R2-4年度　環境省　推進費 2-2003
（JPMEERF20202003）
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

研究代表者：小池　真　（東京大学）

重点課題（主）　９　地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
（副）１６　大気・水・土壌等の環境管理・改善のための技術開発の高度化及び評価・解明に関する研究

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

研究体制

１　東京大学（小池真、茂木信宏）・国立環境研究所（高見昭憲）
２　名古屋大学（持田陸宏、大畑祥、松井仁志）
３　気象研究所（大島長、足立光司、川合　秀明）
４　国立極地研究所（東久美子、當房豊、近藤豊）

1. はじめに （研究の背景）

（A） 北極ブラックカーボン（BC）の重要性

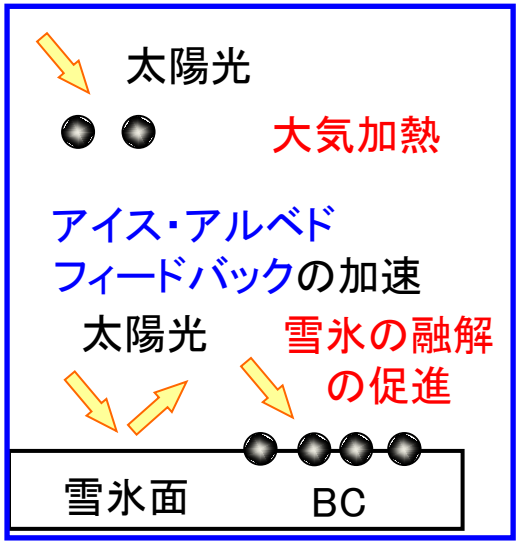
急速に進む北極温暖化にBCが大きく寄与している可能性

北極BC観測とモデルに大きな不確定性
（北極評議会（AC)の作業部会の評価報告書）

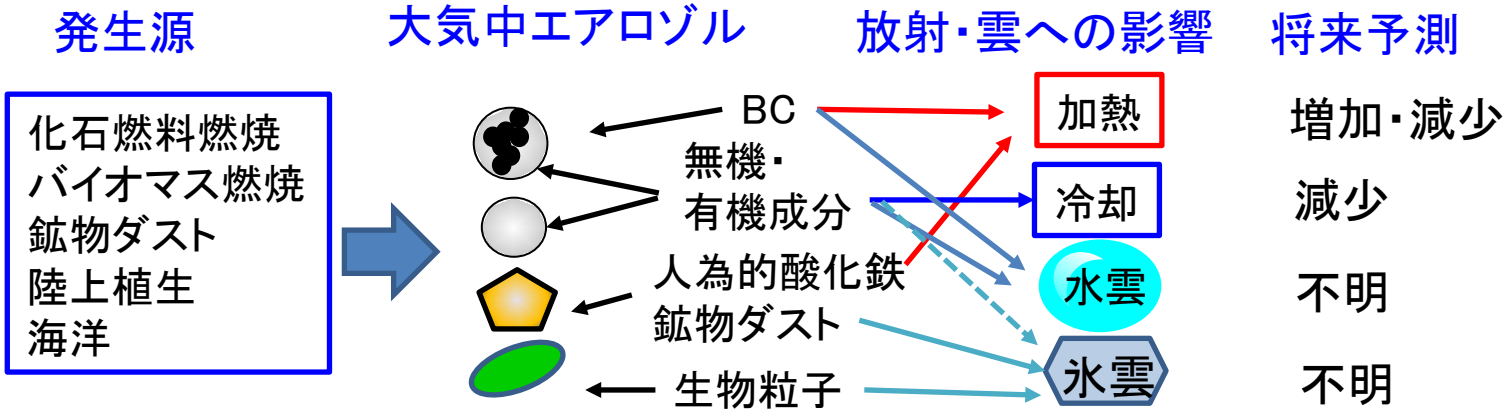
信頼性の高い測定が必要

➡ 日本の高い観測技術による貢献

日本政府の北極政策プロジェクトチーム：
日本で開発されたBC測定装置の世界標準器化を目指す



（B） エアロゾル全体を統合的に研究することの重要性



２．研究開発目的　と　３．研究目標

BCを含むエアロゾル全体の動態と放射影響を、北極に重点をおきながらグローバルに評価する。

（A）　北極域のBC観測の相互比較と動態・放射効果

（B）　エアロゾル全体の動態と雲微物理影響・放射効果（現状評価）

（C）　北極アイスコア分析と数値モデルによる産業革命以前から将来予測までのエアロゾル全体の歴史的変化

➡ 北極評議会の作業部会の評価報告書やIPCC レポートに貢献

サブテーマ

1　東京大学・国立環境研究所　：BC等エアロゾル・雲微物理観測と総合評価
2　名古屋大学　：エアロゾル化学組成と数値モデルによるプロセス評価
3　気象研究所　：エアロゾル分析と気候モデル評価
4　国立極地研究所　：BC・氷晶核観測とアイスコア分析

（A） 北極域のBC観測の相互比較と動態・放射効果

サブテーマ　1，2，3，4

COSMOS BC観測ネットワーク（北極域 4か所）

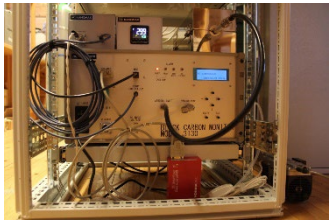
アラスカ（米国海洋大気庁）
（PSAP/CLAP）

アラート（カナダ環境・気候変動省）
（PSAP、アセロメータ）

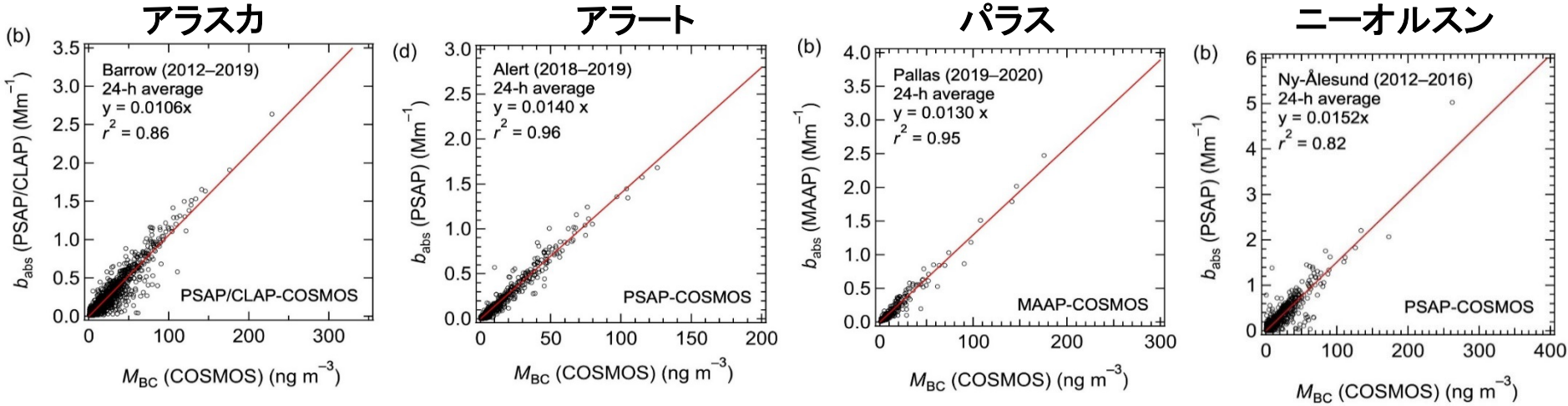
パラス（フィンランド気象研究所）
（MAAP）

ニーオルスン（ノルウェー領）
（スウェーデンのストックホルム大学）
（PSAP）

COSMOS
（精度保証）



これまで、独立に未検証のまま実施



$$M_{BC}\ (\mathrm{g\ m^{-3}}) \text{（BC質量濃度）} = \frac{b_{abs}\ (\mathrm{m^{-1}})\ \text{（光吸収係数）}}{\text{質量あたりの光吸収断面積}\ (\mathrm{m^2\ g^{-1}})}$$

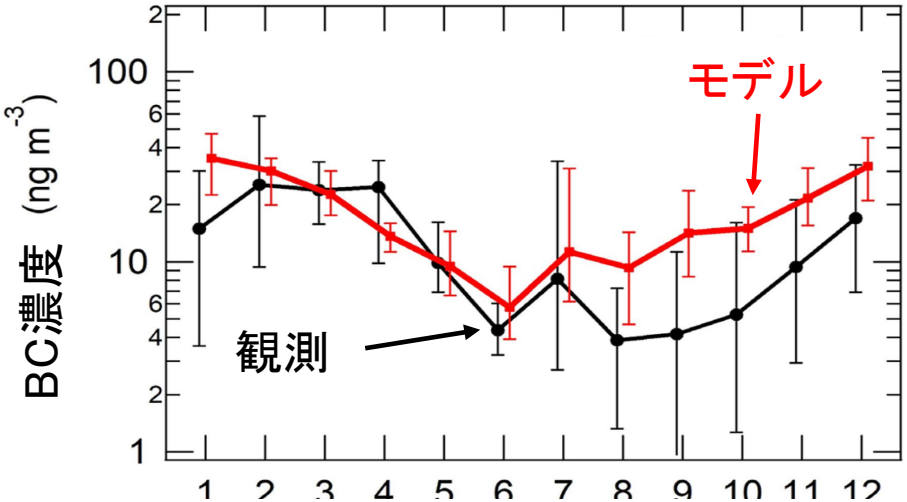
北極BC観測をCOSMOSの濃度スケールに統一させる手順と妥当性を、欧米の研究機関の研究者と論文化。これは、COSMOSを基準とすることに合意したと見なせる。（Ohata et al., AMT 2021）

（A） 北極域のBC観測の相互比較と動態・放射効果

サブテーマ　1，2，3，4　　観測による数値モデルの徹底的な検証と改良

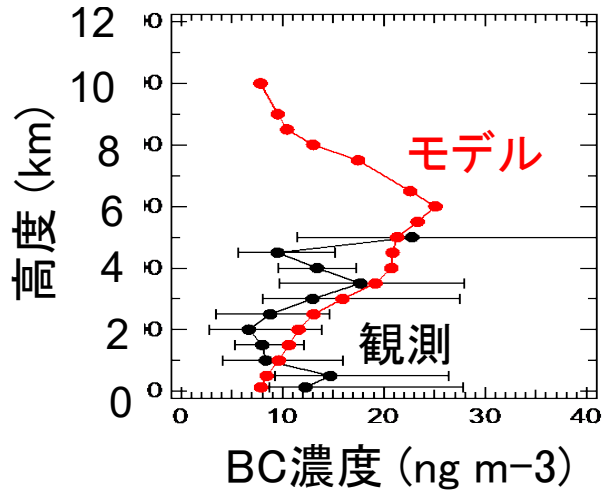
地上観測

Matsui et al., 2022

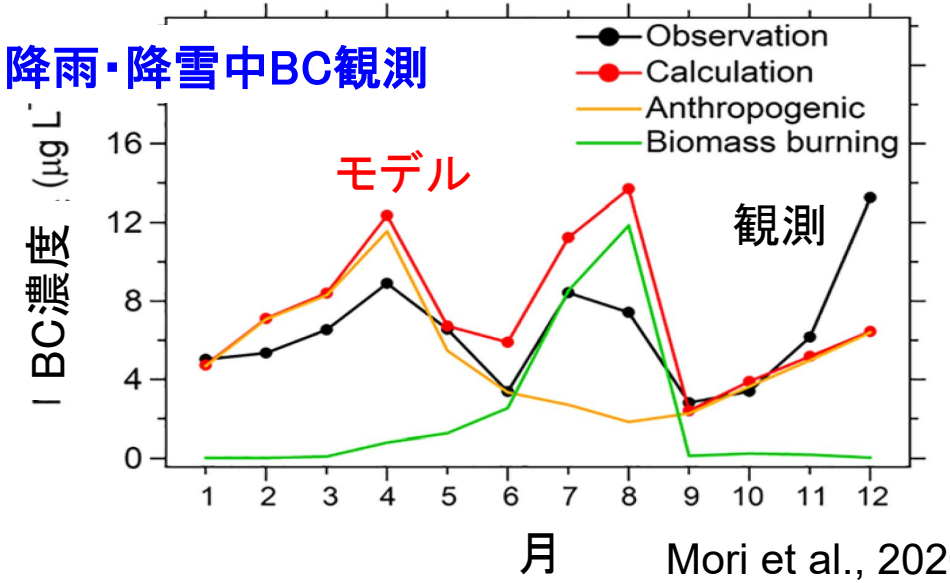


航空機観測

Ohata et al., 2021



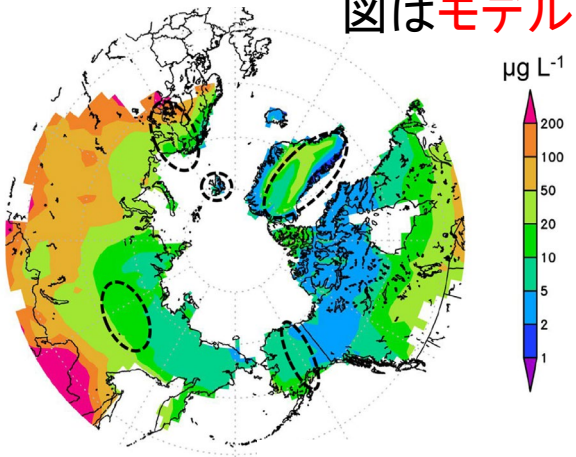
降雨・降雪中BC観測



Mori et al., 2020

広域積雪中BC観測

図はモデル計算値



Matsui et al., 2022

（A） 北極域のBC観測の相互比較と動態・放射効果

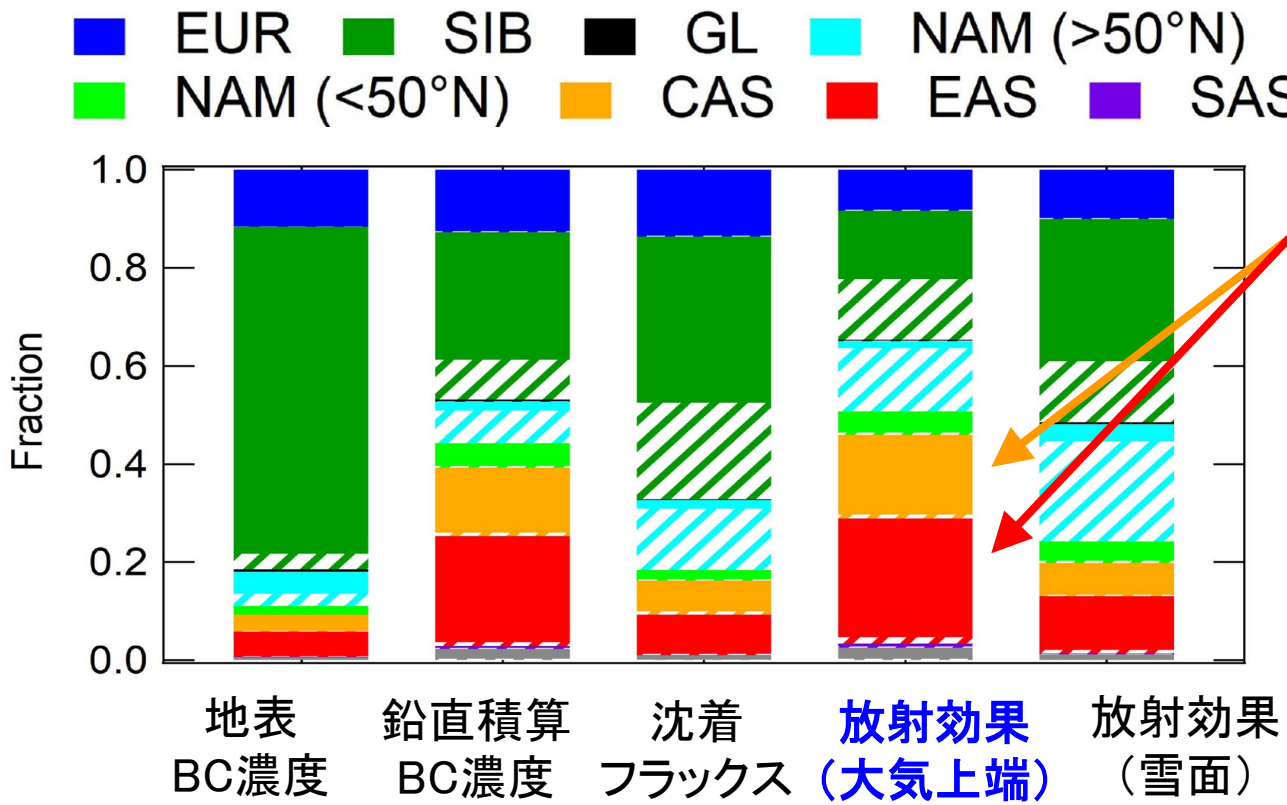
サブテーマ　1，2，3，4　信頼性の高い数値モデルによる評価

（1） 北極での大気上端での有効放射強制力

北極域では、BCは、CO_2 に次いで　2番目（0.61 W m^{-2}）に大きい正の有効放射強制力を持つ。

Oshima et al., 2020

（2） 各領域のBC発生源の寄与



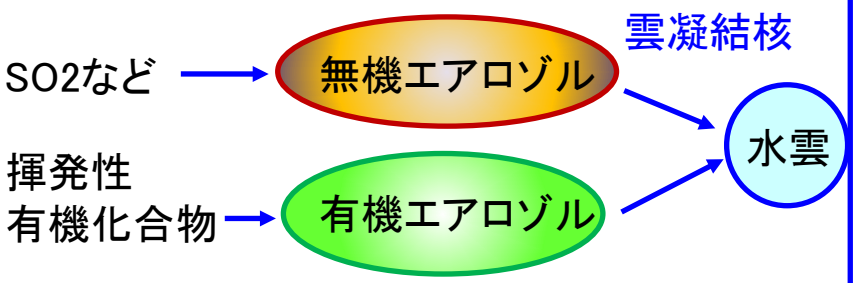
南アジアと東アジアは、大気上端での放射強制力に対して40%の寄与。

日本国内や、日本の高い技術を用いたアジアでのBC排出量削減が、北極BCの放射効果を抑制する可能性

Matsui et al., 2022

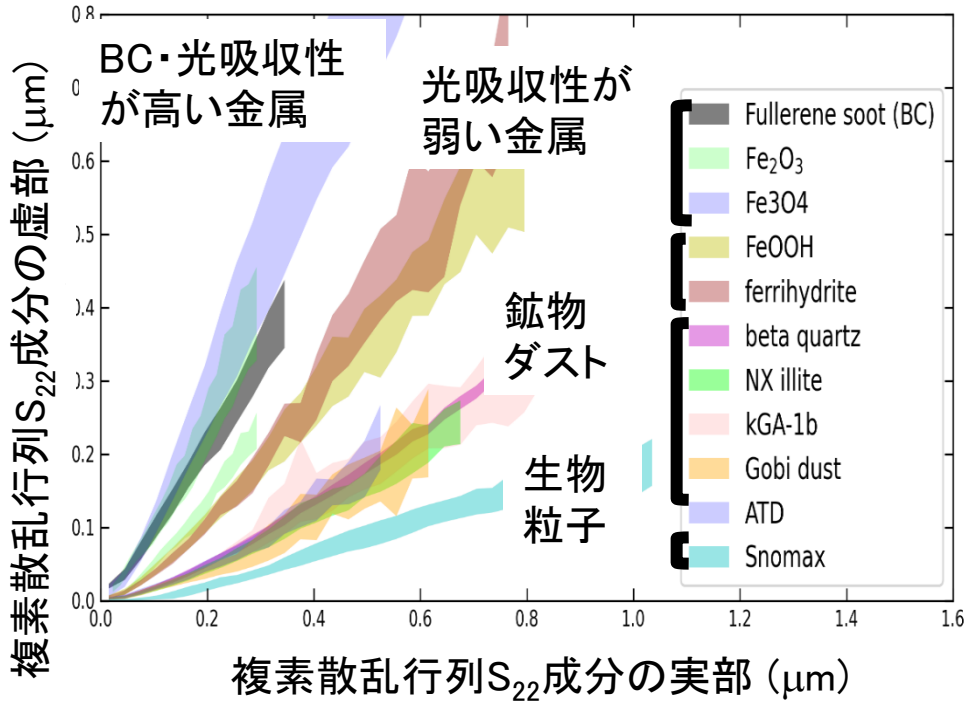
（B） エアロゾル全体の動態と雲微物理影響・放射効果

サブテーマ　1，2，3，4



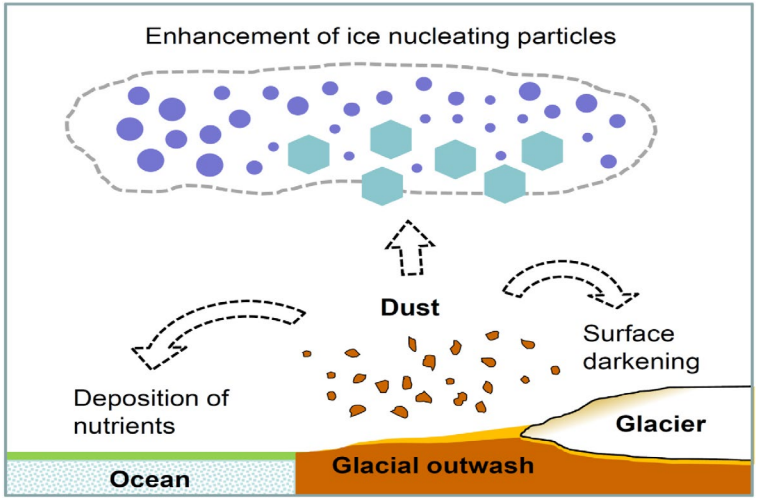
北極大気中で、有機エアロゾルの官能基を定量。(Mochida et al., in preparation)

主要な固体エアロゾルを分離して検出できることを実証。(Moteki, 2021; Yoshida et al., 2022)（特許取得済み）



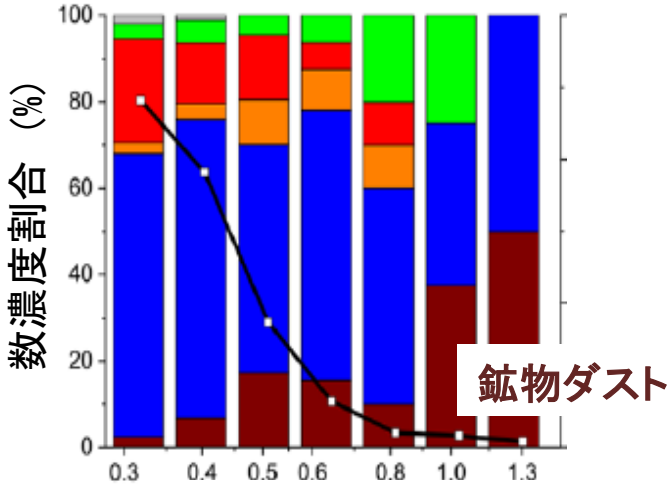
（B） エアロゾル全体の動態と雲微物理影響・放射効果

サブテーマ　1，2，3，4



Koike et al., 2021

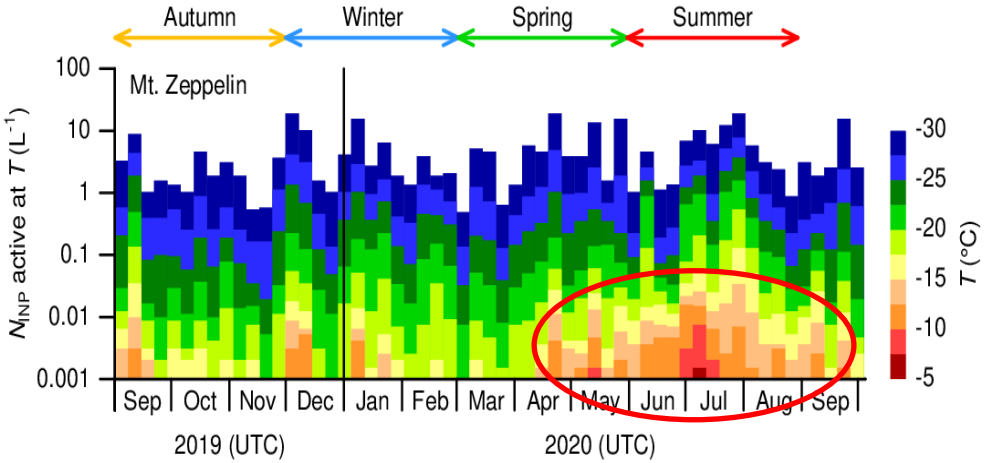
大気エアロゾルとともに雲残渣粒子（雲粒子を蒸発させて残った粒子）の通年分析を実現



Adachi, et al., 2022

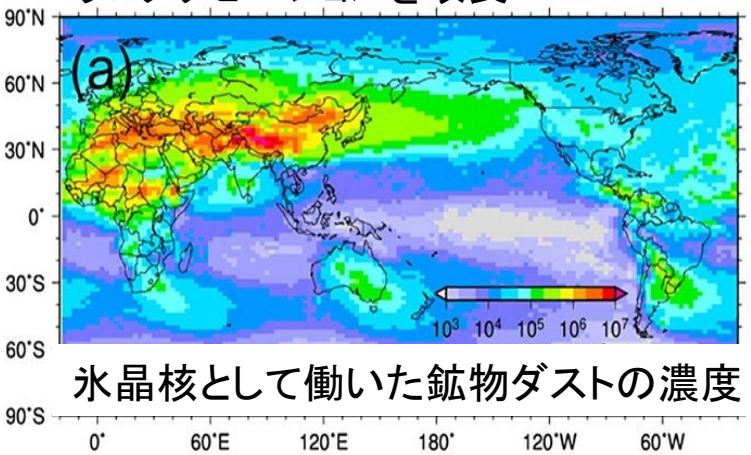
粒子直径 （μm）

氷晶核数濃度の季節変化を提示（夏季の増大）



Tobo et al., in preparation

観測に基づき鉱物ダストの氷晶核特性のパラメタリゼーションを改良



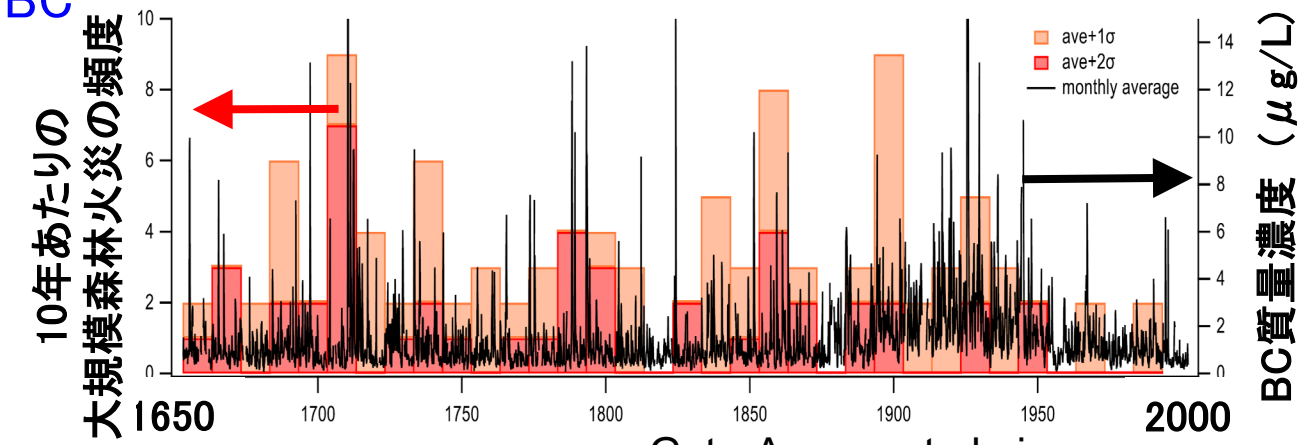
氷晶核として働いた鉱物ダストの濃度

Kawai, Matsui, and Tobo, 2021

（C） 北極アイスコア分析とエアロゾルの歴史的変化

サブテーマ　1，4　　グリーンランド北西部のアイスコア分析

BC

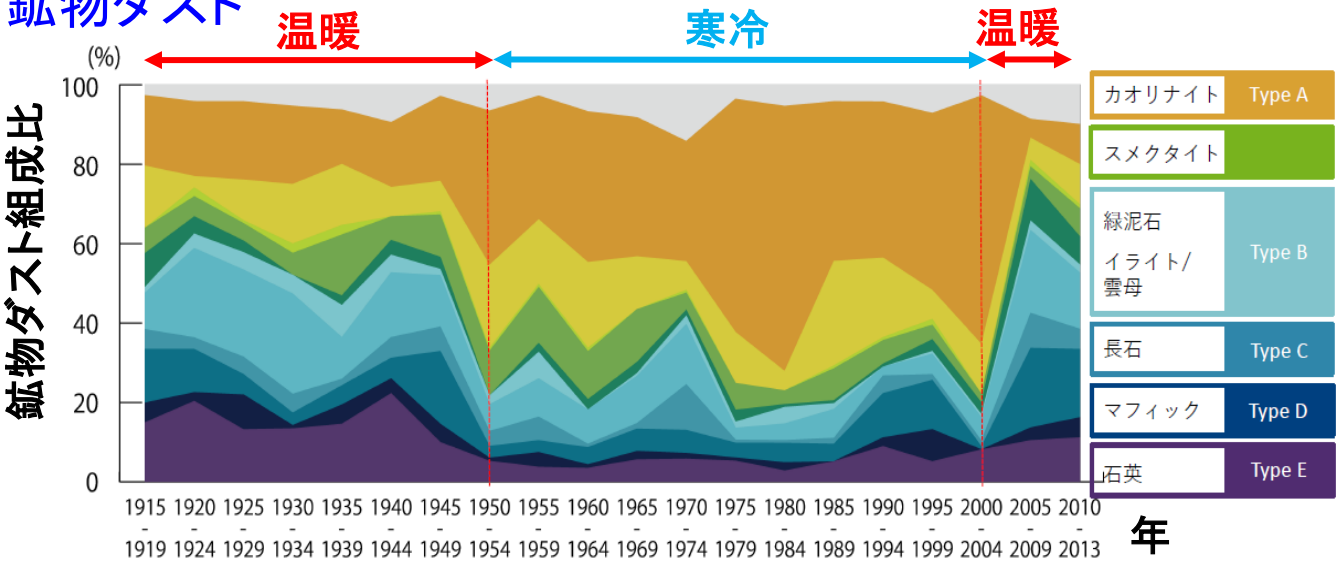


Goto-Azuma et al., in preparation

カナダなど、北半球高緯度の大規模森林火災の頻度には、明確な経年変化が見られない。

➡ CMIP6などの排出源データの検証

鉱物ダスト



Nagatsuka et al., 2021

温暖期と寒冷期で鉱物組成が異なることを示唆。温暖化時には、グリーンランド沿岸部からのダスト放出が重要になったことを示唆。

➡ 将来の温暖化時の自然起源エアロゾル放出量への示唆。

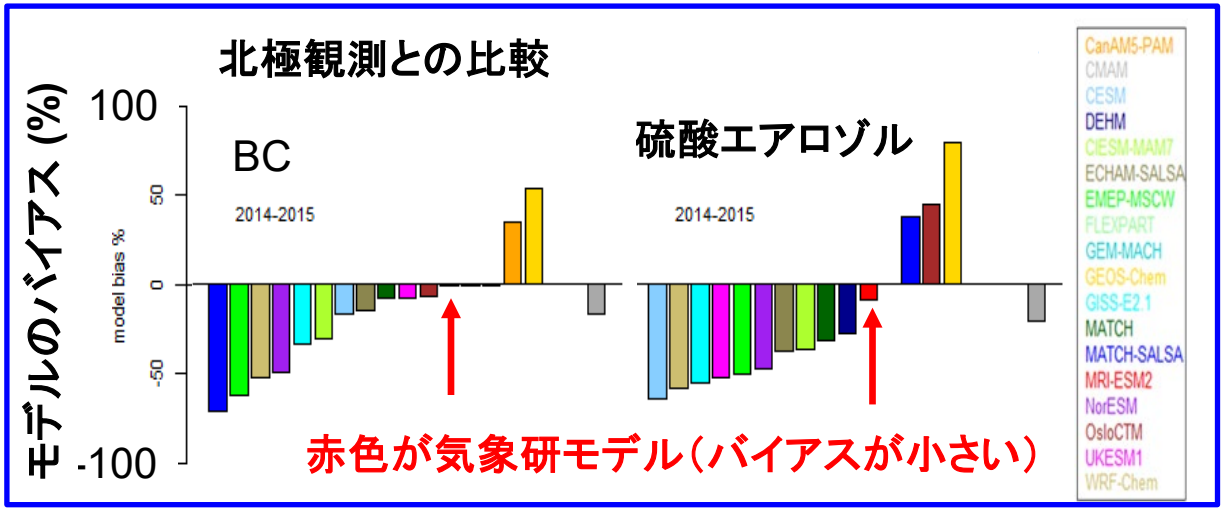
（C） 北極アイスコア分析とエアロゾルの歴史的変化

サブテーマ 3

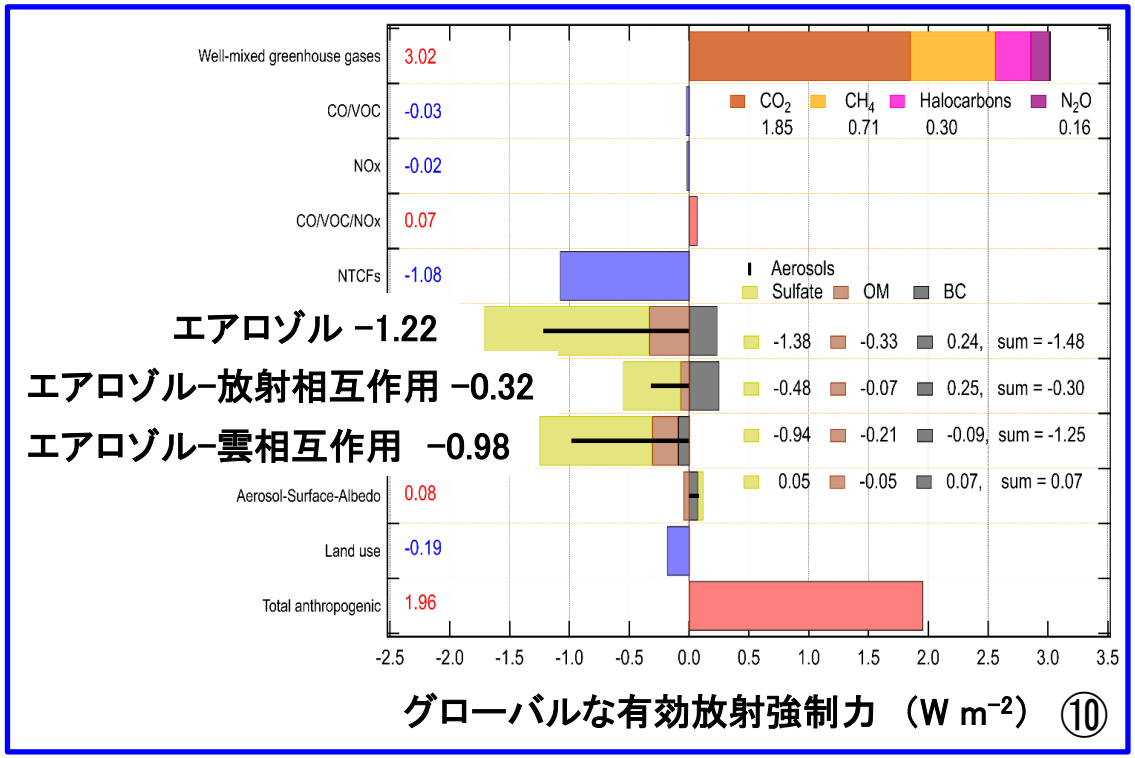
間もなく出版される、北極評議会の作業部会の短寿命放射強制因子（SLCF）評価報告書の図

➡ 信頼性の高いモデル計算であることを実証

Whaley, Oshima et al., 2022



- 各種観測で検証した気象研究所地球システムモデル（MRI-ESM2）を用いて、1850年を基準とした2014年における有効放射強制力（ERF）を推定。
- 北極域では、BCは、CO_2 に次いで2番目（0.61 W m^{-2}）に大きい正の有効放射強制力を持つ。



Oshima et al., 2020

5-2. 環境政策等への貢献

- 様々な北極BC観測をCOSMOSの濃度スケールに統一させる手順と妥当性を、欧米の研究機関の研究者と論文化。COSMOSを基準とすることに研究者間で合意。

- 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）の評価報告書の中で、「世界のBC観測の標準化のために、各種BC測定とCOSMOSとの比較を通じた整合性の確立が必要である」ことが明記。
（研究代表者の小池他、2名が執筆者として参加。）

- 上記報告書は、北極評議会諸国を中心としたBC排出量削減に関わる専門家会議（EGBCM）報告書を通じて、国際的な環境政策の科学的基盤として使用。

- 2021年5月の第三回北極科学大臣会合（ASM3）のレポート中で、COSMOSによる北極BCモニタリングの重要性について言及。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する。

⇒ 日本政府の北極政策プロジェクトチームの「日本の測定器を標準器化する」という戦略を実現するための大きな一歩。

- 気象研究所地球システムモデルによる計算結果は、第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）を通じてIPCC AR6に貢献。

６．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

論文（査読あり国際誌）　98編

（IPCC AR6引用文献　11編）

（２）口頭発表（学会等）　117件

（３）知的財産権（特許）　１件

（４）「国民との科学・技術対話」の実施（含オンライン）　10件

（５）マスコミ等への公表・報道等　17件

（６）本研究費の研究成果による受賞　5件

5-3. 研究目標の達成状況

- サブテーマ1　：　目標を大きく上回る成果をあげた

北極BCの統一データセットの構築。固体粒子・氷粒子観測と動態解明。
論文（査読あり国際誌） 26 編 （IPCC AR6被引用文献 2 編）

- サブテーマ2　：　目標を大きく上回る成果をあげた

北極エアロゾル観測と動態解明。北極BCへのアジアなどの発生源寄与を評価。
論文（査読あり国際誌） 37 編 （IPCC AR6被引用文献 3 編）

- サブテーマ3　：　目標を大きく上回る成果をあげた

雲残渣粒子の変動解明。BCを含むエアロゾルの北極と全球放射強制力を推定。
論文（査読あり国際誌）43 編 （IPCC AR6被引用文献 8 編）

- サブテーマ4　：　目標を大きく上回る成果をあげた

COSMOSと他BC測定器の比較。氷晶核の動態。アイスコア分析による長期変化。
論文（査読あり国際誌）31 編 （IPCC AR6被引用文献 1 編）

⇒ 研究全体として、目標を大きく上回る成果をあげた

まとめ

（1） 目標達成度

- 「BC測定器COSMOSと他の測定との比較検証」という計画目的を達成。
  COSMOSの信頼性の高さの科学的根拠を示すことにより、COSMOSを基準とすることに研究者が合意。
  北極評議会の作業部会報告書において、COSMOSを基準とすることを明記。

- 先端的な観測により検証・改良した信頼性の高い気候モデルにより、BCを含むエアロゾル全体の放射・雲影響（放射強制力）を評価。目標を達成。

  98編の論文やIPCC/CMIP6やAMAPに貢献など、目標を大きく上回る成果

（2） 目標困難度

世界初の技術開発による固体エアロゾルの測定や、大気エアロゾル測定技術をアイスコア分析に応用するなど、革新的な研究に挑戦し、目標を達成。

（3） 研究成果のアウトカム

- 日本の北極政策の「日本の測定器を標準器化する」という戦略の実現に貢献。
- BC排出量削減という国際環境政策に関わる北極評議会の専門家会議（EGMCM）に貢献。

（4） 研究の効率性

- 研究代表者のリーダーシップにより、サブテーマが緊密に連携。多数の共著論文。
- 若手研究者の雇用（次世代人材育成）などを含め、効率的に研究資金を活用。

予備スライド

中間評価コメントへの回答

高い評価をいただきましたことに対し、改めて感謝申し上げます。

◆北極海航路によるBC 沈着影響のモニタリングに期待している。
⇒　本研究の中では、特に北極海航路の影響評価は実施できませんでしたが、本研究が基礎となって構築されつつある北極BC観測ネットワークにおいては、このような影響を検出できる可能性があります。数値モデルによる影響評価の検証においても、この観測ネットワークは重要なものとなります。

◆今後の研究の展開として北極のブラックカーボンの状況がこのように掌握されることは、世界全体の気候変動にどういう影響を及ぼす可能性があるのかという点にもアプローチしてさらなる有意義な研究成果を上げてほしいと期待する。
⇒　世界の数値モデル間には、特に北極BC濃度に大きなバラつきがあり、これがグローバルなBC放射強制力の不確定性となっていました。本研究で検証・改良されたモデルは、北極BC濃度を良く再現できるため、グローバルなBC放射強制力を精度よく推定していると考えらます。ただし、本研究では放射効果までで、気候（気温など）影響は扱っておりません。今後の研究としたいと思います。

◆国民との対話はもう少しあってもよかった。
⇒　研究期間の前半では、COVID-19の影響により、対面でのイヴェントがキャンセルされるなどの制約がありました。後半では、数多く（10件）の対話の機会を設け、本研究の成果を含めた内容を広く知っていただくことができました。

◆研究経費の執行状況を見ると、令和2 年度は旅費の実績が減って物品費が増えている。物品費増は現地との協力に執行したとのことだが、令和3 年度もコロナ禍の影響は避けられないため、予算の繰越しが負担にならないよう計画してほしい。
⇒　令和3・4年度もコロナ禍の影響がありましたが、だんだんと現地訪問もできるようになりました。現地協力も含めて柔軟かつ効率的な予算執行により、計画以上の成果を得ることができました。

COVID-19に伴う気候影響評価（CMIP6/CovidMIP）

サブテーマ　3

Jones, Oshima et al., 2021

- 米国地球科学のレター誌GRLのハイライト論文に選出。
- IPCC AR6/WG1 の政策決定者向け要約（SPM）に記載。
- GRL誌のTop Downloaded Articleに選出（2023年3月30日）。

- COVID-19の流行によるロックダウン等により、温室効果ガスや人為起源エアロゾルなどの排出量が減少。

- 気象研究所の地球システムモデルを含む、世界の12モデルによる影響評価を国際的な枠組みで迅速に実施。

- 一時的な排出量減少により、東アジアや南アジア域でのエアロゾル量は減少したが、地上気温や降水量への有意な影響は見られなかった。

北極評議会とその専門家会議など

北極評議会 （ハイレベルの政府間協議体）

北極圏の持続可能な開発や環境保護等に関する協力の促進
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
（日本はオブザーバ国）

EGBCM（BC・メタン対策に関する専門家会議 Expert Group on Action on BC and methane）

BCやメタンに関する対策についてアセスメントを行い、これを政策決定者に伝える

6つのワーキンググループ

AMAP（北極モニタリング・アセスメント・プログラム Arctic Monitoring and Assessment Programme）

北極環境の現状や脅威に対して信頼性の高い科学的知見を提供し、各種対策の策定に資する科学的なアドバイスをする。