

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 2 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560165

研究課題名（和文） 複雑乱流場における巨視的ダイナミクスの発現の研究

研究課題名（英文） STUDY OF LARGE-SCALE DYNAMICS EMANATED IN COMPLEX TURBULENT FLOWS

研究代表者

前川 博 (MAEKAWA HIROSHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90145459

研究成果の概要（和文）：

乱流境界層などにおける壁面近傍から境界層内せん断層内に出現する渦運動の大規模ダイナミクスを研究することによって、研究目的である複雑乱流場における巨視的ダイナミクスの出現について解析を行った。流れは乱流遷移構造を含み下流に乱流境界層が発達する空間発展型計算によるデータ・ベースを構築して様々な無次元パラメーター（マッハ数、レイノルズ数、上流かく乱条件、壁面境界温度条件）における直接計算結果のデータ・ベースを構築し解析を行った。多くのストリークが発達する上流条件を用いた場合は、かく乱の変動が比較的大きな領域のスポット構造が発展してヘアピン渦パケット構造を起点として低速ストリークに関連した大規模な Lift-Up メカニズムが発生する。壁面近傍の低速ストリーク群と対数則より上の境界層外層までの観察される低速領域を繋げて観察される大規模構造は、Toh&Itano(2005)が提唱した分水嶺と類似な立体的見え方をし、壁面近傍低速ストリークは分水嶺の谷の構造で発達して、谷の構造が合流し大きなストリーク構造には低速塊が上昇する基本的なダイナミクスを形成されることが明らかになった。その階層の上層には馬蹄形渦の形成に見られる新たなダイナミクスが観察された。豊富な渦構造群は一連の構造形成とともに2次や3次渦構造として発達して、大規模な渦構造群“渦の森”として観察されることになることが明らかになった。統計的には Premultiplied spectra を調べると、その極大値が壁面近傍と境界層外層に存在し、構造の階層性が示されている。

低速ストリークに関連した低速塊の Lift-Up 機能が働くことによって階層ごとの不安定性と渦構造に起因する新旧世代間階層型の巨視的ダイナミクスが発現されることが解明できた。

研究成果の概要（英文）：The study of turbulence developing close to solid walls, usually referred to as wall turbulence is one of the most important aspects of turbulence. In this study, large-scale dynamics in the turbulent wall shear flows are investigated, where the vortex motion such as the hairpin packet formation organization and ramifications of the organization of coherent structure is essential. Using spatially evolving direct numerical simulations, the large-scale dynamics of wall turbulence emanation is studied. The dynamics attributes to the new and even older hierarchy unstable structures generated by the lifted-up low-speed streaks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：乱流，DNS，境界層，超音速流

### 1. 研究開始当初の背景

これまで、乱流境界層などの非一様乱流について周期境界条件に拘束された極めて単純化した流れモデルを用いて高解像度シミュレーションが行われてきた。しかしながら、工学に見られる乱流を含む流れ場は一般に複雑である。例えば、精密な実験計測が行える実験の流れ場においては単純化した計算乱流場より全体場ははるかに複雑である。このような流れの中に見られる超大規模階層的構造は計算結果と実験結果の子細が異なっている。例えば壁乱流に共通して現れる超大規模階層的構造を含めた壁乱流構造の成り立ちを理解するためには、高度忠実性アプローチにより流れ場を再現する方法を研究して、壁面近傍構造の相互作用から発現する特徴的な性質や壁面近傍渦群の一部の自由度に着目し、乱流場に現れる巨視的な現象の特徴的な性質を決めている原理を知る必要がある。研究を開始した当初は時間発展型 DNS の研究成果しか発表されていなかった。研究の着眼点である“コトの本質は何か”を理解するためには、複雑乱流において見出された階層構造から抽出される巨視的ダイナミクスを研究する空間発展乱流 DNS の高  $Re$  数乱流のデータが無かった。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、複雑乱流場において決まる系の複雑さを決めているユニークな力学を抽出し、“コトの本質は何か”を理解しようとするものであり、巨視的ダイナミクスの発現に至る過程を解明することである。

工学に見られる乱流を含む流れ場は一般に複雑である。例えば、精密な実験計測が行え

る実験の流れ場においても単純化した計算乱流場より全体場ははるかに複雑である。このような流れの中に見られる超大規模階層的構造は計算結果と実験結果の子細が異なっている。例えば壁乱流に共通して現れる超大規模階層的構造を含めた壁乱流構造の成り立ちを理解するためには、高度忠実性アプローチにより流れ場を再現する方法を研究して、壁面近傍構造の相互作用から発現する特徴的な性質や壁面近傍渦群の一部の自由度に着目し、乱流場に現れる巨視的な現象の特徴的な性質を決めている原理を知る必要がある。

### 3. 研究の方法

実験手法の流体力学的エッセンスの抽出法と全体モデルを研究する上で計算法の中でどのようなことができるのか、また、何故そのようにするとよいのか現象の流体力学的理解と最新の計算流体力学的手法から具体的な各種の手法を作り出す。管内流の実験では、管入り口付近に遷移を促進するためにトリッピングワイヤーを取り付け十分下流で乱流場を計測する。これは遷移促進法であるので、計算流体力学において遷移促進に最も適した方法を考案し計算に応用し、計算管内流では、計算領域を実験のように長くすることは困難なため促進法の中で手法の個性が無くなり早く一様圧力勾配下の管内乱流状態に到達するような計算条件を選択する必要がある。乱流研究や遷移研究のための流れ場を（全体モデル）を空間発展的で現象を支配する流体力学にできる限り忠実に構築し、完成度を高めるために実験手法への応用と計算へのフィードバックをした。手法は一

様等方性乱流を流れ場に導入できるように加工して遷移促進に用い、計算グリッド解像度に対応する高レイノルズ数を計算条件として設定した。一方、Lund 等(JCP)は、乱流境界層を研究する上で、拡大時間発展型計算法を用いて、ある程度発達した乱流状態を計算して導入する方法を提案した。また、J. Fruend (AIAA) も空間発展自由噴流計算において時間発展乱流噴流を用いて、入り口速度分布に重ね合わせている。その手法の欠点は、高マッハ数では噴流が層流的な構造になるため時間発展計算領域が大きくなってしまふ。一様等方性乱流を使う場合の短所は遷移領域が長く計算資源を乱流場以外に多く必要である。また、乱れ強度が大きい一様等方性乱流は解像度を保つために、遷移距離が短くなっても、計算資源が必要なことはかわらない。具体的研究方法を以下のように確定した。平板境界層における空間発展計算法を確立した。Lund の方法を用いず層流境界層が乱流遷移し発達した乱流境界層の研究とした。単一の全体計算ではなく、複数の現象を含む全体モデルの連結した研究を行うこととした。チャンネル乱流における空間発展計算法による階層的大規模乱流場の研究にむけた全体計算法の研究および予備的計算結果の解析より乱流境界層やチャンネル乱流および円管乱流計算結果を入り口流れ条件とした研究を行った。実験的研究においては、乱れ強さ 0.07% 以下の低乱風洞（現有施設）を使って、乱流境界層に関する計算的観点より熱線レークを使って構造を抽出する基礎的実験を行い、乱流グリッドによって風洞の持っている固有の変動を覆い隠して一定程度の強さの大きな乱れをつくり、乱流遷移・乱流境界層を発達させた。

#### 4. 研究成果

乱流境界層などにおける壁面近傍から境

界層内せん断層内に出現する渦運動の大規模ダイナミクスを研究することによって、研究目的である複雑乱流場における巨視的ダイナミクスの出現について解析を行った。流れは乱流遷移構造を含み下流に乱流境界層が発達する空間発展型計算によるデータ・ベースを構築して様々な無次元パラメーター（マッハ数、レイノルズ数、上流かく乱条件、壁面境界温度条件）における直接計算結果のデータ・ベースを構築し解析を行った。多くのストリークが発達する上流条件を用いた場合は、かく乱の変動が比較的大きな領域のスポット構造が発展してヘアピン渦パケット構造を起点として低速ストリークに関連した大規模な Lift-Up メカニズムが発生する。これまでに発見した分水嶺の谷の構造にストリークが発達して、谷の構造が合流するより大きなストリーク構造は低速塊が上昇する基本的なダイナミクスを形成し、その階層の上層には馬蹄形渦の形成に見られる新たなダイナミクスが観察された。

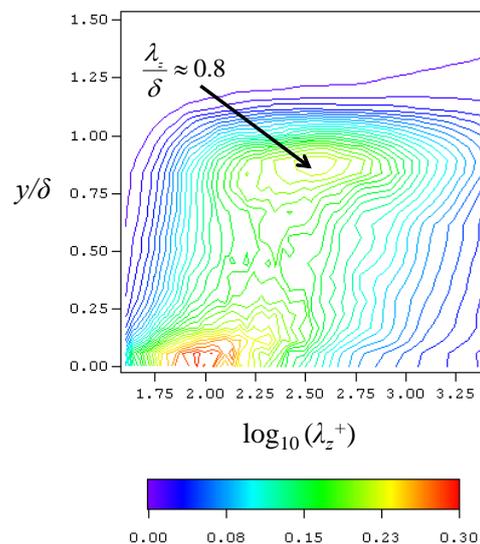


図1 1次元スパン方向 pre-multiplied スペクトル。スペクトルは  $u'^2$  で規格化。

豊富な渦構造群は一連の構造形成とともに2次や3次渦構造として発達して、大規模

な渦構造群“渦の森”として観察されることになることが明らかになった。統計的には Premultiplied spectra を調べると、その極大値が壁面近傍と境界層外層に存在し、構造の階層性が示されている。

さらに、強い衝撃波によって境界層が剥離と再付着を伴う場合に、付着した下流で乱流境界層が発達し平衡状態に漸近する乱流境界層の構造を調べた。壁近傍の低速ストリーク構造や縦渦が平衡状態にいち早く到達して、外層構造が衝撃波の影響を受けて非平衡状態が長く下流に続くが、その複雑乱流場における巨視的ダイナミクスと通常の平板乱流境界層との相違については研究継続中である。今後発表予定である。

#### 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 11 件)

- (1) Yusuke Tokura, Hiroshi Maekawa, Spatial DNS of an Isothermal Flat Plate Supersonic Turbulent Boundary with/out Impinging Shock Wave, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.6, No. 1, 2011, 30-44 DOI10.1299/jfst6.30
- (2) Yusuke Tokura, Hiroshi Maekawa, DNS of a Spatially Evolving Transitional Turbulent Boundary Layer with Impinging Shock Wave, AIAA Aerospace Science, 査読有, No.2011-729, 2011, 1-16
- (3) Daisuke Watanabe, Kensuke Akita, Hiroshi Maekawa, Effects of Oblique Unstable Modes on the development of a Turbulent Mixing Layer at High Convective Mach Numbers, AIAA Aerospace Science, 査読有, No.2011-041, 2011, 1-12
- (4) Yusuke Tokura, Hiroshi Maekawa, Direct Numerical Simulation of Impinging Shock Wave/Transitional Boundary Layer Interaction at  $M=2.$ , Proceedings of The seventh International Conference on Fluid Dynamics, 査読有, 2011, 262-263
- (5) Y. Tokura, H. Maekawa, Spatial DNS of an Isothermal Flat Plate Supersonic Turbulent Boundary Layer with/out Impinging Shock wave, Journal of Fluid

Science and Technology, 査読有, Vol.1, No.1, 2011, 30-44 DOI10.1299/jfst6.30

(6) Y. Tokura, H. Maekawa, Direct Numerical Simulation of Impinging Shock Wave/Transitional Boundary Layer Interaction with Separation Flow, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, 2011, Vol.6, No.5, 765-777 DOI 10.1299/jfst6.765

(7) Z. Zuo, H. Maekawa, Computational Aeroacoustics by the Near Wall Vortex-Shock Interaction Using WCNS, Proceedings of the the 8th International Conference on Flow Dynamics, 査読有, 2011-1269, 2011, 1-2

(8) Z. Zuo, H. Maekawa, Application of a High-Resolution Compact Finite Difference Method to Computational Aeroacoustics of Compressible Flows, Proceedings of ASME-JSM-KSME Joint Fluids Engineering Conference, 査読有, 2011-15009, 2011, 1-8

(9) Y. Tokura, H. Maekawa, Y. Ogata, D. Watanabe, DNS of a Spatially Evolving Transitional/Turbulent Boundary Layer at  $M=2.0$ , AIAA Aerospace Science, 査読有, No.2010-355, 2010, 1-17

(10) H. Maekawa, Y. Tokura, DNS of spatially evolving supersonic boundary layers, Proc. Of IWACOM II, 査読有, 2010, 48

(10) Y. Tokura, H. Maekawa, D. Watanabe, Y. Ogata, Effect of wall temperature condition on the evolution of a supersonic turbulent boundary layer, Proc. Of sixth International Conference on Flow Dynamics, 査読有, 2009, 140-141

[学会発表] (計 14 件)

- (1) 尾形陽一, 小笠原 烈, 前川博, 魚体を模した薄翼の変形運動と加速推進の数値的考察, 日本計算工学会 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 30 日, 京都教育文化センター
- (2) 渡辺大輔, 前川博, 高見創, 円筒乱流境界層から発生する低周波音への流入攪乱の影響, 日本流体力学会第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 20 日, 大阪大学吹田キャンパス
- (3) 荻原健治, 前川博, 高見創, 粗面乱流境界層からの放射音に関する実験的研究, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 8 日, 首都大学東京
- (4) 左志峰, 前川博, 衝撃波と壁近傍渦の相互作用による音波の放出, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 8 日, 首都大学東京

- (5) 松本広大, 尾形陽一, 中程度希薄流挙動に及ぼす壁面滑りの影響の比較検証, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会, 2011/3/5, 岡山理科大学
- (6) 出川智啓, 弘中和也, 前川博, 高見創, 双極渦と壁面の衝突角度の変化による渦運動と音響場の関係, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010/12/20, 慶應大学日吉
- (7) 渡辺大輔, 前川博, 圧縮性境界層から発生する音波の研究, 日本機械学会 2010 年次大会・講演会講演論文集, 2010/9/6, 名古屋工業大学
- (8) 戸倉裕介, 前川博, 超音速境界層における Transient Growth モードによる遷移について, 日本機械学会 2010 年次大会・講演会講演論文集, 2010/9/6, 名古屋工業大学
- (9) 出川智啓, 前川博, GPU を用いた可変密度流体の 2 次元コンパクト差分解析, 第 15 回計算工学講演会 講演論文集, 2010/5/26, 九州大学
- (10) 前川博, 超音速乱流境界層外層における大スケールメカニズムについて, 第 46 回乱流遷移の解明と制御研究会, 2010/3/17, 首都大学東京
- (11) 松原洋輔, 前川博, 出川智啓, 超音速境界層の乱流遷移に及ぼす上流攪乱の影響, 日本機械学会関東支部第 16 期総会・講演会講演論文集, 2010/3/11, 明治大学
- (12) Hiroshi Maekawa, DNS of spatially evolving supersonic boundary layers (招待講演), 2010・3・30, 日本機械学会, パシフィコ横浜
- (13) 若松裕紀, 前川博, 壁面に衝突する双極渦による音波発生機構の解析 (三次元渦運動の影響について), 日本機械学会中国四国支部第 48 期総会・講演会講演論文集, 2010/3/6, 広島工業大学
- (14) 弘中一也, 前川博, 壁近傍の渦と誘起された二次渦により発生する音響場に関する研究, 日本機械学会山梨講演会, 2009/10/24, 山梨大学

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称 : 乱流摩擦抵抗低減装置及び方法

発明者 : 前川博

権利者 : 同上

種類 : 特許権

番号 : 特願 2010-192608

出願年月日 : 2010/8/30

国内外の別 : 国内

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川博 (MAEKAWA HIROSHI)

電気通信大学 大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号 : 90145459

(2) 研究分担者

出川智弘啓 (DEGAWA TOMOHIRO)

沼津工業高等専門学校 講師

研究者番号 : 80402551

(3) 研究分担者

渡辺大輔 (WATANABE DAISUKE)

富山大学 大学院理工学研究部(工学) 講師

研究者番号 : 70363033

(3) 研究分担者

尾形陽一 (OGATA YOUICHI)

広島大学 大学院工学研究科・機械システム工学専攻 准教授

研究者番号 : 10323792