

2017年秋季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

—数十年スケールで見る環オホーツク域の海氷研究—

猪上 淳^{*1}・中野渡 拓也^{*2}・豊田 威信^{*3}・岩本 勉之^{*4}

1. はじめに

北半球において海氷が最も南にまで張り出すオホーツク海は、北極と中緯度との境目として、そして季節海氷の影響が周辺領域に大きな影響を及ぼす特徴的な地域として知られている。オホーツク海における海氷変動が北太平洋のアリュシャン低気圧の強弱に関係しているという大スケールの変動、海氷それ自体の変化による熱収支・放射収支の変動、そして流氷の有無による北海道沿岸の人々の生活・観光資源への影響など、この小さな海は科学的にも社会的にも大きな意味を持っている。今回は環オホーツク海における季節海氷の長期変動の影響について、2017年10月30日（秋季大会第1日）に北海道大学学術交流会館の小講堂にて3名の方にご講演をいただいた。約40名の参加者の活発な質疑、意見交換が行われた。以下に講演内容の抄録を記す。

担当世話人：猪上 淳（国立極地研究所）

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

2. オホーツク海やその周辺域における海氷と海洋の十年規模変動

中野渡拓也（国立極地研究所）

近年、北極域の温暖化増幅現象とは対照的に、ユーラシア大陸や北アメリカなどの中緯度では、冬季に異常な低温現象が頻発しており、その要因として、北極

海縁辺海の冬季の海氷面積の減少の影響が注目されている（Kug *et al.* 2015；Screen 2017）。このような海氷面積の減少は海面熱フラックスの分布や大きさを変化させるため、偏西風の蛇行などの大規模大気場や移動性擾乱の経路の変化を通じて、同時期の冬季の中緯度気候に影響を及ぼすことが指摘されている（Honda *et al.* 2009；Inoue *et al.* 2012；Mori *et al.* 2014）。このような海氷多寡に伴う大気変動は、古くから我が国に隣接するオホーツク海でも指摘されている（Honda *et al.* 1999）。したがって、海氷面積の予測可能性研究は中緯度の気候予測の精度向上において鍵となるプロセスと言える。一方で、海氷生産量の変化は海洋の熱塩循環や海洋中・深層の水塊形成、更には沿岸域のCO₂や鉄などの化学物質の外洋への輸送量に影響を及ぼす可能性がある。本講演では、オホーツク海やバレンツ海における海氷変動の長期予測に対する海洋熱の役割、及びオホーツク海中層水の十年規模の昇温と気候変動との関係について、最近の研究成果に基づいて紹介した。

オホーツク海の水氷面積を決定する要因に関する研究は1980年代から行われており、主に大気による冷却の影響や海氷の漂流効果に着目した研究が行われてきたが（Cavalieri and Parkinson 1987；Kimura and Wakatsuchi 1999）、海氷が最も張り出す2～3月の海氷面積（以下、最大海氷面積）の経年変動については十分説明できなかった。そこで、新たな要因として海洋の熱的メモリーの影響に注目し、海洋観測データ、および衛星観測データなど、利用可能な全ての海水温データを、過去30年間（1979～2006）に遡った解析が行われた。その結果、最大海氷面積は、オホーツク海内部ではなく、前年の秋季における東カムチャツカ海流の海表面水温の変化と密接な関係があることが見出された（Nakanowatari *et al.* 2010）。東カム

*1（連絡責任著者）Jun INOUE, 国立極地研究所。
inoue.jun@nipr.ac.jp

*2 Takuya NAKANOWATARI, 国立極地研究所。

*3 Takenobu TOYOTA, 北海道大学低温科学研究所。

*4 Katsushi IWAMOTO, 紋別市役所／北海道大学水産科学院。

チャツカ海流の水温は、オホーツク海東部の北太平洋の流入水の経路に沿った海域の海水密度度の変動と関係しており、秋季の大気変動や冬季の風速が影響するオホーツク海中央部の海水密度度と地理的に異なるものであった。秋季の東カムチャツカ海流の海水温と、最大海水面積の経年変動との強い関係性が従来から指摘されているオホーツク海の風上における晩秋の気温の情報 (Sasaki *et al.* 2007) を組み合わせることによって、最大海水面積の予測が3ヶ月前の時点において、相関係数0.84 (経年変動成分の70%) という高い精度で可能であることが示唆された。

他方、バレンツ海の海水面積の経年変動については従来から北大西洋からの温暖な流入水による海洋熱フラックスの重要性が指摘されていたものの (Schlichtholz 2011; Årthun *et al.* 2012), 現場の観測データや領域モデルによる研究など限定的なものであり、更にその上流からの影響や予測のリードタイムの延長については研究がされていなかった。そこで、当時では珍しい大気・海洋結合モデルによる海洋再解析データ (NCEP-CFSR 再解析データ: The National Centers for Environmental Prediction - Climate Forecast System Reanalysis) に基づいた正準相関解析を行うことによって、バレンツ海の海水予測に対する最適予測変数の同定とそのリードタイムについて吟味した。その結果、水深200 mの亜表層水温を予測変数に用いることによって、バレンツ海の海水面積はおよそ1年前の時点において高い精度 (経年変動成分の35%) で予測可能であることが明らかになった (Nakanowatari *et al.* 2014)。この水温偏差シグナルは、バレンツ海に流入後、夏季の強い成層構造によって大気から遮断され、1年後の冬季混合によって再出現することがわかった。この亜表層水温偏差は、さらに上流に遡ると、北大西洋振動によってセットアップされた北大西洋の10年規模の海水温偏差が数年かけてノルウェー沿岸流によって移流されてきたものであることもわかった。なお、NCEP-CFSR 大気・海洋結合モデルによる季節予報データを調べてみると、およそ9ヶ月前の時点でバレンツ海の海水面積の長期変動が予測可能であることが確認されており、海水面積の予測において海洋の熱的メモリーの役割が大きいことがわかる。一方で、多氷年と少氷年についての12月のユーラシア大陸の気温変化を見ると、6ケース中4ケースでユーラシア大陸が低温偏差を示していた。このことから、バレンツ海の海水面積の変動は、ユーラ

シア大陸の低温現象をもたらす要因であることが示唆される。一方で、この結果は海水変動だけではユーラシア大陸の低温現象は決定されないことも意味し、大気の内部分動などの影響も含めて今後の課題といえる。

オホーツク海は、北半球の季節海水域の一つであり、冬季は大陸からの寒気によって多量の海水が生成されることによって、北太平洋中層 (およそ1026.8-1027 kg/m³, 以下26.8-27.0σ_θ) の密度帯まで通気が行われている唯一の海域として北太平洋の物質循環などにおいて重要な海域の一つである。World Ocean Databaseなどにアーカイブされている海洋観測データ、1990年代後半から2000年代前半に北海道大学低温科学研究所とロシアの共同研究で取得された集中観測データ、そしてアルゴフロートによる海洋観測データを統合した解析によると、オホーツク海の中層は1955~2004年の50年間に約0.6°Cの水温上昇が起こっており、その影響が北太平洋にまで及んでいることが明らかになった (Nakanowatari *et al.* 2007)。そこで、このオホーツク海中層水の温暖化メカニズムを明らかにするために、東京大学気候システム研究センターで開発された海水・海洋結合モデル (COCO v3.4) (Hasumi 2006) によって、海水の生成・融解などに伴う塩分変化を考慮した数値実験が行われた。その結果、オホーツク海の中層水温の温暖化は、主に海面乱流熱フラックスと淡水フラックスの変化によって説明され、それらは初冬と晩冬の冬季モンスーン (アリューシャン低気圧とシベリア高気圧) の弱化と関係していることが明らかになった (Nakanowatari *et al.* 2015)。風上気温の温暖化の影響については、これまで有力な要因の一つとして考えられていたが (Kashiwase *et al.* 2014)、淡水フラックスも極域での水塊形成に実質的に影響を及ぼしうる結果は興味深い。海洋モデルを駆動するために使用された大気再解析データの海上における淡水フラックスについては、定量的には不十分である可能性が高いので、河川からの流出量も含めて海上における降水量の定量的な見積りが今後必要とされる。

このように、極域海洋には数十年スケールの気候変動が生じており、それらは海洋循環や海水変動を介して、異なる場所の気候や海洋環境に対して遠隔的に影響を及ぼすことが伺える。特に、海洋循環の時間スケールは大気に比べ長く、その熱容量も大きいことから、数十年スケールの気候変動予測において重要なブ

ロセスの一つといえる。今後、北極海の水氷減少も含めた数十年スケール変動の研究を進めていく上で、海洋の水温場に見られる数十年規模変動の要因の解明やその影響の定量化が望まれる。

3. 砕氷巡視船「そうや」を用いたオホーツク海水観測研究

豊田威信（北海道大学低温科学研究所）

オホーツク海は沿岸結水域を除いて最も低緯度に位置する季節海水域として特徴付けられる。このような環境が形成される理由として、風上側のシベリア地方が冬季北半球で最も寒冷な地域となること、それに表層へのアムール川からの流入や夏季降水の淡水供給などによる浅い混合層の形成が挙げられる。北極圏の顕著な温暖化に伴いオホーツク海でも海水域の減少傾向が著しい。北半球全体の海水域の減少率が3.4%/decadeと見積もられているのに対して、オホーツク海海水域の減少率は約9%/decade (Comiso and Nishio 2008) と、北半球の中でも特に減少率が著しい海域の一つとなっている。

オホーツク海海水域の面積の年々変動に影響を与える因子としては、気象客観解析データからはアリューシャン低気圧の変動 (Parkinson 1990; Tachibana *et al.* 1996; Sasaki *et al.* 2007) や North Atlantic Oscillation や Arctic Oscillation (山崎 2000; Ogi *et al.* 2004; Yamamoto *et al.* 2006) などが指摘されている。また、数値モデルからオホーツク海海水域面積の変動がロスビー波の伝播により北半球規模の大気循環に影響を及ぼしうるとも指摘されている (Honda *et al.* 1996)。ただし、南部のみ (北緯50度以南) に注目すると、実感として氷況は弱まっているものの面積の有意な減少傾向は認められず、海水域の年々変動の理解には現場の水氷監視および海水物理過程に関わる研究が必要とされている。

日本におけるオホーツク海の水氷観測は比較的古い歴史を持ち、組織立った観測は1892年の網走・根室測候所による沿岸観測に遡る。その後、1935年には農林省が中心となって航空機による流氷分布の観測が開始され、1969年には北大低温研の流氷レーダーによる観測が開始され、1970年には衛星等のデータを基に気象庁で海水分布の統計が開始された。しかしながら、海水の成長・融解に関わる物理的な過程を理解するために必要な現場データは限られており、この面での実質的な観測が開始したのは巡視船「そうや」を用いて海

上保安庁と北大低温研による協同観測が始まった1996年と言って差し支えないであろう。爾来、観測は20年以上にわたり継続して実施されており、オホーツク海の水氷の特性が様々な側面から少しずつ明らかになってきた。

巡視船「そうや」の観測を開始した当初の目的は、北半球南限に位置するオホーツク海南部の海水はどのような熱的環境で成長しているか、どのくらいの厚さの海水が分布しているか、極域の海水と比べて構造に違いはあるか、海水域は大気の熱収支にどのような影響を及ぼしているか、海水下の海洋にどのような影響を及ぼしているか、といった比較的シンプルな問いかけに対する答えを見出すことであった。このために我々は氷況の長期変動を捉えるためのモニタリング観測、それに様々な課題解決型の観測の二本立てで取り組んできた。講演ではこれまでに得られた結果の概略を紹介した。

海水が成長する熱的な特性については、海水域の拡大とともに表面の乱流フラックスが減少するものの極域とは異なり海水域は熱源として働くことや短波放射の寄与が顕著なため海水成長量は限られることなどが明らかになった。海水構造に関しては南極海水と類似して10 cm 程度の層が積み重なった構造をしており、氷厚発達においては力学的に互いに積み重なる過程が重要であることなどが明らかになった。また、2003年からは船舶から厚い氷を採取するためにバスケット観測を取り入れて、より一般的な海水の特性を把握することに力を注いできた。その中で取り組んだ主な課題としては、衛星 L-band 合成開口レーダーから氷厚分布を見積もる可能性の検証観測、海水域を構成する氷盤の大きさ分布を知るためのヘリコプター観測、海水内の化学成分の特性を調べるためのサンプリング観測などが挙げられる。特に最近の成果としては、海水中には海洋中に比べて数倍もの高い濃度をもつ鉄分が含まれていることが分かり、生態系の維持という観点からも海水が果たす役割を示すことができた (Kanna *et al.* 2014)。現在は擾乱下のフラジリアイスの形成過程も課題の一つとして取り組んでいるところである。一方、氷況モニタリングという観点からは国際的なプロトコルによる目視観測、一定の手法による氷厚観測が続けられた結果、約10年程度の周期を持ちながらもリッジ部を含む平均氷厚が漸減している様子が見えてきた。

以上のように、砕氷巡視船「そうや」を用いた観測

からオホーツク海南部に存在する海水の基本的な性質や氷況の長期変化が少しずつ明らかになってきた。この観測は毎年ほぼ同じ時期に同じ海域で継続して実施しているという点で世界的にもユニークな特徴があり、産官学の共同観測や大学院生の教育効果という点でも意義を感じている。今後も事情が許す限り継続したいと考えている。最後に、これまで観測に貢献して下さった多くの方々、特に第一管区海上保安本部海洋情報部と巡視船「そうや」の乗組員の皆様、観測の立ち上げに尽力された北大低温研の若土正暁氏と大島慶一郎氏に謝意を表したい。

4. 紋別市によるオホーツク海研究への取り組み

岩本勉之（紋別市役所/北海道大学水産科学院）

紋別市は、北海道オホーツク海沿岸のほぼ中央部に位置し、農林水産業や水産加工業などの第1次・第2次産業を基幹産業とする小都市である。1965年に北海道大学低温科学研究所附属流水研究施設がこの地に設置されて以降、世界最先端の海水研究が紋別周辺やオホーツク海で行われ、その成果は漁業や観光業など地域産業の振興に役立てられてきた。また、流水研究施設と紋別市が協力して1986年に始まった北方圏国際シンポジウム「オホーツク海と流水」は、初開催から30年以上経過した現在においても、紋別市主催の行事として毎年2月に開催されている。施設は2004年に閉鎖されたが、紋別市は学術研究には協力的な地域であり、国内外の研究者、大学院生および学生の受入れを積極的に行っている。

紋別市は、流水や海洋などの現場に近いという地の利を活かした様々な活動を行っている。紋別市氷海展望塔「オホーツクタワー」では、施設の供用を開始した1996年から現在まで、毎日1回CTD（Conductivity-Temperature-Depth profiler）による水温・塩分の観測を行っている。1997年からは動物プランクトン採集が開始され、現在も週に1回の観測を継続している。また、冬季にはオホーツクタワー3階から流水の目視観測を行っている。かつて市内にあった紋別測候所が2007年に廃止されたのに伴い、沿岸海水観測を紋別市が引き継いだもので、流水現象の初終日の発表を市が行っている。このほか、紋別市では毎年3月に砕氷観光船ガリンコ号を備船し、北海道区水産研究所と共同で紋別沖の海洋環境のモニタリング観測を行っている。

北海道大学低温科学研究所は2005年に紋別市街地に

隣接した紋別山（通称：大山）にXバンドドップラーレーダーを設置し、海水検出のアルゴリズムの開発を行った（Fujiyoshi *et al.* 2013）。紋別にはかつて流水研究施設が設置した流水レーダーがあり、観測された海水分布は冬季の海の安全を守るための重要な情報として活用されていたが、2004年に廃止された。大山ドップラーレーダーは事実上、流水レーダーの後継にあたり、漁業者の出漁判断や観光船の運航等に利用されている。このレーダーについて、2014年から2016年までの3年間、低温研と紋別市が共同運用を行ったのち、2017年度からは紋別市が単独で運用して情報発信を開始した。今後、海水観測情報の発信に加え、降水情報を市の防災情報として活用する方法を探っていく方針である。

謝辞

講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。また、会場の準備をしていただいた大会実行委員会の皆様に感謝いたします。

参考文献

- Årthun, M., T. Eldevik, L. H. Smedsrud, Ø. Skagseth and R. B. Ingvaldsen, 2012: Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *J. Climate*, **25**, 4736-4743.
- Cavalieri, D. J. and C. L. Parkinson, 1987: On the relationship between atmospheric circulation and the fluctuations in the sea ice extents of the Bering and Okhotsk seas. *J. Geophys. Res.*, **92**, 7141-7162.
- Comiso, J. C. and F. Nishio, 2008: Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C02S07, doi:10.1029/2007JC004257.
- Fujiyoshi, Y., K. Osumi, M. Ohi and Y. Yamada, 2013: Sea ice identification and derivation of its velocity field by X-band Doppler radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **30**, 1240-1249.
- Hasumi, H., 2006: CCSR Ocean Component Model (COCO) Version 4.0. Tech. Rep. 25, Cent. for Clim. Syst. Res., Univ. of Tokyo, Chiba, Japan.
- Honda, M., K. Yamazaki, Y. Tachibana and K. Takeuchi, 1996: Influence of Okhotsk sea-ice extent on atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3595-3598.
- Honda, M., K. Yamazaki, H. Nakamura and K. Takeuchi, 1999: Dynamic and thermodynamic characteris-

- tics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, **12**, 3347-3358.
- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- Inoue, J., M. E. Hori and K. Takaya, 2012: The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- Kanna, N., T. Toyota and J. Nishioka, 2014: Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 44-57.
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima and S. Nihashi, 2014: Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 21-32.
- Kimura, N. and M. Wakatsuchi, 1999: Processes controlling the advance and retreat of sea ice in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **104**, 11137-11150.
- Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min and S.-W. Son, 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geosci.*, **8**, 759-762.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, **7**, 869-873.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi, 2007: Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima and S. Nagai, 2010: What determines the maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk? Importance of ocean thermal condition from the Pacific. *J. Geophys. Res.*, **115**, C12031, doi:10.1029/2009JC006070.
- Nakanowatari, T., K. Sato and J. Inoue, 2014: Predictability of the Barents Sea ice in early winter: Remote effects of oceanic and atmospheric thermal conditions from the North Atlantic. *J. Climate*, **27**, 8884-8901.
- Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Uehara, H. Mitsudera, K. I. Ohshima, H. Hasumi and M. Wakatsuchi, 2015: Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific. *J. Climate*, **28**, 714-736.
- Ogi, M., Y. Tachibana and K. Yamazaki, 2004: The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk high. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 905-913.
- Parkinson, C. L., 1990: The impact of the Siberian high and Aleutian low on the sea-ice cover of the Sea of Okhotsk. *Ann. Glaciol.*, **14**, 226-229.
- Sasaki, Y. N., Y. Katagiri, S. Minobe and I. G. Rigor, 2007: Autumn atmospheric preconditioning for inter-annual variability of wintertime sea-ice in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr.*, **63**, 255-265.
- Schlichtholz, P., 2011: Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05705, doi:10.1029/2010GL045894.
- Screen, J. A., 2017: Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss. *J. Climate*, **30**, 3945-3962.
- Tachibana, Y., M. Honda and K. Takeuchi, 1996: The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579-584.
- Yamamoto, K., Y. Tachibana, M. Honda and J. Ukita, 2006: Intra-seasonal relationship between the Northern Hemisphere sea ice variability and the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14711, doi:10.1029/2006GL026286.
- 山崎孝治, 2000: オホーツク海の海水面積と冬の気象循環との相互作用. *雪氷*, **62**, 345-354.