

平成 21 年 5 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560201
研究課題名（和文）感圧塗料を用いた混合流動系における瞬時壁面濃度分布計測法の開発と非定常特性の解明
研究課題名（英文）Development of measuring method of instantaneous wall-concentration distribution in mixing flow with PSP 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：

本研究では、まず壁面濃度分布計測の検証データベースを作成するために、主に T 字合流管において PIV、LIF および可視化により合流部における詳細な速度場・濃度場の計測を行い、壁面近傍における大規模変動場の構造を明らかにした。次に、同種の流路系において感圧塗料により壁面上の濃度場の計測を試み、定量的計測における問題点を抽出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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，非定常計測，可視化，濃度分布，高サイクル熱疲労

1. 研究開始当初の背景

境界層や管内流の主流に対して、速度、温度や濃度の異なる流体が壁面から流入・混合していく流動系は、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る。そのなかで、主流中に流入した流体と流路壁面との干渉が重要となる系は、例えばガスタービン翼の膜冷却効率や、動力プラント内の合流配管における高サイクル熱疲労の問題など、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。

一般に、このような流体の混合を伴う熱流動系の速度場・温度場は、大規模な組織的変動を伴う非定常性を有する場合が多い。例えば熱疲労が問題となる合流配管系では、壁面温度変動の発生する条件や領域を特定し、その強度や周期、また温度変動をもたらす流れ場の構造を明らかにして、その知見に基づき疲労防止対策を講じることが必要となる。しかし、従来の温度計測法は温度場の大規模変動に追従するのに十分な時間応答性を有せず、温度場の非定常性を的確に検出することは困難である。そのため、これまでは時間平均的な表面温度分布や熱伝達特性を明らかにするに留まっており、壁面上における温度分布の時間変動など、温度場の瞬時構造に関

連した研究は殆ど行われていない。

こうした壁面上に形成される温度分布の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、合流・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、今後、この種の問題はLESなどの大規模な数値シミュレーションにより取り扱われるようになると予想されるが、温度分布の非定常性に関わる特性を明らかにすることは、シミュレーションによる解析結果の妥当性を評価するデータベースとしても有用と考えられる。

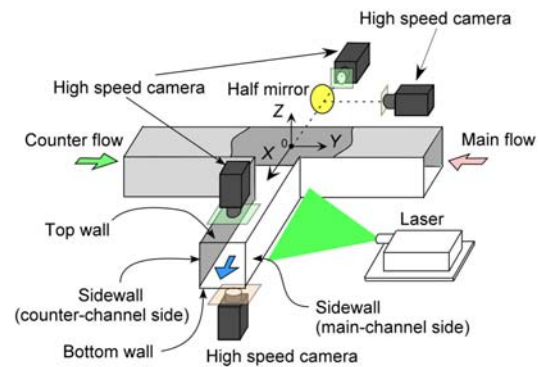
2. 研究の目的

以上のような背景に鑑み、本研究では主流中に流入した流れと壁面とが干渉する混合流動系において、壁面上に形成される温度場の大規模変動に注目した。流路系としては、プラントなどにおいて高サイクル熱疲労の発生機構解明と防止策の開発が問題となっている直交型および対向型のT字合流管を選択した。合流後の流路内に形成される熱流動場の時空間構造と、壁面近傍での大規模変動の発生メカニズムを明らかにし、場の詳細な構造や乱流混合機構を解明するとともに、大規模変動に関するデータベースを構築することを最初の目的とした。

次に、感圧塗料を用いた瞬時壁面温度（濃度）分布の2次元時系列計測技術を確立することを試みた。感圧塗料を本来の機能である酸素濃度センサーとして用いることにより、主流空気中に壁面から窒素など酸素濃度の異なる流体を流入させた混合流動系において、熱と物質移動の相似性に基づき壁面上の瞬時濃度（温度）分布を2次元かつ時系列で測定する技術を開発することを目的とした。この方法を用いて、上記のT字形混合流動系における壁面上温度（濃度）場の大規模変動の計測を試み、PLIF等による計測に基づき構築した熱流動特性のデータベースと比較することにより、感圧塗料を用いた計測手法の妥当性と有効性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で測定対象とした混合流動系のうち、対向型T字合流管の形状と、PIVおよびPLIFを用いた計測システムの概要を右図に示す。本研究では、図に示した対向型T字合流管および2本の流路が直交して合流する直交型T字合流管において、PIVにより流路内に形成される速度場を計測するとともに、PLIFあるいは可視化により2流体が合流・混合する界面の構造および壁面の極近傍における濃度（温度）変動の詳細を明らかにした。とくに対向型T字合流管においては、PIVとPLIFを同期させて速度と濃度の2次元同時計測を実施し、そのデータをPOD（固有直交関



対向型T字合流管と計測システムの概要

数展開)で解析することにより、壁面近傍において大規模な濃度変動をもたらす流れ場の構造を抽出した。また、大規模な濃度変動が観察された領域の壁面圧力変動を、高時間分解能を有する圧力センサーにより計測し、場の非定常特性についても検討を加えた。

次に、以上の計測により判明した壁面濃度変動を、感圧塗料により計測することを試みた。上記のPLIFの実験結果に基づき壁面において強い濃度変動が生じている領域を特定し、その位置に感圧塗料をコーティングした。T字管の一方に空気、もう一方に窒素を供給し、感圧塗料の発光強度の変化から壁面上における酸素濃度分布の変動を捉えることを試みた。

4. 研究成果

- (1) 図1に対向型T字管のPLIF実験で得られた流路対称面内における変動濃度強度分布を示す。この流路系においては、図に示すように流入速度の遅い主管（図の上側の管）側の合流部直後の側壁近傍で、濃度変動強度が極大値を示すことが明らかとなった。高・低温流体が本流路系において合流・混合する場合、高サイクル熱疲労はこの位置において発生する可能性が高いと予想される。

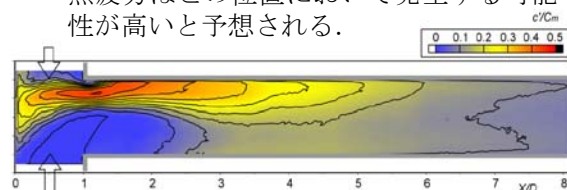


図1 流路対称面内の変動濃度強度分布

- (2) 上記の側壁の極近傍において、壁面に平行な面内で測定された濃度変動強度の分布を図2に示す。濃度変動は流路の中心線上で極大値を示すが、流路の水力直径の2倍程度のスケールを持つ比較的広い領域にわたって高い値を維持することが明らかになった。このことは、濃度の異なる2流体の混合により、大規模な組織的変動が壁面近傍の流れ場に生じていることを示唆している。

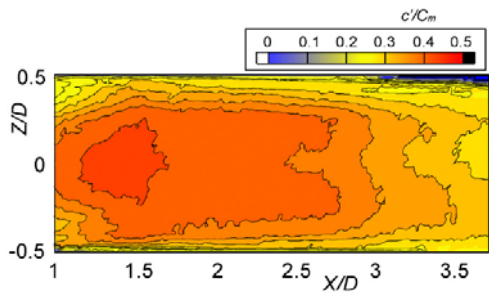


図2 主管側の側壁近傍における変動濃度強度分布

- (3) 側壁近傍における変動濃度場をPODにより解析し、変動場を支配している空間的構造を抽出した。図3に、変動濃度場に対して寄与の大きな2つの代表的固有関数の分布を示す。第1モードは解析領域機内で同一の符号を示しており、空間的に均一な濃度の非定常変動に対応する。第2モードは流路対称軸に対し反対称の符号を取っており、高濃度と低濃度の流体が上下交互に壁面上に到達することを示唆している。壁面上の強い濃度変動は、両者の重ね合わせにより発生している。

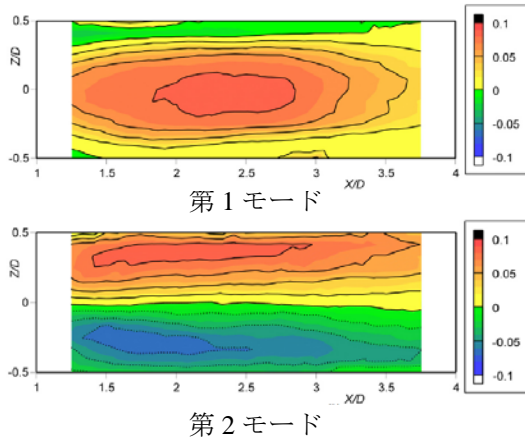


図3 側壁近傍における変動濃度場のPOD固有関数分布

- (4) 壁近傍において上記のような濃度変動が発生するメカニズムを明らかにするために、管断面内の変動濃度強度分布を測定し、それをPODにより解析した。図4は変動濃度強度分布であり、図5はPODの第1および第2モードの固有関数分布である。濃度変動は主管側(図の右側)側壁近傍で上下方向にほぼ均一に高い値を示しており、図2の結果に対応している。POD固有関数は第1モードが流路中心線上で正、コーナー部で負の上下対称分布を示すのに対して、第2モードは上側で正、下側で負の反対称分布となっており、これも図3の結果と整合している。これらの結果から、側壁近傍で発生した強い

濃度変動は、2種類の断面内流れが組み合わさって引き起こされると考えられる。

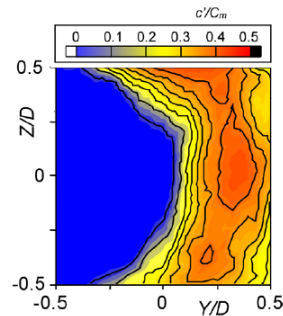


図4 管断面内の変動濃度強度分布

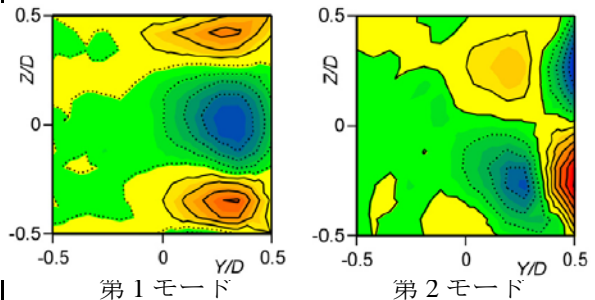


図5 管断面内における変動濃度場のPOD固有関数分布

- (5) 上記の濃度変動をもたらす流れ場の構造を明らかにするために、濃度場と同時に測定された速度分布の結果から図5の固有関数に対応した速度場を抽出した。図6は第1モードに対応する結果であり、瞬時濃度分布と速度ベクトルを示している。第1モードは、流れの水平方向へ振動とそれに伴う上下方向への振動を表している。一方、第2モードは対角線に沿った流れを示し、流れの回転的振動に対応している。側壁近傍の濃度変動はこうした流れの2次元振動と回転的振動の組み合わせにより発生していることが分かる。

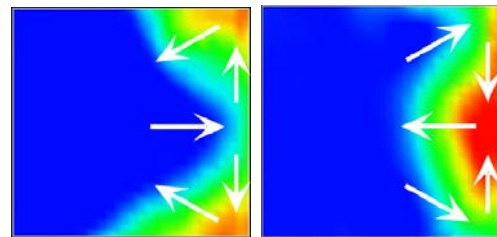


図6 第1モードに対応した流れ場

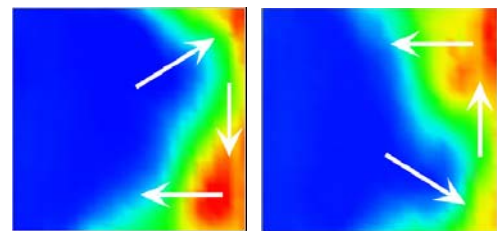


図7 第2モードに対応した流れ場

(6) 変動濃度強度が最大値を示した領域において壁面上の圧力変動を時系列計測し、FFT解析により卓越周波数を調査した。その結果、20Hz以下の周波数領域に弱いピークが現れるが、明確な卓越周波数は出現しないことが明らかになった。また、この領域に感圧塗料をコーティングし、壁面濃度変動の測定を試みた。その結果、目視ではある程度の発光強度の変化が認められるものの、高速度カメラを用いた定量的計測には発光強度が十分ではないことが明らかになった。定量的な濃度変動のデータを得るためには、塗料の担持方法や照明方法などに改善の余地があることが判明した。

(7) 直交型T字管においてもPIVおよび流れの可視化により、流路内の流れ場と混合のメカニズムについて検討した。可視化により測定された混合層における濃度分布をPODで解析した結果、2流体の混合界面は2次元的に垂直方向に振動しており、そこに複数個のキノコ状の縦渦が重畳する複雑な構造を有していることが明らかになった。2流体間の熱輸送を支配する乱流熱流束のうち、水平方向の成分は前者の2次元振動により、また鉛直方向の成分は後者のキノコ状縦渦により生成されることが明らかになった。

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 M. Hirota, H. Nakayama, S. Koide, K. Shinoda, Experimental study on turbulent flow and mixing in counter-flow type T-junction, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 3, pp. 147-158, 2008, 査読有り
- ② M. Hirota, M. Kuroki, H. Nakayama, H. Asano, S. Hirayama, Promotion of Turbulent Thermal Mixing of Hot and Cold Airflows in T-junction, Flow Turbulence and Combustion, Vol. 81, pp. 321-336, 2008, 査読有り

[学会発表] (計6件)

- ① 廣田真史・毛利江里・中山浩・浅野秀夫・後藤裕樹, T形合流管における乱流混合機構, 日本伝熱学会東海支部講演会, 2009年2月6日, 名古屋
- ② 毛利江里・廣田真史・宮越智也・藤永紘基・浅野秀夫, デルタ翼を用いたT形合流管内高・低温流の混合促進, 日本流体力学会年会2008, 2008年9月6日, 神戸
- ③ 伊藤俊一・廣田真史・浅野秀夫, T形合流管における乱流混合の促進, 日本機械学会熱工学コンファレンス2007, 2007年11月24日, 京都
- ④ 毛利江里・廣田真史・中山浩・浅野秀夫・後藤裕樹, T形合流管における乱流混合機構, 可視化情報全国講演会2007, 2007年9月27日, 岐阜
- ⑤ M. Hirota, H. Nakayama, S. Koide, K. Shinoda, Measurement of Turbulent Mixing in Counter-Flow Type T-junction with PIV and PLIF, International Symposium on PIV, 2007年9月11日, Italy, Rome.
- ⑥ M. Hirota, H. Nakayama, S. Koide, K. Shinoda, Experimental study on turbulent flow and mixing in counter-flow type T-junction, ASME-JSME Joint Conference on Thermal Engineering, 2007年7月10日, Canada, Vancouver.

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

(3) 連携研究者