

12-MD01

## 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）

中橋和博（宇宙航空研究開発機構）、大林茂（東北大学流体科学研究所）  
小林広明、江川隆輔、小松一彦（東北大学サイバーサイエンスセンター）  
高橋俊、新井紀夫（東京農工大学工学研究院）  
東田学（大阪大学・サイバーメディアセンター）  
石井 克哉（名古屋大学情報基盤センター）

### 概要

近年の計算機性能の大幅な向上を活用する解析手法として、等方直交格子をベースとする次世代 CFD アルゴリズムの研究を進めている。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計算で更に強化されることが期待される一方、大規模な非定常計算を大規模並列計算機上で効率的に行うためには、並列性能を向上させることが不可欠である。本報告では、等方直交格子をベースとする計算手法の並列性能を調査し、並列数の増加に伴う性能を評価した。また、埋め込み境界法や乱流モデルの導入による壁面近傍の取扱いが並列性能に及ぼす影響を調べた。加えて、ブロック型直交格子法をベースとして現在構築を行っている騒音伝播解析法について述べる。

### 1. 研究の目的と意義

近年、京を初めとする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が大きくなっており、革新的な製品開発のブレークスルーにつながることを期待されている。高性能計算機の性能を十分に活用するためには、その能力を最大限に活かす計算アルゴリズムを構築することが必要である。そのためには、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必要がある。

本研究は、高性能計算機の更なる性能向上を念頭に、そのペタフロップス級の演算能力を最大限に活かす流体の数値計算アルゴリズムを、数値流体力学の研究グループと計算機科学を専門とする研究グループとの協力により開発することを目的とする。この研究により、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可能にするとともに、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合化に資することを旨とするものである。

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、実用性の向上を図る。更に、Building-Cube 法のフレームワークを活用した多分野連成や移動物体問題への拡張を行い、そのような問題における大規模解析手法の構築を目指す。

### 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

#### (1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

本共同研究は、金沢工業大学・東北大学・東京農工大学・大阪大学・名古屋大学と共同して研究を進めた。

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野・超大規模情報システム関連研究分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

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、複数拠点を使い、多くのアーキテクチャに対応したアプリケーションの開発と、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の考案を行うことが可能である。

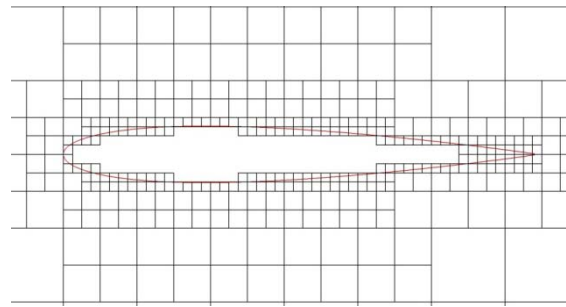
3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

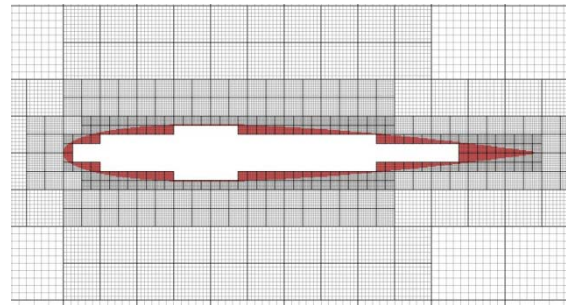
1. Building-Cube 法の概要

Building-Cube 法 (BCM) は格子生成、流体解析アルゴリズム、後処理の単純性を保つために等間隔直交格子を採用している高解像度の計算手法である。BCM では流れ場を多くの様々なサイズの”Cube”と呼ばれる立方体の領域に分割する。各 Cube サイズは物体の形状に合わせて決定され、各 Cube の内部には等間隔直交格子”Cell”を生成して計算が行われるが、全ての Cube が同数の Cell を持つことで高い並列化効率が得られる。

図 1 に、翼周りに生成した BCM 格子を示す。物体近傍では小さい Cube サイズを使用するため、十分に細かい格子を生成することになり、物体を詳細に表現することが可能となる。一方、翼から離れた領域では Cube サイズを大きくすることで、格子点数の削減を図っている。本アプローチにより、各 Cube における計算負荷は均一となり、大規模並列計算環境時でも十分な並列性能を上げることが期待できる。



(a) Cube 配置



(b) Cell 配置

図 1 翼周りの BCM 格子

2. 並列性能の解析

支配方程式は三次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、それを Fractional-step 法によって段階化したのちに、スタガード格子においてそれぞれの項を有限差分法で近似する。Fractional-step 法の予測段階で仮の速度を求め際には、対流項と粘性項のどちらにも 2 次精度の Adams-Bashforth 陽解法を用い、対流項の差分近似には 3 次精度風上差分、粘性項と圧力の Poisson 式には 2 次精度中心差分近似をそれぞれ用いる。なお、図 2 に示すように各 Cube は 2 セル分のオーバーラップ領域を有しており、そのオーバーラップ領域を利用して隣接 Cube との情報交換を行う。

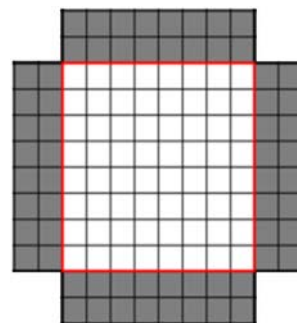


図 2 Cube におけるオーバーラップ領域

表 1 使用する計算機の性能

System	TFlops	Nodes	Sockets /node	Cores /PE	Memory BW GB/s	On-chip Memory	Network	B/F
NECSX-9	26.2	16	16	1	256	256 KB ADB	2x 128GB/s IXS	2.5
Nehalem EX	1.74	6	4	8	34.1	256 KB L2/core, 24MB shared L3	2x 4 GB/s IB	0.47
Fujitsu FX1	5.16	128	1	4	40	6MB shared L2	2x 4 GB/s IB	1.0
Fujitsu FX10	5.68	24	1	16	85	12 MB shared L2	2x 5-50 GB/s IB	0.36
Hitachi SR16K M1	124	128	4	8	128	256 KB L2/core, 32MB shared L3	2x 24-96 GB/s CNW	0.52
Tesla C1060	1.24	16	1	1	102	16KB/SM	1 GB/s IB	1.3

今回の比較で用いた計算機は、表 1 に示すとおりであり、解析ソルバはそれぞれの計算機に合わせて最適化を施してある。

ベクトル型並列計算機 **SX-9**、GPU クラスタ **Tesla C1060** 以外は、全てスカラー型並列計算機である。使用した並列計算機は全て、オンチップキャッシュを搭載している。ベクトル計算機に導入したレッドブラック **SOR** 法はデータ依存性を解消できる一方、ストライドデータアクセスが必要となり性能低下を起こす。そこで、スカラー型並列計算機で **BCM** を計算する際には、通常の **SOR** 法を用いることとした。

並列性能の評価に利用した 3 次元モデルは、図 3 に示す大規模モデル (**F1**, 2 億点) 及び小規模モデル (球, 500 万点) の 2 種類である。図 4 に、大規模モデルである **F1** における流体解析の実効性能を示す。この図より、**SX-9** が他のスカラー型並列計算機より高い実効性能を達成していることが確認できる。これは、**SX-9** の理論メモリバンド幅が高いことに加え、**ADB** の効率的な使用により、実効メモリバンド幅が高いためと考えられる。一方、スカラー型並列計算機同士を比較すると、メモリバンド幅の高い **SR16K** の実効性能が高く、他の実効性能を上回っている。

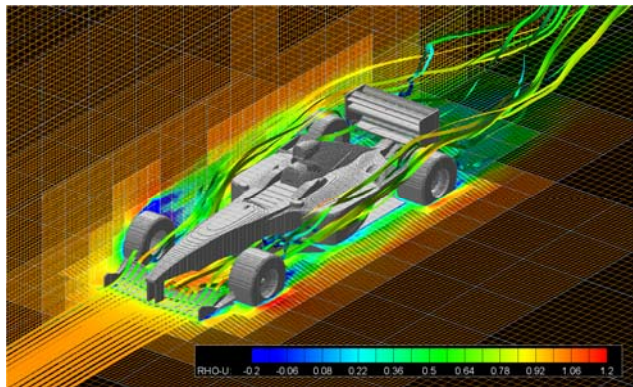
図 5 に小規模モデルにおける流体解析の実効性能を示す。メモリの関係上、GPU は小規模モ

デルしか計算できていないが、GPU クラスタの性能は **SX-9** とほぼ同等で、スカラー型並列計算機よりも高いことが分かる。その理由として、GPU はストリームプロセッサ数と高いバンドメモリ幅を有していることから、**BCM** の並列計算を効率的に行えることが挙げられる。加えて、小規模モデルではデータ規模が小さく、**SX-9** や他のスカラー型並列計算機においては、十分な性能を引き出すことができないためと考えられる。実際、大規模モデルと比較して小規模モデルの実効性能は低い。

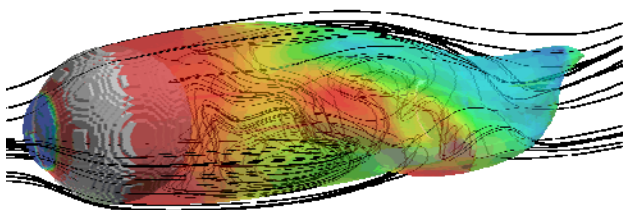
大規模モデルにおけるスケーラビリティに着目すると、図 6 に示すようにすべての大規模計算機システムにおいて高いスケーラビリティが確認できる。これは、大規模モデルにおける並列度が高く、十分に並列処理可能な計算を割り当てることができたためと、ノード間をつなぐネットワークのバンド幅が十分にあったためと考えられる。一方、図 7 に示す小規模モデルでのスケーラビリティは、大規模モデルに比べて概して低い。ベクトル型並列計算機、スカラー型並列計算機共に、小規模モデルにおいては並列可能な処理が不足したため、スケーラビリティの低下が見られる。

スケーラビリティ低下の原因を探るため、大規模モデルと小規模モデルにおける処理の内訳を図 8 に示す。大規模モデルにおいては、並列

数が増えるにつれて、通信が支配的になることが分かる。小規模モデルにおいては、その傾向がより顕著となり通信の影響が非常に大きい。そのため、計算領域における Cube 数が少ない小規模データにおいては、並列数の増加と共にスケーラビリティが悪化していることが分かる。今後、通信量を削減する Cube の割り当て方法を改善することでスケーラビリティの悪化を防ぐ必要がある。



(a) 大規模モデル (F1)



(b) 小規模モデル (球)

図 3 計算モデル

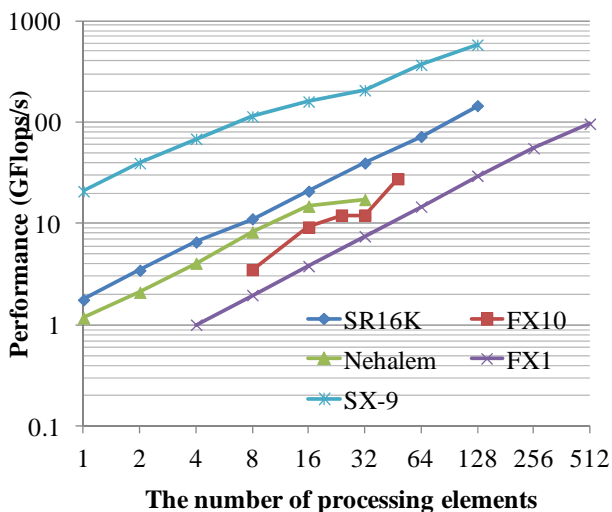


図 4 実効性能 (大規模モデル, F1)

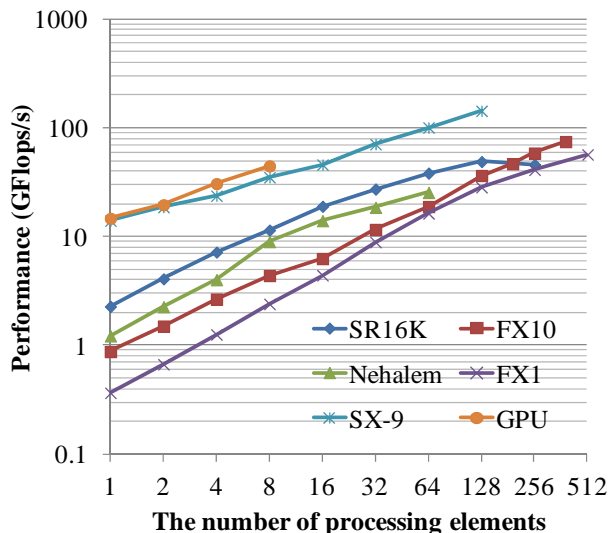


図 5 実効性能 (小規模モデル, 球)

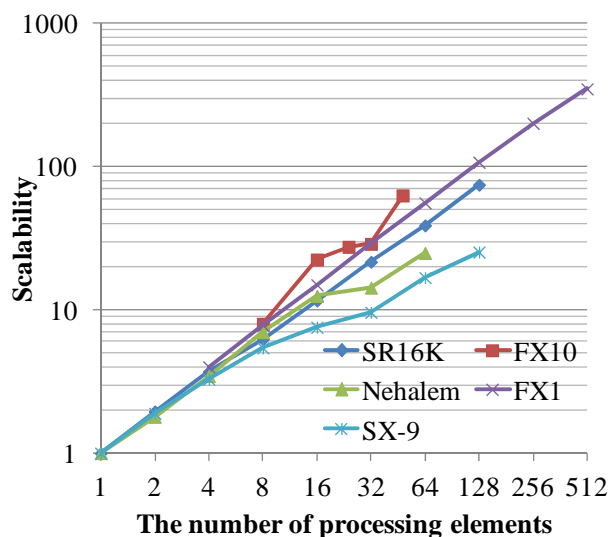


図 6 スケーラビリティ (大規模モデル, F1)

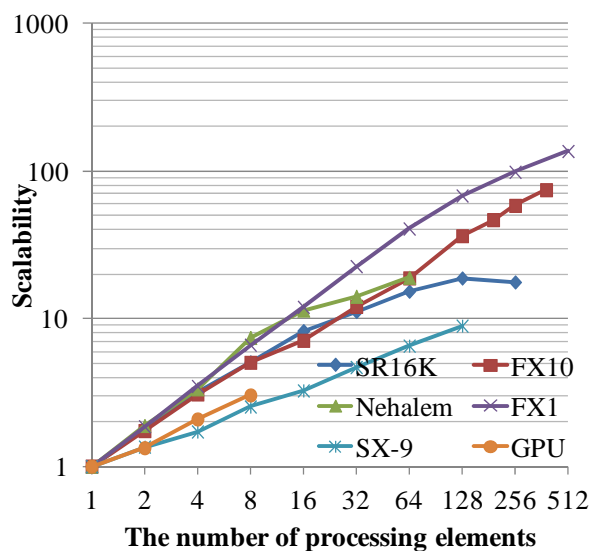
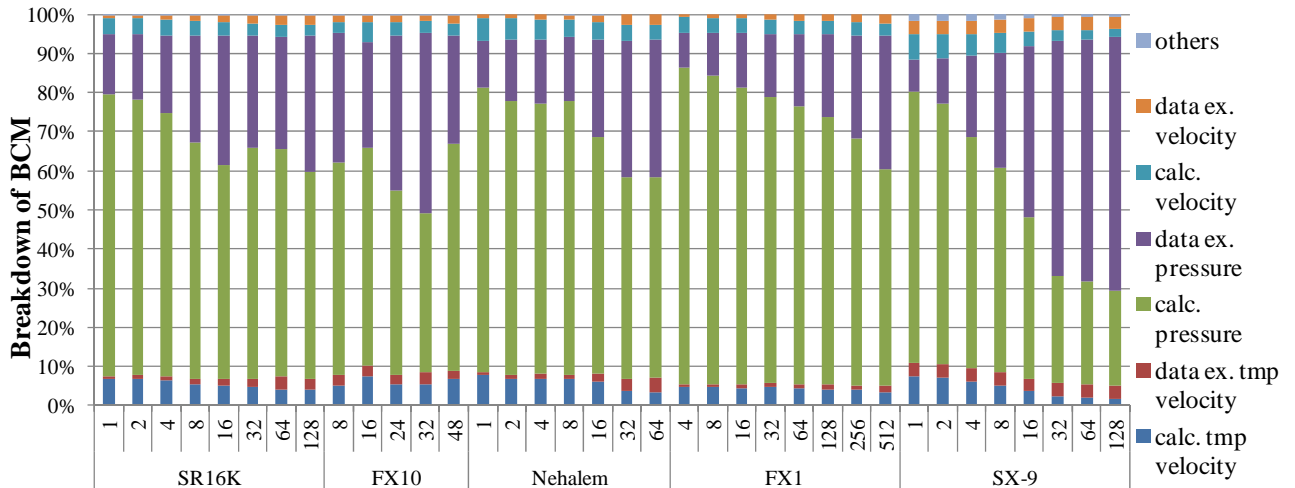
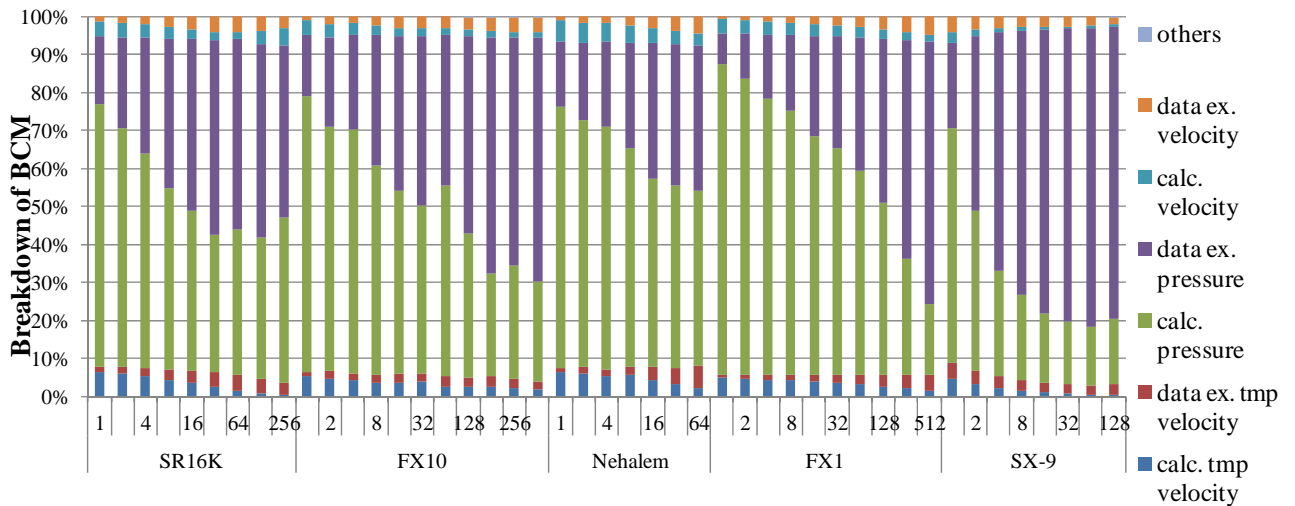


図 7 スケーラビリティ (小規模モデル, 球)



(a) 大規模モデル (F1)



(b) 小規模モデル (球)

図 8 処理の内訳

### 3. 物体近傍の取扱いと並列性能

BCM においては、従来物体壁を単純な階段状表現として扱ってきた。物体境界の幾何学精度を保ち且つ境界層内の粘性領域を解くには物体近傍で非常に細かい格子が必要である。しかし、格子生成のような人的作業が不要になることの利点は、実問題で必要となる複雑形状では非常に大きい。

一方、現在の計算機環境においては、直交格子を用いて物体境界の幾何学精度を保てる程の格子密度で計算をすることは未だに困難であり、カットセル法や埋め込み境界法などの形状表現法が提案されてきた。BCM においても

ghost-cell をベースとした埋め込み境界法を拡張した手法を開発してきた。また、今後航空分野で要求されるようなレイノルズ数  $Re=O(10^{6-8})$  の流体解析を行う場合、乱流境界層中の粘性底層まで解像するためには非常に細かい格子が必要となる。そのような細かい格子による計算は、現在の高性能計算機環境においても現実的なアプローチとはいいがたく、物体壁面近傍での計算を省略して格子点数を節約するための壁面乱流モデルが必須である。

埋め込み境界法や壁面乱流モデルの導入によって壁面の取扱いが複雑化し、BCM の利点である並列性能のロードバランスが損なわれる可能

性がある．そこで，本節では非圧縮性流体ソルバを用いて並列性能の調査を行う．支配方程式は連続の式と非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式であり，フラクショナルステップ法を用いて時間進行を行う．それぞれの式を速度と圧力の定義点が一致したコロケート格子上で離散化し，運動量補間を用いて物理量の振動を抑制する．壁面の取扱いは，ghost-cell をベースとした埋め込み境界法を採用する [坂井，第 26 回数値流体力学シンポジウム]．乱流モデルには検証用に標準スマゴリンスキーモデルを導入している．

計算対象は球とし，表 2 に示すように，Cube 数が 1184 であり，総格子点数は約 4000 万点である．並列計算に使用した計算機は，東北大学流体科学研究所未来流体情報創造センターのスカラ機 SGI Altix UV1000 であり，MPI により Cube 単位で分割することで並列化を行った．並列計算の計算条件を表 3 に示す．結果として得られた並列スケーラビリティを図 9 に示す．埋め込み境界を用いずボクセルにより物体を表す場合 (VOX)，良好な速度向上率が得られた．一方，埋め込み境界法を用いることで (IBM)，速度向上率が若干損なわれていることが分かる．加えて，乱流モデルを使用した解析結果においては (IBM+SMG)，ボクセル計算と比較して速度向上率の大幅な低下が見られる．これは，乱流モデルを使用したことにより情報交換する物理量が増加してしまい，並列化のオーバーヘッドが増加してしまったことが原因である．現在，領域分割においては METIS を用いて Cube 単位での分割を行っているが，埋め込み境界法と乱流モデルを使用した解析を行う場合には，壁面での計算負荷を考慮し，ロードバランスがより等しくなるような分割を実現する必要がある．

表 2 計算格子数

# cubes	1184
# cells in cube	32
# cells (total)	38,797,312

表 3 並列計算条件

# Steps	50
# CPUs	1, 16, 32, 64
Numerical Scheme	ボクセル (埋め込み境界法なし) : <b>VOX</b>
	埋め込み境界法 : <b>IBM</b>
	埋め込み境界法+乱流モデル (スマゴリンスキーモデル) : <b>IBM+SMG</b>

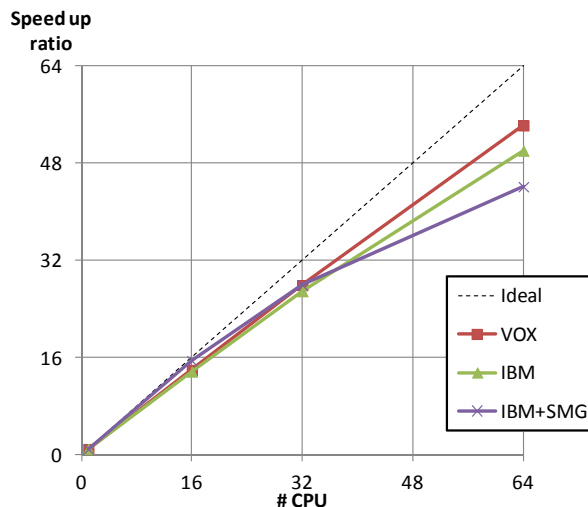


図 9 スケーラビリティ

#### 4. 音響伝播解析法の構築

近年，高バイパス比エンジンの採用によって航空機から発生する騒音は低下している一方，空港付近の騒音規制は厳しくなっており，更なる低騒音化に向けた騒音解析の研究はより重要になっている．そこで，本研究では，圧縮性 Euler 方程式を音波成分に対して線形化した LEE (Linearized Euler Equation) の構築を計算機

科学グループと連携して BCM 上で行い、音源から発生する音波の伝播解析を行う [福島, 第 44 回流体力学講演会]. 本手法により, Generic Inlet Nacelle 形状からの騒音伝播解析を行う.

LEE の支配方程式において, 空間微分には 7 つの stencil を用いた 4 次精度の有限差分スキームである DRP(Dispersion Relation Preserving) スキームを用いて計算を行う. また, Cube 境界や物体境界からの非物理的な振動を取り除くために 4 次精度の Damper を各 iteration で適用している. 時間積分には 6 段階 4 次精度の LDDRK(Low Dissipation Dispersion Runge-Kutta)を用いる. この時間積分も DRP スキームと同様の考えのもと提案されたもので, 通常 4 段階の Runge-Kutta 法を 6 段階にまで増加させ, 時間方向の誤差を抑えるために用いている.

上記の計算手法を BCM 上に実装した LEE コードを用いて, 三次元軸対称ナセルからの音波散乱問題の解析を行う. 計算対象となる Generic Inlet の形状を図 10 に示す. ファンの半径は 1.2m であり, ファン面は  $z=0\text{m}$ (点線)の位置にある. 表 6 に解析で用いる流れ場の条件を示す. 今回の解析は流れ場の無い状態を模擬しているため, マッハ数は 0, 他の圧力や温度などもほぼ定常状態を模擬している. 表 7 には音源の条件として, spinning mode 入力条件を示す. 周波数は 1,578Hz であり, (24,1)モードとなっている. この条件では cut-on の状態であり, ファン面で発生した騒音は軸方向に進みナセルから外部へ伝播する.

解析に用いる格子情報を表 8 に示す. 計算格子を設定する際にはまず, 音源位置と吸収領域を考慮して計算領域を設定する. 今回の解析では計算領域の  $y,z$  方向に無次元長さ 3 の吸収領域を持ち, その中に約 80 点の格子点が入っているため, 過去の研究から十分な減衰効果を持っていると考えられる.  $+x$  方向はこの倍の領域を持っているが,  $-x$  方向は約 1.5 の領域しかない. しかし, ナセルを回折して後方に回り込む音波

は弱く, 十分に減衰させることができると考えられる. 次に, 音源周りの Point Per Wavelength (PPW)を設定し, それによって一つの Cube の分割数を決定する. Cube 境界では高次精度の補間を行っているが, 境界の数が多くなれば, それだけ境界から発生する誤差が増えるため, できる限り Cube は分割しない方が望ましい. ただし, 一つの Cube を大きくし, その分を Cube の分割数を増やすことで補おうとすると, 吸収領域にまで余分な格子点が配置されることになるため, 精度と格子点数の両方を考慮する必要がある. 今回の解析では計算領域と吸収領域を明確にするため, また, ナセル周りの細分化を行うことを考え, 図 11 のような配置とした.

図 12 に, Case1, Case2 を用いて解析を行った場合の,  $z=0$  断面での瞬時圧力変動値分布を示す. 図においては吸収領域となっている部分は省いており, また, 下半分にそれぞれの格子点の様子を一点間引きで示している. 図 12 より, ナセル内部から発生した音波が内壁を伝わって, 最終的にはインレットにおいて斜め方向に回折して伝播している様子が確認できる. また, Case2 では Case1 と比較して解像度が高いために, 圧力変動のピークが高低ともにはっきりと表れている. 図 13 は Case1 において圧力変動を  $+x$  方向から見た図を  $x$  座標ごとに示した図である. これを見ると, 発生した騒音が回転しながら一旦すぼめられ, それを抜けると半径方向に大きく広がっている様子が確認できる. この図において圧力分布は反時計回りに回転している. 圧力変動のピークの数も高低共に 24 個あり, 入力モードの(24,1)に対応した Spinning mode 入力が適切に入力されていることがわかる.

表 6 流れ場の条件

Mach number	0.0
Static pressure [Pa]	105,465.716
Static temperature[K]	296.814
Static density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2378523
Static speed of sound [m/s]	345.37052

表 7 音源の条件

Acoustic mode	(24,1)
Power [dB]	153.7
Frequency [Hz]	1,578

表 8 計算格子数

	Case1	Case2
Min. Cell Size	0.0188	0.0094
# Cubes	708	1464
# Cells in Cube	40	40
# Cells (total)	45,312,000	93,696,000
Max. PPW	11.68	23.37

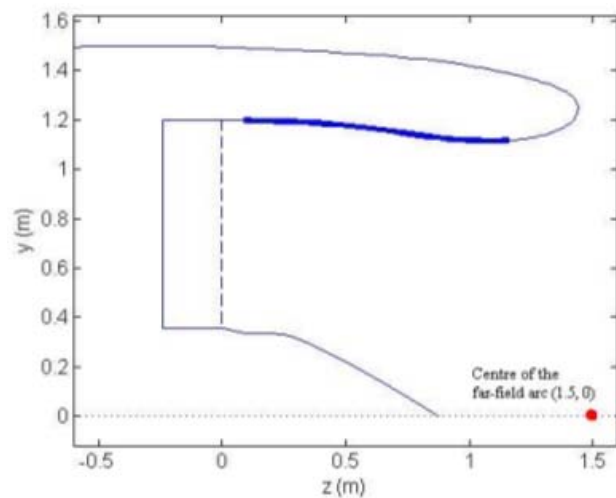
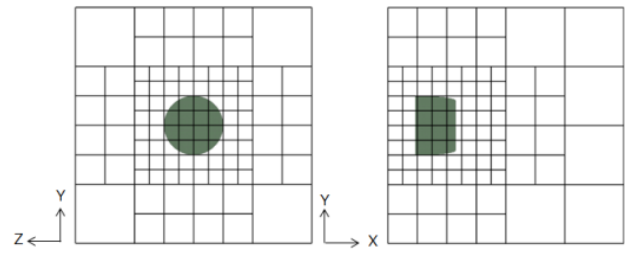
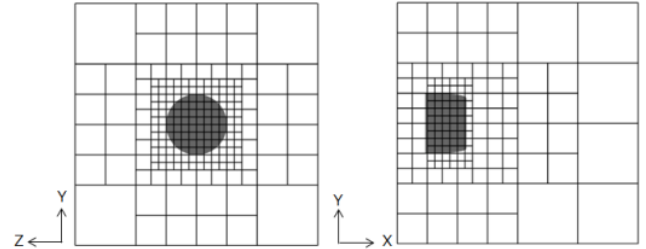


図 10 軸対称エンジンナセルインレット形状



(a) Case 1



(b) Case 2 (細分化)

図 11 Cube 配置図

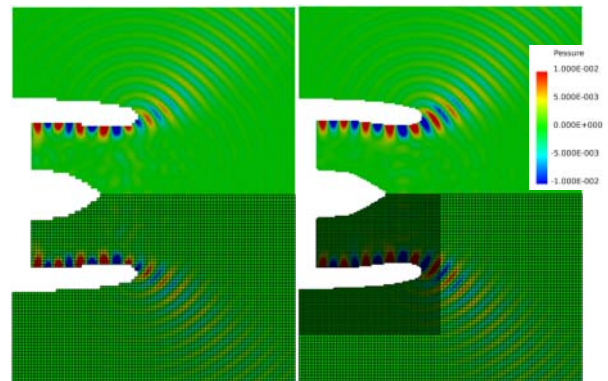
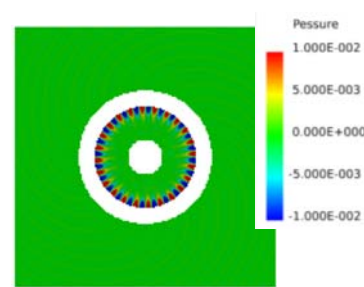
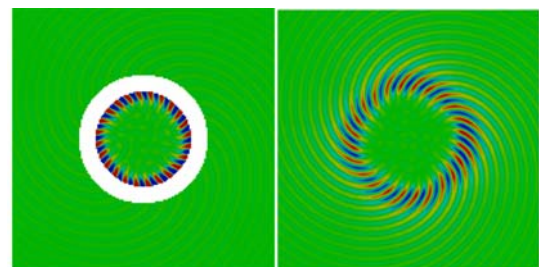


図 12 圧力変動値分布 (左:Case1, 右:Case2)



(a) X= -0.1



(b) X= 0.9

(c) X= 1.9

図 13 +x 方向から見た圧力分布



## (2) 当初計画の達成状況について

今年度の計画は、開発しているブロック型直交格子法に基づく流体解析ソルバを元に、超並列計算機上で高い並列性能が出せるような並列化ソルバを完成させることであった。今年度の成果として、並列数の増加に伴う通信量の増大が顕著であること、また壁面の取扱い手法により領域における計算負荷が大きく変化することを明らかとした。これらは大規模並列計算時におけるスケラビリティの悪化に直結しており、それらを解決する方策の導入なしで超並列計算を行うことはできない。今年度は、これらの解決手法と実証を行うまでには至っておらず、今後早急に対策を講じる必要がある。その実現により大規模並列計算機での並列性能が向上し、超並列計算が可能となる。

また、多分野連成問題解析として、現在流体構造連成振動解析にも取り組んでおり、現在角柱の振動現象について大規模解析により検証を行っている。これを発展させることで、三次元剥離渦構造と流体構造連成振動の関係について詳細に研究することができ、工学的に意義の大きな結果が得られると期待できる。

加えて、多分野連成問題への別の応用例として、空力音響解析を目的とした開発を進めている。今年度は、基礎段階として音響ソルバの開発を進め、その有効性を示した。今後、空力計算とのカップリング手法の構築を進めることで、空力音響解析が可能となる。

## 4. 今後の展望

今年度、各種スカラー型並列計算機において大規模モデル・小規模モデルを用いて並列計算を実行して実効性能についての調査を行い、並列数の増加に伴う通信量の増大が顕著であることが判明した。そのため、超並列計算における並列性能の向上には通信量の隠蔽が不可欠であることが明らかとなったため、今後通信量の隠蔽を行う手法を導入して、大規模計算機での並列性能向上を目指す。また、BCM のオリジナルのコンセプトでは、将来の更なる計算機性能の向上を念頭に、物体壁

を単純な階段状表現として扱ってきた。しかし、航空分野で要求されるような高レイノルズ数領域 ( $10^6 \sim 8$ ) における流体解析を行うために必要な格子点数は莫大であり、当面は埋め込み境界法に代表される形状表現法が必要と考えられる。今回、埋め込み境界法及び乱流モデルを導入した検証計算の結果より、これらの手法を導入することで物体境界での計算量・情報交換量が増加し、BCM の並列性能が悪化することが示された。そのため、物体境界の取扱いにかかる計算負荷の増加を考慮した領域分割手法を検討し、並列性能の向上を目指す。同時に、現在行っている超並列化技術に関する研究を適用し、大規模並列環境での良好な並列性能の実証を目指す。

また、多分野連成現象などの応用工学問題への取り組みとして、LEE を支配方程式とした音響伝播解析手法を構築し、Generic Inlet Nacelle 形状からの騒音伝播解析を行った。今回、4500 万点及び 9400 万点規模の解析を行ったが、圧力変動分布を比較してもまだ改善の余地があるように思われる。計算の信頼性を向上させるためには、より大規模な解析が必要であり、そのためには MPI 並列化が必要不可欠である。現在、計算機科学グループと連携し、大規模並列計算機の性能を引き出すための MPI 並列化の作業を進めており、今後その検証を行う予定である。加えて、今回の LEE による計算結果は流れ場の影響を無視しているが、実際の環境においては流れ場の影響は無視できない。流れ場の影響を加味した騒音伝播解析を行うためには、流体と音響伝播を連成して解析する必要がある。その際、計算時間の増加は避けられないが、大規模並列計算機上における効率的な連成解析手法の構築を数値流体力学グループと計算機科学グループと協調して行うことで、計算時間の短縮が期待できる。今後、そのような手法の検討も本制度の枠組みを利用して行う予定にしている。同様に、現在取り組んでいる流体構造連成振動解析を発展させることで、工学的に意義の大きな結果が得られると期待できる。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

Esmatullah Maiwand Sharify, Shun Takahashi, Norio Arai, “Numerical Computation of Fluid-Structure Interaction on Isolated Stationary Cylinder with Elastic Surface,” *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 7, No. 1, 2012.

Daisuke Sasaki, Akihito Deguchi, Hiroshi Onda, Kazuhiro Nakahashi, “Landing Gear Aerodynamic Noise Prediction Using Building-Cube Method,” *Modelling and Simulation in Engineering*, Vol. 2012, Article ID 632387, 2012. (doi:10.1155/2012/632387)

Ryotaro Sakai, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Parallel Implementation of Large-Scale CFD Data Compression toward Aeroacoustic Analysis,” *Computers & Fluids*, (掲載決定).

Ryotaro Sakai, Daisuke Sasaki, Shigeru Obayashi, Kazuhiro Nakahashi, “Wavelet-Based Data Compression for Flow Simulation on Block-Structured Cartesian Mesh,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids* (掲載決定)

### (2) 国際会議プロシーディングス

#### (3) 国際会議発表

Shun Takahashi, Norio Arai, “Numerical Computations by Cartesian Mesh Method on Several Research Fields,” International Workshop on Future of CFD and Aerospace Sciences, April 2012.

Kazuhiko Komatsu, Takashi Soga, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, Hiroaki Kobayashi, Shun Takahashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “Performance Evaluation of BCM on Various Supercomputing Systems,” 24th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, May 2012.

Kazuhiko Komatsu, Takashi Soga, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, Hiroaki Kobayashi, “Performance Evaluation of a CFD using Cartesian Meshes on Various Supercomputing Systems,” NUG XXIV, June 2012. (招待講演)

Yuma Fukushima, “Estimation of Noise Shielding Effect of Next-Generation Aircraft by a Computational Aeroacoustics Method,” 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, Sep. 2012.

Esmatullah Maiwand Sharify, Hiroki Saito, Harasawa Taikan, Shun Takahashi, Norio Arai, “Experimental and Numerical Study of Blockage Effects on Flow Characteristics around a Square-Section Cylinder,” ISEM-ACEM-SEM-7th ISEM 2012, Taipei, Nov. 2012.

Shun Takahashi, Daisuke Sasaki, Yuma Fukushima, “Large-Scale Flow Simulation for Development of Engineering Product,” International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation, Kyoto, Dec. 2012. (招待講演)

Daisuke Sasaki, Misaka Takashi, Shigeru Obayashi, “Toward Large-Scale Design Optimization Based on Building-Cube Method,” International Workshop on Uncertainty Quantification and Design Optimization, Trieste, Italy, Feb. 2013.

#### (4) 国内会議発表

高橋俊, 新井紀夫, “CFD による太陽光パネルの空力荷重推算,” 航空宇宙学会第 43 回年会, 2012 年 4 月.

福島裕馬, 佐々木大輔, 中橋和博, “ブロック構造型直交格子を用いたエンジンナセルからの騒音伝播解析,” 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.

西田梨奈, 高橋俊, 新井紀夫, 鳥居正剛, “可視化実験と数値計算を用いたバイパス術による脳動脈瘤治療の研究,” 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月.

小松一彦, 江川隆輔, 安田一平, 撫佐昭裕, 松岡浩司, 小林広明, “HPC システムにおける最適化手法の性能可搬性に関する一検討,” 第 7 回次世代 CFD 研究会, 2012 年 9 月. (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

小松一彦, 江川隆輔, 安田一平, 撫佐昭裕, 松岡浩司, 小林広明, “HPC アプリケーションの性能可搬性に関する一検討,” 第 136 回 HPC 研究会, 2012 年 10 月.

西田梨奈, 馬場拓真, 高橋俊, 新井紀夫, 鳥居正剛, “脳動脈瘤のバイパス手術における眼動脈への影響に関する研究,” 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月.

高橋俊, 新井紀夫, “近接した側壁を有する平板周りの研究,” 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月.

齋藤大樹, 原澤大幹, Esmatullah Maiwand Sharify, 高橋俊, 新井紀夫, “柔軟壁による角柱の流体・構造連成振動の低減に関する研究,” 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月.

坂井玲太郎, 大林茂, 石田崇, 松尾裕一, 中橋和博, “埋め込み境界型壁面モデルを用いた直交格子積み上げ法による流体解析,” 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月.

安田俊平, 大林茂, 鄭信圭, 三坂孝志, 佐々木大輔, 山脇るり子, 青塚瑞穂, “非構造格子 CFD ソルバーを用いたフィルム冷却翼の解析,” 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月.

小松一彦, 曾我隆, 江川隆輔, 滝沢寛之, 小林広明, “大規模計算システムにおける Building Cube Method の性能評価,” 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月.

安田一平, 小松一彦, 江川隆輔, 小林広明, “大規模並列システムのノード間通信を考慮した性能モデルに関する一検討,” 第 194 回 ARC・第 137 回 HPC 合同研究発表会(HOKKE-20), 2012 年 12 月.

佐々木大輔, “流体解析による最適設計の現状と展望,” 日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会, 2013 年 3 月. (基調講演)