

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760125

研究課題名（和文）世界最高レイノルズ数のDNSによる剥離を伴う乱流現象に対する
予測精度の高度化研究課題名（英文）Development of predictions for turbulence phenomena
involving separation by high Reynolds-number DNS

研究代表者 阿部 浩幸（ABE HIROYUKI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部数値解析グループ・研究員

研究者番号：80358481

研究成果の概要（和文）：

本研究では、剥離を伴うDNS（直接数値シミュレーション）並列計算コードの開発を平板乱流境界層に対して進めた。その結果、大きな計算領域を用いたDNSの実行に成功し、自由速度と運動量厚さに基づくレイノルズ数で300～2000の範囲のDNSデータベースを構築した。また、研究代表者が今まで実行してきた平行平板間乱流および乱流熱伝達のDNSの基本的な乱流統計量データのWEBにおける公開およびDNSデータを用いた乱流モデルの検証を行った。

研究成果の概要（英文）：

In the present work, we have developed parallelized DNS (direct numerical simulation) codes for a turbulent boundary layer with/without separation. Consequently, the simulations with large domains have been performed successfully and the DNS databases have been established for $Re_\theta=300-2000$ (Re_θ is the Reynolds number based on the free stream velocity and momentum thickness). Also, we have made turbulence statistics obtained from the previous DNSs in a turbulent channel flow with/without passive scalar transport available on the website and used them to evaluate turbulence models.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 平成20年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 平成21年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

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

航空宇宙分野においては、高レイノルズ数における剥離を伴う複雑乱流に対する予測精度の高度化が重要課題の一つである。特に、設計レベルの実用計算に用いられるレイノルズ平均乱流モデルの高精度化が不可欠である。後者においては、近年、直接数値シミュレーション(DNS)のデータを用いた開発が主流である。この方法では、従来の実験データを用いた方法と違い、壁面近傍まで適用可能な高精度なモデルの開発が可能となる。従って、本研究の対象となる剥離を伴う乱流境界層の現象の予測精度の高度化に際してもDNSデータを用いた乱流モデルの開発が不可欠となっていた。しかし、乱流境界層のDNSは平行平板間や円管内乱流に比べ流入条件や境界層外部の境界条件など計算上取り扱いが難しい部分が多く、Spalart(1988)が平板乱流境界層のDNSを自由速度と流入部の運動量厚さに基づくレイノルズ数(Re_0)で1410において行って以来同形状に対して幾つかのDNSが更に低レイノルズ数で行われているものの、いまだ発展を待たれる状態であった。

2. 研究の目的

本研究では、1)世界最高レイノルズ数の剥離を伴う平板乱流境界層の直接数値シミュレーション(DNS)の実施および乱流統計量・乱流構造の解析、2)乱流モデルの開発に資するDNSデータベースの構築・WEBサイトでの公開、3)データベースに基づいた既存乱流モデルの性能評価、を通じて、DNSによる剥離を伴う乱流現象の予測精度の高度化を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

1)平成20年度

平板乱流境界層のDNSおよび剥離を伴うDNSの計算コードの開発・検証を図1のように進めた。なお、剥離DNSに関しては計算領域上部の壁垂直方向速度を操作することにより剥離泡を形成するタイプの計算とした。一方、データベースの新設を行い、研究代表者が今まで行ってきた平行平板間乱流および乱流熱伝達のDNSの統計量のデータベースサイトへの掲載を進めた。同時に、DNSデータを用いた温度場2方程式 $k_0-\epsilon_0$ モデルの検証、後者のモデル開発の重要な速度場と温度場の相似性に関する研究を進めた。

2)平成21年度

平成20年度に引き続き平板乱流境界層のDNSおよび剥離を伴うDNSの計算コードの開発・検証、コードの並列化、大規模計算によるDNSの実施、結果の解析を進めた。なお、剥離DNSは平成20、21年度を通じコードの開発に時間を要したため、乱流モデルの開発は平成20年度に引き続き温度場2方程式 $k_0-\epsilon_0$ モデルの検証を進めた。

4. 研究成果

平成20、21年度を通じ剥離を伴う乱流境界層DNSの並列計算コードの開発をゼロ圧力勾配の平板乱流境界層に対して進めた。その結果、大きな計算領域を用いたDNSの実行に成功し、自由速度と運動量厚さに基づくレイノルズ数で300~2000の範囲のDNSデータベースを構築した(阿部ら2010;図2)。同時に、剥離

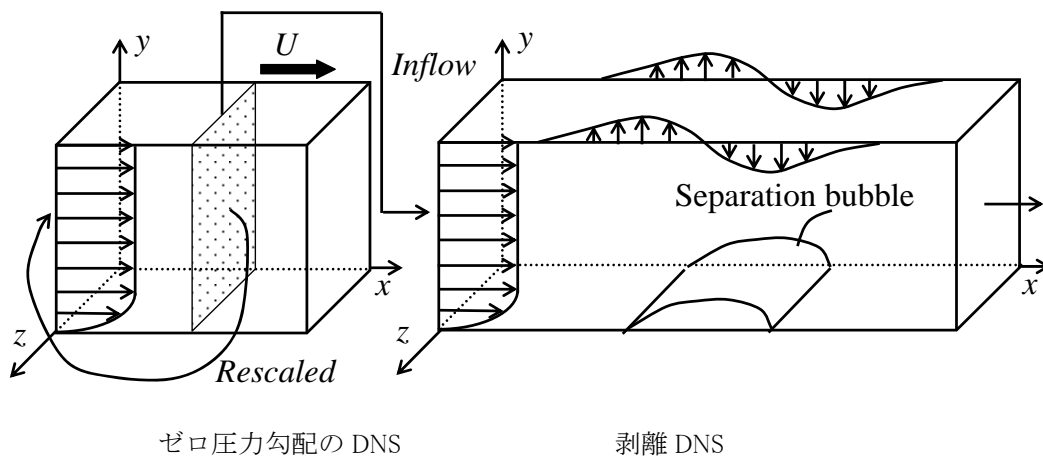


図1 ゼロ圧力勾配の平板乱流境界層のDNSおよび剥離DNSの概略図

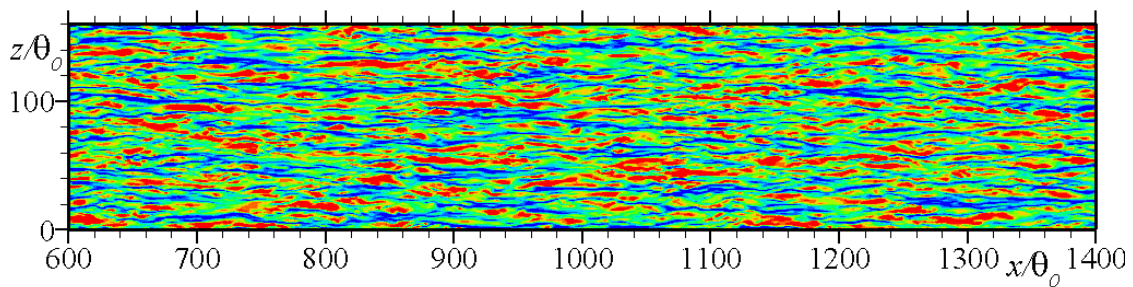


図2 平板乱流境界層 DNS の壁面近傍のストリーク構造 (阿部ら 2010)

流のコードへの拡張およびデータベースの構築を進めた(阿部ら 2010)。

一方, DNS データベースの構築および乱流モデルの開発に関しては, 剥離 DNS に関しては平成 20, 21 年度の研究期間にわたりコードの開発・実行に時間を要したため, 研究代表者が今まで実行してきた平行平板間乱流および乱流熱伝達の DNS の基本的な乱流統計量データの WEB における公開(図 3)および DNS データを用いた温度場 2 方程式 k_0 - ϵ_0 モデルの検証を進めた。なお, 剥離 DNS の結果も順次公開を予定している。後者の k_0 - ϵ_0 モデルにおいては, レイノルズ数効果の再現性が DNS データにより検証されていない問題があったが, DNS データの解析により, 速度場と温度場の時間スケールを相乗平均により同等に渦拡散係数に取り込むモデリングが有効であることを示した(Abe and Antonia 2009)。また, 温度散逸率の輸送方程式においてはレイノルズ数依存性を再現する減衰関数の開発が必要なことを示した(Abe ら 2009)。 k_0 - ϵ_0 モデル構築のベースとなった速度場とのアナロジーについても検討し, 壁面近傍における速度場と温度場の相似性はプラントル数が 1 に近い場合でも必ずしも完全ではなく, 圧力項に関連した非相似性が存在することを明らかにした(Abe and Antonia 2009; Antonia et al. 2009)。

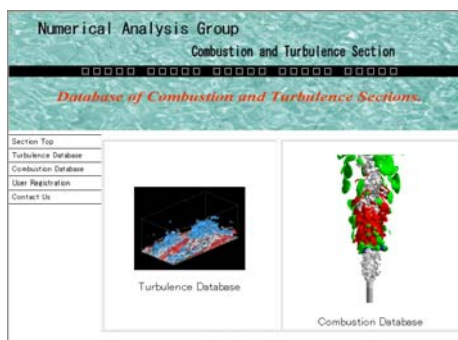


図3 DNS データベースサイト
URL:<http://www.iaat.jaxa.jp/db/index.html>

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① [Hiroyuki Abe](#) and Robert Anthony Antonia, “Near-wall similarity between velocity and scalar fluctuations in a turbulent channel flow,” *Phys. Fluids*, Vol. 21, 025109 (2009) 査読有。
- ② [Hiroyuki Abe](#), Robert Anthony Antonia and Hiroshi Kawamura, “Correlation between small-scale velocity and scalar fluctuations in a turbulent channel flow,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 627, pp. 1-32 (2009) 査読有。
- ③ Robert Anthony Antonia, [Hiroyuki Abe](#) and Hiroshi Kawamura, “Analogy between velocity and scalar fields in a turbulent channel flow,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 628, pp. 241-268 (2009) 査読有。

[学会発表] (計 6 件)

- ① [Hiroyuki Abe](#), “Passive scalars in Turbulent boundary layers,” Proc. of NORDITA-FLOW Spring school on Turbulent Boundary Layers, Sweden, April 9, 2010 (Invited lecture).
- ② 阿部 浩幸, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “平板乱流境界層の DNS におけるリサイクル位置の影響,” 第 25 回生研 TSFD シンポジウム講演論文集, 東京大学生産技術研究所, 2010 年 3 月 5 日, pp. 24-27.
- ③ [Hiroyuki Abe](#) and Robert Anthony Antonia, “Turbulent Prandtl number in a channel flow for $Pr=0.025$ and 0.71 ,” Proc. of 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, edited by N. Kasagi, J. K. Eaton, R. Friedrich, J. A. C. Humphrey, A. V. Johansson and H. J. Sung, Seoul, Korea, June 22-24, 2009, Vol. 1, pp. 67-72.
- ④ 阿部 浩幸, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “リスケール・リサイクル法を用いた平板乱流境界層 DNS データベースの構築,” 第 4 2 回

流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010, 米子コンベンションセンターBiG SHiP, 2010年6月24日～25日, 発表予定.

⑤ 阿部 浩幸, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “リスケール・リサイクル法を用いた平板乱流境界層の DNS,” 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋工業大学, 2010 年 9 月 6 日～8 日, 発表予定.

⑥ 阿部 浩幸, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “剥離を伴う平板乱流境界層の DNS,” 日本流体力学会年会 2010, 北海道大学, 2010 年 9 月 9 日～11 日, 発表予定.

[その他]

ホームページ等

<http://www.iat.jaxa.jp/db/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 浩幸 (ABE HIROYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

研究開発本部数値解析グループ・研究員

研究者番号: 80358481