

研究成果報告書

研 究 題 目		冷却塔から排出される可視プルームの予測手法の 確立	実 施 年 度			
			平成29年度			
代 表 研 究 者	所 属	呉工業高等専門学校 機械工学科				
	氏 名	高田 一貴 印				
1. 研究の目的・背景 発電所や工場等で用水の冷却装置として用いられる冷却塔から排出される温排気は主に寒冷期になると可視プルームを形成する。このプルーム自体は温排気が凝縮した水蒸気であるため人体に悪影響を及ぼす成分は含まれていないが、着氷、日照時間の減少、視覚障害、植物の発育問題など環境問題を引き起こす¹⁾。従って環境問題の観点において可視プルームの大きさや長さを予測する事は周辺に及ぼす影響範囲を評価する上で重要となる。 本研究で検討対象とする冷却塔は日本国内で多く使われているクロスフロー型機械通風式冷却塔（以下冷却塔と略称）である。本研究では環境影響評価に取り入れられることが多くなった CFD（数値流体力学）の手法を用いて可視プルームの予測を試みるが、可視プルームの予測に関する実態は、刻一刻と変化する大気乱流の影響を受けるためその正確な予測は極めて難しいものとされており、これまで可視プルームに及ぼす外風や空気条件等の影響を調査した研究例は極めて少ない。本研究では様々な条件下で熱と物質の移動を伴う気流の数値計算を行い、冷却塔から排出されるプルームの可視化を試みるとともに、さまざまな予測結果を統合して可視プルームの規模を簡便に算出可能な表示法を作成し、環境影響評価へ活用できるようにすることを試みた。計算結果と観測値とを比較することにより計算結果の妥当性も評価しながら、冷却塔から発生するプルームに及ぼす外部条件の影響について検討した。さらに、可視プルームの削減を目的とした乾湿併用型冷却塔における乾き空気と湿り空気の複雑な混合機構についても CFD 解析に基づき考察をおこない、混合促進のメカニズムならびに混合を促進させる手法の要否についても検討を行った。 2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む） (1) 可視プルームに及ぼす冷却塔構成要素の影響評価 本研究では実用的かつ経済的な観点より乱流モデルを採用し、これまでに解明がなされていなかった冷却塔排出部における乾き空気と湿り空気の混合機構およびファンによって空気が外周方向へ旋回する状況下における外気との混合状態を CFD の手法により明らかにすることを試みた。解析では、モデルファンを用いた風速の実測値を塔排出部に与え、ファンの回転により発生する旋回流の影響を明らかにした。図1は2種類の空気がどのようなメカニズムによって混合しているかを表示したものである。塔内への空気流入場所に仮想マーカーの発生点を発生させ、湿り空気部（青線）、乾き空気部（赤線）から塔内に流入する流れの状						

態を示した。これら流線よりそれぞれの流体はファンによる旋回流の影響により交錯しながら上昇していることがわかる。搭上部からみたマーカー軌跡も2種類の流体が旋回流の影響を受けながら交錯する様子が表示された。このことは冷却塔に設置されているファンは、これら2種類の空気の混合機としての役割を担うことが示唆された。

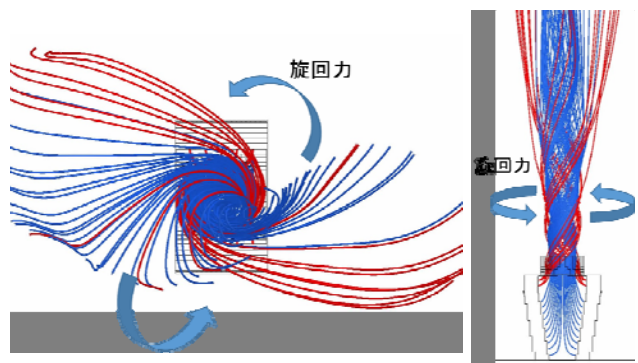


図1 湿り空気と乾き空気の軌跡

(2) 可視プルームに及ぼす内部混合の影響評価

排出された温排気におよぼす乾湿空気の混合状態の影響を明らかにするために、乾き空気と湿り空気の混合比を可視プルームが発生しない条件に設定し、冷却塔内の混合を経てファンより排出される過程をCFDにより解析を行った。結果を図2に示す。混合比を最適化した解析の結果、可視プルームは観測されない事が明らかになった(図2(d))。このことは、冷却塔排出口に至るまでに2種類の空気は完全に混合が達成されていることを示す。これは、排出用のファンが2つの空気の混合機としての役割を担っていることを示唆する。事実、ファンを設けない模擬的な解析を行った結果、可視プルームは上空まで確認された(図2(c))。従って、冷却塔の内部において2つの空気の混合状態は良好であり、さらなる混合促進部材等の設置は不要であることが示唆された。

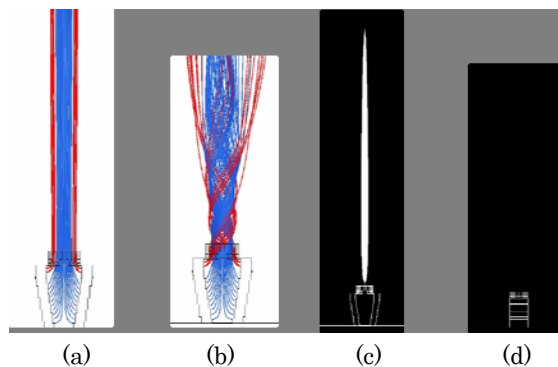


図2 可視プルーム形成に及ぼすファンの有無の影響

- (a) ファン無しの流線
- (b) ファン有りの流線
- (c) ファン無の可視プルーム
- (d) ファン有りの可視プルーム
(可視プルームとして出現しない)

(3) 外部条件の影響評価と可視プルームの相関

外部条件（特に外風）の影響は、相互の衝突による乱流混合の促進によって可視プルームが低減される方向にあらわれる。大気相対湿度と外風速をパラメータとして解析を行った結果、外風速の上昇とともにプルーム長さは短くなることがCFDにより示され(図3)、実際の観測結果とも一致した。これら一連の解析結果を統合して可視プルームの簡便な予測相関式として纏めるために、異なる排出部直径(ファン径)の可視プルームをCFDにより求め(図4)、可視プルームの長さを冷却塔排出部直径で無次元化した無次元可視プルーム長さ(L/D)を空気線図上における過飽和域の面積 A と排出風速 W を乗じた $A \cdot W$ をパラメータとしてプロットした(図5 過飽和域の定義と面積算出)。

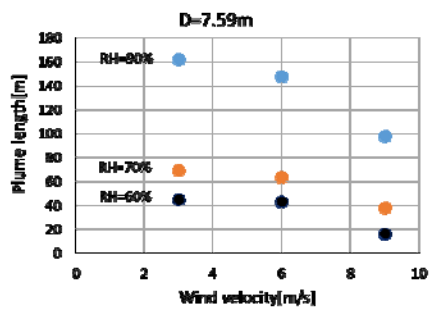


図3 可視プルーム長さに及ぼす
外風速と空気条件の影響



図4 可視プルーム長さ

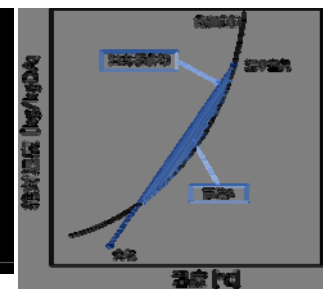


図5 過飽和領域の定義

その結果、 L/D と $A \cdot W$ との間には相関係数 0.94~0.98 となる高い相関性が見いだされた(図6、7)。このことは可視プルーム長さを簡便かつ実用的な可視プルーム相関式として整理することができることを示している。本相関式は可視プルーム長さを排出部直径で無次元化していることから、異なるスケールの冷却塔にも展開可能である。これより冷却塔の設計条件に対して簡便かつ精度のよい予測法を提供することが可能となり、環境影響評価への実用ツールとしての活用が期待される。

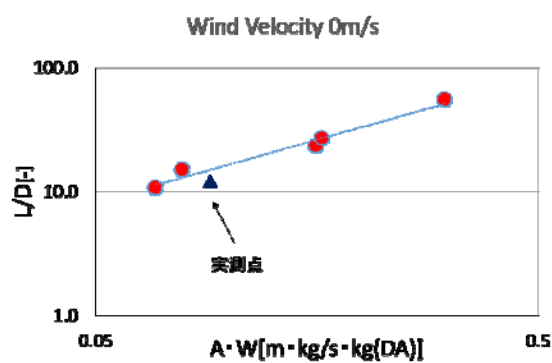


図6 可視プルーム長さの相関
(外風速 0m/s 時)

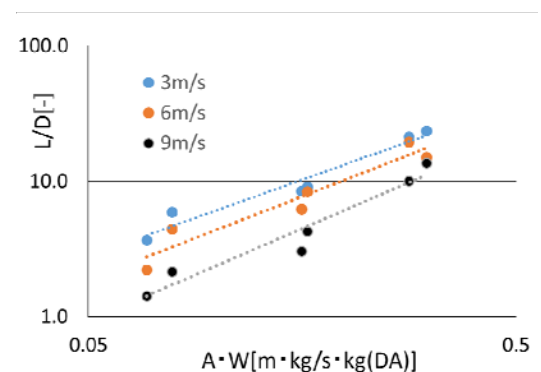


図7 可視プルーム長さの相関
(外風速 3m/s, 6m/s, 9m/s)

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時の計画に対する実績は以下の通りである。

	申請時 [円]	実績 [円]
設備備品費	50,000	64,800
消耗品費	20,000	53,520
借料損料	200,000	194,400
印刷費	30,000	0
旅費	120,000	67,280
その他	80,000	20,000
合計	500,000	400,000

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

CFD による冷却塔可視プルームの予測手法は設計や環境アセスメント等において活用が期待される。本研究では可視プルームの予測のために、計算負荷が比較的軽い汎用的な乱流モデルを採用しプルームの平均的なスケールを求めた。実際のプルームは外風の風速変動に大きく依存するため、これら解明は技術的には時々刻々の変化を解析することによりなされるが、現状でも膨大なハードリソースと計算時間を要するという課題がある。

本研究により、計算負荷を軽減させた汎用的な乱流モデルによる予測精度はマクロスケールとしてのプルーム長さについて 10%程度以内で予測可能である。今後はさまざまな条件下で計算を繰り返してデータを蓄積し、様々な条件に対応できる相関式として整理してデータベース化することにより、計算機や解析コードを不要とする予測手法に成り得ると考えられる。そのような意味では、本検討結果は簡便な影響評価手法として実用段階にあると考えられる。しかしながら、冷却塔の立地条件はさまざまであり、地形や周囲建物等の影響を考慮したケースバイケースの対応が求められる。数値計算による予測データを蓄積しながら、実際の観測結果との比較を織り込み、計算結果の妥当性評価を継続する必要がある。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

研究論文

1. 長谷川真大：冷却塔から排出される可視ブルームの予測とその低減に関する研究、呉工業高等専門学校 専攻科応用研究論文集 No.20、p22-27(2018)
2. 桂拓輝：冷却塔から排出される可視ブルームの予測、呉工業高等専門学校 機械工学科卒業研究論文集 平成 29 年度、pp57-62

学会での発表

1. 長谷川真大、高田一貴、道岡武信：冷却塔から排出される可視ブルームの予測、化学工学会東広島大会 P-07(2018)
2. 長谷川真大、高田一貴、道岡武信：冷却塔から排出される可視ブルームの予測、機械学会中四国支部 徳島大会、214(2018)
3. 高田一貴：プラント機器への CFD 適用、兵庫県立大学主催 第 4 回研究交流会(2018.3)

学術雑誌への投稿

1. Atmosphere または CTI(Cooling Technology Institute) Journal へ投稿を予定