

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red

大西 陽一* 塩谷 仁*

Advance/FrontFlow/red

Yoichi Onishi* and Hitoshi Shiotani*

Advance/FrontFlow/red は乱流、混相流、反応流、自由表面流など各種物理モデルを備えた 3 次元流体解析ソフトである。近年、原子力分野においても安全性に関する現象の徹底的な解明のため、3 次元詳細解析の用途が増加している。本稿では Advance/FrontFlow/red（以下 AFFr）の原子力分野における適用例と使用方法について紹介する。

Key word: 3 次元流体解析、混相流、乱流、境界条件

1. はじめに

原子力プラントの安全性評価においてはプラント内部での気液二相流特性の解明が不可欠であり、原子力における熱流体研究が沸騰現象・ドライアウト等のデータの蓄積を通じて流体力学分野全体へ多大なる貢献をした。試験結果をもとに作成された構成式が組み込まれた 1 次元二相流れとして確立され、プラント全体の安全解析コードとして利用されている。[1]

しかし 1 次元安全解析コードに組み込まれている構成式は、システムの構成や形状・条件が異なるとその都度修正する必要があり、単相流で実施されている乱流混合長に基づいた 3 次元乱流解析の領域にまで至っていない。例えば代表的な安全解析コードに採用されている構成式は、着目する空間スケールが個々の気泡サイズよりもはるかに大きい場合、機器固有のスケールで平均化され、流路断面内でのボイド率や速度分布が流動場に及ぼす影響は普通無視されている。

近年大型コンピュータの性能が飛躍的に向上するにつれ、できるだけ微視的な物理現象に基づいた流体解析を実施することで現象をより深く理解しようとする研究が行われている。個々の気泡の界面を追跡することで気液間の間欠的な現

象まで捉えようとする解析（自由表面解析）や、構成式を用いながらも流路内のボイド率分布や流速分布、乱流の効果も取り入れた 3 次元二流体解析等が実施されている。しかし、コンピュータ性能の進歩は目覚ましいながらも、これら 3 次元解析の計算量は 1 次元解析の計算量と比較して指数的に増加するため、その適用範囲はプラント全体の中の 3 次元流動特性が本質的な理解に重要だと予測される一部の領域での利用にとどまっており、実績のある 1 次元安全解析コードと補完的に用いるのが現状である。現状の計算負荷の高い 3 次元流体解析技術を安全解析として有効に利用するためには、

- ・乱流モデル、計算条件の設定
- ・境界条件の適切な設定
- ・3 次元で得られた結果の適切な評価

を十分によく理解して進める必要がある。

本稿では、AFFr 解析事例の一部の紹介と、3 次元乱流解析の使用例として T 字管解析を例題に説明する。

2. AFFr の計算事例

ここでは、まず AFFr で解析した事例をいくつか紹介する。原子力分野でも重要となる事例を複数選択した。

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2.1. 自由表面流

気液間の振る舞いは基本的に間欠的な非定常現象である。二流体モデル等で利用されている構成式は空間で平均化されているため、気液間の界面構造は消去しており、その構成式を用いた解析で格子サイズをいくら小さくしても気液界面流れによる間欠性の本質を捉えることは不可能である。気液界面構造を捉えた解析を実施するためには表面張力の効果を考慮しなければならず、そのため使用する解析コードは界面曲率を精度よく求めることができ、界面を精度よく追跡することが可能でなくてはならない。AFFr では、流体の占有率(VOF)の輸送を解く手法:VOF 法を採用している。気液界面は VOF 値から決定され、界面がぼやけずシャープに保たれるように移流項スキームに CICSAM 法を採用している。表面張力の算出には CSF 法と呼ばれる界面に働く力を体積力に置き換える手法で運動方程式に組み込んでいる。[2],[3]

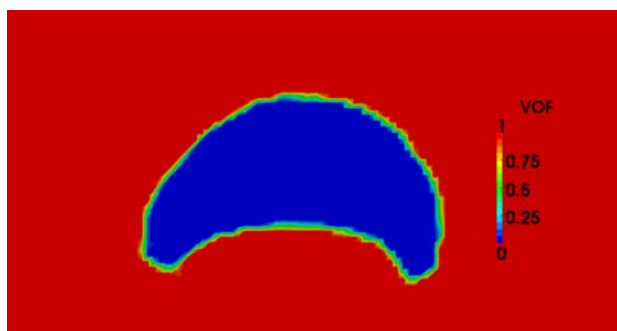


図 1 VOF 値断面図

図 1 は水の中を気泡が上昇する流れ解析の気泡形状の結果である。気泡が移動する系から見ると静止する気泡の上から液体がぶつかり、抵抗を受けてある形状に落ち着く。図 1 に見られる気泡形状は、表面張力と重力、密度差で特徴づけられる。このような自由表面流解析では、通常のクーラン数による時間刻み設定は表面張力の時定数を考慮したもの置き換わり、

$$\Delta t < \sqrt{\frac{\rho(\Delta x)^3}{2\pi\sigma}} \quad (1)$$

を満たすような時間設定で解析を実施する必要がある。ここで ρ は密度、 Δx は格子サイズ、 σ は表面張力である。

2.2. キャビテーション

機器をコンパクトにした結果、局所的に流速が増加し、圧力が液体の飽和蒸気圧以下となった時にキャビテーションが発生し機器の損傷を引き起こす。特にナトリウム冷却システムを採用している FBR では、構造物の安全性評価上重要な現象である。AFFr では、気液速度差を無視した均質媒体モデルに基づいたキャビテーションモデルを有している。

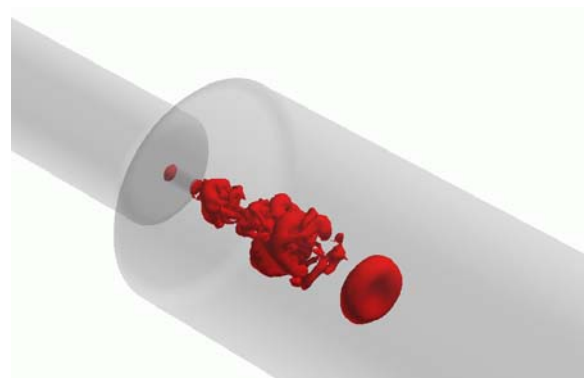


図 2 オリフィスによる
キャビテーション噴流解析

図 2 は AFFr のキャビテーションモデルを使用したオリフィス近傍のボイド率分布である。オリフィス部通過時に流速が増加した結果キャビテーションが発生している。乱流モデルには LES を用いて非定常解析を実施した。ボイド率の等値面は間欠的に発生消滅による非定常運動を繰り返し、現象の非定常性を捉えた結果となった。

2.3. 燃焼

燃焼は発熱を伴う激しい化学反応で、反応特性時間が $1e-5\text{sec} \sim 1e-8\text{sec}$ と通常の流体解析特性時間とかい離していることもあり、何らかの燃焼モデルを用いて燃焼流動解析するのが一般である。用いる燃焼モデルは、燃料となる化学種と酸化剤となる化学種があらかじめ混ざっている予混合燃焼、流れの中で拡散により混合して燃焼す

る拡散燃焼、というように大きく 2 つの形態に分けられる。AFFr では拡散燃焼の場合は燃料と酸化剤の混合率の輸送を解き得られた混合率の結果から反応後の化学種を算出する flamelet モデル、予混合燃焼の場合は、反応進行度の輸送式を解いて火炎面の位置を予測するモデルを有している。ただしどちらの燃焼形態のモデルも、着火消化までは扱えず、何らかの実験相関式を用いて模擬するのが一般である。着火消化までをきちんと扱うには、素反応を直接扱える必要がある。AFFr では、詳細素反応を可逆反応、高压での第三体反応等も考慮して扱える。

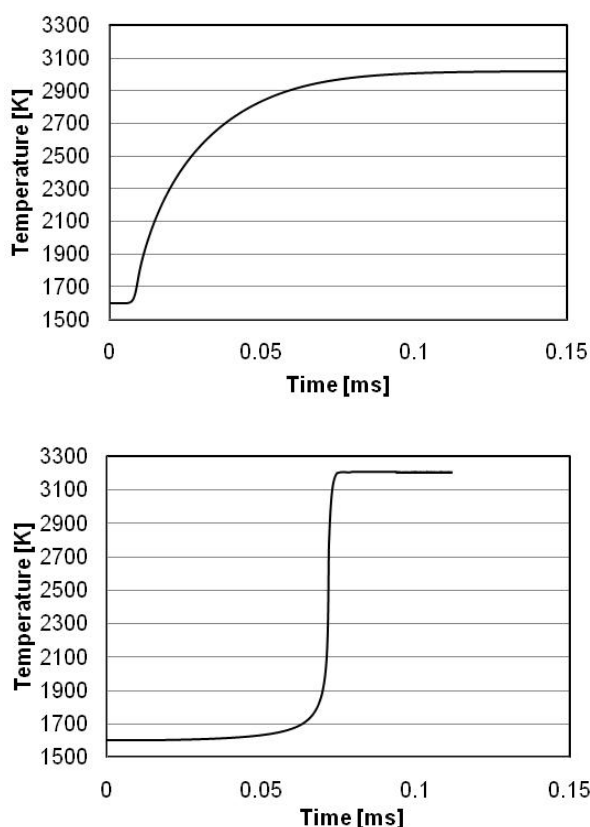


図 3 素反応解析による温度時系列（上：水素空気燃焼、下：メタン空気燃焼）

図 3 上図は水素-酸素系で 8 化学種の 16 素反応スキームを用いた場合の温度時系列データである[4]。初期条件は温度 1600K、圧力 1 気圧で設定しており、約 0.1 秒かけて燃焼状態になっているのが分かる、図 3 下図は、炭化水素メタンを燃料とした場合の温度時系列で、53 化学種、325 反

応式を用いた解析である[5]。炭化水素が燃料となった場合には水素に比べて急激な温度上昇が起こる。また高圧縮された場合は温度上昇時間が異なる。どのような混合状態で何秒後に着火するかしないかは、このように複雑な素反応式を用いて流体解析を実施する必要があるが、流体解析予測ツールとして用いるには先に述べたように特性時間の問題を克服する必要がある。

2.4. 粒子追跡

気液二相流では、流動条件によりさまざまな流動様式が生じる。連続相である液相の中に気泡が分散しているような気泡流、または連続相としての気相の中に液滴が分散しているような噴霧流の場合は、気泡もしくは液滴を粒子のように扱って計算した方が二相流の挙動をより正確に予測できると考えられている。

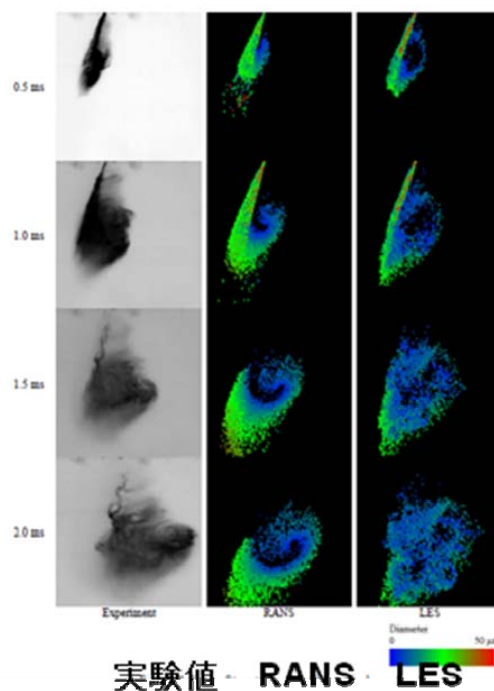


図 4 液滴追跡法を用いた噴霧解析[6]

図 4 は、噴霧状態を乱流モデルに LES を用いた場合と RANS モデルを用いた場合で比較したものである。乱流モデルに LES を選択した方が噴霧状態を良く再現できていることが分かる。

粒子追跡法の適用先としては、PWR 燃料集合

体である。我々は AFFr をベースとした液滴追跡手法の整備と開発を JNES からの委託事業として実施してきた経験がある。[7]

3. AFFr の概要

前章までに事例紹介した AFFr の機能をここで簡単に説明する。AFFr は多成分系を考慮した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 モデルを実装している。流体の圧縮性を考慮することで浮力の影響なども扱うことができる。熱解析に関しては、化学反応モデルや輻射モデルを実装し、固体との連成も扱えるため、燃焼や高温固体からの発熱を伴う計算にも適用できる。また、AFFr は単相の流れを扱うソフトウェアであるが、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 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

項目	機能
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
セル形状	・六面体（ヘキサ）、四面体（テトラ）、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
輻射	・有限体積法 ・ゾーン法 ・モンテカルロ法

項目	機能
多孔質	・ベキ乗則 ・Darcy 則
流体音	・Lighthill-Curl モデル ・Ffowes 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 ・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

4. 計算実行の流れ

計算実行までの手順の概略を紹介する。

4.1. ソフトウェアの構成

Advance/FrontFlow/red は以下のモジュールで構成される。

プリ処理	prefflow
単体計算用ソルバ	fflowS
並列計算用ソルバ	fflowHPC
可視化ファイル作成	ffr2viz
アニメーションファイル作成	ffrmovie
粒子追跡データ変換	ffr2vizp
騒音解析データ処理	sal
プローブ点データ処理	gfconv

4.2. 作業手順

計算実行までの流れは以下の通りである。

(1) メッシュファイルの作成

Advance/FrontFlow/red は非構造格子系のソルバでセル形状としては、テトラ、ピラミッド、プリズム、ヘキサに対応し、これらが混合したデータを扱うことができる。メッシュ作成は Advance/Revocap や Cube-it を使用するが、その他の市販メッシャーで作成されたデータも一部扱うことができる。

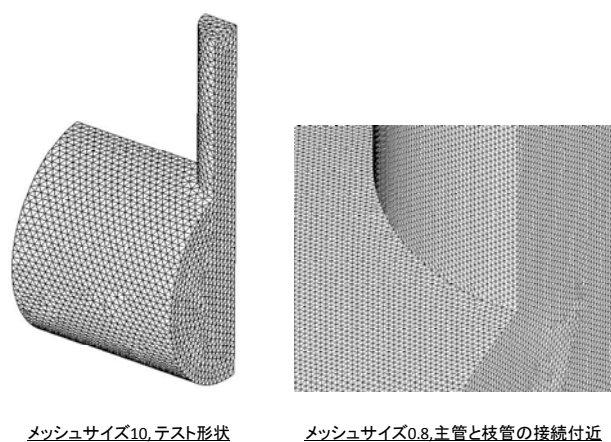


図 5 Cube-it を利用して作成した合流管メッシュ図

図 5 に Cube-it を利用して作成した T 字管の格子図の例を載せる。

(2) 計算制御ファイルの作成

計算条件は fflow.ctl という名称で計算制御ファイルを作成し、必要な変数を記述する。Advance/FrontFlow/red は fortrn90 をベースに作成されたソフトウェアで計算制御ファイルは fortran の namelist 形式で記述する。具体的な設定方法は 5 章で示す。

(3) プリ処理の実行

1.2 で作成したメッシュファイルと計算制御ファイルを作業ディレクトリに置き、prefflow を実行すると、計算に必要なファイルが作成される。単体計算で作成されるデータは表 2、並列計算で作

成されるデータは表 3 の通りである。なお、並列数を変える場合、乱流モデルを RANS から LES に変える場合など一部の計算条件が変更になった場合、prefflow の再実行が必要となる。

表 2 prefflow で作成されるデータ（単体計算）

ファイル名	内容
dimen.h.serial	配列の大きさ
Distance	壁面からの距離
geom	計算用形状データ
geom.frontflow	可視化用メッシュデータ
MAT_CVG	マテリアルの情報

表 3 prefflow で作成されるデータ（並列計算）

ファイル名	内容
dimen.h.serial	配列の大きさ
geom.frontflow	可視化用メッシュデータ
test.m	metis の入力
test.m.part.###	metis の出力（CPU 毎の Node の割り振り）
以下はサブディレクトリ（hpc_####）内に作成	
Bund_hpc	境界のデータ
Comm_hpc	通信のテーブル
dimen.parm	配列の大きさ（並列用）
geom_hpc	CV のデータ
Grid_hpc	領域分割時のメッシュデータ
wall_hpc	壁面からの距離
reod、work	作業用のデータ領域

(4) ソルバの実行

単体計算を実行する際には fflowS を、並列計算を実行する際には fflowHPC を使用する。計算実行時に計算制御ファイルでリスタートファイルの出力設定を行っていると、指定したステップ間隔で restart_#### および restart_####_G (#### は計算ステップ数) が作成される。これらのファイルがあれば、その計算ステップからの継続計算も可能である。

(5) ポスト処理（ffr2viz 等）の実行

計算実行時に結果ファイルの出力設定を行うと、result.frontflow または result.frontflow_#### というファイル名で計算結果が出力される。これらのファイルについて、ffr2viz を実行することで、可視化ファイルが作成され、Advance/Revocap や Paraview などコンター図等の可視化が行える。

5. 解析設定事例

ここでは、原子力に関連する事例を用いて計算制御ファイルの作成方法を紹介する。本稿では、解析事例として、T 字管内の熱流動解析を用いる。まず解析結果から本解析における LES 解析の優位性を確認し、その後設定条件、評価方法について説明する。

5.1. T 字管内の熱流動解析結果

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 $k-\varepsilon$ モデルと LES で解析した。計算条件は以下の通りである。

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

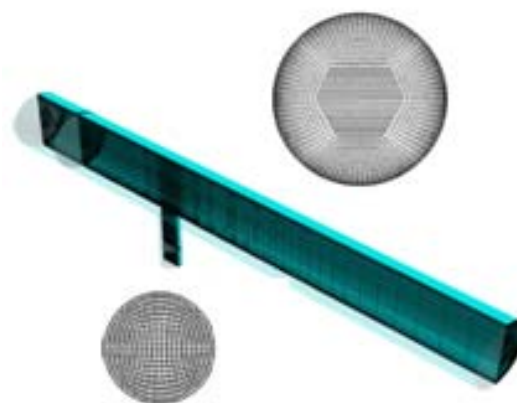
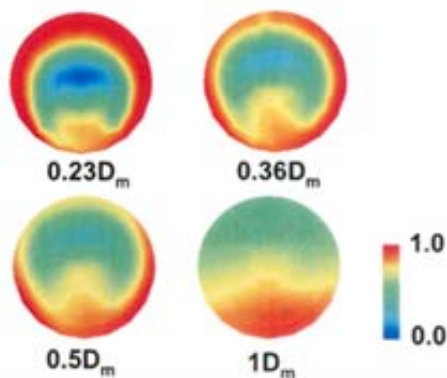
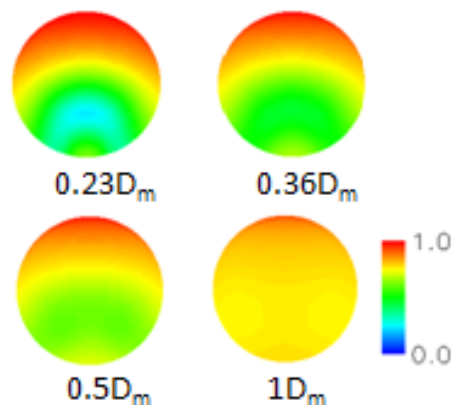


図 6 計算格子

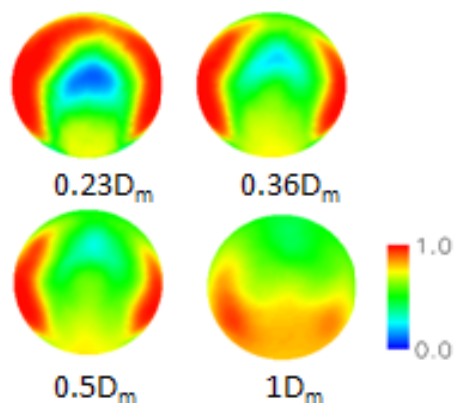
RNG $k-\varepsilon$ モデルの温度分布は実験値を定性的にも再現できなかった。これは、乱流混合を等方的でしかも過大に評価したためと考えられる。一方、LES の温度分布は実験値の特徴を良く再現できた。



(1) 無次元平均温度の実験値

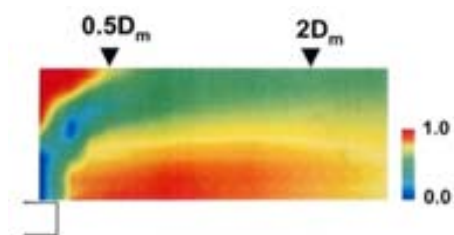


(2) RNG $k-\varepsilon$ モデルによる無次元平均温度



(3) LES による無次元平均温度

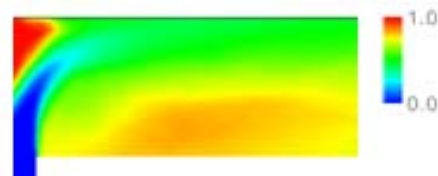
図 7 無次元平均温度



(1) 無次元平均温度の実験値



(2) RNG $k-\varepsilon$ モデルによる無次元平均温度



(3) LES による無次元平均温度

図 8 T 字管の温度混合の解析

5.2. T 字管解析のポイント

・モデル作成

本解析においては T 字管の合流部で十分発達した流れを再現する必要がある。上流側に十分な距離がある場合であれば問題はないが、図 6 のように合流部直前からの流れを計算する場合、流入境界で十分発達した流れを与えるために、図 9 のように流入ドライバー領域を設けて解析モデルを作成する。ドライバー自体の領域は、壁面近傍のストリーク構造を再現できる程度に取る必要がある。ストリーク構造は主流方向に無次元距離で 1000 程度の大きさで存在することが知られている。

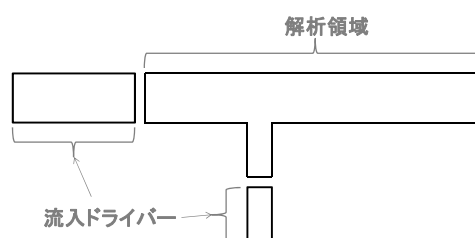


図 9 解析モデルの概略

また、解析格子を作成する際には、壁面近傍の格子幅にも注意が必要となる。LES の非定常解析では、壁面近傍の格子は無次元距離 y^+ を基準に考えるが、作動流体が水のようにプラントル数が 1 より大きな流体の場合、速度境界層より温度境界層の厚みが小さくなるため、プラントル数を考慮して格子幅を決定する必要がある。

・乱流モデルパラメータ

LES を用いた場合のモデルパラメータ C_s は理論的には 0.18 が算出されているが、実機解析でよく用いられる値はさらに小さい 0.1~0.12 程度である。乱流プラントル数=0.5、乱流シュミット数=0.5 に設定する。これは RANS モデルでの解析では 0.9 が最適値とされているので LES 解析時には注意が必要である。

・時間積分法

非定常現象を精度よく解析するためには時間積分を高精度にする必要がある。AFFr では安定性との兼ね合いから、2 次精度陰解法 (Crank-Nicolson 法) もしくは 3 次精度陰解法 (Adams-Moulton 法) を推奨する。

・空間離散化

対流項の離散化には高次精度スキームを使用する。速度の対流項には 2 次中心差分を使用する。安定性のために 2 次中心法に風上差分をハイブリッドした手法はなるべく避けるべきであり、時間刻みを調整する等なるべく 2 次中心差分 100% とする。風上差分による数値粘性は、LES の渦粘性のオーダーと同等もしくは超える場合があり、過剰な数値粘性により結果に非定常性が現れないこととなる場合もあることに注意する。

温度、化学種の対流項も 2 次中心差分を使うことを推奨するが、こちらは安定性のため風上差分とハイブリッドしても、非定常性が全く消えてしまうということにはなりにくい。

・内部反復回数

変数に、速度圧力以外の温度や化学種を含む非

定常解析の場合は、全ての変数の残差が $1e-4$ 以下程度になるまで内部反復 (SMPL 反復) を実行する必要がある。

・境界条件

モデル作成で述べた通り、流入境界には流入ドライバ領域を設けるが、この領域では両端に周期境界条件を適用し、内部の流体に壁面せん断応力に相当する駆動力を与えて流れ場を発達させていく。

また、壁面境界においては壁面近傍の速度、温度の揺らぎをより正確に把握するために No-slip、断熱条件とする。ただし、この場合には壁面近傍の第一格子点が速度境界層、温度境界層の中に含まれるように格子を作成する必要がある。

・解析時間と統計量

T 字管解析の場合、温度差のある流体が合流部で混ざり合って十分下流まで混合状態になっていることを確認してから統計処理をスタートする。スタートする前に、あらかじめ非定常性が出ているかはある時刻の結果をいくつか比較して確認しておくことが重要である。統計処理を実施する時間は、管の特性時間の 10 倍ほどで十分である。

管の特性時間は卓越周波数のストローハル数が 0.2 程度になることが多いことを利用して決定する。

$$St = f \frac{D}{V} \quad (2)$$

ここで D は管径、 V は流速である。

上記に挙げた点に特に注意して解析条件を完成させる。以下に T 字管のテキスト設定ファイルを載せる。

```
&boundary
    conc = 'Neumann'
    kind = 'wall'
    name = 'Wall'
    no = 1
```

```

        t = 0
        temp = 'Neumann'
        u = 0.0
        v = 0.0
        vel = 'no-slip'
        w = 0.0
        ys = 0.0
    /
    &boundary
        conc = 'Neumann'
        kind = 'outlet'
        name = 'Outlet'
        no = 2
        open_air = 0
        p = 101325.0
        t = 0
        temp = 'Neumann'
        u = 0.0
        v = 0.0
        w = 0.0
        ys = 1.0
    /

```

```

    &boundary
        kind = 'inlet'
        name = 'Inlet2'
        no = 3
        profile = 0
        t = 306.15
        u = 0.0
        v = 1.0
        w = 0.0
        ys = 1.0
    /

```

```

    &boundary
        kind = 'inlet'
        name = 'Inlet1'
        no = 4
        profile = 0
        t = 321.15
    /

```

```

        u = 0.23
        v = 0.0
        w = 0.0
        ys = 1.0
    /
    &cgsolver
        amg = 1
        aepsbcg = 1.0e-010
        aepscg = 1.0e-010
        iterbcg = 30
        itercg = 500
        nostop = 1
        repsbcg = 1.0e-010
        repscg = 1.0e-010
        theta_amg = 0.025
    /
    &deltat
        dt = 0.001
        option = 'constant'
    /
    &files
        anim = './anim'
        fforce = './fforce'
        ffrgrid = 'Thermal_JP.gf'
        ffrgridform = 'a'
        force = './presforce'
        gdformat = 'GF'
        gdscale = 1.0
        initial = './restart_'
        p_initial = './part_ini'
        p_restart = './part_restart'
        p_result = './part_result'
        probe = './probe'
        restart = './restart'
        result = './result'
    /
    &flags
        integ_ke = 'imp'
        integ_ty = 'imp'
        integ_vv = 'crank'
    /

```

```

/
&fluid
    imat_u = 1
    mu = 0.000891
    muopt = 'constant'
    poisson_start = 0
    prandtl = 6.06
    conv_vv='c2d'
    conv_ty='c2d'
/
&gravity
    ave_rho_t = 1
    g = -9.8, 0.0, 0.0
    t = 297.0
    rho = 1000.0
/
&hpc
    ncpu = 1
/

```

```

&initial
    aks = 0, 0
    imat_u = 1
    p = 101325
    t = 298.15
    u = 0
    v = 0
    w = 0
/
&kemodel
    epslow = 1.0e-006
    klow = 1.0e-005
/
&les
    average_comp = 0
    average_p = 0
    average_rans = 0
    average_t = 0
    cs = 0.1
    dalpha = 2.0

```

```

    nstart = 999999
    re_uvw_rans = 0
    re_uvw_t = 0
    rms_comp = 0
    rms_p = 0
    rms_rans = 0
    rms_t = 0
    uvw_ave_rms_re = 0
/
&model
    cal_reac = 0
    cal_t = 1
    cal_tys = 0
    density = 0
    flow = 'incompressible'
    osm = 0
    trbmdl = 'SLES'
/

```

・解析結果の評価方法

本解析では配管近傍に生じる流体温度の揺らぎによる熱疲労が問題であり、合流部や合流部下流の循環領域などが揺らぎの大きくなる位置と考えられるが、特に重要となる位置は流れの条件等によっても大きく異なる。例えば図 8 のように主流に対する枝配管の貫徹力が強い場合にはその混合部での変動が大きく、貫徹力が弱い場合には合流部下部の渦領域での変動が大きくなる。また、変動強度は周方向にも異なり、 $\theta=0$ 度ではなく、ある角度において最大強度が見られる。このような構造を詳細に把握する上で、3 次元の詳細な流れを解析することが重要となる。

また、変動の大きな位置に対しては、プローブ機能を用いて特定点の速度、温度等の時系列データを取得し、時間的、空間的な変動を明確にすることで、より詳細に現象を把握していくことが重要となる。

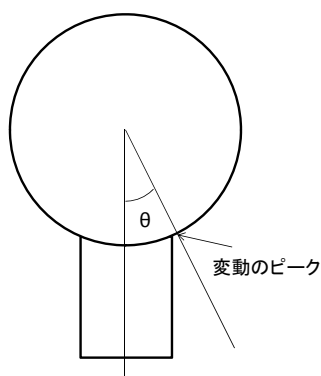


図 10 変動のピーク位置

解析結果を評価するにあたり、計算の妥当性を示すことは必須であるが、T 字管の解析においては日本原子力研究開発機構が実施した長周期温度変動水試験 WALTON[8]の結果との比較などが考えられる。

6. まとめ

原子力の研究開発は、特に軽水炉研究における流動特性の解明がベースとなって、熱流動解析がその中核となってきた。沸騰やドライアウトの試験データをもとに作成された二流体間の構成式を組み込んだ 1 次元安全解析コードが確立され、プラント安全評価に適用されている。近年コンピュータ性能のアップに伴って、進化の著しい 3 次元混相流解析技術も、原子力分野における研究開発が主導的な役割を担うことが予想される。単相流分野で発達してきた乱流解析技術も、原子力分野への適用にあたっては、原子力特有の現象を良く理解し、単相流の乱流解析技術がどの範囲で適用できるかを良く検討して解析を実施する必要がある。本稿で紹介した AFFr はさまざまな混相流モデルを搭載し、原子力分野への応用事例も徐々に増加している。今後の我が国のエネルギー安定供給を支える主要な安全解析コードの 1 つとなるべく鋭意開発を続けていく所存である。

参考文献

- [1] 秋山守、有富正憲、新しい気液二相流数値解析 コロナ社
- [2] Ubbink O. and Issa R.I., "Method for

capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes", *Jour. Comput. Phys.* **153**, 26-50(1999)

- [3] J.U. Brackbill et. al., "A continuum method for modeling surface tension", *Jor. Comput. Phys.* **100**,171(2000)
- [4] Eric L. Petersen and Ronald Hanson, "Reduced Kinetics Mechanisms for Ram Accelerator Combustion" *Journal of Propulsion and power* vol,15, No. 4, July-August 1999
- [5] <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>
- [6] 大島伸行, "革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発 第 7 回ワークショップ FrontFlow/Red 開発状況", 3 頁, 平成 19 年 2 月 5 日
- [7] 平成 22~24 年度、「液滴追跡輸送モデルに基づく詳細流動解析手法の整備」独立行政法人原子力安全基盤機構からの委託作業
- [8] H. Kamide, M/ Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura and K. Hayashi, "Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping", *Nuclear Engineering and Design*, **239**, pp. 58-67, (2009)

※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。)