

## 論文の内容の要旨

論文題目「数値モデルによるオホーツク海の 海洋・海水・連成構造に関する研究」

氏名 藤崎 歩美

オホーツク海は冬に海水が発達する世界で最も低緯度に位置する季節海水域である。四方を陸地に囲まれているため、外海から独立した特徴的な海水特性を有している。例えば北部では海水生成に伴い高塩分水(ブライン)が排出されることにより冷たく重い高密度棚水(Dense Shelf Water, 以下 DSW)が生産される。DSW は中層(200-800m 深)まで沈み込み、東サハリン海流により南部へと運ばれ千島海盆域でオホーツク海中層水へ注ぐ。千島列島付近では潮汐由来の強い鉛直混合がオホーツク海と北太平洋の中層水を活発に交換している。こうしてオホーツク海水は北太平洋中層水をベンチレーション(通水)し、北太平洋の中層循環に影響する(三寺・中村 2007)。

オホーツク海は豊かな生態系を有することでも知られている。冬季の海水生産に伴い鉛直混合が活発化すると深部の栄養塩が表層まで巻き上げられる。そして春に海水が融解すると植物プランクトンの一斉増殖(ブルーミング)が生じる。このようにオホーツク海は一次生産性が高く、豊かな漁業資源域、そして二酸化炭素吸収源として果たす役割も大きい。近年では DSW が植物プランクトンの増殖に不可欠な鉄の輸送を担うと指摘されており物質循環という観点からもオホーツク海は重要な海域である。

このようにオホーツク海の海洋構造は海水と海洋の相互作用の上に成り立っている。このためオホーツク海の海水-海洋連成構造を理解することは重要である。しかしオホーツク海における海洋データは海水域における観測が難しいことから他の日本近海と比べ少ない。数値モデルによる研究を見ると、東サハリン海流の定量的再現(Shimizu and Ohshima 2006)、千島海盆域における中規模渦の再現 (Uchimoto et al. 2007)など一定の成果があげられている。しかしいずれも海水を考慮しない海洋単独モデルによるものか、低解像モデルであるため中規模スケールの海水-海洋相互作用に注目した例はほとんどない。

そこで本研究ではオホーツク海を対象とした中規模渦解像レベルの海水-海洋結合シミュレーションを実施し同海域における海水-海洋連成構造について調査を行った。海洋の物理モデルは Princeton Ocean Model をベースに開発されたオホーツク OGCM (Uchimoto et al. 2007)を用いる。水平解像度は 1/12 度(約 6×9km)、鉛直方向は z- $\sigma$ 座標系で 45 層である。海水の力学モデルには氷盤衝突を考慮した弾粘塑性レオロジーモデル(佐川 2007)を使用している。海水の熱力学モデルは Semnter (1979)による 0 層モデルを採用している。気象データには気象庁領域スペクトルモデル客観解析値を使用した。

シミュレーションに先立ち、現実的な風成循環を得るために気象庁領域スペクトルモデル客観解析値の地上風速データを長期再解析値と比較した。また大気-海水間抵抗係数  $C_{DN}$  について沖合で唯一の観測である 2002-2005 年巡視船そうや航海中に行われた渦相関法による計測結果を解析し数値モデルにおいて妥当な値について検討した。まず地上風速デー

タに関して米国が提供する長期再解析値(NCEP-II)と比較した結果、客観解析値は東西で26%、南北で22%小さかった。このため客観解析値の地上風速データをそのまま適用した場合と一様に1.25を乗じて適用した場合をそれぞれ数値モデルに適用し結果の妥当性を検討した。次に $C_{DN}$ の計測結果を解析した。計測中最も頻繁に遭遇したのは直径500m以下の比較的小さな氷盤が特徴的な氷況で、オホーツク海の海水が変形や破壊を受け粗い海水表面形態をなしていることを示していた。得られた $C_{DN} \times 10^3$ は1.8-6.0の範囲に分布し中間値3.2、平均3.4であった。Shirasawa (1981)はオホーツク海沿岸域の計測結果から数値モデル向けに2.5を提案しているが本計測結果の平均値はこれより大きい。またGuest and Davidson (1991)がまとめた一年氷上の値と比べるとrough ice (2.2-4.0)もしくはvery rough ice (3.1-5.0)上の値と同程度であった。これを受けて数値モデルでは $C_{DN} \times 10^3$ を2から5まで変化させて $C_{DN}$ 計算結果にどう影響するか考察した。

前述した風応力に関する考察を基に海水-海洋結合シミュレーションを行った。

まずオホーツク海風成循環を代表する東サハリン海流について夏弱まり冬強まるという季節変動と観測と同様の流量の再現に成功した。 $C_{DN} \times 10^3$ を2から5まで増加させると最大流量は倍程度まで増加したが、年によって $C_{DN} \times 10^3 = 4, 5$ 間で逆転するなど対応は単純ではなかった。

海水分布は気象庁海水解析図とよく対応しており海水域面積の時間変動も再現されていた。 $C_{DN}$ を増加させると海水が受ける風応力が強まるため海水域が広がることが予想されたが、海水域面積は $C_{DN}$ によってほとんど変化しなかった。この要因には海水域の広がり力が力学的要素だけではなく比較的高い海水温による氷縁部融解によっても決まっていることが考えられる。一方で海水域面積が $C_{DN}$ によって変化しなくても海水移動速度とその下の海流速度は $C_{DN}$ と共に増加する傾向にあった。つまり数値予報モデルにおいて海水域面積や海水分布だけで $C_{DN}$ のチューニングをすることは不十分である。

次に高密度棚水(DSW)形成過程について調査した。海水生産に伴い2-3月にかけて北部沿岸域の海底に高塩分水が沈み込む様子が確認できた。沈んだ高塩分水は周囲との密度差により不安定を生じ、数十kmスケールの強い相対渦度偏差を示した。

DSWの定義を $-1^{\circ}\text{C}$ 以下、ポテンシャル密度 $26.75-26.9\sigma_0$ 以上とすると北西部陸棚域におけるDSW生産量は1998-1999年で $0.22-0.39\text{Sv}$ 、1999-2000年で $0.19-0.44\text{Sv}$ であった( $\text{Sv}=10^6\text{m}^3/\text{s}$ )。後者は同時期のShcherbina et al. (2004)の衛星観測データによる見積もり $0.3\text{Sv}$ と対応する。

Itoh et al. (2003)は歴史的海洋観測データを統合して陸棚全域の年平均DSW生産量 $0.67\text{Sv}$ と見積もった。彼らは冬の観測データが不足していたため4-9月のDSW体積を年間総生産DSW体積とみなした。本モデル結果で年平均DSW生産量を求めると1998-1999年で $0.68-1.08\text{Sv}$ 、1999-2000年で $0.70-1.14\text{Sv}$ であった。一方Itoh et al. (2003)と同じ仮定のも

と年平均 DSW 生産を見積もるとそれぞれ 0.41-0.65Sv、0.45-0.73Sv と彼らの見積もりとよく対応した。彼らの手法では実際の年平均 DSW 生産量を 40% 程度過小評価することになる。

$C_{DN} \times 10^3$  を 2 から 5 まで増加させると北西部陸棚域における年平均 DSW 生産量は 1998-1999 年 1.33 倍、1999-2000 年で 1.27 倍まで増加した。一方対応する海水生産量の増加はそれぞれ 1.16 倍、1.11 倍と、DSW 生産が海水生産に比例しない結果となった。このことは二つの仮説を提起する。一つは Shcherbina et al. (2004) が DSW 生産量見積もりに用いた DSW 生産量と海水生産量が比例するという仮定は妥当ではないということ、もう一つは  $C_{DN}$  を増加させることで力学的な機構により海洋の塩分輸送が強化され、陸棚域へ高塩分水を供給し DSW 生産を促進するというものである。陸棚域への塩分輸送には  $C_{DN}$  が海洋の反時計方向循環を強化し南部から北太平洋由来の高塩分水を陸棚域へ運ぶという水平輸送と、氷縁部で海洋表層へ伝わる運動量フラックスが不連続になることにより水平流速の発散が生じ深部から高塩分水が湧昇するという鉛直輸送が考えられる。両者を調査した結果、前者は  $C_{DN}$  による明確な傾向は見られなかったが、後者の鉛直輸送は  $C_{DN}$  を増加することで強化された。このように DSW 生産機構の新たな可能性として海水が力学的に塩分を鉛直輸送する機構があることがわかった。鉛直輸送の水柱の径は 30-50km 程度であり、これは中規模渦解像モデルだからこそ観察できたものといえる。

最後にオホーツク海における海水海洋熱交換について調査した。比較的暖かい北太平洋海水の流入により海水-海洋熱ラックス  $F_b$  が増大し、海水成長期である 2-3 月でも局所的に 1 ヶ月 0.3m 以上の融解が起こっていた。 $F_b$  は融解を通じて氷縁位置を決定していた。海水底面と海洋表層の温度差  $\Delta T$  は氷縁に近づくにつれ増大していたため、主に  $\Delta T$  が氷縁を決定する大きな  $F_b$  に寄与していると考えられる。最も融解が活発だった北部陸棚端や南部氷縁域では海水に覆われていても  $100\text{W}/\text{m}^2$  以上の熱が海洋から奪われていた。一般に海水に覆われると海洋表層は大気冷却から断熱されるが、 $100\text{W}/\text{m}^2$  という値は開放海面における大気冷却に匹敵するものである。 $F_b$  はその計測の難しさから一定とするような単純なモデルが採用されている例も多い。本モデル結果はそのような単純なモデルを用いると冬季の海水融解に伴う熱交換を正しく考慮できなくなる問題を示している。

融解が顕著な場所では海洋表層からの熱吸収だけでなく海水融解に伴う淡水供給が連続的に起こっている。これらは海洋の成層状態にも影響し、中層水の形成、塩分輸送にも寄与するだろう。冬季の海水融解の影響はこれまで殆ど注目されてこなかった。本研究により示された新たな課題といえる。