

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007 年度～2009 年度

課題番号：19340131

研究課題名 (和文) オホーツク海・北太平洋中層の温暖化とそのメカニズムの解明

研究課題名 (英文) Elucidating mechanisms of intermediate layer warming in the Sea of Okhotsk and North Pacific.

研究代表者

三寺 史夫 (Mitsudera Humio)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：20360943

研究成果の概要 (和文)：オホーツク海から北太平洋にかけての中層温暖化の実態を明らかにするとともに、熱塩(中層)循環の力学過程とその変動メカニズムの解明、および、その基礎となる高密度陸棚水 (DSW) 生成過程の解明を目的とした。北西陸棚域で生成される DSW はここ 50 年間で約 0.1PSU 減少し軽くなっており、これが $26.8\text{-}27.0\sigma_{\theta}$ では温暖化シグナルとして現れている。数値実験の結果、DSW の塩分は、気温の上昇 (海氷生成量の減少)、降水量の増加、風応力の変動の影響を受けて変動することが示された。一方、低緯度の亜熱帯循環中層では逆に低温化が顕著である。これは、70 年代半ば以降、亜寒帯循環が強化され、親潮を通した亜寒帯から亜熱帯への低温水流入量が増加したためである。

研究成果の概要 (英文)：This study is aimed at elucidating characteristics of intermediate-layer warming in the Sea of Okhotsk and western subarctic gyre of the North Pacific, and its mechanisms from a point of view of thermohaline circulation. Dense shelf water (DSW) produced over the northern shelves in the Okhotsk has freshened about 0.1 PSU in the last 50 years, causing warming in the $26.8\text{-}27.0\sigma_{\theta}$ isopycnals. Numerical experiments indicate that air temperature rise (which causes decrease in sea ice production), increase of fresh water precipitation and wind variations are responsible for the warming.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：オホーツク海、熱塩循環、中層水、温暖化

1. 研究開始当初の背景

オホーツク海から北太平洋にかけての中層の水温がここ 50 年間で大きく昇温してい

る (Nakanowatari et al., 2007)。これはオホーツク海で最も強く現れ北太平洋へと広がっている。このことから、海氷生産量が最も大

きいオホーツク海北西陸棚域を起源とする熱塩循環（中層水の3次元循環）と強く結びついた現象であることを示唆している。ユーラシア大陸北東部ではシベリア高気圧の弱化からこの30年間で5°Cもの急激な温暖化を示しており、それが海氷生産量減少をもたらし、ひいては高密度陸棚水（DSW）生成量の減少を引き起こしている可能性がある。事実、オホーツク海の海氷生産量は年々減少傾向にあり、この仮説を支持している。しかし、オホーツク海・北太平洋の大気-海洋-海氷システムに対する知見は、未だ断片的なものである。海氷生産量の変動によってDSWの塩分や生産量はどのように変わるのか。DSWの変動は表層・中層にわたる熱塩3次元循環にどのような熱的・力学的インパクトを与えるのか。ユーラシア大陸北東部の温暖化に伴ういかなる気象・気候条件の変化が、海氷の変動や海洋中層の温暖化と結びついているのか。データに基づくさらなる実証と、数値モデルを用いたメカニズムの解明を総合的に進めた。

2. 研究の目的

以上を背景に、本研究ではオホーツク海・北太平洋における中層温暖化の実態を明らかにするとともに、熱塩3次元循環の力学過程とその変動メカニズムの解明、およびその基礎となるDSW生成過程の解明、を目的とする。

3. 研究の方法

(1) オホーツク海・北太平洋中層循環変動の解析

中層循環の起源となるDSWの形成過程と変動を、データ解析によって調べた。これまでデータの少なかったオホーツク海内部の解析には、既存の資料（World Ocean Database 2005等）にロシア政府機関の観測資料を統合したロシア水文気象学研究所作成のデータを用いた。

さらに、広範囲の北太平洋における中層水温の変動を、既存の資料とArgoによるデータを用い解析した。また、気象研究所が作成したオホーツク海を含む北太平洋高解像度数値モデル(1/10°格子)の出力を解析し、上記観測値と比較することで中層水温変動のメカニズムを考察した。

(2) 北太平洋熱塩循環と変動の数値実験

中層水の循環はオホーツク海から北太平洋にかけての熱塩循環システムとして捉えることができる。そのような観点から、オホーツク海と北太平洋西部亜寒帯を含む領域で海洋・海氷モデルを用いた数値実験を行った。具体的には：①熱塩循環システムがどのような要素で構成されているのか、②海氷形

成量の変化、降水量等の淡水フラックスの変動、風応力の変動に対する中層水温の感度はどうか、数値実験を用いて調査した。

(3) オホーツク海北西陸棚域におけるDSW形成メカニズムの素過程の解明

オホーツク海北西陸棚のポリニヤでの素過程に注目したオホーツク海高解像度数値実験や、さらに地形と塩分強制を単純化し非常に高解像度にしたモデル(1/30°格子)を用いて数値実験を行い、DSW形成過程を考察した。

4. 研究成果

(1) オホーツク海・北太平洋中層循環変動の解析

① オホーツク海の変動

オホーツク海から北太平洋亜寒帯循環中層にかけての中層水温の上昇は顕著であり、その中心はオホーツク海北西部にある。ここでは海氷が大量に生成し、塩分が濃縮されて高密度となった高密度陸棚水（Dense Shelf Water; DSW）が生成され中層への沈み込みが生じている。そのため、DSWの性質が変化したこと、このような中層温暖化をもたらされているものと考えられる。

そこで、本研究ではロシア水文気象学研究所がロシア独自のデータを含めて新たに編纂したオホーツク海の観測データを用いてDSW変動の解析を行った。これにより、オホーツク海の観測点数は従来よりも2~3倍に増加し、特に沿岸域におけるデータ増補は著しく、海氷生産に伴いDSWが形成される北方の陸棚域の解析も可能となった。

このデータセットから、等密度面（26.5から27.5 σ_{θ} まで0.1 σ_{θ} 毎）、および等深度面（標準深度）上の水温・塩分・酸素などの年・月平均気候値を、最適内挿法を用いて緯度経度1/4°格子で作成した。また、各プロファイルから、水温極小を同定し、等密度面の気候値作成と同様にして、水温極小層特性について、年・月平均気候値分布を作成した。特記したいことは、北西陸棚域における水温極小はDSWである、ということである。そして、気候値からの各観測点の偏差を計算し、北西陸棚域における領域平均の各特性の偏差時系列を作成した。

以上より、北西陸棚における高密度陸棚水では、塩分・密度が減少傾向にあることがわかった。この50年間で塩分は約0.1PSU減少、また密度は0.08kg/m³程度軽くなった。この傾向は、オホーツク海の年最大海水面積の減少傾向と整合している。すなわち海氷生産量が減少し、高塩分のブライン供給が減少しているため、重い陸棚水が形成されにくくなっている、ということである。また、オホーツク海東部から流入してくる表層水の塩分も

低塩化しており、これも DSW の低塩化を促している。

また、海盆中央（水深が 1000 m 以上の海域）に見られる水温極小層の経年変動の解析も行った。この海域の水温極小は、冬季混合層の痕跡を良く留めていると考えられる。解析の結果、冬季混合層には有意な長期傾向は見られず、約 20 年の変動が卓越していた。

② 北太平洋亜熱帯循環の中層の低温化

オホーツク海・亜寒帯循環での中層は温暖化を示す一方、北太平洋亜熱帯循環では表層から中層 700m 深まで逆に低温傾向となっていることが見いだされた。そこで本研究では中層水温の低温化について、数十年規模変動に伴う大気強制の変化の影響を調査した。この解析には、現実の大気強制力によって駆動して得られた海洋大循環モデルの歴史実験データと観測データから得られる等密度面データの解析を行った。

モデルデータは、気象研究所共用海洋モデルの渦解像バージョン（NPERM5: 格子間隔 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ 、鉛直 62 層）を 1949 年から 2005 年までの NCEP-NCAR 再解析データから得られる大気強制で駆動した歴史実験データである。観測データは、1955 年から 2004 年までの利用可能なすべての海洋観測データに基づいて作成された等密度面格子データである（Nakanowatari et al. 2007）。海洋観測データの主なソースは、World Ocean Database 2001 とそれには含まれていないいくつかのデータソースを付加して使用した。これらのデータより、 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ の格子間隔で等密度面上におけるポテンシャル水温、塩分、層厚の年平均気候値を影響半径 150km のガウス関数によって格子化した。年平均偏差格子データは、これらの気候値からの偏差を $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の格子間隔で単純平均によって求めている。

モデルデータから得られる $26.8\sigma_\theta$ 面におけるポテンシャル水温の 1977–2004 年と 1955–1976 年の平均の差を見ると、北太平洋中層水温は混合水域や亜熱帯循環域を含む北太平洋西部において過去 50 年間で最大 0.6 度の低温化が見られる。低温傾向は、親潮域において特に顕著である。低温化が顕著な北太平洋西部における水温の時系列より、モデルは観測データに見られる数十年スケールの低温化をほぼ定量的に再現していることがわかる（図 2）。

北太平洋西部にみられる中層水の低温化は、ポテンシャル渦度の減少を伴っていた。通常、低温・低渦位のオホーツク海中層水の一部は親潮によって風成循環境界を横切り、亜熱帯循環領域に輸送される。したがって、北太平洋西部における中層水の低渦位化は、オホーツク海起源の低渦位水の亜熱帯循環

領域への輸送量の増加を意味する。特に、低渦位化は親潮海域や日本東岸において顕著であるため、親潮水塊が直接亜熱帯循環に輸送される経路（Yasuda et al. 1996; Mitsudera et al. 2004）が、北太平洋西部における中層水温の数十年スケールの低温化において重要であることがわかった。

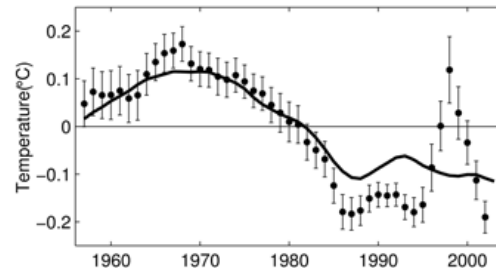


図 1. 北太平洋西部 ($30^\circ\text{--}44^\circ\text{N}$, $142^\circ\text{--}175^\circ\text{E}$) において領域平均した気象研モデル（太線）と観測データ（細実線）のポテンシャル水温時系列。

(2) 北太平洋熱塩循環と変動の数値実験

① 熱塩循環の数値実験

オホーツク海中層の水温変動は、当海域の表層から中層に至る熱塩循環に原因があると考えられる。その熱塩循環がどのような要素で構成されているか、また変動の原因は何かを、数値実験により検討した。

熱塩循環の重要な要素は、シベリアからの寒気による海氷形成に伴う、DSW 生成である。これが陸棚域から流れ出し、東樺太海流の中層に沈み込み、最終的に北太平洋中層（200m–800m）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。

一方、オホーツク海の出口には千島列島があるが、そこでは非常に強い潮汐混合が起きていることが知られている。これが、高塩分の中層水を表層へ運ぶ効果を持っており、海氷の融解で低塩化している表層水に塩分を補っている。これがオホーツク海の表層循環に乗ることによって北方へ移流され、北西陸棚域に達する。そこでは冬季にシベリアからの寒気で効率的に海氷が形成され高密度陸棚水が作られている。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→北方への表層循環、が一連の流れとなって、3 次元的な循環を形成していると考えられる。しかしながら、そのような循環を再現した研究はなかった。

本研究で用いたモデルは東京大学気候システム研究センターで開発された Iced COCO を用いた。解像度は水平格子が東西、南北ともに 0.5° 、鉛直 51 レベルである。日平均気候値の大気データ（風応力及び熱塩計算に必要な諸データ）で駆動し、また、千島

列島域の潮汐混合効果は鉛直拡散係数を大きくすることによって組み込んだ。

図2はシミュレーション結果のひとつで、 $26.8\sigma_\theta$ という等密度面(200m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、(a)、(b)、(d)、(e)は風を0、0.5、1.5、2倍にしたものである。また、(f)に観測データに基づいた解析結果を示している。

(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水である。それがサハリン島東岸に沿って流れ出し、南部の千島海盆に達している。一方、比較的高温の海水が千島列島付近から北の大陸棚に向かい流れている。このため、水温の水平分布は東西にコントラストができる。

面白いのは、風が変化することによって水温が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。これが、陸棚水をさらに高塩分化し、中層まで冷たい海水を大量に流し込むことになる。このため、風の強化が中層の水温低下となって現れたのである。このように、オホーツク海の熱塩循環は風と強く結合していることが明らかとなった。

また、潮汐混合や大気温度を変化させたり、アムール川を取り除いた実験を行った。特に気温を上下させた実験では、海氷生成量に大きな変化が生じた。このため、暖かい時には高密度陸棚水の形成量が落ち込み、中層水温の効率的な上昇に寄与したことがわかった。シミュレーションでは気温が 3°C 上昇したときに中層水温がオホーツク全体の平均で 0.6°C していた。これは、オホーツク海中層のデータ解析により明らかとなった、ここ50年の水温上昇傾向と同程度であった(Nakanowatri et al., 2007)。

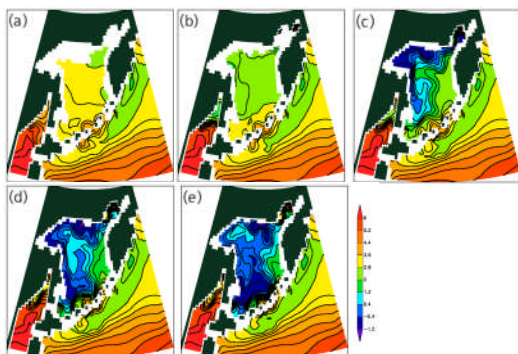


図2 風の強さを変化させることによって生じる中層水温の変化。(c)がコントロール実験。(a)、(b)、(d)、(e)は、コントロール実験に比べて風を0、0.5、1.5、2倍にしたものである。

②現実の大気強制力を与えたシミュレーション

以上の数値実験を基礎として、現実の熱・淡水・風を強制力として与えた長期シミュレーションを行った。大気強制データは、1979-2008年のNCEP-NCARの月平均値である。月平均気候値外力で50年間スピンアップを行った後、1979年から2008年までの月平均の経年変動外力で駆動した。また、この気候変動実験とは別に、熱フラックス、淡水フラックス、そして風応力をそれぞれ変化させ、それ以外の大気強制は気候値に固定した感度実験を行い、モデルの中層水温に見られる長期変化に対して、それぞれの強制の寄与を見積もった。

シミュレーションの結果、中層の昇温は $27.0\sigma_\theta$ において最も大きいという結果を得た。オホーツク海西部の水温時系列より、モデルの中層水温のトレンドは50年間で 0.76°C の昇温率であり、観測データの昇温トレンド($0.62^\circ\text{C}/50\text{-yr}$)とほぼ一致する。

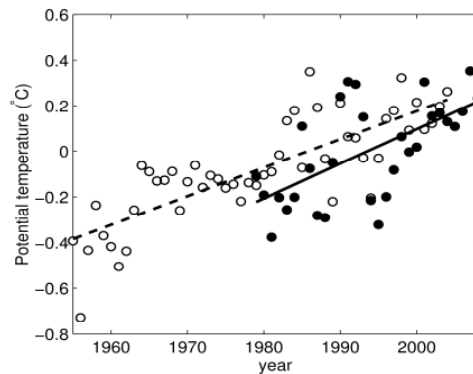


図3 現実の大気強制力を与えた時の、オホーツク海中層水温のシミュレーション結果(黒丸)。白丸は観測値。

中層水温のトレンドマップをみると(図は示さない)顕著な昇温トレンドがオホーツク海西部と亜寒帯フロントに見られ、観測データに見られる昇温トレンドの空間構造(Nakanowatari et al. 2007)と一致する。 $26.8\sigma_\theta$ や $27.2\sigma_\theta$ においても同様の昇温トレンドが見られる。熱フラックス、淡水フラックス(降水量)、風応力の変化によって生じた水温トレンドの大きさを海域毎に見ると、オホーツク海西部における昇温トレンドに対しては、熱フラックスと淡水フラックスの変動の寄与が大きいことが分かった。また、亜寒帯フロントにおける昇温トレンドは風応力の変化の寄与の方が大きいことが示唆された。

(3) オホーツク海北西陸棚域における DSW 形成メカニズムの素過程の解明

沿岸ポリニア下において、ブライン排出による塩分フラックスは密度フロント付近で生じる傾圧渦によって沖に運ばれる。それに加え、沿岸流も DSW の密度に大きな影響を与える可能性がある。したがって、オホーツク海の沿岸ポリニアにおいて Simizu and Ohshima (2002) で示された風成の沿岸流による塩分輸送が DSW の密度にどのような影響を与えるかは非常に重要になる。

そこで本研究では、沿岸ポリニア下において岸沿いの風応力が DSW の塩分値にどのような影響を与えるかを調べた。

モデルは、オホーツク海の北西ポリニアと北部ポリニアを想定して、東西幅 400 km、南北幅 200 km、南北方向に 1/1000 のゆるやかな一様な傾斜を与えた。傾圧不安定波による塩分輸送を再現するため水平格子間隔を 1/30° とした。海面からの浮力 flux はポリニアの沖合い幅 15 km の範囲で一様な塩分フラックスとして与えた。また、海面の風応力として岸沿いの風を与えた。

岸に平行な風速が大きくなると、ポリニア下において顕著な塩分低下が生じた。これは、傾圧渦による沖への塩分輸送に加え、エクマン流による塩分輸送が生じたためである。渦輸送とエクマン流による塩分輸送をスケールリングすることで、ポリニア下の塩分収支に基づいて平衡な塩分値を見積ったところ、それは数値実験結果をよく表現することが分かった。

次に、実際の気象データから海面の塩分フラックスとポリニア幅を計算し、また ECMWF データから得られる岸沿いの風応力も用い、オホーツク海を想定した数値実験を行なった。北部ポリニアでは、風応力による沿岸流形成が塩分低下に重要であることが示唆された。特に、アリューシャン低気圧の変動により 1990 年代に入り北部ポリニア上の東風が強まっており、それは 1990 年以前に比べ 0.05PSU 程度の変化をもたらしうることを指摘した。ここ 50 年間の塩分減少値が 0.1PSU であることを考えると、岸沿いの風は塩分の長期変動に対して重要な寄与を与える可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

① Nakamura, T., Y. Ishida, H. Mitsudera, S. Takagi, and M. Nagasawa, 2010. Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides. Geophysical Research Letters, 37, L04602, doi:

10.1029/2009GL041456. (査読有)

② Fujisaki, A., H. Yamaguchi, and H. Mitsudera 2010: Numerical experiments of air-ice drag coefficient and its impact on ice-ocean coupled system in the Sea of Okhotsk. Ocean Dynamics, 60, doi: 10.1007/s10236-010-0265-7. (査読有)

③ 中野渡哲也、三寺史夫、本井辰夫、大島慶一郎、石川一郎、2010: 渦解像海洋大循環モデルで再現される北太平洋中層水の 50 年規模の低温化。海と空、85 (4)、29-35、2010. (査読有)

④ Kawaguchi, Y. and H. Mitsudera 2009: Effects of Along-Shore Wind on DSW Formation beneath Coastal Polynyas: Application to the Sea of Okhotsk. Journal of Geophysical Research, Res.114. C10013, doi:10.1029/2008JC005041, 2009. (査読有)

⑤ Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, and N. Ebuchi 2009: Wind and buoyancy driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk. Deep-Sea Res. Part 1, 56, 1401-1413. (査読有)

⑥ Kawaguchi and H. Mitsudera, 2008: Numerical Study of Ice-Drift Divergence by a Cyclonic Wind with a Lagrangian ice model. Tellus A, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00321.x. (査読有)

[学会発表] (計 54 件)

① Mitsudera, H.: Overturning circulation in the Sea of Okhotsk and the western North Pacific, and its potential impacts on biogeochemical processes. ESSAS Science Meeting. June 18, 2009, Seattle, USA.

② Mitsudera, H., and K. Uchimoto: Wind and buoyancy-driven overturning circulation in the Sea of Okhotsk. Japan Planetary and Geophysics Union Meeting, May 19, 2009, Makuhari, Japan.

③ 三寺史夫: オホーツク海のモデリング。シンポジウム「陸域と海洋の相互作用-海から陸・陸から海へ」海洋学会、2009年9月25日、京都大学、京都

④ Mitsudera, H., et. al.: Wind and buoyancy effects on meridional overturning circulation in the Sea of Okhotsk. MOCA "Our warming planet", 21, July, 2009,

Montreal, Canada.

⑤ 三寺史夫, 松田淳二, 中村知裕, 内本圭亮, 中野渡拓也, 江渕直人: 風の強制と結合したオホーツク海の熱塩循環 2008年9月25日, 広島国際大学, 呉

⑥ 川口悠介, 三寺史夫: 沿岸ポリニア下のDSW 形成に対する岸沿い風の影響～オホーツク海への応用～2008年9月25日, 広島国際大学, 呉

⑦ 中野渡拓也, 三寺史夫, 本井達夫, 大島慶一郎, 石川一郎: 北太平洋西部の中層水に見られる数十年スケールの低温化一循環境界を横切る輸送量の影響ー 2008年9月27日, 広島国際大学, 呉

[その他]

ホームページ

<http://www.oc.lowtem.hokudai.ac.jp/Mitsudera>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三寺 史夫 (Mitsudera Humio)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 20360943

(2) 研究分担者

大島 慶一郎 (Ohshima Keiichiro)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 30185251

中村 知裕 (Nakamura Tomohiro)
北海道大学・低温科学研究所・講師
研究者番号: 60400008

小野 数也 (Ono Kazuya)
北海道大学・低温科学研究所・技術職員
研究者番号: 40396320

小埜 恒夫 (Ono Tsuneo)
水産総合研究センター・北海道区水産研究所・室長
研究者番号: 40371786