

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760164

研究課題名(和文)重ね合わせ原理に基づく複雑乱流スカラー場の現象解明

研究課題名(英文) Analysis of passive scalar transport in complex turbulent flows based on superposition principle

研究代表者

保浦 知也 (Houra, Tomoya)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00324484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、強制対流の乱流場中で輸送される熱や物質の挙動を、スカラー場の重ね合わせに着目して実験的に明らかにすることである。具体的には、浮力が生じない程度の低加熱時での気流温度変化や、空気とほぼ等しい密度のエチレンを対象として、これらの熱や物質濃度の分布特性におよぼす境界条件の影響を風洞実験により詳細に計測した。また、乱流中で変動する温度と物質濃度の計測技術を改良し信頼性の高い実験データを得られるようになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we explore the turbulent transport of heat and mass in forced convection flows based on the superposition principle of a passive scalar. For this purpose, we experimentally investigate the effect of thermal and mass boundary conditions on the characteristics of temperature and concentration distributions. A slightly heated and an ethylene dispersed air flow with the same molecular density as air, which are expected with no buoyancy effect, are measured in a wind tunnel. Moreover, we developed measurement techniques to obtain the fluctuating temperature and concentration in turbulent flows with high measurement accuracy.

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：熱工学 乱流 熱物質移動 風洞実験 濃度変動計測

1. 研究開始当初の背景

複雑乱流場は電子機器内部や熱交換器など小さな空間スケールからビル群や丘陵・崖壁など大きなスケールにわたって様々な形態で現れる。壁面近くの境界層内で生じる通常のせん断乱流における熱や物質の輸送現象はよく調べられているが、流れのはく離・再付着を伴う複雑乱流場については未解明な部分が多いため、そこで生じる熱物質輸送現象を正確に予測し、その発生メカニズムを正しく把握することは、機器設計から環境保全にわたる広い分野で熱工学の重要課題となっている。

これまで種々の複雑乱流場における熱物質輸送現象について、装置実験と数値実験によりその基本的な性質は明らかにされつつある(逆圧力勾配の影響、粗面乱流、2次元加熱丘周りのはく離流れ、強い主流乱れを伴う乱流境界層など)。しかし、数値シミュレーション技術が進化した現代でも、膨大な出力からこれら複雑乱流場で生じる熱物質輸送現象の本質を抽出し、普遍的に乱流を理解することは未だ困難である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、はく離・再付着を伴う複雑な強制対流乱流場を、スカラー場の重ね合わせに着目して実験的に明らかにすることである。本研究では、スカラー場の多層構造を表す「重ね合わせ原理」に着目する。すなわち、強制対流のように温度が受動スカラーと見なせる場合には、「同じ速度場」のもとではエネルギー式が「同じ速度場」のとは異なる(ただし、作動流体は物性値一定の非圧縮性流体とする)。「同一の瞬時速度場」に形成される2つの境界条件の異なる温度場₁および₂を考えると、 $T_1 + T_2$ を T で置換すれば、温度場の多層構造を表す重ね合わせが成立する。つまり、一見複雑と思われる現象は、より簡単な₁および₂の挙動に分解して説明できる。スカラー場の重ね合わせ原理に立脚すれば、複雑乱流場における熱物質輸送現象の形成過程が格段に理解しやすくなる。さらに、素過程の多層構造を積極的に利用することで、この乱流輸送過程を制御する際の明確な指針を得ることが期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、典型的な壁面乱流とは異なる複雑乱流場を対象として、そこで生じる熱物質輸送現象を、スカラー場の重ね合わせ原理に基づいて解明する。そのために温度場や濃度場などのスカラー場が、速度場に対して受動的とみなせる強制対流場を風洞実験によりシミュレーションし、重ね合わせの原理に立脚して素過程を明らかにする。具体的な方法は以下の通りである。

(1) 同一の速度場内で発達する異なる熱的境界条件により生じる温度場の乱流諸量を

測定する。平均温度分布は乱流熱流束が線形となるので和として説明されるが、温度分散には、異なる温度場間の相互相関が現れる。実験的には、全面加熱の温度分散と部分加熱の測定値の差として、この相関量を見積もることができる。この結果より、たとえば、相関量が零であれば、2つの瞬時温度場が互いに独立であることが分かる。もし相関量が正または負であれば、これらの温度場が互いに及ぼしあう影響の強さが定量的に明らかとなる。

(2) 濃度場についても乱流諸量を測定するために、濃度変動が計測可能な高速応答の水素炎イオン化検出器(高速FIDシステム)を構築して定量的に信頼性の高いデータを取得できるように応答速度を改善する。

(3) 速度場、温度場および濃度場の乱流諸量の風洞実験データを収集する。熱的境界条件は等温の伝熱壁とする。速度測定には、熱線流速計、レーザ流速計、画像処理流速計を用いる。また、変動する温度場の測定には、応答補償された細線温度センサを用いて、信頼性の高い温度測定を実現する。なお、空気中の拡散物質として、エチレン(分子量が空気に近く、シュミット数がほぼ1)を用いて速度場と濃度場の相似性について検討する。平均濃度場の測定には、ガスクロマトグラフを使用する。なお、変動濃度場の測定には応答速度が改善された自作の高速FIDを用いる。さらに、これらの温度変動や濃度変動センサを熱線流速計やレーザ流速計と組み合わせることにより速度と温度または速度と濃度の同時測定を実現し、変動場の相互相関量を測定する。

4. 研究成果

(1) 速度・温度変動の同時測定システム開発
本研究では、はく離・再付着乱流における速度と温度変動の同時測定を実現するために、レーザ流速計(LDV)と温度センサ(細線熱電対または抵抗線温度計)を組合せた。なお、LDV計測のために流体中に混入するシーディング粒子が温度センサの応答を低下させることが問題であった。この温度センサの応答遅れはデジタル信号処理により応答補償し、この温度センサと後方散乱型2成分LDVを組合せた温度変動と速度変動の同時測定技術を開発した。本手法の有効性を検討するために加熱平板上を発達する乱流境界層にて乱流熱流束を測定し、既存の実験および数値シミュレーション結果と比較して妥当な結果が得られていることを明らかにした。

(2) 温度センサの熱伝導誤差の解析

温度勾配がある流れ場における流体温度測定時のセンサ部分の熱伝導による誤差の大きさを明らかにした。従来の誤差解析方法

では、空間的な温度分布がステップ関数となっており、現実との差異が大きかった。本研究では、現実により近い平均温度場を想定し、その補正方法を確立した。これにより細線温度センサの空間分解能を改善することができた。

(3) 二線式熱線流速計の適応応答補償

応答速度の異なる二組の定電流型熱線流速計を用いて測定データから応答を補償する方法を検証し、汎用性の高い多点同時測定法を開発した。これにより、円柱後流で周期的に発生する空間的な乱流構造を簡便に抽出することができるようになった。

(4) 高速 FID システムの応答改善

濃度変動をより正確に測定するために、高速 FID システムの応答特性を改善し、熱線流速計と組み合わせることで、速度と濃度変動の同時計測システムを構築した。図 1 に同時測定された結果の一例を示す。この改良により、さらに信頼性の高い実験データを得られるようになった。

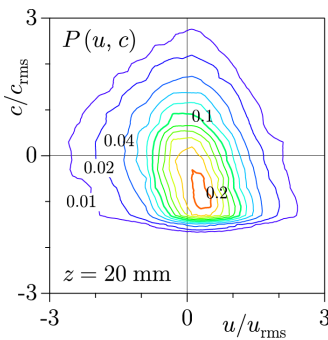


図 1 円柱後流のせん断層における速度と濃度変動の結合確率密度関数 濃度には下限が存在し流れ方向速度と負の相関がある。

(5) ビル模型周りの乱流物質伝達の調査

はく離・再付着を伴う複雑乱流場として乱流境界層内に設置されたビル模型周りの物質拡散過程を詳細に調べた。具体的には、物質が上流から点源供給された場合（図 2）に観察されるビル模型の後流における物質輸送現象から特徴的な濃度分布の発現機構を明らかにした。平均濃度と濃度変動に対する模型設置角度の影響を図 3, 4 に示す。

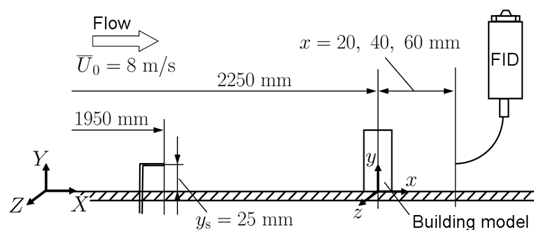


図 2 風洞内の平板上に設置されたビル模型上流のエチレン排出源と高速 FID（水素炎イオン化検出器）システムによる濃度計測

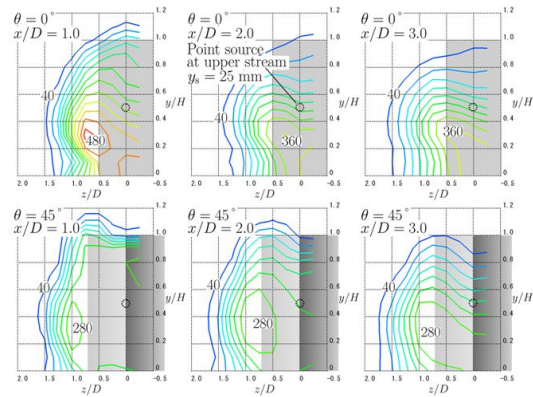


図 3 ビル模型下流における平均濃度分布に対する主流角度の影響 模型中央の丸が上流の点源位置, 上段は主流角度 0° (正対), 下段は角度 45° で角が突き出した場合

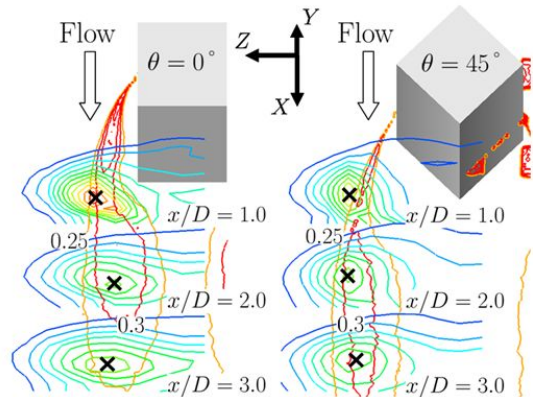


図 4 ビル模型下流における濃度変動分布（青から橙色の等濃度線）と速度乱れ強さ分布（赤と橙色の等値線）の対応 いずれの設置角度でもビル後流で生じるはく離せん断層において運動量と物質輸送における変動強度が強い相似性を示す。

(6) 壁面加熱条件が変化する乱流境界層の温度場特性の解明

受動スカラーの重ね合わせ原理に立脚して現象を解明することを目的として、加熱平板を発達する乱流温度境界層において、流れ方向に熱的境界条件を急峻に変化させた場合の温度場への影響を調べた。平均温度分布は乱流熱流束が線形となるので和として説明されることを実験的に証明した。また、温度分散には、異なる温度場間の相互相関が現れるが、これを実験的に求めた。その 1 例を図 5 に示す。この結果より、加熱壁のごく近傍では、異なる温度場は互いに弱め合うことが明らかとなった。

さらに、乱流熱輸送を支配する乱流熱流束が、加熱条件が一樣である場合と比較して、どのような特性を持つのかを実験的に調べ、各象限別寄与率や確率密度分布を明らかにした。本研究で開発した速度と温度の同時測定技術を用いて、低乱風洞内で加熱された平

板上を発達する乱流境界層の速度場と温度場の相関特性が、壁面加熱条件の変化に対してどのように応答するかを実験的に調べた。壁面が流れ方向にステップ状に加熱される場合は、十分に発達した速度場中を温度場が発達する温度場助走区間となり温度境界層が薄いものの、流れ方向速度と温度変動の相関は通常を負値を保つ。一方、壁面がステップ状に冷却される場合には、この相関は、全面加熱条件での負値とは異なり、壁近傍で正值となることを明らかにした。その結果、異なる境界条件から生じる個々の現象の重ね合わせにより複雑な乱流場が説明できることが実験的に明らかとなった。

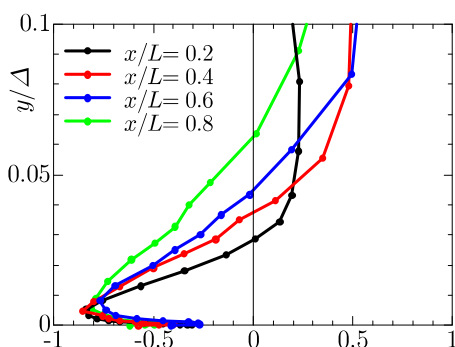


図5 壁面加熱条件が異なる平板乱流境界層で測定された温度場の相関特性が流れ方向に発達する様子。縦軸は壁からの無次元距離，横軸は異なる温度場の共分散

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Soe Minn Khine, Tomoya Houra and Masato Tagawa, Heat-conduction error of temperature sensors in a fluid flow with nonuniform and unsteady temperature distribution, Review of Scientific Instruments, Vol. 84, 2013, 44902.

DOI: 10.1063/1.4801853

Soe Minn Khine, Tomoya Houra and Masato Tagawa, An adaptive response compensation technique for the constant-current hot-wire anemometer, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 3, 2013, pp. 95-108.

DOI: 10.4236/ojfd.2013.32013

Soe Minn Khine, 保浦知也, 田川正人, 温度勾配を有する流体温度場における温度センサの熱伝導誤差の理論解析と実験的検証, 日本伝熱学会論文集 (Thermal Science and Engineering), Vol. 21, 2013, pp. 73-81.

〔学会発表〕(計10件)

T. Houra, K. Takano, M. Tagawa, Y. Nagano, Effects of High Free-Stream Turbulence on a Separated Flow Field

over a Two-Dimensional Hill, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2012年09月24日~2012年09月27日, Palermo, Sicily, Italy

保浦知也・戸田祐介・田川正人・長野靖尚, 加熱平板上を発達する乱流境界層の温度場多層構造に関する研究, 第49回日本伝熱シンポジウム, 2012年05月30日~2012年06月01日, 富山

保浦知也・中村直央・田川正人, 強い主流乱れを伴う乱流境界層の構造解析, 日本機械学会年次大会2012, 2012年09月10日~2012年09月12日, 金沢

Soe Minn Khine・保浦知也・田川正人, 温度勾配をもつ変動温度場における温度センサの応答特性(熱伝導誤差の理論解析と実験による検証), 熱工学コンファレンス2012, 2012年11月17日~2012年11月18日, 熊本

平光研士郎・保浦知也・田川正人, 加熱条件が変化する平板上を発達する乱流境界層の速度場と温度場の相関構造に関する研究, 日本伝熱学会東海支部講演会, 2013年01月25日, 四日市

保浦知也, 細線センサによる速度と温度変動の多点同時計測, 第90期流体工学部門講演会(招待講演), 2012年11月17日~2012年11月18日, 京都

鈴木郁弥, 渡邊拓也, 保浦知也, 田川正人, ビル模型の後流が乱流境界層内の物質輸送に及ぼす影響, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月08日~2013年09月11日, 岡山

井澤宏昭, 平光研士郎, 保浦知也, 田川正人, 加熱条件が変化する平板上を発達する乱流境界層の熱輸送特性, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月08日~2013年09月11日, 岡山

中村和寛, 西脇悠太, 保浦知也, 田川正人, 円柱後流におけるエチレンの乱流拡散過程(速度と濃度の同時計測), 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月11日~2013年09月11日, 岡山

保浦知也, 平光研士郎, 田川正人, 長野靖尚, 加熱条件が変化する平板上を発達する乱流境界層の速度と温度の相関特性, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013年05月29日~2013年05月31日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

保浦 知也 (HOURA, Tomoya)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00324484