

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた大規模解析と並列計算

田中 洋一*

Large-scale Simulation and Parallel Computing using Advance/FrontFlow/red

Yoichi Tanaka*

Advance/FrontFlow/red は文部科学省国家プロジェクトで開発された FrontFlow/red を基盤とし、開発・改良を積み重ねてきた汎用熱流体解析ソフトウェアである。ここでは、Advance/FrontFlow/red をスーパーコンピュータ上で利用するために改良した点や、スーパーコンピュータ上での大規模解析の事例、並列処理性能について紹介する。

Key word: 流体解析、大規模解析、並列計算、スーパーコンピュータ

1. はじめに

スーパーコンピュータの発展とともに、メッシュ数が億単位の大規模モデルを用いて、より詳細・高精度な計算が求められるようになっている。特に、流体解析に焦点を当てると、

- 乱流流れの高精度計算
- 大都市や地球規模を対象とした流れ解析
- 噴霧等の微粒液体のモデル化
- 乱流火炎の詳細計算

など、大規模解析を行うことで解明されることが数多く存在し、そのニーズは高まる一方である。

弊社の流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red（以下では、AFFr と略）は、速度、圧力温度、燃焼、物質拡散、騒音、キャビテーション微粒子などの 3 次元分布を予測・解析するソフトウェアである[1][2]。このソフトウェアの特長として、

- ① 文部科学省によるプロジェクトで開発された FrontFlow/red を改良・実用化したソフトウェア

- ② 高い並列化効率により、大規模モデルでも高速に計算が可能
- ③ お客様のニーズに合わせた柔軟なカスタマイズ対応が可能
- ④ ロバスト性の向上や使い勝手のよさに注力したソフトウェア
- ⑤ “1 ライセンスで並列数は無制限”という高いコストパフォーマンス

が挙げられる。中でも、特長②は、スーパーコンピュータ上で大規模解析を行うのに非常に適したソフトウェアであることを示している。以上のような背景のもと、アドバンス／スーパーコンピューティング・サービスを開始するにあたり、流体解析ソフトウェア AFFr を

- スーパーコンピュータ「京」
(国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究機構が所有)
- 大規模共有メモリシステム UV2000
(国立研究開発法人 海洋研究開発機構が所有)

でご利用いただけるように移植を行った。ただし、スーパーコンピュータ「京」への移植作業は、それとの互換性がある FX10 で実施した（FX10 は、一般財団法人高度情報科学研究機構が所有）。以下では、移植の際に実施した AFFr の改良点や、

*アドバンスソフト株式会社 第3事業部
3rd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

上記のスーパーコンピュータ上での解析事例や並列処理性能について紹介する。

2. AFFr の改良点

スーパーコンピュータ上に AFFr の移植作業を行った際、AFFr の基本的な解析機能は問題なく動作することを確認した。また、4 節で述べる通り、AFFr の特長である並列処理による高速化機能は十分発揮されており、並列処理に対して、特に改良は加える必要はなかった。ただ、計算結果の可視化に関しては、ユーザーの利便性を考慮して、可視化ファイルのサイズ軽減機能の追加した。以下ではその機能について説明する。

2.1. 可視化ファイルのサイズ軽減機能

メッシュ数が数億規模の大規模モデルで解析を行った場合、計算結果を可視化ファイルにそのまま出力すると、非常に大容量のファイル（数 10 ～数 100GB）となることがあり、可視化ソフトウェアで可視化ファイルを開く際、

- ファイルを開くのに非常に時間がかかる
- メモリサイズが足りずに可視化ファイルを開くことができない

といった問題に直面することが予想される。そこで、可視化ファイルを出力する際、メッシュ数を減らして解析結果を間引くことにより、可視化ファイルを軽量化してこの問題を回避できるようにした。

図 1 に示すように、解析モデルを作成する際、本来解析したいメッシュよりも粗めにメッシュを作成しておく。そして、そのメッシュを AFFr 付属のメッシュ細分化ツール REVOCAP_refiner でメッシュを細分化する。その細分化されたモデルで解析を行い、解析結果を可視化ファイルに出力する際、細分化する前のメッシュのみを残して可視化ファイルを出力する。そうすることで、細分化されたメッシュで高精度に計算した結果を、軽量のファイルで得ることができる。

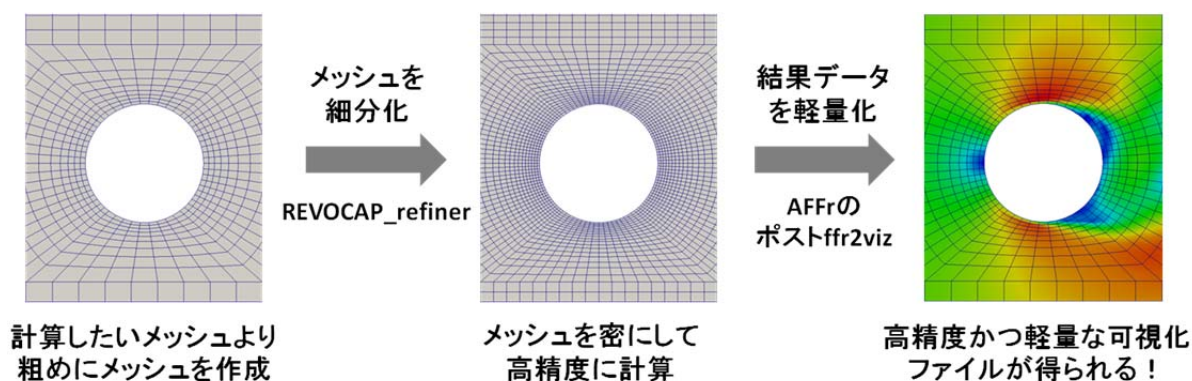


図 1 メッシュ細分化ツール REVOCAP_refiner によるメッシュの細分化と AFFr のポスト ffr2viz による結果データの軽量化の流れ

3. 解析事例

スーパーコンピュータ FX10、および、UV2000 上で AFFr を用いて、

- 車体モデル Ahmed body を用いた大規模解析
- スライディング格子を用いた解析（遠心圧縮機）

を実施し、大規模モデルでの検証計算、および、AFFr の基本機能の動作検証を行った。

3.1. 車体周り流れ解析

図 2 は、Ahmed body と呼ばれる示す車体モデルであり、この車体周りの流れ解析を実施した。計算格子は、最初に、節点数約 150 万、要素数約

760 万のテトラ、プリズムの混合要素を用いて作成した。そして、細分化ツール REVOCAP_refiner を用いて細分化を 1 回、および 2 回行ったモデルを作成した（表 1 参照）。解析条件は、表 2 に示した通りである。

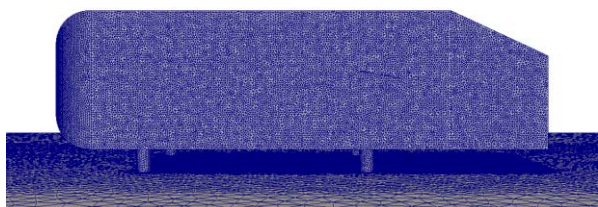


図 2 車体モデル Ahmed body のメッシュ

表 1 車体モデル Ahmed body の節点数、要素数

細分化回数	節点数	要素数
なし	1,505,423	7,638,219
メッシュ細分化 ↓ REVOCAP_refiner		
1 回	11,771,974	7,638,219
2 回	92,978,866	488,846,016
節点数約 1 億		

表 2 解析条件（車体モデル Ahmed body）

支配方程式	非圧縮 NS 方程式
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル
対流項離散化	2 次中心差分
時間積分法	Euler 陰解法
主流速度	40.0 [m/s]

図 3 は、細分化 2 回（節点数約 1 億）のモデルを用いて解析した車体周りの静圧分布と流線を示した図である。計算機は、FX10 を使用した。

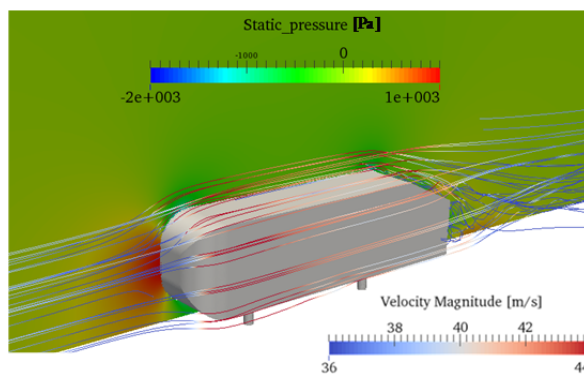


図 3 車体周りの静圧分布と流線

車体前方に高い圧力が発生しており、車体を取り囲むような流れが生じているのが分かる。図 4 に車体後方の静圧分布と速度ベクトルを示す。

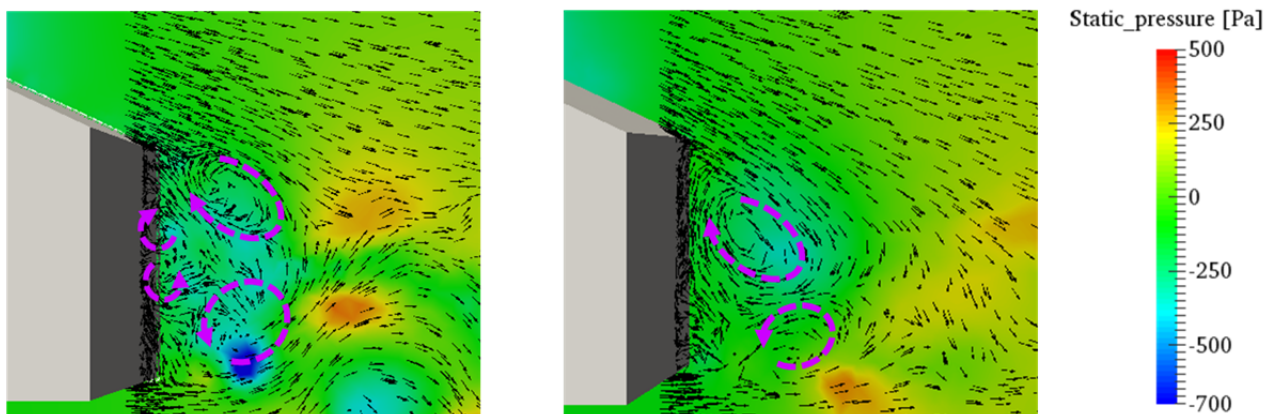


図 4 車体後方の静圧分布と速度ベクトル（左：細分化 2 回、右：細分化なし）

左側は、細分化 2 回（節点数約 1 億）のモデルで解析した結果であり、可視化ファイルを出力す

る際に AFFr のポスト ffr2viz による可視化ファイルのサイズ軽減機能を用いて細分化する前の節

点数（節点数約 150 万）で出力している。一方、右側は細分化せずにそのまま解析した結果を示しており、図 4 の結果はともに細分化する前の節点数で示した結果である。しかし、計算の際に細分化 2 回のモデルを使用した左側の結果の方は、車体後方に発生するより小さな渦まで捉えることができおり、同じファイルサイズでも高精度な結果が得られていることが分かる。

上記の計算は、UV2000 を利用した場合でも同様の計算結果が得られていることを確認している。

以上より、メッシュ数が数億規模の大規模モデルでも問題なく解析可能であることを確認した。また、可視化ファイルのメッシュ数が同じでも、メッシュの細分化機能と可視化ファイルのサイズ軽減機能を用いることで、より高精度な計算結果を得られることを確認した。

3.2. 遠心圧縮機（回転系を含むモデル）

回転系を含んだ解析事例として、図 5 に示した

遠心圧縮機による解析を行った[3]。このモデルでは、インペラの回転によって押し出された空気が、その外側で静止しているディフューザの方に送り込まれる。この回転する系と静止している系の境目にスライディング格子機能を適用することで、回転系と静止系の物理量のやりとりを行うことが可能になる[4]。

計算格子にはヘキサ要素を用いており、節点数約 101 万、要素数約 90 万である。解析条件は、表 3 に示した通りである。

表 3 解析条件（遠心圧縮機）

支配方程式	圧縮 NS 方程式
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル
対流項離散化	3 次風上差分
時間積分法	3 次精度 Adams-Moulton 陰解法
回転数	30,000 [rpm]

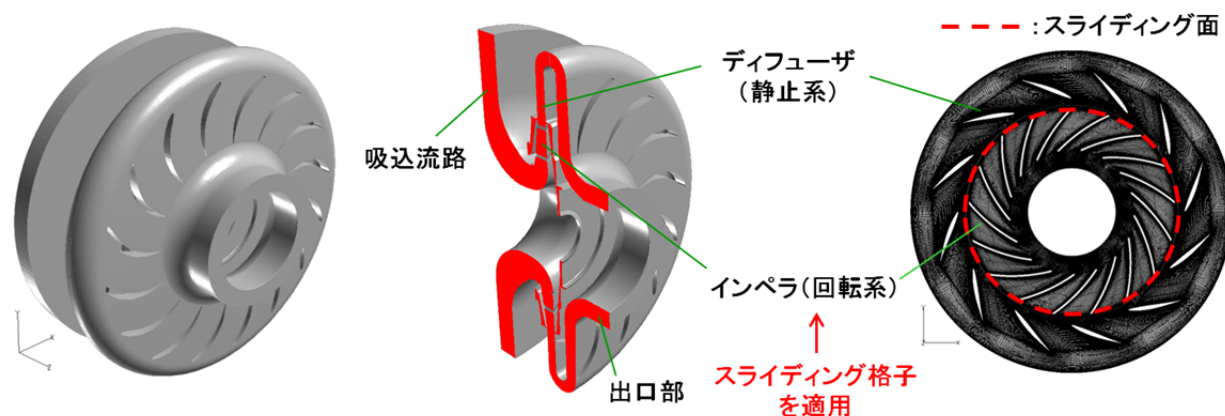


図 5 遠心圧縮機（左：解析領域全体、中央：回転軸を含む断面、右：回転軸に垂直な面（メッシュ表示））

図 6 にインペラディフューザ間の静圧分布、速度分布を示す。計算機は、UV2000 を使用した。図 6 より、インペラの回転によって押し出された空気が静止しているディフューザの方に送り込まれて、圧縮機の外縁に圧縮された空気が溜まっていく様子が分かる。また、インペラディフュー

ザ間において、静圧分布、速度分布は滑らかに変化しており、スライディング面での物理量のやりとりがスムーズに行われていることが確認できる。

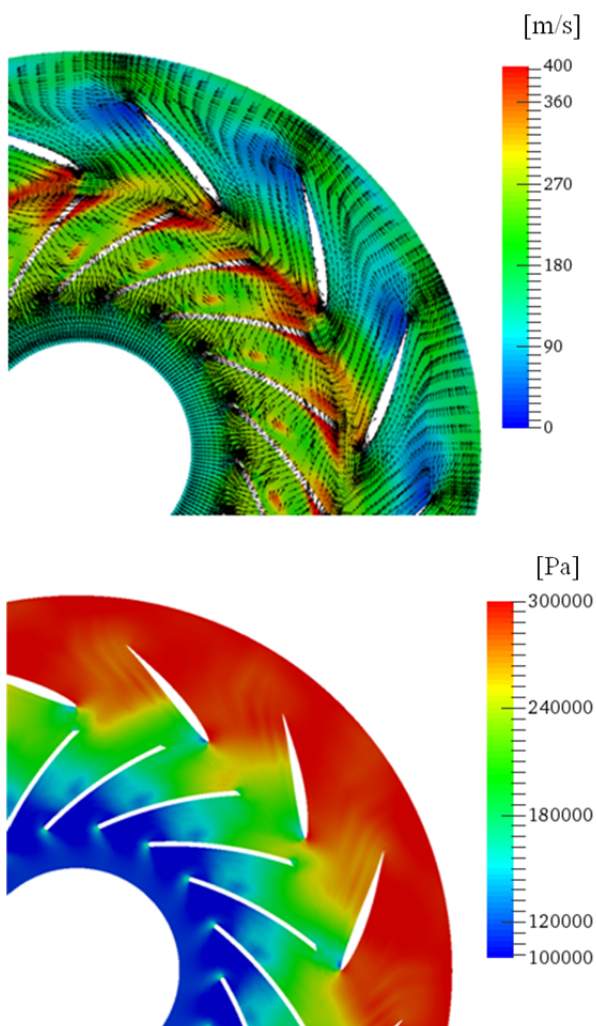


図 6 インペラードیفューザ間の速度分布（上）と静圧分布（下）

上記の計算は、FX10 を利用した場合でも同様の計算結果が得られていることを確認している。

4. 並列処理性能

スーパーコンピュータ上での AFFr の並列処理性能を評価するため、3.1 節で示したモデル Ahmed body を利用して速度向上率の測定を行った。

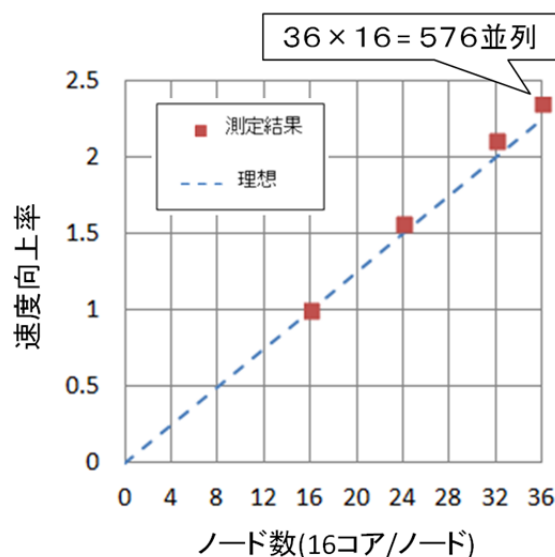


図 7 FX10 での速度向上率（細分化を 2 回行ったモデル Ahmed body を用いて測定）

図 7 は、FX10 での速度向上率である。横軸はノード数であり、FX10 では 1 ノードあたり 16 コア搭載されている。並列数（＝ノード数×コア数）の増加に対して、速度向上率は比例して増加しており、理想通りの速度向上率が得られている。

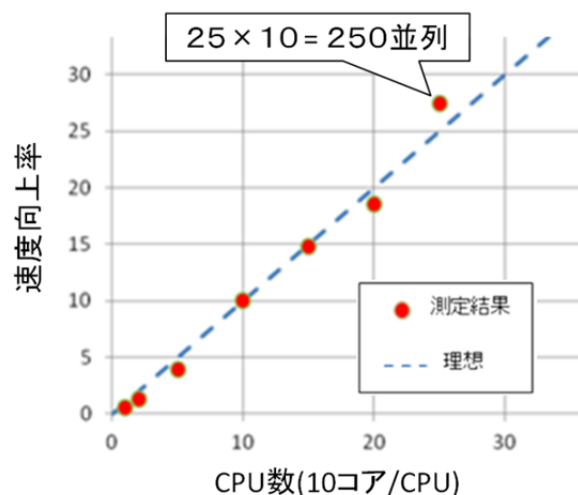


図 8 UV2000 での速度向上率（細分化を 1 回行ったモデル Ahmed body を用いて測定）

図 8 は、UV2000 での速度向上率である。横軸は CPU 数であり、UV2000 では 1CPU あたり 10 コア搭載されている。UV2000 も FX10 と同様、並列数（＝CPU 数×コア数）の増加に対して、速

度向上率が比例して増加しており、理想通りの速度向上率が得られている。

また、FX10、UV2000 とともに、並列数が数百オーダーでもほぼ理想に近い速度向上率を保持しており、大規模モデルの計算に対しても並列処理機能を十分活用できると考えられる。

5. まとめ

AFFr をスーパーコンピュータ「京」、UV2000 に移植を行い、AFFr の特長である並列処理による高速化、大規模解析を活かせる環境を整えた。また、可視化ファイルのサイズ軽減機能を追加することで、大規模解析の結果ファイルでも容易に可視化処理を行えるようにした。今後、産業界や国の研究機関の多くの方々にスーパーコンピュータ上で AFFr を活用していただけることを願っている。

参考文献

- [1] 大西陽一，塩谷仁，杉中隆史，小川哲司，伊藤豪，土田健一，“流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red Ver5.1 の概要と特長” アドバンスシミュレーション vol.17, (2013)
- [2] 杉中隆史，大西陽一，塩谷仁，小川哲司，勝又守，中森一郎，西村民男，原田昌紀，桑原匠史，鈴木雅也，大島小百合，三橋利玄，“流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red Ver.5” アドバンスシミュレーション vol.10, (2011)
- [3] 三浦治雄，小林博美，三橋利玄，西村香純，大友洋，西川憲明，廣川雄一，平成 20 年度先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】「地球シミュレータ産業戦略利用プログラム」利用成果報告書.p27
- [4] 大友洋，“Advance/FrontFlow/red のスライディング格子機能” アドバンスシミュレーション vol.2, (2010)

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)