

オホーツク海のシミュレーション

三寺史夫¹、内本圭亮¹、中村知裕¹、小野数也²

1. 環オホーツク観測研究センター
2. 技術部先端技術支援室

はじめに

オホーツク海は、地球上で最も低緯度で結氷する海として知られている。近年、地球温暖化にともないシベリア高気圧の弱화가顕著になってきており、オホーツク海においてはそれが海氷面積の減少として鋭敏に現れつつある。オホーツク海の高氷の消長は、大気と海洋・地表間の熱交換やアルベド（太陽光の反射率のこと）の劇的な変化を通して、環オホーツク地域さらには地球規模の気候変動・環境変動にまで影響を及ぼすことが知られており、さらに、物質循環や生態系にも大きな影響を及ぼす可能性がある。このような特徴を持つ環オホーツク地域の気候変動・環境変動を総合的に研究するためには、シミュレーションによる現象の再現が不可欠である。本稿では、現在環オホーツク観測研究センターにおいて実施されている高解像度海洋モデルや、環オホーツク圏領域気候モデルの中の海洋コンポーネントを中心に、オホーツク海のシミュレーションについて述べる。本研究を遂行するにあたり、数値計算や出力の解析の多くは環オホーツク情報処理システム（小野，2006）で行っており、技術部によるシステムの整備・拡張が重要であった。

オホーツク海の風成循環

オホーツク海は北部から中央にかけての比較的浅い海盆（1000 m 以浅）と、南部の3000 m を超える千島海盆に大まかに分けることができる。そのうち中央から北部にかけての循環は、ほぼ風によって駆動されていると考えられている。この循環を風成循環と言い、風応力の回転により引き起こされる。オホーツク海の場合、年平均の風はほとんどの領域で反時計回りの回転成分を持つため、海流も反時計回りとなる。図 1 に、このような循環のメカニズムに基づいた現実的なモデルの結果を示す（Uchimoto *et al.*, 2007）。実際、季節風が強い冬季に（図 1b）反時計回りの循環が卓越している。特に、サハリン沿岸では表層に塩分が薄くて強い南下流がある。これが東樺太海流である。この低塩分水はサハリン北岸へ流出するアムール川に影響を受けている海水であり、東樺太海流に乗って北海道沿岸まで到達することを示している。この海流は、表面ばかりではなく水深 500 m においても 20 cm/s を超える強い流れがあることが、観測より知られている。一方、夏季は風が非常に弱く、オホーツク海内部では、東樺太海流を除いて流れも弱い（図 1a）。夏季に顕著なのは北海道沿岸の宗谷暖流である。これは、日本海からの海流で、高温・高塩分の性質を持っている。これが知床沖で北海道から離れ、渦を作りながらオホーツク海内部に流れ出している。

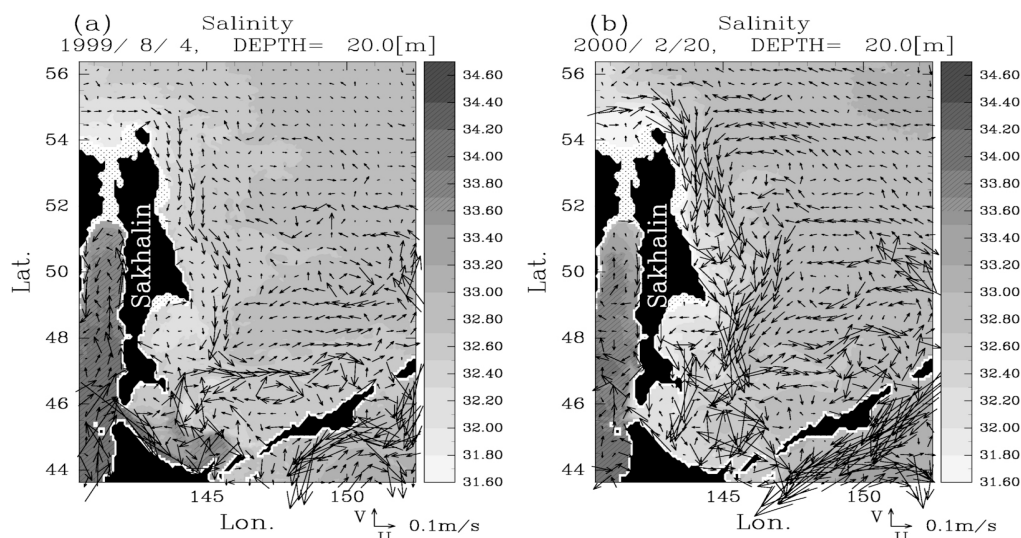


図 1 高解像度オホーツク海モデルによって再現された、(a) 夏季、(b) 冬季の塩分（コンター）と海流（ベクトル）の分布（Uchimoto *et al.*, 2007）。計算領域はオホーツク海全体であるが、ここではサハリンから北海道沿岸の領域を図示した。

オホーツク海北西陸棚域における高密度陸棚水の形成

オホーツク海の流は海氷生成時にも駆動される。海水が氷になるときに、塩分が海氷の外に排出される。このとき排出される塩分は濃縮されており、きわめて高塩分である。このような高塩分水をブラインと言う。水温の低い高緯度の海では、海水の重さ（密度）は塩分の濃さで決まるので、ブラインはまわりの水より重く、より深くまで沈み込むことができる。オホーツク海の北西陸棚域は北太平洋周辺で最も重い海水（高密度陸棚水）が生じる海であるが、これは大規模な結氷が起こるためであり、生成された高密度水は北太平洋全体にも大きな影響を及ぼしている。

図 2 はこのような高密度陸棚水の形成過程を数値実験によって示したものである（Kawaguchi and Mitsudera, 2008）。高塩分水を注ぎ始めると、それは数～10 km の渦を形成して傾斜を下り始める（図 2）。地球の回転と非常にゆるい斜面のため、重い水が斜面を駆け下るといよりも、渦が塩分輸送を主に担っている。したがって、渦による冲向きの塩分輸送が海洋表面から注入される塩分フラックスと均衡した時に、陸棚水の塩分値が決まる。幾見（2005）は Ohshima *et al.*（2003）の海氷生成量から求めた塩分フラックスを用い、高密度陸棚水の形成量の年々変動を推定した（1987～2000 年）。その結果、海氷生成量は 1996 年に少なく、2000 年に最も多かった。海氷形成に伴い塩分が 0.6 psu*1 以上増加する水の形成量は、両者を比較すると 6 倍も異なる。これは、高塩分（高密度）水形成量が海氷生成の変動、ひいては気候変動に対して非常に敏感であることを示唆している。現在、オホーツク海から北太平洋の中層は著しい温暖化傾向を示しているが、海氷生成量に対する高密度水形成量の敏感さも、顕著な中層水の温暖化の一因かもしれない。

*1 psu：電気伝導度に基づいた塩分濃度の単位。ほぼ千分率‰と同程度である。

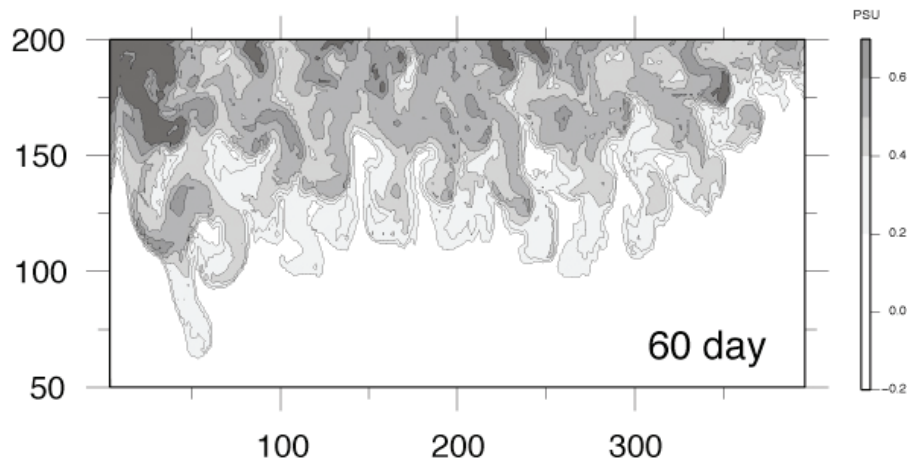


図 2 高密度陸棚水形成の数値実験。塩分フラックスを与え始めてから 60 日目の海底付近の塩分偏差の水平分布（単位は km）。コンター間隔は 0.2 psu。斜面の勾配は 0.001 である（Kawaguchi and Mitsudera, 2008）。

オホーツク海熱塩循環の再現

前節のようなプロセスによって生じた高密度陸棚水は、北西陸棚域から流れ出し、中層に沈み込み、最終的に北太平洋中層（200～800 m）に流れ出して北太平洋中層水と呼ばれる海水の起源水となる。この高密度陸棚水はまた二酸化炭素や酸素などの大気物質を吸収し輸送するほか、鉄のような栄養物質も大量に運んでいることがわかってきた。したがって、高密度陸棚水は物質輸送の主要な経路であり、オホーツク海から北太平洋亜寒帯域の環境変動に直結されている可能性が高い。

一方、オホーツク海の出口には千島列島があるが、そこでは強い潮汐混合（鉛直混合）が起こっていることが知られている。この混合が高塩分の中層水を表層へ運ぶ。この表層水は前述した風成循環に乗ることによって北方へ移流され、高密度陸棚水が形成される北西陸棚域に達する。その結果、アムール川からの淡水流入や海氷の融解で低塩化している表層水に塩分を補う効果をもたらす。このように、「北西陸棚域の高密度水 → オホーツク海中層水 → 潮汐混合 → 風成循環による北方への輸送」、が一連の流れとなって熱塩循環を形成し、その強度をコントロールしている（Matsuda *et al.*, 2008）。

図 3 は数値実験結果のひとつで、 $26.8 \sigma_\theta$ という等密度面（200 m 深前後）に沿った水温である。(c) がコントロール実験であり、比較のため (f) に観測データの解析結果 (Itoh *et al.*, 2003) を示している。(c) のコントロール実験は、全体的に水温がやや高いものの、おおむね観測の結果を再現している。たとえば北西陸棚域には結氷温度に近い非常に冷たい水が存在する。これが海氷形成に伴う高密度陸棚水である。

面白いのは、風が変化することによって中層水温も変化することである。これは風が強くなることによって表層北向きの塩分輸送が大きくなり、海氷生成域の塩分強化をもたらしたためである。このように、オホーツク海の熱塩循環は風と強く結びついていることが明らかとなった。

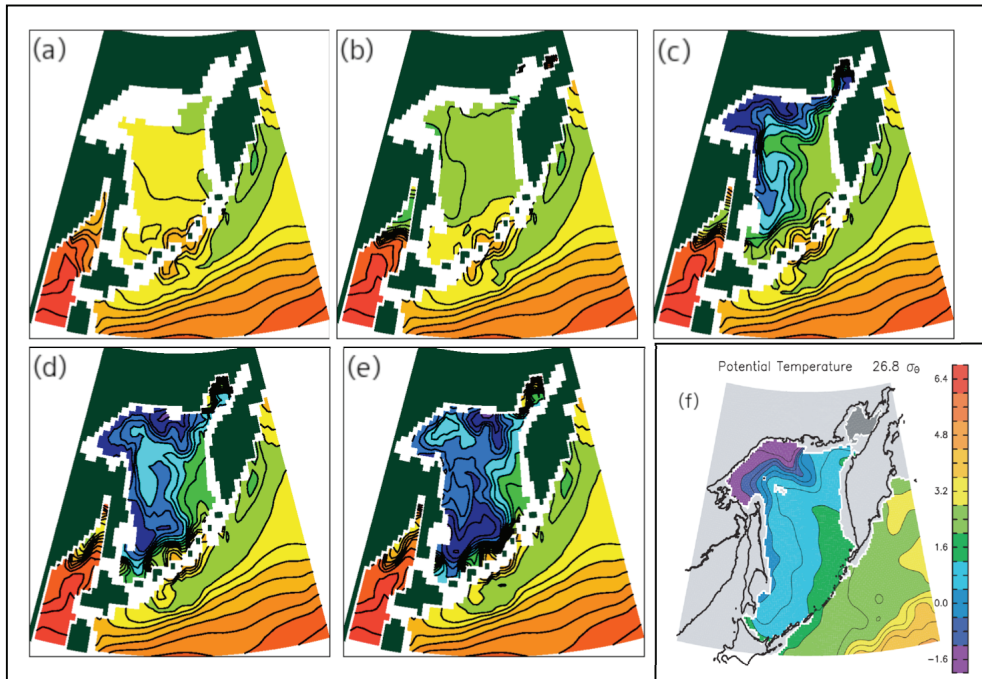


図 3 風の強さを変化させることによって生じる中層水温の変化。(c) がコントロール実験。(a)、(b)、(d)、(e) は、コントロール実験に比べて風をそれぞれ 0、0.5、1.5、2 倍にしたものである。また、(f) に観測データ (Itoh *et al.*, 2003) の解析結果を示す。

気温を変化させると、海氷生成に大きな変化が生じた。また、気温が 3°C 上昇したときには中層水温は平均で 0.6°C 上昇した。この結果は、データ解析により明らかとなったここ 50 年の水温上昇傾向 (Nakanowatari *et al.*, 2007) と同程度であった。

おわりに

オホーツク海の循環は風の効果と熱塩の効果が結びついていることがわかってきている。今後は、環オホーツク圏の気候変動、物質循環、生態系のシミュレーションに発展させていきたいと考えている。

参考文献

- Itoh *et al.* (2003) *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002jc001950.
 Kawaguchi and Mitsudera (2008) *J. Geophys. Res.*, Submitted.
 Matsuda *et al.* (2008) *Deep Sea Res.*, Submitted.
 Nakanowatari *et al.* (2007) *G. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2006GL028243.
 Ohshima *et al.* (2003) *J. Met. Soc. Japan*, 81, 653–677.
 Uchimoto *et al.* (2007) *J. Oceanogr.*, 63, 379–391.
 幾見 (2005) 北海道大学大学院地球環境研究科修士論文。
 小野 (2006) 低温科学研究所技術部技術報告 第11号、32–34。