

北海道大学低温科学研究所 教授

若土 正暁

「オホーツク海氷の実態と気候システムにおける役割の解明」

1. 研究実施の内容

「データ空白域」であったオホーツク海の実態把握と、同海における大気－海洋－海水システムを明らかにすることが本研究プロジェクトの目的である。

そのために、ロシアの協力を得て、今まで進入することさえ不可能であった北西部大陸棚域を含めた、オホーツク海ほぼ全域における本格的な海洋観測や、航空機を用いた海水域上での大気・海水観測、さらには、砕氷パトロール船「そうや」による海水域観測など、いずれもオホーツク海では最初の、「現場観測」の実施によるデータ取得に最大の力点をおいた研究を推進してきた。

本研究プロジェクトは、研究対象が広範囲にわたることから、海洋物理学、大気物理学、雪氷学、地球化学、生態学、古海洋学など、多分野からなる研究者組織で構成され、国内から北海道大学を中心とする関係機関、米国からワシントン大学海洋学部、スクリップス海洋研究所、ロシアから極東水文気象研究所、太平洋海洋研究所、大気観測局などの研究者・技術者の参加により実施された。

1-1) 観測の実施

(A) 海水

オホーツク海の特徴は、何と言っても海水が存在することにある。しかし、冬に発達・拡大、夏には消滅してしまう季節海水であるオホーツク海水の実態について、例えば、構造、成長履歴、漂流などの基本的なことさえ、我々のこれまでの知識は貧弱なものであった。そこで、本研究では、北部海域から南下する海水の終着域である南部北海道沖の海水域を季節海水の一つのモデル海域と位置づけ、第一管区水路部との共同で、1996年から毎年2月に、砕氷パトロール船「そうや」を用いた現場観測を実施してきた。このような、同じ海域で同時期に現場観測を継続して実施している例は世界的にもほとんど無く、極めて貴重な観測データセットが得られたものと考えている。中でも、海水に関して現在最も情報不足である海水厚については、この海域が漂流する海水の終着地という特徴を生かして、「そうや」船上からのビデオを用いた面的な情報と北海道沖での1カ所ではあるが係留系観測による時間変化情報の両方から、オホーツク海の少なくとも南部海域における、ここ数年間の海水厚の実態を把握することが出来た。

一方、オホーツク海全体の海水域の変動を定量的に明らかにするために、リモートセンシングの手法を用いたデータ解析にも取り組んできた。特に、毎日取得できるマイクロ波放射計からの海水データを用いた、高分解能「漂流速度」の導出に成功したことにより、オホーツク海水をはじめ、北半球全域における季節海水域の変動機構を解明できたことは大きな成果である。

1) オホーツク海南部海水域特性

海水のアルベドは、海水域の熱収支を議論する上で非常に重要な量であるが、オホーツク海水域はもとより、世界的にもあまり観測例は無い。我々の観測結果によると、オホー

ツク海水アルベドは、年による氷況の違いに関係なくほぼ一定値 0.64 であった。また、各気象要素や氷況観測データを用いて、南西部海水域全体の熱収支を計算したところ、海洋は熱源になっており、1日あたりの平均海水成長量は 0.5cm 以下であり、海水の現場生産はほんのわずかで、厚い海水のほとんどは北から運ばれてきたものであることが示唆された。

「そうや」に取り付けたビデオによる海水厚観測結果から、北海道沿岸沖に到達する海水のうち表面が平らな氷盤については、年による変動はあるものの、平均 0.2m–0.6m のものから成っていることが分かった。しかし、これは、あくまで平らな氷盤についてであり、オホーツク海水の特徴は、南極海水同様雪を多く含み、さらには氷盤どうしの衝突・重なり合いなど活発な力学過程を経た rafting ice や pressure ridge などのいわゆる厚みのある氷盤の割合が圧倒的に多いことなどが挙げられる。これらは、構造解析結果からも明らかであり、また係留観測データからも実際に最高 17m のものが捉えられた。

2) オホーツク海水の変動

100km 程度、一日以上の時空間スケールでの海水変動について、リモートセンシングの手法を用いて明らかにすることが出来た。それによると、海水は地衡風とほぼ平行に漂流しており、季節海水域の大部分における海水漂流速度の日々の変動は、風速場の変動によって説明できる。特に、オホーツク海水は、北半球の中で風力係数が最も大きい海域であることが分かった。

オホーツク海における海水域面積の年々変動は、北半球の中でも特に大きい。同海が一定の風速変化の影響を最も大きく受ける海域であることから、その年々変動を、風速の年による違いによって説明できることも分かった。ただ、2000/01 年の例のように、通常と異なって、海水域が海水の移流速よりも大幅に拡大した年の場合は、単純に風速場だけで説明は出来ず、海洋の影響を大きく受けている可能性が示唆された。

最後に、海水の生成域とそこでの生成量の導出を試みた。一般に、活発な海水生成域と言われる沿岸ポリニアの存在については、漂流速度場から沿岸付近の発散域として検出し、そこで生成する海水量については、毎日の密接度変化から計算される海水面積の変化から海水の移流による変化量を差し引くことによって求めた。その結果、生成量が最も多いのは、北西部のシベリア沿岸域で、樺太沿岸域も同程度の海水生成があることが分かった。これら沿岸域での海水生成量は、オホーツク海の全海水面積を上まわる。一方、海水域内部では、海水面積の減少も起きおり、解析結果によると、北西部 Shantaraskiy Bay での海水面積の減少が顕著であった。この面積減少（即ち、収束）は、海水どうしの衝突・重なり合いなどの力学過程がそこで起こっていることを意味しており、従って、Shantaraskiy Bay は、海水を厚くする場所として重要な役割を果たしている。そこで力学的に厚くなった海水は、卓越する南への移流によって広がっていくと考えられる。このことは、1) で述べた構造解析や係留による氷厚観測結果と矛盾しない。この海水域内での海水面積の減少量だけでも、その合計はオホーツク海の全海水面積に匹敵する。このことから、海水が力学的に厚くなる過程は、海水面積収支という観点からも無視できないことが分かる。

(B) 海洋

海洋観測に関しては、オホーツク海のほとんどがロシア領海のため、極東水文気象研究所観測船「クロモフ号」を用いて、今まで侵入することさえ不可能であった北西部大陸棚域も含めたほぼ全域の海洋観測を、1998年から毎年1回季節をかえて実施した。また、2001年には、ブッソル海峡におけるそれまでの観測データが不十分だったことから、そこでの海流再測を試み、オホーツク海―北太平洋間における信頼性の高い海水交換量を評価した。これらクロモフ航海における観測項目は、通常のCTD/採水観測の他、流速計やセジメントトラップからなる係留系観測やブイによる海流観測などにも力を入れた。また、古海洋復元のための海底堆積物コアサンプリングも行なった。

1) 海洋循環・東樺太海流

海洋循環に関しては、合計17地点における流速計係留観測による「オイラー的」観測と計20基のアルゴス表層ブイや計10数基のPALACE中層フロートを展開することによる「ラグランジュ的」観測とを平行させて実施した。この観測での最大の成果は、これまで流氷の南への運び役として「まぼろしの海流」とされ、その実態が全く不明であった東樺太海流の存在を初めて確認し、深さ1000mにも及ぶ大海流であること、また他には例を見ないような、冬最大・夏最小の極めて季節変動の大きな海流であることなどを明らかにした。

全体的な循環としては、中央部から北部海域における反時計回りの循環と西岸境界流(東樺太海流)の存在が顕著であり、南部の千島海盆域では弱い時計回り循環が卓越し、その内部に100kmから150kmスケールの高気圧性渦が数個、ほぼ一定の場所に存在する、などの実態が明らかになった。また、太平洋に流出したアルゴスブイのほとんどが、ブッソル海峡を通過したことから、オホーツク海水の北太平洋への流出は、ほぼブッソル海峡を通じて起こっていることが示唆された。

これら北部の反時計回り海洋循環場は、西岸境界流における密度流効果はあるものの、ほとんどが冬に発達する北西季節風によって駆動されていることが、モデルを用いた数値実験の結果から明らかになった。

2) 北太平洋中層水起源としての高密度陸棚水生成量の見積もり

北太平洋中層水の起源となる水(26.7–26.9 $\delta\theta$)がオホーツク海で生成すると言われてきたが、その量的実態は不明であった。本研究では、水温・塩分計をつけた係留系観測、プロジェクト前(1995–97)にロシアで得られた水温・塩分データ解析、過去のすべての歴史データを基に作成した当密度面データセットの解析、クロモフ航海における酸素同位体データ解析など多くの異なる方法を総動員して生成量評価に迫った。それぞれの手法に利点・欠点があり、より信頼性ある量の導出にはもう少し検討する必要があるが、現時点では0.2–0.7Svと見積もられ、方法による違いもあるが、それ以上に年による違いの大きいことが示唆された。

3) ブッソル海峡におけるオホーツク海—北太平洋海水交換観測

海峡における3ヶ所での2年間にわたる流速計係留観測では、回収には成功したが、初めての観測であったこともあり、予想をはるかに越える強烈な潮流のため、充分満足できるデータは取得できなかった。この強力な潮汐流の影響を最小限にするため、係留方式でなく、降下型音響ドップラー流速計を用いた観測を改めて実施した。この方式の場合、観測時期(2001年9月)は限定されてしまうが、潮汐の影響も考慮した、より信頼性の高い交換量を評価できるという利点がある。

観測結果から、海峡を通して、全体的には約9Svのオホーツク海水が太平洋に流出していることが分かった。また、この流出水と同じ性質の等密度水塊が北海道沖で3ヶ月後に観測されており、北太平洋中層水の起源となるオホーツク海水が北海道沖まで達していることが初めて観測で確認された。従って、今後の北太平洋中層水の定量的見積もりに今回の結果は非常に重要である。

4) 物質循環

北西部大陸棚域で生成する高密度陸棚水の流出に伴って、大量の高濃度有機炭素が、外洋の中層に直接運び込まれることが明らかとなった。また、懸濁粒子有機炭素の炭素同位体比の測定から、外洋中層に運び込まれる有機炭素の起源が、実際に大陸棚上で生産された有機物であることも証明された。オホーツク海における大陸棚から外洋への有機炭素の輸送効率は、他の大陸棚域と比べて著しく高く、海氷ブラインによって形成される高密度水の流出という季節海氷域特有のメカニズムが、沿岸—外洋系の物質循環過程に大きな影響を及ぼしていることが初めて明らかとなった。

オホーツク海は、世界で最も基礎生産力の高い海域の一つとしても知られている。セジメントトラップ実験から、特に西部海域の生物生産は、アムール河からの淡水供給にコントロールされていることが分かった。これは、衛星マルチセンサーリモートセンシングのデータ解析結果とも一致している。しかし、アムール河自身の観測をしていないので、詳細は分からない。

5) 古海洋

得られた海底堆積物コアの解析から、オホーツク海における古海洋変動を初めて明らかにした。例えば、オホーツク海の生物生産力、特に珪藻の生産は、氷期に低く間氷期に高い、極めて規則的な変化を示したが、これは氷期における海氷の拡大やアムール河からの栄養塩の流入の減少によって生じたものであると考えられる。セジメントトラップ実験から、IRD(Ice Rafted Debris)は、確かに海氷の融解のシグナルであることが分かった。そこで、IRDに見られる海氷の分布は、現在より氷期に大きく、ミレニアムスケールで変動していたことがわかった。また、融氷期に大陸棚から外洋への大規模な物質運搬イベントがあったこと、融氷期—完新世前半(現在よりも温暖期)には、円石藻類が大繁茂し、現在と違う生態系にあったこと、などが分かった。

(C) 大気

海氷の形成量にも密接に関連する、海氷域における海洋から大気への乱流熱フラックスを線的に評価するために、寒気吹き出し時に航空機観測を実施した。オホーツク海氷域では初めての沿岸域から氷縁域を越えた外洋域までの乱流熱フラックスの実測データを得ることに成功した。

一方、毎夏梅雨期に発達するオホーツク海高気圧の下層に出現する霧の発生・維持機構を明らかにするためのラジオゾンデ観測も「クロモフ」航海中に実施した。

1) 海氷域における乱流熱フラックスの評価と大気境界層の発達過程

航空機観測は三つの海域で行なったが、いずれの場合でも、沿岸から海氷域に入ると、大気は海氷面から、値は小さいが顕熱・潜熱を既に受け取っており、顕熱フラックスの方が潜熱フラックスよりやや大きいことが分かった。注目すべきは、風下における開水面（リード）の存在に対応して、顕熱・潜熱共に急激に増大したことが観測された。同時に、海氷上では、既に気団変質が始まっていることも分かった。衛星画像から、海氷上で既に雲が発生していることが確認されており、これは風上の海氷域で乱流熱フラックスがある程度供給されていることを示しており、それが証明された。また、リードの存在は、海氷域での結氷を促進すると同時に、風下の海面結氷を減速させる可能性もあり、本航空機観測では、気団変質におけるリードの役割について調べた。上流の海氷域では大気は海氷によって冷却されていたが、幅が数 km 以上の開水面のところで顕熱・潜熱フラックスはそれぞれ 50W/m^2 を超え、大気は急激に加熱された（このことは、逆にそこで激しい海面冷却・海氷生成が起こっていることを示唆している）。この大きな乱流熱フラックスは、結果として、凝結を伴う対流による大気境界層の発達（厚さ）を引き起こすことになる。

以上の結果は、海氷形成に極めて重要な海面冷却には、個々のリードの幅だけでなく、積算された開水面積および気団変質による大気境界層の変化を考慮する必要のあることを示唆している。

2) 夏季海洋上における霧の維持機構

幸いにも、オホーツク高気圧内部領域で初めての各気象要素鉛直プロファイルの時間変化を捉えることができた。それらの観測結果から、オホーツク海高気圧下層には霧が発生し、霧による放射冷却過程、低温の海水温及び霧による日傘効果の相互作用によって、下層に寒冷な高気圧が形成維持されることなどが示された。また、オホーツク海の夏は、北の方が南より気温の高い（シベリア大陸高温、太平洋低温）分布をしており、その南北温度勾配が大きい程、オホーツク高気圧が発達することなども明らかになりつつある。

（本研究プロジェクトは、多くの課題に取り組む研究者で構成されてはいたが、すべての課題が、共通の大きな枠（観測によるオホーツク海実態把握）内のものであったことから、一つの観測グループに集中して研究を展開してきた。そのため、以上のように特別に区別せずに書いた）

2. 研究構想

2-1) 研究の背景

高緯度海域に広く分布する海氷が、世界の気候に大きな役割を果たしている事はよく知られている。なかでも、オホーツク海は地球上で最も低緯度に位置する海氷域であり、地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所として、近年特に注目されている。また、オホーツク海は北太平洋中層水の起源水域であり、二酸化炭素の吸収域、高生物生産域など物質循環の見地からも重要な海域である。

しかし、オホーツク海はこれまで観測が少なく、何故そのような低緯度で海氷が形成・発達できるのか等、基本的な問題でさえ未解決であった。本研究では、ロシアの協力によりロシア船を用いたオホーツク海ほぼ全域の海洋観測、ロシア航空機を用いた冬季の大気海氷観測、砕氷パトロール船「そうや」を用いた水路部との海氷域観測等の各現場観測の実施を中心に、リモートセンシング、モデリングなどの手段を総合し、海氷の消長・変動のメカニズム、海洋循環、物質循環、北太平洋中層水の起源水の生成機構、大気-海洋相互作用、古海洋などを明らかにすることを目的に研究を進めてきた。

2-2) 研究の概略

(A) オホーツク海氷研究の重要性

海氷は、南北両極域をはじめ高緯度海域に広く分布し、その特性から世界の気候に大きな影響を与えている。例えば、(1) 海氷は太陽からの放射エネルギーの大部分を反射(高アルベド)してしまし、(2) 大気-海洋間の熱交換を著しく抑制(断熱材の役割)する。また、(3) 海氷が形成する際に生成される高塩分の海水は、世界の海洋の深層水の源であり、海洋大循環の駆動源でもある。このように、気候システムに重要な役割を果たしている海氷の特性とその効果について、量的に評価するような研究は、世界的にもほとんどなされていないのが現状である。それは、何よりも海氷域での情報が著しく不足していることによる。

一方、本研究対象のオホーツク海は、地球上で最も低緯度に位置する季節海氷域である。低緯度の海氷ほど、気候変化に対する応答が速く、また、年々変動が大きい。このため、海氷と気候の相互作用を理解する上、オホーツク海氷は格好の研究材料と言える。オホーツク海氷にはまた、南北両極域海氷と共通するいくつかの特徴がある。例えば、季節海氷(冬発達、夏消滅)という点では南極海の海氷と同じであり、低緯度海氷の成因の一つと言われている、河川水流入による海洋の二重構造は北極海にも顕著に存在する。さらには、北太平洋亜熱帯域に広く分布する北太平洋中層水の起源となる水がオホーツク海にあり、その生成に海氷が大きく関与しているらしいことが指摘されている。

また、オホーツク海とそれを取り囲む、東シベリア大陸-北極圏-北太平洋-日本のいわゆる「環オホーツク海」は、その地理的配置や低緯度海氷などによる多様な相互作用の存在する、地球上唯一ともいえる特徴的環境にある。従って、その中心に位置するオホー

ツク海の全体像把握は、今後の地球環境科学研究に重要な役割を果たすことになる。

(B) 取り組むべき研究課題と進め方

我々は、次の五つの研究課題を取り上げ、その解明に取り組んできた。これらの課題解決の鍵は何と言っても、ロシア船を用いた海洋観測、ロシア航空機を用いた大気・海氷観測を成功させることが出来るか、にあった。現場観測でカバーできないところは、リモートセンシングやモデリングなどを併用することで補強していくことにした。

1) 低緯度海氷の特性・消長過程・変動機構

本研究を開始するにあたり、先ずやるべきは、低緯度海氷の成因の一つと言われてきたアムール河からの淡水流入による海洋二重構造の存在を確認することであった。それは、海氷形成が始まる直前の秋に北西部大陸棚域で実施した海洋観測により実現した。水深 30m-50m の層に、極めて強い密度躍層による「海洋二重構造」の存在が初めて確認出来た。この混合層も、秋から冬にかけての大気冷却により、次第に深まっていくが、密度躍層が強く、最大 150m までが精一杯で、それより深まらず、やがて混合層全体が結氷温度になり表面結氷を迎える、というシナリオがクロモフでの観測とその後の PALACE 中層フロート観測により明らかとなった。つまり、最初の海氷形成は、海洋混合層の熱がいかに速く大気に奪われるか、つまり海洋から大気への乱流熱フラックスの大きさに依存し、その後の海氷域の拡大はほとんどが風で説明できることが明らかとなった。

また、オホーツク海氷は風の影響を受けやすいため、静かに厚みを増していくという、熱力学成長よりも互いの氷盤がぶつかったり、重なりあつたりの力学成長が遥かにまさっている海域であることが、海氷サンプルの構造解析や係留系氷厚観測により明らかになった。

2) 北太平洋中層水の起原水の生成機構とその北太平洋流出量評価

北太平洋中層水(NPIW)は、低温・低塩・高酸素の性質をもち、塩分極小を特徴とする水塊で、北太平洋亜熱帯域の水深 300m-800m 層に広く分布している。北太平洋では、この NPIW の密度層が海面に顔を出すことが冬でさえ無いことから、近年、この水の起原がオホーツク海にあると指摘されるようになってきた。しかし、オホーツク海のどこで、どのようにして、どれだけの量生成し、そのうち、毎年、どのくらいの量の水が北太平洋に流出しているのか、と言った多くの疑問に何一つ答えられないでいた。

本研究は、それらの疑問に対して、観測データを基本に、出来るだけ定量的に答えていくことを試みた最初の研究である。それらを明らかにするためには、以下のポイントとなる観測を実施しなければならない。

- NPIW の一番の起原といわれている、冬季、北西部大陸棚域の沿岸ポリニアにおける海氷形成にともなって生成する高密度水(pure DSW)の量的評価。
- その高密度水がまわりの水とどのような混合過程を経ながら、北太平洋への出口である、ブッソル海峡まで運ばれるのか。これを理解するためには、オホーツク海における海洋循環の実態、特に、西岸強化流である「東樺太海流」の定量的把握、周

囲の水との混合過程などを知る必要がある。

- ・ブッソル海峡における NPIW 起源水の流出量評価

以上の評価のために、我々は、通常の海洋観測（CTD、酸素同位体など）の他、アルゴス表層ブイ・PALACE 中層フロートの展開、流速計・CT 計係留観測などの現場観測を4年間にわたって実施した。また、最近ロシア漁業局によって取得された観測データの解析、歴史データセットを用いた等密度面解析なども併用して、多角的に調べた。さらに、海洋循環・東樺太海流の駆動機構を明らかにするために、モデルを用いた数値実験などにも取り組んだ。

3) 物質循環システム

オホーツク海は、季節海氷域、高生物生産域、北太平洋中層水起源水生成域、アムール河川水流入などの大きな特徴があるため、それらに密接に関連する物質循環システムを評価することは、グローバルな物質循環の理解にも大いに役立つことが期待される。そこで、アムール河口域と外洋の仲介であり、オホーツク海の物質循環に最も重要な「大陸棚」を中心とした観測から、以下のような有機物の循環に関するいくつかの注目すべき知見が得られた。

- ・潮汐&ブラインポンプの発見

通常よりも10-100倍も多量の懸濁粒子含有の高濁度均質層が大陸棚底層からサハリン東岸沖の中層にかけて広がっていることが観測された。これは、陸棚上では通常でも多量の上に、潮汐混合が盛んなことにより、海底に堆積した粒子の激しい再懸濁効果が働いたものと考えられる。この高濁度水が高密度ブライン水とともに効果的に南に輸送されたことから、「潮汐&ブライン」ポンプとも呼べる、高緯度大陸棚特有の外洋への輸送メカニズムの存在が明らかとなった。

また、堆積粒子以外の比較的新鮮な有機炭素（溶存態、DOC;懸濁態、POC）の輸送についても調べたが、オホーツク海が、大陸棚で生産される有機炭素を極めて効率的に外洋に運搬する海であることが分かった。

- ・植物プランクトンブルーム

植物プランクトンのブルームが始まるタイミングは、これまで言われてきた現場海域での海氷融解だけに規定されているわけではなく、むしろ、アムール河からの淡水流入によって作られる安定な密度成層がより大きく関与していることが分かった。

- ・アムール河からの陸起源有機物流入

アムール河では、夏に上流域でモンスーンによる大量の降雨があるので、秋に流量最大という、高緯度河川には珍しい特徴がある。そこで、このアムール河川水流入の、特に、サハリン東部沖における秋季の高い生物生産力への影響について調べた。その結果、アムール河から確かに大量のDOCやPOCの流入はあるものの、前者が海洋ではほとんど分解・除去されず、保存的成分として振舞っているのに対して、後者が保存的性質を示すことなく海洋内部で生成・分解を繰り返しているなど、生

物生産力を高める効果も一様でないことが示された。

4) 大気－海洋相互作用

オホーツク海は、海氷面積の年々変動が大ききことで知られている。海氷が断熱材の役割を果たしていることから、その変動は、海洋から大気への熱フラックスに大きく変化させることを意味している。最近の研究からも、オホーツク海水の多寡が大気への熱フラックスを大きく変化させ、定在ロスビー波という形でグローバルな大気循環に影響を与えることが示唆されている。しかし、実際のオホーツク海水域で、海洋から大気への乱流熱フラックスを実測したという例はこれまでに無かった。

本研究では、海水域における海洋から大気への乱流熱フラックスの評価を、三つの海域でそれぞれ違った方法で行なった。

- ・ 南西部海水域では、寒気吹き出し時における三点同時ラジオゾンデ観測を、ユジノサハリンスク、砕氷船「そうや」、北海道斜里町の三点で実施した。結果は、 30W/m^2 から 300W/m^2 程度であった。この乱流熱フラックスの変動は、気温と海氷密接度の関数として表されることが分かった。
- ・ 南部から中央部にかけての海水域上3測線で、寒気吹き出し時に、航空機を用いた大気・海氷観測を実施した。樺太沿岸から海水野を横断し、外洋に至るコースで表面状況に違いによる熱フラックスの変化とそれに伴う大気境界層の発達具合について観測した。
- ・ オホーツク海を取り囲む陸域約10ヶ所におけるラジオゾンデ観測データの解析から、オホーツク海水域の平均的な乱流熱フラックスを見積もった。このデータ解析からも、 20W/m^2 から 300W/m^2 程度であった。

5) 古海洋環境の復元

本プロジェクトにおける古海洋研究の最大のねらいは、オホーツク海における海氷分布や生物生産力が大昔はどのようなようだったのか、その実態を知ることである。海氷変動について、我々が知り得るのは現在の情報だけである。過去の情報は将来予測に大きな力となる。はなはだ不十分ながらもモデルを使用した研究に頼らざるを得ない現状では、海底堆積物コア解析による過去10万年程度の海氷分布変動の復元は、将来予測に有効な情報となる。問題は、海氷勢力の裏付けとなる、信頼のおける「指標」を何にするかということであった。これまで沿岸域から外洋に運ぶ砂やIRD (Ice Rafted Debris) が氷山の流出の指標データ (Proxy Data) として用いられてきた。海氷についても、本研究で実施した、セジメントトラップ実験の結果から、IRDが海氷分布を同定するのに極めて信頼性の高い指標であることが分かった。

オホーツク海を東西に横断する三ヶ所から採取された海底堆積物コアサンプルのIRD解析結果によると、予想通りではあるが、氷期・間氷期のサイクルに対応して、海水域の分布が西部から東部へと大きく拡大・縮小していたが、一方では、最終氷期最寒期（過去約2万年前）を除いて、東部は常に海氷の分布しない海域であったことが示された。また、

全体的な海水勢力は、ある一時期を除いて、過去8万年間は、一貫して現在よりはるかに大きな面積を占めていた。

3. 研究実施体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名 称	場 所	参加人数	概 要
8. 11. 25～ 11. 27	第1回「オホーツク海と周辺陸域における大気-海洋-雪氷圏」	北大低温研	延べ150名 (3日間)	オホーツク海研究計画の提案と学識者によるその重要性の評価を受ける。
9. 11. 20～ 11. 21	事前打ち合わせ	〃	50名	Yuri Volkov (ロシア極東水文気象研究所長) の講演と研究計画の検討
10. 5. 12～ 5. 14	第1回研究計画推進会議	〃	30名	
10. 7. 3	ロシア極東地域における海洋研究の現状	〃	30名	Sergey Varlmov (ロシア極東水文気象研究所主任研究員) の講演
10. 12. 14～ 12. 15	クロモフ航海報告会	〃	50名	
11. 5. 17	北太平洋海洋循環におけるオホーツク海の役割とは?	〃	40名	Ltne Talley (米国カリフォルニア大学教授) の講演
11. 5. 18～ 5. 19	第2回研究計画推進会議	〃	30名	
11. 12. 5	クロモフ航海報告会	〃	40名	
12. 4. 15	第3回研究計画推進会議	〃	25名	
12. 8. 12～ 8. 13	クロモフ航海報告会	〃	30名	
12. 10. 19～ 10. 27	PICES (北太平洋亜寒帯域海洋研究) 国際ワークショップ	函館	延べ600名	
12. 10. 27	海底堆積物コアに関するシンポジウム	北大低温研	50名	
12. 12. 12～ 12. 15	第2回「オホーツク海と周辺陸域における大気-海洋-雪氷圏相互作用」国際シンポジウム	〃	延べ250名 (4日間)	
13. 2. 8～ 2. 10	オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム	紋別	延べ250名	
13. 3. 7～ 3. 9	WADATI conference (極域大気・海洋・雪氷圏における最新研究成果発表会)	つくば	延べ300名	
13. 3. 31	日本海洋学会シンポジウム「最新のオホーツク海研究」	東京水産大	80名	
13. 6. 28～ 6. 30	北太平洋中層水研究のレビュー	北大低温研	40名	Stephen Riser (米国ワシントン大学教授) の講演
13. 7. 15	第4回研究推進会議	〃	25名	
14. 2. 14	オホーツク海研究プロジェクト成果発表会 (AGU Ocean Science Meeting)	ハワイ	70名	
14. 2. 14	プロジェクト成果の取りまとめに関する検討会	〃	30名	
14. 10. 21～ 10. 23	オホーツク海研究プロジェクト最終報告書作成検討会	ニセコ	18名	

5. 主な研究成果

(1) 論文発表

1. Watanabe, T. and M. Wakatsuchi, 1998, Formation of 26.8-26.9 $\delta \theta$ water in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk as a possible origin of North Pacific Intermediate Water, *J. Geophys. Res.*, 103(C2), 2849-2865.
2. Kikuchi, T., M. Wakatsuchi and M. Ikeda, 1999, A numerical investigation of the transport process of dense shelf water from a continental shelf to a slope, *J. Geophys. Res.*, 104(C1), 1197-1210.
3. Toyota, T., J. Ukita, K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi and K. Muramoto, 1999, A measurement of sea ice albedo over the southwestern Okhotsk Sea, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 77, 117-133.
4. Kimura N. and M. Wakatsuchi, 1999, Processes controlling the advance and retreat of sea ice in the Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, 104(C5), 11137-11150.
5. Ukita, J., T. Kawamura, N. Tanaka, T. Toyota and M. Wakatsuchi, 2000, Physical and stable isotopic properties and growth processes of sea ice collected in the southern Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, 105(C9), 22,083-22,093.
6. Kimura, N. and M. Wakatsuchi, 2000, Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3735-3738.
7. Toyota, T., T. Kawamura and M. Wakatsuchi, 2000, Heat budget in the ice cover of the southern Okhotsk Sea derived from in-situ observations, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 78, 585-596.
8. Itoh, M. and K. I. Ohshima, 2000, Seasonal variations of water masses and sea level in the southwestern part of the Okhotsk Sea, *J. Oceanogr.*, 56, 643-654.
9. Toyota, T. and M. Wakatsuchi, 2001, Characteristics of the surface heat budget during the ice growth season in the southern Sea of Okhotsk, *Ann. Glaciol.*, 33, 230-236.
10. Ohshima K. I., G. Mizuta, M. Itoh, Y. Fukamachi, T. Watanabe, Y. Nabae, K. Suehiro, and M. Wakatsuchi, 2001, Winter oceanographic conditions in the southwestern part of the Okhotsk Sea and their relation to sea ice, *J. Oceanogr.*, 57, 451-460.
11. Aramaki, T., S. Watanabe, T. Kuji and M. Wakatsuchi, 2001, The Okhotsk-Pacific seawater exchange in the viewpoint of vertical profiles of radiocarbon around the Bussol' Strait, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3971-3974.
12. Kimura, N. and M. Wakatsuchi, 2001, Mechanisms for the variation of sea-ice extent in the Northern Hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 106(C12), 31319-31332.
13. Narita, H., M. Sato, S. Tsunogai, M. Murayama, M. Ikehara, T. Nakatsuka, M. Wakatsuchi, N. Harada and Y. Ujiie, 2002, Biogenic opal indicating less productive northwestern North Pacific during the glacial ages, *Geophys. Res. Lett.*, 29(15), 22.1-22.4. 1029/2001GL014320.
14. Matsuoka, T., S. Uratsuka, M. Satake, A. Nadai, T. Umehara, H. Maeno, 2002, H. Wakabayashi, F. Nishio and Y. Fukamachi, Deriving sea-ice thickness and ice types in the Sea of Okhotsk Using dual-frequency airborne SAR (Pi-SAR) data. *Ann. Glaciol.*, 34, 429-434.
15. Yamamoto, M., S. Watanabe, S. Tsunogai and M. Wakatsuchi, 2002, Effects of sea ice formation and diapycnal mixing on the Okhotsk Sea Intermediate Water clarified with oxygen isotopes, *Deep-Sea Res.*, I 49, 1165-1174.
16. Nakatsuka, T., C. Yoshikawa, M. Toda, K. Kawamura and M. Wakatsuchi, 2002, An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk: Implication for the transport of particulate organic matter in a seasonally ice-bound sea, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10, 1029/2001

GL014029.

17. Sato, M., H. Narita and S. Tsunogai, 2002, Barium increasing prior to opal during the last termination of glacial ages in the Okhotsk Sea Sediments. *J. Oceanogr.*, 58, 461-467.
18. Shimizu, D. and K. I. Ohshima, 2002, Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing, *J. Oceanogr*, 58, 851-860.
19. Seki, O., K. Kawamura, T. Nakatsuka, K. Ohnishi M. Ikehara and M. Wakatsuchi, 2002, Sediment core profiles of long-chain n-alkanes in the Sea of Okhotsk: Enhanced transport of terrestrial materials in the last deglaciation to the early Holocene. *Geophys. Res. Lett.* (in press)
20. Ohshima, K.I., M. Wakatsuchi, Y. Fukamachi and G. Mizuta, 2002, Near-surface circulation and tidal currents of the Sea of Okhotsk observed with the satellite-tracked drifters, *J. Geophys. Res.*, 107. (in press)
21. Gladyshev, S., L. Talley, G. Kantakov, G. Khen and M. Wakatsuchi, 2002, Distribution, formation and seasonal variability of the Okhotsk Sea Intermediate Water, *J. Geophys. Res.*, 106. (in press)
22. Fukamachi, Y., G. Mizuta, K.I. Ohshima, H. Melling and M. Wakatsuchi, 2002, Variability of sea-ice draft off Hokkaido in the Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar in winter of 1999, *Geophys. Res. Lett.* (in press)
23. Itoh, M., K.I. Ohshima and M. Wakatsuchi, 2002, Distribution and formation of Okhotsk Sea Intermediate Water; an analysis of isopycnal climatology data, *J. Geophys. Res.* (Accepted)
24. Ohshima, K.I., T. Watanabe and S. Nihashi, 2002, Surface heat budget of the Sea of Okhotsk and the role of sea ice on it, *J. Meteor. Soc. Jpn.* (Revised)
25. Mizuta, G., K.I. Ohshima, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi, 2002, Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current, *J. Phys. Oceanogr.* (Revised)
26. Ohshima, K.I., D. Shimizu, M. Itoh, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi, 2002, Wind-driven circulation in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.* (Revised)
27. Tachibana, Y., H. Ogawa, M. Shiobara, K. Iwamoto, K. Takeuchi and M. Wakatsuchi 2002, Thermodynamic mixed-layer structure of the Okhotsk high and its relation to marine fog, *J. Atmosph. Sci.* (Submitted)
28. Sakamoto, T., T. Tanabe, H. Shimizu, M. Ikehara, N. Kimura, H. Narita, K. Aoki, T. Nakatsuka and M. Wakatsuchi, 2002, Millennium scale sudden and abrupt sea-ice extent events in the Sea of Okhotsk based on analysis of ice rafted debris (IRD) in marine sediment cores, *Marine Geol.* (Submitted)
29. Mizuta, G., K.I. Ohshima, M. Itoh, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi, 2002, Winter mixed layer and its yearly variability under sea ice in the southwestern part of the Sea of Okhotsk, *Continental-Shelf Res.* (Submitted)
30. Seki, O., K. Kawamura, M. Ikehara, T. Nakatsuka, H. Okada and T. Oba, 2002, Variation of alkenone sea surface temperature in the Sea of Okhotsk over the last 85 kyrs, *Orga. Geochem.* (Submitted)
31. Seki, O., M. Ikehara, K. Kawamura, T. Nakatsuka, H. Narita, T. Sakamoto, K. Ohnishi and M. Wakatsuchi, 2002, Reconstruction of plaeoproductivity in the Sea of Okhotsk over the last 30 kyrs, *Paleoceanogr.* (Submitted)
32. Okazaki, Y., K. Takahashi, H. Yoshitani, T. Nakatsuka, M. Ikehara and M. Wakatsuchi, 2002, Radiolaria under the seasonally sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea: flux and their

implications for paleoceanography, *Marine Micropaleontol.* (Submitted)

33. Yoshikawa, C., Y. Yamanaka and T. Nakatsuka, 2002, A study of seasonal variations in nitrogen isotope ratio of sinking particles using a marine ecosystem model, *Deep Sea Res.-I* (Submitted)

(2) 特許出願

発明の名称「海氷の観測方法」

- ・ 国際出願；深町康、平成 14 年 3 月 1 日、PCT/JP02/02002
- ・ 国内出願；深町康、平成 13 年 11 月 29 日、2001-342437