

# HA8000 クラスタシステムでの OpenFOAM-2.0 の並列化効率

今野 雅

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻

## 1. はじめに

2011年6月にオープンソースのCFDツールキットであるOpenFOAMのVersion 2.0(以下, OpenFOAM-2.0)がリリースされた。そこで, OpenFOAM-2.0をHA8000クラスタシステムにインストールし, チャンネル流を対象に並列化効率を調べたので報告する<sup>1</sup>。

## 2. HA8000 クラスタシステムへの OpenFOAM-2.0 のインストール方法と並列実行方法

OpenFOAMのHA8000クラスタシステムへのインストール方法や並列化効率の結果については筆者が管理しているWebサイトであるOpenFOAM Wiki 日本語版<sup>2</sup>にて公開している。同サイトでは, 設定ファイルや並列化効率計算用スクリプトも公開しているので参考にされたい。

## 2. 計算条件

並列化効率を調べた際のOpenFOAM-2.0の計算環境は表1の通りである。並列化効率は計算格子数に依存するので, 表2に示す3種類の格子で検討を行なった。検討したノード数は, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64である。なお, ノードでは全16コアを使用している。

表 1: 計算環境

---

• OpenFOAMのVersion: 2.0.x-90d01e563d97
• コンパイラ: Intel C/C++コンパイラ Ver.11.0-074
• コンパイラ最適化オプション: -msse3 -O3 -no-prec-div
• ジョブキュー: jhpcn064 (学際大規模情報基盤共同利用キュー, 計算ノード: Bグループ)
• ノード間ネットワーク性能: 2.5 GB/s×双方向
• MPIライブラリ: mpich-mx-intel11-shared(*1)
• NUMA最適化: 有り(*2)

---

\*1 Myrinet用MPICHをIntel C/C++コンパイラ Ver.11.0でビルドしたシェアード・ライブラリ

\*2 numactlコマンドを用いて, membindとcpunodebindオプションにプロセッサ番号を指定してソルバを実行

表 2: 検討ケースと格子数

---

• ケース S: $128(x) \times 64(y) \times 64(z)$ = 約 50 万
• ケース M: $256(x) \times 128(y) \times 128(z)$ = 約 420 万
• ケース M-AMG: 格子はケース M と同じだが, 圧力の線型ソルバが AMG (前処理: DIC Gauss Seidel)
• ケース L: $512(x) \times 256(y) \times 256(z)$ = 約 3,400 万

---

<sup>1</sup> 未検討だが2011年12月にリリースされたVersion 2.1の並列化効率も同様と思われる。

<sup>2</sup> <http://www.ofwiki.jp/>

表 3 に流れ場の計算条件を示す。

表 3: 計算条件

- 流れ場：一様乱流チャンネル流(\*1)
- ソルバ：channelFoam (OpenFOAM の標準ソルバ)
- 解析領域：4m(x), 2m(y), 2m(z)
- 境界条件：周期境界・主流方向(x), 固定壁(y), 周期境界(z)
- 平均圧力勾配：主流方向の平均風速が 0.1335 m/s となるよう平均圧力勾配を制御
- 乱流モデル：LES, 標準 Smagorinsky モデル
- 時間項時間スキーム：完全陰解法 (backward)
- 移流項離散化スキーム：中心差分 (linear)
- 線型ソルバ：圧力場について PCG 法 (前処理 DIC 法)。他の場について BiCG 法 (前処理 DILU 法)
- 初期値：boxTurb(\*2) を用いて生成した場
- 積分時間：初期値から 25 秒
- 時間間隔：ケース S, M で 0.05 秒 (時間反復 500 回)。ケース L で 0.025 秒 (時間反復 1,000 回)

\*1 OpenFOAM 付随の Tutorial ケースである incompressible/channelFoam/channel395 ベース

\*2 指定したエネルギースペクトルを持ち連続式を満す一様乱流場を生成する OpenFOAM のユーティリティ

### 3. 高速化率と並列化効率

ここでは、高速化率と並列化効率の結果を示す。なお、ケース S と M では、1 ノードの計算時間をベースにして効率を算出したが、ケース L ではノード数が 1 と 2 の場合にはメモリ不足で解析が行えなかったため、4 ノードの計算時間をベースに効率を算出している。また、計算時間は初期化に掛った時間と計算結果の出力時間を含まない。

図 1 にケース S での高速化率と並列化効率を示すが、格子数が少ないため、16 ノード(256 コア)以上の並列計算では効率が大幅に減少している。

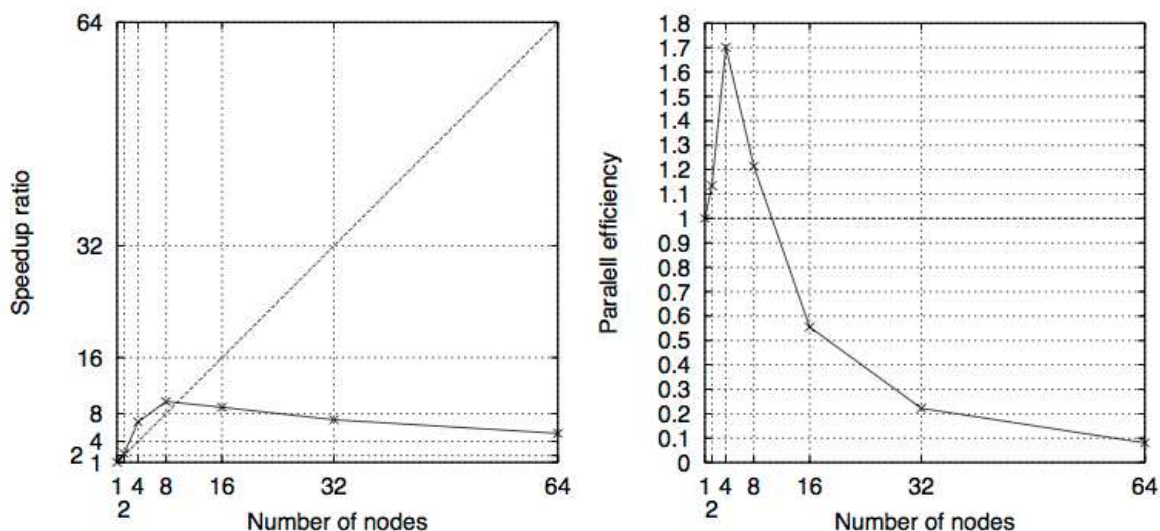


図 1: ケース S での高速化率と並列化効率

図 2 にケース M での高速化率と並列化効率を示すが、格子数が 420 万とそれほど大規模でない  
 ので、64 ノード(1024 コア)計算では並列化効率が減少する。

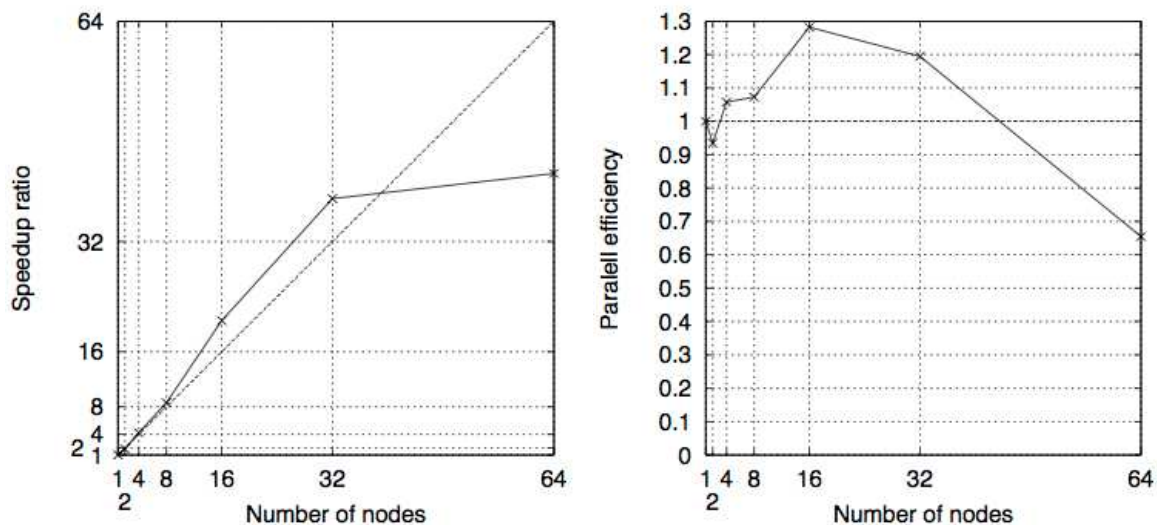


図 2: ケース M での高速化率と並列化効率

図 3 にケース L での高速化率と並列化効率を示すが、64 ノード(1024 コア)計算でも並列化効  
 率が 85%以上出ている。

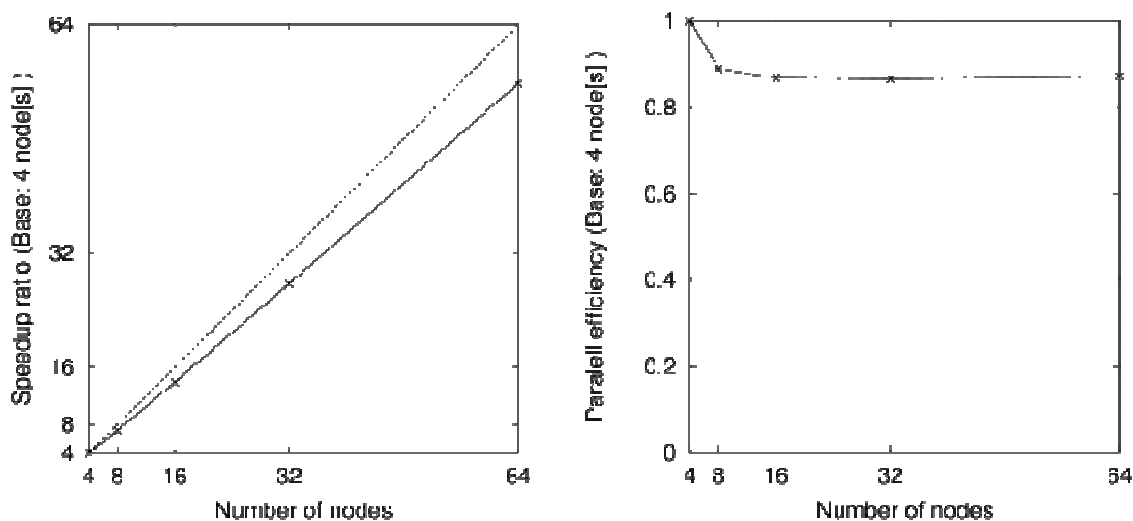


図 3: ケース L での高速化率と並列化効率

図 4 にケース M-AMG での高速化率と並列化効率を示す。圧力の線型ソルバに PCG 法を用いた  
 ケース M の図 2 と比べると、ノード数の増加に伴い、著しく並列化効率が落ちていることがわ  
 かる。

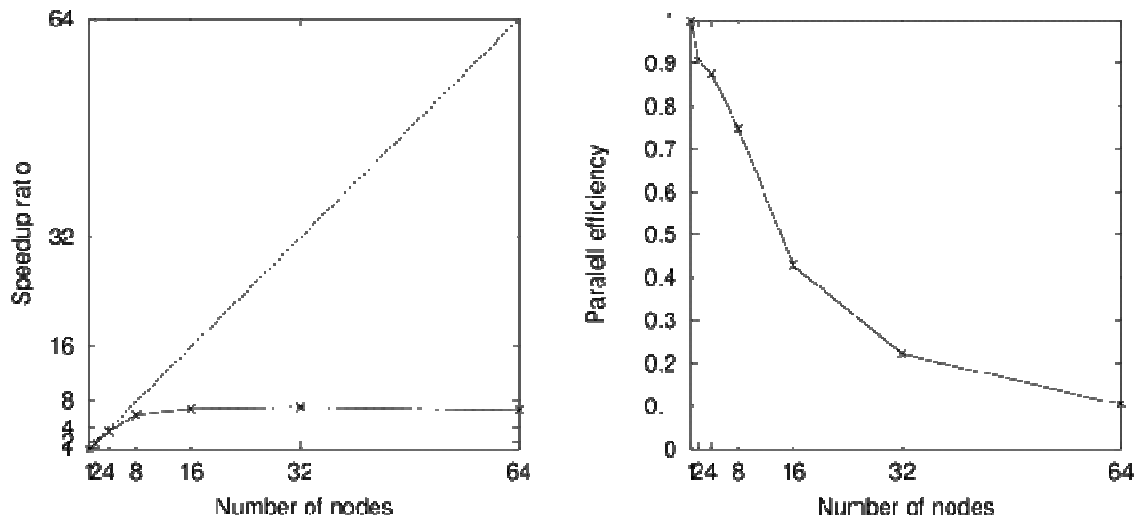


図 4: ケース M-AMG での高速化率と並列化効率

図 5 にケース M と M-AMG の計算時間を示す。8 ノードまでは、AMG 法は PCG 法に比べ 2 倍程度速いが、16 ノード以上では PCG 法より遅くなり、64 ノードでは PCG 法の約 3 倍遅くなっている。格子数にも依存するが、ノード数がある程度少ない場合には圧力の線型ソルバとして AMG 法を用い、ノード数が多い場合には PCG 法を用いることで計算時間の短縮が図れることがわかった。

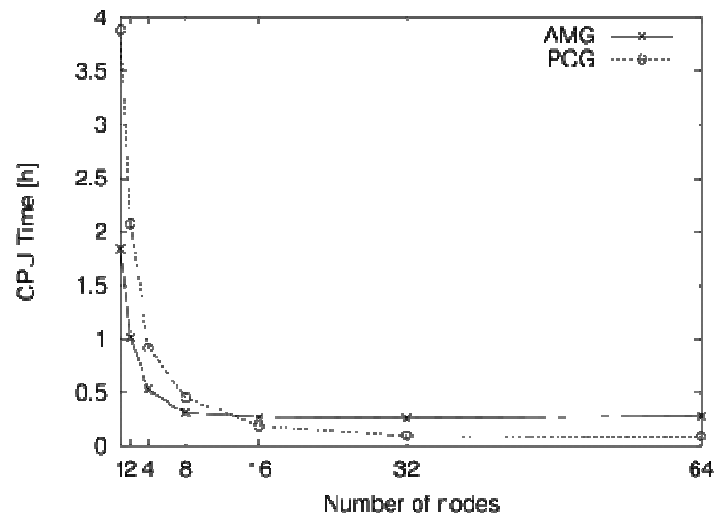


図 5: ケース M と M-AMG との計算時間の比較

なお、本報の計算で用いたノード群は表 2 に示した通り、B グループであるため、ノード間ネットワーク性能は 2.5 GB/s×双方向と、A グループの 5.0 GB/s×双方向に比べて理論値として半分の性能であるため、A グループを用いた場合には多少並列化効率が增加する可能性があることを最後に付け加えておく。

### 3. まとめ

本報では OpenFOAM-2.0 を HA8000 クラスタシステムにインストールし、チャンネル流を対象

に、1 ノード(16 コア)から 64 ノード(1024 コマ)までの OpenFOAM-2.0 の並列化効率を調べた。その結果、格子数が十分大きい場合には、32 や 64 ノードに至るまで高い並列化効率を得ることがわかった。また、本ケースでは、ノード数がある程度少ない場合には圧力の線型ソルバとして AMG 法を用い、逆にノード数が多い場合には PCG 法を用いることで、計算時間の短縮が図れることがわかった。

なお、2 章で述べた通り、本クラスターで OpenFOAM-2.0 を実行するための設定ファイルや並列化効率計算用スクリプトを OpenFOAM Wiki 日本語版で公開しているので、並列化効率算出の追試を行うことも容易である。このため、論文のみよる成果発表に比べ、格段に研究の透明性がより高まると共に、同ソフトウェアやこの計算結果を用いた他の研究の促進が期待される。このように研究成果のリサイクルが可能であり格段に容易なものも、オープンソースのソフトウェアを用い、さらにその結果や入力ファイルをオープンに公開する研究ならではの。

ちなみに、一般社団法人のオープン CAE 学会<sup>3</sup>では、OpenFOAM 等のオープンソース CAE ツールに関するシンポジウムや講習会を行なっているので、興味のある方は同学会のホームページを参照されたい。また 2012 年 1 月現在、同学会公認の勉強会として、東京と大阪にて OpenFOAM 勉強会 for beginner<sup>4</sup>が、岐阜にてオープン CAE 初心者勉強会<sup>5</sup>が各々月 1 程度の頻度で開かれており、一部の勉強会では Ustream 配信や録画も行っている。OpenFOAM はオープンソースの CFD コードであるため、商用のコードと異なり、HA8000 のような超並列スーパーコンピュータ上で超並列計算する場合でも多大なライセンス料が発生しないという利点ある反面、ベンダーからのサポートが受けられない、ドキュメントが不足している、プリポストの GUI ツールが無い等の欠点も存在する。このようなツールを効率良く使うには、ユーザ同士の情報交換が大変有用である。オープンソース CAE ツールに興味がある読者は、是非このような勉強会コミュニティにも参加して頂きたい。

---

<sup>3</sup> <http://www.opencae.jp/>

<sup>4</sup> [http://www.ofwikija.org/index.php/OpenFOAM\\_勉強会\\_for\\_beginner](http://www.ofwikija.org/index.php/OpenFOAM_勉強会_for_beginner)

<sup>5</sup> <http://opencae.gifu-nct.ac.jp/pukiwiki/>