

jh140020-NA11

## 次世代ペタスケール CFD のアルゴリズム研究

佐々木大輔（金沢工業大学）

将来の更なる計算機性能の向上を念頭に、等方直交格子をベースとする次世代 CFD アルゴリズムを構築する研究を進めている。等方直交格子はその単純性から格子生成を極めて高速に行え、高次精度解法の導入も容易である。これら利点は大規模並列計算機上で行う大規模非定常計算により更に強化されることが期待される一方、並列性能を向上させることが不可欠である。本研究では、これまで開発してきた等方直交格子をベースとする計算手法の更なる実用化を図るために空力音響伝播解析及び多数物体の移動問題に対するアルゴリズム開発と共に、音響伝播解析手法の並列性能の改善に向けた調査を実施し、並列性能向上に向けた検討を行った。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

本共同研究は、東北大学・名古屋大学・九州大学を共同研究拠点として実施し、東北大学・名古屋大学・九州大学の計算機・設備を利用している。

#### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

本共同研究は、金沢工業大学・東北大学（サイバーサイエンスセンター、流体科学研究所）・東海大学・名古屋大学・宇宙航空研究開発機構（JAXA）・理化学研究所と共同して研究を実施した。研究内容と研究機関の役割分担は以下の通りである。

- ①流体計算のアルゴリズム開発（金沢工大，東北大・流体研，東海大，理研）
- ②応用工学問題への適用（金沢工大，東北大・流体研，東海大，JAXA）
- ③ペタスケール向けの超並列化技術（東北大・サイバー・名大・情報基盤）
- ④可視化システムの連携技術の構築（東北大・サイバー・名大・情報基盤）
- ⑤大容量のオンチップキャッシュを考慮したベク

トル化技術（東北大・サイバー）

### 2. 研究の目的と意義

次世代高性能計算機を活用したシミュレーション技術に対する産業界の期待は近年ますます大きくなりつつあり、革新的な製品開発のブレークスルーにつながることが期待されている。本研究では、従来は計算機能力の限界により制限されていた様々な流体問題への挑戦を目指し、シミュレーション技術の高度化を通じて航空機やガスタービン、自動車等様々な流体機械の高性能化と環境適合化に資することを目的としている。

多くの CFD 研究では、現行アルゴリズムの高度化・複雑化により大規模計算を目指しているのに対し、本研究では、ペタスケール計算機的能力を活かすためにアルゴリズムの単純さを強化して、CFD およびその応用に革新性をもたらすことを狙ったものである。現在のアルゴリズムを単純に拡張しただけでは超大規模並列環境を効率的に使用することは不可能であるため、計算機科学の分野との密な連携による超大規模並列環境下における超並列アルゴリズム開発が不可欠である。本研究では、ペタフロップス級流体計算を可能とする流体ソルバのアルゴリズム開発と、次世代高性能並列計算機や大規模ベクトル計算基盤におけるソルバの高効率実行を可能にする超並列化技術およびベクトル化技術の研究開発に取り組む。また、超並列アルゴリズム開発に加えて、大規模なデー

タの取り扱いを可能にするデータ圧縮法や遠隔可視化法等の研究も共同で実施する必要がある。

本研究では、直交格子法ベースの計算手法である Building-Cube 法 (BCM) の計算効率 (ベクトル化・並列化) の向上を目的とした研究を実施し、大規模計算機上での実用性の向上を図る。更に、直交格子法自体の計算精度を向上させるために、工学実用問題への応用を通して流体計算の信頼性向上を目的とした研究を進める。

平成 26 年度は、直交格子を用いた空力音響伝播解析の実用化に向けたアルゴリズム開発、多数移動物体問題のアルゴリズム開発を中心として研究を行い、応用工学問題への適用を行う。加えて、分散メモリ型並列計算機上での流体・音響伝播解析手法の効率的な並列化手法の構築に向けた研究として、ロードバランスの改善法を検討する。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

ペタフロップス級流体計算を可能とする流体ソルバのアルゴリズム構築のためには、大規模ベクトル計算機や超並列計算機環境による評価が必須であり、当公募型共同研究による計算機環境が必要不可欠である。並列性能の向上のために流体解析手法や音響伝播解析手法を改良するためにも、本枠組みは非常に有効である。また、複数拠点を扱うことで、スカラー型及びベクトル型計算機に対応したアプリケーションの開発、ネットワークを介した大規模データのハンドリング技術、可視化技術の考案を行うことが可能である。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究で開発を進める Building-Cube 法は 2004 年に提案したものであるが、本公募型共同研究を通して計算技術の開発を進めており、非圧縮性流体解析手法・圧縮性流体解析手法に対して並列化・ベクトル化効率の向上を図ってきた。昨年度は、圧縮性オイラー方程式を音波成分に対して線形化した線形オイラー方程式 (Linearized Euler Equation, LEE) に基づく音響伝播解析手法の MPI 並列化を実施したが、並列化性能の向上

に余地があるため、本年度の取り組みとして並列性能向上に向けた取り組みを実施する。

また、本公募型共同研究では、直交格子における CFD アルゴリズムの開発を行い、非圧縮性ソルバによる航空機主脚の空力音の解析や自動車空力解析、音響伝播解析手法によるファン騒音解析を通して、本手法の工学的な有効性を示してきた。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### ジェットエンジン騒音の解析手法の開発

既存の航空機形態において、各騒音源を低騒音化する研究開発が進められているが、それに対して航空機の形態を変更することによって大幅な低騒音化を達成しようとする研究も進められている。これは、主にエンジン位置を変更することにより、エンジン騒音を機体により遮蔽するという試みである。様々な航空機形態が提案されているが、本研究ではエンジンを主翼上面に取り付ける Over-the-Wing Nacelle (OWN) 形態に着目し、図 1 に示す簡略化モデルを用いて LEE ソルバにより騒音遮蔽効果を定量的に検証した。本研究では 5kHz までのファン騒音の近傍場での伝播を解析するために、約 7 億点の格子点を用いて三つのナセル位置における騒音遮蔽量を周波数帯ごとに解析した。その結果、周波数帯により騒音の伝播特性が異なり、特に低周波数帯に対しての遮蔽効果は高周波数帯と比較してあまり大きくないことが分かった。

圧縮性 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ソルバと LEE ソルバの連成計算として、RANS ソルバの計算結果を元にして乱流騒音を効率的に予測する手法を構築した。構築した手法は Stochastic Noise Generation and Radiation (SNGR) モデルと言い、流れ場の解析と、乱流騒音源の発生、発生した騒音の伝播を分離して解析する。圧縮性 RANS ソルバを用いて流れ場を解析し、合成渦法により騒音源を発生させ、LEE ソルバにより発生した騒音の伝播を解析する。構築した SNGR モデルをマッハ数 0.72 のジェット騒音 (図 2) に適用し、その予測精度を確認した結果、近傍場での音圧レベルは実験値とよい一致を示した。ま

た、Building-Cube 法のフレームワークと、騒音源の発生手法として合成渦法を用いることにより、既存の手法と比較して、RANS ソルバから LEE ソルバへのデータの受け渡しや計算速度などが高速化された。

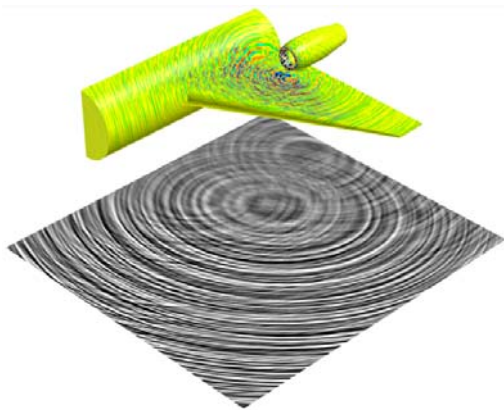


図 1 モデル表面と直下の瞬時圧力分布

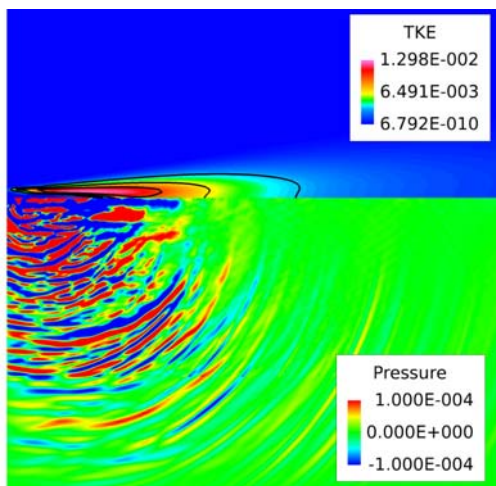


図 2 RANS 解析により得られた乱流運動エネルギー分布(上)とジェットから発生した瞬時の圧力変動値 (下)

### 直交格子法を用いた複数の移動物体周りの圧縮性流体解析法の構築

BCM の計算技術を応用して、直交格子法に基づいた複数移動物体周りの流体解析法を開発した。物体形状の表現はレベルセット法によって行い、境界条件は BCM で実績があるゴーストセル法による埋め込み境界法を用いている。直交格子法におけるレベルセット法は高い汎用性と高速な形状再現が特徴であり、ゴーストセル法は実装が簡易

で計算負荷が小さい利点がある。これらの特徴を生かした計算手法は世界的にも研究例が多く見られるが、その一方で複数の移動物体を含む流れ場への適用例については研究例が多くない。そこで本研究では世界に先駆けて複数の移動物体の干渉によって誘起される流れ場についての解析手法を構築することを目的に研究開発を行った。

解析対象として着目しているのは、多数の微粒子を含む流れ場であり、これらの微粒子が圧力波と影響し合う乱流場を解析することを目的としている。図 3 と図 4 は、超音速付近で飛行する微粒子を含む流れ場中の渦度と圧力場を可視化した結果である。この結果はロケット後流内部における流体場の解析結果で、固気連成解析の重要な結果として現在 ECCOMAS 等で発表を予定している。衝撃波の内部に多数の微粒子が存在する場合、それらが相互に干渉しあうことで衝撃波の形状や強さが変化することは以前から研究されており、本研究によってそれらの詳細なメカニズムを明らかにできると考えている。現在の解析では運動方程式の導入と粒子の衝突現象の再現までができており、現在までに数 10 個の粒子で解析を行った。今後は数 100 から数 1000 のオーダーの粒子を解析し、流体場への影響を調査する。

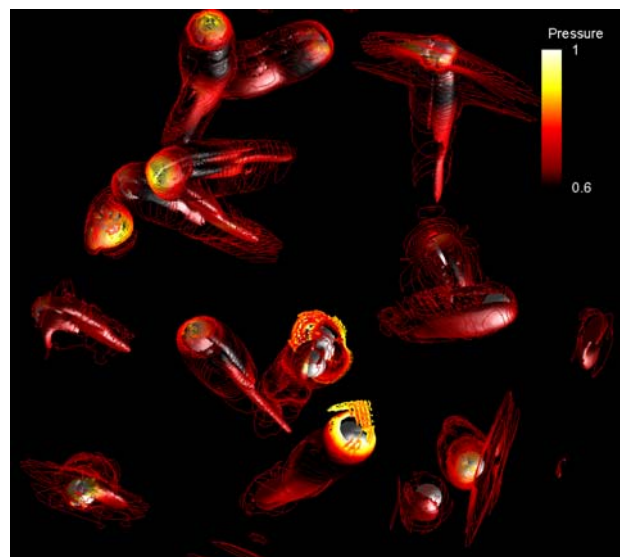


図 3 超音速で飛行する多数の粒子を含む流れ場 1

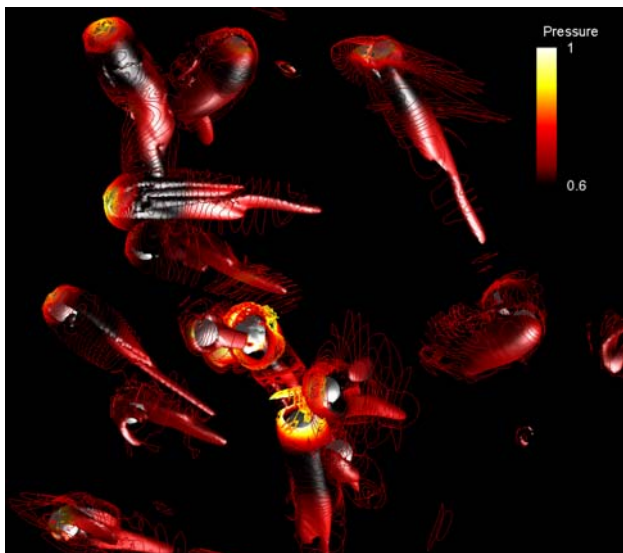


図 4 超音速で飛行する多数の粒子を含む流れ場 2

### LEE コードの並列性能向上に向けた研究

BCM による計算格子は、図 5 に示すように、cube と呼ばれる正方形領域と、cube 内に配置された各軸方向同数の格子点(cell)により構成される。また、BCM-LEE では、それぞれの cube は隣り合う cube と重なり合った overlap cell を 3 つ持っており、overlap Cell に物理量を補間することで隣り合う cube と情報交換を行いながら計算を進める。

本年度はこれまで取り組んできた BCM-LEE の並列化作業をさらに進め、大規模な環境においても高い並列性能を実現できる BCM-LEE の開発を行ってきた。LEE の並列化に関しては、前述のように BCM の特徴である解像度が異なる cube 間の補間処理や演算のインバランスが並列性能へ影響を及ぼす要因になりうる。本年度では、cube 間の補間などについて詳細な調査を行った。

cube 間の補間が並列性能へどのような影響を及ぼしているのかを切り分けて調査するために、物体が存在しないテスト用実験データを用いた場合の並列性能を調査した。cube ごとの演算が完全に均等なケースを想定した場合に、各 MPI プロセスが担当する浮動小数点演算数が均等であるかどうか、確認を行う。表 1 に、物体が存在しない低解像度のテスト用実験データ(cube 数 1436, 1cube 当たりの cells 数 16x16x16)を用いた際の SX-9 における cube 当たりの浮動小数点演算数を示す。浮

動小数点演算数は SX-9 の性能解析ツールである ftrace を用いて取得した。表 1 より、MPI プロセスが増えるにつれて、担当する cube や cube に対する浮動小数点演算数が適切に減少していることが確認できた。

次に、一般的には通信時間などの影響が大きくなりやすい大規模な並列環境において、物体が入っていないデータを用いて演算時間・データ転送時間の解析を行う実験を行った。実験に用いたデータは、cube 数 65,536, 1cube 当たりの cell 数が 32x32x32 の総 cell 数が約 21 億のデータを用いて、SX-9 において実験を行った。1 ノード当たり 16 プロセスを割り当て、SX-9 全 16 ノード 256CPU を用いて flat-MPI で実験を行った。図 6 に MPI プロセス数を変えた場合の実行時間を示す。これを見ると、プロセスを増加させると、演算時間はほぼ理想的に半減していることが分かる。また、プロセスが増えても転送時間の増加がそれほど見られていない。物体が入っていないため、演算量・通信量ともに均等な割り当てができたため、理想的な速度向上が見られた。一方、I/O 時間が増加しているが、これは実験の際に I/O サーバの障害が発生したためであり、通常時には I/O 時間の増加は発生しないと考えている。

以上の結果より、解像度の異なる cube 間の補間の影響は小さくなく、cube ごとの処理が均一であれば理想的な台数効果が得られることが分かった。そこで、cube 毎の処理が均一とは限らない、つまり解析中に物体が存在する条件において並列数と実行時間の関係を調べた。ここで、計算機による特性を調査するため、ベクトル型計算機として SX-9 及び SX-ACE, スカラー型計算機として LX406Re-2 を使用した。図 7 に示すように、cube を均等に割り当てる場合(図中のデフォルト)、並列数の増加に伴う実行時間の減少が、理想的とは言えない。これは、物体が存在する cube において演算量が増えるため、各プロセスでの演算量にインバランスが生じているためである。そこで、物体を持つ cube に対して重みを与えることで、演算量のインバランス解消を図った。これが、図中の



インバランスを考慮した分割の結果である。SX-9 では、演算量のインバランスを考慮することで、並列数に応じてほぼ理想的な演算量の減少が確認できる。SX-ACE でも若干の減少が確認できるが、理想的な減少とは言いがたい。また、スカラー型並列計算機に至っては、実行時間が増加する結果となった。これは、割り当てられる cube 数が変化することで、演算量は均一に近づいたが、各プロセスが担当する通信量のインバランスが発生するためである。今後、物体が存在する場合に、どのように cube ごとの処理を均一化し、各 MPI プロセスに割り当てるべきか、再検討を行う必要がある。

表 1 並列数を変えた場合の浮動小数点演算数

MPI数	担当Cube数	積分区間の演算数 (GFLOP)	Cubeあたりの演算数 (GFLOP)
4	359	2,962.93	8.25
8	178	1,471.51	8.27
12	123	1,016.23	8.26
16	90	746.97	8.30
24	61	506.14	8.30
32	46	379.51	8.25

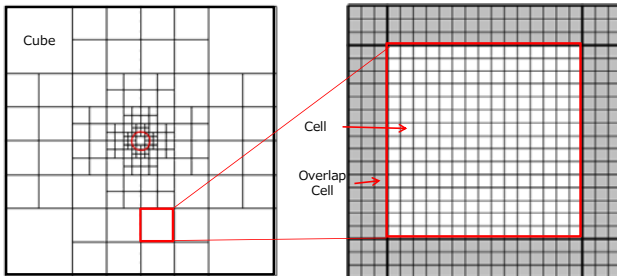


図 5 ブロック配置及び Cube 内 Cell 分割

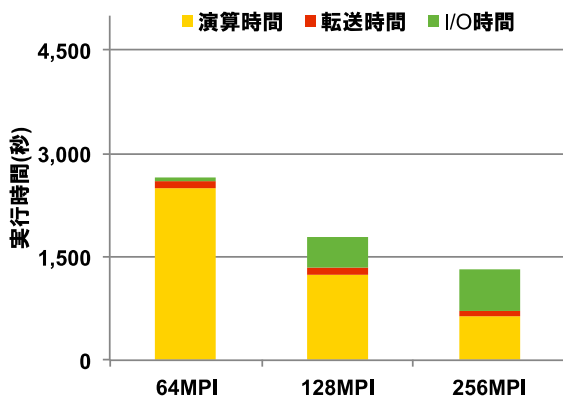
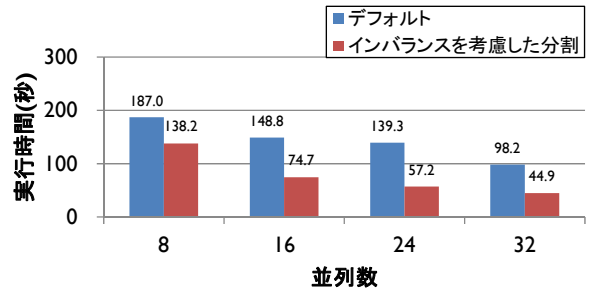
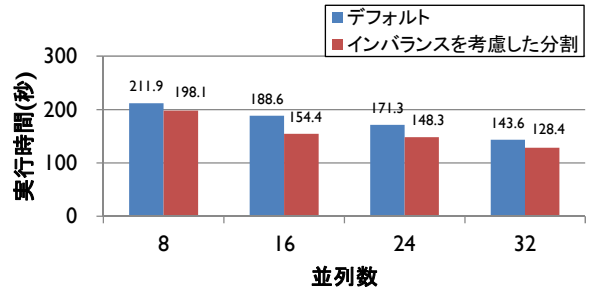


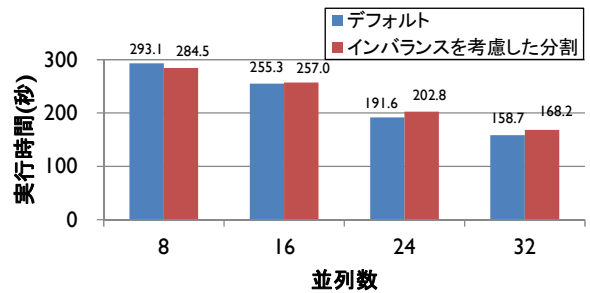
図 6 MPI プロセス数を変えた場合の実行時間の割合



(a) SX-9



(b) SX-ACE



(c) LX406Re-2

図 7 並列数による実行時間の比較

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度、直交格子を用いた空力音響伝播解析の実用化に向けたアルゴリズム開発、多数移動物体問題のアルゴリズム開発を中心として研究を進めてきた。アルゴリズム開発はおおむね順調に推移している。

現在、構築した LEE、圧縮性ソルバを用いて、前述の OWN 形態における騒音遮蔽量の最大化と巡航時における造波抵抗の最小化を考慮したナセルの最適化といった実応用問題への適用を予定している。

また、多数移動物体問題に関しては、亜音速の流れ場中における固気連成による音波との連成解析も現在検討しており、そちらは冷却塔上部の排気ファンとそこから流出する水滴微粒子との流体音響連成現象である。これについては現在ファンの解析を実施している最中で、ファン近傍の壁乱流を高精度に解像する革新的な壁乱流解析手法を開発中である。

一方、分散メモリ型並列計算機上での流体・音響伝播解析手法の効率的な並列化手法の構築に向けた研究として、物体が存在する場合のインバランス解消を試みた。cube ごとの処理を均一化し、各 MPI プロセスの計算負荷を同一にすることで並列性能の向上を図ったが、計算機によっては通信量が増加して全体の実行時間が増えてしまう問題が明らかとなった。今後、様々なプラットフォームにおいて調査を行い、物体が存在する場合において並列性能を向上させる手法について検討を進める必要がある。

併せて、大規模なデータの取り扱いを可能にする可視化法の研究の一環として、前述の翼形形態 (OWN) における大規模可視化を行った。今後、共同研究を通じた大規模可視化技術を開発することで、大規模データの効率的な取り扱いが可能となる。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

Shun Takahashi, Taku Nonomura, Kota 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*, Volume 2014, Article ID 252478, 21 pages, 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/252478>

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”, 日本航空宇宙学会論文集, 第 62 巻 2 号, 39-46 頁, 2014 年 4 月.

Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, Takashi Soga, Akihiro Musa, Hiroaki Kobayashi, “Exploring System Architectures for Next-Generation CFD Simulations in the Postpeta-Scale Era”, *Journals of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2014.

Yuma Fukushima, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Cartesian Mesh Linearized Euler Equations Solver for Aeroacoustic Problems around Full Aircraft,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2015, Article ID 706915, 18 pages, 2015. doi:10.1155/2015/706915

Yuma Fukushima, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Wavenumber Optimized Immersed Boundary Method for Aeroacoustic Analysis Based on Cartesian Mesh,” *AIAA Journal* (投稿中)

### (2) 国際会議プロシーディングス

Yuya Kojima, Daisuke Sasaki, Takeshi Akasaka, Masato Okamoto, Kazuhiko Komatsu, Shigeru Obayashi, Koji Shimoyama, “Low Reynolds Number Flow Analysis of Flat Plate,” *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, October 2014.

Ryohei Serizawa, Shun Takahashi, Daisuke Sasaki, Makoto Okamoto, “Investigation of Flow Characteristics around an Oscillating Airfoil at Large Reduced Frequency,” *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, October 2014.

Yuma Fukushima, Shigeru Obayashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Efficient Aeroacoustic Analysis of Jet Noise,” *Proceedings of the Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, October 2014.

Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Rapid Large-scale Cartesian Meshing for Aerodynamic Computations,” Paper 2.7.1, *Proceedings of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2014)*, St. Petersburg, Russia, September 2014.

Yuma Fukushima, “Efficient Jet Noise Prediction Using Synthetic Eddy Method and Block-Structured Cartesian Mesh,” Paper 2.11.2, *Proceedings of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2014)*, St. Petersburg, Russia, September 2014.

Ryusuke Egawa, Shintaro Momose, Kazuhiko Komatsu, Yoko Isobe, Akihiro Musa, Hiroyuki Takizawa, Hiroaki Kobayashi, “Early Evaluation of the SX-ACE Processor,” SC '14 Poster Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2014.

Daichi Terayama, Shun Takahashi, Kota Fukuda, Shinya Hasegawa, “Numerical Investigation on Fundamental Phenomena of Turbulent Flows in Thermoacoustic devices by CFD,” 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, 2014

### (3) 国際会議発表

Yuma Fukushima, Noriyoshi Kato, Yuriko Takeshima, Shigeru Obayashi, “Multisensory Analysis of Characteristic Noise from WW2 Aircraft,” IEEE VIS 2014, Paris, France, November 2014.

Keiji Onishi, Makoto Tsubokura, Shigeru Obayashi, Kazuhiro Nakahashi, “Practical Applications for the Computational Vehicle Aerodynamics on the Massively Parallel Supercomputer: Part 2, Hierarchical Cartesian Grid Approach Utilizing Dirty CAD Data,” 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, July 20-25, 2014.

Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, Hiroaki Kobayashi, “A Compiler-Assisted OpenMP Migration Method based on Automatic Parallelizing Information,” *29th International Supercomputing Conference*, Leipzig, Germany, June 22-26, 2014.

Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, Hiroaki Kobayashi, “OpenMP Parallelization Method using Compiler Information of Automatic Optimization,” Legacy HPC Application Migration 2014.

Hiroaki Kobayashi, “Tohoku Univ.’s New Supercomputer System and R&D on Highly-Productive HPC for Memory Intensive Applications,” NUG 2014.

### (4) 国内会議発表

高橋俊, 長谷川真也, “数値流体解析に基づいた熱音響機関の数値解析”, 平成 26 年度応用熱音響研究会, 2014 (招待講演)

高橋俊, 長谷川真也, 野々村拓, “圧縮性 Navier-Stokes 方程式による熱音響エンジンの数値解析”, 第 46 回流体力学講演会, 2014 年 7 月.

福島裕馬, 大林茂, 佐々木大輔, 中橋和博, “Over-the-Wing Nacelle 形態におけるナセル位置による騒音遮蔽効果の比較,” 日本航空宇宙学会第 45 回年会講演会, 東京, 2014 年 4 月.

小松一彦, 江川隆輔, 滝沢寛之, 小林広明, “高性能可搬性のための HPC リファクタリング,” 第 9 回 AT 研究会オープンアカデミックセッション ATOS9, 2014 年 5 月.

芹沢 涼平, 高橋 俊, 佐々木 大輔, 岡本 正人, “数値解析による低レイノルズ数での運動翼まわりの流れ特性”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月.

水野 裕介, 高橋 俊, 野々村拓, 福田 紘大, “複数粒子が高マッハ数・低レイノルズ数で移動する流れ解析コードの構築と評価”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月.

水野 裕介, 高橋 俊, 野々村拓, 福田 紘大, “固気混相衝撃波流れ解析に向けた衝撃波を通過する粒子周りの流れ場の数値解析”, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015 年 3 月.

飯岡大樹, 兒島有哉, 佐々木大輔, “低レイノルズ数流れにおける折り曲げ薄翼の二次元流体解析,” 日本機械学会北陸信越支部第 44 回学生員卒業研究発表講演会, 柏崎, 2015 年 3 月.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroaki Kobayashi, “Performance Evaluation of an OpenMP Parallelization by Using Automatic Parallelization Information,” Sustained Simulation Performance 2014.