環境研究総合推進費　戦略的研究開発課題（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・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

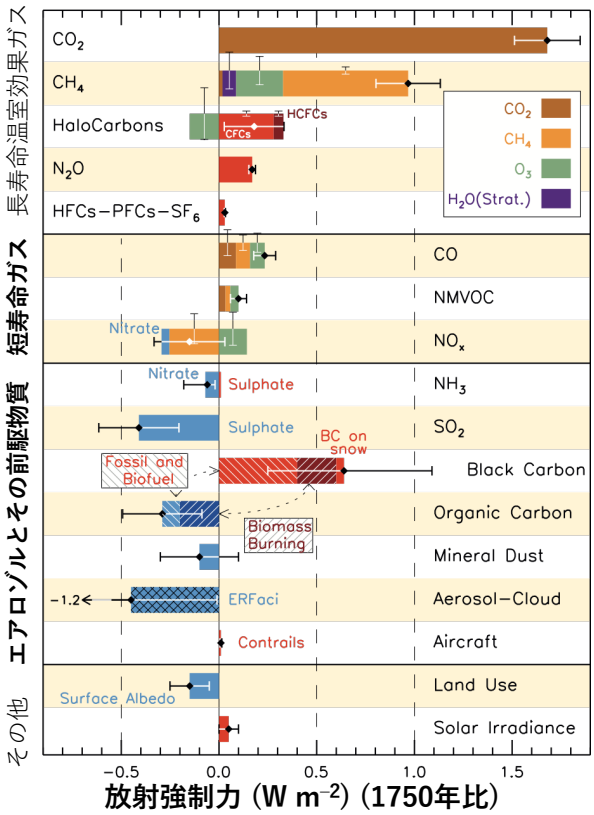
テーマ３リーダー　**花岡 達也**　国立環境研究所　主任研究員




## 人為起源短寿命気候強制因子に関する研究の現状

- 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**

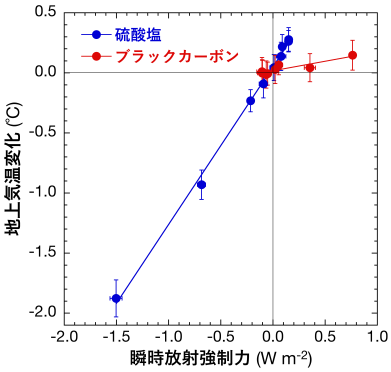


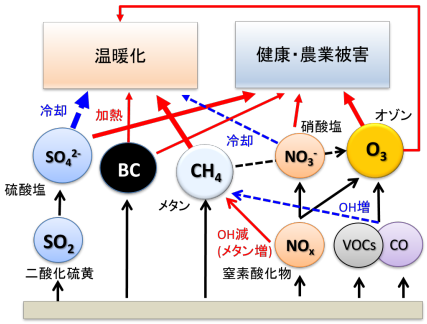

（IPCC AR5, 2013）

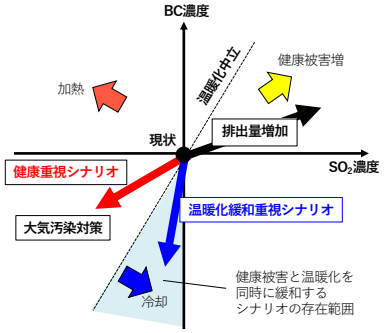
# 先行研究：環境研究総合推進費戦略研究S-12

## 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



# 本プロジェクトの目的

- 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

# 本プロジェクトの構成

**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２**
短寿命気候強制因子による
地域規模の環境影響評価

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

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



# テーマ１の概要

## 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**

**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応答
- 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：3.5/7/14km
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　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

# テーマ１のサブテーマ構成

**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・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**

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



# テーマ２の概要

## 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１**

計算結果 ↓　↑ 排出量

**テーマ２**

健康　農作物　洪水渇水

**統合陸域シミュレータ ILS**

S-12で構築した各影響評価モデル（水・健康・農業）をILSに結合して相互影響も加味しながら包括的な影響評価を行う。

**AIダウンスケール**

地域規模の詳細な環境影響評価のためには空間分解能のダウンスケーリングおよびバイアス補正手法が必要。

**SLCFsによる地域ごとの環境影響（水・健康・農業）の定量的評価**
人命・経済影響を段階的に評価

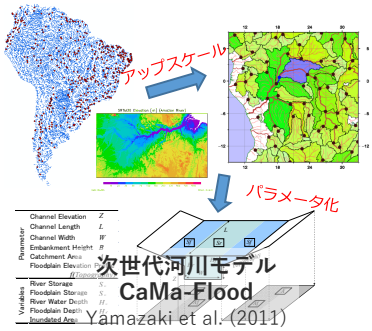
計算結果 → **テーマ３**

**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

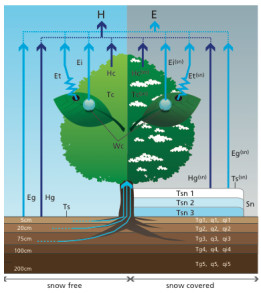
# 統合陸域シミュレータの概要

**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



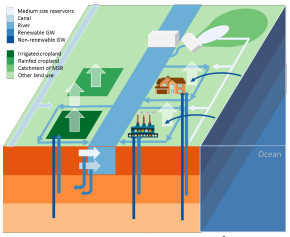

次世代河川モデル
CaMa-Flood
Yamazaki et al. (2011)

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



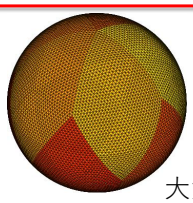

**その他**
- 土砂輸送モデル
- 水温・水質モデル
- 地下水モデル
- 斜面流出モデル
- 治水ダム操作モデル

などを鋭意開発中



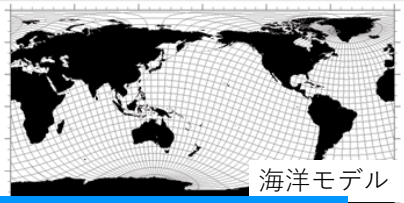
人間活動水資源モデル
H08 (Hanasaki et al., 2008)

汎用カプラ
(Jcup; Arakawa et al., 2011)



大気モデル

I/O モジュール



海洋モデル

**全球/領域の陸の過去復元・実時間解析/予報・将来気候予測等様々な目的に利用**

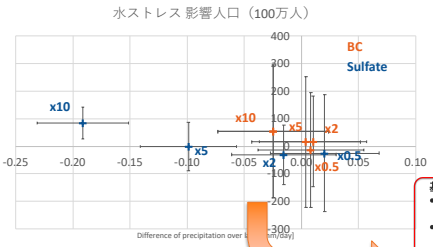


# テーマ２のサブテーマ構成

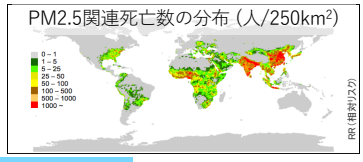
**サブテーマ１**
**SLCFsによる陸水変動の定量的評価**

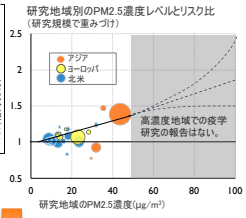
協力

**サブテーマ２**
**SLCFsによる健康影響の定量的評価**



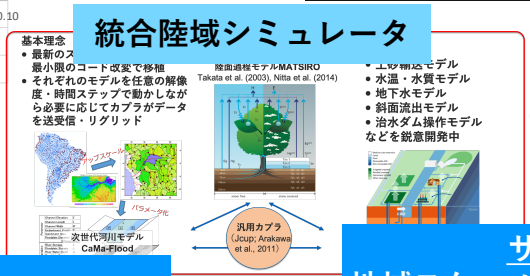

水質・衛生状態による感染症等の取り扱い




モデル結合

**統合陸域シミュレータ**

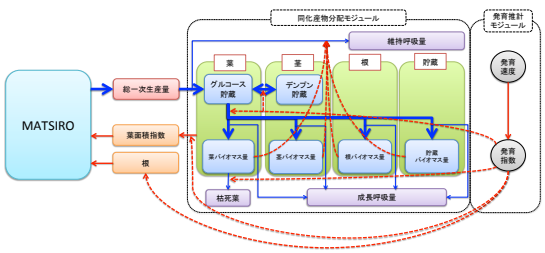



モデル結合

協力

湿地・水田過程の高度化
（メタンの取り扱い）

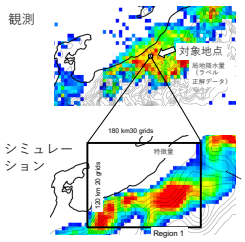
**サブテーマ３**
**SLCFsによる農作物影響の定量的評価**




モデル結合

入力データ改良

**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**




入力

テーマ１による
SLCFs実験結果

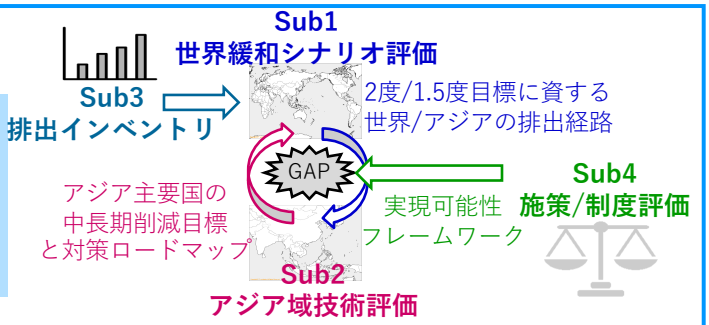
# テーマ３の概要

## 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

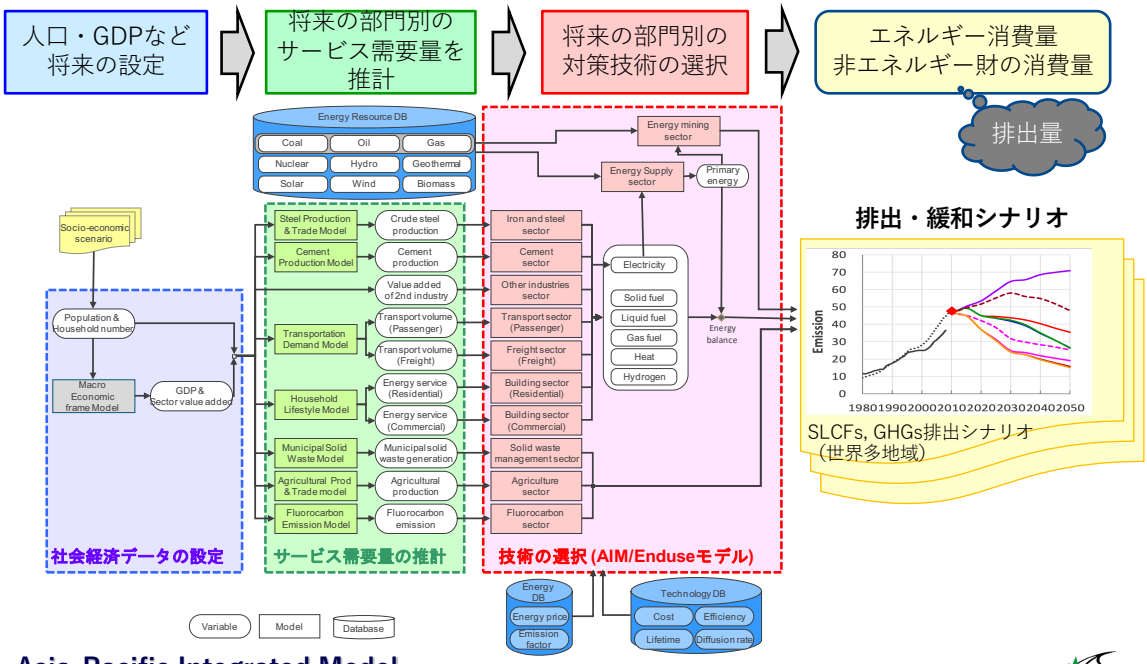
**テーマ1・テーマ2**

**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



# 本課題の中心モデル：AIM/Enduse[Global]の概要

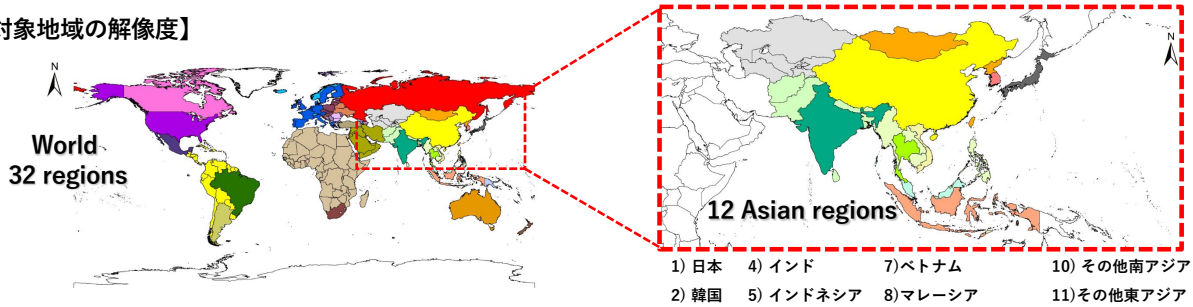
- 将来のサービス需要量を満たし、かつエネルギー供給、技術導入などの各種制約条件の範囲内で、システムの総費用が最小化するような技術選択を評価するモデル。
- 国別・部門別・技術別・ガス種別に対策・施策の検討が可能で、大気汚染対策のみに有効、SLCFs対策のみに有効、複数ガス種の同時削減に有効な対策を組合わせて分析。




**Asia-Pacific Integrated Model**
http://www-iam.nies.go.jp/aim/index.html

# AIM/Enduse[Global]モデルの対象領域とガス種

【対象地域の解像度】




1) 日本　4) インド　7)ベトナム　10) その他南アジア
2) 韓国　5) インドネシア　8)マレーシア　11)その他東アジア
3) 中国　6) タイ　9) その他東南アジア　12) その他中央アジア

【対象ガス種の解像度】

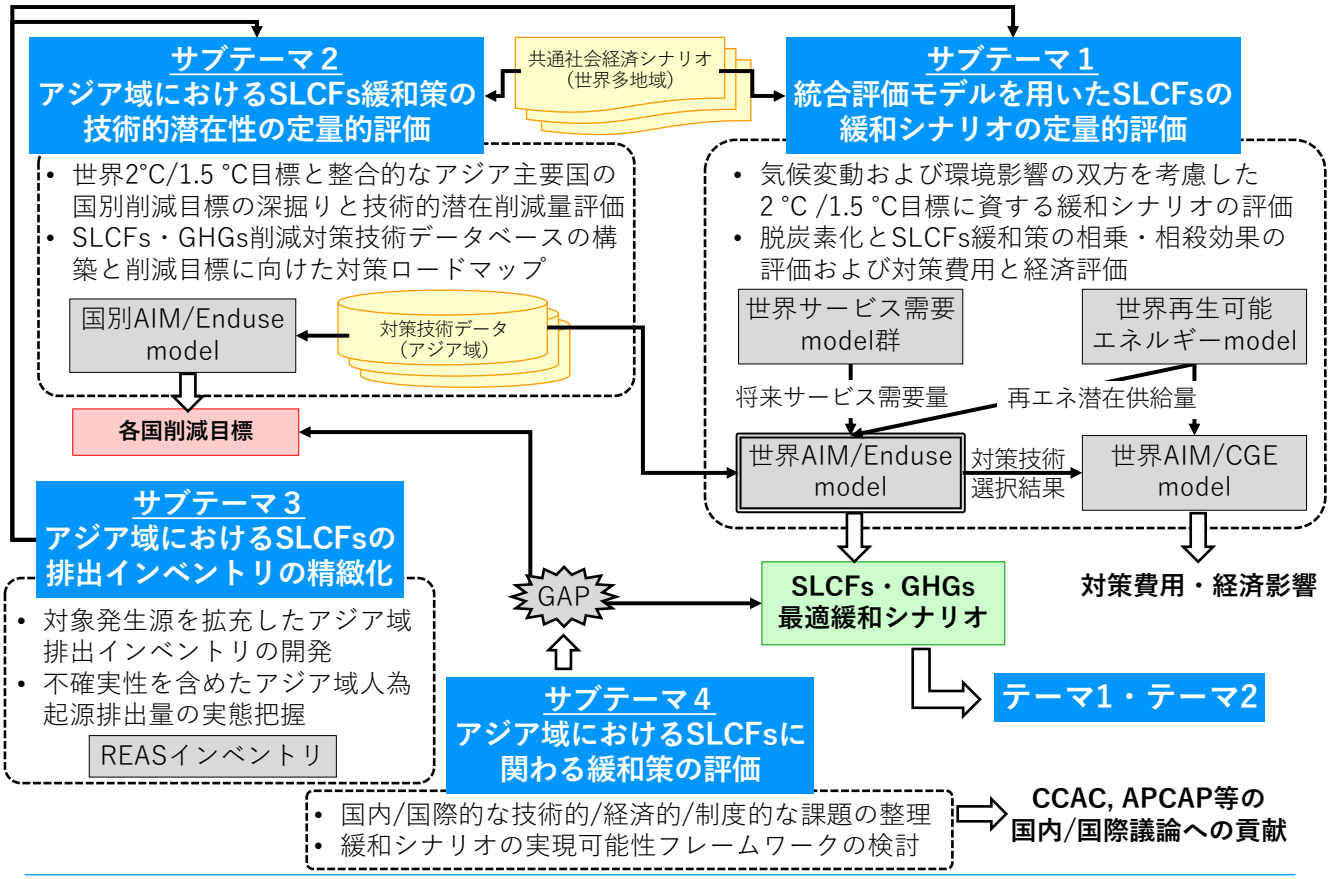
| 部門分類 | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ | $SO_2$ | NOx | BC | OC | $PM_{10}$ | $PM_{2.5}$ | CO | NMVOC | $NH_3$ | HFCs | PFCs | SF6 | CFCs | HCFCs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| エネルギー供給 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | | | | | |
| 燃料採掘 | | ✔ | | | | | | | | | ✔ | | | | | | |
| 産業部門 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ |
| 運輸部門 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | | | | | |
| 家庭・業務 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | | | | | |
| 廃棄物 | | ✔ | ✔ | | | | | | | | ✔ | | | | | | |
| 農畜産・農耕作 | | ✔ | ✔ | | | | | | | | | ✔ | | | | | |
| その他 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | | | | | |

注1)　印：本モデルで評価対象とするガス種
注2) 同じガス種の間で比較したときに
- 排出量が最も大きく 緩和策が必須な部門
- 排出量が大きく 緩和策が有効な部門
- 排出量が比較的あり 緩和策が見込まれる部門
- 排出量が小さい部門（本研究では緩和策は未考慮）

AIM ASIA-PACIFIC INTEGRATED MODEL
Asia-Pacific Integrated Model
http://www-iam.nies.go.jp/aim/index.html
NIES JAPAN



# テーマ３のサブテーマ構成



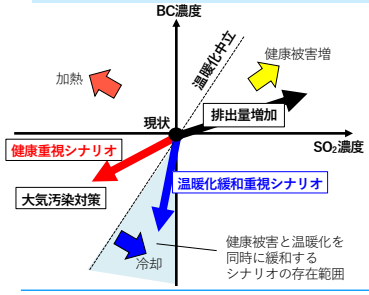
# SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の在り方

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】**

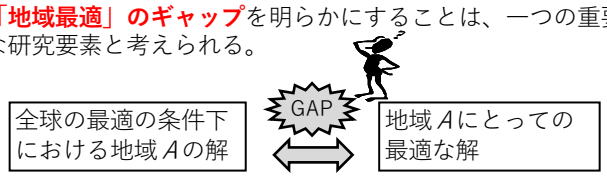
本課題は、全球と地域を同時に取り扱い、また気候影響、環境影響、社会経済影響を多面的に取り扱い、それぞれの評価で用いられる単位も異なるため、画一的な手法による「最適」の議論は難しい。
また、短寿命であるSLCFs削減に伴う顕著な特徴として、地域偏在性も考慮する必要がある。
そこで、最適シナリオの探索における評価方法を次のように定めて、最適シナリオを検討する。

1. 原則として、国際合意である「全球における2℃目標および1.5℃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。






# 本プロジェクトの行政ニーズへの貢献

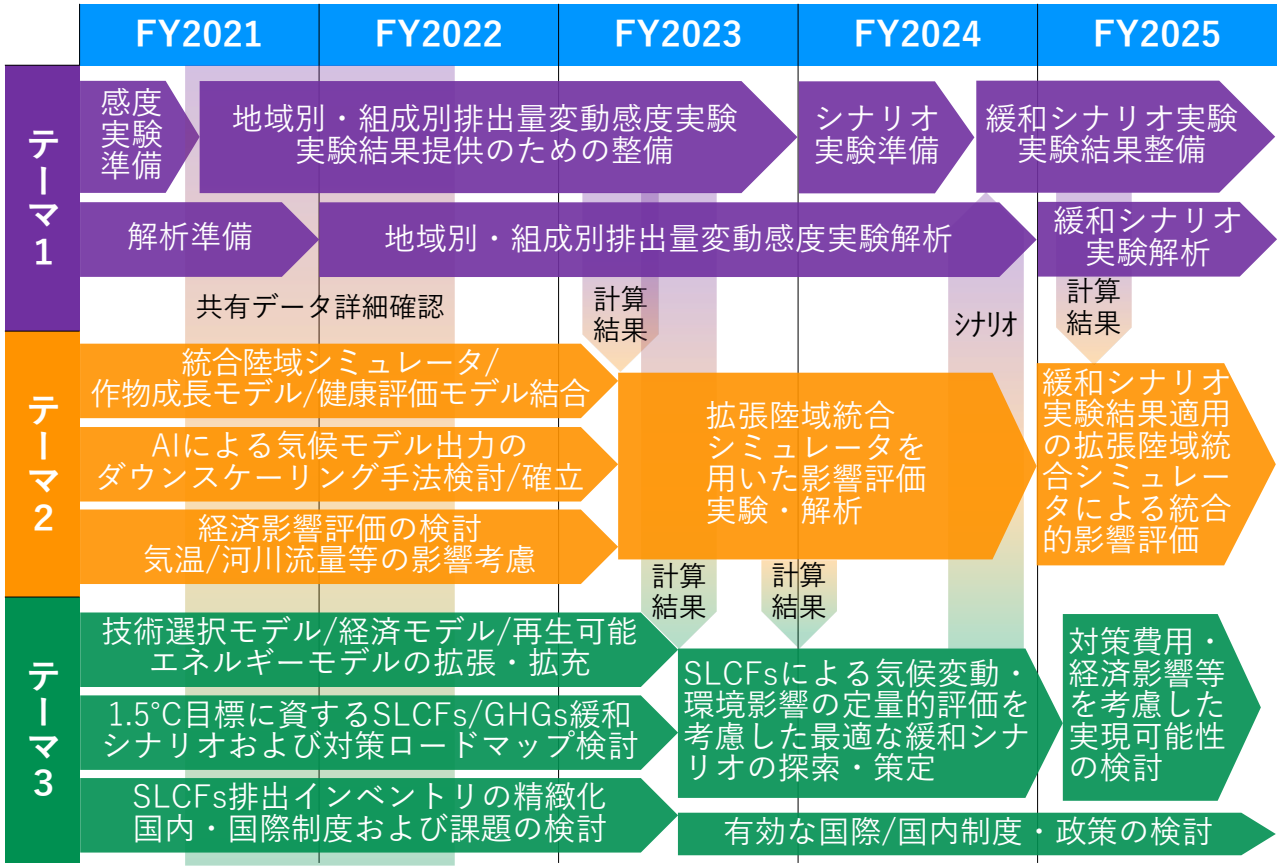
## 行政ニーズ

- パリ協定の目標達成は長寿命温室効果気体の排出量削減だけでは困難という国際的認識
- IPCC 1.5°C特別報告書(2019)では全体を通して非$CO_2$気候強制因子排出量の削減も併せている

▶ 日本では非$CO_2$気候強制因子の大部分を構成するSLCFsの排出量制御を含めた気候変動緩和策が十分に検討されておらず，具体的な政策検討を開始するために不足しているSLCFsの影響および削減効果に関する科学的知見が必要
▶ 政策として支援決定している日仏協力の下でCCAC/Efficient Cooling Initiativeを実行するための科学的知見が不足

## 行政ニーズに貢献するための本プロジェクトでの研究

- 数値モデルを用いて地域ごとに大きく異なるSLCFs排出量の現状を考慮した組成別の気候変動および環境影響のデータベース構築
- SLCFsによる影響を最大限緩和するための排出量削減シナリオ提案

【具体的貢献例】
- ▶ 気象の極端現象に伴う影響の緩和の具体的な政策立案の際に必要とされる地域ごとに異なる災害発生頻度に応じた人命・健康・農作物被害や水資源への影響における多面的な便益を考慮した適切な想定
- ▶ モントリオール議定書キガリ改正によるHFCsの生産・消費に対する地域ごとに異なる段階的削減計画の実現性と対策効果の評価を通じたパリ協定目標達成への寄与度の提示
- ▶ HFCsおよびブラックカーボンの削減に焦点があるCCAC/Efficient Cooling Initiative実行のための科学的知見提示
- ▶ 次項で示すIPCC TFI, IPCC AR7, CCAC, APCAPなどの国際政策関連への科学的知見提示

# 本プロジェクトのロードマップ