

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24241009

研究課題名(和文)北極の温暖化増幅における季節サイクルと多圏相互作用の追究

研究課題名(英文)Understanding the seasonal cycle and multiple interactions related to the Arctic amplification

研究代表者

猪上 淳 (INOUE, JUN)

国立極地研究所・国際北極環境研究センター・准教授

研究者番号：00421884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：北極の温暖化増幅に関して、低気圧活動の役割に着目した観測的・数値的研究を実施した。(1)シベリア域の低気圧活動の変動は、水蒸気輸送過程を通じて水循環・河川流量の変動に影響を与えると同時に、夏季北極海上の海氷を減少させる特有の気圧配置を左右する要素であること、(2)冬季バレンツ海やベーリング海の低気圧活動の変化は、近年の北極温暖化および海氷減少に影響する一方で、中緯度での厳冬を引き起こし、その予測には中緯度海洋の変動が鍵であること、(3)北極海航路上の強風や海氷の移流を精度よく予測するには、高層気象観測網の強化が必要であること、などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The role of cyclones over the mid-latitudes and Arctic region on the Arctic amplification was investigated using field and numerical experiments. Our findings are: (1) cyclone activities over Eurasia modify the water cycle and resultant river discharge through the moisture transport, and are important for composing an atmospheric weather pattern over the Arctic region which induces sea-ice transports during summer; (2) changes in cyclone activities over Barents and Bering Seas influence the recent warming over the Arctic Ocean and sea-ice retreat during winter, and cause cold extremes over mid-latitudes. A change in the upper ocean temperature in the marginal seas would be a key component for skillful seasonal forecasts; and (3) For the better navigation over the Northern Sea Route, forecasts of surface winds and sea-ice drifts induced by a well-developed Arctic cyclone can be improved with an intensive radiosonde observing network.

研究分野：気象学

キーワード：北極海 地球温暖化 極温暖化増幅 予測可能性 異常気象 観測 データ同化

## 1. 研究開始当初の背景

北極における急激な温暖化現象である極温暖化増幅 (Polar Amplification) は、海水減少に代表される北極異変、それに伴う中緯度の異常気象、そして北極航路の開拓にも関係し、社会的関心が近年飛躍的に高まっている。これらの候変化は、北極気候システムという複雑な多圏相互作用の一端と理解するべきである。例えば、海水の分布は低気圧に伴う風によって決まるとともに、低気圧の発生・発達過程には海水分布・陸面状態が影響する。同様に、凍土・積雪・植生などの陸面状態は、気温や降水の季節変化に応答する一方で、海水・海洋との温度差や熱・水循環過程によって再び大気に影響を及ぼす。加えて、温暖化が進行する中で、夏の長期化、冬の温暖化といった従来の季節サイクルそれ自体の変化も顕著である。

これまでの極温暖化増幅に関する研究は、北極振動などのテレコネクションを軸とした、時間・空間スケールが大きなグローバルな研究が主体であった。しかし、海水の減少や極温暖化増幅に寄与する、より本質的なプロセスの一つとして、低気圧活動が挙げられる。特に、この低気圧の役割は季節を通して一様ではなく、鍵となるプロセスが季節毎に異なると考えられる。夏の低気圧は、風で海水を減少させる影響がある一方、冬は乱流熱フラックスによって海洋から熱を奪うことで海水を成長させる役割を持っている。また陸面に関しては、春の消雪のタイミングは低気圧活動によって左右され、秋の降水活動は凍土融解を促進すると考えられる。

国際的な流れとしては、世界気象機関 (WMO) が推進する極域予測プロジェクト (PPP) を中心に、極域の天気予報・季節予報など数時間から季節スケールの予測精度向上を目指した研究が推奨されている。低気圧の発生・発達しやすい海水縁域での観測データは極めて少ないが、日本の海洋地球研究船「みらい」は海水のない海域での観測活動が特に優れており、国際的にも知名度が高い。一方、気象予測における観測データの影響評価という点でも、日本はデータ同化による観測システム実験に成果を挙げてきており、観測とモデルの両輪で、極域の予測可能性研究を推進する体制が整い始めている。

## 2. 研究の目的

本研究では、北極域における多圏 (大気・海洋/海水・陸面) 間の相互作用と中緯度との熱・水輸送の相互作用の担い手である「総観規模スケールの低気圧活動の役割」に着目した新しい切り口で、北極気候システムを季節スケールの精度で理解する。特に、最新の観測データセットの解析・観測船による大気海洋集中観測・データ同化を用いた観測システム実験等を駆使し、北極の温暖化増幅における本質の解明を目指す。具体的には、低気圧活動が極温暖化増幅に果たす役割の解明、

低気圧活動の長期的変化と海水・陸面変化との関係、低気圧を介した中・高緯度間の遠隔応答の実態把握、北極域における低気圧活動の予測可能性研究、を遂行する事で北極気候システム研究を発展させる。

## 3. 研究の方法

北極圏の急激な温暖化に関わる各季節の役割と季節サイクルの解明のために、低気圧活動に焦点を当てた研究を実施する。具体的には、4つのシーズン (春・夏・秋・冬) について、各季節に適した手法 (再解析データ・モデル出力、現場観測・衛星観測データ、データ同化等) の組み合わせによって総観規模スケールの解析を中心に行う。春は低気圧活動とシベリア大陸の消雪パターンの因果関係、夏は海水の急激な減少を引き起こす気圧配置のダイポールパターン (シベリア大陸に低気圧、太平洋側北極海が高気圧) の形成メカニズム、秋は海洋から大気への熱放出と北極低気圧の予測可能性、そして冬は日本へ寒波をもたらすシベリア大陸の寒気形成に着目する。北極圏変動は多圏相互作用によって複雑化しているため、海洋の蓄熱や陸上の積雪など季節間の熱的かけ橋となる時期を見出し、極温暖化増幅における季節サイクルを包括的に理解する。

低気圧等の予測可能性研究に重要な高層気象観測データは、海洋地球研究船「みらい」による北極航海で取得するとともに、国際共同としてニーオルスンやアラート、ユーリカなどの現業の気象官署やドイツの砕氷船上で特別観測を実施してもらう。また、観測データの影響評価については地球シミュレータを用いたアンサンブルデータ同化実験を元に進める。

## 4. 研究成果

### (1) 陸面水循環

これまでシベリア3大川 (レナ川、エニセイ川、オビ川) の流量の変化は、グローバルな大気循環の変化だけではなく、凍土の融解や植生の変化などに伴うローカルな水循環の影響が指摘されてきており、どちらの効果が重要なのか議論が分かれていた。当研究課題では、大気再解析データを用いて極向きの水蒸気輸送量の変動を見積もり、それを過去60年間のシベリア3大川流量の経年変化と比較した。その結果、大気の水蒸気輸送量が1年先行する形で河川流量と統計的に有意な関係があることを明らかにした (Zhang et al. 2013, Nature Clim.)。これは前年の積雪が翌年の夏までに融解して河川へ流れ出る効果が河川流量を説明する主要因であることを意味する。水蒸気フラックスの時間成分解析からは、降水をもたらす水蒸気輸送過程は、流域ごとに異なり、東部のレナ川では低気圧活動、西部のオビ川では季節風に伴う水蒸気輸送が影響し、中部のエニセイ川では両者が寄与することを示した (Oshima et

al. 2015 JGR)。低気圧活動の影響が強い東シベリアでは、特に2004~2008年にかけて、7~9月の夏季降水量の大幅な増加と、引き続き積雪の増大が連続して進行したことが示され、永久凍土の融解に大きな影響を与えていた (Iijima et al. 2016, Int. J. Climatol.)。この低気圧活動の地域的な偏りは、北極海上のポーフォート高気圧の水平的な広がりをも支配することが明らかとなった (Hori et al. 2015, SOLA)。

### (2) 極温暖化増幅と中緯度気候連鎖の解明

冬季バレンツ海における海水面積の減少が、北極海へ侵入する低気圧を増加させ、それに伴って北極海上の温暖化、ユーラシア大陸上の寒冷化をもたらすことを大気解析データから示した (Inoue et al. 2012, J. Clim.)。しかし、この低気圧活動は上流の北大西洋上の大気循環によっても支配されていることが明らかとなった。特にメキシコ湾流の流軸の北進が、対流活動の偏差を通じて偏西風の蛇行をもたらし、北極の温暖化増幅と中緯度の厳冬イベントを引き起こすことを示した (Sato et al. 2014, ERL) (図1)。一方、バレンツ海の海水面積の季節予測には、海洋の熱的メモリーを利用して、バレンツ海の亜表層の水温をモニターすることで、海水面積を1年のリードタイムで予測できることが示された (Nakanowatari et al. 2014, J. Clim.)。同様の手法を用いて、初冬のベーリング海の海水面積も、夏季の北太平洋亜熱帯西部の対流活動及びアラスカ湾の水温を用いれば、3ヶ月のリードタイムで予測できることが分かった (Nakanowatari et al. 2015, ERL)。このように季節をまたぐ、熱帯-中緯度-極域で繰り広げられる大気・海洋・海水の多圏相互作用の一端が解明された。

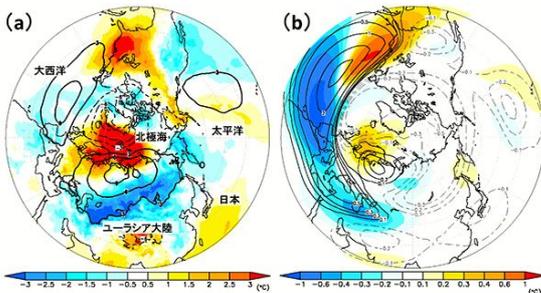


図1 (a)バレンツ海上の気温が高い12月に出現する気圧偏差(線)と気温偏差(色)、(b)メキシコ湾流の水温分布変化により引き起こされる大気応答。

### (3) 予測可能性研究

海洋地球研究船「みらい」の北極航海で行ったラジオゾンデ観測データ(GTS 配信済み)とJAMSTECで開発されたアンサンプルデータ同化システムを用い、大気再解析データへの影響評価を行った。対流圏界面付近を中心に、観測点周辺及び中緯度域にまで解析誤差の改善が見られ、データ空白域での観測拡充の

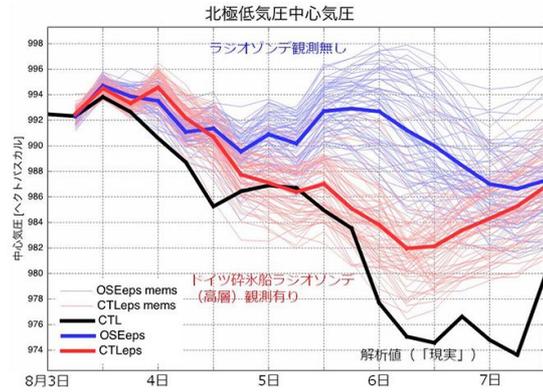


図2 ドイツ砕氷船の観測を同化する実験(赤線)としない実験(青線)による北極低気圧の中心気圧(hPa)の時間発展。細線は全アンサンプル予報の結果、太線はその平均値を示す。黒線は同化システムによって得られた解析値。

意義が示された (Inoue et al. 2013, GRL)。さらに、ドイツ砕氷船で実施されたラジオゾンデ観測データ(GTS 配信済み)を用いて、2012年8月に猛烈に発達した北極低気圧の予測可能性について、上記データ同化実験及びアンサンプル予報実験を行った。その結果、低気圧の予測には上流に位置する当該観測データが含まれることで初期値が改善されるため、一層精度よく中心気圧が予測できることが明らかとなった (Yamazaki et al. 2015, JGR) (図2)。低気圧に伴う海上の強風の予測精度も向上するため、それを強制力として海洋-海水結合モデルによる海水予測を実行したところ、北極海航路上の海水分布予測の精度も向上した (Ono et al. 2016, JAMES)。

一カ所の強化観測でも明瞭な効果が見られたため、2013年9月及び2014年9月には、「みらい」(1日8回観測)に加え、他の観測点にも高層気象観測の頻度を増やすよう依頼し、実験的に北極海周辺の観測網の強化を行った (ARCROSE: Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment)。具体的にはニーオルスンで1日1回のところを6回に(実施担当機関: Alfred Wegener Institute)、ユーリカとアラートでは1日2回のところを4回(担

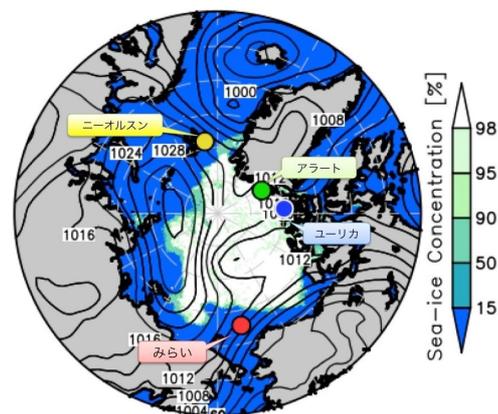


図3 2013年9月に実施した高層気象観測網の強化。ロシア沿岸の高気圧に伴う強風で北極海航路上の海水分布が大きく変化する9月21日に着目。

当機関:Environment Canada)に強化した(図3)。2013年9月21日の北極航路上で発達した高気圧に着目したアンサンプルデータ同化実験及びアンサンプル予報実験を行った結果、海氷分布の数日間の変動を支配する高気圧縁辺の強風(15m/s以上)の予測には、特別観測データが極めて有効であることがわかった。観測データを取り込まない初期値で予測すると高気圧の位置や移動速度の予測が悪化し、結果的に表層風が4m/s程度過小評価してしまうことが示された。また、各種感度実験から、各観測点の予測に対する寄与なども検討した。特に観測頻度に関しては、1日4回の高層気象観測が費用対効果に優れた観測頻度であることを提唱した(Inoue et al. 2015, Sci. Rep.)

#### (4) 国内外における位置づけとインパクト

当該研究成果は、WMO/PPPの一環として位置づけられ、2017年~2019年に計画されている極域予測年(YOPP: Year Of Polar Prediction)の先行研究例として、YOPPサミット等の国際会議の場で情報発信を行った。特に、観測とデータ同化を組み合わせた予測可能性研究は、国際的にも好評価を受けた。また国内では、文部科学省北極域研究推進プロジェクト「ArCS」で、国際共同研究推進テーマ「気象・海氷・波浪予測研究と北極航路支援情報の統合」が立ち上げられ、本研究成果が日本の北極研究・政策の発展に大きく貢献した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](査読あり)(計 27件)

Ono, J., J. Inoue, A. Yamazaki, K. Dethloff, and H. Yamaguchi (2016), The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **8**, 292-303.  
Iijima, Y., T. Nakamura, H. Park, Y. Tachibana, and A. N. Fedorov (2016), Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.4629. (in press)  
Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, and P. Edwards (2015), Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Sci. Rep.*, **5**, 16868.  
Hori, M. E., J. Inoue, and T. Kikuchi (2015), The role of cyclone activity in the interannual variability of the summertime Beaufort high. *SOLA*, **11**, 104-107.  
Nakanowatari, T., J. Inoue, K. Sato,

and T. Kikuchi (2015), Summertime atmosphere-ocean preconditionings for the Bering Sea ice retreat and the following severe winters in North America. *Env. Res. Lett.*, **10**, 094023.  
Oshima, K., Y. Tachibana, and T. Hiyama (2015), Climate and year-to-year variability of atmospheric and terrestrial water cycles in the three great Siberian rivers. *J. Geophys. Res.*, **120**, 3043-3062.

Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli, and G. König-Langlo (2015), Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res.*, **120**, 3249-3273.

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. Clim.*, **27**, 8884-8901.

Sato, K., J. Inoue, and M. Watanabe (2014), Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter. *Env. Res. Lett.*, **9**, 084009.

Zhang, X., J. He, J. Zhang, I. Polyakov, R. Gerdes, J. Inoue, and P. Wu (2013), Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend. *Nature Clim. Change*, **3**, 47-51.

Inoue, J., T. Enomoto, and M. E. Hori (2013), The impact of radiosonde data over the ice-free Arctic Ocean on the atmospheric circulation in the Northern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 864-869.

[学会発表](計 92件)

Iijima, Y., T. Nakamura, H. Park, Y. Tachibana, and A. N. Fedorov, Climatological conditions of enhanced Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA, 2015/12/15. (招待講演)

Inoue, J., Additional atmospheric observations improve weather and sea-ice forecasts over the Arctic Ocean. Arctic Circle Forum in Singapore, Singapore, 2015/11/12. (招待講演)

Inoue, J., Impact of extra observations from existing platforms.

Year Of Polar Prediction Summit,  
Geneva, Switzerland, 2015/7/13. (招待  
講演)  
Inoue, J., Arctic Research  
Collaboration for Radiosonde  
Observing System Experiment  
(ARCROSE). International workshop on  
polar-lower latitude linkages and  
their role in weather and climate  
prediction, Rosendal, Norway,  
2014/12/9. (招待講演)  
猪上淳, 北極海航路上の気象・海象にど  
のように向き合うか?, 日本マリンエ  
ンジニアリング学会 第7回特別講演会,  
笹川記念館, 東京, 2014/5/23. (招待講  
演)

〔図書〕(計 6件)

飯島慈裕・佐藤友徳 (2014), 北半球寒  
冷圏陸域の気候額・環境変動. 気象研究  
ノート第 230 号, pp. 219, 日本気象学会.  
Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J.  
Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida,  
N. Komori, and S. Yamane (2013),  
Observing-system research and  
ensemble data assimilation at JAMSTEC.  
In *Data Assimilation for Atmospheric,  
Oceanic and Hydrologic Applications*  
(Vol. II), S. K. Park and L. Xu (eds.),  
chapter 21, pp. 509-526, Springer.

〔その他〕

プレスリリース

2015.11.20「観測コストを考慮した北極  
海上の最適観測頻度を実証-北極海航路  
の気象・海氷予測の高精度化に貢献-」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20151120.html>  
2015.9.22「北アメリカの厳冬を引き起  
こす新たな要因の解明~夏季北太平洋  
亜熱帯からの大気のテレコネクション  
の影響~」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150922.html>  
2015.4.28「北極域の観測で猛烈な北極  
低気圧を予測-北極海航路上の安全航行  
に向けた予報精度の向上-」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150428.html>  
2014.10.27「ユーラシア大陸中緯度域で  
頻発している寒冬の要因分析~北極海  
の海氷の減少により寒冬になる確率は  
2倍~」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20141027.html>  
2014.10.23「バレンツ海の海氷面積が1  
年前から予測可能に~北大西洋からの  
水温の影響を考慮~」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20141023.html>

2014.8.16「メキシコ湾流の流路変化が  
もたらす北極海の海氷減少とユーラシ  
ア大陸の異常寒波」  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20140816.html>  
2013.3.7「北極海上の高層観測で中高緯  
度の大気循環の再現性が向上-観測デー  
タ空白域での海洋地球研究船「みらい」  
によるデータの役割-」  
[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20130307/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20130307/)  
2012.5.31「海氷減少で下層雲が減少」  
[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20120531/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20120531/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

猪上 淳 (INOUE JUN)

国立極地研究所・国際北極環境研究センタ  
ー・准教授

研究者番号: 00421884

(2) 研究分担者

飯島 慈裕 (IIJIMA YOSHIHIRO)

海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究  
センター・主任研究員

研究者番号: 80392934

高谷 康太郎 (TAKAYA KOUTAROU)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号: 60392966

堀 正岳 (HORI MASATAKE)

海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究  
センター・研究員

研究者番号: 60432225

榎本 剛 (ENOMOTO TAKESHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 10358765

中野渡 拓也 (NAKANOWATARI TAKUYA)

国立極地研究所・国際北極環境研究センタ  
ー・特任研究員

研究者番号: 20400012

大島 和裕 (OOSHIMA KAZUHIRO)

海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究  
センター・研究員

研究者番号: 40400006

(3) 連携研究者

小守 信正 (KOMORI NOBUMASA)

海洋研究開発機構・アプリケーションラ  
ボ・主任技術研究員

研究者番号: 80359223