



鉛直円管内旋回環状流の界面および壁面摩擦係数に関する研究

古東, 遼也

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2025-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9204号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496485>

※ 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。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 古東 遼也

専 攻 機械工学

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

鉛直円管内旋回環状流の界面および壁面摩擦係数に関する研究

指導教員 林 公祐

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

脱炭素社会の実現に向けた取り組みの中で、基幹電源としての役割を期待できる原子力発電が再び注目を集めている。沸騰水型原子炉(Boiling Water Reactor: BWR)の炉心上部には気水分離器が設置されており、炉心で発生した蒸気-水二相流に旋回を付与し、遠心力の働きで液膜形成と液滴再付着を促進して水を取り除き、蒸気のみをタービンに供給する。気水分離器の設計および運用において、原子炉の安全性と効率向上の観点から、気液分離性能や圧力損失をはじめとする二相流動の諸量を精度よく予測する必要がある。流動予測には一次元もしくは多次元二流体モデルが使用されることが多いが、その精度は界面摩擦係数 f_i および壁面摩擦係数 f_w に依存する。しかしながら、気水分離器内流動の数値予測には既存の非旋回二相流用モデルが用いられているのが現状である。また、気水分離器内流動のモデルには、旋回により液滴の多くが再付着していると仮定して、ガスコア中の液滴の存在を無視した二流体モデルが用いられているが、液滴を考慮しないことが f_i および f_w に及ぼす影響について調べた例はなく、その妥当性は不明である。非旋回環状流の f_i と f_w に関する研究例は数多く報告されている。一方、旋回環状流については、気水分離器の縮小模擬装置を用いて気液分離率や圧力損失を実験や数値計算により調べた研究例はあるものの、旋回環状流の f_i および f_w に関する研究は少なく、実験データベースの整備は十分ではない。そのため、液滴を考慮した三流体モデルに基づく f_i および f_w の評価や、それらの整理に適した旋回に関するパラメータについては議論されていない。そこで本研究では、二流体モデルおよび三流体モデルにより算出した f_i および f_w の比較を行い、ガスコア中の液滴を無視できるかどうか検討した。また、旋回強度や液相動粘性係数 ν_L 、管径 D が旋回環状流の f_i と f_w に及ぼす影響を調べ、それらの影響を加味した f_i , f_w 相関式を開発した。

第 1 章では、これらの背景と既存の関連研究について整理したのち、本研究の目的および研究方法について述べた。

第 2 章では、スワローと鉛直円管で構成される実験装置を用いて旋回環状流のボイド率、圧力損失および液膜流量を計測し、それらを用いて液滴の存在を無視した一次元二流体モデルおよび液滴の存在を考慮した三流体モデルに基づく旋回環状流の f_i および f_w を求めた。旋回強度の影響を調べるために、スワローからの距離、すなわち旋回状態の異なる 3 つの試験区間で測定した。その結果、旋回環状流では液滴の付着は促進されるものの、 f_i および f_w を精度よく求めるには、液滴の存在を考慮すべきであること、つまり、旋回環状流のモデル化には三流体モデルを用いるべきであることを明らかにした。また、環状流の液膜上に形成された気液界面波の速度を高速度カメラによる撮影画像に画像流速測定法を適用して取得し、気液界面の旋回強度と f_i および f_w の関係を調べた。気液界面スワール数 s_i (気液界面波速度の軸方向成分に対する周方向成分の比) を旋回強度の指標として旋回強度の影

響を検討した結果, f_i と f_w はともに s_i の区間平均値 $\bar{s}_i$ の増加に伴い増加することを明らかにした. これは旋回強度の増加に伴う流体の経路の増加に加え, 前者は旋回強度の増加に伴う気液界面粗さの増加, 後者は旋回強度の増加に伴う液膜内速度分布の変化によると考えられる. この結果から, 旋回が減衰した領域における f_i , f_w 相関式に $\bar{s}_i$ をパラメータとする旋回効果因子を乗じることで, 旋回環状流の f_i および f_w を表現できる見通しを得た.

第 3 章では, 第 2 章で検討した f_i および f_w 相関式の適用範囲を広げるために, v_L および D が f_i および f_w に及ぼす影響を調べた. v_L の異なる 3 種類の液相および 2 種類の D の実験装置を用いて, ボイド率, 圧力損失および液膜体積流束を旋回強度の異なる 2 つの測定区間で測定した. また, 第 2 章と同様に気液界面波速度を測定した. その結果, スワラー通過直後における s_i は v_L に依存せず, スワラー通過直後の s_i の区間平均 s_i^* を, v_L を含まない気相および液相体積流束に基づく無次元数で表せることを明らかにした. また, f_i と f_w はともに旋回により増加するが, その増加率は v_L 増加に伴い減少し, 同じ旋回強度では D の小さい条件でより大きくなることがわかった. 高 v_L では旋回の減衰が速く, s_i は短い区間で速やかに小さくなるため, f_i , f_w の整理には $\bar{s}_i$ よりも s_i^* を用いた方がよいことを明らかにした.

第 4 章では, 本研究で取得した実験データベースを基に s_i^* , v_L , D の影響を考慮した f_i および f_w 相関式と, 三流体モデルに基づく計算に必要な旋回流用の液滴流量比 E 相関式を開発した. 旋回環状流の f_i と f_w は旋回が減衰した領域における f_i , f_w 相関式に気液界面スワール数, 水の動粘性係数に対する液相動粘性係数の比, 無次元管径を組み込んだ旋回効果因子を乗じることで表現した. E 相関式では, 液膜体積流束 J_E を関連する複数の無次元数で整理し, 旋回環状流に特徴的な気相体積流束依存性を表現した. 開発した相関式を用いた計算結果の妥当性を検証するために, 気水分離器の設計や性能評価において重要な液膜厚さ δ および圧力勾配 dP/dz に関して, 既存の実験データとの比較を行った. その結果, 開発した相関式を用いれば, 管径や形状の異なる鉛直管や気水分離器縮小模擬装置でも旋回環状流の δ および dP/dz を妥当に評価できることを明らかにした.

第 5 章では, 以上の結果を総括し, 本論文の結論を述べた.

以上, 本研究では, 鉛直円管内旋回環状流の f_i および f_w に関する実験データベースを構築し, 旋回環状流の特性を捉えるためのパラメータを検討することで, 気水分離器内旋回環状流用 f_i および f_w 相関式開発の指針を示すとともに, 気水分離器縮小模擬装置における諸量の評価における摩擦係数相関式の有効性を明らかにしており, 本研究で得られた知見は, 気水分離器内流動の予測精度向上に寄与するものと期待される.

氏名	古東 遼也		
論文 題目	鉛直円管内旋回環状流の界面および壁面摩擦係数に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	林 公祐
	副 査	教授	今井 陽介
	副 査	教授	浅野 等
	副 査		
	副 査		印
要 旨			
我が国の電力安定供給を担う基幹電源のひとつとして原子力発電は重要である。沸騰水型原子炉の炉心上部には、炉心で発生した蒸気・水二相流に旋回を付与し、遠心力の働きで液膜形成と液滴再付着を促進して水を取り除き蒸気のみをタービンに供給する気水分離器が設置されている。気水分離器の設計および運用において、原子炉の安全性と効率向上の観点から、気液分離性能や圧力損失などの諸量を精度よく予測する必要がある。流動の予測には平均化モデルが使用されることが多いが、その精度は界面摩擦係数f_iおよび壁面摩擦係数f_wに依存する。しかしながら、気水分離器内流動の数値予測には既存の非旋回二相流用モデルが用いられているのが現状である。また、気水分離器内流動のモデルには、旋回により液滴の多くが再付着していると仮定して、ガスコア中の液滴の存在を無視した二流体モデルが用いられているが、液滴を考慮しないことがf_iおよびf_wに及ぼす影響について調べた例はなく、その妥当性は不明である。非旋回環状流のf_iとf_wに関する研究例は数多く報告されているが、旋回環状流については、気水分離器の縮小模擬装置を用いて気液分離率や圧力損失を調べた研究例はあるものの、旋回環状流のf_iおよびf_wに関する研究は少なく、実験データベースの整備は十分ではない。そのため、液滴を考慮した三流体モデルに基づくf_iおよびf_wの評価や、それらの整理に適した旋回に関するパラメータについては議論されていない。このような背景のもと、本研究では、二流体モデルおよび三流体モデルにより算出したf_iおよびf_wの比較を行い、ガスコア中の液滴を無視できるかどうかを検討している。また、旋回強度や液相動粘度ν_L、管径Dが旋回環状流におけるf_iとf_wに及ぼす影響を調べて、それらの影響を加味したf_iおよびf_w相関式を開発している。 第1章では、これらの背景と既存の関連研究について整理したのち、本研究の目的および研究方法について述べている。 第2章では、スワラーと鉛直円管で構成される二相流実験装置を用いて旋回環状流のボイド率、圧力損失および液膜流量を計測し、それらを用いて液滴の存在を無視した一次元二流体モデルおよび液滴の存在を考慮した三流体モデルに基づく旋回環状流のf_iおよびf_wを求めている。旋回強度の影響を調べるために、スワラーからの距離、すなわち旋回状態の異なる3つの試験区間で測定している。その結果、旋回環状流では液滴の付着は促進されるものの、f_iおよびf_wを精度よく求めるには液滴の存在を考慮するべきであること、つまり、旋回環状流のモデル化には三流体モデルを用いるべきであることを明らかにしている。また、環状流の液膜上に形成された気液界面波の速度を高速度カメラによる撮影画像に画像流速測定法を適用して取得し、気液界面の旋回強度とf_iおよびf_wの関係を調べている。気液界面スワール数s_i（気液界面波速度の軸方向成分に対する周方向成分の比）を旋回強度の指標として旋回強度の影響を検討した結果、f_iとf_wはともにs_iの区間平均値$\bar{s}_i$の増加に伴い増加することを明らかにしている。前者の増加は旋回強度の増加に伴い気液界面の粗さが増加すること、後者は旋回強度の増加に伴い液膜内の速度分布が変化し壁面近傍の速度勾配が増加することによる。この結果から、非旋回環状流におけるf_iおよびf_w相関式に$\bar{s}_i$をパラメータとする旋回効果因子を乗じることで、旋回環状流のf_iおよびf_wを表現できる見通しを得ている。			

第3章では、第2章で検討した f_i および f_w 相関式の適用範囲を広げるために、 v_L および D が f_i および f_w に及ぼす影響を調べている。 v_L の異なる3種類の液相および2種類の管径の実験装置を用いて、ボイド率、圧力損失および液膜体積流束を旋回強度の異なる2つの測定区間で測定している。また、第2章と同様に気液界面波速度を測定している。その結果、スワラー通過直後における s_i は v_L に依存せず、スワラー通過直後の s_i の区間平均 s_i^* を、 v_L を含まない気相および液相体積流束に基づく無次元数で表せることを明らかにしている。また、 f_i と f_w はともに旋回強度増加に伴い増加するが v_L と D の増加に伴い減少すること、高 v_L においては旋回の減衰が速く、 s_i は短い区間で速やかに小さくなるため、 $f_i \cdot f_w$ の整理には s_i よりも s_i^* を用いた方がよいことを明らかにしている。

第4章では、本研究で取得した実験データベースを基に s_i^* 、 v_L 、 D の影響を考慮した f_i および f_w 相関式と、三流体モデルに基づく計算に必要な旋回流用の液滴流量比相関式を開発している。旋回環状流の f_i と f_w は非旋回流における f_i および f_w 相関式に気液界面スワール数、気相レイノルズ数、液膜レイノルズ数、水の動粘度に対する液相動粘度の比、無次元管径を組み込むことで表現している。 E 相関式では、液膜体積流束 J_E に関連する複数の無次元数で整理し、旋回環状流に特徴的な気相体積流束依存性を表現している。開発した相関式を用いた計算結果の妥当性を検証するために、気水分離器の設計や性能評価において重要な液膜厚さ δ および圧力勾配 dP/dz に関して、既存の実験データとの比較を行っている。その結果、開発した相関式を用いれば、管径や形状の異なる鉛直管や気水分離器縮小模擬装置でも旋回環状流の δ および dP/dz を妥当に評価できることを明らかにしている。

第5章では、以上の結果を総括し、本論文の結論を述べている。

以上、本研究では、鉛直円管内旋回環状流の f_i および f_w に関する実験データベースを構築し、旋回環状流の特性を捉えるためのパラメータを検討することで、気水分離器内旋回環状流用 f_i および f_w 相関式開発の指針を示すとともに、気水分離器縮小模擬装置における諸量の評価における摩擦係数相関式の有効性を明らかにしており、これらの成果は流体力学的観点から高い学術的価値を有している。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の古東 遼也は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。