

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 5月31日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560175

研究課題名（和文） 「数値航空機」「数値自動車」の実現—流体・運動力学統合シミュレーションの研究

研究課題名（英文） Construction of "Numerical Airplane" and "Numerical Vehicle" - A study on unified simulation of fluid dynamics and flight dynamics

研究代表者

松野 謙一 (MATSUNO KENICHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：70252541

研究成果の概要（和文）： コンピュータ上での仮想実機試験システムの構築を目的に、「数値航空機」「数値自動車」のプロトタイプモデルを構築した。まず、数値流体力学的な側面からの新しい試みとして静止流体中を物体（航空機や自動車）が自由自在に運動する流れ場を解析する手法「移動計算領域法」を確立した。数値流体力学と運動力学（飛行力学）とを弱連成させたることにより、航空機の離陸から巡航状態、旋回運動そして着陸までの一連の流体力学 - 運動力学（飛行力学）統合シミュレーション技術の基礎を確立した。

研究成果の概要（英文）："Numerical Airplane" and "Numerical Vehicle", which are unified simulation systems of fluid dynamics and flight dynamics, have been constructed. As a basic method of approach, "Moving Computational Domain (MCD)" method was proposed in this study. The MCD method is able to simulate a flow field around flying airplane without a limitation of the size of computational region by translating computational domain itself according to the motion of the airplane inside. A whole of flight, from taking-off to climbing, cruising, banked-turn, descending and finally landing, has been completely and continuously simulated in this study. The weak-coupled interaction between fluid dynamics and flight dynamics has been applied in this unified fluid/flight dynamics simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：数値流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学、シミュレーション工学、航空宇宙工学、飛行力学、運動力学

1. 研究開始当初の背景

本研究課題で用いる用語「数値航空機」「数値自動車」あるいは「数値実機試験」等は、造語である。

十数年以上前に盛んに研究された「数値風

洞」の概念は、世界最高性能のスーパーコンピュータシステムと数値解析ソフトウェアとを一体化し、風洞試験をコンピュータシミュレーションで置き換えようという野心的な研究であり、狭義には JAXA（旧航空宇宙

技術研究所)のスーパーコンピュータシステムを指すことが多いが、期待に沿うだけの成果を挙げた。そして航空機開発だけでなく、F1カーの開発、そして今や乗用車等の開発現場で普通に用いられようになっている。さらに、コンピュータの発展は、スパコンを用いずともワークステーションクラスのコンピュータでも数値風洞を実現できるまでになった。しかしながら、「数値風洞」自体が風洞を模したものであり、一様流中の流れ場を対象としており旋回運動等の流れ場を模擬することはできない。また、当然ながら実際の風洞実験でも旋回状態の計測は不可能である。これは、従来の実験を含むシミュレーション手法にとって困難な部分である。すなわち、従来の手法は基本的にガリレイ変換を基に一様流中に物体が在る場合を想定しているため、直線運動から旋回運動へ、またS字走行時等の流れ場をシミュレーションするのが原理的に困難であるからである。とくに、物体が旋回運動する場合等の流れ場の解析は従来行われていなかった領域であり、物体の総合運動性能を評価する上では、欠かすことのできない部分である。特に航空機の旋回性能や、MotoGP バイクマシンのカーブ走行時の横風の影響の評価は極限の運動性能を追及するためには欠かすことのできない部分であり、そこが勝敗を決める部分ともなる。言い換えれば、静止流体中を物体(航空機や自動車)が自由自在に運動する場合の流れ場を解析する手法を確立することが次世代のシミュレーション技術にとって喫緊の課題である。

このような状況において、報告者は、自身が考案し検証・発展させてきた移動格子有限体積法がこの状況を打破できるという確信を持つに至った。すなわち、報告者は、近年、物体が移動する場合に誘起される流れ場の解析を目的に、特に移動境界問題に適した数値解法として「移動格子有限体積法」を提案し、構造格子・非構造格子両面から様々な検証・発展を行ってきた。この方法は、時間・空間を統合した (x,y,z,t) -四次元空間に離散化のためのコントロールボリュームを置き定式化したもので、格子点の移動はもとより、理論的に格子点の追加・削除が可能という特徴がある。この、境界が移動することによって誘起される流れ場を計算することを目的に発展された本スキームは、上記の目的・目標を達成するための理論的基盤となる可能性がある。加えて本研究課題のためのベースとなる新しいアイデアとして「移動計算領域法」の概念を平成20年に提案した。この「移動計算領域法」のアイデアは、移動格子有限体積法の発展型ともいえ、計算領域の中で物体が自由に格子点を移動変形させながら運動するばかりでなく、更に計算領域全体を流

体中を自由自在に移動させるというものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、いわゆる数値風洞に代わる次世代シミュレーションとして「数値航空機」、「数値自動車」あるいは「数値MotoGP バイクマシン」等の概念を実現し、流体力学と運動力学との統合連成シミュレーションである「数値実機試験」の理論・手法を確立し、実証することである。具体的には、3つある。まず、ひとつは数値流体力学的な側面からの新しい試みとして静止流体中を物体(航空機や自動車)が自由自在に運動する流れ場を解析する手法を確立することであり、二つ目は、高速旋回運動時の流体力学と運動力学(飛行力学等)とを連成させた統合シミュレーションの手法を確立することである。三つ目は、航空機でいえば、離陸から巡航状態そして着陸までの一連の統合運動力学(飛行力学)シミュレーション技術を確立することである。本研究課題は、そのアイデアの実証、即ち「仮想実機試験」システム構築のための基礎研究である。「数値風洞」が、風洞試験をシミュレーションで置き換えようとするのに対し、本研究課題の「数値航空機」「数値自動車」は、実機試験をシミュレーションで置き換える試みである。

3. 研究の方法

本研究課題は、そのアイデアの実証、すなわち「数値航空機」「数値自動車」の実現であり「数値実機試験(仮想実機試験)」システム構築のための基礎研究である。前述の研究目的にあげた3つの具体的目標を、順次達成する形で進める。航空機、自動車それぞれ速度領域が異なるので、圧縮性流体および非圧縮性流体の両方の方程式レベルを対象にする。主な項目は、次の4項目となる。

- (1)「移動計算領域法」の手法の確立と検証。
- (2)数値流体力学と運動力学との連成統合シミュレーション手法の確立
- (3)「数値航空機」及び「数値自動車」のプロトタイプモデルの作成と実証
- (4)「数値実機試験」の試み。

この4項目について、逐次的に成果を積み上げるものは順次達成しながら進める。なお、格子形成等の前処理、計算結果の解析のためのデータ処理および描画等の後処理、および計算途中のデータ保存、計算対象の移動変形に関わる時間依存の格子形成等に関わる途中処理等の効率化に関する事項は、並行して実施できるものについては並列に実行する。

4. 研究成果

(1)主な成果

項目(1)の「移動計算領域法」の手法の

確立と検証に関しては、まず、ベースとなる移動格子有限体積法について、計算理論の確立を進めた。まず、適用する移動速度に対応して、数値紙ヒコーキや数値グライダーを対象として低速域をカバーする非圧縮性流れ領域、高速移動する自動車や数値航空機等への適用を考慮した圧縮流れ領域、また、レイノルズ数領域についても、数値紙ヒコーキを対象とした直接シミュレーション領域、グライダーや比較的低速域・低レイノルズ数領域を対処としたSGSモデルを用いたラージエディシミュレーション（LES）の導入、高速・高レイノルズ数領域に対する乱流モデルを導入したレイノルズ平均ナビエ・ストークス計算（RANS）等について3次元計算コードを開発整備し、さまざまな検証例をもとにその有効性を確認し、移動計算領域法に組み込むことにより、「数値航空機」「数値自動車」実現のための基礎理論として、基本的性質、応用性とも確認、実証することができた。

項目（2）に関し、ベースの計算理論である「移動格子有限体積法」は、空間・時間統一空間でコントロールボリュームを構成して離散化したアルゴリズムであり、非線形の陰的スキームであるから、その解法に内部反復過程を含んでいる。したがって流体力学と運動力学の連成シミュレーションに関しては、理論的には、その内部反復過程に組み込むことにより、特に問題なく実現可能である。しかしながら、この連成計算においては、物体の移動に対応して格子点も移動する必要があり、したがって、流体力学-運動力学強連成シミュレーションは、膨大な計時間が必要となり、現有の計算機では実用時間内には終わらないことが判明した。結果として本課題では一方向にのみの弱連成シミュレーションとして確立した。勿論、強連成計算は、実行可能なことは実証することができたが、より高速な計算機の使用とプログラムの並列化等を施すことにより現在の数十倍から数百倍の効率化をしなければ実用的でないことが判明した。

項目（3）については、「数値航空機」では、高レイノルズ数領域圧縮流領域では「ボーイング777」を想定した遷音速旅客機形態モデル、低レイノルズ数非圧縮流領域では、グライダー形状モデルについて、それぞれプロトタイプを構築した。旅客機モデルでは、離陸（図1参照）、上昇、巡航状態、旋回（図2）、下降、着陸（図3）の一連の飛行機の運動について、その流れ場のシミュレーションを行った。旅客機については遷音速領域が主であるので圧縮性コードに非定常RANS乱流モデルを組み込んで計算を行った。一方、グライダーモデルについては、低速、低レイノルズ数領域であるので、非圧縮性コードを

用い、乱流モデルなしに計算を行った。「数値自動車」では、自動車モデルとして

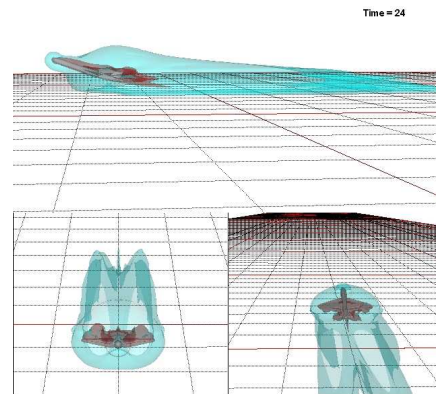


図1 離陸時の速度等値面

「プリウス」形状モデル、自動2輪車としてMotoGPマシン形状モデル、およびビッグスクーターモデルについて、そのプロトタイプを構築した。自動車モデルについては、まず、

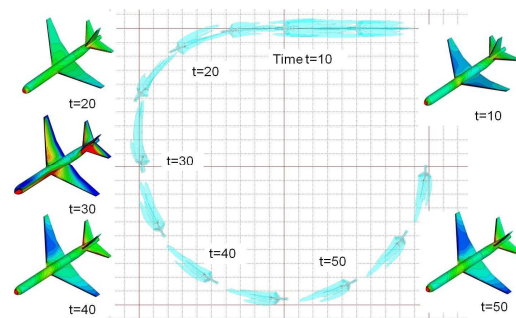


図2 旋回時の圧力分布

単体直進走行時の空力抵抗値を実験値と比

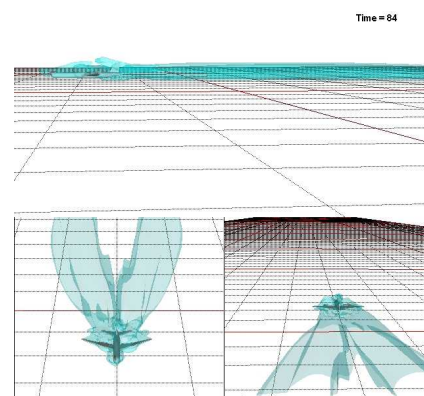


図3 着陸時の速度等値面

較し、数パーセント以内で一致することを確認したのち、直進走行からヘアピンカーブ走行にわたる流れ場の詳細を示した。特に、2

台の自動車が高速でカーブ走行する場合の先頭車と後続車の空力抵抗値について解析し、流れ場の詳細を示した。

項目(4)「数値実機試験」の試みは、コンピュータの演算能力と計算コード並列化ができなかった為、弱連成ではあるが、完全形態の航空機や自動車について数値流体力学-運動力学統合シミュレーションを試み、基礎的な成果を挙げることができた。

(2) 成果の国内外における位置づけとインパクト

近年、国内外で盛んに研究された「数値風洞」の概念は、風洞試験をコンピュータシミュレーションで置き換える目的で盛んに研究され十分な成果を挙げた。「数値風洞」は、計算アルゴリズムと一体化した、狭義にはJAXA(旧航技研)のスーパーコンピュータシステムを指すことが多いが、本研究課題は、数値風洞の計算アルゴリズム部分を更に発展させた、いわば「数値実機試験」をコンピュータの中で実現させようとするものである。本研究課題の成果において、従来の数値風洞で可能な部分は当然として、できなかった離着陸、加速・減速、あるいは旋回運動における流れ場の解析をひとつのコンピュータコードで、それも計算領域の制限なく連続的にシミュレーションすることを可能とした。この成果は、世界でも類を見ない先駆的なものである。本研究課題でそのプロトタイプを示した「数値航空機」「数値自動車」は、「数値風洞」を発展させそれに置き換える理論を構築したのものである。現在、世界のグランドチャレンジの一つといわれる「デジタルフライト」に関する、日本独自の研究成果であるといえる。

さらに、流体力学的な興味からは、(複数の)物体が自由移動するときに誘起される流れ場を解析可能とすることから、物理現象の解析ツールとしても学術的価値がある。

(3) 今後の展望

「数値航空機」として遷音速旅客機(圧縮流)および紙ヒコーキ、グライダー(非圧縮流)についてプロトタイプを構築し幾つかの実証計算を行ったが、更に計算手法(理論)の発展と改良を行うことである。特に、現在のプロトタイプの数値航空機は、流体力学と運動力学との連成は、計算時間の関係から弱連成とせざるを得なかったので並列化等を含む計算の高効率化を図り強連成とすることが必要である。また、ジェット推進等の推進機構モデルも組み込み、より完全な「数値航空機」を実現することである。また、複雑な機構を持つプロペラ機への展開・拡張を行うことにより「数値ヘリコプタ」、「数値プロペラ推進航空機」へと理論を展開し、統合シミュレーションが可能であることを実証する予定である。リアルタイムの「数値実機試験」

の実現のためには、やはり世界最高速のスーパーコンピュータが必要なことは否定できない。しかしながら、一方で、大学や一般企業の研究室レベルのコンピュータで、「数値実機試験」が実施できれば、そのインパクトは計り知れない。この方向で今後も研究を進める予定である。

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 8 件)

- ① S. Asao, K. Matsuno, M. Yamakawa, Trans-Mesh Method and Its Application to Simulations of Incompressible Fluid-Rigid Bodies Interaction, Journal of computational Science and Technology, Vol.5, No.3, 2011, pp.163-174 (査読有).
doi:10.1299/jcst/5.163
- ② M. Yamakawa, Y. Kita, K. Matsuno, Domain Decomposition Method for Unstructured Meshes in an OpenMP Computing Environment, Computers & Fluids, Vol.45, 2011, pp.168-171, (査読有)
DOI:10.1016/j.compfluid.2011.02.008
- ③ H. Asakawa, M. Yamakawa, K. Matsuno, Application on Hybrid Unstructured Moving Grid Method for Three-Dimensional Compressible Flow, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol.74, 2010, pp.119-126 (査読有).
DOI:10.1007/978-3-642-14438-7_12.
- ④ S. Asao, S. Ishihara, K. Matsuno, and M. Yamakawa, Progressive Development of Moving-Grid Finite-Volume Method for Three-Dimensional Incompressible Flows, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol.74, 2010, pp.127-134 (査読有).
DOI: 10.1007/978-3-642-14438-7_13.
- ⑤ K.Watanabe and K.Matsuno, Moving Computational Domain method and Its Application to Flow Around a high-Speed Car passing Through a Hairpin Curve, Journal of Computational Science and Technology, Vol.3, No.2, 2009, pp.449-459 (査読有).
DOI: 10.1299/jcst.3.449
- ⑥ 浅尾慎一、松野謙二、大移動する複数物体によって誘起される非圧縮性流れに対する三次元移動埋め込み格子法、日本機械学会論文集(B編)、75巻755号、2009, pp.1379-1386 (査読有)。

- http://www.jsme.or.jp/transact.html
- ⑦ S. Asao and K. Matsuno, Parallel Computation of Incompressible Flows Driven by Moving Multiple Obstacles Using a New Moving Embedded-Grid Method, Lecture Notes in Computational Science and Engineering 67, Springer, 2009, pp.147-154 (査読有).
DOI: 10.1007/978-3-540-92744-0_18.
- ⑧ M. Yamakawa and K. Matsuno, Numerical Simulation of Compressible Flow using Three-Dimensional Unstructured Added/Eliminated Grid Method, Lecture Notes in Computational Science and Engineering 67, Springer, 2009, pp. 245-252 (査読有).
DOI: 10.1007/978-3-540-92744-0_30.

[学会発表] (計 21 件)

- ① 中島広貴、松野謙一、直進・降下・旋回を含むグライダー周りの空力シミュレーション、第 25 回数値流体力学シンポジウム、Paper A04-3, 日本流体力学学会、大阪 (大阪大学、2011/12/19~21)
- ② 岡本豊、松野謙一、移動計算領域法による複数高速移動車両の運動時に生ずる流れ場の空力シミュレーション、第 25 回数値流体力学シンポジウム、Paper A05-4, 日本流体力学学会、大阪 (大阪大学、2011/12/19~21)
- ③ 但田優介、松野謙一、移動計算領域法によるビッグスクーターの S 字走行空力シミュレーション、第 25 回数値流体力学シンポジウム、Paper A05-5, 日本流体力学学会、大阪 (大阪大学、2011/12/19~21)
- ④ 浅尾慎一、松野謙一、MCD 法を用いた長い管内を落下する球周りの非圧縮流れのシミュレーション、第 25 回数値流体力学シンポジウム、Paper D10-3, 日本流体力学学会、大阪 (大阪大学、2011/12/19~21)
- ⑤ S. Asao et al, Simulations of Falling Spheres with Concentration in an Incompressible Fluid Using Transmission Mesh Method, Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2011, Sep. 22-26, 2011, Kyoto, Japan,
- ⑥ K. Matsuno, Parallel and Vector Computing in Computational Fluid Dynamics, PARENG2011, April 12-15, 2011, Ajaccio, France (招待講演)
- ⑦ 横田祐介、松野謙一、飛行時におけるヘリコプタブレード周りの空力シミュレーション、第 24 回数値流体力学シンポジウム、Paper B7-2、日本流体力学学会、東京 (慶応大学、2010/12/21)
- ⑧ 井上貴博、松野謙一、格子モーフィングを適用した移動計算領域法による MotoGP マシンのサーキット走行モデルの流れシミュレーション、第 24 回数値流体力学シンポジウム、Paper F6-2、日本流体力学学会、東京 (慶応大学、2010/12/20-22)
- ⑨ 桂田真充、松野謙一、離着陸を含む航空機の運動時に生ずる流れ場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、Paper B6-3、日本流体力学学会、東京 (慶応大学、2010/12/20-22)
- ⑩ 浅尾慎一、松野謙一、堂原教義、Domino 法に基づく物体透過格子法による移動物体周り非圧縮流れの並列計算の検討、第 24 回数値流体力学シンポジウム、Paper E5-2、日本流体力学学会、東京 (慶応大学、2010/12/20-22)
- ⑪ 桂田真充、松野謙一、山川勝史、直進から旋回へ移行する航空機の流れ場の数値シミュレーション、日本航空宇宙学会第 47 回中部・関西支部合同秋期大会講演会、日本航空宇宙学会、名古屋 (名城大学、2010/11/26)
- ⑫ K. Matsuno, Development and Applications of Moving Grid Finite Volume Method, Engineering Computational Technology 2010, Sep. 14-17, 2010, Valencia, Spain (招待講演)
- ⑬ 浅尾慎一、松野謙一、堂原教義、物体透過格子法を用いた非圧縮流体と複数物体の連成シミュレーション、日本流体力学学会年会 2010、日本流体力学学会、札幌 (北海道大学、2010/9/9-11)
- ⑭ 波留達也、浅尾慎一、松野謙一、物体透過格子法を用いた移動する複数物体周りの圧縮性流れのシミュレーション、第 23 回数値流体力学シンポジウム、Paper D9-3、日本流体力学学会、仙台 (仙台市民会館、2009/12/16-18)
- ⑮ 河井友梨、松野謙一、低レイノルズ数環境における紙飛行機の飛行シミュレーション、第 23 回数値流体力学シンポジウム、Paper B6-4、日本流体力学学会、仙台 (仙台市民会館、2009/12/16-18)
- ⑯ 北祐介、山川勝史、松野謙一、非構造格子を用いた並列計算に関する領域分割法、第 23 回数値流体力学シンポジウム、Paper E3-3、日本流体力学学会、仙台 (仙台市民会館、2009/12/16-18)
- ⑰ 清水厚志、山川勝史、松野謙一、非圧縮性流れに対する非構造移動格子有限体積法、第 23 回数値流体力学シンポジウム、Paper D10-2、日本流体力学学会、仙

- 台 (仙台市民会館、2009/12/16-18)
- ⑱ 浅尾慎一、波留達也、松野謙一、複数移動境界を持つ非圧縮性流れに対する物体透過格子法、第 23 回数値流体力学シンポジウム、Paper D9-4、日本流体力学学会、仙台(仙台市民会館、2009/12/16-18)
- ⑲ 浅尾慎一、松野謙一、堂原教義、移動埋め込み格子法を用いた強制混合流れのシミュレーション、日本流体力学学会年会 2009、日本流体力学学会、東京(東洋大学、2009/9/2-4)
- ⑳ S. Asao and K. Matsuno, Numerical Computation of Thermal Flows Driven by Moving Multiple Bodies Using Moving Embedded-Grid Method, Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2009, Oct. 21, 2009, Jeju, Korea
- ㉑ M. Yamakawa and K. Matsuno, Numerical Simulation of Flow around a Running Man, Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2009, Oct. 21, 2009, Jeju, Korea

[図書] (計 2 件)

- ① Kenichi Matsuno(分担), Computational Technology Reviews, Vol.3, Edited by B. H. V. Topping, SAXE-COBURG Pub., 2011, pp.95-110.
DOI:10.4203/ctr.3.5
- ② Kenichi Matsuno(分担), Developments

and Applications in Engineering Computational Technology, Chapter5, Edited by B. H. V. Topping, SAXE-COBURG Pub., 2010, pp.103-129.
<http://www.saxe-coburg.co.uk/>

[その他]

ホームページ等

<http://repository.lib.kit.ac.jp/dspace/handle/10212/2033>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松野 謙一 (MATSUNO KENICHI)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授

研究者番号：70252541

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：