Velocity vectors (X-Z)



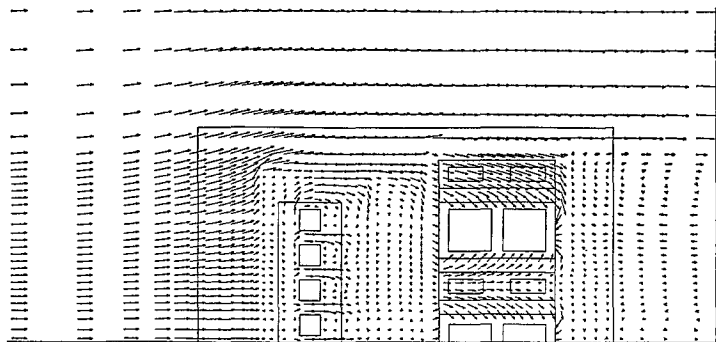
第9図  
速度ベクトル図  
(Y-Z)  
Fig. 9  
Velocity  
vectors  
(Y-Z)



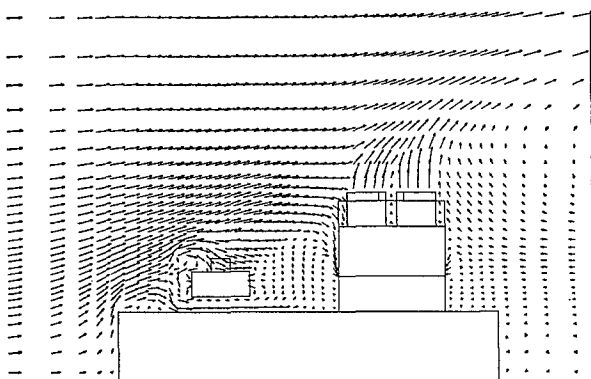
第10図  
温度コンタ  
(X-Z)  
Fig. 10  
Temperature  
contours  
(X-Z)



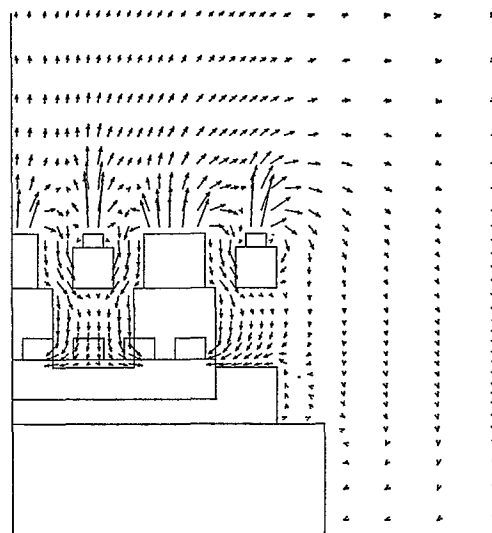
第11図  
計算モデル  
(IV)  
Fig. 11  
Simulation  
model (IV)



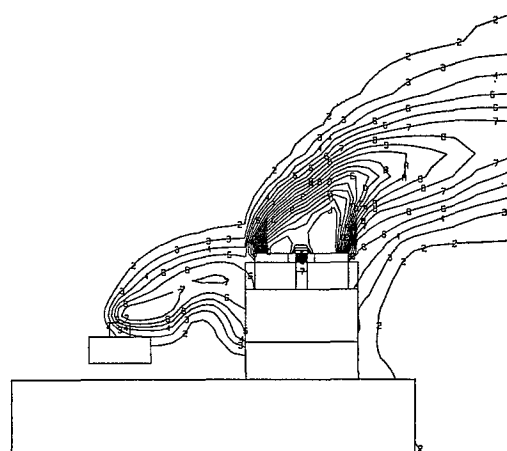
第12図 速度ベクトル (X-Y)  
Fig. 12 Velocity vectors (X-Y)



第13図 速度ベクトル (X-Z)  
Fig. 13 Velocity vectors (X-Z)



第14図 速度ベクトル  
Fig. 14 Velocity vectors



第15図 温度コンタ  
Fig. 15 Temperature contours

### むすび

地域冷暖房の増加、冷却塔増設などにより冷却塔の再循環に関する検討の必要性はますます増加するものと予想される。したがって、今後さらに計算結果と実測との比較により、精度の良い再循環予測を推進する所存である。

また、数値計算法もさらに進歩し現実との整合性も良くなると期待される。

- 1) (株)ソフトウェア クレイドル