

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red Ver. 5.1の概要と特長

大西 陽一* 塩谷 仁* 杉中 隆史* 小川 哲司* 伊藤 豪* 土田 健一*

Outline and Feature of Advance/FrontFlow/red Ver. 5.1

Yoichi Onishi, Hitoshi Shiotani*, Takafumi Suginaka*, Tetsuji Ogawa*, Go Ito* and Ken-ichi Tsuchida*

アドバンスソフト株式会社では、文部科学省の国家プロジェクトで開発された 3 次元流体解析ソフトウェア FrontFlow/red をベースに商用化した Advance/FrontFlow/red を発展させてきて、2013 年 10 月に Ver. 5.1 をリリースした。本稿では、Advance/FrontFlow/red Ver. 5.1 で追加された機能と適用事例について紹介する。

Key word: 3 次元、熱流動、前処理、AMG、VOF、並列

1. はじめに

Advance/FrontFlow/red(AFFr)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]。このたび、コントロールボリュームの構築方法にセル中心法を導入したことをはじめ、解析機能の強化と、物理モデルの改良を行い、Ver. 5.1 としてリリースすることとなった。ここでは、AFFr Ver. 5.1 の新機能と解析事例について紹介する。

2. Ver. 5.1 で追加された機能

AFFr Ver. 5.1 では、以下の機能が追加された。

- ・セル中心法の導入
- ・AMG ソルバーの複数マテリアル対応
- ・非圧縮計算での圧力固定点指定
- ・2 次中心差分法における 1 次風上差分法ブレンド領域の指定
- ・圧力ポアソン方程式計算間隔の設定
- ・VOF 法へのレベルセット関数の適用
- ・NIST テーブルによる物性値の設定
- ・固体・固体伝熱における接触熱抵抗
- ・渦消散モデルの予混合燃焼への拡張
- ・粒子追跡機能における液膜模擬モデル

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部
2nd Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

各機能の概要について以下で説明する。

3. セル中心法の導入

コントロールボリュームを作成する手法として、セル中心法と節点中心法がある。セル中心法では、格子データのセルそのものをコントロールボリュームとし、セルの重心に物理量を定義する。節点中心法では、節点の周りにコントロールボリュームを構築し、構築したコントロールボリュームの重心に物理量を定義する。一般に、コントロールボリュームが持つ面数が多くなると、計算精度が高くなることが期待できる。そのため、四面体で作成された格子データに対しては、多面体のコントロールボリュームを構築される節点中心法は計算精度において優位性があると考えられる。しかし、基準格子の形状によっては、凹型のコントロールボリュームが構築され、コントロールボリュームの重心がコントロールボリューム外にはみ出し、計算安定性、精度を著しく低下させる場合もある。例えば、曲がり管のモデルで壁面近傍の格子を細かく切る場合、図 2 のようなコントロールボリュームが構築され、この状態で計算すると図 3 のように発散する要因となる。構造格子で作成された格子データに対しては、節点中心法で構築されたコントロールボリュームは元のセルに対して半セルずれるだけで節点中心法の長所は生かせず、逆に角がある場合、凹型のコ

ントロールボリュームが構築されて計算に悪影響を及ぼす。

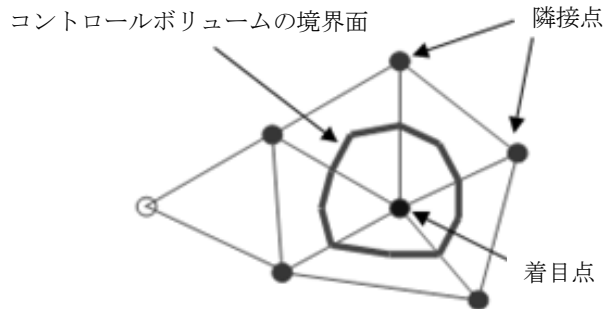


図 1 節点中心法

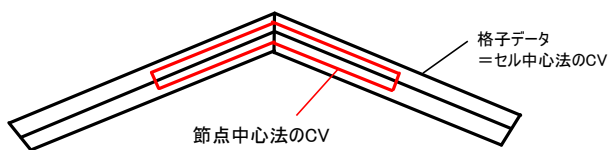


図 2 節点中心法での低品質格子の作成例

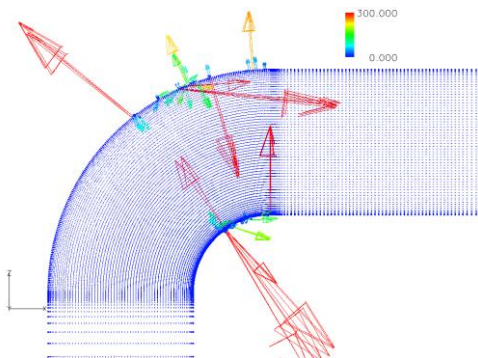


図 3 節点中心法での発散事例

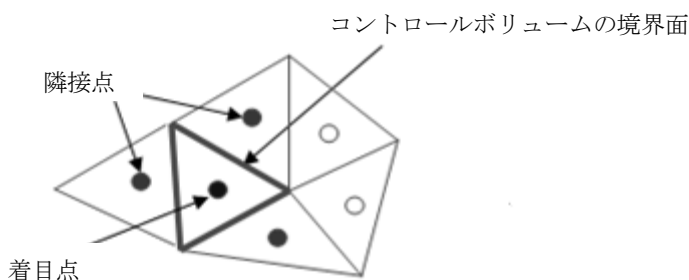


図 4 セル中心法

AFFr Ver. 5.1 では、コントロールボリュームの作成方法にセル中心法を導入し、セル中心法、節点中心法の選択が可能となった。図 3 のようなモデルに対しては、セル中心法を適用することで図 5 の通り、安定で、良好な計算結果が得られることを確認した。

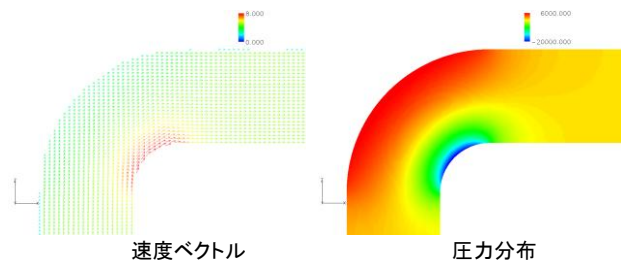


図 5 セル中心法での曲がり管の計算例

4. AMG ソルバーの複数マテリアル対応

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 6 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。単一マテリアルに対しては 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。

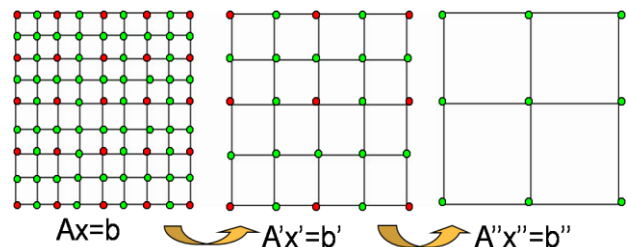


図 6 AMG ソルバーの概要

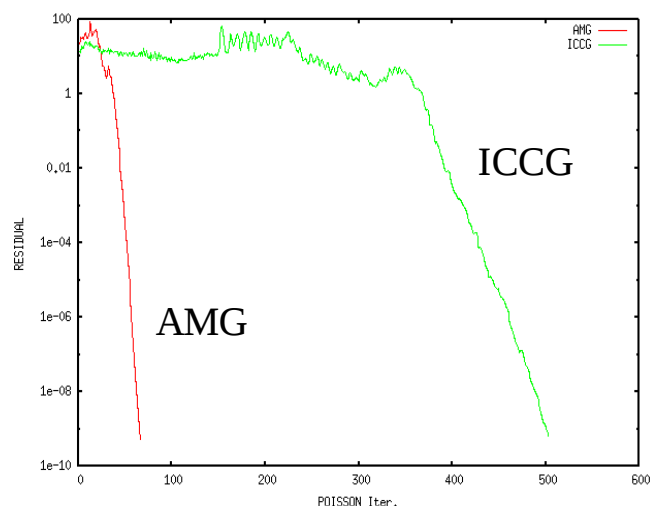


図 7 圧力ポアソン方程式の収束履歴比較

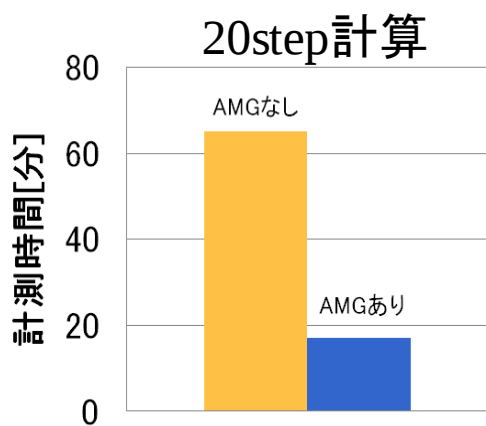


図 8 計算時間比較

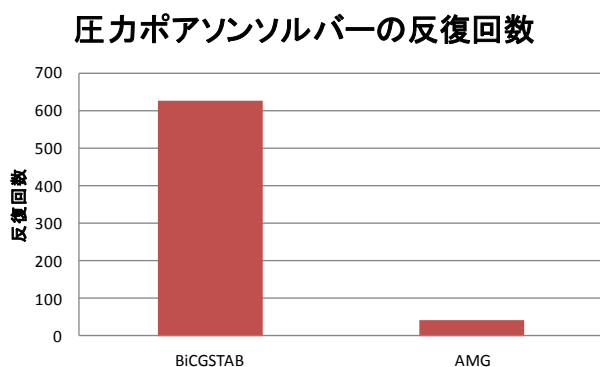


図 9 圧力ポアソン方程式の収束回数比較
(複数マテリアル)

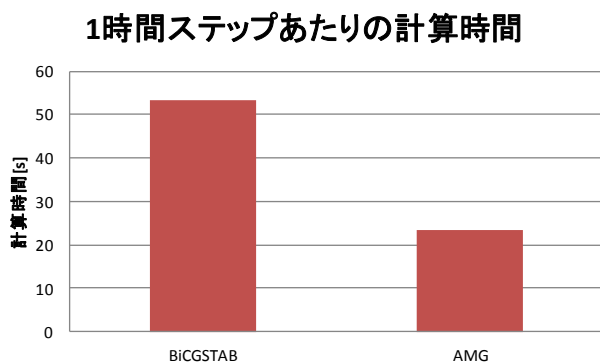


図 10 1 ステップあたりの計算時間比較
(複数マテリアル)

Ver. 5.1 では AMG ソルバーが複数マテリアル（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。

5. レベルセット法の導入

VOF 法において、VOF 値の移流方程式を解いて自由表面位置を陰的に捕獲する手法では、時間とともに VOF 界面がぼやけるため、界面をシャープに定義することができなくなる。そこで、界面位置をシャープに維持するためレベルセット法を導入した。

レベルセット法は、界面からの距離関数 Φ をステップ毎に求めて界面位置を修正する方法で、界面位置を常に 1 セルで捕らえることができる。レベルセット法では計算が進み、界面形状が変化すると距離関数の性質が失われ、計算が不安定になる。そのため、以下の距離関数方程式を用いて距離関数の再初期化が必要となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{sign}(\phi) (1 - |\nabla \phi|) \quad (1)$$

これを離散化して解く場合、以下のように表現しなおす。

$$\frac{\phi^m - \phi^{m-1}}{\Delta t_*} + \vec{W} \cdot \nabla \phi = \text{sign}(\phi) \quad (2)$$

$$\vec{W} = \frac{\text{sign}(\phi)}{|\nabla \phi|} \nabla \phi \quad (3)$$

レベルセット法を導入した VOF 解析の例として、液相に流速を

$$U = \sin(x) \times \cos(y) \quad (4)$$

$$V = -\cos(x) \times \sin(y) \quad (5)$$

で与えたときの液相の挙動の解析結果を図 11 に示す。なお、界面追跡に CICSAM 法を用い、時間刻みを $5 \times 10^{-3} [\text{s}]$ とした。レベルセット法によって、界面に大きな変動が生じる場合でも、形状がシャープに保持されていることが分かる。

また、レベルセット法を協調的に利用することで、自由表面からの距離が必要となる問題への応用も可能となった。

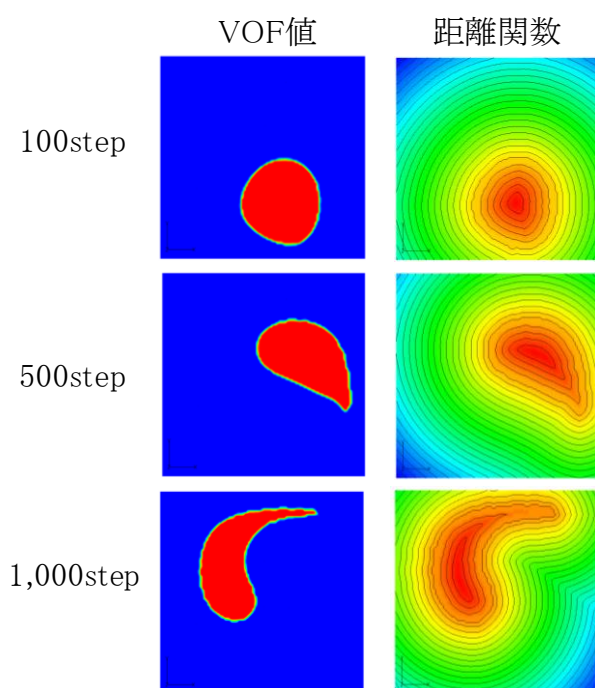


図 11 レベルセット法を用いた VOF 解析事例

6. その他の追加機能

6.1. 解析機能の強化

非圧縮計算での圧力固定点指定

非圧縮計算では、圧力に関しては、運動方程式においてその勾配のみを必要とするため、圧力の基準点を計算領域のいずれかに設定し、そこからの差圧をデータとして用いる。圧力基準点を設定する際、従来では、体積が最も大きいコントロールボリュームを用いてきた。この方法では、格子の作成方法によって基準点が定まらず、また、スライディング格子を用いた解析のように複数の流体マテリアルを持つモデルで、マテリアル毎に基準圧力が異なる不具合が生じるなどの問題があったため、圧力固定点を指定できる機能を追加した。

2次中心差分法における1次風上差分法ブレンド領域の指定

空間離散化手法において2次中心差分法は計算精度の面で優れているが、非構造格子では、格子の状態によって計算が不安定になりやすい。計算安定性を確保するための手法として、1次風上差分とのブレンドが用いられる。ただし、1次風上差分とのブレンドは、安定性が改善される一方で

計算精度を低下させる要因となるため、適用は最小限に抑えることが望ましい。従来では、ブレンドの割合を指定することが可能であったが、それぞれのマテリアルに対して、領域全体で均一に作用しており、安定な領域では精度の低下のみが起これというデメリットが生じていた。Ver. 5.1ではブレンドを行う領域が指定できるようになったことで、計算安定性を確保しつつ、より精度の高い解析を実行できるようになっている。

圧力ポアソン方程式計算間隔の設定

圧力ポアソン方程式の行列計算は計算負荷が高く、解析時間の大部分を占めるが、ある程度発達した流れ場では圧力場の変動は小さくなり、定常解析においては毎ステップ更新する必要がないケースも多くある。Ver. 5.1では、圧力ポアソン方程式の計算間隔を制御ファイル内で指定できるようになり、これによって解析時間の大幅な短縮が見込まれるようになった。

6.2. 物理モデルの改良

NIST テーブルによる物性値の設定

AFFr での物性値の設定方法について、密度については状態方程式、輸送物性については Sutherland の式や Chapman-Enskog の式、比熱、エンタルピーおよびエントロピーについては NASA の多項式を用いて、温度や圧力の依存性を考慮することができるようになっていたが、Ver. 5.1では、ユーザーが用意した物性値テーブルを参照してこれらの物性値を設定することが可能となった。これによって、超臨界流体など従来では扱いが困難であった問題も取り扱いやすくなっている。

固体-固体伝熱における接触熱抵抗

固体間の伝熱は熱伝導によって生じるが、一般的に固体表面には表面粗さが存在するため、表面は完全に密着せず、接触面積が 100% とならないために熱の移動が妨げられる。接触面の温度差と単位面積当たりの熱流束の比を接触熱抵抗と呼ぶ。従来の機能では、固体-固体間の Interface 境界面では、温度境界を Neumann 条件で定義して、

熱伝導による伝熱計算のみ対応していたが、Ver. 5.1 では接触熱抵抗を考慮した解析が可能となった。

渦消散モデルの拡張

渦消散モデルは乱流混合が支配的な燃焼場に適用される化学反応モデルであり、反応速度は乱れエネルギーの減衰速度に比例すると考え方から、燃料の平均反応速度は次式で与えられる。

$$\left| \dot{w}_f \right| = C_{R1} \left(\frac{\rho \varepsilon}{k} \right) \min \left(Y_f, \frac{Y_O}{r}, C_{R2} \frac{Y_P}{1+r} \right) \quad (6)$$

この反応速度式に乱れエネルギー k とエネルギー散逸率 ε が含まれることから、これまでは $k-\varepsilon$ 系の乱流モデルを使用する場合にのみ扱える燃焼モデルとなっていた。これを $k-\omega$ モデルや LES と併用できるようにモデルの拡張を行った。

粒子追跡機能における液膜模擬モデル

AFFr では、粒子や液滴の挙動を計算するための機能として、Euler-Lagrangian 2way による粒子追跡機能が実装されている。これまで、粒子追跡モデルの境界面における扱いは、反射と付着が選択可能であったが、付着に関しては、壁面に到達した時点で計算を停止するのみで、付着した粒子についてはその後の扱いは考慮されていなかった。今回の改良によって、壁面に付着した液滴は液膜として取り扱い、液膜からの蒸発なども考慮できるようになった。

7. 解析事例

7.1. 車体周り流れによる並列性能評価

AFFr の特長の 1 つである、大規模並列計算に関して、並列性能評価のため、図 12 に示す車体周り流れ解析の標準モデル (Armed 車体モデル) を用いた解析を実施した。計算機は財団法人計算科学振興財団 FOCUS のスーパーコンピュータを使用した。計算格子は節点数約 150 万、要素数約 750 万のテトラ、プリズムの混合要素を用い、並列数 2~128 まで変えたときの性能を評価した。

図 13 は 2 並列に対する性能倍率を示した結果で、このモデルでは、128 並列までは性能倍率が

線形に上がっていることが確認された。現状では、理論式に対しては 75% 程度の並列性能が出ており、さらなる並列化性能の向上が今後の開発課題と考えている。

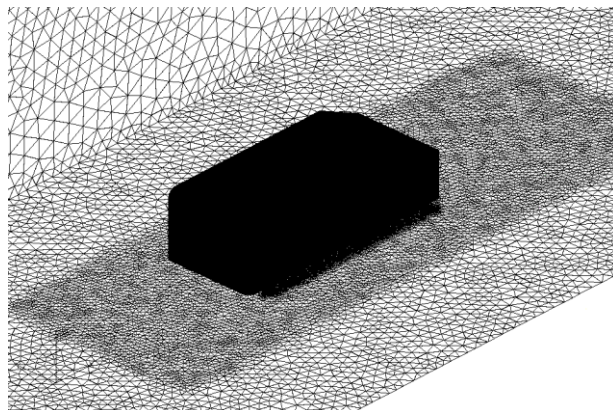


図 12 並列性能評価モデルの計算格子

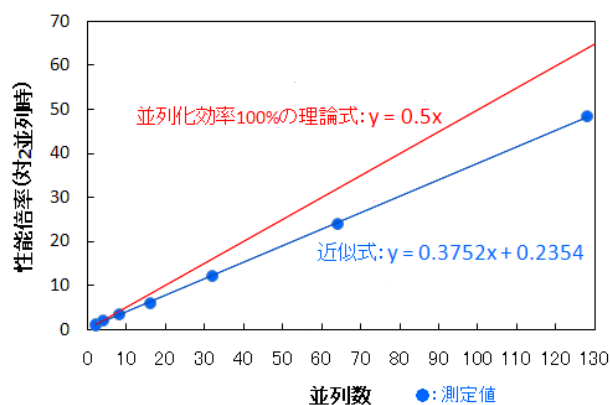


図 13 2 並列に対する性能倍率

7.2. ASMO モデルによる車体周り流れ解析 (乱流モデルの予測精度比較)

AFFr では LES (Large Eddy Simulation) による高精度な乱流場の解析を礎として開発されてきたプログラムである。LES の予測精度の検証として、ASMO (Aerodynamics Studien Modell) モデルという車体形状を単純化した標準モデルによる解析事例を示す。

ASMO モデルの形状を図 14 に示す。本解析では、このモデルに対し 130 万、550 万、2,500 万規模の 3 種類の格子を用い、さらに LES と RANS (Raynolds Averaged Navier-Stokes) モデルとの比較を行った。解析条件は表 1 の通りである。

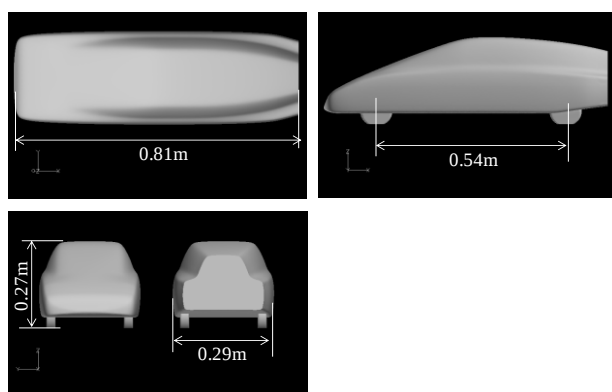
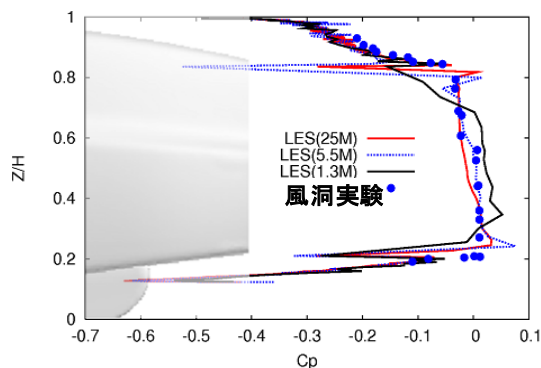


図 14 ASMO モデル形状

表 1 解析条件

支配方程式	非圧縮 NS 方程式
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル 標準 $k-\varepsilon$ モデル
対流項離散化	2 次中心差分+5%1 次風上差分
時間積分法	Adams-Bashforth 法
主流速度	50.0[m/s]
解析領域	12.2×2.2×1.1[m]



(a)LES と実験結果の比較

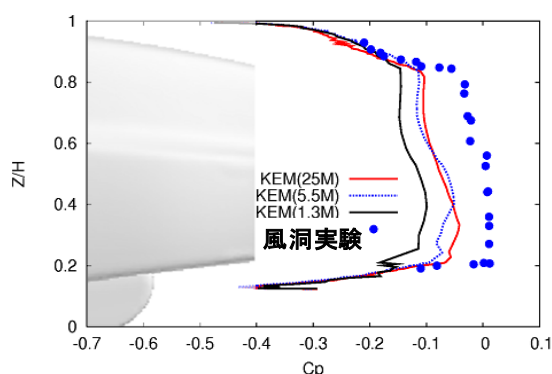
(b) $k-\varepsilon$ モデルと実験結果の比較図 15 ASMO モデル解析結果 (ベース圧)
(ご提供 東京大学 生産技術研究所様)

図 15 に LES および $k-\varepsilon$ モデルでの解析結果と実験結果の比較を示す。RANS では 2,500 万の格子を用いても再現されなかった車体後流のベース圧の分布が、LES では 130 万程度の格子でも精度よく再現される結果が得られた。

7.3. SST $k-\omega$ モデルによる平板摩擦の解析

乱流解析手法は、計算機の発達とともに LES などより厳密な手法に移り変わりつつあるが、実用的な計算を実施するうえでは未だ計算負荷は高く、RANS 解析が主流である。AFFr では RANS 機能の強化にも取り組んでおり、 $k-\omega$ モデルの実装、さらには $k-\omega$ モデルをベースに $k-\varepsilon$ モデルと組み合わせた SST モデルの実装などを進めてきた。ここでは、SST $k-\omega$ モデルを用いた平板の摩擦抗力係数の解析事例を示す。図 16 に示す解析モデルを用い、平板からの速度分布と抗力係数分布を求めた。その結果、図 17 の通り、粘性底層から後流則まで理論解、実験値良好な一致がみられることを確認した。また、境界層の剥離計算の検証として、図 18 に示す、非対称ディフューザーの解析を行ったところ、図 19 の通り、SST $k-\omega$ モデルでは実験の速度分布を精度よく再現できることを確認した。

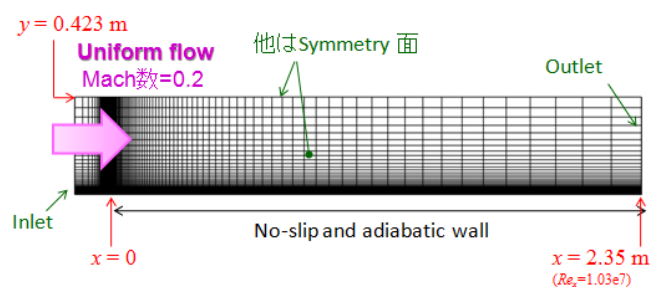
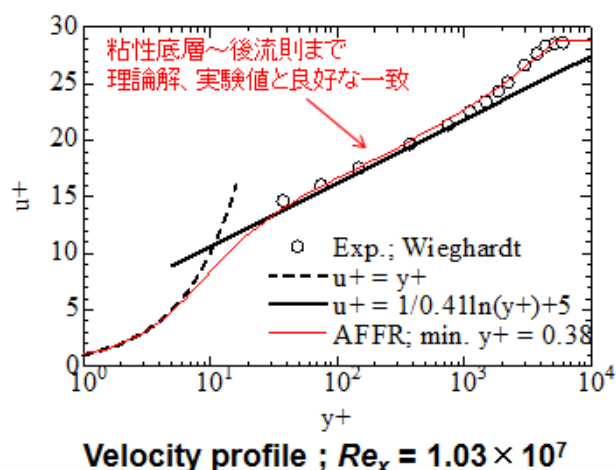
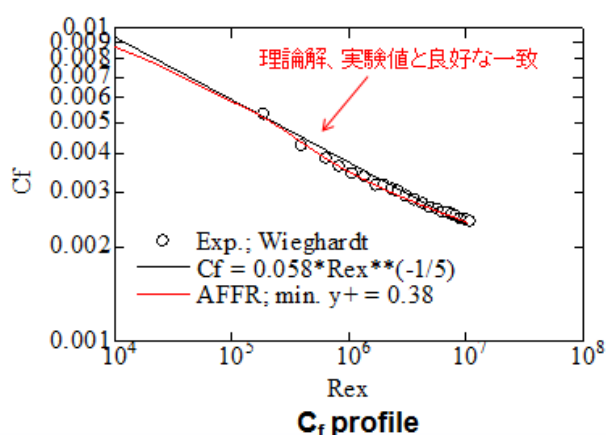


図 16 平板摩擦抗力係数の解析モデル



(a)速度分布



(b)抗力係数分布

図 17 平板摩擦抗力係数の解析結果

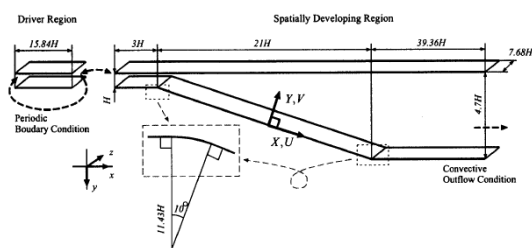


図 18 非対称ディフューザーの解析モデル

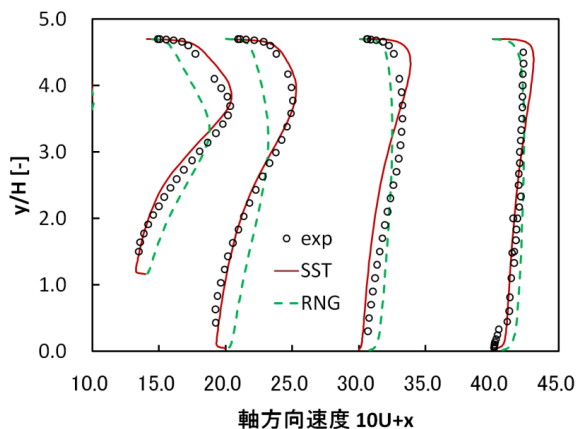


図 19 非対称ディフューザーの解析結果

8. おわりに

Advance/FrontFlow/red は Ver. 4.1 以降、高速化、高安定、使い勝手の向上を中心に開発を進めてきた。これまでの改良に加え、セル中心法を導入や AMG ソルバーの適用範囲の拡張をはじめとした機能強化によって高速化、高安定化などが達成されたと考えている。引き続き、品質向上に取り組むとともに、サポート環境も強化し、よりよいソフトウェアを開発していく所存である。

参考文献

- [1] 杉中隆史, 大西陽一, 塩谷仁, 平川香林, 小川哲司, 大友洋, 徳永健一, 佐藤昌宏, 中森一郎, “Advance/FrontFlow/red Ver. 4.1 の概要と特長”, アドバンスシミュレーション Vol. 2, (2010)
- [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)

※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、【カラー版】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。)