

アドバンスソフト(株)気液二相流解析セミナー、2014年6月10日

気液二相流の課題と今後の期待

大川富雄(電気通信大学)

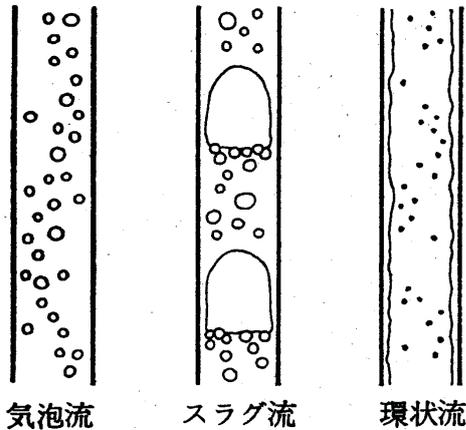
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

主な内容

- はじめに
 - 気液二相流の多重スケール構造について
- 気液二相流解析モデル
 - 解析モデルの概要及び特徴(長所/短所)
 - 解析モデルの選択
 - 主な課題
- 沸騰流解析における課題
- まとめ

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

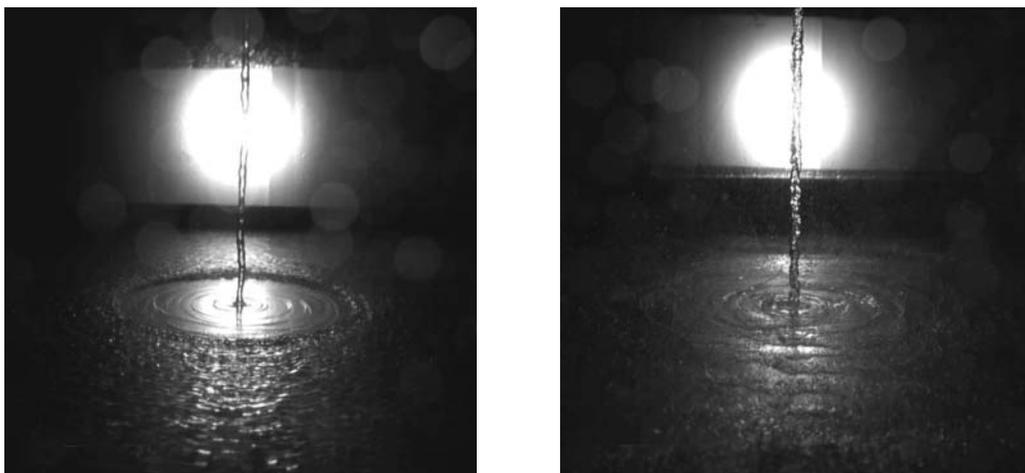
気液二相流の空間スケール(管内流)



- 気泡
 - 沸騰気泡: 0.1-1 mm
 - 水・空気系気泡: 1-10 mm
 - スラッグ気泡: 10-100 mm
- 液膜
 - 厚さ: 0.1-1 mm
 - リップル波、擾乱波: 1-10 mm
 - 擾乱波間隔: 10-100 mm
- 液滴
 - 液滴径: 0.01-0.1 mm
- システム応答 ~ 1,000 mm

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

多重スケール(衝突噴流の例)



- ノズル直径: 10mm、突出圧: 0 kPa(左: 自由落下)、50 kPa(右)
- 液体噴流側面における界面波の形成、液滴生成
- ターゲット上での液膜形成、界面波、液滴生成
- **液シート厚さ、飛散液滴サイズは、噴流直径よりはるかに小さい!**

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

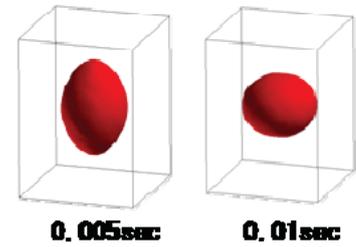
様々な数理モデル～多重スケールに応じて…

- 瞬時局所の式(平均化せず気液界面を追跡)

- VOF, Front tracking, Level set, 粒子法, etc..

- 平均化方程式

- 混合流モデル(気液間速度差相関式)
 - 均質流モデル: 気液間の相対速度を無視
 - スリップ流モデル: スリップ比 S で気液間相対速度を表記
 - ドリフトフラックスモデル: 分布定数 C_0 とドリフト速度 V_{gj} で表記

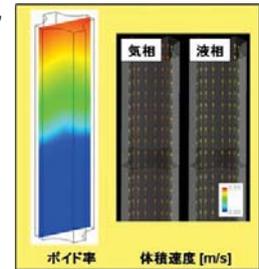


- 二流体(多流体)モデル

- 相間運動量輸送を介して気液間相対速度を表記
- 一次元⇔多次元

- 粒子追跡法

- One way法, Two way法



(画像: アドバンスソフトホームページより)

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

各モデルの特徴

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。

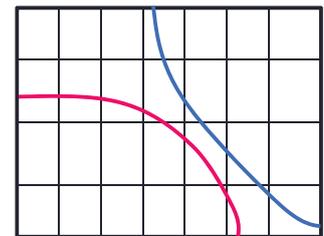
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

解析モデルの選択

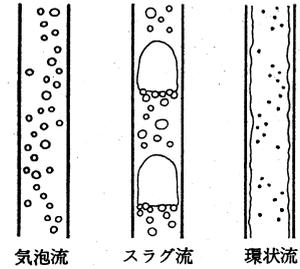
- 一次元解析で足りる場合 → **一次元二流体モデル**
- 多次元解析が必要な場合
 - **界面追跡法** (瞬時・局所の式)
 - 流下液膜やスロッシングのように、気液界面がはっきりしている場合。
 - **多次元二流体モデル** (平均場方程式)
 - 気泡塔のように気液の混合が比較的良い場合。
 - 沸騰を伴う場合。

界面追跡法の課題

- 計算負荷対策
 - 界面近傍へのメッシュ自動集中配置、並列計算、etc..
 - 液膜流解析では高アスペクト比の計算メッシュ
- 三相界線 (動的接触角)
 - 固体面上における液膜 (塗料や溶融燃料など) の広がり挙動
- 気泡合体
 - 界面追跡法の利点の1つは、気泡径モデルを必要としないこと。
 - VOF ~ 界面が近づけば合体してしまう (気泡流中で、気泡反発はありふれた現象だが..)。分子レベルのモデリング。VOFではなく、界面自体を追跡することが必要?
- 相変化
 - 蒸発・凝縮 ~ 温度境界層の解像 AND/OR モデリング
 - 沸騰 ~ 沸騰核、気泡生成周期 (待ち時間)



多次元二流体モデルの課題



- 一次元用構成式の適用性に関する問題
 - 気泡の抗力係数: 終端速度より導出・・・水平方向に適用できるか?
 - 例えば、Lockhart-Martinelliと壁面せん断力モデルの整合性 (j_G, j_L)
 - 気泡径分布の取扱い
 - 乱流モデル ($k-\varepsilon \rightarrow$ LESによる一般性の向上)
- 環状流解析に適用できない(蒸発管の一貫解析)
 - 液膜の表現(気泡流ボイド率のWall Peak解析におけるせん断揚力)
 - 環状流への遷移に関する知見が少ない(液滴流量比すら不明)
 - 液膜と液滴の分離・・・多次元三流体モデルはあり得るか?
 - より一般的には4流体モデル(連続気相、連続液相、気泡、液滴)?
- 沸騰のモデリング

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

沸騰における蒸気生成率

- 飽和沸騰の場合
 - 熱流束既知・・・ $\Gamma_V = q_W / \Delta h_V$ [kg/m²s]
 - 壁面温度既知(熱交換器含む)・・・ $\Gamma_V = h(T_W - T_{SAT}) / \Delta h_V$ [kg/m²s]
 - DNB発生時の壁面温度急上昇時など、特殊な場合を除けば、入熱は沸騰による蒸気生成に消費される。
 - 課題: 熱伝達率相関式や初期気泡径相関式等の高精度化
- サブクール沸騰の場合
 - 入熱 \rightarrow 「液温上昇」と「蒸気生成」に消費される。
 - 沸騰による蒸気生成量の予測が既に難しい。
 - 温度分布: 加熱壁近くは過熱状態 \leftrightarrow バルク液はサブクール状態
 - 生成後の軌跡によって、気泡は過熱液相中で「さらに成長」する場合も、サブクール液中で凝縮によって「消滅」する場合もある。
 - 凝縮量の予測も困難。

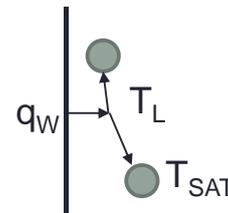
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

サブクール沸騰モデルの目標

- 気泡径やボイド率の精度を議論する以前に、蒸気生成量の予測が容易でない。
 - ⇔ 水・空気系で、ガス流量を知らずにボイド率予測はできない。
 - 蒸気生成量の合理的予測。
- 生成直後に凝縮・消滅する場合と、長期間存在し続ける場合がある。
 - 界面熱伝達率は、Ranz-Marshall的でオーダーは大丈夫。
 - 液相の参照温度は、飽和温度(場合によっては過熱)からバルク温度まで幅があり、気泡軌跡の影響を受けるため、予測困難。
 - 凝縮量評価のための液相参照温度(気泡軌跡)の合理的評価
- 上記を満足した上で、初期気泡径や合体の合理的評価
 - 界面追跡では自動計算の可能性。二流体モデルではモデル化必須。

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

蒸気生成量の評価法



- Lai & Farouk (IJHMT 1993) の方法
 - すべての熱流束を液相に投入 → 気液界面熱伝達を介して蒸気生成
 - 初期ボイドがないと沸騰しない。
 - 界面熱伝達率や気泡径で、ボイド率を調整可能(長所と見ることもできるが、伝熱面表面性状の影響もこの辺りで考慮することになる)
- Kurul & Podowski (IHTC 1990) の方法
 - $\Gamma_v = N_s \times f_b \times p_b \times V_b$ の関係を用いて、算出。
 - 「沸騰核密度」、「気泡生成周期」、「初期気泡径」の相関式が必要
 - より現実に即したモデル化の方法だが、十分な精度の相関式を準備できるのか？

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

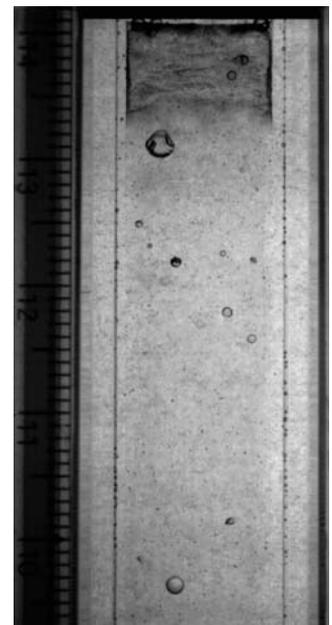
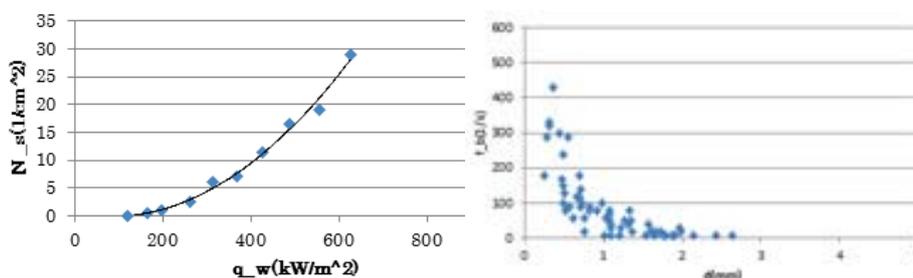
沸騰核密度等の相関式の一例

- $N_s = 1.5 \times 10^4 \Delta T_w^{1.8}$ (Del Valle & Kenning 1985)
 - 過熱度のみの関数
- $d_{b,ini}$: 過熱度、サブクール度、液速度の関数 (Unal 1976)
 - 気泡形成過程を観察した訳ではない; 単一値
- $f_b = K d_{b,ini}^{-0.5}$ (Ceumern-Lindenstjerna 1977)
 - 気泡径の増加とともに減少; 単一値

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

サブクール沸騰の高品質観察に成功

- 画像解析により、 N_s , $d_{b,ini}$, f_b の正確に計測
 - 沸騰核密度: 熱流束あるいは過熱度の増加とともに増加傾向だが、気泡生成状況はサイトによって大きく異なる。無視すべきサイトも多い。
 - 気泡径: サイトにより0.2~3mm程度に分布(各サイトでは割と均一)
 - 気泡周期: $f_b d_{b,ini}$ = 一定は成立 ⇔ 不安定なサイト(無視すべきサイト)も。
 - 相関式では・・・
 - 「注意深い平均化」または「気泡径分布の考慮」が必要
 - N_s , $d_{b,ini}$, f_b はセットで計測しないと危険。



Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

気泡軌跡 (Ahmadi et al., IJHMT 2012a)

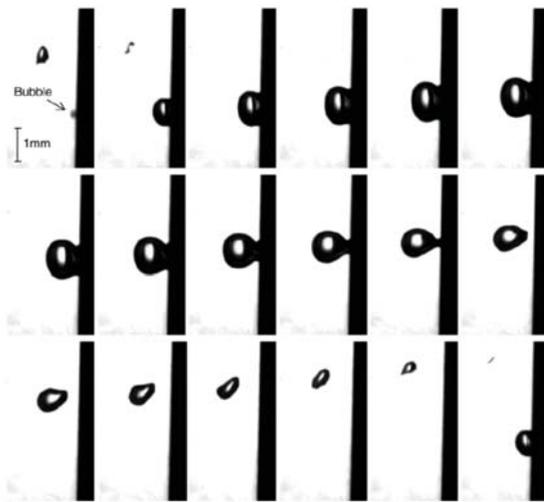


Fig. 4. Bubble lift-off from the heated surface observed in Run 8 (time interval is 0.67 ms).

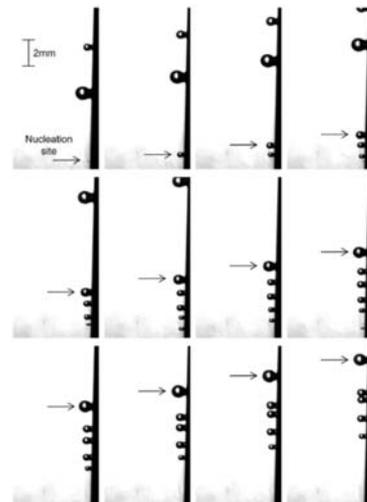


Fig. 5. The bubble sliding along the heated surface for a long distance observed in Run 15 (time interval is 3.3 ms).

- Lift-off または Sliding (沸騰核に留まるのは珍しい)
- 軌跡によって、気泡の寿命(ボイド率)は大きく異なる。

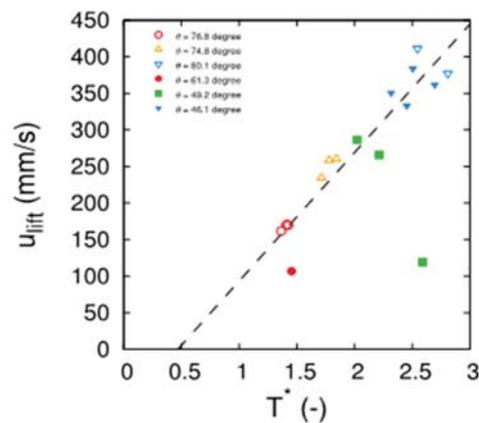
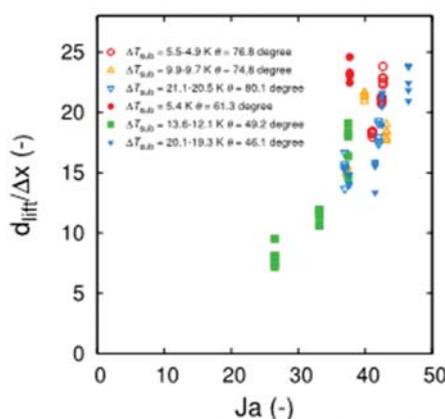
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

なぜ Lift-off するのか？

- まだ揺らいているが、Growth Force が最有力
- 壁面上で成長する球形気泡に働く非定常力

$$F_{Growth} = -\pi\rho_l r_b^2 (2\dot{r}_b^2 + 0.667r_b\ddot{r}_b) \quad (\text{Thorncroft 2001})$$

- $r_b \sim t^{0.5}$ なら Lift-off 抑制だが、成長速度が急低下して Lift-off を促進
- 気泡径 → 過熱液層厚さ、Lift-off速度 → 気泡成長速度でスケーリング



Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

サブクール沸騰域におけるボイド率発展

- サブクール度を徐々に下げると・・・
 1. 非沸騰
 2. 沸騰開始 (ONB)
 - しばらくの間、ボイド率は無視得るほど。
 3. ボイド率の実質的増加開始 (NVG)
 - ボイド率急上昇
- PNVGの前後で何が違うのか？
 - NVG前: 気泡が沸騰核に付着した状態のため、蒸気生成が行えない。
 - 気泡の沸騰核離脱によりNVG
 - Levy の Force balance モデル
 - **観察結果と整合しない！**

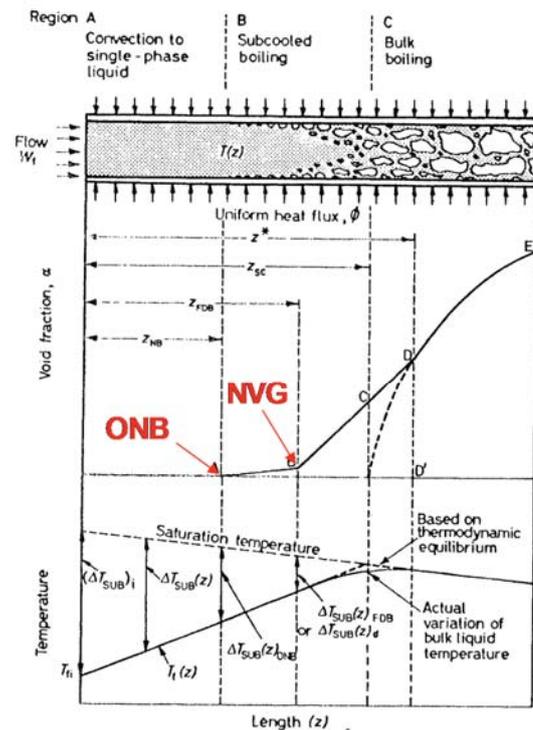


Fig. 6.1. Void fraction in subcooled boiling.

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

NVGの起因事象(水、大気圧、高濡れ面)

- 気泡が再付着すると、気泡の寿命が著しく延びる(Ahmadi et al. IJHMT 2012b)
 - この実験ではこれが NVG の起因事象(高圧では異なる)。
- なぜ再付着するか？
 - 「乱流渦との相互作用」または「気泡合体(こちらが支配的)」による気泡のランダム運動(せん断揚力ではない)
- モデル化
 - 粒子追跡型なら容易
 - 確率的な現象のため、二流体モデルでは検討必要

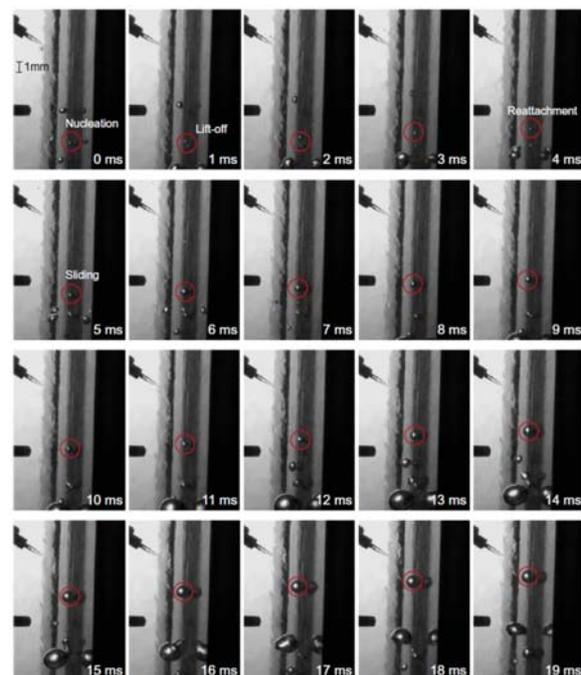


Fig. 6. Process of the bubble reattachment to the heated surface after the lift-off (Run 108).

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

まとめ

- 気液二相流解析の数値モデル、特徴、課題を概観した。
- 沸騰を伴う二相流解析の課題を抽出した。以下が必要。
 - 有効沸騰核密度の相関式
 - 発泡核はそれぞれ違う。なんとなく数えるだけでは足りない。
 - 生成気泡の径分布
 - 気泡径に関するポピュレーションバランスモデル必須
 - 適切な平均化操作に基づく平均気泡径相関式と気泡生成周期相関式
 - 発泡直後の非定常状態に適用可能な気泡挙動モデル
 - 気泡核付着？ スライド？ リフトオフ？
 - 気泡合体等など、低頻度だがマクロに影響大の事象のモデリング
 - 気泡追跡型にしたくなるが、二流体モデルでどのように取り込むか？

謝辞

- 本講演は、下記のプロジェクトで得られた成果を含みます。
 - 原子力システム研究開発事業(MEXT):「ミリチャンネル二相熱流動場の高信頼性予測実現のための研究開発」、2005～2007年度.
 - 科学研究費補助金・基盤研究B:「稠密・高出力密度軽水炉の成立性評価に資する機構論的沸騰二相流解析技術の開発」、2008～2010年度.
 - 受託研究(JNES):「システムコードの2圧力化及びサブクール沸騰モデルの開発」、2013年度.
 - 共同研究(IEA):「格納容器内デブリ分布状況の高信頼性評価に資する液体噴流の流動特性に関する研究」、2013年度.
 - 研究成果最適展開支援プログラム(JST):「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」、2013～2014年度
- ご清聴ありがとうございました。
 - 沸騰流解析でやるべきことは理解できてきた気がします。
 - ご支援いただければ幸いです。