

氏名	野中 利之
学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成14年2月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成3年3月 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻博士前期課程 修了
学位論文題目	種々の重力環境下における多相系流体挙動の観察と解析に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 鈴木 睦 東北大学教授 寶澤 光紀 東北大学教授 三浦 隆利

論文内容要旨

世界初の人工衛星以来、宇宙開発は飛躍的な進歩、発展を遂げてきた。現在、通信や放送、気象観測、航行支援、資源探査等の分野では、商業(実用)化された宇宙技術によって、衛星放送、GPS、天気予報に代表されるような様々な恩恵が人類の日常生活にもたらされている。

一方、宇宙空間への物資の輸送もしくは人の移動を実現するための航空宇宙技術がほぼ確立されると、宇宙空間特有である様々な特徴的な環境(微小重力、高真空、良好な視界、宇宙放射線)を利用した科学の解明や技術の開発(宇宙環境利用技術)が注目を集めるようになった。

微小重力環境では、密度差に基づく物体の移動が抑制され、流体現象における対流挙動も地球上とは大きく異なるため、微小重力下の流体挙動は理工学分野において最も注目すべきテーマとなっている。すでに、燃焼を含む流体物理や結晶成長の領域では、微小重力環境を利用し、無浮力・無沈降などの性質を活かした新規材料創製や流体力学に関わる現象解明等を目的とした実験・解析結果が多数報告されている。

それらの研究の実施に際しては補助装置として、様々な流体プロセスが必要となり試行錯誤的な設計と試験が行なわれている。さらに、宇宙空間における生命維持装置として分離・反応操作などを受け持つ化学プロセスの研究や遠い将来ではあるが宇宙空間における化学プロセスの構築など、微小重力環境における様々な流体プロセスの解析と設計が必要となってきている。

また、流動層のように装置の作動原理上、重力の存在を欠かせない装置は、人工重力として遠心力といった体積力を発生させる必要があり、重力加速度を可変のパラメータとした取り扱いが求められる。

本論文では、微小・通常・高重力環境といった種々の重力環境下における多相系流体に対して、(株)地下無重力実験センター(JAMIC)、(株)日本無重量総合研究所(MGLAB)、通商産業省工業技術院北海道工業技術研究所(HNIRI)の落下塔および研究室所蔵の高重力場発生装置を用いて実験を行ない、数値シミュレーションや数値解析に基づく考察を行なった。

以下、各章の概要について示す。

第1章 緒論

研究の背景となる宇宙環境を利用した研究について概説し、本研究の目的と概要について記述した。

第2章 種々の重力環境の実現手段

微小、高重力環境を実現するための原理について説明した。また、本研究で使用したJAMIC、MGLAB、HNIRIの落下塔および高重力場発生装置の構造や作動原理、さらに搭載できる実験装置の制約条件や実験方法について説明した。

第3章 液液系界面変形（ヴィスカスフィンガリング）挙動の観察と解析

種々の重力環境下における液液系多相系流体の界面変形に関する研究として、多孔質内流れのモデルである Hele-Shaw セル内の液体置換現象の挙動を微小、通常、高重力環境下で観察した。液体は、相互不溶であるシリコーンオイルとクエン酸カリウム水溶液を用いた。微小重力実験では、JAMIC 落下塔を利用した。

鉛直方向における液体置換実験において、ヴィスカスフィンガリングの発生・成長に及ぼす重力の影響について注目した。また、クエン酸カリウム水溶液の濃度、セルの厚さが異なる場合についても高重力実験を行った。

本流体系では、置換される高粘性流体よりも、置換する低粘性流体の方が液体密度が大きいため、重力は液液界面の形状を安定化させる方向に作用し、結果として高重力環境下におけるヴィスカスフィンガリングの数を低減することが実験により確認された。

一方、微小重力環境では、密度差がほぼ消失するため、ヴィスカスフィンガリングの発生が顕著になることが観察された。また、比較として行なった地上重力環境下における水平方向の置換実験の結果が微小重力実験の結果と一致することが確認された。

種々の重力環境下において発生するヴィスカスフィンガリングの数は、既往の線形安定性解析に基づく考察によって説明できることを示した。

第4章 気液系界面変形（液柱破断）挙動の観察と解析

微小重力環境下における気液系界面変形に関する研究として、2つのディスク間に形成された円筒形状（Cylindrical）の液柱の変形挙動を観察した。液柱、周囲流体は、それぞれヒマシ油、空気で構成される。微小重力実験では、JAMIC 落下塔を利用した。

無電場の場合の長さの安定限界（液柱直径の π 倍）を超えた液柱を形成するために、交流電場を利用した気液系の液柱形成装置を作製した。短時間（落下後3~4秒間）で直径の3.3倍以上の気液系液柱が技術的に形成できることを微小重力実験で確認した。

また、交流電場内における液柱の長さの安定限界について、既往の線形安定性解析と実験結果を比較し定性的に一致することを示した。この結果は、上記の線形安定性解析の適用に失敗したスペースシャトル実験の結果とは異なっている。

さらに、交流電場消失によって流体力学的に不安定状態に遷移した液柱の界面変形挙動についても観察した。この結果も、液柱の破断に関する既往の研究結果を支持することとなった。

第5章 気液系界面変形（円管内プラグ形成）挙動の観察と解析

微小重力環境下における気液系界面挙動に関する研究として、円管内における液膜の界面が流体力学的な不安定性によって変形し、管内の閉塞によってプラグを形成する挙動を観察した。液膜、内部流体は、それぞれエタノール、空気で構成される。微小重力実験では、HNIRI, MGLAB, JAMIC の落下塔を利用した。

水平方向に静置した円管内の気液挙動を観察する実験（水平管内プラグ形成実験）、垂直管内を流下する液膜の界面変形挙動を観察する実験（垂直管内プラグ形成実験）を行った。

いずれの実験とも、気液界面が管中心に向かって盛り上がった部分（ピーク）、その後形成されたプラグの間隔を測定した。その結果、ピーク間隔が高松らの既往の線形安定性解析の結果に良好に一致することを確認した。また、ピークの消失等によって、ピーク間隔とプラグ間隔が一致しないことを示し、プラグ間隔で実験結果を整理した既往の報告の問題点を指摘した。

また、円管内液膜の界面変形に関する数値シミュレーションを実施し、ピークの間隔が線形安定性解析の結果と一致することを示した。

第6章 気液系流動（気泡離脱）挙動の観察と解析

重力レベルが経時的に急変する場合の気液系流動に関する研究として、落下塔スタート時における通常から微小重力環境への遷移に伴う固体壁に付着した単一気泡の離脱挙動を観察した。気泡、周囲流体は、そ

れぞれ空気，エタノールで構成される．微小重力実験では，MGLAB 落下塔を利用した．

微小重力環境下で離脱し，移動した気泡の距離を測定した．

数値解析として，通常重力環境下で固体壁面上に付着した気泡（体積所与）の形状を Young-Laplace の式を用いて求め，その界面エネルギーを離脱した場合と比較することで気泡の離脱条件を接触角をパラメータとして示した．

また，界面エネルギーが気泡の運動エネルギーに変換されるものとして，気泡の並進運動に関する運動方程式を解析し，エタノール中の気泡の移動距離を求めた．この結果が微小重力実験の結果に近く，近似計算が有効であることを示し，不一致の原因を考察した．

第7章 固気系流動（固体粒子の流動化）挙動の観察と解析

種々の重力環境下における固気系多相系流体の流動に関する研究として，2次元流動層における流動化の挙動を通常，高重力環境下で観察した．ガス，固体粒子は，それぞれ窒素，ガラスビーズ，アクリル粒子，ポリスチレン粒子を用いた．

流動層の圧力損失の測定および流動状態の観察から，種々の重力環境下における最小流動化速度，最小気泡流動化速度を求めた．

高重力環境下における最小流動化速度については，地上重力環境下での推算式によって予測可能であることを示した．

また，最小流動化速度，最小気泡流動化速度およびそのときの空隙率を比較することで，Geldart マップに基づく流動化特性の分類に及ぼす重力の影響について考察した．

Geldart による A, B 粒子の分類については，彼自身の分類の式が高重力環境で適用可能であることを示した．

また，粒子間の相互作用としての弾性波の伝播速度と空隙率の伝播速度を用いた Foscolo らのモデルについても，高重力環境下での適用性を示した．さらに，彼らが使用した Richardson-Zaki 式の代わりに Blake-Kozeny 式を用いて，各伝播速度の式を導出した．

第8章 液液系流動（界面攪乱）挙動の観察と解析

種々の重力環境下における液液系多相系流体の流動に関する研究として，角型セル内における物質移動を伴って発生する界面攪乱の挙動を高重力環境下で観察した．液体は，ベンゼン，蒸留水を用いた．

この2液間を酢酸が物質移動する系を考え，各移動方向における界面攪乱現象に及ぼす重力の影響について注目した．

解析として，数値シミュレーションおよび観察ビデオ画像に対する動画解析を行なった．

ベンゼン相から水相に酢酸が移動する場合，Rayleigh 的不安定性によって重力レベルの上昇とともに両相全体に激しい流れが生じることが確認された．一方，無重力環境下での数値シミュレーションでは，対流が発生せず，物質移動は拡散が支配的になることが示された．

水相からベンゼン相に酢酸が移動する場合，逆に液液界面近傍に対流が観察されるが，重力レベルの上昇とともに抑制されることが確認された．無重力環境下での数値シミュレーションでは，界面近傍の流れが激しくなることが示された．

第9章 総括

本論文の結果を総括として記述した．

審査結果の要旨

国際宇宙ステーションの本格的な稼働を目前にして、宇宙環境の特徴の1つである微小重力環境の利用が注目されており、流体プロセス開発の基礎として諸現象に及ぼす重力の影響の解明が求められている。本論文では、微小・地上・高重力環境下における多相系流体挙動に関する実験を実施し、数値シミュレーションや数値解析に基づく考察を行なったもので、全編9章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、種々の重力環境を実現するために用いた落下塔・高重力発生装置について記述している。

第3章では、Hele-Shaw セル内における液液置換現象に及ぼす重力の影響について述べている。微小・地上・高重力環境下における観察結果から、鉛直方向に発生するヴィスカスフィンガーの数は線形安定性解析によって説明されることを示している。

第4章では、微小重力環境下におけるディスク間に形成された円筒形状の液柱に対して、交流電場を用いた界面形状の安定化と電場消失に伴う界面の変形挙動について述べている。落下塔実験の結果から、無電場における安定限界よりも長い気液系液柱を交流電場の利用によって短時間で形成できることを示している。さらに、既往の線形安定性解析を用いて、交流電場中の気液系液柱の安定限界を考察している。

第5章では、円管内の液膜が微小重力環境への遷移とともに変形し、プラグを形成する挙動について述べている。液膜の気液界面において、管中心に向かって盛り上がる部分（ピーク）の間隔が既往の線形安定性解析によって説明されることを確認し、既往の研究報告の問題点を指摘している。さらに、管内液膜の界面変形の数値シミュレーションを行ない、線形安定性解析の妥当性を示している。

第6章では、地上から微小重力環境への遷移に伴う気泡の離脱挙動について述べている。地上重力環境下における固体壁に付着した単一気泡の界面形状を Young-Laplace の式を用いて数値解析し、微小重力環境での界面エネルギーの収支式から離脱気泡の移動距離を求め、微小重力実験と比較している。

第7章では、固体粒子の流動化現象に及ぼす重力の影響について述べている。地上・高重力環境下における最小流動化速度、最小気泡流動化速度および各流動化開始状態での空隙率を測定している。高重力環境下における最小流動化速度の実測値を地上重力環境下で提案された既往の推算式と比較している。また、Geldart マップに基づく流動特性の理論を高重力環境に適用した結果が考察されている。

第8章では、液液界面を通じた物質移動によって発生する界面攪乱現象に及ぼす重力の影響について述べている。数値シミュレーションおよび高重力実験によって、Rayleigh、Marangoni 効果に基づく各液相内の流動状態が示されており、物質移動速度に及ぼす重力の影響が明らかにされている。

第9章は、総括である。

以上要するに本論文は、種々の重力環境下における多相系流体挙動に関する実験を実施し、界面変形や流動現象に及ぼす重力の影響を数値解析や数値シミュレーションを用いて考察しており、宇宙環境を利用した化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。