

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560192

研究課題名(和文)「数値航空機」の展開と応用 - 次世代流体・運動力学統合シミュレーションの研究

研究課題名(英文) Developments and Application of "Numerical Airplane" - A Study on Coupled Simulations of Fluid and Flight Dynamics of the next generation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来の数値風洞に代わる次世代シミュレーション(コンピュータの中で航空機周りの流体力学と飛行力学の連成シミュレーションを行う)技術として提案した「数値航空機」の概念をさらに発展・展開し、プロペラ推進小型航空機を対象に「数値実機試験」の実現に向けた実証研究を実施し、その有効性を示した。また、応用技術として、MotoGPマシンに適用した「数値MotoGP」、物理現象として興味ある「数値ブーメラン」「数値サッカーボール」の飛翔に応用し、実験と比較・検証することによりその物理を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Developments and realization of new concept, "Numerical Airplane", which is a coupled simulation technology of fluid and flight dynamics on computers, have been conducted in this study. Based on the new approach, "Moving Computational Domain Method", the fluid dynamics equation and flight dynamics equation of 6 degree have been solved simultaneously in a coupled manner. Prototypes of "Numerical Airplane", "Numerical Vehicle", "Numerical Helicopter", and so on were demonstrated. Flight simulation of a propeller thrust small airplane of "Mustang" type has been conducted for various acrobatic flight conditions with success. The possibility of "Numerical Real Flight Test" on a computer has been demonstrated. The present approach has also been applied to prediction of motions of "boomerang" and "soccer ball". The trajectories and flow mechanism around the bodies were analyzed and compared with experimental data successfully.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 数値流体力学 シミュレーション技術 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」「数値ヘリコプタ」「数値サッカーボール」あるいは「数値実機試験」等は、申請者の造語である。

最初の商用スーパーコンピュータと言われるCDC6600が生まれて早や40年あまり。この間、工学分野での数値シミュレーション技術の発達は目覚ましいものがある。スーパーコンピュータ(スパコン)を最も必要とし且つともに発展してきた学問分野のひとつが計算流体力学(CFD)である。航空工学の分野は、空気力学性能評価の需要もあり、CFDの発展に最も寄与した分野のひとつである。歴史的にも、20年くらい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期待に応えるだけの成果を挙げた。しかしながら「数値風洞」自体が風洞を模したものであり、一様流中の飛翔体周りの流れ場を対象としており、飛翔体の直進運動から旋回運動へ、また、離着陸時のような地面と航空機の相対運動がある場合等の流れ場を扱うことが不可能であった。

一方、報告者は、自身の研究テーマであるCFDのための計算スキームを研究する中で、物体境界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。また、この移動格子有限体積法の発展形として、「移動計算領域法」の概念を提案した。この移動計算領域法は、移動格子有限体積法の発展形で、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時には格子点の追加・削除を行いながら運動するばかりでなく、更に、計算領域全体を、物体と一体として自由自在に移動させることにより、自由に運動する物体が誘起する流れ場を計算するものである。

このような状況において、報告者は、この移動格子有限体積法および移動計算領域法が、上述の数値風洞ではできなかった状況を打破できるという確信を持つに至った。

そこで報告者は、平成21年度から平成23年度にかけて科研費の補助を受け、従来の「数値風洞」に代わる次世代シミュレーション技術として、「数値航空機」「数値自動車」の実現を目指し基礎研究を行った。この研究課題において、報告者は、まず、上述の「移動計算領域法」を、静止流体中を物体(航空機や自動車、あるいはサッカーボールなど)が、自由自在に対象領域の制限なく運動するときに誘起される流れ場を解析する手法として確立した。そして、数値流体力学と運動力学(飛行力学)とを弱連成させることにより、航空機の離陸から上昇、巡航状態、旋回

運動、そして着陸までの一連の流体力学・運動力学統合シミュレーション技術の基礎を確立した。この研究課題では、「数値航空機」として遷音速旅客機(圧縮流)および紙ヒコキ、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。最終目標の「数値航空機」の実現には、更に計算手法(理論)の発展と改良を行うことが必要であり、また、複雑な機構を持つプロペラ機への展開も必要であることが明らかとなった。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究課題では、最終目標の「数値航空機」の実現を図り、風洞試験から実機試験に至る航空機開発のすべての工程をコンピュータシミュレーションで置き換えるための、本研究課題で言うところの「数値実機試験」を実現するためのシステムを構築することである。また、応用システムとして、サッカーボールの運動や、ブーメランの運動等、流体力学と運動力学の統合シミュレーションシステムを構築し、さまざまな物体の流体中における運動を流体力学との関係を研究するための手法を開発することである。

本研究の具体的な研究目的は、構築したプロトタイプの「数値航空機」「数値自動車」等を基礎に、流体力学・運動力学統合シミュレーション技術としての到達点である「数値実機試験」を実現するための実証と展開を行う。より具体的には、連成手法の改良とファンジェットやプロペラ等の推進機構を持つ「数値航空機」への展開、さらに物理的興味からの応用展開として、「数値サッカーボール」や「数値ブーメラン」を構築し、流体力学・運動力学統合シミュレーションによる変化球の再現と運動解析を行う。

3. 研究の方法

本研究課題は、現行プロトタイプの「数値航空機」に対する基盤理論・技術をさらに発展、応用・展開するもので最終目標の「数値実機試験」システム構築のための研究であり、研究方法の改良発展を行いつつ、実証研究を行う。

研究項目は、次の6項目からなる。(1) 計算コードの並列化、高効率アルゴリズムへの改良(RANS、DES、LESモデルの改良含む)。(2) 流体力学・飛行力学の連成シミュレーション手法への確立と検証、「数値航空機」の実現。(3) ジェット推進、プロペラ推進機構の導入(物理モデルの提案と検証を含む)。(4) 「数値ヘリコプタ」のプロトタイプの作成と実証。(5) 「数値サッカーボール」「数値ブーメラン」のプロトタイプモデルの作成と実証、および運動解析。(6) 前処理、後処理の汎用化・自動化、途中処理の導入。

シミュレーションにおける基礎理論とその背景は上述のようにすでに確立している

「移動格子有限体積法」と「移動計算領域法」をベースに、それらに6自由度のニュートン運動方程式のクランク・ニコルソン型差分近似方程式を加えて行う。

4. 研究成果

(1) 計算コードの並列化、高効率アルゴリズムへの改良 (RANS、DES、LES モデルの改良含む)

本研究課題におけるアルゴリズム発展として新たに非圧縮性流体に対する移動格子有限体積法を3次元非構造格子に対応したコードを開発した。これにより、複雑形状への対応が飛躍的に改善された。乱流への対応として、まず、圧縮性流体の高レイノルズ流に対してレイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) 方程式を適用、Spalart-Allmaras モデルを導入した。次に比較的低いレイノルズ数の流れに対しては、圧縮性流および非圧縮性流コードに標準のスマゴリンスキーモデルをベースとしたLESモデルを組み込み、検証計算を行い、移動格子有限体積法におけるLESモデルの特徴を抽出した。通常の曲線・一般座標系に対するLESモデルについては、幾つか報告がなされているが、本研究で用いる移動格子有限体積法は、格子が、曲線・一般座標系である上に時間と共に移動変形するため、その上で評価されるLESモデルの静的および動的な特性を把握する必要がある。図1に示すように、その特性は、格子の移動変形にある程度影響されるものの予想の範囲内であり、実用に耐えることが示された。

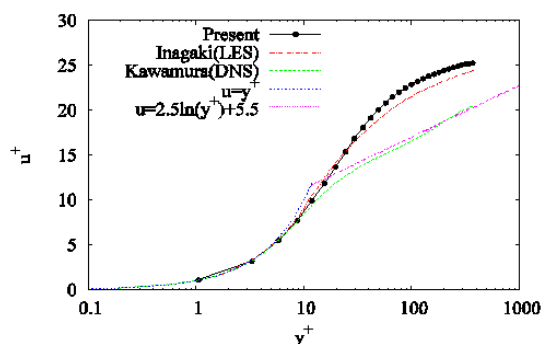


図1. 平板境界層プロファイル

アルゴリズムの改良については、全ての流速およびレイノルズ数に対応すべく、構造・非構造格子系、圧縮・非圧縮の両方に対する計算コードを完成させ、問題なく動くようになった。新たな試みとして、水面近くの物体の動きが水表面に及ぼす影響を見るため、自由表面流れへのアルゴリズムの拡張を進めた。

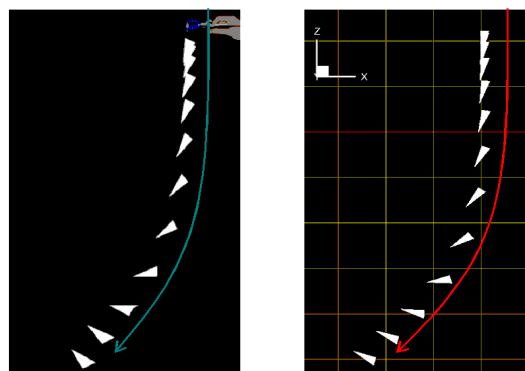
計算コードの並列化に対しては、圧縮性・非圧縮性流コード、構造格子・非構造格子コードとも、アルゴリズムの並列化を検討する前に、全コードに対し、まず、OpenMP 並列化を行った。OpenMP は、プログラムにディレクティブを挿入するだけで、共有メモリを対象として並列化が可能である。そのまま並列化

が可能な部分に OpenMP ディレクティブを順次、コードに組み込み、並列化作業を行った。

後に述べる「数値プロペラ機」に対しては、リアルタイムのシミュレーションを試みることを考慮し、GPUを用いた並列計算を行った。

(2) 流体力学・飛行力学の連成シミュレーション手法への確立と検証、「数値航空機」の実現

項目(2)は、「数値航空機」の実現を目指した研究で、本研究課題の中心となる研究項目である。本研究項目では、流体力学と運動力学 (飛行力学) の相互作用を考慮した連成シミュレーション手法に関する研究である。航空機が自身の推力や重力の作用を受け運動する。この時、運動によって周りの流体に運動を引き起こし、揚力や抵抗といった力を航空機は受ける。航空機が飛行するときは、このような推力や重力、揚力及び抵抗が釣り合う状態にある。すなわち、物体 (航空機) が運動することにより流れを誘起し、流れは物体に力を及ぼす。この加えられた力は、物体の運動を引き起こす。このように流体の運動と物体の運動が互いに影響を及ぼし合い釣り合った状態で流体中の物体の運動が決まる。この場合、流れ場は、流体力学方程式を解くことになり、物体の運動は、ニュートンの運動方程式を解くことに対応する。お互いに及ぼし合う力が釣り合う状態で、流体運動および物体の運動が決まる。流体力学・運動力学の連成シミュレーションを行うことになる。連成の方法には、一方向の影響のみを考慮する弱連成と、相互方向の影響を反復過程に取り入れて行う強連成とがある。弱連成、強連成ともに実施し、差異を検証したが、結論を言えば、弱連成と強連成の差異は誤差の程度であった。これは、理論的にも予想されることであろう。



(a) Experiment (b) Simulation
図2 紙飛行機の飛行軌道

本項目の具体的な研究対象は、「数値紙ヒコーキ」とし、流体力学・飛行力学の連成シミュレーションを行った。紙ヒコーキは、自身の生み出す推力を持たず、重力のみを外力として受けそれに流体から受ける力により支配され飛行を行う。飛行速度も遅く、レイノルズ数も低いことから、層流計算及びLES

計算を行った。並行して、紙ヒコーキを実際に飛ばしてその軌道を測定、計算結果との比較を行うことにより本シミュレーション手法の有効性を示した

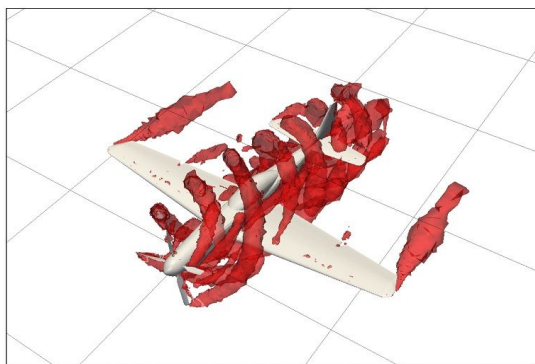
(3) ジェット推進、プロペラ推進機構の導入(物理モデルの提案と検証を含む)

旅客機の推進機構であるジェット推進については、双発ジェット旅客機を対象に、ジェットエンジンの吸い込み口に境界条件として吸い込み条件を、ファンおよびジェット吹き出し口には、推力となる運動量を加えた噴流の条件を境界条件として与えることによる推進効果モデルを導入した。ホットジェットあるいはコールドジェットについて検討したが、やはり実測データに基づくモデル化が必要である。

このジェット推進モデルを用いて、ア prioriに運動軌道を与える形で、航空機の離陸、上昇、旋回、着陸の各飛行状態について一連のシミュレーションを行い、ジェット後流の、特に胴体と尾翼に及ぼす影響を、評価した。

一方、プロペラ推進については、計算時間が過大となるであろうとの推定のもと、実際にプロペラを回すのではなく、運動量理論モデルに基づくプロペラ推進を導入することを当初の目的とした。運動量理論モデルについては、いくつかのモデルについて考案、検討、そして評価を行ったが、想定していたほどの計算への効率化が不出、改めて検討の結果、プロペラのモデル化を止めることとした。

結果として推進機構の導入については、より困難なプロペラ推進機構について、プロペラを実際回転させて推力を生み出す完全な形で導入を果たした。即ち、本研究課題に於いては、何らモデル化を行う事無く、忠実にプロペラを装着し、実機の場合と同様に直接プロペラそのものを回転させることとした。プロペラ回転運動による流体運動を誘起することによる推力を発生させる本来の手法をとることとした。これは、大きな困難を伴うことなく、プロペラを囲む領域に「スライド格子」を導入することにより、実現することができた。



Isosurface of second invariant of gradient of velocity tensor on forward flight ($t=100$)

図3 プロペラ推進小型航空機

これにより、プロペラ回転による推力の発

生、それを受けて航空機が空気中を飛行する現象を忠実にコンピュータ上で再現することを可能とし「数値航空機」の実現を果たした。運動性の高い小型航空機(P51 Mustang)形状を使い、最終目的である「デジタルフライト(飛行力学・流体力学連成シミュレーション)」システムの構築にむけて、さまざまな航空機の安定性を含め、飛行の検証作業が可能となった(図3)。すなわち、言い換えれば本研究目的の最終点、「数値実験」のプロトタイプが確立したと言える。(4)「数値ヘリコプタ」のプロトタイプの作成と実証

「数値ヘリコプタ」のプロトタイプを作成した。4枚ヘリブレードを持つヘリコプタを対象に格子形成をおこない、上昇・前進・ホバリング等のシミュレーションを行った。ここでの成果が前述の「プロペラ推進」航空機に生かされたことを付記する。

別形態の「数値ヘリコプタ」として、より複雑な「オスプレイ型」の垂直離着陸形態についても、シミュレーションを行った。本テイルローター機「オスプレイ」を対象としたモデルでは、回転翼の動きも含めプロトタイプモデルを構築した。新しい点として、スライド格子を何重にも組み合わせ、より滑らかな二軸プロペラ回転機構を再現し、また、離着陸時の格子制御機構をより滑らかに且つアルゴリズム的に容易にした。

(5)「数値サッカーボール」「数値ブーメラン」のプロトタイプモデルの作成と実証、および運動解析

本研究項目については、特に大きな進展を示すことができた。本研究課題に於いて開発した非圧縮性流体に対する3次元非構造移動格子有限体積法を、4枚羽根のブーメランに適用、手元から離れ戻ってくるまでの状況を完全に再現することができた。並行して、実物ブーメランの飛翔実験を実施し、その結果と比較・検証を行いその有効性を実証した。実験との比較で本手法(流体力学・運動力学連成シミュレーション)の有効性を示すことができた。現在論文にまとめている。

「数値サッカーボール」については、プロトタイプの作成を完了し、ボールに回転の無い場合等を想定したシミュレーションを行った。軌道の検証を行った。

(6) 前処理、後処理の汎用化・自動化、途中処理の導入

前後処理、途中処理については、計算効率化のためGPUに対応するようにコードを書き換えた。特に「後処理」について、計算結果の可視化に対し、フリーソフトウェアを導入し、コスト低減を試みた。これは、今後、研究成果を公開した時に、より一般的に成果を普及させるのに役立つという判断からである。

以上、全体として当初計画通りの、一部は計画以上の研究成果が得られた。

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)

Shinichi Asao, Kenichi Matsuno,
Simulations of a falling sphere with
concentration in an infinite long pipe
using a new moving mesh system,
Applied Thermal Engineering, 査読有,
Vol. 72, 2014, pp.29-33
doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.0
6.059

Shinichi Asao, Kenichi Matsuno, and
Masashi Yamakawa, Parallel
Computations of Incompressible Flow
Around Falling Spheres in a Long Pipe
Using Moving Computational Domain
Method, Computers and Fluids, 査読
有, Vol.88, 2013, pp.850-856
doi:10.1016/j.compfluid.2013.07.021

Shinichi Asao, Kenichi Matsuno, and
Masashi Yamakawa, Parallel
Computations of Incompressible
Fluid-Rigid Bodies Interaction Using
Transmission Mesh Method, Computers
and Fluids, 査読有, Vol.80, 2013,
pp.178-183
doi:10.1016/j.compfluid.2012.03.021

Masashi Yamakawa, Kenichi Matsuno,
Shinichi Asao, Adaptive Polyhedral
Mesh Generation for Compressible
Flows, Journal of Computational
Science and Technology, 査読有, Vol.7,
2013, pp.278-285

Shinichi Asao, Kenichi Matsuno, and
Masashi Yamakawa, Simulation of a
Falling Sphere in a Long Bending Pipe
with Trans-Mesh Method and Moving
Computational Domain Method, Journal
of Computational Science and
Technology, 査読有, Vol.7, 2013,
pp.297-305

Masashi Yamakawa, Daiki Takekawa,
Kenichi Matsuno and Shinichi Asao,
Numerical Simulation for a Flow Around
Body Ejection Using an Axisymmetric
Unstructured Moving Grid Method,
Computational Thermal Sciences,
査読有, Vol.4, 2012, pp.217-223.

〔学会発表〕(計 29 件)

Takeshi Inomoto and Kenichi Matsuno,
Numerical simulation of flows around
jellyfish in a current, 6th
International Conference on
Computational Mechanics (ICCM 2015),
July 14-17, 2015, Auckland New
Zealand
Sadanori Ishihara, Kenichi Matsuno,

Masashi Yamakawa, Takeshi Inomoto,
Shinichi Asao, Free Surface Flow
Simulation Using Moving-Grid
Finite-Volume Method 6th
International Conference on
Computational Mechanics (ICCM 2015),
July 14-17, 2015, Auckland New
Zealand

T. Inomoto, K. Matsuno, M. Yamakawa,
S. Asao and S. Ishihara, Application
of Unstructured Moving Grid Finite
Volume Method for Incompressible
Flow of Fall Motion of Parashute, The
25th international Symposium on
Transport Phenomena, CD-ROM(Paper
144) Nov.5-7, 2014, Krabi, Thailand.
T. Inomoto, K. Matsuno, M. Yamakawa,
S. Asao, and S. Ishihara,
Unstructured Moving Grid Finite
Volume Method for Incompressible
Flows - Boomerang

Parallel CFD 2014, May 20-22, 2014,
Trondheim, Norway

Masashi Yamakawa, Yusuke Morishita,
Kenichi Matsuno, Shinichi Asao,
Unsteady Flow Computations around a
Projectile Using Unstructured
Moving Mesh Method, Asian Symposium
on Computational Heat Transfer and
Fluid Flow - 2013, June 3-6, 2013,
Hong Kong University

松井彩徒、松野謙一、山川勝史、移動
格子有限体積法を用いたLES解析に
関する研究、第28回数値流体力学シ
ンポジウム、USB(B02-2) 2014年12
月9~11日 東京、タワーホール船堀
坂下竜太、山川勝史、松野謙一、空気
力学と飛行力学の連成によるプロペラ
航空機モデルの飛行シミュレーション
第28回数値流体力学シンポジウム、
USB(F05-2) 2014年12月9~11日 東
京、タワーホール船堀

浅尾慎一、松野謙一、山川勝史
物体透過格子法と移動計算領域法によ
る管の形状の違いと球の落下のふるま
いの一考察、第28回数値流体力学シ
ンポジウム、USB(E05-5) 2014年12月9
~11日 東京、タワーホール船堀

石原定典、松野謙一、山川勝史、移動
格子有限体積法を用いた自由表面流れ
の数値シミュレーション、第28回数
値流体力学シンポジウム、USB(D11-2)
2014年12月9~11日、東京、タワー
ホール船堀

井ノ本健、松野謙一、山川勝史、ニュー
ラルネットワークを用いた流れ場の
不連続面同定の解適合格子への応用、
第27回日本機械学会計算力学講演会
CD-ROM 2014年11月22-24日、
盛岡、岩手大学

- 石原定典、松野謙一、山川勝史、自由表面流れに対する移動格子有限体積法、第 27 回日本機械学会計算力学講演会 CD-ROM 2014 年 11 月 22-24 日、盛岡、岩手大学
- 松田銀次郎、松野謙一、山川勝史、旅客機モデルを用いた空力シミュレーションに関する研究、第 27 回数値流体力学シンポジウム、2013 年 12 月 17~19 日、愛知、名古屋大学
- 浅尾慎一、松野謙一、山川勝史、堂原教義、物体透過格子と移動計算領域法を用いた無限に長い曲り管を落下する 2 つの球のシミュレーション、第 27 回数値流体力学シンポジウム、2013 年 12 月 17~19 日、愛知、名古屋大学
- 森下悠祐、山川勝史、松野謙一、移動計算領域法を用いたヘリコプタ周り流れの数値シミュレーション、第 27 回数値流体力学シンポジウム、2013 年 12 月 17~19 日、愛知、名古屋大学
- 井ノ本健、松野謙一、山川勝史、非圧縮性流れに対する非構造移動格子有限体積法、第 27 回数値流体力学シンポジウム、2013 年 12 月 17~19 日、愛知、名古屋大学
- 生野裕亮、山川勝史、松野謙一、Euler/Navier-Stokes ソルバーに対する非構造並列計算、第 27 回数値流体力学シンポジウム、2013 年 12 月 17~19 日、愛知、名古屋大学
- 坂下竜太、山川勝史、松野謙一、ティルトローター機に関する数値シミュレーション、第 91 回日本機械学会流体工学部門講演会、2013 年 11 月 9~10 日、福岡、九州大学
- 吉川俊樹、松野謙一、山川勝史、空気力学と飛行力学の連成による紙ヒコーキの飛行シミュレーション、第 50 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同講演会、2013 年 10 月 25 日、大阪、大阪大学、
- 吉川俊樹、松野謙一、山川勝史、紙ヒコーキの飛行力学・空気力学連成シミュレーション、第 26 回数値流体力学シンポジウム、CFD26 講演予稿集 E06-4、日本流体力学会、東京（国立オリンピック記念青少年センター、2012.12.18~20）
- 滝井郁人、松野謙一、山川勝史、インタラクティブ構造格子形成システムの構築、第 26 回数値流体力学シンポジウム、Paper B01-1、日本流体力学会、東京（国立オリンピック記念青少年センター、2012.12.18~20）
- 21 盛野雅和、山川勝史、松野謙一、C O D 法を用いた非構造 MPI-OpenMP 並列計算、第 26 回数値流体力学シンポジウム、CFD26 講演予稿集 A11-4、日本流体力学会、東京（国立オリンピック記念青少年センター、2012.12.20、2012.12.18~20）
- 22 吉川俊樹、松野謙一、山川勝史、紙ヒコーキの航空力学シミュレーション、第 49 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会 講演集 C-15、名古屋（2012.11.30）名城大学
- 23 森下悠祐、山川勝史、松野謙一、物理空間の結合を伴う流れ場への非構造移動格子有限体積法の適用、日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会論文集、pp.531-532、京都（2012.11.17-18）
- 24 吉川俊樹、松野謙一、山川勝史、紙ヒコーキの空気力学シミュレーション、日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会論文集 pp.565-566、京都（2012.11.17-18）
- 25 盛野雅和、山川勝史、松野謙一、C O D 法を用いた非構造並列計算に関する研究、日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会論文集 pp.567-568、京都（2012.11.17-18）
- 26 滝井郁人、松野謙一、山川勝史、G U I を用いた対話型格子形成システムの構築、第 25 回計算力学講演会、講演番号 23071、日本機械学会、神戸（2012.10.6 - 9）
- 27 森下悠祐、山川勝史、松野謙一、管から射出される物体周り流れの数値シミュレーション、日本流体力学会年会 2012、講演番号 057、高知（2012.9.16-18）
- 28 吉川俊樹、松野謙一、山川勝史、紙ヒコーキ航空力学シミュレーションに関する基礎研究、日本流体力学会年会 2012、講演論文集 番号 056、高知（2012.9.16-18）
- 29 小寄晃彦、松野謙一、山川勝史、アクロバット飛行を行う小型航空機まわり流れの数値シミュレーション、日本流体力学会年会 2012、講演論文集 番号 055、高知（2012.9.16-18）
- 〔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・大学院工芸科学研究科・教授
研究者番号： 70252541