

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号： 14101  
 研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2010 ～ 2012  
 課題番号： 22560166  
 研究課題名 (和文) 低次モデル構築による多数噴流の混合制御手法の開発  
 研究課題名 (英文) Development on mixing control of multiple jets base on the construction of low-dimensional model

## 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

## 研究成果の概要 (和文)：

工学機器における混合や伝熱を効果的に制御するため、複数の噴流からなる多数噴流のための制御手法について、高精度な計算手法、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を用いて検討した。ノズルのベクトル制御を提案し、自由噴流に適用した結果、これらの方法が混合性能の改善に有効であること、多数衝突噴流の制御を行い、混合特性を明らかにした。

研究成果の概要 (英文) : In order to develop effective control method for heat and mass transfer and mixing in engineering applications, we investigate multiple jets which are assembled with a number of jets using high accurate numerical scheme, a mixing-state evaluation technique based on a statistical entropy and a low-dimensional technique based on both POD (proper orthogonal decomposition) method and DMD (Dynamic Mode Decomposition) method. A vector control of nozzle is proposed and applied to the mixing enhancement of free jets and 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.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

さまざまな工学機器において、混合、伝熱、化学反応等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きた。これまでの噴流制御の目標は各機器の定格時の混合改善が主たるものであったが、制御しなければ

ならない流れ場も従来に比べ多様化し、機器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、微小化にあわせた強い混合制御手法の開発が求められている。噴流制御の方法は受動的手法（非円形ノズル、リップ、タブ、同軸噴流、共鳴噴流など）と能動的手法（音響励起、微小噴流の吹き付けなど）に分類することができる。能動制御を考えると噴流の下流側を直接制御することは一般に難しく、ノズル近傍領域を制御することになる。線形安定解析の結果から、軸対称噴流の場合、近傍領域の不安定なモードは、周方向に一樣な軸対称な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（はばたきモード、分岐モード、開花モード等）も行われている。これらのモードは実験のみならず DNS(direct numerical simulation)により再現され、最適化の結果、噴流の広がりや最大にする励起周波数も見出されている。しかしながら単独の噴流が多数利用されている実用の場に対して、多数の噴流を積極的に制御することはまだ十分な検討は行われていない。

## 2. 研究の目的

機器の負荷変動に柔軟に対応し、かつこれまでにない強い混合性能を持つ噴流混合技術を創出するには、新たな制御手法の観点が必要である。本研究では単独噴流が複数化された複合噴流に着目し、その制御について検討する。これまでに行われた噴流の能動制御のほとんどは単独噴流で、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攪乱を入力し制御すればよい。しかしながら、噴流が多数化した場合、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。本研究では多数化に必要な評価技術から、個々の噴流の制御技術、多数の噴流の干渉による混合制御技術の開発を行い、多数噴流に関する包括的な基礎研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 高精度計算手法の開発

これまで多様な噴流の利用に対する制御を高精度に予測するため、フーリエ級数と Compact Scheme を併用した高精度なハイブリッドスキームを開発し、非円形噴流、複合噴流、衝突噴流、噴流のダイナミック制御などの研究を通して、開発したスキームの有効性が明らかにしてきた。しかしながら、フーリエ級数の使用は周期境界条件を噴流周囲に課すため、周囲からの流体の巻き込みである エントレイメントを正しく評価することができないことから、混合性能の評価に一定の制約が生じていた。これまでの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 級数を用いた

離散化を提案し、実験ならびに従来の周期境界条件を課した場合との比較を行い、提案する手法の妥当性を検証する。

### (2) 混合制御手法の開発

多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、噴流自体の流れ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、従来の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、ノズルを能動的に制御するベクトル制御を提案している。同一平面内において振動させる振動モードならびに、一定角度で傾けたノズルを噴流軸周りに回転させる回転モードの二種類の制御を行い、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。これらの結果から、多数化の要素技術として高性能な噴流制御手法の開発を行う。

### (3) 低次モデル構築のためモデル技術の検討

多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、噴流だけでなく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ってきている。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ために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法とは、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、動的な情報を得ることはできない。最近、流れ場の瞬時データの集まり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。これによる構造分析を来行い、低次モデルに関するモード構造の特性から、モデル化技術を検討する。

### (4) 衝突噴流の混合制御

衝突噴流の伝熱特性には、レイノルズ数、ノズル形状、衝突壁面とノズルとの距離、噴流の流入速度分布など、様々なパラメータが影響するが、よどみ領域の伝熱に対してどのようなパラメータが有効であるかは明確になっていない。ノズル出口直後の自由噴流領

域で形成される渦構造などの非定常な流動構造がよどみ領域での伝熱に及ぼす影響を明らかにするため、噴流出口部で主流方向に振動励起することで制御した場合との比較から、衝突壁上での混合特性についての影響を調査し、制御の可能性を探る。

#### (5) 多数噴流の制御

単一ノズルの衝突噴流はよどみ領域で非常に高い熱伝達性能を示すが、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。多重衝突噴流において、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の噴流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。

### 4. 研究成果

#### (1) 高精度計算手法の開発

実験データが豊富にある単独円形噴流のDNSを行い、非周期条件を課した場合における巻き込み量について計算した結果、実験値と良く一致する妥当な結果が得られ、開発した計算スキームが周囲境界条件を適切に表すことができることを確認した。また、瞬時構造および平均特性の結果から、適当なスケールリングにより、周期条件と非周期条件の違いが発達領域の乱流特性に対して特に大きな影響を与えないことを明らかにした。また、衝突噴流についてのDNSも行い境界条件の影響を評価した。衝突壁上で発生する渦が計算領域外へ流れ出る際、非周期境界条件と渦放出による現象との食い違いが数値的不安定を誘起することから、周囲境界にFRINGE領域を設ける方法を提案し、境界付近での数値的不安定を除去する新しい計算スキームを開発、提案する手法の妥当性を確かめた。

#### (2) 混合制御手法の開発

振動モードで制御した場合、振動周波数を変えることにより、波状モード、分岐モード、フラッピングモードへとフローパターンが大きく変化し、いずれの場合も制御方向へ大きく拡散すること、エントロピーを用いた混合指標より、分岐モードにおいて、噴流の分岐間の活発な混合と大幅な混合促進効果が

得られることを明らかにした。回転モードで制御した場合、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、エントロピー量およびエントロピーを用いた混合指標より、ベクトル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、考案したベクトル制御が混合制御に有効であることを見出した。

#### (3) 低次モデル構築のためモデル技術の検討

DMD法を用いて円形噴流の構造解析を行い、Snapshot POD法による解析結果との比較及び周波数特性から、DMD法で抽出されるダイナミックモードはpreferred modeの周波数と対応し、DMD法により従来から指摘されている噴流の動的特性を示す構造が抽出されることを明らかにした。振動ベクトル制御した場合、制御噴流の上位モードは、波状モード、分岐モード、フラッピングモードのいずれの場合も、噴流の加振周波数に対応し、励起が主要な渦構造の形成に寄与していることを明らかにした。回転ベクトル制御した場合、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、ベクトル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。

#### (4) 衝突噴流の混合制御

よどみ近傍の非定常伝熱特性は周期的に生じる非定常な渦構造によるもので、これにより粘性低層の薄化が生じ、伝熱・混合が活発化する。これらの知見から、ノズル出口で振動励起することで、ノズル出口直後で積極的に渦構造を発生させる制御を試みたが、非定常変動は強くなるが、平均値はほとんど改善が見られず、単純な構造制御の限界を明らかにした。

#### (5) 多数噴流の制御

多重衝突噴流の流動構造の解析から、多重衝突噴流と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。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で強い乱れが生じ、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。

#### 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9件)

①K. TSUJIMOTO, K. AO, T. SHAKOUCHI, and, T. ANDO, Mixing and Flow Structures of Vector-Controlled Free Jets using DNS, Proc. Seventh Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, pp.1-6, 2011. 査読無 <http://www.tsfp-conference.org/>.

②K. TSUJIMOTO, K. AO, T. SHAKOUCHI, and T. ANDO, Direct numerical simulation of vector-controlled free jets, J. Physics: Conf. Series, 318, 032051, pp.1-6, 2011, 査読無, doi:10.1088/1742-6596/318/3/032051.

③K. Tsujimoto, K. AO, T. SHAKOUCHI, and T. ANDO, Numerical Investigation on Flow Structures and Mixing Performances of Vector-Controlled Free Jet using DNS, J. Fluid Science and Technology, 6-4, pp. 401-411, 2011. 査読有, doi:10.1299/jfst.6.401

④辻本公一, 青孝次, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSによるベクトル制御された自由噴流の構造と混合特性に関する検討, 日本機械学会論文集 B 編, 77-775, pp.537-545, 2011. 査読有, doi.org/10.1299/kikaib.77.537

⑤K. Tsujimoto, K. Ao, T. Shakouchi, and T. Ando, Direct Numerical Simulation of Vector-Controlled Free Jet, Proc. The 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, CD-ROM, pp.1-6, 2010. 査読無.

⑥K. Tsujimoto, T. Inden, T. Shakouchi, and T. Ando, Direct Numerical Simulation of Vector Controlled Impinging Jet, Proc. The 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, CD-ROM, pp.1-6, 2010. 査読無.

[学会発表] (計19件)

①辻本公一, DNSによる多重衝突噴流の流動特性解析, 日本機械学会東海支部第62期総会講演会, 2013年3月19日, 三重.

②辻本公一, 回転モード下におけるベクトル制御噴流の流動・混合特性, 第26回数値流体力学シンポジウム, 2012年12月19日, 東京.

③辻本公一, DNSによる多重衝突噴流の解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 京都.

④辻本公一, DNSによる円形衝突噴流のよどみ

領域の非定常解析, 日本流体力学会年会 2012, 2012年9月16日, 高知市.

⑤K. Tsujimoto, DNS of Dynamic Vector-Controlled Free Jets, The 9th European Fluid Mech. Conf., 2012/9/10, Rome (Italy).

⑥辻本公一, 直接数値シミュレーションによるベクトル制御噴流の構造解析, 日本機械学会, 2012年度年次大会, 2012年9月10日.

⑦辻本公一, DMD法を用いた円形噴流の構造抽出に関する研究, 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月19日, 吹田市.

⑧辻本公一, 回転モード下におけるベクトル制御噴流のDNS, 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月19日, 吹田市.

⑨K. Tsujimoto, Direct Numerical Simulation of Vector-Controlled Free Jets, 13th Euro. Turbulence Conf. 2011/9/13, Warszawa (Poland).

⑩辻本公一, DMD法を用いた円形噴流の構造解析に関する研究, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月12日, 東京都.

⑪辻本公一, DNSによるベクトル制御噴流に対する傾斜角の影響に関する研究, 日本流体力学会年会 2011, 2011年9月9日, 八王子.

⑫K. Tsujimoto, Mixing and Flow Structures of Vector-Controlled Free Jets using DNS, Seventh Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2011/7/31, Ottawa (Canada).

⑬辻本公一, DMD法による自由噴流の構造抽出に関する研究, 日本機械学会東海支部第60期総会講演会, 2011年3月14日, 名古屋.

⑭辻本公一, DMD法によるベクトル制御自由噴流の流れ場解析, 日本数値流体力学会第24回数値流体力学シンポジウム, 2010年12月22日, 横浜.

⑮辻本公一, DMD法による円形噴流の構造解析, 日本数値流体力学会第24回数値流体力学シンポジウム, 2010年12月22日, 横浜.

⑯辻本公一, 非周期境界条件を用いた円形噴流の直接数値シミュレーション, 第88期日本機械学会流体工学部門講演会, 2010年10月30日, 米沢.

⑰辻本公一, ベクトル制御による自由噴流の混合特性に関する研究, 第88期日本機械学会流体工学部門講演会, 2010年10月30日, 米沢.

⑱K. Tsujimoto, Direct Numerical Simulation of Vector Controlled Impinging Jet, The 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, 2010/9/29, Cincinnati (USA)

⑲K. Tsujimoto, Direct Numerical Simulation of Vector-Controlled Free Jet, The 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, 2010/9/28, Cincinnati (USA)

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・助教  
研究者番号：30273345  
社河内 敏彦 (SHAKOOUHI 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・助教  
研究者番号：00550401