

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05754

研究課題名(和文)大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化

研究課題名(英文)Hot air recirculation around air-cooled heat exchangers in plants

研究代表者

渡邊 智昭(Watanabe, Tomoaki)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70772292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,100,000円

研究成果の概要(和文)：プラントにおける空冷式熱交換器からの排熱拡散を模擬し、高温流体が気流中に噴出する流れの数値シミュレーションを実施した。熱交換機が誘起する多数の噴流の干渉や各噴流の強い旋回により高温流体が地表付近に留まることが示された。また、一方向に引き伸ばされた高温流体塊が生成されるメカニズムを乱流の数値シミュレーションにより明らかにした。熱交換器模型の風洞実験により熱交換器から横風中に噴出した流体が再度吸気される過程を可視化計測により示した。また、熱交換器排熱の観測実験を実施し、微気象環境下の排熱拡散に関するデータを取得した。こうした現象を微気象シミュレーションにより再現できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型プラント内の列をなした空冷式熱交換器において、高温排熱塊が風下側の熱交換器や各種装置に吸い込まれる事により装置の性能低下を引き起こすHot Air Recirculation(HAR)と呼ばれる現象が問題になっている。本成果によりプラントにおいてHARを引き起こす可能性がある現象が明らかとなった。また、HAR類似現象を微気象シミュレーションにより再現できることが確認された。微気象シミュレーションから得られる情報を基にHAR発生を事前予測しプラント運用を最適化することにより、HAR現象に起因するプラント運用効率の低下を防ぐことができると期待される。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations were performed for jets in a crossflow, which resemble heat dispersion observed for air-cooled heat exchangers used at plants. High-temperature fluid tends to stay near the ground because of the interaction of the multiple jets and the swirl motion of the jets. The process by which long-elongated turbulent structures with high temperature are generated was investigated by numerical simulations of turbulent flows. A flow similar to the hot-air recirculation at plants was successfully reproduced in wind-tunnel experiments of a model of air-cooled heat exchangers. Observational experiments were also conducted to obtain data on heat dispersion in a microclimate environment. These phenomena were shown to be well predicted by microclimate simulations.

研究分野：流体工学

キーワード：微気象 流体工学 Hot Air Recirculation プラント 数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

大型プラント内の列をなした空冷式熱交換器において、高温排熱気塊が風下側の熱交換器や各種装置に吸い込まれる事により装置の性能低下を引き起こす Hot Air Recirculation (HAR) と呼ばれる現象が問題になっている①。微気象情報を基に HAR 現象を予測しプラント運用を最適化することにより、HAR 現象に起因するプラント運用効率の低下を防ぐことができると期待される。

## 2. 研究の目的

HAR 発生メカニズムと支配パラメータを流れの数値シミュレーション・熱交換器排熱の観測実験により解明し、微気象情報およびプラント運転状況に基づく HAR 予測の可能性を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 排熱源をモデル化した流れの数値解析を実施した。計算手法として、乱流モデルを用いることなく流れの基礎式を数値的に解く直接数値計算法 (Direct Numerical Simulation, DNS) と、小スケール乱流運動の効果をモデル化 (サブグリッドスケールモデル) し大スケール乱流運動の支配方程式を解くラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) を用いた。DNS・LES には内製の部分段階法に基づく有限差分法コードを使用した。空間離散化には二次精度中心差分を、時間積分には三段三次ルンゲクッタ法を用いた。また、LES におけるサブグリッドスケールには 10 次精度ローパスフィルタに基づく陰的モデルを適用した。構造物などのモデル化には埋め込み境界法を用いた。また、計算コードは MPI により並列化されている。本計算コードにより得られた乱流の数値計算結果が実験や他機関により開発されたコードの計算結果と比較されており、計算コードの妥当性が確認されている②③④⑤。

(2) 小型ファンを用いて空冷式熱交換器模型を製作し、風洞実験により熱交換器が誘起する流れを調査した。実プラントに設置されている熱交換器の諸元に基づき模型を設計した。風洞実験には名古屋大学に設置されている飛行性能評価風洞・定常流発生装置を使用した。熱交換器模型が誘起する流れを熱線流速計や粒子画像速度計 (Particle Image Velocimetry, PIV) により計測した。

(3) 微気象環境下における熱交換器からの排熱拡散現象を調査するため、都市ビル屋上に設置されている熱交換器排熱の観測実験を実施した。排熱の速度計測および可視化と観測日時の気象データを取得し、MSSG 微気象シミュレーションによる排熱拡散の予測精度を検証した。

## 4. 研究成果

プラントにおける空冷式熱交換器からの排熱拡散を模擬し、高温流体が横風中に噴出する流れの DNS・LES を実施した。空冷式熱交換器では旋回を伴う流れが誘起される。そこで、噴出流れの旋回成分の影響を調査するための解析を実施した。旋回流の境界条件には管内を流れる旋回流の速度分布を用いた。図 1 に旋回を伴わない場合の温度分布の可視化図を示す。 $x$  は横風方向、 $z$  は鉛直方向を表し、円形の噴出口 (直径  $D$ ) の中心を通る断面が可視化されている。噴出した高温流体が上方向に拡散していくため、地表付近には高温流体がほとんど現れない。一方、強い旋回を伴う流れが噴出すると、旋回が軸方向の流れを崩壊させることで高温流体が地表付近に留まることが明らかとなった。この旋回の効果は無次元数

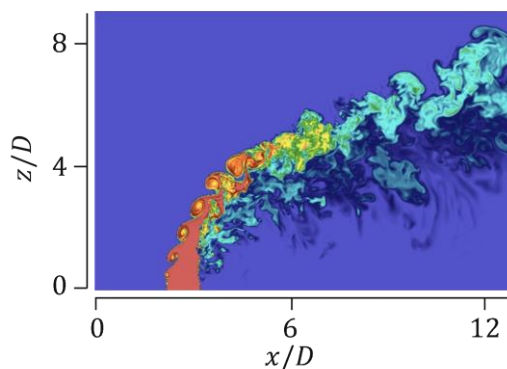


図 1 横風中に高温流体が噴出する流れの DNS (赤色：高温領域；青色：低温領域)

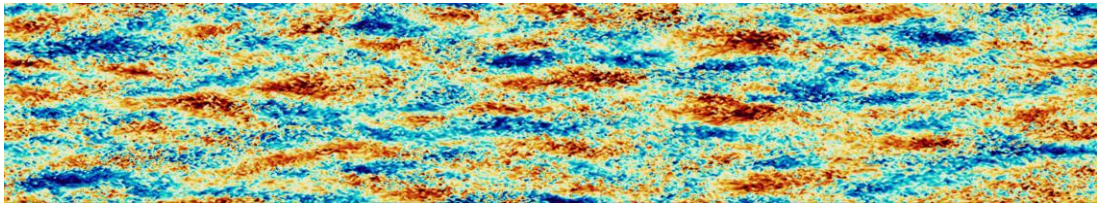


図2 安定密度成層下の乱流混合層中の非等方的な大規模構造  
(赤色：高速領域；青色：低速領域)

である Swirl 数に依存することが明らかにされている⑥。旋回による鉛直方向熱拡散の抑制は HAR 発生に繋がり得る。地表における無次元温度を Swirl 数の関数として整理することで、旋回により地表付近の温度上昇が生じる条件を明らかにした。また、実プラントの熱交換器と同様に旋回を伴う高温流体が横風中に多数噴出する流れの解析を行った。旋回流同士の間渉により鉛直方向熱拡散が抑制され、地表付近の温度上昇が生じることが確認された。こうした流れの MSSG 微気象シミュレーションによる解析が調和的予測班により実施された。本数値解析結果との比較により、HAR 類似現象を微気象シミュレーションにより精度よく予測できることが確認された⑦⑧。

HAR 発生時には一方向に引き伸ばされた非等方的な高温流体塊が現れることが仮想プラントを対象としたシミュレーションにより確認された。こうした非等方性の強い乱流構造の発生要因を明らかにするための数値シミュレーションを実施した。安定密度成層下の浮力や地面と乱流の間渉により鉛直方向乱流運動が抑制される環境下において、平均速度シアが乱流場に作用することで平均流方向に引き伸ばされた乱流構造(図2)が生成されることが明らかとなった⑨。温度成層下ではこの乱流構造により一方向に長い高温流体塊が現れることも示された。また、安定密度成層下であってもこうした乱流構造は平均速度シアが働かない乱流場には現れないことも確認された⑩。非等方的な高温流体塊の外縁部は低温流体と接しており、その境界領域が高温流体塊の安定化や崩壊に関連していると予想される。こうした境界領域には乱流の速度変動に起因するせん断層が存在することが示された⑪。せん断層構造を抽出しその近傍の流れ場の特性を明らかにすることで、せん断層の崩壊が高温流体塊の外縁における乱流熱拡散を促進する可能性が示された⑫⑬⑭⑮。

小型ファンによる熱交換器模型を用いた風洞実験を実施した。ファンが誘起する流れの PIV 計測により、熱交換器模型から噴出する流体が横風により下流に移流される過程を調査した。熱交換器模型から上向きに噴出した流れと横風の間渉により噴出した流体が再び熱交換器模型に吸い込まれることが示され、HAR 類似現象を小型模型で再現することに成功した。異なる横風流速に対する実験により HAR 現象が発生する条件について検討した。さらに、実プラントで用いられる HAR 抑制手法について熱交換器模型を用いた実験により検証し、HAR 発生メカニズムとの関連を明らかにした。

都市ビル屋上に設置された熱交換器からの排熱拡散の観測実験を実施した。排熱気流の可視化や速度計測を行い、計測実施日の気象データとともに MSSG 微気象シミュレーションの検証に用いた。調和的予測班により観測対象とした区域の微気象シミュレーションが実施され、観測された排熱拡散が微気象シミュレーションにより再現されることを確認した。これは実気象条件下のプラント排熱拡散を微気象シミュレーションにより正確に予測可能であることを示す重要な成果である。

#### <引用文献>

- ① 久保田 圭、空冷式 LNG プラントにおける Hot Air Recirculation (HAR)、日揮技術ジャーナル、Vol. 3、No. 2、2014、1-8
- ② T. Watanabe & K. Nagata, Mixing model with multi-particle interactions for Lagrangian simulations of turbulent mixing, Physics of Fluids, Vol. 28、2016、085103
- ③ T. Watanabe, X. Zhang, & K. Nagata, Turbulent/non-turbulent interfaces detected in DNS of incompressible turbulent boundary layers, Physics of Fluids, Vol. 30、2018、035102
- ④ T. Watanabe, X. Zhang, & K. Nagata, Direct numerical simulation of incompressible turbulent boundary layers and planar jets at high Reynolds numbers initialized with implicit large eddy simulation, Computers & Fluids, Vol. 194、2019、104314

- ⑤ T. Katagiri, T. Watanabe, & K. Nagata, Statistical properties of a model of a turbulent patch arising from a breaking internal wave, *Physics of Fluids*, Vol. 33、 2021、 055107
- ⑥ T. Furuta, T. Watanabe, K. Nagata, X. Hu, K. Matsuda, R. Onishi, & S. Qian, Direct numerical simulation of turbulent mixing in a heated swirling jet issued into a cross-flow, *WCCM-APCOM 2022*, 2022
- ⑦ X. Hu, R. Onishi, T. Furuta, K. Matsuda, K. Nagata, S. Qian, & T. Watanabe, Model intercomparison study of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation, *WCCM-APCOM 2022*, 2022
- ⑧ S. Qian, X. Hu, T. Furuta, K. Matsuda, K. Nagata, R. Onishi, & T. Watanabe, Sensitivity study of turbulence models and mesh size for CFD simulations of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation, *WCCM-APCOM 2022*, 2022
- ⑨ T. Akao, T. Watanabe, & K. Nagata, Vertical confinement effects on a fully developed turbulent shear layer, *Physics of Fluids*, Vol. 34、 2022、 055129
- ⑩ T. Watanabe, Y. Zheng, & K. Nagata, The decay of stably stratified grid turbulence in a viscosity-affected stratified flow regime, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 946、 2022、 A29
- ⑪ M. Hayashi, T. Watanabe, & K. Nagata, The relation between shearing motions and the turbulent/non-turbulent interface in a turbulent planar jet, *Physics of Fluids*, Vol. 33、 2021、 055126
- ⑫ K. Nakamura, T. Matsushima, Y. Zheng, K. Nagata, & T. Watanabe, Large- and small-scale characteristics in a temporally developing shearless turbulent mixing layer, *Physics of Fluids*, Vol. 34、 2022、 115117
- ⑬ M. Hayashi, T. Watanabe, & K. Nagata, Characteristics of small-scale shear layers in a temporally evolving turbulent planer jet, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 920、 2021、 A38
- ⑭ T. Watanabe & K. Nagata, Energetics and vortex structures near small-scale shear layers in turbulence, *Physics of Fluids*, Vol. 34、 2022、 095114
- ⑮ 中村浩太郎、渡邊智昭、長田孝二、無せん断乱流混合層における乱流・乱流界面の特性、日本機械学会第 100 期流体力学部門講演会、2022

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Akao, T. Watanabe, K. Nagata	4. 巻 34
2. 論文標題 Vertical confinement effects on a fully developed turbulent shear layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 055129 ~ 055129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0090686	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Watanabe, Y. Zheng, K. Nagata	4. 巻 946
2. 論文標題 The decay of stably stratified grid turbulence in a viscosity-affected stratified flow regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A29-A29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Watanabe, K. Nagata	4. 巻 34
2. 論文標題 Energetics and vortex structures near small-scale shear layers in turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 095114 ~ 095114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0099959	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Nakamura, T. Matsushima, Y. Zheng, K. Nagata, T. Watanabe	4. 巻 34
2. 論文標題 Large- and small-scale characteristics in a temporally developing shearless turbulent mixing layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 115117 ~ 115117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0121047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi M., Watanabe T., Nagata K.	4. 巻 33
2. 論文標題 The relation between shearing motions and the turbulent/non-turbulent interface in a turbulent planar jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 055126 ~ 055126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0045376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katagiri T., Watanabe T., Nagata K.	4. 巻 33
2. 論文標題 Statistical properties of a model of a turbulent patch arising from a breaking internal wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 055107 ~ 055107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0046832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Masato, Watanabe Tomoaki, Nagata Koji	4. 巻 920
2. 論文標題 Characteristics of small-scale shear layers in a temporally evolving turbulent planar jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A38-A38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Tomoaki, Nagata Koji	4. 巻 927
2. 論文標題 Large-scale characteristics of a stably stratified turbulent shear layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A27-A27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.773	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 榎亮, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 速度こう配テンソルの三成分分解による乱流噴流のエネルギー輸送解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村浩太郎, 松島哲也, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 平行格子により生成される無せん断乱流混合層の直接数値計算
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Furuta, T. Watanabe, K. Nagata, X. Hu, K. Matsuda, R. Onishi, S. Qian
2. 発表標題 Direct numerical simulation of turbulent mixing in a heated swirling jet issued into a cross-flow
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Hu, R. Onishi, T. Furuta, K. Matsuda, K. Nagata, S. Qian, T. Watanabe
2. 発表標題 Model intercomparison study of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Qian, X. Hu, T. Furuta, K. Matsuda, K. Nagata, R. Onishi, T. Watanabe
2. 発表標題 Sensitivity study of turbulence models and mesh size for CFD simulations of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Akao, T. Watanabe, K. Nagata
2. 発表標題 The characteristics of elongated large-scale structures in a wall-confined shear layer
3. 学会等名 The 19th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村浩太郎, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 無せん断乱流混合層における乱流・乱流界面の特性
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二, 胡希東, 松田景吾, 大西領, 錢紹祥
2. 発表標題 主流と直交する旋回噴流群による乱流熱拡散の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 赤尾拓海, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 鉛直方向運動の束縛を受ける乱流混合層の発達に関する数値解析
3. 学会等名 第20回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 主流と直交する旋回噴流群による熱拡散の数値解析
3. 学会等名 第3回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化
3. 学会等名 第3回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊智昭
2. 発表標題 安定密度成層下のせん断乱流の乱流構造と拡散現象に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 安定密度成層下のせん断乱流の大スケール構造
3. 学会等名 第2回「微気象制御学」領域ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Akao, T. Watanabe, K. Nagata
2. 発表標題 Wall-confinement effects on the development of a turbulent shear layer
3. 学会等名 The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化
3. 学会等名 第2回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 主流に直交する旋回噴流の数値解析
3. 学会等名 第2回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Watanabe, K. Nagata
2. 発表標題 Characteristics of small-scale shear layers in isotropic turbulence
3. 学会等名 JSPS Bilateral Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Katagiri, T. Watanabe, K. Nagata
2. 発表標題 Turbulent/non-turbulent interface in a turbulent patch arising from a breaking internal wave
3. 学会等名 The 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Hayashi, T. Watanabe, K. Nagata
2. 発表標題 Analysis of velocity gradient tensor in a turbulent planar jet with triple decomposition
3. 学会等名 The 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊智昭
2. 発表標題 大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化
3. 学会等名 「微気象制御学」領域シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林雅人, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 乱流平面噴流における内部せん断層の解析
3. 学会等名 第18回日本流体力学中部支部講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長田 孝二  (Nagata Koji)  (50274501)	名古屋大学・工学研究科・教授    (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------