



鉛直流路内単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関する研究

中原, 裕介

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2003-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2877

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002877>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 9 3 】

氏 名 ・(本 籍) 中原 裕介 (鳥取県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学 位 記 番 号 博い第310号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成15年3月31日

【 学位論文題目 】

鉛直流路内単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 薦原 道久

 教 授 竹中 信幸

 教 授 道奥 康治

 助教授 富山 明男

気液二相流は気相と液相が混在する流れであり、気相または液相のみが単独で流れる単相流に比べて複雑な挙動を示すため、その流動現象の予測は困難である。気液二相流に関連する各種工業装置のより合理的な設計、高い安全性・信頼性の獲得、及び安定かつ効率的な操作のためには、気液二相流の各種の流動特性を把握すると共に、それらを精度良く評価できるモデルや数値予測手法が不可欠である。気液二相流の数値予測手法は平均化手法・気泡追跡法・界面追跡法の3手法に大別できる。平均化手法と気泡追跡法は様々な工業上の問題に適用できるが、気液二相流動場を精度良く予測するためには、気液間相互作用に関する高精度の構成方程式・実験相関式が必要となる。一方、界面追跡法は空間分解能が高く、構成方程式や実験相関式を用いずに流れ場の詳細情報を得られるため、平均化手法・気泡追跡法の構成方程式・実験相関式の高度化を推進する際に役立つ情報を提供できる。

ボイラ伝熱管、沸騰水型原子炉燃料集合体内サブチャンネル等に見られる鉛直流路内気液二相流を平均化手法ないしは気泡追跡法によって予測する際には、流路内二相流に関する構成方程式・実験相関式が不可欠となる。相関式構築に際して最も基礎的かつ重要な指針を与えるのは単一気泡に関する情報である。流路内を上昇する単一気泡の運動は流路壁面の影響を受けるため、無限静止液中における気泡運動とは大きく異なる。このため、現在まで鉛直円管内単一気泡の終端速度、上昇速度及び形状に関して数多くの研究が行われ、多くの構成方程式、実験相関式が提案されてきた。しかしながら、平均化手法・気泡追跡法の予測精度向上のためにはより高精度の構成方程式・実験相関式が必要な状況にある。また、非円形流路内単一気泡に対する研究は円管内単一気泡に比べると極めて少なく、円管の豊富なデータを活用するためにも、非円形流路内単一気泡に関する系統的な知見が必要な状況にある。

そこで本研究では、鉛直円管・正方形ダクト・サブチャンネル内を上昇する単一気泡を対象として、流路壁面が気泡の終端速度・上昇速度・形状に及ぼす影響を実験及び数値計算によって調べ、平均化手法・気泡追跡法の高精度化に役立つ相関式を提示することを目的とした。実験は水-空気系を用いて行うため、構築する相関式の流体物性に関する適用範囲は実験条件範囲内に限定される。そこで、界面追跡法の一つである体積追跡法を用いて構築した相関式の他の流体物性に対する適用性を検討した。

本論文は5章より構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、静止液中及び鉛直流路内単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関する既存の研究、本研究の目的、方法を述べた。

第2章では、既存の体積追跡法が有する“低粘性・高密度比条件に適用困難”という問題を克服するために、まず、体積追跡法の計算精度向上に最も重要となる体積輸送計算方法を検討した。体積輸送スキームにはCIP(Cubic-Interpolated Propagation)法を用いた。数多く提案されているCIP法の中から気泡解析に最適なスキームを選定するために、各スキ-

ームの体積保存性・界面の数値拡散によるぼやけを比較検討した。検討結果から輸送計算精度の良いスキームを選択し水-空気系単一気泡解析を実施したが、“気液界面が極端にぼやける”、“非物理的な圧力場が生じる”等、良い結果は得られなかった。そこで、これらの問題を解決するために計算セル内に体積輸送計算用のマイクロセルを配置する新しい体積追跡法を考案し、水-空気系単一気泡解析を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 提案した体積追跡法は、既存の体積追跡法と比べ流体体積を良好に保存でき、かつ気液界面幅を一計算セルサイズ程度に保持できる。
- (2) 表面張力に起因する気液間圧力差を精度良く評価できる。
- (3) モルトン数が 10^{-4} 以下の低粘性条件及び気液密度比が1:1000程度の高密度比条件における単一気泡解析に適用できる。
- (4) 既存の体積追跡法では計算が困難であった水-空気系鉛直円管内静止液中単一気泡の終端速度・形状を精度良く計算できる。

第3章では鉛直円管及び正方形ダクト内単一気泡の終端速度、上昇速度及び形状に関する既存の相関式の妥当性の検討及び改良を目的とし、鉛直円管及び正方形ダクト内水-空気系単一気泡を対象として、静止水・層流・乱流条件下で終端速度・上昇速度・形状を測定した。流路サイズ・気泡径・液相流速の影響を調べるために、円管に対しては管径 D 、無次元気泡径 λ (気泡の球体積等価直径 d と水力等価直径 D_H の比; d/D_H)、液相レイノルズ数 Re_L を各々 $13.3 \leq D \leq 24.8 \text{ mm}$, $0.2 \leq \lambda \leq 2.0$, $0 \leq Re_L \leq 28000$ 、ダクトに対しては、辺の長さ W , λ , Re_L を各々 $13.0 \leq W \leq 27.2 \text{ mm}$, $0.2 \leq \lambda \leq 2.0$, $0 \leq Re_L \leq 16000$ の範囲とした。測定結果を基に終端速度・上昇速度・抗力及び形状に関する実験相関式を構築し、その実用性を検証した。その結果、以下の結論を得た。

- (5) 鉛直円管内単一気泡の終端速度及び層流・乱流条件下の上昇速度を $\pm 5\%$ の精度で評価できる相関式を提案した。また、本相関式を基に鉛直円管内単一気泡の抗力評価式を提示した。
- (6) 提案した抗力評価式の適用範囲を既存の知見に基づいて検討し、鉛直円管内単一気泡 ($\lambda > 0.6$) に対してモルトン数 $M \leq 10^{-4}$ かつエトベス数 $Eo_H \geq 10$ 、小気泡 ($\lambda < 0.6$) に対してモルトン数 $M \leq 10^{-4}$ かつ気泡レイノルズ数 $Re_H \geq 200$ の範囲で使用できることを確認した。
- (7) 正方形ダクト内単一気泡のフルード数評価に使用すべき代表長さとして、流路面積が等価な円管直径 D_d を提案した。円管内単一気泡用抗力評価式の代表長さに提案した D_d を代入すると、正方形ダクト内単一気泡の静止液・層流・乱流条件下の終端速度及び上昇速度を $\pm 5\%$ の精度で評価できる。
- (8) 流路内単一大気泡 ($\lambda > 0.6$) の形状を液相レイノルズ数とエトベス数の関数として示す気泡形状関数を提示した。

(氏名： 中原 裕介 NO.4)

- (9) 界面追跡法を用いて鉛直円管・正方形ダクト内静止液中単一大気泡の数値計算を行い、円管・ダクトの双方において終端速度・気泡形状を良好に評価できることを確認した。
- (10) 界面追跡法を用いて、構築した気泡形状関数が広範囲の流路サイズ ($9.96 \leq D \leq 50.0 \text{ mm}$, $13.0 \leq D \leq 50.0 \text{ mm}$) 及び石油パイプラインにおける天然ガス-石油系、水-空気系、沸騰水型原子炉定格運転条件に対応する高温・高圧の水-蒸気系等の幅広い二相流体系（モルトン数が 10^4 以下の低粘性条件）に適用できることを確認した。

第4章では原子炉炉心設計上重要な課題でありながら従来ほとんど研究対象とされていなかった原子炉燃料集合体内サブチャンネルを上昇する単一気泡を対象として、終端速度・上昇速度・形状に関するデータベースの獲得、及び燃料集合体内二相流解析に適用できる相関式の構築を試みた。液相流速及び気泡径の影響を調べるために、実験条件は、液相レイノルズ数を $0 \leq Re_L \leq 21000$ 、無次元気泡径を $0.24 \leq \lambda \leq 3.2$ ($3 \leq d \leq 40 \text{ mm}$) の範囲とした。測定結果と現状の燃料集合体内二相流解析に用いられている相関式を比較した結果、既存の相関式では終端速度及び上昇速度を良好に評価できないことがわかった。そこで、新たにサブチャンネル内単一気泡の終端速度・上昇速度・抗力を評価できる相関式を構築した。その結果、以下の結論を得た。

- (11) サブチャンネル内静止液中単一気泡の形状及び運動形態は無次元気泡径 λ によって大きく異なり、(A)回転楕円体形状でジグザグ運動あるいはらせん運動を伴いながら上昇する小気泡 ($\lambda \leq 0.6$)、(B)後端に突出部を有する変形冠球形状で、その突出部を非定常に振動させながらサブチャンネル内を直線的に上昇する中気泡 ($0.6 < \lambda \leq 0.9$)、(C)側面形状は円管内大気泡（テイラー気泡）に酷似しているが、胴体部が隣接するサブチャンネルに浸出している十字型水平断面形状を有する大気泡 ($\lambda > 0.9$) の3領域に分類できる。
- (12) $\lambda > 0.9$ の条件では気泡胴体部が隣接するサブチャンネルに浸出する。これは単一の気泡のみでもサブチャンネル間の気液混合（ボイドドリフト）が生じることを意味している。
- (13) 静止液条件下の小・中気泡 ($\lambda \leq 0.9$) の終端速度は、無限静止液中単一気泡終端速度に関する既存の理論式に、適切な単一気泡のアスペクト比を代入することによって良好に予測できる。
- (14) 静止液条件下の大気泡 ($\lambda > 0.9$) の終端速度を良好に評価できる実験相関式を提案した。
- (15) 既存の上昇速度 V_R の評価式 $V_R = c\bar{V}_L + V_T$ ($\bar{V}_L$: 管断面平均軸方向液相速度) に、上記(13)、(14)の終端速度 V_T のモデルと実験結果を基に構築した係数 c の相関式を代入することにより、層流・乱流条件下の単一気泡の上昇速度を、燃料集合体内二相流解析で一般に用いられている相関式よりも良好に評価できる。

(氏名： 中原 裕介 NO.5)

第5章は本研究の総括である。

以上、本研究で構築した各種の実験相関式は、鉛直円管・正方形ダクト・サブチャンネル内単一気泡の終端速度・上昇速度・抗力及び形状を良好に評価できる。また、構築した実験相関式の実験条件範囲外への適用性を検討するために開発した界面追跡法は、気液二相流を精度良く解析するために満たすべき5つの条件；(1)気液界面のシャープさの保持、(2)流体体積の保存、(3)表面張力起因力の高精度評価、(4)高密度比二相流体系への適用性、(5)複数の界面を含む流れへの適用性、を満足しており、様々な気液二相流動場の定過程の解析に応用できる。

氏名	中原 裕介		
論文 題目	鉛直流路内単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	葛原 道久
	副 査	教授	竹中 信幸
	副 査	教授	道奥 康治
	副 査	助教授	富山 明男
	副 査		
要 旨			
ボイラ伝熱管、沸騰水型原子炉燃料集合体内サブチャンネル等にみられる鉛直流路内気液二相流を平均化手法ないしは気泡追跡法によって精度良く予測するためには、適用範囲が広く、かつ高精度の相関式が必要となる。また、非円形流路内単一気泡に対する研究は円管内単一気泡に比べると極めて少ないため系統的知見が必要な状況にある。本論文では、鉛直円管・正方形ダクト・サブチャンネル内を上昇する単一気泡の終端速度・上昇速度・形状を実験的に調べ、平均化手法・気泡追跡法に役立つ相関式の構築すること、及び相関式適用範囲を検討するための界面追跡法の開発を目的としている。 第2章では、既存の界面追跡法が有する問題を克服するために、計算セル内に体積輸送計算用のマイクロセルを配置する新しい界面追跡法を考案し、水-空気系単一気泡計算を試みている。開発した界面追跡法は既存の界面追跡法に比べ流体体積を良好に保存できること、気液界面幅を一計算セルサイズ程度に保持できること、表面張力に起因する気液間圧力差を良好に評価できること、及び低粘性・高密度比条件に適用できることを確認している。また、既存の界面追跡法では計算困難であった水-空気系鉛直円管内静止液中単一気泡の数値計算を実施し、終端速度・形状を精度良く評価できることを確認している。 第3章では、鉛直円管及び正方形ダクト内単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関する既存相関式の妥当性の検討と改良を遂行するために、鉛直円管・正方形ダクト内水-空気系単一気泡を対象として静止水・層流・乱流条件下において終端速度・上昇速度・形状を測定している。測定結果を基に終端速度・上昇速度・抗力・形状に関する相関式を構築すると共に、その妥当性を確認している。また、開発した界面追跡法を用いて実験では調べられなかった流体物性・管径を対象として単一気泡計算を実施し、構築した気泡形状相関式が広範囲の管径及び幅広い流体物性に適用できることを確認している。 第4章では、原子炉炉心設計上重要な課題でありながら従来ほとんど研究対象とされていなかった原子炉燃料集合体内サブチャンネルを上昇する単一気泡の終端速度・上昇速度・形状に関するデータベースを取得している。測定結果より、現行の燃料集合体内二相流解析手法に用いられている相関式では終端速度・上昇速度を良好に評価できないことを明らかにしている。また、静止液条件下の小・中気泡の終端速度は無限静止液中単一気泡終端速度に関する既存の理論モデルによって良好に評価できることを示すとともに、静止液条件下の大気泡終端速度を良好に評価できる実験相関式を構築している。さらに、終端速度理論モデルと構築した実験相関式を既存の上昇速度評価式に代入することにより、層流・乱流条件下の気泡上昇速度を良好に評価できることを確認している。 第5章には本研究の結論が総括されている。 以上、本研究は鉛直円管・正方形ダクト・サブチャンネル内単一気泡の終端速度・上昇速度・抗力及び形状を良好に評価できる各種相関式を構築するとともに、様々な気液二相流動の素過程解析に活用できる界面追跡法を提示しており、気液二相流工学・工業上価値ある研究と認める。よって、学位申請者の中原裕介は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。			