

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360083

研究課題名(和文) 高レイノルズ数乱流境界層における圧力統計量の普遍性の解明と大規模組織構造との関連

研究課題名(英文) Universal Feature of Pressure Statistics and its Relation to Large Scale Motion in High-Reynolds Number Turbulent Boundary Layers

研究代表者：

辻 義之 (Yoshiyuki Tsuji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00252255

研究成果の概要(和文)：高レイノルズ数乱流境界層において変動圧力の計測および変動速度の計測を実施し、Re数によらない内層と外層変数による無次元統計量を見出した。一様速度勾配による非等方性が慣性小領域に及ぼす影響を線形応答理論により定慮化するとともに、平均速度勾配による非等方性に関する普遍的なスケーリング則を見出した。

研究成果の概要(英文)：Static pressure and velocity fluctuations are measured in high-Reynolds number turbulent boundary layers. It is found that the mean pressure and root mean square profiles are scaled by inner/outer typical velocity scale and length scale independent of Reynolds numbers. Anisotropy caused by the mean velocity gradient is analyzed by linear response theory in the inertial range. The universal anisotropic constants are derived theoretically and they are determined by the experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	9,100,000	2,730,000	11,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流

1. 研究開始当初の背景

申請者はスウェーデン王立工科大学(KTH)との共同研究で、高レイノルズ数乱流境界層中での変動静圧の計測を世界で初めておこなった。高レイノルズ数乱流境界層における平均速度分布、乱れ速度の分布、壁面せん断応力など、基本的乱流統計量の計測を改めて高精度で実施する国際協力研究が計画されている。乱流境界層は古典的な流れ場であり、過去に膨大な研究成果が報告されているが、このような問題を再吟味する背景には、過去の成果に統一的な解釈が得られて

おらず、実験施設(風洞)や計測方法などの相違が結果に影響すると考えられるからである。近年の計測機器の精度の向上と風洞をとりまく整備環境の改善から、より高精度の計測が可能となり、計測方法の統一化が望まれている。スウェーデン王立工科大学(KTH、スウェーデン)、ボローニア大学(イタリア)を中心に、ケンブリッジ大学(英国)、プリンストン大学、カリフォルニア工科大学、イリノイ大学(米国)、メルボルン大学(豪州)、ICTP(イタリア)、そして日本の研究者が参加して、各国の風洞施設を巡り、計測方法を

吟味するプロジェクトが実施された。特に高レイノルズ数に焦点をあて、乱流の普遍的性質の解明が目的とされた。

2. 研究の目的

高レイノルズ数乱流境界層における、圧力統計量および粒子加速度の再吟味と大規模組織構造や微細渦が乱流統計量の特性に果たす役割を議論する。これらの知見を踏まえ、乱流の普遍性の観点から、壁乱流の速度勾配（非等方性）が慣性小領域に浸透する過程を定量化する。

3. 研究の方法

高レイノルズ数乱流境界層実験が実施できる大型風洞施設において、速度、壁面せん断応力および圧力変動を計測する。異なる風洞施設において同一の研究者が同一の方法で計測した結果の比較、また、同一風洞で異なる研究者が計測した結果を比較する。その結果に基づき、風洞や計測法に依存しない乱流の統計的普遍性の存在について考察する。実験は、スウェーデン王立工科大学、メルボルン大学、九州大学の大型風洞施設でおこなった。乱流境界層中の大規模組織構造 (Super Structure, SS と略記する) を解析するために、チャンネル流れにおける速度、壁面せん断応力および圧力変動を計測をおこなった。計測結果を同一条件での直接数値計算 (DNS) との比較をおこなった。特に、波数スペクトルを比較する上で必要となる凍結乱流仮説が SS のスケールを見積もるうえでの影響を評価した。平均速度勾配が一定となる流れ場において、大きなスケールの非等方性が、圧力やラグランジュ加速度の統計に与える影響を線形応答理論に基づき調べた。

4. 研究成果

運動量厚さに基づく Re 数を同一にして、異なる風洞における計測結果の比較をおこなった。実験は王立工科大学、メルボルン大学、九州大学の大型風洞においておこなった。内層変数で無次元化した平均速度分布は、カルマン定数ならびに切片定数はいずれの風洞において計測した結果もよく一致した。つ

まり、壁近くの平均速度分布には、対数則としての普遍則の存在を確認できた。しかし、摩擦速度と主流速度の比として定義される局所摩擦係数には、Re 数の関数としての普遍的な関数型を見出せないことが明らかとなった。外層は風洞の性質や乱流へのトリップの方法、境界層の発達などの影響が無視できない。変動圧力の計測においても、バックグラウンドのノイズを除去した変動 rms 値は、風洞によって異なり、上記の結果をうらづけている [論文 3, 4] [発表 2, 3, 4, 6, 7]。

チャンネル流れにおいて、壁面せん断応力、変動速度、ならびに変動圧力の計測をおこなった。境界層中に見出されている SS のスケールを見積もるために用いられる凍結乱流仮説の検証を DNS データに基づき行った。局所平均速度を用いて、時間周波数を波数に変換したスペクトルと本来の波数スペクトルを比較した結果、両者は低波数まで十分に一致を認められた。つまり、SS が顕著に見出される壁近くにおいて、凍結乱流仮説はよい近似として成立する。実験では時系列信号の計測が主になされるが、組織構造の空間スケールを見積もるうえで、凍結乱流仮説をもちいることは妥当であることが明らかとなった [発表 4, 7, 11, 16]。また、SS が乱れエネルギー分布へ寄与する割合は小さいことが予想される。定量的評価は、Re 数によって異なるため、継続して調査している。

混合層中心付近に形成される一様平均速度場において、速度・圧力の同時計測並びに圧力の 2 点計測をおこなった。シアによる非等方性の慣性小領域への浸透を線形応答理論を用いて調べた。圧力場における非等方の効果は、1 点計測では見積もれないこと、シアの方向への 2 点計測によって定量化できることを理論的に示し、実験データによりその普遍定数を見出した。流れ方向への流体粒子加速度は、非等方性の影響が陽には表れないこと、従って一様等方場での値と一致することを理論的に示し、実験によって確認した。また、圧力速度相関スペクトルにおける非等方の効果を初めて見積もり、スペクトル係数を実験により定めた。これらのスペクトル係数は、一様なシアに対しては普遍的な定数となることが期待される [2, 6, 16, 19]。

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 10 件)

- ① H. Tanaka, N. Ohno, and Y. Tsuji, Enhancement of Cross-Field Transport into the Private Region of Detached-Divertor in LHD, *Physics of Plasmas*, vol.17 (2010), 102509 (8pages) (査読有)
- ② Tomohiro Hayakawa and Yoshiyuki Tsuji, Mean wind: Its velocity and Temperature Fluctuation in Low-Prandtl-Number Thermal Convection, *Physica D*, vol. 239 (2010), pp. 1353-1358. (査読有)
- ③ J.K. Mori, H. Imanishi, Y. Tsuji, et al., Direct total skin-friction measurement of a flat plate in zero-pressure-boundary layers, *Fluid Dyn. Res.*, vol.41(2009), 021406 (19pages). (査読有)
- ④ Yoshiyuki Tsuji, High-Reynolds Number Experiments: the Challenge of Understanding Universality in Turbulence, *Fluid Dynamical Research*, Vol.41 (2009),064003(17pages). (査読有)
- ⑤ H. Tanaka, N. Ohno, N. Asakura, Y. Tsuji et al., Statistical Analysis of Fluctuation Characteristics at High-and Low-field Sides in L-mode SOL Plasmas of JT60U, *Nucl. Fusion*, Vol.49(2009), 065017(7pages). (査読有)
- ⑥ 辻 義之、田中宏彦、大野靖哲、流体乱流研究から診たプラズマ乱流データの解析：スペクトルと相関関数、*プラズマ核融合学会誌*、vol.85,No.9, pp.620-630,(2009). (査読無)
- ⑦ 辻 義之、田中宏彦、大野靖哲、流体乱流研究から診たプラズマ乱流データの解析：確率密度関数とその応用、*プラズマ核融合学会誌*、vol.85,No.10, pp.665-673,(2009). (査読無)
- ⑧ 辻 義之、田中宏彦、大野靖哲、流体乱流研究から診たプラズマ乱流データの解析：組織構造の定義とその抽出、*プラズマ核融合学会誌*、vol.85,No.11, pp.774-782,(2009). (査読無)
- ⑨ 辻 義之、田中宏彦、大野靖哲、流体乱流研究から診たプラズマ乱流データの解析：流体およびプラズマ乱流の普遍性、*プラズマ核融合学会誌*、vol.85, No.11, pp.783-792,(2009). (査読無)
- ⑩ 河合 勇太、辻 義之、エッジトーン現象によって噴流中に形成された組織構造の特徴：第3報、渦構造への干渉によるエッジトーン現象のパッシブ制御、*日本機械学会論文集B編*, 74 巻,738 号 (2008), pp 354-361. (査読有)

[学会発表] (計 21 件)

- (1) 早川智博、辻 義之、熱乱流中の巨視的流動に関する実験的研究、研究集会「乱流の動力学的記述と統計力学的記述の

相補性」、京都大学数理解析研究所、2010年1月13日-15日。

- (2) Yoshiyuki Tsuji, Anisotropic pressure correlation spectra in turbulent shear flow, *NORDITA and Linné FLOW Centre Workshop on Turbulent Boundary Layers*, April 29-30,(2010), ROOM FB42, AlbaNova, Stockholm ,Sweden.
- (3) Yoshiyuki Tsuji, Dissipation Constant in High-Reynolds Number Turbulence, 6th *IMS Turbulence Workshop; Qualitative Universality, Large- and Small-Scale Coherent Structures and Long-Range Memory in Turbulent Flow*, 12-15 July, (2010), Institute for Mathematical Science, Imperial College London, UK.
- (4) 今山慎太郎、辻 義之、平板乱流境界層の速度分布、せん断応力分布に普遍性は存在するのか?、日本流体力学会年会2010、北海道大学、2010年9月9日-11日。
- (5) 辻 義之、無次元化したエネルギー散逸率の境界条件への依存性について、研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」、九州大学応用力学研究所、2010年11月11日-13日。
- (6) 辻 義之、せん断乱流中の圧力および圧力勾配の非等方スペクトルにつて、研究集会「乱流の多重性・階層性とその数理的構造」、京都大学数理解析研究所、2009年1月14日-16日。
- (7) S. Imayama, Y. Yamamoto, Y. Tsuji, Coherent Structures and their Contribution to Turbulent Intensity in Turbulent Channel Flow, 6th *International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, June 22-24, (2009) ,Seoul National University, Seoul Korea.
- (8) Yoshiyuki Tsuji, On the Energy Dissipation Constant in High-Reynolds Number Turbulence, *RIMS Symposium; Mathematics and Physics across the Diversity of Turbulence Phenomena*, 9-11 July, (2009), Kobe Japan.
- (9) K. Horiuchi, Y. Tsuji, K. Saitou, Extraction of the Non-equilibrium Energy Spectrum in High-Reynolds Number Turbulence, 12th *EUROMECH European Turbulence Conference*, September 7-10, (2009), Marburg, Germany.
- (10) H. Ushimaru, Y. Tsuji, Y. Kukita, Experimental Determination of Jet Surface Configuration Based on Color-coding Measurement of Surface Slope Angle, The 13th *International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, September 27-October 2, (2009), Kanazawa, Japan.
- (11) 辻 義之、今山慎太郎、山本義暢、乱流境界層：そのチャンネル乱流との相違、

- 第 87 期流体工学部門講演会、名古屋工業大学、2009 年 11 月 7 日-8 日.
- (12) 服部智洋、辻 義之、川島英幹、日夏宗彦、児玉良明、大型模型船体周りの流れの超音波を用いた計測、日本船舶海洋工学会秋季講演会、メルパルク東京、2009 年 11 月 11 日-12 日
- (13) 益子岳史、佐野雅己、辻 義之、超音波を用いた熱乱流速度場の測定実験、研究集会「乱流研究の展望：ブレイクスルーを求めて」、京都大学数理解析研究所、2008 年 1 月 16 日-18 日.
- (14) Yoshiyuki Tsuji and Tomohiro Hayakawa, Mean Wind: Its Velocity and Temperature Fluctuation in Low-Prandtl-Number Thermal Convection Symposium on Fluid Science and Turbulence, May 29-31, (2008), Johns Hopkins University, USA.
- (15) Imanishi Hiroki, Kiyoto Mori, Yoshiyuki Tsuji, *et al.*, Reconsideration of Karman - Schoenherr Skin Friction Formula in High-Re-Number Turbulent Boundary Layer, 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, August 18-21, (2008), Daejeon, Korea.
- (16) Yoshiyuki Tsuji, An isotropic Pressure and Acceleration Spectra in Shear Flow, The Nature of High-Reynolds Number Turbulence, An Isaac Newton Institute Programme for 2008, September 29 – October 3, (2008), Cambridge University, UK.
- (17) 辻 義之、松原雅春、望月信介、高レイノルズ乱流境界層における壁面せん断応力計測の試み、研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」、九州大学応用力学研究所、2008 年 11 月 13 日-15 日.
- (18) 服部 智洋、今西 浩輝、辻 義之、松原雅春、高 Re 数における Karman - Schoenherr 摩擦抵抗係数式の再考察、日本流体力学学会年会 2008、神戸大学、2008 年 9 月 4 日-7 日.
- (19) Yoshiyuki Tsuji, High-Reynolds Number Experiments: Challenge to Understand the Universality of Turbulence, The 40-year Anniversary Conference of the Japan Society of Fluid Mechanics, Kobe University Centennial Hall, 5 Sep.(2008), Kobe, Japan.
- (20) H. Tanaka, N. Ohno and Y.Tsuiji, *et al.*, Statistical Analysis on Bursty Fluctuation in Attached and Detached -Divertor Plasmas of the LHD, International Congress on Plasma Physics 2008, September 8-12, (2008), Fukuoka, Japan.
- (21) Yuta Kawai and Yoshiyuki Tsuji, Vortical Structures in High-Reynolds-Number Jet Indicating Edgetone Oscillation, 6th Japan-Korea Symposium on Nuclear

Thermal Hydraulics and Safety, Bankoku-Shinryokan, Nov. 24-27, (2008), Okinawa, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 義之 (Yoshiyuki Tsuji)
工学研究科 教授
研究者番号：00252255

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし