

1. 北太平洋中層水

～オホーツクで生まれる北太平洋で一番重い水～

北海道大学 低温科学研究所 三寺 史夫

1. はじめに

現在の気候や大陸の分布のもとでは、世界で最も重たい水は南極大陸の大陸棚やグリーンランドの沖合で生成されている。これが深層水であり、海洋の 1500m 以深のほぼすべてを占めている海水である。それがベルトコンベアといわれる、地球を数千年かけてゆっくりと一周する流れに乗って世界中の海を廻っており、北太平洋がその終着点であるといわれている。

では、太平洋およびその周辺ではどこで一番重たい水が作られているのだろうか？

それがオホーツク海北端の沿岸域であることが、最近の研究でわかつてきた。オホーツク海の大部分は旧ソ連領あるいは経済水域内であったことから、日本に近い海にもかかわらず長らくベールに包まれた海であった。しかしながら、1997 年から始まった低温科学研究所を中心とする国際共同研究で、一挙にそのベールがはがされようとしている。そのようにして発見されたオホーツク海で生成される重たい水が、北太平洋中層水という、太平洋の 500m から 1000m を占める海水の起源になっているのである。実際には、北西端の陸棚域でできた海水がオホーツク海内で激しい混合・変質を経ながら北太平洋に流れ出し、親潮の一部となり、さらに黒潮を含む亜熱帯循環の下にもぐりこみながら北太平洋全体に広がっている。人為起源炭素の吸収源および貯蔵庫としても有力と考えられており、注目されている海水である。

今回の講演では、このような北太平洋中層水の様子を亜熱帯循環、親潮・黒潮混合域、オホーツク海、と流れを遡りながら眺めていくことにしたい。

2. 北太平洋中層水

黒潮より南の亜熱帯循環に広がる北太平洋中層水は塩分極小で特徴付けられる。すなわち、塩分の薄い水ということである。図 1 に太平洋（西経 160 度）の塩分の断面を示すが、北緯 50 度あたりから沈みこんだ低塩分の水が北緯 30 度付近では 700m ぐらいまで潜り込んでいることがわかる。それが赤道域に向かって再び浅くなり、北緯 10 度で 100m ぐらいまで上昇している。この塩分極小層は 1.0268 g/cm^3 の密度面に沿って分布している。言い換えれば北太平洋中層水の特徴的な重さは 1.0268 g/cm^3 ということを示している。

今度は 1.0268 g/cm^3 との密度面における塩分の様子を眺めてみよう（図 2）。そうすると、オホーツク海からベーリング海の西側の塩分が一番うすく、それが南に行くにつれ

てだんだんと濃くなっていくのがわかるだろう。先に述べたように、その起源がオホーツク海であることが近年特定された。そして、周りの水と混合して少しづつ濃くなりながら亜熱帯循環に乗って南下している。どうやら、北緯10度付近で南半球起源のさらに高塩分の水と接しているようである。また一部はインドネシア多島海へ入り、インド洋へと抜けている。

北海道から東のほうに眼を転ずると、アラスカ湾のほうに向かって塩分が徐々に濃くなっているのがわかる。これは亜寒帯循環における中層水で、その上下の海水より温かいので中暖水と呼ばれているものである。温かくなるのは、オホーツクから流出した海水が、日本の三陸沖で黒潮水と混ざりつつ亜寒帯循環にのって東方に流されていくからである。このように、三陸沖で黒潮水とオホーツク起源の親潮水が混じりあい、一方は亜熱帯循環に行って周りより低温・低塩の北太平洋中層水になり、他方は亜寒帯循環に入つて周りより高温・高塩の中暖水になるのである。

3. 黒潮と親潮の混合水域

このように見ていくと、北太平洋中層水の通り道としてどうやら三陸沖が重要であることがわかる。このあたりは、混合水域と呼ばれており、黒潮と親潮が複雑に入り組んでいるところである。その概観を眺めてみよう（図3）。

黒潮は日本の南岸を房総半島から離れ、東方に向かってジェットとなって流れ出ている。これは黒潮続流と呼ばれる流れである。そして、多くの時計回り、あるいは反時計回りの渦を伴っている。黒潮続流は大気のジェット気流に相当するものであり、したがって時計回りの渦は高気圧、反時計回りの渦は低気圧に当たる。黒潮続流は、黒潮が低緯度から北に向かって運んだ大量の熱と塩分を、太平洋の中央部にまで押し出す役割を担っている。

一方、親潮は千島列島沿いを流れ、北海道、三陸沖を南下する。時には房総半島沖まで南下する場合もある。黒潮に比べてかなり低温であり、北海道、東北沿岸での道筋は衛星の赤外画像でもはっきり見ることができる。しかし、黒潮続流と出会った後、表面からははっきりしなくなる。実は、この後親潮が黒潮続流の下にもぐりこみ、東に流れつつ南下して亜熱帯循環に入るのである。

三陸沖で細かく水温、塩分を観測した結果を図4に示す。これは、中層水の特徴的な密度である 1.0268g/cm^3 面上の塩分を表したもので、三陸沖ではほぼ 300m から 500m の深さに相当する。これを見ると低塩分の海水が北のほうからやってきて、黒潮続流と合流している様子が見て取れる。面白いのは、ぼんやりした流れがじわじわと合流するのではなく、むしろ川のようにはっきりとした道筋があるということである。

このような親潮の流れは、数値シミュレーションによっても示すことができた（図5）。この密度面での親潮の流れは周りよりも分厚いことが知られている。そのような分厚い水をオホーツク海から流出させると、川のようになって流れて行くのである。

実は海洋の 1000m ぐらいまでの循環は風によってほぼ決まっていて、親潮のある亜寒

帶循環と黒潮のある亜熱帯循環の境界はかなりはっきりしており、一般に海水の交換が行われにくい。この境界が、北太平洋では北海道と東北の間ぐらいにある。ところが、親潮は日本の東方でその境界を越え、亜熱帯循環に川のように侵入してくるのである。これは、分厚い流れがオホーツク海から出ることによって日本沿岸における亜熱帯・亜寒帯循環の境界が少しだけ南にずれ、結果的に親潮が亜熱帯循環まで入り込めるためである。またどうやら渦も重要な役割を担っていそうである。数値シミュレーションからは、渦が親潮水を糸巻きのように巻き取ってその境界を越えさせるという様子が示され、観測でもそのような様子が捉えられている。

4. 千島列島周辺の海

ここでのテーマは、オホーツク海の周辺でなぜ分厚い流れができるのか、ということである。そのためには千島列島の存在が重要である。

千島列島は高い海嶺が海の上に顔を出した部分であり、地形は大変複雑である。大部分海峡は比較的浅く、太平洋とオホーツク海間での海水交換はブッソル海峡とクルゼンシュタイン海峡という二つの深い海峡に限られている。

また、この海域では潮汐が激しいことが知られている。2000m深という深いところでも 1m/s もの潮流があった、という報告があるぐらいである。この高い海嶺と激しい潮流のため、千島列島周辺では激しく混合が起こっていることが最近わかつってきた。その証拠として、図 6 に列島周辺の衛星赤外画像を示す。夏、太陽によって温められて水温が高くなっているが（黒っぽい部分）、千島列島の周辺だけ表面水温が低い（白い）。しかも渦のような現象があちこちで見られる。これは、列島周辺でつよい鉛直混合が起こり、下のほうの冷たい水が表面まで現れてきたためである。したがって、潮汐によって如何にして分厚い水ができ、またそれがどのようにして太平洋のほうに流れ出していくのか、ということが、ここでの問題である。

それを見るために、潮汐の数値実験を紹介する（図 6）。現実的な地形を用い現実的な潮汐で駆動しており、表面水温の分布は観測されてものとよく似ている。鉛直断面を見てみると、潮流の風下側で成層の間隔が広がり、よく混ざっていることがわかる。また、層厚の厚い部分が表面水温の低い部分と対応しており、このように混合して分厚くなったり層がどんどん広がって千島列島周辺を満たしているのである。

さて、次はその分厚い層がどのように広がるか、ということである。これを見るには、数十年分の計算が必要となるため、簡単なモデルで計算してみた。そうすると、列島のオホーツク海側に強くて深い時計回りの循環ができ、さらにそれが西に伸びて、少々うすくはなるものの、オホーツク海南部全体に厚い層ができることがわかった（図 7）。このような循環像は観測とも良く対応している。結論として、混合の強い部分は千島列島に限られるが、その効果は西方に伝わり中層水にあたる層はオホーツク南部全体で分厚くなる。そして、それが海峡を通って太平洋に流出し、最終的に北太平洋中層水となるのである。

5. オホーツク海北西陸棚域

中層水を源流へと遡る旅もここで終着点となる。

オホーツク海は大規模に凍る海としては世界でもっとも低緯度に存在することは良く知られている。これは、シベリアに北半球の寒極があるためで、冬になると冷たい北西季節風が吹くからである。この、氷が張る、ということが、重い水を作るために重要なのである。

海水には塩分が含まれていてしょっぱい。しかし、氷という固体になるときに塩分が外に排出することが知られている。すなわち氷はしょっぱくない。このとき外に排出される塩分は濃縮されておりきわめて濃くなる。水温の低い海では、海水の重さ（密度）は塩分の大きさで決まるので、このしょっぱい水は重い、ということになる。

オホーツク海の中でも、北西陸棚域はもっとも大量の氷が生産される場所である。これは寒い地域のためということはもちろんだが、北西の季節風に乗って、できた氷が常に沖合へと流されていくためでもある。すなわち、岸近くではいつでも水面が開いており、そこで常時冷たい空気と触れるため、効率よく氷が生産されるのである。これは、しょっぱくて重たい水も北西陸棚域で効率よく生産されることを示している。

図8にそのような濃い塩分のできる様子を観測で示した例を挙げる。これは大陸棚の海底に温度、塩分、流速が測れる測器を置いて観測したものである。冬、氷が張り始める1月ぐらいからじわじわと塩分が高くなり始め、3月まで上昇し続けることがわかるだろう。最終的には、北太平洋中層水よりも少し重い 1.0270g/cm^3 弱の海水ができる。この観測は2000年に行われたものであり、北太平洋周辺でできる最も重いこの水の存在は、先から述べているとおりごく最近になって特定されたのである。

この北西陸棚域でできた重い水は、東樺太海流という海流に乗って南に下がり、オホーツク南部の千島海盆に達する。そこで4節で述べたように強い混合・変質を受けつつ、北太平洋へと流れ出していくのである。

6. おわりに

北太平洋は深層循環のベルトコンベアの終着点であり、数千年かけて延々と北大西洋グリーンランド沖からたどり着く。したがって、北太平洋中・深層の水は古く酸素などは使用されて非常に少なくなっている。オホーツク海はそのような北太平洋にあって、効率の良い浄化器の役割をしていると言ってもよいのではないだろうか。すなわち、千島列島周辺の強い潮汐混合によって深いところから古い水をくみ上げ、それを北西陸棚域に送り、海氷生産とともに効率的に新鮮な水に生き返らせている、ということである。オホーツク海は、大循環における干潟のような役割を果たしているかもしれない。このようにして新しくなった水が再び太平洋に流れ出て、北太平洋中層水として500mから1000mの層を占めているのである。

オホーツク海の海水は地球温暖化に対して大変敏感だといわれている。これは温暖化するときに高緯度の気温の上昇が大きいと考えられているためである。数値気候モデル

の中には、オホーツク海の氷はなくなる、という予測をしているものさえある。

本当にオホーツク海の氷はなくなるのだろうか？もしオホーツク海で海水が作れなくなると、それに伴って重い水もできなくなるだろう。すなわち、北太平洋中層水ができなくなる可能性を示している。このことが地球の気候システムや環境にどの様な影響があるのか良くわかっていない。しかし、少なくとも新鮮な水を作りそれを太平洋の深くまで押し込むという、オホーツク海の機能がダメージを受けるのは間違いない。これからもオホーツク海の海氷や循環を注意深く見守って行きたいと考えている。

参考文献

- Mitsudera, H., B. Taguchi, Y. Yoshikawa, H. Nakamura, T. Waseda, and T. Qu, 2004, Numerical study on the Oyashio Water Pathways in the Kuroshio-Oyashio Confluence, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 1174-1196.
- Nakamura T. and T. Awaji (2004): Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment. *J. Geophys. Res.*, 109, C09S07, doi: 10.1029/2003JC001850, 2004.
- Schmitz, W.J. (1996) On the world ocean circulation. Vol II. WHOI Technical Report. 237pp.
- Shcherbina, A.Y., L.D. Talley, and D.L. Rudnick (2004) Dense water formation on the northwestern shelf of the Okhotsk Sea: I. Direct observation of brine rejection. *J. Geophys. Res.*, 109, C09S08, doi:10.1029/2003JC002196
- Yasuda, I., K. Okuda, and Y. Shimizu, 1996: Distribution and modification of North Pacific intermediate water in the Kuroshio-Oyashio frontal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 448-465.

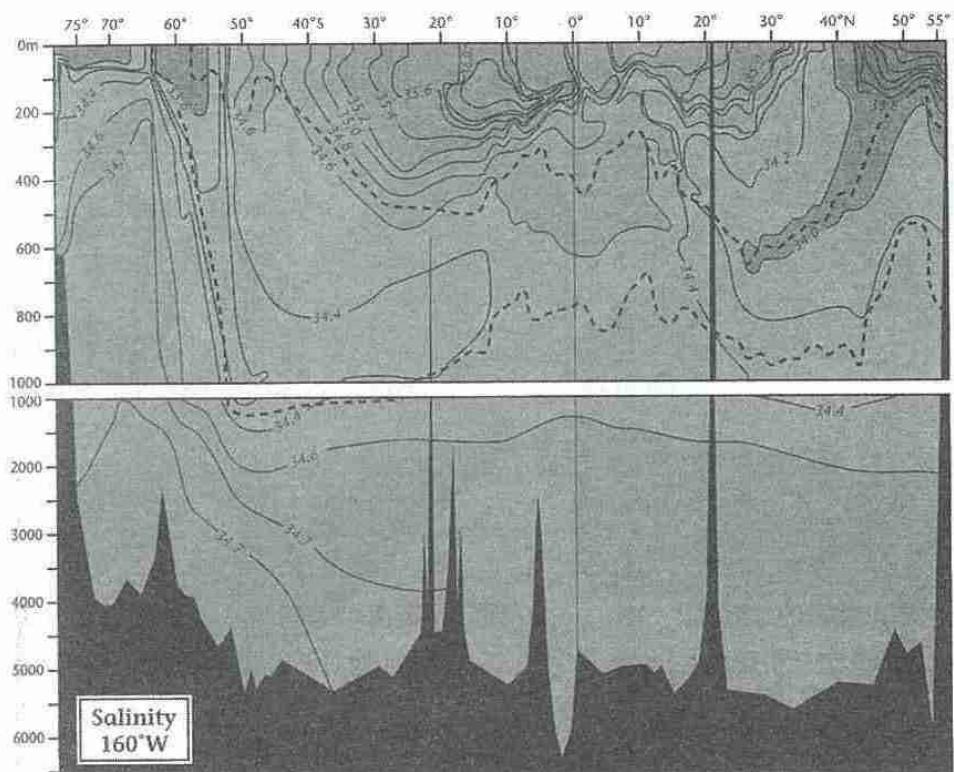


図1 西経160度における塩分の断面。実線が塩分値をあらわす。
破線は $1.0268\text{g}/\text{cm}^3$ と $1.0273\text{g}/\text{cm}^3$ の密度面を表す。Schmitz(1996)より引用。

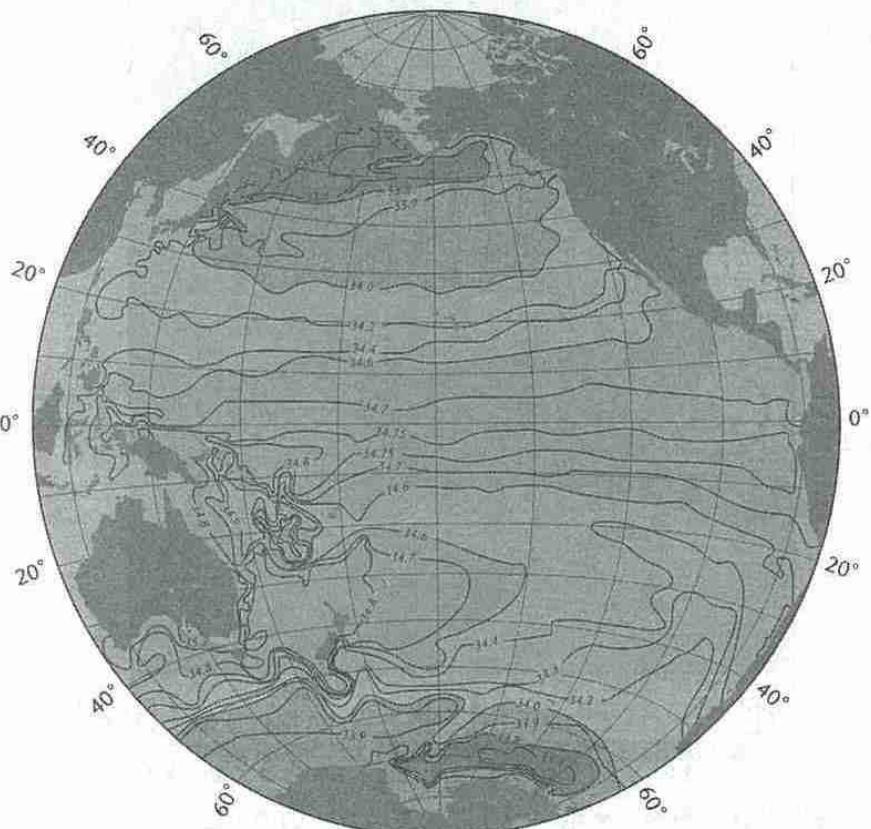


図2 密度が $1.0268\text{g}/\text{cm}^3$ 上での塩分の分布。オホーツク海から塩分の低い水が出てきていることがわかる。Schmitz(1996)より引用。

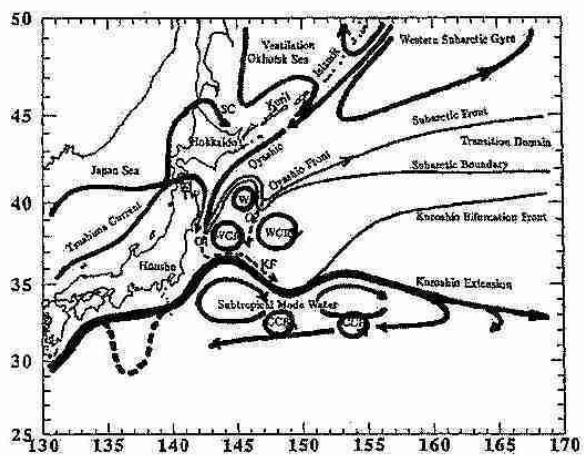


図3 混合水域の特徴的な流れ。

Yasuda他(1996)より引用。

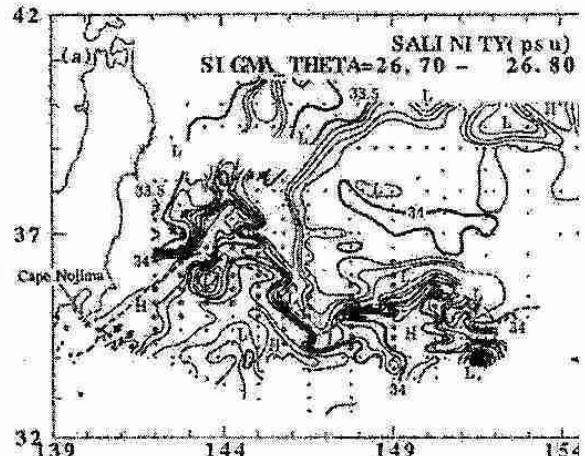


図4 密度が $1.0268 \text{g}/\text{cm}^3$ 上での塩分の分布。

Yasuda他(1996)より引用。

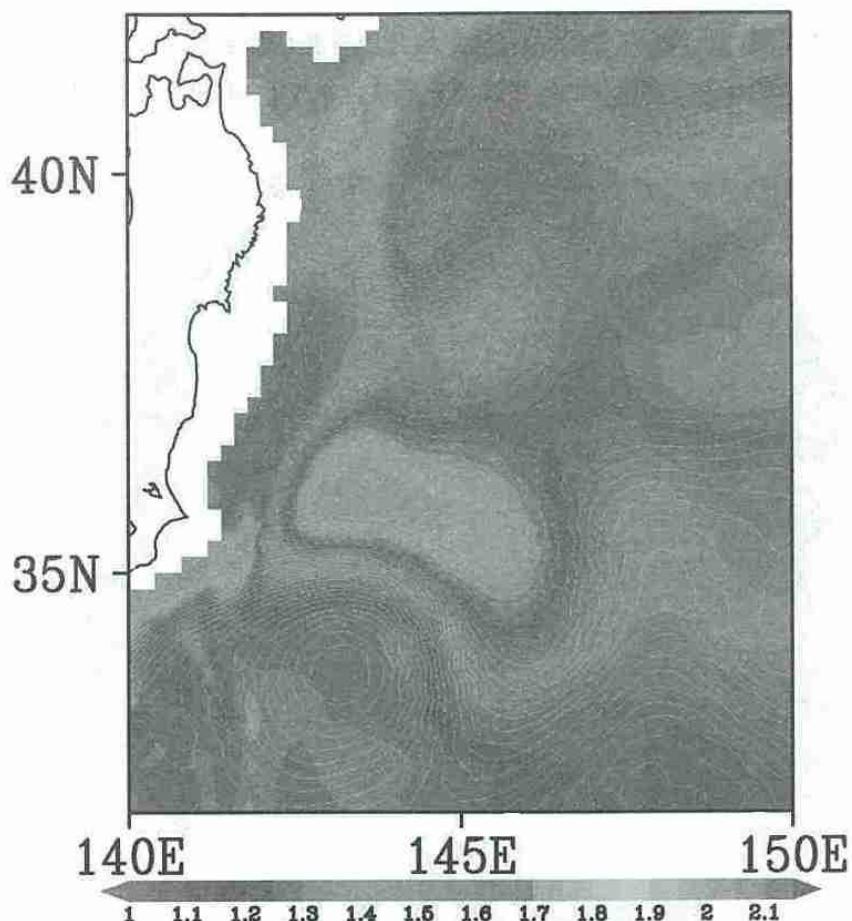


図5 モデルで再現された親潮（オホーツク海起源の水）の通り道。

ポテンシャル渦度を描いたもので、凡例の数字の小さい部分が層が厚いことを示す。

Mitsudera他(2004)より引用。

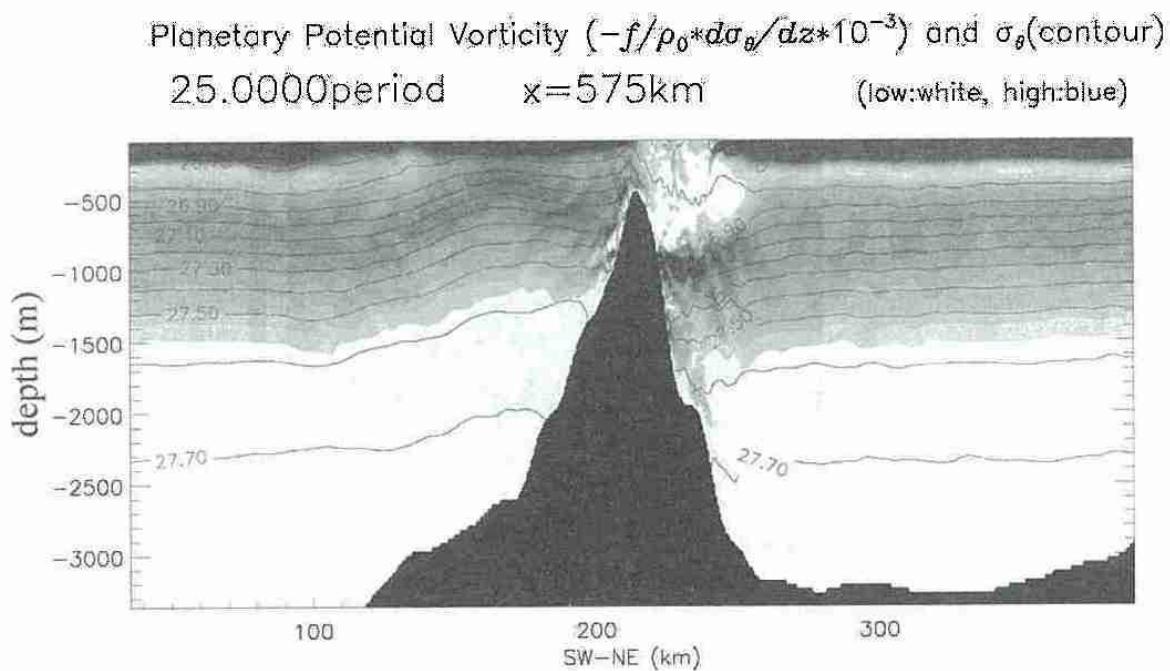
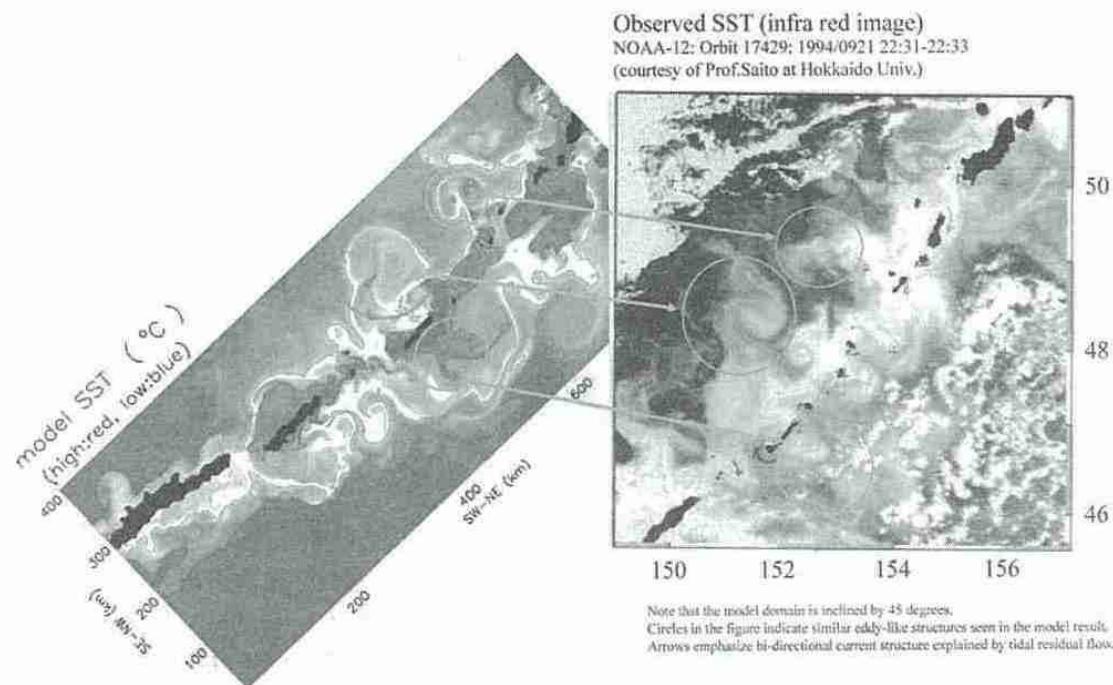


図 6 (上段) 千島列島付近の海面水温。右が赤外画像で、左がシミュレーションの結果。
(下段) シミュレーションによる潮汐混合の様子。海嶺の頂上付近で成層が壊れている
様子がわかる。Nakamura and Awaji (2004) より引用。

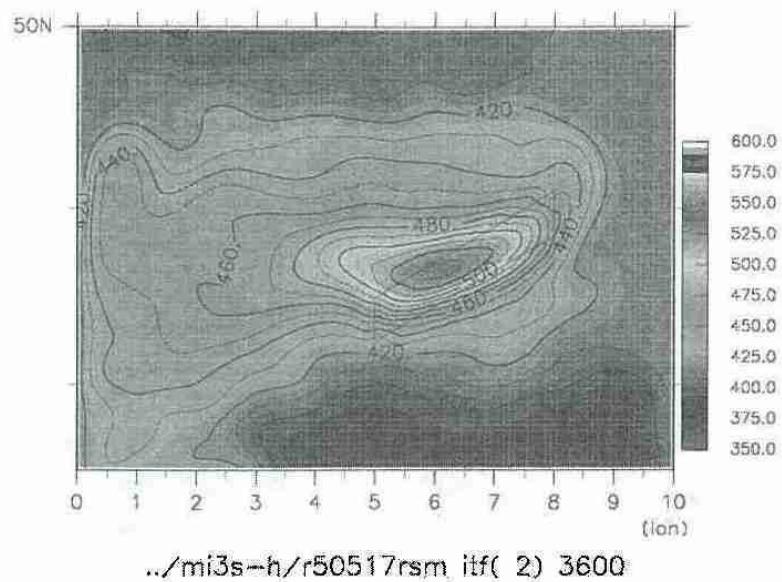


図7 混合によってできた厚い層が広がる様子。実線の四角の部分が千島列島に相当する海嶺で、そこだけに混合を与えている。

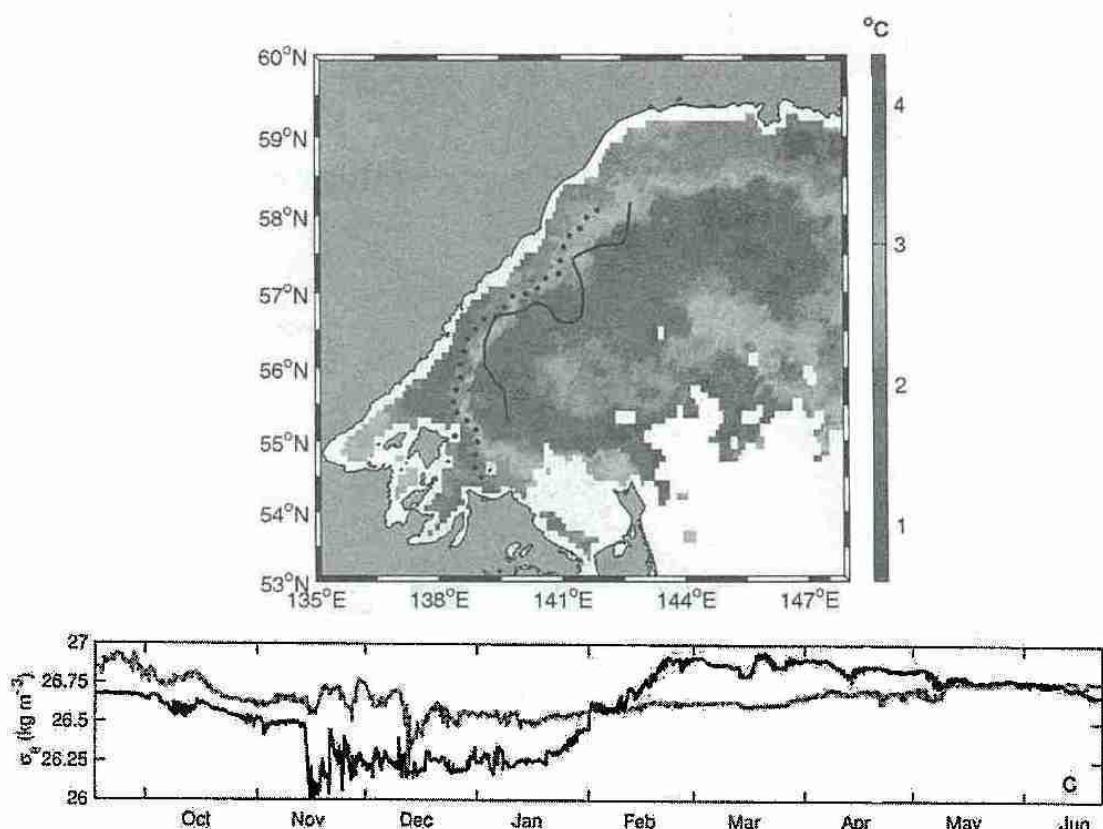


図8 (上段) オホーツク海の北西陸棚域。赤い三角が観測点をあらわす。
カラーは水温である。(下段) 観測で得られた密度の変化。濃い実線が陸に近い観測点
の密度変化である。2月末には 1.0270 g/cm^3 に近い重さの海水ができる。
Shcherbina 他 (2004) から引用。