

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420143

研究課題名(和文)乱流熱物質輸送過程における重ね合わせ原理に基づく現象の解明と予測

研究課題名(英文) Analysis and prediction of turbulent heat and mass transport 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、はく離・再付着を伴う複雑な強制対流の乱流場中で輸送される熱や物質の挙動を、風洞実験と直接数値シミュレーション(DNS)により明らかにすることである。複雑な乱流場として、2次元丘モデル周りなどの壁乱流を対象とし、その乱流特性を素過程の重ね合わせとして理解することで、複雑な乱流場における熱や物質の移流拡散現象を明らかにした。また、信頼性の高い実験データを得るために、温度センサの周波数伝達関数に基づく応答補償や、より小型の濃度変動計測装置を開発し、乱流中で変動する温度および物質濃度を高精度で測定する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we simulated and explored the complex turbulent heat and mass transport processes in forced convection regime with separation and reattachment by wind-tunnel experiment and direct numerical simulation (DNS). As a complex turbulent flow, we mainly investigated the effects of the thermal boundary condition on heat transfer characteristics over two-dimensional hill model, and we tried to understand the elementary processes based on the superposition principle. Moreover, we developed an accurate temperature measurement using the response compensation based on the frequency transfer function and a smaller-sized concentration detector specially designed for separated turbulent flows.

研究分野：熱流体工学

キーワード：熱工学 乱流 熱物質輸送 風洞実験 温度変動計測 濃度変動計測 直接数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

乱流による熱物質輸送現象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・岸壁など大きなスケールにわたって様々な形態で現れる。典型的な平板乱流境界層に比べて複雑なこれらの乱流場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を明らかにされている(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、温度成層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展した現代でも、膨大な出力からこれらの複雑乱流場で生じる熱物質輸送現象の本質を抽出し、乱流現象を普遍的に理解することは未だ困難であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、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装置実験と直接数値シミュレーション(DNS)により明らかにすることを目的とする。具体的には、複雑な強制対流場の一例として、2次元丘モデル周りの壁乱流を対象とし、速度場に対して受動的とみなせる温度場や濃度場などのスカラー場の乱流特性を、それらの素過程の重ね合わせとして理解することで、複雑な乱流における熱や物質の移流拡散現象をより普遍的に説明することを試みる。温度変動および濃度変動を高い精度で測定し、さらにDNSにより詳細な渦構造を同定することで、乱流熱物質輸送における既存の乱流モデルの精度評価と改良に資する知見を得る。

3. 研究の方法

典型的な壁面せん断乱流とは異なる複雑な乱流場を主な対象として、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説明する。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とDNS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) 温度と濃度変動の高精度計測技術の開発

温度や濃度などの乱流中で変動するスカラーを正確に計測することは、複雑な乱流現象を定量的に予測するための基盤となるデータベースの信頼性を担保する上でとても重要であり、センサの応答を理論的、数值的に解析し、風洞実験で実証する。

(2) 2次元丘モデル周り流れの風洞実験

種々の境界条件における熱物質輸送構造の重ね合わせ原理の検証を平板乱流境界層での計測結果と対比させながら、より複雑な乱流場として2次元丘モデル周り流れを対象として実施する。

(3) 直接数値シミュレーションによる解析と乱流モデルによる予測

温度助走区間を伴う乱流温度境界層、円管内乱流及びT型チャンネル温度混合場などの直接数値シミュレーションを行い、種々の温度境界条件において、重ね合わせが成立するかどうかを詳細に検討する。特に、装置実験では得ることが困難な、これらの場における壁面近傍に至る正確な基本乱流統計量を取得し、現象の解明を試みる。

4. 研究成果

(1) 温度変動計測の高精度化

細線温度センサの応答関数に及ぼす種々のパラメータの影響を明らかにするために、既存の理論解析では考慮されていない速度変動の影響を細線温度センサの非定常数値解析により明らかにして、デジタル応答補償による気流温度変動の高精度計測に向けた知見を得ることができた。

さらに、細線温度センサの熱時定数に及ぼす熱伝導損失の影響を定量的に明らかにした。また、これまで正確な値が分からずに仮定されていたプロング部の熱時定数について、温度センサの出力から簡便に測定する技術を新しく開発した。

これらの知見に基づいたセンサ出力の総合的な応答補償により、平板乱流温度境界層における温度変動を高精度で測定できることを示した。具体的には図1に示すように、乱流温度境界層の風洞実験において、応答補償の必要がほとんど無い線径0.63 μm の極細白金ロジウム抵抗線と適切に応答補償した3.1 μm のタングステン線による温度変動の測定結果がほぼ一致し、DNSと遜色の無い高精度な測定結果を得られることを実証した。

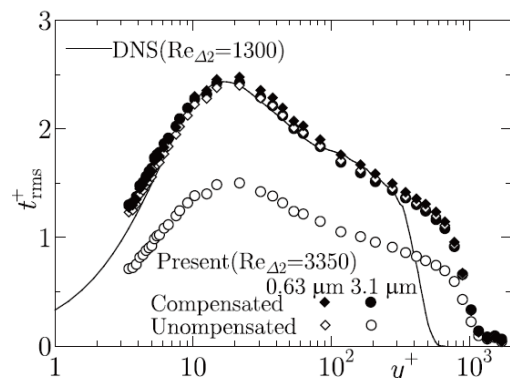


図1 抵抗線温度センサにより測定された平板乱流温度境界層内の温度変動計測に及ぼす応答補償の効果 取扱の容易な直径3.1 μm のセンサを用いて極細センサ(0.63 μm)と同程度に高精度な計測が可能となった。

(2) 種々の境界条件における熱物質輸送構造の重ね合わせ原理の実験的検証

平板上を発達する乱流境界層の壁温が流れ方向に急変する系について、風洞実験により、温度場の乱流特性を明らかにした。(1)で開発した温度センサの応答補償技術を多点同時測定プローブに適用し、種々の加熱条件によって温度場乱流構造が大きく変化することを定量的に明らかにした。具体的には、多点同時測定結果に基づいた乱流構造の条件付き解析により、熱輸送に支配的な変動のパターンを抽出することができた。

物質拡散の風洞実験(図2)では、これまでの検出器に比較してより小型かつ応答特性を改善した改良型の高速度応答水素炎イオン化検出器(高速FID)を作成し、2次元丘モデルの後方におけるはく離領域内で変動する濃度場の特性を定量的に明らかにすることができた(図3)。取得された濃度変動の時系列波形を解析することにより、点源放出された物質の乱流拡散過程における濃度変動場のスペクトル解析を実施し、濃度変動には2つの特徴的な周波数帯が認められることが明らかとなった(図4)。

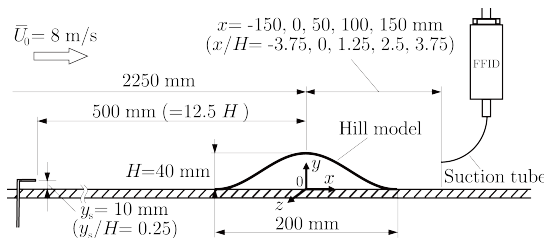


図2 風洞内の乱流境界層中に設置された2次元丘模型上流のエチレン排出源と改良型小型高速FID(水素炎イオン化検出器)システムによる濃度計測

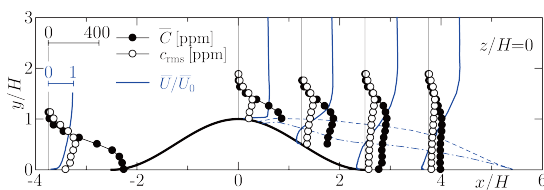


図3 2次元丘模型周りにおける平均濃度(●)と濃度変動(○)および平均速度分布(青線) 水平方向平均速度から風下ではく離が生じ、平均濃度が一樣に広がる様子

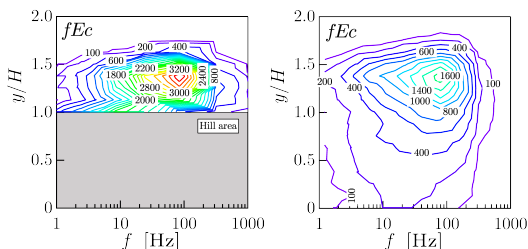


図4 丘頂上(左)と風下の逆流領域(右)における濃度変動スペクトル分布 はく離せん断層の高さにおける高周波数と壁近傍の低周波数変動の寄与が観察される

(3) 複雑乱流場のDNSによる調査

温度助走区間を伴う乱流温度境界層、円管内乱流及びT型チャンネル温度混合場の直接数値シミュレーションを行い、種々の温度境界条件において、熱物質輸送に係る重ね合わせが成立するかを詳細に検討した。特に、装置実験では得ることが困難な、壁面近傍に至る詳細な基本乱流統計量を取得し素過程を明らかにした。

また、実験と同様な2次元丘モデルに加えて、平板上に設置された前向きステップ、2次元ブロックを通過する乱流境界層に種々の温度成層が重畳した場合について、直接数値シミュレーションを行い、重ね合わせが成立しない浮力を伴う場合についてもデータベースを構築し、その詳細を明らかにすることができた。

以上のように、装置実験およびDNSによる調査により、多くの複雑乱流場についてのデータベースを構築することができた。これにより、重ね合わせの原理に基づいて素過程を定量的に明らかにすることができた。また、これらの複雑な乱流場を予測する乱流モデルを改善する方策について検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

H. Hattori, T. Houra, A. Kono and S. Yoshikawa, "Computational fluid dynamics study for improvement of prediction of various thermally stratified turbulent boundary layers," ASME Journal of Energy Resources Technology, 査読有, 2017, 139(5): 051209-051209-8 DOI:10.1115/1.4036177

〔学会発表〕(計20件)

T. Houra, Y. Nagano and M. Tagawa, Effects of a Stepwise Change in Thermal Boundary Conditions on Heat Transfer Characteristics in a Turbulent Boundary Layer Developing on a Flat Plate, 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15), 2014年8月10日~15日, Kyoto, Japan

H. Hattori, M. Iwase, T. Houra and M. Tagawa, DNS and LES for Turbulent Heat Transfer and Mixing in T-Junction Channel Flow, 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM10), 2014年9月17日~19日, Marbella, Spain

田口翔太, 井澤宏昭, 保浦知也, 田川正人, 非一様壁面加熱条件下で発達する平板境界層内変動温度場の乱流構造解析, 日本機械学会 2014年度年次大会, 2014年9月7日~10日, 東京電機大学 千住

キャンパス, 東京
保浦知也, 田川正人, 細線温度センサ周波数応答の数値解析と実験的検証, 熱工学コンファレンス 2014, 2014 年 11 月 8 日 ~ 9 日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス, 東京

服部博文, 岩瀬仁俊, 保浦知也, 田川正人, 数値計算による T 型混合路内の乱流温度混合に関する研究, 熱工学コンファレンス 2014, 2014 年 11 月 8 日 ~ 9 日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス, 東京

保浦知也, 田川正人, 細線センサの熱伝達と応答特性に関する実験的研究, 日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会, 2015 年 3 月 13 日 ~ 14 日, 中部大学 春日井キャンパス, 愛知

田口翔太, 保浦知也, 田川正人, 非一様壁面加熱条件下で発達する乱流境界層内熱輸送の多点同時測定, 日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会, 2015 年 3 月 13 日 ~ 14 日, 中部大学 春日井キャンパス, 愛知

保浦知也, 田川正人, 細線温度センサによる壁乱流変動温度場の高精度測定, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日 ~ 5 日, 福岡国際会議場, 九州

保浦知也, 田口翔太, 田川正人, 長野靖尚, 非一様加熱壁面上を発達する乱流温度境界層の条件付き構造解析, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日 ~ 5 日, 福岡国際会議場, 九州

鈴木秀明, 保浦知也, 田川正人, 2 次元丘模型の上流から点源放出されたエチレンの乱流拡散過程, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13 日 ~ 16 日, 北海道大学 工学部, 札幌

保浦知也, 田口翔太, 田川正人, 非一様加熱条件下で発達する平板乱流温度境界層の熱輸送機構と時空間相関構造, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13 日 ~ 16 日, 北海道大学工学部, 札幌
H. Hattori, M. Tanaka, T. Houra and M. Tagawa, DNS studies for various turbulent thermal boundary layers and scalar linearity, 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT-15), 2015 年 9 月 15 日 ~ 18 日, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

保浦知也, 鈴木秀明, 白石龍太郎, 田川正人, 二次元丘模型周りの乱流物質拡散に及ぼす速度境界層の影響, 熱工学コンファレンス 2015, 2015 年 10 月 24 日 ~ 25 日, 大阪大学 吹田キャンパス

T. Houra, H. Suzuki and M. Tagawa, Turbulence Measurement of a Passive Scalar Emitted from a Point Source in the Upstream Region of a Two-Dimensional Hill Model, The Fisrt Pacific-Rim Thermal Engineering

Conference (PRTEC2016), 2016 年 3 月 13 日 ~ 17 日, Waikoloa Beach Marriott Resort & Spa, Hawaii's Big Island, USA
H. Hattori, S. Yoshikawa, T. Houra and M. Tagawa, Turbulent Heat Transfer in Thermally-Stratified Boundary Layer over Two-Dimensional Hills by means of DNS, The Fisrt Pacific-Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2016), 2016 年 3 月 13 日 ~ 17 日, Waikoloa Beach Marriott Resort & Spa, Hawaii's Big Island, USA

T. Houra and M. Tagawa, Highly Accurate Measurement of Fluctuating Temperature Fields in a Wall Bounded Turbulent Shear Flow using Fine-Wire Temperature Sensors, The Fisrt Pacific-Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2016), 2016 年 3 月 13 日 ~ 17 日, Waikoloa Beach Marriott Resort & Spa, Hawaii's Big Island, USA

中村裕也, 保浦知也, 田川正人, サブミクロン冷線を用いた平板乱流温度境界層の速度と温度の高精度同時測定, 日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会, 2016 年 3 月 17 日 ~ 18 日, 愛知工業大学 八草キャンパス, 愛知

保浦知也, 吉田峻, 田川正人, 熱線と抵抗線群からなる新型プローブによる 2 成分乱流速度測定, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月 21 日 ~ 23 日, 九州大学 伊都キャンパス, 九州

鈴木秀明, 白石龍太郎, 保浦知也, 田川正人, 2 次元丘模型上流から点源放出されたエチレン乱流拡散過程のスペクトル解析, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月 21 日 ~ 23 日, 九州大学 伊都キャンパス, 九州

白井大地, 保浦知也, 田川正人, 細線温度センサにおけるブロング時定数の実験的評価, 日本機械学会東海支部第 66 期総会・講演会, 2017 年 3 月 14 日 ~ 15 日, 静岡大学 浜松キャンパス

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: 0 0 3 2 4 4 8 4

(2) 研究分担者

服部 博文 (HATTORI, Hirofumi)
名古屋工業大学・技術部情報解析技術課・課長
研究者番号: 3 0 4 6 7 3 5 2

(3) 研究協力者

森田 昭生 (MORITA, Akio)