

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP 製品紹介セミナー

2016年12月15日(木)開催

プログラム

13:30~13:40 (10分)	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介 研究主席 中森 一郎
13:40~14:30 (50分)	特別講演「気液二相流の実験及び解析の動向」 電気通信大学教授 大川 富雄 様
14:30~14:40 (10分)	(休憩)
14:40~15:10 (30分)	圧縮性の顕著な気液二相流の数値解析 主管技師長 湊 明彦
15:10~15:30 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP 製品概要紹介 主管研究員 杉中 隆史
15:30~15:50 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP の新機能紹介 研究員 桐原 亮平
15:50~16:00 (10分)	気液二相流解析関連サービス紹介、質疑応答 主査 田口 浩一
16:00~16:30 (30分)	お客様の個別相談 (ご相談があるお客様に対して)

memo



アドバンスソフト株式会社のご紹介

研究主席 中森 一郎

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP 製品紹介セミナー

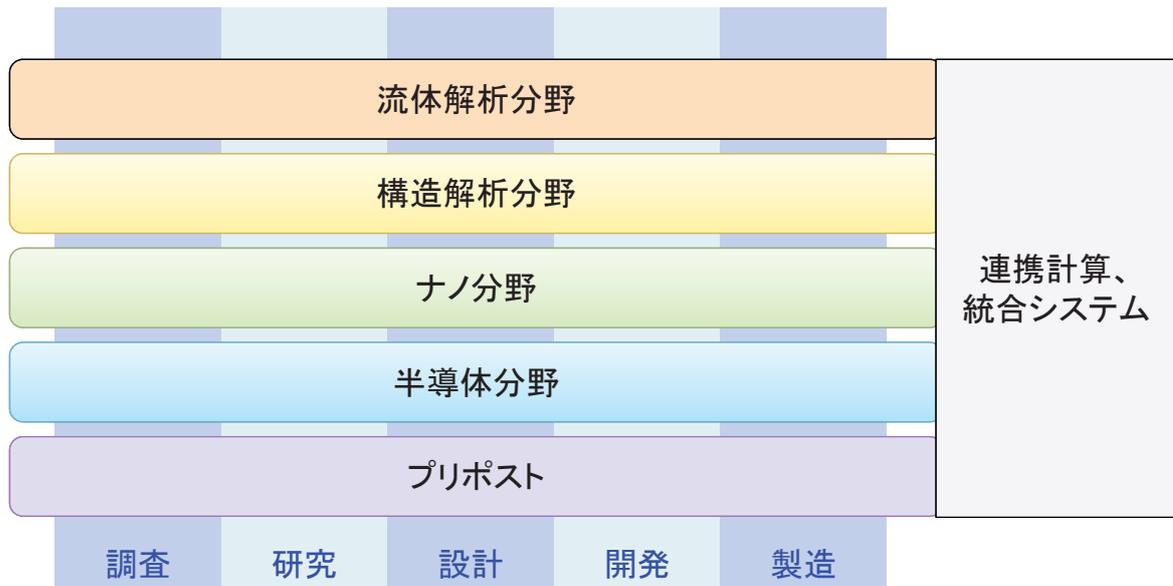
2016年12月15日 (木)
アドバンスソフト株式会社

会社概要

名 称	アドバンスソフト株式会社 AdvanceSoft Corporation
本 社	〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台4-3 新お茶の水ビル17階 TEL: 03-6826-3970 FAX: 03-5283-6580
設 立	2002年(平成14年)4月24日
資本金	3,724万円
社員数	90名(2016年12月1日現在)

事業部	部	業務概要
第1事業部	技術第1部 事業部付	・ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域の開発など
	技術第2部	・プリポスト・可視化システム・連成システム開発、構造解析エンジニアリングなど
	技術第6部	・次世代TCADシステムの開発 ・環境関連の開発、解析業務
第2事業部	技術第4部	・混相流に係わる次世代流体システム開発など
第3事業部	技術第3部	・乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
	技術第7部	・J-PARCIに係わるプロジェクトの実施等 ・発電・化学プラントやライフライン等の管路系流体解析エンジニアリング業務、次世代流体解析システム保守・販売サポート
第4事業部	技術第5部	・原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
—	総合企画部	・スーパーコンピューティングサービス ・防災シミュレーション ・コンサルティングサービスの提供 ・解析サービスの提供
営業本部	営業部	・お客様窓口

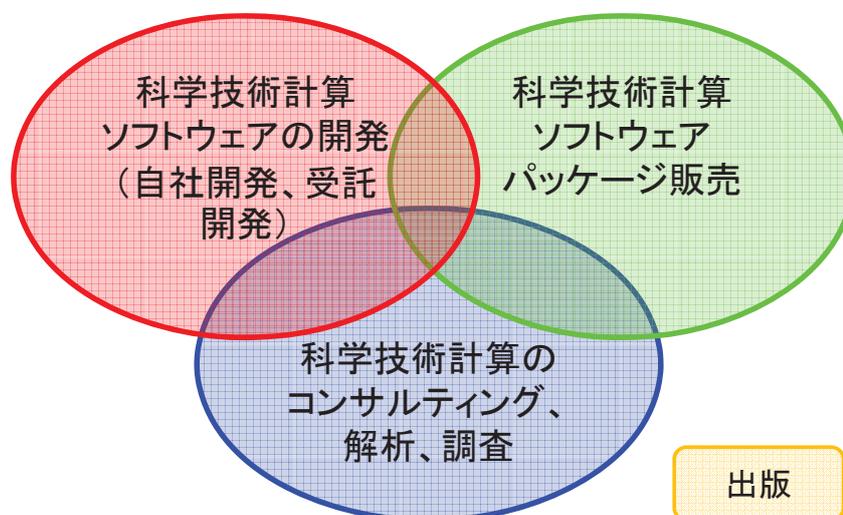
事業分野



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。

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。

事業内容（出版事業）



Vol. 23 最新号

- 特集「アドバンスソフトからサービスを提供するソフトウェア」
- ・「第一原理計算ソフトウェア Advance/PHASEの適用事例」
胡春平・田中大地・伊藤哲・岡崎一行
 - ・「流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/redの新機能」
富塚孝之・大西陽一・小川哲司・高橋邦生
 - ・「管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNetの新機能」
大須賀直子・秋村友香
 - ・「汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAPおよび関連するソフトウェアの新機能」
徳永健一
 - ・「気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの新機能」
杉中隆史・大島小百合・桐原亮平・中森一郎
 - ・「構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTRの新機能」
袁熙
 - ・「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseへの無限要素の導入」
松原聖・尾川慎介
 - ・「大規模3次元TCADシステム Advance/TCAD」
原田昌紀・大倉康幸・桑原匠史・萩原敦・島田昭男・徳屋純一・山口憲・小池秀輝
 - ・「大規模電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWaveの開発」
並木武文・松原聖
 - ・「分子動力学ソルバー LAMMPSの概要」
並木武文・小瀬村大亮
 - ・「圧縮性流体解析ソルバー Advance/FaSTARの概要」
中森一郎
 - ・「津波シミュレータ T-STOCを利用したサービス」
富塚孝之・鈴木雅也・河野裕暢・松原聖・島田昭男
 - ・「可視化ソフトウェア ParaView利用サポートサービス」
清野多美子・徳永健一・石井義隆・田之上文彦・鈴木将之
 - ・「汎用ジオメトリ/メッシュ作成ツールキット Cube-it」
加藤国男
 - ・「周波数領域と時間領域での音響解析」
松原聖・尾川慎介・並木武文・小瀬村大亮
 - ・「ハンズオンセミナーを題材とした音響解析入門」
尾川慎介・徳永健一・松原聖

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

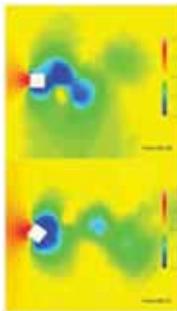
ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	火災解析・環境安全解析シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げています。詳細はwww.advancesoft.jpをご覧ください

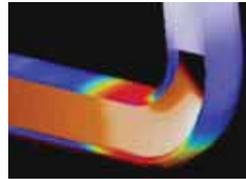
アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

流体

Advance/FrontFlow/red



Advance/FrontFlow/FOCUS



Advance/FrontFlow/MP

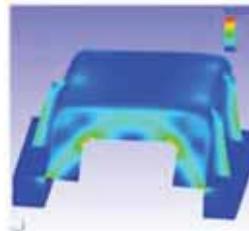


Advance/FrontNetシリーズ



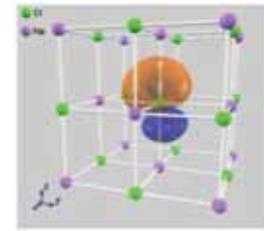
構造

Advance/FrontSTR



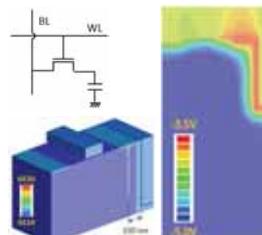
ナノ

Advance/PHASE



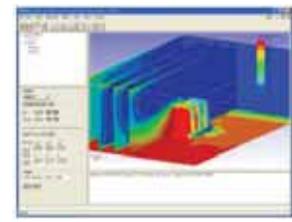
半導体

Advance/DESSERT



プリポスト

Advance/REVOCAP



※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP(www.advancesoft.jp)をご参照ください。

Advance Soft

「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

facebook、YouTubeでも当社の情報を発信しています

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

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

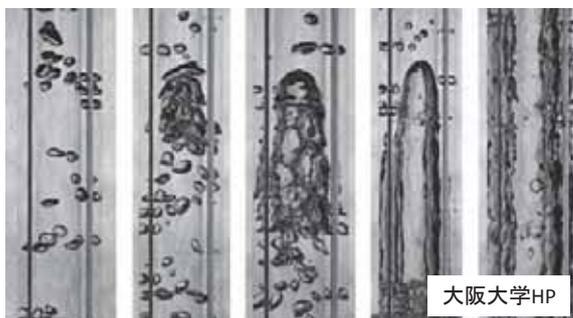
気液二相流の実験及び解析の動向

大川 富雄

電気通信大学 機械知能システム学専攻

okawa.tomio@uec.ac.jp

気液二相流の流動形態



▷ 流動形態は様々で適切なモデルの選択が必要

- ▷ 粒子追跡法
- ▷ 一次元二流体モデル
- ▷ 多次元二流体モデル
- ▷ 界面追跡法

気液二相流の解析モデル

モデル	長所	短所
界面追跡法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 瞬時局所の式に基づく(気液界面をダイレクトに計算する)ので、高解像度かつ相関式依存度低であり、原理的に高精度解析が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最小空間スケールの空間分解能が必要で、計算時間が膨大(局所詳細メッシュ有効な場合も)。 ・ 気泡合体や沸騰核など、ミクロスケール現象はモデル化が必要。
混合流モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低計算負荷。 ・ 高速流解析や定常システム系統解析に有効。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基本的には一次元・定常解析用 ・ 混合がきわめて良い場合(単相流的に取扱い可能な場合)を除いて、多次元解析や非定常解析には不向き。
二流体モデル(1D)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低計算負荷。 ・ 非定常を含めてシステム解析に有効。 ・ 相関式がよく整備されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 複雑形状流路など、多次元性の強い場には不向き(相関式の開発困難)。
二流体モデル(3D)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現実的な計算負荷で、複雑形状流路内二相流など、多次元かつ非定常の問題を解析可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気泡流以外(特に環状噴霧流)への適用例は少ない。 ・ 相関式開発が必ずしも容易でない(多くの相関式は一次元解析用で、空間スケールが必ずしもマッチしない)。
粒子追跡法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液滴、気泡合体などの素過程について、高度な相関式を導入しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高度な相関式の整備は容易でない。 ・ 分散流以外に適用できない。

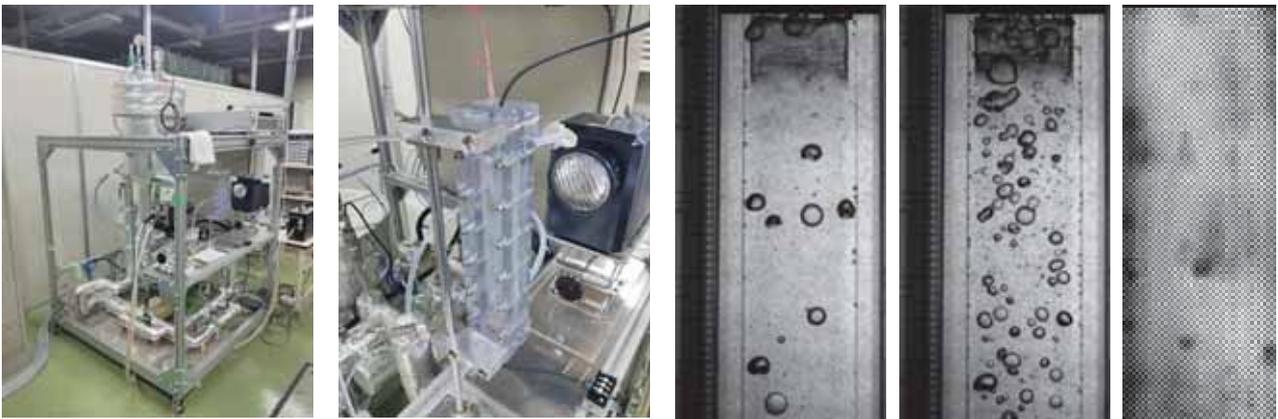
気液二相流解析の現状

- ▶ 様々なモデルがあり、問題に応じて適切なモデルを選択する必要がある。
- ▶ 決定版といえる汎用的なモデルは存在しない。
- ▶ 合理的と思われる解が得られても、物理現象を正確に再現できている保証はない。
 - ▶ 多次元二流体モデル解析で、環状噴霧流が得られるか？
- ▶ 解析モデルの限界を理解した上で解析する必要性



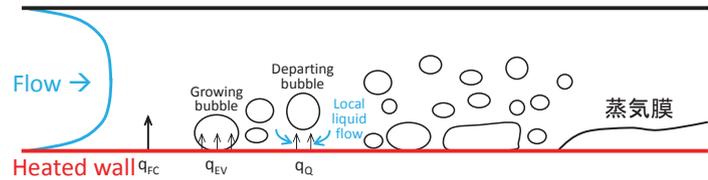
気液二相流実験

- ▷ 実験対象は、解析では再現困難な現象
- ▷ 実験例より、現時点における気液二相流解析手法の課題を考察
 - ▷ 強制対流サブクール沸騰
 - ▷ 多孔質体を用いた高性能冷却
 - ▷ 高温金属の急冷
 - ▷ 液体噴流
 - ▷ 液滴・液膜衝突
 - ▷ ミニチャンネル貫流ボイラ



強制対流サブクール沸騰

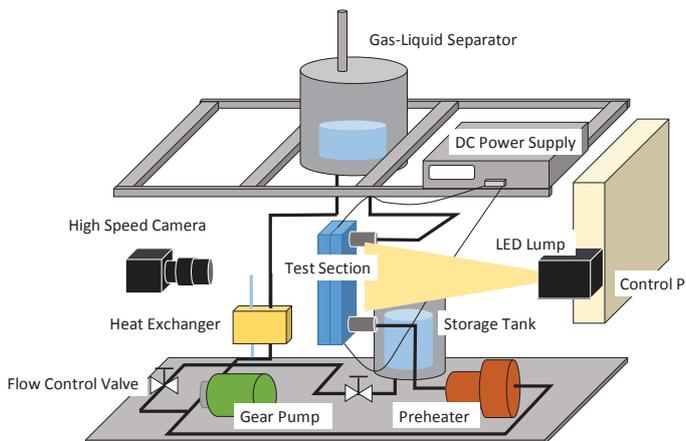
背景



- ▷ ボイド率は、「沸騰量」と「凝縮量」のバランスにより決定される。
- ▷ 沸騰量の高精度予測がまず重要
 - ▷ 発泡核密度
 - ▷ 気泡生成周期
 - ▷ 初期気泡径
- ▷ 凝縮量
 - ▷ 気泡径(界面積濃度)に大きく依存
 - ▷ 気泡径分布の影響はどの程度か？平均値を押さえておけば良いのか？
 - ▷ 気泡の伝熱面離脱速度に大きく依存



実験装置・方法

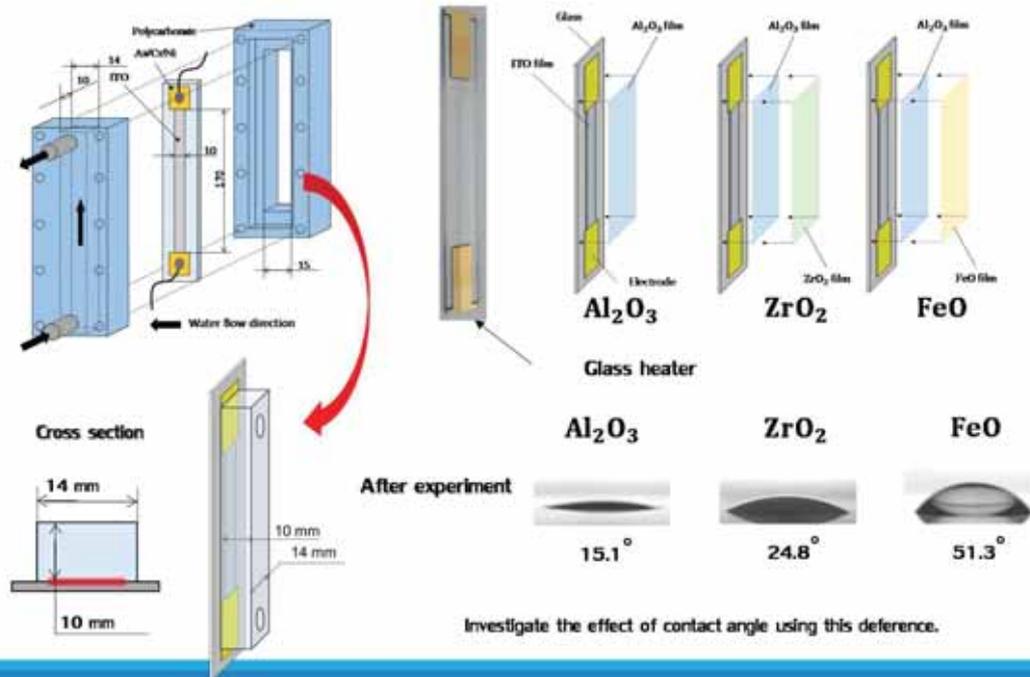


- ① 流量設定
- ② 入口温度の設定
- ③ テストセクションに加える熱流束を徐々に増加
- ④ 高速度カメラによる気泡挙動計測
または
- ⑤ IRカメラによる伝熱面温度計測

実験条件

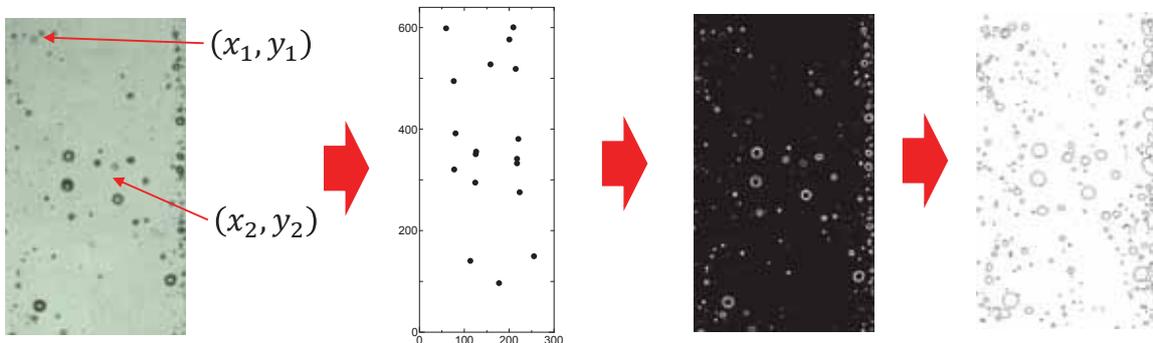
q_w (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	ΔT_{sub} (K)	θ (°)	Frame Rate (fps)	S. R. (pixel/μm)
176-617	160-700	10-40	15,25,51	6400	21-34

テストセクション

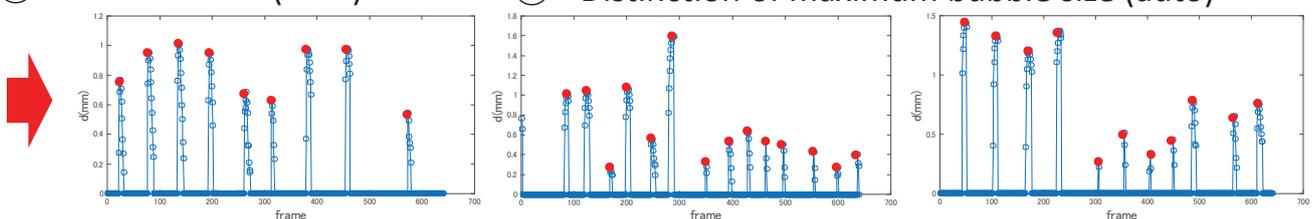


すべての気泡の最大径を計測

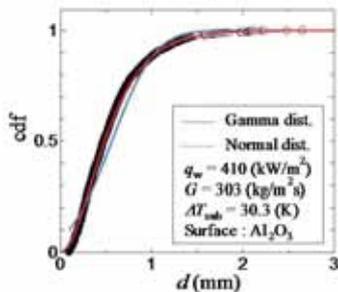
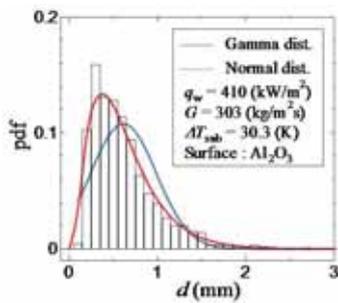
- ① Measure positions (manual) → ② Filtering and analysis (auto)



- ③ Identification (auto) → ④ Distinction of maximum bubble size (auto)



気泡径分布のフィッティング



A typical case

$$\text{pdf} : f(d_b) = d_b^{\alpha-1} \frac{\exp\left(-\frac{d_b}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \quad \text{cdf} : F(d_b) = \frac{\gamma(\alpha, d_b/\beta)}{\Gamma(\alpha)}$$

α : shape parameter β : scale parameter

Fitting error

Gamma dist. : 6.7 %
Normal dist. : 12.8 %



Gamma dist.
is used to fit

Calculated by L.S.M

Parameters : $q_w, G, \Delta T_{\text{sub}}, \theta$

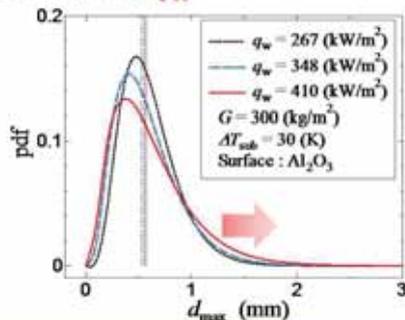


Investigate

Parametric trends of the bubble size and the bubble size distribution (α, β)

パラメーター依存性

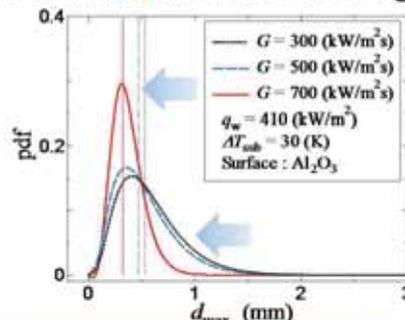
Heat flux q_w



Effect of q_w on...

- The mean bubble size Not significant
- The distribution Breadth increases

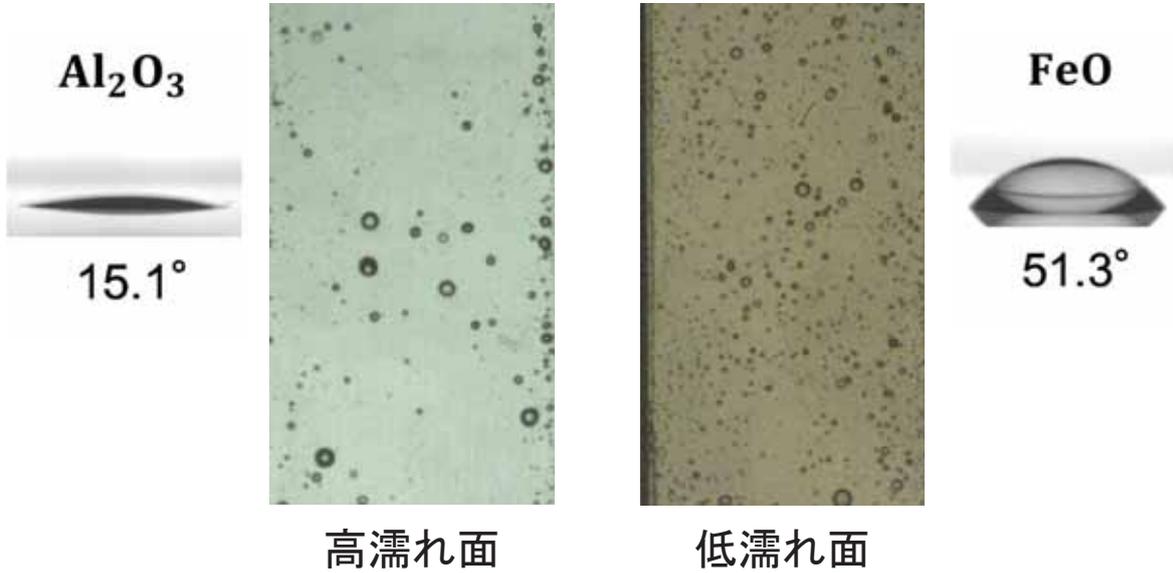
Mass flux G and Subcooling ΔT_{sub}



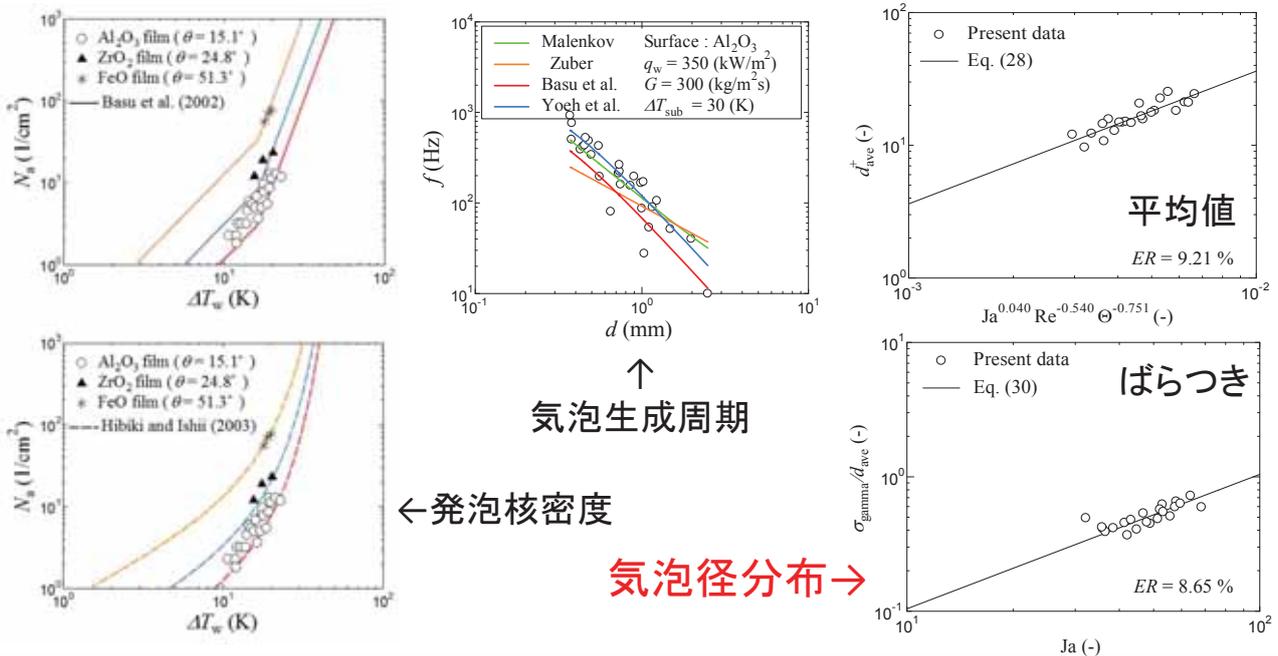
Effects of $G, \Delta T_{\text{sub}}$ on...

- The mean bubble size Mean bubble size decreases
- The distribution Breadth decreases

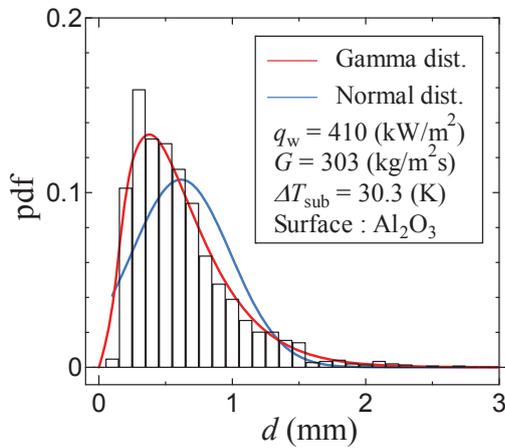
接触角(濡れ性)の影響



各種相関式開発



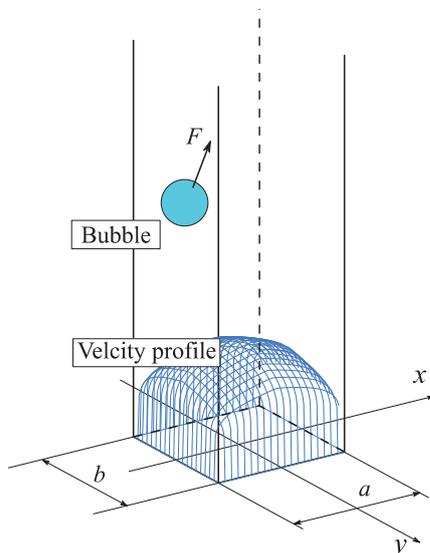
実験結果のまとめ



- ▷ 発泡核密度や気泡生成周期のトレンドは既存相関式と概ね一致
- ▷ 気泡径分布: 実に様々なサイズの気泡が生成される。
 - ▷ 左の例では0.2~2.5mm
 - ▷ 平均気泡径相関式しか存在しないため、気泡径**分布**相関式を開発
- ▷ 平均気泡径で代表して問題ないのか？

気泡追跡シミュレーション

- ▷ 二流体モデルよりも気泡径分布を取り込みやすい



- ▷ 気泡の運動

$$\rho_b \frac{d\mathbf{u}_b}{dt} = -\nabla P - f_D - f_L - f_{VM} + \rho_b \mathbf{g}$$

$$\frac{d\mathbf{z}_b}{dt} = \mathbf{u}_b$$

- ▷ 気泡に加わる力

- 抗力 f_D

$$f_D = \frac{3}{4d_b} C_D \rho_l |\mathbf{u}_b - \mathbf{u}_{l,b}| (\mathbf{u}_b - \mathbf{u}_{l,b})$$

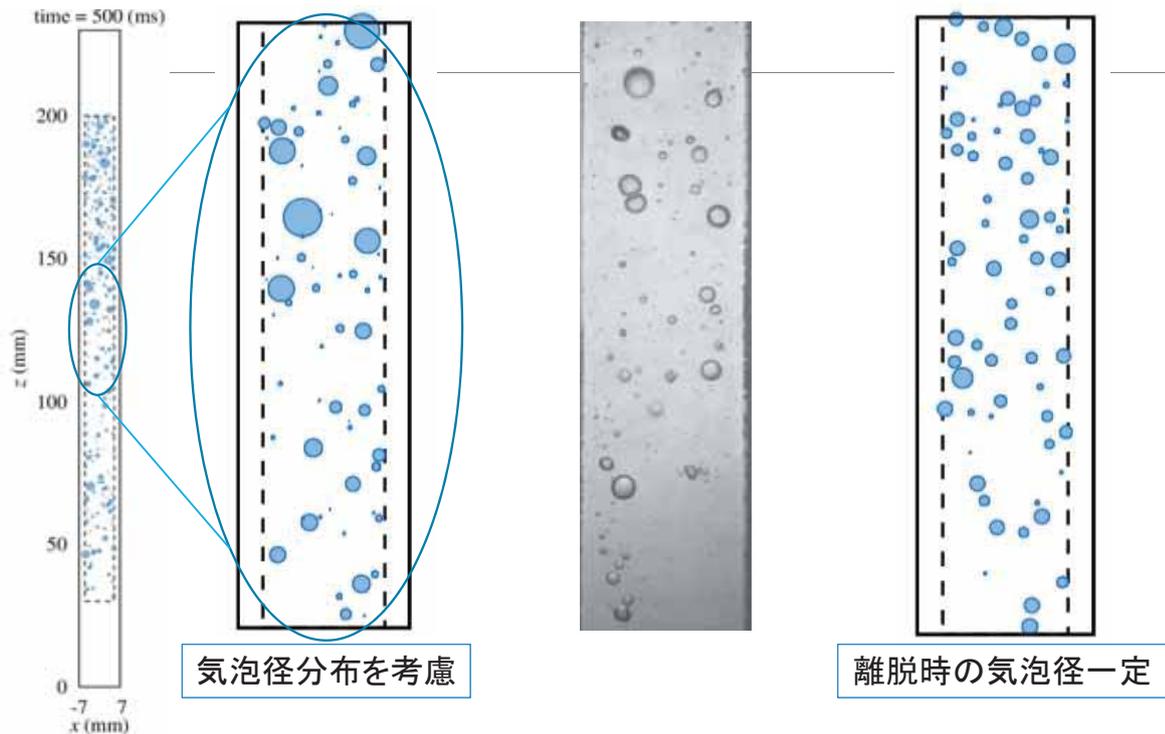
- 揚力 f_L

$$f_L = C_{lift} \rho_l (\mathbf{u}_b - \mathbf{u}_{l,b}) \times (\nabla \times \mathbf{u}_{l,b})$$

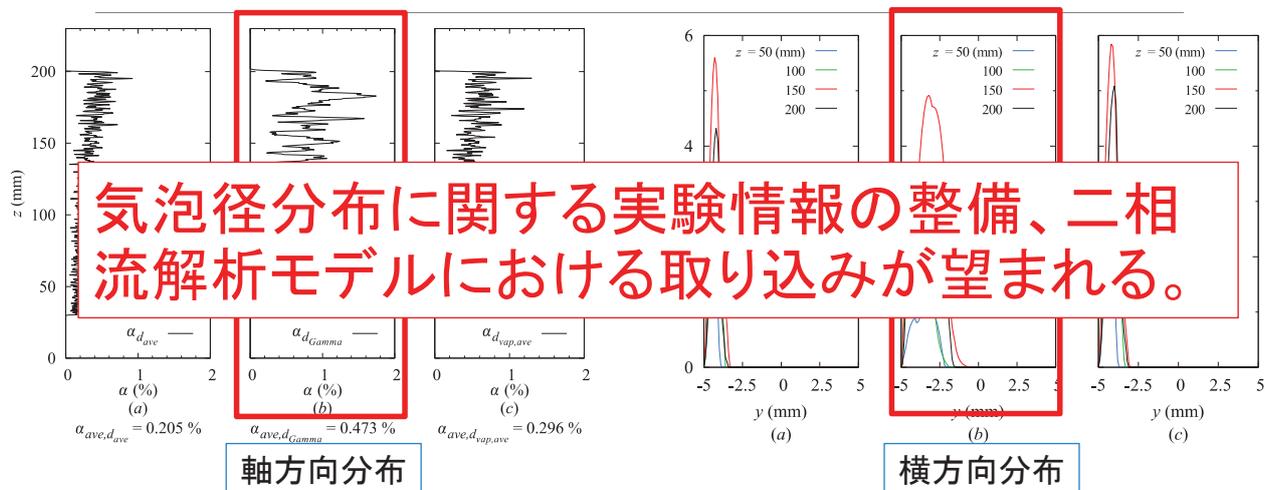
- 仮想質量力 f_{VM}

$$f_{VM} = C_{VM} \rho_l \left(\frac{d\mathbf{u}_b}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_{l,b}}{dt} \right)$$

計算結果



ボイド率分布



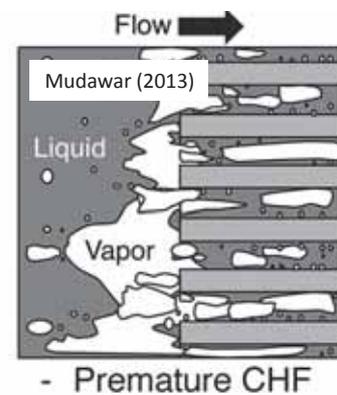
- ▷ 気泡径分布を考慮すると平均ボイド率が2倍程度増加。
- ▷ 高精度解析を行う上で、気泡径分布の考慮は必須。



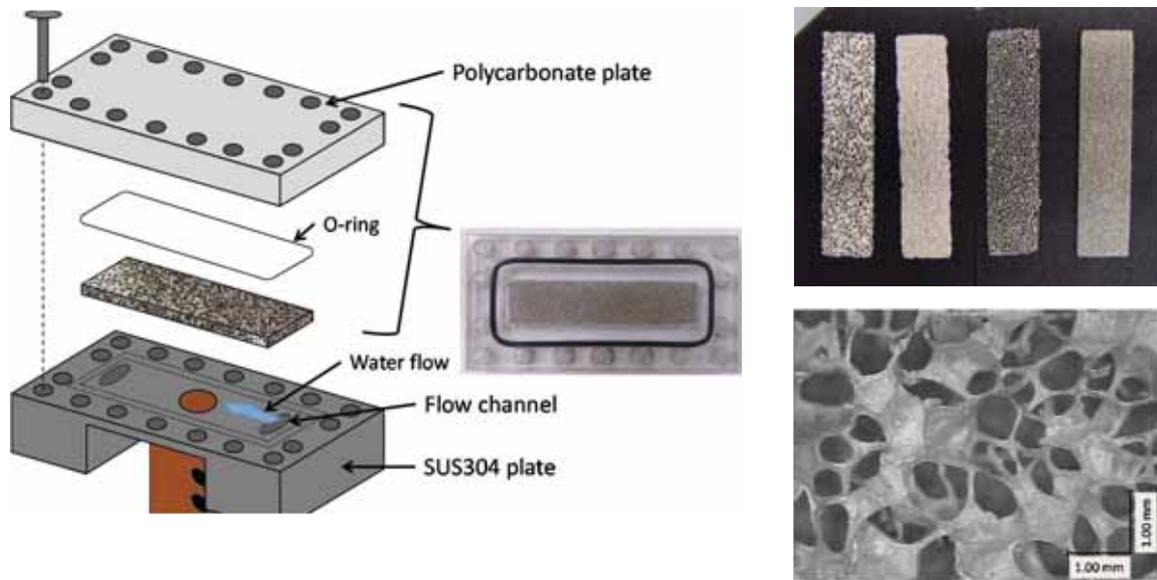
多孔質体を用いた高性能冷却

背景

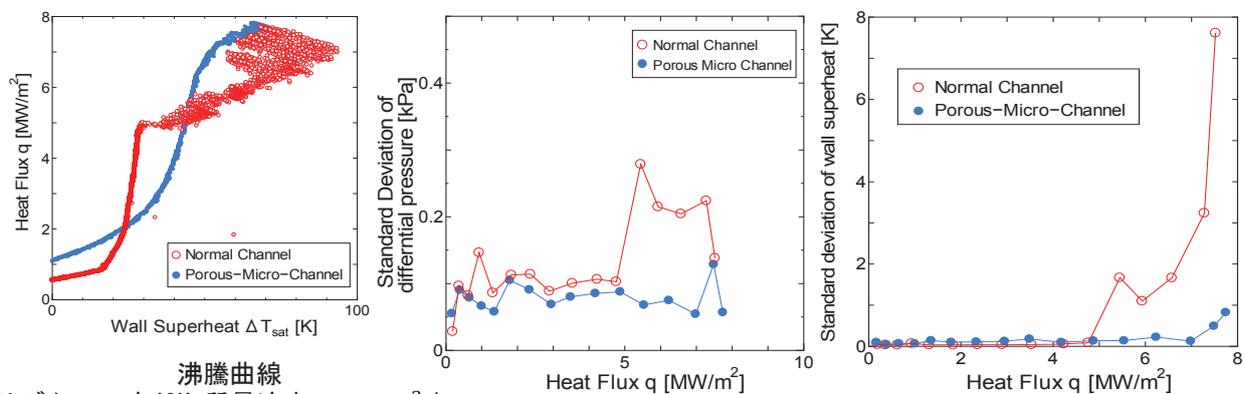
- ▷ 超高熱流束面の冷却
- ▷ 小口径流路内における沸騰熱伝達は有効な冷却手段と思われる。
- ▷ 不安定になりやすく、広く使用されるには至っていない。
- ▷ 高熱流束面を安定に冷却可能な手法の開発を狙う



ポーラスマイクロチャンネル



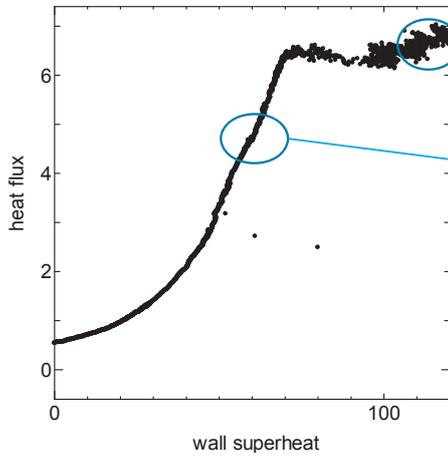
沸騰曲線、差圧変動、温度変動



沸騰曲線
(サブクール度40K 質量流束400kg/m²s)

- ▷ 通常流路(NC): 高熱流束域で、過熱度が大きく増加するとともに、差圧と伝熱面温度が激しく変動する。
- ▷ ポーラスマイクロチャンネル(PMC): 変動が大幅に緩和される。

流動の様子(NC)



通常流路における沸騰曲線

(サブクール度40K 質量流束 $G=400\text{kg/m}^2\text{s}$)

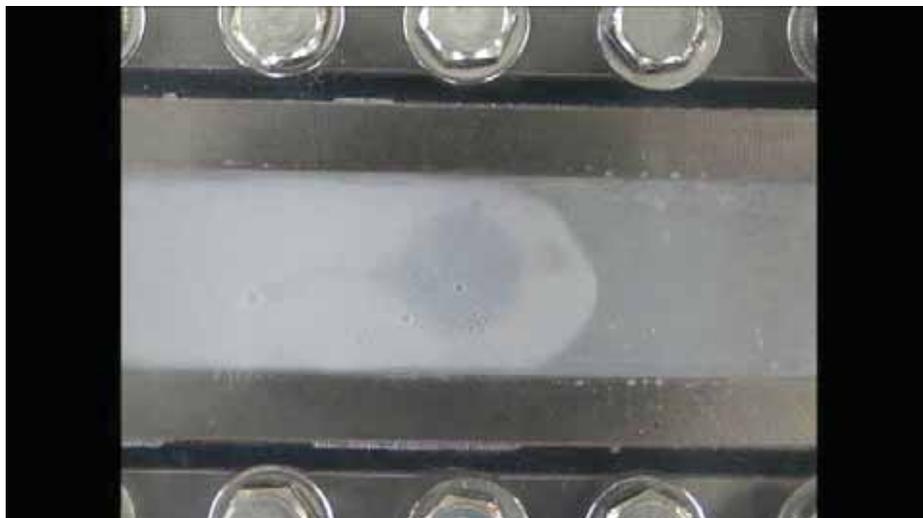


69.82dB

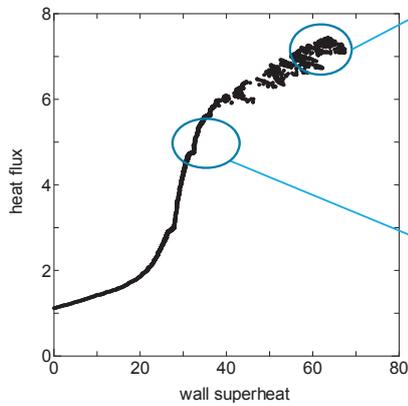


63.93dB

NCにおける不安定流動



流動の様子(PMC)



ポーラスマイクロチャンネルにおける沸騰曲線
(サブクール度40K 質量流束 $G=400\text{kg/m}^2\text{s}$)



63.28dB



63.59dB

NCとPMCの比較



69.82dB

差圧標準偏差 0.145144 [kPa]



63.28dB

差圧標準偏差 0.0668 [kPa]

- ▷ 多孔質体内によるミキシングにより、大気泡が消滅。
- ▷ 多孔質体内の流れを解析できれば、容易に最適化可能。

高温金属の急冷

背景

- ▷ 高温面の急冷
 - ▷ 様々な場面で重要
 - ▷ 鉄鋼材料の焼入れ
 - ▷ 原子炉における緊急冷却
- ▷ きわめて高温の面を水で冷却する場合、沸騰形態は膜沸騰となるため、急冷できない。
- ▷ 何らかの工夫により、急冷できないか？

冷却状況の比較(初期 温度約1000°C)



表面加工なし



表面加工あり

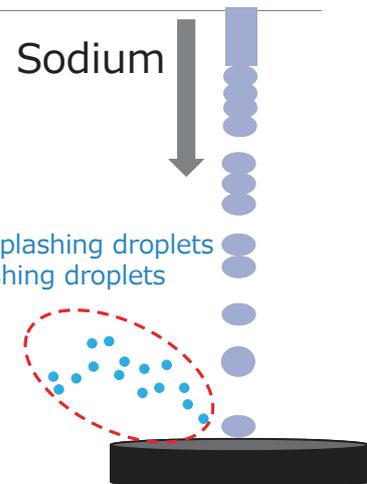
▷ 表面状態をシミュレーションに組み込めるか？

液体噴流

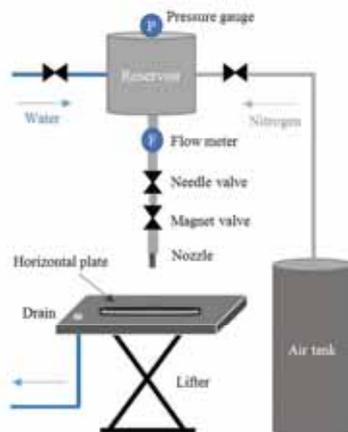


背景

- ▷ 高速炉でナトリウムが漏洩
- ▷ 雰囲気中の湿分、酸素と反応して火災を生じる可能性がある。
- ▷ 燃焼: 表面反応
 - ◆ Amount of splashing droplets
 - ◆ Size of splashing droplets
- ▷ 液体噴流が構造物と衝突したときに生じる液滴飛散により、反応場が提供される。
- ▷ ナトリウム燃焼の激しさを評価する上で、飛散液滴の「総量」と「サイズ」が重要。



実験装置

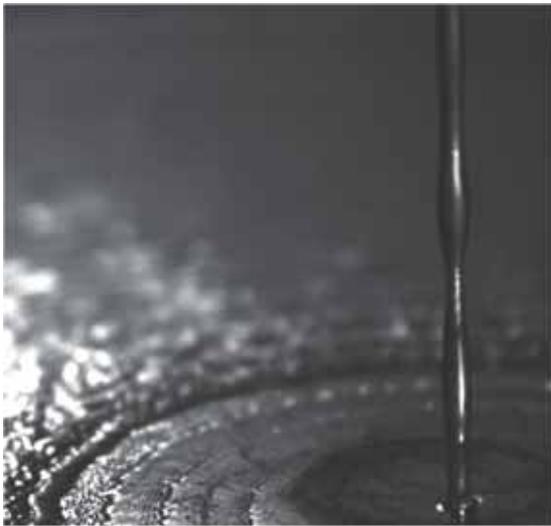


- Pressurize the reservoir by gas cylinder
- Use lifter to change the fall height
- Adjust the flow rate by needle valve
- High speed camera was used to observe the condition of the liquid jet

□ Experimental conditions

- Jet velocity at the nozzle U_0 : 0.3~8.5 [m/s]
- Fall height L : 62.5~500 [mm]
- Nozzle diameter d_0 : 1, 2, 4 [mm]

液滴飛散状況



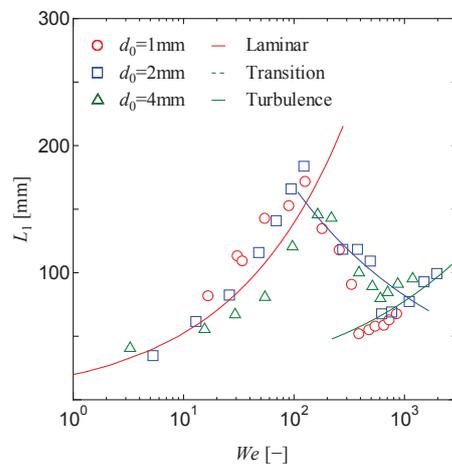
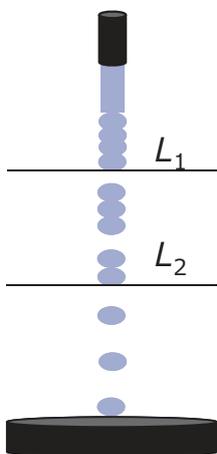
$d_0=4\text{mm}$ $L=500\text{mm}$ $Q=1500\text{ml/min}$



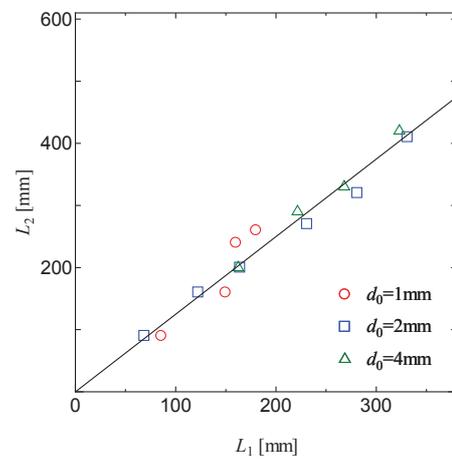
$d_0=4\text{mm}$ $L=500\text{mm}$ $Q=700\text{ml/min}$

▶ 液滴飛散はインパクト時に生じる→Breakup length, 衝突周期

分裂長さ (Breakup length)

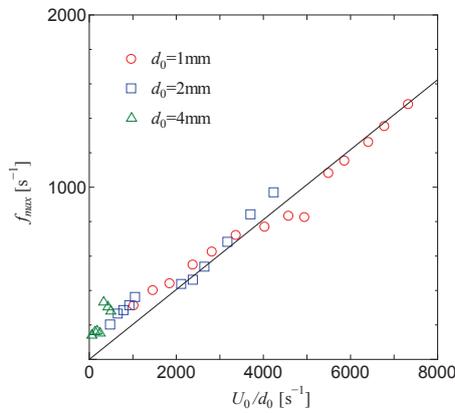
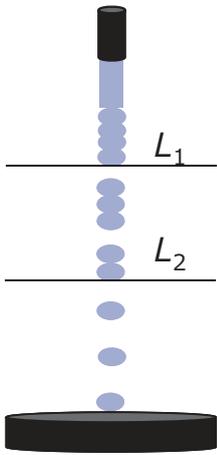


最小分裂長さ

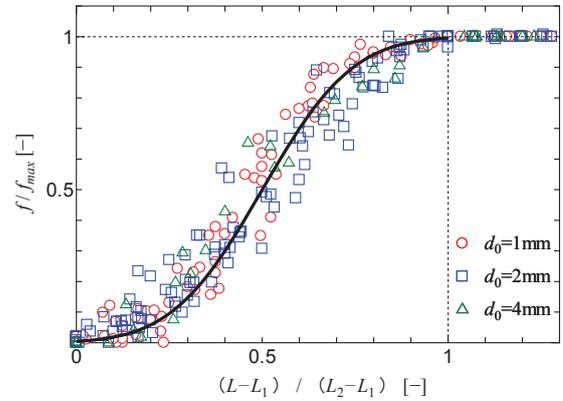


最大分裂長さ

衝突周期



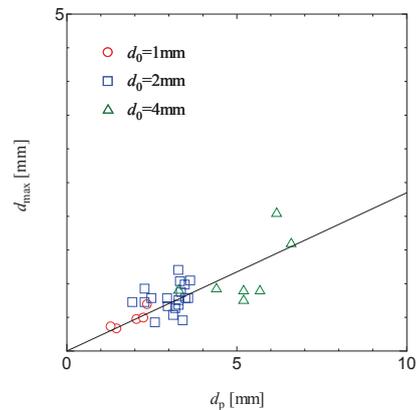
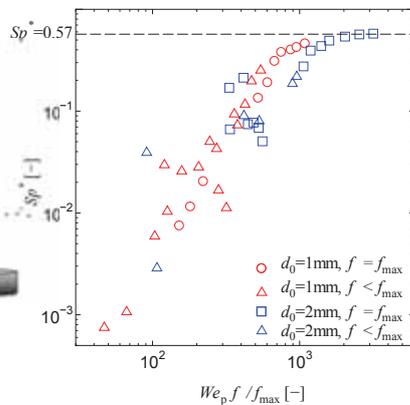
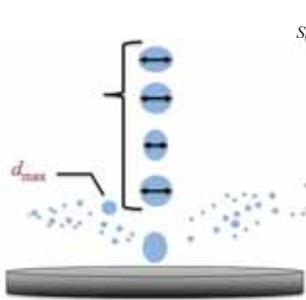
最大衝突周期



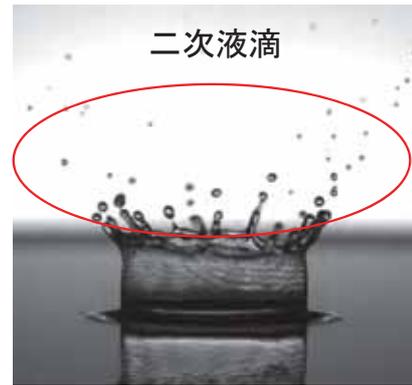
遷移領域における衝突周期

- ▷ 任意の高さで、衝突液滴の周期とサイズを予測可能

飛散率と飛散液滴サイズ



- ▷ 衝突時の状態より、飛散液滴の量とサイズを予測可能
- ▷ マルチスケール問題を如何に解くか？
- ▷ 周囲空気、ノズル、噴流不安定波長、衝突液滴、飛散液滴



液滴・液膜衝突

背景

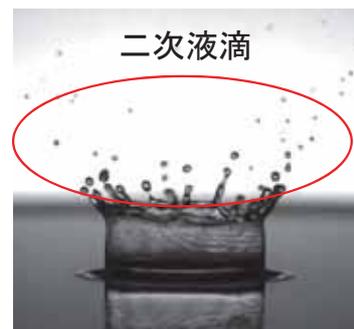
- ▷ 液滴と液膜の衝突
 - ▷ インクジェットプリンタ
 - ▷ スプレー冷却
 - ▷ 田畑における病原菌の飛散
 - ▷ 格納容器内におけるデブリの飛散
 - ▷ ナトリウム漏洩
 - ▷ ...

一次液滴



一次液滴(衝突前の液滴)

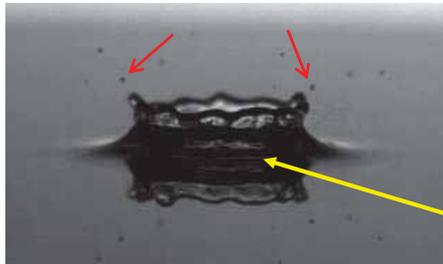
二次液滴



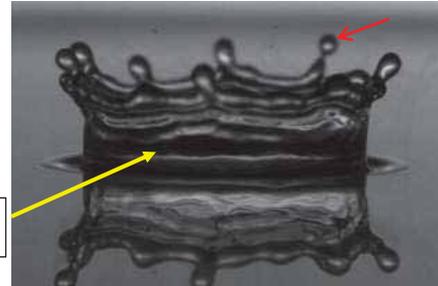
二次液滴(衝突後の飛散液滴)

Prompt & late splash

Prompt Splash



Late Splash



Crown

Crown形成前あるいは成長途中で発生

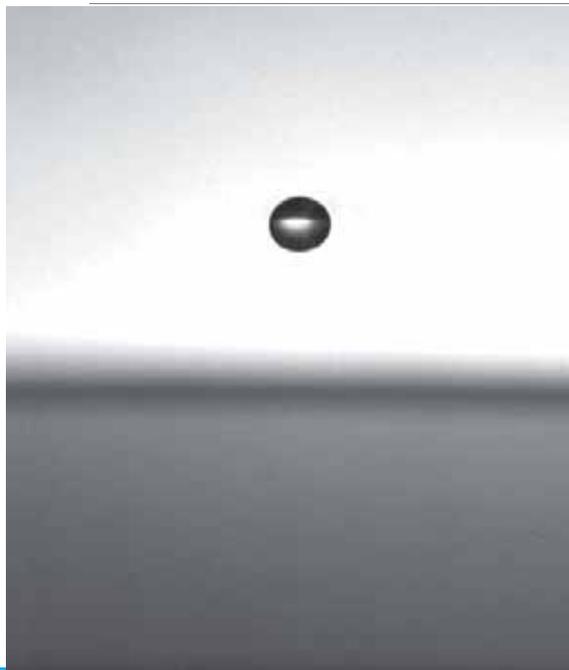
- 液滴径が小さい
- 飛散速度が速い

Crown形成後の不安定により発生

- 液滴径が大きい
- 飛散速度が遅い

- ▷ Prompt と late の各々について、**スプラッシュ条件**を与える。
- ▷ 液跳ね量、液滴サイズ、飛散速度は今後の課題

Prompt & late splash



Prompt Splash

- 液滴径が小さい
- 飛散速度が速い
- 横方向に飛散



広範囲に影響を及ぼす場合に注目

Late Splash

- 液滴径が大きい
- 飛散速度が遅い
- 上方向に飛散

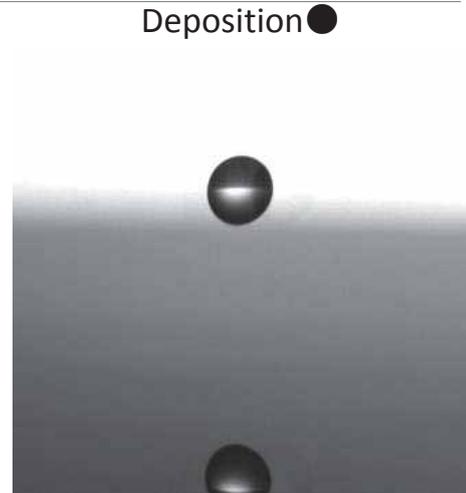
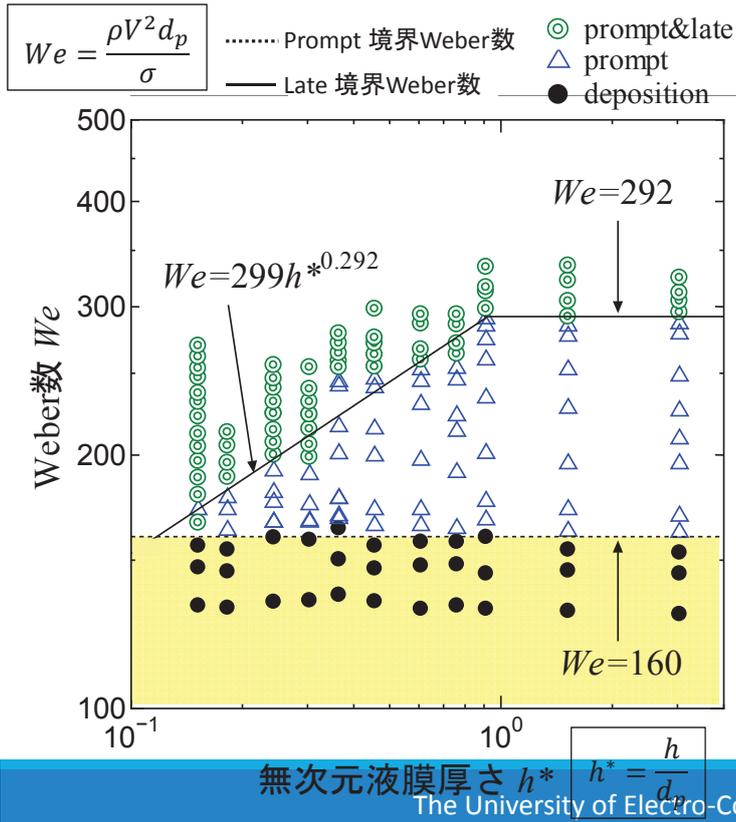


飛散総量が影響を及ぼす場合に注目



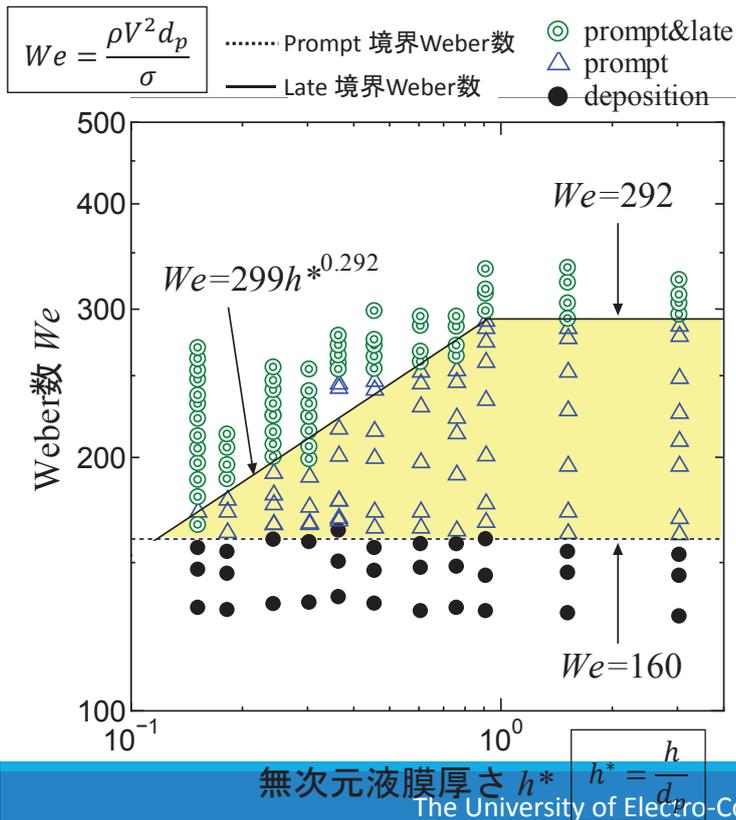
二次液滴生成機構ごとの生成条件の予測は重要

Deposition



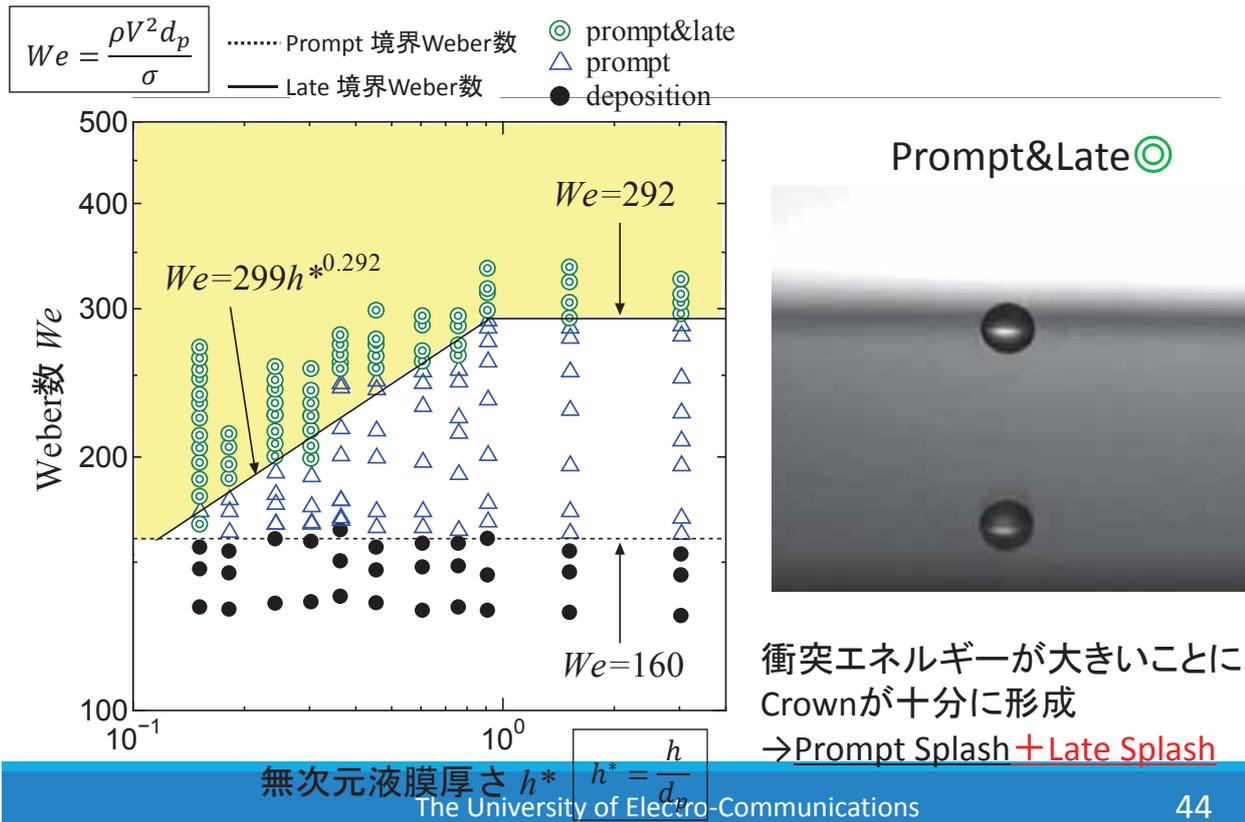
二次液滴生成のための
 十分な衝突エネルギーが不足
 → 二次液滴生成なし

Prompt splash

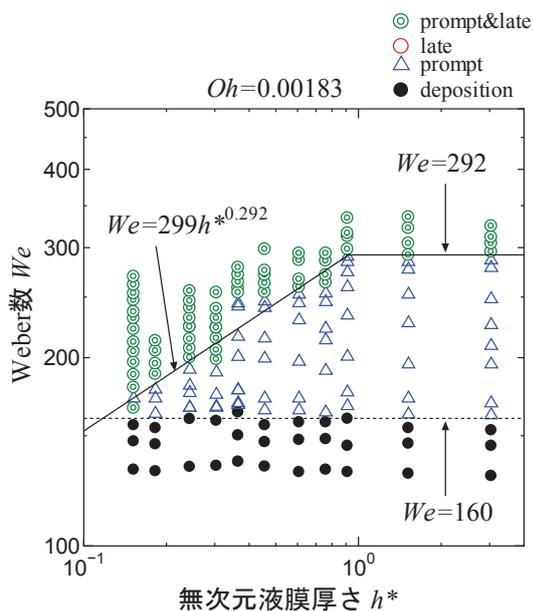


衝突直後, 勢いよく飛散

Prompt & late splash



得られた知見



▷ 流体が水の場合

- ▷ Deposition-prompt 境界は液膜厚さに依存しない。
- ▷ Prompt-late 境界は液膜厚さとともに徐々に増加。 $h^*=1$ 程度以上でその影響は無視できる。
- ▷ 薄液膜ではLateが先行するか？
- ▷ マルチスケール問題
 - ▷ 二次液滴、とくにprompt splashにより生成される二次液滴は解析可能か？

おわりに

- ▷ 最近の実験より、気液二相流解析の課題を考察
- ▷ 抽出された解析機能のニーズ
 - ▷ サブクール沸騰・**気泡径分布**
 - ▷ ポーラスマイクロチャンネル・**多孔質体内熱流動**
 - ▷ 焼き入れ・**伝熱面表面状態の影響**
 - ▷ 液体噴流／液滴衝突・**マルチスケール問題**
 - ▷ ミニチャンネル貫流ボイラ・**環状噴霧流中の液滴挙動**
- ▷ 気液二相流解析技術の発展は目覚しく、一見合理的と思われる結果が得られるが、現実と乖離している場合も少なくない。実験データとの比較・検討が以前として重要。

圧縮性の顕著な気液二相流の 数値解析

総合企画部 主管技師長 湊 明彦

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP

製品紹介セミナー

2016年12月15日 (木)

アドバンスソフト株式会社

内容

(1) 圧縮性二相流の基礎式と現象

- ・基礎式(質量, 運動量保存則)
- ・音速, 臨界流, 圧力波と水撃の基礎と現象

(2) 圧縮性二相流の数値解法

- ・特性曲線法, Godunov(ゴドノフ)法による圧縮性单相流の解法
- ・Godunov法の二流体モデルへの拡張
- ・検証(二相水撃の理論解, 実験データとの比較)

(3) 応用解析例

- ・超音速二相噴流
- ・気泡崩壊水撃

圧縮性単相流の基礎式

質量保存則 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$

運動量保存則 $\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \mathbf{F}$

ρ : 密度
 u : 速度
 P : 圧力
 F : 外力
 t : 時間

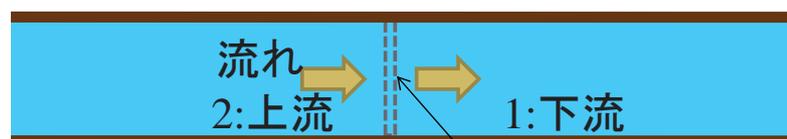
(簡単のため ρ は P のみの関数とする)

一次元圧縮性単相流の基礎方程式

質量保存則 $\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial z} \rho u = 0$

運動量保存則 $\frac{\partial}{\partial t} \rho u + \frac{\partial}{\partial z} \rho u^2 + \frac{\partial}{\partial z} P = F$

圧力波と同じ速度で移動する座標系による表示



圧力波面
 静止した体積のない面

圧力波面への流入量 = 流出量 の関係から

質量flux $\frac{d}{dz} \rho u = 0 \Rightarrow \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = G \text{ (const.)}$

運動量flux $\frac{d}{dz} (\rho u^2 + P) = 0 \Rightarrow P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$

質量flux $\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = G$

運動量flux $P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$

$$P_1 + v_1 G^2 = P_2 + v_2 G^2$$

ここで比容積は $v = \rho^{-1}$

音速 c のいろいろな表現

$$c = \frac{G}{\rho} = v \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{d\rho}{dP}\right)}}$$

$$\left(\frac{dv}{dP}\right) = -\frac{v^2}{c^2}$$

$$G = \sqrt{-\left(\frac{dP}{dv}\right)} = \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}}$$

$$c = \sqrt{\frac{v}{\beta}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$G^2 = -\frac{P_1 - P_2}{v_1 - v_2}$$

音速 c : 微小圧力変動の伝播速度なので

$$P_1 - P_2 \Rightarrow 0, \quad v_1 - v_2 \Rightarrow 0 \quad \text{のとき} \quad u \Rightarrow c$$

$$\text{つまり} \quad G^2 = (\rho c)^2 = -\frac{dP}{dv}$$

ここで流体の圧縮率 β と $\beta = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dP}\right) = \frac{v}{c^2}$

剛性率 K を定義

$$K = \beta^{-1}$$

水-空気二相流中の音速

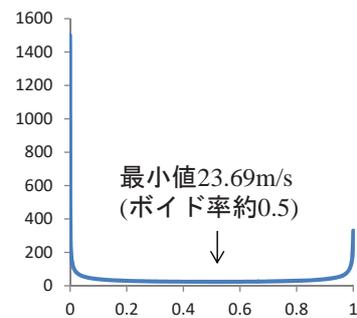
二相流の比容積

$$v_{2\phi} = x v_g + (1-x) v_l$$

クオリティ

$$x = \frac{\alpha \rho_g}{\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l}$$

音速 (m/s)



比容積の圧力微分

$$\frac{dv_{2\phi}}{dP} = x \frac{dv_g}{dP} + (1-x) \frac{dv_l}{dP}$$

音速を使った表示

$$\frac{v_{2\phi}^2}{c_{2\phi}^2} = x \frac{v_g^2}{c_g^2} + (1-x) \frac{v_l^2}{c_l^2}$$

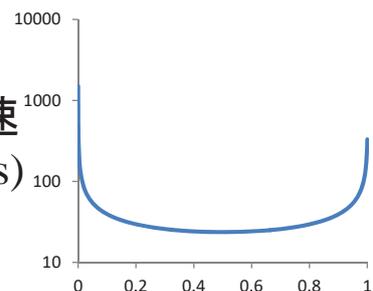
$\frac{dv}{dP} = -\frac{v^2}{c^2}$ であるから (対数表示)

従って二相流の音速は

$$c_{2\phi} = \frac{x v_g + (1-x) v_l}{\sqrt{x \frac{v_g^2}{c_g^2} + (1-x) \frac{v_l^2}{c_l^2}}}$$

ボイド率

音速 (m/s)



ボイド率

臨界流

質量保存則 $\frac{\partial}{\partial z} \rho u = 0$

運動量保存則 $\frac{\partial}{\partial z} \rho u^2 + \frac{\partial}{\partial z} P = F$

$G = \rho u = const.$ なので

$$\frac{d}{dz} \frac{G^2}{\rho} + \frac{d}{dz} P = F \quad \text{つまり} \quad \left\{ G^2 \left(\frac{d(1/\rho)}{dP} \right) + 1 \right\} \frac{dP}{dz} = F$$

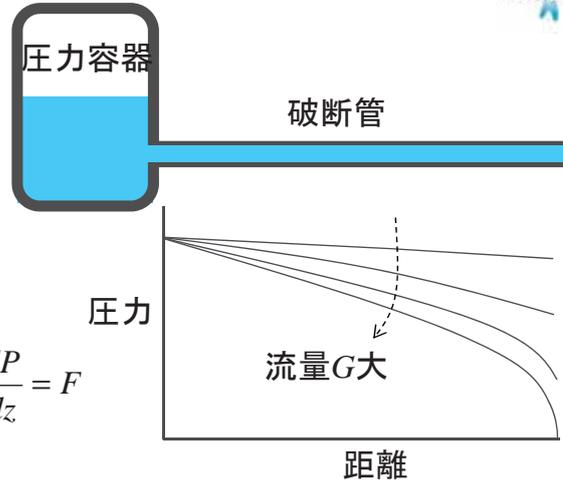
G 大とともに $\frac{dP}{dz} \Rightarrow \infty$ このとき $G^2 \left(\frac{d(1/\rho)}{dP} \right) + 1 = 0$

従って臨界流量は $G_c = \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}} = \rho c$

二相流の比容積を用いれば、二相流への拡張が可能

均質二相流比容積 スリップ二相流運動量fluxの比容積

$$v_{2\phi} = xv_g + (1-x)v_l \qquad v_{2\phi} = \frac{x^2}{\alpha} v_g + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)} v_l$$



臨界二相流のスリップ比評価

Moody	$S_{crit} = \sqrt[3]{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$
Fauske	$S_{crit} = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$
小笠原	(実験式)

圧力波と水撃

圧力波前後の関係式

$$u_2 - u_1 = G(v_1 - v_2)$$

圧力波前後の速度変化は

$$du = Gdv = -\rho c \cdot \frac{v^2}{c^2} dP = -\frac{1}{\rho c} dP \qquad \therefore \left(\frac{dv}{dP} \right) = -\frac{v^2}{c^2}$$

従って $\Delta P = -\rho c \Delta u$

1m/sで動く水柱が衝突して停止したときの圧力上昇は

$$1000[\text{kg/m}^3] \times 1500[\text{m/s}] \times 1[\text{m/s}] = 1.5[\text{MPa}]$$



質量保存則と運動量保存則の変形

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

↓ $d\rho = c^2 dP$ を用いて

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\rho}{c^2} \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

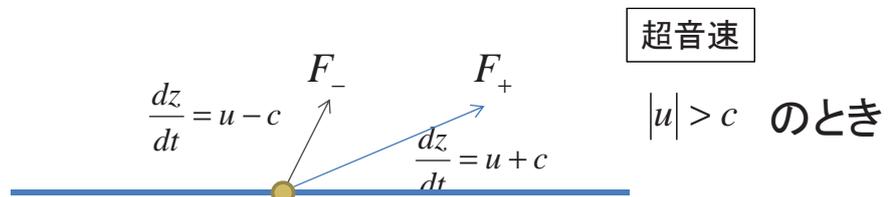
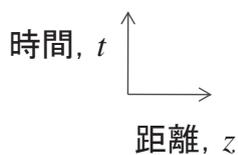
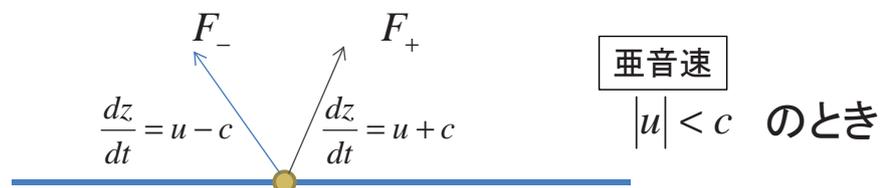


$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

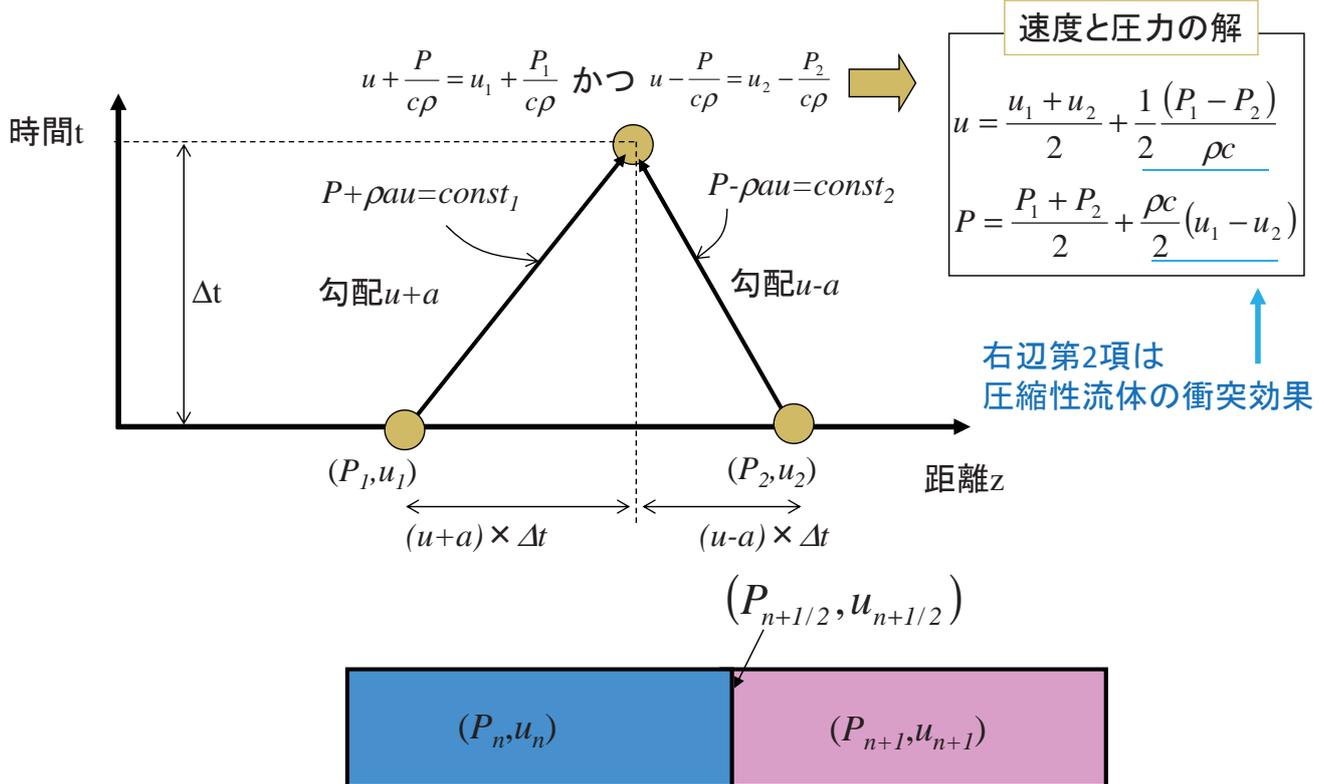
$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{を二つのfluxに分ける}$$

$$\frac{\partial F_+}{\partial t} + (u+c) \frac{\partial F_+}{\partial z} = 0 \quad \text{と} \quad \frac{\partial F_-}{\partial t} + (u-c) \frac{\partial F_-}{\partial z} = 0 \quad \text{ここで} \quad F_{\pm} = u \pm \frac{1}{\rho c} P$$



特性曲線法による過渡解析



Godunov法の考え方

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + P)}{\partial z} = 0$$

$$\rho_i(t + \Delta t) = \rho_i(t) + \left\{ (\rho u)_{BD} \Big|_{i-1/2} - (\rho u)_{BD} \Big|_{i+1/2} \right\} \frac{\Delta t}{\Delta z}$$

($u > c$ のとき上流側の値)

$$\rho u_i(t + \Delta t) = \rho u_i(t) + \left\{ (P_{BD} + \rho u u)_{BD} \Big|_{i-1/2} - (P_{BD} + \rho u u)_{BD} \Big|_{i+1/2} \right\} \frac{\Delta t}{\Delta z}$$

$\rho, u, P(\rho)$

$$BD: \text{Breakdown(崩壊)} \quad u_{BD} = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho c} \quad P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$$

輸送速度

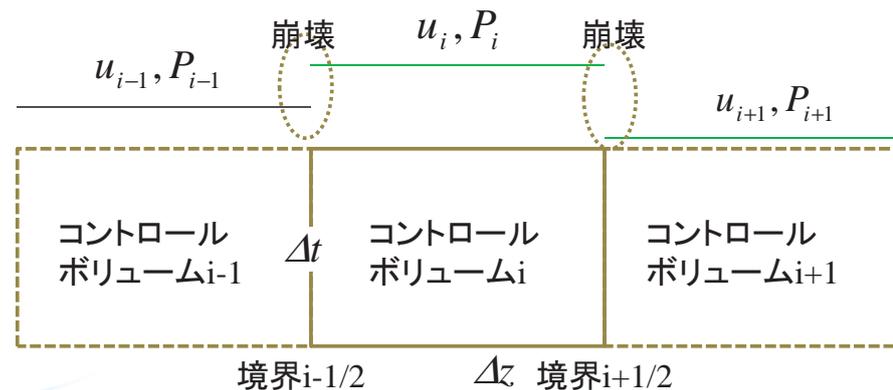
$$u_{BD} (\neq u)$$

輸送される保存量

$$\rho_{up}, u_{up} \text{ (上流側)}$$

境界圧力

$$P_{BD} (\neq P)$$



圧縮性二流体モデルの基礎方程式

・質量保存則
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

・運動量保存則
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k = -\alpha_k \nabla P + \mathbf{F}_{ik} + \mathbf{F}_{wk} + \mathbf{F}_{vk} + \nabla \cdot \alpha_k \mu_k \nabla \mathbf{u}_k + \alpha_k \rho_k \mathbf{g}$$

t:時間(s), u:速度(m/s), P:圧力(Pa), g:重力加速度 (m/s²), F: 単位体積当りの外力(N/m³), α:体積比, ρ:密度(kg/m³), μ:粘性(N·s/m)
 (添字) k:相(気体g,液体ℓ), i:界面, w:壁, v:付加質量

相変化なし、エントロピー保存を仮定したときエネルギー保存則は不要

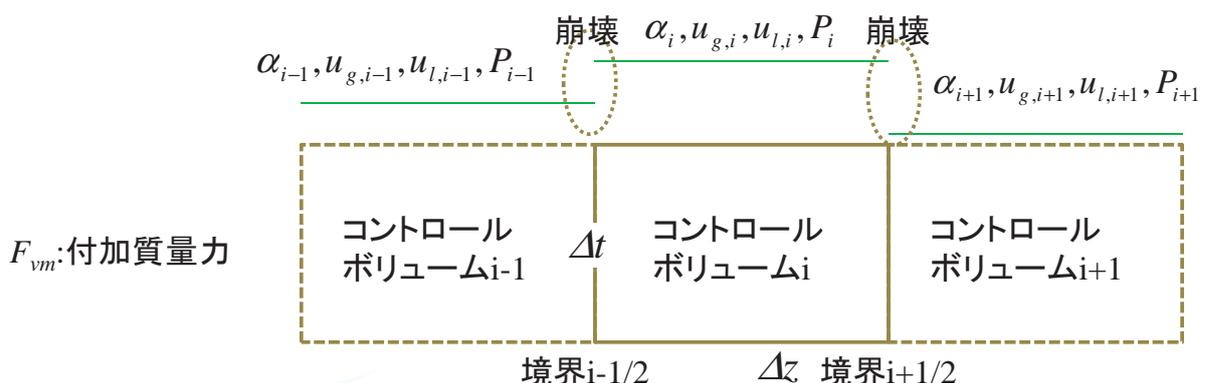
二流体モデルへのGodunov法の拡張

質量保存則
$$\frac{\partial \alpha \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial z} = 0 \quad (\text{気体})$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l}{\partial z} = 0 \quad (\text{液体})$$

運動量保存則
$$\frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g^2}{\partial z} + \alpha \frac{\partial P}{\partial z} - F_{vm} = 0 \quad (\text{気体})$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l^2}{\partial z} + (1-\alpha) \frac{\partial P}{\partial z} + F_{vm} = 0 \quad (\text{液体})$$



Godunov法の崩壊の関係式をそのまま使いたい

$$u_{BD} = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho c} \quad P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$$

二流体モデルの二速度を一つの代表速度に置き換える

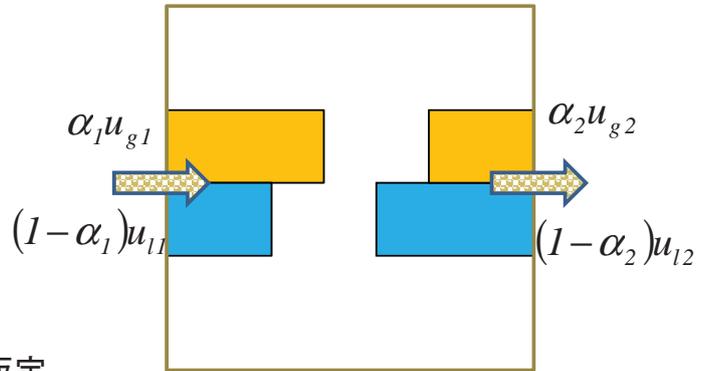
$\frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$ の項は水撃に相当し

$(u_1 - u_2)$ は衝突速度

コントロールボリューム内二相流体の衝突

二相流体の衝突は、体積速度で判断できる

$$j = \alpha u_g + (1 - \alpha) u_l$$



そこで、下記のように二流体モデルの崩壊の関係式を仮定

$$j_{BD} = \frac{j_1 + j_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}$$

$$P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}{2} (j_1 - j_2)$$

$$j_{BD} = \frac{j_1 + j_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}$$

j の平均 衝突による j の変化 $\delta j \rightarrow \delta u_g, \delta u_l$ に配分

付加質量力(気液加速度差に比例)を考慮した気液速度変化の関係式

$$\alpha \rho_g \delta u_g - \rho_{vm} (\delta u_g - \delta u_l) = 0$$

ρ_{vm} は二相流単位体積あたりの付加質量

$$(1 - \alpha) \rho_l \delta u_l + \rho_{vm} (\delta u_g - \delta u_l) = 0$$

これより

$$\delta u_g = \frac{S^*}{1 + (S^* - 1)} \delta j$$

気液加速度比

$$S^* = \frac{\delta u_g}{\delta u_l}$$

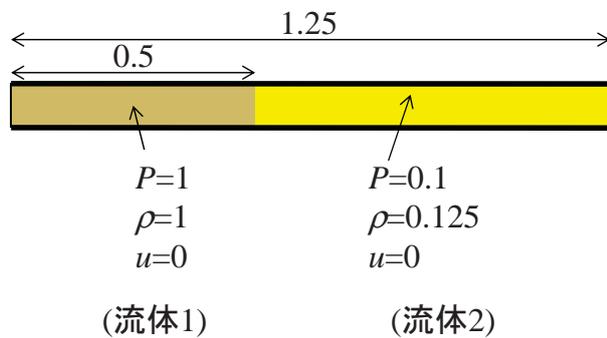
$$\delta u_l = \frac{1}{1 + (S^* - 1)} \delta j$$

ここで $S^* = \frac{\rho_g + \alpha(1 - \alpha)\rho_{vm}}{\rho_l + \alpha(1 - \alpha)\rho_{vm}}$ と、 j 加速度に係る二相密度 $\rho_{2\phi} = \frac{\alpha S^* \rho_g + (1 - \alpha)\rho_l}{\alpha S^* + (1 - \alpha)}$

Benchmark Problem

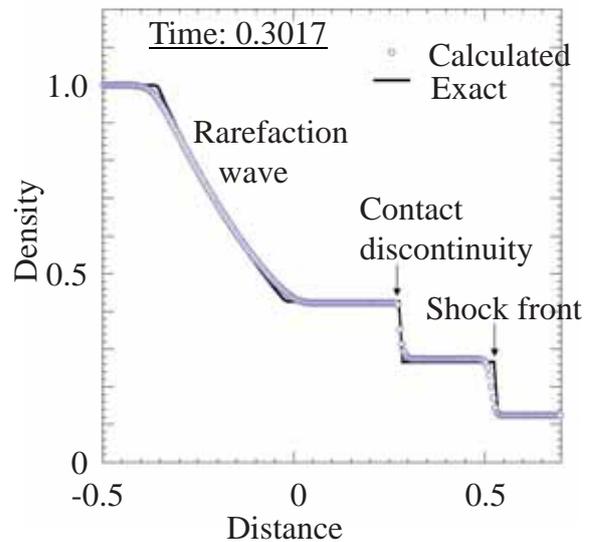
(Sod's shock tube)

Initial state



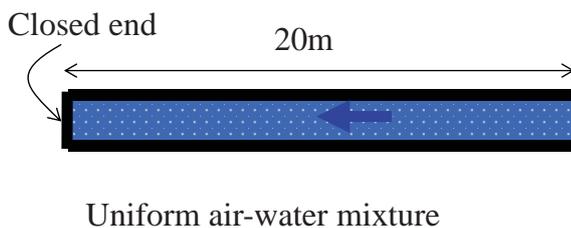
Time step: $\Delta t=1.0 \times 10^{-3}$

Number of finite volumes: 200

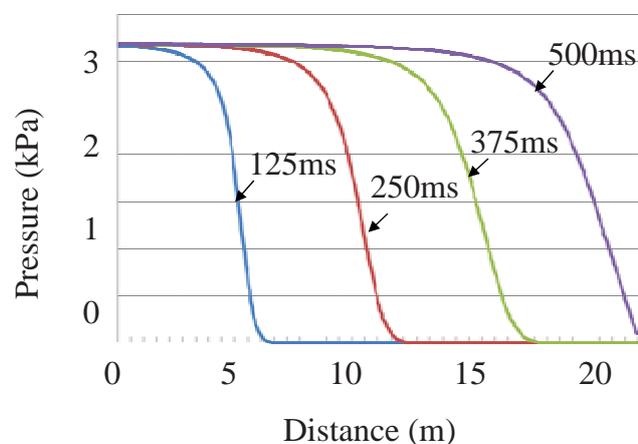


Benchmark Problem

(Hydraulic hammer in two-phase flow)

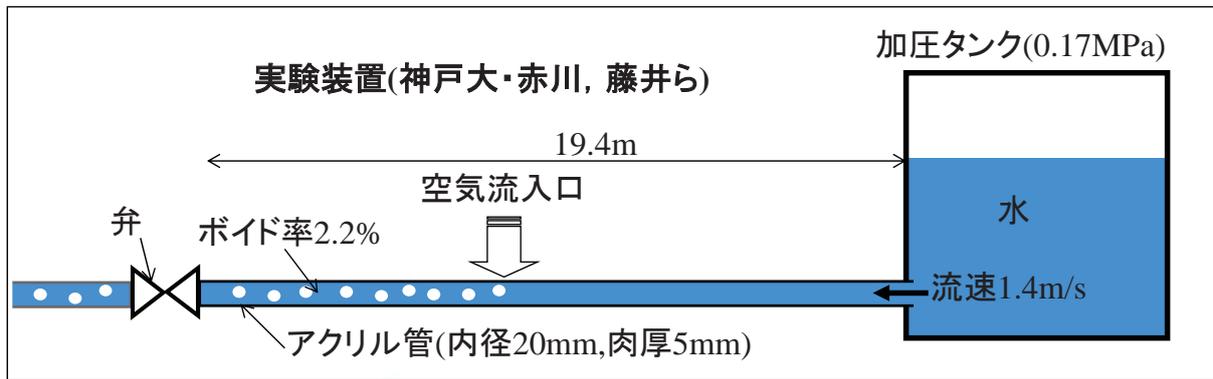
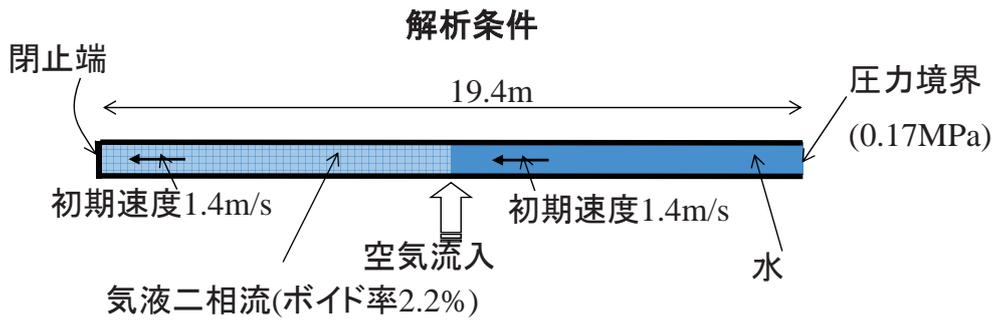


Air-water
 Void fraction 10%
 Velocity 0.1m/s



	Theoretical	Calculated
Wave propagation velocity (m/s)	35.3	36.4
Pressure rise (kPa)	3.18	3.20

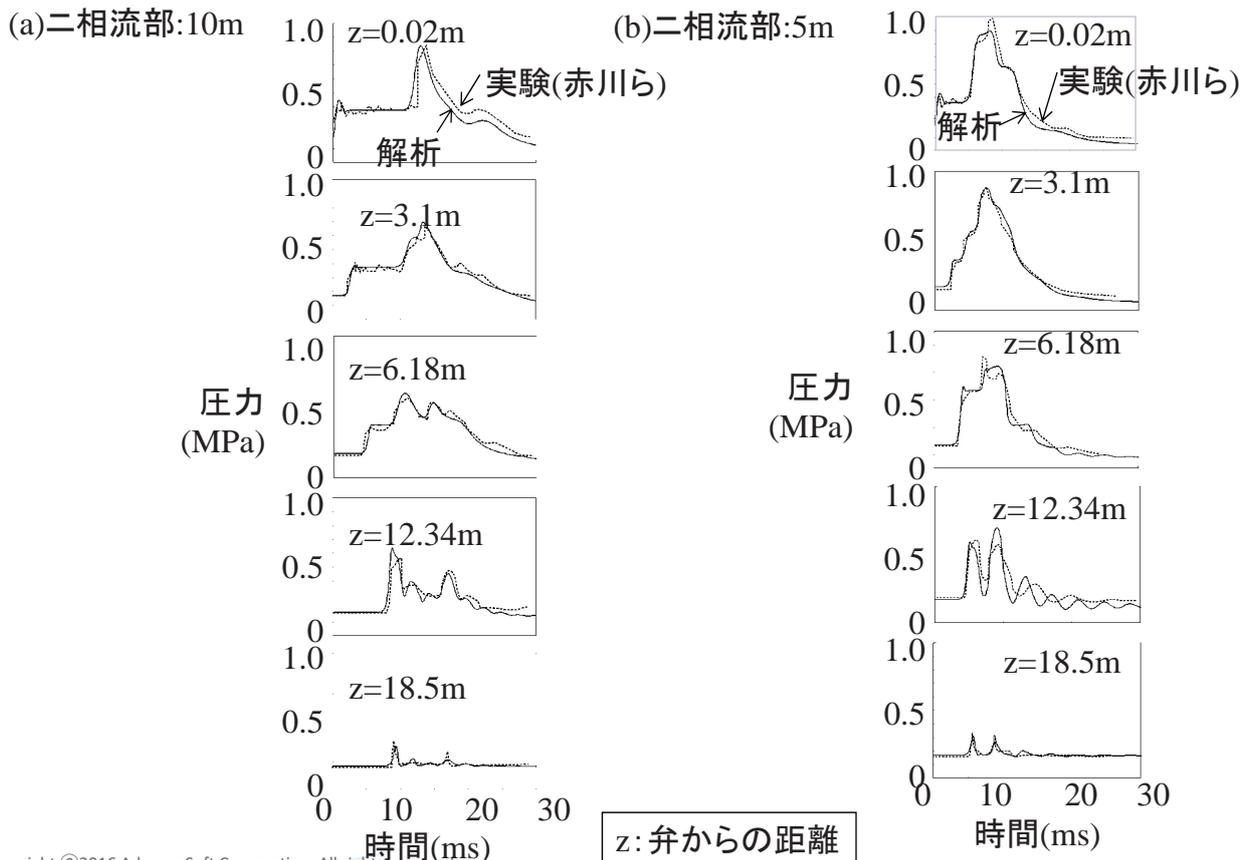
単相/気液二相共存配管内水撃の実験解析



Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

*湊, No.01-1224, 機論B68-673(2002)

単相/二相共存配管内水撃の解析結果

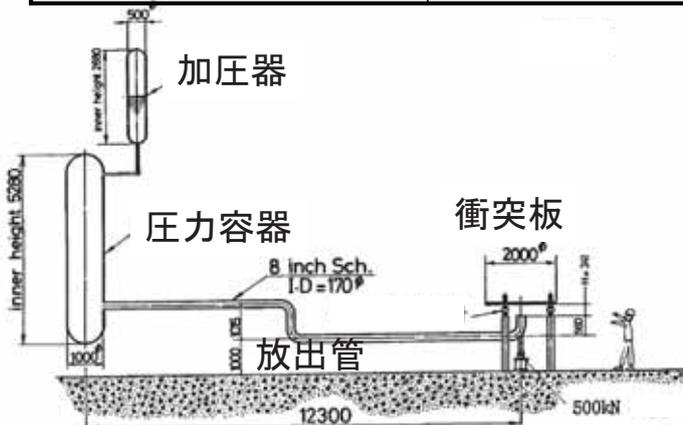
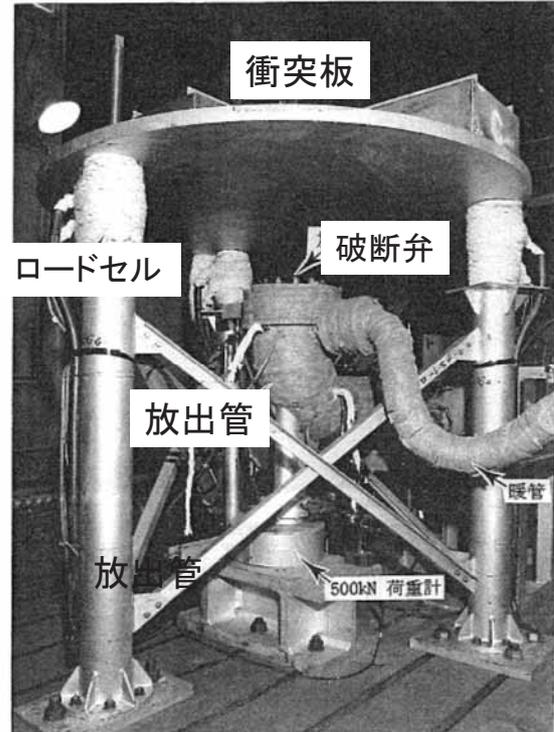


Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

二相ジェット荷重試験装置 (日本原子力研究開発機構)

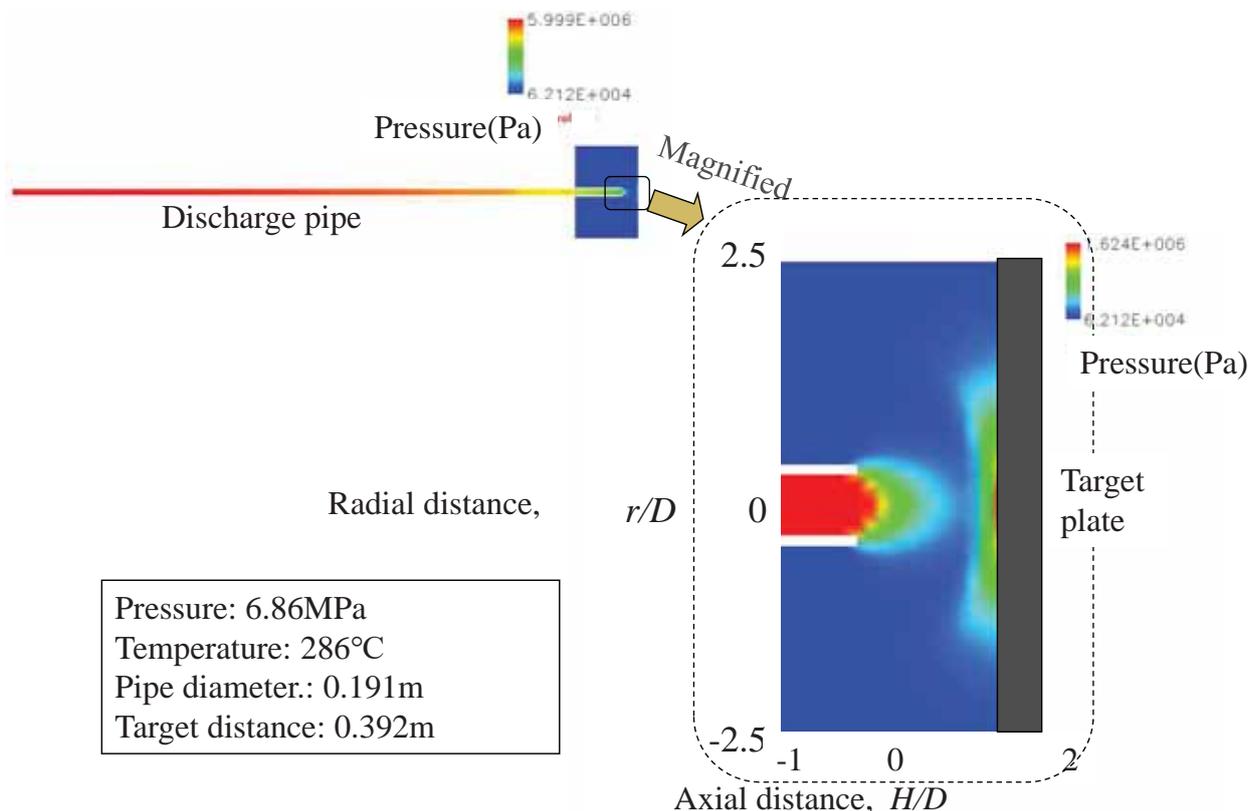
Experimental conditions

Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature (°C)	285	325
Pipe diameter, D (mm)		90-190	
Distance to target, H/D		1, 2, 5, 18	

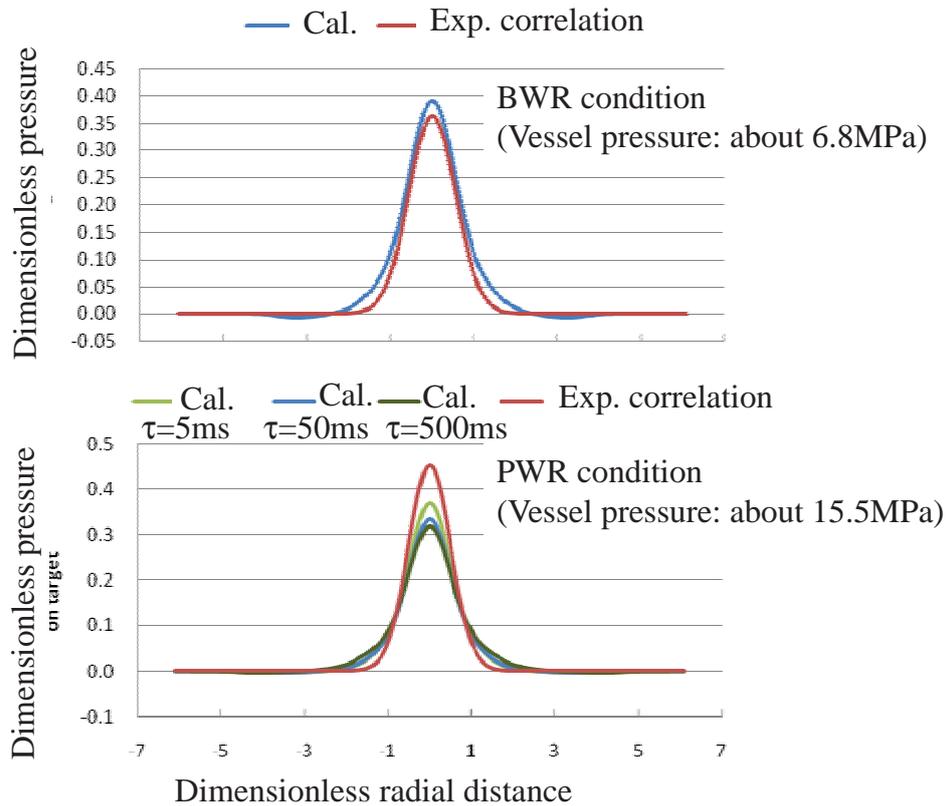


*Isozaki, T., Miyazono, S., "Experimental Study of Jet Discharge Test Results under BWR/PWR Loss of Coolant Accident Conditions," Nucl. Eng. Design, 96, pp.1-9 (1988)

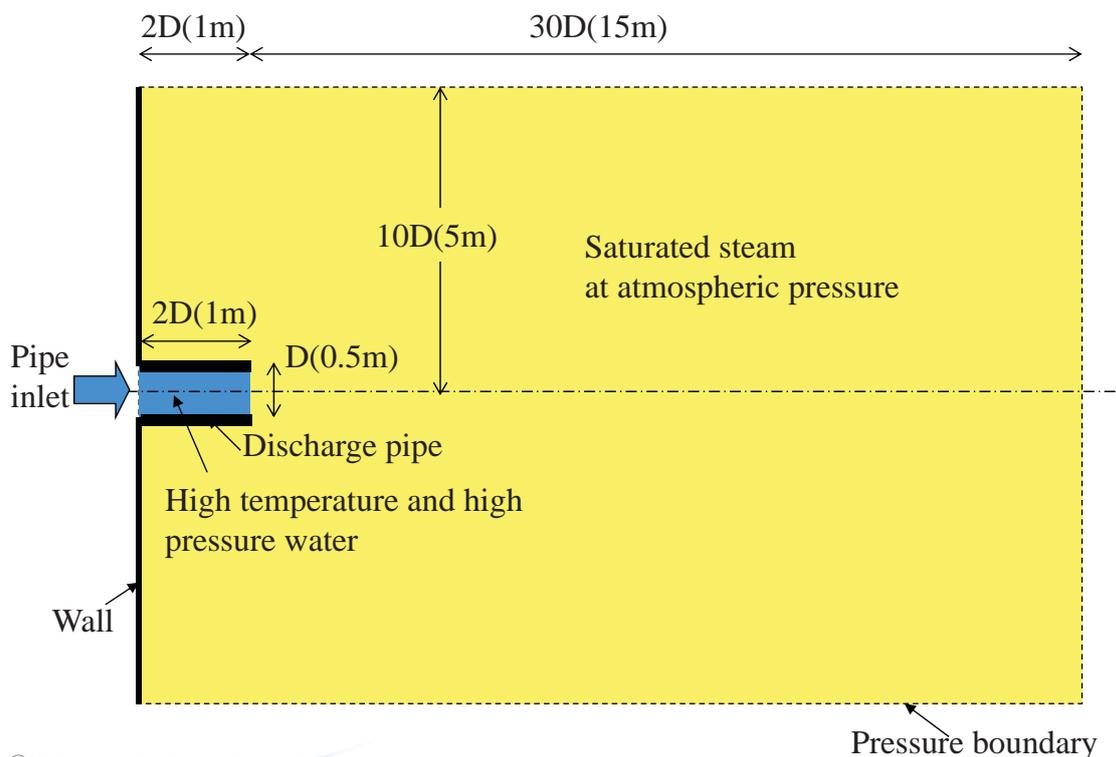
衝突板近傍圧力分布の解析結果



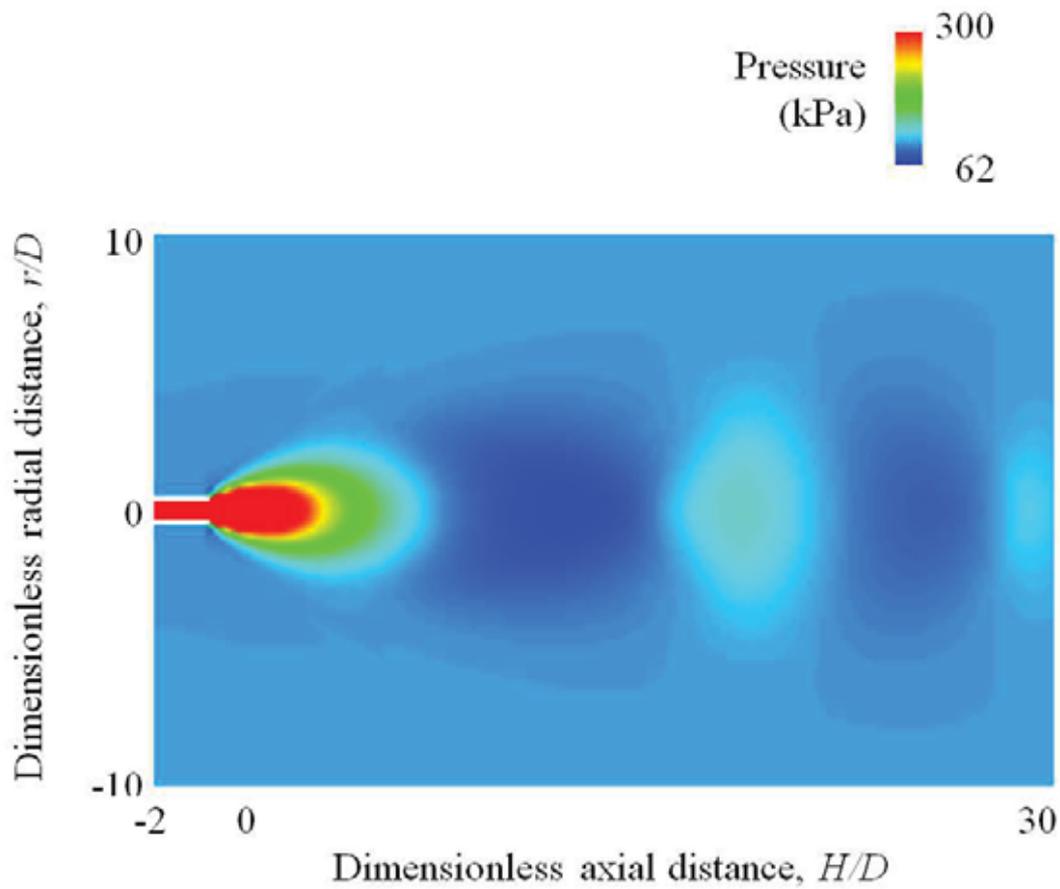
衝突板上の圧力分布



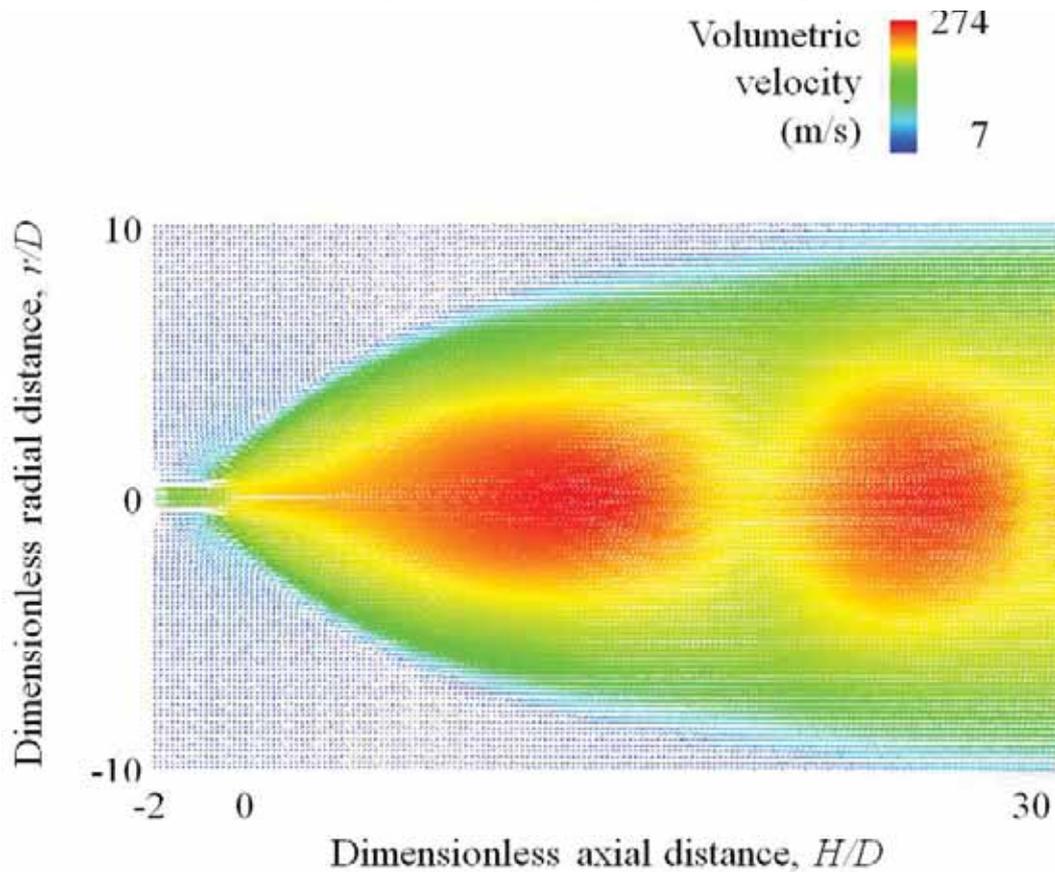
実機スケール自由噴流解析条件



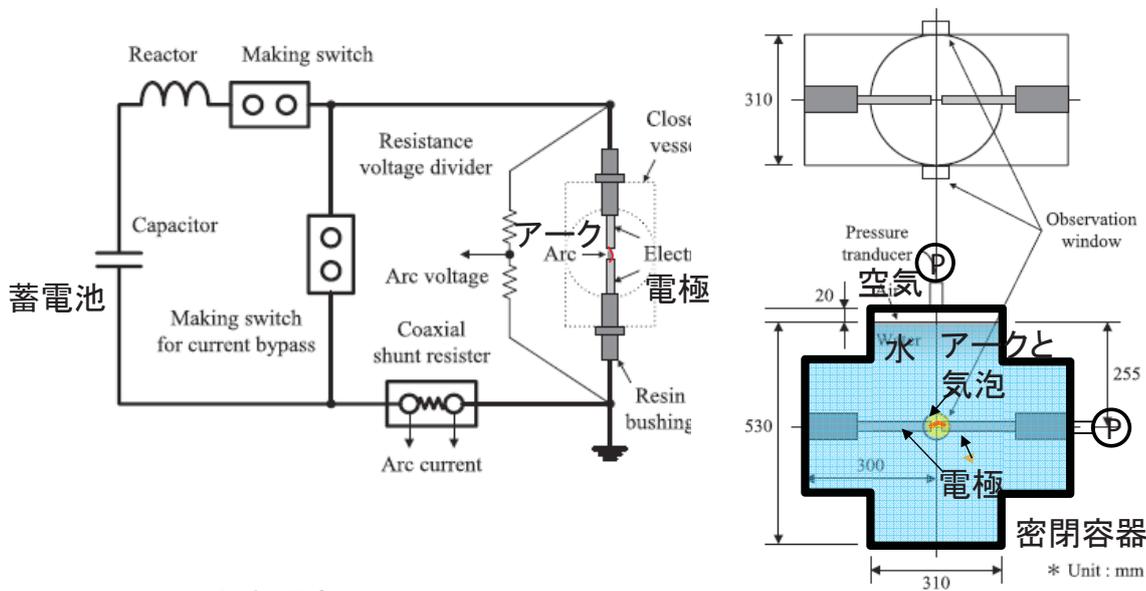
自由噴流中の圧力分布解析結果(PWR condition)



自由噴流中の速度分布解析結果(PWR condition)



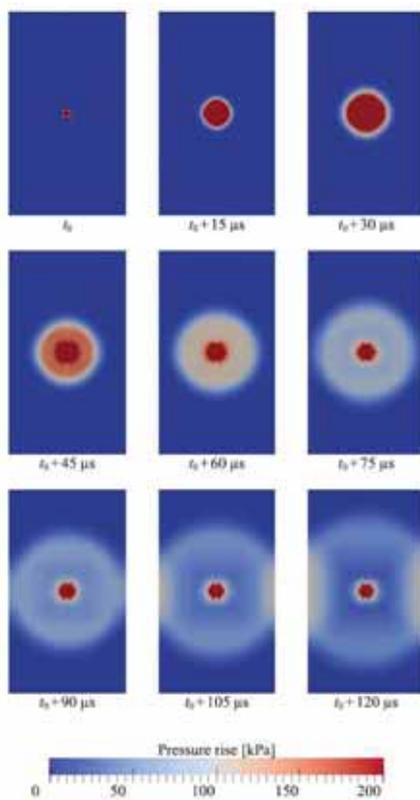
水中アーク試験装置(電力中央研究所)



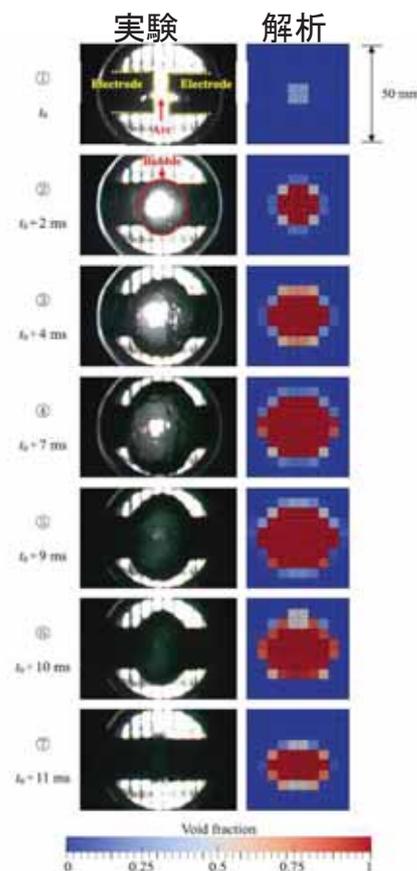
電力中央研究所

大高聡也,他3名:「水中アークを対象とした圧力上昇解析モデルの基礎検討」
電気学会論文集B(電力・エネルギー部門誌),Vol.134,No.7,pp604-613(2014)

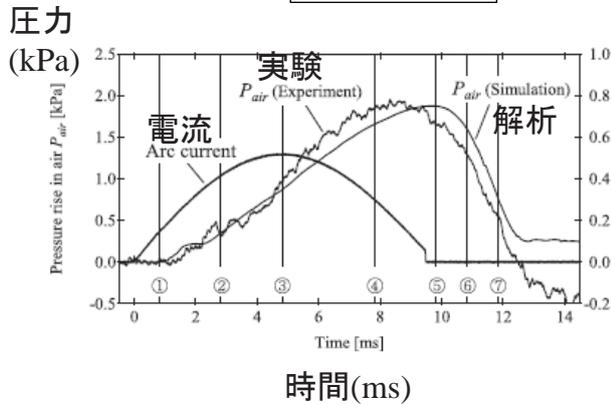
圧力カウンター



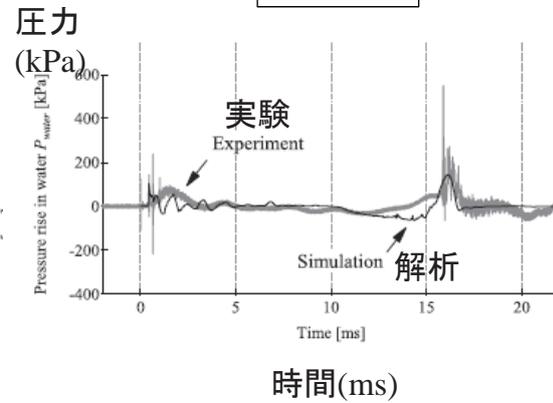
気泡サイズ



空気圧力



水圧力



結 言

- 気液二相流の顕著な圧縮性を考慮した二流体モデル
三次元解析技術を紹介した。
- 圧縮性单相流の実績ある解析手法(Godunov法)をベースに
気液二相流の体積速度を单相流の速度とみなす近似により
二流体モデルへの拡張を行った。
- 二相流水撃の理論解および実験結果との比較により上記
手法が有効であることを確認した。
- 実用問題に適用した応用例(二相噴流,アーク水撃)を紹介した。

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP製品概要紹介

主管研究員 杉中 隆史

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP
製品紹介セミナー

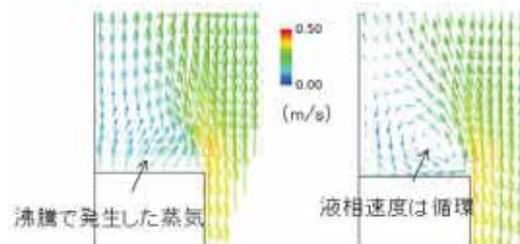
2016年12月15日（木）
アドバンスソフト株式会社

内容

- ・ 概要
- ・ 特長
- ・ 壁面熱伝達モデル
- ・ 蒸発モデル
- ・ 凝縮モデル
- ・ 気泡合体による気泡径分布の解析モデル
- ・ 固体凝集モデル
- ・ 解析実績
- ・ 解析事例① 銀棒の油焼入れ（沸騰解析）
- ・ 解析事例② 空気中の水滴蒸発解析
- ・ 解析事例③ 配管内の凝縮解析
- ・ 解析事例④ 気泡塔の解析
- ・ 解析事例⑤ 自由表面解析
- ・ 解析事例⑥ 気泡合体解析
- ・ 解析事例⑦ 固体凝集解析

概要

- Advance/FrontFlow/MPは、非構造格子を使用して、二流体モデルで気液二相流を解析するソフトウェアである。
- 気相と液相で、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を別々に解く。
 - 気相と液相の力学的非平衡状態と熱的非平衡状態を計算できる。
 - 同一メッシュで、気相と液相の異なる速度を計算できる。

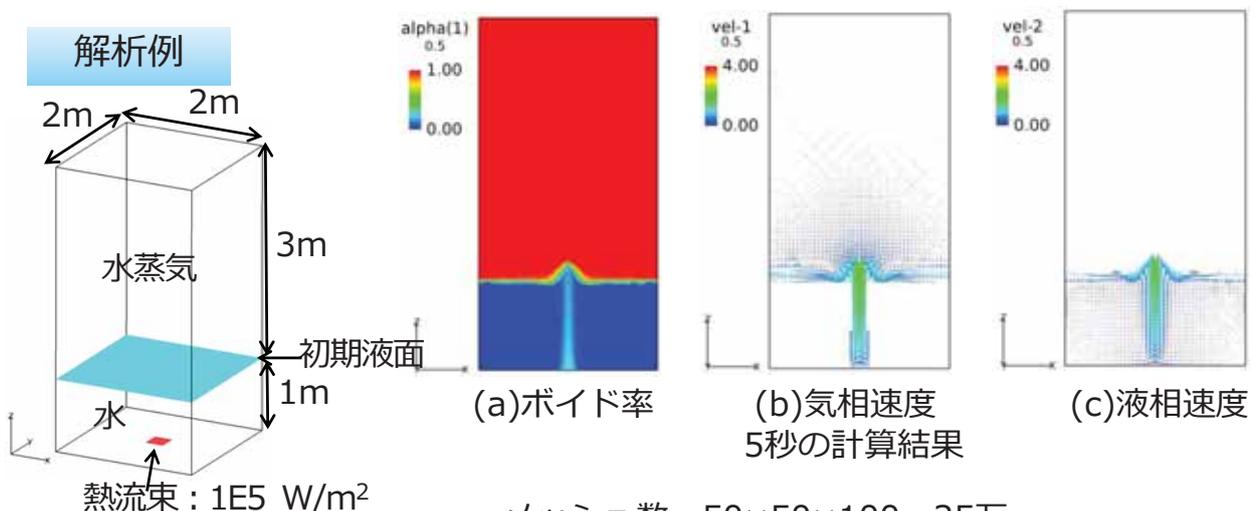


(a)気相速度 (b)液相速度

- 気液界面や壁面での質量・運動量・エネルギー輸送は構成方程式（実験相関式）を使用する。
- メッシュより小さい気泡の質量を保存して計算できる。
 - メッシュサイズや時間刻みが大きくとれ、実用的な解析ができる。

特長

- ①自由表面、気泡流、噴霧流、沸騰、凝縮を同時に、そして安定に計算することができる。

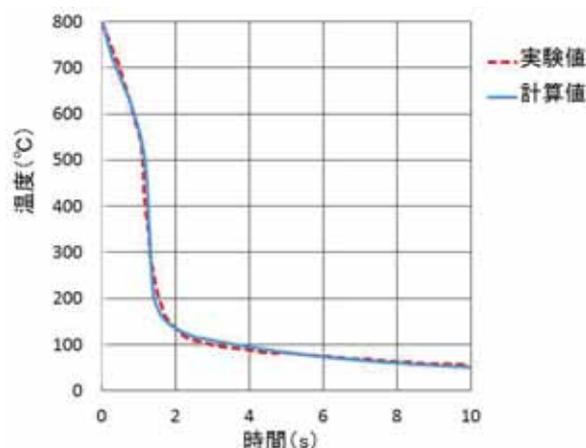


解析例
 2m x 2m x 3m
 水蒸気
 初期液面
 水
 熱流束：1E5 W/m²
 初期値：1気圧、100℃、静止

メッシュ数：50×50×100 = 25万
 時間刻み：0.05秒
 5秒の計算時間：5分（12並列で計算した場合）

特長

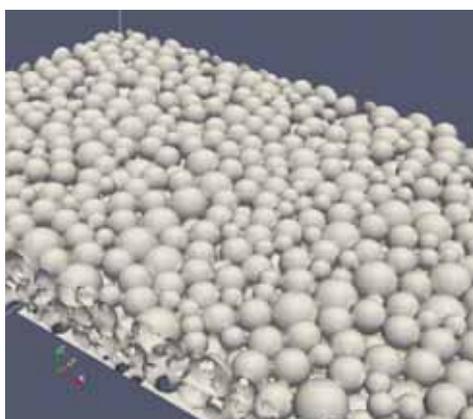
- ②壁面熱伝達モデルを実装している。
- ③当社で開発しているため、ユーザーのニーズに合わせた修正ができる。



焼入れ解析で冷却曲線を実測値に合わせ込んだ例

特長

- ④多孔質体の気液二相流解析ができる。



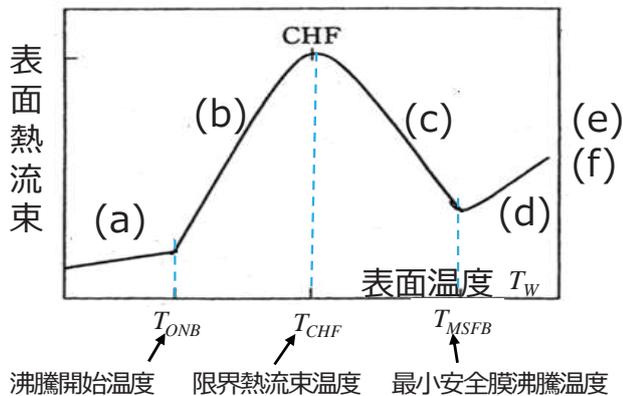
当社の微細構造モデリングツール
REVOCAP_PorousModelerを
使用して粒子分布を設定する。



粒子分布を直接使用して、気液二
相流解析を行う。

壁面熱伝達モデル

沸騰曲線



毎時刻、各表面メッシュについて、以下の(a)から(f)のどの状態であるかを判別する。

- (a) 液単相
- (b) 核沸騰 (サブクールまたは飽和)
- (c) 遷移
- (d) 膜沸騰
- (e) 蒸気単相
- (f) 凝縮

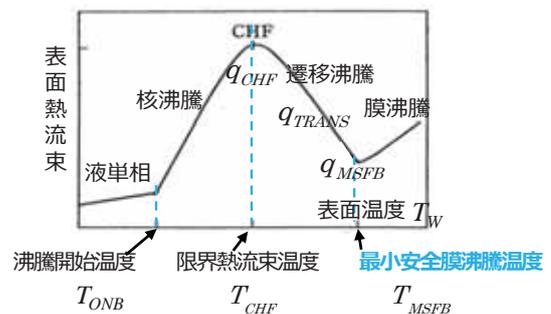
- $T_w \leq T_{ONB}$: 液単相
- $T_{ONB} < T_w \leq T_{CHF}$: 核沸騰
- $T_{CHF} < T_w \leq T_{MSFB}$: 遷移沸騰
- $T_{MSFB} \leq T_w$: 膜沸騰

表面温度とバルク（温度境界層より離れた位置）の温度と速度を使用して、(a)から(f)の構成方程式（実験相関式）で表面熱流束を計算する。

壁面熱伝達モデル

最小安全膜沸騰温度

最小安全膜沸騰温度は、膜沸騰と遷移沸騰が切り替わる表面温度のことである。



【方法1】

均質沸騰核生成温度 T_{HN} に基づく式で最小安全膜沸騰温度 T_{MSFB} を求める。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left(\frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5}$$

ここで

$$T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2})DP + (2.3907 \times 10^{-5})DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9})DP^3$$

$$DP = 3203.6 - P$$

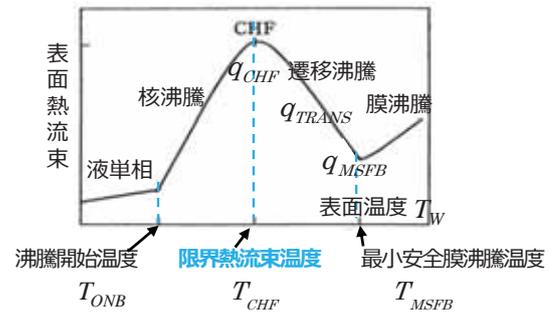
【方法2】

T_{MSFB} は流体の種類、表面性状、形状、材質に影響されるので、 T_{MSFB} の実験式あるいは実験値を場所ごとに与える。

壁面熱伝達モデル

限界熱流束温度

限界熱流束温度は、遷移沸騰と核沸騰が切り替わる表面温度のことである。



【方法1】

以下の(a)と(b)の熱流束が一致するように限界熱流束温度 T_{CHF} を求める。

(a)Chenによる核沸騰熱流束式 ここで

$$q_{CHEN} = h_{nucb} (T_W - T_l) \quad h_{nucb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_W - T_s)^{0.24} (p_W - p)^{0.75} S W_{n2}$$

(b)Zuberによる限界熱流束式

$$q_{CHF} = 0.15 h_{fg} \rho_g^{0.5} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \}^{0.25} \quad S = \begin{cases} 1.0 & (Re_{TPP} \leq 0) \\ (1 + 0.12 Re_{TPP}^{1.14})^{-1} & (0 < Re_{TPP} \leq 32.5) \\ (1 + 0.42 Re_{TPP}^{0.78})^{-1} & (32.5 < Re_{TPP} \leq 70) \\ (1 + 0.42 \times 70^{0.78})^{-1} & (70 < Re_{TPP}) \end{cases}$$

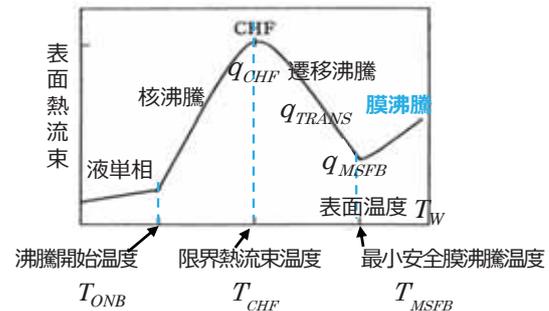
【方法2】

T_{CHF} の実験式あるいは実験値を場所ごとに与える。

壁面熱伝達モデル

膜沸騰の表面熱流束

輻射熱伝達率、Bromleyの膜沸騰熱伝達率、Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率を使用して液相の熱伝達率 h_{wl} を求める。



$$h_{wl} = h_r \frac{T_W - T_s}{T_W - T_l} + h_f \frac{T_W - T_s}{T_W - T_l} + h_d + 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \frac{\lambda_l}{L}$$

ここで

$$h_r = (1 - \alpha_g) \sigma_{SB} \epsilon_r \frac{T_W^4 - T_s^4}{T_W - T_s} \quad (\alpha_g \leq 0.5)$$

$$h_f = \begin{cases} h_{f0} & (0.5 < \alpha_g \leq 0.75) \\ h_{f0} (3 - 2X_1) X_1^2 & (0.75 \leq \alpha_g) \\ 0 & \end{cases}$$

$$h_{f0} = 0.62 \left\{ \frac{\rho_g \lambda_g^3 (\rho_l - \rho_g) g h_{fg}}{\mu_g (T_W - T_s) \lambda} \right\}^{0.25} \quad \text{Bromleyの膜沸騰熱伝達率}$$

h_d Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率

冷却材の種類により上式を修正して使用する。

壁面熱伝達モデル

サブクール核沸騰の表面熱流束

Chenの式をサブクール域に拡張した以下の式を使用する。

$$q_{wl} = (1 - \varepsilon)q_{NB} + \varepsilon q_C + q_{SPL} + 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4} \frac{\lambda_l}{L}$$

ここで

$$q_{NB} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_W - T_s)^{0.24} (p_W - p)^{0.75} S W_{n2} (T_W - T_l)$$

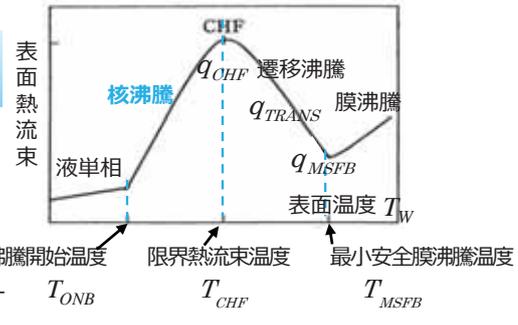
Chenの核沸騰熱流束式

q_C Hancox-Nicollの流束式から強制対流分を除いた凝縮に使用される熱流束

q_{SPL} Dittus-Boelterの乱流強制対流熱流束式とNusselt数4の大きい方を使用

ε Rouhaniモデルにより、サブクール水を熱するのに費やされる割合

冷却材の種類により上式を修正して使用する。



壁面熱伝達モデル

遷移沸騰の表面熱流束

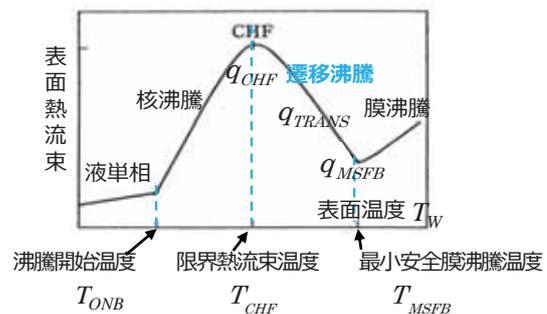
限界熱流束温度における熱流束 q_{CHF} と最小安全膜沸騰温度における熱流束 q_{MSFB} を補間して、遷移沸騰の熱流束 q_{TRANS} を求めている。

$$q_{TRANS} = \gamma q_{CHF} + (1 - \gamma) q_{MSFB}$$

ここで

$$\gamma = \left(\frac{T_W - T_{MSFB}}{T_{CHF} - T_{MSFB}} \right)^2$$

冷却材の種類により上式を修正して使用する。



蒸発モデル

基礎方程式

- ・ 液滴に対する質量と運動量の保存方程式
- ・ 不凝縮ガス(空気など)と蒸気の混合ガスに対する質量と運動量の保存方程式
- ・ 蒸気に対する質量保存方程式

液滴表面の質量分率 w_s の計算

$$w_s = \frac{p_1}{P} \frac{M_1 / M_2}{1 - [1 - (M_1 / M_2)](p_1 / P)}$$

液滴からの単位時間当たり蒸発量 W [kg/(s個)]の計算

$$W = 2\pi r \rho D (w_s - w_\infty) \left(2 + 0.55 Re^{0.5} Sc^{1/3} \right)$$

単位体積当たりの液滴数 n [個/m³]の計算

$$n = \alpha / \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) = \frac{6\alpha}{\pi d^3}$$

単位時間・単位体積当たりの蒸発量[kg/(sm³)]の計算

$$W \cdot n$$

凝縮モデル

垂直あるいは傾斜面の膜状凝縮^[1]

- ・ 層流の場合

$$Nu = 0.943 (Gr \cdot Pr / H)^{1/4}$$

- ・ 正弦波流の場合

$$Nu = 1.65 S^{-1/3} (H / Pr) (Gr \cdot Pr / H)^{1/3}$$

- ・ 高調波流または乱流の場合

$$Nu = 0.906 (H / Pr)^{1/15} (Gr \cdot Pr / H)^{4/15} \times$$

$$\left[1 + 3.12 \times 10^{-11} \left\{ H^2 Pr^{-5/4} (Gr \cdot Pr / H)^{1/2} \right\}^2 \right]^{2/15}$$

強制対流の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \lambda_L / L$$

自然対流の式

$$Nu = 4 \lambda_L / L$$

[1]上原春男, 木下英二, “鉛直面上の体積力対流の波流および乱流膜状凝縮平均熱伝達係数の整理式”, 機論, 63-616B(1997)4013-4020.

気泡合体による気泡径分布の解析モデル

標準的二流体モデル

- ・ 気相の質量保存式
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式



気泡合体による気泡径分布の解析モデル

- ・ 気泡群の質量保存式(複数)
- ・ 気泡合体のソースターム
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 気泡群の運動方程式(複数の代数方程式)
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式

- ・ 各気泡グループの運動は、力学的平衡状態を仮定して、気相全体の平均速度からの速度差を計算する。

固体凝集モデル

粒径グループ毎の運動量保存式

$$\rho_p \frac{Dv_{pk}}{Dt} = -\frac{3}{4} C_{Dm} \frac{\rho_l}{d_{pm}} |v_l - v_{pk}| (v_{pk} - v_l) + \rho_l \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{2} \rho_l \left(\frac{Dv_l}{Dt} - \frac{Dv_{pk}}{Dt} \right) + (\rho_l - \rho_p) g_i$$

粒子の慣性力 相間の抗力 圧力勾配力 付加慣性力 浮力

粒径グループ毎の個数濃度の保存方程式

$$\frac{\partial n_{pk}}{\partial t} + \nabla(n_{pk} v_{pk}) = \nabla(D_{pk} \nabla n_{pk}) + S_{pk}$$

凝集のソースタームとして速度差による凝集と乱流による凝集を考慮する。
以下の S_{pk} はグループ kより小さい粒子同士が凝集してkが生成し、グループ kの粒子が他と凝集して kが消滅するソースタームを表す。

$$S_{pk} = \left(\frac{1}{2} \sum_{m+n=k} N_{mn} - \sum_{m=1}^{\max} N_{mk} \right) \eta = \left(\frac{1}{2} \sum_{m+n=k} \beta(m,n) n_m n_n - \sum_{m=1}^{\max} \beta(m,k) n_m n_k \right) \eta$$

$$\beta(m,n) = 2(2\pi)^{0.5} R^2 \left\{ \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 g^2 + \frac{1}{9} R^2 \frac{\varepsilon \rho_l}{\mu_l} \right\}^{0.5}$$

$$R = \frac{d_{pm} + d_{pn}}{2} \quad \tau_m = \frac{4}{3} d_{pm}^2 \rho_l / (\mu_l \text{Re}_m C_{Dm})$$

解析実績

➤ 自動車・熱交換器

- 熱交換器の沸騰凝縮解析
- 焼入れ熱処理の解析
- 気泡除去装置の解析
- 配管の圧損解析
- 表面張力による液体挙動解析

➤ 化学

- 気泡塔内の解析
- T字合流配管部のサーマルストライピング現象の解析

➤ 原子力

- 燃料集合体の解析
- 気水分離器の解析
- 気流ジェット噴流装置の解析
- 垂直管と水平管の環状流解析
- プール水のスロッシング解析

➤ その他

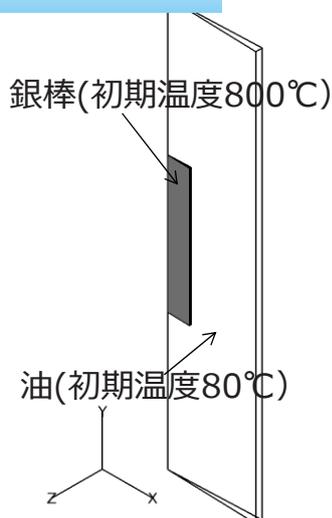
- 製鉄プロセスの解析
- 配管内の液滴の蒸発解析(拡散)
- 配管内の蒸気の凝縮解析
- 海中の気泡流解析
- スパコン「京」の利用

解析事例① 銀棒の油焼入れ（沸騰解析）

解析目的

- ・ 冷却曲線を実験値と比較して再現性を検証

解析条件

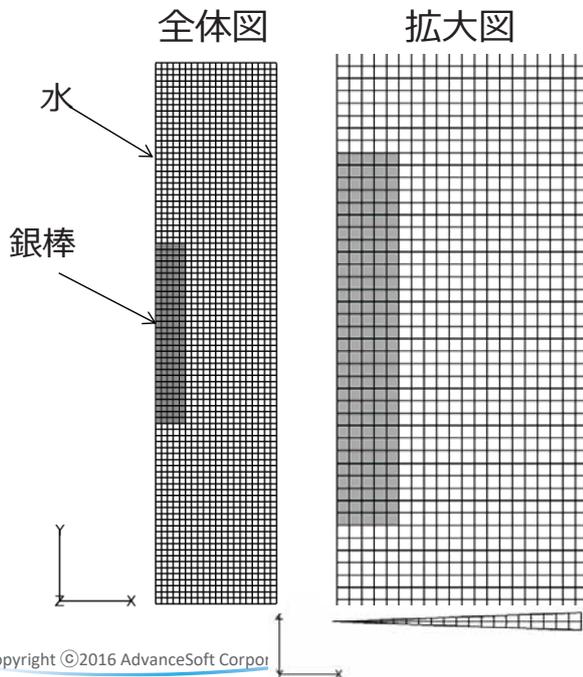


解析領域全体図

- ・ ワークの材質：銀（相変態なし）
- ・ ワーク形状：直径10mm、長さ30mmの円柱
- ・ ワークの姿勢：垂直
- ・ ワークの初期温度：800℃
- ・ 冷却剤：油
- ・ 油槽内の初期油温：80℃
- ・ 現象時間：10秒
- ・ 時間刻み：0.05秒一定

解析事例① 銀棒の油焼入れ (沸騰解析)

計算格子

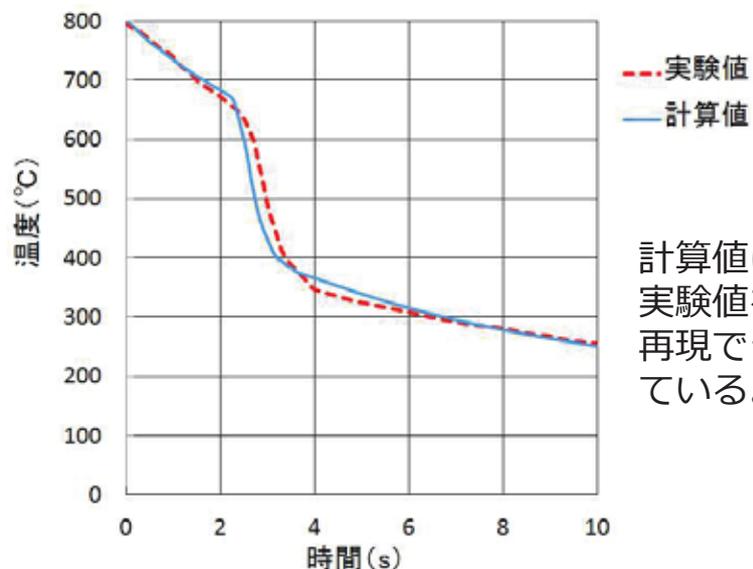
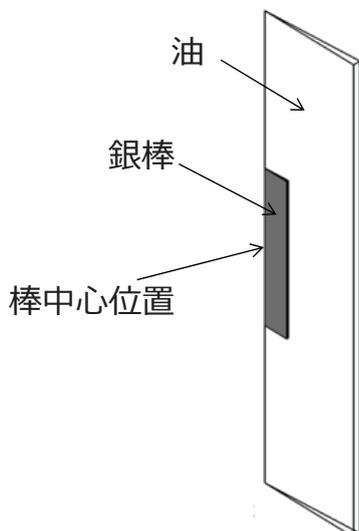


- メッシュサイズ：
大部分は1mm (x方向とz方向)
表面から第一格子点は0.25mm
- コントロールボリューム数：5,856
- 時間刻み：0.05秒
- 最大クーラン数：95~497
- 現象10秒までの計算時間：
2分52秒(2並列で計算した場合)

解析事例① 銀棒の油焼入れ (沸騰解析)

解析結果

銀棒中心位置の冷却曲線



計算値は
実験値を
再現でき
ている。

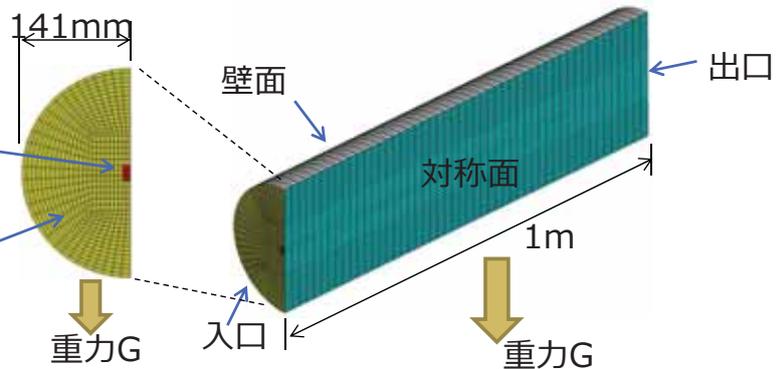
実験値の引用文献：

解析事例② 空気中の水滴蒸発解析

解析目的 ・ 空気中の水滴蒸発解析を定性的に検証

解析条件

- ・ 水滴入口 : 1.0[m/s]
- ・ 水滴径 : 0.1、1.0[mm]
- ・ 空気入口 : 1.0[m/s]



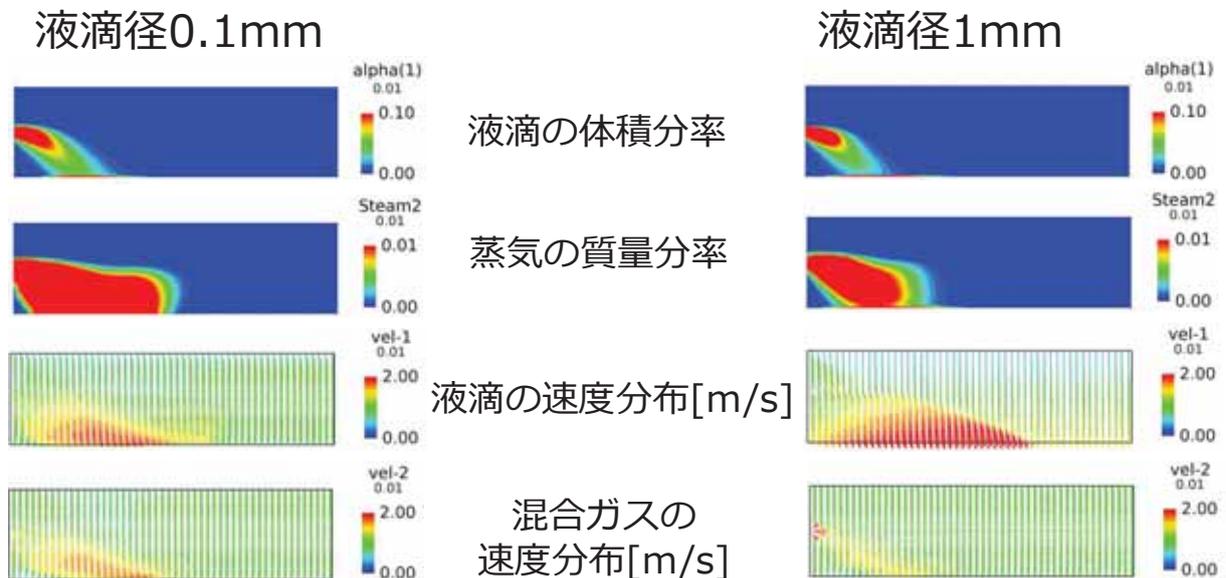
計算格子

- ・ 乱流モデル : 混合型k-εモデル
- ・ 流動様式 : 噴霧流
- ・ 時間刻み : 1.0e-5[sec]

セル数 : 29,100
節点数 : 31,620

解析事例② 空気中の水滴蒸発解析

解析結果 0.2秒後



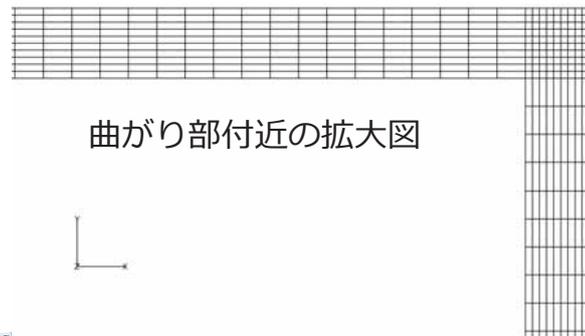
解析事例③ 配管内の凝縮解析

解析目的 ・ 配管内の凝縮解析を定性的に検証

解析条件

- ・ 平板間距離：12.5mm
- ・ 物性値：飽和状態の水と水蒸気
- ・ 初期値：静止、ボイド率1、飽和温度
- ・ 入口境界条件：20m/s、ボイド率1、飽和温度
- ・ 壁面境界条件：no-slip、飽和温度 - 1℃
- ・ 水滴径：1μm

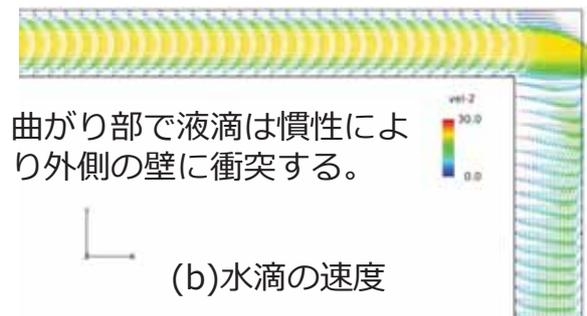
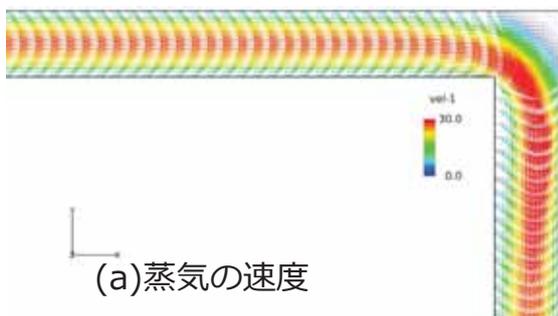
計算格子



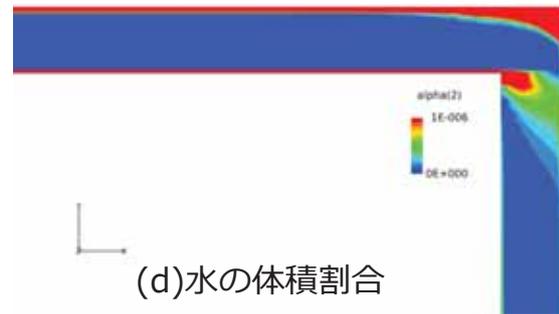
曲がり部付近の拡大図

解析事例③ 配管内の凝縮解析

解析結果 0.1秒後



曲がり部で液滴は慣性により外側の壁に衝突する。



解析事例④ 気泡塔の解析

解析目的

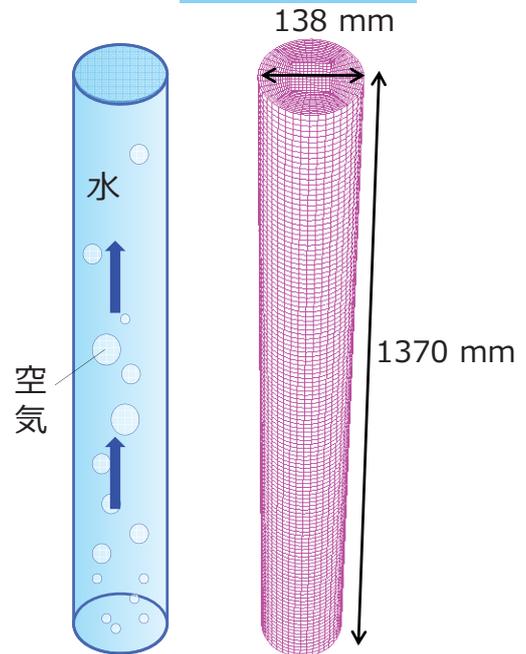
- ・ 気液二相流解析の基本機能の精度検証
- ・ 気泡塔（気液反応装置）底面からの気体流入時のボイド率と液相速度を実験値*と比較して再現性を検証

* J.H.Hills, Trans.Instn.Chem.Engrs, Vol52,1971,pp1-9

解析条件

- ・ 気泡径：3 mm
- ・ 物性値 液相：密度 1000 kg/m³
気相：密度 1.2 kg/m³
- ・ ガス通気量：空塔速度 3.8 cm/s
- ・ 格子数:91,000

計算格子



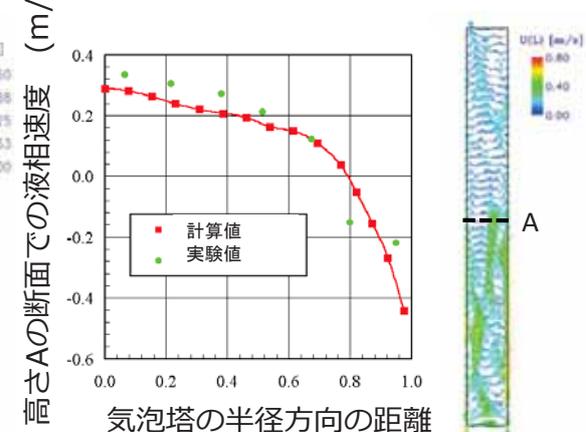
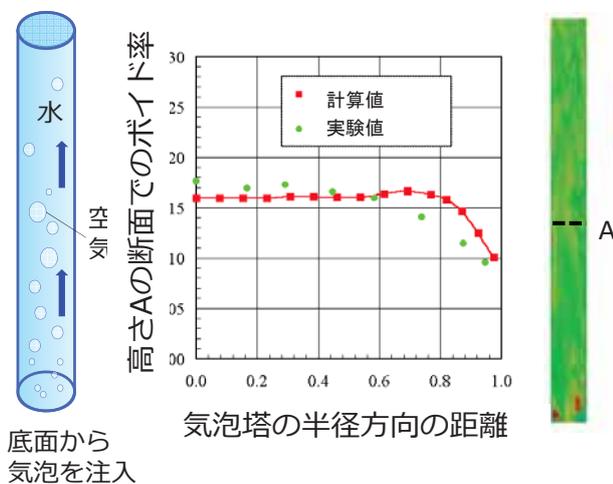
気泡塔のイメージ図

解析事例④ 気泡塔の解析

解析結果

ボイド率：実験値と計算値の比較

液相速度：実験値と計算値の比較



ボイド率と液相速度の計算値は実験値を再現できている。

30秒の計算時間：8時間12分
(12並列で計算した場合)

解析事例⑤ 自由表面解析

解析目的 ・ スロッシングの実験値と比較して再現性を検証

解析条件

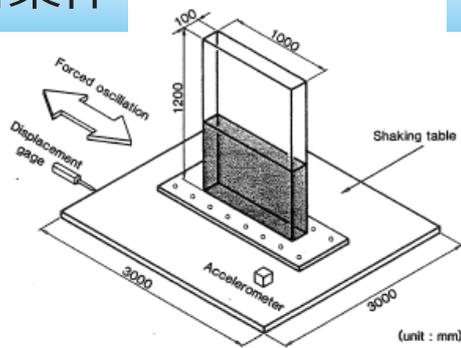
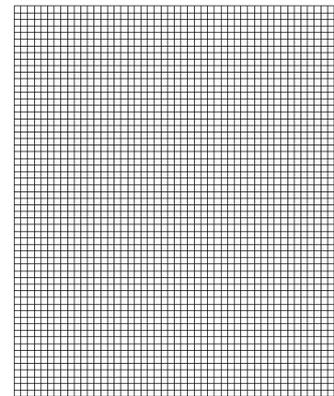


Figure 4. Experimental rectangular model tank set on a shaking table

計算格子



OKAMOTOらのスロッシング実験(*)

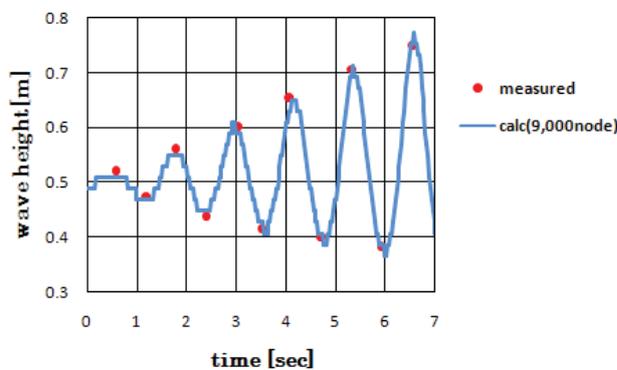
参考文献：

(*)Okamoto, Kawahara, Int.J. Numer. Meth. Fluid 11 (1990) 453-477.

節点：50(横)×60(縦)×3(奥行き)
 節点数：9,000
 横方向の最小格子サイズ：20mm
 縦方向の最小格子サイズ：20mm

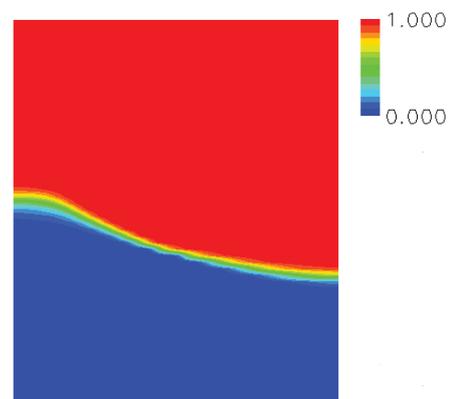
解析事例⑤ 自由表面解析

解析結果



右壁における界面位置の時間変化：
 実験値と計算値の比較

界面位置の計算値は実験値を再現
 できている。



解析結果：7秒後のボイド率

7秒の計算時間：5時間38分
 (4並列で計算した場合)

解析事例⑥ 気泡合体解析

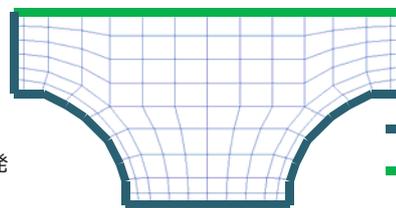
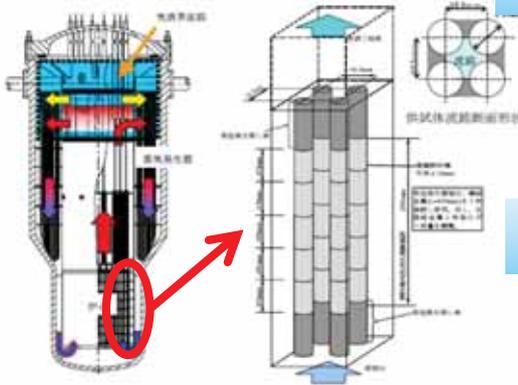
解析目的 ・気泡径分布を実験値と比較して再現性を検証

解析条件

- ・気相：六フッ化硫黄、液相：エタノール
- ・乱流モデル：k-εモデル
- ・最下段から気泡を注入
- ・気泡径：0.1mmから5mmまで5群

計算格子

- ・断面内のメッシュサイズは1mm程度
- ・軸方向のメッシュサイズは3mm程度
- ・解析格子数 81,150 (1/2モデル)



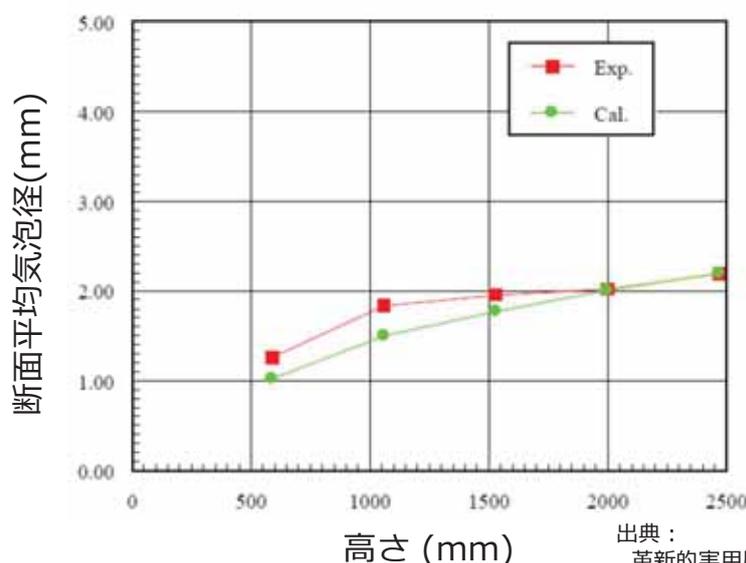
壁面
対称面

出典：
革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

解析事例⑥ 気泡合体解析

解析結果

断面平均気泡径の高さ方向分布：実験値と計算値の比較

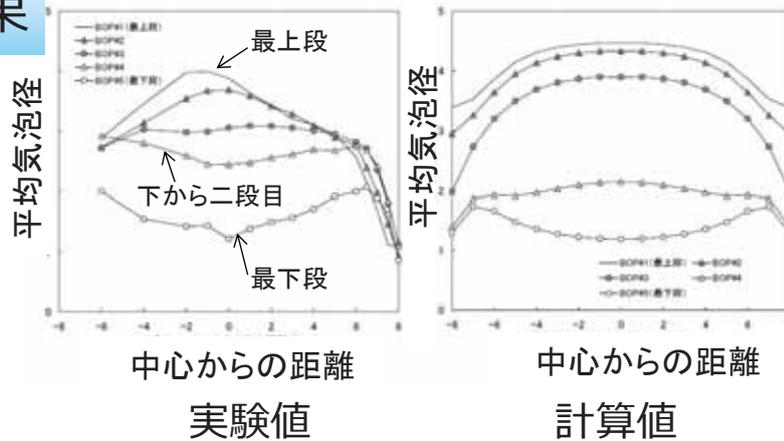


計算値はサブチャンネル内の上昇に伴って気泡径が増大する実験値を再現できている。

出典：
革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」 30

解析事例⑥ 気泡合体解析

解析結果



計算値は、下段では気泡径が2mm以下の比較的小サイズであるため壁近傍に集まる「鞍型分布」を形成し、下流側に発達するにつれて合体によって気泡が大型化してサブチャンネル中心に集まる「砲弾型分布」を形成する実験値を再現できている。

出典：

革新的実用原子力技術開発費補助事業

平成18年度成果報告書概要版

「高温高圧二相自然循環炉の熱流動シミュレーション評価手法の開発」31

解析事例⑦ 固体凝集解析

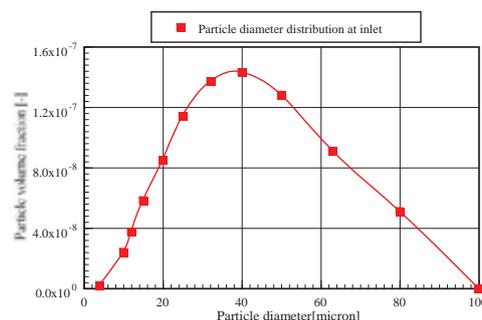
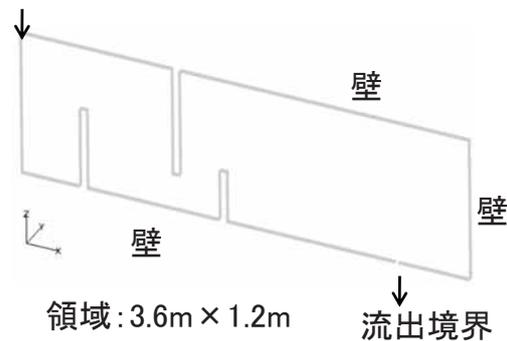
解析目的

- ・ 固体凝集解析を定性的に検証

解析条件

- ・ 液体の密度：7,100kg/m³
- ・ 固体の密度：10,000kg/m³
- ・ 流入速度：0.4m/s
- ・ 固体の粒径：以下の12グループ
4、10、12、15、20、25、
32、40、50、63、80、
100μm

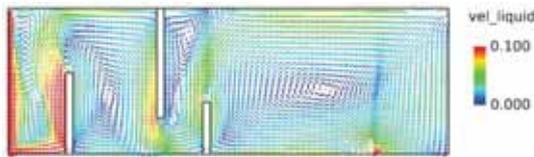
流入境界



入口の粒径分布

解析事例⑦ 固体凝集解析

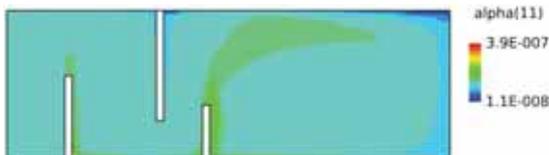
解析結果



液体の速度分布 (単位 : m/s)



粒径25μmの体積割合



粒径50μmの体積割合



粒径80μmの体積割合



粒径50μmの生成・消滅速度(m³/m³s)

正は、4~40μmの粒径の凝集によって、50μmの粒径が生成される速度を表わす。
負は、50μmの粒径が他の粒径と凝集して、50μmの粒径が消滅する速度を表わす。

Advance Soft



「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

facebook、YouTubeでも当社の情報を発信しています

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

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

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP の新機能紹介

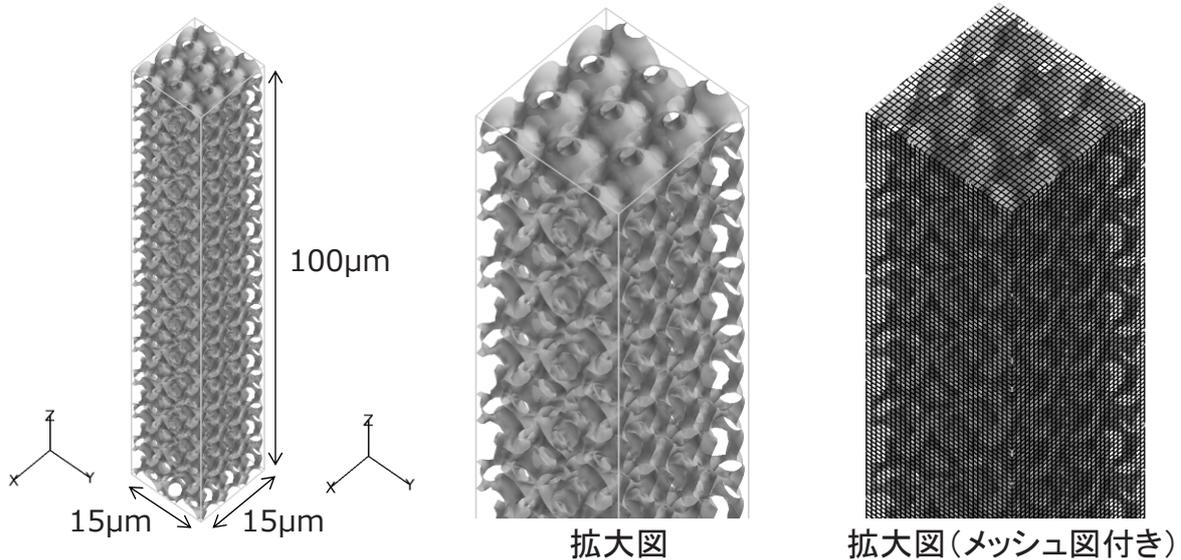
研究員 桐原 亮平

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP
製品紹介セミナー

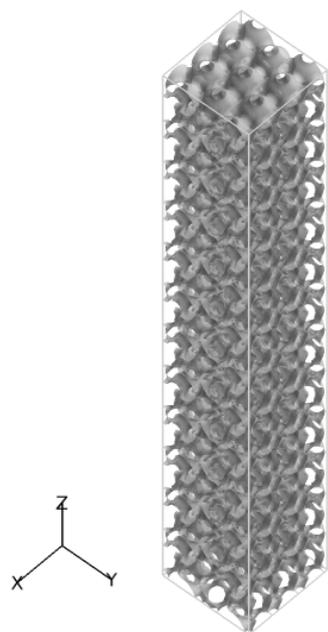
2016年12月15日 (木)
アドバンスソフト株式会社

多孔質体の気液二相流解析

弊社の微細構造モデリングツール REVOCAP_PorousModeler を使用して、多孔質の粒子分布を与えて、気液二相流を解析する機能を追加した。



多孔質体の気液二相流解析



解析目的

高温の多孔質によって、水が沸騰する挙動を解析する

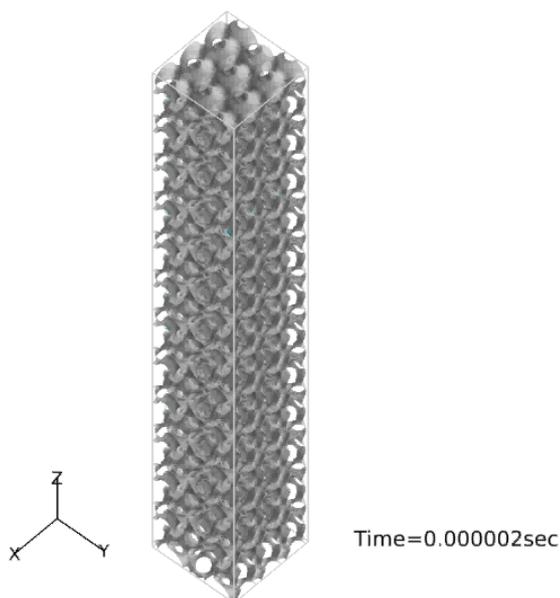
解析条件

- ・流体：水と水蒸気
- ・初期値：
 - ポイド率：0（水で満たされている状態）
 - 流れ：静止
 - 温度：300K
- ・境界条件：
 - 底面：壁
 - 側面：対称条件
 - 上面：自由流出
 - 粒子温度：1000K

多孔質体の気液二相流解析

解析結果

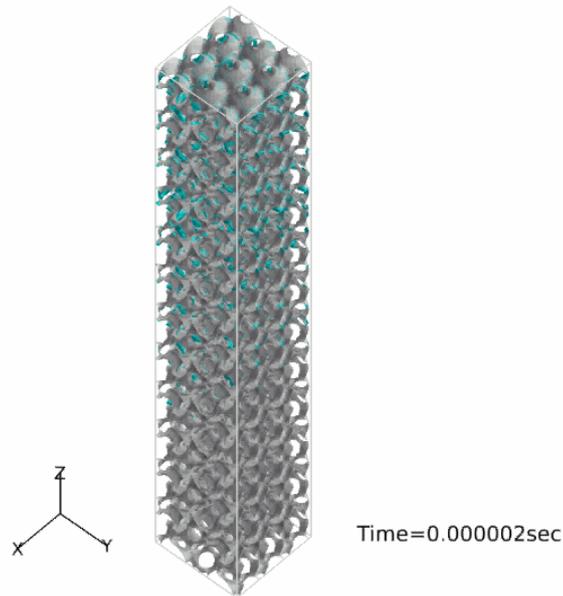
現象10 μ sまで計算
時間刻み：1E-6s
ステップ数：100
並列数：9
計算時間：12分17秒



ポイド率0.9の等値面の時間変化

多孔質体の気液二相流解析

解析結果



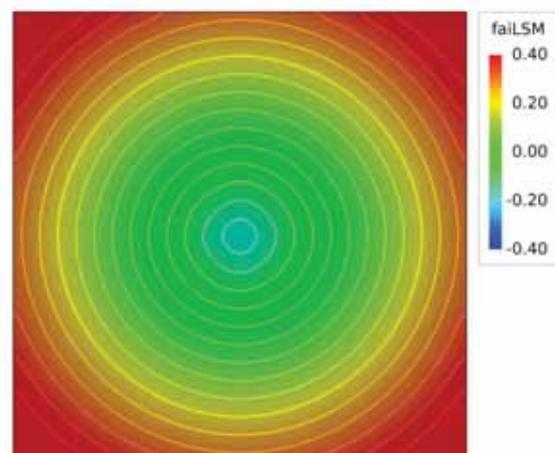
ポイド率0.7の等値面の時間変化

レベルセット法と二流体モデルのハイブリッド法

表面張力の精緻化のため、自由表面の界面追跡に広く用いられているレベルセット法を用いて計算する機能を追加した。

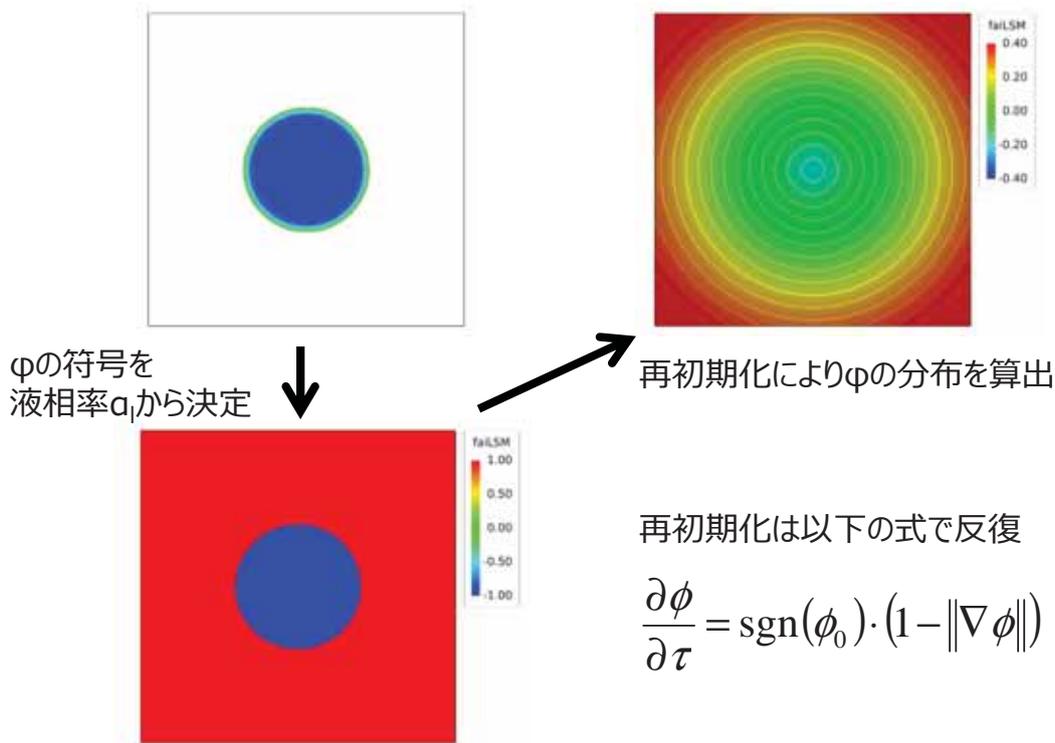
レベルセット法は、例えばある基準面からの距離 ϕ に対する以下の集合を求める方法である。

$$L_c(\phi) = \{(x_1, \dots, x_n) | \phi(x_1, \dots, x_n) = c\}$$



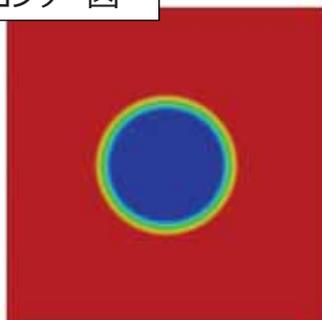
円の周りの ϕ を計算した例

レベルセット法と二流体モデルのハイブリッド法



レベルセット法と二流体モデルのハイブリッド法

(a) α_l のコンター図

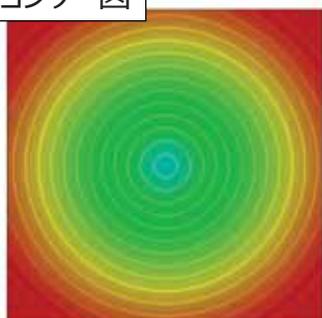


従来までのCSFモデルでは不連続関数 α_l の数値微分で表面張力 f_{st} を算出

$$f_{st}(x) = -\sigma \cdot \kappa(x) \cdot \vec{n}(x) \cdot \frac{\rho(x)}{\langle \rho \rangle}$$

$$= -\sigma \cdot \left(\nabla \cdot \frac{\nabla \alpha_l(x)}{|\nabla \alpha_l(x)|} \right) \cdot \nabla \alpha_l(x) \cdot \frac{\rho(x)}{\langle \rho \rangle}$$

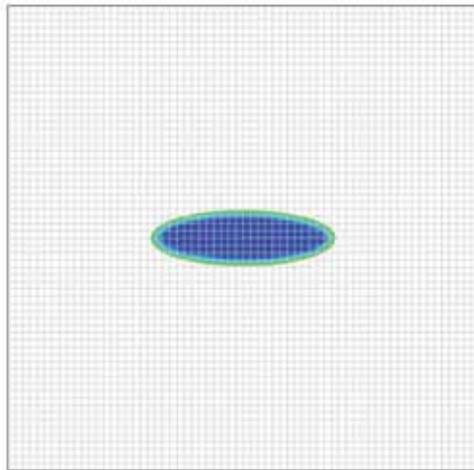
(b) φ のコンター図



レベルセット法により連続関数φでの微分が可能

$$f_{st}(x) = -\sigma \cdot \left(\nabla \cdot \frac{\nabla \phi(x)}{|\nabla \phi(x)|} \right) \cdot \frac{\nabla \phi(x)}{|\nabla \phi(x)|} \delta(x) \cdot \frac{\rho(x)}{\langle \rho \rangle}$$

レベルセット法と二流体モデルのハイブリッド法



左図のような楕円形の液滴に対して表面張力のみを作用させ、その伸縮運動の時間発展を解析した。

解析条件

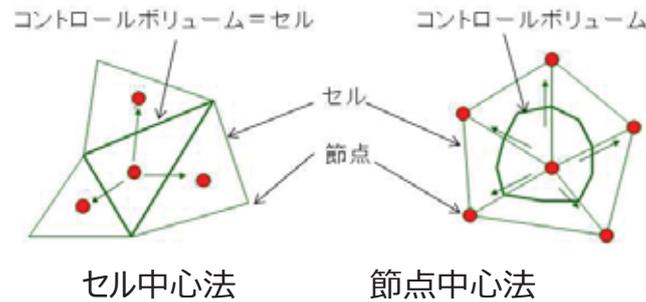
- ・流体：空気と水（20℃）
- ・計算領域：縦・横ともに1 m
- ・要素数：64x64
- ・楕円長：
 - 長軸半径：0.20 m
 - 短軸半径：0.06 m
- ・時間刻み：1E-3 s

レベルセット法と二流体モデルのハイブリッド法



Advance/FrontFlow/MPの解析結果

セル中心法での解析機能の追加



- Advance/FrontFlow/MPは非構造格子系を使用
- 基礎方程式はコントロールボリュームで全ての保存方程式を積分して離散化
- コントロールボリュームを定義する方法に、節点中心法だけでなくセル中心法も選択可能に



- アスペクト比が大きく曲率があるメッシュでの解析が向上
- REVOCAP_PorousModelerで構造格子を作成した時に、行列の優対角化により計算が高速化

ロードマップ

2017年6月リリース予定

新機能	ユーザーのメリット
レベルセット法	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 自由表面と分散相(気泡流や相変化など)を同時に扱う解析が可能 ✓ スロッシング解析は従来より精度が向上
接触角機能	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 自由表面と分散相(相変化など)を伴う解析が可能
液体二成分と気体の解析への拡張	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 気液二相流を扱いつつ、比重の異なる2成分液体の挙動解析が同時解析が可能
セル中心法	<ul style="list-style-type: none"> ✓ アスペクト比が大きく曲率があるメッシュでの精度向上 ✓ 構造格子を選択した時に計算が高速化
沸騰熱伝達モデルの改良	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 壁面熱流束の解析精度が向上

Advance Soft



「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

facebook、YouTubeでも当社の情報を発信
しています

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

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

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行ないます。

例えば解析業務の場合



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、解析経験豊富な技術者がお客様のご要望をお伺い致します。

2. 最適な解析方法をご提案し、見積仕様書を作成致します。

3. 解析内容、納期、料金等、お客様のご了承が得られましたら、作業を実施致します。

4. 解析結果の可視化をはじめ、評価や考察を行ない、報告書を作成致します。



終わりに

ご清聴ありがとうございました。

アドバンスソフトは、高度な技術力、開発力、人材を武器に、最先端理論を応用した解析シミュレーションソフトウェアを開発・販売しています。受託解析、受託開発、パッケージソフトウェア、コンサルティング等多様なソリューションを通じて、お客様の問題解決に即戦力として貢献します。

お問い合わせ先：田口またはご担当営業まで
TEL:03-6826-3971 FAX:03-5283-6580
E-mail:office@advancesoft.jp



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つ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です。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。

Advance/FrontFlow/MP は、東京大学生産技術研究所計算科学技術連携研究センターが実施した文部科学省のソフトウェアの研究開発プロジェクトの成果である流体解析ソフトウェア FrontFlow/red を基に、アドバンスソフト株式会社が独自に研究開発した気液二相流ソフトウェアです。