やまぐち　よしひろ
氏　名　山口義博

授与学位　博士（工学）
学位授与年月日　平成16年9月8日
学位授与の根拠法規　学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称　東北大学大学院工学研究科（博士課程）航空宇宙工学専攻

学位論文題目　**Predictions of Flow Separations by Compressible-Incompressible Unified Scheme**
（非圧縮性・圧縮性統一解法による剥離流れの予測）

指導教官　東北大学教授　中橋　和博
論文審査委員　主査　東北大学教授　澤田　恵介　　東北大学教授　大林　茂
東北大学助教授　松島　紀佐　　（情報科学研究科）

論文内容要旨

Chapter. 1

本章では，先ず非圧縮性・圧縮性統一解法の必要性を述べる．これまでの動向調査と剥離流れ解析への有用性を考察した上で，本研究における統一解法への必要要件を示し，開発への指針を述べる．

数値流体力学による解析手法は，すでに実用上不可欠なツールとなっている．しかしながら，エンジン全体の解析のような低速から高速までの流れ，後流や衝撃波と境界層との干渉，化学変化，相変化等を伴う現象を一つのコードで解くことはいまだ困難である．実験においては，通常，現象を解析するのは要素単位となり，全体の実動作現象を一度に解析するのは困難なことである．計算機環境の充実に伴い，数値計算においては，計算手法が整えば，より実用動作に近い解析を可能とするため、高精度かつ高信頼性の開発が可能となる．しかしながら，近似リーマン解法に代表される，圧縮性ナビエ・ストークス方程式への解法は，低マッハ数限界と呼ばれるマッハ数がおよそ0．1より遅い流体が支配的な流れの解析に対し，解への信頼性が低くなる．これは支配方程式の流速と音速の差が大きくなることによる，固有値行列のStiff化により生じるものである．

統一解法とは，圧縮性の支配方程式が低圧縮性の解析において生じる，低マッハ数限界を回避する手法で，大きくは2つに分類される．一つは密度ベースと呼ばれる，近似リーマン解法に前処理行列をほどこしたもの．もう一つは圧力ベースと呼ばれる非圧縮性解法の考え方を取り入れたものである．また，比較的新しい手法として，オイラー方程式の低マッハ数での漸近解析に基づく手法なども提案されている．密度ベースの手法は，パラメータへの依存性が課題として取り上げられている．一方，圧力ベースの手法は，衝撃波の捕獲精度や空間解像度等に課題が残されている．

本研究では，必ずしもCFDに精通していない技術者による利用や，多原理解析のベースコードとしての拡張性を考慮し，パラメータの依存性の無い，シンプルな新しい統一解法の提案を目的とする．

Chapter. 2

本章では，新しく提案する非圧縮性・圧縮性統一解法の構築理論の背景と具体的な計算手法，および開発したコードに付随する特徴について示す．

先ずは，オイラー方程式に対する低マッハ数領域での漸近解析を行い，運動量保存式における圧力勾配項の取り扱いの重要性を示す．本理論により，運動量保存式の圧力は，動圧に相当する上流化すべき圧力と，音波の式に支配される微小擾乱圧力と，境界値の速度のみ依存する圧力に分類できることがわかる．統一解法開発においては，動圧相当分の圧力と微小擾乱圧力とを分離すべきであるとの考察がなされる．

そこで当理論と既存の圧力ベースの統一解法の一つであるCIP-CUP法を参考として，新しい圧力ベースの非圧縮・圧縮性統一解法の具体的な計算手法を提案する．本手法は非保存形の支配方程式に対して，流速寄与分と音波の寄与分とに純粋に方程式を分解して，フラクショナルステップを採用する解法をと

る. 前段を流速寄与分のみを計算する移流段と呼ぶ. 後段を音波の寄与分を計算する準等エントロピー段と呼ぶ. そこで, 本解法をConvection and Acoustic-wave contributions Decomposition for Unified Scheme (CADUS)と名づける. 移流段で解く方程式は, 固有値が速度のみで音速に依存しないにもかかわらず, 流速フラックスと圧力フラックスが存在する. そこで, ともに適切な上流化計算を行うために, 流速フラックスと圧力フラックスとを分離して上流化する特徴をもつ近似リーマン解法の, AUSM法とCUSP法の考え方を応用する. 近似リーマン解法は保存形の支配方程式を扱うため, 非保存形であるCADUSに上流化法を応用するにあたり, 部分積分による保存形の項の導出を施すことで適用を可能とする. また, 圧力フラックスの上流化には, マッハ数0近辺と1近辺両方での不連続性を改善する新しい補間関数を提案する. 準等エントロピー段では, 完全陰的な解法をとる. この点はフラクショナルステップ法による分離として参考とした CUP法と大きく異なる点であり, 計算の安定化に寄与する. また, 導出される圧力方程式の行列解法として, 残差切除法を採用することで, 確実な収束性と並列化計算への拡張性を確保する.

複雑な形状の解析にも対応するため, セル中心の有限体積法をベースとしてhybrid格子も計算できるようコードの開発を行った. また, 実用計算上, 乱流モデルの適用は避けられないが, パラメータ依存性の無いスキームの開発を目的とするため, 壁関数を使わないモデルが望まれる. より現実的な要素数で適切な剥離流れを解析するために, 比較的実績のある k-ω型2方程式モデルを採用する. さらにωの最低値を解析的に与えることにより, 過剰な乱流粘性の生成を回避する手法を採用する.

CADUS 法は分離解法であるため、通常の近似リーマン解法と比較すると計算負荷が高くなる. そこで, 計算時間とメモリの高負荷を分散するため, METIS 法により領域分割した計算格子と MPI による並列計算へのコードの対応を行った. 適切な行列計算手法の採用と, 領域間をダミーセルの使用による最小限の物理量の交換により, 高い並列化効率の実現が確認された.

Chapter. 3

本章では, 定常計算による統一解法の原理証明を行う. 検証問題として, 1.二次元キャビティ内流れ, 2.二次元超音速チャネル内流れ, 3.非粘性における亜音速から遷音速までの NACA0012 翼型周りの流れ, 4. 乱流計算を含む遷音速での RAE2822 翼形周りの流れ, 5. 三次元 NACA0012 矩形翼周りの流れ, 6. 剥離泡を伴うNACA0012 翼形周りの流れ解析を実施した.

非圧縮性かつ粘性解析の検証問題として, 二次元キャビティー問題の結果を示した. レイノルズ数 1000, 開口部のマッハ数を0.01とした. 主流渦, 二次渦の位置や速度分布ともにGhiaらによる計算結果と良い一致が得られた.

本手法は非保存形の支配方程式を離散化しているため, 理論的にエントロピージャンプを捕らえることはできない. そこで, 入り口マッハ数を2とした超音速チャネル内流れ解析により, 厳密解とどの程度の差異が生じるかを検証した. マッハ数, 圧力, 密度のコンター分布において, 定性的に適切な衝撃波と膨張波が計算できることを確認した. 壁面での定量的な比較においても, エントロピー以外の物理諸量の比較においても, 良い一致を示した.

外部流れの解析を NACA0012 翼型周りの流れで, 亜音速から遷音速まで行った. よどみ点近傍などの局所低速域での解析挙動を, オリジナルのAUSM法による圧力フラックス計算を使用した場合と比較した. AUSM法の圧力フラックスはマッハ数が0.01での解析において, 不物理的な解析結果を示した。それに対し, CADUS 法における圧力フラックス計算では, マッハ数が 0.01 から 0.8 の幅広い領域で, 適切な解を導出することを確認した.

圧力フラックスの上流化による効果を確認するため, RAE2822 翼型周りの非粘性遷音速流れ解析において, 上流化を行わないCUP法ベースとの衝撃波位置の比較を行った. 上流化を行う本手法は, 衝撃波が適切な位置で捕らえられることが実証され, 遷音速領域においても今回提案する圧力フラックスの手法の妥当性が確認できた. 同じ計算対象において, 乱流モデルによる解析も合わせて行った. 衝撃波の境界層へ干渉に伴い, 衝撃波位置が非粘性計算よりも上流に移動し, より実験結果に近い解が得られ, 乱流計算の妥当性も確認された.

並列計算により約110万要素の格子を16分割した, 三次元NACA0012矩形翼周りの解析を行った. 翼端渦が問題となる航空機の離発着時の状況を想定した. 低マッハ数限界付近での迎角10度の条件で計算を行い, 計算領域間の不連続は生じず, 翼端渦をきれいに捕らえること確認された.

剥離流れの解析を二次元 NACA0012 翼型周りで検証した. 実験では流速 10m/sec, レイノルズ数 0.13×10^6, 迎角10度の流れにおいて, ショートバブルが確認されている. 低レイノルズ数 k-ω二方程式モ

デルにおける，ωの解析的な最小値の適用により，実験とほぼ同様のバブルを適切に捕らえ，本手法が層流-乱流遷移を伴う解析にも有効性であることが確認できた．

Chapter. 4

本章では，非定常計算による時間精度と数値拡散の影響について検証を行って，十分な実用性をもつ手法であることを確認する．検証問題として，1．一次元衝撃波管問題，2。自由流中の渦の移動問題，3．二次元円柱周りに生じるかルマン渦の解析を実施した．

先ずSodによる一次元衝撃波管問題の計算を行った．前章にみられたようにエントロピージャンプは捕らえられないものの，衝撃波位置の遅れは非常に小さく，厳密解に非常に近い解を振動なく解析することを確認した．また膨張波は厳密解に完全に一致し，非定常の超音速流れにも本手法が適用できると考えられる．

二次元の自由流中での渦の拡散性をみることにより，本手法の拡散性を検証した．低拡散スキームであるAUSM法と比較し，実用上の問題のないレベルであり，かつ時間精度も十分高いことが確認された．

二次元円柱周りの計算を行い，生じるカルマン渦のストローハル数を実験値と比較した．レイノルズ数を3000,自由流マッハ数を0.05とした解析を行い，実験値である0.21に近い0.22の解析結果を得た．また，可視化により適切なカルマン渦の放出が確認でき．剥離を伴う非定常な流れの解析においての時間精度や粘性計算の妥当性を示した．

Chapter. 5

本章は結論である．第二章において，パラメータ依存性を持たないシンプルな非圧縮性・圧縮性の統一解法を，低マッハ数での漸近解析により構築し，CADUS 法と名づけた．第三章と第四章の計算結果より，亜音速から超音速までの定常および非定常流体計算において有効であることを結論付けた．衝撃波が境界層へ干渉する流れや，層流-乱流への遷移を伴い剥離泡を生じる流れなどの複雑な定常流れ，さらに非定常のカルマン渦を生じる流れの解析にも有効であることを述べ，本手法が幅広い計算領域に適用できることを結論付けた．また並列化において高い並列化効率が示され，今後はより複雑かつ大規模な実用問題への解析ツールとして期待できるとの展望を述べた．

論文審査結果の要旨

数値流体力学(CFD)は，近年のコンピューターの著しい発展とアルゴリズム研究の進展に伴い，流体機械の設計・解析のために，実験・理論と並んで不可欠な手段となっている。しかし，一口に流れの問題といっても，亜音速から超音速，低温から高温，層流から乱流というように，物理的に異なる現象を含む幅広い問題を取り扱う必要があり，実験手法はもとより，計算においても流れ場の条件に従って異なる計算手法を選択しなければならない。このため，たとえばエンジンの各要素における流れを評価することは可能になってきたが，エンジン全体の作動シミュレーションを，流れの基礎方程式に基づいて精度良く行うことは容易ではない。そこで，亜音速から超音速までのすべての流れの速度領域を，統一的に精度良く効率的に解ける統一計算法の開発が必要である。

本論文は，流れの基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を物理的考察により分割し，それぞれに適したスキームを構築し統合することで，低速から高速の流れを統一的に解くことができる計算法を開発し，剥離流を含む様々な流れに適用してその有効性を確認することを目的としたもので，全編５章よりなる。

第１章は緒論であり，本研究の背景及び目的を述べている。

第２章では，流れの基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式の低速流れと高速流れにおける漸近展開から方程式を二つに分け，それぞれに適したスキームを考察し，それらを２段解法に統合し，CADUS と呼ばれる新しいスキームを構築した。流れの特性方向に着目して基礎方程式の計算法を分ける手法は広く知られているが，CADUS では，それと異なるパラメータ依存のない新しい分割法を提案している。この計算法は学術的価値も高く，本論文独自の成果である。また，既存の CFD の適用範囲を広げるものとして工学的な有用性も非常に大きい。

第３章では，CADUS に基づく並列非構造格子流体ソルバーを開発し，その有用性を実証するために，非圧縮性流れ・遷音速流れ・超音速流れ・内部流れ・外部流れ・剥離流れ・２次元流れ・３次元流れの定常テストケースに適応することで，その精度と計算効率を確認している。CADUS は統一解法であるため，それらすべての問題に単一の計算プログラムで対応することが可能である。本章の結果は，提案された計算法が流体解析および設計に有効であることを示す重要な成果である。

第４章では，同一の計算プログラムによる非定常流れの検証問題を取り扱っている。通常，圧縮性流れの解法を非圧縮流れに適用するには，基礎方程式に前処理を施す方法が多く研究されているが，この方法ではさらに疑似時間を導入しないと時間精度を保つことができない。CADUS は前処理なしに定式化を行うため，そのまま非定常流れへの適用が可能である。本章では，衝撃波の伝播，渦の移流，カルマン渦の放出という代表的な非定常流れを用いて計算結果を検証しており，その結果 CADUS を用いた計算法の有効性が更に確かめられた。

第５章は結論である。

以上要するに本論文は，非圧縮流れから圧縮性流れを統一的に解く新しい計算方法を提案し，その精度および有効性を実証したもので，数値流体力学および航空宇宙工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。