

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760767

研究課題名(和文) 概念設計指向の数値流体解析法構築と環境適合型航空機設計への適用

研究課題名(英文) Development of Preliminary Design Oriented CFD Solver and its Application to Environment Friendly Aircraft Design

研究代表者

今村 太郎 (Imamura, Taro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30371115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、航空機概念設計の段階で求められる高速性とロバスト性を兼ね備えた概念設計指向の数値流体解析法を構築した。任意の複雑形状を取り扱えるよう格子生成には階層型の直交格子法を採用し、その上で圧縮性流体の支配方程式を解析するプログラムとした。壁面境界条件の取り扱い方法(埋め込み境界法)、物体に働く力の計算法、乱流モデルとの連成、流体解析の空間高次精度化、に取り組み、航空機設計において解析が求められる様々な流れ場への適用が可能となった。開発したコードは、航空機翼周り解析を中心に離着陸時の低速流れや超音速巡航の造波抵抗推算、また非定常音響解析など幅広い分野の解析に役立っている。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a conceptual-design-oriented computational fluid dynamics code that is fast and robust. These two factors are required especially during the conceptual design phase of an aircraft. In order to handle an arbitrary complex geometry, Cartesian grid with adaptive mesh refinement is used. Using this grid, compressible Navier-Stokes equations are solved by the program. We have worked constantly on many topics: wall boundary condition treatment (Immersed boundary method), calculation method for force acting on a body, coupling with turbulence model, the development of high-order scheme. Through these developments, the code now can be applied to many flow conditions which appear during aircraft designing, such as low-speed flow during take-off and landing, wave drag estimation during super-sonic cruise. Additionally, the code is being extended to the application of unsteady aeroacoustic flow simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 航空宇宙流体力学 数値流体力学 航空機設計

1. 研究開始当初の背景

航空機設計の分野においては、今後さらに高まる環境面への配慮から低燃費・低騒音機体が望まれている。現在、欧米を中心に2020年以降に向けて、航空機の大幅な高効率化と環境適合性を狙った技術開発が進められており、CO₂排出量の半減、NO_x排出量の80%削減、空港周辺騒音レベルの半減、といった目標、更にその先の高い目標に向けた取り組みが行われている。これらの目標値の中には、従来の航空機形態(胴体に主翼や尾翼が取り付けられた形)では実現困難な値もあり、NASAを中心に進められているHybrid-wing body (HWB) 形態に見られるような革新的な機体形状コンセプトの検討が必要である。

航空機設計においては航空機設計法という確立した学問が存在する。古典的な航空機設計法では、過去に設計された航空機データベース、風洞試験データベース、そして理論解析が多用される。これらデータの多くは半世紀以上前にデータベース化されたものであるが、今も尚色褪せず有効なデータとして利用され続けている。しかしながら、既存機とは異なる革新的な機体の場合は、古典的な航空機設計法で利用されるデータベースの適用範囲を逸脱してしまうため注意が必要である。特に概念設計段階で古典的な航空機設計法以外に簡便な推算法がない場合、それを有効範囲外であることを認識しつつ利用するケースがある。その結果として本来、革新的な機体形状が有する特徴が埋没してしまう可能性があり、新しい推算方法の確立が求められている。

概念設計の段階で利用可能は推算手法として、1980年代から盛んに研究が始まった数値流体力学(Computational Fluid Dynamics、以下CFD)がある。これまで行われてきたCFD研究は、離散化手法、衝撃波捕獲法、高次精度スキーム、収束加速法、データ構造、計算格子生成法、並列化手法等多岐に亘り、その成果は、商業用ソフトウェアにも導入されている。航空機を含む様々な輸送機械等の工業製品の開発に欠かせないツールとなっていることから一定の成熟したレベルに到達したと考えられる。申請者はこれまでの研究で、高精度・高効率スキームを用いたCFDコードの構築と航空機への活用を行ってきた。その成果の一部は現在三菱航空機が設計開発を進めているMitsubishi Regional Jetに生かされている。しかしながら、その開発と応用を通じ、現在用いられているCFD技術の問題点も認識するようになった。その最大のボトルネックは流体解析に必要な計算格子生成である。例えば、離着陸時における航空機全機周り流れ場の解析に必要な構造格子の作成には、格子生成専門のエンジニアでも数カ月の作業を要する。とかくCFD研究において実問題への応用は、これまで開発されてきた手法の組み合わせ

と、計算機能力の向上に頼るだけで実現できると考えられがちであるが、複雑形状を容易に扱うことが可能な新しいアルゴリズムの開発が求められている。本研究を通じて開発を目指す概念設計指向(Preliminary Design Oriented)の数値流体解析法は、これまで培われてきたCFD技術に立脚しているという点では発展的であるが、これまでのCFDでは取り残されていた領域に挑戦するという点では革新的であり、学術的にも意義深い研究テーマである。

2. 研究の目的

本研究は、任意の複雑形状に対しては解析が困難である乱流境界層や衝撃波等の現象を高速かつロバストに捉え、その知識を航空機概念設計に迅速に反映させるための数値流体解析法、概念設計指向の数値流体解析法(Preliminary Design Oriented Computational Fluid Dynamics code、以下PDOC)を構築することが目的である。

3. 研究の方法

本研究は、任意の複雑形状に対しては解析が困難である乱流境界層や衝撃波等の現象を高速かつロバストに捉え、その知識を航空機概念設計に迅速に反映させるための数値流体解析法、概念設計指向の数値流体解析法を構築することが目的である。第1段階では、計算機環境の整備および、概念設計指向数値流体解析法の構築を行う(既に本年度は、2次元版の格子生成プログラムおよび流体解析プログラムの開発に着手している)。第2段階では、概念設計指向数値流体解析コードの高度化を実施する。乱流モデルの組み込みや並列計算に向けた検討など、航空機概念設計への適用を視野に入れた改良を実施する。第3段階では、概念設計指向数値流体解析法の成果を航空機の概念設計に適用する。

4. 研究成果

平成23年度は、概念設計指向数値流体解析法(PDOC)の構築を主として行い、本年度の大きな目標であった、完全自動格子生成するプログラムの作成及び、オイラー方程式&ナビエ・ストークス方程式に基づく流体ソルバーの構築ができた。いずれも2次元版と3次元版のコードが完成できたことから、平成24年度以降の研究を遂行する上での礎を築くことができた。開発にあたり、当初は2次元版の拡張により3次元版コードが完成できると見込んでいたが、3次元版においては特にプログラムの高速化が開発の初期段階から必須である事が明らかになった。そのため、冗長なプログラム部分の改修のみならず、物体交差判定アルゴリズムの高速化や形状データのグループ化等の高速化アルゴリズムを新たに取り入れることにより、課題を解決した。壁境界条件については、当初は一次元方向に高解像度が求められる境界層

や衝撃波等の領域で一次元的な線分格子を用いる予定としていたが、コード開発を行う過程で、直交格子が本来保有する、単純なアルゴリズムを大きく損なうことが明らかになってきた。そこでオイラー解析において埋め込み型境界法に基づく境界条件を新しく開発したコードに適用できるように修正し、実装した。その結果、階段状に取り扱った境界条件では計算が発散してしまう遷音速流れの条件においても、安定な収束解が得られる事を示した。粘性壁条件の計算では、階段状壁面条件で層流境界層が正しく計算できるレイノルズ数域を明らかにした。レイノルズ数が10~1000程度では、プラジウスの層流境界層分布と一致したが、10000程度になると階段状壁面条件の影響により正しく計算ができなかった。この点については、次年度以降の課題として取り組む予定である。ソルバーの開発のみならず、境界条件の詳細な検討も実施できたことから、当初の予定以上に研究を遂行することができたと考える。

平成24年度は、前年度の結果を踏まえ、プログラムの高度化に取り組んだ。格子生成プログラムについては、複雑な形状の取り扱いを目的として、複数ファイルで定義された複数物体周りの解析が実施できるようになった。物体毎に最小格子幅、境界条件の設定ができるようにすることで、柔軟に計算を行う事が出来る。更に流体现象に適した格子生成を目的として、後流領域への自動格子生成や Refinement Box の追加機能を実装した。流体解析プログラムについては、物体に働く力の推算方法の影響について定量的に評価を行った。他にも Dual Time Step 法を用いた陰解法を実装し、非定常流体計算が可能となった。

平成25年度は、乱流モデルの組み込み、スキームの高次精度化、並列化等の高度化に取り組み、また様々な問題への応用計算を展開した。はじめに、複雑な物体形状周りにおける定常乱流の計算を可能とするために、直交格子に適した定常乱流計算手法を開発した。埋め込み境界法に Spalart-Allmaras 乱流モデルから導かれた壁関数を組み合わせ、境界層解像に必要な格子数の増大を抑えた。検証のために平板を用いた計算を行った。物体壁面と格子が同一方向の場合は壁から一点目の y^+ が120程度で乱流境界層が解像可能であり、壁面を格子に対して傾けた場合でも一点目の y^+ が30程度であれば乱流境界層を解像可能であった。続いて、非構造直交格子において高次精度でセル表面の変数値を補間する方法を構築した。非構造格子では隣接するセルの情報にしか簡単にアクセスできないが、ここでは直交格子の利点を生かし、等間隔領域において勾配値を高次精度化した。1次元および2次元の検証問題において、新しく構築した手法を用いた場合、従来用いられてきた2次精度や3次精度の手法を用い

た場合よりも大幅に解像度が向上した。1階勾配値のみを4次精度に向上させる方法は、補間スキームを完全な空間5次精度にする方法と比べ、検証問題の結果では大きな差異が見られなかった。また、ハンギングノードにおいては若干精度が低下するものの従来の手法より良い移流結果が得られ、また顕著な非物理的散逸や反射も生じないことが確認された。新しく提案した計算法は、計算時間については従来の3次精度風上バイアス法と比べ、10[%]程度の増加に留まったことから、構築したスキームは精度の演算量の両面からバランスの取れた実用的な計算手法である。最後に、実用計算に向けたプログラム的高速化に取り組んだ。単CPUでの実行性能向上と共に、OpenMPによる並列化に取り組み、ワークステーション上での三次元計算が実用的な時間内で可能となった。

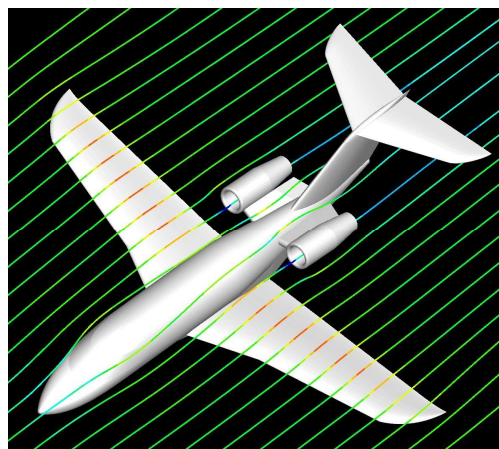


図1 三次元航空機周りの解析例

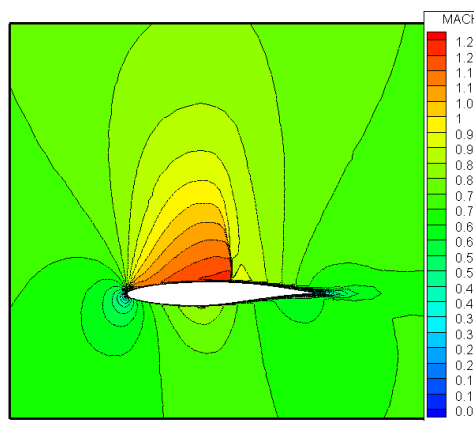


図2 RAE2822 周りの二次元 RANS 解析

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 2件)

- 1) 玉置義治, 今村太郎, “非構造直交格子における空間5次精度補間法の構築”, ながれ(掲載予定)
- 2) 櫻田麻由, 今村太郎, “相似形な格子要素からなる二次元二分木格子生成法に関する研究” 日本航空宇宙学会誌論文集 (掲載予定)

〔学会発表〕(計 19件)

- 1) 玉置義治, 今村太郎, “有限体積法における高次精度流束積分スキームの提案”, 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2014年7月4日 青森県弘前市(講演受理)
- 2) 左海将之, 砂田保人, 今村太郎, 李家賢一, “POD・DMD解析を用いた円柱まわり流れのレイノルズ数効果の解明”, 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2014年7月4日 青森県弘前市(講演受理)
- 3) Yoshiharu Tamaki, Taro Imamura, “Development of Higher-Order Accurate Spatial Interpolation Scheme for Unstructured Cartesian Grids” AVIATION2014 2014.6.20 Atlanta, USA (講演受理)
- 4) Masayuki Sakai, Yasuto Sunada, Taro Imamura and Kenichi Rinoie, “Experimental and Numerical Flow Analysis around Circular Cylinders Using POD and DMD”, AVIATION2014 2014.6.20 Atlanta, USA (講演受理)
- 5) Yoshiharu Tamaki, Taro Imamura, “3rd AIAA Workshop on Benchmark Problems for Airframe Noise Computations (BANC-III)”, Atlanta, USA, Jun. 14, 2014, Atlanta, USA
- 6) 原田基至, 今村太郎, “I形断面梁まわりに生じる二次元非定常流れのPOD解析” 第45期定時社員総会/年会講演会 2014年4月10日 東京
- 7) 今村太郎, 高橋悠一, 玉置義治, “直交格子法ベースの圧縮性流体ソルバーの改良(乱流モデルの組み込みと高次精度化の検討)”, 平成25年度航空宇宙空力班シンポジウム 2014年1月24日 北海道登別市
- 8) Yuichi Takahashi and Taro Imamura, “High Reynolds Number Steady State Flow Simulation using Immersed Boundary Method”, AIAA SCITECH 2014, Jan. 13, 2014 Maryland, USA
- 9) 高橋悠一, 今村太郎, “埋め込み境界法とSA乱流モデルに基づく壁関数を用いた定常流解析” 第27回数値流体力学シンポジウム, E10-2, 2013年12月19日 愛知県名古屋

- 10) 玉置義治, 今村太郎, “非構造直交格子における空間5次精度補間法の構築” 第27回数値流体力学シンポジウム, E04-3 2013年12月17日 愛知県名古屋市
- 11) Masayuki Sakai, Yasuto Sunada, Taro Imamura and Kenichi Rinoie, “Experimental and Numerical Studies on Flow behind a Circular Cylinder Based on POD and DMD” APISAT2013, Nov. 21, 2013, Takamatsu, Japan
- 12) 櫻田麻由, 今村太郎(東京大学大学院工学系研究科), “相似形な格子要素からなる二次元二分木格子生成法に関する研究”, 第45回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2013 2013年7月4日 東京
- 13) 今村太郎, 高橋悠一, “NACA0012翼近傍に配置された円柱周り流れからの二次元音響解析” 第45回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2013 2013年7月4日 東京
- 14) Taro Imamura, and Yuichi Takahashi (2013). Unsteady Flow Simulation around Cylinder under Airfoil using Cartesian-based Flow Solver. AIAA paper 2013-2857, Jun. 25, 2013, San Diego, USA
- 15) 今村太郎, “粘性非定常流解析に向けた直交格子圧縮性流体ソルバーの改良”, 平成24年度航空宇宙空力班シンポジウム 2013年1月25日 京都府亀岡市(原稿のみ送付、口頭発表のみキャンセル)
- 16) 高橋悠一, 今村太郎, “直交格子法を用いた粘性計算における力計算と物体壁面境界の取扱いについて” 第26回数値流体力学シンポジウム 2012年12月18日 東京
- 17) 神園仁志, 今村太郎, 埋め込み境界法を用いた直交格子オイラーソルバーの改良、第44回流体力学講演会・航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012 2012年7月5日 富山県富山市
- 18) 今村太郎, 神園仁志, 高橋悠一, 航空機空力性能評価を目的とした直交格子法ベース流体ソルバーの開発、平成23年度航空宇宙空力班シンポジウム、2012年1月27日 宮城県仙台市
- 19) 神園仁志, 今村太郎, 舵面つき二次元翼周り流れの数値解析、第49回飛行機シンポジウム講演集、3D5, 石川県金沢市、2011年10月28日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/rinoielab/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今村 太郎 (IMAMURA, Taro)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30371115

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：