

光吸収性エアロゾルの監視と大気・雪氷系の放射収支への影響評価 —地球規模で進行する雪氷圏融解メカニズムの解明に向けて—

国土交通省 気象庁 気象研究所

気象予報研究部 第4研究室 大河原望・谷川朋範・庭野匡思

気象観測研究部 第1研究室 石元裕史

気候・環境研究部 第2研究室 保坂征宏

全球大気海洋研究部 第3研究室 足立光司・大島長・梶野瑞王

(研究委託先)

北海道大学 低温科学研究所 的場澄人

平成29—令和3年度合計予算額 141,606千円

(うち、令和3年度当初予算額 29,198千円)

【要旨】本研究では、日射を吸収する性質を持つ光吸収性エアロゾル(Light Absorbing Aerosols; 以下 LAA)が、大気中や地表面で諸過程を引き起こし、同時に諸過程と関わりながら、大気・雪氷系の放射収支、そして気候系に与える影響について、地上観測や衛星リモートセンシングで監視しつつ、数値モデルにより評価を行った。

現地地上観測による監視として、国内では札幌、北見、長岡において、気象・放射・積雪の地上観測を行うとともに、冬期に定期的な積雪断面観測により積雪粒径や不純物濃度を含む積雪の監視を行い、詳細な観測データを得た。札幌における気象・放射・雪氷観測データは、国際積雪モデル相互比較プロジェクト(ESM-SnowMIP)の一層の推進に貢献した。

国外では北西グリーンランドのSIGMA-Aサイトと SIGMA-Bサイトにおける自動気象観測装置による観測を継続した。札幌における気象・放射・雪氷観測データと、過去にグリーンランド氷床において取得した雪氷観測データの一部を研究コミュニティに公開した。

海氷については、国内のサロマ湖において海氷の狭帯域(分光)アルベド、広帯域アルベド、透過率測定を実施し、海氷アルベド物理モデルの開発・検証に必要なデータを習得した。海氷上の分光観測を行うとともに分光観測データの解析を行い、海氷上の精密な放射スキームを改良するための基礎データを得た。これら観測データを活用して、大気—積雪—海氷系の波長別放射伝達モデルにおける海氷藻類(アイスアルジー)の光学特性の精緻化を行い、高度化を達成した。また、電子顕微鏡によるエアロゾル粒子の分析により、大気中のLAA粒子を含むエアロゾル粒子の組成、混合状態、発生、除去、雪氷・氷晶への影響などに関して成果が得られた。

衛星リモートセンシングによる監視では、新たに積雪と海氷の波長別反射率および偏光測定データから、衛星観測に必要な積雪と海氷の反射・偏光特性を明らかにした。また、本研究課題で開発されたボロノイ構造を有する光散乱粒子形状モデルを、積雪粒子の反射特性に整合するよう、粒子の大きさによって形状が変化するボロノイ混合モデルの開発に成功した。このボロノイ混合モデルを積雪粒径、積雪不純物濃度の衛星観測に応用し、2000年以降の北

半球の長期間データセットを作成した。

数値モデルによる影響評価では、気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)を用いて、全球規模および北極域において、産業革命前を基準とした現在における人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力を推定した。北極域では、LAAである黒色炭素(Black Carbon; 以下BC)は二酸化炭素に次いで二番目に大きい正の有効放射強制力を持つことが明らかになった。MRI-ESM2.0によるモデル計算結果は国際的な研究の枠組みで使用され、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書(AR6)に対して直接的に貢献した他、北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)の短寿命気候強制力因子に関する評価報告書の執筆を通じて国際的な北極気候研究の進展・発展に大きく貢献した。

また、本課題において開発を継続している極域気候モデル(NHM-SMAP)も、グリーンランド氷床表面質量収支計算モデル相互比較プロジェクト(GrSMBMIP)に参画しており、IPCC AR6に対して直接的に貢献した。

さらに、非静力領域化学気象モデル(NHM-Chem)および積雪変質モデル(Snow Metamorphism and Albedo Process; 以下SMAP)を結合した領域気象化学-積雪モデル(NHM-Chem-SMAP)の開発を進め、NHM-Chem-SMAPへのBCとダストの湿性沈着モジュールの実装により札幌における積雪中のBCとダスト濃度の再現に成功した。

[キーワード] 光吸収性エアロゾル、積雪不純物、積雪粒径、気象・放射・積雪観測、衛星リモートセンシング、数値モデル

1. はじめに

雪氷圏は気候変動に対して最も脆弱な地域の一つである。近年の地球温暖化が進行する状況では、北極域において全球平均の約2倍の地上気温の上昇が見られる^[1]。また、北半球の春季積雪面積の減少、北極海の海水面積の減少、氷床の融解^[2]のような、急激な雪氷の融解が進んでいる。雪氷圏では地表面上の雪氷は概して太陽放射のアルベドが大きいいため、太陽エネルギーの多くを反射し、あまり吸収しない。しかし、ひとたび融解して雪氷の面積が減少すれば、地表面での太陽放射吸収量が増大し、気温が上昇して雪氷の融解・昇温が増大する強い正のフィードバックがあり(アイスアルベドフィードバック)、このことが気候変動に対する脆弱性をもたらしている。

アルベド低下の原因は、雪氷面積の減少だけではない。黒色炭素(Black Carbon; 以下BC)や鉱物ダストといった光吸収性エアロゾル(Light Absorbing Aerosols; 以下LAA)等が雪氷面に落下した積雪不純物はその一つであり、これは雪面の可視域のアルベドを低下させ、温暖化を加速する。また、積雪粒径の増大も原因の一つである。積雪の温度が高いほど、積雪の変質により積雪粒径が増大しやすくなり、雪面の近赤外域のアルベドが低下して、積雪の温度をさらに高くする。

しかし、その地球温暖化への寄与や影響の定量的な理解は十分ではない。また、大気中のLAAは日射を吸収し大気を加熱することでも温暖化を増幅するが、その動態は十分に把握されておらず、そのモデル化も十分ではない。そうした背景のもと、地表面雪氷における積雪不純物や積雪粒径、アルベドの雪氷圏変動の実態を長期的に監視しつつ、上記の物理過程を

組み込んだ高精度のモデルを用いて影響評価を行う必要がある。

気象研究所ではこれまでも、LAAの主要な発生源である東アジアと、最も影響を受けやすい雪氷圏に注目して、現地観測や衛星リモートセンシングによるモニタリングを行ってきた。また、気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0) や領域化学気象モデル (NHM-Chem)、積雪変質モデル (SMAP; Snow Metamorphism and Albedo Process) の開発を行い、研究に活用してきた。この研究課題ではさらにそれを推し進め、より高精度の観測・監視を行い、より密に結合し改良した数値モデルを用いて影響評価を行う。

2. 研究目的

本課題では、雪氷面の積雪不純物濃度・積雪粒径、それによって引き起こされる雪氷面アルベド変動、そして大気中のLAAを、現地観測と衛星リモートセンシングにより監視する。さらに、各種の数値モデルを用いて、LAA由来の諸過程の地球温暖化への影響評価を行う。

(1) 地上観測による監視

現地地上観測による監視では、国内・北極域で実施してきた気象・放射・積雪観測を継続してより長期のデータセットを作るとともに、観測地点数の増加や、新たな観測用測器・分析装置の導入によりデータセットの質を向上させる。

その一環として、大気中のLAAおよび積雪不純物の形状・組成等を顕微鏡で分析し、衛星リモートセンシングのアルゴリズム改良に活用する。また、海氷の放射特性を明らかにするために海氷観測とそのモデル化を行う。なおこのサブテーマで作成した各種基礎情報・データセットは、サブテーマ(2)および(3)の検証・改良に用いる。

(2) 衛星リモートセンシングによる監視

衛星リモートセンシング技術により、積雪不純物の濃度および積雪粒径、積雪融解等について時空間的に広がりを持った監視を行う。物理量推定のための放射アルゴリズムで用いられる積雪・積雪不純物粒子の形状を改良してその精度を向上させる。地球観測衛星Terra/Aquaに搭載の中分解能撮像分光放射計(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; 以下MODIS)データのある2000年以降の長期間についてグリーンランド、日本・東アジア域を含む、北半球全体に拡張されたデータセットを作成する。さらに、静止気象衛星ひまわり8号(以下ひまわり8号)、気候変動観測衛星「しきさい」(Global Change Observation Mission- Climate 1; 以下GCOM-C)等のデータを活用したアルゴリズム開発を行い、時間・空間解像度の高いプロダクトを作成して東アジア域を監視する。

(3) 数値モデルによる影響評価

SMAP を中に含む気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM2.0) に加え、非静力学領域気象化学モデルに SMAP を結合した領域気象化学-積雪モデル(NHM-Chem-SMAP) を開発し、観測データで検証しつつ改良する。それらのモデルにより、LAA 等のエアロゾル動態や、その雪氷面への沈着について調査し、積雪不純物濃度、積雪粒径が大気・雪氷系の放射収支や気候系に与える影響を定量的に評価し、これらの広域監視に活用する。

3. 研究方法

研究目的を達成するために、LAA や積雪不純物等を対象に、3つのサブテーマに分けて研

究を進める。地上観測による監視により、基盤となる詳細なデータを得つつ、詳細モデルを開発・検証する。衛星リモートセンシングアルゴリズムを改良し、より高精度な、時間空間的に広域な監視をする。必要な過程の組み込まれた数値モデルを用いて、観測データにより検証しながら高度化を進めつつ、大気・雪氷系の放射収支などへの影響を評価する。

(1) 地上観測による監視

本研究課題実施期間を通して、国内の積雪地域(札幌・長岡・北見)において現地観測を実施し、地上気象・放射・LAA・積雪不純物・積雪粒径等に関する観測データを取得する。札幌、北見、および長岡には自動気象観測装置 (Automatic Weather Station; 以下AWS)が設置されており、AWSによる気象・放射・積雪観測を行うほか、定期的に積雪断面観測を実施する。断面観測では積雪サンプルも採取し、LAAの成分・濃度を測定する。なおこの3地点は厳冬期にそれぞれ、乾雪であるしまり雪、断熱性の高い霜ざらめ雪、濡れ雪であるざらめ雪が卓越するという異なる特徴をもち、多様な積雪の観測が可能となる。

これらの国内の観測サイトの中では、札幌の北海道大学低温科学研究所露場において最も詳細な観測を行う。札幌のAWSにおける観測項目は、気温・湿度、風向・風速、気圧、降水量、地温、土壌伝導熱、上向き・下向きの短波・近赤外・長波放射量、乱流熱フラックス等である。さらに、冬季間には週2回、積雪断面観測を実施する。観測項目は、積雪深、雪温、積雪層構造、積雪密度、積雪粒径、および全層密度である。長岡と北見のAWSにおいても、気温・湿度、風向・風速、気圧、降水量、上向き・下向きの短波・長波放射量が観測されている。

積雪中LAA濃度を分析するために、札幌・長岡(防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター)・北見(北見工業大学)において積雪試料を表層0-2cm、および2-10cmの2層で採取する。採取した積雪試料は気象研究所に送り、重量測定とカーボン分析を行うことで積雪内部LAA濃度を定量する。

気象研究所ではグリーンランド北西部カナック周辺に、SIGMA-A(氷床上)・SIGMA-B(カナック氷帽上)という2基のAWSを設置し、気象・放射の連続観測を実施している。これらは、世界気象機関 (World Meteorological Organization; WMO) の全球雪氷圏監視計画(Global Cryosphere Watch; GCW) が主導して構築した地上気象・雪氷長期モニタリングステーションネットワーク(CryoNet)に登録されており、その観測は世界的に見ても重要なサイトである。本研究実施期間では、2017年6月には、SIGMA-AとSIGMA-B両サイトに行き、AWSの保守並びに機動観測を実施する。更に、2018年4月にはSIGMA-Aサイトに犬橈で行き、機動観測を実施する。また、2018年7月には、グリーンランド氷床内陸の国際共同観測拠点(Ease Greenland Ice-core Project; 以下EGRIP)サイトにて、気象・放射・雪氷観測を実施し、北極域の雪氷圏変動の理解に資する現地観測データを取得する。

ニーオルスン(ノルウェー)にて全天分光日射計(ground-based spectral radiometer system for albedo and flux; 以下GSAF)による分光放射観測を連続的に実施し、積雪アルベドをコントロールする積雪粒径とLAA濃度の実態把握、および積雪アルベドへの影響評価を実施した。

典型的な季節海水域である北海道サロマ湖をテストサイトとして、海水放射観測、海水物理観測、海水上積雪断面観測から海水面アルベドの実態把握を行い、観測に基づく海水アルベド物理モデルの開発および高度化をめざす。

LAA粒子の物理化学特性や雲凝結核能を理解するため、以下の観測測器を用いる。

- ・ LAA粒子の個別粒子単位での組成、形態、混合状態等を観測するために、透過型電子顕微鏡(JEM-1400、JEOL)およびクールステージ付きの走査型電子顕微鏡(SU-3500、HITACHI)を用いた解析を行う。
- ・ 個別エアロゾル粒子の氷晶核能(氷雲および降雪をもたらす氷雲粒の生成能力)の実験に小型環境チャンバー(Rh10002L; Japan High Tech Co., Ltd.)を用いる。
- ・ つくばで採取したエアロゾルの水溶性化学組成分析にイオンクロマトを用いる。
- ・ 北極のニーオルスンでのLAA粒子(BC)連続分析に、BC測定器COSMOSを用いる。
- ・ 積雪中のLAA粒子を検出するために、乾燥空気を使った昇華装置を用いる。

分析に供した試料は、北極(ニーオルスン)、グリーンランド(ノード基地)、南極(昭和基地)、つくば(気象研究所)、航空機観測(グリーンランド、東アジア、アメリカなど)で得られた電子顕微鏡グリッドに捕集されたエアロゾル粒子を用いる。

(2) 衛星リモートセンシングによる監視

積雪中のLAA濃度と積雪粒径についてはこれまで、MODISデータを用いてグリーンランドを試験領域としてそれら进行评估する技術を開発してきた。本課題では、その光散乱モデルの積雪粒子をポロノイ構造(ある形状の中に含まれる多面体セルを抜き出すことで作成した粒子形状)を利用した不規則形状に改良することにより精度を向上させる。また並行してポロノイ形状粒子が積雪粒子の光散乱特性を議論する粒子モデルとして妥当であるかの検証を行う。そのためにX線マイクロCTデータにより得られた積雪の3次元構造から実際の積雪粒子を分離・抽出し、その粒子形状に対して幾何光学近似法による光散乱計算を実施する。積雪反射特性の衛星解析に最適化されたポロノイ形状粒子モデルがマイクロCTから抽出した実際の積雪粒子の光散乱特性と整合するかどうかを調べる。また札幌(北海道大学低温科学研究所)および芽室(北海道農業研究センター)に設置したGSAFデータを用いて、ポロノイ粒子モデルの形状、LAAの混合状態について検討する。

その他、積雪のマイクロCTデータを利用して、リモートセンシングに適用する霰や雪片などの降雪粒子のより現実に近い3次元形状モデルの開発や、大気中のLAA粒子モデルとして、水溶性物質と内部混合したスス粒子の形状モデル開発に取り組む。

衛星リモートセンシングによる積雪分布、積雪物理量の時空間変動を明らかにするため、北半球全体を対象としたデータセットを作成する。日本・東アジア域はひまわり8号を用い、陸上積雪、海氷分布、大気エアロゾルの光学的厚さを観測する手法(アルゴリズム)の開発・改良を行い、その監視を行う。ひまわり8号は短時間の変化を詳細に捉えるための高頻度観測を行っており、そのため、陸上積雪、海氷プロダクトはコンポジット処理による日別のデータセットの他に、10分インターバルによるデータセットを作成する。

この他、2000年以降の北半球の長期間データセットをMODISデータを用いて作成する。積雪分布のほかに積雪物理量(表層積雪粒径、浅層積雪粒径(積雪深10cm程度)、積雪不純物濃度(BC相当))を監視する。予め放射伝達モデルを用いて衛星から観測される積雪の双方向反射率(Bidirectional Reflectance Distribution Function; 以下BRDF)のルックアップテーブルを作成し、衛星データから得られたBRDFともっとも近いBRDFを検索して積雪物理量を推定

する。放射伝達計算で必要な積雪粒子モデルは、本研究課題で開発したボロノイ粒子を用い(Ishimoto et al., 2018²⁸)、積雪粒子の反射特性に整合するよう、粒子の大きさによって形状が変化するボロノイ混合モデルを適用した。また、積雪不純物はBCを仮定し、積雪粒子と内部混合した有効媒質近似法を適用する(Tanikawa et al., 2020⁸⁰)。

(3) 数値モデルによる影響評価

気象研究所地球システムモデルの開発

従来の気候モデル(MRI-CGCM3)(Yukimoto et al., 2012^[3])に数多くの改良を実施することで、第6期結合モデル相互比較計画(CMIP6)(Eyring et al., 2016^[4])に向けた新しいバージョンの気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)を開発した(Yukimoto et al., 2019⁹⁸); Kawai et al., 2019³⁷); Oshima et al., 2020⁶⁵)。MRI-ESM2.0は、大気大循環モデル(MRI-AGCM3.5)、海洋大循環モデル(MRI.COM4)、エアロゾルモデル(MASINGAR mk-2r4)、大気化学モデル(MRI-CCM2.1)から構成され、各コンポーネントモデルはカップラー (Simple Coupler; Scup)で結合される。このモデル開発におけるLAAに関する大きな改良としては、(1)BCが疎水性から親水性へと変換される変質過程(aging)において、物理化学法則に基づき変換速度を表現するパラメタリゼーション(Oshima and Koike, 2013^[5])の導入(従来は一定値の変換速度)、(2)積雲対流パラメタリゼーション(Yoshimura et al., 2015^[6])において、エアロゾルが降水除去を経ながら鉛直輸送されるように、エアロゾルの鉛直輸送と除去過程の整合的な扱い(従来は鉛直輸送と除去を独立に扱う)、(3)エアロゾルの放射過程において、親水性BCと硫酸塩エアロゾルとの内部混合を仮定し、被覆による光吸収の増大効果(レンズ効果)(Oshima et al., 2009^[7])の導入(従来はレンズ効果なし)などがあげられる。

MRI-ESM2.0による近年数年間の計算を実施し、観測データとの比較により、モデルの検証を実施した。またMRI-ESM2.0を用いて、CMIP6を構成する、放射強制力モデル相互比較計画(RFMIP)(Pincus et al., 2016^[8])、エアロゾルおよび大気化学に関するモデル相互比較計画(AerChemMIP)(Collins et al., 2017^[9])、気候変動の検出と要因分析に関するモデル相互比較計画(DAMIP)(Gillett et al., 2016^[10])などに参加し、計画されている数多くのモデル計算を実施した。これらの計算結果をCMIP6で定められているデータ形式に変換し、データ公開用サーバ(DIAS)に提出した。これらのモデル計算の中には、エアロゾルによる放射強制力を推定する計算、産業革命以前から現在までの歴史実験計算、将来予測計算などが含まれている。さらに、MRI-ESM2.0を用いて、北極評議会・北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)での短寿命気候強制因子(Short-lived Climate Forcers ; 以下SLCFs)の影響評価を行うためのモデル計算も実施した。

領域気候モデルによる影響評価

世界の雪氷圏で引き起こされている急速な変化を支配するメカニズムを解明するために、領域気象モデルと積雪変質モデルを結合した NHM-SMAP を用いて、グリーンランドの表面質量収支を計算し、観測と比較する。

また、領域気象化学モデルNHM-Chemと積雪変質モデルSMAPを結合させて、大気から積雪に沈着するLAAの影響評価を行う。

4. 結果・考察

(1) 地上観測による監視

(1-1) 気象・放射・積雪観測

札幌の北海道大学低温科学研究所露場における10冬期間に露場で取得された気象・雪氷観測データ積雪不純物(BC、ダスト)が雪面アルbedo・放射強制量的影響を、積雪アルbedo物理モデルによる数値計た(広沢ほか、2018¹)。結果、BCとダストが存在する雪面アルbedo低下量は0.053、放射強制力は+6.8 W m⁻²。内訳は、BC分が+5.5 W m⁻²、ダスト分が1.3 W m⁻²。札幌ではダストに比べてBCの方がより大きな融雪効果が分かった。

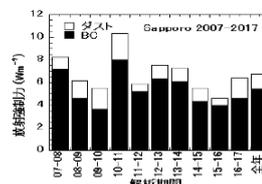


図 1. 2007-2017 冬期の札幌における BC とダストに起因する放射強制力

2007 - 2017 年々を用いて、力に与える定算を行い調べることに起因 W m⁻²であった。ダスト分が 1.3 W m⁻²であり(図1)、効果を持つこ

2018年4月には犬橇を活用して北西グリーンランド氷床における雪氷広域機動観測”SIGMA - Traverse 2018”を実施した。シオラパルクからSIGMA-Aサイトにかけての約95 kmの行程を犬橇で13日かけて往復し、道中で詳細な雪氷物理観測を実施した(庭野ほか、2018¹¹³) ; Niwano et al.,2020⁵⁶)。各観測点での表面 10cm 密度はそれぞれ、281、288、307、および 320 kg m⁻³ であり、より高標高帯で観測された先行研究によれば、グリーンランド氷床における表面 10cm 密度の平均値は 315 kg m⁻³ であり、その観測地点は本研究と比べて高い標高帯のデータが多いことから、低標高帯では高標高帯と比べて表面密度が系統的に小さい傾向にある可能性が示唆された。

2018年7月、グリーンランド氷床内陸のEGRIPサイトにて、気象・放射・雪氷観測を実施した。このデータは、サブテーマ(2)で活用するGCOM-Cの検証にも活用された。また積雪サンプリングを実施し、光吸収性不純物濃度を測定した。分析結果によると、濃度は札幌等の日本国内に比べて低く、これによるアルbedoの低下はより小さいと見積もられた。

札幌の表面積雪中のLAA濃度の経年変動等を取りまとめた(図2)。札幌で取得している気象・雪氷データを国際積雪モデル相互比較プロジェクト(ESM-SnowMIP)に提供し(同時に、オープンデータレポジトリにおいて公開された)、その成果が論文発表された(Ménard et al., 2019⁴⁹)。アジアからの貢献が我々のデータのみであることは特筆に値する。

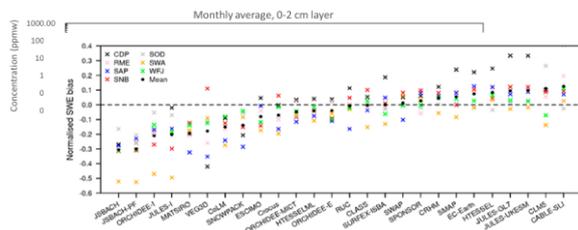


図 2. 札幌における表面雪(0-2cm) 中の LAA 濃

図 3. ESM-SnowMIP に参画した全積雪モデルのパフォーマンス比較結果の一例。積雪水当量の規格化されたバイアスをモデル毎に示す(Ménard et al., 2021⁴⁸)。“SAP”は札幌を示す。

ド氷床上で実施した現地観測において取得欧州宇宙機関ESAで運用されている氷プロダクトの検証に活用された al., 2019⁴¹)。

2019年4月には、近年のグリーンランド損失のホットスポットと呼ばれている最南においてデンマークとの国際共同雪氷現地観測3mの積雪を対象とした密度・比表面積の、温暖化に伴う雪氷物理状態の近年の変また、4月時点に存在する積雪は冬期に涵はずにも関わらず、内部に多数の氷板と光の存在が認められたことから、Q-Transect ニタリングサイトとすべき可能性が認められ札幌で取得している気象・雪氷データがされた国際積雪モデル相互比較プロジェクトの新しい成果が論文発表された(Ménard et al., 2021⁴⁸)(図3)。

また、札幌における気象・放射・雪氷観測データと、過去にグリーンランド氷床において取得した雪氷観測データを以下の通り研究コミュニティに公開した。グリーンランド氷床における観測データ(図4)については、データ論文としてもとりまとめた(Niwano et al., 2020⁵⁶)。北西グリーンランド氷床上における積雪物理状態の観測結果は依然として十分に存在しないことから、貴重な観測データと言える。

北西グリーンランドSIGMA-AサイトのAWS観測データを活用して、SIGMA-Aサイトにおける雪面熱収支の2012年以降の経年変化を明らかにした(廣瀬ほか, 2021¹¹⁵)。SIGMA-Aにおいて過去に取得した気象・雪氷観測データから、北西グリーンランドのバフィン湾における過去の海水分布の経年変化を復元することに成功した(Kurosaki et al., 2020⁴⁶)。SIGMA-Bサイトにおいて過去に取得した気象・放射・雪氷観測データを用いて、周辺の氷帽で観察された光吸収性能を持つ緑藻の繁殖を推定することに成功した(Onuma et al., 2018⁶⁴)。

(1-2) 全天分光日射計(GSAF)による積雪物理量監視

北極域における積雪粒径とLAA濃度の実態把握、および積雪アルベドへの影響評価を目的として、ニーオルスン(ノルウェー)においてGSAFによる積雪物理量の長期観測を実施した。観測の結果、近年の積雪内部粒径(~10cm程度)の増加傾向や、LAA濃度においては積雪の特

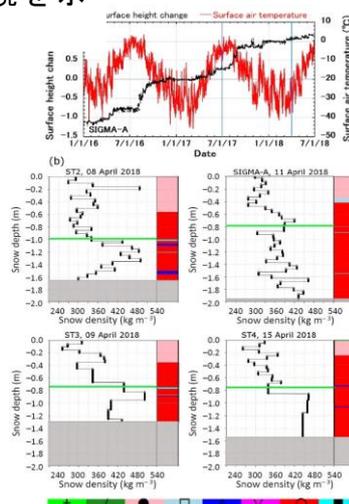


図4. 2018年4月に北西グリーンランド氷床上におけるSIGMA- Traverse 2018観測期間中に取得

してグリーンランされたデータが、Sentinel-3 OLCI雪(Kokhanovsky et

氷床雪氷表面質量部のQ-Transectに測を実施した。表断面観測を実施したの把握を試みた。養したものである吸収性雪氷微生物を将来の重要なモデル検証に活用トESM-SnowMIP

徴によって各年の濃度に違いが見られた(図5)。特にLAA濃度においては、比較的積雪の多い年は濃度が高く、逆に積雪の少ない年は低い傾向がみられた。この結果は雪氷面への大気エアロゾルの沈着過程の違いを示唆しており、前者は降雪に伴う湿性沈着、後者は乾性沈着が卓越していると考えられる。その他、数時間程度で進行する降雪量の変化とそれに伴う積雪アルベドの変化、また降雨イベントによる積雪アルベドの急激な減少が確認された(Tanikawa et al., 準備中)。

(1-3) 海水放射スキームの改良に必要な基礎データ取得と海水放射伝達モデルの開発 地球観測衛星による海水観測の推定精度向上、および海洋モデルのうち特に海水の放射ス

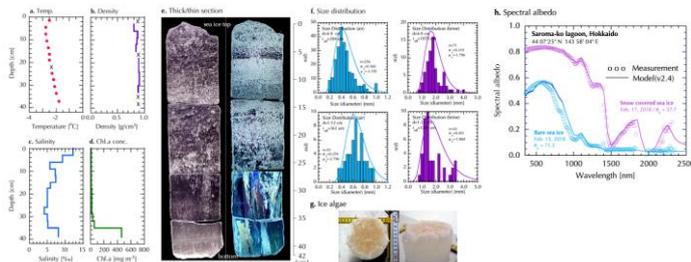


図 6. 海水観測結果(2018年2月)。(a)氷温度、(b)密度、(c)塩分、(d)クロロフィル a 濃度、(e) 海水の薄片解析 (f)気泡 ブラインの粒径分
スキームの高度化を図るため、本課題では放射伝達理論に基づく大気-積雪-海水系の放射伝達

モデルの開発を行った。特に観測に基づく海水アルベド物理モデルの開発を進めるため、典型的な季節海水域である北海道サロマ湖をテストサイトとして、海水放射観測、海水物理観測、海水上積雪断面観測を実施した(Nomura et al., 2020⁵⁹), Toyota et al., 2020⁸³); 木村ら, 2021¹⁰³)。積雪深、海水厚の異なる様々な海水の狭帯域(分光)アルベド、広帯域アルベドの観測を行い、海水アルベドの実態把握を行った。また、分光アルベドの他、反射率、透過率

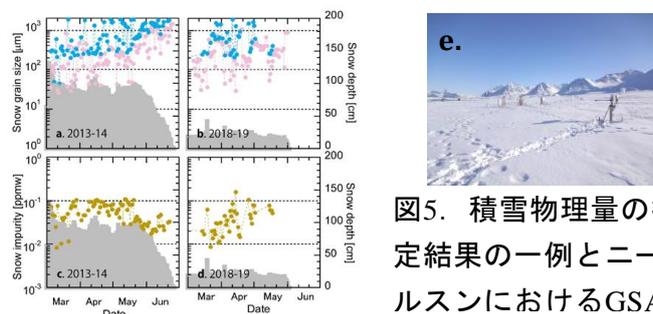


図5. 積雪物理量の推定結果の一例とニーオ
ルスンにおけるGSAF

の測定を実施し、狭帯域、広帯域アルベドの解釈に必要なデータの取得を行った(Wongpan et al., 2019⁹⁰), Tanikawa et al., 2021⁷⁸)。

放射伝達モデルは、海水上積雪と海水を構成する氷、気泡、塩分胞(ブライン)、海水藻類(アイスアルジー)の光散乱を考慮した物理モデルを構築した。モデルと観測結果の比較を行ったところ、両者概ねよく一致し、海水の波長別アルベドを高精度に計算することが可能に

なった(結果の一部を学術雑誌に報告(Tanikawa, 2022⁷⁷))(図6)。

(1-4) 大気試料の電子顕微鏡による分析等

極域での観測

・ ニーオルスンでの観測

北極圏に位置するニーオルスン(ノルウェー)において、2017年からの長期観測を行った。ゼッペリン山観測所において、エアロゾル粒子の採取、およびカウンタフローバーチャルインパクト(Counter Flow Virtual Impactor; CVI)を用いて雲粒子を直接捕集し、含まれる残渣成分の分析を行った。この長期観測によって、夏季と冬季におけるエアロゾル種の発生の違い(夏季は海洋性の硫酸塩、冬季は海塩粒子が増える)や長距離輸送(森林火災や人為汚染物質の輸送)、また氷晶核粒子の傾向(ダストや海塩粒子の寄与)などが明らかとなった。これらの結果は、極域における混相雲の生成メカニズム、その結果生じる降雪と積雪に含まれるLAA粒子の関係の解明につながり、混相雲がもたらす気候影響に対する新たな知見を与える(Adachi et al., 準備中)。また、夏季に氷晶核をもたらずエアロゾル粒子が氷河由来のダスト粒子が大いに寄与することを発見し、Nature Geosciences誌に発表した(Tobo, Adachi et al., 2019⁸¹)。加えて、ゼッペリン観測所では2019年以降COSMOSを用いたBCの連続観測もっており、極域におけるLAA粒子の長期濃度変化に関するデータを取得することができた(Ohata, et al., 2021⁶⁰)。この結果により、BCの季節変動や長期変動などが明らかになりつつある。

・ グリーンランド上空や地上での観測

グリーンランドのノード基地を拠点として航空機観測および地上観測を2018年春に行った。その結果LAA粒子となるBCや鉱物粒子などが多く検出され、それらの粒子の高度依存性を明らかにした(Adachi et al., 2021², Ohata et al., 2021⁶⁰)。また、シベリアの森林火災から排出されたLAA粒子(BCや、大気中で固体球状の形態をした有機エアロゾルの一種、以下ターボール)が、上空4000m程度で高濃度に検出され、極域における汚染物質の長距離輸送に関する知見も得た(図7)。さらに、氷晶核濃度とエアロゾルの比較を行い、海洋性の粒子が氷晶核形成に重要な役割を果たしていたことを示した(Hartmann, Adachi et al., 2020²²)。また、航空機観測と同時に行ったエアロゾル観測や、グリーンランド氷床上での観測も行っている(青木ら, 2021¹⁰¹)。

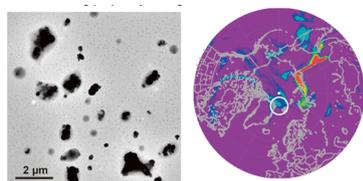


図7. グリーンランド上空で観測された森林火災由来のエアロゾル粒子。左：森林火災由来のエアロゾル粒子電子顕微鏡画像。右：MRI-ESM2.0によるシベリア由来の森林火災空気の輸送。図はAdachi et al.(2021)²より引用。

・ 南極での観測

南極(昭和基地)において、積雪および大気中のBC濃度および粒径を分析し、LAA粒子がどのように大気中から積雪に移行するかを検証した(Kinase, Adachi et al., 2020³⁸)。その結果、地上付近よりも上空のBCが積雪に影響を及ぼしていることが分かった。

つくばにおける観測

つくば(気象研究所)において採取した水溶性エアロゾル粒子を、イオンクロマトを用いてその成分を明らかにした。その結果、6年以上の長期にわたるエアロゾル濃度変動が明らかとなり、LAA粒子やそれらと混合する他の無機成分の長期変動傾向が示された。

その他の観測

LAA粒子(BC、ダスト、ターボール、黒色酸化鉄など)の事態解明を目的とした観測は、上記の観測地点以外に、1)航空機観測を用いた森林火災から生じたLAA粒子の直接観測における実態解明および生成メカニズム解明(Adachi et al.,2018⁵⁾, 2019⁴⁾, Sedlacek et al., 2018⁶⁸⁾, Kleinman et al., 2020⁴⁰⁾)、2)船舶を用いた森林火災由来のLAA粒子解析(Yoshizue et al., 2020)、3)東アジアにおけるLAA粒子輸送および混合状態(Moteki, Adachi et al., 2017⁵³⁾; Ohata et al., 2018⁶²⁾; Yoshida et al., 2018⁹⁵⁾; Kurisu et al., 2019⁴⁵⁾; Sun, Adachi et al., 2020⁷²⁾; Takegawa et al., 2020⁷³⁾)、4)アマゾンで観測したサハラ砂漠から飛来するダスト粒子(Adachi et al., 2020³⁾)などを行い、地球規模で重要となるLAA粒子発生源やその輸送過程に関する成果を得た。

LAA粒子に関する成果：BC、COSMOS、ダスト、酸化鉄、ターボール

上記で示した各地の観測に加え、モデル計算や実験的にLAA粒子の検出方法やその光学特性などの研究を行った。その結果、BC粒子が他の粒子と混合して形態や成分を変化する過程を再現し、その詳細な光学特性や混合状態の検証を行った(Ishimoto et al., 2019²⁷⁾; Ching, Adachi et al., 2019¹⁴⁾)。また、ダストやBCなどの形態や光学特性を考慮した検出手法の開発を行った(Yoshida et al.,2022⁹³⁾)。

氷晶核、積雪中不純物分析に関する成果

氷晶核になる粒子の解明は、氷雲の生成過程の理解に加え、その氷雲が積雪として降下した時に雪氷不純物となる。その氷晶核解明のため、1)氷晶核能測定比較実験の実施(Hiranuma, Adachi et al., 2019²⁴⁾)、2)電子顕微鏡試料を用いた氷晶核実験の開発(Adachi et al., 2022¹⁾、図8)、3)乾燥空気を用いた積雪の昇華実験手法の開発を行った。

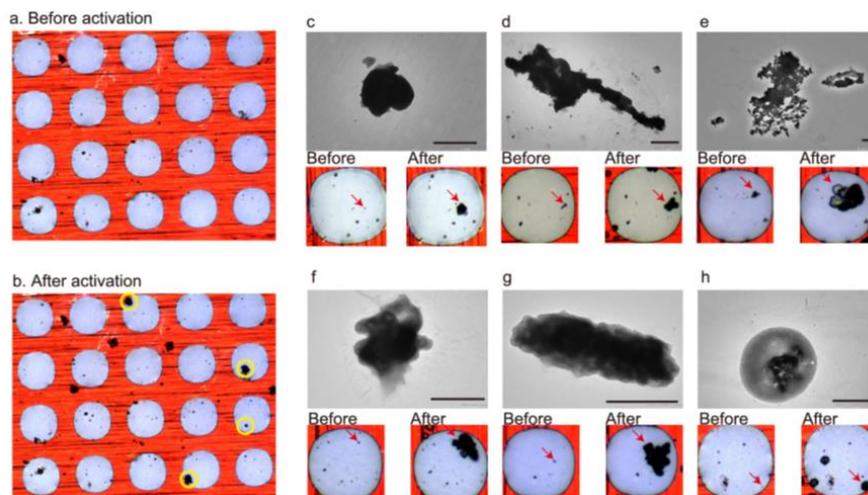


図8. 小型冷凍チャンバーを用いた氷晶核粒子生成実験の例。(a)電子顕微鏡用グリッド上で氷を生成させる前のエアロゾル粒子。(b)−27°Cまで冷却させて氷を生成させた写真(生成した氷は黄色の丸で囲む)。氷を生じた粒子は氷雲の核になる可能性があることを示す。(c-h)氷を生成した森林火災由来のエアロゾル粒子。多くは灰粒子。図はAdachi et al. (2022)¹⁾の図17を引用。

有機エアロゾルに関する成果

有機エアロゾルの中にブラウンカーボンと呼ばれるLAA粒子が存在する。そのブラウンカーボンや、LAA粒子と混合する可能性のある有機エアロゾルの研究に関し、1)ターボールの加熱特性や生成・除去プロセスの解明(Adachi et al., 2018⁵⁾, 2019⁴⁾, 2021²⁾)、2)有機エアロゾルの生成や吸湿性に関する研究(Freney et al., 2018¹⁹⁾; Deng et al., 2018¹⁵⁾)を行った。

(2) 衛星リモートセンシングによる監視

(2-1) 積雪粒子形状モデルのデータセット作成

本研究課題では、衛星リモートセンシングデータから物理量を評価するアルゴリズムに用いる光散乱粒子モデルとして、現実の積雪散乱特性を精度よく再現する粒子形状モデルを用いる。積雪粒子の構造ではポロノイ粒子モデルを、LAAのリモートセンシングでは、LAAの形状・混合状態等様々な物理情報をもとにした高度な光散乱粒子モデルを新たに構築した。このような不規則形状のモデルを用いることで、従来の特形状粒子では再現できなかった現実的な散乱特性を再現することが可能となり、その結果として、より高精度のLAA濃度や積雪粒径等の監視情報が作成される。

積雪リモートセンシングのためのポロノイ粒子モデルの光散乱特性検証

積雪粒子の散乱特性は粒子サイズや形状に強く依存するため、積雪物理量リモートセンシングの精度向上には最適な積雪粒子散乱モデルを与える必要がある。氷雲の衛星リモートセンシングにおいては非球形・不規則形状粒子を考えると現実の氷粒子の全体的な光散乱特性を再現するのに必要であることがわかってきており、積雪のリモートセンシングにおいても積雪に対して非球形粒子を適用することが有効であることが示唆されている。本研究課

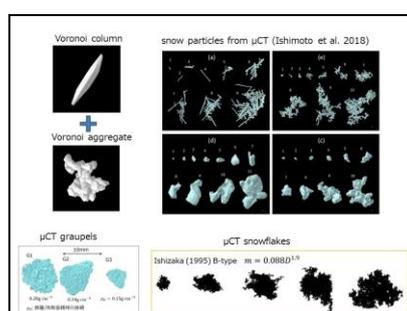
題では、これまで実測の積雪反射特性に整合する積雪粒子形状モデルとしてボロノイ構造を持つ仮想的な氷粒子(ボロノイ粒子)を考え、この粒子モデルを使った衛星リモートセンシングによる積雪物理量推定アルゴリズムの開発を進めた^{27),28)}。またそれに並行して2017年度は、この仮想粒子とその散乱特性がどの程度現実の積雪粒子の形状・散乱特性を再現しているのかを調べた。防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターの協力を得て人工雪・自然雪のX線マイクロCTによる積雪の断面画像データを入手した。画像処理等による3次元化や接触している粒子を分離するアルゴリズムを開発しマイクロCTデータに適用することで積雪内にある個別積雪粒子の3次元形状を抽出し、異なる雪質の積雪に対する積雪粒子の形状とサイズのデータセットを作成した。このデータセットを用いて降雪時の雪質の違いや時間経過による変質での積雪粒子形状や粒径分布との関係を調べた。また抽出された積雪粒子の可視および近赤外での平均的な散乱特性を幾何光学近似法(Geometric Optics approximation Method; GOM)で計算した。その計算結果から、積雪で計測した比表面積(Specific Surface Area; SSA)と積雪の散乱特性を結びつけることに妥当性があることが理論的に示され、また本課題で衛星による積雪のリトリバル解析に用いている2種類の粒子形状モデル(Voronoi column、Voronoi aggregate)や、経験的に求めた粒子形状のサイズ依存性と、それを用いた積雪粒子の散乱特性に、ある程度整合性があることがわかった。これら結果は論文としてまとめ、Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer誌で発表²⁸⁾するとともに、国内外の学会等で発表を行った。

内部混合スス粒子モデルの開発

理論計算から求めた粒子光散乱特性と放射観測との違いから、大気中のLAAは水溶性物質等との内部混合状態にあることが多いと推測されている。LAAに水溶性物質が内部混合した時、どのような形状・光散乱特性を示すのかを調べるため、2018年度は仮想的な表面ポテンシャルを使って流体の表面張力をシミュレートした内部混合粒子モデルを開発した²⁷⁾。フラクタル次元でその形状が表現されることの多いスス粒子について、その形状を数値計算から事前に作成し、水溶性物質の混合状態に依存した形状変化を伴う内部混合粒子モデルを考えた。作成した粒子モデルに大気湿度と物質の違いに応じた光学定数を与えて、地上放射観測や衛星ライダ波長における粒子光散乱特性をDDA法とFDTD法を用いて計算した。スス粒子モデルを新たに開発した内部混合モデルに変更した結果、これまで過大評価されていたスス濃度の推定値が改善されることがわかった。

マイクロCTデータを用いた雪片・霰粒子モデルとマイクロ波反射特性データセット

X線マイクロCTによる積雪の断面画像データを使った積雪粒子の抽出と、その粒子モデルの光散乱特性を幾何光学近似法(GOM)で計算する一連の手法・手順を確立したことを受けて、2018年度よりこの手法の応用としてマイクロCTの積雪データから降雪粒子の形状をモデル化することを考えた。特に降雪後間マイクロCTデータは、ある程度落下中造の中に維持していると考えられる。いた方法を応用して同じマイクロCT



もないサンプルの多くの粒子形状をその構積雪粒子の解析で用データからサイズの

図 9. ボロノイ粒子モデル (左) と積雪 μ CT データ

異なる雪片粒子モデルを抽出することができ、また2021年度には雪片を構成する接触粒子を選別することで、複数のサイズ-質量関係を持つ雪片モデルのデータセットを作成することが可能であることがわかった。これまで報告されてきた雪片の3次元形状モデルは、理想的な氷晶形状の集合体や、内部構造を簡略化した仮想的なモデルが主であり、実測から得られたサイズ-質量の関係を満足する粒子モデルの3次元データセットを作ることが困難であった。積雪マイクロCTデータを使うことで、より現実に近い雪片の3次元モデルを作成することが可能となった。また2019年度は採取した複数の霰粒子のマイクロCTデータから、画像処理の手法を応用して密度を変えた霰粒子モデルを作成した。また2021年度にはこの霰モデルとDDA法による電磁波散乱計算結果を用いて、サイズ・密度・含水率を変数としたCバンド偏波レーダーでの霰粒子反射特性を出力とする数値計算コードを開発した。マイクロCTデータを利用したこれら降雪粒子モデルは、降雪・積雪に関するリモートセンシング技術の高度化に資するものと考えられる(図9)。

内部混合・外部混合を陽に扱う幾何光学近似計算コードの開発

不純物が混入した現実の積雪放射特性が積雪粒子に対する不純物の内部混合・外部混合どちらによるものかを判断する議論では、内部混合・外部混合の状態と、その時の粒子散乱特性との関係を明らかにすることが重要である。しかし内部混合・外部混合として用いられている粒子散乱特性が具体的にどのような氷粒子・不純物のサイズや混合状態の時に再現されるのかは深く議論されてこなかった。この問題を解決するため2021年度には、異なる吸収特性を持つ多成分系での幾何光学近似計算が扱える散乱計算コードを新たに開発した。この計算コードは実際の積雪粒子におけるLAAの混入状況を考慮した積雪散乱特性の計算を可能にすると考えられる。

積雪粒子形状モデル、積雪不純物粒子モデルの検証観測

積雪粒子モデルの有効性を検証するために、札幌(北海道大学低温科学研究所)および芽室(北海道農業研究センター)に設置したGSAFデータを用いて調査した。積雪粒子形状モデルは角柱状と凝集体の2種類のポロノイ粒子モデル、また不純物モデルについては、光吸収性不純物はBCを仮定し、BCが水溶性エアロゾルによって覆われたコア/シェル型の外部混合モデルと、有効媒質近似(DEMA)法を用いた氷粒子との内部混合モデルの2種類の不純物モデルを用いた(図10)。この有効性をGSAFデータから推定された積雪物理量と実測値を比較して調査したところ、積雪粒子形状モデルは、小粒子では角柱状ポロノイ粒子モデル、大粒子では凝集体ポロノイ粒子モデル、中間サイズでは両者の混合モデルを用いると、積雪粒径の

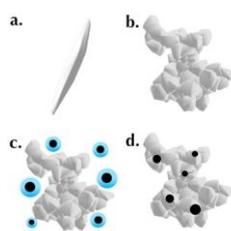


図 10. ポロノイモデル：
(a) 角柱状ポ

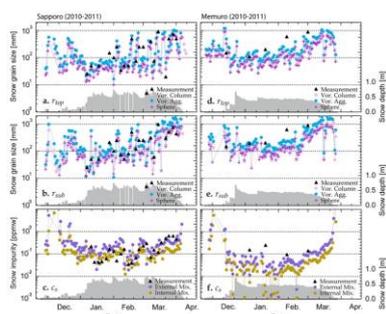


図 11. 推定された積雪粒
径と積雪不純物濃度のテ

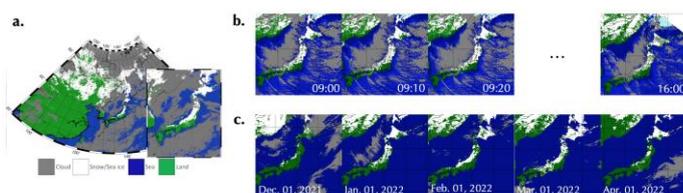


図 12. ひまわり 8 号による積雪、海氷観測。(a)

推定精度が向上することがわかった。一方、積雪不純物モデルは、LAAの雪氷面への沈着過程を考慮し、観測サイトや季節に応じて適切なモデルを用いると、積雪不純物濃度の推定精度が向上することがわかった(図11)(Tanikawa et al., 2020⁷⁹)。この結果は、現在、GSAFや衛星データから積雪物理量を推定するアルゴリズムに使用されている。

(2-2) 衛星データによる大気・積雪の監視

ひまわり8号による東アジアの積雪、海氷、

ひまわり8号による陸上積雪および海氷アルゴリズムの開発・改良を行い、その監視ひまわり8号の利点を生かし、既存のアルゴリズムと雪氷(積雪、海氷)の識別に有効な近赤外、(チャンネル)を用い、積雪の双方向反射特検知手法(アルゴリズム)の開発を行った(谷の結果、積雪検知に関しては正答率が90%の精度を実現できることが分かった。融解検知できており、高頻度観測を活用した複数向上に資することがわかった(Yogo et al., 域も正答率80%を超える高い精度で検知で認められた。特にひまわり8号の空間分解能

マイクロ波衛星では表現が難しい海氷縁辺部の検知精度の向上が確認された(Ioka et al., 2019²⁶)。このプロダクトはひまわり8号の高頻度観測を利用し、陸上積雪、海氷プロダクトは日別データセットの他に、10分インターバルによる監視を行っている(図12)。また、現在このプロダクトは気象庁現業に採用され稼動中である。

この他、ひまわり8号によるエアロゾル監視を実施した。衛星からのエアロゾルリターンは黄砂や越境汚染等に関連して数値予報モデルや環境監視に重要な情報をもたらす(Mano et al., 2009¹¹¹)。図13は2020年5月12日の大陸からの黄砂を検知した結果である。厚い黄砂に関しては、光学的厚さを過大評価(または推定不能)している可能性があるものの、概ね黄砂を検知できていることを確認した。

極軌道衛星による北極域の積雪物理量観測

衛星リモートセンシングによる積雪不純物濃度および積雪粒径の時空間変動を明らかにするために、MODISによる2000年以降の北半球の長期間データセットを作成した。氷とLAA

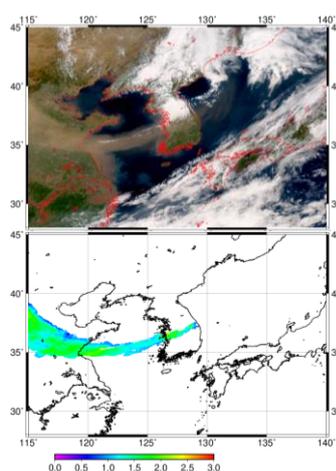


図 13. ひまわり 8 号による陸上積雪の監視

黄砂観測

を検知する手法(アを実施した。ひまズムの見直し、雲短波長赤外の波長性を考慮した積雪川ら, 2018¹⁰⁹)。それを超える極めて高期も高い精度で検シーン処理が精度2019⁹²)。また海氷きていることが確の向上により、マ

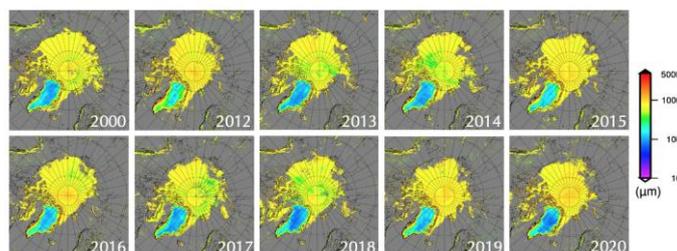


図 15. MODIS から求めた表層積雪粒径の 1 ヶ月コンポジット画像(2000 年、2012-2020 年 7 月)。

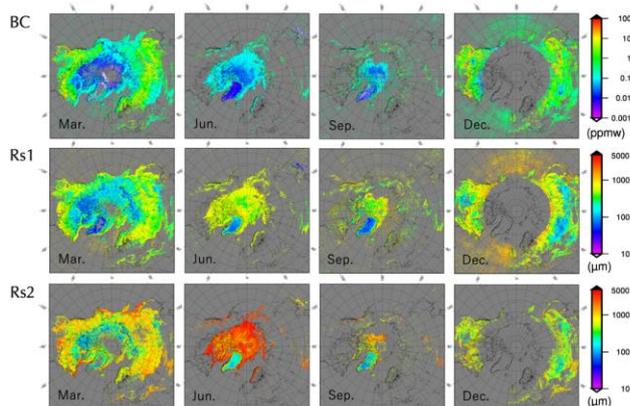


図 14. MODIS から求めた積雪物理量の 1 ヶ月コンポジット画像(2020 年 3 月、6 月、9 月、12 月の例)。上段から BC 相当濃度(BC)、表層積雪粒径(Rs1)、浅層積雪粒径(Rs2)。

の光吸収特性を利用して、表層積雪粒径(Rs1)、浅層積雪粒径(Rs2: 積雪深10cm程度)、LAA濃度 c (BC相当)を推定した。リトリバルアルゴリズムは、予め放射伝達モデルを用いて、2層それぞれの積雪粒径、全層不純物濃度、太陽-観測点-衛星間の幾何条件の関数として、BRDFをチャンネル毎に計算を行い、衛星データから得られたBRDFともっとも近いBRDFを検索して積雪物理量を推定した。

衛星リモートセンシングによる北半球における積雪不純物濃度および積雪粒径分布解析結果の一例として、図14に2020年3月、6月、9月、12月の1ヶ月コンポジット画像を示す。一般的な傾向として、積雪不純物濃度は高緯度ほど低く、中緯度ほど高い傾向がみられた。この領域は近年、その面積が拡大している裸氷域・暗色域であり、見かけ上濃度が高く見えている。また北極海海水上の積雪不純物濃度は陸上よりも低く、この傾向は他の年でも同様の傾向であった。なお、LAA濃度は僅かなアルベドの違いから推定するため、正確に求めることは難しい。海水上においては積雪深の違いを見ている可能性も指摘されている(Hori et al., 2007^[12])。そのため十分積雪がある時期に監視することが望ましい。積雪粒径は高緯度ほど低く、中緯度ほど高い傾向がみられた。北極海海水上の積雪粒径は陸上の積雪粒径よりも小さい傾向にあったが、中緯度オホーツク海海水上積雪の粒径はその緯度帯の陸上積雪粒径と同程度であった。浅層積雪粒径は積雪表層粒径よりも概して大きく、陸上積雪、海水上積雪、グリーンランド氷床上積雪で顕著にみられた。

図15は7月の北半球の積雪物理量の経年変化の一例として、表層積雪粒径の結果を示したものである。海氷上積雪の浅層積雪粒径は年による変動はみられるものの、概して500-1000 μm の範囲で推移していた。一方、グリーンランド氷床上の積雪粒径は海氷上積雪のそれよりも値は小さいものの、その変動幅は海氷上積雪よりも大きかった。特に2012年、2015年の積雪粒径は他の年に比べて大きく、2012年は2000年以降最もアルベドが低い状態になったことが報告されている(Alexander et al., 2014^[13])。Box et al. (2012)^[14]によると、アルベドの低下は気温の上昇と正のフィードバックの関係にあることから、気温の上昇が積雪粒径の増大を引き起こし、その結果、氷床全体のアルベドが低下した可能性が考えられる。

(3) 数値モデルによるLAAの大気・雪氷系の放射収支への影響評価

(3-1) 地球システムモデルによる影響評価

地球システムモデルの観測による検証

現在気候における気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)の再現性を検証するために、近年(2008-2015年)を対象としたモデル計算結果と北極域で実施された観測結果との比較を実施した。この近年計算では、現実的な海面水温を表現するために、海洋モデルは結合

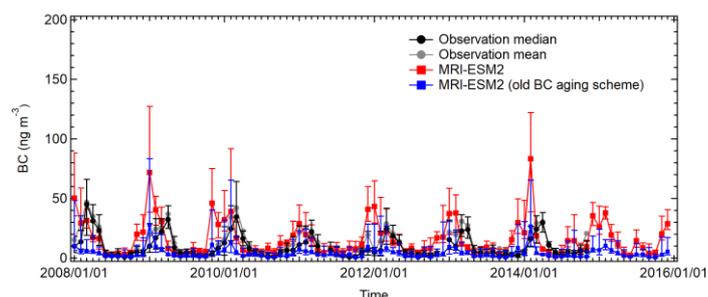


図 16. ニーオルスン(ノルウェー)における BC 質量濃度(ng m^{-3})の時間変動の地上観測(丸印)とモデル計算結果(四角印)の比較。観測は冬期に

せず、外部境界データとして海面水温データ(COBESST)を与える計算を行った。また現実

的な気象場を表現するために、気象庁再解析データ(JRA-55)を用いて補正する計算(ナッジング)を実施した。北極域(ニーオルスン(ノルウェー))における COSMOS による BC の地上観測結果と比較したところ、従来のモデル計算では、観測された大気中 BC 濃度の冬季・春季の増大を再現できなかったのに対し、MRI-ESM2.0 計算では、BC 濃度の再現性が向上した(図 16)。これらの MRI-ESM2.0 での BC の濃度増大の再現性の向上は、他の北極域の観測地点においても確認された(Koike et al., 2021^[42])。この結果は、北極域での BC の季節変化を決める上では、変質過程が重要な役割を果たすことを示唆している。このように MRI-ESM2.0 では、特に北極域での BC 濃度の再現性が従来よりも向上したため、従来よりも信頼性の高い LAA の放射効果を推定することが可能となった。また、全球的にも放射や雲に関する再現性が大きく向上し、世界のモデルに比較して、気候全般の再現性が良いモデルとなった(Kawai et al., 2019^[37])。

有効放射強制力の推定

MRI-ESM2.0を用いて、産業革命前(1850年)を基準とした現在(2014年)における人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力(Effective Radiative Forcing; 以下ERF)を推定した(図17)(Oshima et al., 2020⁶⁵)。大気上端における全球平均の全人為起源合計の正味のERFは 1.96 W m^{-2} と推定され、これは主に二酸化炭素(1.85 W m^{-2})、メタン(0.71 W m^{-2})、ハロカーボン類(0.30 W m^{-2})による正の強制力と全エアロゾル(-1.22 W m^{-2})による負の強制力で構成されていた。全エアロゾルによるERFへの寄与は、エアロゾル-放射相互作用(-0.32 W m^{-2})が23%、エアロゾル-雲相互作用(-0.98 W m^{-2})が71%、残りがエアロゾルを要因とする地表面

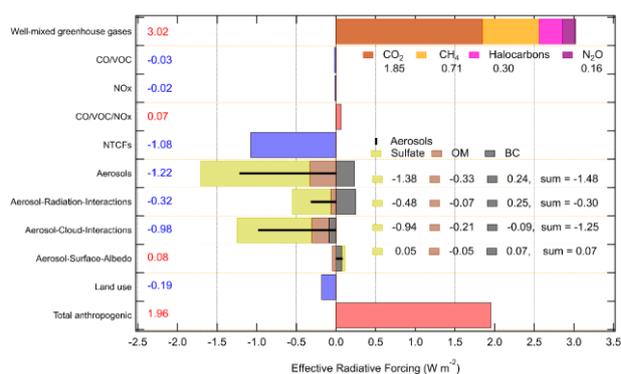


図 17. MRI-ESM2.0 により推定された 1850 年を基準とした 2014 年における気候変動をもたらす主な駆動要因の有効放射強制力。Oshima et al. (2020)⁶⁵ Figure 1 より引用。

アルベド変化(0.08 W m^{-2})であった。エアロゾル-放射相互作用によるERFは、太陽放射を吸収する特性を持つBC(0.25 W m^{-2})による正の強制力と散乱特性を持つ硫酸塩(-0.48 W m^{-2})と有機エアロゾル(-0.07 W m^{-2})による負の強制力の合計で構成され、エアロゾルとその前駆物質が排出される発生源域で顕著であった。エアロゾル-雲相互作用によるERF(Effective Radiative Forcing associated with cloud-aerosol interactions; 以下ERFaci)は発生源域とその風下域で顕著であり、これらは下層雲の雲凝結核や雲粒の数濃度の増大に起因していた。同時にMRI-ESM2.0では、主に人為起源BCを要因とする上層雲(-38°C 以下の気温)の氷晶数濃度の増大により、特に熱帯対流域において、顕著な負の短波ERFaciおよび顕著な正の長波ERFaciが推定された。放射収支の観点では、これらの大きな正負の強制力は互いに大部分が相殺されるが、上層の氷雲は顕著な長波放射による大気加熱を引き起こすため、この結果はエアロゾルと氷雲の相互作用のさらなる研究の重要性を示唆している。

北極域における大気上端における人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力(ERF)を推定した(図18)。全人為起源合計の正味のERFは北極域のほぼ全ての領域で正であり、BCを要因とする地表面アルベド低下の効果が寄与していた。北極域ではBCは二酸化炭素に次いで二番目に大きい正のERFを持つことが明らかになり、この結果は北極温暖化においてBCが重要な役割を果たす可能性を示唆している。

CMIP6 関連のモデル相互比較研究

MRI-ESM2.0による産業革命前(1850年)から現在までの歴史実験の計算結果を用いて、北

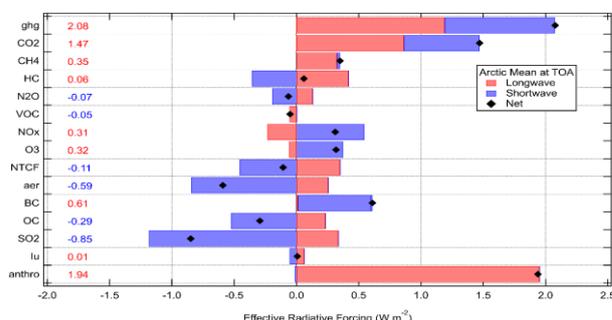


図 18. 北極域(北緯 60 度以北)における MRI-ESM2.0 により推定された 1850 年を基準とした 2014 年における気候変動をもたらす主な駆動要因の有効放射強制力。赤色が長波、青色が短波成分、黒印および左端の数値は正味の値を示す。Oshima et al. (2020)⁶⁵⁾ Figure 8 より引用。

極域の地上気温変化の要因分析を行った。MRI-ESM2.0は北極域で観測された20世紀前半(1940年頃)の温暖化と20世紀後半(1970年頃)の寒冷化を再現するとともに、自然強制と気候の内部変動が1940年頃の温暖化、人為起源エアロゾルの増大と気候の内部変動が1970年頃の寒冷化の主要因であることを示した(Aizawa et al., 2021⁷⁾; 2022⁶⁾。

また、CMIP6を構成するRFMIP、AerChemMIP、DAMIPなどの国際的な枠組みで実施したMRI-ESM2.0による計算結果は、放射強制力、大気質、気温変化などに関する様々な研究に活用され、2020年以降、10編以上の査読付き論文として出版された。AerChemMIPについては、データ公開されたMRI-ESM2.0によるモデル実験数は世界で3番目に多く、複数の論文成果の引用も含め気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 第6次評価報告書(AR6)に貢献した。

AMAP でのモデル相互比較研究

北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)の枠組みで、MRI-ESM2.0 を用いて、エアロゾルやオゾン等の短寿命気候強制因子(SLCFs)が北極気候や大気質に及ぼす影響を評価した。近年の観測データと MRI-ESM2.0 を含む複数のモデル計算結果の比較をしたところ、MRI-ESM2.0 は北極域での BC、硫酸塩エアロゾル、PM2.5 濃度の観測結果を、他のモデルと比較してよく再現した(Whaley et al., 2022⁸⁹⁾)。また AMAP で用意した排出源シナリオに基づいた将来予測計算を実施し、SLCFs が北極域の気温変化に及ぼす影響を推定した。これらの研究成果の一部は、AMAP での SLCFs 評価報告書に掲載された(AMAP, 2021)。

コロナ禍による排出量減少に伴う気候影響評価

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の流行により、各国がロックダウン等の行動制限を課すことで、2020年の温室効果気体や人為起源エアロゾル等の排出量が大きく減少した。これらの排出量減少が気候に及ぼす影響を評価するために、世界各国の最新の気候モデルを用いた、国際研究チームによるモデル相互比較計画(CovidMIP)が立ち上がった。なおCovidMIPはCMIP6/DAMIPの枠組みで実施された。本研究では、共通の条件設定やプロトコルを用いて、MRI-ESM2.0を含む世界の12の地球システムモデルを用いて計300以上のアンサンブル計算を実施した。その結果、2020～2021年の一時的な排出量減少により、東アジアや南アジア域でのエアロゾル量は減少するが、2020～2024年における地上気温や降水量への有意な影響は見られないことが明らかとなった(Jones et al., 2021³⁰)。

(3-2) 領域気候モデルによる影響評価

領域気候モデルによる氷床の表面質量収支の観測による検証

世界で2番目に大きい巨大氷床であるグリーンランド氷床(Greenland Ice Sheet; GrIS)では、1990年代以降、急激に雪氷質量損失が進行している。近年では、氷床質量損失に対する表面質量収支(Surface Mass Balance; 以下SMB)減少の寄与が、氷床流動による質量損失の寄与よりも相対的に増加している、と考えられている。GrIS SMBは、近年では領域気候モデルで推定されることが一般的であるが、その不確定性は依然として大きいと考えられている。その不確定性低減に貢献するために、水平解像度5km・時間解像度1時間の高解像度領域気候モデルNHM-SMAPを開発した(Niwano et al., 2018⁵⁸)。大気部分は気象庁非静力学モデルJMA-NHMで計算されるのに対して、雪氷部分の計算は積雪変質モデルSMAPが担う。本研究では、NHM-SMAPを気象庁の最新の再解析データJRA-55で駆動した。2011～2014年のGrISに適用されたNHM-SMAPの評価を行ったところ、平均誤差、二乗平均平方根誤差、はそれぞれ0.75 m w.e.、1.07 m w.e.、および図19)。NHM-SMAPの標準設定では、動を精緻かつ現実的なRichards式に基づいているのに対し、多くの既存の領域気候モデルツスキームを採用している。バケツスキームirreducible water contentを2%および6%を行ったところ、SMBの推定精度はRichardsに最も良くなることが示され(Niwano et al., SMAPの優位性が実証された。各感度実験間定差は200 Gt year⁻¹に達した。このことは、積雪内部水分移動計算手法の選択が

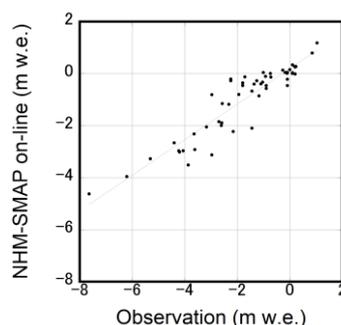


図 19. 2011～2014 の
NHM-SMAP の観測による検証

SMB について行
および決定係数
0.86 と良好であ
積雪内部水分移
方法で計算して
は古典的なバケ
を採用した上で
する感度実験を
式を用いた場合
2018⁵⁸)、NHM-
の年積算 SMB 推

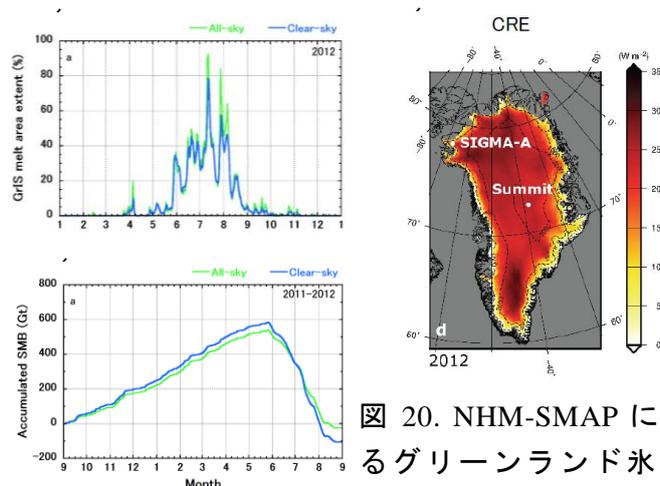


図 20. NHM-SMAP によるグリーンランド氷床の表面質量収支変動シミュレーション結果。
 (a) 雪氷表面融解面積、
 (b) 雪氷質量損失、(c) 雲の放射効果。

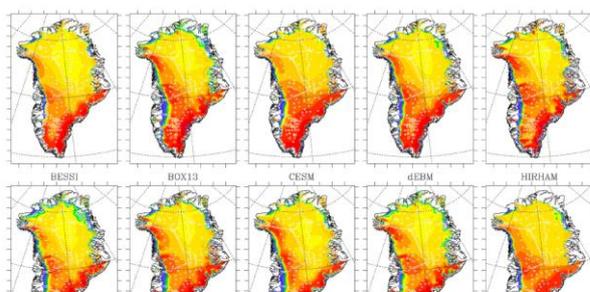
GrIS SMB 推定に大きな影響を与えることを示す重要な結果と言える。

グリーンランド氷床における雲放射効果の定性的・定量的影響をNHM-SMAPを用いて調べた(Niwano et al., 2019⁵⁷)。その結果、雲量が増加するほど雪氷表面融解面積は拡大するものの、雪氷質量損失は雲量の減少によって加速されることを世界で初めて明らかにした(図20)。また、この際、雪氷面上の光吸収性不純物(雪氷微生物を含む)の存在は、雪氷表面融解に対する雲の放射影響を抑制する可能性があることを指摘した。

領域気候モデルの雪氷融解量推定高度化への取り組み

領域気候モデルNHM-SMAPを用いて、グリーンランド氷床表面質量収支計算モデル相互比較プロジェクトGrSMBMIP(Fettweis et al., 2020¹⁸)に参画した(図21)。その成果の概略を「気象研究所お知らせ」として一般向けに周知した。NHM-SMAPは、他のモデルと比較して雪氷融解量を過小評価している傾向があることが分かった。現在、NHM-SMAPでは、雪氷融解に影響を与える光吸収性不純物(BC、ダスト、微生物)の影響を十分に考慮出来ていないので、その点の高度化を更に推進する必要がある。なお、他の海外のモデルは、それらの影響を陽に考慮しているわけではなく、雪氷面アルベドを衛星観測から得られた気候値によって補正しているため、相対的に現実に近い融解量を推定することが出来ている。

更に、最新の領域気象化学-積雪モデルNHM-Chem-SMAPの開発を加速させ、湿性沈着モジュールの改良により、札幌のBCとダストの積雪中濃度の再現に成功した。図22に、BCについて観測結果とモデルシミュレーション結果の比較を示す(BC濃度の対数値の決定係数は0.53)(Niwano et al., 2021⁵⁴)。



5. 成果

本研究によって以下の成果が得られた。

(1) 地上観測による監視

- ・ これまで国内で行ってきた現地地上気象・放射・積雪観測や地上大気観測による雪氷汚染の実態監視を継続することが出来た。
- ・ グリーンランド北西部のSIGMA-A、SIGMA-Bという2基のAWSでの観測を継続し、急変する北極域での貴重な現場データの継続取得を可能にした。さらに、積雪の機動観測を北西グリーンランド氷床上とEGRIPサイトにおいて実施した。
- ・ 札幌における10冬季の気象・雪氷観測データを解析し、札幌では、LAAによるアルベド低下量はおよそ0.05であり、BCの方がダストよりもアルベド低下に与える影響が大きいことを示した。
- ・ 国内における観測データの品質管理を行い、表面積雪中のLAA濃度の経年変動等を取りまとめた。また、札幌の気象・雪氷データを、アジアからは唯一、国際積雪モデル相互比較プロジェクトESM-SnowMIPに提供し、その成果が論文発表された(Ménard et al., 2019⁴⁹)。
- ・ 2018年に本研究課題遂行の一環としてグリーンランド氷床上で実施した現地観測において取得されたデータが、欧州宇宙機関ESAで運用されているSentinel-3 OLCI雪氷プロダクトの検証に活用された(Kokhanovsky et al., 2019⁴¹)。
- ・ 札幌における地上気象・放射・雪氷観測データを研究コミュニティに公開した。
- ・ グリーンランド氷床において過去に取得したデータの一部を研究コミュニティに公開した。
- ・ 札幌における気象・放射・雪氷観測データは、国際積雪モデル相互比較プロジェクトESM-SnowMIPの一層の推進に貢献した。
- ・ ニーオルスン(ノルウェー)にて全天分光日射計GSAFによる積雪表層とその下層の積雪粒径、積雪中のBC濃度の監視を行った。その結果、積雪状況の違いによるBC濃度の違いが確認され、大気エアロゾルの沈着過程の違いを示唆する結果が得られた。
- ・ 海洋モデルの特に海氷放射スキームの高度化を目的として、物理過程にもとづく海氷の放射伝達モデルを開発した。その過程で、北海道サロマ湖で海氷機動観測を展開し、放射観測(狭帯域・広帯域アルベド、透過率、放射収支)、物理観測(密度、塩分、海氷構造、アイスアルジー(Chl.a濃度)等)を行い、海氷、積雪の光学特性に関する様々な基礎データを取得した。
- ・ 大気中のLAA粒子を含むエアロゾル粒子の組成、混合状態、発生、除去、雪氷・氷晶への影響などに関し多くの成果が得られた。それぞれの詳細に関しては、各論文に詳細が報告されている。得られた成果は、国際的に評価された雑誌(Nature Geoscience, Proceedings of the National Academy of Sciences, Nature Communicationsなど)に掲載された論文を含む多くの国際科学雑誌などに掲載された(LAA粒子と電子顕微鏡データを含む論文は20報以上)。このように論文発表を通じた成果の社会還元を行った。

(2) 衛星リモートセンシングによる監視

- ・ 地上や衛星からのリモートセンシングによる積雪粒径・不純物量の推定において、不規則形状粒子モデルであるボロノイ粒子を利用した放射・散乱計算が有効であり、X線マイクロCTによる詳細な積雪粒子形状を用いた散乱特性計算結果の比較により、積雪粒

子散乱特性におけるボロノイ粒子の妥当性が示された。

- ・ ここで開発したマイクロCTデータ処理を用いて、より現実的で汎用性が高いと考えられる霰・雪片の3次元モデルを開発した。
- ・ 今後の高度な降雪・積雪リモートセンシングに向けて、LAA等が水溶性物質と内部混合した時の全体形状をシミュレートする手法や、積雪粒子にエアロゾルが混合した多成分系粒子の散乱特性を陽に計算する幾何光学近似法計算コードを新たに開発した。
- ・ 積雪リモートセンシングに必要な光散乱粒子モデルの検討を行い、積雪粒子の形状には角柱状ボロノイ粒子モデルと凝集体ボロノイ粒子モデルの混合モデル、LAAの混合状態はLAAの雪氷面への沈着過程を考慮し、観測サイトや季節に応じて内部混合、外部混合モデルが実測とよく整合することが明らかになった。
- ・ ひまわり8号による大気、積雪を観測するためのアルゴリズム開発・改良を行い、東アジアの積雪分布、オホーツク海海氷面積、黄砂観測を実施した。またひまわり8号の高頻度観測を利用した積雪プロダクト開発を行った。
- ・ 極軌道衛星による積雪物理量の時空間変動を明らかにするために、MODISによる2000年以降の北半球の長期間データセットを作成した。

(3) 数値モデルによる影響評価

- ・ 気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)を新たに開発した。観測データとの比較により、MRI-ESM2.0は特に北極域においてBC濃度の再現性が従来よりも向上し、従来よりも信頼性の高いLAAの放射効果が推定可能となった。また、放射や雲の再現性も大きく向上した。
- ・ MRI-ESM2.0を用いて、全球規模および北極域において、産業革命前を基準とした現在における人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力を推定した。北極域では、LAAであるBCは二酸化炭素に次いで二番目に大きい正の有効放射強制力を持つことが明らかになった。
- ・ MRI-ESM2.0を用いた産業革命前から現在までの歴史実験計算は、北極域で観測された20世紀前半(1940年頃)の温暖化と20世紀後半(1970年頃)の寒冷化を再現するとともに、自然強制と気候の内部変動が1940年頃の温暖化、人為起源エアロゾルの増大と気候の内部変動が1970年頃の寒冷化の主要因であることが示された。
- ・ MRI-ESM2.0によるモデル計算結果は、CMIP6など国際的な枠組みでの研究で使用された。特にCMIP6を構成するAerChemMIPでは、MRI-ESM2.0による多数の計算を実施し、データ公開されたモデル実験数は世界で3番目に多く、これらの計算結果は、IPCC AR6(第6次評価報告書)に掲載された。MRI-ESM2.0による計算結果は、複数の論文として出版され、これらの論文はIPCC AR6で引用された。
- ・ 北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)でのSLCFsに関する評価報告書にMRI-ESM2.0の成果を掲載するとともに、AMAPでのSLCFs専門家会合グループメンバーとして評価報告書の共同執筆を行うことで、北極評議会/AMAPでの政策決定者向け要約の策定に貢献した。
- ・ IPCC第54回総会および同パネル第1作業部会第14回会合に参加し、各国間の調整の場で

発言を行い、AR6 策定の活動に貢献した。またIPCC TFIでのSLCFsに関する専門家会合委員としてIPCC SLCFs専門家会合に出席し、IPCCの活動へ貢献した。

- ・ MRI-ESM2.0を含む世界各国の気候モデルを用いた、国際研究チームによるCMIP6の枠組みを使用したモデル相互比較計画(CovidMIP)において、COVID-19の流行に伴う人為起源物質の排出量減少が気候に及ぼす影響を評価した。COVID-19の流行という突如の出来事に対し、世界の研究者が迅速に協力し、国際的な枠組みでのモデル相互比較計画を立ち上げ、信頼性の高い影響評価を実施できたことも、重要な成果と考えられる。
- ・ 領域気象モデルと積雪変質モデルを結合した NHM-SMAP を用いて、グリーンランドの表面質量収支を計算し、観測と比較して良好な結果を得た。積雪内の水分移動の重要性を示した。
- ・ 領域気象モデルと積雪変質モデルを結合した NHM-SMAP を用いたグリーンランドの表面質量収支を計算結果から、雲量が増加するほど雪氷表面融解面積は拡大するものの、雪氷質量損失は雲量の減少によって加速されることが世界で初めて明らかになった。また、雪氷面上の光吸収性不純物(雪氷微生物を含む)が、雪氷表面融解に対する雲の放射影響を抑制する可能性があることが示唆された。
- ・ 極域気候モデルNHM-SMAPが、グリーンランド氷床表面質量収支計算モデル相互比較プロジェクトGrSMBMIPに参画し、世界的なプレゼンスを示した。
- ・ NHM-Chem-SMAPの湿性沈着モジュールの改良により、NHM-Chem-SMAPによる札幌のBCとダストの積雪中濃度の再現に成功した。

6. 引用文献（研究成果の学術誌発表文を含まず）

- [1] R.V. Bekryaev et al. (2010), *J. Climate*, 23, 3888-3906.
- [2] IPCC: AR5 (2014)
- [3] Yukimoto, S., et al, (2012), A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model description and basic performance—. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 23-64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02.
- [4] Eyring, V., et al., (2016), Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
- [5] Oshima, N. and Koike, M.: Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 263–282, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-263-2013>, 2013.
- [6] Yoshimura, H., Mizuta, R., & Murakami, H. (2015). A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence. *Monthly Weather Review*, 143(2), 597-621.
- [7] Oshima N, et al., (2009), Aging of black carbon in outflow from anthropogenic sources using a mixing state resolved model: 2. Aerosol optical properties and cloud condensation nuclei activities. *J Geophys Res* 114:D18202. <https://doi.org/10.1029/2008JD011681>
- [8] Pincus R, Forster PM, Stevens B, (2016), The Radiative Forcing Model Intercomparison

- Project (RFMIP): experimental protocol for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9:3447–3460. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3447-2016>
- [9] Collins WJ, et al., (2017) AerChemMIP: quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6. *Geosci Model Dev* 10:85–607. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-585-2017>
- [10] Gillett, N. P., et al., (2016), The detection and attribution model intercomparison project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3685–3697. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3685-2016>
- [11] Mano, Y., T. Hashimoto and A. Okuyama (2009), Verification of Satellite-derived Aerosol Optical Thickness over land with AERONET data. *Pap. Meteor. Geophys.*, 60, 15-19
- [12] Hori, M., T. Aoki, K. Stamnes, and W. Li (2007), ADEOS-II/GLI snow/ice products - Part III: Retrieved results, *Remote Sensing of Environment*, 111(2-3) 291 - 336.
- [13] Alexander, P. M., et al. (2014), *The Cryosphere*, 8, 2293–2312, <https://doi.org/10.5194/tc-8-2293-2014>.
- [14] Box, J. E., et al. (2012), *The Cryosphere*, 6, 821–839, <https://doi.org/10.5194/tc-6-821-2012>.

【研究成果の発表状況】（課題開始年度－令和三年度）

（1）誌上发表（学術誌）

- 1) Adachi, K, J.E. Dibb, E. Scheuer, J.M. Katich, J.P. Schwarz, A.E. Perring, B. Mediavilla, H. Guo, P. Campuzano-Jost, J.L. Jimenez, J. Crawford, A. J. Soja, N. Oshima, M. Kajino, T. Kinase, L. Kleinman, A.J. Sedlacek, R.J. Yokelson, P.R. Buseck, (2022). Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035657.
- 2) Adachi, K., Oshima, N., et al., (2021), Compositions and mixing states of aerosol particles by aircraft observations in the Arctic springtime, 2018, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 3607–3626, <https://doi.org/10.5194/acp-21-3607-2021>.
- 3) Adachi, K., Oshima, N., et al., (2020), Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11923–11939, <https://doi.org/10.5194/acp-20-11923-2020>.
- 4) Adachi K., et al. (2019), Spherical tarball particles form through rapid chemical and physical changes of organic matter in biomass-burning smoke, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (39), 19336-19341.
- 5) Adachi, K., et al., (2018), Volume changes upon heating of aerosol particles from biomass burning using transmission electron microscopy, *Aerosol Science and Technology*, 52(1), 46-56.
- 6) Aizawa, T., Oshima, N., and Yukimoto, S. (2022), Contributions of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability to mid-20th century Arctic cooling—CMIP6/DAMIP multimodel analysis. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097093. doi:10.1029/2021GL097093.

- 7) Aizawa, T., Ishii, M., Oshima, N., Yukimoto, S., and Hasumi, H. (2021), Arctic warming and associated sea ice reduction in the early 20th century induced by natural forcings in MRI-ESM2.0 climate simulations and multi-model analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL092336. doi: 10.1029/2020GL092336.
- 8) Allen, R. J., Oshima, N. (4th in 18 authors), et al. (2021), Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions, *Environ. Res. Lett.*, 16, 034010, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe06b>.
- 9) Allen, R. J., Oshima, N. (7th in 34 authors), et al. (2020), Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9641–9663, <https://doi.org/10.5194/acp-20-9641-2020>.
- 10) Amino, T., Iizuka, Y., Matoba, S., Shimda, R., Oshima, N., Suzuki, T., Ando, T., Aoki, T., and Fujita, K. (2021), Increasing dust emission from ice free terrain in southeastern Greenland since 2000, *Polar Science*, 27, 100599, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100599>.
- 11) Bowman, H., Oshima, N. (6th in 12 authors), et al., (2022), Changes in anthropogenic precursor emissions drive shifts in the ozone seasonal cycle throughout the northern midlatitude troposphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 3507–3524. doi:10.5194/acp-22-3507-2022.
- 12) Ching, J. and M. Kajino (2020), Rethinking air quality and climate change after COVID-19, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 5167, 11 pp., <https://doi.org/10.3390/ijerph17145167>.
- 13) Ching, J., M. Kajino, H. Matsui (2020), Resolving aerosol mixing state increases accuracy of black carbon respiratory deposition estimates, *One Earth*, 3, 763-776, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.004>.
- 14) Ching, J., K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, and M. Kajino (2019), Aerosol Mixing State Revealed by Transmission Electron Microscopy Pertaining to Cloud Formation and Human Airway Deposition, *npj Climate and Atmospheric Science*, (2), 22.
- 15) Deng, Y., K. Adachi (7th in 10 authors), et al., (2018), Hygroscopicity of Organic Aerosols and Their Contributions to CCN Concentrations Over a Midlatitude Forest in Japan, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9703-9723.
- 16) Dhaka, S. K., M. Kajino (12th in 14 authors), et al., (2020), PM2.5 diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology, *Sci. Rep.*, 10:13442, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70179-8>.
- 17) Dragović, S., M. Kajino (4th in 9 authors), et al., (2020), Synthesis of studies on significant atmospheric electrical effects of major nuclear accidents in Chernobyl and Fukushima, *Sci. Total Environ.*, 733, 139271, 14 pp., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139271>.
- 18) Fettweis, X., Niwano, M. (28th in 40 authors), et al. (2020), GrSMBMIP: intercomparison of the modelled 1980–2012 surface mass balance over the Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, 14, 3935–3958, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3935-2020>.
- 19) Freney, E., K. Adachi (4th in 21 authors) et al. (2018), Aerosol composition and the contribution of SOA formation over Mediterranean forests, *Atmospheric Chemistry and*

- Physics, 18(10), 7041-7056.
- 20) Ge, B., M. Kajino (13th in 23 authors), et al. (2020), Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia) phase III: Multi-model comparison of reactive nitrogen deposition over China, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 10587-10610, <https://doi.org/10.5194/acp-20-10587-2020>.
 - 21) Griffiths, P. T., Oshima, N. (17th in 23 authors), et al. (2021), Tropospheric ozone in CMIP6 simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 4187–4218, <https://doi.org/10.5194/acp-21-4187-2021>.
 - 22) Hartmann, M., Adachi, K., et al. (2020), Wintertime airborne measurements of ice nucleating particles in the high Arctic: A hint to a marine, biogenic source for ice nucleating particles. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087770. <https://doi.org/10.1029/2020GL087770>
 - 23) Hattori, S., Iizuka, Y., Alexander, B., Ishino, S., Fujita, K., Zhai, S., Sherwen, T., Oshima, N., Uemura, R., Yamada, A., Suzuki, N., Matoba, S., Tsuruta, A., Savarino, J., Yoshida, N. (2021), Isotopic evidence for acidity-driven enhancement of sulfate formation after SO₂ emission control. *Sci. Adv.*, 7, 19, eabd4610. doi:10.1126/sciadv.abd4610.
 - 24) Hiranuma, N., K. Adachi, et al. (2nd in 52 coauthor) (2019), A comprehensive characterization of ice nucleation by three different types of cellulose particles immersed in water, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7), 4823-4849.
 - 25) Iizuka, Y., Matoba, S., Minowa, M., Yamasaki, T., Kawakami, K., Kakugo, A., Miyahara, M., Hashimoto, A., Niwano, M., Tanikawa, T., Fujita, K., Aoki, T. (2021), Ice core drilling and the related observations at SE-Dome site, southeastern Greenland ice sheet, *Bull. Glaciol. Res.*, 39, 1-12, <https://doi.org/10.5331/bgr.21R01>.
 - 26) Ioka, Y., Y. Yogo, T. Tanikawa, M. Hosaka, H. Ishida and T. Aoki (2019), Algorithm theoretical basis for the Himawari-8,-9/AHI Cryosphere product, Part 2: Sea ice distribution, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 64, 13-21.
 - 27) Ishimoto, H., R. Kudo, and K. Adachi (2019), A shape model of internally mixed soot particles derived from artificial surface tension, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(1), 107-118.
 - 28) Ishimoto H., S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, T. Aoki, and K. Masuda (2018), Snow particles extracted from x-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 209, 113-128.
 - 29) Jones, C. D., Oshima, N. (32nd in 48 authors), et al. (2021), The Climate Response to Emissions Reductions due to COVID-19: Initial Results from CovidMIP. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091883. doi: 10.1029/2020GL091883. (Highlight, Research Spotlight)
 - 30) Jones, C. D., Oshima, N. (33rd in 49 authors), et al. (2020) Initial Results from CovidMIP, *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>.
 - 31) Kajino, M., N. Oshima (4th in 23 authors), K. Adachi (18th in 23 authors), et al. (2021), Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables, *Geosci. Model Dev.*, 14, 2235–2264. doi:10.5194/gmd-14-2235-2021.
 - 32) Kajino, M., et al. (2021), Simulation of the transition metal-based cumulative oxidative

- potential in East Asia and its emission sources in Japan, *Sci. Rep.*, published online, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85894-z>.
- 33) Kajino, M., K. Adachi (2nd in 10 authors), et al. (2021), Deposition and dispersion of radio-cesium released due to the Fukushima nuclear accident: 2. Sensitivity to aerosol microphysical properties of Cs-bearing microparticles (CsMP), *J. Geophys. Res.*, 126(1), e2020JD033460, <https://doi.org/10.1029/2020JD033460>, 23 pp..
 - 34) Kajino, M., et al. (2020), Modeling transition metals in East Asia and Japan and its emission sources, *GeoHealth*, 4, e2020GH000259, <https://doi.org/10.1029/2020GH000259>, 22 pp..
 - 35) Kajino M., K. Adachi (20th in 25 authors) et al. (2019), NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology – chemistry model: model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols, *JMSJ*, 97, 337-374.
 - 36) Katata G., K. Matsuda, A. Sorimachi, M. Kajino, K. Takagi (2020), Effects of aerosol dynamics and gas-particle conversion on dry deposition of inorganic reactive nitrogen in a temperate forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 4933-4949, <https://doi.org/10.5194/acp-20-4933-2020>.
 - 37) Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H., and Nagasawa (2019), R., Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2875-2897.
 - 38) Kinase, T., Adachi, K., Oshima, N., Goto - Azuma, K., Ogawa - Tsukagawa, Y., Kondo, Y., et al (2020), Concentrations and size distributions of black carbon in the surface snow of eastern Antarctica in 2011. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD030737.
 - 39) Kinase, T., K. Adachi, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Zaizen, and Y. Igarashi (2020), Temporal variations of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in atmospheric depositions after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident with long-term observations, *Sci. Rep.*, 10:21627, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78312-3>, 8 pp..
 - 40) Kleinman, L. I., Adachi, K. (3rd in 16 authors), et al. (2020) Rapid evolution of aerosol particles and their optical properties downwind of wildfires in the western US, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 13319–13341, <https://doi.org/10.5194/acp-20-13319-2020>.
 - 41) Kokhanovsky, A., Niwano, M. (13th in 30 authors), et al. (2019), Retrieval of snow properties from the Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument, *Remote Sens.*, 11, 2280, <https://doi.org/10.3390/rs11192280>.
 - 42) Koike, M., Oshima, N. (9th in 14 authors), et al., (2021), Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project, *Polar Science*, 27, 100621, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100621>.
 - 43) Krinner, G., M. Niwano (43rd in 57 authors), et al. (2018), ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks, *Geosci. Model Dev.*, 11, 5027-5049, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-5027-2018>.

- 44) Kubota, T., M. Kajino (14th in 18 authors), et al. (2020), Role of advection in atmospheric ammonia: A case study at a Japanese lake basin influenced by agricultural ammonia sources, *Atmos. Environ.*, 243, 117856, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117856>.
- 45) Kurisu, M., K. Adachi, K. Sakata, and Y. Takahashi, (2019), Stable Isotope Ratios of Combustion Iron Produced by Evaporation in a Steel Plant, *ACS Earth and Space Chemistry*, DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00171
- 46) Kurosaki, Y., Matoba, S., Iizuka, Y., Niwano, M., Tanikawa, T., Ando, T., Hori, H., Miyamoto, A., Fujita, S., and Aoki, T., (2020), Reconstruction of sea ice concentration in northern Baffin Bay using deuterium excess in a coastal ice core from the northwestern Greenland Ice Sheet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD031668, <https://doi.org/10.1029/2019JD031668>.
- 47) Matoba, S., M. Niwano, T. Tanikawa, Y. Iizuka, T. Yamasaki, Y. Kurosaki, T. Aoki, A. Hashimoto, M. Hosaka, and S. Sugiyama, (2018), Field activities at the SIGMA-A site, northwestern Greenland Ice Sheet, 2017, *Bull. Glaciol. Res.*, 36, 15-22, <https://doi.org/10.5331/bgr.18R01>.
- 48) Ménard, C. B., Niwano, M. (23th in 32 authors), et al., (2021), Scientific and human errors in a snow model intercomparison. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102, E61-E79, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329.1>.
- 49) Ménard, C. B., Niwano, M. (12nd in 15 authors), et al., (2019), Meteorological and evaluation datasets for snow modelling at ten reference sites: description of in situ and bias-corrected reanalysis data, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 865-880, <https://doi.org/10.5194/essd-11-865-2019>.
- 50) Mori, T., Oshima, N. (11th in 15 authors), et al., (2021), Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034110. doi:10.1029/2020JD034110.
- 51) Mori, T., Oshima, N. (6th in 9 authors), et al., (2020) Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032240, <https://doi.org/10.1029/2019JD032240>, 2020.
- 52) Moseid, K. O., Oshima, N. (10th in 12 authors), et al., (2020) Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 16023–16040, <https://doi.org/10.5194/acp-20-16023-2020>.
- 53) Moteki, N., K. Adachi, S. Ohata, A. Yoshida, T. Harigaya, M. Koike, and Y. Kondo (2017), Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating, *Nature Communications*, 8, 15329.
- 54) Niwano, M., Kajino, M., Kajikawa, T., Aoki, T., Kodama, Y., Tanikawa, T., and Matoba, S., (2021), Quantifying relative contributions of light-absorbing particles from domestic and foreign sources on snow melt at Sapporo, Japan during the 2011-2012 winter, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL093940. <https://doi.org/10.1029/2021GL093940>
- 55) Niwano, M., Box, J. E., Wehrlé, A., Vandecrux, B., Colgan, W. T., and Cappelen, J., (2021), Rainfall on the Greenland ice sheet: present-day climatology from a high-resolution non-

- hydrostatic polar regional climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL092942. <https://doi.org/10.1029/2021GL092942>
- 56) Niwano, M., Yamaguchi, S., Yamasaki, T., and Aoki, T., (2020), Near-surface snow physics data from a dog-sledge traverse expedition in the northwest Greenland ice sheet during 2018 spring. *Polar Data Journal*, 4, 133-144, <http://doi.org/10.20575/00000019>.
- 57) Niwano, M., Hashimoto, A., and Aoki, T., (2019), Cloud-driven modulations of Greenland ice sheet surface melt, *Sci. Rep.*, 9, 10380, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46152-5>.
- 58) Niwano, M., T. Aoki, A. Hashimoto, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Fujita, A. Tsushima, Y. Iizuka, R. Shimada, and M. Hori, (2018), NHM–SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, 12, 635-655, <https://doi.org/10.5194/tc-12-635-2018>.
- 59) Nomura, D., T. Tanikawa(4th in 22 authors), et al., (2020), Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019), *Bulletin of Glaciological Research* 38, 1-12.
- 60) Ohata, S., Koike, M., Yoshida, A., Moteki, N., Adachi, K., Oshima, N., Matsui, H., Eppers, O., Bozem, H., Zanatta, M., and Herber, A. B., (2021), Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861–15881.
- 61) Ohata, S., Oshima, N. (23rd in 23 authors), et al. (2021), Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748.
- 62) Ohata, S., A. Yoshida, N. Moteki, K. Adachi, Y. Takahashi, M. Kurisu, and M. Koike (2018), Abundance of Light-Absorbing Anthropogenic Iron Oxide Aerosols in the Urban Atmosphere and Their Emission Sources, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 8115–8134.
- 63) Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M., and Aoki, T., (2020), Physically based model of the contribution of red snow algal cells to temporal changes in albedo in northwest Greenland, *The Cryosphere*, 14, 2087–2101, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2087-2020>.
- 64) Onuma, Y., N. Takeuchi, S. Tanaka, N. Nagatsuka, M. Niwano, and T. Aoki, (2018), Observations and modelling of algal growth on a snowpack in north-western Greenland, *The Cryosphere*, 12, 2147-2158, <https://doi.org/10.5194/tc-12-2147-2018>.
- 65) Oshima, N., et al, (2020): Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0, *Prog. Earth. Planet. Sci.*, 7, 38, <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w>.
- 66) Parrish, D. D., Oshima, N. (8th in 11 authors), et al., (2021), Investigations on the anthropogenic reversal of the natural ozone gradient between northern and southern midlatitudes. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 9669–9679. doi:10.5194/acp-21-9669-2021.

(Highlight articles)

- 67) Sato, Y., M. Kajino (4th in 14 authors), et al. (2020), A Model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1 km resolution, *Atmos. Environ* X, 7, 100086, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2020.100086>.
- 68) Sedlacek II, A. J., K. Adachi (3rd in 6 authors), et al., (2018), Formation and evolution of tar balls from northwest tern US wildfires, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11289-11301.
- 69) Sekiyama, T. T. and M. Kajino (2020), Reproducibility of surface wind and tracer transport simulations over complex terrain using 5-, 3-, and 1-km grid models, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 59, 937-952, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0241.1>.
- 70) Stamnes, S., T. Tanikawa (5th in 11 authors), et al., (2018), Advantages of Measuring the Q Stokes Parameter in Addition to the Total Radiance I in the Detection of Absorbing Aerosols, *Frontiers in Earth Science* 6:34.
- 71) Sugiyama, S., Matoba, S. (13th in 36 authors), Niwano, M. (28th in 36 authors), et al., (2021), Rapidly changing glaciers, ocean and coastal environments, and their impact on human society in the Qaanaaq region, northwestern Greenland, *Polar Science*, 27, 100632, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100632>.
- 72) Sun, C. Z., Adachi, K., et al., (2020), Mixing State of Black Carbon Particles in Asian Outflow Observed at a Remote Site in Taiwan in the Spring of 2017. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032526. <https://doi.org/10.1029/2020JD032526>
- 73) Takegawa, N., Seto, T., Moteki, N., Koike, M., Oshima, N., Adachi, K., et al. (2020), Enhanced new particle formation above the marine boundary layer over the Yellow Sea: Potential impacts on cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031448. <https://doi.org/10.1029/2019JD031448>
- 74) Takigawa, M., M. Kajino (7th in 8 authors), et al., (2020), Can Delhi's pollution be affected by crop fires in the Punjab region?, *SOLA*, 16, 86-91, <https://doi.org/10.2151/sola.2020-015>.
- 75) Takeuchi, N., M. Niwano (6th in 7 authors), et al., (2018), Temporal variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in northwest Greenland, *Ann. Glaciol.*, 59, 21-30, <https://doi.org/10.1017/aog.2018.19>.
- 76) Tan, J., M. Kajino (15th in 19 authors), et al. (2020), Why do models perform differently on particulate matter over East Asia? A multi-model intercomparison study for MICS-Asia III, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 7393-7410, <https://doi.org/10.5194/acp-20-7393-2020>.
- 77) Tanikawa, T., (2022), Spectropolarimetry of snow and ice surfaces: measurements and radiative transfer calculations, Springer Series in Light Scattering 8, (Ed.) A. A. Kokhanovsky, Springer. (in press)
- 78) Tanikawa, T., K. Masuda, H. Ishimoto, T. Aoki, M. Hori, M. Niwano, A. Hachikubo, S. Matoba, K. Sugiura, T. Toyota, N. Ohkawara, and K. Stamnes (2021) Spectral degree of linear polarization and neutral points of polarization in snow and ice surfaces, *Journal of*

- Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 273, 107845.
- 79) Tanikawa, T., K. Kuchiki, T. Aoki, H. Ishimoto, A. Hachikubo, M. Niwano, M. Hosaka, S. Matoba, Y. Kodama, Y. Iwata, and K. Stamnes (2020), Effects of snow grain shape and mixing state of snow impurity on retrieval of snow physical parameters from ground-based optical instrument, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, e2019JD031858. <https://doi.org/10.1029/2019JD031858>
 - 80) Thornhill, G. D., Oshima, N. (23rd in 30 authors), et al. (2021) Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols – a multi-model comparison, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 853–874, <https://doi.org/10.5194/acp-21-853-2021>.
 - 81) Tobo, Y., K. Adachi, et al., (2019), Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles, *Nature Geoscience*, 12(4), 253-258.
 - 82) Toyoda, T., Aoki, T., Niwano, M., Tanikawa, T., Urakawa, L. S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Hirose, N., Yamanaka, G., (2020), Impact of observation-based snow albedo parameterization on global ocean simulation results, *Polar Science*, 100521, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100521>.
 - 83) Toyota, T., Ono, T., T. Tanikawa, P. Wongpan, and D. Nomura (2020) Solidification effects of snowfall on sea-ice freeze-up: Results from an onsite experimental study, *Annals of Glaciology*, 1-10. doi:10.1017/aog.2020.49
 - 84) Tsutaki, S., M. Niwano (5th in 5 authors), et al., (2017), Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016, *Ann. Glaciol.*, 58, 181-192, <https://doi.org/10.1017/aog.2017.7>.
 - 85) Turnock, S. T., Oshima, N. (16th in 24 authors), et al. (2020) Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14547–14579, <https://doi.org/10.5194/acp-20-14547-2020>.
 - 86) Vandecrux, B., Niwano, M. (11th in 13 authors), et al. (2020), Firn cold content evolution at nine sites on the Greenland ice sheet between 1998 and 2017, *J. Glaciol.*, 66, 591–602, <https://doi.org/10.1017/jog.2020.30>.
 - 87) Vandecrux, B., M. Niwano (21st in 24 authors), et al. (2020), The firn meltwater Retention Model Intercomparison Project (RetMIP): evaluation of nine firn models at four weather station sites on the Greenland ice sheet, *The Cryosphere*, 14, 3785–3810, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3785-2020>.
 - 88) Wehrlé, A., Box, J. E., Niwano, M., Anesio, A. M., Fausto, R. S., (2021), Greenland bare ice albedo from PROMICE automatic weather station measurements and Sentinel-3 satellite observations, *GEUS Bulletin*, 47, 5284. <https://doi.org/10.34194/geusb.v47.5284>
 - 89) Whaley, C. H., Oshima, N. (34th in 56 authors), et al., (2022): Model evaluation of short-lived climate forcers for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species, multi-model study, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 5775–5828, <https://doi.org/10.5194/acp-22-5775-2022>.
 - 90) Wongpan, P., T. Tanikawa (4th in 12 authors), et al., (2019), Using under-ice hyperspectral

- transmittance to determine land-fast sea-ice algal biomass in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *Annals of Glaciology*, 61(83), 454-463.
- 91) Yasunari, T. J., M. Niwano, Y. Fujiyoshi, A. Shimizu, M. Hayasaki, T. Aoki, A. M. da Silva, B. N. Holben, S. Matoba, N. Murao, S. Yamagata, and K-M. Kim (2017), An unreported Asian dust (Kosa) event in Hokkaido, Japan: A case study of March 2016, *SOLA*, 13, 96-101, <https://doi.org/10.2151/sola.2017-018>.
- 92) Yogo, Y., Y. Ioka, T. Tanikawa, M. Hosaka, H. Ishida and T. Aoki (2019), Algorithm theoretical basis for the Himawari-8,-9/AHI Cryosphere product, Part 1: Snow cover, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 64, 1-12.
- 93) Yoshida, A. Moteki N., and Adachi K., (2022), Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data, *Aerosol Sci. Technol.*, 10.1080/02786826.2022.2057839
- 94) Yoshida, Oshima, N., (8th in 10 authors), et al., (2020) Abundances and microphysical properties of light-absorbing iron oxide and black carbon aerosols over East Asia and the Arctic, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032301, <https://doi.org/10.1029/2019JD032301>.
- 95) Yoshida, A., K. Adachi (4th in 7 authors), et al., (2018), Abundance and Emission Flux of the Anthropogenic Iron Oxide Aerosols From the East Asian Continental Outflow, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(19), 11,194-111,209.
- 96) Yoshizue, Adachi, K. (3rd in 7 authors), et al., (2020) Detection of Aerosol Particles from Siberian Biomass Burning over the Western North Pacific. *Atmosphere* 2020, 11, 1175.
- 97) Yoshizue, M., Iwamoto, Y., Adachi, K. et al. (2019), Individual particle analysis of marine aerosols collected during the North–South transect cruise in the Pacific Ocean and its marginal seas. *J Oceanogr* 75, 513–524. <https://doi.org/10.1007/s10872-019-00519-4>.
- 98) Yukimoto, S., N. Oshima (4th in 17 authors), M. Hosaka (10th in 17 authors), et al., (2019), The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component, *J. Meteor. Soc. Japan*, 97(5), 931-965.
- 99) Zanis, P., Oshima, N. (13rd in 15 authors), et al., (2022), Climate change penalty and benefit on surface ozone: a global perspective based on CMIP6 earth system models. *Environ. Res. Lett.*, 17, 024014. doi:10.1088/1748-9326/ac4a34.
- 100) Zanis, P., Oshima, N. (14nd in 18 authors), et al., (2020) Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8381–8404, <https://doi.org/10.5194/acp-20-8381-2020>.
- 101) 青木輝夫, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 谷川朋範, 竹内望, 山口悟, 本山秀明, 藤田耕史, 山崎哲秀, 飯塚芳徳, 堀雅裕, 島田利元, 植竹淳, 永塚尚子, 大沼友貴彦, 橋本明弘, 石元裕史, 田中泰宙, 大島長, 梶野瑞王, 足立光司, 黒崎豊, 杉山慎, 津滝俊, 東久美子, 八久保晶弘, 川上薫, 木名瀬健 (2021), SIGMAおよび関連プロジェクトによるグリーンランド氷床上の大気・雪氷・雪氷微生物研究– ArCS IIプロジェクトへのつながり –. *雪氷*, 83, 169-

- 191.
- 102) 川端康弘, 梶野瑞王, 財前祐二, 足立光司, 田中泰宙, 清野直子 (2021), 東京都心における視程の変化, 天気, 68(1), 5-12. https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2021/2021_01_0005.pdf
- 103) 木村宏海, 八久保晶弘, 舘山一孝, 谷川朋範, 小嶋真輔 (2021) 塩を含む積雪の含水率測定法, 雪氷(投稿中)
- 104) 黒崎 豊, 的場澄人, 飯塚芳徳, 庭野匡思, 谷川朋範, 青木輝夫 (2018), バフィン湾周辺の環境がグリーンランド北西部の降雪中のd-excessと化学成分に与える影響, 雪氷, 80(6), 515-529.
- 105) 財前祐二, 折笠成宏, 田尻拓也, 青木輝夫, 庭野匡思 (2018), 冬季から初春季につくばで測定されたエアロゾル吸湿パラメータ κ の変化, エアロゾル研究, 33(1), 5-11, <https://doi.org/10.11203/jar.33.5>.
- 106) 齊藤和之, 森淳子, 町屋広和, 宮崎真, 伊勢武史, 末吉哲雄, 山崎剛, 飯島慈裕, 伊川浩樹, 市井和仁, 伊藤昭彦, 大石龍太, 太田岳史, 堅田元喜, 小谷亜由美, 佐々井崇博, 佐藤篤司, 佐藤永, 杉本敦子, 鈴木力英, 田中克典, 新田友子, 庭野匡思, Eleanor Burke, 朴昊澤, 山口悟 (2018), 北極陸域モデル相互比較GTMIPの熱・水収支解析, 雪氷, 80(2), 159-174.
- 107) 高橋麗, 梶野瑞王, 津口裕茂, 林修吾, 橋本明弘, 雲凝結核が降水に与える影響—平成27年9月関東・東北豪雨を対象として—, Aerosol impacts on precipitation - a case study on the Kanto-Tohoku heavy rainfall event in September 2015—, エアロゾル研究, Earozoru Kenkyu, (in Japanese), 36(1), 55-64, doi:10.11203/jar.36.55.
- 108) 谷川朋範, 青木輝夫, 堀雅裕, 八久保晶弘, 庭野匡思, 杉浦幸之助, 的場澄人, 島田利元 (2021), 光学リモートセンシングによる雪氷プロダクトの地上検証観測, 日本リモートセンシング学会, 41, 582-594.
- 109) 谷川朋範, 余郷友祐, 井岡佑介, 深堀正志, 保坂征宏, 青木輝夫, 浜田啓次, 赤坂有史 (2018), 「静止気象衛星ひまわり 8号・9号とその利用」第11章「積雪・海氷」, 気象研究ノート第238号, 135-145.
- 110) 庭野匡思, 青木輝夫 (2021), 気象研究所における積雪モデリング研究, 大気化学研究, 44, 044A03.
- 111) 庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 大島 長, 梶野瑞王, 大沼友貴彦, 藤田耕史, 山口 悟, 島田利元, 竹内 望, 津滝 俊, 本山秀明, 石井正好, 杉山 慎, 平沢尚彦, 阿部彩子 (2021), 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み: 2020年夏最新版. 雪氷, 83, 27-50.
- 112) 庭野匡思 (2019), グリーンランド氷床における近年の急激な雪氷質量損失 —現地観測と数値モデルによるメカニズム理解の試み—, 天気, 66(3), 225-230, https://doi.org/10.24761/tenki.66.3_225.
- 113) 庭野匡思, 山崎哲秀, 山口 悟 (2018), 北極犬橇観測行2018, 雪氷, 80(6), 588-592.
- 114) 庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 山口悟, 谷川朋範, 保坂征宏, 2017: 2015-2016冬期の新潟県アメダスへの積雪変質モデルSMAPの適用, 雪氷, 79(6), 525-538
- 115) 廣瀬聡, 青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 山口悟, 山崎哲秀 (2021), 北西グリーンランド氷床上SIGMA-Aサイトで観測された雪面熱収支の特徴. 雪氷, 83, 143-154.

(2) 口頭発表(計182本。掲載は本報告書に結果を引用しているもののみ。)

1. 對馬あかね, 庭野匡思, 青木輝夫, 谷川朋範, 的場澄人, 大河原望 (2019): 2007-2018年冬季の札幌の表面積雪中の EC、OC および dust 濃度の変動傾向, 日本雪氷学会/日本雪工学会, 2019年9月8-11日, B2-2.
2. 広沢陽一郎, 青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人, 兒玉裕二, 谷川朋範 (2018): 札幌で9冬期間に観測された積雪不純物がアルベドと放射強制力に与える効果, 2018年5月20日-5月24日, 日本地球惑星科学連合2018年度連合大会, 幕張メッセ, 千葉, ACC28-P08.(発表日: 2018年5月23日)

(3) 出願特許: なし

(4) 受賞等

- ・ (公社)日本気象学会、2019年気象集誌論文賞、Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii (2019), The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component, J. Meteor. Soc. Japan, 97(5), 931-965. 2019年12月21日
- ・ 日本雪氷学会 平田賞(日本雪氷学会): 2017, 庭野匡思, 「積雪変質モデルSMAPの開発とその応用」

(5) 一般への公表・報道等

- ・ 成果の記者発表(2022年4月7日、プレスリリース、「20世紀中頃の北極寒冷化は人間活動による大気中の微粒子の増大と気候の自然変動が複合的に影響～北極温暖化の将来予測の信頼性向上に貢献～」), <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20220407.html>
- ・ 庭野匡思, 勝山祐太 (2022): 雪氷圏における気候変動と気象防災, 気象雪氷サイエンスカフェつくば, 主催:(公社)日本雪氷学会(関東・中部・西日本支部)/(公社)日本気象学会(教育と普及委員会)/(一社)日本気象予報士会, http://meteocafe.blogspot.com/2022/01/213_22.html, 2022年2月14日.
- ・ 成果の記者発表(2022年2月9日、プレスリリース、「北極域のブラックカーボン濃度測定標準化に成功-北極温暖化に与える影響を高精度で推定可能に-」), <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20220209.html>
- ・ 池辺豊, 2022: レポート「温暖化したら降雪・積雪はどうなる? ~サイエンスアゴラ2021講演会から~」, サイエンスポータル編集部, <https://news.yahoo.co.jp/articles/50b7bdece2871465ed01d5dbd3807ae77e745f3f>
- ・ 庭野匡思, 2021: 講演1「降雪と積雪」, サイエンスアゴラ「温暖化時代の雪と私達の暮らし~雪氷研究の最前線から~」, No.06-C17, 2021年11月6日.
- ・ 成果の記者発表(2021年11月4日、プレスリリース、「森林火災が北極大気を加熱する黒

- 色炭素粒子の重要な発生源であることを実証～北極温暖化の将来予測に貢献～」), <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211105.html>
- ・ 庭野匡思, 2021: 気象研究所報道発表「札幌の積雪中に存在する光吸収性粒子が融雪に与える影響を国内・国外由来に分離して推定しました」, 2021年10月26日, https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R03/031026/press_031026.html
 - ・ 環境展望台, 国内ニュース「気象研、「氷床に降る雨」の時空間変動を詳細解析」, <https://tenbou.nies.go.jp/news/jnews/detail.php?i=32379>
 - ・ 読売新聞記事「グリーンランド雨量増 氷床解ける原因 温暖化影響か」(2021年8月24日)
 - ・ 庭野匡思, 2021: 気象研究所報道発表「近年のグリーンランド氷床で増加している降雨の変動の実態を 詳細に定量化することに成功」, 2021年8月23日, https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R03/030823/press_030823.html
 - ・ 成果の記者発表(2021年5月7日、プレスリリース、「コロナ禍によるCO2等排出量の減少が地球温暖化に与える影響は限定的」), https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20210507/
 - ・ 成果の記者発表(2021年5月6日、プレスリリース、「SO2排出削減にもかかわらず硫酸エアロゾル減少が鈍化する要因を特定」), <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210506.html>
 - ・ 庭野匡思, 2020: 令和2年度気象研究所研究成果発表会「北極域の急速な温暖化」, 2020年12月16日～2021年1月27日, オンライン, <https://youtu.be/yJEbKmKEtIY>
 - ・ 庭野匡思, 2020: 気象研究所お知らせ「近年のグリーンランド氷床の融解量評価に関する国際共同研究に貢献しました」発表, 2020年11月13日, https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021113a/021113_oshirase.html
 - ・ Shukman, D. (BBC), 2019: Climate change: Greenland's ice faces melting 'death sentence', <https://www.bbc.com/news/science-environment-49483580>

(6) 研究分野における成果の発展・牽引

第6期結合モデル相互比較計画(CMIP6)により承認されている複数のモデル相互比較計画(RFMIP, AerChemMIP, DAMIP)に気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)を用いて参加することで、国際的な枠組みでエアロゾルに関する研究を実施し、共同で10本以上の論文を発表した。これらの一部はIPCC AR6で引用されており、またMRI-ESM2.0によるモデル計算結果は、IPCC AR6 の図に掲載された。これらの成果は、当該分野の進展・発展に大きく貢献することが期待される。

北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)/短寿命気候強制因子専門家会合グループメンバーとして、MRI-ESM2.0を用いて、LAAなどを含むエアロゾルやオゾン等が北極気候に及ぼす影響を評価した。また、グループメンバーと協力し、AMAPによる短寿命気候強制因子に関する評価報告書の共同執筆を行った。これらの成果は、国際的な北極気候研究の進展・発展に大きく貢献することが期待される。

ESM-SnowMIPにおいて、本研究課題の重要な観測拠点である札幌は、1次元モデル相互比較の実施・検証サイトにアジアから唯一選定され、検証データ論文(Ménard et al., 2019)では、

札幌の気象・雪氷データが出版されている。積雪変質モデルSMAPも参加した1次元モデル相互比較の結果は現在査読中であるが、SMAPは本モデル相互比較プロジェクトに参画した多種多様なモデルの中で、最も詳細な積雪物理過程を考慮したモデルであることが記述されている。

GrSMBMIP(Fettweis et al., 2020)は、グリーンランド氷床表面の雪氷質量収支を計算するモデルの相互比較プロジェクトである。参加したモデルの種類は数種に及ぶが、本研究課題の予算も活用して開発されたNHM-SMAP等の領域気候モデルが、最も推定精度が良いと結論付けられている。

(7) 政策への寄与・貢献

第6期結合モデル相互比較計画(CMIP6)の枠組みで実施された気象研究所地球システムモデルによる計算結果と研究成果は、IPCC第6次評価報告書(AR6)に対して貢献した。また、北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP)の短寿命気候強制因子に関する評価報告書の共同執筆を行い、北極評議会/AMAPでの政策決定者向け要約の策定に貢献した。また、当研究グループが参画した国際数値モデル相互比較プロジェクト(ESM-SnowMIP、GrSMBMIP)もIPCC AR6に直接的に貢献した。