

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247076

研究課題名(和文) 表層と中層を繋ぐ北太平洋の子午面循環：その三次元構造と変動メカニズムの新たな描像

研究課題名(英文) Overturning circulation that connects the surface and intermediate layers in the North Pacific: A new perspective on its three-dimensional structure and variability

研究代表者

三寺 史夫 (Mitsudera, Humio)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：20360943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：オホーツク海で沈み込み北太平洋の中層を通気する北太平洋の子午面循環の解明を目指した。子午面循環の強度を決めるのは高緯度域の塩分であるが、北太平洋では低緯度からの高塩水供給経路は未解明であった。本研究では、北太平洋亜熱帯循環と亜寒帯循環の境界域である移行領域を流れる準定常ジェットに注目し、低緯度から亜寒帯への塩輸送過程を明らかにした。理論、数値実験、漂流ブイ観測から、準定常ジェットの流路は、たかだか500m程度の海底地形によって制御されていることが分かった。黒潮起源の高塩水は、この準定常ジェットを通して亜寒帯循環に侵入する。西風が強くなると亜寒帯への塩輸送が大きくなり、子午面循環は強化される。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to elucidate the overturning circulation originating in the Sea of Okhotsk that ventilates the intermediate layer of the North Pacific Ocean, where strength of the overturn is determined by salinity. However, our knowledge regarding salt transport pathways from low latitude to high latitude was still lacking. Here we present a salt pathway paying attention to the quasi-stationary jets in the transition region between the subtropical and subarctic gyres. The quasi-stationary jets flow northeastward regulated by bottom topography whose height is only 500 m although the ocean is deep. We have elucidated this process using theoretical models, numerical experiments and drifting buoy measurements. Numerical and chemical tracer analyses show that the saline Kuroshio waters are transported to the subarctic gyre through the quasi-stationary jets. The overturn is likely strengthened when the westerly wind is strengthened because of increase of the northward salt flux.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋科学 北太平洋 子午面循環 準定常ジェット 高塩水輸送 物質輸送 海底地形

### 1. 研究開始当初の背景

海洋の表層と中深層をつなぐ子午面循環は膨大な熱・塩・物質を輸送し、地球規模の気候変動や物質循環の基盤となっている。本研究では、オホーツク海で沈み込み北太平洋の中層(300~800m)を通気する北太平洋の子午面循環における三次元構造、およびその変動機構の解明を目指す。この子午面循環の下層の経路は、オホーツク海を起点とする北太平洋中層循環である。一方、低緯度からオホーツク海に至る表層の高塩水供給経路は未解明である。本研究では、亜熱帯循環と亜寒帯循環の海水交換過程に注目し、表層の高塩水供給システムを明らかにする。特に

- ・高塩水がどのような経路を通過して亜熱帯から亜寒帯に運ばれ、表層塩分を決めるのか。
- ・この高塩水供給経路はどのようなメカニズムで変動するのか。

という観点から、研究を進める。

中でも北海道東方の準定常ジェット(Isoguchi et al., 2006)による黒潮水輸送過程に注目する。準定常ジェットは、亜熱帯と亜寒帯の境界域である移行領域を北東に流れる海流であり、海洋学的・気象学的・生物学的に非常に重要である。

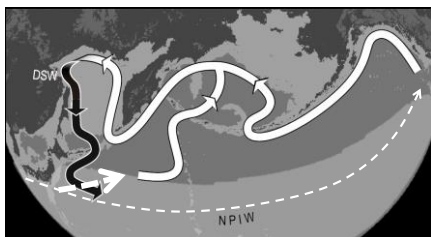


図1 表層と中層を繋ぐ北太平洋子午面循環の模式図。白が表層、黒が中層経路を表す。破線矢印が本研究課題である亜熱帯から亜寒帯への高塩水供給路を示す。Uehara et al. (2014)を改変。

### 2. 研究の目的

亜熱帯から亜寒帯への高塩水輸送経路を明らかにし、表層と中層をつなぐ北太平洋子午面循環を解明することを、本研究の目的とする。具体的には、以下のとおりである。

#### (1) 準定常ジェットの力学の解明

黒潮水運ぶ準定常ジェット(図2)の形成メカニズムを明らかにする。そのため傾圧ロスビー波の特性曲線を利用し、準定常ジェットの理論を構築する。また、亜表層に抵抗盤をつけた漂流ブイを用いた観測等により、準定常ジェットによる黒潮水侵入経路を計測する。

#### (2) 塩や栄養物質などトレーサー輸送経路の解明

研究船による水温、塩分、化学トレーサーの観測、および、海洋データ同化や高解像度海洋モデル出力の解析で得た情報を組み合わせることによって、亜熱帯-亜寒帯間の高塩水供給システムを明らかにする。

#### (3) 子午面循環の変動メカニズムの解明

風に対する循環の応答に注目する。さらに、

この高塩水供給と降雨等淡水供給とのせめぎあいでは生じる表層塩分の変動メカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

- ・亜熱帯と亜寒帯をつなぐ準定常ジェットに注目し、その形成要因を理論的に導く。海洋再解析データの流速場をロスビー波の伝播特性の観点から解析するとともに、理想化されたモデル設定による数値実験を実施する。
- ・理論を基礎に、漂流ブイ観測および現場観測(水温・塩分・化学トレーサー解析)により黒潮表層水の侵入経路を計測する。
- ・海洋データ同化結果の解析や高解像度モデルを用いた数値実験・トレーサー実験などを実施し、渦輸送を含めた表層経路の力学過程を明らかにする。
- ・子午面循環の変動メカニズムを解明するため、データ解析および数値実験を行って風応力や淡水供給の変化に対する子午面循環の感度を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 準定常ジェットの力学

##### ① 準定常ジェットの形成メカニズム

黒潮水運ぶ準定常ジェット(Wagawa et al., 2014; Kida et al., 2015)の形成メカニズム解明のため、FRA-JCOPE2再解析データを用いた。このデータは海洋研究開発機構によって作成されたもので、対象海域の流れの、最も現実的で解像度が高いもののひとつである。海洋数値モデルに、海面高度、海面水温、水温塩分鉛直分布の観測データを同化して作成されている。本研究では1993~2009年の平均場に焦点をあて、流れ場の分布と密度分布を検討した。

流速分布(図2)を見ると、北海道東方にある海膨の東側斜面に沿って北東向き準定常ジェットが存在することが分かる。それが亜寒帯前線に達すると、東向流に加え地形に沿って北へ分岐する流れが出現する。このような準定常ジェットとそこからさらに北上する流れが黒潮の高塩水を輸送しており、西部亜寒帯循環への高塩水供給を示す図1(太い破線矢印)の基礎となっている。

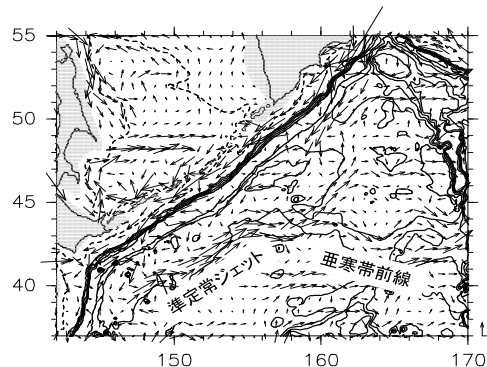


図2 亜表層(26.6σ<sub>θ</sub>)の流速分布。43°N、158°E近傍で亜寒帯前線と北上流に分岐する。実線は海底地形のコンター。

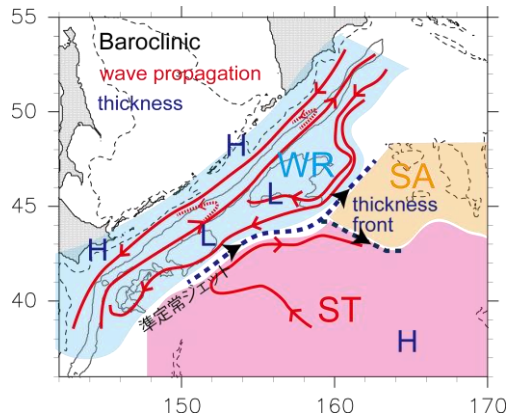


図3 傾圧場の模式図。赤の矢印は傾圧ロスビー波の進行を表す。青字のH/Lは上層層厚が厚い／薄いところを表す。

再解析データに対して2層準地衡理論に基づく順圧（鉛直平均流）・傾圧（等密度面深度分布）それぞれの特性曲線（順圧・傾圧それぞれのロスビー長波の伝播経路）を適用した。順圧の特性曲線は、海膨の東方では東西にのびていたが、海膨上では閉じたものとなった。このことは、大洋内部からの順圧ロスビー波が海膨を越えられず海膨東縁に順圧の西岸境界流ができ得ること、また海膨上に時計回り順圧流の形成を促すこと、を示す。

傾圧の特性曲線は、その順圧流に大きく支配されていた。その特徴を、傾圧の平均場と併せて図3に模式的に示す。SA/STで示す領域は、亜寒帯／亜熱帯風成循環の特徴を示し、その上層層厚は比較的厚い。WRで示す領域は、海底地形に沿う順圧流の影響を強く受け、その上層層厚は薄い。その薄い層厚は、亜寒帯西岸の高緯度から特性曲線に沿って伝播していることがわかった。この領域の傾圧の低気圧性循環の縁に沿って親潮の海流系が形成される。そのうち亜寒帯前線は、亜寒帯の薄い層厚と亜熱帯の厚い層厚がぶつかるあたりにあたるため、準定常的な海洋内部のジェットが形成されることが明らかとなった(Mitsudera et al., 投稿中)。

## ② 理想的な2層モデルによる数値実験

上記の解析結果を理想的な数値実験によりさらに探求した(図4)。矩形の海(深さ5500m)に500mの高さの海膨(破線部分)がある2層モデル(一層目の層厚500m)を設定した。渦を分解できるよう水平分解能は $1/12^\circ$ としている。亜熱帯・亜寒帯循環を模したdouble gyreが形成されるような風を吹かせた。結果の平均流を見ると、海膨の東に強い流れ(準定常ジェット)が形成され、たかだか500mの高さの海膨が表層でジェットを作ることが確かめられた。海膨上(太点線に囲まれた領域)には高気圧性の順圧流が形成されて(等値線)、この順圧流のため、1層目の層厚で見ると、亜寒帯側の薄い層厚が亜熱帯側に流され(陰影)、強いフロントが形成される。

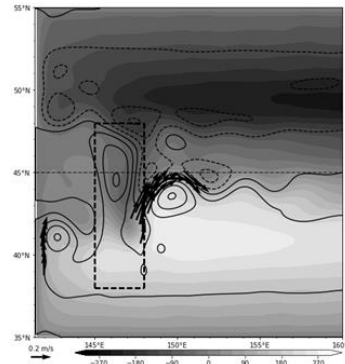


図4 40年間計算した理想的数値実験の最後の10年間の平均。陰影は一層目の層厚の初期値からのアノマリー(m)。ベクトルは1層目で0.2m/sより早い流速。等値線は順圧流(間隔10 Sv)。太い点線は海膨の存在する範囲。細点線は風応力のカールが0で、亜熱帯循環と亜寒帯循環の境界。

それに地衡流的に対応した流れ(ベクトル)が準定常ジェットである。この結果は、順圧流を考慮した傾圧ロスビー波の特性曲線によって良く説明できる。以上のように、観測や海洋再解析 JCOPE から得られた結果を数値モデルで明快にサポートする結果を得ることができた。また一連の実験を行うことで、海膨上の高気圧性循環は、double-gyreの一部ではなく、渦の働きによって渦位が一様化する効果として発生することを明らかにした。また、500mは順圧流を作りやすい高さであることが示唆された(Miyama et al., 投稿中)。

## ③ 準定常ジェットの漂流ブイと粒子追跡による解析

ここでは、漂流ブイ観測及び粒子追跡モデル(TRACMASS; Döös 1995)の解析結果から移行領域の流動構造や亜熱帯-亜寒帯間の海水交換過程について調べた。2015年9月に行われた観測では、漂流ブイを準定常ジェットの流軸(41.5°N-153°E付近)を横断する形で投入した。ブイは60m深の流れを捉えるよう設計されており、その漂流速度は地衡流とよく一致していた。

観測で得られたブイの軌跡(図5上)は海が6000mと深いにも関わらず、500m程度の高さの海底地形とよく対応していた。これは、数値実験結果をサポートするものである。準定常ジェットに乗ったブイは北東-南西方向にのびる海底地形(地形A:図5上)に沿って北東へ流れ、その後、移行領域の42°N、155°E付近で渦を描きながら停滞し、北東方向へ流れていくものと南東方向へ流れていくものに分岐した。北東方向へ流れたブイは北西-南東方向にのびる海底地形(地形B)に沿って南東方向へと方向を変えた。このように準定常ジェット及び移行領域における亜熱帯-亜寒帯間の海水輸送経路および海底地形との関係が可視化された。



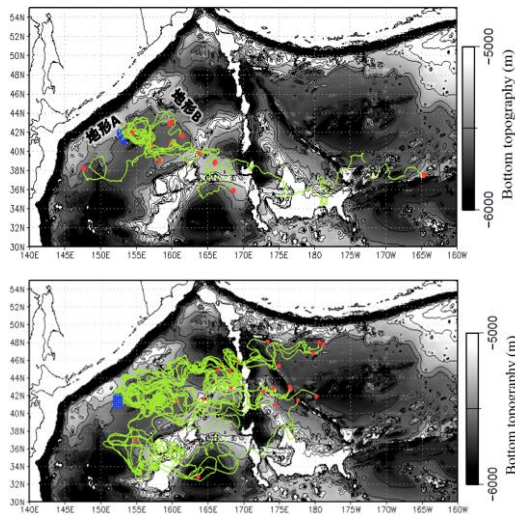


図5 (上) 漂流ブイの軌跡。青点が放流位置、赤点が終了位置を示す。背景は海底地形。(下) 粒子追跡モデルを用いた粒子の軌跡。

より詳細に移行領域周辺の流動構造を調べるため、衛星高度計から求めた地衡流で仮想粒子を流す実験を行った。観測ライン周辺を初期位置とし、2015年9月1日を初期時刻として480日間の粒子の動きを計算したものが図5下である。実験から得られた粒子の軌跡も、観測結果と同様に低い海底地形に対応した流れを示していた。さらに、地形Bの谷を通過する経路があることも確認できた。初期時刻を変えて実験を行った結果、年変動や季節変動も見られるものの、卓越する流れは海底地形に対応するものであった。

漂流ブイ観測と仮想粒子追跡実験の結果から、移行領域における亜熱帯-亜寒帯間の海水交換の経路が明らかとなり、その経路を決定する要因としてたかだか標高500m程度の海底地形が大きく寄与していることが示された。

## (2) 塩や栄養物質などトレーサー輸送経路の解明

### ① トレーサー解析

本課題では、Fujii et al. (2013) で開発された水塊の移動経路を特定する手法を用い、黒潮から亜寒帯・ベーリング海に至る水塊の移動経路について、海洋モデルの接線型モデルとアジョイントモデルを利用して、解析を行った(藤井他, 2016)。解析では、(1)接線形モデルにより東経140度線の北緯30度と日本南岸の間を1997~2006年の期間に通過する水塊を追跡、(2)アジョイントモデルにより、ベーリング海に2006年の終わりに到達した水塊を時間方向逆向きに追跡、(3)そして、両モデルで追跡した水塊の濃度の積をとる、ことで黒潮からベーリング海に至る水塊の移動経路について特定した(図6)。

対象の水塊は、黒潮続流により東経150度付近にある第二の峰のあたりまで移流された後に、その一部は黒潮続流の北の混合水域を北西方向に移流され、やがて北緯40度、

147°E付近で準定常ジェットに取り込まれて、東北東に移流される。残りの水塊も多くは、第三の峰がある東経156度付近で黒潮続流から北にそれて混合水域に入り、その後西進し、やがて準定常ジェットに取り込まれる。準定常ジェットに移流された後は、それに続く亜寒帯海流によってさらに東ないし東北東に移流され、西部亜寒帯ジャイアとアラスカンジャイアの間にできた亜寒帯ジャイアの切れ目を北上して、ベーリング海へと侵入する。この準定常ジェットからベーリング海までの経路については、Uehara et al. (2014)が指摘した、西部亜寒帯ジャイアからベーリング海への直接流入路と対応しており、図5の粒子追跡結果とも整合的である。また、準定常ジェットを通過する水塊量は、全体の70%以上と大きく、黒潮系水の亜寒帯、ベーリング海への流入に関して重要な役割を担っていることが示唆された。

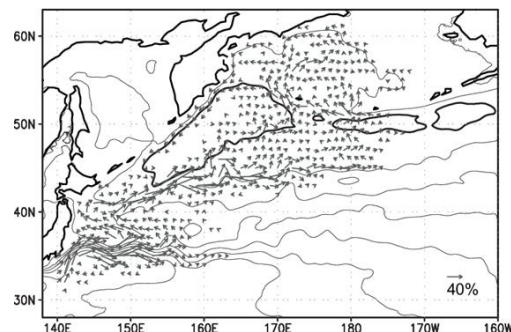


図6 各地点における幅1度の緯線、経線に沿った海面から海底までの鉛直断面を1997~2006年の期間に横切る対象水塊の通過量をその総量に対する割合で表したもの(矢印、%)。ただし、緯線を横切る流れは $1/\cos\phi$  ( $\phi$ は緯度)をかけて補正してある。実線は2002~2006年の海面高度平均値の等値線(間隔0.2m)で、特に太実線は、西部亜寒帯ジャイアおよびアラスカンジャイアに伴う、低海面高度領域の外縁を示す。

### ② 準定常ジェットによる物質輸送と生物生産

準定常ジェットが黒潮続流から分岐し海水を北方へ輸送する詳細な過程は、係留系、水中グライダー、黒潮続流を横切る繰り返し観測により調べられた。その結果、黒潮続流の短期変動に伴い暖水が放出され、混合水域において暖水渦の西側を通りながら北方へと輸送されること、その流量は $25.5 \sim 25.7 \sigma\theta$ 層で $1.8 \pm 0.6 \text{ Sv}$ に達すること、が示された。これらは上記トレーサー実験の結果と整合的である。

準定常ジェットは、亜寒帯海流と接する海域に至ると、安定した流路をとる。準定常ジェットを上流から下流にかけて複数横断するような観測を実施し、ジェットおよびその周辺海域における表層水温・塩分構造および、アルカリ度、栄養塩、クロロフィルa現存量

を測定した。表層においては等密度面混合が仮定できないため、亜熱帯水と亜寒帯水の混合比はこれまで不明であった。そこで本研究では、冬季混合層に取り込まれる層においては水平混合を仮定し塩分-アルカリ度関係を用いて、亜熱帯水と亜寒帯水の混合比を算出する方法を新たに考案した。その結果、準定常ジェット流軸上の海水は、上流から下流に向かい約 40 日の時間スケールの間に亜熱帯水 95%から 27%へと急激に変質していた。同時に亜寒帯域から栄養塩を取り込み、下流に向けてクロロフィル現存量が増大していることが示された (Kakehi et al., 2017)。亜寒帯水の取り込みは中層においても確かめられた (Wagawa et al., 2014)。

北西太平洋は生産性の高い海域として認知されている一方で、多くの浮魚類が親潮-黒潮前線間海域に回遊し成長しているのは夏秋季である。夏秋季に多くの浮魚類が準定常ジェットの終焉域に収束する。実際に準定常ジェット終焉域では、秋季にクロロフィル現存量が極大域を形成することが海色衛星データから示されており、前述の観測結果と合わせ、準定常ジェットが活発な混合によって亜寒帯海域から栄養塩を取り込み、夏季以降の生物生産を高く維持していることが推測された。

一方で、北西北太平洋では鉄が生物生産の制限要因となっているため、鉄循環の解明は当海域の高い生産性解明の鍵である。準定常ジェットの中層にはオホーツク海や親潮からの海水が流入しており、鉄が高い濃度で溶存していることが明らかとなった (Nishioka and Obata, 2017)。特に、中層上部にはオホーツク海起源の溶存鉄が十分な濃度で存在していた。準定常ジェットおよび移行領域では 200m を超える深い混合層が発達するため、オホーツク海起源の鉄も冬季混合によって表層に回帰することが十分可能である。このように鉄の三次元循環においても準定常ジェットは重要な役割を果たすことが明らかとなりつつある。

### (3) 子午面循環の変動メカニズムの解明

風の変動に対する子午面循環の応答について、数値実験により調べた (Matsuda et al. 2015)。海洋-海氷モデルは Iced-COCO (Hasumi 2006) を用い、計算領域は北太平洋全体をカバーする。オホーツク海で 3~7 km、黒潮続流域で 10 km 程度となるような変形グリッドを用い、北西太平洋ではほぼ中規模渦を分解しており、海氷生成に伴う高密度水 (DSW) の形成や黒潮・親潮の再現性は良い。

この海洋モデルを用い、北太平洋領域全体で風を強くした実験を行ったところ、オホーツク海を含め亜寒帯循環が高塩化するという結果を得た。一方、亜熱帯循環は低塩化する。これは、偏西風による南向きエクマン輸送が亜寒帯から亜熱帯に表層の低塩水を運ぶとともに、それ補償するように地衡流が亜

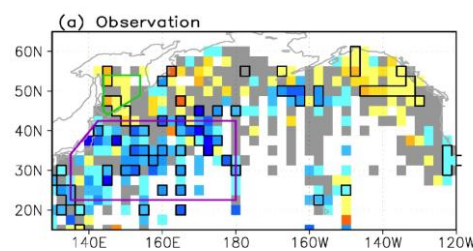


図 7 26.8 $\sigma\theta$  における塩分変化:1977-2004 年の平均と 1955-1976 年の平均の差。Nakanowatari et al. (2015a)より引用。

熱帯から亜寒帯へ高塩水を運ぶという、subpolar cell の強化を通じた塩分輸送の強化に対応する。また、亜寒帯循環が高塩化するとオホーツク海の塩分も高くなる。このため、DSW の沈み込みが深くなり、沈みこむ流量も増加することが分かった。

このような風に対する子午面循環の応答は、実際に見られるのであろうか。

それを示唆するような変化が、北太平洋の中層で生じている (Nakanowatari et al., 2015a,b)。例えば北太平洋の亜熱帯循環では中層 26.8 $\sigma\theta$  の塩分が 50 年間で 0.05 psu もの低塩化を示した (図 7)。これは 1976 年を挟んだ気候のレジームシフトによる風の強化に伴って、西岸境界を通り、オホーツク海から亜熱帯循環へと流れ込む低塩水の輸送量が増加したことによる。同時に、亜寒帯循環は高塩化傾向にあった (図 7)。これは、Matsuda et al. (2015) の数値実験で見られた「風の強化に伴う子午面循環の強化と循環間塩分輸送の増大」と整合的である。このように、風の変動の影響は表層の水温・塩分を変化させ、子午面循環を通して中層循環にも及ぶことが示された。

#### <引用文献>

- ① Isoguchi, O. et al., *J. Geophys. Res.*, **111**, C10003. (2006)
- ② Döös, K., *J. Geophys. Res.*, **100**, 13499-13514. (1995)
- ③ Uehara, H. et al., *Prog. Oceanogr.*, **126**, 80-97. (2014)
- ④ Fujii, Y. et al., *J. Geophys. Res.*, **118**, 2035-2051. (2013)
- ⑤ Hasumi H., *AORI Rep.*, **25**, U. Tokyo. (2006)

#### 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 37 件) 以下は引用した論文

- ① Kakehi S., S. Ito, and T. Wagawa, Estimating surface water mixing ratios using salinity and potential alkalinity in the Kuroshio-Oyashio mixed water regions, *J. Geophys. Res.*, **122**, 1927-1942. DOI:10.1002/2016JC012268 (2017) 査読有
- ② Nishioka, J., and H. Obata, Dissolved iron distribution in the western and central subarctic

Pacific - HNLC water formation and biogeochemical processes -, *Limnol. Oceanogr.* DOI:10.1002/lno.10548 (2017) 査読有

- ③ 藤井陽介, 三寺史夫, 中村知裕, 西垣肇, 美山透, 伊藤進一, 和川拓, 亜寒帯・ベーリング海に流入する黒潮系水の移動経路の解析, 月刊海洋, **48**, 143-151. (2016) 査読無
- ④ Matsuda, J., H. Mitsudera (2 番目), T. Nakamura (3 番目) (全 6 名), Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: the role of salinity advection. *J. Geophys. Res.*, **120**, 1462-1489. DOI:10.1002/2014JC009995 (2015) 査読有
- ⑤ Nakanowatari, T., H. Mitsudera (2 番目) (全 6 名), Multidecadal-scale freshening at the salinity minimum in the western part of North Pacific: Importance of wind-driven cross-gyre transport of subarctic water to subtropical gyre. *J. Phys. Oceanogr.*, **45**, 988-1008. DOI: 10.1175/JPO-D-13-0274.1 (2015a) 査読有
- ⑥ Nakanowatari, T., T. Nakamura (2 番目), H. Mitsudera (7 番目) (全 8 名), Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and the western subarctic North Pacific. *J. Clim.*, **28**, 714-735. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00172.1 (2015b) 査読有
- ⑦ Kida, S., H. Mitsudera (2 番目), S. Ito (5 番目), T. Miyama (9 番目), T. Nakamura (12 番目), H. Nishigaki (13 番目) (全 22 名), Oceanic fronts and jets around Japan: a review. *J. Oceanogr.*, **71**, 469-497. DOI: 10.1007/s10872-015-0283-7 (2015) 査読有
- ⑧ Wagawa, T., S. Ito, Y. Shimizu, S. Kakehi, and D. Ambe Currents associated with the quasi-stationary jet separated from the Kuroshio Extension. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1636-1653. DOI: 10.1175/JPO-D-12-0192.1 (2014) 査読有

[学会発表] (計 98 件)

- ① 三寺史夫, 海洋循環の西岸強化とロスビー波、日本気象学会 2016 年度秋季大会、2016/10/27、名古屋大学 (愛知県名古屋市) 招待講演
- ② Ito S., Pelagic fishes in the western North Pacific. NIPPON FOUNDATION NEREUS PROGRAM 2016 Annual meeting. 2016/6/3, Vancouver (Canada), 基調講演
- ③ Mitsudera, H., Quasi-stationary jets in the North Pacific subarctic frontal zone: Formation mechanisms and roles in the salt transport. JpGU 2015, 2015/5/25, 幕張コンベンションセンター (千葉県千葉市) 招待講演
- ④ 美山透, なぜ北海道東方準定常ジェット (フロント) /磯口ジェットが存在するのか?, 2015 年大槌シンポジウム「海洋変動と熱, 物質循環」, 2015/9/8, 大槌公民館 (岩手県伊閉郡大槌町) 招待講演

[図書] (計 5 件)

三寺史夫, 西岡純, 中村知裕 他、8 章 環オホーツク地域における大陸と海洋をつなぐ物質循環システム、低温科学便覧、丸善出版、383pp (p159-p183) (2015)

[産業財産権]

該当なし

[その他] ホームページ

<http://www.woc.lowtem.hokudai.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三寺史夫 (Humio Mitsudera)  
北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号: 20360943

### (2) 研究分担者

美山透 (Toru Miyama)  
海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任研究員  
研究者番号: 80358770

西垣肇 (Hajime Nishigaki)  
大分大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 70253763

伊藤進一 (Shin-ichi Ito)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号: 00371790

和川拓 (Taku Wagawa)  
日本海区水産研究所・研究員  
研究者番号: 10601916

中村知裕 (Tomohiro Nakamura)  
北海道大学・低温科学研究所・講師  
研究者番号: 60400008

西岡純 (Jun Nishioka)  
北海道大学・低温科学研究所・准教授  
研究者番号: 90371533

### (3) 連携研究者

藤井陽介 (Yousuke Fujii)  
気象研究所・主任研究員  
研究者番号: 60343894

### (4) 研究協力者

中野渡拓也 (Takuya Nakanowatari)  
国立極地研究所・国際北極環境研究センター・研究員  
研究者番号: 20400012

西川はつみ (Hatsumi Nishikawa)  
北海道大学・低温科学研究所・博士研究員  
研究者番号: 10783392