



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on flow transition of dilute bubbly fluids : circular pipe flow and bubble convection [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	中村, 幸太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14438号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81381
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kotaro_Nakamura_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 中村幸太郎

学 位 論 文 題 名

Study on flow transition of dilute bubbly fluids -circular pipe flow and bubble convection-

(希薄分散気泡流体の遷移に関する研究 -円管内流と気泡対流-)

単相流体における流れの遷移理論は、1883 年のレイノルズの実験以降、130 年以上の歳月を経て完成されつつある。流れの遷移過程では、系の支配パラメーターがある臨界値を超えると、無限小攪乱に対して基本場が不安定化し、有限振幅攪乱により非線形発展することで二次的な流れが形成される。この一連のシナリオは、非線形段階における攪乱の振る舞いより、超臨界遷移と亜臨界遷移に大別される。前者では遷移が段階的に進行し、例えばその一つである熱対流では、レイリー数が増加することで無限小攪乱に対して基本場（熱伝導状態）が不安定となり、その後の非線形発展により対流ロールが形成される。一方で後者では、有限振幅攪乱が加えられることで臨界値よりも低い領域で流れの遷移が始まる。これは一般的に時空間発展を伴う流れ場で観察され、例として円管内流が挙げられる。いかなるレイノルズ数でも無限小攪乱に対して基本場（円管層流）は安定であるが、有限振幅攪乱をきっかけに層流からの遷移が突発的に進行する。

しかしながらこの理論は、微細気泡（平均直径 1 mm 以下）のわずかな混入によって成り立たなくなる。これは本課題で扱う実験的事実である。流れの非線形発展を扱う層流-乱流遷移の分野において、この問題は高度な課題となっている。単一流体における渦構造が微細気泡により変調され、遷移現象における本来のシナリオが書き換えられる。所属研究室ではこれまでに、体積率 0.1 パーセント以下の希薄分散気泡流体で観測される乱流遷移として、回転二重円筒間流れにおける渦の増強作用、および水平チャンネル乱流における縦渦群の停留を実験的に示した。この二種類の実験から、微細気泡の体積率がバルク平均として希薄であっても、乱流の要素渦に選択的に集積し、渦変調が発現することを発見した。これが本論文の主軸となる「渦構造と微細気泡の相互干渉」である。これまで多くの研究者が、密度や物性値の補正により単相流モデルに近似・回帰させようと試みてきたが、そのほとんどは結果に物理的な矛盾を生じさせた。流れが非線形成長する遷移過程では、ナビエ-ストークス方程式由来の非線形挙動と、気泡運動が持つ非線形挙動が拮抗するため、このような近似・回帰では一連の現象を表すことができない。この遷移過程における、微細気泡に働く主要な流体力（浮力、抗力、揚力、付加質量力）の役割を明らかにし、質量、運動量、エネルギーの保存則群の単相近似からの崩壊を新たに構築する必要がある。

希薄分散気泡流体の乱流遷移理論構築に向けて、渦構造と気泡群との相互干渉の理解と、流れの中における気泡群形成条件の特定が重要である。渦構造との相互干渉により集積した気泡の流れへの応答・作用、気泡群が形成される条件、およびそれに伴う流れの変調作用を明らかにする必要がある。博士論文の研究ではまず、レイノルズの管内流遷移の再現実験にまで立ち戻り、希薄分散気泡流体の亜臨界遷移に関する調査を行った。円管内流中の微細気泡は、線形段階ではその基本場を

不安定にすることはないが、二次流れ形成後の非線形相互作用については明らかにされていない。一方で、微細気泡は浮上する際に自ら粗密分布を形成して対流を誘起する。熱対流と同様にこの現象に流れの安定性理論を適用することで、気泡運動が持つ非線形挙動およびこの流れの遷移の特性を明らかにする。

本博士論文では、円管内流と気泡対流の大きく二つの研究対象を扱っており、それぞれの成果を個別にまとめた。論文は研究全体の諸論および結論を含め、全四部で構成されている。本研究の背景と目的が第一部で述べられる。単一流体の管内乱流遷移シナリオが解説されてきた歴史に始まり、管内流の層流-乱流遷移が微細気泡の混入により変調されることを紹介した。混相流体力学の観点からこの系の研究が行われており、先行研究の成果をまとめた。第二部では、管内流遷移の結果についてまとめられている。管内レイノルズ数が 1900 程度のとき、有限振幅攪乱をきっかけとして、乱流遷移の種子と言える孤立乱流塊 (乱流パフ) が発生する。

レーザードップラー流速計で流れ場を定量的に判別し、微細気泡の有無によるパフ形成確率を計測した。体積率わずか 0.018 パーセントの微細気泡の混入により、パフ形成確率が急増する結果を得た。形成確率急増の要因は微細気泡とパフ内包縦渦の相互干渉にあると考え、直接数値計算で再現された乱流パフを液相場として、気泡の並進運動方程式を数値的に解くことで One-way シミュレーション (液相-気相の作用のみ考慮) でその運動を予測した。Two-way (液相-気相間の相互作用) の効果を確認するため、粒子画像流速測定法を用いて二次元三成分の管内流速度場を算出した。流れ場に蛍光粒子を混入させることで気相および液相の二相を同時に可視化し、微細気泡の分布およびその有無でのパフの渦構造変調を検証した。第三部では、気泡対流の安定性解析の結果がまとめられている。問題を単純化するため、下壁から注入された気泡が静止液体層中を浮力により上昇して上面から離脱する系を考えた。この系を連立偏微分方程式で記述し、無限小攪乱に対する線形安定性解析を実施し、流れが不安定化するパラメーターが得られ、臨界固有関数として 2 種類の対流 (多層および全層対流) の形成が確認できた。この固有関数に対して運動エネルギーの時間発展を調べることで、この不安定化メカニズムおよびそこでの気泡の役割を議論した。これらの臨界固有関数を初期近似解として、経路追跡法により流れの非線形発展を追いかけた結果、多層対流は超臨界遷移、全層対流は亜臨界遷移となることが分かった。エネルギー収支バランスを評価することで、流れの非線形発展における気泡運動の役割を議論した。第四部では、第一部から第三部の知見がまとめられ、希薄分散気泡流体の遷移理論構築に向け、今後の展望が述べられている。