

## 1. 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理化学観測の成果と今後の予測

### 1 - 1 a) 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理観測の成果と今後の予測

大島慶一郎（北海道大学低温科学研究所）

今日は、オホーツク海が北太平洋の循環やさらにはそこでの生態系にまで非常に重要な役割を果たすということ、それが近年の温暖化によってどう変わりつつあるかということ、ロシアとの共同観測の成果を交えて、お話したいと思います。

ちょうど今の時期というのは、オホーツク海には、流氷がやってまいります。実は、北緯 44 度というような緯度で本格的な流氷が見られるというのはここ北海道だけなのです。図 1 には、冬季における流氷分布を白で示しています。ノルウェーの沖などでは北緯 70 度でも海は凍りません。図 1 から、オホーツク海が北半球の流氷の南限であることがわかります。素朴に、なぜこんな緯度が低いのに流氷が見られるかということですが、それは実は結構単純で、非常に寒いからというのが一番の理由なのです。図 1 のカラーの等値線は冬季（2 月）の平均気温を示したものです。実はオホーツク海の風上、ロシア内陸に、マイナス 40 に及ぶ領域、非常に寒い北半球の寒極があるのです。ここから冷たい風が吹き込んでくるために、オホーツク海では海氷ができるわけです。今、海氷という言葉を使いましたが、皆さんには流氷という言葉がより慣れ親しんでいるかと思いますが、海の水が凍ったものは学術的には、海氷という言い方が一般的ですので、今日は海氷という言葉を使わせていただきます。

オホーツク海は北半球の海氷域の南限であり、海氷が多量に生成される場所なのですが、海氷が多量にできると、非常に重い水ができるのです（詳しくは後ほど説明）。重い水は潜り込みます。潜り込んで、それが北太平洋全体に広がるということで、そういう意味で重要だということなのです。つまり、オホーツク海から水が潜り込んで北太平洋規模の大きな循環を作っているのですが、どんなことでそういうことがわかってきたかを次に説明します。

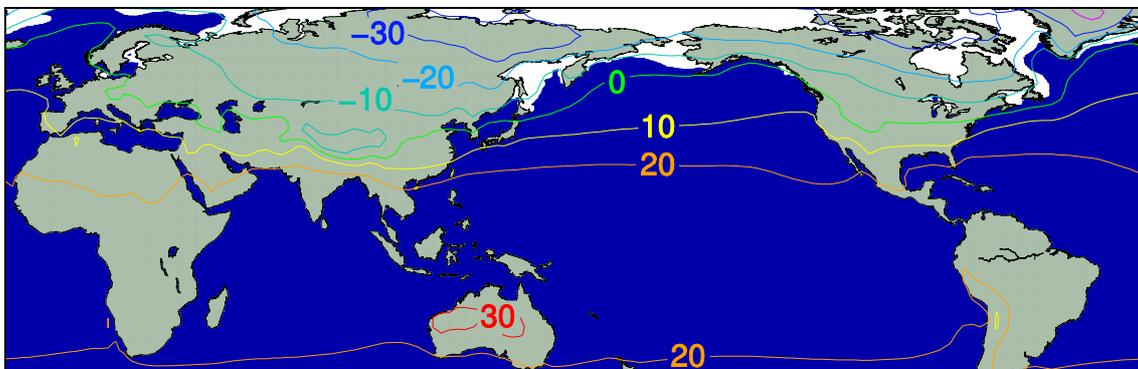


図 1: 地球全体での 2 月の平均海氷分布(白)と平均気温(等値線) 二橋 創平氏 作成

オホーツク生態系保全「日露協力シンポジウム」

1. 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理化学観測の成果と今後の予測

1) 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理化学観測の成果と今後の予測：大島慶一郎

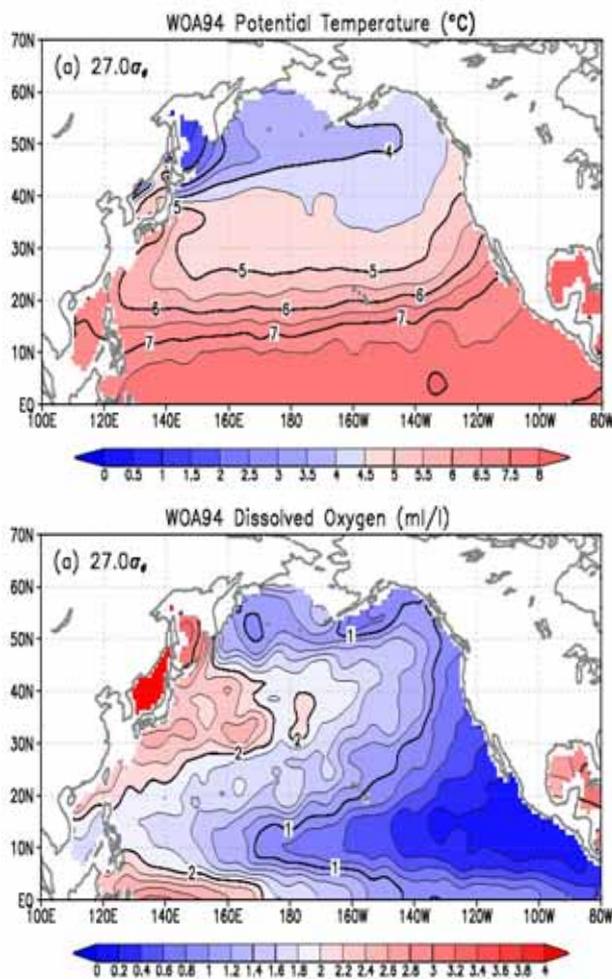


図2: 北大平洋における、等密度面  $\sigma_t=27.0$  での(a)水温と (b)溶存酸素量の分布。  $\sigma_t=27.0$  は水深にするとおおよそ 300-500m の層。

このオホーツク海の重要性がわかってきたというのは 1990 年代です。それまではオホーツク海は海洋学にとってはマイナーな海でした。なぜオホーツク海が重要かということを示しているのが図 2 です。図 2 は北太平洋における中層 (300 ~ 500m) での、同じ密度の面での (a) 水温 (b) と酸素量の分布を示したものです。中層の水温は、オホーツク海が一番低いということがわかります。また海水中に含まれる酸素 (b) もオホーツク海は非常に多いということがわかります。これはどういうことを示しているかということなのですが、中層では海水というのは、同じ密度の面に沿って循環するとい性質がありますので、この図から水の起源がわかるのです。まず、酸素が多いということは、酸素は海表面から取り込まれていますから、表面起源の水であることを意味します。つまり、この図から表面起源の水がオホーツク海から押し込まれて北太平洋中層に広がっているということがわかる

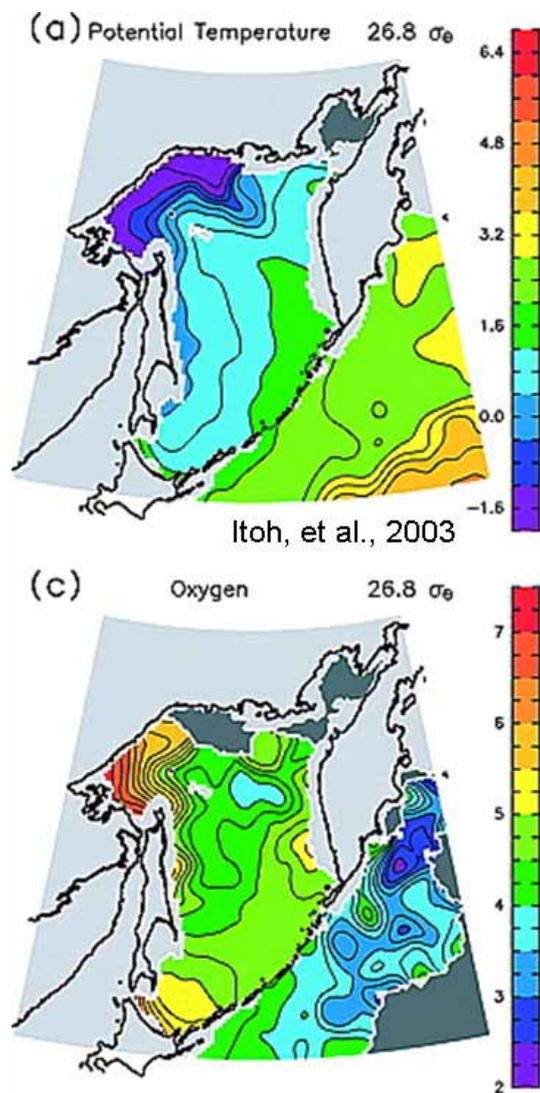
のです。なお、日本海も酸素量が多いですが、日本海と太平洋の間の海峡は浅い (200m 以下) ですから、日本海の影響は太平洋の中層には影響しません。これらの図が、オホーツク海が北太平洋全体の中層に表層起源の水を送り込んでいること、中層水のソースになっていることを示唆しているわけです。そういう意味でオホーツク海は北太平洋もにおいて重要な海なわけです。

ところがオホーツク海は、冷戦時代まではなかなか観測することが難しく、本当にそういったことが起こっているのか、起こっているとするとオホーツク海のどこで潜り込みがあるのかといったことというのは分かっていませんでした。そこで冷戦が終了して、日本とロシア、更にアメリカが共同してオホーツク海を観測しようということになりまして、ロシア極東海洋気象研究所と共同して、その船で、今まで 1998 年から 6 回、大規模な国際共同観測をオホーツク海で行なってきました。一番最近では 2 年前 2007 年に行なっており

ます。これらの共同観測では様々な成果が出ています。どういう機関で行なったかという  
と、日本は北大低温科学研究所が中心になりまして、その他に JAMSTEC、東大海洋研、最近  
の観測は地球研が中心となってサポートしております。アメリカからはスクリップス海洋  
研究所、ワシントン大学が参加しています。3つの国が協力し合って、オホーツク海全域に  
わたって観測を行いました。

さて、これらの観測でどんなことが分かってきたかということこれから説明します。

図3は図2と同様の図でオホーツク海での中層における同じ密度の面での水温(a)と酸素  
量(b)の分布を示したもので、過去のデータに加え、国際共同観測の成果を取り入れて作  
ったものです。この図からオホーツクの中のどこで潜り込みが起きているかということ



がわかります。北西部の沿岸に沿った所に水温が低くて酸素量の大きい所があることが明確にわかります。つまりこのオホーツク海北西部が重要なのです。ここから重い冷たい水が潜り込んでいるということです。

ここはどんな所かという、寒極からの厳しい寒気が海へ吹き出す場所でできた海氷がどんどん吹き流されて非常に多量の海氷ができる場所なのです。そこを沿岸ポリニヤ（ロシア語が起源）と言うのですが、ここから水が中層に潜り込んで北太平洋全体に広がっていることを示唆しているわけです。海氷ができると、冷たいから重いのですが、それだけではなくて海氷ができる時に塩分を吐き出すので、そのために更に重い水ができるのです。重い水は潜り込みますので、これが中層に潜り込んで、オホーツク海だけではなく北太平洋まで広がっていくこととなります。

ということは、海氷が沢山できる所で重い水ができるということ

図3: オホーツク海における、等密度面  $\sigma_t = 26.8$  での(a)水温と (b)溶存酸素量の分布。  $\sigma_t = 26.8$  は水深にするとおおよそ 150-350m の層。 Itoh, et al., (2003) より。

になります。そこで我々は海氷の生産量、海氷がどこで沢山できているかというのを、衛星のデータや大気のパラメータなどを使って調べました。図4がその結果でオホーツク海の海氷生産量の分布を示します。冷たい重い水が潜り込んでいる所、北西部で海氷生産が非常に盛んだということが明確にわかりあます。しばしば、「オホーツク海の流氷はアムール川起源の水が凍ったもの」という言い方をされることがありますが、これは間違っ

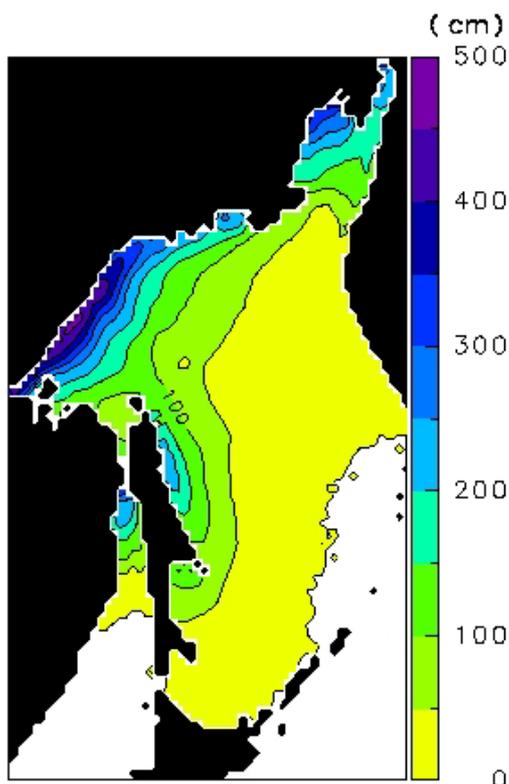


図4: オホーツク海での年間の海氷生産量分布。

海氷の厚さ(cm)に換算して示したもの。

人工衛星のマイクロ波放射計による海氷情報と熱収支計算から見積もったもの。

Ohshima, et al., (2003) より。

ています。オホーツク海で見られる流氷・海氷のうち、アムール川の水が凍ったものというのは、全体からするとほんのわずかでしかありません。むしろ、沿岸ポリニヤ域・北西部域で非常に大量の海氷ができているということです。

しかしながら、この図4の成果は人工衛星データなどを使った間接的な研究であり、直接観測したものではありません。現実を考えると、海氷が生成される冬季に直接観測を行うのは難しいものがあります。そこで、冬に本当に重い水ができているかということを実験的に直接測るために、国際共同プロジェクトでは、重い水ができていると考えられる北西部沿岸ポリニヤ域の海底に測器を設置して、冬季を含む一年間の観測をした後回収するというを行っています。図5がその結果で、沿岸ポリニヤでの海底における水温と塩分の時間変化を示しています。12月から海氷ができてはじめると、海氷から塩分が排出されて海水の塩分がどんどん高くなっていきます。水温は結氷温度の-1.8℃で、塩分が高くなると水もどんどん

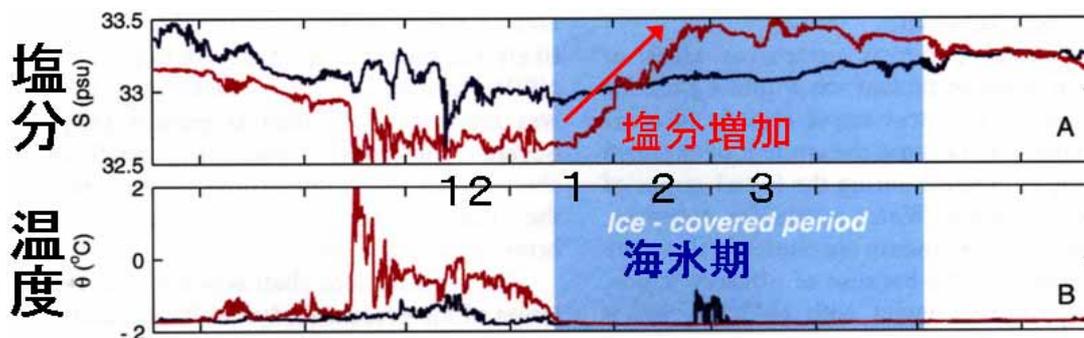


図5: オホーツク海の北西沿岸ポリニヤに設置した、水温・塩分計の時系列結果。 Shcherbina, et al., (2003) より。

重くなっていき 2-3 月には中層まで潜り込むような重い水ができてきているということが直接示されています。なお、この成果は、科学雑誌のサイエンスに掲載されております。

今までの話をまとめますと、オホーツク海の北西部では非常に高い海氷生産によって冷たくて重い水が生成され、それが中層まで潜り込み、オホーツク海だけではなく、更に北太平洋まで拡がって、上下方向の大きな循環を作っているということです。

さて今、地球温暖化の問題が重要視されています。例えばオホーツク海の海氷においても、今年は流氷の到来が史上 2 番目に遅いということや、流氷が徐々に減ってきているという話があります。そういった温暖化の影響が本当にあるのか、あるとするとどのように出ているのか、ということこれからお話いたします。

先ほどの、オホーツク海がなぜ海氷の南限かという所で、風上が非常に寒いからという話をしました。つまり、オホーツク海の海氷にとっては、風上の気温が非常に重要になります。図 6 には、オホーツク海の風上域での 50 年間の気温の変化を赤線で示しています。実はこの 50 年間で 2 気温が上昇していることがわかります。地球温暖化で、地球全体の気温というのは平均で 100 年で 0.74 の上昇となっていますから、それに比べるとずっと大きい昇温です。つまりオホーツク海の風上域は地球温暖化に非常に敏感・高感度な場所であるということです。そうするとどうということが起こるか？

図 6 の青線で示したのがオホーツク海の海氷面積の 30 年間の変化です。気温の変化と比較しやすいように、上ほど海氷が少ないように示しています。右肩上がりということとはだんだん海氷が減っているということになりますが、風上の気温と非常に相関が良いこともこの図からわかります。つまり、気温が高いと海氷面積が小さくなるということです。このことから 50 年間で海氷面積が減っていることが推定されます。つまり、海氷生産が減ってきているということです。今までの話からわかるように、海氷生産が減るとことは、冷たくて重い水が沈み込む量も減る可能性があります。実際どうなのか？

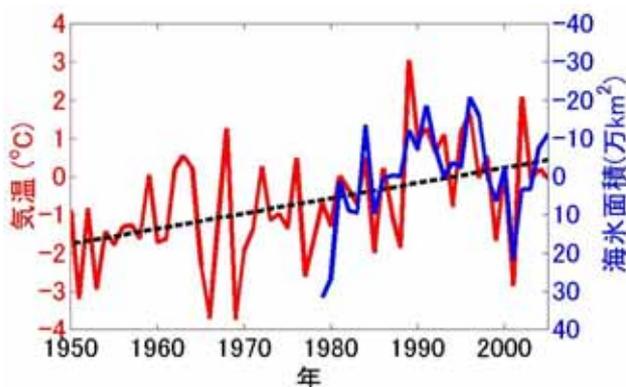


図 6: オホーツク海の 2 月の海氷面積(青線)とその風上の地上気温(赤線)の年々変動。偏差(平均からのずれ)で示しており、海氷面積(右端の軸)は上ほど小であることに注意。地上気温は 10-3 月の平均。Nakanowatari, et al., (2007) より。

図 7 は過去から最近のデータまで含めて、この 50 年間のオホーツク海の中層の水温と酸素量を見たものです。予想される通り、水温が上がって酸素量が下がっています。つまり本来海氷ができることによって、冷たくて酸素を沢山含んだ水が、表面から潜り込んでいるはずのものが減っているために、水温が上昇し、酸素が減っていることを示しています。つまり水の潜り込みが減っていることを示しているのです。

これはオホーツク海の留まらず、オ

ホーツク海が北太平洋で一番重い水ができる所ですから、北太平洋にも影響あるのではないかということになります。そこで、北太平洋まで広げて、この50年間で中層の水温がどれだけ上昇しているかということ調べました(図8)。図8からは中層の水温が一番上がっているのがオホーツク海であることがまずわかります。図8の緑線は、流線に相当します。北太平洋の亜寒帯域では、この緑線に沿った反時計回りの循環になっているのですが、オホーツク海を起点にして昇温のシグナルがこの循環に沿って広がっているということがわかります。つまり、オホーツク海で冷たい水の沈み込みが弱まっているというのが、北太平洋までの上下方向の循環をも弱めていることを示唆している図になるわけです。

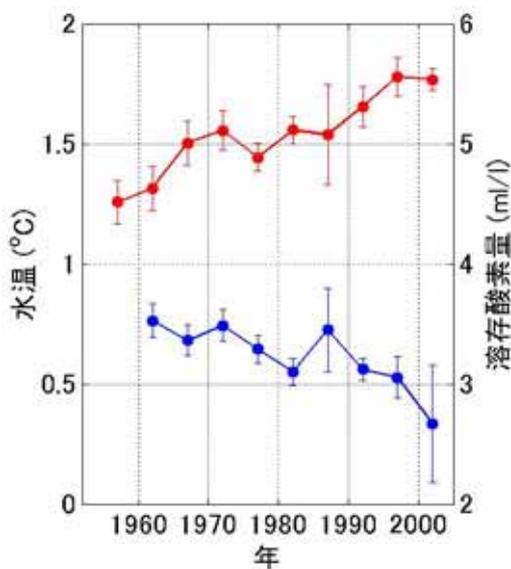


図7: オホーツク海の中層水の(a)水温と(b)溶存酸素量のこの50年の変化。中層のある密度層(水深約500mの層)で比べたもの。Nakanowatari, et al., (2007) より。

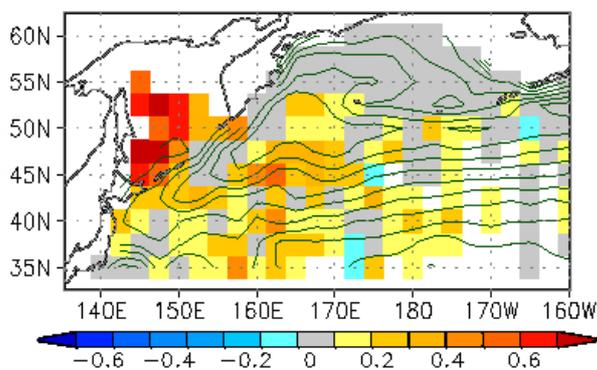


図8: 北太平洋及びオホーツク海の中層水温のこの50年の変化。中層のある密度層(水深約300-500mの層)で、この50年間で何度変化したかを示す。Nakanowatari, et al., (2007) より。

このように、水の押し込み・上下方向の循環が弱くなるということは、物質の循環にとって非常に重要になってきます。特に重要となるのは鉄分の循環なのです。実はロシアとの共同観測で、もう一つ重要な発見がありました。それはどんな発見かといいますと、海水生成によって塩分が排出されて重い水ができ、それが中層に潜り込む時に同時に多量の鉄分も一緒に中層に運ばれているということがわかったことです。この鉄分の詳しい話は、この後、西岡さんから詳しくありますが、鉄分は今、海洋学で最も注目されている成分であります。生物生産というのが、この鉄分の多い少ないかで決まるということが、最近の研究で段々と分かってきたからです。

図9が今回の話のまとめとなるポンチ絵です。まず、中層へ重い水が沈み込む時に一緒に鉄も運び込まれます。この鉄というのは元々陸起源なのですが、我々はこの鉄の起源はアムール川にあると考えています。アムール川の鉄の話は、この後に、地球研の白岩さん

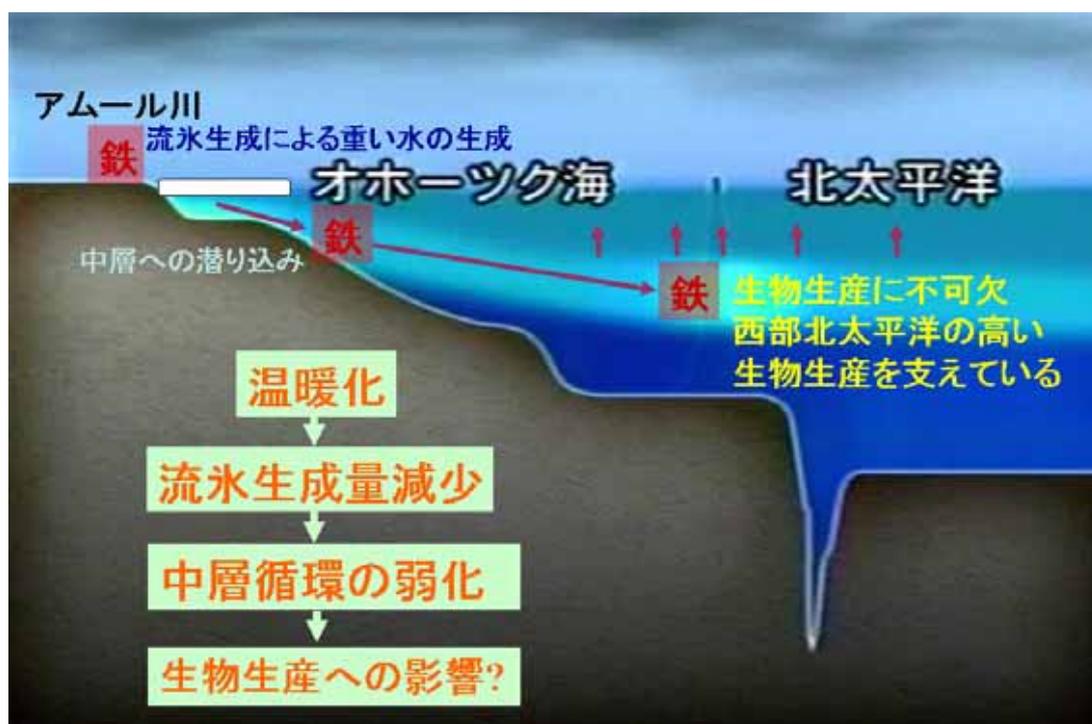


図9: オホーツク海を起源とする中層循環と鉄分の循環、その温暖化による影響

から詳しい話があります。アムール川から運ばれた鉄が、海水生産によって重い水が中層へ沈み込む時に、一緒に運ばれ、上下方向に混合したり、じわじわ湧昇していくことによって、オホーツク海さらには親潮、西部北太平洋という、生物生産が非常に高い所での、生物生産を支えている、という仮説を我々は提案しております（中層鉄仮説）。それを検証するために、ロシアとも協力して今観測を行なっております。

さて、こういうシステムが成り立っているとした時に、温暖化が起こって水の潜り込みが減るとどういったことが起こりうるのでしょうか。海水が減り、重い水の潜り込みが減ると、中層循環も弱くなり、鉄の供給も弱くなり、ひいては生態系、生物生産にも影響するかも知れない、という仮説・シナリオも成り立つこととなります。ただ、こういった話をする時、どこまで本当らしい話でどこまでが仮説かということがあります。この温暖化によって重い水の潜り込みが弱くなっているというところまではデータから明らかで、このステップまでは確かであると思います。鉄を介して具体的にどのように生物に影響を与えるかというのは、まだわかっていないこともあり、仮説の段階であります。これから更なる検証のため観測していかなければいけないということです。これには、北太平洋全体の生態系に影響する可能性がある話ですから、国境を越え、それから物理、生物、化学、水産、そういった分野を越えた研究というのが非常これからは不可欠になります。全て関連しあっているということです。

最後にもう一つ、話題を提供したいと思います。日本とロシアの共同観測の成果は他にも色々あるのですが、一つ重要な成果として、今まであまりよくわかっていなかったオ

ホーツク海の海流の実態がかなり明確になったことがあります。図 10 がその成果をまとめたオホーツク海の海流の模式図です。特に重要な海流というのはサハリン東岸を流れる東樺太海流。東樺太海流というのは、日本海を流れる対馬暖流の流量に比べ年平均にすると3倍くらいあるので非常に強力な流れです。特に冬季及び秋季には、東樺太海流は北海道の方まで達するような流れとなります。

今日は環境のお話ということで、この海流と海洋汚染に関する話を最後にいたします。今サハリン油田の開発が進んでいますが、もし油田やタンカーから油事故が起こったらどうなるか。それから、知床が4年前に世界遺産に認められた直後、油まみれの海鳥が知床に漂着するということがありました。これがどこからやってきたのか？ さらに、2005年にアムール川の上流の中国の松花江から多量のベンゼンなどの汚染物質が流出した事故がありました。この影響は？ 東樺太海流というのは、アムール河口を起源とする海水やサハリン油田あたりを起源とする海水を南まで運んでいき、サハリン南部、更には北海道沖まで運んでいく海流なのです。

我々は観測する一方で、観測成果に基づいて数値モデルシミュレーションによって、海水がどう漂流していくかというようなこともやっております。例えば図 11 はサハリン沖にある海水がどう漂流していくかの結果を数値シミュレーションで示したものです。東樺太海流に乗って北海道沖まで行く場合もあれば、年によって沖に出てしまう場合もあるという結果です。



図 10: 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) より。

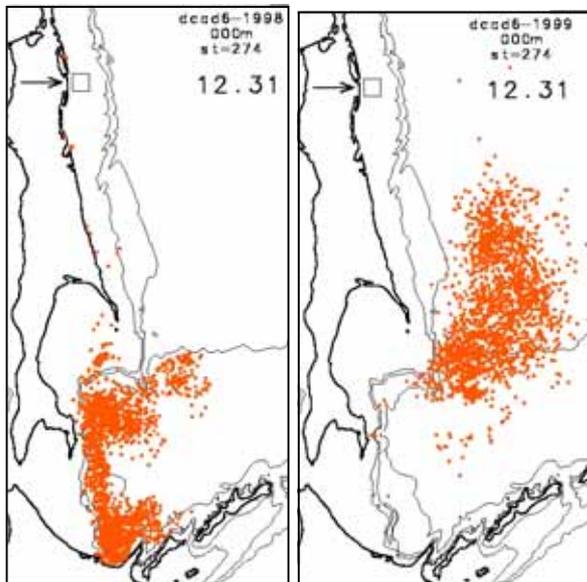


図11: 風で駆動されるオホーツク海の数値シミュレーション

において、サハリンII海域(矢印)から、10月に毎日、粒子を海面に流したときの12月31日での粒子の分布。左:1998年の例。右:1999年の例。

Ohshima and Simizu, (2008) より。

オホーツク生態系保全「日露協力シンポジウム」

1. 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理化学観測の成果と今後の予測

1) 温暖化で変わるオホーツク海：海洋物理化学観測の成果と今後の予測：大島慶一郎

次に油まみれの海鳥に関してですが、知床に漂着したのは約 5,500 羽ということで、これは日本の海鳥の事故の中で最大の数なのですが、これがどこから来たのかということに関しては、結局まだ結論は出ておりません。数値シミュレーションを用いると、後方粒子追跡という手法、これはビデオの逆回しのような手法なのですが、これを用いると漂着したものを時間を逆にたどってどこから来たのか推定できるというわけです。それによると、具体的にここだという所までは同定できないのですが、やはり東樺太海流に沿って北から来ているということが、シミュレーションでわかります。

日本はモデル研究や数値シミュレーションは非常に進んでおりますので、こういう研究も後環境予測などに役立てるということも、今後非常に重要なコンポーネントになってくるのではないかと考えます。