

# 大規模並列計算によるディーゼル噴霧解析の高速化

## 1. はじめに

ディーゼルエンジンは燃料噴射、過給機などの技術革新によって、燃費改善と排ガス浄化が達成され、近年注目されている。さらなる改善のためには実験に加えて、複雑なエンジン内現象の理解と予測を目的とした数値解析の役割がますます重要になると考えられる。現在、予測精度改善のために、燃料の簡略化反応機構の開発、LES (Large Eddy Simulation) の導入などが期待されている。

しかしながら、予測精度を高めるにつれ、計算量が増加する傾向にあり、実用的な計算時間内に解が得られないことが課題と考えている。計算時間削減には並列計算が有効であるが、流動解析や他の燃焼器の解析に比べて、エンジン燃焼はサブモデル、移動格子により、コードが複雑で、並列計算の利用が積極的でない。そこで、筆者らはMPI (Message Passing Interface) による並列計算を用いて、ディーゼル噴霧解析の計算時間削減を検討した<sup>(1)</sup>。

## 2. MPI による計算時間の削減

領域分割によるMPIの場合、計算前に計算領域を並列計算数に分割する。次に、各領域を計算機のコアに割り当てて全領域を同時に計算し、計算時間を削減する。支配方程式を計算する場合、勾配や数値流束、全計算領域の最大値、最小値などの計算で他の計算領域の値が必要となる。この場合、MPI通信を行い、各計算領域が情報を送信や受信することで、必要な情報を共有する。通信には時間を要することから、領域分割の方法やコーディングを最適化し、無駄な通信を削減することが計算速度改善に重要となる。

## 3. 計算コード

本研究ではC++かつフリーのオープンソースとして注目されているOpenFOAMを用いた。OpenFOAMは噴霧パーセルを含む燃焼計算が領域分割を用いたMPI (Flat MPI) に対応している。実用的に活用するにはコード修正が必要となるが、C++のテンプレート、継承などの機能が高度に使われている。このため、モデル修

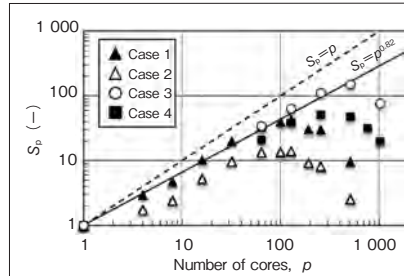


図1 コア数と並列性能の関係

正や追加に対してユーザーのコーディング量の削減、コードの保守性向上が期待でき、ベースコードとして十分な機能を搭載している。また、GitHubで公開されており、コード修正が比較的活発で、どの研究者も計算結果を再現できる。

## 4. スパコンによる計算時間削減

計算機には京都大学のスパコン (CrayXE6) を用いた。計算の再現性の観点から、OpenFOAM-2.2.2の噴霧燃焼解析のチュートリアル (aachemBomb) を採用した (Case1)。格子数は16.8万、燃焼は一段総括反応を用いた計算である。また、Case1の条件から非蒸発場 (Case2)、簡略化反応機構 (Case3)、Case1の格子数8倍 (Case4) へと変更した計算も実行した。

図1にコア数 (並列数) と性能向上率  $S_p$  の関係を示す。性能向上率はシリアル計算 (1コア) の計算時間を並列計算での計算時間で除した値である。簡略化反応機構や格子数の多いCase3とCase4で性能向上率が高い。並列数がある一定値を超えると通信時間の増加が並列計算で削減される計算時間を上回り、並列性能が悪化している。今回はCase3で512並列時に最大149倍の高速化が得られた。

次にEngine Combustion Networkのベンチマーク実験 (Spray A, 非燃焼の蒸発噴霧) を対象に、LES解析を実施した。図2に噴射開始から1.5msのLES解析の噴霧画像を示す。噴霧外縁は当量比0.1の等値面として定義し、噴孔から噴霧先端までの長さ (蒸気長さ) と噴孔から液相先端部までの長さ (液相長さ) を実験と比較した。

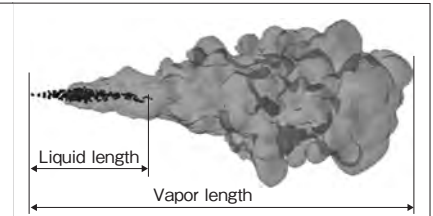


図2 蒸発噴霧のLES計算例 ( $t=1.5\text{ms}$ )

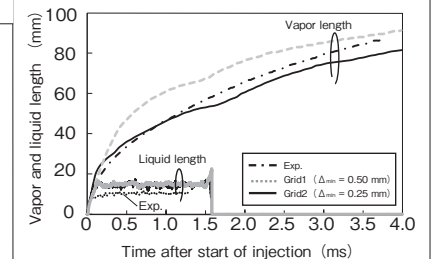


図3 液相長さ気相長さ

結果を図3に示す。Grid1は最小格子幅0.50 mm、格子数107万、Grid2は最小格子幅0.25 mm、格子数944万の結果である。格子解像度が高いGrid2は液相と気相長さとも実験とよく一致している。Grid2の計算時間は噴射開始から5msまで14時間である。24時間のシリアル計算の結果から、並列計算なしの場合、計算時間は90.5日と推測できた。よって、性能向上率は154である。

以上より、計算格子数が少ない場合、簡略化反応機構、LESで格子数が多い場合は、燃焼計算に加えて、非燃焼計算でも並列性能が得られることを確認した。今後は並列性能を改善し、ピストンやバルブを含む計算を並列計算への対応を検討する。

一方、スパコンを用いてもすべてのモデルが不要になるほどの高速化は見込めないため、燃料の簡略化機構、壁関数、噴霧モデルなどのモデル開発がいつそう望まれる。

(原稿受付 2016年7月1日)

[堀 司 神戸大学]

## ●文献

- (1) 堀 司・柴垣大貴・ほか, OpenFOAMを用いた大規模並列計算によるディーゼル噴霧解析の高速化, 自動車技術会論文集, 47-2 (2016), 267-272.
- (2) Engine Combustion Network, <http://www.sandia.gov/ecn/>