

北極域環境変動メカニズムの解明に向けた高解像度海水海洋結合モデリング

課題責任者

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

著者

渡邊 英嗣^{*1}, 平野 大輔^{*2}, 小野寺丈尚太郎^{*1}, 伊東 素代^{*1}, 西野 茂人^{*1}, 菊地 隆^{*1}

*1 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

*2 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

北極海の海水変動・海洋熱輸送・酸性化の実態解明を行うことを目的に、高解像度海水海洋モデリングを実施した。モデル領域は北極海全域および北大西洋北部で、目的に応じて数ヵ月から十年スケールのハインドキャスト実験を行った。今年度の成果は大きく3つテーマに分けられる。1) アラスカ沖のバロー沿岸ポリニヤにおいて、海盆域中層からの熱供給による海水生成抑制および当該海域特有の水塊形成を示唆した。2) 冬季海水下の亜表層熱輸送過程を解析し、陸棚縁ジェットによるチャクチ海台周辺域への熱供給を定量化した。3) 北極海生態系モデルに炭酸系ルーチンを組み込み、海洋酸性化に対する陸棚海盆間輸送の影響評価に着手した。今後は海盆域亜表層に分布する海洋熱と海水減少の相互作用、バロー沿岸ポリニヤの長期変動、冬季陸棚水の酸性化への寄与を調べるとともに、生物由来の有機物粒子や植物プランクトンの成長に必要な鉄などの物質循環も含めて研究を続けていく予定である。

キーワード：北極海, 海水変動, 沿岸ポリニヤ, 亜表層水温極大, 海洋酸性化

1. 研究の背景

北極海で近年顕著な夏季の海水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。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。近年の観測により、カナダ海盆の亜表層には冬季に2つ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。水深10 - 20mの水温極大は開水面での短波吸収（太陽放射加熱）が熱源で、盛夏から晩秋にかけて海水融解水による成層化とポーフォート高気圧に伴うエクマン下降流によって亜表層に隔離される。一方、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中規模渦やポーフォート海洋循環などで水平方向に貫入することで形成される。さらに水深数百mの海盆中層では、北大西洋から流入した高温・高塩分の大西洋起源水が海盆の縁に沿って反時計回りに循環している。これらの海洋熱は数ヵ月から数十年スケールで残存するが、何らかの物理プロセスによって海面付近に供給された場合には、直上の海水を底面から融かす、あるいは新たな結氷を抑制することにつながり、海水減少要因の一端を担う。北極海の海水減少に伴って光・水温・栄養塩環境が変化すれば、食物連鎖を介して動物プランクトンや魚類・海生哺乳類の生息域に少なからずインパクトを与えることも予想される。一方でこれまでに開発されてきた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・湧昇などの局所的な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個々の物理プロセスの理解だけでなく、「海水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. モデル概要および実験設定

本課題で用いる海水海洋物理モデルはCOCO (Center for Climate System Research Ocean Component Model) version 4.9で、モデルスキームおよび実験設定は著者らの先行研究[1][2]と同様である。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5km (1280 × 1024格子) /鉛直42層の渦解像版を実装して、1年単位の季節変動実験および十年スケールの年々変動実験を行った。初期の海水海洋場はCOCO中解像度版(水平25km格子)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-CFSR (National Centers for Environmental Prediction - Climate Forecast System Reanalysis) 再解析データから作成し、AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project) 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特性を持つ太平洋起源水を流入させた。また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

ポリニヤとは海水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。前者は風や海流に駆動される海水の力学的移動によって、後者は比較的温暖な水塊からの熱供給によって形成・維持される。潜熱ポリニヤでは海水の熱力学的生成が活発に起こるため、特に南極海では重要な深層水形成域になる。北極海においても数多くのポリニヤが観測されており、このうちアラスカ沖のバロー沿岸ポリニヤ BCP (Barrow Coastal Polynya) はこれまで強い北東風に伴って海水が岸から離れることで形成される潜熱ポリニヤとして考えられてきた。しかし人工衛星アルゴリズムの改良や最新の係留系観測によって、BCP に温暖な太平洋夏季水および大西洋起源水から海洋熱が供給されることで冬季でも結氷が抑制される顕熱ポリニヤとしての特徴も指摘されている。

本課題では 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)。主な解析にはバロー沖チャクチ陸棚上の B2 地点 (北緯 71 度、西経 158 度、水深 55m) における係留系観測 (2009 年 8 月～2010 年 7 月) で得られた水温・塩分・海洋流速データを用いた。海水密接度および海水生成量はマイクロ波放射計 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System) データから作成されたものを使用した。観測結果からは北東風強化・水温上昇・海水生成量低下がほぼ同じ時期に捉えられており、上記のプロセスが支持されている。さらにカナダ海盆中深層に位置する大西洋起源水の挙動を可視化するために、季節変動実験 (2009 年 10 月～2010 年 3 月) において北極海盆域の 200m 以深に撒いた仮想トレーサーの拡がり調べたところ、BCP イベント時には強い北東風に伴ってバロー峡谷を水深の浅い方に遡る “up-canyon flow” が生じ、さらに鉛直拡散が加わることで仮想トレーサーが海面付近まで達する様子が確認された。これらの解析結果から、BCP

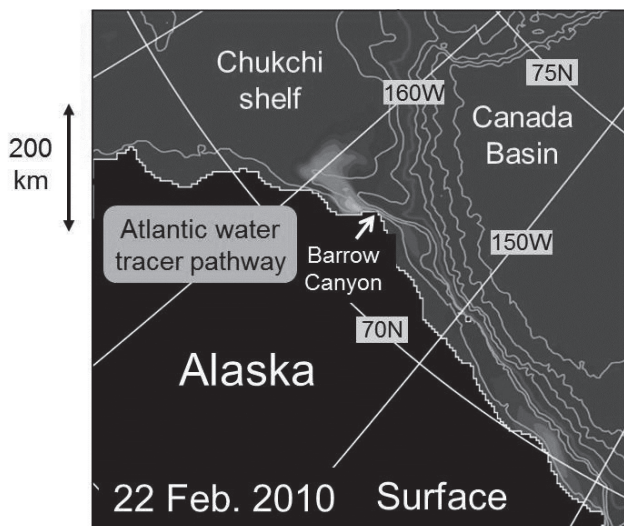


図 1 2010 年 2 月のバロー沿岸ポリニヤ形成時における大西洋水トレーサーの水平分布。

は形成時に暖水塊からの熱供給によって海水生産が抑制されるプロセスを伴い、潜熱・顕熱ポリニヤ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 [3]。このハイブリッド特性によって、当該海域固有の水塊形成が生じている可能性もあり、本成果は北極海全域の水塊変質を考える上でも重要である。

4. 亜表層水温極大の形成プロセス

北極海の太平洋側に位置するカナダ海盆域では亜表層の海洋貯熱量が 2000 年代中盤から増加傾向にあることが、米国ウッズホール海洋研究所の長期時系列観測などから明らかとなっている。カナダ海盆域の鉛直水温分布は複数の暖水層で特徴付けられるが、このうちチャクチ陸棚域東部を夏季に通過して太陽放射加熱を受けた後に中規模渦などによって海盆中央部まで輸送された ACW (Alaskan Coastal Water) の深さでの昇温が特に顕著である。一方でチャクチ陸棚域西部を通過してきた sBSW (summer Bering Sea Water) のシグナルは近年弱まっていることから、太平洋側北極海において亜表層の熱輸送量および輸送経路が変化していることが示唆される。しかしこのような水温変化は夏から秋に限定された船舶観測および数地点の係留系観測データでしか捉えられておらず、海盆域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。

本課題では COCO 年々変動実験 (2001 年 1 月～2014 年 12 月) 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)。まず ACW の主要な輸送経路上に位置し、長期に渡る各種観測データが得られているバロー峡谷で比較検証を行ったところ、本実験結果はバロー峡谷における海水密接度および通過流量を非常に良く再現していることを確認した。近年は熱輸送量をやや過大評価しているが、2012 年夏季に特に多かった変動パターンを捉えている。海洋研究開発機構が 2010 年秋から 4 年間係留系を設置していたチャクチ深海平原海域では海水下の亜表層における水温上昇が毎冬観測されており、年々変動実験でもそのような季節性が再現された。この水温上昇はエクマン昇降や乱流混合のタイミングとも一致しないので鉛直 1 次元プロセスでは説明できず、陸棚起源の暖水輸送が冬季海水下の昇温に寄与していることが示唆される。

次に海洋亜表層で鉛直積算した貯熱量を計算すると、各年 3 月頃にはチャクチ海台周辺域に暖水塊が分布していた。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°C 近い亜表層水温極大が捉えられている。この暖水域はベーリング海峡に撒いた仮想トレーサーの拡がり良く一致していることから、温暖な太平洋夏季水が冬季海水下に多くの熱を供給していることが示唆された。熱輸送経路をより具体的に特定するために西経 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。亜表層の水平流速場を確認すると、冬季にチャク

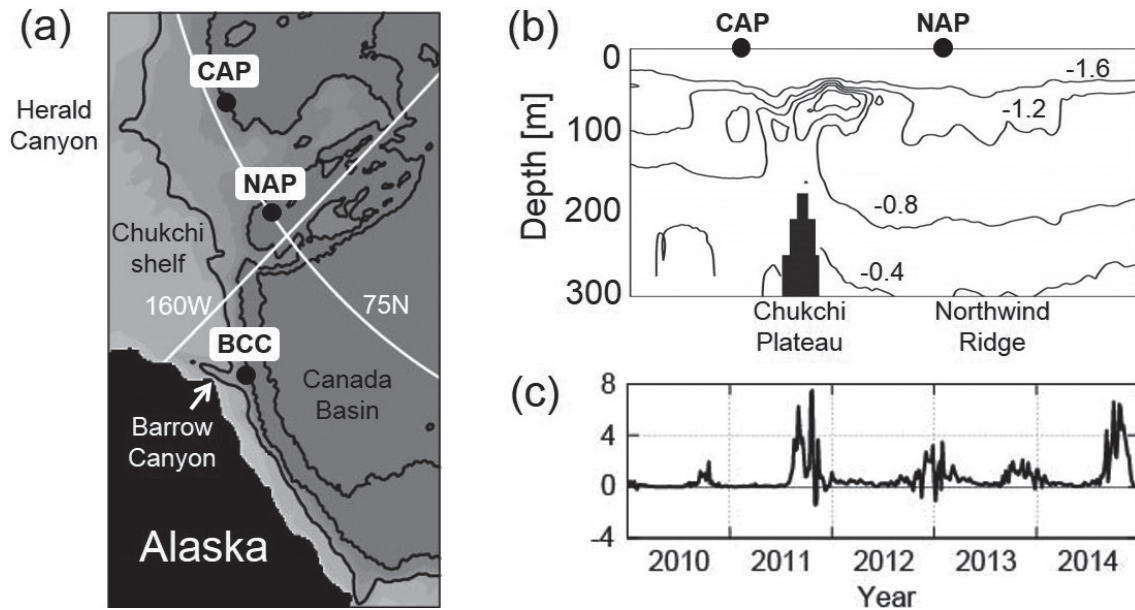


図2 (a) 研究対象海域と係留系設置地点。(b) 北緯 75 度に沿った東西断面における 2013 年 3 月の鉛直水温分布。(c) 西経 160 度を横切る西向き海洋熱輸送量の時系列。

チ陸棚北縁で西向きジェットが卓越しており、この強い海流が太平洋起源の暖水を運んでいた。この時期は北極海の広い範囲が高気圧で覆われており、時計回りの風に伴う沿岸湧昇が西向きジェットの加速に寄与していたと解釈できる。ここまでの解析により、北極海チャクチ海台周辺域の冬季海水下で観測された亜表層の水温上昇に対しては、温暖な太平洋夏季水がアラスカ沿岸流およびその下流域で生じる西向きの陸棚縁ジェットによって輸送される過程が重要であることが明らかとなった [4]。

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。既に CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) に提出された地球システムモデルの結果を利用して炭酸系データのモデル間比較も行われている。このうち炭酸カルシウム飽和度の時空間変動に関しては、海面値の長期トレンドが同様の傾向を示す一方で、亜表層の鉛直構造には深刻なバイアスが見られる。これまでの観測研究により、海底堆積物からの有機物分解などを受けた冬季陸棚水が流入する北極海盆域の亜表層で炭酸カルシウム飽和度が極小を示すことが明らかとなっており、このような陸棚海盆間輸送の再現性がモデルバイアスの大きな要因と考えられる。カナダ海盆域の亜表層では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あることから、生物に対する酸性化の影響を包括的に理解するためには、海面付近だけでなく陸棚起源水が流入する深さでの鉛直分布も含めてきちんと表現することが本質的に重要である。

本課題では高解像度モデリングの長所を生かした海洋酸性化の現状分析と将来予測にも着手した。初年度はまず既存の低次海水海洋生態系モデル Arctic NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) に OCMP (Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project) で提唱されている炭酸系ルーチンを組み込み、二酸化炭素分圧 $p\text{CO}_2$ ・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 CMIP5 に提出済みの MIROC-ESM (Model for Interdisciplinary Research on Climate - Earth System Model) の出力を用いた。実験準備を整えた上でテストケースとして、水平 25km 格子の中解像度版で 1979 年から 2010 年まで年々変動実験を行った。計算結果はカナダ海盆表層で $p\text{CO}_2$ が高く、pH および Ω が低いという定性的な水平分布を再現しているが (図 3)、現実よりもかなり早く 1990 年代前半にアラゴナイト未飽和の海域が広範囲に出現しており、初期値の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。

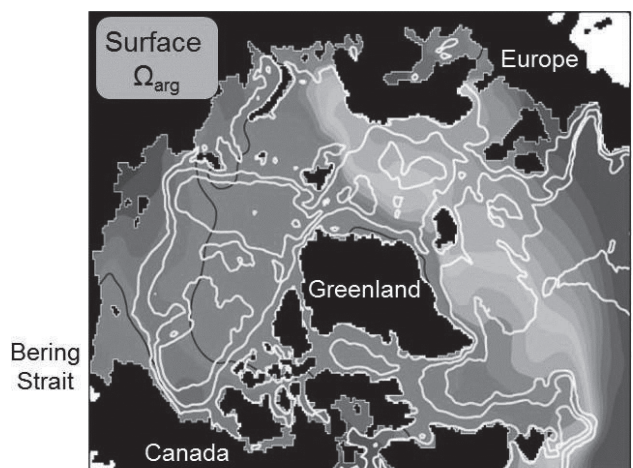


図3 25km 格子版の年々変動実験で計算されたアラゴナイト飽和度の水平分布 (海面値)。

謝辞

本課題は科学研究費助成事業・若手研究 B (課題番号 26800248、2014 年度～)、GRENE 北極気候変動研究事業 (2011～2015 年度)、ArCS 北極域研究推進プロジェクト (2015 年度～) の支援を受けて実施しました。海洋研究開発機構・地球情報基盤センターの多大なるサポートにも深く感謝致します。

文献 (雑誌)

- [1] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi, “Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump”, *Nature Comm.*, vol. 5, no.3950, doi:10.1038/ncomms4950, May 2014.
- [2] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. N. Aita, A. Ishida, and M. J. Kishi, ”Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland”, *Biogeosciences*, vol. 12, pp. 6147-6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015, October 2015.

- [3] Hirano, D., Y. Fukamachi, E. Watanabe, K. I. Ohshima, K. Iwamoto, A. R. Mahoney, H. Eicken, D. Simizu, and T. Tamura, “A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska”, *J. Geophys. Res.*, vol. 121, pp. 980-997, doi:10.1002/2015JC011318, January 2016.

文献 (国際会議)

- [4] Watanabe, E., J. Onodera, S. Nishino, and T. Kikuchi, “Overwinter transport of subsurface warm water around the Arctic Chukchi Borderland”, *Ocean Sciences Meeting*, New Orleans, Louisiana, U.S.A., February 2016.

High-Resolution Sea Ice-Ocean Modeling on the Arctic Environmental Changes

Project Representative

Eiji Watanabe Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Eiji Watanabe^{*1}, Daisuke Hirano^{*2}, Jonaotaro Onodera^{*1}, Motoyo Itoh^{*1}, Shigeto Nishino^{*1} and Takashi Kikuchi^{*1}

*1 Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*2 Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research

High-resolution sea ice-ocean modeling studies were conducted to clarify sea ice variability, ocean heat transport, and ocean acidification in the Arctic Ocean. Seasonal to decadal hindcast experiments were performed using a pan-Arctic physical and biogeochemical model. Outcomes in this fiscal year are categorized to following three themes: 1) suppression of sea ice production and formation of unique water mass in the Barrow Coastal Polynya, accompanied with ocean heat transport from intermediate warm layers in the Arctic basin, 2) wintertime subsurface warm water transport along westward shelf-break jet under sea ice, and 3) evaluation of shelf-basin interaction associated with ocean acidification using carbonate chemistry modeling. As future works, interaction between subsurface warm layers and sea ice decline, decadal variability in the Barrow Coastal Polynya, impacts of dense shelf water on ocean acidification, and circulation of organic materials and iron will be investigated in this project.

Keywords: Arctic Ocean, sea ice, coastal polynya, subsurface temperature maximum, ocean acidification

1. Research Background

Arctic sea ice retreat is still remarkable, particularly in the Pacific side. Changes in wind-driven export of Arctic sea ice to the North Atlantic and atmospheric radiative fluxes are known to be important factors for sea ice reduction. In addition, ocean heat transport from subarctic seas is another candidate to decrease sea ice volume. It has been indicated that vertical hydrographic profiles in the Canada Basin were characterized by three temperature maxima. The near-surface temperature maximum was the shallowest one arising from summer solar heat absorption and subsequent autumn Ekman downwelling. The subsurface temperature maximum reflected intrusion of the Pacific summer water. The deepest maximum was located in the Atlantic layer. Substantial parts of upper ocean heat would eventually affect sea ice freezing/melting. However, spatial and temporal variabilities of these warm layers still remain uncertainties. In this study, high-resolution pan-Arctic sea ice-ocean modeling analyses are conducted to address 1) interactions between sea ice and ocean heat transport and 2) impacts of shelf water transport on marine ecosystem in the Arctic basin.

2. Model and Experimental Design

The model used in this study is COCO (Center for Climate System Research Ocean Component Model) version 4.9.

The model domain is composed of the entire Arctic Ocean and northern North Atlantic. The horizontal resolution is approximately 5 km so that mesoscale eddies and narrow boundary currents can be resolved[1][2]. In this fiscal year, several seasonal and interannual experiments were performed. Initial sea ice and hydrographic fields were given by a decadal experiment from 1979 using a 25-km grid version of the same model. Atmospheric forcing was obtained from NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction - Climate Forecast System Reanalysis) datasets. At the Bering Strait, volume, temperature, and salinity of the Pacific water inflow were prescribed to idealized seasonal cycles.

3. Hybrid-type Barrow Coastal Polynya

The nature of the Barrow Coastal Polynya (BCP) formed off the Alaskan coast in winter was examined using mooring, atmospheric reanalysis, and the AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System) derived sea ice concentration/production data. Whereas the BCP has been considered to be a latent heat polynya formed by predominantly offshore winds, it is recently suggested that sea ice production in the BCP is suppressed by warm Pacific- and/or Atlantic-origin waters distributed beneath the BCP.

In this study, we focused on oceanographic conditions such as water mass distribution and ocean current structures beneath

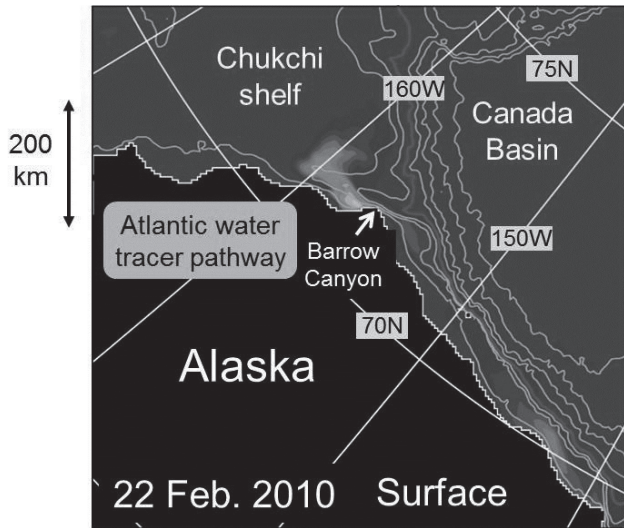


Fig. 1 Spatial distribution of the simulated Atlantic Water tracer around the BCP in February 2010.

the BCP, which have not been fully documented. A mooring was deployed off Barrow, Alaska from August 2009 to July 2010. During the freeze-up period from December to May, five BCP events occurred in the same manner: 1) dominant northeasterly wind parallel to the Barrow Canyon, with an offshore component near Barrow, 2) high sea ice production followed by sudden cessation of sea ice growth, 3) upwelling of warm ($> 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ above a freezing point) and saline (> 34) Atlantic Water (AW) beneath the BCP, 4) strong up-canyon flow associated with density fluctuations. A baroclinic current structure, established after the upwelling, resulted in enhanced vertical mixing. The mixing event and open water formation occurred simultaneously, once sea ice production had stopped. Thus mixing events accompanied by ocean heat flux from AW into the surface layer likely form/maintain the open water area that is a sensible heat polynya. These transitions from a latent heat polynya to a sensible one were well reproduced by a seasonal experiment of the COCO

model from October 2009 (Fig. 1). We propose that the BCP is a hybrid latent and sensible heat polynya, with both processes driven by the same offshore wind[3].

4. Subsurface Temperature Maximum

Ocean heat transport is a possible important factor for recent sea ice decline, especially in the western Arctic Ocean. Decade-long observations revealed increasing potential temperature and thickness of the Alaskan Coastal Water layer in the central Canada Basin. Ocean heat content for a salinity range between 31 and 33 showed a clear subsurface warming trend. On the other hand, a signal of the summer Bering Sea Water located below 100 m was gradually shrinking in recent years. Therefore, subsurface warm water pathway from the Chukchi shelf into the central Canada Basin possibly changed according to external forcing such as surface wind fields. However, there are not so enough data under sea ice to evaluate exact pathway and heat transport of subsurface warm water covering wide areas of the western Arctic basin. In our field campaign, bottom-tethered year-long moorings have been deployed in the Chukchi Borderland since October 2010. The subsurface hydrographic sensors detected mid-winter or spring peaks of potential temperature above $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ every year. Based on this seasonality, we investigated overwinter transport of subsurface warm water toward the Chukchi Borderland by pan-Arctic sea ice-ocean modeling analyses[4].

In the interannual experiments from 2001 to 2014, strong easterly winter winds in the southern part of the prevailed Beaufort High sometimes produced a westward shelf-break jet along the northern edge of the Chukchi shelf. The shelf-break jet strength accounted for the lateral ocean heat transport and consequent subsurface temperature maximum in the downstream region (Fig. 2). Warm eddies generated north of the Barrow Canyon were still located east of the Northwind Ridge.

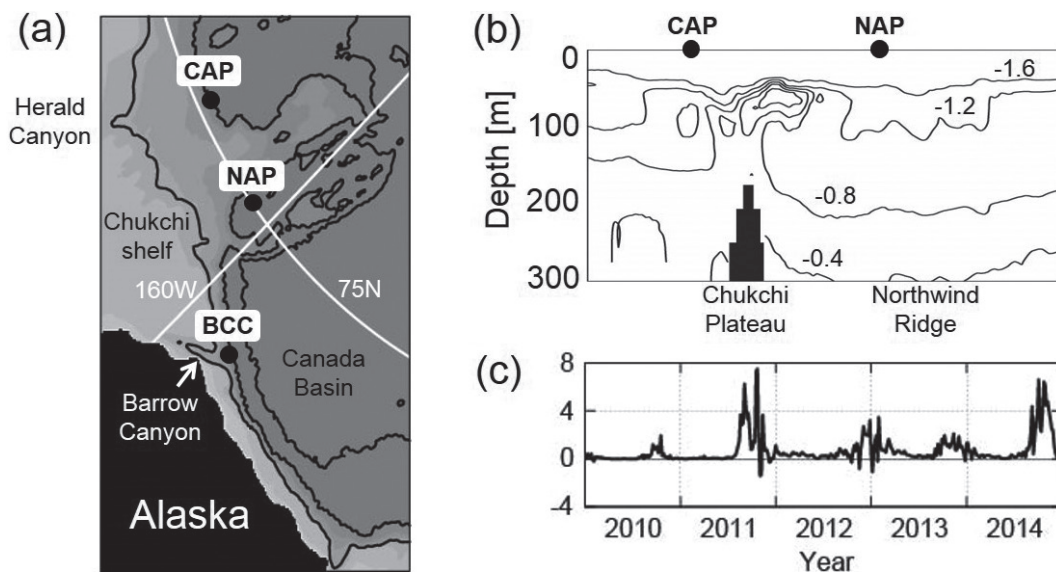


Fig. 2 (a) Analysis target region and mooring locations. (b) Vertical profile of the simulated temperature along 75°N in March 2013. (c) Interannual variability of westward ocean heat transport across 160°W .

Therefore, subsurface warming around the Chukchi Borderland would have been attributed to lateral advection of shelf-origin warm water via shelf-break jet rather than eddy-induced transports.

5. Carbonate Modeling

Ocean acidification is an important problem for Arctic marine biology. Now we need to know how and where acidification will proceed in near future. For example, future status of chemical properties was evaluated by intercomparison of the Earth System Models. As expected, most CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) models simulated reduction in calcium carbonate saturation rate “ Ω ” under global warming scenario. However, the simulated vertical profile of “ Ω ” remarkably differed among these models, particularly in subsurface layers. Several ship-based observations have reported the complicated profiles of “ Ω ” in the Arctic Ocean. In the surface layer of Canada Basin, “ Ω ” value is very low due to large input of river water and sea ice meltwater. The second minimum of “ Ω ” is located in the Pacific winter water layer. The Pacific winter water experienced cooling, convective mixing with brine rejection, and remineralization of organic materials over the Chukchi shelf. Thus intrusion of dense shelf water with high $p\text{CO}_2$ would be a candidate producing climate model biases. In this fiscal year, we coupled a carbonate chemistry routine to the Arctic NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) model and started to investigate how shelf-basin interaction modulated ocean acidification in our high-resolution modeling framework (Fig. 3).

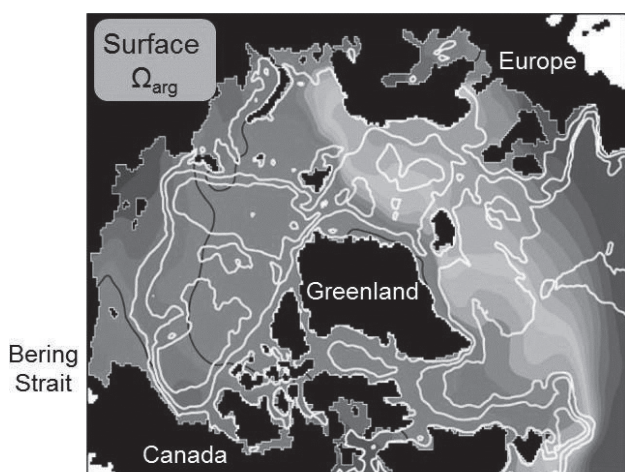


Fig. 3 Spatial distribution of surface “ Ω ” simulated by an interannual experiment from 1979 to 2010.

Acknowledgement

This work was supported by Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 26800248), Green Network of Excellence (GRENE) Arctic Climate Change Research Project, and Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). We really appreciate great supports by the JAMSTEC-CEIST (Center for Earth Information Science and Technology).

References (Publications)

- [1] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi, “Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump”, *Nature Comm.*, vol. 5, no.3950, doi:10.1038/ncomms4950, May 2014.
- [2] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. N. Aita, A. Ishida, and M. J. Kishi, “Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland”, *Biogeosciences*, vol. 12, pp. 6147-6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015, October 2015.
- [3] Hirano, D., Y. Fukamachi, E. Watanabe, K. I. Ohshima, K. Iwamoto, A. R. Mahoney, H. Eicken, D. Simizu, and T. Tamura, “A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska”, *J. Geophys. Res.*, vol. 121, pp. 980-997, doi:10.1002/2015JC011318, January 2016.

References (International Meetings)

- [4] Watanabe, E., J. Onodera, S. Nishino, and T. Kikuchi, “Overwinter transport of subsurface warm water around the Arctic Chukchi Borderland”, *Ocean Sciences Meeting*, New Orleans, Louisiana, U.S.A., February 2016.

