

— 解 説 —

オホーツク海研究の今後

北海道大学低温科学研究所 若 土 正 暁

はじめに

オホーツク海は、以下の3点で非常に興味深い海域として最近注目されている。(1)地球温暖化に最も敏感である可能性(気象研究所のモデルより)、(2)北太平洋中層水の起源水生成域として有力、(3)二酸化炭素の missing sink の候補の一つ。これらはいずれもオホーツク海における海氷の存在が密接に関わっているのではないかとされている。

北太平洋亜熱帯循環のほぼ全域にわたって分布する北太平洋中層水の起源となる水が本当にオホーツク海で生成されているのであれば、大気中に放出された地球温暖化ガスである二酸化炭素が他の化学物質とともにその生成域で吸収され、やがては北太平洋中層全体に輸送されていく事になる。従って、北太平洋北部の海洋循環や物質循環を理解していく上で、オホーツク海の実態解明が大きな鍵を握っているのかもしれない。

オホーツク海の最大の特徴は、何といても海氷が存在することであり、それも地球上で最も低緯度に分布していることである(図1)。従って、上に挙げた大きな問題の解明には、この低緯度海氷を生むオホーツク海やその上を広く覆う大気の特異環境の実態を明らかにするだけでなく、同時に低緯度海氷の消長が大気や海洋に与える影響についても評価する、いわば両側面からのアプローチが是非とも必要になってくる。

1) 海氷の一般特性

海氷は、太陽からの放射エネルギーの大部分を反射してしまう上に、大気-海洋間の熱交換を著しく抑制する効果(厚さ2m以上の海氷を通して海洋から大気への熱フラックスは、冬季沿岸ポリニ



図1：北半球における冬の月平均海氷密度分布図の一例

アを通してのその約1000分の1に減少する)をもつので、その存在によって周囲の気は冷却しさらなる海氷域の拡大を促すことになる。この自己拡大促進効果(正のフィードバック効果)は、海氷の融解期にも起こる。いったん融解が始まると海氷域の後退は加速される。このような正のフィードバック効果をもつので、海氷は地球温暖化などの気候変化に対する高感度のセンサになり得るのではないかとされている。

海氷はまた時空間的に大きく変動する物質である。両極域の海氷面積や密接度も年ごとに、またある時間スケールごとに大きく変動している。例えば、南大洋における海氷域の季節変動幅は、南極大陸の面積に匹敵する。子午線方向を冬拡大・夏後退という大きな季節変動を繰返す過程でも、海氷域内部では風や海流によって各海氷盤がめまぐるしく変動している。

海氷のもう一つの特性として、熱と塩の再分配がある。高緯度の海での結氷と海氷成長は、ブライン排出による塩獲得を海側にもたらすと同時に潜熱を大気側に放出する。このブライン排出は高密度水を生成し、深・底層水の更新化に寄与している。一方、海氷が低緯度に移流すると、海氷融解による淡水供給と熱損失を海側にもたらす事になる。

上に挙げた海氷の一般特性は、オホーツク海のような低緯度になると微妙に変化するのだろうか。小さな縁辺海にすぎないオホーツク海が果しているかもしれない“大きな役割”を理解するためには、極域海氷とは違った視点からのオホーツク海氷への取り組みが必要になってくる。

オホーツク海において今後推進すべき重要な研究課題として、我々は次の三本柱を考えている(若土・大島・竹内、1996)。

2) オホーツク海氷の消長

オホーツク海の海氷が、何処で、どのように生まれ、育ち、消滅していくのか、この素朴な、しかしオホーツク海氷研究の本質とも言うべき疑問に対して我々はまだ明快な解答を与える事が出来ない。近年の人工衛星による観測技術の進歩により、海氷が何処に先ず現れ、海氷域がどのように拡大していき、また後退していくかは容易に観測出来るようになった。しかし、海氷がそこで生成したのかそれとも他から流れて来たのかは、海氷域の変動を見ているだけでは区別が困難である。

低緯度のオホーツク海に海氷が生成する主な理由として、アムール河からの大量の淡水供給によって海洋上層に薄い低塩分層が出来るためと言われている。しかし、そのような海洋二重構造の存在を海氷出現前に確認したという観測例はまだ無い。もしこの特徴的な海洋構造が本当にオホーツク海氷を生む大きな原因となっているとしたら、晩秋の海洋観測だけでなくアムール河の流量のモニタリングも今後の重要な課題になってくる。

オホーツク海における主な海水生産域は、北西部大陸棚域や北カラフト東岸沖などの沿岸ポリニアとされている。そこでは、冷たい北西季節風によるフラジルアイスの急速生成と沖への吹き流しが絶え間なく起こり、非常に効率の良い海水生産工場になっている。この急速海水生産に伴って排出される多量のブラインは高密度水を生成するので、ポリニアでの海洋・海水観測を船上からだけでなく航空機も併用して実施する事が必要である。

主に沿岸ポリニアで生成した海水が、その後何処でどのように成長し、ついには融解によって消滅してしまうのか、それぞれの海水の成長履歴についても実は殆ど判っていない。これを調べるために、まず音響式の氷厚計を開発し、それを気象・海洋観測漂流ステーションに取り付け、海水とともに移動しながら海象データの他に氷厚変化も観測する。この方法によって、大気・海洋条件による海水の成長履歴を知る事が理論上は可能になる。しかし、実際の海水は単純に成長・融解だけでなく、転倒したり、合体したり、積雪があったりしながら発達するため、必ずしも一枚板から構成されているわけではない。だから、上記の方法も何度か現場でテストを繰り返しながら改良していく事が必要であろう。

上で述べてきたように、オホーツク海水は複雑で変動性豊かな研究対象なので、実際に現場で観測するとなるとかなり手強い相手である。だから、この複雑なオホーツク海水の消長の機構を理解するためには、現場観測と平行して海水モデルの開発が是非とも必要になってくる。

3) 北太平洋中層水の起源

塩分極小を特徴とし、ポテンシャル密度にすると26.7-26.9程度の水と定義づけられ(Talley, 1993)、北太平洋亜熱帯循環のはば全域にわたって分布する北太平洋中層水(以下NPIWと略す)の起源となる水が、オホーツク海で生成されている可能性が指摘されている(Talley, 1991; Yasuda, 1996)。しかし、その起源水が何処でどのようにして生成されるのか、といった具体的な事はまだ何一つ判っていない。

生成メカニズムとして今まで有力視されていたのは、オホーツク海北西部の大陸棚域で冬季の海面冷却及び結氷に伴うブライン排出によるという説(Kitani, 1973; Alfultis and Martin, 1987)であるが、冬季の観測データがほとんど無い現状ではその正当性を確かめることは出来ない。

そこで、乏しいながらも今までに得られている海洋観測データのすべてを用いてデータセットを作成し、それらの解析からNPIWの起源水の生成過程について議論した最近の我々の研究成果(Watanabe and Wakatsuchi, 1996)を簡単に紹介する。

3-1) オホーツク海千島海盆の水塊構造

NPIW起源水がオホーツク海で生成するのであれば、千島列島間の海峡を通して北太平洋と直接海水

交流のある千島海盆には少なくとも、その起源水が存在するはずである。千島海盆は、中層に低密度の比較的一様な水塊が存在し高気圧性循環を形成している(Wakatsuchi and Martin, 1991)。低温・低塩・高酸素の特性を持ち、ポテンシャル密度が26.8-27.0(NPIW密度領域に相当)程度のその水塊は、千島海盆に

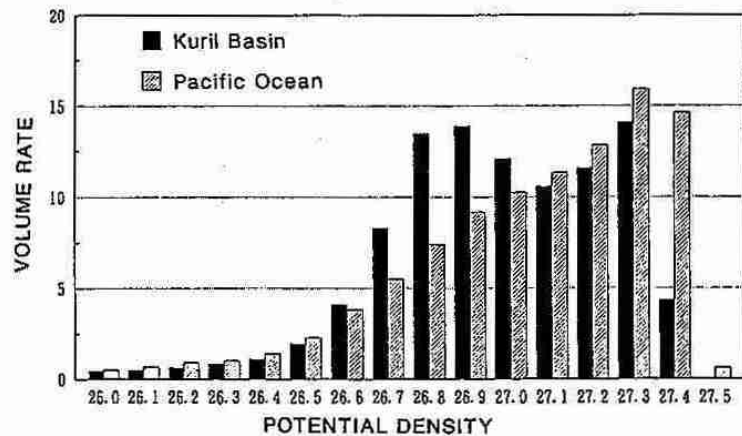


図2：千島列島を挟んだ千島海盆内部と北太平洋北西部における表面から水深1000mまでの水塊(体積)の密度構成比(%)

は多量に存在している(図2)。このNPIWと等しい密度領域にピークがあるのは、オホーツク海に特有で北太平洋には存在しないことから、NPIW起源水は多量に存在する千島海盆自身か或はオホーツク海内部の何処かで生成しているはずである。

3-2) NPIW起源水の生成過程

NPIW起源水が何処でどのように生成するかを探るために、我々は等密度面解析を行なった。NPIW起源水の大きな特徴の一つである高酸素の水塊は、NPIW密度領域以下の密度面上では確かにオホーツク海北西部に存在するが、同じ密度(26.8-26.9)面上になると南西海域で最も顕著に見られる(図3)。この等密度面解析から、NPIW起

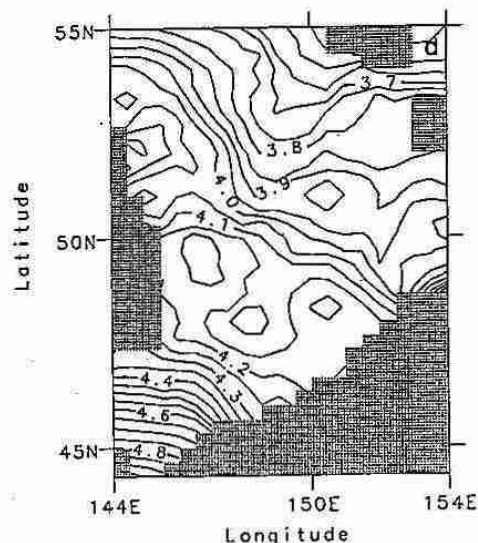


図3：オホーツク海南部(北緯55度以南)におけるポテンシャル密度26.9面上の溶存酸素分布(ml/l)

源水の生成にオホーツク海南西域、つまり北海道沿岸沖が重要な役割を果たしていることが示唆される。

オホーツク海北海道沿岸沖では、高温・高塩・高酸素の宗谷暖流が南東流している事はよく知られている。図3に示したポテンシャル密度26.9面上における北海道沿岸沖の高酸素域が、同時に高温・高塩の特徴も示していることから、その特徴的な水塊の生成に宗谷暖流が大きく関わっている事が考えられる。夏季の宗谷暖流は、勢力は強いがかなり低密度なのでNPIW起源水の生成に直接関与しているとは考えにくい。ところが、春先の宗谷暖流(宗谷暖流前駆水)は冬季日本海で冷却されたものが流入するの

で、夏季のそれより勢力は弱いものの遙かに高密度(26.8-27.2)である(Takizawa, 1982)。北海道沿岸沖で季節を問わず、これ以上の高密度水が観測されたという例は今のところ無いので、宗谷暖流前駆水がNPIW起源水の生成に大きく寄与しているものと考えられる。

図4に示されているように、北海道沿岸沖のポテンシャル密度26.9近くの水が高温・高塩化しているのは、明らかに宗谷暖流前駆水の影響を強く受けたためである。この水と北西海域の水塊を結んだ直線上にNPIW起源水(千島海盆地)が存在していることから、NPIW起源水の生成過程に関する次のようなシナリオが浮かぶ(図5)。ポテンシャル密度幅(26.8-27.2)をもつ宗谷暖流前駆水が、その流路を北に転じる際周囲の水との連行・混合過程を経てポテンシャル密度26.8-26.9の様な水となり北海道沿岸沖に達する。高温・高塩・高酸素の性質を維持したその水とそれより低温・低塩・貧酸素の北西海域からの流入水との等密度面混合(混合比1:4)によりその中間の性質をもつNPIW起源水が生成する。宗谷暖流前駆水に関する観測データから、その断面積(大島、1988)と流速(青田・河村、1978)

を用いてこの生成過程によるNPIW起源水の年間生成量を見積った

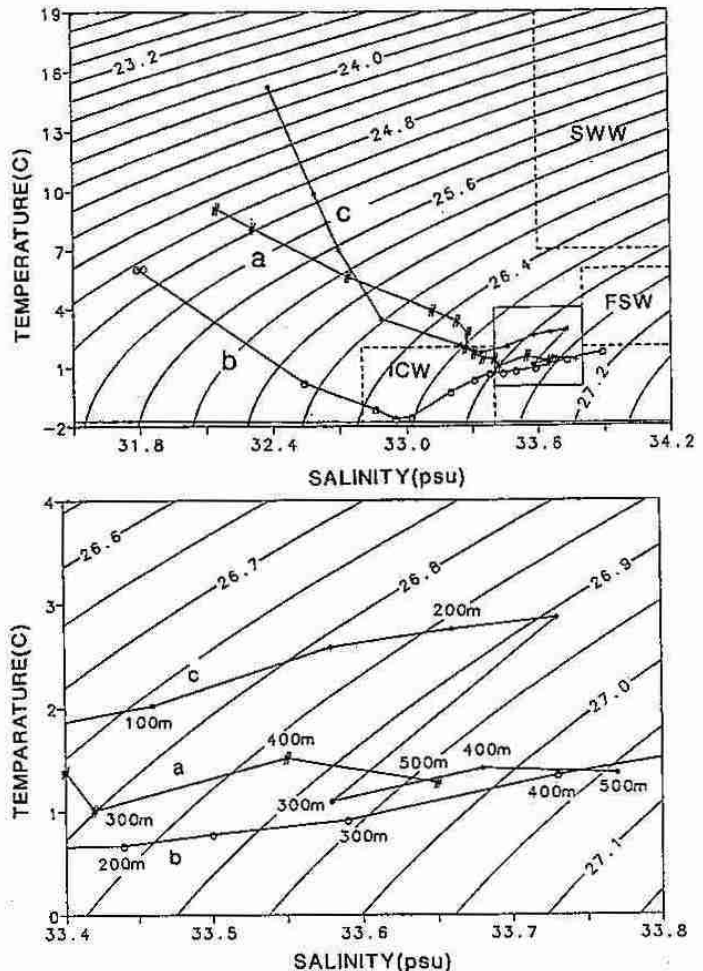


図4：オホーツク海の三海域、千島海盆(a)、北西域(b)、北海道沿岸域(c)におけるそれぞれに典型的な水塊構造のT-Sダイアグラムと四角で囲んだ部分の拡大図

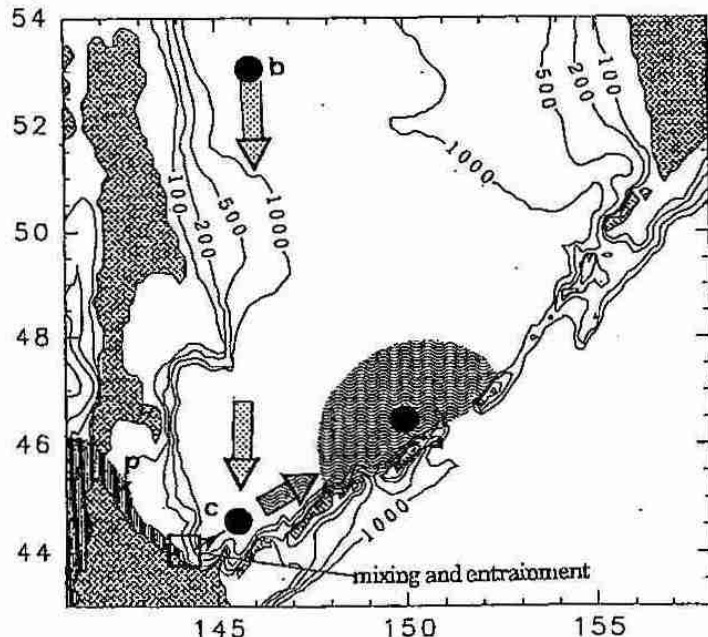


図5：等密度面混合を仮定した場合に考え得る北太平洋中層水と同じ密度の水のオホーツク海における生成過程の模式図 宗谷暖流前駆水とオホーツク海北西部起源の水が北海道沿岸沖で等密度面混合によって生成

ところ、約0.94Sv.が得られた。

オホーツク海における重要研究課題の一つであるNPIW起源水の生成過程について、ここではその考
えうる一つのメカニズムとして我々の研究結果を紹介した。しかし、まだ定性的な議論の段階でありそ
の生成過程の完全な理解のためには、より充実した現場観測の実施が今後の重要な課題である。それも
ポイントとなる海域・時期における集中観測の実施を目指すべきである。例えば、我々の指摘した説の
確認のためには、宗谷暖流前駆水の発達する春先の北海道沿岸沖の観測、また従来の説を確かめるには、
活発な海水生産が起こっているオホーツク海北西部大陸棚域やカラフト東岸沖の冬季観測、また潮汐混
合が盛んに起こっていると予想される千島列島間の海峡付近での長期にわたる流速計係留観測、などの
実施が是非とも必要になる。

4) 海氷域における大気-海洋相互作用

よく知られているように、北半球の寒極はオホーツク海のすぐ北側の東シベリア大陸にある。冬季、
ここからの厳しい寒気が北西季節風によってオホーツク海上空にやって来る。マイナス数十度Cにもな
る寒気がやって来ても、海はマイナス2度C程度以下には冷却されないで、海面付近では非常に大き
な温度勾配が出来、ばく大な熱が海洋から大気に放出される。通常はそこに海氷が生成するので、その
海氷を通しての海洋から大気への熱放出は激減(その厚さによっては海の100分の1から1000分の1に減少)
する。従って、海氷の有無は大気側にも海洋側にも大きく影響する。広大な海氷域内部にも実際には大
小さまざまな開水面が存在し、そこでは周囲の海氷域よりも海がより冷却され大気はより熱せられるので、
それによる対流がそれぞれで生じている事が考えられる。しかし、それがどのような構造、規模で起き、
どれだけ熱等の輸送を促進しているかについては、余り研究がなされていない。適当に開水面がある海
氷域では、海氷の全く無い所よりむしろ熱フラックスが多いとも言われている。

このオホーツク海氷域で顕著と思われる大気-海洋相互作用の機構を解明するためには、ミクロとマ
クロの二つの方向からのアプローチが考えられる。ミクロ的なアプローチは、隙間のあるような海氷域
で大気や海洋の中小規模現象を直接捉える事である。特に、船舶や航空機を用いた大気・海洋同時観測
が不可欠であろう。一方、マクロなアプローチとしては、寒気の吹き出しの時に、海氷上で気団がどの
ように変質していくかを調べる事がある。風上から風下に向かって航空機からドロップゾンデを投下し
ていけば、大気中の気温や水蒸気量のプロファイルの風下方向における変化が捉えられるので、どれだ
けの熱や水蒸気が海洋から大気に受け渡されているかが解る。この両方のアプローチを同時に行えば、
さらに効果的である。

おわりに

我々が当面オホーツク海で取り組むべき研究課題として、今まで三つの例について述べてきた。勿論、これ以外にも多くの重要な研究課題があるだろう。例えば、生態学の分野でもオホーツク海水域は最近注目されている。

オホーツク海のより深い理解をめざすためには、その研究対象の幅の広さ、奥行きの深さから考えて、海洋物理学、気象学、地球化学、雪氷学、生態学などいろいろの研究分野や、現場観測、データ解析・分析、リモートセンシング、理論などいろいろの研究手法を駆使した総合研究が不可欠である。そのためには、それぞれの研究分野・研究手法相互間で立ち入った建設的な議論を展開し、より有機的に研究を推進していくべきである。

参考文献

- Alfulitis, M. A., 1987: Satellite passive microwave studies of the Sea of Okhotsk ice cover and its relation to oceanic processes, 1978–1982. *J. Geophys. Res.*, 92(C12), 13013–13028.
- 青田 昌秋、河村 俊行、1978:北海道オホーツク海沿岸の冬季の海況。低温科学、37、93–106。
- Kitani, K., 1973: An oceanographic study of the Okhotsk Sea: particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Sea Fish. Res. Lab.*, 9, 45–77.
- 大島 慶一郎、1988:宗谷暖流におけるサブメソスケール。波動に関する研究 I 実態の把握。低温科学、47、117–129。
- Takizawa, T., 1982: Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 281–292.
- Talley, L. D., 1991: An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res.*, 38, Suppl. 1, 171–190.
- Talley, L. D., 1993: Distribution and formation of North Pacific intermediate water. *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 517–537.
- Wakatsuchi M. and S. Martin, 1991: Water circulation of the Kuril Basin of the Okhotsk Sea and its relation to eddy formation. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 47, 152–168.
- 若土 正暁、大島 慶一郎、竹内 謙介、1996:オホーツク海研究プロジェクトの提案。月刊海洋、28、(印刷中)。
- Watanabe T. and M. Wakatsuchi, 1996: Formation of 26.8 and 26.9 potential density waters in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk, as a possible origin of North Pacific Intermediate Water. To be submitted to *J. Geophys. Res.*.
- Yasuda, I., 1996: The origin of the North Pacific Intermediate Water. Submitted to *J. Geophys. Res.*.