

コンピュータで再現する エアロゾルとその気候影響

名古屋大学大学院環境学研究科
松井 仁志

名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻 大気水圏科学系 気候科学講座
松井 仁志 (MATSUI Hitoshi)

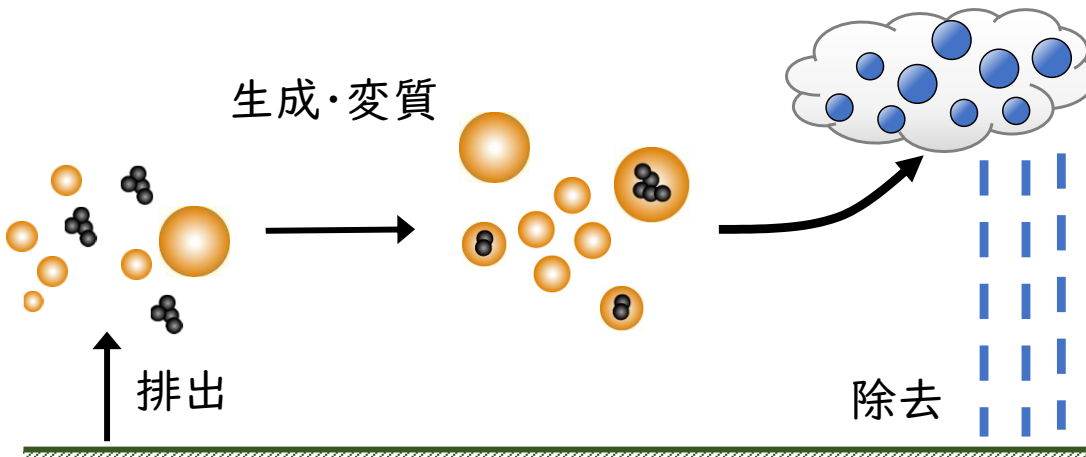
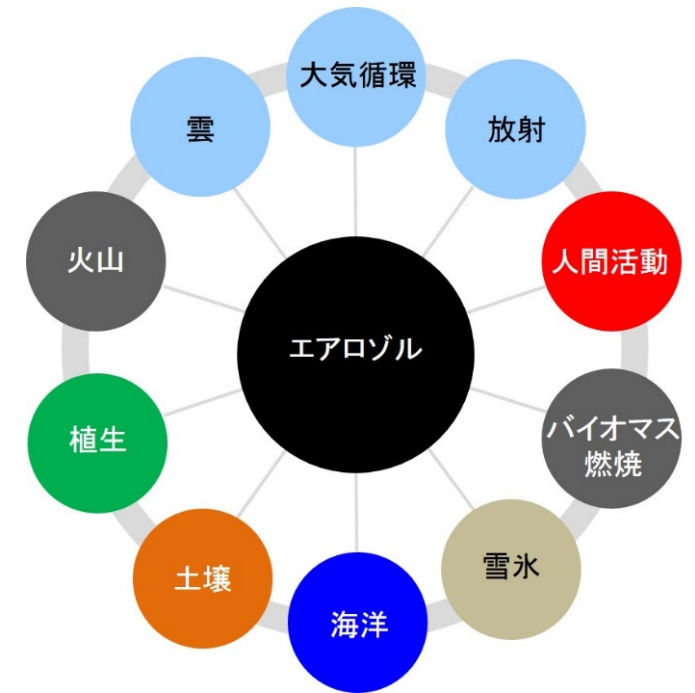
Email: matsui (at) nagoya-u.jp
<https://has.env.nagoya-u.ac.jp/~matsui/>

専門分野: 気候科学・大気化学

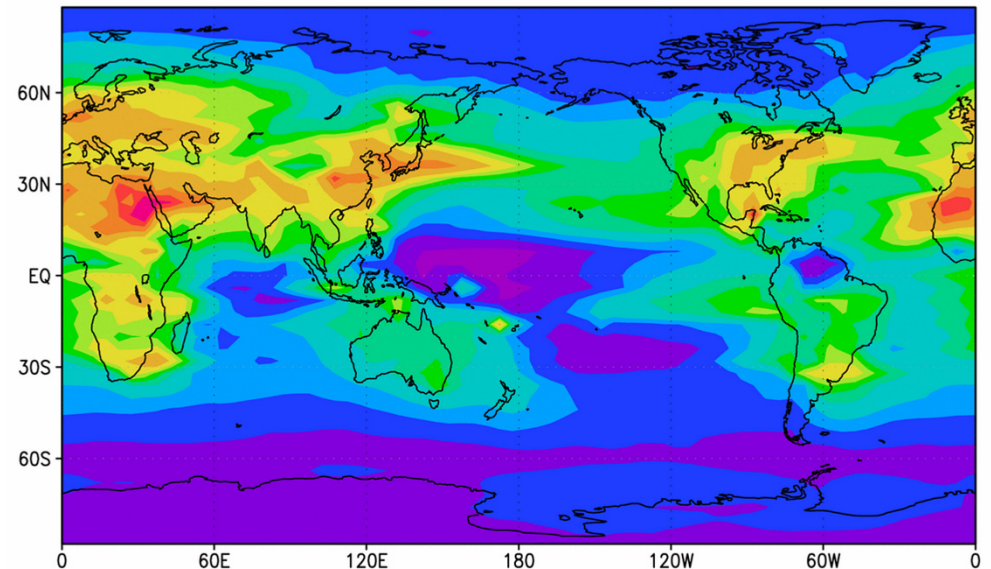
研究内容: エアロゾルを通じた地球の気候・大気環境問題

最近のテーマ:

- ✓ エアロゾルモデルの開発
- ✓ ブラックカーボンの温暖化効果
- ✓ エアロゾルの半球・全球スケールの輸送・変動過程
- ✓ エアロゾルの雲・降水過程への影響



数値モデル計算例 (エアロゾル数濃度)



1 エアロゾルとその気候影響の概要

「エアロゾルは大気中にどれくらいあり、気候にどのような影響を与えるのか？」

2 エアロゾルのシミュレーションとは？

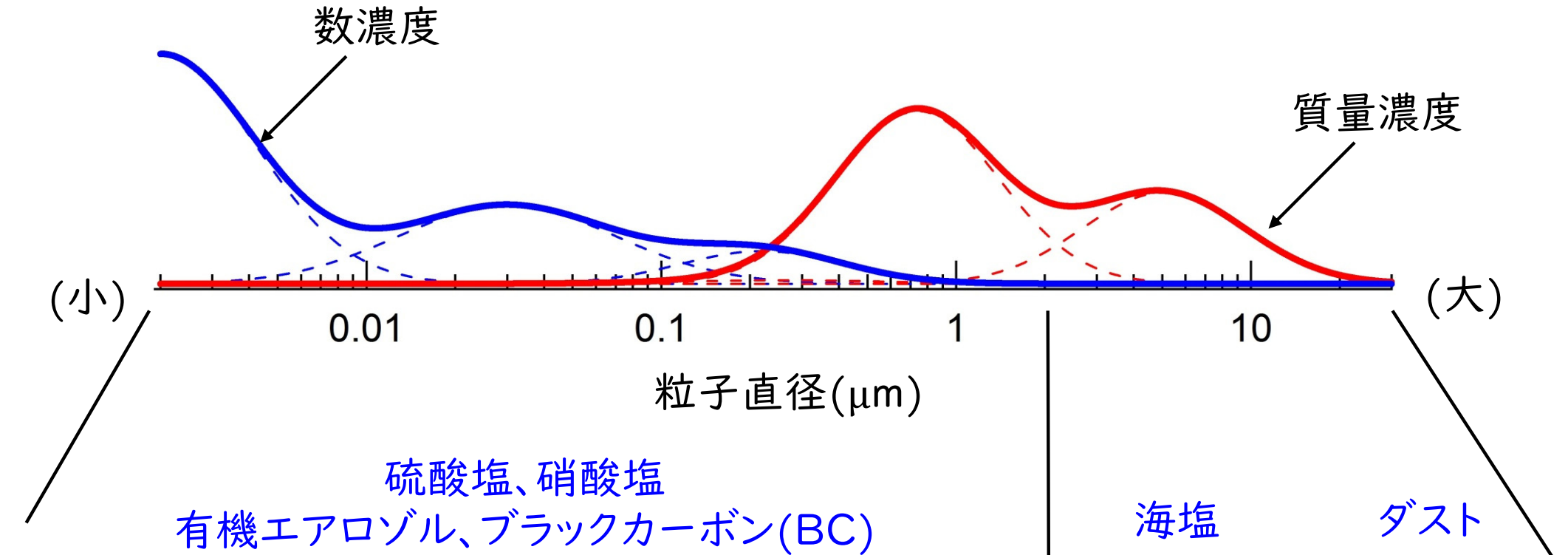
「エアロゾルをコンピュータでどのように扱うのか？扱う上で重要な要素は何か？」

3 エアロゾルのシミュレーション研究例の紹介

「エアロゾルとその気候影響のシミュレーションはどのように進展してきているのか？」

大気エアロゾル

大気中に浮遊する直径数nmから100 μ m程度の微粒子（液体・固体）



人間活動
(工業・交通など)



森林火災



植生



火山



海洋



土壌

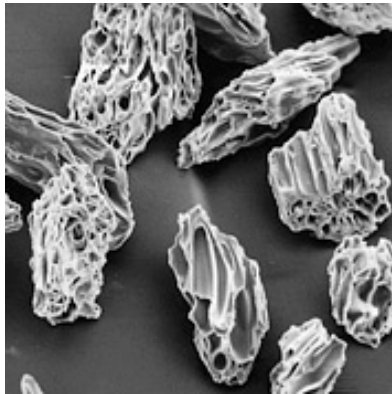
大気エアロゾル



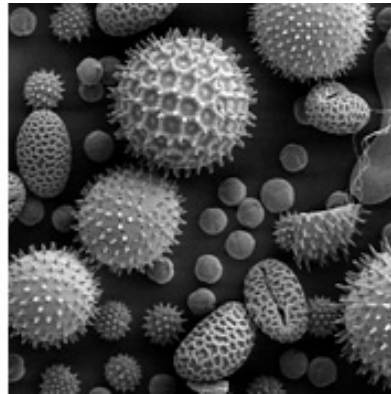
海塩

ダスト

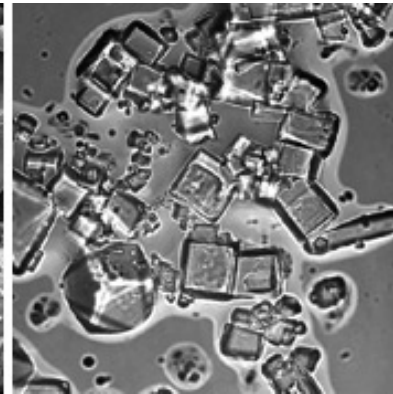
ブラックカーボン
(すす、黒鉛)



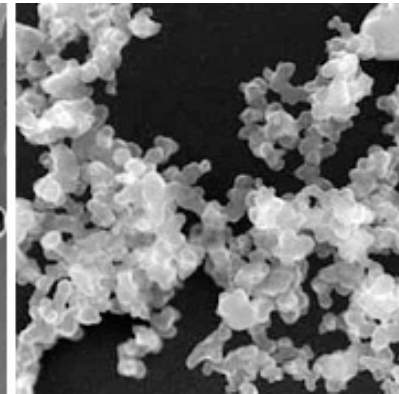
火山灰



花粉

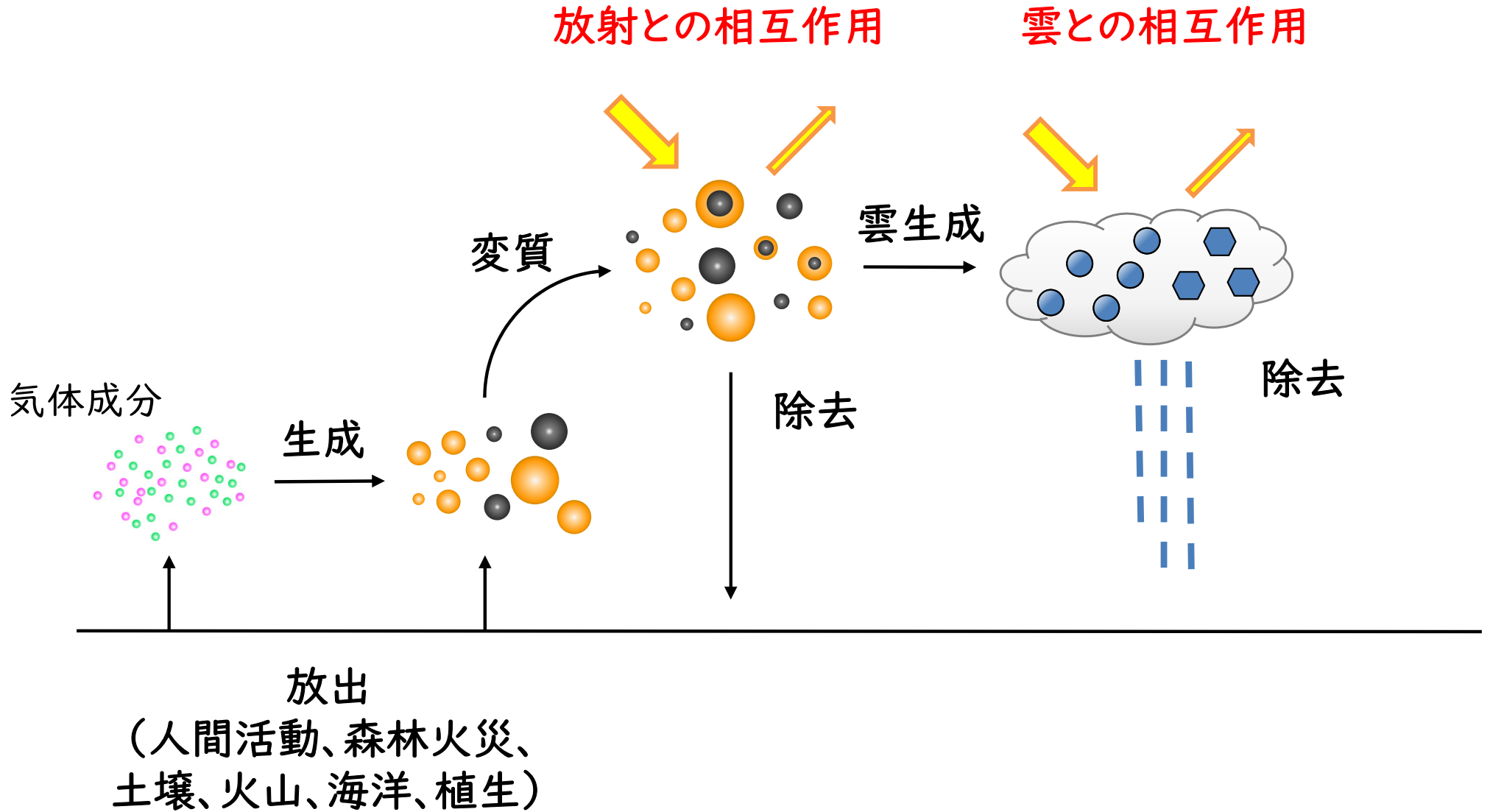


海塩



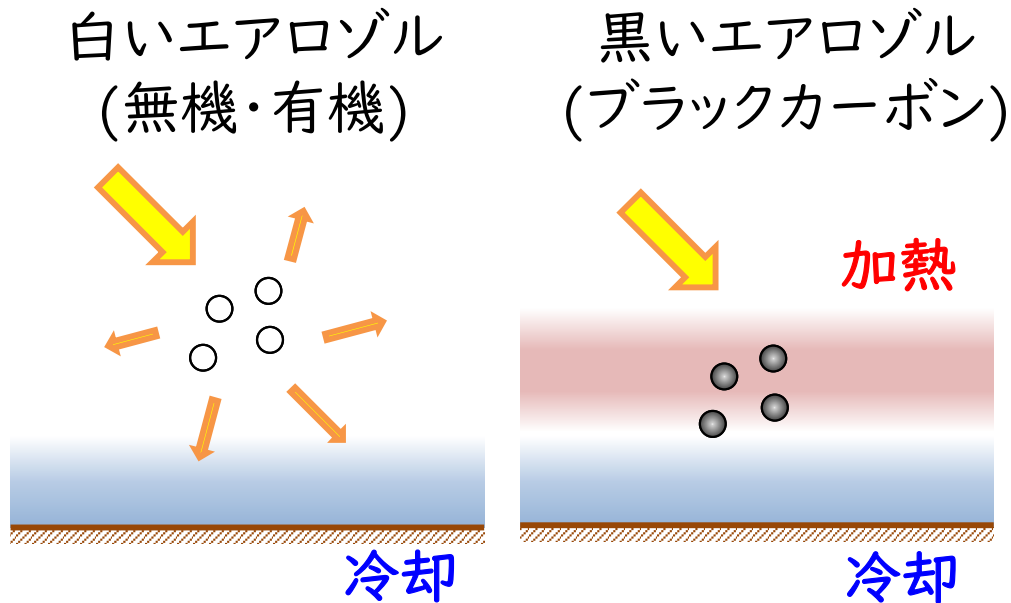
ブラックカーボン

大気エアロゾルとその気候影響

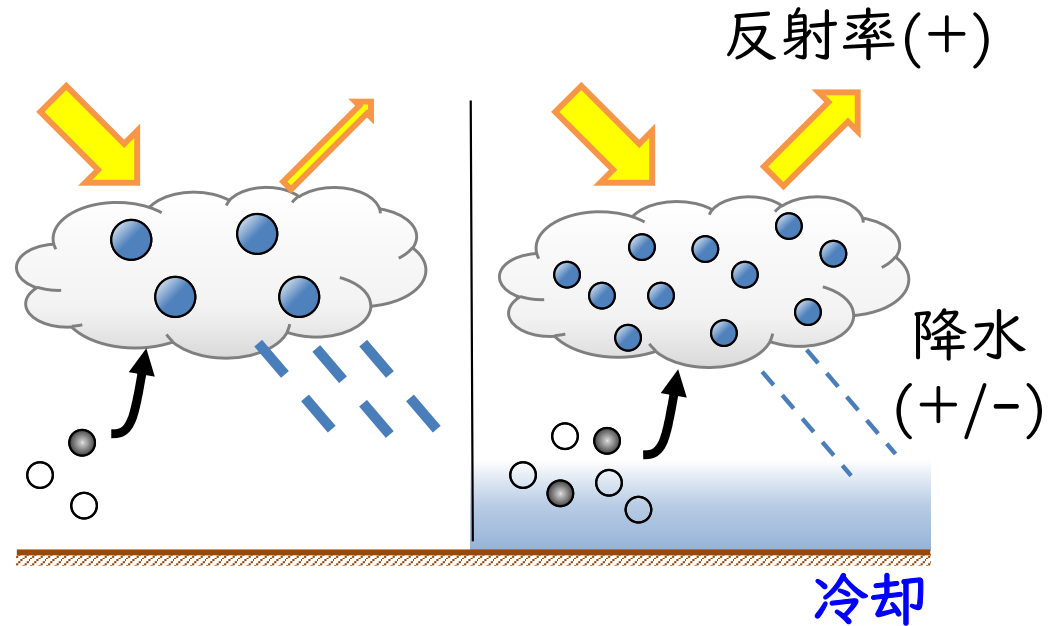


エアロゾルの放射・雲との相互作用

エアロゾル-放射相互作用



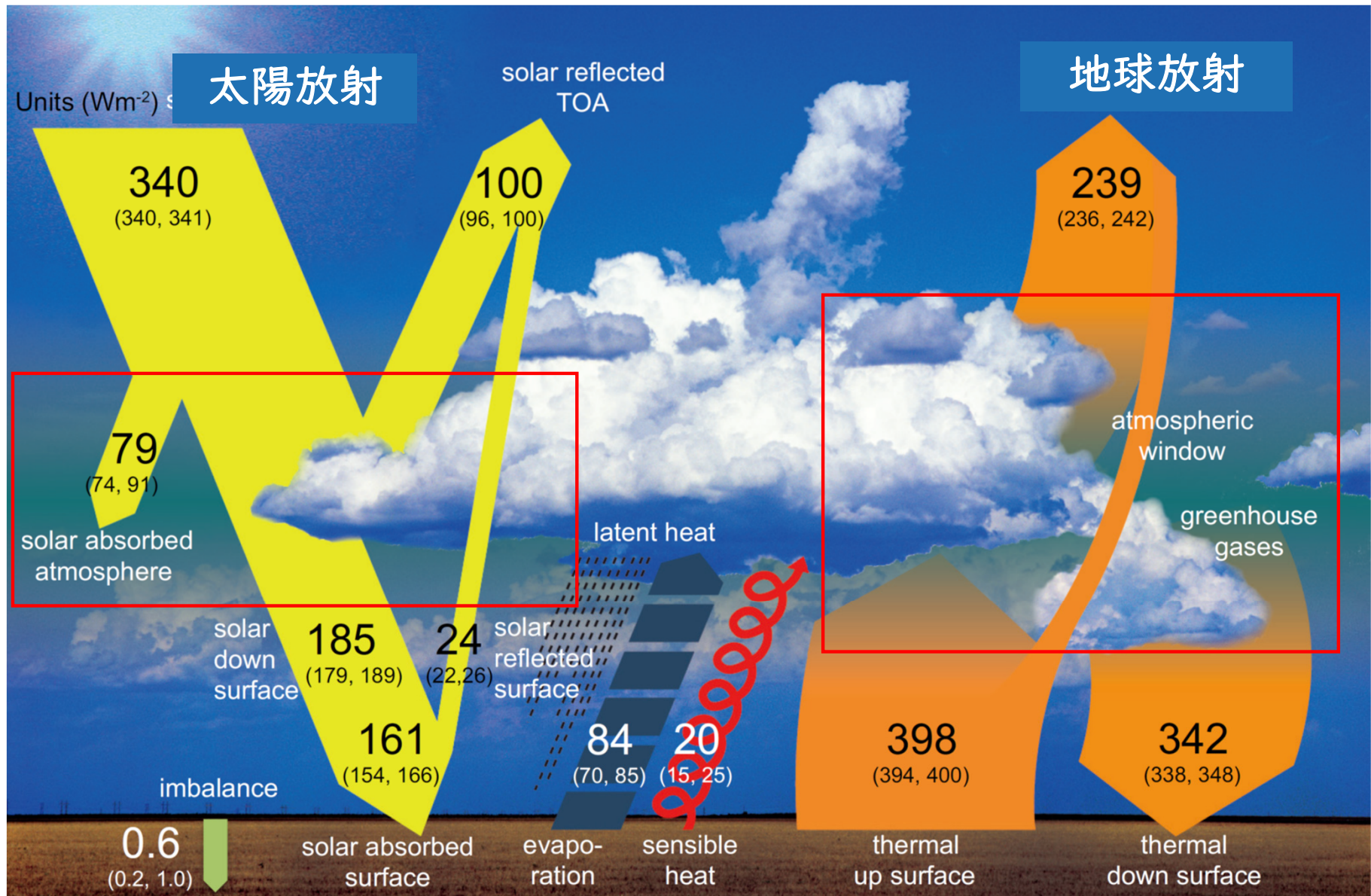
エアロゾル-雲相互作用



太陽光の反射や吸収による
大気の冷却・加熱

雲粒子の生成による
雲の特性・降水の変化

地球のエネルギー収支



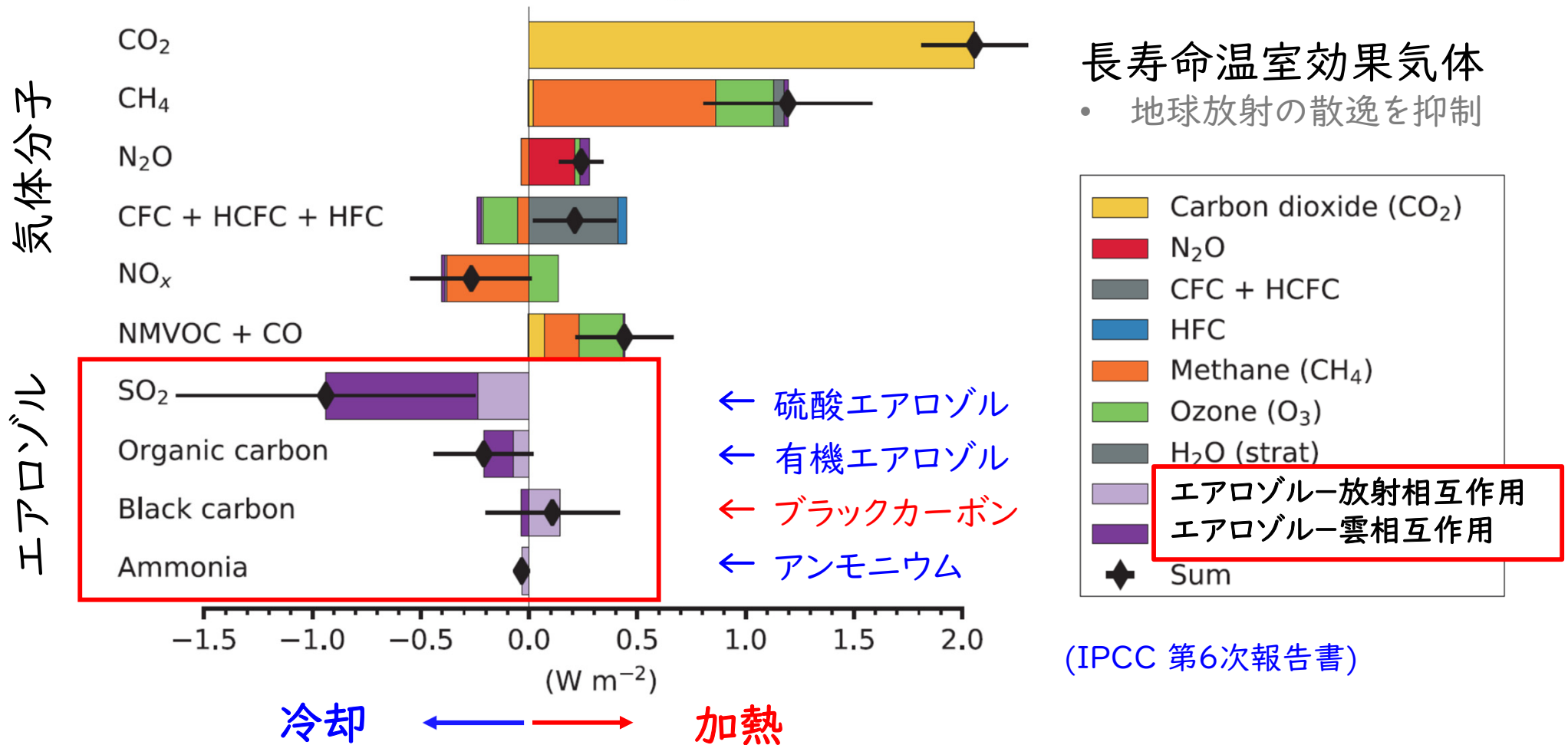
(IPCC 第4次報告書)

エアロゾルは、放射や雲などへの影響を通して、**太陽からの放射**（主に可視光）と**地球からの放射**（主に赤外光）のエネルギー収支に影響を及ぼす。

エアロゾルの放射・雲との相互作用

1750年から2019年までの放射収支の変化

(a) Effective radiative forcing, 1750 to 2019



白いエアロゾル (>90%) は冷却効果

- 太陽光を反射
- 雲の反射率増大

黒いエアロゾル (<10%) は温暖化効果

- 太陽光を吸収
- 雪氷の融解促進

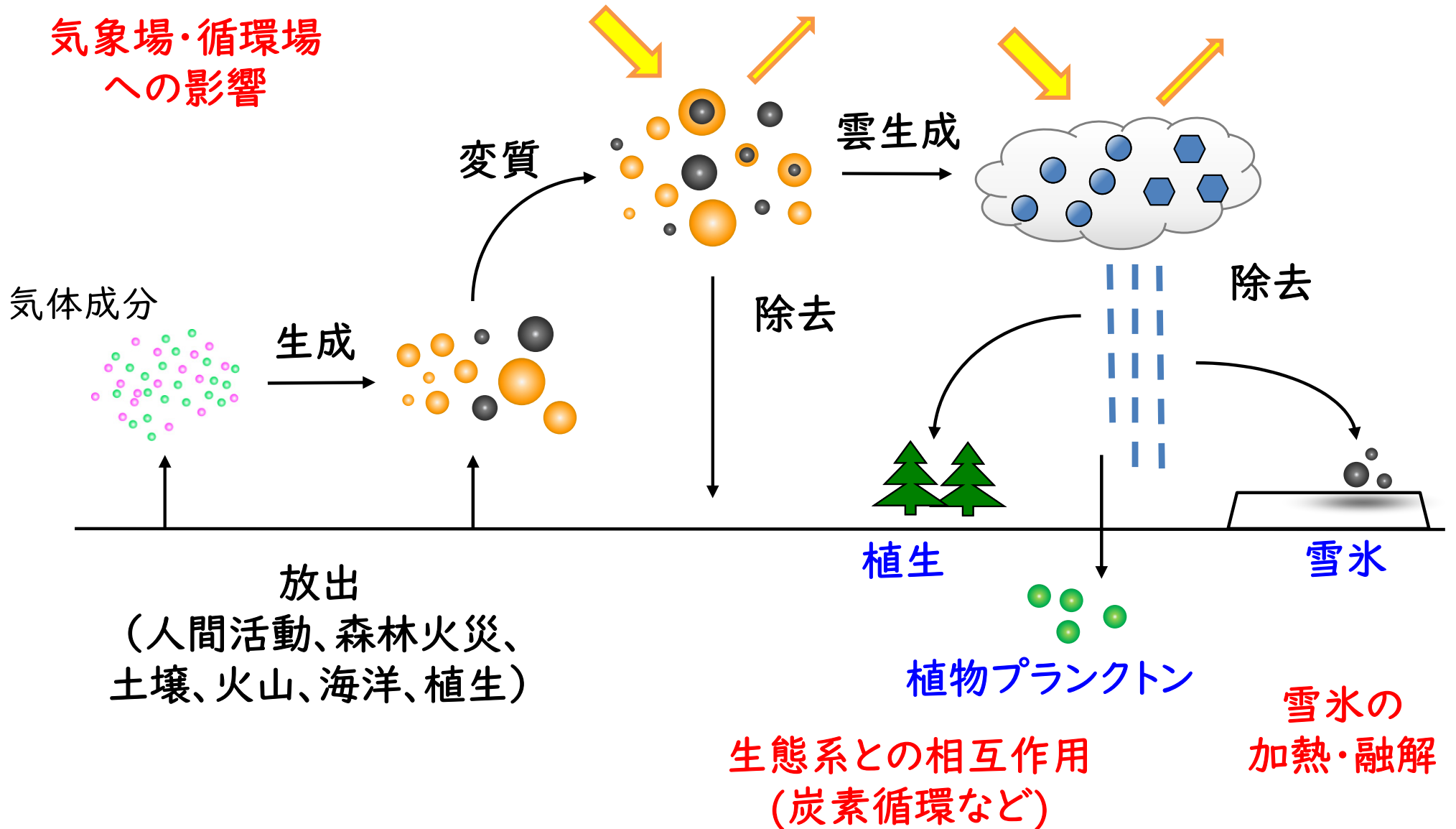
エアロゾルとその気候・気象・環境影響

大気汚染・健康被害

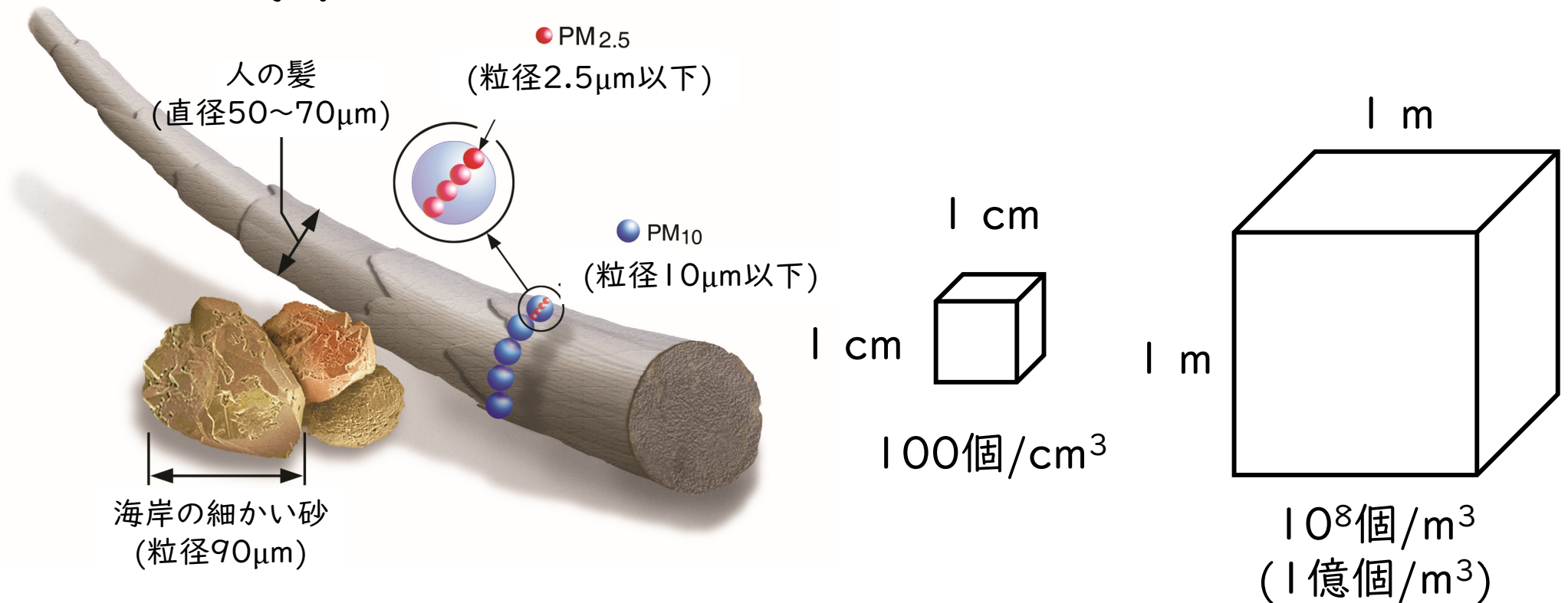
放射との相互作用

雲との相互作用

気象場・循環場
への影響



大気中にエアロゾルはどれくらいあるのか？



(<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> を変更)

地球大気(対流圏)に存在するおおよそのエアロゾルの数

$$10^8 \text{ 個 m}^{-3} \times 5 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ m} = 5 \times 10^{26} \text{ 個}$$

10兆 (10¹³) の10兆倍

地球大気のエアロゾル数	>	スーパーコンピュータの計算速度	>	人間の細胞の数	>	世界の人口
5×10 ²⁶ 個		10 ¹⁸ 回/秒		4×10 ¹³ 個		8×10 ⁹ 人

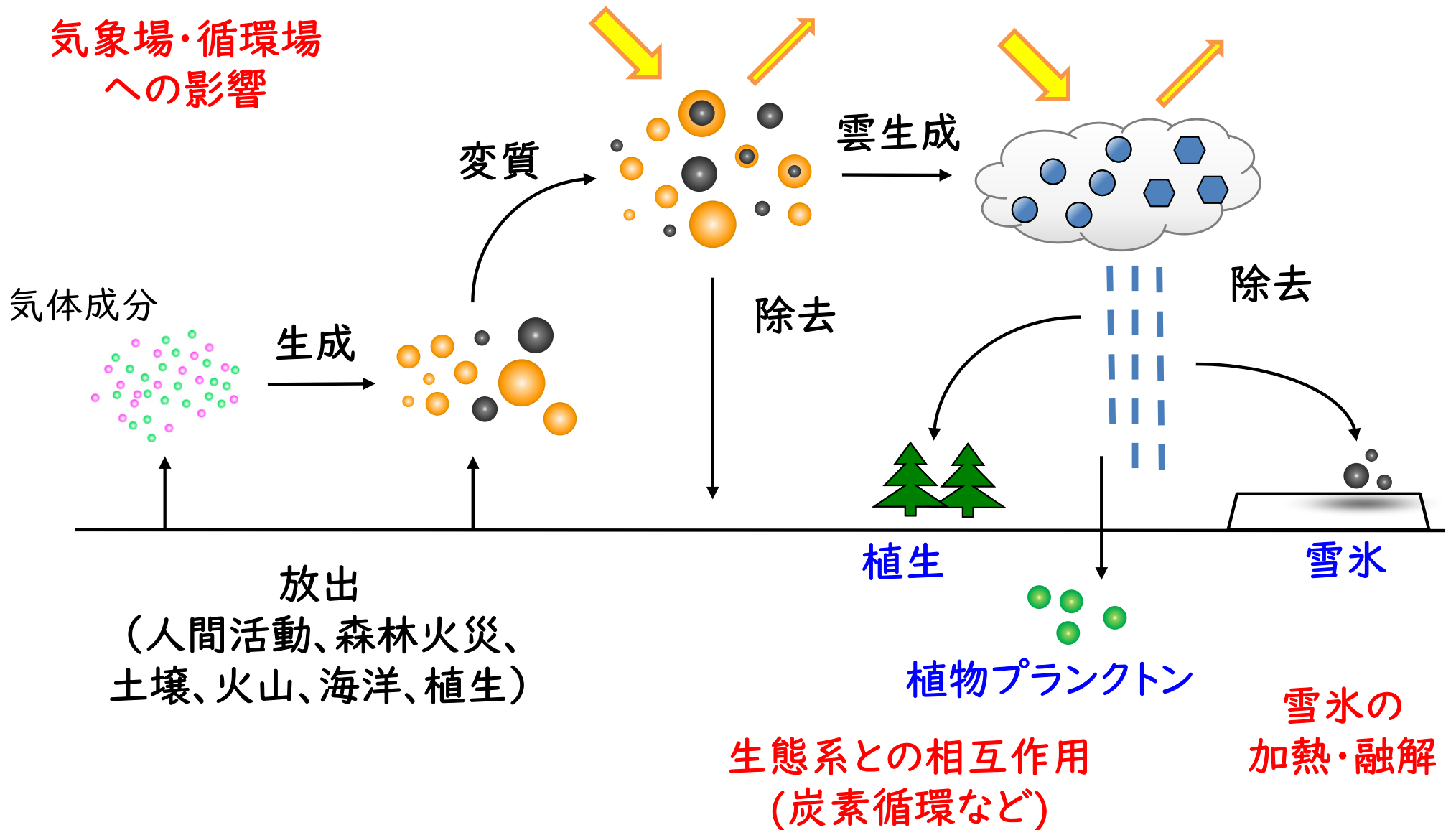
エアロゾルとその気候・気象・環境影響

大気汚染・健康被害

放射との相互作用

雲との相互作用

気象場・循環場
への影響



1 エアロゾルとその気候影響の概要

「エアロゾルは大気中にどれくらいあり、気候にどのような影響を与えるのか？」

2 エアロゾルのシミュレーションとは？

「エアロゾルをコンピュータでどのように扱うのか？扱う上で重要な要素は何か？」

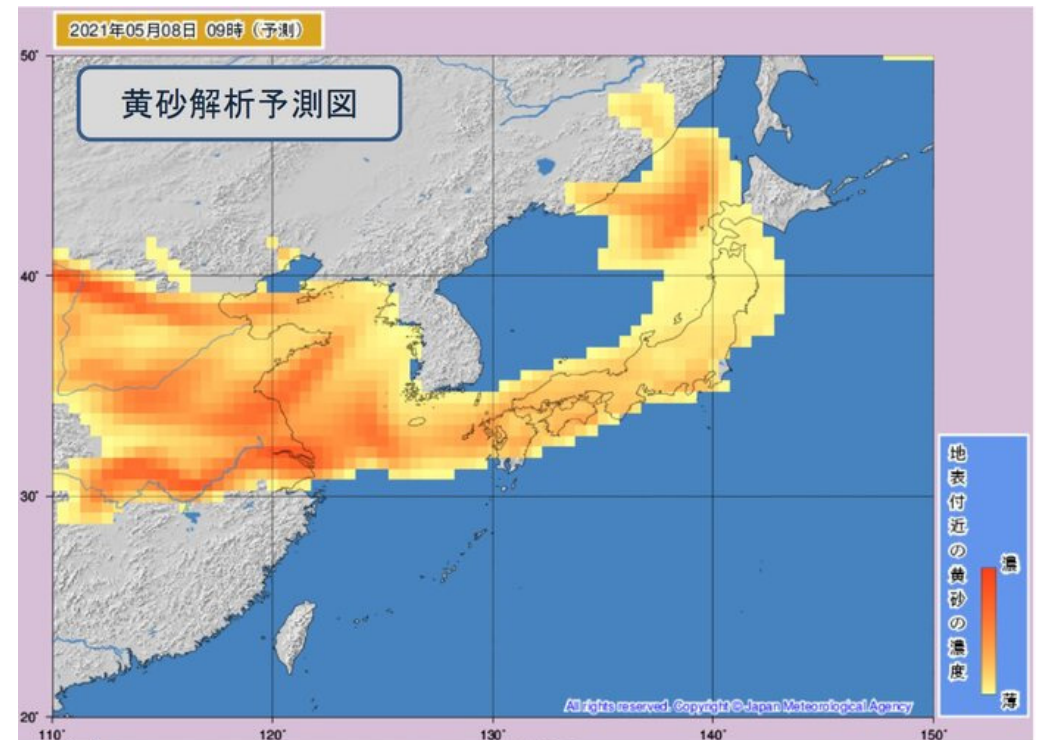
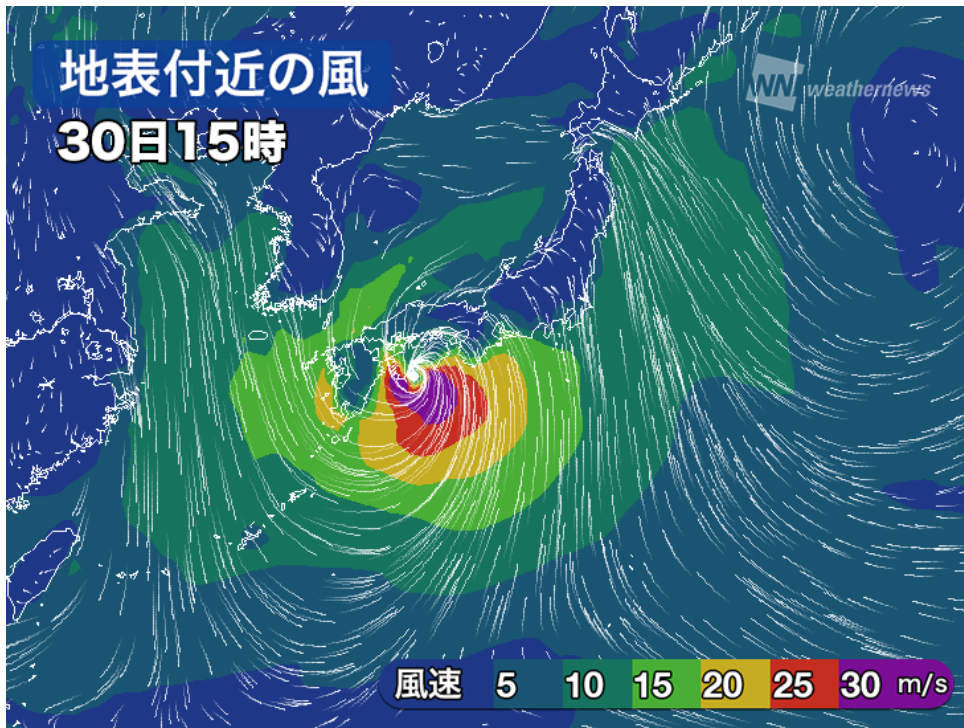
3 エアロゾルのシミュレーション研究例の紹介

「エアロゾルとその気候影響のシミュレーションはどのように進展してきているのか？」

数値シミュレーション

シミュレーション（辞書を調べると・・・）

- コンピュータなどを使用して模擬的に実験を行うこと。実験内容を数式模型によって組み立て、これを**コンピュータ処理することによって実際の場合と同じ結果を得ようとするもの**。
- 関心対象の現象を観測し、将来を予測する場合や、実物を作り実験する場合に対比して、**現実の代替となるコンピュータ・モデルや模型を利用して、将来を説明し予測すること**。

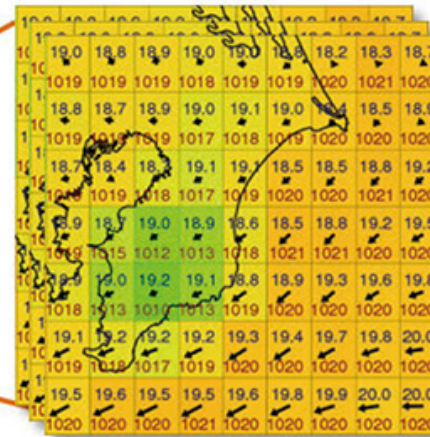
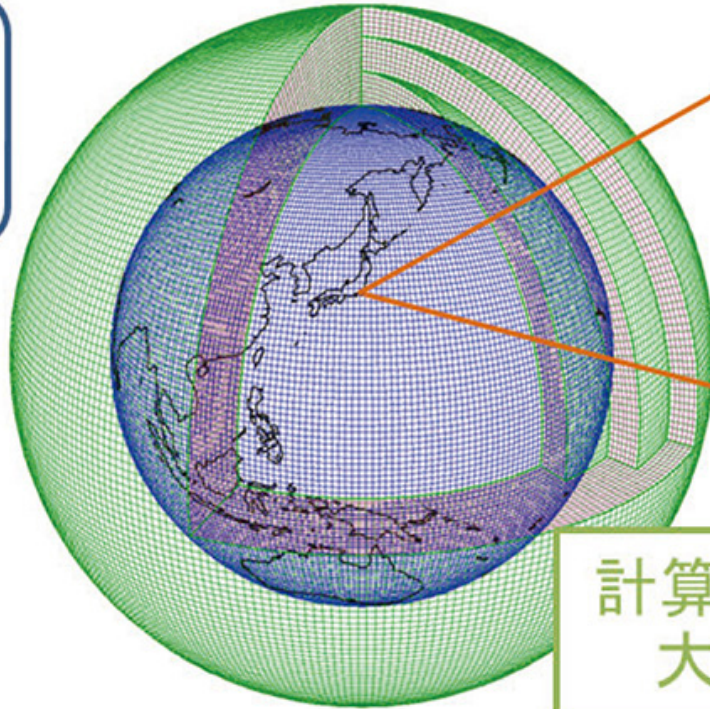


(<https://weathernews.jp/s/topics/201809/280085>)

(<https://www.data.jma.go.jp/env/kosa/fcst>)

気候シミュレーションのイメージ

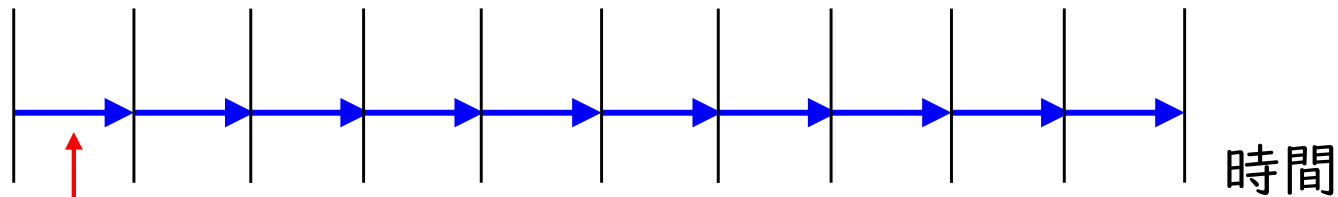
地球大気・海面・陸地を細かい格子に分割



観測データを基に、格子毎にある時刻の気象要素などの値を割り当て、物理学や化学の法則に基づいて時間変化を計算

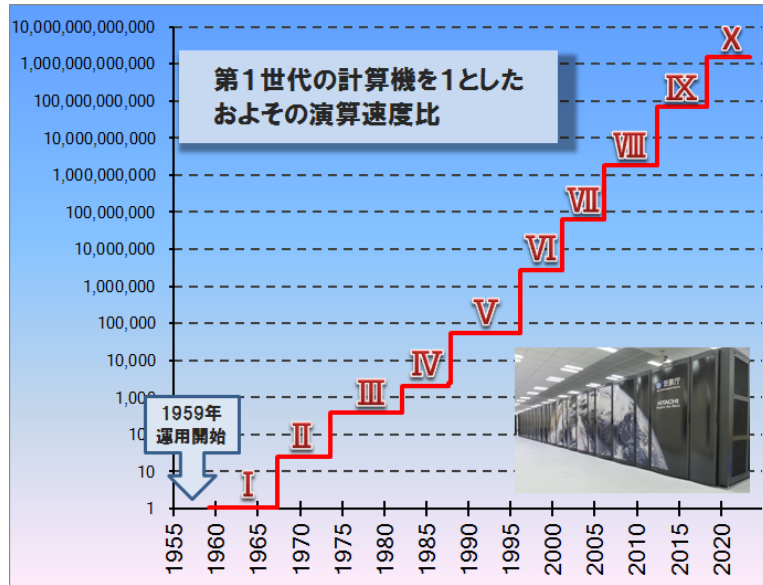
計算機上に仮想の地球大気を作るイメージ

(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2020/index4.html>)

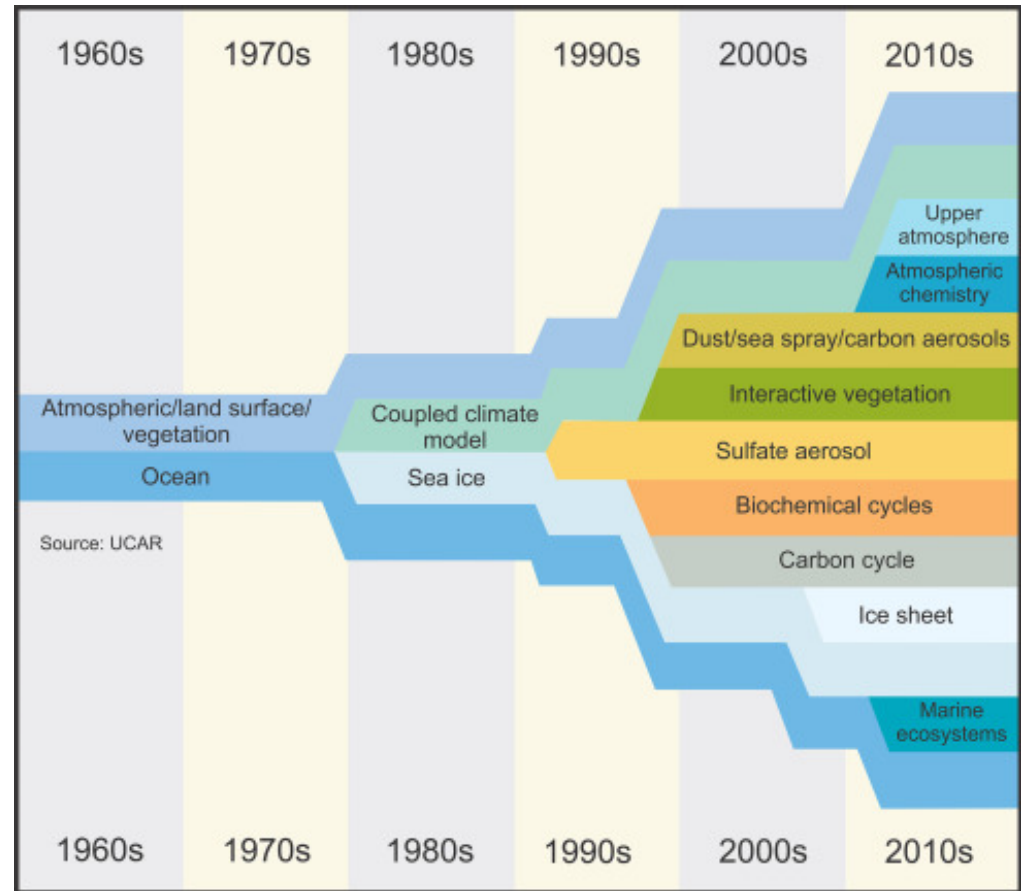


物理・化学法則を用いて、格子それぞれの気象要素（気温、気圧、風、雲、放射など）や物質の濃度（水蒸気、温室効果ガス、エアロゾルなど）などの時間変化を繰り返し計算する

気候シミュレーションの発展



(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-2.html>)



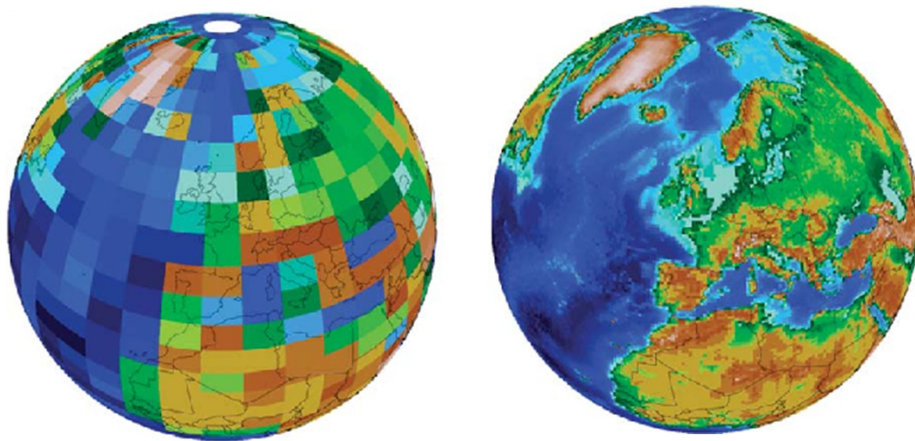
大気
海洋

海氷

エアロゾル
植生
炭素循環

高層大気
大気化学
氷床
海洋生態系

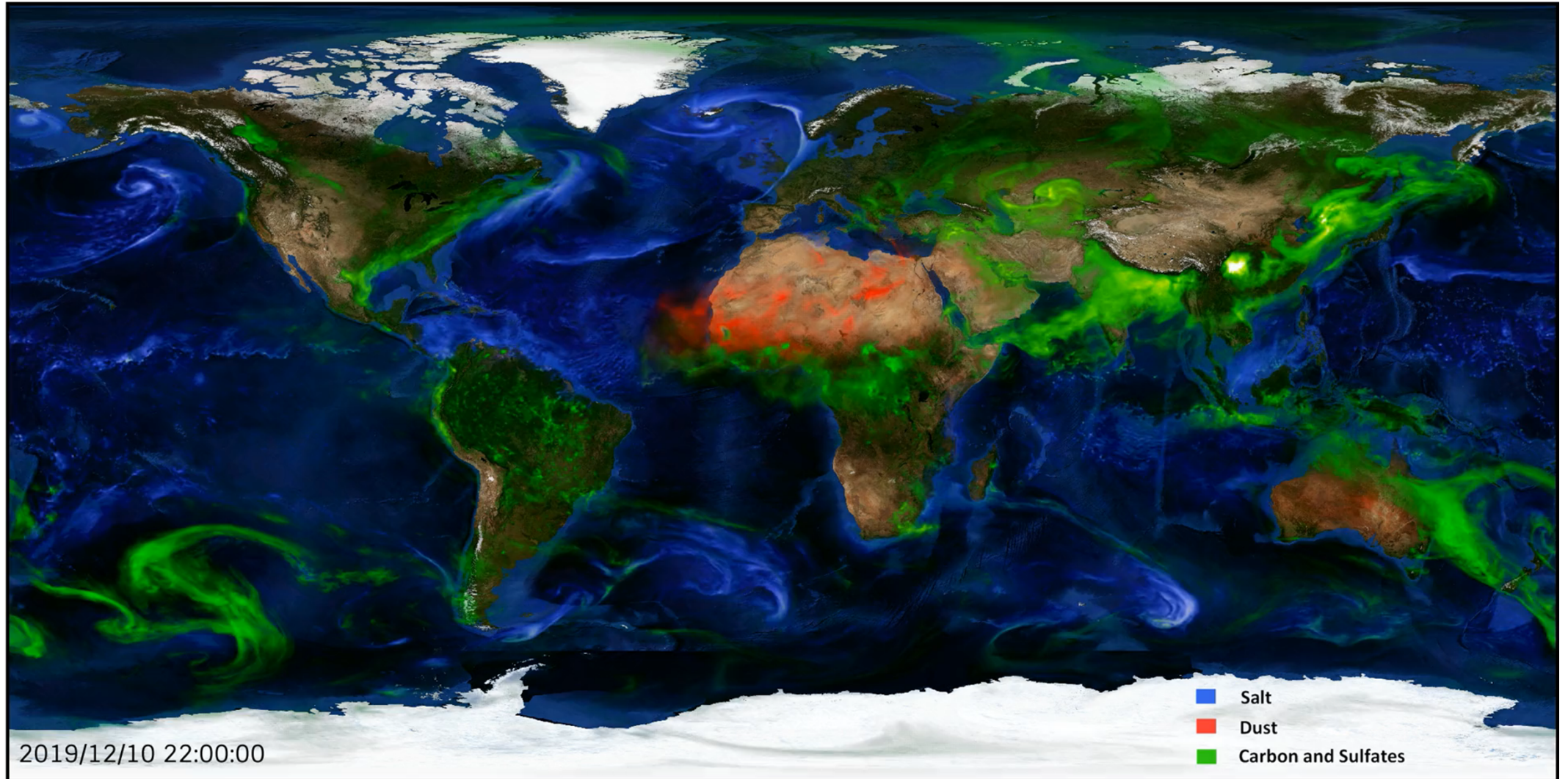
(<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/climate-models>)



(Washington et al., 2009)

高解像度化や様々なプロセスの導入が進み、コンピュータ上に地球そのものを作るイメージのシミュレーションに発展してきた。

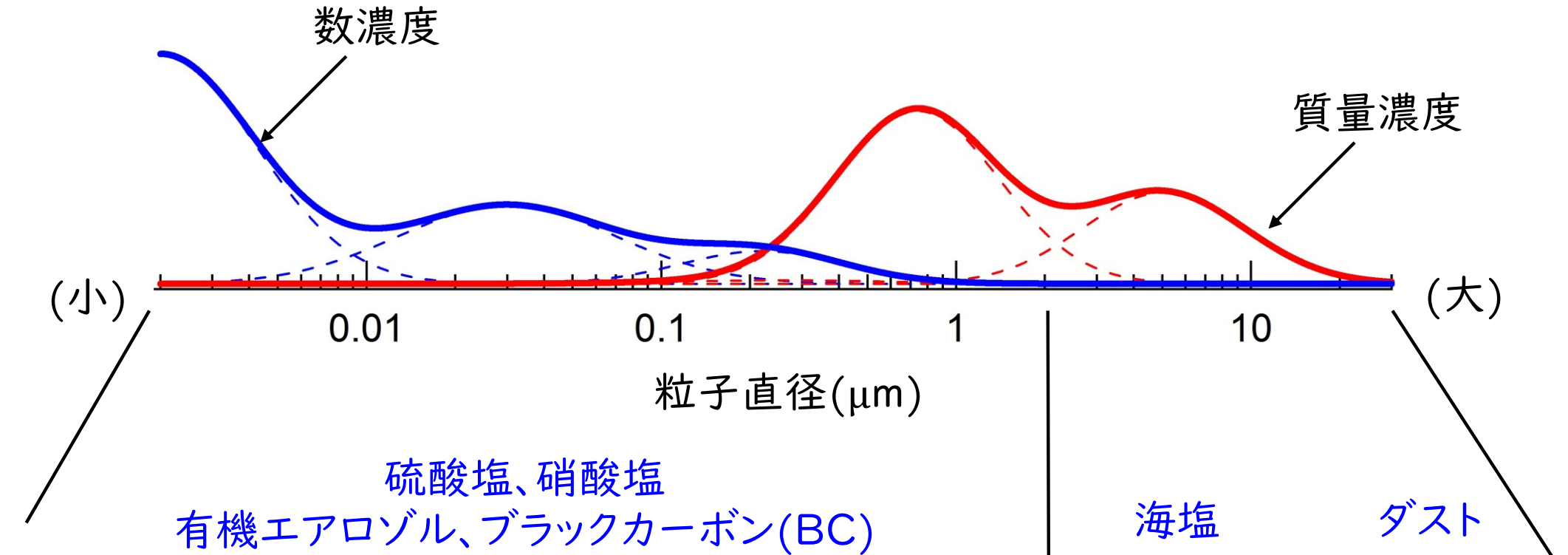
エアロゾルの数値シミュレーション



(<https://svs.gsfc.nasa.gov/4582>)

大気エアロゾル

大気中に浮遊する直径数nmから100 μ m程度の微粒子（液体・固体）



人間活動
(工業・交通など)

森林火災

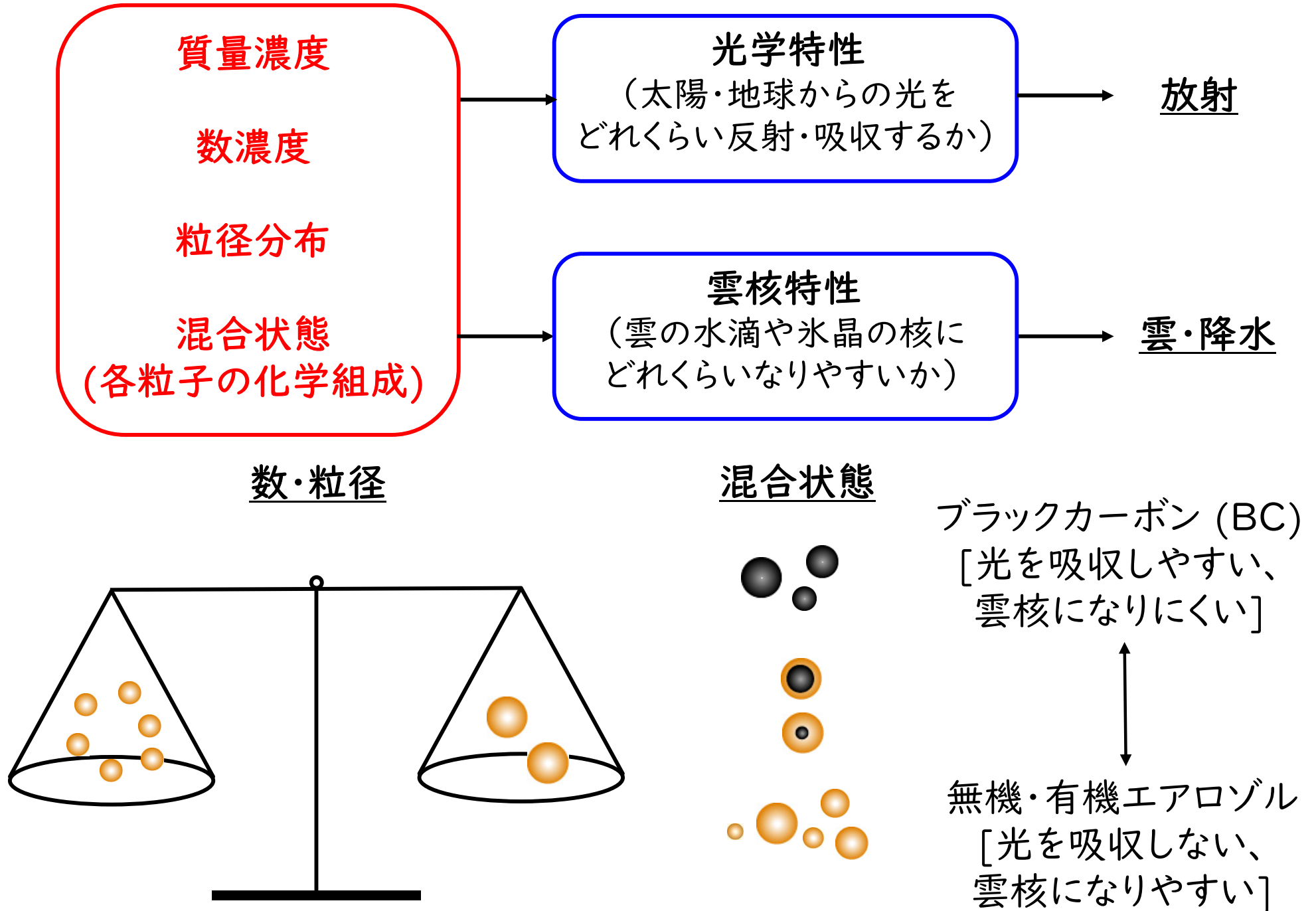
植生

火山

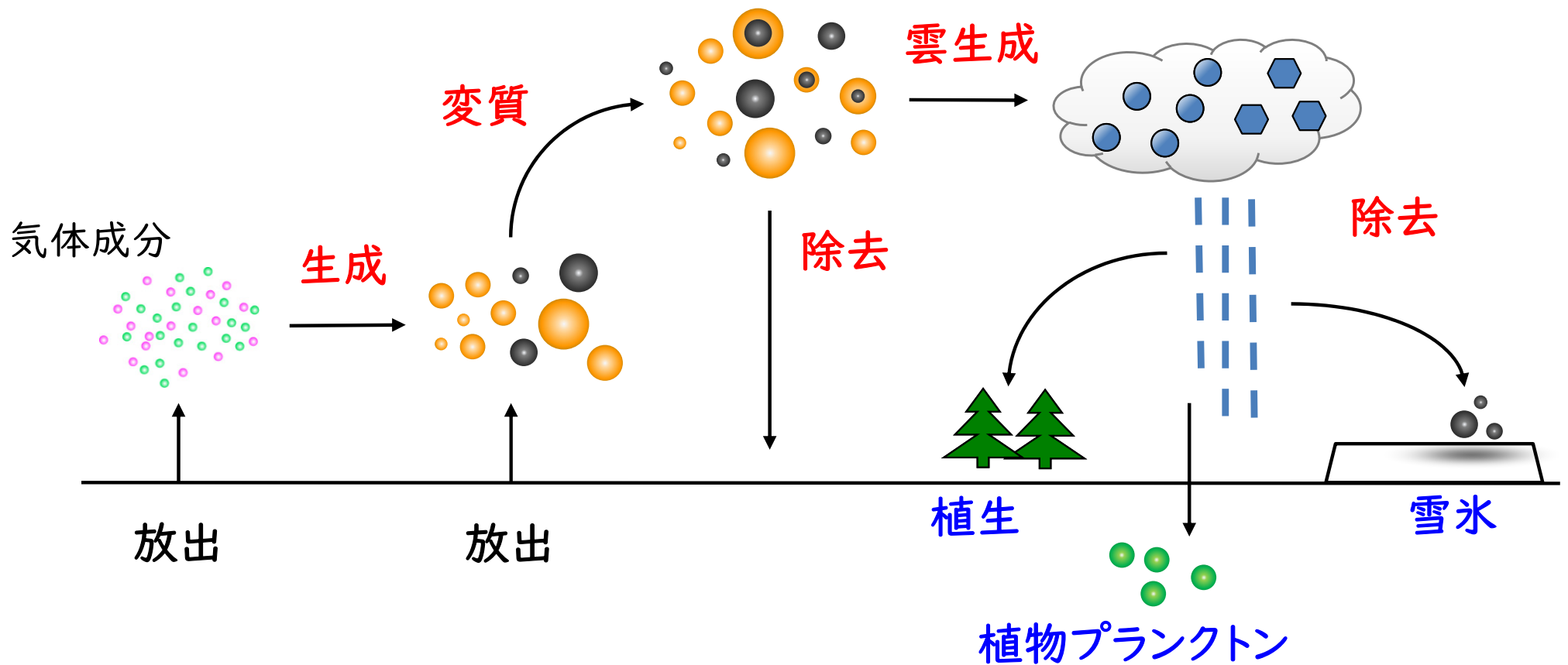
海洋

土壌

エアロゾルの粒子特性の重要性



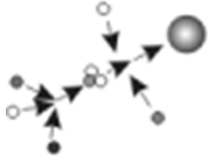
エアロゾルプロセス



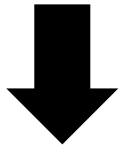
- エアロゾルモデルでは、エアロゾルの**放出、輸送、生成、変質、除去過程**を計算する。
- また、これらの過程に伴う**質量濃度、数濃度、粒径分布、化学組成、混合状態、光学特性、雲核特性**の変化を計算する。

エアロゾルプロセス

新粒子生成

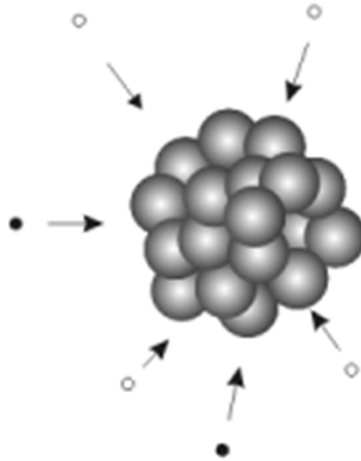


気体分子の集合体から
非常に小さな粒子が生成
する

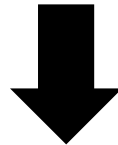


数濃度が**増大**する

凝縮

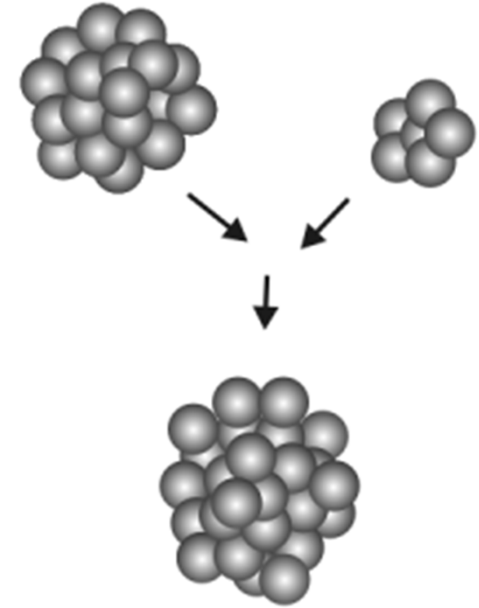


もともと存在するエアロゾ
ルの表面で気体分子が
粒子化する

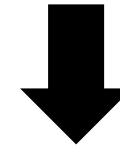


質量濃度が**増大**する
粒径が**増大**する
混合状態が**変化**する

凝集



粒子同士が衝突・併合す
る



数濃度が**減少**する
粒径が**増大**する
混合状態が**変化**する

エアロゾルモデルで重要になる要素

粒子特性

(質量、数、粒径、化学組成、混合状態、光学特性、雲核特性)

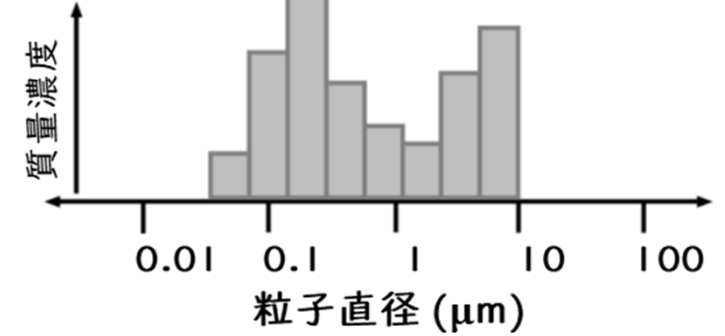
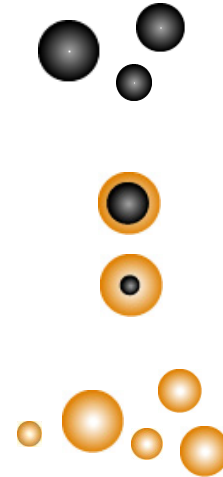
ブラックカーボン (BC)
ダスト
有機エアロゾル (OA)
硫酸塩
アンモニウム
硝酸塩
海塩

雲核に
なりにくい

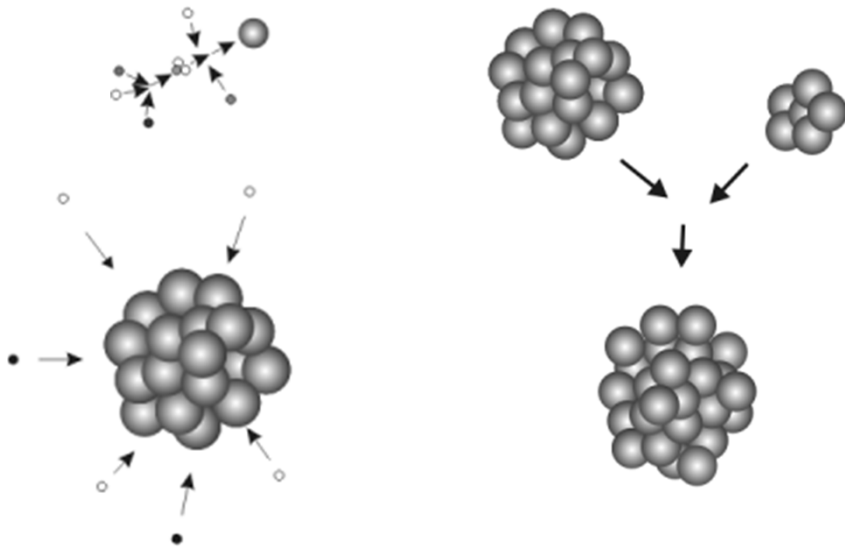
光を吸収
しやすい

雲核に
なりやすい

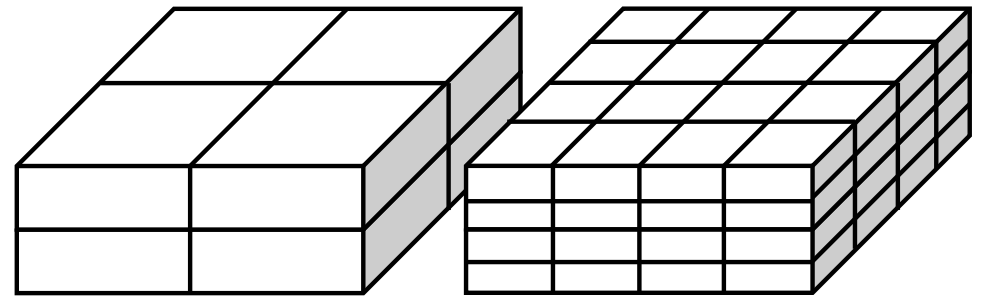
光を吸収
しない



エアロゾルプロセス

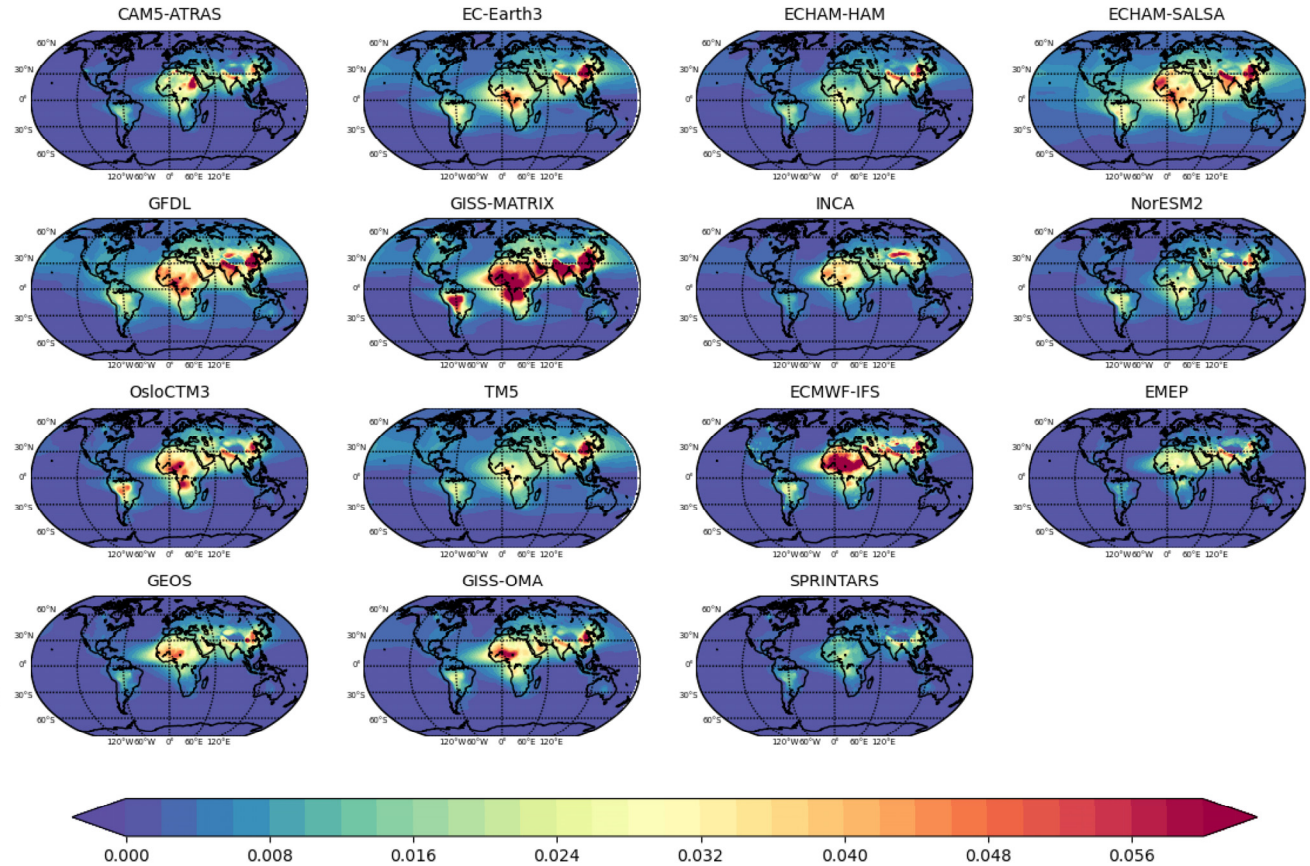
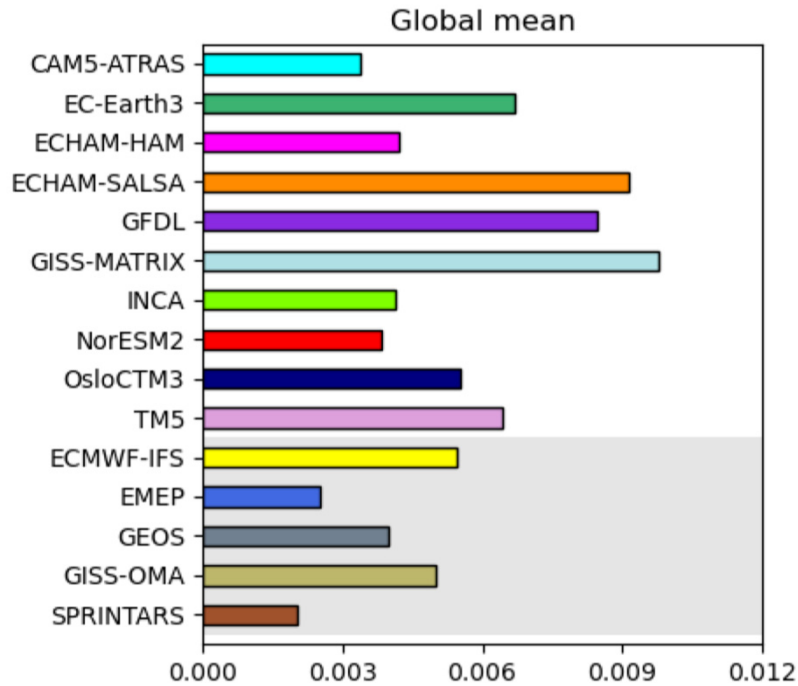


空間解像度



数値モデルによるエアロゾルの推定のばらつき

15のエアロゾルモデルによるエアロゾルの光吸収量(地球大気全体の平均)



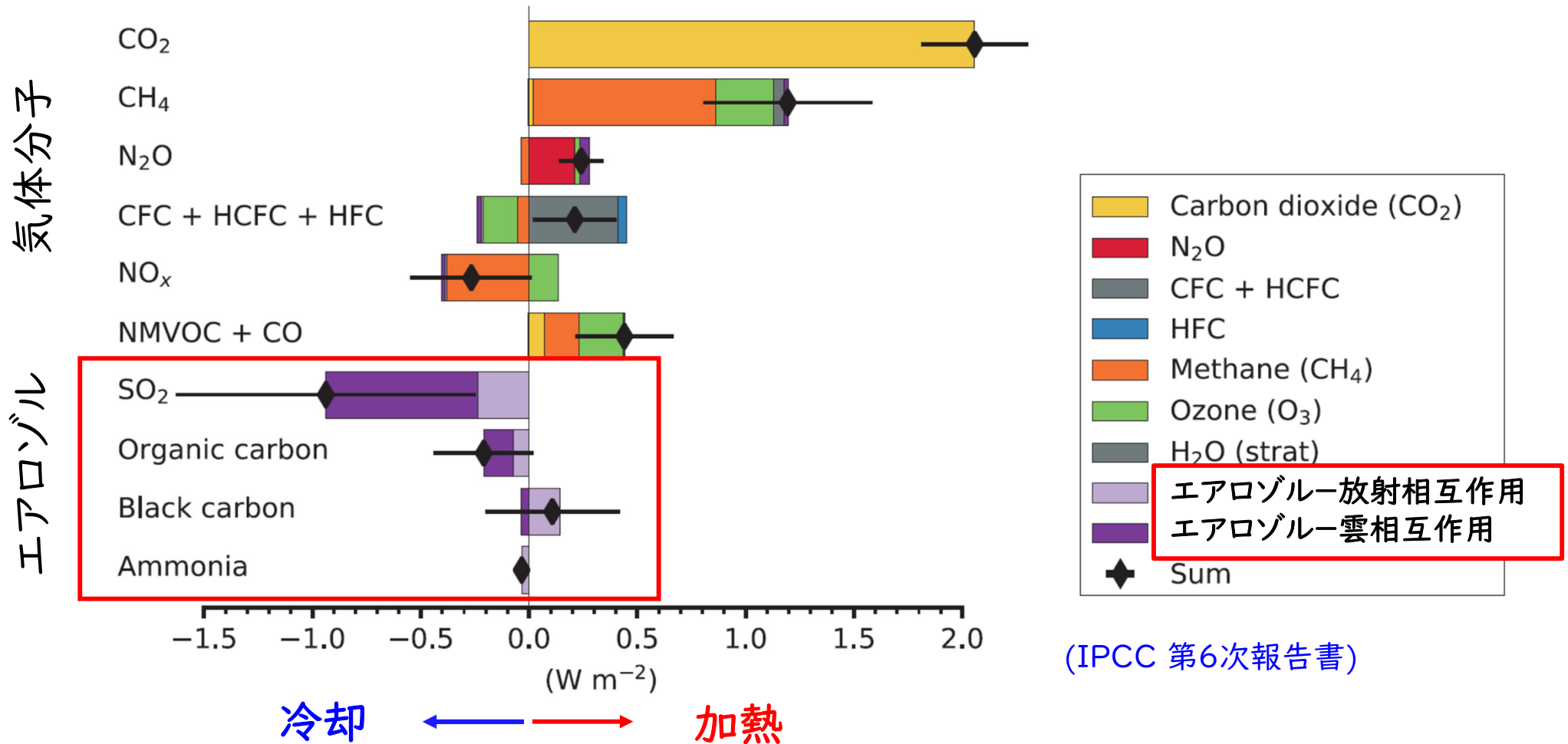
(Sand et al., 2021)

モデルによるエアロゾルの表し方が大きく異なるため、数値モデル間のエアロゾルの濃度や分布のばらつきは非常に大きい。この大きなばらつきが、放射・雲との相互作用の大きな不確実性の一因となっている。

放射・雲との相互作用の大きな不確実性

1750年から2019年までの放射収支の変化

(a) Effective radiative forcing, 1750 to 2019



モデルによるエアロゾルの表し方が大きく異なるため、数値モデル間のエアロゾルの濃度や分布のばらつきは非常に大きい。この大きなばらつきが、放射・雲との相互作用の大きな不確実性の一因となっている。

1 エアロゾルとその気候影響の概要

「エアロゾルは大気中にどれくらいあり、気候にどのような影響を与えるのか？」

2 エアロゾルのシミュレーションとは？

「エアロゾルをコンピュータでどのように扱うのか？扱う上で重要な要素は何か？」

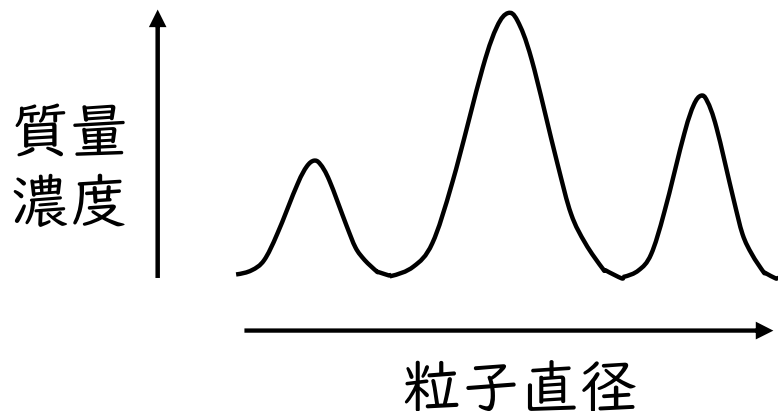
3 エアロゾルのシミュレーション研究例の紹介

「エアロゾルとその気候影響のシミュレーションはどのように進展してきているのか？」

新たなエアロゾルモデルの開発

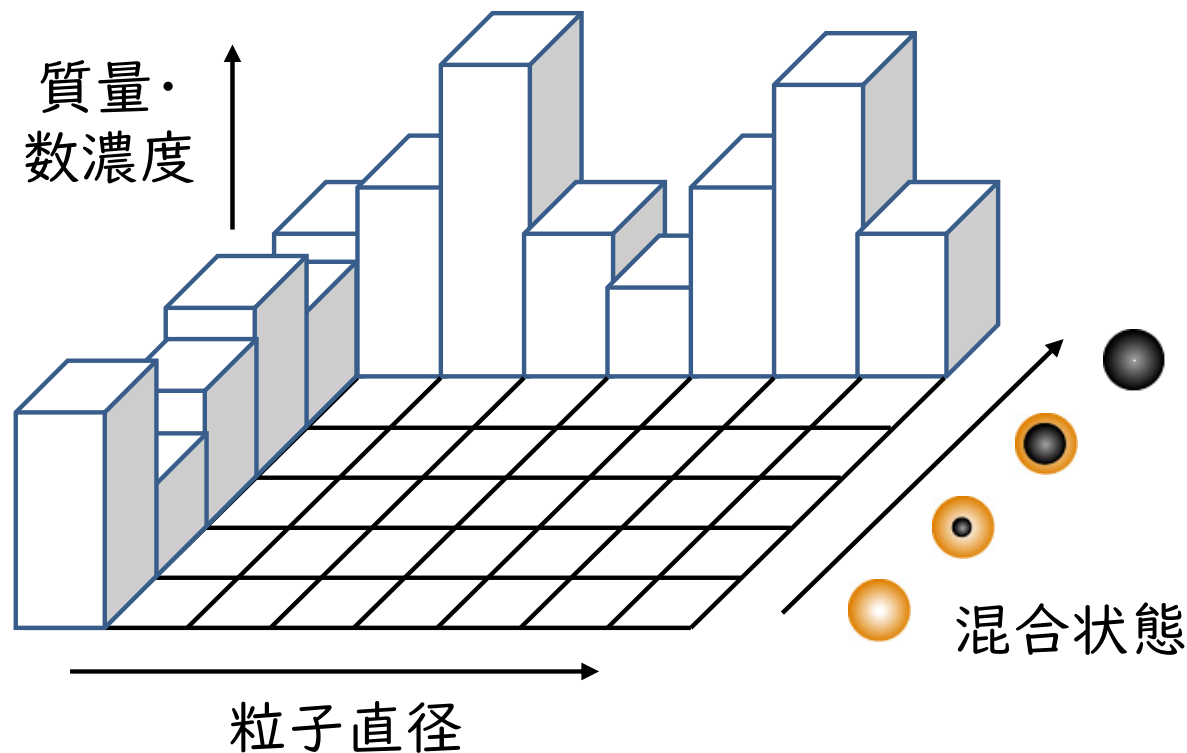
新しいエアロゾルモデル

一般的なエアロゾルモデル



質量のみを予報

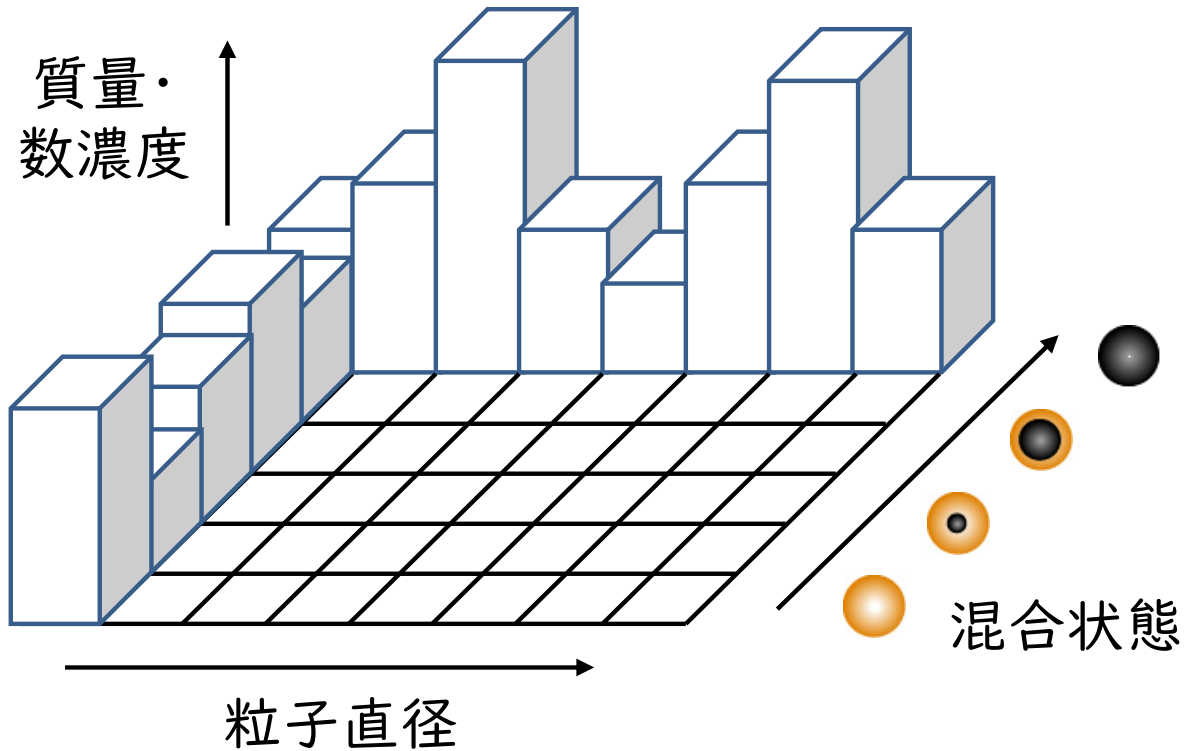
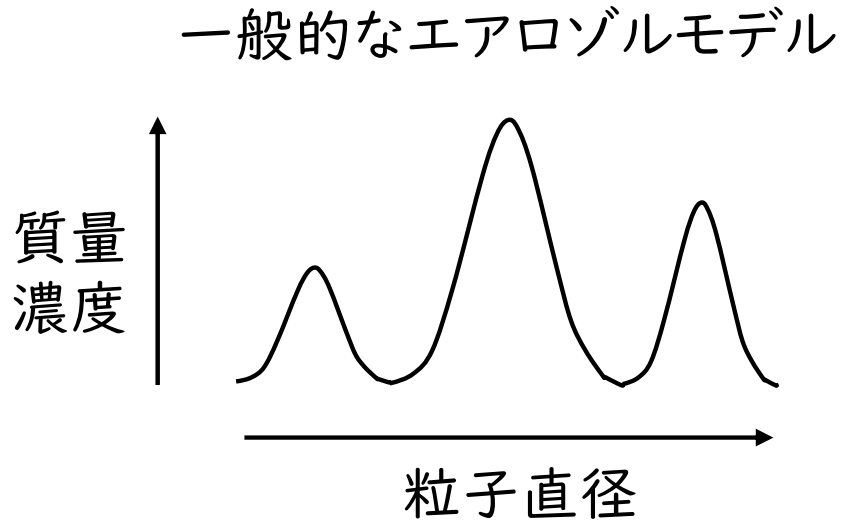
質量・
数濃度



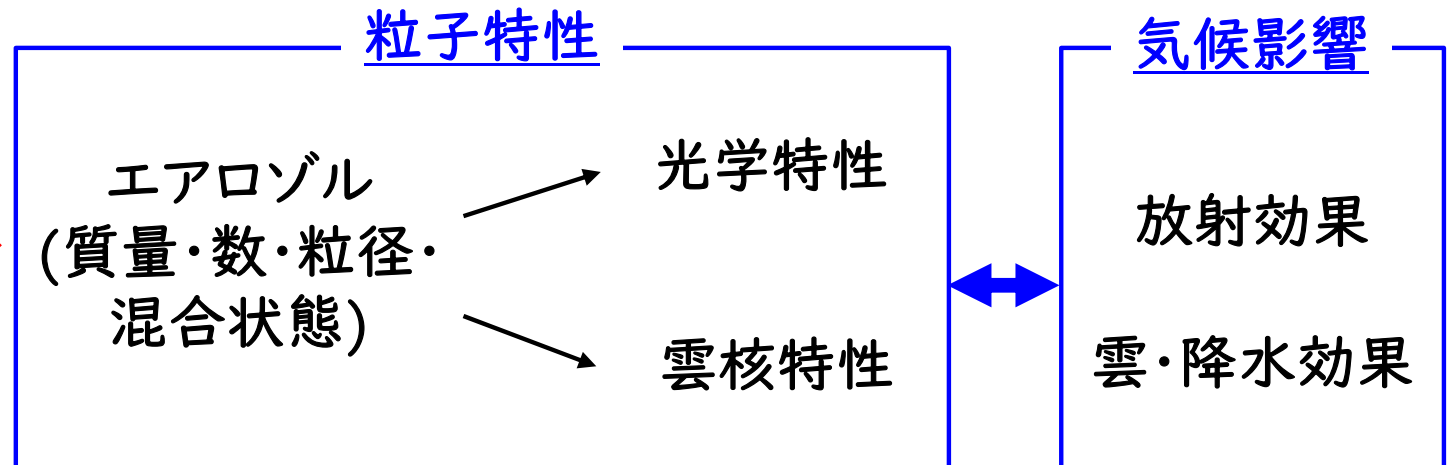
質量・数・粒径・混合状態の
すべてを予報

新たなエアロゾルモデルの開発

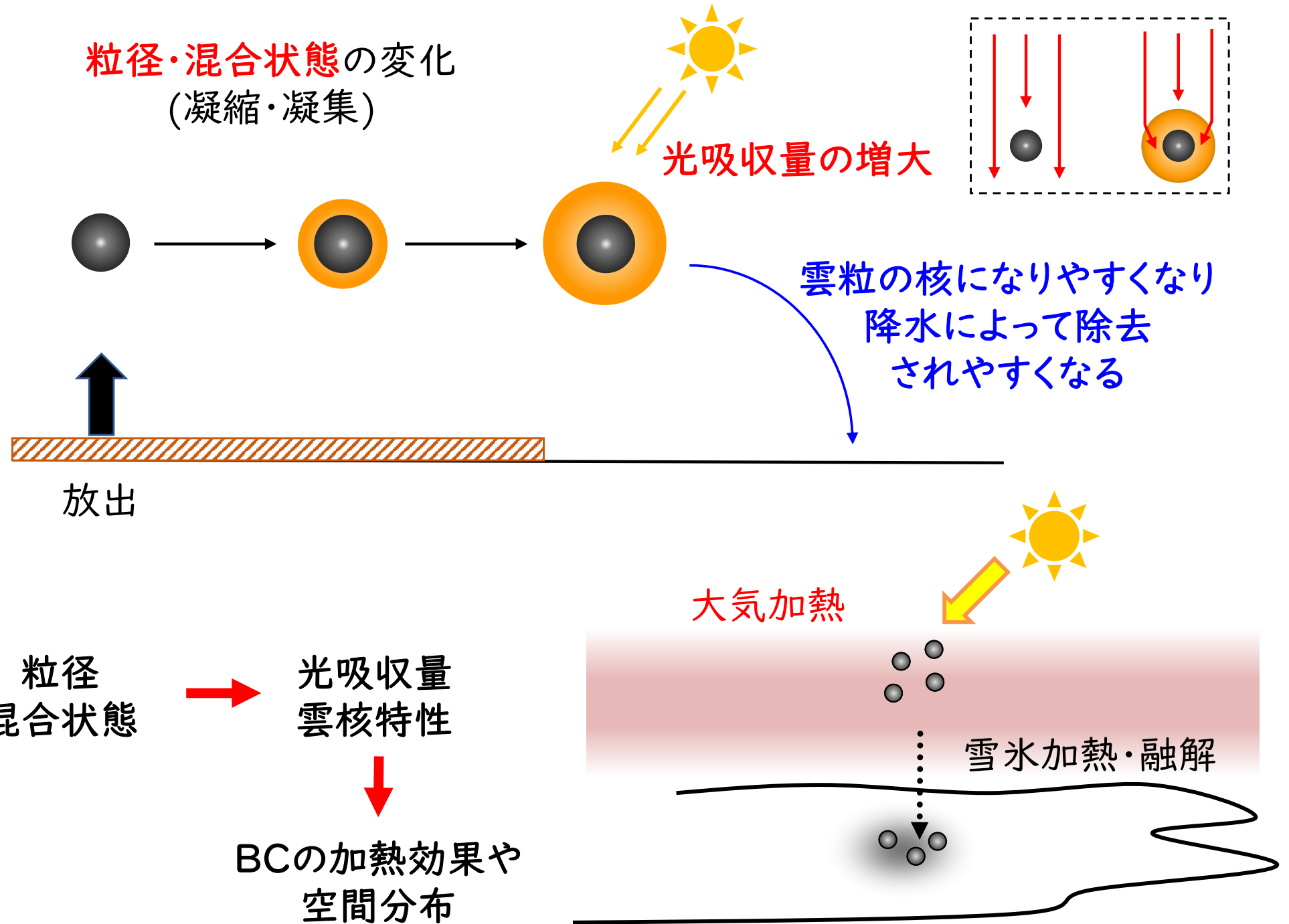
新しいエアロゾルモデル



- 新粒子生成
- 凝縮・凝集
- 除去過程 など

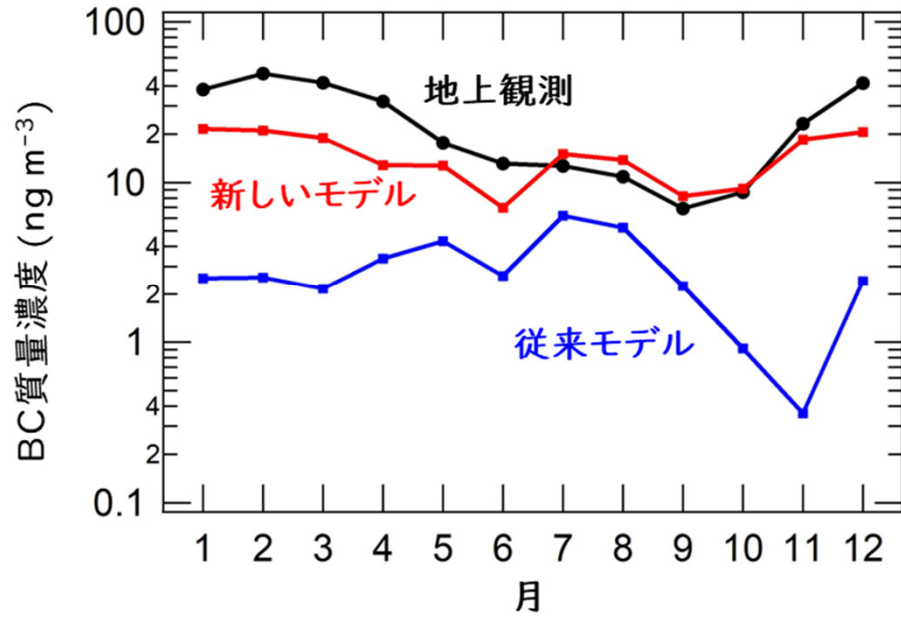


ブラックカーボン(BC)に関するモデル開発

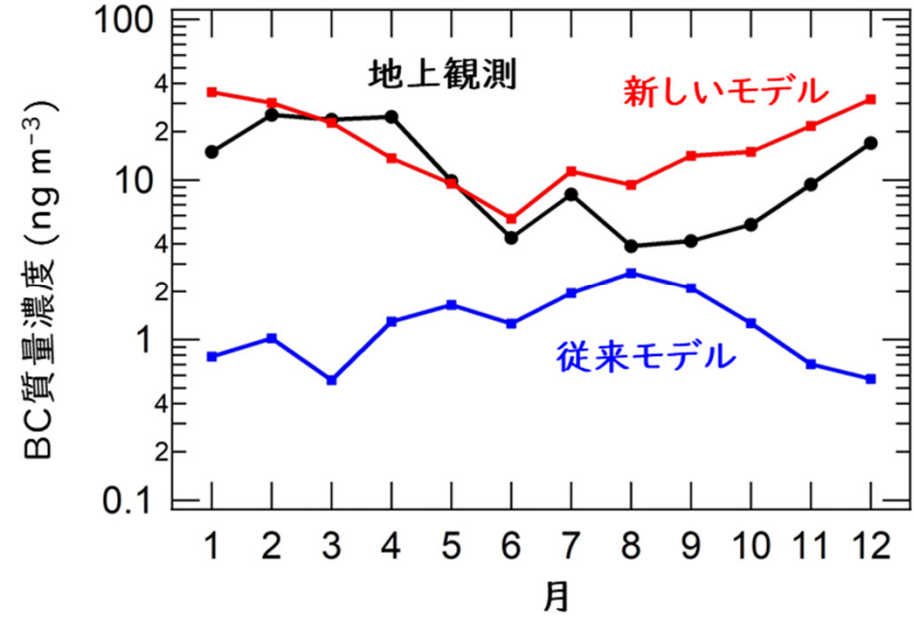


BCの放射への影響評価

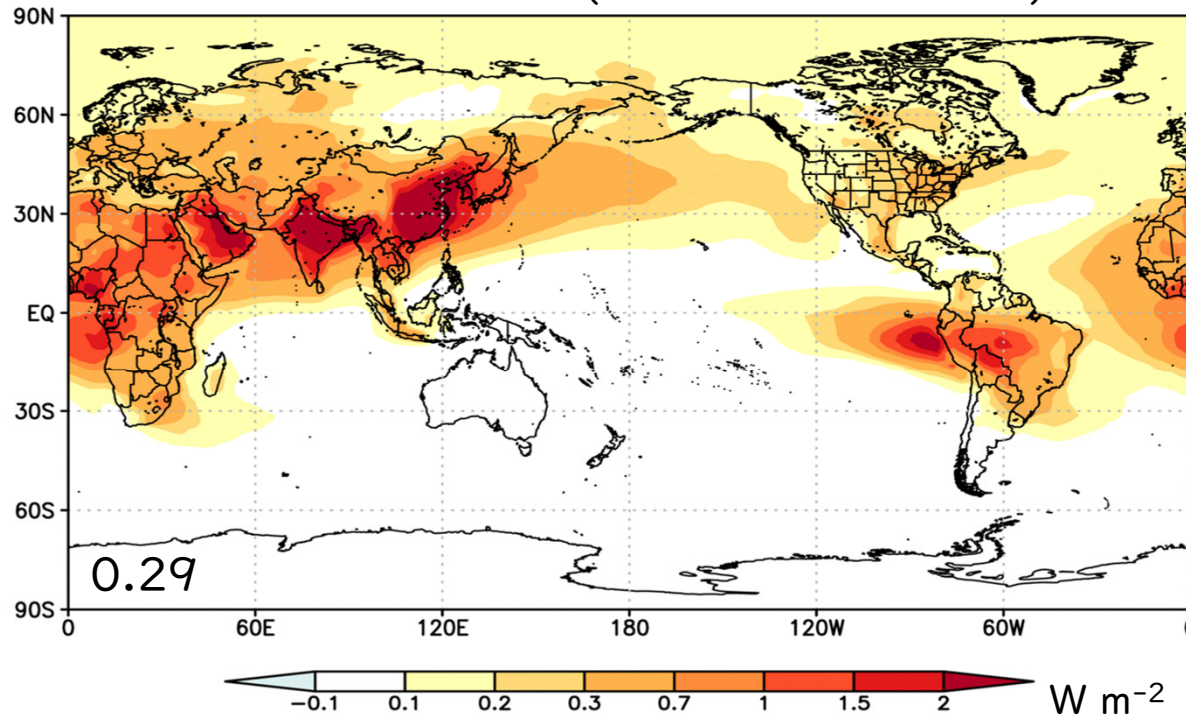
Barrow (71.3°N, 156.6°W)



Ny-Alesund (78.9°N, 11.9°E)



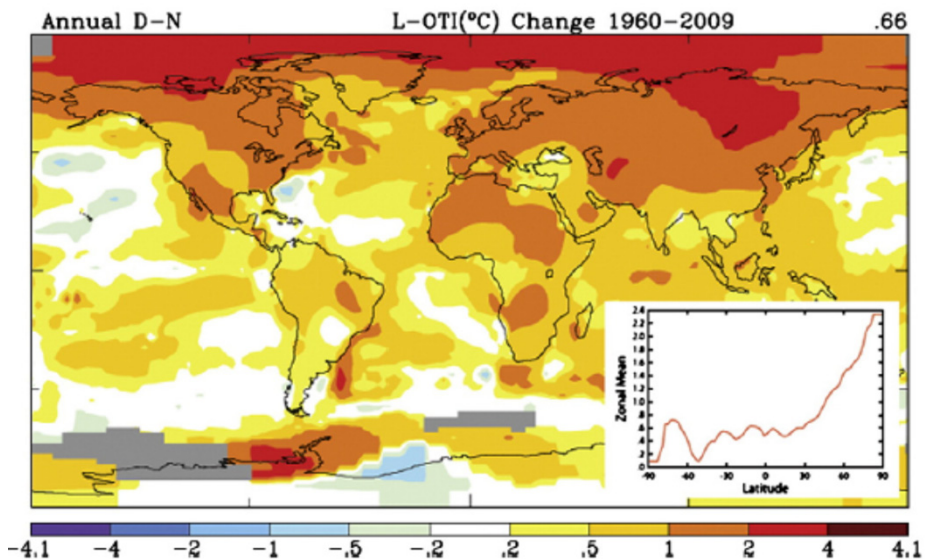
BCの放射強制力 (1750年から2010年)



(Matsui et al., 2018, 2022; Matsui, 2020)

北極BCと雪氷融解の相互作用

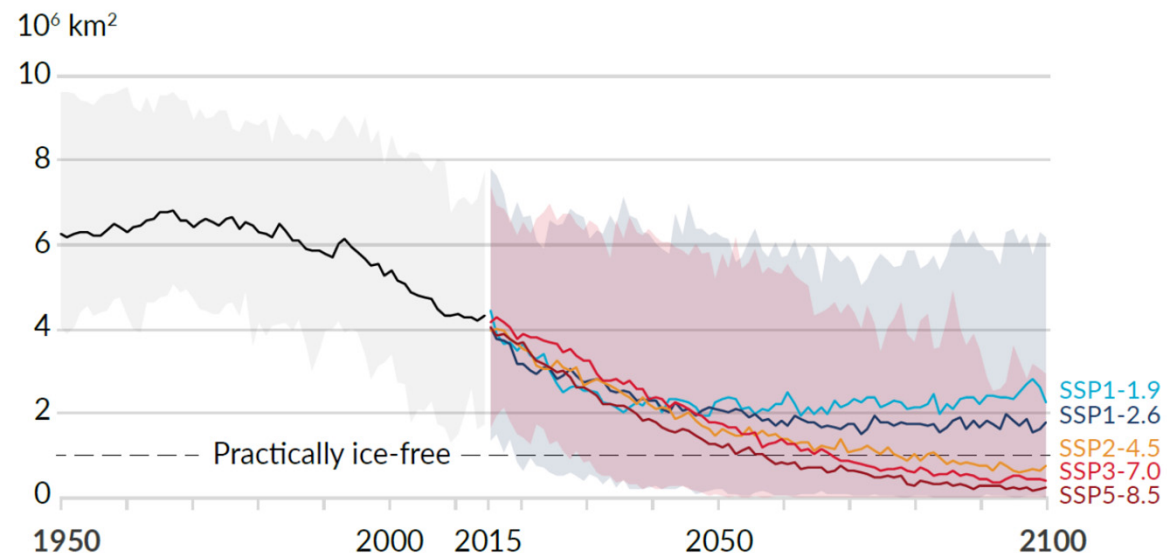
1960-2009年の地表気温の変化



(Serreze and Barry, 2011)

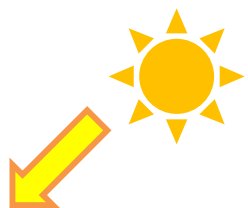
北極海の海氷面積のこれまでの変動と将来予測

b) September Arctic sea ice area



(IPCC 第6次報告書)

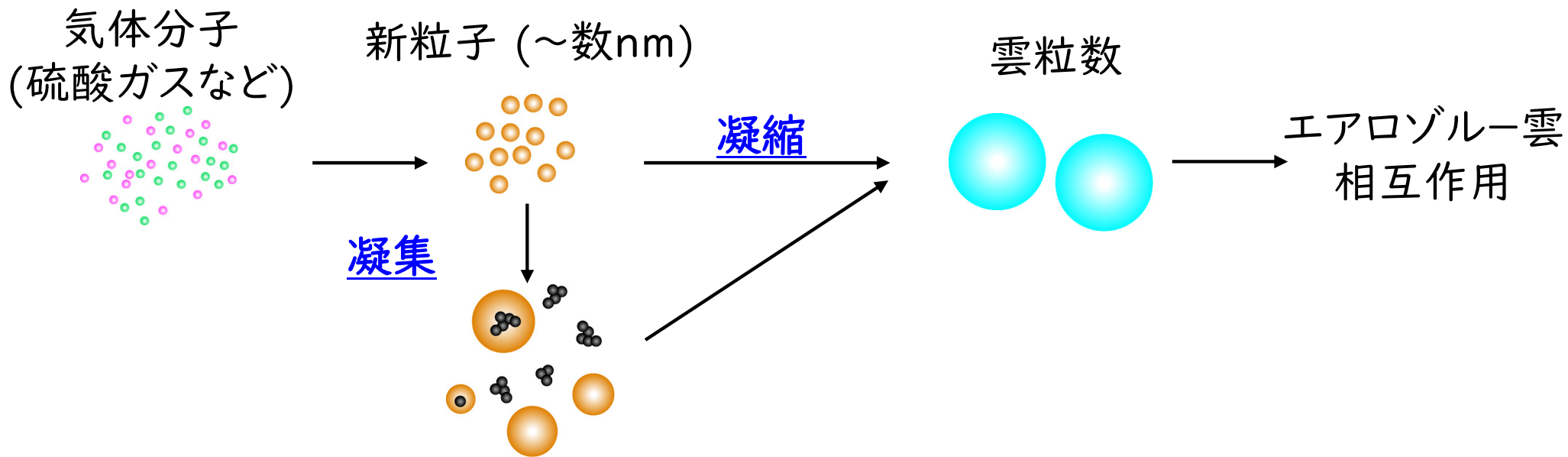
大気加熱



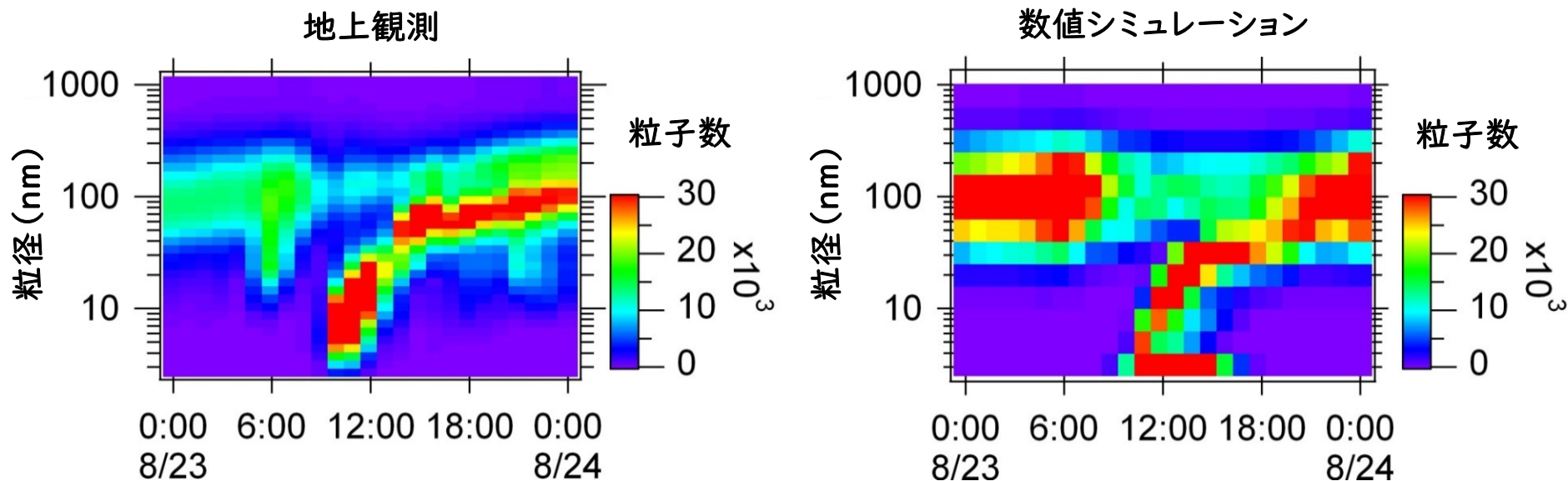
雪氷加熱・融解

北極域のBCが、大気や雪氷面の加熱を通して、北極域の急速な温暖化にどの程度影響を与えるのかを明らかにする必要がある。

新粒子生成過程のモデル開発・検証



北京での集中観測 (2006年8-9月) との比較例



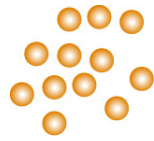
(Matsui et al., 2011)

新粒子生成の重要性の評価

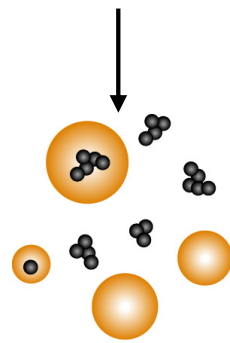
気体分子
(硫酸ガスなど)



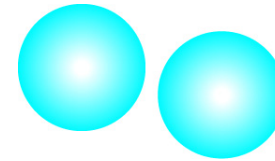
新粒子 (~数nm)



凝集

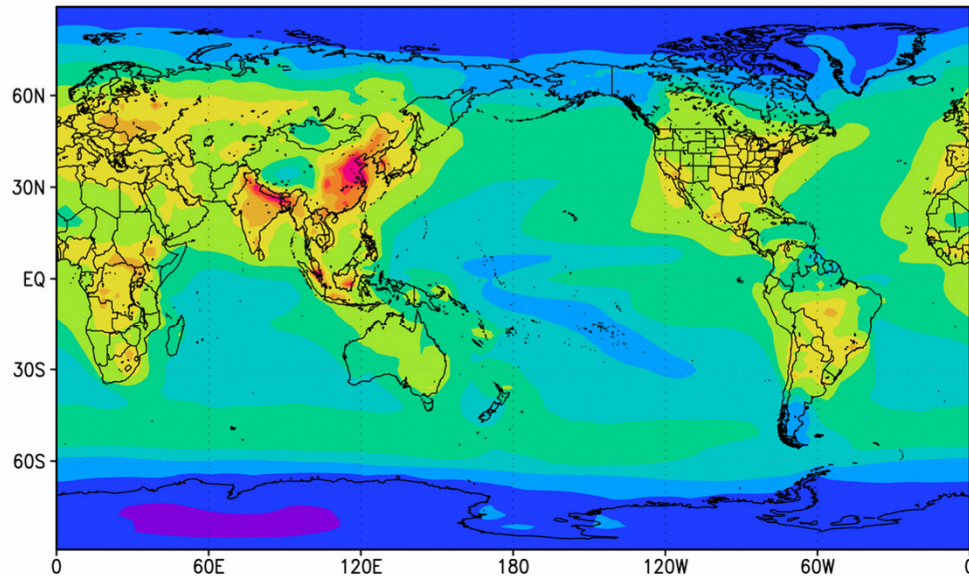


凝縮

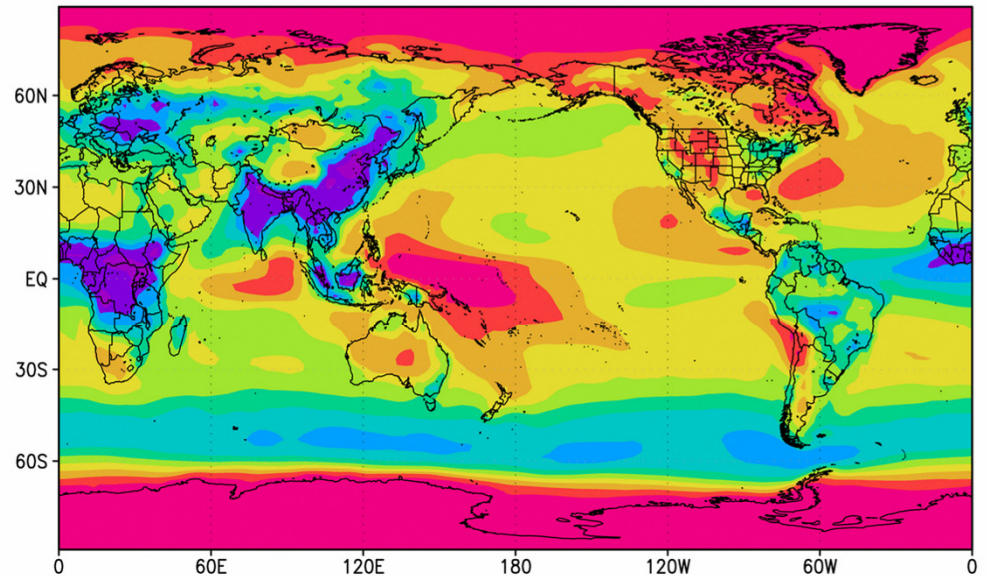


エアロゾル-雲
相互作用

40 nm以上の粒子数濃度 (地上)

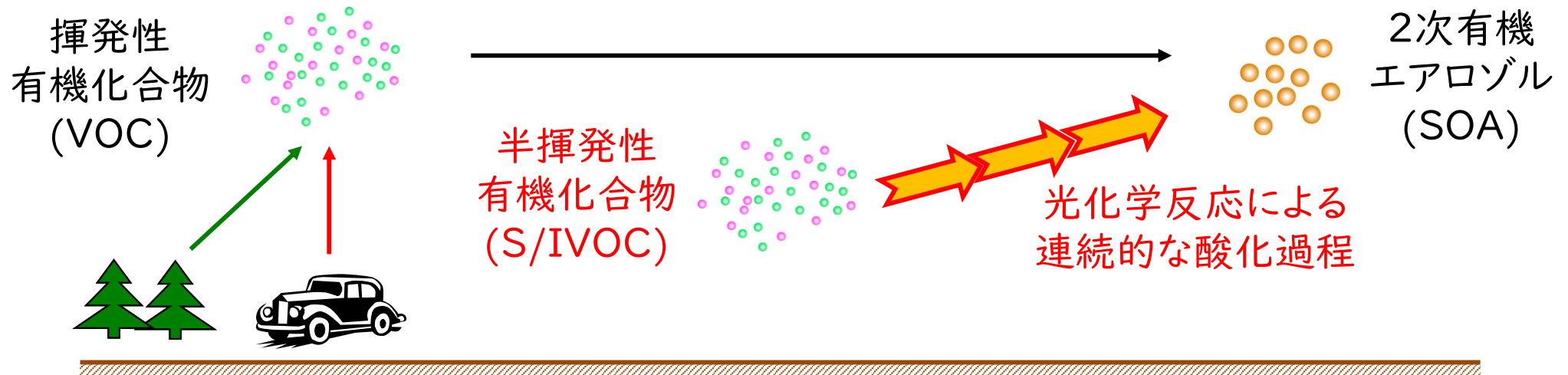


40nm以上の粒子数に対する新粒子生成の寄与

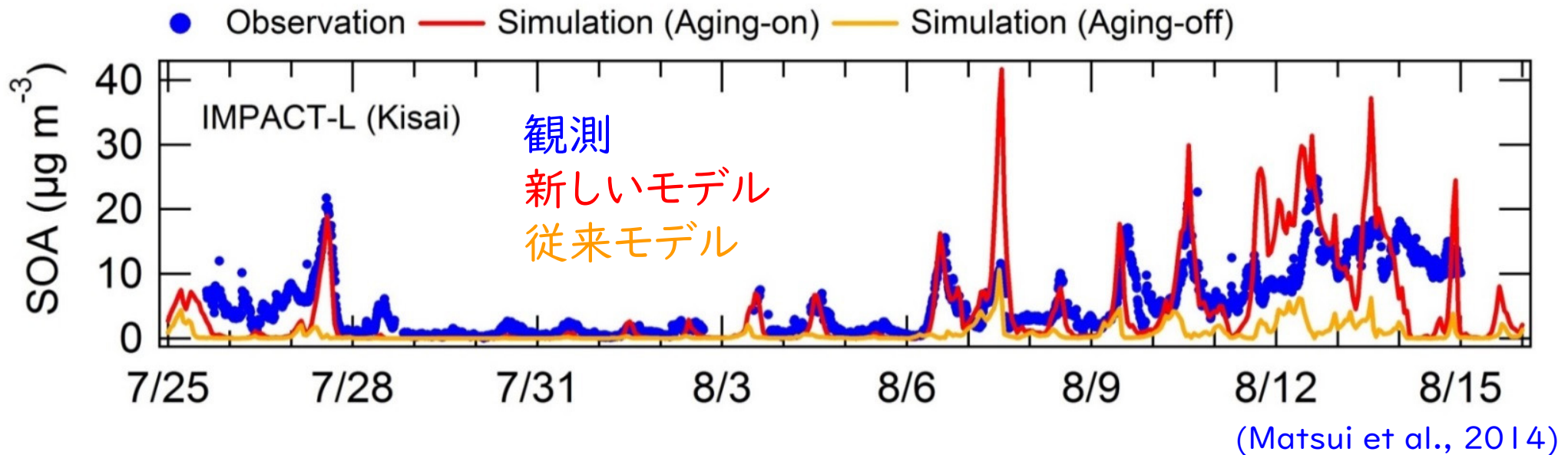


(Matsui and Mahowald, 2017)

有機エアロゾルの生成過程のモデル開発・検証



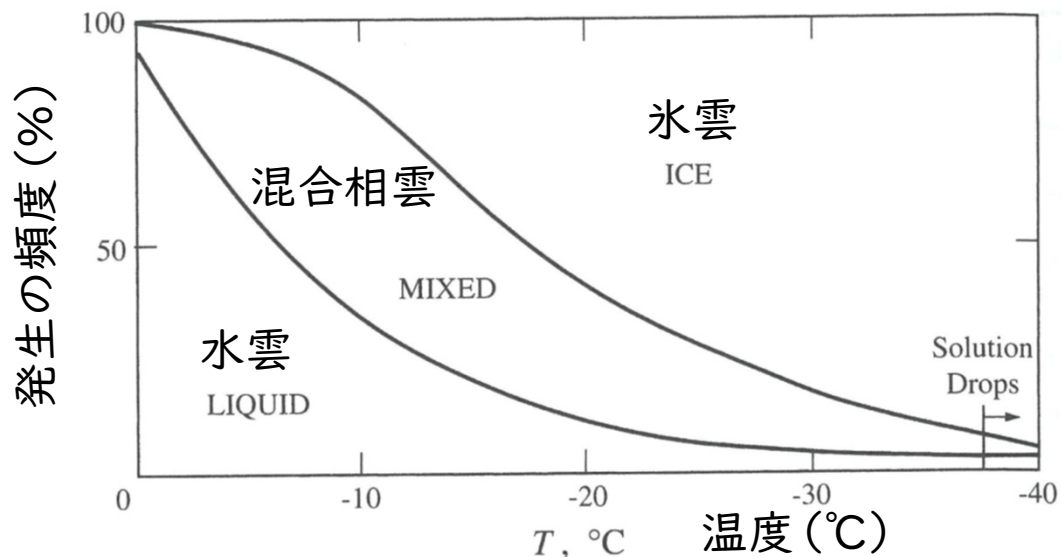
埼玉での集中観測 (2004年7-8月) との比較例



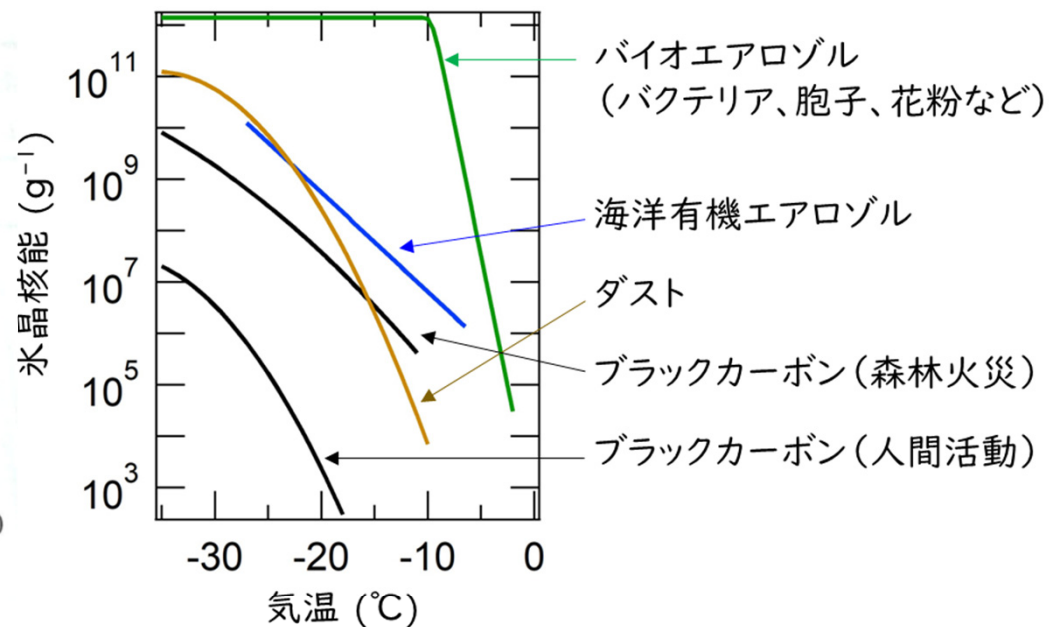
半揮発性・中間揮発性の有機化合物の酸化過程の導入によって、
有機エアロゾルの質量濃度の再現性が大きく向上した。

氷晶核とその雲への影響評価

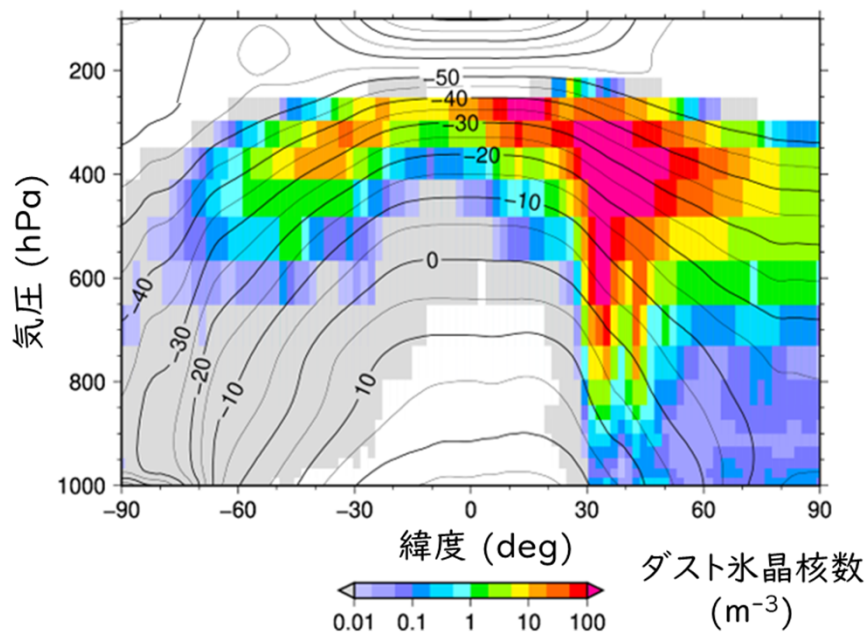
混合相雲: 水と氷が共存した雲



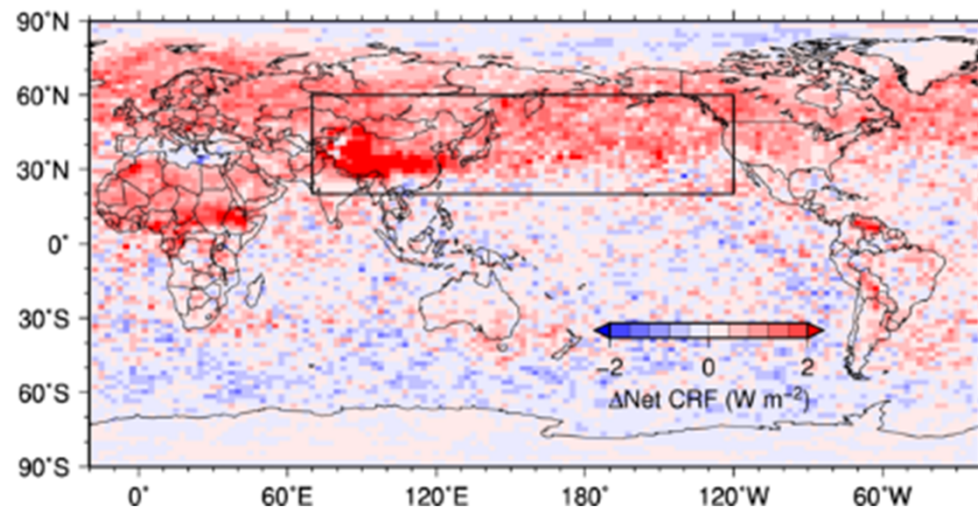
(Seinfeld and Pandis, 2016)



氷晶核数の全球分布

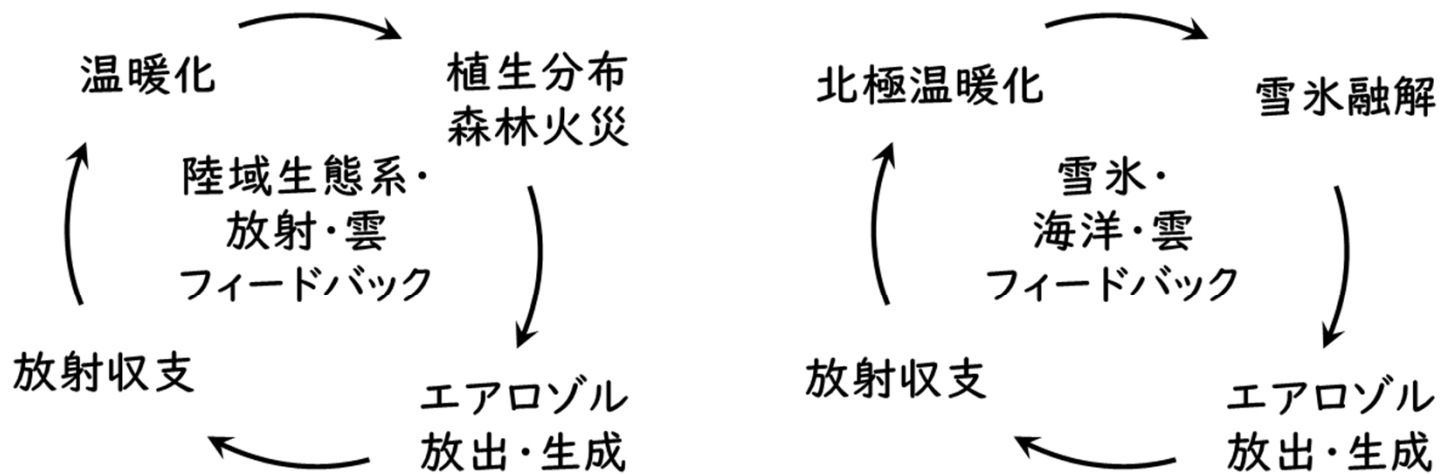
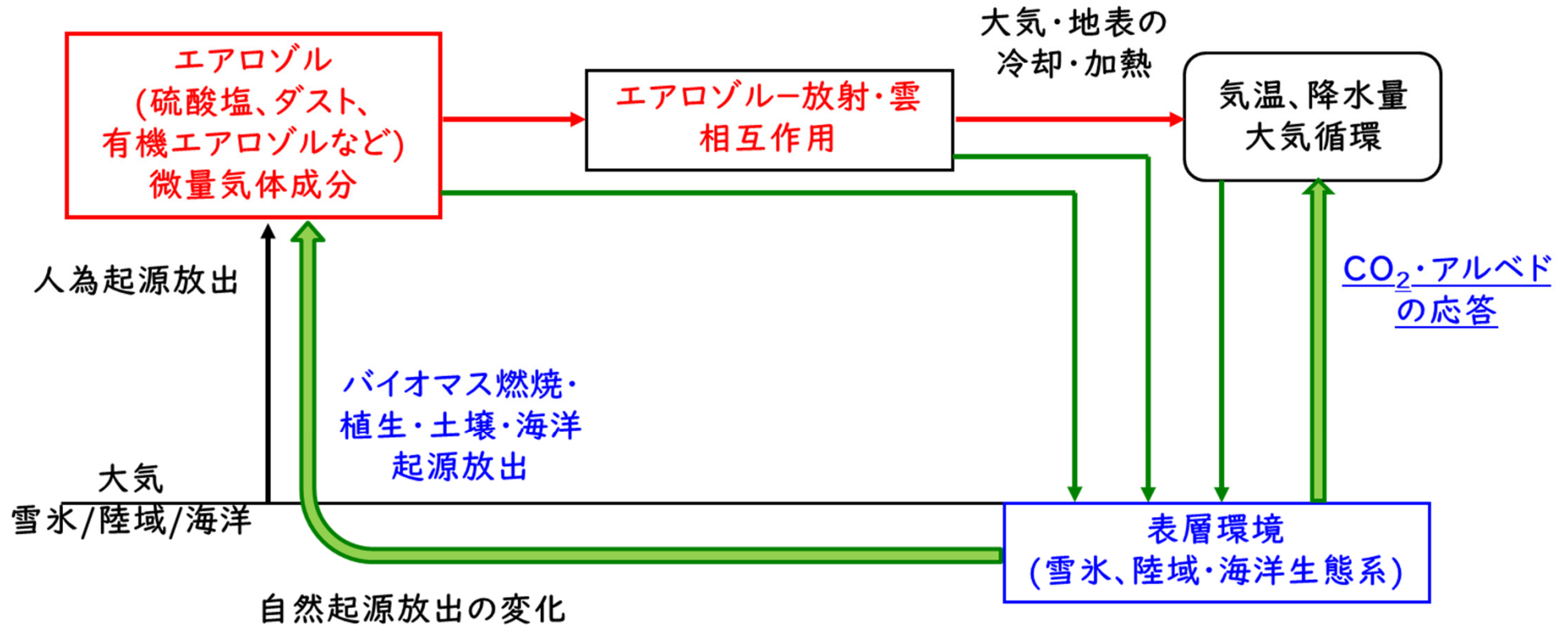


氷晶核による雲放射強制力



(Kawai, Matsui, and Tobo, 2021)

エアロゾルと気候の相互作用・フィードバック



まとめ

- 大気中には、様々な発生源から放出・生成された非常に小さい微粒子（エアロゾル）が膨大な数存在している。
- エアロゾルは、気候（放射、雲、雪氷、生態系）、気象、環境に大きな影響を及ぼす。
- エアロゾルのコンピュータによるシミュレーションでは、エアロゾルの粒子特性（質量、数、粒径、混合状態など）やプロセス、空間解像度などの表し方やバランスの決め方が重要になる。
- エアロゾルのシミュレーションの不確実性（様々なモデル間のばらつき）は大きく、エアロゾルの気候影響評価の不確実性が大きい主要因の一つとなっている。
- エアロゾルの粒子特性やプロセスの観測による理解は近年大きく進展してきた。観測で得られた知見を用いることで、エアロゾルのシミュレーション手法や観測の再現性も大きく向上してきた。