

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 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560211

研究課題名（和文）混合流動場における瞬時壁面濃度 2 次元分布計測法の開発と非定常性の解明

研究課題名（英文）Development of measuring method of instantaneous concentration distribution in mixing flow and clarification of its unsteady characteristics

研究代表者

廣田 真史（HIROTA MASAFUMI）

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30208889

研究成果の概要（和文）：

本研究では、T 字形直交合流管において合流部における主流流と枝管流の混合状態を可視化し、可視化画像を濃度に変換することで濃度場の瞬時分布を計測する手法を開発した。この手法で得られた濃度場に正規直交展開を適用して濃度場を支配する大規模構造を抽出し、2 流体の混合界面が周期的に変動していることを見出した。さらに、別途取得した速度場および乱流熱流束の測定データと併せて解析することで、この混合界面の周期的変動と乱流混合過程の関係について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we developed a measuring method of instantaneous concentration distributions in turbulent flow based on the results of flow visualization. We applied this method to the turbulent mixing in a cross-flow type T-junction. By analyzing the measured instantaneous concentration distributions with the proper orthogonal decomposition, we extracted large scale periodic fluctuations of the mixing interface between two flows mixed in the T-junction. Then, the turbulent heat/mass transfer process in the T-junction was made clear by combining these data with the measured results of velocity and turbulent heat fluxes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：乱流混合，合流管，非定常性，可視化，濃度場

1. 研究開始当初の背景

主流内に速度、温度や濃度の異なる流体が壁面から流入する混合流動系は、動力プラントや反応装置など産業機器の広い分野にわたり見受けられ、例えばガスタービン翼の膜冷却や動力プラント内の合流配管など、熱流体工学やエネルギー変換工学の課題に深く

関わっている。そのため、その詳細な熱流動特性を明らかにすることは機器の高性能化・高効率化および安全性向上のために重要であり、これまで多くの研究が行われてきた。このような 2 流体の混合を伴う熱流動系の速度場・温度場は、大規模な変動を伴う非定常性を有する場合が多いと考えられる。温度場

や濃度場の時空間変動など、混合流動系におけるスカラー場の瞬時構造や非定常性を明らかにすることは、機器の高性能化や安全性向上の観点から工業的に重要であるのみでなく、乱流混合現象の本質的な解明を進める上で学術的意義も大きいと思われる。また、このような流動系は数値シミュレーションによっても取り扱われるようになると予想されるが、スカラー場の非定常性に関わる特性を明らかにすることは、LESに代表されるような大規模な数値シミュレーションによる解析結果の妥当性を評価する実験データとしても有用と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、主流内に濃度が異なる流体が流入する混合流動系において、瞬時の濃度場を測定する手法を確立し、その構造や大規模変動など非定常特性を実験的に明らかにすることを目的とした。流路系としては、代表的な混合系である直交型のT字合流管を選択した。合流後の流路内に形成される濃度場の時空間構造に加えて、速度場の特性や乱流スカラー流束の分布についても測定を行い、濃度場の大規模変動の発生メカニズムや場の詳細な構造、乱流混合機構を解明するとともに、こうした混合流動系におけるデータベースを構築することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究で測定対象とした直交型T字合流管の概要を図1に示す。主管（水平管）と枝管（垂直管）を流れる空気流はT字部において直角に合流・混合する。主管のレイノルズ数は 2.5×10^4 であり、枝管流速は主管流速と同一に設定した。実験では等温流において枝管流にオイルミストを混入させ、レーザーシートにより可視化した2流体の混合界面をハイスピードカメラで撮影することで、混合層の非定常挙動を明らかにした。この可視化により得られた画像にレーザー強度の補正を施すことにより、可視化画像を濃度分布に変換した。また、PIVによる速度場計測を行うとともに、枝管流を加熱した状態で平均温度分布の計測および乱流熱流束の測定も行った。上記の可視化で得られた濃度場と、PIVにより得られた速度場にPOD解析を適用することにより、それぞれの場の支配的な構造を抽出した。こうした支配的構造間の関係と乱流熱流束の分布から、本混合流動系における乱流混合のメカニズムを明らかにした。

4. 研究成果

(1) 最初に管内の熱流動場の概要を明らかにした。図2はPIVにより測定した流路対称面における平均速度ベクトル、図3は枝管流を加熱流にした場合の平均温度 $(T - T_c) / \Delta T$ の分布であり、温度混合層の領域を実線で記した。混合層の厚さは合流直後の $X/B = 0$ において既に流路高さの20%以上に及んでおり、高・

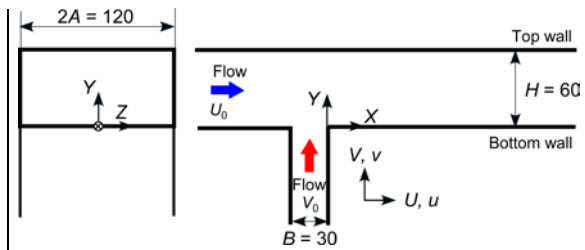


図1 実験に用いた直交型T字合流管の概要

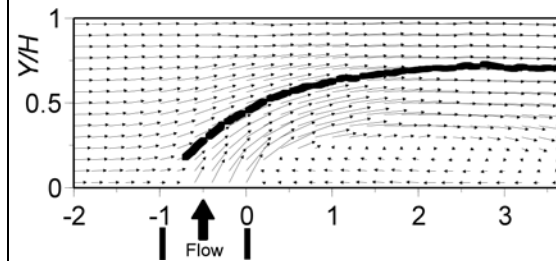


図2 流路対称面における平均速度分布

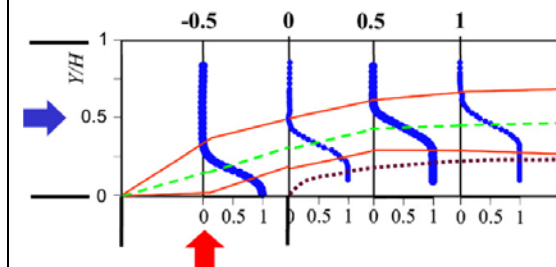


図3 流路対称面における平均温度分布

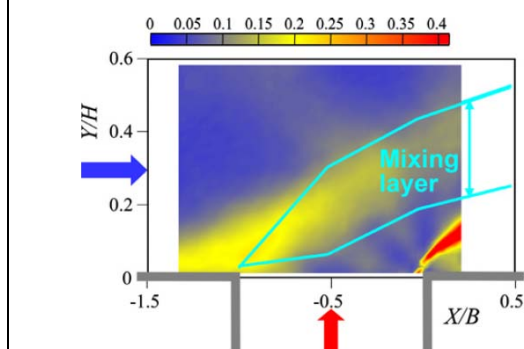


図4 合流部における主流方向乱流強度 u'

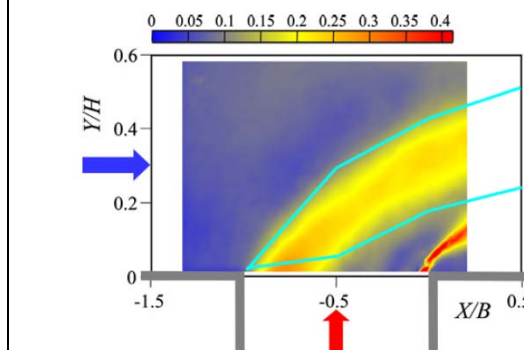


図5 合流部における垂直方向乱流強度 v'

低温流の混合は両者の衝突後、急速に進むことが明らかになった。

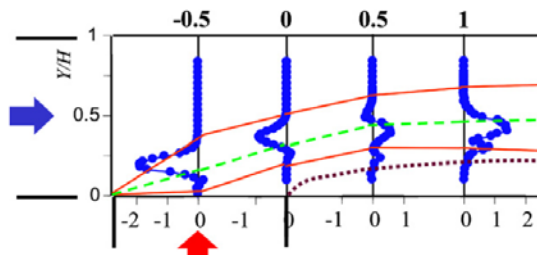


図6 主流方向乱流熱流束 ut

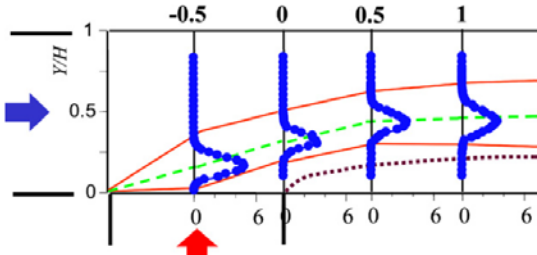


図7 鉛直方向乱流熱流束 vt

(2) 衝突直後の乱流混合が活発である原因を明らかにするために、合流部における乱流強度を求めたところ、図4と図5に示すようにいずれの成分も混合層内（図の水色の実線で囲まれる領域）で高い値を示し、これらが2流体の混合に寄与していることが推測された。分布を詳細に観察すると、主流方向成分 u' は合流部の上流から高い値を示すのに対し、鉛直方向成分 v' は混合層内で増大しており、両者の分布傾向にはわずかな相違が見られることが明らかになった。

(3) 次に、乱流混合のメカニズムを明らかにするために、乱流熱流束 ut （主流方向成分）と vt （鉛直方向成分）の分布を測定した。図6と図7は混合部近傍の対称面内における ut と vt の分布である。両成分とも混合層内で極大値を示しており、2流体間の迅速な混合をもたらすと考えられる。とくに合流直後では、図4や図5に示すように混合層の境界が主流軸（ x 軸）に対して傾斜しているため、 vt のみではなく ut も乱流熱輸送に寄与することが明らかになった。

(4) こうした合流部における2流体の乱流混合のメカニズムを明らかにするために、枝管流中に oil mist を混入させて、流路対称面と合流部出口 $X/B = 0$ の主管断面で流れを可視化した。図8と図9は可視化画像の一例である。対称面では、上流側エッジで枝管流の逆流と主管流が枝管へ入り込む現象が交互に生じることが確認できた。また断面内の観察から、混合界面が鉛直方向に振動し、その界面に沿ってキノコ状の縦渦がスパン方向に配列する様子が観察された。したがって、2流体の合流界面は、鉛直方向への振動運動にこれらの縦渦の発生・消滅が足しあわされた複雑な構造を有することが明らかになった。

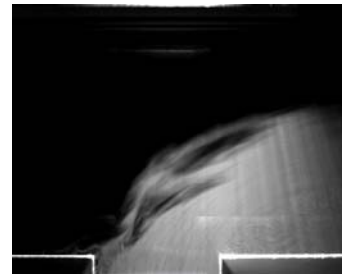


図8 対称面内における流れの可視化画像

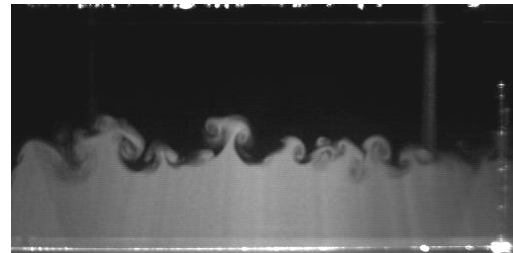


図9 主管断面内における流れの可視化画像

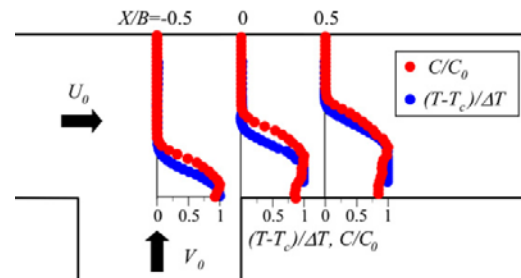


図10 平均濃度分布と平均温度分布の比較

(5) これらの可視化画像を濃度分布に変換し、1200枚分について平均化することで平均濃度分布を求めた。この分布を、図3の平均温度分布と比較した結果を図10に示す。平均濃度分布 C/C_0 は平均温度分布 $(T-T_c)/\Delta T$ と定量的に良い一致を示している。このことから、両分布の間には相似性があり、濃度場の特性を解析することにより、図6や図7に示した乱流熱流束の生成過程や混合機構を明らかにすることが出来ると考えられる。

(6) 上に述べた主管断面内 ($X/B = 0$) の可視化画像を濃度分布に変換し、それに POD を適用して2流体の界面の支配的構造を抽出した。この解析では低次モードほどエネルギー寄与率が大きく、場において支配的な構造を表すと考えられる。図11と図12に第1及び第2モードの固有関数 $\Phi_c^{(1)}(\mathbf{x})$ と $\Phi_c^{(2)}(\mathbf{x})$ を示す。 $\Phi_c^{(1)}(\mathbf{x})$ は同一符号（負値）の領域がスパン方向にほぼ均一に広がった分布を示し、合流界面の鉛直方向への2次元的な振動に対応する。一方、 $\Phi_c^{(2)}(\mathbf{x})$ は正の領域と負の領域がスパン方向に交互に並んでいることから、上述のキノコ状縦渦に対応した構造を表すと考えられる。またエネルギー寄与率はそれぞれ18%、4%であった。

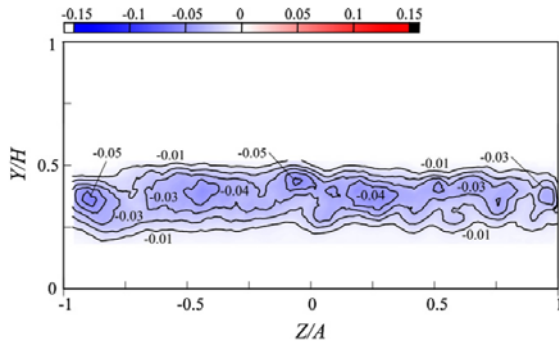


図 11 変動濃度の第 1 モード固有関数 $\Phi_c^{(1)}(x)$

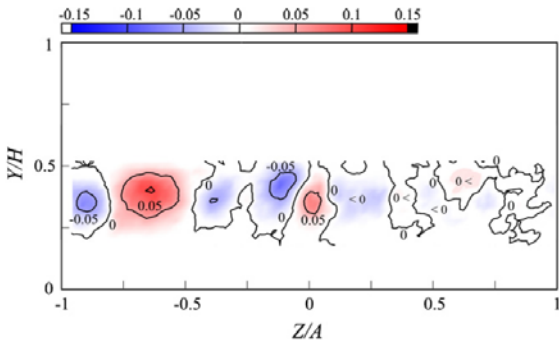


図 12 変動濃度の第 2 モード固有関数 $\Phi_c^{(2)}(x)$

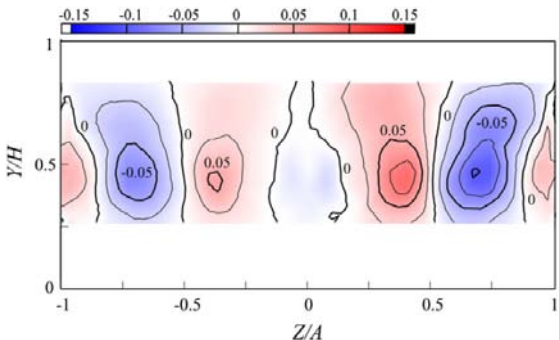


図 13 変動速度の第 1 モード固有関数 $\Phi_v^{(1)}(x)$

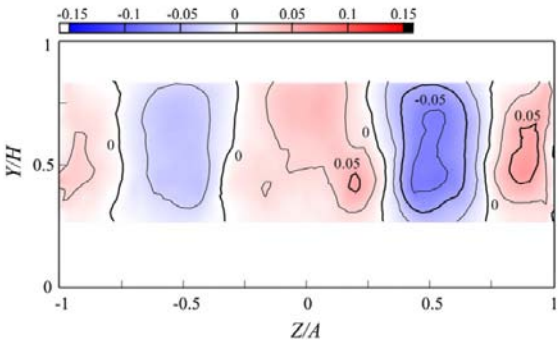


図 14 変動速度の第 2 モード固有関数 $\Phi_v^{(2)}(x)$

(7) 次に、図 11、図 12 と同一の断面で測定された鉛直方向変動速度 v に対して POD 解析を行った。図 13 と図 14 に第 1 及び第 2 モードの固有関数 $\Phi_v^{(1)}(x)$ と $\Phi_v^{(2)}(x)$ を示す。両者ともスパン方向に正と負の領域が交互に現れており、 $\Phi_c^{(2)}(x)$ と定性的に類似であることから、この流れは界面に現れたキノコ渦をもたらすと考えられる。一方、 $\Phi_c^{(1)}(x)$ で表される界

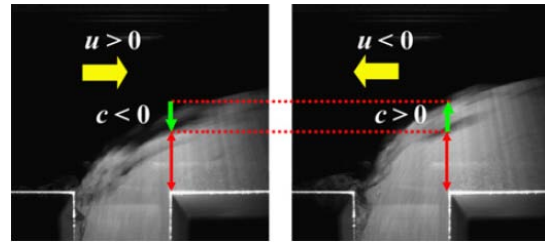


図 15 主流方向への混合界面の振動

面の鉛直方向への 2 次元的振動に対応した構造は、 v の固有関数には現れなかった。これより、この界面の振動は u の変動に起因するものと考えられる。以上の結果から、合流部における乱流熱流束 ut は 2 流体の混合界面の主流軸方向への 2 次元的振動により生成される (図 15)、 vt はキノコ状の縦渦による鉛直方向への熱輸送を表すと判断できる。したがって本実験により明らかになったこれらの特徴的な構造を強化することにより、2 流体の効率的な混合促進を行うことが可能であるとされる。この結果を踏まえて、デルタ翼により発生する縦渦により混合状態の促進および制御を試み、有用性を確認した。

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 2 件)

- ① Masafumi Hirota, Hiroshi Nakayama, Turbulent Flow and Mixing Characteristics in T-junction, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6, No. 4, 査読有 (2011), pp. 598-613.
- ② M. Hirota, E. Mohri, H. Asano, H. Goto, Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, 査読有 (2010), pp. 776-784.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 堀秀一郎, 廣田真史, 浅野秀夫, 松田拓也, 丸山直樹, 西村顕, T 形合流管内における高・低温空気流の乱流混合促進・制御, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, (2011 年 10 月 29 日), 浜松.
- ② Masafumi Hirota, Turbulent Flow and Mixing Characteristics in T-junction, ERCOFTAC SIG 15 Workshop (Invited lecture), (2011 年 10 月 18 日), Paris, (France).
- ③ 堀秀一郎, 廣田真史, 浅野秀夫, 上野俊介, 丸山直樹, 西村顕, T 形合流管内における高・低温空気流の乱流混合促進・制御, 日本機械学会年次大会 2011, (2011 年 9 月 14 日), 東京.
- ④ Masafumi Hirota, Hiroshi Nakayama, Turbulent Flow and Mixing Characteristics in T-junction, International Conference on Jets,

Wakes, Separated Flows 2010 (Invited talk),
(2010年9月28日), Cincinnati (USA).

- ⑤ 廣田真史, 藤永紘基, 宮越智也, 堀秀一郎,
浅野秀夫, 丸山直樹, 西村顕, デルタ翼列
による T 形合流管内の乱流混合促進・制御,
日本流体力学会年会 2010, (2010年9月9
日), 札幌
- ⑥ 廣田真史, 宮越智也, 藤永紘基, 堀秀一郎,
浅野秀夫, 丸山直樹, 西村顕, デルタ翼列
による T 形合流管内の乱流混合促進, 日本
機械学会年次大会, (2010年9月6日), 名
古屋
- ⑦ 藤永紘基, 宮越智也, 廣田真史, 浅野秀夫,
丸山直樹, 西村顕, デルタ翼列を用いた T
形合流管における乱流混合の促進, 第 47
回日本伝熱シンポジウム, (2010年5月27
日), 札幌
- ⑧ 藤永紘基, 宮越智也, 毛利江里, 廣田真史,
浅野秀夫, 丸山直樹, 西村顕, デルタ翼群
を用いた T 形合流管内の乱流混合促進, 熱
工学コンファレンス 2009, (2009年11月7
日), 山口

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣田 真史 (HIROTA MASAFUMI)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30208889

(2) 研究分担者

西村 顕 (NISHIMURA AKIRA)
三重大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60345999