

環境研究総合推進費 課題調査型研究 2FS-2001
(JPMEERF20202F01) 2020年度

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
適応・緩和策推進のための調査研究

Preliminary Research on Adaptation and Mitigation
to Climate Change and Environmental Impacts
Caused by Short-Lived Climate Forcers (ACCES)

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：

（2－5）短寿命気候強制因子による気候変動・水循環等への影響に対応する
適応・緩和策推進に資する研究

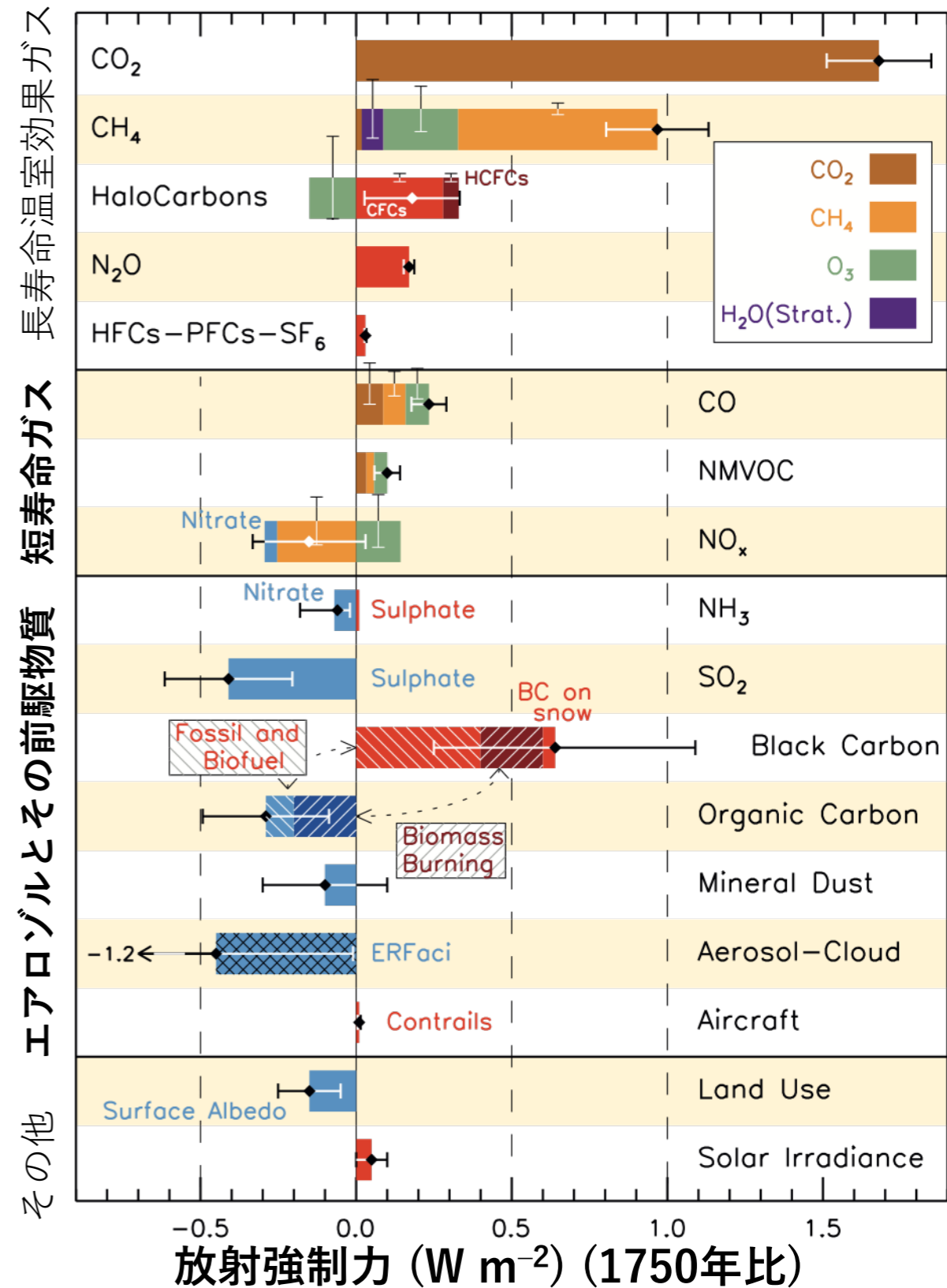
研究代表者 **竹村 俊彦** 九州大学 応用力学研究所 主幹教授
研究分担者 **芳村 圭** 東京大学 生産技術研究所 教授
花岡 達也 国立環境研究所社会システム研究センター 主任研究員
(現在：国立環境研究所社会システム領域地球持続性統合評価研究室 室長)

研究背景 (1)

- 短寿命気候強制因子 (SLCFs) 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**
 - ▶ SLCFsは短寿命であるため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大きい
 - ▶ 気候変動を引き起こすメカニズムが複雑
 - ▶ SLCFs自体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策定が決定
 - ▶ モントリオール議定書キガリ改正を契機としたCCAC/Efficient Cooling Initiative: HFCs削減に関する日仏ロードマップ記載

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

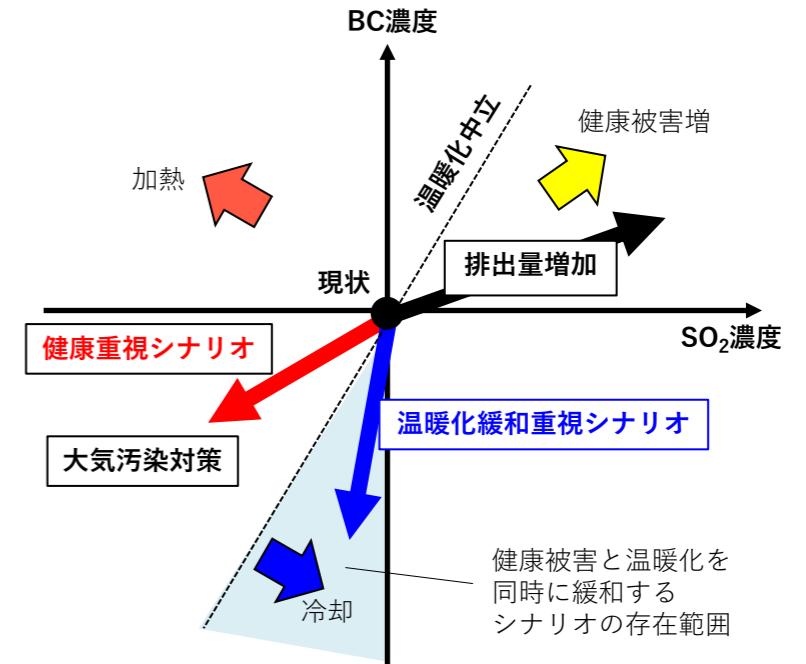
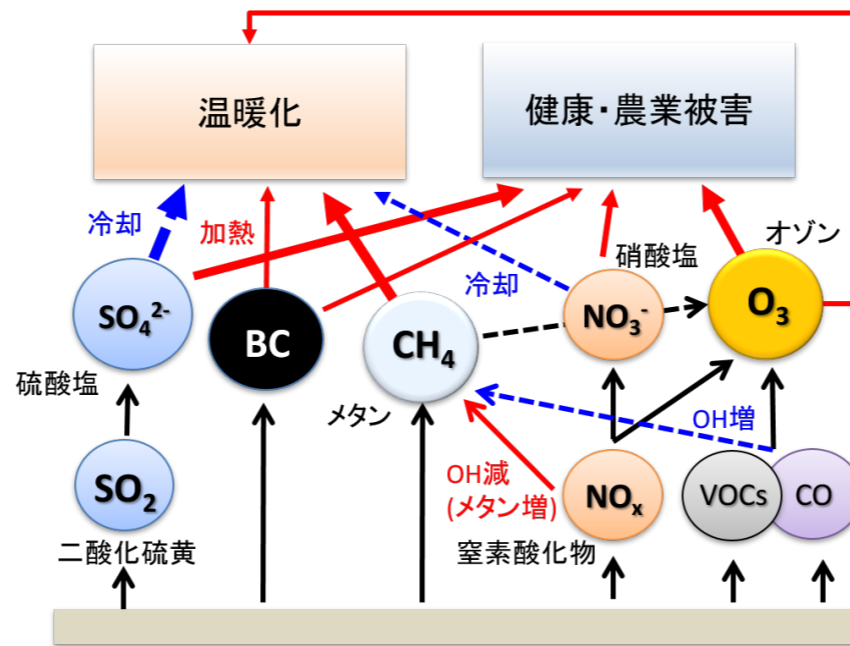
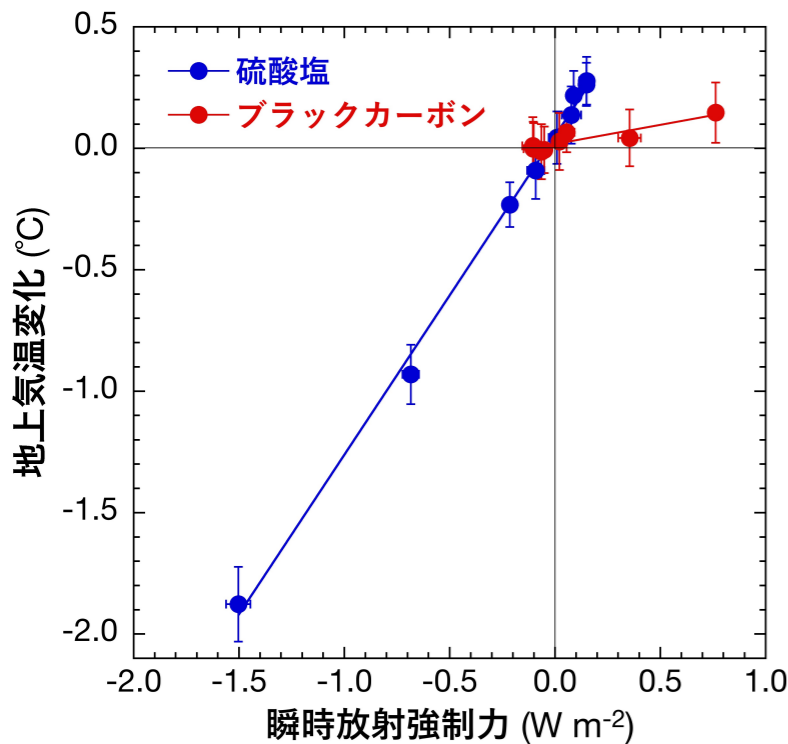


(IPCC AR5, 2013)

研究背景 (2)

環境研究総合推進費戦略研究S-12の主要研究成果

- 自ら開発してきた数値モデルを用いたSLCFs組成別の気候・環境影響の解明
 - ▶ ブラックカーボン (BC) 排出量削減による気温低下は従来の推定よりも小さい (左図)
 - ▶ 窒素酸化物の削減はオゾン減少 (寒冷化) の一方 メタン増加と硝酸塩エアロゾル減少 (温暖化) をもたらす (中図)
 - ▶ SLCFsによる気候変動を考慮した農業・水循環・健康影響評価のツール整備と初期解析
- SLCFsの多様な影響を考慮した緩和シナリオ策定の重要性の指摘 (右図)
 - 全球平均では再生可能エネルギー強化・民生運輸電化促進・汚染除去対策強化継続を伴う2°C目標の排出量削減シナリオが最適



事後評価

課題全体：S テーマ1：A テーマ2：A テーマ3：S テーマ4：A

研究開発目的・研究目標

以下の研究を戦略的研究開発（Ⅰ）にて実施することを目指して必要な検討・現状分析および事前準備を行う

- 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による地域ごと・組成ごとの気候変動・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
- SLCFsの気候変動・環境影響の評価に関連する数値モデルが成熟しつつある



- 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）および国内政策に対するSLCFs最適削減に関する定量的な科学的知見の提供

研究開発内容：S-20テーマ構成検討

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

気温

降水量

極端
現象

ダウンスケーリング

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

健康

農作物

洪水
渇水

エアロ
ゾル¹⁾

微量
気体²⁾

SLCFs

地域ごとのSLCFs
による気候変動・
環境影響緩和に関
する政策のための
科学的知見の創出

最適緩和シナリオ

統合評価モデル

インベントリ

パリ協定

国内政策

IPCC

CCAC

APCAP

テーマ3

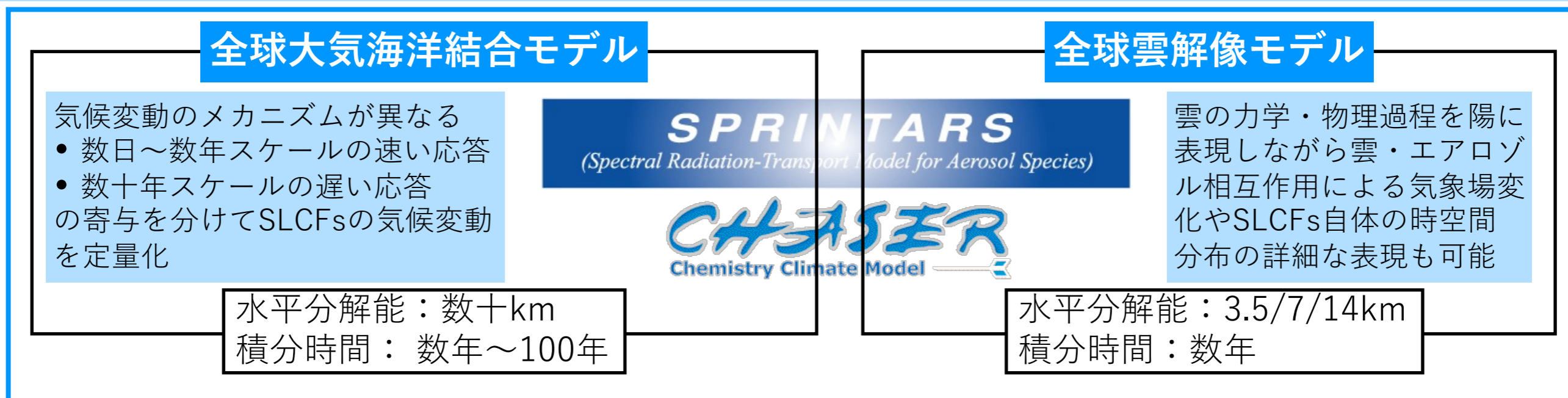
短寿命気候強制因子による環境
影響の緩和シナリオの定量化

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

研究成果1-1：S-20テーマ1構成検討

短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価

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各種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



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

シナリオ・排出量データ

テーマ2・テーマ3

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

研究成果1-1：S-20テーマ1サブテーマ構成検討

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・硝酸塩（前駆物質含む）

大気海洋結合モデル

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
結果相互比較

全球雲解像モデル

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

サブテーマ4

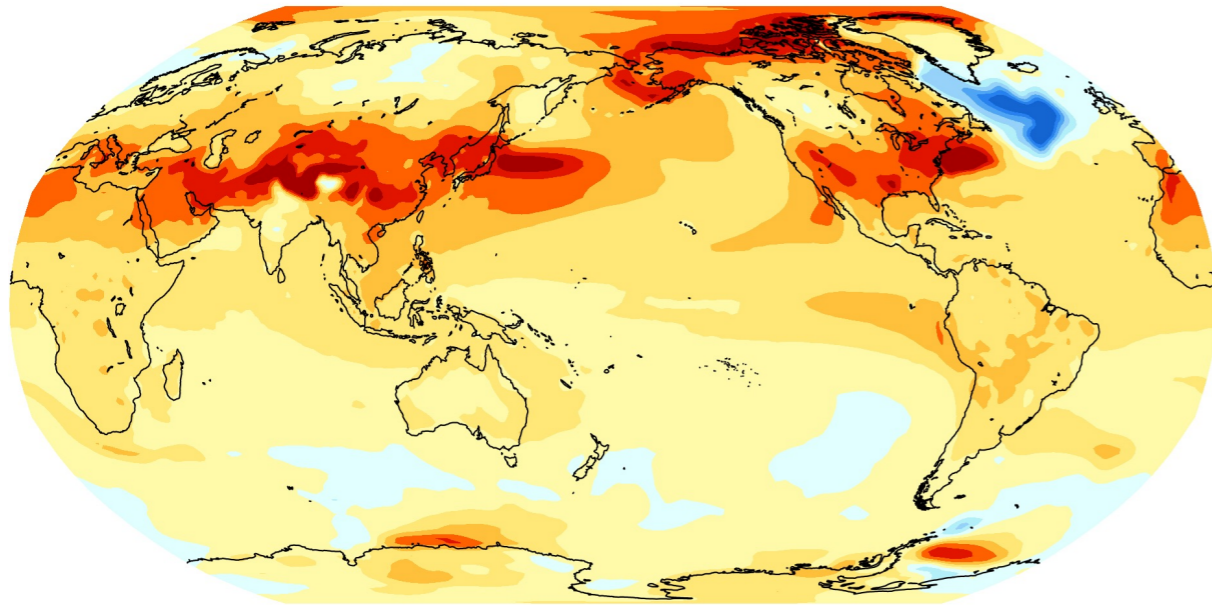
短寿命気候強制因子による大気水循環変動の定量的評価

- 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

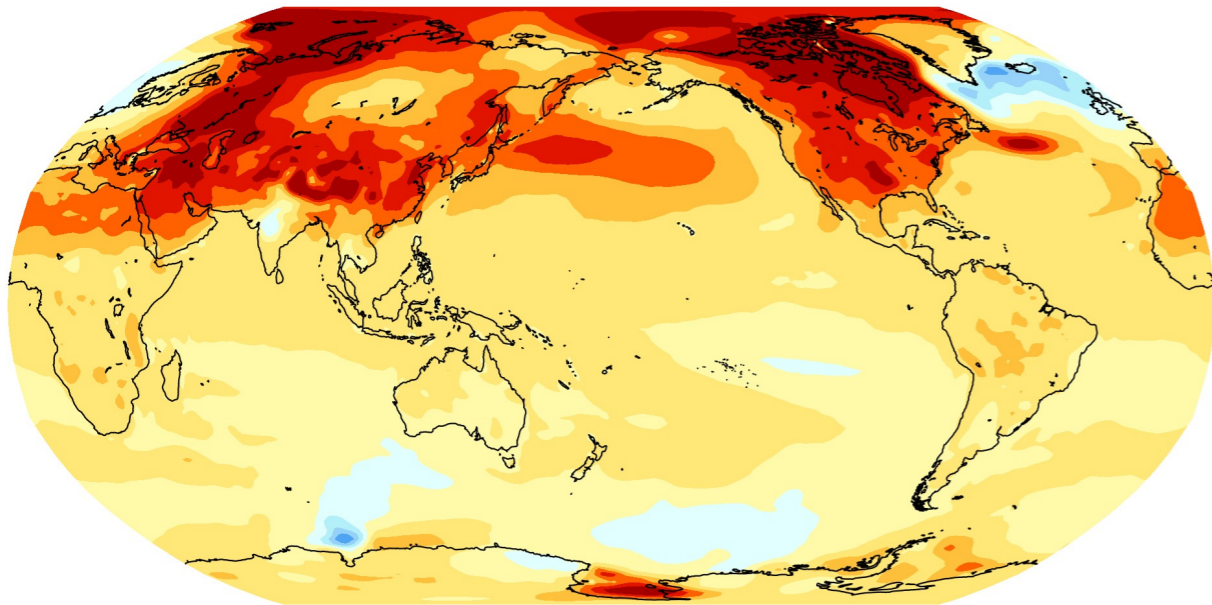
研究成果1-2：SLCFs気候変動予備実験・解析

硫酸塩エアロゾル減少による気温変化のCO₂濃度依存性

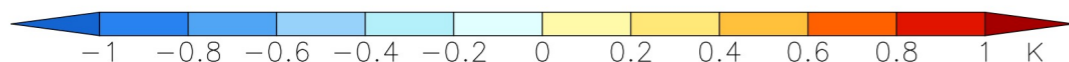
Δ surface air temperature (Sulx00)



Δ surface air temperature (Sulx00 CO2x2)



MIROC-SPRINTARS



MIROC-SPRINTARS大気海洋結合モデル実験

- (1) CO₂濃度369ppmで燃料起源SO₂排出量が
(a) 現在 (b) ゼロ
- (2) CO₂濃度738ppmで燃料起源SO₂排出量が
(a) 現在 (b) ゼロ

年平均地上気温変化

(上) 実験1b-1a (下) 実験2b-2a

(Takemura, Sci. Rep., 2020,

[doi:10.1038/s41598-020-78805-1](https://doi.org/10.1038/s41598-020-78805-1))

- 近い将来に想定される硫酸塩エアロゾルの濃度低下に伴う気温上昇は、同量の濃度低下であっても、CO₂濃度が高い状態の方が大きくなることを示す。
- その傾向は北半球中・高緯度で強く、雪氷アルベドフィードバック・水蒸気フィードバックが寄与

➡ 大気汚染対策を実施する場合に温室効果ガス濃度上昇を同時に抑制しなければ地球温暖化を加速度的に進行する

◆ **プレスリリース実施** (環境省/ERCAへ報告済)

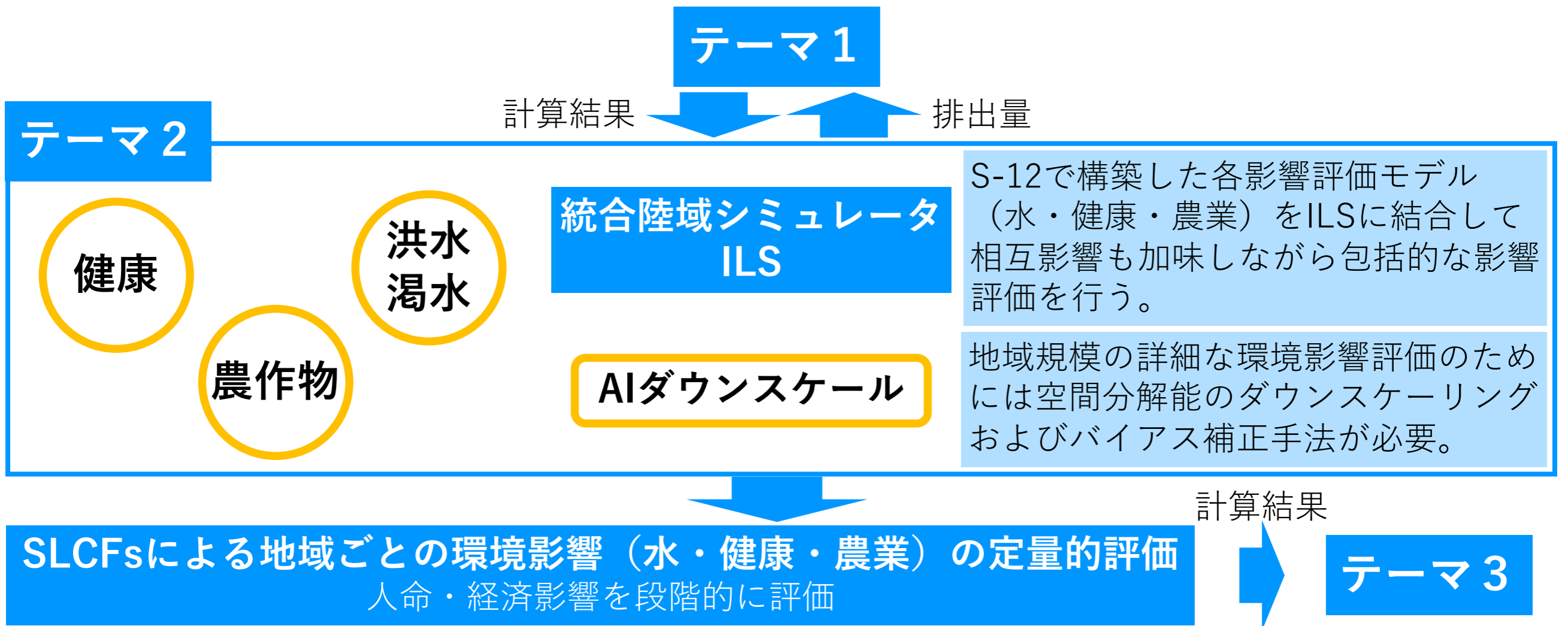
➡ **国内計5紙掲載**

国際発信：AAASニュースサイト

研究成果2-1：S-20テーマ2構成検討

短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価

開発してきた健康・農作物・洪水渇水影響に関する評価モデルを用いたSLCFsによる環境影響の評価



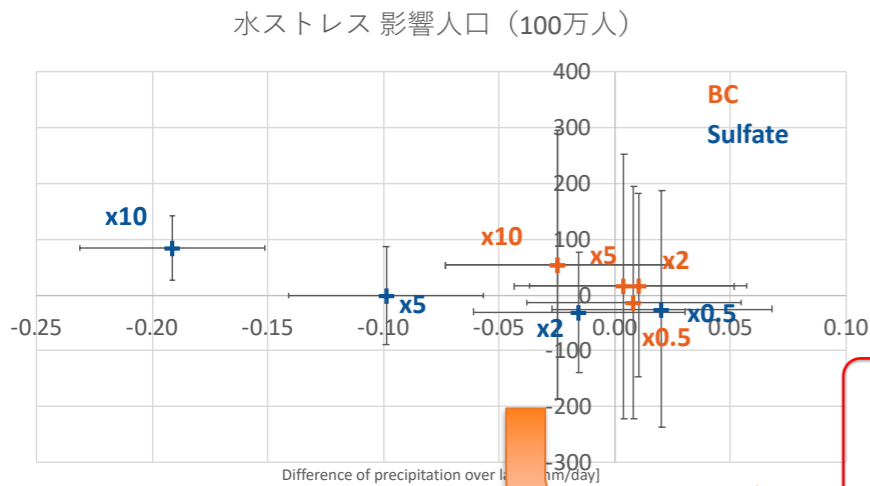
テーマ間連携

- テーマ1により計算されたSLCFsの効果を含めた気候変動予測結果を利用
- テーマ1へ陸上からのSLCFs排出量に最適な値を提供
- 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

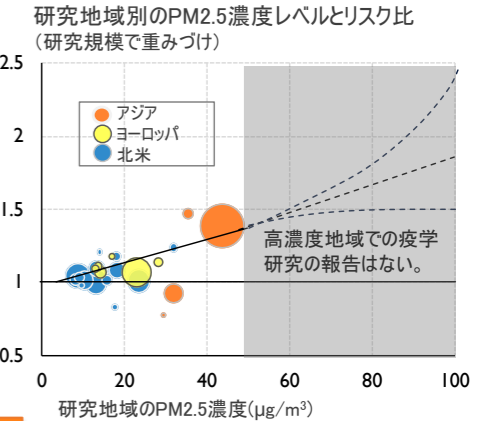
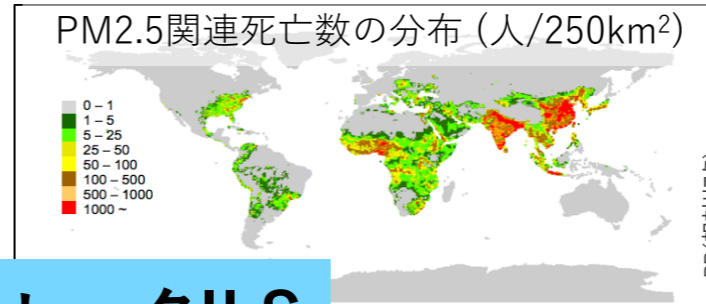
研究成果2-1：S-20テーマ2サブテーマ構成検討

サブテーマ1 SLCFsによる陸水変動の定量的評価

サブテーマ2 SLCFsによる健康影響の定量的評価



水質・衛生状態
による感染症等
の取り扱い

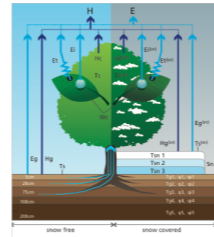


統合陸域シミュレータILS

基本理念

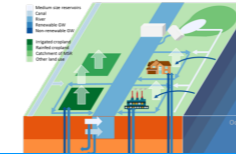
- 最新のスタンドアロンモデルを最小限のコード改変で移植
- それぞれのモデルを任意の解像度・時間ステップで動かしながら必要に応じてカプラがデータを送受信・リグリッド

1次元化した
陸面過程モデルMATSIRO
Takata et al. (2003), Nitta et al. (2014)



その他

- 土砂輸送モデル
- 水温・水質モデル
- 地下水モデル
- 斜面流出モデル
- 治水ダム操作モデル
- などを鋭意開発中



汎用カプラ
(Jcup; Arakawa et al., 2011)

モデル結合

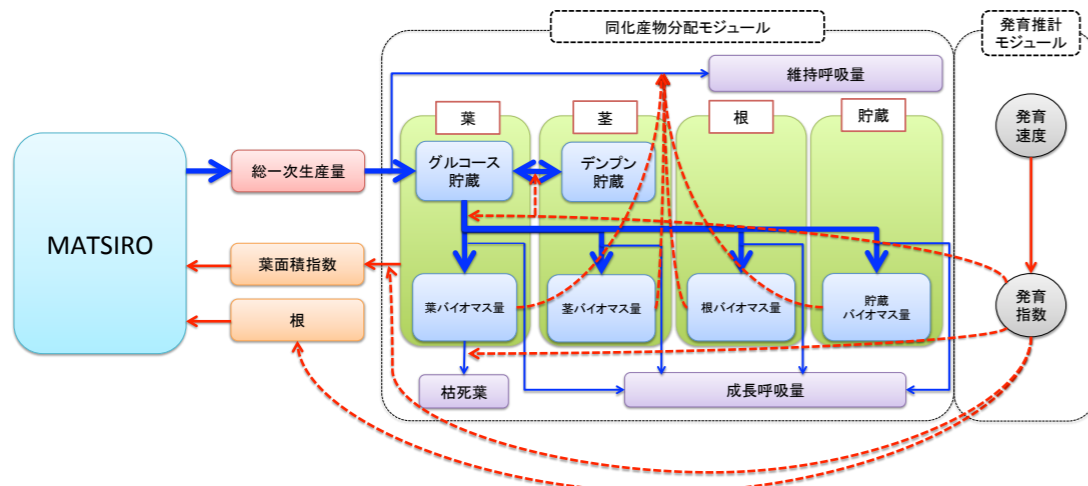
モデル結合



湿地・水田過程の高度化
(メタンの取り扱い)

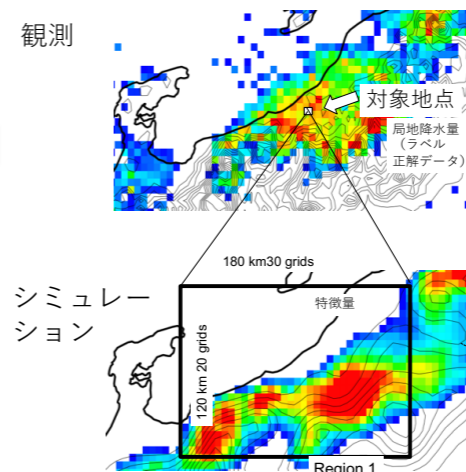
サブテーマ3 SLCFsによる農作物影響の定量的評価

サブテーマ4 地域スケールでの影響評価のための 気象データダウンスケーリング



モデル結合

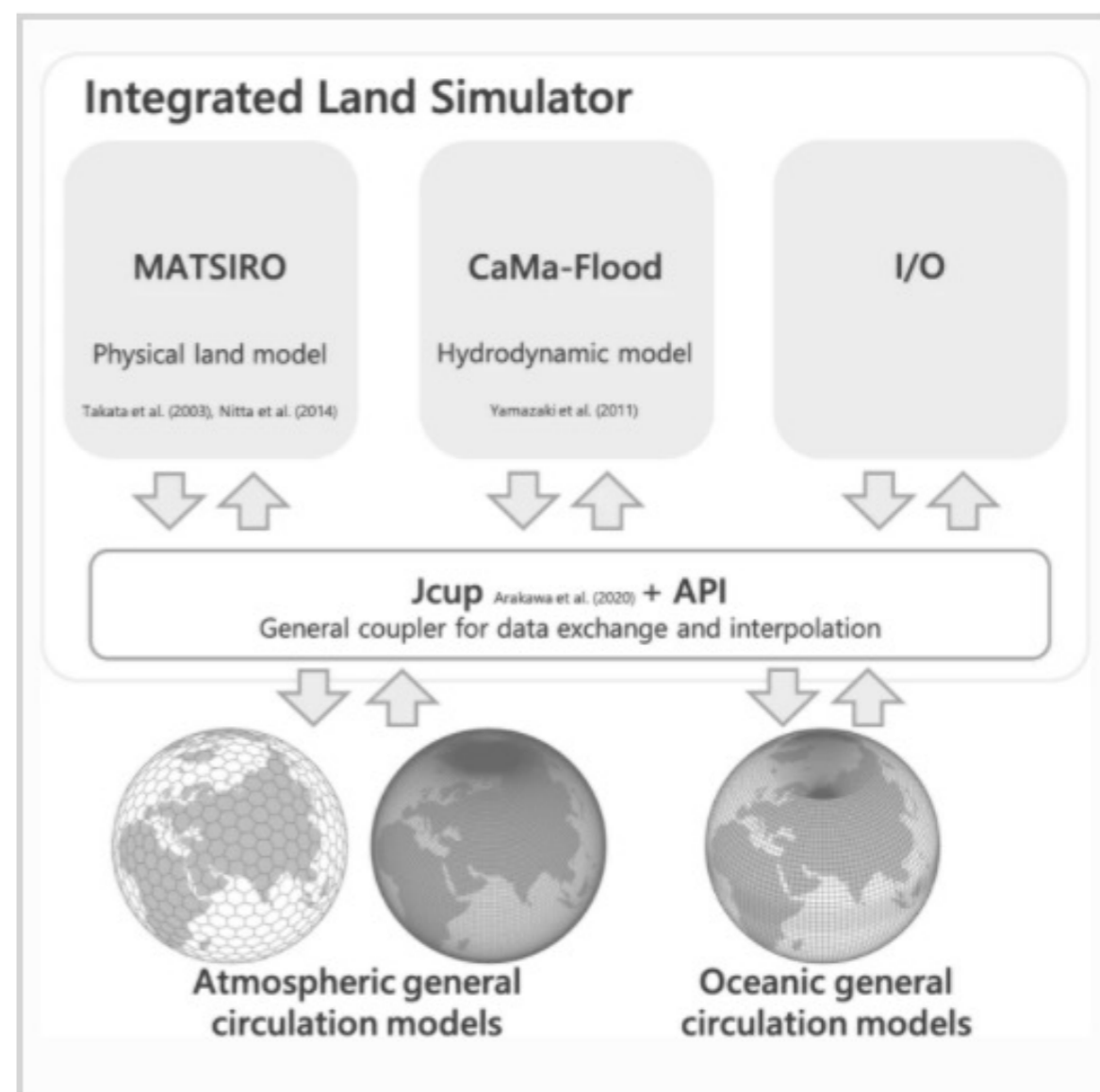
入力データ改良



テーマ1による
SLCFs実験結果
入力

研究成果2-2：モデル開発とバイアス補正手法構築

- S-20テーマ2における影響評価で取り扱うセクターの検討
 - セクター検討に基づいた水文モデルの改良・構築
 - 陸域を構成する複数の要素モデルを汎用カプラーJcupで結合してMPMD (Multiple Program Multiple Data)方式で実行
 - 陸面モデルMATSIRO、河川氾濫原モデルCaMa-Flood、独立したファイル入出力用コンポーネントを結合
- ➡ S-20テーマ2にて健康影響や農作物への影響を評価するモデルなどを追加予定



- 機械学習を用いた気候モデル出力のバイアス補正手法の試行・最適化
- 気象庁MSM-GPVによる降水量データ（空間解像度約5km）と同期間のレーダーアメダス降水量データ（空間解像度約1kmをMSM-GPVと同じ5kmにアップスケール）を利用
- ➡ MSM-GPV降水量のバイアス補正を行うための機械学習アルゴリズムを学習させた

研究成果3-1：S-20テーマ3構成検討

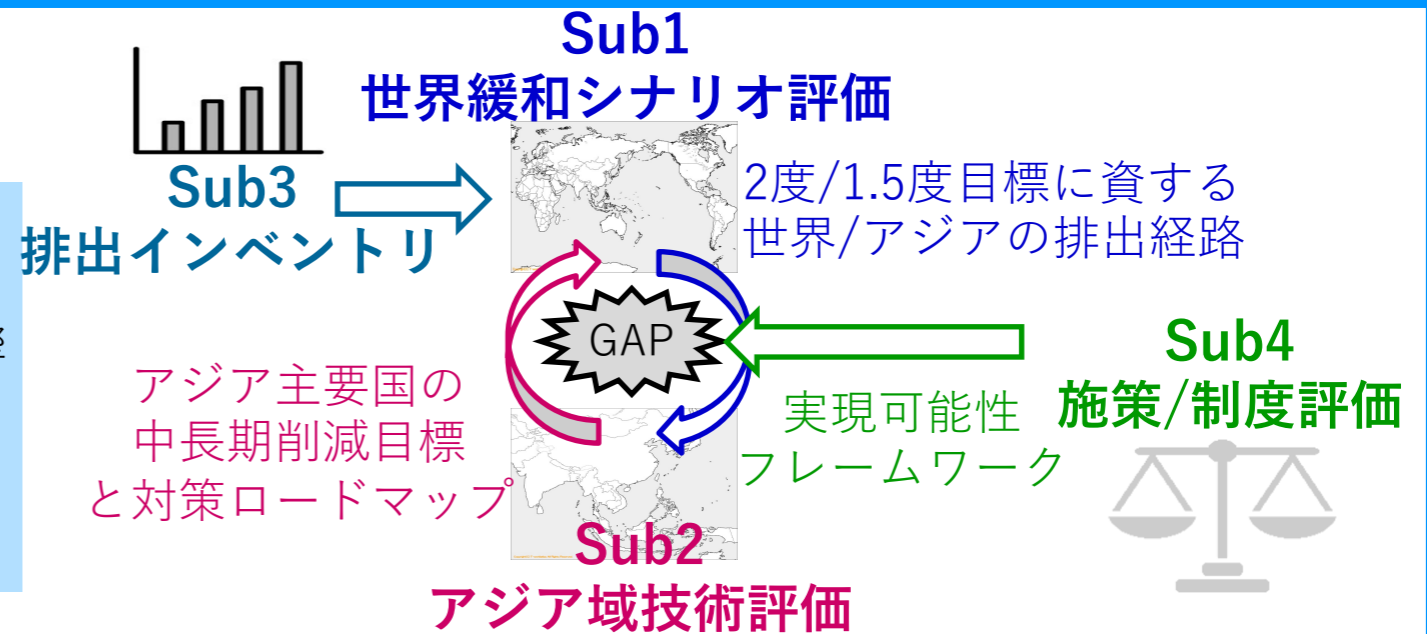
短寿命気候強制因子による環境影響の緩和シナリオの定量化

2度目標/1.5度目標および環境影響の低減を考慮したSLCFs・GHGs最適緩和シナリオの策定および地域別・ガス種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

テーマ3

S-12を踏まえて以下を分析する研究構成

- 最適な早期大幅緩和シナリオの探索
- 2度/1.5度目標を実現する対策費用と経済影響
- 対策ロードマップと技術的潜在削減量
- 技術・制度的な課題とSLCFs緩和策の実現性
- 脱炭素化とSLCFs緩和策の相乗・相殺効果



SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの定量的評価

国別・ガス種別の中長期排出経路の結果

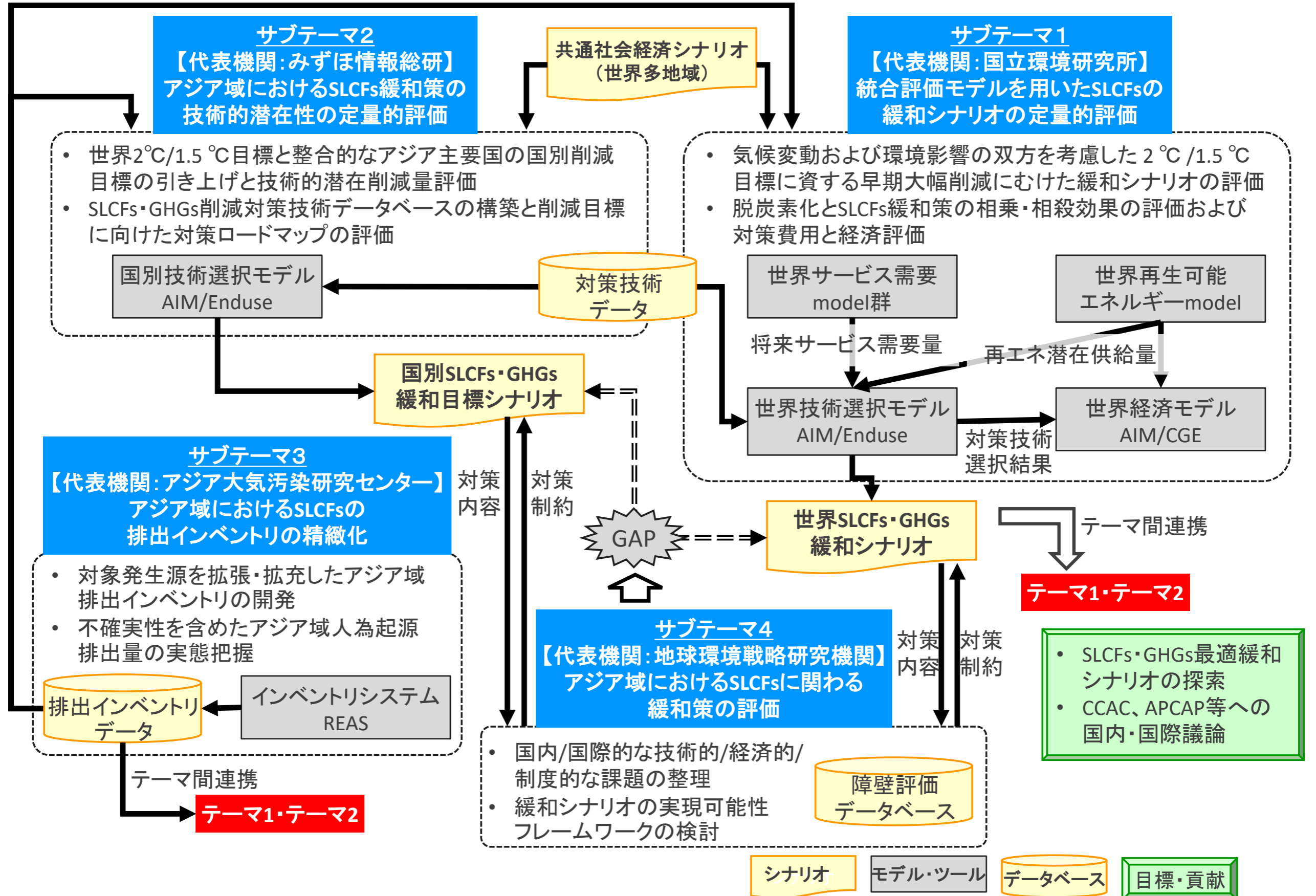
気候影響・環境影響の評価結果

テーマ1・テーマ2

テーマ間連携

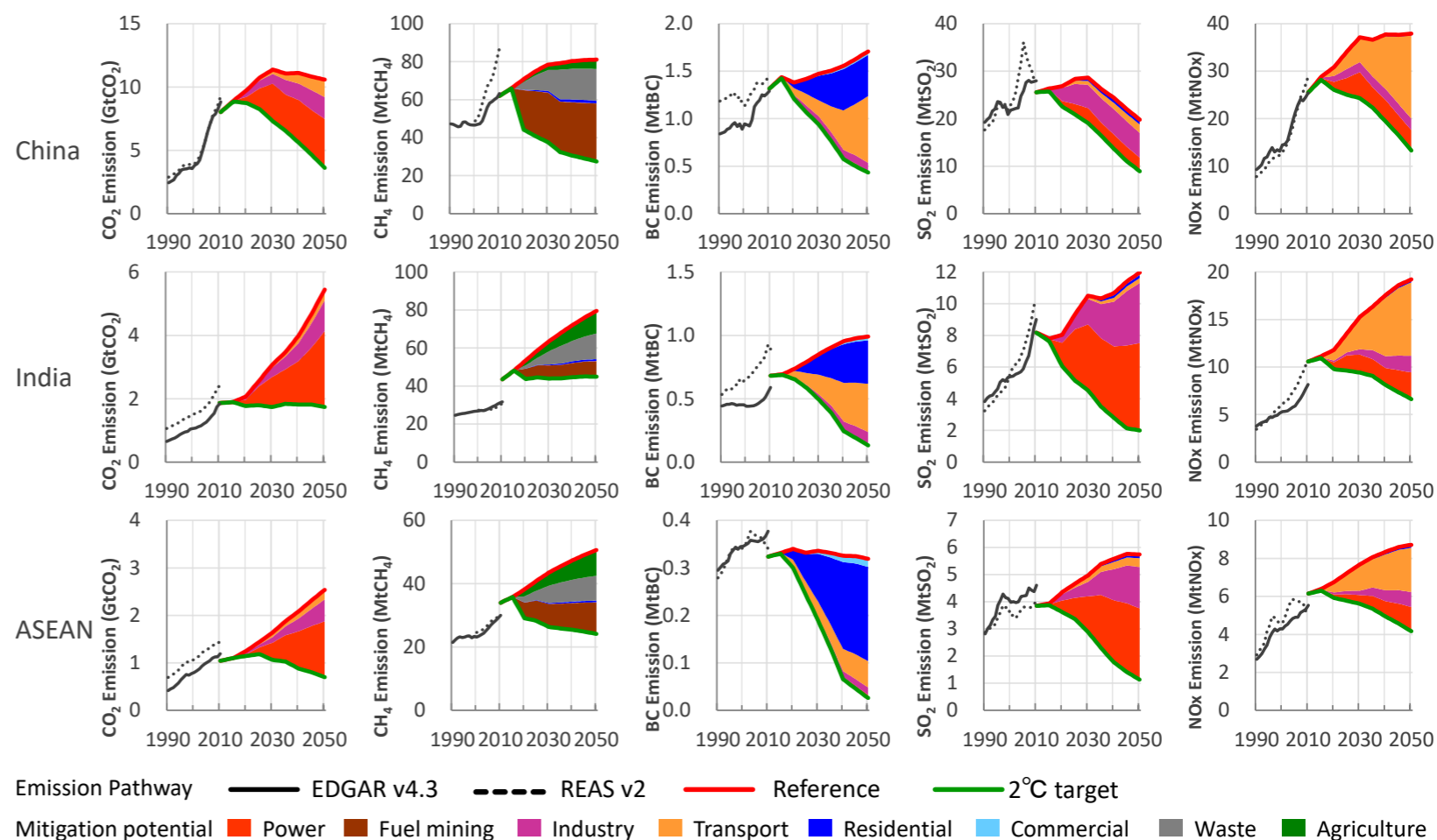
- テーマ1による気候影響評価を考慮したSLCFsの早期大幅緩和シナリオの探索
- テーマ2による環境・健康影響評価を考慮した効果的なSLCFs緩和シナリオの探索
- テーマ1およびテーマ2とのSLCFs・GHGs最適緩和シナリオの共有

研究成果3-1：S-20テーマ3サブテーマ構成検討



研究成果3-2：SLCFs緩和策の技術情報整備

- 地域別・ガス種別・部門別の潜在削減量の評価：アジア域における地域偏在性の特性分析
 - … 2度目標を達成しながら同時にSLCFs削減を進める最適緩和探索に向けた予備的シナリオ実験
 - CH₄は主要な排出削減部門や排出削減傾向が他のガス種と大きく異なる
 - アジア域の中でも国によって主要な排出削減部門が異なる



アジア域における地域別・ガス種別の排出経路と部門別の潜在削減量の地域偏在性の評価

➡ S-20において新たに1.5度目標を実現するような早期大幅排出削減を評価

- モントリオール議定書キガリ改正の評価に向けたAIM/Enduseモデルの改良・拡充準備
 - HFCsの回収・破壊処理データ収集・整備
 - 非エネルギー部門のCH₄等の削減対策技術の情報収集
- ➡ モジュール設計・開発

SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の在り方

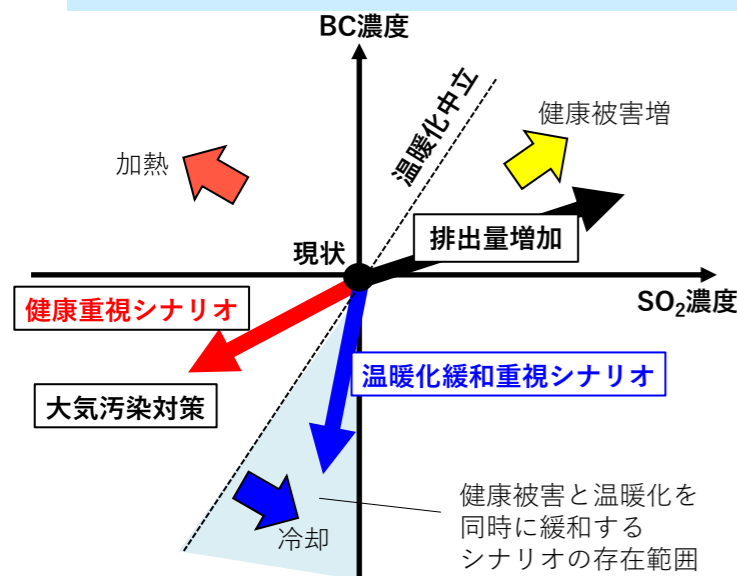
最適シナリオの探索における課題

- [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。
- [評価指標の問題] 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。
- [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。

【基本方針】

本課題は、全球と地域を同時に取り扱い、また気候影響、環境影響、社会経済影響を多面的に取り扱い、それぞれの評価で用いられる単位も異なるため、画一的な手法による「最適」の議論は難しい。また、短寿命であるSLCFs削減に伴う顕著な特徴として、地域偏在性も考慮する必要がある。そこで、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、最適シナリオを検討する。

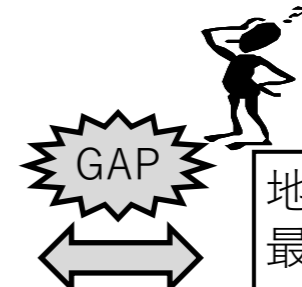
1. 原則として、国際合意である「全球における2°C目標および1.5°C目標の実現」が主目標であるため、「地域の最適」よりも**「全球の最適」を上位とする**。
2. 気候影響、環境影響、社会経済影響で主要な評価軸（気温変化、健康影響変化、水ストレス人口変化、SLCF削減量変化など）を設定し、**影響評価軸の組み合わせの結果が最適になる解を探索する**。
3. ただし、SLCFs特有の状況として新興国・途上国（特にアジア域）の影響が大きいことが分かっているため、影響規模が甚大な地域がある場合は**「異なる地域間の重み」を考慮した場合の解も検討する**。
4. また、SLCFs特有の別の状況とし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**。



S12における検討例。
本課題では評価軸を、さらに展開していく。
(例えば、レーダーチャート方法)

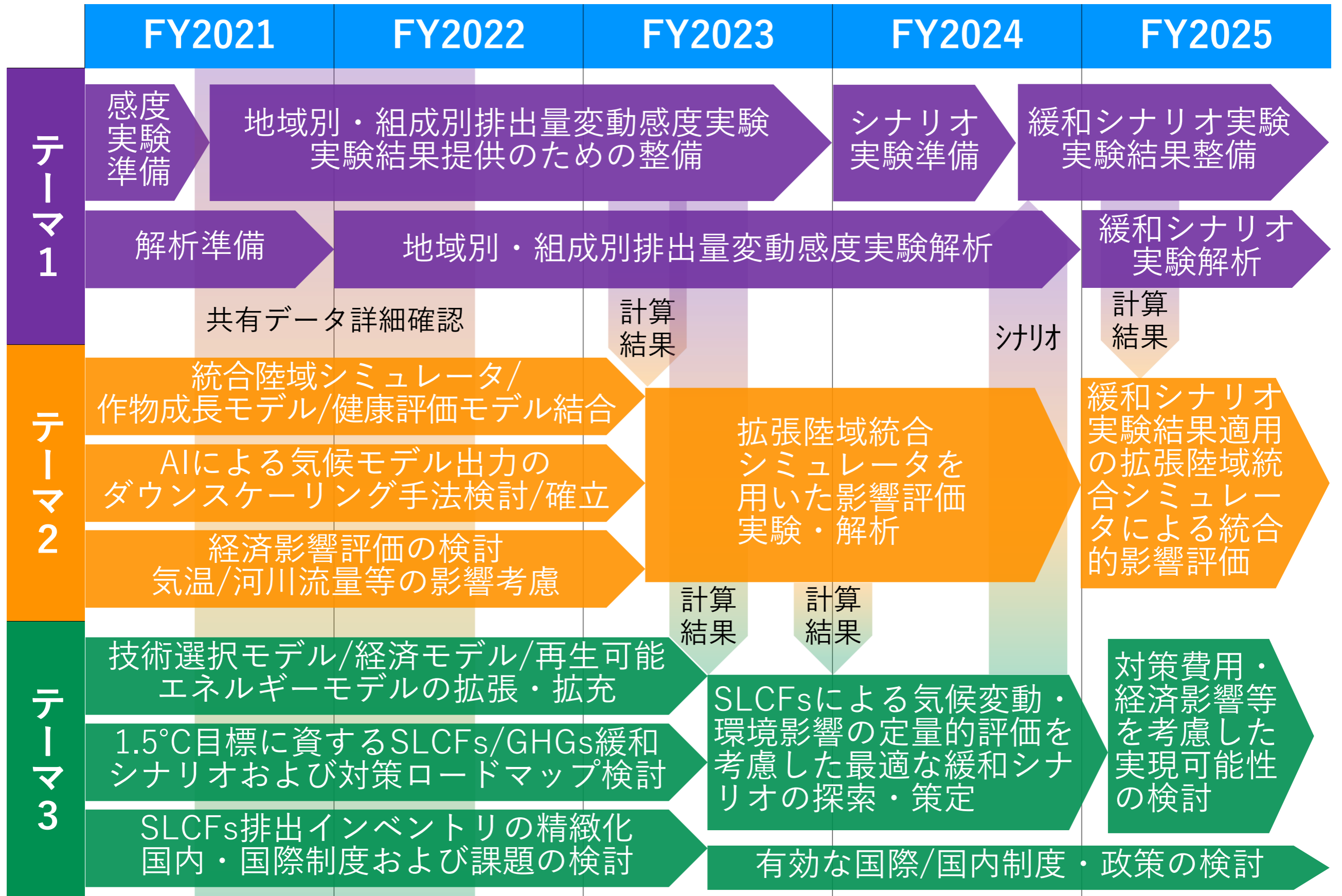
地域にとっては最適（ファースト・ベスト）ではなくとも、上述の方針の範囲の中での**セカンド・ベスト**の探索は重要。また、セカンド・ベストの探索のためには、**「全球最適」と「地域最適」のギャップ**を明らかにすることは、一つの重要な研究要素と考えられる。

全球の最適の条件下における地域Aの解



地域Aにとっての最適な解

S-20ロードマップ



環境政策等への貢献

- S-20の研究成果による国際的枠組（IPCC AR7, IPCC TFI, CCAC, APCAP等）および国内政策に対するSLCFs最適削減に関する定量的な科学的知見の提供を目指す基盤を構築
- Asia Pacific Clean Air Partnership (APCAP)
第2期Science Panel Member（竹村）
 - ➔ 政策要綱を2020年に執筆・公表
“Co-control of air pollution and surface air temperature”
各国の大気環境・気候変動に関わる政策決定者へ向けて、
SLCFsに関する新しい科学的知見についてメッセージ発出
 - ➔ S-20の研究成果による国際貢献を効果的に行う基盤を構築
- Climate and Clean Air Coalition (CCAC)
Scientific Advisory Panel委員（花岡 2021～）
 - ➔ S-20の研究成果による国際貢献を効果的に行う基盤を構築

研究目標の達成状況

目標を大きく上回る成果をあげた

- 戦略FS検討専門部会委員・アドバイザー・環境省担当者と十分な議論を行い、S-20の研究計画を詳細に構築した結果、テーマ間連携を取りながらS-20開始時から研究をスムーズに遂行できている。
- サブテーマ1では、S-20へ向けた試験的な実験を実施し、興味深い科学的知見が得られたことから、論文として執筆・公表してプレスリリースを行ったところ、多くの新聞に掲載されるような注目をされたことは、当初の目標を大きく上回る。また、CCACの政策要綱を執筆して各国政策決定者等に公開したことも、当初の目標を大きく上回る。
- サブテーマ2では、統合陸域シミュレータILSを用いた洪水予測システムに関して、JAXA理事長表彰を受けたことは当初の目標を上回る。また、参加者100名超の陸にまつわる様々なプロセスに関する国内ワークショップを開催して、今後の協力体制を築くことができた。
- サブテーマ3では、HFCsだけではなく、非エネルギー部門の排出量が多くを占めるメタンを含めたモジュールの開発・拡張を進めることができたことは当初の目標を上回る。

研究成果の発表状況

査読付き論文	3件
査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	7件
「国民との科学・技術対話」の実施	4件
マスコミ等への公表・報道等	6件
本研究に関連する受賞	2件

< 査読付き論文 >

- T. TAKEMURA: Scientific Reports, 10, 21748, doi:10.1038/s41598-020-78805-1 (2020),
“Return to different climate states by reducing sulphate aerosols under future CO₂
concentrations” → 新聞5紙に掲載
- 他2編

< 受賞 >

- 竹村俊彦：Highly Cited Researchers, Clarivate (2020)
- 芳村圭：JAXA理事長表彰（社会貢献分野）（2020）