

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226018

研究課題名(和文)ペタフロップス級計算機に向けた次世代CFDの研究開発

研究課題名(英文)Study of Next-Generation CFD toward Petaflops Computers

研究代表者

中橋 和博 (NAKASHI, Kazuhiro)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・航空本部・本部長

研究者番号：00207854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 164,800,000円、(間接経費) 49,440,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は航空機等の空力設計に使われている現行CFDが抱える様々な課題、例えば計算結果の物理モデル依存性や複雑形状に対する作業量増大等を抜本的に解決することを目指したものである。計算機の更なる性能改善を念頭にBuilding-Cube Methodを提案し、実用化のための様々なアルゴリズム研究を行った。

その成果の一つとして、自動車周りの流れを京コンピュータ上での世界トップレベルの大規模数値計算で再現した。本CFDアプローチが、極めて複雑で且つ不完全なCADデータからでも直接に流体計算を行えることを示したことは、航空機や自動車の空力設計プロセスを革新的に変える可能性を持ち、その意義は大きい。

研究成果の概要(英文)： This study was conducted aimed at solving the problems of the current CFD in the use of the aerodynamic designs of aircrafts, such as the physical model dependence of the computational results and the increase of the work load for treating complex geometries. The Building-Cube Method was proposed bearing the further performance improvement of computers in mind, and the various algorithm studies for practical use were conducted.

One of the achievements was demonstrated by the world-leading large scale flow computation around a car using the K-computer. It is significant that the proposed CFD approach can treat extremely complicated and incomplete CAD data directly for the simulation. This can be a game-changing technology for aerodynamic design process of aircrafts and automobiles.

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：流体工学 航空宇宙工学 シミュレーション工学 計算機システム 流体騒音 自動車工学 超臨界流体

1. 研究開始当初の背景

数値流体力学 (CFD) は、航空機を主なターゲットに 70 年代から急速に進歩した学問分野である。80 年代には翼の 2 次元設計に、90 年代にはスーパーコンピュータの性能改善に伴って主翼全体の設計に活用されるようになった。そして CFD アルゴリズムの刷新で航空機全体の空力設計が 2000 年代に入って可能になる。今日では旅客機の低燃費化に大きな役割を果たすだけでなく、自動車等の空力設計にも重要な道具になっている。

本研究の代表者グループは、航空機全機周りの流れを数値計算するための CFD ソフト (TAS Code : Tohoku university Aerodynamic Simulation Code) を 90 年代後半に開発した。複雑な形状を忠実に再現、新しい時間積分法や移動物体問題に対するアルゴリズム提案等で、当時としては世界的にも最先端のソフトであった。その成果は、2008 年から本格的開発が始まった三菱航空機の旅客機 MRJ において、空力解析と最適設計の主要ツールとして使われた。MRJ は世界的にも CFD の高度な活用例になっている。

旅客機開発は、航空輸送の高い成長予測を背景に世界的な性能競争が激しくなっている。その厳しい状況において、試験設備や開発経験が欧米に比べ不足している我が国にとって、高性能計算機を活用したシミュレーション技術への期待は大きい。おりしも世界最高性能を狙った京コンピュータの稼働が本研究課題開始の 2 年後に予定されていた。それを航空機等の流体機械の高性能化に活かすことが本研究の大きな動機付けである。

ただし、計算機能力だけに依存したリードは一時的なものに終わる。計算能力が飛躍的に高まるのを機会に、それを最大限に活かす計算アルゴリズムを構築し、応用研究をいち早く進める事が将来に亘る差別化技術の創成につながるものであり、それが本研究課題の大きな目的である。

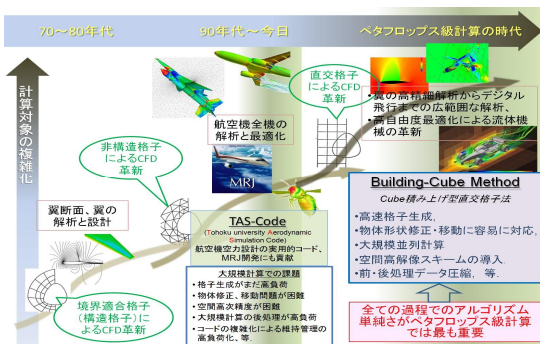


図 1. CFD の進展

2. 研究の目的

本研究は、ペタフロップス級計算機および将来の更なる計算機性能の向上を念頭に、高性能計算機的能力を最大限に活かす次世代 CFD アルゴリズムを世界に先駆けて構築し、同時に空力形状最適化や空力騒音低減等への応用研究を加速して、シミュレーション技

術の高度化を通じて航空機をはじめとする流体機械の高性能化と環境適化に資することを目的とする。

背景で述べたように、CFD は長く流体研究者の研究課題・研究ツールであったのが、2000 年代になり市販ソフトとしても流通するようになった。非構造格子 CFD のアルゴリズムが 90 年代に開発されたことが大きい (図 1)。これは、計算空間を細かな四面体セルに分割して行うもので、計算セルの形状融通性により航空機全機形状の扱いを容易にし、一般技術者でも使えるようになった。

しかし、形状融通性のために計算精度や計算前処理、後処理等が犠牲となっている。研究代表者も TAS Code の開発と応用を通じて、これら欠点が今後の高性能計算機で障害となるであろうことを強く感じた。その解決のために CFD アルゴリズムに新たな革新をもたらすことを目指したのが本研究である。

本研究では、直交格子をベースとする CFD で革新を目指す。従来の直交格子の問題点を解決し且つ大規模並列計算機での利用を念頭に、キューブ状計算領域を積み上げる Building-Cube Method (BCM) をコアとする CFD アルゴリズムである。

3. 研究の方法

次世代 CFD として、申請代表者が提案した Building-Cube Method (BCM) を基本とし、次世代高性能計算機のアーキテクチャへの対応も加味したアルゴリズム研究、関連技術の高度化および応用研究を行う。

BCM は、計算空間に様々なサイズのキューブ状計算領域を積み上げて流れ場全体を表現するものである。各キューブ内には等間隔直交格子を用いることによって高解像度計算を可能にし、また全てのキューブでの計算負荷均等化による大規模並列計算機への対応を容易にする。キューブ構造を活かして格子生成の高速化や後処理でのデータ圧縮も行えること等が特徴である。前処理や後処理も含め、全ての計算過程でのアルゴリズムを単純化することでペタフロップス級計算機的能力を最大限に引き出すとともに、ソフトの維持管理・拡張を容易にすることを狙う。

研究体制では、アルゴリズム研究、ペタフロップス級計算機への対応研究、そして具体的な応用を目指した応用研究チームから構成した。全チームが集まり研究進捗を報告する研究会を半年に一度の割合で開催している。研究 3 年目からは仙台で毎年開催される国際会議のオーガナイズドセッションとして発表の場を設け、国内外の研究者との意見交換を行う機会も設けた。

4. 研究成果

次世代 CFD としての Building-Cube Method について、以下の研究開発を行い、実用化に向けての大きな進展を得た (論文、発表、等)

(1) 前処理技術 (格子生成)

Building-Cube Method の格子生成法は、本課題開始前年に発表している (T. Ishida, S. Takahashi, K. Nakahashi, 'Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method', *J. Comput. Science and Technology*, 2(4), 435-446, 2008)。この方法により、従来の CFD では半日から数日も要していた格子生成の時間を PC 上で数十秒にまで画期的に短縮した。

研究期間中に、この手法にマルチコア PC 上でのアルゴリズム最適化、GUI での会話処理機能等を追加し、実用的なソフトを構築した。これにより Building-Cube Method が様々な複雑形状に容易に適用できるようになり、その成果は重要である。

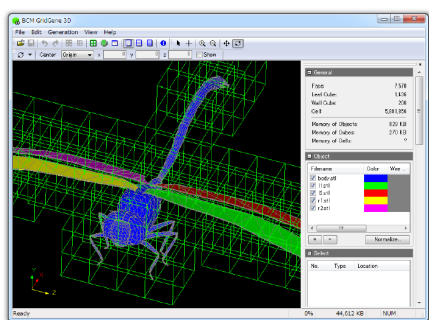


図 2. BCM 格子生成ソフトの画面

(2) 計算アルゴリズム

高精度化: 一般に用いられる非構造格子 CFD は空間精度が 2 次であり、乱流の細かな渦の解像や空力音伝播解析等は困難であった。過去 10 年、その空間精度改善研究が世界的に行われていたが実用化には至っていない。本研究では、従来の延長ではなく直交格子にすることで高精度化を目指した。計算効率の損失なしに空間 3 次精度が得られ、さらに 4, 5 次等の高次精度の成果も得た。高次精度は特に音響場の微弱な音波をシミュレーションするには不可欠である (論文: 、 、 、等)。

壁境界条件: Building-Cube Method のアルゴリズム Simplicity を大きく壊すことなく曲面壁を精度よく取り扱うために、埋め込み境界法 (IBM: Immersed Boundary Methods) に基づくさまざまな試みを行った。その結果、航空のような薄い翼も扱えること (論文、発表等)、航空機脚の空力騒音解析での境界層剥離位置に精度改善が見られたこと (論文、発表等)、あるいは複雑形状にも容易に対応できること (論文、発表等) 等を示した。特に (論文、発表) では、不完全な CAD データも直接扱える境界法を提案しており、自動車の空力解析時間を革新的に短縮するもので注目すべき成果である。

壁境界の別の取り扱いとして、壁のごく近傍に別の計算法を充てる方法も提案している (論文、 、 、 、発表等)。

高速化技術: 近年の計算機は、ベクトル演算を使うことと演算装置数 (コア数) を増やすことで演算性能を上げてきている。この計算機アーキテクチャに対応させるのが BCM を提案するきっかけである。ベクトル並列計算機 NEC SX-9 において、ベクトル化率 99.8%、1 ノード 16CPU で 97% の並列化効率を得られることを実証した (論文、 、 等)。

また、次世代 CFD に適した超ペタフロップス計算機への要求要件を明確化するために、複数の大規模計算機を用いた BCM の詳細評価を行った。その結果、ノード間の通信が大規模並列における障害になることを確認し、次世代 CFD に適した超ペタフロップス級の大規模計算の概念設計をするための非常に重要な知見を得た (発表等)。

更に、京コンピュータで 12,288 コアを用いて 200 億点という世界的にも最大規模の数値計算を実施し、本アプローチの有用性を実証している (論文)。

(3) 後処理技術

大規模計算では計算出力のデータ量が膨大になり、たとえば 2 億点の格子を用いた計算では毎時間ステップ毎に 4 GB の出力があり、膨大な時間ステップの計算結果をすべて保持することは不可能である。BCM では、ウェーブレット変換等の画像データ圧縮技術を CFD 計算結果にも応用する新提案をし、計算結果データ量が 30 分の 1 ほどのサイズになることを示した (論文、等)。今後、予想される数十億、数百億格子点規模の非定常計算には不可欠な技術となろう。

(4) 応用研究

航空機: 航空機では、単に流れ場を解析するだけでなく、空力形状の最適化が重要であり、そのためには高速で再計算できる能力が求められる。そのための Euler ソルバーを開発した。また境界移動等も容易であることを利用して翼のフラッタ解析も可能にしている (論文等)。

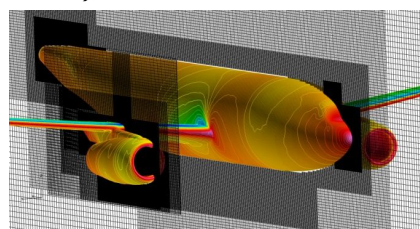
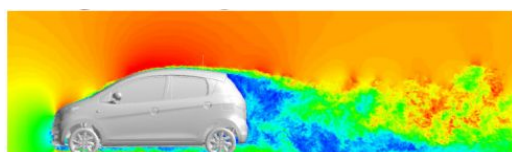


図 3. 旅客機周りの空力解析例 (論文)

航空機の環境問題として、着陸時の脚や高揚力装置等からの風切り音発生抑制が重要な課題となっている。離陸時に騒音源となるエンジンからの音の伝播解析も不可欠である。これら空力音に関する数値解析技術を構築した (論文、発表、 、 、等)。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では構造格子をベースにしたマルチブロック法に

よる CFD ソフト (UPACS-LES) を高度化するとともに、BCM ベースの空力音解析ツールも活用予定である。

自動車：自動車の低燃費化に空力設計もますます重要になっており CFD が多用されつつある。しかし、航空機に比べ形状が極めて複雑であり、且つ使われる CAD データも CFD 解析用としては欠陥が多いため、特に計算前処理に 1 週間以上の時間を要している。これを 1~2 時間に短縮し、且つ計算時間も一桁減らした。図 4 に従来 の 計 算 法 (Unstructured grid) と本研究課題で取り上げた方法 (Cartesian grid) の比較を示している。これからも本アプローチの優位性が証明された (論文、発表)。



| | Cartesian grid with modified IBM | | Unstructured grid | |
|----------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------|-------------|
| | 6.1 mm | 0.7 mm | 6.0 mm, | 1.5 mm |
| Grid resolution | 6.1 mm | 0.7 mm | 6.0 mm, | 1.5 mm |
| Number of grids | 110 million | 19 billion | 0.45 million | 2.3 billion |
| Entire work time for preparation | 1 hour | 2 hours | 1 week | 2 weeks |
| Flow computation time | 19 hours | +25 hours | 120 hours | +120 hours |

図 4. 京コンピュータによる自動車計算に対する本アプローチ (Cartesian grid) と従来法 (Unstructured grid) との比較 (論文)

その他の応用研究: CFD 技術は実験が困難な問題に重要であり、その一例として超臨界水等への拡張が研究されている。しかしながら、複雑形状流路内で且つマルチ・フィジクスに伴う計算高負荷が課題であり、その解決方法として BCM の活用を試みている (論文、発表等)。また、多数の移動物体による複雑な流れ場に対しても、簡便かつ高速な直交格子のアルゴリズムを応用した研究を開発中である (論文)。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 24 件)

Onishi, K., Tsubokura, M., Obayashi, S., Nakahashi, K., "Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K Computer: Part 2 Use of Dirty CAD Data with Modified Cartesian Grid," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., 査読有, 7(2), 印刷中, 2014 (DOI: 1/2014-01-0580).

西村康孝, 佐々木大輔, 中橋和博, "Building-Cube Methodによる圧縮性 Euler ソルバーの構築と航空機翼のフラッタ解析への応用," 日本航空宇宙学会誌論文集, 査読有, 62(2), pp. 39-46, 2014.

X. Su, S. Yamamoto, "A new matrix dissipation model for central scheme," Int. J. Numer. Meth. Fluids, 査読有, 74(7), pp.494-513, 2014 (DOI: 10.1002/fld.3860).

S. Takahashi, T. Nonomura, K. Fukuda, "A Numerical Scheme Based on an Immersed

Boundary Method for Compressible Turbulent Flows with Shocks: Application to Two-Dimensional Flows around Cylinders", Journal of Applied Mathematics, 査読有, Vol. 2014, 2014 (DOI: 10.1155/2014/252478)

K. Nakahashi, "Aeronautical CFD in the age of Petaflops-scale computing: From unstructured to Cartesian meshes," European Journal of Mechanics B/Fluids, 査読有, 40, pp.75-86, 2013 (DOI:10.1016/j.euromechflu.2013.02.005).

X. Su, D. Sasaki, K. Nakahashi, "Cartesian mesh with a novel hybrid WENO/meshless method for turbulent flow calculations", Computers & Fluids, 査読有, 84(15), pp.69-86, 2013 (DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.05.017).

R. Sakai, D. Sasaki, K. Nakahashi, "Parallel implementation of large-scale CFD data compression toward aeroacoustic analysis", Computers & Fluids, 査読有, 80(10), pp.116-127, 2013, (DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.04.020).

T. Ishida, S. Kawai, K. Nakahashi, "Gridless Boundary Treatment for Viscous Flow Computations using Cartesian Grid Method," J. Computational Science and Technology, 査読有, 7(1), pp.38-58, 2013 (DOI: 10.1299/jcst.7.38).

R. Sakai, D. Sasaki, S. Obayashi, K. Nakahashi, "Wavelet-based data compression for flow simulation on block-structured Cartesian mesh," Int. J. Numer. Meth. Fluids, 査読有, 73(5), pp.462-476, 2013 (DOI: 10.1002/fld.3808).

X. Su, S. Yamamoto, K. Nakahashi, "Analysis of a meshless solver for high Reynolds number flow," Int. J. Numer. Meth. Fluids, 査読有, 72(5), pp.505-527, 2013 (DOI: 10.1002/fld.3747).

X. Su, D. Sasaki, K. Nakahashi, "On the efficient application of weighted essentially nonoscillatory scheme," Int. J. Numer. Meth. Fluids, 査読有, 71(2), pp.185-207, 2013 (DOI: 10.1002/fld.3655).

S. Qi, T. Furusawa, S. Yamamoto, K. Nakahashi, "Comparison of Different Wall Boundary Treatments for Preconditioning Method Coupled with Building-cube Method," Procedia Engineering, 査読有, 61, pp.298-305, 2013 (DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.019).

D. Sasaki, A. Deguchi, H. Onda, K. Nakahashi, "Landing Gear Aerodynamic Noise Prediction Using Building-Cube Method," Modeling and Simulation in Engineering, 査読有, 2012 (632387), 2012 (DOI: 10.1155/2012/632387).

X. Su, D. Sasaki, K. Nakahashi, "A Hybrid Scheme for the Near Wall Treatment of Building Cube Method," J. Fluid Science and Technology, 査読有, 7(2), pp.197-208, 2012 (DOI: 10.1299/jfst.7.197).

福島裕馬, 佐々木大輔, 中橋和博, "ブロック構造型直交格子と IB 法を用いた LEE コードの構築," 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 60 (1), pp.56-63, 2012.

佐藤功人, 小松一彦, 滝沢寛之, 小林広明, "OpenCL におけるタスク並列化支援のための実行時依存関係解析手法", IPSJ Transactions on Advanced Computing Systems (ACS36), 査読有, 5 (1), pp.53-57, 2012.

古澤卓, 牧野幸太郎, 山本悟, 中橋和博, "前処理法と BCM に基づく熱対流の数値シミュレーション," 日本機械学会論文集 B 編,

- 査読有, **78**(788), pp745-752, 2012.
- K. Komatsu, T. Soga, R. Egawa, H. Takizawa, H. Kobayashi, “Performance evaluation of a next-generation CFD on various supercomputing systems,” Sustained Simulation Performance 2012, 査読有, **1**, pp.123-132, 2012 (DOI:10.1007/978-3-642-32454-3).
- T. Soga, A. Musa, K. Okabe, K. Komatsu, R. Egawa, H. Takizawa, H. Kobayashi, S. Takahashi, D. Sasaki, K. Nakahashi, “Performance of SOR methods on modern vector and scalar processors”, Computers & Fluids, 査読有, **45** (1), pp.215-221, 2011 (DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.12.024).
- K. Komatsu, T. Soga, R. Egawa, H. Takizawa, H. Kobayashi, S. Takahashi, D. Sasaki, K. Nakahashi, “Parallel Processing of the Building-Cube Method on a GPU Platform”, Computers & Fluids, 査読有, **45**(1), pp.122-128, 2011 (DOI:10.1016/j.compfluid.2010.12.019).
- 21 K. Shimoyama, S. Yoshimizu, S. Jeong, S. Obayashi, Y. Yokono, “Multi-Objective Design Optimization for a Steam Turbine Stator Blade Using LES and GA,” J. Compu. Science and Technology, 査読有, **5**(3), pp.134-147, 2011.
- 22 S. Obayashi, “Multi-Objective Design Exploration and its Applications”, Int. J. of Aeronautical and Space Science, 査読有, **11**(4), pp.247-265, 2010.
- 23 高山央貴, 佐々木大輔, 中橋和博, 田辺安忠, 齋藤茂, “構造・非構造カップリングによるヘリコプター全機周りの流体数値計算”, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, **58**(681), pp.277-284, 2010.
- 24 住隆博, 黒滝卓司, 桧山淳, “高次精度補間を導入した特性インターフェイス条件によるマルチブロック計算法”, 日本航空宇宙学会和文論文集, 査読有, **57**, pp.196-209, 2009.
- [学会発表](計24件)
- Y. Fukushima, T. Misaka, S. Obayashi, D. Sasaki, K. Nakahashi, “The Numerical Analysis of Forward Fan Noise Shielding Effect on the Over-the-Wing Nacelle Configuration,” 52nd AIAA Aerospace Science Meeting, National Harbor(U.S.A.), Jan.15, 2014.
- 山本悟, “マルチフィジックスCFDの産業利用,” 日本機械学会2013年度年次大会ワークショップ「CFDの産業利用における方向性」(招待講演), 岡山市, Sept. 9, 2013.
- 中橋和博, “ベタフロップス計算機時代におけるCFD,” 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(基調講演), 東京, July 4-5, 2013.
- K. Onishi, S. Obayashi, K. Nakahashi, M. Tsubokura, “Use of the Immersed Boundary Method within the Building Cube Method and its Application to Real Vehicle CAD Data,” The 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego(U.S.A.), June 25, 2013.
- H. Kobayashi, “Early Evaluation of NGV and Feasibility Study of the Next Generation Vector System Architecture for Memory Intensive Applications,” NUG XXIV (招待講演), Stuttgart (Germany), June 14, 2013.
- Y. Fukushima, T. Misaka, S. Obayashi, S. Jeong, D. Sasaki, K. Nakahashi, “CFD-CAA Coupled Computation of Fan Noise Propagation from Engine Nacelle Based on Cartesian Mesh Method,” 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin (Germany), May 27, 2013.
- D. Sasaki, M. Takashi, S. Obayashi, “Toward Large-Scale Design Optimization Based on Building-Cube Method,” Int. Workshop on Uncertainty Quantification and Design Optimization, Trieste (Italy), Feb. 25, 2013.
- S. Takahashi, D. Sasaki, Y. Fukushima, “Large-Scale Flow Simulation for Development of Engineering Product,” International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (招待講演), Kyoto (Japan), Dec. 7, 2012.
- K. Nakahashi, “Computational Grids for Aeronautical CFD : Past, Present and Future,” 12th ISGG Conference on Numerical Grid Generation, MASCOT/ISGG2012(基調講演), Las Palmas de Gran Canaria (Spain), Oct. 25, 2012.
- K. Nakahashi, “Aeronautical CFD in the Age of Petaflops-Scale Computing; From Unstructured to Cartesian Meshes,” 100-Year Anniversary, Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen Univ. (招待講演), Aachen (Germany), June 15, 2012.
- A. Deguchi, D. Sasaki, K. Nakahashi, M. Murayama, K. Yamamoto, Y. Yokokawa, “Aeroacoustic Simulation of JAXA Landing Gear by Building-Cube Method and Non-compact Curle's Equation”, AIAA 2012-0388, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville(U.S.A), Jan. 9-12, 2012.
- Y. Fukushima, D. Sasaki, K. Nakahashi, “Code Development of Linearized Euler Equation on Block-Structured Cartesian Mesh for Complicated Geometries”, AIAA 2012-0832, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville(U.S.A), Jan. 9-12, 2012.
- K. Nakahashi, “Immersed Boundary Method for Compressible Euler Equations in the Building-Cube Method,” AIAA 2011-3386, 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Honolulu (U.S.A), June 27-30, 2011.
- T. Ishida, S. Kawai, K. Nakahashi, “A High-Resolution Method for Flow Simulations with Block-Structured Cartesian Grid Approach,” AIAA 2011-3380, 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Honolulu (U.S.A), June 27-30, 2011.
- D. Sasaki, H. Onda, A. Deguchi, R. Sakai, K. Nakahashi, “Landing Gear Aerodynamic Noise Prediction using Building-Cube Method”, AIAA 2011-3366, 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu(U.S.A), June 27-30, 2011.
- T. Furusawa, S. Yamamoto, “Numerical Simulation of Supercritical Water in T-Shaped Channel across Critical Point”, Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conf., **I**, pp.1-6, 2011.
- K. Sano, Y. Hatsuda, S. Yamamoto, “Scalable Streaming-Array of Simple Soft-Processors for Stencil Computations with Constant Memory-Bandwidth”, Proc. 19th Annual IEEE Symposium on

- Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM2011) I, pp.234-241, 2011.
- T. Imamura, T. Hirai, S. Enomoto, K. Yamamoto, “Near- and Far-fields Characteristics of Tandem Cylinder Flow using Delayed Detached Eddy Simulation,” Proc. of Inter-noise 2011, Osaka (JAPAN), Sep.5,2011.
- S. Enomoto, K. Yamamoto, et.al, “Large-Eddy Simulation of High-Subsonic Jet flow with Microjet Injection,” AIAA-2011-2883, 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Portland (U.S.A), June.8,2011.
- T. Imamura, T. Hirai, S. Enomoto, K. Yamamoto, “Tandem Cylinder Flow Simulations using Sixth Order Compact Scheme,” AIAA-2011-2943, 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Portland (U.S.A), June.8, 2011.
- 21 M. Murayama, Y. Yokokawa, H. Kato, H. Ura, H. Uchida, K. Yamamoto, K. Abe, L. Wu, “Computational and Experimental Study on Noise Generation from Tire-Axle Regions of a Two-Wheel Main Landing Gear,” AIAA-2011-2821, 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Portland (U.S.A), June.7, 2011.
- 22 中橋和博, “Building-Cube Methodの壁境界条件について,” 第24回数値流体力学シンポジウム, 横浜, Dec. 20-22, 2010.
- 23 K. Nakahashi, “Block-Structured Cartesian Mesh Approach for Near-Future Peta/Exa-Scale CFD,” 18th International Meshing Roundtable (基調講演), Salt Lake City (U.S.A.), Oct. 27, 2009.
- 24 K. Nakahashi, S. Takahashi, T. Ishida, “Progress and Expectation of CFD for Near-Future Peta-Flops Computers,” Parallel CFD 2009 (基調講演), Moffett Field (U.S.A.), May 5, 2009.

〔図書〕(計 4件)

- M. M. Resch, X. Wang, W. Bez, E. Focht, H. Kobayashi, “Sustained Simulation Performance 2012,” 182p, Springer Berlin Heidelberg, 2012 (ISBN: 978-3-642-32453-6 (Print) 978-3-642-32454-3 (Online))
- M. M. Resch, X. Wang, W. Bez, E. Focht, H. Kobayashi, S. Roller, (Eds.), “High Performance Computing on Vector Systems 2011,” 189 pages, Springer 2012 (ISBN 978-3-642-22244-3)
- Resch, M.M., Benkert, K., Wang, X., Bez, W., Kobayashi, H., Roller, S., (Eds.), “High Performance Computing on Vector Systems 2010,” 198 pages, Springer, 2010 (ISBN: 978-3-642-11851-7).
- Resch, M., Roller, S., Benkert, K., Galle, M., Bez, W., Kobayashi, H., (Eds.), “High Performance Computing on Vector Systems 2009”, 250 pages, Springer, 2010 (ISBN: 978-3-642-03913-3).

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

中橋 和博 (NAKASHI, Kazuhiro)

(独)宇宙航空研究開発機構・航空本部・
本部長
研究者番号：00207854

(2)研究分担者

山本 悟 (YAMAMOTO, Satoru)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：90192799

大林 茂 (OBAYASHI, Shigeru)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：80183028

小林 広明 (KOBAYASHI, Hiroaki)
東北大学・サイバ-サイエンスセンター・教授
研究者番号：40205480

山本 一臣 (YAMAMOTO, Kazuomi)
(独)宇宙航空研究開発機構・航空本部・
主幹研究員
研究者番号：80358465

佐々木 大輔 (SASAKI, Daisuke)
金沢工業大学・工学部・講師
研究者番号：60507903

(3)連携研究者

鄭 信圭 (JEONG, Shinkyu)
東北大学・流体科学研究所・准教授
(H23年に韓国 Kyunghee Univ.に転出)
研究者番号：20358469

滝沢 寛之 (TAKIZAWA, Hiroyuki)
東北大学大学院・情報科学研究科・准教授
研究者番号：70323996

江川 隆輔 (EGAWA, Ryusuke)
東北大学・サイバ-サイエンスセンター・准教授
研究者番号：80374990

黒滝 卓司 (KUROTAKE, Takuji)
(独)宇宙航空研究開発機構・航空本部・
席研究員
研究者番号：20358659

榎本 俊治 (ENOMOTO, Shunji)
(独)宇宙航空研究開発機構・航空本部・
主任研究員
研究者番号：40358487

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

高橋 俊 (TAKAHASHI, Shun)
東海大学・工学部・講師
研究者番号：60553930

計 7 名