

GRENE 北極気候変動研究プロジェクトまとめと今後の課題

Synthesis and Legacy of GRENE Arctic Climate Change Research Project

*山内 恭^{1,2}、高田 久美子^{1,3,4}*Takashi Yamanouchi^{1,2}, Kumiko Takata^{1,3,4}

1. 国立極地研究所、2. 総合研究大学院大学、3. 国立環境研究所地球環境研究センター、4. 海洋研究開発機構総合的気候変動予測研究分野

1. National Institute of Polar Research, 2. The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 3. National Institutes for Environmental Studies, 4. JAMSTEC

グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 北極気候変動研究プロジェクト「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」は、2011~2015年度の5カ年にわたって実施された、わが国初の、分野横断、観測・モデル融合、オールジャパンの北極研究である。既に、プロジェクト期間は終了し、多くの成果を得たとともに、これからの観測・研究のための基盤をも整備することができた。

本プロジェクトでは4つの戦略研究目標が提示された:

1. 北極における温暖化増幅メカニズムの解明、
2. 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明、
3. 北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等に及ぼす影響の評価、
4. 北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測。

その解明を目指して公募された7つの研究課題が推進された:

- (1) 北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化、
- (2) 環北極陸域システムの変動と気候への影響、
- (3) 北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響: 大気プロセスの包括的研究、
- (4) 地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割、
- (5) 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明、
- (6) 北極海環境変動研究: 海氷減少と海洋生態系の変化、
- (7) 北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測。

このように、トップダウンで示された目標に向けてボトムアップで構想された課題を進めるという大変ユニークな構成であった。

プロジェクトでは、2011年開始以来、北極を周る様々な場所、スバルバルから、ロシア・シベリア、アラスカ、カナダ、グリーンランドに北極海と多岐にわたる場所で観測が行われてきた。特に、スバルバル・ニールスンには、高精度の雲レーダー (95 GHz) が設置され、大気の集中観測が行われている。また、北極海では「みらい」や砕氷船の航海が行われ、係留系の観測も進められた。取得したデータは北極データアーカイブ (ADS) に蓄積され、解析用のインターフェースとともに供されている。また、原理的な物理モデルから大循環モデルまで、様々なモデル研究が進められて来た。

これらの観測・研究を通じ、多くの新たな研究成果が生まれているが、その代表的なものとしては:

- (1) 北極温暖化増幅の季節進行を含めた詳しいしくみ、
- (2) 北極温暖化の中緯度影響、特に日本の冬の寒波・豪雪への影響、
- (3) 北極海水予測と北極海航路の可能性、
- (4) 陸上植物活動の変化と大気中CO₂吸収の増加、
- (5) 生態系に影響する海洋酸性化等の海洋環境変化と優占種の変化、
- (6) 氷河・氷床崩壊による海面上昇への寄与、

などがあげられよう。戦略研究目標毎の関係を示した科学的成果の関連は図1の通りである。

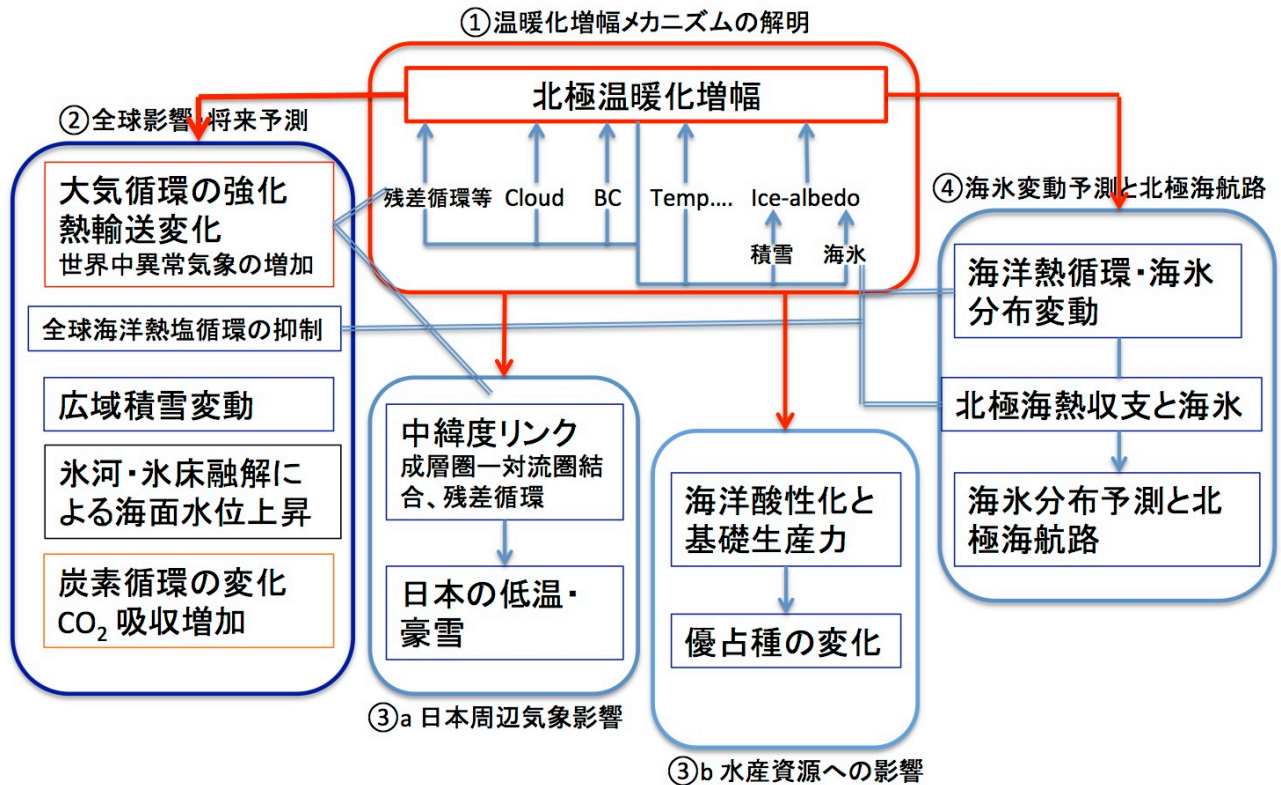
しかし、温暖化に伴う雲のふるまい、気象予測の高精度化、水循環、永久凍土融解や海洋底からのメタン発生など、未だ解明しきれなかった課題も多く、今後の研究が待たれる。基盤施設としての雲レーダーをはじめ、GRENE で培われた分野融合の研究体制などをLegacyとして、これからの研究を進めて欲しい。既に

ArCS (Arctic Challenge for Sustainability 北極域研究推進) プロジェクトやYOPP (極域予測年; WMO/PPP極域予測プロジェクト) をめざした計画が進んでいるが、それ以外にも、活発な研究推進が期待される。

キーワード：北極、海氷、温暖化増幅、中緯度影響、北極海航路

Keywords: Arctic, sea ice, warming amplification, mid-latitude link, Arctic sea routes

全体のまとめ



西部北極海における厳冬期の亜表層暖水輸送

Mid-winter transport of subsurface warm water in western Arctic Ocean

*渡邊 英嗣¹、小野寺 丈尚太郎¹、伊東 素代¹、西野 茂人¹、菊地 隆¹

*Eiji Watanabe¹, Jonaotaro Onodera¹, Motoyo Itoh¹, Shigeto Nishino¹, Takashi Kikuchi¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Ocean heat transport is a possible important factor for recent sea ice decline, especially in the western Arctic Ocean. 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 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. Recently, year-long moorings in Chukchi Abyssal Plain detected mid-winter subsurface warming, plausibly caused by lateral advection of shelf-origin water. In this study, a pan-Arctic sea ice-ocean modeling was performed to address overwinter transport of subsurface warm water. The horizontal grid size was approximately 5 km to resolve mesoscale eddies and narrow jets. The interannual experiment from 2001 to 2014 demonstrated that Barrow Canyon throughflow and westward shelf-break jet established primary pathways of subsurface heat transport toward Chukchi Borderland. Shelf-break heat was partly lost by event-like wind mixing but remained under highly stratified surface layer until mid-winter.

キーワード：北極海、亜表層水温極大、陸棚縁ジェット

Keywords: Arctic Ocean, Subsurface temperature maximum, Shelf-break jet

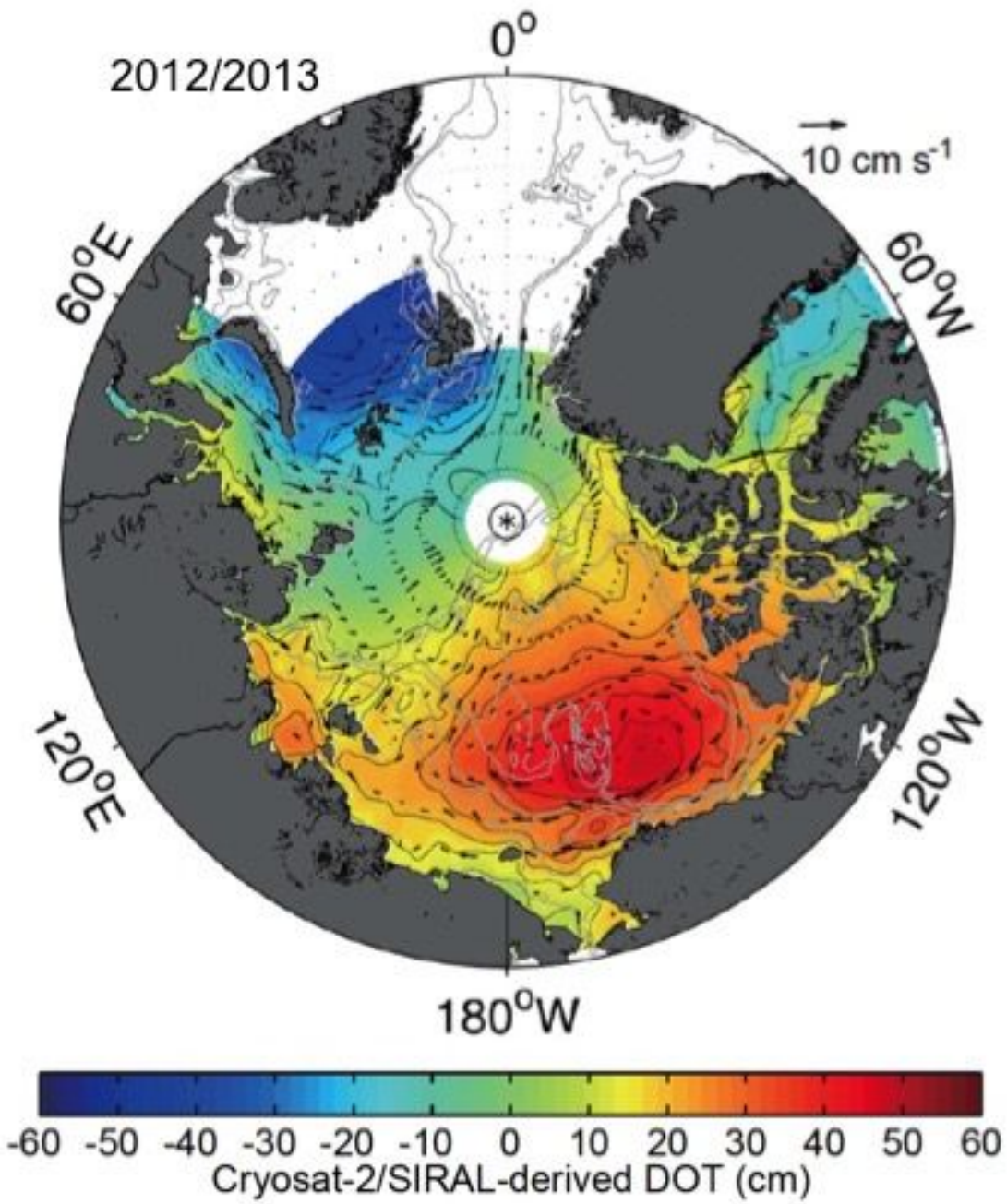
Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL measurements

*Kohei Mizobata¹, Eiji Watanabe², Noriaki Kimura³

1.Tokyo University of Marine Science and Technology, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.National Institute of Polar Research

The monthly dynamic ocean topography (DOT) of the Arctic Ocean was successfully estimated .by using the sea surface height measured by the SAR / Interferometric Radar Altimeter (SIRAL) on board CryoSat-2 (CS-2). The CS-2 monthly DOT showed the interannual and monthly variability of the Beaufort Gyre (BG) during winter between 2010/2011 and 2014/2015. Estimated BG in the Pacific Sector of the Arctic Ocean indicates that the northward flow at the western edge of the BG was primarily estimated over the Chukchi Borderland (CBL). However, in the winter of 2012/2013, the BG extended across the CBL (see figure). Our analyses revealed a significantly variable BG in response to changes in the sea surface stress field. Our analysis suggests that 1) sea ice motion, driven by wind fields, acts as a driving force for the BG when sea ice motion was intensified during winter and 2) sea ice motion can also act as an inhibiting force for the BG when sea ice motion is weakened during winter. In addition, the relationship between the DOT, steric height and ocean bottom pressure implied that the DOT during winter responded to varying wind stresses through baroclinic and also barotropic adjustments. According to a tracer experiment based on our monthly CS-2 DOT and derived geostrophic velocity field, we inferred that in the winter of 2012/2013, the Pacific-origin water carried into the BG through the Barrow Canyon was transported to the northern shelf and shelf break of the Chukchi Sea rather than the CBL, which is where the Pacific-origin water had been transported in the other years of the observation period.

Keywords: Beaufort Gyre, CryoSat-2/SIRAL, Dynamic ocean topography



北極海における冬季から春季の海氷状況をもとにした夏季海氷分布の予測

Medium-range prediction of the Arctic sea ice

*木村 詞明^{1,2}、山口 一²*Noriaki Kimura^{1,2}, Hajime Yamaguchi²

1.国立極地研究所、2.東京大学大学院新領域創成科学研究科

1.National Institute of Polar Research, 2.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

INTRODUCTION

The summer Arctic sea-ice extent has decreased in this several decades. This reduction has accelerated maritime transport using the Arctic sea route. Sea ice prediction is essential to realize safe and sustainable use of the route. Especially, medium-term forecast looking several months ahead is necessary to determine whether or not the shipping route through the Arctic will be navigable.

The Arctic Ocean is nearly fully covered by sea ice until April or May, after which time interannual differences in ice area become noticeable. One possible cause of the interannual difference of ice retreat is ice thickness in spring before the start of melting. However, observations of ice thickness are insufficient in their spatial and temporal coverage, observation period or their accuracy to resolve the interannual difference of the thickness. Recently, Krishfield et al. (2014) shows the way to derive the daily sea ice thickness from the satellite microwave data.

To estimate the spatial distribution of spring ice thickness, we focus on the winter ice motion and redistribution. Our prediction is basing on the relationship between the ice thickness in spring and ice area in the following summer. We predict the summer ice area based on this relation.

DATA

We prepare a daily ice-velocity product on a 60 km resolution grid for 2003-2015, calculated from data of the satellite microwave sensors Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) and AMSR2. The procedure for detecting ice motion is based on the maximum cross correlation method (Kimura et al., 2013). Ice thickness is calculated from AMSR-E and AMSR2 images using the algorithm by Krishfield et al. (2014). This study also uses satellite derived daily ice concentration on a 10 km resolution grid, distributed by Arctic Data archive System (<https://ads.nipr.ac.jp/index.html>).

METHOD OF ICE PREDICTION

To investigate the dynamic redistribution of sea ice during winter, movement of particles spread over the ice area is calculated. About 20000 particles having initial ice thickness are arranged at an interval of 30 km over the ice area on December 1 of each year. Daily displacement of the particles is calculated from the satellite derived ice velocity on one-day time steps up to April 30.

Provisional ice thickness on April 30 is estimated by 1) particle density only, 2) particle density multiplied by the initial ice thickness, 3) particle density multiplied by the initial ice thickness only in the thick-ice (>1.5m) area. We found the highest correlation between the spring ice thickness and summer ice cover in the case of 3. We can predict the summer ice area based on the relationship between the provisional ice thickness and summer ice area. Based on the analysis, first report of the summer ice prediction showing the ice concentration map for July 1 to September

11 is released in May on our website.

The medium-term forecast looking several months ahead should be useful for safe and efficient use of the Arctic sea route. As a next step, we are trying to predict the ice thickness distribution.

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank the Arctic Data archive System for the gridded AMSR-E and AMSR2 data. This study was supported by the Green Network of Excellence Program Arctic Climate Change Research Project.

REFERENCES

- Kimura N., Nishimura A., Tanaka Y. and Yamaguchi H. (2013) Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic, *Polar Research*, 20193.
- Krishfield, R. A., Proshutinsky, A., Tateyama, K., Williams, W. J., Carmack, E. C., McLaughlin, F. A., and Timmermans, M. L. (2014) Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle, *J. Geophys. Res.*, 119, 1271-1305.

キーワード：北極、海氷、衛星リモートセンシング

Keywords: Arctic, Sea ice, Satellite remote-sensing

北極海のラジオゾンデ観測データが冬の中緯度で生じる寒波の予報精度に与える影響

Impact of radiosonde data over the Arctic ice on forecasting winter extreme weather over mid latitude

*佐藤 和敏¹、猪上 淳^{1,2,3}、山崎 哲²、Kim Joo-hong⁴、Maturilli Marion⁵、Dethloff Klaus⁵、Hudson Stephen⁶

*Kazutoshi Sato¹、Jun Inoue^{1,2,3}、Akira Yamazaki²、Joo-hong Kim⁴、Marion Maturilli⁵、Klaus Dethloff⁵、Stephen R Hudson⁶

1.国立極地研究所、2.海洋研究開発機構、3.総合研究大学院大学、4.Korea Polar Research Institute、5.Alfred Wegener Institute、6.Norwegian Polar Institute

1.National Institute of Polar Research, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.SOKENDAI (Graduate University for Advanced Studies), 4.Korea Polar Research Institute, 5.Alfred Wegener Institute, 6.Norwegian Polar Institute

In February 2015, the Arctic air outbreak caused extreme cold events and heavy snowfall over the mid latitude, in particular over the North America. During the winter, special radiosonde observations were made on the Norwegian RV Lance around the north of Svalbard under the N-ICE2015 project. We investigated the impact of the radiosonde data on forecasting of a cold extreme event over the eastern North America using the AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis version2 (ALERA2) data set. ALERA2 was used as the reference reanalysis (CTL) while the observing-system experiment (OSE) assimilated the same observational data set, except for the radiosonde data obtained by the RV Lance. Using these two reanalysis data as initial values, ensemble forecasting experiments were conducted. Comparing these ensemble forecasts, there were large differences in the position and depth of a predicted polar vortex. The CTL forecast well predicted the southward intrusion of the polar vortex which pushed a cold air over the eastern North America from the Canadian Archipelago. In the OSE forecast, in contrast, the trough associated with southward intrusion of the polar vortex was weak, which prevented a cold outbreak from Arctic. This result suggested that the radiosonde observations over the central Arctic would improve the skill of weather forecasts during winter.

キーワード：北極、極渦、アンサンブル予報

Keywords: Arctic, polar vortex, ensemble forecast

数十年スケールの地上気温変動と北極振動との関係

Relationship between the Arctic Oscillation and Surface Air Temperature in Multi-Decadal Time-Scale

*田中 博¹*Hiroshi Tanaka¹

1.筑波大学計算科学研究センター

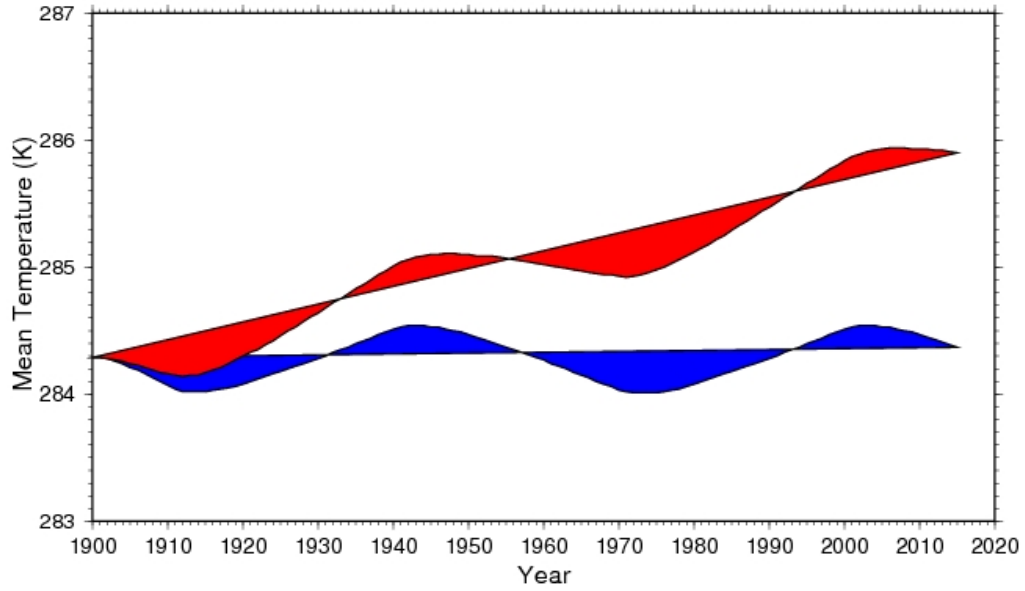
1.Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

本研究では、簡単なエネルギーバランスモデル(EBM)の時間積分を行い、アルベド変化に伴う数十年スケールの気温変化を説明する仮説を提唱した。この数値実験では、人為起源の温暖化に自然変動が重なることで、温暖化ハイエイタスが再現された。同時に、1970年から2000年頃の急激な温度上昇には自然変動が人為起源の温暖化と同程度の大きさと重なっている事が示された。このモデルで鍵となる惑星アルベドの長周期変動について、JRA-55再解析データを用いて調査したところ、惑星アルベドはEBM仮説のように、1958-1970年で増加、1970-2000年で減少、2000-2012年で増加した。この長周期変動を、気温変化のEOFとして得られる北極振動モードとバレンツ海モードと比較した結果、バレンツ海モードは惑星アルベドと同じ数十年変動を示し、20世紀末の急激な温暖化や近年の温暖化ハイエイタスと整合的な変動を示した。一方、北極振動は温和な北極域と寒冷な中緯度という近年の局所的な気温変化に大きく貢献していることを示した。

キーワード：北極振動、北極温暖化増幅、エネルギーバランスモデル、惑星アルベド、数十年スケール変動

Keywords: Arctic Oscillation, Arctic Amplification, Energy Balance Model, Planetary Albedo, Multi-decadal Variability

N. H. Mean Temperature with Linear Trend
Two Box Energy Balance Model



人文学と科学の協働—ばらばらを統合する

Cooperation between the arts and science ----Integration of disintegration----

*本多 俊和¹

*Henry Stewart¹

1.元放送大学

1.Former professor of the Open University of Japan

Integration of research in the arts (humanities) and science is the focus of attention, both in academia and the media. However, little attention has been given to the fundamental differences in methodology and research posture between the two. This difference can, and often does hinder productive cooperation, as well as becoming the grounds of distrust in research results. Based upon personal experience as an Arctic anthropologist, I discuss instances of success and failure in cooperative research. As a contribution to further cooperation, I conduct natural scientists on a journey into the mysteries and pitfalls of anthropological field research.

ロシア水文気象環境監視局の航空機による北極・西シベリア域における大気環境観測
 Observation of Atmospheric Environment over The Arctic and West Siberia using ROSHYDROMET
 Airplane

*今須 良一¹、町田 敏暢²、青木 周司³、山内 恭⁴、松永 恒雄²、松枝 秀和⁵、金谷 有剛⁶、松見 豊⁷、篠田 太郎⁷、谷本 浩志²、五藤 大輔²、森野 勇²、澤 庸介⁵、坪井 一寛⁵、丹羽 洋介⁵、兼保 直樹⁸、村山 昌平⁸、末吉 哲雄⁴、滝川 雅之⁶、竹谷 文一⁶、佐藤 陽祐⁹、竹内 渉¹⁰、入江 仁士¹¹、笠井 康子¹²、Strunin Mikhail¹³、Fomin Boris¹³

*Ryoichi Imasu¹, Toshinobu Machida², Shuji Aoki³, Takashi Yamanouchi⁴, Tsuneo Matsunaga², Hidekazu Matsueda⁵, Yugo Kanaya⁶, Yutaka Matsumi⁷, Taro Shinoda⁷, Hiroshi Tanimoto², Daisuke Goto², Isamu Morino², Yousuke Sawa⁵, Kazuhiro Tsuboi⁵, Yosuke Niwa⁵, Naoki Kaneyasu⁸, Shohei Murayama⁸, Tetsuo Sueyoshi⁴, Masayuki Takigawa⁶, Fumikazu Taketani⁶, Yousuke Sato⁹, Wataru Takeuchi¹⁰, Hitoshi Irie¹¹, YASUKO KASAI¹², Mikhail Strunin¹³, Boris Fomin¹³

1.東京大学大気海洋研究所、2.国立環境研究所、3.東北大学大学院理学研究科、4.国立極地研究所、5.気象庁気象研究所、6.海洋研究開発機構、7.名古屋大学宇宙地球環境研究所、8.産業技術総合研究所、9.理化学研究所、10.東京大学生産技術研究所、11.千葉大学環境リモートセンシング研究センター、12.情報通信研究機構、13.ロシア水文気象環境監視局高層気象観測センター

1.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Institute for Environmental Studies, 3.Graduate School of Science, Tohoku University, 4.National Institute of Polar Research, 5.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 6.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 7.Institute for Space-Earth Environmental Research, 8.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 9.RIKEN, 10.Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 11.Center of Environmental Remote Sensing, Chiba University, 12.National Institute of Information and Communications Technology, 13.Central Aerological Observatory, ROSHYDROMET

西シベリアを含む北極域は、地球温暖化の影響を最も敏感に受ける地域である。そのため、同地域での継続的で総合的な大気環境の観測が求められている。そのためには、航空機による観測が非常に有力な手段となる。近年、ロシア水文気象環境監視局 (ROSHYDROMET) は、新規にYakovlev-42D型の大型航空機 (写真) を導入し、“Airplane-Laboratory”と呼んで、その運用を中央高層大気観測所 (CAO) に託した。この航空機は、ロシア領土内の北極域からシベリア上空を研究のために飛行できる唯一の大型航空機である。一方、日本ではGOSATやGCOM-C1などの衛星プロジェクトが進行中であり、これらの衛星と上記航空機との同時運用が、北極域の総合的な研究に大いに貢献するものとして期待されている。そのため、2014年11月7日に東京大学大気海洋研究所とROSHYDROMET/CAOとの間で研究協力協定を締結した。2015年11月23-24日にはキックオフミーティングをモスクワで開催し、この枠組みの中で行う飛行計画やデータ利用方法についての議論をスタートした。“Airplane-Laboratory”の機内は、1)気象要素、2)気体・エアロゾル (ライダー含む)、3)放射 (イメージャー含む)、4)放射線、5)雲微物理量、6)レーザーの6つの区画に分かれ、対流圏の気体、粒子状物質を総合的に観測できるよう、様々な観測機器を搭載している。気体成分としては、CO₂、CH₄、O₃、NO、NO_x、NO_yを個別に測り、キャピティリングダウン分光分析装置 (CRDS) も搭載する。エアロゾルは、0.06-3.0μm間の粒径分布、雲凝結核、黒色炭素 (BC)などを測定する。雲微物理量については、各種プローブを搭載して雲粒径のほか、粒子形状も記録する。放射計は紫外域から熱赤外域をカバーし、ライダーは上向き、イメージャーは紫外域から近赤外域をカバーする。ロシア側からは、ガスとBCの測定精度向上のために、CRDSとブラックカーボン単一粒子測定方法 (SP2)の校正について、日本側の協力を期待されている。航空機の飛行時間は、2014年は計200時間、2015~2033年 (計20年間)は500時間/年とされているが、日本との共同観測への割り当て時間については、現在、協議中である。

キーワード：北極圏、航空機、大気環境、ロシア水文気象環境監視局、西シベリア
Keywords: The Arctic, Airplane, Atmospheric Environment, ROSHYDROMET, West Siberia



20 世紀前半の北極圏温暖化に対する熱帯からの遠隔強制

Tropical Forcing of the Early Twentieth Century Warming over the Arctic

*Tokinaga Hiroki^{1,2}, Xie Shang-Ping³, Mukougawa Hitoshi¹

*Hiroki Tokinaga^{1,2}, Shang-Ping Xie³, Hitoshi Mukougawa¹

1.京都大学防災研究所、2.京都大学白眉センター、3.カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, 3.Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego

Land air temperature over the Arctic had warmed by about 1.5C during the early twentieth century (20C). We examine a remote forcing of tropical oceans on the early 20C warming over the Arctic, analyzing new sea surface temperature (SST) products and comparing SST-forced atmospheric general circulation model (AGCM) simulations. The new SST products feature a significant warming in the equatorial Pacific during the early 20C while conventional ones exhibit a broad warming over the tropics and subtropics. Only AGCM simulation forced with the new SST product successfully reproduces the observed Arctic warming and atmospheric teleconnection patterns triggered by the equatorial Pacific warming. They effectively transport heat from the subtropics to the higher latitude, contributing to the Arctic warming during the early 20C.

キーワード：北極温暖化、太平洋数十年規模振動

Keywords: Arctic warming, Interdecadal Pacific Oscillation

植生フィードバックが北極温暖化増幅をもたらすメカニズムについて

On the mechanism of vegetation feedback to the Arctic warming amplification

*吉森 正和^{1,2}、大石 龍太^{3,4}、阿部 彩子³

*Masakazu Yoshimori^{1,2}, Ryouta O'ishi^{3,4}, Ayako Abe-Ouchi³

1.北海道大学大学院地球環境科学研究院、2.北海道大学北極域研究センター、3.東京大学大気海洋研究所、4.国立極地研究所

1.Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, 2.Arctic Research Center, Hokkaido University, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 4.National Institute of Polar Research

It is well known that the Arctic climate is sensitive to the external radiative forcing and its response is generally larger than the rest of the world. Observations show that the Arctic is indeed warming at about twice the speed of the global average, and climate model simulations also projects that the Arctic warming amplification continues to the future. Various physical processes have been listed as important contributors to the amplification, but the feedback effect of vegetation distribution change in response to the climate change is not always taken into account. Here, we extend the study of O'ishi and Abe-Ouchi (2009) in which the vegetation change is internally predicted in a coupled climate-dynamic vegetation model. In the current study, a calibration for the model's systematic bias against present-day observations is added. This is important as the present-day vegetation distribution impacts on how the vegetation changes under the perturbed climate, and that the vegetation responds to the temperature itself and not to the temperature anomaly. Detailed energy transport and energy balance analysis are conducted for the doubled and quadrupled CO₂ equilibrium experiments.

In the experiment of atmospheric CO₂ increase, much of the current tundra area is replaced by the boreal forest, and the temperate forest expands as the boreal forest migrates to the north. Arctic land surface warms the most in spring due to albedo increase through vegetation-type changes and earlier snow melting. The effect of vegetation feedback is, however, not confined to the land warming. The large warming occurs in the Arctic Ocean in winter. Part of the excessive energy over land is cancelled by the increased evaporative cooling and part of it is transported to the Arctic Ocean in spring. This transport is accomplished by the mean meridional circulation (polar cell) in the atmosphere. This increased heat transport induces sea ice albedo feedback in summer and large heat release from the ocean in winter, causing the Arctic warming amplification.

キーワード：北極域温暖化増幅、植生フィードバック、気候モデル、動態植生モデル

Keywords: Arctic warming amplification, vegetation feedback, climate model, dynamic vegetation model

トップダウン法とボトムアップ法によるCO₂フラックス推定値の比較 - シベリア・ヤクーツクでの試み -

Comparison of CO₂ fluxes estimated by top-down and bottom-up methods -- a case study at Yakutsk, Siberia --

*高田 久美子^{1,2,3}、Patra Prabir³、Belikov Dmitry^{2,1}、小谷 亜由美⁴、森 淳子^{3,1}、GTMIP グループ、市井 和仁³、佐伯 田鶴³、丹羽 洋介⁵、斉藤 和之³、太田 岳史⁴、Maksyutov Shamil²、町田 敏暢²、Ganshin Alexander^{6,7}、Zhuravlev Ruslan^{6,7}、杉本 敦子⁸、青木 周司⁹

*Kumiko TAKATA^{1,2,3}、Prabir Patra³、Dmitry Belikov^{2,1}、Ayumi Kotani⁴、Junko Mori^{3,1}、GTMIP Group、Kazuhiro Ichii³、Tazu Saeki³、Yosuke Niwa⁵、Kazuyuki Saito³、Takeshi Ohta⁴、Shamil Maksyutov²、Toshinobu Machida²、Alexander Ganshin^{6,7}、Ruslan Zhuravlev^{6,7}、Atsuko Sugimoto⁸、Shuji Aoki⁹

1.国立極地研究所 国際北極環境研究センター、2.国立環境研究所地球環境研究センター、3.海洋研究開発機構、4.名古屋大学、5.気象庁気象研究所、6.Tomsk State University、7.Central Aerological Observatory、8.北海道大学、9.東北大学

1.Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research, 2.CGER, National Institute for Environmental Studies, 3.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4.Nagoya Univ., 5.Meteorological Research Institute, JMA, 6.Tomsk State University, 7.Central Aerological Observatory, 8.Hokkaido University, 9.Tohoku University

森林生態系の炭素収支が気候変動において重要な役割を担っているとともに大きな不確実性があることは広く認識されており、炭素収支に関するボトムアップ推定とトップダウン推定を比較することによって両者の不確実性を低減しようとする試みは、近年精力的に進められている。GRENE事業北極気候変動分野（以下、GRENE北極事業）では、観測データが乏しいシベリア域をはじめとした北極域で陸域観測や大気観測が実施されるとともに、プロセスモデルや逆解析モデルによる地上CO₂フラックスの推定も実施されている。

GRENE北極事業の陸域の研究課題では環北極域でエネルギー・水・炭素循環の観測を多地点で実施しており、その中の4地点で複数の陸域のプロセスベースモデル（陸面過程モデル）によるエネルギー・水・炭素フラックスの相互比較(GTMIP)(Miyazaki et al., 2015)を進めている。一方、温室効果気体の研究課題では航空機や地上ステーションでのCO₂濃度の高精度観測を実施するとともに、逆解析モデルによる地域スケールでのCO₂地上フラックスの推定を実施している。今回はNet Ecosystem Production (NEP) またはNet Biome Productivity (NBP) に相当する炭素収支量を対象として、ヤクーツクでの陸域タワー観測に基づくCO₂フラックス値、陸面過程モデルのCO₂フラックス推定値、逆解析モデルによるヤクーツク周辺500km四方のCO₂フラックス推定値について、1980年から2012年の月平均値で比較した（タワー観測は2004-2011年）。

その結果、タワー観測、陸面過程モデル、逆解析モデルの値は概ね一致し、6-8月に大きな吸収、他の月は小さな放出または吸収となる季節変化の特徴が共通して見られた。経年変動は、夏季平均値（6-8月）のほうが年間値よりもばらつきが小さい傾向が認められた。冬季はもともとフラックス値が小さい上に、不確実性の大きい呼吸過程が支配的であるため、冬季の推定値のばらつきが大きく、年間値もその影響を受けたと考えられる。夏季平均値の年々変動は、幾つかのモデルで観測と似た傾向が認められるが、一致・不一致の原因には様々なものが考えられる。第一には、それぞれの推定方法の代表的な水平スケールの違いがある。また、森林火災の考慮の仕方や影響の受け方が違うことも不一致の原因の一つとして考えられる。タワー観測では湿潤年・高温暖乾燥年などの特徴的な気象条件と対応したNEPの変動が見られるが、モデルでは必ずしもそれらの特徴が捉えられていない。これらを個別に調査して一致・不一致の原因を明らかにすることにより、CO₂収支の不確実性の低減していくことができる。

キーワード：CO₂収支、寒帯林帯、トップダウン法とボトムアップ法、タワー観測

Keywords: CO₂ balance, boreal forest region, topdown and bottomup method, tower observation

アラスカの大規模森林火災期間中の気象条件

Weather Conditions During Large-Scale Widespread Forest Fires in Alaska

*早坂 洋史¹、田中 博²、ピーター ビーニック³*Hiroshi Hayasaka¹, Hiroshi L Tanaka², Peter A Bieniek³

1.NPO北海道水文気候研究所、2.筑波大学、3.アラスカ大学

1.NPO Hokkaido Institute of Hydro-climate, 2.University of Tsukuba, 3.University of Alaska Fairbanks

世界の森林火災の頻発地域は、衛星データのホットスポット（HS）を使った世界森林火災地図で把握できる。大規模で広範囲な森林火災地帯の1つであるアラスカの北方林（タイガ、針葉樹林帯）は、面積が約 $0.47 \times 10^6 \text{ km}^2$ （アラスカ州面積の32%）である。近年、2004、2005、2009、および2015年に、大規模で広範囲な森林火災を経験した。特に2004年の森林火災は、記録のある1956年以降では、最大の焼損面積となった。2004年の焼損面積は、史上最大の面積で約 $26,700 \text{ km}^2$ 、2015年は史上2番目で $20,900 \text{ km}^2$ であった。この2年の焼損面積は、アラスカ北方林の約10.5%に相当する。

本研究では、近年の激しい火災期間の毎日の火災象条件を分析した。総観的気象条件は、高層（500hPa）および下層（1000hPa）の大気再分析データを使って分析した。大気再分析データに基づく総観的天気図は、気圧の高い条件下と低い条件下での広域森林火災活動を引き起こしていた激しい火災気象条件を明確にするために使用した。気圧の高い条件では、高気圧システムの南から北への移動に伴い、風向が南から南西寄りだったものが、北から東寄に変化した。これをロスビー砕波(RWB)との関連で考察した。RWBと火災活動との関連も考察した。

解析結果を要約すると、

1. 気圧の高いタイプの火災気象は、RWBと関連したユニークな気象現象下で生じた。RWBはアラスカ近傍で生じたジェット気流の大きな蛇行に伴う東寄の風で生じた。上層（500hPa）の尾根とブロック高気圧のために、下層（1000hPa）の高気圧は北へ動いた。この南からの北への高気圧の動きの間に、2の激しい火災気象条件が生じ、最初のホットスポット(HS)ピーク①と2番目のHSピーク②（同一火災期間中では最大、②>①）が現れた。
2. この2つのHSピーク、①と②は、2つの総観的気象条件下で生じた。HSピーク①は、上層・下層のアラスカ湾の気圧の尾根により、南と西寄りの風をアラスカ内陸部に供給し生じた。HSピーク②は高気圧がアラスカを越えて移動した後のポーフォート高気圧(BSH)で生じた。
3. 上層ブロック高気圧と連携してBSHが生じ、東寄りの風をアラスカ内陸部に供給した。この東寄りの風は、BSHとアラスカ内陸との大きな気圧差によるもので、最大のHSピーク②が生じた。HSピーク①の南と西寄りの風よりも強い風のために、HSピーク、①と②のHS数に違いが生じた。
4. 低い気圧の火災気象タイプでは、アラスカ内陸部に南と西寄りの風を供給されて、単一の大きなHSピーク①が生じた。この風の条件は、北極海の低圧のシステムおよびベーリング海の高圧のシステムの大きい気圧差で起きていた。
5. 以上の気圧の高い条件下と低い条件下でのアラスカ火災気象条件は予測できるかもしれない。本研究の結果から、（1）アラスカ近傍でのジェット気流の大きな蛇行の監視と（2）北極海での低気圧の発達とベーリング海での高気圧の発達の監視、が重要であると言える。

キーワード：ポーフォート高気圧、ジェット気流蛇行、ロスビー砕波、広域森林火災、MODISホットスポット

Keywords: Beaufort Sea High, Jet stream meandering, Rossby waves breaking, Widespread fires, MODIS hotspot

ALOS-PALSARを利用したInSARによるツンドラ火災後の融解沈下検出

InSAR detection of thermokarst after a tundra wildfire, using ALOS-PALSAR

*岩花 剛¹、内田 昌男²、山之口 勤³、ヒンズマン ラリー¹

*Go Iwahana¹, Masao Uchida², Tsutomu Yamanokuchi³, Larry Hinzman¹

1. アラスカ大学・国際北極圏研究センター、2. 国立環境研究所、3. 一般財団法人リモート・センシング技術センター

1. International Arctic Research Center, University of Alaska, 2. National Institute for Environmental Studies, 3. Remote Sensing Technology Center of Japan

Through the subsidence of ice-rich permafrost upon thaw (thermokarst), the consequences of permafrost degradation for surface ecology, landscape evolution, and hydrological processes have been of great scientific interest and social concern. Part of a tundra patch affected by wildfire in northern Alaska (27.5 km²) was investigated here, using remote sensing and in-situ survey to understand permafrost thaw dynamics after surface disturbances. L-band InSAR with spatial resolution of less than ten meters detected ground subsidence triggered by the tundra fire. We introduced a calibration procedure comparing burned and unburned areas for InSAR subsidence signals to remove the noise from seasonal surface movement. In the first year after the fire, an average surface subsidence rate of 6.2 cm/year (vertical) was measured. Subsidence in the burned area continued over the following two years with decreased rates. These results suggest that this InSAR-measured ground subsidence is caused by the thaw of ice-rich permafrost (thermokarst), a feature supported by surface change observations from high-resolution optical images and in-situ ground level surveys. InSAR analysis clearly showed spatial variation in thermokarst subsidence at fine scale, enabling us to investigate dynamics of thermokarst processes and quantify permafrost degradation, and leading to accurate estimates of ground ice loss upon permafrost thaw.

走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた北極域の積雪に含まれる黒色炭素の形態観察 Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis of Black Carbon in Arctic snow

*永塚 尚子¹、Mateiu Ramona²、東 久美子^{1,3}、塚川 佳美¹、杉浦 幸之助⁴、榎本 浩之^{1,3}、青木 輝夫⁵

*Naoko Nagatsuka¹, Ramona Valentina Mateiu², Kumiko Goto-Azuma^{1,3}, Yoshimi Ogawa-Tsukagawa¹, Konosuke Sugiura⁴, Hiroyuki Enomoto^{1,3}, Teruo Aoki⁵

1.国立極地研究所、2.デンマーク工科大学、3.総合研究大学院大学、4.富山大学、5.気象研究所

1.National Institute of Polar Research, 2.Technical University of Denmark, 3.SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 4.University of Toyama, 5.Meteorological Research Institute

極地に分布する積雪や氷河の氷の中には、様々な大気降下物が保存されている。このうち、黒色炭素（ブラックカーボン）や鉱物ダストなどの光吸収性エアロゾルは雪氷面に沈着してアルベドを低下させることで最近の北極域の温度上昇に寄与していると考えられている。ブラックカーボンはその構造によって光吸収特性が大きく異なる性質があることが報告されているが、実際の雪氷中のブラックカーボンの形態について明らかにした例はない。

本研究では、北極雪氷圏に供給される大気エアロゾルの気候変動への応答、および放射強制力への影響を評価することを目的として、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた北極域積雪試料中のブラックカーボンの構造観察を行い、その空間的変動を考察する。

分析を行ったのは、GRENE北極プロジェクトにおいてグリーンランド、アラスカ、シベリア、および北海道札幌市で採取された積雪サンプルである。サンプルはパウダーフリー・ポリ袋内で融解した後、ガラスバイヤルに移し替えて冷蔵保存したものを使用した。

ブラックカーボン粒子の構造をより明瞭に観察するため、レース状のカーボン支持膜を乗せた200mesh Cu Holeyマイクログリッド、あるいは洗浄済みのシリコンウェハーを使用して試料台基盤上の汚れを排除し、その上にサンプルを1滴垂らして蒸発させ、観察を行った。さらに、エネルギー分散型X線分析装置 (EDS) を用いて、ブラックカーボン粒子の表面の化学組成を分析した。試料の観察は国立極地研究所の走査型電子顕微鏡 (QUANTA FEG 450)を用いて行った。

顕微鏡観察の結果、アラスカおよび札幌の積雪サンプルには、いずれも直径~60 nmの同サイズの球形粒子で構成された、鎖状体構造を持つ粒子と凝集体構造を持つ粒子が含まれていた。さらにEDSによる定性分析の結果、これらの粒子は主にC（カーボン）で構成されていることがわかった。これは、先行研究で報告されているブラックカーボン粒子の構造 (e.g. Buseck et al., 2012) に比較的近い特徴であることから、本研究で観察されたこれらの粒子もブラックカーボンであると考えられる。

しかしながら、鎖状体、および凝集体構造を持つブラックカーボン粒子の割合はサンプル間で大きく異なった。たとえば、グリーンランドの積雪にはアラスカや札幌に比べて鎖状体構造を持つ粒子が多く含まれており、これは北極域各地の積雪に含まれるブラックカーボンの起源あるいは輸送経路が地域によって異なることを示している。化石燃料や森林火災の燃焼によって大気中に排出された直後のブラックカーボンには、鎖状体構造を持つ粒子が比較的多く含まれていることが明らかになっていることから、グリーンランドの積雪に含まれるブラックカーボンは、硫酸塩などの他の大気エアロゾルの吸着や混合などのプロセスをほとんど受けていないと考えられる。

積雪サンプルには、ブラックカーボンだけではなく、鉱物粒子やその他の不純物も含まれていた。札幌のサンプルには直径1-2 μmの球状粒子が含まれており、それはC, Cu, Si, Na, Al, Fe, Mg, K, Caなどの元素で構成されていた。このような粒子の形態、粒径、および化学組成は、人為起源エアロゾルの1つであるフライアッシュとよく似た特徴を示していることから、札幌のサンプルに含まれるブラックカーボンも人為起源由来（化石燃料燃焼）である可能性が考えられる。

キーワード：黒色炭素、走査型電子顕微鏡、北極域の積雪

Keywords: Black Carbon, SEM, Arctic Snow

アラスカ積雪中のブラックカーボン及び固体微粒子の濃度と堆積量

Concentrations and depositions of black carbon and insoluble particles in Alaskan snows

*塚川 佳美¹、東 久美子¹、近藤 豊¹、杉浦 幸之助²、大畑 祥³、森 樹大³、茂木 信宏³、小池 真³、平林 幹啓¹、Dallmayr Remi¹、榎本 浩之¹

*Yoshimi Ogawa-Tsukagawa¹, Kumiko Goto-Azuma¹, Yutaka Kondo¹, Konosuke Sugiura², Sho Ohata³, Tatsuhiro Mori³, Moteki Nobuhiro³, Makoto Koike³, Motohiro Hirabayashi¹, Remi Dallmayr¹, Hiroyuki Enomoto¹

1.国立極地研究所、2.富山大学極東地域研究センター、3.東京大学大学院理学系研究科

1.National Institute of Polar Research, 2.Center for Far Eastern Studies, University of Toyama,

3.Graduate School of Science, The University of Tokyo

ブラックカーボン(BC)や鉱物性ダストなどの光吸収性エアロゾルは、雪氷面に沈着することでアルベドを低下させ、積雪の融解を加速させる。これらの過程により正の放射強制力を生じるが、放射強制力の推定には大きな誤差が伴っている(Bond *et al.*, 2013)。このエアロゾルが雪氷面のアルベドに与える影響を評価する上で、雪氷中の光吸収性エアロゾルの濃度や堆積量を正確に把握することが重要である。しかし北極域での雪氷中の光吸収性粒子濃度と堆積量の高精度の観測報告例は、極めて限られている。そこで、我々はGRENE北極気候変動研究事業のもとで北極域における積雪中BCと固体微粒子の濃度・堆積量を明らかにするため、北極広域で積雪を採取した。そのうちアラスカの近年の積雪中BC及び固体微粒子の濃度・堆積量とその空間的分布について報告する。積雪試料の採取は2012年から2015年の2月下旬-3月中旬に、アラスカの広域22地点で行った。本研究では、BCの分析にレーザー誘起白熱法を測定原理とするSingle Particle Soot Photometer (SP2; Droplet Measurement Technologies) を用い、固体微粒子の分析にはCoulter Counter Mutisizer4 (Beckman Coulter Inc.)を用いた。

アラスカのBC濃度は緯度によって地域差があり、BC濃度の緯度分布の違いから、観測領域を南部(61.82-63.27°N)、中部(63.57-65.9°N)、北部(66.56-68.62°N)、Prudhoe Bay(70.19°N)、Barrow(71.32°N)の5つに分けた。このうちフェアバンクスを含む中部地域ではBC濃度が他の地域に比べて高かった。またBCの質量粒径分布はBarrow, Prudhoe Bay, 北部, 南部地域ではほぼ単一モードであるのに対して、中部地域では2つのモードからなっており、BC質量濃度に占める大粒子(>645nm)の割合が大きくなっていた。BC濃度と質量粒径分布の特徴から中部地域のBCは局地的な人為起源の発生源の影響を受けていると考えられた。局所的な影響の小さい地点を選別し、平均BC濃度を求めたところ、観測期間中の平均BC濃度の年々変動は比較的小さく、異なった測定手法を用いた先行研究と比べて低濃度であった。一方、固体微粒子の質量濃度は、BC質量濃度の数百倍であった。固体微粒子の質量濃度はBC濃度と同様に中部で高濃度であり、北部と南部は低濃度であった。BC濃度と水等量から求めた一冬分のBC堆積量は、BC濃度と同様に中部が最も多く、南部では少なかった。固体微粒子の堆積量は、中部と南部で大きな差はなかった。

Bond *et al.* (2013): *J. Geophys. Res., Atmos.*, 118, 5380-5552

キーワード：ブラックカーボン、アラスカ

Keywords: black carbon, Alaska

グリーンランド北西部の氷河雪氷中の窒素の起源と表面微生物への影響

The sources of nitrogen and its effect on microbes on glacial snow and ice in the northwest Greenland

*竹内 望¹、大手 信人²、永塚 尚子³、植竹 淳³、田中 聡太¹、大沼 友貴彦¹

*Nozomu Takeuchi¹, Nobuhito Ohte², Naoko Nagatsuka³, Jun Uetake³, Sota Tanaka¹, Yukihiro Onuma¹

1.千葉大学、2.京都大学、3.国立極地研究所

1.Chiba University, 2.Kyoto University, 3.National Institute of Polar Research

グリーンランド氷床は近年予測を上回る速さで融解しており、その融解量は単に気温の上昇だけでは説明できないことがわかってきた。気温以外の融解の原因の一つとして注目されているのが、氷床表面のアルベドの低下、いわゆる暗色化である。氷床表面のアルベドの低下は日射の吸収を増やすため、氷床の融解が促進されるのである。アルベドの低下は、主に氷床表面の雪氷に含まれる不純物によって引き起こされることがわかっている。特に氷床の辺縁部の裸氷域では暗色化が顕著であり、その原因は微生物が形成する黒色の微生物複合体、クリオコナイトであることが明らかになっている。このような生物学的氷河の暗色化過程を理解するには、微生物の栄養塩の一つである氷河上の窒素の起源と微生物利用を定量的に明らかにする必要がある。そこで本研究では、2012年から2014年にかけてグリーンランド北西部のカナック氷帽から採取した雪氷の無機窒素濃度と溶存硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{13}\text{C}$ 同位体比、不純物の有機物成分の $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{13}\text{C}$ 同位体比を測定し、グリーンランド上の窒素供給源およびその微生物利用について考察した。

カナック氷帽の積雪および氷河氷には $0.9 - 4.1 \text{ ueq l}^{-1}$ の硝酸が含まれていたが、アンモニアや亜硝酸はほとんど含まれていなかった。このことは大気由来の硝酸および氷体内に蓄積されていた過去の硝酸が、氷河の主な窒素供給源であることを示している。硝酸同位体比の分析の結果、そのほとんどは微生物由来ではなく大気由来であること、また積雪中の硝酸は人為起源窒素であるのに対し、氷体内の窒素は自然起源の窒素であることを示していた。また氷河上の微生物を含む有機体窒素の同位体比は、人為起源硝酸の窒素同位体比に一致した。以上の結果から、グリーンランド氷床上の微生物は、大気由来の人為起源窒素を主な栄養塩として利用していることがわかった。このことは、大気由来の窒素供給が氷床上の微生物活動に影響し、暗色化に寄与する可能性を示している。

キーワード：グリーンランド、微生物、窒素

Keywords: Greenland, microbe, nitrogen

グリーンランド北西部における海洋性溢流水河の末端位置と流動速度の季節変化

Seasonal variations in frontal positions and flow speeds of marine terminating outlet glaciers in northwestern Greenland

*榊原 大貴^{1,2}、杉山 慎²

*Daiki Sakakibara^{1,2}, Shin Sugiyama²

1.北海道大学大学院環境科学院、2.北海道大学低温科学研究所

1.Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, 2.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Greenland ice sheet is losing mass due to increase in surface melting and ice discharge from marine terminating outlet glaciers. The mass loss from the Greenland ice sheet accounts for a substantial part of global sea level rise over the last several decades. To accurately include the contribution of marine terminating outlet glaciers in the future projection of global sea level rise, better understanding of mechanisms controlling the glacier dynamics is required. Thus, it is important to study changes of marine terminating outlet glaciers in connection with atmospheric and the ocean conditions. For this purpose, we analysed Landsat images to measure frontal positions and flow speeds of marine terminating outlet glaciers along the coast of the Prudhoe Land, northwestern Greenland between 1987 and 2015. Relationships among frontal position, flow speed, sea ice condition in front of glacier terminus, and air temperature were investigated with special focus on seasonal variations.

All of studied 19 glaciers retreated from the 1980s to 2014. Among those, Heilprin, Tracy, Farquhar, Melville, Bowdoin, and Diebitsch Glaciers retreated by more than 1 km. Most of the studied glaciers began retreat around 2000, as demonstrated by the increase in the mean retreat rate from -1 m a^{-1} in 1980s-1999 to 66 m a^{-1} in 2000-2014. A possible driver of the rapid retreat since 2000 is atmospheric warming because the rapid retreat followed the onset of summer temperature increase in northwestern Greenland. Within 5 km from the studied fronts, ice speed ranged between 14 and 1814 m a^{-1} . Many of the studied glaciers accelerated in the early 2000s. Magnitude of the acceleration was correlated with the retreat rate as demonstrated by rapid retreat and flow acceleration at Heilprin, Tracy, Farquhar, Bowdoin and Diebitsch Glaciers. The acceleration was greater near the front, suggesting the change in the flow regime enhanced stretching of ice along the glacier and induced dynamic thinning. These results indicate that ice thinning due to flow acceleration was the driver of the rapid frontal retreat of the studied glaciers.

In general, studied glaciers advanced from spring to early summer, which was followed by retreat in late summer. Then, the front stayed at the retreated positions throughout the following fall. Magnitude of the seasonal front variations ranged in 50-400 m. The timing of the seasonal retreat agreed with the disappearance of sea ice in front of the glacier terminus. Many of the glaciers indicated speedup from spring to mid-summer and deceleration in late summer. Magnitude of the seasonal variations in ice speed was between 80 and 440 m a^{-1} . Because the speed changes were correlated with air temperature in summer season, the seasonal speedups were probably due to enhanced basal sliding driven by meltwater input to the bed.

キーワード：氷河、グリーンランド

Keywords: Glacier, Greenland