



Title	北太平洋の亜熱帯と亜寒帯をつなぐ海流と移行領域の形成
Author(s)	三寺, 史夫; Mitsudera, Humio; 西川, はつみ 他
Citation	低温科学, 82, 135-141
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.135
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91754
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_p135-141_LT82.pdf



北太平洋の亜熱帯と亜寒帯をつなぐ海流と 移行領域の形成

三寺 史夫¹⁾, 西川 はつみ²⁾, 松田 拓朗^{1)*}

2023年11月29日受付, 2023年12月26日受理

北海道の東方の北緯40度付近には、北太平洋移行領域という海域がある。そこでは、黒潮と親潮の水が混ざり合い、中間の性質を持つ特徴的な水塊が形成される。この移行領域は海洋生態系にとって好環境であること、またその海面水温変動は北半球中緯度の気候変動に関わるなど、海洋科学にとって重要な海域である。2000年代に入って、この海域に黒潮水を運ぶ準定常な海流が発見された。この海流は表層流にもかかわらず、6000mもの深海底の500m程度の高さの海膨に沿って流れており、そのメカニズムは謎とされていた。本稿では、この海流が形成されるメカニズムを解説するとともに、その移行領域における役割を解明するためのドリフターや仮想粒子追跡によるラグランジュ的解析結果について紹介する。

Ocean currents that connect subtropical and subarctic gyres in the North Pacific Ocean, and the formation of the Transitional Domain

Humio Mitsudera¹⁾, Hatsumi Nishikawa²⁾ and Takuro Matsuta^{1)*}

A boundary region between the subtropical gyre and subarctic gyre in the North Pacific exists around 40°N eastward from Hokkaido. The region is called the Transitional Domain. There, the Kuroshio origin water and Oyashio origin water are mixed and form a unique water. Recently, quasi-stationary surface currents that carry the Kuroshio water into the Transition Domain were discovered. The surface currents flow along ocean bottom rises of a height of ~500 m, despite the bottom depth there exceeds 6000 m. In this article, we explain the mechanism of the formation of the quasi-stationary currents and describe the results from Lagrangean analyses to elucidate roles of these currents for the formation of the Transitional Domain, including observations using in-situ drifters as well as the particle tracking using current information retrieved from satellite altimeters.

キーワード：北太平洋移行領域, 磯口ジェット, 海底地形
transition domain, Isoguchi jets, bottom topography

1. はじめに

北海道の東方の北緯40度付近には、帯状に広がる北太平

洋移行領域という海域がある(図1)。そこでは、黒潮と親潮の水が混ざり合い、中間の性質を持つ特徴的な水塊が形成される。この移行領域は、亜寒帯海域を流れる親潮

連絡先

三寺 史夫

北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-5478

Email: humiom@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature
Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

2) 東京大学 大気海洋研究所
Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of
Tokyo, Kashiwa, Japan

*現在は北海道大学環境科学院

* Now at Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,
Sapporo, Japan

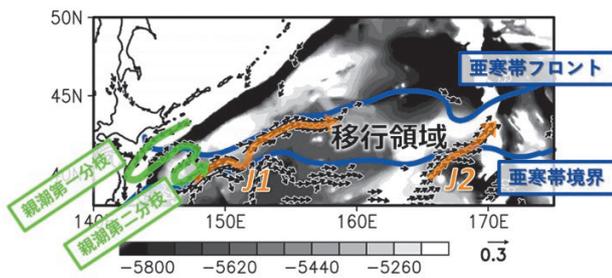


図1: 表層海流(ベクトル: 流速0.1m/s以上のみを描画)と流れ・前線の位置の概略図。オレンジ矢印は磯口ジェットJ1・J2を、緑色矢印で親潮を、青線で亜寒帯フロントと亜寒帯境界を示す。J1・J2・亜寒帯フロント・亜寒帯境界に囲まれた海域が北太平洋移行領域である。背景の陰影は海底地形。Nishikawa et al. (2021)を改変

Figure 1: Surface currents (vectors are drawn for those that exceed 0.1m/s) and schematic plots of the front positions. Orange arrows denote the Isoguchi's J1 and J2, a green arrow denotes the Oyashio, and the blue lines denote the Subarctic Front and Subarctic Boundary. Background shade represents bottom topography. Modified from Nishikawa et al. (2021).

水を含むため栄養物質が豊富なこと、また黒潮の影響を受けて比較的暖かいことから、海洋生態系にとって好環境であり漁場も形成される豊かな海であることが知られている。さらに、この海域での海面水温変動は、北半球中緯度の気候循環に大きく影響することもわかってきた。このような海面水温変動や物質循環には、暖かい黒潮水と冷たいが栄養塩豊富な親潮水の挙動が深くかかわっている。本稿では、Mitsudera et al. (2018), Nishikawa et al. (2021), Matsuta and Mitsudera (2023)に基づき、亜熱帯(黒潮水)と亜寒帯(親潮水)をつなぐ海流と移行領域の形成について解説する。

移行領域の形成には、亜熱帯の黒潮水を移行領域へと運ぶ海流が大きな役割を担っている。発見者にちなんで磯口ジェットと呼ばれており、図1にJ1, J2と記載されている海流である(Isoguchi et al., 2006)。J1は図1の亜寒帯フロント、J2は亜寒帯境界に対応し、移行領域はこれら2つの海洋前線に囲まれている。したがって、移行領域や海洋前線の形成には、磯口ジェットJ1, J2の形成過程や輸送過程の理解が必要不可欠である。

磯口ジェットは北海道から1000km以上も離れた北太平洋の中に形成されるにもかかわらず、なぜかほぼ決まった流路をとる。本稿では、まず、このような磯口ジェット形成要因について考察する(Mitsudera et al., 2018)。次に、磯口ジェットを通して亜熱帯の黒潮水が、移行領域へと侵入していくメカニズムについて述べる。磯口ジェットの上流域は親潮水と黒潮水が合流する場所なので、両水塊が入り乱れて複雑な様相を示すことで有名である。

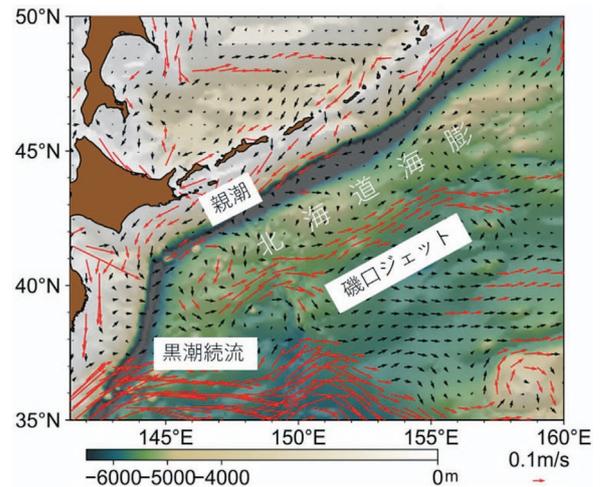


図2: 海表面流速(矢印)と海底地形(カラー陰影)。海底地形は深海底の起伏(5,000~6,000m)を強調表示。赤の矢印は流速0.1m/s以上を表す。

Figure 2: Surface currents (arrows) and bottom topography (color shade with emphasis of topography between 5000m and 6000m). Red arrows are drawn for currents that exceed 0.1m/s

その流動を解析するためにドリフターを観測船から放流するとともに、衛星観測によって求めた海流の流速データを用い仮想粒子を流す研究を行った。その中で、磯口ジェットを通り移行領域へと黒潮水が供給されるためには、流れの時間変動成分(渦や年々変動)が重要な役割を果たしていること、そして、移行領域に到達した黒潮水が、やがて亜寒帯循環へと侵入していく様相が明らかとなってきた(Nishikawa et al., 2021; Matsuta and Mitsudera, 2023)。

2. 北海道東方海域の亜熱帯・移行領域・亜寒帯をつなぐ海流—磯口ジェット—

磯口ジェットは黒潮を源流とする温かく塩分の高い海水を、本州南岸・房総沖から北海道沖の緯度帯まで運ぶ。そのため、親潮からの冷たい亜寒帯の海水との間に、北太平洋で最も強い水温前線をつくる。近年、磯口ジェットの強さの変動に伴ってこの水温前線が変動し、海面水温が大きく変化すること、それが北半球規模の気候変動を引き起こすことがわかってきた。また、水産資源への

* 1 仮想粒子追跡手法 … 任意の海域に仮想的に粒子を配置し、流れの場から粒子の動きを推定し追跡する手法。この研究では、衛星等により求めた流速データを用いて粒子の動きを計算している。時間を追う方法を前方粒子追跡、時間をさかのぼる方法を後方粒子追跡と呼ぶ。

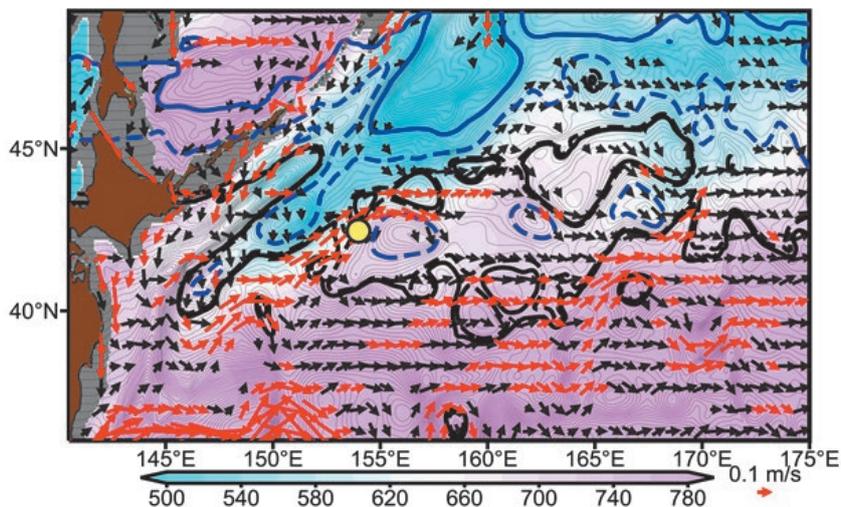


図3：表層海流(矢印)と海洋表層の厚さ(密度1027.2 kg/m³の深さ：カラー陰影)。黒の実線・破線、青い実線・破線、細い線は、傾圧ロスビー波の伝搬経路を表す。黄色の点は、高緯度から南下する薄い層(水色の部分)と北緯40度近傍を伝搬する中緯度の厚い層(ピンクの部分)が出会う海域。磯口ジェットは黄色い点を中心に形成される。Mitsudera et al. (2018)を改変

Figure 3: Surface currents (arrows) and surface layer thickness between the surface and a depth of 1027.2 kg/m³ isopycnal (color shade). Black contours and blue contours denote the propagation paths of the baroclinic Rossby waves. Yellow dot denotes a region where the baroclinic Rossby waves from high latitudes and those from mid latitude encounter. Isoguchi jet J1 forms around this region. Modified from Mitsudera et al. (2018).

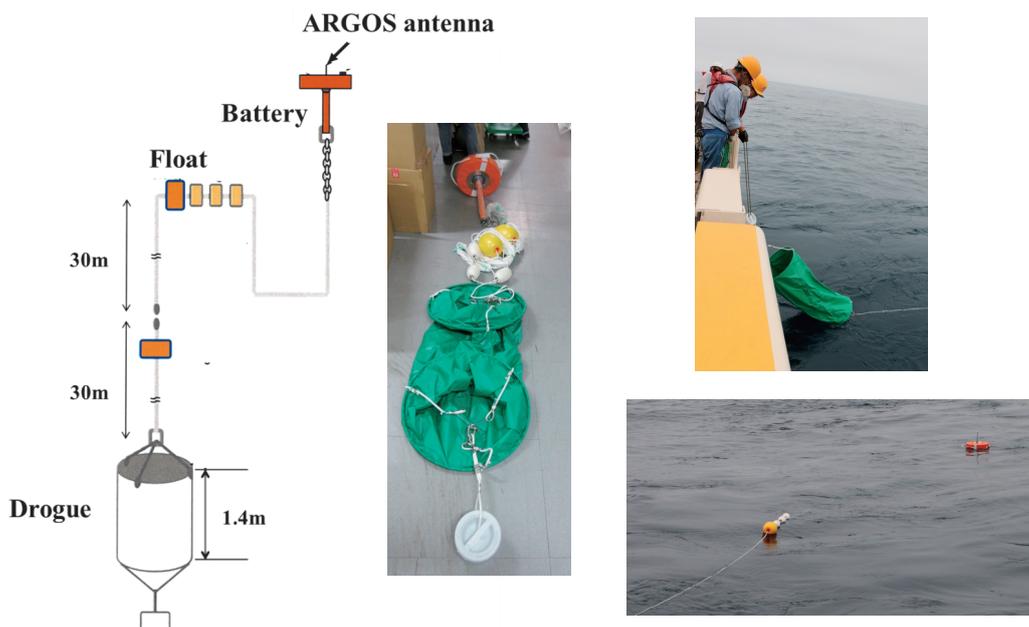


図4：漂流ブイ観測。(左)ブイの構成、(中央)ブイの概観、(右)観測の様子

Figure 4: Observation by surface drifter. (Left) Buoy arrangement, (center) buoy view, (right) observation snap shots.

影響も大きい。たとえば日本の太平洋沿岸で生まれたマイワシなどの稚幼魚は、餌の多い亜寒帯へと回遊する際に磯口ジェットを利用する。さらに磯口ジェットが形成する海面水温前線は成魚にとっても好餌場となるため、周辺海域に漁場を形成することが知られている。

このように磯口ジェットは気候変動や水産資源にとっ

て重要な海流であるが、なぜ岸から1000kmも離れた北太平洋の中の決まった海域に形成されるのか、その根本的なメカニズムは未解明であった。

我々は、太平洋の深さ5500mの深海底にある、背の低い緩やかな起伏(北海道海膨, 図2)に着目し、磯口ジェット形成の謎を解いた。従来この高さの海底地形は、海洋

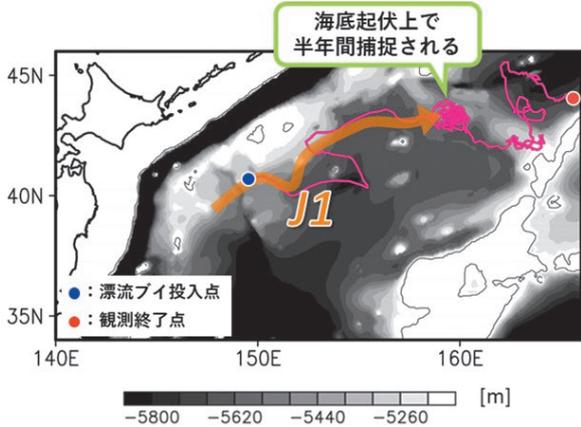


図5：移行領域の入口である磯口ジェットJ1で投入した漂流ブイの軌跡の一例。青丸が投入点、赤丸が観測終了位置を示す。オレンジの矢印ではJ1のおおよその位置を示す。背景の陰影は海底地形。Nishikawa et al. (2021)を改変

Figure 5: A trajectory of a buoy deployed from the J1. The buoy was deployed at the blue circle. Red circle denotes the end point of the buoy observation. Orange arrow represents a schematic path of J1. Background shade denotes bottom topography. Modified from Nishikawa et al. (2021).

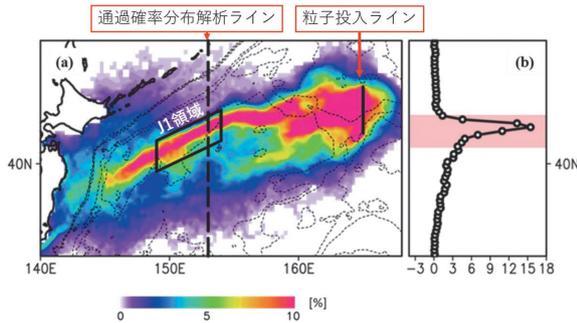


図6：仮想粒子の後方追跡の結果。(a) 移行領域 (42° N -45° N, 165° Eの黒線部分) から放出した粒子が通過する確率の分布 (0.25°毎のグリッドを通った粒子数/放出された全粒子数)。ここで「グリッドを通った粒子数」は、あるグリッドを複数回通っても、1回だけカウントしている。165° Eでは、毎月1日に0.25°毎のグリッドから1つの粒子が投入される。合計で毎月13粒子が放出されるので、165° E上のそれぞれのグリッドでの通過確率は1/13 (≒7.7%)である。(b) 153° E ((a)の破線) 上での通過確率分布。43°近傍の陰影はJ1の緯度であり、そこでは高い通過確率を示す。すなわち、移行領域に到達する粒子の大部分はJ1を通ってくる事がわかる。Nishikawa et al. (2021)を改変

Figure 6: Result from a backtracking analysis. (a) Probability of passing particles in a grid of 0.25° evaluated by [number of particles passing a grid/total number of particles deployed from the black line along 42°N -45°N, 165°E in the transition domain]. The “number of particles passing a grid” here means that the passing of a particle is counted only once even though the particle passes the grid multiple times. On the black line along the 165°E, one particle is released from every 0.25° grid on the first day of a month, so that the probability of the passing of the each grid on the 165°E line is 1/13 (≒ 7.7%). (b) Probability of passing particles along 153°E denoted by a broken line in (a). Pinkish shade around 43°N denotes a region around J1. Modified from Nishikawa et al. (2021).

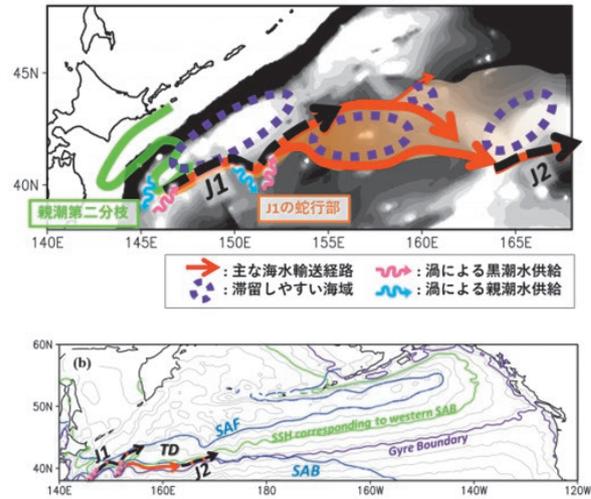


図7：(上)移行領域周辺の海水の輸送・滞留プロセスの概略図。曲がった矢印は渦による輸送で、親潮第二分枝やJ1の蛇行部で生じることを表す。背景の陰影は海底地形。(下) 磯口ジェット (J1) から移行領域 (TD) を経由し亜寒帯循環につながる輸送経路。グレーの等値線は海面高度を表す。海洋表面の海流は海面高度に沿って流れる。このことから、亜熱帯の黒潮水が一度移行領域に入れば、亜寒帯へと輸送されることがわかる。Nishikawa et al. (2021)を改変

Figure 7: (Upper) A schematic view of the surface water transport. Wavy arrows denote that the water transport occurs because of the time dependent behavior of the front due to eddies. Background shade denotes bottom topography. (Lower) Water pathway from J1 to the subarctic gyre via the transition domain. Gray contours denote bottom topography. This diagram infers that once a Kuroshio particle was transported into the transition domain, the particle would be transported to the subarctic gyre. Modified from Nishikawa et al. (2021).

表層の流れに影響を及ぼすことはない、と考えられている。しかし、図2を見ると、明らかに磯口ジェットは北海道海膨の東斜面に沿って流れていることがわかる。さらに、図3を見ると、亜寒帯の薄い表層(水色の部分)が北海道海膨に沿って北海道沖まで南下しており、そのすぐ東側の比較的厚い表層(ピンクの部分)との間で、層厚に200mもの大きな段差ができています。磯口ジェットは、この層厚差の厚い方を右に見ながら流れていることがわかる。

では、従来無視できると考えられてきた背の低い海膨が、いかにして磯口ジェット形成を担うだろうか。その要因は、海洋に数多く存在する半径数10kmの中規模渦と海底地形との相互作用によって生じる、海膨スケール(1000kmスケール)の順圧的な海洋循環にあった(Mitsudera et al, 2018; Miyama et al, 2018)。海洋表層の厚さという情報は、傾圧ロスビー波によって伝えられる。通常、傾圧ロスビー波は西向きに進むが、海膨上では、この海膨スケールの順圧循環によって波の伝搬経路が南西向きに曲げられてしまう。それに伴い、亜寒帯起源の薄い表層が北海道沖

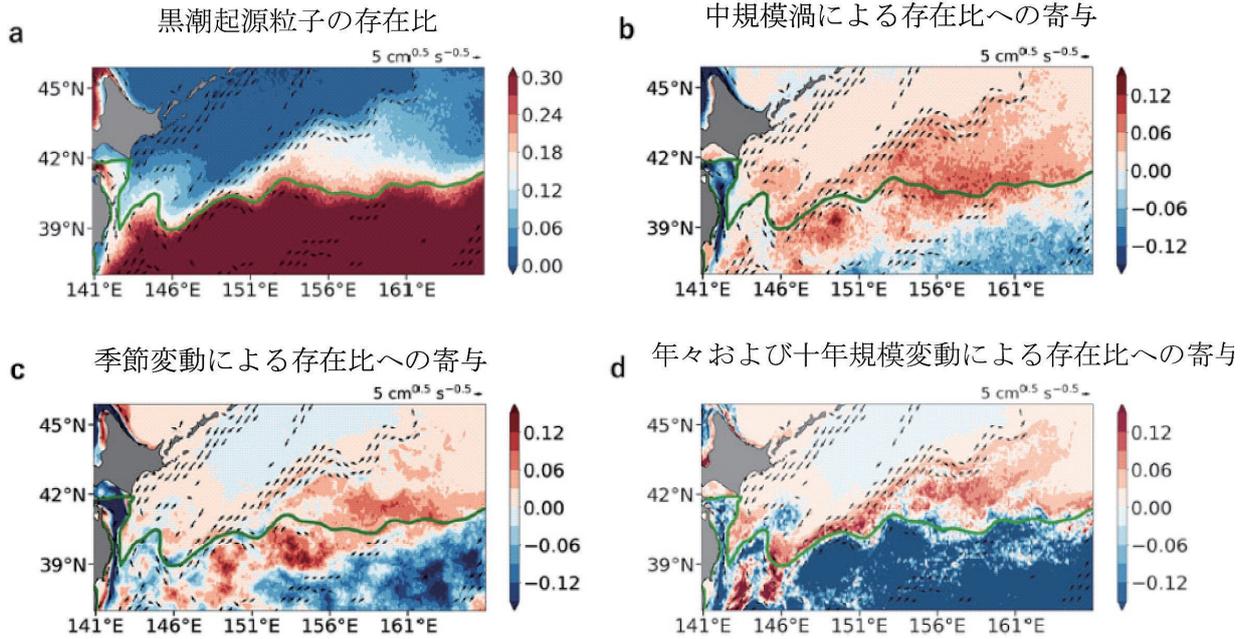


図8：(a)黒潮水に対応する粒子の存在比 R_K ($=0.1^\circ$ 毎の各グリッドを通過する黒潮水粒子/各グリッドから放出される全粒子数)。黒潮水を識別するため、 34° N以南から放出した粒子に1、それ以外に0の値を付している。海流は全ての周期(中規模渦、季節変動、年々変動+10年規模変動)を含む。解析期間は1995年から2020年で、それぞれの粒子に対して360日間積分した結果を解析した。緑の線は海面高度0.4 mの等値線で、亜寒帯境界を表す。(b)「全周期を含む海流による R_K 」と「91日の移動平均を掛けた海流による R_K 」の差。中規模渦による R_K への寄与を表す。(c)「91日の移動平均を掛けた海流による R_K 」と「361日の移動平均を掛けた海流による R_K 」との差。海流の季節変動による R_K への寄与を表す。(d)「91日の移動平均を掛けた海流による R_K 」と「月平均の海流による R_K 」との差。年々変動+10年規模変動の寄与を表す。Matsuta and Mitsudera (2023)を改変

Figure 8: (a) Ratio of the Kuroshio particles' passing defined by (number of the Kuroshio particles passing each grid of 0.1°)/(total number of particles released from each grid). A Kuroshio particle is defined by that released southward of 34° N. In this panel, ocean currents include all frequencies of their variations such as those of mesoscale eddies, annual variations and interannual+interdecadal variations. Analysis is made from 1995 to 2020. Each particle is tracked for 360 days. Green line denotes a contour of 0.4 m of the sea surface height, which represents the Subarctic Boundary. (b) Ratio of the Kuroshio particles' passing caused by mesoscale eddies. (c) Ratio of the Kuroshio particles' passing caused by annual variations of the ocean currents. (d) Ratio of the Kuroshio particles' passing caused by interannual+interdecadal variations of the ocean currents. Modified from Matsuta and Mitsudera (2023)

まで南下することを我々は見出した。そして図3に見られるとおり、薄い層を北方から運ぶ傾圧ロスビー波と、北緯40度の近くを西向きに伝搬する比較的厚い層の傾圧ロスビー波が出会う海膨上に、磯口ジェットが形成されるのである。これは、背の低い海底地形による表層海流形成の、新たなメカニズムである。

3. 黒潮水の移行領域・亜寒帯循環への侵入

このような磯口ジェットは移行領域(図1)にどのような影響を及ぼすのだろうか。過去の研究では「磯口ジェットJ1が黒潮水を移行領域へ運ぶことにより、領域内で黒潮水と親潮水が混ざる」という漠然としたイメージはあったものの、そのプロセスは十分に調べられていなかった。そこで本研究では次に、J1を入口とした移行領域内の海水輸送過程について調査した。

磯口ジェットJ1から移行領域内への水の動きを調べる

ため、漂流ブイ(図4)をJ1周辺に投入し、その動きを解析した。その結果、まず、移行領域内の海水の動向が深さ5500 mの太平洋に存在するわずか数百mの海底起伏によって支配されていることを、漂流ブイによる観測事実として確認した。図5に示した漂流ブイの軌跡の一例を見ると、北海道海膨上のJ1に沿ってブイが動いている様子がわかる。この北上には、ブイ投入から1か月程度かかっている。さらに北上した漂流ブイは、北海道海膨から東に伸びた緩やかな海底起伏上の渦に捕えられ(図5)、約半年もの間、同じ場所に留まっていた。これは想定外の結果で、背の低い地形の重要性を改めて認識した。

次に、衛星観測やドリフター観測得られた情報を統合し求めた海面流速場データを用いて、J1に仮想的に配置した粒子を追跡し海の流れを可視化すること(前方粒子追跡)で、移行領域で海水が通りやすい経路や滞留しやすい場所をより詳細に調べた。また、時間をさかのぼって粒子を追跡すること(後方粒子追跡)で、黒潮水が移行領域

へと供給される過程を調べた。図6に後方粒子解析の解析例を示す。移行領域に到達する海水(粒子)の多くがJ1を通過してくることがわかる。さらに時間をさかのぼって粒子を追跡すると、フィリピン沖を源流とした黒潮水が移行領域に輸送される様相が明らかとなった。図7は漂流ブイ観測の結果と粒子追跡の解析結果を模式的に示したものである。強い流れのJ1・J2や前線に沿った場所は海水の通り道となっており、それは海底起伏の周辺に形成される傾向にあった。一方で移行領域内の緩やかな海底起伏上では海水が留まりやすいということが可視化された。

以上の解析でさらに驚いたのは、黒潮水が移行領域へと供給されるためには時間変動(数ヶ月スケールの中規模渦の活動やJ1の年々変動)が重要であること、また磯口ジェットに隣接する親潮第二分枝やJ1の蛇行域(図6上の水色とピンクの波矢印)といった細く狭い海域が、移行領域への黒潮水の主な供給経路となっている、ということであった。仮に海洋の流れが定常であれば、移行領域に黒潮水は流入せず、親潮水で満たされてしまうということもわかった。すなわち、磯口ジェットの時間変動が移行領域に黒潮水流入を促し、領域形成に本質的な役割を担うということである。

黒潮水がJ1にいったん供給されれば移行領域内へと速やかに輸送される。海面高度コンターをさらに下流側に追跡すると(図7下)、移行領域へと流入した黒潮水は亜寒帯循環へと輸送されることがわかる。すなわち、移行領域は「亜熱帯循環と亜寒帯循環間の海水交換の窓」の役割を果たしているのである。このように、磯口ジェットによる亜熱帯と亜寒帯を繋ぐ海水輸送プロセスの描像が明らかとなった(図7下)。

4. 磯口ジェットの時間変動と輸送過程

では、どのような時間変動が、黒潮水の移行領域への流入にとって大事なのだろうか。Matsuta and Mitsudera (2023)は、衛星から得た海流の変動を、渦による変動(91日の移動平均をかけたもの)、季節変動(月平均)、年々+10年規模変動(361日の移動平均)に分けて、黒潮水(34°N以南から放出した仮想粒子)の移行領域への流入を解析した。その結果が図8である。図8aはすべての周期の変動を含む海流のデータを用い、黒潮水の粒子を追跡してその存在比 R_{st} (=0.1°毎の各グリッドを通過する黒潮水粒子/各グリッドから放出される全粒子数)を示したものである。亜寒帯フロント(J1)と亜寒帯境界(図1参照)に挟まれた移行領域における R_{st} は、黒潮域と親潮域のもの中間

値となっており、観測からの知見と一致する。図8bは「全周期を含む海流による R_{st} 」と「91日の移動平均を掛けた海流による R_{st} 」の差で、中規模渦による R_{st} への寄与を表す。亜寒帯境界近傍とJ1を含む移行領域内へと流入する黒潮水にとって、中規模渦の影響が顕著である。逆に言うと、渦がなければ、J1を通過して移行領域へと流入する黒潮水輸送が減ることを示している。また、図8cは「91日の移動平均を掛けた海流による R_{st} 」と「361日の移動平均を掛けた海流による R_{st} 」との差で、海流の季節変動による R_{st} への寄与を表す。図8bと比較してみると、海流の季節変動は、中規模渦による変動に比べて黒潮水のJ1への流入に対してそれほど寄与していないことがわかる。一方、図8dは「91日の移動平均を掛けた海流による R_{st} 」と「月平均の海流による R_{st} 」との差で、年々+10年規模変動の寄与を表す(渦変動は取り除いていることに注意)。年々変動は、黒潮水のJ1への流入を効果的に担っていることがわかる。特に、年々変動の影響はJ1からさかのぼってみると、親潮第二分枝を通過してその上流まで見てとれ、146°E以西では黒潮統流の近くまで続いている。

以上のように、亜寒帯境界は黒潮水が移行領域へと輸送される際の障壁となっているものの、中規模渦による変動と年々変動によってこの障壁を乗り越え、J1を通じた輸送が生じていることが明らかとなった。また、流れ場のLagrangian Coherent Structure (Matsuta and Mitsudera, 2023)を解析することにより、黒潮統流が北辺に同期して、J1が黒潮統流へとつながるような流路をとること、それが黒潮水のJ1への流入を促すことも示された。

5. 今後の展望

北海道海膨に類するゆるやかな起伏は、世界の海のいたるところにある。したがって、本研究で見出した表層海流形成のメカニズムは、磯口ジェットに限らず様々な中高緯度海域で働いているに違いない。緩やかな海底地形というキーワードで、世界の海洋循環の特徴を調べてみたいと考えている。

また前述のように、北太平洋移行領域は海洋生態系にとって好環境であり漁場も形成されること、また気候変動に及ぼす影響が大きな海域であることがわかってきた。本稿では、磯口ジェットを通して黒潮水の輸送過程を明らかにすることにより、移行領域や海洋前線の形成プロセスを考察した。一方で、移行領域は、オホーツク海から流出する海水融解水(沿岸親潮水)や中層水の行先にもなっている。移行領域の高い生産性や水温変動がもたら

す気候変動についても、オホーツク海の視点を含めてぜひ解明していきたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、美山透博士、西垣肇博士、伊藤（進）博士、和川博士、中野渡拓也博士、中村知裕博士ら多くの研究者の協力を頂きました。感謝いたします。また、丁寧な査読をしてくださった白岩博士に感謝いたします。

参考文献

- Isoguchi, O., H. Kawamura and E. Oka (2006) Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **111**, C10003, doi:10.1029/2005JC003402.
- Matsuta, T. and H. Mitsudera (2023) Kuroshio water intrusion into the subarctic region in the western North Pacific Ocean and analyses of the Lagrangian coherent structure. *J. Oceanogr.* **79**, 629-636, <https://doi.org/10.1007/s10872-023-00696-3>.
- Mitsudera H., T., Miyama, H. Nishigaki, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, T. Nakamura, T. Wagawa, R. Furue, Y. Fujii and S. Ito (2018) Low ocean-floor rises regulate subpolar sea surface temperature by forming baroclinic jets. *Nat. Commun.*, **9**, 1190, doi: 10.1038/s41467-018-03526-z.
- Miyama, T., H. Mitsudera, H. Nishigaki and R. Furue (2018) Dynamics of a Quasi-Stationary Jet along the Subarctic Front in the North Pacific Ocean (the Western Isoguchi Jet): An Ideal Two-layer Model. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**. 1175/JPO-D-17-0086.1.
- Nishikawa H., H. Mitsudera, T. Okunishi, S. Ito, T. Wagawa, D. Hasegawa, T. Miyama, H. Kaneko and Ren-Chieh Lien (2021) Surface water pathways in the subtropical-subarctic intergyre frontal zone of the western North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **199**, 102691, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102691>.