

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420119

研究課題名(和文) 低次モデルを用いた複数噴流のダイナミック制御

研究課題名(英文) Dynamic control of multiple jets using low-dimensional model

研究代表者

辻本 公一 (TSUJIMOTO, KOICHI)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10243180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：工学機器における混合や伝熱性能を向上させるため、DNS (Direct Numerical Simulation) により複数噴流の動的制御について検討した。自由噴流、衝突噴流に対してさまざまな回転制御を行い、統計エントロピーを用いた混合性能評価技術やPOD (Proper Orthogonal Decomposition) 法、DMD (Dynamic Mode Decomposition) 法などの低次モデル技術に基づき混合性能を評価した結果、これらの方法が混合性能の改善に有効であることを明らかにした。さらに複数噴流の制御を行い、混合特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to improve heat transfer and mixing performance of engineering applications, we investigate dynamic control of multiple jets using DNS(Direct Numerical Simulation). As the dynamic control, various types of rotating control are examined for free and impinging jets. Based on a mixing-state evaluation technique using a statistical entropy and a low-dimensional technique using both POD (Proper Orthogonal Decomposition) method and DMD (Dynamic Mode Decomposition) method, the mixing performance is evaluated. As a result, it is found that the proposed methods lead to the improvement of the mixing performance. Further multiple impinging jets are controlled and their characteristics of mixing performance are turn out.

研究分野：流体工学

キーワード：Jet DNS low-dimensional model Coherent structure Mixing Vector control POD DMD

### 1. 研究開始当初の背景

多くの工学機器において、混合、伝熱、化学反応の促進を行うための基本的な手段として噴流が用いられている。この噴流制御の目標は各機器の定格時における混合改善が主たるものであったが、制御しなければならぬ機器も従来に比べ多様化し、運用の大幅な負荷変動に柔軟に対応すること、あるいは機器のコンパクト化、微小化することに対応することができる強い混合制御手法の開発が求められている。これまで噴流制御の方法は受動的な手法（例えば非円形ノズル、リップ、タブ、同軸噴流、共鳴噴流など）と能動的な手法（音響励起、微小噴流の吹き付けなど）に分類でき、それぞれが個別に検討されてきた。理論的な線形安定解析の結果から、噴流出口近傍領域での不安定なモードには、周方向に一様な軸対称モードと螺旋モードがあり、これら基本モードの組合せによって複雑な噴流操作（はばたき (flapping) モード、分岐 (bifurcating) モード、開花 (blooming) モード等）の可能性が明らかにされている。それらの制御の着眼点は単独噴流の不安定モードをどのように引き出すかで、そのためのかく乱や、ノズルの形状を変化させるなどの方策が提案されてきた。しかしながら単独の噴流が複数利用されている実用の場合に対して、複数の噴流を積極的に制御することについて十分な検討は行われていない。

### 2. 研究の目的

実用上、利用される複数噴流の混合特性を改善するため、単独噴流で有効性を見出した噴流を動的に制御するダイナミック制御の考えを複数噴流場に適用し、複数噴流場における独自の有効な混合制御手法を開発する。そのためには効率的に予測する数値スキームの開発が必要である。軸対称噴流の場合であれば前述のように、安定解析結果から得られる不安定モードを基準に入力制御を検討することができる。しかしながら、噴流が複数化した場合、従来と大きく異なる不安定構造の発生や従来とは異なる混合の評価技術の確立が必要になる。本研究では複数化に必要な個々の噴流の制御技術、複数噴流の干渉による混合制御技術の開発を行い、複数噴流の制御に関する包括的な基礎研究を行う。

### 3. 研究の方法

多様な噴流の制御に対する制御結果を高精度に予測するため、すでに開発したスペクトル法と Compact Scheme を併用した高精度なハイブリッドスキームを利用した直接数値シミュレーション(DNS)を実施する。特に本研究で利用する計算コードは、周期境界条件の制約を緩和するため、主流と直交する2方向への離散化に sine, cosine 級数を用いておりこれにより、自由噴流の場合、混合特性を表す周囲流体の取り込みを表すエントレイメントが正確に評価することができる。

また、噴流自体の周囲への拡散を表す混合状態量として、熱力学的状態量に基づく混合指標である統計エントロピーを取り上げ、これらエントレイメントや統計エントロピーを利用して混合性能を評価する。衝突噴流については、衝突壁上での混合状態よりも壁直上の混合状態に強く関心があることから、混合性能に相当する衝突面上でのヌセルト数を評価指標として取り上げ、制御効果を検討する。

#### (1) 混合制御手法の開発

複数化には個々の噴流の効果的な混合制御手法の開発が不可欠である。これまでの能動制御では、噴流自体の不安定性に関連する励起を利用した制御が行われてきた。しかし、より高性能な混合性能改善のためには新しい制御の観点が必要で、従来手法のように噴流自体の流れの不安定性に依存するのではなく、噴流を強制的に制御することに着目し、噴流を能動的に制御するダイナミック制御を提案している。自由噴流に対して空間中に広範囲に噴流を拡散させるため、一定角度で傾けたノズルを回転軸周りに回転させる回転制御、またこの回転制御に対して、回転の一周期ごとに回転方向を変える交互回転制御を行い、制御する振動周波数の違いが、どのように噴流の構造変化を生じ、混合状態に影響を与えるかを調査し、流動特性ならびに混合特性を定量的、定性的に評価する。さらに噴流出口付近でより積極的に噴流を拡散させるため、回転軸まわりに一定の距離で旋回させる旋回制御についても検討する。これらの結果から、複数化に必要な高性能な噴流制御手法の開発を行う。また、衝突噴流についてもこの旋回制御について検討を行う。

#### (2) 低次モデルによる制御のための基礎的検討

複数噴流の混合特性を評価と制御のためには、低次モデルの構築が有効である。実験手法及び数値スキームの進歩により、様々な流れ場について詳細な時空間データが得られるようになり、その動的挙動を理解するため、膨大なデータの中から主要な構造を見出す方法として3次元PIVや大規模乱流計算において、POD ( Proper Orthogonal Decomposition ) 法などの構造解析手法がしばしば用いられる。POD法では、流れ場を直交分解し、統計的にエネルギーの高い支配的な構造を抽出する構造解析手法であり、その計算負荷を軽減した Snapshot POD法が一般に用いられる。しかしながら、POD解析は流れ場の時間平均された空間相関に基づく抽出方法であるため、動的な情報を直接得ることはできない。最近、流れ場の瞬時の時系列データから動的な情報とそれに対応するモードを抽出することができるDMD ( Dynamic Mode Decomposition ) 法が注目されている。これによる構造解析を行い、低次

モデルに関するモード構造の特性から、モデル化のための基礎的知見を得る。

### (3) 複数噴流の制御

自由噴流の場合、その制御方法として、上記(1)で検討された方法のうち、複数化が容易な旋回制御について、周波数特性について調べ、複数化の可能性について検討する。

衝突噴流はよどみ領域で非常に高い熱伝熱性能を示すが、よどみ領域から離れた位置において伝熱性能は急激に減少する。そのため、不均一な熱伝達を解消し、さらに伝熱面積を拡大するため、工業分野では一般に多数のノズルをもつ多重衝突噴流が用いられる。多重衝突噴流では、各噴流が衝突後に形成する壁面噴流は相互に作用し合い、複雑な流れ場を形成し、伝熱性能に大きな影響を与えることが知られている。そのため、多重衝突噴流の最適な伝熱性能を得るためには、噴流の幾何学的配置、つまり噴流同士の間隔や噴流の配置形状が流れ場に及ぼす影響を解析することが重要である。4本のノズルを持つ多重衝突噴流について、正方形の角に二次元的に配置した場合、一列に1次元的に配置したそれぞれの場合について噴流間の間隔を変更した制御を行い、多重衝突噴流が形成する複雑な流動構造、およびノズルの配置間隔が流動構造に及ぼす影響について調べる。さらに一列の場合については列方向に振動させる振動制御を試み、複数噴流におけるダイナミック制御の可能性を探る。

## 4. 研究成果

### (1) 混合制御手法の開発

自由噴流の場合、回転制御した結果、瞬時構造および平均特性より、回転周波数の変化に応じて Helical mode から Entangled mode へとフローパターンが変化すること、いずれの場合も半径方向へ大きく拡散すること、下流側では発達した乱流状態へと移行することを明らかにし、エントレイメント量およびエントロピーを用いた混合指標より、回転制御は周囲流体の巻き込み量を大幅に増加させ、混合を著しく促進させること、Helical mode において最も高い混合促進効果が得られることを明らかにした。このことから、考案したダイナミック制御が混合制御に有効であることを見出した。さらにカオス混合的な視点から、回転方向を反周期ごとに反転させる交互回転制御を提案し、多数の回転周波数の場合についてシミュレーションを行い、回転周波数に対する混合特性を評価した結果、一方向に回転させた制御と同様の混合性能が交互回転制御の場合にも生じることを明らかにした。回転軸周りに噴流を旋回させる制御方法について、旋回半径ならびに旋回周波数を変化させ混合特性を評価した結果、制御しない場合と比べ大幅に混合特性が改善し、制御したパラメータ範囲において旋回

半径よりも旋回周波数に応じて噴流構造のパターンが大きく変化することを見出した。

衝突噴流の場合、単独噴流を一定速度で旋回させる旋回制御を行い、旋回周波数と旋回半径の影響について調べた。衝突面上での伝熱特性の不均一が、特定の旋回周波数でかつ特定の旋回半径下で大きく改善されることを見出した。この均質化について熱バランスの収支からその要因を明らかにした。

### (2) 低次モデルによる制御のための基礎的検討

回転制御した場合、Snapshot POD 法による解析結果から、上流部において周囲流体を巻き込む流れと混合を促進させる構造が形成されること、DMD 法による解析結果から、噴流の制御周波数と対応するモードは、Snapshot POD 法の1次モードと類似の構造を有する高いエネルギーモードを有すること、ダイナミック制御によりこれらの高いエネルギーモードが直接的に誘起されることを明らかにした。以上からも低次モデルの構築において DMD 法が有効な手段となり得ることを見出した。

また自由噴流の回転制御や交互回転制御や旋回制御した衝突噴流を制御したについてその際の動的挙動を調査するため、DMD 法により噴流の動的構造を解析し、制御によって生じる噴流の空間構造と周波数特性について明らかにした。特に制御に対する主要なモードの構造特性は、回転制御の影響を受け、スパイラルな高いエネルギーを持つ構造特性をもつことを明らかにされ、回転制御した場合、直感的にも理解できる動的構造が捉えられ、少数モードでの低次モデル化の可能を示唆する結果を得た。

### (3) 複数噴流の制御

自由噴流の場合について、単独噴流を複数配置した旋回制御を行った結果、単独の場合と比べて混合特性は大きく改善しない結果を得た。この要因は単独の場合と比べ、個々の噴流どうしの干渉が大きいため、単純な複数化では効果を上げないこと、複数化の問題点を明らかにした。

衝突噴流の場合、流動構造の解析から、多重衝突噴流の特異な流動構造として噴流のコア領域の早期崩壊、噴流外縁部における速度の減衰、噴流の半径方向の変更が確認された。また、各噴流が衝突壁面に形成する壁面噴流が、互いに領域中央部で衝突することで吹き上げ流れを形成、噴流と吹き上げ流れの相互作用により、領域内に再循環領域が形成されること、壁面噴流の衝突する箇所強い乱れが生じ、これにより伝熱特性が局所的に改善されることを明らかにした。さらに4本の噴流を一列に配置した多重衝突噴流について配置間隔が伝熱特性に与える影響を調べ、正方形配置した場合と同様に噴流間に特徴的な吹き上げ流れが形成されることを明

らかにした。さらに列方向に多重噴流を振動させる制御を行った結果、制御しない場合と比べ総伝熱量が改善され多重衝突噴流下におけるダイナミック制御の有効性を明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

<sup>1</sup> K. Tsujimoto, T. Onodera, T. Shakouchi, T. Ando, Direct numerical simulation of dynamic-rotational controlled jet, Proc. Int. Conf. Jet, Wakes and Separated Flows 2015, USB-memory, 6P., 2015, 査読有.

<http://www.flow.kth.se/?q=node/215>

<sup>2</sup> N. Koike, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Analysis of flow characteristics in rotating impinging jet using DNS, Proc. Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, USB-memory, 6P., 2015, 査読有.

<http://www.flow.kth.se/?q=node/215>

<sup>3</sup> A. Sanmuga, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Impinging Jet Controlled using Rotating Nozzle, Proc. ASME-JSME-KSME joint Fluids Eng. Conf. 2015, USB-memory, 6P., 2015, 査読有.

<http://www.ajk2015-fed.org/main/>

<sup>4</sup> K. Tsujimoto, A. Sanmuga, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Dynamic Rotating Jets, Proc. the 15th European Turbulence Conf., USB-memory, 2P., 2015, 査読無.

<http://www.etc15.nl/>

<sup>5</sup> T. Koide, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, DNS analysis of multiple impinging jets, J. Fluid Science and Technology, Vol. 9, No. 3, 12p., 2014, 査読有.

[doi.org/10.1299/jfst.2014jfst0027](https://doi.org/10.1299/jfst.2014jfst0027)

<sup>6</sup> K. Tsujimoto, N. Shibata, T. Shakouchi, T. Ando, Structural analysis of dynamic-controlled jet using DNS, J. Fluid Science and Technology, Vol. 9, No. 3, 12p., 2014, 査読有.

[doi.org/10.1299/jfst.2014jfst0043](https://doi.org/10.1299/jfst.2014jfst0043)

<sup>7</sup> T. Onodera, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of dynamic controlled jet under the rotational control mode, Proc. 6th Int. Conf. Vortex Flows and Vortex Models, CD-ROM, 6P., 2014, 査読無.

<https://sites.google.com/site/icvfm2014>

<sup>8</sup> N. Koike, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Impinging Jet Controlled using Rotating Nozzle, Proc. 6th Int. Conf. Vortex Flows and Vortex Models, CD-ROM, 6P., 2014, 査読無.

<https://sites.google.com/site/icvfm2014>

<sup>9</sup> K. Tsujimoto, N. Shibata, T. Shakouchi, and T. Ando, Structural Analysis of Dynamic-controlled jet using DNS, Proc. Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, CD-ROM, 6p., 2013, 査読有.

<http://icjwsf2013.org/>

<sup>10</sup> T. Koide, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, and T. Ando, DNS analysis of multiple impinging jets, Proc. Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, CD-ROM, 6p., 2013, 査読有.

<http://icjwsf2013.org/>

<sup>11</sup> M. Kito, T. Shakouchi, K. Tsujimoto, and T. Ando, Resonance Jet Flow from Notched Orifice Nozzle, Proc. Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, CD-ROM, 6p., 2013, 査読有.

<http://icjwsf2013.org/>

[学会発表](計 29 件)

<sup>1</sup> 神野敬太, 辻本公一, 小池直紀, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 間欠制御された多重衝突噴流の DNS, 日本機械学会東海支部第 65 期総会講演会, 2016 年 3 月 18 日, 愛知工業大学(愛知県・豊田市).

<sup>2</sup> 小池直紀, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 回転制御下における衝突噴流の熱流動特性, 日本機械学会東海支部第 65 期総会講演会, 2016 年 3 月 18 日, 愛知工業大学(愛知県・豊田市).

<sup>3</sup> サンムガ, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS を用いたダイナミック制御による噴流の混合性能, 日本機械学会東海支部第 65 期総会講演会, 2016 年 3 月 18 日, 愛知工業大学(愛知県・豊田市).

<sup>4</sup> 神野敬太, 辻本公一, 小池直紀, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 一列に配置された多重衝突噴流の DNS, 第 29 回 数値流体力学シンポジウム, 2015 年 12 月 17 日, 九州大学(福岡・福岡市).

<sup>5</sup> サンムガ, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS によるダイナミック制御した多重噴流の混合特性, 日本機械学会第 93 期流体工学部門講演会, 2015 年 11 月 8 日, 東京理科大学(東京・葛飾区).

<sup>6</sup> 小池直紀, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS を用いたノズル回転制御下における衝突噴流の熱流動解析, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学(北海道・札幌).

<sup>7</sup> K. Tsujimoto, A. Sanmuga, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Dynamic Rotating Jets, the 15th Euro. Turb. Conf., 2015/8/28, Delft(The Netherlands).

<sup>8</sup> A. Sanmuga, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Impinging Jet Controlled using Rotating Nozzle, ASME-JSME-KSME joint Fluids Engineering Conference 2015, USB-memory,

6P., 2015/7/27, Soul (Korea).  
9 N. Koike, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Analysis of flow characteristics in rotating impinging jet using DNS, ICJWSF-2015, 2015/6/17, Stockholm (Sweden).  
10 K. Tsujimoto, T. Onodera, T. Shakouchi, T. Ando, Direct numerical simulation of dynamic-rotational controlled jet, ICJWSF-2015, 2015/6/16, Stockholm (Sweden).  
11 SANMUGA K ARUMUGAM, 辻本公一, 小野寺冬真, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS によるダイナミック制御した多重噴流の混合特性, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015 年 3 月 14 日, 中部大学(愛知・春日井).  
12 N. Koike, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of Impinging Jet Controlled using Rotating Nozzle, The 6th Int. Conf. Vortex Flows and Vortex Models, 2014/11/18, Nagoya (Japan).  
13 T. Onodera, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, T. Ando, Direct Numerical Simulation of dynamic controlled jet under the rotational control mode, The 6th Int. Conf. Vortex Flows and Vortex Models, 2014/11/18, Nagoya (Japan).  
14 小池直紀, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 回転制御した衝突噴流の DNS, 第 12 回 日本流体力学会中部支部講演会, 2014 年 11 月 7 日, 三重大学(三重・津).  
15 小野寺冬真, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, ダイナミック制御した多重噴流の DNS, 第 12 回 日本流体力学会中部支部講演会, 2014 年 11 月 7 日, 三重大学(三重・津).  
16 小池直紀, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS によるノズル回転制御下における衝突噴流の流動, 伝熱特性, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 25 日, 富山大学(富山・富山市).  
17 小野寺冬真, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 回転モード下におけるダイナミック制御多重噴流の DNS, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 25 日, 富山大学(富山・富山市).  
18 K. Tsujimoto, N. Shibata, T. Shakouchi and T. Ando, DNS of vector-controlled jet under a rotational mode, The 10th Euro. Turb. Conf., 2014/9/16, Copenhagen (Denmark).  
19 小池直紀, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, ノズル回転制御下における衝突噴流の流動, 伝熱特性, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 8 日, 東京電機大学(東京・足立区).  
20 小野寺冬真, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS による回転モード下におけるダイナミック制御噴流の構造解析, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, 2014 年 9 月 9 日, 東京電機大学(東京・足立区).  
21 小池直紀, 辻本公一, 小出貴弘, 社河内敏彦, ノズル回転制御下における衝突噴流の DNS,

第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 10 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).  
22 小野寺冬真, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 回転モード下におけるダイナミック制御噴流の DNS, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 18 日, 名古屋大学(愛知・名古屋市).  
23 小出貴弘, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS による多重衝突噴流の噴流間干渉の非定常解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2013 年 11 月 10 日, 九州大学(福岡・福岡市).  
24 小野寺冬真, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 回転モードによるダイナミック制御した自由噴流の DNS, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2013 年 11 月 10 日, 九州大学(福岡・福岡市).  
25 T. Koide, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, and T. Ando, DNS analysis of multiple impinging jets, Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, 2013/9/1, Nagoya (Japan).  
26 K. Tsujimoto, N. Shibata, T. Shakouchi, and T. Ando, Structural Analysis of Dynamic-controlled jet using DNS, Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows, 2013/9/18, Nagoya (Japan).  
27 小出貴弘, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNS による多重衝突噴流の熱流動特性解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 11 日, 岡山大学(岡山・岡山市).  
28 T. Koide, K. Tsujimoto, T. Shakouchi, and T. Ando, Analysis of Jet-Jet Interaction of multiple impinging jet using DNS, The 14th Euro. Turb. Conf., 2013/9/4, Lyon (France).  
29 K. Tsujimoto, N. Shibata, T. Shakouchi, and T. Ando, Analysis of dynamic-controlled round jet using POD and DMD, The 14th Euro. Turb. Conf., 2013/9/1, Lyon (France).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻本 公一 (TSUJIMOTO KOICHI)  
三重大学, 大学院工学研究科, 教授  
研究者番号: 10243180

### (2) 研究分担者

安藤 俊剛 (ANDO TOSHITAKE)  
三重大学, 大学院工学研究科, 准教授  
研究者番号: 30273345  
社河内 敏彦 (SHAKOUCHI TOSHIHIKO)  
三重大学, 大学院工学研究科, 特任教授  
研究者番号: 10024605  
鬼頭 みずき (KITO MIZUKI)  
鈴鹿工業高等専門学校, 機械工学科, 講師  
研究者番号: 00550401