

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360082

研究課題名(和文) 超流動乱流における量子渦の可視化法の開発と圧力変動計測による乱流普遍則の解明

研究課題名(英文) Visualization of quantum vortex in super fluid and study of universality in turbulence based on pressure measurement

研究代表者

辻 義之(Tsuji, Yoshiyuki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00252255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：液体ヘリウム(He)は、絶対温度2.17Kにおいてその粘性が消滅して安定な超流動状態に移る。この粘性がない状態では、通常の室内実験では実現不可能な高レイノルズ(Re)数乱流が生成される。本研究では、超流動状態における流速場の可視化方法を開発し、熱対向流中の量子渦の挙動を観察することに成功した。また、従来用いていた圧力プローブを小型化することにより、乱流中の変動圧力計測方法を高精度化することができた。対数領域における確率密度関数型の不変性を利用して、乱流境界層壁近くの変動強度を補正する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：When the liquid helium has its temperature below 2.17K, it becomes a super fluid with no viscosity. Under this condition, we can expect high Reynolds number property in fluid turbulence. In this study, we successfully developed the visualization technique of super fluid and can observe the quantum vortex motions. Also, the small pressure probe is developed to measure accurate pressure fluctuations. This technique is applied to the near-wall region of turbulent boundary layer. Using the invariant assumption of probability density functions, we suggest the correction method of pressure intensity near wall region.

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：流体工学 量子乱流 圧力変動 普遍法則

## 1. 研究開始当初の背景

R.ファイマンは、1955年の論文で量子渦の複雑に絡み合う乱流状態を予測していた。この描像が具体的な計測結果に基づき、実際に起こりうる現象として理解され始めたのはここ10数年の研究による。特に流体乱流のエネルギースペクトルに広く認められる $-5/3$ 乗則(Kolmogorovにより提案された普遍則)が、Maurerらによる実験や坪田らの数値計算によって超流動乱流にも発見されたことは、大きな渦が小さな渦へ崩壊する過程で自己相似的なカスケードが存在することを示唆するものであった。

超流動乱流では、量子渦はすべて同一の渦度を持ち、渦糸が互いに絡み合った状態(タングル)として乱流場を形成する。従って、乱流中の渦構造を明確に抽出することが可能である。超流動乱流のエネルギースペクトルに $-5/3$ 乗則が観測されたことは、渦構造がどのように統計法則に関与するのかを調べる格好の対象となる。また、要素還元的に乱流を量子渦の集合体ととらえ、複雑な乱流現象に対する新たな理解をもたらすことが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、超流動Heにおける流速計測を可視化手法により確立することを第一の目的とする。超流動状態でも長時間浮遊するトレーサの選定、分量、注入方法などを検討し、乱流速度変動を粒子画像速度計測法(PIV法)により計測する。超流動場の量子渦を光学的手法で可視化した例は、世界でも数例があるのみである。

## 3. 研究の方法

超流動乱流の可視化法を改良するため、これまでおこなってきた予備的実験に基づき、デュアーに光学窓を設置する。また、超流動乱流場でも長時間浮遊するトレーサ粒子として中空ガラスビーズ球に代えて水素・ネオンの混合気体とし、粒子径分布の調整、溶液中への様な分散方法を確立する。次に断熱性の優れた透明素材によりダクト流路を製作して、熱カウンター流の可視化をおこなう。層流から乱流への遷移に伴い、対向流から量子渦タングルが形成される過程を明らかにする。

### 3-1 クライオスタット

図3.1.1に本実験で用いたステンレス製クライオスタットの断面の略式図を示す。最内槽が液体ヘリウム槽である。液体ヘリウム槽は内径200mm、高さ1300mmである。液体ヘリウム槽への熱侵入は外周の液体窒素槽と真空断熱槽によって軽減される。液体窒素槽は熱輻射による熱侵入を軽減する。真空断熱槽は熱伝導による熱侵入を軽減する。真空断熱槽の真空度は $10^{-6}$ kPa程度としている。このクライオスタットは可視化実験のために石

英ガラス製の窓を有している。可視化窓は $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ の箇所配置している。 $0^\circ$ の窓から $180^\circ$ の窓へシートレーザー光を入射し $90^\circ$ の窓からカメラで撮影をする。各箇所窓は外部から最内槽まで貫くように三層の窓から成っている。本実験では液体ヘリウム槽の圧力を制御することで、液体ヘリウムの温度を制御している(3, 5, 6)。

図3.1.2は本研究で行った実験におけるクライオスタットの内装の略式図である。図のようなフランジに支柱を設けて試料などを設置し、先に述べたクライオスタット上部にのせ実験を行う。支柱の最下部には液体ヘリウムをかさ増しする目的でアルミニウム2017(ジュラルミン)ブロックを接続している。ジュラルミンブロックには上部に穴をあけ、白金コバルト温度計を挿入している。白金コバルト温度計は室温から10K程度までをモニターする。また底部には液体ヘリウムの温度をあげるためなどに用いる、常温で420 $\Omega$ 、定格230Wのカートリッジヒーターを接着している。電気系統は48ピンフィードスルーによって実験室側と配線している。

### 3.2 水素粒子生成システム

水素粒子の生成手法の概略を、Bewleyらのものを比較した(表3.2.1参照)。まず、実験室下で水素ガスとヘリウムガスを混合する。本研究では混合比 $H_2:He=1:40$ 、Bewleyらは $1:50$ である。次に混合ガスの圧力を設定する。本研究は120kPa(abs)、Bewleyらは20kPa(abs)である。混合ガスは噴射チューブを介してHe IIの状態にある液体ヘリウム中へ噴射する。BewleyらはHe Iの状態にある液体ヘリウム中へ噴射し、水素粒子を供給したHe IをHe IIへ転移させている。両者の手法を比較し本研究では噴射圧力と、噴射する液体ヘリウムの相をBewleyらの条件をとり入れて行うこととした(17, 18)。

### 3.3 可視化光学系

クライオスタットの周辺にカメラとレーザーを設置した。先に述べたとおりクライオスタットの $0^\circ$ から $180^\circ$ の窓に照射できる方向にダブルパルスレーザーを、 $90^\circ$ の窓から撮影できる方向にCCDカメラを設置している。両者は制御ソフトを用いて、カメラの露光時間中にレーザー光が照射されるように同期して使用する(8, 9, 17, 18)。

カメラレンズは等倍マクロレンズを用いた。このレンズによって可視化領域は $9.07\text{mm} \times 9.16\text{mm}$ 、ピクセル分解能は $9\mu\text{m}/\text{pixel}$ となる。従来の実験では可視化領域は $41.3\text{mm} \times 41.7\text{mm}$ 、ピクセル分解能は $41\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。ピクセル分解能の向上によって、微細な水素粒子の撮影が16分の1ほど狭い領域を可視化することとなる。ダブルパルスレーザーから照射される点源光は、トレーサ粒子の二次元運動を可視化するためにシート光に変換する。本研究では三種のレンズを用いて、

シート光を形成した。ダブルパルスレーザーとレンズ系の関係の略式図を図 3.3.1 に示す。三種のレンズはダブルパルスレーザーから近い順に、焦点距離  $f=-60$  の円筒形平凹レンズ、 $f=70$  の球面平凸レンズ、 $f=-15$  の円筒形平凹レンズ（三種ともシグマ光機）である。計算上は  $f=-60$  の円筒形平凹レンズと  $f=70$  の球面平凸レンズを 55mm、 $f=70$  の球面平凸レンズと  $f=-15$  の円筒形平凹レンズを 35mm の間隔で置くことで、直径 2.5mm のレーザービームは幅 12mm の平行シート光に変換される。シートのウェストは  $f=-15$  の円筒形平凹レンズから 240mm 後方で形成され厚さは 1mm 以下となる。レンズとダブルパルスレーザーは光軸合わせが容易なように定盤の上に固定した(17, 18)。

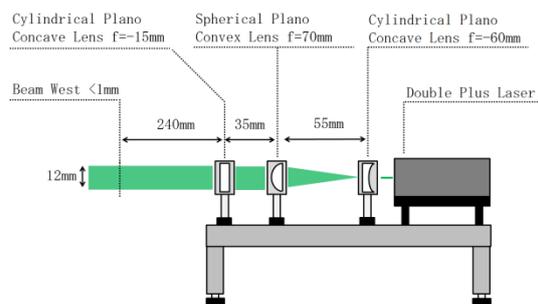


図 3.3.1 可視化光学系概略図

#### 4. 研究成果

本研究では PTV アルゴリズムを用いて、トレーサー粒子の運動速度を算出した。

##### 4.1 可視化画像

図 4.1.1 は He I へ混合ガスを噴射中に取得した画像である。He I の温度は  $T=2.21\text{K}$  である。水素ガスとヘリウムガスの混合比は 1:40、噴射圧力は 20kPa (abs) である。微細な水素粒子が霧状に拡散していく様子を確認することができた。噴射が終了してから 5 分ほど経過した後を取得した画像を比較する(17, 18)。He I の温度は  $T=2.23\text{K}$  である。霧状の水素粒子が視野域全体に広がっている。均一に、高い個数密度で水素粒子が分布している。画像から推測すると水素粒子の平均径は  $1\mu\text{m}$  オーダーである。撮影した画像は Bewley らが取得した画像とよく似ている。この後 He I を減圧冷却し He II へ転移させた。He II へ転移した直後を取得した画像と比較する(17, 18)。He II の温度は  $T=2.17\text{K}$  である。He II への転移により、視野域における粒子の個数密度が低下する。そして糸状に分布する粒子群が出現する。このような糸状に分布する粒子群は He II でのみ見られ、さらに Bewley らの可視化結果にもよく似ている。以上のことから、ここに示した糸状に分布する粒子群は、量子化渦にトラップされた水素粒子群であると考えられる。

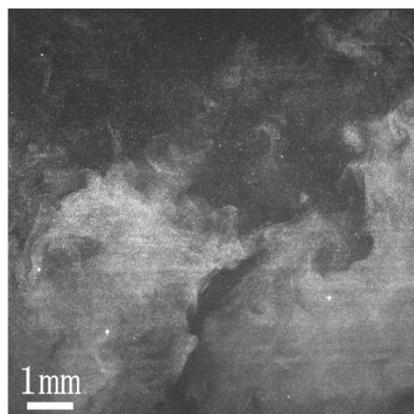


図 4.1.1 He I へ混合ガスを噴射中に取得した画像 (He I 温度  $T=2.21\text{K}$ )

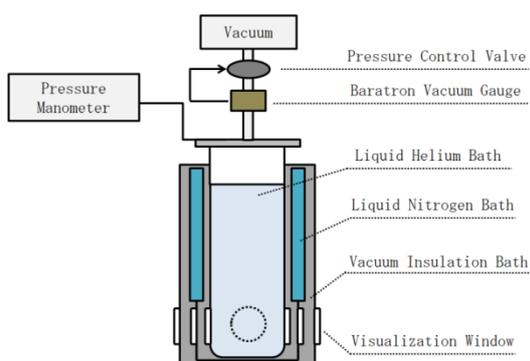


図 3.1.1 クライオスタット概略図

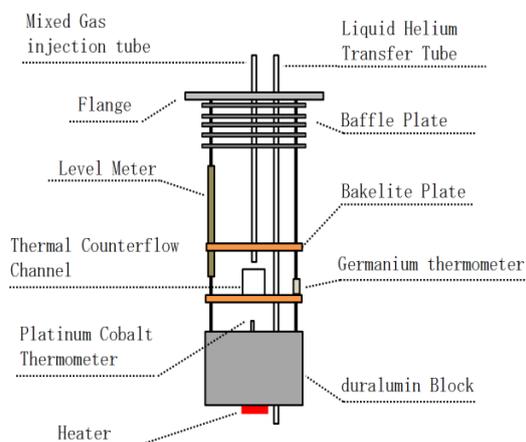


図 3.1.2 クライオスタット内装概略図

表 3.2.1 水素粒子製造条件の比較  
本研究 (Wada) と先行研究 (Bewley)

	Wada	Bewley
Mixing Ratio	$\text{H}_2:\text{He}=1:40$	$\text{H}_2:\text{He}=1:50$
Injection Pressure	120kPa (abs)	20kPa (abs)
Liquid Helium Phase	He II	He I
Injection Position	In Liquid	In Liquid

超流動転移から1分後に取得した画像では、視野域における糸状に分布する粒子群の存在が顕著になる(17, 18)。さらに4分経過した後に取得した画像と比較すると、糸状に分布する粒子群の個数が少なくなっているが、一つずつが長く太くなっていることが確認できた。このことから量子化渦にトラップされた粒子群は時間経過とともに互いをトラップしあい、束になっていくと考えられる。

#### 4.2 渦糸のリコネクション

本実験では量子化渦のリコネクションに追従しているようなトレーサー粒子の運動を撮影した。He II の温度は  $T=2.02\text{K}$  である。量子化渦にトラップされた二つの粒子群が接近し、つなぎ変わり、バックグラウンドの流れとは明らかに異なる運動をして離脱していく様子を撮影することに成功した。図 4.2.1 のように、異なる二つの量子化渦に追従するトレーサー粒子のうち、リコネクションする点に最も近い位置にあるトレーサー粒子間の距離を  $l'$  とする。量子化渦が時間  $t_0$  でつなぎ変わってからの  $l'$  は指数関数で表すことができると仮定した。本実験においてリコネクトする点に最も近く、離脱後の距離  $l'$  を求めることができる二つのトレーサー粒子は、図中の青実線矢印と赤点線矢印である。この二点の距離を図 4.2.1 の丸プロットに示す。図中の破線は上式の指数関数の形で最小二乗法を用いて、丸プロットを近似した曲線である。

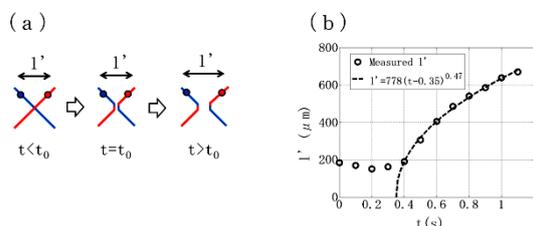


図 4.2.1(a) 量子化渦のリコネクションの概念図 (b) 丸プロットは計測した  $l'$ 、破線は最小二乗法で丸プロットを近似した近似式

#### 4.3 熱カウンター流の可視化

熱カウンター流における代表的なトレーサー粒子の軌跡を解析した(17)。He II の温度は  $T=2.02\text{K}$ 、熱流束は  $z$  正方向に  $q=38.1\text{mW/cm}^2$  印加している。通常流体の一樣乱流中では見られないような、上下動をするトレーサー粒子を確認することができた。これは粘性流である常流動成分と量子化渦が生じた超流動成分が対向する流動を反映していると考えられる(17)。

#### 4.4 変動圧力計測法の改良

これまで、乱流中の変動圧力の計測を小型プローブによりおこなってきた。噴流、乱流境界層、混合層における計測をおこない、プローブ計測に起因するデータ補正法の開発とともに、乱流中の圧力統計量の解析を進め

てきた。また、計測データ中には風洞内のバックグラウンドの変動(低周波)が含まれ、その影響を補正する方法を報告した(①, ②)。

図 4.4.1(a)には、変動圧強度を壁からの距離に対してプロットした結果である。数値計算の結果と比較して、壁近くでは変動強度が低下している。これは主に壁近くの渦構造に起因する間欠的な強い圧力変動を正確に計測できていないことによる。乱流中の圧力 PDF は、低圧側にすそ野が伸びた型を呈する。壁からの距離がほぼ同一の数値計算より得られた PDF と比較すると、低圧側のすそ野が大きくずれており、この傾向が空間分解能の低下によるものと考えられる。空間分解能を補正する方法として、PDF 型のすそ野の分布を改善することを考える。PDF のすそ野は、stretched exponential 型で近似される。壁乱流の直接数値計算の結果によると、圧力変動の3次、4次モーメントが壁近くでほぼ一定になることから、PDF 型が変化しないと考えられる。つまり、圧力変動の PDF 型が普遍となる領域で PDF 型のすそ野を補正した。変動圧力を修正した結果を図 4.4.1(b)に示す。

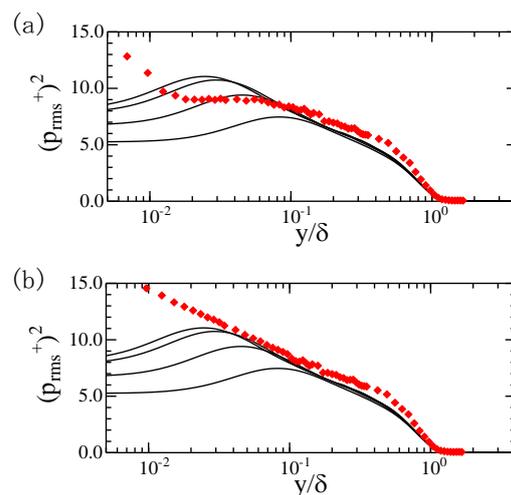


図 4.4.1(a) 圧力変動強度の実験値(赤■)と直接数値計算の比較。(b) 補正後の比較

#### 4.5 まとめ

本研究では水素微粒子を生成するための条件を明らかにし、量子化渦を可視化するための光学系を開発した。He I 中に直径  $1\mu\text{m}$  程度の微細な水素粒子を生成することができ、量子渦にトラップされた粒子群の撮影に成功した。リコネクションする量子化渦に追従するトレーサー粒子の運動を明らかにした。また、生成した水素粒子をトレーサー粒子として、熱カウンター流の可視化実験をおこない、常流動成分、超流動成分の速度分布関数を計測した。

圧力プローブを小型化することにより、乱流中の変動圧力計測方法を高精度化した。対数領域における確率密度関数型の不変性を利用して、乱流境界層壁近くの変動強度を補正する方法を提案した(23, 24)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Y. Tsuji, S. Imayama, P. Schlatter, P. Henrik Alfredsson, A. V. Johansson, I. Marusic, N. Hutchins, and J. Monty, Pressure fluctuation in high-Reynolds-number turbulent boundary layer: results from experiments and DNS, *Journal of Turbulence*, vol. 13, No. 50, pp.1-19, (2012).
- ② Yoshiyuki Tsuji and Yukio Kaneda, Anisotropic Pressure Correlation Spectra in Turbulent Shear Flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 694, pp.50-77, (2012).
- ③ Feng Shan, A. Fujishiro, T. Tsuneyoshi, Yoshiyuki Tsuji, Particle image velocimetry measurements of flow field behind a circular square-edged orifice in a round pipe, *Exp. in Fluids* vol. 54 pp.1-18(2013).
- ④ Feng Shan, Atsushi Fujishiro, Tatsuya Tsuneyoshi and Yoshiyuki Tsuji, Effects of flow field on the wall mass transfer rate behind a circular orifice in a round pipe, *Int. J. Heat Mass Trans.*, vol.73, pp.524-550(2014).

[学会発表] (計 28 件)

- (1) Yoshiyuki Tsuji, Measurement of Acceleration and its Statistics in Turbulence, *Recent Progress in fluid Dynamics Research, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics AIP Conf. Proc.*, Vol. 1376, pp.81-83 (2011).
- (2) Y. Tsuji, S. Imayama, P. Schlatter, P. H. Alfredsson, A. V. Johansson, Pressure Fluctuation in High-Reynolds Number Turbulent Boundary Layer: Results from Experiments and Numerical Simulations, 7th International Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena (TSFP7), Ottawa, Canada, July 28 - 31, 4 pages in CD ROM Proceedings, (2011).
- (3) 栄國泰秀、和田一輝、石田一真、岩本晃史、前川龍司、辻 義之、超流動ヘリウム熱カウンター流における温度変動の測定と流速予測、日本流体力学会年会 2011、首都大学東京、9/7-9/9, (2011).
- (4) 辻 義之、乱流境界層における圧力統計量の普遍性乱流の普遍性と個別性：流体乱流を通して宇宙を見る、京都大学数理解析研究所、1/11-1/13,(2012).

- (5) Yasuhide Eikoku, Kazuma Ishida, Kazuki Wada, Akifumi Iwamoto, Yoshiyuki Tsuj, Heat Transfer and Boiling of Liquid Helium Oscillation in Narrow Rectangular Duct, The 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, China National Convention Center (Beijing, China), 8/19-8/24, (2012).
- (6) 石田一真、栄國泰秀、加藤大貴、岩本晃史、辻 義之、矩形ダクトが超流動ヘリウムの沸騰に与える影響について、日本流体力学会年会 2012、高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市)、9/16-18,(2012).
- (7) 辻 義之、今山慎太郎、乱流境界層の圧力変動の計測とその補正、日本機械学会関東支部主催山梨講演会、山梨大学(山梨県甲府市),10/26-27,(2012).
- (8) Kazuma Ishida, Yasuhide Eikoku, Daiki Kato, Yoshiyuki Tsuj, Akifumi Iwamoto, Boiling of Liquid Helium and Periodic Oscillation in Narrow Rectangular Duct, International Toki Conference, National Institute for Fusion Science, Toki, 11/19-22, (2012).
- (9) Yasuhide Eikoku, Kazuki Wada, Kazuma Ishida,Yoshiyuki Tsuj, Akifumi Iwamoto, Visualization and Velocity Fluctuation Measurement in Super Fluid He II , International Toki Conference, National Institute for Fusion Science, Toki, 11/19-22, (2012).
- (10) Yoshiyuki Tsuj, Yoshinobu Yamamoto, Correction of Pressure Data Close to the Wall in Turbulent Boundary Layer, American Physical Society 65th annual DFD meeting, 11/18-20,(2012).
- (11) 辻 義之、山本義暢、圧力統計量に基づく壁乱流の内層と外層の構造研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理解析」京都大学数理解析研究所、1/9-11,(2013).
- (12) 辻 義之、壁乱流の大規模組織構造の解明がもたらすエネルギー高効率化への貢献、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第5回シンポジウム、THE GRAND HALL (品川) 7/10-11, (2013).
- (13) 後藤克己、辻 義之、平板乱流境界層の外層速度スケールと摩擦損失係数に関する考察、日本流体力学会 年会 2013、東京農工大学、9/12-14, (2013).

- (14) 山本義暢、辻 義之、高レイノルズ数チャンネル流における凍結乱流場の空間相関解析、日本流体力学会 年会 2013、東京農工大学、9/12-14、(2013).
- (15) 山本義暢、辻 義之、スーパーコンピュータにおける乱流の大規模直接数値シミュレーション、日本機械学会関東支部山梨講演会、山梨大学、10/26、(2013).
- (16) 佐野正幸、恒吉達矢、山本義暢、辻 義之、数値計算による壁乱流の組織構造に関する研究、日本機械学会関東支部山梨講演会、山梨大学、10/26、(2013).
- (17) 加藤大貴、和田一輝、石田一真、平野 彰、辻 義之、伊藤高啓、岩本晃史、濱口真司、高田 卓、微細水素粒子を用いた超流動乱流の可視化、第91期日本機械学会流体力学部門講演会、九州大学、11/9-10、(2013).
- (18) 石田一真、栄国泰秀、加藤大貴、平野 彰、伊藤高啓、辻 義之、岩本晃史、濱口真司、高田 卓、矩形流路内で発生する He II の膜沸騰における可視化と流動モデルの検討、第91期日本機械学会流体力学部門講演会、九州大学、11/9-10、(2013).
- (19) 辻 義之、山本義暢、高レイノルズ数乱流境界層における圧力計測：壁近くでの統計量補正法の提案、第91期日本機械学会流体力学部門講演会、九州大学、11/9-10、(2013).
- (20) 和田裕貴、今山慎太郎、伊藤高啓、辻 義之、高レイノルズ数乱流境界層の対数領域における確率密度関数の自己相似性、第91期日本機械学会流体力学部門講演会、九州大学、11/9-10、(2013).
- (21) Yoshiyuki Tsuji, Y.Yamamoto, Probability density function of pressure in turbulent boundary layers, American Physical Society Division of Fluid Dynamics 66th Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 11/24-26,(2013).
- (22) Yuki Wada, Yoshiyuki Tsuji, Logarithmic region of turbulent boundary layer from low to high Reynolds numbers, American Physical Society Division of Fluid Dynamics 66th Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 11/24-26,(2013).
- (23) Yoshinobu Yamamoto, Yoshiyuki Tsuji, Reynolds Number Effects on Kinetic Energy Transfer from Outer Layer in Turbulent Channel Flows, American Physical Society Division of Fluid Dynamics 66th Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 11/24-26,(2013).
- (24) Yoshiyuki Tsuji, Large scale structures based on pressure in high-Reynolds number turbulent boundary layer, High Reynolds Number Boundary Layer Turbulence: Integrating Descriptions of Statistical Structure, Scaling and Dynamical Evolution, University of New Hampshire, USA, 11/21-23, (2013).
- (25) 辻 義之、圧力統計量に基づく壁乱流中の組織構造、数理解析研究所研究集会「大スケール流体運動と乱流揺らぎ」、京都大学、1/8-10、(2014).
- (26) 山本義暢、辻 義之、高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模構造の影響と寄与、研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」、九州大学応用力学研究所、2/22-13、(2014).
- (27) Yoshiyuki Tsuji, Experimental evaluation of energy dissipation rate in turbulence, Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence, Nagoya University, 3/10-12, (2014).
- (28) 佐野正幸、恒吉達矢、山本義暢、辻 義之、チャンネル乱流場における壁面圧力に基づく組織構造の解析、日本機械学会東海支部、第63期総会・講演会、大同工業大学、3/18-19、(2014).

## 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