

「地球変動のメカニズム」
平成9年度採択研究代表者

若土 正暁

(北海道大学 低温科学研究所 教授)

「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. 研究実施の概要

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、基本的な問題が未解決である。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動員して、海氷の消長過程、北太平洋中層水の起源水の生成機構、海氷変動とそのインパクト、大気・海洋相互作用などを明らかにし、オホーツク海における海氷の実態と気候システムにおける役割の解明をめざしている。

平成12年度には、前年度、前々年度に引続きロシア船「クロモフ号」を用いた第三回目の航海を海氷消滅後（平成12年6月2日～7月5日）に行なった。この航海では、通常の海洋観測（CTD/採水）の他に、第一回目の航海の際にブツソル海峡に設置した流速計、第二回目の航海の際にサハリン東岸沖・北東沖、北西部大陸棚域などに設置した流速計やセジメントトラップなどの係留系の回収や、昨年同様、過去の海氷変動・環オホーツク気候の復元を可能にする海底堆積物コアのサンプリングなどを実施した。特に、北西部大陸棚域では、海氷消滅直後の海洋構造をかなり密に調べた。19ヶ所の係留系はすべて回収に成功したが、一部にデータ取得に不十分なものもあったが、概ね良好なデータが得られた。本研究で当初予定していた主な現場観測（「クロモフ号」による三回の航海、ロシア航空機を用いた冬季海氷域の大気・海氷観測）のほとんどが成功裡に終了した。初めて得られた、これら多くの貴重なデータについては、現在総力をあげて解析を進めており、近い将来、今まで未知であったオホーツク海の実態が次々に明らかにされていくことが期待される。

2. 研究実施内容

平成12年度に実施した研究項目とその内容は以下の通りである。

(1) ロシア船「クロモフ号」による観測航海

本研究の目玉である、ロシア船を用いたオホーツク海ほぼ全域の三年連続の観測航海の第三回目を平成12年6月2日から7月5日の日程で実施した。観測海域と観測点は図1に示してある。本航海では、海洋循環、物質循環、高生物生産性の実態把握のために設置した、流速・水温・塩分計・セジメントトラップからなる係留系の回収、CTD/採水観測、オホーツク海古海洋研究のための広範囲にわたる表層海底堆積物コアのサンプリング、さらには中層フロート(4基)による海洋中層循環の観測などを実施した。19カ所に設置した係留系の回収はすべて成功した。一部に不十分なものもあったが、概ね良好なデータが得られた。これまでのすべての観測で得られたデータについては現在解析中であるが、今までに得られた、おおざっぱ所見としては以下の通りである。

1) 海洋循環

最大の成果は、今まで「まぼろしの海流」とも言われ、その実態が不明であった「東樺太海流」の存在を初めて確認し、その季節変動を明らかにしたことである。

係留系の観測データ(膨大な量のうちの一部のデータではあるが)から、サハリン東岸沖では、すべての深度で「南西ないし南向きの流れ」が卓越しており、流速には顕著な季節変動がみられ、「1月から2月に最大(約0.35m/s)」に達することが分かった。しかも、全ての観測点でほぼ等深線に沿った南下流がみられ、絶対値は岸近くで大きくなっていった。

上記の係留による「オイラー的」海洋循環の観測と平行して、アルゴス海洋漂流ブイ(計20基)によるラグランジェ的観測も、第2回目クロモフ航海で実施した。この観測から、サハリン東岸沖の陸棚には、ほぼ定常的な0.2-0.3m/s程度の強い南下流が等深線に沿って存在することが分かった。また、樺太東岸北部の陸棚域には、日周潮の潮流(最大振幅0.7m/s)が顕著に存在する。

一方、カシェバロババンクでは、潮流(日周潮)が非常に大きく、最大振巾が1.3m/sに及び、特に、バンクの西側で潮流の振巾が大きいこと、バンクを中心に時計回りの平均流(0.1-0.2m/s程度)が存在すること、などが分かった。さらに、プッソル海峡中央付近では、0.4m/s程度の振巾を持つ潮流(日周潮・半日周潮とも顕著)の存在も認められた。定常流成分として、海峡の中心部(最深部)に反時計回りの弱い渦が存在していた(2つのブイがこの渦に長期捕捉されていたため、長期の観測が可能となった)。もう

一つ、興味深い現象として、ブッソル海峡の北西方向約100kmの地点を中心として、時計回りの顕著な定常渦流（直径約100km、速度0.2 - 0.3m/s程度）が存在していたことである。この渦の存在も、地衡流パターンとしては以前から知られていたが、実測データとして今回初めて認められた。

三回目の航海では、中層循環を調べることを目的に、ワシントン大学と共同で中層(Palace)フロート4基を投入した。フロートの動きから、500m深での東樺太海流の流速は0.1m/s程度であることがわかった。さらに、オホーツク海では初めての結氷に至るまでの冬季混合層の深まりも直接観測することができた。このフロートは海氷域でも簡単には機能停止せず、1つは一冬を越して未だ観測を継続している。

2) 水塊形成

北西部大陸棚域の海氷形成前の海洋構造を初めて観測した。前年の海氷形成にともなって生成した高密度水が、この時期でさえ、海底近くにかかなりの規模で存在しているのを確認することができた。また、水深約40mのところに強い密度躍層が存在し、従来から低緯度海氷の成因の一つと言われていた、秋口の発達した密度成層構造を初めて確認することが出来た。

また、係留系に流速計とともに取り付けられた水温・塩分計の時系列データから北太平洋中層水の起源水の一つといわれている、北部大陸棚域で冬季海氷形成にともなって生成する高密度水の輸送量を評価するための解析を進めている。

3) 物質循環

物質循環に関する観測研究は、CTD採水器による採水観測とセジメントトラップ係留による沈降粒子の観測から成る。3回の航海で、各約100ヶ所の測点から採取された海水は、船上で塩分・溶存酸素・栄養塩・炭酸系（全炭酸・pH・アルカリ度）・フロン・DMS等の分析に供し、また一部は研究室に持ち帰って、メタン・メタンの炭素同位体比・全炭酸の安定/放射性炭素同位体比・海水の酸素同位体比・溶存/懸濁有機炭素量等の測定に用いた。これらのデータは、オホーツク海における水塊形成のトレーサーとして、また人為起源温室効果ガスの海洋内部への吸収量の見積り等に使用される予定で、現在解析が進められている。

栄養塩データ解析から、オホーツク海の大陸棚が大きな窒素のシンクであることが明らかとなった。CTD採水器に装着した濁度計のデータから、オホーツク海の懸濁粒子量の空間分布が明らかになり、大陸棚からの中層水の流出が大量の物質輸送を伴うものであることを初めて明らかにした。一方、時系列式のセジメントトラップは、サハリン沖の南北2地点の上下2層に約

2年間に亘って設置され、各々計42期間分の沈降粒子試料が連続的に採取された。試料は、各種の有機・無機化学分析、粒度・鉱物分析、プランクトン種組成の分析などに供し、オホーツク海の生物生産の時空間変動や陸域からの物質輸送のメカニズムなどの解析が行われている。その結果、オホーツク海西部では植物プランクトンのブルームは、海氷の後退によってではなく、アムール河からの淡水流入に刺激されて起こること、大陸棚からの陸起源物質の流出は東サハリン海流の流速の大きな冬ではなく、秋に起こること等々が明らかとなってきた。

4) 古海洋

古海洋研究のための海底堆積物コアは、計8本のピストンコア及び、数10カ所からのマルチプルコアが得られ、現在までの間に、試料の状態の良い4本のピストンコア試料を用いて、過去約12万年間のオホーツク海的环境変動を解析してきた。マルチプルコア試料は、現在の表層環境が、どのように堆積物データに記録されるかを理解するために用いられている。コアの解析では、有孔虫殻の酸素同位体比層序や放射性炭素年代の測定を始め、コアの物性測定、各種有機・無機化学分析、同位体比分析、珪藻・有孔虫・石灰質ナノプランクトン・放散虫等の微化石群集解析、鉱物分析、砕屑粒子の粒度分析等を行い、過去のオホーツク海の水氷分布や生物生産力の変化、水塊形成の変化に関する解析を行っている。粒度分析に基づくIce Rafted Debrisの解析では、サハリン沖海域で海氷生産量が氷期に拡大し間氷期に縮小したことが明らかになった一方で、オホーツク海東部海域では、海氷の変動が必ずしもグローバルな氷期・間氷期変動に一致しないことが示された。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。

(2) 砕氷船「そうや」による南西部海氷域での現場観測

海氷の形成・輸送過程や大気海洋への影響を明らかにする上で海氷域の現場観測データを得ることは重要である。本研究グループでは、1996年より海上保安庁水路部との共同により砕氷型巡視船「そうや」によるオホーツク海南西部海氷域の海洋、海氷、気象観測を行なっている。海氷の厚さ、張り出し面積などは年による違いが顕著なので、毎年観測を継続することは重要であり、2001年2月にも観測を行なった。

主な観測項目は、例年通りの海氷の厚さ・面積のビデオ観測、海氷サンプリング、CTD-XBT観測、バルク法による熱収支の観測などであった。昨年までの観測からこの海域では、厚い氷でも何枚もの薄い氷が重なり合っ

のであること、新生氷は他の海域には見られない特異な結晶構造を持つこと、海洋の混合層は従来言われていたよりも数倍深くまで達しており、特に厚い海氷の見られる年に深くまで発達していること、この海域の現場での海氷成長速度はごく小さいこと、などが明らかになってきている。これらは、この海域の海氷がオホーツク海北部の寒冷な海域で形成され激しく折り重なりながら流されて来たものであること、海氷の輸送には風だけでなく海流が寄与していること、新しい氷は現場でもわずかに形成されていることなどを示唆している。

今回の観測期間中の海氷については、張り出し面積が、人工衛星観測が始まって以来最大で、海氷の厚さ、氷盤の大きさとも「そうや」観測を始めて以来最大であった。このように、海氷の特徴の年による違いが非常に顕著であるため、現場観測を今後とも継続していくことが極めて重要である。現在、今年の実勢力発達の原因についていろいろな角度から調べている。

(3) ロシア航空機などによるオホーツク海氷上の大気境界層観測

観測は2000年2月9、14、18日の3回、それぞれ樺太の南部、中部、北部の3箇所、いずれも三層(100m、500m、800m)の高度で行なわれた。短時間の欠損を除けば、測定はほぼ完璧に行なうことが出来た。このような総合的な航空機観測がオホーツク海上で行われたのは今回が初めてであり、季節海氷域上での気団変質過程について理解する上で非常に重要なデータを取得することができた。現在、これらのデータは解析中であるが、海氷上でも無数に存在するリードなどを通して顕熱・潜熱フラックスが $50\text{W}/\text{m}^2$ を越える場合があることが分かり、それにより気団変質が起こることなどが明らかになっている。

このような航空機観測とは別に、海氷域の南下時期(2月)に北海道斜里町、「そうや」船上、サハリン(ユジノサハリンスク、ホロナイスク)におけるゾンデ同時観測を行ない、北海道沖の海氷上での気団変質過程を調べる観測も実施してきた。その結果、海氷が無いか少ない場合、季節風上流のサハリンと比較し下流の斜里では下層に混合層が発達し、気温・湿度の増加が顕著であるが、海氷が発達すると、それら増加量は半分程度に減少することが分かった。

今後、両現場観測で得られたデータを詳細に解析していくことによって、オホーツク海氷域における大気・海洋相互作用のメカニズムが明らかになっていくことが期待される。

(4) 北海道湧別沖の海氷漂流・氷厚係留観測

海氷の量を見積もるために不可欠である厚さについて、オホーツク海の北海道沿岸域(湧別沖)で、連続した時系列のデータを取得することを目的として、氷厚計・ADCP等の係留観測を1998年から毎冬実施している。

観測データはすべて良好に取得されており、現在勢力的に解析を進めている。

海氷の厚さも0.2mほどのものから20mにも達するものまで、年による変動が大きいことが分かり、このような観測の継続した実施がますます重要になってくる。

(5) リモートセンシングによる海氷研究

SSM/1マイクロ波データを用いた海氷の分類（生まれたばかりの新生氷、少し時間の経った若い氷、かなり時間の経った一年氷）から、オホーツク海の海氷域の詳細な変動機構を明らかにした研究（Kimura and Wakatsuchi, JGR,1999）に続いて、本研究では、同じマイクロ波データを用いて、北半球全体の海氷域について、海氷の漂流ベクトルをかなりの精度で求め、その地衡風との関係を明らかにした（Kimura and Wakatsuchi, GRL, 2000）。また、これらの結果から、海氷の下の海洋の循環も導き出すことが出来た。いずれも、実測データとよく一致していることが確認された。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

Ukita, J., T. Kawamura, N. Tanaka, T. Toyota and M. Wakatsuchi, 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, 2000.

Kimura, N. and M. Wakatsuchi, Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere, Geophys. Res. Lett., 27, 3735-3738, 2000.

Toyota, T., T. Kawamura and M. Wakatsuchi, Heat budget in the ice cover of the southern Okhotsk Sea derived from in-situ observations, J.Meteorol. Soc. Jpn., 78, 585-596, 2000.

Itoh, M. and Kay I. Ohshima, Seasonal variations of water masses and sea level in the southwestern part of the Okhotsk Sea, J. Oceanogr., 56, 643-654, 2000.

Nakamura, T., T. Awaji, T. Hatayama, K. Akitomo, T. Takizawa, T. Kono, Y. Kawasaki and M. Fukasawa, The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial K1 tidal flow : a possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits, J. Phys. Oceanogr., 30, 1601-1621, 2000.

Toyota, T. and M. Wakatsuchi, Characteristics of the surface heat budget during the ice growth season in the southern Sea of Okhotsk, Ann. Glaciol., 33, 230-236, 2000.

Aramaki, T., S. Watanabe, T. Kuji and M. Wakatsuchi, The Okhotsk-Pacific seawater exchange in the viewpoint of vertical profiles of radiocarbon around the Bussol' Strait, Geophys. Res. Lett., 28, 3971-3974, 2001.

Ohshima, K. I., G. Mizuta, M. Itoh, Y. Fukamachi, T. Watanabe, Y. Nabae, K.

Suehiro and M. Wakatsuchi, Winter oceanographic conditions in the southwestern part of the Okhotsk Sea and their relation to sea ice, *J. Oceanogr.*, 57, 451-460, 2001.

Kimura, N. and M. Wakatsuchi, Mechanisms for the variation of sea-ice extent in the Northern Hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 106(C12) 31319-31332, 2001.

Nakatsuka, T. and The Okhotsk Sediment Core Analyses Group, Variations in the oceanographic environment during last 120 kyr in the Sea of Okhotsk, Proc. 2nd Wadati Conference on Global Change and the Polar Climate, Tsukuba, March, 2001.

Mizuta, G., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., and Wakatsuchi, M., Flow field and its seasonal variability off the east coast of Sakhalin in the Sea of Okhotsk. Proceedings of the International Symposium on Atmosphere-Ocean-Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment, Sapporo, Japan, March 2001.

Fukamachi, Y., Mizuta, G., Ohshima, K.I., Aota, M. and Wakatsuchi, M., Mooring measurement of ice thickness off Yubetsu, Hokkaido. Proc. Int. Symp. Atmosphere-Ocean-Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment, Sapporo, Japan, March 2001.

Ohshima, K.I., Wakatsuchi, M., Fukamachi, Y. and Mizuta, G., Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with the satellite-tracked drifters. Proc. Int. Symp. Atmosphere-Ocean-Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment, Sapporo, Japan, March 2001.

Fukamachi, Y., G. Mizuta, Kay I. Ohshima, and M. Wakatsuchi, Estimation of dense shelf water volume transport using long-term mooring data off the east coast of Sakhalin. Proc. Int. Symp. Atmosphere-Ocean-Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment, Sapporo, Japan, March 2001.

Kono, T., S.C. Riser, T. Takizawa, Y. Kawasaki and M. Wakatsuchi, Formation process of the Oyashio Water from the mooring observations in the Bussol' Strait, Proc. Int. Symposium on atmosphere-ocean cryosphere interaction in the Sea of Okhotsk and the surrounding environment March 2001.

Wakatsuchi, M., Preliminary results of observations for the International Joint Okhotsk Sea Project, Proc. 2nd Wadati Conference on Global Change and the Polar Climate, Tsukuba, March, 2001.