

# マルチブロック構造格子における NURBS Volume を利用した 自動細分化ツールの開発

松村洋祐<sup>1</sup>, 堤誠司<sup>2</sup>, 高木亮治<sup>2</sup>, 山本一臣<sup>2</sup>, 伊藤浩之<sup>3</sup>, 竹川国之<sup>3</sup>

1. みずほ情報総研株式会社, 2. 宇宙航空研究開発機構, 3. 株式会社菱友システムズ

## Development of an Automatic Refinement Tool for Multiblock Structured Grids Based on NURBS Volume

by

Yosuke Matsumura, Seiji Tsutsumi, Ryoji Takaki, Kazuomi Yamamoto, Hiroyuki Ito and Kuniyuki Takekawa

### ABSTRACT

In the era of petascale supercomputing, numerical simulations generally require large grids with more than one giga ( $1 \times 10^9$ ) nodes. Conventional techniques are not practical for generating such large grids, and new techniques are required. As one of such new techniques, we have been developing a tool that automatically refines multiblock structured grids based on NURBS Volume and transfinite interpolation. The current status of the tool is described in this paper.

### 1. はじめに

「京」等の登場により、スーパーコンピュータは、浮動小数点演算性能が 10 PFLOPS を超えて、ペタスケールの時代に突入した。JAXA においても次期スーパーコンピュータはペタスケールになることは確実であり、数値シミュレーションに使用する格子も必然的に 10 億格子点、100 億格子点を超えるような大規模なものとなる。

このような大規模の格子は、そのデータ量の大きさから、従来の GUI 機能を有するメッシュジェネレータで作成することが非常に困難となる。たとえメッシュジェネレータを並列化すること等により、メモリ上に全てのデータを格納することができたとしても、手作業で格子点を配置したり調整したりするには、膨大な作業量が必要となる。また、格子を作成することができたとしても、その格子を目視等で確認することは不可能となる。つまり、このような大規模の格子を作成するためには、従来の手法によらない、新しい格子生成手法が必要となってくる。

大規模格子の生成手法は、CAD データを読み込めばすべて自動的に格子を生成する自動格子生成手法、規模の小さい基本格子を従来の方法で予め生成し細分化のみ自動的に行う半自動格子生成手法の 2 種類の方法に大きく分けられる。自動格子生成手法において最大の問題点は物体壁面の取扱いをどうするかに帰着する。JAXA にて開発を行っている LS-Grid<sup>1)</sup> や HexaGrid<sup>2)</sup> では、空間は等間隔直交格子、物体壁面は物体適合格子を生成する自動格子生成が可能であり、Re 数が高い航空宇宙流体において壁面境界層を精度よく計算が可能である。しかしながら、複雑な形状すべてに対して自動的に格子を生成することは非常に難しく、物体の特徴線をマニュアルで指定する作業が入ってしまう、もしくは特徴線を捉えきれず形状を正確に再現しないといった問題がある。一方、近年は領域全体に直交格子を生成し、任意形状の取扱いはカットセル法や Immersed Boundary 法を利用する手法が着目されており<sup>3)4)</sup>、非常に大規模な格子に対しても格子生成が可能である。非粘性流れ解析や比較的 Re 数の低い流れ場に関しては適用事例が多いが、高 Re 数流れの壁面境界層のモデル化に関しては依然として研究課題が多いことも事実である。

半自動格子生成は従来のメッシュジェネレータで生成可能な規模の格子を予め作成し、細分化のみバッチ処理で行うようにする手法である。現在のアプリケーションで行われている実装の多くは、非構造格子において基本格子の要素の辺を 1/2 に単純に細分化していくものであり、クラス

タリング等の細かな制御を行うことは困難である。そのため、基本格子の作成時に、最終的に生成される大規模格子の格子幅やその変化率等を想像しながら作業する必要がある、格子の作成者に新たな労力をかけさせることとなっている。

一方、NASA で開発されている in-house の構造格子作成ツールである OVERGRID<sup>5)</sup> では物体壁面や突起物周り 1 つ 1 つに対して重合格子を生成するスクリプトファイルを作成する。膨大な時間を要するが、一旦スクリプトファイルが作成できれば、格子密度の変更等が自動で実施可能である。これらの手法では格子を細分化した際に形状の再現をするために精細な CAD データを予め持つておく必要がある。

著者らもマルチブロック構造格子を対象とした半自動格子生成手法の開発に取り組んできた。これまでは細分化のための線形補間を用いるツールを開発して用いていたが、物体境界の細分化に応じた形状を再現することができないことから、再度、CAD 形状への貼り付けと境界付近の格子点分布の修正作業を必要としていたために自動化に難があった。これを解決して境界上の格子点を精度良く再配置するために、従来の手法を発展させて、CAD で曲面を表現するために利用されている非一様有理 B スプライン (NURBS; Non-Uniform Rational B-Spline) を補間に用いることにした。これと TFI (Transfinite Interpolation) を組み合わせる事により、柔軟で自動化が可能なマルチブロック構造格子向けの細分化ツールの開発が可能になった。

本稿では、このツールのコアになる NURBS Volume と TFI、マルチブロック構造格子への適用のための手法について説明し、ツールの構成や入力パラメータ、適用事例について紹介する。

### 2. NURBS Volume と TFI を組み合わせた格子自動細分化手法

#### 2. 1. NURBS Volume の作成

NURBS とは、非一様有理 B スプライン (Non-Uniform Rational B-Spline) の略で、自由曲線、曲面の数学的表現法の一つであり、多くの CAD で曲面を扱うために利用されている。NURBS Volume とは、NURBS を利用した 3 次元空間の表現手法であり、数学的には 3 次元実数ベクトル空間  $\mathbb{R}^3$  から射影空間  $\mathbb{P}^3$  への 3 変数の NURBS による連続写像となる。NURBS Volume は、以下の式で表される<sup>6)</sup>。

$$\vec{V}(u, v, w) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \bar{P}_{l,m,n} N_{l,p}(u) N_{m,q}(v) N_{n,r}(w) \quad (1)$$

$N_{l,p}(u)$  は、ノットベクトル  $\tau_u = \{u_i\}_{i=0}^{N+p}$  を持つ  $p$  階の B スプライン基底関数、 $\{\bar{P}_{l,m,n}\} = \{(x_{l,m,n}, y_{l,m,n}, z_{l,m,n}, 1)\}_{l,m,n=0}^{L,M,N}$  はコントロールポイントである。

ここで、基本格子の全ての格子点を通過する NURBS Volume を作成する。このとき、NURBS Volume が格子点を通過する際のパラメータ  $(\bar{u}_i, \bar{v}_j, \bar{w}_k)$  はコード長の比として与える。ノットベクトルは、averaging method で与える<sup>7)</sup>。

これによって作成された NURBS Volume は図 1 に示すような以下の性質を持つ。

- ・格子ブロック内部の任意の座標値を、 $(u, v, w)$  の 3 パラメータの関数であらわすことができる。また、その関数は、例えば  $i$  方向に  $C^p$  級連続である。
- ・パラメータ  $u = \bar{u}_{i_1}$  を与えた場合に作成される曲面は、基本格子の  $i = i_1$  の格子面と一致する。 $v$ 、 $w$  のみを変更することで、基本格子の格子面上の任意の位置に格子点を生成することができる。
- ・パラメータ  $u = l/L$  を与えた場合に作成される曲面は、基本格子に対し、コード長の比が  $l/L$  の位置に作成される。

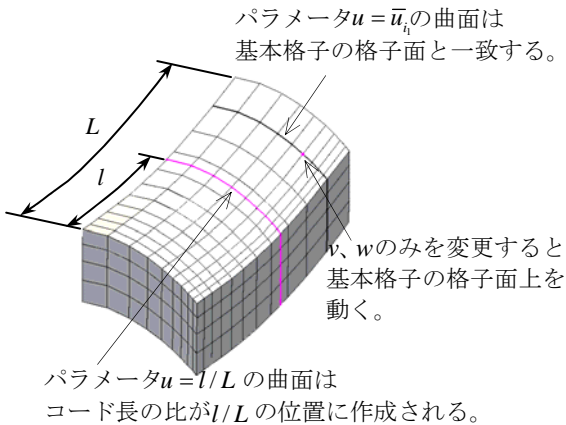
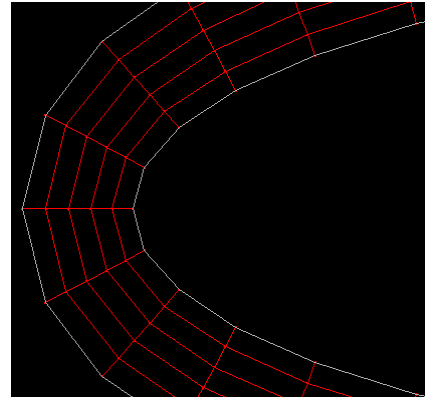


図 1 NURBS Volume の性質

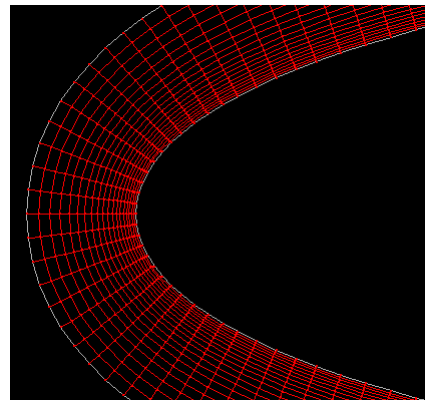
これらの性質により、作成された NURBS Volume に新しい格子点数分の新しいパラメータを与えることで、基本格子の持つ性質を生かしながら、任意の位置に格子点を生成しつつ、任意に格子点数を変化させることが可能となる。そのため、複数方向からのクラスタリングの制御等の複雑な自動細分化にも対応が可能となる。

また、格子ブロック内部が NURBS Volume であらわされているため、曲面や曲線の表現に NURBS を使用している CAD との相性が良く、細分化によって新たに生成された格子点の境界形状への適合も容易となる。

図 2 に NURBS Volume によって生成される細分化格子の例を示す。基本格子の品質を保ちながら、境界層へのクラスタリングと格子密度の変更が行われており、境界形状の曲面も復元されていることがわかる。



(A) 基本格子



(B) NURBS Volume による細分化格子

図 2 NURBS Volume による細分化格子の例

## 2. 2. TFI によるパラメータの算出

NURBS Volume を利用して格子の自動細分化を行う際、新しく生成する格子点全てに対応するパラメータを与えることは現実的ではない。そこで、各格子ブロックの境界にある 12 個の辺に対して、両端の格子幅や辺上の格子点数、分布方法等の直感的で最小限の入力を与えて、辺上に生成する格子点のパラメータを算出することとし、格子ブロック内部に生成する格子点のパラメータについては、TFI (Transfinite Interpolation) によって算出することとした。

格子ブロック境界の辺に対しては、以下のいずれかの手法により新しいパラメータ分布を算出する。

- ・コード長を基にした制御関数による分割 (current)

辺の格子点数を指定する。基本格子の格子点を通過するパラメータから線形補間を行い、新しく生成する格子点のパラメータの分布を求める<sup>8)</sup>。

- ・等比分割 (imax)

辺の第一格子幅と格子点数を指定する。これらから初項、公比、分割数を算出して等比分割を行い、新しく生成する格子点のパラメータを求める。

- ・Hyperbolic Tangent 分割 (tanh)

辺の両端の格子幅と格子点数を指定する。これらから Hyperbolic Tangent を利用した関数により、新しく生成する格子点のパラメータを求める<sup>9)</sup>。

これらの分割方法を組み合わせることにより、数値シミュレーションを行う際に時間刻みの制約となる最小格子幅 (ほとんどの場合壁面第一層に存在する) や細分化する意味のない外部境界付近の格子幅を制御しながら、格子を細分化することが可能となる。

格子ブロック境界の面については、面を構成する 4 辺上の格子点パラメータより Boundary-blended Control Function

で補間することにより、全ての格子点のパラメータを算出する<sup>8)</sup>。

格子ブロック内部については、格子ブロック境界の 6 面上の格子点のパラメータより Linear TFI で補間することにより、全ての格子点のパラメータを算出する<sup>8)</sup>。

また、格子ブロック境界の辺を全て指定させることも、利用者の利便性の点からは好ましくない。そこで、計算境界を指定することで、図 3 に示すように計算境界から垂直に出る全ての辺に対して入力を与えられるようにした。

入力を与えられる格子ブロック境界の辺

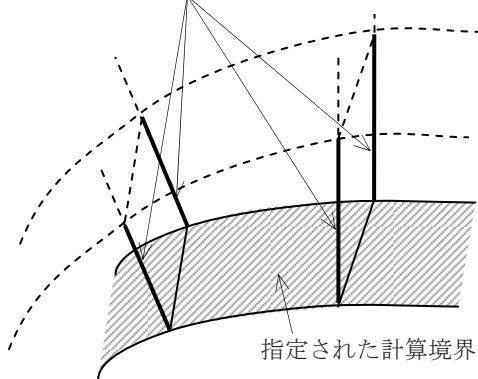


図 3 計算境界から垂直に出る辺

### 2. 3. マルチブロック構造格子への対応

開発したツールでは、並列化を容易にするために格子ブロックごとに自動細分化を行っている。そこで、以下のようにしてマルチブロック構造格子の格子ブロック間の接続を保証する。

格子ブロック境界で共有される辺については、基本格子の辺上の格子点より NURBS 曲線を作成する。このとき、複数の格子ブロックで共有されている辺については、図 4 に示すように必ず幾何学的に同じ向きで NURBS 曲線が作成されるようにする。これにより、異なる格子ブロック間でも同一の NURBS 曲線が生成されることが保証される。この NURBS 曲線に入力条件から新しく生成した格子点のパラメータを与える。NURBS 曲線が同一でパラメータも同一であれば、異なる格子ブロック間でも共有されている辺に関しては同じ座標位置に格子点が生成される。

格子ブロック境界で共有される面についても同様の処置を施す。

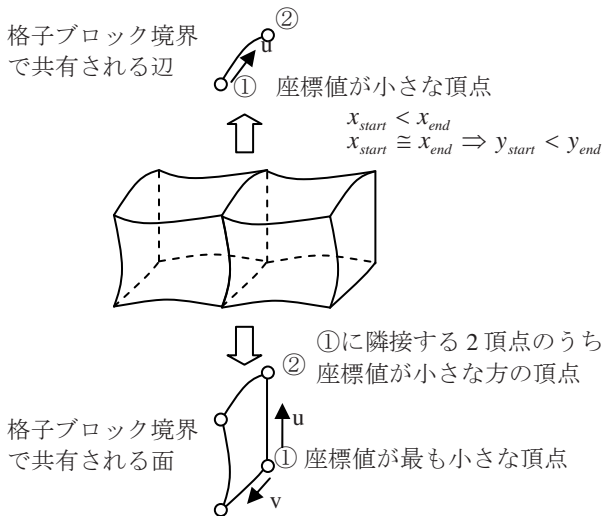


図 4 格子ブロック境界で共有される辺、面

また、多対多の格子ブロック間接続を許すマルチブロック構造格子の場合、格子ブロックごとに格子自動細分化を行うと、格子ブロック間の接続が保証されない場合がある。

このため、マルチブロック構造格子を図 5 に示すようにサブブロックに分割する。具体的には格子ブロック間の接続情報を元に、全てのサブブロックが 1 対 1 の接続関係になるよう、格子ブロックを分割する。

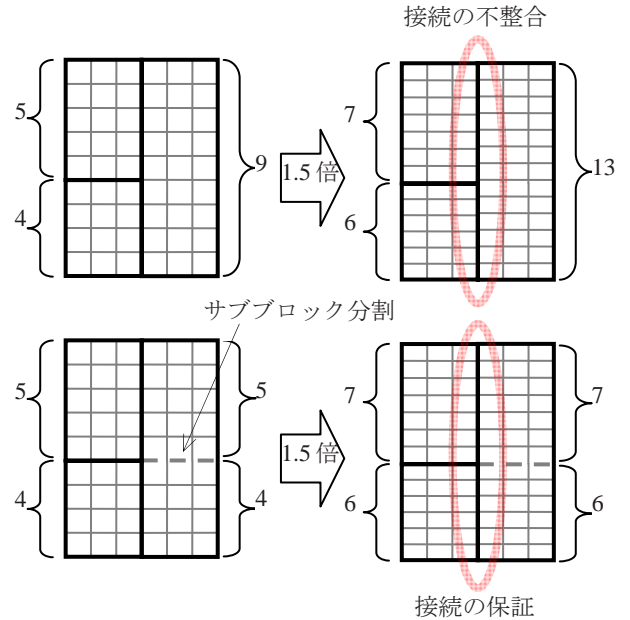


図 5 サブブロック分割

### 3. ツールの構成と大規模格子作成プロセス

自動細分化ツールは、JAXA 内製の圧縮性流体ソルバである upacs-LES<sup>10)</sup> のフレームワーク向けに開発されている。図 6 にツール全体の構成を示す。ツール全体は、サブブロック分割ツール createSubblock、入力データ作成援用ツール subwindowEdgeControl、自動細分化ツール modifyGrid から構成されている。

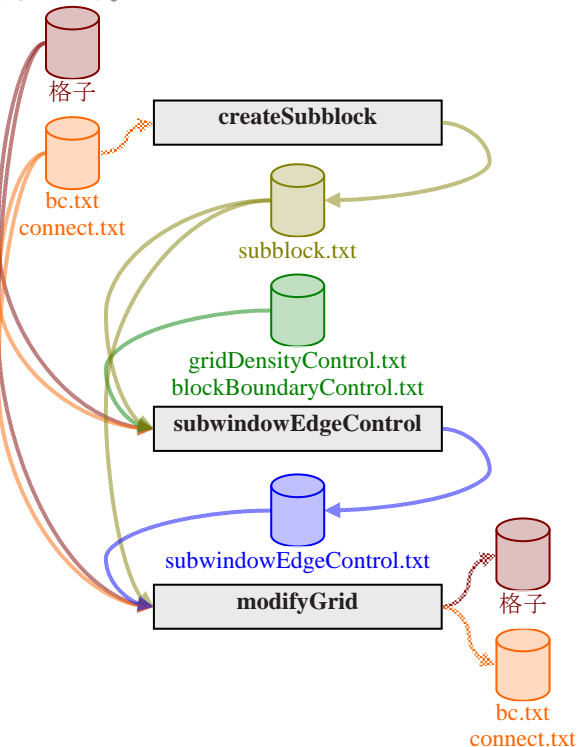


図 6 ツール全体の構成



サブブロック分割ツールcreateSubblockは、マルチブロック構造格子のサブブロック分割を行うツールである。境界条件bc.txt、接続情報connect.txtを入力として、図 7に示すsubblock.txtを出力する。createSubblockはC++で書かれたツールであり、単一プロセスで動作する。

入力データ作成援用ツールsubwindowEdgeControlは、ユーザによって設定されたパラメータから自動細分化ツールの入力データを作成するツールである。図 8に示すgridDensityControl.txtと図 9に示すblockBoundaryControl.txtを入力として、図 10に示すsubwindowEdgeControl.txtを出力する。subwindowEdgeControlはC++で書かれたツールであり、単一プロセスで動作する。

自動細分化ツール modifyGrid は、実際に自動細分化を行うツールである。格子、subwindowEdgeControl.txt、subblock.txtを入力として、細分化された格子を出力する。bc.txt や connect.txt についても、細分化された格子に合わせたものを自動的に生成して出力する。modifyGrid は Fortran 90 で書かれたツールであり、MPI によって並列化されている。

```

1 inflow
1 1 1 1 1 2 100
0 0 0 0 0 0 0
I J K
2 INTER_BLOCK
1 396 1 1 396 2 100
3 1 1 1 1 2 100
I J K
.....
1 1 1 1 1 28 2 100
2 1 28 1 1 31 2 100
.....

```

境界条件  
接続情報  
サブブロック情報

図 7 subblock.txt

```

# 全ブロック, 全方向の格子点数を2倍とする
all 2.0
# ブロック 26 の I 方向 1.5 倍, J 方向 2 倍, K 方向 1 倍
26 i 1.5 j 2.0 k 1.0
# ブロック 31 の I 方向のみ 1.2 倍
31 i 1.2

```

図 8 gridDensityControl.txt

```

# rocket 境界で格子幅 0.1 から格子点数 7 点で
# 等比分割
rocket imax 0.1 7
# farfield 境界で格子幅 0.1~0.6 で格子点数 15 点で
# hyperbolic tangent 分割
farfield tanh 0.1 0.6 15

```

図 9 blockBoundaryControl.txt

```

# ブロック 1 の(1, 1, 1)から(28, 1, 1)の辺を
# 格子幅 0.01 から格子点数 14 点で等比分割
1 1 1 1 28 1 1 imax 0.01 14
1 1 1 1 1 1 25 tanh 1e-05 0.02 53
.....

```

図 10 subwindowEdgeControl.txt

この自動細分化ツールを使用した大規模格子作成プロセスは以下の通りである。

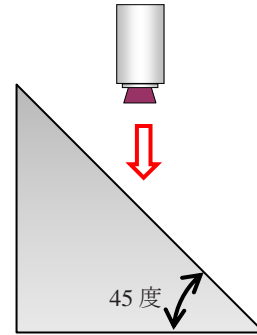
まず、従来からある商用グリッドジェネレータ Gridgen (Pointwise 社)等を用いて、1 千万格子点規模の基本格子を予め作成しておく。その後、数値シミュレーションを実行する前に、スーパーコンピュータ上で基本格子を自動細分化するジョブを実行して大規模格子を生成する。数値シ

ミュレーションを行うスーパーコンピュータ上で基本格子を細分化するため、大規模格子データの転送は不要である。

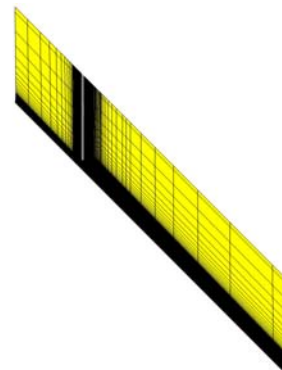
#### 4. 適用事例

本自動細分化ツールを、45 度斜め平板に衝突する超音速ジェット騒音解析用の格子に適用した。この格子では hybrid Large-Eddy Simulation (LES) / Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 解析を実施しており、斜め平板の乱流境界層を捉えるために格子をクラスタリングして、空間格子を細分化する一方で、物体壁面第一層格子幅を保つことが求められる。また、遠方境界付近のバッファ領域で格子数を増やさないような制御も求められる。

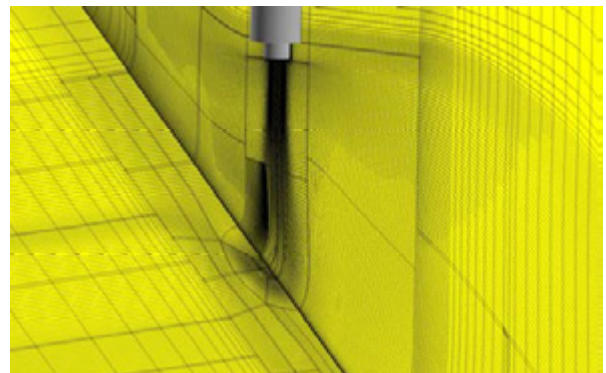
図 11に 45 度斜め平板に衝突する超音速ジェット騒音解析用格子の概要を示す。図 11(B)は解析領域全体であり、超音速ジェットを排気するエンジンやその円形ノズル、また 45 度斜め平板といった物体を含んでおり、形状が複雑である。更に、排気ジェットのせん断層を精度よく解像するためにせん断層に沿う方向に格子をクラスタリングしており、図 11(C)に示した対称面や衝突板から分かるように格子トポロジも複雑になっている。図 11に示した基本格子の総格子点数は 33M 点で、628 ブロックから構成されている。



(A) 解析対象



(B) 解析領域全体

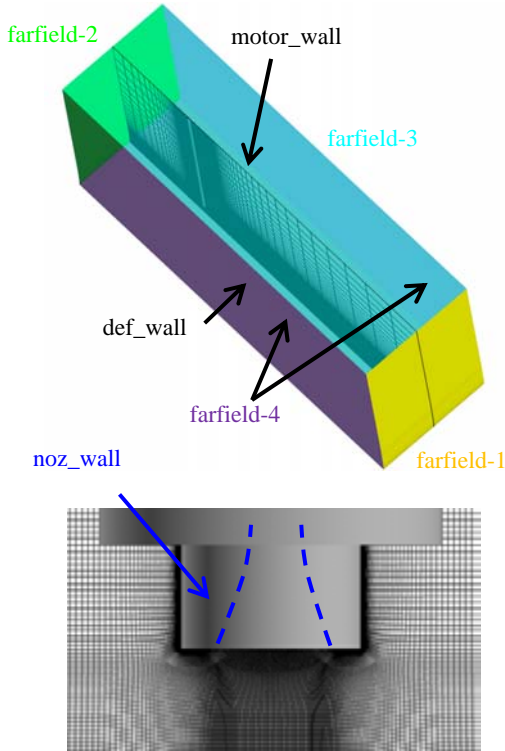


(C) 対称面格子と衝突板格子

図 11 45 度斜め平板衝突ジェット解析の基本格子 (33M 点)

この基本格子に対して、図 12に示すように全方向に 7.0 倍の細分化を実施した。ノズル壁面、及び斜め平板表面は壁面境界層を解像する目的で格子をクラスタリングしているため、図 13に示すようにそれぞれの壁面で第一層格子幅については基本格子と同一とし、imax関数でストレッチさせることとした。また、遠方境界(パuffa領域)で格子点数を増やさないため、tanh関数で格子点数と最大格子幅を指定することとした。

all 7.0  
 図 12 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における gridDensityControl.txt



boundary	function	$\Delta S$	$\Delta E$	n
farfield_1	tanh	20.0	0.06893	197
farfield_2	tanh	6.0	0.01367	151
farfield_3	tanh	6.0	0.142857	101
farfield_4	tanh	7.0	0.013786	141
def_wall	imax	0.0005	—	72
noz_wall	imax	0.0001	—	44

図 13 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における blockBoundaryControl.txt

細分化を実施するにあたり、JAXA JSS を用いた。530 プロセス(133 ノードの flat MPI)を利用し、使用した総メモリ量は 600GB、約 1.5 時間を要して 92 億格子点の細分化格子を作成した。出力された格子ファイルのサイズは約 210GB となった。

図 14に細分化前後のノズルリップ付近の格子分布の比較を示す。基本格子 1 セル内に対して指定通り 7 セルが生成されていることが分かる。また、NURBS Volumeの利用により、基本格子の持つ性質を生かしながら滑らかな細分化がなされていることが分かる。

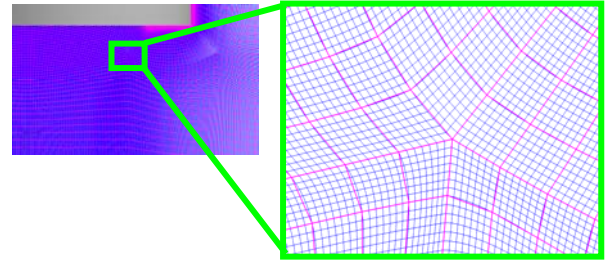


図 14 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における ノズルリップ付近の格子分布 赤:基本格子, 青:細分化格子

図 15に細分化前後のノズル断面の格子分布の比較を示す。NURBS Volumeの利用により、曲面形状に対してもスムーズに格子点の補間がなされていることが分かる。

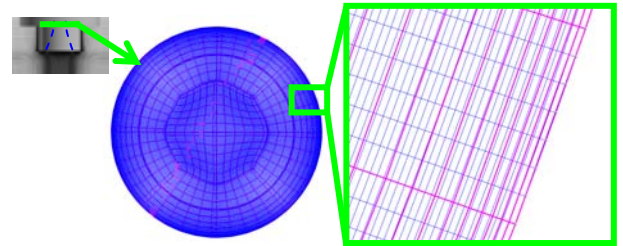


図 15 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における ノズル断面の格子分布 赤:基本格子, 青:細分化格子

図 16に細分化前後の壁面境界付近の格子分布の比較を示す。細分化前後で第一層格子幅が保持されていることが分かる。また、格子幅分布が直線であることより等比分割指定通りに行われていることが分かる。

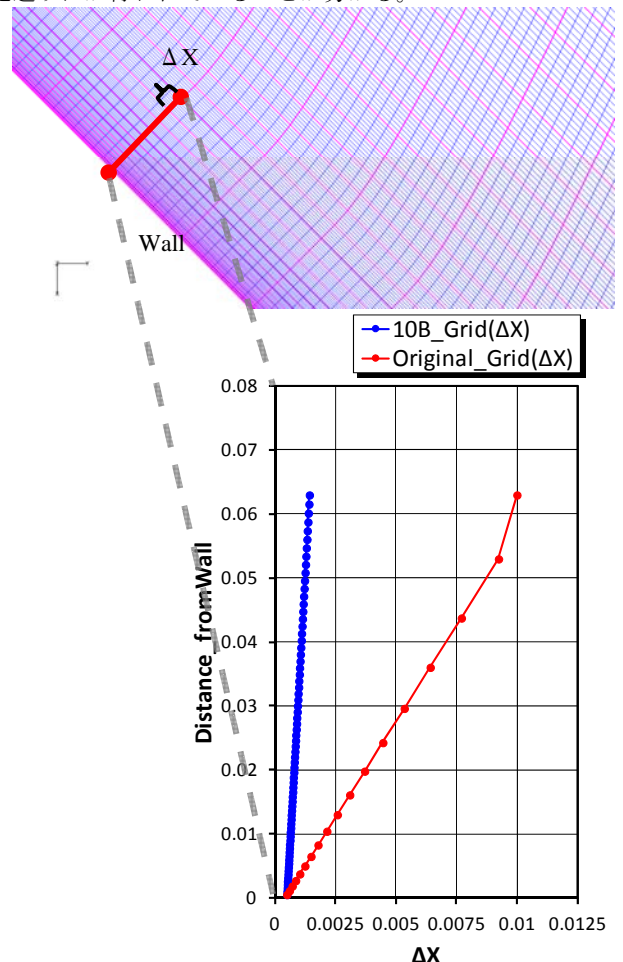


図 16 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における 壁面境界付近の格子分布 赤:基本格子, 青:細分化格子

図 17に細分化前後の遠方境界付近の格子分布の比較を示す。細分化後の最大格子幅が指定した値に固定されていることが分かる。また、格子幅が滑らかに変化していることからHyperbolic Tangent分割が指定通りに行われていることが分かる。

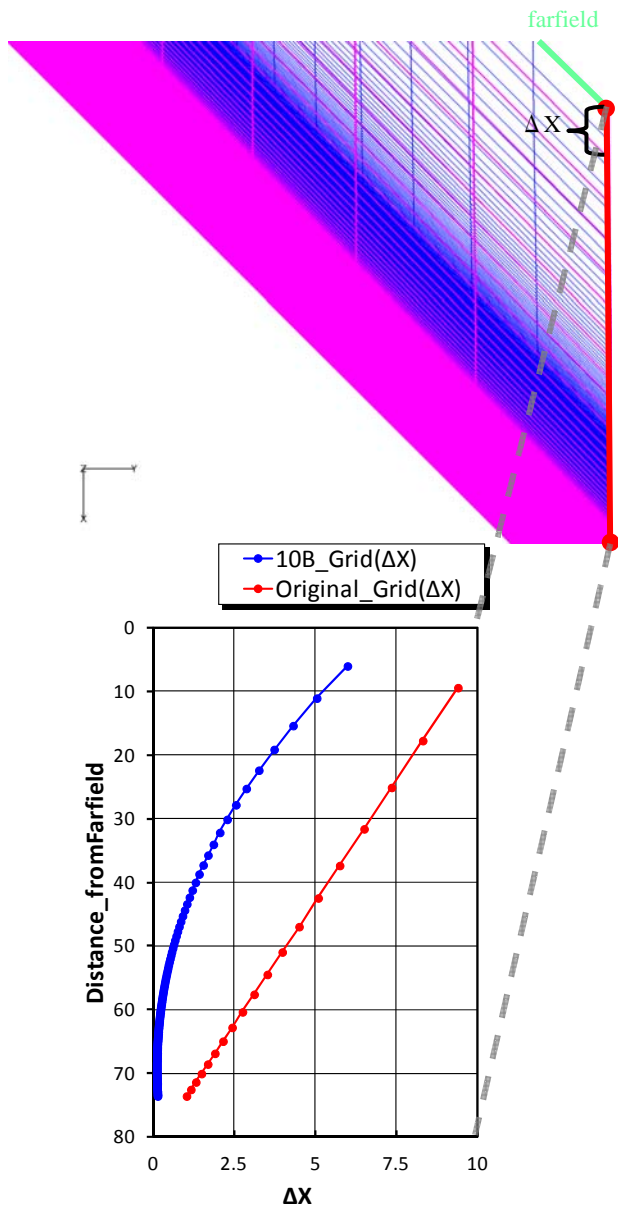


図 17 45 度斜め平板衝突ジェット解析格子における遠方境界付近の格子分布 赤:基本格子, 青:細分化格子

以上より、複雑な形状やトポロジを持つ格子に対しても、想定通りの格子生成が行われていることが確認でき、100億格子点クラスの大規模格子の生成において本手法及び本ツールが有効であることが実証された。

## 5. まとめ

NURBS Volume と TFI を組み合わせたマルチブロック構造格子の自動細分化手法を用いたツールの開発とその現状について紹介した。本手法及び本ツールの長所は以下の通りである。

- ・基本格子の持つ性質を生かしながら、任意の位置に格子点を生成しつつ、任意に格子点数を変化させることが可能となる。そのため、複数方向からのクラスタリングの制御等の複雑な自動細分化にも対応が可能となる。

- ・格子ブロック内部が NURBS Volume であらわされているため、曲面や曲線の表現に NURBS を使用している CAD との相性が良く、細分化によって新たに生成された格子点の境界形状への適合も容易となる。

- ・TFI を利用しているため、格子ブロックの境界边上での両端の格子幅や边上の格子点数、分布方法等の直感的で最小限の入力を与えるだけで細分化が可能である。

- ・最小格子幅等、変更したくない格子幅を保つことができる。

- ・MPI で並列化されており、スーパーコンピュータ上で数値シミュレーションのプリ処理として実行できる。そのため、大規模な格子データを手元で作って転送する必要がない。

- ・upacs-LES に必要となる境界条件、接続情報も生成できるため、利用者への負担が少ない。

また、開発した自動細分化ツールを実際の格子の細分化に適用した結果、100億格子点クラスの大規模格子の生成において、本ツールが有効であることが実証された。

今後は、実際の格子に合わせた更なる利便性の向上や高速化、「京」での性能調査とチューニング、更に大規模な格子生成への適用等を行いたいと考えている。

## 謝辞

本研究の一部は文部科学省「HPCI 戦略プログラム分野 4 次世代ものづくり」の支援により行われた。

## 参考文献

- 1) Fujimoto, K., and Fujii, K., "Study on the Automated CFD Analysis tools for Conceptual Design of Space Transportation Vehicles," Proc. 5th ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference, FEDSM 2007-37128, 2007.
- 2) Lahur, P, Ishida, T., Hashimoto, A., and Murakami, K., "Automatic Grid Generation of Complete Aircraft Model in Wind Tunnel Test for Navier-Stokes Simulation," AIAA Paper 2013-0555, January 2013.
- 3) 小野謙二, "設計における直交格子法の利用," ながれ 21, 2002, pp.16-25.
- 4) Nakahashi, K., and Kim, L.S., "Building-Cube Method for Large-Scale, High Resolution Flow Computations," AIAA Paper 2004-0423, January 2004.
- 5) Chan, W.M., "Developments in Strategies and Software Tools for Overset Structured Grid Generation and Connectivity," AIAA Paper 2011-3051, June, 2011.
- 6) Martin, W., & Cohen, E., "Representation and Extraction of Volumetric Attributes Using Trivariate Splines: A Mathematical Framework," Proc. 6th ACM Symp. on Solid modeling and applications, (2001) pp. 234-240.
- 7) Piegel, L. & Tiller, W., "The NURBS Book," (Springer, 1996) pp. 364-382.
- 8) Thompson, J. F., Soni, B. K. & Weatherill, N. P., "HANDBOOK OF GRID GENERATION," (CRC PRESS 1999) pp. 3.1-3.15.
- 9) Vinokur, M., "On One-Dimensional Stretching Functions for Finite-Difference Calculations," J. Comp. Phys., 50-2 (1983) pp. 215-234.
- 10) 榎本俊治, 野崎理, 今村太郎, 山本一臣, "LES による円形ジェットの乱流混合騒音の数値予測," 第 21 回数値流体力学シンポジウム, B1-1, 2007.