



多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来/
日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解

発達した低気圧による 北極域へのブラック カーボン輸送の解析

山下 陽介¹⁾ 滝川 雅之²⁾
五藤 大輔¹⁾ 八代 尚¹⁾
佐藤 正樹³⁾ 金谷 有剛²⁾
竹谷 文一²⁾ 宮川 拓真²⁾

**Analysis of the black carbon transport to the
Arctic associated with the well-developed low-
pressure systems**

**Yousuke Yamashita, Masayuki Takigawa,
Daisuke Goto, Hisashi Yashiro, Masaki
Sato, Yugo Kanaya, Fumikazu Taketani,
Takuma Miyakawa**

- 1) 国立環境研究所
2) 海洋研究開発機構
3) 東京大学大気海洋研究所

北極域では、遠方の発生源から輸送されてきたブラックカーボンが、気候変動に影響することが懸念されている。本稿では、高解像度のエアロゾル輸送モデルを用いることで、発達した温帯低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の再現実験を行い、極域への輸送量等を解析した結果を紹介する。

1. はじめに

エアロゾルモデル SPRINTARS (Spectral Radiation Transport Model for Aerosol Species; Takemura *et al.* 2000, 2002, 2009; Goto *et al.* 2011) は、大気大循環モデルと結合しており、大気エアロゾルの放出・沈着・生成などを表現し、エアロゾルの輸送や放射への影響、降水による沈着なども計算することが可能である。本稿では、非静力学正20面体格子大気モデル (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: NICAM; Tomita and Satoh 2004; Satoh *et al.* 2008, 2014) に SPRINTARS を結合した NICAM-SPRINTARS (Suzuki *et al.* 2008; Goto *et al.* 2015) を用いた結果を紹介する。

エアロゾルの一種であるブラックカーボン (black carbon: BC) は、太陽光を効率的に吸収して大気加熱に働き、また雪氷・海氷面に沈着すると融解の促進に働く。特に、北極域のような人間活動が活発ではない場所では、遠方の発生源から輸送された BC が影響を及ぼすと考えられるため、極域などで気候変動の影響を評価する際に、輸送シミュレーション性能を向上させることが重要となる。

北極域への輸送経路として重要なベーリング海では、発達した温帯低気圧がしばしば見られ、高濃度の BC が極域に輸送されることがある。ベーリング海は、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海洋地球研究船「みらい」北極圏航海の航路となっており、2016年8月22日から10月6日まで行われた北極圏航海 (MR16-06) では、発達した温帯低気圧が見られた9月末に高濃度の BC が観測された (Taketani *et al.* 2016, 2022)。そこで Yamashita *et al.* (2021) では、「みらい」で収集された BC 観

測データを NICAM-SPRINTARS の輸送性能評価のために利用し、シミュレーション結果から発達した温帯低気圧による北極域への BC 輸送を解析した。

本稿では、Yamashita *et al.* (2021) を元に、2 章で実験設定、3 章で輸送モデルの評価と 2016 年 9 月末の温帯低気圧事例による北極域への輸送解析の結果を、4 章で発達した低気圧事例についての合成図解析の結果を紹介する。5 章では全体のまとめと今後の展望・期待を、おわりにとして記載した。

2. 実験設定

実験に用いた NICAM-SPRINTARS は、鉛直 78 層で上端は約 50 km、格子間隔は大気境界層付近で 100 ~ 200 m 程度、3.5 ~ 18 km で 400 m 程度である。温帯低気圧や前線システムを解像するため、水平解像度約 56 km の高解像度で実験を行い、比較のために約 220 km の低解像度でも実験を行った。高解像度、低解像度ともに同じ積雲対流パラメタリゼーションを用いた。NICAM-SPRINTARS では、BC の他、有機炭素・硫酸塩・海塩・ダストエアロゾルの放出・輸送・乾性沈着・湿性沈着や、エアロゾルの放射・雲・降水との相互作用を扱っている。

2016 年 9 月のシベリア森林火災で放出された BC 輸送を再現するため、NICAM-SPRINTARS に森林火災のエミッション（放出量）を入力できるようにした。この際、衛星観測から推定された放出高度と BC 放出量データを利用して、地表から放出高度まで BC の初期分布を与える。入力する放出高度と BC 放出量データは、Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) の Global Fire Assimilation System (GFAS) の日平均値を用いた。人為起源のエミッションとしては、Emission Database for Global Atmospheric Research Hemispheric Transport of Air Pollution (EDGAR-HTAP) v2.2 (Janssens-Maenhout *et al.* 2015) の 2010 年のインベントリを用いた。海表面温度は、Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) V2 の週

毎のデータを与えた。気象場を合わせるため、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) -Final (FNL) 再解析データの東西風、南北風、気温をナッジングした。

2016 年 9 月末の発達した温帯低気圧イベントをシミュレーションする際には、シベリア域の森林火災起源で放出された BC の長距離輸送の性能を評価するため、NICAM-SPRINTARS でシベリア域 (90 ~ 140°E, 50 ~ 70°N) のみに森林火災のエミッションを与えた感度実験も実施した。なお比較のために、森林火災のエミッションを与えない感度実験も行った。

事例解析の結果が 9 月頃の低気圧に伴う一般的なものか確かめるため、長期間の実験として 2015 ~ 2018 年のナッジング実験を行った。この際には、森林火災、人為起源の BC エミッションともに全球で与えた。

3. 2016 年 9 月末の温帯低気圧イベント

3.1 観測による輸送モデルの評価

2016 年の「みらい」北極圏航海では、太平洋側北極海であるチュクチ海から八戸港へ帰港する 9 月末に BC 濃度が 300 ng m⁻³ 程度まで増加する高濃度イベントが観測されていた (図 1)。NICAM-SPRINTARS では「みらい」航路上で、観測で得られた高濃度イベントを概ね再現していた。シベリアのみで森林火災のエミッションを与えた実験でも似たような結果が得られた。同様の解析を森林火災の BC 放出を止めた実験に対して行くと、濃度が大幅に低下したことから、「みらい」で観測された高濃度イベントはシベリア森林火災起源であることが分かった。

また、アジアの汚染源から放出される人為起源の BC 濃度の再現性を調べるため、汚染源の下流に位置し、長期観測が行われている長崎県の福江島の観測データを利用した。その結果、NICAM-SPRINTARS でも、観測された濃度変化などが概ね再現されていた。

モデルの長距離輸送性能を調べるために、シベリア付近で放出された BC を輸送経路に沿って

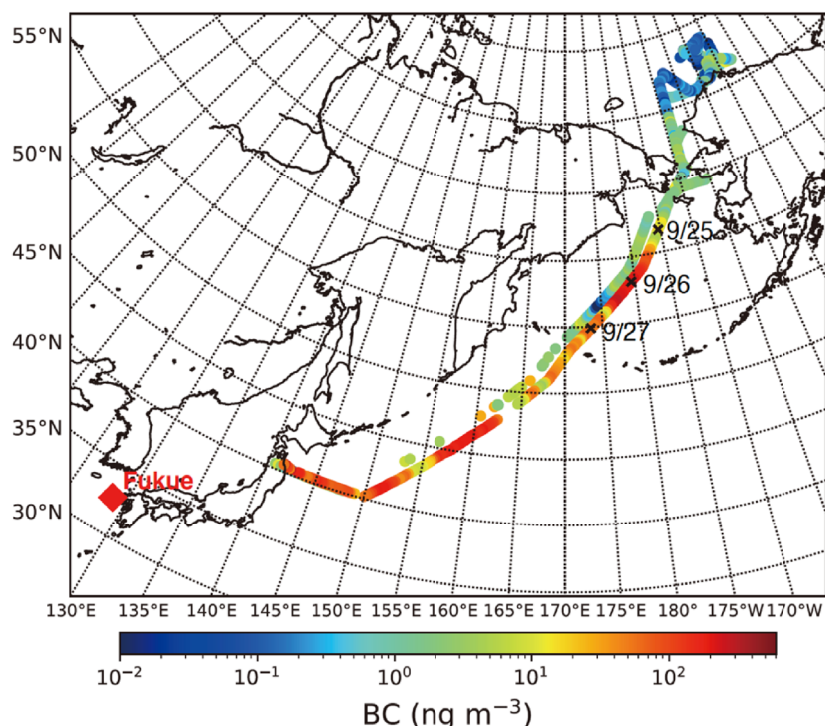


図1 2016年8月22日から10月6日までの「みらい」北極圏航海(MR16-06)の航路と観測されたBC濃度(ng m^{-3}). 9/25~9/27の00UTCにおける位置を×で示した. Yamashita *et al.* (2021) のFig. 2を再掲.

追跡した。経路上の累積降水量が増加するにつれBC鉛直積算濃度は指数関数的に減少しており、シベリア森林火災のBCのほとんどは、ベーリング海への輸送中に湿性沈着されていたと考えられる。経路上のBCが半減するまでの累積降水量は、これまでに福江島の観測で推定された15 mm (Kanaya *et al.* 2016) より小さい6 mm (56 km 実験), 4 mm (220 km 実験)と降水に敏感ではあったものの、降水による沈着量を元に全球的なBCの寿命を推定すると、これまで報告されていた1週間程度の値(IPCC, 2013)と一致する結果となり、長距離輸送の評価に利用できる(許容範囲にある)モデルと考えられる。

3.2 北極域への輸送解析

2016年9月末に「みらい」航路上で高濃度のBCが観測された際には、56 kmの高解像度で実験した結果では、9月26日12UTCにおいてカムチャ

ツカ半島の北側(158°E, 57°N)付近に中心を持つ低気圧とそこから伸びている寒冷前線の後面、温暖前線の前面にフィラメント状の高濃度BC域が偏在している(図2)。さらに温暖前線付近からベーリング海付近に中心を持つ低気圧まで、天気図上では前線とされていない潜在的な前線に沿って高濃度のBC域が伸びている。一方の220 kmの低解像度実験では、高濃度BC域が広範囲に広がっており、前線付近に偏在する構造が再現できていないことがわかる。

9月26日12UTCにカムチャツカ半島の北側にあった低気圧は、9月28日00UTCには160°E, 72°N付近に移動していた(図3a)。図3(a)の陰影は、56 kmの高解像度実験のBC濃度を地表面、850 hPa(1500 m付近)、700 hPa(3000 m付近)、500 hPa(5500 m付近)、400 hPa(7000 m付近)で切り出したものである。地表から400 hPaの高度

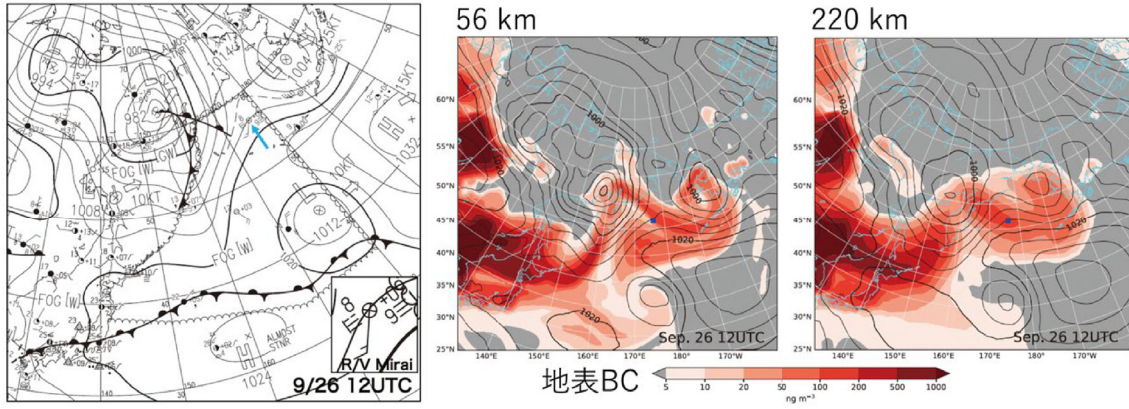


図2 2016年9月26日12UTCにおける(左) 気象庁の地上天気図と(右) NICAM-SPRINTARS による高解像度(約56 km)と低解像度(約220 km)で計算した地表BC濃度(陰影, ng m^{-3})と海面気圧(細線: 4 hPa, 太線: 20 hPa). 青矢印と青四角は「みらい」の位置を表す. Yamashita *et al.* (2021) のFig. 1, Fig. 7を再掲(改).

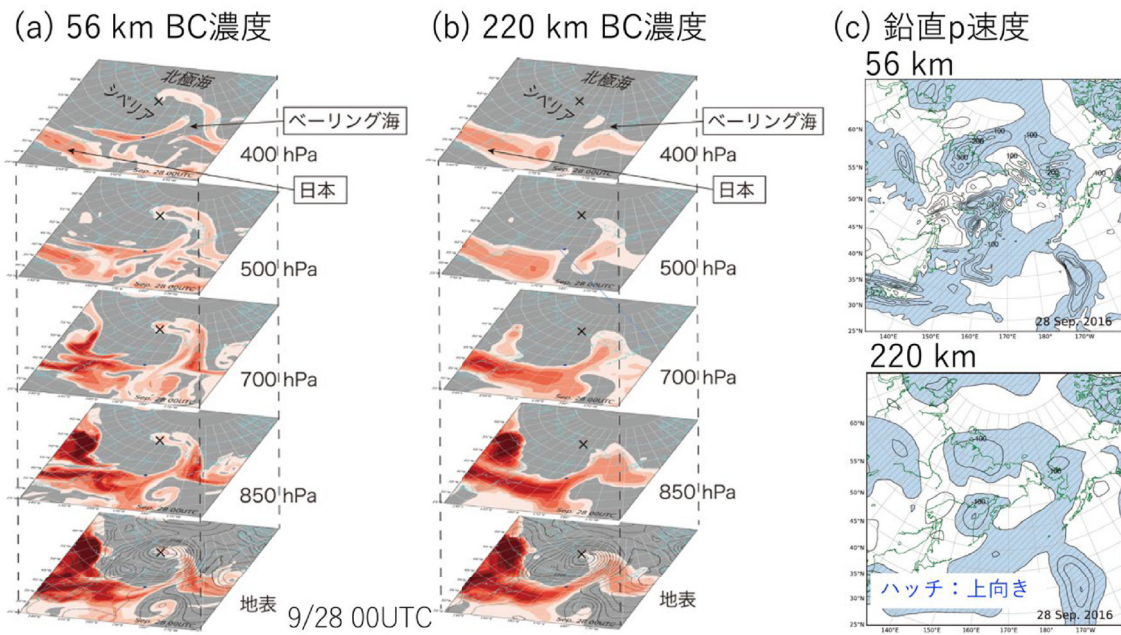


図3 NICAM-SPRINTARS による(a) 高解像度(約56 km), (b) 低解像度(約220 km)で計算したBC濃度(陰影). 最下段の等値線は海面気圧, ×印は低気圧中心の位置を表す. (c) 700 hPaにおける鉛直p速度 (hPa d^{-1}). 上向き領域にハッチを掛けた. Yamashita *et al.* (2021) のFig. 8, Fig. 9, Fig. 10を再掲(改).

まで、低気圧から伸びる前線に沿って、低気圧の東側にあたるベーリング海付近から北極域まで高濃度 BC 域が伸びており、低気圧と前線に沿って上空まで到達し北極域に流入していることが示唆される。一方、220 km の低解像度実験では、特に400~500 hPa 高度で極域への流入が不明瞭となっている(図 3b)。低気圧周辺の上昇流の指標となる700 hPa の鉛直 p 速度では、北極域からベーリング海付近で上昇流となっており(図 3c)、低気圧から伸びる前線に沿って上空まで BC 濃度が高い場所と一致する。上昇流の大きさを56 km と220 km の実験結果で比較すると、56 km の解像度では -300 hPa d^{-1} の極値であるのに対し、220 km の解像度では -100 hPa d^{-1} と絶対値が小さい。このように高解像度実験では、低気圧や前線に伴う上昇流の、特に水平スケールが小さい極値が解像できるようになるため、低気圧による BC の上方への輸送と極域への輸送が表現できるようになったと考えられる。

4. 発達した低気圧事例の合成図解析

4.1 手法

事例解析で調べた極域への輸送プロセスが9月頃の低気圧に伴う一般的なものか確かめるため、長期間のナッジング実験の結果から、2015~2018年の9月における発達した低気圧事例について合成図解析を行った。対象とした低気圧は、水平スケールが約2000 km 以上と大きく中心気圧が低いものうち、東アジア・シベリア域から北極域に抜ける領域に存在するものである。代表的な低気圧中心を探すため、(1) 120~180°E, 50~75°N の範囲で日平均した海面気圧が周囲の8点より低い、(2) 東西・南北方向ともに、中心から見て10°以内の勾配は10°における勾配よりも緩い、(3) 周囲20°以内で最も中心気圧が低いものうち1000 hPa 以下、のものを取り出した。なお、領域の端での誤検出を防ぐため、110~190°E, 45~80°N の範囲で探索した。2015~2018年の9月で101個の事例が見つかった。検出される低気圧が解像度で変わらないように、56 km の高解像度実

験の検出結果を220 km の低解像度実験の解析にも利用した。

4.2 結果

低気圧毎に位置が異なるため、検出された低気圧の中心を経度0°, 緯度0°に取り、地表における経度-緯度面の合成図としたものを図4(a)に示す。低気圧中心付近の緯度では、中心の西側よりも東側でBC濃度が2倍程度高くなっている。高濃度の領域は中心の東側から南側に伸びており、低気圧に伴う南から北への移流により中心の東側で濃度が高くなっていることが示唆される。地表付近では56 km と220 km の解像度間の違いは不明瞭だが、400 hPa の高度では、低気圧の東側で56 km の解像度の方がより北極側まで高濃度域が入る(図4b)。また濃度を比較すると、低気圧の東側10°付近では56 km で 5 ng m^{-3} を超える程度に対し、220 km では 3 ng m^{-3} を超える程度と違いが見られた。さらに低気圧中心の5°より北では、56 km の解像度で220 km より濃度が高くなっており、高解像度になると上空で北極側に効率的にBCが輸送されているように見える。

図4(c)は、低気圧中心の緯度で経度-高度面の合成図を作成したもので、700 hPa よりも上空では低気圧の東側で56 km と220 km の解像度間の違いが現れてくる。図4(d)は700 hPa の鉛直 p 速度の経度-緯度面図を示したもので、高濃度 BC 域が見られる低気圧の東側~北側で上昇流となっている。上昇流の極値は、56 km では220 km の3倍程度に達する。図3(c)のように、個々の事例で上昇流最大となる領域は水平スケールが小さく、図4(d)はこうした特徴を平均したものと考えられるので、発達した低気圧と前線システムに伴う上昇流を再現できる高解像度実験では、上方へのBC輸送の増大も再現可能となったことが分かる。

最後に、極域へのBC輸送量を調べた。アリューシャン付近(150°E~160°W)で平均した60°NをまたぐBC輸送量を解析した結果、発達した低気圧事例で9月平均の約2倍となっており、56 km の解像度で220 km より輸送量が大きく700~400 hPa では倍程度まで違っていた(表1)。この

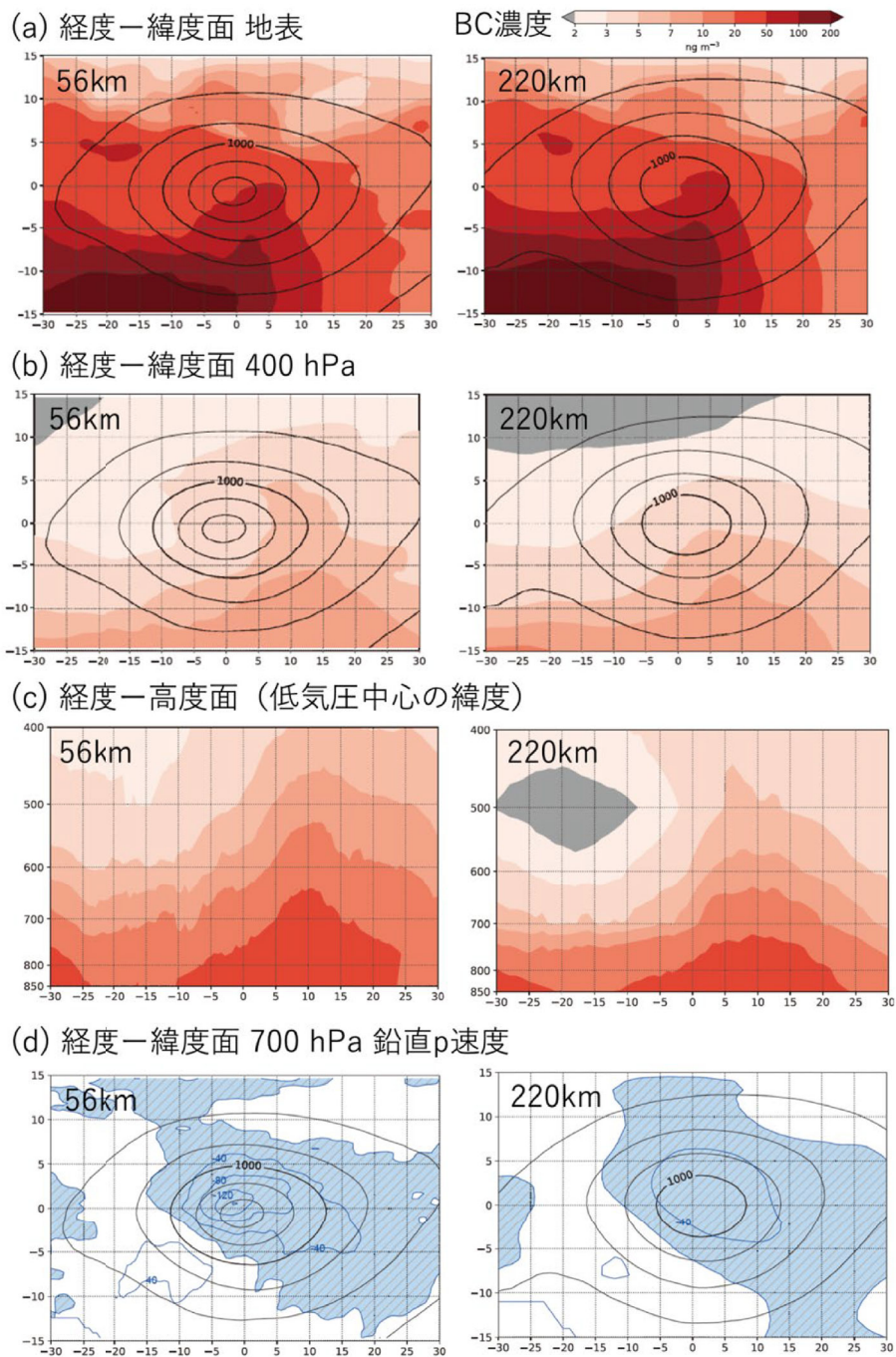


図4 NICAM-SPRINTARSによる(a)地表、(b)400 hPaにおけるBC濃度(陰影)の経度-緯度面の合成図。左は高解像度(約56 km)、右は低解像度(約220 km)。(c)経度-高度面の合成図。(d)700 hPaにおける鉛直p速度の経度-緯度面の合成図。Yamashita *et al.* (2021)のFig. 11, Fig. 12, Fig. 13を再掲(改)。

表 1 150°E~160°Wで平均した 60°NをまたぐBC輸送量 (kg m⁻² s⁻¹). Yamashita *et al.* (2021) のTable 4 を再掲.

Pressure (hPa)	850	775	700	600	500	400
Ant+Fire_56						
Composite of developed low events	27.1	23.1	20.6	17.0	13.6	9.4
September mean	16.0	12.3	10.0	7.5	6.4	4.0
Ant+Fire_220						
Composite of developed low events	23.6	16.6	10.6	7.3	5.3	5.4
September mean	15.2	10.3	6.1	4.2	3.2	2.7

ため、9月頃の低気圧に伴う一般的な特徴として、極域へのBC輸送量の増大があり、高解像度ほど上方まで輸送されるため極域へのBC輸送量も大きくなることが示唆される。

5. おわりに

本研究では、北極域へのBC輸送性能を向上させ気候予測をより正確にするため、NICAM-SPRINTARSを用いて温帯低気圧事例による北極域へのBC輸送を解析した。北極域への輸送経路として重要なベーリング海では、2016年9月末の発達した温帯低気圧の中心付近と周辺の別の低気圧まで続く数千kmの前線システム付近にフィラメント状の高濃度BC域が偏在しており、低気圧の移動に伴って低気圧の東側にあたるベーリング海付近から北極域へ移動していた。さらに、101個の発達した低気圧事例について合成図解析を行うと、低気圧や前線システムに伴う南北移流や上昇流が見られる低気圧中心の東側で西側よりもBCが高濃度となっていた。また220kmの低解像度では、こうした上昇流を十分に再現できないため、56kmの高解像度の方がより北極側、より高高度までBC濃度が高く、北極域へ効率的にBCが輸送されることが分かった。

本研究により、これまで指摘されていた温帯低気圧周辺の沈着プロセスを解像する他に、低気圧に伴う上昇流を解像することが北極域へのBC輸送性能の向上にとって重要であることが明らかになった。より高解像度の全球エアロゾル輸送モデルを用いていくのが望ましいと考えられる (Sato *et al.* 2016 ; Goto *et al.* 2020)。

本研究を行うにあたり、2016年の「みらい」北

極圏航海時のBC観測データを輸送モデルの性能評価に利用した。こうした船舶による観測は、北極域や海洋上など人間活動が活発ではない場所における物質輸送の理解に不可欠で、今後の船舶観測の充実、および、衛星観測や輸送モデル実験等と組み合わせた研究の進展に期待したい。

謝辞：本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(JPMXP1020351142)、および、ポスト「京」重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」の一環として実施された。また、JSPS 科研費JP20K12155の助成を受けた。NICAMの計算は、スーパーコンピュータ「京」の計算資源の提供を受け実施された (hp160231, hp170232, hp180181, hp190151)。本研究で用いた実験データは、<https://doi.org/10.34474/data.jmsj.13384538.v1> よりダウンロード可能である。本研究で用いたJRA-55客観解析データは気象庁で提供されているもので、<http://jra.kishou.go.jp/> よりダウンロード可能である。作図にはpythonのmatplotlibを用いた。

参考文献

- [1] Goto, D., T. Nakajima, T. Takemura, and K. Sudo, 2011: A study of uncertainties in the sulfate distribution and its radiative forcing associated with sulfur chemistry in a global aerosol model. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 10889-10910, <https://doi.org/10.5194/acp-11-10889-2011>.
- [2] Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima, 2015: Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations

- around Japan. *Geosci. Model Dev.*, 8, 235-259, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-235-2015>.
- [3] Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, E. Oikawa, R. Kudo, T. M. Nagao, and T. Nakajima, 2020: Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geosci. Model Dev.*, 13, 3731-3768, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3731-2020>.
- [4] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1535 pp.
- [5] Janssens-Maenhout, G., M. Crippa, D. Guizzardi, F. Dentener, M. Muntean, G. Pouliot, T. Keating, Q. Zhang, J. Kurokawa, R. Wankmüller, H. Denier van der Gon, J. J. P. Kuenen, Z. Klimont, G. Frost, S. Darras, B. Koffi, and M. Li, 2015: HTAP_v2.2: A mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411-11432, <https://doi.org/10.5194/acp-15-11411-2015>.
- [6] Kanaya, Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, and Y. Kondo, 2016: Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009–2015: Constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10689-10705, <https://doi.org/10.5194/acp-16-10689-2016>.
- [6] Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, 2016: Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, 6, 26561, <https://doi.org/10.1038/srep26561>.
- [7] Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, 227, 3486-3514, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.006>.
- [8] Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, and H. Kubokawa, 2014: The nonhydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18, <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>.
- [9] Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817, <https://doi.org/10.1029/2008GL035449>.
- [10] Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, 105, 17853-17873, <https://doi.org/10.1029/2000JD900265>.
- [11] Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, 15, 333-352, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2).
- [12] Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. O'Ishi, and A. Abe-Ouchi, 2009: A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3061-3073, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3061-2009>.
- [13] Taketani, F., T. Miyakawa, H. Takashima, Y. Komazaki, X. Pan, Y. Kanaya, and J. Inoue, 2016: Shipborne observations of atmospheric black carbon aerosol particles over the Arctic Ocean, Bering Sea, and North Pacific Ocean during September 2014. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 121, 1914-1921, <https://doi.org/10.1002/2015JD023648>.
- [14] Taketani F., T. Miyakawa, M. Takigawa, M. Yamaguchi, Y. Komazaki, P. Mordovskoi, H. Takashima, C. Zhu, S. Nishino, Y. Tohjima, and Y. Kanaya, 2022: Characteristics of atmospheric black carbon and other aerosol particles over the Arctic Ocean in early autumn 2016: Influence from biomass burning as assessed with observed microphysical properties and model simulations. *Sci Total Environ.*, 848, 157671, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157671>.
- [15] Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357-400.
- [16] Yamashita, Y., M. Takigawa, D. Goto, H. Yashiro, M. Satoh, Y. Kanaya, F. Taketani, T. Miyakawa (2021): Effect of model resolution on black carbon transport from Siberia to the Arctic associated with the well-developed low-pressure systems in September, *J. Meteor. Soc. Japan*, 99(2), 287-308, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-014>.

