

## 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4月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360081

研究課題名（和文）自乗量保存形スキームとJFNK法による非線形流体連成問題の  
計算アルゴリズムの開発研究課題名（英文）Computational algorithm using secondary conservative scheme and  
JFNK method for nonlinear fluid interaction problems

研究代表者

森西 洋平（MORINISHI YOHEI）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40222351

研究成果の概要（和文）：

本研究では、自乗量保存形の移流項差分スキームと非線形問題の数値計算手法である JFNK 法を用い、流れが関与する非線形問題の数値計算アルゴリズムを構築した。具体的には、(1) 非圧縮性流体の非分離解法の構築、(2) 圧縮性流れに対する自乗量保存形差分スキームの構築、(3) 流体-構造連成問題に対応する移動格子の自乗量保存形差分スキームの構築、(4) コンパクト差分による非圧縮性流体の高次精度数値計算手法の構築、(5) 自乗量保存形差分と衝撃波捕獲法の混合スキームの構築、および(6) 非ニュートン流体での境界層乱流の数値計算手法の構築、を行なった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, numerical methods for non-linear fluid interaction problems were constructed based on the secondary conservative convection scheme and the JFNK (Jacobian-Free Newton-Krylov) method. Specifically, (1) the non-segregated numerical method for incompressible flows, (2) the secondary conservative finite-difference scheme for compressible flows, (3) the secondary conservative finite-difference convection scheme for moving grids, (4) the high-order accurate compact finite-difference scheme for incompressible flows, (5) the hybrid scheme of the shock capturing method and the secondary conservative finite-difference scheme, and (6) the numerical method for non-Newtonian fluid in turbulent boundary-layer flow, were constructed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、乱流の非定常数値シミュレーションに適した手法として自乗量保存形の移流項差分スキームを構築してきた。これは、輸送方程式の移流項が持つ解析的な性質、つまり移流項の型（発散型、勾配型、混合型）の互換性と自乗量保存特性を

離散的に満足するものである。また近年、非線形方程式の有望な数値計算手法として JFNK (Jacobi an-Free Newton-Krylov) 法が注目されるようになってきた。これらの手法を併せると、流体が関与する非線形連成問題、たとえば流体-構造連成問題、流体音響問題、あるいは抵抗低減非ニュートン流体、の高精

度数値計算アルゴリズムが構築できるのではないか、というアイデアが本研究開始当初の背景である。

## 2. 研究の目的

本研究課題の申請時における当初の研究目的は、自乗量保存形の移流項差分スキームおよびJFNK法を用い、流体-構造連成問題、流体音響解析、粘弾性流体、等に対する計算アルゴリズムを構築し、検証計算を通してこれら計算アルゴリズムの有効性を確認する事であった。

## 3. 研究の方法

本研究では、自乗量保存形の移流項差分スキームおよびJFNK法を用い、(1)非圧縮性流体の非分離解法の構築、(2)圧縮性流れに対する自乗量保存形差分スキーム、(3)流体-構造連成問題に対応する移動格子の自乗量保存形差分スキーム、(4)コンパクト差分による非圧縮性流体の高次精度数値計算手法、(5)自乗量保存形差分と衝撃波捕獲法の混合スキーム、および(6)非ニュートン流体での境界層乱流の数値計算手法、を構築し、検証計算を通してこれらの有効性を確認した。これらのうち、(1)はJFNK法の直接的な応用、(3)は流体-構造連成問題、(2)と(4)は流体音響問題、(6)は粘弾性流体、に関係したものである。(5)は圧縮性流れの計算アルゴリズムに関連し、当初の研究目的に追加して実施したものである。

## 4. 研究成果

本研究課題の成果について、上記「3. 研究の方法」に挙げた(1)~(6)の項目を以下順番に説明する。また、これら以外の関連研究を(7)その他に示す。

### (1)非圧縮性流体の非分離解法の構築

時間および空間に関する完全離散式の自乗量保存形差分を用い、非圧縮性流れの非分離解法を開発した。その際に現れる非線形連立方程式の解法にはJFNK法を導入した。JFNK法に使用されるクリロフ部分空間反復解法にはGMRES(m)法を採用しているが、大規模問題に対しては前処理の導入が必須であるので、フレキシブル前処理(FLP)、従来の物理的前処理(SLP)、および本研究で提案する物理的前処理(DASLP)を示し検討した。検証計算としてまず平板チャネル乱流のDNSを取り上げ、検討した前処理の中では本研究で提案したDASLPが最も有効である事を確認した。次に、時間刻み幅を変化させて数値計算を実

施し、完全離散式の自乗量保存形差分を使用すれば非線形連立方程式の解が収束する限り大きな時間刻み幅による計算が安定に実施可能である事を示した。その際、乱流統計量をより正確に再現するためには時間刻み幅をコルモゴロフ時間スケール以下に設定する必要のある事も示した。さらに、一般には数値的な時間刻み幅の制限が物理的なものよりも厳しくなる例としてバックステップ乱流のDNSを取り上げ、このような場合には特に本研究で提案した数値計算手法が有効な事を示した。以上の研究成果は、日本機械学会論文集(雑誌論文リストの1)、また第24回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの8)にて発表している。

### (2)圧縮性流れに対する自乗量保存形差分スキーム

圧縮性流れの支配方程式に対する時間および空間に関する完全離散式の自乗量保存形差分スキームを構築した。構築された差分スキームでは、時間項を含めて移流項の型、つまり発散型、勾配型、および混合型が定義されており、質量保存則が離散に満足されればこれらは互換で、発散型が先天的に保存形、混合型が先天的に自乗量保存形である。このような型の互換性と保存特性を離散的に満足する移流項差分スキームは、密度平方根の重み付き時間方向補間を導入することで構成された。3次元周期的非粘性流の数値計算から、型の互換性と保存特性は非線形離散システム方程式の解が収束する限り、計算機の丸め誤差のオーダーで満足される事が確認された。さらに、圧縮性等方減衰乱流のDNSから、提案された差分スキームの粘性流に対する有効性も確認された。以上の研究成果は、J. Comput. Phys. 誌(論文リストの4)および日本機械学会論文集(雑誌論文リストの2)、また第24回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの5)およびASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conf. 2011(学会発表リストの10)にて発表している。

### (3)流体-構造連成問題に対応する移動格子の自乗量保存形差分スキーム

本研究では、これまで固定格子に限定されてきた圧縮性流れおよび非圧縮性流れに対する自乗量保存形移流項差分スキームを移動格子へ拡張した。まず、圧縮性および非圧縮性流れともに、移動格子の効果をヤコビアンと相対反変速度成分に反映させて、時間微分項を含めて移流項を適切に定義すれば、固

定格子の場合と同様に移動格子の場合でも移流項の型の互換性が成立し、自乗量保存特性が満足される事を示した。特に非圧縮性流れに対しては、質量保存則に加えて GCL (Geometric Conservation Law, 幾何学的保存則) のうちの体積保存則の成立が型の互換性と自乗量保存特性の必須条件となる事も示した。次に、圧縮性流れに対して、3次元写像法を導入して半離散式(空間離散式)および完全離散式(時間空間離散式)に対する移動格子の自乗量保存形差分スキームを構築した。検証計算の波動格子問題では移流項差分スキームの型の互換性が離散的に成立している事を定量的に示した。ピストン問題の検証計算では、衝撃波捕獲法との混合スキームによって移動格子の自乗量保存形差分スキームが超音速圧縮性流れへも拡張できる事を示した。役割についても明らかにした。さらに、検証計算として波動格子問題、ピストン問題、振動角柱周り流れ、の数値計算を実施した。さらに、非圧縮性流れに対しては、完全離散式に対する直角移動格子の自乗量保存形差分スキームを構築した。振動角柱周り流れの数値計算では、Keulegan-Carpenter数に対する流体反力係数の変化を調べ、対応する実験結果と定量的に一致する事を確認した。以上の研究成果は、日本機械学会論文集(雑誌論文リストの8)、また第23回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの1)、第24回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの6)、および第25回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの12)と13)にて発表している。

#### (4)コンパクト差分による非圧縮性流体の高次精度数値計算手法

本研究では、コンパクト差分による非圧縮性流れの高次精度数値計算アルゴリズムを構築した。まず、3次元周期的非粘性流の数値計算を実施し、離散化手法にコンパクト差分を用いる場合について、圧力ポアソン方程式に対する有効なソルバーの検討および有効な移流項の型の選択を行なった。CPU時間の測定等により、コンパクト差分で離散化された圧力ポアソン方程式のソルバーとしては、検討したものの中で2次精度通常差分によるADI前処理付きBi-CGSTAB法が最も有効である事を示した。また、コンパクト差分を用いた場合、非粘性においても長時間の時間積分が可能な移流項の型は解析的に自乗量保存形を与える混合型のみである事も示した。次に、平行平板間チャンネル乱流についてSGSモデルを使用しない数値計算を実施し、

コンパクト差分の精度および格子解像度が計算結果に及ぼす影響を調べた。差分精度を向上させると、平均速度分布および主流方向乱流強度のピーク値がスペクトル法の結果に漸近し、コンパクト差分による高精度化の効果が確認された。また、コロケート格子のコンパクト差分はスタガード格子のものよりも概ね2次精度低い計算結果を与える事、打ち切り誤差および高波数打ち切りの効果が通常差分の場合と同様に表れる事も示した。さらに、いくつかの渦粘性型SGSモデルを用いて平行平板間チャンネル乱流のLESを事項し、DNSデータとの比較検討を行なった。以上の研究成果は、日本機械学会論文集(雑誌論文リストの6)、また第23回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの3)にて発表している。

#### (5)自乗量保存形差分と衝撃波捕獲法の混合スキーム

本研究では、圧縮性流れに対する自乗量保存形差分スキームを衝撃波捕獲法と混合し、衝撃波捕獲と低数値拡散性を両立する計算手法の構築に取り組んだ。自乗量保存形差分スキームにFDS法あるいはFVS法による数値拡散を加えるタイプの混合スキームでは、不連続面での数値振動が完全には抑えられなかった。これは中心差分項と数値拡散項との間で飛びの量の差異が生じるためである。自乗量保存形差分スキームの数値流束とFDS法、FVS法、あるいはSHUSの数値流束を加えるタイプの混合スキームでは、衝撃波での数値振動が完全に抑制された。一方、移流項自身を混合するタイプの混合スキームは保存特性が崩される結果となった。また、渦-衝撃波干渉問題の検証計算では、本研究で構築した全ての混合スキームが不連続部以外での低数値散逸性に優れていることが確認された。以上の検証計算の結果から、不連続面の捕獲と不連続部以外での低数値拡散性を両立する手法として、自乗量保存形差分の数値流束とFDS法、FVS法、あるいはSHUSの数値流束を混合するタイプの混合スキームを推奨している。以上の研究成果は、日本機械学会論文集(雑誌論文リストの5)、第8回日本流体力学学会中部支部講演会(学会発表リストの4)、第24回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの9)、および第25回数値流体力学シンポジウム(学会発表リストの12)と15)にて発表している。

#### (6)非ニュートン流体での境界層乱流の数値計算手法

自乗量保存形の2次精度移流項差分スキームを基に粘弾性流体の境界層流れの計算アルゴリズムを構築した。速度と圧力はスタガード格子の配置で、粘弾性応力はセル中心に配置している。流れ場の計算アルゴリズムは非圧縮性流れに対する半陰的フラクショナルステップ法であり、境界層のより現実的な境界条件として流入部にリサイクル法、流出部に対流流出条件を課している。粘弾性応力のモデルとしては、Oldroyd-Bモデル、FENE-Pモデル、およびGiesekusモデルを導入している。粘弾性応力の境界条件は、速度の境界条件を満足させた構成方程式を直接解くことにより与えた。非ニュートン流体の緩和時間特性を表わすワイゼンベルグ数が異なるゼロ圧力勾配境界層のDNSを実施し、粘弾性流体による抵抗低減効果および乱流統計量の変化を定量的に調べた。その結果、構成方程式モデルに基づくDNSにより、実験結果（ポリマー、非イオン性界面活性剤）の定性的な挙動の再現が可能であることを示した。また、ポリマー（界面活性剤ミセル）の伸長とDRの流れ方向分布は反相関すること、ならびにそれらが上流で引き伸ばされると下流においてDRを維持するのに粘弾性応力は必ずしも必要でないことが明らかになった。以上の研究成果は、Phys. Fluids誌（雑誌論文リストの3）、J. Fluid Mech.誌（雑誌論文リストの7）、およびASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conf. 2011（学会発表リストの11）にて発表している。

#### (7)その他

非圧縮性流体の自乗量保存形差分スキームの円筒座標系への拡張について、第24回数値流体力学シンポジウム（学会発表リストの7）および第25回数値流体力学シンポジウム（学会発表リストの14）にて発表している。また、自乗量保存形差分スキームの混相流への拡張の試みについて、第23回数値流体力学シンポジウム（学会発表リストの2）および第25回数値流体力学シンポジウム（学会発表リストの17）にて発表している。また、上記(2)と(4)の応用問題として、流体音の数値解析を第25回数値流体力学シンポジウム（学会発表リストの16）にて発表している。

#### 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) 森西洋平, 福井岳人, 完全保存形差分スキームとJFNK法による非圧縮性流れの非分離解法, 日本機械学会論文集B編, 査読有り, 75巻759号 (2009.11), pp.2163-2172.
- 2) 森西洋平, 低マッハ数圧縮性流れの非定常数値計算に対する完全保存形差分スキーム, 日本機械学会論文集B編, 査読有り, 75巻759号 (2009.11), pp.2153-2162.
- 3) S. Tamano, M. Itoh, S. Hotta, K. Yokota, Y. Morinishi, Effect of rheological properties on drag reduction in turbulent boundary layer flow, Physics of Fluids, 査読有り, Vol.21 (2009), No.055101, pp.1-12.
- 4) Y. Morinishi, Skew-Symmetric Form of Convective Terms and Fully Conservative Finite Difference Schemes for Variable Density Low-Mach Number Flows, J. Comput. Phys., 査読有り, Vol.229 (2010.01), pp.276-300.
- 5) 森西洋平, 小林直樹, 古賀和樹, 自乗量保存形差分と衝撃波捕獲法の混合スキーム, 日本機械学会論文集B編, 査読有り, 77巻781号 (2011.09), pp.1715-1730.
- 6) 森西洋平, 八巻真人, 小幡鷹政, 武市康太, コンパクト差分による非圧縮性流れの数値計算手法とLES, 日本機械学会論文集B編, 査読有り, 77巻781号 (2011.09), pp.1731-1746.
- 7) S. Tamano, M.D. Graham, Y. Morinishi, Streamwise Variation of Turbulent Dynamics in Boundary Layer Flow of Drag-reducing Fluid, J. Fluid Mech., 査読有り, Vol.686 (2011.11), pp.352-377.
- 8) 森西洋平, 沼田将成, 小林直樹, 古賀和樹, 移動格子に対する自乗量保存形差分スキーム, 日本機械学会論文集B編, 査読有り, 78巻785号 (2012.01), pp.1-16.

〔学会発表〕（計17件）

- 1) 加藤孝明, 森西洋平, 移動格子に対する自乗量保存形差分スキームを用いた回転系振動格子乱流の数値解析, 第23回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(仙台, 2009.12.16), p10 (CD版A2-3).
- 2) 古庄康裕, 松並弘, 森西洋平, 動的接触角を考慮した気液混相流の数値解析, 第23回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(仙台, 2009.12.17), p93 (CD版A5-5).
- 3) 八巻真人, 森西洋平, コンパクト差分を用いた平行平板間非圧縮性乱流のLES, 第23回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(仙台, 2009.12.17), p140 (CD版)

- E5-2).
- 4) 小林直樹, 森西洋平, 衝撃波捕獲法と自乗量保存形差分の混合スキームの開発, 第8回日本流体力学学会中部支部講演会講演論文集(岐阜, 2010.11.19), p.13.
  - 5) 武市康太, 森西洋平, 混合型移流項を用いたコンパクト差分による圧縮性流れのLES, 第24回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(横浜, 2010.12.22), 講演D9-4 (USB版).
  - 6) 夏野匡哲, 森西洋平, 振動格子乱流における回転の効果, 第24回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(横浜, 2010.12.22), 講演C10-2 (USB版).
  - 7) 山田晋裕, 森西洋平, 差分法による流れ解析における円筒座標の極の取り扱いの再考, 第24回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(横浜, 2010.12.22), 講演D12-1 (USB版).
  - 8) 福井岳人, 森西洋平, 完全保存形差分スキームを用いた純粋ポアズイユおよび純粋クエット型バックステップ乱流のDNS, 第24回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(横浜, 2010.12.22), 講演D12-2 (USB版).
  - 9) 小林直樹, 古賀和樹, 森西洋平, 圧縮性流れに対する修正 Steger-Warming 法と自乗量保存形差分の混合スキーム, 第24回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(横浜, 2010.12.22), 講演D12-4 (USB版).
  - 10) K. Takeichi, S. Tamano, Y. Morinishi, A stable compact finite difference method with skew-symmetric form for LES of variable density flows, 6th Symposium on DNS, LES and Hybrid RANS/LES Methods, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, (Hamamatsu, 2011.07.26), JK2011-02008, (USB版, 8 pages).
  - 11) S. Tamano, M. D. Graham, Y. Morinishi, Streamwise variations in turbulence statistics in drag-reducing turbulent boundary layer of viscoelastic fluids, 2nd International Symposium on Turbulent Flows: Issues and Perspectives, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, (Hamamatsu, 2011.07.26), JK2011-25001, (USB版, 11 pages).
  - 12) 古賀和樹, 玉野真司, 森西洋平, 移動格子に対する自乗量保存形差分と衝撃波捕獲法の混合スキーム, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.19), 講演C01-5 (USB版).
  - 13) 夏野匡哲, 劉治翔, 玉野真司, 森西洋平, 回転系振動格子乱流の流れ場解析, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.19), 講演B02-2 (USB版).
  - 14) 山田晋裕, 玉野真司, 森西洋平, 直円管内旋回乱流の数値解析, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.19), 講演B02-3 (USB版).
  - 15) 森西洋平, 非圧縮性CFDに対する wigglesensor について, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.19), 講演C02-5 (USB版).
  - 16) 武市康太, 棚橋亮介, 玉野真司, 森西洋平, 混合型移流項をコンパクト差分を用いた流体音の数値解析, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.20), 講演A07-4 (USB版).
  - 17) 山本恭平, 武田謙太郎, 玉野真司, 森西洋平, 自乗量保存形差分スキームを用いた気液混相流の数値解析, 第25回数値流体力学シンポジウム講演要旨集(大阪, 2011.12.21), 講演A11-4 (USB版).
- [その他]  
ホームページ等  
<http://morinishi.mech.nitech.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
森西洋平 (MORINISHI YOHEI)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40222351
  - (2) 研究分担者  
玉野真司 (TAMANO SHINJI)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40345947