

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760063

研究課題名（和文）

乱流の情報縮約手法の開発：ウェーブレットの視点から

研究課題名（英文）

Development of turbulence modeling: A wavelet viewpoint

研究代表者

岡本 直也 (OKAMOTO NAOYA)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80547414

研究成果の概要（和文）：3次元非圧縮乱流の情報縮約手法の開発をウェーブレットの視点から行った。具体的には、(A) 等方な乱流に対する、ウェーブレット非線形フィルタリングとフーリエ線形フィルタリングの比較、(B) ウェーブレット解析による非等方な乱流の間欠性の定量化、(C) ウェーブレットに基づいた非圧縮乱流の適合格子シミュレーション手法の開発ならびに、混合層乱流に対するその手法の性能評価を行った。

研究成果の概要（英文）：A turbulence modeling for three-dimensional incompressible turbulent flows has been developed from a viewpoint of wavelet. Specifically, (A) comparison between wavelet nonlinear filtering and Fourier linear filtering for isotropic turbulence, (B) quantification of intermittency of anisotropic turbulence by the use of wavelet analysis, and (C) development of an adaptive wavelet method to simulate incompressible turbulence and its assessment for incompressible turbulent mixing layers in terms of savings of memory and CPU time, have been conducted.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：計算流体物理学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：乱流、ウェーブレット、乱流モデル、間欠性、電磁流体、情報縮約、適合格子

1. 研究開始当初の背景

異常気象や汚染物質の拡散などの予測や解明は、近年問題となっている地球環境問題の解決に必要不可欠である。これらの現象は複雑で乱れた状態、乱流状態になっている。乱流現象を予測・解明するためには、計算科学的手法、特に大規模な直接数値計算(DNS)が強力な手段であるが、乱流自身のもつ巨大自由度、強非線形性のため、地球規模流動現象にみられる高レイノルズ数乱流のDNSは、現在最高のスーパーコンピュータをもってしても不可能である。そのため、様々な乱流に

共通する性質（普遍性）の解明、ならびに、その普遍性を利用した数物理的に根拠のある情報縮約手法（乱流モデル）の開発が不可欠である。

乱流中には、秩序的な構造が空間的に偏りをもって分布している（間欠性）。乱流の普遍的な性質である間欠性を利用した乱流モデルがFargeらによって提案された（CVS手法）。このCVS手法では、数学的手法であるウェーブレット解析を用いて、乱流中の秩序的な場を少数自由度で抽出し、得られた秩序場の時間発展を適合格子を用いて数値計算

する。ここで、適合格子とは、場所によって計算格子の細かさが異なり、その格子が流れに合わせて時間的に変化するものである。

我々は、高レイノルズ数乱流に対するこの CVS 手法の有効性を検証するため、地球シミュレータを駆使して得られた、従来とは桁違いの自由度を持つ、ある時刻の一樣乱流直接数値計算データに適用し、高レイノルズ数乱流中における秩序場が乱流中で重要な役割をはたしていること、また、レイノルズ数が高く間欠性が高いほど、CVS 手法が情報縮約に有効であることを示してきた。また、一樣な格子を用いた三次元乱流の直接数値計算に、この CVS 手法で用いられるウェーブレットフィルタリングを適用することで、CVS 手法が、乱流場のある時刻だけの情報縮約だけでなく、シミュレーション全体における情報縮約に有効であることを示してきた。また、流れが磁場と相互作用する電磁流体乱流にもこの手法が拡張できることを示してきた。

2. 研究の目的

本研究では、

- (1) 等方な電磁流体乱流に対してウェーブレットフィルタリングと他のフィルタリング手法を比較し、CVS 手法の有効性の高さを示すこと
- (2) 非等方な電磁流体乱流の間欠性をウェーブレット解析により定量化すること
- (3) ウェーブレットを用いた適合格子 CVS の開発とその信頼性の評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1)では、宇宙流体乱流などでみられる規範的な一樣等方性電磁流体乱流をとりあげ、ウェーブレット非線形フィルタリングとフーリエ線形フィルタリングの比較を行う。ウェーブレットフィルタリングは、もとの乱流場をウェーブレット変換し、得られるウェーブレット係数の大小により2つの場に分離する。フーリエフィルタリングでは、あるカットオフのスケールを決め、そのスケールより大きい小さいかで場を2つに分離する。ここで、ウェーブレット係数の大きなものから逆変換により再構成される場を、秩序場、あるスケールより大きなスケールのフーリエ係数から再構成される場を、大スケール場とする。秩序場、大スケール場の自由度を同一にし、それぞれの場の構造や、統計的性質を比較する。解析するデータは、先行研究で得られた電磁流体乱流の DNS データを利用する。解析は、名古屋大学の並列計算機を利用して行う。

(2)では、より工学的に重要な、液体金属の鑄造過程などでみられる電磁流体として

規範的な乱流である、一樣磁場をかけた低磁気レイノルズ数電磁流体乱流をとりあげる。解析するデータは地球シミュレータ上で低磁気レイノルズ数乱流の DNS を実施し、得られたデータの解析は、名古屋大学の並列計算機を利用する。DNS コードは文献リスト⑦で開発したものを利用する。非等方な乱流を定量化するため、ウェーブレット解析を用いて、スケールと方向に依存した統計解析を行う。また、その非等方性の強さが間欠性にどのように影響するかを調べる。

(3)では、具体的な対象として3次元非圧縮混合層乱流をとりあげ、その乱流に対する CVS 手法、DNS の開発を行い、実際に適合格子 CVS と DNS を実施し、それぞれによって得られた統計量や、CPU 時間・メモリを比較することで、CVS 手法の計算コストや信頼性の定量的な評価を行う。離散化手法としては有限体積法を用いる。

4. 研究成果

(1)格子点数 512 の 3 乗の 3 次元非圧縮性電磁流体乱流から約 3%の自由度でウェーブレットフィルタリングとフーリエフィルタリングで場を抽出した結果、

- ① ウェーブレットフィルタリングにより抽出された秩序場は、もとの乱流場にみられる構造をよく再現したが、フーリエフィルタリングによって抽出された大スケール場は、もとの乱流場の構造をよく再現しないこと (図 1 参照)、
 - ② 秩序場の確率密度分布関数 (PDF) はもとの乱流場の PDF をよく再現したが、大スケール場の PDF はもとの乱流場の PDF をよく再現しないこと
- などがわかった。この結果は、フーリエフィルタリングよりウェーブレットフィルタリングの方が、電磁流体乱流にみられるシート状構造やその統計を効率的に表現できることを示している。

(2)地球シミュレータ上で、異なる強さの磁場に対する低磁気レイノルズ数電磁流体乱流の直接数値計算を実施し (図 2 参照)、得られたデータのウェーブレット解析により、以下の成果を得た。

- ① 乱流中の各スケールにおいて、一樣磁場と垂直な方向に乱流のエネルギーが卓越すること、
 - ② 一樣磁場が乱流場の磁場方向の間欠性の増加に重要な役割を果たすこと
- などがわかった。

このことは、一樣磁場の電磁流体乱流に対して、ウェーブレットを用いるシミュレーションが、磁場が強いほど有効であることを示唆

しており、この方向の今後の展開が望まれる。また、磁場を用いて電磁流体の流れの制御を行う研究分野、例えば抵抗低減などで、本研究の知見が役立つことが期待される。

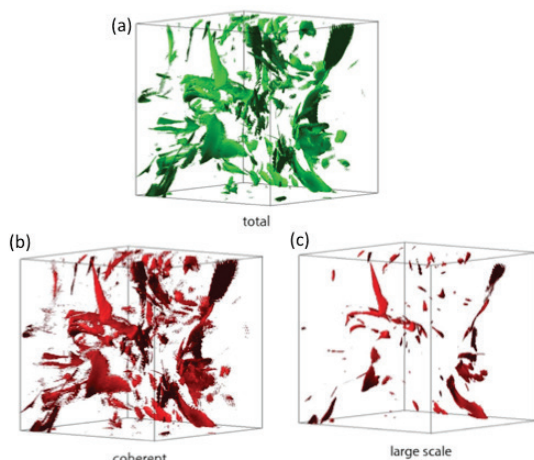


図1：電磁流体乱流中の局所的な回転の強さが大きい領域が可視化されている。(a)もとの乱流場、(b)ウェーブレットフィルタリングにより抽出された秩序場、(c)フーリエフィルタリングにより抽出された大スケール場。[文献リスト⑥より]

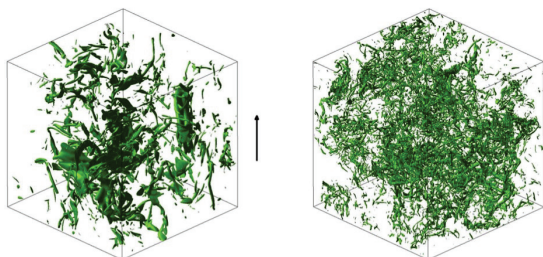


図2：地球シミュレータで得られた格子点数512の3乗の直接数値計算データの可視化図。流体中の局所的な回転の強さが大きい領域が可視化されている。左図は右図にくらべて外部磁場の強さが大きく、矢印は外部磁場の向きを表している。[文献リスト③より]

(3)有限体積法に基づいた、①3次元非圧縮乱流に対する適合格子シミュレーションを開発し、②三次元混合層乱流の適合格子 CVS と直接数値計算を行い比較することで、適合格子 CVS の性能を評価した。

① 適合格子 CVS と DNS とともに、速度場の時間発展には部分段階法、2段2次のルンゲクッタ法を用いた。圧力のポアソン方程式は、それに疑似時間項を付加し、得られた方程式を時間積分し、その定常解を得ることで解を得た。疑似時間項の時間積分には、2次精度有理ルンゲクッタ

法を用いた。適合格子 CVS では、各時刻において、適合格子の生成にウェーブレットフィルタリングを用いた。

② 適合格子 CVS は、DNS の乱流エネルギーの時間発展を良く再現した。また、CVS は、DNS の渦構造をよく再現した(図3参照)。CVS で得られた渦構造の周りに、適合格子が集中している様子を確認できた。自由度については、適合格子 CVS は DNS の 30~40%程度、メモリについては、適合格子 CVS の 40~50%程度まで削減できた。CPU 時間を、(a)ポアソン方程式と(b)それ以外の部分にかかる計算にわけて計測したところ、(a)については削減できなかったが、(b)については削減できた。

今後の課題としては、ポアソン方程式に対するマルチグリッド手法などの高速解法の実装があげられる。今回開発したコードは、シングルプロセッサ用のものであるが、並列化を行うことにより、より高レイノルズ数で間欠性の高い乱流に対して CVS 手法の有効性を検証することが望まれる。また、本研究で開発した手法と Volume Penalization 法の組み合わせにより、複雑な境界をもった乱流に対する CVS 手法の開発が望まれる。

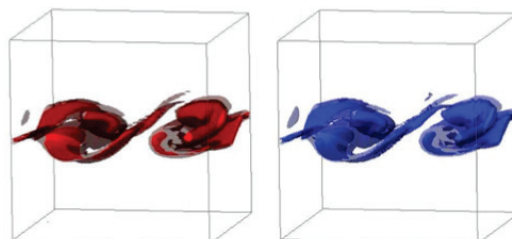


図3：DNS (左) と適合格子 CVS (右) によって得られた秩序場の可視化図。

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 K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kawahara, K. Schneider and M. Farge, Coherent vorticity and current density simulation of three-dimensional magnetohydrodynamic turbulence using orthogonal wavelets, Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 2012, 印刷中 (査読有), DOI:10.1080/03091929.2012.654790
- ② N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda, Coherent Vorticity Simulation of Three-Dimensional Forced Homogeneous Isotropic Turbulence, Multiscale Modeling & Simulation, 9, 2011,

- 1144-1161 (査読有),
DOI: 10.1137/10079598X
- ③ N.Okamoto, K.Yoshimatsu, K.Schneider and M.Farge, Directional and scale-dependent statistics of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence, ESAIM: PROCEEDINGS, 32, 2011, 95-102 (査読有),
DOI: 10.1051/proc/2011014
- ④ K. Yoshimatsu, K. Schneider, N. Okamoto, Y. Kawahara, and M. Farge, Intermittency and geometrical statistics of three-dimensional homogeneous magnetohydrodynamic turbulence: a wavelet viewpoint, Physics of Plasmas, 18, 2011, 092304-1 - 092304-9 (査読有), DOI: 10.1063/1.3628637
- ⑤ N.Okamoto, K.Yoshimatsu, K. Schneider, and M.Farge, Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: a wavelet viewpoint, Journal of Physics:Conference Series, 318, 2011, 072035-1 - 072035-5 (講演に査読有), DOI: 10.1088/1742-6596/318/7/072035
- ⑥ N. Okamoto, K. Yoshimatsu, Y. Kondo, K. Schneider and M. Farge, Coherent vorticity and current extraction in three-dimensional homogeneous magnetohydrodynamic turbulence: Comparison between wavelet and Fourier filtering, Proceedings of the European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010, 01379_1-12, 2010(講演に査読有), http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/ECCOMAS-CFD2010/papers/01379.pdf
- ⑦ N. Okamoto, P. Davidson and Y. Kaneda, On the decay of low-magnetic-Reynolds-number turbulence in an imposed magnetic field, Journal of Fluid Mechanics, 651, 295-318, 2010 (査読有),
DOI: 10.1017/S0022112009994137

[学会発表] (計 7 件)

- ① 森島由太、岡本直也、芳松克則、K. Schneider, M. Farge, ウェーブレット解析を用いた 3 次元乱流のアダプティブシミュレーション, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011.12.19, 大阪大学 (大阪府)
- ② K. Schneider, K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kawahara, and M. Farge, Intermittency and geometrical

- statistics of 3d homogeneous magnetohydrodynamic turbulence using wavelets, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 14-18, 2011, 2011.11.17, Salt Lake City (USA)
- ③ N.Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider and M. Farge, Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint, CCS Symposium Autumn 2011, 2011.11.1, 名古屋大学 (愛知県)
- ④ N.Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider and M. Farge, Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint, Fundamental problems of turbulence, 50 years after the Marseille Conference 1961, 2011.9.29, Marseille (France)
- ⑤ N.Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider and M. Farge, Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint, 13th European Turbulence Conference, 2011.9.15, Warsaw (Poland)
- ⑥ 岡本直也、芳松克則、K.Schneider、M. Farge、金田行雄, 3次元非圧縮性一様など硬乱流における、ウェーブレット解析に基づく情報縮約, 平成 22 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2010.11.13, 九州大学, (福岡県)
- ⑦ N. Okamoto, K. Yoshimatsu, Y. Kondo, K. Schneider, M. Farge, Coherent Vorticity and Current Extraction in Three-Dimensional Homogeneous Magnetohydrodynamic Turbulence: Comparison Between Wavelet and Fourier Filtering, Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010, 2010.6.14, Lisbon (Portugal)

[その他]

ホームページ等

http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100002236_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 直也 (OKAMOTO NAOYA)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 80547414

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし