

重力流の先端部の構造 (続報)

正員 馬場 信弘* 学生員 桂 樹 哲 雄*
学生員 菅 貞 博* 正員 北 浦 堅 一*

Structure of Head of a Gravity Current (Second Report)

by Nobuhiro Baba, *Member*, Tetsuo Katsuragi, *Student Member*,
Sadahiro Kan, *Student Member*, Ken-ichi Kitaura, *Member*

Summary

The structure of the head of gravity currents spreading out in all directions is investigated in the experiment and in the computation by extending the method developed in the previous paper for the two-dimensional gravity currents. A finite volume of fluid contained in a rectangular region was released instantaneously in another fluid of slightly different density in a larger region. Box models of fluid dispersion were described to elucidate the mechanisms of energy conversion in different stages of development of spreading gravity currents.

Visualization experiments were made with dye to trace the head of the spreading gravity currents. By opening the lock gate equipped obliquely in the corner of a water tank of square section, a finite volume of salt water of slightly different density in the corner of the tank was released instantaneously so as to form the gravity currents spreading over the whole area. The computation was also made in the same conditions as the experiments to study the flow structure of the head of spreading currents. The incompressible Navier-Stokes equation for an inhomogeneous fluid together with the transport equation for solute was solved by the finite volume method.

Both the experiment and the computation produce the formation and development of the gravity currents spreading in an axisymmetric manner. The results indicate that there exist different stages of development of this kind of spreading gravity currents. After the released fluid spreads at a constant speed, it slows down in the self-similar stage, and then it decelerates further in the viscous stage. It is found that the structure of the head changes according to the stages of development, which affects the mixing of fluid by spreading gravity current and that the head extending in a circle or a circular arc is subject to the three-dimensional instability to form the mountain-valley structure.

1. 序論

海水の密度差による重力の作用で生じる重力流が発生する過程は水平方向の流体輸送だけではなく、鉛直方

向の物質拡散に大きな影響を与えるため、その進行速度や拡散範囲を予測することは、海洋環境問題にとって重要な課題の一つである。重力流の通過によって水質が急激に変化し、栄養塩や酸素の供給状態が直接影響を受けるため、その先端部がいつどこに形成され、どのくらいの期間維持されるかという問題は漁業関係者の重大な関心事でもある。

河口から河川を遡流する塩水楔のように重力流が一方方向に進行する場合については水門開放問題として多数の水槽実験によって調べられてきており¹⁾、また、数値実験によっても再現されるようになった²⁾。重力流の

* 大阪府立大学大学院工学研究科

先端部の形状や進行速度は密度差や水深だけでなく、その発達段階によって変化することが知られている。前報³⁾では、水槽実験と数値実験によって、この発達段階における先端部の構造について調べ、ボックスモデルを用いたエネルギー変換の観点から各発達過程における力学的な機構について考察した。

河口から内湾への淡水流入、海峡を通過する水塊、発電所や工場からの排水、原油の流出など海洋では放射状に広がる重力流が多く見られる。水質改善のために開発された攪拌装置⁴⁵⁾による人工的な混合過程にもこのような重力流が重要な役割を果たしていると考えられる。一方向に進行する2次元重力流の場合に比べて、放射状に広がる重力流についてはあまり詳しく研究されておらず、系統的な水槽実験も行われていないため、計算結果を検証するための実験データも不足している。

本研究の目的は、放射状に広がる重力流を実験と計算それぞれによって再現する方法を開発し、その形成と発達過程に関する基礎的な性質を調べることである。実験では、角型水槽の隅に水門を設置し、水門を開放することによって、着色した密度の異なる流体が水槽の隅から中央部へ広がる様子を可視化し、画像解析する。計算では、領域中央部に密度の異なる流体を置いた初期条件から、ナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいて、密度場の時間変化を解析する。ボックスモデルで近似した放射状に広がる重力流の発達段階についてエネルギー保存則に基づいてその先端速度を予測し、重力流の内部のエネルギー変換過程について考察する。実験結果と計算結果を詳細に比較することによって、両者を相互に検証するとともに、先端位置の時間変化について、エネルギー変換に基づいたボックスモデルによる予測に照らしてその発達段階を分類し、それぞれの段階における重力流の挙動と構造について調べる。

2. 方法

2.1 対象問題

Fig. 1 に示すように、密度 ρ_0 の流体の中で密度 $\rho_0 + \Delta\rho$ の別の流体が中央から底面に沿って放射状に広がるとき、その先端部の進行速度について考察する。原点 O から水門までの距離が x_0 、水深 H に対して重い方の流体の初期厚さ h_0 は $h_0 \leq H$ であり、流体の初期の密度差 $\Delta\rho/\rho_0$ は 1% 程度である。水門の位置から広がる重力流の先端までの距離 x を、水門を開放してから経過時間 t の関数で表すことを考える。

重力流の発達過程において、混合による密度変化はなく、密度の異なる2つの流体の体積比が一定であると仮定して、エネルギー変換の観点からその発達段階につい

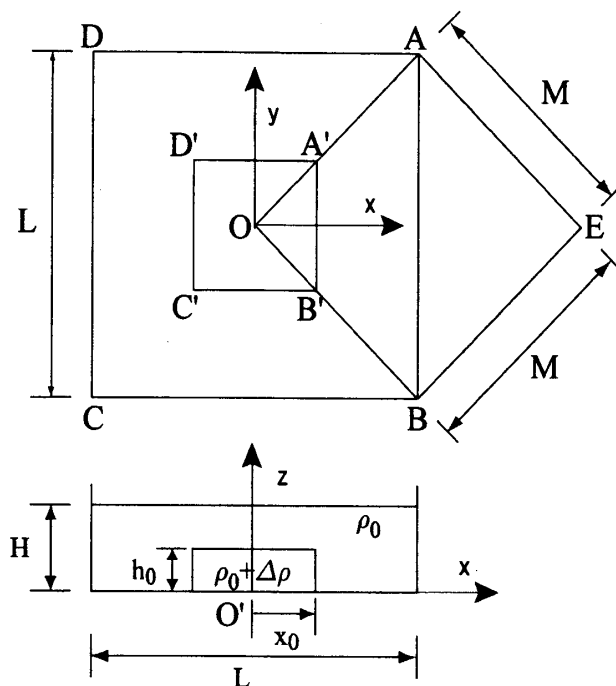


Fig. 1 A schematic diagram of generation of a spreading gravity current by releasing a finite volume of fluid into another fluid with different densities.

て考察する。直線状の水路を進行する2次元重力流の場合について行った解析方法³⁾を放射状に広がる重力流の場合に拡張して適用する。この重力流の形状の変化による位置エネルギーの変化 ΔP は一般に

$$\Delta P \propto \Delta\rho g h \Delta V \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 $\Delta\rho$ は密度差、 g は重力加速度、 ΔV は形状が変化した部分の体積、 h は先端部の厚さである。また先端部の運動エネルギーの増加 ΔK は

$$\Delta K \propto \rho v^2 \Delta V \quad (2)$$

の形で表される。ここで ρ は先端部の密度、 v は先端部の代表的な速度である。先端部が一体となって移動しているとき、その代表速度として、先端部の移動距離 x の時間微分によって定義する先端速度

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

を用いる。力学的エネルギーが保存され、(1)式の位置エネルギーの減少分がすべて(2)式の運動エネルギーの増加に使われたと仮定すると、先端速度について

$$v \propto \sqrt{g'h} \quad (4)$$

が得られる。ここで

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (5)$$

は密度差による重力の実質的な効果を表す加速度である。

水門開放直後の初期段階において、重力流の厚さ h が一定ならば、進行速度も一定、すなわち、先端部の移動

距離 x は

$$x \propto g'^{\frac{1}{2}} t \quad (6)$$

と与えられる。

また重力流が放射状に広がる場合、その重力流の占める底面の面積が先端の移動距離 x の 2 乗に比例し、その平均厚さが先端部の厚さ h に比例する。重力流全体の体積が一定である、すなわち、

$$V \propto x^2 h = \text{const.} \quad (7)$$

と仮定すると、重力流が広がれば、その厚さが減少する。このとき、力学的エネルギーが保存されるならば、(4) 式より

$$x \propto (g'V)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

が得られる。すなわち、この自己相似段階では、先端部はその移動距離が時間の $1/2$ 乗に比例して減速することがわかる。

重力流の先端部が薄くなり、その進行速度が十分遅くなると、相対的に壁面摩擦の影響が大きくなる。先端部が距離 Δx だけ移動したときの底面における粘性摩擦力によるエネルギー散逸量 ΔE は

$$\Delta E \propto \mu \frac{v}{h} S \Delta x \quad (9)$$

と表される。ここで μ は粘性係数、 S は粘性摩擦力が作用する面積で、(7) 式の仮定より、

$$S \propto x^2 \quad (10)$$

である。(1) 式の位置エネルギーの減少分がすべてこの粘性摩擦力によって散逸すると仮定すると、

$$x \propto \left(\frac{g'V^3}{v} \right)^{\frac{1}{8}} t^{\frac{1}{8}} \quad (11)$$

が得られる。ここで v は動粘性係数である。すなわち、このような粘性段階では先端部はその移動距離が時間の $1/8$ 乗に比例して急速に減速することがわかる。

以上のように、放射状に広がる重力流も、2 次元重力流の場合と同様に、重力の位置エネルギーを使って進行し、エネルギーの変換方法によって、その発達段階を初期段階、自己相似段階、粘性段階の 3 つの段階で表すことができることがわかった。先端部の進行速度は発達段階によって変化し、また 2 次元重力流の場合とは異なるべき乗則に従うことが予想される。実験と計算によってこのべき乗則を検証することも本研究の目的の一つである。

2.2 実験方法

放射状に広がる重力流の $1/4$ の部分、すなわち、Fig. 1 の OAB の部分を含む一辺の長さ $M = 600\text{mm}$ の正方形断面 AOB E に相当する小型角型水槽において、 90° に開いた鉛直壁面の内側隅から距離 x_0 の位置に、壁面に対して 45° 方向、鉛直に、水門を設置する。水門の外側に密

度 ρ_0 の清水、内側に染料で着色した密度 $\rho_0 + \Delta\rho$ の食塩水を入れ、瞬時に水門を開放したときの食塩水の広がりを追跡する。水深は $H = 50\text{mm}$ 、重力流の初期厚さは $h_0 = 50\text{mm}$ 、水槽の隅から水門までの距離は $x_0 = 50\text{mm}$ 、 100mm の 2 通り、密度比は $\Delta\rho/\rho_0 = 1.0\% - 2.0\%$ である。さらに対照実験として幅 100mm 、長さ 1200mm の 2 次元水路において一方向に進行する 2 次元重力流の実験を行った。

放射状に重力流が発達する過程を、水槽の上方および側方からデジタルビデオカメラによって撮影し、先端部の位置の時間変化を測定する。そのデジタル画像の輝度情報を用いた画像解析⁹⁾を応用し、重力流先端部の内部構造について調べる。

2.3 計算方法

不均一流体のナビエ・ストークス方程式、連続の条件および密度の相対的な変化量に関する輸送方程式を有限体積法によって解く計算方法²³⁾を 3 次元に拡張して用いる。境界はすべて固定境界とし、速度の粘性条件と密度の拡散流速が零になる条件を課す。空間積分には 2 次精度、時間積分には 1 次精度の陽解法を用いるが、密度の拡散が非常に弱い条件で数値的に安定な解を得るために、密度の輸送方程式の対流項には 3 次精度の QUICK 法を用いる。Fig. 1 に示すように、計算領域は一辺の長さ L の正方形断面 ABCD、高さ H の直方体領域である。その計算領域の中央に、一辺の長さ $2x_0$ の正方形断面 A'B'C'D'、高さ h_0 の直方体領域を設定し、その中に密度 $\rho_0 + \Delta\rho$ の流体を、その外側に密度 ρ_0 の流体を満たした状態を初期条件とする。水深 H 、浅水波の伝播速度 $U = \sqrt{g'H}$ 、対流時間 $T = H/U$ 、初期密度 ρ_0 を用いて無次元化を行うと、問題を支配する無次元パラメータはレイノルズ数 $Re = UH/\nu$ と密度の拡散パラメータ $Rs = UH/\kappa$ となる。ここでは ν 、 κ は、それぞれ、動粘性係数及び食塩の拡散係数である。また、密度変動については、放射状に広がる重力流の初期密度が $\rho_s = 1$ 、その周りの流体の密度が $\rho_s = 0$ と表されるように、初期密度差 $\Delta\rho$ を用いて $\rho_s = (\rho - \rho_0)/\Delta\rho$ と無次元化を行う。

計算条件は実験条件に合わせる。実験で用いる小型水槽の大きさ、および水門距離に対応して、計算領域の大きさは $L/H = 18, 32$ 、初期重力流の長さは $x_0/H = 1, 2$ の 2 通りとする。格子間隔が $\Delta x/H = \Delta y/H = 1/5$ 、 $\Delta z/H = 1/20$ の立方体格子と、格子間隔を半分にした $\Delta x/H = \Delta y/H = 1/10$ 、 $\Delta z/H = 1/40$ の細かい格子を用い、時間増分はそれぞれ $\Delta t/T = 1/100$ 、 $1/200$ とする。密度差は $\Delta\rho/\rho_0 = 1.0\% - 2.0\%$ 、これに対応してレイノルズ数は $Re = 3300 - 4600$ 、密度拡散係数は $Rs = 3.7 \times 10^6$ とする。重力流の初期厚さを $h_0/H = 1/1, 1/2, 1/4$ の 3 通りに変えた場合の計算を行い、異なる発達段階における先端部の構造について調べる。

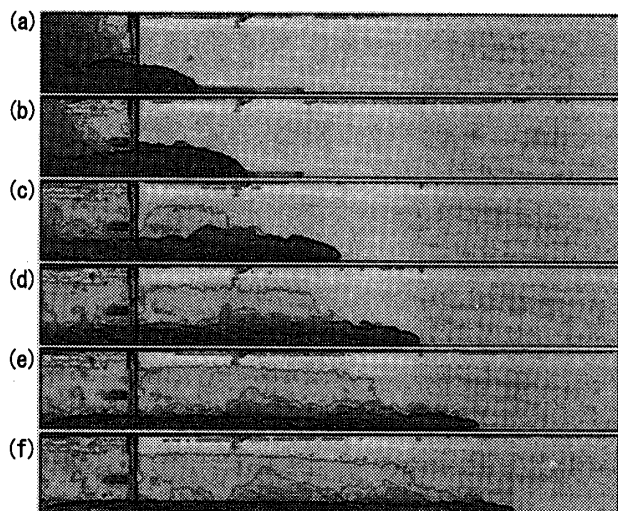


Fig. 2 Side-view images of a spreading gravity current with the contours of their brightness superimposed, at (a) $t = 1$ s, (b) $t = 2$ s, (c) $t = 4$ s, (d) $t = 6$ s, (e) $t = 8$ s, (f) $t = 10$ s, after opening the gate for case of $x_0 = 50$ mm, $\Delta\rho/\rho_0 = 2.0\%$.

3. 結果と考察

3.1 実験結果

まず、可視化実験の結果について述べる。水槽の真横に設置したビデオカメラから撮影した先端部の画像を Fig. 2 に示す。ビデオカメラで撮影したデジタル画像に、その画像の RGB 情報から計算した輝度の等値線図を重ねて示す。光量のむらや傾斜を除去するため、実験開始直前の画像の輝度を基準として、基準から変化した量を等値線図で示している。輝度は重力流の着色に用いた染料の濃度と対応するので、2次元重力流の場合には通過光の輝度から平均密度場の推定が可能であるが⁹⁾、3次元の場合には同じ方法では難しいので、ここでは、重力流の広がりと共に、染料の濃度から内部の拡散の程度を知るために、補助的に参照する。画像には仕切板をスムーズに引き上げるために水槽壁面に設置されたガイドが写っている。仕切板を引き上げると、水槽の隅に閉じ込められていた重い流体が流れ出し、逆に外側にあった軽い流体がその上に流れ込む。流れ出した重い流体は先が丸い先端部を持ち、薄くなって底面を這うように進行し、そのあとには長い平行部が続く。この重力流を取り囲む密度界面では先端部の直後から後方まで KH 不安定による変形によって外側の流体を取り込んでいる様子がわかる。

水槽の隅から発生した重力流が広がる様子を Fig. 3 に示す。水門を開放した直後には、水門と平行な直線的な先端部分が残っているが、広がる両側の壁近傍の部分が

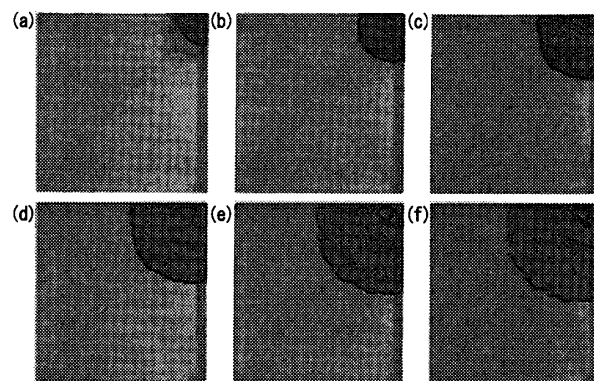


Fig. 3 Top-view images of a spreading gravity current with the contours of their brightness superimposed, at (a) $t = 1$ s, (b) $t = 2$ s, (c) $t = 4$ s, (d) $t = 6$ s, (e) $t = 8$ s, (f) $t = 10$ s, after opening the gate for case of $x_0 = 50$ mm, $\Delta\rho/\rho_0 = 2.0\%$.

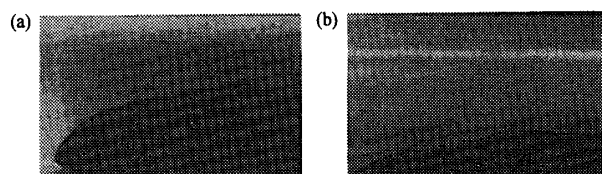


Fig. 4 Comparison of side-view images of (a) a two-dimensional gravity current and (b) a spreading gravity current at $t = 5$ s.

遅れて、その影響がすぐに中央部分まで伝わるので、2秒後までに先端は円弧状になる。先端部は染料濃度が高く、質量集中が起こっていることがわかる。その後すぐに、円弧状の先端部は、その円弧に沿って多数の小さな円弧上の山が並んだ形に変形する。山の大きさにはばらつきがあるが、先に張り出した山がまわりの山を取り込むことによって次第に大きな山に成長する。この山谷構造は平行平板間の2次元重力流の直線状の先端部にも見られ、2次元の流れが3次元の流れに遷移する3次元不安定性¹⁰⁾と同じ現象であると考えられる。

先端部の断面形状について、2次元重力流の場合との比較を Fig. 4 に示す。平行な壁面内を進行する2次元重力流の場合には水門開放によってほぼ左右対称に流体交換が起こり、先端部が水深の半分程度の厚さで丸く膨らんで進行するのに対して、放射状に広がる重力流の場合には、流体交換が非対称に起こり、最初から先端部の厚さが水深の $1/3 \sim 1/4$ 程度に薄くなって進行する。

上方から撮影した静止画像から水槽の対角線上における先端部の位置を求め、その時間変化を計測した。水門距離を代表長さとして無次元化した結果を Fig. 5 に示す。比較のために、一方向に進行する2次元重力流の場合の結果も重ねて示されている。2次元重力流の場合には一定速度で進行する初期段階から減速し、先端位置が

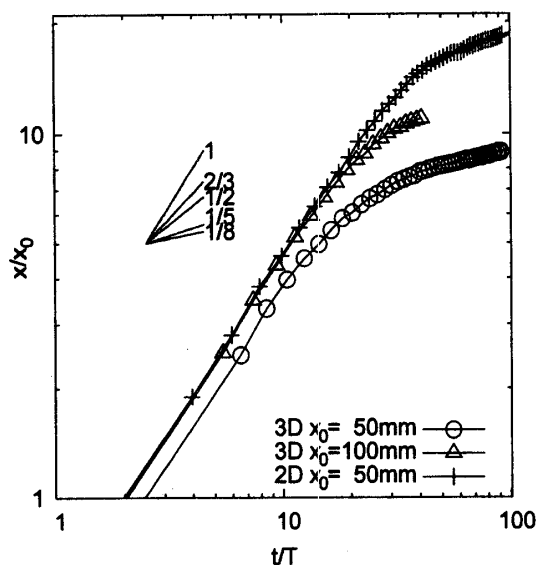


Fig. 5 The position of current fronts with time measured by the experiment.

時間の $2/3$ 乗に比例する自己相似段階を経て、 $1/5$ 乗に比例する粘性段階に至る過程が再現され、これまでの実験結果⁹⁾と一致する。一方、放射状に広がる重力流の場合、一定速度で進行する初期段階から減速し、先端位置が時間の $1/5$ 乗あるいはさらに小さい値のべき乗に比例する粘性段階に至る。

3.2 計算結果

次に計算結果について述べる。計算領域の中央の鉛直断面における密度場の時間変化を Fig. 6 に示す。等値線の間隔は初期の密度差の $1/10$ である。計算領域の中央において、密度差のある流体を解放すると、初期状態では鉛直だった境界面が傾斜し始め、流体交換が生じる。中央の重い方の流体が底面に沿って放射状に広がり、先端部に質量集中が生じ、そのあとに密度成層が形成される。一方、まわりの軽い方の流体は上面に沿って四方から中央に向かって進行し、衝突したその流体は重い方の流体を押しつけて中央に穴を開ける。このように、四方に発散する重力流と 1 点に収束する重力流が同時に形成され、互いに逆方向に進行する。

初期段階における先端部への質量集中は著しい。先端部はその厚さが水深の半分程度にまで丸く膨れて進行し、その直後に大きなくびれができて、 $t/T=10$ のときには、この断面では後続流と切り離されたように見える。このとき先端部内部では重い流体が軽い流体の上に乗った不安定な状態になっており、先端部が大規模なスケールの反時計回りの回転運動を伴っていることがわかる。その後、先端部の厚さは次第に減少し、先端部が通過したあとには安定な密度成層が残る。

底面における密度の等値線図を Fig. 7 に示す。正方形領域から解放された重い流体は、 $t/T=5$ のときまでに、先端部は円領域に広がるが、その後、再び、初期値の正

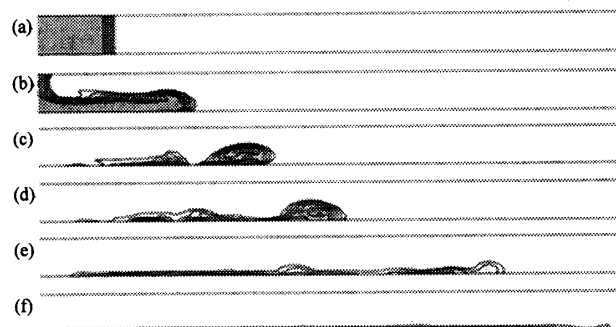


Fig. 6 Density contour maps on the vertical centre plane of the computed gravity current at $Re=3300$, $\Delta\rho/\rho_0=1.0\%$ at (a) $t/T=0$, (b) $t/T=5$, (c) $t/T=10$, (d) $t/T=15$, (e) $t/T=30$, (f) $t/T=50$.

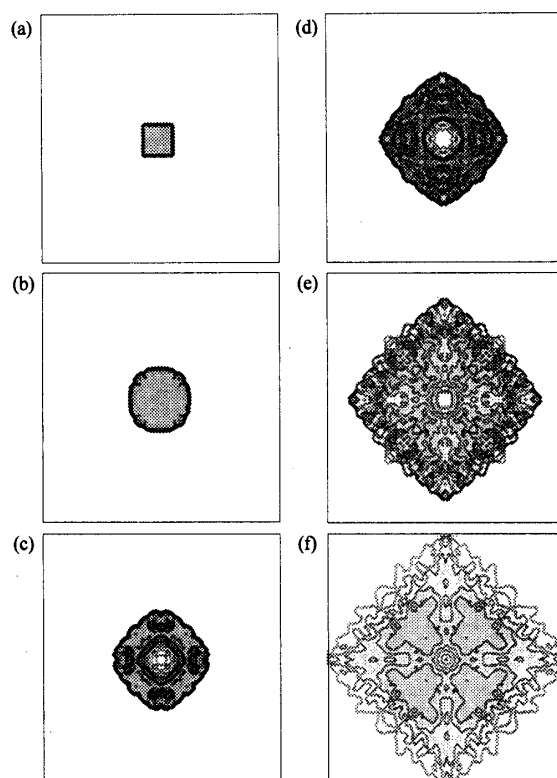


Fig. 7 Density contour maps on the bottom plane of the computed gravity at $Re=3300$, $\Delta\rho/\rho_0=1.0\%$ at (a) $t/T=0$, (b) $t/T=5$, (c) $t/T=10$, (d) $t/T=15$, (e) $t/T=30$, (f) $t/T=50$.

方形を 45 度回転した正方形となって広がる。この点が可視化実験の結果とは異なる。全体として円や正方形を形作る先端部の密度界面は、局所的に、3 次元不安定性のためにジグザグに変形する。この変形の様子は Fig. 3 に示した可視化実験の結果と一致する。

放射状に広がる重力流の密度場の等値線図は、水平面内において興味深い幾何学的な模様を示すが、必ずしもこれが物理的に意味がある模様とは限らない。本研究の範囲を超えるので、ここでは詳しく調べないが、この模様は、密度を輸送する方程式の対流項に用いた数値スキ-

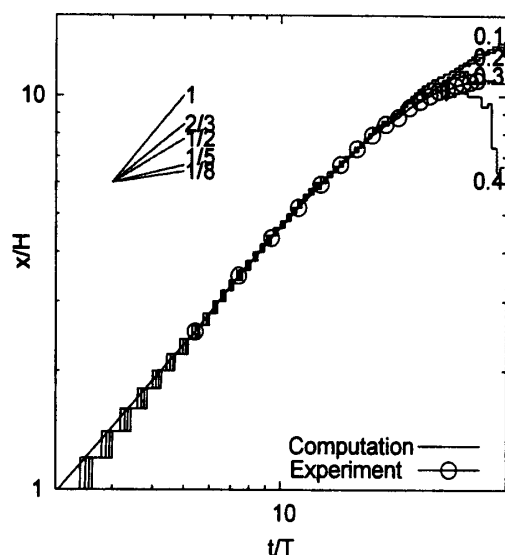


Fig. 8 The position of current fronts with time computed at $Re = 4600$, $\Delta\rho/\rho_0 = 2.0\%$, $x_0 = 100\text{mm}$. Numbers attached to the lines denote the thresholds of density used to recognize the front of the head.

固有の性質と関係することが分かっている⁸⁾。また、先端部の形状に関する実験との相違はこの数値スキームの性質と関係しており、本計算で用いた QUICK 法では座標軸方向に伝播が速いことによると推測される。

広がる重力流の先端位置の時間変化について、計算値と実験値の比較を Fig. 8 に示す。先端位置は中央断面において密度が与えられた閾値以上の値となる一番前の位置として認識したので、階段状に変化している。先端位置はよく一致している。先端部が一定速度で進行する初期段階および先端部が減速した第 2 段階の $t/T = 20$ 付近まで、先端位置は実験とよく一致しており、計算においても第 2 段階への遷移が再現されたことがわかる。 $t/T = 20$ 以降、先端部の挙動は先端位置を決めるのに用いた密度の閾値に依存する。密度界面は最初前進するが、大きい密度の流体領域の先端位置は、ある点から後退する。これは、まわりの密度が小さい流体と混合することによって、先端部の密度が減少するためであって、重力流自体が後退しているわけではない。密度界面はその密度によって異なった挙動をするが、これは重力流の先端部で激しい混合が起きていることを示している。

計算および実験のどちらの結果にも、自己相似段階および粘性段階におけるべき乗則のべきの値について、ボックスモデルによる予測値とは異なるモードが現れているが、これは先端部の構造に関係していると考えられる。すなわち、先端部の大部分の質量や運動エネルギーが集中している部分の放射方向の長さが移動距離と共に増加せず、ほとんど一定を保っている場合、エネルギー変換に寄与する重力流の有効部分は、(7)式の代わりに

$$V \propto xh = \text{const.} \quad (12)$$

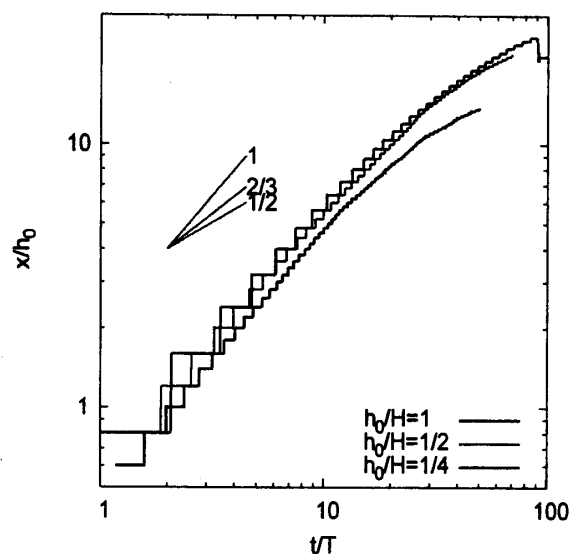


Fig. 9 The effect of the initial height of gravity current on the position of current fronts with time at $Re = 4600$, $\Delta\rho/\rho_0 = 2.0\%$.

となる。このとき、2次元重力流の場合と同じべき乗則が得られ、自己相似段階および粘性段階の移動距離はそれぞれ

$$x \propto (g'V)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

および

$$x \propto \left(\frac{g'V^3}{\nu} \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{1}{5}} \quad (14)$$

と与えられる。

次に重力流の初期水深の影響について述べる。Fig. 9 は、初期水深を $h_0/H = 1/1, 1/2, 1/4$ の 3 通りに変えた場合の重力流の先端位置の時間変化であり、密度差が 2% の場合である。この図では先端部の内部構造を決定する局所的な変数、すなわち先端部の初期厚さ h_0 、先端の代表速度 $U_h = \sqrt{g'h_0}$ 、代表時間 $T_h = h_0/U_h = \sqrt{h_0/g'}$ を用いて無次元化を行った。先端部が一定速度で進行する初期段階が無次元時間で $t/T_h = 10$ まで続き、先端位置が時間の $1/2$ 乗に比例して減速する第 2 段階が $t/T_h = 30$ から始まる。すなわち、第 2 段階への遷移が重力流の先端部の局所的な内部構造に関係していることがわかる。

最後に、重力流が広がる場合の混合について調べる。与えられた密度の閾値を超える流体部分の体積の時間変化を Fig. 10 に示す。一番下の $P(\rho_s \geq 0.95)$ の曲線は重力流の中心核部分でほとんど混合されず、密度が初期値 $\rho_s = 1.0$ からほとんど変化しない流体の割合を示しており、一方、一番上の $P(\rho_s \geq 0.05)$ の曲線は希釈されて広がった重力流全体の流体の割合を示している。重い流体が解放されたあと、どの密度の流体も同じように混合が進み、 $t/T = 10$ 前後から、密度が大きい流体の混合は弱くなり、逆に密度が小さい流体の混合が強くなる。第 2

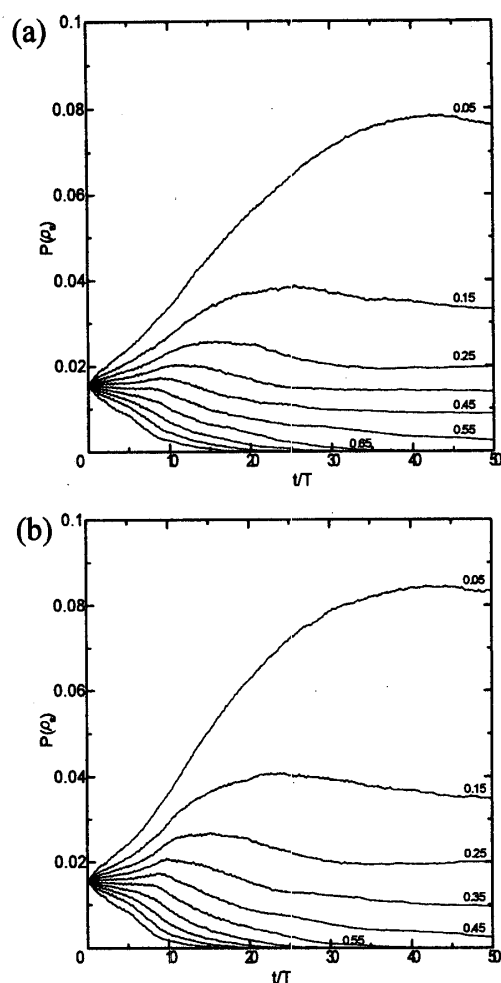


Fig. 10 Time variation of the proportion of the volumes of fluid in the range of specific densities at (a) $Re=3300$ $\Delta\rho/\rho_0=1.0\%$, and (b) $Re=4600$, $\Delta\rho/\rho_0=2.0\%$. Numbers attached lines in the figure denote the lower value of density of the range.

段階に移移する $t/T=20$ までに、重力流の核となる $\rho_s \geq 0.85$ の重い流体はほとんど消滅する。自己相似段階では広い領域に広がった密度界面を通る拡散によって、比較的軽い方の流体の体積が増加する。密度差の違いは $t/T=10$ 以降密度の大きい側で顕著になり、密度差が大きい方が混合が速く進むことがわかる。密度差が大きくなって密度界面における混合が抑制される効果より、重力流の進行速度が増加して対流運動が激しくなった結果、混合が促進される効果の方が大きいことを示している。

4. 結論

前報において、2次元重力流の解析のために開発した方法を3次元に拡張し、水門を用いた小型水槽における実験と、ナビエ・ストークス方程式の有限体積解に基づいた計算によって、放射状に広がる重力流を再現した。

ボックスモデルで近似した重力流について、エネルギー変換の観点から発達段階を分類し、先端速度のべき乗則に関する予測を行った。次に、正方形断面の水槽の角近傍に斜めに水門を設置し、その隅から密度の異なる流体を開放することによって、安定に広がる重力流を小型水槽で再現し、染料による可視化実験と先端部の進行速度の計測を行った。さらに、ナビエ・ストークス方程式と連続の条件および密度場を決定する輸送方程式の有限体積解に基づいて、計算領域の中央部から密度の異なる流体を解放したときの密度場の時間変化を計算した。

実験と計算によって、放射状に広がる重力流を再現することができた。非対称な流体交換から、中央の正方形領域から開放された重い流体は軸対称に広がり、円状に広がった先端部に質量集中が生じ、その後に成層化された流体が続く。放射状に広がる重力流は一定速度で進行する初期段階のあと、先端部の移動距離が時間の1/2乗に比例する第2段階と時間の1/5乗あるいはさらに小さい値のべき乗に比例する粘性段階が現れる。この重力流の発達段階に応じて、先端部の形状と内部構造が変化すること、その変化が重力流による流体混合に影響を与えること、そして、円状に広がる先端部にも3次元不安定性によって山谷構造が現れることが明らかになった。

本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究および科学技術振興事業団の計算科学技術活用型特定研究開発事業の補助を受けたことを記し、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) J. E. Simpson: Gravity Currents in the Environment and the Laboratory, Ellis-Hornwood/Halstead Press, 1987.
- 2) 川中幸一, 馬場信弘: 2次元重力流の計算, 日本造船学会論文集, 第178号, 1995, 33-39.
- 3) 馬場信弘, 岡村将治, 福庭哲也: 重力流の先端部の構造, 日本造船学会論文集, 第184号, 1998, 197-205.
- 4) 大内一之, 山鷹敏夫, 小林勝弥, 中村充: 密度流拡散装置の研究開発, 日本造船学会論文集, 第183号, 1998, 281-289.
- 5) 工藤君明: 流動攪拌システムの流力性能, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第42号, 2000, 139-153.
- 6) 阪口泰規, 馬場信弘, 伊藤聡美: デジタル画像の輝度情報を利用した重力流の密度場計測, 可視化情報, Vol. 19, Suppl. No. 1, pp. 381-382, 1999.
- 7) 馬場信弘, 阪口泰規, 伊藤聡美: 重力流の先端部の3次元不安定性, 日本造船学会論文集, 第185号, 119-125, 1999.
- 8) Tetsuo Katsuragi, Sadahiro Kan, Hirohiko Nishikawa, Nobuhiro Baba, and Ken-ichi Kitaura: Computation of Axisymmetrical Spread of Gravity Currents, Proceedings of TECHNO-OCEAN 2002, S-III-5 (Nov. 2002).