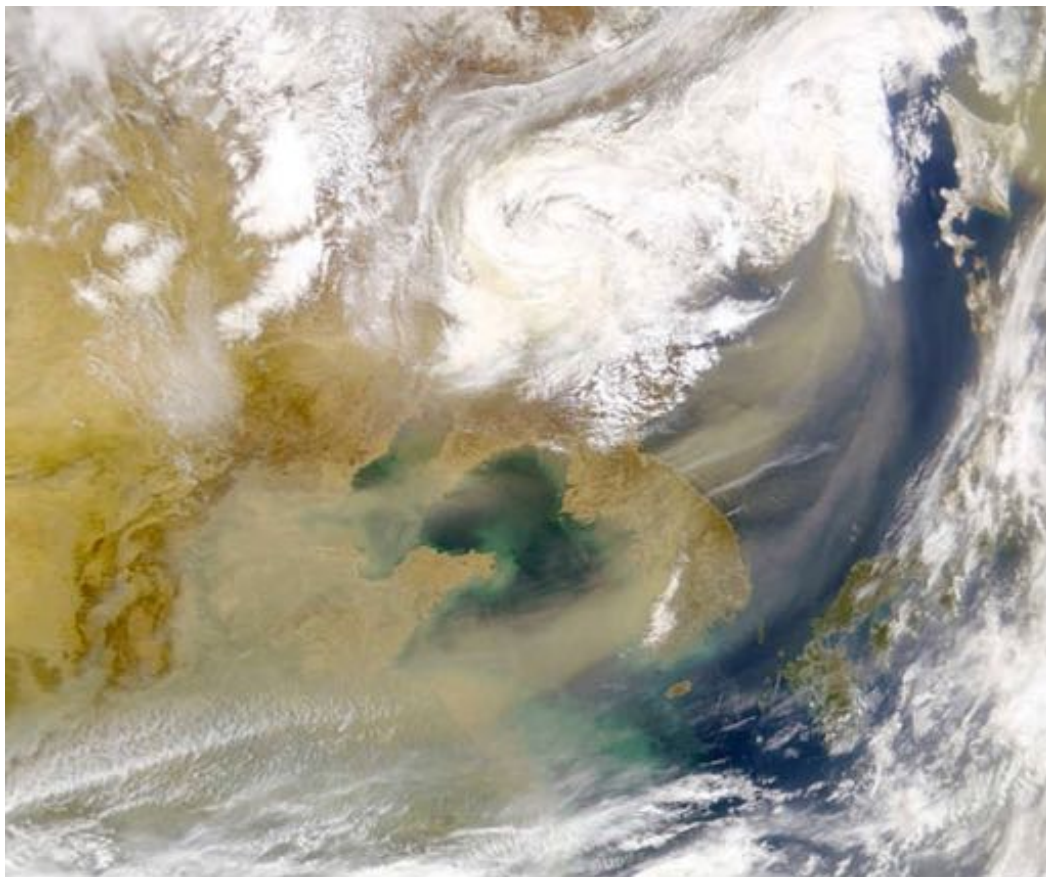


テーマ 3 「大気環境に関わるエアロゾル 全球シミュレーション」

五藤 大輔（国立環境研究所・地域環境保全領域）

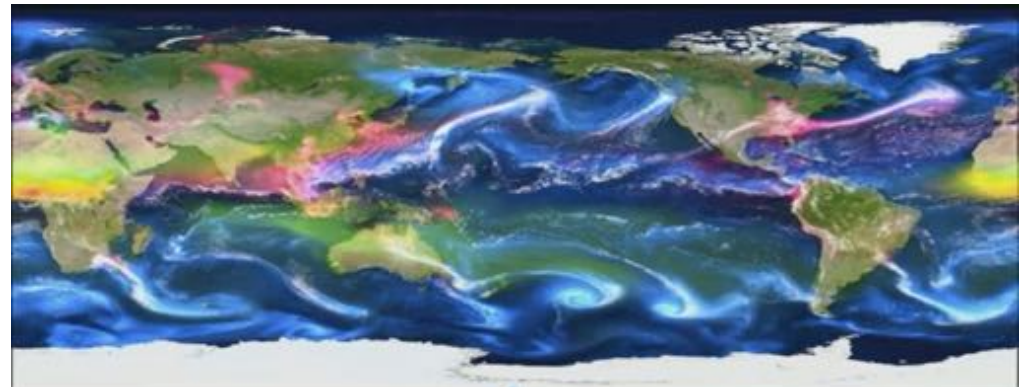
要旨：大気汚染物質のエアロゾルは、PM_{2.5}として大気環境だけではなく、太陽光の散乱・吸収、あるいは雲の核となることで、気候にも影響を与えます。大気環境改善と地球温暖化抑制を同時に実施できるように、大気汚染物質を効果的に減らすことが国内外で議論されています。このような議論の場にも役立つ科学的知見として、「富岳」を使って得られたエアロゾル高解像度シミュレーションやエアロゾルデータ同化に関する最新の成果をご紹介します。

本日の内容



衛星観測SeaWiFs (2000年4月7日)

- エアロゾルとは何か？
- エアロゾルシミュレーション
- 「富岳」の利用で進展したか？
- エアロゾルの気候影響評価
- エアロゾルの同化計算



エアロゾルとは何か？

エアロゾル、PM_{2.5}

- エアロゾルは大気中に浮いている粒子
- PM_{2.5}はエアロゾルの中であるサイズ以下のもの
- あるサイズとは、2.5 μm (マイクロメートル。1 μm は1 mmの1000分の1)
- PMは粒子状物質 (Particulate Matter) のこと
- PM_{2.5}は小さいので目に見えない (髪の毛の太さの30分の1程度)



大気汚染（群馬県前橋市の例）



群馬県前橋市（群馬県衛生環境研究所）から撮影した赤城山（距離19 km）。

晴天日でもPM_{2.5}濃度が高いと視程がさえぎられることがわかる

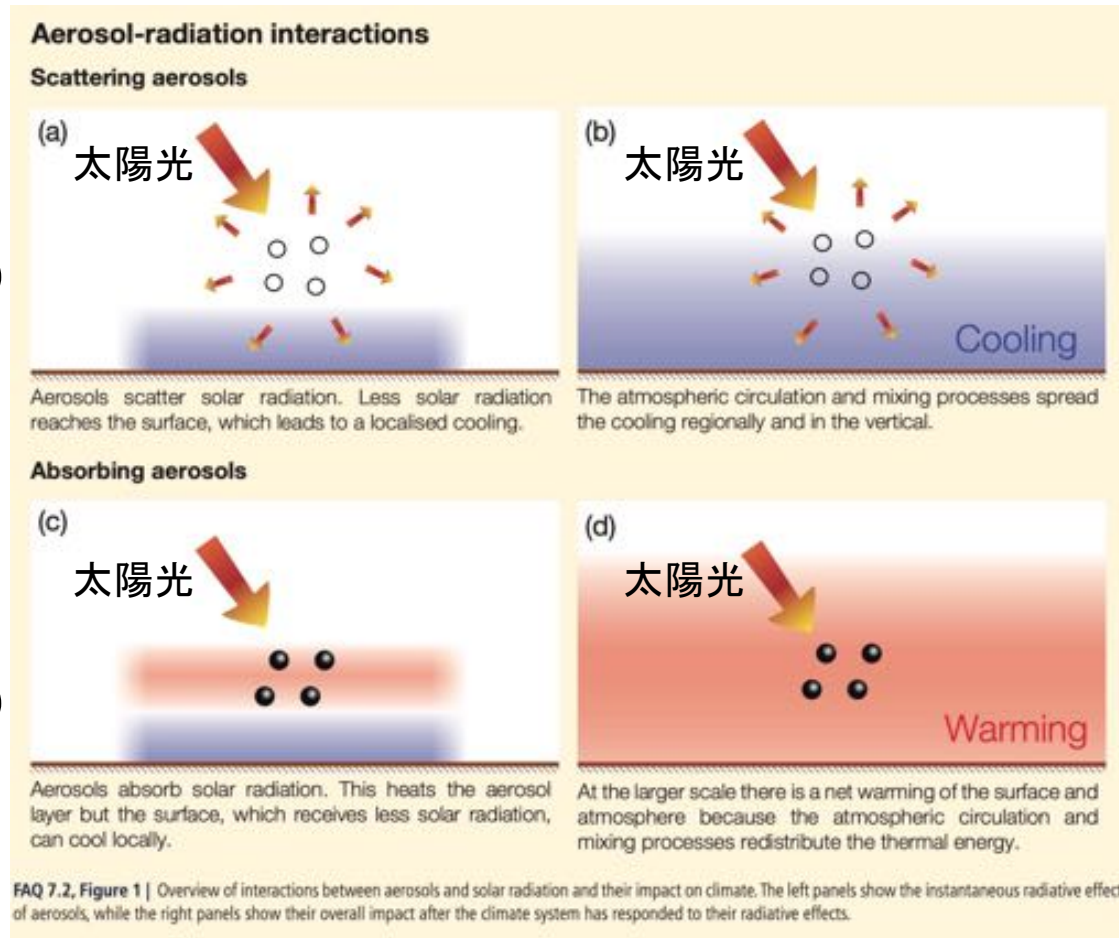
（群馬県衛生環境研究所 熊谷貴美代博士 撮影）。

エアロゾルと放射の相互作用

エアロゾルには、散乱だけするものと光吸収が強いものの2種類がある。

太陽光を**散乱**する
エアロゾル
(硫酸塩エアロゾル)

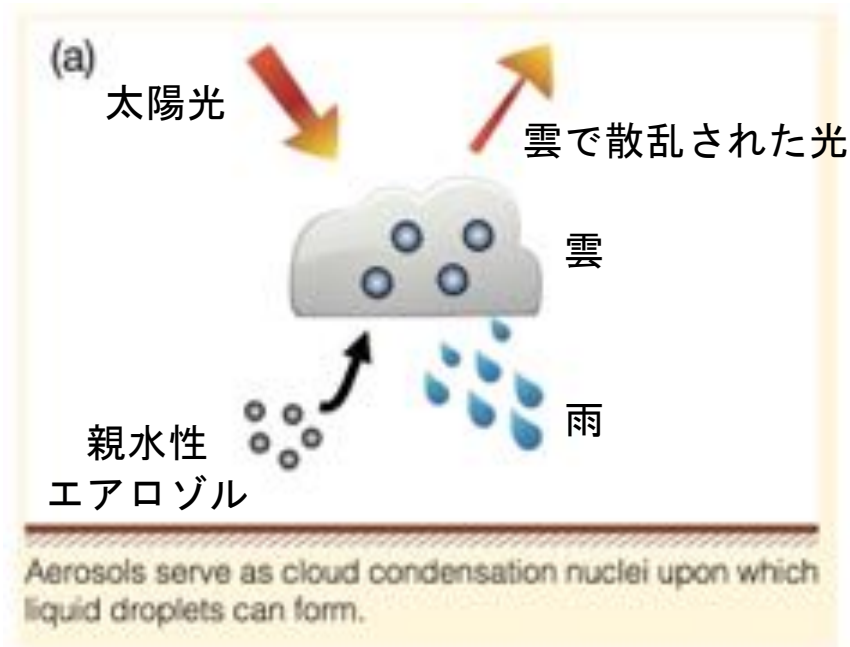
太陽光を**吸収**する
エアロゾル
(ブラックカーボン)



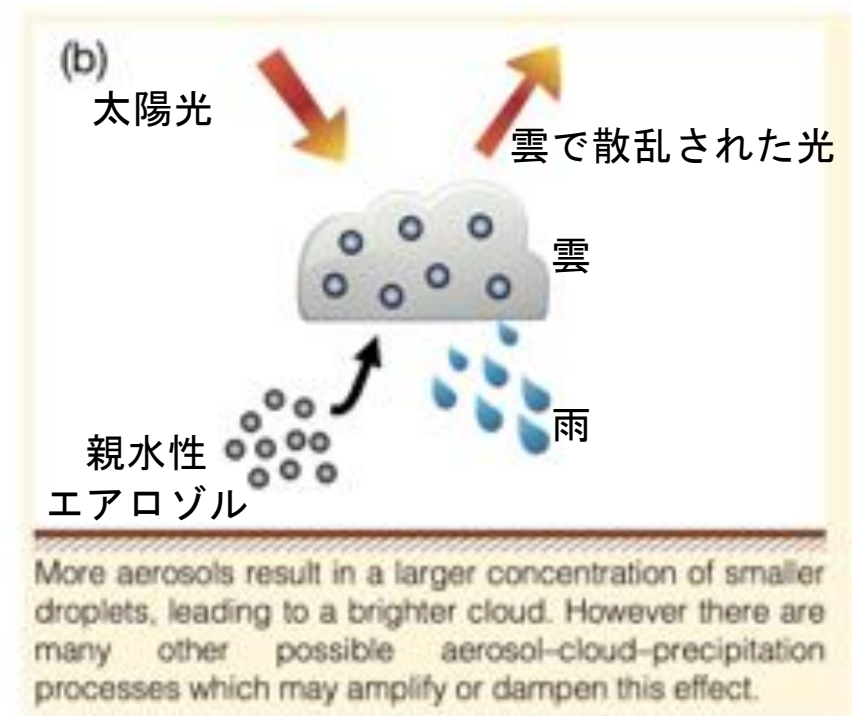
(IPCC-AR5, Chapter 7, 2013)

エアロゾルと雲の相互作用

エアロゾルが雲の核となる

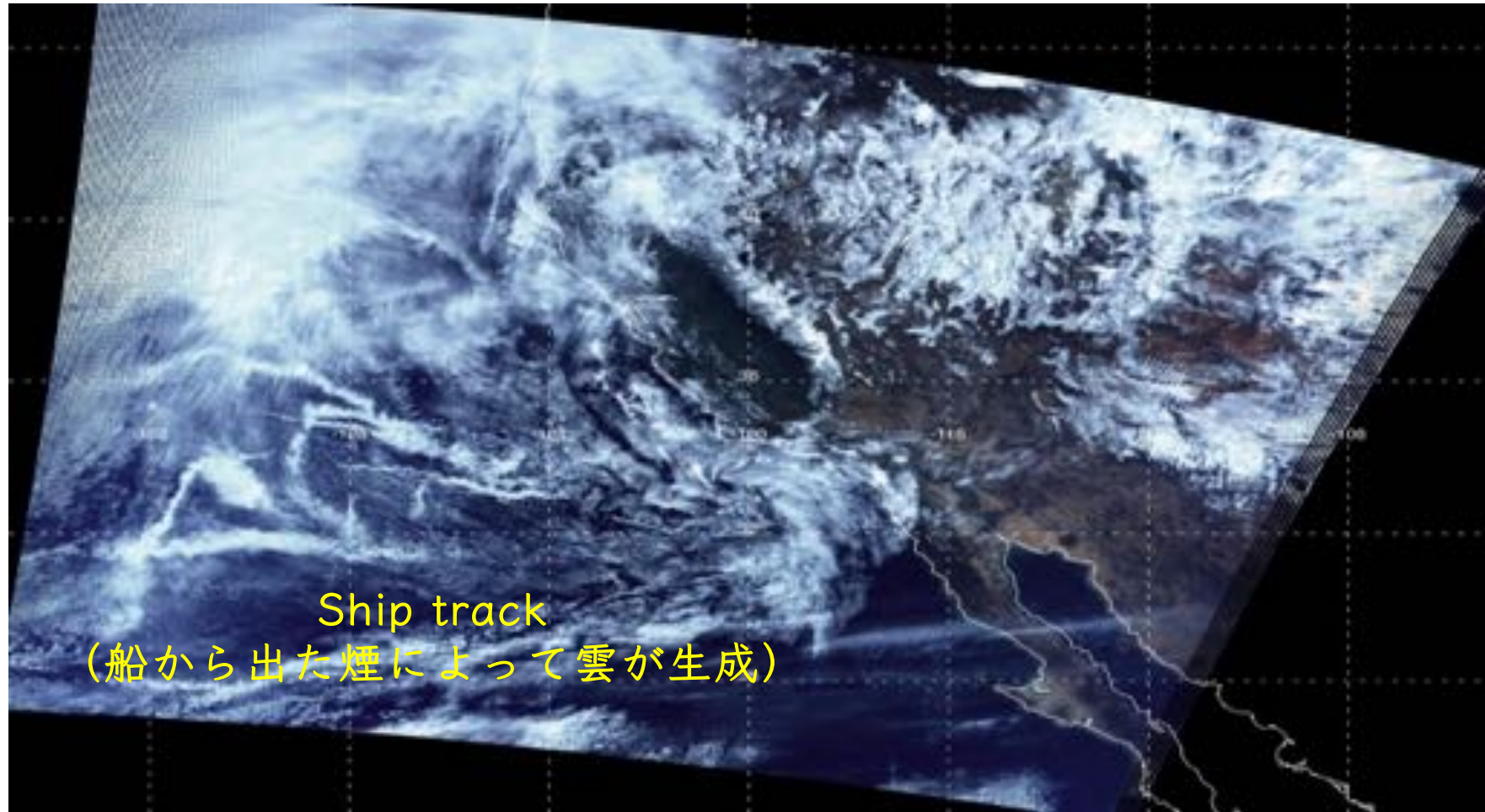


エアロゾルが多いと雲特性が変化



エアロゾル-雲-降水の関係は、理解が進んでいるが、まだ不十分である

衛星から見た雲－エアロゾル相互作用



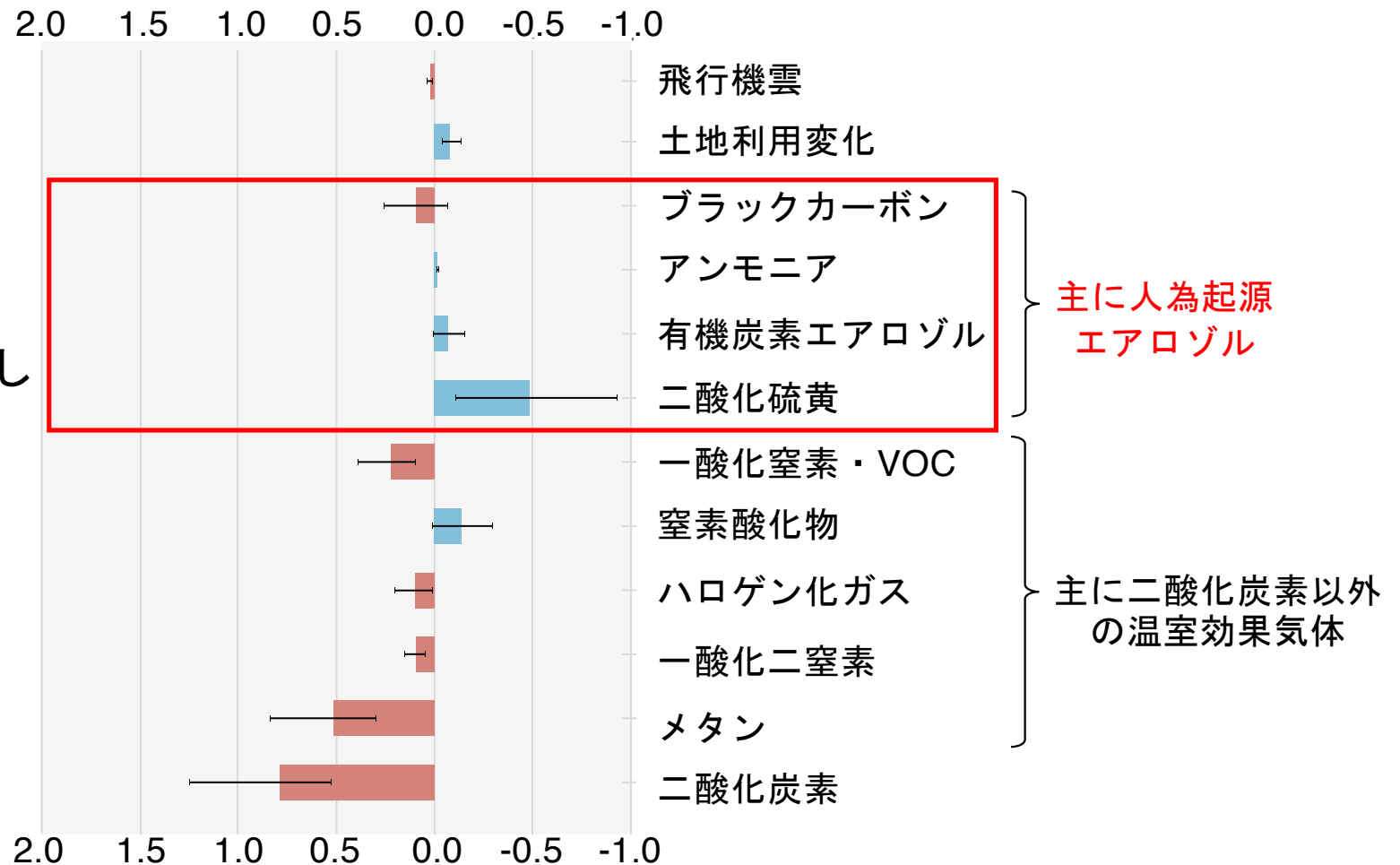
Ship track
(船から出た煙によって雲が生成)

大気汚染が地球の気候と関係している？

過去^{*1}から現在^{*2}の
気温変化に対して、
各物質が何°C寄与したのか？

^{*1}過去（1850-1900年）

^{*2}現在（2010-2019年）



(IPCC AR6 WG1, Summary for Policymakers, 2021)

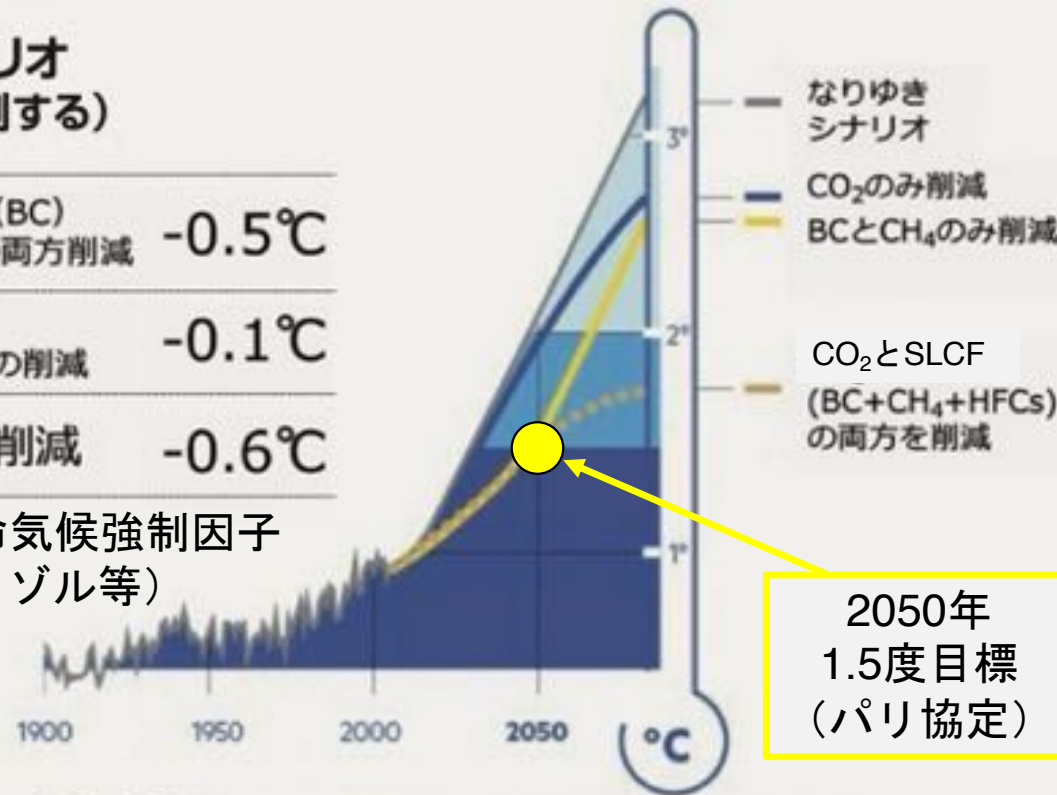
世界で議論されている大気汚染の将来シナリオ



気温緩和シナリオ (温度上昇を抑制する)

ブラックカーボン (BC) とメタン (CH ₄) の両方削減	-0.5°C
ハイドロフルオロ カーボン (HFCs) の削減	-0.1°C
上記のSLCFの削減	-0.6°C

SLCF: 短寿命気候強制因子
(エアロゾル等)



気候緩和シナリオを用いて
シミュレーションした気温変化

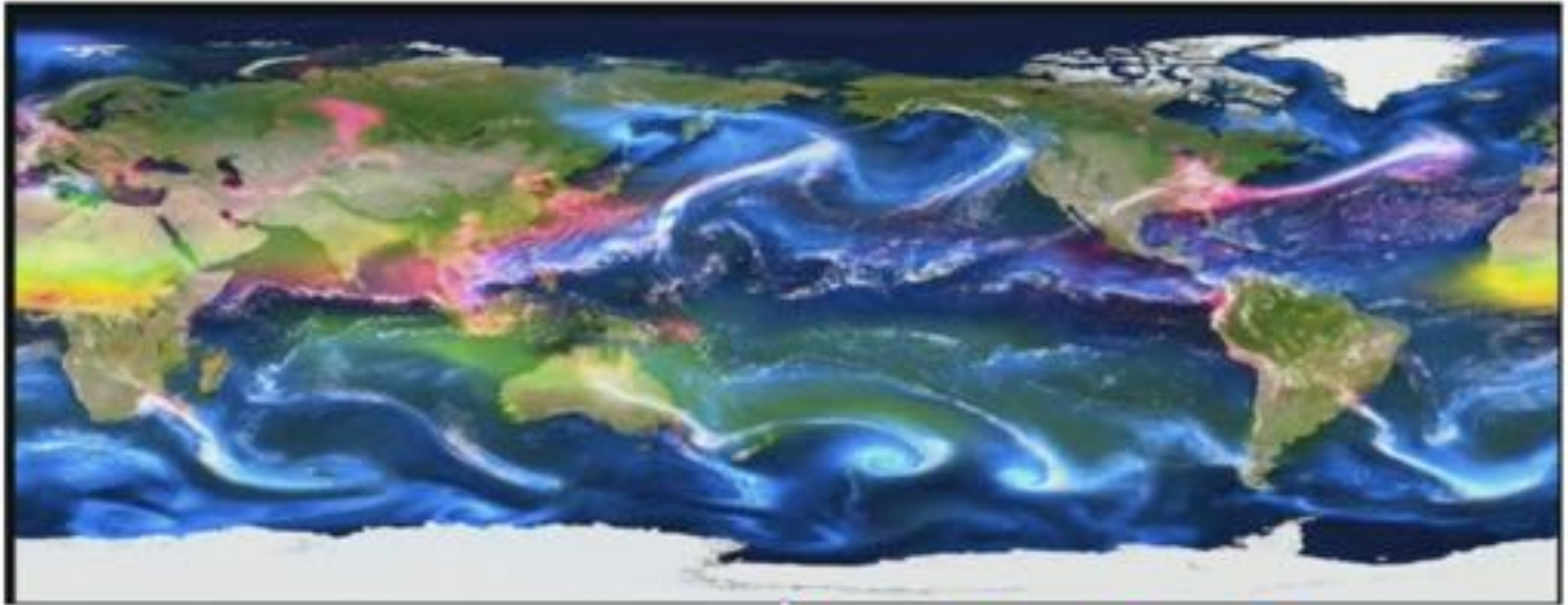
www.ccacoalition.org/science

(CCAC; <https://www.ccacoalition.org/en/content/short-lived-climate-pollutants-slcp>)

このような研究をするために
数値シミュレーションが必要になる
↓
エアロゾルシミュレーションの紹介

NICAM-Chemによる全球高解像度シミュレーション

全球3.5kmグリッドに設定して計算したエアロゾル光学的厚さ



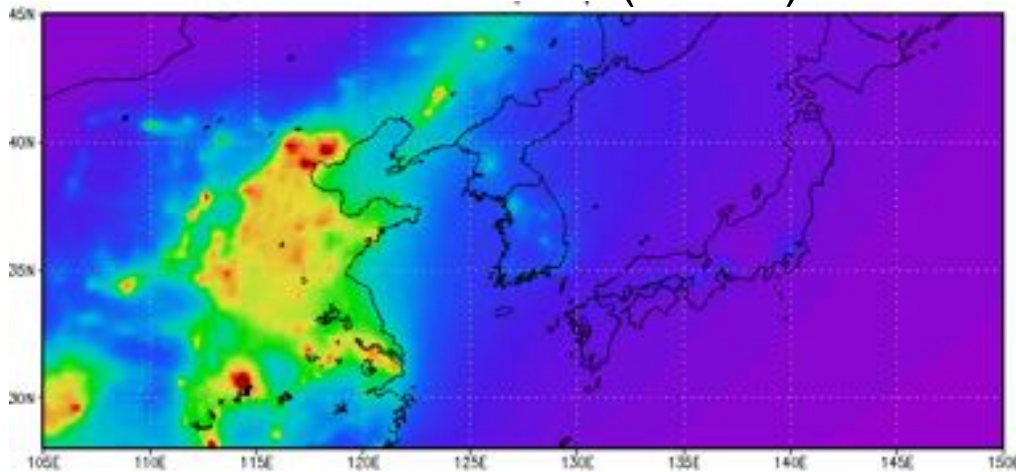
■ 硫酸塩エアロゾル ■ 海塩粒子 ■ 土壌粒子 ■ 炭素性エアロゾル □ 雲

全球10km規模グリッドで計算している世界のモデルは、数個のみ！

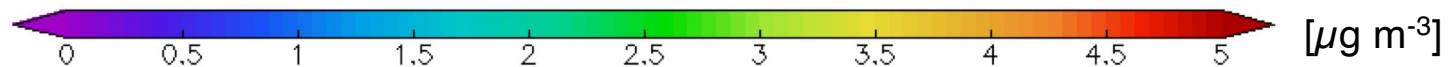
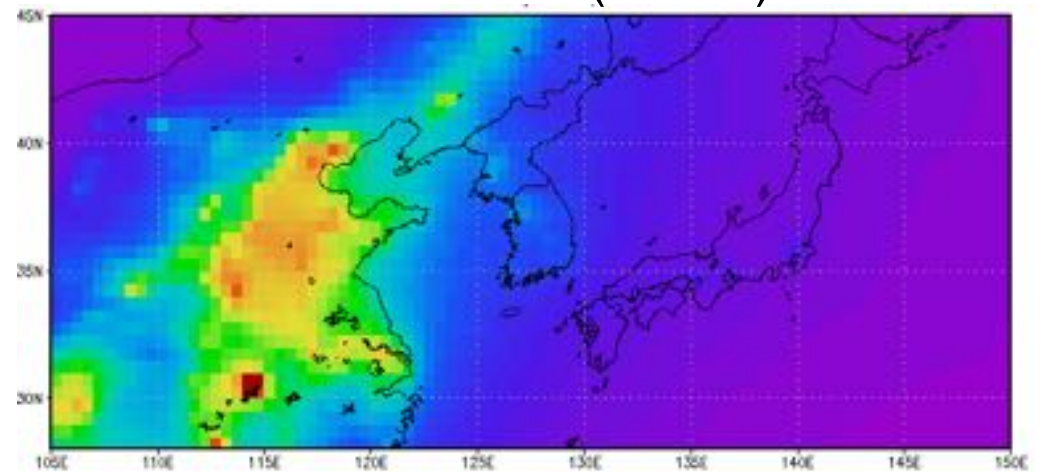
高解像度でエアロゾル再現性が向上(発生源付近)

2012年におけるブラックカーボン(光吸収性粒子)の地表面濃度平均値

NICAM-Chem (14 km)

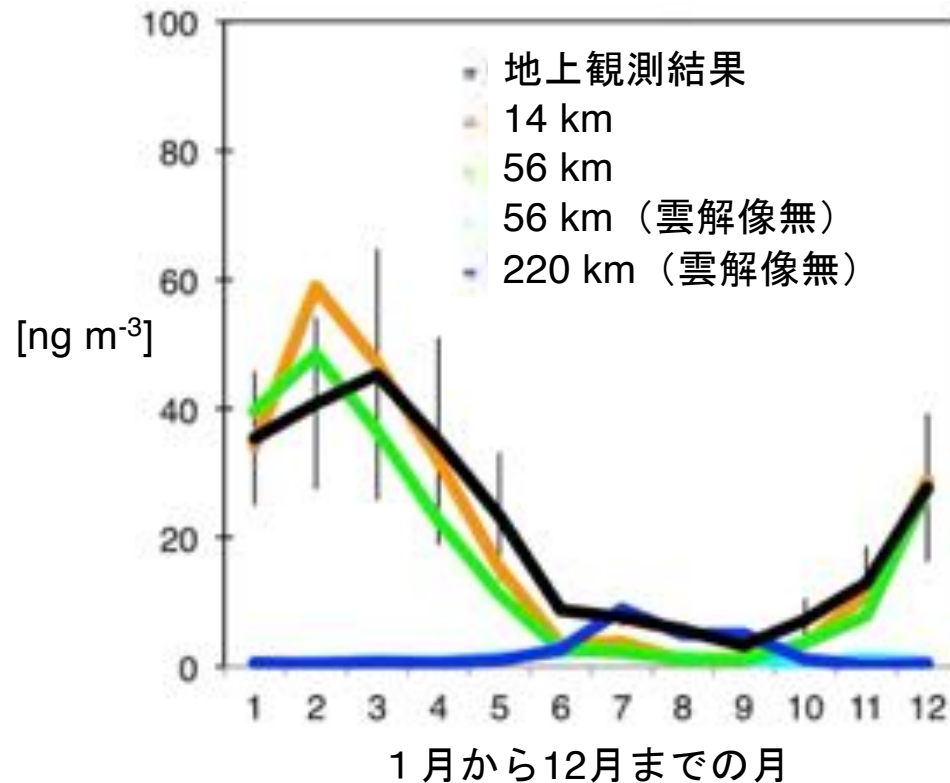


NICAM-Chem (56 km)

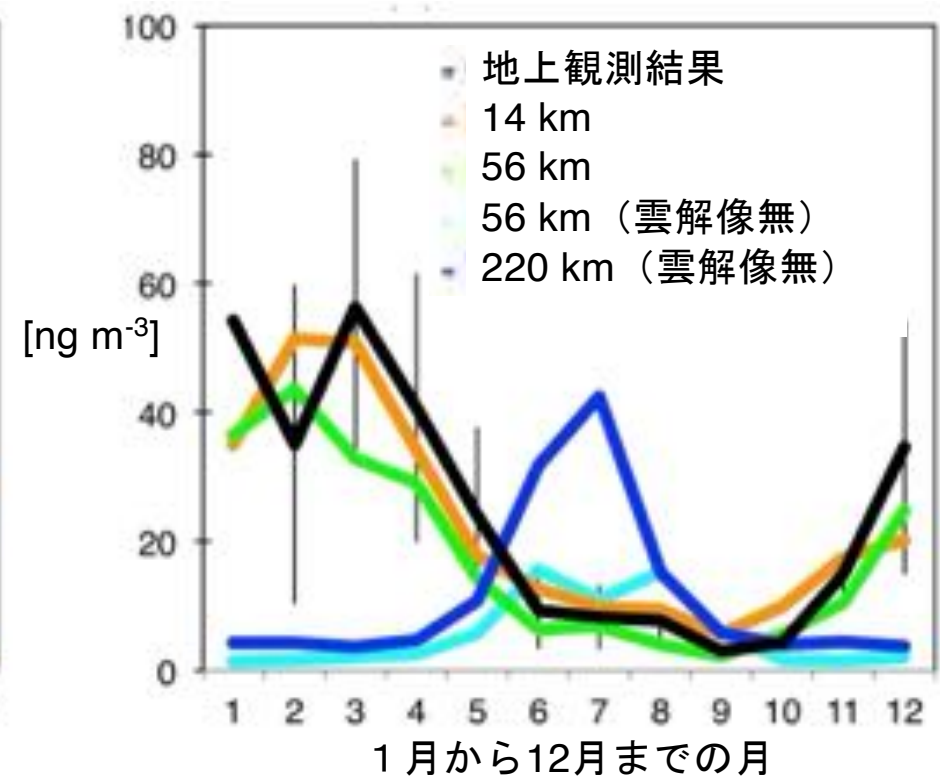


高解像度で北極のブラックカーボン再現性向上

Zeppelin (スヴァールバル諸島)

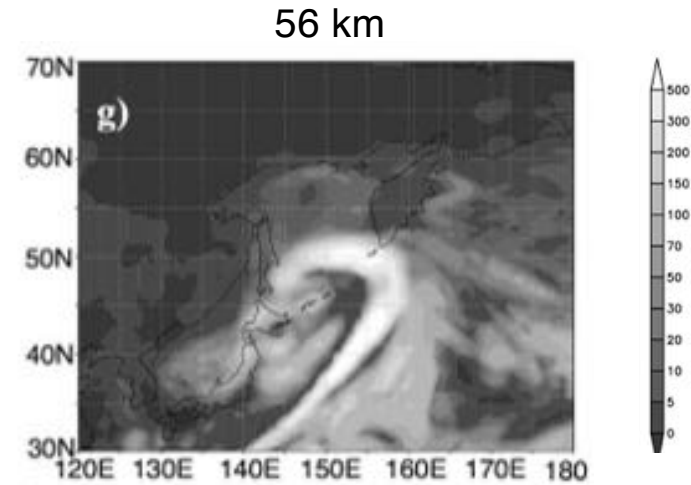
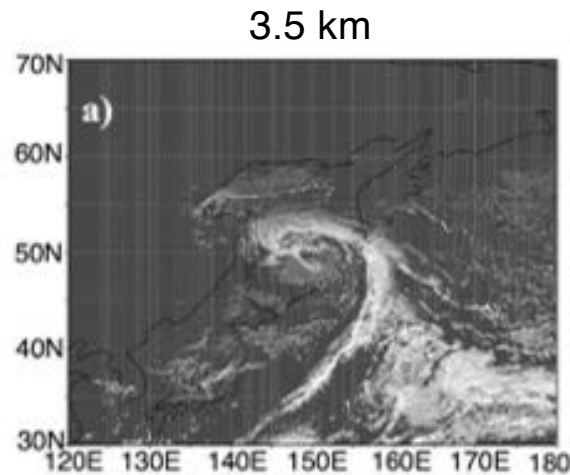


Utqiagvik (アラスカの北極側)

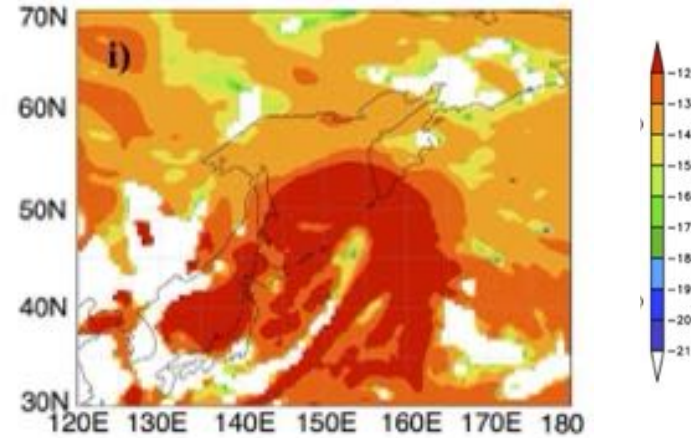
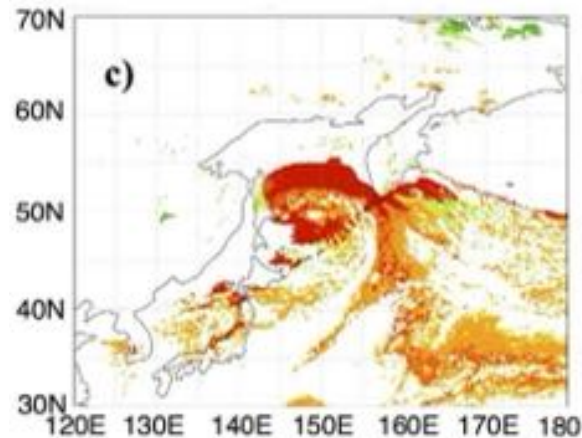


高解像度でエアロゾルの除去量再現性が向上

雲水量
[g/m²]



ブラックカーボン
湿性沈着量
 $\log_{10}(\text{bcwet})$ [kg/m²/s]



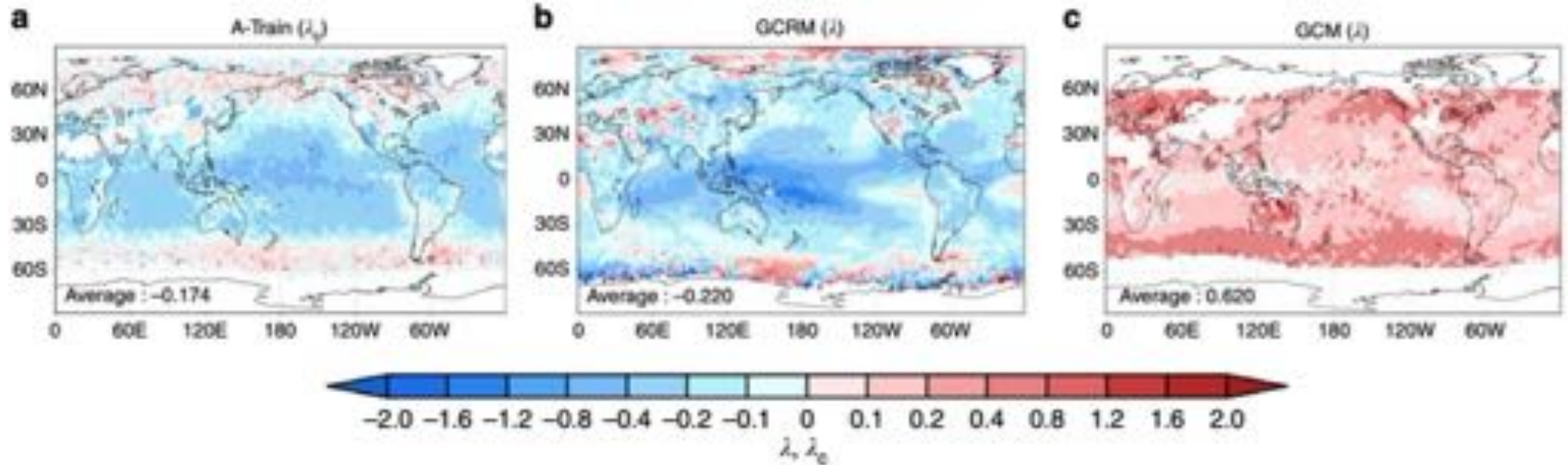
Sato et al. (Sci. Rep., 2016)

高解像度で雲・エアロゾル再現性向上

人工衛星

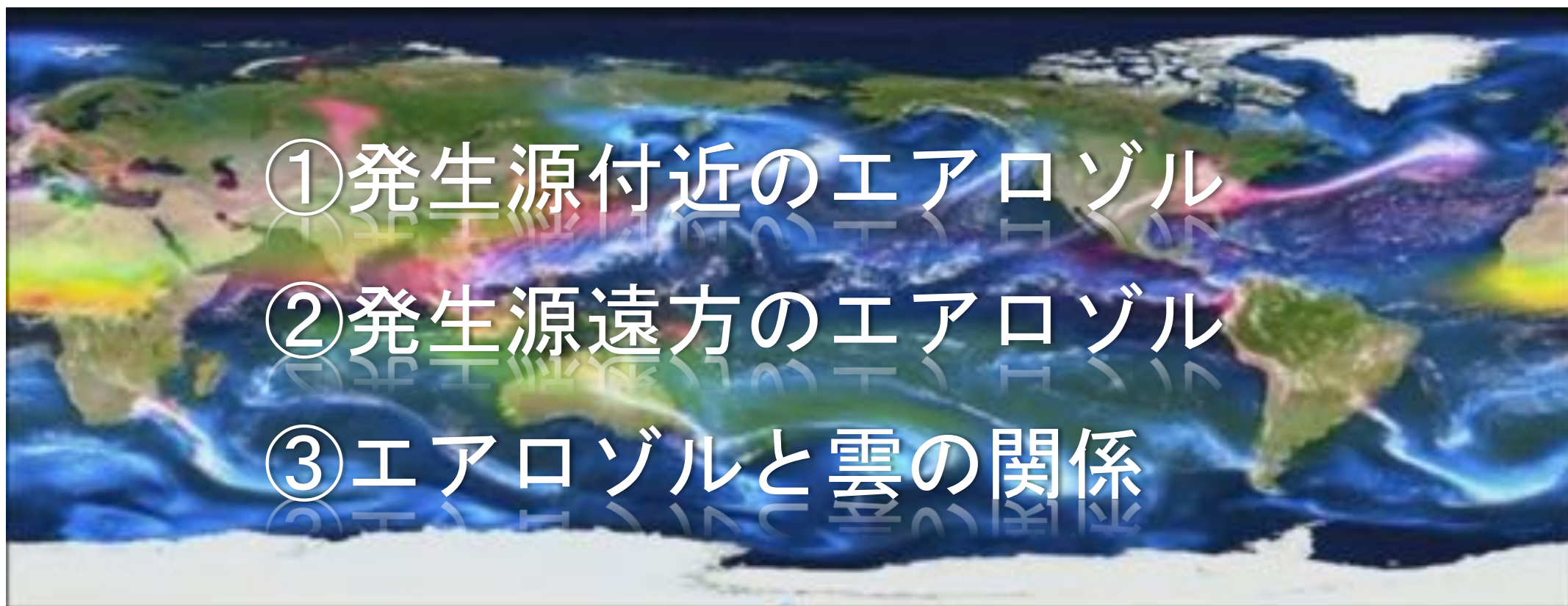
NICAM-Chem (14 km)

MIROC (300 km)



$$\lambda = \{d \log_{10}(\text{雲水量})\} / \{d \log_{10}(\text{エアロゾル数濃度})\}$$

高解像度シミュレーションの再現性向上のまとめ



「富岳」の利用で進展したか？

富岳利用における計算性能に関わる情報

計算機	NICAM バージョン	モデル設定	計算性能 (1ヶ月積分)
京	16	全球14km, 鉛直38層, 時間1分	14,080 ノード時間 (640ノード × <u>22時間</u>) ※640並列
富岳	19	全球14km, 鉛直 <u>78層</u> , 時間 <u>30秒</u>	4,480 ノード時間 (640ノード × <u>7時間</u>) ※2560並列

バージョン
アップ

約4倍
計算負荷

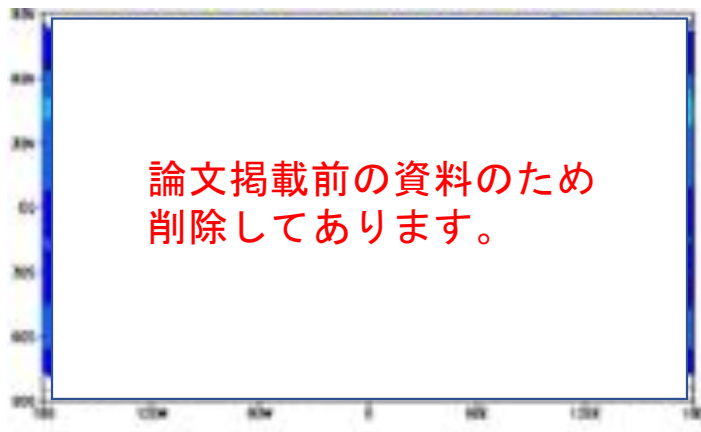
約3倍
計算高速

エアロゾルシミュレーションの設定

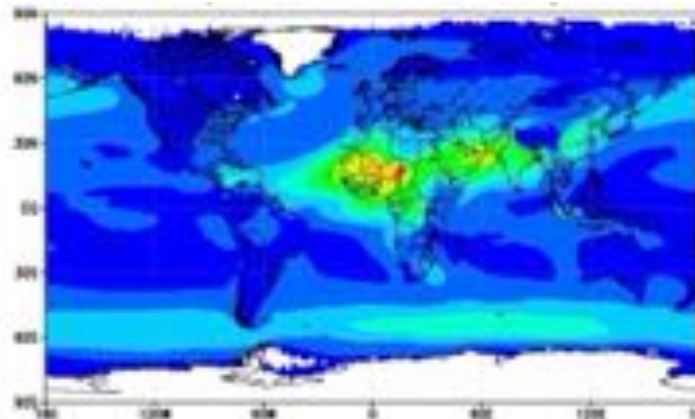
素過程	モジュール
力学	NICAM (Tomita & Satoh, 2004; Satoh et al., 2008, 2014)
輸送	van Leer (1977)の改良版 (Miura, 2007; Niwa et al., 2011a)
雲	NSW6 (Tomita, 2008)、積雲パラメタリゼーション用いず
雲-雨変換	Khairoutdinov and Kogan (2000)
境界層	Meller & Yamada (1974), Nakanishi & Niino (2004, 2006) レベル 2
放射計算	MSTRN-X (Sekiguchi and Nakajima, 2008)
水平解像度	g-level 9 (14km)
鉛直解像度	78層 (京を使っていたときよりも 2 倍以上の高解像度)
実験期間	1年間 (1ヶ月スピナップ後)
エアロゾル	SPRINTARS (Takemura et al., 2005) の高解像度版 (Goto et al., 2019; 2020)
エアロゾル種類	土壌粒子、海塩粒子、炭素性エアロゾル (有機 & 黒色炭素)、硫酸塩
酸化物質	オフライン酸化物質 (OH, H ₂ O ₂ , O ₃) by MIROC-CHASER (Sudo et al., 2002)
吸湿性	海塩粒子、炭素性エアロゾル (有機炭素)、硫酸塩
排出量	人為起源: HTAP-v2, 森林火災: GFEDv4.1, 土壌/海塩粒子: モデル内でオンライン計算

エアロゾル光学的厚さの年平均値

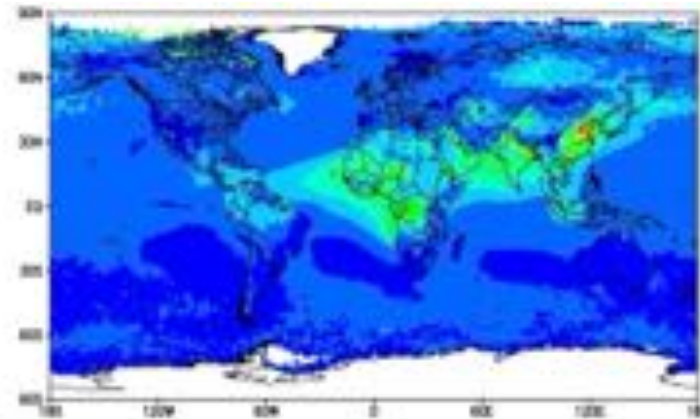
富岳を使った新しい結果



京を使った以前の結果
(Goto et al., 2020)



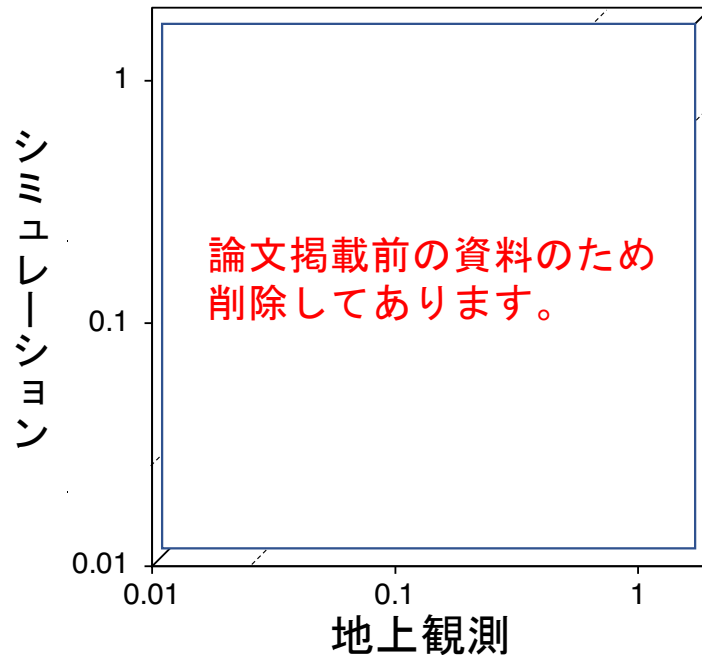
TERRA/MODIS (人工衛星)



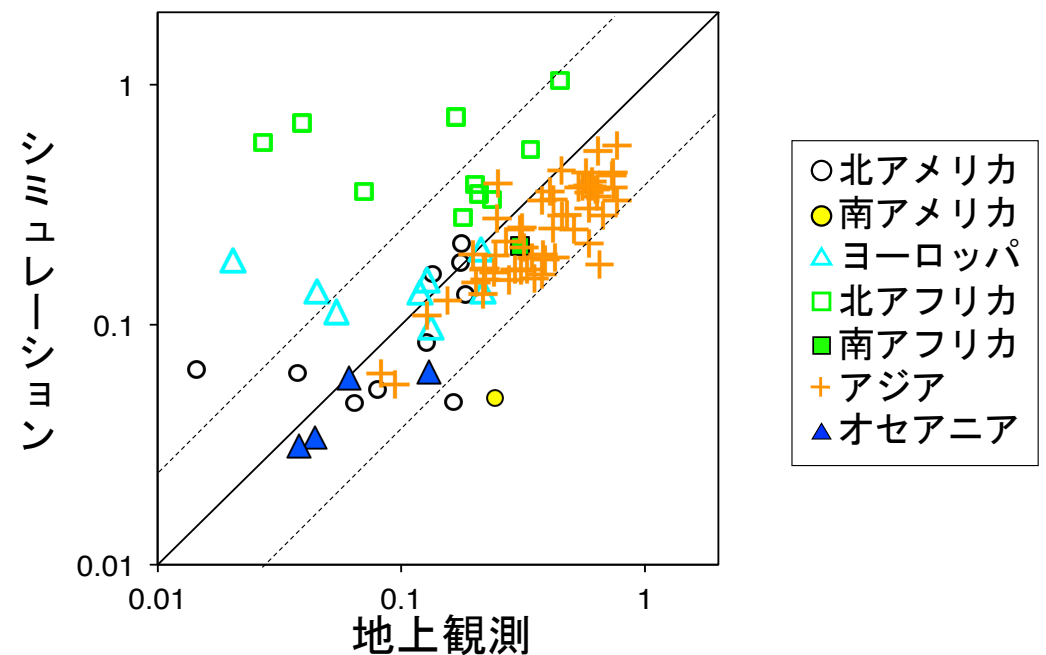
- 「京」で得られていた再現性の良い結果は、「富岳」でも実現された
- 人工衛星との差が大きい場所がまだ存在するが、一般的なエアロゾルシミュレーションモデルと比べると遜色ない
- 「富岳」での計算結果では、中国四川盆地やインドヒンドスタン平原での高濃度がよく再現されている（主に鉛直解像度を上げたため）

エアロゾル光学的厚さの再現性を検証

富岳を使った新しい結果



京を使った以前の結果



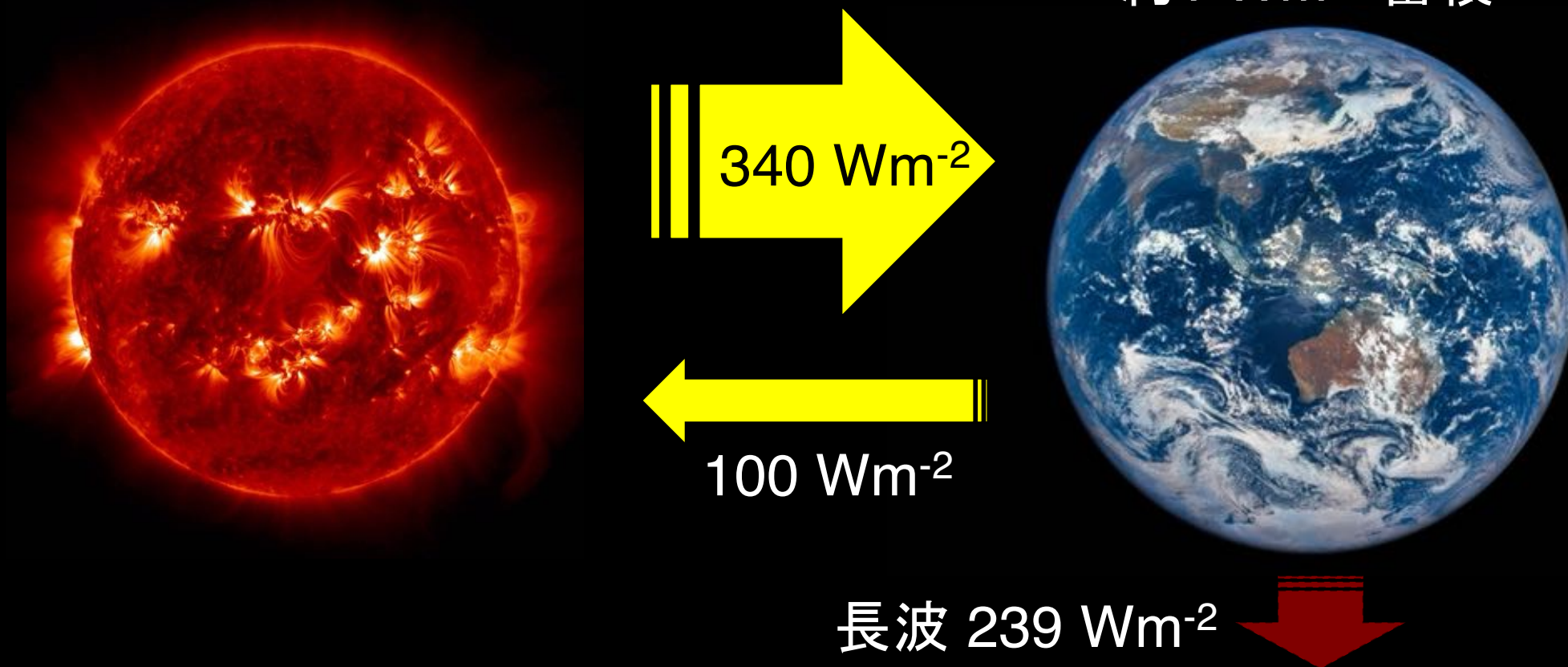
	解像度	相関係数	RMSE (不確実性)	NMB (誤差)
富岳を使った新しい結果	14 km, 78 層	論文掲載前の資料のため削除してあります。		
京を使った結果	14 km, 38 層	0.471	0.21	-20.2%

観測サイトは世界91地点 (AERONET, SKYNET, CARSNET)

今後エアロゾル排出量を変えたら
気候にどのような影響が出るか？
(エアロゾルの気候影響評価)

太陽光（短波）が地球に届き、 1 Wm^{-2} 地球に蓄積される

約 1 Wm^{-2} 蓄積



ブラックカーボンに関する排出量変化シミュレーション



大気上端での
短波フラックス

人間活動ブラックカーボン排出を0
人間活動ブラックカーボン排出を10倍増

91.6 W m^{-2}
89.5 W m^{-2}
差 2.1 W m^{-2}

71.1 W m^{-2}
76.6 W m^{-2}
差 1.4 W m^{-2}

178.3 W m^{-2}
174.9 W m^{-2}
差 3.4 W m^{-2}

大気での
短波吸収
フラックス

地表面に到達する
短波フラックス

ブラックカーボン

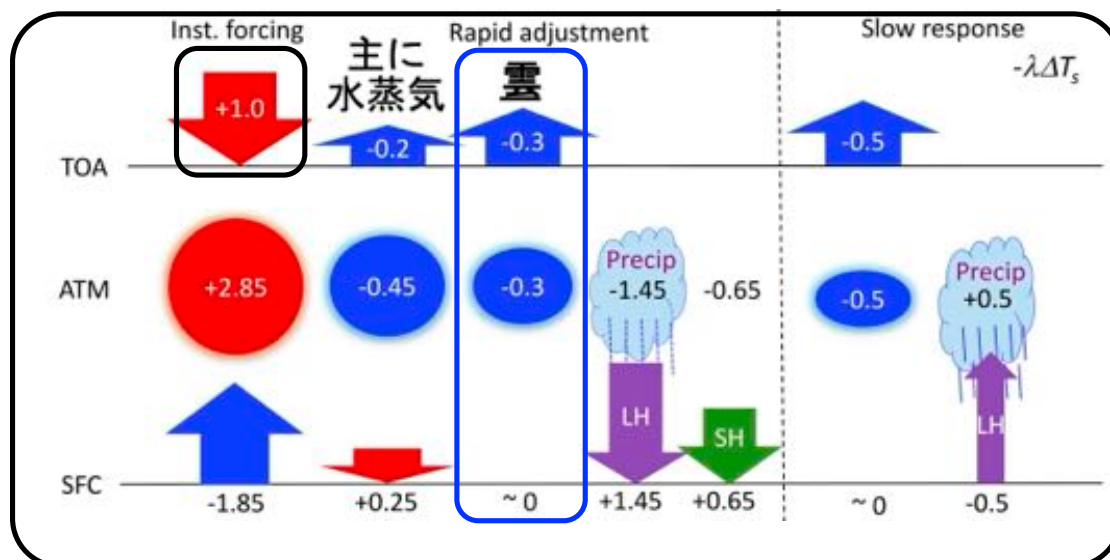
- 地表面に到達する光の量を減らす
- 大気を暖めて、雲の分布も変える

大気や地表面での
短波フラックスが変化

ブラックカーボンに関する排出量変化シミュレーション

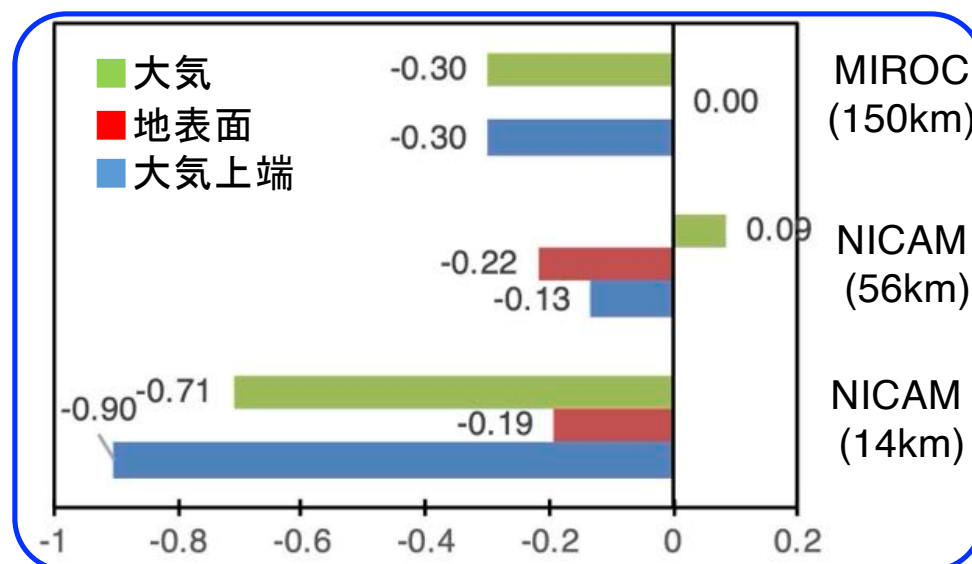
人間活動起源ブラックカーボンの排出量を10倍にした実験との差分で議論

大気上端でのエアロゾル瞬時放射強制力で
規格化されたエネルギー収支



(Suzuki and Takemura, J. Geophys. Res. Atmos., 2019)

雲による放射フラックスの変化

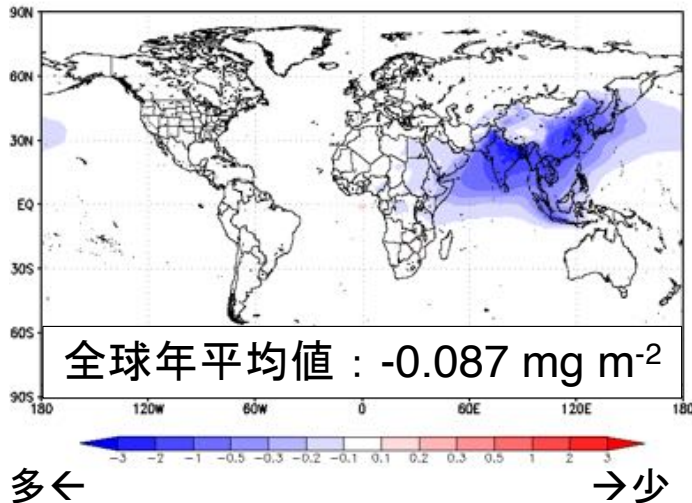


ブラックカーボンの排出量変化に対する雲の
応答は、NICAM (14km) はMIROCより大きい。

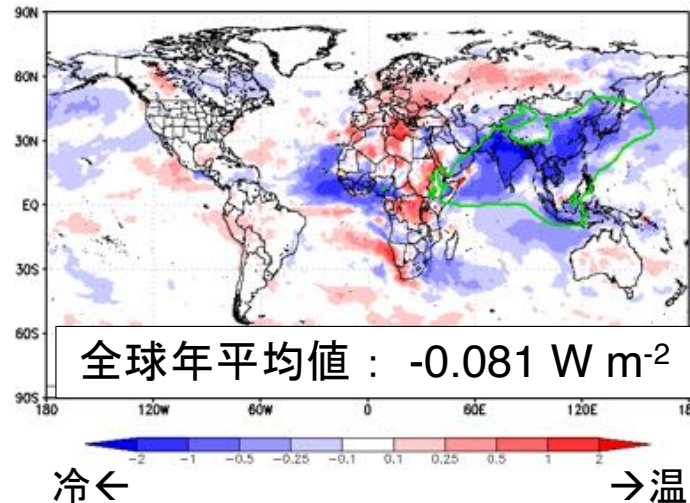
高解像度の方がブラックカーボンの増加に伴う大気加熱により対流が起きやすい

アジアの人為起源ブラックカーボンを全削減したシミュレーション

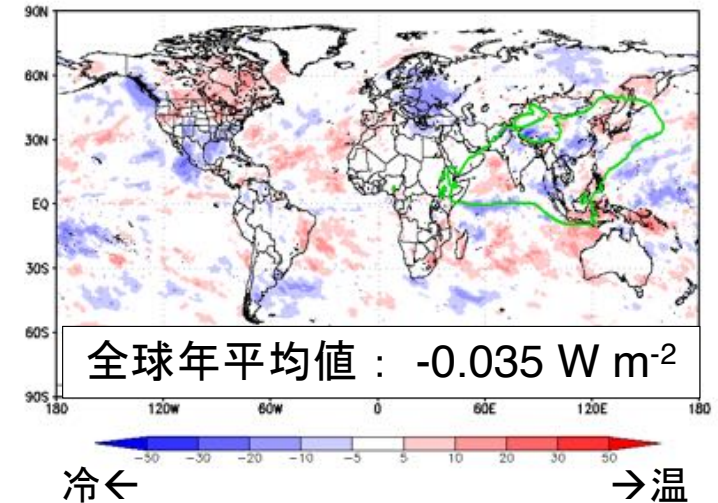
ブラックカーボン
鉛直積算量 [mg m^{-2}]



大気上端での瞬時エアロゾル
短波放射強制力 [W m^{-2}]



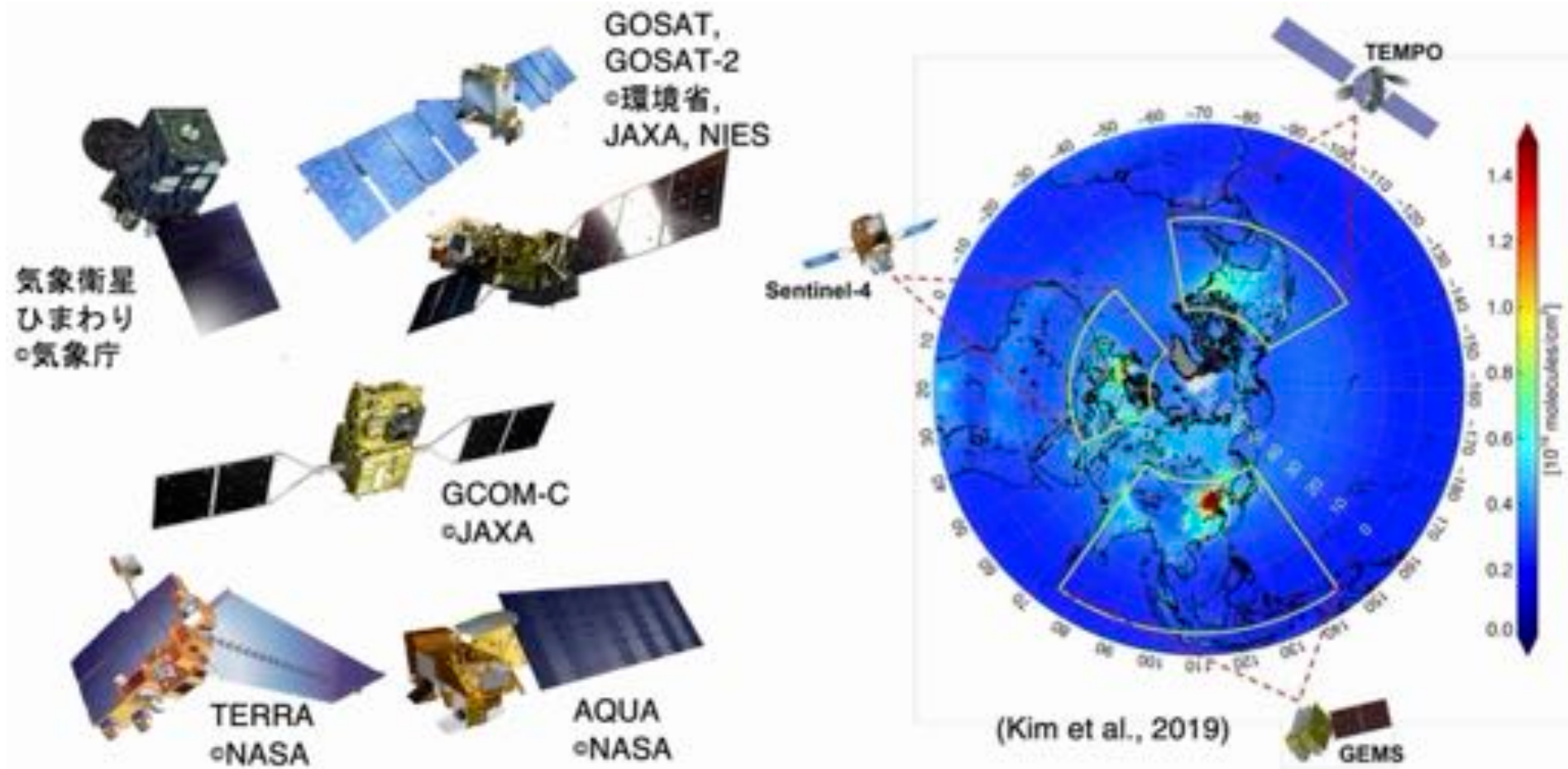
大気上端での短波フラックス [W m^{-2}]
(エアロゾルと雲の影響が出る)



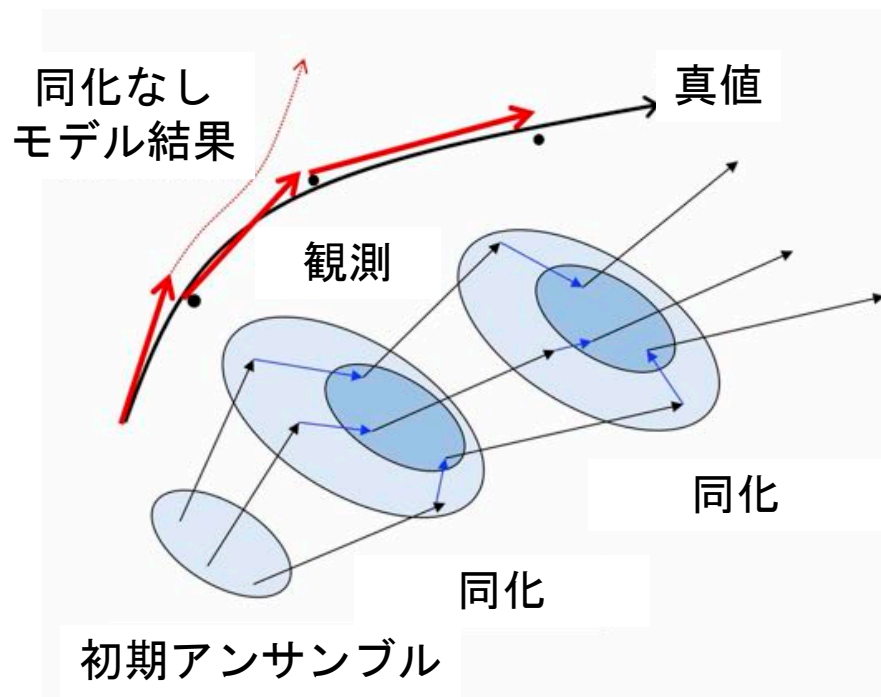
- ブラックカーボン削減量が多い場所では負の放射強制力（削減で冷える）
- 雲の変化も加味すると、全体では弱い負（削減でやや冷える）となる

エアロゾルの同化計算

増加する人工衛星（大気汚染物質観測）



NICAM-Chemによるエアロゾル同化



参考文献

- Hunt, Kostelich, & Szunyogh (2007)
- Miyoshi, Yamane, & Enomoto (2007)

同化 : J (コスト関数) を最小する τ^f を求める

$$J(\tau) = \frac{1}{2} (\tau - \tau^f)^T P^{-1} (\tau - \tau^f) + \frac{1}{2} (H\tau - \tau^0)^T R^{-1} (H\tau - \tau^0)$$

$$\Delta\tau = \tau^a - \tau^f = PH^T(R + HPH^T)^{-1}(\tau^0 - H\tau^f) = K(\tau^0 - H\tau^f)$$

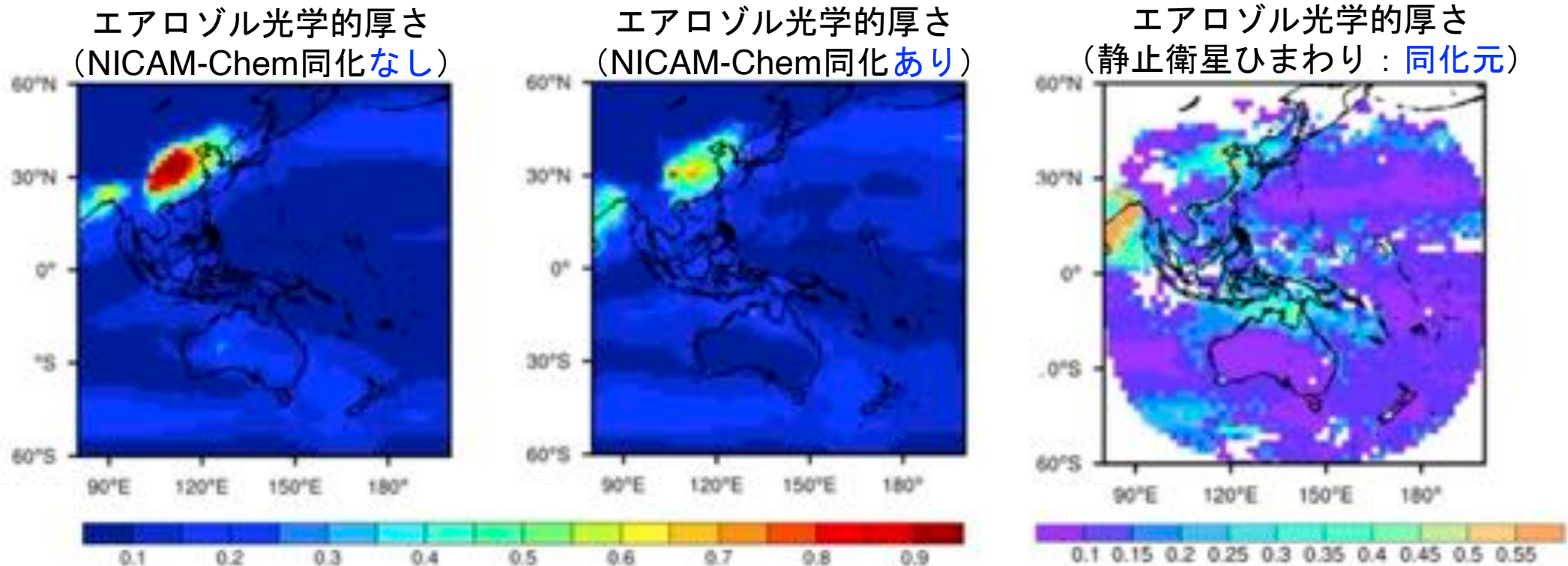
P : 背景誤差、 R : 観測誤差、 H : 観測オペレータ、 K : カルマンゲイン

NICAM-Chemエアロゾル同化での実験設定

- 変数 : エアロゾル光学的厚さ (AOT)
- データ : 静止衛星ひまわり・GCOM-C/SGLIなどの人工衛星リトリバル結果
- 手法 : 局所アンサンブルカルマンフィルタ (LETKF)
- 時間窓 : 24 時間
- 局所水平長 : 200 km (エアロゾルの気塊の典型的な大きさとする)
- メンバー数 : 20 (これまでの標準実験)
- アンサンブルの摂動 : 排出量の100% (エアロゾルシミュレーションで最も不確実性が高い)

静止衛星ひまわりのエアロゾルデータ同化

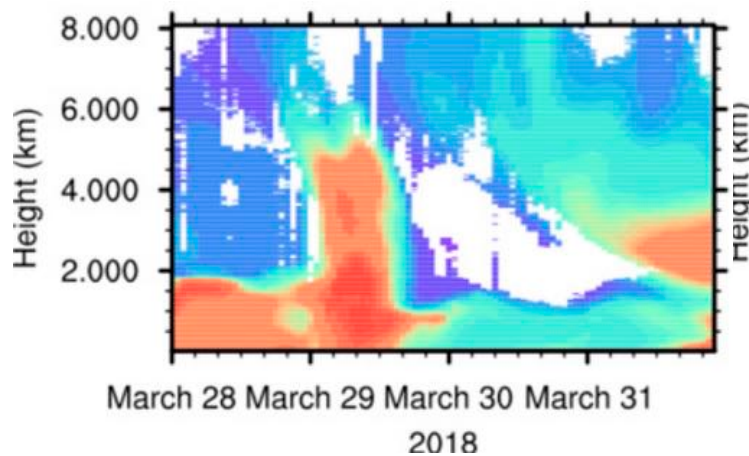
比較場所はアジアオセアニア。エアロゾル光学的厚さ：2次元のエアロゾル光学量



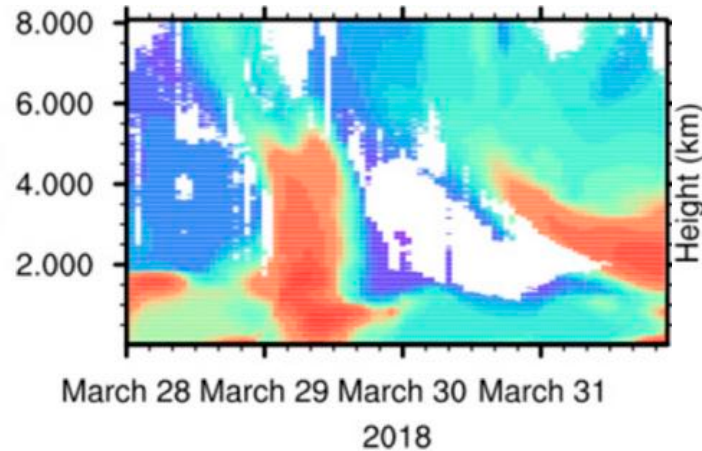
極軌道衛星GCOM-Cのエアロゾルデータ同化

比較場所は大阪（近畿大学）。エアロゾル消散係数：3次元のエアロゾル光学量

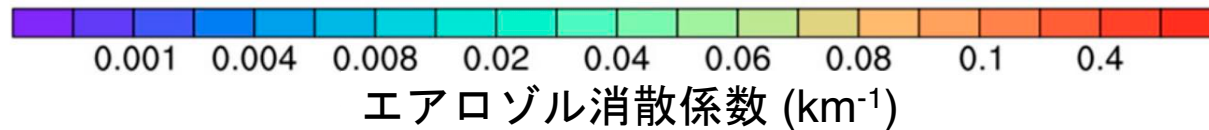
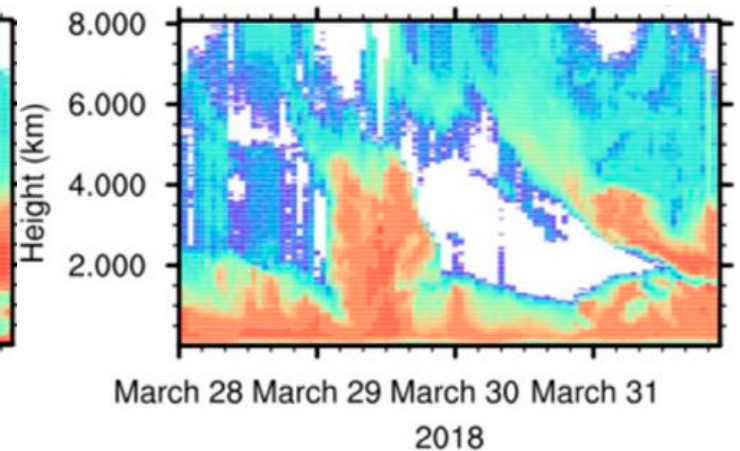
エアロゾル消散係数
(NICAM-Chem同化なし)



エアロゾル消散係数
(NICAM-Chem同化あり)



エアロゾル消散係数
(AD-net ライダー：独立観測)



本日のまとめ

- 「京」から「富岳」に計算資源が拡充し、NICAM-Chem自身の進化によって、全球14kmの世界最高レベルの高解像度エアロゾルシミュレーションの精度が向上しました。
- 「富岳」の計算資源によって、エアロゾル変化に対する気候影響を、高解像度シミュレーションで実施できるようになりました。この知見は、地球温暖化抑制のための緩和策シナリオ作成に役立てられます。
- エアロゾル同化手法を構築しており、新しい様々な衛星結果とNICAM-Chem高解像度シミュレーションと組み合わせ、エアロゾルシミュレーションの高精度化を進めています。

ご清聴ありがとうございました