

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18740292
 研究課題名(和文) 東アジア縁辺海における大陸棚斜面に沿う沈降流とそれに伴う物質輸送
 研究課題名(英文) Descent of dense water and transport process along continental shelves in the East Asian marginal seas
 研究代表者 田中 潔 (KIYOSHI TANAKA)
 東京大学・海洋研究所・助教
 研究者番号：20345060

研究成果の概要：回転系における重力流を再現することの出来るストリームチューブモデルと現在までに蓄積されている各種の観測データを使用して、東アジア縁辺海（日本海、オホーツク海、東シナ海）における大陸棚斜面に沿う海水の沈降過程を調べた。特にどのような力学場が形成されることで海水沈降が可能となっているのかについて焦点をあてて考察し、現在までに時空間的に断片的にしか得られていない観測的な知見を補完した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	300,000	3,100,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：東アジア縁辺海、大陸棚斜面、海水沈降、ストリームチューブモデル

1. 研究開始当初の背景

近年になって東アジア縁辺海において、大陸棚斜面に沿う海水の沈み込みが観測されている。例えば、日本海ではロシアのピョートル大帝湾沖の大陸棚斜面上において、2001年の初冬に湾内に起源を持つと思われる高密度陸棚水が水深 3000m 以深にまで沈んでいるのが観測された。また、オホーツク海の北西部では、大陸棚上における冬季の海水生成に伴うブライン（高塩分水）排出によって高密度陸棚水が形成され、それが斜面に沿って水深 500m 付近にまで沈み込んでいる。さらに、東シナ海では緩やかに傾斜した大陸棚上の外縁付近において、陸棚底層水が沖を流れる黒潮の中層へ貫入している。

こうした斜面沈降流の実態については、実際のところ、その基礎的な部分でさえも、近年まで未解明のままである。その一因は、沈降流の発生海域が限られており、多くは厳寒域に位置することによる観測的困難性に有る。さらに、沈降現象の空間スケール（水平 100～500km、鉛直 100～5000m）に比較して、沈降を担う各力学要素（海底エクマン流や傾圧渦）のスケール（水平 1～10km、鉛直 10～100m）が極めて小さいため、数値的研究においては莫大な計算機資源が必要とされることも研究が遅れていた原因である。しかしながら、近年の計算機環境の向上により、こうした状況は、徐々に改善されつつある。

とはいえ、海盆規模の背景流・場も含めての現実的な沈降過程を、通常の（プリミティ

方程式系) 海洋大循環モデルを用いて再現することは今日の計算機環境を持ってしても未だ困難な状況にある。

2. 研究の目的

そこで、本研究ではこれまでに数多くの実績を有し且つ、現実的な計算機資源のもとで海水の沈降過程を考察することが可能なストリームチューブモデル(重力流モデルの一種)を使用して、東アジア縁辺海における大陸棚斜面(緩やかに傾斜する大陸棚も含む)に沿う海水沈降の物理過程を検討する。

すなわち、現在までに蓄積されている各種の観測データとストリームチューブモデル(数値モデル)をもとに、特に大陸棚斜面上においてどのような力学場が形成・維持されることで海水沈降が可能となっているのかについて着目しながら、東アジア縁辺海における海水沈降過程の理解を深めるとともに、時空間的に断片的にしか得られていない観測的な知見を補完する。

3. 研究の方法

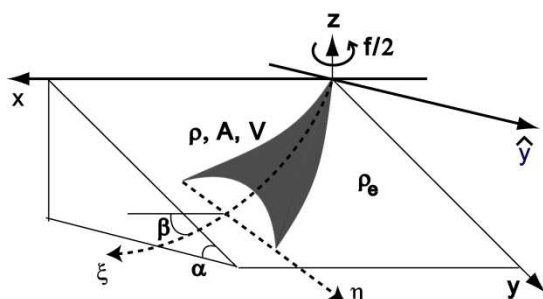
ストリームチューブモデルについては Smith (1975, Deep-Sea Research, 22, 853-873) を基にして作成する。モデルに課す境界条件(背景場の成層条件等)については米国海洋データセンター(NODC)等より入手した海洋観測データを基に作成する。また、高密度陸棚水の生成に重要な気象条件を調べるためには、米国環境予報センター/大気研究センター(NCEP/NCAR)や気象庁作成の再解析データを使用する。

モデルは複数の常微分方程式から構成され、ワークステーションを使用してそれを数値的に解くことで、高密度陸棚水が沈降する経路や、沈降に伴う混合過程などを調べる。また、得られた結果はハードディスクや Ultrium 磁気テープ等に保存する。

4. 研究成果

(1) モデル開発

図1: ストリームチューブモデル。



先ず、図1のようなモデルを開発した。すなわち、高密度陸棚水が周囲の海水を取り込みながらコリオリ力と重力、摩擦力のバランス下で斜面をプリューム状に沈降することを

$$\frac{d}{d\xi}(AV) = E, \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\xi}(\rho AV) = \rho_e E, \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\xi}(\rho AV^2) = (\rho - \rho_e) Ag \sin \alpha \sin \beta - K, \quad (3)$$

$$\rho \left(Vf \cos \alpha + V^2 \frac{d}{d\xi} \beta \right) = (\rho - \rho_e) g \sin \alpha \cos \beta. \quad (4)$$

想定して、モデルは以下の方程式系から成る:

(1)式はプリュームの流軸方向に関する流量保存、(2)式は質量保存、(3)式は運動量保存を表し、(4)式はプリュームの流軸と直交する方向の運動方程式である。ここで、 ξ はプリュームの流軸方向の座標、 β はそれと直交する斜面下向きの座標を表す。 ρ , A , V はそれぞれプリュームの密度、断面積、速度を表す一方、 ρ_e は背景場の密度を表す。 α , β , f は海底斜面の角度、プリュームの流軸と斜面等深がなす角度、コリオリ係数をそれぞれ表す。

プリュームの沈降に伴ってエントレイン(連衡加入)される背景場の海水量は式中において E で表されているが、ここでは(以下の Smith (1975)の再現実験を除く)プリュームの幅を W として、

$$E = E_c W V$$

を仮定した(E_c はエントレインメント定数)。

また、プリュームの沈降に伴って生じる摩擦力は式中において K で表されているが、ここでは(以下の Smith (1975)の再現実験を除く)、

$$K = K_c W V^2$$

を仮定した(K_c は摩擦定数)。

(2) 日本海における海水沈降

Smith (1975) はグリーンランド沖での深層水形成(overflow)を想定して実験を行い($\tan \alpha = 5.8 \times 10^{-3}$, $f = 1.3 \times 10^{-4}$)、プリュームの軌跡について図2破線の結果を得た。高密度水は地球自転の影響を強く受け、沈降開始後すみやかに等深線に沿う地衡流(斜面上向きのコリオリ力と下向きの重力がバランス)に近い流れを形成する。

大陸棚斜面上における高密度水の沈降が生じている世界の主要な海域(グリーンランド沖、ウェッデル海等)では、海底斜面の傾きが比較的緩やかであり、 $\tan \alpha \sim 10^{-2}$ である。これに対して、ピョートル大帝湾が位置する

付近の日本海北西部における海底斜面は極めて急峻であり、図3に示されるように $\tan \alpha \sim 10^{-1}$ である。さらに、日本海におけるコリオリ係数は、グリーンランド沖やウェッデル海より幾分か小さい。

そこで、比較のために先のモデルにおいて $\tan \alpha = 9 \times 10^{-2}$, $f = 9.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ とする一方、その他のパラメータについては Smith (1975) と同じにして実験を行うと、図2 実線（赤色）の結果を得る。日本海北西部では、グリーンランド沖やウェッデル海と比較して、斜面に沿う地衡流は形成されにくく、高密度水は斜面を沈降し易いことが示唆される。

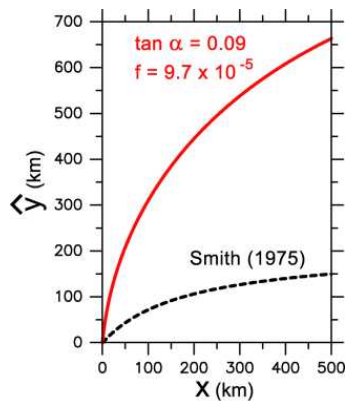


図2: プリュームの軌跡。黒色の破線は Smith (1975) の再現実験結果。赤色の実線は大陸棚斜面の傾斜とコリオリ係数だけを、日本海北西部を想定した値に変更したケース。

- Blue:** continental shelf (shallower than 150 m)
- Red:** very steep slope ($\tan \alpha > 0.1$)
- Pink:** steep slope ($\tan \alpha > 0.05$)

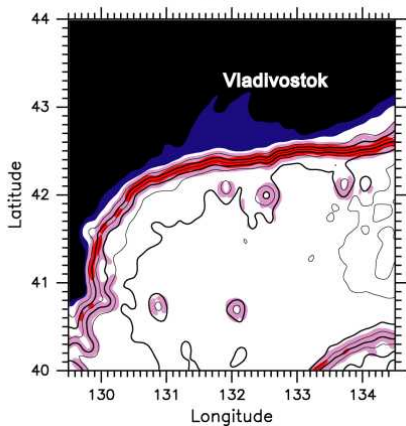


図3: 日本海北西部の海底地形 (ETOPO1 を水平約 10km のスケールで平滑化)。等値線は 500m 毎の水深を表す。青色の領域は水深 150m 以浅の大陸棚、赤色の領域は大陸棚斜面のうち傾斜が $\tan \alpha > 10^{-1}$ の領域、ピンク色の領域は傾斜が $\tan \alpha > 0.5 \times 10^{-1}$ の領域

を示す。

次に、モデルにおいて海底斜面傾斜やコリオリ係数以外の要因についても、日本海北西部を想定して実験を行った。例えば背景場の成層状態については、米国海洋データセンター (NODC) によって提供されている海洋データセット World Ocean Atlas (WOA) 2005 における東経 131.5 度、北緯 41.5 度の気候学的な冬季水温・塩分プロファイルを基に作成した (図4; WOA2005 のデータが無い 3500m 以深については、3500m における値を外挿した)。

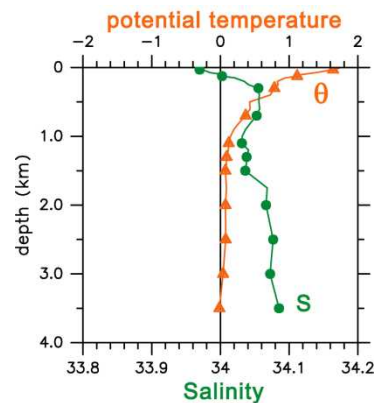


図4: WOA05 の東経 131.5 度、北緯 41.5 度における冬季ポテンシャル水温・塩分プロファイル (WOA05 の水温データはポテンシャル水温に変換)。

また、ピョートル大帝湾沖の大陸棚斜面上において実際に海水沈降が生じていたと推定されている 2001 年の初冬に、湾内では水温 $-1.8 \sim -1.2$ 、塩分 $34.2 \sim 34.7$ の非常に重い陸棚水が形成されていたことが観測されている (Labanov et al., 2002, Proc. 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 31-36.)。

そこで、モデルにおけるプリューム沈降初期のポテンシャル水温 θ_0 及び塩分 S_0 について、 $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.7)$, $(-1.2, 34.2)$ の 2 ケース (上述の -1.8 θ_0 -1.2 , 34.2 S_0 34.7 の範囲内で最も重い場合と最も軽い場合) を設定し、且つ、その他のモデルパラメータについても日本海北西部を想定した値に更に変更して実験を行うと、図5の結果を得る。すなわち、日本海北西部の海盆 (日本海盆) の水深はおよそ 3000m であることから、 $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.7)$ の高密度陸棚水 (赤色) は、海盆にまで十分に達するほどに高密度であったことが示唆される。一方、 $(\theta_0, S_0) = (-1.2, 34.2)$ の高密度陸棚水 (青色) は、海盆付近においてちょうど (負の) 浮力を失う程度の密度であったことが示唆される。

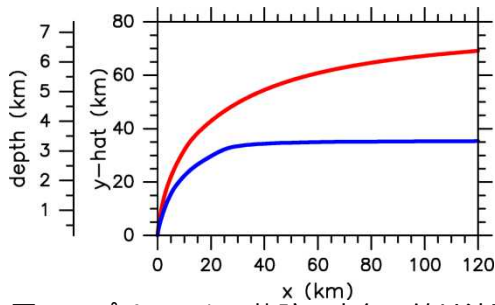


図 5: プリュームの軌跡。赤色の線は沈降初期のポテンシャル水温及び塩分が $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.7)$ のケース、青色の線は $(\theta_0, S_0) = (-1.2, 34.2)$ のケース。

さらに、こうした海水沈降に対するサーモバリック効果の寄与についても考察した。サーモバリック効果は海水の熱膨張率が圧力に依存することに起因して生じる現象で、相対的に低温で高密度な海水が相対的に高温で低密度な海水中に沈み込むときに、深度とともに負の浮力（沈み込み方向の力）が増加する効果として知られる。例えば、ほぼ結氷点（ ~ -2 ）に近い低温な高密度陸棚水が形成される南極のウェッデル海等では、海水の沈み込みに対してサーモバリック効果が極めて重要な役割を果たしていることが指摘されている（例えば、Killworth, 1977, Deep Sea Research, 24, 427-448）。

そこで、実験では上述の $(\theta_0, S_0) = (-1.2, 34.2)$ の範囲内においてサーモバリック効果が最も顕著に現れやすい $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.2)$ のケースについて、実験を追加した。プリュームの海水密度をこれまで同様に通常の海水状態方程式を用いて計算して実験を行うと（サーモバリック効果を正しく再現するケース）、図 6 の実線の結果を得る。この場合、水深 3500 ~ 4000m 付近で負の浮力を失っている。

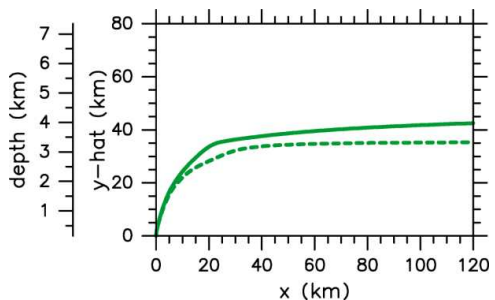


図 6: $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.2)$ のケースにおけるプリュームの軌跡。実線は通常の海水状態方程式を使用したケース（サーモバリック効果を正しく再現したケース）。破線は海水の

熱膨張率が圧力に依存しない状態方程式を使用したケース（サーモバリック効果を再現しないケース）。

次に、比較のために、海水の熱膨張率が圧力に依存しないような海水状態方程式を使用した実験を行った（サーモバリック効果を再現しないケース）。すなわち、この場合、以下のような海水状態方程式を使用する：

$$\rho(\theta, S, p) = \rho_0(\theta_r, S_r, p) \left\{ 1.0 + \alpha(\theta - \theta_r) + \epsilon(S - S_r) + \delta(\theta - \theta_r)^2 \right\}$$

ここで、 $\theta_r = 0.0$, $S_r = 34.0$, $\alpha = -5.3$, $\epsilon = 7.6$, $\delta = -5.5$ であり、海水の熱膨張率は圧力に依存しない。海面 ($p = 0$) において上記の式で得られる海水密度は、通常の海水状態方程式から計算される値とほぼ一致する。図 6 の破線に、サーモバリック効果を再現しないこのケースの結果を示す。水深 3000m 付近で負の浮力を失っており、先のケース（図 6 実線）と比較して、サーモバリック効果は海水の沈降を 20% 程促進している。この値は南極ウェッデル海等と比較すると小さいが、無視できるほどの大きさでもない。すなわち、海水生成に伴って比較的結氷点に近い低温な陸棚水が形成され、沈み込みの水深が 3000m を超えるほど深い日本海北西部域では、サーモバリック効果も海水沈降に対して一定の寄与を果たしていると言える。

現実の海底地形の上にこれまで得たプリュームの軌跡（図 5）を重ねると図 7 のようになる。この図では、高密度陸棚水が東経 132 度、北緯 42.5 度付近の大陸棚縁辺から沈降を開始することを想定している。Talley et al. (2003, Geophysical Research Letters, doi:10.1029/2002GL016451) では、2001 年初冬の東経 131.5 度の子午面上において、大陸棚斜面上を高密度陸棚水が沈降している様子を捉えているが（特に斜面下部において）、図 6 で推定されたプリュームの軌跡はそれと矛盾しない結果となっている。

多くの観測結果から（例えば、Tsunogai et al., 2002, Journal of Oceanography, 59, 685-693; Senju et al., 2002, Geophysical Research Letters, doi:10.1029/2001GL014093; Talley et al., 2003）、日本海北西部における海水沈降は、2000 年以前には長期に渡って生じていなかったことが示唆されている。そこで、米国環境予報センター/大気研究センター（NCEP/NCAR）の再解析データを使用してピョートル大帝湾沖における 1 月の海上気温を調べると（図 8）、2001 年初冬は該当領域でおおよそ 10 年振りの記録的な厳冬であったことが分かった。すなわち、この年は顕著に厳冬であったため、ピョートル大帝湾内で顕著に重い（日本海盆に

まで十分に沈降するほどに高密度な)陸棚水が形成されていた可能性が高い。

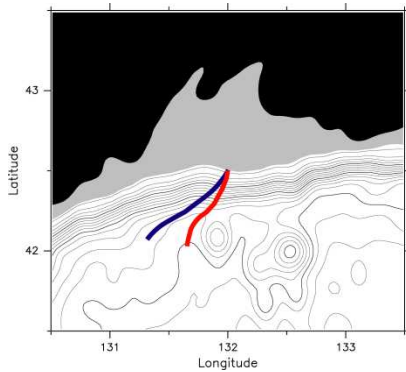


図 7：図 5 のプリューム軌跡を日本海北西部における現実的な地形 (ETOPO1 を水平約 10km のスケールで平滑化) に重ね合わせた結果。黒色の等値線は 100m 毎の水深を表す。赤色の線は沈降初期のポテンシャル水温及び塩分が $(\theta_0, S_0) = (-1.8, 34.7)$ のケース、青色の線は $(\theta_0, S_0) = (-1.2, 34.2)$ のケースにおけるプリュームの軌跡。

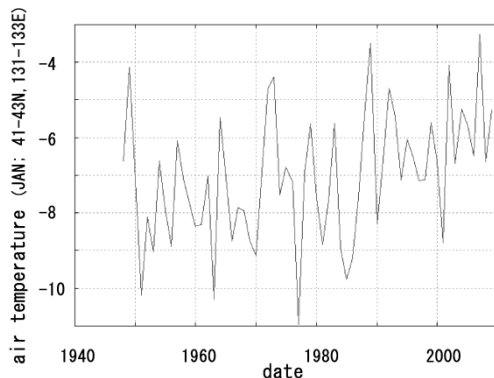


図 8：NCEP/NCAR 再解析データの東経 131-133 度、北緯 41-43 度における 1 月の平均海上気温 (過去約 50 年間の時系列図)。

(3) オホーツク海における海水沈降

数多くの観測結果から、オホーツク海においても、北西陸棚域で形成された高密度陸棚水が大陸棚斜面を沈降していることが知られている。そこで、オホーツク海西部域を対象にして、日本海の場合と同様にストリームチューブモデルによる検討を行った。

モデルの背景場は WOA 2005 における東経 144.5 度、北緯 54.5 度の冬季水温・塩分プロファイルを基に作成した (図 9)。また、プリューム沈降初期のポテンシャル水温 θ_0 及び塩分 S_0 については Ito et al. (2003, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2002JC001590)

を参考にして、 $(\theta_0, S_0) = (-1.68, 33.52)$ を与え、その他のパラメータについてもオホーツク海西部を想定した値に設定して実験を行った。

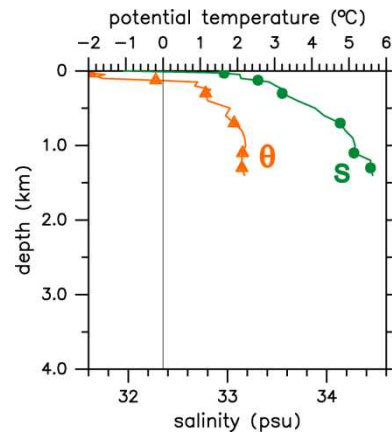


図 9：WOA05 の東経 144.5 度、北緯 54.5 度における冬季ポテンシャル水温・塩分プロファイル (WOA05 の水温データはポテンシャル水温に変換)。

図 10 にモデルで得られたプリュームの軌跡と現実の海底地形を重ねて示す。Fukamachi et al. (2004, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2003JC001906) では北西陸棚域で形成された陸棚水が北緯 54 度付近において、大陸棚斜面上の水深 400m 以深にまで沈降している様子が捉えられているが、モデルも同様の特性を示しており、水深が 500m に近くなると、(負の)浮力を失ってほぼ等深線に沿った流れとなる。

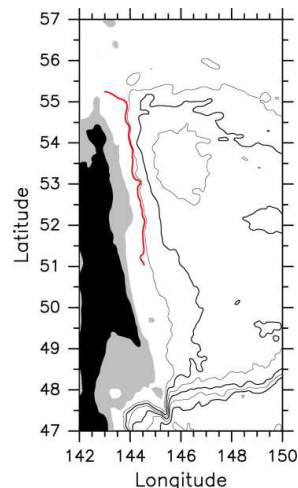
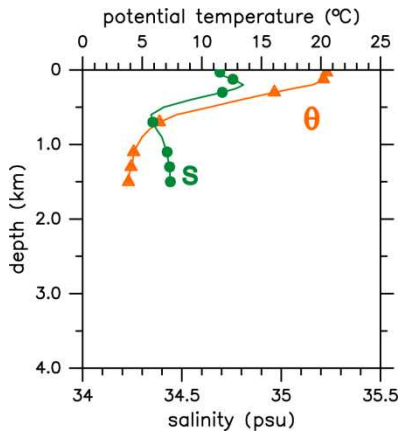


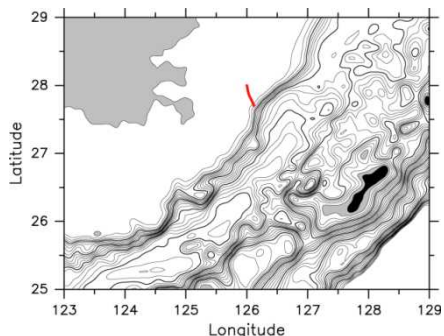
図 10：オホーツク海西部の海底地形 (ETOPO1 を水平約 10km のスケールで平滑化) と、モデルで計算されたプリュームの軌跡を重ね合わせた結果。黒色の等値線は 500m 毎の水深を、赤色の線はプリュームの軌跡を表す。灰色の影の領域は水深 100m 以浅の大陸棚を示す。

(4) 東シナ海における海水沈降

東シナ海では緩やかに傾斜した大陸棚に沿って陸棚水が沖側へ移流し、黒潮の中層に貫入していると考えられている (Tsunogai et al., 1999, Tellus, 51B, 701-712)。そこで、実験ではモデルの背景場に WOA 2005 にお



ける東経 126.5 度、北緯 27.5 度の冬季水温・塩分プロファイル (図 11) を課すとともに、プリューム沈降初期のポテンシャル水温 θ_0 及び塩分 S_0 には $(\theta_0, S_0) = (15.7, 34.42)$ を与えた (図 12)。東シナ海においては陸棚水



の持つ (負の) 浮力が小さいため、大陸棚を移流してきた陸棚水は、沈降開始後、大陸棚外縁付近においてすぐに浮力を失い、その軌跡は日本海やオホーツク海に比べて非常に短いものとなる。

図 11 : WOA05 の東経 126.5 度、北緯 27.5 度における冬季ポテンシャル水温・塩分プロファイル (WOA05 の水温データはポテンシャル水温に変換)。

図 12 : 東シナ海の海底地形 (ETOPO1 を水平約 10km のスケールで平滑化) と、モデルで計算されたプリュームの軌跡を重ね合わせた結果。黒色の等値線は 100m 毎の水深を、赤色の線はプリュームの軌跡を表す。灰色の影の領域は水深 100m 以浅の領域を示す。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

田中潔 (2008), 海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の力学. 九州大学応用力学研究所研究集会報告 19ME-S6 (第 9 回地球流体力学研究集会講義録「地球流体における波動と対流現象の力学」), 76-87, 査読無し.

田中潔 (2007), 海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の傾圧不安定. 第 56 回理論応用力学講演会講演論文集, 110, 査読無し.

Tanaka, K. (2006), Effects of the Earth's rotation and bottom slope on a density current descending a sloping bottom. Journal of Geophysical Research, 111, C11018, doi:10.1029/2006JC003677, 査読有り.

〔学会発表〕 (計 4 件)

田中潔, 日本海底層水の形成過程: ストリームチューブモデルによる検討. 2009 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学, 2009 年 4 月.

田中潔, 海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流. 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ 国際会議場, 2008 年 5 月.

田中潔, 海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の力学. 第 9 回地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」, 九州大学応用力学研究所, 2008 年 3 月.

田中潔, 海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の傾圧不安定. 第 56 回理論応用力学講演会, 日本学術会議, 2007 年 3 月.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

田中 潔 (KIYOSHI TANAKA)

東京大学・海洋研究所・助教

研究者番号 : 20345060

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し