

日本海北西部における底層水形成とその変動

田中 潔

東京大学 大気海洋研究所

1. はじめに

2000 年末から 2001 年初頭の冬季に（以下、2001 年冬季）、日本海北西部において底層水が形成されていたことが複数報告されている。例えば *Talley et al.* [2003] は、2001 年 2 月に低温・高酸素濃度の高密度水がピョートル大帝湾（Peter the Great Bay：以下 PGB、図 1）沖の大陸棚斜面をプリューム状に沈降している様子を捉えた。また、*Senjyu et al.* [2002]、*Kim et al.* [2002]、*Tsunogai et al.* [2003] は、その年の春・夏季にその沈降プリュームに起源を持つと推定される低温・高塩・高酸素・高クロロフィル濃度の底層水が、数 100m の厚さで大陸棚斜面の基部付近に広がっていたことを報告している。

域を示す。また、赤色の×印は後述の歴史的観測データの観点を示す。

日本海北西部での底層水形成に関して興味深いことの一つに、底層水の形成が必ずしも毎冬生じるのではなく、発生する年と発生しない年が有ることが挙げられる。特に近年は発生しない傾向が強く、地球温暖化との関係も指摘されている [*Gamo et al.*, 1986; *Gamo*, 1999]。しかしながら、2001 年冬季 PGB 周辺域では気温が非常に低かったため [*Kim et al.*, 2002; *Talley et al.*, 2003]、PGB で低温・高塩な高密度陸棚水が作られ [*Lobanov et al.*, 2002]、それが大陸棚斜面を沈降して冒頭で述べたような底層水の形成に至ったと考えられている。

そこで、本研究ではこうした日本海での底層水形成について、陸棚水が大陸棚斜面を沈降する過程とその経年変動を、力学的観点から調べた。すなわち、2001 年冬季に日本海で底層水が形成された理由を（対して、他の多くの年では形成されなかった理由を）、その年に PGB で高密度陸棚水が作られたことに（他の多くの年では作られなかったことに）帰結することが、力学的に見て妥当かどうかを検討した。

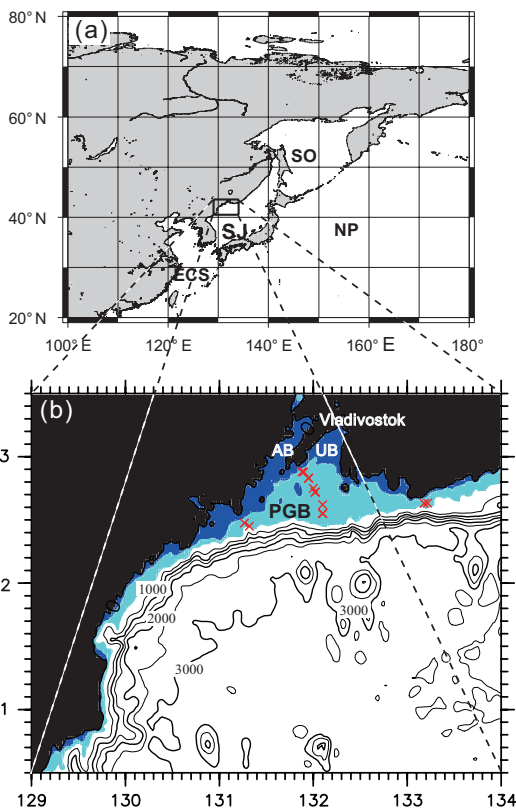


図 1. (a) 日本海とその周辺海域。頭字語 SJ, SO, ECS, NP はそれぞれ日本海 (the Sea of Japan)、オホーツク海 (the Sea of Okhotsk)、東シナ海 (the East China Sea)、北太平洋 (the North Pacific) を表す。(b) PGB 周辺の海底地形。頭字語 AB, UB はそれぞれ、Amurskiy Bay と Ussuriyskiy Bay を表す。等深線の間隔は 500 m。濃青と水色の部分はそれぞれ、50 m 以浅と 150 m 以浅の大陸棚

2. 陸棚水の経年変動

まず、World Ocean Database 2005（以下、WOD05） [*Boyer et al.*, 2006] に収録の歴史的観測データセットから、PGB 域の海底から 50 m 以内に含まれるデータを集め、得られた 14 個（1935～1985 年）についてを TS ダイアグラム上に示した（図 2 の丸印）。水温 (θ) は $-1.88 \leq \theta \leq 0.92$ °C の範囲内に（平均値： -0.47 °C）、塩分 (S) は $33.96 \leq S \leq 34.21$ の範囲内に有る（平均値： 34.02 ）。海水密度 (σ_θ) の平均は 27.34 で、海水密度の変動は塩分変動に強く影響を受けている。

一方、2001 年冬季については、WOD05 にはデータが無いものの（その後の WOD13 にも無い）、*Lobanov et al.* [2002] 及び *Talley et al.* [2003] の報告から、そのときの PGB の水温・塩分は $-1.2 \leq \theta \leq -0.12$ °C、 $34.2 \leq S \leq 34.7$ の範囲内に有り（図 2 の水色矩形域内）、平均的な海水密度は $\sigma_\theta = 27.69$ であったと推定される。

これらの解析から、データ数は必ずしも十分ではないものの、PGB の陸棚水は経年変動していることが分かる。また、予想通り、2001 年冬季にはそれ以前の年（WOD05 収録年）に比べて、顕著に重い陸

棚水が作られていたと推察される。両者（2001年冬季とWOD05のそれぞれの平均値）の海水密度差は0.35であり、その大きさはノルウェー海で生じている同様の海水沈降現象（地球規模の深層循環の始点）における沈降水と周囲海水の密度差に匹敵するほどである [Smith, 1975]。

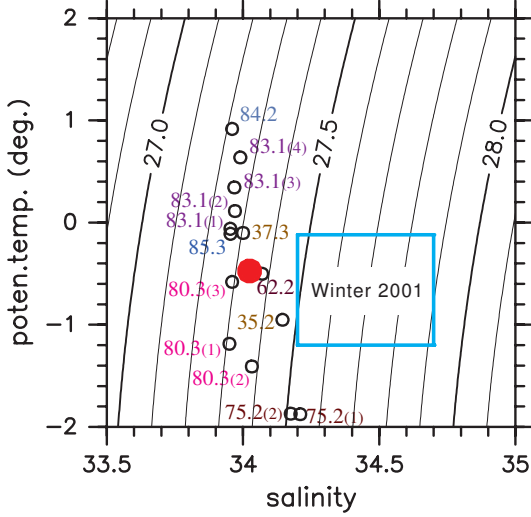


図 2. (a) PGB 陸棚水の TS ダイアグラム。白抜き丸印は WOD05 収録のデータ、赤丸はそれらの平均値を示す。白抜き丸印に添えられている数字は観測年月を、括弧内の数字はその月に複数回キャストがあったことを示す。一方、水色の矩形域は、Lobanov et al. [2002] 及び Talley et al. [2003] の報告から推定される 2001 年冬季の値。

3. 数値モデル実験

次に、前節で得られた陸棚水密度の経年変動が、大陸棚斜面上を沈降する過程に及ぼす影響を数値実験で調べる。ここではモデルとして、Smith [1975] が考案した streamtube モデルを使用する。これは図 3 のように、回転系において高密度水プリュームの断面が流路方向に相似的な形を維持したまま、一様斜面上を定常沈降することを仮定したモデルであり、支配方程式系（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：

$$\frac{dx}{d\xi} = \cos \phi \quad (1)$$

$$\frac{dy}{d\xi} = \sin \phi \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\xi} (AV) = E \quad (3)$$

$$\frac{d}{d\xi} (\rho AV) = \rho_e E \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\xi} (\rho AV^2) = (\rho - \rho_e) Ag \sin \eta \sin \phi - K \quad (5)$$

$$\rho \left(Vf \cos \eta + V^2 \frac{d\phi}{d\xi} \right) = (\rho - \rho_e) g \sin \eta \cos \phi. \quad (6)$$

座標系 $(x, y, z, \hat{y}, \xi, \phi)$ は図 3 の通り、 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

す。また、 $g (= 9.8 \text{ ms}^{-2})$, $f (= 9.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1})$, $\eta (= \arctan 0.09)$ はそれぞれ重力加速度、コリオリパラメータ、大陸棚斜面の傾斜度を表す。周囲海水の密度 $\rho_e(z)$ は、World Ocean Atlas 2005 [Locarnini et al., 2006; Antonov et al., 2006] の PGB 最寄り点プロファイルから与える。

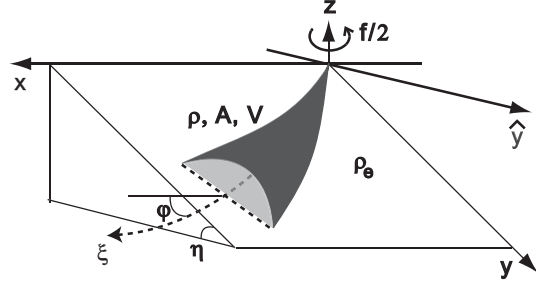


図 3. 数値モデル (streamtube モデル)。

海底摩擦及びエントレインメント（周囲海水の連行加入）の効果 (K 及び E) の与え方については Killworth [1977] の方法と同様とし、それらに係る定数は PGB 沖と同様の中緯度・急斜面上で有効性が検証された Hill et al. [1998] と同じ値を用いる。

図 4 に、初期条件として $V_0 = 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$, $A_0 = 10^6 \text{ m}^2$, $\phi_0 = 90^\circ$ (Lobanov et al. [2002], Fayman [2003], Navrotsky et al. [2004] を参考) を課したときの、陸棚水の沈降軌跡を示す。図 4(a) は WOD05 の陸棚水 (図 2 の丸印)、(b) は 2001 年冬季の陸棚水 (図 2 の水色矩形域) を起源に持つ場合を示している。先ず (a) を見ると、1980 年より前は 3000 m (PGB 沖の大陸棚斜面基部の深さに相当) 以深にまで時々沈降している一方、1980 年代以降はそうした深い沈降は生じていない。こうした特徴は、20 世紀になって日本海深層循環が弱化しているという Gamo et al. [1986] や Gamo [1999] の報告と一致する。そして、それらの平均値を有する陸棚水 ($\theta = -0.47^\circ \text{C}$, $S = 34.02$: 図 2 の赤丸; 以下、‘WOD 平均陸棚水’) は、せいぜい 1500 m 深までしか沈降しない。Talley et al. [2003] は 2001 年冬季の 1 年前 (2000 年冬季) にも PGB 沖で観測を実施し、そのときはプリュームが 1500 m 深までしか達していないことも報告しているが (彼女らの論文の Fig. 4a)、上記モデルの結果と併せて考えると、そうした 1500 m 深程度までの沈降は PGB 沖では一般的な事象であることが示唆される。

次に図 4(b) を見ると、2001 年冬季の陸棚水の大部分は 3000 m 以深に達するとともに、それらの平均値を有する陸棚水 ($\theta = -0.66^\circ \text{C}$, $S = 34.45$: 図 2 の水色矩形域の中心; 以下、‘2001 年冬季平均陸棚水’) も同様に 3000 m 以深に達しており、現実の 2001 年冬季における底層水形成を説明することが出来る。さらに、ノルウェー海等と比較して、日本海では相当早く斜面を沈降することが分かるが (実際、日本海で沈降角度 ϕ が 45° 以下になるのは 3000 m

深以降である)、こうした特徴は *Talley et al.* [2003] が観測で捉えた 2001 年冬季沈降プリュームの特徴、すなわちプリュームが一枚の鉛直断面図内(彼女らの論文の Fig. 4b)において大陸棚斜面のほぼ全域を覆っていたことと矛盾しない。

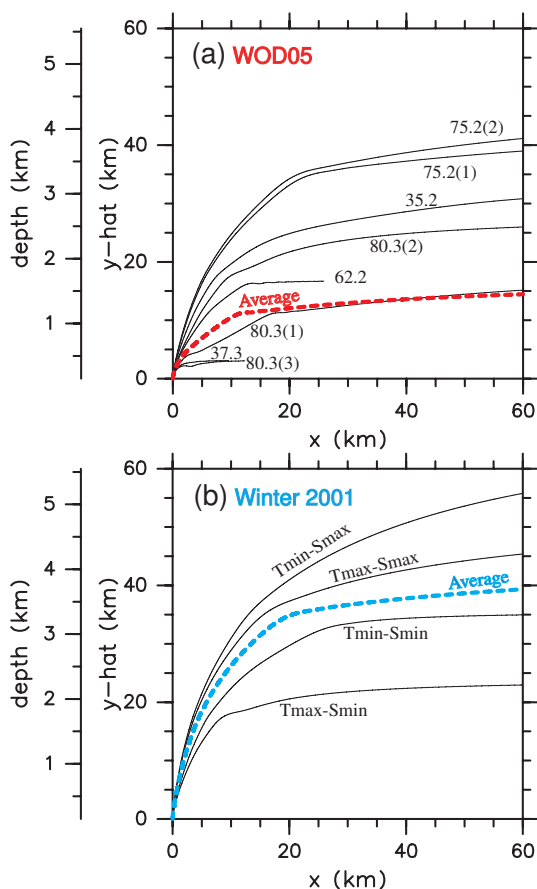


図 4. モデルで計算された陸棚水の沈降軌跡。PGB を流出する陸棚水が、(a) WOD05 の陸棚水の場合、(b) 2001 年冬季陸棚水の場合。(a) の実線は図 2 の白抜き丸印、(b) の実線は図 2 の矩形頂点に起源を持ち、破線はそれぞれの平均値(‘WOD 平均陸棚水’及び‘2001 年冬季平均陸棚水’)に起源を持つ。なお、(a) において 1983~1985 年のケースについては、沈降深度が 50 m 以浅のため図示していない。

南極海などの極域における海水沈降では、thermobaricity による効果(海水の熱膨張率が圧力に依存することに起因して海水沈降が加速される効果; 以下、サーモバリック効果)が重要な役割を果たしていることが良く知られている [Killworth, 1977; Akitomo, 1999a, 1999b]。そこで、日本海におけるサーモバリック効果についても、以下のように検討を加えた。

海水の近似状態方程式は一般に下記で与えられる:

$$\frac{\rho}{\rho_{ref}} = 1 + (\alpha_0 + \alpha_1 p)(\theta - \theta_{ref}) + \beta(S - S_{ref}) + \gamma(\theta - \theta_{ref})^2, \quad (7)$$

ここで、 $\theta_{ref}(= 0^\circ\text{C})$ 、 $S_{ref}(= 34.0)$ は基準水温と基準塩分を、 p は水圧を、 ρ_{ref} は基準密度を表す ($\theta =$

θ_{ref} , $S = S_{ref}$, $p = 0$)。各定数 $\alpha_0, \alpha_1, \beta, \gamma$ については、*Jackett et al.* [2006] によって精度の良い値が求められている(値省略)。式 (7) では thermobaricity が $\alpha_1 p$ で表されており、この項を有効/無効($\alpha_1 p \neq 0$ or $= 0$)にしてその差異を調べることで(図 4 では有効になっている)、日本海でのサーモバリック効果の大きさを見積もることが出来る。

そこで、前述の‘WOD 平均陸棚水’(図 4(a) 赤色破線)及び‘2001 年冬季平均陸棚水’(図 4(b) 水色破線)において、 $\alpha_1 p = 0$ として計算したところ、 $\alpha_1 p \neq 0$ の場合と比較して顕著な差が生じなかった(図省略)。すなわち、‘WOD 平均陸棚水’($\theta = -0.47^\circ\text{C}$)や‘2001 年冬季平均陸棚水’($\theta = -0.66^\circ\text{C}$)に対しては、サーモバリック効果は重要な役割を果たしていない。

しかしながら、一般にサーモバリック効果は沈降海水が低温なほどその効力が強化される。そのため、もし日本海上記陸棚水よりももっと低温な陸棚水が沈降することが有れば、どうなるであろうか?

実際、2001 年冬季には、PGB 湾奥の Amurskiy Bay や Ussuriyskiy Bay で結氷点に近い陸棚水が存在していた [Lobanov et al., 2002]。そこで、図 5 に結氷点水温 ($\theta = -1.8^\circ\text{C}$) を持つ海水を沈降させた結果を示す。初期塩分値を様々に変化させたみたところ ($S = 34.0 \sim 34.8$)、低塩なほどサーモバリック効果が顕著である: 例えば $S = 34.0$ の場合では、サーモバリック効果が働かない場合には沈降深度が 1500 m 程度であるのに対して(黒色破線)、サーモバリック効果が働く場合には沈降深度が 3000 m (PGB 沖大陸棚斜面の基部に相当)に達した(黒色実線)。すなわち、実際の日本海での底層水形成においても、南極海等で重要性が指摘されているサーモバリック効果が、状況によっては重要になる可能性が示唆された(例えば 2001 年よりも厳冬の年や、Amurskiy Bay, Ussuriyskiy Bay の陸棚水が PGB 内で変質せずに大陸棚斜面上へ直接流出するような場合等において)。

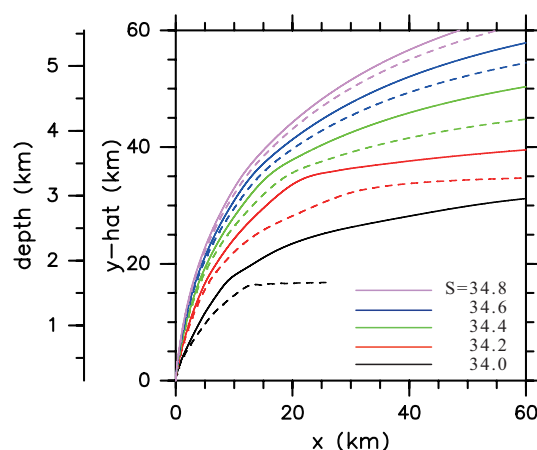


図 5. 結氷点水温 ($\theta = -1.8^\circ\text{C}$) を持つ陸棚水の沈降軌跡。実線はサーモバリック効果が有る場合、破線は無い場合。

4. まとめと議論

以上の考察をまとめると次のようになる。

- PGB 陸棚水の水温・塩分は経年的に変動している。
- PGB 陸棚水は、1980 年より以前は PGB 沖の大陸棚斜面基部 (3000 m 深) まで時々沈降していた。
- 1980 年代に入って海水沈降の傾向が弱まった。
- しかし、2001 年冬季に重い陸棚水が作られて、再び PGB 沖の大陸棚斜面基部にまで達する沈降が生じた。
- 深さ 3000 m (大陸棚斜面の基部) にまで沈降しない年であっても、1500 m 深程度までの沈降であれば一般的に生じている可能性が有る。
- 日本海においても (南極海等で重要性が指摘されている) サーモバリック効果が、状況によっては (結氷点近くの低温な陸棚水が沈降する場合) 重要な役割を果たす可能性が示唆された。

はじめに述べたように、2001 年冬季 PGB 周辺では気温が非常に低かった。Talley *et al.* [2003] はそれがシベリア高気圧やアリューシャン低気圧の強化に因ることを指摘している。また、Minobe *et al.* [2004] も日本海の水温経年変動がシベリア高気圧やアリューシャン低気圧に強く影響を受けることや、それが特に北極振動 (Arctic Oscillation; 以下 AO) と強く関係することなどを明らかにした。そこで本報の以降では、そうした PGB 周辺域の大気条件について、2001 年冬季の底層水形成の観点から既往の研究を少し補足する。

図 6(a) はウラジオストック気象台データ及び JRA25/JCDAS 再解析データに基づく、PGB の冬季地表気温の経年変化を示す。2001 年冬季に気温が顕著に低かったことが、両者からとも確認できる。一方、風速や風向については、2001 年冬季に特に目立った特徴は見られなかった (図省略)。

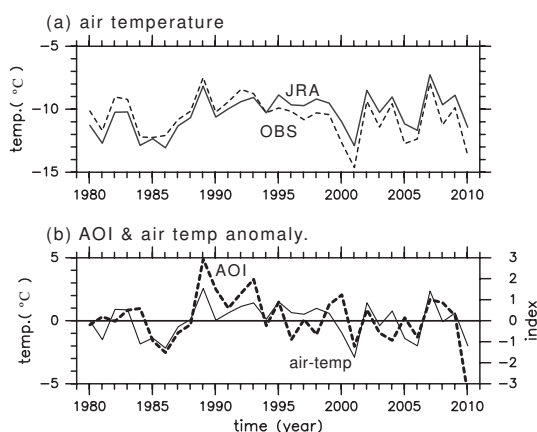


図 6. (a) PGB における冬季 (12-2 月平均値) 地表気温の経年変化。破線はウラジオストック気象台データ (World Meteorological Organization 提供)、実線は JRA25/JCDAS 再解析データ (気象庁・電力中央研究所

提供)。(b) JRA25/JCDAS 地表気温の偏差と AO 指数 (National Climate Data Center 提供) の経年変化。

次に、JRA25/JCDAS 地表気温 (偏差) と AO 指数を比較したところ (図 6(b))、両者の間に高い相関 ($r = 0.61$) が見られた: 例えば 2001 年冬季には気温偏差及び AO 指数とも強い負値を示す。一方、北太平洋域で良く知られているもう一つの気候変動、西太平洋 (Western Pacific) パターン指数と、地表気温の間の相関は高くなかった ($r = 0.34$, 図省略)。

そこで、北半球 2001 年冬季の地表気温と海面気圧について、平年値からの偏差分布を調べた。図 7(a) の地表気温の偏差分布を見ると、2001 年冬季 PGB での低温は、シベリア高地及びオホーツク海を覆っている強い低温域から強く影響を受けていたことが確認できる。そして、図 7(b) の海面気圧偏差を見ると、シベリア高気圧の北部とアリューシャン低気圧が強化されており、そらが寒気を北方から PGB 周辺に運んでいる。その結果、PGB で強い海面冷却が生じ、日本海での底層水形成に至ったと考えられる。

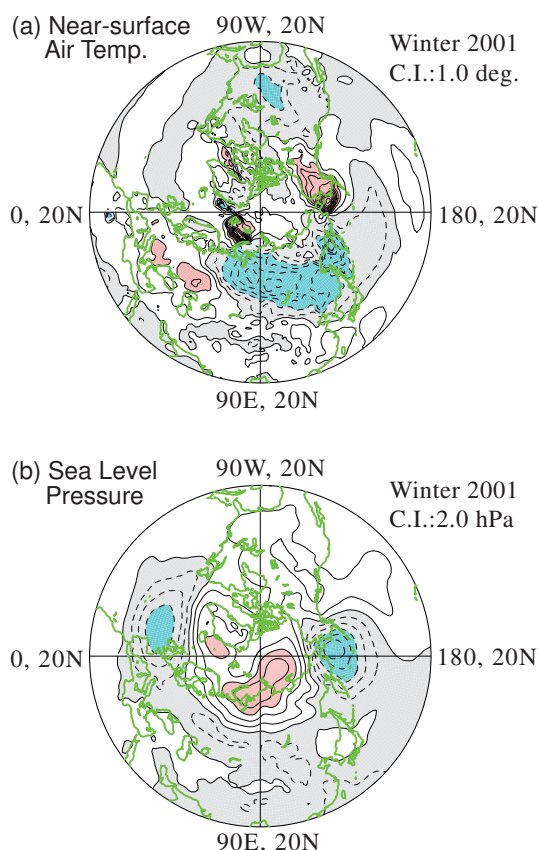


図 7. 北半球 2001 年冬季の (a) 地表気温と (b) 海面気圧 (JRA25/JCDAS) について、平年値 (1979 ~ 2010) からの偏差分布。等値線間隔は (a) 1.0 °C、(b) 2.0 hPa。破線は負値を示す。水色と赤色はそれぞれ、強い負値と強い正値を示す ((a) 2.0 °C 以上、(b) 6.0 hPa 以上)。

最後に、モデルの結果を PGB 周辺の海底地形図に重ねた結果を図 8 に示す。PGB を流出した陸棚水は南方に向けて斜面を沈降し始め、コリオリ力を受

けながらしだいに西方へ向かい、最終的には等深線にほぼ沿う流れとなる。‘WOD 平均陸棚水’による中程度の沈降の場合には（赤色線）、陸棚水の特質はPGB 西端付近でほぼ失われ、1500 m 深あたりから日本海深層水の中に貫入する。それに対して、‘2001 年冬季平均陸棚水’による深い沈降の場合には（水色線）、陸棚水は大陸棚斜面基部に達した後、日本海盆で新しい底層水を形成する。

本研究では、2001 年冬季に日本海で底層水が形成された理由を、その年に PGB で高密度陸棚水が作られたことに帰結することが力学的に見て妥当であることを初めて明らかにするとともに、そうした底層水形成のイメージや物理的解釈についても初めて提示したことに、大きな意義が有ると考える。

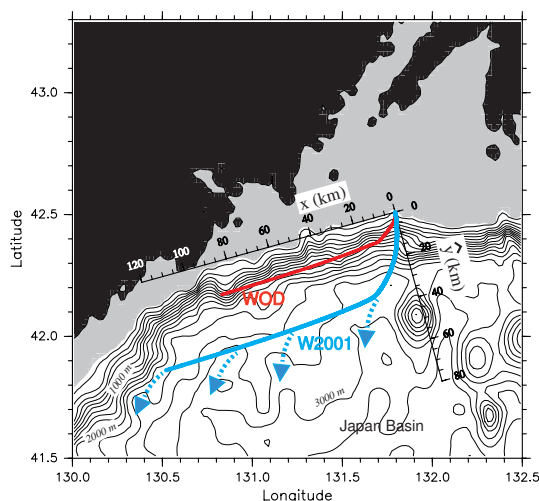


図 8. モデルの結果（プリユーム軌跡、図 4）を PGB 周辺の海底地形図に重ねた結果。赤色線は ‘WOD 平均陸棚水’、水色線は ‘2001 年冬季平均陸棚水’ の沈降を表す。等深線間隔は 200 m、灰色の部分は 150 m 以浅を表す。

参考文献

Akitomo, K., 1999: Open-ocean deep convection due to thermobaricity 1. Scaling argument. *J. Geophys. Res.*, **104**, 5225-5234.

Akitomo, K., 1999: Open-ocean deep convection due to thermobaricity 2. Numerical experiments. *J. Geophys. Res.*, **104**, 5235-5249.

Antonov, J. I., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov and H. E. Garcia, 2006: World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.

Boyer, T. P., J. I. Antonov, H. E. Garcia, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, M. T. Pitcher, O. K. Baranova, I. V. Smolyar, 2006: World Ocean Database 2005. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 190 pp.

Fayman, P. A., 2003: The currents modeling for peter the great bay on the base of FERHRI survey, 2001. *Pacific Oceanogr.*, **1**, 79-81.

Gamo, T., 1999: Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3137-3140.

Gamo, T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai and H. Tsubota, 1986: Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. *J. Mar. Res.*, **44**, 781-793.

Hill A.E., A. J. Souza, K. Jones, J. H. Simpson, G. I. Shapiro, R. McCandliss, H. Wilson and J. Leftley, 1998: The Malin cascade in winter 1996. *J. Mar. Res.*, **56**, 87-106.

Jackett, D. R., T. J. McDougall, R. Feistel, D. G. Wright, and S. M. Griffies, 2006: Algorithms for density, potential temperature, conservative temperature, and the freezing temperature of seawater. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **23**, 1709-1728.

Killworth P. D., 1977: Mixing on the Weddell Sea continental slope. *Deep-Sea Res.*, **24**, 427-448.

Kim, K.-R., G. Kim, K. Kim, V. Lobanov, V. Ponomarev, and A. Salyuk, 2002: A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000-2001: The case of the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (8), 1234, doi:10.1029/2001GL014498.

Lobanov, V., A. Salyuk, V. Ponomarev, L. Talley, K. Kim, K.-R. Kim, P. Tishchenko, A. Nedashkovskiy, G.-B. Kim, and S. Sagalaev, 2002: Renewal of bottom water in the Japan/East Sea. *Proc. 17th Int. Symp. Okhotsk Sea and Sea Ice*, Mombetsu, Japan, 31-36.

Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer and H. E. Garcia, 2006: World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.

Minobe, S., A. Sako, and M. Nakamura, 2004: Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J. Phy. Oceanogr.*, **34**, 2382-2397.

Navrotsky, V. V., I. D. Lozovatsky, E. P. Pavlova and H. J. S. Fernando, 2004: Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea). *Cont. Shelf Res.*, **24**, 1375-1395.

Senjyu, T., T. Aramaki, S. Otsuka, O. Togawa, M. Danchenkov, E. Karasev, and Y. Volkov, 2002: Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (7), 1149, doi:10.1029/2001GL014093.

Smith, P. C., 1975: A streamtube model for bottom boundary currents in the ocean. *Deep-Sea Res.*, **22**, 853-873.

Talley, L. D., V. Lobanov, V. Ponomarev, A. Salyuk, P. Tishchenko, I. Zhabin and S. Riser, 2003: Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (4), 1159, doi:10.1029/2002GL016451.

Tsunogai, S., K. Kawada, S. Watanabe, and T. Aramaki, 2003: CFC Indicating Renewal of the Japan Sea Deep Water in Winter 2000-2001. *J. Oceanogr.*, **59**, 685-693.