

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19360397

研究課題名（和文） 海洋フロントの生成と変動の予測

研究課題名（英文） Prediction of the formation and variation of oceanic fronts

研究代表者

馬場 信弘（BABA NOBUHIRO）

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：10198947

研究成果の概要（和文）：

海洋フロントの生成と変動を予測する新しい方法の開発を行った。フロントにおいて不連続に変化する密度やその他の物理量を非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の有限体積法による数値解として正確に捉えるために、勾配制限型の非振動スキームを導入した。3次元的な密度界面を対象とし、海洋環境を考察する上で十分な精度で海洋フロントの挙動を予測できることを、実験との比較によって検証し、本手法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

A new method is developed for the prediction of the formation and variation of oceanic fronts. The non-oscillating numerical scheme with a kind of the gradient limiters is implemented for the discontinuity of density and other quantities at the front represented adequately as the finite volume solution of the incompressible Navier-Stokes equation. The validation of the present method is made for the comparison of the experimental results to predict the behavior of the oceanic front for the three-dimensional density interface in such an accurate way to investigate the marine environment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2009年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：海洋環境工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋工学・海洋物理・環境技術・環境予測・海洋科学・フロント・重力流・密度成層

## 1. 研究開始当初の背景

海洋フロントは、密度が不連続に変化する密度界面であるので、フロントを通る運動量やエネルギー、物質の輸送が抑制され、その周辺の流場や環境に大きな影響を与える。海洋フロントに関連する様々な問題が解決で

きていない理由は、周りの状況によって出現するこの不連続面の取り扱いが理論的にも実験的にも難しいことである。このようなフロントの挙動やそれに伴う周辺の物理的な環境を予測することができれば、環境保全や食料資源確保の目的から、その社会的、経済的な利益や効果は非常に大きい。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、生物学的環境を支配する海洋フロントに特有な物理的な現象を対象とし、実海域における海洋フロントの生成と変動を予測する方法を開発することである。実海域における3次元的な密度界面を対象とし、閉鎖性海域および大洋における環境影響を考察する上で十分な精度でフロント近傍の物質輸送を予測することを研究の目標とする。

## 3. 研究の方法

フロントにおいて不連続に変化する密度やその他の物理量を偏微分方程式の数値解によって正確に捉えるため、新たに非圧縮性流体のための非振動スキームを開発する。流れの物理量は区分的な関数で表現し、局所的な単調性を維持するためにその関数の勾配に制限を設ける。線形な波動方程式について数値誤差の解析を行い、不連続性の強さに応じて勾配制限が効くこの新しいスキームの特性を確認する。さらに、このスキームを多次元化し、非線形な場合に拡張して、有限体積法による非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の数値解法に適用する。

この非振動スキームを導入した計算主要部の検証と改良を行うため、計算と同等レベルの精度で行う実験との比較を行う。

タイプの異なるフロントについて計算法の検証するため、その発生メカニズムについて検討を行う。成層化した海域において潮流や海流による局所的な混合によって生成される場合、大規模な海流の収束や発散によって生成される場合など、その発生のメカニズムは異なる。成層の混合、回転、粒子系の影響など、そのメカニズムにとって本質的な部分だけを取り出すことによって、これまでできなかったタイプのフロントについても、初期条件、境界条件を合わせた実験と計算の比較を行う。

図1に本研究で設計、開発した実験水槽を示す。いずれも成層化流体を使用でき、回転水槽では回転台上に画像計測システムが設置され、傾斜水槽では、砂やプラスチックの粒子系を一様に分散させるための攪拌機能を備えている。

染料を用いた可視化画像の輝度から2次元的な密度場を計測してきたこれまでの方法を拡張し、流場の断層画像から3次元的な密度場を計測する独自の方法を開発する。異なる色のスリット光線を別の断面に照射し、横方向からビデオカメラによって撮影した

断層画像から各断層の画像を分離する。この方法によって、3次元の非定常な流場という高度なレベルにおいて実験と計算の比較を行う。

粒子系を用いた実験は一般に再現性を上げることが難しい。同一の初期条件でフロントを形成するため、図2に示すようなエアバブルを発生させて、粒子系を同一の活性化した状態に保つ方法を開発した。さらに上記の画像計測法を応用して、粒子の濃度分布を推定する。

実験と計算の比較は、直接、解像できる低レイノルズ数の範囲で行ってきたが、実海域におけるフロントは、実験室レベルの現象より、 $10^3$ から $10^4$ 倍、レイノルズ数が高く、含まれる運動のスケールの範囲もこれに応じて増大する。そのため、密度成層や密度界面による乱流運動の抑制効果を表す非等方性のサブグリッドスケールモデルを導入して、主要な運動だけを解像する。

変動する流場に応じて計算の解像度を最適化させることによって全体の解像力と計算効率を向上させる新しい独自の技術開発を行う。フロントの計算では時間変動する流場は局所的であり、フロント、密度界面、壁境界近傍に限られているので、このような時間変動する局所的な領域を集中的に反復計算することにより解全体の収束速度を上げる。空間だけでなく、時間軸についても変動周期に応じて時間増分を変化させることにより、計算効率を上げる。

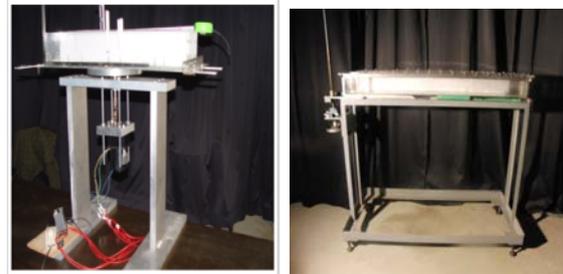


図1 回転水槽（左）と傾斜水槽（右）

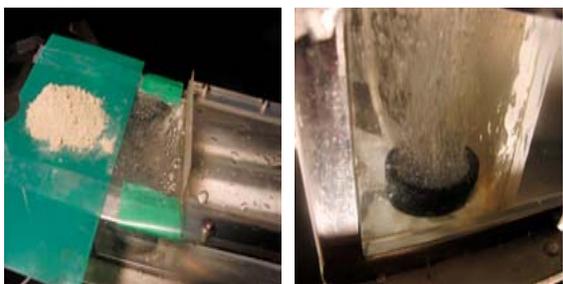


図2 粒子系活性化装置

#### 4. 研究成果

海洋フロントのための計算主要部の開発を行った。海洋フロントは密度の不連続面であり、この不連続面を偏微分方程式の数値解によって正確に捉えるため、新たに非圧縮性流体のための非振動スキームを開発した。関数を区分的な平面で表現し、局所的な単調性を維持するために、その平面の勾配に制限を設ける手法である。局所的単調性の条件から、隣接する区分的平面の勾配差が平均勾配の整数倍を超えないという制約条件を導いた。

図3に示すように、1次元および2次元の線形波動方程式について、この勾配差制限の概念が、過度の数値拡散を導入せずに不連続面においても数値振動が抑えられ、また制限がかかった場合でも空間的に2次の精度を保持していることを確認し、従来の TVD スキームと比較して優位であることを検証した。

非圧縮性のナビエ・ストークスの方程式、連続の条件、密度を決定するための輸送方程式を支配方程式として、この新しいスキームを対流項に適用し、有限体積法による離散化を行った。2次元的な海洋重力流の計算を行い、変形する密度界面において、過度の数値拡散による不連続面の消失はなく、数値振動も起きていないことが確認された。

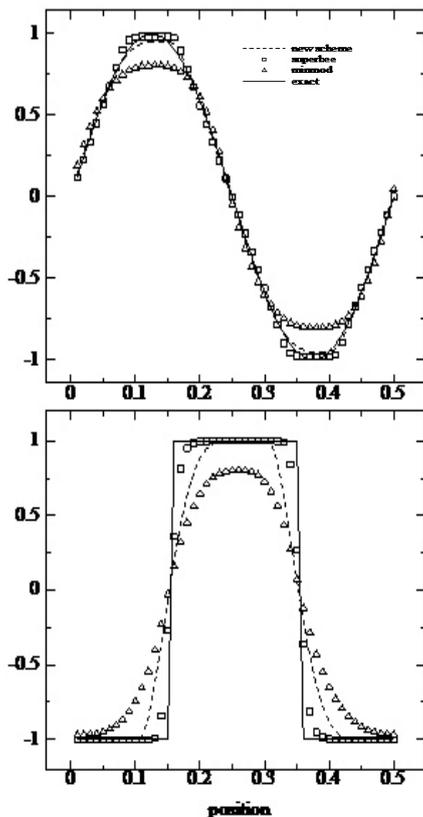


図3 非振動スキームの検証

計算結果を実験と比較することによって開発した計算主要部の検証と改良を行った。高度化したスキームを組み込んだナビエ・ストークスの有限体積解による計算によって、同等レベルの正確度でフロントを再現し、フロント近傍の3次元非定常な密度場について、計算結果と実験結果を比較した。

フロントの再現方法について検討を行った結果、フロントの挙動に及ぼす最も重要な影響因子として、成層の混合、回転効果、伴う粒子系が挙げられた。

図4に、流体交換によって発生させたフロントの先端位置の時間変化を示す。計算結果と実験結果は広範囲に渡ってよく一致している。図5に示すように、フロントの発達段階がエネルギー変換の観点から考察した理論モデルと一致し、一定速度の初期段階から、時間の1/2乗に比例して急に減速する粘性段階に移行する過程が良く捉えられていることがわかる。このことより、実験室レベルにおけるフロントの基本的な挙動とそのエネルギー変換の機構が本計算法によって精度よく再現できたことが確かめられた。

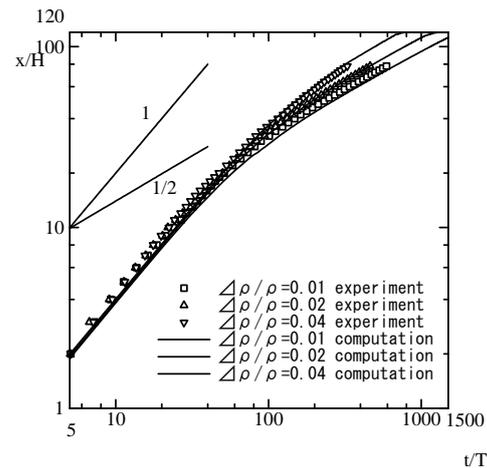


図4 フロントの位置の時間変化

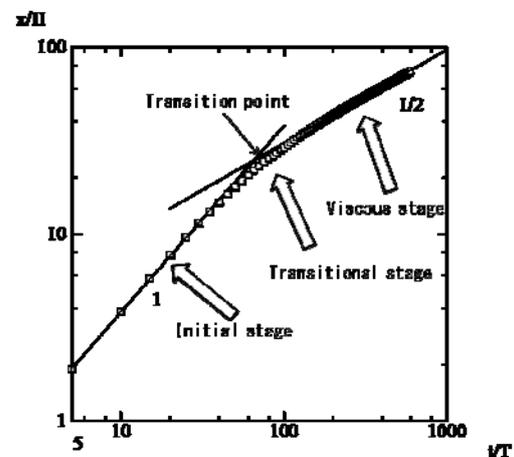


図5 フロントの発達段階の遷移

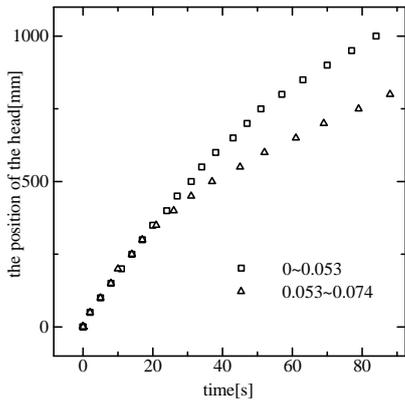


図6 フロントの先端速度に及ぼす粒径分布の影響

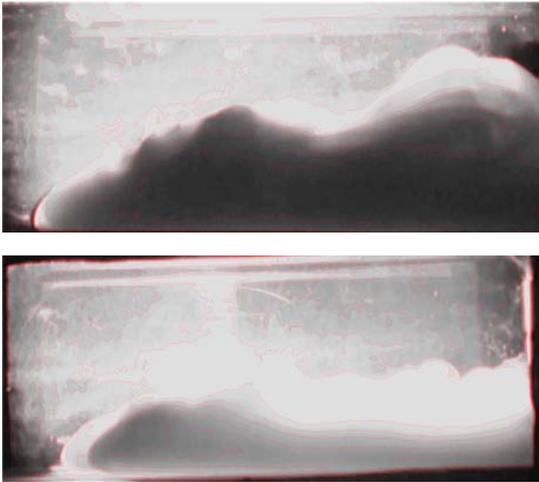


図7 粒子系フロントの質量分布  
(上：粒径小；下：粒径大)

粒子系の場合のフロントの先端位置の時間変化を図6に示す。初期の密度差が同じであっても、粒径分布が異なる場合、ある段階からフロントの挙動が変わる。図7はこの粒径分布の異なる場合のフロントを水槽実験で再現し、画像解析によって推定した質量分布である。粒径が大きい場合、粒子の沈殿等によってフロントの質量が減少し、先端速度が急減速する段階への遷移が早まることがわかる。粒子系のフロントでは粒径分布とその変化がその挙動に重大な影響を及ぼすことが明らかになった。

フロントにおける混合についての検証を行うため、循環流による混合層の発達の計算と実験を行った。図8は混合層内の密度変化であり、混合速度の変化も含め、計算結果と実験結果は良く一致している。密度界面は図9に示すように3次元的な構造を持っており、これらの結果から、本計算が3次元の形状のフロントにおける混合過程についても有効であることがわかる。

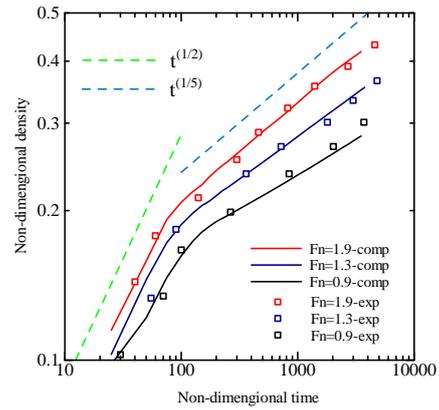


図8 発達する混合層内の密度の時間変化

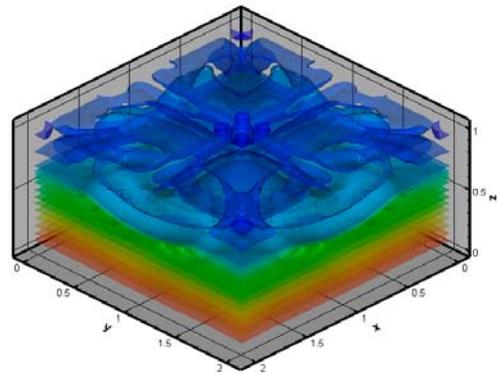


図9 密度界面近傍の密度の等値面

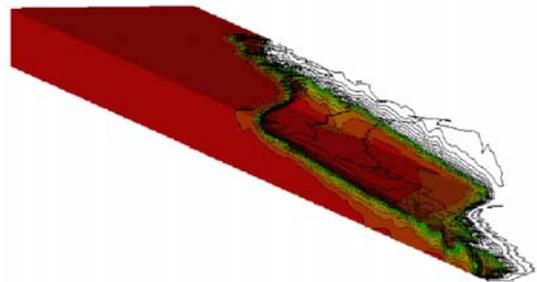
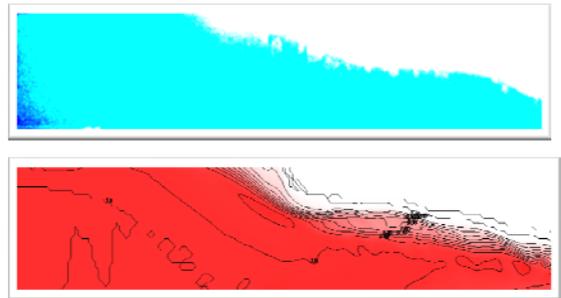


図10 回転系におけるフロント  
(上：実験可視化写真；中：計算密度等値線  
図；下：計算鳥瞰図)

回転水槽を用いた可視化実験と回転座標系を用いた実験を行い、回転がフロントの形状やその移動速度に与える影響について調べた。図 10 は流体交換によって生成したフロントが壁に沿って進行するところを上側から見た場合に対応し、進行方向に垂直に発生したフロントがコリオリ力によって変形したところである。その変形量や時間変化の割合は、ロスビー数の関数で表わされることが確かめられた。

実験室レベルの現象に比べてレイノルズ数が  $10^3$  から  $10^4$  倍高く、運動のスケールの範囲が増大した実海域におけるフロントを捉えるため、有限個のグリッド上での計算では捉えられない小さいスケールの運動がグリッド上の大きなスケールの運動に与える影響を密度の非一様性を考慮した渦動粘性によるサブグリッドモデルを定式化し、フロントの計算に導入した。中間レイノルズ数においては、界面における混合を促進する乱れの効果が得られることが分かった。

また、計算効率を上げるため、フロント、密度界面、壁境界近傍など、時間的に変動の激しい領域を集中的に反復することにより収束速度を上げる方法を開発した。収束回数は大幅に減少し、計算量は減少した。さらに、実際の CPU 時間を大幅に短縮するため、収束の悪いセルを探索するアルゴリズムを改善した方法によって、実験室レベルのフロントの長時間の計算を行った。その結果、水門開放による流体交換によって生成されたフロントは、一定速度で進行する初期段階から、壁面における反射など特別な攪乱がなくても、フロントの位置が時間の  $1/2$  乗に比例して減速する段階に自然に遷移することが明らかになった。

以上の通り、3次元的な密度界面を対象とし、海洋環境を考察する上で十分な精度で海洋フロントの挙動を予測できることを、実験との比較によって検証し、当初の目的を達成した。フロントが発達する際に自然な遷移によって現れる  $1/2$  乗則は、この研究の中で初めて明らかにされた事実であり、まだ、その適用範囲を明確にするための十分なデータはそろっていないが、その学術的意義は大きい。また発達段階の遷移まで含めて、フロントの生成から変動まで予測できるようになったことによって、従来の方法に比べて飛躍的にその応用範囲が広がった。例えば、油漏れ事故の拡散防止や温排水の拡散促進など、重力流を制御するシステムを構築するために利用することができるようになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) R. Tsurumi, T. Katsuragi and N. Baba, Experiment on the turbidity currents driven by sand particles in water, Proceedings of International Conference on Experimental Fluid Mechanics, 査読無, Vol.2, 2010, 732-754.
- (2) R. Tsurumi, T. Katsuragi and N. Baba, Experiment on the turbidity currents using a small inclined tank, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics APHydro, 査読無, 2010, 313-316.
- (3) J. Koue, T. Katayama, T. Katsuragi, N. Baba and K. Kitaura, Structure of the Head of Gravity Currents in a Long Channel, Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 2009, 871-876.

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) R. Tsurumi, T. Katsuragi and N. Baba, Experiment on the turbidity currents driven by sand particles in water, International Conference on Experimental Fluid Mechanics, Nov. 25, 2010, Liberec, Czech Republic.
- (2) R. Tsurumi, T. Katsuragi and N. Baba, Experiment on the turbidity currents using a small inclined tank, The 5th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics APHydro, July 2, 2010, Osaka.
- (3) 片山卓也, 桂樹哲雄, 馬場信弘, 湧昇システムにおける成層流体の混合, 日本船舶海洋工学会講演会, 2009年11月5日, 大阪
- (4) 脇川慎太郎, 馬場信弘, 片山卓也, 北浦堅一, 回転が重力流の挙動に与える影響に関する実験, 日本船舶海洋工学会講演会, 2008年11月12日, 大阪
- (5) 池田麻由, 浦部英一郎, 馬場信弘, 密度界面の計算方法の改良, 日本船舶海洋工学会講演会, 2007年11月12日, 大阪

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

馬場 信弘 (BABA NOBUHIRO)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：10198947

### (2) 研究分担者

北浦 堅一 (KITAURA KEN-ICHI)  
大阪府立大学・工学研究科・講師  
研究者番号：00081399