

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560159

研究課題名(和文) 圧縮・非圧縮性統合流動シミュレータ開発に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on unified flow simulator of compressible and incompressible flows

研究代表者

西田 秀利 (NISHIDA HIDETOSHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：40164561

研究成果の概要(和文)：本研究においては現在別個の取扱いがなされている非圧縮性流れと圧縮性流れとを一括して解析可能な統合流動シミュレータ開発に向けた基礎的な数値計算法の構築および評価を目的としている。簡便性と汎用性を念頭にデカルト座標ベースの新たなスキームを開発し、その評価を行った結果、粘性流・非粘性流に関わらず一つの手法で非圧縮性から圧縮性まで解析可能であることが実証され、圧縮・非圧縮性統合流動シミュレータの開発が可能であるとの結論を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, the fundamental scheme for developing an unified flow simulator of compressible and incompressible flows is constructed and validated. A new method based upon the Cartesian grid is proposed and applied to some typical flow simulations. As a result, the present scheme can be computed from incompressible flow to compressible flow. Then, it is concluded that the unified flow simulator of compressible and incompressible flows will be developed successfully by using the present scheme.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：計算流体力学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 流体工学

キーワード：圧縮非圧縮性統合スキーム、数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年のコンピュータの目覚ましい進展により、今日では計算流体力学(CFD)は流動現象解析の一方法論として認知され、機器設計ツールとしても組み込まれるようになってきている。このようなCFDの進展により、様々な流動現象が解析されている。周知のように流動現象には圧縮性流動と非圧縮性流動があり、それぞれ圧縮性ナビエ・ストークス方程式および非圧縮性ナビエ・ストークス方

式により支配されている。そのために、例えば図1に示すような航空機の離陸・巡航・着陸を連続的に解析する場合、代表マッハ数が増加することにより非圧縮性流れから圧縮性流れそして再度非圧縮性流れへと変化することになる。その結果、計算スキームが基本的に異なる2種類の方程式系を解く必要があると考えられる。そこで、マッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合流動解析スキ

ムの構築・開発が望まれている。しかしながら、通常は圧縮性方程式においてマッハ数をゼロに漸近させると硬直性問題のために計算不能となることが知られている。近年、一様マッハ数圧力補正法 (Mach-uniform pressure-correction) が Wesselingらによって提案された。この手法は従来の圧縮性方程式の無次元化ではなく非圧縮性方程式で用いられている圧力差を用いて行ったものであり、その結果桁落ちによる情報の欠落を防止している。しかし、Wesselingらの手法は非圧縮性流動解析において良く用いられる食い違い格子 (Staggered grid) において定式化されており、さらに、粘性流 (ナビエ・ストークス方程式) への展開もほとんど為されていない。

(2) 本研究においては、圧縮性・非圧縮性流動解析共に広く採用されているコロケーション格子系において、この一様マッハ数圧力補正法を定式化し、非粘性流方程式であるオイラー方程式のみならず粘性流方程式であるナビエ・ストークス方程式への拡張を実施する。コロケーション格子系での統合ナビエ・ストークス解析スキームにより、実用に供しうる流動解析シミュレータを開発することが可能となる。本研究のような圧縮・非圧縮性統合スキームに関する研究は国内外問わず前述の Wesseling らのグループと研究代表者のみであると言っても過言ではない。研究代表者は従来、圧縮性および非圧縮性流動解析スキームに関する研究を行っており、スキーム開発に関して経験と実績を有しており、国際会議において関連の発表を傍聴した際に統合流動シミュレータ開発の着想を得たものである。

## 2. 研究の目的

(1) 研究の全体構想は、圧縮性のみならず非圧縮性流動現象をも統一して解析する「マッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合流動解析スキーム」を構築し、実際に圧縮性流れから非圧縮性流れまで代表マッハ数が時々刻々変化するような流動現象の数値シミュレーションを構築したスキームによって実施し、その信頼性・計算効率等を評価することにより、実用に供しうる「圧縮・非圧縮性統合流動シミュレータ」の開発を行うことである。

(2) この中で本研究の目的は統合流動シミュレータ開発に関する基礎的研究、すなわち、コロケーション格子系におけるマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合流動解析スキームの構築・評価および高次精度化ならびにデカルト座標ベース境界適合手法の実装の3点である。

## 3. 研究の方法

(1) オイラー方程式に対するマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームの構築・評価：コロケーション格子系での統合スキームの構築を行い、2次元および3次元の基本的な曲線座標系における検証問題に対してシミュレーションを実施し、定性的・定量的に本統合スキームの検証を行う。

(2) ナビエ・ストークス方程式に対するマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームの構築・評価：オイラー方程式の場合と同様に2次元および3次元の基本的な問題に対して、特に、マッハ数がゼロ (非圧縮性流) から1を超える超音速流まで同一方程式・同一スキームによって解析可能か否かについて定性的・定量的に検証を行う。

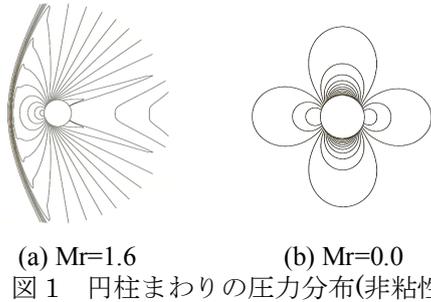
(3) 構築したマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームに対する高次精度化：(1)および(2)において構築した(主としてナビエ・ストークス方程式)統合スキームの高次精度化を実施し、シミュレーション対象として高次精度が要求される乱流現象の直接数値シミュレーション(DNS)およびラージ・エディ・シミュレーション(LES)を取り上げ、従来の結果(例えば、スペクトル法や高次精度差分法により得られた結果)と比較することにより、本手法の高次精度化の評価を行う。

(4) デカルト座標系ベース境界適合アプローチの実装：(1)および(2)で構築したスキームは複雑形状を取り扱う場合に都合が良いように一般曲線座標系において定式化される。しかしながら、今日実際に要求される解析対象はより複雑なものとなるために、解析に必要な計算格子の形成に多大な時間・労力を要する。そこで、計算格子にデカルト座標を用いることにより、計算格子形成を簡素化し、しかも複雑な境界に適合したアプローチを採用することでより汎用性・計算効率を高めることが可能であると考えられる。従って、「統合流動シミュレータ開発」を見据え、構築した統合スキームにデカルト座標系ベース境界適合アプローチを実装し、(1)および(2)において実施した一般曲線座標系の結果と定性的・定量的に比較することにより「デカルト座標系ベース境界適合統合流動解析スキーム」の完成を目指す。

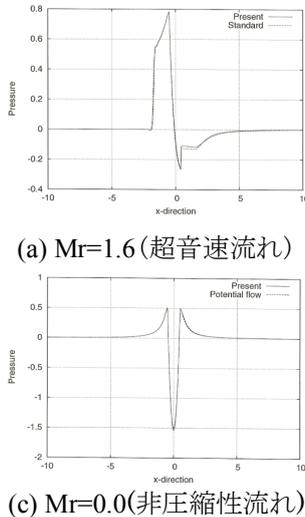
## 4. 研究成果

(1) オイラー方程式に対するマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームの構築・評価：円柱まわりの非粘性流に対してマッハ数1.6の超音速流れから亜音速流れ、さらにマッハ数0の非圧縮性流れまでのシミュレー

シミュレーションを実施した結果、超音速流れから非圧縮性流れまでシミュレーションが可能である事が実証された(図 1). また、定量的にも従来の手法を用いた数値解と遜色の無い結果を得ることができている(図 2). さらに、圧縮性方程式で問題となる硬直性による時間刻み幅の制限も回避できることが判明した(表 1).



(a)  $Mr=1.6$  (b)  $Mr=0.0$   
図 1 円柱まわりの圧力分布(非粘性)



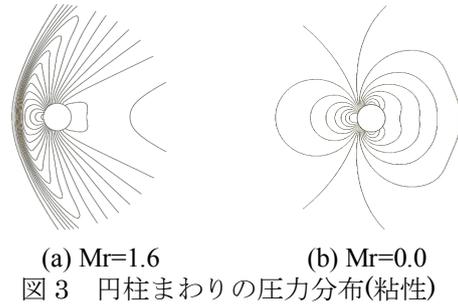
(a)  $Mr=2.0$ (超音速流れ) (b)  $Mr=1.6$ (超音速流れ) (c)  $Mr=0.0$ (非圧縮性流れ)  
図 2 中心線上圧力分布の比較

表 1 計算可能最大時間刻み幅の比較

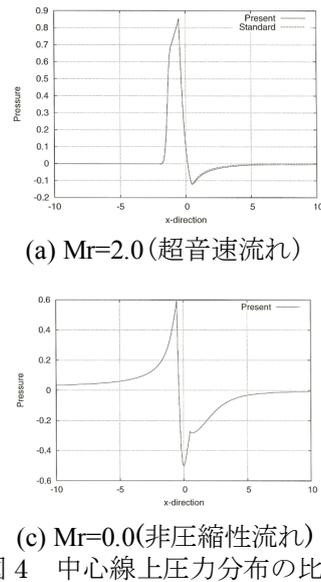
Mach number	present	standard
0.0	$6.9 \times 10^{-4}$	N/A
0.01	$9.3 \times 10^{-4}$	$8.7 \times 10^{-6}$
0.7	$5.6 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$
1.6	$7.4 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-4}$

(2) ナビエ・ストークス方程式に対するマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームの構築・評価：円柱まわりの粘性流に対してマッハ数 2.0 の超音速流れから亜音速流れ、さらにマッハ数 0 の非圧縮性流れまでのシミュレーションを実施した結果、レイノルズ数 40、プラントル数 1.0、比熱比 1.4 の条件で超音速流れから非圧縮性流れまでシミュレーションが可能であることが実証された(図 3). また、定量的にも従来の手法を用いた数値解と遜色の無い結果を得ることができている(図 4). さらに、オイラー方程式の場合

と同様に圧縮性方程式で問題となる硬直性による時間刻み幅の制限も回避できることが判明した(表 2).



(a)  $Mr=1.6$  (b)  $Mr=0.0$   
図 3 円柱まわりの圧力分布(粘性)



(a)  $Mr=2.0$ (超音速流れ) (b)  $Mr=0.0$ (非圧縮性流れ)  
図 4 中心線上圧力分布の比較

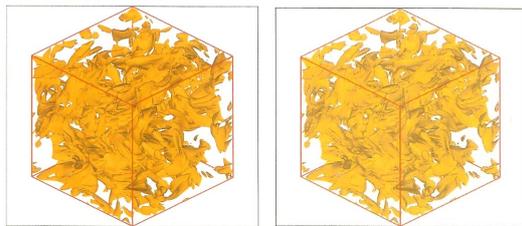
表 2 計算可能最大時間刻み幅の比較

Mach number	present	standard
0.0	$1.98 \times 10^{-3}$	N/A
0.01	$1.98 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-5}$
0.2	$1.98 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4}$
2.0	$3.90 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$

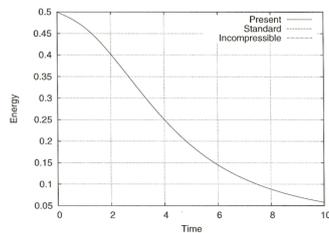
3次元への拡張に関しては、3次元円柱まわりの流れのシミュレーションを実施し、比較解が数多く存在する非圧縮性流れにおいて検証を行った結果、定性的および定量的に他者の数値解と一致することを確認した。一方、粘性流れにおいてはマッハ数 0 の極限においても圧力方程式中に温度項(温度の微分項)が残る問題に関しては、定量的に非圧縮性条件の満足度に対して検討を行った。その結果、従来の手法と同程度連続の式を満足することが判明し、マッハ数の 2 乗程度影響を及ぼすことが認められた。

(3) 構築したマッハ数に依存しない圧縮・非圧縮性統合スキームに対する高次精度化：高次精度化として、空間微分に関して移流項に

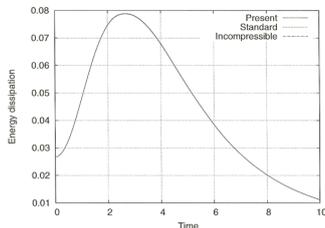
は補間型修正微分求積法を粘性項には修正微分求積法を採用することにより物理量の非物理的振動の発生を回避することに成功した。計算対象として一様等方性乱流を取り上げ、高次精度化の検討を実施した。最初に、空間精度を 10 次、レイノルズ数を 222、マッハ数を 0.01、格子解像度を  $128^3$  とした際の DNS を行った結果を非圧縮性方程式の数値解(空間 10 次精度)と比較し、流れ場(図 5)のみならず乱流統計量(図 6)に関しても同等の結果を得ることに成功した。



(a) 本手法 (b) 非圧縮性  
図 5 速度勾配テンソル第二不変量(DNS)



(a) 全エネルギー



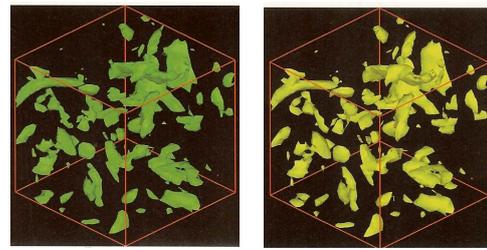
(b) エネルギー散逸率

図 6 乱流統計量の比較(DNS)

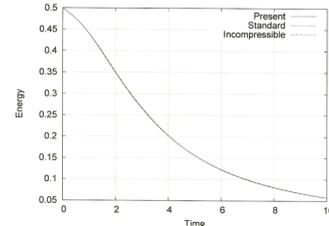
次に、Smagorinsky モデルを用いた LES を格子解像度のみを  $32^3$  に低下させて実施した。本計算スキームによる結果は流れ場全体は非圧縮性方程式による LES 結果を再現していることが認められるが(図 7)、全エネルギーを除く高次の統計量は乱流の発達過程において若干異なることが認められた(図 8)。

また、計算効率の面からは、DNS、LES 共に本計算スキームの計算可能な最大時間刻み幅が非圧縮性方程式と同等であり、従来の圧縮性方程式の最大時間刻み幅と比較して 50~60 倍緩和されていることが判明した。

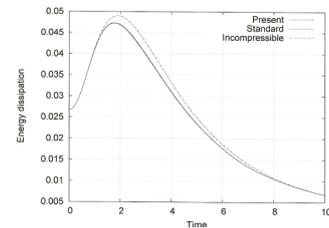
(4) デカルト座標系ベース境界適合アプローチの実装: デカルト座標系で複雑な局率を有する流れ場を解析可能な研究代表者が考案



(a) 本手法 (b) 非圧縮性  
図 7 速度勾配テンソル第二不変量(LES)



(a) 全エネルギー

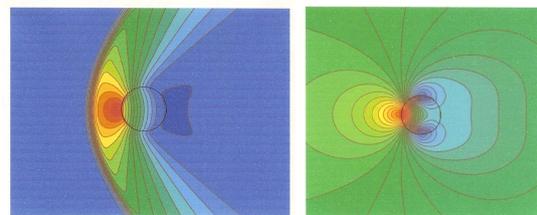


(b) エネルギー散逸率

図 8 乱流統計量の比較(LES)

した非圧縮性方程式に対するシームレス仮想境界法を一様マッハ数圧力補正法に組み込むことにより、デカルト座標系ベースの圧縮・非圧縮性統合流動解析スキームの構築を試みた。シームレス仮想境界法を圧縮性方程式に適用する際には、連続の式に対する付加質量項を評価する必要があり、代表的な円柱まわりの流れ(レイノルズ数 40)に対してシミュレーションを実施した。その結果、超音速流れから非圧縮性流れまでデカルト座標ベースで解析可能であることを実証した(図 9)。

3次元への拡張に関してもシミュレーションを実施し、その一例を図 10 に示す。



(a)  $Mr=2.0$

(b)  $Mr=0.0$

図 9 円柱まわりの圧力分布( $Re=40$ , シームレス仮想境界法)

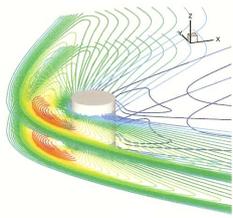


図 10 3次元円柱まわりの超音速流れ

最後に、非圧縮性から圧縮性流れへ時間と共にマッハ数に変化するような非圧縮性・圧縮性統合シミュレーションをデカルト座標系ベーススキームにおいて試みた。マッハ数を 0.01 から 0.8 まで、すなわち、飛行機における離陸から巡航状態を模擬したものに相当する。図 11 にその圧力分布を示す。非圧縮性流れから徐々に圧縮性の効果が支配的になっている様子が観察される。

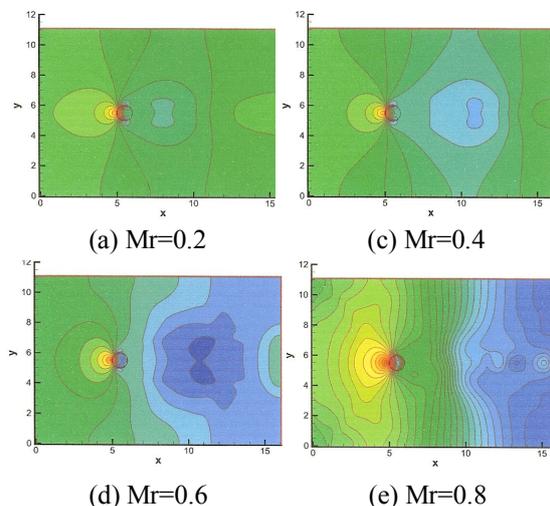


図 11 非圧縮性圧縮性統合シミュレーション

以上より、一様マッハ数圧力補正法とシームレス仮想境界法とを組み合わせたデカルト座標系ベースの非圧縮性・圧縮性統合流動解析スキームは、簡便性と汎用性を兼ね備えた将来的に有望な数値計算手法であり、非圧縮性・圧縮性統合流動シミュレータの開発が可能であるとの結論を得た。

## 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 6 件)

- ① H.Nishida, Seamless virtual boundary method for complicated incompressible flow simulation, Proc. ICCFD6, 査読有, 1-6 (2010).
- ② 西田秀利, 田尻恭平, 熱流動を伴う非圧縮性流れ解析に対するシームレス仮想境界法, 日本機械学会論文集(B), 査読有, Vol. 76,

No. 765, 741-746, (2010).

③ H.Nishida, Progress of current seamless virtual boundary method, Proc. Parallel CFD 2010, 査読有, 1-5, (2010).

④ H.Nishida and A.Tanaka, Curvilinear seamless virtual boundary method for incompressible flow analysis, Proc. the 2nd Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 査読有, 129-134, (2009).

⑤ H.Nishida and K Tajiri, Numerical simulation of incompressible flows around a fish model at low Reynolds number using seamless virtual boundary method, J. Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.4, No.3, 500-511, (2009).

⑥ H.Nishida and N.Ichikawa, Effective parallel computation of incompressible turbulent flows on non-uniform grid, Proc. Parallel CFD 2008, 査読有, 1-4, (2008).

[学会発表] (計 4 件)

① 明珍賢治, 西田秀利, シームレス仮想境界格子ボルツマン法による非圧縮性流れの数値シミュレーション, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010 年 12 月 21 日, 慶應義塾大学日吉キャンパス.

② 山田高大, 田中満, 西田秀利, シームレス仮想境界法を用いた圧縮性・非圧縮性統合シミュレーションに関する研究, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 18 日, 仙台市民会館.

③ 田尻恭平, 西田秀利, シームレス仮想境界法による熱を含む非圧縮性流れの数値計算, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008 年 12 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

④ 田中貴巳, 西田秀利, 境界適合格子上におけるシームレス仮想境界法を用いた非圧縮性流体解析に関する研究, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008 年 12 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

[その他]

ホームページ等

[http://www.fe.mech.kit.ac.jp/cfdlab/nishida/index\\_j.html](http://www.fe.mech.kit.ac.jp/cfdlab/nishida/index_j.html)

(京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 機械システム工学専攻 計算工学研究室 HP)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 秀利 (NISHIDA HIDETOSHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授  
研究者番号：40164561

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：