

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760063

研究課題名(和文) 複雑境界をともなう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 a numerical method to simulate turbulent flows in complex geometries: A wavelet viewpoint

研究代表者

岡本 直也 (Okamoto, Naoya)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80547414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：任意形状の壁に囲まれた弱圧縮流れに対するウェーブレットアダプティブシミュレーション手法(CVS手法)の開発を行った。カルテシアン座標で複雑形状や境界条件を扱うことのできるVP法を用いた。CVS手法では、各時刻で流れ場のウェーブレット変換を行うことで、局所的に格子を細分化し、流れ場とアダプティブ格子を時間的に発展させる。急拡大領域をもつ2次元チャネル流れに対し、CVS手法の正確さと効率を評価した。CVS手法は、一様格子上のシミュレーション手法によって得られた速度場の時間発展をよく保持しながらも、CPUコストをよく削減することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We present an adaptive multiresolution simulation method for computing weakly compressible flow bounded by solid walls of arbitrary shape, using wavelets and a finite volume (FV) approach. A volume penalization method is employed to compute the flow in the Cartesian geometry and to impose the boundary conditions. A dynamical adaption strategy to advance both the locally refined grid and the flow in time uses biorthogonal wavelet transforms at each time step. We assess the quality and efficiency of the method for a two-dimensional flow in a channel with a suddenly expanded section. The results are compared with a reference flow obtained by a non-adaptive FV simulation on a uniform grid. It is shown that the adaptive method allows for substantial reduction of CPU time, while preserving the time evolution of the velocity field obtained for the non-adaptive simulation.

研究分野：流体物理学

キーワード：ウェーブレット 乱流 アダプティブ シミュレーション wavelet adaptive

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化、原子炉事故などによる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環境問題の解決に必要な不可欠である。これらの現象では、乱流と複雑な境界との相互作用が重要な役割を果たしている。乱流は、巨大自由度、多階層性、強間欠性、強非線形性をもった現象である。乱流現象の予測や理解には、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、実験では測定が困難な物理量までも測定誤差なく得ることができる直接数値計算(DNS)とそのデータ解析が強力な手段となってきた。乱流の自由度は、レイノルズ数(非線形性の強さを表す無次元パラメータ)の4分の9乗に比例して増大する。そのため、直接的に広いスケールにわたる乱流の多階層構造を捉えるDNSはスーパーコンピュータを駆使した大規模なものでなければならない。しかし、高速移動物体まわりの流れなどは、一般に複雑形状まわりの流れであるとともに、そのレイノルズ数が10の7乗~10の10乗程度である。そのような乱流のDNSの実現は、現在のスーパーコンピュータや予測しうる計算機の性能をもってしても不可能である。よって、そのような乱流現象を予測・解明するためには、数理・物理学的根拠を持った情報縮約手法(乱流モデル)の開発、及び複雑境界をとともなう高レイノルズ数乱流に対する乱流モデルの信頼性の評価が不可欠である。

様々な乱流に共通する性質である間欠性を利用した乱流モデルが、最も規範的な乱流である2次元、3次元の1様非圧縮性乱流に対して提案された(Farge et al. Phys. Fluids, 11, p2187, 1999; Farge et al. Phys. Fluids 15, p2886, 2003)。そのモデル化手法では、間欠的なデータの疎な表現に適したウェーブレット解析を用いて、もとの乱流場を少数自由度からなる秩序渦度場と、残りの大自由度の無秩序場に分解し(CVE手法)、得られた秩序渦度場とその近傍の無秩序場のみを時間発展させる(CVS手法)。CVS手法は、流れに合わせて場所ごとに格子の解像度を変化させる適合格子シミュレーションの一種である。

近年、Roussel & Schneiderらは、3次元弱圧縮性混合層の適合格子CVSを行い、CVSがDNSの20%程度のCPU時間・メモリでDNSの統計をよく再現することを示した(Roussel&Schneider, J. Comput. Phys., 229,p.2267, 2010)。

2. 研究の目的

本研究では、

- (1) 任意形状周りの非定常流れを計算できるアダプティブCVS手法を開発する。
- (2) CVS手法に有用な、乱流場の非等方な間欠性の定量化を行う。

3. 研究の方法

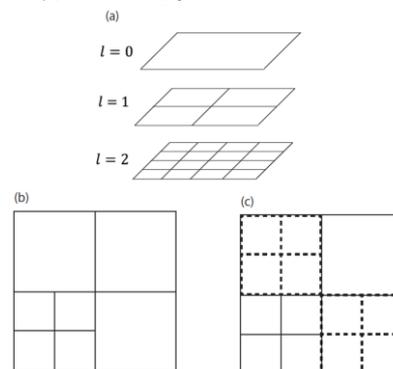
- (1) 任意形状周りの非定常流れを計算できるCVS手法を開発

複雑形状の取り扱いには、カルテシアン座標系で複雑形状を有する流れを計算できるVolume Penalization (VP)法を用いる。この手法の考えは、物体を浸透率 η をもつ多孔質媒体として考え、 η が0の極限で剛体を表現するというものである。この手法ではマスク関数 χ を用いて、物体領域と流体領域をそれぞれ1と0で表す。任意形状を扱うことができ、多数の物体を同時に扱うことも可能である。本研究では、弱圧縮の流れを扱うため、圧縮性流れに対して提案されたVP法(Boiron et al. Computers & Fluids, 38(3), 2009, 703-714)を用いる。Navier-Stokes方程式にペナライズ項ならびに外力項を加えて、1様なグリッドで計算する手法をここではPNSと呼ぶことにする。

CVSでは、各時刻で、流れ場をウェーブレット変換することで、秩序構造を抽出する。Roussel & Schneiderと同様に密度、運動量、エネルギーにウェーブレットフィルタリングを行う。ウェーブレット係数の大きさの大小を利用し、アダプティブメッシュを生成する。

PNS手法、CVS手法ともに、空間の離散化は有限体積法を用い、(2,4)MacCormack法を用いる。この離散化は時間的には2次精度、空間的には非線形項は4次、粘性項は2次精度となる。時間刻み dt は、Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)条件とペナライズ項と粘性項に起因する安定性の条件から決定する。陽的にペナライズ項を離散化した場合、 dt は η より小さくする必要がある。

CVS手法では、アダプティブメッシュを用いる。下図(a)のようなツリー構造をもった階層に対して、セルを取り除いたり加えたりすることで、下図(b)のようなアダプティブメッシュを得る。隣り合うメッシュサイズが異なるとき、下図(c)の破線で囲まれたメッシュを確保し、流れの計算に用いる。

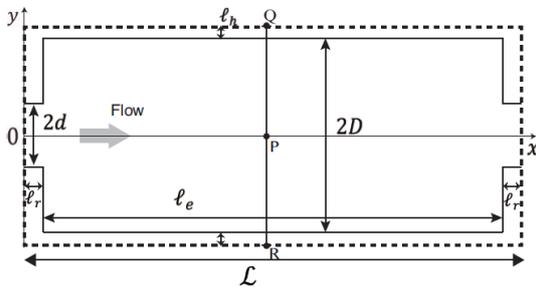


(2) CVS 手法に有用な、乱流場の非等方な間欠性の定量化

CVS 手法では、流れ場の間欠性を利用する手法である。流れ場の間欠性が高いほどウェーブレット手法はより効率的になり、実際、等方乱流においてレイノルズ数の増加と共に間欠性が増加していくと、ウェーブレット手法がより効率的になることが示されている (Okamoto et al. Phys. Fluids, 19, 115109, 2007)。流れ場が非等方な時、間欠性も非等方性を示すと考えられ、ここではその非等方な間欠性を定量化した。詳細は、文献①を参照されたい。

4. 研究成果

(1) 任意形状周りの非定常流れの CVS



本研究では、上図のような急拡大領域を持った 2 次元チャンネル流れを考える。この形状では、安定状態から、振動流へ分岐が観測される。長方形の破線が計算領域全体を表しており、実線が、固体領域と流体領域の境界を表している。水平方向、垂直方向ともに周期境界条件を用いる。マスク関数は、破線と実線で囲まれた領域で 1 をとり、流体領域では 0 とする。チャンネル形状は (i) 拡大率 $E=D/d$, (ii) アスペクト比 $A=l_e/(2D)$, (iii) 縮小領域の無次元長さ $s=l_r/d$ で決められる。 $E=3$, $A=7/3$, $s=1/2$ とした。物体領域の無次元幅は $l_h/d=3/10$ とした。流れを駆動するため、流れ方向の外力項は $F_x=2(1-\chi)/Re$ と与えた。ここで Re はレイノルズ数であり $Re=65$ とした。

まず CVS を $\eta=10^{-3}$ で行い、流れが時間的に周期的になるまで計算し、得られた場を以下に行う計算の初期場とした。PNS の解像度は 256^2 とし、CVS の最大格子点数も 256^2 とした。

PNS に対する η 依存性：十分な格子点があるとき、 η が小さくなるほど解はより正確になる。しかし、 η が小さくなるほど時間きざみに対する制約が厳しくなるため、CPU コストと解の正確さのバランスを考えた η のみつもりが重要である。

図 1 は点 P における流れ方向速度の時間依存性を示している。 $\eta=10^{-3}$, $\eta=10^{-4}$ は

よく重なっていることがわかる。一方、 $\eta=10^{-2}$ は時刻 10 付近からそれらとはずれていることがわかる。 $\eta=10^{-3}$ の PNS は、 $\eta=10^{-4}$ の PNS より 10 倍計算時間短いこと、 $\eta=10^{-3}$ の PNS と $\eta=10^{-4}$ はよく重なっていることを考慮し、 $\eta=10^{-3}$ を採用する。

図 1 下図は、ある時刻における流れ場の可視化を表している。Takaoka et al. (Phys. Fluids, 21 (2), 024105, 2009) と同様に波うった構造がみられる。

CVS 手法の評価：CVS では、各時刻で流れ場をウェーブレット変換し、係数の大きさがある閾値以上となるものを抽出し、その時間発展をとらえる。そのため、閾値の大きさが CVS の計算コストに直接的に関係する。図 2 は、点 P における流れ方向速度の時間依存性を、3 つの閾値に対して示している。比較のため PNS における値も示してあり、PNS, CVS 共に、 $\eta=10^{-3}$ の値が用いられている。CVS1 と CVS2 は、PNS の値をよく再現しているが、CVS3 は時刻 25 あたりから、PNS とのずれが大きくなっている。CVS2 の時刻 25 における可視化図を示す。PNS にみられる波状の構造が良く捉えられていることがわかる。表 1 は、PNS, CVS における計算コスト (CPU 時間・メモリ) ならびに相対誤差を示している。ここで、相対誤差は点 P における CVS と PNS の流れ方向速度を測定し、時刻 0 から 47.6 における相対誤差の最大値である。この表から、CVS1 と CVS2 が計算コストと流れの再現性を考慮すると良い選択であると考えられる。

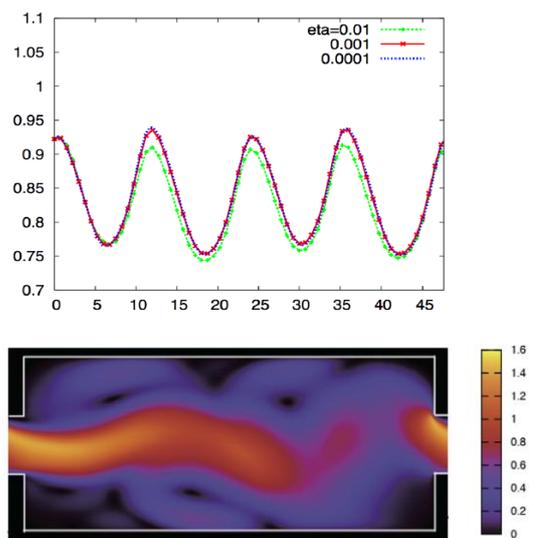


図 1：点 P における流れ方向速度の時間依存性を異なる 3 つの η に対し、プロットしている。下図は無次元時刻 25 における速度の大きさの可視化図 ($\eta=10^{-3}$) である。

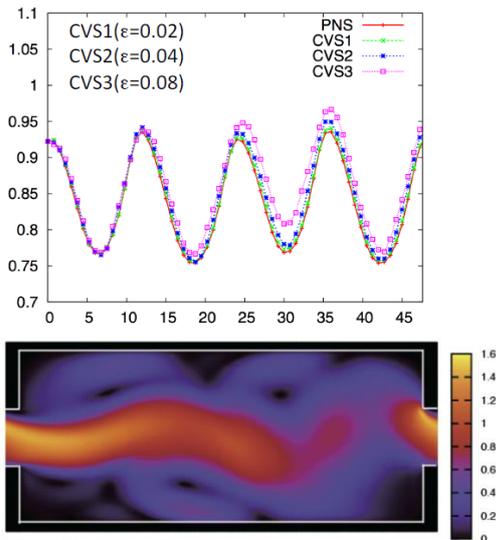


図2：点Pにおける流れ方向速度の時間依存性をCVSの異なる3つの閾値に対し、プロットしている。下図は無次元時刻25における速度の大きさの可視化図($\eta=10^{-3}$)である。

表1：PNSとCVSの計算コストの比較。

Method	CPU time	CPU (CVS/PNS)	Memory	Relative error
PNS	22 h 21 min	-	-	-
CVS1	5 h 3 min	22.6%	31.1%	1.1%
CVS2	4 h 2 min	18.0%	25.6%	2.7%
CVS3	3 h 13 min	14.4%	21.5%	6.5%

- (2) CVS手法に有用な、乱流場の非等方な間欠性の定量化
 一様磁場下の低磁気レイノルズ数電磁流体乱流に対し、以下の指標を導入した。

$$\Lambda_j^C \equiv \left\{ \frac{c_\alpha(k_j)}{c_E(k_j)} \right\}^2 = \frac{F[u_j^\perp] - 1}{F[u_j^\parallel] - 1}$$

この指標は、磁場の方向に沿う速度成分と、磁場の方向に垂直な速度成分の、ウェーブレットを利用して定義された各スケールにおけるフラットネスの比を表している。等方な場に対して、この指標は1となる。図3は、異なる磁場の強さ (Interaction parameter $N=0, 1, 2$) に対するこの指標をプロットしたものである。 $N=0$ の時、外部磁場はないため、指標は1を示している。 $N=1$ のときは、弱い非等方性を示しており、そのスケール依存性は弱い。一方 $N=2$ のときは、非等方性が強く、スケール依存性も大きいことがわかる。この結果は、CVS手法において、 N が大きくなるほど、より効率的になることを示唆している。文献①では、他の非等方性の指標も導入されている。

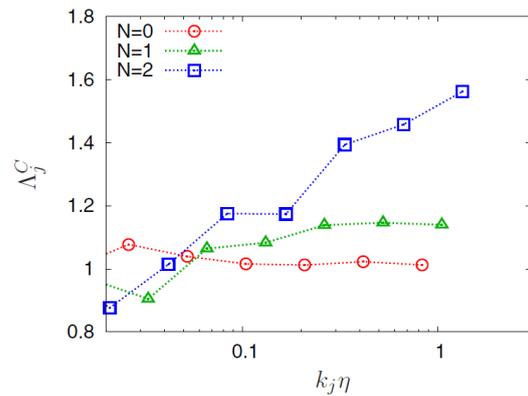


図3：非等方性の指標の N (磁場の強さ) 依存性。横軸はコルモゴロフスケールで無次元化された波数。

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 3 件)

- ① Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, Marie Farge, Small-scale anisotropic intermittency in magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds numbers, Physical Review E, 89(3), 033013, 2014
 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.033013
- ② K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kawahara, K. Schneider, M. Farge, Coherent Vorticity and Current Density Simulation of Magnetohydrodynamic Turbulence, 31st JSST Annual Conference JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, 184-189, 2012
http://www.jsst.jp/e/JSST2012/extended_abstract/pdf/9.pdf
- ③ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, Y. Kawahara, K. Schneider, M. Farge, Coherent vorticity and current density simulation of three-dimensional magnetohydrodynamic turbulence using orthogonal wavelets, Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 107, 73-92, 2012
 DOI:10.1080/03091929.2012.654790

[学会発表] (計 4 件)

- ① Naoya Okamoto, Margarete Domingues, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, Adaptive Wavelet Simulation for Weakly Compressible Flow Bounded by Solid Walls of Arbitrary Shape, 2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering, March 14-18,

- 2015, Salt Lake City (USA)
- ② N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge, Directional multi-scale statistics of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 11-15, 2013, Denver (USA)
 - ③ N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge, Directional multi-scale statistics of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence, Turbulence Colloquium Mediterranea, September 5-9, 2013, Sidi Bou Said (Tunisia)
 - ④ N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge and Y. Kaneda, Coherent vorticity simulation of three-dimensional forced homogeneous isotropic turbulence using orthogonal wavelets, 6th EUROPEAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING (ECCOMAS 2012), September 10-14, 2012, Vienna (Austria)

[その他]

ホームページ等

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

<http://scholar.google.com/citations?user=t8rhBqMAAAAJ&hl=en>

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