

都市街区スケールシミュレーションによる 大規模冷却塔の廃熱影響評価

富塚 孝之¹・岡 和孝²・亀卦川 幸浩³

¹非会員 みずほ情報総研株式会社 科学技術部 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3)

E-mail: takayuki.tomizuka@mizuho-ir.co.jp

²非会員 みずほ情報総研株式会社 環境・資源エネルギー部 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町3-1)

E-mail: kazutaka.oka@mizuho-ir.co.jp

³非会員 明星大学助教授 理工学部環境システム学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: kikegawa@es.meisei-u.ac.jp

都市の大気環境に大きな影響をもたらす人工廃熱や大気汚染物質の排出構造(量や排出場所およびその時間変化)は、自動車走行や建築空調などのエネルギーシステムのあり方により左右されるものである。中でも冷却塔による空調廃熱システムは、外気への顕熱廃熱による気温上昇を抑えられる一方、白煙による視程影響や水蒸気の放出による湿度影響が懸念される。本研究では、大規模冷却塔を備えた産業施設近隣に業務系街区および住宅系街区を含んだ都市街区が存在する場合を想定し、大規模冷却塔が周辺街区への湿度の影響を見る目的で3次元数値シミュレーションをおこなった。その結果、相対湿度90%以上の高湿度領域は夏季および冬季の両方において、大規模冷却塔から約100mの領域にまで達することが分かった。

Key Words : urban thermal environment, cooling tower, vapor, fog, computational fluid dynamics

1. はじめに

冷却塔は人工廃熱を潜熱として大気に放出することにより大気の温度上昇が抑えられることから、ヒートアイランド現象を緩和させる対策の一つとして考えられている。その一方で、潜熱廃熱された水蒸気は周囲の気象条件によっては白煙を形成する場合がある。白煙そのものに害はないが、視界障害、日照への影響など様々な環境問題を引き起こす可能性がある。このため、近年大都市や工業地域等の地域冷暖房施設に設置される大規模冷却塔に対して、白煙対策の検討は重要である。

しかし白煙は、湿度、気温および風などの気象条件に依存し、さらに冷却塔からの潜熱および顕熱廃熱量の割合はその方式や外気の気象条件により変わってくるため、その発生を予測することは決して容易ではない。

そこで本研究では、工業用または産業用大規模冷却塔が業務系街区や住宅系街区に隣接している場合を想定し、白煙予測の一手法として3次元ミクロスケールモデルシミュレーションにより白煙の発生領域を評価した。日本国内におけるいくつかの大都市を参考に仮想的なモデル街区を作成し、気象条件は関西地方の夏季および冬季における気象データを採用した。冷却塔からの廃熱量につ

いては、その構造から熱量移動過程を考慮し、時々刻々の外気気象条件を用いて算出した。

2. 気象条件および冷却塔からの廃熱シナリオ

気象条件は、関西、中国、四国地方における気象庁AMeDAS資料から51測定局の地上気象観測データと、米子、潮岬におけるAMeDASおよび高層気象データを分析し、2001年夏季および冬季の1ヶ月間の気象データを選定した。

冷却塔において処理される廃熱の潜熱・顕熱比の割合は、冷却塔方式、モデル、そして気象条件などに依存する。本研究では、冷却塔方式として向流型冷却塔を想定し、既存の資料などをもとに各種パラメータを設定した(図-1)。冷却塔からの潜熱・顕熱比は、外気気象条件下で、塔内で熱水分移動過程を考慮し、廃熱の動的な顕熱・潜熱分離をおこなう冷却塔モデルを用いた¹⁾。同モデルは、空調用として一般的な向流型冷却塔を対象に、空気～冷却水間のバルク熱収支を考慮し、塔内での空気状態量(温度・絶対湿度)の変化を予測可能とするモデルである。

塔下部より流入した外気について、塔頂部入口での冷却水滴周辺に形成される空気境膜（飽和状態）とのエンタルピー平衡を極限状態として仮定し、湿り空気線図（t-x線図）上、外気状態量の変化を直線近似する簡易的な熱・水分移動モデル²⁾を採用した（図-2）。同モデルにより算出された塔出口の空気状態量を入口空気と対比させ、空気エンタルピーの総変化量（=廃熱総量）を顕熱と潜熱に分離する方法をとった。

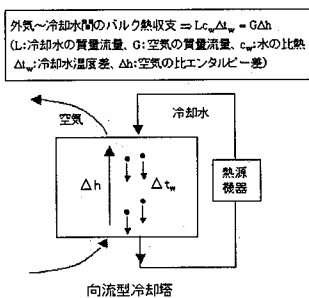


図-1 冷却塔の動作イメージ

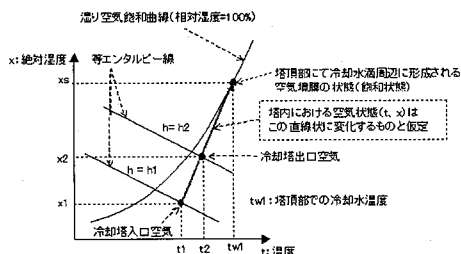


図-2 冷却塔内空気の状態変化のモデル化のイメージ

上記冷却塔モデルをもとに、前述の気象データの時刻別平均値を用いて夏季および冬季における潜熱・顕熱比を算出した（図-3）。夏季の潜熱比は高く、廃熱量のうち約9割が潜熱として排出されていることになる。逆に冬季は、廃熱量の7割弱までしか潜熱として廃熱できない結果となった。

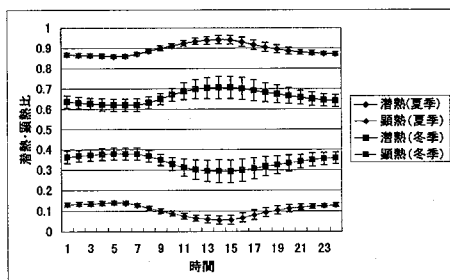


図-3 夏季および冬季における潜熱・顕熱比の日変化

3. ミクロスケールモデルシミュレーション

(1) モデル街区

ミクロスケールモデルシミュレーションを行なう上で、大規模冷却塔を備えた産業施設の近隣に業務系街区および住宅系街区が存在する場合を想定した、仮想的なモデル街区を作成した（図-4）。大規模冷却塔を工場地帯に設置し、幹線道路を挟んで商業事務地域、住宅地域が数km内に存在するようにした。

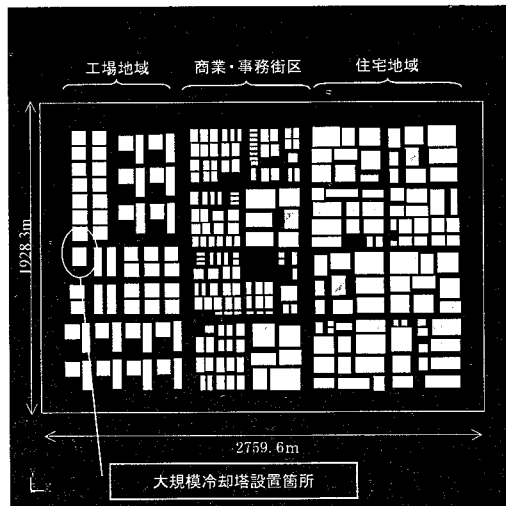


図-4 仮想街区モデル

(2) 大規模冷却塔

大規模冷却塔の能力としては、100万kW程度の廃熱を処理するものとした。この廃熱を前述で求めた潜熱・顕熱比を用いて潜熱・顕熱廃熱に分離した。今回、この大規模冷却塔と同時に高さ60mの煙突が存在する場合を考えた（図-5）。煙突からは70万kW程度の廃熱を処理するものとした。

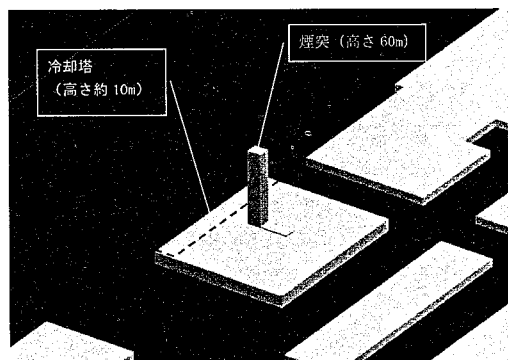


図-5 大規模冷却塔を備えた産業施設モデル

煙突からの廃熱の潜熱・顕熱比はおおよそ1:1とした。

図-6、図-7は潜熱・顕熱比をもとに算出した夏季および冬季における廃熱条件を示す。なお、潜熱は蒸発潜熱値を用いて水蒸気量に換算してある。

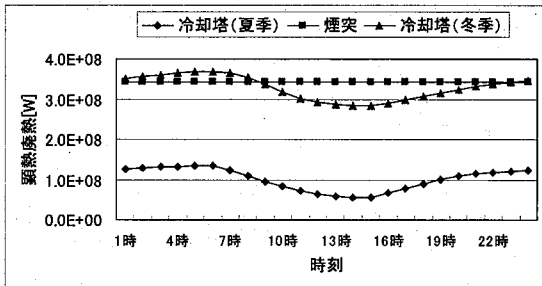


図-6 夏季および冬季における顕熱廃熱条件

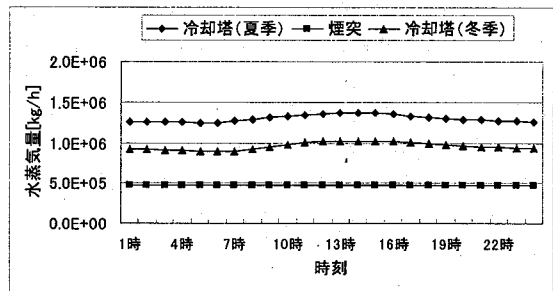


図-7 夏季および冬季における潜熱廃熱条件

(3) 計算格子および計算モデル

前述の街区モデルをもとに計算格子を作成した。計算領域は $2759.6\text{m} \times 1928.3\text{m} \times 200.0\text{m}$ とし、計算格子は不等間隔で点数は $94 \times 70 \times 25 (=164500)$ である(図-8)。

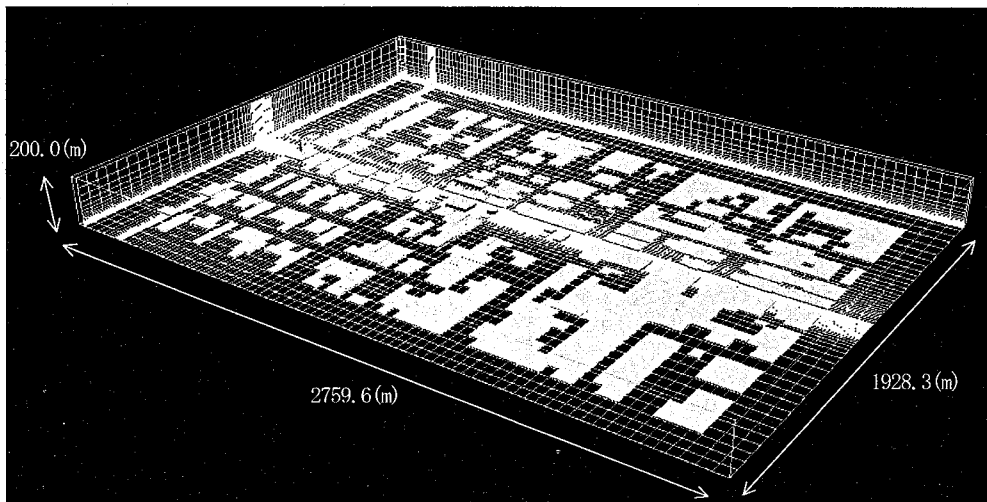


図-8 計算格子および街区モデル

計算モデルは以下の基礎方程式で構成される。

- ・運動量保存式、
- ・標準 $k-\varepsilon$ 方程式(乱流)
- ・エネルギー方程式、
- ・移流拡散方程式(水蒸気)

境界条件は、以下の通りである。

- 側面：風速、温度および水蒸気濃度の固定境界条件
- 上面：自由流入出
- その他：壁関数

(4) 気象条件

ミクروسケールモデルの気象境界条件の求めるべく、2章で記した気象データをもとに、白煙が発生する可能性の高い時間帯を選定した。選定基準としては風速が小さく相対湿度の高い時間帯とし、その結果夏季は午前4時～午前7時、冬季は午前6時～午前9時の4時刻分を選定した。ここで1時刻は1時間の平均データである。

なお、上記のミクロスケールモデルの境界条件を決定するために、2段階ネスティングのメソスケールモデ

ルシミュレーションを夏季および冬季の1ヶ月間実施した。計算領域は東西約400km×南北約300kmと東西約90km×南北約160kmの二層である。このシミュレーション結果から前述の選定した時間における該当する都市の風向・風速、気温、湿度データを抽出し、境界条件として設定した。境界条件の一例として冬季の午前6時における風速および気温の境界条件（鉛直分布）を図-9に示す。

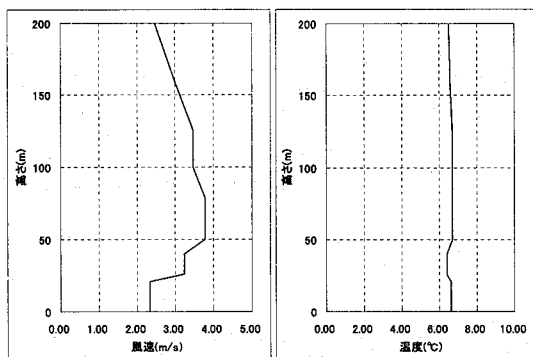


図-9 冬季午前6時における風速および気温の境界条件

(5) 計算結果

夏季および冬季におけるミクروسケールモデルのシミュレーション結果のうち、冬季の午前6時の風速ベクトル図、気温および相対湿度の分布図を図-10～図-13に示す。図-10は風速ベクトルの水平断面の全体図であり、図-11以降は大規模冷却塔近傍における風速ベクトル図、気温および相対湿度分布図である。

風速ベクトル図では領域全体で北よりの風が吹いていることを示しており、気温および相対湿度分布図から大規模冷却塔および煙突から比較的高温のガスと水蒸気が排出されていることが確認できる。

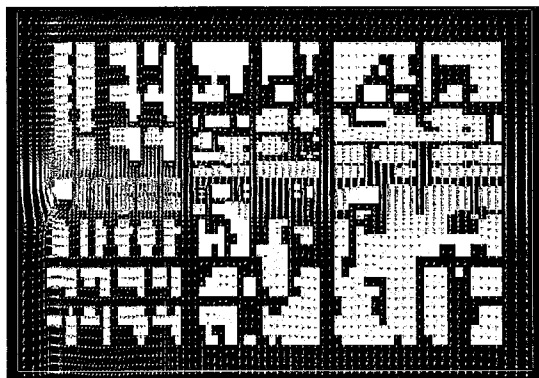


図-10 水平断面全体の風速ベクトル図

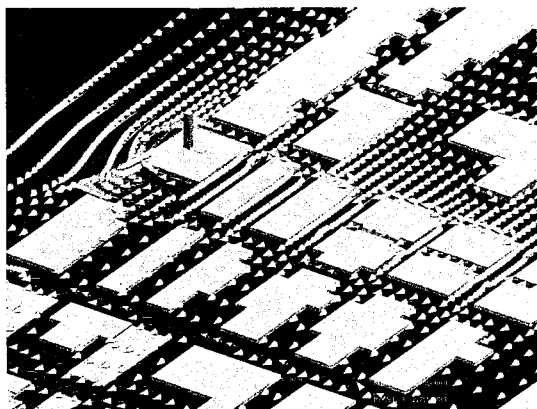


図-11 大規模冷却塔近傍の水平断面風速ベクトル図



図-12 大規模冷却塔近傍の鉛直断面気温分布図

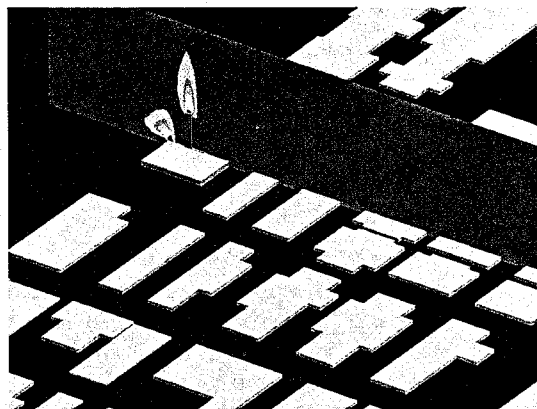


図-13 大規模冷却塔近傍の鉛直断面相対湿度分布図

4. 相対湿度による白煙評価

ミクروسケールモデルのシミュレーション結果から白煙の発生について評価した。白煙の判定は相対湿度100%以上の領域とした。実際には大気中のエアロゾル濃度なども影響するため、相対湿度100%未満の領域でも霧や白煙が発生する可能性はあるが、本研究では相対湿度のみで評価をおこなった。

夏季においては対象とした4時刻のうち、4時、6時、7時において白煙領域が確認できた（図-14～図-16）。大規模冷却塔から高さ約80m、水平方向に約120mで白煙が生じる結果となった。この分布形状は風の影響を受け、風速が小さい場合は水平方向の白煙範囲が約60m程度の時刻もあった。

冬季においては白煙が生じない結果となった。これは冬季に排出される水蒸気量が、夏季に比べて小さくなることと、風速が全体的に夏季に比べて大きいことが要因となっている。しかし、相対湿度90%以上の領域で見ると、大規模冷却塔から水平方向に約120mまで広がっており、気象条件（気温および風速の低下）によっては白煙が生じる可能性を示唆している（図-17、図-18）。

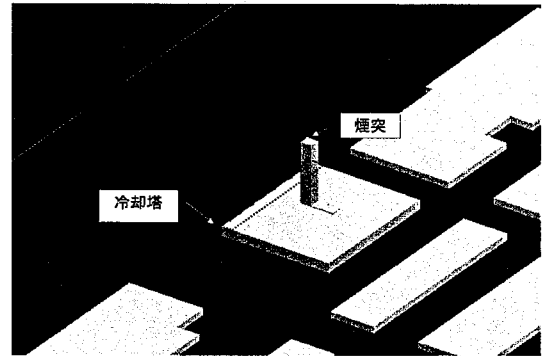


図-16 夏季の白煙発生状況（午前7時）

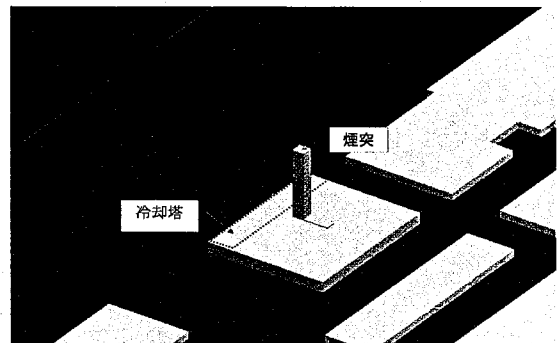


図-17 冬季の相対湿度90%以上の領域（午前8時）

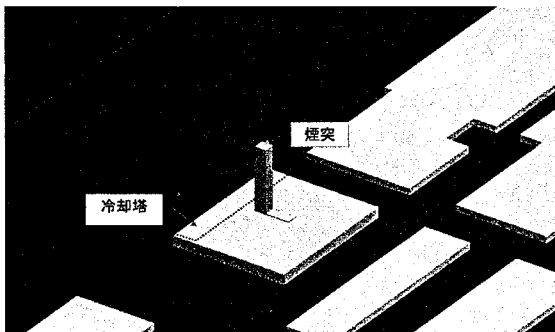


図-14 夏季の白煙発生状況（午前4時）

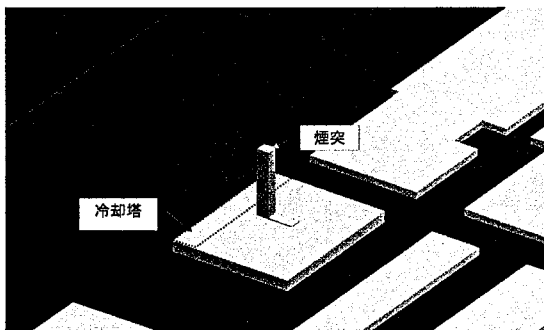


図-15 夏季の白煙発生状況（午前6時）

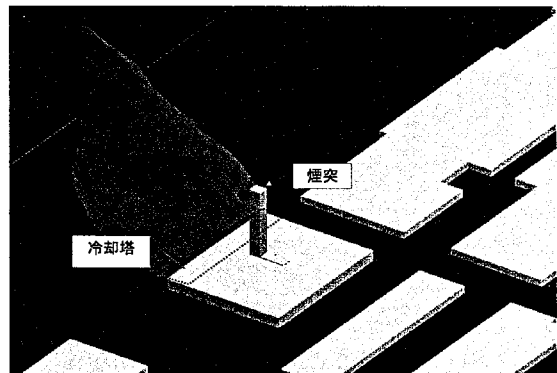


図-18 冬季の相対湿度90%以上の領域（午前9時）

次に参考ケースとして、冬季午前9時の気象条件下で大規模冷却塔および煙突からの潜熱・顕熱排出条件が夏季と同様の場合を想定したシミュレーションもおこ

なった。その結果、数百mの範囲にまで白煙が生じ、夏季と同じ水蒸気量が排出された場合、冬季ではより広範囲に白煙が生じる可能性があることが示された（図-19）。

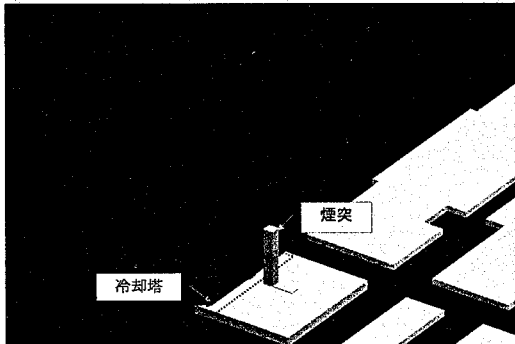


図-19 冬季の白煙発生状況（午前9時）
[夏季の廃熱条件適用]

5. まとめ

ミクروسケールモデルを用いて都市街区スケールにおける大規模冷却塔の影響評価を、冷却塔の方式および夏季および冬季の気象条件を考慮しておこなった。

同評価手法では対象地域の気象条件や施設の立地条件だけでなく、冷却塔の構造などエネルギーシステムの特性まで考慮した評価が可能であることが示された。

今後の課題としては、降雨や水蒸気の相変化などの物理モデルをシミュレーションに取り入れ、白煙の発生をより精緻に予測できるモデルの検討が必要である。

参考文献

- 1) 亀卦川幸浩，玄地裕，近藤裕昭：建築における空調熱源と電力供給システムの構成が夏季の都市熱環境に及ぼす影響，環境システム研究論文集，Vol.33，pp.189-197，2005.
- 2) 渡辺浩文，尾島俊雄：河川水熱利用地域冷房施設の大気への熱的影響に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.460，pp.61-69，1994.

Numerical Estimation of Thermal Effluent from Large Scale Cooling Tower by Urban Scale CFD model

Takayuki TOMIZUKA, Kazutaka OKA and Yukihiro KIKEGAWA

Under certain ambient conditions, the moist air from a cooling tower may form a visible plume of water vapor (fog). It sometimes causes nuisance such as lower visibility, obstacles to sunshine, and so on.

This study numerically estimates the visible plume caused by a large scale cooling tower adjacent to an urban area by using micro-scale CFD model. The simulation results indicate the visible plume reaches more than 100m from the cooling tower.