

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560064
 研究課題名（和文） カノニカルな非一様性乱流の高精度・高解像度大規模直接数値計算法の開発
 研究課題名（英文） Development of the methods of large-scale, high-resolution direct numerical simulation of canonical problems of inhomogeneous turbulence
 研究代表者
 石原 卓 (ISHIHARA TAKASHI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：10262495

研究成果の概要：

カノニカルな非一様性乱流の高精度・高解像度な大規模直接数値計算(DNS)実現に向け、スペクトル法コードの高効率化、Sinc関数を用いた新DNS手法の開発、精度と効率の比較検討を実施した。その結果、新DNS手法では適当なパラメータ選択により高精度計算可能なこと、チャンネル乱流ではスペクトル法と同程度であるが壁乱流や乱流混合層では従来手法より効率的に高精度大規模DNSが実現しうることなど、大規模DNS実現のための重要な知見を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数値流体物理学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：(1) 乱流の直接数値計算 (2) スペクトル法 (3) Sinc関数 (4) 平行二平板間乱流 (5) 乱流境界層 (6) 乱流混合層 (7) ハイパフォーマンスコンピューティング (8) 結合コンパクト差分法

1. 研究開始当初の背景

近年のスーパーコンピュータの著しい発展により、大規模な数値計算が可能となり、流体力学の分野においても乱流の大規模な直接数値計算(DNS)に基づく、乱流の計算科学的な研究がますます有力なものとなってきている。実際、周期境界条件下の一様等方性乱流のDNSにおいては、フーリエスペクトル法が高精度・高解像度かつ高効率な数値計算法として最も有効であることが知られており、すでに非常に大規模なDNS(格子点数

4096の3乗)が実施され、高レイノルズ数乱流の多くの統計法則が明らかにされている。

しかし、非一様性乱流のカノニカルな問題として重要な、平行二平板間乱流(チャンネル乱流)、乱流境界層、乱流混合層などについては、スペクトル法やスペクトル的なコンパクト差分法を用いた大規模なDNSが試みられているものの、スーパーコンピュータを駆使して世界最大規模DNSを実現するために最適な手法が十分に検討されているとは言えない。

一方、Sinc 関数を用いた数値計算法が二階常微分方程式の境界値問題を高精度に解く手法として知られており、その手法が有限領域のみならず、半無限領域や無限領域の問題にも原理的に応用可能であること、及び、最終的に解くべき線型方程式の高効率な解法、(すなわち、格子点数を n とした場合、通常 n^2 の演算が必要な部分を $n \log n$ の演算で実現する解法) が存在することがわかっている。そこで、Sinc 関数を用いた計算手法を非一様性乱流のカノニカルな問題に応用すれば、高精度・高解像度かつ高効率な DNS 手法が開発でき、大規模な DNS が実現できるのではないかという期待がある。

また、結合コンパクト差分法では高精度でかつスペクトル的な解像度が得られる解法が知られており、これも非一様性乱流の大規模 DNS に応用可能な計算手法の一つとして有力な候補である。

以上から、精度と解像度及び効率を考慮し、カノニカルな非一様性乱流の世界大規模 DNS を実現するために最適な方法を検討することは重要な課題であると考えられる。

2. 研究の目的

工学的に重要な非一様性乱流のカノニカルな問題として知られている乱流境界層や乱流混合層などの大規模直接計算 (DNS) を実施するため、従来手法であるスペクトル法を用いた DNS コードの高効率化を実施するほか、近年、高精度・高解像度な数値解法として注目されている Sinc 関数展開法や結合コンパクト差分法を用いた DNS 手法を新しく開発し、それらの性能と効率を比較する。以上により、スーパーコンピュータ上でカノニカルな非一様性乱流場の高精度・高解像度な超大規模 DNS を実現するための最適な方法を明らかにし、最終的に超大規模 DNS を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的に向けて、以下のように研究を推進する。

- (1) 平行二平板間乱流や乱流境界層の DNS において実際に解く必要のある、有限領域や半無限領域における二階線形常微分方程式の境界値問題をテスト問題として考え、従来のスペクトル法、Sinc 関数を用いた数値計算法、結合コンパクト差分法の精度、解像度及び効率を比較する。
- (2) スペクトル法を用いた、平行二平板間乱流、乱流境界層、乱流混合層の DNS コードを作成し、その結果の信頼性を確認した後、名古屋大学のスーパーコンピュータ HPC2500 や地球シミュレータ用に最適化し、スペクトル法を用いた大規模な DNS

が実現できるようにする。

- (3) Sinc 関数を用いた数値計算法や結合コンパクト差分法を平行二平板間乱流、乱流境界層などに応用した DNS コードを開発し、結果を (2) と比較する。
- (4) 上記 (1), (2), (3) の結果をもとに、非一様性乱流の大規模な DNS を行うにあたり、精度、解像度、効率の面で最適な手法を決定し、その手法を用いて大規模な DNS を実施する。

4. 研究成果

非一様性乱流のカノニカルな問題として知られている乱流境界層や乱流混合層などの大規模直接計算 (DNS) を実施するため、近年、高精度・高解像度な数値解法として注目されている、Sinc 関数展開法や結合コンパクト差分法を応用した新しい DNS 手法を開発し、それらの結果の精度と計算の効率を従来手法であるスペクトル法と比較・検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) Sinc 関数を用いた数値計算法は有限領域、半無限領域などの境界条件によらず、適当なパラメータを選ぶことにより、従来のスペクトル法に匹敵する精度と効率を得られることが分かった。
- (2) 平行二平板間乱流においては、Sinc 関数選点法を用いた DNS で適当にパラメータを選択することにより、従来の DNS 手法であるフーリエ・チェビシエフタウ法と同程度の計算量で同程度の精度の計算が可能であることが分かった。(しかし、パラメータの選択が不要という意味では従来手法のほうが Sinc 関数を用いた数値計算法より優れているといえる。)
- (3) 乱流境界層においては、Sinc 関数 Galerkin 法を用いた DNS コードを開発し、その計算結果を従来手法である Jacobi 関数展開を用いたスペクトル法と比較し、結果の妥当性を確認した。また、新しく開発した DNS 手法は壁垂直方向の格子点数が増すほど従来手法より高速であることを実際に確認した。
- (4) いくつかの数値実験を行った結果、格子点数が同程度の場合、結合コンパクト差分法より、Sinc Galerkin 法を用いた手法のほうがより高精度を実現できることが分かった。

以上の結果により、非一様性乱流の超大規模 DNS を実現するための各手法の特徴が明らかとなり、大規模 DNS の方向性が定まったといえる。

そこで、上で得られた知見をもとに、スペクトル法を用いた平行平板間乱流のコードを地球シミュレータ用に最適化し、格子点数

1024 の 3 乗の DNS を実施した。また、乱流境界層と乱流混合層についても、より大規模な DNS の実現に向けて、予備的な大規模 DNS を実施した。その結果、

- (5) 平行二平板間乱流において、壁摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re_\tau=2560$ (世界最大) を実現し、対数則領域 $y^+=800$ におけるテーラー長に基づくレイノルズ数は $R_\lambda=300$ であり、コルモゴロフ則 (K41) と矛盾しないエネルギースペクトルを得ることができた。
- (6) 乱流境界層については、ヤコビ多項式を用いたスペクトル法を用いて、フリンジ法を導入した DNS を実施し、過去の文献や最新の実験データと比較して結果の詳細な検証を行った。Sinc 関数ガラーキン法を用いた DNS は高精度であり、かつ従来のスペクトル法より高効率であるが、結果を詳細に検証した結果、Sinc 関数ガラーキン法を用いた乱流境界層 DNS では無限遠方の扱い方の見直しが必要であることがわかった。
- (7) (時間発展型) 乱流混合層については、スペクトル法を用いた DNS コードを開発し、それを用いて大規模渦が 3 回ペアリングする場合の世界最大規模 DNS を実現した。その結果、3 回ペアリングの後、大スケールでは速度プロファイルが相似形となり、小スケールでは K41 と矛盾しないスペクトルが得られること等がわかった。

本研究は、計算アルゴリズムや大規模並列計算手法を駆使して、従来解明することが困難であった乱流現象を第一原理的に計算科学的手法により解明するための重要なステップとして位置づけることができ、その研究成果は重要であると考えられる。

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 7 件)

- (1) Takashi Ishihara, Toshiyuki Gotoh and Yukio Kaneda, Study of High-Reynolds Number Isotropic Turbulence by Direct Numerical Simulation, Annual Review of Fluid Mechanics, 査読有, 41 (2009), 165-180
- (2) Koji Morishita, Takashi Ishihara and Yukio Kaneda, Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High Reynolds Number, Proceedings of International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, Y Kaneda, M Sasai and K Tachibana (Eds.), 査読有, (2008), 165-172

- (3) T. Ishihara and H. Higuchi, Multifractal Analysis by Using High-Resolution Direct Numerical Simulation of Turbulence, Proc. The IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence, Nagoya, Japan, September, 11-14, 2006, 査読有, (2008), 61-66
- (4) Y. Kaneda, T. Ishihara, K. Morishita and Y. Mizuno, Attempts at Computer-Aided Understanding of Turbulence, Proc. The IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence, Nagoya, Japan, September, 11-14, 2006, 査読有, (2008), 49-54
- (5) Y. Kaneda and T. Ishihara, Small-Scale Statistics in High-Resolution Direct Numerical Simulation of Turbulence, Progress in Turbulence II, Proc. the iTi-Conference in Turbulence 2005, 査読有, (2007), 11-16
- (6) T. Ishihara, Y. Kaneda, M. Yokokawa, K. Itakura and A. Uno, Small-scale statistics in high-resolution direct numerical simulation of turbulence: Reynolds number dependence of one-point velocity gradient statistics, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, 592, (2007), 335-366
- (7) 金田行雄, 石原卓, 乱流の計算科学への試み, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読有, 26 (6), (2007), 375-383

[学会発表] (計 14 件)

- (1) 高橋知也, 石原卓, 金田行雄, FENE-P モデルを用いた抵抗低減チャネル乱流の直接数値シミュレーション, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008/12/17, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- (2) 杉木慎吾, 石原卓, 金田行雄, 時間発展乱流混合層の DNS による 2 点速度相関, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008/12/17, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- (3) Koji Morishita, Takashi Ishihara and Yukio Kaneda, Direct numerical simulation of turbulent channel flow at high Reynolds number, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, 2008/11/27-29, Symposium Hall, Nagoya University
- (4) Takashi Ishihara, Hiromitsu Iwata and Yukio Kaneda, Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer

- using Sinc-Galerkin Method, Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, Turbulence and Complex Flows by Using Advanced Technologies of Modeling on Supercomputers, 2008/11/18-20, Hotel Kitano Plaza Rokkoso, Kobe
- (5) Koji Morishita, Takashi Ishihara and Yukio Kaneda, Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High Reynolds Number, Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, Turbulence and Complex Flows by Using Advanced Technologies of Modeling on Supercomputers, 2008/11/18-20, Hotel Kitano Plaza Rokkoso, Kobe
- (6) 石原卓, 乱流の大規模 DNS データ解析：速度差の統計の距離依存性と Re 依存性, 九州大学応用力学研究所平成 20 年度共同利用研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学，構造と統計法則」, 2008/11/15, 九州大学応用力学研究所
- (7) 高橋知也, 石原卓, 金田行雄, FENE-P モデルを用いた抵抗低減チャネル乱流 DNS による乱流構造の解析, 第 6 回日本流体力学会中部支部講演会, 2008/11/8, 名古屋工業大学
- (8) Takashi Ishihara, Statistics of two-point velocity difference in high-resolution direct numerical simulations of turbulence in a periodic box, Inertial-Range Dynamics and Mixing, 2008/9/30, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge
- (9) 森下浩二, 石原卓, 金田行雄, 高レイノルズ数チャネル乱流の直接数値シミュレーション日本流体力学会年会 2008, 2008/9/6, 神戸大学六甲台キャンパス
- (10) Takashi Ishihara, Joint multifractal analysis of intermittent fields in high-resolution DNS of turbulence, Frontiers of Computational Science - Macroscopic Systems/Fluid Mechanics, 2008/3/26, Venture Business Laboratory 3F, Nagoya University
- (11) 石原卓, 乱流の大規模直接数値計算を用いたデータ解析：乱流場の間欠性について, 筑波大学大学院数理物質科学研究科, 凝縮系理論コロキウム, 2008/3/10, 筑波大学自然系学系棟 D410
- (12) 岩田浩光, 石原卓, 金田行雄, Sinc-Galerkin 法を用いた乱流境界層の DNS, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 2007/12/19, 秋葉原コンベンションホー

- ル
- (13) T. Ishihara and H. Higuchi, Joint multifractal analysis of intermittent fields in high-resolution DNS of turbulence, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2007/11/20, Salt Lake City, USA
- (14) 樋口裕孝, 石原卓, 乱流の大規模直接数値計算データを用いたマルチフラクタル解析, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007/9/22, 北海道大学札幌キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 卓 (ISHIHARA TAKASHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10262495

(2) 研究分担者

金田 行雄 (KANEDA YUKIO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10107691

石井 克哉 (ISHII KATSUYA)
名古屋大学・情報連携基盤センター・教授
研究者番号：60134441

芳松 克則 (YOSHIMATSU KATSUNORI)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70377802