

学位論文題名

Topological Behavior of the Interface between Two Immiscible Liquid Layers

(不混和二液体界面の変形に関する研究)

学位論文内容の要旨

密閉円筒容器内において底板(あるいは天板)の回転により駆動される流れには気泡のような形状の渦崩壊現象(Vortex Breakdown Bubble; VBB)が生じることが知られており、従来このVBBに対して発生原因や境界条件への依存性が議論されてきた。また、各種の混合・攪拌技術として、VBBによる剪断速度場が細胞を破壊する恐れがあるため、その制御・抑制などの研究がおこなわれている。こうした一連の研究の端緒はEscudier(1984)による研究であり現在までにさまざまな境界条件下で実験的・数値的検討がおこなわれてきた。しかし、過去の研究はいずれも単一流体の流れを扱うものであり、円筒内に二種の混じり合わない液体が存在する場合の流れについては考慮されてこなかった。そこで、本研究では不混和性の二液体の上層のみが円板によって駆動される系での実験をおこなった。装置構成としては比較的簡便なものであるが、特異な界面変形現象が生じることが示された。この界面変形現象の全容を明らかにし、その変形機構を解明することを本論文の目的とした。

本論文は全八章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第一章は序論であり、密閉円筒容器内の流れに関する従来の研究をまとめ、本研究の背景と動機および目的を述べた。

第二章では二液体界面の変形現象について可視化実験をおこなった結果について述べた。上層液体には動粘度100cStのシリコンオイル、下層液体には水を用いた。パラメータとしてReynolds数と上層液体のアスペクト比(層深さ/容器半径)をとり種々現れる形状を”hump”, ”cusp”, ”Mt. Fuji”, ”bell”の四種に分類した。また、形状の特徴量として界面中心部の隆起高さとし、隆起した界面の半値半径をとり、Reynolds数増加による形の遷移を示した。更に、Reynolds数、アスペクト比を軸とし二次元平面上で界面変形の相図を得た。

第三章では簡単な近似の下で円筒座標系でのNavier-Stokes方程式の解を解析的に求め、

界面変形について考察した。半径および軸方向の速度をいずれも 0 とし線形化した N-S 式を解き、半径方向の圧力分布を求めてそれによる界面の隆起を算出した。算出結果は比較的高いアスペクト比かつ低い Reynolds 数の領域において実験結果とよく一致した。また、中程度のアスペクト比においては全ての Reynolds 数域で実験結果に一致した。

第四章では界面形状変化の数値シミュレーション結果について述べた。先ず単層の流れについて非圧縮 Navier-Stokes 方程式を HSMAC 法で計算するコードを開発し、次いで Level Set 法により不混和二層流を計算するコードを開発した。コードはいずれも円筒座標系で軸対称を仮定して組まれている。計算結果と二章に示した実験結果とを比較した。計算の結果は前章の理論による見積もりに比べて広い範囲で実験結果に一致した。

第五章では上層内の流れ場について、実験および数値計算の結果から考察した。超音波流速分布計 (UVP) を用いて上層の流れ場を計測し、数値計算結果と併せて界面形状の遷移と流れ場の変化を議論した。界面の大変形により、単層流の場合には見られない流速構造が現れることが示された。また、数値計算により得た流速場を用いて流れによって受動的に輸送される粒子の軌道を計算し、Poincare 断面を描き上層内の流動場について議論した。粒子は初期位置に依存して特定のトーラス上を移動することが示された。この粒子のトーラス状軌道は実験的にも確認された。

第六章では界面変形のスケージングについて述べた。第二章で示した界面変形の実験結果は [上層-下層] 液体の組み合わせは [100cSt オイル-水] であるが、ここでは [300cSt オイル-水] および [100cSt オイル-フロリナート] の異なる二種類の組み合わせで実験をおこない、得られた結果を用いて界面変形のスケージングについて議論した。フロリナートはフッ素系不活性液体で比重が約 1.78 である。第二章で示した四種の形状について、Reynolds 数と Froude 数を軸とし相図を得た。

第七章では円筒容器のスピンアップ時に、内部の二液体界面に生じる非定常な波動現象について述べた。本章の対象とする現象は前の二～六章とは異なるが、不混和二液体間の運動量輸送を考える上で重要な現象である。ここでは界面波動の発生から消滅までを可視化し、その非定常な波動特性を示した。

第八章は結論であり、得られた結果を総合し本論文のまとめとした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 大 島 伸 行

副 査 准教授 村 井 祐 一

副 査 准教授 隅 田 育 郎 (金沢大学理工研究域

自然システム学系)

学 位 論 文 題 名

Topological Behavior of the Interface between Two Immiscible Liquid Layers

(不混和二液体界面の変形に関する研究)

密閉円筒容器内において底板 (あるいは天板) の回転により駆動される流れには気泡のような形状の渦崩壊現象 (Vortex Breakdown Bubble; VBB) が生じることが知られており, 従来この VBB に対して発生原因や境界条件への依存性が議論されてきた。また, 各種の混合・攪拌技術として, VBB による剪断速度場が細胞を破壊する恐れがあるため, その制御・抑制などの研究がおこなわれている。こうした一連の研究の端緒は Escudier (1984) による研究であり現在までにさまざまな境界条件下で実験的・数値的検討がおこなわれてきた。しかし, 過去の研究はいずれも単一流体の流れを扱うものであり, 円筒内に二種の混じり合わない液体が存在する場合の流れについては考慮されてこなかった。そこで, 本研究では不混和性の二液体の上層のみが円板によって駆動される系がおこなわれた。装置構成としては比較的簡便なものであるが, 特異な界面変形現象が生じることが示された。この界面変形現象の全容を明らかにし, その変形機構を解明することが本論文の目的として設定された。

本論文は得られた結果は以下のように要約される。

(1). 二液体界面の変形現象について可視化実験をおこない, 種々現れる形状を "hump", "cusp", "Mt.Fuji", "bell" の四種に分類した。界面形状は Reynolds 数と上層液体のアスペクト比 (層深さ/容器半径) に強く依存することが示された。形状の特徴量として界面中心部の高さと同様に隆起した界面の半値半径をとり, Reynolds 数増加による形の遷移を示した。更に, Reynolds 数, アスペクト比を軸とし二次元平面上で界面変形の相図を得た。なお, 一連の実験は 0 以上 1000 未満の Reynolds 数および 0.5 以上 1.5 以下のアスペクト比の範囲においておこなわれた。

(2). 円筒座標系において線形化した Navier-Stokes 方程式を解き, 界面変形の再現を試みた。結果は, アスペクト比が 1.0 未満では 1000 未満のほぼ全ての Reynolds 数領域で, アスペクト比が 1.0 以上の領域では Reynolds 数が 300 以下の領域において実験結果と定性的に一致した。

(3). Level Set 法により不混和二層流を計算するコードを開発し, 界面変形の機構を考察した. 本数値計算により” hump”, ” cusp”, ” Mt.Fuji” の各形状が再現され, 前述の線形化した N-S 式による結果よりも広いパラメータ領域で実験結果に一致した.

(4). 上層内の流れ場について, 実験および数値計算の結果から考察した. 超音波流速分布計 (UVP) を用いて上層の流れ場を計測し, 数値計算結果と併せて界面形状の遷移と流れ場の変化が議論された. 界面の大変形により, 単層流の場合には見られない流速構造が現れることが示された. また, 数値計算により得た流速場を用いて流れによって受動的に輸送される粒子の軌道を計算し, Poincare 断面を描き上層内の流動場について議論した. 粒子は初期位置に依存して特定のトーラス上を移動することが示された. この粒子のトーラス状軌道は実験的にも確認された.

(5). 作動流体の組み合わせを変えて可視化実験をおこない, 界面変形のスケーリングが考察された.

以上要するに, 著者は, これまで知られていなかった界面変形現象を発見し, 変形の形態学的分類をおこない, その変形機構の一部を解明した. また, 変形した界面上における流体粒子のカオス的挙動を明らかにする等, 流体力学の基礎研究に貢献する結果を得ている. 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.