



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_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 中村幸太郎

審査担当者 主 査 准教授 田坂 裕司
 副 査 教 授 村井 祐一
 副 査 教 授 大島 伸行
 副 査 教 授 渡部 正夫
 副 査 教 授 板野 智昭 (関西大学・システム理工学部)

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-)

レイノルズによる実験以降、100 年以上の時を経て、層流から乱流に至る流れの遷移過程が解明されつつある。可視化観察による遷移過程の調査や、流れの安定性解析を足がかりとして築き上げられた学問体系は、近年の数値計算技術の高度化により可能となった、乱流中に埋め込まれた厳密解の性質調査、および位相空間において層流と乱流を隔てるカオス境界のエッジトラッキングなどにより、完成が近づいている。これらの知見は、流れの抵抗低減や伝熱促進、安定化制御など、流体力学に幅広く応用されている。一方で、一般的な工業の分野では、気泡や粒子など、流れが様々な混相状態である場合が多い。単相流体を想定しているこれまでの遷移研究はそれらを扱うことができず、また原子力など混相流を扱う専門分野では、実用的な範囲における工学的に必要な情報抽出に留まっている。

本論文では、 $100\ \mu\text{m}$ 程度の微細な気泡が分散する流れの遷移過程を記述する体系の構築を目指して、その足がかりとなる 2 つの代表的な題材に対し詳細な研究が行われている。亜臨界遷移現象の代表例である円管内流れの孤立乱流塊遷移、および気泡注入により生じる浮力対流である。前者では、その遷移過程において縦渦と低速ストリークからなる自己維持機構が形成される。論文では、そのような流れの渦構造に対する気泡の運動・集積パターン、およびそれが流れの遷移に与える影響に注目して研究が行われている。ステレオ撮影した流れの画像を解析することにより、渦構造および気泡の集積パターンが、また可視化観察結果の統計的な処理により遷移に与える影響が、それぞれ調査されている。後者は、流れの超臨界遷移の代表例である、熱対流との相似性を考えた研究である。気液二相流の数値計算によく用いられる二流体モデルを支配方程式として、線形安定性解析による遷移開始条件、および分岐解析による非線形解の変遷が調査されている。解析には気泡同士の反発や後流の影響などによる拡散効果は含まれておらず、流れの剪断により気泡に働く揚力に注目した解析が行われている。論文は、序論と結論を含む 4 部構成となっており、2 部および 3 部が成果の中核となっている。それらの成果は以下のように要約される。

- (1) 管内流れに対し、一様に分散された微細気泡は、局所乱流塊形成の過程で乱流塊が内包する渦構造により集積する。これには、渦構造が気泡にもたらす圧力勾配力が主要な役割を果たしている。
- (2) 微細気泡の混入は孤立乱流塊の形成確率を増加させる一方、乱流塊の形成に必要な攪乱強度

には影響を与えない。これは、流れが渦構造を持つことで初めて微細気泡の集積効果が発現し、流れの遷移過程に変調を与えることを示している。

(3) 二流体モデルを支配方程式とした線形安定解析により、対流の開始条件を与える中立安定曲線が得られた。これは、気泡間相互干渉の効果を排除した場合においても、流れ場が対流のサイズを決める波数選択性を有することを示している。

(4) 気泡の滞在時間と粘性時間のスケールから得られるプラントル数に対し、熱対流の場合と異なり中立安定曲線は変化し、全層対流と多層対流の2種類の流れパターンが発現することが示された。

(5) 線形安定性解析の結果得られた多層対流と全層対流について、非線形効果を考慮した分岐解析の結果、前者は通常の熱対流と同様の超臨界遷移、後者はこれと異なり亜臨界遷移となることが示された。また、分岐曲線は折れ曲がっており、複数の解が存在することが示された。これは、波数選択性が無いとする過去の研究結果を理論的に説明する成果である。

これを要するに、著者は、これまでの遷移研究で使われてきた流れの可視化計測ならびに安定性解析の手法を気液二相流研究に向けて高度化することで、希薄分散気泡の混入が流れの遷移に与える影響を明らかにし、また今後の遷移研究における指針を与えている。これは、気液二相流が介在する流体システムの最適化や伝熱の促進などに対し、基礎研究の立場から流体力学の発展に大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。