

AMR 法による高揚力装置流れの高解像度数値解析

松尾裕一 (JAXA), 富塚孝之, 中森一郎 (アドバンスソフト)

High resolution numerical analysis of a high-lift configuration using an AMR method

by

Yuichi MATUO, Takayuki TOMIZUKA, and Ichiro NAKAMORI

ABSTRACT

In this paper, a high-resolution numerical analysis for flow around a high-lift device with an AMR method is described. In the present approach, not only for numerical simplicity but also for practical use, a block-based AMR method is adopted where a structured mesh with a body-fitted coordinate system in the each block and a self-similar tree-based hierarchical data structure with multiple roots are used. The pros and cons are discussed to apply the present AMR approach to the complex flows around the high-lift device.

1. はじめに

実用問題の LES 解析においては, 高解像度スキームの適用が容易なことから, 構造格子がしばしば使われる. 非構造格子による LES の解析事例も最近が増えて来ているが, 精度を上げるのに工夫が要するため, 未だ発展途上にある[1]. 構造格子を用いる際, 図 1 に例示したように, 格子点が本来必要のないところに集中してしまったり, 逆に必要などころにうまく集められないといった場合がある. 特に, LES/DES では, 格子サイズ自体が Subgrid Scale (SGS) 渦粘性のパラメータとなるため, 捉えるべき現象に対し空間格子解像度をできるだけ一定に保つことが重要であると言われている[2]. また, LES/DES のような非定常解析においては, ある程度多くの計算ステップ数が要求されるため, 無用な計算時間の増加を招かないためにも格子点数は有効に使いたいところである.

他方, 格子点配置や計算時間の問題は, いずれ計算機の進歩が解決してくれるだろうという考え方もある. しかし, 3 次元問題・同一の計算時間を仮定したとき, 解像度を 2 倍にするためには, 空間各方向に格子点数 2 倍, 時間刻み半分で $2^4=16$ 倍, 解像度を 4 倍にするためには $4^4=256$ 倍の性能向上が必要となる一方で, 計算機の性能の伸びは, (ムーアの法則によれば) 5 年で 10 倍, 技術改善要素を入れても 5 年でせいぜい数 10 倍程度であり, 計算機の性能向上に頼り過ぎるのは必ずしも現実的でない.

こうした場合に, 近年, 解適合格子細分化法 (Adaptive Mesh Refinement; AMR) と呼ばれる方法が注目されている. AMR は, 必要な領域に対してのみ格子を細分化再結合する方法である. 解適合格子は一般に, r -, h -, p - の 3 種類の方法に分類される. r 法 (r -refinement) とは, 格子点を移動させる方法, h 法 (h -refinement) とは, AMR のように格子を局所的に細分化する方法, p 法 (p -refinement または p -enrichment) とは, 局所的にスキームの精度を高くする方法のことを指す. h 法と p 法を組み合わせて hp -adaptation

として使われることもある[3]. h や p は, h を格子間隔, p を空間精度とすると, 打ち切り誤差は $O(h^p)$ と表されることに由来する.

著者らはこれまで, LES 解析等において格子を有効利用するとともに, 格子点を必要な場所に動的に集めることを視野に, ブロック AMR 法を用いた並列化流体解析コードを開発してきた[4]. 八分木のブロック化アルゴリズムに基づき, MPI 並列化及び単純なマルチブロックへの適用やメモリの削減などの実応用に向けた改善に取り組んできた[5][6]. ただ, 高揚力装置のような複雑形状を含む場合のマルチブロック化は未対応であった.

ここでは, 従来開発してきた AMR コードに複雑物体形状に対するマルチブロック対応を行うとともに, MD 30P30N と呼ばれる 3 翼素の高揚力装置の解析へ適用し, AMR 法の有用性や課題を検討した結果を報告する.

2. AMR (解適合格子細分化) 法によるアプローチ

AMR 法は, 1980 年代から現在に至るまで様々な手法が提案されている. これらは主に

- (A) 直交デカルト格子系を基盤として, セル (格子) 単位で細分化する方法...セルベース AMR
 - (B) 構造格子上にブロック (領域) を定義し, ブロック単位で細分化する方法...ブロックベース AMR
- の 2 種類に大別される.

前者の AMR-(A) は, Berger と Olinger による先行研究[7]まで遡ることができ, 諸量の空間変化や時間変化に応じてセル単位で, 随時, 細分化 (Refinement) と再結合 (De-refinement または Coarsening) を繰り返すものである (図 2(a)). 主に火炎や爆轟, 噴流, 自由界面のような物理変化の激しい部分が時々刻々移り変わって行くような場合の解析に有効な手法であり, Aftosmis[8] や Wang[9] により航空宇宙分野にも応用されている. しかし, 物体壁面を含む解析には, カットセルや境界層専用格子を使うなどの工夫が必要であり, データ構造や前後処理についても独自の開発が必要となる.

一方, 後者の AMR-(B) は, AMR をセル単位ではなくブロック単位 (図 2(b)) で行うものであり, i) ブロックの中では既存の構造格子ソルバーが使える, ii) ブロック間通信は境界値のみで済む, iii) データ構造がシンプル, iv) 並列化が容易, 等, 比較的簡単に AMR のメリットを享受できる. ただし, セル単位 AMR ほどの形状適合性はない. 翼周りの遷音速非粘性流れに適用した構造格子 AMR の例として Dudek ら[10] の計算や, NS 方程式を支配方程式として翼まわりと鈍頭物体まわりの圧縮性流れを計算した Steinhilber ら[11] の例がある. 最近では, SAMRAI[12], AMROC[13] といった汎用 AMR ライブラリも開発されている.

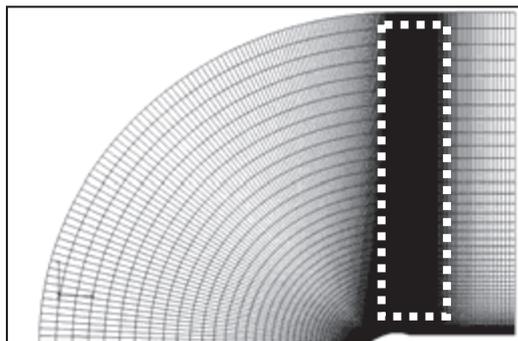


図 1 構造格子使用時に格子が遠方に集中した例

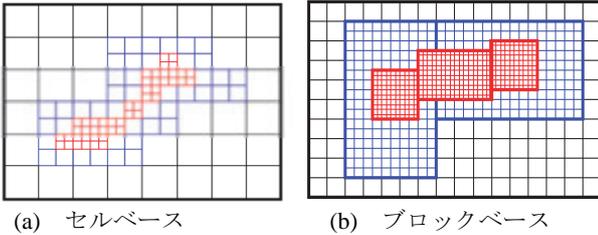


図2 AMR 格子のタイプ

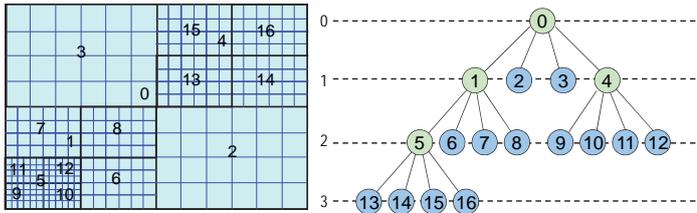


図3 2次元におけるブロック AMR 格子例

ここで、AMR を適用する際によく使われる技法や一般原則について述べる[13]. AMR で利用されるデータ構造に「木構造(Tree data structure)」がある. 2次元では「四分木(Quadtree)」, 3次元では「八分木(Octree)」と呼ばれるデータ構造が良く使われる. 1つのセルの各辺を半分にすると1つの親セル(Parent)に対して, 2次元では4つの子セル(Children), 3次元では8つの子セルが生まれる. CやFortran90のポインタによる連結リスト(Linked list)を使えば木構造は容易に実装できる. 単位がセルではなくブロックの場合でも考え方は同じである. 「適切な入れ子(Proper nesting)」とは, AMR 境界での精度を確保するためにAMRの格子サイズの変更は必ず1段階に留めるという原則である. AMR 境界は, いわゆるハンギングノードになる. 「空間充填曲線(Space filling curve)」は, 木構造データを並列計算のために1次元配列に並べ替えるために使われ, Z曲線, Morton 曲線, Hilbert 曲線などがある. 「ガードセル(Guard cell)」とは, ブロックベース AMR でブロック境界のデータ交換のために設けられる数点のステンシルから成る領域を指す. AMR では, Refinement や De-refinement の度に親から子, 子から親への格子間のデータ補間が必要になる. このうち親(粗い格子)から子(細かい格子)への補間を「延長(Prolongation)」, その逆を「制限(Restriction)」と呼ぶことがある.

我々は, LES 解析等において格子を有効利用するとともに, 格子点を必要な場所に動的に集めることを視野に, ブロック AMR 法を用いた並列化コードを開発してきた[4]. 実用 LES 解析に適用することを目指し, 八分木のブロック化アルゴリズムに基づく AMR 法を開発・検証するとともに, MPI 並列化及び初期マルチブロックへの適用やメモリの削減などの実応用に向けた改善に取り組んできた[5][6].

データ構造として, 並列実行において負荷バランス維持に都合良い均等ブロック分割が可能な自己相似 AMR と八分木構造(Octree)を採用した. 図3は, 2次元の自己相似木構造(四分木)を例示したものである. ここで, 例えば BlockID という番号のブロックは,

親ブロック	Parent(BlockID)
子ブロック	Child(LocalID, BlockID), $1 \leq \text{LocalID} \leq 8$
隣接ブロック	Neigh(FaceID, BlockID), $1 \leq \text{FaceID} \leq 6$

を持ち, そのブロックが

Rlevel(BlockID)	AMR レベル
Lbtype(BlockID)	最末端かどうか
Flag_refine(BlockID)	AMR を施すかどうか

というフラグを持つようにすれば, AMR の基本アルゴリズムを構成できる. 図4は, ある状況下での配列間や番号付けの関係を示したものである. AMR 適用の際には図5に示したように, ガードセル充填の作業が必要になるが, 補間に際して単調性が保持されるような工夫を施している. すなわち, 図6のような2次元の AMR 境界を考えたとき,

$$Q_{i+1,j+1}^{\ell+1} = Q_{i,j}^{\ell} + 0.25\Delta_{\xi} + 0.25\Delta_{\eta}$$

$$Q_{i+1,j}^{\ell+1} = Q_{i,j}^{\ell} + 0.25\Delta_{\xi} - 0.25\Delta_{\eta}$$

$$Q_{i,j+1}^{\ell+1} = Q_{i,j}^{\ell} - 0.25\Delta_{\xi} + 0.25\Delta_{\eta}$$

$$Q_{i,j}^{\ell+1} = Q_{i,j}^{\ell} - 0.25\Delta_{\xi} - 0.25\Delta_{\eta}$$

とする. ここに,

$$\Delta_{\xi} = 0.5 \left(\text{sign}(\Delta_{\xi}^{+}) + \text{sign}(\Delta_{\xi}^{-}) \right) \min(|\Delta_{\xi}^{+}|, |\Delta_{\xi}^{-}|)$$

$$\Delta_{\eta} = 0.5 \left(\text{sign}(\Delta_{\eta}^{+}) + \text{sign}(\Delta_{\eta}^{-}) \right) \min(|\Delta_{\eta}^{+}|, |\Delta_{\eta}^{-}|)$$

$$\Delta_{\xi}^{+} = Q_{i+1,j}^{\ell} - Q_{i,j}^{\ell}, \Delta_{\xi}^{-} = Q_{i,j}^{\ell} - Q_{i-1,j}^{\ell}$$

$$\Delta_{\eta}^{+} = Q_{i,j+1}^{\ell} - Q_{i,j}^{\ell}, \Delta_{\eta}^{-} = Q_{i,j}^{\ell} - Q_{i,j-1}^{\ell}$$

であり, $Q_{i,j}^{\ell+1}$ は, $\{\ell+1\}$ AMR レベル(細かい格子)における格子点 (i,j) の物理量を, $Q_{i,j}^{\ell}$ は, $\{\ell\}$ レベル(粗い格子)における格子点 (i,j) の物理量をあらわしている.

自己相似木構造の下では, 各ブロックの格子点数は同一数になるので, 「領域分割」の考え方で並列化を行うことができる. ただし, ここでは複数ブロック→1CPU という割付を可能とするとともに, 細分化 Refinement によってブロックが新たに生成される際, 各 CPU の負荷バランスを一定に保つように, 各 CPU にできるだけ均等に, かつ, 物理的に近いブロックを配置する Z 曲線によるブロックの並べ替え(オーダリング)を行っている(図7). また, 各ブロック周囲のガードセル充填において, 各面の転送データ量は同じでなく, よってブロック毎に通信すると効率が悪いので, 面 ID が 1 と 2, 3 と 4, 5 と 6 の 3 グループに分けて, 一度に通信を行うように効率化している.

並列化コードは, Fortran90 と MPI で作成し, 流体ソルバーの部分をかセット式に交換可能なように, ソルバー部と AMR 部は分離したプログラム構造としている. また, 計算性能を重視し, 木構造の構築にポインタは使わずに上述のように配列を用いている. 図8に, 並列化コードの処理の流れを示した.

さらに, 実用問題への適用を考慮し, 親格子(Root)を一個ではなくマルチブロック(Multiple Roots)とし, 必要な場所に確実に AMR が適用できるようにした. ただ, プログラムの複雑化を避けるため, 各ブロックの格子点数は同一, 扱えるのは単純接続のみとしている. 一方で, 曲線座標で定式化し, 境界層の扱いを可能とした. 時間積分は, 陽解法を基本とするが, ブロック毎に陽解法と陰解法を選

択可能とし, AMR により格子が細分化された場合や境界層で時間刻みが小さく成り過ぎるのを回避している[5].

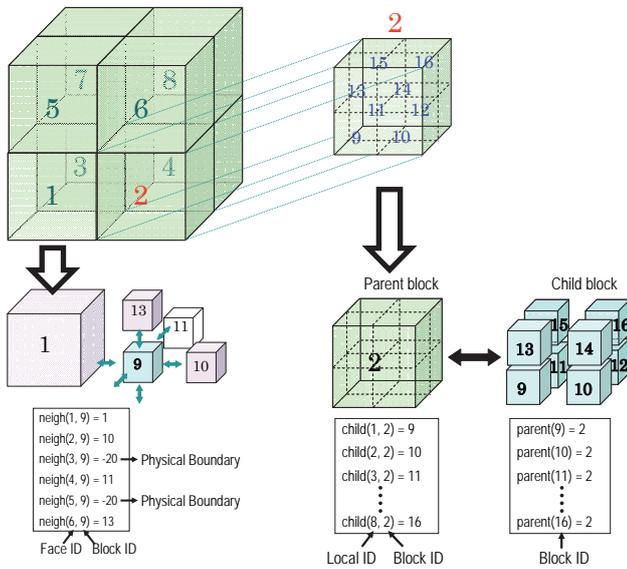


図 4 AMR に係る配列間の関係事例

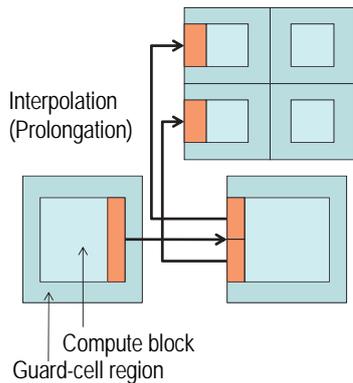


図 5 ガードセル充填のイメージ(2次元)

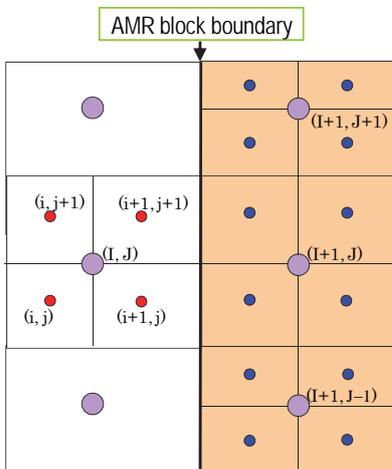


図 6 AMR 境界における格子点の関係

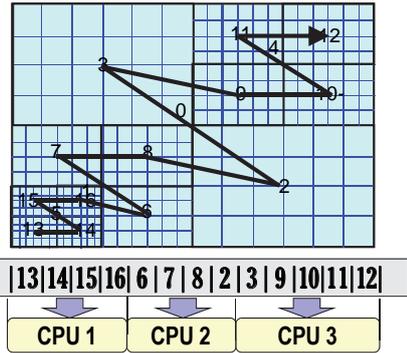


図 7 Z 曲線によるオーダリング

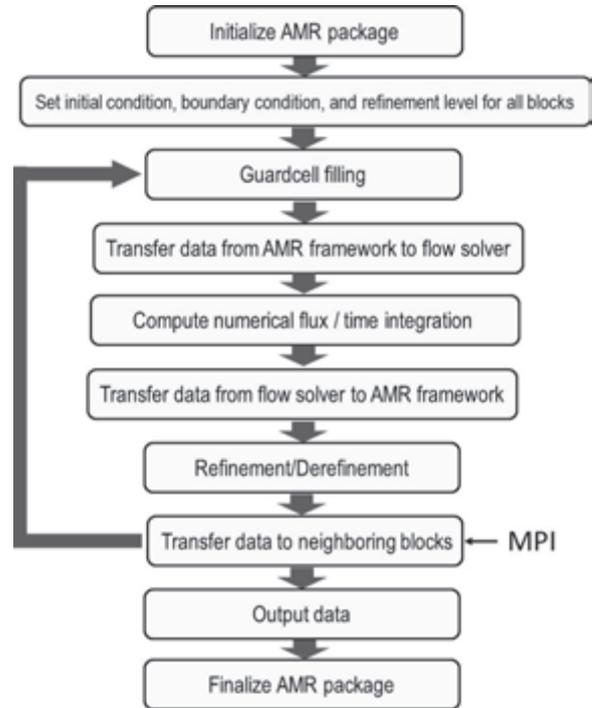


図 8 ブロックベース AMR 法のフローチャート

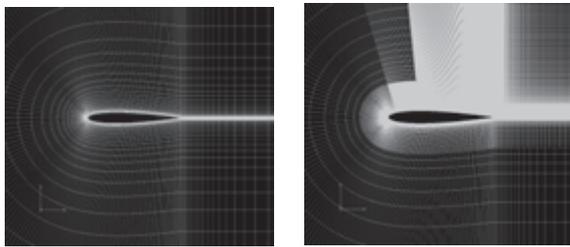
3. AMR 法の機能検証のための計算事例

図 9 は, NACA0012 翼型の高迎角剥離流を, $M_\infty = 0.3$, $\alpha = 20^\circ$, $Re = 10^6$ の条件で解いたものである. 252×64 初期格子を 14×4 のブロック (1 ブロックあたり 18×16) に分割し, 3 段階の AMR を適用しており, AMR 細分化後は 518 ブロックになっている. 図では, ある瞬間のマッハ数分布を単一格子(左側)と AMR 格子(右側)で比較しているが, AMR 格子では細かい剥離渦が鮮明に捉えられている.

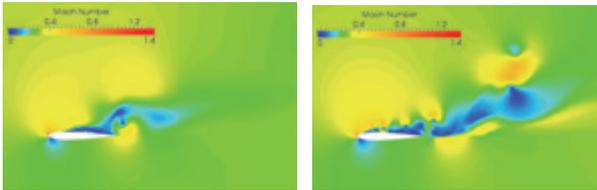
図 10 は, 大気圏再突入物体モデル(ORION CM)[14]を過ぎる遷音速流を, $M_\infty = 0.8$, $\alpha = 20^\circ$, $Re = 10^7$ の条件で解いたものである. 96 (流れ方向) $\times 60$ (半径方向) $\times 40$ (周方向) の格子を $3 \times 3 \times 2$ のブロック 1 ブロックあたり $32 \times 32 \times 20$ に分割し, 後流部分に 2 段階 AMR を適用し, トータル 1,308 ブロックを用いた. 図は, 中央断面におけるある瞬間の速度分布を単一格子(左側)と AMR 格子(右側)で比較しているが, AMR 格子では後流の細かな渦構造が捉えられている.

図 11 は、コア流 $M_\infty = 0.58$ 、ファン流 $M_\infty = 0.76$ 、単位長さ $Re = 5 \times 10^6$ のエンジンノズル出口を模擬した同軸噴流を $100D \times 30D \times 30D$ (ただし、 D はコア流の直径) の計算領域で解いたものである。128 (流れ方向) \times 40 (半径方向) \times 32 (周方向) の格子を $4 \times 2 \times 4$ のブロック (1 ブロックあたり $30 \times 20 \times 8$) に分割し、ブロックあたり $\Delta M_{max} > 0.01$ の条件下で 2 段階の動的 AMR を適用したもので、図は、中央断面における瞬間的な密度分布の時間による変化を示している。時間が進むにつれ、格子が分割 (最終的に 752 ブロック) され、噴流の細かい渦構造が捉えられている。

ここでは、AMR 法が有効な事例を幾つか示したが、無論、あらゆる場合に有効なわけではなく、同法が比較的有效なのは、剥離せん断層を含むとか、渦構造を捉えるような場合である[6]ことに注意する。音の伝播を捉えるような場合は、AMR 格子境界 (いわゆる「ハンギングノード」) から出る振動を抑える工夫が必要である。

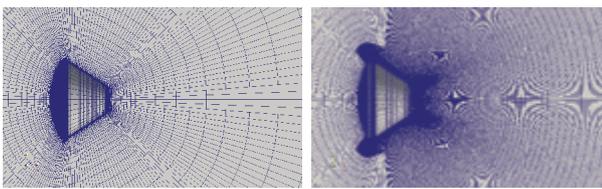


(a) 格子(左:単一格子, 右:AMR 格子)

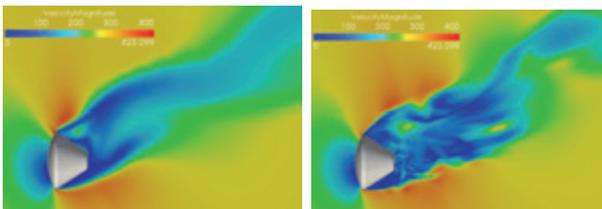


(b) 瞬間的な渦度分布(左:単一格子, 右:AMR 格子)

図 9 翼まわり剥離流れの 2次元解析結果

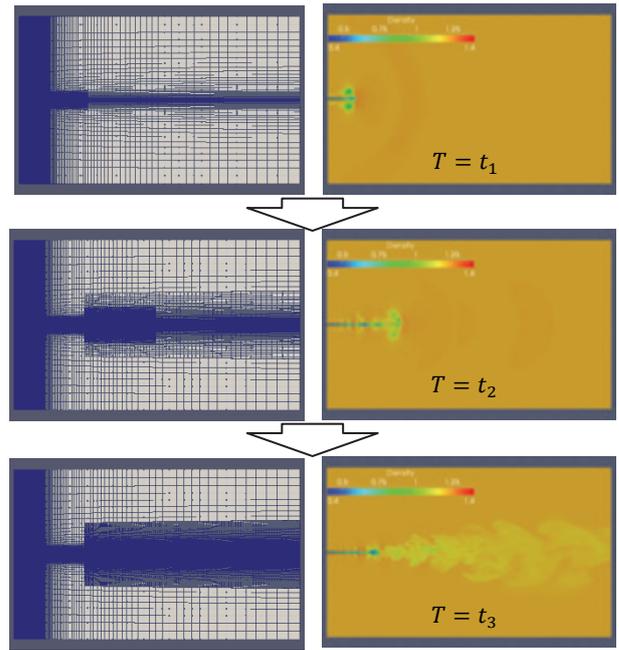


(a) 格子(左:単一格子, 右:AMR 格子)



(b) 瞬間的な速度分布(左:単一格子, 右:AMR 格子)

図 10 大気圏再突入物体の遷音速流 3次元解析結果



(a) AMR 格子の時間変化 (b)瞬間的な密度分布

図 11 同軸噴流の 3次元解析結果

4. AMR 法による高揚力装置の 3次元解析

以上のように、従来までに開発した AMR コードにより、単純な物体形状まわりの高解像度流れ解析が可能であることは示された[4-6]。しかし、高揚力装置のような(多重連結領域を含む)複雑形状には対応できていなかった。そこで、図 12 に示したように、(従来は単純なブロック分割 (左) しかできなかったところに) ブロック間の接続情報が入れられるように汎用化改良 (右) を加えた。ただし、プログラムの煩雑化を避けるため、各ブロック点数が同じでなければならない制約はそのままにしている。

この機能を検証するため、MD 30P30N と呼ばれる 3 翼素の高揚力装置に本 AMR コードの適用を試みた。図 13 に、MD 30P30N の翼断面形状を示す。この高揚力装置は、AIAA の BANC-II ワークショップ[15]でも取り上げられており、実験データ[16]もよく整備されている。流れ場に、遷移やウェーク、剥離せん断層やそれらの干渉を含むため、複雑な状況となる。

図 14 に、中心断面における格子形状の全体、図 15 に初期ブロック形状を示す。各ブロックの格子点数を 64 (流れ方向) \times 48 (垂直方向) \times 24 (スパン方向) とし、24 ブロック (スパン方向は 1 ブロック、約 177 万点) から成る。図 16 は、AMR を施していない初期状態でのスラット付近の格子を示す。本報告では、格子を細かくすべき場所が予めある程度想定できることを踏まえ、粗い初期格子で定常的な解を求めた後、自動ではなく特定のブロックに手動で AMR を施すようにした。図 17, 18 は、こうして作成した 2 段階 AMR を施したスラット及びフラップ付近の格子とマルチブロックの様子を示す。2 段階の AMR を適用しているので、格子が最も細かい部分の解像度は、一様に細かくしたとしたら 177 万点 \times 23 \times 23 = 1.13 億点の格子点と同じ解像度に相当するので、格子点数は相当に節約できていることになる。

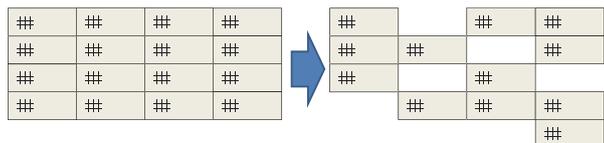


図12 マルチブロック機能への改良イメージ

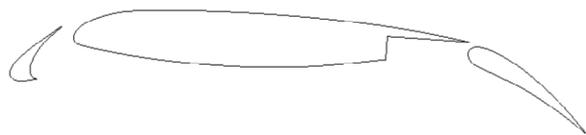


図13 30P30N高揚力装置の断面形状

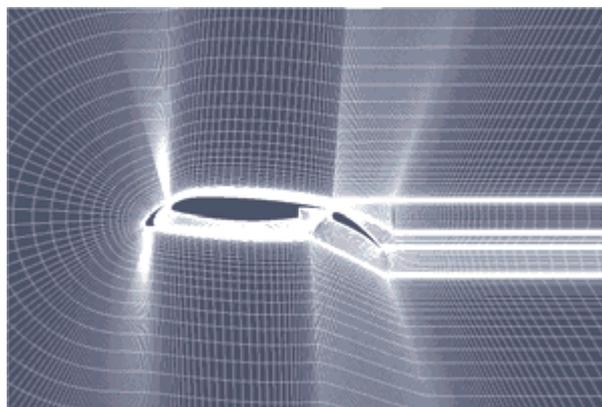


図14 格子断面形状 (全体)



図15 マルチブロックの様子 (全体)

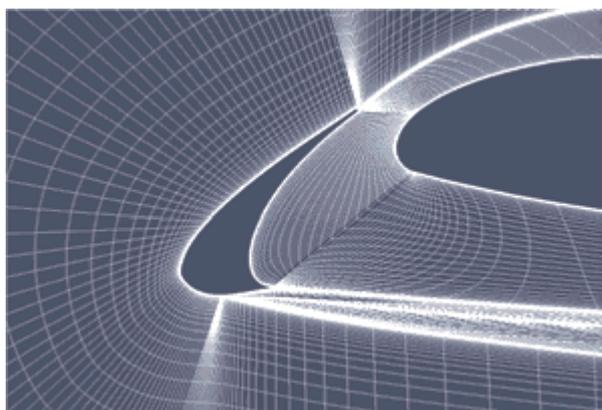


図16 スラット付近の初期格子

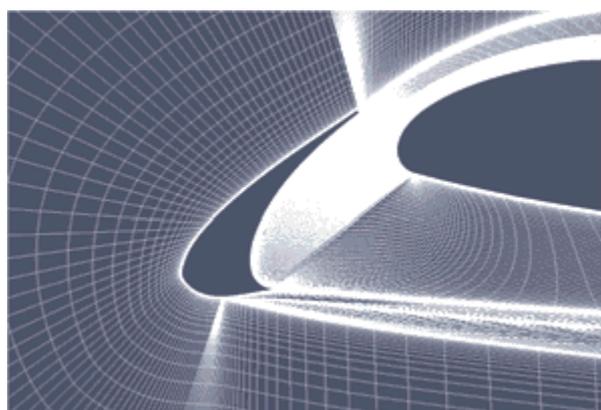
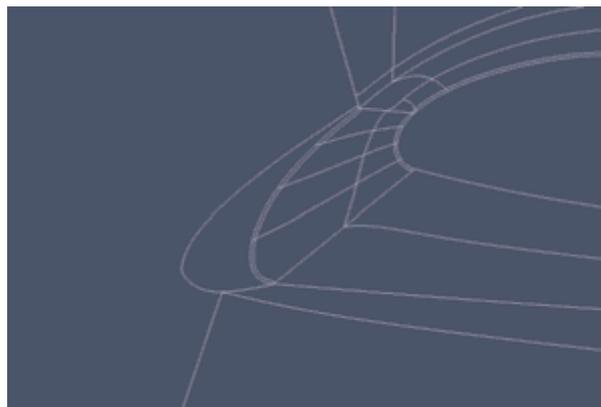


図17 2段階AMR適用後のスラット付近のマルチブロック及び格子形状

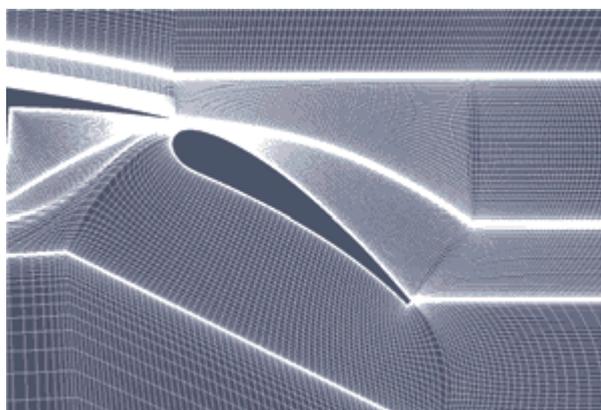
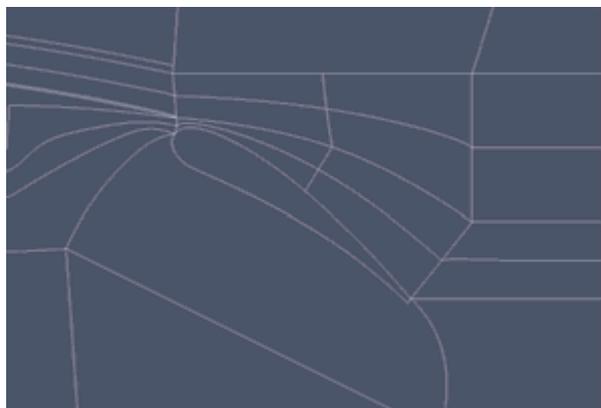


図18 2段階AMR適用後のフラップ付近のマルチブロック及び格子形状

流れの条件として、 $M_\infty = 0.17$, $\alpha = 4^\circ$, $Re = 1.7 \times 10^6$ を設定した。また、明示的なLESモデルは用いずに、 $\Delta t = 1.4 \times 10^{-5}$ (CFL=100)の陰解法で計算した。図19, 20に、130,000ステップ計算後のスラット及びフラップ付近の瞬間的な渦度分布を示す。スラット前縁や、主翼後縁からの細かい渦構造が現れ始めているのがわかる。ただし、文献[17]で見られる渦構造に比べると不十分である。これは、2段階のAMRではまだ格子解像度が足りていない、格子点分布が適切でない等が要因と思われるが、さらなる検討が必要である。図21は、時間平均した表面圧力分布を実験値[16]と比較したものであり、一致の程度は十分とはいえないが、分布の傾向は捉えられている。上述の問題はあるものの、計算自体は、10CPU程度の計算であるので、大規模並列計算を必ずしも行う必要がないのはAMRのメリットの一つである。しかしながら、現時点では、各ブロックの格子点数が同じでなければならない制約の中で、いわゆる「きれいな」格子を作るのが難しいという課題が残った。複雑形状への対応（汎用性）とコードの単純さはトレードオフ関係にあるため、AMR法の有効性や適用範囲を踏まえた対応が今後必要である。

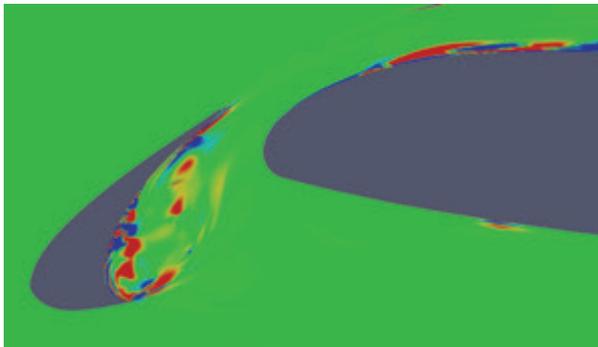


図19 スラット付近の瞬間渦度分布

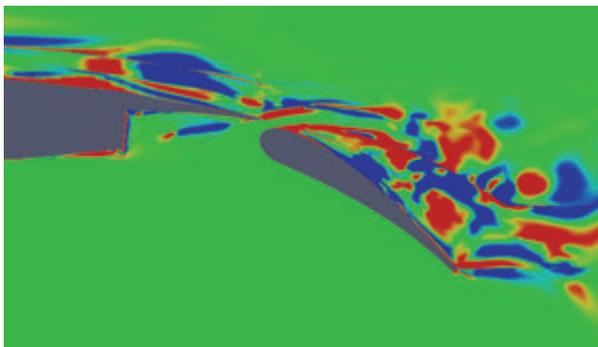


図20 フラップ付近の瞬間渦度分布

5. おわりに

本稿では、著者らが従来から開発してきたAMRコードに対して、複雑物体形状に対するマルチブロック対応を行うとともに、MD 30P30Nと呼ばれる3翼素の高揚力装置へ適用し、AMR法の有用性や課題を考察した。AMRは、剥離やせん断層、ウェークと境界層の干渉等を含む高揚力装置の複雑流れに対して、高解像度解を捉えるのに有効である（あろう）ということがわかった。しかし、今回実施した解析では、有効であると最終的に結論づけるには、格子分布やAMRの細分化に問題がある。今後は、格子分布やAMRの細分化、あるいは計算パラメータを変える等して、有効性検証を継続する予定である。

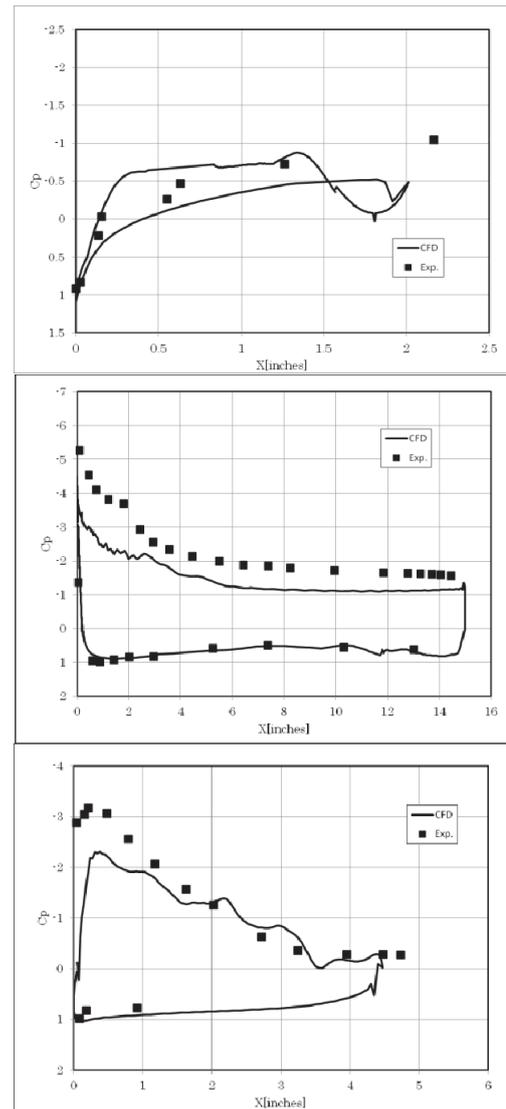


図21 AMR解析におけるCp分布の比較

参考文献

- [1] Winkler, C. M., Dorgan, A. J. and Mani, M.: A Reduced dissipation Approach for Unsteady Flows on Unstructured Grid, AIAA Paper 2012-0570, 2012.
- [2] Spalart, P. R.: Strategies for turbulence modeling and simulations, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **21** (2000), pp.252-263.
- [3] Burgess, N. K. and Mavriplis, D. J.: An *hp*-Adaptive Discontinuous Galerkin Solver for Aerodynamic Flows on Mixed-element Meshes, AIAA Paper 2011-490, 2011.
- [4] 松尾裕一, 池知直子, 中森一郎: LES解析のための並列化BAMRコードの開発, 第21回数値流体力学シンポジウム講演集, E1-6, 2007.
- [5] 松尾裕一, 桑原匠史, 池知直子, 中森一郎: BAMR法に基づく並列LESコードにおける計算効率の改善, 第24回数値流体力学シンポジウム講演集, E4-5, 2010.
- [6] Matsuo, Y., Kuwabara, T. and Nakamori, I.: A Parallel Structured Adaptive Mesh Refinement Approach for Complex Turbulent Shear Flows, *Journal of Fluid Science and Technology* **7** (2012), pp. 345-357.
- [7] Berger, M. J. and Olinger, J.: Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations, *Journal of Computational Physics* **53** (1984), pp.484-512.

- [8] Aftosmis, M. J., Berger, M. J. and Adomavicius, G.: A Parallel Multilevel Method for Adaptively Refined Cartesian Grids with Embedded Boundaries, AIAA Paper 2000-0808, 2000.
- [9] Wang, Z. J. and Chen, R. F.: Anisotropic Cartesian Grid Method for Viscous Turbulent Flow, AIAA Paper 2000-0395, 2000.
- [10] Dudek, S. A. and Colella, P.: Steady-State Solution-Adaptive Euler Computations on Structured Grids, AIAA Paper 98-0543, 1998.
- [11] Steinthorsson, E., Modiano, D. and Colella, P.: Computations of Unsteady Viscous Flows Using Solution-Adaptive Mesh Refinement in Curvilinear Body-Fitted Grid Systems, AIAA Paper 94-2330, 1994.
- [12] Wissink, A. M., Hornung, R. D., Kohn, S. R., Smith, S. S., and Elliott, N. S.: Large Scale Structured AMR Calculations Using the SAMRAI Framework, SC01 Proceedings, 2001.
- [13] Deiterding, R.: Block-Structured Adaptive Mesh Refinement - Theory, Implementation and Application, ESAIM: Proceedings, **34** (2011), pp.97-150.
- [14] Murphy, K. J., Bibb, K. L., Brauckmann, G. J., Rhode, M. N., Owens, B., Chan, D. T., Walker, E. L., Bell, J. H., and Wilson, T. M.: Orion Crew Module Aerodynamic Testing, AIAA Paper 2011-3502 (2011).
- [15] https://info.aiaa.org/tac/ASG/FDTC/DG/BECAN_files/BANCII.htm.
- [16] Jenkins, L. N., Khorrami, M. R. and Choudhari, M.: Characterization of Unsteady Flow Structures near Leading-Edge Slat: Part I., PIV measurements, AIAA Paper 2004-2801 (2004).
- [17] Lockard, D. P. and Choudhari, N. M.: Noise Radiation from a Leading-Edge Slat, AIAA Paper 2009-3101 (2009).