

また平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2008 ～ 2009
 課題番号： 20760055
 研究課題名 (和文) 乱流のウェーブレット解析：情報縮約化手法の開発とその検証
 研究課題名 (英文) Application of wavelet analysis to turbulence:
 Development of turbulent modeling and its validation

研究代表者

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

研究成果の概要 (和文)：

高レイノルズ数 3 次元非圧縮性乱流における、ウェーブレット解析に基づく非経験的な情報縮約化手法の開発、大規模数値計算による検証を行った。開発した手法は直接数値計算に比べ約 10 分の 1 の自由度しか保持してないにもかかわらず、乱流の統計量の時間発展だけでなく渦構造もよく再現する。また、その情報縮約化手法の電磁流体乱流、及び、固体壁を境界の一部に持つ乱流に対する一般化に成功した。

研究成果の概要 (英文)：

A wavelet based non-empirical turbulent modeling for three-dimensional incompressible turbulence at high Reynolds number, called CVE, has been developed. Its validity was also assessed. It was shown that CVE reduces the number of degrees of freedom by a factor 10 with respect to direct numerical simulation, while preserving high-order statistics of the turbulent flow. CVE was generalized to modeling for magnetohydrodynamic turbulence and wall-bounded turbulence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 工学基礎

キーワード：計算科学、流体物理学、乱流、ウェーブレット、情報縮約

1. 研究開始当初の背景

異常気象、汚染物質の拡散など様々な問題において見られる流れは、乱流である。その解明には、計算科学的手法、特に、実験では測定が困難な物理量を測定誤差がなく得ることができる直接数値計算 (DNS) が強力な

手段となっている。地球規模の流れの乱流の自由度は、あまりにも巨大であるため、近い将来現れると期待されるスーパーコンピュータをもってしても、DNS の実行が不可能である。流れの予測精度の向上には、乱流の小スケールの普遍性を利用した、数理・物理

学的根拠を持った乱流の情報縮約化手法（乱流モデル）の開発が必要不可欠である。その有望な手法の一つにウェーブレット解析を応用した乱流モデル（以下、CVE手法と呼ぶ）がある。ウェーブレット解析は、間欠的なデータの疎な表現に適し、スケール的にも空間的にも十分に局在した性質を同時に捉える解析手法である。

CVE手法では、小スケールにおいて間欠的に分布する乱流の秩序渦構造を捉え、無秩序構造のモデル化を行う。（秩序渦構造と無秩序構造は、渦度場をウェーブレット変換し、その係数の大きさがある非経験的に決まる値より大きい小さいかによって分けられる。）この手法は、乱流の間欠性のみを利用しているため、拡張性が高く、複雑流動現象のモデル化にも有効であると考えられていた。また、秩序構造の割合がレイノルズ数の増加につれて減少するため、高レイノルズ数乱流のシミュレーションが高効率で実行できると期待されていた。その一般化、この手法に基づくシミュレーションの実行、及び、その予測可能性（信頼性）の定量的評価が必要であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

- (1) 高レイノルズ数3次元非圧縮性乱流における、CVE手法の開発、及び、大規模データ解析・大規模数値シミュレーションによる検証・その信頼性の定量的評価。
- (2) CVE手法の複雑流動現象、特に、電磁流体乱流に対する一般化、及び、固体壁を境界の一部として持つ乱流場に対する一般化。
- (3) CVE手法開発の基盤となる乱流の間欠性のウェーブレット解析による解明。

3. 研究の方法

(1) 高レイノルズ数 3次元非圧縮性乱流の 3次元直交離散ウェーブレット解析に基づいた CVE 手法の開発、及び、数値シミュレーション

① 最も規範的な乱流場である 3次元周期境界条件を満たす乱流場の DNS 結果と、CVE手法によるシミュレーション結果との比較により、CVE手法の検証・予測可能性を評価した。空間微分にはフーリエスペクトル法を、時間発展には4次のルンゲクッタ法を用いた。CVE手法に基づいた数値シミュレーションでは、各時刻にて、直交ウェーブレット解析を用いて、秩序構造を抽出した。さらに、その移動、それによる小スケールでの渦の生成

を捉えるために、ウェーブレット空間において、セーフティゾーンと呼ばれる領域を導入した。

② 秩序構造の時間発展を捉えるには、ウェーブレット空間において、秩序渦周りにセーフティゾーンが必要となる。その設定の仕方による、シミュレーション結果の依存性を調べた。

③ 格子点数 256^3 のシミュレーションに加え 512^3 のシミュレーションも行い、CVE手法によるシミュレーション結果、特に、自由度縮約の効率のレイノルズ依存性について調べた。

④ CVE手法の利点を示すため、周期境界条件の下での固有関数であるフーリエ級数に基づく秩序構造抽出手法との比較を行った。

(2) CVE手法の一般化

① 宇宙流体乱流、地球内部の乱流や核融合における規範的乱流場の一つである周期箱中の 3次元非圧縮性一様等方性電磁流体乱流、

② 固体壁を境界の一部として持つ非圧縮性乱流場のうち最も規範的なものである平行 2平板間乱流を対象とした。①、②に対する一般化された CVE手法を提案し、秩序・無秩序構造の役割、その非線形相互作用への寄与を評価した。①では、まず、3次元一様電磁流体乱流の DNS を行い統計的に定常な場を得た。その渦度場と電流密度場に対して、ウェーブレット変換を行い、秩序構造をそれぞれ抽出した。②では、石原（名大）らら得た DNS データベースを用いて、壁からの距離毎に、壁に平行な面内でウェーブレット変換を渦度に施した。

(3) 乱流の間欠性の解明

CVE手法開発の基盤となる乱流の間欠性について調べるため、金田（名大）ららによって得られた 3次元一様等方性乱流の世界最大規模 DNS データベースの解析を行った。様々な乱流統計量のスケール依存性について調べた。また、秩序渦構造の生成要因解明のため数値実験を行った。

4. 研究成果

(1) 3次元周期箱中の非圧縮性一様等方性乱流に対する CVE手法の開発、及び、その検証

- ① CVE手法ではDNSの約10分の1の自由度しか保持していないにもかかわらず、エネルギー、エネルギー流束などの乱流の統計量だけでなく、渦構造の時間発展もよく再現することが分かった。
- ② 位置に関するセーフティゾーンがCVE手法に不可欠であることを示した。
- ③ レイノルズ数が高いほど、CVE手法によるシミュレーションに必要な自由度が減少することが分かった。

- ④ フーリエ級数に基づく方法を用いて、CVE手法により抽出された秩序渦構造と同じ自由度を持つように構造を抽出した。CVE手法では、抽出された僅か3.7%の自由度からなる秩序渦構造が乱流場の統計的性質をよく保持している。一方フーリエ級数に基づく方法により抽出された構造は、エネルギーやエンストロフィ、粘性領域以外でのエネルギースペクトルをよく再現しているものの、乱流場の秩序渦構造、乱流場の渦度成分の確率密度関数を再現しないことが分かった。

(2) CVE手法の一般化

- ① 従来のCVE手法を電磁流体乱流に適用するため、CVE手法を一般化した秩序渦・電流密度シート抽出(CVCE)手法を提案した。CVCE手法を、規範的乱流場の一つである周期箱中の3次元一様等方性電磁流体乱流の大規模DNSデータに対して適用した。抽出された秩序構造が乱流場をよく再現していること(図2参照)、秩序渦構造、秩序電流密度シート構造のウェーブレット空間における重なり程度などを定量化した。この内容について、International Workshop on Physical and Mathematical Challenges in light of ITER, 26th-30th, October, 2009, 2009/10/27, Marseille, Franceで招待講演を行った。

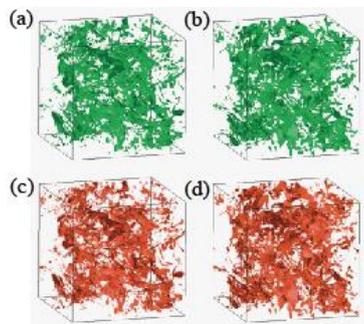


図2. 可視化図. (a), (b) MHD乱流場, (c), (d) 約3%の自由度からなる秩序構造: (a), (c) 渦度場の大きさ, (b), (d) 電流密度場の大きさ. (a)と(c), (b)と(d)の等値面の値はそれぞれ同じである。

- ② 固体壁を境界にもつチャンネル乱流の秩序構造を、CVE手法を応用して抽出し、その統計量の壁からの距離依存性などについて調べた。その結果、壁付近では乱流場の間欠性が強いこと、そのため、秩序構造の割合が少ないことが分かった。
- (3) 乱流の間欠性の解明
金田らによって得られた世界最大規模の3

次元一様等方性乱流のDNSデータのウェーブレット解析を行った。主に、以下の結果を得た。

- ① 小スケールにおいて、ラグランジュ加速度がオイラー加速度よりも10倍程度間欠的である。
- ② エネルギー輸送とエネルギーの相関が慣性小領域で大きい。
- また、回転乱流を例にとって、秩序渦構造の生成要因を調べた。非線形効果が主要な要因であることを示した。

CVE手法は、乱流の変動が大きいところは細かい格子を用い、変動が緩やかなところでは、より粗い格子を利用する適合格子シミュレーション手法の一種である。そのため、本研究で得られた成果により、適合格子を用いた高レイノルズ数乱流の数値シミュレーションの展開が期待される。本研究で開発したCVE手法は、実効自由度を縮約するが、メモリ使用量の節約を行わない擬適合格子シミュレーション手法に該当する。今後、メモリ使用量の低減により演算量を減らしシミュレーションを高速化する完全適合格子CVE手法の開発が期待される。

数理・物理的根拠をもった乱流モデルを必要としている気象、宇宙、環境、機械工学などの諸分野に貢献すると予想される。

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8件)

1. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, and M. Farge, "Coherent vortex extraction from three-dimensional homogeneous isotropic turbulence: Comparison of wavelet and Fourier nonlinear filtering methods," *Theoretical and Applied Mechanics Japan* Vol. 58, 227-233 (2010). (審査有)
2. K. Yoshimatsu, Y. Kondo, K. Schneider, N. Okamoto, H. Hagiwara and M. Farge, "Wavelet-Based Coherent Vorticity Sheet and Current Sheet Extraction from Three-Dimensional Homogeneous Magnetohydrodynamic Turbulence," *Physics of Plasmas* Vol. 16, 082306-1 - 082306-11 (2009). (査読有)
3. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda and M. Farge, "Intermittency and Scale-Dependent

- Statistics in Fully Developed Turbulence,” *Physical Review E* Vol. 79, 026303-1 - 026303-5 (2009). (査読有)
4. K. Yoshimatsu and N. Okamoto, “Wavelet-Based Statistics of Energy Transfer in High Resolution Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence,” *Journal of Turbulence* Vol. 9 No. 45, pp. 1-25 (2008). (査読有)
 5. K. Yoshimatsu, M. Midorikawa and Y. Kaneda, “Coherent Vortices Formation in Homogeneous Rotating Turbulence: Asymmetry between Cyclonic and Anticyclonic Vortices,” Proceedings of International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008; ed. Y. Kaneda, M. Sasai, K. Tachibana, CD-ROM, pp. 83-90 (2008). (査読有)
 6. N. Okamoto and K. Yoshimatsu, “Energy Transfer in High Reynolds Number Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence: A Wavelet Viewpoint,” Proceedings of International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, ed. Y. Kaneda, M. Sasai, K. Tachibana, CD-ROM, pp. 173-180 (2008). (査読有)
 7. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda and M. Farge, “Intermittency in high resolution direct numerical simulation of turbulence in a periodic box: a wavelet viewpoint,” Advances in Turbulence XII Proceedings of the 12th Euromech European Turbulence Conference, September 7-10, 2009, Marburg, Germany; ed. B. Eckhardt, Springer, pp. 945 (2009) (講演のみ審査有)
 8. N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda, “Coherent vortex simulation: application to 3D homogeneous isotropic turbulence,” Advances in Turbulence XII Proceedings of the 12th Euromech European Turbulence Conference, September 7-10, 2009, Marburg, Germany; ed. B. Eckhardt, Springer, pp. 759-762 (2009) (講演のみ審査有)
- [学会発表] (計 19 件)
1. N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda, “Coherent vortex simulation of 3D homogeneous isotropic turbulence”, 62nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Sunday-Tuesday, November 22-24, 2009; Minneapolis, Minnesota, 2009/11/24, Minneapolis, Minnesota, USA.
 2. K. Yoshimatsu, Y. Kondo, K. Schneider, N. Okamoto, H. Hagiwara and M. Farge, “Wavelet-based coherent vorticity sheet and current sheet extraction from 3D homogeneous MHD turbulence”, International Workshop on Physical and Mathematical Challenges in light of ITER, 26th-30th, October, 2009, 2009/10/27, Marseille, France. (招待講演)
 3. 近藤祐史、芳松克則、岡本直也, “ウェーブレットによる3次元一様電磁流体乱流からの秩序構造の抽出”, 第7回日本流体力学会中部支部講演会, 2009/10/16, 名古屋大学.
 4. N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda, “Coherent vortex simulation: application to 3D homogeneous isotropic turbulence”, the 12th EUROMECH European Turbulence Conference, September 7-10, 2009, Marburg, Germany, 2009/09/08, Marburg, Germany.
 5. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda and M. Farge, “Intermittency in high resolution direct numerical simulation of turbulence in a periodic box: a wavelet viewpoint”, the 12th EUROMECH European Turbulence Conference, September 7-10, 2009, Marburg, Germany, 2009/09/08, Marburg, Germany.
 6. 芳松克則、岡本直也、Marie Farge, Kai Schneider, “三次元一様等方性乱流からの秩序渦構造の抽出 - ウェーブレット及びフーリエ非線形フィルタリング手法の比較 -”, 第58回理論応用力学講演会, 2009/06/10, 日本学術会議, 東京都港区.
 7. 岡本直也、芳松克則, “Wavelet-based statistics of energy transfer in high resolution direct numerical simulation of three-dimensional homogeneous isotropic turbulence”, 乱流の統計理論とその応用, 2009年3月9日-10日(9日), 統計数理研究所, 東京都港区.
 8. N. Okamoto and K. Yoshimatsu,

- “Wavelet-based statistics of energy transfer in high resolution direct numerical simulation of three-dimensional homogeneous isotropic turbulence”, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, 2008年11月27日-29日(28日), 名古屋大学.
9. K. Yoshimatsu, M. Midorikawa and Y. Kaneda, “Columnar vortices formation in freely-decaying homogeneous rotating turbulence”, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, 2008年11月27日-29日(28日), 名古屋大学.
 10. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda, M. Farge, “Intermittency and scale-dependent statistics in fully developed turbulence”, 61st Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2008年11月23日-25日(24日), San Antonio, Texas, USA.
 11. 近藤祐史, 芳松克則, 岡本直也, 萩原裕之, “Wavelet 解析による一様等方性電磁流体乱流の秩序渦構造抽出”, 乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則, 2008年11月13日-15日(13日), 九州大学応用力学研究所.
 12. K. Yoshimatsu, “Columnar vortices formation in freely-decaying homogeneous rotating turbulence”, Seminaire M2P2 n-120, Modeles et Calculs pour la Mecanique des Fluids, 2008年9月11日, Universite de Provence, Marseille, France. (招待講演)
 13. 岡本直也, 芳松克則, Kai Schneider, Marie Farge, 金田行雄, “高レイノルズ数一様等方性乱流における秩序渦: ウェーブレットの視点から”, 日本流体力学会 2008, 2008年9月4日-7日(6日), 神戸大学.
 14. K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda., “Coherent vortices in high resolution direct numerical simulation of homogeneous isotropic turbulence: A wavelet viewpoint”, The International Workshop on Multiscale methods for fluid and plasma turbulence: Applications to magnetically confined plasmas in fusion devices, 2008年4月21日-25日(21日), CIRM, Marseille, France. (招待講演)

他5件。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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