

温暖化の高感度域オホーツク海

- 海氷減少が北太平洋を変える？ -

北海道大学低温科学研究所 大島 慶一郎

1. はじめに

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。比較的低緯度にも関わらず海氷が存在するということが、オホーツク海の自然・気候・生態系を特徴づける最も大きな要素となっている。海氷が到来する最南端の北海道知床周辺は、海氷が育む豊かな海洋生態系などをもって、2005年7月に世界遺産に認定された。

最近の研究によって、オホーツク海では多量の海氷が生成されるのに伴って北太平洋表層では一番重い水が作られることがわかってきた。さらに、重い水ができることで、北太平洋の中層まで及ぶような大きな対流（上下方向の循環）が作られていることもわかってきた。いわば、オホーツク海は北太平洋の心臓・ポンプの役割を果たしているわけである。近年の地球温暖化によって、オホーツク海での海氷生成量が減少し、このポンプの働きも弱くなってきていることが示唆されてきた。循環が弱まると、将来的に生物生産や漁業資源にも大きな影響を及ぼす可能性がある。

2. 北半球の海氷域の南限

図1には、地球全体での2月の海氷分布の気候値（1979-2002年の平均値）を白で示している。2-3月は北半球では最も海氷が大きく広がる月である。この時期、北極海はほぼ全域海氷に覆われている。太平洋及び大西洋とも西岸域の方がより南へ海氷が張り出すが、南端の緯度が44度であるオホーツク海は本格的な海氷域としては北半球の南限であることがわかる。対照的な例として、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？ 図1には、2月の平均気温の気候値（1979-2002年の平均値）をカラーの等値線で示している。北半球の寒極（最も寒い地域）がユーラシア大陸北東部にあることがわかる。ここはオホーツク海の風上にあたる。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。

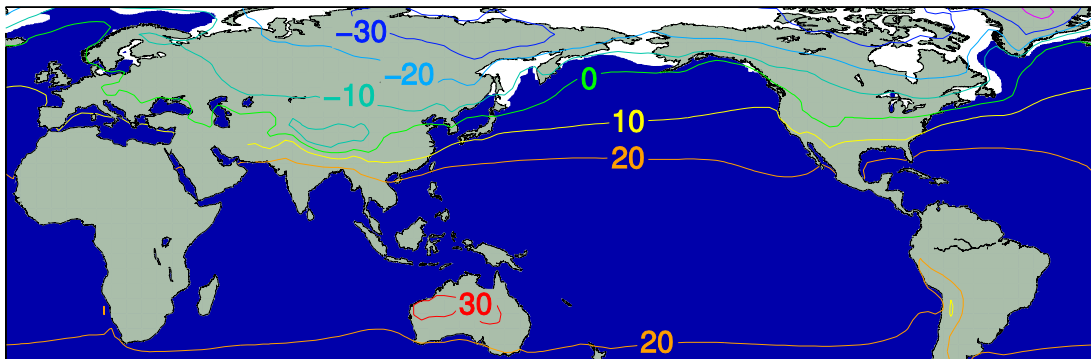


図1：地球全体での2月の海水分布と平均気温。

海水分布の気候値（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。

3．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。オホーツク海の家氷生産量分布（図2）を見ると、最も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とがわかる。その生産量は厚さに換算すると4-5mにも及ぶ。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、生成された海氷が吹き流されすぐにまた新しい海氷ができるということが繰り返され、多量の海氷が生成される。このような海域は、沿岸ポリニヤ（ポリニヤはロシア語が語源）と呼ばれ、言わば海氷の生産工場になっている。オホーツク海の家氷は多くこのような沿岸ポリニヤで生成されて拡っていく。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。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

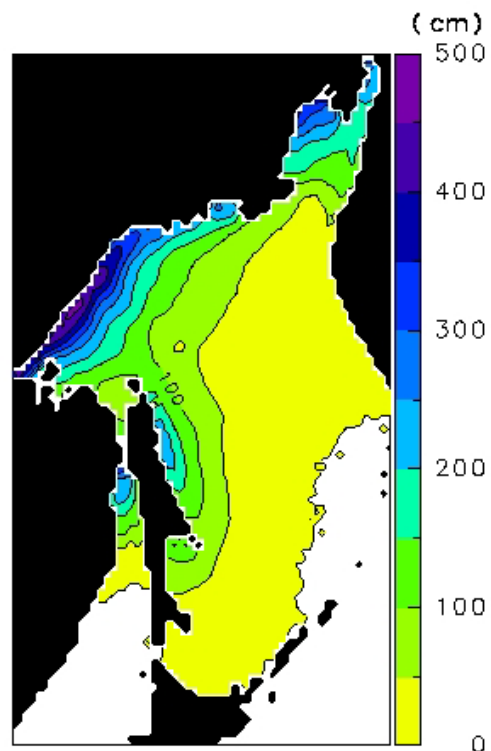


図2：オホーツク海での年間の海氷生産量分布。

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氷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。文献1より加筆。

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。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（対流）が作られるのである。このようにして、オホーツク海でできた冷たくて重い水は、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っていく。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。

4. 地球温暖化とオホーツク海

昨年も今年も北海道沿岸に来た海氷量はかなり少なかった。「この数十年でオホーツクの流氷は減ってきている」こういう実感をオホーツク沿岸に永く住んでいる方は多くもたれているのではないかと。実際に、北海道大学の流氷レーダーでの観測でも、オホーツク沿岸の海氷は確実に減少傾向にある。それではオホーツク海全体ではどうなのか？ 減ってきているとするとどのくらい減っているのか？ 近年の地球温暖化と関係があるのか？ その影響は？ 次々と疑問が挙がってくる。

海氷の拡がりや面積がある程度正確にわかるようになったのは、人工衛星による観測が可能となった 1970 年代からである。図 3 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さく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は、30 年足らずしかないが、それによるとオホーツク海の海氷面積はこの 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）となっていて、このような信頼性の高いデータからも海氷が確かに減少していることがわかる。（因みに、地球上にはもっと海氷の減少が激しい海域・季節があり、それは夏の北極海で、10 年で約 9% の減少となっていて、大きな問題となっている）

衛星観測以前はどうであっ

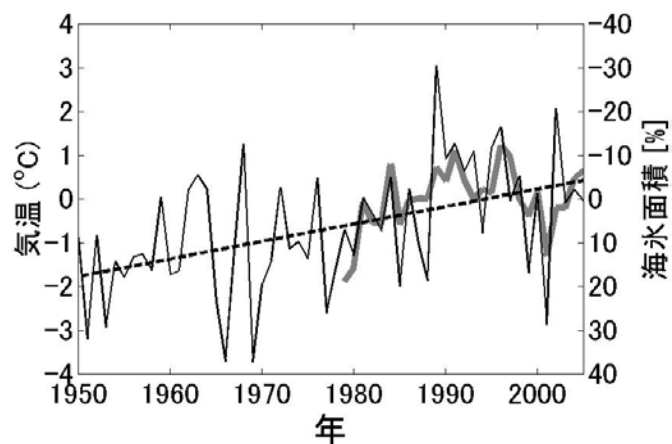


図 3：オホーツク海の海氷面積とその風上での地上気温の年々変動。

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。文献 2 より加筆。

たのか？図 3 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 3 からわかるように、この気温は 2 月の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海氷が減少傾向にあることが示唆されている。

5 . 海氷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、海氷が減ると重い水の生成量も減るのか？ 1990 年冷戦終結以降、北海道大学低温科学研究所が中心となって、この永くベールに包まれていたオホーツク海を精力的に観測してきた。これらによる最新の海のデータに過去のデータを合わせて解析すると、果たせるかな、オホーツクでの冷たくて重い水の生成量は減少していることがわかってきた。

図 4(a)は、海氷生成に伴ってできる重い水が潜り込む中層（水深にするとおおよそ 500m の層）での、オホーツク海における水温の 50 年の変化を示したものである。この 50 年で約 0.6 水温が上

昇していることがわかる。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。図 4(b)には、同じ中層での溶存酸素量の変化を示しているが、この 50 年で大きく減少し

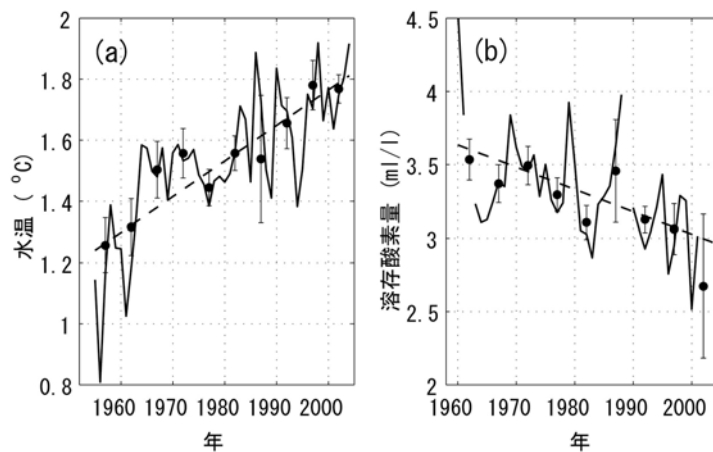


図 4 : オホーツク海の中層水の(a)水温と(b)溶存酸素量のこの 50 年の変化。

丸は 5 年平均の値で、上下線はその値の確からしい範囲を示す。中層のある密度帯（水深にするとおおよそ 500m の層）で比べたもの。黒破線は 50 年で平均した時の傾向直線。

ているのがわかる。酸素は海水が表層にある時に取り込まれる。海水の溶存酸素量は表層から絶って（潜って）からの時間が長い程生物に消費され減少する。溶存酸素量が減少しているということは、表層水の中層への潜り込みが少なくなっていることを意味する。前述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、海水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。

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、北太平洋規模の上下方向の循環を作っている。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（水深にするとおおよそ 300-500m の層）でのこの 50 年間における水温の変化を見たものである。昇温傾向は

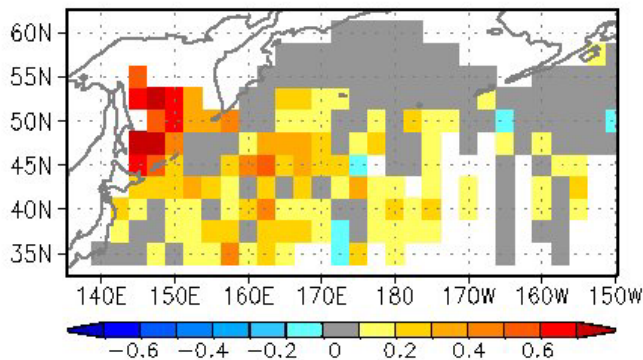


図 5：北太平洋及びオホーツク海の中層水温のこの 50 年の変化。

中層のある密度帯（水深にするとおおよそ 300-500m の層）でみたもの。この 50 年間(1955-2004 年)で何度変化したかを示す。暖色が濃い程、昇温傾向が大きい。文献 2 より加筆。

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。昇温傾向はオホーツク海西部が最も大きく、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。このことから北太平洋中層の昇温化はオホーツク海が起源と考えられる。すなわち、オホーツク海での低温の重い水の生成量の変化が北太平洋規模の循環にまで影響を及ぼしているということである。

6. 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上下方向の循環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、近年の温暖化でオホーツク海のポンプの働きが弱まっているということである。

海水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、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)。もしそうなら、漁獲量の減少や(植物プランク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。

オホーツク海が北太平洋にこれほど重要であること、またそのオホーツク海が温暖化の影響で大きく変化していることは、ごく最近の研究でわかってきたことである。長くベールに包まれていたこの海が明らかになるにつれ、ますますこの海を知る必要が我々にはあると考える。

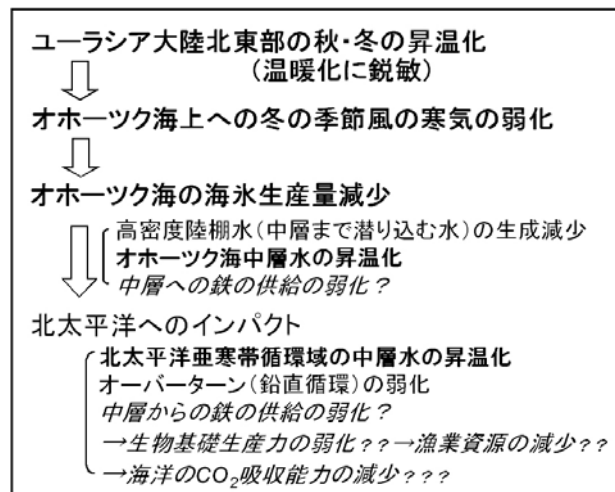


図6：温暖化がオホーツク海を介して北太平洋へ与えるインパクト(模式図)

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。

参考文献

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