



Title	オホーツク海および北太平洋西部亜寒帯循環とそのモデリング
Author(s)	三寺, 史夫; Mitsudera, Humio; 中村, 知裕 他
Description	3章 環オホーツク圏のモデリング
Citation	低温科学, 65, 139-148
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20464
Type	departmental bulletin paper
File Information	MITUDERA.pdf





オホーツク海および北太平洋西部亜寒帯循環とそのモデリング

三寺 史夫・中村 知裕 北海道大学低温科学研究所

オホーツク海から北太平洋西部亜寒帯にかけての海洋循環の特徴は、偏西風によって駆動される風成循環と、海水の形成や潮汐混合に伴う熱塩循環（浮力が駆動する循環）が結合することによって、表層から中層にかけての複雑な3次元循環場を形成していることである。本稿では、海洋モデルを用いた研究を中心に、このようなオホーツク海から北太平洋にかけての海洋循環とその形成メカニズムの研究をレビューする。

1. はじめに

現在の気候や海陸分布のもとでは、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。これが海洋物理学でいう深層水であり、海洋の1500 m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いる。

では、北太平洋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、最近の研究でわかってきた。オホーツク海の大部分はロシア海域であることから、観測が非常に困難であり、未知の海であった。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、オホーツク海の観測が始めて本格的になされ、多くの事実が発見されている。このようにして明らかになったことの1つが、北西端陸棚域で海水生成時にできる高密度陸棚水と呼ばれる重い海水である。この海水は陸棚域からオホーツク海中層(200 m-400 m)に沈み込み、千島列島周辺で激しい混合・変質を経て北太平洋に流出し、さらに黒潮と混合しつつ亜熱帯循環や亜寒帯循環に乗って北太平洋全体に広がっている。このようにして、高密度陸棚水は、亜熱帯では北太平洋中層水という塩分極小層、亜寒帯では中暖水と呼ばれる水温極大層を形成している海水の起源となっているものと考えられている。

北海道大学低温科学研究所における最近の研究¹⁾で、オホーツク海の中層がこの50年間で大きく昇温し、さらにその傾向が北太平洋へと広がっていることが明らかとなった。これは地球温暖化が顕著に現れているシベリア東部からの寒気の弱まりが、海氷生産量、および、高密度陸棚水の生成量を減少させているためと考えられてい

る。高密度陸棚水は大陸棚から流れ出るとき、大量の物質を巻き込んで海洋中層を通して遠方まで輸送することができる²⁾。しかし、温暖化による海氷生産量の減少は、中層水による物質輸送能力の弱화를意味しており、日本近海の影響が危惧されるところである。また、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いる。

オホーツク海から北太平洋西部亜寒帯循環にかけての特徴は、偏西風によって駆動される風成循環と、海水の形成や潮汐混合に伴う熱塩循環（浮力が駆動する循環）が共存していることである。本稿では、海洋モデルを用いた研究を中心に、このようなオホーツク海から北太平洋にかけての海洋循環の研究をレビューする。

2. オホーツク海北西陸棚域における高密度陸棚水の形成

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位置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、冬になると冷たい北西季節風が吹くことにより結氷する。この「結氷する」ということが、重い水を作るために重要である。

海水には塩分が溶けているが、氷になるときには塩分が海水の外に排出されることが知られている。このとき排出される塩分は濃縮されており、きわめて高塩分である。このような高塩分水をブラインという。水温の低い高緯度の海では、海水の重さ（密度）は塩分の大ききで決まるので、ブラインはまわりの水より重く、より深くまで沈み込むことができる。オホーツク海は北太平洋周辺で最も重い海水が生じる海であるが、これは大規模な結氷が起こるためであり、生成された重い水の循環は北太平洋全体にも大きな影響を及ぼしている。

オホーツク海の中でも、北西陸棚域はもっとも大量の水が生産される場所である。これは寒い地域のためであ

ることはもちろんだが、シベリアからの吹き出しのために、生成された氷が常に沖へと流されていくためでもある。したがって、岸近くではいつでも海面が開いており（ポリニア）、そこで常時冷たい空気と触れる。このため、効率よく氷が生産されるのである。このことは、高塩分・高密度のブラインも北西陸棚域では効率よく生産されることを意味する。

図1はこのような高密度陸棚水の形成プロセスを数値実験によって示したものである³⁾。オホーツク海北西陸棚域は傾斜が0.001以下の非常に緩やかな斜面であり、海水生成に伴う塩分フラックスが岸沿いにあるときに陸棚水はいかなる振る舞いを示すのか、またどのような塩分値を持つのか、を調べた。海洋表面から流入させる塩分フラックスはブライン形成過程をパラメータ化して決めている。

高塩分水を注ぎ始めると、それは数キロメートルから10キロメートルの渦を形成して傾斜を下り始める（図1）。地球の回転と非常にゆるい斜面のため、重い水が斜面を駆け下るといっても、渦が塩分輸送を主に担うのである。したがって、渦による沖向きの塩分輸送が海洋表面から注入される塩分フラックスと均衡した時に、陸棚水の塩分値が決まる。図2はOhshimaら⁴⁾の海水生成量から求めた塩分フラックスを用い、高密度陸棚水の形成量の年々変動を推定したものである。海水生成量は1996年に少なく2000年に最多であり、それは2倍程度の変動を示した。一方、塩分値の増分が0.6 psuを超えるような重い水の形成量変動幅はそれよりも大きく、6倍もの差となった。これは、高塩分（高密度）水形成量が海水生成の変動、ひいては気候変動にたいして非常に敏感であることを示唆している。現在、オホーツク海から

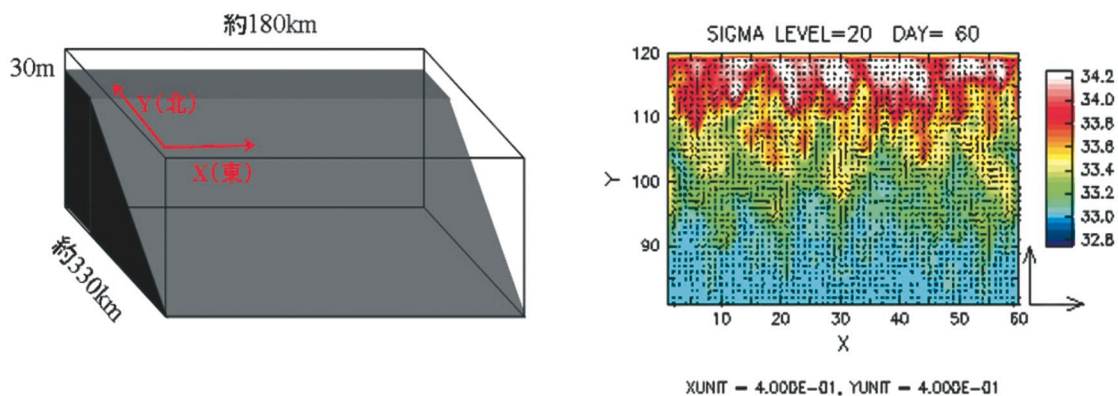


図1 高密度陸棚水形成の数値実験。陸棚上部の平坦な部分において塩分フラックスを与えた。(左) 海底地形、(右) 塩分フラックスを与え始めてから60日目の海底付近の塩分分布。

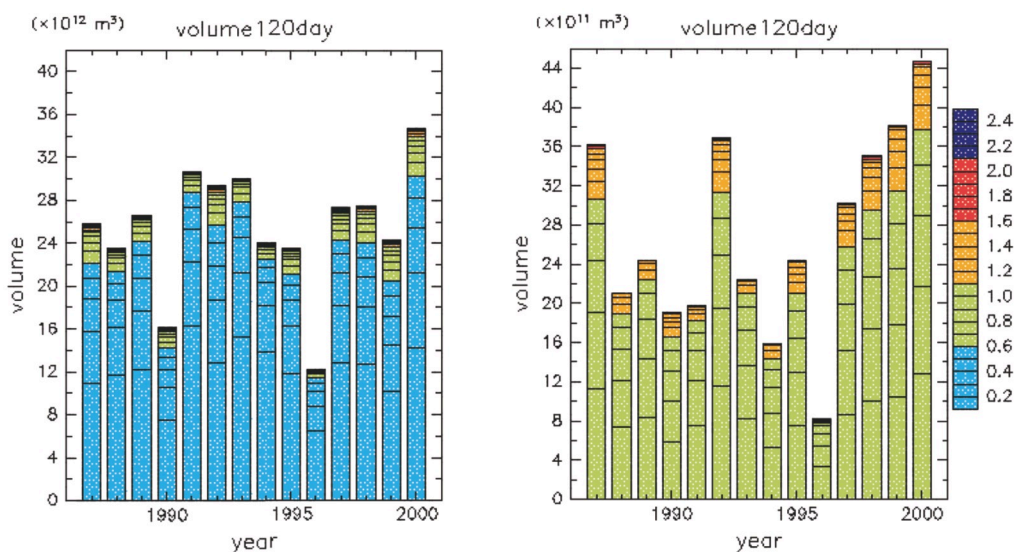


図2 Ohshimaら⁴⁾の海水生成量を用いて推定した高密度陸棚水の生成量。(左) 0.1 psu以上増加した海水の体積、(右) 0.6 psu以上増加した海水の体積。

西部亜寒帯循環の中層は著しい温暖化傾向を示しているが、海氷生成量に対する高密度水形成量の敏感さも、顕著な中層温暖化の一因かもしれない。

3. オホーツク海の風成循環

このように生成された高密度陸棚水はいかにして遠方に運ばれていくのだろうか。それには、オホーツク海の循環をまず知る必要がある。

オホーツク海は北部から中央にかけての比較的浅い海盆（1000 m 以浅）と、南部の 3000 m を超える千島海盆に大まかに分けることができる。そのうち、中央から北部にかけての循環はほぼ風によって駆動されていると考えられている⁹⁾。風成循環を引き起こすのは風応力の回転成分であり、オホーツク海の場合、年平均の風はほとんどの領域で反時計回りの回転成分を持つため、海流も反時計まわりとなる。図 3 に、このような風成循環のメカニズムに基づいた現実的なモデルの結果を示す⁶⁾。季節風が強い冬季に（図 3 b）、確かに反時計まわりの循環が卓越していることが分かる。特に、サハリン沿岸では、表層で塩分のうすい強い南下流がある。これが東樺太海流である。この低塩分水はサハリン北岸に流出するアムール川に影響を受けている海水であり、東樺太海流に乗って北海道沿岸まで到達することを示している。この海流は、表面ばかりではなく水深 500 m でも 20 cm/s を超える強い流れがあることが観測からわかった⁷⁾。一方、夏季は風が非常に弱く、オホーツク海内部では、東樺太

海流を除いて流れも弱い（図 3 a）。夏季に顕著なのは北海道沿岸の宗谷暖流である。これは、日本海から流れてくる海流で、高温・高塩分の性質を持っている。

北西陸棚域で生成された高密度陸棚水は陸棚を下りながら中層（200 m から 400 m 深）にもぐりこみつつ、サハリン北岸に達する。ここで東樺太海流に取り込まれ、サハリン東岸を南下することが観測から示唆された⁸⁾。それが南部の千島海盆に到達し、夏季には顕著な中冷構造を形成するのではないかと考えられる⁹⁾。このような、風成循環によって輸送される高密度陸棚水のモデリングは物質循環の観点からも重要であり、今後の課題である。

4. 千島列島周辺の潮汐混合がもたらす熱塩循環

千島海盆に到達した高密度陸棚水は、千島列島沿いの強い潮汐混合によって変質され、オホーツク海循環や西部亜寒帯循環、さらには北太平洋全域の中層循環に多大な影響を及ぼすことが明らかとなってきた。この節では、潮汐混合がもたらす千島列島近傍と海盆での循環、次節では北太平洋の循環に及ぼす影響の数値シミュレーションの結果を記述する。

千島列島は高い海嶺が海上に顔を出した部分が連なった列島で、このため地形は大変複雑である。大部分が浅く、太平洋とオホーツク海間での海水交換は 2 つの比較的深い海峡に限られていると言ってよい。

また、この海域では潮汐が激しい。2000 m 深でも 1

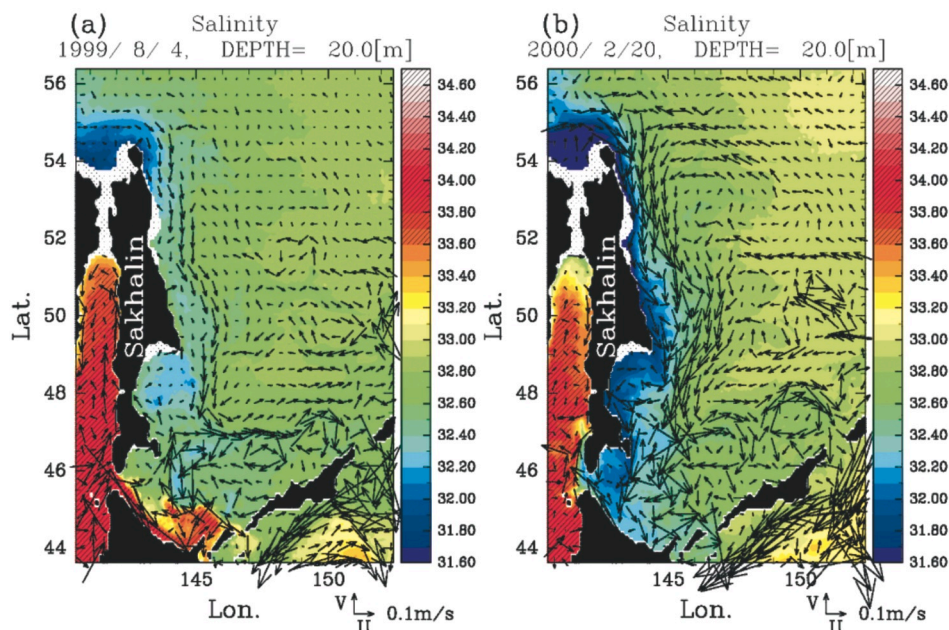


図 3 （上図）高解像度オホーツク海モデルによって再現された塩分分布（カラー）と海流（ベクトル）。(a)夏季, (b)冬季。

m/s もの潮流があった、ともいわれている。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ってきた。その証拠として、図4（右のパネル）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。このことは、潮汐によって上下に強く攪拌され、分厚い層ができていることを表している。

それを見るために、潮汐の数値実験を紹介する（図4中央）。水平格子が700m程度で、現在のスーパーコンピュータでも長時間の演算が必要である。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ど驚くほどよく似ている¹⁰⁾。また、鉛直断面（図5）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。層が厚くなることで、渦位 f/H (f はコリオリパラメータ、 H は層の厚さ) と呼ばれる物理量は小さくなる。このことが力学的には重要で、この低渦位水が北太平洋全域にわたる中層循環を強化しているものと考えられている¹¹⁾。

潮汐混合で形成された低渦位水はどのように広がるのだろうか。まず、オホーツク海内の循環について考えてみる。これには長時間の計算が必要で、上述のような複雑なモデルは使えないため、簡単なモデルで計算して

みた。海峡が浅い千島列島北部に対応するような箱型の海嶺を考える。また、海嶺上での潮汐混合を想定し、その海域の混合係数を局所的に高くした。そうすると、千島列島のオホーツク海側に強く深い時計回りの循環ができ、さらにそれが西に伸びて海盆全体を厚い層で覆うことがわかった（図6）。このような循環は観測結果とも良く対応しており、オホーツク海中層の低渦位水¹²⁾生成を説明することができる。

一方、潮汐混合によって表面まで巻き上がった塩分は、オホーツク海中央部の反時計回り循環に乗って北西陸棚域まで戻る。そこでは先に述べたとおり、活発な海水生成に伴い高密度陸棚水が生成されている。Nakamura¹¹⁾ は、このように塩分が北西陸棚域に回帰することによってそこでの塩分が高くなり、高密度陸棚水が効率的に形成されることを示している。このように、千島列島における潮汐混合は、オホーツク海の循環や高密度水形成に大きな影響を与えることが分かってきた。

5. オホーツク海海域の熱塩効果もたらす北太平洋循環へのインパクト

5.1. 低渦位水の通り道—黒潮と親潮の混合水域

千島海盆において形成された低渦位水が海峡を通過して太平洋側に流出すると、親潮に合流して日本東方・三陸沖に至る。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。親潮水は黒潮水と比

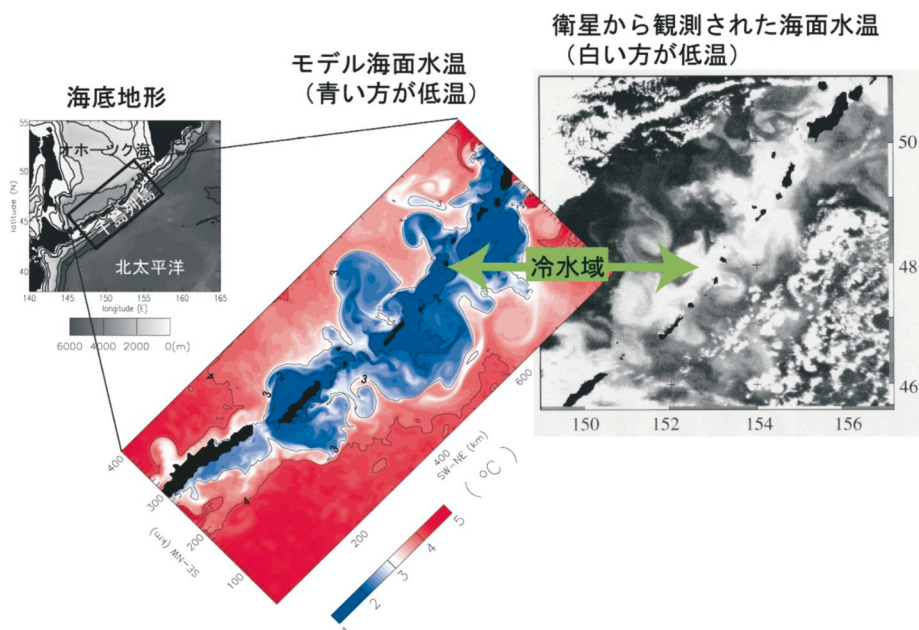


図4 衛星観測とシミュレーションによる千島列島付近の海面水温。(左) 地形、(中央) シミュレーションの結果、(右) 赤外衛星画像。

Planetary Potential Vorticity ($-f/\rho_0 * d\sigma_\theta / dz * 10^{-3}$) and σ_θ (contour)
 25.0000period x=575km (low:white, high:blue)

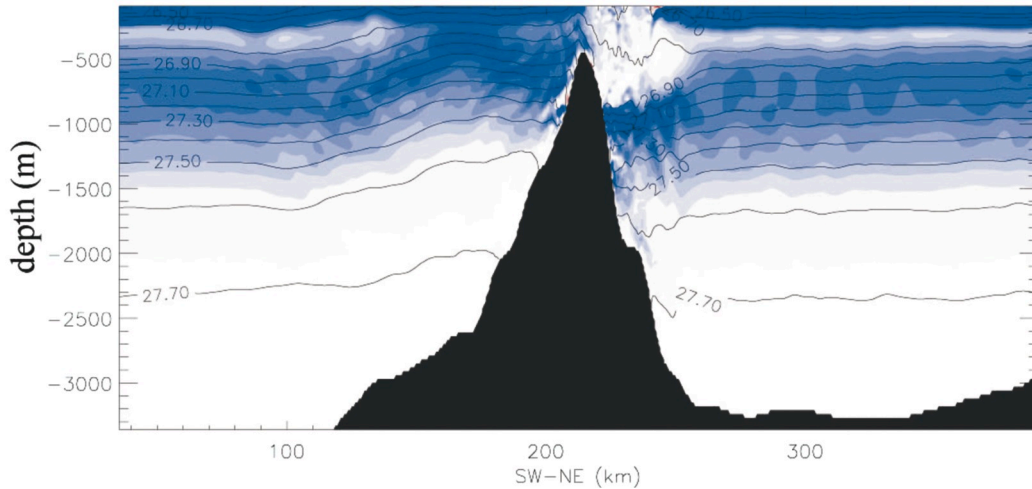


図5 シミュレーションによる潮汐混合の鉛直断面。海嶺の頂上付近で混合が起こり、成層が壊れている様子がわかる。

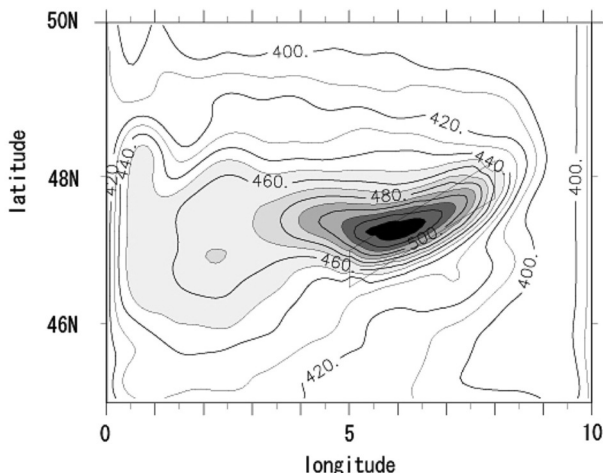


図6 混合によってできた厚い層が広がる様子。実線の平行四辺形の部分が千島列島に相当する海嶺で、そこだけに混合を与えている。コンター間隔は10m。計算初期の厚さは400m。450mより深いところにシェードを施した。

べると低温・低塩の性質を持っており、日本東方で両者は混合し、変質しつつ北太平洋全体に広がる。そして、亜熱帯域では北太平洋中層水、亜寒帯域では中暖水を形成し、北太平洋中層を占める水塊となる。

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り、多数の渦を伴っている。黒潮続流は大気のジェット気流に類似するものであり、時計回りの渦は大気の高気圧、反時計回りの渦は低気圧に相当する。黒潮続流はまた、黒潮が赤道域から北に向かって運んだ大量の熱と塩分を、太平洋の中央部に向けて押し出す役割を担っている。

一方、親潮は千島列島沿いに流れ、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、衛星の赤外画像でもはっきりと認識できる。しかし、親潮の経路は、黒潮続流や渦と出会った後、表面から見るだけでは良く分からなくなる。実は、この後親潮は黒潮続流の下にもぐりこみ、東に流されつつ南下して亜熱帯循環に入るのである¹³⁾。

海洋表層の循環は風によってほぼ決まっていますが、親潮のある亜寒帯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、理論的には北海道沖あたりにある。これまでの多くの数値実験の結果、このような風成循環の境界を挟んだ海水交換において、亜熱帯から亜寒帯へ侵入は容易であるが、その逆は困難であることが知られていた。ところが親潮水はその境界を越え、表層では三陸沖から時には房総沖まで達し、中層ではさらに赤道域まで達している。

最近の研究で、このような循環境界を越えるような流れをもたらす原因が、オホーツク海から流出する低渦位水であることが分かってきた^{11),14),15)}。図7にこのような親潮の流れを数値シミュレーションによって再現した結果を示す。低渦位水をオホーツク海から流出させると、川のように北海道・東北沿岸に沿って流れて行く様子が見える。一方、オホーツク海に低渦位水がない場合には混乱水域全体を黒潮水が占め、さらにそれは亜寒帯循環側へ侵入していた。このように、オホーツク海南部で低渦位水が生成されることにより北太平洋全体の循環に大きなインパクトを与える、ということが明らかと

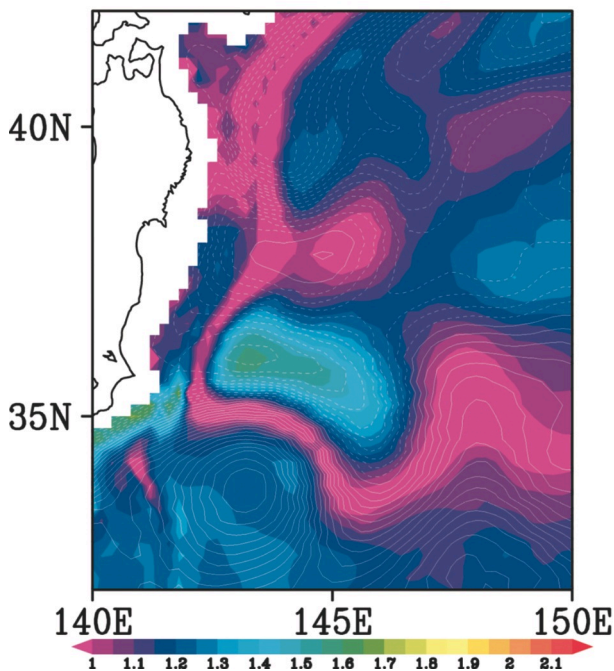


図7 モデルで再現された親潮(オホーツク海起源の水)の通り道。ポテンシャル渦度を描いたもので、紫の部分は層が厚いことを示す。

なってきた。

5.2. 北太平洋中層へのインパクト

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。 σ_θ が26.8の密度面においては、オホーツク海の塩分が一番小さい。そして、周りの水と混合し、少しずつ濃くなりながら亜熱帯循環に乗って南下し、その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。一方、北海道から東のほうでは、アラスカ湾に向かって塩分が徐々に濃くなっている。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¹⁶⁾。温かくなるのは、親潮水が黒潮水と混ざりつつ亜寒帯循環によって東方に流されていくからである。

すなわち、日本東方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き、周囲より低温・低塩分の北太平洋中層水になり、他方は亜寒帯循環に入って周囲より高温・高塩分の中暖水になる。

このような中層水に対する、千島列島の潮汐混合の影響について調べた数値実験を紹介する¹¹⁾。全球海洋モデルで、千島列島近傍の鉛直拡散係数を変化させながらその効果を考察している。図8aは潮汐混合を含めずに実験したものである。観測(図8c)と比較すると塩分極小値の沈み込みは非常に弱い。一方、千島列島近傍のみ $200 \text{ cm}^2/\text{s}$ という強い鉛直拡散係数を加えたケースで

は、塩分極小が明瞭になっている(図8b)。両者の差(図8d)を見ると、亜熱帯・亜寒帯循環の境界付近(40°N 近傍)での塩分が 0.2 psu も低下しており、循環境界付近でのプロセスが改善されたことを示している。図9は潮汐混合を加えた場合と加えない場合の等密度面($27.1 \sigma_\theta$)における塩分差を示しているが、オホーツク海全域にわたる塩分低下とともに、その影響が北太平洋全体にまで広がっていることがよく分かる。塩分濃度の変化から、その差はオホーツクを出た後に黒潮続流とともに東へ流れ、そこから南北に循環に乗って広がっている様子も見て取れる。

さて、このような潮汐混合のインパクトはいかなるプロセスを経て作られたのであろうか。それを見るために、大きな潮汐混合を与え始めたときの、初期の中層の流速差をプロットしたのが図10である。大きな混合を与え始めて1ヶ月後には日本沿岸をケルビン波が伝播し、南向きの流速を強化していることがわかる。これは、鉛直混合することによって千島列島近傍の水塊の渦位が小さくなり、そのシグナルが波として遠方まで伝わったためである。この南向きの流速の強化によって、低塩分水が風成循環の循環境界を南に通り抜ける。5年後には、高次モードのロスビー波が黒潮続流によって東向きに流され、東方に流速アノマリも広がっている。このようにオホーツク海から流出した海水は、流速のアノマリに乗って北太平洋中層全体の低塩分化に寄与していることが明らかとなった。

6. オホーツク海・北西北太平洋における熱塩循環と風成循環のカップリング

このように流出した低渦位・低塩分の親潮水は、最終的にどうなるのであろうか。まず、先に述べたように、黒潮続流を越えて南下した水塊は亜熱帯循環の500 mから1000 mを占める北太平洋中層水となり、その一部はインドネシア通過流によってインド洋に出る。ただし、この場合、中層水は深いところに存在するため、海面に回帰することはほとんどないと思われる。

一方、中暖水の密度もほぼ26.8程度であり、北太平洋中層水と同様オホーツク海から流れ出た海水の影響が大きいと考えられる。このような亜寒帯中暖水形成の数値実験を図11示す¹⁷⁾。黒潮側から入れたトレーサーの多くが循環境界を北に横切って亜寒帯循環に入り、最終的に西部亜寒帯循環に流れ込んでいる。混合水域では親潮水と黒潮水が強く混合されていることから、このような亜熱帯・亜寒帯循環の相互作用もオホーツク海起源の海水

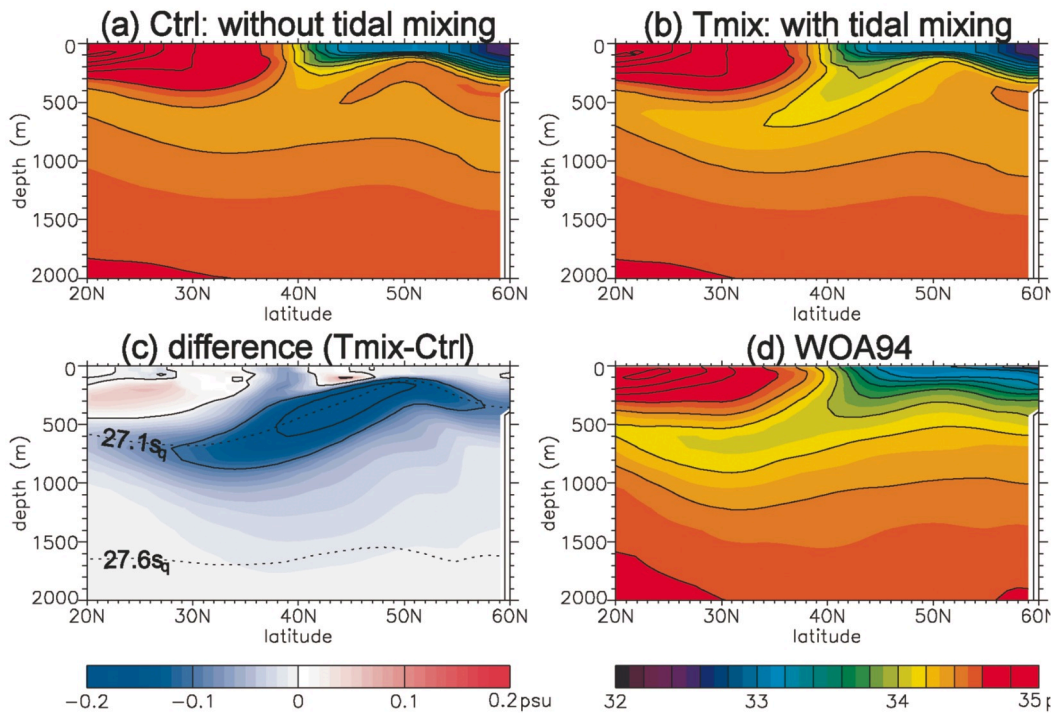


図8 北太平洋モデルにおける東西方向の鉛直断面。千島列島沿いに潮汐混合のパラメタリゼーションを加えることによって生じる塩分の差異を示している。(a)潮汐混合を含めない場合の塩分分布, (b)潮汐混合を含めた場合の塩分分布, (c)(b)から(a)を引いた塩分の差異, (d)観測によって得られた塩分分布。

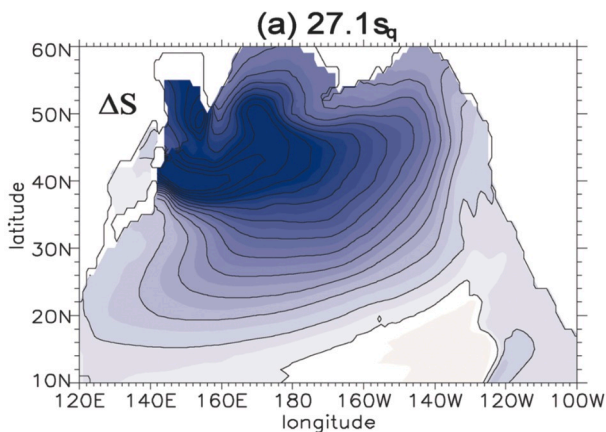


図9 北太平洋モデルにおける, 潮汐混合のパラメタリゼーションを含めた場合の塩分から含めない場合の塩分を引いた, $27.1\sigma\theta$ 上での差異。

が西部亜寒帯循環に戻ってくる経路のひとつと考えられる。また、オホーツク海から流出した海水の一部は、親潮フロントを越えずに、直接、西部亜寒帯循環に達するものもある。

西部亜寒帯循環では中暖水の層の上端が海洋混合層に接していることがこの数値実験から示唆され、また自動昇降 (Argo) フロートのデータからもそのことは支持されている。これは、中暖水もエクマンポンピングによっ

て表層まで吸い上げられていることを意味している。このように、オホーツク海の中層から流出した海水が最終的に海洋表面へ回帰する可能性があり、気候変動や海洋生物生産への影響を及ぼすことも考えられる。

エクマンポンピングはまたその強弱を通して風成循環や親潮の強さを変える。その一部は千島列島沿いの海峡を通してオホーツク海内に流入し、海水の生成や高密度陸棚水の形成に影響を及ぼしているかもしれない。このように、オホーツク海と北西北太平洋の循環は、浮力(熱塩)の効果と風成循環が結合した3次元的なシステムと考えられるが、その詳細な解明はこれからの課題である。

7. まとめ

これまで述べたとおり、北太平洋における熱塩循環は、オホーツク海から北太平洋亜寒帯循環にかけて存在する。その駆動力で特徴的なのは、オホーツク海北西陸棚域における海水生成・ブラインの排出と、千島列島における潮汐混合である。また、風成循環も熱塩循環と結合しながら大規模な3次元循環を駆動していると考えられる。そのようなシステムの模式図を図12に示す。

オホーツク海の海水は地球温暖化に敏感だといわれており、現実はその生成量は減少傾向にある。数値気候モ

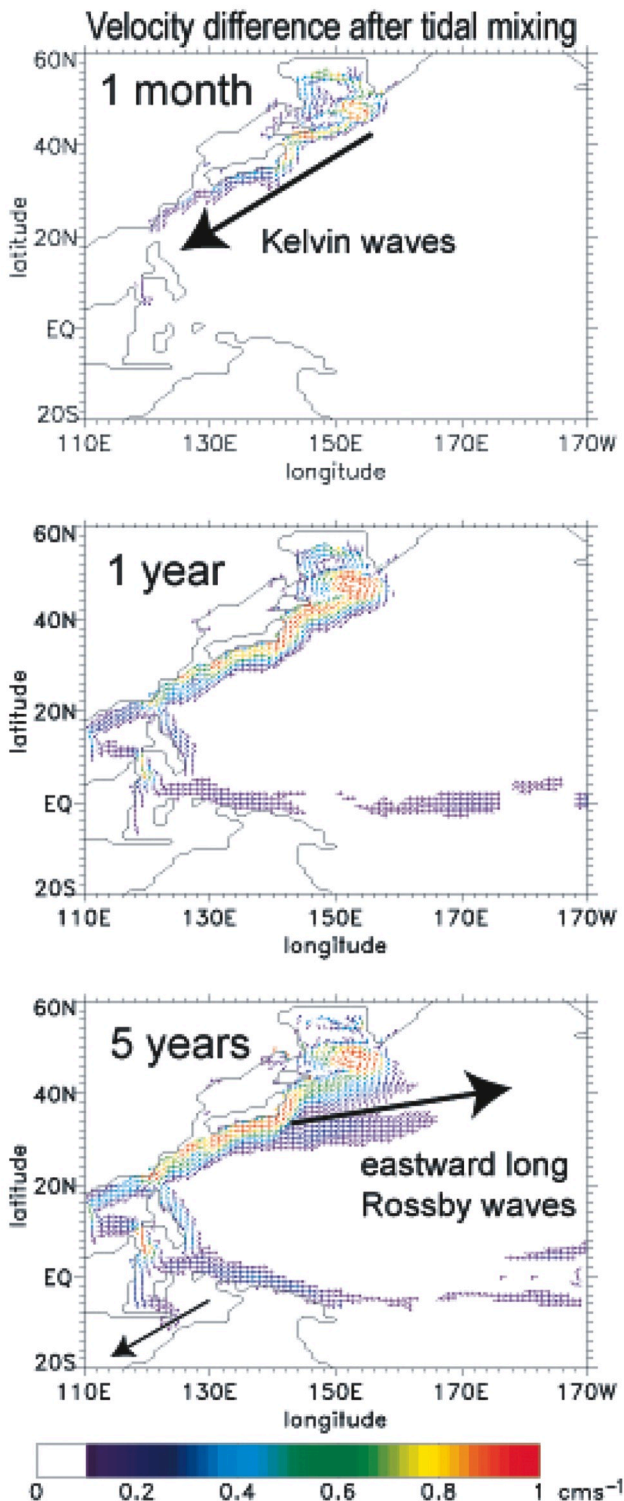


図10 北太平洋モデルで、千島列島沿いに潮汐混合を与えることによって生ずる過渡的な応答。潮汐混合を加えた場合から、加えない場合の速度を引いたもの。(a)1ヵ月後、(b)1年後、(c)5年後。

デルの中には、オホーツク海の氷はなくなる、という予測さえしているものもある。もしオホーツク海で海氷が作れなくなると、高密度陸棚水もできなくなるだろう。

これは、北太平洋中層水が著しく変質することを示唆している。また、循環そのものへの影響もあるかもしれない。

高密度陸棚水が形成されるオホーツク海北西陸棚域にはアムール川河口が位置している。アムール川は大量の物質をユーラシア大陸から大陸棚に運びこむが、その中には鉄分のような生物生産において必須の栄養物質も含まれている。これらの物質は潮汐によって高密度陸棚水に巻き込まれ、オホーツク海中層へと流れ出し、さらには北太平洋へと広がっていることが分かってきた¹⁸⁾。オホーツク海・北太平洋の中層循環は、このように物質の効率的な輸送経路となっており、さらに潮汐混合や冬季の混合によって海洋表層に回帰して日本近海の豊かな植物プランクトン生産を支えている可能性がある。したがって、温暖化による熱塩循環の弱化は、植物プランクトンの増減を介して漁業資源や炭素循環に多大な影響をもたらすことも考えられる。オホーツク海・北太平洋における温暖化は日本近海で生じている明瞭なシグナルであり、環境問題の基礎として、そのメカニズムの解明は今後の重要な課題である。

参考文献

- 1) Nakanowatari T., K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi, *Geophys. Res. Lett.* in press.
- 2) Nakatsuka, t., M. Toda, K. Kawamura, and M. Wakatsuchi, *J. Geophys. Res.* **109** (2004) C09S14 doi: 10.1029/2003JC001909.
- 3) 幾見, 北海道大学大学院地球環境研究科修士論文, (2006).
- 4) Ohshima, K. I., T. Watanabe, and S. Nihashi, *J. Meteor. Soc. Japan* **81** (2003) p.653.
- 5) Ohshima, K. I., D. Simizu, M. Itoh, G. Mizuta, Y. Fukamachi M. Wakatsuchi, *J. Phys. Oceanogr.* **34** (2004) p.513.
- 6) Uchimoto, K., H. Mitsudera, N. Ebuchi, and Y. Miyazawa, *J. Oceanogr.* in press.
- 7) Mizuta, G., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi, *J. Phys. Oceanogr.* **33** (2003) p.2430.
- 8) Fukamachi, Y., G. Mizuta, K. I. Ohshima, L. D. Talley, S. C. Riser, and M. Wakatsuchi, *J. Geophys. Res.* **109** (2004) C09S10, doi: 10.1029/2003JC001906.
- 9) Wakatsuchi, M., and S. Martin, *J. Oceanogr. Soc. Japan* **47** (1991) p.152.
- 10) Nakamura, T., and T. Awaji, *J. Geophys. Res.* **109**

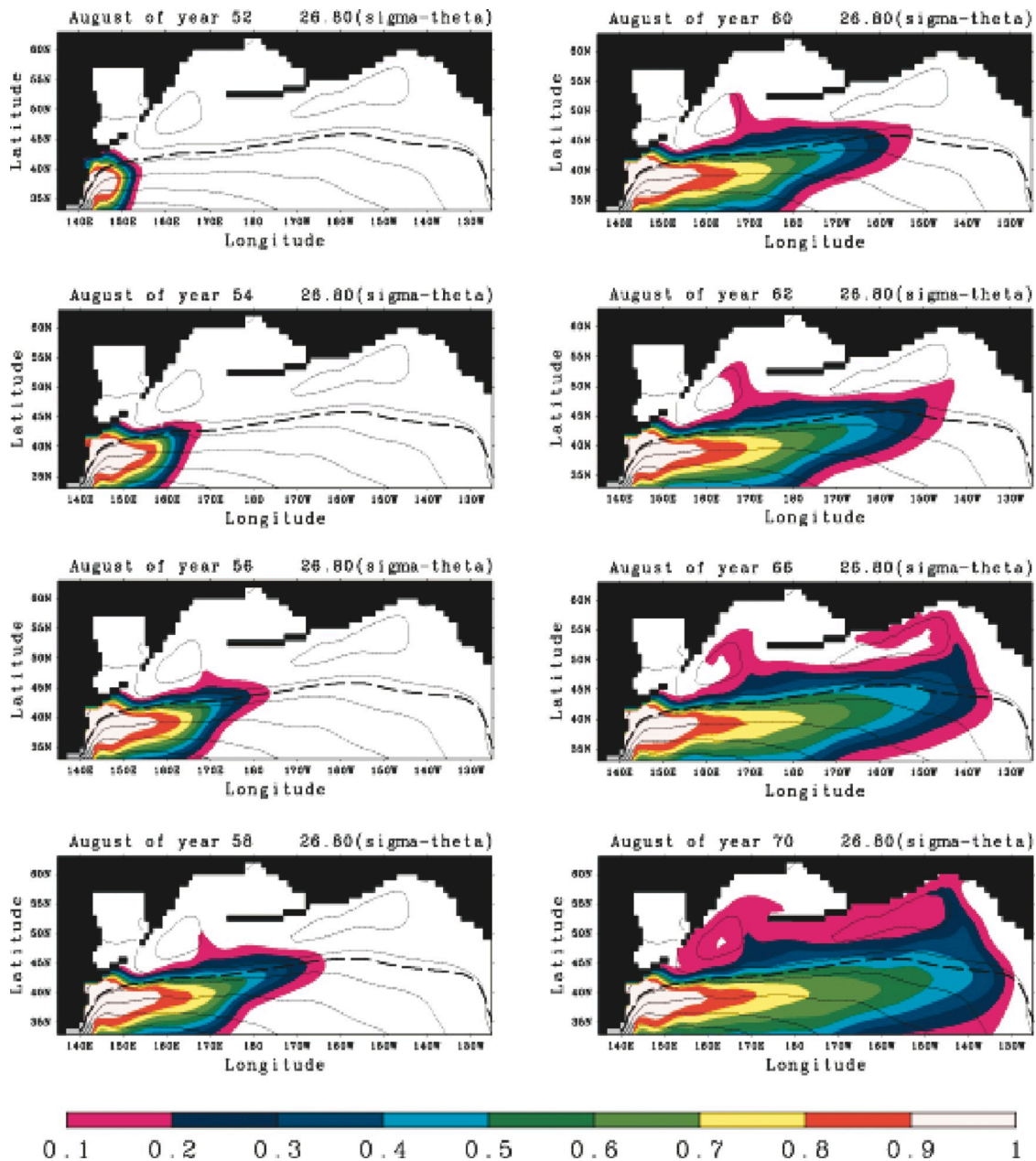


図 11 日本南岸の黒潮域から流出させたトレーサーの分布の時間発展。実線は海面高度，破線は $\text{curl}(\tau/f)=0$ の等値線。

(2004) C09S07, doi: 10.1029/2003jc001850.

- 11) Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa and T. Awaji, *J. Geophys. Res.* **111** (2006) C04003, doi: 10.1029/2005jc003142.
- 12) Itoh, M., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi, *J. Geophys. Res.* **108** (2003) C8, 3258 doi: 10.1029/2002jc001950.
- 13) Yasuda, I., K. Okuda, and Y. Shimizu, *J. Phys. Oceanogr.* **26** (1996) p.448.
- 14) Mitsudera, H., B. Taguchi, Y. Yoshikawa, H. Nakamura, T. Waseda, and T. Qu, *J. Phys.*

Oceanogr. **34** (2004), p.1174.

- 15) Tatebe, H. and I. Yasuda, *J. Phys. Oceanogr.* **34** (2004) p.2327.
- 16) Ueno, H. and I. Yasuda, *J. Geophys. Res.* **105** (2000) p.16,885.
- 17) Endoh, T., H. Mitsudera, S-P Xie, and B. Qiu, *J. Phys. Oceanogr.* **34** (2004), p.360
- 18) Nishioka, Jun, Tsuneo Ono, Hiroaki Saito, Takeshi Nakatsuka, Shigenobu Takeda, Takeshi Yoshimura, Koji Suzuki, Kenshi Kuma, Shigeto Nakabayashi, Daisuke Tsumune, Humio Mitsudera,

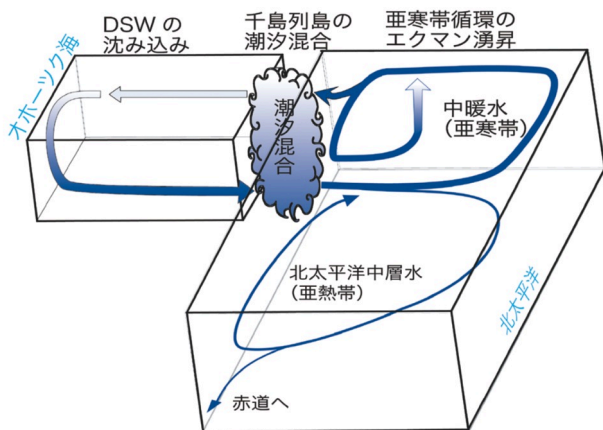


図12 オホーツク海・北太平洋亜寒帯循環における3次元循環の模式図。

Atsushi Tsuda, and W. Keith Johnson *J. Geophys. Res.* submitted.

(2006年11月20日 改訂受付)

Modeling studies of circulation in the Sea of Okhotsk and the Subarctic North Pacific

Humio Mitsudera
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Tomohiro Nakamura
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

abstract:

One of characteristics of the ocean circulation system in the Sea of Okhotsk and subarctic North Pacific is the co-existence of wind-driven circulation and thermohaline circulation, exhibiting complicated three-dimensional structures in which the surface- and intermediate-layer motions are coupled via various processes. In this article, we review modeling studies of processes that drive the three-dimensional overturning circulation that spans the surface and intermediate layers.

三寺史夫

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目
北海道大学 低温科学研究所
e-mail: humiom@lowtem.hokudai.ac.jp
URL: <http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/Mitsudera/index.html>

中村知裕

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目
北海道大学 低温科学研究所
e-mail: nakamura@lowtem.hokudai.ac.jp
URL: <http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/Nakamura/index.html>