

北極域環境変動メカニズムの解明に向けた高解像度海氷海洋結合モデリング

渡邊 英嗣（海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター）

1. 研究の背景

北極海で近年顕著な夏季の海氷縁後退は大気場や生態系の応答も含めて重大トピックの1つとなっており、早急にメカニズムを解明し、将来予測に反映させることが各方面から要請されている。北極海でさらに光・水温・栄養塩環境が急激に変化すれば、食物連鎖を介して動物プランクトンや魚類・哺乳類の生息域にも少なからずインパクトを与えることが予想される。一方でこれまでに開発されている北極海モデルの殆どは水平解像度が数十kmと粗いため、沿岸流・渦活動・湧昇などの海洋物理プロセスに関する定量的な解析が困難な状況である。本課題で取り組む北極海全域を対象とした高解像度モデリングは局所現象の理解だけでなく、「海氷変動と海洋熱輸送の相互作用」や「基礎生産性の高い陸棚水が海盆スケールの生態系変動に及ぼす影響」を明らかにする上でも重要なステップであり、先駆的な成果をもたらす可能性が十分にある。

2. モデル概要

本課題で用いる海氷海洋物理モデルはCOCO 4.9で、海氷部分は1層熱力学、マルチカテゴリー氷厚分布、EVP レオロジーを採用している。海洋部分はUTOPIA/QUICKEST 移流スキーム、Smagorinsky 調和型粘性スキーム、Noh and Kim 型混合層スキームを選択している。モデル領域は北極海全域および北大西洋北部で、水平解像度 5 km (1280 x 1024 格子) / 鉛直 42 層の高解像版を実装して、数ヵ月から数年スケールのハインドキャスト実験を行った。初期の海氷海洋場はCOCO 中解像度版（水平解像度 25 km）で1979年から数十年積分した出力を与えた。大気境界条件はNCEP/CFRSR 再解析データから作成し、AOMIPの河川流量データを海面淡水フラックスとして与えた。ベーリング海峡では観測に基づく流量・水温・塩分の太平洋起源水を流入させ、水塊輸送を可視化するために目的に応じて仮想トレーサーを与えた。

3. バロー沿岸ポリニヤのハイブリッド特性

ポリニヤとは、海氷域における持続的な開水面あるいは薄氷域のことであり、潜熱ポリニヤと顕熱ポリニヤに大別される。前者は風や海流による海氷発散によって、後者は高温水の湧昇によって形成・維持される。アラスカ沖のバロー沿岸ポリニヤ（Barrow Coastal Polynya、以後 BCP）は基本的に潜熱ポリニヤとして考えられているが、BCP に高温の太平洋夏季水および大西洋水が流入することで海氷生産が抑制されるプロセスも示唆されている。本研究では BCP イベント時の海洋内部の状況に着目し、係留系・衛星・大気再解析データおよびCOCO 季節変動実験の結果を融合して多角的に BCP 特性を調べた（図1）。

主な解析には2009年8月から2010年7月にかけて、バロー沖チャクチ陸棚上のB2（北緯71度、西経158度、水深55m）の係留系観測で得られた海氷厚・水温・塩分・海洋流速データを用いた。海氷密接度および海氷生産量はマイクロ波放射計 AMSR-E データから作成されたものを使用した。これらにCOCO 季節変動実験で得られた仮想トレーサーの分布も合わせて、カナダ海盆中深層に位置する高温の大西洋水の挙動を調べた。これらの解析結果から、BCP は形成時に高温水の湧昇によって海氷生産が抑制されるプロセスを伴い、潜熱ポリニヤと顕熱ポリニヤの双方の特徴を併せ持つ“ハイブリッド”ポリニヤであることを明らかにした。

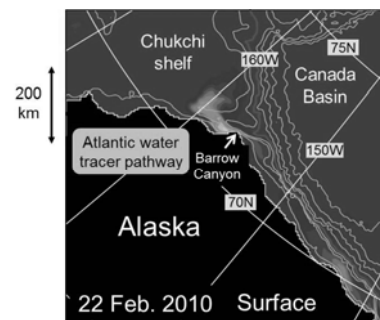


図1：2010年2月のバロー沿岸ポリニヤ形成時における大西洋水トレーサーの水平分布。

4. 亜表層水温極大の時空間変動メカニズム

近年の海水減少の要因としては、風系や海面熱収支の変化が挙げられているが、海域によっては海洋熱輸送の影響も重要である。カナダ海盆の亜表層には冬季に複数の水温極大が存在し、異なる形成メカニズムが提唱されている。そのうち水深 50 - 100m の水温極大はベーリング～チャクチ陸棚域で夏季に日射を受けた暖水塊（太平洋夏季水）がバロー峡谷沖合で発生した渦などで水平方向に貫入することで形成される。カナダ海盆北部の夏季水層は 2000 年代中盤から昇温傾向にあるが、西部北極海の亜表層における正確な熱輸送経路や熱解放プロセスについてはまだ十分にわかっていない。本研究では、COCO 年々変動実験の結果を解析し、チャクチ海台周辺域における亜表層水温極大の年々変動とそのメカニズムについて調べた（図 2）。

COCO 渦解像版の結果から表層 100m で鉛直積算した海洋貯熱量を計算すると、チャクチ海台周辺域で年々変動が顕著であり、特に 2012/13 年冬季（2012 年 10 月～2013 年 3 月）には多くの海洋熱が蓄積されていたことがわかった。北緯 75 度に沿った東西方向の鉛直断面図では水深 50 - 100m に 0℃ 近い亜表層水温極大が捉えられている。この熱源を探るために、チャクチ陸棚縁（100m 等深線で定義）を横切る南北方向の海洋熱輸送量を計算すると、2012 年夏季にバロー峡谷から多くの熱が流入しており、係留系観測から見積もられた時系列とも整合的であることが確認できた。次に西経 160 度を横切る東西方向の海洋熱輸送量を計算すると、ノースウィンド海嶺南端（北緯 73 度付近）の亜表層において西向きシグナルが卓越し、2012/13 年冬季に極大値を示した。これにはチャクチ陸棚縁に沿う西向きジェットが寄与している。熱損失についても解析を行ったが、2012/13 年冬季は海水融解水の影響を多く受けたことで海面付近の密度成層が強く、風応力起源の鉛直拡散に伴う亜表層からの熱解放が抑制されていた。このようにチャクチ海台周辺域の亜表層水温極大は、バロー峡谷からの熱流入、チャクチ陸棚縁に沿った西向きジェット、海上風に駆動される鉛直乱流混合の組み合わせによって大きく年々変動していることが示唆された。

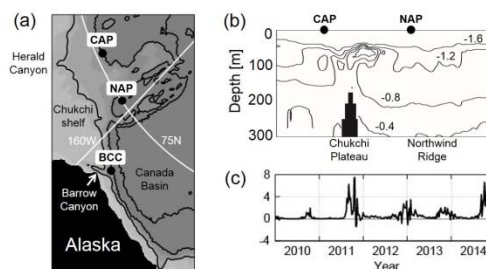


図 2 : (a) 研究対象海域と係留系設置地点。 (b) 北緯 75 度に沿った東西断面における 2013 年 3 月の鉛直水温分布。 (c) 西経 160 度を横切る西向き海洋熱輸送量の時系列。

5. 炭酸系モデリング

北極海は大気からの二酸化炭素吸収、海水融解水による希釈、陸棚海底に堆積した有機物の分解などに伴って海洋酸性化が急速に進行しており、環境ストレスによる生物への影響が危惧されている。既に炭酸カルシウムのうちアラゴナイト未飽和の海域が拡がりつつあり、動物プランクトンの 1 種である翼足類の殻が溶解している観測事実も報告されている。一方で酸性化の時空間変動や要因の定量的評価については未解明な部分も多い。本研究では、既存の低次海洋生態系モデル Arctic NEMURO に OCMIP プロトコルで提唱されている炭酸系ルーチンを組み込み、 $p\text{CO}_2$ ・ pH ・炭酸カルシウム飽和度 Ω の計算を行った。アルカリ度と全炭酸の初期値は GLODAP のデータセットから数千年積分した MIROC-ESM の出力（CMIP5 に提出済）を用いた。

今年度はテストケースとして、25km 格子版で 1979 年から 2010 年まで年々変動実験を行った。その結果、カナダ海盆表層で Ω が低いという定性的な分布を再現しているが（図 3）、1990 年代前半にアラゴナイト未飽和の海域が出現しており、初期値補正も含めて実験設定を見直す必要があることがわかった。

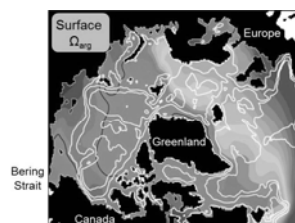


図 3 : 25km 格子版の年々変動実験で計算されたアラゴナイト飽和度の水平分布（海面値）。