



オンラインセミナー 沸騰・凝縮・キャビテーションの解析精度を上げる — 混相流の物理モデル選択と適用事例

2026年 8 月 7 日(金)開催

プログラム

1. アドバンスソフト株式会社のご紹介 主催者あいさつ 1
2. 「混相流解析が難しい理由 — VOF 法・二流体モデル・相変化モデルの適用領域」 5
3. 「沸騰・凝縮解析事例 — 二流体モデルによる相変化現象の再現」 18
4. 「解析資産の蓄積と社内展開 — 無制限ライセンスによるメッシュ・モデル比較の実践」 27
5. 価格および関連サービスのご紹介 39

AdvanceSoft



アドバンスソフト株式会社のご紹介

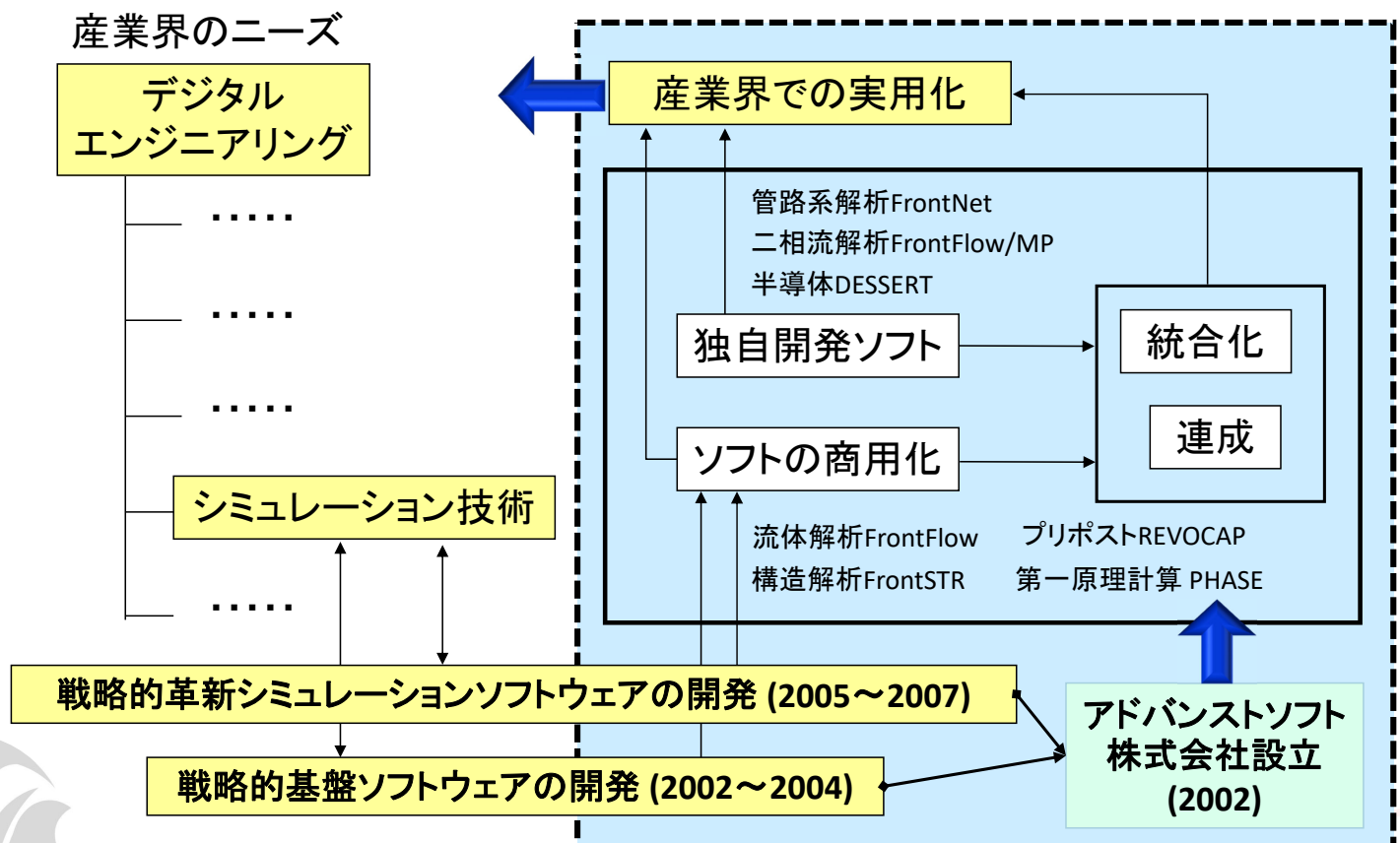
沸騰・凝縮・キャビテーションの解析精度を上げる
— 混相流の物理モデル選択と適用事例

2026年8月7日（金）
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

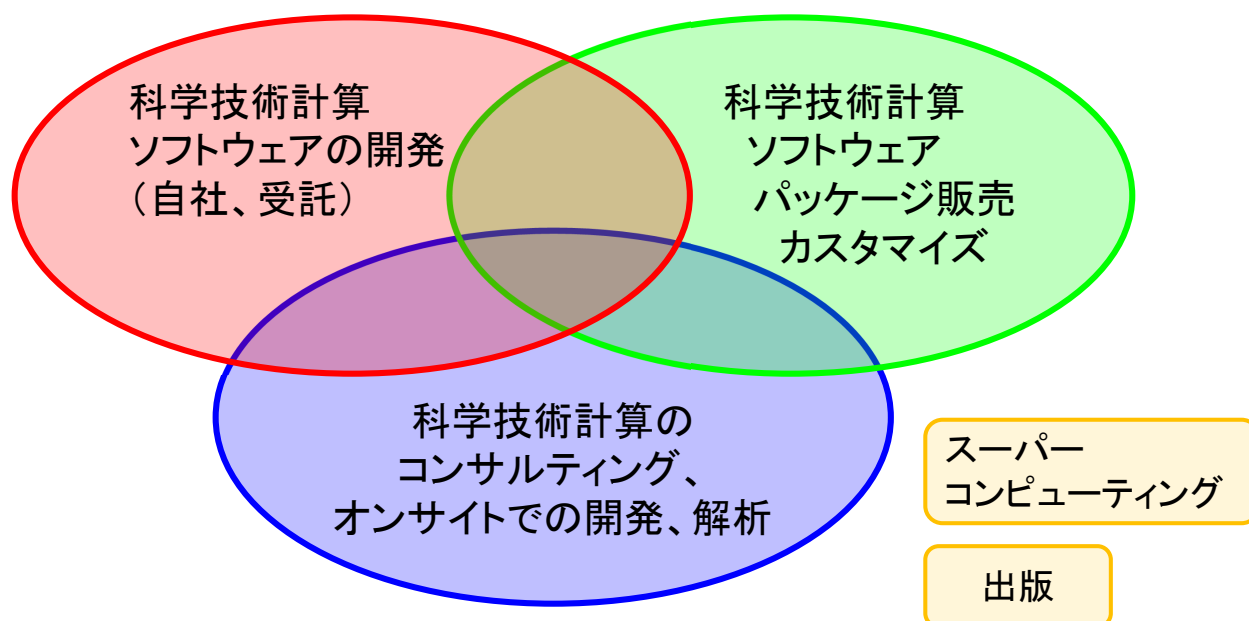
アドバンスソフトとは



Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

アドバンスソフトの特徴

- ・ シミュレーションソフトウェアの開発力
 - 自社でソースコードを所有し、事業化
 - ニーズに対し自社でカスタマイズが可能
 - 計算原理とその限界を熟知した技術者



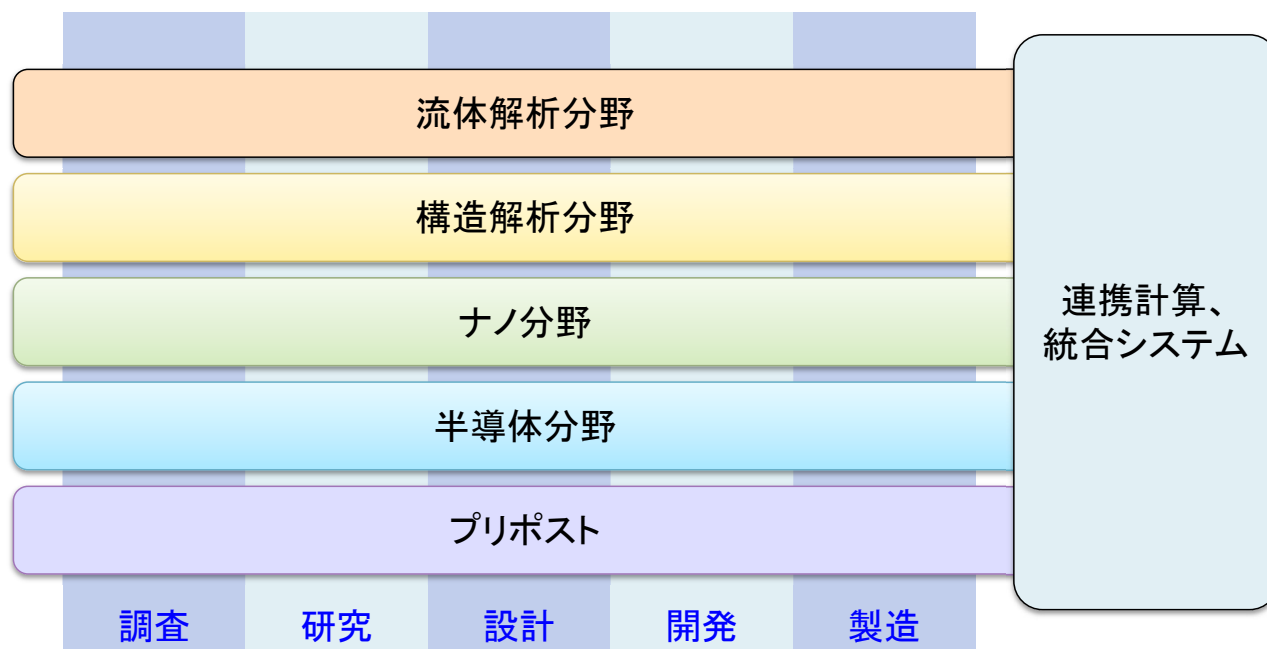
✓ 幅広い分野

- ナノから構造・流体分野の幅広い技術
- 製造業・原子力から材料・半導体産業までの幅広いニーズに対応
- お客様に多種多様な提案が可能

```

eps=1.0d-10
do i=1,nbc1
  do j=numbc(i),numbc(i+1)-1
    if (indbc(1,j)).lt.nesta.or.indbc(1)
      if (abs(bcval(3,i)).le.eps.and.abs(
    else
      do k1=1,3
        do k2=1,3
          xx(k2,k1)=xpos(k2,ielm(i)
          xx(k2,k1)=xpos(k2,ibcelm(i)
        end do
      end do
      area=area3d(xx)
      qcoef1=area/12.0d0*cp1x(bcval(1
      /cp1x(bcval(3,i),bcval(4,
      qcoef2=area/3.0d0*cp1x(bcval(5,
      /cp1x(bcval(3,i),bcval(4,
    do k1=2,4
      inode=ielm(indbc(k1,j),indl
      abvec(inode)=abvec(k1,j),j)
      do k2=2,4
        inode=ielm(indbc(k2,j),ii
        inode=ibcelm(indbc(k2,j),j)
        at=acoeff1
  
```

事業分野



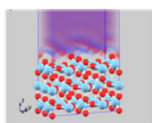
産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

ソフトウェアご紹介

第一原理計算ソフトウェア

Advance/PHASE

密度汎関数理論に基づき、物質の性質を原子・分子レベルから解析する第一原理計算ソフトウェアです。



ナノ材料

GUI 付属

ナノ材料解析統合 GUI

Advance/NanoLabo

材料解析ソフトウェア QuantumESPRESSO と LAMMPS に対応した統合 GUI です。



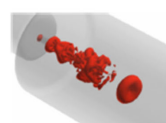
ナノ材料

プリポスト

流体解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/red

非圧縮性から圧縮性流れまで、広範囲で複雑な流れに対応した汎用 3 次元流体解析ソフトウェアです。

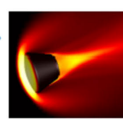


流体

圧縮性流体解析ソルバー

Advance/FOCUS-i

非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーです。特に超音速や超音速の流れに適しており、高い並列化効率で計算出来ます。

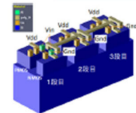


流体

大規模 3 次元 TCAD システム

Advance/TCAD

超微細半導体デバイスからパワーデバイスまで、高度な機能と使いやすい GUI を備えた 3 次元 TCAD システムです。



半導体デバイス

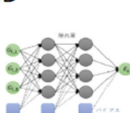
GUI 付属

ニューラルネットワーク

分子動力学システム

Advance/NeuralMD

Neural Network Potential に基づいた分子動力学のソフトウェアです。第一原理計算の結果を教師データとして分子力場を作成します。



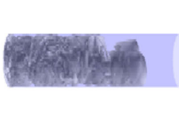
ナノ材料

AI・機械学習

気液二相流解析ソフトウェア

Advance/FrontFlow/MP

沸騰と凝縮を伴う気液二相流の流動特性や伝熱特性を 3 次元で解析するソフトウェアです。



流体

管路系流体過渡解析ソフトウェア

Advance/FrontNet

配管や流体機器から成る管路系内流体に対する 1 次元過渡解析の実用的なソフトウェアです。



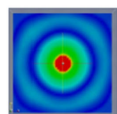
流体

GUI 付属

大規模電磁波解析ソフトウェア

Advance/ParallelWave

マクスウェル方程式を FDTD 法で 3 次元に解く電磁波解析ソフトウェアです。アンテナの電波解析から光の干渉や回折を考慮した光波解析まで幅広く適用できます。

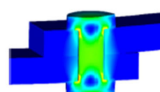


光波・電磁波

構造解析ソフトウェア

Advance/FrontSTR

固体の変形や熱伝導を、有限要素法を用いた 3 次元で解析するソフトウェアです。

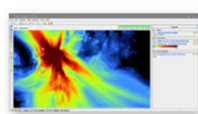


構造

大気拡散影響予測システム

Advance/Emerg

大気拡散物質の挙動予測と影響評価のためのソフトウェアシステムです。



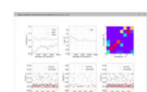
流体

GUI 付属

深層学習用ツール

Advance/iMacle

機械学習のうち、ニューラルネットワークによる深層学習に特化、最小限の機能に絞り込んだ比較的軽いツールです。

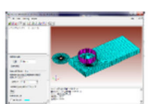


AI・機械学習

汎用プリポストプロセッサ

Advance/REVOCAP

解析の一連の流れをスムーズに行う事を実現した汎用プリポストプロセッサです。

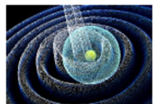


プリポスト

音響解析ソフトウェア

Advance/FrontNoise

環境騒音、機器内の共鳴等における音場を有限要素法を用いた 3 次元で解析するソフトウェアです。



音響

自社による開発（国プロ含む）

開発チームによる質の高いサポートサービス

カスタマイズや機能追加も応相談

並列数無制限（追加料金なし）

ソフトウェアの解析事例

解析事例Webページをご覧ください。

アドバンスソフト 事例集

検索

<http://case.advancesoft.jp>

- ソフトウェア名からだけでなく、産業分野別、解析分野別の検索が可能となりました。
- 最新の事例を掲載しました。今後も逐次最新事例を紹介します。

産業分野別	解析分野別
自動車・運輸	流体
材料・化学	爆発・燃焼
産業機械	構造
航空宇宙	振動音響
エレクトロニクス	ナノ・バイオ
建設土木	プリポスト
原子力	半導体デバイス
エネルギー	光・電磁波
環境・防災	

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



混相流解析が難しい理由 — VOF法・二流体モデル・相変 化モデルの適用領域

第3事業部 大西陽一

混相流セミナー
2026年8月7日（金）
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

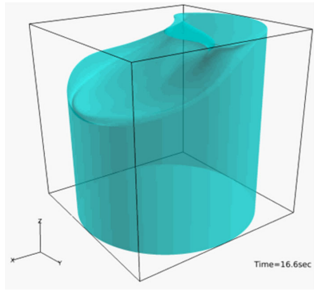
1

混相流とは

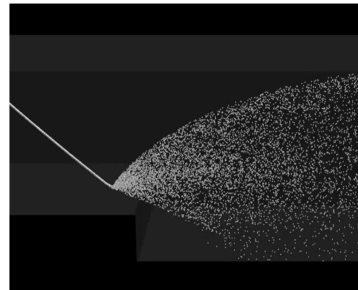
- 気体または液体を基質とし、その中にほかの相（液相，固相のいずれであってもよい）が**基質と界面**で区別されて存在する媒質の流れをいう。一般に第二または第三の相は粒子の形（粒子相）をとる。（機械工学辞典より）

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

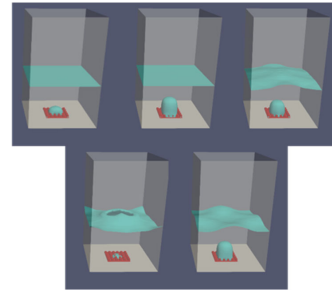
混相流れの計算例



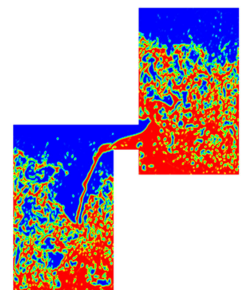
気液界面



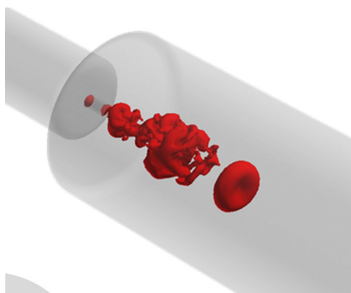
噴霧



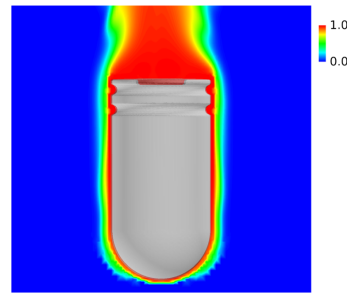
核沸騰



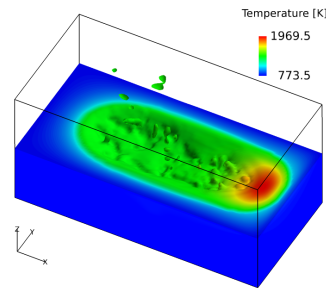
気泡流



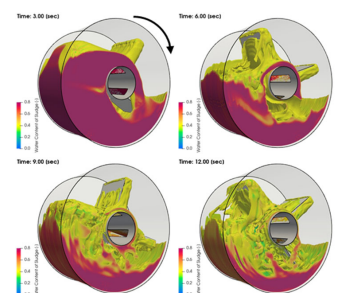
キャビテーション



膜沸騰



溶融



混練

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3

流れと無次元数 単相流

• ナビエストークス方程式

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \nabla \{ \lambda (\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \} + \nabla \{ \sigma \delta_s (I - \vec{n}_s \vec{n}_s) \} + \rho \vec{g}$$

対流項
粘性項
表面張力項 重力項

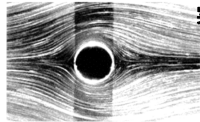
$$\frac{\text{対流項}}{\text{粘性項}} = \frac{\frac{\rho u^2}{L}}{\frac{\mu}{L^2}} = \frac{\rho u L}{\mu} = Re \text{ レイノルズ数}$$

流れの代表的な分類:円柱周りの流れ(流線分布)

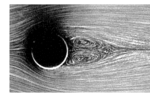
Advance/FlowFront/Redで計算

円柱周りの流れに関するReynolds数 $Re_D = \frac{\rho u D}{\mu}$

ρ : 一様流の密度 [kg/m^3]
 u : 一様流の速度 [m/s]
 D : 円柱の直径 [m]
 μ : 一様流の粘性係数 [$Pa \cdot s = kg/(m \cdot s)$]



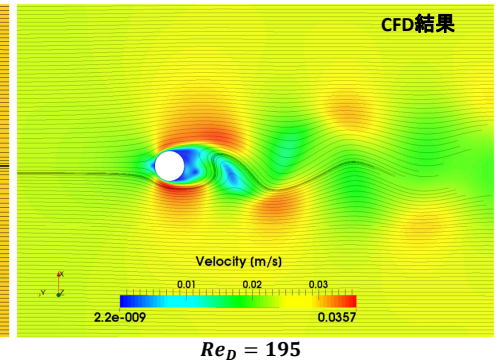
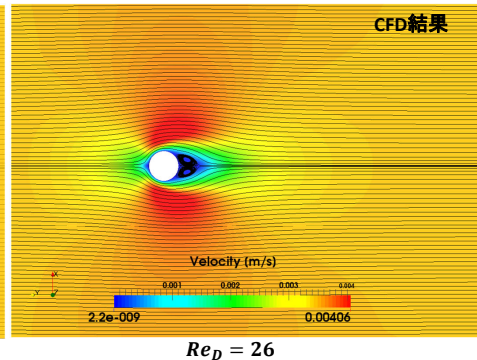
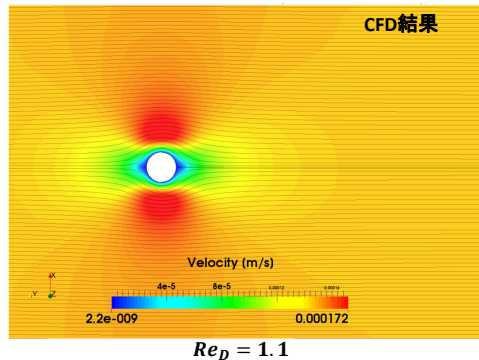
実験の流れ場



実験の流れ場



実験の流れ場



参考: 日本機械学会編、「写真集 流れ」、pp. 2-5、丸善、1992.

流れと無次元数 单相流

• ナビエストークス方程式

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \nabla \{ \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} + \mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \} + \nabla \{ \sigma \delta_s (I - \vec{n}_s \vec{n}_s) \} + \rho \vec{g}$$

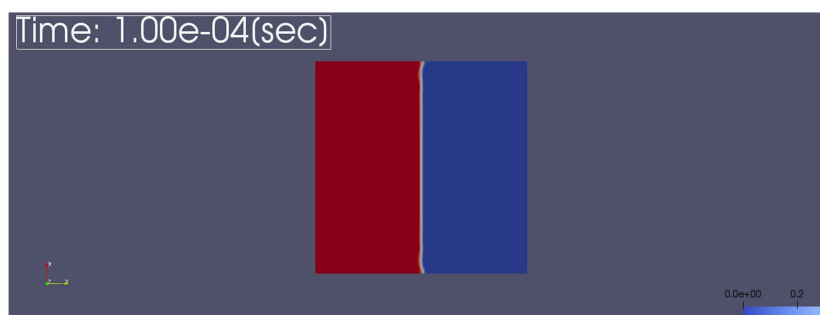
対流項

粘性項

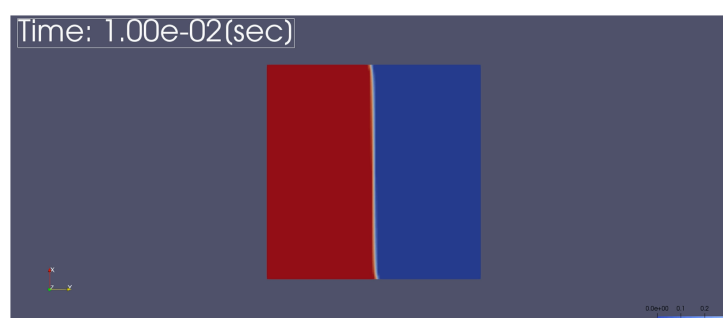
表面張力項 重力項

$$\frac{\text{重力項}}{\text{表面張力項}} = \frac{\Delta \rho g L^2}{\sigma} = Eo \text{ エトベス数}$$

流れと無次元数 自由表面



$Eo \ll 1$
 $L=1\text{mm}$



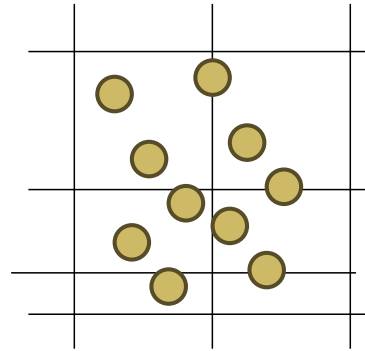
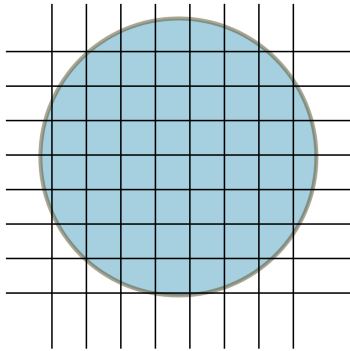
$Eo \gg 1$
 $L=1\text{m}$

相変化と時間スケール

現象別の時間スケール

- 1. 沸騰(気泡のダイナミクス)
 - 10～100マイクロ秒($10^{-5} \sim 10^{-4}$ 秒): 初期の気泡核生成と超高速な初期成長。壁面直下のマイクロ液膜の蒸発が支配
 - 1～10ミリ秒($10^{-3} \sim 10^{-2}$ 秒): 一般的な気泡の成長から壁面からの離脱まで。浮力、表面張力、流体の慣性力がバランス
- 2. 凝縮(液滴・液膜の運動)
 - 数ミリ秒～数十ミリ秒($10^{-3} \sim 10^{-1}$ 秒): 滴状凝縮における微小液滴の合体と、重力による液滴の転落・流下。
 - 数秒～数分($1 \sim 10^2$ 秒): 膜状凝縮において、壁面を覆う液膜が自重で流れ落ちる定常的な流動状態の形成。
- 3. 凝固・融解(相変化界面の移動)
 - 数十ミリ秒～数秒($10^{-2} \sim 10^0$ 秒): 過冷却液体中でのデンドライト(樹枝状結晶)の高速な伸長。流体の局所的な熱対流が形状に影響します。
 - 数秒～数分($1 \sim 10^2$ 秒): マクロな容器や配管内における融解・凝固(固液界面の移動)。

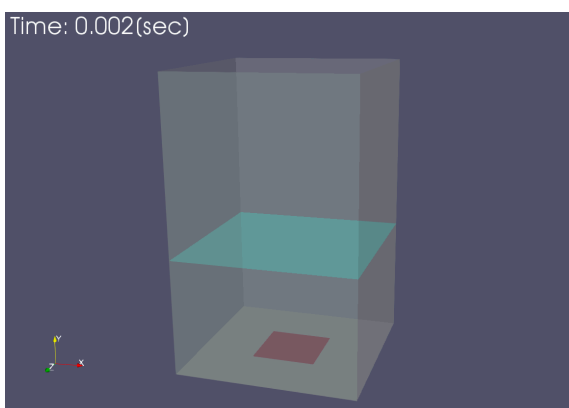
メッシュと気泡の大きさ比較



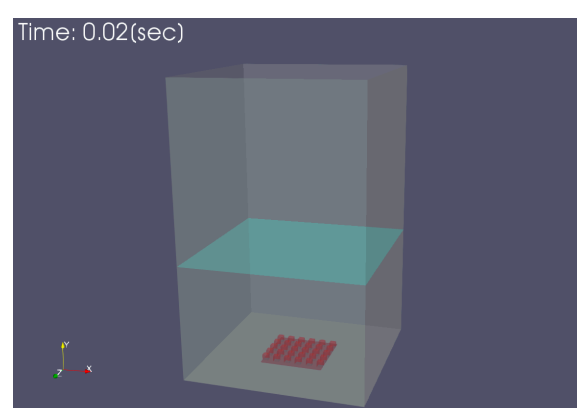
界面を精度よく解く場合は、径を10個程度のメッシュで捉えたい。

メッシュで解像できないときは、小さな気泡の気泡群として運動を解く方が良い

沸騰 加熱度50°C



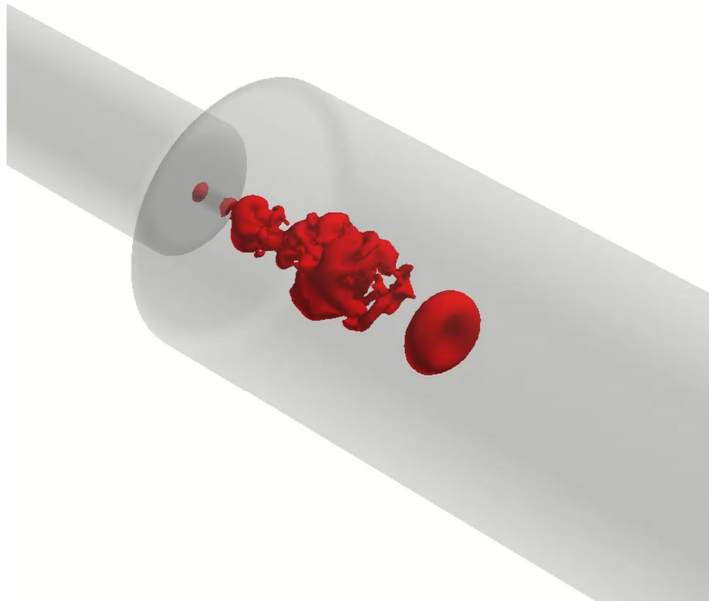
Plate



Finあり

界面の熱流束差に応じて相変化するモデル
⇒界面を精度よく解く必要がある。しかも安定に！

キャビテーション



場の圧力と飽和圧力差によって相変化するモデル。

混相流 モデル選択指針 (アドバンスソフト流)

1 混相流では、無次元数が「解くべき方程式」を決める

単相流では無次元数は流れの様相を変えるだけで、解く式はNS方程式ひとつ。混相流では、VOF法・二流体モデル・ラグランジュ法は互いに別の方程式系です。

2 モデルは 4 つの無次元数でほぼ決まる

$D/\Delta x$ (界面を格子で解像できるか)、 α (分散相の体積率)、 St (相が流れに追従するか)、 $Ja \cdot \sigma$ (相変化の強さ)。この 4 つで使うべきモデルが決まります。

3 「メッシュを詰めても合わない」の多くはモデル選択の誤り

格子を細かくすると、ある細かさを超えたところでモデルの前提そのものが破れます。収束の問題ではなく、領域を間違えている可能性を先に疑ってください。

単相流と混相流：無次元数が変わるもの

単相流

無次元化すると

Re / We / Fr

が現れる

↓

変わるのは「流れの様相」

慣性支配・表面張力支配・重力支配。

地上が微小重力かで流れは一変する。

解く方程式は最後までひとつ。

混相流

レイノルズ数などに加えて

$D/\Delta x$ / α / St / Ja

が現れる

↓

変わるのは「支配方程式そのもの」

界面を追う式か、相ごとに平均した式か、

粒子の運動方程式か。連続体の扱いが違う。

まずモデルの選択。

メッシュを切る前に、自分の現象がどの領域にいるのかを決める。これが混相流解析の最初の一步です。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

なぜ難しいのか（１） 界面が「解」であること

① 界面は境界条件ではなく、未知数

単相流では計算領域の形は最初に決まっている。混相流の界面は、位置も形も、さらに分裂・合体というトポロジーの変化まで、解いてみるまで分からない。メッシュを切る段階では「どこまでを解像すべきか」が決められない。

② 長さスケールが 2 つあり、その比が方程式から決まらない

系のスケール L （配管径・タンク径）と、界面のスケール D （気泡径・液滴径）は独立。単相乱流なら最小スケールは $\eta/L \sim Re^{(-3/4)}$ で見積もれるが、 D にはそれがない。 D を決めるのは分裂と合体のバランス。

メッシュを詰めても実験と合わない

格子を細かくすれば良くなる、とは限りません。ある細かさを超えると界面が解像され始め、使っていたモデルの前提が壊れる。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

なぜ難しいのか（２） 物性の飛びと相変化

界面をはさんで物理量が不連続に飛ぶ

物性の不連続

水／空気（大気圧）で
密度比 約 1000 倍
粘性比 約 55 倍

界面をまたいで係数が 1 0 0 0 倍以上変化する。
圧力方程式が数値的に不安定

表面張力

界面曲率の評価が必要
 $\Delta t \leq \sqrt{(\rho^- \Delta x^3 / 2n\sigma)}$

曲率誤差が数値的不安定性を発生する。

相変化

水 → 水蒸気で
体積 約 1 0 0 0 倍以上

質量が相をまたぎ、
運動量と熱の生成源になる。
界面温度境界層の解像が要る。

これらの計算手法を事前に備えていなければ、どれだけ格子を詰めて実験との差は埋まりません。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

モデル選択を決める 2 つの軸

力の比ではなく、「解像できるか」と「どれだけ詰まっているか」

軸 1

D / Δx

界面スケール ÷ 格子スケール

気泡径・液滴径の代表長さに、格子が何個入るか。

$D/\Delta x \geq 10$ … 界面を直接追える（解像する）

$D/\Delta x \ll 1$ … 界面は平均化するしかない（モデル化）

界面を「解く」のか「モデルで表す」のかを分けます。

軸 2

α

分散相の体積率

分散相がどれだけ詰まっているか。相互作用の範囲が変わります。

$\alpha < 10^{-6}$ … 連続相→分散相の一方のみ

$10^{-6} \sim 10^{-3}$ … 双方向。分散相が場を変える

$\alpha > 10^{-3}$ … 粒子・気泡どうしの相互作用まで効いてくる。

補助軸 St（ストークス数）

$$St = \frac{\rho_d D^2 U}{18 \mu_c L}$$

$St \ll 1$ なら相は流れに追従し、簡易混合モデルで足ります。

Ja・σ 相変化

$$Ja = \frac{\rho_l C_p \Delta T}{\rho_v L_{sat}}, \quad \sigma = \frac{p_\infty - p_{vap}}{0.5 \rho U^2}$$

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

モデル選択マップ°

分散相 体積率 α α 大

二流体モデル

Euler-Euler
気泡流・核沸騰・流動層

ラグランジュ法

Euler-Lagrange
噴霧・粒子輸送・エアロゾル

 α 小

遷移域

ハイブリッド
連成が必要

VOF 法

界面を直接追跡する
自由表面・スロッシング・砕波・液膜・スラグ流・
シートキャビテーション・タンク充填／排出

界面を解像できない

界面を解像できる

界面スケール ÷ 格子スケール $D / \Delta x$

相変化モデル ($Ja \cdot \sigma$) — どの領域にも関係する。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3 つの問いで決める

上から順に答えるだけで、使うべきモデルは絞れます

Q1

界面を格子で解像できるか？ $D/\Delta x \geq 10$

YES → VOF 法。界面を直接追う。

NO → Q2 へ

Q2

分散相の体積率は？ α

$\alpha \geq 10^{-3}$ → 二流体モデル。界面積濃度で相間交換を評価。

$\alpha \leq 10^{-3}$ → ラグランジュ法。粒子ごとに運動方程式を解く。（実際は $\alpha=0.3$ くらいまで使用することがある。）

Q3

分散相は流れに追従するか？ St (ストークス数)

$St \ll 1$ → 混合モデル／ドリフトフラックスで代用できる。

$St \geq 1$ → 相間の滑りが本質。二流体かラグランジュが必要。

Q4 相変化はあるか？ あれば、選んだモデルの上に相変化モデルを足す。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

VOF 法

界面が連続していて、格子で追えるとき

使うべきとき

- ・自由表面、スロッシング、碎波
- ・液膜、液柱、タンクの充填／排出
- ・スラグ流、環状流の界面挙動
- ・シートキャビテーション
- ・ノズル内部の一次分裂
- ・界面の形そのものが答えになる問題

満たすべき条件

- ・代表径あたり 10～20 格子
- ・表面張力が効くなら時間刻みに制限

$$\Delta t \leq \sqrt{(\rho^- \Delta x^3 / 2\pi\sigma)}$$
- ・界面圧縮スキーム／再初期化の設定
- ・接触角（濡れ性）の指定

限界 — ここを超えたら別のモデルへ

界面構造が格子より細くなった瞬間、VOF は物理を失います。数値拡散によって気液が非物理的かつ不可逆に混合し、界面はばやけたまま戻りません。また、気泡数密度や粒径分布は原理的に出せません。

判定の目安：知りたい構造の代表径 D に対して $\Delta x \leq D/10$ を確保できるか。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

二流体モデル（Euler-Euler）

分散相が多く、界面を解像する意味がないとき

使うべきとき

- ・気泡流、気泡塔、攪拌槽
- ・核沸騰を伴う冷却流路、EV 冷却
- ・ボイラ、蒸気発生器
- ・配管二相流の圧力損失・ボイド率
- ・流動層、スラリー輸送
- ・断面平均量が答えになる問題

何を解いているか

各相に、連続の式・運動量式・エネルギー式を 1 組ずつ。体積率 α で結合します。

界面は解かず、界面積濃度 a_i に集約して相間の運動量・熱・質量交換を評価します。

精度を支配するのはメッシュではなく構成式

抗力（Ishii-Zuber、Tomiya）、揚力、壁潤滑力、乱流分散力、そして気泡径。とくに気泡径の扱い（一定径か、MUSIG／界面積濃度輸送か）で結果が大きく変わります。格子を詰めても構成式は良くなりません。

検証は、実験が測っている量（断面平均ボイド率か、局所分布か）と同じ量で行ってください。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

ラグランジュ法と混合モデル

希薄なとき、あるいは相が完全に追従するとき

ラグランジュ法（DPM/DDM）

$\alpha \leq 0.1$ 分散相

粒子・液滴を個別に追跡し、それぞれに運動方程式を解きます。

- ・噴霧の下流、燃料噴射、塗装
- ・粒子輸送、エアロゾル、集塵

粒径分布が直接得られるのが最大の利点。

分裂・蒸発・衝突はサブモデルで与えます。

粒子数が増えるとコストが線形に増加。

混合モデル／ドリフトフラックス

$St \ll 1$ 相が流れに追従

混合物として 1 つの運動量式を解き、相間の滑りは代数関係で与えます。

- ・微細気泡、マイクロバブル
- ・微粒子スラリー、沈降

二流体モデルより簡易

滑りが現象の本質である場合は使えません。

まず St を評価して、使えるかどうかを判定します。

判定の目安

$$St = \frac{\rho_a D^2 U}{18 \mu_c L} \quad St \leq 0.1 \text{ なら混合モデルで十分、} St \geq 1 \text{ なら滑りを解くモデルが必要です。}$$

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

相変化モデル — どの領域にも関係する

ベースのモデル	相変化の扱い方	調整パラメータ／注意点
VOF 法	界面熱フラックス型 (Lee, Tanasawa/Schrage)	界面温度を飽和温度に固定。界面近傍の温度境界層を解像できるかが精度を決める
二流体モデル	壁面熱分配モデル (RPI) + 界面熱伝達	核生成サイト密度、離脱径、離脱頻度。 実験による較正がほぼ必須
キャビテーションモデル	圧力駆動型 (Zwart, Schnerr-Sauer 等)	核数密度と核径。 σ が下がると シート → クラウドへ様相が変わる

ヤコブ数 Ja

$$Ja = \frac{\rho_l C_p \Delta T}{\rho_v L_{sat}}$$

顕熱と潜熱の比。相変化がどれだけ激しいか。

キャビテーション数 σ

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_{vap}}{0.5 \rho U^2}$$

蒸発の起こりやすさ。小さいほど激しい。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

遷移域 — 実務で最も多い領域

ひとつのモデルでは解けない現象は、珍しくありません

● 噴霧・燃料噴射

ノズル内（キャビテーション+連続液柱=VOF）→ 一次分裂 → 液滴群（ラグランジュ）
 対処：VOF-to-DPM 変換。ノズル近傍だけ解像し、下流は粒子に受け渡す。

● 沸騰・冷却限界

核沸騰（二流体+RPI）→ CHF → 膜沸騰（連続した蒸気膜=界面あり）
 対処：同じ壁面上で領域が移る。CHF を跨ぐならモデル切替か広域モデルが要る。

● キャビテーション

シート（界面あり）とクラウド（分散）が同時に存在し、周期的に入れ替わる
 対処：混合モデル+圧力駆動相変化で捉え、壊食位置は界面解像で確認する。

決定法：「何を予測したいか」で決める

粒径分布 → ラグランジュ、圧力損失・ボイド率 → 二流体、壊食位置・界面形状 → VOF。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

選んだあと — 妥当性をどう確かめるか

1

流動様式は想定どおりか

気泡流のつもりがスラグ流になっていないか。まず絵と実験写真を見比べる。

2

モデルの前提が破れていないか

$D/\Delta x$ と α を計算結果から改めて評価する。マップ上の位置がずれていないか。

3

構成式・サブモデルのパラメータ

二流体なら抗力則と気泡径、キャビテーションなら核数密度など

4

メッシュと離散化スキーム

順番は最後。界面解像モデルなら $D/\Delta x$ を $5 \rightarrow 10 \rightarrow 20$ で確認する。

比較する量は、計算を始める前に決めておく。実験が測っている量と同じ量を出すこと。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

まとめ

単相流では、無次元数が「流れの様相」を決めました。
混相流では、無次元数が「解くべき方程式」を決めます。

- **メッシュを切るまえに**

自分の現象がマップ上のどこにいるかを定める。ここを外すと、後の努力が効きません。

- **$D/\Delta x$ 、 α 、 St 、 Ja の 4 つで、使うべきモデルを見極める**

- **難しいのは計算ではなく、この見極め**

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

全域を、ひとつのソリューションで

Advance/FrontFlow/red + Advance/FrontFlow/MP (二流体オプション)

AFFr (Advance/FrontFlow/red)

- ・VOF 法による界面追跡
- ・粒子追跡モデル
- ・LES を中心とした乱流モデル
- ・キャビテーション

マップの右側と中央を担当します。

MP オプション (Advance/FrontFlow/MP)

- ・二流体モデル (Euler-Euler)
- ・相間の熱・運動量交換
- ・沸騰／凝縮の相変化モデル

マップの左上と、下の相変化の層を担当します。

無制限ライセンス

並列数・同時実行数が無制限のため、メッシュ依存性の確認やモデル比較を、計算コストを理由に省略せずに済みます。前ページの問題を、最後まで実行できます。

沸騰・凝縮解析事例 — 二流体モデルによる相変化現象の再現

アドバンスソフト株式会社

2026年8月7日

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

内容

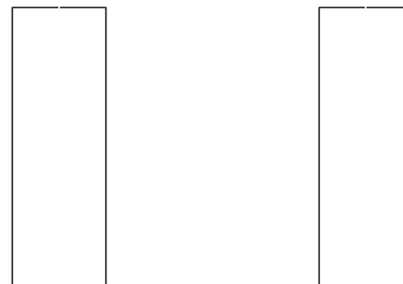
1. 二流体モデルの概要
2. 二流体モデルの基礎方程式
3. 沸騰解析の難しさ
4. 予測精度を決定づける構成方程式
5. 二流体モデルによる沸騰の解析事例
 - ・プール沸騰曲線試験解析
 - ・油焼入れ熱処理の基本検証解析
 - ・衝突噴流による沸騰冷却の基本検証解析
 - ・レーザーによる金属の溶融・沸騰解析

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

2

1. 二流体モデルの概要

- 気相と液相それぞれの保存方程式を解く
- 同一計算格子で、気相と液相の異なる速度と温度を非平衡過程を含め計算できる
- 気泡流・スラグ流・噴霧流など異なる流動状態を一つの枠組みで計算できる
- 気泡や液滴は計算格子内の体積分率で扱う
- 計算格子より小さいスケールで起こる気液間の相互作用は構成方程式（実験相関式や理論に基づいたモデル）で計算する
- 気泡同士の合体を計算する場合は Population Balance Modelとソースタームで表現する方法がある（Advance/FrontFlow/MPを使用し、ダイナミックSGSモデルで計算した実績あり）



沸騰により発生した気相速度

発生した気相に駆動される液相速度

Advance/FrontFlow/MPによる高温固体の沸騰冷却解析

2. 二流体モデルの基礎方程式

(1)質量保存則

- 沸騰による質量移行を考慮
(液体 → 蒸気)

(2)運動量保存則

- 沸騰による運動量移行を考慮
(液体運動量 → 蒸気運動量)

(3)エネルギー保存則

- 沸騰によるエネルギー移行を考慮
(液体エンタルピー → 蒸気エンタルピー)
(過熱液体) (飽和蒸気)

運動量, エネルギーを持った質量が移行



3. 沸騰解析の難しさ

- ・熱非平衡を考慮した蒸発速度（分子運動、熱力学）
- ・沸騰の微細機構（マイクロレイヤー、キャビティ、沸騰核）
- ・微視的気泡/液滴の発生と運動
- ・界面の不安定（Taylor不安定、Helmholtz不安定）
- ・界面の熱伝達（輻射、対流、潜熱）
- ・ドライアウト/バーンアウト機構（液膜、CCFL）



マイクロレイヤーやキャビティやといったミクロな物理から、界面不安定性やCCFL・ドライアウトといったマクロな流動破壊までを、熱非平衡や複雑な複合熱伝達を含め、一貫した計算モデル上で成立させなければならない

対応 解析経験
文献調査
実験との整合

4. 予測精度を決定づける構成方程式 ～流動様式

- ・気泡流、スラグ流、チャーン流、噴霧流、環状流などの状態（流動様式）により、気液界面の面積が変わる
- ・二流体モデルは計算格子内の気液界面形状を計算しないで、各時刻・各計算格子でボイド率（気相体積分率）などから流動様式を決め、その流動様式に対する構成方程式を使用
- ・流動様式の分類
 - ・気泡流・中間領域・噴霧流
 - ・気泡流・スラグ流・環状流・中間領域・噴霧流
 - ・気泡流・キャップ気泡流・チャーン流・環状流（例、スラグ流が生じない大口径管）
 - ・噴霧流のみ（例、スプレー噴霧）
- ・流動様式の切り替え部分は、不連続が生じないように滑らかに補間

4. 予測精度を決定づける構成方程式 ～相間の運動量交換

- 界面摩擦力
 - 気相と液相の境界（界面）で互いの流速の差によって生じる摩擦抵抗
 - 実現象
 - 気泡径が小さいか表面張力が大きい場合 → 気泡は球形で直線的に運動
 - 気泡径が大きい表面張力が小さい場合 → 気泡は非球形で振動して運動
 - 小さい気泡が多く集まった場合 → 気泡の上昇速度が遅くなる
 - 大きい気泡が多く集まった場合 → 気泡の上昇速度が速くなる
 - 実験結果を再現できる界面摩擦モデルを使用することで計算精度が向上
- 揚力
 - 気液速度差と液体の速度勾配により、主流に対して横方向に作用する力
 - 実現象
 - 小さい気泡は壁に近づく
 - 大きい気泡は壁から離れる
 - 実験結果を再現できる揚力係数を使用することで計算精度が向上

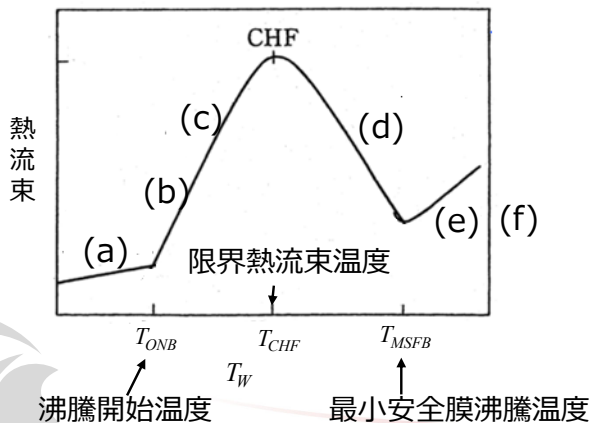
4. 予測精度を決定づける構成方程式 ～相間の運動量交換

- 壁面潤滑力
 - 気泡が壁に沿って運動するとき、液体が壁から排除されるのに伴い気泡が壁から遠ざかる力
- 乱流拡散力
 - ボイド率分布に偏りがあるときに、ボイド率分布を均一化する力
- 仮想質量力
 - 気相と液相が互いに異なる速度で運動し、相対速度が変化するときが発生する力

4. 予測精度を決定づける構成方程式 ～表面熱伝達モデル

・ 沸騰曲線

- (a) 液単相
- (b) サブクール核沸騰
- (c) 飽和核沸騰
- (d) 遷移沸騰
- (e) 膜沸騰
- (f) 蒸気単相



・ 手法1

部材毎に以下の構成方程式を使用

- ① 限界熱流束温度
- ② 最小安全膜沸騰温度
- ③ 沸騰領域ごとの表面熱伝達係数または熱流束

・ 手法2 拡張RPIモデル

気泡の発生・成長・壁面急冷の沸騰メカニズムを考慮
表面熱流束が以下の合計になる壁面温度を計算

- ① 液体への対流熱伝達
- ② 気泡離脱後の液体による急冷熱伝達
- ③ 蒸発潜熱
- ④ 蒸気膜への熱伝達（膜沸騰・ドライアウト領域）

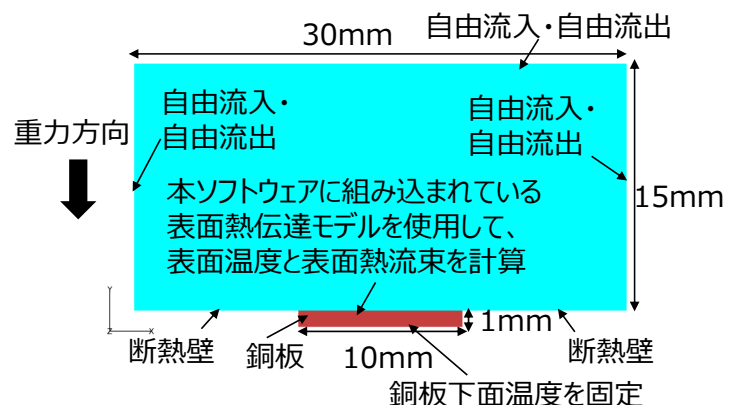
5. 解析事例 ～プール沸騰曲線試験解析

・ 解析対象

プール沸騰解析を行い、沸騰曲線の実験結果^[1]と比較

・ 解析条件

項目	値
流体	水と水蒸気
固体	銅
飽和温度	100 °C
銅板下面温度	104、120、160、1100°C
重力加速度	9.80665 m/s ²
次元	2次元軸対称
格子数	11,500
メッシュサイズ	0.2 mm
時間刻み	5×10 ⁻⁵ s
現象時間	0.2 s



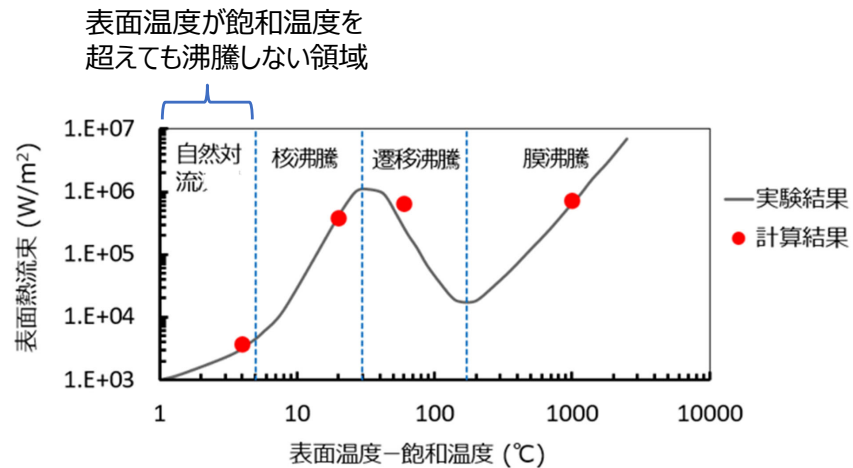
参考文献

[1] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/boiling-curve/>

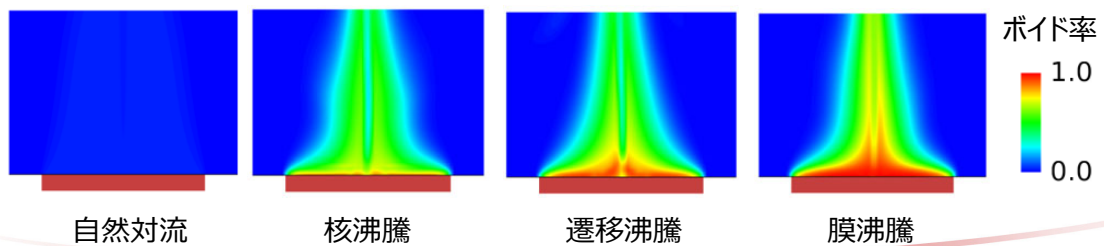
5. 解析事例 ～プール沸騰曲線試験解析

• 解析結果

沸騰曲線の検証
(実験結果との比較)



ボイド率の時間平均分布



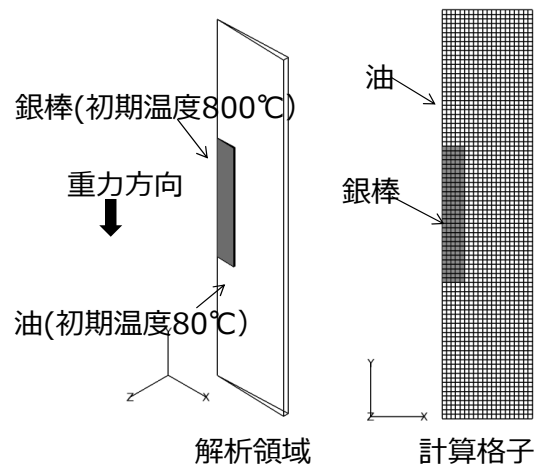
5. 解析事例 ～油焼入れ熱処理の基本検証解析

• 解析対象

銀棒の油焼入れ熱処理の解析を行い、冷却曲線の実験結果^[1]と比較

• 解析条件

項目	値
ワークの形状	円柱 (直径10mm、長さ30mm)
流体	油
固体	銀
飽和温度	320 $^{\circ}\text{C}$
重力加速度	9.80665 m/s^2
次元	2次元軸対称
格子数	5,856
メッシュサイズ	0.2 mm
時間刻み	0.05 s
現象時間	10 s



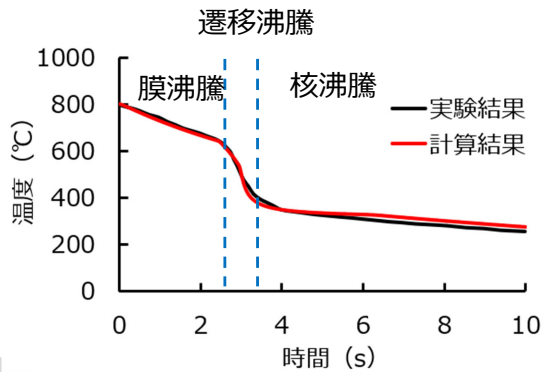
参考文献

[1] 奈良崎道治, 焼入れ冷却と焼入れシミュレーション, 不二越, vol.15(2008) pp5.

5. 解析事例 ～油焼入れ熱処理の基本検証解析

・ 解析結果

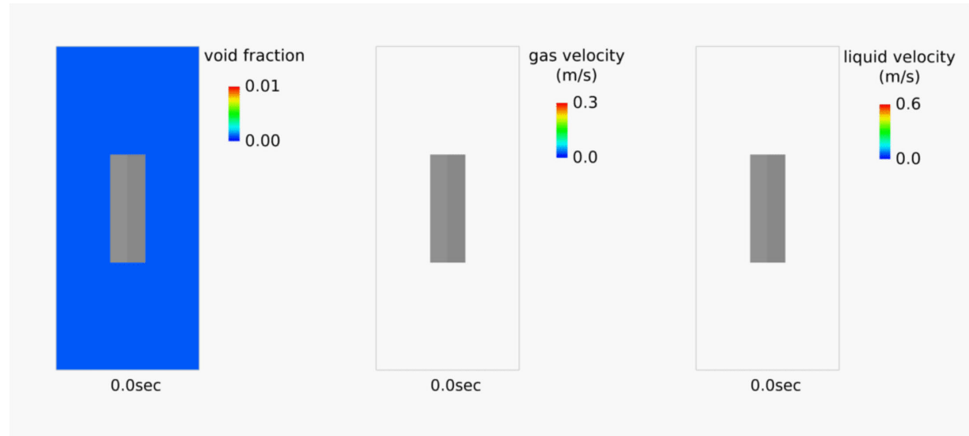
冷却曲線の検証
(実験結果との比較)



ボイド率

気相速度

液相速度



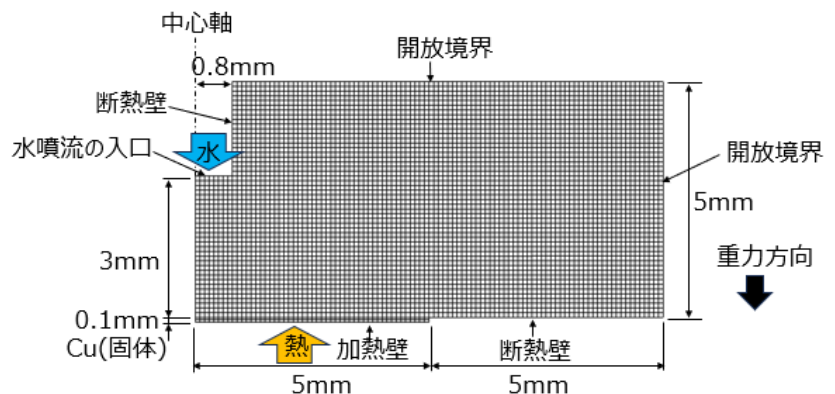
5. 解析事例 ～衝突噴流による沸騰冷却の基本検証解析

・ 解析対象

水の噴流を高温固体に衝突させ、固体を沸騰冷却する解析を行い、沸騰曲線の実験結果^[1]^[2]と比較

・ 解析条件

項目	値
流体	水と水蒸気
固体	銅
噴流水の速度	2 m/s
噴流水の温度	97 °C
飽和温度	100 °C
銅板下面温度	110、115、120、122.5、125、127.5、130 °C
乱流モデル	k-εモデル
重力加速度	9.80665 m/s ²
次元	2次元軸対称
半径方向格子数	100 (中心軸から開放境界)
軸方向格子数	52 (加熱壁から開放境界)
時間刻み s	10 ⁻⁵ s
現象時間 s	2 s



計算格子と境界条件

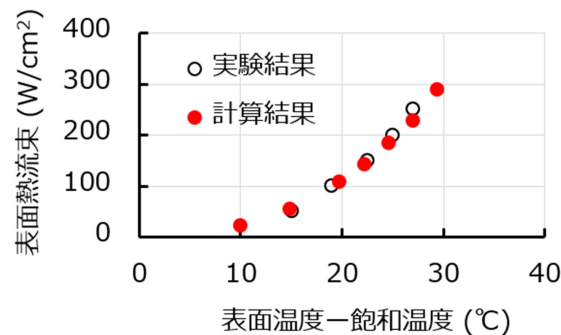
参考文献

- [1] Katto, Y. and Kunihiro, M., "Study of the mechanism of burn-out in boiling system of high burn-out heat flux", Bull. JSME, 16(1973)1357-1366.
[2] Narumanchi, S., Troshko, A., Hassani, V., Bharathan, D., "Numerical Simulations of Boiling Jet Impingement Cooling in Power Electronics", Conference Paper NREL/CP-540-39401(2006)1-11.

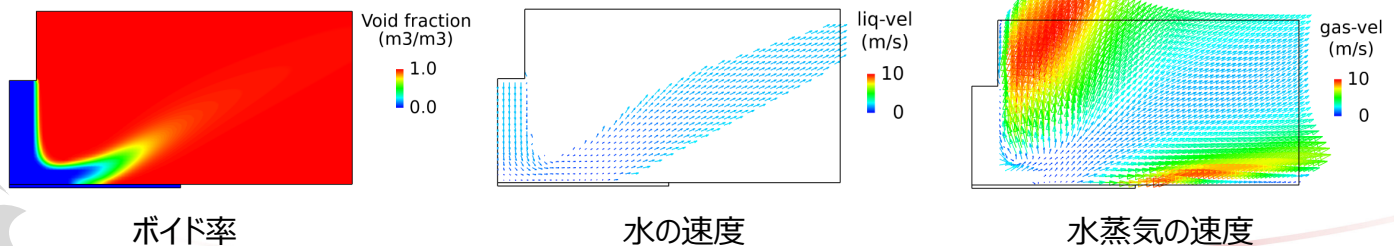
5. 解析事例 ～衝突噴流による沸騰冷却解析の基本検証解析

・ 解析結果

冷却曲線の検証
(実験結果との比較)



熱流束 250 W/cm² 時の計算

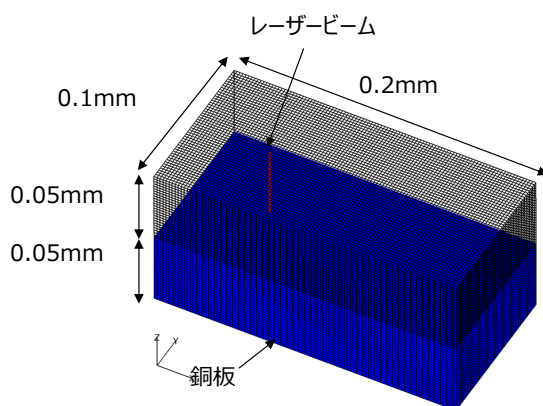


5. 解析事例 ～レーザーによる金属の溶融・沸騰解析 (標準版に実装予定)

・ 解析対象

二流体モデルを使ったレーザーによる金属の溶融・沸騰解析

・ 解析条件

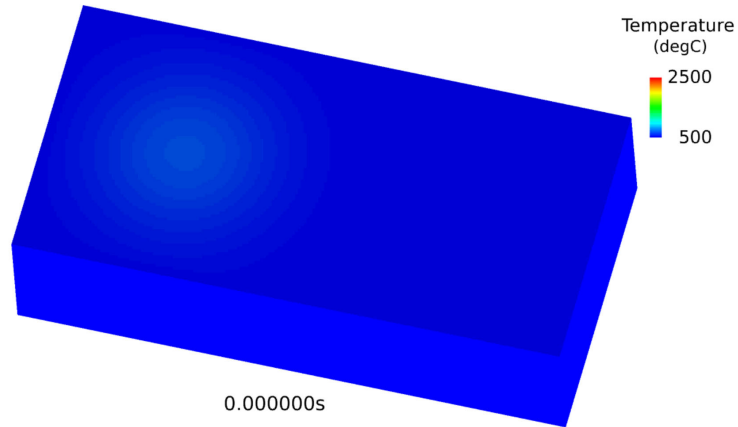


項目	設定値
ビーム	レーザービーム
ビーム径	100μm(ガウス分布)
ビーム出力	300W(連続照射)
ビーム走査速度	5m/s
金属材料	銅
相変化	溶融・沸騰・蒸発・凝固
融点／沸点	1357.8K／2835.0K
融解潜熱／蒸発潜熱	2.127×10 ⁵ ／4.727×10 ⁶
初期温度	773.15K
溶融金属の表面張力	考慮
底面と側面	no-slip、温度773.15K
金属表面の放射率	0.3
メッシュ形状	ボクセル(立方体)
メッシュサイズ	2μm
格子数	250,00 (100×50×50)
時間刻み	10 ⁻⁹ s
現象時間	3×10 ⁻⁵ s

5. 解析事例 ～レーザーによる金属の溶融・沸騰解析（標準版に実装予定）

• 解析結果

- 固体・液体表面形状と表面温度の時間変化



二流体モデルを用いる利点

- 同一計算格子で溶融金属と金属蒸気が異なる速度と温度を持つことができるため、激しい非平衡現象を表現
- 計算格子のサイズが比較的大きくても、蒸発面で、溶融金属の下降流と金属蒸気の上昇流を表現（深いキーホールを計算）
- スパッタ（飛散液滴）が計算格子の解像度不足で消失しない

混相流セミナー Advance/FrontFlow/red + MP

AFFr二相流解析事例紹介

アドバンスソフト株式会社

2026年8月7日

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Part. 1 | キャビテーション — 気液相変化の解析

気液二相を「単一の流体場」でどう表現するか

Part. 1 キャビテーション — 均質に混合した気液を一つの流体として解く

Part. 2 VOF法 — 界面を解像し、分離した気液を明示的に追う

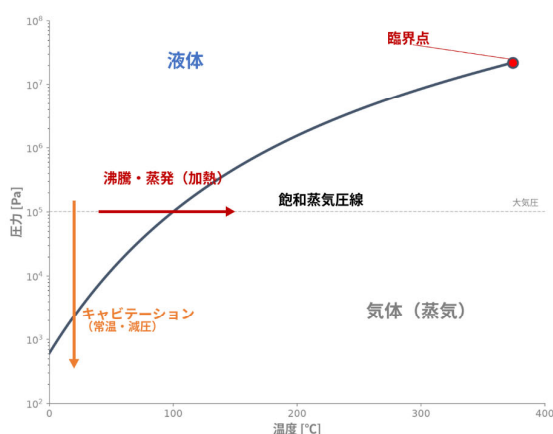
Part. 3 電気化学デバイス — 多孔質電極内の液水を飽和度場で平均化して解く

Part. 4 超臨界流体 — 界面が消失した単一相を実在流体物性で解く

Part. 5 ラグランジュ粒子追跡 — 液滴を「点」として流体場中を追跡

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

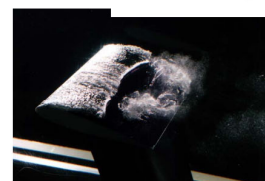
キャビテーション現象



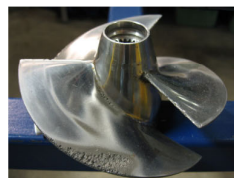
減圧による相変化



水槽試験でのプロペラキャビテーション



NACA0015翼まわりのキャビテーション



キャビテーションによる壊食 (エロージョン)



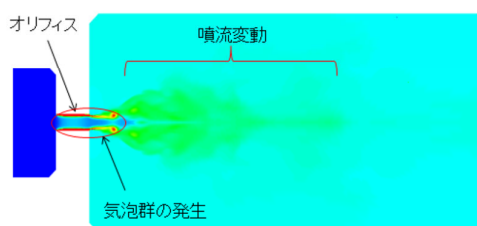
超音波洗浄

- 流れの加速・渦で局所圧力が飽和蒸気圧を下回り、**常温のまま気泡が発生・急崩壊する「圧力駆動」の相変化**
- ポンプ・バルブ・プロペラなどで**壊食・振動・騒音・性能低下**の原因になる一方、**超音波洗浄**のように気泡崩壊を洗浄に**積極利用**する場面もある
- 発生源は渦中心など**局所・瞬時の低圧部** — 実験計測は難しく、相変化のモデル化や気泡混じり流れの**音速低下**（圧縮性）など数値解析も難しい

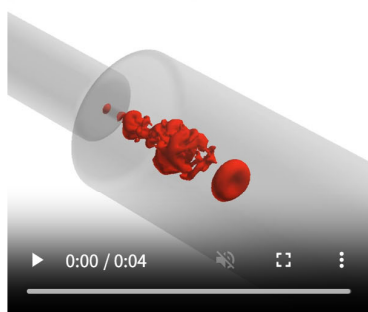
Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3

解析事例：オリフィスキャビテーション噴流



解析対象 — オリフィス出口の気泡群発生と噴流変動



オリフィス下流の噴流変動と気泡群の発生 (動画)

オリフィスを通過する液体の流れに着目し、噴流（ジェット）の変動と、それに伴うキャビテーション気泡群の発生・挙動をAdvance/FrontFlow/redにより解析

- オリフィス出口で加速した噴流が下流へ大きく広がり変動する様子と、出口近傍での**気泡群の発生**を捕捉
- 噴流外縁に沿う**リング状・渦構造の気泡クラウド**の形成・放出など、キャビテーション噴流の**視覚的特徴を再現**
- 噴流低圧域での気泡集合と、下流の圧力回復に伴う**圧力パルス**から、壊食リスクの高い箇所を評価可能

オリフィス通過後の圧力低下で生じる気泡群の空間挙動と、それに伴う噴流の不安定性・変動を非定常解析で予測可能

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

4

AFFrのキャビテーションモデル（井小萩モデル）と検証



AFFrのキャビテーションモデル

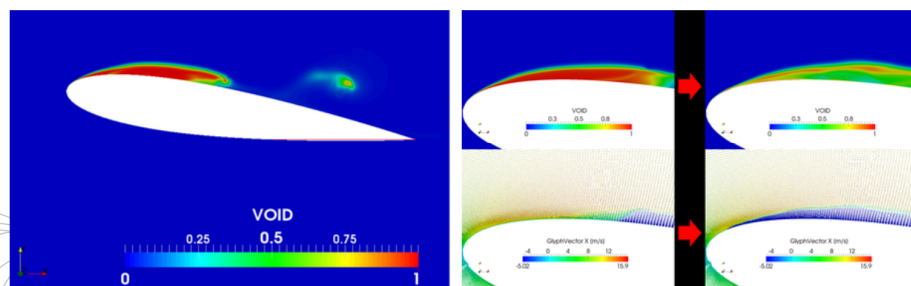
相変化ソース項（蒸気の生成・消滅率）： $\dot{m} = C \alpha^2 (1 - \alpha)^2 \frac{p_v(T) - p}{\sqrt{2\pi R_v T}}$

蒸発 ($p < p_v$): $C = C_e \rho_l / \rho_v$ (既定 $C_e = 10$) / 凝縮 ($p > p_v$): $C = C_c$ (既定 $C_c = 1$)。係数・基準圧などは入力で調整可能

- 東北大学 井小萩研究室のモデルを実装 — 局所圧力と飽和蒸気圧の差 ($p_v - p$) で駆動する均質媒体モデル。速度係数に分子運動論的な規格化因子 $\sqrt{2\pi R_v T}$ (Hertz-Knudsen型) を含む
- 減圧域の気泡発生と圧力回復域の急崩壊を、**蒸発・凝縮で非対称な速度係数**で表現。乱流モデルは RANS から LES まで組合せ可能

圧力差駆動の均質相変化モデルで、非定常キャビテーションを定量的に再現

基礎検証：NACA0015 2D翼まわり



- NACA0015 (AoA $\approx 8^\circ$) まわりの2D圧縮性NS解析 — 井小萩モデル+気液二相状態方程式
- シートキャビティ成長 → リエントラントジェットによる切断 → クラウドキャビティ放出の周期挙動を再現

シート→クラウド放出

リエントラントジェット（流速ベクトル）

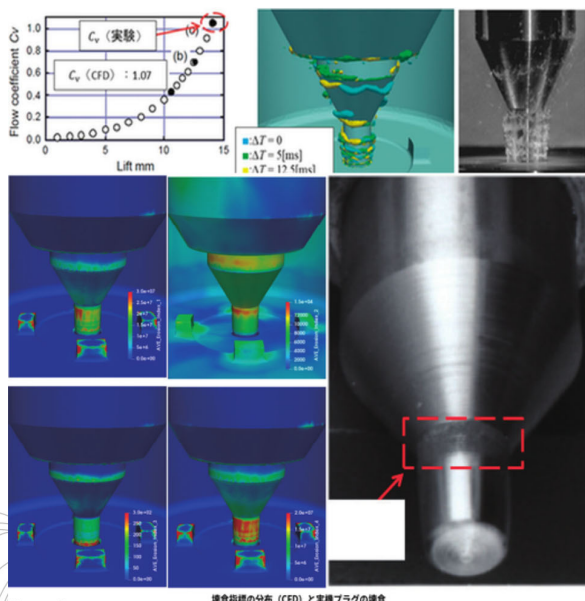
Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

5

壊食リスク評価 — キャビテーション解析後の指標化



アズビル株式会社 CFDを用いた調節弁に発生するキャビテーション壊食の予測(高藤様, 尹様)
https://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/2020/tech202004_07.html



壊食出現の位置 (CFD) と実験プラグの壊食

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

- キャビテーションの非定常解析のあと、壁面で壊食指標を時間統計し、**壊食リスクの高い箇所をマップ化** — 設計段階で評価
- エロージョン指標^[1]を壁面で評価：

壊食指標（周期 T_c で時間平均）^[1]

$$I_1 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \alpha \max\left(\frac{\partial p}{\partial t}, 0\right) dt$$

$$I_2 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \alpha \max(p - p_v, 0) dt$$

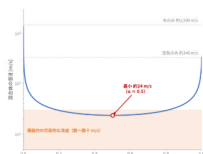
$$I_3 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \max\left(-\frac{\partial \alpha}{\partial t}, 0\right) dt$$

$$I_4 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \max(p - p_v, 0) \max\left(-\frac{\partial \alpha}{\partial t}, 0\right) dt$$

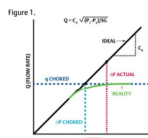
- LES+圧縮性解析で弁内の非定常キャビテーションを解像 — 左図のとおり流量係数 $C_{v,v}$ は実測と約2%で一致
- 約30時間運転後のプラグ壊食の位置・形態が指標の高い箇所と対応
- 本機能はカスタマイズ対応でのみ提供（標準機能には含まれない）

[1] N. Hasuike et al., Journal of the JIME, Vol.46, No.3, pp.79-87, 2011

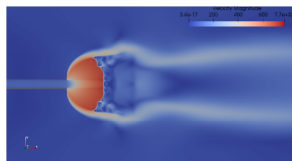
6



気液混合体の音速 — ボイド率 α に対する変化



差圧を上げてても流量は頭打ち



配管破断噴流の速度分布 (AFFr) — マッハディスクを再現

① 気液が混じると音速が激減する

- 気泡がわずかに混じるだけで、混合体の音速は水・空気どちらの単相よりも激減 ($\alpha \approx 0.5$ で最小約 24 m/s)
- なぜ? 圧縮性 (縮みやずさ) は気体が支配し柔らかい / 密度 (慣性) は液体が支配し重い — 「柔らかいのに重い」ので波が遅い
- $\alpha \approx 0$ では微量の気泡で圧縮性が急増して急落、 $\alpha \rightarrow 1$ で気体の値へ回復 — だから中間で最小になる

② 通常の流速でもマッハ1に達しチョーキング

- 音速が下がるため、機器内の通常の流速 (数〜数十 m/s) でも容易にマッハ1へ到達
- 絞り部で音速に達すると下流の圧力が上流に伝わらず、差圧を上げてても流量は頭打ち (チョーキング) — バルブで「どこまで差圧を掛けられるか」の指標
- AFFrは混合体の状態方程式から音速を各セルで評価し、圧縮性を考慮したSIMPLE法 (圧力ベース) でこの頭打ちを再現

③ フラッシングはその典型例

- フラッシング (高温高圧液の急減圧沸騰) はこの気液二相を生む典型 → 破断口・安全弁で臨界流となり、噴流は超音速の不足膨張でマッハディスク (衝撃波) を形成
- 解析事例: 配管破断噴流 — マッハディスク位置・噴流拡大率・圧力/温度分布が実測と良好に一致

Part. 2 | VOF法 — 気液界面を解像する

気液二相を「単一の流体場」でどう表現するか

Part. 1 キャビテーション — 均質に混合した気液を一つの流体として解く

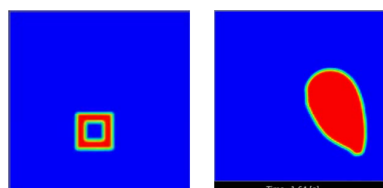
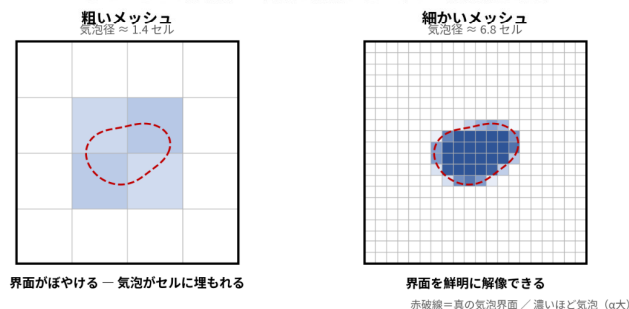
Part. 2 VOF法 — 界面を解像し、分離した気液を明示的に追う

Part. 3 電気化学デバイス — 多孔質電極内の液水を飽和度場で平均化して解く

Part. 4 超臨界流体 — 界面が消失した単一相を実在流体物性で解く

Part. 5 ラグランジュ粒子追跡 — 液滴を「点」として流体場中を追跡

VOFはセルごとの体積率 — 気泡の解像にはメッシュ細分化が必要



基礎検証：3つの界面移流テスト（動画）

解像するがゆえの難しさ

- 1つの気泡に**多数のセル**が必要 — 二流体モデルより計算コスト大
- 普通の移流スキームでは界面が**数値拡散**でぼやける — 鮮明に保つ工夫が必須

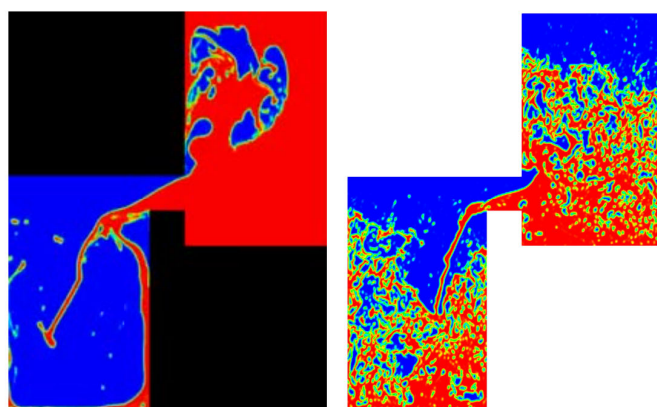
AFFrの実装の工夫

- CICSAM法：圧縮性スキームと高精度スキームを界面の向きでブレンド — 界面を1～2セル幅に維持（HRIC等も選択可）
- クーラン数制限付き自動サブサイクルで安定に移流、表面張力はCSFモデル、非構造格子にそのまま適用可

基礎検証 — 界面移流テスト

- ① 中空矩形の斜め移流：拡散せず形状を維持
- ② 剪断流れ：反転後に元の円形を回復（Tsui+ 2009と一致）

解析事例：タンクからの放水



赤＝水、青＝空気（VOF体積率で色分け）

解析モデル

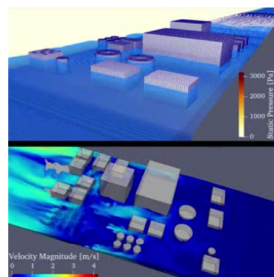
- 左右2つのタンク（各 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ ）を隔壁の開口で接続
- メッシュ幅 2.5 mm — 界面と気泡を解像できる細かさ

結果のポイント

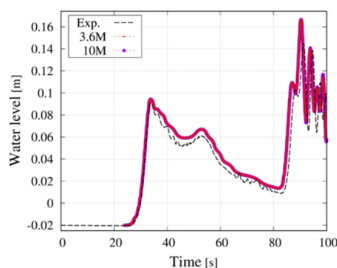
- 右タンクの水が空気を巻き込みながら左タンクへ勢いよく流入
- 巻き込まれた気泡は浮力でゆっくり水面へ上昇 — 界面の大変形と気泡の運動を1つの計算で一体に解析
- 落ち着いた後の界面は非常にシャープ — 前スライドで検証した数値拡散の抑制がそのまま効いている

大変形する自由表面＋気泡巻き込みをそのまま追跡

解析事例：建物を解像する市街地スケールの津波予測



解析動画（激しい浸水条件）



上流水位の時間履歴：実験と比較

なぜ建物を解像するか

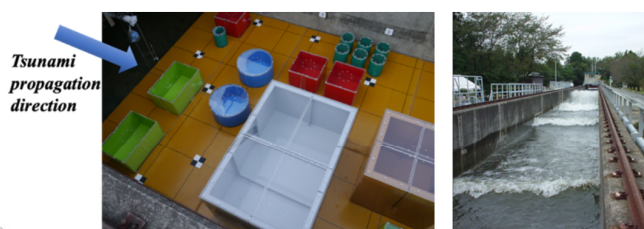
- 浸水範囲の予測だけでなく、**建物間の流れ・波力・避難計画の評価**には建物を明示的に解像した解析が必要

解析モデル

- 実験と同縮尺の3次元市街地モデル — 約**355万**節点
- 水面付近 鉛直 **1 cm**・建物周り 水平 **2.5 cm** の高解像度格子

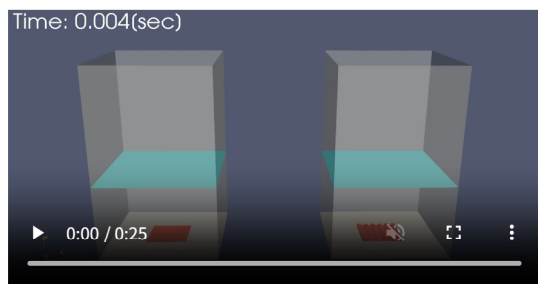
結果

- 建物群を駆け巡る渦・剥離流、道路に沿って加速するチャネリング現象、建物への非定常波力を可視化
- 上流水位の時間履歴が実験と良好に一致
- SX-Aurora TSUBASA 1VE・8並列：実時間 約100 s（約5万ステップ）を約1週間で解析

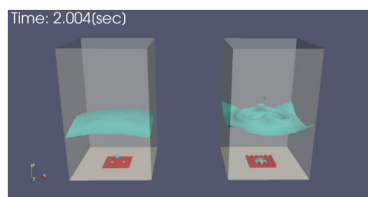


実験と同縮尺の市街地モデル（WCEE 津波遡上ブラインドコンテスト）

解析事例：沸騰解析 — 気泡を解像するVOFシミュレーション



気泡の発生・成長・離脱（左：プレート／右：フィン）（動画）



加熱部形状で変わる沸騰挙動

沸騰伝熱の主役である**気泡の発生・成長・離脱**をVOFで直接解像し、**加熱部形状（プレート型／フィン型）**による沸騰挙動の違いを比較。

解析条件

- 水温 80℃／過熱度 10℃／約50万メッシュ・12 MPI並列（現象 5 秒を約 6 時間）／1/4 対称モデル
- 相変化は加熱面で**温度回復法**＋界面で**熱流束差モデル**を併用

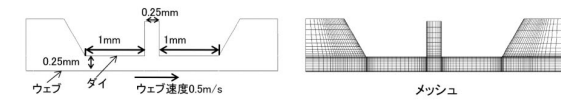
なぜ加熱部形状で挙動が変わるか

- フィン型**：溝・エッジが気泡の核生成サイトとなり、伝熱面積も拡大 — 気泡の発生・離脱が活発になり**自由表面が大きく乱れる**
- プレート型**：平坦で核生成サイトが限られ、気泡はまばら — **液面はほぼ静穏**にとどまる

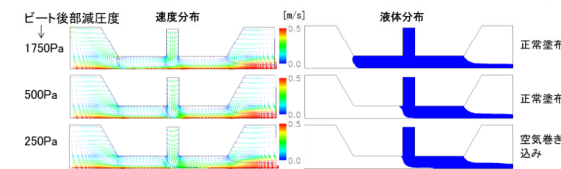
今後の展開

- 沸騰解析は現在**カスタマイズ対応限定**（フラッシング・エロージョン評価と同様）
- 高効率除熱としての**二相冷却の需要拡大**を見込み、**正規版搭載に向けて重点開発中**

気泡一つひとつを解像する沸騰解析 — 加熱面の設計（形状・過熱度）が沸騰挙動に与える影響を直接評価



スロットダイ塗布の解析モデルとメッシュ（ウェブ速度 0.5 m/s）



ビード後部減圧度による塗布状態の変化 — 250 Pa で空気巻き込み

- **ねらい**：塗布工程の正常塗布／空気巻き込み／濡れ上がりの条件窓を予測 — 塗りムラ・欠陥の原因を工程条件から評価
- 表面張力 0.061 N/m、静的接触角 ダイ60°・ウェブ40° — 濡れ性までVOFで考慮
- 減圧度 1750・500 Pa → 正常塗布、250 Pa → 空気巻き込み。実験の「500-1750 Pa で正常」という条件窓を数値的に再現

非ニュートン粘性（AFFr実装：Herschel-Bulkley型）： $\mu_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \dot{\gamma}^{n-1}$

$\dot{\gamma} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 。 $\tau_0 = 0$ で Power-law、 $n = 1$ で Bingham に帰着。実測の粘度—せん断速度カーブをフィットし、VOFの各相に個別設定可（Couette流・管内流で検証済み）

- 塗布液・樹脂・スラリーなどせん断速度で粘度が桁で変わる液も、自由表面と同時に解析

気液二相を「単一の流体場」でどう表現するか

Part. 1 キャビテーション — 均質に混合した気液を一つの流体として解く

Part. 2 VOF法 — 界面を解像し、分離した気液を明示的に追う

Part. 3 電気化学デバイス — 多孔質電極内の液水を飽和度場で平均化して解く

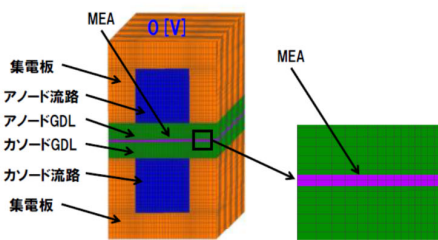
Part. 4 超臨界流体 — 界面が消失した単一相を実在流体物性で解く

Part. 5 ラグランジュ粒子追跡 — 液滴を「点」として流体場中を追跡

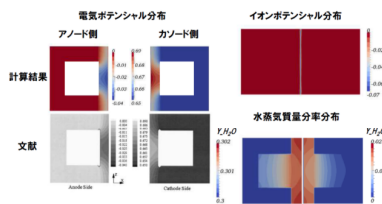
解析事例：燃料電池（PEFC） — 電気化学×液水輸送



単一流路モデルによる検証



解析対象：単一流路モデル^[1]（流路・GDL・MEA・集電板、約20万要素）



セル内部の分布（計算 vs 文献^[1]） — 電気・イオンポテンシャル、水蒸気質量分率

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

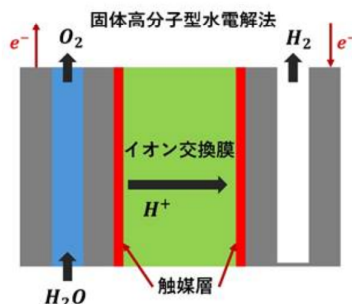
- **ねらい**：セル内部の反応・輸送から発電性能（I-V特性）を予測 — 流路・GDL・MEA設計を試作前に評価
- **AFFr拡張モデル**：
 - Butler-Volmer型の電気化学反応（アノード／カソード）
 - 電気・イオンポテンシャルの輸送方程式 → **電流密度分布**を算出
 - **液水飽和度の輸送**（毛管圧=Leverett関数、蒸発・凝縮を相間ソース）に加え、電解質膜内の水輸送モデルも搭載
 - 多成分ガス物性：Chapman-Enskog（粘性・拡散）、NASA 7係数（熱物性）
- **分布の見方**：ポテンシャル勾配が反応・電流の集中を、水蒸気分率がカソード側の生成水・フラディング傾向を可視化
- **検証**：文献^[1]の単一流路モデルと同条件 — 各分布が文献と一致し、I-V特性も実験と良好に一致

[1] Magnussen, B. F., Hua Meng and Chao-Yang Wang, "Electron Transport in PEFCs", J. Electrochem. Soc., 151 (3) A358-A367 (2004)

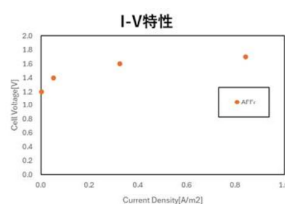
電気化学反応・液水・ガス拡散を1つのCFDで — 設計変更の影響をI-Vカーブまで直結して評価

15

解析事例：水電解（PEM形） — 水素製造のCFD



固体高分子（PEM）形水電解 — アノードでO₂、カソードでH₂を生成



- **水電解**：水を電気分解して水素を製造 — グリーン水素・脱炭素の要素技術として需要が拡大
- 物理は燃料電池と共通（電気化学反応＋物質輸送） — PEFC向けに拡張した同じAFFr基盤で解析：
 - Butler-Volmer型の電気化学反応
 - 電気・イオンポテンシャル輸送 → **電流密度分布**
 - 多孔質内の流れ・ガス拡散、発生ガスの混相流
- アノード側で水が分解されてO₂が発生、H⁺がイオン交換膜を透過し、カソード側でH₂を生成
- 解析から**I-V特性**を算出 — 印加電圧に対する電流密度（＝水素製造量）をセル内部の物理から予測

発電（PEFC）と水素製造（水電解）を同一の電気化学CFD基盤で — セル設計・運転条件をI-Vカーブで評価

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

16

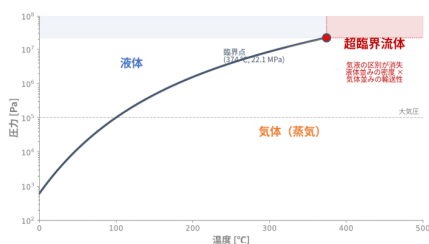
気液二相を「単一の流体場」でどう表現するか

- Part. 1 キャビテーション — 均質に混合した気液を一つの流体として解く
- Part. 2 VOF法 — 界面を解像し、分離した気液を明示的に追う
- Part. 3 電気化学デバイス — 多孔質電極内の液水を飽和度場で平均化して解く
- Part. 4 超臨界流体 — 界面が消失した単一相を実在流体物性で解く**
- Part. 5 ラグランジュ粒子追跡 — 液滴を「点」として流体場中を追跡

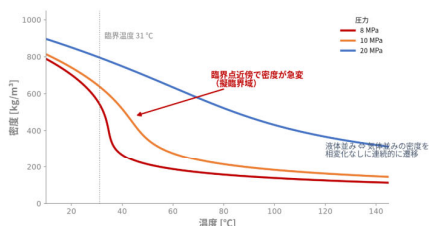
Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

17

超臨界流体の流動解析 — 実在流体物性モデル



臨界点を超えると気液の区別が消失（水の場合）



SRK状態方程式によるCO₂密度 — 擬臨界域の急変

- **超臨界流体**：液体並みの密度と気体並みの輸送性を併せ持つ — 臨界点近傍では物性が急峻に変化（擬臨界域）し、理想気体・非圧縮の仮定が成り立たない

実在流体物性モデル（AFFr搭載）

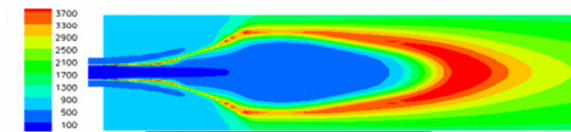
- **立方型状態方程式（SRK／Peng-Robinson）**：多成分の混合則（二成分間相互作用係数）と理想気体からのずれを解析的に評価 — **混合・燃焼系に強い**
 - **NIST実在流体テーブル**：温度×圧力の格子に8物性（ $\rho \cdot c_p \cdot c_v \cdot h \cdot \gamma \cdot \text{音速} \cdot \mu \cdot \lambda$ ）を内蔵 — **純物質の臨界点近傍を高精度に再現**
- 輸送物性はChungの高密度流体モデル等を選択可
- **適用例**：ロケットエンジンの超臨界圧噴射・燃焼、超臨界CO₂サイクル機器、高圧ガスの噴射・充填

臨界点まわりの急峻な物性変化を実在流体モデルで捕捉 — フラッシング解析もこの物性基盤の上に構築

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

18

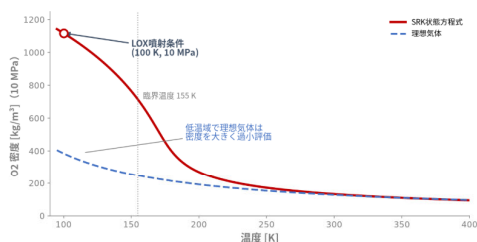
解析事例：超臨界圧燃焼 — ロケットエンジン噴射器



温度[K] **実験結果^[1]と良好な一致!**

※[1] Proceedings of the 2nd International Workshop on Rocket Combustion Modeling, DLR, 2001.

LOX/GH₂同軸噴射器の温度場 — 実験ベンチマーク (DLR 2001) と良好な一致 (公式解析事例集より)



10 MPa の O₂ 密度 — SRK と理想気体 (AFFr と同一定数で作図)

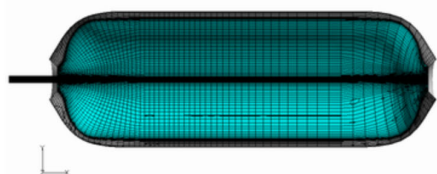
Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

- **遷臨界噴射**：LOXは臨界圧 (5.04 MPa) 超・臨界温度 (154 K) 未満の状態では噴射 — 気液界面・表面張力・蒸発潜熱が消失し、界面追跡や相変化モデルなしの**単相**として扱える
- **実在気体効果**：理想気体は低温域で密度を大きく過小評価 — **SRK状態方程式+departure関数**で密度・比熱・音速を評価 (NISTデータと良く一致)
- **火炎構造**：火炎はLOXポスト先端に付着した拡散火炎で厚さ **0.1 mm 以下**・約3800 K (最小格子 1 μm で解像)
- **解析の難所**：臨界点近傍では比熱がピークを持ち、密度が液体並みの急勾配 (擬似界面) で変化 — **数値振動・不安定**の原因となるため、頑健な実在流体EOS実装と高解像度格子が鍵

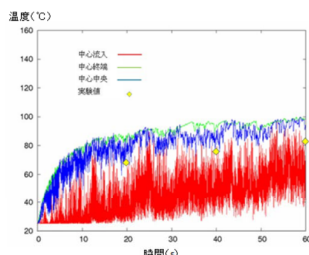
物理描像の出典：松山ほか, JAXA-SP-05-017/JAXA-SP-06-010 (航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集, 2006)

19

解析事例：自動車用圧縮水素容器の急速充填



容器・流入配管の解析格子 (約12.7万要素)



容器内代表点の温度履歴 — 実験値 (◆) を良好に再現

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

- **背景**：燃料電池車の水素充填は**数分での急速充填**が前提 — 断熱圧縮により容器内温度が上昇し、**容器材料の使用上限温度**が制約 → 充填中の温度予測が重要
- **解析条件**：AFFr ver.4.0 / LES (標準スマゴリンスキー) / **実在気体EOS：SRK** / 多層容器壁との**共役伝熱** / 流入 8.3×10^{-3} kg/s (60 秒で約 2 → 30 MPa)
- **解析の難所**：温度上昇は「圧縮による発熱」と「壁への放熱」の競合で決まる — 30 MPa級の水素は**理想気体から大きくずれ** (論文副題「実在気体の影響」、実在気体EOSと壁共役伝熱の**両方**を解かないと温度が合わない)
- **結果**：容器内の温度成層と代表点の温度履歴が**実験と良好に一致** — 急速充填時の温度評価に実用可能

出典：公式解析事例集 (JARI受託・NEDO水素社会構築共通基盤整備事業) / 木枝ほか「自動車用圧縮水素容器の急速充填シミュレーション」自動車研究 30-6 (2008) 287-290

20

気液二相を「単一の流体場」でどう表現するか

Part. 1 キャビテーション — 均質に混合した気液を一つの流体として解く

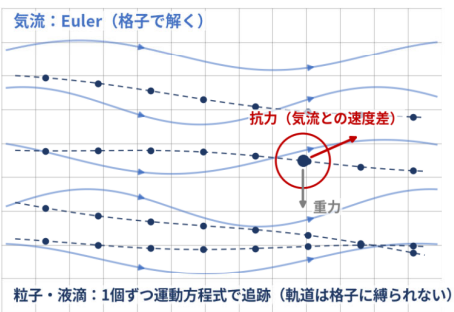
Part. 2 VOF法 — 界面を解像し、分離した気液を明示的に追う

Part. 3 電気化学デバイス — 多孔質電極内の液水を飽和度場で平均化して解く

Part. 4 超臨界流体 — 界面が消失した単一相を実在流体物性で解く

Part. 5 ラグランジュ粒子追跡 — 液滴を「点」として流体場中を追跡

ラグランジュ粒子(液滴)追跡



気流はEuler（格子）、粒子はLagrange（軌道追跡） — Euler-Lagrange 法



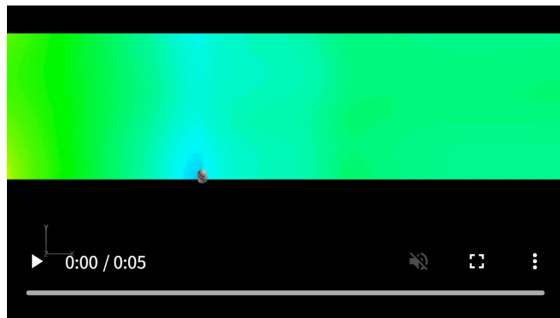
粒子濃度による使い分け

考え方

- 気流は格子上で解き、粒子・液滴は1個ずつ運動方程式（抗力・重力）で軌道を追跡
- 格子より小さい粒子を「点」として扱う — 界面を格子で解像しないから液滴数百万個でも追える
- 粒子→気流への反作用は抗力の運動量ソースで反映（two-way coupling）

適している場面

- 低濃度の分散相 — 噴霧・粉体・ミスト（体積率が小さい）
- スケール差が大きい — 粒径 μm ～ $\text{百}\mu\text{m}$ vs 装置スケール m
- VOFで1個1個の界面を解くと計算コストが非現実的になる多数液滴



気流に晒された液滴群が分裂・散逸していく（動画）



左：噴射直後の液滴列 右：微細な粒子群へ分裂し拡散

- インジェクター等から噴射された直後の液柱・液滴が、周囲気流との**相対速度（せん断力）**と**表面張力のバランス**でより細かな液滴へ壊れていく — **二次微粒化**
- AFFrは**Pilchモデル**を搭載：液滴の**Weber数**に応じて**分裂形態**と**分裂時間**を評価し、親液滴を微細な子液滴群へ置き換え
- 動画では、横風に晒された液滴列が時間とともに激しく変形し、**無数の微細粒子群へ分裂・散逸**しながら軌道を描いて拡散していく様子を可視化
- 格子で1個1個の分裂界面を解像せずに、**噴霧の粒径分布・到達距離**を予測 — 燃料噴霧・スプレー塗装・ミスト生成の要素技術
- このほか液滴の**蒸発・沸騰**も装備：Ranz-Marshallの熱・物質伝達で、飽和蒸気圧 + D^2 則 / Langmuir-Knudsen 非平衡蒸発、沸点で沸騰へ切替。**蒸気を質量ソース・潜熱をエネルギーシンク**として気相へ two-way 連成（気化・冷却まで評価）

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

23

まとめ

AFFrの二相流関連機能

- **キャピテーション** — 相変化ソース + 気泡混じり流の圧縮性・壊食評価
- **VOF法** — 界面捕獲 + 表面張力・沸騰／凝縮・非ニュートン
- **電気化学デバイス／多孔質媒体** — 飽和度輸送 + Leverett毛管圧（PEFC・水電解）
- **超臨界／実在流体** — 状態方程式で界面消失域まで
- **ラグランジュ粒子** — 噴霧・蒸発・沸騰・二次微粒化

幅広い現象を1コードで — 二相流予測の高いポテンシャル

シミュレーションでできること

- **観る** — 観測しにくい現象（気泡崩壊・界面・機器内部）を可視化・定量化。二相流は高速・微小・不透明・壊食で実測が難しい
- **予測する** — 機器形状・運転条件を変えた結果を試作前に評価。多数の設計案を比較し、開発の試行回数・コストを削減

二相流でお困りの方へ

- まずは**標準機能**で解く
- 足りなければ**モデル追加・カスタマイズ**（自社開発コード）
- 解析リソースが無ければ**受託解析**も

見えにくい現象を「観て」、設計変更の結果まで「予測」する — 標準機能・カスタマイズ・受託解析まで、課題に合わせて対応します

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

24

価格および関連サービスのご紹介

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

価格のご案内

ー基本ライセンス料金

契約形態	AFFr 基本	+ 混相流OP	AFFr + 混相流OP
スタンダード 年間ライセンス	100万円	+ 200万円	300万円
買取ライセンス	300万円	+ 200万円	500万円
Unlimited 年間ライセンス	500万円	+ 200万円	700万円
Unlimited 買取ライセンス	1,500万円	+ 500万円	2,000万円

ー教育機関向け（アカデミック版）

契約形態	AFFr 基本	+ 混相流OP	AFFr + 混相流OP
スタンダード 年間ライセンス	50万円	+ 100万円	150万円
買取ライセンス	150万円	+ 100万円	250万円
Unlimited 年間ライセンス	250万円	+ 100万円	350万円
Unlimited 買取ライセンス	750万円	+ 250万円	1,000万円

ー保守サポートサービスを含む（最新バージョンの使用権、E-mailによる問い合わせ対応）

ー買取りライセンスは、次年度以降に保守サポートの更新が必要となります。

ー教育機関向け（アカデミック版）はライセンス料金半額になります。

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

解析事例集のご案内 (AFFr)

<https://www.frontflowred.advancesoft.jp/cases/>

**Advance/**FrontFlow/red

ホーム製品紹介導入前後のサポート解析サービス用語集お問い合わせ

解析事例一覧

cases

絞り込みたいカテゴリーを複数選択すると、いずれかのカテゴリーに該当する項目が「AND検索」で表示されます。

機能から探す

熱流体

乱流

化学反応・燃焼

輻射

目次

- 機能から探す
- 産業分野から探す
- 投稿タイプ
- 並べ替え
- 解析事例一覧
 - スロットダイ塗布
 - 円筒タンクのスロッシング
 - 気液混合流の流動
 - 気泡塔の流動解析

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

並べ替え

投稿日順

閲覧数順

解析事例一覧

スロットダイ塗布解析

記事 #自由表面 #材料・化学 #溶剤流

リチウムイオン二次電池 (LIB) 極板、導板、有機ELディスプレイ用光学フィルム、半導体フォトリソレジスト塗布などで広く採用されている「スロットダイ塗布 (Slot Die Coating)」を対象に、流体解析ソフト Advance/

FrontFlow/red の混相流解析オプション Advance/

FrontFlow/MP を用いて、2次元スロットダイ塗布解析を行った例をご紹介します。

詳細はこちら

円筒タンクのスロッシング解析

記事 #溶剤流 #自由表面 #噴霧・水

流体解析ソフト Advance/

FrontFlow/red の混相流解析オプション Advance/

FrontFlow/MP を用いた、地震波による円筒タンクのスロッシング解析の例をご紹介します。1968年十勝沖地震の八戸近海での地震記録を2次元にした地震波をXZ2方向に同時入力し、内径4m X 高さ4mの円筒タンク内の液体挙動、液面分布、最大液高と最小液高の時間変化、天板における最大圧力の時間変化を解析しました。

詳細はこちら

気液混合流の流動解析：気泡領域形成の評価

記事 #熱流体 #溶剤流

アドバンスソフトの開発・解析サービス

お客さまのご要望に応じて科学技術計算ソフトウェアの新規開発、機能追加、受託解析等のサービスをおこないます。

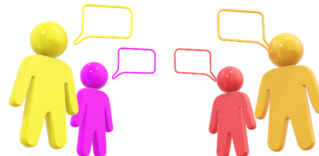


1. 流体・構造・ナノ関連など幅広い分野のソフトウェアを開発し、解析経験がある技術者がお客様の要望をお伺いいたします。

2. 最適な解析方法をご提案いたします。

3. お客様のご了解が得られましたら、モデリングを行い、解析を実施いたします。

4. 解析結果を可視化し、解析結果の評価や考察を行なって報告書を作成いたします。



お問い合わせ先：ご担当営業まで

TEL : 03-6826-3971 FAX : 03-5283-6580

E-mail : office@advancesoft.jp

Copyright ©2026 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立てる用途に限定して無料配布しています。
このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。
このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。