

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-2003 地球温暖化に関わる北極エアロゾルの動態解明と放射影響評価
(JPMEERF20202003)

令和2年度～令和4年度

Arctic Aerosols: Behavior, Radiative Forcing, and Linkage with Global Warming

〈研究代表機関〉

国立大学法人東京大学

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学

国土交通省気象庁気象研究所

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	21
II-1 エアロゾル・雲微物理観測と総合評価 (国立大学法人東京大学)	21
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 エアロゾル化学組成観測と数値モデルによるプロセス評価 (国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学)	33
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 エアロゾル分析と気候モデルによる評価 (国土交通省気象庁気象研究所)	48
要旨	

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-4 BC・氷晶核観測とアイスコア分析	・・・・・・・・・・	63
(大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所)		

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細	・・・・・・・・・・	79
IV. 英文Abstract	・・・・・・・・・・	107

・ 成果の概要

課題名 2-2003 地球温暖化に関わる北極エアロゾルの動態解明と放射影響評価

課題代表者名 小池 真 (国立大学法人東京大学大学院理学系研究科准教授)

重点課題 主：【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

副：【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び
評価・解明 に関する研究

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (2-2) 気候変動に関わる北極域におけるブラックカーボンエア
ロゾルの動態解明と 影響評価

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

111,020千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和2年度：39,650千円、令和3年度：35,685千円、令和4年度：35,685千円)

研究体制

(サブテーマ1) エアロゾル・雲微物理観測と総合評価 (国立大学法人東京大学)

(サブテーマ2) エアロゾル化学組成観測と数値モデルによるプロセス評価 (国立大学法人東海国
立大学機構名古屋大学)

(サブテーマ3) エアロゾル分析と気候モデルによる評価 (国土交通省気象庁気象研究所)

(サブテーマ4) BC・氷晶核観測とアイスコア分析 (大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
国立極地研究所)

研究協力機関

「研究協力機関はない。」

本研究のキーワード 地球温暖化、環境変化、北極、エアロゾル、ブラックカーボン、雲、
アイスコア、気候モデル、アセスメントレポート

1. はじめに（研究背景等）

太陽放射を強く吸収するブラックカーボン・エアロゾル（BC）は、グローバル平均で二酸化炭素、メタンについて大きな正の放射強制力をもつと見積もられている。また北極圏ではBCの雪氷面への沈着によるアルベド（反射率）低下がアイス・アルベド・フィードバックを助長させ、さらに温暖化を増幅させている可能性がある。このため気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や北極評議会では、温暖化抑制のためのBC排出量削減へ向けた検討が始まっている。しかしながら、これまで欧米の研究機関が実施してきた北極BC観測は測定精度の検証が不十分であり、お互いの測定値の整合性にも大きな不確定性があった。このため、日本で開発してきた高精度BC測定器であるCOSMOSを使った北極BCの信頼性の高い動態把握と、COSMOSを基準とすることにより既存の他のBC観測のお互いの整合性を検証することが必要であった。日本で開発されたBC測定装置を世界標準とすることを目指すことについては、日本政府の北極政策プロジェクトチームの戦略に合致したものである。

一方において、今後は負の放射強制力を持つ（地球温暖化を抑制する）人為的な硫酸エアロゾルの減少が予測されている。このため、北極やグローバルスケールでの温暖化抑制効果が弱まり、温室効果気体等による温暖化を加速させる可能性がある。従ってBCに重点を置きつつも、エアロゾル全体での直接的な放射効果（エアロゾル-放射相互作用効果）および雲影響を通じた間接効果（エアロゾル-雲相互作用効果）を、北極を中心にグローバルに評価する研究が必要である。北極評議会の作業部会では、短寿命気候強制力因子（SLCFs）の報告書の取りまとめ、間もなく出版（公開）予定となっているが、この報告書もBCに重きを置きながらも、エアロゾル全体の影響まで含めたものとなっている。

現状を把握する正確な観測、定量化のための詳細な数値モデル、そして産業革命以降の人為的排出源の影響を評価するアイスコア分析を統合した研究が強く求められている。

2. 研究開発目的

本研究では日本が強みとする観測と数値モデル計算により、BCを含むエアロゾル全体の北極での動態とその雲微物理影響を明らかにする。そして直接的・間接的な放射影響（エアロゾル-放射相互作用効果とエアロゾル-雲相互作用効果）を北極に重点をおきながら、グローバルに評価する。これらの研究により、IPCCおよび北極評議会の関連作業部会等に貢献することを目指す。

(A) 北極およびアジアのBCの動態

これまで我々がBC測定器COSMOSにより構築してきた、北極観測ネットワーク（4地点）とアジア（3地点）での観測により、BCの動態を明らかにする。これと並行して、これらの北極内での各観測地点において、欧米の研究機関により実施されているBC観測との比較・評価を行う。また観測により検証された数値モデル計算も活用することにより、アジアなど中緯度の人為的発生源、高緯度の森林火災、北極圏内での天然ガス燃焼（フレアリング）の北極BCへの寄与を評価する。

(B) エアロゾルの直接・間接放射効果

北極の代表的な観測地点であるニーオルスン（ノルウェー領スヴァールバル諸島）において、人為起源・自然起源エアロゾルの動態とその雲微物理への影響を評価する。このために、私たちが開発してきた各種の最先端の測定技術によるエアロゾル・雲観測を実施する。これらの観測により改良・検証された数値モデルにより、エアロゾルの直接・間接放射効果（エアロゾル-放射相互作用・エアロゾル-雲相互作用）を、北極に重点をおきながらグローバルに推定する。

(C) 産業革命以前から現在までのエアロゾルの動態と放射効果

北極のアイスコアの分析により、産業革命以前から現在までの、BCやダスト等のエアロゾルの動態を明らかにし、数値モデルにより人為起源・自然起源エアロゾルの動態と放射影響を評価する。

3. 研究目標

全体目標	北極とそれを含むグローバルな温暖化に関わるBC および他のエアロゾル全体の動態とその直接・間接放射効果（放射強制力）を、北極に重点をおきながらグローバルに評価する。これらの観測・数値モデル研究を論文化することにより、IPCC レポートや北極評議会によるアセスメントレポートに貢献することを旨とする。
サブテーマ1	エアロゾル・雲微物理観測と総合評価
サブテーマリーダー/所属機関	小池真/東京大学
目標	BC 測定器COSMOS の北極観測ネットワークにより、北極内でのBC の時空間変動を明らかにするとともに、既存の北極BC 観測の精度を評価する。ニーオルスンにおいて固体エアロゾルの観測を実施し、その動態と雲微物理量との関係性を評価する。エアロゾルの大発生源であるアジア（福江島観測所など）においても継続的なエアロゾル観測を実施し、動態を明らかにする。
サブテーマ2	エアロゾル化学組成観測と数値モデルによるプロセス評価
サブテーマリーダー/所属機関	持田陸宏/名古屋大学
目標	ニーオルスンにおいてエアロゾル採取を実施し、雲凝結核として働くエアロゾルの動態を、特に有機エアロゾルの寄与の観点から評価する。数値モデルにより、北極および全球スケールでの人為起源・自然起源エアロゾルの動態と、直接的・間接的な放射効果を推定する。
サブテーマ3	エアロゾル分析と気候モデルによる評価
サブテーマリーダー/所属機関	大島長/気象庁気象研究所
目標	北極ニーオルスンにおいて、大気エアロゾルや雲粒中エアロゾル（残渣粒子）試料を取得し、電子顕微鏡分析する。電子顕微鏡でしか測定できない粒子形態、組成、混合状態の解析により、北極エアロゾルの微物理特性・動態を評価する。気象研究所地球システムモデル（気候モデル）を本研究等で得られる大気・積雪・アイスコア等の観測データを用いて検証・改良をするとともに、北極・全球域の1850年から現在までのBCや他エアロゾルの動態と放射効果を評価する。
サブテーマ4	BC・氷晶核観測とアイスコア分析
サブテーマリーダー/所属機関	東久美子/国立極地研究所
目標	北極およびアジアにおいてCOSMOSによるBC観測を実施し、品質管理されたデータセットを作成して他のサブテーマに提供する。COSMOSデータの精度をトレースできる方法を確認し、他国の他の測定法によるBCデータと比較する。さらに論文などにBCの高精度測定法などを明文化することにより、COSMOSの標準化の基盤

を形成する。

またニーオルスンにおいてエアロゾル捕集を行い、氷晶核として働くエアロゾルの数濃度とその季節変化を評価する。アイスコア分析にもとづき、過去150年間のBCやダスト等のエアロゾルの経年変化を評価する。

本研究は4つのサブテーマにより構成されているが、「2. 研究開発目的」に掲げた3つの研究目的（下図の研究目的の(A)-(C)）に対して、すべてのサブテーマが有機的に連携することにより貢献した。このため、サブテーマごとに研究内容や成果を記載している本報告書では、それぞれの目的に対応した研究内容が分散する形となり、やや全体の見通しが悪いものとなっている。研究の全体像の理解のために、下記の研究体制と内容の図を適宜参照されたい。

研究目的

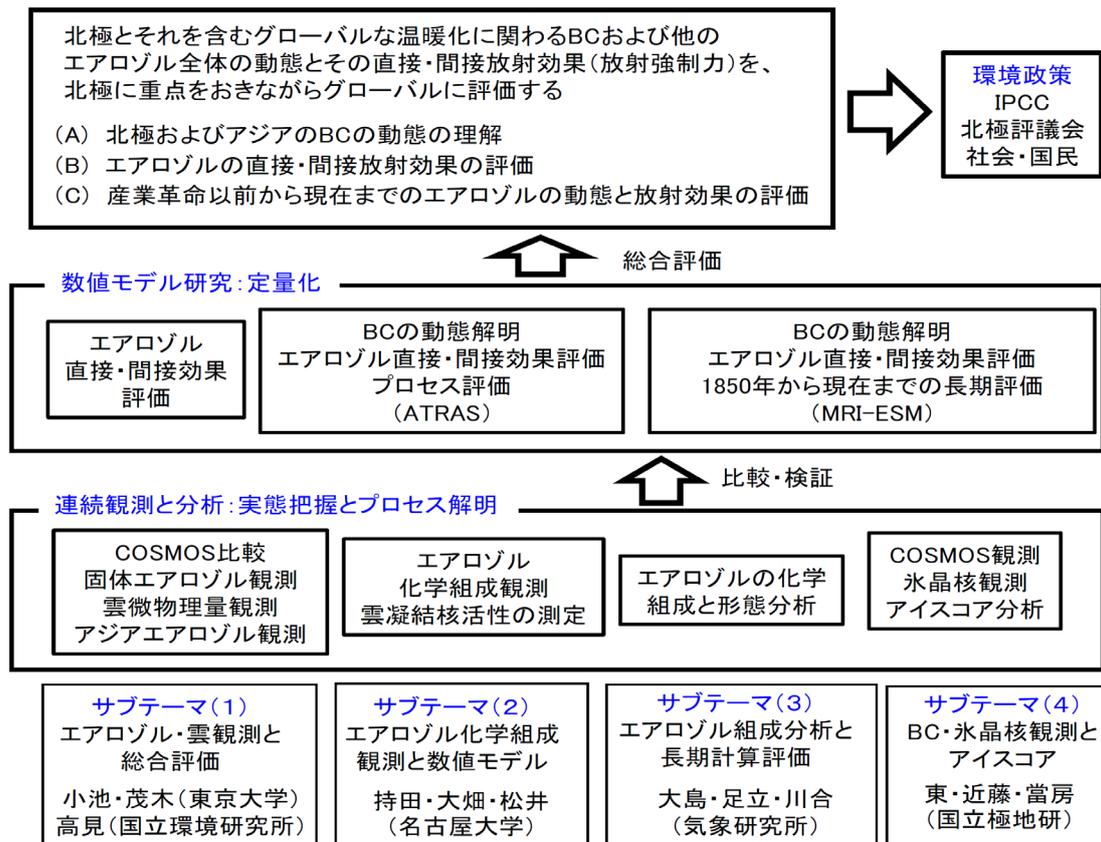


図-0.1 研究体制と内容

4. 研究開発内容

(1) 北極およびアジアのBCの動態の理解

● 北極BCのネットワーク観測と統一BCデータの作成 (サブテーマ1, 2, 3, 4)

本研究では私たちが開発してきたBC質量濃度測定器 (COSMOS) を使ったBCの高精度の連続観測を、北極域の代表的な観測地点であるノルウェー領スヴァールバル諸島のニーオルスン、アラスカのウトキアグヴィク (バロー)、カナダのアラート、フィンランドのパラスの4か所において実施した (図-0.2)。COSMOSはBC濃度を15%の精度で測定できることを実証してきている。そこでこれらの観測地点で欧米の研究機関が実施してきている他のBC測定技術 (MAAP、PSAP、Aethalometer) により得られた同時観測

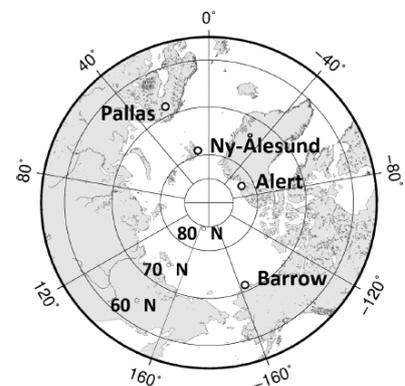


図-0.2 BC測定器COSMOSによる北極BCネットワーク観測地点

データとCOSMOSのデータを比較し、他のデータを絶対値の保証されているCOSMOSの濃度スケールと一致させるための変換係数とその安定性を調べた。

BCの大発生源であるアジア（日本およびインド）においても、COSMOSによるBCの連続観測を実施した。またBC以外のエアロゾルの効果も総合的に評価するために、長崎県五島列島福江島においても継続的なエアロゾル観測を実施し、冬季における越境大気汚染の実態などを調べた。

● 航空機観測に基づく北極BC動態解明（サブテーマ1,2,3）

北極大気中のBCの高度分布観測は、その発生源・輸送過程の理解や、放射効果の定量化の観点から重要である。しかしながら北極域での航空機観測は容易ではないため、その数は限られている。本研究の研究グループは、2018年3-4月にドイツのアルフレッド・ウェーゲナー研究所（AWI）が中心となり実施した北極域の国際航空機観測PAMARCMiP2018に参加し、BCなどの観測を実施した。本研究ではこの観測により得られたデータを解析した。具体的には、春期に実施された過去の航空機観測との比較を、特にバイオマス燃焼の影響の年々変動の観点から行った。

● 北極の降雨・降雪中BCの動態（サブテーマ1,2,3,4）

北極の雪氷中のBCは、雪氷の光吸収効率を増加させ、アイス・アルベド・フィードバックを加速させる可能性がある。雪氷中BCのほとんどは、降雨・降雪により大気からもたらされる考えられている。この過程は同時に、大気からのBCの除去過程としても重要であり、BCの長距離輸送の鍵となる過程である。しかしながら、これまで通年を通じた北極での降雨・降雪中BCの連続観測はなかった。そこで本研究では、ニーオルスンおよびパローにおいて降水の通年にわたる採取を行い、日本で分析した。

● 数値モデルによる北極BCの発生源寄与の推定（サブテーマ2）

北極大気中のBCは、アジアなど北極外から多く輸送されてくる。本研究では、北極BCの動態およびその発生源を推定するために、全球気候-エアロゾルモデルCAM-ATRASのさまざまな改良を行った。特に北極BCのモデル計算で重要となる、エアロゾルの降水による除去過程のモデル表現の改良を行った。また北極域におけるBCの発生源寄与を推定するために、様々な発生源からのBCの放出・輸送・変質・除去過程を個別に追跡・計算できるタグモデルを開発し、CAM-ATRASに導入した。全球を13の領域にわけ、それぞれの領域から放出される人為起源（化石燃料・バイオ燃料の燃焼起源）とバイオマス燃焼起源のBCについて、大気中での輸送・変質・除去過程を別々の変数（トレーサー）を用いて計算した。

（2）エアロゾルの直接・間接放射効果の評価

● 複素散乱振幅測定技術による固体エアロゾル分析（サブテーマ1,2）

エアロゾルの雲への影響は、水雲粒子を生成する雲凝結核エアロゾルと、氷雲粒子を生成する氷晶核エアロゾルの影響がある。このうち氷晶核として働くエアロゾルについては、その化学種、存在量、時間変動といった基本的な描像さえ得られていないのが現状である。このため、北極域で多く見られる混相雲（過冷却水滴と氷粒子の両方からなる雲）への人為的なエアロゾルの影響評価には大きな不確実性がある。氷晶核として働くエアロゾルはBC、鉱物ダスト粒子、生物粒子等の固体粒子であると考えられる。そこで本研究では、固体エアロゾルの化学種・粒径・数濃度の同時定量が可能な新しい測定技術（複素散乱振幅センシング技術）を開発した。そして様々な鉱物ダスト粒子などの標準粒子を測定することによりその測定技術の有効性を確認し、実大気観測への応用を実現した。

● 大気エアロゾルの化学成分分析（サブテーマ2）

北極域の大気エアロゾルの化学組成を把握し、化学組成ごとの動態を解明するために、エアロゾルの捕集装置を開発し、ニーオルスンのゼッペリン山観測所において連続的なフィルター・サンプリングを実施した。このエアロゾルを捕集したフィルターを日本に輸送の上で、フーリエ変換型赤外分光法（FTIR）およびイオンクロマトグラフ法による化学分析を行った。FTIR分光分析法では有機エアロゾルの大気濃度等を定量し、またイオンクロマトグラフ法では無機イオンの大気濃度を定量した。さらにエアロゾルの雲凝結核特性を調べるために、吸湿タンデム電気移動度分析器（HTDMA）を用いて、ニーオルスンで採取された大気エアロゾルの吸湿特性を調べた。

● 大気エアロゾルの電子顕微鏡分析（サブテーマ3）

本研究では、北極域の大気エアロゾルの化学組成とともに水雲粒子や氷雲粒子中に含まれるエアロゾル（雲残渣粒子）の化学組成の分析を電子顕微鏡を用いて実施した。前者は大気エアロゾルを直接フィルター捕集し、また後者は雲粒子をインレット内で蒸発させた上で残渣粒子をフィルター捕集した。これらのフィルターを日本に輸送し、透過型電子顕微鏡を用いた分析（画像解析や組成分析）を行った。また2018年にグリーンランドのノルド基地で採取した試料の分析を行い、ニーオルスン試料と比較することで、北極における普遍的なエアロゾル粒子の微物理・化学特性を明らかにする解析を行った。

● 氷晶核粒子の観測（サブテーマ4）

本研究ではまた、北極大気中の氷晶核粒子の数濃度変動の観測を実施した。北極域の代表的な観測地点であるスヴァールバル諸島のニーオルスンのゼッペリン山観測所において大気エアロゾルをフィルター捕集し、日本で分析した。低温になるほど多くのエアロゾルが氷晶核粒子として働くため、その濃度測定は、温度ごとに測定する必要がある。そこで本研では、幅広い温度域で適用できるように開発・改良されたオリジナルの水滴凍結法（CRAFT）を用いることにより、北極域下層雲があらわれる $-30^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の温度条件下における氷晶核粒子の数濃度を高精度で測定した。

● 氷粒子と氷晶核粒子（エアロゾル）との対応（サブテーマ1,4）

本研究ではさらに、北極域では唯一となる個別の降水粒子の連続観測をニーオルスンのゼッペリン山観測所で行い、この観測に基づいて氷晶核粒子（エアロゾル）と氷雲粒子との対応について調べた。本年度はケルン大学との共同研究により、ニーオルスンの雲レーダ・ライダ観測に基づき単層の氷を含む雲を抽出した。雲レーダ・ライダにより上空に混相雲が検出された時の直径 $500\mu\text{m}$ 以上の降水粒子は全て氷粒子であると仮定して解析を進めた。氷晶核数濃度としては、ゼッペリン山観測所で観測された典型的な数濃度を採用した。氷晶核数濃度は気温に依存して変化するため、雲頂気温に対応した値を使用した。降水粒子は数濃度フラックスを測定しているため、氷晶核粒子との比較も数濃度フラックスとして比較した。

● 数値モデルによる雲凝結核・氷晶核粒子の雲影響（エアロゾル-雲相互作用）評価（サブテーマ2,4）

北極域および全球スケールでのエアロゾル-雲相互作用の推定を高度化するために、雲凝結核（水雲粒子を形成するエアロゾル）と氷晶核（氷雲粒子を形成するエアロゾル）の数値モデル表現の改良を行った。雲凝結核については、エアロゾルの数濃度とその粒径分布の再現が鍵となるため、新粒子生成と有機エアロゾル生成を詳細に表現した。また氷晶核については、主要な役割と果たしているとされる鉱物ダストについて、氷晶核パラメタリゼーションの導入や放出スキームの改良を行った。

（3）産業革命以前から現在までのエアロゾルの動態と放射効果の評価

● アイスコア分析（サブテーマ4）

北極域のエアロゾルの動態やその雪氷面反射率（アルベド）などへの影響を正確に把握するには、産業革命以前からの長期に及ぶ観測データが必要である。数十年を超える長期観測データが殆どない北極域では、アイスコアのデータがほぼ唯一の情報源である。そこで本研究はグリーンランド北西部と北東部で掘削したアイスコアを分析し、アイスコアに含まれるBCの濃度と粒径および鉱物ダストの粒径・組成の変動を明らかにした。

● 気候モデルによるBCとその他のエアロゾルによる有効放射強制力の評価（サブテーマ3,4）

本研究では、気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2.0）を、近年実施された観測を用いて検証・改良を行った。その上で、産業革命前から現在まで（1850-2014年）を対象とした歴史実験計算および将来シナリオ実験計算（2015-2100年）を実施した。モデル計算で使用する排出量データは、第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）で提供された排出量データや境界条件を使用した。また、CMIP6を構成する各種の相互比較計画（RFMIP、AerChemMIP、DAMIP）のためのモデル計算を実施した。さらに、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（SLCFs）のアセスメントレポートのための枠組みで、AMAPで提供された排出量データに基づき、近年を対象とした過去再現実験（1990-2015年）、放射強制力の推定実験、将来シナリオ実験（2015-2050年）を実施した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

(1) 北極およびアジアのBCの動態の理解

● 北極BCのネットワーク観測と統一BCデータの作成 (サブテーマ1, 2, 3, 4)

本研究では、北極4地点においてCOSMOSと欧米の研究機関のBC観測との詳細な比較を実施した。具体的には、カナダのアラート（カナダ環境・気候変動省のPSAPとAethalometer）、ノルウェー領のニーオルスン（ストックホルム大学のPSAPとAethalometer）、アラスカのバロー（米国海洋大気庁のPSAPとCLAP）、フィンランドのパラス（フィンランド気象研究所のMAAP）との比較を実施した（図-0.3）。またアジアの観測地点として福江島（海洋研究開発機構のMAAP）での観測とも比較した。これらのCOSMOS以外のBC測定では、BCを含む全てのエアロゾルをフィルターに捕集し、各種補正を施すことにより光吸収係数（ $b_{\text{abs}}(\text{m}^{-1})$ ）が得られる。BC質量濃度 $M_{\text{BC}}(\text{ng m}^{-3})$ は、BCの質量光吸収断面積 $MAC(\text{m}^2 \text{ng}^{-1})$ を仮定することにより、測定で得られた $b_{\text{abs}}(\text{m}^{-1})$ から $M_{\text{BC}} = b_{\text{abs}}/MAC$ により求められる。本研究では、これらの他の測定で得られる b_{abs} を精度保証されたCOSMOSの M_{BC} と一致するように MAC の値を決定することにより、COSMOSのBC濃度スケールに統一されたBC質量濃度をすべての観測所で求めた。

このために本研究ではまず、BC質量濃度の高精度観測が可能なSP2（単一粒子レーザー誘起白熱法）との比較により、COSMOSによるBC質量濃度測定が北極においても15%程度の絶対精度があることを確認した（図-0.3 (a), (b)）。次に、COSMOSのBC質量濃度観測 M_{BC} と各種測定器によって得られた光吸収係数 b_{abs} との時系列の比較（図-0.3 (c)）および散布図による比較（図-0.3 (d)-(h)）から、 $MAC = b_{\text{abs}}/M_{\text{BC}}$ の値を決定した。この結果、各観測所の測定器ごとに MAC の値は異なるものの、それぞれ適切な値を用いればCOSMOSのBC質量濃度スケールに規格化された質量濃度に変換可能であることが分かった。本研究により初めて、お互いの絶対値が比較可能な北極域でのBC質量濃度のデータセットが作成できた。この統一データは本研究の数値モデル計算の検証・改良において活用されたと共に、今後、世界の様々な研究において活用されることが見込まれる。（Ohata et al., 2021a）

本研究ではまた、BCの大発生源であるインドのニューデリーにおいて2019年からCOSMOSによるBC濃度の観測を開始した。この結果、冬・春に濃度が高く、夏に低下するという大きな季節変化をすること

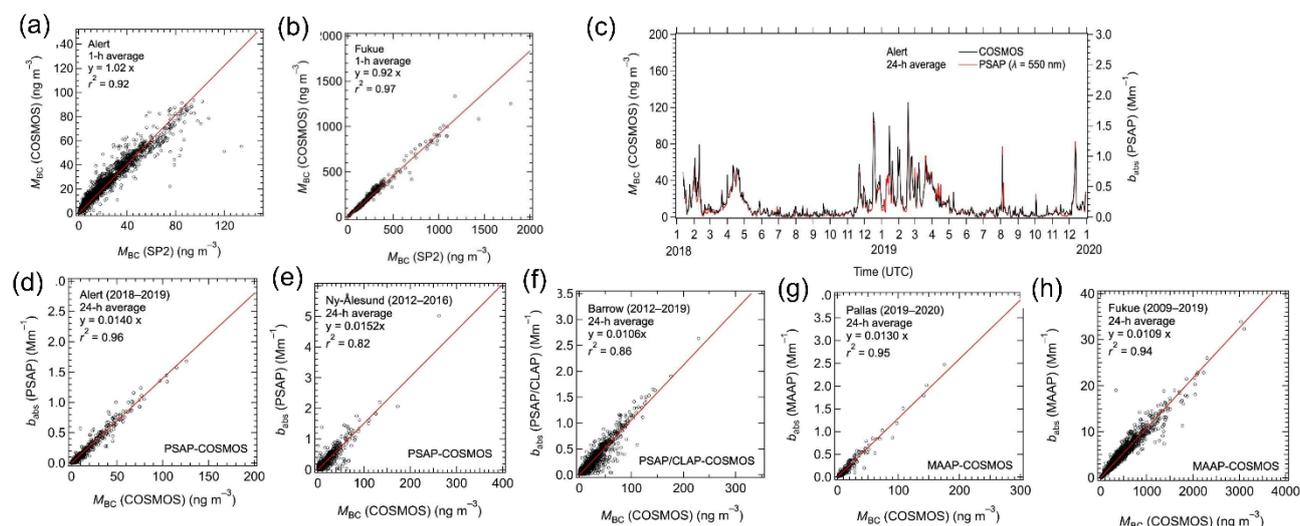


図-0.3 COSMOSと北極域およびアジアでの各種BC測定との比較。(a), (b) COSMOSと高精度観測が可能なSP2とのBC質量濃度観測 (M_{BC}) 比較。北極域のカナダのアラートとアジアの福江島での比較。2つの図で濃度レンジが大きく異なっていることに注意。(c) アラートにおけるCOSMOSの M_{BC} とPSAPの b_{abs} の時系列の比較。(d)-(g) 北極域の4観測地点におけるCOSMOSの M_{BC} と各種測定器によって得られた b_{abs} の散布図。この図の傾きが質量光吸収断面積 (MAC) に対応する。(h) 同様に福江観測所での散布図。（Ohata et al., 2021a）

がわかった。これはインドで初めての高精度BC観測であり、このデータは定量的なBCの環境影響評価の研究に重要となる。

本研究ではさらにアジアのエアロゾルの動態を継続的に把握するために、福江島において継続的なエアロゾル観測を実施した。硝酸イオン濃度は近年増加傾向にあったが、2019年に比べ2020年は約半分になっていた。硫酸イオン濃度については2013年以降減少傾向にあったが、2020年ではさらに減少していた。この結果は中国の大気汚染物質の排出量削減がかなり進んだことを反映していると考えられる。

● 航空機観測に基づく北極BC動態解明 (サブテーマ 1, 2, 3)

2018年3-4月に北極域で実施されたPAMARCMiP2018航空機観測で私たちが取得したBCデータを解析した。観測されたBC濃度は2010年のHIPPO観測と同様に低かった一方で、中高緯度の森林火災が活発であった2008年 (ARCTAS) と2015年 (NETCARE) の観測では3倍ほど高濃度となっていた (図-0.4)。北極で行われた4つの航空機観測により、BCの鉛直積算量の大小関係は、中高緯度の森林火災の活動度と対応していることが明らかとなった。この研究結果は、春期北極でのBC濃度の年々変動は、中高緯度の森林火災の影響を大きく受けていることを示唆するものである。

各年の森林火災からのBCの放出量を含めた全球モデル計算を、名古屋大学のCAM-ATRASおよび気象研究所のMRI-ESM2.0を用いて実施した。この結果、森林火災活動度が低かった年の観測値の再現性は良い一方で、活動度が高かった年の観測値は大きく過小評価していた。後者の観測結果を再現するためには、森林火災からのBC放出量を少なくとも3倍程度も大きくする必要があることが分かった。このことは、人工衛星で検出されている森林火災からのBC排出量を大きく過小推定しているか、北極への輸送量を大きく過小推定している可能性を示唆するものである。(Ohata et al., 2021b)

● 北極の降雨・降雪中BCの動態 (サブテーマ 1, 2, 3, 4)

ニーオルスンおよびバローにおいて降雨・降雪の通年にわたる採取を行い、その中に含まれるBC濃度や沈着量の季節変化およびその要因を、数値モデル計算も用いて明らかにした。北極でのBC沈着量の季節変を初めて明らかにした研究である。(Mori et al., 2020; Mori et al., 2021)

● 数値モデルによる北極BCの発生源寄与の推定 (サブテーマ2)

積雲や混合相雲におけるエアロゾルの除去過程を改良することによって、エアロゾル (特にBC) の全球分布の観測再現性を大きく向上させた (Matsui and Moteki, 2020; Matsui, 2020; Liu and Matsui, 2021; Matsui and Liu, 2021)。従来の多くの数値モデル研究では、熱帯域の対流圏上部および北極域の対流圏下部においてBC濃度をそれぞれ過大あるいは過小推定してきた。本研究では、積雲・混合相雲での除去過程を改良することにより、熱帯域の対流圏上部および北極域の対流圏下部の両方の領域において、BC濃度の観測再現性が大きく向上した。また、北極域に着目すると、特に冬季から春季にかけて、BC質量濃度の鉛直分布をより現実的に再現できるようになった。除去過程の改良によって、北極域における産業革命前から現在までのBC放射強制力は 0.09 W m^{-2} から 0.18 W m^{-2} へと約2倍に増大した。これらの結果から、エアロゾルの雲・降水過程による除去過程の精緻化が、アジアなどの低・中緯

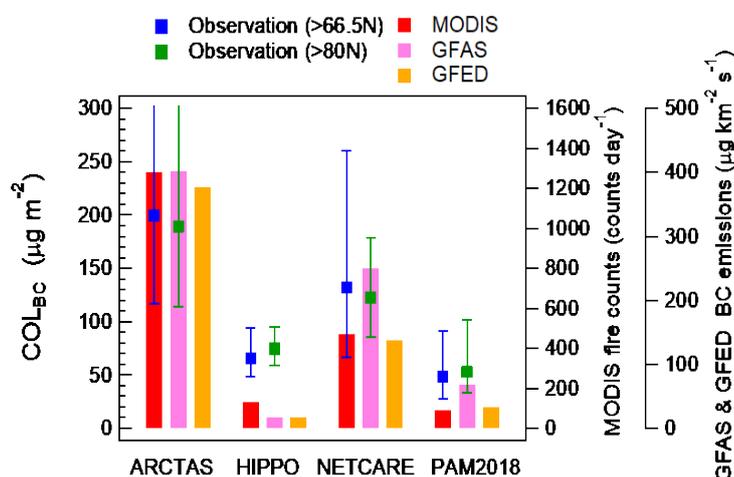


図-0.4 北極圏 (66.5°N以北) で春季に実施された4つの航空機観測から得られた高度5 km以下のBCの鉛直積算量の比較 (青四角)。観測緯度の違いを考慮し、80°N以北の値も示してある (緑四角)。棒グラフのうち赤はMODIS人工衛星により得られた50°N以北の森林火災地点の数、ピンクと黄色はこの人工衛星データから推定された森林火災によるBC発生量。(Ohata et al., 2021b)

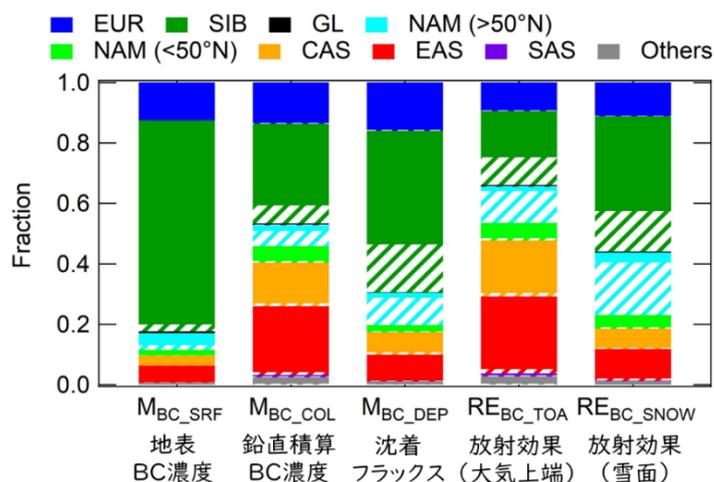


図-0.5 北極域（北緯70度以北）における領域・年平均のBC発生源寄与（2009年から2015年の7年間の平均）。塗りつぶしの部分は人為起源BCの寄与、斜線の部分はバイオマス燃焼起源BCの寄与を示す。EUR：ヨーロッパ、SIB：シベリア、GL：グリーンランド、NAM(>50N)：北米（北緯50度以北）、NAM(<50N)：北米（北緯50度以南）、CAS：中央アジア、EAS：東アジア、SAS：東南アジア。（Matsui et al., 2022）

度の発生源から放出されるエアロゾルが北極域まで輸送される過程を正しく理解する上で非常に重要であることを示した。

改良されたCAM-ATRASモデルの計算によって、本研究の北極域の観測で得られた、地表付近のBC質量濃度（バロー、アラート、ニューオルスン、パラスの4地点）、BC沈着フラックス（バロー、ニューオルスンの2地点）、積雪内のBC質量濃度などの観測結果を再現することに成功した(Matsui et al., 2022)。この検証されたモデル計算により、北極域（北緯70度以北）における地表大気中のBC質量濃度や放射効果に対して、各領域の発生源寄与が大きく異なることを明らかにした（図-0.5）。北極域の大気BCの放射効果に対しては、アジアなどの中緯度での人為起源のBCが主要な寄与を占めるのに対し、北極域の雪氷BCの放射効果に対しては、シベリアやアラスカでのバイオマス燃焼起源のBCが主要であることを明らかにした。また北極BCに対するアジア起源の寄与は、地表大気中のBC質量濃度については8%と寄与が小さいのに対し、BC鉛直積算濃度やBC大気加熱効果に対しては37%および43%と大きな寄与を持つことを示した。さらにBCの発生源寄与は空間的・時間的に大きく変動しており、北極域内の場所や季節によって主要な起源が異なることを明らかにした。これらの結果から、北極域におけるBCの気候影響をより精緻に推定するためには、1) 地表付近のBC濃度だけでなく、その鉛直構造をより精度よく理解することや、2) 多点におけるBC観測を継続的に行い、それらの変動の違いとその要因を明らかにしていくことが重要であることを示した。

（2）エアロゾルの直接・間接放射効果の評価

● 複素散乱振幅測定技術による固体エアロゾル分析（サブテーマ1,2）

本研究では、氷晶核として重要と考えられる固体エアロゾルの化学種（複素屈折率）と粒径を同時に定量可能な測定技術（複素散乱振幅センシング技術）を開発した(Moteki, 2021)。特定の粒子種で

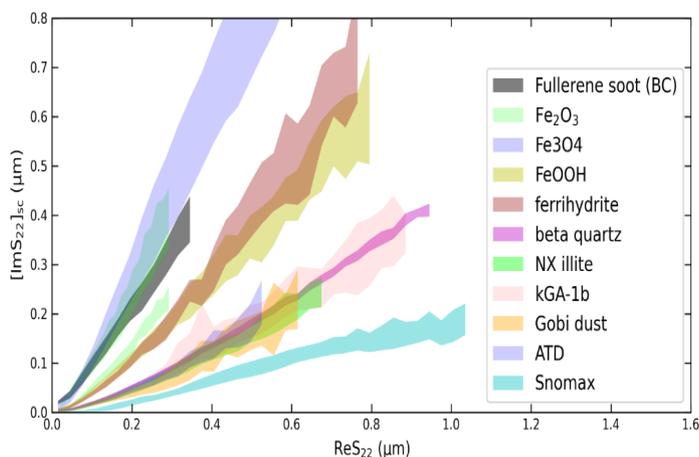


図-0.6 様々な試料の複素散乱振幅の測定結果。横軸と縦軸は複素散乱行列のS22成分の実部と虚部を示す。代表的な鉱物粒子の実験結果が示されている。kGA-1bはカオリナイト、ATDは市販の鉱物ダスト粒子（Arizona Test Dust）である。鉱物粒子以外のエアロゾルとして、BCの標準粒子であるフラーレン・スートと、氷晶核として利用されている市販のバクテリア粒子であるSnomaxの結果も示した。（Yoshida et al., 2022）

様々な大きさをもつ粒子を測定した結果（複素散乱振幅のデータ点群）を用いると、この粒子種についての複素屈折率・形状・体積等価粒径分布を推定することが可能である。実際の環境試料についてこのデータ解析手法を適用するためには、判別したい異なる粒子種の複素散乱振幅データ点群が相互に判別可能である必要がある。そのために、本研究では大気中で氷晶核として働く可能性のある、鉱物ダスト、BC、生物粒子を測定器に導入し、複素散乱振幅データの特徴を明らかにした(Yoshida et al., 2022)。この実験の結果、これらの代表的な固体粒子は判別して測定可能であることが明らかになった(図-0.6)。実際の環境中のエアロゾル試料では、実験結果のうちBCに近いもの、鉱物ダストに近いもの、生物粒子(Snomax)に近いものの3つのグループに分かれることが多いことも明らかとなった。

● 大気エアロゾルの化学成分分析（サブテーマ2）

ニーオルスンのゼッペリン山観測所において2021年6月から2022年3月までの期間に、大気エアロゾルをPTFEフィルターに採取した。PM_{2.5}（直径2.5 μm以下のエアロゾル）試料をFTIR測定することにより、有機エアロゾルの質量濃度を明らかにした。またこのフィルター試料をイオンクロマトグラフ分析することにより、大気中の各種の水溶性無機イオンの濃度を明らかにした。

FTIR分析においては、有機エアロゾルの化学構造の特徴も得られた。また、定量された化学官能基の情報に基づき、有機物質質量/有機炭素質量の比率や酸素/炭素の比率の季節変化も明らかにすることに成功した。

● 大気エアロゾルの電子顕微鏡分析（サブテーマ3）

本研究では、ニーオルスンにおいて2017年より実施している大気エアロゾル粒子および雲残渣粒子（雲粒子を蒸発させた時に残る粒子）の採取を継続して実施した。採取された4万粒子以上の粒子の化学組成を電子顕微鏡により分析することにより、北極で採取された雲残渣粒子に含まれる鉱物ダスト、海塩、硫酸塩などの季節変動を世界で初めて明らかにすることに成功した(Adachi et al., 2022a)。

粒径ごとの電子顕微鏡分析の結果、微細な粒子には硫酸塩が卓越する一方において、粗大粒子（1マイクロメートル前後）では海塩粒子が多く存在することが明らかとなった。水雲粒子が形成される気温0℃以上で採取されたエアロゾル粒子と雲残渣粒子の化学組成は類似しており、多くのエアロゾル粒子が雲凝結核として機能した（水雲粒子を形成した）ことが示された。これに対し氷雲粒子も形成可能な冬季に採取された雲残渣粒子は、大気エアロゾルに比べダスト粒子が多く含まれていた(図-0.7)。また雲残渣粒子に含まれる鉱物ダストの数比率は気温が下がるほど増加することも明らかとなった。これ

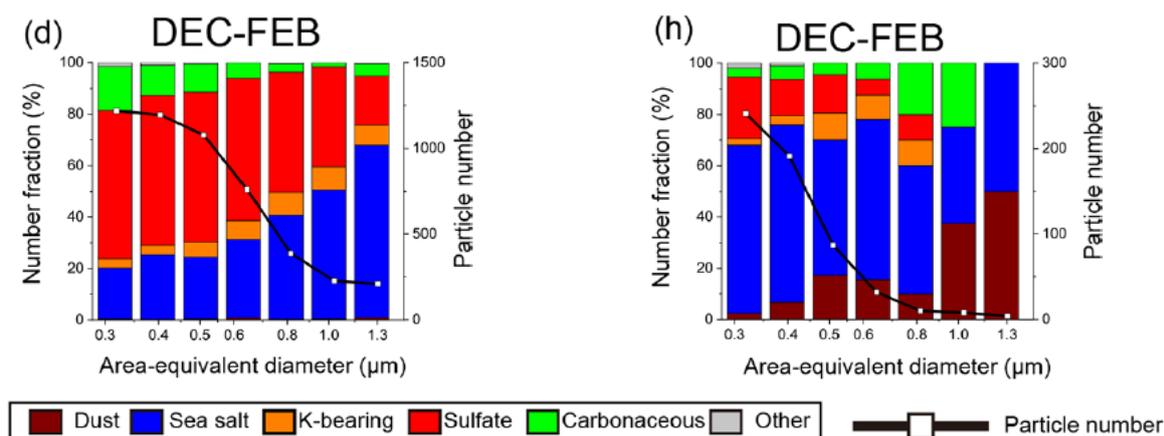


図-0.7 個別粒子分析で粒径ごとに分類を行った各エアロゾル種の数割合の結果（12, 1, 2月）を示す。(a)大気エアロゾル粒子の結果。(b)雲残渣粒子（雲粒子を蒸発させた時に残る粒子）の結果。(Adachi et al., 2022a)。

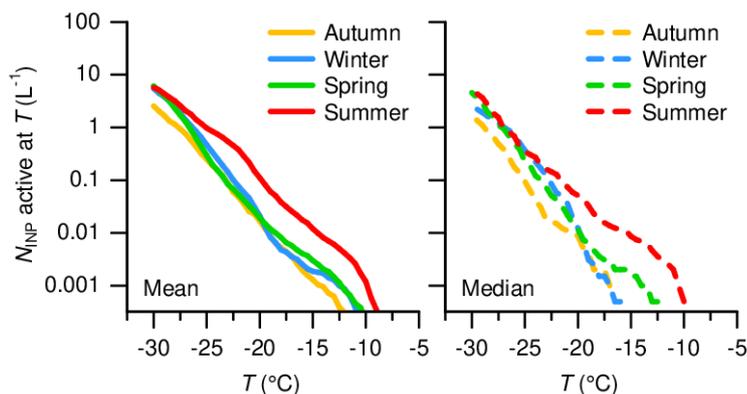


図-0.8 2019年9月からの1年間にZeppelin山観測所で観測された各温度(T)条件下における氷晶核粒子の数濃度(M_{INP})の季節平均値(左図)と中央値(右図)。Autumnは2019年9~11月、Winterは2019年12月~2020年2月、Springは2020年3~5月、Summerは2020年6~8月に該当する。(非公開)

らの観測事実は、ダスト粒子が氷雲の核(氷晶核粒子)として機能したことを示唆するものである。また、氷晶核粒子として機能したダスト粒子を含むと考えられる試料と、エアロゾル粒子中のダスト粒子の組成を比較したところ、ダストの主要成分には大きな違いがみられなかった。一方で、氷晶核として働いた可能性があるダスト粒子は2.4倍の高い頻度で海塩が多く付着する傾向がみられた(図-3.6)。本研究で得られた電子顕微鏡を用いて北極の個別粒子に着目したエアロゾル粒子と雲残渣粒子の詳細な比較は、エアロゾル粒子の直接・間接放射効果の理解に資する結果であり、特に北極域での気候影響に重要とされる混合雲の形成メカニズムの一端を明らかにした。

● 氷晶核粒子の観測(サブテーマ4)

本研究では、2019年9月から2020年10月にかけて北極域で実施された大型の国際共同研究プロジェクトであるMOSAICの期間において、大気エアロゾルのサンプリングをゼッペリン山観測所において実施した。このエアロゾル試料を極地研のCRAFTで分析し、氷晶核粒子の数濃度の変動を調べた。その結果、約 -30°C で活性を示す氷晶核粒子の季節変動は明瞭ではないものの、約 -15°C 以上で活性を示す氷晶核粒子の数濃度に関しては、夏季になると顕著に増加する傾向にあることが明らかになった(図-0.8)。さらに本研究では、氷晶核粒子の数濃度が増加するタイミングは、スヴァールバル諸島の地表気温が 0°C 以上に達して地表面が露出するタイミングとよく一致していることも明らかにした。

スヴァールバル諸島は、冬季になると積雪や氷河・氷床によって地表面がほぼ完全に覆われているが、5~9月頃になると沿岸域の積雪の融解が進み、地表面の一部が露出する。露出した地表面からは、ダストや地表面(ツンドラ生態系)での生物活動に伴う生物由来エアロゾルの発生が活発になる可能性がある。高緯度起源のダストの氷晶核能については、低~中緯度の砂漠起源のダストの氷晶核能よりもはるかに高く、 -15°C 以上の温度でも高い氷晶核能を示すことが我々の先行研究によって確認されている。また夏季になると生物由来(微生物)と思われるエアロゾルがゼッペリン山観測所でも見つかっている。これらのことから、スヴァールバル諸島もしくはその近辺の高緯度の陸域から発生するダストや生物由来エアロゾルが、約 -15°C 以上で活性を示す氷晶核粒子の季節変動に影響を及ぼしていた可能性がある。

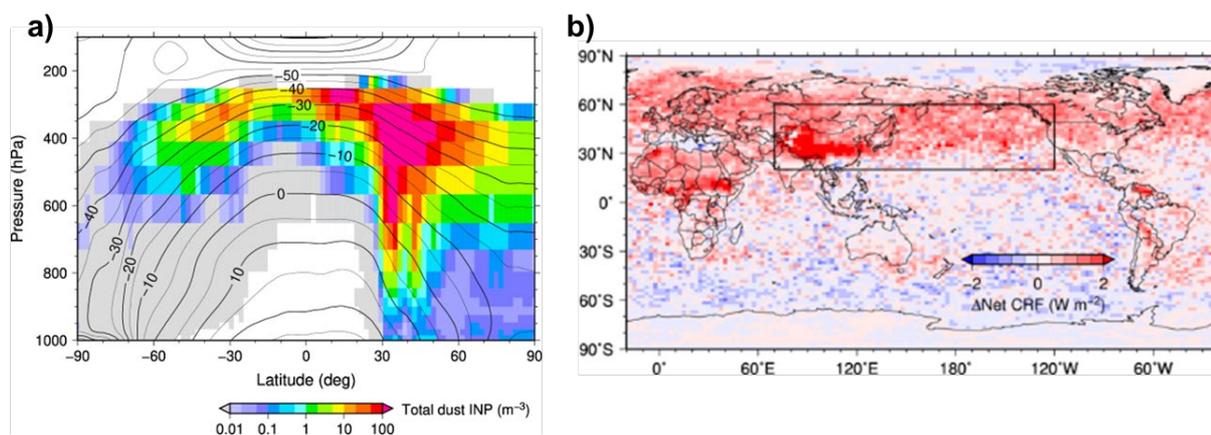


図-0.10 氷晶核の数濃度と雲放射強制力の全球分布（年平均）。a)は鉱物ダスト由来の氷晶核数の緯度・高度分布（線は気温を示す）、b)は鉱物ダスト由来の氷晶核の雲放射強制力の全球分布を示す。（Kawai et al., 2021）

● 氷粒子と氷晶核粒子（エアロゾル）との対応（サブテーマ1,4）

本研究では北極域では唯一となる個別の降水粒子の連続観測をニーオルスンのゼッペリン山観測所で行った。そしてケルン大学との共同研究により、ニーオルスンの雲レーダ・ライダ観測に基づき単層の氷を含む雲を抽出した。雲レーダ・ライダ観測で氷を含む雲が観測された時の降水粒子は全て氷粒子起源のものであるとして、降水粒子の数濃度フラックスを求めた。降水粒子の数濃度は気温がおよそ -15°C 以下では気温の低下とともに増加する傾向が見られ、低温ほど増加する氷晶核数濃度と整合的であった。このことは、降水粒子が氷晶核により直接的に影響されている可能性を示唆するものである。一方、気温が -10°C 以上では、降水粒子の数濃度は氷晶核数濃度よりも数桁以上も高かった。これらの氷晶核や雲微物理観測は2019年9月～2020年8月の期間にニーオルスンで実施されたNASCENT 国際観測キャンペーンにも貢献した(Pasquier et al., 2022)。

● 数値モデルによる雲凝結核・氷晶核粒子の雲影響（エアロゾル-雲相互作用）評価（サブテーマ2）

北極域および全球でのエアロゾル-雲相互作用の推定を高度化するために、CAM-ATRASモデルの雲凝結核（水雲粒子を形成するエアロゾル）と氷晶核（氷雲粒子を形成するエアロゾル）のモデル表現を改良した(Matsui and Liu, 2022)。この結果、太平洋・大西洋上の航空機観測で得られたエアロゾルの数濃度・粒径分布と有機エアロゾルの質量濃度の空間分布・鉛直分布を再現することに初めて成功した。また、核生成由来の超微小粒子が有機エアロゾルの生成によって粒径 $50\sim 100\text{ nm}$ 程度まで成長する過程が、遠隔域における雲凝結核数濃度に対して重要であることを示した。(Liu and Matsui, 2022)

CAM-ATRASモデルに鉱物ダストの氷晶核特性を導入することにより、アジアダストが他の地域のダストに比べて、氷晶核として作用しやすい低温域（高高度）に分布する割合が高く、他のダストと比べて効率的に氷晶核として働くことを明らかにした(Kawai et al., 2021; Kawai et al., 2023)。そして鉱物ダスト由来の氷晶核数濃度の全球分布を推定するとともに（図-0.10a）、それらが雲影響を通して北極域を含む北半球高緯度の広い範囲で大きな雲放射強制力を持つことを示した（図-0.10b）

（3）産業革命以前から現在までのエアロゾルの動態と放射効果の評価

● アイスコア分析：BC（サブテーマ4）

本研究では、グリーンランド北西部のSIGMA-D地点で得られたアイスコアの分析から、産業革命以前から近年までのBC濃度の季節変化と経年変化を明らかにした。この結果、1870年代から冬季（12月～2月）の濃度が上昇して1920～1930年代にピークとなり、その後減少に転じて2000年代には産業革命以前の濃度レベルに戻ったことなどが明らかとなった。これに対し夏季（6～8月）は、1870年代～20世紀前半の濃度増加が見られなかった。冬季には化石燃料燃焼起源のBCによりBCの質量濃度が産業革命以前の4倍程度になっているにもかかわらず、夏季にはその影響が殆どなかったことは特筆すべきである。

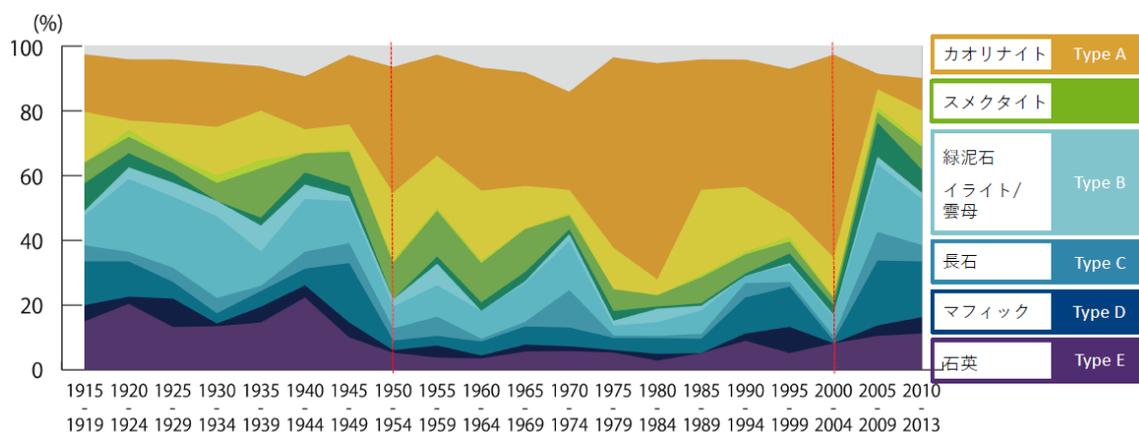


図-0.11 SIGMA-Dコアにおける鉱物組成の変動⁷⁾ 赤い縦線は温暖期（1915～1949年、及び2005～2013年）と寒冷期（1950～2000年）の境界を示す。（Nagatsuka et al., 2021）

先行研究では、アイスコアBCデータからのバイオマス燃焼の復元データの作成は、化石燃料燃焼起源BCの影響が現れる前の期間（19世紀中盤以前）においてのみしか行われなかった。これに対して本研究では、SIGMA-D アイスコアから過去350年間の夏季のバイオマス燃焼起源BCの経年変動を復元することができた。夏季のBC濃度は過去350年間を通じて増加傾向は見られず、むしろ2000年頃までは減少傾向が見られた。化石燃料燃焼起源のBCの影響が出始める1870年代より前の期間においては、冬季のBCは中低位度のバイオマス燃焼を起源としていると考えられ、その影響はほぼ一定であった。

● アイスコア分析：鉱物ダスト（サブテーマ4）

図-0.11にSIGMA-DアイスコアのSEM-EDS解析結果を示す。過去百年の間にダストの鉱物組成が数十年スケールで変動しており、鉱物種によって変動のトレンドが異なっていたことが明らかになった（Nagatsuka et al., 2021）。寒冷期（1950～2000年）には湿潤温暖な地域で生成されるカオリナイトが増加し、温暖期（1915～1949年、及び2005～2013年）には高緯度の乾燥地域やグリーンランド沿岸部などで生成される雲母、緑泥石、長石、苦鉄土鉱物、石英が増加していた（図-0.11）。このように鉱物種の変動がグリーンランドの地表面気温と関係していることが明らかになった。空気塊の起源解析や全球気候モデル計算の結果からも、温暖期と寒冷期でダストの発生源が異なっていたことが示唆された。

● 気候モデルによるBCとその他のエアロゾルによる有効放射強制力の評価（サブテーマ3, 4）

気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2.0）による近年10年間程度の計算（2008-2020年）と観測との比較により、モデルの検証・改良を実施した。さらに北極評議会・AMAPにおけるSLCFsに関する影響評価の枠組みで、近年の複数の観測データ（地上・衛星・船舶・航空機・アイスコア等）とMRI-ESM2.0を含む18種のモデル計算結果を比較・検証し（Whaley et al., 2022）、MRI-ESM2.0の北極エアロゾル濃度の再現性が良いことが示された（AMAP, 2021）。

この検証された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（ERF）を推定した（Oshima et al., 2020）。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} 、全エアロゾルは -1.22 W m^{-2} の負の強制力を持つと推定された。全エアロゾルによるERFへの寄与は、エアロゾル-放射相互作用が23%、エアロゾル-雲相互作用が71%、残りがエアロゾルを要因とする地表面アルベド変化等であった。BCのERFは 0.25 W m^{-2} で、BC発生源域で顕著であった。

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ERFを推定した（図-0.12）

（Oshima et al., 2020）。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った。メタンのERFは三番目であった。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。

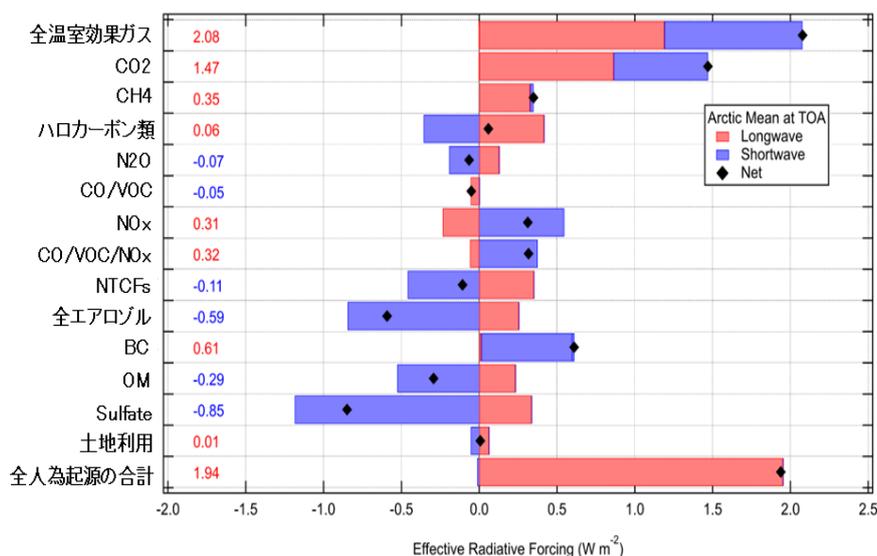


図-0.12 北極域（北緯60度以北）におけるMRI-ESM2.0により推定された1850年を基準とした2014年での有効放射強制力。赤色が長波、青色が短波成分、黒印および左端の数値は正味の値（W m⁻²）を示す。Oshima et al. (2020)を改変。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

● 北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP）の報告書

研究代表者の小池真および研究分担者の近藤豊と大島長が、北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP）/短寿命気候強制力因子（SLCFs）専門家会合グループのメンバーとして報告書（アセスメントレポート）作成に関する作業を行なった。具体的には、1) 大気中・雪氷中のBC濃度の高精度測定法、2) 北極での大気中・雪氷中のBCの高精度の観測結果、3) 光吸収性の酸化鉄エアロゾルの観測結果、4) 北極におけるダストの氷晶核特性、5) SLCFsが気候と大気質に及ぼす影響のモデル計算について執筆した。このように本研究などで得られた多くの優れた成果をこの報告書に反映することができた。この報告書の「結論と勧告（Conclusions and recommendations）」の中では、「北極BC観測の標準化のために、各種BC測定をSP2やCOSMOSと比較することによる整合性の確立が必要である」ことが述べられている。これは事実上、我々が開発してきたCOSMOS測定器が標準的なBC測定法として認められていると解釈できる。この成果は、北極のみならず世界のBC測定法の標準化へ向けた大きな前進とみなせる。この成果は今後、短寿命気候強制因子（SLCFs）であるBCの排出量規制という各国の政策を検証するための科学的な基盤となっていくことが期待される。実際にAMAP/SLCF報告書はBCの排出削減を加速するためのAC国を中心としたEGBCM(Expert group for black carbon and methane)報告書やその環境政策の科学的基盤として用いられる。このため、本研究の成果はAMAP, EGBCMを通して、気候変動、北極温暖化、大気質の改善に対応するための国際的な政策立案に貢献する。

● 第三回北極科学大臣会合（ASM3）

2021年5月に第三回北極科学大臣会合（ASM3）がアジア初となる東京で開催された。この会合のレポートの中において、我々が開発してきたCOSMOSによる北極BCのモニタリングの重要性について言及されている。これはCOSMOSが高精度測定器として公に認められたことを意味しており、日本の大きな国際貢献である。

● 日本政府の北極政策プロジェクトチームの戦略

上記の一連の行政貢献は、「日本で開発されたBC測定装置を世界標準とする」という日本政府の北極政策プロジェクトチームの戦略を実現するための第一歩として位置づけられる。

● IPCC 第6次評価報告書と第6期結合モデル相互比較計画

第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）の国際的な枠組みで実施した気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2.0）による計算結果は、IPCC AR6（第6次評価報告書）に図表として掲載され、IPCC AR6に対して直接的に貢献した。本研究の成果論文のうち11編がIPCC AR6で引用された。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究で作成されたCOSMOSを基準とした北極の統一BCデータセットは、今後、国際的な標準データセットとして、様々な行政の科学的根拠として活用されることが期待される。

北極評議会の作業部会の専門家会合では、今後も評価報告書などを取りまとめていく予定である。本研究のBCや各種エアロゾルに関する研究成果は、このような継続的な国際評価報告書の編纂活動に貢献するものである。

IPCCの第49回総会最終決定文章において、IPCCの国別温室効果気体排出量タスクフォースにおいてエアロゾルなどのSLCFsについての推計方法についてのレポートが準備されることとなった。今後、BCなどの排出量統計が必要となった場合には、本研究で開発されたCOSMOS測定器そのものや、各種のBC測定器で得られたデータのCOSMOS濃度スケールへの統一化の手順、さらには観測により検証された信頼性の高い数値モデルなどの知見が貢献できると見込まれる。

これらの貢献は、「日本で開発されたBC測定装置を世界標準とする」という日本政府の北極政策プロジェクトチームの戦略に対しても、引き続き貢献できることが期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>北極とそれを含むグローバルな温暖化に関わるBCおよび他のエアロゾル全体の動態とその直接・間接放射効果（放射強制力）を、北極に重点をおきながらグローバルに評価する。これらの観測・数値モデル研究を論文化することにより、IPCC レポートや北極評議会によるアセスメントレポートに貢献することを目指す。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげることができた。</u> 北極において我々が開発してきたCOSMOS測定器によるBCのネットワーク観測を実施するとともに、欧米の研究機関のBC観測値もCOSMOS濃度スケールに統一させることにより、北極BCの動態を明らかにした。またこれらの観測により検証された数値モデルにより、BCや鉱物ダストの直接・間接放射効果を評価し、アジアなど各領域の発生源寄与を推定した。これらの研究成果は北極評議会の作業部会のアセスメントレポートに貢献し、その「結論と勧告」の中でCOSMOS測定器が標準的なBC測定法として認められた。また数値モデル研究の成果は、IPCCの第6次評価報告書および第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）にも貢献した。 本研究は、4つのサブテーマが深く連携することにより、研究を遂行した。複数のサブテーマの研究者の共著論文を多く出版している。また本研究は、観測と数値モデルを統合したことも特徴である。これにより短期間で数値モデルの改良を効率的に進め、大きな成果をあげることができた。</p>

サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>BC 測定器COSMOS の北極観測ネットワークにより、北極内でのBC の時空間変動を明らかにするとともに、既存の北極BC 観測の精度を評価する。ニーオルスンにおいて固体エアロゾルの観測を実施し、その動態と雲微物理量との関係性を評価する。エアロゾルの大発生源であるアジア（福江島観測所など）においても継続的なエアロゾル観測を実施し、動態を明らかにする。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげることができた。</u> BC 測定器COSMOS の北極観測ネットワークと欧米の研究機関の各種BC測定器との比較により、他機関のBC測定値を精度保証されたCOSMOS濃度スケールに規格化した標準データセットを構築した。 氷雲粒子を形成する氷晶核として重要な固体エアロゾルについて、世界で初めてとなる種類別に粒径を測定できる新しい技術（複素散乱振幅測定技術）を確立した。北極で唯一となる降水粒子の連続観測を実施し、氷晶核と氷雲粒子数濃度の関</p>

	<p>係を示した。</p> <p>3年間の研究期間において、26編の論文を査読付国際誌に出版した。（2編がIPCC AR6で引用）</p>
サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>ニーオルスンにおいてエアロゾル採取を実施し、雲凝結核として働くエアロゾルの動態を、特に有機エアロゾルの寄与の観点から評価する。数値モデルにより、北極および全球スケールでの人為起源・自然起源エアロゾルの動態と、直接的・間接的な放射効果を推定する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげることができた。</u></p> <p>観測研究では、ニーオルスンにおいてエアロゾルを採取し、エアロゾルの雲影響の観点から重要な有機エアロゾルの動態を、化学官能基の情報まで含めて最新のIR分析技術等により明らかにした。</p> <p>数値モデル研究では、本研究で実施された様々なBC観測等によりモデルを検証・改良し、BCの地表濃度や放射強制力に対するアジアなど各領域の発生源寄与の信頼性の高い推定を実現した。</p> <p>3年間の研究期間において、37編の論文を査読付国際誌に出版した。（3編がIPCC AR6で引用）</p>
サブテーマ3 目標	目標の達成状況
<p>北極ニーオルスンにおいて、大気エアロゾルや雲粒中エアロゾル（残渣粒子）試料を取得し、電子顕微鏡分析する。電子顕微鏡でしか測定できない粒子形態、組成、混合状態の解析により、北極エアロゾルの微物理特性・動態を評価する。</p> <p>気象研究所地球システムモデル（気候モデル）を本研究等で得られる大気・積雪・アイスコア等の観測データを用いて検証・改良をするとともに、北極・全球域の1850年から現在までのBCや他エアロゾルの動態と放射効果を評価する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげることができた。</u></p> <p>観測研究では、大気エアロゾルと雲残渣粒子（雲粒子を蒸発させた時に残る粒子）を世界で初めて通年にわたり採取し、電子顕微鏡分析することにより、北極エアロゾルの雲影響に関わる知見が得られた。</p> <p>数値モデル研究では、本研究で実施された様々なBC観測等によりモデルを検証・改良し、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放射強制力を総合的に推定した。北極域ではブラックカーボンに二酸化炭素に次いで二番目に大きい正の放射強制力を持つことを明らかにした。</p> <p>3年間の研究期間において、43編の論文を査読付国際誌に出版した。（8編がIPCC AR6で引用）</p>
サブテーマ4 目標	目標の達成状況
<p>北極およびアジアにおいてCOSMOSによるBC観測を実施し、品質管理されたデータセットを作成して他のサブテーマに提供する。COSMOSデータの精度をトレースできる方法を確立し、他国の他の測定法によるBCデータと比較する。さらに論文などにBCの高精度測定法などを明文化するにより、COSMOSの標準化の基盤を形成する。</p> <p>またニーオルスンにおいてエアロゾル捕集を行い、氷晶核として働くエアロゾルの数濃度とその季節変化を評価する。アイスコア分析にもとづき、過去150年間のBCやダスト等のエアロゾルの経年変化を評価する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげることができた。</u></p> <p>北極の4地点でCOSMOSによるBC観測を実施し、品質管理されたデータセットを作成するとともに、COSMOSデータの精度をトレースできる方法を確立し、他国の他の測定法によるBCデータと比較した。さらに論文やAMAP-SLCF報告書（2023）においてBCの高精度測定法を明文化することで、COSMOSの標準化の基盤を形成した。</p> <p>またニーオルスンにおいてエアロゾル捕集を行い、氷晶核として働くエアロゾルの数濃度とその季節変化を評価した。アイスコア分析にもとづき、過去150年間を超える期間にわたりBCや鉍物ダスト等のエアロゾルの経年変化を評価した。</p> <p>3年間の研究期間において、31編の論文を査読付国際誌に出版した。（1編がIPCC AR6で引用）</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

○144件

<主な査読付き論文>

- 1) K. ADACHI, Y. TOBO, M. KOIKE, G. FREITAS, P. ZIEGER and R. KREJCI: Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 14421–14439 (2022), Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard. (IF:7.197)
- 2) K. KAWAI, H. MATSUI, and Y. TOBO: Geophys. Res. Lett., 50, e2022GL102470 (2023), Dominant role of Arctic dust with high ice nucleating ability in the Arctic lower troposphere. (IF: 5.576)
- 3) M. LIU and H. MATSUI: Geophys. Res. Lett., 49, e2022GL100543 (2022), Secondary organic aerosol formation regulates cloud condensation nuclei in the global remote troposphere. (IF: 5.576)
- 4) N. MOTTEKI : Optics Express, 29(13), 20688-20714 (2021). Measuring the complex forward-scattering amplitude of single particles by self-reference interferometry: CAS-v1 protocol.
- 5) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTTEKI, N. OSHIMA, K. G. AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: Atmos. Chem. Phys., 22, 13, 8989-9009 (2022) (IF:7.197), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects.
- 6) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER: Atmos. Chem. Phys., 21, 15861-15881 (2021) Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring.
- 7) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: Atmos. Meas. Tech., 14, 6723–6748 (2021) Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic, <https://doi.org/10.5194/amt-14-6723-2021>.
- 8) N. OSHIMA, S. YUKIMOTO, M. DEUSHI, T. KOSHIRO, H. KAWAI, T. Y. TANAKA and K. YOSHIDA: Progress in Earth and Planetary Science, 7, 38 (2020), Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. (IF:3.875)
- 9) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, M. KADOTA, M. MINOWA, Y. KOMURO, H. MOTOYAMA and T. AOKI: Clim. Past, 17, 3, 1341-1362 (2021) (IF:4.498), Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-146>
- 10) A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, and K. ADACHI: Aerosol Science and Technology (2022) Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data, <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2057839>.

6-2. 知的財産権

【サブテーマ1】

微粒子識別装置及び微粒子識別方法 特願 2021-078102 (令和3年4月30日)

国立大学法人 東京大学・茂木信宏

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	8件
口頭発表（学会等）	150件
「国民との科学・技術対話」の実施	10件
マスコミ等への公表・報道等	17件
本研究費の研究成果による受賞	5件
その他の成果発表	0件

7. 国際共同研究等の状況

【サブテーマ1】

北極におけるCOSMOSによるBCネットワーク観測およびCOSMOSと他のBC観測との比較は、ノルウェー極地研究所、ストックホルム大学、フィンランド気象研究所、アメリカ海洋大気庁、カナダ環境・気候変動省との共同研究として実施した。データ解釈等の議論を行い、関連観測の論文を共著で出版した。

PAMARCMiP 2018航空機観測は、ドイツのアルフレッド・ヴェーゲナー研究所等と共同で行い、その後データ解釈等の議論を行い、関連観測の論文を共著で出版した。

北極ニーオルスンにおける雲微物理観測は、ノルウェー極地研究所との共同研究として実施した。また、ニーオルスンにおける雲レーダ・ライダー等を使った研究はドイツのケルン大学との共同研究として実施した。

北極評議会・AMAPの国際的な枠組み（北極圏国（カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国）とオブザーバー国（英国、スイス、日本等）が参加）において、SLCFsの北極気候影響評価報告書に執筆者として参加・貢献した。

北極評議会・AMAPの国際的な枠組みで、SLCFs評価報告書に執筆者として貢献した。

【サブテーマ2】

北極におけるエアロゾル捕集などは、ノルウェー極地研究所などとの共同研究の枠組みで実施した。

PAMARCMiP 2018航空機観測は、ドイツのアルフレッド・ヴェーゲナー研究所等と共同で行い、その後データ解釈等の議論を行い、関連観測の論文を共著で出版した。

名古屋大学のCAM-ATRASモデルは、AeroComなどの全球エアロゾルモデルの相互比較プロジェクトに参加しており、多くの国際共同研究が継続的に進められている。また、米国コーネル大学のMahowald教授などと、全球気候モデルCAMを用いたBCの放射効果の推定や人為起源鉄の海洋沈着量などに関する共同研究を進めてきた。

【サブテーマ3】

PAMARCMiP 2018航空機観測は、ドイツのアルフレッド・ヴェーゲナー研究所等と共同で行い、その後データ解釈等の議論を行い、関連観測の論文を共著で出版した。

ニーオルスンにおけるエアロゾルや雲残渣粒子の捕集とそのデータを使った研究は、ノルウェー極地研究所およびスウェーデンのストックホルム大との共同研究として実施し、共著で論文を出版

した。

第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）を構成する、放射強制力モデル相互比較計画（RFMIP）、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）、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）へMRI-ESM2.0を用いて参加し（世界各国のモデルグループが参加）、これらの論文成果はIPCC第6次評価報告書に貢献した。

北極評議会・AMAPの国際的な枠組みで、MRI-ESM2.0を用いてSLCFsの影響評価を実施し（北極圏国（カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国）とオブザーバー国（英国、スイス、日本等）が参加）、これらの研究成果をとりまとめ、AMAPのSLCFs評価報告書に執筆者として貢献した。

COVID-19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高い信頼性で評価するために、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モデル相互比較計画（CovidMIP）を緊急で実施し、本研究成果はIPCC第6次評価報告書第1作業部会の政策決定者向け要約に記載された。

【サブテーマ4】

北極におけるCOSMOSによるBCネットワーク観測およびCOSMOSと他のBC観測との比較は、ノルウェー極地研究所、ストックホルム大学、フィンランド気象研究所、アメリカ海洋大気庁、カナダ環境・気候変動省との共同研究として実施した。データ解釈等の議論を行い、関連観測の論文を共著で出版した。

北極評議会・AMAPの国際的な枠組み（北極圏国（カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国）とオブザーバー国（英国、スイス、日本等）が参加）において、SLCFsの北極気候影響評価報告書に執筆者として参加・貢献した。

8. 研究者略歴

研究代表者

小池 真

早稲田大学理工学部卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）、
現在、東京大学大学院理学系研究科准教授

研究分担者

1) 茂木 信宏

東京工業大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）
東京大学先端科学技術研究センター助教、現在、東京大学大学院理学系研究科助教

2) 高見 昭憲

京都大学工学部卒業、英国オックスフォード大学大学院修了（D.Phil.）
東京大学工学部助手、現在、国立環境研究所 地域環境保全領域 領域長

3) 持田 陸宏

東京大学理学系研究科化学専攻博士課程修了（理学博士）
現在、名古屋大学宇宙地球環境研究所教授

4) 大畑 祥

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）、
現在、名古屋大学宇宙地球環境研究所助教

5) 松井 仁志

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）、
現在、名古屋大学大学院環境学研究科准教授

6) 大島 長

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）

- 現在、気象庁気象研究所全球大気海洋研究部第三研究室主任研究官
- 7) 足立 光司
神戸大学発達科学部卒業、神戸大学大学院自然科学研究科修了（理学博士）
現在、気象庁気象研究所全球大気海洋研究部第三研究室主任研究官
- 8) 川合 秀明
京都大学大学院理学研究科修了（理学博士）
現在、気象庁気象研究所気象予報部第二研究室主任研究官
- 9) 東 久美子
北海道大学工学部卒業、北海道大学工学研究科応用物理学専攻博士課程修了（工学博士）、ニューヨーク州立大学バッファロー校地質学科研究員、防災科学技術研究所長岡雪氷防災研究所雪氷変動観測研究室長、現在、国立極地研究所教授
- 10) 當房 豊
金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了，（理学博士）、金沢大学博士研究員、コロラド州立大学リサーチサイエンティスト、現在、国立極地研究所准教授
- 11) 近藤 豊
東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻(理学博士)、名古屋大学教授、東京大学教授、現在、国立極地研究所特任教授及び東京大学名誉教授

II. 成果の詳細

II-1 エアロゾル・雲微物理観測と総合評価

国立大学法人東京大学 理学系研究科准教授	小池 真
国立大学法人東京大学 理学系研究科助教	茂木 信宏
国立研究開発法人国立環境研究所 地域環境保全領域領域長	高見 昭憲

[要旨]

北極温暖化の主要因は、グローバルスケールでの温室効果気体濃度の増加である。しかしながら、短寿命気候強制因子（SLCFs）であるエアロゾルも、太陽放射の吸収・散乱量の変化（エアロゾル-放射相互作用）と雲の反射率や雲量の変化（エアロゾル-雲相互作用）により、北極気候において重要な役割を果たしていると考えられる。このエアロゾルの気候影響における重要課題のひとつがブラックカーボン・エアロゾル（BC）の影響の定量化である。BCは太陽放射を強く吸収し大気を加熱するとともに、雪氷表面への沈着によりアイス・アルベド・フィードバックを加速させる可能性がある。しかしながら、従来の欧米研究機関による北極BC観測には大きな不確実性があった。本研究では他のサブテーマと連携して、我々が開発してきたBC測定器COSMOSによる北極BCのネットワーク観測を、北極の代表的な4つの観測地点において実施した。そしてこれらのCOSMOS以外のBC観測との比較により、COSMOS以外のBC測定結果をCOSMOSのBC濃度スケールに規格化する手法を確立し、統一データセットを構築した。本研究ではまた他のサブテーマと連携して、航空機観測によりBCの高度分布とその年々変動の要因や、降雨・降雪中のBCの動態についても明らかにした。またBCの放射影響評価の基礎となる、BCの光吸収係数（複素屈折率）の値を、実大気中のBCを用いて推定することに成功した。これらの研究成果のうち特に重要な点について、北極評議会/北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP）/短寿命気候強制力因子（SLCFs）専門家会合グループの報告書（アセスメントレポート）に、グループメンバーの一人として反映させた。

エアロゾルの北極気候影響のもうひとつの重要課題は、氷雲粒子を形成する氷晶核（エアロゾル）の動態理解と、混相雲（過冷却水滴と氷粒子の両方からなる雲）への影響評価がある。氷晶核は、その化学種、存在量、時間変動といった基本的な描像さえ得られていないのが現状である。このため、北極域の放射収支に重要な役割を果たす混相雲への人為的なエアロゾルの影響評価や、北極温暖化に伴うエアロゾル放出量変化による影響評価には大きな不確実性がある。本研究では氷晶核は固体エアロゾルである、ということに着目し、世界で初めてとなる個別の固体粒子の化学種（複素屈折率）とその大きさをオンラインで測定する技術（複素散乱振幅センシング技術）の開発に成功した。また北極域で唯一となる降水粒子の直接かつ連続観測に基づき、大気中の氷晶核数濃度と、氷粒子と考えられる降水粒子数濃度との関係を統計的に示した。そして数値モデルを用いて、氷晶核数濃度が変動した時に典型的な北極混相雲がどのように応答するのかを明らかにした。

1. 研究開発目的

本研究では私たちが開発してきたブラックカーボン・エアロゾル（BC）の質量濃度測定器（COSMOS）を使ったBCの高精度の連続観測を、北極域の代表的な観測地点であるノルウェー領スヴァールバル諸島のニーオルスン、アラスカのウトキアグヴィク（バロー）、カナダのアラート、フィンランドのパラスの4か所において実施する。そしてこれらの観測地点で欧米の研究機関が実施してきている他のBC測定技術（MAAP、PSAP、Aethalometer）により得られた同時観測データとCOSMOSのデータを比較し、他のデータを絶対値の保証されているCOSMOSの濃度スケールに変換した統一北極BCデータセットを構築する。これらのデータや我々が実施してきた航空機観測などの様々な観測をもとに、北極BCの動態とその変動要因を理解する。またBCやそれ以外のエアロゾルの大発生源であるアジア（福江島観測所など）においても継続的なエアロゾル観測を実施し、動態を明らかにする。

氷雲粒子を形成する氷晶核として働く可能性のある固体エアロゾルについて、その化学種、数濃度、粒径分布を測定可能な新しい測定技術である複素散乱振幅センシング技術を開発する。様々な鉱物ダスト粒子などの標準粒子を測定することによりその測定技術の有効性を確認し、実大気観測への応用を実現する。

北極域で唯一となる個別の降水粒子の連続観測をニーオルスンのゼッペリン山観測所で行実施する。雲レーダ・ライダ観測に基づき氷を含む単層の雲を抽出し、これらの雲を対象として氷晶核（エアロゾル）と降水粒子（氷粒子）との対応を明らかにする。

2. 研究目標

BC 測定器COSMOS の北極観測ネットワークにより、北極内でのBC の時空間変動を明らかにするとともに、既存の北極BC 観測の精度を評価する。ニーオルスンにおいて固体エアロゾルの観測を実施し、その動態と雲微物理量との関係性を評価する。エアロゾルの大発生源であるアジア（福江島観測所など）においても継続的なエアロゾル観測を実施し、動態を明らかにする。

3. 研究開発内容

● 北極BCのネットワーク観測と統一BCデータの作成

太陽放射を強く吸収するBCは、北極大気加熱や雪氷面への沈着によるアイス・アルベド・フィードバックの助長作用の観点から重要と考えられている。このためIPCCや北極評議会では、温暖化抑制のためのBC排出量削減へ向けた検討が始まっている。しかしながら、これまで欧米の研究機関が実施してきた北極BC観測は測定精度の検証が不十分であり、お互いの測定値の整合性にも大きな不確実性があった。このため、日本で開発してきた高精度BC測定器であるCOSMOSを使った北極BCの信頼性の高い動態把握と、COSMOSを基準とすることにより既存の他のBC観測のお互いの整合性を検証することが必要であった。

本研究ではサブテーマ2, 3, 4と連携して、私たちが開発してきたBC質量濃度測定器（COSMOS）を使ったBCの高精度の連続観測と欧米の研究機関のBC観測との詳細な比較を実施した。具体的には、カナダのアラト（カナダ環境・気候変動省のPSAPとAethalometer）、ノルウェー領のニーオルスン（ストックホルム大学のPSAPとAethalometer）、アラスカのバロー（米国海洋大気庁のPSAPとCLAP）、フィンランドのパラス（フィンランド気象研究所のMAAP）での観測と比較した（図-0.2）。またアジアの観測地点として福江島（海洋研究開発機構のMAAP）での観測とも比較した。これらのCOSMOS以外のBC測定では、BCを含む全てのエアロゾルをフィルターに捕集し、各種補正を施すことにより光吸収係数（ $b_{\text{abs}}(\text{m}^{-1})$ ）が得られる。BC質量濃度 $M_{\text{BC}}(\text{ng m}^{-3})$ は、BCの質量光吸収断面積 $MAC(\text{m}^2 \text{ng}^{-1})$ を仮定することにより、測定で得られた $b_{\text{abs}}(\text{m}^{-1})$ から $M_{\text{BC}} = b_{\text{abs}}/MAC$ により求められる。本研究では、これらの他の測定で得られる b_{abs} を精度保証されたCOSMOSの M_{BC} と一致するように MAC の値を決定することにより、COSMOSのBC濃度スケールに統一されたBC質量濃度をすべての観測所で求めた。

● 航空機観測に基づく北極 BC 動態解明

北極大気中のBCの高度分布観測は、その発生源・輸送過程の理解や、放射効果の定量化の観点から重要である。しかしながら北極域での航空機観測は容易ではないため、その数は限られている。本研究の研究グループは、2018年3-4月にドイツのアルフレッド・ウェーゲナー研究所（AWI）が中心となり実施した北極域の国際航空機観測PAMARCMiP2018に参加し、BCなどの観測を実施した。本研究では、本研究ではサブテーマ2, 3, 4と連携して、この観測により得られたデータを解析した。具体的には、春期に北極域で実施された過去の3つの航空機観測、2008年のARCTAS、2010年のHIPPO、2015年のNETCARE航空機観測との比較を、特に中緯度の森林火災燃焼の影響の年々変動の観点から行った。

森林火災からの影響を定量的に評価するために、森林火災からの各年のBCの放出量を考慮した全球モデル計算を、名古屋大学のCAM-ATRASおよび気象研究所のMRI-ESM2.0を用いて実施した。そして、これらの数値モデルで使用した森林火災からのBC放出量に関する各種のデータ（エミッションデータ）の妥当性などを評価した。

● 複素散乱振幅センシング技術による固体エアロゾル分析とBCの複素屈折率の推定

エアロゾルの雲への影響は、水雲粒子を生成する雲凝結核エアロゾルと、氷雲粒子を生成する氷晶核エアロゾルの影響がある。このうち氷晶核として働くエアロゾルについては、その化学種、存在量、時間変動といった基本的な描像さえ得られていないのが現状である。このため、人為的なエアロゾルの氷雲や混相雲（過冷却水滴と氷粒子の両方からなる雲）への影響評価には大きな不確実性がある。そこで本研究では、氷晶核として働くエアロゾルは固体エアロゾルである、ということに着目し、個別の固体エアロゾルの種類と粒径を測定するという世界でもほとんど例のない測定技術を開発し、観測に用いる。

固体エアロゾルの測定では、エアロゾルの物性・粒径・数濃度の同時定量が可能な複素散乱振幅の測定技術を用いる。従来の多くのエアロゾル測定では、測定器内に導入した粒子にレーザーを照射し、その散乱光の強度から粒子の大きさを測定していた。その際には、粒子種（屈折率）を仮定することが必要であった。これに対し複素散乱振幅の測定技術では、粒子による散乱波の振幅とともにその位相も測定することにより、粒子種ごとに固有な複素屈折率が推定可能となる。この新しい測定技術（複素散乱振幅センシング技術 Complex Amplitude Sensing, CAS）は、前処理が不要かつ非破壊・非接触の測定が可能となるため、大気・海洋・雪氷中の粒子状物質（BC、鉱物ダスト、金属粒子、生物粒子など）の様々な動態観測への応用が期待される次世代粒子測定技術である。固体エアロゾルの測定では、エアロゾルを水中に分散させ、個別粒子の散乱波の位相と振幅を同時に測定する。複素散乱振幅は、散乱粒子に入射する平面波場に対して観測される散乱場の振幅および位相シフトを表す物理量（複素数）である。複素散乱振幅は、粒子の複素屈折率、体積、形状、および配向など特性を反映するため、そのデータを取得してそれを解析することで、個々の粒子種の判別と、粒子種ごとの粒径別数濃度を定量することが原理的に可能である。

複素散乱振幅センシング技術（CAS）の測定原理を表す模式図を図-1.1 に示した。本技術では、粒子を含んだ液体をフローセルに流し、レーザー光の入射波と、粒子によるその散乱波の干渉パターンを前方方向で測定し、干渉パターンを理論的に解析することで、粒子の散乱波の位相と振幅（複素散乱振幅）を正確に導出する方法論を開発した。具体的には、ガウシアンビーム・フローセル・粒子の位置座標が干渉信号に及ぼす関係を定式化し、装置パラメータが複素散乱振幅の測定の系統誤差・統計誤差に及ぼす影響を解析した。さらに、粒子の複素散乱振幅測定において、ガウシアンビームに平面波近似を適用できる条件を理論的に評価するためのソフトウェアを開発した。

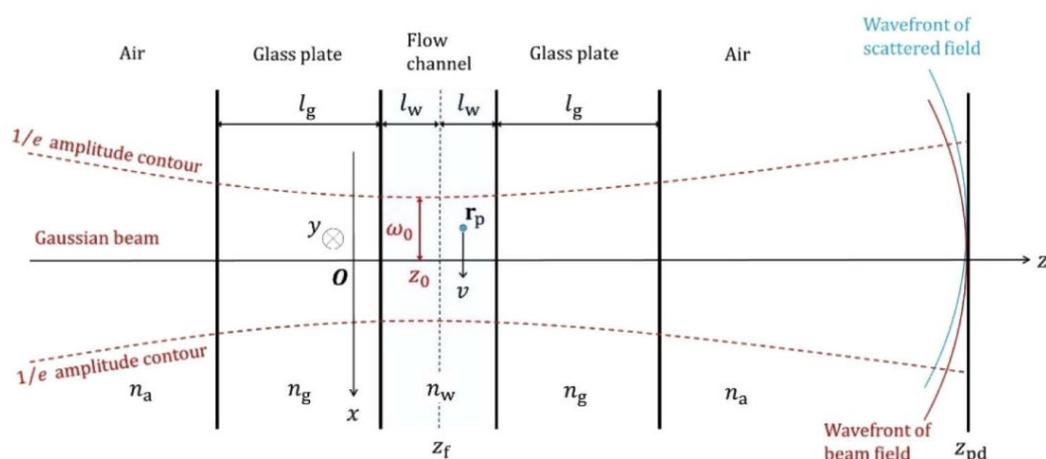


図-1.1 複素散乱振幅センシング技術（CAS）の測定原理を表す模式図。粒子は”Flow channel”と書かれた領域を上から下へ向けて通過する。粒子を測定するレーザービームは、左端の”Gaussian beam”と書かれた方向から入射する。この入射光と粒子からの散乱光の干渉光が、右端の z_{pd} と書かれた検出面で検出される。

● 氷粒子と氷晶核粒子（エアロゾル）との対応

私たちはこれまでの研究において、北極域で唯一となる通年での連続的な雲粒子の直接観測を実施してきた。そして水雲粒子の数濃度変動と、水雲粒子を形成する雲凝結核（水溶性エアロゾル）との間に明瞭な正の相関があり、エアロゾルが水雲粒子の濃度変動をもたらしていることを実証した。これに対し氷雲粒子については、北極域や世界各地での航空機観測からは、氷粒子を形成する氷晶核（固体エアロゾル）との関係について整合的な結果が得られていないのが現状である。このため、人為起源の氷晶核や北極が温暖化した時に放出量が増加する可能性のある自然起源の氷晶核の影響の推定には、大きな不確定性がある。これまで実施されてきた航空機観測は、スナップショット的な情報しか得られない限界がある。そこで本研究では、北極域に位置するニーオルスンのゼッペリン山観測所において、世界で初めてとなる長期間にわたる個別の降水粒子（氷粒子）の直接観測を実施した（図-1.2）。

ゼッペリン山が位置するニーオルスンにおいて、ケルン大学の研究グループが雲レーダとライダ観測に基づく雲の水・氷の相を判別した高度分布観測を実施している（図-1.3）。本研究ではこの観測に基づき、単層かつ雲頂高度が2.5 km以下の混相雲（過冷却水と氷が共存する雲）が存在した時間帯を抽出した。降水粒子観測はレーザー中を落下（降水）する個々の粒子の影の大きさから測定している。この測定では粒子形状の情報は得られないため、雲レーダ・ライダにより上空に混相雲が検出された時の直径500 μm 以上の降水粒子は全て氷粒子であると仮定して解析を進めた。氷晶核数濃度としては、ゼッペリン山観測所で観測された典型的な数濃度を採用した。氷晶核数濃度は気温に依存するため、雲頂気温に対応した値を使用した。降水粒子は数濃度フラックスを測定しているが、この観測値から数濃度を推定するためには粒子の大きさに依存した終端落下速度を仮定する必要がある。そこで本研究では、降水粒子と氷晶核の比較は、それぞれの数濃度フラックスを比較した。氷晶核数濃度フラックスとしては、私たちのこれまでの研究で得られた、雲層に入る空気塊の典型的な上昇流速度を仮定して計算した。

● アジアのエアロゾルの動態把握

北極大気中のエアロゾルは、アジアなど幅広い領域の発生源から輸送されてきている可能性がある。またグローバルモデルの検証をする際にも、北極エアロゾルの観測データだけでは明らかに不十分である。アジアという世界的に見てもエアロゾル濃度が高い領域での各種エアロゾルの観測は、本研究で不可欠であるのみならず、様々な環境行政の基礎となる貴重なデータを得ることができる。本研究で実施している、国環研の長崎県五島列島福江島の観測所での観測は、2014年から続いている無機・有機エアロゾルの定期観測として、アジア大陸からの越境汚染を捉えるわが国で唯一の貴重なデータを生み出している。本研究では、福江島観測所で実施された越境大気汚染が卓越する冬季にエアロゾル質量分析計（Aerosol Chemical Speciation Monitor: ACSM, Aerodyne）を用いた観測データや、長崎県五島市の常時監視局データなどを用いて近年の大気汚染物質の変動を解析した。またこれまでに福岡で得られたデータも用いて、越境大気汚染の国内への影響を解析した。

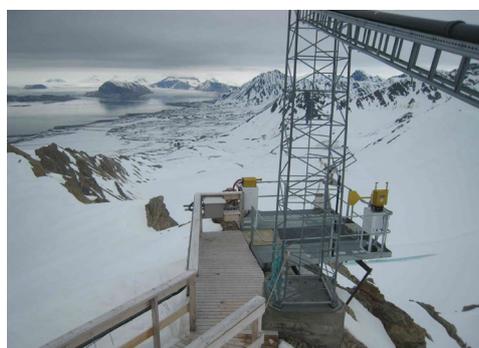


図-1.2 ゼッペリン山観測所のテラス上に設置された雲粒子測定装置（写真左の白い台上の装置）と降水粒子測定装置（写真右の白い台上の装置）。

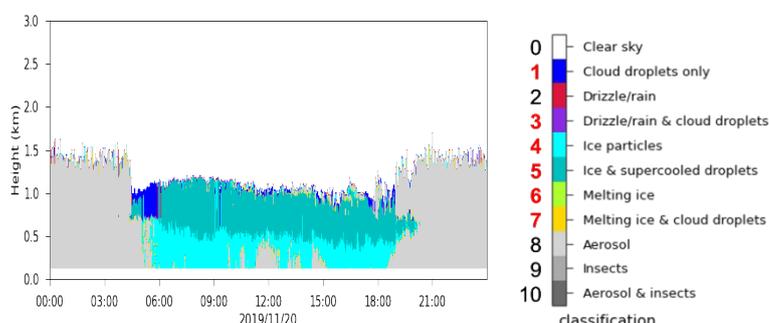


図-1.3 ゼッペリン山観測所のあるニーオルスンにおける雲レーダ・ライダ観測例。上層に過冷却水と氷粒子よりなる雲層が形成され、その下に氷の降水が見られる。

4. 結果及び考察

● 北極BCのネットワーク観測と統一BCデータの作成

北極の多地点におけるCOSMOSによるBC観測と、欧米の研究機関による他のBC測定器による観測結果との比較および統一データセットの構築については、サブテーマ4の結果および考察にまとめた。（図-0.3も参照のこと）。

● 航空機観測に基づく北極BC動態解明

2018年3-4月に北極域で実施されたPAMARCMiP2018航空機観測によるBCの高度分布観測および過去に北極域で春季に実施された3つの航空機観測との比較については、サブテーマ2の結果および考察にまとめた。図-0.4も参照のこと。

● 複素散乱振幅センシング技術による固体エアロゾル分析

固体エアロゾルの測定では、個別のエアロゾルの物性（複素屈折率）と粒径を同時に定量可能な複素散乱振幅センシング技術を開発した。この手法では、レーザービームを絞り込んだビームウエストと呼ばれる場所に粒子を導入し、もともとのレーザービームと粒子による散乱波との干渉強度を測定している。この時に測定される信号強度を表現した従来の測定理論式では、入射レーザービームは平面波であるなどの仮定がなされていた。現実の測定条件ではこれらの仮定は厳密には満たされない。そこで本研究では、ビーム波が平面波でなくガウシアンビーム波（同位相面がガウス分布の形状をした波）であることなどを考慮し、理論式を改良した。その結果、ビームウエスト半径の3倍以下の粒径であれば平面波近似に伴う測定の誤差は2%以下であり、計測に影響しないことが明らかになった。この結果により計測可能な粒径範囲の上限を定める基準が明確化された(Moteki, 2021)。

さらに理論信号のシミュレーションと測定信号の比較により、系統誤差の主要因である粒子流路とビームウエスト位置のずれを修正することが可能になった。粒子流路の位置条件の最適化を行った後、粒径範囲0.2 μm -5 μm のポリスチレン粒子・シリカ粒子を用いて、実際の装置の実験により複素散乱振幅測定性能を評価した（図-1.4）。

このように広い粒径範囲にわたり複素散乱振幅を高精度測定できる技術は世界初である。液中粒子の複素散乱振幅を定量するための厳密な方法論は以下のように要約される（CAS-v1プロトコル）。

1. 波長とフローセル流路幅の適切な組み合わせを選択し、測定対象の粒径範囲に応じてガウシアンビームのビームウエスト径の設計値を決める。
2. フローセルの光軸に沿う方向の位置を、ガウシアンビームのウエスト位置が流路内に含まれるように粗く調節する。

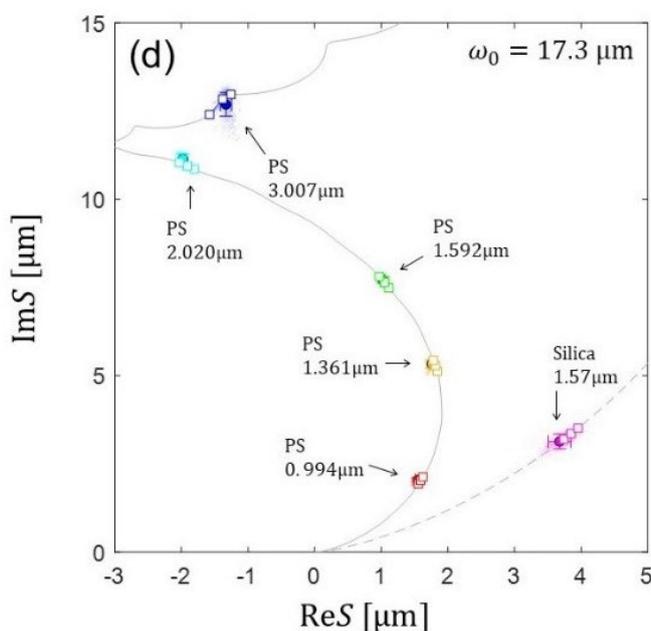


図-1.4 球形粒子（ポリスチレン(PS)粒子、シリカ粒子）の複素散乱振幅の実験値（ドットと塗りつぶされた丸）と理論値（灰色線と白抜き四角）の比較図。灰色の曲線は粒径に対する連続関数としての複素散乱振幅の理論曲線。

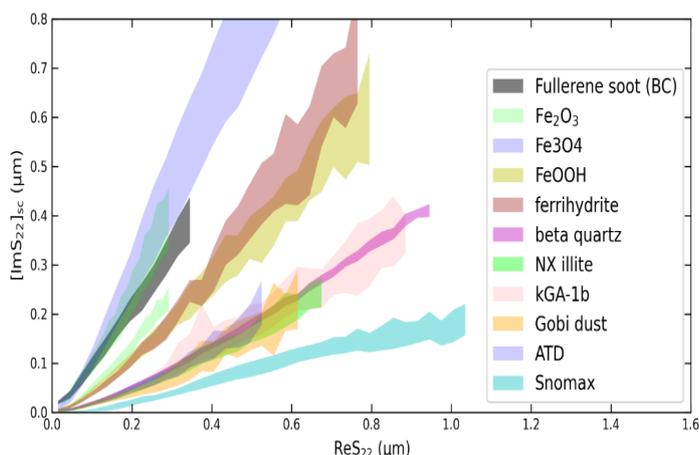


図-0.6 様々な試料の複素散乱振幅の測定結果。横軸と縦軸は複素散乱行列のS22成分の実部と虚部を示す。代表的な鉱物粒子の実験結果が示されている。kGA-1bはカオリナイト、ATDは市販の鉱物ダスト粒子（Arizona Test Dust）である。鉱物粒子以外のエアロゾルとして、BCの標準粒子であるフラーレン・スートと、氷晶核として利用されている市販のバクテリア粒子であるSnomaxの結果も示した。（Yoshida et al., 2022）

3. 干渉信号の実測波形と理論波形を比較しながらフローセルの光軸方向の位置を、流路中心がビームウエストに一致するように精密に調整する。
4. 必要な測定精度に応じて、波形幅のしきい値をイベントフィルターリングに適用し、検出された粒子のうちフローセルの流路壁近傍を通過しているものを除外する。
5. 粒径と屈折率が既知の粒子の理論値と実測値の比較から、ビーム上エスト径の厳密な値を決定する。
6. ガウシアンビーム散乱理論との比較を通じて、平面波散乱理論の適用可能性を確認します。
7. 測定対象の未知粒子サンプルを導入し、干渉信号から複素散乱振幅を導出する。

上述の方法論により、液中粒子の複素散乱振幅を高精度に測定できることを、粒径と屈折率が既知の球形粒子（ポリスチレン、シリカ）を用いた実験により実証した（図-1.4）。

実際の環境試料についてこのデータ解析手法を適用するためには、判別したい異なる粒子種の複素散乱振幅データ点群が相互に判別可能である必要がある。そのために、本研究では大気中で氷晶核として働く可能性のある、鉱物ダスト、BC、生物粒子を測定器に導入し、複素散乱振幅データの特徴を明らかにした（Yoshida et al., 2022）。この実験の結果、これらの代表的な固体粒子は判別可能であることが明らかになった（図-0.6）。実際の環境中のエアロゾル試料では、実験結果のうちBCに近いもの、鉱物ダストに近いもの、生物粒子（Snomax）に近いものの3つのグループに分かれることが多いことも明らかとなった。

● 複素散乱振幅センシング技術の応用によるBCの複素屈折率の推定

BCの光吸収係数を表す複素屈折率は、光吸収計測からBC濃度を定量する上で不可欠であり、また気候モデルにおいてBCの放射効果を定量化する上においても必須となるパラメータである。言い換えれば、複素屈折率の不確定性がそのまま光吸収BC測定法やBCの気候影響の不確定性となる。しかしながら、BCのような複雑形状の微小粒子については、可視波長帯での幾何光学近似が適用可能な一様平板試料を作成できないことや、大気中で共存する他のエアロゾル化学種が測定に及ぼす影響を除外することが困難であることにより、複素屈折率の正確な測定が実現できてこなかった。これまで、リモートセンシングや気候モデリングで仮定されるBCの複素屈折率としてBond and Bergstrom (2006)による推奨値 $1.95 + 0.79i$ が用いられてきた。しかし、この推奨値は人工合成試料かつ粒子形状の影響を無視した実験法を用いた2005年以前の先行研究の結果に基づき推定されたものであり、この値が大気中の黒色炭素の複素屈折率としてどの程度妥当な値なのか、また大気中の黒色炭素の複素屈折率が実際にどの程度の変動幅を持ちうるのかは分かっていなかった。そこで本研究では、本研究で開発された複素散乱振幅センシング技術を応用することにより、実大気中のBCの複素屈折率の推定を行った。このために、大気エアロゾルを水に取り込み、硫酸塩等の水溶性化学種から分離した状態のBC粒子の光学特性を測る方法を考案した。光学特性の測定では、構成成分の複素屈折率に大きな感度をもつ散乱波の位相・振幅を高精度

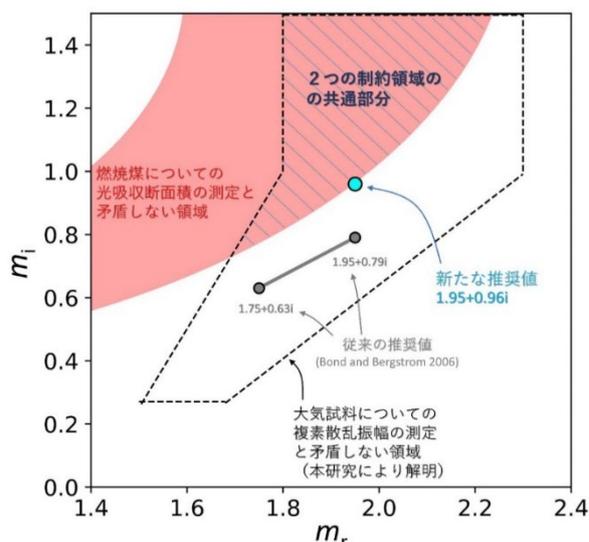


図-1.5 波長633nmにおける黒色炭素の複素屈折率 m_r+im_i の制約領域

で測れる複素散乱振幅センシング法を採用した。複素散乱振幅の測定データ点群を、未知である粒子形状の不確実性を包括的に考慮して解析することで、複素屈折率の実部・虚部の範囲をベイズ事後確率として導出する方法を開発した。この方法により様々な粒子種が共存する流体試料について測定された複素散乱振幅のデータ点群から、各粒子種の粒径分布・形状・複素屈折率を推定することができる。特に、BC粒子の現実的な凝集体の粒子形状モデルを用いた散乱モデルと最新のベイズ統計数理法を組み合わせることで、粒子形状や粒径分布の影響を包括的に考慮した推定法を初めて実現した。

大気中のBC粒子について、複素屈折率の実部・虚部が90%以上の事後確率で含まれる領域を図-1.5の黒色破線で示した。この領域と、近年報告された燃焼煤（すす）の単位質量当たりの光吸収断面積の測定値と理論的に矛盾しない複素屈折率の範囲（図-1.5の赤色領域）の共通部分として、大気中のBCの複素屈折率の範囲（図-1.5のハッチ領域）を制約した。この領域の中で、事後確率の密度が比較的大きくかつBCの吸収を過大評価する危険性が少ない推奨値として、 $1.95+0.96i$ を提案した。本研究による新たな推奨値 $1.95+0.96i$ を用いると、従来推奨値 $1.95+0.79i$ を用いた場合に比べて、黒色炭素の単位質量当たりの光吸収が16%程度大きくなると推算される。

この結果は、従来推奨値を用いている現行の気候モデル群はBCによる太陽放射の吸収量を16%程度過小評価していることを示唆している。新たな推奨値を用いることで、気候モデリングにおける大気中や雪氷中のエネルギー収支の計算や、リモートセンシングにおけるエアロゾル組成別濃度の導出の際の一つの系統誤差が修正される。そのため、本研究の成果は、今後の気候変化の要因分析・予測や全球スケールでのエアロゾル観測の精度向上に貢献するものである。

本研究で開発した粒子の複素屈折率の制約方法（CAS法で取得された複素散乱振幅のベイズ解析）はBC以外の粒子状物質にも適用できるため、大気・海洋・アイスコア中の未知粒子の光学的同定、粉体材料の光学特性評価など、粒子計測全般への応用が期待される。

● 氷粒子と氷晶核粒子（エアロゾル）との対応

本研究では北極域では唯一となる個別の降水粒子の連続観測をニーオルスンのゼッペリン山観測所で行った。測定には光学式のディストロメータ(MPS, DMT Inc.)を用いた。この装置の粒径分解能は $25\mu\text{m}$ である。またケルン大学との共同研究により、ニーオルスンの2016年6月～2021年12月の期間の雲レーダ・ライダー観測に基づき、雲底高度が2.5km以下の単層の氷を含む雲を抽出した。この結果、どの季節においても、これらの抽出された雲の多くは雲頂高度が3000m以下で、雲層厚が2000m以下であることが分かった（図-1.6）。

本研究の降水粒子の直接観測では、水粒子か氷粒子かの判別ができない。そこでレーダ・ライダー観測で氷を含む下層雲が存在している条件の下、観測される最大長さ $500\mu\text{m}$ 以上の降水粒子をすべて氷粒子、あるいはそれが融解して水粒子となったものと仮定した。この仮定の妥当性を検証するために、

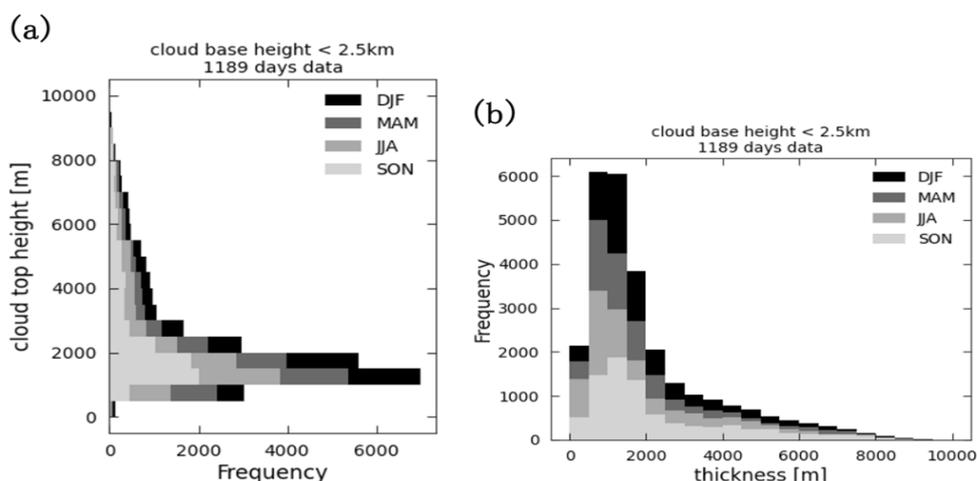


図-1.6 ニーオルスンにおいて、2016年6月～2021年12月に雲レーダ・ライダー観測により検出された雲底高度が2.5km以下の単層の氷を含む雲の統計。(a)雲頂高度の統計。(b)雲層厚の統計。

以下の2つの解析を実施した。ひとつは、期間が限られるものの、降水粒子を撮像して降水が水粒子か氷粒子かを判別できる装置（CPI, SPEC Inc.）の観測データを解析した。この測定器の分解能は2.3 μm である。レーダ・ライダー観測で氷を含む下層雲が存在している期間のデータを抽出し、その形状判別を行った。この結果、大きさが100 μm および500 μm 以上の粒子（降水粒子）は、すべて氷粒子であることが分かった。一方、雲粒子を含む全ての粒径の粒子では、80%程度が水粒子（過冷却水滴）であることが分かった。このことは、CPIデータが得られていない時期についても、大きさが500 μm 以上の粒子は氷粒子であると仮定することの妥当性をある程度支持するものである。

本研究の降水粒子を氷粒子とみなすことの妥当性のもうひとつの検証として、降水粒子の粒径分布の観測データと、雲レーダ・ライダーから得られる雲層厚データを用いて、鉛直積算雲氷量（ice water path, IWP）を推定した。一方において、鉛直積算雲氷量はレーダ・ライダー観測とともに実施されているマイクロ波放射計観測を組み合わせた解析により導出されている。両者には正の相関がみられ、観測した降水粒子が氷粒子であることを支持する結果となった。

北極の混相雲（水と氷が共存した雲）では、気温が最も低い雲頂付近で氷晶核（エアロゾル）を含む水粒子が凍結して氷粒子を形成することが期待される。気温が低いほど氷粒子を形成する氷晶核として働くエアロゾルの割合は増加し、氷粒子数濃度は増加すると考えられる。そこで本研究では、観測された降水粒子（氷粒子）の数濃度と、雲頂気温に対する氷晶核数濃度との関係をより定量的に調べた。氷晶核数濃度としては、私たちが前の推進費研究において得た、ゼッペリン山で観測された各温度での典型的な氷晶核数濃度（Tobo et al., 2019）を用いた解析を実施した。観測された雲頂気温の全域についての氷晶核数濃度は得られていないため、温度方向に外挿して用いた。特に -10°C 以上の気温への外挿には不確実性がある点には注意が必要である。降水粒子は数濃度そのものではなく数濃度フラックスが直接の観測量であるため、私たちが前の推進費研究で求めた雲内での実効的な上昇流速（Koike et al., 2019）を用いた。この結果、降水粒子の数濃度は気温がおよそ -15°C 以下では気温の低下とともに増加する傾向が見られ、低温ほど増加する氷晶核数濃度と整合的であった（図-0.9）。このことは、降水粒子が氷晶核により直接的に影響されている可能性を示唆するものである。一方、気温が -10°C 以上では、降水粒子の数濃度は氷晶核数濃度よりも数桁以上も高かった。この結果の解釈には、3つの可能性がある。第一に、降水粒子の多くは氷粒子の生成を介さない暖かい雨であるという可能性である。ただし、上記のように、少なくともその一部は氷粒子であることが確認されているため、すべてのデータが暖かい雨であるということは考えにくい。第二に、気温が -10°C 以上では氷晶核数濃度の観測データが無いため -10°C 以下の観測データを外挿しているが、この値が過小評価している可能性がある。実際に、気温が -10°C 以上で有効に働くバイオエアロゾルが存在することが近年報告されている。ただし、

数桁にもおよぶ降水粒子数濃度の差を全てバイオエアロゾルが賄うことは難しいと考えられる。北極におけるバイオエアロゾルの動態はほとんど分かっていないため、今後の研究が必要である。第三に、氷晶の二次生成が強く働いている可能性がある。実際に気温が -3 から -8°C では、効率的な2次生成が働くことが知られている。このような過程により観測結果が説明できるかどうかについては、今後、詳細な数値モデル計算研究などが必要である。これらの雲微物理観測は2019年9月～2020年8月の期間にニーオルスンで実施されたNASCENT 国際観測キャンペーンにも貢献した(Pasquier et al., 2022)。

● 数値モデル計算 (LES) による氷晶核 (エアロゾル) や氷粒子の形状の混相雲への影響

本研究では、人為起源の氷晶核数濃度の変動や、北極温暖化などによる自然起源の氷晶核数濃度の変動に対して、北極の混相雲がどのように応答するのかを、詳細な数値モデル計算により調べた(Ong et al., 2022)。このために、理化学研究所で開発されたSCALE-LESモデルに、高知工科大学で開発されたAMPSという微物理モデルを移植した。北極での航空機観測が実施されたSHEBAを対象として、氷晶核数濃度に関わるパラメータのみを変化させた時の雲の応答を調べた。図-1.9には計算開始から4時間後

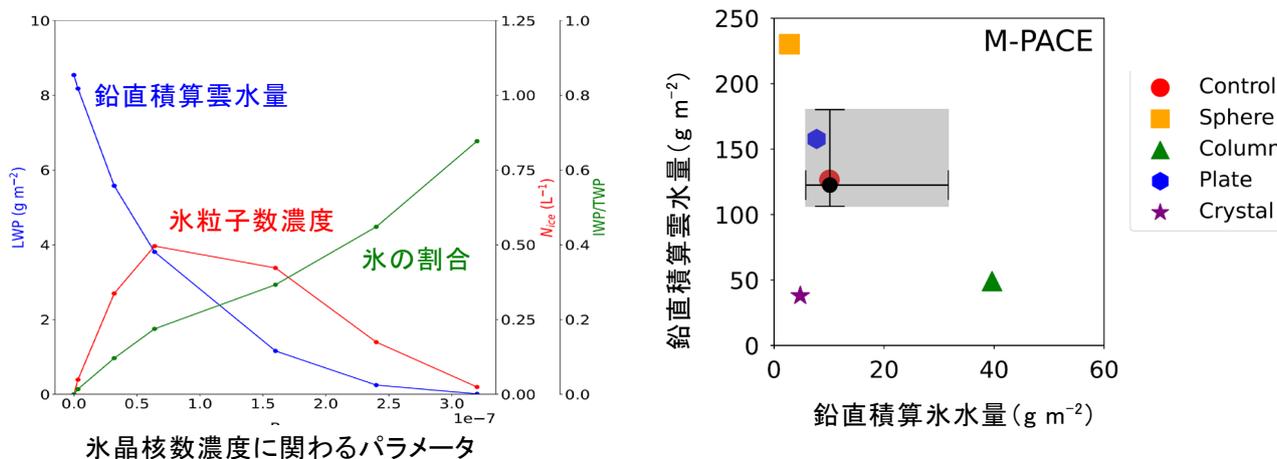


図-1.9 数値モデル計算 (LES) により得られた氷晶核数濃度の変化に対する鉛直積算雲水量などの雲微物理量の変化。数値モデル計算開始から4時間後の結果を示す。北極での観測であるSHEBA観測を対象とした計算結果。(Ong et al., 2022)

図-1.10 数値モデル計算 (LES) により得られた、モデル内での氷粒子の形状の鉛直積算の雲水 (液相の水) や氷水 (固相の水) に対する影響。数値モデル計算開始から4時間後の結果を示す。北極での観測であるM-PACE観測を対象とした計算結果。灰色の四角は観測値の範囲。(Ong et al., submitted)

の雲微物理量を示した。本研究で対象とした混相雲では、氷晶核 (エアロゾル) 数濃度があまり多くない状態では氷粒子 (雲・降水粒子) 数濃度は増加する一方、氷晶核数濃度がさらに増えると氷粒子数濃度が減少する結果となった。氷晶核数濃度の増加とともに鉛直積算雲水量は減少しており、また雲内での氷の割合が増加していた。氷晶核数濃度が増加すると多くの氷粒子が生成されるが、WBFと呼ばれる氷粒子の成長過程により、液相の雲水量が減少していたことが分かった。氷晶核数濃度がさらに増加するとWBF過程により雲水量が大きく減少し、結果的に雲頂での放射冷却と対流不安定性が維持できなくなっていた。そのために氷粒子数も減少してしまっていた。雲の放射効果は鉛直積算の雲水量に大きく依存するため、本研究の結果は、氷晶核数濃度変動が北極の放射収支・気候に重要な雲の放射効果に対して大きく影響する可能性を示唆するものである。

ほとんどの日々の天気予報モデルや気候モデルにおいて、雲氷、雪、霰などのそれぞれの氷粒子の形状は特定の形が仮定されている。氷粒子の形状は、粒子の落下速度、衝突併合効率、放射影響などに影響するため、どのような形状を仮定するかにより計算結果が変わってくる。近年、氷粒子の形状を予報変数として取り扱い、氷晶の昇華成長や衝突併合成長における氷粒子の形状変化の時間発展を計算する新しい数値モデルが開発されてきている (Hashino et al., 2020)。しかしながら、氷粒子の形状変化を陽に計算するモデルにおいても、その変化の定式化のやり方により支配的な氷粒子の形状が異な

り、それが雲微物理過程や放射過程に影響する。そこで本研究では、氷晶の昇華成長における氷粒子の形状の時間発展のモデル表現を変化させることにより、その影響を評価した (Ong et al., submitted)。図-1.10には、支配的な氷晶の形状と、その時の鉛直積算の雲水量（液相の水）および氷水量（固相の水）の値を示した。このように、氷粒子の昇華成長の仕方を変化させることにより支配的な結晶の形（晶癖）が変化し、鉛直積算の雲水量・氷水量が5倍も変化することが明らかとなった。この変化は、粒子の落下速度や衝突併合効率を通じて、衝突併合過程にも大きく影響することが分かった。世界的な雲微物理モデルの動向として、今後、氷粒子の形状を陽に扱う方向に進んでいくことが考えられるが、その時、粒子形状変化のモデル表現にも結果が大きく依存することが示された。

● アジアのエアロゾルの動態把握

長崎県の福江島においてACSMで測定した硝酸イオン、硫酸イオンの濃度について各年の2月から4月の平均値を比較した（図-1.11）。近年、中国における二酸化硫黄、窒素酸化物、アンモニアなどの排出量が減少しているため、粒子に含まれる硝酸イオン、硫酸イオンの濃度割合が変化している。福江島

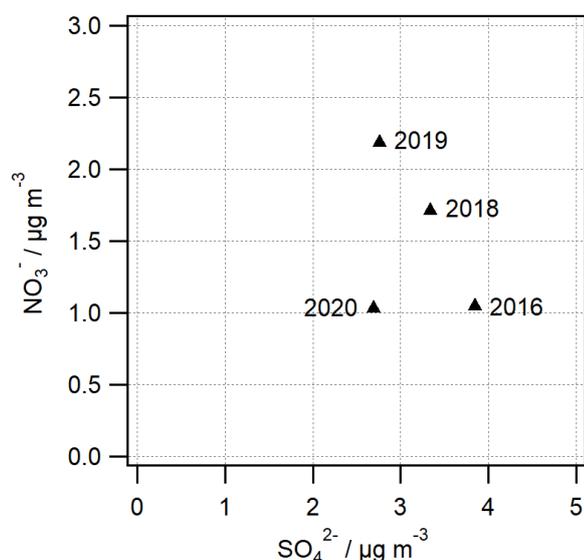


図-1.11 長崎福江島で観測した微小粒子中の硫酸イオンと硝酸イオンの変動

での2019年までの観測結果では、硫酸イオンの割合が減少し硝酸イオンの割合が増加するという傾向がみられた。2020年は、硝酸イオン、硫酸イオンの両方の濃度が大幅に減少した。硝酸イオン濃度は近年増加傾向にあったが、2019年に比べ約半分の濃度になっており、減少に転じていた。硫酸イオン濃度については、2013年以降減少傾向にあり、2020年では一段と減少していた。中国での大気汚染物質の排出量削減がかなり進んだ2016年と比較しても、2020年の硫酸イオン濃度は約30%減少していた。この結果は、中国における二酸化硫黄の排出量がかなり減少したことを示している。

また福岡県福岡市の福岡大学において2018年1月20日から2月10日の期間、微小粒子の個数濃度とオゾンを観測しその結果を解析した。微小粒子は走査式移動度粒径測定装置 (SMPS 3034, TSI) を、オゾンはオゾン計 (Thermo 49i/J) を、気象要素の観測には簡易気象測定機 (WXT520, Vaisala) を用いて観測した。風速の強弱（風速3ms⁻¹未満が弱いと定義）により、気象要素、粒子個数濃度、オゾン濃度を分類した。風速が弱い時をGroup A、強い時をGroup Bとした。Group AではGroup Bと比較して相対的に、粒子個数濃度 (PN)、黒色炭素濃度 (BC)、二酸化窒素 (NO₂) 濃度が高く、また気温や相対湿度も高かった。特に風が弱い朝のラッシュアワー時に濃度等が高くなることから、福岡市内で発生する大気汚染物質の影響が大きいと考えられる。一方でGroup Bではオゾン濃度が高く、PN、BCは低く、また気温、相対湿度も低い傾向にあった。日射はあるにもかかわらず、オゾンは35ppb程度で一定であり日変動をしなかった。このGroup Bは大陸からの季節風で輸送される越境大気汚染の影響が大きいと考えられる。これらの結果から、粒子状物質は都市域内の排出削減が重要であり、オゾンについては越境大気汚染の影響が大きく中国などでの排出抑制が重要と考えられる。

最後に、福岡市において捕集したエアロゾルの化学成分の分析と気塊の流跡線の関連を解析した。

2020年春季福岡市の福岡病院でPM_{2.5}のフィルター捕集を行い、硫酸イオンなどはイオンクロマトグラフによって成分分析を行った。オゾン濃度は福岡市内の常時監視局のデータを利用した。後方流跡線解析はNOAAのHYSPLITモデルを用いて行った。PM_{2.5}及びそれに含まれる各化学成分が全般的に高濃度の日について後方流跡線解析を行うと、気塊は黄海、韓国南部などを經由して福岡に到達していた。同時に晴天で日射も強い場合はオゾンの日変動も観測されたので、PM_{2.5}の高濃度日は越境大気汚染とローカルな汚染の両方が関与していると思われる。硫酸イオン濃度(SO₄²⁻)が特異的に高い日は気塊が九州の南部から福岡に到達しており、諏訪之瀬島や桜島など国内の火山の影響が大きいと考えられる。以前は硫酸イオンが高濃度の日には中国からの越境大気汚染の影響が大きかったが、最近では中国での大気汚染対策が進んでいることから、国内の火山の影響も相対的に大きくなっていると考えられる。発がん性などが懸念され、かつ、石炭燃焼など放出される微小粒子中の多環芳香族炭化水素類(PAHs)の濃度が特異的に高い場合についても流跡線解析を行った。多くの場合、日本海から島根、山口を經由して福岡に到達していた。PAHsのみ濃度が高い場合、越境大気汚染ではなく国内に特異的なローカルな発生源があるのかもしれない。

このように、以前はPM_{2.5}や硫酸イオンなどが高濃度の場合、主に中国などからの越境大気汚染の影響が大きかったが、近年は中国での大気汚染対策が進んでいることから、国内発生源の影響も検討する必要がある。また、アジア域で発生するPMの成分も徐々に変化しており、その点も考慮に入れる必要があると思われる。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1の研究目標は、第一に、BC測定器COSMOSの北極観測ネットワークにより、北極内でのBCの時空間変動を明らかにするとともに、既存の北極BC観測の精度を評価すること。第二に、ニーオルスンにおいて固体エアロゾルの観測を実施し、その動態と雲微物理量との関係を評価すること。第三に、エアロゾルの大発生源であるアジア(福江島観測所など)においても継続的なエアロゾル観測を実施し、動態を明らかにすることであった。本研究では、BC測定器COSMOSの北極観測ネットワークと欧米の研究機関の各種BC測定器との比較により、他機関のBC測定値を精度保証されたCOSMOS濃度スケールに規格化した標準データセットを構築することができた。また氷雲粒子を形成する氷晶核として重要な固体エアロゾルについて、世界で初めてとなる種類別に粒径を測定できる新しい技術(複素散乱振幅測定技術)を確立した。さらに北極で唯一となる降水粒子の連続観測を実施し、氷晶核と氷雲粒子数濃度の関係を示した。アジア地域のエアロゾル観測という点では、長崎福江島での観測を継続できており、計画通り進んだ。また、観測結果の解析も行い、アジアからの粒子状物質の越境大気汚染の影響を評価することができた。このように、目標を上回る成果をあげることができた。

6. 引用文献

1. Hashino, T., G. de Boer, H. Okamoto, and G. J. Tripoli, (2020). Relationships between immersion freezing and crystal habit for arctic mixed-phase clouds—a numerical study. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **77**, 2411–2438.
2. Koike, M., Ukita, J., Ström, J., Tunved, P., Shiobara, M., Vitale, V., Lupi, A., Baumgardner, D., Ritter, C., Hermansen, O., Yamada, K., and Pedersen, C. A. (2019). Year-round in situ measurements of Arctic low-level clouds: Microphysical properties and their relationships with aerosols. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 1798–1822. <https://doi.org/10.1029/2018JD029802>.
3. N. MOTEKI : *Optics Express*, **29**(13), 20688–20714 (2021). Measuring the complex forward-scattering amplitude of single particles by self-reference interferometry: CAS-v1 protocol.
4. Moteki, N., Ohata, S., Yoshida, A., & Adachi, K. (2023). Constraining the complex refractive index of black carbon particles using the complex forward-scattering amplitude. *Aerosol Science and Technology*, in press. (Preprint is available from <https://doi.org/10.31223/X5736W>).
5. Ong, C. R., Koike, M., Hashino, T., and Miura, H. (2022). Modeling Performance of SCALE-AMPS: Simulations of Arctic Mixed-Phase Clouds Observed during SHEBA, *J. Advances in Modeling Earth Systems*,

- 14, e2021MS002887. doi:10.1029/2021MS002887.
6. Ong, C. R., Koike, M., Hashino, T., and Miura, H. (submitted to *J. Atmos. Sci.*). Responses of simulated Arctic mixed-phase clouds to parameterized ice particle shape
 7. Tobo, Y., Adachi, K., DeMott, P. J., Hill, T. C. J., Hamilton, D. S., Mahowald, N. M., Nagatsuka, N., Ohata, S., Uetake, J., Kondo, Y., and Koike, M. (2019). Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles. *Nature Geoscience*, 12,253-12,258.
 8. A. YOSHIDA, N. MOTOKI, and K. ADACHI: *Aerosol Science and Technology* (2022) Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data, <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2057839>.

II-2 エアロゾル化学組成観測と数値モデルによるプロセス評価

国立大学法人東海国立大学機構

名古屋大学宇宙地球環境研究所	持田 陸宏
名古屋大学大学院環境学研究科	松井 仁志
名古屋大学高等研究院	大畑 祥

<研究協力者>

名古屋大学宇宙地球環境研究所	周 瑞辰 (令和4年度)
名古屋大学大学院環境学研究科	Nkembeng Kenneth Fuanke (令和3年度～4年度)

[要旨]

(1) エアロゾル化学組成観測

北極ニーオルスンにおける大気エアロゾルの動態把握を目指し、Zeppelin観測所においてエアロゾルの連続採取を実施した。そして有機エアロゾル試料の先端的分析手法であるFTIR分析とイオンクロマトグラフィによる無機イオン分析により、有機・無機エアロゾルの最新の状況を取得した。そして、有機エアロゾルに関して季節変動の特徴を得たほか、従来の炭素分析では得られない酸素原子等の寄与を含む有機エアロゾル質量濃度の知見を得た。また、名古屋大学の吸湿タンデム電気移動度分析器 (HTDMA) を用いて、ニーオルスンにおいて春季に採取した大気エアロゾル試料に対して吸湿性の測定を行い、水溶性成分の吸湿性パラメータの値を取得した。さらに、本研究で得られた有機エアロゾルの元素組成の情報も利用して、エアロゾルの吸湿性に対する有機・無機成分の寄与の推定値を得た。

(2) 数値モデルによるプロセス評価

我々が独自に開発してきた全球気候-エアロゾルモデルCAM-ATRASを用い、北極および全球スケールでの人為起源・自然起源エアロゾルの動態と、直接的・間接的な放射効果 (エアロゾル-放射・雲相互作用の放射強制力) を推定した。第一に、CAM-ATRASモデルの積雲および混合相雲 (水と氷が共存する雲) におけるエアロゾルの除去過程の改良し、エアロゾル (特にブラックカーボン (BC)) の全球分布の観測再現性を大きく向上させた。第二に、北極BCの質量濃度や加熱効果などに対する発生源寄与を推定し、北極BCの大気加熱効果に対するアジア由来の人為起源BCの重要性や、雪面加熱効果に対するシベリア・アラスカなどのバイオマス燃焼起源BCの重要性を明らかにした。第三に、北極域のエアロゾル-放射・雲相互作用の放射強制力に対する様々な微物理特性・プロセス (エアロゾルの粒径分布、変質過程、雲活性化、除去過程など) の重要性を定量的に明らかにした。第四に、全球スケールにおいて、BCの放射強制力を定量的に評価するとともに、雲凝結核・氷晶核やエアロゾルによる雲放射強制力の推定を高精度化した。これらの成果を通して、研究目標をすべて達成するとともに、3年間の研究期間において、当研究費に関わる査読付国際誌論文をインパクト・ファクターの高い国際誌に多数出版し (計32編)、目標を上回る成果をあげた。

1. 研究開発目的

本サブテーマでは、BC以外の成分を含むエアロゾル全体の動態や雲微物理影響を、北極の代表的な観測点において明らかにすること、そして、エアロゾルの直接的・間接的な放射効果を、北極に重点をおきながらグローバルに推定することを目的とする。観測では、北極の代表的な観測地点であるニーオルスンにおいて年間を通じて大気エアロゾルを捕集し、本課題において新規に導入する赤外分光分析による有機エアロゾル定量法や、エアロゾル成分の雲凝結核活性測定技術も利用して、無機・有機エアロゾル成分量を定量化し、雲凝結核として働くエアロゾルの動態を明らかにする。数値モデル計算では、我々が独自に開発してきたエアロゾルの粒径分布や個々の粒子の化学組成 (混合状態) の情報を詳細に

表現できる全球気候-エアロゾルモデルCAM-ATRASを用い、北極および全球スケールでのブラックカーボン（BC）を含むエアロゾルの動態とその放射・雲過程との相互作用を評価する。

2. 研究目標

ニーオルスンにおいてエアロゾル採取を実施し、雲凝結核として働くエアロゾルの動態を、特に有機エアロゾルの寄与の観点から評価する。数値モデルにより、北極および全球スケールでの人為起源・自然起源エアロゾルの動態と、直接的・間接的な放射効果を推定する。

3. 研究開発内容

(1) エアロゾル化学組成観測

北極ニーオルスンにおける大気エアロゾルの動態把握を目指し、Zeppelin観測所における長期エアロゾル採取を実現するためのエアロゾルサンプラを名古屋大学において作製した上、同観測所への設置を行った（図-2.1）。このサンプラを用いたエアロゾル採取においては、まず、Zeppelin観測所の共通マニフォールドから取り込まれた試料空気がPM_{2.5}サイクロンに導入されてエアロゾルの分級が行われる。粗大な粒子が取り除かれたPM_{2.5}を含む試料空気は、サイクロンの下流側に設けた37 mm PTFEフィルター上に捕集される。試料空気はポンプによって吸引され、流量は標準状態（0℃，1気圧）において16.7 LPMとなるようにマスフローコントローラによって制御される。この採取装置を用いて、2021年6月からPM_{2.5}試料の長期採取を開始した。PM_{2.5}を捕集するためのフィルターの交換は週に1回を基本とし、本プロジェクトが終了する2023年3月末までに90以上のPM_{2.5}試料が得られた。このうち、2022年12月26日までの試料を化学分析のために名古屋大学に輸送した。

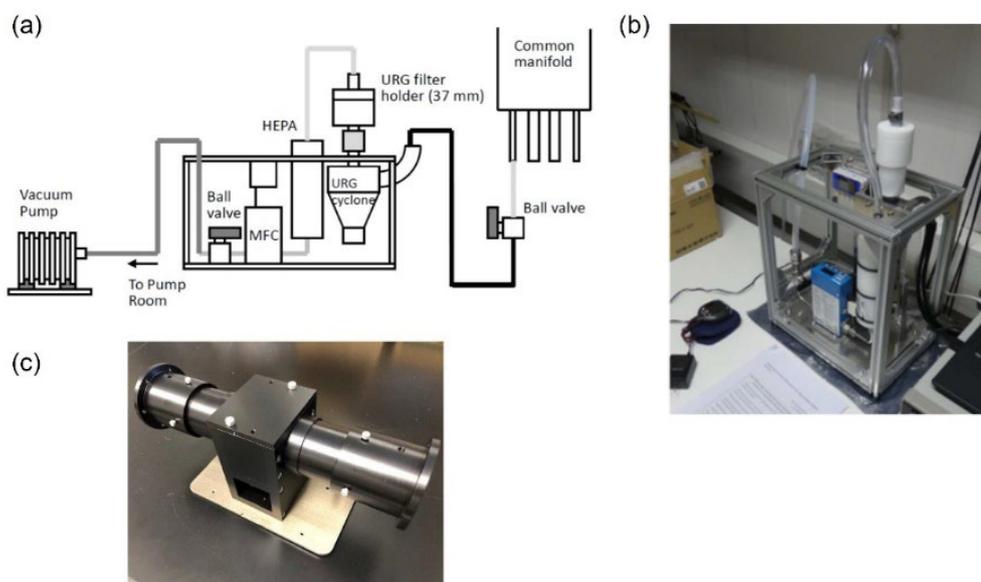


図-2.1 (a, b) Zeppelin観測所に設置したローボリュームエアサンプラの(a)模式図および(b)写真。(c) PM_{2.5}試料のFTIR分析のために作成した試料ホルダー。

また、ニーオルスンで得られるPM_{2.5}試料のFTIR分析を行うために、FTIR分光分析装置に取り付けるフィルターホルダーを作製した。先行研究¹⁾により報告されているホルダーに準じた構造となっており、PTFEフィルター及び赤外光の光路の部分が窒素ガスによりパージされる。フィルター試料を交換する度にフィルターホルダーの内部が実験室の空気に晒されるが、ホルダー内の体積を抑えることで速やかな窒素ガス置換を目指す構造となっている。

採取したフィルター試料のうち、2021年6月16日から2022年12月6日までに採取した試料に対してFTIR分光分析法およびイオンクロマトグラフ法による化学分析を行い、FTIR分光分析法では当該期間の有機成エアロゾルの大気濃度等の、イオンクロマトグラフ法では2022年3月15日までの無機イオンの大気濃度を調べた。FTIR測定においては、フィルターホルダー内に設置した試料に対して複数回のスペクトル測定を行った上、最後に得られたスペクトルを定量的ための解析に用いた。解析には、AIRSpec (Reggente et al., 2019)²⁾を用い、PTFEフィルターに由来する光吸収の寄与を差し引くベースライン補正を行ったのち、エアロゾル中の各化学官能基に由来する光吸収をフィッティングにより求め、フィルター上の有機エアロゾルの定量と化学官能基の寄与、また元素組成の導出を行った。また、FTIR分析が終了したフィルター試料に対して、外部の分析会社の協力により水溶性無機イオンの分析を実施した。この分析では、水を用いて無機イオンの超音波抽出を行った上、イオンクロマトグラフ法により、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の各イオンの測定を行った。そのほか、ニーオルスンにおいてCOSMOSによって取得された大気BCの濃度値をエアロゾルの吸湿性の解析に使用した。

さらに、名古屋大学の吸湿タンデム電気移動度分析器 (HTDMA) を用いて、ニーオルスンの大気エアロゾルの吸湿性の測定を行った。雲凝結核活性を測定する代表的な手法に雲凝結核カウンタの使用があるが、本研究ではHTDMAによる吸湿成長測定によって代替した。関連プロジェクトにおいて2022年の3月3～16日にニーオルスンのGruvebadet大気研究室の屋上においてハイボリュームエアサンプラを用いて $\text{PM}_{0.95}$ 試料を採取しており (6試料)、本研究ではそれらの試料から水溶性成分を超音波抽出してエアロゾル抽出物の水溶液を得た。これを自作のアトマイザを用いて噴霧することで抽出物の微粒子を生成させ、微粒子を含む空気を除湿した状態でHTDMAに導入し、相対湿度85%の条件で吸湿成長度 (乾燥粒径に対する加湿時の粒径の比) を計測した。そして、この吸湿成長度の値に基づき、エアロゾル中水溶性成分の吸湿性パラメータ κ の値を導出した。

なお、FTIR分析においては、École polytechnique fédérale de LausanneのSatoshi Takahama博士およびUniversity of California, DavisのAnn M. Dillner博士の協力を得た。イオンクロマトグラフ法による無機イオン成分はムラタ計測器サービス株式会社の横山容子氏の協力のもとで行われ、試料の採取はNorwegian Polar Instituteの協力のもと、関連プロジェクトと連携して行われた。

(2) 数値モデルによるプロセス評価

全球気候—エアロゾルモデルCAM-ATRASの改良

エアロゾルの北極域および全球スケールでの時空間分布の推定を改善させるために、これまで我々が開発してきたCAM-ATRASモデル^{3),4)}の積雲および混合相雲 (水と氷が共存する雲) におけるエアロゾルの除去過程のモデル表現を改良した⁵⁾。積雲については、従来は別々に計算されることが多かった、積雲内でのエアロゾルの上方輸送、エアロゾルの雲凝結核としての活性化、降水による除去、の一連の過程を統一的・整合的に計算する手法を新たに開発し、モデルに導入した。混合相雲については、雲内で氷晶が選択的に成長し水滴が蒸発することによって、エアロゾルの降水除去率が減少する過程をモデルに導入した。

また、北極域および全球スケールでのエアロゾル—雲相互作用の推定を高度化するために、自然起源エアロゾルの1つである鉱物ダストについて、氷晶核パラメタリゼーションの導入や放出スキームの改良を行った^{6),7)}。雲内で氷晶の形成を促す氷晶核については、従来気温のみに依存する (エアロゾルとは無関係に決まる) 計算手法が用いられてきた。我々は室内実験等で得られてきた鉱物ダストの数濃度・粒径分布と氷晶核数を結びつける氷晶核パラメタリゼーション⁸⁾をCAM-ATRASに導入し、ダストが氷晶核を通して雲の放射収支に及ぼす影響の直接的かつ定量的な評価を可能にした。また、放出スキームについては、乾燥地におけるダスト放出と地表面状態に関する観測データを用いて、ダスト放出の臨界摩擦速度 (ダストが放出されるために必要な地上風速に対応する) のモデル計算手法を改良した。

北極BCの発生源寄与の推定

北極域におけるBCの発生源寄与を推定するために、様々な発生源からのBCの放出・輸送・変質・除去過程を個別に追跡・計算できるタグモデルを開発し、CAM-ATRASに導入した⁹⁾。具体的には、全球を13の領域（図-2.2）にわけ、それぞれの領域から放出される人為起源（化石燃料・バイオ燃料の燃焼起源）とバイオマス燃焼起源のBCについて、大気中での輸送・変質・除去過程を別々の変数（トレーサー）を用いて計算する。全体で26の発生源（13領域×2起源）のBCを追跡することを可能にした。このタグモデルでは、CAM-ATRASが扱うすべてのエアロゾルビン（粒径分布12ビン×混合状態8ビン）について各発生源のBCのトレーサーを個別に考慮し、各発生源のBCが異なる粒径分布や混合状態を持つことを表現できる。このような扱いによって、各発生源のBCが異なる時空間分布を持つことを計算することに加え、各発生源のBCの降水過程による除去のされやすさの違いや各発生源のBCの光吸収効率（単位BC質量あたりの光吸収量）の違いなど、一般的なタグ・トレーサー法を用いた手法では考慮することができない点を表現・計算することが可能である。そして、各発生源のBCのトレーサーの情報から、北極域（北緯70度以北と定義）における 1) 地表大気中のBC質量濃度、2) 鉛直積算BC質量濃度（地表から高度約40kmまでの全高度のBCを積算した質量）、3) BCの沈着フラックス、4) 大気上端におけるBCの加熱効果、5) 雪面におけるBCの加熱効果、のそれぞれについて発生源寄与を推定した。

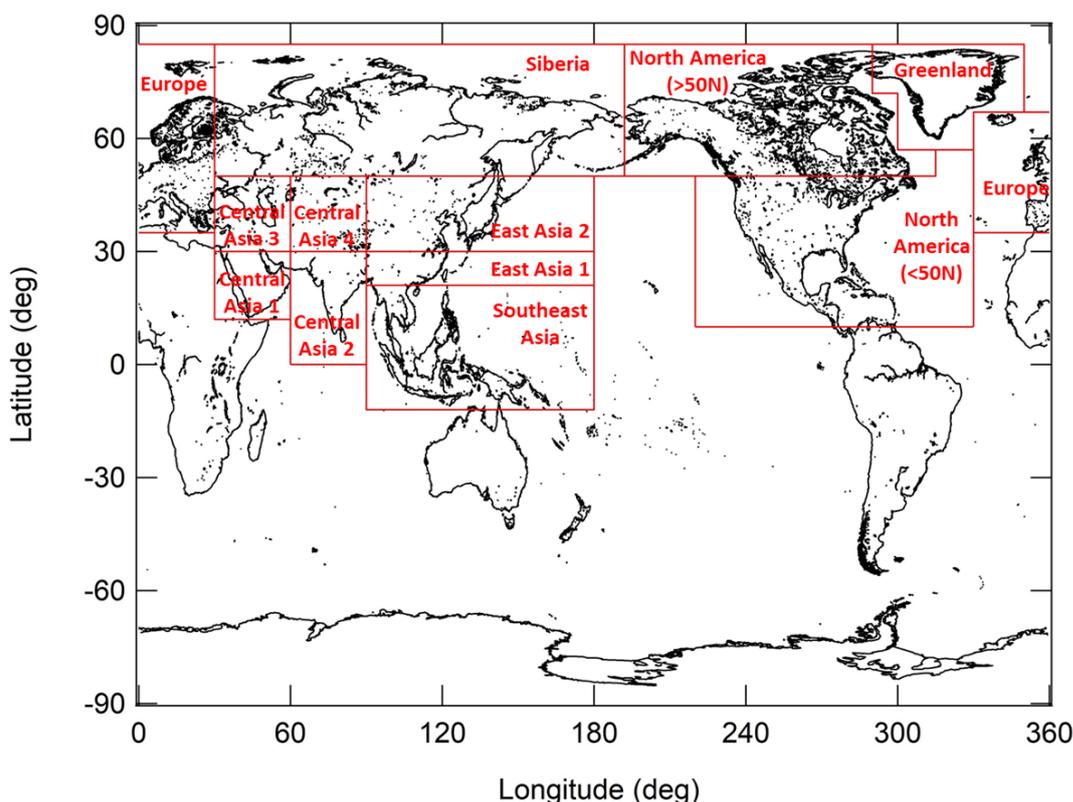


図-2.2 タグモデルにおける発生源領域の設定。赤枠で囲われた12の領域とその他の領域の計13領域について、BCの放出・輸送・変質・除去過程を個別に計算する。

CAM-ATRASの計算と観測による検証

本研究では、「4. 結果及び考察」で示すそれぞれの数値モデル研究について、比較・検証に用いた観測の観測期間に合わせた5～10年程度の現在気候のモデル計算を実施した。人為起源・バイオマス燃焼起源のエアロゾルとその前駆気体の放出量については、CEDSの月平均放出量データ^{10),11)}やGFEDの日平均放出量データ¹²⁾を用いた。モデル計算では、気圧800hPa以下の自由対流圏における気温と風速・風向について、MERRA2の再解析データを用いてナッジングを行った。放射強制力を推定する際には、産業革命前

(1750年)の放出量データを用いた計算を別途行い、現在気候と産業革命前のモデル計算の放射収支の差からエアロゾル-放射相互作用とエアロゾル-雲相互作用による放射強制力を推定した。

モデル計算の比較・検証には、主に以下の観測データを使用した。

- 高精度BC計測装置COSMOSを用いた地表大気BC質量濃度：バロー、アラート、ニーオルスン、パラスの北極域の4地点（2009～2015年）¹³⁾
- 単一BC粒子測定装置SP2を用いた航空機観測によるBC質量濃度：ARCTAS（2008年）^{14), 15), 16)}、HIPPO（2009～2011年）^{17), 18)}、PAMARCMiP（2018年）¹⁹⁾
- 単一BC粒子測定装置SP2を用いたBC沈着フラックス：バロー、ニーオルスンの北極2地点（2013～2017年）^{20), 21)}
- 積雪中のBC質量濃度：フィンランド（2013年）、アラスカ（2012～2015年）、シベリア（2013年）、グリーンランド（2012～2016年）、ニーオルスン（2013年）²²⁾
- 航空機観測によるエアロゾル数濃度（>3nm、3～7nm、>60nmの3つの粒径範囲）：ATom（2015～2018年）²³⁾
- 航空機観測による有機エアロゾル質量濃度：ATom（2015～2018年）²³⁾
- 氷晶核計測装置CRAFTによる氷晶核数濃度（-25℃～-10℃）：東京スカイツリー（2017年）²⁴⁾

4. 結果及び考察

(1) エアロゾル化学組成観測

大気エアロゾル化学成分の実態把握

ニーオルスンのZeppelin観測所において2021年6月8日から2022年3月15日までの期間にPTFEフィルターに採取したPM_{2.5}試料のFTIR測定では、夏季・秋季・冬季・春季における有機エアロゾルの質量濃度を得た。FTIR分析においては、有機エアロゾルの化学構造の特徴も得られた。フィルターに捕集したエアロゾル試料に含まれる有機物全体の濃度水準の把握は、有機炭素に基づくものが主流であり、フィルター試料中の有機エアロゾル質量濃度を得る手法は発展途上にある。本研究では先端的なFTIR分光分析に基づく定量法を採用することで、炭素以外の元素の寄与も含めた知見を得た。

さらに、FTIR法により2022年3月15日から2022年12月6日までの有機エアロゾル濃度の定量も行った。この期間を対象とする無機イオン成分と合わせた解析は未実施であるが、イオンクロマトグラフ法による無機イオン分析は実施済みであり、今後、ニーオルスンの北極エアロゾルの化学成分濃度の変動を年々変動も含めて解析するためのデータの一部を取得することができた。

北極エアロゾルの吸湿性およびそこに含まれる有機・無機成分の寄与

本課題に関連するプロジェクトにおいて2022年3月3日～16日の期間にニーオルスンのGruvebadet大気研究室の屋上で石英繊維フィルターに採取されたPM_{0.95}試料を利用し、試料から抽出した水溶性成分の吸湿成長度を相対湿度85%の設定条件で吸湿タンデムDMAを用いて測定した。なお、当該試料に対して関連プロジェクトで無機イオン成分および水溶性無機炭素の測定値を得ており、条件が揃えば得られた吸湿成長の値から無機イオン成分の寄与を差し引き、水溶性有機エアロゾルの寄与を求めることが原理的には可能である。しかし、水溶性無機炭素測定におけるブランク値に高いものが含まれること、一部の試料において化学成分分析のための試料準備に問題があった可能性があることから、この石英繊維フィルター試料から得た吸湿性パラメータと化学成分情報を利用する有機物の寄与推定は行っていない。

エアロゾル抽出物の吸湿性測定からエアロゾル吸湿性に対する有機物の寄与を評価する方法に代わり、Zeppelin観測所において2021年6月から2022年3月期間にPTFEフィルターに採取した試料のFTIR測定で取得した有機エアロゾルの元素組成比を利用するパラメタリゼーション²⁾によってエアロゾル吸湿性

に対する有機物の寄与の評価を行った。この方法では、FTIR測定で得られた有機エアロゾルの質量濃度と、元素組成比から見積られる密度、さらにはイオンクロマトグラフに基づく測定により得られた水溶性無機イオン濃度の情報を用いた。さらに、非水溶性成分のうちBCについて、COSMOSで得られた定量値も解析に用いた。対象となるPM_{2.5}には鉱物ダストなどBC以外の非水溶性成分が含まれている可能性があるが、これらの寄与については解析において考慮しなかった。

現在の大気モデルにおいて有機エアロゾルの化学構造（化学組成）の時空間的な変化を考慮することは容易ではなく、吸湿性の代表値を利用する必要がある場合には、元素組成を基に得られた上記の値が参照する値となる。また、エアロゾルの化学組成からエアロゾル粒子としての吸湿性を求めるには各化学成分の密度の知見も重要であり、本研究では推定によりその密度の知見も得られた。ただし、これらの有機物の吸湿性パラメータ・密度の推定値は、FTIR測定に基づく元素分析の結果の不確かさに依存する上、吸湿性パラメータの方は、利用する既往研究のパラメタリゼーションの選択に依存する点に注意が必要である。有機エアロゾルの定量値、さらにはそこから計算される吸湿性パラメータに対する寄与の結果の解釈には注意が必要である。これまでの大気モデルで仮定されている吸湿性に対して、今回の結果が北極域のエアロゾルの気候影響評価において優位性を持つかどうかについて、推定の不確かさの検証を進めることが望まれる。

放射影響を含むエアロゾルの役割を把握するためには、その存在量を、その性状を規定する化学成分とともに把握することが前提となる。しかし、北極域のエアロゾル化学組成の知見は乏しく、変わりゆく北極の環境における最新の動態を把握することが急務であった。観測研究においては、新たに実施した大気エアロゾル採取に基づき、北極エアロゾルの最新の情報を得ることができた。なお、北極ニーオルスンの大気試料に対する上記の取り組みのほか、沖縄および西部北太平洋におけるエアロゾルの吸湿性に関する研究のまとめも、北極エアロゾルの特徴付けに資するものとして、関連するプロジェクトと連携する形で本課題の取り組みとしても位置付け、2報の論文報告に至っている^{26), 27)}。また、フィルター光吸収法に基づくBC測定法の評価と相互比較をすべてのサブテーマ（1～4）の研究者と共同で実施し、3報の論文報告に至っている^{13), 28), 29)}。

（2）数値モデルによるプロセス評価

北極域および全球スケールのエアロゾルの観測再現性の向上

積雲や混合相雲におけるエアロゾルの除去過程を改良することによって、エアロゾル（特にBC）の全球分布の観測再現性を大きく向上させた⁵⁾。従来の多くの数値モデル研究では、航空機観測と比べて、熱帯域の対流圏上部においてBC濃度を1桁程度過大推定し、北極域の対流圏下部においてBC濃度を1桁程度過小推定してきた。本研究でも、積雲・混合相雲での除去過程を改良する前のモデル計算では、先行研究と同様の過大推定・過小推定の傾向が見られた（図-2.4a）。一方、積雲・混合相雲での除去過程を改良したモデル計算では、熱帯域の対流圏上部および北極域の対流圏下部の両方の領域において、BC濃度の観測再現性が大きく向上した（図-2.4b）。また、北極域に着目すると、特に冬季から春季にかけて、BC質量濃度の鉛直分布をより現実的に再現できるようになった。除去過程の改良によって、北極域における産業革命前から現在までのBC放射強制力は0.09 W m⁻²から0.18 W m⁻²へと約2倍に増大した。これらの結果から、エアロゾルの雲・降水過程による除去過程の精緻化が、アジアなどの低・中緯度の発生源から放出されるエアロゾルが北極域まで輸送される過程を正しく理解する上で非常に重要であることを示した。これらをまとめ、Journal of Geophysical Research: Atmospheresに投稿・出版した⁵⁾。

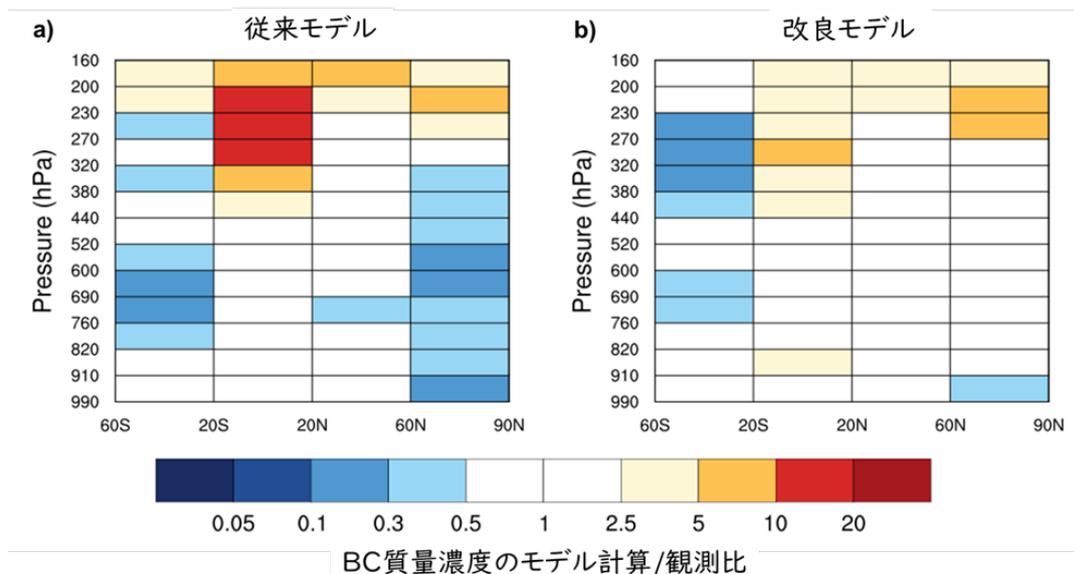


図-2.4 BC質量濃度のモデル計算/観測比の緯度・高度分布。a)は積雲・混合相雲での除去過程を改良する前、b)は積雲・混合相雲での除去過程を改良した後のモデル計算の観測再現性を示す。観測は、HIPPO航空機観測を使用した。比率が1に近いほど（白色）、数値モデル計算による航空機観測のBC濃度の再現性が高いことを示す。比率が1以上（赤色）は数値モデルがBC濃度を過大推定している領域を、比率が1以下（青色）は数値モデルがBC濃度を過小推定している領域を示す。

北極BCの発生源寄与の評価

CAM-ATRASタグモデルの計算によって、北極域における地表付近のBC質量濃度（バロー、アラート、ニューオルスン、パラスの4地点）、BC沈着フラックス（バロー、ニューオルスンの2地点）、積雪内のBC質量濃度などの観測結果を再現することに成功した⁹⁾。そして、北極域（北緯70度以北）における 1) 地表大気中のBC質量濃度、2) 鉛直積算BC質量濃度、3) BC沈着フラックス、4) 大気上端におけるBCの加熱効果、5) 雪面におけるBCの加熱効果、の発生源寄与が大きく異なることを明らかにした（図-2.5）⁹⁾。具体的には、北極域の大気BCの加熱効果に対しては、アジアなどの中緯度での人為起源のBCが主要な寄与を占めるのに対し、北極域の雪氷BCの加熱効果に対しては、シベリアやアラスカでのバイオマス燃焼起源のBCが主要な寄与を占めることなどを明らかにした。また、北極BCに対するアジア起源の寄与は、地表大気中のBC質量濃度については8.4%と寄与が小さいのに対し、BC鉛直積算濃度やBC大気加熱効果に対しては37%、43%と大きな寄与を持つことを示した。これらの結果は、北極域に近い高緯度域（ロシア、ヨーロッパなど）からのBCは北極域の比較的低高度に輸送されるのに対し、中緯度（アジアなど）からのBCは長距離輸送されたのちに北極域の高高度に輸送されることに対応しており、これまでの観測研究など¹⁵⁾で示唆されてきたことと整合的である。さらに、BCの発生源寄与は空間的・時間的に大きく変動しており、北極域内の場所や季節によって主要な起源が異なることを明らかにした（図-2.6）。これらの結果から、北極域におけるBCの気候影響をより精緻に推定するためには、1) 地表付近のBC濃度だけでなく、その鉛直構造をより精度よく理解すること、2) 多点におけるBC観測を継続的に行い、それらの変動の違いとその要因を明らかにしていくこと、が重要であることを示した。この研究は、すべてのサブテーマ（1~4）の研究者と共同で実施し、Atmospheric Chemistry and Physicsに投稿・出版した⁹⁾。

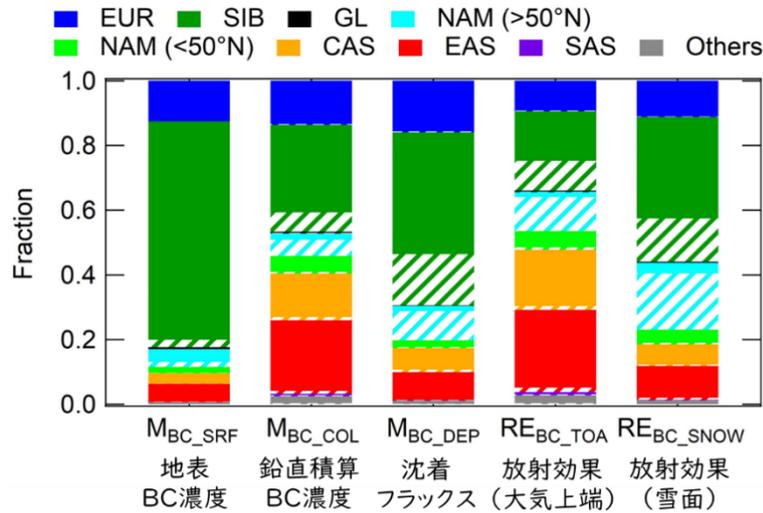


図-2.5 北極域（北緯70度以北）における領域・年平均のBC発生源寄与（2009年から2015年の7年間の平均）。左から、地表大気中のBC質量濃度、鉛直積算BC質量濃度、BC沈着フラックス、大気上端におけるBCの加熱効果、雪面におけるBCの加熱効果の発生源寄与を示す。塗りつぶしの部分は人為起源BCの寄与、斜線の部分はバイオマス燃焼起源BCの寄与を示す。EUR：ヨーロッパ、SIB：シベリア、GL：グリーンランド、NAM(>50°N)：北米（北緯50度以北）、NAM(<50°N)：北米（北緯50度以南）、CAS：中央アジア、EAS：東アジア、SAS：東南アジア。

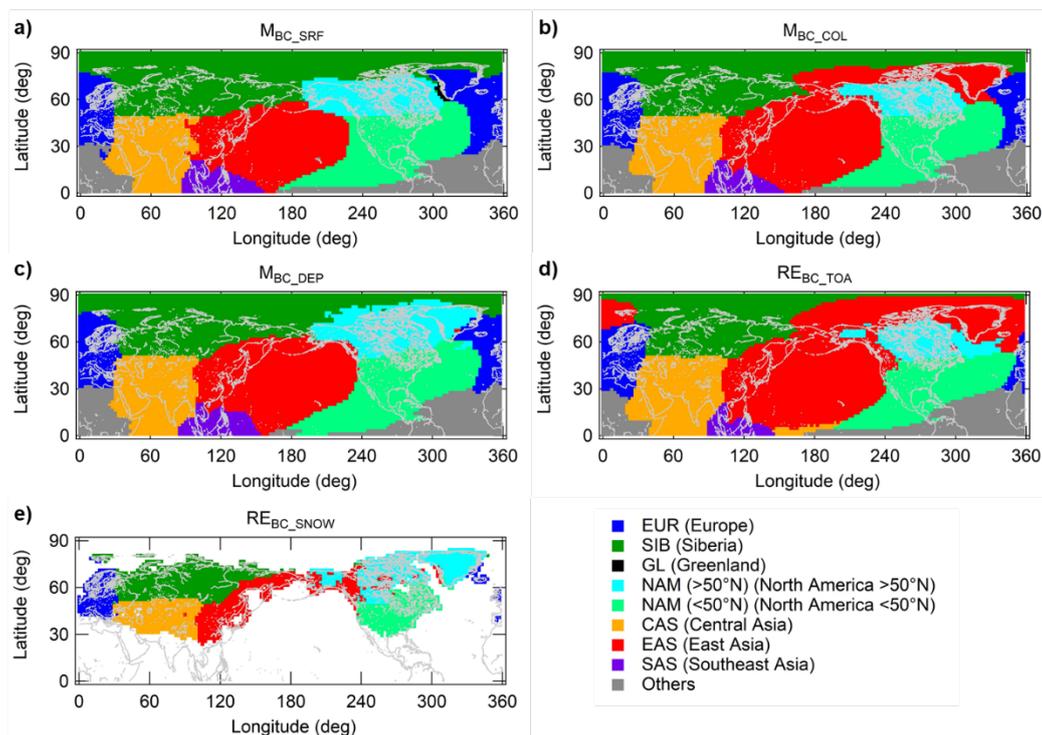


図-2.6 最大の発生源寄与を持つ起源の空間分布。a)は地表大気中のBC質量濃度、b)は鉛直積算BC質量濃度、c)はBC沈着フラックス、d)は大気上端におけるBCの加熱効果、e)は雪面におけるBCの加熱効果について、最も大きな発生源寄与を持つ起源を示す。

北極エアロゾルに対する微物理プロセス・特性の重要性の評価

エアロゾルの微物理特性・プロセスは数値モデルによって扱いが大きく異なり、エアロゾルやその放射・雲影響の推定においてモデル間の大きなばらつきの要因となっている。本研究では、様々なエアロゾルの微物理特性・プロセス（放出時の粒径分布、変質過程、雲内の上昇流速度・過飽和度、積雲・混

合相雲での除去過程)を現状の不確実性(モデル間のばらつき)の範囲で変化させた感度実験を行い、この不確実性がエアロゾルの空間分布や放射・雲放射強制力の推定にどの程度の不確実性をもたらすのかを調べた。その結果、これらのエアロゾルの微物理特性・プロセスは、北極域のエアロゾル濃度の推定においてファクター10~50程度の非常に大きな不確定要素となることが明らかとなった(図-2.7)³⁰⁾。また、これらのエアロゾルの微物理特性・プロセスが、北極域におけるエアロゾル-放射・雲相互作用の放射強制力の推定において $-0.40 \sim +0.30 \text{ W m}^{-2}$ の大きな不確定性幅をもたらし、放射強制力の符号も変え得ることを示した(図-2.8)。これらの結果は、北極エアロゾルとその気候影響の推定において、微物理特性・プロセスの不確実性を減らすことが不可欠であることを示している。これらをまとめ、Journal of Geophysical Research: Atmospheres、Geophysical Research Letters、Journal of Climate に投稿・出版した^{30), 31), 32)}。

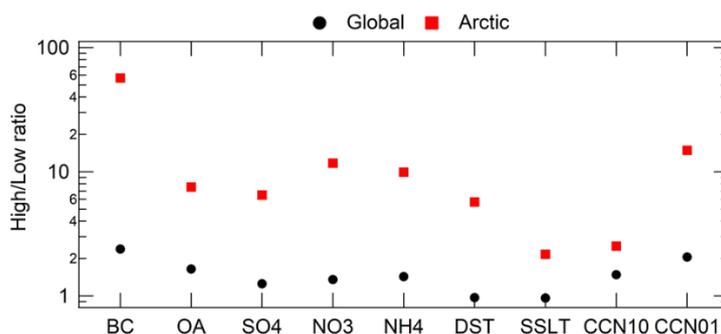


図-2.7 エアロゾルの微物理特性・プロセス(放出時の粒径分布、変質過程、雲内の上昇流速度・過飽和度、積雲・混合相雲での除去過程)に伴うエアロゾル各成分の鉛直積算濃度の不確実性。これらのエアロゾルの微物理特性・プロセスを現状の不確実性の範囲で変化させた感度実験を多数行い、鉛直積算濃度が最大となるケース(High)と最小になるケース(Low)の濃度比を計算した。黒が全球平均、赤が北極域(北緯70度以北)の年平均の濃度比で、左からブラックカーボン、有機エアロゾル、硫酸エアロゾル、硝酸エアロゾル、アンモニウム、鉱物ダスト、海塩、雲凝結核数(過飽和度1%と0.1%)を示す。

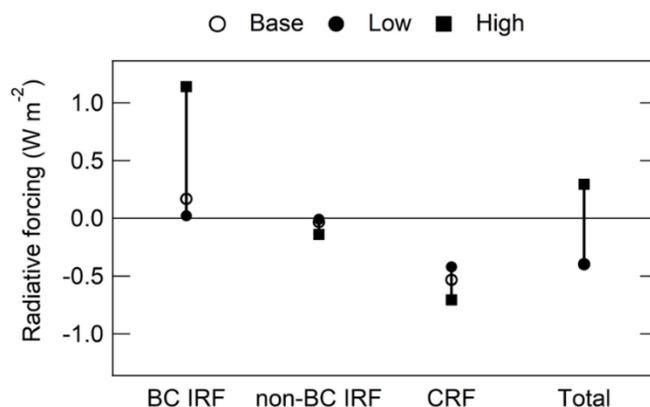


図-2.8 エアロゾルの微物理特性・プロセス(放出時の粒径分布、変質過程、雲内の上昇流速度・過飽和度、積雲・混合相雲での除去過程)に伴う、北極域(北緯70度以北)におけるエアロゾル-放射・雲相互作用の放射強制力の不確実性。鉛直積算濃度が最大となるケース(High)と最小になるケース(Low)を含む3つのケースについて、北極域のBC瞬時放射強制力(BC IRF)、BC以外のエアロゾル成分の瞬時放射強制力(non-BC IRF)、雲放射強制力(CRF)、それらの合計の放射強制力(Total)を示す。放射強制力は現在気候(2010年)と産業革命前(1750年)の放出量データを使用した計算の放射収支の差から推定した。

BC放射強制力（エアロゾル-放射相互作用）の評価

CAM-ATRASモデルの計算により、産業革命前から現在までの全球平均のBC放射強制力を $+0.29 \text{ W m}^{-2}$ と推定した（図-2.9）³³⁾。また、このBC放射強制力の推定において、BCの光吸収効率（単位質量当たりのBC光吸収量：質量吸収断面積）の産業革命前から現在までの増大を考慮することの重要性を明らかにした。BCは大気中の凝縮・凝集などの変質プロセスによって、BC以外のエアロゾル成分（硫酸塩、硝酸塩、有機エアロゾルなど）に少しずつ覆われ、光吸収効率が増大することが知られている。本研究では、産業革命前と現在では、変質プロセスの速度に大きな違いがあり（エアロゾルやその前駆気体の濃度が異なるため）、そのために光吸収効率が50%も異なることを示した（産業革命前の光吸収効率は $5.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 、現在気候の光吸収効率は $8.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ）。この結果から、BCの放射強制力の推定において、BC以外の成分の放出量・生成量、粒径分布、混合状態の理解・推定を向上させる必要性を明らかにした。これらをまとめ、Journal of Geophysical Research: Atmospheresに投稿・出版した³³⁾。

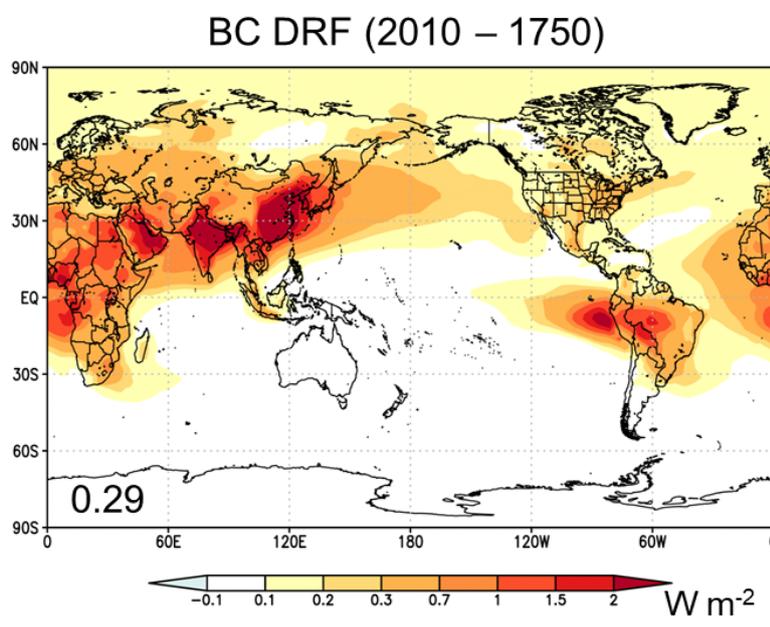


図-2.9 大気上端におけるBC放射強制力の空間分布（年平均）。放射強制力は現在気候（2010年）と産業革命前（1750年）の放出量データを使用した計算の放射収支の差から推定した。

雲凝結核・氷晶核とエアロゾル-雲相互作用の推定高度化

CAM-ATRASモデルの計算により、太平洋・大西洋上の航空機観測（ATom航空機観測）で得られたエアロゾルの数濃度・粒径分布（全数濃度（粒径3 nm以上）、超微小粒子の数濃度（粒径3~7nm）、雲凝結核に対応する数濃度（粒径60 nm以上）など）と有機エアロゾルの質量濃度の空間分布・鉛直分布を再現することに初めて成功した³⁴⁾。また、核生成由来の超微小粒子が有機エアロゾルの生成によって粒径50~100 nm程度まで成長する過程が、遠隔域における雲凝結核数濃度（過飽和度1%）の半分以上を占める主要な過程であることを明らかにした。そして、この過程に伴う産業革命前から現在までの全球平均の雲放射強制力が、 $+0.1 \text{ W m}^{-2}$ 程度である（冷却効果が減少する）ことを示した。これらの結果から、核生成と有機エアロゾル生成を同時にかつ詳細に考慮することが、有機エアロゾルの質量濃度、エアロゾルの数濃度・粒径分布、雲凝結核数濃度、エアロゾル-雲相互作用の予測精度を向上させるために不可欠であることを明らかにした。これらをまとめ、Geophysical Research Lettersに投稿・出版した³⁴⁾。

CAM-ATRASモデルに鉱物ダストの氷晶核特性を導入することによって、アジアダスト（黄砂）が日本

に輸送されてきた高濃度イベント時（2017/5/6～5/8）の東京スカイツリーにおける氷晶核数濃度の観測結果を再現することに成功した⁶⁾。また、アジアダストが他の地域（北アフリカなど）から放出されるダストに比べて、氷晶核として作用しやすい低温域（高高度）に分布する割合が高く、他のダストと比べて大幅に（4.4倍）氷晶核として働きやすいことを明らかにした。そして、鉱物ダスト由来の氷晶核数濃度の全球分布を推定するとともに（図-2.10a）、それらが雲影響を通して北極域を含む北半球高緯度の広い範囲で大きな雲放射強制力を持つことを示した（図-2.10b）。この研究は、サブテーマ4の研究者と共同で実施し、Journal of Geophysical Research: Atmospheresに投稿・出版した⁶⁾。

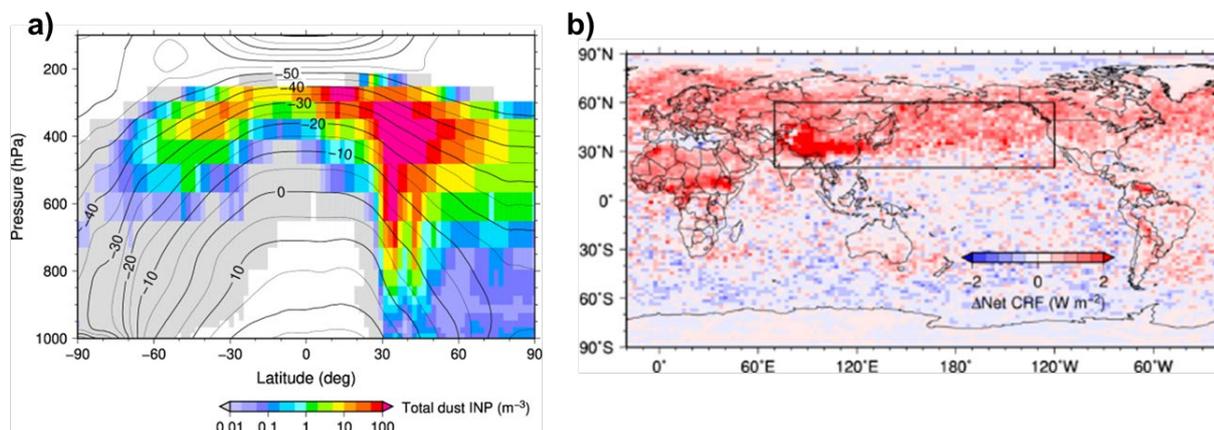


図-2.10 氷晶核の数濃度と雲放射強制力の全球分布（年平均）。a)は鉱物ダスト由来の氷晶核数の緯度・高度分布（線は気温を示す）、b)は鉱物ダスト由来の氷晶核の雲放射強制力の全球分布を示す。

この他にも、エアロゾルの動態とその放射・雲過程との相互作用に関する数値シミュレーション等を実施し、Nature Communicationsや米国科学アカデミー紀要などのインパクト・ファクターの高い国際誌に多数の論文を出版した（当研究費に関連する査読付国際誌論文は計32編）。

5. 研究目標の達成状況

エアロゾル化学組成の観測では、先端的な有機エアロゾルの分析手法である化学官能基のIR分析に基づいて有機エアロゾル濃度の季節変動を示し、また、エアロゾル吸湿性に対する化学成分の寄与の知見を得ることができた。エアロゾル化学組成について理解の乏しい北極域において得た貴重な知見であり、大気モデルの計算値の妥当性の評価に利用されるなどの波及が期待される。有機エアロゾルはその標準的なモニタリング手法が確立されておらず、本研究におけるFTIR手法による定量は、その標準化への波及も考えられる。

数値モデルによる評価では、「北極および全球スケールでの人為起源・自然起源エアロゾルの動態と、直接的・間接的な放射効果を推定する」という目標をすべて達成する研究成果をあげた。また、BCの放射強制力や雲放射強制力などのエアロゾル放射・雲相互作用の推定に対し、様々なプロセスや微物理特性の重要性を明らかにする研究を多数実現させてきた。3年間の研究期間において、主著・責任著者論文を13編、その他共著論文を19編、査読付国際誌に出版し、目標を上回る成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) B. DEBUS, S. TAKAHAMA, A. T. WEAKLEY, K. SEIBERT, and A. M. DILLNER: Appl. Spectrosc., 73, 271-283 (2019), Long-Term Strategy for Assessing Carbonaceous Particulate Matter Concentrations from Multiple Fourier Transform Infrared (FT-IR) Instruments: Influence of Spectral Dissimilarities on Multivariate Calibration Performance.
- 2) M. REGGENTE, R. HÖHN, and S. TAKAHAMA: Atmos. Meas. Tech., 12, 2313-2329 (2019), An open

platform for Aerosol InfraRed Spectroscopy analysis – AIRSpec.

- 3) H. MATSUI: *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 9, 1921–1947 (2017), Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 1. Model design.
- 4) H. MATSUI and N. MAHOWALD: *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 9, 1887–1920 (2017), Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 2. Evaluation and sensitivity simulations.
- 5) M. LIU and H. MATSUI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD033890 (2021), Improved simulations of global black carbon distributions by modifying wet scavenging processes in convective and mixed-phase clouds.
- 6) K. KAWAI, H. MATSUI, and Y. TOBO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034263 (2021), High potential of Asian dust to act as ice nucleating particles in mixed-phase clouds simulated with a global aerosol-climate model.
- 7) K. KAWAI, H. MATSUI, R. KIMURA, and M. SHINODA: *Sci. Online Lett. Atmosphere*, 17, 239–245 (2021), High sensitivity of Asian dust emission, transport, and climate impacts to threshold friction velocity.
- 8) P. J. DEMOTT, A. J. PRENNI, G. R. MCMEEKING, R. C. SULLIVAN, M. D. PETTERS, Y. TOBO, M. NIEMAND, O. MÖHLER, J. R. SNIDER, Z. WANG, and S. M. KREIDENWEIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 393–409 (2015), Integrating laboratory and field data to quantify the immersion freezing ice nucleation activity of mineral dust particles.
- 9) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTTEKI, N. OSHIMA, K. GOTO-AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 8989–9009 (2022), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects.
- 10) R. M. HOESLY, S. J. SMITH, L. FENG, Z. KLIMONT, G. JANSSENS-MAENHOUT, T. PITKANEN, J. J. SEIBERT, L. VU, R. J. ANDRES, R. M. BOLT, T. C. BOND, L. DAWIDOWSKI, N. KHOLOD, J. KUROKAWA, M. LI, L. LIU, Z. LU, M. C. P. Moura, P. R. O’ROURKE, and Q. ZHANG: *Geosci. Model Dev.*, 11, 369–408 (2018), Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS).
- 11) M. J. E. VAN MARLE, S. KLOSTER, B. I. MAGI, J. R. MARLON, A.-L. DANIAU, R. D. FIELD, A. ARNETH, M. FORREST, S. HANTSON, N. M. KEHRWALD, W. KNORR, G. LASSLOP, F. LI, S. MANGEON, C. YUE, J. W. KAISER, and G. R. VAN DER WERF: *Geosci. Model Dev.*, 10, 3329–3357 (2017), Historic global biomass burning emissions for CMIP6 (BB4CMIP) based on merging satellite observations with proxies and fire models (1750–2015).
- 12) G. R. VAN DER WERF, J. T. RANDERSON, L. GIGLIO, T. T. VAN LEEUWEN, Y. CHEN, B. M. ROGERS, M. MU, M. J. E. VAN MARLE, D. C. MORTON, G. J. COLLATZ, R. J. YOKELSON, and P. S. KASIBHATLA: *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697–720 (2017), Global fire emissions estimates during 1997–2016.
- 13) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA, and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748 (2021), Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic.
- 14) Y. KONDO, H. MATSUI, N. MOTTEKI, L. SAHU, N. TAKEGAWA, M. KAJINO, Y. ZHAO, M. J. CUBISON, J. L. JIMENEZ, S. VAY, G. S. DISKIN, B. ANDERSON, A. WISTHALER, T. MIKOVINY, H. E. FUELBERG, D. R. BLAKE, G. HUEY, A. J. WEINHEIMER, D. J. KNAPP, and W. H. BRUNE: *J. Geophys. Res.*, 116, D08204 (2011), Emissions of black carbon, organic, and inorganic aerosols from biomass burning in North America and Asia in 2008.
- 15) H. MATSUI, Y. KONDO, N. MOTTEKI, N. TAKEGAWA, L. K. SAHU, Y. ZHAO, H. E. FUELBERG, W. R. SESSIONS, G. DISKIN, D. R. BLAKE, A. WISTHALER, and M. KOIKE: *J. Geophys. Res.* 116, D05202 (2011), Seasonal variation of the transport of black carbon aerosol from the Asian continent to the Arctic

during the ARCTAS aircraft campaign.

- 16) H. MATSUI, Y. KONDO, N. MOTTEKI, N. TAKEGAWA, L. K. SAHU, M. KOIKE, Y. ZHAO, H. E. FUELBERG, W. R. SESSIONS, G. DISKIN, B. E. ANDERSON, D. R. BLAKE, A. WISTHALER, M. J. CUBISON, and J. L. JIMENEZ: *J. Geophys. Res.* 116, D20217 (2011), Accumulation-mode aerosol number concentrations in the Arctic during the ARCTAS aircraft campaign: Long-range transport of polluted and clean air from the Asian continent.
- 17) J. P. SCHWARZ, B. H. SAMSET, A. E. PERRING, J. R. SPACKMAN, R. S. GAO, P. STIER, M. SCHULZ, F. L. MOORE, E. A. RAY, and D. W. FAHEY: *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5542–5547 (2013), Global-scale seasonally resolved black carbon vertical profiles over the Pacific.
- 18) S. C. WOFSY: *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 2073–2086 (2011), HIPER pole-to-pole observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols.
- 19) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA, and A. B. HERBER: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861–15881 (2021), Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring.
- 20) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI, and Y. KONDO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032240 (2020), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska.
- 21) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034110 (2021), Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard.
- 22) T. MORI, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. MIURA, M. HIRABAYASHI, N. OSHIMA, M. KOIKE, K. KUPIAINEN, N. MOTTEKI, S. OHATA, P. R. SINHA, K. SUGIURA, T. AOKI, M. SCHNEEBELI, K. STEFFEN, A. SATO, A. TSUSHIMA, V. MAKAROV, S. OMIYA, A. SUGIMOTO, S. TAKANO, and N. NAGATSUKA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 13325–13356 (2019), Black carbon and inorganic aerosols in the Arctic snowpack.
- 23) S. C. WOFSY: ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1613> (2018), ATom: Aircraft flight track and navigational data.
- 24) Y. TOBO, J. UETAKE, H. MATSUI, N. MOTTEKI, Y. UJI, Y. IWAMOTO, K. MIURA, and R. MISUMI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD033658 (2020), Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo.
- 25) W. R. LEITCH, L. M. RUSSELL, J. LIU, F. KOLONJARI, D. TOOM, L. HUANG, S. SHARMA, A. CHIVULESCU, D. VEBER, and W. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 3269–3287 (2018), Organic functional groups in the submicron aerosol at 82.5° N, 62.5° W from 2012 to 2014.
- 26) Y. DENG, H. FUJINARI, H. YAI, K. SHIMADA, Y. MIYAZAKI, E. TACHIBANA, D. K. DESHMUKH, K. KAWAMURA, T. NAKAYAMA, S. TATSUTA, M. CAI, H. XU, F. LI, H. TAN, S. OHATA, Y. KONDO, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, and M. MOCHIDA: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 5515–5533 (2022), Offline analysis of the chemical composition and hygroscopicity of submicrometer aerosol at an Asian outflow receptor site and comparison with online measurements.
- 27) K. KAWANA, Y. MIYAZAKI, Y. OMOR, H. TANIMOTO, S. KAGAMI, K. SUZUKI, Y. YAMASHITA, J. NISHIOKA, Y. DENG, H. YAI, and M. MOCHIDA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2022JD036690 (2022), Number-size distribution and CCN activity of atmospheric aerosols in the western North Pacific during spring pre-bloom period: Influences of terrestrial and marine sources.
- 28) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTTEKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO, Y. TOBO, J. UKITA, and A. YOSHIDA: *Polar Sci.*, 27, 100621 (2021), Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project. (IF: 2.355)

- 29) E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, A. VIRKKULA, M. GINI, K. ELEFThERiADiS, T. MÜLLER, S. OHATA, Y. KONDO and A. HYVÄRINEN: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 5397–5413 (2021) (IF:4.184) , Absorption instruments inter-comparison campaign at the Arctic Pallas station.
- 30) H. MATSUI and M. LIU: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2022JD036943 (2022), Substantial uncertainties in Arctic aerosol simulations by microphysical processes within the global climate-aerosol model CAM-ATRAS.
- 31) H. MATSUI and N. MOTEKI: *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088978 (2020), High sensitivity of Arctic black carbon radiative effects to subgrid vertical velocity in aerosol activation.
- 32) H. MATSUI and M. LIU: *J. Clim.*, 34, 7843–7856 (2021), Importance of supersaturation in Arctic black carbon simulations.
- 33) H. MATSUI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032316 (2020), Black carbon absorption efficiency under preindustrial and present-day conditions simulated by a size- and mixing-state-resolved global aerosol model.
- 34) M. LIU and H. MATSUI: *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL100543 (2022), Secondary organic aerosol formation regulates cloud condensation nuclei in the global remote troposphere.

II-3 エアロゾル分析と気候モデルによる評価

国土交通省気象庁気象研究所

全球大気海洋研究部第三研究室

大島 長

全球大気海洋研究部第三研究室

足立 光司

気象予報研究部第二研究室

川合 秀明

〔要旨〕

(1) **エアロゾル分析（電子顕微鏡分析）**：主に北極においてエアロゾル粒子（ニーオルスン及びグリーンランド）と雲残渣粒子試料（ニーオルスン）の採取を行い、電子顕微鏡を用いて分析を行った。その結果、エアロゾル粒子の季節変動、混合状態、高度分布などに関する知見が得られた。また、雲の残渣粒子を採取時の気温や雲外のエアロゾル粒子と比較することで、水雲や氷雲になる可能性がある粒子の種類、組成、混合状態などを明らかにした。特に、ダスト粒子が北極の混合層雲での氷晶核形成に寄与した可能性を強く示唆した成果が得られ、その混合状態についても新たな知見を得た。これらの当初から計画していた観測における科学的成果に加えて、全球規模でのエアロゾルの輸送過程や気候影響を考慮すべき新たなエアロゾル種（森林火災由来粒子、隕石由来粒子など）の報告も行った。これらの個別粒子単位における観測成果は、北極での気候変動の理解に資する成果であり、今後の気候変動予測を行ううえで重要な要素となることが期待される。

(2) **気候モデルによる評価**：近年実施されたエアロゾル等の観測との比較により、気象研究所で開発を行っている地球システムモデル（MRI-ESM2.0）の検証を行ったところ、MRI-ESM2.0による計算は北極域で観測されたブラックカーボン(BC)や硫酸塩エアロゾル濃度を平均誤差10%以内で再現した。MRI-ESM2.0を用いて、全球および北極域において、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等による有効放射強制力を推定するとともに、エアロゾル-放射相互作用、エアロゾル-雲相互作用、エアロゾルを要因とする地表面アルベド変化について定量的に評価し、エアロゾルと氷雲の相互作用の重要性を示した。また北極域では、ブラックカーボン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を明らかにし、ブラックカーボンの北極気候への重要性を示した。MRI-ESM2.0による産業革命前から現在までの歴史実験計算と北極域でのアイスコア観測との比較を行い、1970年代に北極域で人為起源の硫酸エアロゾルが増大していたことを明らかとした。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世紀中ごろ（1970年頃）の寒冷化を再現し、20世紀中ごろの北極寒冷化には、同時期の人為起源エアロゾルの増大と数十年規模の内部変動が大きく寄与していたことを定量的に明らかとした。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：Arctic Monitoring and Assessment Programme）での短寿命気候強制因子（SLCFs）に関するモデル相互比較研究を実施し、将来の北極温暖化の緩和には、二酸化炭素の正味の排出量削減に加えて、ブラックカーボンとメタンを含むSLCFs排出量の削減が重要であることを示唆するとともに、AMAPのSLCFs評価報告書に執筆者として貢献した。また、第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）に関連する国際的なモデル相互比較研究を行うとともに、MRI-ESM2.0による計算データの公開も行った。さらにコロナ禍による人為起源物質の排出量減少に伴う気候影響評価を国際的な枠組みで実施した。これらの成果はIPCC第6次評価報告書に引用・活用・記載された。

1. 研究開発目的

本サブテーマ(3)では、エアロゾル分析と気候モデルによる評価を実施する。エアロゾル分析では、主に北極においてエアロゾル粒子の採取を行い、電子顕微鏡分析によりエアロゾルの直接・間接放射効果に資する個別粒子の微物理・化学分析を行うことを目的とする。気候モデルによる評価では、近年実施されたエアロゾル等の観測との比較により、気象研究所で開発を行っている地球システムモデルの検

証・改良を行い、同モデルを用いて産業革命前から現在までの北極域におけるエアロゾルの動態解明と放射影響評価をすることを目的とする。

2. 研究目標

北極ニーオルスンにおいて、大気エアロゾルや雲粒中エアロゾル（残渣粒子）試料を取得し、電子顕微鏡分析する。電子顕微鏡でしか測定できない粒子形態、組成、混合状態の解析により、北極エアロゾルの微物理特性・動態を評価する。気象研究所地球システムモデル（気候モデル）を本研究等で得られる大気・積雪・アイスコア等の観測データを用いて検証・改良をするとともに、北極・全球域の1850年から現在までのBCや他エアロゾルの動態と放射効果を評価する。

3. 研究開発内容

（1）エアロゾル分析（電子顕微鏡分析）

ノルウェーの北極圏に位置するニーオルスン基地近傍のゼッペリン観測所において、エアロゾル粒子の電子顕微鏡用試料採取を行った。2020-2021年度は渡航規制により、現地を訪問しての観測はできなかったものの、現地研究者と他サブテーマの研究分担者の協力によって、サンプラーをリモートアクセスによる操作を行うことで毎月の試料採取を行った。2022年度は現地を直接訪問し、集中観測および試料の回収を行うとともに、リモートアクセスによる観測を継続した。本研究期間中（2020年4月以降）にこれまで、エアロゾル粒子と雲残渣粒子合わせて648試料を採取した。これら試料に加え、2020年度以前に採取した全試料（約600試料）を対象として、透過型電子顕微鏡（JEM-1400, JEOL）を用いた、1）微小粒子の画像解析、2）粗大粒子の画像解析、3）組成分析を継続して行った。加えて、ニーオルスン試料の比較対象として、2018年にグリーンランドのノード基地で採取した試料の分析を行い、ニーオルスン試料と比較することで、北極における普遍的なエアロゾル粒子の微物理・化学特性を明らかにする解析を行った。過去に採取した試料も本研究の遂行に使用して、電子顕微鏡を用いた実験を行った。また、サブテーマ(1), (2), (4)と共同し、他の観測機器で得られたデータを解釈するために、フィルター試料や標準粒子の分析を行った。さらに、サブテーマ(1), (4)と連携して、ニーオルスンにおけるCOSMOSによるBCの観測を本研究期間中継続して行った。そのメンテナンスは、現地協力者に加え、現地観測を行った際に集中的に行った。

（2）気候モデルによる評価

本研究では、気象研究所で開発を行っている気象研究所地球システムモデルver. 2.0（MRI-ESM2.0）を用いた。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、大気化学気候モデルMRI-CCM2.1から構成され、各モデルコンポーネントはカップラー（Simple Coupler）で結合される¹⁾（図-3.1）。近年実施された観測を用いてモデルの検証・改良を行うために、MRI-ESM2.0による近年10年間程度（2008-2020年）の計算を行った。この近年計算では、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）を用いて束縛をかける計算（ナッジング）を実施した。

MRI-ESM2.0を用いて、産業革命前から現在まで（1850-2014年）を対象とした歴史実験計算および将来シナリオ実験計算（2015-2100年）を実施した。モデル計算で使用する排出量データは、第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）で提供された排出量データや境界条件を使用した。歴史実験計算の初期値には、産業革命前（1850年）の気候値（1850年条件で500年以上の積分をした計算結果）を与えた。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）、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）、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）などで計画されている数多くのモデル計算を実施し、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。さらに、北極評議会・北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP: Arctic Monitoring and Assessment Programme）での短寿命気候強制因子（SLCFs）に関する影響評価の枠組みで、MRI-ESM2.0を用いて、AMAPで提供された排出

量データに基づき、近年を対象とした過去再現実験（1990-2015年）、放射強制力の推定実験、将来シナリオ実験（2015-2050年）を実施した。

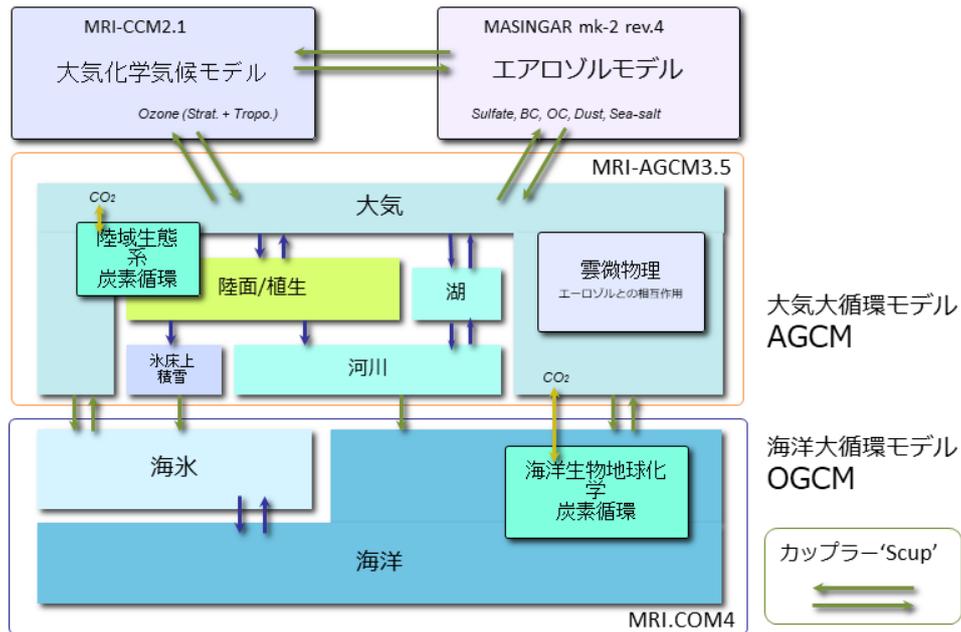


図-3.1 気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)の構成模式図。

4. 結果及び考察

(1) エアロゾル分析（電子顕微鏡によるエアロゾル試料分析）

本研究の主要北極観測拠点であるニーオルスンでは、2017年より継続して電子顕微鏡用のエアロゾル粒子及び雲残渣粒子試料の採取を行っている（図-3.2）。それらの試料の電子顕微鏡分析を行い、4万粒子以上の統計解析を行った結果、粒子の主成分である硫酸塩や海塩に加え、森林火災や人為起源から発生するブラックカーボン粒子が内部混合粒子として存在することが明らかとなった（図-3.3）。

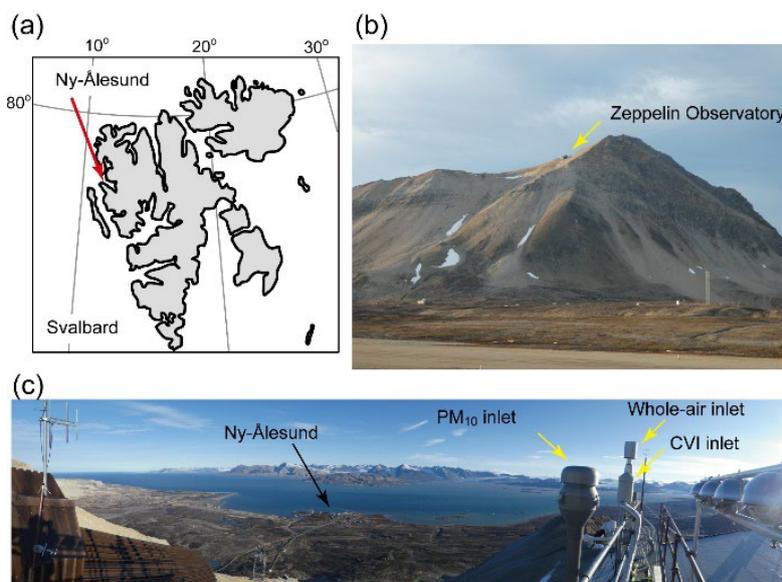


図-3.2 ニーオルスン基地とゼッペリン観測所。(a)スヴァールバル諸島とニーオルスンの位置。(b)ゼッペリン山に位置する観測所。(c)ゼッペリン観測所から見たニーオルスン基地及び観測に使用したインレット。Adachi et al. (2022c)²⁾ Fig. 1から引用。

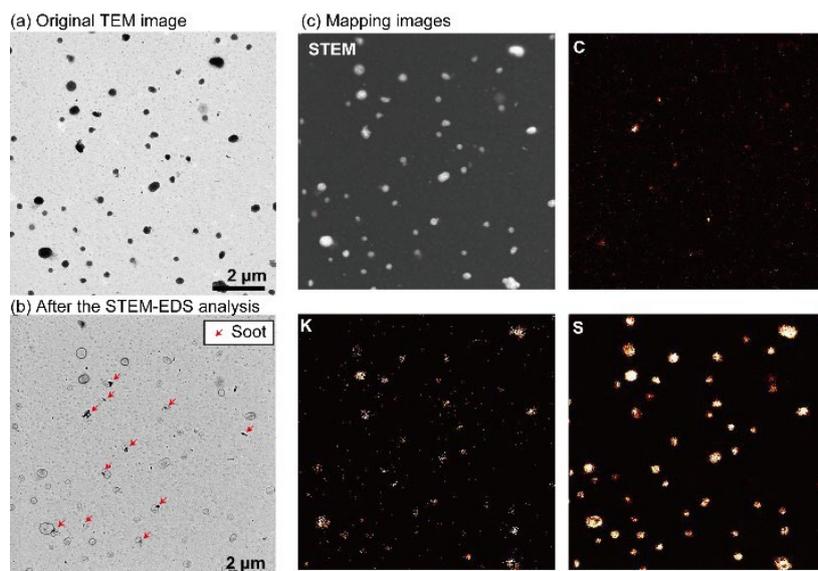


図-3.3 ブラックカーボン（すす粒子(soot)）と内部混合するカリウム含有粒子の電子顕微鏡画像。(a)オリジナルの電子顕微鏡画像。(b)電子線により硫酸塩を除去して内部混合ブラックカーボン粒子を示した図（赤矢印）。(c)電子顕微鏡画像と同じ領域における元素分布図（C, K, S）。Adachi et al. (2022c)²⁾ Fig. 5から引用。

粒径分布の特徴では、より微細な粒子に硫酸塩が卓越し、逆に粗大粒子（1マイクロメートル前後）では海塩粒子が多く存在することが明らかとなった（図-3.4）。また、粒子の二次生成を促す日射が豊富で、海からの硫黄供給も多い夏に硫酸塩の割合が増え、逆に平均風速が高くなる冬に海塩の生成が増える傾向がみられた。気温0℃以上で採取されたエアロゾル粒子と雲残渣粒子の粒子種割合は同じような傾向を示し、多くのエアロゾル粒子が雲凝結核として機能したことを示した。一方で、低温（-4℃以下）で採取された雲残渣粒子は、エアロゾル粒子に比べダスト粒子を多く含有し、ダスト粒子が氷雲の核（氷晶核粒子）として機能したことを示唆した（図-3.5）。また、氷晶核粒子として機能したダスト粒子を含むと考えられる試料と、エアロゾル粒子中のダスト粒子の組成を比較したところ、ダストの主要成分には大きな違いがみられなかった。一方で、氷晶核として働いた可能性があるダスト粒子は2.4倍の高い頻度で海塩が多く付着する傾向がみられた（図-3.6）。本研究で得られた電子顕微鏡を用いて北極の個別粒子に着目したエアロゾル粒子と雲残渣粒子の詳細な比較は、エアロゾル粒子の直接・間接放射効果の理解に資する結果であり、特に北極域での気候影響に重要とされる混合雲の形成メカニズムの一端を明らかにした。これらの成果は、サブテーマ(2)、(4)の研究者及びストックホルム大の研究者が共著者となり、国際科学論文として出版した（Adachi et al., 2022c)²⁾。

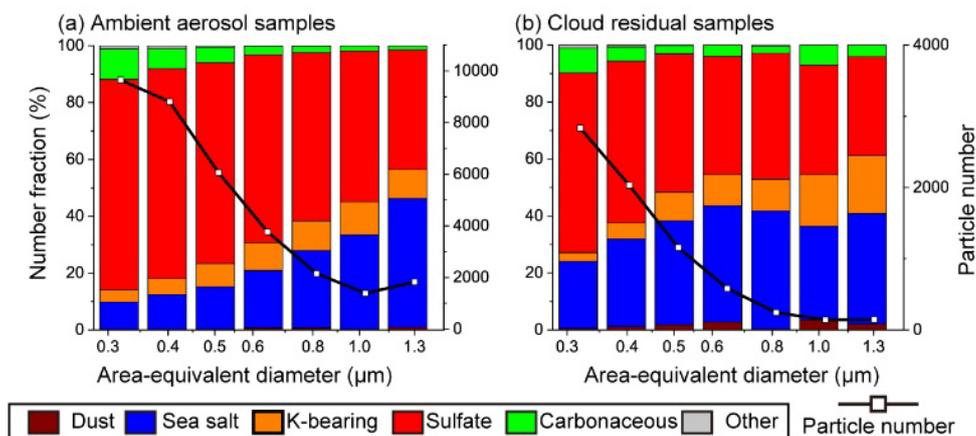


図-3.4 個別粒子分析で粒径ごとに分類を行った各エアロゾル種の数割合の結果を示す。(a)エアロゾル粒子の結果。(b)雲残渣粒子の結果。Adachi et al. (2022c)²⁾ Fig. 7から引用。

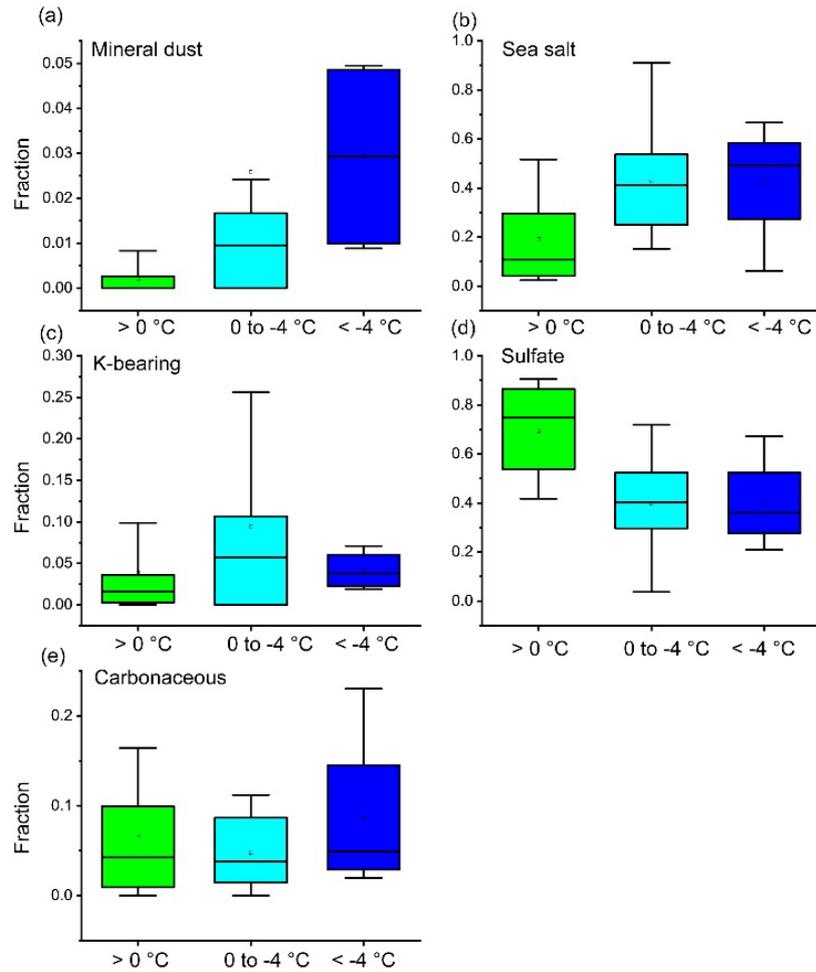


図-3.5 雲残渣中の各粒子種の数割合を0°C以上、0～-4°C、-4°C以下で分類した結果を示す。左上のダスト粒子では、低温になるほどダストの割合が増えることが分かる。箱が25, 50, 75パーセンタイルを示し、ひげが10-90パーセンタイルを示す。Adachi et al. (2022c)²⁾ Fig. 11から引用。

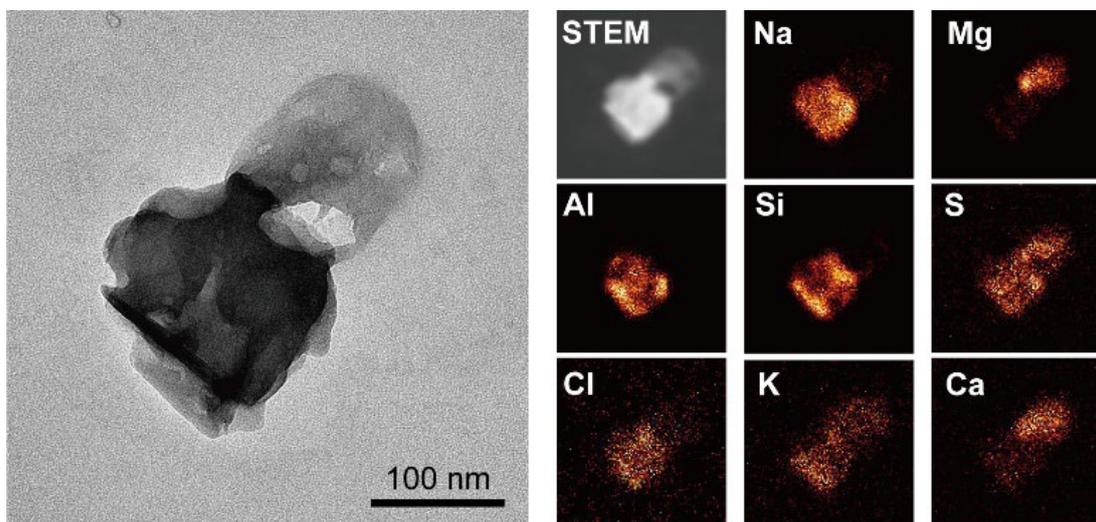


図-3.6 海塩と混合したダスト粒子の電子顕微鏡画像。左が電子顕微鏡画像、右が各元素の分布を示す。AlやSiがダスト、NaやClが海塩の存在を示す。Adachi et al. (2022c)²⁾ Fig. 2から引用。

本研究期間中にニーオルスンでの定点長期観測に加え、極域のエアロゾルや全球規模での気候に関わると考えられるエアロゾル粒子に関して、多くの電子顕微鏡解析やモデルを使った成果が得られた。それぞれの成果は国際科学論文として出版しており、本報告書ではそれぞれの概要を示す。

北極域におけるエアロゾルの混合状態の三次元的な空間分布を理解するため、PAMARCMiP航空機観測において、グリーンランドとスヴァールバル諸島周辺の様々な地点、高度における試料採取を行い、電子顕微鏡を用いた詳細な分析を行った。その結果、高度に応じた組成、粒径、混合状態の変化が観測され、北極域における高度別個別粒子の実態を示す研究成果が得られた（図-3.7左）（Adachi et al., 2021³⁾；Ohata et al., 2021⁴⁾）。特に、4キロメートル以上の高度において森林火災の影響がモデルと観測の両面から観測され、極域への森林火災由来エアロゾルの寄与が明らかとなった。加えて、飛行機観測と同時期に行われた地上観測において、グリーンランドとニーオルスン観測基地において集中観測を行った。そこで得られた試料を解析し、その両者を比較し、モデルの結果と合わせて、それらの粒子の変動や化学成分の詳細な検討を行った（Adachi et al., 論文準備中）。また、極域でのエアロゾル供給源として森林火災の重要性が考えられており、その森林火災から放出されるエアロゾル粒子に着目した電子顕微鏡分析を行った。その結果、これまで十分に認識されていなかった微小灰エアロゾル粒子の存在が明らかとなり、その雲生成への寄与についての知見が得られた（図-3.7中）（Adachi et al., 2022a）⁵⁾。また、北極域を含めた全球規模で重要なダスト供給源として知られるサハラ砂漠からの大陸間規模での輸送や、森林からのエアロゾル放出などの実態解明を目的とした観測結果を報告した（Adachi et al., 2020）⁶⁾。加えて、北極を含む全球規模での新たなエアロゾル粒子供給源として、隕石由来の成分に着目した解析を行った。その結果、鉄とマグネシウムを指標として、隕石成分を含むエアロゾル粒子が特に高度8キロメートル以上で比較的高い割合を示すことを明らかにした（図-3.7右）。これらの粒子も雲生成への影響が考えられ、特にエアロゾル供給源が限られる極域において重要な役割を果たすことが示唆される結果であった（Adachi et al., 2022b）⁷⁾。なお、この隕石成分の発見に関する成果は推進費を謝辞に含めてプレスリリースを行った。また電子顕微鏡を用いた分析に加えて、サブテーマ(1), (4)と連携して、ニーオルスンにおけるCOSMOSによるBCの観測を継続して行い、そのデータの取りまとめを行った。これらの成果は、Ohata et al. (2021)⁴⁾に報告し、北極のBC濃度の時空間分布に関する理解に貢献した。

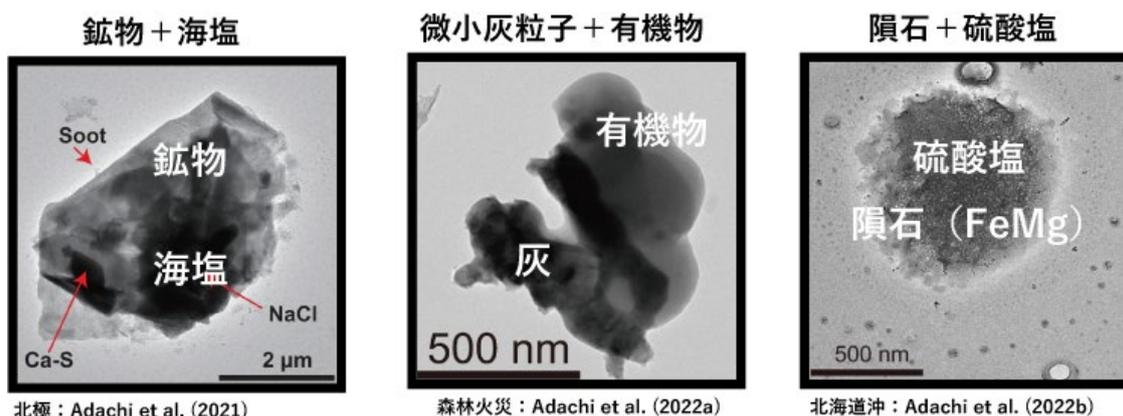


図-3.7 様々な混合を示すエアロゾル粒子。左：北極の飛行機観測試料で見られた鉱物と海塩の混合粒子。中央：森林火災中の煙で見られた微小灰と有機物の混合粒子。右：硫酸塩に溶け込む隕石由来物質。それぞれの引用³⁾, ⁵⁾, ⁷⁾は各図の下に示す。

主にサブテーマ(3)で行ったエアロゾル分析についての研究成果をまとめると、北極における直接的な観測で、従来からバルク分析で知られていたエアロゾル粒子の直接・間接放射効果に関して、個々の粒子の組成や混合状態に関する新たな知見が得られた（Adachi et al., 2022c）²⁾。今後、北極を含む全球気候の理解に重要になる可能性がある新たなエアロゾル粒子種についての報告も行った（Adachi et al., 2022a⁵⁾, 2022b⁷⁾）。人為発生源から離れた極域で重要となる全球規模でのエアロゾル輸送に

関する成果も報告した (Adachi et al., 2020⁶⁾, 2021³⁾)。これらの観測では、個別粒子に関するミクロンサイズでの解析にとどまらず、モデル解析を用いた全球規模での輸送過程や大気中の濃度比較も行った。加えて、電子顕微鏡データを用いて、本推進費で開発する他の装置との比較検証も行った (Yoshida et al., 2022)⁸⁾。北極域におけるエアロゾルの気候影響を理解するためにはエアロゾル粒子の混合特性が重要であることを明らかにし、その特徴を論文で報告した。

(2) 気候モデルによる評価

近年の観測によるモデルの検証

気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM2.0) による近年10年間程度の計算 (2008-2020年) と近年実施された観測との比較により、モデルの検証を実施した。これらの観測データとの比較は、サブテーマ間の連携により行われた。アラスカ・バローにおいて、2013年以降COSMOSにより観測された大気中BC濃度は、冬季・春季に増大し夏季に減少するという季節変化を示しており、MRI-ESM2.0も同様の季節変化を示した (Mori et al., 2020)⁹⁾。またMRI-ESM2.0は、バローにおいて観測された積雪中BC濃度を2倍以内の精度で再現した (Mori et al., 2020)⁹⁾。歴史実験計算についても観測による検証を行い、CMIP6参加の他モデルと比較して、MRI-ESM2.0は東アジア域で観測された地上PM_{2.5}濃度を再現した (Turnock et al., 2020)¹⁰⁾。MRI-ESM2.0の雲についても検証を行い、従来のモデルに比較して、放射や雲に関するモデル性能が大きく改善されることで、熱帯降水帯等の表現も改善しており、その改善の原因・メカニズムを明らかにした (Kawai et al. 2021)¹¹⁾。

さらに北極評議会・AMAPにおけるSLCFsに関する影響評価の枠組みで、近年の複数の観測データ (地上・衛星・船舶・航空機・アイスコア等) とMRI-ESM2.0を含む18種のモデル計算結果を比較し、モデルの検証を実施した (Whaley et al., 2022)¹²⁾。その結果、2014-2015年の北極全域でのBC濃度と硫酸塩エアロゾル濃度については、MRI-ESM2.0による計算値と観測値との平均誤差は10%以下とAMAP参加の他モデルよりも小さく、MRI-ESM2.0での北極エアロゾル濃度の再現性が良いことが示された (図-3.8)

(AMAP, 2021)¹³⁾。このようにMRI-ESM2.0は、北極域におけるエアロゾルの再現性が大きく向上したため、従来よりも信頼性の高いエアロゾルの放射効果や気候影響の推定が可能である。

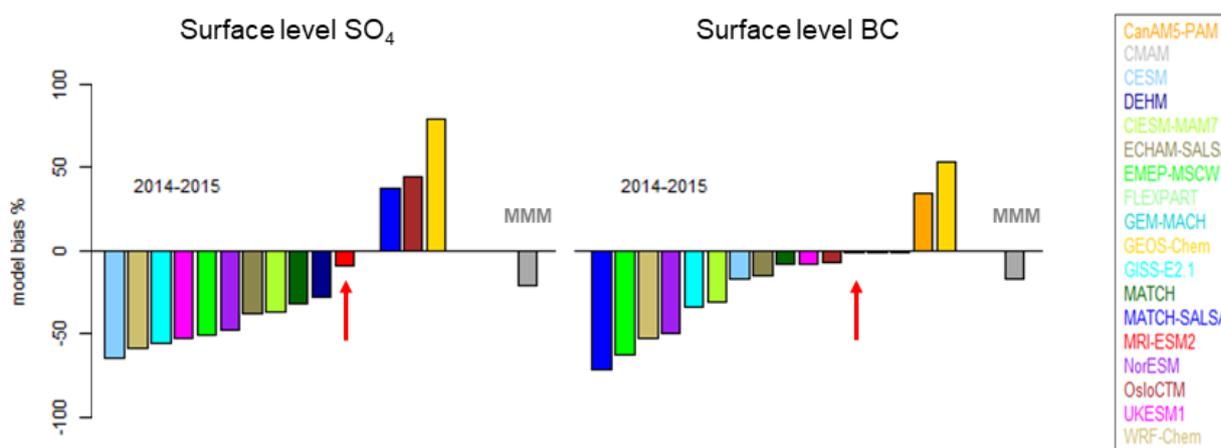


図-3.8 AMAP参加の各モデルによる計算と北極域の地上エアロゾル観測との誤差 (バイアス)。2014-2015年に北極域 (北緯60度以北) の複数地点で観測された硫酸塩エアロゾルとブラックカーボンを示す。赤色と赤矢印はMRI-ESM2.0を示す。MMMはマルチモデル平均を示す。AMAP (2021)¹³⁾ Figure 7.67を改変。

MRI-ESM2.0による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 (ERF) を推定した (図-3.9) (Oshima et al., 2020)¹⁴⁾。本研究は、CMIP6を構成するRFMIPとAerChemMIPの枠組みで実施された。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アルベド変化等 (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ブラックカーボン (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 (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、主に人為起源ブラックカーボン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重要性を示唆している。エアロゾルと氷雲の相互作用を扱う気候モデルは、世界の最新のCMIP6モデルでも数種類のみと限られるため、本研究で示唆したエアロゾルと氷雲の相互作用の重要性は、今後の研究の方向性を示している。

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ERFを推定した (図-3.10) (Oshima et al., 2020)¹⁴⁾。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、ブラックカーボン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。北極域ではブラックカーボン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ブラックカーボンが重要な役割を果たす可能性を示唆している。

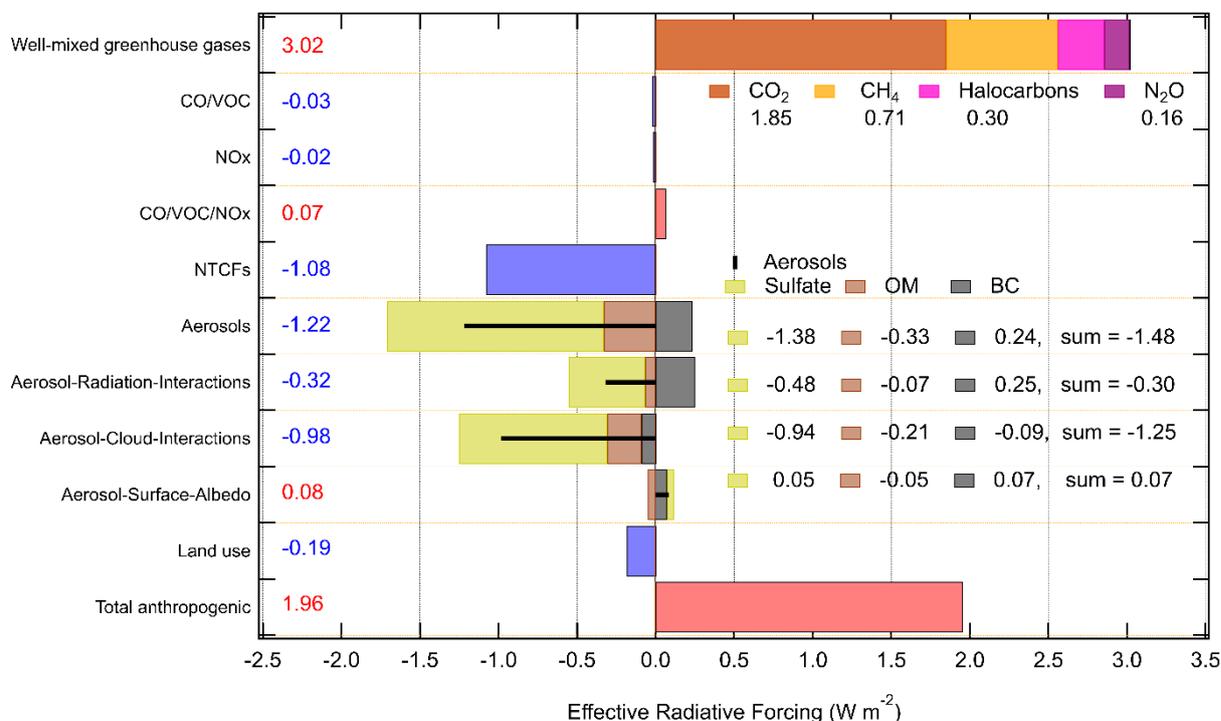


図-3.9 MRI-ESM2.0により推定された1850年を基準とした2014年における気候変動をもたらす主な駆動要因の有効放射強制力。Oshima et al. (2020)¹⁴⁾ Figure 1より引用。

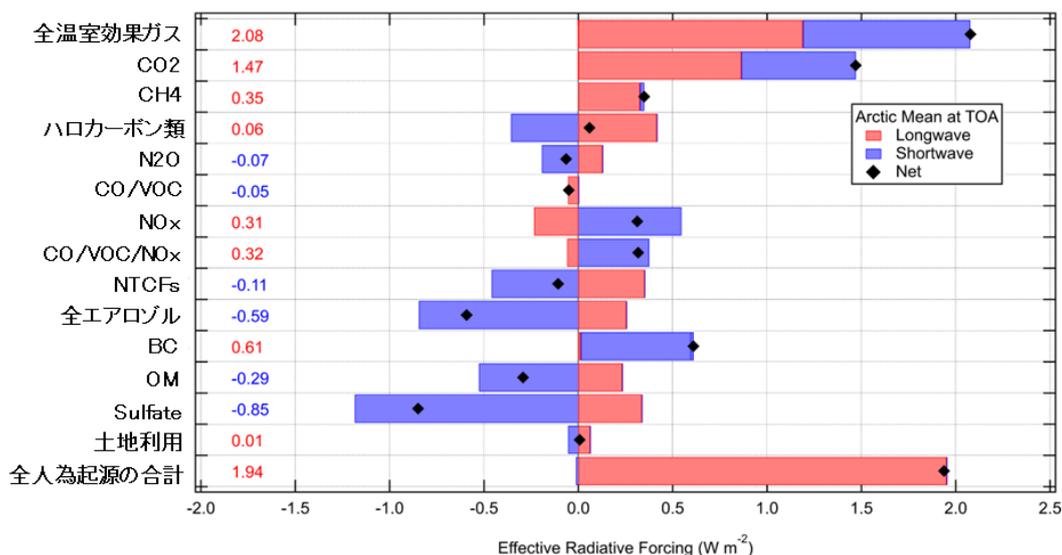


図-3.10 北極域（北緯60度以北）におけるMRI-ESM2.0により推定された1850年を基準とした2014年における気候変動をもたらす主な駆動要因の有効放射強制力。赤色が長波、青色が短波成分、黒印および左端の数値は正味の値 ($W m^{-2}$) を示す。Oshima et al. (2020)¹⁴⁾ Figure 8を改変。

1850年から現在までの歴史実験計算と北極域でのアイスコア観測との比較

MRI-ESM2.0による1850年から現在までの歴史実験計算での北極エアロゾルの再現性を検証するために、グリーンランド南東のSE-Domeサイト（67.2° N, 36.4° W）でのアイスコア観測¹⁵⁾との比較を実施した。この比較では、モデル計算による推定精度を向上させるために、10メンバーの歴史実験計算によるアンサンブル平均値を用いた。アイスコア中で観測された硫酸エアロゾル沈着量は1970年代に増大を示し、1980年以降は減少を示しており、MRI-ESM2.0はこれらの増大と減少を定量的に再現した（図-3.11）（Iizuka et al., 2022）¹⁶⁾。またモデル計算結果を人為起源と自然起源に区別したところ、1970年代の硫酸エアロゾル沈着量の増大は人為起源の影響を強く受けていたことが明らかとなった（図-3.11）。これらの結果は、MRI-ESM2.0による歴史実験計算の妥当性を示すとともに、1970年代の人為起源エアロゾルの増大が同時期の気候変動に寄与していた可能性を示唆している。

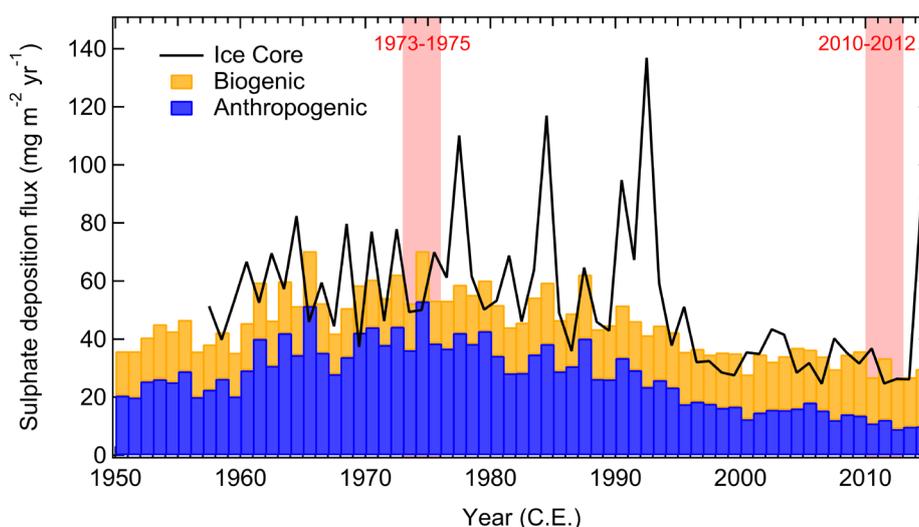


図-3.11 SE-Domeサイトで観測されたアイスコア中の硫酸エアロゾル沈着フラックスとMRI-ESM2.0による計算結果との比較。黒線は観測を示し、モデル計算結果は人為起源（青色）と自然起源（オレンジ色）に区別して示す。この図のモデル計算結果では火山起源の硫酸エアロゾルを表示していないが、気候計算には火山起源エアロゾルの影響は含まれる。Iizuka et al. (2022)¹⁶⁾ Figure 5より引用。

20世紀前半の北極温暖化と20世紀中ごろの北極寒冷化の要因

北極域では20世紀前半（1940年頃）に温暖化が起き、20世紀中ごろ（1970年頃）に寒冷化が起きている（図-3.12）。しかしながら、従来の気候モデルではこれらの地上気温変化の再現性が不十分であった。最新のCMIP6に参加したいくつかのモデルでは、従来の気候モデルでは難しかった北極地上気温の再現性が向上し、MRI-ESM2.0による歴史実験計算においても20世紀前半の温暖化と20世紀中ごろの寒冷化の再現性が大きく向上した（図-3.12）（Aizawa et al., 2021）¹⁷⁾。本研究では、CMIP6やDAMIPに参加した気候モデル群の解析を行うことで、自然由来の外部因子と数十年規模の内部変動が同程度の大きさを20世紀前半の北極温暖化に寄与していたことを示唆した（Aizawa et al., 2021）¹⁷⁾。また同様の解析を行うことで、20世紀中ごろの北極寒冷化には、同時期の人為起源エアロゾルの増大と数十年規模の内部変動が大きく寄与していたことを明らかとした（図-3.13）（Aizawa et al., 2022）¹⁸⁾。

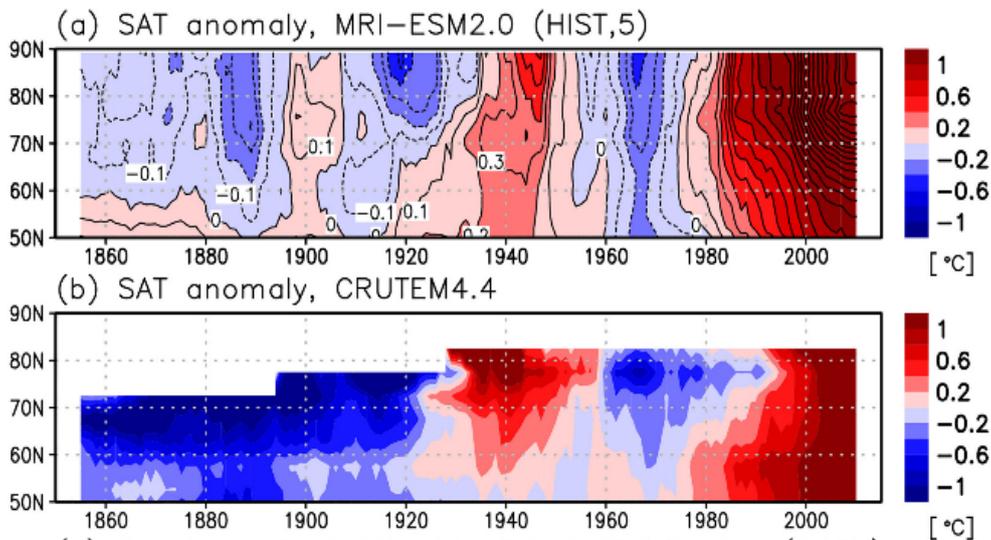


図-3.12 北緯50～90度における地上気温偏差の時間変化。(a) MRI-ESM2.0による歴史実験計算と(b)観測との比較。気温偏差は1941～1970年平均を基準とし、10年移動平均の帯状平均を示す。モデル計算結果は5メンバーのアンサンブル平均値を示す。Aizawa et al. (2021)¹⁷⁾ Figure 1より引用。

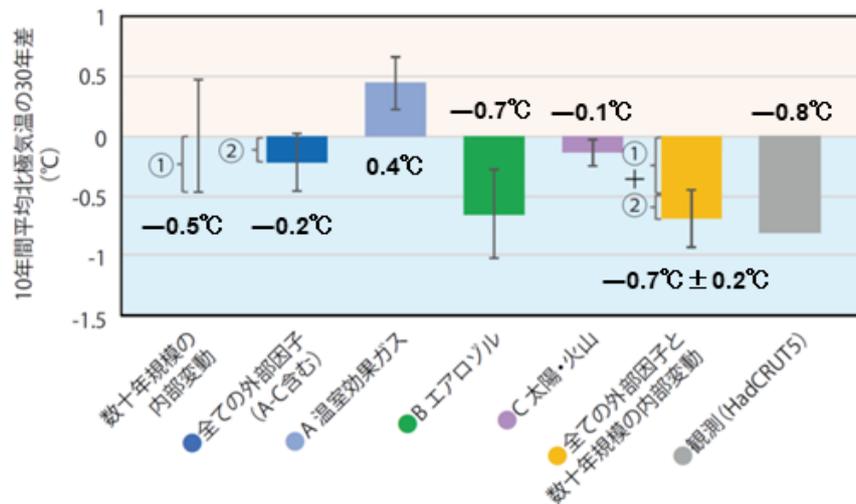


図-3.13 複数の気候モデル群の解析により推定された要因別の北極地上気温の変化への寄与。北極域での1970年（1965～1974年平均）の気温から1940年（1935～1944年平均）の気温を引いた値を示す。20世紀中ごろの北極寒冷化に対して人為起源エアロゾルが最も寄与し（ -0.7°C ）、温室効果ガスは寒冷化の緩和に寄与した（ 0.4°C ）。全ての外部因子と数十年規模の内部変動を考慮すると $-0.7^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の寒冷化を示し、観測の -0.8°C と整合する。Aizawa et al. (2022)¹⁸⁾ Figure 4を改変。

地球システムモデルにおける気候表現の不確実性の定量化

本研究では、MRI-ESM2.0での気候表現の不確実性についての定量的な調査を実施した。地球システムモデルでは、様々な下限値や些細な取り扱いなど、一見マイナーな取り扱いと思われることが、モデルの振る舞いに非常に大きな影響を与えることがある。これらの中には、パラメータの下限値、上限値、スキームやプロセスの閾値によるon/off、2つのスキームを並行して動かすか1つのみを排他的に動かすか、鉛直解像度、物理過程の詳細な数値計算法、バグなどが含まれる。モデルのパラメタリゼーションにおけるそうした設定や扱いが、モデルにおける雲の表現や、全球平均気温の将来予測に極めて大きな影響を示すことがある。時として、こうした扱いのインパクトは、パラメタリゼーションの精緻化や新スキームの導入、新しい予報変数の追加などによるインパクトよりも大きいこともある。だが、一般に、そうした新スキームや精緻化の影響が詳細に議論される一方で、それと同様か時にはそれ以上のインパクトを持つこともある、マイナーに見える取り扱いの議論はそれほど詳細には行われないことが多い。この重要な点について、放射にとって重要な雲に影響する部分を中心に詳細に調査し、包括的にまとめ、論文として出版した (Kawai et al., 2022)¹⁹⁾。

CMIP6関連のモデル相互比較研究とIPCC第6次評価報告書への貢献

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、過去・現在・将来における放射強制力、大気質、気温、降水、放射量、黄砂、海洋への影響などの様々な研究に活用され、複数の論文として出版された (Zanis et al., 2020²⁰⁾; Oshima et al., 2020¹⁴⁾; Allen et al., 2020²¹⁾, 2021²²⁾; Turnock et al., 2020¹⁰⁾; Moseid et al., 2020²³⁾; Thornhill et al., 2020²⁴⁾; Griffiths et al., 2021²⁵⁾; Aizawa et al., 2021¹⁷⁾, 2022¹⁸⁾; Yukimoto et al., 2022²⁶⁾, Ushijima et al., 2022²⁷⁾; Maki et al., 2022²⁸⁾; 他6編)。これらの研究成果の一部 (計8編の論文¹⁰⁾, 14), 20), 21), 22), 23), 24), 25)) は、IPCC第6次評価報告書 (第1作業部会の第6章、第7章、Annex II) で引用された。我々がデータ公開した、AerChemMIPでのMRI-ESM2.0によるモデル実験数は世界で3番目に多く、MRI-ESM2.0による計算データはIPCC第6次評価報告書の図表に活用された。

北極評議会・AMAPでのSLCFs評価報告書への貢献

北極評議会・AMAPでのSLCFs専門家グループメンバーとして、MRI-ESM2.0を用いて、エアロゾル・オゾン・メタン等のSLCFsが北極気候に及ぼす影響を評価した。AMAPでは、CMIP6での中庸のSSP2-4.5シナリオに相当する現状ベースのCLE (Current LEgislation) シナリオや技術的に実現可能な最大削減を実施した場合のMFR (Maximum technically Feasible Reduction) シナリオなどが準備され、MRI-ESM2.0を含む5つの地球システムモデルによる将来予測計算および排出量シナリオと組み合わせたモデルエミュレーターを用いて、SLCFsの排出量削減が気候と大気質の両方に及ぼす影響を評価した (von Salzen et al., 2022)²⁹⁾。現在に対する2050年における北極地上気温の変化について調べたところ、MFRシナリオとCLEシナリオの計算結果の比較から、将来のSLCFsの削減による大気質の改善は、硫酸塩エアロゾルの減少による北極温暖化を引き起こすが、ブラックカーボンとメタンの削減を行うことで、二酸化硫黄の削減に伴う温度上昇を相殺することが示唆された (von Salzen et al., 2022)²⁹⁾。これらの結果から、二酸化炭素の正味の排出量削減に加えて、ブラックカーボンとメタンを含むSLCFs排出量のさらなる削減は、北極温暖化の緩和において重要であることが示唆された。これらの研究成果は、AMAPのSLCFs評価報告書の第8章に記述された (AMAP, 2021)¹³⁾。

コロナ禍による人為起源物質の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、二酸化炭素などの温室効果ガスや人為起源エアロゾル等の排出量は、産業革命以後の前年比で最も大きく減少した。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) が緊急で

立ち上がった（日本からは海洋研究開発機構と気象庁気象研究所が参画）。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。マルチモデル解析を実施することで、2020～2021年の2年間の一時的な人為起源物質の排出量の減少により、2020～2024年の東アジアや南アジア域でのエアロゾル量は減少し（大気質は改善）、地上に到達する短波放射は増大するが、地上気温や降水量への有意な影響は検出できないことが示された（Jones et al., 2021）³⁰⁾。COVID-19の流行という予期せぬ突然の出来事に対し、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自体も、本研究の重要な成果と考えられる。本研究成果は、IPCC第6次評価報告書第1作業部会の政策決定者向け要約（SPM）に記載された。

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマ（3）で実施したエアロゾル分析については、当初の目的に対しては、COVID-19による渡航規制の影響があったものの、現地協力者や他サブテーマの研究分担者の協力で切れ間なく観測を行うことができた。その結果、エアロゾル粒子と雲残渣粒子合わせて648試料を採取した。それらの試料を電子顕微鏡で分析した結果、北極エアロゾルの微物理特性や直接・間接放射効果に資する知見が得られ、その成果を学術論文として出版した。加えて、全球規模での長距離輸送や、気候影響に関わる可能性がある新たなエアロゾル粒子の発見を行うなど、当初の計画以上の成果が得られた。

気候モデルによる評価では、サブテーマ間の密接な連携を通じた様々な観測データを用いたモデル検証により、気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2.0）での北極エアロゾルの再現性が良いことを確認できた。MRI-ESM2.0を用いて、全球域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放射強制力を総合的に推定するとともに、北極域ではブラックカーボンが二酸化炭素に次いで二番目に大きい正の放射強制力を持つという知見が得られた。とくに、エアロゾルと氷雲の相互作用を扱う気候モデルは、世界の最新のCMIP6モデルでも数種類のみと限られるため、本研究でエアロゾルと氷雲の相互作用の重要性を示唆することで、今後の研究の方向性を示すことができた。さらに、20世紀前半の北極温暖化と20世紀中ごろの北極寒冷化の要因を定量的に推定し、20世紀中ごろの寒冷化には人為起源エアロゾルと数十年規模の内部変動が主要な役割を果たしていたことを明らかにした。MRI-ESM2.0を用いたCMIP6関連のモデル相互比較研究に関する成果は多くの論文として出版され、このうち8編の論文はIPCC第6次評価報告書（第1作業部会）で引用され、またMRI-ESM2.0による計算データはIPCC第6次評価報告書の図表で活用されるなど、IPCC に対して重要な貢献ができた。社会的な関心が高いCOVID-19に伴う気候影響についても、国際的な枠組みで、信頼性の高い影響評価を迅速に実施でき、その成果はIPCC第6次評価報告書第1作業部会の政策決定者向け要約（SPM）に記載された。また北極評議会・AMAPのSLCFs 評価報告書にも執筆者として貢献した。

本サブテーマ（3）による研究成果は、本研究期間中（2020年4月以降）に計46編の査読付き論文として出版され、IPCCや北極評議会への国際貢献も行うことができたため、目標を大きく上回る成果をあげることができた。

6. 引用文献

- 1) S. YUKIMOTO, 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: J. Meteor. Soc. Japan, 97, 931-965 (2019), The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component.
- 2) K. ADACHI, Y. TOBO, M. KOIKE, G. FREITAS, P. ZIEGER and R. KREJCI: Atmos. Chem. Phys., 22, 14421–14439 (2022c), Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard.
- 3) K. ADACHI, N. OSHIMA, S. OHATA, A. YOSHIDA, N. MOTOKI and M. KOIKE: Atmos. Chem.

- Phys., 21, 3607-3626 (2021), Compositions and mixing states of aerosol particles by aircraft observations in the Arctic springtime, 2018.
- 4) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861–15881 (2021), Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring.
 - 5) K. ADACHI, J. E. DIBB, E. SCHEUER, J. M. KATICH, J. P. SCHWARZ, A. E. PERRING, B. MEDIIVILLA, H. GUO, P. CAMPUZANO-JOST, J. L. JIMENEZ, J. CRAWFORD, A. J. SOJA, N. OSHIMA, M. KAJINO, T. KINASE, L. KLEINMAN, A. J. III SEDLACEK, R. J. YOKELSON and P. R. BUSECK: *J. Geophys. Res.*, 127, e2021JD035657 (2022a), Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke.
 - 6) K. ADACHI, N. OSHIMA, Z. GONG, S. DE SÁ, A. P. BATEMAN, S. T. MARTIN, J. F. DE BRITO, P. ARTAXO, G. G. CIRINO, A. J. III SEDLACEK and P. R. BUSECK: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11923-11939 (2020), Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy.
 - 7) K. ADACHI, N. OSHIMA, N. TAKEGAWA, N. MOTTEKI and M. KOIKE: *Commun. Earth Environ.*, 3, 134 (2022b), Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy.
 - 8) A. YOSHIDA, N. MOTTEKI and K. ADACHI: *Aerosol Science and Technology*, 56, 609-622 (2022), Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data.
 - 9) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI and M. KOIKE: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032240 (2020), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska.
 - 10) S. T. TURNOCK, R. J. ALLEN, M. ANDREWS, S. E. BAUER, M. DEUSHI, L. EMMONS, P. GOOD, L. HOROWITZ, J. G. JOHN, M. MICHOU, P. NABAT, V. NAIK, D. NEUBAUER, F. M. O'CONNOR, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, M. SCHULZ, A. SELLAR, S. SHIM, T. TAKEMURA, S. TILMES, K. TSIGARIDIS, T. WU and J. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14547–14579 (2020), Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models.
 - 11) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *Atmospheric Science Letters*, 22, e1064 (2021), Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the double-intertropical convergence zone problem in MRI-ESM2.
 - 12) C. H. WHALEY, R. MAHMOOD, K. VON SALZEN, B. WINTER, S. ECKHARDT, S. ARNOLD, S. BEAGLEY, S. BECAGLI, R.-Y. CHIEN, J. CHRISTENSEN, S. M. DAMANI, X. DONG, K. ELEFThERIADIS, N. EVANGELIOU, G. FALUVEGI, M. FLANNER, J. S. FU, M. GAUSS, F. GIARDI, W. GONG, J. L. HJORTH, L. HUANG, U. IM, Y. KANAYA, S. KRISHNAN, Z. KLIMONT, T. KÜHN, J. LANGNER, K. S. LAW, L. MARELLE, A. MASSLING, D. OLIVIÉ, T. ONISHI, N. OSHIMA, Y. PENG, D. A. PLUMMER, O. POPOVICHEVA, L. POZZOLI, J.-C. RAUT, M. SAND, L. N. SAUNDERS, J. SCHMALE, S. SHARMA, R. B. SKEIE, H. SKOV, F. TAKETANI, M. A. THOMAS, R. TRAVERSI, K. TSIGARIDIS, S. TSYRO, S. TURNOCK, V. VITALE, KALEY A. WALKER, M. WANG, D. WATSON-PARRIS, and T. WEISS-GIBBONS: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 5775–5828 (2022), Model evaluation of short-lived climate forcers for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species, multi-model study.
 - 13) AMAP, 2021. AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. x + 324pp. (in press)
 - 14) N. OSHIMA, S. YUKIMOTO, M. DEUSHI, T. KOSHIRO, H. KAWAI, T. Y. TANAKA and K.

- YOSHIDA: *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 38 (2020), Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0.
- 15) Y. IIZUKA, R. UEMURA, K. FUJITA, S. HATTORI, O. SEKI, C. MIYAMOTO, T. SUZUKI, N. YOSHIDA, H. MOTOYAMA and S. MATOBA: *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123, 574–589 (2018), A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high accumulation dome ice core, Southeast Greenland.
 - 16) Y. IIZUKA, R. UEMURA, H. MATSUI, N. OSHIMA, K. KAWAKAMI, S. HATTORI, H. OHNO and S. MATOBA: *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 127, e2022JD036880 (2022), High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland.
 - 17) T. AIZAWA, M. ISHII, N. OSHIMA, S. YUKIMOTO and H. HASUMI: *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092336 (2021), Arctic warming and associated sea ice reduction in the early 20th century induced by natural forcings in MRI-ESM2.0 climate simulations and multimodel analyses.
 - 18) T. AIZAWA, N. OSHIMA and S. YUKIMOTO: *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097093 (2022), Contributions of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability to mid-20th century Arctic cooling—CMIP6/DAMIP multimodel analysis.
 - 19) H. KAWAI, K. YOSHIDA, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, e2022MS003128 (2022), Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models.
 - 20) P. ZANIS, D. AKRITIDIS, A. K. GEORGOULIAS, R. J. ALLEN, S. E. BAUER, O. BOUCHER, J. COLE, B. JOHNSON, M. DEUSHI, M. MICHOU, J. MULCAHY, P. NABAT, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, A. SIMA, M. SCHULZ, T. TAKEMURA and K. TSIGARIDIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8381–8404 (2020), Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study.
 - 21) R. J. ALLEN, S. TURNOCK, P. NABAT, D. NEUBAUER, U. LOHMANN, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, M. MICHOU, T. WU, J. ZHANG, T. TAKEMURA, M. SCHULZ, K. TSIGARIDIS, S. E. BAUER, L. EMMONS, L. HOROWITZ, V. NAIK, T. VAN NOIJE, T. BERGMAN, J.-F. LAMARQUE, P. ZANIS, I. TEGEN, D. M. WESTERVELT, P. LE SAGER, P. GOOD, S. SHIM, F. O'CONNOR, D. AKRITIDIS, A. K. GEORGOULIAS, M. DEUSHI, L. T. SENTMAN, J. G. JOHN, S. FUJIMORI and W. J. COLLINS: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9641–9663 (2020), Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers
 - 22) R. J. ALLEN, L. W. HOROWITZ, V. NAIK, N. OSHIMA, F. M. O'CONNOR, S. TURNOCK, S. SHIM, P. LE SAGER, T. VAN NOIJE, K. TSIGARIDIS, S. E. BAUER, L. T. SENTMAN, J. G. JOHN, C. BRODERICK, M. DEUSHI, G. A. FOLBERTH, S. FUJIMORI and W. J. COLLINS: *Environ. Res. Lett.*, 16, 034010 (2021), Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions.
 - 23) K. O. MOSEID, M. SCHULZ, T. STORELVMO, I. R. JULSRUD, D. OLIVIÉ, P. NABAT, M. WILD, J. N. S. COLE, T. TAKEMURA, N. OSHIMA, S. E. BAUER and G. GASTINEAU: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 16023–16040 (2020), Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening.
 - 24) G. D. THORNHILL, W. J. COLLINS, R. J. KRAMER, D. OLIVIÉ, R. B. SKEIE, F. M. O'CONNOR, N. L. ABRAHAM, R. CHECA GARCIA, S. E. BAUER, M. DEUSHI, L. K. EMMONS, P. M. FORSTER, L. W. HOROWITZ, B. JOHNSON, J. KEEBLE, J.-F. LAMARQUE, M. MICHOU, M. J. MILLS, J. P. MULCAHY, G. MYHRE, P. NABAT, V. NAIK, N. OSHIMA, M. SCHULZ, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, S. TILMES, T. WU, G. ZENG and J. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 853–874 (2021), Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols – a multi-model comparison.

- 25) P. T. GRIFFITHS, L. T. MURRAY, G. ZENG, Y. M. SHIN, N. L. ABRAHAM, A. T. ARCHIBALD, M. DEUSHI, L. K. EMMONS, I. E. GALBALLY, B. HASSLER, L. W. HOROWITZ, J. KEEBLE, J. LIU, O. MOEINI, V. NAIK, F. M. O'CONNOR, N. OSHIMA, D. TARASICK, S. TILMES, S. T. TURNOCK, O. WILD, P. J. YOUNG and P. ZANIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 4187–4218 (2021), Tropospheric ozone in CMIP6 simulations.
- 26) S. YUKIMOTO, N. OSHIMA, H. KAWAI, M. DEUSHI and T. AIZAWA: *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100335 (2022), Role of interhemispheric heat transport and global atmospheric cooling in multidecadal trends of northern hemisphere precipitation.
- 27) Y. USHIJIMA, H. TSUJINO, K. SAKAMOTO, M. ISHII, T. KOSHIRO, and N. OSHIMA: *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099987 (2022), Effects of Anthropogenic Forcings on Multidecadal Variability of the Sea Level Around the Japanese Coast Simulated by MRI-ESM2.0 for CMIP6.
- 28) T. MAKI, T. Y. TANAKA, T. KOSHIRO, A. SHIMIZU, T. T. SEKIYAMA, M. KAJINO, Y. KUROSAKI, T. OKURO and N. OSHIMA: *SOLA*, 18, 218-224 (2022), Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0.
- 29) K. VON SALZEN, C. H. WHALEY, S. C. ANENBERG, R. V. DINGENEN, Z. KLIMONT, M. G. FLANNER, R. MAHMOOD, S. R. ARNOLD, S. BEAGLEY, R.Y. CHIEN, J. H. CHRISTENSEN, S. ECKHARDT, A. M. L. EKMAN N. EVANGELIOU, G. FALUVEGI, J. S. FU, M. GAUSS, W. GONG, J. L. HJORTH, U. IM, S. KRISHNAN, K. KUPIAINEN, T. KÜHN J. LANGNER, K. S. LAW, L. MARELLE, D. OLIVIÉ, T. ONISHI, N. OSHIMA, V.V. PAUNU, Y. PENG, D. PLUMMER, L. POZZOLI, S. RAO, J.C. RAUT, M. SAND, J. SCHMALE, M. SIGMOND, M. A. THOMAS, K. TSIGARIDIS, S. G. TSYRO, S. T. TURNOCK, M. WANG and B. WINTER: *Communications Earth & Environment*, 3, 222 (2022), Clean air policies are key for successfully mitigating Arctic warming.
- 30) C. D. JONES, J. E. HICKMAN, S. T. RUMBOLD, J. WALTON, R. D. LAMBOLL, R. B. SKEIE, S. FIEDLER, P. M. FORSTER, J. ROGELJ, M. ABE, M. BOTZET, K. CALVIN, C. CASSOU, J. N. S. COLE, P. DAVINI, M. DEUSHI, M. DIX, J. C. FYFE, N. P. GILLET, T. ILYINA, M. KAWAMIYA, M. KELLEY, S. KHARIN, T. KOSHIRO, H. LI, C. MACKALLAH, W. A. MÜLLER, P. NABAT, T. NOIJE, P. NOLAN, R. OHGAITO, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, J. PARODI, T. J. REERINK, L. REN, A. ROMANOU, R. SÉFÉRIAN, Y. TANG, C. TIMMRECK, J. TJIPUTRA, E. TOURIGNY, K. TSIGARIDIS, H. WANG, M. WU, K. WYSER, S. YANG, Y. YANG and T. ZIEHN: *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091883 (2021), The climate response to emissions reductions due to COVID-19: Initial results from CovidMIP.

II-4 BC・氷晶核観測とアイスコア分析

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所

共同研究推進系 東 久美子

先端研究推進系 當房 豊

国際北極環境研究センター 近藤 豊

[要旨]

化石燃料やバイオ燃料の燃焼で大気中に放出されるすすの主成分であるブラックカーボン (black carbon; BC) は、炭素からなる黒色の微粒子 (大部分は直径1 μm 以下) であるため、太陽放射を強く吸収し、大気を加熱する効果がある。また、BCは雪氷面に沈着すると、地表の反射率を低下させ雪氷の融解を促進するため、BCの加熱効果は特に北極で大きくなる。BCが北極の気候に与える影響を推定するためには、その空間分布を正確に把握する必要がある。このことは、これまでの数多くの研究や北極評議会 (Arctic Council) のもとに行われてきたSLCF (Short-lived Climate Forcers; 短寿命気候汚染物質) の専門家グループと連携したAMAP (Arctic Monitoring and Assessment Program) 報告書でも指摘されてきた。しかし、この過程の理解は不十分であり、その本質的な進展には新たな手法と観測に基づく研究が必要である。我々は、これまで継続的に開発してきた観測的手法を、本研究を通して大きく発展させ、BCの挙動を解明した。

BC質量濃度の長期観測は、BCの排出・輸送・沈着の過程の定量的理解とその変化を調べる上で必要不可欠である。我々の開発したCOSMOSはBC濃度を15%の精度で測定できることを実証してきた。しかし北極で用いられている他の研究グループの測定器では、フィルター上に捕集したBCの光吸収係数の測定値をBC濃度に変換している。吸収係数からBC濃度を求める場合には、光吸収係数がBC濃度と良く相関していることと光吸収係数とBC濃度の比が安定であることが必要条件である。しかし、この点の確認がこれまで皆無であった。我々は、バロー (アラスカ)、ニューオルスン (ノルウェー)、アラート (カナダ)、パラス (フィンランド) で他機関が使用しているMAAP, PSAP, Aethalometer という3種類の測定器をCOSMOSと比較した。これにより、他機関による長期観測データを規格化するという方法の有効性を評価した。測定されたBC濃度の長期的なデータを集積し、データアーカイブ化して、モデル研究を含め、BCの気候影響の評価が広く行えることを可能にした。またこのデータアーカイブを用いて北極BCの時間・空間変化を明らかにしてきた。

北極域での温暖化が進むと、一般的には、北極域下層雲内での氷晶 (微小な氷の結晶) の割合は少なくなると予測されている。しかしながら、エアロゾルが北極域下層雲内での氷晶形成に及ぼす影響については、この予測の中では考慮されておらず、殆ど分かっていない。氷晶核粒子の増加は、雲内での氷晶形成を促進するため、北極域下層雲の放射特性や寿命などに多大な影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、北極域において氷晶核粒子の数濃度を高精度でモニタリングできる観測システムの構築に取り組んだ。まずは超低濃度状態であっても、約 -30°C ~ 0°C という幅広い温度域で氷晶核粒子を検出することが可能な観測システムを独自で開発し、日本国内 (東京スカイツリーの大気観測所) で一年以上にわたって試験運用することによって、その有用性を確認した。その後、同観測システムをスヴァールバル諸島のZeppelin山観測所に導入し、世界初となる北極域での氷晶核粒子の通年モニタリングを開始した。本研究では、2019年9月からの約一年間に得られたデータの解析を重点的に行ったが、その結果、約 -30°C で活性を示す氷晶核粒子の季節変動はほとんど見られないものの、約 -15°C 以上で活性を示す氷晶核粒子の数濃度に関しては、夏季になると顕著に増加する傾向にあることを初めて明らかにした。さらに本研究では、氷晶核粒子の数濃度が増加するタイミングは、スヴァールバル諸島の地表気温が 0°C 以上に達して地表面が露出するタイミングと非常によく一致していることも示した。Zeppelin山観測所での氷晶核粒子の通年モニタリングによって得られた成果は、北極域の温暖化の進行によって積雪の融解や氷河の後退が進んだ際に、北極域での氷晶核粒子の数濃度が増加する可能性があることを提唱するものである。

本研究では現代の観測の他、グリーンランドで掘削したアイスコアから、産業革命以前~現代に

至るまでのBCの濃度と粒径の変動を復元した。グリーンランド北西部のアイスコアのBCの濃度を1月毎という従来にない高時間分解能で復元した結果、約350年間を通じて、夏季に化石燃料燃焼起源のBCが殆ど無視できるレベルであったことが明らかになった。これを利用して、過去350年間のバイオマス燃焼起源のBCの経年変動を復元することができた。従来は、化石燃料燃焼起源のBCがグリーンランドに流入し始めた19世紀終盤以降、BCを森林火災の復元に使うことができないと考えられていたが、本研究により、19世紀終盤以降も森林火災起源のBCの変動を復元することが初めて可能になった。パットラジェクトリー解析により、グリーンランド北西部に夏季に飛来するBCは主にカナダ北部の森林火災由来と推定された。1650年～2000年頃の間、同地域の森林火災には増加傾向が見られず、むしろ若干の減少傾向が見られた。更に、近年、バイオマス燃焼起源のBCの粒径が産業革命以前に比べて大きくなったことが示唆された。

グリーンランド北西部のアイスコアだけでなく、北東部のアイスコアのBC分析を行った結果、両アイスコアにおけるBC濃度の経年変化パターンが似ていること、このパターンがグリーンランド南部のアイスコアのパターンとは異なることが分かった。ヨーロッパと北米のBCのエミッション・イベントリーのトレンドの違いから、グリーンランド北部は南部に比べてヨーロッパの化石燃料燃焼起源のBCの影響を強く受けていることが示唆された。

グリーンランド北西部のアイスコアから、過去100年間の鉱物ダストの変動を解析した結果、温暖期と寒冷期では鉱物組成や粒径が異なることが分かった。温暖期にはグリーンランド西海岸で発生したダストの寄与が大きくなったことが示唆されたが、これは温暖化によってグリーンランド沿岸部が夏季に雪氷に覆われている期間が短くなったことでダスト発生源として重要になったためであると考えられる。一方、寒冷期には、過去の温暖期にカナダ北部で生成された堆積物が鉱物ダストの主な起源であることが示唆された。更に、グリーンランド北東部のアイスコアの鉱物ダストの変動を解析したところ、北西部のアイスコアとは鉱物組成や粒径が異なっていた。これは、両アイスコアの掘削地点に飛来する鉱物ダストの発生地域が異なっていることを示している。

1. 研究開発目的

【サブテーマ4】

(1) 北極域でのBC観測

BC質量濃度の長期観測は、BCの排出・輸送・沈着の過程の定量的理解とその変化を調べる上で必要不可欠である。我々の開発したCOSMOSはBC濃度を15%の精度で測定できることを実証してきた。一方、北極域で用いられている他の研究グループの測定器では、フィルター上に捕集したBCの光吸収係数の測定値をBC濃度に変換している。吸収係数からBC濃度を求める場合には、光吸収係数がBC濃度と良く相関していることと光吸収係数とBC濃度の比が安定であることが必要条件である。しかし、この点の確認がこれまで皆無であった。本研究では、バロー（アラスカ）、ニーオルスン（ノルウェー）、アラート（カナダ）、パラス（フィンランド）で他機関が使用しているMAAP、PSAP、Aethalometer という3種類の測定器による観測データをCOSMOSによる観測データと比較する。これにより、他機関による長期観測データを規格化するという方法の有効性を評価する。

更に、規格化されたMAAP、PSAP、AethalometerのデータとCOSMOSのデータを組み合わせて、2008-2020年の13年間にわたりバロー（アラスカ）、ニーオルスン（ノルウェー）、アラート（カナダ）、パラス（フィンランド）で測定されたBC濃度の長期的なデータを集積し、データアーカイブ化する。これにより、モデル研究を含め、BCの気候影響の評価を広く行うことを可能にする。また、このデータアーカイブを用いて北極BCの時間・空間変化を明らかにする。

(2) 北極域での大気中の氷晶核粒子の観測

北極域の下層大気では、年間を通して混相雲（過冷却水滴と氷晶が混在する雲）が頻繁に発生しており、北極域での放射収支や水・物質循環などに多大な影響を及ぼしている。混相雲の光学特性や寿命は、雲凝結核・氷晶核として働くエアロゾルの存在によって大きく左右される。例えば、氷

晶核粒子（氷晶核として働くエアロゾル）の増加は、混相雲内での氷晶の形成や成長、過冷却水滴の蒸発を促進するため、混相雲を光学的に薄い雲へと変化させ、雲の寿命（持続期間）を短くすると考えられている。しかし、北極での大気中の氷晶核粒子の動態については、非常に濃度が低く、計測が難しいこともあって、科学的知見が非常に乏しい。

そこで本研究では、より幅広い温度域で適用できるように開発・改良されたオリジナルの水滴凍結法を用いることによって、北極域下層雲があらわれる $-30^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の温度条件下において、氷晶核粒子の数濃度を高精度でモニタリングできる観測システムを確立し、さらに北極域の中でも、温暖化傾向が特に顕著に現れていて混相雲の発生頻度も際立って高いと言われているスヴァールバル諸島にあるニーオルスンのZeppelin山観測所において、氷晶核粒子の数濃度の季節変動を明らかにすることを目的とする。

(3) グリーンランドのアイスコアの解析

北極域のエアロゾルの動態やその雪氷面アルベドなどへの影響を正確に把握するには、産業革命以前からの長期に及ぶ観測データが必要である。数十年を超える長期観測データが殆どない北極域では、アイスコアのデータがほぼ唯一の情報源である。先行研究では北極のアイスコアから、BCや鉍物ダスト等のエアロゾルの濃度の長期変動が得られている。しかし従来の研究では、重要な要素であるBCの粒径データが殆どなかった。鉍物ダストについては粒径や組成に関する情報が非常に少なく、特にグリーンランド北部におけるダストの粒径や組成の変動に関するデータは殆どなかった。そこで、本研究はグリーンランド北西部と北東部で掘削したアイスコアに含まれるBCの濃度と粒径、更に鉍物ダストの粒径変化、組成変化を復元することを目的とする。BCとダストの濃度・粒径については、季節単位または月単位、鉍物組成については、5~10年単位という、従来にない高時間分解能で復元する。

2. 研究目標

北極およびアジアにおいてCOSMOSによるBC観測を実施し、品質管理されたデータセットを作成して他のサブテーマに提供する。COSMOSデータの精度をトレースできる方法を確立し、他国の他の測定法によるBCデータと比較する。さらに論文などにBCの高精度測定法などを明文化するにより、COSMOSの標準化の基盤を形成する。またニーオルスンにおいてエアロゾル捕集を行い、氷晶核として働くエアロゾルの数濃度とその季節変化を評価する。アイスコア分析にもとづき、過去150年間のBCやダスト等のエアロゾルの経年変化を評価する。

3. 研究開発内容

【サブテーマ4】

(1) 北極域でのBC観測

COSMOSによるBC測定ではサンプル空気を 300°C に加熱し、BC以外のエアロゾルを除去することが重要である。これまで、故障が頻発したヒーターに代わりシーズヒーターを用いた新たな



図-4.1 ノルウェー・スヴァールバル諸島のニーオルスンに設置されたCOSMOS。（左）黒い箱の右後方にある金属製のヒーターで、取り入れた大気を加熱し、ブラックカーボン以外のエアロゾル粒子を蒸発させて、COSMOS本体（黒い箱）で光吸収率の測定を行う。（右）ヒーターの拡大写真。

COSMOS用の加熱インレットを製作し、北極の4地点での運用を始めた。またその他のCOSMOSの機能を改良し、より安定した観測が行えるようにした（図-4.1）。

北極の4地点でのCOSMOSの観測データを、毎週1回取得し、その状態を診断した。この診断を効果的・効率的に行うためのソフトウェアを開発した。その結果、様々なCOSMOSの障害が発生したことを早期に検知することが可能になった。データ欠損を最小限にするための体制を築いてきた。

障害が発生した場合、それぞれの観測所の技術者との連絡により、故障した部品の交換などを行うという方法を確立してきた。故障が起きやすい箇所と故障の原因を理解し、故障に対応するノウハウを積み上げられてきた。故障が起きやすい箇所の改良も並行して行ってきた。このように、遠隔地での長期観測には短期集中観測にはない問題があるので、適切な戦略が必要である。また外国での観測であるので、国際協力により、お互いの信頼関係を築くことも重要である。

COSMOSによる観測に加えて、バロー（アラスカ）、ニーオルスン（ノルウェー）、アラート（カナダ）、パラス（フィンランド）で他機関が使用しているMAAP、PSAP、Aethalometer という3種類の測定器をCOSMOSと比較した（図-4.2）。これにより、他機関による長期観測データを規格化するという方法の有効性を評価した。

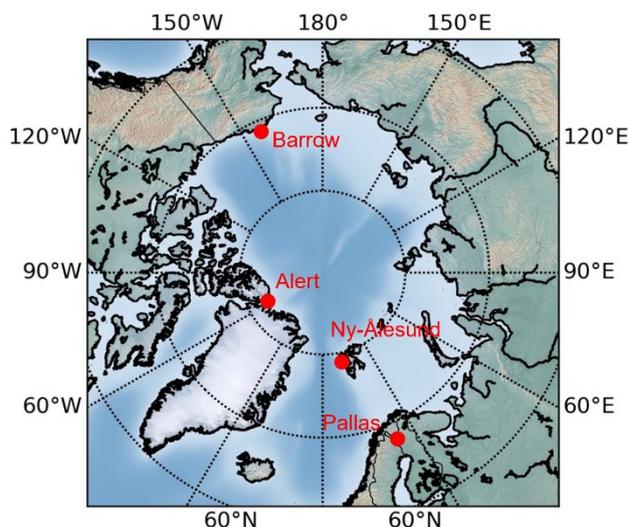


図-4.2 ブラックカーボンの比較観測を行ったアメリカ・アラスカのバロー、カナダのアラート、ノルウェー・スピッツベルゲン島のニーオルスン、フィンランドのパラスの位置を示す北極地図。

（2）北極域での大気中の氷晶核粒子の観測

北極域での大気中の氷晶核粒子は、非常に濃度が低いことから、計測することが技術的にかなり難しいとされている。そこで我々は、超低濃度状態であっても、氷晶核粒子を検出することが可能なCRAFT¹⁾ (Cryogenic Refrigerator Applied to Freezing Test) を開発してきた。CRAFTでは、水滴凍結法（エアロゾルを含む水滴を低温ステージ上で冷却することで、エアロゾルの氷晶核特性を計測する手法）に基づいた氷晶核粒子の検出手法を採用している。CRAFTで大気中の氷晶核粒子の数濃度を計測する際には、フィルター上に捕集されたエアロゾルを超純水中に抽出した後に、エアロゾルを含む水滴をピペットで作成することにより計測を行う。このようなCRAFTによる大気中の氷晶核粒子の数濃度の計測は、これまでにZeppelin山観測所²⁾、みらいの北極海航海^{2,3)}・南大洋航海⁴⁾での短期集中観測の中で実施してきており、数濃度が極めて低い大気環境下であっても可能であることを十分に検証してきた。

本研究では、北極域での氷晶核粒子の数濃度の季節変動を明らかにすることを目的としていることから、長期的に渡って連続的に氷晶核粒子をモニタリングできる観測システムを確立する必要がある。これまでの短期集中観測では、手動でのフィルター交換を行ってきたが、北極域のような環境下では、フィルター交換を定期的に確実に行うことが困難である。そこで本研究では、10ライン・グローバルサンプラー（東京ダイレック社製）を氷晶核粒子分析用のエアロゾル試料のサンプリングに使えるようにカスタマイズすることによって、独自の自動エアロゾルサンプリングシステムを確立させた。このサンプリングシステムでは、直径47 mm、孔径0.2 μmのポリカーボネートフィルターを装着したフィルターホルダーを最大10個搭載することができ、フィルターホルダーを定期的に自動で交換することが可能である。このサンプリングシステムは、東京スカイツリーの458メートル地点に設立した大気観測所にて試験運用し、数年に渡って問題なく稼働することを確認してきた。図-4.3に東京スカイツリーでのモニタリング観測の結果⁵⁾を例示しているが、東京上空の水

晶核粒子に関しては、「世界の各地で報告されている氷晶核の数濃度の変動幅⁶⁾内に収まっていること」「 $-20^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ で活性を示す氷晶核粒子の数濃度が季節的な変動を示し、高温多湿な時期に増加する傾向にあること」「強い黄砂の飛来が観測された時期（2017年5月）には、氷晶核粒子の

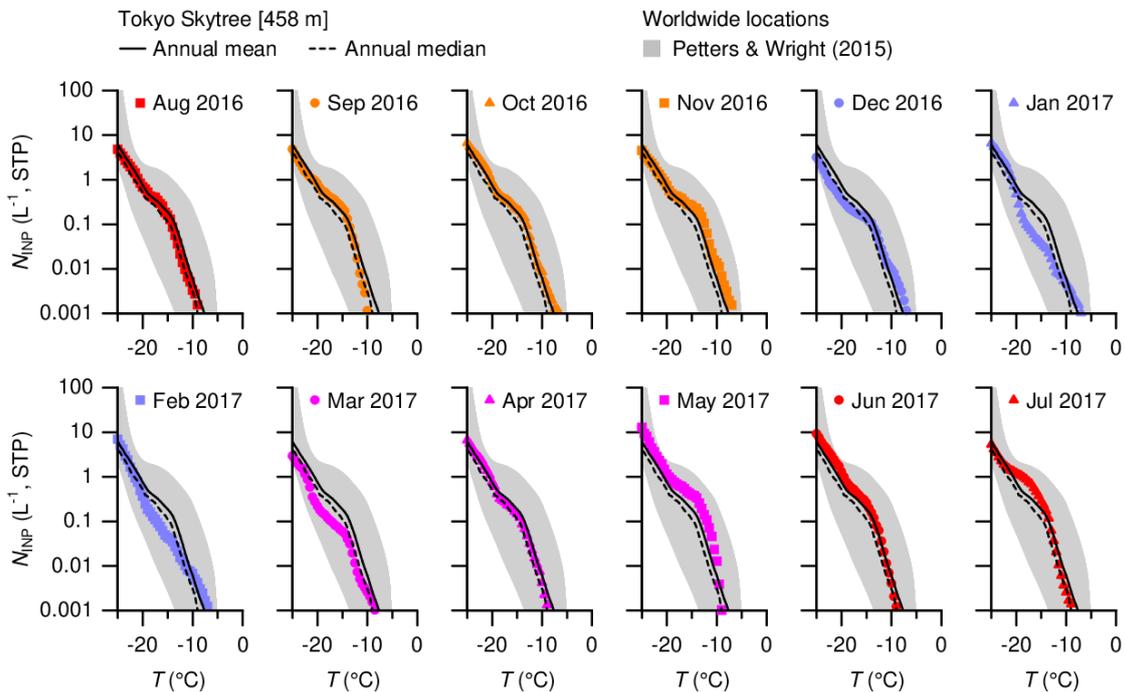


図-4.3 東京スカイツリーの大気観測所で観測された任意の温度 (T) 条件下における氷晶核粒子の数濃度 (M_{INP}) の月平均値⁵⁾。黒い実線は東京スカイツリーにおける年平均値、破線は年中央値を示している。陰影はPetters and Wright (2015)が報告した世界各地での計測値の変動幅⁶⁾を示す。

数濃度が大幅に増加すること」などを明らかにしてきた。

東京スカイツリーの大気観測所での試験運用を経た後、北極域での氷晶核粒子の数濃度の長期モニタリングを目的とし、2018年にスヴァールバル諸島・ニーオルスンのZeppelin山観測所にも同様の自動エアロゾルサンプリングシステムの導入に取り掛かり、2019年から本格的な運用を開始した（図-4.4）。東京スカイツリーでは3日に1回の頻度でフィルター



図-4.4 Zeppelin山観測所（左写真）に設置されている氷晶核粒子計測用の自動エアロゾルサンプリングシステム（右写真）の様子。本システムは、COSMOSと同じPM10インレットに接続されている。

ホルダーが切り替わるように設定していた。一方、北極域の氷晶核粒子の数濃度は、東京上空よりも低いことがこれまでの短期集中観測^{2,3)}によって想定されていたこともあり、サンプル量をより多く確保するため、Zeppelin山観測所では1週間に1回（日曜の0:00 UTC）にフィルターホルダーが切り替わるように設定した。このエアロゾルサンプリングシステムは、COSMOSと同じPM10インレットに接続されている。このPM10インレットに入ってくるエアロゾル（つまり、フィルター上に捕集

されるエアロゾル)の粒径と数濃度を計測するために、本研究では、0.3~10 μmにおいて粒径別のエアロゾルの数濃度の計測が可能なパーティクルカウンター(OPS、TSI社製)も新たに設置した。Zeppelin山観測所の自動エアロゾルサンプリングシステムで採取されたエアロゾル試料は、極地研のCRAFTで分析することにより、約-30°C~0°Cの温度域(北極域下層雲があらわれるほぼ全ての温度域をカバー)における氷晶核粒子の数濃度を0.5°Cごとに導出した。

(3) グリーンランドのアイスコアの解析

本研究では、アイスコア連続融解分析装置(CFA)に接続したSP2(レーザー誘起白熱法によるBC分析装置)により、グリーンランド北西部SIGMA-D地点(図4-5)のアイスコアを高時間分解能で分析した。分析データを詳細に解析し、過去350年間にわたって1月ごとのBCの濃度と粒径の変動を明らかにした。また、同アイスコアから少量のサンプルを切り出し、凍結乾燥することで粒子成分を抽出した後、走査型電子顕微鏡(SEM)とSEMに接続したエネルギー分散型X線解析装置(EDS)を用いて鉍物粒子を分析し、過去約100年間の粒径と鉍物組成変動を5年分解能で復元した⁷⁾。

グリーンランドの北西部だけでなく、グリーンランドの北東部におけるBCと鉍物ダストの変動の研究も行った。EGRIP地点(図4-5)で掘削されたアイスコアを用いて、CFAに接続したSP2によりBCの高時間分解能分析を実施した。また、CFAを用いて融解したEGRIPアイスコアのサンプルの一部をSEM-EDSで分析し、過去100年間における鉍物粒子の粒径と鉍物組成変動を10年分解能で復元した。

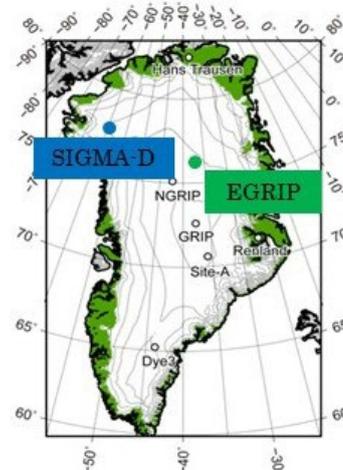


図-4.5 グリーンランドにおけるアイスコア掘削地点。SIGMA-DとEGRIPの標高は各々約2100mと約2700m。

4. 結果及び考察

(1) アラートでのSP2-COSMOSの比較

COSMOSの測定精度を総合的に評価するため、我々が開発した高精度のBC濃度測定器SP2とCOSMOSの測定値とを比較した。その結果、COSMOSはアジアにおいて、SP2と比較して誤差15%でBCを測定できることを実証した。またAlertにおいても同様な結果を得た(図-4.6)。これは、BC連続測定器としては世界最高の精度を達成できたことを意味する。

(2) 光吸収断面積の測定

COSMOSにより測定されたBCの質量濃度 M_{BC} とMAAP, PSAP, Aethalometerにより測定された光吸収係数 b_{abs} との相関関係をまず調べた。その相関は良いためBCの光吸収断面積MACを

$$MAC = b_{abs} / M_{BC}$$

の関係から求めた。図-4.7はAlertにおけるCOSMOSとPSAPの比較結果である。

(3) 光吸収断面積の時間・空間変動

アメリカ(アメリカ海洋大気庁)、

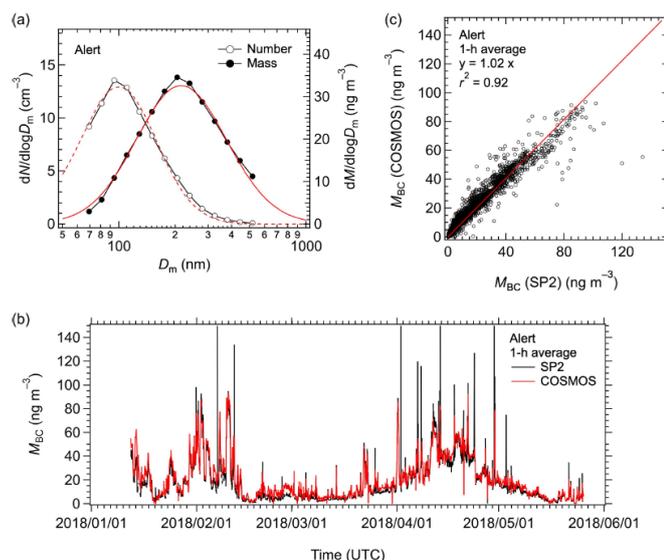


図-4.6 アラートにおけるSP2とCOSMOSの比較結果⁸⁾。

カナダ（カナダ環境・気候変動省）、スウェーデン（ストックホルム大学）、フィンランド（フィンランド気象研究所）、ギリシャ（国立科学研究センター）が運用する8個（4種類）の測定器とCOSMOSを比較した。その結果、これらの測定器のデータをCOSMOSの測定値に統一化するために必要な変換係数であるMACを決定することができた。COSMOS以外の測定器の変換係数は、同じ種類の測定器でも場所により最大約30%異なり、また同じ場所でも測定器により約30%異なることがわかった。また同じ測定器でもその変換係数は年ごとに変動した（図-4.8）。このことは、COSMOS以外の測定器を観測に用いる場合はCOSMOSとの比較を長期間行う必要があることを示している。

この比較観測研究には、これまで北極でBC観測を実施してきた国内外の主要な研究者が共著者として参加した。北極の4地点で長期間にわたり観測されてきたBC濃度を、COSMOSを基準にして高精度で規格・統一化する方法が確立されたことで、これらの場所のBC濃度を誤差約20-30%で補正することができるようになった。つまり、北極各地で長年にわたり観測されてきたBC濃度を比較することが可能となり、統一濃度スケールをもつ北極のBC濃度データを得ることができた。COSMOSによる観測は今後のエアロゾル研究にさらに貢献することが期待される。

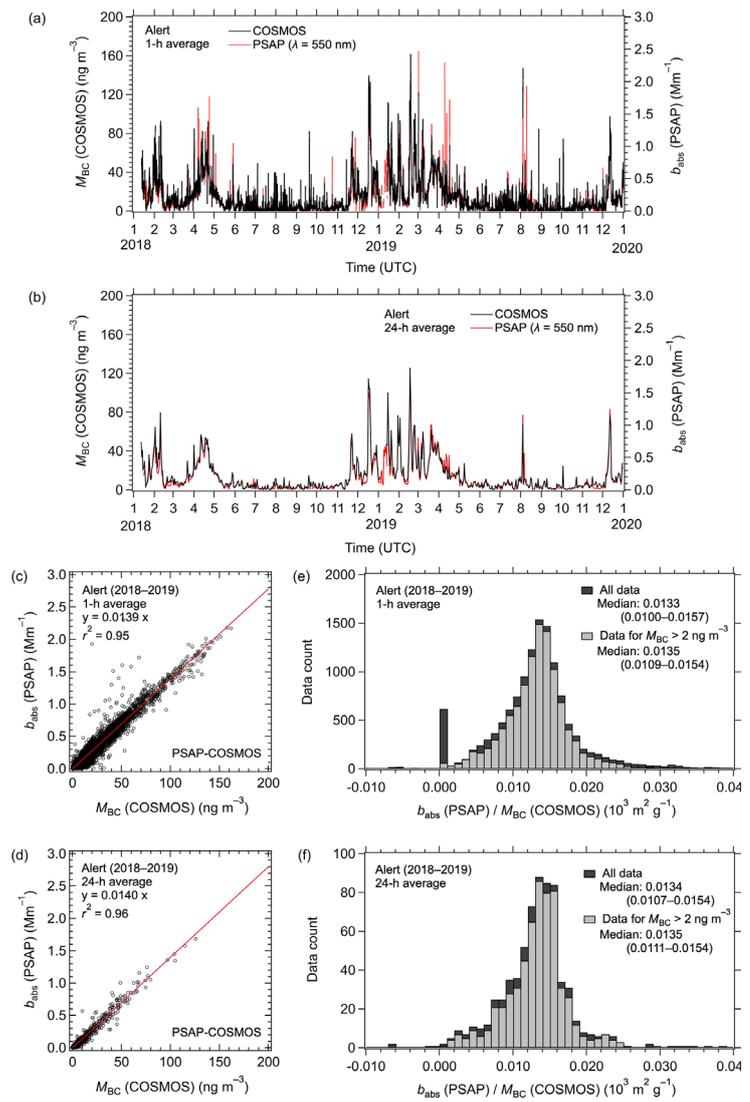


図-4.7 アラートにおけるCOSMOSとPSAPの比較結果⁸⁾。

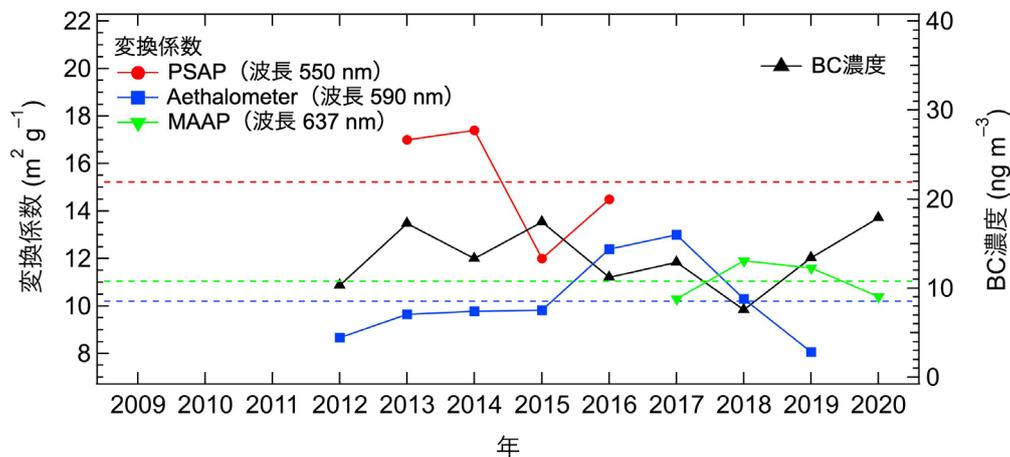


図-4.8 ニーオルスンにおけるCOSMOSとPSAP、Aethalometer、MAAP測定器の比較によるMAC(変換係数)の年ごとの変動。▲はCOSMOSで測定されたBC濃度。点線はそれぞれの測定器における変換係数の平均値⁸⁾。

(4) 北極での大気中と降水中のBCの長期観測

COSMOSによるBC濃度 M_{BC} の長期連続観測は大気中のBCの挙動の理解に重要であり、継続してこの観測を行った。またバローにおける降水中のBC濃度の測定を2013-2017に行ない、ニーオルスンにおける降水中のBC濃度の測定を2012-2020に行った。これらのデータを詳しく解析した。

水中のBC濃度の測定は、BCを水中から大気中に浮遊させた後にSP2で検出するという独自に開発した方法を用いた。この方法は、北極の積雪中のBC濃度測定に適用された（図-4.9）。この図と結果はAMAP-SLCF報告書(2023)でも用いられている。

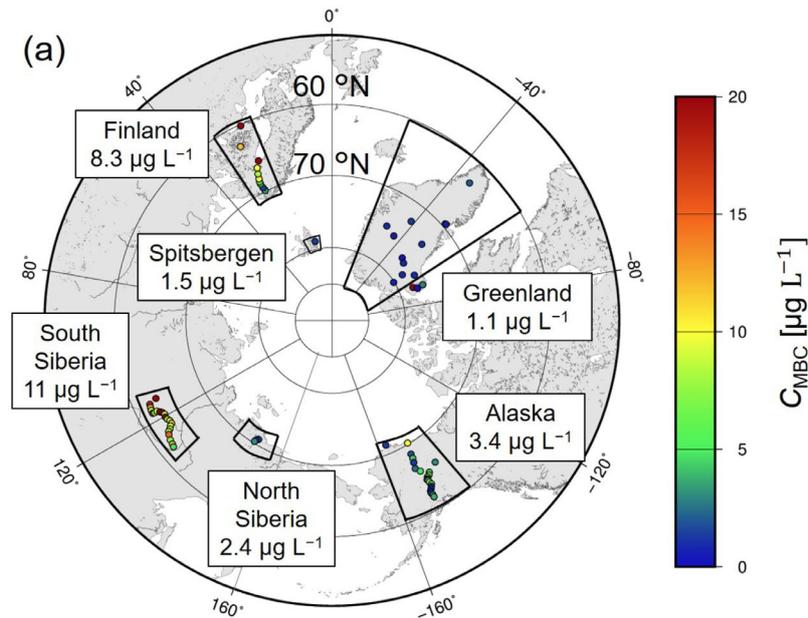


図-4.9 北極域での積雪中のBC濃度。AMAP-SLCF (2023)で用いられた⁹⁾。

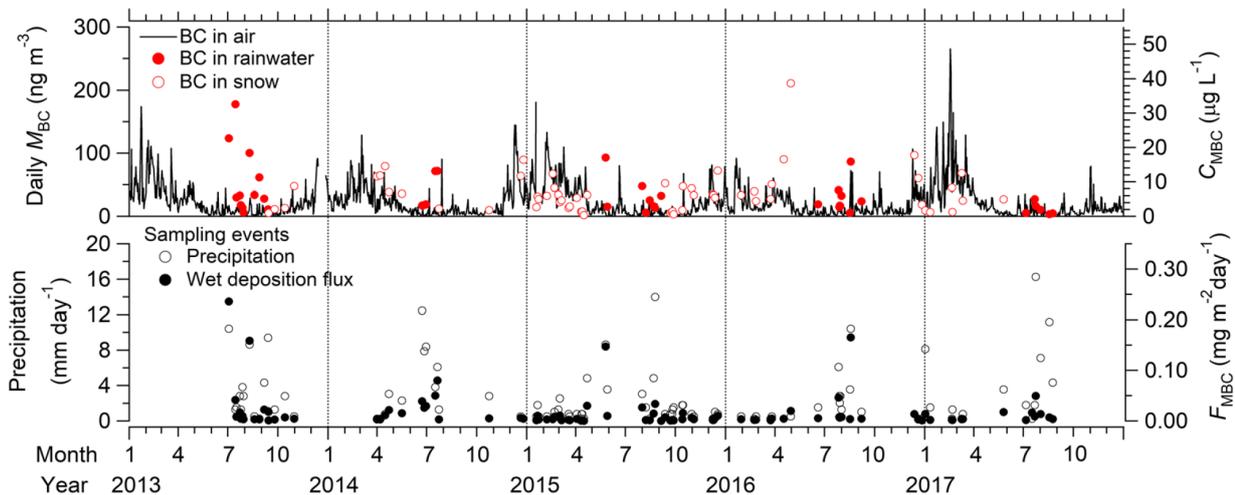


図-4.10 バローで測定された、大気中と降水中のBC濃度（上図）。降水に伴うBCのフラックス（下図）¹⁰⁾。

図-4.10にアラスカのバローにおいて2013-2017年に測定された M_{BC} を示した。この期間、降水中のBC濃度 C_{MBC} の同時観測も行われた（図-4.10）。 M_{BC} と C_{MBC} の同時観測からバローでのBCの降水に伴う沈着過程を始めて明らかにした。特に C_{MBC} の測定と降水量の気象観測から、沈着フラックス

を推定し、BCの降水除去の動態を明らかにした。冬季は人為起源BC、夏季は森林火災起源BCに注目した解析を行った。この結果を論文として国際誌に発表した。

同様の観測をニーオルスンにおいて2012-2020年の期間に行った(図-4.11)。この2か所の観測により、平均すれば C_{MBC} は M_{BC} と良く相関することが初めて示された(図-4.12)。この結果は数値モデルによる湿性沈着量の検証にも有用であることが示された¹¹⁾。

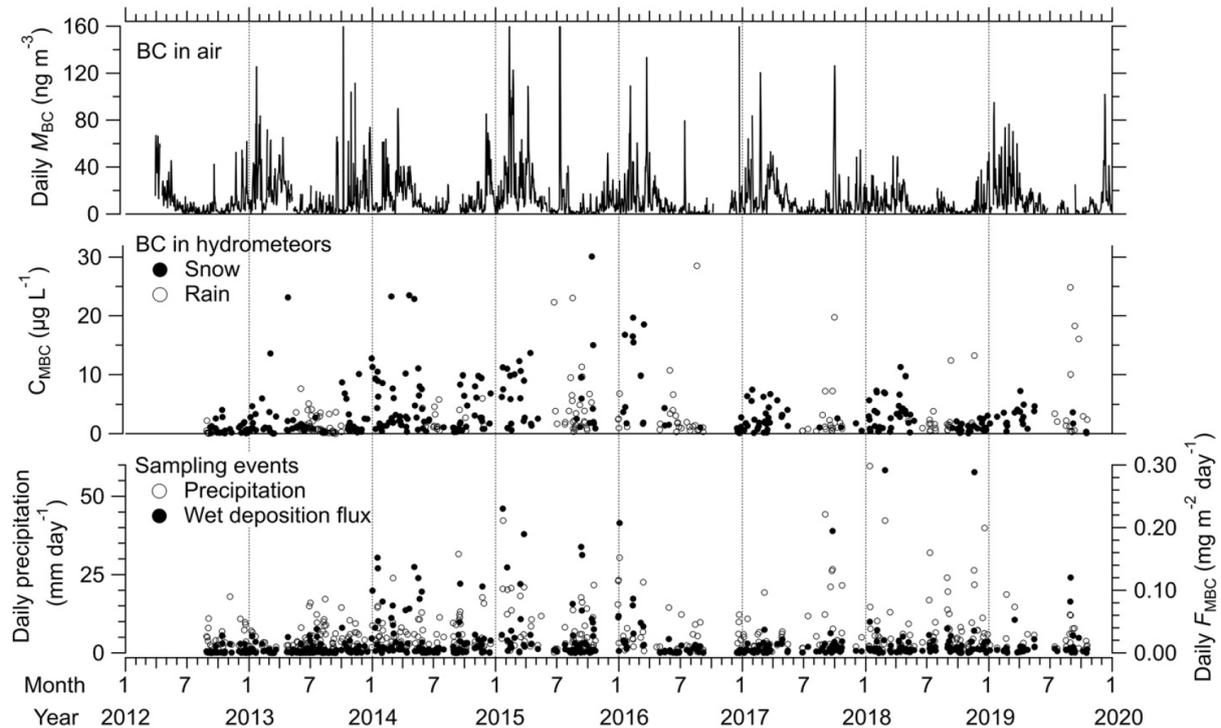


図-4.11 ニーオルスンで測定された、大気中のBC濃度(上図)。降水中のBC濃度(中図)。降水に伴うBCのフラックス(下図)¹²⁾。

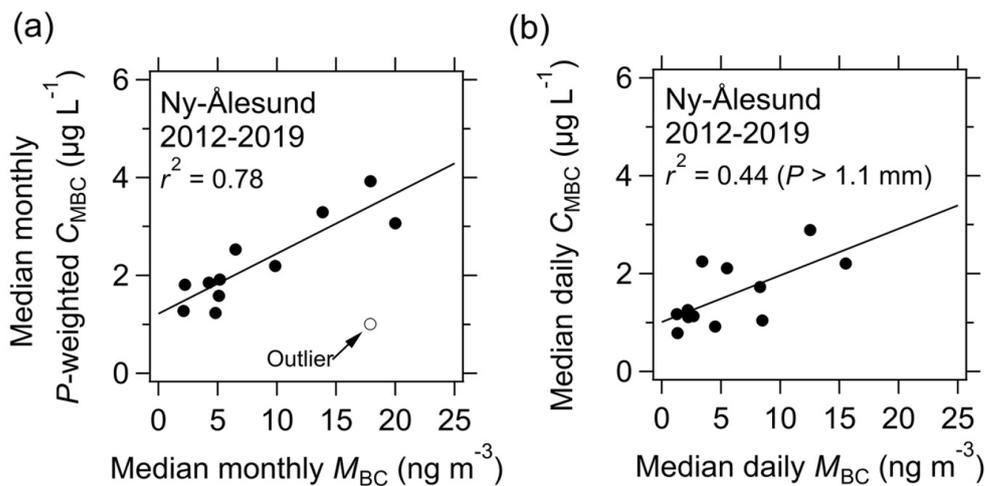


図-4.12 ニーオルスンで測定された、大気中のBC濃度と降水中のBC濃度との相関¹²⁾。

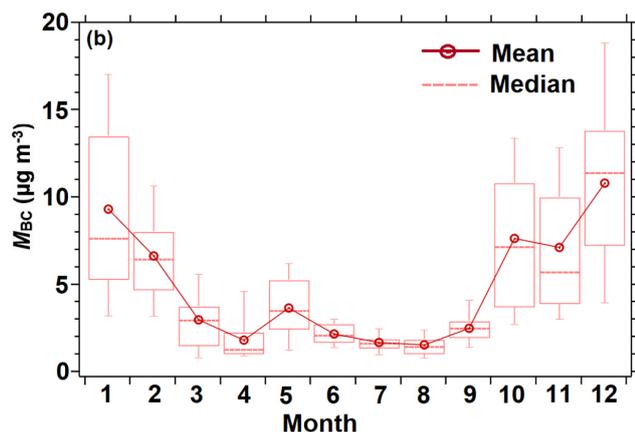


図-4.13 ニューデリーで測定された、大気中のBC濃度¹³⁾。

(5) インドにおける大気中のBC観測

アジアでのBC排出量が全球的な総排出量に占める割合は大きい。また北極でのBCのかなりの部分はアジアから排出され長距離輸送されたものである。このためインドのエアロゾル測定の基準を作る役割を担う機関である国立物理学研究所 (NPL) と共同でインドにおけるBCを含むエアロゾル測定の標準化のための研究を2018年に開始した。この共同研究はインドにおけるBCの排出量の検証を行うための観測の重要な足掛かりとなる。COSMOSによる M_{BC} の観測はニューデリーにあるNPLの観測所で2019年の9月に開始され、現在も継続されている。図-4.13に2019-2020年の1年間の M_{BC} の季節変化を示した。夏季に低く、秋・冬に高濃度になっている。インドで初めて高精度の M_{BC} が得られた。今後の長期観測により、季節変動の特徴をより明確に把握できるはずである。

(6) 北極域での大気中の氷晶核粒子の観測

本研究では、2019年9月から2020年10月にかけて北極域で実施された大型の国際共同研究プロジェクトであるMOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate) の期間における氷晶核粒子の数濃度を明らかにするため、観測システムの準備を進めてきた。MOSAICプロジェクトの期間中にコロナ禍に突入してしまったため、ノルウェーおよびスヴァールバルへの入国が制限されていたが、現地にいるノルウェー極地研究所のスタッフの協力もあり、自動エアゾルサンプリングシステムについては問題なく稼働し続けることができた。2020年10月には、研究目的での渡航ということで特別な許可を得て現地入りすることができたため、自動エアゾルサンプリングシステムで得られたエアロゾル試料の回収とフィルターの補充を行うことができた。

Zeppelin山観測所から持ち帰ったエアロゾル試料を極地研のCRAFTで分析し、2019年9月～2020年10月上旬の期間における氷晶核粒子の数濃度の変動を調べた。その結果、約 -30°C で活性を示す氷晶核粒子の季節変動は明瞭ではないものの、約 -15°C 以上で活性を示す氷晶核粒子の数濃度に関しては、夏季になると顕著に増加する傾向にあることが明らかになった (図-4.14)。さらに本研究では、氷晶核粒子の数濃度が増加するタイミングは、スヴァールバル諸島の地表気温が 0°C 以上に達して地表が露出するタイミングと非常によく一致していることも、初めて明らかになった。

スヴァールバル諸島は、冬季になると積雪や氷河・氷床によって地表がほぼ完全に覆われているが、5～9月頃になると、地表気温が 0°C を上回る日が多くなるため、沿岸域の積雪の融解が進み、地表の一部が露出した状態になる (図-4.15)。夏季に露出した地表からは、ダストや地表 (ツンドラ生態系) での生物活動の活性化に伴う生物由来エアロゾルの発生が活発になることが予測される。高緯度起源のダストの氷晶核能については、低～中緯度の砂漠起源のダストの氷晶核能よりもはるかに高く、 -15°C 以上の温度でも高い氷晶核能を示すことが我々の先行研究によって確認されている²⁾。スヴァールバルでの生物由来エアロゾルについては、科学的知見がまだ無いが、夏季になると生物由来 (微生物) と思われるエアロゾルがZeppelin山観測所でも見つかっており²⁾、その中には -15°C 以上の温度で高い氷晶核特性を示すものが含まれていた可能性もある。以上のことから、

スヴァールバル諸島もしくはその近辺の高緯度の陸域から発生するダストや生物由来エアロゾルが、約 -15°C 以上で活性を示す氷晶核粒子の季節変動に影響を及ぼしていた可能性があり、今後さらなる検証が必要だと考えている。

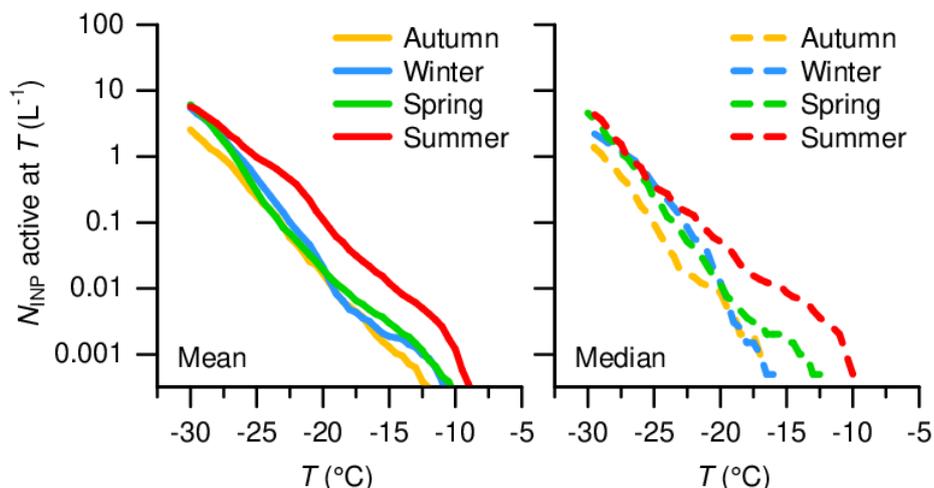


図-4.14 2019年9月からの1年間にZeppelin山観測所で観測された任意の温度 (T) 条件下における氷晶核粒子の数濃度 (M_{INP}) の季節平均値 (左図) と中央値 (右図)。Autumnは2019年9～11月、Winterは2019年12月～2020年2月、Springは2020年3～5月、Summerは2020年6～8月に該当する。(非公開)

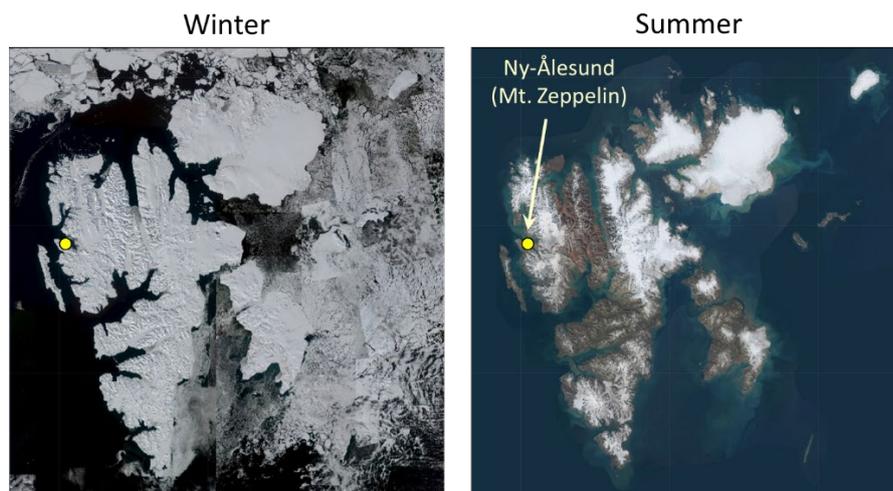


図-4.15 冬季 (左図) と夏季 (右図) におけるスヴァールバル諸島の人工衛星画像 (<https://toposvalbard.npolar.no/>)。

(7) グリーンランドのアイスコアによる化石燃料燃焼起源及び森林火災起源のBCの復元

グリーンランドのアイスコアを用いた先行研究により、化石燃料燃焼起源のBCが北極域に流入したことで、グリーンランドでは19世紀終盤から降雪中のBC濃度が増加したことが知られている。また、化石燃料燃焼起源のBCの増加が冬季に顕著であったことや、化石燃料燃焼起源のBCの濃度が1920～30年代にピークとなった後、減少に転じたことなどが知られている¹⁴⁾。我々の研究により、SGIMA-D地点におけるBC濃度の経年変化や、BC濃度の季節変化パターンの経年変化が明らかとなり、環境総合推進費2-1703の成果として報告した。本研究で新たにグリーンランド北東部のEGRIP地点のアイスコアのBC分析を行ったところ、SIGMA-D地点と同様、BC濃度が化石燃料燃焼起源のBCの影響で1870年代から増加したこと、1920～1930年代にピークとなり、1930年代以降減少し、近

年は産業革命以前のレベルまで低下したことなどが明らかになった。また、化石燃料燃焼起源のBCの影響によるSIGMA-D地点とEGRIP地点の濃度変化のパターンは、よく似ており、グリーンランド南部のアイスコア¹⁴⁾と比べて濃度変化のパターンが少し異なっていた。これらのことから、濃度変化パターンの違いはデータのノイズではなく、グリーンランドの北部と南部の地域差によるものであることが明らかになった。BCのエミッション・インベントリーを見ると、ヨーロッパと北米では経年変化のパターンが異なっていることから、グリーンランドの北部と南部ではヨーロッパと北米の影響の強さが異なっていると考えられる。今後、BCの輸送モデルにより、地域差や輸送過程を明らかにする必要がある。

環境総合推進費2-1703の成果として、SIGMA-D地点で、化石燃料燃焼起源のBCの影響がない時代には、BC濃度は夏季に極大、冬季に極小となっており、バイオマス燃焼起源のBCは主として夏季に多かったことが示唆された。化石燃料燃焼起源のBCの流入による濃度増加が顕著になった1870年代以降、秋から冬にかけてのBC濃度の増加が顕著になり、BC濃度の極大値が夏から冬にシフトした。

本研究では、CFAにより取得した高時間分解能のSIGMA-DアイスコアのBCデータをさらに詳細に解析することで、月毎のBC濃度の経年変化を復元した。図-4.16はSIGMA-Dアイスコアから復元された、月毎のBC濃度の10年平均値を350年にわたってプロットしたものである。1870年代以前は冬季（12月～2月）の濃度とその変動が小さかったこと、1870年代から冬季の濃度が上昇し、1920～1930年代にピークとなり、その後、減少に転じ、2000年代には産業革命以前の濃度レベルに戻ったことなどが分かる。これに対し、夏季（6～8月）は、1870年代以前も濃度の年々変動が大きかったが、1870年代～20世紀前半の濃度増加が見られない。SIGMA-Dにおいては、産業革命以前から今日に至るまで、夏季には化石燃料燃焼起源のBCの流入が殆どなかったと推定される。1920～1930年代は、冬季に化石燃料燃焼起源のBCの流入によりBCの質量濃度が産業革命以前の4倍程度になっているにもかかわらず、夏季には化石燃料燃焼起源のBCの影響が殆どなかったことは特筆すべきである。

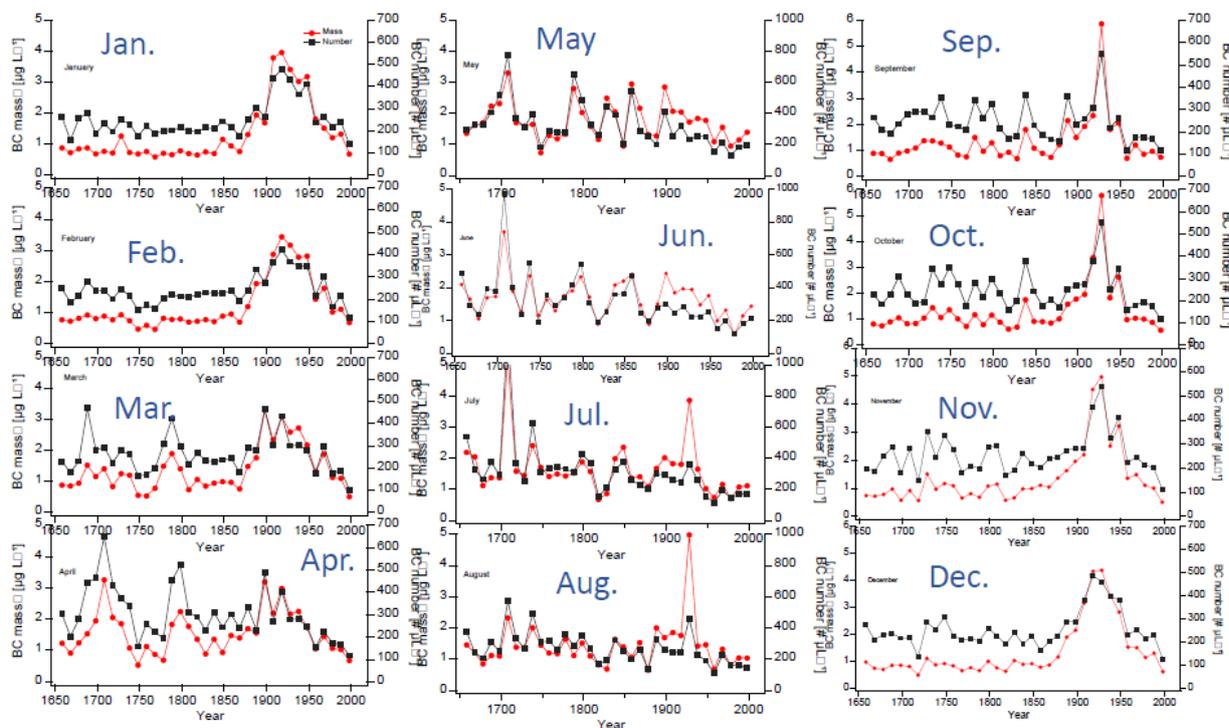


図-4.16 SIGMA-D地点における過去350年間の月毎のBC濃度の10年平均値の経年変動（赤と黒はそれぞれ質量濃度及び数濃度）（非公開）

先行研究では、化石燃料燃焼起源BCの流入開始以後、BCデータを使ったバイオマス燃焼の復元を断念していたため、BCデータを使ったバイオマス燃焼の復元データは19世紀中盤以前の時代までしかなかった。しかし、本研究では、350年間を通して、夏季のバイオマス燃焼起源BCの経年変動を復元することができた。夏季のBC濃度は変動が大きいですが、過去350年間を通じて、増加傾向は見られず、むしろ、2000年頃までは、減少傾向が見られた。本研究でバックトラジェクトリー解析を行った結果、SIGMA-Dに堆積したバイオマス燃焼起源のBCは主としてカナダ北部の森林火災由来のものであることが示唆されたので、過去350年間において、カナダ北部の森林火災起源のBCが減少傾向にあった可能性が高い。

化石燃料燃焼起源のBCの影響が出始める前、冬季のBCは、冬季でも積雪に覆われない中低位度のバイオマス燃焼を起源としていと考えられるので、中低緯度のバイオマス燃焼による北極域へのBCの輸送量の10年平均値は、1650年代～1870年代において、ほぼ一定であったことが示唆される。

SIGMA-Dアイスコアでは、化石燃料燃焼起源のBCによる19世紀終盤からの濃度増加に伴って、BCの平均粒径が増加し、1930年代からのBC濃度の減少に伴って、BCの平均粒径も減少した。しかし、BC濃度が1870年代以前のレベルまで低下するのに対し、BCの平均粒径は高止まりの傾向を見せていた。その原因として、森林火災起源のBCの粒径が1870年代以前に比べて大きくなったこと以外に、BCが氷床の表面や内部で氷床表面融解や氷の変形等により氷床上に堆積後に変化した可能性も考えられた。しかし、氷床表面融解が殆どなく、氷の変形の度合いがSIGMA-Dとは異なるEGRIPでもSIGMA-Dと同様の粒径変化を示したので、氷床に堆積後の変化ではなく、森林火災起源のBC粒子が1870年代以前に比べて粗大化したことが明らかになった。

(8) グリーンランドのアイスコアによる鉱物ダストの復元

図-4.17にSIGMA-DアイスコアのSEM-EDS解析結果を示す。過去百年の間にダストの鉱物組成が数十年スケールで変動しており、鉱物種によって変動のトレンドが異なっていたことが明らかになった。寒冷期(1950～2000年)には湿潤温暖な地域で生成されるカオリナイトが増加し、温暖期(1915～1949年、及び2005～2013年)には高緯度の乾燥地域やグリーンランド沿岸部などで生成される雲母、緑泥石、長石、苦鉄土鉱物、石英が増加していた。このように鉱物種の変動がグリーンランドの地表面気温と関係していることが明らかになった。鉱物組成の変動要因の解明のため、バックトラジェクトリー解析を行って、SIGMA-Dに到達する空気塊の地域別寄与を求めた。また、CMIP6の下で実施された全球気候モデル(MIROC6)シミュレーションの結果から、雪氷で被覆された地表面の割合の空間分布を求めた。これらの解析結果から、SIGMA-D地点では、温暖期にグリーンランド西海岸で発生したダストの寄与が大きくなったことが示唆された。これは温暖化によってグリーンランド沿岸部が夏季に雪氷に覆われている期間が短くなったことでダスト発生源として重要に

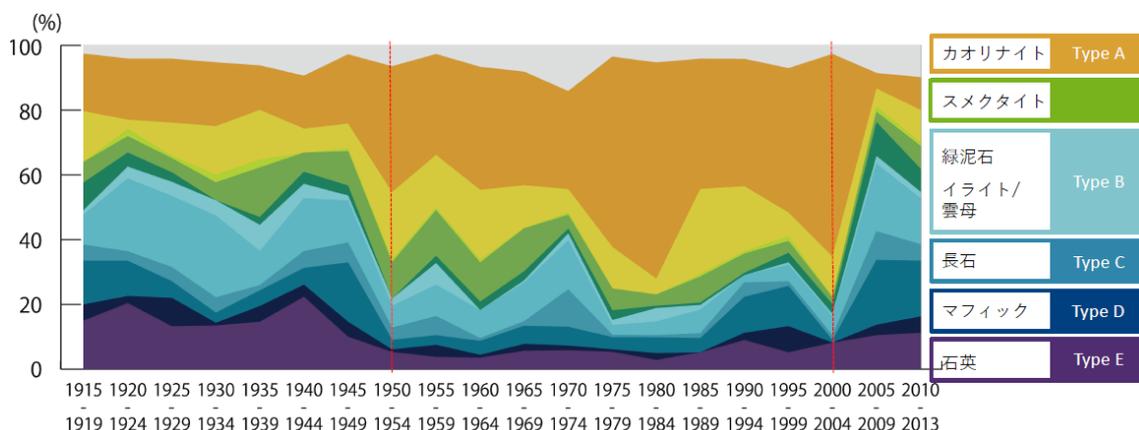


図-4.17 SIGMA-Dコアにおける鉱物組成の変動⁷⁾ 赤い縦線は温暖期(1915～1949年、及び2005～2013年)と寒冷期(1950～2000年)の境界を示す。

なったことによると考えられる。一方、寒冷期には、過去の温暖期にカナダ北部で生成された堆積物がSIGMA-D地点のダストの主な起源であることが示唆された。鉱物ダストの粒径分布は、温暖期には寒冷期に比べて大粒径の粒子が多く、温暖期には距離の近いグリーンランド沿岸の発生源の寄与が大きくなったことと整合する結果となった。

EGRIPアイスコアのSEM-EDSの解析結果は、SIGMA-Dと大きく異なっており、より内陸で標高の高いEGRIPと、より沿岸に近く標高の低いSIGMA-Dとでは、飛来する鉱物ダストの発生源が異なっていることが示された。EGRIPアイスコアでは、グリーンランド沿岸由来と考えられる鉱物の割合が小さく、粒径分布もSIGMA-Dに比べて、大粒径の粒子の割合が小さかった。これらの結果は、グリーンランド沿岸の発生源の寄与が小さかったことを示している。

5. 研究目標の達成状況

(1) 北極域でのBC観測

バロー（アラスカ）、ニーオルスン（ノルウェー）、アラート（カナダ）、パラス（フィンランド）で他機関が使用しているMAAP, PSAP, Aethalometer という3種類の測定器をCOSMOSと比較した。これにより、他機関によるBCの長期観測データを規格化するという方法を確立した。またこれらの観測点におけるBCの規格化されたデータも作成した。COSMOSが北極のBC測定の重要な基準となることがAMAP-SLCF (2023)報告書¹⁵⁾に記載され、国際的に高い評価を受けた。また北極における降水中のBCの粒径分布・濃度の高精度測定法を確立した。この測定法を用いて北極での降水・積雪観測を実施し、BCの沈着に関する新たな知見を得ることができた。これらの観測データにより全球モデルのBCの輸送過程、沈着過程の計算を検証することが出来た¹¹⁾。以上のことから本研究で掲げていた研究目標は十分に達成できた。

(2) 北極域での大気中の氷晶核粒子の観測

本研究では、スヴァールバル諸島・ニーオルスンのZeppelin山観測所において、氷晶核粒子の数濃度の季節変動を明らかにすることを目標としていたが、氷晶核粒子の数濃度を高精度でモニタリングできる独自の観測システムを確立し、Zeppelin山観測所にて通年で運用することに成功した。コロナ禍ではあったものの、2020年10月には特別な許可を得て現地入りして試料を持ち帰ることができた。そこで本研究では、2019年9月から2020年10月のMOSAICプロジェクトの期間に焦点を当てた試料の分析とデータ解析を進めた。その結果、Zeppelin山観測所での氷晶核粒子の数濃度は、明瞭な季節変動を示すことが明らかになった。スヴァールバル諸島周辺における温暖化傾向は、北極域の中でも特に顕著だと言われているが^{16,17)}、本研究では、現地の地表気温が0℃以上に達して地表面が露出するタイミングで氷晶核粒子の数濃度が増加する傾向にあることも確認された。以上のことから、本研究で掲げていた研究目標は十分達成することができた。

(3) グリーンランドのアイスコアの解析

グリーンランドのアイスコアのBCの濃度と粒径を、従来にない高時間分解能で解析することで、化石燃料燃焼起源とバイオマス燃焼起源のBCを分離することができた。これにより、化石燃料燃焼起源のBCの流入開始後の19世紀終盤以降においても、それ以前の時代と同様に、夏季の森林火災起源のBCの変動を復元することができた。先行研究では森林火災のみを起源とするレボグルコサン等を使って、19世紀終盤以降も森林火災を復元した研究例はあるが、レボグルコサンの分析には多量のサンプルと労力を要するため、高時間分解能の連続データは存在しなかった。これに対し、本研究では、夏季のカナダの森林火災起源のBCと、冬季の中低位度のバイオマス燃焼起源のBCの経年変動を解析することができた。前者は年々変動が大きかったが、350年間の長期トレンドを見た場合、温暖化に伴う増加トレンドは見られず、若干の減少トレンドが見られた。一方、後者については、19世紀終盤以降のトレンドは不明であるものの、それ以前は、年々変動が少なく、長期トレンドも見られず、ほぼ一定であった。グリーンランド北東部と北西部のアイスコアのデータを比較す

ることで、グリーンランド北部のBC濃度のトレンドが南部とは異なること、それが化石燃料燃焼起源のBCの発生地域の違いによるものである可能性が高いことなどが分かった。鉱物ダストについても、従来にない高時間分解能の連続データを取得することができ、北西部の沿岸に近い地点と、北東部の標高の高い内陸の地点では、飛来する鉱物ダストの組成や粒径分布が異なることが明らかになった。北西部においては、温暖期にグリーンランド西部の沿岸域のダスト発生源の影響が大きくなったことを明らかにした。このように本研究の目標を十分に達成することができた。

6. 引用文献

- 1) Y. TOBO: *Sci. Rep.*, 6, 32930 (2016), An improved approach for measuring immersion freezing in large droplets over a wide temperature range.
- 2) Y. TOBO, K. ADACHI, P. J. DEMOTT, T. C. J. HILL, D. S. HAMILTON, N. NAGATSUKA, J. UETAKE, Y. KONDO and M. KOIKE: *Nat. Geosci.*, 12, 253-258 (2019), Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles.
- 3) J. INOUE, Y. TOBO, F. TAKETANI and K. SATO: *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL094646 (2021), Oceanic supply of ice-nucleating particles and its effect on ice cloud formation: A case study in the Arctic Ocean during a cold-air outbreak in early winter.
- 4) T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, Y. TOBO, K. MATSUMOTO, M. YOSHIZUE, M. TAKIGAWA, and Y. KANAYA: *Earth Space Sci.*, 10, e2022EA002736 (2023), Measurements of aerosol particle size distributions and INPs over the Southern Ocean in the late austral summer of 2017 on board the R/V Mirai: Importance of the marine boundary layer structure.
- 5) Y. TOBO, J. UETAKE, H. MATSUI, N. MOTTEKI, Y. UJI, Y. IWAMOTO, K. MIURA and R. MISUMI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD033658 (2020), Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo.
- 6) M. D. PETERS and T. P. WRIGHT: *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8758–8766 (2015), Revisiting ice nucleation from precipitation samples.
- 7) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, M. KADOTA, M. MINOWA, Y. KOMURO, H. MOTOYAMA and T. AOKI: *Clim. Past*, DOI: 10.5194/cp-2020-146 (2021), Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years (2021), 17, 1341-1362, <http://doi.org/10.5194/cp-17-1341-2021>. (IF: 3.536)
- 8) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, HYVÄRINEN, E., ANDREWS, P. TUNVED, E. ASUMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATPLIS, R. KREJEI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, Y. YOSHIDA, N. MOTTEKI., Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748 (2021), Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic.
- 9) T. MORI, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. MIURA, M. HIRABAYASHI, N. OSHIMA, M. KOIKE, K. KUPIAINEN, N. MOTTEKI, S. OHATA, P. R. SINHA, K. SUGIURA, T. AOKI, M. SCHNEEBELI, K. STEFFEN, A. SATO, A. TSUSHIMA, V. MAKAROV, S. OMIYA, A. SUGIMOTO, S. TAKANO and N. NAGATSUKA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 13, 325-13,356 (2019), Black carbon and inorganic aerosols in Arctic Snowpack.
- 10) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI and M. KOIKE: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, 23, e2019D032240. <http://doi.org/10.1029/2019JD032240> (2020), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska.
- 11) H. MATSUI, H., T. MORI, S. OHATA, N. MOTTEKI, N. OSHIMA, K. GOTO-AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 8989-9009 (2022), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects.
- 12) T. MORI, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N.

- MOTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI and W. AAS: Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034110, <https://doi.org/10.1029/2020JD034110> (2021)
- 13) A. MALIK, S.G. AGGARWA, S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, P.R. SINHA, P. PATEL, B. KUMAR, K. SINGH, D. SONI and M. KOIKE: *Aerosol Air Qual. Res.*, 22, 8, 221028, <https://doi.org/10.4209/aaqr.220128> (2022), Measurement of black carbon in Delhi: Evidences of regional transport, meteorology and local sources for pollution episodes.
- 14) J. R. MCCONNELL, R. EDWARDS, G. L. KOK, M. G. FLANNER, C. S. ZENDER, E. S. SALTZMAN, J. R. BANTA, D. R. PASTERIS, M. M. CARTER and J. D. KAHL: *Science*, 317, 1381-1384 (2007), 20th-century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing.
- 15) AMAP, 2023. AMAP Assessment 2023: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway, in press.
- 16) S. DAHLKE and M. MATURILLI: *Advances in Meteorology*, 2017, 4928620 (2017), Contribution of atmospheric advection to the amplified winter warming in the Arctic North Atlantic Region.
- 17) K. ISAKSEN, Ø. NORDLI, B. IVANOV, M. A. Ø. KØLTZOW, S. AABOE, H. M. GJELTEN, A. MEZGHANI, S. EASTWOOD, E. FØRLAND, R. E. BENESTAD, I. HANSEN-BAUER, R. BRAKKAN, P. SVIASHCHENNIKOV, V. DEMIN, A. REVINA and T. KARANDASHEVA: *Sci. Rep.*, 12, 9371 (2022), Exceptional warming over the Barents area.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Moteki, N., Ohata, S., Yoshida, A., & Adachi, K. (2023). Constraining the complex refractive index of black carbon particles using the complex forward-scattering amplitude. *Aerosol Science and Technology*, in press. (Preprint is available from <https://doi.org/10.31223/X5736W>).
- 2) Moteki, N. (2023). Climate-relevant properties of black carbon aerosols revealed by in situ measurements: a review. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1), <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00544-4>.
- 3) A. YOSHIDA, N. MOTEKI, and K. ADACHI: *Aerosol Science and Technology* (2022) Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data, <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2057839>.
- 4) A. YOSHINO, A. TAKAMI, A. SHIMUZU, K. SATO, K. HAYAKAWA, N. TANG, K.-O. PHAM, A. HARA, H. NAKAMURA, H. ODAJIMA: *Applied Sciences*, 12, 11400 (2022)
“Analysis of Chemical Components of Fine Particulate Matter Observed at Fukuoka, Japan, in Spring 2020 and Their Transport Paths.”
- 5) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTEKI, N. OSHIMA, K. G. AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 13, 8989-9009 (2022) (IF:7.197), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects.
- 6) T. MORI, Y. KONDO, K. GOTO-AZUMA, N. MOTEKI, A. YOSHIDA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, S. OHATA, and M. KOIKE: *Aerosol Sci. Technol.*, 57, 1, 35-49 (2022) (IF:4.809), Measurement of number and mass size distributions of light-absorbing iron oxide aerosols in liquid water with a modified single-article soot photometer., <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2144113>.
- 7) K. GOTO-AZUMA, T. HOMMA, T. SARUYA, F. NAKAZAWA, Y. KOMURO, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, Y. KONDO, M. KOIKE, T. AOKI, R. GREVE and J. OKUNO: *Polar Science*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100621> (2021) (IF:1.389) Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate.
- 8) J. T. PASQUIER, R. O. DAVID, G. FREITAS, R. GIERENS, Y. GRAMLICH, S. HASLETT, G. LI, B. SCHAFER, K. SIEGEL, J. WIEDER, K. ADACHI, F. BELOSI, T. CARLSEN, S. DECESARI, K. EBELL, S. GILARDONI, M. GYSEL-BEER, J. HENNEBERGER, J. INOUE, Z. A. KANJI, M. KOIKE, Y. KONDO, R. KREJCI, U. LOHMANN, M. MATURILLI, M. MAZZOLLA, R. MODINI, C. MOHR, G. MOTOS, A. NENES, A. NICOSIA, S. OHATA, M. PAGLIONE, S. PARK, R. E. PILECI, F. RAMELLI, M. RINALDI, C. RITTER, K. SATO, T. STORELVMO, Y. TOBO, R. TRAVERSI, A. VIOLA and P. ZIEGER: *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 103, E2533-E2558 (2022) (IF:9.116), The Ny-Ålesund Aerosol Cloud Experiment (NASCENT): Overview and first results.
- 9) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTEKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO and Y. TOBO: *Polar Science*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100557> (2021) (IF:1.389) Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project.
- 10) R. ONG C, H. MIURA, and M. KOIKE: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78, 1129-1146, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0161.1> (2021). The Terminal Velocity of Axisymmetric Cloud and Rain Drops Evaluated by the Immersed Boundary Method.
- 11) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O.

- EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861-15881 (2021) Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring.
- 12) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERiADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTeKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748 (2021) Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic, <https://doi.org/10.5194/amt-14-6723-2021>.
- 13) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTeKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI and W. AAS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034110 (2021) Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard, <https://doi.org/10.1029/2020JD034110>.
- 14) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTeKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO, Y. TOBO, J. UKITA, and A.Y OSHIDA: *Polar Science*, 27, 100621 (2021). Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project.
- 15) K. GOTO-AZUMA, T. HOMMA, T. SARUYA, F. NAKAZAWA, Y. KOMURO, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, Y. KONDO, M. KOIKE, T. AOKI, R. GREVE, J. OKUNO: *Polar Science*, 27, 100557 (2021). Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100557>.
- 16) C.R. ONG, H. MIURA, and M. KOIKE: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78, 1129-1146 (2021). The Terminal Velocity of Axisymmetric Cloud and Rain Drops Evaluated by the Immersed Boundary Method, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0161.1>.
- 17) N. MOTeKI : *Optics Express*, 29(13), 20688-20714 (2021). Measuring the complex forward-scattering amplitude of single particles by self-reference interferometry: CAS-v1 protocol.
- 18) 吉野 彩子, 高見 昭憲, 原 圭一郎, 西田 千春, 林 政彦: *エアロゾル研究*, 36(3), 196-203 (2021) 福岡県福岡市・長崎県福江島・沖縄県辺戸岬におけるエアロゾル化学成分の特徴
- 19) 吉野彩子 高見昭憲: *大気環境学会誌 (J.Jpn. Soc. Atmos. Environ.)* Vol. 55 No. 6 pp248- (2020) 長崎福江島における大気質観測-COVID-19 による越境大気汚染への影響
- 20) N.TAKEGAWA, T. SETO, N.MOTeKI, M. KOIKE, N. OSHIMA, K. ADACHI, K. KITA, A. TAKAMI, AND Y. KONDO. *Geophys.Res. Atmos.*, 125, e2019JD031448. <https://doi.org/10.1029/2019JD031448> (2020) Enhanced New Particle Formation above the Marine 1 Boundary Layer over 2 the Yellow Sea: Potential Impacts on Cloud Condensation Nuclei.
- 21) N. MOTeKI : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 243, 106811 (2020) Capabilities and limitations of the single-particle extinction and scattering method for estimating the complex refractive index and size-distribution of spherical and non-spherical submicron particles
- 22) A. YOSHIDA, N. MOTeKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, Y. KONDO, H. MATSUI, N. OSHIMA, A. TAKAMI & K. KITA : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(15), e2019JD032301 (2020) Abundances and microphysical properties of light-absorbing iron oxide and black carbon aerosols over East Asia and the Arctic.
- 23) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTeKI, and M. KOIKE: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019D032240. <http://doi.org/10.1029/2019JD032240> (2020)(IF:3.82) Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska.
- 24) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTeKI, Y. ZHAO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA : *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1190> (2020)(IF:5.414) Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based

absorption photometers in the Arctic.

- 25) Y. TOBO, J. UETAKE, H. MATSUI, N. MOTOKI, Y. UJI, Y. IWAMOTO, K. MIURA and R. MISUMI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD033658 (2020) (IF: 3.82) Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo.
- 26) H. MATSUI and N. MOTOKI: *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088978, doi:10.1029/2020GL088978 (2020) (IF: 4.5) High sensitivity of Arctic black carbon radiative effects to sub-grid vertical velocity in aerosol activation.
- 27) T. MORI, S. OHATA, Y. MORINO, M. KOIKE, N. MOTOKI, and Y. KONDO : *Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, 96(3): 122-129 (2020) Changes in black carbon aerosols in Tokyo in 2003–2017.

【サブテーマ 2】

- 1) N. MOTOKI, S. OHATA, A. YOSHIDA, and K. ADACHI: *Aerosol Sci. Technol.*, accepted (IF: 4.809) , Constraining the complex refractive index of black carbon particles using the complex forward-scattering amplitude.
- 2) K. KAWAI, H. MATSUI, and Y. TOBO: *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL102470 (2023), Dominant role of Arctic dust with high ice nucleating ability in the Arctic lower troposphere. (IF: 5.576)
- 3) K. KAWANA, Y. MIYAZAKI, Y. OMOR, H. TANIMOTO, S. KAGAMI, K. SUZUKI, Y. YAMASHITA, J. NISHIOKA, Y. DENG, H. YAI, and M. MOCHIDA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2022JD036690 (2022) (IF: 5.217) , Number-size distribution and CCN activity of atmospheric aerosols in the western North Pacific during spring pre-bloom period: Influences of terrestrial and marine sources.
- 4) Y. DENG, H. FUJINARI, H. YAI, K. SHIMADA, Y. MIYAZAKI, E. TACHIBANA, D. K. DESHMUKH, K. KAWAMURA, T. NAKAYAMA, S. TATSUTA, M. CAI, H. XU, F. LI, H. TAN, S. OHATA, Y. KONDO, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, and M. MOCHIDA: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 5515–5533 (2022) (IF: 7.197) , Offline analysis of the chemical composition and hygroscopicity of submicrometer aerosol at an Asian outflow receptor site and comparison with online measurements.
- 5) M. LIU, H. YAO, and H. MATSUI: *Environ. Res. Lett.*, 17, 114059 (2022), Marked rebound of agricultural fire emissions in Asia after the outbreak of COVID-19. (IF: 6.947)
- 6) Q. ZHONG, N. SCHUTGENS, G. R. VAN DER WERF, T. VAN NOIJE, S. E. BAUER, K. TSIGARIDIS, T. MIELONEN, R. CHECA-GARCIA, D. NEUBAUER, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, D. J. L. OLIVIÉ, H. KOKKOLA, H. MATSUI, P. GINOUX, T. TAKEMURA, P. Le SAGER, S. RÉMY, H. BIAN, and M. CHIN: *Nat. Commun.*, 13, 5914 (2022), Using modelled relationships and satellite observations to attribute modelled aerosol biases over biomass burning regions. (IF: 14.919)
- 7) M. LIU and H. MATSUI: *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL100543 (2022), Secondary organic aerosol formation regulates cloud condensation nuclei in the global remote troposphere. (IF: 5.576)
- 8) Y. IIZUKA, R. UEMURA, H. MATSUI, N. OSHIMA, K. KAWAKAMI, S. HATTORI, H. OHNO, and S. MATOBA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2022JD036880 (2022), High flux of small sulfate aerosols during the 1970s reconstructed from the SE-Dome ice core in Greenland. (IF: 5.217)
- 9) H. MATSUI and M. LIU: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2022JD036943 (2022), Substantial uncertainties in Arctic aerosol simulations by microphysical processes within the global climate-aerosol model CAM-ATRAS. (IF: 5.217)
- 10) Q. ZHONG, N. SCHUTGENS, G. R. VAN DER WERF, T. VAN NOIJE, K. TSIGARIDIS, B. E. BAUER, T. MIELONEN, A. KIRKEVÅG, Ø. SELAND, H. KOKKOLA, R. CHECA-GARCIA, D. NEUBAUER, Z. KIPLING, H. MATSUI, P. GINOUX, T. TAKEMURA, P. Le SAGER, S. RÉMY, H. BIAN, M. CHIN, K. ZHANG, J. ZHU, S. G. TSYRO, G. CURCI, A. PROTONOTARIOU, B. JOHNSON, J. E. PENNER, N. BELLOUIN, R. B. SKEIE, and G. MYHRE: *Atmos. Chem. Phys.*, 22,

- 11009–11032 (2022), Satellite-based evaluation of AeroCom model bias in biomass burning regions. (IF: 7.197)
- 11) S. D. RATHOD, D. S. HAMILTON, L. LI, N. M. MAHOWALD, H. MATSUI, J. R. PIERCE, and T. C. BOND: *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL099323 (2022), Atmospheric radiative and oceanic biological productivity responses to increasing anthropogenic combustion-iron emission in the 1850–2010 period. (IF: 5.576)
- 12) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTTEKI, N. OSHIMA, K. GOTO-AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 8989–9009 (2022), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects. (IF: 7.197)
- 13) M. LIU, H. MATSUI, D. S. HAMILTON, K. L. LAMB, S. D. RATHOD, J. P. SCHWARZ, and N. M. MAHOWALD: *npj Clim. Atmos. Sci.*, 5, 28 (2022), The underappreciated role of anthropogenic sources in atmospheric soluble iron flux to the Southern Ocean. (IF: 9.448)
- 14) R. UEMURA, K. MASAKA, Y. IIZUKA, M. HIRABAYASHI, H. MATSUI, R. MATSUMOTO, M. UEMURA, K. FUJITA, and H. MOTOYAMA: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 578, 117299 (2022), Soluble salts in deserts as a source of sulfate aerosols in an Antarctic ice core during the last glacial period. (IF: 5.785)
- 15) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748 (2021) (IF:4.184) , Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic.
- 16) E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, A. VIRKKULA, M. GINI, K. ELEFThERIADIS, T. MÜLLER, S. OHATA, Y. KONDO and A. HYVÄRINEN: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 5397–5413 (2021) (IF:4.184) , Absorption instruments inter-comparison campaign at the Arctic Pallas station.
- 17) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA, and A. B. HERBER: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861–15881 (2021), Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring. (IF: 7.197)
- 18) K. KAWAI, H. MATSUI, R. KIMURA, and M. SHINODA: *Sci. Online Lett. Atmosphere*, 17, 239–245 (2021), High sensitivity of Asian dust emission, transport, and climate impacts to threshold friction velocity. (IF: 2.245)
- 19) M. SAND, B. H. SAMSET, G. MYHRE, J. GLIB, S. E. BAUER, H. BIAN, M. CHIN, R. CHECA-GARCIA, P. GINOX, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, H. KOKKOLA, P. LE SAGER, M. T. LUND, H. MATSUI, T. VAN NOIJE, D. J. L. OLIVIÉ, S. REMY, M. SCHULZ, P. STIER, C. W. STJERN, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, S. G. TSYRO, and D. WATSON-PARRIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15929–15947 (2021), Aerosol absorption in global models from AeroCom phase III. (IF: 7.197)
- 20) W. SU, L. LIANG, G. MYHRE, T. J. THORSEN, N. G. LOEB, G. L. SCHUSTER, P. GINOX, F. PAULOT, D. NEUBAUER, R. CHECA-GARCIA, H. MATSUI, K. TSIGARIDIS, R. B. SKEIE, T. TAKEMURA, S. E. BAUER, and M. SCHULZ: *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13, e2021MS002584 (2021), Understanding top-of-atmosphere flux bias in the AeroCom phase III models: A clear-sky perspective. (IF: 6.66)
- 21) K. KAWAI, H. MATSUI, and Y. TOBO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034263 (2021), High potential of Asian dust to act as ice nucleating particles in mixed-phase clouds simulated with a global aerosol-climate model. (IF: 5.217)
- 22) H. MATSUI and M. LIU: *J. Clim.*, 34, 7843–7856 (2021), Importance of supersaturation in Arctic

- black carbon simulations. (IF: 5.38)
- 23) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034110 (2021), Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. (IF: 5.217)
 - 24) M. LIU and H. MATSUI: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 5965–5982 (2021), Aerosol radiative forcings induced by substantial changes in anthropogenic emissions in China from 2008 to 2016. (IF: 7.197)
 - 25) J. BRAHNEY, N. MAHOWALD, M. PRANK, G. CORNWELL, Z. KLIMONT, H. MATSUI, and K. A. PRATHER: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 118, e2020719118 (2021), Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. (IF: 12.779)
 - 26) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTTEKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO, Y. TOBO, J. UKITA, and A. YOSHIDA: *Polar Sci.*, 27, 100621 (2021), Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project. (IF: 2.355)
 - 27) K. D. LAMB, H. MATSUI, J. M. KATICH, A. E. PERRING, J. R. SPACKMAN, B. WEINZIERL, M. DOLLNER, and J. P. SCHWARZ: *npj Clim. Atmos. Sci.*, 4, 15 (2021), Global-scale constraints on light-absorbing anthropogenic iron oxide aerosols. (IF: 9.448)
 - 28) M. LIU and H. MATSUI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD033890 (2021), Improved simulations of global black carbon distributions by modifying wet scavenging processes in convective and mixed-phase clouds. (IF: 5.217)
 - 29) J. GLIB, A. MORTIER, M. SCHULZ, E. ANDREWS, Y. BALKANSKI, S. E. BAUER, A. M. K. BENEDICTOW, H. BIAN, R. CHECA-GARCIA, M. CHIN, P. GINOUX, J. J. GRIESFELLER, A. HECKEL, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, H. KOKKOLA, P. LAJ, P. LE SAGER, M. T. LUND, C. L. MYHRE, H. MATSUI, G. MYHRE, D. NEUBAUER, T. VAN NOIJE, P. NORTH, D. J. L. OLIVIÉ, S. RÉMY, L. SOGACHEVA, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, and S. G. TSYRO: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 87–128 (2021), AeroCom phase III multi-model evaluation of the aerosol life cycle and optical properties using ground- and space-based remote sensing as well as surface in situ observations. (IF: 7.197)
 - 30) J. CHING, M. KAJINO, and H. MATSUI: *One Earth*, 3, 763–776 (2020), Resolving aerosol mixing state increases accuracy of black carbon respiratory deposition estimates. (IF: 14.944)
 - 31) Y. TOBO, J. UETAKE, H. MATSUI, N. MOTTEKI, Y. UJI, Y. IWAMOTO, K. MIURA, and R. MISUMI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD033658 (2020), Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo. (IF: 5.217)
 - 32) H. MATSUI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032316 (2020), Black carbon absorption efficiency under preindustrial and present-day conditions simulated by a size- and mixing-state-resolved global aerosol model. (IF: 5.217)
 - 33) D. S. HAMILTON, R. A. SCANZA, S. D. RATHOD, T. C. BOND, J. F. KOK, L. LI, H. MATSUI, and N. M. MAHOWALD: *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL089688 (2020), Recent (1980 to 2015) trends and variability in daily-to-interannual soluble iron deposition from dust, fire, and anthropogenic sources. (IF: 5.576)
 - 34) M. A. BURGOS, E. ANDREWS, G. TITOS, A. BENEDETTI, H. BIAN, V. BUCHARD, G. CURCI, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, H. KOKKOLA, A. LAAKSO, J. LETERTRE-DANCZAK, M. T. LUND, H. MATSUI, G. MYHRE, C. RANDLES, M. SCHULZ, T. VAN NOIJE, K. ZHANG, L. ALADOS-ARBOLEDAS, U. BALTENSPERGER, A. JEFFERSON, J. SHERMAN, J. SUN, E. WEINGARTNER, and P. ZIEGER: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 10231–10258 (2020), A global model-measurement evaluation of particle light scattering coefficients at elevated relative humidity. (IF: 7.197)
 - 35) H. MATSUI and N. MOTTEKI: *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088978 (2020), High sensitivity of

Arctic black carbon radiative effects to subgrid vertical velocity in aerosol activation. (IF: 5.576)

- 36) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI, and Y. KONDO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032240 (2020), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. (IF: 5.217)
- 37) A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, Y. KONDO, H. MATSUI, N. OSHIMA, A. TAKAMI, and K. KITA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032301 (2020), Abundances and microphysical properties of light-absorbing iron oxide and black carbon aerosols over East Asia and the Arctic. (IF: 5.217)

【サブテーマ 3】

- 1) C. H. WHALEY, K. S. LAW, J. L. HJORTH, H. SKOV, S. R. ARNOLD, J. LANGNER, J. B. PERNOV, G. BERGERON, I. BOURGEOIS, J. H. CHRISTENSEN, R.-Y. CHIEN, M. DEUSHI, X. DONG, P. EFFERTZ, G. FALUVEGI, M. FLANNER, J. S. FU, M. GAUSS, G. HUEY, U. IM, R. KIVI, L. MARELLE, T. ONISHI, N. OSHIMA, I. PETROPAVLOVSKIKH, J. PEISCHL, D. A. PLUMMER, L. POZZOLI, J.-C. RAUT, T. RYERSON, R. SKEIE, S. SOLBERG, M. A. THOMAS, C. THOMPSON, K. TSIGARIDIS, S. TSYRO, S. T. TURNOCK, K. VON SALZEN and D. W. TARASICK: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 637-661 (2023), Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance. (IF:7.197)
- 2) K. ADACHI, 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, and P. R. BUSECK: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035657 (2022), Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke. (IF:5.217)
- 3) P. ZANIS, D. AKRITIDIS, S. TURNOCK, V. NAIK, S. SZOPA, A. K. GEORGOULIAS, S. E. BAUER, M. DEUSHI, L. W. HOROWITZ, J. KEEBLE, P. LE SAGER, F. M. O'CONNOR, N. OSHIMA, K. TSIGARIDIS, and T. VAN NOIJE: *Environ. Res. Lett.*, 17 024014 (2022), Climate change penalty and benefit on surface ozone: a global perspective based on CMIP6 earth system models. (IF:6.947)
- 4) T. AIZAWA, N. OSHIMA and S. YUKIMOTO: *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097093 (2022) Contributions of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability to mid-20th century Arctic cooling—CMIP6/DAMIP multimodel analysis. (IF:5.576)
- 5) H. BOWMAN, S. TURNOCK, S. E. BAUER, K. TSIGARIDIS, M. DEUSHI, N. OSHIMA, F. M. O'CONNOR, L. HOROWITZ, T. WU, J. ZHANG, D. KUBISTIN and D. D. PARRISH: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 3507–3524 (2022), Changes in anthropogenic precursor emissions drive shifts in the ozone seasonal cycle throughout the northern midlatitude troposphere. (IF:7.197)
- 6) A. YOSHIDA, N. MOTTEKI and K. ADACHI: *Aerosol Science and Technology*, 56, 609-622 (2022) Identification and particle sizing of submicron mineral dust by using complex forward-scattering amplitude data (IF:4.809)
- 7) C. H. WHALEY, R. MAHMOOD, K. VON SALZEN, B. WINTER, S. ECKHARDT, S. ARNOLD, S. BEAGLEY, S. BECAGLI, R.-Y. CHIEN, J. CHRISTENSEN, S. M. DAMANI, X. DONG, K. ELEFThERIADIS, N. EVANGELIOU, G. FALUVEGI, M. FLANNER, J. S. FU, M. GAUSS, F. GIARDI, W. GONG, J. L. HJORTH, L. HUANG, U. IM, Y. KANAYA, S. KRISHNAN, Z. KLIMONT, T. KÜHN, J. LANGNER, K. S. LAW, L. MARELLE, A. MASSLING, D. OLIVIÉ, T. ONISHI, N. OSHIMA, Y. PENG, D. A. PLUMMER, O. POPOVICHEVA, L. POZZOLI, J.-C. RAUT, M. SAND, L. N. SAUNDERS, J. SCHMALE, S. SHARMA, R. B. SKEIE, H. SKOV, F. TAKETANI, M. A. THOMAS, R. TRAVERSI, K. TSIGARIDIS, S. TSYRO, S. TURNOCK, V. VITALE, KALEY A. WALKER, M. WANG, D. WATSON-PARRIS and T. WEISS-GIBBONS: *Atmos. Chem. Phys.*, 22,

- 5775–5828 (2022), Model evaluation of short-lived climate forcers for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species, multi-model study. (IF:7.197)
- 8) K. ADACHI, N. OSHIMA, N. TAKEGAWA, N. MOTEKI, and M. KOIKE: *Communications Earth & Environment*, 3, 134 (2022), Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. (IF:7.29)
 - 9) T. HASSAN, R. J. ALLEN, W. LIU, S. SHIM, T. VAN NOIJE, P. LE SAGER, N. OSHIMA, M. DEUSHI, C. A. RANDLES and F. M. O’CONNOR: *Communications Earth & Environment*, 3, 149 (2022), Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic Meridional Overturning Circulation through radiative forcing effects. (IF:7.29)
 - 10) T. KOSHIRO, H. KAWAI and A. T. NODA: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, 119, e2200635119 (2022), Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. (IF:12.779)
 - 11) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTEKI, N. OSHIMA, K. GOTO-AZUMA, M. KOIKE and Y. KONDO: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 8989-9009 (2022), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects. (IF:7.197)
 - 12) G. ZENG, O. MORGENSTERN, J. H. T. WILLIAMS, F. M. O’CONNOR, P. T. GRIFFITHS, J. KEEBLE, M. DEUSHI, L. W. HOROWITZ, V. NAIK, L. K. EMMONS, N. L. ABRAHAM, A. T. ARCHIBALD, S. E. BAUER, B. HASSLER, M. MICHOU, M. J. MILLS, L. T. MURRAY, N. OSHIMA, L. T. SENTMAN, S. TILMES, K. TSIGARIDIS, and P. J. YOUNG: *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 127, e2022JD036452 (2022), Attribution of stratospheric and tropospheric ozone changes between 1850 and 2014 in CMIP6 models. (IF:5.217)
 - 13) Y. IIZUKA, R. UEMURA, H. MATSUI, N. OSHIMA, K. KAWAKAMI, S. HATTORI, H. OHNO and S. MATOBA: *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 127, e2022JD036880 (2022), High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland. (IF:5.217)
 - 14) 大島長: *エアロゾル研究*, 37, 189-200 (2022), 気候システムでエアロゾルがもたらす便益と不利益
 - 15) F. BROWN, G. A. FOLBERTH, S. SITCH, S. BAUER, M. BAUTERS, P. BOECKX, A. W. CHEESMAN, M. DEUSHI, I. D. SANTOS, C. GALY-LACAUX, J. HAYWOOD, J. KEEBLE, L. M. MERCADO, F. M. O’CONNOR, N. OSHIMA, K. TSIGARIDIS and H. VERBEECK: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 12331-12352 (2022), The ozone–climate penalty over South America and Africa by 2100. (IF:7.197)
 - 16) S. YUKIMOTO, N. OSHIMA, H. KAWAI, M. DEUSHI and T. AIZAWA: *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100335 (2022), Role of interhemispheric heat transport and global atmospheric cooling in multidecadal trends of northern hemisphere precipitation (IF:5.576)
 - 17) Y. USHIJIMA, H. TSUJINO, K. SAKAMOTO, M. ISHII, T. KOSHIRO, and N. OSHIMA: *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099987 (2022), Effects of Anthropogenic Forcings on Multidecadal Variability of the Sea Level Around the Japanese Coast Simulated by MRI-ESM2.0 for CMIP6. (IF:5.576)
 - 18) K. VON SALZEN, C. H. WHALEY, S. C. ANENBERG, R. V. DINGENEN, Z. KLIMONT, M. G. FLANNER, R. MAHMOOD, S. R. ARNOLD, S. BEAGLEY, R. Y. CHIEN, J. H. CHRISTENSEN, S. ECKHARDT, A. M. L. EKMAN, N. EVANGELIOU, G. FALUVEGI, J. S. FU, M. GAUSS, W. GONG, J. L. HJORTH, U. IM, S. KRISHNAN, K. KUPIAINEN, T. KÜHN, J. LANGNER, K. S. LAW, L. MARELLE, D. OLIVIÉ, T. ONISHI, N. OSHIMA, V. V. PAUNU, Y. PENG, D. PLUMMER, L. POZZOLI, S. RAO, J. C. RAUT, M. SAND, J. SCHMALE, M. SIGMOND, M. A. THOMAS, K.

- TSIGARIDIS, S. G. TSYRO, S. T. TURNOCK, M. WANG and B. WINTER: *Communications Earth & Environment*, 3, 222 (2022), Clean air policies are key for successfully mitigating Arctic warming. (IF:7.29)
- 19) H. KAWAI, K. YOSHIDA, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, e2022MS003128 (2022), Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models. (IF:6.66)
- 20) T. MAKI, T. Y. TANAKA, T. KOSHIRO, A. SHIMIZU, T. T. SEKIYAMA, M. KAJINO, Y. KUROSAKI, T. OKURO and N. OSHIMA: *SOLA*, 18, 218-224 (2022), Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. (IF:2.245)
- 21) K. ADACHI, Y. TOBO, M. KOIKE, G. FREITAS, P. ZIEGER and R. KREJCI: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 14421–14439 (2022), Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard. (IF:7.197)
- 22) J. T. PASQUIER, R. O. DAVID, G. FREITAS, R. GIERENS, Y. GRAMLICH, S. HASLETT, G. LI B. SCHÄFER, K. SIEGEL, J. WIEDER K. ADACHI, F. BELOSI, T. CARLSEN, S. DECESARI, K. EBELL, S. GILARDONI, M. GYSEL-BEER, J. HENNEBERGER, J. INOUE, Z. A. KANJI, M. KOIKE, Y. KONDO, R. KREJCI, U. LOHMANN, M. MATURILLI, M. MAZZOLLA, R. MODINI, C. MOHR, G. MOTOS, A. NENES, A. NICOSIA, S. OHATA, M. PAGLIONE, S. PARK, R. E. PILECI, F. RAMELLI, M. RINALDI, C. RITTER, K. SATO, T. STORELVMO, Y. TOBO, R. TRAVERSI, A. VIOLA and P. ZIEGER: *B. Am. Meteorol. Soc.*, 103, 11 (2022), The Ny-Ålesund Aerosol Cloud Experiment (NASCENT): Overview and First Results. (IF:9.116)
- 23) G. D. THORNHILL, W. J. COLLINS, R. J. KRAMER, D. OLIVÍE, R. B. SKEIE, F. M. O'CONNOR, N. L. ABRAHAM, R. CHECA-GARCIA, S. E. BAUER, M. DEUSHI, L. K. EMMONS, P. M. FORSTER, L. W. HOROWITZ, B. JOHNSON, J. KEEBLE, J.-F. LAMARQUE, M. MICHOU, M. J. MILLS, J. P. MULCAHY, G. MYHRE, P. NABAT, V. NAIK, N. OSHIMA, M. SCHULZ, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, S. TILMES, T. WU, G. ZENG and J. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 853–874 (2021), Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols – a multi-model comparison. (IF:7.197)
- 24) R. J. ALLEN, L. W. HOROWITZ, V. NAIK, N. OSHIMA, F. M. O'CONNOR, S. TURNOCK, S. SHIM, P. LE SAGER, T. VAN NOIJE, K. TSIGARIDIS, S. E. BAUER, L. T. SENTMAN, J. G. JOHN, C. BRODERICK, M. DEUSHI, G. A. FOLBERTH, S. FUJIMORI and W. J. COLLINS: *Environ. Res. Lett.*, 16, 034010 (2021), Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions. (IF:6.947)
- 25) 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: *雪氷*, 83(1), 27-50 (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.
- 26) K. ADACHI, N. OSHIMA, S. OHATA, A. YOSHIDA, N. MOTEKI and M. KOIKE: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 3607–3626 (2021), Compositions and mixing states of aerosol particles by aircraft observations in the Arctic springtime, 2018. (IF:7.197)
- 27) P. T. GRIFFITHS, L. T. MURRAY, G. ZENG, Y. M. SHIN, N. L. ABRAHAM, A. T. ARCHIBALD, M. DEUSHI, L. K. EMMONS, I. E. GALBALLY, B. HASSLER, L. W. HOROWITZ, J. KEEBLE, J. LIU, O. MOEINI, V. NAIK, F. M. O'CONNOR, N. OSHIMA, D. TARASICK, S. TILMES, S. T. TURNOCK, O. WILD, P. J. YOUNG and P. ZANIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 4187–4218 (2021) Tropospheric ozone in CMIP6 simulations. (IF:7.197)
- 28) T. AMINO, Y. IIZUKA, S. MATOBA, R. SHIMDA, N. OSHIMA, T. SUZUKI, T. ANDO, T. AOKI, and K. FUJITA: *Polar Science*, 27, 100599 (2021), Increasing dust emission from ice free terrain in

- southeastern Greenland since 2000. (IF:2.355)
- 29) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTTEKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO, Y. TOBO, J. UKITA and A. YOSHIDA: *Polar Science*, 27, 100621 (2021), Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project. (IF:2.355)
- 30) 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: *雪氷*, 83(2), 169-191 (2021), SIGMA 及び関連プロジェクトによるグリーンランド氷床の上の大気・雪氷・雪氷微生物研究- ArCS IIプロジェクトへのつながり -.
- 31) C. D. JONES, J. E. HICKMAN, S. T. RUMBOLD, J. WALTON, R. D. LAMBOLL, R. B. SKEIE, S. FIEDLER, P. M. FORSTER, J. ROGELJ, M. ABE, M. BOTZET, K. CALVIN, C. CASSOU, J. N. S. COLE, P. DAVINI, M. DEUSHI, M. DIX, J. C. FYFE, N. P. GILLET, T. ILYINA, M. KAWAMIYA, M. KELLEY, S. KHARIN, T. KOSHIRO, H. LI, C. MACKALLAH, W. A. MÜLLER, P. NABAT, T. NOIJE, P. NOLAN, R. OHGAITO, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, J. PARODI, T. J. REERINK, L. REN, A. ROMANOU, R. SÉFÉRIAN, Y. TANG, C. TIMMRECK, J. TJIPUTRA, E. TOURIGNY, K. TSIGARIDIS, H. WANG, M. WU, K. WYSER, S. YANG, Y. YANG and T. ZIEHN: *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091883 (2021), The climate response to emissions reductions due to COVID-19: Initial results from CovidMIP. (IF:5.576)
- 32) T. AIZAWA, M. ISHII, N. OSHIMA, S. YUKIMOTO and H. HASUMI: *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092336 (2021), Arctic warming and associated sea ice reduction in the early 20th century induced by natural forcings in MRI-ESM2.0 climate simulations and multimodel analyses. (IF:5.576)
- 33) M. KAJINO, M. DEUSHI, T. T. SEKIYAMA, N. OSHIMA, K. YUMIMOTO, T. Y. TANAKA, J. CHING, A. HASHIMOTO, T. YAMAMOTO, M. IKEGAMI, A. KAMADA, M. MIYASHITA, Y. INOMATA, S. SHIMA, P. KHATRI, A. SHIMIZU, H. IRIE, K. ADACHI, Y. ZAIZEN, Y. IGARASHI, H. UEDA, T. MAKI and M. MIKAMI: *Geosci. Model Dev.*, 14, 2235–2264 (2021), Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. (IF:6.892)
- 34) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034110 (2021) Seasonal Variation of Wet Deposition of Black Carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. (IF:5.217)
- 35) D. D. PARRISH, R. G. DERWENT, S. T. TURNOCK, F. M. O'CONNOR, J. STAEHELIN, S. E. BAUER, M. DEUSHI, N. OSHIMA, K. TSIGARIDIS, T. WU and J. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 9669–9679 (2021), Investigations on the anthropogenic reversal of the natural ozone gradient between northern and southern midlatitudes. (IF:7.197)
- 36) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 6723–6748 (2021) ,Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic. (IF:4.184)
- 37) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15861–15881 (2021) ,Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring. (IF:7.197)
- 38) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *Atmospheric Science Letters*, 22, e1064 (2021)

Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the double-intertropical convergence zone problem in MRI-ESM2. (IF:2.992)

- 39) A. YOSHIDA, N. MOTOKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, Y. KONDO, H. MATSUI, N. OSHIMA, A. TAKAMI and K. KITA: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032301 (2020), Abundances and microphysical properties of light-absorbing iron oxide and black carbon aerosols over East Asia and the Arctic. (IF:5.217)
- 40) P. ZANIS, D. AKRITIDIS, A. K. GEORGOULIAS, R. J. ALLEN, S. E. BAUER, O. BOUCHER, J. COLE, B. JOHNSON, M. DEUSHI, M. MICHOU, J. MULCAHY, P. NABAT, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, A. SIMA, M. SCHULZ, T. TAKEMURA and K. TSIGARIDIS: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8381–8404 (2020), Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study. (IF:7.197)
- 41) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTOKI and M. KOIKE: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032240 (2020), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. (IF:5.217)
- 42) N. OSHIMA, S. YUKIMOTO, M. DEUSHI, T. KOSHIRO, H. KAWAI, T. Y. TANAKA and K. YOSHIDA: *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 38 (2020), Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. (IF:3.875)
- 43) R. J. ALLEN, S. TURNOCK, P. NABAT, D. NEUBAUER, U. LOHMANN, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, M. MICHOU, T. WU, J. ZHANG, T. TAKEMURA, M. SCHULZ, K. TSIGARIDIS, S. E. BAUER, L. EMMONS, L. HOROWITZ, V. NAIK, T. VAN NOIJE, T. BERGMAN, J.-F. LAMARQUE, P. ZANIS, I. TEGEN, D. M. WESTERVELT, P. LE SAGER, P. GOOD, S. SHIM, F. O'CONNOR, D. AKRITIDIS, A. K. GEORGOULIAS, M. DEUSHI, L. T. SENTMAN, J. G. JOHN, S. FUJIMORI and W. J. COLLINS: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9641–9663 (2020), Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. (IF:7.197)
- 44) K. ADACHI, N. OSHIMA, Z. GONG, S. DE SÁ, A. P. BATEMAN, S. T. MARTIN, J. F. DE BRITO, P. ARTAXO, G. G. CIRINO, A. J. SEDLACEK III and P. R. BUSECK: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11923–11939 (2020), Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy. (IF:7.197)
- 45) S. T. TURNOCK, R. J. ALLEN, M. ANDREWS, S. E. BAUER, M. DEUSHI, L. EMMONS, P. GOOD, L. HOROWITZ, J. G. JOHN, M. MICHOU, P. NABAT, V. NAIK, D. NEUBAUER, F. M. O'CONNOR, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, M. SCHULZ, A. SELLAR, S. SHIM, T. TAKEMURA, S. TILMES, K. TSIGARIDIS, T. WU and J. ZHANG: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14547–14579 (2020) Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models. (IF:7.197)
- 46) K. O. MOSEID, M. SCHULZ, T. STORELVMO, I. R. JULSRUD, D. OLIVIÉ, P. NABAT, M. WILD, J. N. S. COLE, T. TAKEMURA, N. OSHIMA, S. E. BAUER and G. GASTINEAU: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 16023–16040 (2020), Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening. (IF:7.197)

【サブテーマ 4】

- 1) K. KAWAI, H. MATSUI and Y. TOBO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 50, e2022GL102470 (2023) (IF:5.217), Dominant role of Arctic dust with high ice nucleating ability in the Arctic lower troposphere. (in press)
- 2) T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, Y. TOBO, K. MATSUMOTO, M. YOSHIZUE, M. TAKIGAWA, and Y. KANAYA: *Earth Space Sci.*, 10, e2022EA002736 (2023) (IF:3.680), Measurements of aerosol particle size distributions and INPs over the Southern Ocean in the late austral summer of 2017 on board the R/V Mirai: Importance of the marine boundary layer structure.
- 3) 松井仁志、大畑祥、當房豊、松木篤、板橋秀一、大島長、鈴木健太郎、佐藤 陽祐：大気化学研究、48, 048A01 (2023), エアロゾル-放射・雲相互作用。

- 4) K. ADACHI, Y. TOBO, M. KOIKE, G. FREITAS, P. ZIEGER and R. KREJCI: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 14421-14439 (2022) (IF:7.197), Composition and mixing state of Arctic aerosol and cloud residual particles from long-term single-particle observations at Zeppelin Observatory, Svalbard.
- 5) H. MATSUI, T. MORI, S. OHATA, N. MOTTEKI, N. OSHIMA, K. G. AZUMA, M. KOIKE, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 13, 8989-9009 (2022) (IF:7.197), Contrasting source contributions of Arctic black carbon to atmospheric concentrations, deposition flux, and atmospheric and snow radiative effects.
- 6) Y. DENG, H. FUJINARI, H. YAI, K. SHIMADA, Y. MIYAZAK, E. TACHIBANA, D. K. DESHMUKH, K. KAWAMURA, T. NAKAYAMA, S. TATSUTA, M. CAI, H. XU, F. LI, H. TAN, S. OHATA, Y. KONDO, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, and M. MOCHIDA: *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 8, 5515-5533 (2022) (IF:7.197), Offline analysis of the chemical composition and hygroscopicity of sub-micrometer aerosol at an Asian outflow receptor site and comparison with online measurements.
- 7) J. T. PASQUIER, R. O. DAVID, G. FREITAS, R. GIERENS, Y. GRAMLICH, S. HASLETT, G. Li, B. SCHAFER, K. SIEGEL, J. WIEDER, K. ADACHI, F. BELOSI, T. CARLSEN, S. DECESARI, K. EBELL, S. GILARDONI, M. GYSEL-BEER, J. HENNEBERGER, J. INOUE, Z. A. KANJI, M. KOIKE, Y. KONDO, R. KREJCI, U. LOHMANN, M. MATURILLI, M. MAZZOLLA, R. MODINI, C. MOHR, G. MOTOS, A. NENES, A. NICOSIA, S. OHATA, M. PAGLIONE, S. PARK, R. E. PILECI, F. RAMELLI, M. RINALDI, C. RITTER, K. SATO, T. STORELVMO, Y. TOBO, R. TRAVERSI, A. VIOLA and P. ZIEGER: *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 103, E2533-E2558 (2022) (IF:9.116), The Ny-Ålesund Aerosol Cloud Experiment (NASCENT): Overview and first results.
- 8) 三隅良平、岩本洋子、當房豊、森樹大、三浦 和彦 : エアロゾル研究、37, 96-103 (2022), 東京スカイツリーでのエアロゾル・雲研究.
- 9) R. MISUMI, Y. UJI, K. MIURA, T. MORI, Y. TOBO and Y. IWAMOTO: *Atmos. Res.*, 272, 10650 (2022), Classification of aerosol-cloud interaction regimes over Tokyo.
- 10) T. MORI, Y. KONDO, K. GOTO-AZUMA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, S. OHATA, and M. KOIKE: *Aerosol Sci. Technol.*, 57, 1, 35-49 (2022) (IF:4.809), Measurement of number and mass size distributions of light-absorbing iron oxide aerosols in liquid water with a modified single-particle soot photometer., <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2144113>.
- 11) A. MALIK, S.G. AGGARWA, S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, P.R. SINHA, P. PATEL, B. KUMAR, K. SINGH, D. SONI, and M. KOIKE: *Aerosol Air Qual. Res.*, 22, 8, 221028 (2022) (IF:4.53), Measurement of black carbon in Delhi: Evidences of regional transport, meteorology and local sources for pollution episodes., <https://doi.org/10.4209/aaqr.220128>.
- 12) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVARINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 10, 6723-6748 (2021) (IF:4.184), Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic.
- 13) J. INOUE, Y. TOBO, F. TAKETANI and K. SATO: *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL094646 (2021) (IF:5.576), Oceanic supply of ice-nucleating particles and its effect on ice cloud formation: A case study in the Arctic Ocean during a cold-air outbreak in early winter.
- 14) E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, A. VIRKKULA, M. GINI, K. ELEFThERIADIS, T. MÜLLER, S. OHATA, Y. KONDO and A. HYVÄRINEN: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 8, 5397-5413 (2021) (IF:4.184), Absorption instruments inter-comparison campaign at the Arctic Pallas station. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5397-2021>
- 15) J. INOUE, Y. TOBO, K. SATO, F. TAKETANI and M. MATURILLI: *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 7, 4971-4987 (2021) (IF:4.184), Application of cloud particle sensor sondes for estimating the number concentration

- of cloud water droplets and liquid water content: case studies in the Arctic region.
- 16) K. KAWAI, H. MATSUI and Y. TOBO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034263 (2021) (IF:5.217), High potential of Asian dust to act as ice nucleating particles in mixed-phase clouds simulated with a global aerosol-climate model.
 - 17) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034110 (2021) (IF:5.217), Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard.
 - 18) J. UETAKE, Y. TOBO, S. KOBAYASHI, K. TANAKA, S. WATANABE, P. J. DEMOTT and S. M. KREIDENWEIS: *Sci. Total Environ.*, 788, 147623 (2021) (IF:10.754), Visualization of the seasonal shift of a variety of airborne pollens in western Tokyo.
 - 19) M. KOIKE, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, H. MATSUI, T. MORI, N. MOTEKI, S. OHATA, H. OKAMOTO, N. OSHIMA, K. SATO, T. TAKANO, Y. TOBO, J. UKITA and A. YOSHIDA: *Polar Sci.*, 27, 100621 (2021) (IF:2.355), Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project.
 - 20) F. NAKAZAWA, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, K. GOTO-AZUMA, J. P. STEFFENSEN and D. DAHL-JENSEN: *Polar Sci.*, 27, 100597 (2021) (IF:2.355), Variation in recent annual snow deposition and seasonality of snow chemistry at the east Greenland ice core project (EGRIP) camp, Greenland.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100597>
 - 21) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, M. HIRABAYASHI, K. GOTO-AZUMA, N. NAGATSUKA, W. SHIGEYAMA, S. MATOBA, T. HOMMA, J. P. STEFFENSEN and D. DAHL-JENSEN: *Polar Sci.*, 27, 100568 (2021) (IF:2.355), Temporal and spatial variabilities in surface mass balance at the EGRIP site, Greenland from 2009 to 2017. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100568>
 - 22) K. GOTO-AZUMA, T. HOMMA, T. SARUYA, F. NAKAZAWA, Y. KOMURO, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, Y. KONDO, M. KOIKE, T. AOKI, R. GREVE and J. OKUNO: *Polar Sci.*, 27, 100621 (2021) (IF:2.355), Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100621>
 - 23) C. CHO, J. P. SCHWARZ, A. E. PERRING, K. D. LAMB, Y. KONDO, J.-UK PARK, D.-H. PARK, K. SHIM, J.-S. PARK, R. J. PARK, M. LEE, C.-KEUN SONG and S.-W. KIM: *Sci. Total Environ.*, 773, 145531 (2021) (IF: 10.754), Light-absorption enhancement of black carbon in the Asian outflow inferred from airborne SP2 and in-situ measurements during KORUS-AQ.
 - 24) 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：雪氷、83, 2, 169-191 (2021), SIGMA及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
 - 25) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, M. KADOTA, M. MINOWA, Y. KOMURO, H. MOTOYAMA and T. AOKI: *Clim. Past*, 17, 3, 1341-1362 (2021) (IF:4.498), Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-146>
 - 26) T. UCHIDA, W. SHIGEYAMA, I. OYABU, K. GOTO-AZUMA, F. NAKAZAWA, T. HOMMA, K. KAWAMURA and D. DAHL-JENSEN: *J. Glaciol.* 68, 269, 546-556, (2021) (IF:4.278), Discovery of argon in air-hydrate crystals in a deep ice core using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.115>
 - 27) W. SHIGEYAMA, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, T. HOMMA, N. NAGATSUKA, R. V. MATEIU, M. TAKATQA, N. AZUMA and D. DAHL-JENSEN: *Polar Data Journal*, 5, 99-124 (2021), Microparticles in a deep ice core drilled at NEEM, Greenland: cryogenic scanning electron microscopic observations of

location, size, shape, and constituent elements.

- 28) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, K. IKEDA, H. TANIMOTO, D. YAMADA, D. NARITA, Y. KONDO, and Z. KLIMONT, *Sci. Rep.*, 11, 1, 23378 (2021) (IF:4.997), Dominance of the residential sector in Chinese black carbon emissions as identified from downwind atmospheric observations during the COVID-19 pandemic., <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02518-2>.
- 29) Y. TOBO, J. UETAKE, H. MATSUI, N. MOTTEKI, Y. UJI, Y. IWAMOTO, K. MIURA and R. MISUMI: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, 23, e2020JD033658 (2020) (IF:5.217), Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo.
- 30) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI, and M. KOIKE: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, 16, e2019D032240 (2020) (IF:5.217), Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska., <http://doi.org/10.1029/2019JD032240>
- 31) A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, Y. KONDO, H. MATSUI, N. OSHIMA, A. TAKAMI, and K. KITA: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, 15, e2019D032301 (2020) (IF:5.217), Abundances and microphysical properties of light-absorbing iron oxide and black carbon aerosols over the East Asian and Arctic regions., <http://doi.org/10.1029/2019JD032301>.
- 32) N. TAKEGAWA, T. SETO, N. MOTTEKI, M. KOIKE, N. OSHIMA, K. ADACHI, K. KITA, A. TAKAMI, and Y. KONDO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, 9, e2019JD031448 (2020) (IF:5.217), Enhanced new particle formation above the marine boundary layer over the Yellow Sea: Potential impacts on cloud condensation nuclei.
- 33) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, Y. KOMAZAKI, K. IKEDA, Y. KONDO and Z. KLIMONT: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11, 6339-6356 (2020) (IF:7.197), Rapid reduction of black carbon emissions from China based on 2009–2019 observations from Fukue Island, Japan., <https://doi.org/10.5194/acp-20-6339-2020>.
- 34) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 10 (2020) (IF:4.184), Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic., <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1190>

<査読付き論文に準ずる成果発表>

- 【サブテーマ 1】 「特に記載すべき事項はない」
- 【サブテーマ 2】 「特に記載すべき事項はない」
- 【サブテーマ 3】 「特に記載すべき事項はない」
- 【サブテーマ 4】 「特に記載すべき事項はない」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 【サブテーマ 1】 「特に記載すべき事項はない」
 - 【サブテーマ 2】 「特に記載すべき事項はない」
 - 【サブテーマ 3】
- 1) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, 52, 707-708 (2022), Cloud feedbacks in MRI-ESM2.
- 2) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: *CAS/JSC WGNE Research Activities in Earth System Modelling/WMO*, 50, 709-710 (2020), Relationship between shortwave radiation bias over the Southern Ocean and the ITCZ in MRI-ESM2.

【サブテーマ4】

- 1) M. SCHNAITER, F. M, C. LINKE, E. ASMI, H. SERVOMAA3, A. HYVÄRINEN, S. OHATA, Y. KONDO, and E. JÄRVINEN: Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint] (2023), The Four-Wavelength Photoacoustic Aerosol Absorption Spectrometer PAAS-4, <https://doi.org/10.5194/amt-2022-332>, in review.
- 2) 猪上淳、當房豊：北極環境研究コンソーシアムニュースレター、12, 4 (2022), 「IASC AWG 大気科学分科会 会合報告」
- 3) 佐藤陽祐、大友啓嗣、井村裕紀、藤野梨紗子、近藤誠、荒木健太郎、山下克也、當房豊：天気 69, 387-393 (2022), 「2021年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会 報告」
- 4) 當房豊、猪上淳：北極環境研究コンソーシアムニュースレター、11, 5 (2021), 「IASC AWG 大気科学分科会 会合報告」
- 5) 荒木健太郎、志田純哉、近藤誠、藤倉理人、南孝太郎、稲垣実央、山下克也、佐藤陽祐、當房豊：天気、68, 391-397 (2021), 2020年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告」
- 6) 猪上淳、當房豊：北極環境研究コンソーシアムニュースレター、10, 5-6 (2020), 「IASC AWG 大気科学分科会 会合報告」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) K. GOTO-AZUMA, N. MOTOKI, K. FUKUDA, J. OGATA, T. MORI, S. OHATA, Y. KONDO, M. KOIKE, M. HIRABAYASHI, K. KITAMURA, A. YONEKURA, S. FUJITA, F. NAKAZAWA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA and K. KAWAMURA, The 12th Symposium on Polar Science, Online (2021) Continuous flow analysis of black carbon in Dome Fuji deep ice core over Termination I using a wide-range single-particle soot photometer
- 2) Y. TOBO, H. MATSUI, K. KAWAI, S. OHATA, Y. KONDO, O. HERMANSEN, J. INOUE and M. KOIKE, 12th Symposium on Polar Science, Online (2021) Year-round measurements of ice nucleating particles in Svalbard during MOSAiC 2019/20
- 3) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFTHERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTOKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA, and N. OSHIMA, The 12th symposium on polar science, Online (2021) Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic
- 4) K. GOTO-AZUMA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, Y. KONDO, R. DALLMAYR, J. OGATA, N. MOTOKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, K. FUKUDA, M. HIRABAYASHI, S. MATOBA, Y. KOMURO, A. TSUSHIMA, N. NAGATSUKA, K. FUJITA, N. OSHIMA, K. KITAMURA, K. KAWAMURA and T. AOKI, The 12th Symposium on Polar Science, Online (2021) Concentrations and sizes of black carbon originated from anthropogenic and biomass burning emissions in Northwest Greenland over the past 350 years
- 5) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFTHERIADIS, S. VRATOLIS, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTOKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA, PACES 4th Open Science Meeting, Online (2021) Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic
- 6) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTOKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI and W. AAS, PACES 4th Open Science Meeting, Online (2021) Seasonal variations of wet deposition of black carbon at Ny-Alesund in Svalbard and at Barrow in Alaska

- 7) 森樹大, 近藤豊, 大畑祥, 東久美子, 福田かおり, 小川佳美, 茂木信宏, 吉田淳, 小池真, Sinha, P. R., 大島長, 松井仁志, 當房豊, 矢吹正教, Aas, W., 日本地球惑星連合2021年大会, オンライン (2021) ニーオルスンにおける黒色炭素粒子の湿性沈着に関する研究 Seasonal Variations of Wet Deposition of Black Carbon at Ny-Ålesund, Svalbard
- 8) K. GOTO-AZUMA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, Y. KONDO, R. DALLMAYR, J. OGATA, N. MOTTEKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, F. KAORI, M. HIRABAYASHI, S. MATOBA, Y. KOMURO, A. TSUSHIMA, N. NAGATSUKA, K. FUJITA, N. OSHIMA, K. KITAMURA, K. KAWAMURA, W. SHIGEYAMA, H. MOTOYAMA and T. AOKI, 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン (2021) A biomass burning record over the past 350 years in an ice core from Northwest Greenland
- 9) T. AOKI, K. GOTO-AZUMA, S. MATOBA, R. SHIMADA, Y. KONDO, N. MOTTEKI, M. KOIKE, K. FUJITA, H. MOTOYAMA, and M. HORI, 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン (2021) Possible albedo reduction of snow surface due to black carbon over the past 350 years on the Greenland Ice Sheet estimated from the SIGMA-D ice core
- 10) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER, 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン (2021) Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring
- 11) 大畑 祥, 茂木 信宏, 川中子 ひかる, 當房 豊, 足立 光司, 持田 陸宏, 第26回大気化学討論会, オンライン (2021) SPES法に基づく名古屋都市大気の水溶性エアロゾルの観測
- 12) 當房豊, 松井仁志, 河合慶, 大畑祥, 近藤豊, O. HERMANSEN, 猪上淳, 小池真, 2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会 (2022) MOSAiCの期間におけるスヴァールバル諸島での氷晶核粒子の季節変動
- 13) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI, and M. KOIKE: JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (Online) (2020) Black carbon and inorganic aerosols in Arctic snowpack.
- 14) 吉田淳, 茂木信宏, 大畑祥, 森樹大, 小池真, 近藤豊, 松井仁志, 大島長, 高見昭憲, 北和之: 日本地球惑星連合2020年大会(オンライン開催) (2020) 航空機を用いた東アジアおよび北極域における黒色炭素と酸化鉄エアロゾルの動態研究.
- 15) 高橋暢宏, 小池真, 日本地球惑星連合2020年大会 (オンライン開催) (2020) 大型研究 「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」について.
- 16) 吉野彩子, 高見昭憲, 鶴野伊津志, 林政彦, 原圭一郎, 西田千春, 第37回エアロゾル科学・技術研究討論会(オンライン開催) (2020) 春季福岡, 福江における粒子の質量と化学組成の変化.
- 17) 森樹大, 東久美子, 近藤豊, 塚川佳美, 三浦和彦, 平林幹啓, 小池真, 茂木信宏, 大畑祥, 大島長, 杉浦幸之助, 青木輝夫, Martin Schneebeli, 佐藤篤司, 對馬茜, Vladimir Makarov, 大宮哲, 杉本敦子, 鷹野真也 : 第37回エアロゾル科学技術研究討論会(オンライン開催) (2020) 北極域に沈着したBC 濃度と粒径分布.
- 18) 森樹大, 近藤豊, 福田かおり, 當房豊, 東久美子, 大畑祥, 松井仁志, P. R. SINHA, 大島長, 矢吹正教, 茂木信宏, 小池真: 第37回エアロゾル科学技術研究討論会 (オンライン開催) (2020) ニーオルスンに沈着した黒色炭素粒子濃度の季節変化.
- 19) 吉野彩子, 高見昭憲, 原圭一郎, 西田千春, 林政彦, 鶴野伊津志, 第61回大気環境学会年会(オンライン開催) (2020) 2020年春季の九州北部におけるエアロゾル化学成分の変化. 8) R. ONG C. M. KOIKE, T. HASHINO, and H. MIURA : 日本気象学会 2020年度秋季大 (2020) (オンライン開催) Performance of MPS-SCALELES Model Calculations of Arctic Mixed-Phase Clouds

- 20) T. MORI, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI and W. AAS: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online) (2020) Seasonal Variation of Wet Deposition of Black Carbon at Ny-Ålesund, Svalbard.
- 21) K. GOTO-AZUMA, N. MOTTEKI, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. FUKUDA, S. OHATA, A. YOSHIDA, T. MORI, Y. KONDO, M. KOIKE, M. HIRABAYASHI, R. DALLMAYR, J. OGATA, K. KITAMURA, S. MATOBA and T. AOKI: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online) (2020) Continuous flow analysis of iron oxide in a Greenland ice core using a modified single-particle soot photometer.
- 22) K. GOTO-AZUMA, N. MOTTEKI, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. FUKUDA, S. OHATA, A. YOSHIDA, T. MORI, Y. KONDO, M. KOIKE, M. HIRABAYASHI, R. DALLMAYR, J. OGATA, K. KITAMURA, T. AOKI: The 11th Symposium on Polar Science (2020) (Online) Continuous flow analysis of iron oxide in a Greenland ice core using a modified single-particle soot photometer.
- 23) T. AOKI, M. KOIKE, E. WATANABE, and H. KOBAYASHI: The 11th Symposium on Polar Science (2020) (Online) Strategic Goal 1 “Advanced observation of Arctic Environmental Change” in ArCS II Project.
- 24) 當房豊, 植竹淳, 松井仁志, 茂木信宏, 宇治靖, 岩本洋子, 三浦和彦, 三隅良平: 2020年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会(オンライン開催) (2021・2月) 大気中の氷晶核粒子の季節変動: 東京スカイツリーの事例.
- 25) 青木 輝夫, 東 久美子, 的場 澄人, 島田 利元, 近藤 豊, 茂木 信宏, 小池 真, 藤田 耕史, 本山 秀明, 堀 雅裕: 日本地球惑星連合2021年大会 (2021) (オンライン開催) SIGMA-D アイスコアから推定したグリーンランド氷床における過去350年間のブラックカーボンによる積雪のアルベド低下可能量
- 26) 森樹大, 近藤豊, 大畑祥, 東久美子, 福田かおり, 小川佳美, 茂木信宏, 吉田淳, 小池真, P. R. SINHA, 大島長, 松井仁志, 當房豊, 矢吹正教, W. AAS: 日本地球惑星連合2021年大会 (2021) (オンライン開催) ニーオルスンにおける黒色炭素粒子の湿性沈着に関する研究 Wet Deposition of black Carbon at Ny-Ålesund, Svalbard
- 27) 大畑祥, 小池真, 吉田淳, 茂木信宏, 足立光司, 大島長, 松井仁志, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA, A. HERBER, 日本地球惑星連合2021年大会 (2021) (オンライン開催) Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring.
- 28) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, R. SINHA P, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: PACES 4th Open Science Meeting (IGAC2021), May 26-28, 2021. Seasonal Variations of Wet Deposition of Black Carbon at Ny-Ålesund in Svalbard and at Barrow in Alaska
- 【サブテーマ2】**
- 1) T. MORI, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, K. FUKUDA, Y., OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: The 11th Symposium on Polar Science, 2020
“Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund.” 松井仁志: エアロゾル・雲・降水に関する研究集会 (2023)
「エアロゾルとその放射・雲影響の全球シミュレーション」
- 2) N. K. Fuanke, M. Mochida, S. Ohata, S. Takahama, and A. M. Dillner (著者の修正有): 第27回大気化学討論会 (2022)
“Seasonal variations in chemical composition, sources, and climatic impact of organic aerosols in the Arctic: A case of Ny-Ålesund, Norway”

- 3) 河合慶、松井仁志、當房豊：2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会（2022）
「アジアダストの氷晶核に関する全球数値シミュレーション」
- 4) 當房豊、松井仁志、河合慶、大畑祥、近藤豊、O. Hermansen、猪上淳、小池真：2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会（2022）
「MOSAICの期間におけるスヴァールバル諸島での氷晶核粒子の季節変動」
- 5) 松井仁志：日本気象学会2022年度春季大会（2022）
「粒子の微物理特性を表現した全球エアロゾルモデルの開発と気候影響評価」
- 6) 河合慶、松井仁志、木村玲二、篠田雅人：日本気象学会2022年度春季大会（2022）
「アジアダストの発生・輸送・気候影響に対する臨界摩擦速度の重要性」
- 7) 松井仁志、大畑祥、當房豊、松木篤、板橋秀一、大島長、鈴木健太郎、佐藤陽祐：日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）
「大気化学の将来構想：エアロゾルの動態と放射・雲過程との相互作用」
- 8) 河合慶、松井仁志、木村玲二、篠田雅人：日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）
“High sensitivity of Asian dust emission, transport, deposition, and climate impacts to threshold friction velocity.”
- 9) M. LIU and H. MATSUI: 日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）
“The underappreciated role of anthropogenic sources in atmospheric soluble iron flux to the Southern Ocean.”
- 10) 植村立、眞坂昂佑、飯塚芳徳、平林幹啓、松井仁志、松本理誠、植村美希、藤田耕史、本山秀明：日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）
「最終氷期における南極ドームふじ氷床コアの硫酸塩エアロゾルの硫黄同位体を用いた起源推定:アタカマ砂漠からの寄与の可能性」
- 11) D. KIM, M. CHIN, G. SCHUSTER, T. TAKEMURA, P. TUCCELLA, P. GINOX, X. LIU, Y. SHE, H. MATSUI, and K. TSIGARIDIS: 21th AeroCom / 10th AeroSAT workshops 2022, 2022
“Assessment of dust source attribution to the global land and ocean regions.”
- 12) M. CHIN, H. BIAN, Q. TAN, V. AQUILA, G. TAHA, X. PAN, T. KUCSERA, T. TAKEMURA, H. MATSUI, K. TSIGARIDIS, S. BAUER, P. GINOX, S. FADNAVIS, and A. LAAKSO: 21th AeroCom / 10th AeroSAT workshops 2022, 2022
“Diversity of aerosols in the UTLS from the AeroCom III UTLS model experiment: Sources, transport, removal, and interannual variability.”
- 13) D. KIM, M. CHIN, H. YU, T. TAKEMURA, P. TUCCELLA, P. GINOX, Y. SHI, X. LIU, H. MATSUI, J. ZHENG, Z. ZHANG, and J. KOK: 21th AeroCom / 10th AeroSAT workshops 2022, 2022
“Multi-model-satellite comparison of Dust Optical Depth at 10 μm in the global scale and the Northern Atlantic Ocean.”
- 14) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFTHERIADIS, S. VRATOLIS, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: 4th PACES Open Science Meeting, online, 2021
“Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic”
- 15) S. OHATA, M. KOIKE, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, K. ADACHI, N. OSHIMA, H. MATSUI, O. EPPERS, H. BOZEM, M. ZANATTA and A. B. HERBER: 日本地球惑星科学連合2021年大会（2021）
“Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring”
- 16) 大畑祥、茂木信宏、川中子ひかる、當房豊、足立光司、持田陸宏：第26回大気化学討論会（2021）

- 「SPES法に基づく名古屋都市大気の水溶性エアロゾルの観測」
- 17) 川中子ひかる、大畑祥、茂木信宏、當房豊、持田陸宏：第26回大気化学討論会 (2021)
「SPES法に基づく水溶性エアロゾルのオンライン分析法の評価」
- 18) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFTHERIADIS, S. VRATOLIS, R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTTEKI, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA and N. OSHIMA: 第12回極域科学シンポジウム (2021)
“Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic”
- 19) M. A. BURGOS, E. ANDREWS, G. TITOS, A. BENEDETTI, H. BIAN, V. BUCHARD, G. CURCI, Z. KIPLING, A. KIRKEVAG, H. KOKKOLA, A. LAAKSO, J. LETERTRE-DANCZAK, M. LUND, H. MATSUI, G. MYHRE, C. RANGLES, M. SCHULZ, T. VAN NOIJE, K. ZHANG, and P. ZIEGER: EGU General Assembly 2021, 2021
“First global assessment of modelled aerosol hygroscopicity in the context of other aerosol optical properties.”
- 20) N. MAHOWALD, J. BRAHNEY, M. PRANK, G. CORNWELL, Z. KLIMONT, H. MATSUI, and K. PRATHER: EGU General Assembly 2021, 2021
“Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle.”
- 21) 河合慶、松井仁志：日本気象学会2021年度春季大会 (2021)
「混合相雲における氷晶核の全球数値シミュレーション：アジアダストの重要性」
- 22) 森樹大、近藤豊、大畑祥、東久美子、福田かおり、小川佳美、茂木信宏、吉田淳、小池真、P. R. SINHA、大島長、松井仁志、當房豊、矢吹正教、W. AAS：JPGU Meeting 2021 (2021)
「ニーオルスンにおける黒色炭素粒子の湿性沈着に関する研究」
- 23) M. LIU and H. MATSUI: JPGU Meeting 2021, 2021
“Improved simulations of global black carbon distributions by modifying wet scavenging processes in convective and mixed-phase clouds.”
- 24) 河合慶、松井仁志、當房豊：JPGU Meeting 2021 (2021)
「全球モデルを用いたアジアダストの混合相雲における氷晶核としての重要性の評価」
- 25) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTTEKI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: PACES 4th Open Science Meeting, 2021
“Seasonal variations of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund in Svalbard and at Barrow in Alaska.”
- 26) J. BRAHNEY, N. MAHOWALD, M. PRANK, G. CORNWELL, Z. KLIMONT, H. MATSUI, and K. PRATHER: European Aerosol Conference 2021, 2021
“Constraining the sources of microplastic aerosol.”
- 27) X. PAN, R. KAHN, M. CHIN, H. MATSUI, T. TAKEMURA, Y. XIE, and M. VAL MARTIN: 20th AeroCom workshop and 9th AeroSAT workshop, 2021
“Update on AeroCom biomass burning emission injection height experiment (BBEIH).”
- 28) M. CHIN, H. BIAN, X. PAN, T. TAKEMURA, H. MATSUI, K. TSIGARIDIS, P. GINOUX, S. FADNAVIS, and A. LAAKSO: 20th AeroCom workshop and 9th AeroSAT workshop, 2021
“Progress and results of the AeroCom UTLS+ACAM experiment.”
- 29) Y. TOBO, H. MATSUI, K. KAWAI, S. OHATA, Y. KONDO, O. HERMANSEN, J. INOUE, and M. KOIKE: 12th Symposium on Polar Science, 2021
“Year-round measurements of ice nucleating particles in Svalbard during MOSAiC 2019/20.”
- 30) M. A. BURGOS, E. ANDREWS, G. TITOS, A. BENEDETTI, H. BIAN, V. BUCHARD, G. CURCI, A.

- KIRKEVAG, H. KOKKOLA, A. LAAKSO, M. LUND, H. MATSUI, G. MYHRE, C. RANDLES, M. SCHULZ, T. VAN NOIJE, K. ZHANG, L. ALADOS-ARBOLEDAS, U. BALTENSPERGER, A. JEFFERSON, J. SHERMAN, J. SUN., E. WEINGARTNER, and P. ZIEGER: EGU 2020 meeting, 2020
“First global evaluation of the representation of water uptake within ten earth system models.”
- 31) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, Y. ZHAO, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, N. MOTTEKI, and M. KOIKE: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020
“Black carbon and inorganic aerosols in Arctic snowpack.”
- 32) 吉田淳、茂木信宏、大畑祥、森樹大、小池真、近藤豊、松井仁志、大島長、高見昭憲、北和之 : JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (2020)
「航空機を用いた東アジアおよび北極域における黒色炭素と酸化鉄エアロゾルの動態研究」
- 33) 森樹大、近藤豊、福田かおり、當房豊、東久美子、大畑祥、松井仁志、P. R. SINHA、大島長、矢吹正教、茂木信宏、小池真 : 日本エアロゾル学会 (2020)
「ニーオルスンに沈着した黒色炭素粒子濃度の季節変化」
- 34) X. PAN, R. KAHN, M. CHIN, H. MATSUI, T. TAKEMURA, B. XIE, H. ZHANG, and M. VAL MARTIN: 19th AeroCom workshop and 8th AeroSAT workshop, 2020
“AeroCom III multi-model comparison: Update on biomass burning emission injection height experiment (BBEIH).”
- 35) M. CHIN, H. BIAN, S. BAUER, P. GINOX, A. KIRKEVAG, H. KOKKOLA, T. KUCSERA, H. MATSUI, G. MYHRE, D. NEUBAUER, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS: 19th AeroCom workshop and 8th AeroSAT workshop, 2020
“Vertical profile: Are models getting better after all these years?”
- 36) M. A. BURGOS, E. ANDREWS, G. TITOS, A. BENEDETTI, H. BIAN, V. BUCHARD, G. CURCI, A. KIRKEVAG, H. KOKKOLA, A. LAAKSO, M. LUND, H. MATSUI, G. MYHRE, C. RANDLES, M. SCHULZ, T. VAN NOIJE, K. ZHANG, L. ALADOS-ARBOLEDAS, U. BALTENSPERGER, A. JEFFERSON, J. SHERMAN, J. SUN, E. WEINGARTNER, and P. ZIEGER: 19th AeroCom workshop and 8th AeroSAT workshop, 2020
“First global overview on the representation of water uptake by ten global climate models.”
- 37) 松井仁志、茂木信宏: 第25回大気化学討論会 (2020)
「北極域のブラックカーボンの放射強制力に対する雲内上昇流の扱いの重要性について」
- 38) 飯塚芳徳、植村立、松井仁志、大島長、的場澄人 : 雪氷研究大会 (2020)
「グリーンランド南東ドームアイスコアによる1970年代の硫酸エアロゾル組成とフラックス」

【サブテーマ3】

- 1) N. OSHIMA, S. YUKIMOTO, M. DEUSHI, T. KOSHIRO, H. KAWAI, T. Y. TANAKA and K. YOSHIDA: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020年7月, オンライン (2020)
Effective Radiative Forcing Estimates of Anthropogenic Aerosols in MRI-ESM2.
- 2) K. ADACHI: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020年7月, オンライン (2020)
Spherical tarballs form through chemical and physical evolution of primary organic particles in biomass-burning smoke.
- 3) 川合秀明, 神代剛, 遠藤洋和, 荒川理: 日本気象学会2020年度秋季大会, 2020年10月, オンライン (2020)
全球の海霧の分布とその温暖化時の変化
- 4) 大島長、行本誠史、出牛 真、神代 剛、川合秀明、田中泰宙、吉田康平: 第25回大気化学討論会、2020年11月, オンライン (2020)
気象研究所地球システムモデルを用いた人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力の推定
- 5) H. KAWAI, S. YUKIMOTO, T. KOSHIRO, N. OSHIMA, T. TANAKA, H. YOSHIMURA and R.

- NAGASAWA: AGU Fall Meeting 2020, 2020年12月, オンライン (2020)
Significant Improvement of Cloud Representation in MRI-ESM2.
- 6) K. ADACHI, T. KINASE, E. M SCHEUER, J. E DIBB, J. M KATICH, and J. P. SCHWARZ: AGU Fall meeting 2020, 2020年12月, オンライン (2020)
Spherical tarballs form through chemical and physical evolution of primary organic particles in biomass-burning smoke.
 - 7) 川合秀明: エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2021年2月, オンライン (2021)
総説: 海上の下層雲の概要、気候モデルにおけるそのパラメタリゼーション
 - 8) H. KAWAI, S. YUKIMOTO, T. KOSHIRO, N. OSHIMA, T. TANAKA, H. YOSHIMURA and R. NAGASAWA: Improvement and calibration of clouds in models, 2021年4月, オンライン (2021)
Realities of Developing and Improving Parameterizations Related to Clouds in GCMs.
 - 9) 川合秀明: 国立極地研究所気水圏コロキウム, 2021年5月, オンライン(2021)
気候モデルにおける南大洋の雲.
 - 10) 川合秀明, 神代剛, 行本誠史: 日本気象学会2021年度春季大会, 2021年5月, オンライン (2021)
MRI-ESM2における南大洋の短波放射バイアスとダブルITCZ問題の關係
 - 11) 大島長: ArCS II 第2回全体会合, 2021年5月6月30日, オンライン(2021)
気象研究所地球システムモデルを用いた北極気候研究 (放射強制力, 20世紀前半の北極温暖化, COVID-19による気候影響評価)
 - 12) 大島長: グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2021年9月3日, オンライン (2021)
アイスコア観測と全球モデル計算との比較
 - 13) 足立光司: 第38回エアロゾル学会・技術研究討論会, 2021年8月26-27日, オンライン (招待) (2021)
深層学習を利用した画像認識技術による電子顕微鏡画像中の炭素質エアロゾル粒子の判定.
 - 14) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2021年9月, オンライン (2021)
Does the reduction in the Southern Ocean radiation bias alleviate the double-ITCZ problem?
 - 15) N. OSHIMA, S. YUKIMOTO, M. DEUSHI, T. KOSHIRO, H. KAWAI, T. Y. TANAKA and K. YOSHIDA: Tri-MIPathlon-3, 2 December 2021, Online meeting (2021)
Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0.
 - 16) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: AGU Fall Meeting 2021, 米国, 2021年12月, ニューオーリンズ&オンライン (2021)
Does the reduction in the Southern Ocean radiation bias alleviate the double-ITCZ problem?
 - 17) K. ADACHI: Pacificchem2021, 22 December 2021, Online (2021) (Invited)
Physical and chemical analyses of aerosol particles from biomass burning using transmission electron microscopy.
 - 18) H. KAWAI, S. YUKIMOTO, T. KOSHIRO, N. OSHIMA, T. TANAKA, H. YOSHIMURA and R. NAGASAWA: AMS 102nd Annual Meeting, 2022年1月, アメリカ, オンライン (2022)
Significant Reduction of the Southern Ocean Radiation Bias in a Climate Model.
 - 19) H. Kawai and T. Koshiro: EarthCAREモデリングワークショップ, 2022年2月, オンライン (2022)
Examples of possible evaluation of GCMs using cloud radar and lidar satellite data.
 - 20) 川合秀明, 神代剛, 行本誠史: 2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 2022年2月, オンライン(2022)
南大洋の雲は熱帯降水に影響するか?
 - 21) 川合秀明, 神代剛, 行本誠史: 第13回熱帯気象研究会, 2022年3月, オンライン(2022)
気候モデルにおけるダブルITCZ問題はもししたら緩和できるか?

- 22) T. AIZAWA, N. OSHIMA and S. YUKIMOTO: EGU General Assembly 2022, 2022年4月, オンライン (2022)
Evaluation of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability contributing to mid-20th century Arctic cooling — CMIP6/DAMIP multimodel analysis.
- 23) T. AIZAWA, N. OSHIMA and S. YUKIMOTO: JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン (2022)
Contributions of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability to mid-20th century Arctic cooling.
- 24) H. KAWAI, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: JpGU meeting 2022, 2022年5月, 千葉県千葉市&オンライン (2022)
How can the double-ITCZ problem be alleviated in climate models?
- 25) H. KAWAI, J. CHIBA and T. KOSHIRO: O, CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022年7月, アメリカ, シアトル (2022)
Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs.
- 26) KOSHIRO, T., H. KAWAI and A. T. NODA: 2022 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, 2022年7月, 米国, シアトル (2022)
Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback.
- 27) H. KAWAI, J. CHIBA and T. KOSHIRO: 16th Conference on Cloud Physics, 2022年8月, アメリカ&オンライン, マディソン&オンライン (2022)
Simple parameterization of breakup processes of low clouds for GCMs.
- 28) 川合秀明, 吉田康平, 神代剛, 行本誠史, 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月, 札幌市 (2022)
全球気候モデルにおけるマイナーに見える取り扱いの重要性.
- 29) H. KAWAI, K. YOSHIDA, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: 6th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models, 2022年11月, イギリス, レディング (2022)
Importance of Minor-Looking Treatments in Global Climate Models.
- 30) 大島 長: グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2022年11月, 北海道函館市 (2022)
アイスコアと気象研究所地球システムモデルによるエアロゾル沈着量の長期変化.
- 31) K. ADACHI: AGU Fall meeting 2022, 2022年12月, オンライン (2022)
Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke.
- 32) N. OSHIMA, M. DEUSHI, T. AIZAWA and S. YUKIMOTO: Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), 2023年3月, 東京都立川市 (2023) (Invited)
Impacts of Short-lived Climate Forcers on the Arctic Climate by MRI-ESM2.0 and Multi-model Analyses.
- 33) H. KAWAI, K. YOSHIDA, T. KOSHIRO and S. YUKIMOTO: 第2回EarthCAREモデリングワークショップ, 2023年3月, 静岡県伊豆市 (2023)
Importance of Minor-Looking Treatments in GCMs --- Can satellite observation reduce uncertainty in such treatments?
- 34) 川合秀明, 吉田康平, 神代剛, 行本誠史, エアロゾル・雲・降水に関する研究集会, 2023年3月, オンライン (2023)
モデルのマイナーに見える扱いは雲表現にとってどんなに重要か?

【サブテーマ4】

- 1) 當房豊, 足立光司, 松井仁志, 河合慶, 大畑祥, 近藤豊, 猪上淳, 小池 真: 2022年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会 (2023)

- 「スヴァールバル諸島での氷晶核粒子の変動に関する考察」
- 2) 當房豊：東京大学大気海洋研究所 気候システムセミナー (2023)
「混相雲内での氷晶形成に関わるエアロゾル」 (招待)
 - 3) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, Y. KOMURO, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. KITAMURA, T. AOKI, T. J. POPP and D. DAHL-JENSEN: Seventh International Symposium on Arctic Research, Tokyo, Japan, 2023
“Variations in mineralogy of dust in ice cores obtained from Greenland over the past 100 years”
 - 4) K. GOTO-AZUMA, N. MOTTEKI, J. OGATA, K. FUKUDA, M. HIRABAYASHI, Y. KOMURO, I. OYABU, K. KITAMURA, S. FUJITA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, T. MORI, S. OHATA, Y. KONDO, M. KOIKE. K. KAWAMURA, S. O. RASMUSSEN and D. DAHL-JENSEN: Seventh International Symposium on Arctic Research, Tokyo, Japan, 2023
“Abrupt shifts in terrestrial aerosol deposition in Greenland during Dansgaard-Oeschger events 9-13”
 - 5) Y. KOMURO F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, K. FUKUDA, N. KURITA, K. KITAMURA, G. SINNL, S. O. RASMUSSEN, T. J. POPP and D. DAHL-JENSEN: Seventh International Symposium on Arctic Research, Tokyo, Japan, 2023
“Dating and insoluble particle analysis of a shallow ice core drilled at EGRIP, Greenland”
 - 6) I. OYABU, K. KAWAMURA, K. KITAMURA, S. MORIMOTO, S. AOKI, K. GOTO-AZUMA and T. BLUNIER: Seventh International Symposium on Arctic Research, Tokyo, Japan, 2023
“Atmospheric CH₄ concentration during the Holocene reconstructed from the NEEM (Greenland) and Dome Fuji (East Antarctica) ice cores”
 - 7) M. SINGH, S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, M. KOIKE, N. OSHIMA, E. ANDREWS, A. HYVÄRINEN, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, S. SHARMA, D. VEBER, K. ELEFTHERIADIS, S. VRATOLIS, N. MOTTEKI and P.R. SINHA: National Workshop on Boundary Layer Exchange Processes and Climate Change, Chennai, India, 2023
“Mass absorption cross-sections of black carbon for Aethalometer measurements at four sites in the Arctic”
 - 8) Y. TOBO, H. MATSUI, K. KAWAI, S. OHATA, Y. KONDO, O. HERMANSEN, K. ADACHI, J. INOUE, and M. KOIKE: 3rd CATCH Open Science Workshop, Online, 2022
“Insights from a year-round record of ice nucleating particles over Svalbard during MOSAiC.” (Invited)
 - 9) 當房豊、松井仁志、河合慶、大畑祥、近藤 豊、O. HERMANSEN、猪上淳、小池真：2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会 (2022)
「MOSAiCの期間におけるスヴァールバル諸島での氷晶核粒子の季節変動」
 - 10) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, Y. KOMURO, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. KITAMURA, T. AOKI, T. J. POPP and D. DAHL-JENSEN: The 13th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2022
“Variations in mineralogy of dust in ice cores obtained from northwestern and northeastern Greenland over the past 100 years”
 - 11) 永塚尚子、東久美子、對馬あかね、藤田耕史、的場澄人、大沼友貴彦、小室悠紀、平林幹啓、尾形純、塚川佳美、北村享太郎、青木輝夫、Trevor James Popp、Dorthe Dahl-Jensen: 雪氷研究大会 2022 (2022)
「アイスコアを用いたグリーンランド氷床北部における過去 100 年間の鉱物組成変動の空間分布」
 - 12) K. GOTO-AZUMA, N. MOTTEKI, J. OGATA, K. FUKUDA, M. HIRABAYASHI, Y. KOMURO, I. OYABU, K. KITAMURA, S. FUJITA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, T. MORI, S. OHATA, Y.

- KONDO, M. KOIKE, K. KAWAMURA, S. O. RASMUSSEN and D. DAHL-JENSEN: Willi Dansgaard Centenary Symposium 2022, Copenhagen, Denmark, 2022
- “High-resolution analyses of the EGRIP deep ice core: A study on Dansgaard-Oeschger events 9-13
- 13) 永塚尚子、東久美子、對馬あかね、藤田耕史、的場澄人、大沼友貴彦、小室悠紀、平林幹啓、尾形純、塚川佳美、北村享太郎、青木輝夫、Trevor James Popp、Dorthe Dahl-Jensen：日本地球惑星科学連合 2022 年大会（2022）
「グリーンランド北西部および北東部で掘削されたアイスコア中の過去 100 年間の鉱物組成変動の比較」（招待）
- 14) 永塚尚子、東久美子、對馬あかね、藤田耕史、的場澄人、大沼友貴彦、青木輝夫：日本地球化学会 第 69 回年会（2022）
「グリーンランドアイスコアから復元する過去 100 年の鉱物ダスト起源とその変動要因の解明」（招待）
- 15) 森樹大、近藤豊、東久美子、茂木信宏、吉田敦、福田かおり、塚川佳美、大畑祥、小池真：エアロゾル学会（2022）
「水中に含まれた黒色酸化鉄粒子濃度の測定法の確立」
- 16) E. IOANNIDIS, K.S. LAW, J.-C. RAUT, L. MARELLE, T. ONISHI, S. BEKKI, B. D’ANNA, B. TEMIME-ROUSSEL, B. BARRET, T. ROBERTS, E. ANDREWS, S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, Y. KIM, F. TAKETANI, Y. KANAYA, C. GRANIER, P. K. QUINN, K. A. PRATT, MEETA CESLER-MALONEY, J. MAO, and W. SIMPSON: iCACGP-IGAC2022, Manchester, England, 2022
“Sources and processes influencing black carbon over Alaska during wintertime.”
- 17) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, K. IKEDA, H. TANIMOTO, D. YAMADA, D. NARITA, Y. KONDO and Z. KLIMONT: iCACGP-IGAC2022, Manchester, England, 2022
“Rapid reduction in black carbon emissions from China and the dominance of the residential sector: evidence from 2009-2022 observations on Fukue Island, Japan.”
- 18) F. M SCHNAITER, H. SERVOMAA, E. ASMI, S. OHATA, Y. KONDO, H.-P. HYVÄRINEN and E. JÄVINEN: International Aerosol Conference, Athens, Greece, 2022
“Long-term measurements with the four wavelengths photoacoustic aerosol absorption spectrometer PASS-4λ in the Finnish Arctic.”
- 19) T. MORI, Y. KONDO, K. GOTO-AZUMA, N. MOTOKI, A. YOSHIDA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, S. OHATA, and M. KOIKE: American Association for Aerosol research (AAAR), North Carolina, America, 2022
“Measurement of Light-absorbing Iron Oxide Aerosols in Liquid Water with a Modified Single-Particle Soot Photometer”
- 20) 當房豊：地球惑星システム科学セミナー（2021）
「北極域でのエアロゾル-雲相互作用」（招待）
- 21) Y. TOBO, H. MATSUI, K. KAWAI, S. OHATA, Y. KONDO, O. HERMANSEN, J. INOUE, and M. KOIKE: The 12th Symposium on Polar Science, Online, 2021
“Year-round measurements of ice nucleating particles in Svalbard during MOSAiC 2019/20.”
- 22) K. GOTO-AZUMA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, Y. KONDO, R. DALLMAYR, J. OGATA, N. MOTOKI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, K. FUKUDA, M. HIRABAYASHI, S. MATOBA, Y. KOMURO, A. TSUSHIMA, N. NAGATSUKA, K. FUJITA, N. OSHIMA, K. KITAMURA, K. KAWAMURA and T. AOKI: The 12th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2021
“Concentrations and sizes of black carbon originated from anthropogenic and biomass burning emissions in Northwest Greenland over the past 350 years”

- 23) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, K. FUKUDA, N. KURITA, K. KITAMURA, A. YONEKURA, T. J. POPP, and D. DAHL-JENSEN : The 12th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2021
“Dating and Solid Particle Analysis of a Shallow Ice Core Obtained from Egrip” Greenland”
- 24) S. OHATA, T. MORI, Y. KONDO, S. SHARMA, A. HYVÄRINEN, E. ANDREWS, P. TUNVED, E. ASMI, J. BACKMAN, H. SERVOMAA, D. VEBER, K. ELEFThERiADiS, S. V., R. KREJCI, P. ZIEGER, M. KOIKE, Y. KANAYA, A. YOSHIDA, N. MOTeki, Y. ZHAO, Y. TOBO, J. MATSUSHITA, AND N. OSHIMA: The 12th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2021
“Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic.”
- 25) N. NAGATSUKA, K. GOTO-AZUMA, A. TSUSHIMA, K. FUJITA, S. MATOBA, Y. ONUMA, R. DALLMAYR, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. KITAMURA, M. MINOWA, Y. KOMURO, H. MOTOYAMA, T AOKI, F. NAKAZAWA, T. J. POPP and D. DAHL-JENSEN : The 12th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2021
“Variations in mineralogy of dust in ice cores obtained from Greenland over the past 100 years”
- 26) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, J. OGATA, K. FUKUDA, N. KURITA, K. KITAMURA, A. YONEKURA, T. J. POPP and D. DAHL-JENSEN: The 12th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2021
“Dating and solid particle analysis of a shallow ice core obtained from EGRIP, Greenland”
- 27) Y. TOBO: Svalbard/MOSAiC workshop on snow, sea-ice and aerosol interactions in the Arctic, Online, 2021
“Introduction of aerosol and cloud research contributors from Japan during MOSAiC.”
- 28) Y. TOBO: 11th Ice Nucleation Colloquium, Online, 2021
“Variability of aerosols related to cloud formation over the Svalbard region.” (Invited)
- 29) 永塚尚子、東久美子、對馬あかね、藤田耕史、的場澄人、大沼友貴彦、R. DALLMAYR、門田萌、平林幹啓、尾形純、塚川佳美、北村享太郎、箕輪昌紘、小室悠紀、本山秀明、青木輝夫、中澤文男、T. J. POPP、and D. DAHL-JENSEN : 雪氷研究大会2021 (2021)
「グリーンランドで掘削されたアイスコア中の過去100年間の鉱物組成変動」
- 30) 小室悠紀、中澤文男、東久美子、平林幹啓、尾形純、福田かおり、栗田直幸、北村享太郎、米倉綾香、T. J. POPP、D. DAHL-JENSEN : 雪氷研究大会2021 (2021)
「グリーンランドEGRIP浅層コアの年代決定及び固体粒子解析」
- 31) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA and M. HIRABAYASHI, EastGRIP International Spring/Summer Seminar Series, Online, 2021
“Snow pit study EastGRIP – Analysis of metals and solid particles –”
- 32) 青木輝夫、東久美子、的場澄人、島田利元、近藤豊、茂木信宏、小池真、藤田耕史、本山秀明、堀雅裕: 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
「SIGMA-Dアイスコアから推定したグリーンランド氷床における過去350年間のブラックカーボンによる積雪のアルベド低下可能量」
- 33) T. MORI, Y. KONDO, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTeki, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P.R. SINHA, N. OSHIMA, H. MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI, and W. AAS: 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
“Seasonal variations of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund in Svalbard.”
- 34) A. DAMIANI, H. IRIE, K. YAMAGUCHI, H. M. S. HOQUE, T. NAKAYAMA, Y. MATSUMI and Y. KONDO: 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
“Exploring ground-based aerosol optical properties to improve satellite estimates of surface particulate matter concentrations.”

- 35) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, M. HIRABAYASHI, W. SHIGEYAMA and N. NAGATSUKA: 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
 “Seasonal Changes in Concentration, Metal Composition and Size Distribution of Mineral Particles in Recent Snow at EGRIP, Greenland.”
- 36) K. GOTO-AZUMA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, Y. KONDO, R. DALLMAYR, J. OGATA, N. MOTEGI, S. OHATA, T. MORI, M. KOIKE, K. FUKUDA, M. HIRABAYASHI, S. MATOBA, Y. KOMURO, A. TSUSHIMA, N. NAGATSUKA, K. FUJITA, N. OSHIMA, K. KITAMURA, K. KAWAMURA, W. SHIGEYAMA, H. MOTOYAMA, and T. AOKI : 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
 “A biomass burning record over the past 350 years in an ice core from Northwest Greenland.”
- 37) F. NAKAZAWA and K. GOTO-AZUMA: 日本地球惑星科学連合大会 (2021)
 “Inactivating microorganisms in melted snow and ice samples using ultraviolet germicidal radiation.”
- 38) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, K. GOTO-AZUMA, M. HIRABAYASHI, W. SHIGEYAMA and N. NAGATSUKA: EGU General Assembly 2021, Online, 2021
 “Recent Seasonal Changes of Metal Composition and Size Distribution of Mineral Particles in Snow at EGRIP, Greenland.”
- 39) F. NAKAZAWA and K. GOTO-AZUMA: EGU General Assembly 2021, Online, 2021
 “Examination of Ultraviolet Germicidal Radiation for Inactivating Microorganisms in Melted Snow and Ice Samples.”
- 40) 當房豊、植竹淳、松井仁志、茂木信宏、宇治靖、岩本洋子、三浦和彦、三隅良平：2020年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会 (2021)
 「大気中の氷晶核粒子の季節変動：東京スカイツリーの事例」
- 41) F. NAKAZAWA and K. GOTO-AZUMA: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online), 2020
 “The effect of ultraviolet germicidal radiation on melted snow and ice samples for the inactivation of microorganisms.”
- 42) K. GOTO-AZUMA, N. MOTEGI, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, K. FUKUDA S. OHATA, A. YOSHIDA, T. MORI, Y. KONDO, M. KOIKE, M. HIRABAYASHI, R. DALLMAYR, J. OGATA, K. KITAMURA, S. MATOBA and T. AOKI: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online), 2020
 “Continuous flow analysis of iron oxide in a Greenland ice core using a modified single-particle soot photometer.”
- 43) Y. KOMURO, F. NAKAZAWA, N. NAGATSUKA, M. HIRABAYASHI, W. SHIGEYAMA, S. MATOBA, T. HOMMA and K. GOTO-AZUMA: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online), 2020
 “Analysis of solid microparticles and metal components contained in snow at EGRIP, Greenland.”
- 44) T. MORI, S. OHATA, K. GOTO-AZUMA, Y. KONDO, K. FUKUDA, Y. OGAWA-TSUKAGAWA, N. MOTEGI, A. YOSHIDA, M. KOIKE, P. R. SINHA, N. OSHIMA, H.I MATSUI, Y. TOBO, M. YABUKI and W. AAS: The 11th Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan (Online), 2020
 “Seasonal Variation of Wet Deposition of Black Carbon at Ny-Ålesund, Svalbard.”
- 45) 吉田淳、茂木信宏、大畑祥、森樹大、小池真、近藤豊、松井仁志、大島長、高見昭憲、北和之：日本地球惑星科学連合大会、Online (2020)
 「航空機を用いた東アジアおよび北極域における黒色炭素と酸化鉄エアロゾルの動態研究」
- 46) 森樹大、近藤豊、大畑祥、Y. ZHAO、P. R. SINHA、大島長、松井仁志、茂木信宏、小池真：日本地球惑星科学連合大会、Online (2020)
 「アラスカにおける、ブラックカーボンの湿生沈着の季節変化」

- 47) 森樹大、東久美子、近藤豊、塚川佳美、三浦和彦、平林幹啓、小池真、茂木信宏、大畑祥、大島長、杉浦幸之助、青木輝夫、Martin Schneebeli、佐藤篤司、對馬茜、Vladimir Makarov、大宮哲、杉本敦子、鷹野真也：エアロゾル学会 (2020)
「北極域に沈着したBC濃度と粒径分布」
- 48) A. DAMIANI, H. IRIE, K. YAMAGUCHI, H. M. S. HOQUE, T. NAKAYAMA, Y. MATSUMI and Y. KONDO: 大気化学討論会 (2020)
“Linking BC and PM2.5 surface concentrations with aerosol optical properties jointly estimated by skyradiometer and MAX-DOAS instruments.”
- 49) 金谷有剛、山地一代、宮川拓真、竹谷文一、Y. Choi、朱春茂、近藤豊、宮崎和幸、Z. Klimont、山田大地、成田大樹、池田恒平、谷本浩志：大気化学討論会 (2020)
「新型コロナ流行・経済活動低下時の福江島での大気ブラックカーボン濃度応答：中国での家庭起源排出割合の評価」
- 50) 當房豊：気候物質科学セミナー (2020)
「スヴァールバル諸島・Zeppelin山における雲凝結核・氷晶核の研究」 (招待)

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 高見昭憲、オンライン、2021年、福岡の環境物質：遠隔輸送と都市排出物の混ざりもの 公開講演会「福岡の大気環境と健康」(主催：福岡大学産学官連携研究機関研究所「福岡から診る大気環境研究所」(参加者約 50 名))

【サブテーマ2】

- 1) 第25回日本気象学会中部支部公開気象講座「気候や人間の健康に影響を及ぼす大気中の微粒子(エアロゾル)」(主催：日本気象学会中部支部、2022年9月3日、オンライン、参加者約64名)にて講演(講演タイトル：「コンピュータで再現するエアロゾルとその気候影響」)

【サブテーマ3】

- 1) 船橋市・オンライン市民公開講座「地球温暖化によって将来の気候はどう変わるのか？」(2020年 12 月、オンライン)
- 2) 地球環境講演会「何が地球の将来の温度を決めるのか？」(2021 年 1 月、オンライン)
- 3) 科学ライブショー「ユニバース」ノーベル物理学賞特別番組「気候モデルで地球温暖化を予測する！」(2021年11月、千代田区)
- 4) 船橋市・オンライン市民公開講座「地球温暖化を考える！(祝！真鍋さんノーベル賞受賞)～気候モデルによる温暖化シミュレーション～」(2022年1月、オンライン)
- 5) つくば市立桜中学校「雲の話、地球温暖化の話」サイエンスQ 出前授業(2022年3月、オンライン)
- 6) 日本気象学会第56回夏季大学「地球の温度上昇予測に大きなばらつきがあるのはなぜか？— 答えは、雲—」(2022年8月、オンライン)

【サブテーマ4】

- 1) ARCSII 第1回専門家派遣報告会(2021年9月9日、Online)
近藤豊、「短寿命気候強制力因子が北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響」
- 2) ARCSII AMAP報告書2021 (SPM)メディア向けレクチャー(2021年10月13日、Online)
近藤豊、「短寿命気候強制力因子が北極の気候、大気質、および人間の健康に及ぼす影響」

(4) マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

- 1) 2021 年3 月2 日、プレスリリース、「変形しながら落下する雨粒の数値シミュレーションが可能に」 東京大学大学院理学系研究科

2)プレスリリース2021年9月28日、「グリーンランド氷床に飛来するダストの起源～アイスコア中の微なダストから過去100年の変化が明らかに～」 国立極地研究所, 北海道大学, 名古屋大学, 東京大学. <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210928>

【サブテーマ2】

- 1) プレスリリース (2023年4月26日、「北極域から放出されるダストが北極下層雲での氷晶形成において重要な役割を果たすことを発見 ～地球温暖化や気候変動の予測精度向上に期待～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2023/04/post-492.html>)
- 2) プレスリリース (2022年10月3日、「気候モデルによる大気微粒子の数濃度・粒径分布の推定精度を大きく向上させることに成功 ～微粒子の雲への影響評価や気候予測の高精度化に期待～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/10/post-332.html>)
- 3) プレスリリース (2022年9月20日、「1970年代の硫酸エアロゾルの粒径復元にはじめて成功～硫酸エアロゾルが雲をつくる作用の解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/09/1970.html>)
- 4) プレスリリース (2022年5月2日、「東アジア大陸から輸送される大気微粒子の吸湿性 ～化学組成との関係を明らかに・ラボ分析に基づく実験手法の有用性も提示～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/05/post-249.html>)
- 5) プレスリリース (2022年4月15日、「人間活動によって放出される大気微粒子が南大洋域への主要な鉄供給源となることを解明 ～地球温暖化予測の高度化に期待～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/04/post-242.html>)
- 6) プレスリリース (2021年12月13日、「氷期の南極の硫酸エアロゾルはどこから飛来したのか? ～南米アタカマ砂漠からの寄与～」) (<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2021/12/post-164.html>)
- 7) プレスリリース (2021年11月5日、「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.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2021/11/post-119.html>)

【サブテーマ3】

- 1) 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」)
- 2) 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～」)
- 3) 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の標準化に成功—北極温暖化に与える影響を高精度で推定可能に—」)
- 4) 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～」)
- 5) 成果の記者発表 (2022年7月11日、プレスリリース、「対流圏で採取したエアロゾル粒子から隕石由来の物質を電子顕微鏡分析で検出し、それらが成層圏から流れてきていることを示しました」)
- 6) 成果の記者発表 (2022年8月15日、プレスリリース、「物理的な推定指標を用いて下層雲による温暖化の増幅が説明できることを示しました」)
- 7) 成果の記者発表 (2022年9月20日、プレスリリース、「1970年代の硫酸エアロゾルの粒径復元にはじめて成功～硫酸エアロゾルが雲をつくる作用の解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～」)

【サブテーマ4】

- 1) 日経産業新聞 (2022年2月25日、「北極のすす観測高精度に、極地研、各国のデータの比較も容

易」)

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

- 1) 日本気象学会 2021 年度日本気象学会賞 茂木信宏 単一粒子測定技術の開発に基づく大気エアロゾルの動態と放射影響の研究
- 2) 日本地球惑星科学連合 第4 回西田賞 茂木信宏 光吸収性エアロゾルの測定技術の開発と気候影響に関わる観測的研究

【サブテーマ2】

- 1) 松井仁志：日本気象学会・日本気象学会賞（2022年5月）

【サブテーマ3】

- 1) 日本地球惑星科学連合 PEPS Most Cited Paper Award 2022（最多被引用論文賞） 2022年6月（Oshima et al., Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0, Progress in Earth and Planetary Science, 7, 38, 2020)
- 2) Top Downloaded Article, Geophysical Research Letters, 2023年3月30日（Jones et al., The climate response to emissions reductions due to COVID-19: Initial results from CovidMIP, Geophysical Research Letters, 48, e2020GL091883, 2021)

【サブテーマ4】 「特に記載すべき事項はない」

(6) その他の成果発表

【サブテーマ1】 「特に記載すべき事項はない」

【サブテーマ2】 「特に記載すべき事項はない」

【サブテーマ3】 「特に記載すべき事項はない」

【サブテーマ4】 「特に記載すべき事項はない」

IV. 英文Abstract

Arctic Aerosols: Behavior, Radiative Forcing, and Linkage with Global Warming

Principal Investigator: Associate Professor, Makoto Koike,

Institution: 7-3-1, Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo, JAPAN

Tel: +81-3-5841-4595 / Fax: +81-3-5841-4666

E-mail: koike@eps.s.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: The University of Tokyo, Graduation School of Science,

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies,

Nagoya University (Tokai National Higher Education and Research System)

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,

National Institute of Polar Research,

[Abstract]

Key Words: Global Warming, Environmental Change, Arctic, Aerosol, Black Carbon, Cloud, Ice-Core, Climate-Model, Assessment Report

In this project, black carbon (BC) particles, one of the Short-Lived Climate Forcers (SLCFs), have been intensively studied in the Arctic. We used COSMOS, a high-accuracy instrument developed in Japan, to measure BC concentrations in the atmosphere at four Arctic or high-latitude sites. At these sites, BC measurements have also been made using other BC instruments by other groups. We made detailed comparisons between COSMOS and these other measurements and developed a method to convert their values to COSMOS-scaled BC mass concentrations. We then constructed a unified dataset to study spatial and temporal variation of BC in the Arctic. In addition to these ground-based measurements, we also analyzed vertical profile of BC obtained during PAMARCMiP2018 aircraft experiment to study a year-to-year variation of BC in the Arctic. We also measured BC mass concentration in precipitation (rain and snow) and estimated wet deposition flux. We validated and refined our global models (CAM-ATRAS, Nagoya University, and MRI-ESM2.0, Meteorological Research Institute, Japan) by comparing them to various observations. Using these models, we reveal that the source contribution of each region, such as Asia, to the BC mass concentrations and radiative effects in the Arctic differs significantly. Effective radiation forcing of BC at the top of atmosphere was found to be the second highest after CO₂.

In addition to BC, we studied other aerosols and their possible impacts on radiation and clouds in the Arctic. We developed a technique (Complex Amplitude Sensing, CAS, technique) that can simultaneously quantify the chemical species (complex refractive index) and particle size of solid aerosols, which are considered important as ice nucleating particles (INP). Various standard solid particles (mineral dust, biological particles, etc.) were examined and we confirmed that these particles can be successfully measured. We also sampled atmospheric aerosols and cloud residuals at Ny-Alesund in the Arctic and analyzed them using various techniques, such as electron microscopes. We successfully reveal a seasonal variation in INP concentration, differences in chemical composition between aerosols and cloud-residuals, and functional groups of organic aerosols.

Finally, by analyzing an ice core from Greenland, we obtained BC and mineral dust data with high accuracy and high time resolution covering the last 350 years. Chemical composition of mineral dust varied on a multidecadal scale over the past hundred years. Various emission inventories were examined by comparing numerical model calculations with these ice core data.