

称号及び氏名	博士（工学） 澤野 陽介
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 31 日
論 文 名	「重力流の発達過程における力学的機構に関する基礎的研究」
論文審査委員	主査 馬場 信弘
	副査 有馬 正和
	副査 片山 徹
	副査 中谷 直樹

## 論文要旨

海洋では、海水の水温や塩分濃度に変化し、海水の密度が時間と空間によって変動するため、重力の作用によって重力流が形成される。熱塩循環のように地球規模のスケールから内湾への河川水の流入まで、自然界では様々なスケールの重力流が発生する。海上への重油の流出や発電施設からの温排水の拡散は人工的に発生する重力流の例である。重力流は栄養塩や汚染物質等を輸送し、また後方に密度躍層を形成して鉛直輸送を阻害するので、周囲の環境に大きな影響を及ぼす。自然環境と人間活動の調和を目指す海洋システム工学において、重力流がいつどこまで広がるのか、周囲の流体とどのように混合していくのかという基本的な性質を明らかにすることは非常に重要である。

重力流の発達過程に関するこれまでの研究は、さまざまな理論、実験、計算によって行われてきた。その中で、重力流の発達についての基本的な特性は、小さい水槽で再現できる水門開放問題について詳しく調べられてきた。重力流の先端位置の時間変化についていくつかのべき乗則が提案されているが、それが成り立つ条件や範囲等、まだ明らかになっていない点が多い。また、べき乗則から示唆される自己相似性についても調べられているが、浅水近似が成り立つ薄い重力流の場合に限られており、実験によって検証された例も少ない。重力流の厚さが有限の場合も含めて統一的な理論に基づいて実験と計算を行い、重力流がどのような発達の過程をたどるのか、その過程でどのような自己相似性を有しているか、境界形状や境界条件がどのような影響を及ぼすか、このような重力流の基本的な特性を明らかにすることは重要な課題である。

本論文は、水門開放により形成される重力流が発達する過程を理論、実験、計算によって調べ、重力流の基本的な特性を明らかにし、その力学的機構について考察する。エネルギー変換の観点から重力流の発達をモデル化することによってその発達の各段階の平衡状態において現れる、べき乗則を整理し、対応する自己相似性の成立条件について調べる。重力流の形成から粘性散逸が支配的になる段階までを再現するため、長い水槽を用いて非定常な密度場の画像計測を行い、それぞれの段階およびその移行過程における重力流の構造について調べる。数値散逸の小さく、変数の不連続性に対応した計算スキームを用いて NS 方程式の有限体積解を計算し、重力流の内部の流場の構造を調べ、発達段階に応じてエネルギー変換がどのように変化するかについて調べる。理論、実験、計算の結果を相補的、総合的に考察し、重力流の発達過程における力学的機構を明らかにすることを目的とする。

第 1 章では、研究の背景および目的について述べ、各章の構成について述べる。

第 2 章は、重力流の性質を調べるための理論的な根拠と方法について記述する。密度差により生じる重力の位置エネルギーを運動エネルギーに変換することによって重力流が発達する過程と、粘性によってそのエネルギーが散逸されるエネルギー変換の過程をボックスモデルによって表し、重力流の進行速度に関するべき乗則に基づいて、重力流の発達過程を整理した。重力流の発達のためのエネルギーの供給源となる位置エネルギーの供給率は、流体交換によって流体の落差が一定となる場合と厚さの変化と連動する場合とで異なるため、重力流の先端部の発達を考える上でも、重力流全体の大局的な運動を把握することが重要であることがわかった。重力流の自己相似性について考察するため、流体交換によって左右反対方向に進行する 2 層の重力流の流場を流れ方向に 1 次元の変数で表す浅水近似によって問題の定式化を行った。2 層の厚さの和が一定になる拘束条件によって生じる水平方向の圧力勾配が重要であるが、水深に対して層の厚さが薄い場合にはその圧力勾配が微小であることから、1 変数の方程式が導かれた。連続の式、密度の輸送方程式および不均一粘性流体に対する非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を有限体積法に基づき離散化し、重力流の計算方法について記述した。セル内の物理量を区分的直線により近似し、上流側に積分することにより高精度に数値流束を求めるスキームによって、数値散逸を極力抑え、密度が不連続となる界面を捉えられることを示した。

第 3 章では、水槽実験による重力流の再現方法について述べている。重力流の発達段階が変化する過程を観測するために進行距離を水深の 100 倍以上に取れる長い水槽を用い、水門開放により重力流を発生

させる実験環境を構築した。水槽背面に発光体を平面上に配列した一様光源を設置し、複数のカメラを用いて染料が光を吸収する割合から重力流の非定常な密度場を算出する画像計測法を開発した。予備実験を行った結果、画像のピクセルごとのキャリブレーション、複数カメラによる画像の合成、カメラによる視野角度、輝度の補正、初期攪乱による時間軸のずれの補正等を行うことによって、画像計測の精度が大幅に向上し、この画像計測が重力流の発達段階を考察する上で有効な手法であることを示した。

第4章では、境界形状が重力流の発達過程に及ぼす影響について調べた。扇形に開いた水槽において水門位置および水深を変えて軸対称重力流を発生させ、その発達について調べた。その結果、広がる方向の先端部は一定速度で進行した後、減速する段階に移行するが、平面重力流では発達段階が遷移する際に先端部の最大厚さが急激に減少するのに対し、軸対称重力流では発達段階の移行に際してもその急激な変化は見られないことがわかった。平面重力流の計算方法を円柱座標系の場合に拡張し、座標系の計量をセル内の基礎変数として取り込むことによって幾何学的保存性を維持した状態で離散化を行い、鉛直断面における2次元計算を効率よく行う方法を開発した。軸対称流の場合、先端部の進行に際して先端部の内部構造が水平方向と鉛直方向に逆の変形を強制的に受けた結果、発達段階の移行も早くなることが明らかになった。

第5章では、重力流が自由表面に沿って進行する場合と壁面に沿って進行する場合を比較し、境界条件が重力流の発達過程に及ぼす影響について調べた。水門開放直後、重力流の先端部は一定速度で進行するが、自由表面重力流は壁面重力流よりも早く進行して壁面重力流よりも鋭い先端部を形成した。自由表面において発生する粘性応力が壁面よりも小さいためにこれらの差が現れたと考えられる。その後、自由表面重力流は壁面重力流と同じように減速し始めて、粘性摩擦が支配的となる発達段階へ遷移した。粘性応力が小さいと考えられる自由表面上を進行する場合でも、密度界面や内部における粘性散逸の影響が重要であることが確認された。重力流の先端厚さは発達段階が遷移した際に急激に減少するが、壁面重力流は遷移し終わってからも減少し続けるのに対し、自由表面重力流は増加し始める場合が生じることが明らかになった。

第6章では、重力流の発達段階の遷移について調べた。水槽の中央において水門開放し左右対称に発達する重力流を発生させた結果、先端速度が一定速度で進行する初期段階の後、先端位置が時間の $1/2$ 乗に比例して進行する段階に遷移した。初期段階において丸く膨れ上がった先端部の厚さは、発達段階が遷移し始める直前に減少し始め、先端部の膨らみは最終的に消失する。反射波等の外的な要因がない場

合にもこのような発達段階の遷移が自然に起こり、この遷移が起こる位置は、水門からの距離、経過時間ともに、レイノルズ数に比例して増加することが明らかになった。ナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいた計算を行った結果、先端位置の時間変化は実験結果と一致し、この発達段階の遷移が再現された。位置エネルギー、運動エネルギーおよび粘性散逸の時間変化を調べた結果、初期の段階では運動エネルギーが粘性散逸を上回るが、先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例して進行する段階では位置エネルギーはほぼすべて粘性散逸されることがわかった。

第7章では、重力流の自己相似性について調べた。非粘性流の浅水近似方程式において鉛直方向に静水圧近似を考え、密度界面における運動エネルギーによる水平方向の圧力変化が無視できると仮定したとき、先端速度が一定となり、密度界面が直線となる近似解が得られた。粘性流の浅水近似方程式において水平方向の圧力勾配として重力流の厚さの変化に伴う内部流速の加速を考慮したとき、先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例する自己相似性があり、厚さの時間変化が相似性に影響を与えないと仮定したとき、密度界面の形状についての近似解が得られた。水槽実験によって重力流の密度場を調べた結果、一定速度で進行する初期の段階において、先端部後方の密度界面は直線状の近似解に収束することがわかった。先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例する減速する段階に入ると、密度界面は流線型になり、自己相似解に収束することが明らかになった。

第8章では、結論について述べる。

重力流の発達過程を特徴づける各種のべき乗則について、自己相似解との対応関係を示し、長水槽を用いた密度場の画像計測およびナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいて詳細な検討を行った。その結果、力学的エネルギーが粘性散逸される平衡状態および重力流の発達に伴い移行過程において、組織的な構造が形成される普遍的な力学的な機構が明らかになった。

## 審査結果の要旨

本論文は、重力流の発達に関する基本的な特性と重力流の構造を明らかにすることを目的として、長水槽を用いた密度場の画像計測およびナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいて詳細な検討を行い、重力流の発達過程における力学的機構について研究したものであり、以下の成果を得ている。

(1) 境界形状が重力流の発達過程に及ぼす影響について調べた結果、先端部は一定速度で進行した後、減速する段階に移行するが、平面重力流では発達段階が遷移する際に先端部の最大厚さが急激に減少するのに対し、広がる方向の軸対称重力流では発達段階の移行に際してもその急激な変化は見られないことがわかった。

(2) 重力流が自由表面に沿って進行する場合と壁面に沿って進行する場合を比較し、境界条件が重力流の発達過程に及ぼす影響について調べた結果、粘性応力が小さいと考えられる自由表面上を進行する場合でも、密度界面や内部における粘性散逸の影響が重要であることが確認された。

(3) 重力流の発達段階の遷移について調べた結果、先端速度が一定速度で進行する初期段階の後、先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例して進行する段階に遷移した。このような発達段階の遷移が自然に起こり、この遷移が起こる位置は、水門からの距離、経過時間ともに、レイノルズ数に比例して増加することが明らかになった。位置エネルギー、運動エネルギーおよび粘性散逸の時間変化を調べた結果、初期の段階では運動エネルギーが粘性散逸を上回るが、先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例して進行する段階では位置エネルギーはほぼすべて粘性散逸されることがわかった。

(4) 重力流の自己相似性について調べた結果、非粘性流の浅水近似方程式から、先端速度が一定となり、密度界面が直線となる近似解が得られた。粘性流の浅水近似方程式から先端位置が時間の  $1/2$  乗に比例する自己相似性があり、密度界面の形状についての近似解が得られた。水槽実験によって重力流の密度場を調べた結果、この自己相似解に収束することが明らかになった。

以上の諸成果は、重力流の発達過程において力学的エネルギーが粘性散逸される平衡状態および発達の移行過程において、普遍的な力学的な機構に基づいた組織的な構造が形成されることを示しており、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。