

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05139

研究課題名（和文）マルチフィジックス流動シミュレーション手法の開発：ウェーブレットの視点から

研究課題名（英文）Development of a multiphysics fluid simulation method: A wavelet viewpoint

研究代表者

岡本 直也 (Okamoto, Naoya)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80547414

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非圧縮オイラー方程式にウェーブレットノイズ除去手法を利用することで、乱流場をシミュレーションする手法を開発した。シミュレーションによって得られた流れ場は、乱流場に特徴的な間欠性や $-5/3$ 乗則に従うエネルギースペクトルをよく再現することを示した。また、直交座標系などの単純な座標系においてシミュレーションが可能な、スカラー輸送を伴う複雑境界を有する流れのシミュレーション手法の開発を行った。詳細は、この報告書に記載の参考文献を参照されたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、気象災害や地球温暖化などの環境問題や、省エネルギー社会に向けた、工学的課題の解決が求められている。流体現象の予測や解明には、近年めざましい発展を遂げている計算機を利用した計算科学的手法、特に基礎方程式をモデル化せずに厳密に解く第一原理的な、直接数値計算（DNS）が強力な手段となってきた。しかしながら、応用問題を解く際は系の自由度が莫大なため、現在あるいは予見しうるスーパーコンピュータの性能をもってしてもDNSを実行できない場合も多い。本研究の目的は、信頼性を失うことなく計算コストを減らすための計算手法の開発であり、ウェーブレット等の先進的な数学的手法の学術的応用の成果が得られている。

研究成果の概要（英文）：We developed a numerical method to simulate turbulent flow by applying a wavelet-based denoising to incompressible Euler-equations. It is shown that the computed flow exhibits an intermittent nonlinear dynamics and a $-5/3$ energy spectrum, characteristic of three-dimensional fully developed turbulence. We have also developed a volume penalization method for inhomogeneous Neumann boundary conditions, which allows us to model scalar flux through walls in geometries of complex shape using simple, e.g. Cartesian, domains for solving governing equations. Further details are shown in the references listed in the report.

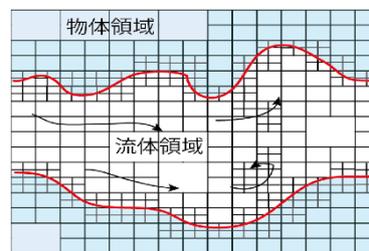
研究分野：数値流体物理学

キーワード：ウェーブレット シミュレーション 乱流 VP法

1. 研究開始当初の背景

近年、気象災害や地球温暖化などの環境問題や、省エネルギー社会に向けた、熱交換機の高効率化、次世代半導体作りの基となる結晶成長過程など社会的工学的課題の解決が求められている。これらの問題に表れる液体や気体の流れの多くは非定常であり、流れ以外にも熱や化学反応などのマルチフィジックスを含む。流体现象の予測や解明には、近年めざましい発展を遂げている計算機を利用した計算科学的手法、特に基礎方程式をモデル化せずに厳密に解く第一原理的な、直接数値計算 (DNS) が強力な手段となってきた。しかしながら、流れが複雑形状を有する装置に囲まれていたりマルチフィジックスを含む場合、あるいは地球規模流動現象にみられるように流れの形態が乱流状態の場合では、系の自由度が莫大なため、現在あるいは予見しうるスーパーコンピュータの性能をもってしても DNS を実行できない場合も多い。そのため、これらの流体现象の解明には、数理・物理学的根拠を持った計算コストの低い手法の開発、ならびにその手法の信頼性の評価が不可欠である。

我々はこれまで、ウェーブレット解析に基づいて、乱流の大規模 DNS データ(格子点数 2048³)から秩序渦構造をわずか数%の自由度で抽出し(Okamoto et al. Phys. Fluids 115109, 2007)、その秩序構造の時間発展を捉える自由度低減手法(CVS 手法)の開発(Okamoto et al. SIAM Multiscale Model. Simul. 2011)などを行ってきた。この論文では高精度・高解像度なフーリエスペクトル法により一様格子上で計算を行っており、計算コスト(CPU 時間とメモリ)の削減はしていないけれども、アダプティブ格子を用いることで計算コストの削減が可能となる。複雑境界をとまなう流れを、デカルト座標系で計算できる手法として VP 法がある(Angot et al. Numerische Mathematik 81, 497-520, 1999)。VP(Volume Penalization)法は物体形状が時間変化する場合にも拡張が可能で、境界に沿う計算コストの多大な格子生成をする必要もない。最近我々は、VP 法を用いて任意形状物体を境界にもつ圧縮性非定常流れのアダプティブ CVS を開発した(Okamoto et al., ESAIM Proc. Surv, 53, 38-48, 2016)。右図のようにアダプティブ格子を用いているため、流体領域のみならず物体領域内の格子も削減でき、一様格子を用いたものより計算コストの削減に成功した。



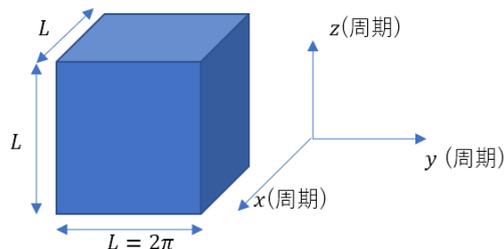
2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの研究成果を進展させ、

- (A) ウェーブレット手法に基づく新しいシミュレーション手法が、非圧縮乱流の低コストなシミュレーション手法としてなりうるかの検証 (文献①)、ならびに
 - (B) 複雑境界まわりの流動現象を、単純な計算格子でも扱うことのできる、VP 法の開発 (物体と流体が完全接触しているときの熱的境界条件を有するもの)
- である。本報告では、(A)について内容を紹介し、(B)については最近発表がなされた文献 (②、③) を参照されたい。

3. 研究の方法

ウェーブレット手法に基づく新しいシミュレーション手法として、オイラー方程式にウェーブレットフィルタリングを適用しながらシミュレーションを行う手法(CVS)を開発し、実際にシミュレーションを行うことで、乱流統計量を再現するかの検証を行った。計算領域は、下図のように周期境界条件の立方体領域であり、計算格子は512³である。比較対象として従来手法である、超粘性に基づく手法(HV)、Euler-Voigt(EV)手法、ならびにオイラー方程式をシミュレーションする手法(EE)もあわせて行った。Navier-Stokes 方程式をシミュレーションする手法(NS)で得られた場を正解場とした。空間離散化にはフーリエスペクトル法を利用し、時間発展には4次の Runge-Kutta 法を用いた。系を駆動する外力は、ランダムフォーシングを用い、行ったシミュレーションでは、すべて同一の時間履歴をもつようにした。また NS, CVS, HV におけるエンストロフィーは 85 程度である (これは小スケールの生成度合の指標の1つである)。CVS 手法で保持される自由度の全格子点数に対する割合は 3.5%程度である。これに相当するように HV で保持される自由度をフーリエ空間で設定した。計算には名古屋大学の基盤センターの並列計算機を用いた。



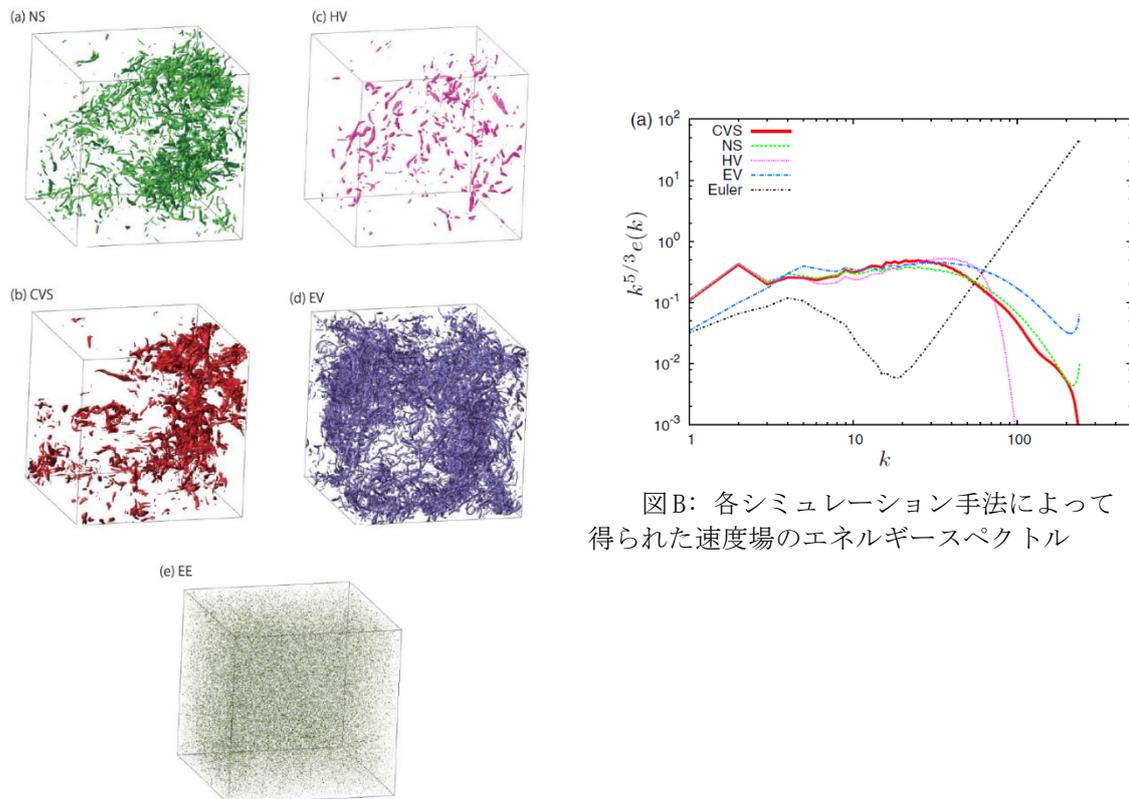
4. 研究成果

図Aは、実際にシミュレーションで得られたある時刻 ($t = 3.4\tau$, ここで τ は、大スケール渦の特徴的な時間スケール) での渦度場とよばれる場の可視化図である。(a) NS が通常の Navier-Stokes 方程式を解くことで得られた乱流場の可視化図である。(b) CVS が本研究で提案する、Euler 方程式にウェーブレットフィルタリングを適用して、シミュレーションを行うことで得られたものである。CVS 手法によって得られた場には、NS 手法によって得られた乱流場と同様にチューブ状の構造が見られることがわかる。(c) HV 手法によって得られた可視化図にもチューブ状構造が観察されるが、分布がより一様になっている。(d) についてはここでは省略する。(e) は、EE であり、秩序的な構造は観察されず、一様な分布がみとれる。

図Bは、各シミュレーション手法によって得られた速度場のエネルギースペクトル $E(k)$ に波数の $5/3$ 乗をかけたものである。NS, CVS, HV の $E(k)$ はすべて $k^{-5/3}$ の波数依存性を有していることがわかる。HV のスペクトルは高波数側での減衰が著しいのになら、CVS のスペクトルは高波数側でも、NS 手法と同程度の大きさをもっていることがわかる。これは、HV の超粘性効果が高波数で卓越していることによると考えられる。

本研究の提案手法によって得られる流れ場が、乱流の特徴をよく捉えている（渦構造の間欠性や、エネルギースペクトル $k^{-5/3}$ を有している）ことがわかった。今後の課題として、実際にウェーブレットアダプティブ格子を用いたシミュレーションを実施することや、開発した VP 法と組み合わせることで、複雑境界下における熱輸送を伴う流体ソルバーの開発が考えられる。

- ① Farge, M., Okamoto, N., Schneider, K., & Yoshimatsu, K. (2017). Wavelet-based regularization of the Galerkin truncated three-dimensional incompressible Euler flows. *Phys. Rev. E*, 96(6), 063119.
- ② Sakurai, T., Yoshimatsu, K., Okamoto, N., & Schneider, K. (2019). Volume penalization for inhomogeneous Neumann boundary conditions modeling scalar flux in complicated geometry. *J. Comput. Phys.*, 390, 452-469.
- ③ Sakurai, T., Yoshimatsu, K., Okamoto, N., & Schneider, K., Corrigendum to ‘‘Volume penalization for inhomogeneous Neumann boundary conditions modeling scalar flux in complicated geometry’’ [*J. Comput. Phys.* 390 (2019) 452-469] (accepted)



図B: 各シミュレーション手法によって得られた速度場のエネルギースペクトル

図A: 各シミュレーション手法によって得られた渦度場の可視化図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Teluo Sakurai, Katsunori Yoshimatsu, Naoya Okamoto, Kai Schneider	4. 巻 390
2. 論文標題 Volume penalization for inhomogeneous Neumann boundary conditions modeling scalar flux in complicated geometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 452-469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcp.2019.04.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Farge Marie, Okamoto Naoya, Schneider Kai, Yoshimatsu Katsunori	4. 巻 96
2. 論文標題 Wavelet-based regularization of the Galerkin truncated three-dimensional incompressible Euler flows	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 063119_1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.96.063119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 N. Okamoto, T. Matsuzaki, M. Yokokawa, Y. Kaneda
2. 発表標題 Effect of high-order finite difference discretization of the nonlinear term on turbulence statistics
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Okamoto
2. 発表標題 Effect of high-order finite difference discretization on the statistics of 3D incompressible homogeneous turbulence
3. 学会等名 4th International Workshop on Marine-Earth Science Simulations: Data assimilation and multiscale techniques for numerical simulation of turbulent flows（国際学会）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Okamoto, M. Farge, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2 . 発表標題 Wavelet regularization of the three-dimensional incompressible Euler equations
3 . 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 松崎 継生, 岡本 直也, 横川 三津夫, 金田 行雄
2 . 発表標題 乱流DNSにおける種々の時間積分スキームの評価
3 . 学会等名 第166回 ハイパフォーマンスコンピューティング研究会
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Komura, K. Kawakami, A. Kusaba, K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kangawa, K. Kakimoto, and K. Shiraishi
2 . 発表標題 Multiphysics simulation of GaN MOVPE: Flow influence on GaN growth orientation
3 . 学会等名 International workshop on Nitride Semiconductors (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Komura, K.Kawakami, Y. Yamamoto, A. Kusaba, K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kangawa, K. Kakimoto, K. Shiraishi
2 . 発表標題 Flow Influence on Gan MOVPE Growth Orientation
3 . 学会等名 International Workshop on Modeling in Crystal Growth (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名	K. Kawakami, S. Komura, Y. Yamamoto, A. Kusaba, K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kangawa, K. Kakimoto, K. Shiraishi
2. 発表標題	Methodology for Multiphysics Flow Simulation in GaN MOVPE Using Thermodynamic Analysis and First Principles Calculations for GaN Deposition
3. 学会等名	International Workshop on Modeling in Crystal Growth (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	M. Farge, N. Okamoto, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2. 発表標題	Wavelet-based regularization of the Galerkin truncated three-dimensional incompressible Euler equations
3. 学会等名	70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	岡本直也, Marie Farge, Kai Schneider, 芳松克則
2. 発表標題	三次元非圧縮オイラー方程式のウェーブレットレギュラリゼーション
3. 学会等名	日本流体力学会年会2017
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	Kai Schneider, Marie Farge, Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu
2. 発表標題	Wavelet Regularization of 3D Incompressible Euler Flows
3. 学会等名	the 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 Naoya Okamoto, Marie Farge, Kai Schneider, Katsunori Yoshimatsu
2. 発表標題 Wavelet Regularization of Three-dimensional Incompressible Euler Flows
3. 学会等名 Turbulence Colloquium at Mauna Kea: Recent Advances in Turbulence Research (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	芳松 克則 (Yoshimatsu Katsunori) (70377802)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------