

エンジン筒内流動解析における格子細分化法の適用

松尾裕一^{*1}, 南部太介^{*1}, 溝淵泰寛^{*1}, 桑原匠史^{*2}, 桐原亮平^{*2}, 中森一郎^{*2}

^{*1}宇宙航空研究開発機構航空技術部門, ^{*2}アドバンスソフト

Application of an adaptive mesh refinement method to the analysis of flow inside an engine cylinder

by

Yuichi Matsuo, Taisuke Nambu, Yasuhiro Mizobuchi, Takuhito Kuwabara, Ryohei Kirihara, and Ichiro Nakamori

ABSTRACT

This paper describes the application of an adaptive mesh refinement method based on the block-based adaptation to the analysis of flow inside an engine cylinder. The suitability of the present AMR methodology, particularly of the time integration method and the effect of AMR to the computational results is shown. By comparing the results obtained using 1mm uniform mesh, 0.5mm uniform mesh, AMR mesh, we find the present block-based AMR method is effective for the high resolution of the flow analysis in the engine cylinder.

1. はじめに

筆者らは3年前からレシプロエンジン内の熱流動を解析対象とした新たなCFDソルバ「HINOCA」の研究開発を進めている[1-5]. 本ソルバは, LESをベースとするとともに, 流れの圧縮性を考慮したものとなっている. エンジンサイクル中にシリンダーとピストンが大きく可動するレシプロエンジンの解析において, 格子生成のコストと質の確保は大きな課題となるが, 本ソルバでは, 直交格子法とImmersed boundary (IB)法を採用し, 格子作成に関わるコストを最小限にしている.

しかし, 一様な直交格子を使う場合, バルブやプラグの形状を正確に表現したり, 壁近傍の境界層を精度よく捉えるためには, 格子サイズを0.1mm以下程度にかなり細かくする必要があり, 一様格子全体を細かくすると格子点数の著しい増大, 計算時間の増加を招く. 一方, シリンダー中心部付近の流れの解像には, そこまで細かい格子は必要ない(0.5mm程度で良い)ため, 解像度が必要な部分だけ格子を細かくすることができれば, 計算リソースや計算時間の節約につながる.

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する方法である. 解適合法は一般に, r -, h -, p -の3種類の方法に分類される. r 法(r -refinement)は, 格子点を移動させる方法, h 法(h -refinement)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)は, 局所的にスキームの精度を高くする方法を指す. h 法と p 法を組み合わせ hp -adaptationとして使われることもある[6]. 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, 構造格子を用いたLES解析において, 格子点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中させることを視野に, ブロックAMR法を用いた並列流体解析コードを開発してきた[7]. 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[8][9].

本稿では, HINOCAの流動解析部に対して, 従来開発してきたブロックAMR法を適用し, AMRの方法論の適切性(特に時間積分法)や, AMR適用の計算妥当性に与える影響を調べた結果を報告する.

2. 格子細分化法の適用

格子細分化(AMR)法の手法は大きく2つに分類される. 一つは, セル単位で細分化を行う手法, もう一つは, ある程度のセルをまとめたブロック単位で細分化を行う手法である(図1). 今回のAMR法の適用においては, ベースとなるHINOCAソルバとの親和性を考慮に入れ, 後者のブロック単位で細分化を行う方法を採用した. HINOCAの並列計算手法は, 前処理において, 全計算領域を格子点数の等しいブロックに分割し, 各演算プロセスに1ブロックを割り当てる並列処理を行うため, 既にブロック単位で領域分割が施されている. ここで生成されたブロックを単位として, AMR法によりさらに細分化を行えば, HINOCAソースコードの変更をできるだけ抑えながらAMR法を組み込む事が可能である. また, 今回導入したAMR法は, 数値計算を実施する前にあらかじめ細分化領域を選定し細分化を実施する「静的」手法のため, 細分化処理についても前処理を行い, 隣接ブロックの通信情報テーブルを作成した後に計算を行うことが可能である. 細分化は, 1つのブロックを8分割し, 細分化ブロックを生成する八分木法を用い, ブロック間の親子関係や隣接情報は木構造を用いて管理を行う. 図2, 3は, 2次元に簡略化した場合のブロック分割とそれに対応する木構造を示している. この木構造を元に, 各ブロックにおける隣接ブロックと親ブロック情報を作成し前処理時に保存しておく.

時間積分については, 2種類の手法の導入を検討した. 1つ目は, 細かい格子のブロックにおける流体計算を実行する場合の時間刻み Δt の値を, 粗い格子のブロック上で計算する場合の1/2の値で計算するadaptive time stepを採用する方法であり, 2つ目は, 細かい格子のブロック, 粗い格子のブロックで共通の Δt を用いて計算するsynchronous time step法である. 図4にadaptive time stepにおける各細分化レベルの時間積分の概念図を, 図5にsynchronous time stepにおける概念図をそれぞれ示す. adaptive time stepでは, 粗い格子は細かい格子の2倍の時間刻みで時間積分を行うため, 各々の細分化レベルのブロックにおいて適正な時間積分で計算が進行し, 計算時間に無駄が生じない. 一方, synchronous time stepでは, 細かい格子と粗い格子で同じ時間刻みを使用するため, 細かい格子で決定される時間刻みを全体の時間刻みとして採用した場合には, 時間計算のステップがadaptive time stepより嵩んでしまうという欠点がある.

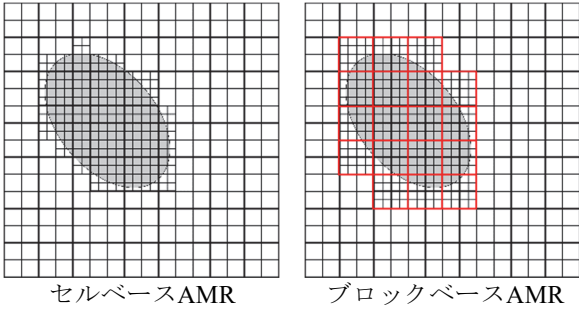


図1 AMR法の2つのタイプ

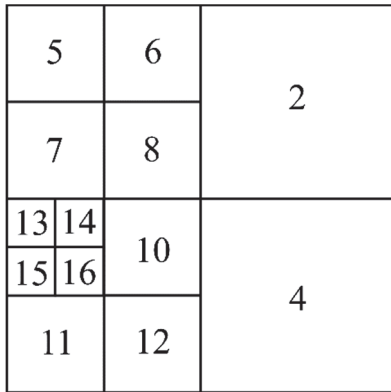


図2 ブロック分割の例

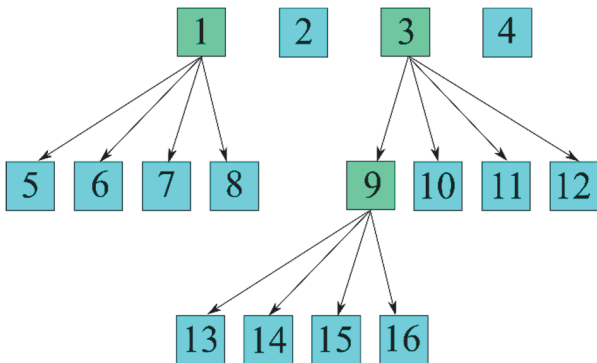


図3 図2のブロック分割で得られる木構造

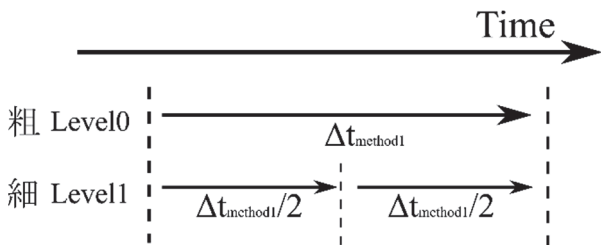


図4 adaptive time stepにおける時間積分

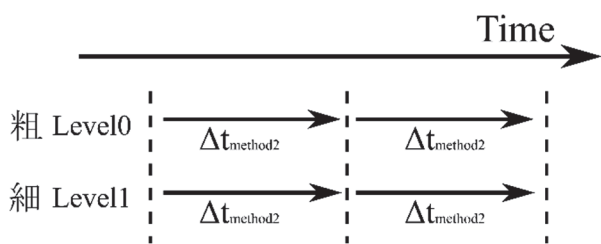


図5 synchronous time stepにおける時間積分

AMR法を導入するにあたり, 粗い格子のブロックと細かい格子のブロックが接する箇所等においては補間が必要となる. 粗いセルから細かいセルへの補間については, 以下に示すスロープ・リミター付の線型補間を用いている.

$$q_{i,j,k} = Q_{I,J,K} + \bar{\nabla}Q \cdot (r_{i,j,k}^q - r_{I,J,K}^Q) \quad (1)$$

$$\bar{\nabla}Q = \begin{pmatrix} 0.5[\text{sign}(\Delta_I^+) + \text{sign}(\Delta_I^-)] \min(|\Delta_I^+|, |\Delta_I^-|) \\ 0.5[\text{sign}(\Delta_J^+) + \text{sign}(\Delta_J^-)] \min(|\Delta_J^+|, |\Delta_J^-|) \\ 0.5[\text{sign}(\Delta_K^+) + \text{sign}(\Delta_K^-)] \min(|\Delta_K^+|, |\Delta_K^-|) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta_I^+ &= Q_{I+1,J,K} - Q_{I,J,K} & \Delta_I^- &= Q_{I,J,K} - Q_{I-1,J,K} \\ \Delta_J^+ &= Q_{I,J+1,K} - Q_{I,J,K} & \Delta_J^- &= Q_{I,J,K} - Q_{I,J-1,K} \\ \Delta_K^+ &= Q_{I,J,K+1} - Q_{I,J,K} & \Delta_K^- &= Q_{I,J,K} - Q_{I,J,K-1} \end{aligned} \quad (3)$$

また, 細かいセルから粗いセルへの補間については, 体積平均を用いて補間を行うこととする. ここで, $r_{i,j,k}$ と $r_{I,J,K}$ は, 細かいセルの中心と粗いセルの中心ベクトルを示している.

さらに, ベースとなるプログラムHINOCAは, Immersed Boundary (IB)法を用いて計算領域中の物体壁を扱うため, 粗い格子と細かい格子のブロックを跨いで物体壁が存在する場合には, 先に述べた補間を行った後に, IB法による処理を行う必要がある. 図6は, 同じ領域における, IB法による参照点を含むセル (灰色セル) と参照点の情報を用いて壁関数が適用されるセル (矢印の先の青色セル) の位置関係を, 粗い格子レベルと細かい格子レベルについて示している.

粗い格子レベルから細かい格子レベルへの補間時のIB境界の適用は, 粗い格子レベルにおいてIB法を用いた境界条件を適用後, 粗いセルから細かいセルへの補間を行い, 再度細かい格子レベルにおいてIB法を用いた境界条件の適用を行う. 一方, 細かい格子レベルから粗い格子レベルへの補間時のIB境界の適用は, 逆の手順となる.

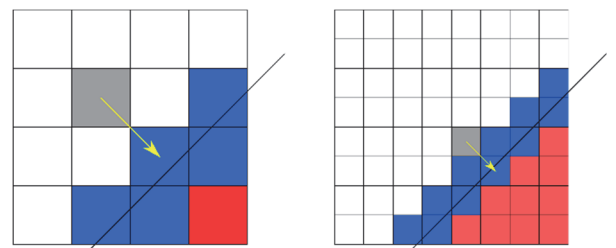


図6 各細分化レベルにおけるIB境界の概略

3. 計算条件

図7に示すエンジン筒内部の流動計算において, 通常の等間隔格子を用いた計算と, 細分化を適用した格子を用いた計算の比較を行った. 初期条件は, 圧力 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度 $T = 298.15 \text{K}$ を与え, ピストンのクランク角=0度からクランク角刻み一定で計算を開始する. 計算で用いる境界条件については表1にまとめている. 計算ケースは, 格子サイズが1mm (ケース1mm), 0.5mm (ケース0.5mm), および, 格子サイズ1mmの格子体系にAMRと手法1を適用 (ケースAMR1), 格子サ

イズ1mmの格子体系にAMRと手法2を適用（ケースAMR2）したケース4ケースを準備し、これらについて検証計算を実施した。

各ケースの計算格子とブロック数の情報を表2に、計算格子図を図8に示している。格子の細分化はエンジン内流動に関して重要な箇所であるバルブ周辺について実施している。計算は、各ブロックに1プロセス3スレッドを割り当てており、通信等にかかる時間を除けばほぼ同じ計算時間となることが期待される。

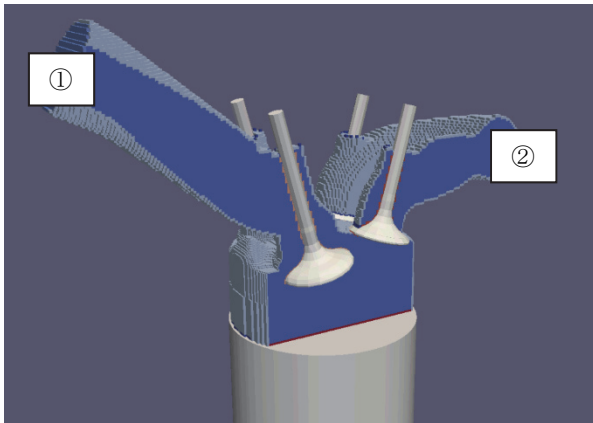


図7 テストモデルの概略

表1 境界条件

設定箇所	条件
①	総圧力総温度固定流入境界 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 298.15 \text{K}$
②	静圧固定流出境界 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, $T = 298.15 \text{K}$
バルブ、ピストン シリンダー	断熱滑り無し壁(壁関数)

表2 計算格子とブロック数情報

ケース	1ブロックあたりの格子数	総ブロック数
1mm	34×24×24	77
0.5mm	34×24×24	386
AMR1	34×24×24	269
AMR2	34×24×24	173

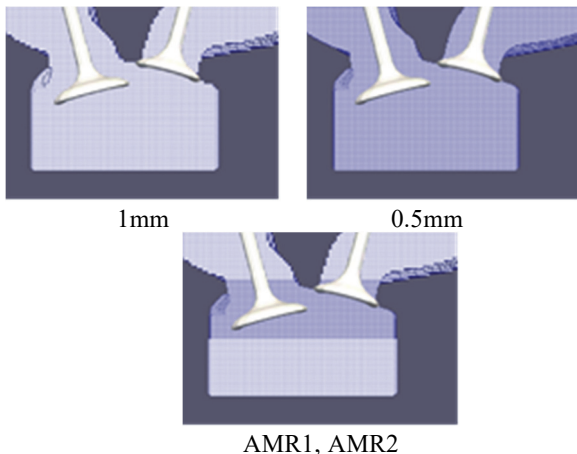


図8 各ケースにおける格子図

4. 計算結果

クランク角=60度における計算結果を以下に示す。図9は、シリンダー内のある断面における速度の絶対値の分布を示している。計算が進むにつれ、左側の流入バルブが開き、バルブに対して向かって右側で、流入速度が比較手的に増大している領域が確認できる。格子サイズ1mmのケースにおいては、排出バルブの底面に沿った流れになっているが、その他のケースでは異なり、流れは排出バルブ底面に沿わず、一定の角度で流入しているのが見てとれる。

シリンダーより少し上の領域に着目すると、ケース1mmでは、右下に速度の大きな領域が存在するが、その他のケースでは同様の分布は見られず、より複雑な分布となっている。このように、ケースAMR1、AMR2の結果は、格子サイズ0.5mmのケースの結果に近く、良好な結果が得られていることが分かる。また、バルブ周辺を細分化した結果が0.5mmの結果に近いことから、バルブ周辺の格子サイズが流れ場全体に及ぼす影響も大きいことが本計算により確認された。

図10は、各ケースにおいて、 $\Delta t =$ 一定で1000ステップの計算にかかる時間を示している。ケース1mmの計算時間が最も短く、0.5mm、AMR1、AMR2ではほぼ横ばいの結果となっている。ここで示しているのは、 $\Delta t =$ 一定で計算した場合の時間であるが、AMR1の細分化格子レベルでは他のケースの半分の時間ステップで計算しているため、0.5mmとAMR2の時間ステップをそれに合わせて計算したとすると図11のような結果が予想される。これは、0.5mmの格子において同じ時間精度の計算を実施した場合に、AMR2は他のケースに比べて約2倍程度に計算時間が短縮されることを示している。

5. まとめ

本稿では、HINOCAの流動解析部に対して、従来開発してきたブロックAMR法を適用し、AMRの方法論の適切性（特に時間積分法）や、AMR適用の計算妥当性に与える影響を調べた結果を報告した。

格子サイズとして、0.5mm、1mmで一様に格子を切った場合、バルブ付近にAMRを適用した場合、さらに時間積分としてAMR領域では元の時間刻みの半分にした場合（AMR1）、AMR領域でも元の時間刻みを用いた場合（AMR2）の4種類の結果を比較し、AMR1とAMR2では結果がほぼ変わらないこと、AMRの結果は0.5mmの結果に近いものが得られることが確認でき、AMRの有効性が確認された。今後は、ピストンやバルブの動きに合わせてAMRを動的に適用する方向に開発を進めて行く予定である。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理法人：JST）によって実施された。また、計算にはJAXAスーパーコンピュータJSS2が使われた。

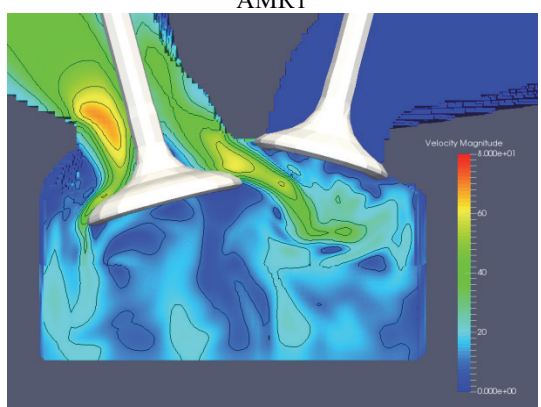
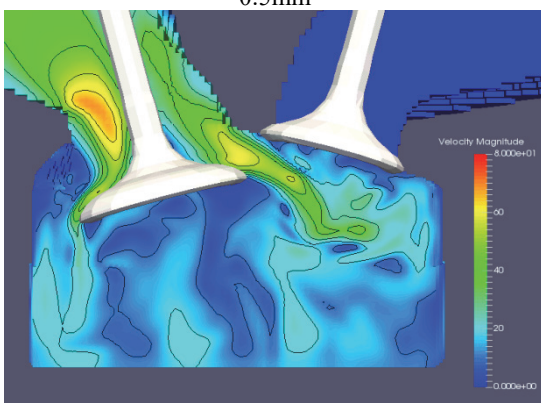
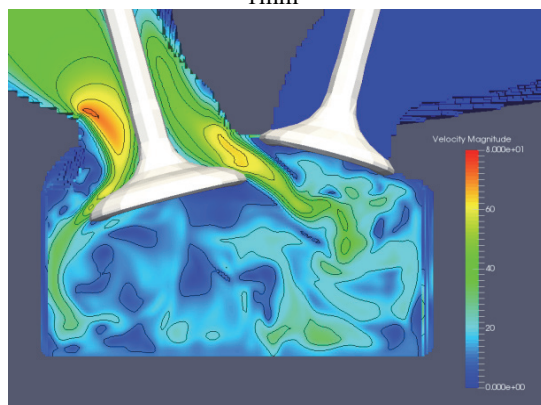
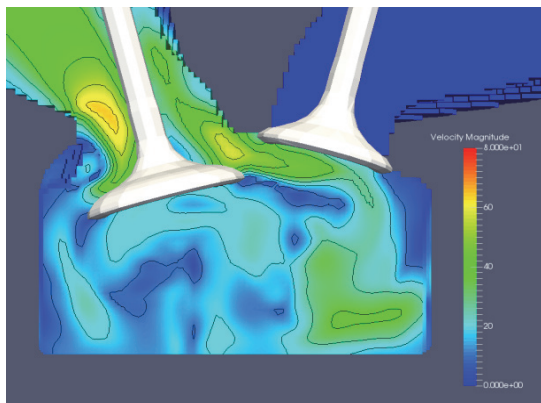


図9 各ケースにおいて得られた速度の絶対値分布

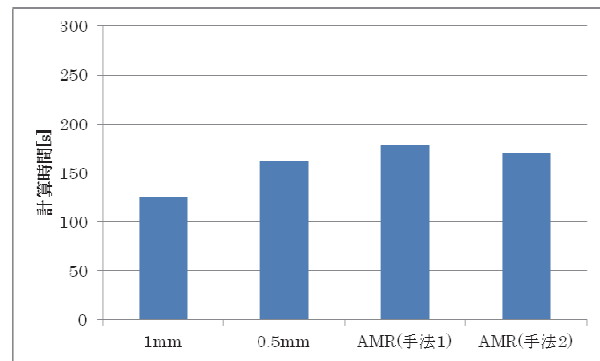


図10 各ケースにおける計算時間

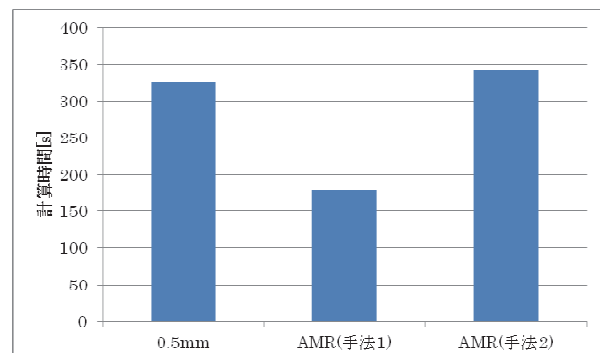


図11 AMR1の細分化格子レベルの時間ステップに合わせて計算した場合の計算時間

参考文献

- [1] http://www.jst.go.jp/sip/event/k01_hinoca/index.html
- [2] 喜久里：自動車用エンジンにおける火炎伝播の数値解析，第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，1C08，2017
- [3] 堀，溝渕：火炎点火エンジンにおける放電経路伸長を考慮した点火モデルの開発，第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，1C07，2017
- [4] 南部，溝渕，松尾，安田，菱田，高木：等間隔直交格子及びImmersed Boundary法に基づいた流体解析ソルバにおける燃料噴霧流解析，自動車技術会2016年秋季大会，146，2016
- [5] Nambu, T., Mizobuchi, Y., Matsuo, Y., Morii, Y., Hishida, M., Yasuda, H. and Yao, H.: Development of IC engine simulation platform based on compressible LES and immersed boundary method, LES for Internal Combustion Engine Flows, 2016
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, pp. 345-357, 2012.