

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760131

研究課題名（和文）

地球シミュレータを用いた世界最大規模直接数値計算による乱流境界層制御

研究課題名（英文）

World's Largest Direct Numerical Simulation of Turbulent-Boundary-Layer Control on the Earth Simulator

研究代表者

岩本 薫（IWAMOTO KAORU）

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・特任准教授

研究者番号：50408712

研究成果の概要：省エネルギーや環境保全の対策の1つとして、自在な乱流制御手法の確立が期待されている。乱流境界層を対象とし、地球シミュレータを用いて超並列計算コードを開発し、高レイノルズ数かつ、広い計算領域、長時間に亘る計算を行い、非制御時の高精度の各種乱流統計量を取得した。大規模構造のスパン方向サイズを用いたレイノルズ数により、流れ場に依らず壁近傍の乱流統計量を整理できることが分かり、乱流摩擦抵抗の普遍的モデルを構築した。また、摩擦抵抗係数とレイノルズ応力の関係式を新たに導出した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000	0	2,300,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	210,000	3,910,000

研究分野：熱流体制御工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：熱流体力学，乱流，直接数値計算，地球シミュレータ，制御

## 1. 研究開始当初の背景

近年、関心が高まっている省エネルギーや環境保全の対策の1つとして、流れの遷移、剥離、抵抗、流体音、伝熱などの自在な乱流制御手法の確立が期待されている。高速輸送機器などにおけるエネルギー損失の最大の原因である、壁面摩擦抵抗を制御によって低減することは、省エネルギーに大きな貢献をもたらす。近年では、少ない投入エネルギーで大きな制御効果が期待できるアクティブ・フィードバック制御が注目されている。本制御の構成要素には、一般的に、流れ場の

情報を検知するセンサ、流れ場に作用して流れの流動構造に変化を及ぼすアクチュエータ、センサからの情報を特定の制御理論に基づいてアクチュエータの動作を規定するコントローラの3つがある（図1）。壁乱流の直接数値計算（DNS）を用いた数値実験により、高い制御効果が得られることが多数報告され、本制御のポテンシャルの高さを裏付けている。また、Micro-electromechanical Systems（MEMS）の発達により制御デバイスの制作が可能となってきている。しかし、過去の数値実験・室内実験は、円管内乱流や平行平板

間乱流など内部流を対象としており、大気境界層や航空機などの高速輸送機器周りである外部流を対象とはしていない。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は以下の通りである。

(1) 上記の実現象に近い形状でかつカノニカルな体系として、壁が存在する外部流、すなわち乱流境界層の直接数値計算を行い、非制御時の基礎データを提供する。具体的には、地球シミュレータを利用することにより、世界最高のレイノルズ数かつ、広い計算領域、及び長時間に亘る世界最大規模の直接数値計算を実施し、より信頼性の高い乱流統計量を取得する。得られたデータを用いて、乱流摩擦抵抗や物質拡散の主要因となる壁面近傍の乱流準秩序構造と、高レイノルズ数特有の壁遠方における大規模構造との関係を調査し、乱流摩擦抵抗と物質拡散機構モデルの構築を行う。また、様々な統計量を取得することで、乱流境界層データベースを構築し世界に提示する。

(2) 既存の摩擦抵抗低減制御アルゴリズムを乱流境界層に適用し、内部流の結果と比較する。具体的には、制御効果が大きいアクティブ・フィードバック制御を主なターゲットとし、乱流構造規範型制御・(準)最適制御・適応型制御手法を評価する。得られた結果と上記の非制御時に構築した乱流摩擦抵抗の力学モデルを元に、内部流・外部流で統一した乱流摩擦抵抗低減制御アルゴリズムを確立する。

## 3. 研究の方法

### (1) 超並列計算コードの開発

一般に、高レイノルズ数乱流の直接数値計算を実行するには多量の計算コストが必要となる。本研究では、地球シミュレータを用いて乱流境界層の世界最大規模の直接数値計算を行う(推定必要メモリ約1TB、計算速度約1.5TFLOPS)。この性能を達成するため、申請者の並列計算の実績を活かして、約1000個のCPUを用いた効率の良い超並列計算コードを開発し、高精度の各種乱流統計量を取得する。

### (2) 乱流摩擦抵抗と物質拡散機構モデルの構築

高レイノルズ数流れにおいては、摩擦抵抗増大の要因となる大規模乱流構造の力学機構や、物質拡散機構の主因である乱流構造間非線形相互作用など未解明な問題が多く存在する。本研究では、詳細なデータを取得できる直接数値シミュレーションの特性を活かし、定量的評価を行う。また、流動状態の定性的観察も合わせて実施し、壁面近傍の乱流準秩

序構造と高レイノルズ数特有の壁遠方における大規模構造との空間的關係を把握し、乱流摩擦抵抗と物質拡散機構モデルの構築を行う。

### (3) 乱流境界層データベースの構築

取得する各種乱流統計量は、高精度乱流モデルの構築・検証などに必要不可欠である。これらのデータベースを東京理科大学のホームページ上で世界に公表し、幅広く社会産業界全般と知識の共有を行い、熱流体工学の進展に役立てる。

### (4) 乱流摩擦抵抗低減制御アルゴリズムの確立

乱流摩擦抵抗低減にはレイノルズ応力の減少が必須である。摩擦抵抗係数とレイノルズ応力の関係式として2002年にFIK項等式が提案されている。しかしながら、外部流である境界層においてはその関係が不明瞭であった。本研究では、境界層におけるFIK項等式を再度見直し、より明確な意味を持つ項等式を導出し、内部流・外部流で統一した乱流摩擦抵抗低減制御の指針を確立する。

## 4. 研究成果

### (1) 超並列計算コードの開発

一般に、高レイノルズ数乱流の直接数値計算を実行するには多量の計算コストが必要となる。並列化には、すべてのスーパーコンピュータで同様に使用できるMPIという並列化手法を採用した。この手法はコーディングに時間がかかるが、実行性能は他の並列化手法に比べて良いという特徴がある。また、すべての計算ノードの計算量が等しくなるように設定し、またノード間で転送するメッセージ量を減少させることにより、高い実行性能を得ることができた。

### (2) 乱流摩擦抵抗と物質拡散機構モデルの構築

本計算から得られた瞬時場の流れ方向に垂直な断面( $y-z$ )における流速分布を図1(c)に示す。図1(a)には平行平板(チャンネル)間ポアズイコ乱流、図1(b)には平行平板間クエット乱流の流速分布を示す。レイノルズ数はほぼ同じである。ここで、 $\delta$ は平方平板間距離の半分、または境界層厚さである。流れの形態に依らずに大規模構造は壁近傍からチャンネル中央、又は境界層の上部まで広く存在していることが分かる。しかし、大規模構造の(z)サイズ( )は異なることが分かる。ポアズイコ乱流、クエット乱流、境界層乱流において、それぞれ  $1.2$ 、 $5$ 、 $2$  である。大規模構造は壁近傍の乱流場に影響を与えている過去の研究結果より、この影響は流れの形態に依存することが示唆される。

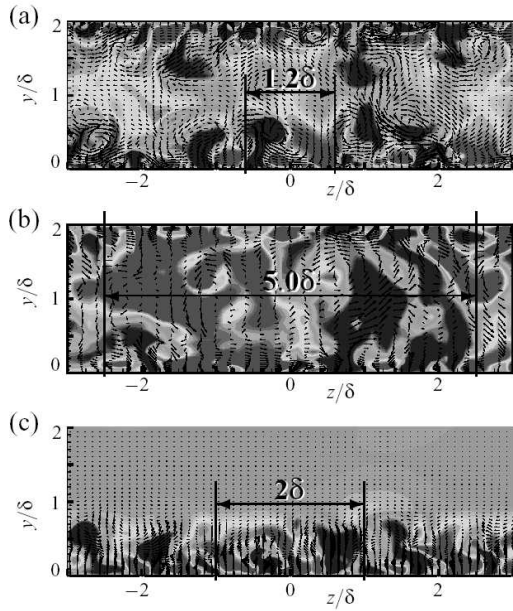


図1：瞬時場の流れ方向に垂直な断面における流速分布（黒～白，低速～高速領域）．(a)平行平板間ポアズイコ乱流，(b)平行平板間クエット乱流，(c)乱流境界層．

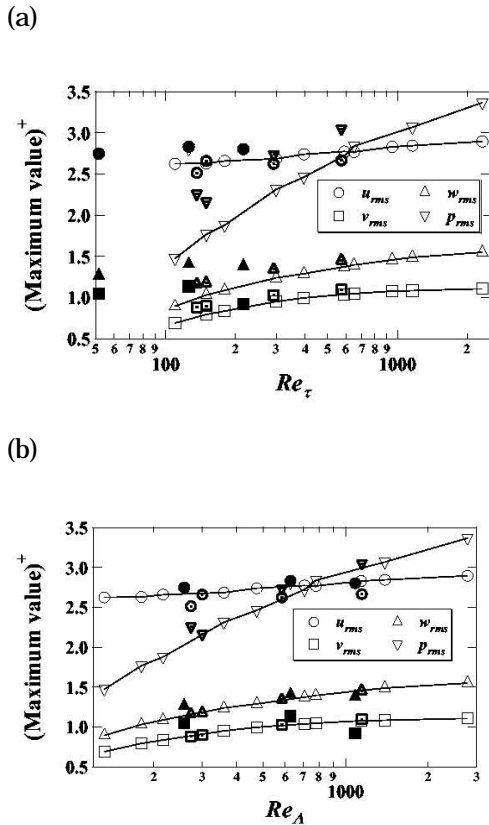


図2：各乱れ成分の最大値のレイノルズ数 (a) $Re_\tau$ ，(b) $Re_A$  依存性．実線つきシンボルが平行平板間ポアズイコ乱流，塗潰しシンボルが平行平板間クエット乱流，白抜きシンボルが乱流境界層．

また，図2に通常の  $Re_\tau$  を用いたレイノルズ数，及び  $Re_A$  を用いたレイノルズ数で整理した各乱れ成分の最大値を示す．通常の  $Re_\tau$  を用いたレイノルズ数では，各流れ場でピーク値は相違があるが， $Re_A$  を用いたレイノルズ数では，流れ場に依らずピーク値が一致し，壁近傍の乱流統計量を整理できることが分かった．よって，乱流摩擦抵抗には，大規模構造のスケールを用いることによって，適切にモデル化ができることを示した．

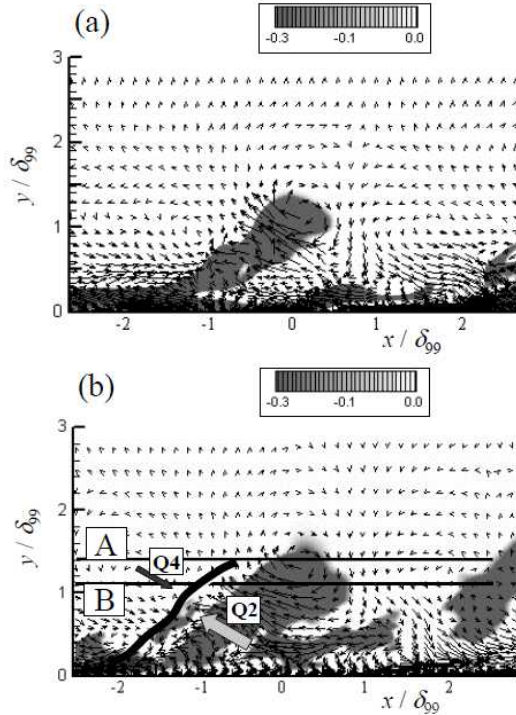


図3：乱流境界層の(a)瞬時の速度ベクトル，及び温度分布，(b)渦抽出による条件つき平均場．

図3に乱流境界層の瞬時の速度ベクトルと温度分布を示す．グレーの領域は負の温度領域とし，ベクトルは速度変動を示している．外層( $y/\delta_99 > 1$ )では，負の値の温度分布が間欠的に現れている事が分かる．また，図3(a)は，この負の値の温度変動分布の周りで大規模な横渦(渦のheadに相当)が存在することを示している．図3(a)のように，外層に存在する渦を条件として抽出した7瞬時場の平均(x-y)断面図を，図3(b)に示す． $0.4 < y/\delta_99 < 1.0$ において，負の値の温度分布が強いイジェクション( $u < 0, v > 0$ ; Q2)と良く一致している．また，正の値の温度分布がスweep( $u > 0, v < 0$ ; Q4)がQ2の上流に現れており，Q2とQ4がぶつかるイベントが起きていることが観察される．図3(b)中の太い線はQ2とQ4がぶつかる位置を示している．この位置において

Q2 が  $Ru > 0$  ( $u < 0$ ,  $< 0$ ), また Q4 も  $Ru > 0$  ( $u > 0$ ,  $> 0$ ) となり全体的に  $u$  と の相関は正となっている。他方, 渦中心よりも高い位置 ( $y/\delta > 1.2$ ) では主流方向速度変動と温度変動が負の相関関係となっており  $y/\delta > 1.3$  において壁から離れるに従い  $Ru$  が減少している結果と良く一致している。つまり, 外層において負の温度変動が間欠的に現れ, 大規模な横渦 (head) と対応していることが分かった。

### (3) 乱流境界層データベースの構築

高精度乱流モデルの構築・検証などに必要不可欠な各種乱流統計量を長時間にわたって取得した。これらのデータベースは熱流体工学の進展に役立つものである。

### (4) 乱流摩擦抵抗低減制御アルゴリズムの確立

摩擦抵抗低減にはレイノルズ応力の減少が必須である。摩擦抵抗係数とレイノルズ応力の関係式として 2002 年に FIK 項等式が提案されている。しかしながら, 外部流である境界層においてはその関係が不明瞭であった。本研究では境界層における FIK 項等式を再度見直し, より明確な意味を持つ項等式を導出することに成功した。その結果, 摩擦係数に寄与するレイノルズ応力の重み付が内部流の場合と相違し, 全空間において等しい重み付であることが分かった。また, 1. で構築した高精度データベースを用いて, 新たな項等式が正しいことを確認した。さらに従来の FIK 項等式との差異を調査した。その結果, 壁面摩擦係数への影響について, レイノルズ応力項と層流 (ストークス) 項の寄与は減少, 非一様項は増加することが分かった。

## 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3件)

Tohdoh, K., Nakano, H., Iwamoto, K. and Kawamura, H., Direct Numerical Simulation of Passive Scalar Transport in a Turbulent Boundary Layer, Proc. of 7th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 査読有, 1, 2008, 169-174.

Iwamoto, K., Tsukahara, T., Nakano, H., and Kawamura, H., Effect of Large-Scale Structures upon Near-Wall Turbulence, IUTAM Bookseries, 査読有, 4, 2008, 55-60.

Iwamoto, K., Tsukahara, T., Nakano, H., and Kawamura, H., Effect of Large-Scale

Structures upon Near-Wall Turbulence, Proceeding of IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence, 査読有, 2007, 53-58.

### [学会発表](計5件)

小塚, 藤堂, 岩本, 河村, 大規模直接数値シミュレーションによる乱流熱伝達の研究, 学術フロンティア推進事業 Holcs・第三回計算科学フロンティアフォーラム, 2008/09/09, 東京.

藤堂 公浩, 岩本 薫, 河村 洋, DNS による温度場乱流境界層における外層の間欠構造, 第 45 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2008/05/21, 筑波.

Kaoru Iwamoto, Direct Numerical Simulation of Wall Turbulence at High Reynolds Number, Frontiers of Computational Science, Macroscopic Systems/Fluid Mechanics, 2008/03/26, Nagoya.

岩本 薫, 高レイノルズ数チャネル乱流における階層構造間相互作用, 共同研究会「乱流の統計理論とその応用」, 2008/03/04, 東京.

中野 秀樹, 岩本 薫, 河村 洋, 乱流境界層の大規模 DNS, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 2007/12/19, 東京.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩本 薫 (IWAMOTO KAORU)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・特任准教授

研究者番号: 50408712

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし