環境研究総合推進費　戦略的研究開発（Ｉ）S-20　テーマ1

短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価

テーマリーダー　**竹村 俊彦**　代表機関名：九州大学

体系的番号：JPMEERF21S12010　研究実施期間：令和3～7年度

サブテーマ1リーダー　**竹村 俊彦**　九州大学応用力学研究所　主幹教授

サブテーマ2リーダー　**須藤 健悟**　名古屋大学大学院 環境学研究科　教授

サブテーマ3リーダー　**五藤 大輔**　国立環境研究所地域環境保全領域　主幹研究員

サブテーマ4リーダー　**鈴木 健太郎**　東京大学大気海洋研究所　教授

研究分担者：**永島 達也**（国立環境研究所）　**八代 尚**（国立環境研究所）

渡辺 真吾（海洋研究開発機構）　**道端 拓朗**（岡山大学）

はじめに ― 短寿命気候強制因子（SLCFs）の気候モデル研究の背景

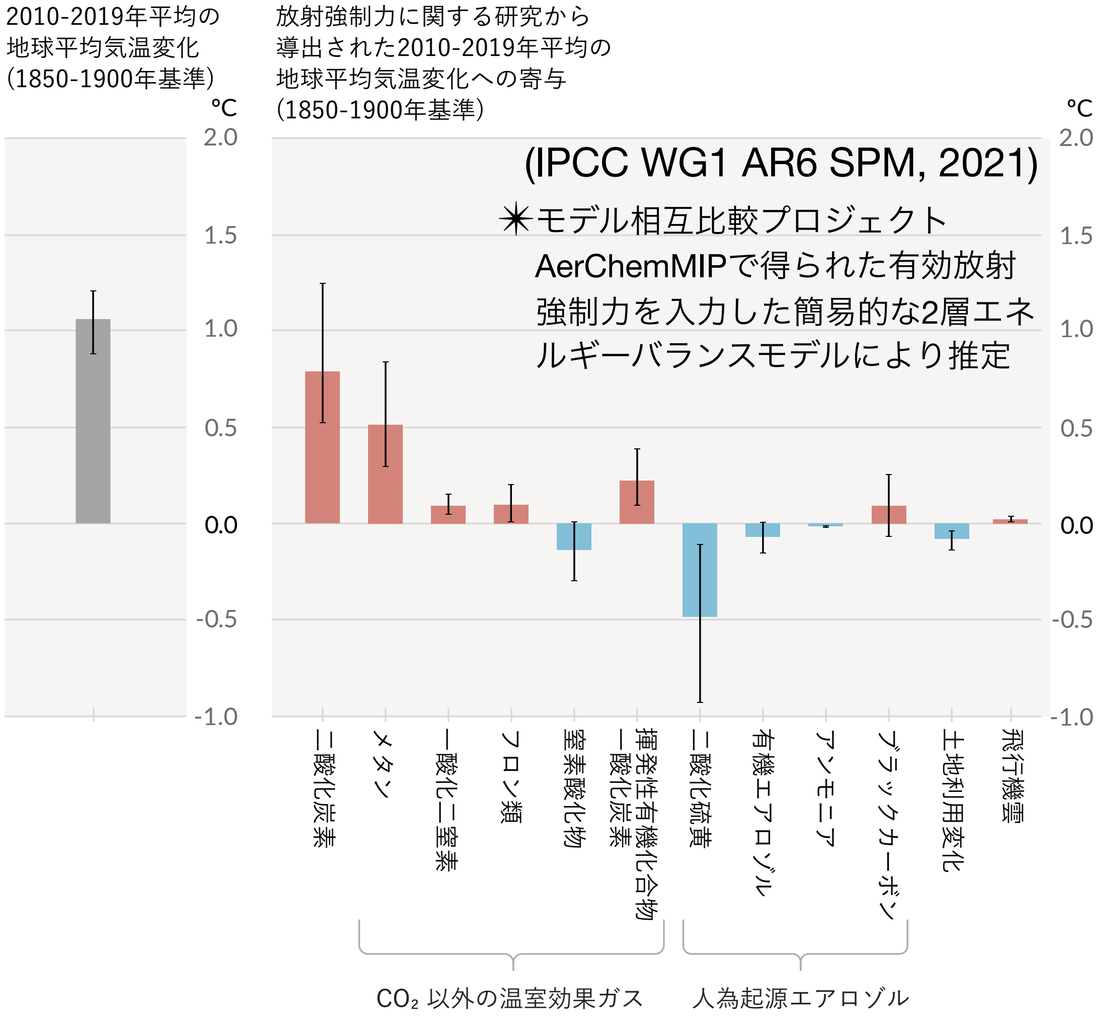
- 短寿命気候強制因子（SLCFs）の地球平均の放射強制力の評価については過去に気候モデルを用いた多くの研究

- **IPCC第6次評価報告書 (AR6) でもSLCFsの気候影響評価は簡易的になされている**（右図）
  - 短寿命であるSLCFsは濃度自体の時空間変動が非常に大きい
  - SLCFs間の化学的相互作用が複雑
  - 気候変動を引き起こすメカニズムが複雑
  - SLCFsの濃度予測や気候影響過程を気候モデルに含めると大きな計算機リソースが必要（特に大気海洋結合モデルにおいて）

- SLCFsは濃度の時空間変動が大きい

  ➡ **排出源対策を実施する地域に依存して気候変動に違いが出る可能性が高い**

  これまでのほとんどの研究では全球一様に排出量を増減させるシミュレーションのみ



環境研究総合推進費 S-20 テーマ1の研究開発目的

開発してきたエアロゾル気候モデルおよび化学気候モデルが組み込まれた数値モデルを用いてSLCFsによる気候変動を地域ごと・組成ごとに定量的に評価

全球大気海洋結合モデル

気候変動のメカニズムが異なる
- 数日～数年スケールの速い調節
- 数十年スケールの遅い応答

の寄与を分けてSLCFsの気候変動を時空間分布とともに定量化

水平分解能：数十km　積分時間：数年～100年

SPRINTARS
(Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)

CHASER
Chemistry Climate Model

全球雲解像モデル

雲の力学・物理過程を陽に表現しながら雲・エアロゾル相互作用による気象場変化やSLCFs自体の時空間分布の詳細な表現も可能

水平分解能：14/56km　積分時間：数年

SLCFsによる地域ごと・組成ごとの気候変動（気温・降水量など）の定量的評価
災害を直接的にもたらし得る極端現象の評価を含む

計算結果 → テーマ２
テーマ３ → シナリオ排出量データ

テーマ間連携
- テーマ２におけるSLCFs環境影響評価のための外力として利用
- テーマ３におけるSLCFs影響最適緩和シナリオ策定時の要素として利用
- テーマ３により策定されたシナリオを適用した数値モデルによる気候将来予測

環境研究総合推進費 S-20 テーマ1の研究目標

【サブテーマ１】

- サブテーマリーダーが中心となり開発してきたエアロゾルモデルSPRINTARSが組み込まれた全球気候モデルMIROCを用いたエアロゾル関連排出量が地域ごと・組成ごとに変化した場合の気候変動の定量的評価

【サブテーマ２】

- サブテーマリーダーが中心となり開発してきた化学気候モデルCHASERが組み込まれた全球気候モデルMIROCを用いたSLCFs微量気体排出量が地域ごと・組成ごとに変化した場合の気候変動の定量的評価
- 研究対象である組成の影響の定量的評価のためのモデルの構築・改良

【サブテーマ３】

- SPRINTARSとCHASERが組み込まれたサブテーマリーダーが中心となり開発してきたNICAM-Chemを用いたSLCFs関連排出量が地域ごと・組成ごとに変化した場合の気候変動の定量的評価

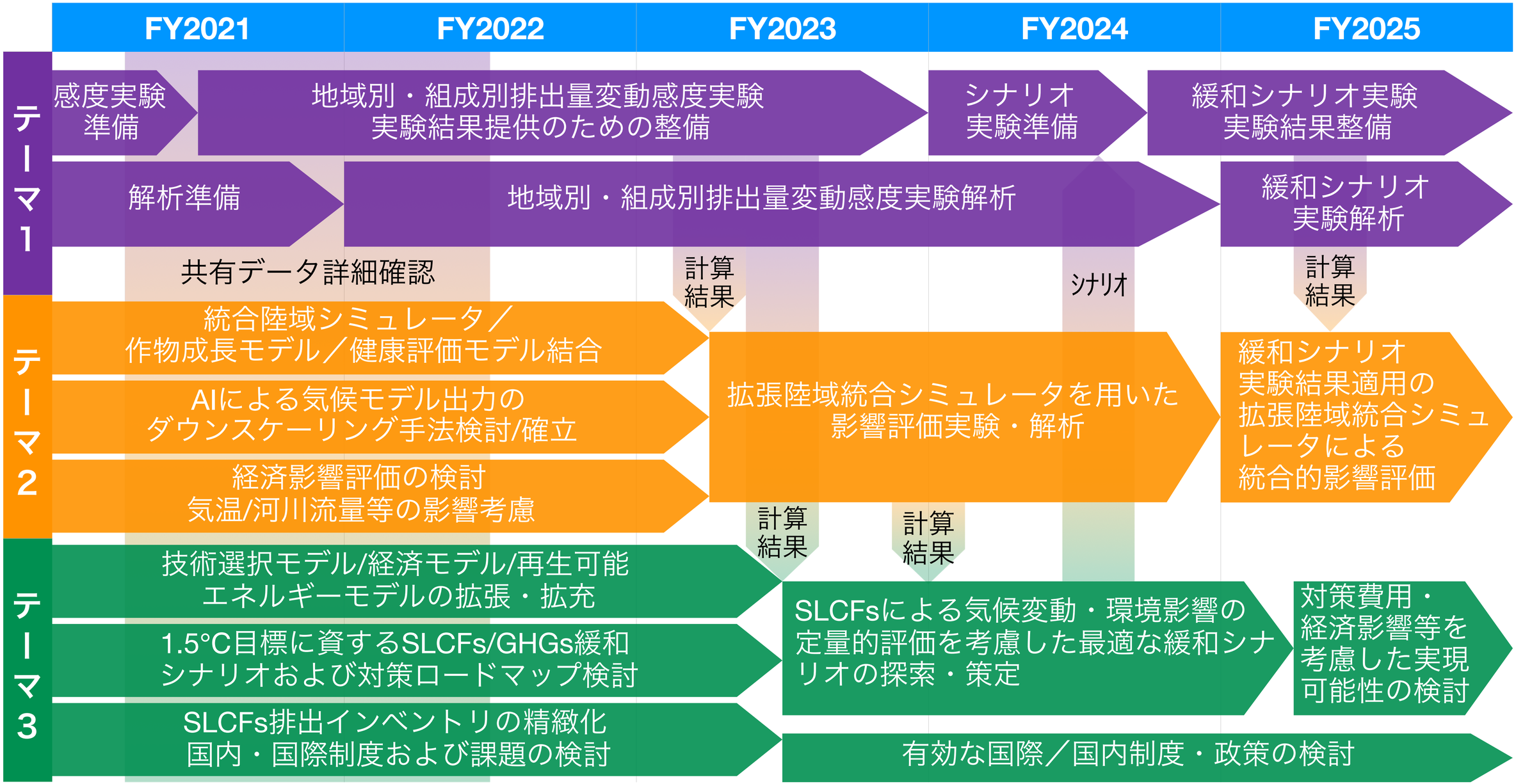
【サブテーマ４】

- サブテーマ1, 2, 3の実験結果を用いたSLCFs関連排出量の組成ごと・地域ごとの変化による大気水循環変動とエネルギー収支変化の定量的評価

【サブテーマ共通】

- 実験・解析の結果のテーマ2, 3への提供およびテーマ3により策定されるSLCFs排出量削減緩和シナリオを適用した気候モデルによる地域ごとの気候変動の将来予測

環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20の研究計画



環境研究総合推進費 S-20 テーマ1の構成と研究開発内容

サブテーマ１
エアロゾルによる気候変動の定量的評価

硫酸塩・ブラックカーボン・有機物（前駆物質含む）

サブテーマ２
短寿命微量気体による気候変動の定量的評価

メタン・オゾン・代替フロン・VOC・硝酸塩（前駆物質含む）

- 地域ごと・組成ごとにSLCFs関連排出量を変化させる感度実験・解析
- テーマ３の影響緩和シナリオを適用した実験による将来予測

大気海洋結合モデル MIROC

SLCFs関連排出量
データ共通化

SPRINTARS
(Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)

CHASER
Chemistry Climate Model

シミュレーション
結果統合解析

全球雲解像モデル NICAM

サブテーマ３
高分解能気候モデルを用いた短寿命気候強制因子による気候変動の定量的評価

- 雲物理を陽に表現可能：
  雲は気候を大きく変化させる重要なファクター
- 地域ごと・組成ごとにSLCFs関連排出量を変化させる感度実験・解析

＊「富岳」利用

サブテーマ４
短寿命気候強制因子による大気水循環変動の定量的評価

- 特に雲・降水・エネルギー収支の変動の定量的評価：
  気象災害による人的・経済的被害をもたらす極端現象と密接に関連

S-20 テーマ1の研究開発内容：共通実験プロトコル

【実験の種類】

- 「標準実験」と特定の地域・組成・部門（人為起源・森林火災起源）の排出量をゼロにする「感度実験」
- 長寿命温室効果気体濃度を2015年とSSP3-7.0の2060年の2種類で設定
- 大気モデルによる実験：放射強制力算出と気象場の速い調節の解析
- 大気海洋結合モデルによる平衡実験：大気モデルとの差をとって気象場の遅い応答の解析

【排出量データベース】

- 人為起源：CEDS April 2021 Release（CMIP6 (IPCC AR6)で利用されたデータベースの改訂版）
  - 2015年の月平均値を利用　組成：SO_2, BC, OC, CH_4, NOx, NMVOC, NH_3, CO, CO_2, N_2O
  - 部門分類：Agriculture, Energy, Industrial, Transportation, Residential/Commercial/Other, Solvents production and application, Waste, International Shipping, Aircraft
- 森林火災起源：GFED Version 4.1s
  - 2012～2016年の月平均値を利用　組成：SO_2, BC, OC, CH_4, NOx, NH_3, CO, CO_2, N_2O, NMHC

【地域分割】

- 人為起源：日本 (JPN), 中国 (CHN), インド (IND), インドネシア・タイ・ベトナム (ITV), その他アジア(XAS), EU (PEU), その他ヨーロッパ・ロシア (XEU), 北米 (USC), 中南米 (CSA), オセアニア (OCE), 中央アジア・中東 (CME), アフリカ (AFR), アジア全域 (ASI), 全球 (GLA)
- 森林火災起源：東南アジア (SEA), シベリア (SIB), 南米 (SAM), アフリカ (AFB), 全球 (GLB)

サブテーマ1結果：S-20-1感度実験による瞬時放射強制力の算出方法

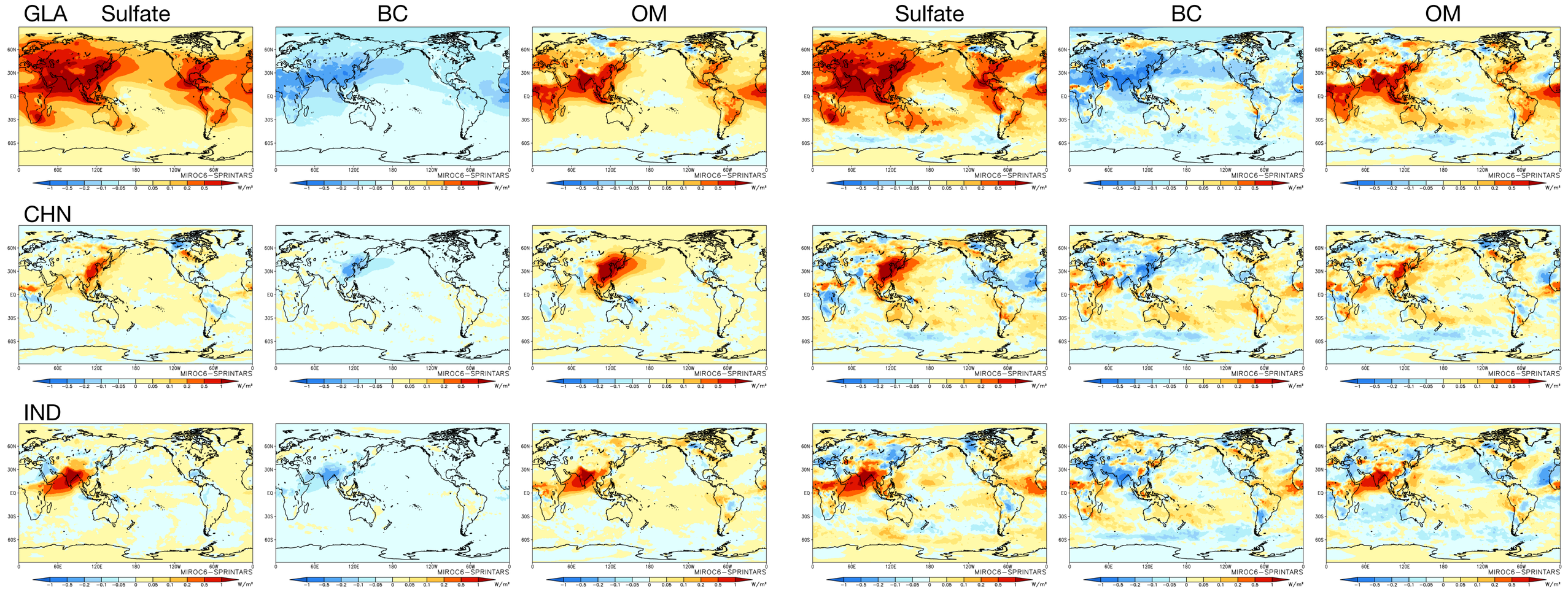
エアロゾル放射相互作用による瞬時放射強制力の算出方法

変更前：モデル1タイムステップで放射スキームで「エアロゾル完全なし」と「全エアロゾルあり」の2回計算した放射収支の差について
排出量データの異なる2実験の差をとる ➡ 気象場の速い調節が含まれて他種エアロゾルの濃度変化が含まれてしまう（特に自然起源）

変更後：モデル1タイムステップで放射スキームで「対象エアロゾルのみなし」と「全エアロゾルあり」の2回計算した放射収支の差をとる

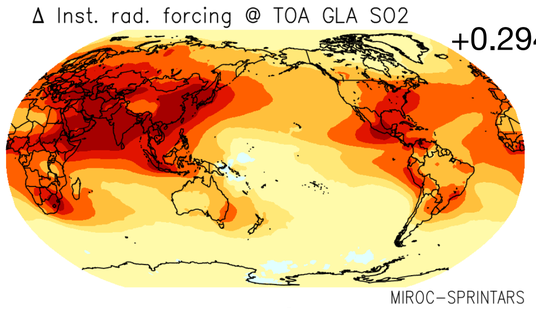
瞬時放射強制力 (大気上端) 算出方法変更後

瞬時放射強制力 (大気上端) 算出方法変更前

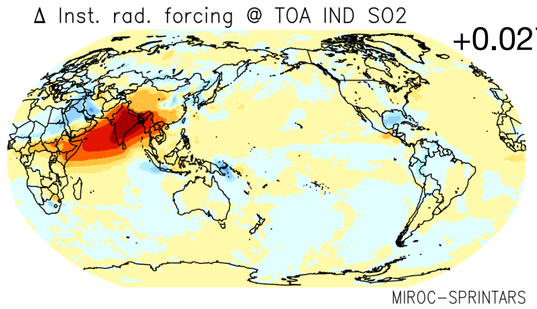


サブテーマ1結果：瞬時放射強制力　硫酸塩エアロゾル

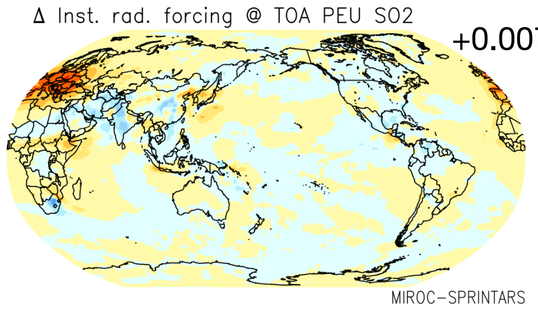
全球



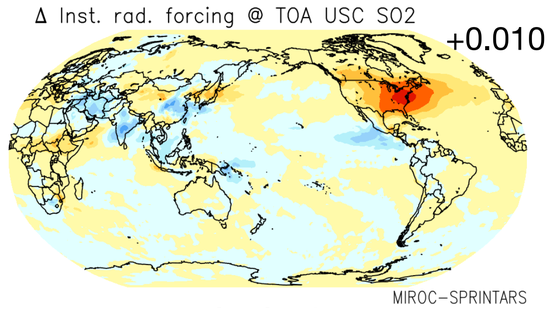
インド



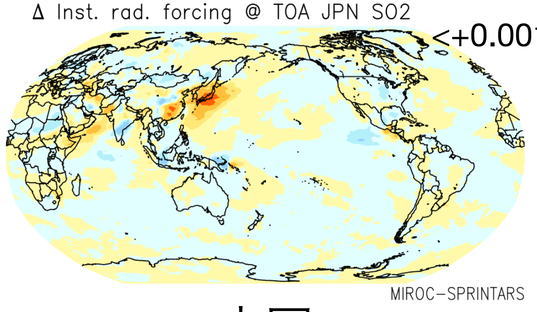
EU



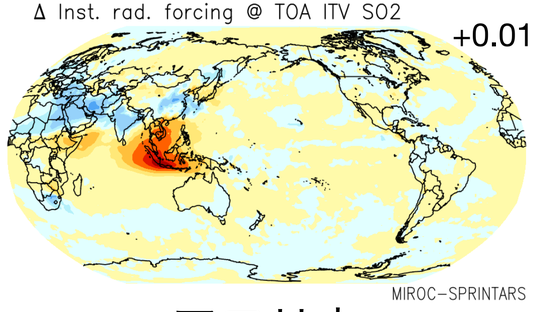
北米



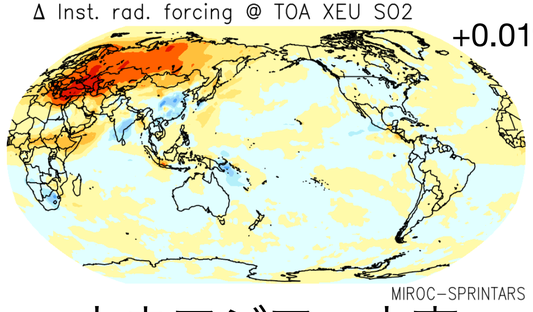
日本



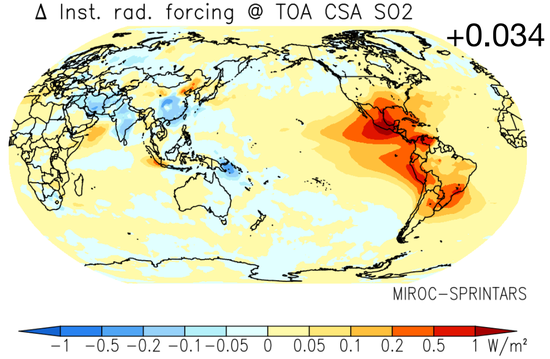
インドネシア・タイ・ベトナム



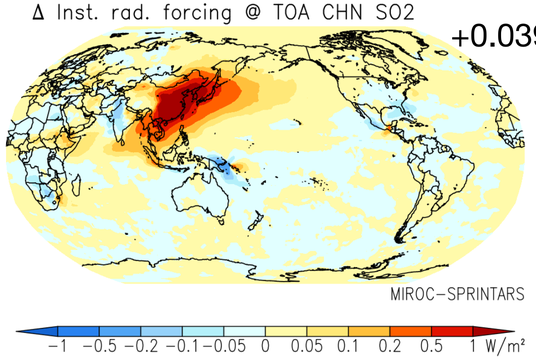
その他欧州・ロシア



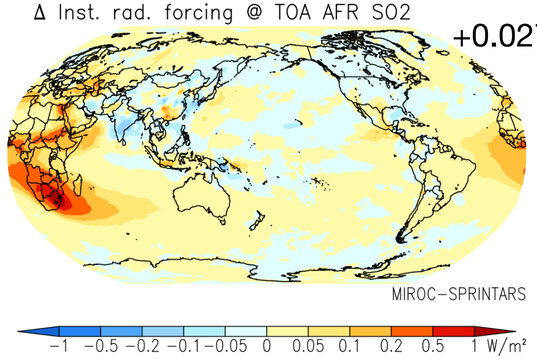
中南米



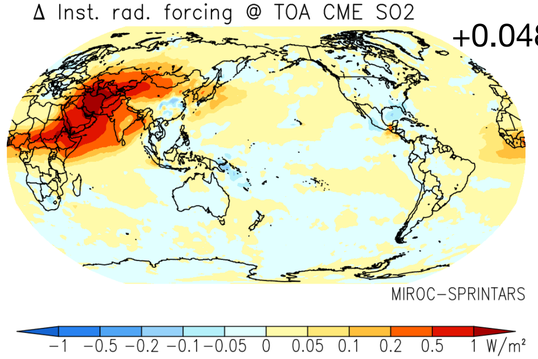
中国



アフリカ



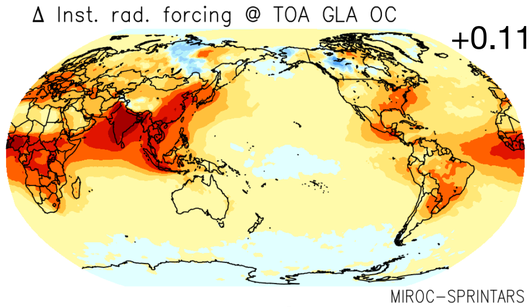
中央アジア・中東

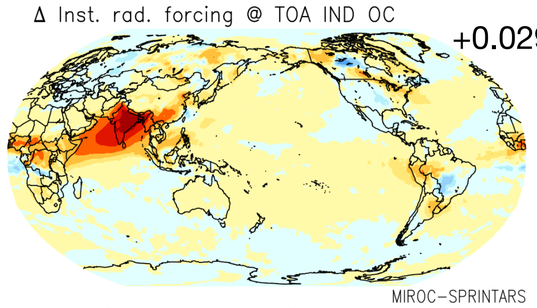


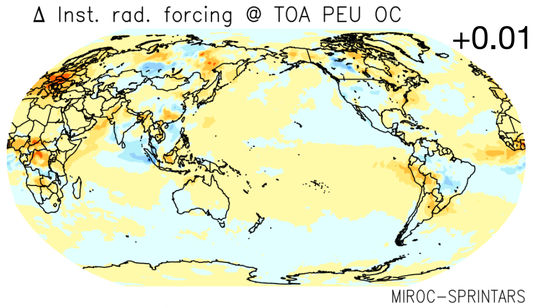
TOA：大気上端

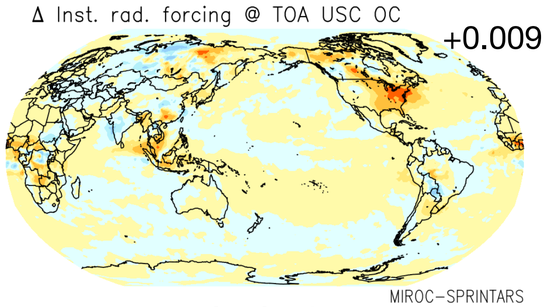
大気モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源SO_2排出量をゼロにした場合の年平均TOA瞬時放射強制力

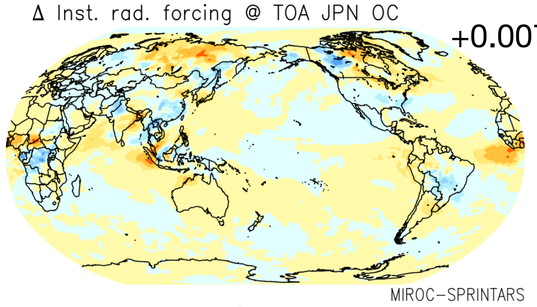
サブテーマ1結果：瞬時放射強制力　有機エアロゾル

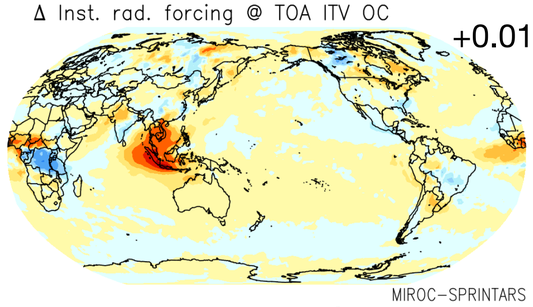
全球


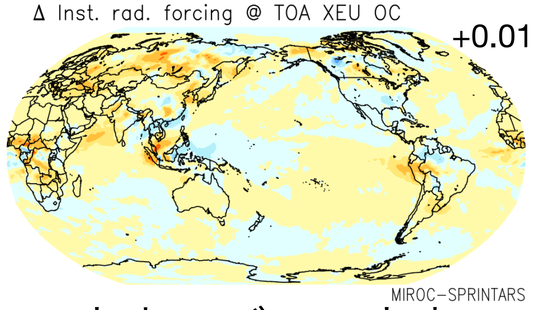
インド


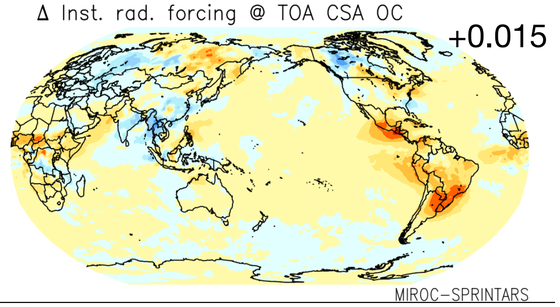
EU


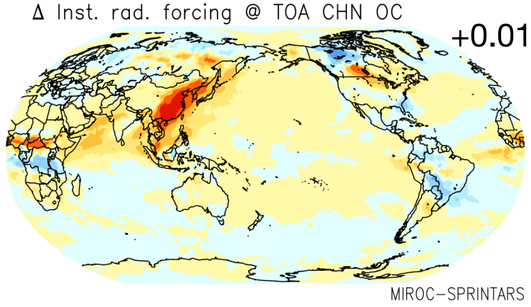
北米


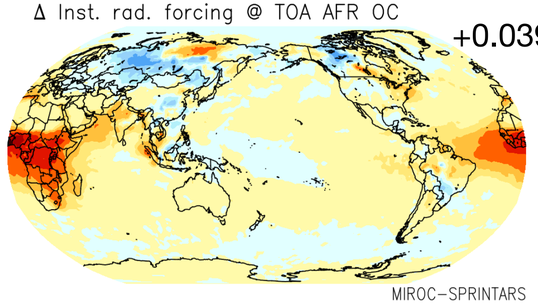
日本


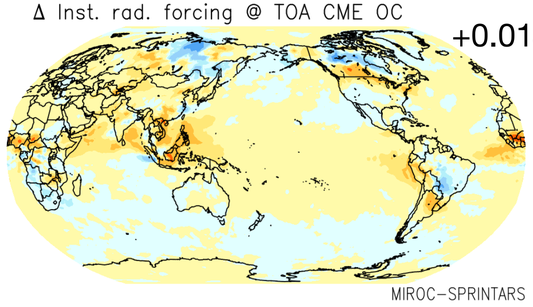
インドネシア・タイ・ベトナム


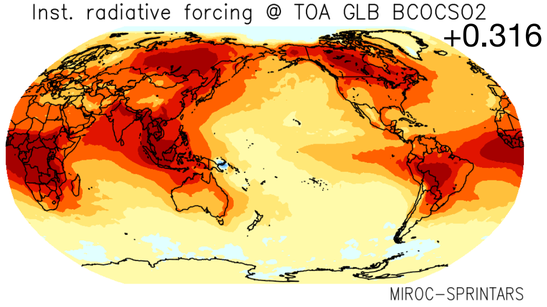
その他欧州・ロシア


中南米


中国


アフリカ


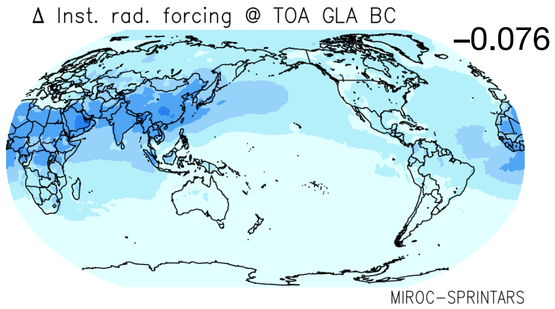
中央アジア・中東


森林火災起源 (OM+BC+Sull)


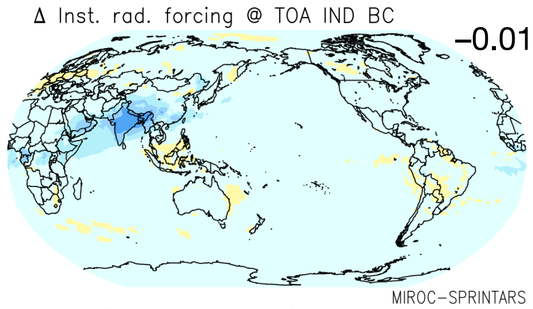
大気モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源OC排出量をゼロにした場合の年平均TOA瞬時放射強制力

サブテーマ1結果：瞬時放射強制力　ブラックカーボン

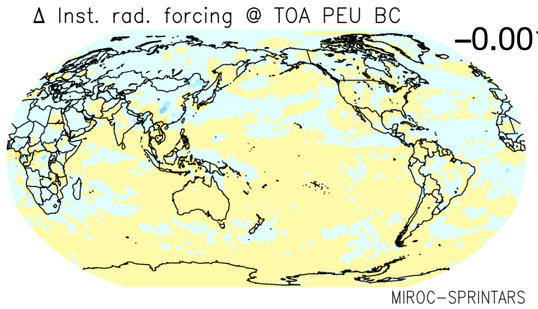
全球



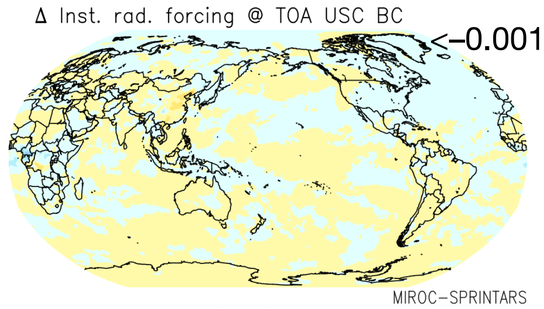
インド



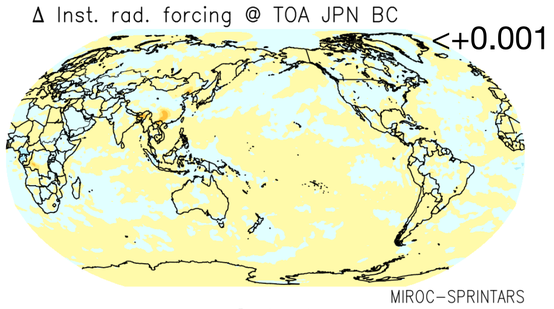
EU



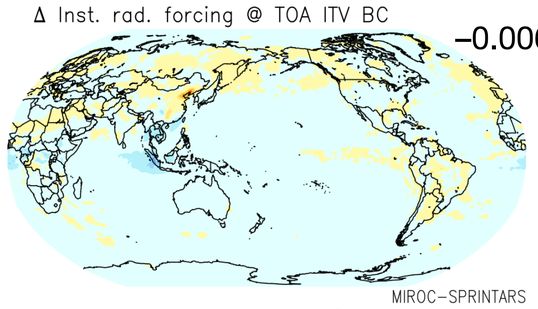
北米



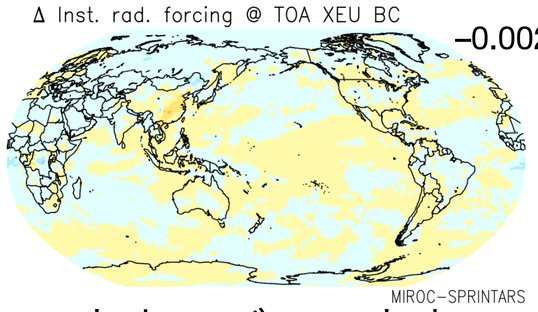
日本



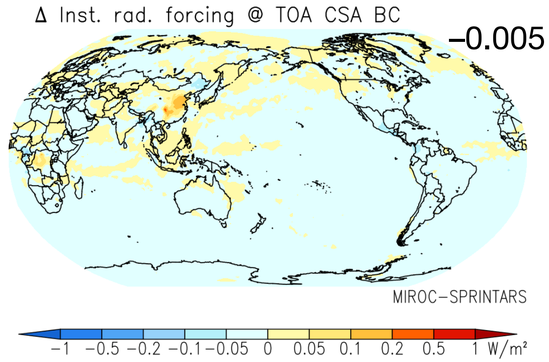
インドネシア・タイ・ベトナム



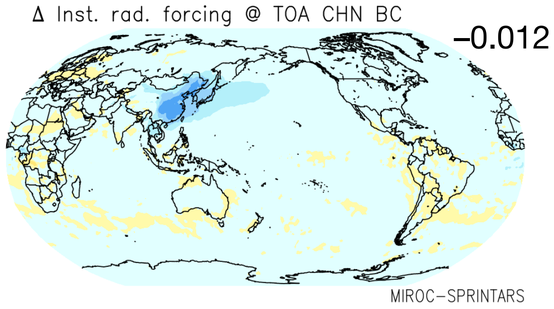
その他欧州・ロシア



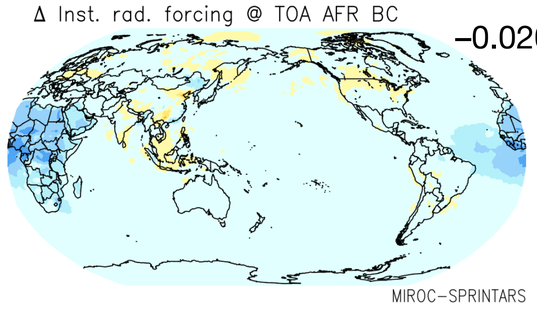
中南米



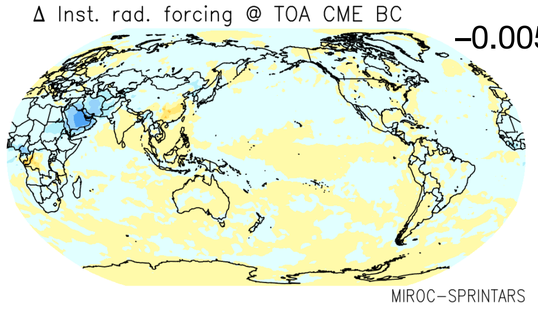
中国



アフリカ



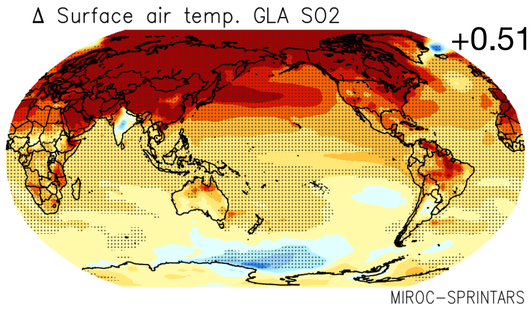
中央アジア・中東



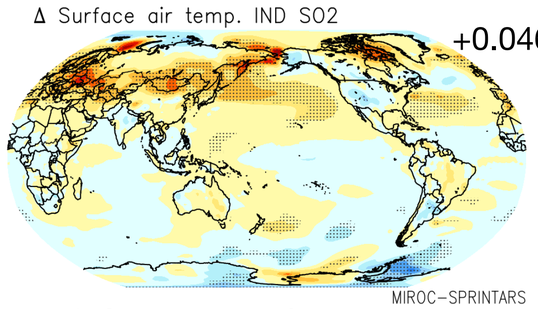
大気モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源BC排出量をゼロにした場合の年平均TOA瞬時放射強制力

サブテーマ1結果：地上気温変化　硫酸塩エアロゾル

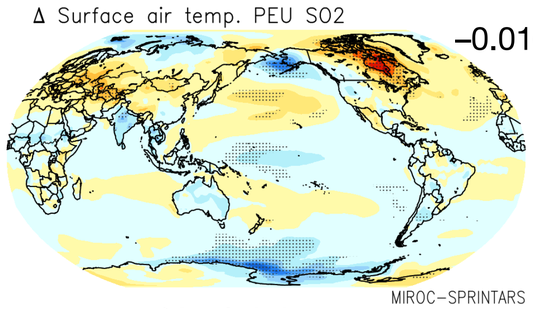
全球



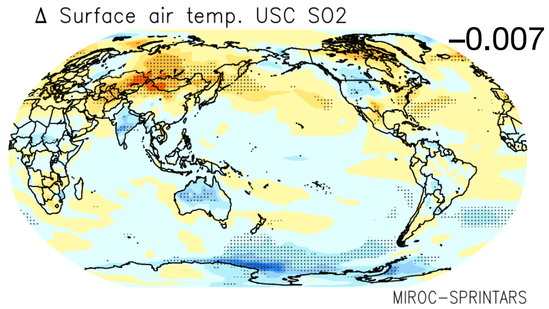
インド



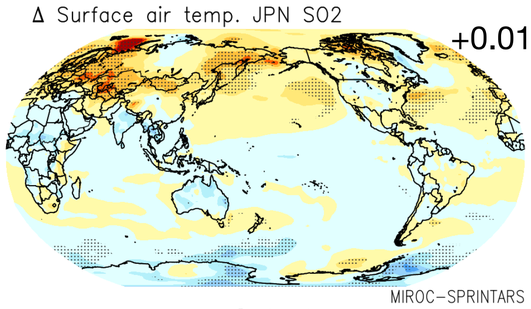
EU



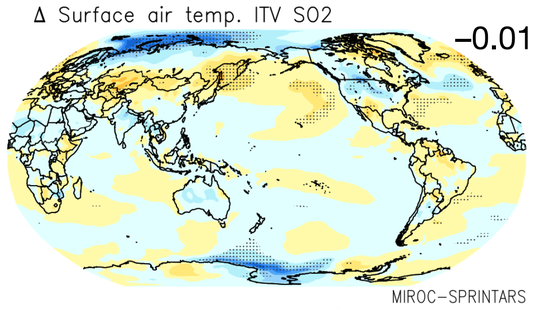
北米



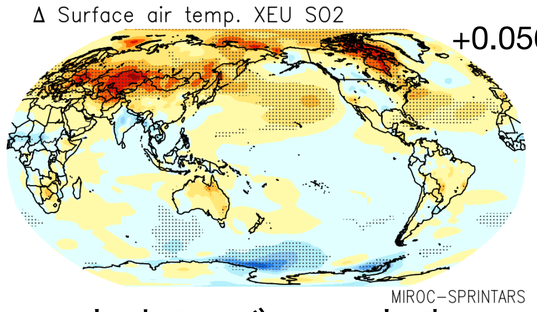
日本



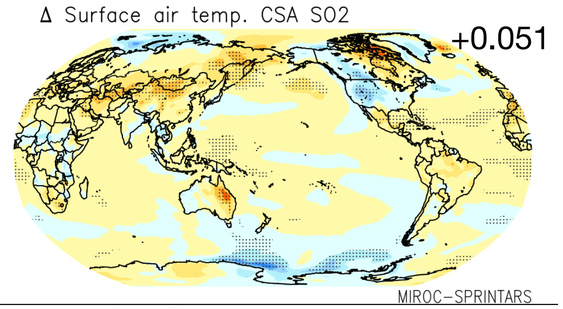
インドネシア・タイ・ベトナム



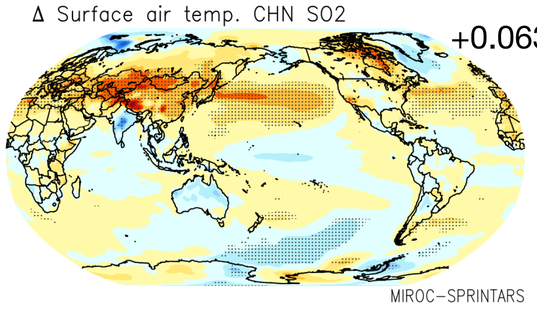
その他欧州・ロシア



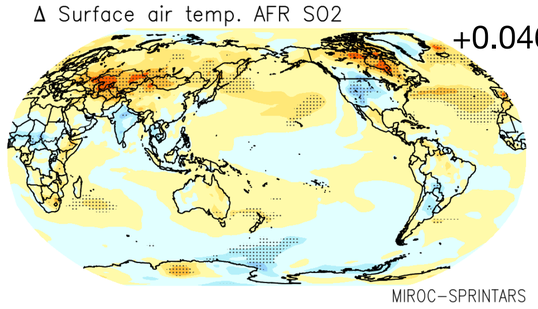
中南米



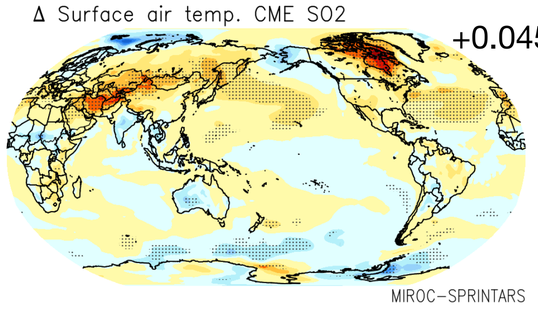
中国



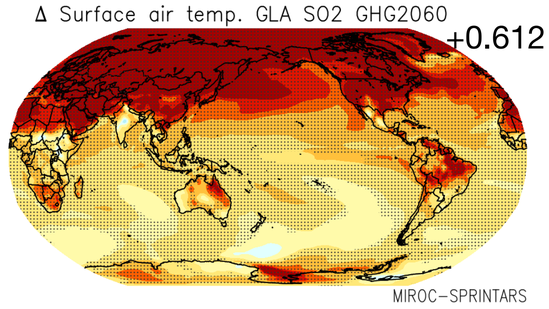
アフリカ



中央アジア・中東



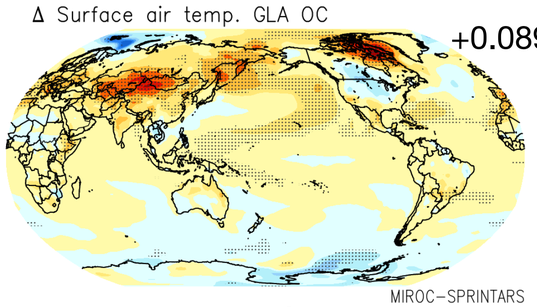
全球 (GHG 2060)



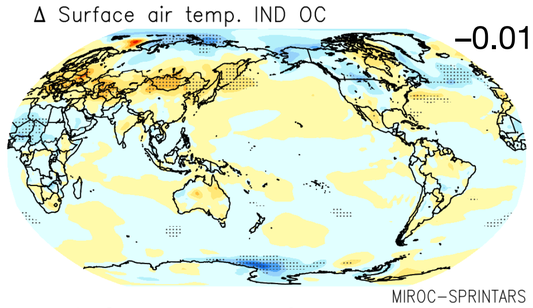
大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源SO_2排出量をゼロにした場合の年平均地上気温変化

サブテーマ1結果：地上気温変化　有機エアロゾル

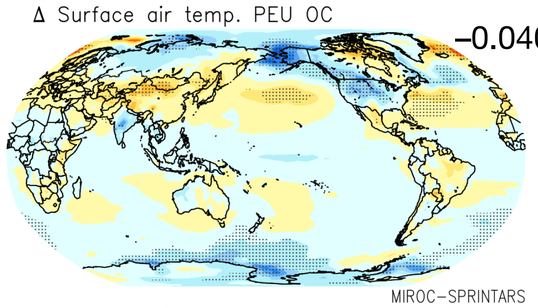
全球



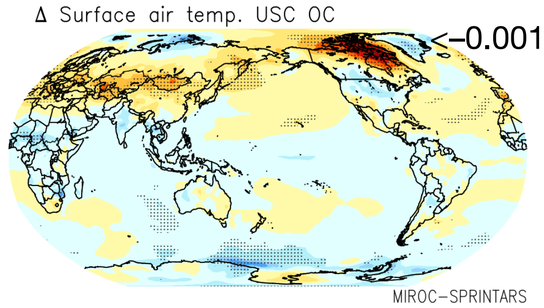
インド



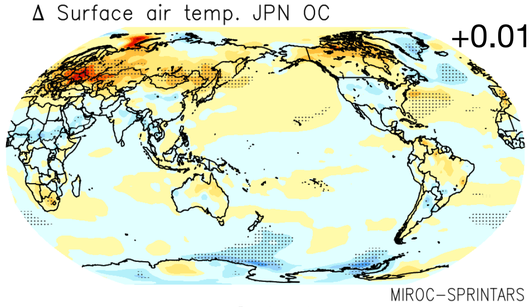
EU



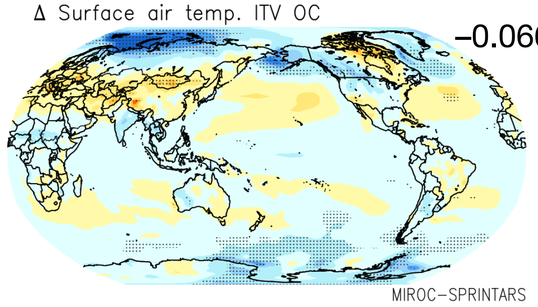
北米



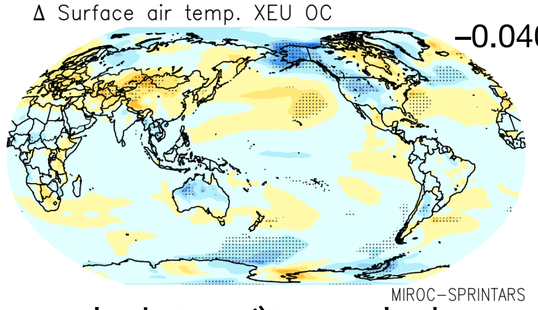
日本



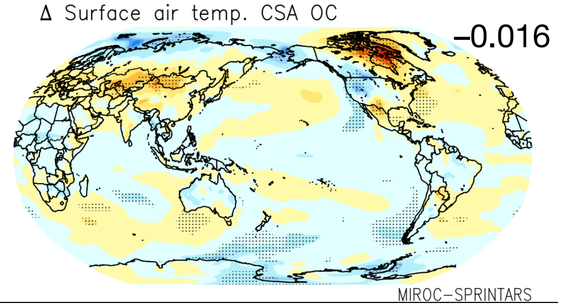
インドネシア・タイ・ベトナム



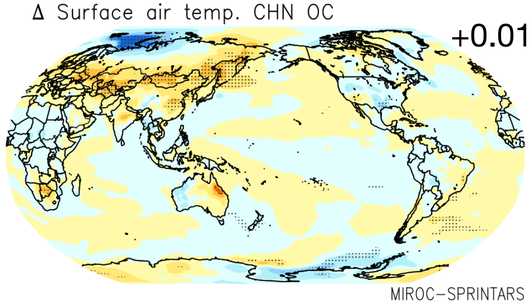
その他欧州・ロシア



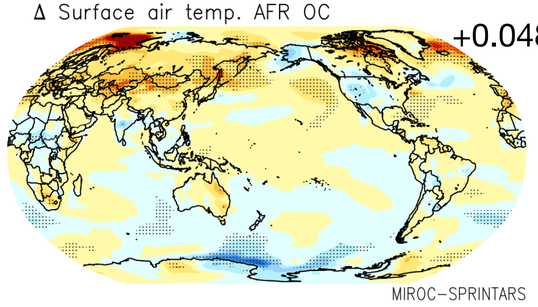
中南米



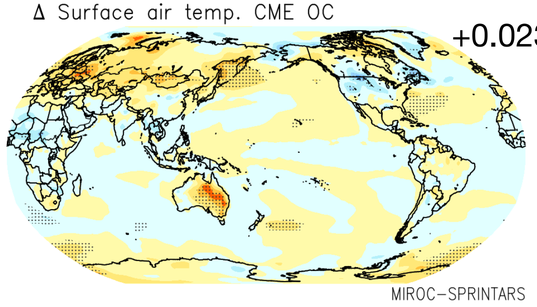
中国



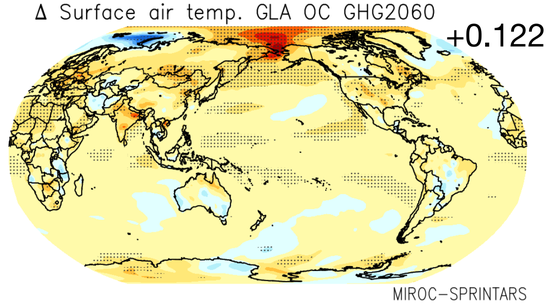
アフリカ



中央アジア・中東

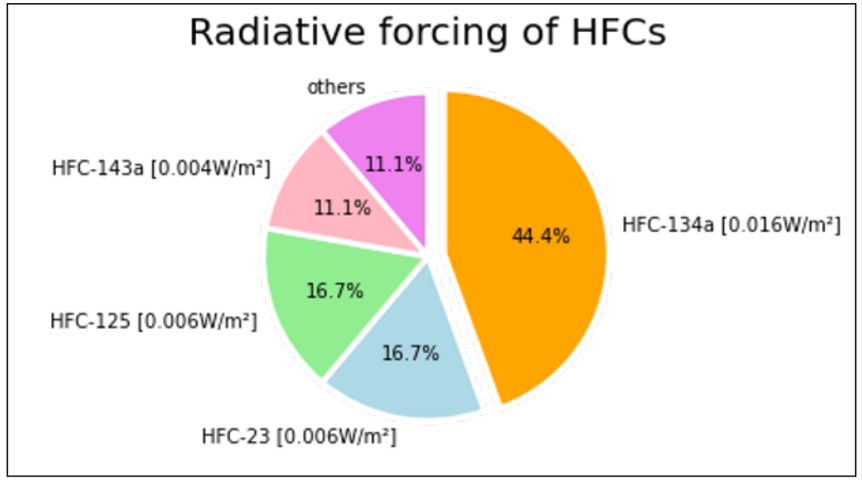


全球 (GHG 2060)



大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源OC排出量をゼロにした場合の年平均地上気温変化

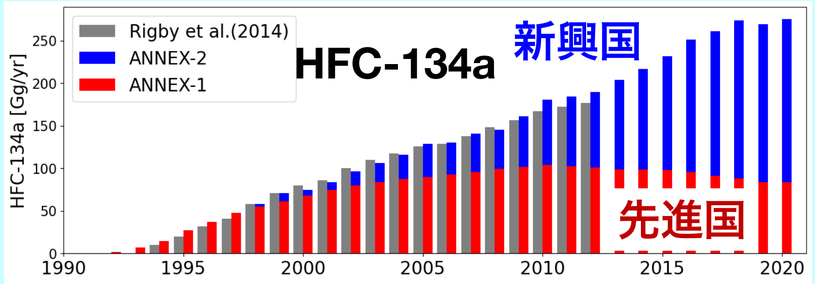
サブテーマ2結果：代替フロン (HFCs) のシミュレーションへの導入・検証

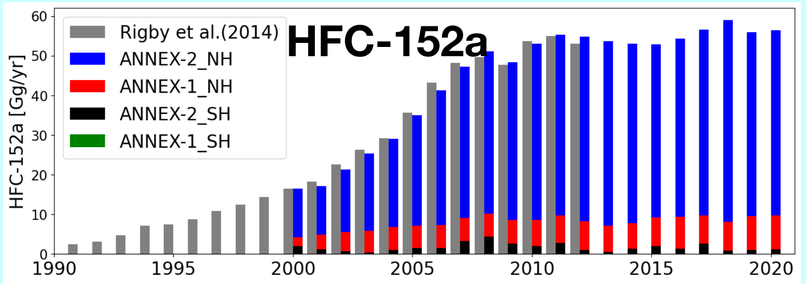


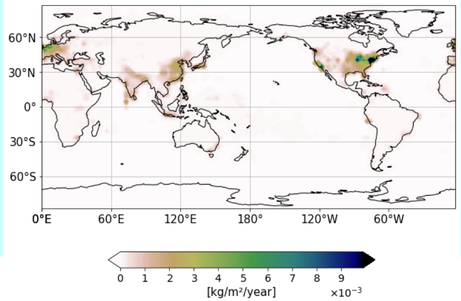
- HFC-134a + OH → H_2O
- HFC-134a + Cl → HCl
- HFC-134a + $O(^1D)$ → 0.65*O + 0.24*OH

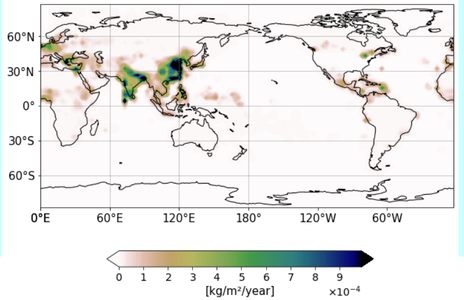
• HFCs 排出量の独自推定

ANNEX-I: 国連気候変動枠組条約 (UNFCCC)
ANNEX-2: NOAAデータによる逆推定



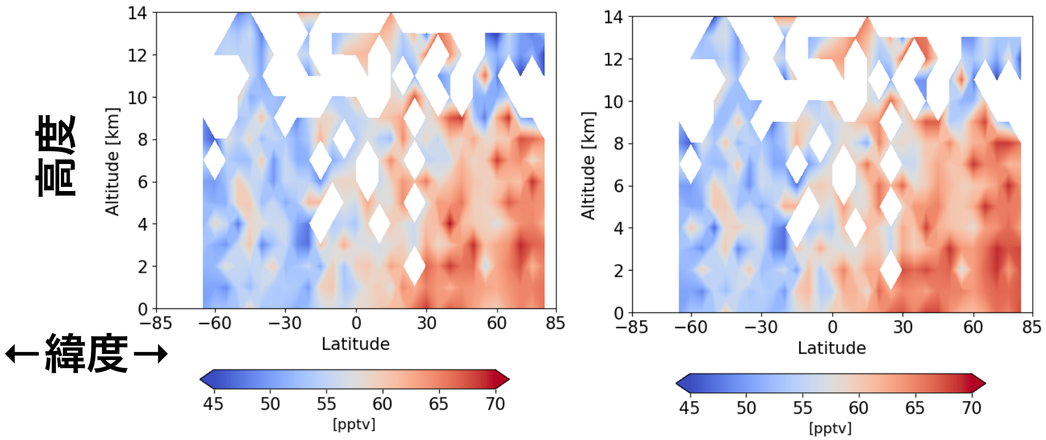




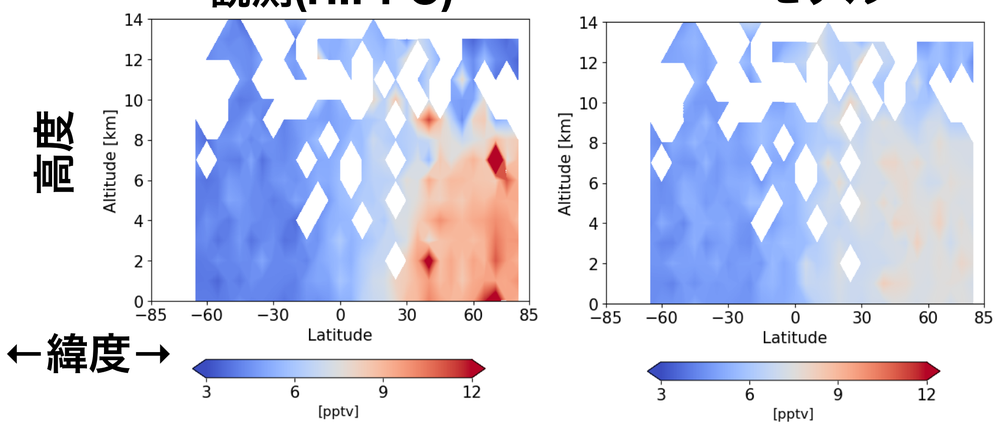


航空機観測（HIPPO）との比較

HFC-134a

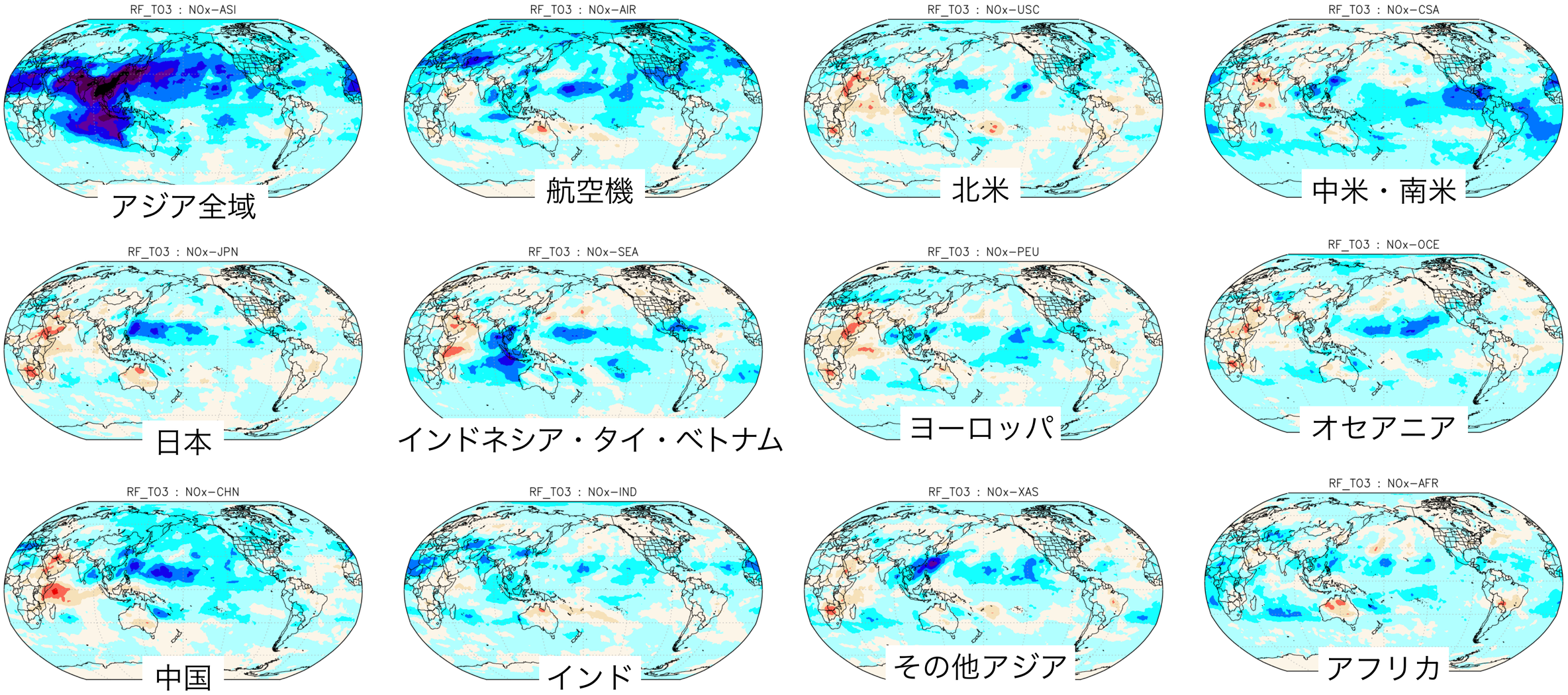


HFC-152a

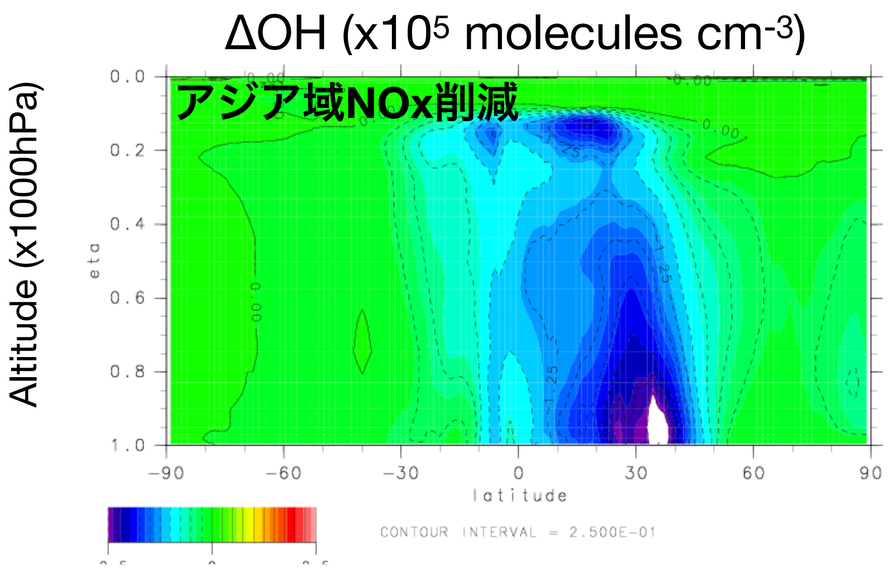


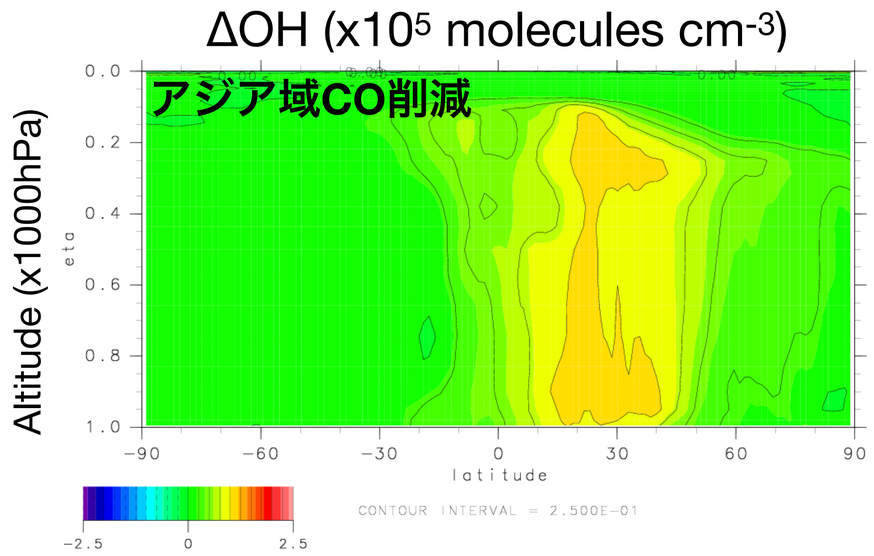
サブテーマ2結果：人為起源NOx排出量削減による対流圏オゾン変化

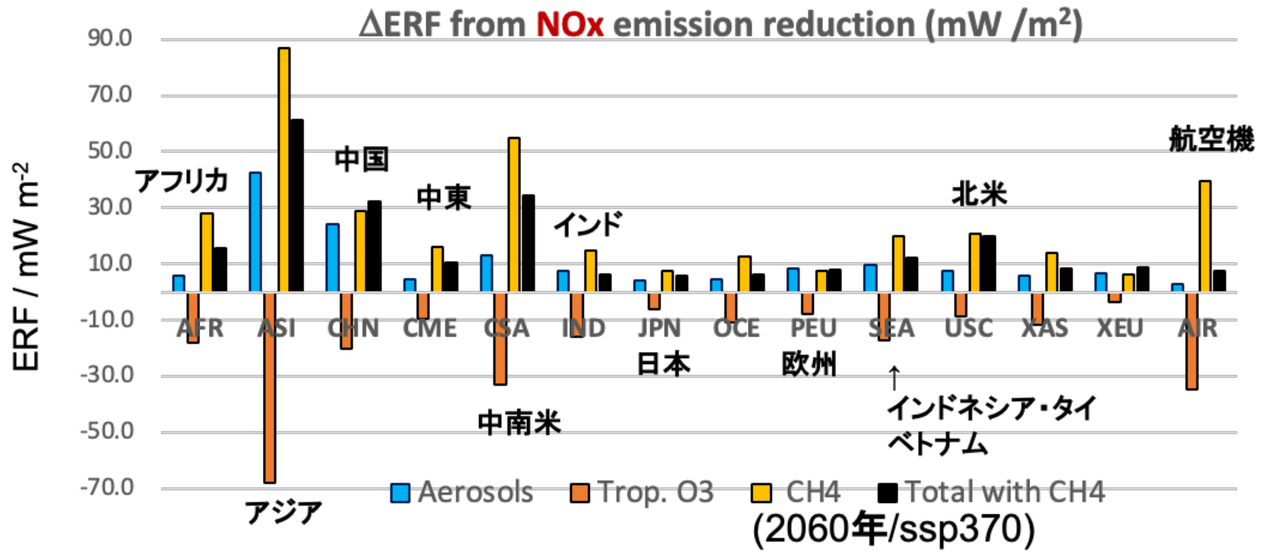
化学気候モデルMIROC-CHASERを用いて計算された各地域からの人為起源NOx排出量をゼロにした場合の年平均対流圏O_3放射強制力

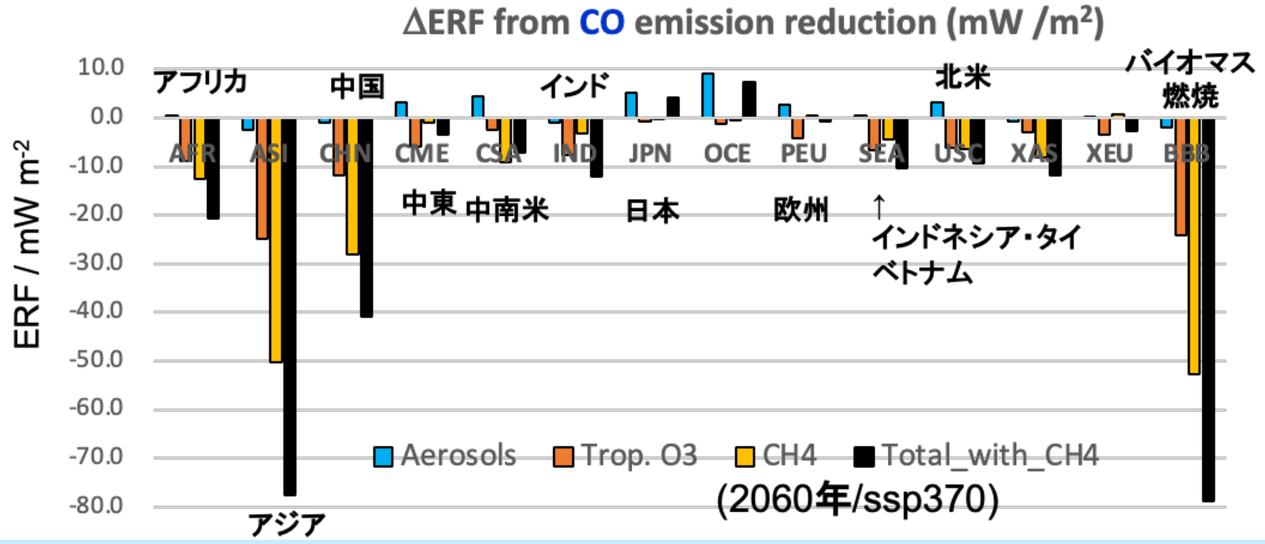


サブテーマ2結果：NOx/CO削減による気候影響評価：エアロゾル/O_3/CH_4



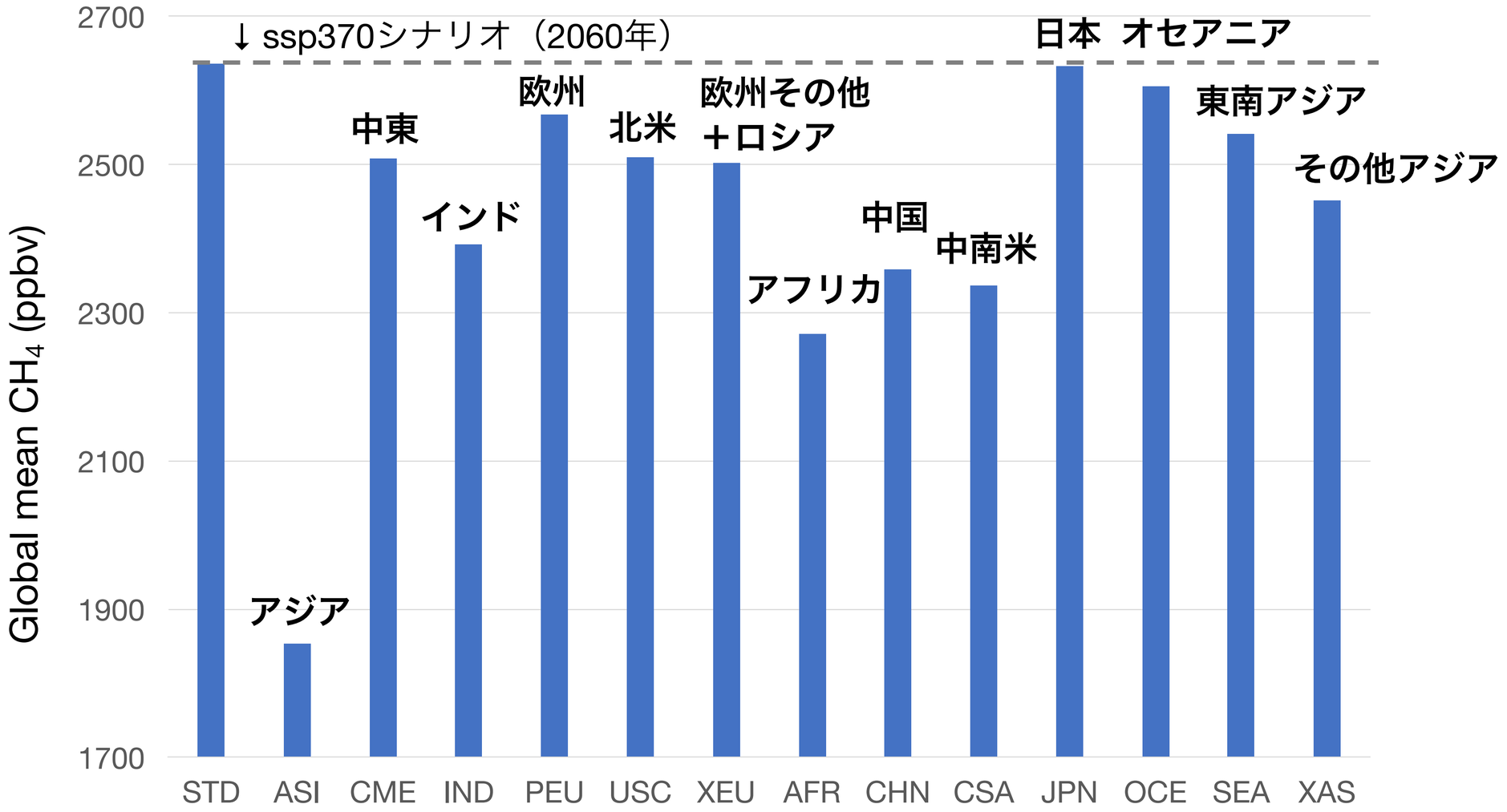






化学気候モデルMIROC-CHASERを用いて計算された各地域からの人為起源NOx (上)・CO (下) 排出量をゼロにした場合の全球・平均有効放射強制力

サブテーマ2結果：各地域からのメタン排出削減によるメタン濃度変化



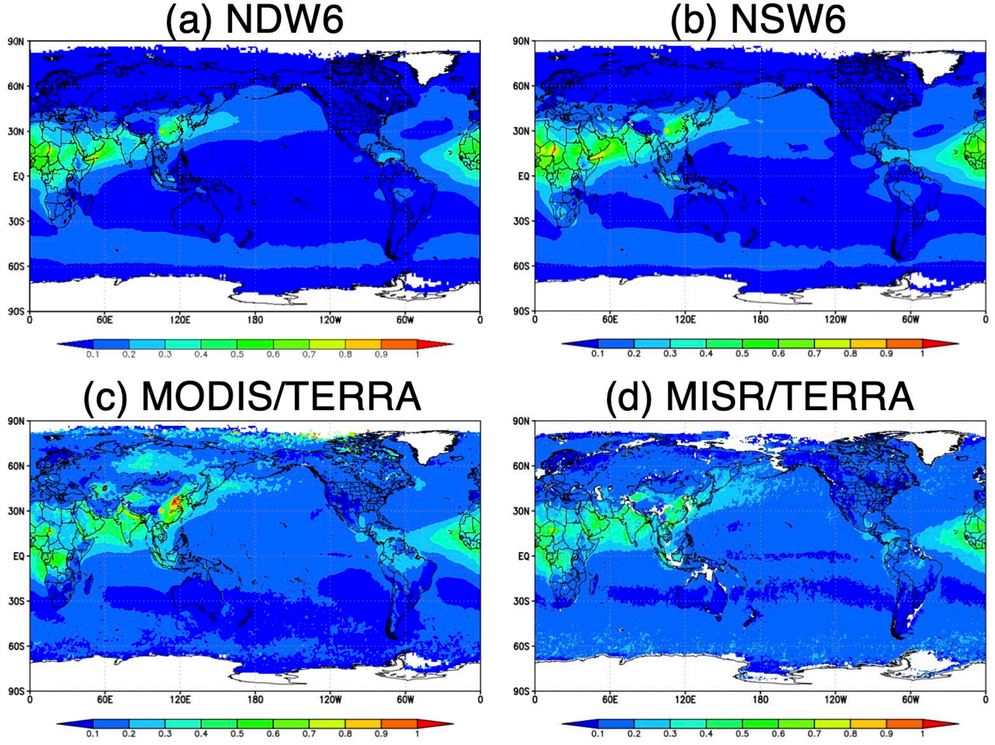
化学気候モデルMIROC-CHASERを用いて計算された各地域からの人為起源CH_4排出量をゼロにした場合の全球平均CH_4濃度

サブテーマ3結果：NICAM-Chem改良によるエアロゾル再現性の検証

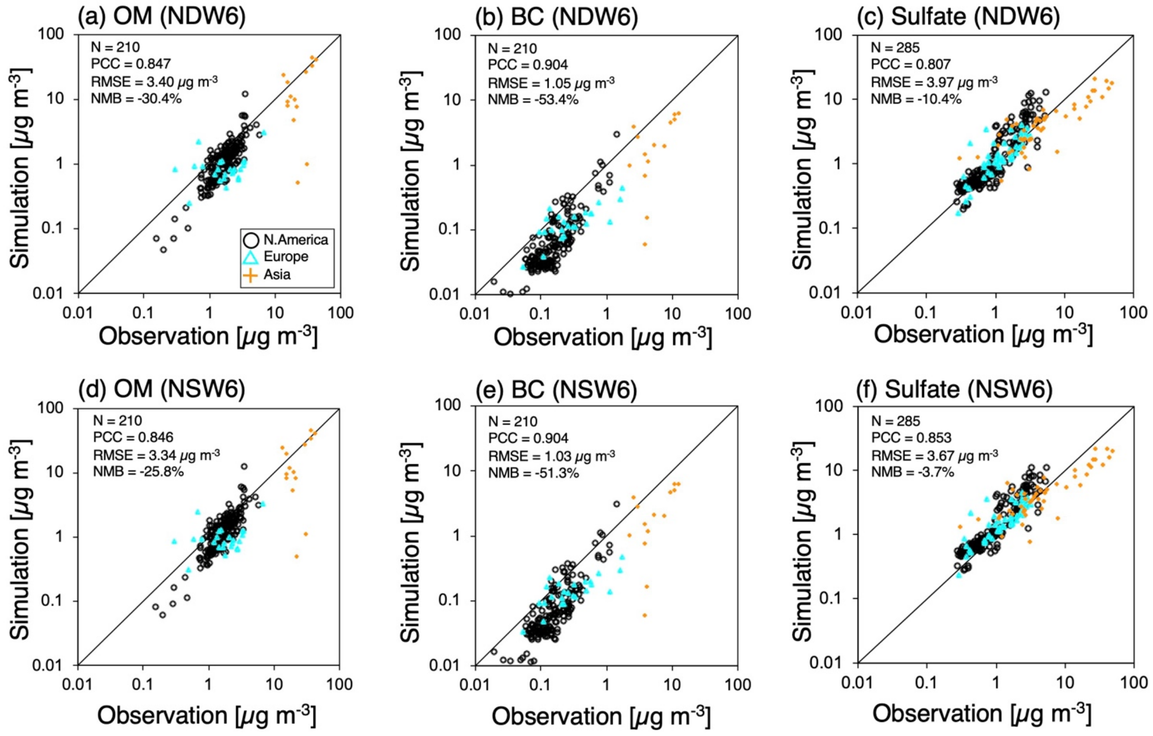
NICAM-Chemモデル改良（全球14km高分解能エアロゾルシミュレーション）

- スーパーコンピュータ「富岳」を利用して計算実施
  - S-20-1として申請・採択された富岳政策対応課題 (2021年9月～2022年3月), 富岳一般課題 (2022年10月～2023年9月)
- 改良内容・検証結果：Goto et al. (2023) として公表
  - NICAMバージョンアップ：version 16 ➡ 19　高分解能化：水平14km, 鉛直層数38 ➡ 水平14km, 鉛直層数78
  - 雲微物理モジュール高度化：NSW6 (1モーメント) ➡ NDW6 (2モーメント)

エアロゾル光学的厚さ



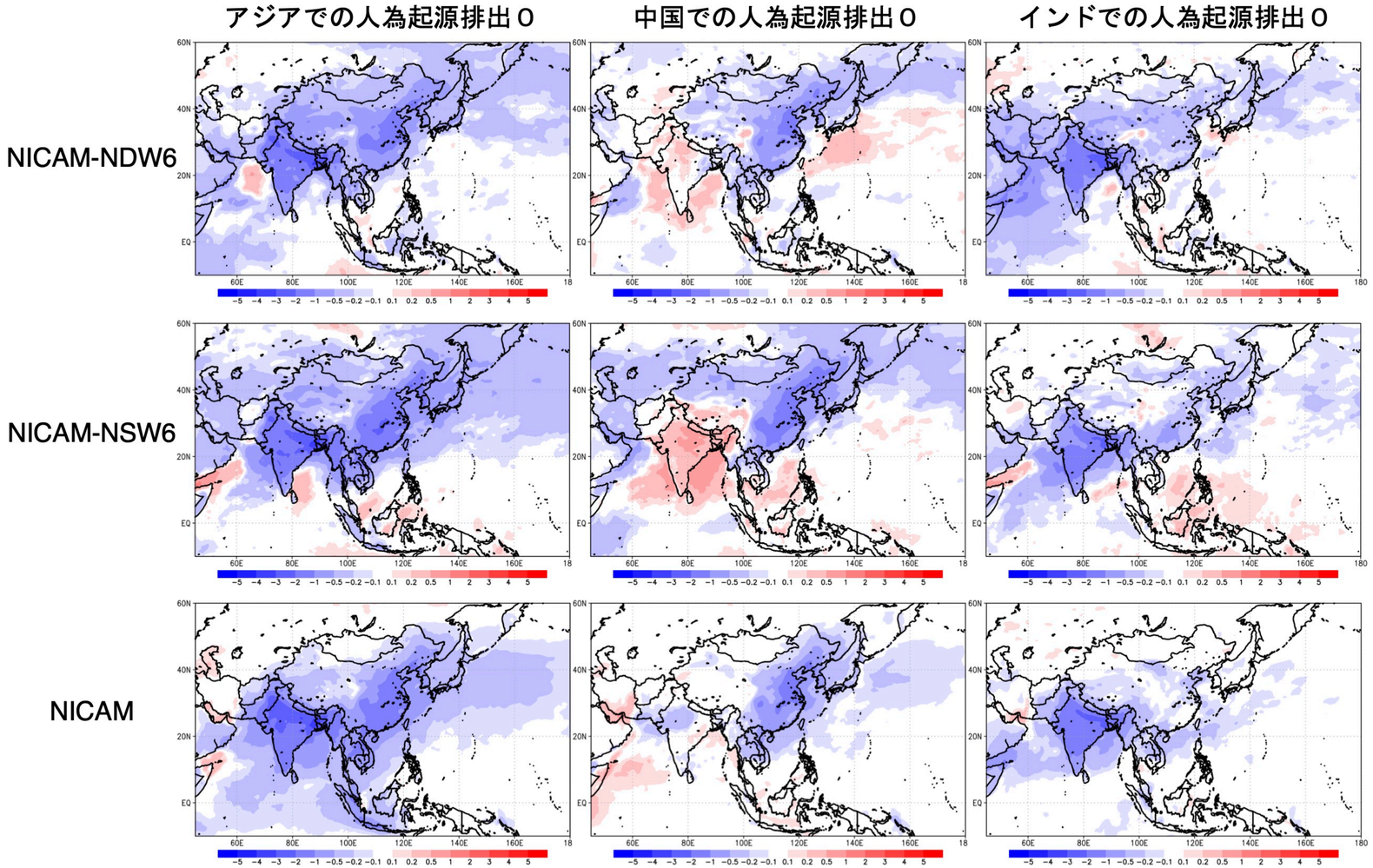
エアロゾル組成別質量濃度　(Goto et al., 2023)



サブテーマ3結果：化石燃料起源BC排出量削減による大気の速い応答

- モデル：NICAM-Chem（全球56 km分解能／5年積分）
- 3種類の雲物理モジュールで比較実験：NDW6, NSW6, 雲微物理過程を陽に表現しない方法（大規模凝結・積雲パラ）

大気上端でのエアロゾル放射強制力 [Wm^{-2}]

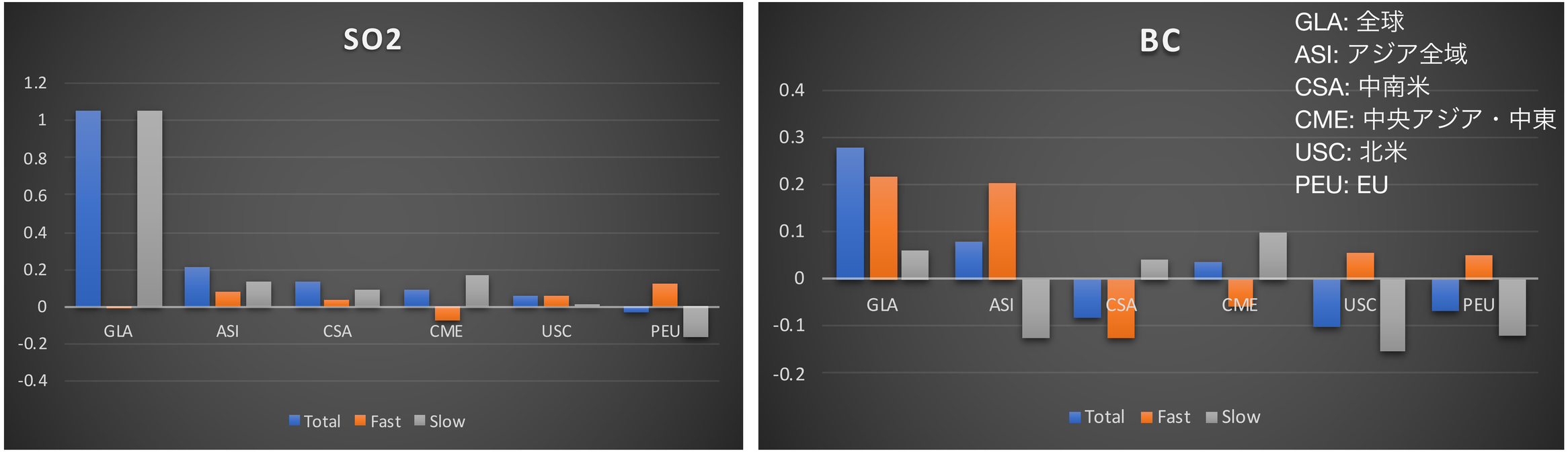


中国でのBC排出量を削減

➡ 削減されていないインドで正の強制力
その大きさは雲物理モジュールによって異なる

➡ BCの瞬時放射強制による雲変化が重要

サブテーマ4結果：降水応答のエアロゾル排出削減地域依存性

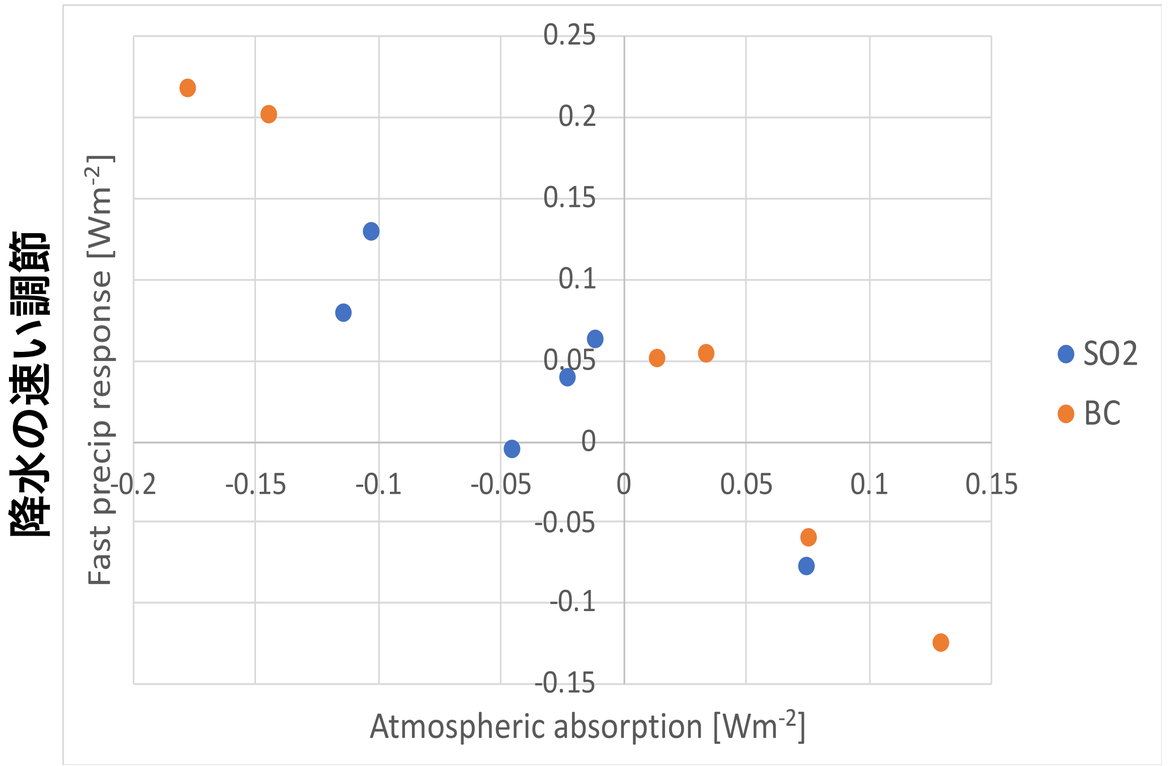


サブテーマ1により実施された感度実験から得られた地域ごとの排出量をゼロにした場合の速い調節（赤）と遅い応答（灰色）による全球平均降水量変化　（左）SO_2（硫酸塩エアロゾル）　（右）ブラックカーボン

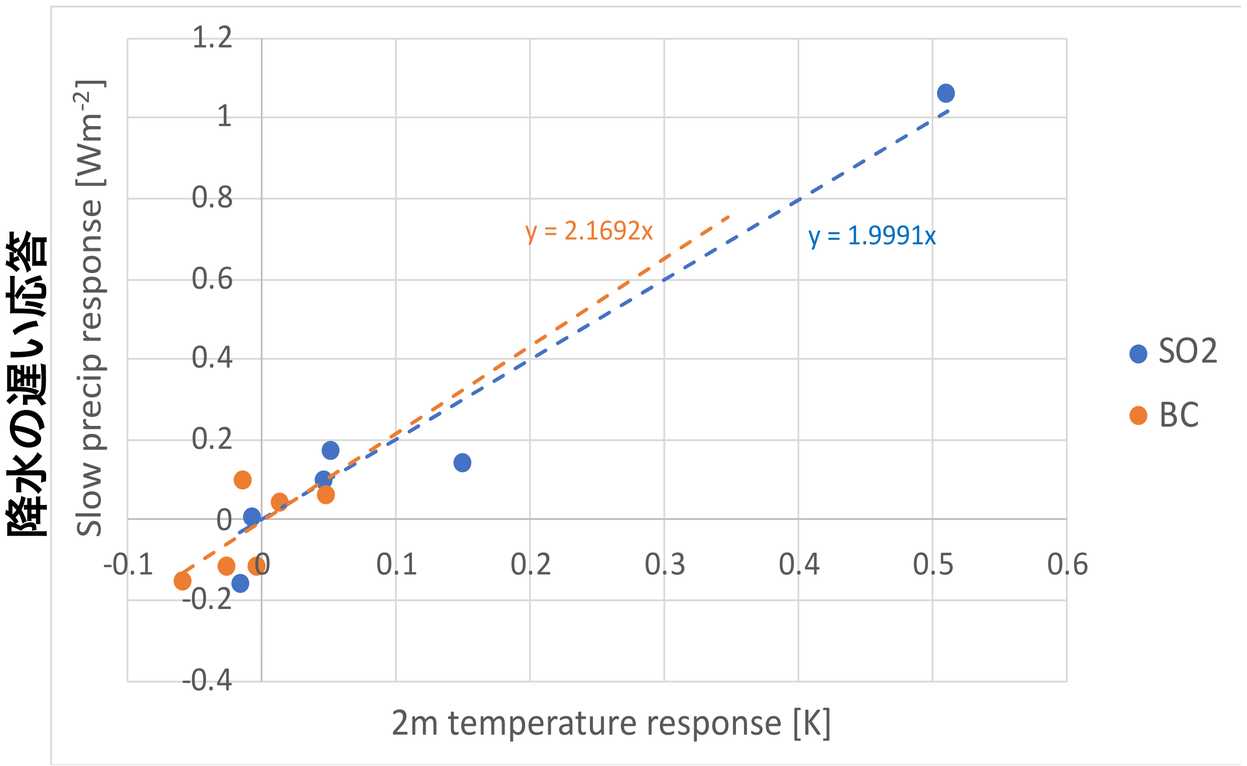
- 先行研究：全球的な排出量削減 ➡ SO_2では遅い応答が卓越　BCでは速い調節が卓越
- S-20-1による新たな知見：地域的な排出量削減 ➡ 速い調節／遅い応答の内訳は排出削減地域に大きく依存
  ➡ 降水応答のメカニズムが排出削減地域によって異なることを示唆

サブテーマ4結果：SLCFsによる大気エネルギー収支変化と水循環のリンク

MIROC-SPRINTARSによる実験



大気放射吸収変化



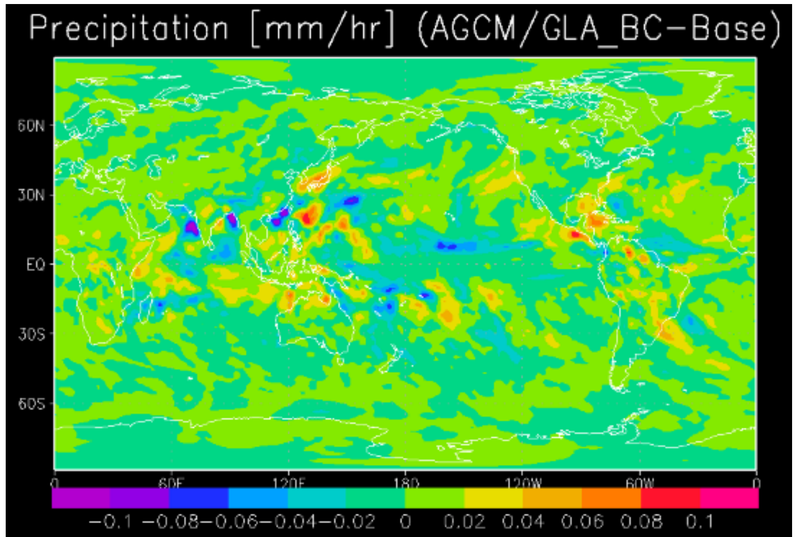
地上気温の応答

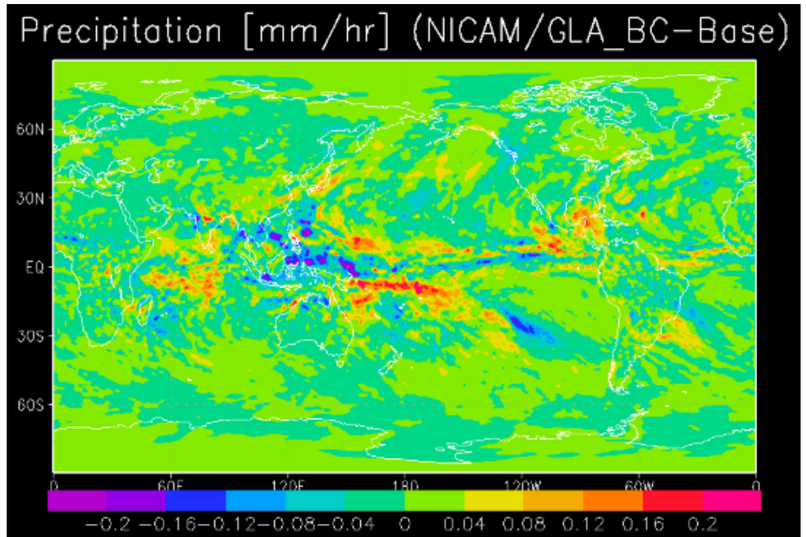
- SLCFs排出量変化の地域・組成によらない普遍的な性質
  - 降水の速い調節：大気放射吸収の変化とバランス
  - 降水の遅い応答：地表気温の応答と連動（~2% K^{-1}：水循環感度）
- SLCFs排出量変化の地域・組成ごとの違い：速い調節・遅い応答の内訳

サブテーマ4結果：エアロゾル排出削減による大気水収支変化

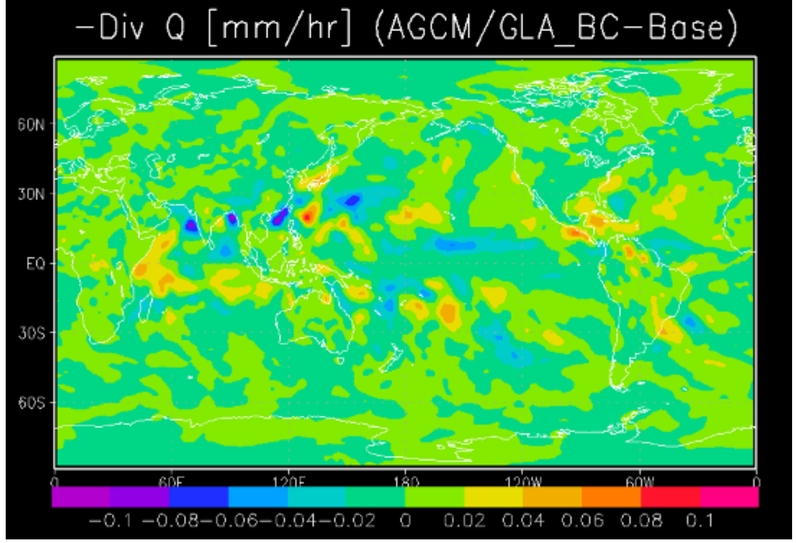
MIROC大気モデル　　NICAM大気モデル

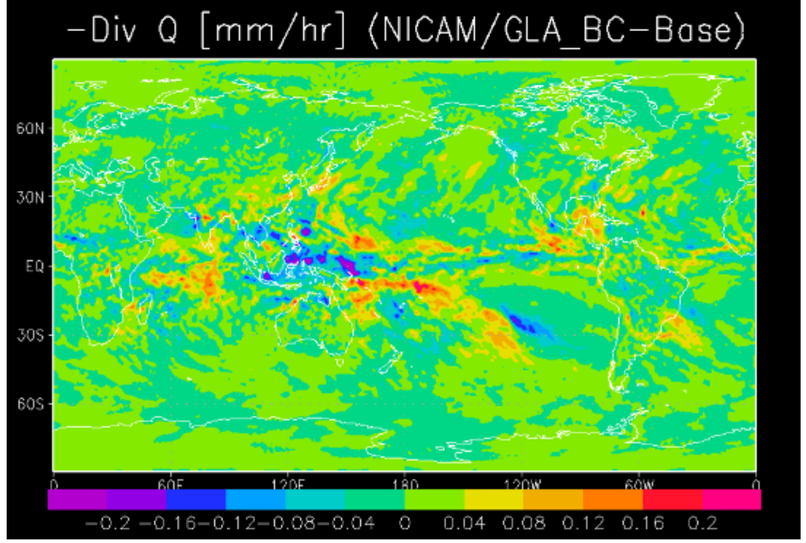
降水量変化





水蒸気輸送変化





人為起源BC排出量を全球でゼロにした場合の降水量変化（上）と水蒸気輸送変化（下）

（左）サブテーマ1での
MIROC-SPRINTARS
（右）サブテーマ3での
NICAM-Chem
により実施された感度実験の結果解析

- 降水量変化は大気循環場の変化の寄与が支配的
- 両モデルで変化の空間分布に差異

➡大気循環–雲–降水相互作用の表現や空間分解能の違いの影響を示唆

S-20 テーマ1の研究の進捗状況と環境政策等への貢献

研究の進捗状況

【サブテーマ１】計画以上の進展がある

- エアロゾル関連排出量を地域ごと・組成ごとにゼロにする網羅的な感度実験をすでに完了
- 他テーマへの実験結果の提供も計画よりも前倒しで実施

【サブテーマ２】計画通り進展している

- 化学過程の改良, メタン過去再現実験, 代替フロン類のシミュレーション導入と実験を実施
- 微量気体排出量を地域ごと・組成ごとにゼロにする網羅的な感度実験の推進と他テーマへの提供

【サブテーマ３】計画以上の進展がある

- スーパーコンピュータ「富岳」 を用いた世界最高レベル全球14kmでのエアロゾルシミュレーションを実施
- 共通プロトコルに基づいた高空間分解能シミュレーションを計画よりも前倒しで実施

【サブテーマ４】計画通り進展している

- サブテーマ1, 2, 3の実験結果を用いたSLCFsによるエネルギー収支および大気水収支の変化の解析

環境政策等への貢献

- Asia Pacific Clean Air Partnership (APCAP) Science Panel Member：すでに政策要綱を執筆・公表した実績
- IPCC TFIが現在進めているSLCFsのインベントリ方法論の作成に関する一連の会合に選出されて出席
- S-20-1単独および国際共同研究を通じた研究成果の公表論文のIPCC第7次評価報告書への貢献の期待　等

S-20 テーマ1の研究成果の発表状況

研究成果の発表状況

- 査読付き論文：14件　その他の論文：3件　口頭発表：42件
- 受賞：1件　科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（研究部門）
- 「国民との科学・技術対話」の実施：18件