

令和5年度 気象研究所研究成果発表会

災害をもたらす自然現象や気候変動を理解し、命と暮らしを守る最新研究

4. 大気中の微粒子（エアロゾル）が 地球の気候を変える

—気候研究の最前線—

全球大気海洋研究部 大島 長

大気中の微粒子(エアロゾル)が 地球の気候を変える -気候研究の最前線-

大島 長



気象庁気象研究所
全球大気海洋研究部



令和5年度 気象研究所研究成果発表会
2023年12月2日 気象研(オンライン)

本日の話題

大気中の微粒子(エアロゾル)が地球の気候を変える -気候研究の最前線-

1. はじめに (エアロゾルについて)
2. 産業革命以前から現在までの気候影響
3. 現在から将来にかけての気候影響
4. まとめ

エアロゾル(エーロゾル)とは？

大気中に浮遊する液体または固体の微粒子を「**エアロゾル粒子**」と呼ぶ。

※ 気相中に液体または固体の粒子が分散した状態の系をエアロゾル (aerosol) と呼ぶ。

大きさ(粒径): 数 nm ~ 数十 μm (1000 nm = 1 μm = 0.001 mm)

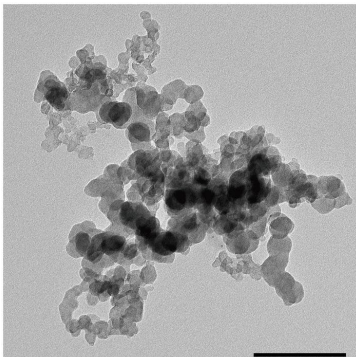
主要組成: 硫酸塩、硝酸塩、アンモニウム塩、黒色炭素(煤)、有機物、鉱物ダスト、海塩など

生成過程: 一次粒子(直接放出される)、二次粒子(大気中の化学反応で生成される)

微小粒子 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径 < 2.5 μm) **人為起源**の影響大

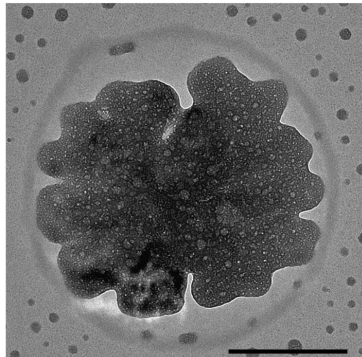
粗大粒子 (粒径 > 2.5 μm) **自然起源**の影響大

黒色炭素粒子
(川崎)



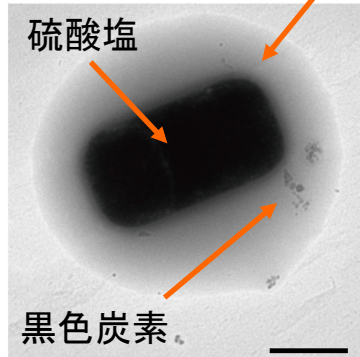
200 nm

硫酸アンモニウム粒子(北極)



500 nm

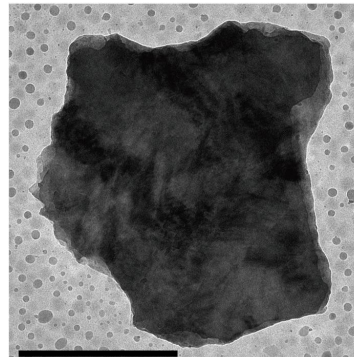
内部混合粒子
(アメリカ)



500 nm

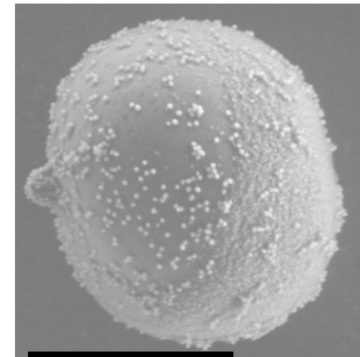
有機物

鉱物粒子(北極)



1 μm

スギ花粉(つくば)



20 μm

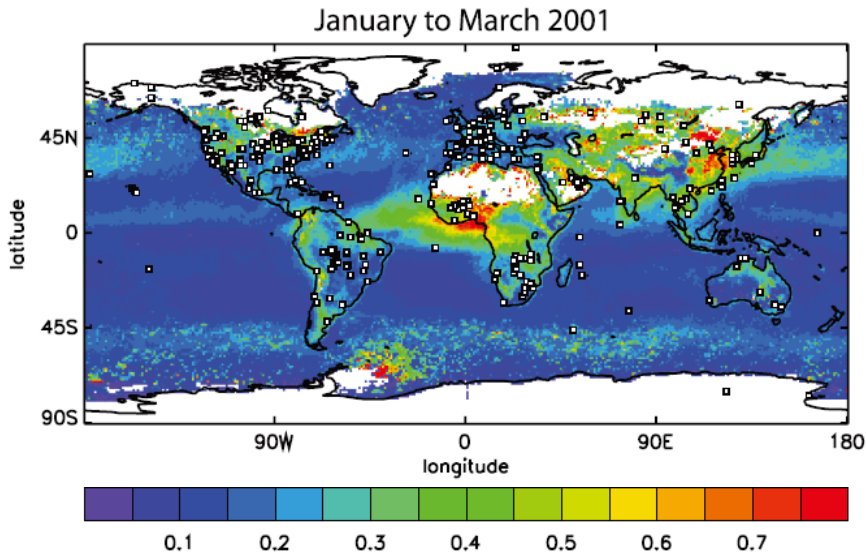
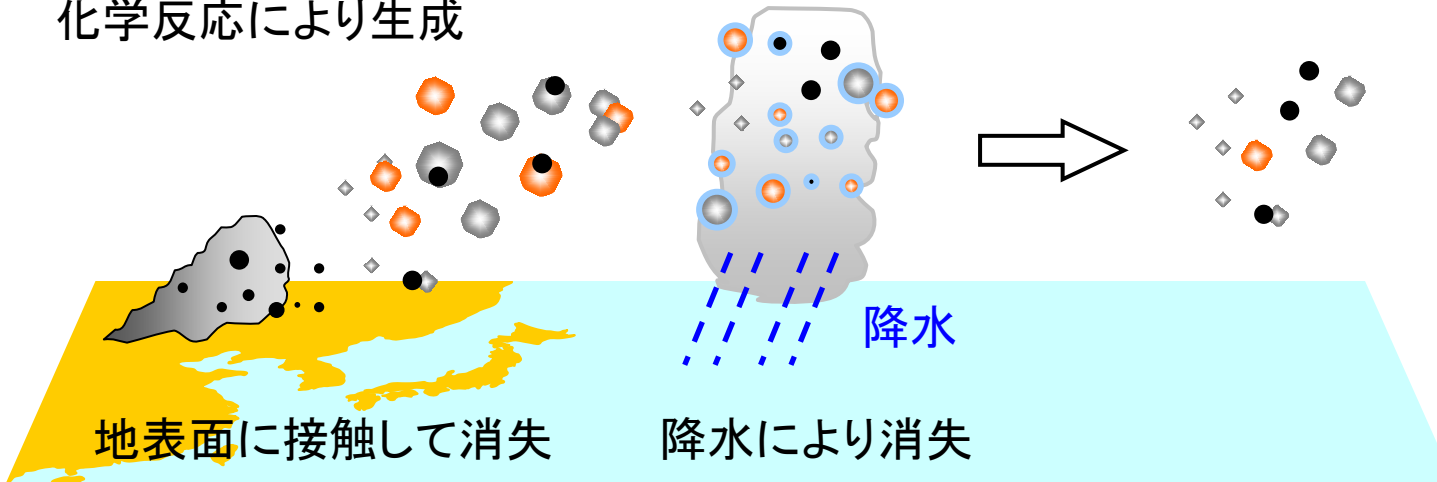
電子顕微鏡画像(気象研究所)

エアロゾルの空間分布

発生源から放出
化学反応により生成

一部は雲粒になる

一部は遠方に運ばれる



エアロゾル総量の光学的深さ

- 温室効果ガスと異なり、**エアロゾルは大気中の寿命が短い**
- 空間分布が不均一になる(地域の違いが現れる)
- 主に対流圏の高度に分布

IPCC [2007]

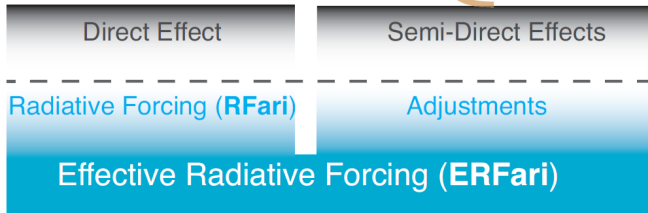
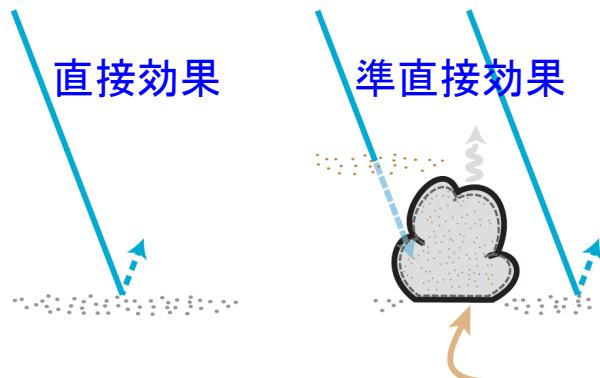
エアロゾルは地球の放射収支を変える

エアロゾルの放射への影響

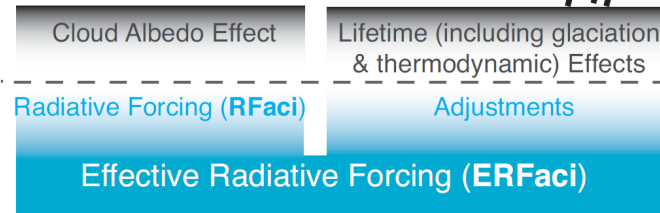
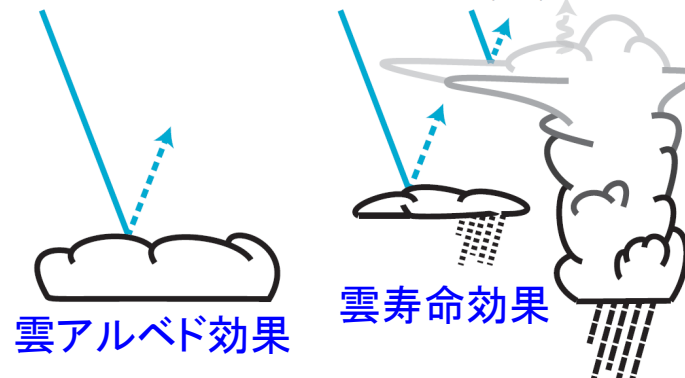
1. エアロゾル-放射相互作用(直接的): 太陽光を散乱または吸収する
2. エアロゾル-雲相互作用(間接的): 雲凝結核・氷晶核として働き、雲を変調させる
3. 雪氷面が黒く汚れると、**地表面のアルベド**(光反射率)が低下する

- 降水(水循環)、大気循環、海洋循環へ影響
- 大気汚染物質であり、人間の健康に悪影響
- 視程、酸性雨、海洋の生物生産、マイクロプラスチック問題など

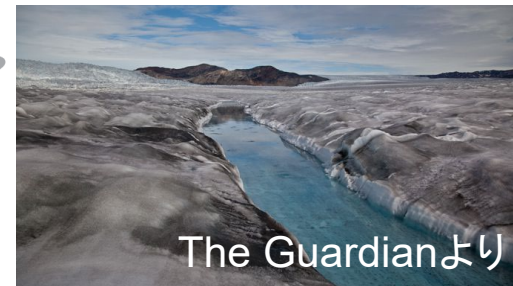
1. エアロゾル-放射相互作用



2. エアロゾル-雲相互作用



3. 地表(積雪)の暗色化



<https://www.theguardian.com/environment/2014/jul/05/dark-snow-speeding-glacier-melting-rising-sea-levels>
Photograph: Henrik Egede Lassen/Alpha Film

IPCC [2013]

SLCFsという考え方

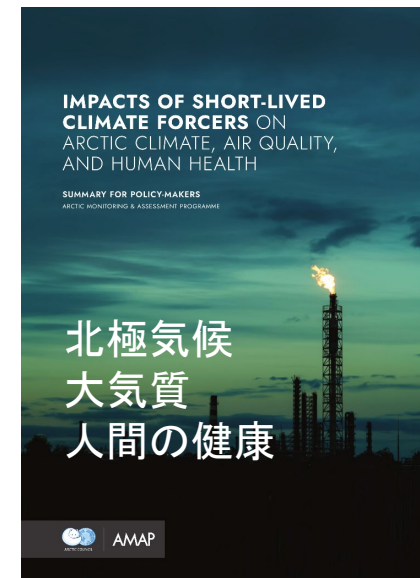
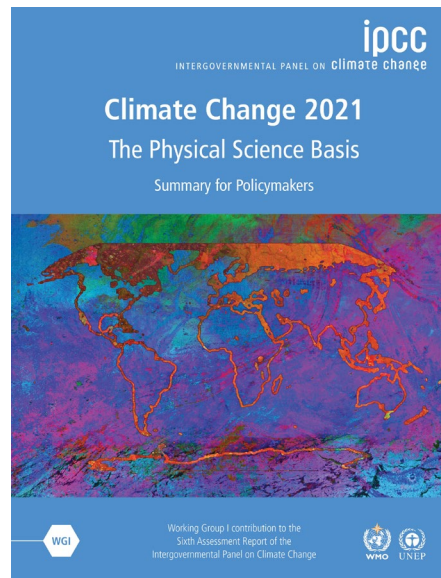
SLCFs (Short-Lived Climate Forcers) 短寿命気候強制因子

- エアロゾルやオゾン・メタンおよびその前駆物質などの気候に影響を及ぼす物質
- 大気中での寿命が短い(数分から10年程度以内) **排出量削減の効果が短期間に現れやすい**
- 一部は大気汚染物質 **大気汚染と気候の両方に影響**

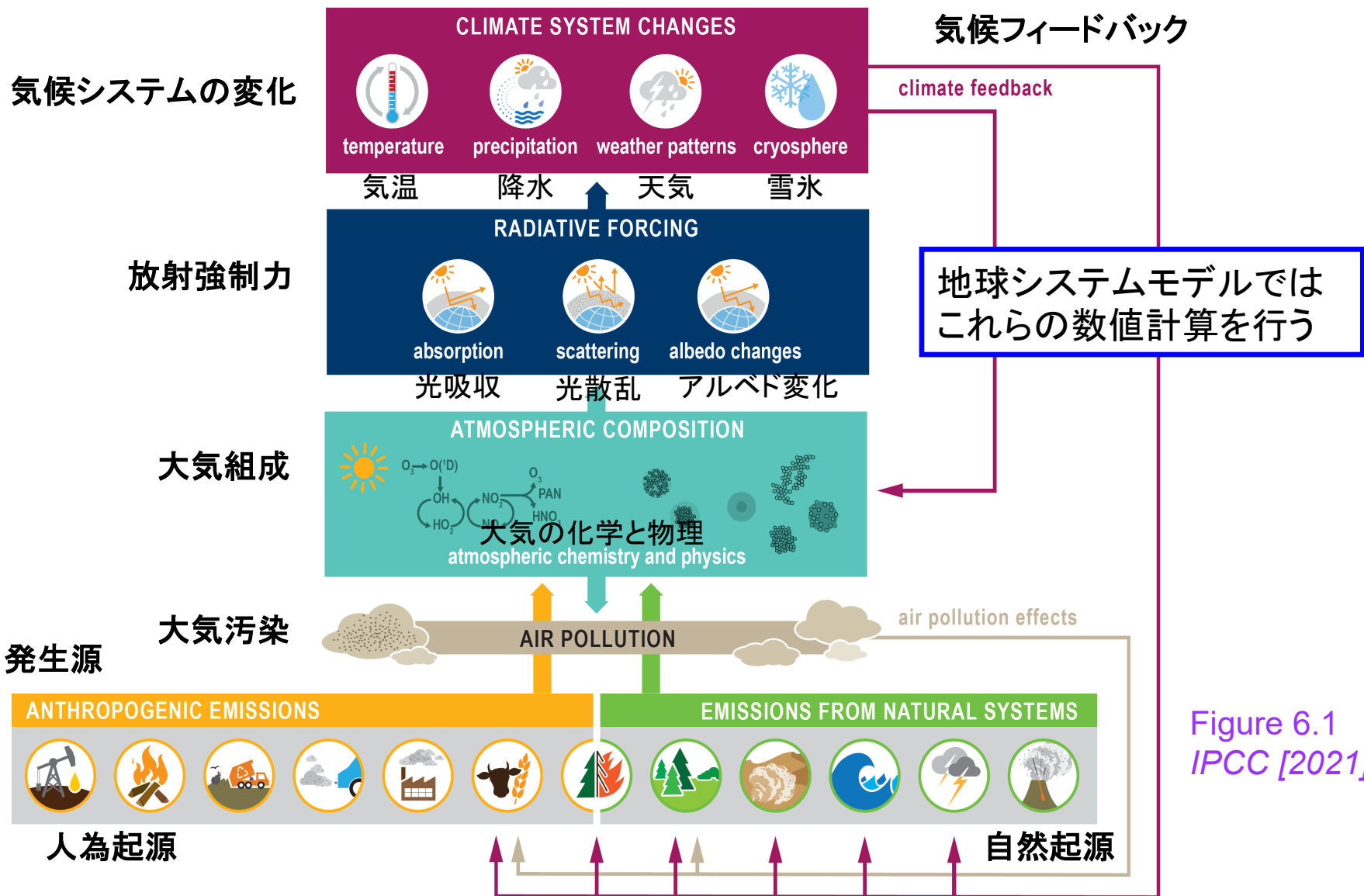
SLCFs の重要性は国際的にも高く認識されている

- IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第6次評価報告書でSLCFsの**独立章(第6章)**
- IPCC TFI (インベントリタスクフォース)での**SLCFs排出量推計に関する方法論報告書**の準備
- **北極評議会**の北極圏監視評価プログラム(AMAP)での**SLCFsに関する評価報告書**
気象研究所はこれらの報告書に貢献している

IPCC組織図



SLCFsの発生源と気候システムへの影響



化石燃料、バイオ燃料、廃棄、交通、産業、農業、バイオマス燃焼、植生、土壌、海、雷、火山

Figure 6.1
IPCC [2021]

エアロゾルによる交通被害(アイスランド噴火)



これらの写真は発表者が撮影

エアロゾルによる人間の社会活動への影響は大きい

2010年4月17日のスイス・チューリッヒ空港での写真。
フライトは全てキャンセル。空港は大混雑。

アイスランドの火山噴火のため、欧州ほぼ全域で航空機の飛行禁止が長く続いた。
(エイヤフィヤトラヨークトルの噴火)

エアロゾルによる最大規模の気候変動(恐竜等の絶滅)

[Kaiho, Oshima et al., Sci. Rep., 2016]

<https://www.theguardian.com/science/2016/jul/14/asteroid-killed-dinosaurs-by-setting-oil-alight-and-spreading-soot-says-study>
Photograph: Don Davis/AFP/Getty Images



地質調査

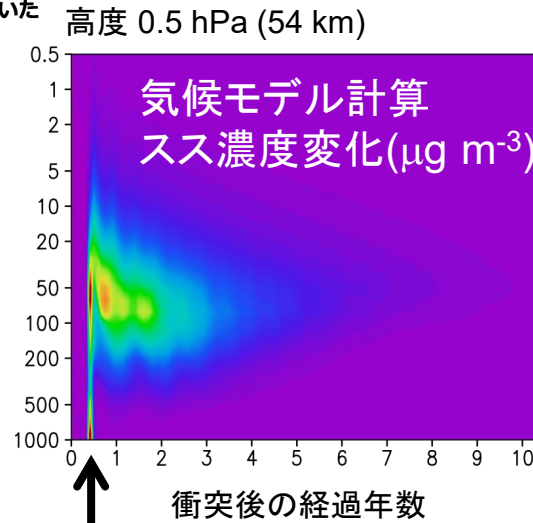
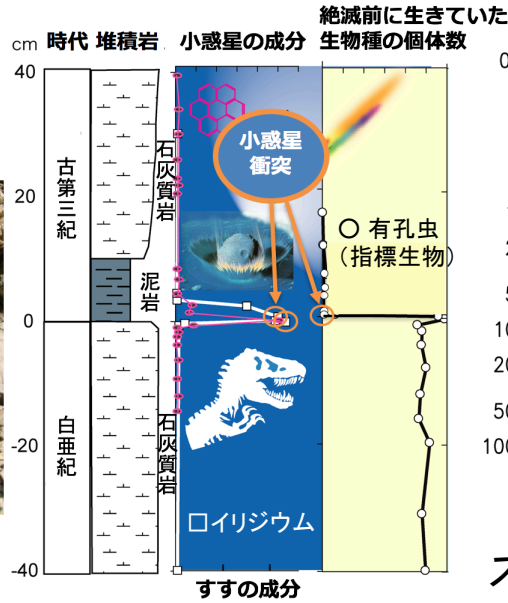
イリジウム層



©海保邦夫



堆積岩 (スペイン南部)

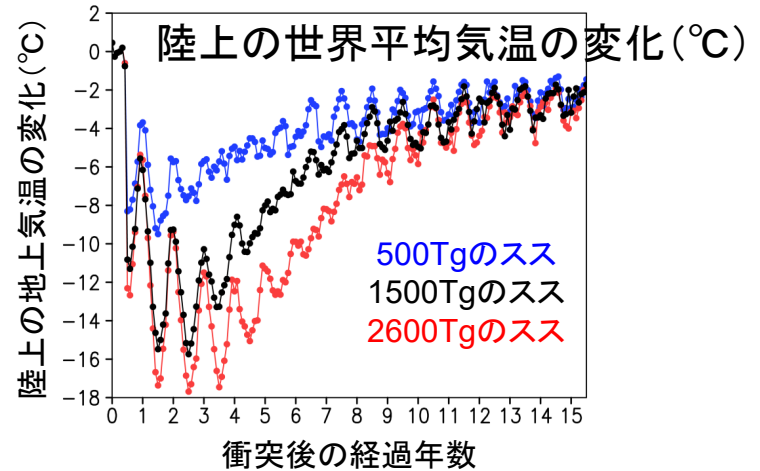
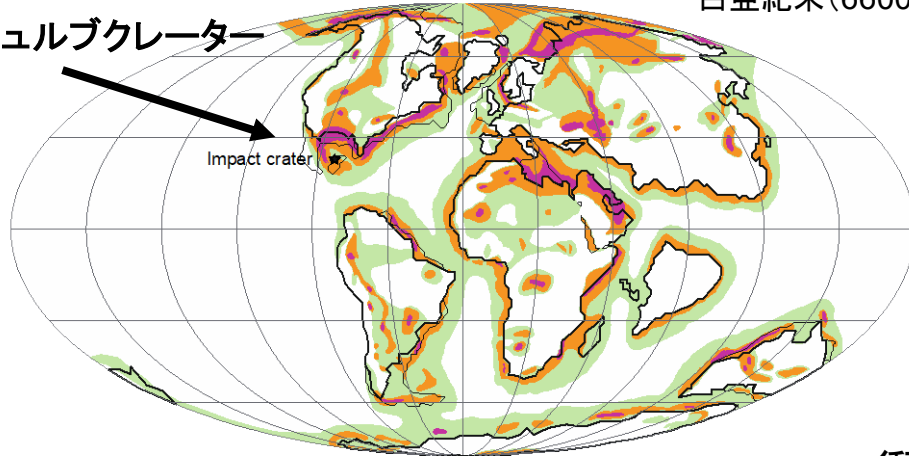


スス粒子をユカタン半島上空に放出したモデル計算

[Kaiho & Oshima, Sci. Rep., 2017]

チチュルブクレーター

白亜紀末(6600万年前)



衝突後2~3年間で陸上気温が10-16°C低下

本日の話題

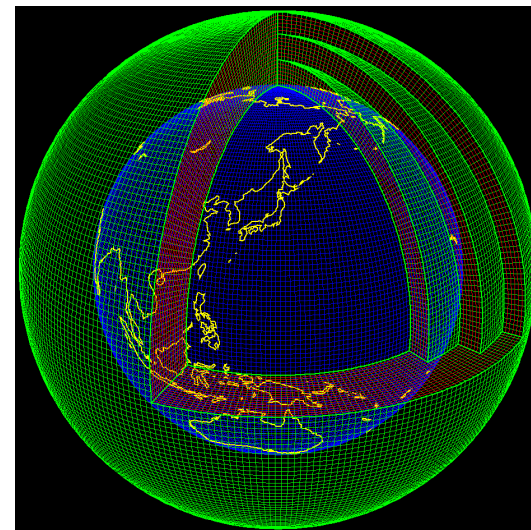
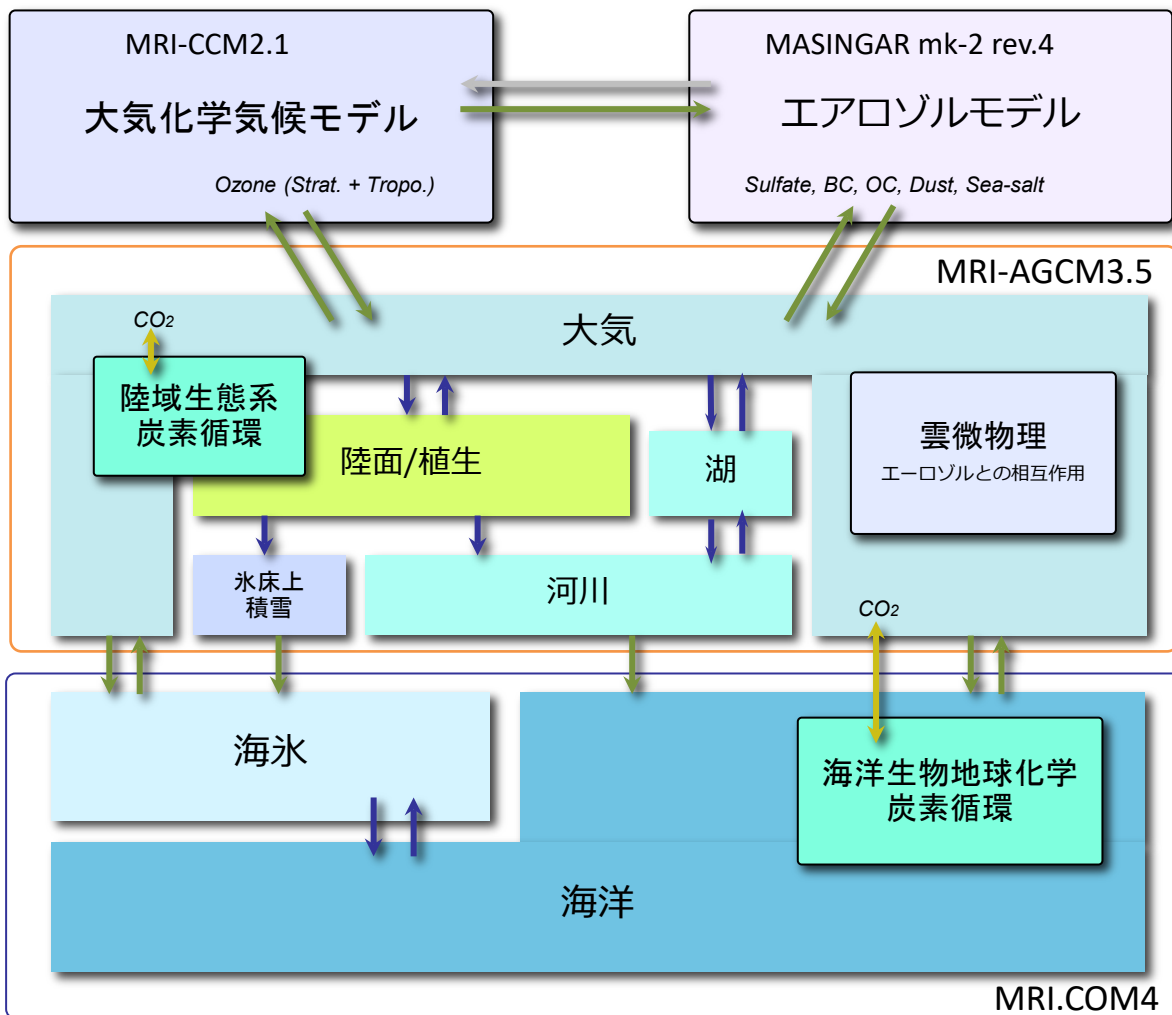
大気中の微粒子(エアロゾル)が地球の気候を変える -気候研究の最前線-

1. はじめに (エアロゾルについて)
2. **産業革命以前から現在までの気候影響**
3. 現在から将来にかけての気候影響
4. まとめ

気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2.0)

地球システム(大気、海洋、雪氷、陸域、エアロゾル、大気化学、炭素循環など)を扱うモデル

Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0 (MRI-ESM2.0) を開発



大気大循環モデル
AGCM

海洋大循環モデル
OGCM

カップラー'Scup'



モデル相互比較計画

第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6)

- 気候モデルの相互比較の枠組み。
- 世界の研究機関がそれぞれの最新のモデルを用いて、共通の条件設定のもとで数値実験を行い、結果を比較。
- IPCCの評価報告書に対応。

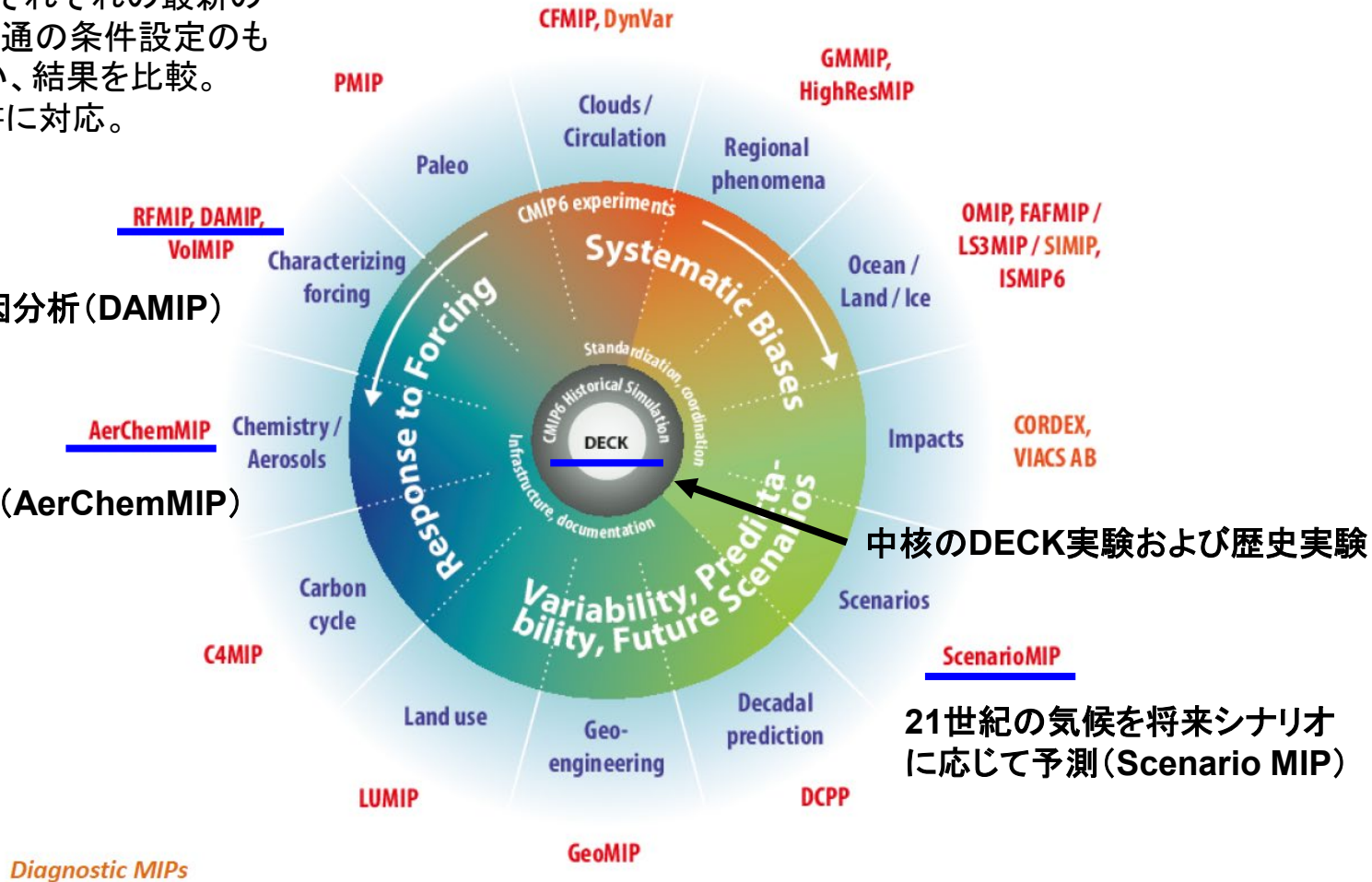
21 CMIP6-Endorsed MIPs



放射強制力 (RFMIP)

気候変動の検出と要因分析 (DAMIP)

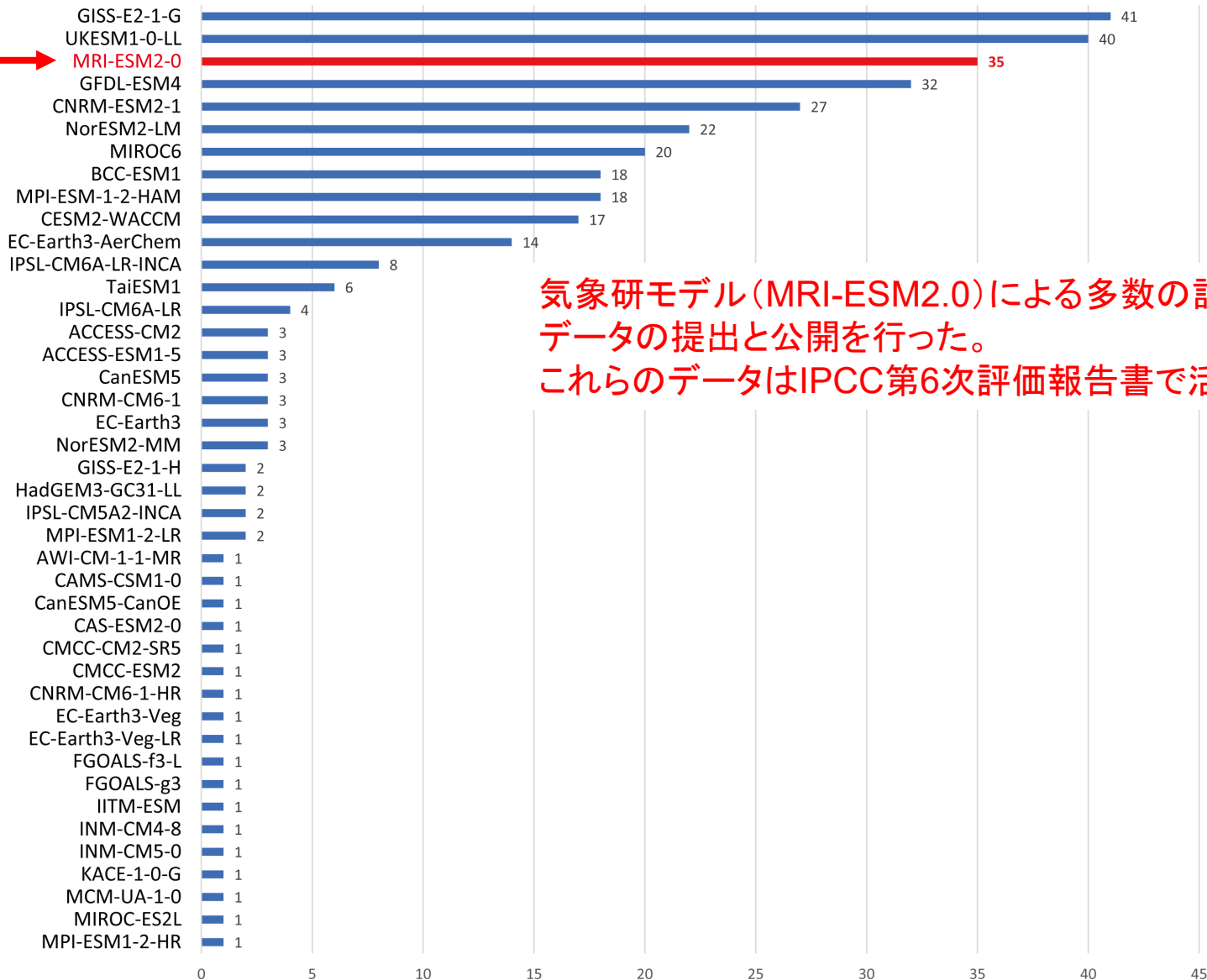
エアロゾルと大気化学 (AerChemMIP)



気象研究所はMRI-ESM2.0を用いて、これらのモデル相互比較に参加

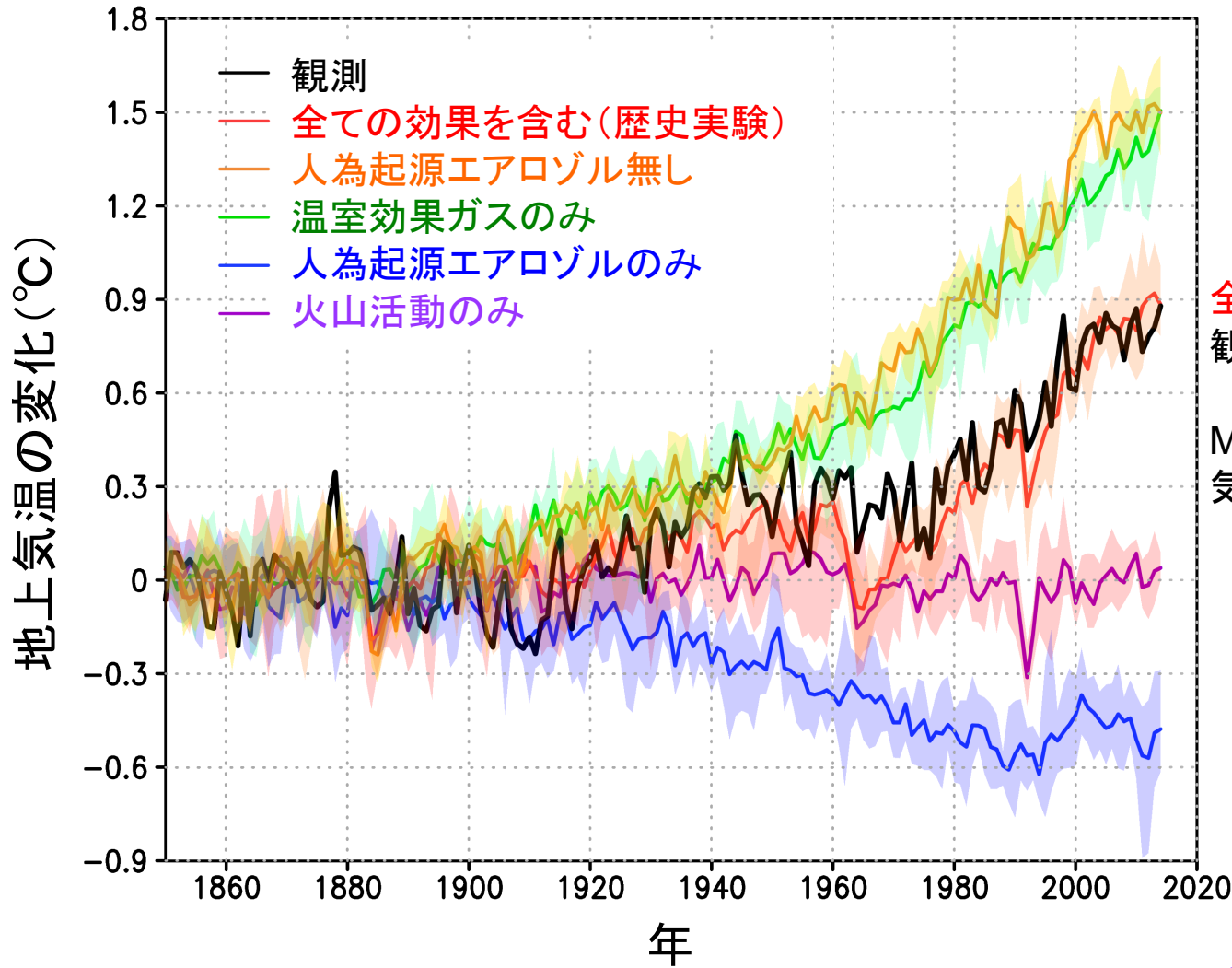
AerChemMIPでのモデルデータの提出数

ESGF CMIP6 AerChemMIP Data Holdings (15 November 2021)



気象研モデル(MRI-ESM2.0)による多数の計算を実施し、データの提出と公開を行った。
これらのデータはIPCC第6次評価報告書で活用された。

世界平均の地上気温の変化(MRI-ESM2.0)



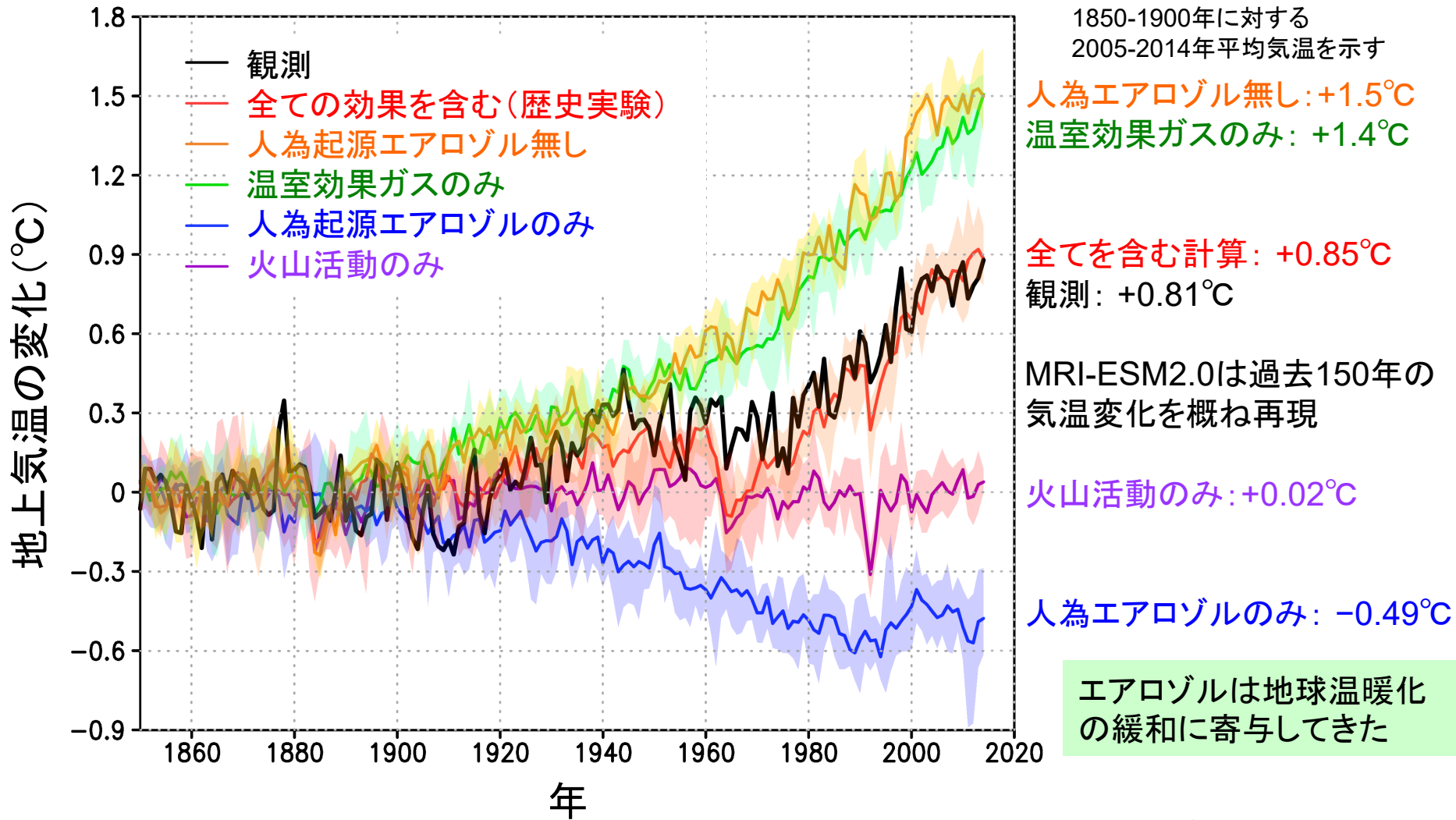
1850-1900年に対する
2005-2014年平均気温を示す

全てを含む計算: $+0.85^{\circ}\text{C}$
観測: $+0.81^{\circ}\text{C}$

MRI-ESM2.0は過去150年の
気温変化を概ね再現

[大島, エアロゾル研究, 2022]

エアロゾルがないと気温は上がる

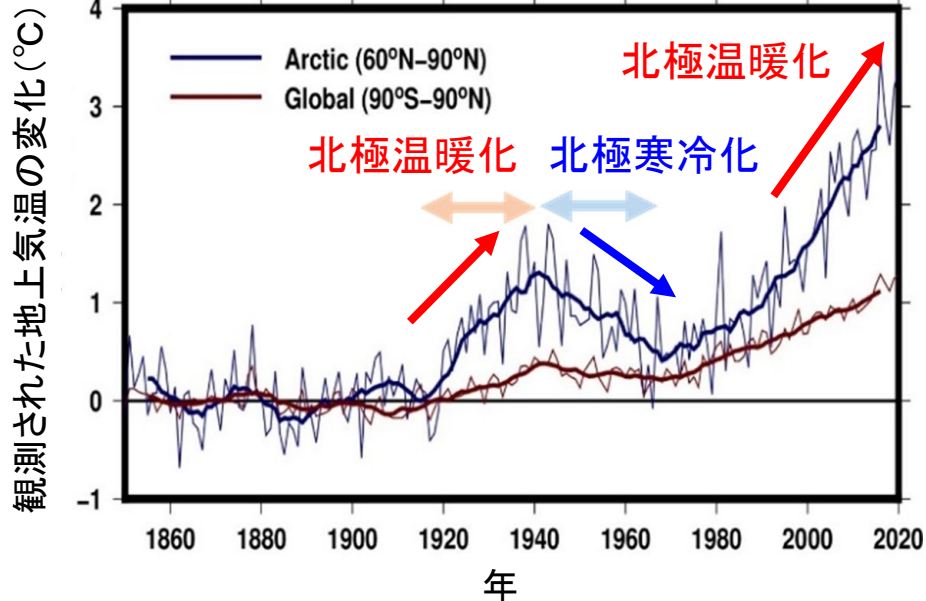


[大島, エアロゾル研究, 2022]

- 温室効果ガス・エアロゾル・火山活動などの各寄与を推定。
- **人為起源エアロゾル**は、現在の世界平均の地上気温を0.5~0.6°C低下させ、温室効果ガスによる気温上昇のうち30~40%を打ち消す。**もしエアロゾルがなかったら、気温は今よりも高くなる。**

エアロゾルは北極の気候を変える

北極平均と世界平均の地上気温の変化

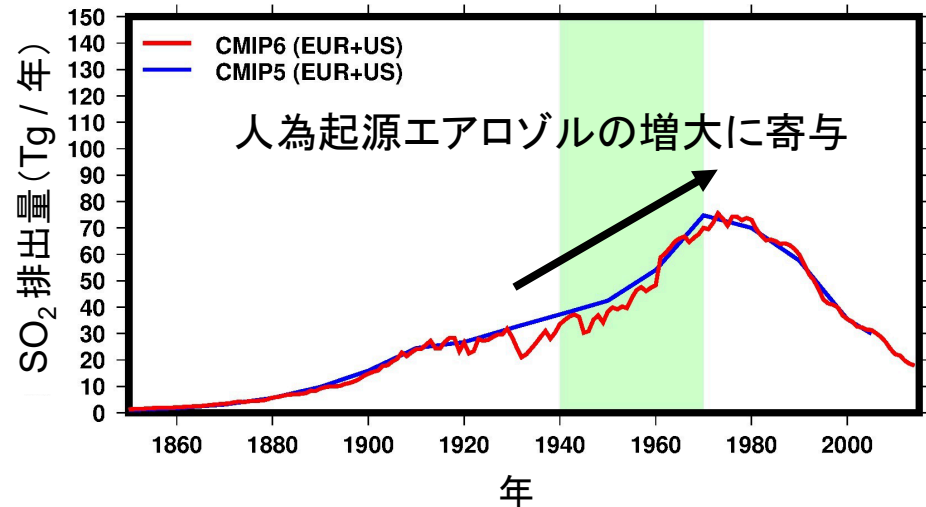


1970年頃の北極地上気温の変化とその要因
(1940年頃の気温からの差)

- 観測: -0.8°C
- 温室効果ガス: $+0.4^{\circ}\text{C}$
- 人為起源エアロゾル: -0.7°C
- 気候の内部変動: -0.5°C

世界の13モデルの解析結果

SO₂ 排出量の変化(ヨーロッパ+北米)
(SO₂は硫酸塩エアロゾルの前駆物質)



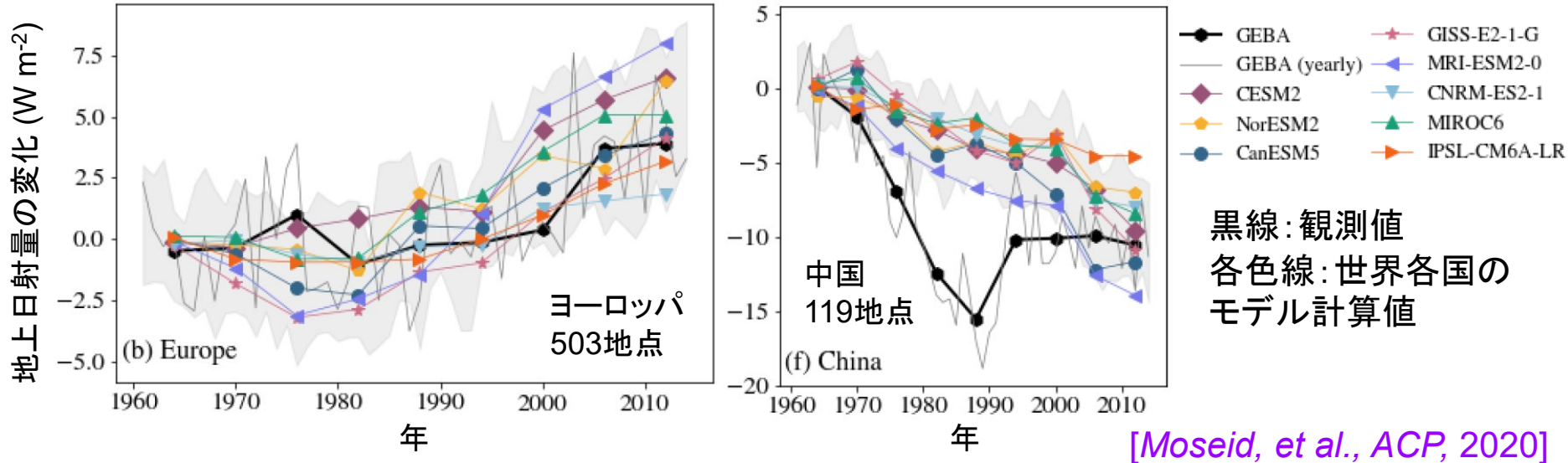
- 20世紀中頃の北極寒冷化には、同時期の人為起源エアロゾルの増大が寄与。
- 数十年規模の内部変動の寄与も大きい。

[Aizawa, Oshima et al., GRL, 2022]

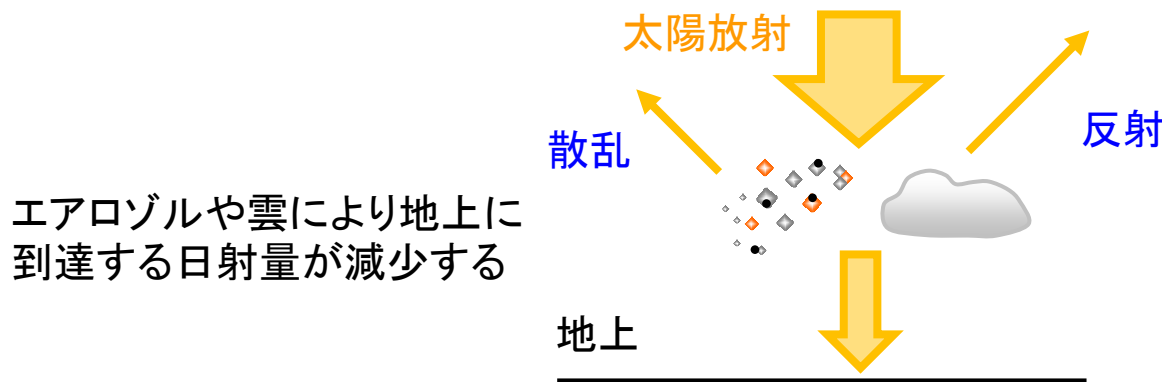
[相澤, 大島, ArCS II ニュースレター, 2022] をもとに作成

エアロゾルは地上に達する日射量を減らす

地上に到達する日射量(下向き短波放射)の変化(6年平均値)



- 人為起源エアロゾルは、地上日射量の減少と回復に影響
- 地上日射量は、ヨーロッパでは回復傾向(大気汚染の改善)、中国では減少傾向(大気汚染の悪化)
- モデルの地上日射量の変化は、ヨーロッパでは再現性がよいが、中国では再現性が悪い



COVID-19に伴う気候影響評価



Did the Drop in COVID-Related Emissions Affect the Climate?

Global emissions dropped markedly in 2020, due in large part to lockdowns that slowed economic and social activity, but the climate likely won't be noticeably affected.

SOURCE: *Geophysical Research Letters*



米国地球物理学連合の
レター誌GRLのハイライト論文

Wheeling, K. (2021), *Eos*, 102, <https://doi.org/10.1029/2021EO158007>

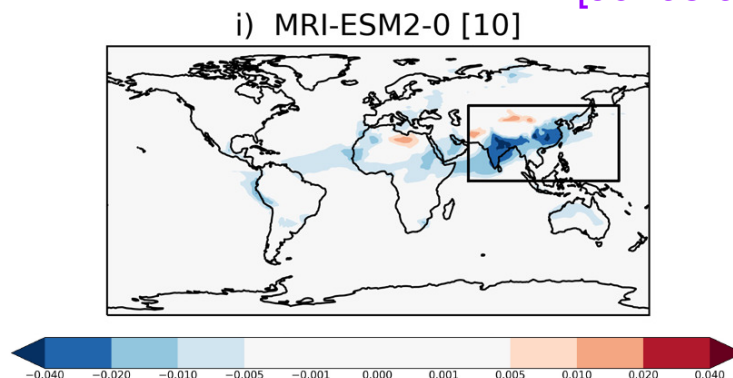
COVID-19の流行によるロックダウン等により、温室効果ガスや人為起源エアロゾルなどの排出量が減少。

気象研究所を含む、世界12モデルによる信頼性の高い影響評価を国際的な枠組みで迅速に実施(CovidMIP)。

一時的な排出量の減少により、東アジアや南アジア域でのエアロゾル量は減少し(大気汚染は改善)、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見られなかった(2020-2024年)。

一時的な排出量削減が地球温暖化に与える影響は限定的。温暖化の緩和には、より長期的なCO₂等の削減が重要。

[Jones et al., *GRL*, 2021]



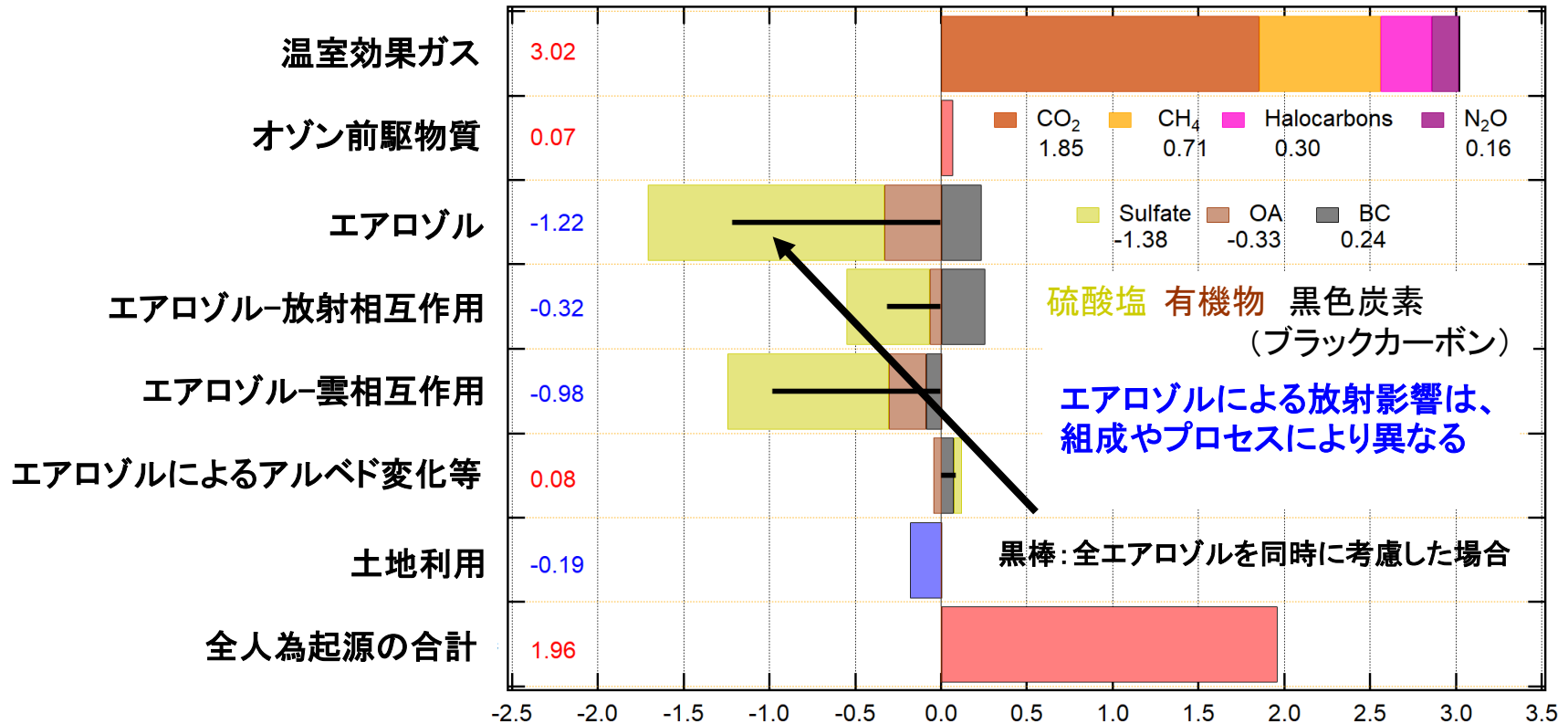
人為起源排出量の減少による
エアロゾルの光学的深さの変化

本日の話題

大気中の微粒子(エアロゾル)が地球の気候を変える -気候研究の最前線-

1. はじめに (エアロゾルについて)
2. 産業革命以前から現在までの気候影響
3. **現在から将来にかけての気候影響**
4. まとめ

エアロゾル等による様々な放射影響

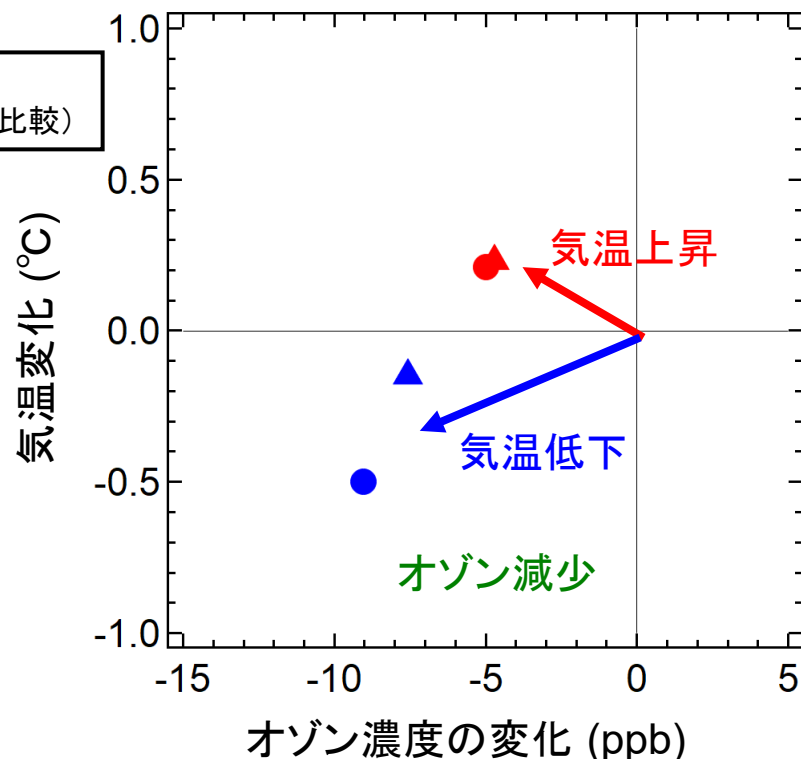
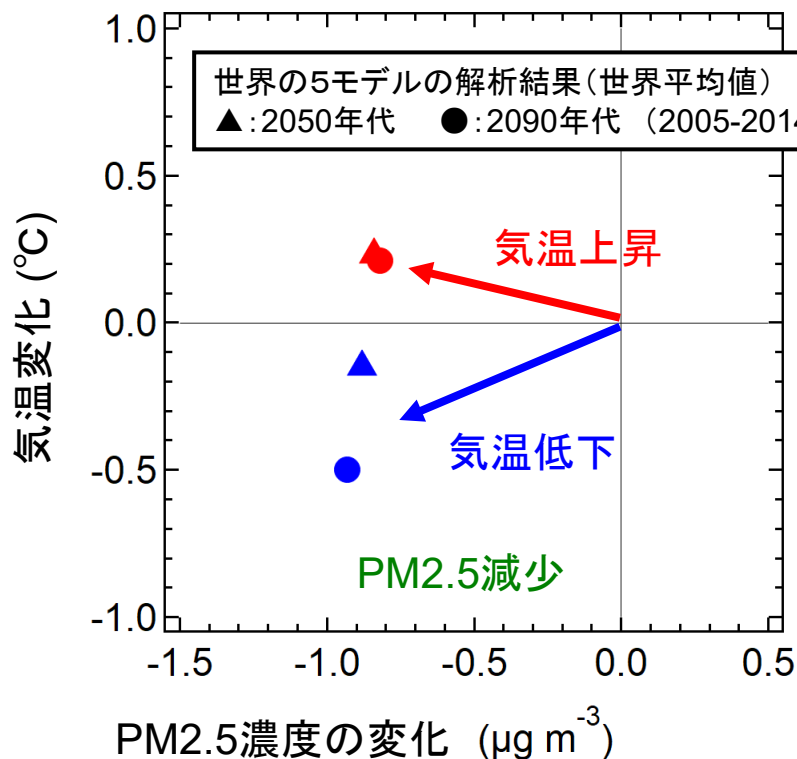


[Oshima et al., PEPS, 2020] をもとに作成

有効放射強制力 (W m⁻²)

- MRI-ESM2.0により、気候変動をもたらす主な駆動要因による有効放射強制力を推定。
- エアロゾルの放射影響では、**エアロゾル-雲相互作用**が主要。
- ブラックカーボン(BC)による気候応答メカニズムの示唆(大気加熱、降水減少、大気安定化、寿命)。
- 北極域ではCO₂に次いで、BCは2番目に大きい正の強制力。**北極気候でのBCの重要性**。

大気汚染の改善と地球温暖化の抑制の両立



将来シナリオ(SSP3-7.0)に対して、

赤色の印:エアロゾルとオゾン前駆物質の排出量削減: PM2.5減少、オゾン減少、気温上昇

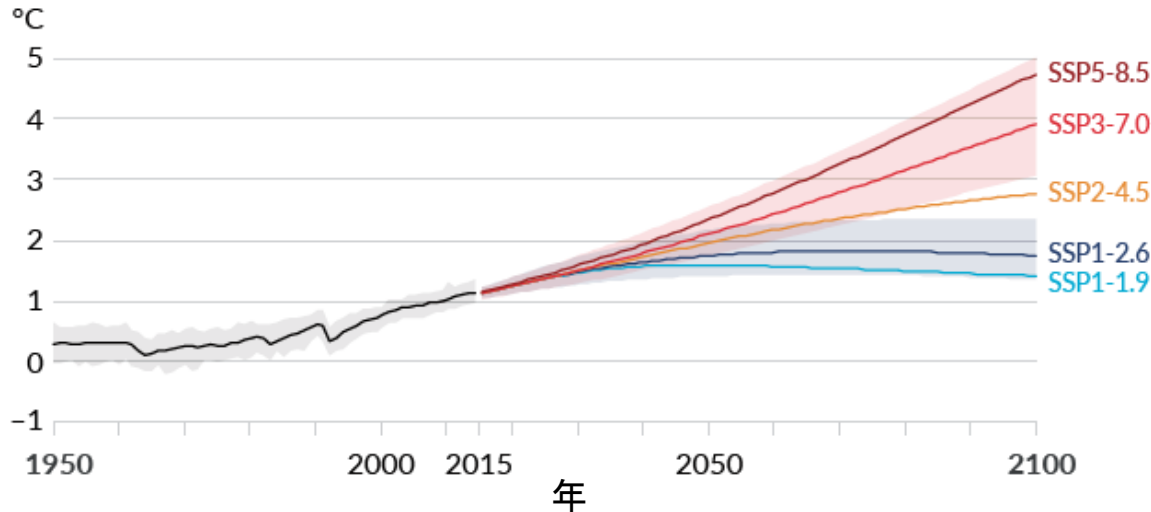
青色の印:上記に加えてメタンを削減: PM2.5減少、オゾン減少、気温低下

[Allen et al., ERL, 2021] をもとに作成

将来、エアロゾルの排出量を削減すると、大気汚染は改善するが、地球温暖化は進行する。大気汚染の改善と地球温暖化の緩和を両立させるため(人間の健康と気候の共便益を得る)には、エアロゾルと(二酸化炭素を含めた)温室効果ガスの両方の排出量削減が重要である。

地球温暖化の進行を緩和するには？

1850-1900年に対する世界平均の地上気温の変化(°C)

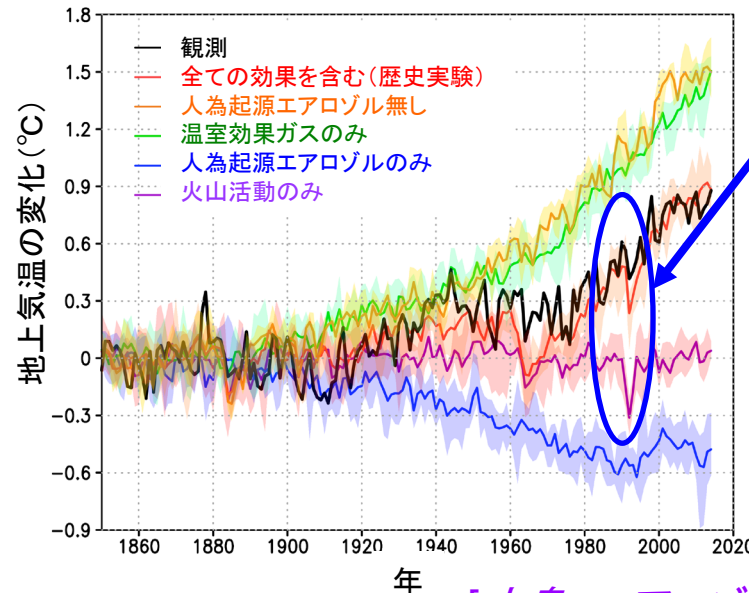


地球温暖化の進行は、どのシナリオでも継続する可能性

Figure SPM.8
IPCC [2021]



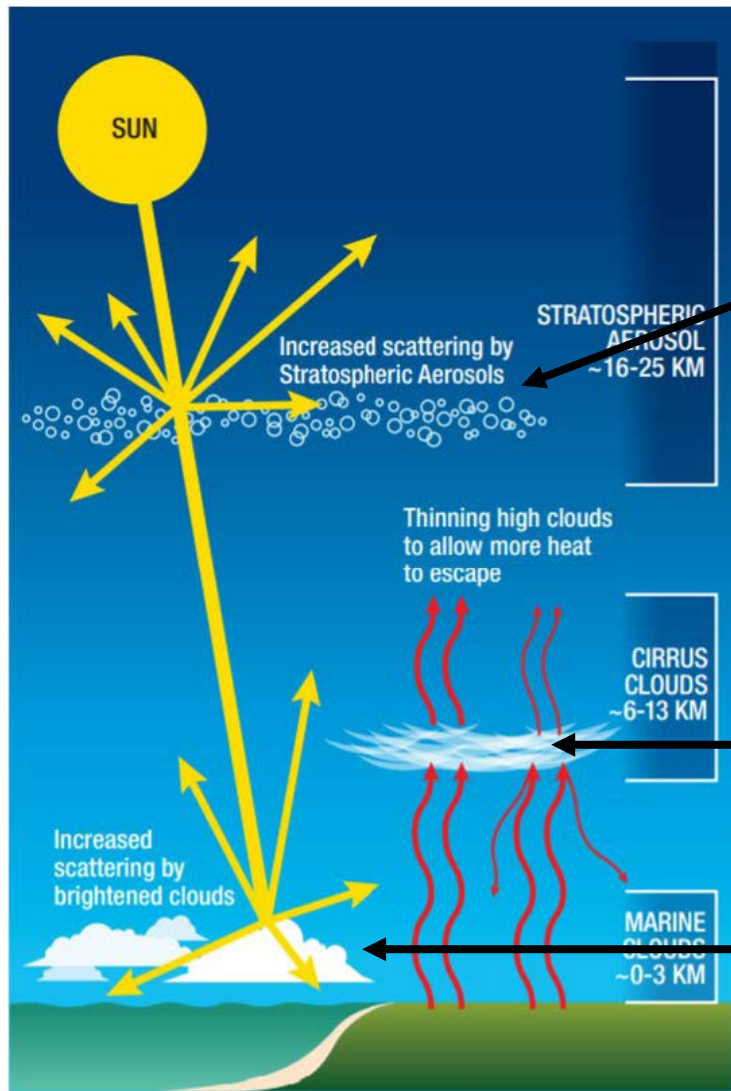
1991年ピナツボ噴火



火山噴火の事例から、成層圏エアロゾルの増加は、地球を冷却することが実証されている。

この現象を模倣して、もし、人為的に成層圏にエアロゾルを注入すると、気候はどうなる？

ジオエンジニアリングでのエアロゾル



太陽放射改変:

地球の放射収支に直接介入し、地表面を冷却させる

成層圏にエアロゾルを注入(太陽光の反射)

- 実現性が高い手法と考えられる
- 数年間で地球を冷やすことができる
- しかし意図しない結果が現れるかもしれず、副作用の定量化が不十分であり、様々なリスクや不確実性がある

巻雲の薄化(赤外放射を宇宙に逃がす)

海洋上の雲の白色化(太陽光の反射)

欧米では人為的な**気候介入**の研究が進められている

本日の話題

大気中の微粒子(エアロゾル)が地球の気候を変える -気候研究の最前線-

1. はじめに (エアロゾルについて)
2. 産業革命以前から現在までの気候影響
3. 現在から将来にかけての気候影響
4. **まとめ**

まとめ

- 気象研究所は地球システムモデル(MRI-ESM2.0)を開発・活用し、様々な国際的なモデル相互比較計画に参加し、IPCCの評価報告書などに貢献してきた。
- エアロゾルは大気質と気候の両方に重要であり、削減の効果が短期間に現れやすい。
- エアロゾルは正味で地球を冷却する効果を持ち、地球温暖化の緩和に寄与してきた。
- エアロゾルの減少は、大気汚染の改善をもたらすが、地球温暖化を進行させる。
- 将来、大気汚染の改善と地球温暖化の緩和を両立させる(人間の健康と気候の共便益を得る)ためには、エアロゾルと温室効果ガス(二酸化炭素やメタン等)の両方の排出量削減が重要である。北極の温暖化の緩和には、ブラックカーボンの排出量削減も重要である。

ご清聴ありがとうございました。

謝辞： 本研究は、JSPS科研費、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20202003, JPMEERF20205001, JPMEERF20232001)、北極域研究推進プロジェクト(ArCS II)(JPMXD1420318865)、環境省・地球環境保全等試験研究費(国1753, 国2253)、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」(JPMXD0717935561)の助成を受けたものです。