

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340139

研究課題名（和文） 深海乱流の直接計測と化学トレーサーによる日本海深層循環の解明

研究課題名（英文） Study on deep circulation of the Japan Sea by direct measurement of deep water turbulence and chemical tracer

研究代表者

松野 健 (MATSUNO TAKESHI)・教授

九州大学・応用力学研究所

研究者番号：10209588

研究成果の概要（和文）：深海乱流計を用いて初めて日本海深層までの乱流強度の測定を行い、乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  は、海底付近では  $3\sim 5\times 10^{-11}$  ( $\text{W kg}^{-1}$ ) 程度の小さな値であることを示した。これは、日本海底層水（JSBW）の特徴的な構造が、海底付近に強い混合があるためではないことを示すものである。また、鉛直1次元モデルにより、水温一様な JSBW がその構造を維持したまま徐々に上昇している現象が、地殻熱流量による加熱と沈み込み水による間欠的な冷却によって説明できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Direct measurement of turbulence intensity to the bottom water in the Japan Sea was carried out for the first time using Deep Water Microstructure Profiler (VMP5500), resulting in small values of turbulent energy dissipation rate about  $3\sim 5\times 10^{-11}$  ( $\text{W kg}^{-1}$ ). This suggests that there is no intensified turbulence in the bottom layer. Using 1-dimensional model, the characteristics of the Japan Sea Bottom Water could be reproduced by terrestrial heat and intermittent supply of cold water originated by deep sinking.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,500,000円	2,550,000円	11,050,000円
2011年度	3,300,000円	990,000円	4,290,000円
2012年度	3,000,000円	900,000円	3,900,000円
年度			
年度			
総計	14,800,000円	4,440,000円	19,240,000円

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：日本海底層水、乱流エネルギー散逸率、深海乱流計、沈み込む水、地殻熱流量、日本海固有水、溶存酸素、鉛直1次元モデル

### 1. 研究開始当初の背景

日本海は3000mを超える深い海盆を持つ一方、水深200m以浅の対馬、津軽、宗谷の主に3つの海峡で外海とつながる半閉鎖的縁辺海で、冬季の冷却によって深層水が形成される一方200m以深の部分が外洋から孤立していることもあって、特殊な鉛直構造を持っていることが知られていた。

特に日本海盆の底層では厚さ1000mにも達するポテンシャル水温(PT)一様層が常時観測されており、近年そのPTは徐々に上昇していることが報告されている。この水温上昇は近年の温暖化によって冷水の沈み込みが抑制されていることに起因するものと考えられており、比較的強い鉛直混合のある海底境界層に上層からの熱が伝わることによっ

て PT が上昇しているという解釈が一般的であった。

一方、冬季による冷却が弱くなって十分に深くまで沈み込めなくなった水は、底層より浅い中・深層にまでしか達しない傾向が強まり、中・深層に新しい沈み込み水が増えることが示唆されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、PT 一様な日本海底層水 (JSBW) の鉛直構造の維持過程と長期的水温上昇に関する上記の仮説を確認するため、実際に JSBW の中でそれより浅い層に比較して強い乱流混合があるかどうかを、深層の乱流強度を直接計測すること、それに基づいて、JSBW の形成・維持機構また PT が長期的に上昇している理由を明らかにすることである。また、底層まで沈み込めなくなった水がどのように日本海全体に広がっているかを化学的手法から明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

深層での乱流計測などは、2010年11月および2011年8月の海洋研究開発機構の学術研究船淡青丸の研究航海 KT-10-27 および KT-11-19 により実施された。調査海域は津軽海峡の西側の日本海盆の東部で、水深は3200から3700m程度であった。底層までの微細構造の計測には深海乱流計 VMP5500 を用いた。KT-10-27 では、3測点で5casts、KT-11-19 では3測点6castsの測定を行った。ただ、このうち2011年の1測点2castsは計測器の設定不良により有効なデータが得られなかった。

VMP5500 の計測では、到達深度を設定したのち、回収用のケーブルなど一切なしで、海面からフリーフォールさせる。下降速度  $0.5\text{--}0.6(\text{ms}^{-1})$  で、流速、水温、塩分、圧力の微細構造を計測しながら所定の深度に達したのち錘を自動的に切り離し、浮上する。浮上速度は下降速度より速く、計測深度が3500m程度の場合、投入後およそ3時間10分程度で海面に浮上した。海面浮上後ビーコンにより電波を発信するので、船上のアンテナにより浮上方向を確認し、近づいて回収した。

通常、乱流計測は変動が大きいので、可能な限り、1測点で複数回の計測を行う。今回の観測でも原則として1測点2回の計測を行った。1回目の cast の回収後、データの取り出し、再設定を行って、回収後2時間ないし3時間後に2回目の投入を行った。VMP5500 による計測中、あるいは、1回目回収と2回目投入の間に、CTD/LADCP による観測、あるいは TurboMAP による上層 (500m 以浅) の乱流計測を行った。

CTD による観測では、化学成分の分析および塩分と溶存酸素 (DO) のキャリブレーション

のための採水を行うとともに、ファインスケールの流速分布を計測するため、LADCP

(Lowered ADCP) による観測を同時に行った。

また、耐圧が500mの微細構造プロファイラー TurboMAP を用いて、深度500mまでの乱流計測を時間の許す限り繰り返した。結果的に1測点3castsの微細構造の鉛直分布が得られた。

## 4. 研究成果

### (1) 深海乱流計測による結果

KT-10-27 および KT-11-19 で得られた乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  は前者で500m以深、後者で700m以深で  $10^{-10}(\text{W kg}^{-1})$  以下の値であり、深さとともに徐々に小さくなっていく傾向がすべての計測から得られ、深度3000m以深では  $3\text{--}5 \times 10^{-11}$  と非常に小さな値になっていた。深層での乱流強度は非常に弱かったと考えられる。

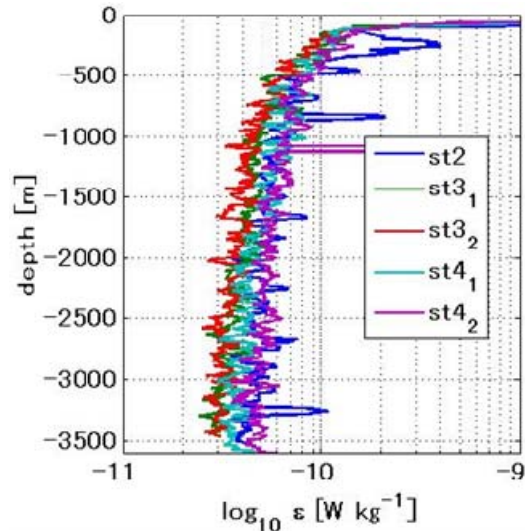


図1 KT-10-27 で得られた乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  の鉛直分布

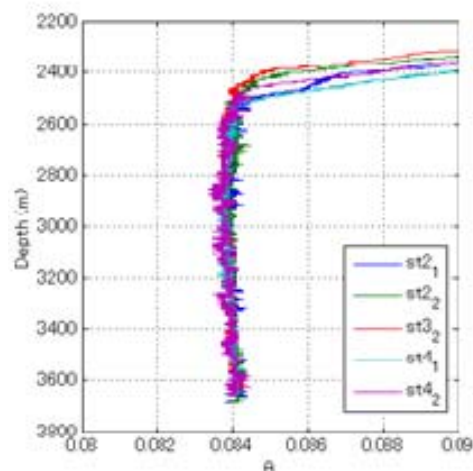


図2 KT-10-27 で観測された底層付近の PT の鉛直分布 (横軸は非常に拡大されている)

一方CTDによる水温・塩分の鉛直分布からは、2500m以浅では弱いながらも若干の成層が見られるのに対し、それ以深ではほぼ様な分布になっていることが確認され、1000m程度の厚さを持つJSBWが恒常的に形成されていることを示すものである。しかし、上述のように、2500mを境としてそれ以深で乱流が強くなる傾向は見られなかった。これは、JSBWが強い鉛直混合によって維持されているものではないことを強く示唆するものである。

#### (2) LADCPによる流速シアの鉛直分布

CTDと共に降下させたLADCPによる流速分布の解析により、全層に亘って鉛直波数の小さいシアを持った水平流が見られること、シア自体は底層で若干大きくなる傾向にあることが明らかになった。

LADCPによるファインスケールの流速シアと $\varepsilon$ を用いて鉛直渦粘性係数を推定した。その値は3000m以深では $10^{-6}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ 程度になっており、分子粘性より若干大きい程度の非常に小さい値であることがわかった。このことも、JSBWで乱流が強くないことを表すものである。

#### (3) JSBWの形成機構とPT上昇の理由

日本海底層における特殊な鉛直構造と、その構造を維持したままポテンシャル水温が長期的に上昇するメカニズムについて検討を行った。当初予想した底層における強い鉛直混合が、KT-10-27、KT-11-19の2回の航海において観測されなかったため、上層からの熱が底層を暖めているというシナリオでは説明できないことが明らかになった。そこで、

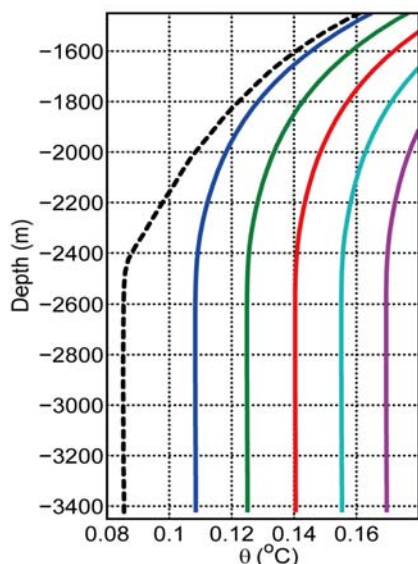


図3 鉛直1次元モデルによるJSBWの再現実験、点線は初期分布、カラーは100年ごとの鉛直分布。青0.02°C/100年は観測値にほぼ対応している。

底層の水温を上昇させる要因として、海底面からの地殻熱流量を考慮し、鉛直1次元モデルによる数値実験を行った。過去の地殻熱流量のデータを用いて、緩やかな加熱に基づいた底層水温の上昇を見積もると、1000mに及ぶ一様層を維持しながら水温が上昇することが確かめられた。しかしその上昇幅は実際に観測されている水温上昇に比べて大きく、底層には何らかの冷却の影響があることが示唆された。それは、本来、日本海深層水を形成している冬季の冷却が効いていることを示すものである。観測された鉛直拡散係数と既存の地殻熱流量のデータを用い、適当な冷却を底層に加えたモデル実験を行うことによって、密度様な底層水の水温が緩やかに上昇している現在の状況を再現することができた。

#### (4) 沈み込み水の分布

近年は底層までの沈み込みが限定的であることが指摘されている。しかし冬季にはある程度の冷却によって日本海北西部の表層水の沈み込みは起こっていると考えられる。その水が日本海にどのように広がっているかを明らかにするため、上述の淡青丸による観測航海のほか、より広範囲で観測が行われた白鳳丸のKH-10-02によるデータを用い、1000mより浅い水塊について化学成分の分析による水塊の起源の推定を行った。希土類パターンの分析から、日本海東部海域でしばしば観測される中・深層におけるD0極大を示す水が表層水の特徴を持っていることが示され、表層水の混合比が見積もられた。このことは、沈み込み水の日本海東部での分布をD0から推測できることを示すものである。

KH-10-2による広範囲をカバーするD0の鉛直分布測定結果を用いて、相対的に高D0の水が日本海盆東部に断片的に現れていることが示され、沈み込み水は、その形成域から舌状に広がっているのではなく、間欠的に沈み込んだ水がパッチ状に分布していることが示唆された。

#### 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6件)

1. Yanlin Cui and Tomoharu Senjyu, Box model analysis of the long-term dissolved oxygen variation in the Japan Sea Proper Water, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 143, 1-6, 2012.09. (査読無)
2. Yanlin Cui and Tomoharu Senjyu, Has the upper portion of the Japan Sea Proper

Water formation really been enhancing?, Journal of Oceanography, 68, 4, 593-598, 2012. 08. (査読有)

3. Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa: Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model, Journal of Oceanography, 68(2), 285-294, DOI:10.1007/s10872-011-0095-3, 2012 (査読有)
4. Nagai, T. and T. Hibiya: The processes of semi-enclosed basin-ocean water exchange across a tidal mixing zone, Journal of Oceanography, 67(4), 533-539, DOI:10.1007/s10872-011-0045-0, 2011 (査読有)
5. 千手智晴・大慶則之, 日本海能登半島沖海域の海洋構造と対馬海流モニタリングに対する重要性, 海洋気象学会, 海と空, 87, 2, 33-48, 2012. 03. (査読有)
6. Sasaki, S., J. Zhang, H. Narita, T. Senjyu, T. Gamo, Mapping the spatial distribution of advected intermediate/deep water in the eastern Japan Sea Basin using dissolved oxygen, Proc. 5th PEACE/CREAMS-AP International Ocean Workshop, 2010, 157-160. (査読無)

[学会発表] (計 20 件)

1. 千手智晴: 小さな大洋-日本海のふしぎ, 2013 年度日本海洋学会春季大会シンポジウム「日本海および周辺海域でいま進みつつある環境の変化: その驚くべき実態に迫る!」, 平成 25 年 3 月 25 日, 東京海洋大学.
2. 千手智晴, 荒巻能史, 田中伸一, 森康輔: 日本海盆-大和海盆境界域における長期深海係留観測, 2013 年度日本海洋学会春季大会, 平成 25 年 3 月, 東京海洋大学
3. Senjyu, T., T. Aramaki, Y. Isoda and S. Tanaka: Variability of the benthic front between the Japan and Yamato Basins in the Japan Sea, The 6th Program of the East Asian Cooperative Experiments (PEACE) Ocean Science Workshop and the 9th Korea-Japan Workshop on Ocean Color (KJWOC), 2012.11, Nagoya University.
4. Wang, B., T-K. Kim, J-H. Yoon, N. Furuichi, and T. Hibiya: Application of the improved vertical mixing scheme to the modeling of the Japan Sea under traveling typhoons, 2012 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 24 年 9 月 15 日, 東海大学清水校舎, 静岡.
5. 遠藤 貴洋, 松野 健, 千手 智晴: 日本海底層水の昇温過程に関する数値実験, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2012. 07. 06, 北海道大学低温科学研究所
6. 千手智晴, 荒巻能史, 田中伸一: 日本海深層における溶存酸素量の長期係留観測, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 平成 24 年 3 月, つくば市.
7. 古市 尚基, 丹羽 淑博, 日比谷 紀之: 様々な外力場に対する海洋混合層モデルの有効性の検証 - LES 実験の結果から, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 平成 24 年 3 月 28 日, 筑波大学, つくば市.
8. 星野 陽介, 日比谷 紀之: 海峡を通じた二層交換過程に及ぼす潮汐流の役割に関する数値的考察, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 平成 24 年 3 月 27 日, 筑波大学, つくば市.
9. 日比谷 紀之: LES による海洋微物理過程の高精度パラメタリゼーション, 21 世紀気候変動予測革新プログラム平成 23 年度成果発表会, 平成 24 年 2 月 28 日, 一橋記念講堂, 東京,
10. 遠藤 貴洋, RIAMOM への semi-prognostic 法の導入-日本海深層循環の数値シミュレーションへの適用に向けて-, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 平成 23 年 11 月 9 日, 北海道大学低温科学研究所
11. 星野 陽介, 日比谷 紀之: 海峡を通じた二層交換流の調節過程に関する数値的考察, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日市.
12. 千手智晴, 熊本雄一郎, 張勁, 田中伸一, 荒巻能史: 日本海底層における海水交換-日本海盆と大和海盆, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日市.
13. 佐々木俊次, 張勁, 千手智晴, 松野健, 溶存酸素・希土類元素分布からみる日本海海水循環と水塊構造の詳細, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日市.
14. 西村誠次, 松野健, 千手智晴, 堤英輔, 日比谷紀之, 長澤真樹, 佐々木俊次, 日本海底層における一様層の形成・維持過程, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日市.
15. 古市 尚基, 丹羽 淑博, 日比谷 紀之: Large Eddy Simulation に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日市.
16. Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa:

Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using Large Eddy Simulations, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2011, June 29, 2011, Melbourne, Australia.

17. 古市 尚基, 日比谷 紀之, 丹羽 淑博: 風起源の近慣性振動に関する LES とその結果に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 日本地球惑星科学連合 2011 年度大会, 平成 23 年 5 月 25 日, 幕張メッセ, 千葉.
18. 日比谷 紀之, 海のダイナミクス - その謎に挑む, 愛媛大学スーパーサイエンス特別コース講演会 (招待講演), 2011 年 2 月 10 日, 愛媛大学理学部
19. Endoh, T., T. Matsuno, and Y. Yoshikawa, Fine-scale vertical shear of horizontal velocity estimated using an accelerometer mounted on the TurboMAP, Workshop on the vertical processes in the shelf region of the East China Sea, 2011 年 2 月 22 日, 九州大学応用力学研究所
20. Sasaki, S., J. Zhang, H. Narita, T. Senjyu, T. Gamo, Mapping the spatial distribution of advected intermediate/deep water in the eastern Japan Sea Basin using dissolved oxygen, 5th PEACE/CREAMS-AP International Ocean Workshop, 2010 年 9 月 12 日, 江陵 (韓国).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松野 健 (MATSUNO TAKESHI)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 10209588

### (2) 研究分担者

日比谷 紀之 (HIBIYA TOSHIYUKI)  
東京大学大学院・理学系研究科・教授  
研究者番号: 80192714

張 勁 (CHO KEI)  
富山大学大学院・理工学研究部 (理学)・教授

研究者番号: 20301822

千手 智晴 (SENJYU TOMOHARU)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 60335982

遠藤 貴洋 (ENDO TAKAHIRO)  
九州大学・応用力学研究所・学術研究員  
研究者番号: 10422362

### (3) 連携研究者

( )