

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04264

研究課題名（和文）縦渦による噴流輸送制御に向けた基礎構造の解明

研究課題名（英文）Fundamental study on transport phenomena on jets toward their control by streamwise vortices

研究代表者

伊藤 靖仁 (Ito, Yasumasa)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40346078

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：噴流を中心とする乱流の基礎構造の解明を行うとともに、噴流初期流速分布の工夫による混合拡散の制御を目的とした研究を、主に数値シミュレーションにより行った。具体的には、準一様等方性乱流およびせん断乱流場における乱流エネルギーおよびスカラーの渦スケール間輸送機構を明らかにすると共に、ヴォルテクスジェネレータを用いた噴流制御、および深層強化学習による噴流初期流速分布の最適制御を行った。研究の結果、噴流における混合・拡散の促進/抑制のために望ましい初期流速分布形状の同定を行うとともに、その流動構造を解明することにより、その物理的背景を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

噴流はエンジン、エアコンなど幅広い流体機器にみられる現象であり、その基礎構造の解明および最適化は、高エネルギー効率・低環境負荷機器の開発に不可欠である。本研究では最も一般的な噴流制御手法である初期流速分布の最適化に焦点を当て、それにより引き起こされる縦渦など二次流れを利用した噴流制御法の最適化を行った。本研究より、初期流速分布を特殊な形状とすることで、通常の噴流とは大きく異なる統計的性質を有する噴流が形成されることが明らかになった。これは従来では実現が困難であった特性を有する噴流の実現可能性を示しており、今後の工学応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The research aimed to elucidate the fundamental structure of turbulent flows centered around jets and control the mixing and diffusion through innovative design of the initial velocity distribution of the jet. The study primarily relied on numerical simulations. Specifically, it aimed to reveal the turbulent energy and scalar transport mechanisms across vortex scales in quasi-uniform isotropic turbulence and shear turbulent flows. The research also involved jet control using vortex generators and optimal control of the initial jet velocity distribution through deep reinforcement learning. The results identified desirable initial velocity distributions for promoting or suppressing mixing and diffusion in jets. Furthermore, the physical mechanisms behind them were elucidated. Overall, the research contributed to the understanding of turbulent flows and provided insights into controlling mixing and diffusion.

研究分野：流体工学

キーワード：Jet Mixing Diffusion Control

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

噴流場における熱・物質の乱流拡散混合の制御手法を確立することは、高効率工業装置の開発に直結する重要な課題である。多くの流体機器において拡散混合促進が求められるのは言うまでもないが、局所熱源冷却のための冷風噴射など、噴流拡散を抑制し指向性を強めることも重要な場合がある。

これまでの申請者のグループでは、実用性を踏まえて付加エネルギーを用いないパッシブな噴流制御を目的とする研究を行ってきた。例えば噴流出口部に取り付けたヴォルテクスジェネレータ(VG)と呼ばれる小突起が噴流に及ぼす影響を調査した結果、VG が生成した縦渦を利用した噴流制御は可能であるが、混合拡散は VG の数に比例して増大するわけではなく、強制的な乱流化に伴う乱流エネルギー散逸の加速の影響が顕著な場合には抑制されることを明らかにした。また、旋回噴流に関する研究でも、噴流と周囲流体の混合は旋回により促進されるものの、旋回強さと乱れに寄与する支配的なエネルギーモードの強さは必ずしも一対一ではないことなどを明らかにした。

しかし、既往研究では考慮すべきパラメータや条件も限定的であったため、得られた知見や制御法の有効性の適用範囲も限定される。また現実を鑑みると流れ場は初期条件・境界条件により流れは簡単に変化するため、あらゆる条件で流れ場を再現しデータベース化することは現実的ではない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、工学的応用が見込める領域を中心とした条件での噴流現象の理解および付加エネルギーを必要としないパッシブな噴流制御法の確立を目指した。具体的には、ヴォルテクスジェネレータの各種パラメータが噴流の拡散・混合に及ぼす影響を章関するとともに、噴流の混合拡散の促進・抑制を目的として、深層強化学習を用いた初期流速分布の最適化を行った。さらに乱流輸送現象に関する基礎研究として、準一様等方性乱流場である格子乱流場と、噴流と同様にせん断乱流場である混合層を対象とした基礎研究を行い、特に渦スケール間の乱流エネルギーおよびスカラー輸送に着目した研究を行った。

3. 研究の方法

(1) ヴォルテクスジェネレータによる噴流制御

本研究では、有限差分法に基づく直接数値計算を実行した。計算領域は噴流出口径 d に対し、 $L_x = 12.0d$, $L_y = 7.0d$, $L_z = 7.0d$ とした。噴流出口直径および噴流出口速度に基づくレイノルズ数は 10000 とした。タブの設置数は 0 個、3 個、6 個とし、タブは迎角 $\theta = 90^\circ$ で噴流出口外周に等間隔に設置した。

(2) 深層強化学習を用いた最適噴流初期分布の同定

図 1 に、流体数値シミュレーションにおける計算の概略を示す。計算領域は主流(x)方向に 300 mm、垂直(y)方向に 400 mm であり、格子点数は各方向にそれぞれ 100 点または 400 点である。噴流シミュレーションは OpenFOAM により実行し、乱流モデルには定常 k- ϵ モデルを用いた。流入流量は、初期流速分布に関わらず一定(断面平均流速が 2 m/s)とした。

深層強化学習のアルゴリズムには、Deep Q-Network を採用した。一般的に噴流は周囲流体を巻き込みながら発達するが、それと同時に中心部での噴流速度は出口からの距離に従って低下する。そこで具体的な最適化指標を、下流部における流量または噴流中心速度とした。

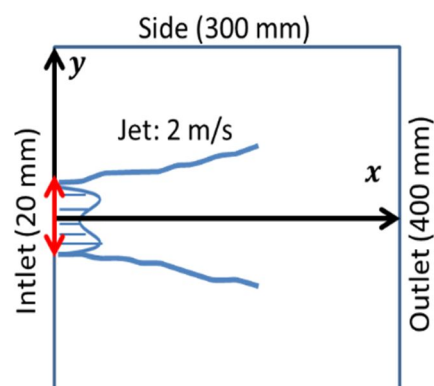


Fig. 1 Schematic of computational domain

4. 研究成果

(1) ヴォルテクスジェネレータによる噴流制御

図 2 にタブを設置した場合における流量(Q_i)とタブ無しの場合の流量($Q_{i,wo}$)の比の主流方向変化を示す。 $\theta = 30^\circ$ の場合、3 タブの場合には全領域にわたって混合拡散が促進されており、6 タブの場合には、上流部分では

促進されるが下流では抑制される．これに対して $\theta = 90^\circ$ では，3 タブの場合において上流部では促進されるが中流域から抑制されること，6 タブの場合には $\theta = 30^\circ$ の場合や $\theta = 90^\circ$ の 3 タブの場合と同様の分布を示すが，より顕著であることがわかる．図 3 に，3 タブの場合におけるタブ近傍での流線を示す．図 3 より， $\theta = 30^\circ$ の場合には見られる縦渦が $\theta = 90^\circ$ の場合には見られないことがわかる．ただしこの影響はすぐ下流で消えるため，縦渦の影響は出口近傍に限られる，すなわち混合拡散に及ぼす影響は小さいことが明らかになった．またその他の統計的解析から，3 タブの場合には，巻き込み速度および噴流界面面積が 3 タブの場合よりも 6 タブの場合の方が小さくなるため，混合拡散が 6 タブの場合の方が下流部でより抑制されることが明らかになった．その一方で 3 タブの場合には， $\theta = 30^\circ$ の場合には，0 タブの場合より噴流海面面積が大きく，巻き込み速度も同程度であるため下流まで促進され続けるが， $\theta = 90^\circ$ では噴流界面面積は 0 タブ以上であるが，巻き込み速度が小さいため抑制されることが明らかになった．

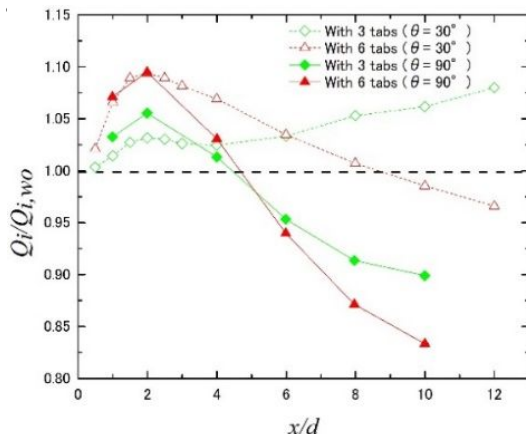


Fig. 2 . Mainstream directional change in the effect of tab placement on flow rate

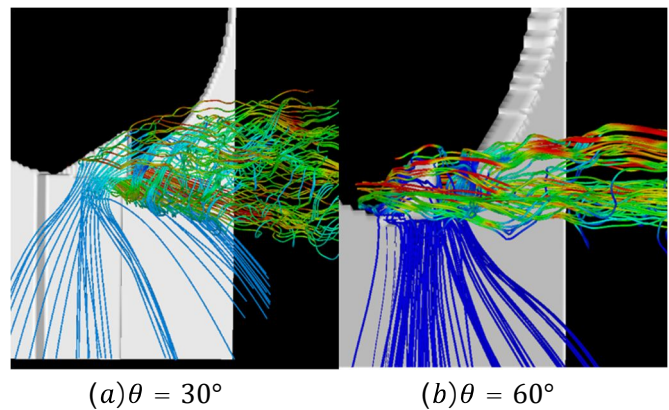


Fig. 3 . Streamlines around the tabs in the case of 3 tabs .

(2) 深層強化学習を用いた最適噴流初期分布の同定

図 4 に学習によって同定された最適な初期流速分布を示す．流量最小化と中心温度最大化の場合には類似した形状をしており，外縁部の流速が大きく外側へ広がるような分布を示す．一方で中心流速最大化の場合には，中心へ集まるような分布となっている．初期分布が一様流速の場合と比較すると，流量最小化の場合では流量が約 28%減少，中心流速最大化の場合では流速が約 19%増加，また中心温度最大化の場合では，温度差の減少が約 21%抑制された．各場合におけるこれらの統計量を比較すると，流量最小化と中心温度最大化の場合にはほぼ同じ値であった．一方，中心流速最大化の場合には，中心流速と流量が大きく中心温度が小さいという結果となった．一般的な噴流では，主流方向に進むにつれて中心流速が減少，周囲温度との差が減少，流量が増大する傾向を示す．しかし，今回のように初期流速分布が複雑な場合には，この傾向は当てはまらないことがわかった．

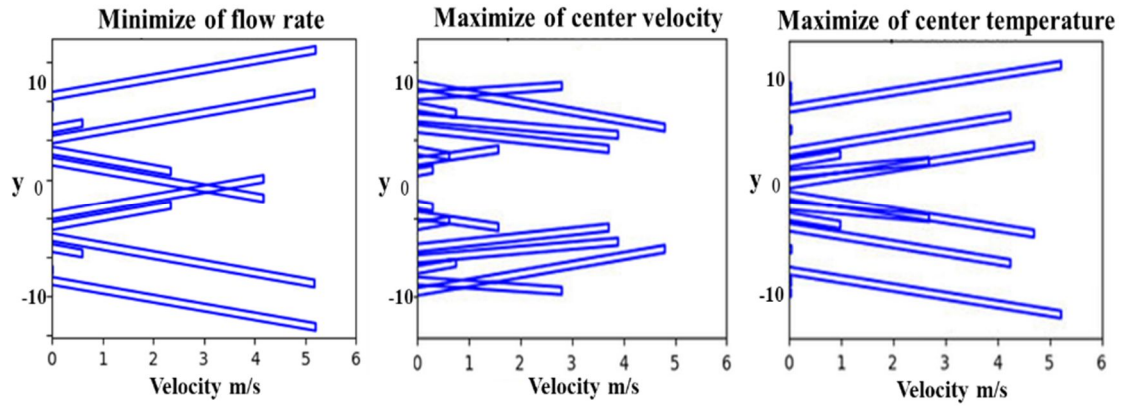


Fig.4 Optimal initial velocity distribution

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasumasa Ito, Kosuke Naganawa, Yasuhiko Sakai, Koji Iwano	4. 巻 105
2. 論文標題 Momentum Diffusion Near Jet Exit in a Round Jet Controlled by Half Delta Wing Tabs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 715-734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10494-020-00129-x	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 1.Muyang Wang, Takuya Yurikusa, Yasuhiko Sakai, Koji Iwano, Yasumasa Ito, Yi Zhou, Yuji Hattori	4. 巻 97
2. 論文標題 Inter-scale transport of turbulent energy in grid-generated turbulence with low Reynolds numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Int. J. Heat Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 109031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.109031	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 該当する

1. 著者名 Wang Muyang, Yurikusa Takuya, Sakai Yasuhiko, Iwano Koji, Ito Yasumasa, Zhou Yi and Hattori Yuji	4. 巻 35
2. 論文標題 cale-by-scale Analysis of Interscale Scalar Transfer in Grid Turbulence with Mean Scalar Gradient	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 45153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0145314	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 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Wang, Y. Ito, Y. Yurikusa, Y. Sakai, K. Iwano
2. 発表標題 The relation between dissipation and the scale-by-scale transport in grid-generated turbulence
3. 学会等名 2021年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 汪 沐陽, 百合草 拓哉, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 格子乱流でのスカラの逆カスケード方向の輸送現象に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 汪 沐陽, 大川 拓己, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 乱流混合層におけるエネルギーおよびスカラの渦スケール間輸送機構の解明
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Wang, Y. Ito, T. Okawa, K. Iwano, Y. Sakai,
2. 発表標題 numerical Investigation about Inverse Cascade Phenomenon in Mixing Layer
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasumasa Ito, Takuya Yurikusa, Yasuhiko Saka, Koji Iwano, Yi Zho
2. 発表標題 Inter-scale Transfer of Turbulent Energy and Scalar in Grid Turbulence
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 百合草 拓哉, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕治
2. 発表標題 正方格子下流で生成される平衡・非平衡乱流場における乱流エネルギーおよびスカラのスケール間輸送機構の解明
3. 学会等名 日本機械学会東海支部 第70期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川 拓己, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕司
2. 発表標題 乱流混合層における乱流エネルギーおよびスカラのスケール間輸送の遷移に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会東海支部 第70期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 百合草 拓哉, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕治
2. 発表標題 格子乱流場における乱流エネルギー およびスカラのスケール間輸送機構に関する数値的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大川 拓己, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕司
2. 発表標題 自由せん断混合層における 乱流エネルギーおよびスカラの スケール間輸送機構に関する研究
3. 学会等名 第18回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wang Muyang, Yurikusa Takuya, Sakai Yasuhiko, Iwano Koji and Ito Yasumasa
2. 発表標題 Inter-scale transfer of passive scalar in grid turbulence
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 汪沐陽・百合草拓哉・岩野耕治・酒井康彦・伊藤靖仁
2. 発表標題 平均スカラー勾配を伴う流れ場におけるスカラーカスケード機構
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 3. Muyang Wang, Yasumasa Ito, Yi Zhou, Koji Nagata, Tomoaki Watanabe, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yuji Hattori,
2. 発表標題 Transport and dissipation mechanism of turbulent energy and scalar in wakes behind bars and grids
3. 学会等名 19th International conference on flow dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林祐介, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 噴流の混合拡散に対する深層強化学習を用いた初期流速分布最適化
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林祐介, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 噴流の熱拡散抑制を目的とした深層強化学習による最適条件の同定
3. 学会等名 第36回CFDシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村竜也, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 タブによる円形噴流の混合拡散制御に関する直接数値計算
3. 学会等名 第72期日本機械学会東海支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林祐介, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 流の混合拡散抑制を目的とした深層強化学習による初期流速分布最適化
3. 学会等名 第72期日本機械学会東海支部講演会
4. 発表年 2022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	酒井 康彦 (Sakai Yasuhiko) (20162274)	公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員 (73905)	

6. 研究組織（つづき）

	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	岩野 耕治 (Iwano Koji) (20750285)	名古屋大学・工学研究科・助教 (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