

## 境界埋め込み法を用いた等間隔直交格子ソルバにおける DDM 並列計算

安田章悟, 菱田学 (菱友システムズ)  
高木正英 (海上技術安全研究所)  
南部太介, 溝淵泰寛, 松尾裕一 (JAXA)

## Parallel DDM simulation in Cartesian-IB flow solver

by

Shogo Yasuda and Manabu Hishida (Ryoyu Systems)  
Masahide Takagi (NMRI)  
Taisuke Nambu, Yasuhiro Mizobuchi and Yuichi Matsuo (JAXA)

## ABSTRACT

A new flow solver using the compressible LES, Immersed Boundary method and Cartesian grid is developed for automotive internal combustion engine simulation. We incorporated the basic spray model in this solver and carried out parallel spray calculations. This paper presents the results of comparison of the calculation time between two parallel methods. One is particle process method that uses a dedicated process for particle calculation. The other is domain decomposition method in which a process assigned to each domain calculates spray and gas and communicates with other processes to send and receive particles which go outside and inside the domain. Under the condition in this study, we find that domain decomposition method is faster than particle process method.

## 1. はじめに

昨今の地球温暖化、エネルギー枯渇問題への関心の高まりを受けて、CO<sub>2</sub> 排出量、石油消費量を削減していくことが切に求められている。特に、陸上輸送での CO<sub>2</sub> 排出量及び石油消費量は膨大かつ増加傾向にあるため、自動車エンジンの燃費向上が必要となってきた。また、加速減速時の性能向上や、地域別、国別で特性の異なる燃料への対応など、さらに高い要求が求められるようになってきた。

これらの要求を実現するためには、エンジン燃焼室で発生している熱流動現象を把握し、その制御を可能にすることが必要である。しかし、エンジン燃焼室では流動、噴霧、燃焼が密接に絡み合い、非常に複雑な現象となっており、エンジンシステムは複雑化の一途を辿っている。このため、CFD を用いて複雑な現象を捉え、設計開発に役立てていくとする取り組みが進んでいる。

現在ではエンジンの燃焼室解析コードはいくつかあるが、解析コードに要求される

- ・高速かつ高精度な計算
- ・低負荷で移動境界も扱える格子生成
- ・圧縮性への対応
- ・サイクル変動を捉える非定常計算

を満たせていない。そこで、JAXA では内閣府が進めている SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) の下これらの要求を満たした解析コードの開発を進めている。現在開発中の解析コードでは IB (immersed boundary) 法、等間隔直交格子法を用いることで、高速な計算を実現している。また、物体形状を STL データ (三角面で構成されるデータ) で与えると、格子を作成する手間をかけずに計算を開始できる<sup>(1)</sup>。

気相計算では、領域分割を行い各領域に 1 つずつプロセスを割り当てることで並列化を行っている。一方、噴霧計算では、粒子を質点としてラグランジュ的に追う DDM (Discrete Droplet Model) を用いるため、並列化手法に 2 つの方法が考えられる。1 つ目の方法では、噴霧計算だけを行う専用のプロセスを用意し、そのプロセスと領域分割された各領域を受け持つプロセスが通信を行う方法である。もう 1 つは、領域分割された各領域を受け持つプロセスがその領域内にある噴霧の計算も受け持ち、流入/流出する粒子を通信する方法である。

本研究では、自由噴霧を対象に、2 つの並列化手法の計算時間の比較を行った。

## 2. 解析手法

## 2. 1 流動解析手法

エンジン燃焼室の複雑な流れ場を精度よく解析するため、支配方程式として非定常三次元圧縮性乱流場を扱うことが可能な、フィルタリングされた非定常三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = \frac{\partial F_{vx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{vy}}{\partial y} + \frac{\partial F_{vz}}{\partial z} \quad (1)$$

を用いている。Q は保存量ベクトル、F は非粘性流束ベクトル、F<sub>v</sub> は粘性流束ベクトルである。移流項の計算には AUSM 系の SLAU<sup>(2)</sup> を使い、空間精度は MUSCL 法を使い 3 次精度化している。粘性流束は中心差分で評価している。時間積分には Jameson 型の 4 段 Runge-Kutta 法を採用している。また、LES サブグリッドモデルには WALE<sup>(3)</sup> モデルを採用している。

また、空間内を等間隔に切られた直交格子は、物体形状である STL データと交差判定が行われ、境界条件を埋め込む IB セル、物体セル、流体セルに選別される。

## 2. 2 噴霧解析手法

## 2. 2. 1 噴霧モデル

噴霧モデルには、粒子全てを解析することは非常に困難なため、粒子群をパーセルで近似し液滴をラグランジュ的に追う DDM を用いた。本研究では、粒子の移動と次に示す分裂モデルのみを考慮している。

## 2. 2. 2 分裂モデル

分裂モデルは大きく分けて 2 つに分類され、1 つは液滴と流動のせん断等による表面波不安定成長解析から求められるモデルである。もう 1 つは、液滴が振動しその変形量や一定時間で分裂を開始するモデルである。本研究では前者の不安定成長解析から求める KHRT モデル<sup>(4)(5)</sup>を採用した。このモデルは KH (Kelvin-Helmholtz) 不安定性、RT (Rayleigh-Taylor) 不安定性を同時に解くモデルであり、RT モデルの分裂が起こらない場合 KH モデルの分裂が起こる。

RT モデルは、液滴表面での密度差に起因した RT 不安定性による分裂を記述するものである。このモデルの液滴の分裂時間  $\tau_{RT}$ 、液滴表面で成長する RT 波の波長  $\Lambda_{RT}$ 、 $\Lambda_{RT}$  の最大成長率  $\Omega_{RT}$  は以下のとおり与えられる。

$$\tau_{RT} = \frac{C_\tau}{\Omega_{RT}} \quad (2)$$

$$\Lambda_{RT} = C_3 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{a\rho_p}} \quad (3)$$

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2a}{3} \left( \frac{a\rho_p}{3\sigma} \right)^{1/4}} \quad (4)$$

ここに、 $C_3$ 、 $C_1$  は定数、 $\sigma$  は表面張力、 $a$  は液滴加速度、 $\rho_p$  は液滴密度である。RT 波の波長が液滴径よりも小さく、経過時間が分裂時間を超えていると分裂が起こる。

KH モデルは、液滴表面での速度差に起因した KH 不安定性による分裂を記述するものである。このモデルでは液滴の分裂時間  $\tau_{KH}$ 、液滴表面で成長する KH 波の波長  $\Lambda_{KH}$ 、 $\Lambda_{KH}$  の最大成長率  $\Omega_{KH}$  は以下のとおり与えられる。

$$\tau_{KH} = \frac{3.788 B_1 r_0}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}} \quad (5)$$

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02 r_0 (1 + 0.45\sqrt{Z})(1 + 0.4T^{0.7})}{(1 + 0.865 We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (6)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34 + 0.385 We_g^{1.5}}{(1 + Z)(1 + 1.4T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_p r_0^3}} \quad (7)$$

$$Z = \frac{\sqrt{We_p}}{Re_p}, \quad T = Z \sqrt{We_g}$$

ここに、 $We_p$ 、 $We_g$  はウェーバー数、 $Re_p$  はレイノルズ数、 $r_0$  は液滴半径、 $B_1$  は定数である。分裂の条件によってはパーセルの数が増えることもある。

### 2. 2. 3. 移動、壁面反射方法

液滴の位置は、ニュートンの運動方程式から求める。

$$m \frac{d^2 xp}{dt^2} = F \quad (8)$$

ここに、 $xp$  は液滴の位置座標、 $m$  は液滴の質量、 $F$  は流体から受ける力で、TAB モデル<sup>(6)</sup>を用いた液滴の変形量が考慮されている。等間隔直交格子を使っているため、粒子がどのセルに入っているかの探索は、位置座標から瞬時に特定することができる。

液滴が壁面に衝突する際には、液滴を鏡面反射させている。その衝突の判定は STL データを使い判定し、以下のような手順で行っている。

- ①. STL データである三角面を有する平面と、移動経路の交差判定。
  - ②. その交点を求め、その点が三角面内にあるかを判定。
  - ③. 三角面で鏡面反射させ、反射後の液滴の位置を求める (図 1)。三角面との交点と反射後の液滴の位置との経路を移動経路として①へ戻る。
- ①から③の手順を行い、交差判定がなされなくなった位置を最終位置とする。

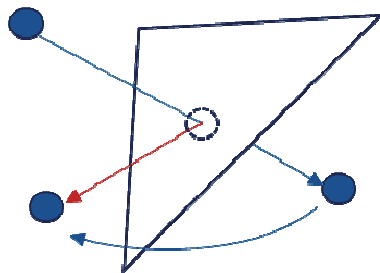
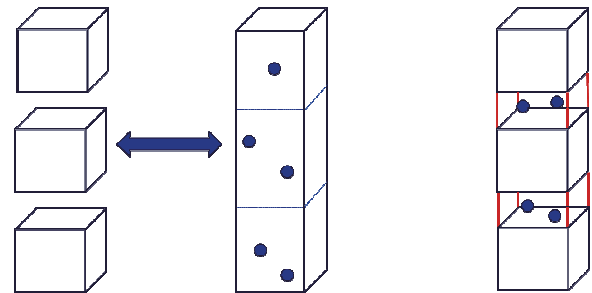


図 1 粒子の反射方法

### 2. 2. 4. 噴霧並列化手法

1. で述べたように、噴霧計算において 2 種類の並列化手法を用意した。1 つは、噴霧計算だけを行う専用のプロセスを用意し、そのプロセスと流動計算における各領域との通信を行う方法 (図 2(A))。もう 1 つは、流動計算で領域分割された各領域から流入/流出する粒子を通信する方法である (図 2(B))。ここでは、それぞれの方法を粒子プロセス法、領域分割法と呼ぶこととする。前者は、領域間のロードバランスは良好だが、必ず粒子数分の通信が起こるため通信負荷は増える。後者は、既存ソフトでもよく使われている方法であり、通信負荷が低いが、粒子が多く存在している領域では計算負荷が高く、領域間のロードバランスが悪くなる。



(A)

(B)

図 2 並列化手法

(A) 粒子プロセス法 (B) 領域分割法

## 3. 計算結果

### 3. 1 噴霧到達距離の計算

噴霧到達距離の計算では、定容容器 (15×15×100mm) を用意し、格子幅 0.25mm で計算を行った。境界条件はすべての面を 300K のすべり等温壁とした。初期条件は、大気圧、静止流体とした。燃料はイソオクタンとした。噴霧は燃料を噴射頂角 10° の solid cone (中実円錐) 状に速度 90m/s で噴射させた。KH 分裂モデルパラメータの値は、 $B_0$  (KH 分裂後液滴径に関するパラメータ) を 0.61、 $B_1$  を 40 と固定した。

図 3 は RT 分裂モデルパラメータ  $C_3$  を 0.2, 0.3, 0.4 と変化させたグラフである。縦軸に噴霧到達距離、横軸に噴射時間をとっている。グラフから現在組み込まれているモデルでは、このような条件下において RT 分裂パラメータ  $C_3$  を 0.2, 0.3, 0.4 と変化させても噴霧到達距離に影響はなく、実験結果とよく一致することが確認できる。したがって、以下の並列化比較における計算での RT 分裂パラメータ  $C_3$  には 0.2 を採用する。

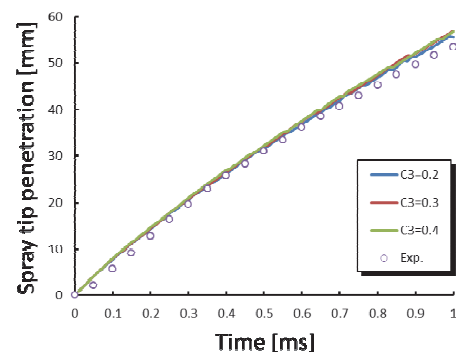


図 3 RT 分裂モデルパラメータ  $C_3$  の噴霧到達距離への影響

3. 2. 並列化手法の比較

並列化手法の比較では、噴霧到達距離計算と同様に定容器 (5×3.5×80mm) を用意し、格子幅 1mm で計算領域を z 方向に 3 分割したものと、x 方向に 2 分割、z 方向に 5 分割、計 10 分割した 2 ケースの計算を行った。計算機には、JAXA のスーパーコンピュータ JSS2 を使用した。領域分割法における計算資源は、3 分割の計算では 3 ノード使用し 3 プロセスを立ち上げ、10 分割の計算では 10 ノード使用し 10 プロセスを立ち上げている。また、1 プロセスあたり 4 コアを使用している。一方、粒子プロセス法における計算資源は、粒子専用のプロセスを使用するため、3 分割の計算では 4 ノードを使用し 4 プロセスを立ち上げ、10 分割の計算では 11 ノード 11 プロセスを立ち上げている。領域分割法同様、粒子プロセス法においても 1 プロセスあたり 4 コアを使用している。

境界条件は、全ての面を断熱壁とした。初期条件は、大気圧、静止流体とした。噴霧は水滴とし、噴射頂角 20° の solid cone 状に速度 300m/s で噴射させた (図 4)。

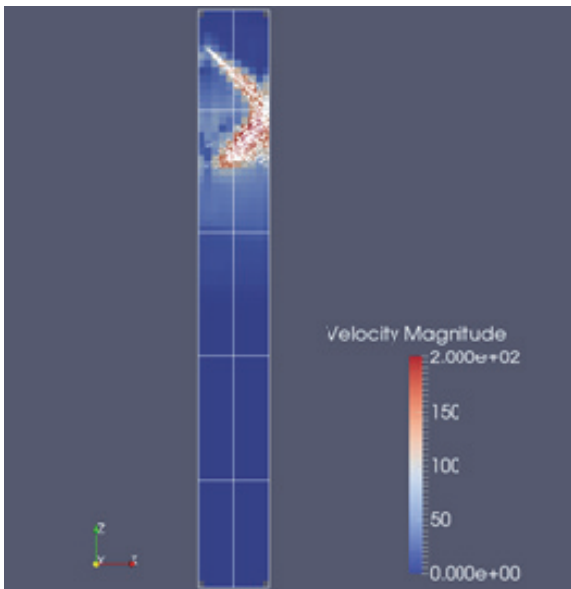


図 4 領域 10 分割での噴霧並列計算

並列化手法の違いによる計算時間の比較をしたグラフを図 5、図 6 に示す。図 5 は計算領域を 3 分割、図 6 は 10 分割した計算結果で、縦軸に計算時間、横軸に粒子数をとっている。計算時間は 10000step 計算するのに要する時間を示している。図 5、図 6 のグラフからどの粒子数でも領域分割の方が速い結果となった。

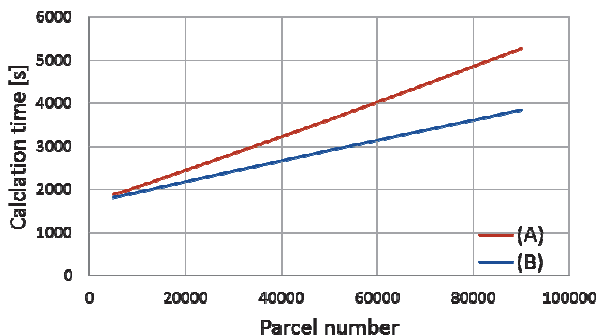


図 5 領域 3 分割での粒子プロセス法と領域分割法の比較 (A) 粒子プロセス法 (B) 領域分割法

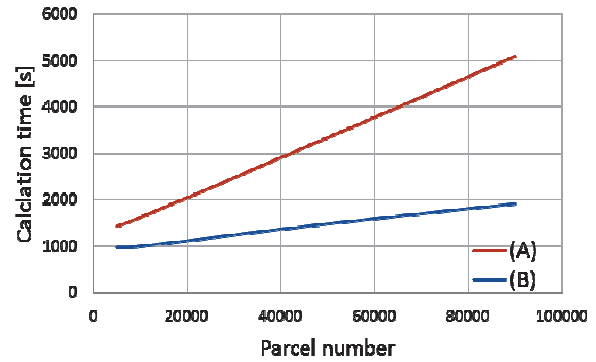


図 6 領域 10 分割での粒子プロセス法と領域分割法の比較 (A) 粒子プロセス法 (B) 領域分割法

通信負荷を考慮せず考えると、図 5 の 3 分割では各領域が大きいため、領域分割法において多くの粒子が存在する領域と少ない粒子の領域となる場合がある。したがって、領域間のロードバランスを崩し、粒子プロセス法の方が速く計算できると予想していた。しかし、結果は領域分割法の方が速く、これは領域分割法のロードバランスの悪さによる計算時間の増加よりも粒子プロセス法での通信負荷による計算時間の増加の方が大きいためだと考えられる。

2 つのグラフを比較した結果、領域分割法において図 6 の 10 分割の方が、粒子数に対する計算時間の増加が小さくなっていることがわかる。これは、領域数が増えることでロードバランスが良くなるため、粒子数が増える場合でも計算時間が増大しないからだと考えられる。

また、粒子プロセス法では、1 つのプロセスが全粒子を計算し、それぞれの粒子が含まれている各流動計算領域を担当するプロセスと通信するため、分割数が多いと通信負荷が増え、分割数を増やしてもあまり速度向上につながらなかったことがわかった。実際のエンジン形状で計算する場合、領域分割数は 10 以上になることがほとんどであるため、この結果とプログラムへの組み込みやすさを考慮すると、領域分割法で並列化する方法をとるのが良いと思われる。

4. まとめ

- ・ IB 法、圧縮性、LES を扱う現在開発中の解析ソルバで、噴霧の基本的なモデル (DDM、分裂) を組み込むことができた。
- ・ 組み込んだ噴霧基本モデルで計算を行い、RT 分裂モデルパラメータ  $C_3$  が 0.2~0.4 の間では、どの値でも実験と一致することがわかった。
- ・ 粒子プロセス法と領域分割法の 2 つの並列化手法の比較から領域分割法での並列化が優位であることがわかった。
- ・ 今後さらに蒸発モデルや液膜モデルなどを組み込み、検証を行っていく。

謝辞

貴重なデータを提供していただいた、岡山大学河原伸幸准教授、群馬大学座間淑夫助教に心より感謝致します。本研究の数値計算の実行に当たっては宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータ「JSS2」を用いた。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」(管理人：JST) によって実施された。

## 参考文献

- 1) 安田 他, ” 直交格子および IB 法を用いたレシプロエンジン向け圧縮性流体解析ソルバの開発”, 第 29 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2015, D06-5.
- 2) Shima, E. and Keiichi, K., On new simple low-dissipation scheme of AUSM-family for all speeds, AIAA paper 2009-136, 2009.
- 3) Ducros, F., Nicoud, F. and Poinsot T., Wall-adapting local eddy-viscosity models for simulations in complex geometries, 6th ICFD Conf. on Numerical Methods for Fluid Dynamics, 293-299, 1998.
- 4) Patterson, M. and Reitz, D., Modeling the effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission, SAE Paper No.980131, 1998.
- 5) Beale, J. and Reitz, D., Modeling Spray Atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor Hybrid Model, Atomization and Sprays vol. 9, 623-650, 1999.
- 6) O' Rourke, J. and Amsden, A., The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper No.872089, 1987.