

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red の新機能

富塚 孝之* 大西 陽一* 小川 哲司* 高橋 邦生*

Advance/FrontFlow/red

Takayuki Tomizuka*, Youichi Ohnishi*, Tetsuji Ogawa* and Kunio Takahashi*

Advance/FrontFlow/red は非圧縮性から圧縮性流れまで、広範囲で複雑な流れに対応した汎用 3 次元流体解析ソフトウェアである。乱流、混相流の他にさまざまな物理モデルが組み込まれ、ロバスト性、計算の高速化にも注力し、研究分野だけでなく産業界においても実用的に利用されるようになってきた。本稿では Advance/FrontFlow/red（以下 AFFr）の機能概要と近年組み込まれた物理モデルなどについて紹介する。

Key word: 汎用 3 次元流体解析、AMG、放射、超並列、スーパーコンピュータ、大規模計算、圧力 Poisson 方程式、半透過性物質、オンラインマニュアル

1. はじめに

AFFr はさまざまな流体现象に対応することを目的とした、3 次元非構造格子系の汎用流体解析プログラムである。適用分野としては、

- ・非圧縮性流れ
- ・圧縮性流れ
- ・自由表面流れ
- ・燃焼
- ・キャビテーション
- ・騒音

と幅広く、原子力工学、機械工学、化学工学、環境工学および安全工学と多種多様な産業界に利用されている。

近年、科学技術の世界は測定機器、実験機器の飛躍的な技術進歩により、微視的かつ複雑な物理現象の解明が進み、要求される数値シミュレーションも非常に高度、複雑かつ大規模なものになっている。従って、第一線で用いられる数値シミュレーションソフトウェアは複雑な物理現象を再現できる物理モデルを有し、並列計算機能はもち

ろんのこと、非線形問題を高速に演算できる行列ソルバーが組み込まれ、スーパーコンピュータ上でもその性能を余すことなく引き出すことができる必要がある。コンピュータの演算性能はこの 10 年で 500 倍から 1000 倍程度まで向上しているといわれている。しかし、この性能を可能な限り引き出すためには、分散メモリーによる容量制限やキャッシュメモリーのアクセス効率などハードウェアを考慮したプログラミング技術も必要である。

AFFr は物理モデル、数値計算技術、高度なプログラミング技術といった現代の数値シミュレーションに必須な専門知識を有するスタッフにより、開発、改良を重ねてきた。2016 年 10 月には Ver. 5.3 をリリースし、高度でかつユーザーに使い易いソフトウェアのコンセプトを基に改良されている。

本稿では AFFr の特徴的な機能について解説し、Ver. 5.3 における新機能について紹介する。

2. AFFr の機能概要

AFFr は多成分系を考慮し、混相流、化学反応、燃焼にも適用できる汎用熱流体解析ソフトウェアである。乱流モデルは、非定常解析用の LES や DES、定常解析用の各種 RANS モデルを実装

*アドバンスソフト株式会社 第 3 事業部

している。混相流に係る物理モデルとしては液滴のような分散相の移動を扱う粒子追跡機能、界面追跡モデルである VOF 法、キャビテーションモデルなど気液間に速度差がないと近似できる条件での二相流の問題を扱うこともできる。表 1 に AFFr の主要機能一覧を示す。

表 1 Advance/FrontFlow/red の主要機能

項目	機能
基礎式	・質量保存式 ・運動量保存式 ・エネルギー保存式 ・化学種の質量保存式
圧縮性	・非圧縮性流体 ・低 Mach 数近似による圧縮性 ・単一ガスの状態方程式による圧縮性 ・多成分ガスの状態方程式による圧縮性 ・実在ガスモデルによる圧縮性
乱流モデル	・なし（層流） ・渦粘性一定 ・RANS: 高レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデル、低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、Chen $k-\epsilon$ モデル、$k-\omega$ モデル、SST モデル ・LES: 標準 Smagorinsky モデル、Dynamic Smagorinsky モデル (Dynamic SGS モデル) ・DNS
境界条件	・流速: 流入、流出、no-slip、free-slip、Spalding 則 ・温度: Dirichlet、熱流束、熱伝達係数、Enhanced wall treatment による熱伝達係数 ・化学種質量分率: Dirichlet、Neumann、物質伝達係数 ・RANS 変数: Dirichlet、Neumann、壁法則
離散化	・有限体積法、節点中心法
流入変動風	・乱数による流入変動風 ・流入ドライバによる流入変動風
セル	・六面体（ヘキサ）、四面体（テト

項目	機能
形状	ラ、三角柱（プリズム）、四角錐（ピラミッド）およびこれらの併用
アルゴリズム	・SIMPLE 法（定常計算） ・SIMPLEC 法（非定常計算） ・PISO 法 ・Rhie-Chow 法による圧力補間法
時間積分法	・Euler 陽解法 ・Euler 陰解法 ・2 次精度 Crank-Nicolson 法 ・2 次精度 Adams-Bashforth 法 ・3 次精度 Adams-Moulton 法 ・4 次精度 Runge-Kutta 陽解法
移流項スキーム	・1 次精度風上差分 ・2 次精度風上差分 ・2 次精度風上差分+リミタ (TVD 法) ・2 次精度中心差分 ・3 次精度風上差分+リミタ (TVD 法) ・2 次精度中心差分と 1 次精度風上差分のブレンド
行列解法	・ICCG 法 ・BiCGSTAB 法 ・AMG 法
熱連成	・流体-固体の熱連成 ・固体内部に複数の材質
放射	・有限体積法 ・ゾーン法 ・モンテカルロ法
多孔質	・べき乗則 ・Darcy 則
流体音	・Lighthill-Curl モデル ・Ffowcs Williams and Hawking モデル
移動格子	・回転移動格子 ・並進移動格子
キャビテーション	・均質流モデル
自由表面	・VOF 法、CICSAM 法
粒子追跡	・固体粒子と流体の二相流 ・液滴とガスの二相流 (オイラー・ラグランジアン 2way)
表面反応	・素反応 ・Sticking 吸着モデル ・LHER 表面総括反応モデル ・Bohm プラズマモデル

項目	機能
	・マルチサイト（保存・非保存則アルゴリズム） ・マルチ反応メカニズム ・マルチバルク成長
気相反応	・総括反応モデル（スス生成含む） ・渦消散モデル ・素反応（逆反応、三体反応、圧力依存、ユーザー定義） ・flamelet モデル
並列計算	・対応（Windows 版は対応していない）
容量制限	・ソフト側に制限なし

2.1. AMG ソルバー

AFFr の特徴的な機能の 1 つとして、高速ソルバーである AMG ソルバーがあげられる。

AFFr は Ver. 4.1 から九州大学情報基盤研究開発センター西田晃先生が開発した AMG の線形ソルバーを利用させていただき、インターフェイスを実装している。AMG ソルバーは図 1 に示すように、基準格子に対して格子幅の粗い複数の解析格子を使用し、個々の格子に対してサイズの異なる問題行列を作成し、重ね合わせて収束を加速する手法である。単一材料に対しては 100 万節点の T 字管の解析において反復回数が 1/7 以下、計算時間 1/3 以下まで短縮できることが検証されている。Ver. 5.1 では AMG ソルバーが複数材料（固体領域を含む計算）に対して適用可能となり、固体-流体間の熱連成を含む 300 万節点の火災の解析において、反復回数が 1/15、1 ステップあたりの計算時間が 1/2 以下まで短縮されることが確認できている。図 2 に圧力ポアソン方程式の収束履歴について AMG と ICCG の比較結果を示す。図 3 は AMG を適用した場合としない場合について、20step 計算したときの計測時間を示している。図 4 では複数材料の解析問題に対し、BiCGSTAB と AMG の反復回数の比較結果を、図 5 には 1step あたりの計算時間の比較結果を示している。

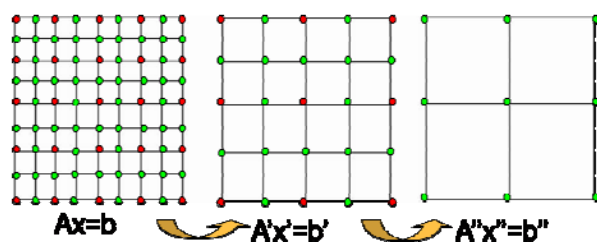


図 1 AMG ソルバーの概要

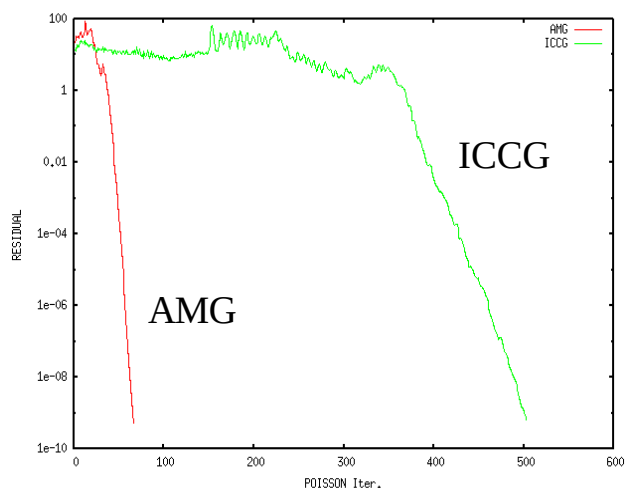


図 2 圧力ポアソン方程式の収束履歴比較

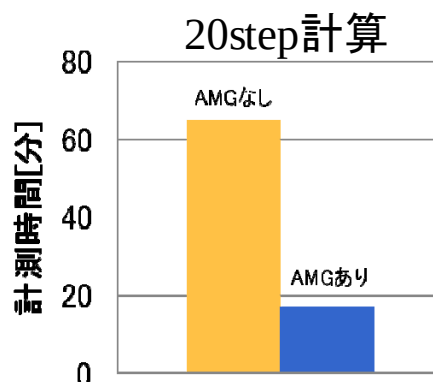


図 3 計算時間比較

圧力ポアソンソルバーの反復回数

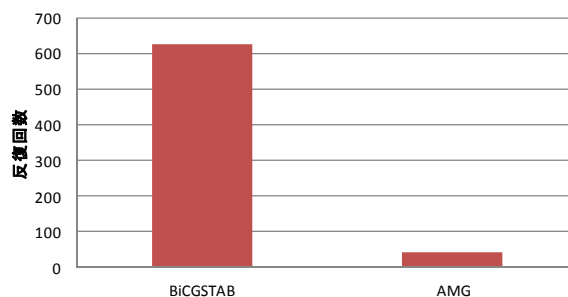


図 4 圧力ポアソン方程式の収束回数比較（複数材料）

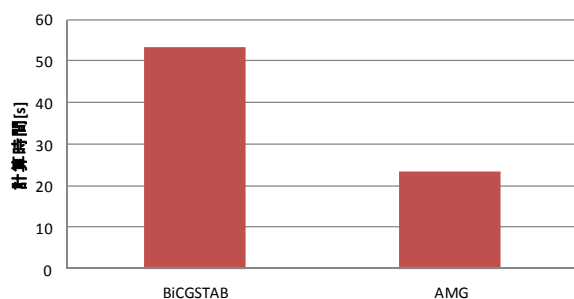


図 5 1 ステップあたりの計算時間比較
(複数マテリアル)

2.2. スーパーコンピュータ上での計算能力

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、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)と互換性のある「FX10」(一般財団法人高度情報科学技術研究機構が所有)と、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)に対し、Ahmed body モデルを利用して速度向上率の測定を行った。

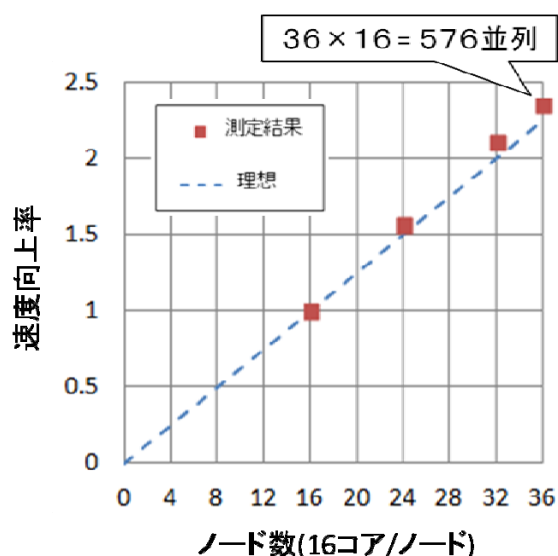


図 6 FX10 での速度向上率 (格子数約 1 億のモデル Ahmed body を用いて測定)

図 6 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。

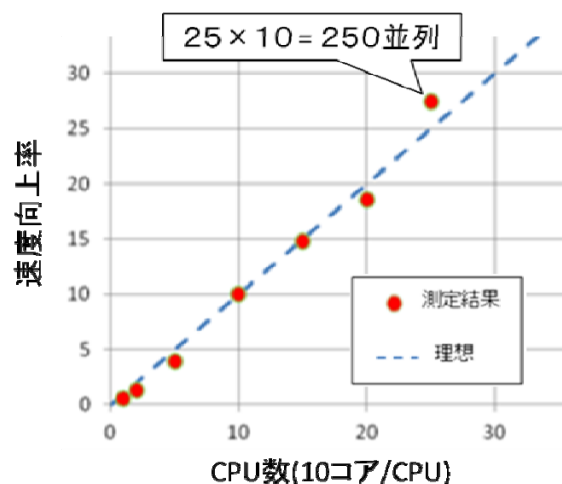


図 7 UV2000 での速度向上率 (細分化を 1 回行ったモデル Ahmed body を用いて測定)

図 7 は、UV2000 での速度向上率である。横軸は CPU 数であり、UV2000 では 1 CPU 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。

3. Ver. 5.3 の新機能

Ver. 5.3 で追加・改良された機能は以下の通りである。

- ・放射計算における透過設定機能
- ・RANS から LES へのリスタート機能
- ・熱伝達設定機能の拡張
- ・オンラインマニュアルのリニューアル

その中で放射計算機能とオンラインマニュアルについて以下に記す。

3.1. 放射計算における透過設定機能

Ver. 5.3 の新機能として、これまでの放射計算機能に対し、半透過性の固体も取り扱えるように機能追加した。Ver. 5.2 までの放射計算機能では固体に対して吸収または反射のみであったので、

吸収された放射エネルギーは全て熱に変換された。しかし Ver. 5.3 では、ガラスのように光のエネルギーを一部透過、一部が反射そして一部が吸収する半透過性物質のシミュレーションすることができる。透過する際は屈折率も考慮するので、半透過物質の熱量のみならず、透過した光が当たる箇所の温度分布も評価できる。ヘッドライトやランプなどのように光源をカバーするガラスの材質を検討する際に、有用と考えられる。

図 8 に解析解との比較を目的とした、放射の固体透過モデルを示す。固体部分のメッシュ分割を図 9 に示すように 1 分割、5 分割および 20 分割とした場合についての AFFr の計算結果と解析解との比較を行った。放射輝度の比較結果を図 10 に示す。

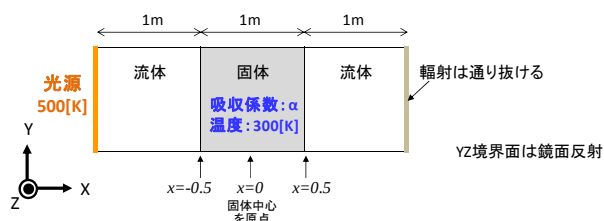


図 8 放射の固体透過解析モデル

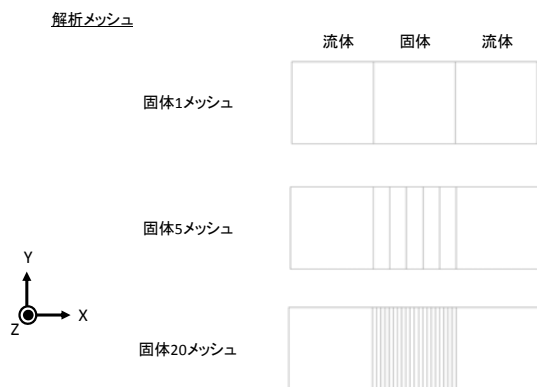


図 9 解析に用いた計算メッシュ

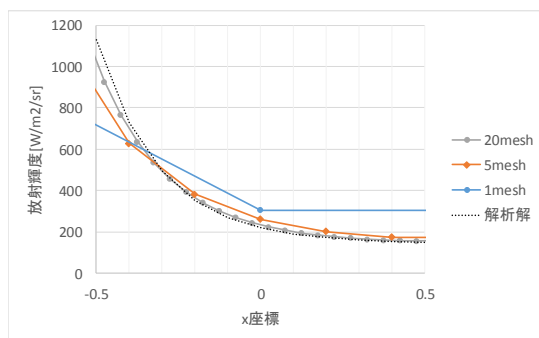


図 10 放射輝度の比較結果

本モデルでは固体領域（吸収体）を 5 メッシュ程度で解析解とほぼ一致する結果となった。さらにメッシュ分割を増やすと解析解に近づくことも確認された。

3 次元の解析事例として図 11 に示すランプに対して、レンズの光吸収による温度上昇について解析をおこなった。図 12 に解析結果としてレンズの温度分布を示す。

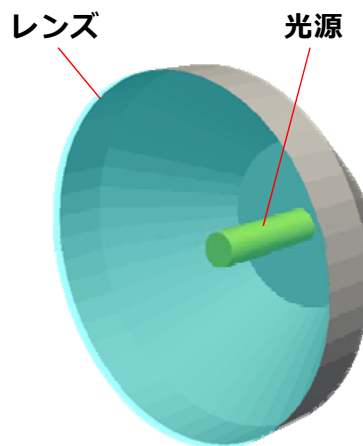


図 11 ランプの模式図

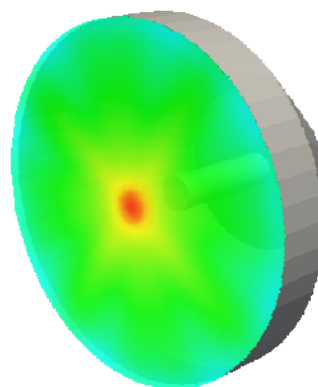


図 12 レンズの温度分布

3.2. オンラインマニュアル

Ver. 5.3 ではオンラインマニュアルの再整備と充実化を図った。図 13 にオンラインマニュアルにおける解析事例のメニューを示す。解析事例はさまざまな流れの現象毎に整備しており、ユーザーが目的とする物理現象から事例を検索できるようなコンセプトとなっている。ユーザーは事例を選択すると計算条件に対する詳細な解説を見ることができ、同計算に用いた計算格子および解

析制御ファイルをダウンロードすることができる。今後もこの解析事例を増やし、ユーザーの解析入力作成に対する負荷を軽減することを目標とする。



図 13 解析事例メニュー

4. おわりに

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red の機能概要と 2016 年 10 月にリリースとなった Ver. 5.3 の特徴について紹介した。本ソフトは今後も世界の数値計算技術の最先端を鑑み、日本の産業界の発展を支援できる最高の流体解析ソフトウェアツールとして、開発、改良を重ねていく所存である。

参考文献

- [1] Ahmed et al., “Some Salient Features of the Time Average Ground Vehicle Wake”, SAE Paper, No. 840300, 1984
- [2] 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

年度先端研究施設供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 p.27

- [3] 伊藤 豪, 大西 陽一, “流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red による自由表面解析”, アドバンスシミュレーション Vol.17, 2013.12
- [4] 小川 哲司, 松原 聖, “流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた流体・構造連成解析”, アドバンスシミュレーション Vol.17, 2013.12
- [5] 大西 陽一, 塩谷 仁, “体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red”, Vol.19, 2014.10
- [6] 田中 洋一, “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”, アドバンスシミュレーション Vol.22, 2016.6

※ 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。)