

Advance/FrontFlow/red Ver. 4.1 の概要と特長

杉中 隆史⁽¹⁾、大西 陽一⁽¹⁾、塩谷 仁⁽¹⁾、平川 香林⁽¹⁾、小川 哲司⁽¹⁾
大友 洋⁽¹⁾、徳永 健一⁽²⁾、佐藤 昌宏⁽²⁾、中森 一郎⁽¹⁾
アドバンスソフト株式会社 ⁽¹⁾技術第3部、⁽²⁾技術第5部

Outline and feature of Advance/FrontFlow/red Ver. 4.1

Takafumi Suginaka, Yoichi Onishi, Hitoshi Shiotani, Karin Hirakawa, Tetsuji Ogawa,
Hiroshi Otomo, Kenichi Tokunaga, Masahiro Sato, Ichiro Nakamori
⁽¹⁾3rd, ⁽²⁾5th Technical Division in AdvanceSoft Corporation

1. はじめに

国内の産業界が自社の生産力を強化し、海外の産業に勝り、発展を継続していくためには、国産で世界水準の実用ソフトウェアを保有していることが必要である。これを実現するために、文部科学省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトおよび文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトが、東京大学生産技術研究所を中心とする産学連携プロジェクトとして、2002 年度から 6 年間実施された。ソフトウェアの開発プロジェクトとしては国内では類がない数十億円規模の大型プロジェクトであった。このプロジェクトにおいて開発された流体解析ソフトウェアが FrontFlow/red Ver. 3.0 である。

アドバンスソフト株式会社は、上記のプロジェクトを実施し、プロジェクト終了後には、開発したソフトウェアを継続して保守・改良することをミッションとして設立された会社である。

FrontFlow/red Ver. 3.0 が開発された当初は、Large Eddy Simulation (LES) という非定常な乱流現象を精度良く解析する手法を礎とし、乱流

場の大規模解析をターゲットに、ソフトウェアの設計段階から高い並列性能を意識して開発が進められてきた。

一方、産業界では、乱流、伝熱、輻射、燃焼、流体音、キャビテーション、固体粒子や液滴を含む二相流、自由表面などの数値シミュレーションに対する要望が際限なく複雑化、高度化する中で、多種多様な解析に対応し、高速かつ安定に結果が得られ、しかも使い勝手が良いソフトウェアに対する要望はますます強くなってきた。当社はこの要望に応えるために FrontFlow/red Ver. 3.0 のこれまでの成果を継承しつつ、高速性、計算安定性、使い勝手などを改良して

Advance/FrontFlow/red Ver. 4.1 (以下「Ver. 4.1」と略す) をリリースするに至った。以下では、Ver. 4.1 の概要と特長を紹介する。

2. Ver. 4.1 の特長と解析機能

2.1. 特長

Ver.4.1 の特長をまとめると以下のようになる。

LES による高精度乱流解析 超並列化・ベクトル化による大規模解析 高速性 高いコストパフォーマンス 開発者による技術サポート 多様な解析対象と機能の拡張性

上記のそれぞれの特長について次で説明する。

2.1.1. LES による高精度乱流解析

Ver. 4.1 は LES による非定常な乱流現象の高精度予測を追求し、燃焼、物質拡散、空力などの非定常大規模解析や、構造、電磁場、音響などとの大規模連成解析に適用することができる。

産業界では乱流現象を予測する際に $k-\varepsilon$ モデルなどの乱流変動を時間平均したモデルである Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) モデルが一般的に使用されている。RANS は、多くのモデル定数をシンプルな実験結果に合うように決めているため、その合わせ込みが適用できる範囲では良い結果が得られる。しかし、旋回流や浮力などにより局所的に強い流れが生じると、その方向の乱流強度（乱流による混合の強さ）が他の方向の乱流強度より卓越して乱流強度が非等方的になる。この非等方性が大きくなるにつれて、RANS の計算結果は実測値と大きく乖離することが知られている。

一方、LES は乱流強度の非等方性を予測できるモデルである。LES がどのようなモデルでどのような利点があるかを以下で説明する。

乱流は、非定常で 3 次元の流動で、大小さまざまな渦を含み、それらの渦が複雑に干渉するランダムな運動である。ところが、小さい渦には、壁の形状や境界条件の影響を受けない普遍的な性質があることが実験的に確認されている。LES はこの特性を利用して、普遍性が期待できる小さい渦をメッシュより小さい成分（サブグリッドスケール成分）と考え、メッシュで解像できる成分（グリッドスケール成分）はダイレクト・シミュレーションと同様に流体の原理方程式をそのまま解くモデルである。したがって、メッシュサイズを小さくするにつれてダイレクトシミュレーション (DNS) に近づく。

LES の基礎方程式について説明する。連続方程式と運動方程式 (Navier-Stokes 方程式) にフィルターをかけて、グリッドスケールの連続方程式と運動方程式を得る。このとき運動方程式の中に、

サブグリッドスケール成分による応力項が表れる。この応力項がメッシュよりも小さいスケールの渦がグリッドスケールの渦へ与える影響を表していると考えられる。そして、この応力項は、ガリレイ不変則、サブグリッドスケールの運動エネルギー方程式における生成項と散逸項が釣り合っているという仮定、分子粘性とのアナロジーによる勾配拡散近似、次元解析、乱流統計理論を使用して、グリッドスケール成分の速度を使ってモデル化する。流れ場を特徴づける大きい渦による乱流変動は、メッシュで解像して直接計算する。したがって、LES ではメッシュで解像できる乱流を、非定常計算により現実の流れに近い状態で計算する。

Ver. 4.1 に導入した LES は、標準 Smagorinsky モデルと Dynamic Smagorinsky モデル (Dynamic SGS モデルとも呼ばれる) である。

標準 Smagorinsky モデルではフィルター関数を使用して空間平均された以下の方程式を解く。

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} \bar{q} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + \bar{\rho} g_i$$

上付きのバーはフィルター関数を使用した空間平均を表す。ここで SGS 応力項

$$\tau_{ij} = \left(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{q}$$

は以下のようにモデル化する。

$$\tau_{ij} = -2\nu_e \bar{S}_{ij}$$

ここで、 \bar{S}_{ij} は GS 成分の歪速度テンソル、 ν_e は SGS 応力の渦粘性係数で

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$$

と表す。この C_s は計算値を実験値に合わせこむモデル定数であり、通常 0.2 から 0.065 までの値が使われる。平行平板などの系では 0.1 が最も良いことが報告されている。Ver. 4.1 のデフォルト

値は 0.1 としている。

Dynamic Smagorinsky モデルでは上記の C_s は計算により求めることができる。したがって、モデル定数を与える必要がない。

以上より LES の利点を以下にまとめる。

LES は RANS と比べて、適用範囲が広い。
 LES は RANS と比べて、乱流の非等方性が強い流れの計算精度が高い。

その他に、LES の有用性として以下がある。

- (1)騒音解析を行う場合に、LES により壁面上の静圧変動を計算する。この静圧変動から、音圧変換と FFT (高速フーリエ変換) により音圧レベルの周波数解析を行う。上記の音圧変換と FFT プログラムは Ver. 4.1 に内蔵されている。
- (2)燃焼解析で温度や化学種の乱流変動を詳細に計算する場合には LES を使用する。
- (3)キャビテーション解析で、成長したキャビテーションが気泡塊(クラウドキャビティ)となって放出する周期的現象を計算する場合には圧縮性 LES を使用する。

2.1.2. 超並列化・ベクトル化による大規模解析

Ver. 4.1 はソフトウェアの設計段階から並列計算のパフォーマンスを最大限に引き出すためのアルゴリズムを適用している。そのため、シングル CPU に対応したソフトウェアを並列対応にするのと違って、高い並列化効率が得られている。

2.1.3. 高速性

Ver. 4.1 は前処理の高速化、AMG ソルバーの導入に加え、高速化のための細部にわたるチューニングを施している。その結果、Ver. 4.0 と比較し

て飛躍的な計算スピードの向上が得られている。

2.1.4. 高いコストパフォーマンス

Ver. 4.1 のベースになっている FrontFlow/red Ver. 3.0 は国のプロジェクトで開発されたため、低価格でご提供している。特に、CPU 数に依存しない価格設定にしているため、計算機資源を有効活用し、定額で大規模な計算を実行することができる。

2.1.5. 開発者による技術サポート

Ver. 4.1 は当社で改良を行っているため、開発者が直接技術サポートを提供している。また、お客さまのご要望に素早く対応できる開発体制とカスタマイズ性がある。世の中のニーズが大きく動く現代のビジネスシーンにおいて、迅速な新技術への対応が可能であると考えている。

2.1.6. 多様な解析対象と機能の拡張性

Ver. 4.1 は乱流、燃焼化学反応、輻射、粒子追跡、流体音、キャビテーション、圧縮性、固体-流体熱連成、多孔質体、自由表面、等 多くの解析対象に対応している。お客さまの現在の課題に対応し、お客様特有の機能を組み込むなどの拡張が可能である。

2.2. 解析機能

FrontFlow/red Ver. 3.0 で開発した解析機能を含め、Ver. 4.1 の解析機能一覧を表 2.2 に示す。

表 2.2 Ver. 4.1 の解析機能一覧

項目	機能
基礎式	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	輻射	<ul style="list-style-type: none"> 有限体積法 ゾーン法 モンテカルロ法
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 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 	多孔質	<ul style="list-style-type: none"> べき乗則 Darcy 則
離散化	<ul style="list-style-type: none"> 有限体積法、節点中心法 	流体音	<ul style="list-style-type: none"> Lighthill-Curl モデル Ffowcs Williams and Hawking モデル
流入変動風	<ul style="list-style-type: none"> 乱数による流入変動風 流入ドライバーによる流入変動風 	移動格子	<ul style="list-style-type: none"> 回転移動格子 並進移動格子
セル形状	<ul style="list-style-type: none"> 6 面体 (ヘキサ)、4 面体 (テトラ)、3 角柱 (プリズム)、4 角錐 (ピラミッド) およびこれらの併用 	キャピテーション	<ul style="list-style-type: none"> 均質流モデル
アルゴリズム	<ul style="list-style-type: none"> 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 	自由表面	<ul style="list-style-type: none"> VOF 法、CICSAM 法
時間積分法	<ul style="list-style-type: none"> 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 	粒子追跡	<ul style="list-style-type: none"> 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)
移流項スキーム	<ul style="list-style-type: none"> 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 	表面反応	<ul style="list-style-type: none"> 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 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
行列解法	<ul style="list-style-type: none"> ICCG 法 BiCGSTAB 法 AMG 法 	気相反応	<ul style="list-style-type: none"> 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
熱連成	<ul style="list-style-type: none"> 流体-固体の熱連成 固体内部に複数の材質 	並列計算	<ul style="list-style-type: none"> 対応 (Windows 版は対応していない)
		容量制限	<ul style="list-style-type: none"> ソフト側に制限なし

2.3. Ver. 4.1 での改良点

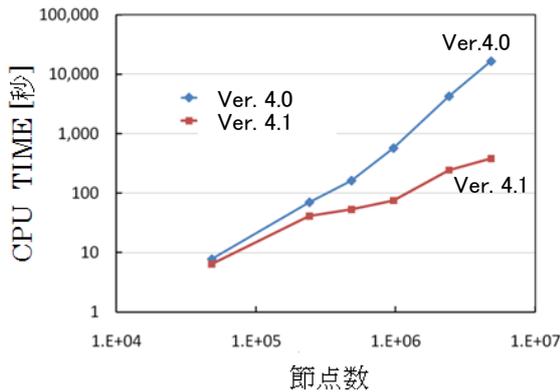
Ver. 4.1 において、FrontFlow/red Ver. 3.0 から改良した点を以下に示す。計算スピードは、Advance/FrontFlow/red Ver. 4.0 (以下「Ver. 4.0」と略す) と比較して示す。

2.3.1. 計算スピードがアップ

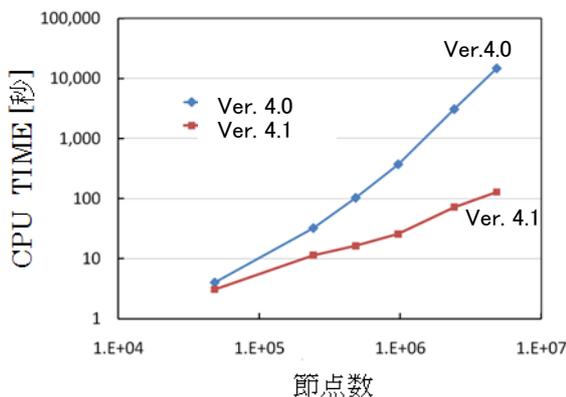
(1) 前処理の高速化

Ver. 4.1 で処理時間がかかる壁面距離のアルゴリズムを改良した。その結果、Ver. 4.0 と Ver. 4.1 で比較すると、図 2.3.1.1 に示すように 500 万節点で前処理にかかる計算時間の大部分を占める壁面距離の計算時間が 100 倍以上スピードアップし

た。



(i) 1 プロセッサによる計算



(ii) 8 プロセッサによる計算

大規模になるほど高速化率がアップ
500 万節点では、100 倍以上スピードアップ

図 2.3.1.1 壁面距離の計算時間

(2) 定常計算の高速化アルゴリズムの導入

定常計算を行う場合に、FrontFlow/red Ver. 3.0 では非定常計算を実行して、時間発展させて定常解を求めていた。Ver. 4.1 では基礎方程式から時間項を落とし、圧力と速度のカップル法を改良した。その結果、定常計算が数倍スピードアップした。乱流平板の計算では 12.6 倍スピードアップした。この計算手法は Ver. 4.1 において計算安定性が大幅にアップしたために使用することが可能になった。

(a) 乱流平板の計算におけるスピードアップ

- ・ 計算条件

3 次元、圧縮性、SIMPLE 法、
空間 2 次精度、RNG $k-\epsilon$ model、
非平衡壁処理、Re 数： 1.03×10^7 、
主流マッハ数：0.2、最小格子幅：10 mm
(評価点での wall $Y^+ = 0.4$)

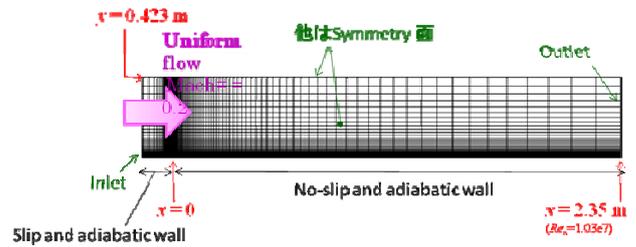


図 2.3.1.2 計算格子

・ 計算結果

図 2.3.1.3 より速度分布の計算結果は Ver. 4.0 と Ver. 4.1 で一致している。表 2.3.1.1 より計算時間は 12.6 倍スピードアップした。また、図 2.3.1.4 より Ver. 4.1 では速度残差の収束状況が非常に良くなったことがわかる。

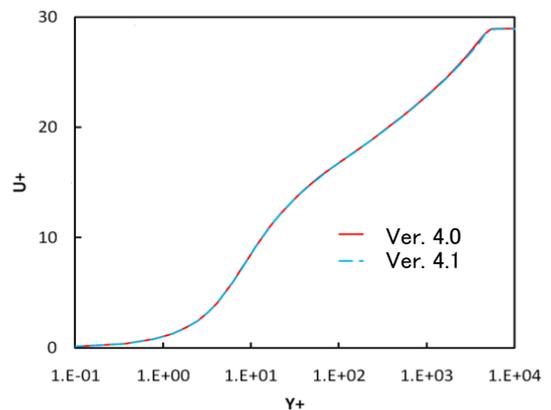


図 2.3.1.3 速度分布の計算結果

表 2.3.1.1 反復回数と計算時間

項目	反復回数	計算時間
Ver. 4.0	22675	31 時間 31 分 53 秒
Ver. 4.1	2009	2 時間 29 分 43 秒

12.6 倍スピードアップ

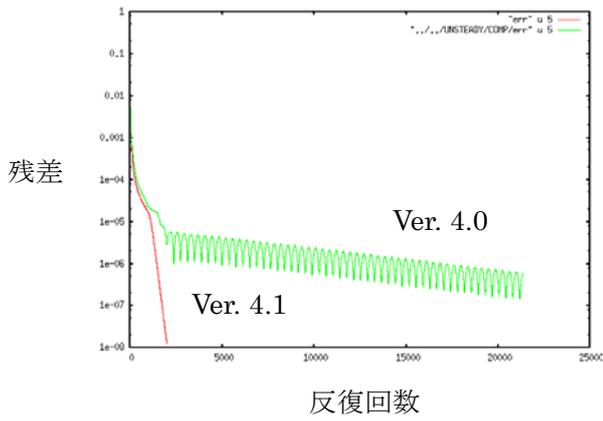


図 2.3.1.4 速度残差の収束履歴

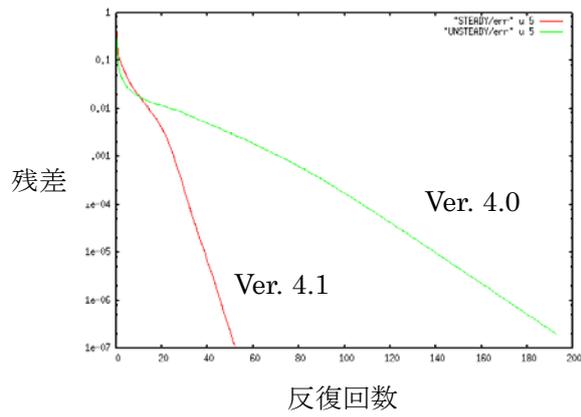
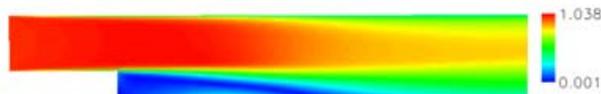


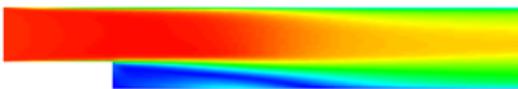
図 2.3.1.6 速度残差の収束履歴

(b) バックステップの計算におけるスピードアップ

図 2.3.1.5 より速度分布の計算結果は Ver. 4.0 と Ver. 4.1 で一致している。表 2.3.1.2 より計算時間は3倍スピードアップした。また、図 2.3.1.6 より Ver. 4.1 では速度残差の収束状況が非常に良くなったことがわかる。



(i) Ver. 4.0 の速度絶対値



(ii) Ver. 4.1 の速度絶対値

図 2.3.1.5 速度絶対値の計算結果

表 2.3.1.2 反復回数と計算時間

項目	反復回数	計算時間
Ver. 4.0	194	9分 25秒
Ver. 4.1	53	3分 6秒

3倍スピードアップ

(3) AMG ソルバー導入による高速化

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、そのためのインターフェースを実装した。

AMG ソルバーは図 2.3.1.7 に示すように、複数の計算格子を使用して、それぞれの計算格子により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。

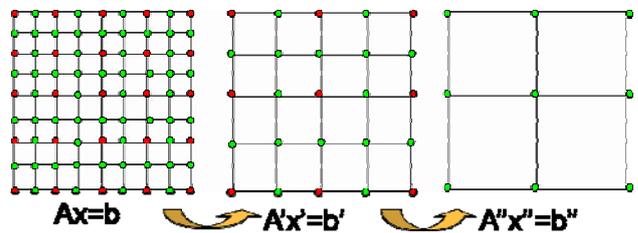


図 2.3.1.7 AMG ソルバーの概要

図 2.3.1.8 に、T 字管の計算を 100 万節点、1 プロセで行った場合の圧力ポアソン方程式残差の収束履歴を示す。AMG を使用すると、波長の大きい乱れが速く収束するようになった。

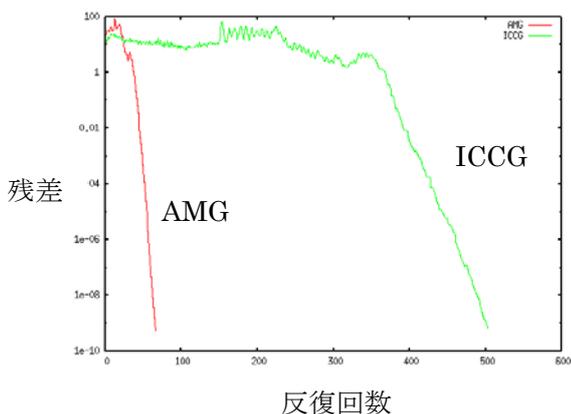


図 2.3.1.8 圧力ポアソン方程式残差の収束履歴 (T字管、100万節点、1プロセッサの計算)

表 2.3.1.3 収束までの反復回数

項目	反復回数
AMG を使用した場合	66
AMG を使用しない場合	503

(T字管、100万節点、1プロセッサの計算)

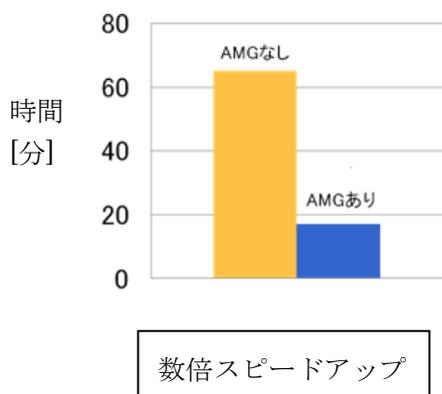


図 2.3.1.9 計算時間の比較 T字管、100万節点、20step、1プロセッサの計算)

図 2.3.1.9 に示すように、AMG ソルバーを使用すると、圧力ポアソン方程式の計算時間が数倍スピードアップした。

(4) CPU 内マルチコアの並列化効率の向上

半導体技術の進展を受けて、CPU チップ内に多数のプロセッサコアを内蔵した「マルチコア」が主流になった。node 間通信は MPI を使用し、node

内通信は IMPACT 自動並列機能を使用することが可能になったが、node 内負荷の不均等に対応できていない問題がある。これは、ポアソン方程式を解く行列ソルバーにおいて、前進後退代入・前処理などデータ依存性のある箇所が自動並列化されないために生じている。この問題に対処するためには、共有メモリ型を意識した並列化が必要となり、以下のような改良を行った。

- OpenMP を用いた並列化
- マルチカラーオーダーリング法を用いてデータ依存性を除去 (データ依存性のない要素群ごとに分類しなおす、色分けをする)



図 2.3.1.10 イメージ図

非構造格子を扱う Ver. 4.1 では、より多くの色数でオーダーリングする手法を採用した

(Reverse Cuthill-McKee Ordering)。この手法は Ver. 4.1 のポアソンソルバー-ICCG 法 ILU-Bicgstab 法の並列化に向いている。以下に、マルチコア並列化効率の実測値を示す。

(a) 1 node (pure thread 並列) の場合

計算対象：ロケット燃焼器 (節点数:23,000)

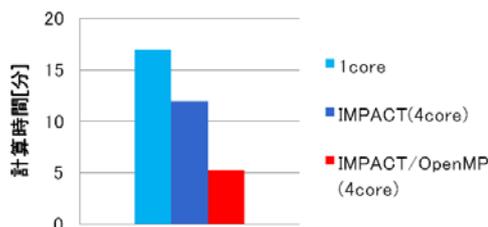
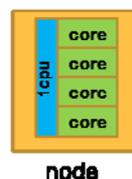


図 2.3.1.11 1 node (pure thread 並列)

(b) Multi node (hybrid MPI/IMPACT/OpenMP 並列) の場合

計算対象：ロケット燃焼器（節点数:160,000）

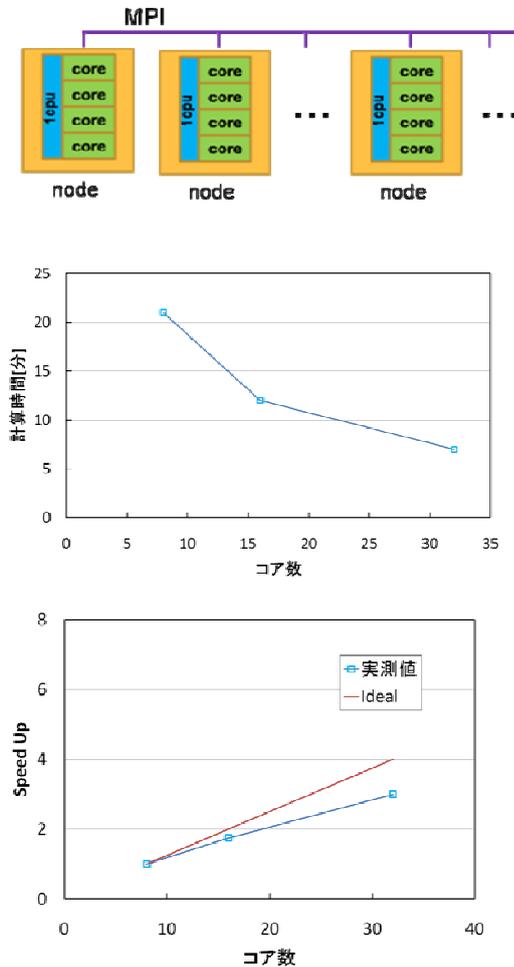


図 2.3.1.12 Multi node

- (5) 圧力ベース圧縮性ソルバーの高速化
- (6) BiCGSTAB ソルバーの改良による高速化
- (7) OSM ソルバーと ODE ソルバーの導入による燃焼計算の高速化
- (8) 不連続接合格子の利用による計算負荷の低減
不連続接合格子（接合面のメッシュ形状が一致しない格子）の計算機能を導入した結果、全体の格子数を減らすことで計算負荷を低減することが可能になった。ただし、現状ではスライデ

イングしない面に対して使用可能である。

2.3.2. 計算安定性がアップ

(1) 勾配計算の計算精度の向上

重みつき最小二乗法を導入したことで、歪みが大きい格子での勾配計算の計算精度が向上した。

図 2.3.2.1 に勾配が 75,000 になるように変数値をあたえて勾配を計算した結果を示す。

Ver. 4.0 では歪みが大きい場所で勾配が 60000 になる勾配量の計算誤差が大きかったが、Ver. 4.1 ではその計算誤差が生じなくなった。

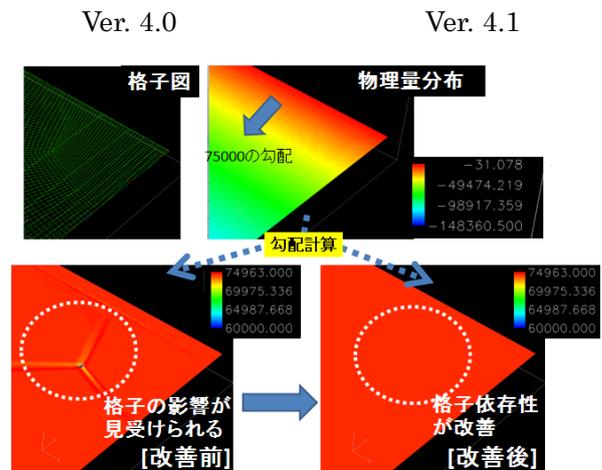


図 2.3.2.1 勾配計算方法の改良

(2) 壁に垂直方向の大きい物体力に対する改良

図 2.3.2.2 に、左側側面を低温、右側側面を高温にして自然対流を起こし、上面で上向きの力を与え、下面で下向きの力を与えた計算結果を示す。Ver. 4.0 までは上面付近では上向きの流れが生じ、下面付近では下向きの流れが生じるという不自然な結果になった。

Ver. 4.1 では、境界の取り扱いを改良することにより、妥当な計算結果が得られるようになった。この改良により、壁面付近で壁面に大きな力が働く問題を解析できるようになった。

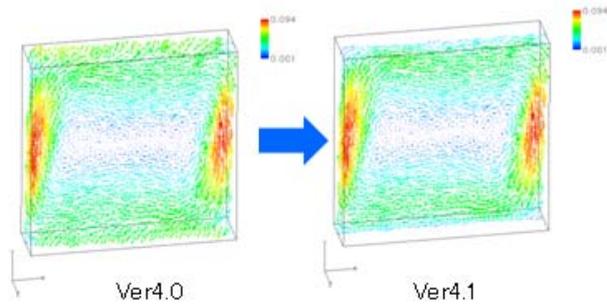


図 2.3.2.2 上下の水平壁に垂直方向に大きい物体力を与えた解析

(3) スライディング境界における質量、運動量、圧力の取り扱いの改良

スライディング境界における質量、運動量、圧力の取り扱いを改良した結果、境界を挟んで圧力の連続性が向上した。

(4) 拡散項の格子依存性の低減

Muzaferija による拡散項の離散化式の取り扱いを改良した結果、拡散項の格子依存性が減少した。

(5) 移流項高次スキームの取り扱いを改良

(6) 境界における輻射の取り扱いを改良

2.3.3. 使いやすさがアップ

(1) GUI によるプリポスト

Advance (ADAP/REVOCAP)によるプリポストを導入したことにより、データ設定が容易になった。

(2) マニュアル (使用説明書)

FrontFlow/red Ver. 3.0のマニュアルはわかりにくいという声が多かったため、Ver. 4.1ではマニュアルを全面改訂した。Ver. 4.1のマニュアルの目次を以下に示す。

目次

1 章	概要	1
1.1 節	解析機能、動作環境一覧	1
1.2 節	ソフトウェアの構造	5
2 章	解析の流れ	6
3 章	インストール	7
3.1 節	ソフトウェアの配置とコンパイル	7
3.2 節	環境設定	7
4 章	計算準備	8
4.1 節	格子データファイルの作成	9
4.2 節	計算制御ファイルの作成	11
4.2.1 項	入出力ファイルの設定	15
4.2.2 項	解析条件の設定	18
(1)	解析方法 (圧縮性、乱流、温度) の設定	19
(2)	計算格子サイズの設定	22
(3)	計算開始、終了/定常・非定常の設定	25
(4)	SIMPLE 法の設定	28
(5)	時間刻みの設定	30
(6)	化学種の設定	32
(7)	流体物性/移流スキームの設定	37
(8)	時間積分法の設定	44
(9)	プロセッサ数の設定	46
(10)	出力形式 (結果ファイル) の設定	48
4.2.3 項	境界条件の設定方法	51
4.2.4 項	初期条件の設定	79
5 章	前処理	82
5.1 節	1 プロセッサによる計算の前処理	82
5.2 節	並列計算の前処理	87
5.3 節	前処理時のエラー対策	91
6 章	メインソルバー実行	95
6.1 節	1 プロセッサによる計算	95
6.2 節	並列計算	102
7 章	後処理 (可視化処理)	107
7.1 節	通常データの可視化	107
7.2 節	粒子追跡データの可視化	112
7.3 節	アニメーション作成	114
8 章	計算制御ファイル詳細設定	117
8.1 節	流れ制御機能	117
8.1.1 項	乱流モデル (RANS 編)	117
8.1.2 項	乱流モデル (LES 編)	131
8.1.3 項	重力・浮力	138
8.1.4 項	1次元、2次元計算	140
8.1.5 項	多孔質	142
8.1.6 項	輻射	145
8.1.7 項	実在ガスモデル	155
8.1.8 項	キャビテーション	160
8.1.9 項	自由表面	169
8.2 節	解析別設定方法	176
8.2.1 項	火災の解析	176
8.2.2 項	表面反応の解析	186
8.2.3 項	粒子追跡法を用いた解析	191

8.2.4 項	流体音解析	205
8.2.5 項	流体力解析	218
8.2.6 項	固体の熱伝導解析	225
8.3 節	ユーザー特別設定機能	229
8.3.1 項	ユーザー定義サブルーチン	229
8.3.2 項	境界条件の時間変化	233
8.3.3 項	マトリックスソルバの制御	237
8.3.4 項	緩和係数の使用	240
8.3.5 項	化学反応計算の制御	242
8.3.6 項	ファイルによる初期値入力	251
8.4 節	格子機能	256
8.4.1 項	スライディング（回転）格子機能	256
8.4.2 項	（並進）移動格子機能	261
8.5 節	解析機能	264
8.5.1 項	時系列データの出力機能	264
8.5.2 項	統計量の出力機能	267
8.5.3 項	アニメーションの作成	270
8.5.4 項	モニター機能の使用	275
9 章	トラブルと対処策	278
9.1 節	全般的なトラブル	278
9.2 節	プリプロセッサに関するトラブル	279
9.3 節	メインソルバーに関するトラブル	280
9.4 節	エラーメッセージと対策集	283
10 章	FAQ	285
付録		287
1. Linux を初めてご使用される方へ		287
索引		288

(3) チュートリアル

Ver. 4.1 を初めて使用するユーザーでもデータ作成と計算の実行と可視化処理ができるように以下のチュートリアルを用意した。

(a) DNS を用いたバンプ周りの圧縮性流動解析

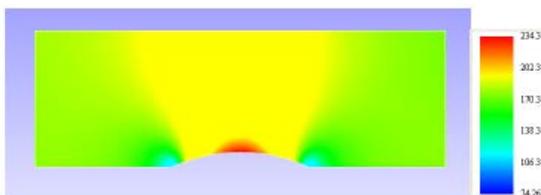


図 2.3.3.1 バンプ周りの速度分布

(b) RANS（標準 $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 、Chen $k-\epsilon$ ）を用いたバックステップの流動解析

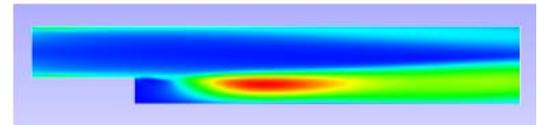


図 2.3.3.2 乱流エネルギーの分布

(c) LES を用いた T 字管の温度混合解析

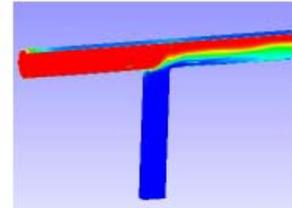


図 2.3.3.3 温度分布

(d) 固体壁で囲まれたキャビティ内の自然対流解析（固体の熱伝導を考慮）

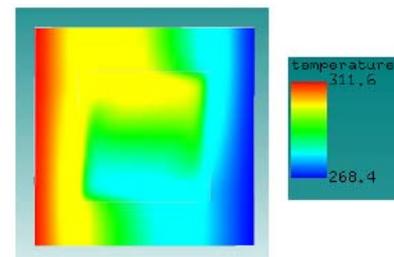


図 2.3.3.4 温度分布

(e) DNS を用いた水素噴流の素反応燃焼解析

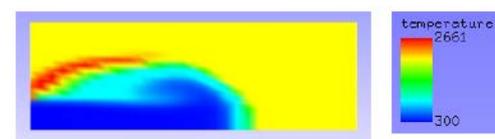


図 2.3.3.5 温度分布

(f) スライディングメッシュ機能を用いた回転角柱の非圧縮性 LES 解析

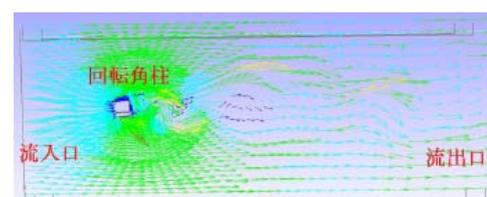


図 2.3.3.6 回転角柱の速度分布

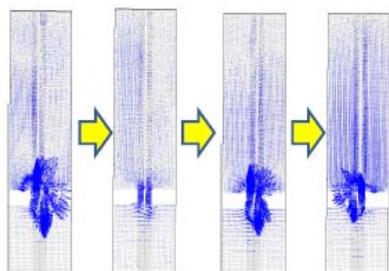
(g) 移動格子機能を用いた攪拌器の流体解析

図 2.3.3.7 攪拌器の速度分布

2.3.4. その他**(1) SST $k-\omega$ モデル**

境界層の剥離計算などで計算精度良いと報告されている SST $k-\omega$ モデルを導入した。

(2) リスタート計算時に並列数の変更

ジョブ投入時に使用可能な並列数に合わせて領域分割し直して再計算できる機能を導入した。それにより、空いている CPU を有効活用できるようになった。

(3) 厚みのない壁

計算セルの面を壁にする機能を導入した。ただし、現状では使用するメッシュジェネレータに限定される。

(4) 流体音

流れから発生する騒音を減らす問題は、騒音の法規制対応や室内の快適性を向上させるために、重要な開発課題になっている。空力騒音は速度の 6 乗から 9 乗に比例するため、高速運転時には大きな音源になる。また、エンジンや駆動系からの騒音はその対策が進み次第に小さくなってきたために、空力騒音の課題が目立つようになった。

Ver.4.1 は LES を使用し、音響学的類推 (Lighthill 方程式が音源項をもちながら、静止流体中を音速で伝播する式を表現しているという

考え) に基づいて分離計算法により騒音予測をすることによって、音の発生源と伝達経路を解析することができる。

分離計算法は流れ場の計算と音場の計算を分離して行う手法である。流れ場の変動の空間スケール長が発生する音波の波長よりも十分小さく、音が低速の流れ場中で発生しているなど、音が流れ場に与える影響を無視できる場合に有効である。

流れ場から音圧の評価を行うのに、Lighthill 方程式の解である Curle の式 FW-H (Ffowcs Williams and Hawkings) の式を使用することができる。両者とも音源と観測点の距離が音波の波長に比べて十分大きく (遠方場)、音源領域 (物体) のサイズが音波の波長に比べて十分に小さい (コンパクト音源) ことを仮定している。また、流れの渦から放射されて直接観測点に到達する音を表す 4 重極音源項や物体以外の境界における音波の反射や吸収は考慮しない。しかしながら Curle の式や FW-H の式を使った解析でも騒音低減のために有用な情報が得られる。

音源となる境界面 (物体) が移動していない場合には、Curle の式を用いる。このとき音圧 p_a は、次式で表される。

$$p_a = \frac{1}{4\pi c_0} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S n_i p(y, t - r/c_0) dS$$

ここで、 c_0 は音速、 x は観測点の座標、 y は音源の座標、 $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ は観測点音源点間距離、 n は境界面の法線ベクトルである。

音源となる境界面がファンのように運動している場合には FW-H の式を使用する。このとき音圧 p_a は、次式で表される。

$$p_a = \frac{1}{4\pi c_0} \int_S \frac{r_i}{r^2 (1 - M_r)^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} n_i p(y, \tau) + \frac{n_i p(y, \tau)}{1 - M_r} \frac{\partial M_r}{\partial \tau} \right\} dS$$

ここで、 M_r は相対マッハ数、 τ は遅延時間であり、それぞれ次式で定義される。

$$M_r \equiv \frac{r_i V_i}{rc_0}, \quad \tau \equiv t - r/c_0$$

解析の手順は以下のように行う。

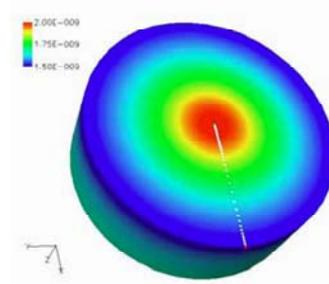
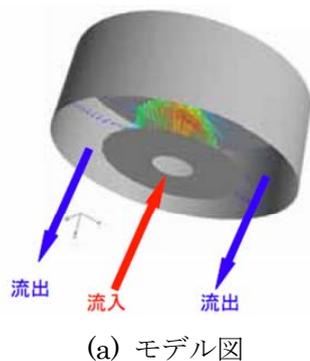
- Step1** 計算制御ファイルで流体音計算の設定を行う。
- Step2** メインソルバーを実行する。
実行後、流体音解析に使用する時系列データが出力される。
- Step3** ポスト処理プログラム sal (Ver. 4.1に内蔵されている) を使い、時系列データから設定した観測点での音圧スペクトルの分布を得る。

(5) 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、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）の解析機能を導入した。

上記の固体表面上の反応モデルと気相中の反応モデルと熱流動を連成させた大規模な反応解析が可能になった。これにより、CVD（化学蒸着法）による製膜プロセス、触媒表面反応、エンジンやガスタービンの燃焼解析などに利用することができる。

図 2.3.4.1 に半導体プロセスの解析結果を示す。



(b) 蒸着面上における Si 膜の膜厚分布

図 2.3.4.1 半導体プロセスの解析

(6) 実在ガス

実在ガスモデルによる圧縮性流体の計算機能を導入したことにより、実在ガスの解析や超臨界圧の燃焼解析が可能になった。

Ver. 4.1 では、実在ガスモデルを扱うため実在流体効果を考慮した Redlich-Kwong の状態方程式を適用した。

この実在ガスモデルの検証として、O₂, CH₄, O₂:CH₄=50:50 について 1 セルの解析によって 10K から 1000K までの密度、音速、粘性係数、熱伝導率を求め、NIST データとの比較を行った。得られた結果は、NIST データと良い一致を示し、これまでの理想ガスモデルでは再現できなかった低温超臨界領域まで再現できるようになったことで、実在ガスモデルを扱うことができるようになった。以下に計算条件と計算結果を示す。

(a) 計算条件

状態方程式：Redlich-Kwong

$$P = \frac{R_u T}{M_{w,m} V - b_0} - \frac{a}{M_{w,m} V (M_{w,m} V + b_0)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_u \quad : \text{Universal Gas Constant [J/kmol - K]} \\ M_{w,m} : \text{Molecular weight of mixture} \\ V \quad : \text{Specific Volume [m}^3\text{/kg]} \\ b_0, a \quad : \text{Gas Parameter} \end{array} \right.$$

輸送係数のモデル：Chung モデル

圧力：1 MPa

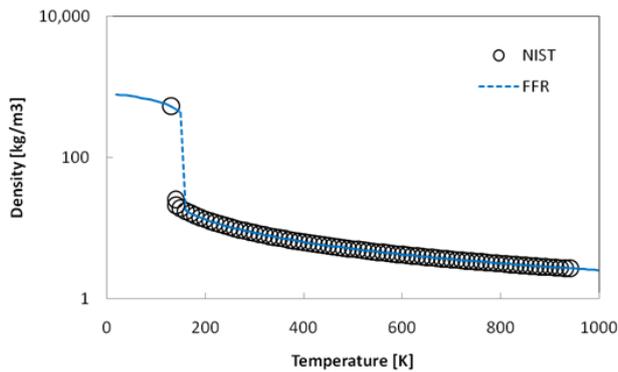
温度変化：10 K ~ 1000 K

気体の種類：O₂ 50%、CH₄ 50%

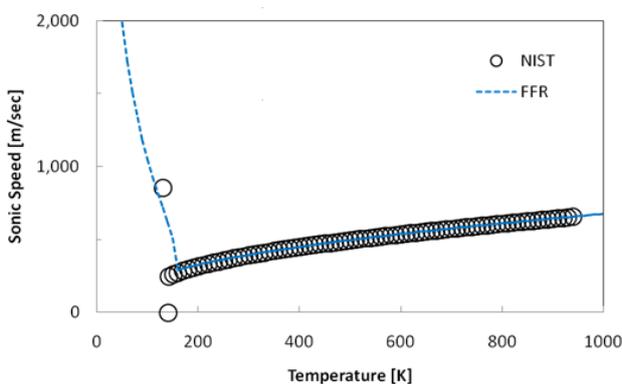
表 2.3.4.1 パラメータ

Species	O ₂	CH ₄
Molecular weight [kg/mol]	32.0E-3	16.042E-3
Lewis	1.0	0.3
Critical temperature [K]	145.581	190.56
Critical pressure [Pa]	5.043E+6	4.559E+6
Acentric factor	0.0222	0.01142
Critical density [kg/m ³]	436.1	162.66

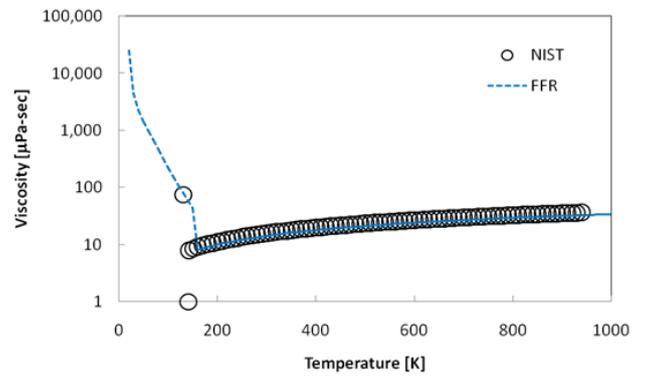
(b) 計算結果



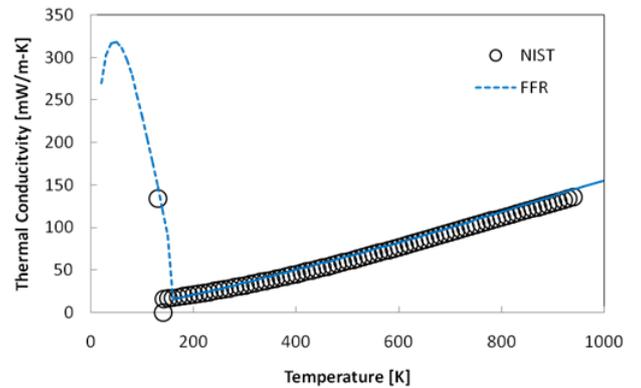
(i) 密度



(ii) 音速



(iii) 粘性係数



(iv) 熱伝導率

図 2.3.4.2 実在ガスモデル

Cheng ら実在ガスによる超臨界圧燃焼解析の検証結果を図 2.3.4.2 に示す。

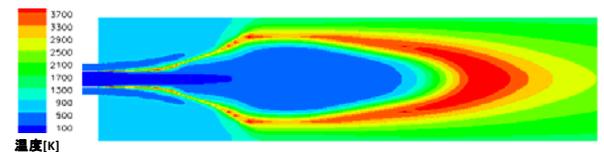


図 2.3.4.3 超臨界圧燃焼解析による温度分布

(7) キャビテーション

キャビテーションは、流体機器内部や翼前縁などの物体表面で起こり、流体機器の性能低下、騒音、壊触（エロージョン）といった問題を発生させたり、逆に有害物質の分解処理や洗浄などの有効利用を行うことができる現象である。

Ver. 4.1 では旋回流れ、はく離流れ、時間的に変動する複雑な渦などの乱流挙動を圧縮性 LES で高精度に予測できるようになったため、キャビ

レーションモデルを導入した。その結果、シート状に成長したキャビテーションが、ある長さに到達して気泡塊(クラウドキャビティ)となって放出する周期的現象を計算できるようになった。

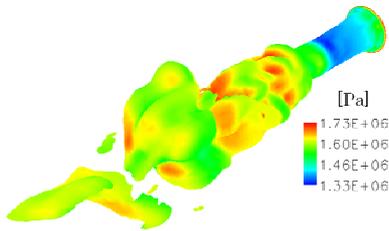


図 2.3.4.4 オリフィスから発生するキャビテーションの解析

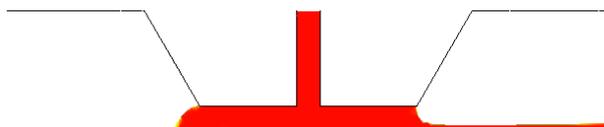
(8) 自由表面

VOF 法を導入して自由表面の解析が可能になった。図 2.3.4.5 にスロット塗布ビード解析の結果を示す。なお、計算条件としては塗布液の濡れ上がりや空気の巻き込みが起こらないで、正常な塗布状態が維持できるもので、解析結果も正常な塗布状態になった。

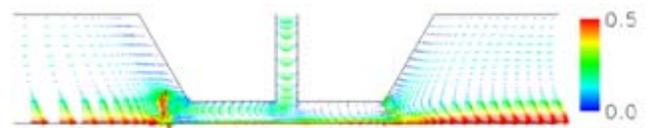
(a) 計算条件

- スリット幅：0.25mm
- ダイとウェブの距離：0.25mm
- 流入速度：0.17m/s
- ウェブ速度：0.5m/s
- ビード後部減圧度：1750Pa
- ダイと液の静的接触角：60°
- ウェブと液の静的接触角：40°

(b) 計算結果



(i) 塗布液の分布



(ii) 速度分布

図 2.3.4.5 塗布解析

(9) 低レイノルズ数効果を考慮した Enhanced Wall treatment 機能

壁付近の粘性の影響が大きい領域は k の一方程式モデルを使用し、完全な乱流領域は高レイノルズ数 k - ϵ モデルを使用する 2 層ゾーンモデルを導入した。

(10) 粒子追跡機能の並列計算

オイラー・ラグランジアン 2way による粒子追跡機能の並列計算で使用できるようにした。これにより、固体粒子と流体の分散系二相流の解析や液滴とガスの分散系二相流の解析において、大規模な並列計算が可能になった。

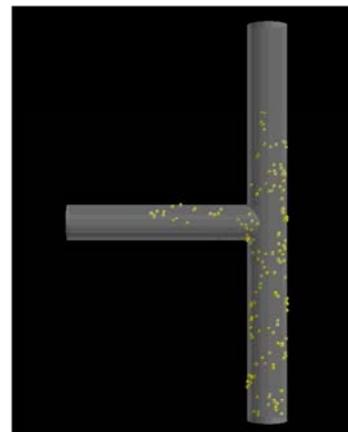


図 2.3.4.6 分岐管内の粒子挙動の解析

(11) 液滴蒸発

オイラー・ラグランジアン 2way による粒子追跡機能で、液滴とガスの分散系二相流を解析する際に、液滴が蒸発して気相に変化するプロセスを考慮できるようにした。これにより、液滴燃料による燃焼解析や液滴による消火解析が可能になった。

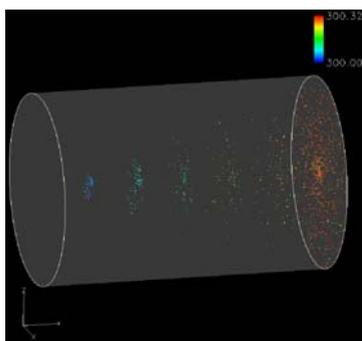


図 2.3.4.7 蒸発を伴う液滴噴霧の解析

(12) 全粒子中の最高温度と最低温度の表示

オイラー・ラグランジアン 2way による粒子追跡機能で、粒子温度を可視化できるようにした。

(13) 多孔質体

多孔質内部を通る流れを計算する際に、孔の数が多い場合には1つ1つの孔をメッシュで表現するとメッシュ数が多くなり計算負荷が過大になる。そのような場合には、流体が多孔質内部を通る際に受ける影響を圧損モデルで模擬して計算することができる。Ver. 4.1 では、ダルシー則とベッキ乗則を導入した。並列計算にも対応している。

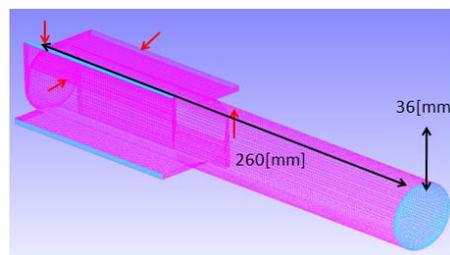
3. 解析事例

3.1. 旋回流の解析

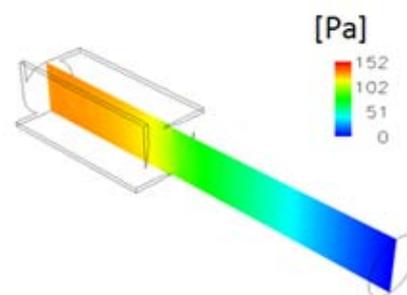
旋回流が生じる流れでは乱流の非等方性が強くなるため、 $k-\epsilon$ モデルより LES の方が実験値の再現性が良いことが報告されている。Ver. 4.1 においても同様の結果が得られるかどうかを確認するために、簡単なモデルで、LES と RNG $k-\epsilon$ モデルで同じ計算格子を使って、計算を行ってみた。

図 3.1.1 に旋回流の解析モデルおよび解析結果を示す。3mm×100mm のスリット状の入口 4 箇所から、1m/s で流入して、旋回流を発生させ、右側の円形断面部から流出する流れである。実験値がないので定量的な比較はできないが、RNG $k-\epsilon$ モデルの計算結果は、圧力分布と軸方向速度分布を断面内でほぼ一様分布として計算した。これ

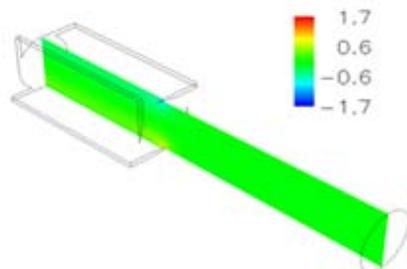
は、乱流混合を等方的でしかも過大に評価したためと考えられる。一方、LES の計算結果は、流入スリット部の旋回流やその減衰を妥当に計算できているものと思われる。



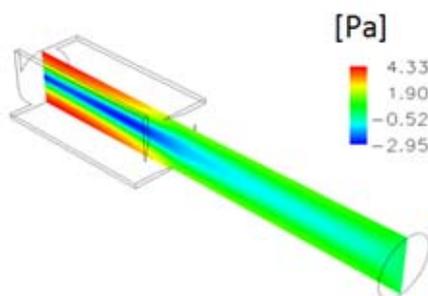
(i) 解析モデル



(ii) RNG $k-\epsilon$ モデルによる圧力

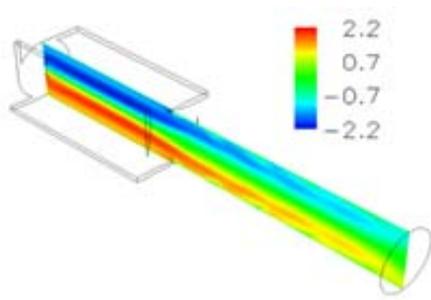


(iii) RNG $k-\epsilon$ モデルによる軸方向速度



(iv) LES による圧力 (時間平均値)

図 3.1 旋回流の解析



(v) LESによる軸方向速度（時間平均値）

図 3.1 旋回流の解析

3.2. T字管の温度混合解析

T字管において温度差のある流体が合流する際に、温度の混合状況を RNG $k-\epsilon$ モデルと LES で解析した。その解析結果を図 3.1.2 に示す。

RNG $k-\epsilon$ モデルの温度分布は実験値を定性的にも再現できなかった。これは、乱流混合を等方的でしかも過大に評価したためと考えられる。一方、LES の温度分布は実験値の特徴を良く再現できた。

(a) 計算条件

- 主管内径：0.15m
- 主管流入部の平均速度：0.23m/s
- 主管流入部の温度：321.15K
- 枝管内径：0.05m
- 枝管流入部の平均速度：1m/s
- 枝管流入部の温度：306.15K
- 節点数：404,892

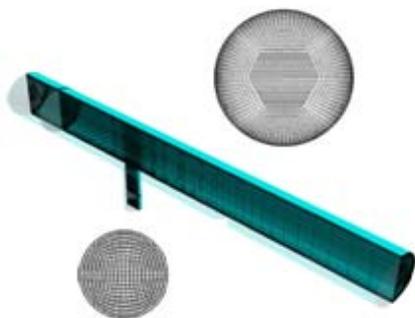
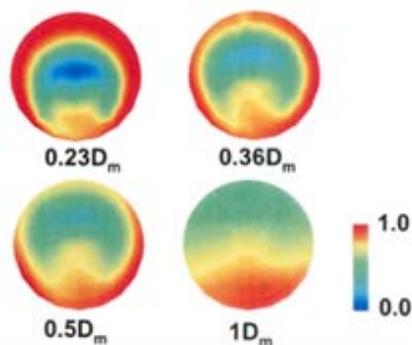
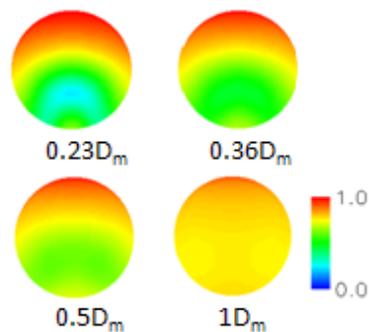
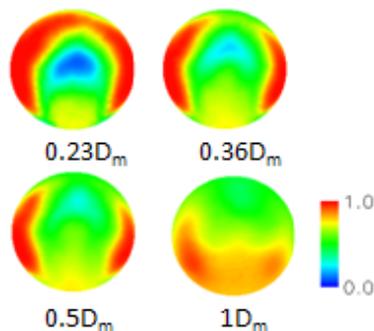


図 3.2.1 計算格子

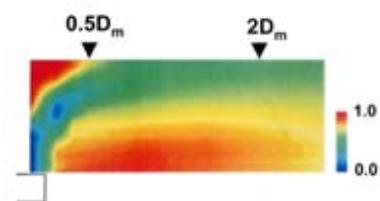
(b) 計算結果



(i) 無次元平均温度の実験値

(ii) RNG $k-\epsilon$ モデルによる無次元平均温度

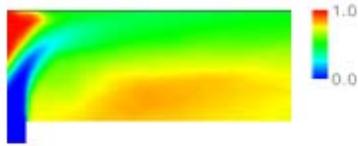
(iii) LESによる無次元平均温度



(iv) 無次元平均温度の実験値

(v) RNG $k-\epsilon$ モデルによる無次元平均温度

図 3.2.2 T字管の温度混合の解析



(vi) LES による無次元平均温度

図 3.2.2 T 字管の温度混合の解析

3.3. フォーミュラーカーの空力解析

地球シミュレータを使用して超並列化・ベクトル化によるフォーミュラーカーの大規模空力解析の事例を紹介する。

(a) 計算条件

- 車速：45[m/s]
- 時間刻み：1.0E-6 or 1.5E-6[s]
- 乱流モデル：LES (Smagorinsky, $C_s=0.15$)
- 現象時間：0.0464[s](33,600step)
- 時間平均時間：0.0354[s](23,600step)
- ハード：地球シミュレータ
- ノード：100 (800CPU)
- ベクトル化率：96.40%
- 並列化率：99.88%
- メモリサイズ：515GB
- 計算格子の形状：テトラ
- 要素数：1 億 2 千万

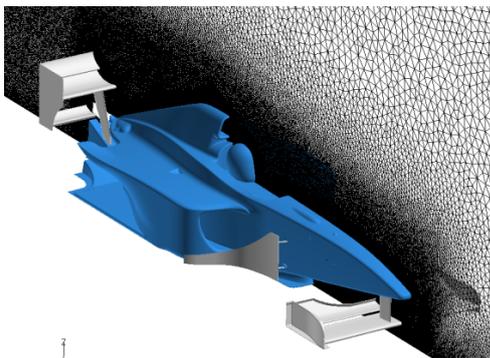
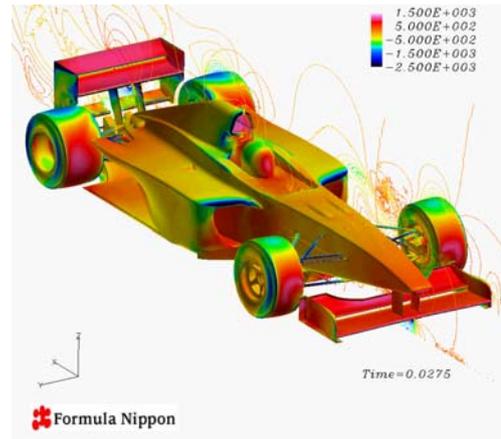
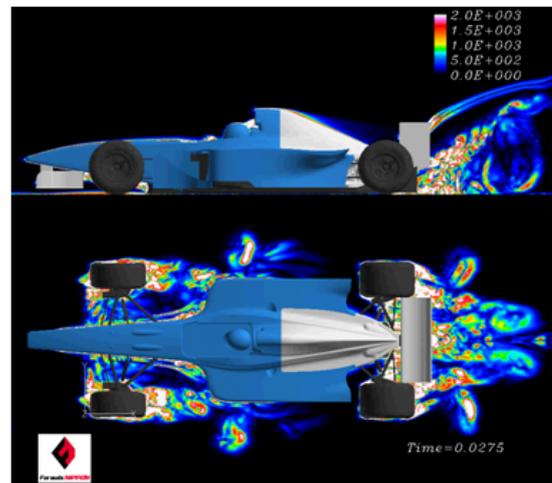


図 3.3.1 計算格子

(b) 計算結果



(i) 圧力



ご提供：株式会社日本レースプロモーション様・Lola Cars International Ltd 様
株式会社ルマン様・株式会社エムワイジー様

(ii) 渦度の変動

図 3.3.2 フォーミュラーカーの空力解析

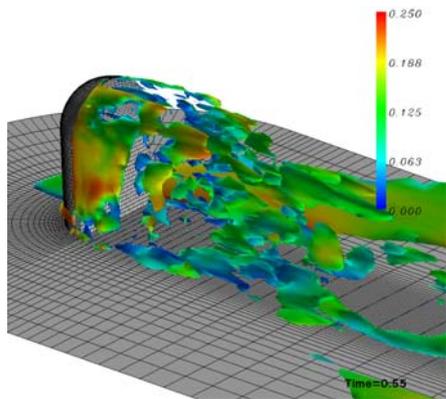
3.4. ドアミラーの騒音解析

ドアミラーの騒音解析の事例を紹介する。

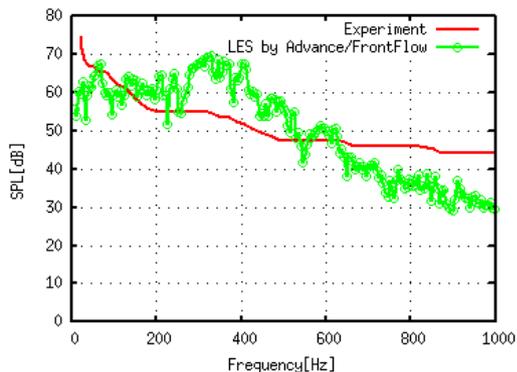
(a) 計算条件

- 乱流モデル：LES
- レイノルズ数：7.4E+05
- 計算領域：10.5D×5D×3.5D
- 節点数：80 万
- 壁面近傍格子幅量:0.03D

(b) 計算結果



(i) Helicity 密度とマッハ数



(ii) 音圧スペクトル

図 3.4 ドアミラーの騒音解析

3.5. ファンの騒音解析

ファンの騒音解析の事例を紹介する。

(a) 計算条件

乱流モデル : LES

ファン直径 : 230mm

回転数 : 400rpm

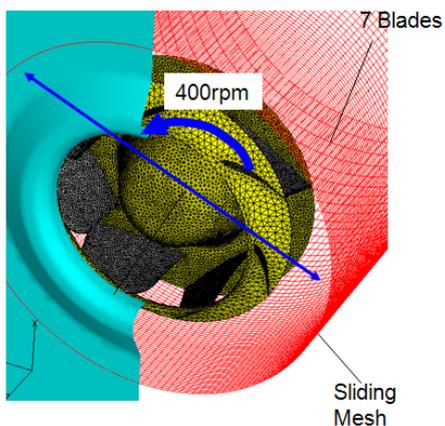
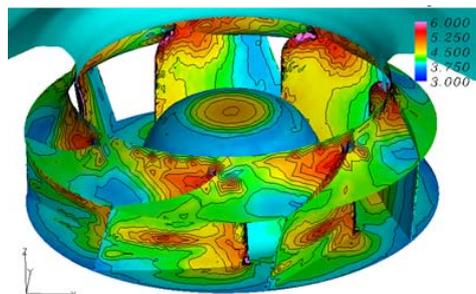
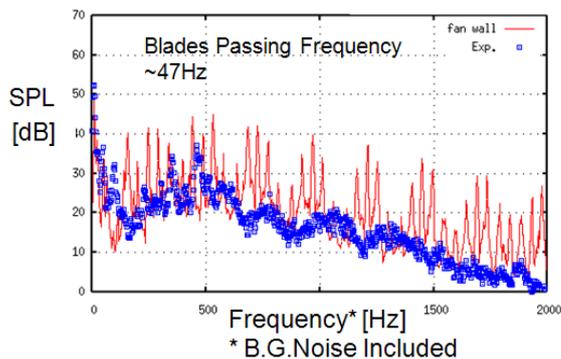


図 3.5.1 計算格子

(b) 計算結果



(i) 変動圧力分布 (P_{rms})



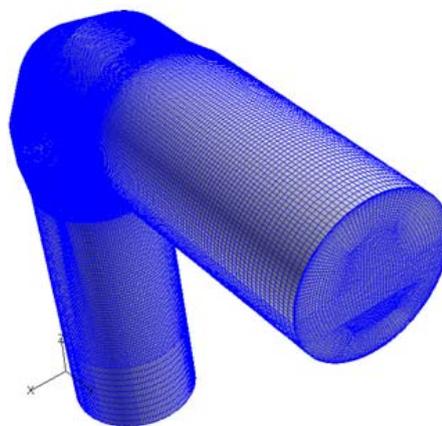
(ii) 音圧スペクトル

東プレ株式会社様との共同研究

図 3.5.2 ファンの騒音解析

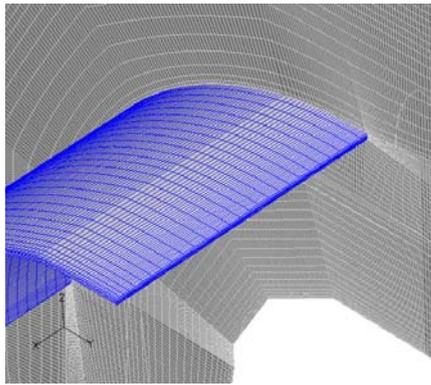
3.6. 案内板溶接部応力解析

株式会社電業社機械製作所様のご協力で実施した流体構造連成解析による案内板溶接部の応力解析の結果を紹介する。ただし、構造解析の機能は Ver. 4.1 に含まれていない。

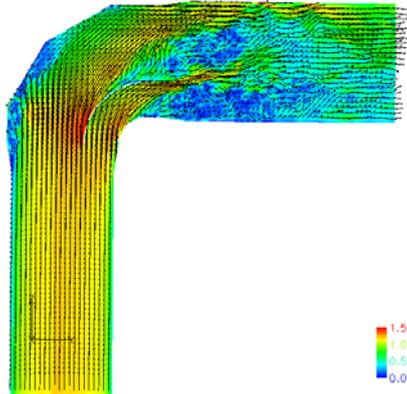


(i) 計算格子

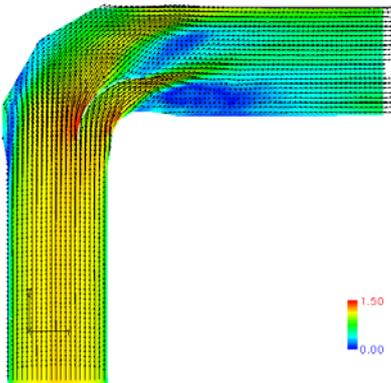
図 3.6 案内板溶接部の応力解析 (流体構造連成)



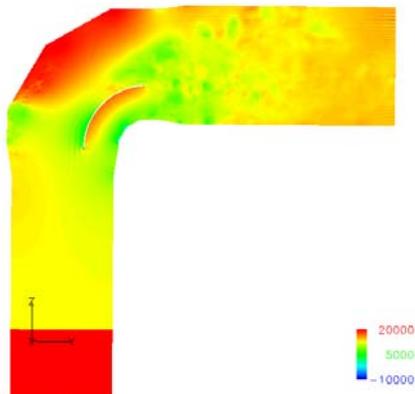
(ii) 案内板の計算格子



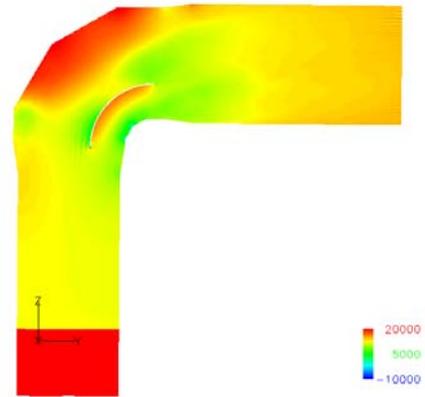
(iii) 瞬時速度



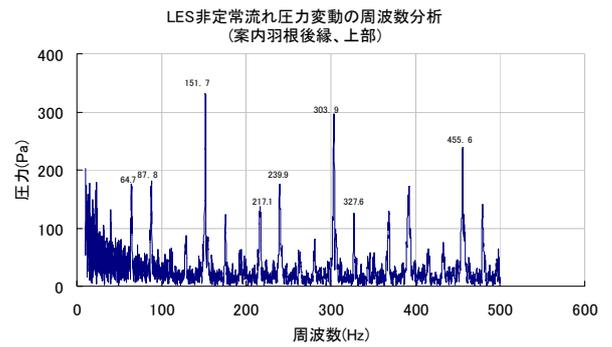
(iv) 平均速度



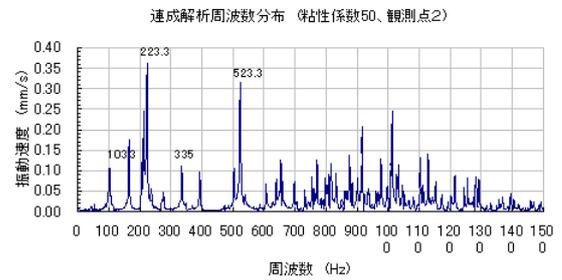
(v) 瞬時圧力



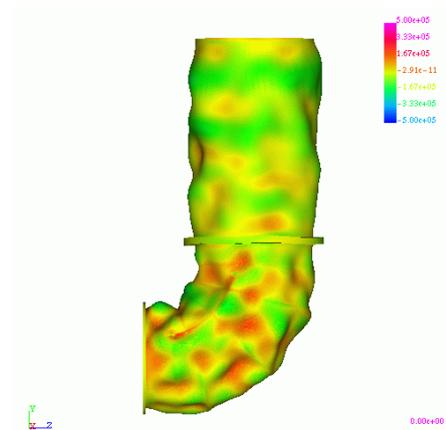
(vi) 平均圧力



(vii) 圧力の周波数分布

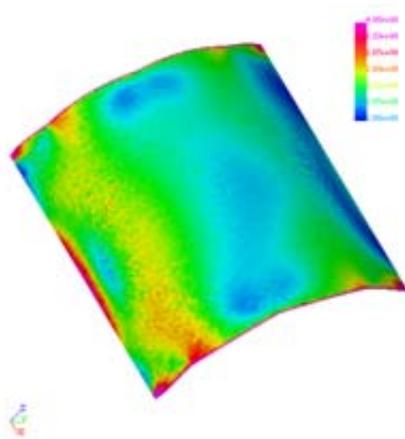


(viii) 振動速度の周波数分布

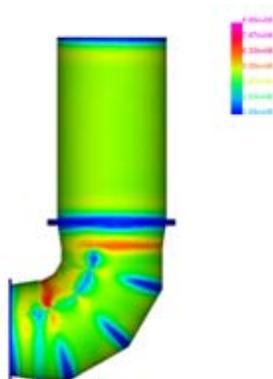


(ix) 振動速度の周波数分布

図 3.6 案内板溶接部の応力解析 (流体構造連成)



(x) 平均応力分布



(xi) 平均応力分布

図 3.6 案内板溶接部の応力解析 (流体構造連成)

4. Ver. 4.1 の操作方法

Ver. 4.1 の操作方法を紹介するために、「T字管」のチュートリアルを以下に示す。

解析概要

本ケースではT字管の解析事例をご紹介します。

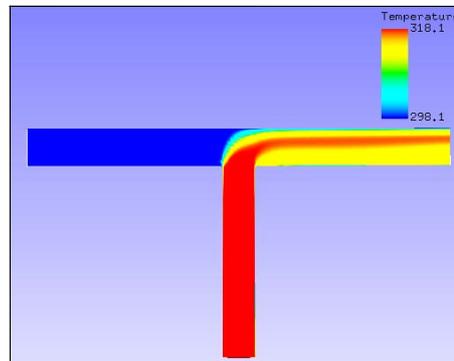


図 1 温度分布

解析条件

本解析における解析基礎条件を以下に示します。

- ・非定常解析
- ・非圧縮流体
- ・時間刻み：0.001s
- ・流体：水
- ・時間積分法：Euler 陰解法
- ・移流項：80%1 次風上差分
- ・圧力解法：SIMPLE 法
- ・乱流モデル：LES (標準 smagorinsky モデル)

初期条件は以下です。

- ・任意値
(一つの例としてここでは全領域流速 0[m/s]、
圧力 101325[Pa]とします)

境界条件と面の名前 (デフォルト値) は以下です。

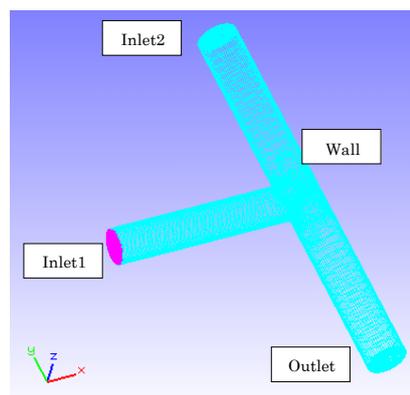


図 2 境界条件

表 1 境界条件の説明

境界名	境界条件
INLET1	318.15[k]、流速固定：50[m/s] (面と垂直方向)
INLET2	298.15[k]、流速固定：10[m/s]
OUTLET2	298.15[k]、流速固定：0[m/s]
WALL	ノースリップ条件

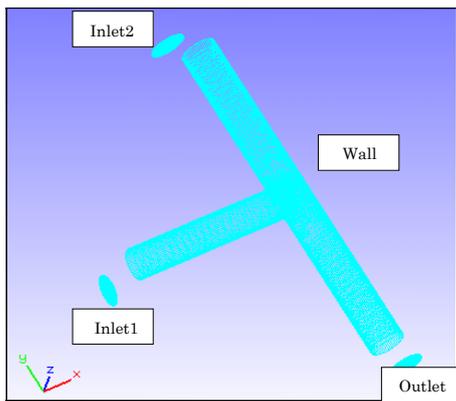


図3 面の名前 (デフォルト値)

解析準備

本解析に必要なファイルは以下の2点です。

【表2 解析に必要なファイル】

ファイル名 (例)	ファイルの名称
	格子ファイル
fflow.ctl	計算制御ファイル

これらファイルの作成方法、作成時の注意点について以下で説明します。

1 格子ファイルの作成方法

【格子ファイル作成の基本】

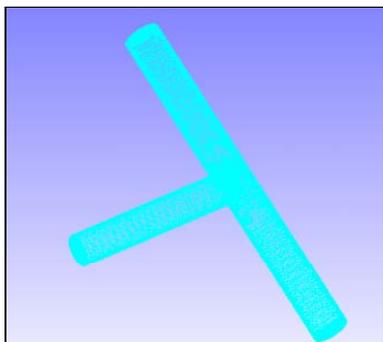
格子データファイルは Advance/REVOCAP(ADAP)または市販のグリッド生成ソフトウェア等を使用し作成してください(ADAPはテトラ格子のみ作成可能です)。FrontFlow/Redの現バージョンでは、Gridgenにより作成した FieldView-Unstructured 形式 (ASCIIのみ) および、FFR-GF形式の格子データを読み込むことができます。なお、格子データの拡張子やファイル数は使用する格子データの形式により異なります。

参考

Gridgenで格子を作成し、FieldView-Unstructured-ASCII形式で格子データファイルを出力するには、Gridgenのコントロールパネルから下記の順にボタンを選択してください(お使いのGridgenのバージョンにより異なる場合があります)。

[Input/Output]>[Grid Pts Export]>[Volumes]>[FV-UNS]>[ASCII]

計算格子作成例は以下です (Gridgenを用いて作成しました。全て六面体メッシュです)。



【図4 計算格子】

2 計算制御ファイルの作成方法

[Step1] 格子ファイルの読み込み
以下では計算制御ファイルの作成手順を説明します。格子ファイルの読み込み

ADAPを起動します

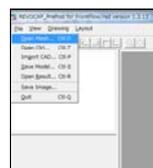
[File]-[Open Mesh]を選択します

- ① 格子データがあるフォルダまで移動し、
- ② 拡張子を選択します。
- ③ 格子データを選択し、OKボタンを押します

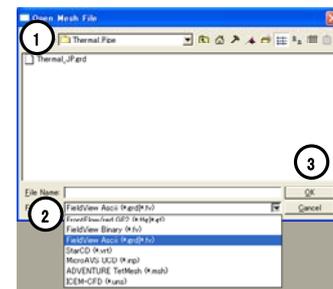
[Step1] 格子ファイルの読み込み



[Step1] 格子ファイルの読み込み

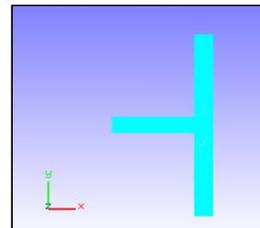


[Step1] 格子ファイルの読み込み



格子ファイルの読み込みが完了すると右図のような画面が表示されます。

[Step1] 格子ファイルの読み込み

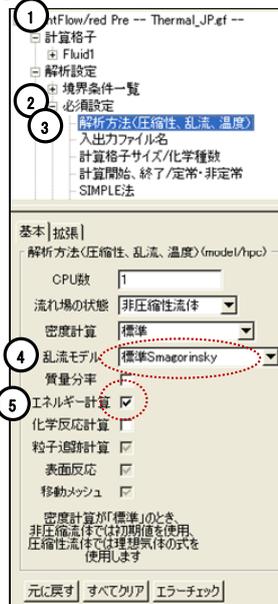


[Step2] 必須設定

[Step2.1] 解析方法 (圧縮性、乱流、温度)

- ① [Step1] で読み込んだ格子ファイル名を選択します
- ② [解析設定]-[必須設定] を展開します
- ③ [解析方法 (圧縮性、乱流、温度)] を選択します
- ④ [流れ場の状態] に [非圧縮流体]、[乱流モデル] に [標準 Smagorinsky] を選択します
- ⑤ [エネルギー計算] にチェックを入れます

[Step2.1] 解析方法 (圧縮性、乱流、温度)

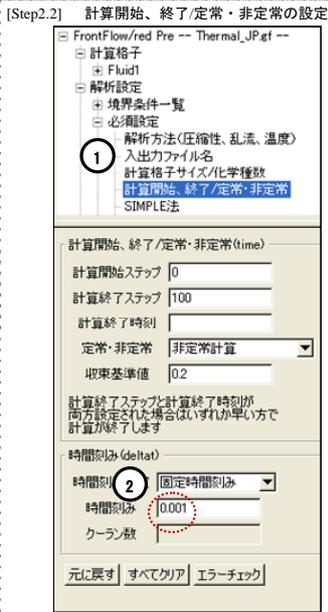


元に戻す すべてクリア エラーチェック

[Step2.2] 計算開始、終了/定常・非定常の設定

①[解析設定]-[必須設定]-[計算開始、終了/定常・非定常]を選択します

②[時間刻み]を0.001 変更します



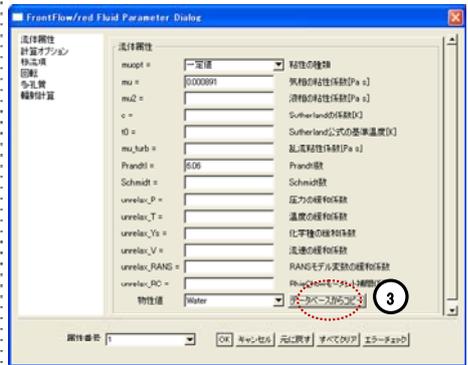
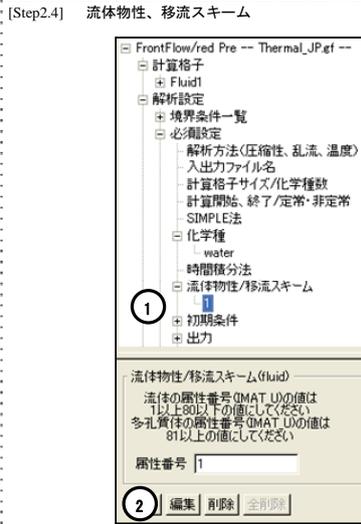
[Step2.4] 流体物性、移流スキーム

①[解析設定]-[必須設定]-[流体物性/移流スキーム]-[1]を選択します

②編集ボタンを押します

ダイアログが開いたら[物性値]の欄で[Water]を選択し、[データベースからコピー]ボタンを押してください。物性値が必要な項目に自動的に入力されます。

OK ボタンを押してダイアログを閉じてください。



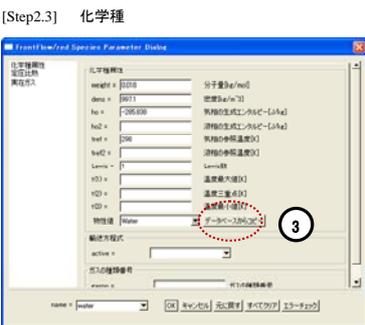
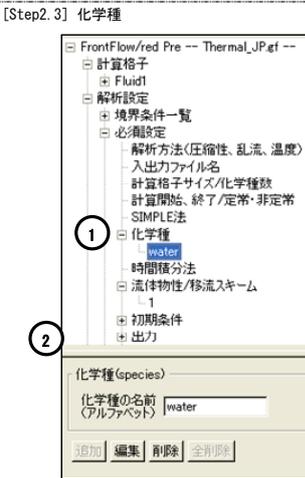
[Step2.3] 化学種

①[解析設定]-[必須設定]-[化学種]-[water] (水) を選択します

②編集ボタンを押してください

③ダイアログが開いたら[物性値]の欄で[Water]を選択し、[データベースからコピー]ボタンを押してください。物性値が必要な項目に自動的に入力されます。

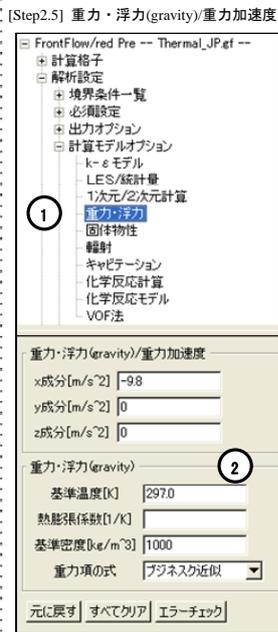
OK ボタンを押してダイアログを閉じてください。



[Step2.5] 重力・浮力 (gravity)/重力加速度

①[格子ファイル名]-[解析設定]-[計算モデルオプション]-[重力・浮力]を選択します

②図のように入ります。



[Step3] 境界条件
 [Step3.1] 流入境界

① [格子ファイル名]-[計算格子]を展開します
 ② [Fluid1]を展開します
 ③ 境界名(ここでは Inlet)を右クリックします
 [境界条件]から INLET を選択し、設定ボタンを押します。

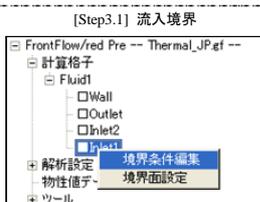


境界面の名前の前の記号が黒く塗り潰され、境界条件が設定されたことを示しています。

これで境界条件の既定値の適用は完了しました。

ここでは更に既定値を修正するための作業を行いません。

ツリーの Inflow 上で右クリックするとポップアップメニューが表示されるので、「境界条件編集」を選択します。



ダイアログが表示されるので、左の覧から「流速・温度/圧力」を選択します。画面が切り替わります。ここで t の欄に 318.15 を入力し、u の欄に 50 を入力します。

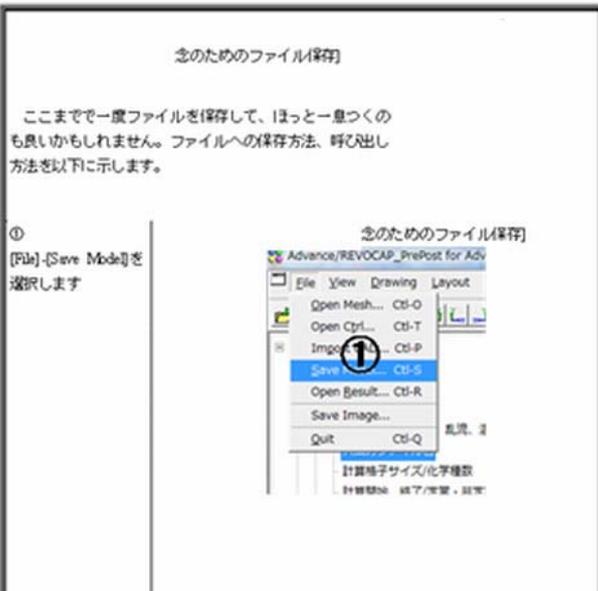
OK ボタンを押すと変更が完了します。

Inlet2 の境界面についても同様の設定をしてください。ただし既定値の変更は v を -10 に設定するのみです。

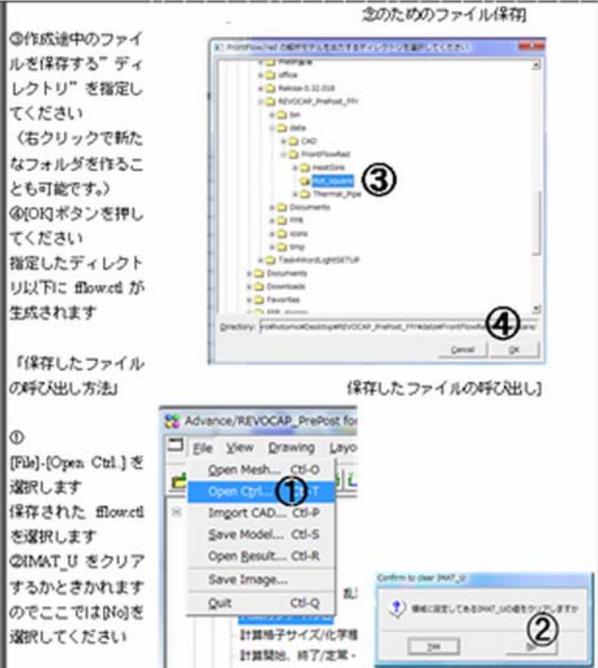
[Step3.2] その他の境界の設定

境界面名	既定の境界条件名
wall	WALL_NO-SLIP
Outlet	OUTLET

[Step3.2] 他の境界面については表のように既存の境界条件を適用してください。既定値の変更は不要です。



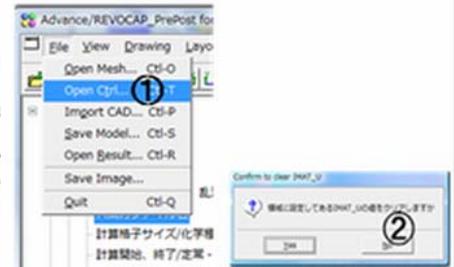
① [File]-[Save Mode]を選択します



②作成中のファイルを保存する”ディレクトリ”を指定してください (右クリックで新たなフォルダを作ること可能です。)
 ③OKボタンを押してください
 指定したディレクトリ以下に flowctd が生成されます

「保存したファイルの呼び出し方法」

① [File]-[Open Ctrl]を選択します
 保存された flowctd を選択します
 ②IMAT_U をクリアするかときかれしますのでここでは [N] を選択してください



[Step4] 制御ファイルの転送

① [格子ファイル名]-[ツール]-[ファイル転送]を選択します

② 転送先の情報を入力し、転送方法を選択します

③ 転送実行ボタンを押します

④ 問題なく転送されると「ファイルの転送が完了しました」と告知されます

[REVOCAP/windows ご使用の場合]

① [格子ファイル名]-[ツール]-[ローカル実行]を選択します

② 保存場所ボタンを押して、ダイアログを表示し、計算格子ファイルがあるフォルダを選択してください。

③ 解析制御ファイルの上書き保存のボタンを押してください。

④ ローカルで preflow の「実行」ボタンを押してください。

前処理

計算を実行するディレクトリ上に

- ・ 計算制御ファイル
 - ・ 格子ファイル
- の2点をご準備ください。

[UNIX/Linux/cygwin ご使用の場合]

1. カレントディレクトリを作業ディレクトリに変更し、preflow を実行します。

```
% cd work [Enter キー]
% preflow [Enter キー] *
```

*) インストール時に環境変数 PATH を設定しなかった場合は、下記のように preflow プログラムを FrontFlow/Red インストールディレクトリから作業ディレクトリにコピーして実行してください。

```
% cp /home/user_id/FrontFlow_Red/bin/preflow / [Enter キー]
% ./preflow [Enter キー]
```

ここではインストールディレクトリが「/home/user_id/FrontFlow_Red」であった場合を仮定しています。

[Windows ご使用の場合]

1. 実行プログラムを作業ディレクトリにコピーします。
(FrontFlow/Red のインストールフォルダを「C:\FrontFlow_Red」と仮定します。)
2. 「C:\FrontFlow_Red\bin\Win32」ディレクトリ内のすべてのファイルを作業フォルダにコピーしてください。
(作業ディレクトリの配置は、パスに全角文字や半角スペースが含まれなければ自由に決めることができます。ここでは作業ディレクトリを C ドライブ直下「C:\Work」に配置したと仮定します。)
3. コマンドプロンプトを開き、下記コマンドを実行します。

```
% cd C:\Work [Enter キー]
% preflow [Enter キー] *
```

* 「preflow.exe」と入力しても実行できます。

参考

コマンドプロンプトは、Windows XP の場合、次のメニューから起動することができます。

[スタート]>[すべてのプログラム]>[アクセサリ]>[コマンドプロンプト]

右図のようなエラー出力がされた場合は保存場所を再度確認してください。



preflow が終了すると右図のようなメッセージが出力されます。



設定フォームにおいてログの保存にチェックを入れている場合は、右のようなダイアログが表示されます。Yes を選択すると、preflow のログを確認できます。



もし間違っている部分がどこかわからない場合は「./data/FrontFlowRed/Thermal_Pipe /」(ディレクトリ REVOCAP_prePost_FFR からの相対パス)以下に予めある fflow.ctl を読み込んで実行してください。

prefflow を起動すると、以下のようなメッセージが表示されます(表示される内容は、お使いの FrontFlow/Red のバージョン、および計算制御ファイルの設定内容によって異なることがあります)。

【図 5 prefflow を実行したときのログ画面】

```

=====
|                               Welcome to FrontFlow                               |
=====
#####
### Scalar Information          #####
### Scalar No.      Scalar Name  #####
#####
number of chemical species : 1
1 air      mi = 0.29000E+01 [kg/mol]      Ri = 0.28669E+03 [J/(K.kg)]
          cp = 0.10040E+04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

=====
|                               LIST SERIAL CPU MESH                               |
=====
#####
### Initializing... Please wait.
### Reading FFR Grid element type field...
### Reading FFR Grid boundary type field...
### Reading FFR Grid vertices coordinate field...
### Reading FFR Grid Boundary Face field...
### Reading FFR Grid Element field...
### LIST FACE ...
### INTER FACE: NIFACE= 56740
### TOTAL FACE: NFACE= 59540
### LIST FACE ...
### INTER FACE: NIFACE= 19064
### TOTAL FACE: NFACE= 20384
### LIST FACE ...
### LIST FACEBC ...
### LIST FACEIN ...
.
.
. (以下略)
.
.

```

prefflow の実行には、計算条件によって数分～数時間かかることがあります。

正常に動作が終了すると、以下のようなメッセージが表示されます。作業ディレクトリ内に dimen_h_serial (インクルードファイル) などが生成されます。

計算制御ファイルの設定に何か問題がある場合は、エラーメッセージを表示して途中で停止します。マニュアルの××をご参照の上、計算制御ファイルを修正し、prefflow を再実行してください。

【図 6 前処理正常終了時のログ画面】

```

.
.
. (表示の続き)
.
### ICALL= 2 At SF= 15300 -0.542686767166157
### SF between ICVA= 2303 and ICVB= 4106
### Warning: Opposite Dir. between Edge vector and SF vector
### ICALL= 2 At SF= 15306 -0.5607377504949493
### SF between ICVA= 2305 and ICVB= 4112
### Warning: Opposite Dir. between Edge vector and SF vector
### ICALL= 2 At SF= 15310 -0.721761039350652
### SF between ICVA= 2307 and ICVB= 4116
### Warning: Opposite Dir. between Edge vector and SF vector
### ICALL= 2 At SF= 15318 -0.539797687845408
### SF between ICVA= 2310 and ICVB= 4124
### READ_INITIAL...
### READ_SOURCE...
##### Start measuring all Distance #####
Processing ... NO. 2000 FINISHED, Dis. & BC 0.7725E+01 1713
##### End measuring all Distance #####
### list_output_geom...
### TOTAL MATERIAL NUMBER= 1
### MATERIAL CV NO.=(NCVIN) 1 => 2311
### MATERIAL CV NO.=(NCV ) 1 => 2311
### TOTAL MATERIAL NUMBER= 1
### MATERIAL CV-FACE NO.= 1 => 15320
### list_output_grid...
### list_output_grid FFR-GF...

=====
### dimen_h_serial file has been created successfully
### %%% RUN TIME (S): 0.000000E+00
### %%% Pre-Exec terminated normally
=====

```

[注意] prefflow を実行したときに、次のようなメッセージが表示されて入力待ち状態になることがあります。

【図 7 前処理途中での入力待ち画面】

```

.
.
. (表示の続き)
.
### ICALL= 2 At SF= 15318 -0.539797687845408
### SF between ICVA= 2310 and ICVB= 4124
### LIST PAIR ...
### TOUCH-INLET BC FACE NUMBER : 0
### READ_INITIAL...
### READ_SOURCE...
### list_wall_distance...
### Wall Distance File existed.
Will you calculate again and over write it ? (n/y)

```

前処理では各格子点から最近接壁面までの距離を計算して、壁面距離ファイルに書き出します。作業ディレクトリ内に壁面距離ファイルが存在する場合は、壁面距離を再計算するか、既存のファイルのデータを使用するか選択することができます。再計算する場合には

「y」を入力します。また、すでに壁面距離が正しく計算されている場合には、「n」を入力して壁面距離計算をスキップすることができます。

計算実行

ここまでで作業ディレクトリには以下のファイルが存在しています。

【表 3 計算実行時に存在しているファイル】

ファイル概要	ファイル名
計算制御ファイル	fflow.ctf
格子ファイル	rot_square.ffg (一例)
プリプロセッサ	prefflow
配列のディメンジョンファイル	dimen_h_serial
壁面距離ファイル	distance
ジオメトリファイル	geom
ジオメトリ変換ファイル	geom.frontflow
マテリアルファイル	MAT_CVG

以下で計算実行手順をご説明します。

[UNIX/Linux/cygwin ご使用の場合]

カレントディレクトリを作業ディレクトリに変更し、fflowS を起動します。

```
% fflowS [Enter キー] *
```

* インストール時に環境変数 PATH を設定しなかった場合は、下記のように fflowS プログラムを FrontFlow/Red インストールディレクトリから作業ディレクトリにコピーして実行してください。

```
% cp /home/user_id/FrontFlow_Red/bin/fflowS / [Enter キー]
% ./fflowS [Enter キー]
```

ここではインストールディレクトリが「/home/user_id/FrontFlow_Red/」である場合を仮定しています。

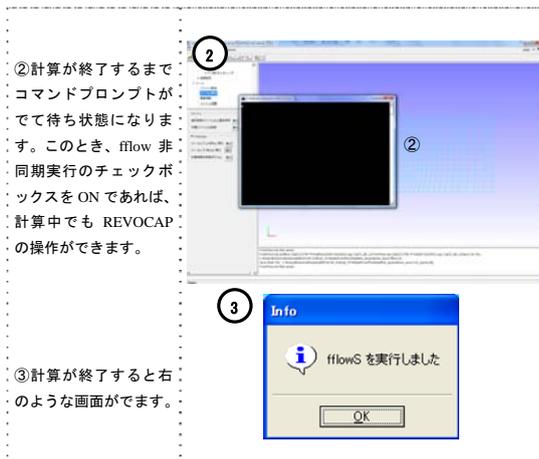
[Windows ご使用の場合]

カレントディレクトリを作業ディレクトリに変更し、コマンドプロンプトより fflowS を起動します。

```
% fflowS [Enter キー]
```

[REVOCAP/windows ご使用の場合]

The screenshot shows the REVOCAP/windows application window. On the left, a menu is open with the following options: ① ローカルで「fflowS 実行」ボタンを押してください。 (Click the "fflowS execution" button locally). On the right, the "Thermal_JPg" project is selected, and the "実行" (Execute) button is highlighted with a red circle and the number 1. Below the menu, there are sections for "ファイル" (Files) and "ローカルで FFR 実行" (Execute FFR locally). The "ファイル" section includes options for "保存場所" (Save location), "解析制御ファイルの上書き保存" (Overwrite analysis control file), and "中間ファイルの削除" (Delete intermediate files). The "ローカルで FFR 実行" section includes checkboxes for "ログの保存" (Save log), "fflowS 非同期実行 (プリプロセッサで起動)" (fflowS asynchronous execution (start with preprocessor)), and buttons for "prefflow 実行" (Execute prefflow), "fflowS 実行" (Execute fflowS), "fflowS 停止" (Stop fflowS), and "計算結果を交換 (付2/cv)" (Exchange calculation results (2/cv)).



メインソルバー実行中は、計算ログが標準出力に出力されます。

【図 8 メインソルバー実行時のログ画面】

```
#####
##### WELCOME TO FrontFlow/ved #####
##### FrontFlow/ved Version 2.0 #####
##### Year:2004 Mon:07 Date:15 #####
##### Hour:0010 Min:07 Sec:12 #####
#####
#####
#####
Domain number : 1
transport model : constant
viscosity [Pa s] : 0.182E-04 (mu0)
Schmidt number : 1.000 (Sc)
Prandtl number : 0.720 (Pr)
viscosity : m = mu0
conductivity : l = Cp*mPr (Cp:isopiestic specific heat)
diffusivity : D = m/(r*Sc) (r:mass density)
#####
number of chemical species : 1
1 air m1 = 0.29000E-01 (kg/mol) R1 = 0.28669E+03 (J/K/kg)
cp = 0.10040E-04 0.00000E-00 0.00000E-00 0.00000E+00 0.00000E+00 Formation enthalpy : 0.00000E+00
##### Wall Distance File existed.
Will you calculate again and over write it ? (n/y)
```

前処理のときと同様、壁面距離を再計算するか、既存のファイルのデータを使用するかの選択を入力します。通常は前処理段階で壁面距離が正しく計算されているので、

「n」を入力して壁面距離計算をスキップします。再計算する場合には「y」を入力します。例えば

n [Enter キー]

としてください。

計算が正常に進行している間は、下記のようにモニター値が各時間ステップで出力されます。

【図 9 メインソルバー実行途中のログ画面】

```
=====
TIME STEP : 6
TIME : 0.6000E+00 TIME INTERVAL: 0.1000E+00 MAX.COURANT : 0.5760E-00 AT VERTEX : 289
-----
U V W P T K EPS COMP_1
MONI : -8981E+00 0.2698E+00 -7791E+00 0.1000E-02 0.3007E+03 0.0000E+00 0.0000E+00 0.1000E+01
MIN : -6990E+01 -7673E+01 -1350E+02 -9018E+01 0.2270E+03 0.1000E+26 0.1000E+26 0.1000E+01
MAX : 0.5570E+01 0.8503E+01 0.1107E+02 0.7349E+02 0.5416E+03 -1.000E+26 -1.000E+26 0.1000E+01
OUTER-ITER NO. : 2
-----
INNER-ITER :
ITER : 2 2 2 14 2 0 0 0
RES : 0.1000E-05 0.1000E-05 0.1000E-05 0.1000E-05 0.1000E-05 0.0000E-00 0.0000E+00 0.1000E-01
ABS : 0.1000E-05 0.1000E-05 0.1000E-05 0.1000E-05 0.5802E-02 0.0000E+00 0.0000E+00 0.1000E-05
OUTER-ITER ERROR : CONVERGENCE TOLERANCE : 0.2000E-00
ERR : 0.7360E-01 0.9620E-01 0.1416E+00 0.1360E+00 0.4005E-01 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
=====
```

計算が正常に終了すると、以下のようなメッセージが表示されます。

【図 10 メインソルバー正常終了時のログ画面】

```
=====
output restart file, iter=( 23), time=( 2.30000D+00)
=====
execution terminated normally
=====
Wall time : 0000:00:05 | Stop in Year:2004 Mon:07 Day:15 Hour:11 Min:17 Sec:30
STOP Subroutine name: FRONTFLOW
=====
```

後処理 (可視化作業)

メインソルバーの実行が正常終了すると、計算結果ファイルが書き出されます。計算結果ファイルは計算制御ファイルの入出力ファイルで指定した文字列に拡張子「.frontflow」を追加したファイル名で書き出されます。間隔は計算制御ファイルの出力で指定したステップごとに書き出され、ファイル名後にステップ番号がついて出力されます。

可視化ファイル作成のために必要になるファイルは以下です。

ファイル概要	ファイル名
計算制御ファイル	fflow.ctl
ジオメトリ変換ファイル	geom.frontflow
計算結果ファイル	result.frontflow

以下では、格子データ形式を FrontFlow native 形式、出力ファイルを RES.fv とします。

FieldView UNFORMATTED 形式に変換するには、作業ディレクトリにおいて、下記のオプションで ffr2viz を実行します。

```
% ./ffr2viz -r result.frontflow -g geom.frontflow -gf FF -o RES.fv -rf FVA [Enter キー]
```

FieldView ASCII 形式に変換するには、下記のように実行します。

```
% ffr2viz -r result.frontflow -g geom.frontflow -gf FF -o RES.fv -rf FVA [Enter キー]
```

AVS 形式に変換するには、下記のように実行します。

```
% ./ffr2viz -r result.frontflow -g geom.frontflow -gf FF -o RES.fv -rf AVS [Enter キー]
```

注) 上記の例は全て結果ファイル名が result.frontflow のときを想定しています

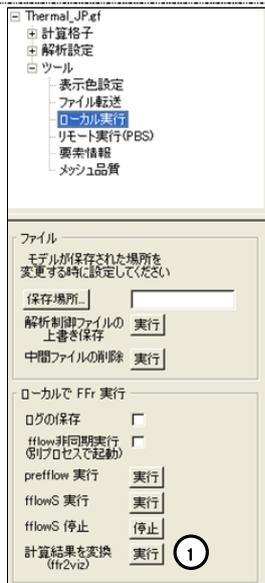
ffr2viz が正常終了すると下記のようなメッセージが表示され、(オプションや格子データ形式によりメッセージは若干異なります) 可視化ファイル RES.fv ができます。

【図 11 ffr2viz 正常終了時のログ画面】

```
#####
##### * FFR2VIZ * #####
##### ver.2.02 (07/29/2004) #####
##### - (c) AdvanceSoft Corporation - #####
#####
#####
#####
Convert Single CPU data.
### Reading FFR Grid element type field...
### Reading FFR Grid boundary type field...
### Reading FFR Grid vertices coordinate field...
### Reading FFR Grid Boundary Face field...
### Reading FFR Grid Boundary Face field...
### Reading FFR Grid Boundary Face field...
.
.
. (略)
.
##### Variables number and name : 5 tur_mu
##### Variables number and name : 6 velo_u,Velocity
##### Variables number and name : 7 velo_v
##### Variables number and name : 8 velo_w
##### writing FV Header completed.
##### Writing FV variable data ...
##### Hexa elements= 19380
##### Appending data for FV completed.
END: ffr2viz conversion is successfully completed.
```

[REVOCAP/windows ご使用の場合]

①計算結果を変換
(ffr2viz) の「実行」ボ
タンを押してください。

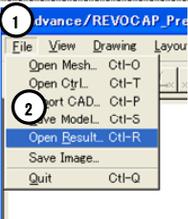


②変換が終了すると右
図のような画面が出力
されます。



結果ファイルの取り込みは以下の手順で行います。

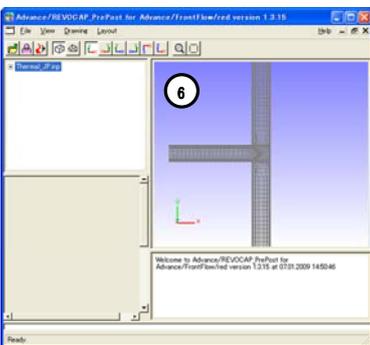
①、②
[File]-[Open
Result]を選択し
ます



③Fileの種類を
inp形式に合わ
せます



④ファイルを選
択します
(ディレクトリ
REVOCAP_preP
ost_FFrからの
相対パス)

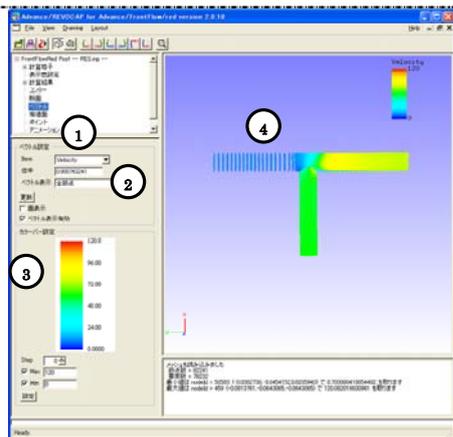


⑤OKボタンを
押します

⑥読み込みが完
了したときの画
面です

1、速度場の表
示方法

① [計算結果フ
ァイル名]-[計算結
果]-[ベクトル]を選
択します

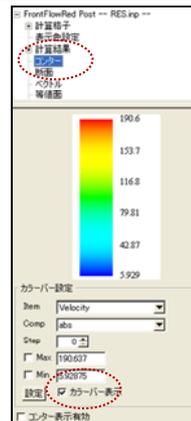


② [Item]の項
目で [Velocity]
を選択しま
す

③ [ベクトル表
示有効]にチ
ェックをい
れます。こ
こでは「面
表示」はOFF
にします。

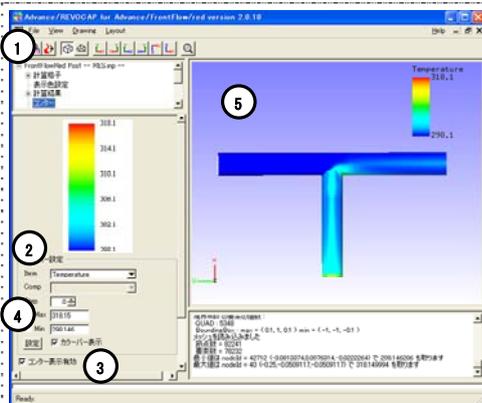
④ 速度場が表
示されます

カラーバーを
表示させる場
合は、ツリーか
ら[コンター]
を選択し、図の
様に「カラーバ
ー表示」をON
に設定してく
ださい。



2、温度の表示方
法

① [計算結果
ファイル名]-[計算結
果]-[コンター]を選
択します

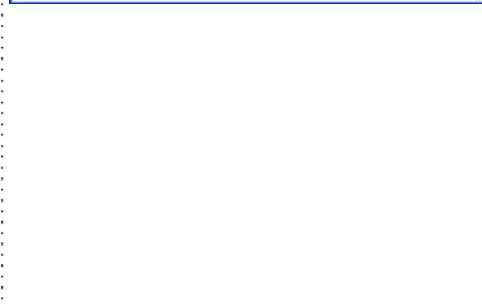


② [Item]の項
目で [temperat
ure]を選択し
ます [Step]
で0を選択
する(表示
が最もスム
ーズになり
ます)

③ [コンター
表示有効]
にチェッ
クを入れます

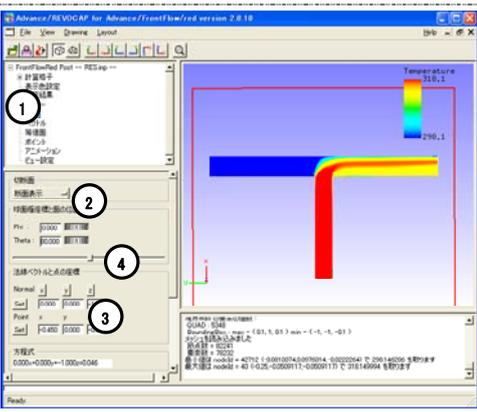
④ [設定]ボタ
ンを押しま
す

⑤ 温度が表
示されます



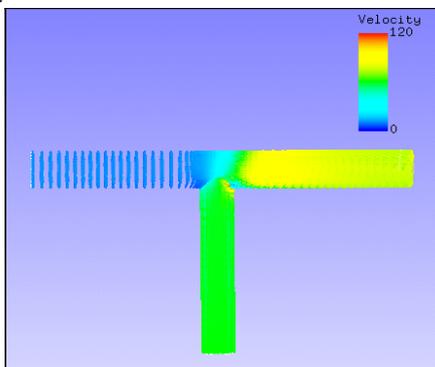
3、断面の表示方法

- ① [計算結果] ファイル名-[計算結果]-[断面] を選択します。
- ② コンボボックスで[断面表示]を選択します。
- ③ z ボタンを押すと、z 方向の断面の物理量を表示できます。
- ④ スライダーによって面の位置を変更できます。
- ⑤ 右図は断面表示の一例です。



計算結果

・速度分布



・温度分布

