

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540509

研究課題名(和文) 斜面重力流に伴うエントレインメント及び混合過程に対する傾圧不安定渦の効果

研究課題名(英文) Effect of Baroclinic Instability on Entrainment and Mixing Processes in the Density Current Descending a Slope

研究代表者

田中 潔 (Kiyoshi, Tanaka)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：20345060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：斜面重力流に伴うエントレインメントと混合過程を、傾圧不安定渦の効果に着目して調べた。非静水圧3次元モデルを用いて斜面重力流とそれに伴う傾圧不安定渦を再現し、そこに大量の標識粒子を投入して、それらの漂流経路をラグランジュ的に追跡した。渦に取り込まれ標識粒子は、渦内で循環を繰り返し、上昇と沈降を繰り返しながら斜面を沈降した。また、現実の海洋(日本海)で生じている斜面重力流において、エントレインメント・混合過程が実際に重要な役割を果たしていることも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Effect of baroclinic instability on entrainment and mixing processes in the density current descending a sloping bottom was investigated using a three-dimensional, non-hydrostatic numerical model. The particle tracking was performed in the numerical model, in which a large amount of the labeled particles were deployed. After being entrained into the baroclinic eddies, the particles go up and down repeatedly and as a result they descend the slope. Moreover, the experimental results were applied to the bottom water formation in the Sea of Japan. The entrainment and mixing processes play very important roles in the bottom water formation in the Sea of Japan, where the dense shelf water descends the continental slope, entraining ambient sea waters, to form the bottom water.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋物理学 大陸棚斜面 傾圧不安定

1. 研究開始当初の背景

(1) 斜面重力流

南極や北大西洋北西部(グリーンランド沖等)における大陸棚斜面に沿う重力流の沈降は、地球規模の海洋熱塩循環の起点にあり、全球規模の気候形成・変動に重要な役割を果たすことが良く知られている。また、近年では我が国周辺(日本海など)でもそうした斜面重力流の存在が確認されている。

一般に陸棚から大陸棚斜面へ流出した高密度海水は、地球自転効果のため斜面を容易には沈降出来ないが(斜面下向きに働く重力と上向きに働くコリオリ力がバランスする地衡流平衡のため)、海水沈降を可能にする(地衡流平衡を崩す)メカニズムの一つとして、傾圧不安定(地球自転効果が本質的な流れの不安定)に因る渦の発達が挙げられる。そして、傾圧不安定に因る海水沈降は、海底摩擦に因る海底境界層内沈降と比べて10倍以上の量の海水沈降を生じさせると予想されるが、その実態については不明な点が多い。

(2) エントレインメント過程

傾圧不安定に因る海水沈降について、特に分かっていないことに、沈降に伴って周囲海水をエントレインメント(連行加入)して海水混合する過程が有る。エントレインメント・混合過程は、底層水の組成を決定付ける非常に重要な物理過程である。しかしながら、傾圧不安定渦の力学機構は近年になって解明されたばかりでもあり、それに関わるエントレインメント・混合過程の解明は世界的にも緒に就いたばかりである。

こうしたエントレインメント・混合過程の実態を調べることは、気候変動の将来予測を行う上でも、重要な問題である。例えばOGCM(海洋大循環モデル)では、最新の計算機環境を以てしても、空間スケールの小さい斜面重力流(渦のスケール水平数~数10km、鉛直数10~数100m)と1000km以上の規模の海洋大循環を同時に正確に再現することは簡単ではなく、斜面重力流の効果をパラメタライズして取り入れていることが多い。本研究で得られる成果は、より信頼性の高いそうしたパラメタライズの開発にも資するものである。

2. 研究の目的

本課題では、斜面重力流に伴うエントレインメントと混合過程の実態を、今日まで全く考慮されてこなかった傾圧不安定渦の効果に着目して調べる。鉛直方向の運動が大事な海水沈降を正しく再現するための非静水圧3次元モデルを用いて、斜面重力流とそれに伴う傾圧不安定渦が数値的に再現された流速場に、大量の標識粒子を投入してそれらの漂流経路をラグランジュ的に追跡することで、傾圧不安定渦に因るエントレインメント及び混合過程の実態を捉える。

特に注目するのは、現実海洋の様々な深度に分布する多様な周囲海水が、どのような経

路(流跡線)を辿って、どのような場所で、どのような他の海水と混合していくのか、という点である。粒子追跡によるラグランジュ的視点から検討を行うことで、オイラー的視点からは得られない、海水が渦に取り込まれる過程の流跡やそれらの起源域の描像を提出することが可能となる。

また、現実の海洋(例えば我が国の近くでは日本海)で生じている斜面重力流において、そうしたエントレインメント・混合過程がどのように重要な役割を果たしているかについても検討を加える。

3. 研究の方法

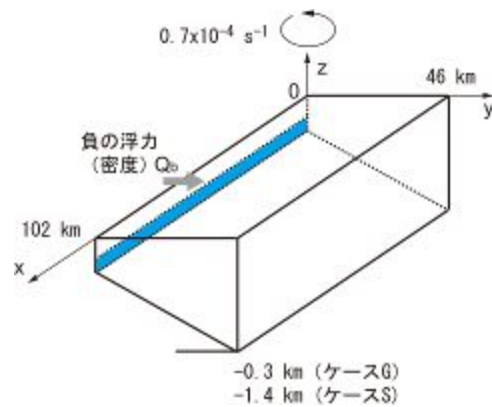


図1: 非静水圧数値モデルの模式図。

図1のような三次元の非静水圧数値モデルを駆動して、斜面重力流とそれに伴う傾圧不安定渦を再現する。支配方程式は、回転系におけるリジッド・リッジ近似下におけるブシネスク流体の運動方程式、連続の式、密度の移流拡散方程式である:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p - \frac{\rho}{\rho_0} \mathbf{g} + \nu_h \Delta_h \mathbf{u} + \nu_v \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho - \kappa_h \Delta_h \rho + \kappa_v \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}.$$

上式において、各変数は慣用的表記に従い、モデルのx方向には周期境界条件、海面には非粘着条件、それ以外の境界には粘着条件を課した。初期条件は静止・一様として、大陸棚斜面上方の鉛直壁において現実的な大きさの負の浮力 $Q_b (= 2.0 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ を課して流れを駆動する。

傾圧不安定波は非常に微小な振幅から発達し始め、十分な時間が経過すると有限振幅に達し、渦活動が顕著となる。本研究では渦運動エネルギーが平均場運動エネルギーに等しくなる時刻を有限振幅に達した時刻とみなし、その時刻に標識粒子を初期配置した。

標識粒子追跡はオイラー・ラグランジュの方法に従い、下記の追跡式をルンゲクッタ法で解いた:

$$\frac{dX_n}{dt} = U(X_n, t)$$

ここで、 X_n は時刻 t における各粒子の位置を、 U はそこでの流速を表す。追跡実験は先ず、海底斜面の傾斜 S が 0.005 のケース（傾斜が緩やかなケース）について実施した。粒子の初期配置と配色は x 方向に一様とし、図 2 及び図 3 のように配置間隔は水平方向に約 400m、鉛直方向に約 2m とした。

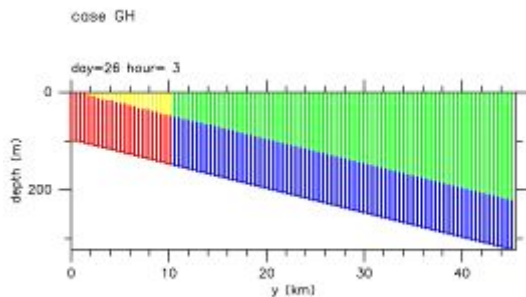


図 2：海底斜面の傾斜が緩やかな $S=0.005$ のケースにおける、標識粒子の初期配置と配色。鉛直断面。

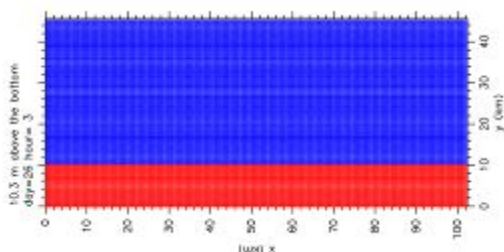


図 3：海底斜面の傾斜が緩やかな $S=0.005$ のケースにおける、標識粒子の初期配置と配色。一例として海底から 10m 面のみ示す。

4. 研究成果

(1) エントレインメント・混合過程

以下、本報における時刻は、粒子の追跡開始時刻を基準（0日0時）とする。図 4 及び図 5 は追跡開始から 5、10、15 日の粒子分布を示す。図 4 にはモデル内の全粒子を x 方向に重ねた鉛直分布を、図 5 には z 方向に重ねた水平分布をそれぞれ示す。ラグランジュ的視点から検討を行うことで、海水が渦に取り込まれて沈降する過程を効果的に視覚化することに成功している。例えば、渦に取り込まれて輸送される粒子の軌跡は必ずしも軸対称な円形ではなく、そこから大きく歪められたものであることが分かる。また、粒子は渦内で循環を繰り返すことで、必ずしも斜面を一方向的に沈降するのではなく、斜面に沿っての上昇と沈降を繰り返しながら結果として沈降が卓越することも明らかになった。

次に、海底斜面の傾斜 S が 0.03 のケース（傾斜が急峻なケース）について検討した。図 6 には 5 日におけるモデル内の粒子を x 方向に重ねた鉛直分布を、図 7 には 15 日における z 方向に重ねた水平分布をそれぞれ示す。傾斜が緩やかな $S=0.005$ のケースに比べて、赤色の斜面上部底層水は勢いよく沈降するとともに、周囲海水も渦前線に伴う鉛直流

に因って多量にエントレインされることが明らかになった。これらの詳細な結果については、現在、学術論文に纏めているところである。

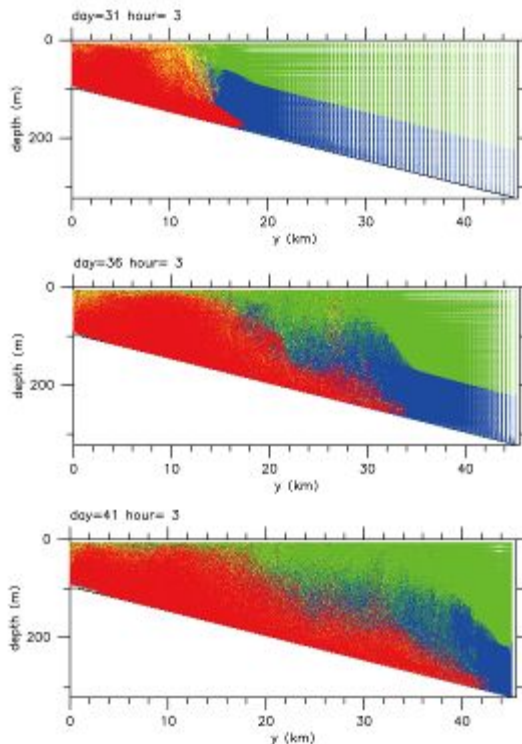


図 4：モデル内の粒子を x 方向に重ねた鉛直分布図。上から 5 日、10 日、15 日。

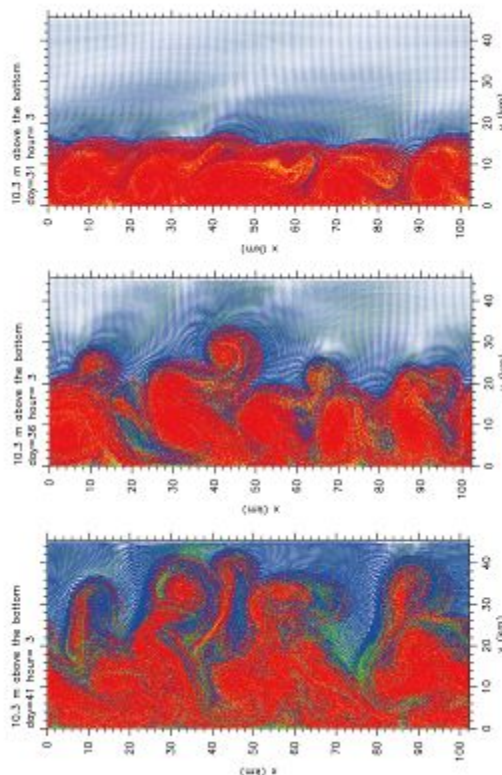


図 5：モデル内の粒子を z 方向に重ねた水平分布図。上から 5 日、10 日、15 日。

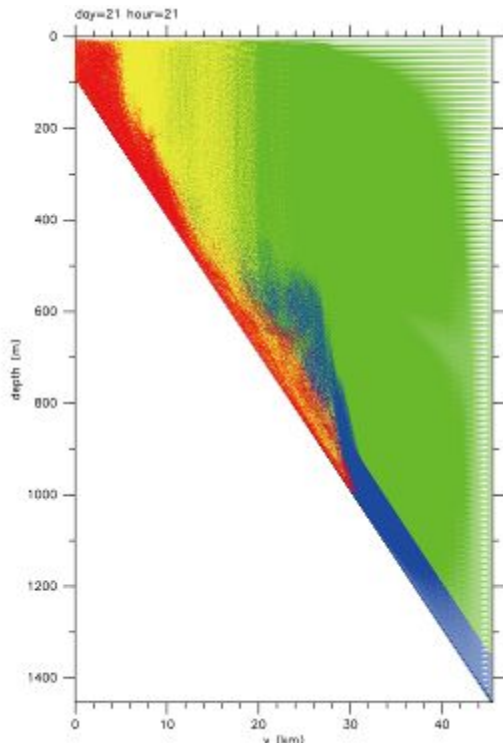


図 6 : S=0.03 のケースにおいてモデル内の粒子を x 方向に重ねた 5 日の鉛直分布図。

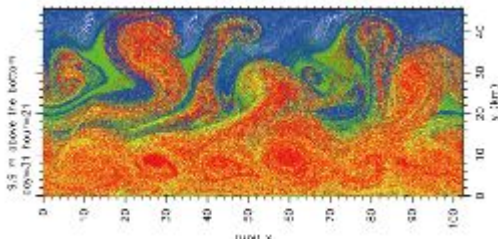


図 7 : S=0.03 のケースにおいてモデル内の粒子を z 方向に重ねた 15 日の鉛直分布図。

(2) 日本海底層水の形成

斜面重力流においてエントレインメント過程が非常に重要であることが上記(1)の理想的な数値実験から明らかになったことから、それが現実の海洋(日本海の底層水形成)においてどれくらい重要であるのかを次に調べた。

日本海北西部では、斜面重力流に因る底層水形成が生じている(図 8)。そこで、図 9 に示されるストリームチューブモデルによって数値実験を実施した。モデルでは日本海の大陸棚斜面において、平年的な海水沈降が生じた年と、特異的に顕著な沈降が生じた 2001 年のケースについて、沈降流路やエントレインメント量を計算した。特に、既往の研究では必ずしも適切に考慮されていなかったエントレインメント・混合過程を、本課題では上記(1)で得られた知見も考慮して、中緯度・急峻斜面域における特性を反映する適切なものとした。支配方程式(プリューム位置座標、質量保存、運動量保存)は次の通り

である:

$$\frac{dx}{d\xi} = \cos \phi$$

$$\frac{dy}{d\xi} = \sin \phi$$

$$\frac{d}{d\xi} (AV) = E$$

$$\frac{d}{d\xi} (\rho AV) = \rho_e E$$

$$\frac{d}{d\xi} (\rho AV^2) = (\rho - \rho_e) Ag \sin \eta \sin \phi - K$$

$$\rho \left(Vf \cos \eta + V^2 \frac{d\phi}{d\xi} \right) = (\rho - \rho_e) g \sin \eta \cos \phi.$$

ここで、 ρ , A , V はそれぞれプリュームの密度、断面積、沈降速度を表し、それ以外の各変数は慣用的表記に従う。また、 K , E はそれぞれ海底摩擦及びエントレインメントの効果を表す。

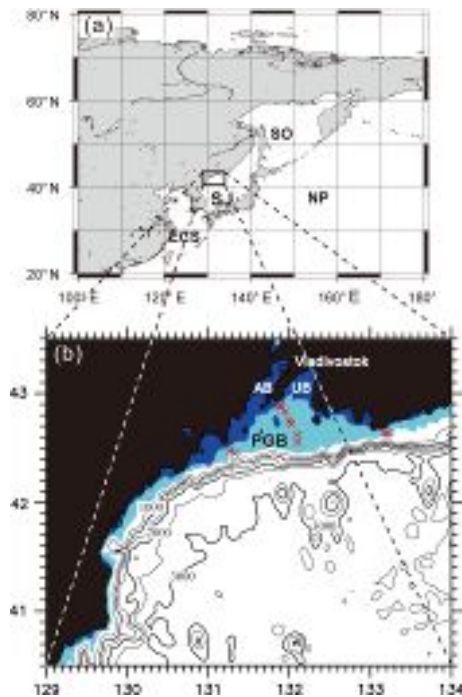


図 8 : 日本海底層水の形成域。

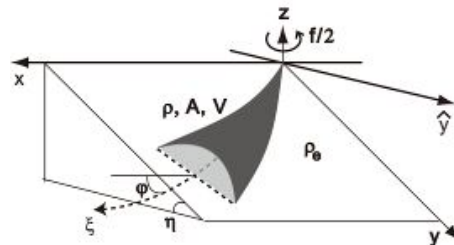


図 9 : ストリームチューブモデル。

図 10 はモデルで計算された沈降流路を示す。“WOD”の添え字が付いている軌跡は平年値を、“W2001”の添え字が付いている軌跡は顕著な沈降が生じた 2001 年冬の様子を表す。中緯度・急峻斜面域におけるエントレインメ

ント・混合過程を適切に再現したことにより、2001年に特異的に生じた深い海水沈降を再現することに成功している。

図 11 は、沈降軌跡に沿った沈降流量の変化を示す。斜面を沈降する海水は、平年は沈降開始時における初期海水沈降量の 3~4 倍程度の周囲海水を、また、2001 年冬季は 9~10 倍程度の周囲海水を、斜面上でエントレインして混合している。こうしたエントレインメント・混合過程は、沈降海水の密度や沈降深度を決定づけている。すなわち、本研究の遂行によって、斜面重力流に伴うエントレインメント・混合過程が、我が国周辺の現実海洋（日本海）で生じている底層水形成において、実際に非常に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

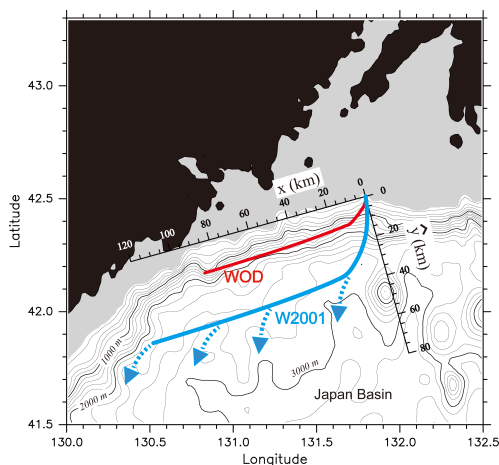


図 10：日本海における海水沈降流路。“WOD”：平年値、“W2001”：2001 年冬季。

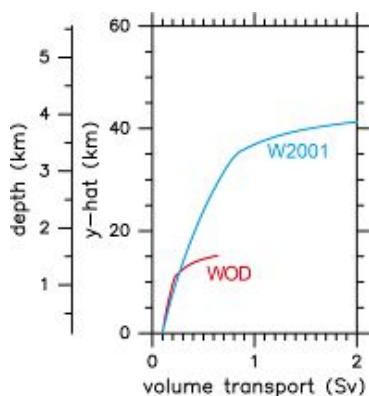


図 11：沈降軌跡に沿って示した海水沈降量。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Tanaka, K. (2014): Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan, *Journal of Geophysical Research*, 119, 2081-2094, doi:10.1002/2013JC009456, 査読付き.

〔学会発表〕(計 1 件)

Tanaka, K.: Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan. The 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting at Naha, Okinawa, Japan. April 23, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

無し

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

無し

取得状況 (計 0 件)

無し

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.icrc.aori.u-tokyo.ac.jp/member/ktanaka/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 潔 (TANAKA Kiyoshi)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：20345060

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し