

環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20

短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に 対応する緩和策推進のための研究

Research on Mitigation to Climate Change and Environmental
Impacts Caused by Short-Lived Climate Forcers

プロジェクトリーダー **竹村 俊彦** 代表機関名：九州大学
体系的番号：JPMEEERF21S12000 研究実施期間：令和3～7年度

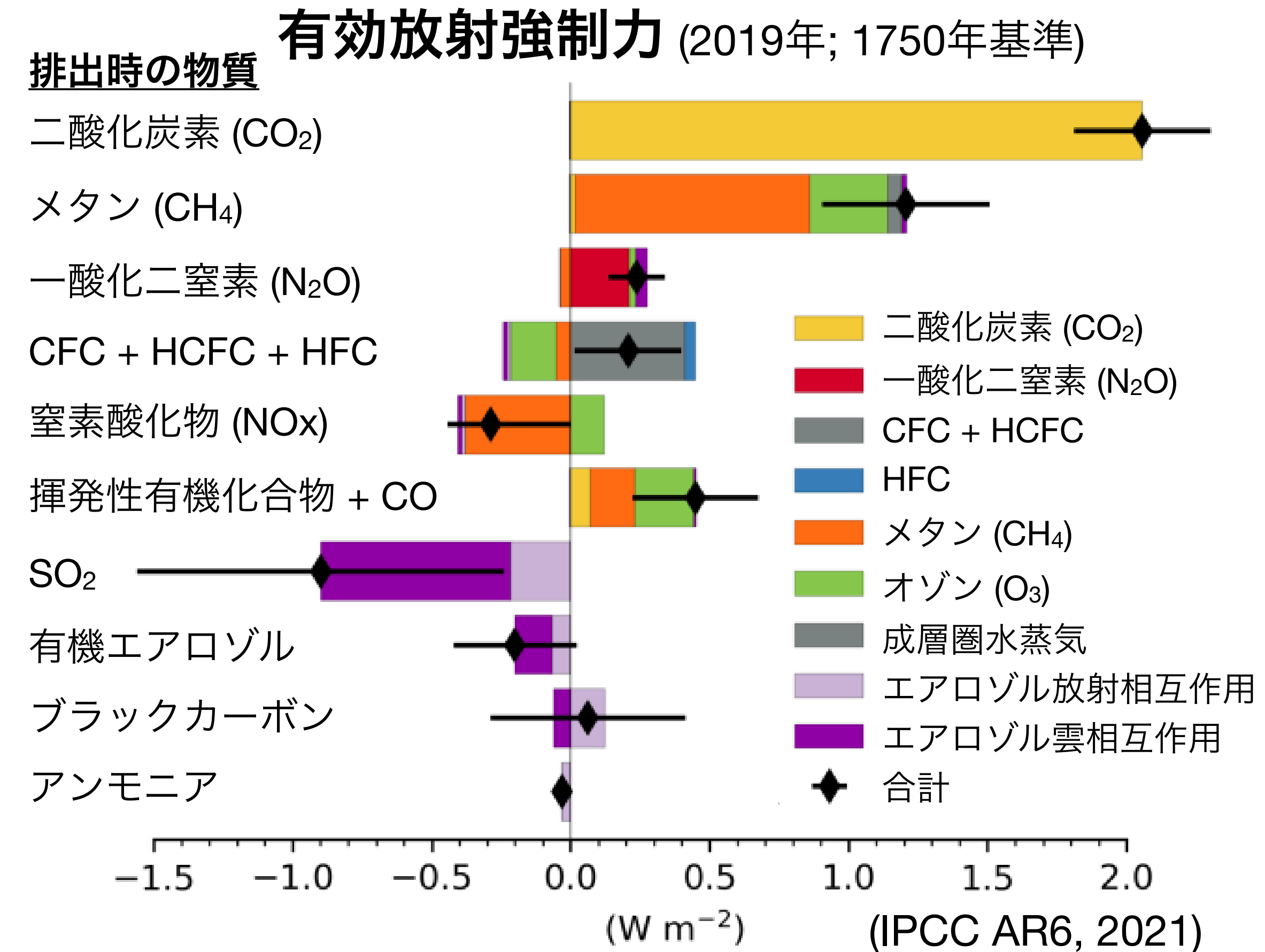
テーマ1リーダー	竹村 俊彦	九州大学応用力学研究所	主幹教授
テーマ2リーダー	芳村 圭	東京大学生産技術研究所	教授
テーマ3リーダー	花岡 達也	国立環境研究所社会システム領域	室長

はじめに — 短寿命気候強制因子（SLCFs）に関する動向の現状

パリ協定の目標達成が長寿命温室効果気体の削減のみでは困難である現実

➡ 排出量制御の効果が短期間で現れるSLCFsの緩和策を併せることが必須であり国際的な潮流

- 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多くの研究（右図）
- **SLCFsによる地域ごと・組成ごとの気候変動・環境影響の定量的評価は黎明期**
 - ▶ 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自体の健康影響等の毒性による影響評価が必要
- **国際的なSLCFsの重要性の認識の高まり**
 - ▶ IPCC AR6におけるSLCFs独立章
 - ▶ IPCC TFIによるSLCFs排出量推計ガイドラインの新規作成が進行中
 - ▶ モントリオール議定書キガリ改正を契機としたHFCs削減に関する日仏ロードマップ



環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20の研究開発目的

今後数十年の気候変動緩和の具体的施策の立案のためにはSLCFsによる地域別・組成別の気候変動・環境影響と最適シナリオに関する定量的科学的知見の蓄積が不可欠

- 推進費S-7：東アジアにおける広域大気汚染の解明と温暖化対策との共便益を考慮した大気環境管理の推進に関する総合的研究
- 推進費S-12：SLCPの環境影響評価と削減パスの探索による気候変動対策の推進 【事後評価S】



環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20

短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究

- 排出源および大気中の時空間分布が偏在している**短寿命気候強制因子 (SLCFs)** による 地域ごと・組成ごとの気候変動および環境影響について 本プロジェクトの参画者自らが開発してきた数値モデルを用いて定量的に評価する
- SLCFsによる気候変動・環境影響の定量的評価を基盤として**影響緩和へ向けた排出量削減最適シナリオ**を策定する



国際的枠組（IPCC AR7, IPCC TFI, CCAC, APCAP等）および国内政策への定量的なSLCFs最適削減に関する科学的知見の提供

環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ） S-20の構成

<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/climate/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

大気海洋結合モデル
高分解能気候モデル



最適緩和シナリオ

統合評価モデル

インベントリ

テーマ3

短寿命気候強制因子による環境
影響の緩和シナリオの定量化

ダウンスケーリング

エアロゾル¹⁾

微量気体²⁾

短寿命気候強制因子
(SLCFs)

地域ごとのSLCFsによる気候変動・
環境影響の緩和に関する政策議論に
活用できる科学的知見の創出

テーマ2

短寿命気候強制因子による
地域規模の環境影響評価

影響評価モデル



パリ協定

国内政策

IPCC

CCAC

APCAP

1) 硫酸塩, BC, 有機物, 硝酸塩,
それらの前駆物質

2) メタン, オゾン, HFCs,
それらの前駆物質

環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20の研究目標

【テーマ1】

- 本プロジェクトの参画者が中心となり開発してきたエアロゾルモデルSPRINTARSおよび大気化学モデルCHASERが組み込まれた全球気候モデルMIROCおよび全球高分解能気候モデルNICAM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
- SLCFsに関するテーマ2での影響評価およびテーマ3での排出量削減シナリオ策定のための計算結果の提供
- テーマ3により策定される地域ごとのSLCFs排出量削減シナリオを適用した気候変動の将来予測

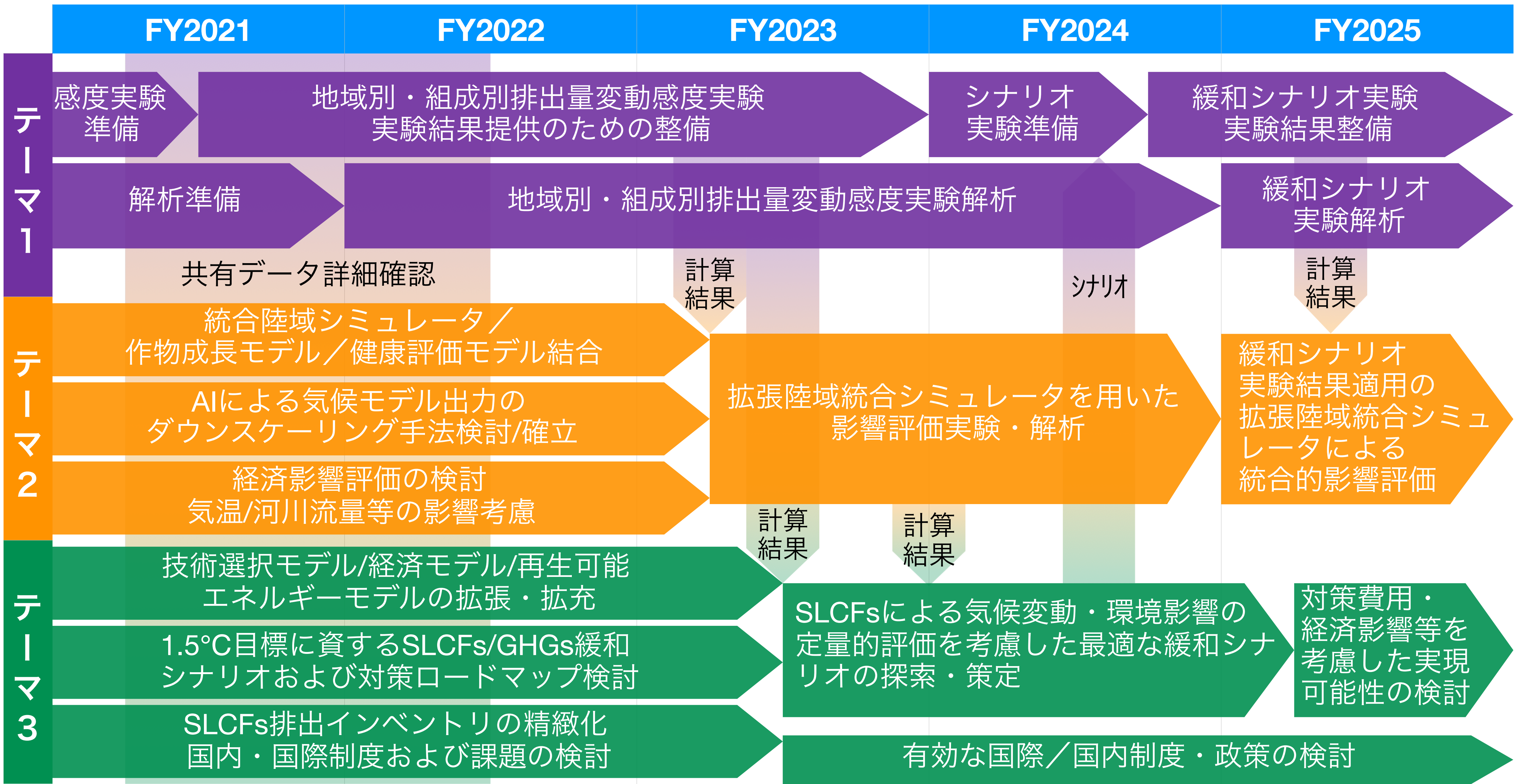
【テーマ2】

- 高度化・高精度化された統合陸域シミュレータILSおよびテーマ1の気候実験結果を用いたSLCFs排出量増減による地域規模での健康影響・農作物影響・洪水渇水影響の評価
- テーマ3により策定される地域ごとのSLCFs排出量削減シナリオを適用したテーマ1での気候変動の将来予測の結果を用いた健康影響・農作物影響・洪水渇水影響の評価

【テーマ3】

- 2°C/1.5°C目標および環境影響の低減を考慮したSLCFsと長寿命温室効果ガス（GHGs）の最適緩和シナリオの探索を通じて地域別・組成別の技術的な潜在削減量や経済影響などの定量的な評価を実施
 - ➡ 緩和策の技術的・経済的・制度的な課題を明確化
 - ➡ S-20独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオを策定

環境研究総合推進費 戦略的研究開発（Ⅰ）S-20の研究計画



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）

- 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

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）

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

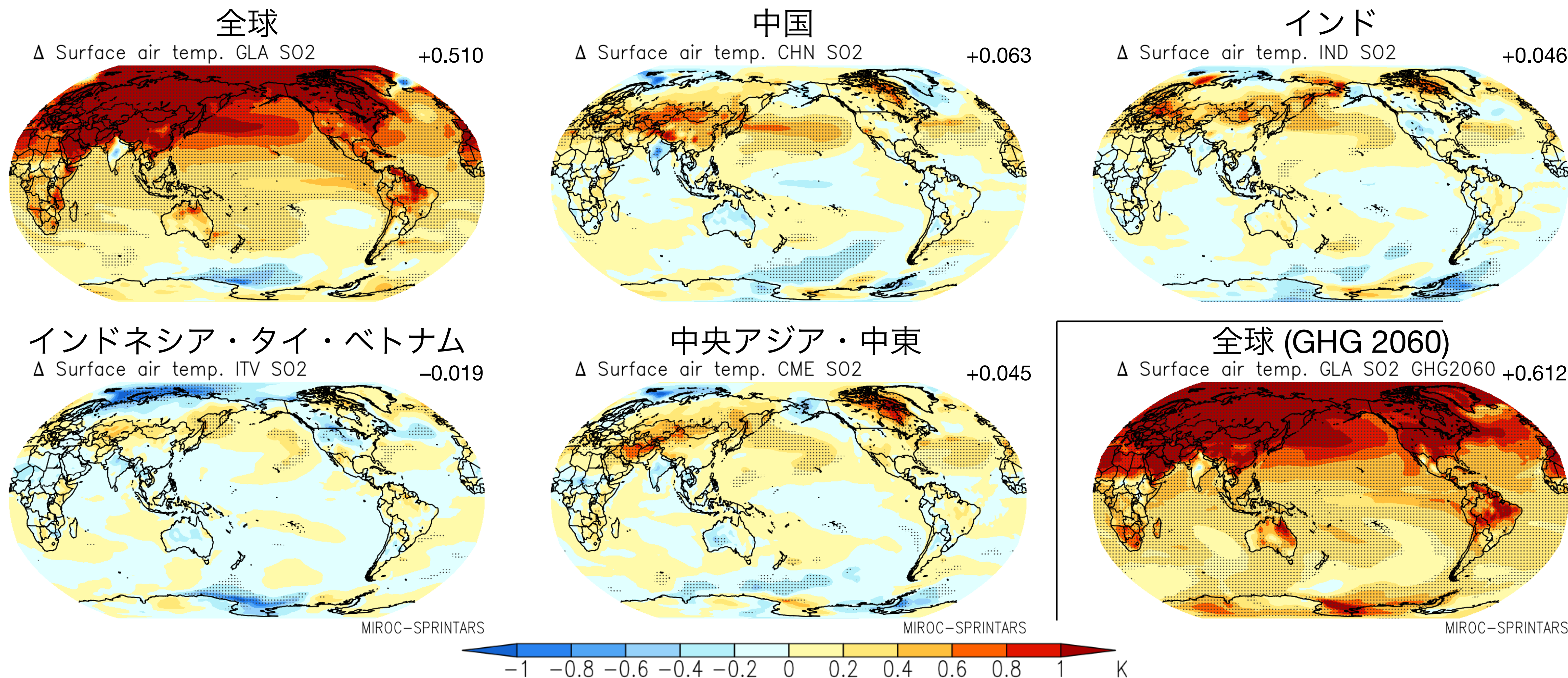
- 雲物理を陽に表現可能： ＊「富岳」利用
雲は気候を大きく変化させる重要なファクター
- 地域ごと・組成ごとにSLCFs関連排出量を変化させる感度実験・解析

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

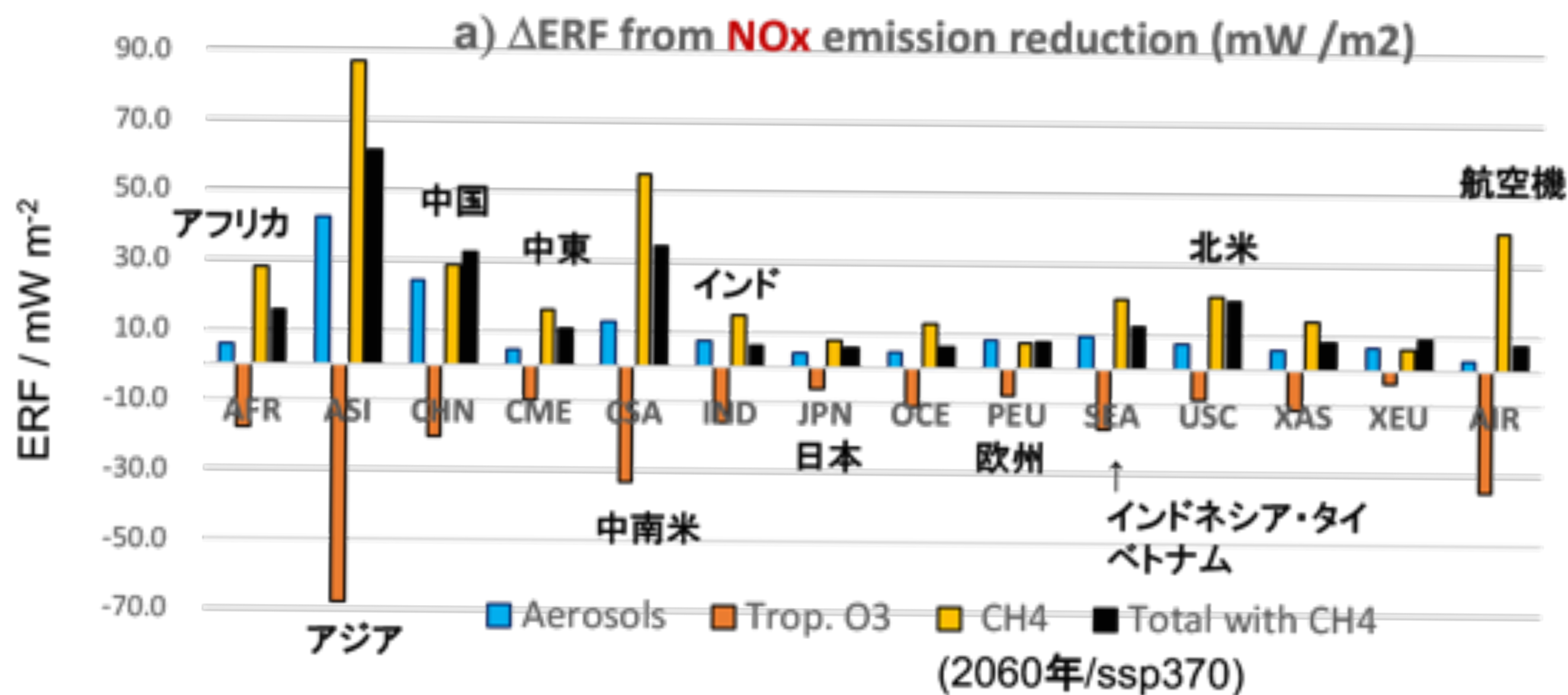
テーマ1結果：人為起源エアロゾル削減による地上気温変化



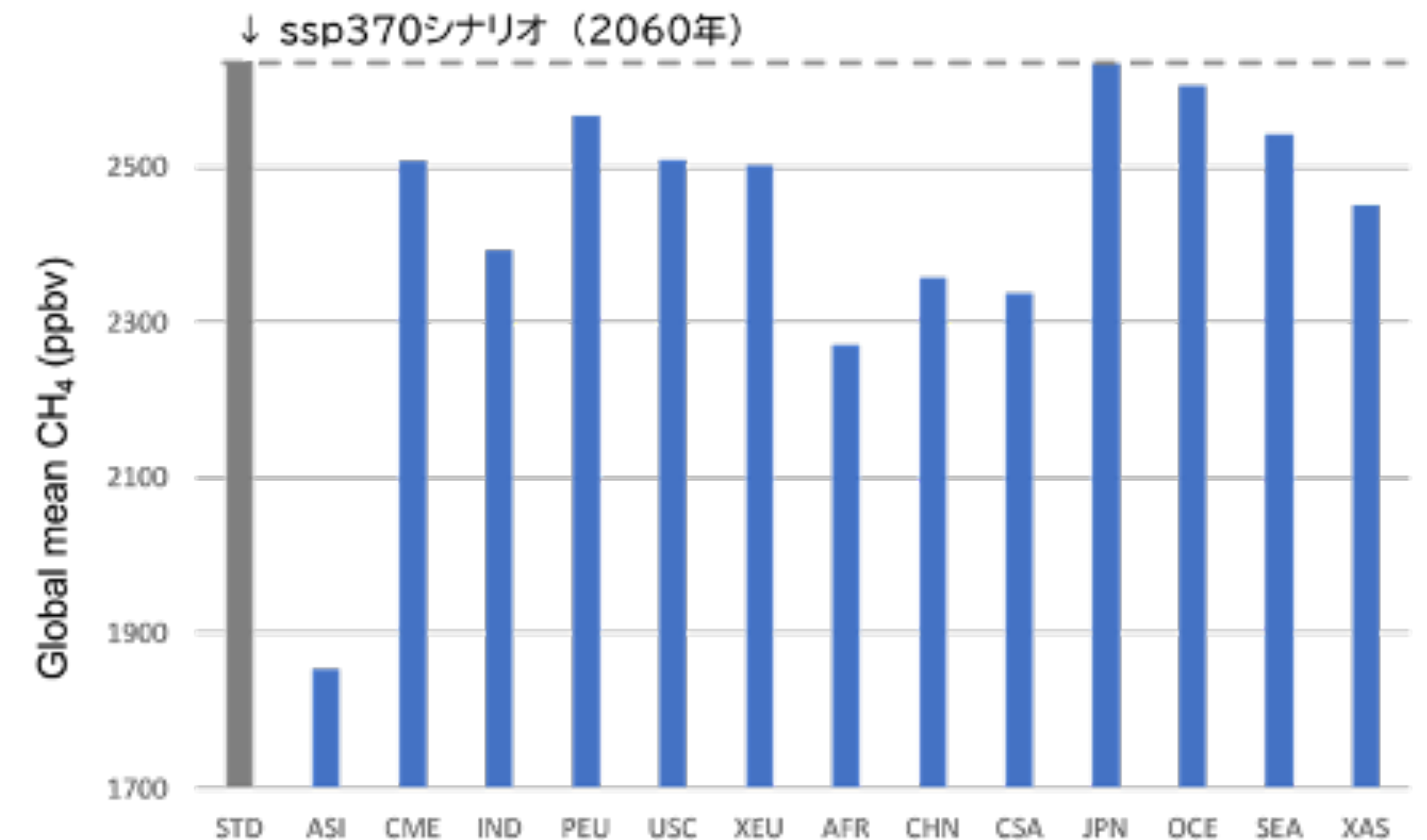
大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSを用いて計算された各地域からの人為起源SO₂排出量をゼロにした場合の年平均地上気温変化

- 地域ごとのSO₂排出量減少による地上気温変化への寄与度は地域のばらつきが大きい
- 長寿命温室効果気体濃度が高い状況ではSO₂排出量を同じように減少させても昇温が大きくなる

テーマ1結果：地域ごとのCH₄, NO_x排出量削減の複雑性



CHASERによる各地域でNO_x排出量をゼロにした場合の要因別（エアロゾル・対流圏オゾン・メタンの濃度変化）および合計の有効放射強制力



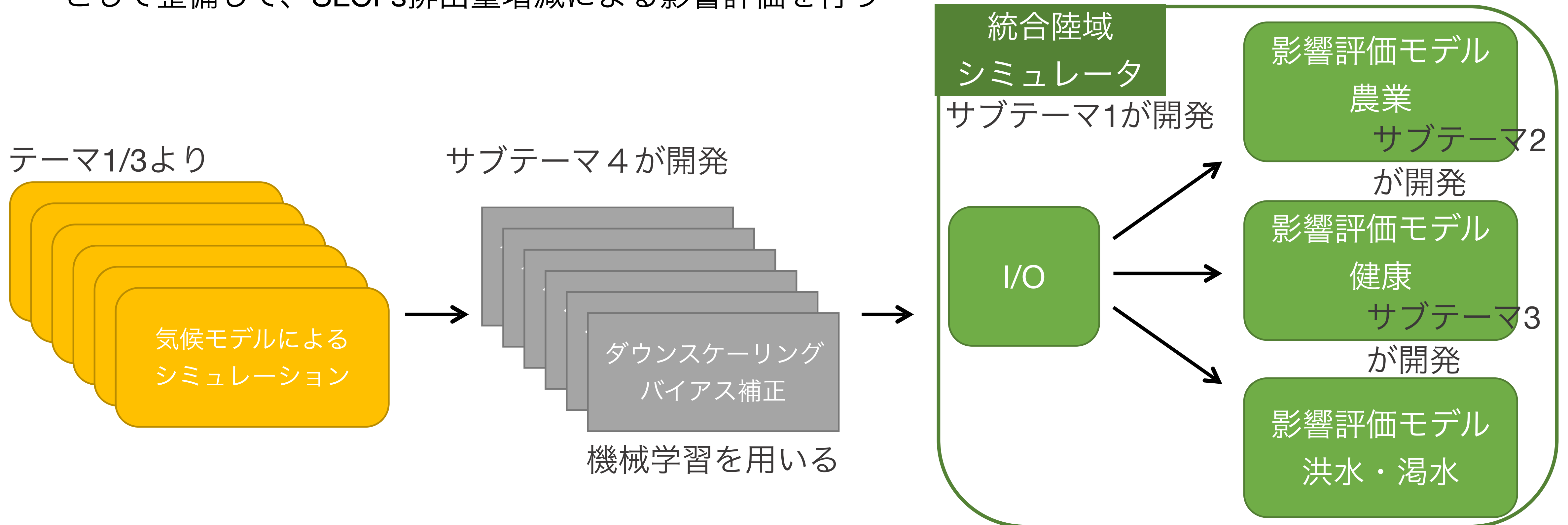
CHASERによるSSP3-7.0シナリオおよび各地域からのメタン排出削減によるメタン濃度予測

- 大気汚染対策を主眼としたNO_xの排出量削減
 - ▶ O₃濃度減少による大気冷却効果と大気汚染緩和
 - ▶ OHラジカル濃度の低下による大気の酸化・浄化能力低下 ➡ 温室効果気体CH₄濃度増加
 - ▶ 大気冷却効果のある硝酸塩エアロゾルの減少：健康影響を考慮すると減少すべき
 - ➡ 化石燃料およびバイオマス燃料からの一酸化炭素（CO）の排出量削減を同時に実施する検討の必要性
- CH₄排出削減はアジア全域での実施が最も効果的 アフリカ・中南米・中国での排出削減も効果的

S-20 テーマ2の構成と研究開発内容

統合陸域シミュレータを用いて**SLCFs排出量増減の地域規模での環境影響評価**を行う

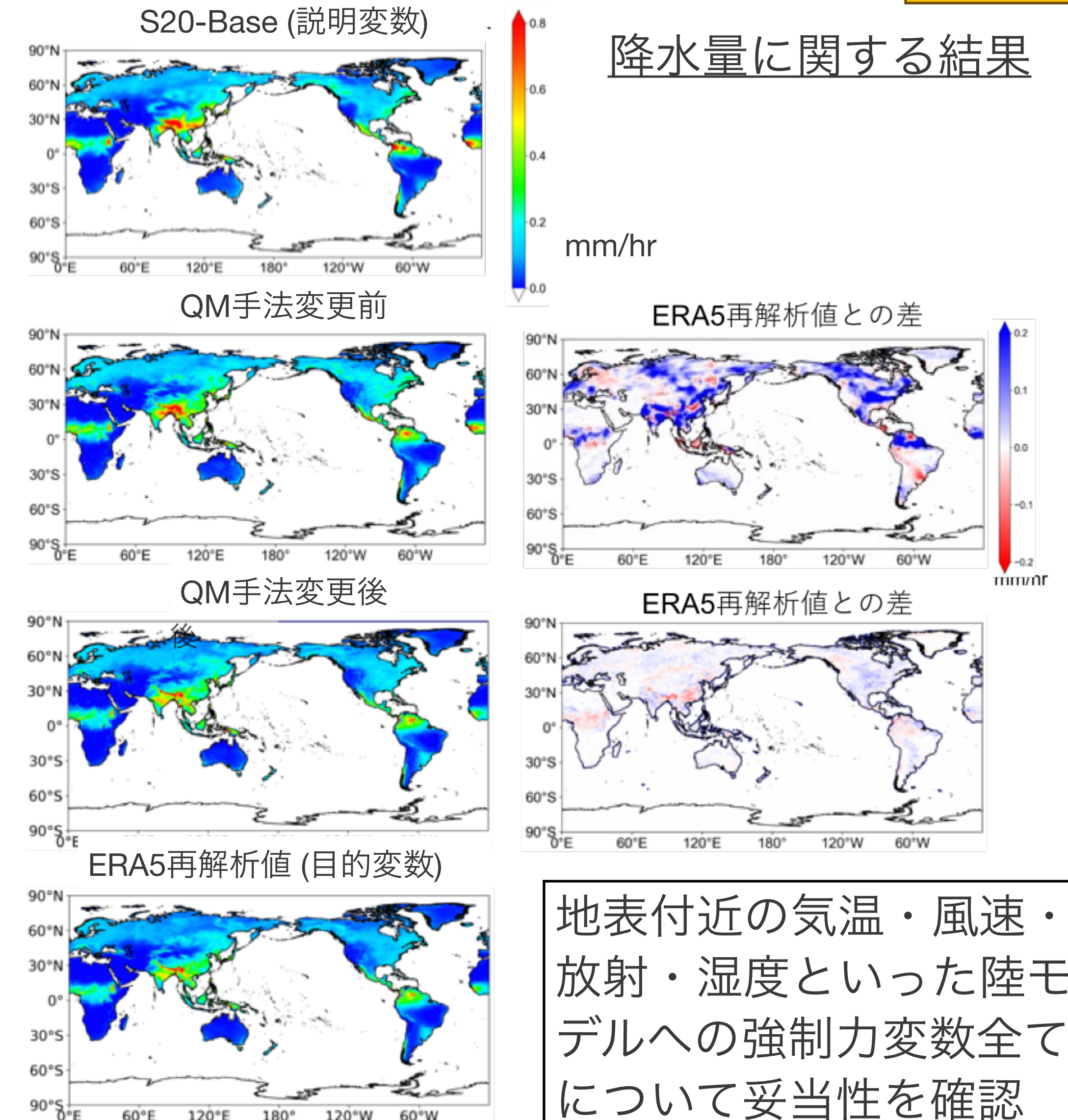
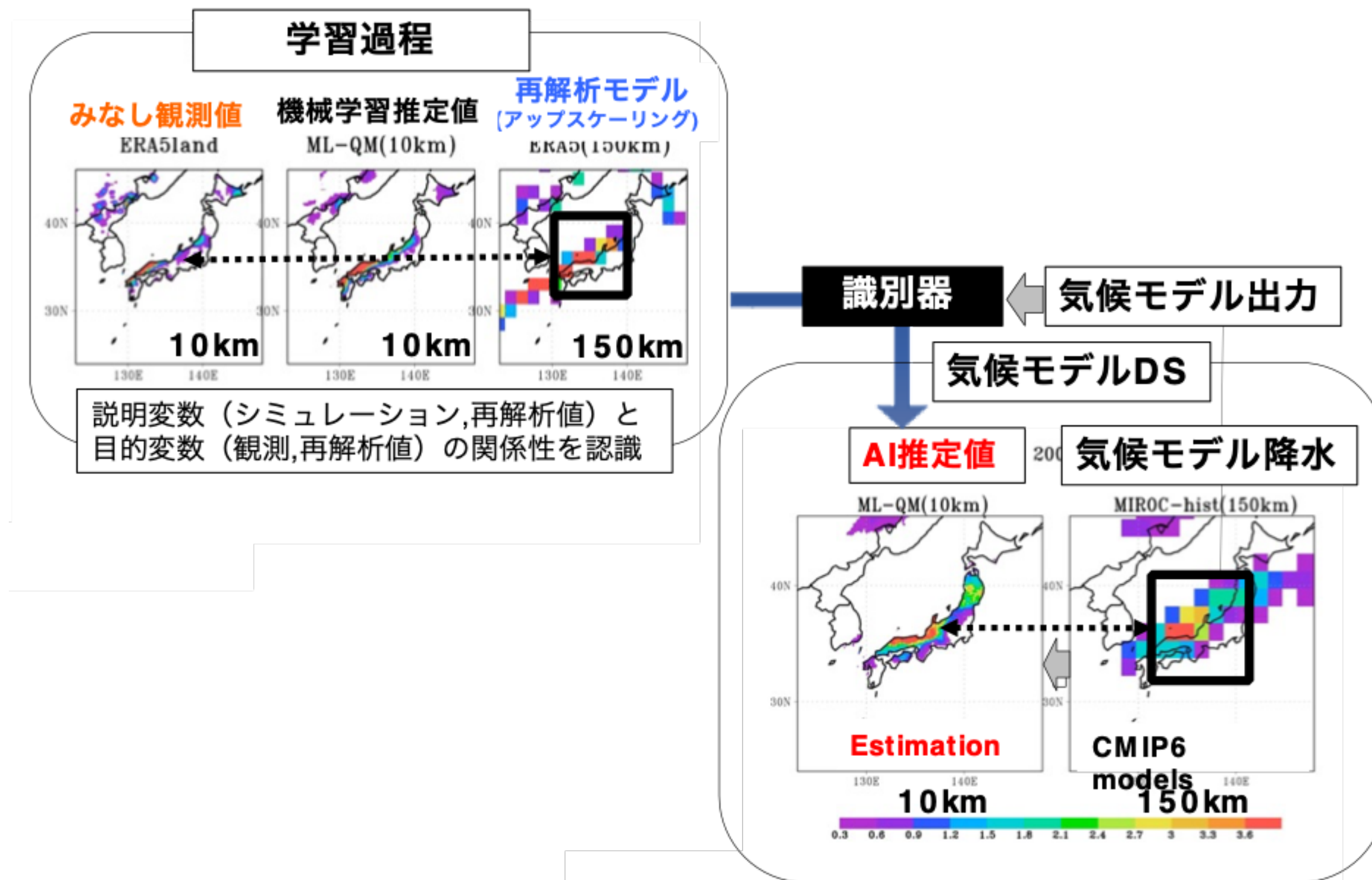
- 地域規模での影響を評価するためには多数の気候モデル実験をもとにした影響評価が必要
 - これまでの枠組みでは、多段階の作業が必要、データ量が多い、入力ファイルの形式変更が必要、といった理由から、多数の影響評価実験を行うには手間や時間がかかりすぎる
- ➡ 影響評価を高速かつ少ない手順で実施するため、統合陸域シミュレータILSを拡張して統合影響評価モデルとして整備して、SLCFs排出量増減による影響評価を行う



テーマ2結果：機械学習を用いたバイアス補正・ダウンスケーリング

S20-2-4

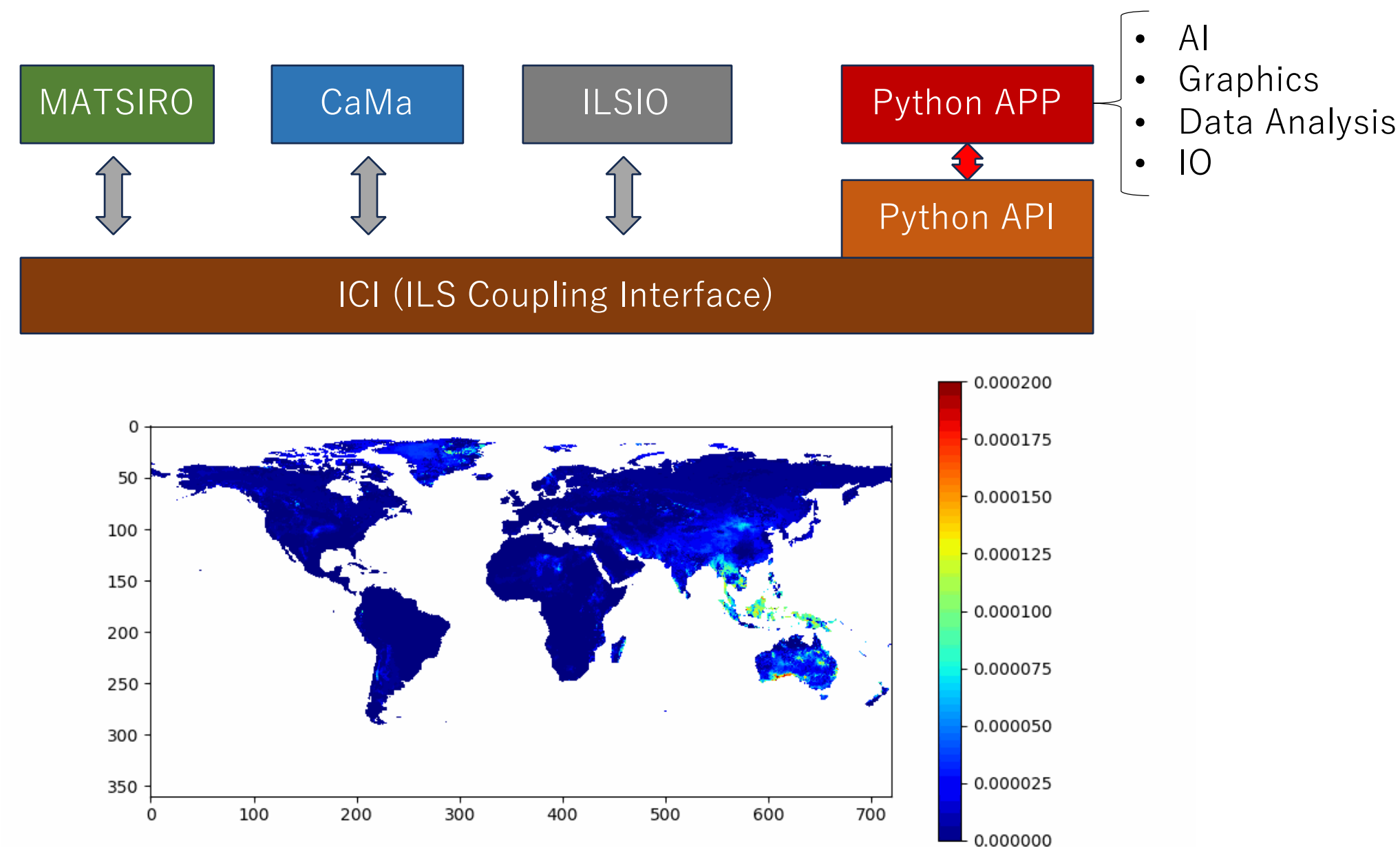
- Yoshikane and Yoshimura (2021, 2023) に基づいてAIによって学習した「モデルのくせ」の直し方をS-20シミュレーション結果に適用する
- 機械学習（ML）によって空間分布を補正して分位マッピング（QM）によって平均・分散を補正する



ILS結合インターフェイスのPythonへの対応と影響評価関数への適用

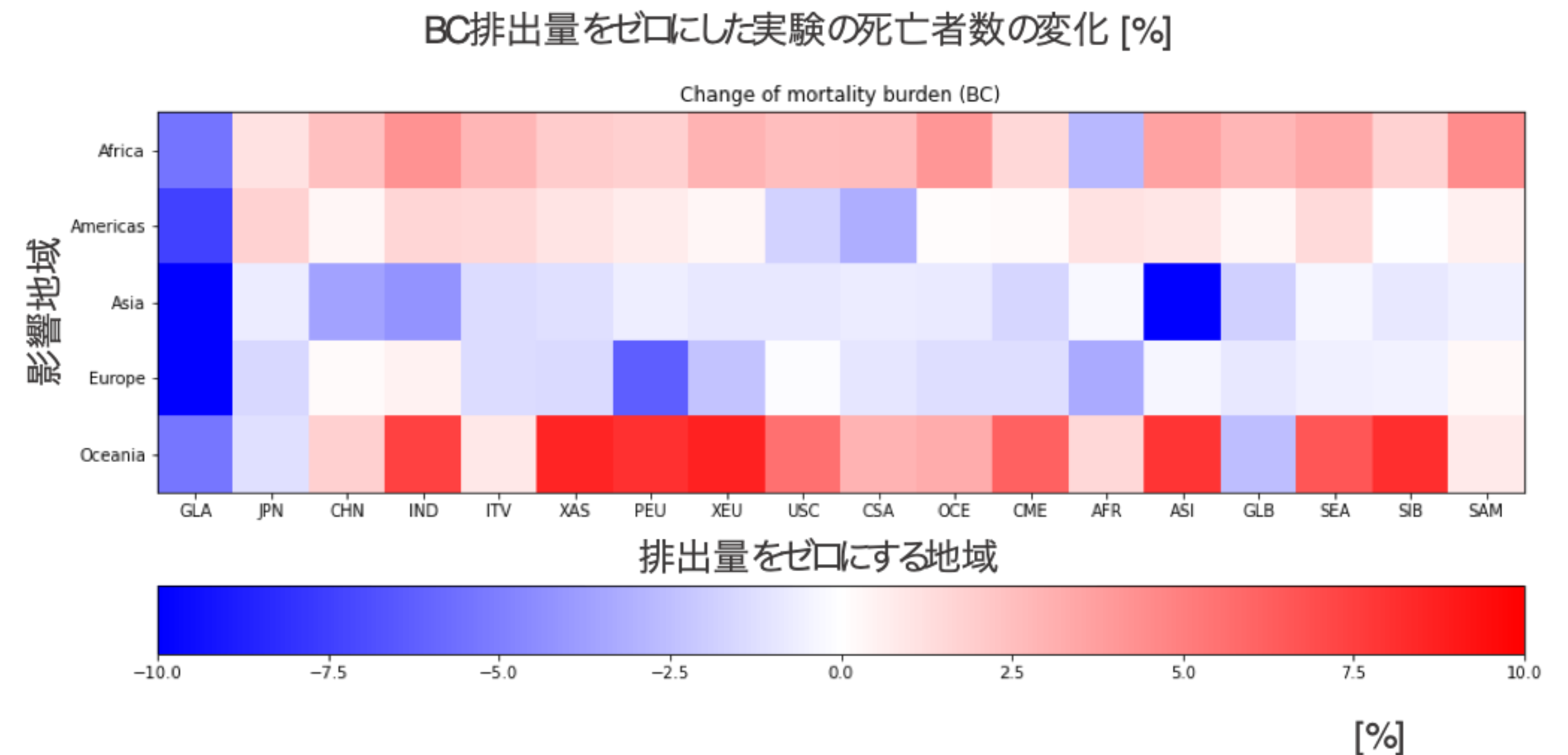
S20-2-1 S20-2-2

- 従来は結合するモデルもFortranで書かれている必要があったが、影響評価モデルはFortranで書かれているものばかりではなく、ファイルやテーブル、文字列の扱いが容易な言語への対応が望まれていた。
- ➡ Pythonのモデルを結合できるようにILSの結合インターフェイスICIを拡張してCから呼び出し可能な形にラッパーを整備した。



```
mpirun -n 16 ${COMMAND} : -n 7 ${COMMANDC} : -n 1 ${COMMANDIO} : -n 1 python3 ${PYSRIPT}
```

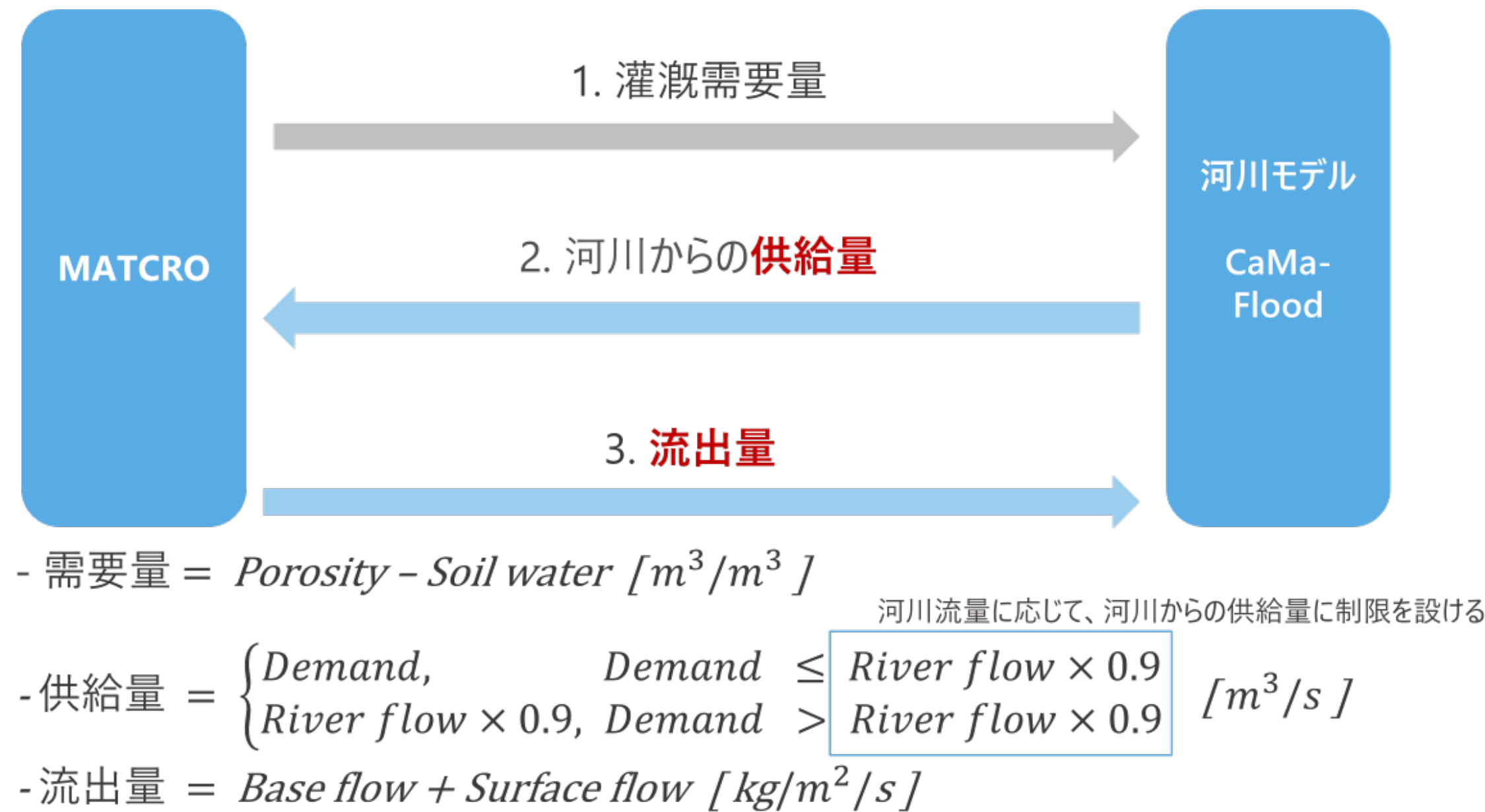
ILSの結合モジュールの概要とPython結合の例：
シミュレーション結果の同時モニタリング機能の実装



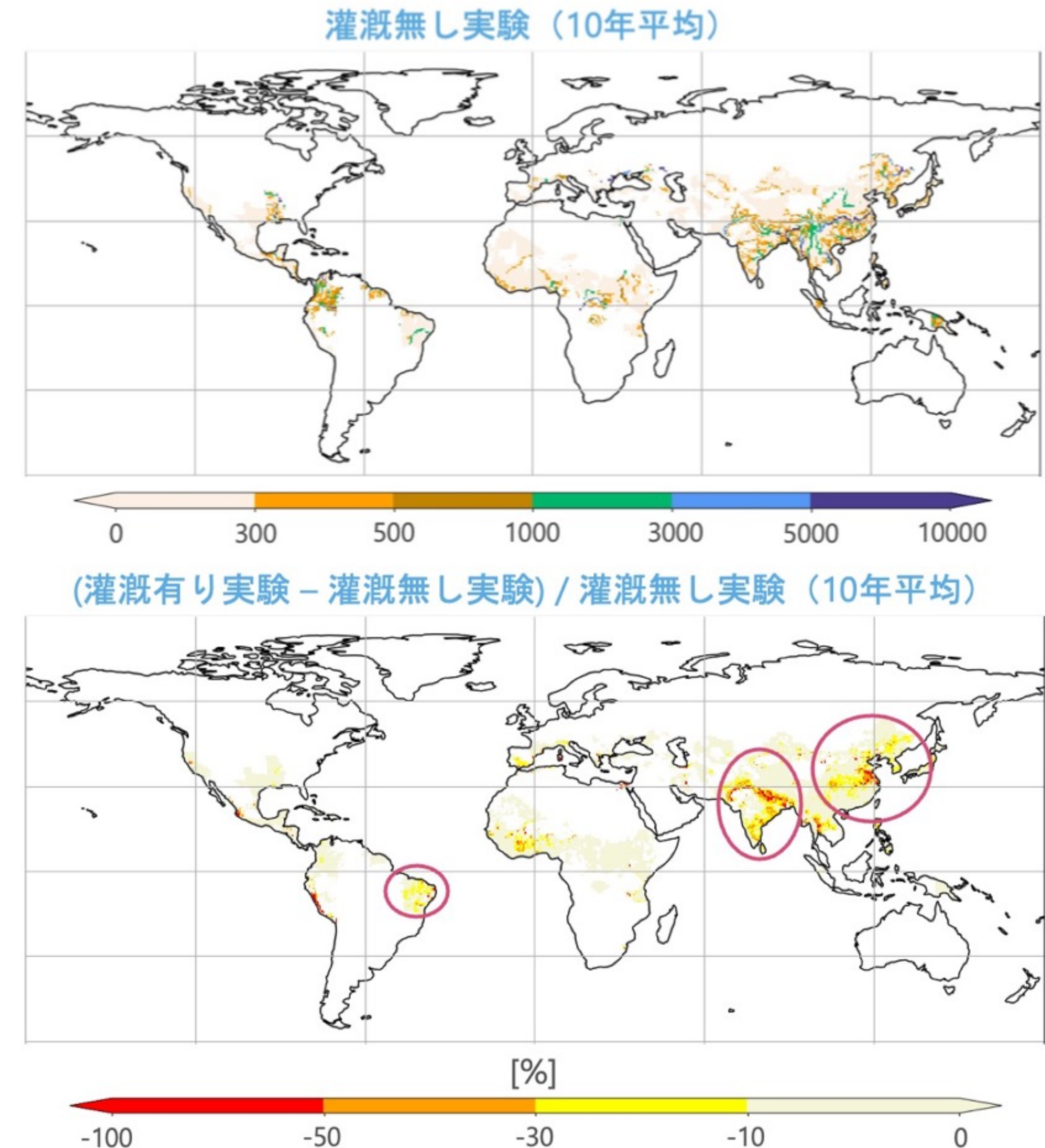
Python結合の例その2：健康影響評価関数の実装
S-20感度実験（BC排出ゼロ実験）を用いたPM2.5による死亡者数の地域ごとの増減

テーマ2結果：作物成長モデルMATCROとILSの結合

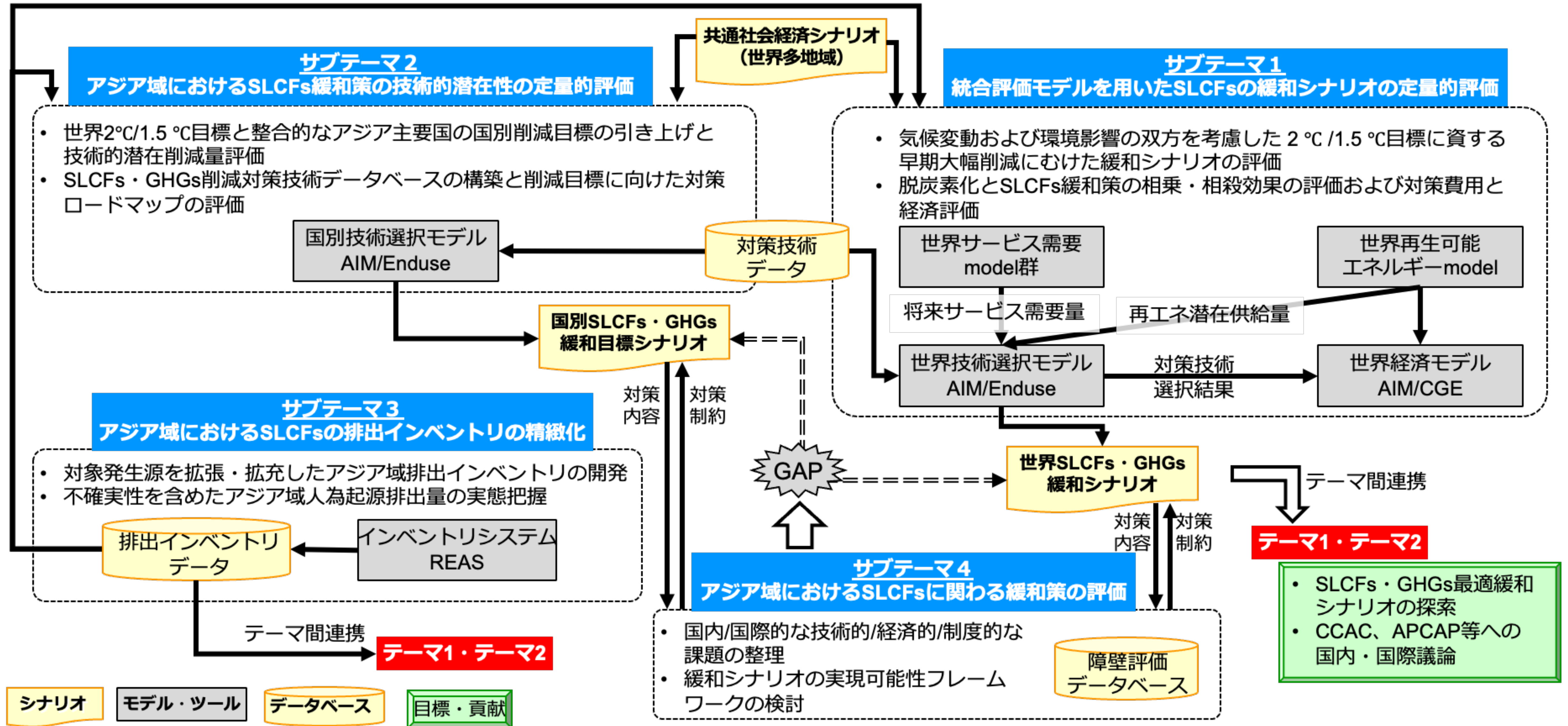
S20-2-3 S20-2-1



- Fortranで書かれたモデル同士の結合。結合モジュールJcupを通じて変数（データ）をやり取りするところはPythonと同じ。
- 灌漑の考慮により、灌漑が盛んな地域（右図の丸で囲んだ地域）において河川流量は減少し（領域平均で-10%ほど）、蒸発散量・収量は増加することを確認した。



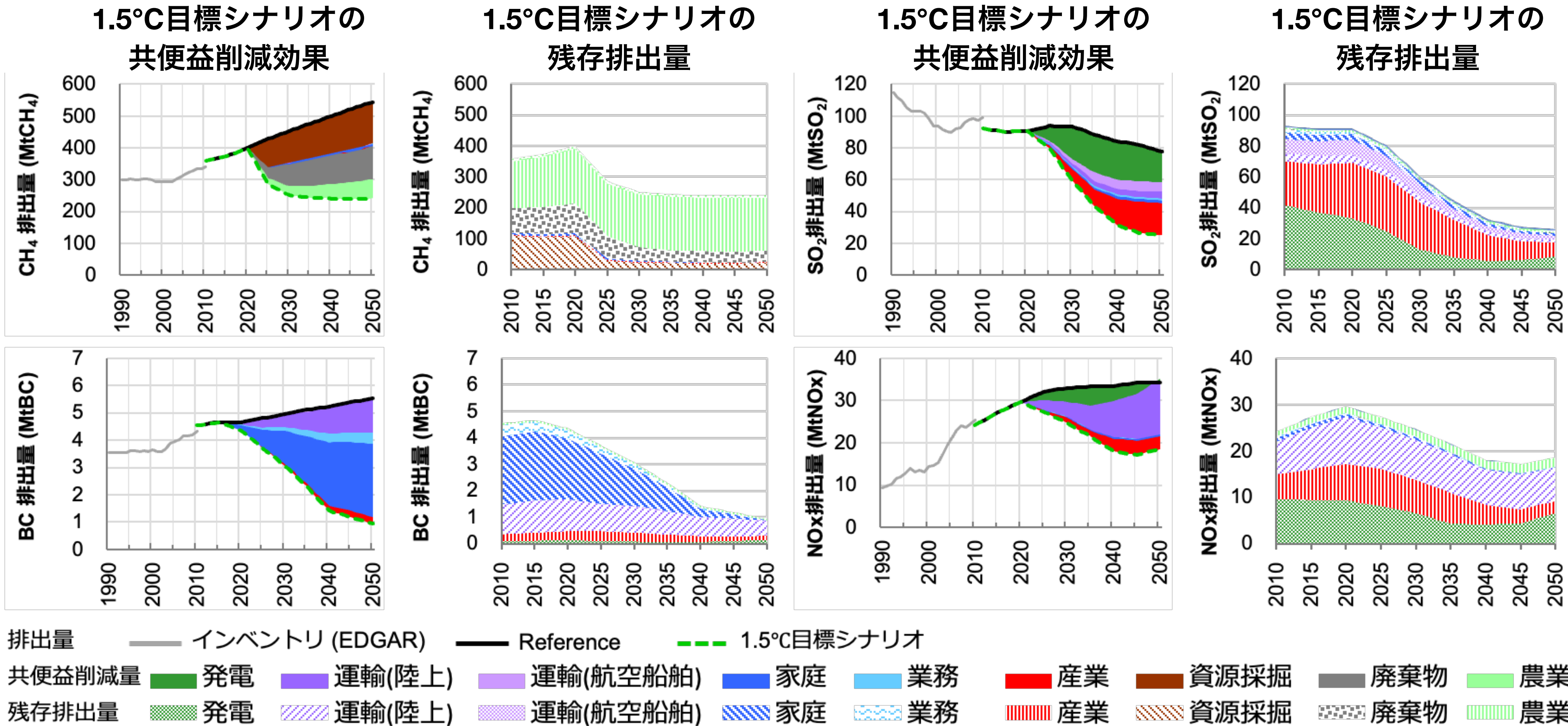
S-20 テーマ3の構成と研究開発内容



テーマ3結果：1.5℃目標に資する世界のGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの探索

(サブテーマ1および2の連携による提言)

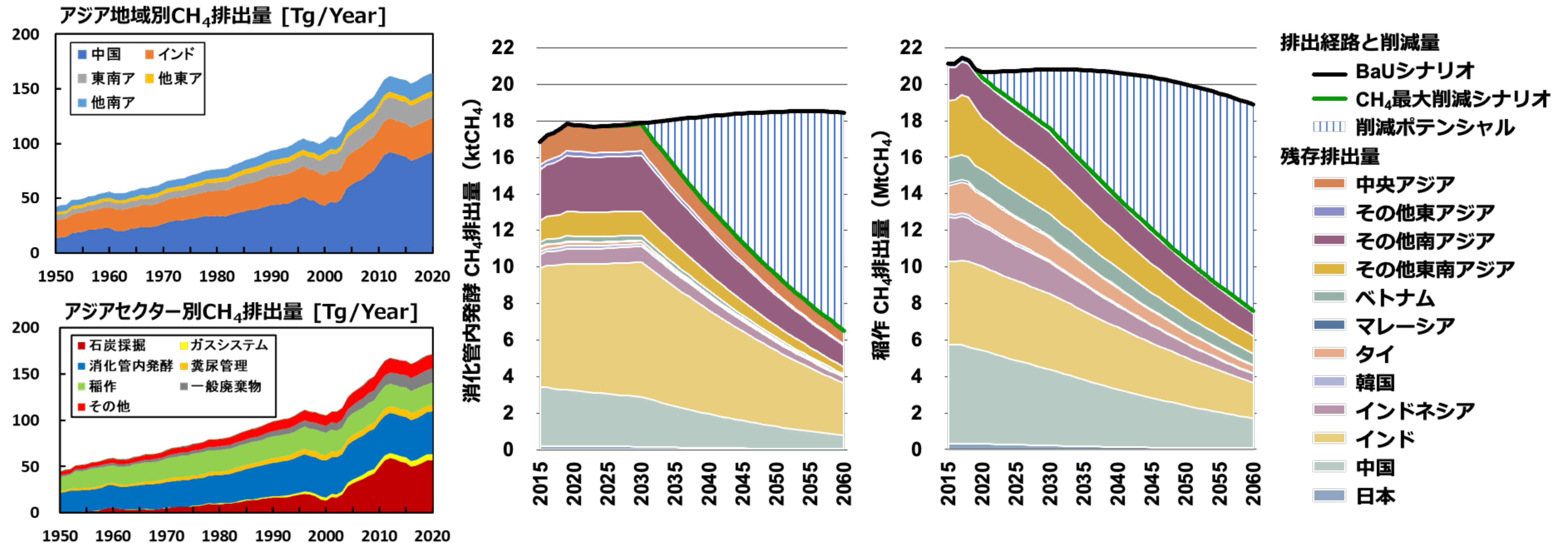
- 1.5℃目標に資するCO₂ネットゼロ排出を実現するには、大幅な脱炭素対策の導入が必須。同時にエネルギー起源のSLCFs・大気汚染物質の共便益削減効果も期待できる
- ただし、脱炭素化が困難な部門や非エネルギー部門におけるGHGs, SLCFs, 大気汚染物質の排出量が残存する



テーマ3結果：アジア域における主なCH₄排出国・部門とCH₄最大削減の可能性の評価

(サブテーマ3および2, 1の連携による提言)

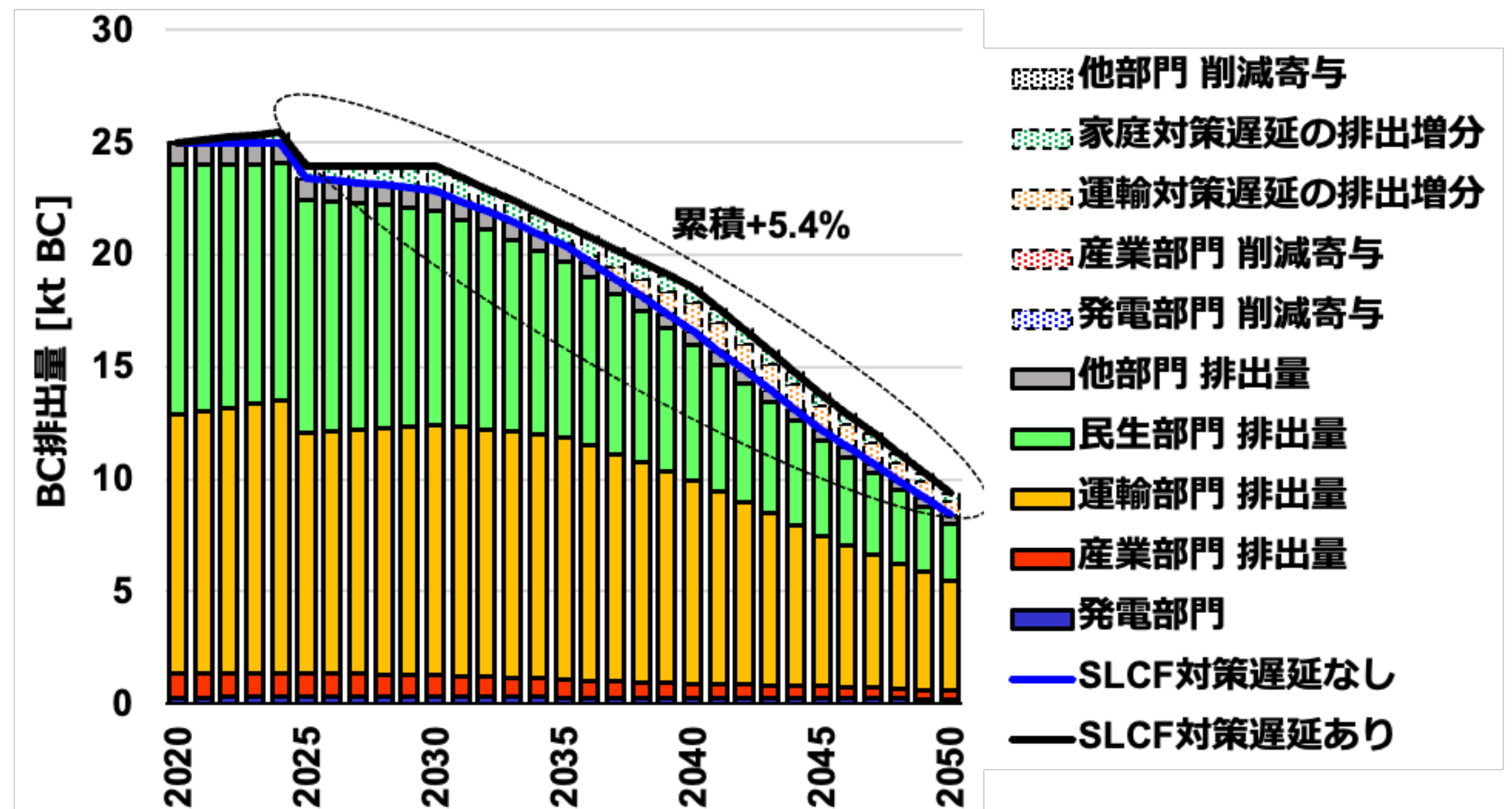
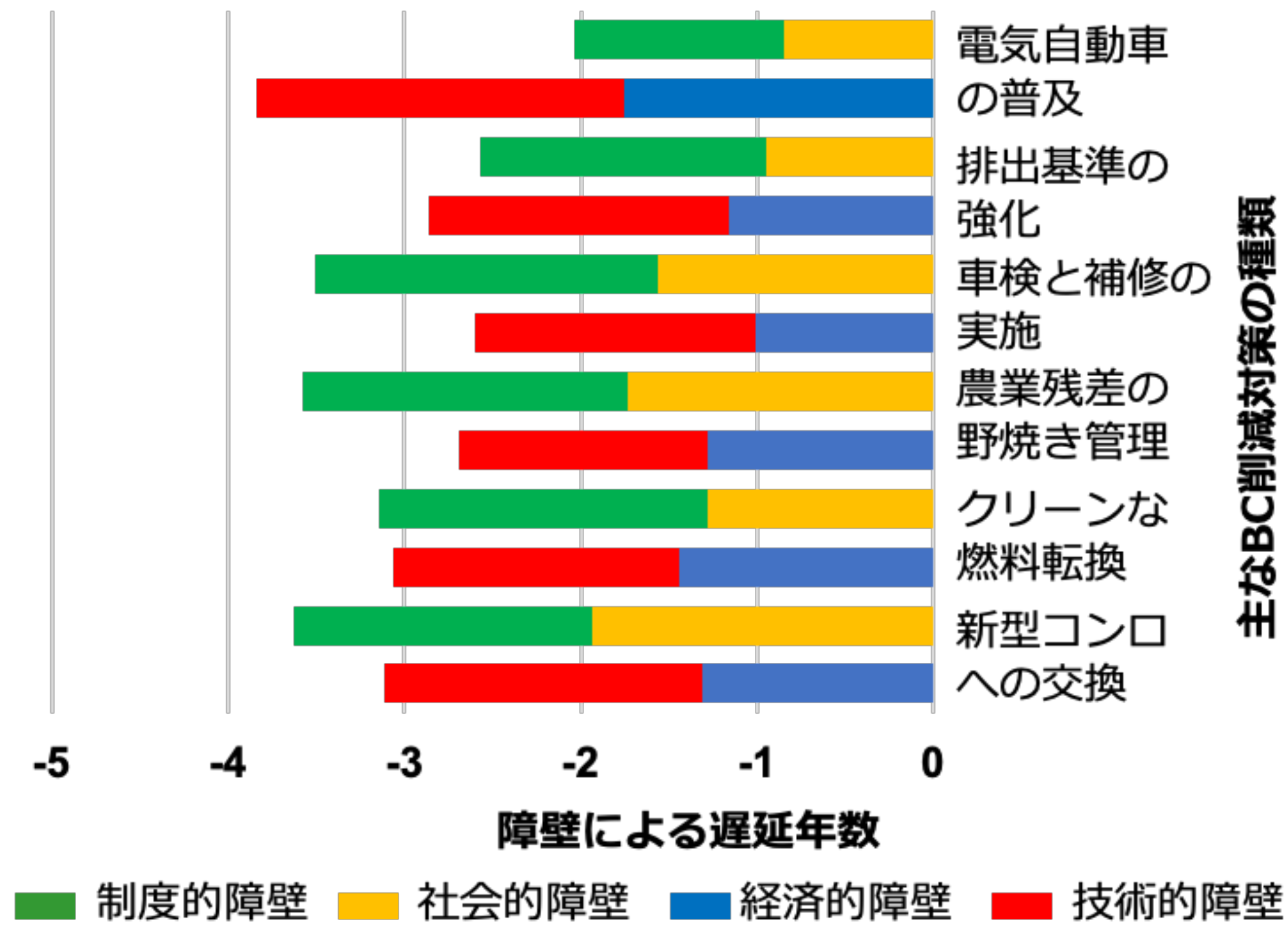
- アジア域のCH₄排出量はこの70年で約3.5倍増加。最大の排出国は中国、次いでインド（近年両国で約75%を占める）
- 最大の発生源は中国の石炭採掘 インドの家畜消化管内発酵が次ぎ、東南アジアの稲作の寄与分も大きい
- 脱炭素対策だけでは農業部門のCH₄排出が大きく残存する そこで利用可能なCH₄削減対策が2060年までに最大限導入されると想定した場合、2015年比で消化管内発酵は61%減、稲作は64%減と試算されたが、4割のCH₄排出が依然残存する



1.5°C目標に資するアジア域における早期削減シナリオと障壁を考慮した遅延削減シナリオの評価

(サブテーマ4および2, 1の連携による提言)

- 4つの障壁カテゴリー（経済・技術・社会・制度）に対し、削減対策に与える障壁影響度を4段階で定量的に評価した実現可能性フレームワークを開発し、タイを対象にBC削減策に対する障壁と遅延年数および障壁克服への費用を評価した
- タイ国が掲げる中長期温室効果ガス低排出開発戦略に沿ったシナリオに対し、BC削減策への障壁による対策遅延の影響を分析した結果、累積BC排出量は5.4%増加する一方で、累積CO₂排出量は1.3 %増に留まる



テーマ間連携：最適なGHGs・SLCFs緩和シナリオの探索に向けた案

- 狙い1) 対策の組み合わせ次第で相乗効果と相殺効果があり、国/部門/ガス毎に特徴が異なるため、主な組み合わせを網羅する
- 狙い2) 脱炭素対策（1.5℃目標に資するCO₂ネットゼロ排出）に加え、SLCFs早期大幅削減の可能性とその影響を見る
- 狙い3) “オーバーシュート無し”の1.5℃目標の実現や大気質の改善に対する、SLCFs早期大幅削減の貢献度を見る



「1.5℃目標に資するGHGs対策強化×除去対策強化×非エネルギー部門のSLCFs対策強化」の組み合わせ

シナリオ群	概要	シナリオコード	対策の組み合わせ 及び 対策強度(★)							
			大気汚染除去強化	エネルギー起源GHGs対策				非エネルギー起源SLCFs対策		
				発電部門 再エネ強化	全部門 省エネ強化	需要部門 電化強化	需要部門 水素強化	農業部門 対策強化	廃棄物部門 対策強化	Fガス部門 対策強化
レファレンス：主	なりゆき（BaU）	SSP2								
レファレンス：副	技術固定	Frozen								
除去対策のみ	EoP段階的削減	EPS	★							
	EoP最大削減	EPM	★★★★							
GHG対策強化	低炭素(2℃目標)	LC		★★	★★	★★		★	★	★
	脱炭素(1.5℃目標)	DD		★★★★	★★★★	★★★★	★★	★	★	★
GHG+SLCF強化	低炭素+SLCF早期大幅削減	LCS		★★	★★	★★		★★★★	★★★★	★★★★
	脱炭素+SLCF早期大幅削減	DDS		★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★★★	★★★★	★★★★
GHG+EoP	低炭素+EoP最大削減	LC-EPM	★★★★	★★	★★	★★		★	★	★
	脱炭素+EoP最大削減	DD-EPM	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★	★	★	★
最大削減 組み合わせ	低炭素+SLCF+EoP最大	LCS-EPM	★★★★	★★	★★	★★		★★★★	★★★★	★★★★
	脱炭素+SLCF+EoP最大	DDS-EPM	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★★★	★★★★	★★★★

テーマ間連携: 最適なGHGs・SLCFs緩和シナリオの探索の考え方

最適シナリオの探索における課題

- p [評価領域の問題] 部分最適（例えば地域）の総和が、全体最適（例えば全球）と必ずしも一致しない。
- p [評価指標の問題1] 何を評価軸（例えば費用最小化か効用最大化か）にするかによって、最適が異なる。
- p [評価指標の問題2] 気候影響、環境影響、社会経済影響のそれぞれで、評価に用いられる単位が異なる。
- p [世代間衡平の問題] 割引率の設定によって、現在と将来の世代間の最適の重みが異なる。

誰にとっての最適なのか？

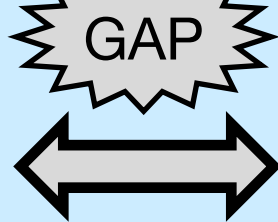


【基本方針】

最適シナリオの探索における評価方法を次のように定めて検討する。

1. 原則として、国際合意である「全球における2°C目標および1.5°C目標の実現」が主目標であるため、「地域の最適」よりも「**全球の最適**」を上位とする。

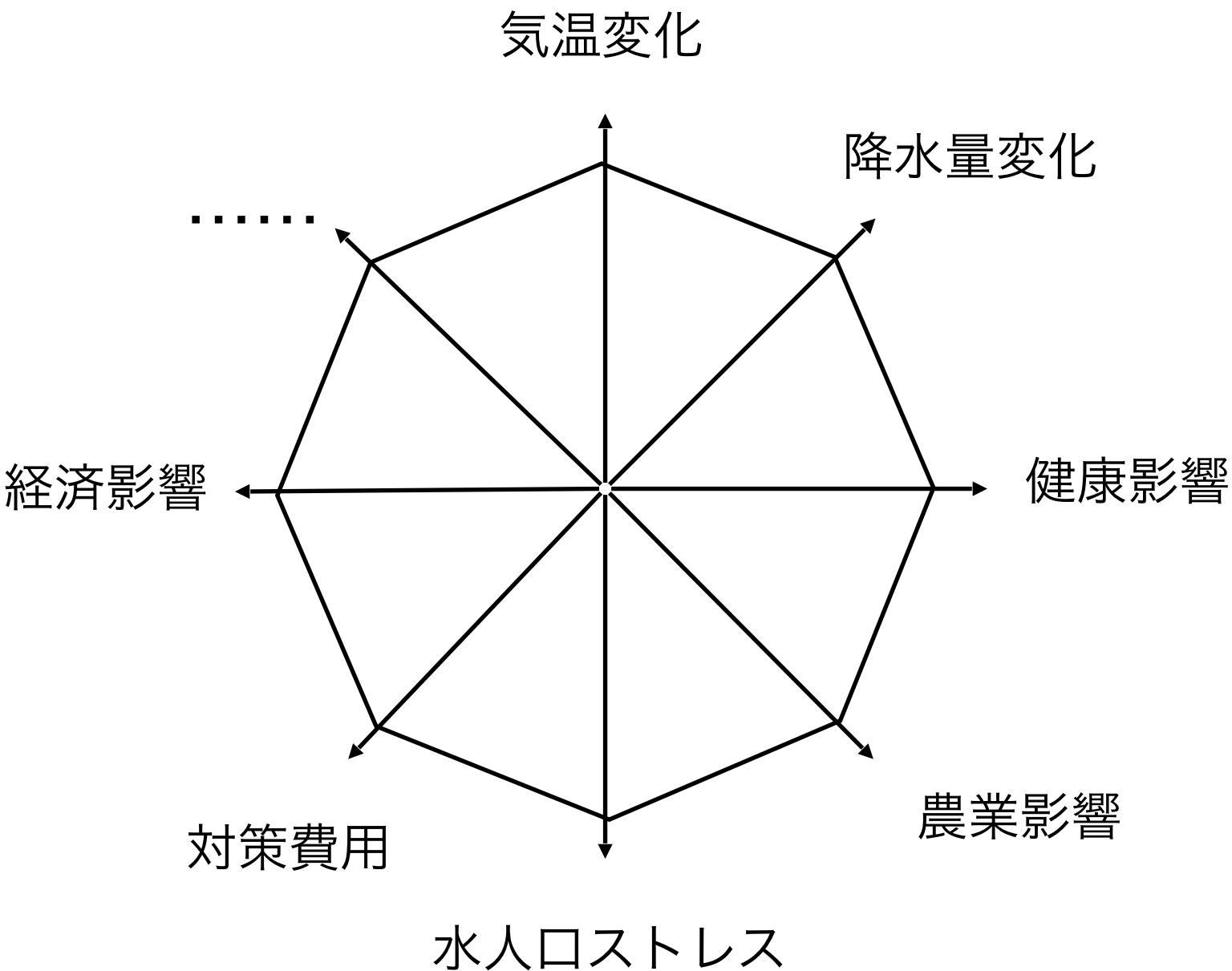
全球の最適の条件下
における地域Aの解



地域Aにとっての最適解

2. 気候影響、環境影響、社会経済影響で主要な評価軸（気温変化、健康影響変化、水ストレス人口変化、SLCF削減量変化など）を設定し、**影響評価軸の組み合わせの結果が最適になる解を探索する。**
3. 主要な評価軸について、**対策を取った場合と対策を取らなかった場合の差（又は変化率）**を用いて評価する。
4. ただし、SLCFs特有の状況として新興国・途上国（特にアジア域）の影響が大きいことが分かっているため、影響規模が甚大な地域がある場合は「**異なる地域間の重み**」を考慮した場合の解も検討する。
5. また、SLCFs特有の別の状況として早期大幅削減の優位性の検証があるが、世代間衡平性の観点から、影響評価の「**異なる時点間の重み**」は考慮しない。

イメージ図：主な評価軸を用いたレーダーチャートでシナリオ毎の違いを可視化する



IPCC AR6より「2050~2055年頃のCO₂ネットゼロ排出」及び「2025年頃に排出量をピークアウト」の議論が主軸であるので、例えば、2030年時点と2050年時点の2時点を考慮する。

研究の進捗状況と環境政策等への貢献

研究の進捗状況

【テーマ1】計画以上の進展がある

- 地域ごと・組成ごとの排出量をゼロに設定した感度実験を実施するためのデータ整備は計画通り
- その後の気候モデルによる感度実験およびその結果解析は中間評価時点までの計画以上に進捗
- スーパーコンピュータ「富岳」の公募申請に採択され、NICAM-Chemを用いた全球14kmの世界最高レベルの空間分解能でのエアロゾルシミュレーションを実施できたことは計画以上

【テーマ2】計画通り進展している

- 統合陸域シミュレータILSへの健康影響評価・農作物影響・洪水渇水影響の各モジュールの搭載を推進
- 各セクターごとの影響評価及びAIによるダウンスケーリング・バイアス補正手法の整備が順調に進捗

【テーマ3】計画通り進展している

- 1.5°C目標に資するSLCFs早期削減・遅延削減シナリオの影響を分析して早期大幅削減シナリオ案の探索を推進
- 経済的・技術的・社会的・制度的な障壁を考慮した実現可能性フレームワークの開発を推進

環境政策等への貢献

- 資料提供：IPCCインベントリタスクフォースにおけるSLCFインベントリ専門家会合／EANET第4次東アジアにおける酸性雨の状況に関する評価報告書／令和4年度環境省第1回大気モニタリングデータ解析ワーキンググループ会合 等
- UNEP/CCAC, UNEP/APCAP科学委員会委員 等

研究成果の発表状況等

- **S-20アウトリーチ活動：ウェビナーシリーズ**

「気候変動と大気汚染 —短寿命気候強制因子の影響と緩和—」公開ウェビナー

- ▶ サブテーマリーダーが最低1回担当

- ▶ できるだけ一般の方々が参加しやすい曜日・時間として金曜日19:00～20:00をデフォルト

第1回：2022年3月18日 竹村

第2回：2022年10月21日 芳村

第3回：2022年12月16日 花岡

第4回：2023年5月12日 須藤

- ▶ Zoomウェビナーを利用

YouTubeライブでも同時配信 ➡ アーカイブとしてS-20ウェブサイトから事後視聴可能

<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/climate/S-20/webinar.html>

＊ S-20各テーマとも年間直接経費3,000万円未満 ➡ アウトリーチ活動実施により中間・事後評価でプラス評価

- 査読付き論文：38件 その他の論文：13件 口頭発表：116件

- 受賞：2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・科学技術振興部門）

- 「国民との科学・技術対話」の実施（上記S-20ウェビナー以外）：26件

- ブループラネット賞記念講演会を主催：V. Ramanathan教授（スクリップス海洋研究所）