



流体ソフトウェアのご紹介

アドバンスソフト技術セミナー

Advance/FrontFlow/FS

アドバンスソフト株式会社
主任研究員

杉中 隆史

3.

1

内容

- Advance/FrontFlow/FSとは？
- Advance/FrontFlow/FSの開発経緯
- Advance/FrontFlow/FSの特徴
- Advance/FrontFlow/FSの解析事例
 - ・塗布
 - ・スロッシング
 - ・漏水
 - ・液柱崩壊
 - ・液滴飛翔
 - ・液滴や気泡に作用する表面張力
 - ・毛細管現象
- 補足
 - ・いろいろな二相流解析手法の比較
 - ・HRIC法とCICSAM法について

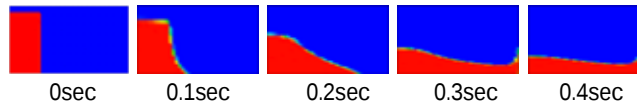


2

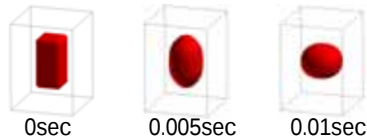
Advance/FrontFlow/FSとは？

- 水と空気、水と油など混ざり合わない2種類の流体が**自由表面(Free Surface)**を有して流れる挙動を解析するソフトウェア
→ 2流体の体積割合、速度、圧力、温度、乱流量などの分布を解析できる
- **表面張力**や**壁の濡れ性(接触角)**を考慮できる
- **非構造格子**や**並列計算**を使用できる

(例1) 液柱崩壊過程 (液体を赤色、気体を青色として表示)



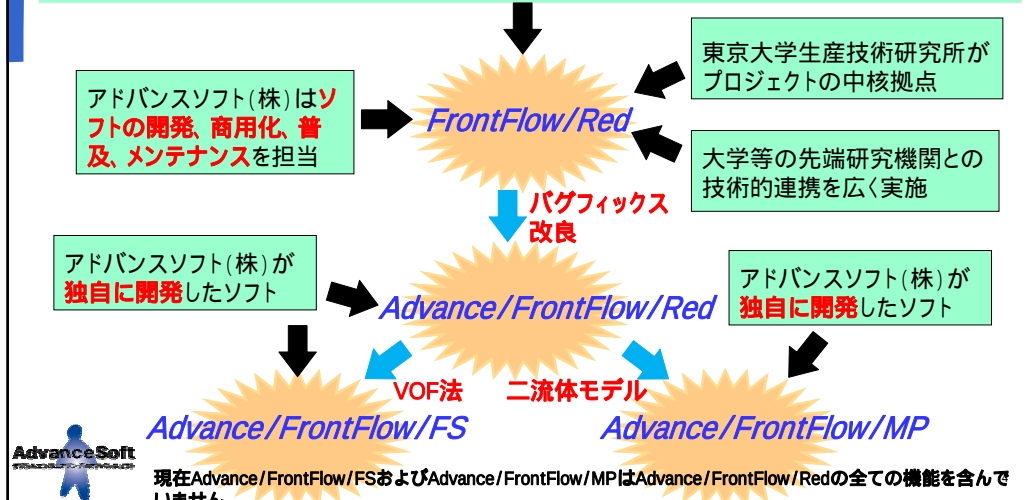
(例2) 無重力中に直方体状に置いた水が、表面張力の作用で球状に変化する挙動(自由表面を赤色で表示)



3

Advance/FrontFlow/FSの開発経緯

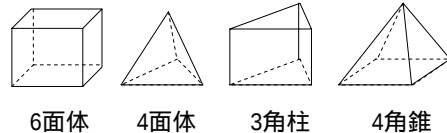
- 文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクト(2002年度～2004年度)
- 文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト(2005年度～2007年度)



Advance/FrontFlow/FSの特徴

- Advance/FrontFlow/Redをベースに開発

- 非構造格子を使用



数値計算方法が原因で
自由表面形状が変形しない

- 自由表面をシャープに捕獲し、自由表面形状を保持する方法としてVOF法の枠組みで、HRIC法およびCICSAM法を導入(最近の研究結果であるM-CICSAM法やSTACS法も性能評価のために導入)



HRIC法 : High Resolution Interface Capturing scheme
CICSAM法 : Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes
M-CICSAM法 : Modified version of CICSAM
STACS法 : Switching Technique for Advection and Capturing of Surfaces

5

Advance/FrontFlow/FSの特徴

- 並列計算による大規模解析が低コスト(CPU数に関係なく定額)でできる

- 国産(アドバンスソフト開発)のソフトウェアである



ユーザーサポート、カスタマイズ、改良
を迅速、柔軟、深いレベルで実施いたします



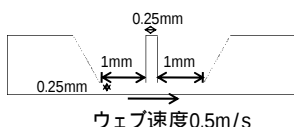
6

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～塗布

■ 解析目的

ウェブ速度、ビート後部減圧度、形状などの条件による 濡れ上がり、 正常塗布、 空気巻き込みの予測精度を検証する。

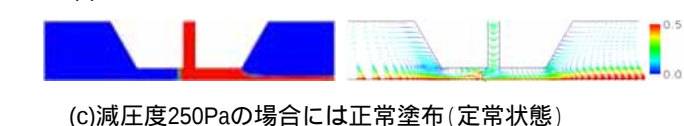
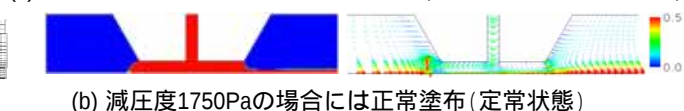
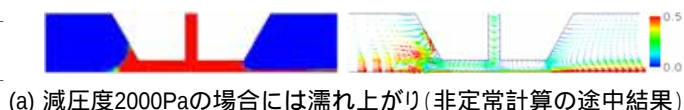
■ 解析条件



スリット流入速度: 0.17m/s
ビート後部減圧度: パラメータ
静的接触角: ダイ～液: 60°
ウェブ～液: 40°

■ 解析結果

塗布液の分布 (赤色が塗布液、青色が空気) と速度分布



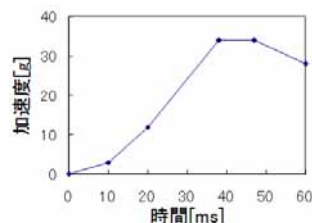
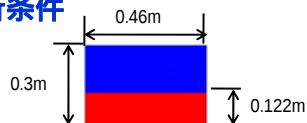
ビート後部減圧度をパラメータとして解析した結果、250Pa～1750Paで正常塗布になり、文献(*)の実験結果をほぼ再現できた。
(*)安原ら,化学工学会第36会秋季大会,E2P08(2003). 7

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～スロッシング

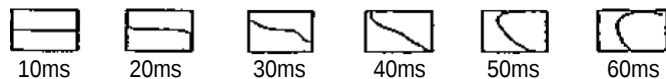
■ 解析目的

液体のスロッシング挙動の予測精度を検証する。

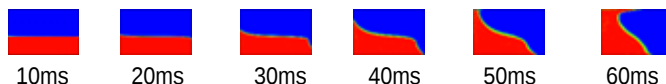
■ 解析条件



■ 解析結果



(*)M.Nakano and T. Iwamoto, SAE paper No.881782(1988).



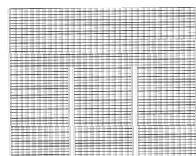
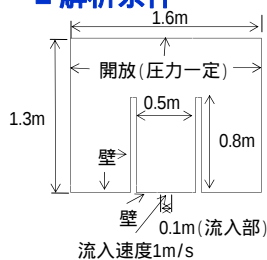
10msから60msまでの液面挙動を解析し、実験と良好に一致した。

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～漏水

■ 解析目的

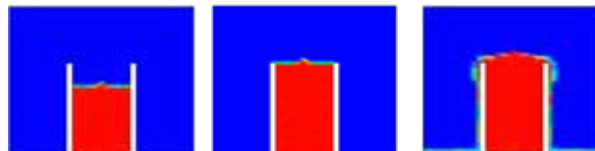
溢水解析における質量保存性を検証する。

■ 解析条件



メッシュ

■ 解析結果



3sec 4sec 5sec
水の分布 (赤色が水、青色が空気)

解析条件から、液面を水平と仮定すると4秒後に水が壁上端に達することになる(理論値).
解析結果は、液面は中央がわずかに凸形で4秒後に壁上端に達し、質量保存性は良好である。

9

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～液柱崩壊(6面体メッシュ)

■ 解析目的

6面体メッシュを使用して、液柱崩壊時の液面挙動の予測精度を検証する。

■ 解析条件



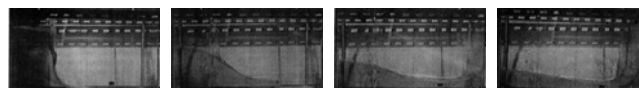
メッシュ



液柱の初期分布 (赤色が水、青色が空気)

■ 解析結果

液面挙動の
実験結果(*)



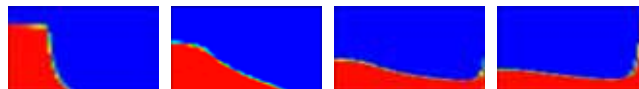
0.1sec

0.2sec

0.3sec

0.4sec

液面挙動の
解析結果



0.1sec

0.2sec

0.3sec

0.4sec

6面体メッシュで
実験結果を再現
できた。

(*)Koshizuka and Oka, Nuclear Science and Engineering,123(1996),pp.421-434.

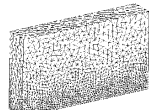
10

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～液柱崩壊(4面体メッシュ)

■ 解析目的

4面体メッシュを使用して、液柱崩壊時の液面挙動の予測精度を検証する。

■ 解析条件



メッシュ



液柱の初期分布 (赤色が水、青色が空気)

■ 解析結果

液面挙動の
実験結果(*)



0.1sec



0.2sec

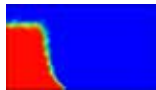


0.3sec

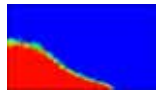


0.4sec

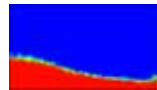
液面挙動の
解析結果



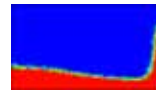
0.1sec



0.2sec



0.3sec



0.4sec

4面体メッシュで
実験結果を再現
できた。

(*)Koshizuka and Oka, Nuclear Science and Engineering,123(1996),pp.421-434.

11

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～液滴飛翔

■ 解析目的

インクジェット液滴飛翔解析の予測精度を検証する。

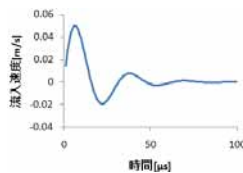
■ 解析条件



解析領域全体のメッシュ



ノズル付近のメッシュ (拡大図)



流入速度

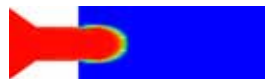
密度: 1000kg/m³

粘性係数: 0.01PaS

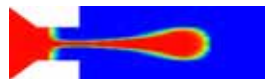
表面張力係数: 0.029N/m

■ 解析結果

10 μ sec



30 μ sec



50 μ sec



液滴の分布 (赤色が液、青色が空気)

実験値との比較検証は今後実施する予定。

12

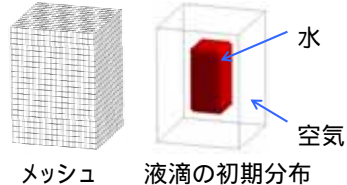
Advance/FrontFlow/FSの解析事例～液滴に作用する表面張力

■ 解析目的

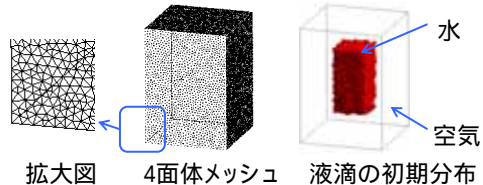
表面張力が液滴に対して正しく作用することを確認する。

■ 解析条件

(1) 6面体メッシュ

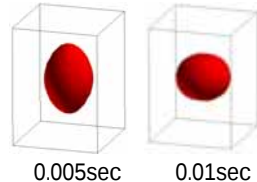


(2) 4面体メッシュ

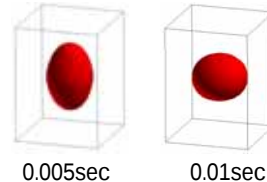


■ 解析結果

(1) 6面体メッシュ



(2) 4面体メッシュ



直方体状に置いた水が表面張力の作用で球状になる妥当な結果が得られた。

13

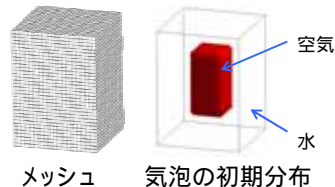
Advance/FrontFlow/FSの解析事例～気泡に作用する表面張力

■ 解析目的

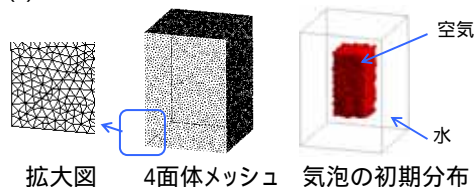
表面張力が気泡に対して正しく作用することを確認する。

■ 解析条件

(1) 6面体メッシュ

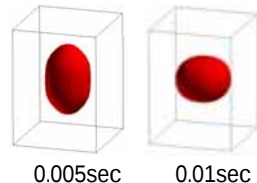


(2) 4面体メッシュ

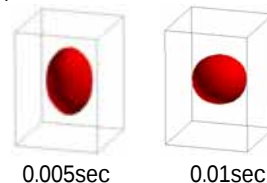


■ 解析結果

(1) 6面体メッシュ



(2) 4面体メッシュ



直方体状に置いた気泡が表面張力の作用で球状になる妥当な結果が得られた。

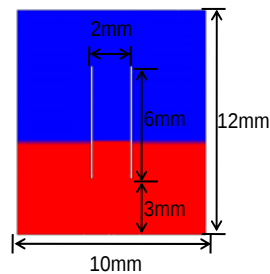
14

Advance/FrontFlow/FSの解析事例～毛細管現象

■ 解析目的

毛細管現象の予測精度を検証する。

■ 解析条件

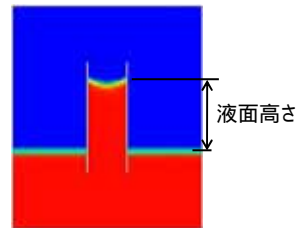


メッシュ(1/2モデル)

水の初期分布 (赤色が水、青色が空気)

垂直板の内表面の接触角: 60°
 水の密度: 998.2 kg/m^3
 表面張力係数: 0.0725 N/m

■ 解析結果



定常時の液面形状

液面高さの理論値 3.7 mm
 をほぼ再現できた。

15

いろいろな二相流解析手法の比較

解析方法	特徴	対象スケール
分子動力学法	気泡や液滴の分子レベルの挙動を計算、非連続体に適用可能	ミクロ
二相系格子ボルツマン法	統計力学に基づいてマクロな量を計算	メソ
境界適合法による界面追跡法	移動格子で自由表面を直接追跡	マクロ(自由表面の詳細解析)
体積追跡法に基づく界面追跡法 {VOF法、 改良VOF法(アドバンスソフト・漢)、MARS法 (京大・功刀)、レベルセット法、CIP法(東工 大・矢部)、CIP-LSM(東大・姫野)、Ghost- Fluid-Methodなど}	Advance/FrontFlow/FS 固定格子で自由表面を直接追跡	マクロ(自由表面の詳細解析)
気泡追跡法、液滴追跡法 Advance/FrontFlow/MP	個々の気泡や液滴をラグランジュ的に追跡	マクロ
二流体モデル	メッシュ内の詳細挙動は構成方程式でモデル化	マクロ (大規模解析)

超音速流計算が可能な拡張二流体モデル(アドバンスソフト・漢)、粒子法(東大・越塚)、
 ハイブリッド法、界面積濃度輸送方程式、代数スリップモデル、均質流モデル、溶媒蒸発やボリ
 マー溶液の二相流解析モデルなどは上の表に入れていない。
 Advance/OCTA

16

HRIC法とCICSAM法について

■ VOF法の基礎方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{非圧縮流体の場合} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \tau - \nabla P + \vec{F} \quad \text{重力、遠心力、表面張力の体積力 (CSFモデル) 等} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \phi_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \phi = 0 \quad \text{2流体の場合} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \phi_i = 1 \quad \text{流体の体積割合} \quad n \text{は流体の数} \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i \quad (5)$$

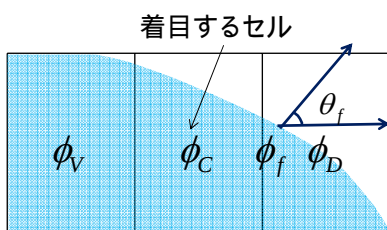
$$\mu = \sum_{i=1}^n \phi_i \mu_i \quad (6)$$



17

HRIC法とCICSAM法について

■ 自由表面を正確に捕える手法 →



$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \phi_i = 0$$

自由表面をシャープに計算できること
自由表面形状を保持できること
質量を保存できること
数値計算方法が原因で自由表面形状が変形しない

$$\text{無次元変数} \quad \tilde{\alpha} = \frac{\phi - \phi_V}{\phi_D - \phi_V} \quad \text{を定義する}$$

$$\text{セル面の値は} \quad \tilde{\alpha}_f = \frac{\phi_f - \phi_V}{\phi_D - \phi_V} \quad \text{となる}$$

自由表面を正確に捕えられるように ϕ_f すなわち $\tilde{\alpha}_f$ を求めることが目的

$$\tilde{\alpha}_f = \tilde{\alpha}_{f, \text{compressive}} f(\theta_f) + \tilde{\alpha}_{f, \text{high-resolution}} [1 - (f(\theta_f))]$$



自由表面をシャープに計算する項 自由表面形状を保持する項

18

HRIC法とCICSAM法について

■ HRIC法

$$\tilde{\alpha}_{f,compressive} = \begin{cases} 2\tilde{\alpha}_C & 0 < \tilde{\alpha}_C < 0.5 \\ 1 & 0.5 < \tilde{\alpha}_C < 1 \\ \tilde{\alpha}_C & \text{その他} \end{cases}$$

$\tilde{\alpha}_{f,high-resolution}$: 風上差分で計算

$$f(\theta_f) = \sqrt{\cos \theta_f}$$

さらに、局所クーラン数Cを使用して、以下のように修正する

$$\tilde{\alpha}' = \begin{cases} \tilde{\alpha}_f & C < 0.3 \\ \tilde{\alpha}_{f,high-resolution} + (\tilde{\alpha}_f - \tilde{\alpha}_{f,high-resolution}) \frac{0.7-C}{0.7-0.3} & 0.3 < C < 0.7 \\ \tilde{\alpha}_D & C > 0.7 \end{cases}$$



19

HRIC法とCICSAM法について

■ CICSAM法

$\tilde{\alpha}_{f,compressive}$: Hyper-C スキームを使用

$\tilde{\alpha}_{f,high-resolution}$: Ultimate-Quickestスキームを使用

$$f(\theta_f) = \min \left\{ \frac{\cos(2\theta_f) + 1}{2}, 1 \right\}$$



20