

## 温暖化によるオホーツク海及び北太平洋のオーバーターン弱化

大島 慶一郎

中野渡 拓也

若土 正暁

(北海道大学低温科学研究所)

### 要旨：

オホーツク海での高い海氷生産は、北太平洋表層では最も重い水を生み、北太平洋のオーバーターンの源となる。この 50 年で、オホーツク海を起源に北太平洋の中層水が昇温化し、オーバーターンが弱化していることが示唆された。温暖化によりオホーツク海の海氷生産量が減少したことによると推測する。オーバーターンの弱化は物質循環・生物生産にも多大な影響を及ぼしうる。

### 1. 北半球の海氷域の南限

オホーツク海は、北半球では流氷（海氷）域の南限である。（海水が凍った氷は、学術的には‘海氷’という言い方が一般的なもので、以後はそれに従う。）沿岸付近のみ結氷する海域はもっと南にも存在するが、本格的な海氷域としては南限である。オホーツク海は南端の緯度が 44 度であるのに対し、大西洋のノルウェー沿岸域では緯度 70 度でも海氷が出現しない。

オホーツク海が海氷域の南限となるのはなぜか？ 実は、北半球の寒極（最も寒い地域）はオホーツク海の風上であるユーラシア大陸北東部にある。秋季から冬季になると、オホーツク海上にはこの寒極からの厳しい寒気が季節風として吹き込んでくる。オホーツク海の風上が北半球の寒極であることが、海氷域の南限となっている一番の要因なのである。

### 2. 北太平洋で一番重い水ができる海

オホーツク海では寒極からの厳しい寒気により海氷の生成量も大きなものとなる。この大きな海氷生産は海洋場にも大きな影響を与える。特に海氷生産が大きいのは、オホーツク海の北西沿岸域である。この海域では、冬季は沖向きの風が卓越するため生成された海氷は次々と沖へ吹き流され、薄い新生氷域が維持されやすい。氷が薄いと氷中の熱伝導が大きくなり断熱効果は弱まり、大気への熱フラックスは大きくなる。このようにして生成された海氷が吹き流されるために疎氷・薄氷域が維持されている海域を、沿

岸ポリニヤ (coastal polynya : polynya はロシア語が語源) と言う。ここでの大きな熱フラックスは主に海氷生成に使われるので、沿岸ポリニヤは言わば海氷の生産工場になっている。これに対し、海氷が厚く集積される海域は、海氷自身が断熱材として働き、厳しい寒気の中でも海氷はそれ程成長しない。

沿岸ポリニヤ域では水深も浅いため水柱が結氷温度に達すると、奪われた熱はほとんどが海氷生成に使われることになる。海洋下層からの熱と海氷内部の(負の)熱を近似的に無視すると、表面熱収支計算のマイナス分が海氷生産量になる。このようにして海氷生産量を求めたのが図1である<sup>1)</sup>。この図からもオホーツク海の北西沿岸域で最も多量の海氷生産があることが示される。

オホーツク海の家氷の多くは、このような沿岸ポリニヤで生成されて拡っていったものと考えられる。しばしば、「オホーツク海の流氷(海氷)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海全体の氷からするとごくほんのわずかでしかない。

海氷ができる時には、塩分の一部しか氷に残らないので、冷たくて塩分の高い水(ブライン)が掃き出されることになる。海水は冷たいほど、また塩分が高いほど重くなる。オホーツク海北西部では、大量に海氷が作られるため、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<sup>2)3)</sup>。海洋の中深層まで及ぶ大きな循環(対流)は密度差で駆動される。すなわち、重い水が沈み込んでそれが徐々に湧き上がってくるという循環である。北太平洋では深層までに及ぶような重い水は作られないが、中層にまで及ぶ程度の重い水がオホーツク海で海氷生成に伴って作られる<sup>3)</sup>。この重い水が沈み込むことで北太平洋での大きな中層の循環(オーバーターン)が作られるのである。

図2は、北太平洋における中層(冬季の対流が及ばない、密度が  $\sigma_t = 26.8$  より高い層)の、等密度面  $\sigma_t = 27.0$  (水深にするとおよそ 300-500m の層)での水温の分布を示す。海水は、一旦中層まで潜り込むと等密度面に沿って流動・混合するので、等密度面上での水温・溶存酸素などの分布を見ると、海水の起源や混合の具合などがわかる。図2からオホーツク海が北太平洋に対し低温のソースとなっていることがわかる。溶存酸素<sup>4)</sup>やフロン<sup>6)</sup>の分布で見ても、オホーツク海は北太平洋に対して高酸素・高フロン

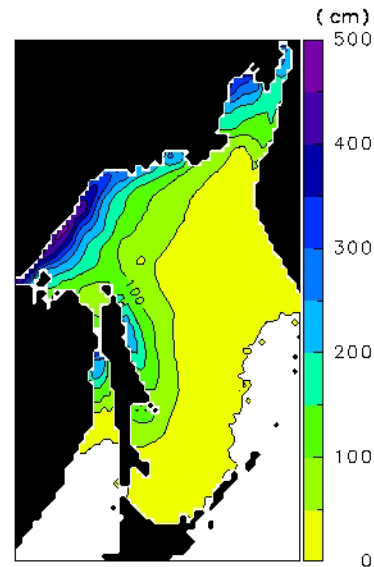


図1：オホーツク海での年間の海氷生産量分布。海氷の厚さ(cm)に換算して示す。人工衛星のマイクロ波放射計による海水データと熱収支計算から見積もったもの。黒は陸地で、図の南端が北海道。

1)より加筆。

のソースになっていることがわかる。これらの分布は、表層から中層へ潜り込む（低温の）水のソースはオホーツク海にあることを示している。

図 3a は、オホーツク海における等密度面  $\sigma_t = 26.9$  (水深にするとおよそ 200-400m の層) での水温の分布を示したものである。結氷温度に近い冷たい水が北西陸棚に起源

を持っていることが示唆される。同様な図からこの海域は溶存酸素量が高いことも示される<sup>7)</sup>。これは、ここから表層水が潜り込んでいることを示し、このポリニヤでの高い海水生産(図 1)とよい対応を示し、ここで中層の密度にまで達する冷たい重い水(高密度陸棚水)が生成されていることがわかる。図 3 a からはこの水が東樺太海流により南へ広がっていること<sup>8)</sup>もわかる。

オホーツク海北西部(ポリニヤ)でできた高密度水は、オホーツク海の中層から千島海峡を抜け、北太平洋の中層全域に広がる。そして、北太平洋中層水(NPIW: North Pacific Intermediate Water)の 1 成分をも成し<sup>9)</sup>、中層では大気に接した水の起源となっている。このように、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)まで運ばれる海域なのである。

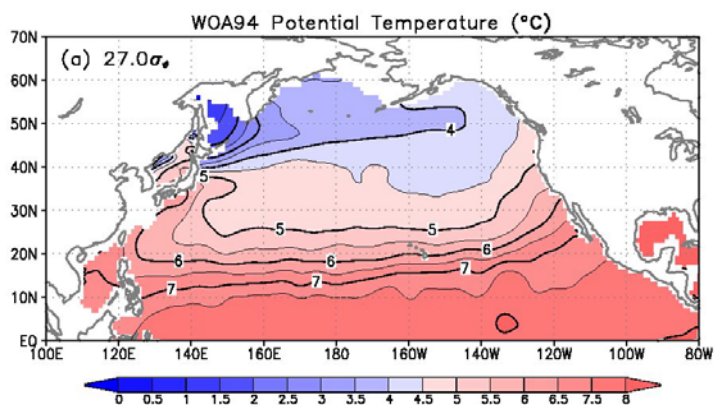


図 2 : 北太平洋における等密度面  $\sigma_t = 27.0$  での水温分布。

$\sigma_t = 27.0$  は水深にするとおよそ 300-500m の層。5)より。

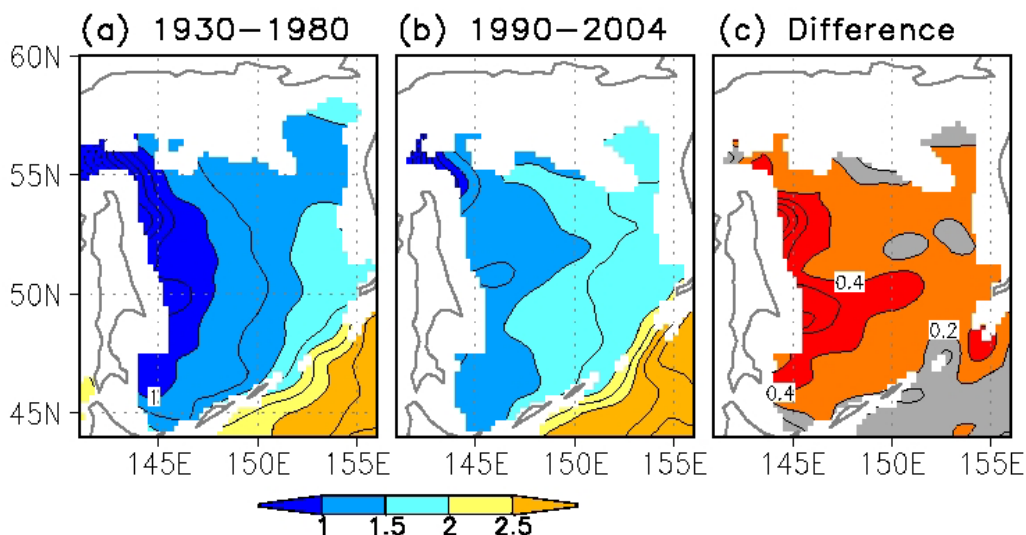


図 3 : オホーツク海における等密度面  $\sigma_t = 26.9$  での水温分布。

(a)1930-1980 年での気候値、(b) 1990-2004 年での気候値、(c) (b)から(a)を引いたもの。

$\sigma_t = 26.9$  は水深にするとおよそ 200-400m の層。

### 3. 地球温暖化とオホーツク海の海氷

人工衛星により全球の海氷分布がモニターできるようになってから 30 年程経つが、北極海では夏の海氷面積が大きく減少していること(10年で8-9%の減少)が明らかになってきた<sup>10)</sup>。地球温暖化が最も顕著に現れる海域・現象として注意が喚起されている。オホーツク海は、北極海ほど顕著ではないが、やはり海氷面積は有意に減少している。

図4には、衛星観測から得られたオホーツク海の2月の海氷面積の年々変動を示している(灰色実線。図では上ほど海氷面積が小となっていることに注意)。1990年代は海氷面積の

小さい年が続いたが、2001年前後に海氷面積が一時的に大きくなり、その後また小さくなる傾向が続いている。衛星観測による海氷面積データからは、オホーツク海の手氷面積はこの27年でオホーツク海全域面積の約9%分の減少(海氷面積としては約20%の減少)となっている<sup>11)</sup>。

衛星観測以前はどうであったのか? 図4にはオホーツク海の風上での秋・冬の地上気温の年々変動も示している(黒実線)。図4からわかるように、この気温は海氷面積と強い相関があることがわかる。気温が低い程その年の海氷面積は大きくなる。注目されるのは、この気温が明らかに上昇傾向を持っていることである。50年で2.0もの気温の上昇が見られる。この2.0という値は、地球全体の平均気温の上昇率(IPCCによると過去100年で平均0.74の上昇)よりずっと大きく、オホーツク海の風上にある北半球の寒極の秋・冬は、特に温暖化の影響が大きく出る場所・季節であることがわかる。この風上の気温と海氷面積の相関から推定すると、風上での昇温傾向に対して、海氷面積の減少傾向も50年の時間スケールで起っていることが示唆される。古くから連続してある数少ない客観的なデータとしては、北海道沿岸の網走での目視海氷観測がある。この海氷目視観測からもこの50-100年スケールでオホーツク海の手氷が減少傾向にあることが示唆されている<sup>12)</sup>。

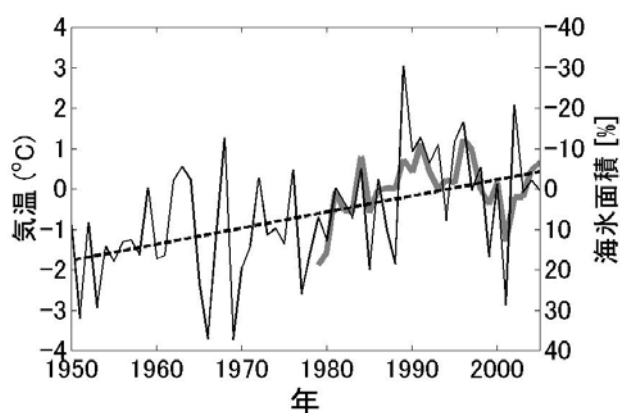


図4: オホーツク海の手氷面積とその風上での地上気温の年々変動。

衛星観測によるオホーツク海全域の2月の海氷面積偏差(1979-2003年)を灰色実線で、ユーラシア大陸極東域(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)を黒実線で示す。偏差とは平均からのずれ。黒破線は50年で平均した時の傾向直線。気温偏差の軸は左端に示す。海氷面積偏差の軸は右端に示しており、単位(%)はオホーツク海全域面積に対する割合としている。上ほど小であることに注意。11)より加筆。

#### 4. 海水減少が北太平洋の循環を弱める

オホーツク海では、海氷の生成によって北太平洋で一番冷たくて重い水が作られている。もし、海氷生産が減ると重い水の生成量も減るのか？ 図3 (b)は1990年冷戦終結以降に日米露国際共同観測などによって取得されたデータから、 $\sigma = 26.9$ 面での水温分布を示したものである。図3 (a)の1930-1980年での気候値と比べると、北西陸棚域に低温のソースがあることやそのシグナルが東樺太海流に沿って広がっていることに変わりはないが、全体に昇温していることがわかる。両者の差を見ると(図3 c)、特に西部域での昇温が著しい。オホーツク海中北部には反時計回りの循環があるが<sup>13)</sup>、昇温化はその循環に沿うように、北西陸棚域、東樺太海流域、北緯50度付近の東向流域と広がっている。このように、低温の高密度陸棚水が潜り込んで循環する経路に沿って昇温しているということは、高密度陸棚水の生成量が減少していることを示唆している。

詳しい解析によると<sup>11)14)</sup>、オホーツク海中層の昇温は $\sigma = 26.8-27.1$ (水深にすると200-700mの層)で有意で、特に $\sigma = 26.9-27.0$ ではこの50年で約0.6℃水温が上昇している。海は熱容量が大きいので、オホーツク海の中層全体の昇温を熱量に換算すると、直上の大気全体を100℃以上上げる熱量に相当する。通常、中深層の水の性質は安定していて変動は極めて小さい。50年で0.6℃の変化は、中層水の変動としては非常に大きい。オホーツク海中層では、溶存酸素量もこの50年で大きく減少している<sup>11)</sup>。このことも、表層水の中層への潜り込みが少なくなっていることを示している。前節で示した結果を合わせると、オホーツク海風上域での温暖化によって、海氷の生成量が減り、重い水の生成が減少、それによって表層から中層へ送り込まれる低温で高酸素な水の量が減少した、と考えられる。

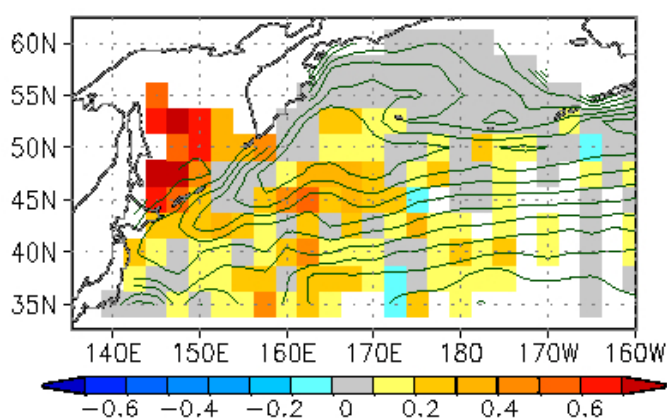


図5：北太平洋及びオホーツク海の中層水温のトレンドマップ。

同じ密度面  $\sigma = 27.0$  面と比較したもので、水深にするとおよそ300-500mの層での、この50年間(1955-2004年)における水温のトレンド(線形回帰係数:  $^{\circ}\text{C}/50$ 年)を示す。緑線は、2000 dbarを基準面とする  $\sigma = 27.0$  面での加速度ポテンシャル(この密度面での流線に相当)。11)より加筆。

前述したように、オホーツク海でできる冷たくて重い水は、北太平洋の中層に潜り込み北太平洋を冷却し、北太平洋規模のオーバーターンを作っている。従って、オホーツク海の中層の変化というのは、この海にとどまらず、北太平洋の循環にまで影響を及ぼす可能性がある。図5は、オホーツク海を含む北太平洋中層(同じ密度面  $\sigma = 27.0$  で比較したもので、水深にするとおよそ300-500mの層)でのこの50年間における水温のトレンドを見たもので

ある。昇温傾向はオホーツク海のみならず北太平洋北西域まで広がっていることがわかる。図5には、27.0 面での加速度ポテンシャル（おおよその流線）も緑線で示している。東カムチャッカ海流が千島列島沿いを南下し親潮となり、それが北海道・東北沖まで南下し、さらに北東方向に転じて亜寒帯海流をなし、北太平洋北西部に反時計回りの西部亜寒帯循環を作っている、という様子が見られる。昇温域はオホーツク海から千島海峡より流出した海水の循環経路に沿って広がっていることがわかる。北太平洋中層の昇温化はオホーツク海が起源であることを示唆するものである。また、溶存酸素量も、オホーツク海水の影響を受ける親潮・西部亜寒帯循環域の中層で有意に減少していることが報告されている<sup>11)15)</sup>。以上は、オホーツク海での低温の重い水の潜り込みの減少は、北太平洋規模の中層にまで及んでいることを示していると考えられる。

### 5. さらなるシナリオ

以上まとめると、オホーツク海は地球温暖化の高感度域と言え、この50-100年スケールで海水生産量が減っており、そのために低温の重い水の生成が減少し、北太平洋規模での中層の昇温及びオーバーターンの弱化を生じさせているというシナリオが提示される。簡単に言うと、近年の温暖化により、オホーツク海が持っている、表層水を北太平洋の中層に送り込むというポンプの働きが弱まっているということである。最新の海底コア解析研究によると（内田昌男・私信）北太平洋中層のオーバーターンが1000年スケールの気候変動にリンクして、大きく変化していることが示唆されている。本稿で示唆された「オホーツク海及び北太平洋中層のオーバーターンは温暖化に鋭敏である」ことは、1000年スケールの変動を考える上でも1つの視点を与えるものである。

海氷ができる時に作られる重い水が中層に潜り込む際に、同時に鉄分も送り込まれている可能性がある。鉄分が海の生物生産量を決めているのだ、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鉄分を供給し、それがそこでの高い生物生産を支えている<sup>16)</sup>、という仮説も成り立ちうる。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える（あくまでも仮説であることに注意）。もしそうになると、漁獲量の減少や（植物プランク

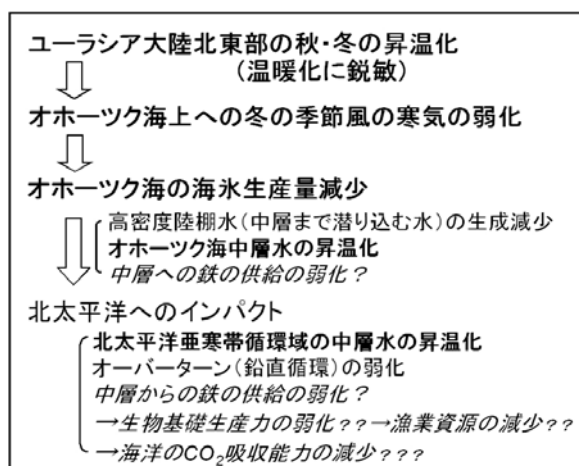


図6：温暖化がオホーツク海を介して北太平洋へ与えるインパクト（模式図）

太字は観測・解析で明らかになったもの。斜字は仮説の段階のもので、?マークが多いほど不確実性が大きいことを示す。

トンは二酸化炭素の吸収源でもあるので)二酸化炭素の吸収の減少も招くかもしれない。

図6は、温暖化の影響がオホーツク海を介して北太平洋へ与えるインパクトを模式的にまとめたものである。模式図には最近の研究から事実として明らかになったもの(太字)と仮説の段階のもの(斜字)にわけて示している。オホーツク海及びそこでの海氷生成量の変動は、オホーツク海のみならず北太平洋での生物生産・漁業資源量が今後どうなっていくかを予測する上でも、鍵を握っている可能性がある。

## 参考文献

1. Ohshima, K. I., T. Watanabe and S. Nihashi (2003): *Journal of Meteorological Society of Japan*, 81, 653-677.
2. Kitani, K. (1973): *Bull. Far Sea Fish. Res. Lab.* 9, 45-77.
3. Shcherbina, A. Y., L. D. Talley and D. L. Rudnick (2003): *Science*, 302, 1952-1955.
4. Talley, L. D. (1991): *Deep Sea Res. Part A*, 38, S171-S190.
5. Locarnini, R. A., et al., (2006): *World Ocean Atlas 2005, Vol. 1*, NOAA Atlas NESDIS 61, edited by S. Levitus, 182pp.
6. Warner, M. J., et al. (1996): *Journal of Geophysical Research*, 103, 20525-20542.
7. Itoh, M., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2003): *Journal of Geophysical Research*, 108, 3258, doi:10.1029/2002JC001590.
8. Fukamachi, Y. et al. (2004): *Journal of Geophysical Research*, 109, C09S10, doi:10.1029/2003JC001906.
9. Yasuda, I. (1997): *Journal of Geophysical Research*, 102, 893-909.
10. Comiso, J. C. (2006): *Geophysical Research Letters*, 33, L18504, doi:10.1029/2006GL027341.
11. Nakanowatari, T., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2007): *Geophysical Research Letters*, 34, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.
12. 青田昌秋, 石川正雄, 村井克詞, 平田稔雄 (1993): *海の研究*, 2, 251-260.
13. Ohshima, K. I., et al. (2004): *Journal of Physical Oceanography*, 34, 513-525.
14. Itoh, M. (2007): *Journal of Oceanography*, 63, 637-641.
15. Ono, T., T. Midorikawa, Y. W. Watanabe, K. Tadokoro and T. Saino (2001): *Geophysical Research Letters*, 28, 3285-3288.
16. Nishioka, J., et al. (2007): *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2006JC004055