

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560171

研究課題名（和文）複合噴流の能動制御

研究課題名（英文）Active control of compound jets

研究代表者

辻本 公一 (TSUJIMOTO KOICHI)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

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、噴流を複数にした複合噴流について検討を行った。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）法による構造評価技術などの複合化に必要な評価技術を検討し、その有効性を明らかにした。ノズルのベクトル制御や複合噴流の制御手法を提案し、自由噴流や衝突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を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to develop the effective control method for a heat and mass transfer and a mixing in engineering applications, we investigate the compound jet which is assembled with a number of jets. Both a mixing-state evaluation technique using statistical entropy and an extraction technique of large-scale flow structures using POD (proper orthogonal decomposition) method are investigated and are found to be useful in the evaluation of the performance of compound jets. A vector control of nozzle and the control method for compound jets are proposed and applied to the mixing enhancement of both free jets and impinging jets. As a result it is found that the proposed methods lead to the improvement of the mixing performance.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2008年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2009年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：Jet, DNS, Active control, Coherent structure, Mixing, Impinging Jet, Compound jet, Vector control

## 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ぬ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、微小化にあわせて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な手法（非円形ノズル、リブ、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、周方向に一様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、噴流の広がりを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複数に利用されている実用場に対して、複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

上述のように、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開発するには、新たな制御手法の観点が重要である。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。本研究では複合化に必要な評価技術から、個々の噴流の制御技術、複数の噴流の干渉による混合制御技術の開発を行い、複合噴流に関する包括的な基礎研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 複合化のための噴流制御の検討

複合化をより効果的にするための単独噴流の制御手法について検討する。噴流の受動制御手法として、矩形、三角、星型等のノズル形状の工夫による非円形噴流の提案があるが、具体的な混合特性の報告は見られない。本研究ではその中でも代表的な楕円噴流に注目し、噴流構造の特徴、混合特性について明らかにする。また能動制御手法として、拡散特性を大きく変化させることができるベ

クトル制御に着目し、噴流の流動特性ならびに混合特性について調査する。これらの結果から、複合化の要素技術として高性能な噴流制御手法の開発をする。

### (2) 複合化による能動制御手法の検討

2つの軸対象噴流を空間中で衝突させた場合、その衝突面上では大規模な渦輪構造が形成されることや、ノズル出口の制御によってこの大規模構造が消失することをこれまで行ったシミュレーションにおいて明らかにしている。混合の活性化には大規模構造の形成と制御が不可欠であることから、ここでもこの観点に基づき、複数噴流を干渉させる複合化について検討する。具体的には複数噴流として4本の単独噴流を干渉させ、衝突角度の変更や、周方向に位相角を持たせて配置することで大規模渦の形成や旋回モードの形成とそれに関連した混合特性を評価する。

### (3) 複合化のための評価技術の検討

複合噴流の混合特性を評価するには、従来とは異なる性能評価技術が必要である。本研究では統計エントロピーを用いた混合評価について検討し、その妥当性について明らかにする。また、噴流の能動制御のためには、流れ構造の評価技術も不可欠である。本研究ではPOD(Proper Orthogonal Decomposition)法を用いた構造評価技術を採用し、構造抽出技術の検討を行う。

### (4) 衝突壁面噴流の検討

噴流の応用例として、壁面に噴流を衝突させる衝突噴流がある。製造現場ではさまざまな機器、製品の冷却・加熱の手段として利用されており、また噴流を複数に配置することも一般的に行われている。このような実用的な観点から、評価の主体である自由噴流に加え、新たに衝突噴流の計算コードを開発し、自由噴流とは異なる性質を持つ衝突噴流場において、有効な噴流制御手法の検討と複合化の可能性について検討を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 複合化のための噴流制御手法の検討

非円形噴流として代表的な楕円型噴流をとりあげ、複数化のための基礎データとして単独噴流の統計量や混合指標について評価した。楕円噴流に特徴的な軸の切り替わりや噴流幅の増大が再現され、実験事実と整合していることを確認したが、提案する混合指標で評価した混合度は軸対称噴流と比べて大差はなく、楕円噴流が混合性能向上に関し圧倒的に有利な方法ではないことを見出した。またノズルを一方向に周期的に振動させたベクトル制御を行った結果、噴流の可視化結

果からノズルの振動周波数を増加させるにつれ、波状、分岐、フラッピングのモードへと噴流構造が変化し、周波数を変化させることで多様な流動状況を制御することができることを明らかにした。また、混合指標に基づき混合状態を定量化した結果、通常の噴流よりも高い混合性能が見出され、分岐、フラッピング、波状のモードの順で拡散特性が良好であることも明らかにし、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。

#### (2) 複合化による能動制御手法の検討

4本の軸対称噴流の衝突角ならびに周方向の位相角を変え衝突と旋回の強さを変化させ、統計量や混合特性について調査した結果、噴流の衝突角度を変化させるという簡便な方法により、流れ場に旋回成分を与えることが可能であることや、衝突角が小さくかつ旋回を与えたものの混合特性がよいことを定量的に明らかにした。

#### (3) 複合化のための評価技術の検討

複合化による混合特性を評価するためには従来の噴流特性の評価方法では不十分であることから、混合状態の評価指標について検討した。噴流の中心軸速度分布、噴流幅、乱流強度の分布について検討した結果、従来から提案されている簡易な指標は混合状態の目安を与えるが、軸対称噴流をもとに考えられた基準であるので能動制御した噴流では、特異なデータを示し、混合性能を定量的に比較するにはこれらの指標は十分でないことを明らかにした。また、スカラー濃度による混合指標として統計エントロピと混合パラメータについて検討した結果、両者は混合指標としての類似の特性を示し、異なる噴流間の混合性能に優劣をつけることができることを明らかにした。さらにスカラー濃度による混合指標の成分の空間分布を可視化した結果、混合指標は渦構造との関連が強く、混合指標の成分により局所的な混合状態を把握することができることを見出した。

噴流の混合において重要な役割を果たす大規模構造を抽出する手段としてPOD法について検討した。本研究で取り扱う噴流のシミュレーションデータは周期方向が仮定できずデータ規模が巨大なため、通常のPOD法を採用した完全3次元処理はできないことからSnapshot PODを構造抽出法として採用し、本手法を上記の複合噴流に適用した。その結果、低次モードの瞬時構造において明確な大規模旋回渦を抽出することができ、構造抽出に対する有効性を明らかにした。また構造抽出の妥当性を検証するため、従来のエネルギー

指標に基づく解析に加え、エンストロフィー指標の解析について評価した。エンストロフィー指標に基づく流れ場のPOD解析の結果から、低次モードにおけるエネルギーおよび噴流構造の特性は、従来のエネルギー指標と同様の傾向を示すことや、低次モードを再構成した結果、エンストロフィー指標が構造の再現性に優れる可能性のあることを見出した。

#### (4) 衝突壁面噴流の検討

衝突噴流に対して従来の能動制御を用いた混合特性の改善の可能性を探るため、軸対称噴流で代表的な、軸対称モード、ヘリカルモードにより励起した噴流を壁面に衝突させた衝突噴流について検討した。その結果、衝突するまでの自由噴流領域では励起に応じた渦構造が形成されるが、衝突後の衝突壁上では渦輪に近いリング状の大規模構造が形成され、励起の違いがあるにも関わらず衝突壁上で生じる構造の大局的な様子に大きな違いが生じないことを明らかにした。また、乱れエネルギーやレイノルズ応力などの統計量の分布から、励起により発生した構造は壁から離れた位置で強い混合を与えるが局所ヌセルト数分布から、衝突壁上での伝熱促進には励起の効果は現れないことを明らかにした。この要因を探るため、熱流束の釣り合いを調べた結果、励起しない場合、自由噴流領域から衝突直後まで構造的な渦の発生が弱く噴流自体の拡散が抑制され、壁近傍で強い対流伝達が維持できること、励起した場合、強い乱流伝熱を生じるが、壁近傍の対流伝熱が壁垂直方向流れにより抑制されるため、伝熱向上が図られないなどの不活性化の原因を見出した。また、伝熱性能の効果が強く現れる因子であるレイノルズ数を変えた検討も行った。その結果、衝突噴流の場合レイノルズ数の増加により衝突面上において粘性低層が薄くなることが要因で壁近傍での混合が活発となり伝熱特性が改善することを明らかにした。考案したベクトル制御もこの流れ場について適用し、ノズルの振動周波数を変えて伝熱特性を評価した。ノズルの振動周波数が小さい場合、制御を行わない場合と同様の大規模な渦構造が形成され、基本的な構造形成の様子は変わらず、衝突面上での伝熱特性の改善が生じないこと、ノズルの振動周波数が大きい場合、ノズル出口直後からフラッピングモードによる渦輪が交互に周期的に放出され、衝突面上での衝突速度が向上したことにより、よどみ点で伝熱特性が大きく改善されることを明らかにした。このことから噴流の衝突点近傍付近で、ベクトル制御が有効に機能することを見出した。

## 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7件)

①K. Tsujimoto, T. Inden, T. Shakouchi and T. Ando, DNS of heat transfer in impinging jets at moderate Reynolds number, Proc. the 6th Int. Sym. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, CD-ROM, 1-12, 2009, 査読有.

②K. Tsujimoto, S. Kariya, T. Shakouchi and T. Ando, Evaluation of jet mixing rate based on DNS data of excitation jets, Int. J. Flow Control, 1(3), 213-225, 2009, 査読有.

③K. Tsujimoto, T. Ishikura, T. Shakouchi and T. Ando, Direct numerical simulation of active-controlled impinging jets, J. Fluid Science and Technology, 4(2), 279-291, 2009, 査読有.

④K. Tsujimoto, T. Ishikura, T. Shakouchi and T. Ando, Direct numerical simulation of active-controlled impinging jets, Proc. 2nd The 2nd Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows CD-ROM, 1-10, 2008, 査読有.

⑤辻本公一, 狩谷修次, 社河内敏彦, 安藤俊剛 制御噴流のDNSによる混合指標に関する検討 日本機械学会論文集B編74-737, 34-41, 2008, 査読有.

⑥K. Tsujimoto, S. Kariya, T. Shakouchi and T. Ando, Evaluation of Jet Mixing Rate Based on DNS Data of Excitation Jets, Proc. Fifth Int. Sym. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 905-910, 2007, 査読有.

⑦K. Tsujimoto, T. Shakouchi, S. Kariya and T. Ando, Study on Jet Mixing Rate Based on Controlled Jets, Advances in Turbulence XI, 447-449, 2007, 査読有.

[学会発表] (計11件)

①辻本公一, 青孝次, 社河内敏彦, 安藤俊剛, ベクトル制御された自由噴流の流動特性, 日本機械学会東海支部第59期総会, 2010年3月9日, 名古屋.

②辻本公一, 青孝次, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 自由噴流におけるノズルのベクトル制御, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2009年11月7日, 名古屋.

③位田貴彦, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, ベクトル制御された衝突噴流の構造解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2009年11

月7日, 名古屋.

④位田貴彦, 辻本公一, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 衝突噴流におけるノズルのベクトル制御に関するDNS, 日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月13日, 盛岡.

⑤辻本公一, 藤井秀崇, 社河内敏彦, 安藤俊剛, 噴流解析手法としてのSnapshotPOD法の検討, 日本機械学会東海支部第58期総会講演会, 2009年3月17日, 岐阜.

⑥辻本公一, 位田貴彦, 石倉大雅, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSによる衝突噴流の構造解析, 日本機械学会2008年度年次大会, 2008年8月3日, 横浜.

⑦辻本公一, 藤井秀崇, 社河内敏彦, 安藤俊剛, SnapshotPOD法による噴流の構造解析, 日本機械学会2008年度年次大会, 2008年8月3日, 横浜.

⑧辻本公一, 石倉大雅, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSにより能動制御された衝突噴流の構造解析, 第21回数値流体力学シンポジウム, 2007年12月19日, 名古屋.

⑨辻本公一, 藤井秀崇, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSを用いた複合噴流の能動制御, 日本機械学会第85期流体工学部門講演会, 2007年11月17日, 東広島.

⑩辻本公一, 石倉大雅, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSによる衝突噴流の混合状態の可視化, 可視化情報全国講演会2007, 2007年9月26日, 岐阜.

⑪辻本公一, 石倉大雅, 社河内敏彦, 安藤俊剛, DNSによる衝突噴流の能動制御, 日本流体力学会年会2007講演会, 2007年8月6日, 東京.

## 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・准教授  
研究者番号: 10243180

### (2) 研究分担者

社河内 敏彦 (SHAKOUCI TOSHIHIKO)  
三重大学・大学院工学研究科・特任教授  
研究者番号: 10024605

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