

# 環オホーツク海研究の進展

大島 慶一郎（北海道大学低温科学研究所）

## はじめに

オホーツク海は、北半球の海氷の南限であること（図1）、そのために気候変動や温暖化に敏感であること、また高海氷生産により北太平洋で一番重い水が作られ、北太平洋規模の鉛直循環・物質循環を作っていること、などから非常に重要な海であることが認識されつつある。また最近の研究からは、陸（アムール流域）からの物質輸送が海の涵養にとって極めて重要であることも示唆され、環オホーツク海という視点での研究の重要性が指摘されている。冷戦終了後は、オホーツク海のみならず、その周辺域のカムチャッカ氷河域やアムール川流域でも国際共同観測が行なわれ、重要な研究成果が次々と得られつつある。

## 1. 冷戦から国際共同観測へ

そのほとんどがロシア領海であるオホーツク海は、長くベールに包まれていた海であった。1990年代以降、冷戦の終結によりオホーツク海内での国際共同観測が可能になり、その海の実態が徐々に明らかになってきた。特に、1998 - 2001年の4年間にわたって行なわれたロシア船クロモフ号による日露米国際共同観測プロジェクトは、オホーツク海研究のbreakthroughの役割を果たし、東樺太海流や高密度水生成の実態解明など多くのことが明らかになった。このプロジェクトは、科学技術振興事業団戦略的基礎研究（CREST）「代表北海道大学低温科学研究所 若土正暁」によってサポートされた。研究プロジェクトの目的は、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・海氷システムを明らかにすることである。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が行われた。プロジェクトは、海洋物理学、大気物理学、地球化学、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（クロモフ号所有機関）の研究者・技術者の参加により実施された。CRESTからの資金のバックアップとロシアでのオホーツク海のオープン化のタイミングが絶妙に合ったことと、日露米間での協力が非常にうまくいったことで、今までできなかった様々な観測が可能となった。

## 2. 東樺太海流のベールを剥く

オホーツク海においては、海洋研究の基本となる海の循環さえ、日本・ロシアの古い文献（Watanabe, 1963; Moroshkin, 1966）などによるスキーマティックな抽象以上のことはよくわかっていなかった。それらによると、オホーツク海には大きな反時計回りの循環があり、最も顕著な流れはその循環の西側・樺太沖沿いにできる強い南下流（東樺太海流）ということになっている。「東樺太海流」という名前は、教科書の海流マップや地図帳に記されている場合もあれば、ない場合もある。記されているものは、もとをたざせば日本やロシアの古い文献に基づいたものであるが、これらは十分な実測に基づいたものではなく、船のドリフトや水塊・海氷の動きなどから類推したものである。この海流の流量・構造やその季節変化といった定量的なことは、ほとんどわかっていなかった。

CRESTプロジェクトでは、東樺太海流を明らかにすることを最重点課題の一つとした。一つの海流をその存在の可否も含めて明らかにしていく観測は、教科書等にある世界の海流マップの空白域を埋める作業とも言える。流れを測る観測と

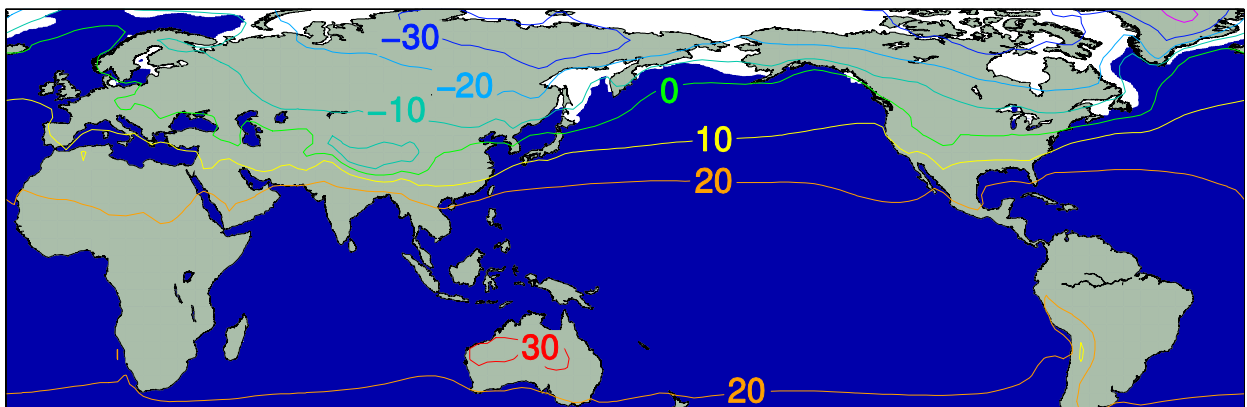


図1 全球での2月の海氷分布と平均気温。

海氷分布の気候値（1979-2002年の平均値）を白で、表面平均気温の気候値を等値線で示す。二橋創平氏作成。

しては、表層ブイや中層フロートを海中に漂流させて測る手法と、固定された点で流速計を長期連続係留して測る手法の2種類の方法を組み合わせで行われた。これらの観測で、東樺太海流が存在をはじめて実測から明確にされ、その構造や季節変動も明らかにされた。

図2は、ブイの結果などに基づいて、オホーツク海の循環を模式的に示したものである(Ohshima, et al., 2002)。東樺太海流は、大きな反時計回り循環の西岸境界流の成分(沖合い分枝: Ohshima, et al., 2004)と、沿岸に沿って北西陸棚から北海道沖まで達する成分(沿岸分枝)の二つの分枝からなっていることがわかった。図3は、流速計を長期係留して得られた観測結果(Mizuta et al., 2003)を基に、東樺太海流の流量の季節変化を、日本海の主海流である対馬暖流と比較して示したものである。東樺太海流の年平均の流量は黒潮の流量の2-3割、日本海の対馬暖流の流量の約3倍に相当し、縁海の流れとしてはかなり大きなものである。また東樺太海流は、流量・流速が冬季に最大で夏季に最小となる大きな季節変動をすることも特徴の一つである。

東樺太海流は、海水やそれに伴う負の熱や淡水(後述する)北で沈み込んだ重い水を南へ運ぶ(Fukamachi et al., 2004)ので、気候形成や物質循環にも重要な役割を果たすと考えられる。また社会的には、サハリン油田で油流出が起こった場合など汚染物質を北海道沖へ運んでしまう海流でもあり(Ohshima and Simizu, 2008)、その意味でも重要である。さらには、この海流が海水や海獣を運び、かつての文化圏形成(菊池, 2003)に大きな役割を果たしていた可能性もある。



図2 オホーツク海の表層循環の模式図。表層漂流ブイの結果などに基づいたもの。Ohshima et al. (2002)を加筆。

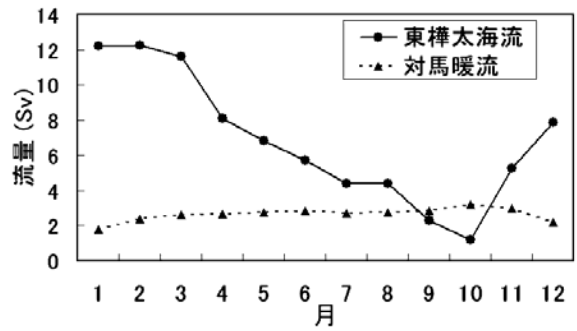


図3 東樺太海流と対馬暖流の流量の季節変化。

単位は  $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (= 1 Sv)。東樺太海流は北緯 53 度に沿って横切る長期係留測流の結果 (Mizuta et al., 2003) に基づく。対馬暖流は対馬海峡でのフェリーによる超音波流速プロファイラーの結果 (Takikawa et al., 2005) に基づく。

### 3. 北太平洋で一番重い水ができる海

オホーツク海の北海道沿岸には毎冬海水が到来するが、このような緯度で本格的な海水が見られるのはここだけである。図1には、地球全体での2月の海水分布の平均値を白で示している。オホーツク海は本格的な海水域としては北半球の南限であることがわかる。では、なぜオホーツク海が海水域の南限となるのか? 図1には、2月の平均気温を等値線で示している。北半球の寒極(最も寒い地域)がオホーツク海の風上にあることがわかる。秋季から冬季、この寒極からの厳しい寒気がオホーツク海上に季節風として吹き込んでくることで、海水域の南限となっている一番の要因なのである。

海水ができる時には、塩分の一部しか氷に残らないので、冷たくて重い高塩分水が吐き出されることになる。オホーツク海は、大量に海水が作られるため、北太平洋で(表面で作られる海水としては)一番重い水が生成されることになる。この重い水はオホーツク海中層に潜り込んで、さらには北太平洋中層(200-800m)全域に拡がっていき、北太平洋規模の鉛直循環(上下方向の循環)を作っていることがわかってきた。オホーツク海は大気と接した水が北太平洋では唯一海洋中層(水深200-800m位)まで運ばれる海域とも言える。

このようなオホーツク海的重要性がわかってきたのは、1990年代以降の研究によるが、オホーツク海内においても、どこで多量の海水ができるのか、また本当に重い水が作られているのか、といったことも明らかになってきた。衛星による海水データと大気データから求めた海水生産量の分布によると(図4: Ohshima et al., 2003)、最も海水生産量が大きいのは北西部沿岸域であることがわかる。この海域は、厳しい寒気に加え沖向きの風が卓越するため、生成された海水が吹き流され薄氷域が維持され、多量に熱が奪われ、大量の海水が生成される。このような海域は、沿岸ポリニヤ(coastal polynya: polynyaはロシア語が語源)と呼ばれ、言わば海水の生産工場になっている。プロジェクトでは、この海域で中層にまで達する重い水が生成されていることを直接観測することにも成功している(Shcherbina et al., 2003)。また、

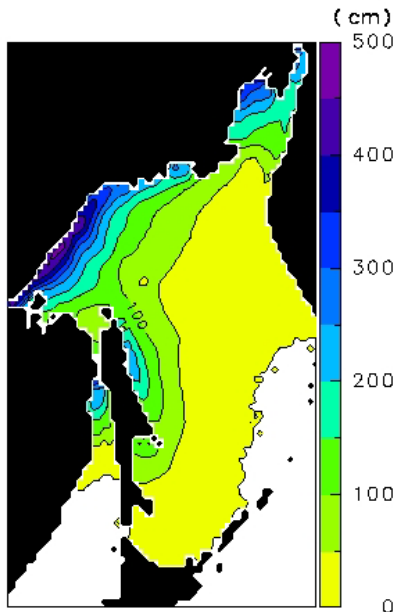


図4 オホーツク海での年間の海水生産量分布。海水の厚さ(cm)に換算して示す。人工衛星のマイクロ波放射計による海水データと熱収支計算から見積もったもの。Ohshima et al.(2003)より。

沿岸ポリニヤのような開水面域・薄氷域では厚い海水域に比べ圧倒的に大きい熱フラックスがあるということも、航空機からの乱流フラックスの直接観測から確かめられた(Inoue et al., 2006)。

オホーツク海の海水は多くこのような沿岸ポリニヤで生成されて拡散していく。しばしば「オホーツク海の流水(海水)は、アムール川の水が凍ったもの。それが漂流して北海道沖まで到来する」という言い方をされるが、これは間違いである。アムール川の水が凍った分の氷はオホーツク全体の氷からするとごくほんのわずかでしかない。

#### 4. アムール・オホーツクプロジェクト - 中層鉄仮説・巨大魚付林 -

ロシアとの共同観測では、もう一つ重要な発見があった。海水生成により重い水が中層に潜り込む際に、同時に多量の鉄分も送り込まれていることが偶然発見されたのである(Nakatsuka et al., 2004)。鉄分が海の生物生産量を決めている、という最近有力視されている説も含めて考えると、オホーツク海中層からの鉄分が北太平洋西部域にも供給される(Nishioka, et al., 2007)、そこでの高い生物生産を支えているという考え(中層鉄仮説)が提案されている(図5)。

さらに、この鉄分は元々は陸面よりアムール川を介して海へ供給されていると考えられ、まさに陸が海を涵養している「巨大魚付林(うおつきりん)」という概念をもってアムールオホーツクシステムを理解することが提唱されている。このような仮説を明らかにするため、総合地球環境学研究所と北大低温科学研究所が共同で、アムール・オホーツクプロジェクト(代表:白岩孝行)を2005年より開始している。2006



図5 オホーツク海を起源とする中層(鉛直)循環と鉄分の循環、その温暖化による影響。

年と2007年には、鉄観測に特化したクロモフ号による日露共同航海観測も行なわれ、またアムール川流域での観測も日露共同で行なわれている。このような研究には、陸と海そして大気という圏を結ぶような、また物理・化学・生物・水産という分野を超えた学際的な研究が不可欠である。そのような方向をめざして、2004年には北大低温科学研究所に環オホーツク観測研究センターも設立されている。

#### 5. 地球温暖化で変わるオホーツク海

オホーツク海の海水面積は、人工衛星により正確な観測が可能になってから約30年経つが、この間で約20%減少している(図6の青線)。100年以上にわたる網走での目視海水観測や約30年にわたる北大の紋別流水研究施設での流水レーダー観測でも、北海道沿岸の海水量は明らかな減少が見られている(青田他, 1993)。オホーツク海の海水の拡がり、寒極であるその風上での地上気温(図6の赤線)とよく対応(相関)していることもわかってきた。この気温は50年で約2.0度も上昇しており(地球全体の平均気温は過去50年で0.65の上昇)、オホーツクの風上域は温暖化の影響が強く出る場所であることがわかる。この気温と海水面積の高い相関も含めて推定すると、海水面積の減少傾向は50-100年スケールで生じていたことが推定される。

国際共同観測などによって取得された最新の海のデータと過去のデータを合わせた解析からは、オホーツク海ではこの50年海水の生成量が減ったことで冷たい重い水の潜り込みも減少していることがわかってきた(Nakanowatari et al., 2007)。さらに、オホーツク海での水の潜り込みの減少は北太平洋の鉛直(上下方向の)循環までも弱めていることが示唆されている。

海水の鉛直循環が弱まると様々な影響が出てくる。特に注目されるのが鉄の循環である。すなわち、オホーツク海の海水生産が弱まると北太平洋まで含めて鉄分の供給が弱まり、ついには海の生物生産量まで減少させるというシナリオも可能性としてはありうることになる(図5)。もしそうなると、漁獲量の減少や二酸化炭素の吸収の減少も招くかもしれない。

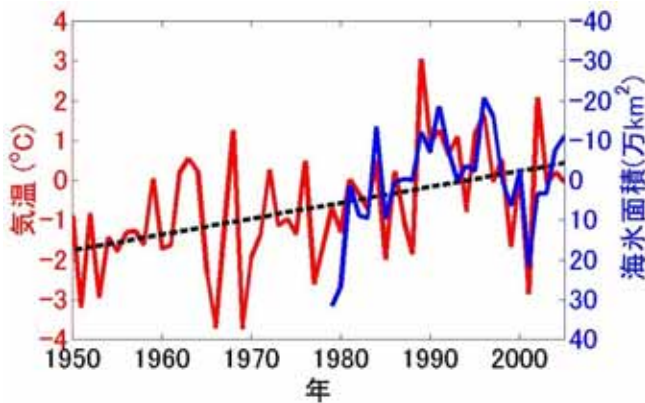


図6 オホーツク海の海水面積とその風上での地上気温の年々変動。

衛星観測によるオホーツク海全域の2月の海水面積偏差(1979-2005年)を青線で、風上域(50°-65°N, 110°-140°E)における秋・冬(10-3月)の地上気温偏差(1950-2005年)を赤線で示す。黒破線は気温偏差の線形トレンド成分。海水面積偏差の軸は右端に示しており、符号は上下逆。Nakanowatari et al. (2007) より。

このように、オホーツク海の研究は、オホーツク海にとどまらず、北太平洋も含むもっと大きなスケールの変動や更には人間活動にも関わってきている。

一方、これらの研究で示された、オホーツク海及び北太平洋の鉛直循環は温暖化の影響を受けやすい、という事実は、過去や長期の気候変動を考える上でも重要な視点である。カムチャッカ氷河には、過去の気候変動のシグナルが隠されている。また、氷河には、鉄分のもう一つの経路である大気からの鉄分供給の情報も含まれている。環オホーツク観測研究センターでは、カムチャッカ氷河でのコア掘削と解析とともに大気エアロゾルのモニタ - 観測も重点研究として行なわれている。

## 文献

青田昌秋・石川正雄・村井克詞・平田稔雄, 1993: オホーツク海・北海道沿海の海水密度の長期変動, 海の研究, 2-4, 251-260.

Fukamachi, Y., Mizuta, G., Ohshima, K. I., Talley, L. D., Riser, S. C. and Wakatsuchi, M. 2004: Transport and modification processes of dense shelf water revealed by long-term moorings off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Journal of Geophysical Research*, 109, C09S10, doi:10.1029/2003JC001906.

Inoue, J., M. Kawashima, Y. Fujiyoshi and M. Wakatsuchi 2005: Aircraft observations of air-mass modification over the sea of Okhotsk during sea-ice growth, *Boundary-Layer Meteorol.*, 117, 111-129.

菊池俊彦, 2003: 考古学から見た環オホーツク海交易, 2002年秋季日本気象学会シンポジウム・環オホーツク研究の新しい視点, 天気, 50, 498-503.

Mizuta, G., Fukamachi, Y., Ohshima, K. I. and Wakatsuchi, M. 2003: Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current, *Journal of Physical Oceanography*, 33, 2430-2445.

Moroshkin, K. V. 1966: Water masses of the Sea of Okhotsk, Joint Pub. Res. Serv., 43942, 98 pp., U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C.

Nakanowatari T., Ohshima, K. I. and Wakatsuchi, M. 2007: Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004, *Geophysical Research Letters*, 34, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.

Nakatsuka, T., Toda, M., Kawamura, K. and Wakatsuchi, M. 2004: Dissolved and particulate organic carbon in the Sea of Okhotsk, Transport from continental shelf to ocean interior, *J. Geophys. Res.*, 109, C09S14, doi:10.1029/2003JC001909.

Nishioka, J., Ono, T., Saito, H., Nakatsuka, T., Takeda, S., Yoshimura, T., Suzuki, K., Kuma, K., Nakabayashi, S., Tsumune D., Mitsudera, H., Johnson, W. K. and Tsuda, A. 2007: Iron supply to the western subarctic Pacific: importance of iron export from the Sea of Okhotsk, *Journal of Geophysical Research*, 112, C10012, doi:10.1029/2006JC004055.

Ohshima, K. I., Wakatsuchi M., Fukamachi, Y. and Mizuta, G. 2002: Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with the satellite-tracked drifters, *Journal of Geophysical Research*, 107, 3195, doi:10.1029/2001JC001005.

Ohshima, K. I., Watanabe T. and Nihashi, S. 2003: Surface heat budget of the Sea of Okhotsk during 1987-2001 and the role of sea ice on it, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81, 653-677.

Ohshima, K. I., Simizu, D., Itoh, M., Mizuta, G., Fukamachi, Y., Riser, S. C. and Wakatsuchi, M. 2004: Sverdrup balance and the cyclonic gyre in the Sea of Okhotsk, *Journal of Physical Oceanography*, 34, 513-525.

Ohshima, K. I., Simizu, D. 2008: Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation. *Journal of Oceanography*, 64, 103-114.

Shcherbina, Y. A., Talley, L. D. and Rudnick, D. L. 2003: Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea, *Science*, 302, 1952-1955.

Takikawa, T., Yoon, J.-H. and Cho, K.-D. 2005: The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data, *Journal of Physical Oceanography*, 35, 1154-1168.

Watanabe, K. 1963: On the reinforcement of the East Sakhalin Current preceding to the sea ice season off the coast of Hokkaido; Study on the sea ice in the Okhotsk Sea (IV), *Oceanogr. Mag.*, 14, 117-130.