

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2FS-2001 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  
(JPMEERF20202F01)  
令和2年度

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

<研究代表機関>  
九州大学

<研究分担機関>  
東京大学  
国立環境研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	12
II-1 短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価のための調査研究 (九州大学)	12
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価のための調査研究 (東京大学)	21
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 短寿命気候強制因子による環境影響の緩和評価技術の検討のための調査研究 (国立環境研究所)	30
要旨	

- 1. 研究開発目的
- 2. 研究目標
- 3. 研究開発内容
- 4. 結果及び考察
- 5. 研究目標の達成状況
- 6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細	.....	38
IV. 英文Abstract	.....	41

## I. 成果の概要

課題名 2FS-2001 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

課題代表者名 竹村 俊彦 (九州大学応用力学研究所 教授)

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

研究実施期間 令和2年度

研究経費 (千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
令和2年度	13,000	13,000
<b>合計額</b>	<b>13,000</b>	<b>13,000</b>

本研究のキーワード 短寿命気候強制因子、SLCF、気候変動、環境影響、緩和、数値モデル

### 研究体制

(サブテーマ1) 短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価のための調査研究 (九州大学)

(サブテーマ2) 短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価のための調査研究 (東京大学)

(サブテーマ3) 短寿命気候強制因子による環境影響の緩和評価技術の検討のための調査研究  
(国立環境研究所)

### 研究協力機関

研究協力機関はない。

## 1. はじめに (研究背景等)

人為起源のCO<sub>2</sub>などの長寿命温室効果気体が深刻な気候変動をもたらすことが明らかとなり、国際的にはパリ協定の下での様々な動向、国内では気候変動適応法の施行など、本格的な行動が具体化している。一方、長寿命温室効果気体と同様に、大気・海洋・陸面のエネルギー収支に影響をもたらして気候変動を引き起こすエアロゾル・メタン・オゾンなどの短寿命気候強制因子 (SLCFs) については、その影響に対する緩和へ向けた動きが活発とは言いがたい。その主な理由として、SLCFsの濃度自体の時空間変動が非常に大きいこと、SLCFs間の化学的相互作用が大きいこと、気候変動を引き起こすメカニズムが複雑であることにより、地域ごとの環境影響の定量評価が困難であったことが挙げられる。また、SLCFs自体の毒性による環境影響を考慮する必要があることも問題を複雑にしている。しかし、SLCFsによる気候変動や影響の評価をするための数値モデルが、これまでの研究により成熟しつつあり、困難な状況を克服する可能性が開けてきた。

SLCFsに関する近年の具体的な関連動向として、2019年1月発効のモントリオール議定書キガリ改正を契機とした代替フロン (HFCs) の排出量削減を、CO<sub>2</sub>やSLCFsであるブラックカーボン (BC) の削減と併せて目標とする、日仏協力ロードマップにも記載された「気候と大気浄化の国際パートナーシップ (CCAC)」の「Efficient Cooling Initiative」が立ち上げられた。また、IPCC第6次評価報告書 (AR6) におけるSLCFsの独立章の新設は、国際的なSLCFsの重要性の認識の高まりを示している。さらに、IPCCインベントリタスクフォース (TFI) では、SLCFsの排出量推計ガイドラインを新規策定することを決定し、具体的な検討作業を開始している。こうした動向は、パリ協定の目標と現状の各国の緩和

目標との間に大きな隔たりが存在し、長寿命温室効果気体の削減だけでは緩和策が行き詰まる可能性のあることが根底にある。さらに、今世紀中頃までに長寿命温室効果気体の排出量を大幅削減できたとしても、長寿命であるため、気温上昇抑制効果の顕在化は同時には期待できない。そのため、排出量制御の効果が短期間で現れるSLCFsの緩和策も併せて実施することが、国際的共通課題となっていることを強く認識する必要がある。このような状況であるため、時空間変動の大きいSLCFsによる地域ごと・組成ごとの気候変動および環境影響を明らかにし、それらを緩和するための最適シナリオに関する科学的知見の蓄積が不可欠である。

## 2. 研究開発目的

本研究課題では、排出源および大気中の時空間分布が偏在しているSLCFsの地域規模での気候変動および環境影響を定量的に評価し、同時に影響緩和へ向けたシナリオを策定するための研究を、令和3～7年度戦略的研究開発（I）S-20にて実施することを目指して、必要な検討および現状分析を実施する。

## 3. 研究目標

全体目標	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）の地域規模での気候変動および環境影響を定量的に評価し、同時に影響緩和へ向けたシナリオを策定するための研究を戦略的研究開発（I）課題にて実施することを目指して、①気候変動科学 ②環境影響評価 ③環境影響緩和 に関するサブテーマを設定し、必要な検討・現状分析および事前準備を行う。気候モデルや影響評価モデルの結果を緩和シナリオ作成時に使用したり、作成された最適緩和シナリオを気候モデルや影響評価モデルで使用したりするなど、テーマ間をまたがったデータ利用をスムーズに行い、環境政策に資する研究成果を最大限創出できるように戦略的研究開発（I）課題における研究体制を十分に検討するとともに、今後利用する各種ツールの開発・整備を開始する。
サブテーマ 1	短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価のための調査研究
サブテーマリーダー /所属機関	竹村 俊彦／九州大学
目標	自ら開発を進めてきたSLCFsの過程が含まれる複数の数値モデルの利用方法を検討するとともに、戦略的研究開発（I）課題において気候変動評価へ円滑に入れるように、観測データやモデル相互比較を通じた数値モデルの精度検証を進めつつ、研究体制を確定させる。
サブテーマ 2	短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価のための調査研究
サブテーマリーダー /所属機関	芳村 圭／東京大学
目標	SLCFsを加味して推定した気候・気象・水文諸量を用い、複数セクターにおける影響を評価するにあたり、洪水・水資源、農業、健康分野などのセクターの選別を行う。同時に、詳細な影響評価には欠かせない気候モデル出力のバイアス補正・ダウンスケーリングに関して、新しい機械学習を用いたアプローチでより効率的かつ正確な手法を構築するための準備を整える。

サブテーマ3	短寿命気候強制因子による環境影響の緩和評価技術の検討のための調査研究
サブテーマリーダー /所属機関	花岡 達也／国立環境研究所
目標	SLCFsシナリオ策定に用いてきた世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルに、新たにフロン類に係るモジュールを組み込み、パリ協定の2度目標を達成しつつ、同時にSLCFsによる健康影響・環境影響を軽減させる早期削減シナリオ評価の準備を進める。また、テーマ間のシナリオ評価結果の共有方法および気候影響・環境影響評価結果のシナリオへの反映方法を検討し、戦略的研究開発（I）課題における本テーマの研究体制を整備する。

#### 4. 研究開発内容

戦略的研究開発（I）S-20にて予定している以下の研究について、事前に必要な検討を行うとともに、研究の本格実施に円滑に入るための準備を行う。

これまでに自ら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、短寿命気候強制因子（SLCFs）による気候や大気水循環の変動を地域規模で定量的に評価する。例えば、SLCFsの排出量や大気中の水蒸気量が非常に多く、標高の高い積雪域もあるアジアモンスーン域は、SLCFsによる気候変動が複雑であり定量的にも大きい可能性が非常に高く、このテーマでの主要ターゲットの1つである。その際に、数年～数十年の中・長期的な変動だけではなく、災害を直接的にもたらし得る極端現象に対するSLCFsの寄与も定量化する。これらの評価を実施する上で、既存の静止気象衛星や2020年頃から運用予定である静止化学衛星からのSLCFsの情報を利用した気候モデルの精度検証も併せて行う。また、気候モデルによるシミュレーション結果を境界条件として、SLCFs排出量増減に伴う地域規模での健康影響・農作物影響・洪水渇水影響について、各種影響評価モデルを用いた評価を行う。その際、政策活用時に要求される可能性のある高時空間分解能の情報創出のために、ダウンスケーリングの利用を検討する。以上の地域規模での詳細な気候変動・環境影響評価に基づき、多面的な便益と地域情勢を考慮した新しい緩和シナリオを構築する。地球全体を網羅しつつ、特にSLCFsの排出量が圧倒的に多いアジア域における技術的・政策的な実現性や有効な適応・緩和政策について検討する。

本研究課題では、SLCFs間の共便益の相殺の可能性を考慮して、エアロゾル（硫酸塩・ブラックカーボン・有機物・それらの前駆物質）・オゾンおよびその前駆物質・代替フロン・メタンの全体を取り扱い、それらによる気候変動・環境影響および影響緩和の定量的評価を行う。

#### 5. 研究成果

##### 5-1. 成果の概要

###### （1）戦略的研究開発（I）S-20の構想提案

令和3～7年度戦略的研究開発（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」の研究計画を確定させるための調査を実施した。S-20のテーマリーダー・戦略FS検討専門部会委員・アドバイザー・環境省担当者との議論を踏まえて、S-20の目的とテーマ・サブテーマ構成を以下のように設計した。

###### ①研究の目的と概要

S-20では、排出源および大気中の時空間分布が偏在しているSLCFsの地域ごとおよび組成ごとの気候変動および環境影響を定量的に評価し、同時に影響緩和へ向けた排出量削減シナリオを策定するための研究を推進する。特にアジア域に対する解析・評価を詳細に実施するが、研究成果を国際政策に活用することも目指すため、全球での地域ごとの解析・評価も実施する。気候変動評価で

は、これまでに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による気候や大気水循環の変動を地域ごと・組成ごとに定量的に評価する。その際に、数年～数十年の中・長期的な変動だけではなく、災害を直接的にもたらし得る極端現象に対するSLCFsの寄与も定量化する。これらの評価を実施する上で、既存の静止気象衛星や2020年頃から運用予定である静止化学衛星からのSLCFsの情報を利用した気候モデルの精度検証も併せて行う。環境影響評価においては、気候モデルによるシミュレーション結果を境界条件として、SLCFsの排出量増減に伴う地域ごとの健康影響・農作物影響・洪水渇水影響について、各種影響評価モデルを用いた評価を行う。その際、政策活用時に要求される可能性のある高時空間分解能の情報創出のために、ダウンスケーリングの利用を検討する。SLCFsシナリオ策定では、地域ごとの詳細な気候変動・環境影響評価に基づき、多面的な便益と地域情勢を考慮した排出量削減に関する新しい緩和シナリオを構築する。地球全体を網羅しつつ、特にSLCFsの排出量が圧倒的に多いアジア域における技術的・政策的な実現性や有効な緩和政策について検討する。さらに、新たに策定されたSLCFsシナリオを用いて、気候変動および環境影響の将来予測を実施する。以上の研究により、SLCFsの緩和策を具体的に提示する科学的根拠を構築する。S-20の主要アウトカムは、国際的枠組（IPCC第7次評価報告書（AR7）、IPCC TFI SLCFs排出量推計ガイドライン策定、CCAC, Asia Pacific Clean Air Partnership（APCAP）等）および国内政策に対して、最適なSLCFs削減に関する定量的な科学的知見を提供することである。また、IPCC TFIにてSLCFs排出量推計ガイドラインの策定が進行していることは、将来的に各国でのSLCFs関連排出量の算定が求められることを意味する。S-20のアウトカムは、これに備えることにもなる。

なお、SLCFs間の共便益の相殺の可能性を考慮して総合的な研究を指向するために、S-20では、エアロゾル（硫酸塩・ブラックカーボン・有機物・硝酸塩・それらの前駆物質）・メタンおよびその前駆物質・オゾンおよびその前駆物質・代替フロンを網羅して取り扱い、それらによる気候変動・環境影響および排出量削減に関する影響緩和の定量的評価を行う。CCAC/Efficient Cooling Initiativeでは、特に代替フロンとブラックカーボンの削減に焦点を当てており、S-20ではこれらもカバーできることになる。S-20は、環境研究総合推進費戦略研究S-7（FY2009-2013）およびS-12（FY2014-2018）にて構築してきた研究成果を発展させることにより、国内外の環境政策へ貢献することを指向する。S-12では、以下のような主要成果をもたらした。

- ブラックカーボン排出量削減による気温低下は従来の推定よりも小さいという新規性のある科学的知見の創出
- 窒素酸化物の削減は、寒冷化をもたらすオゾン減少の一方で、温暖化をもたらすメタン増加と硝酸塩エアロゾル減少という結果となり、SLCFsの相互作用が非常に複雑であることの指摘
- 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
- 多様な対策組合せによる相乗・相殺効果を考慮したSLCFs緩和シナリオ策定の重要性の指摘および2℃目標相当の排出量削減に関するSLCFs最適緩和シナリオの探索

以上のS-12の研究成果は、全球一様の比率で組成ごとにSLCFs関連排出量を増減させるという条件に基づいたものであった。S-20では、地域ごとあるいは国ごとに異なるSLCFsの実情に応じた対策に研究成果を活用するために、地域ごとに定量的な解析・評価を行うことが鍵となる。地域分割は、テーマ3で想定している区分をベースとするが、それよりも小さいスケール（国別および人口の多い国では国内地域別）で検討しなければならない現象や影響については、各サブテーマにて各モデル固有の特徴に応じた適切なスケールで解析した後に、テーマ間およびサブテーマ間の連携をとる。

## ②プロジェクト全体の成果目標

- 開発を進めてきた各種数値モデルを用いた排出源および大気中の時空間分布が偏在しているSLCFsの地域ごと・組成ごとの気候変動と環境影響の定量的評価
- 多部門からの緩和対策分析によるSLCFs関連排出量削減の最適シナリオの探索

- 最適緩和シナリオを適用した各種数値モデルによるシミュレーションによるSLCFsによる気候変動および環境影響の将来予測
- 国際的枠組（IPCC, CCAC, APCAP等）および国内政策へのSLCFs最適削減に関する科学的知見の提供

### ③プロジェクトの研究テーマ構成およびサブテーマ構成

S-20では、以下の3つのテーマ構成により、当該3テーマの下にサブテーマを設けて、各テーマおよびサブテーマ関係者が一体的に研究を実施する。

表0. 1 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」各テーマおよびサブテーマの構成

テーマ名 および テーマリーダーの担当するサブテーマ	サブテーマ
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  サブテーマ(1)：エアロゾルによる気候変動の定量的評価	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 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 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
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  サブテーマ(1)：短寿命気候強制因子による陸水変動の定量的評価	サブテーマ(2)：短寿命気候強制因子による健康影響の定量的評価 サブテーマ(3)：短寿命気候強制因子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
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  サブテーマ(1)：統合評価モデルを用いた短寿命気候強制因子の緩和シナリオの定量的評価	サブテーマ(2)：アジア域における短寿命気候強制因子緩和策の技術的潜在性の定量的評価 サブテーマ(3)：アジア域における短寿命気候強制因子の排出インベントリの精緻化 サブテーマ(4)：アジア域における短寿命気候強制因子に関わる緩和策の評価





図0.1 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」研究構成概要

## （2）サブテーマごとの成果概要

### ①サブテーマ1

戦略的研究開発（I）S-20テーマ1にて実施する実験の予備実験として、大気海洋結合のMIROC-SPRINTARSを用いて、主要な人為起源短寿命気候強制因子（SLCFs）である硫酸塩エアロゾルの前駆気体であるSO<sub>2</sub>について、燃料消費起源の排出量を全球一様の比率で数段階に増減させる感度実験を行った。その際のCO<sub>2</sub>濃度を、2000年レベルおよびその2倍の2つのパターンに設定したところ、硫酸塩エアロゾル濃度の低下に伴う気温上昇は、同量の硫酸塩エアロゾル濃度の低下であっても、CO<sub>2</sub>濃度が高い状態の方が大きくなることを定量的に示した（図1.4、図1.5a）。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（図1.5b）および水蒸気フィードバック（図1.5c）が寄与していることを示した。このことは、大気汚染対策を実施する場合、同時に温室効果ガス濃度の上昇を抑制しなければ、地球温暖化が加速度的に進行することを示している。この研究成果は論文（6-1.査読付き論文の1）として公表し、プレスリリースを行い（<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/537>）、国内計5紙に掲載された。また、国外の一般向け情報発信も行った（[https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2021-03/ku-apr031021.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-03/ku-apr031021.php)）。

戦略的研究開発（I）S-20テーマ1にて利用予定の最新版MIROC-SPRINTARSの定量的表現の精度向上を図るために、エアロゾルに関する観測データとの比較を行った。受動型センサの多地点展開の観測網である、NASA Goddard Space Flight CenterのAERONETで10年以上継続観測している世界94地点と、日本の研究グループが展開するSKYNETの全地点データを利用した。また、静止気象衛星ひまわり8号により得られる広域分布についても比較を行った。エアロゾル光学的厚さ（500nm）とオングストローム指数について比較を行ったところ、MIROC-SPRINTARSのエアロゾル空間分布の再現性は全般的に高いことを示した。MIROC-SPRINTARSを用いたPM<sub>2.5</sub>の予測を2008年から毎日実施しており、その予測結果は、多くの新聞等のメディアに掲載されて社会生活のための基盤情報として利用されているほか、各自治体の環境研究所での観測にも活用されている。このことは、MIROC-

SPRINTARSのシミュレーション結果の信頼度を裏付けているものとも言える。

戦略的研究開発（I）S-20では、国際的に最適なSLCFs削減に関する定量的な科学的知見を提供することを目指す。研究代表者である竹村が、Asia Pacific Clean Air Partnership（APCAP）の第2期Science Panel Memberを務めていることに関連して、政策要綱 Co-control of air pollution and surface air temperature (<https://bit.ly/3oAvtcH>) を本FS期間中に執筆・公表し、各国の大気環境および気候変動に関わる政策決定者へ向けて、これまでの研究に基づく科学的知見についてメッセージとして発出した。また、S-20で利用するエアロゾル気候モデルSPRINTARSや化学気候モデルCHASERは、以前から複数の国際的なモデル相互比較プロジェクトに積極的に参画してきたが、本FS期間中も、Aerosol Comparisons between Observations and Models（AeroCom）、Precipitation Driver Response Model Intercomparison Project（PDRMIP）、Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project（AerChemMIP）における議論に参画し、論文も受理・公表された。

## ②サブテーマ2

戦略的研究開発（I）S-20テーマ2では、陸域過程のシミュレーションを行って洪水・渇水等への影響評価を行う。そのときに用いるモデルとして、統合陸域シミュレータ（ILS）を開発した。ILSは、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、MPMD（Multiple Program Multiple Data）方式で実行する。現在、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しており、今後戦略的研究開発（I）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、いくつかの陸域要素モデルが追加される予定である。また、同じカプラーJcupを用いて大気・海洋大循環モデルとの結合も可能である。全球オフライン実験により計算性能を確認した結果、MATSIROの負荷が一番大きい一方で、プロセス数の増加に対して高いスケーラビリティを持つことが示され、スーパーコンピュータを用いた大規模計算への可能性が示唆された。また、全球20カ所のサイトを対象に、計算結果と観測値を比較した結果、平均的な場合は2変数線形回帰式による推定より再現性が低い傾向を持つものの、極値の再現性はILSの方が良いことがわかった。この結果は、今後の開発におけるベンチマークとなる予定である。また、このILSを利用した洪水予測システムが、防災に資するとしてJAXA理事長表彰（社会貢献分野）を受けた。

戦略的研究開発（I）S-20テーマ2で用いるための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開発を進めた。日本の一地域を対象として、2007年から2018年の気象庁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）を用いて、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。ブーツストラップ手法を参考に、検証対象とする年を除いた11年間のデータで学習した。機械学習アルゴリズムには、サポートベクターマシンSVMを使っている。ただし、機械学習だけだと系統的な過小評価があるため、分位マッピング手法（Quantile Mapping）でポストプロセス的に結果を補正した。その結果、月平均値と95パーセンタイル値の両方について、本手法によって、もともとのMSM-GPV降水量よりも精度のより良い降水量が推計できていることがわかった。

戦略的研究開発（I）S-20テーマ2を推進するにあたり、陸モデルの開発・改良は鍵となる。そのために、テーマ2の4つのサブテーマが協力し合うのはもちろんであるが、それ以外の研究者とも協調し、これまでの気候モデル用の陸面過程モデルでは扱えてこなかった（もしくは過度に簡素化されていた）様々な陸での重要な要素、例えば河川、湖沼、積雪、植生、土壌、地下水、人間活動等について、別途研究されている知見やモデルをより安易かつ物理的な整合性は担保した形で結合させることを目指し、2021年3月に「2020年度次世代陸モデル開発・応用・社会実装に関する合同ワークショップ」をオンライン開催した。20件の話題提供、100名を超す参加者が集まり、大変有意義な情報交換・議論を行うことができた。

### ③サブテーマ3

戦略的研究課題（I）S-20テーマ3において、エネルギー部門だけでなく、非エネルギー部門を主要排出源とする短寿命気候強制因子（メタン(CH<sub>4</sub>)や代替フロン(HFC))を加えて緩和対策を評価し、健康影響と温暖化影響の双方を同時解決するためのSLCFsに係る影響緩和シナリオを評価する必要がある。そこで、メタン(CH<sub>4</sub>)や代替フロン(HFC)などに関する排出削減技術の調査研究を実施し、SLCFs排出削減の深堀評価に必要とされる要素を新たにモデル分析に組み込むための準備を進めた。

S-20テーマ3では、世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルであるAIM/Enduse[Global]を核とした統合評価モデルを用いて地域別・部門別・ガス種別の技術的な潜在削減量や排出経路などの評価を行う。そこで、AIM/Enduse[Global]モデルを用いてパリ協定の2°C目標を達成しつつ、同時にSLCFs削減を進める最適影響緩和シナリオの探索にむけた予備的シナリオ実験として地域別・ガス種別・部門別の潜在削減量を評価し、アジア域における地域偏在性の特性を分析した。図3.3より、CH<sub>4</sub>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った特徴を示しており、また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ことが示唆された。したがって、S-20において新たに1.5°C目標を実現するような早期大幅排出削減を評価するにあたり、地域別・ガス種別・部門別の特徴を考慮した効率的なSLCFs削減対策の導入を探索していく必要がある。

SLCFsであるBC・CH<sub>4</sub>・対流圏O<sub>3</sub>・HFCsは、早期大幅削減による2°C/1.5°C目標への貢献が期待されるが、特にCH<sub>4</sub>およびHFCsの主要な排出源は非エネルギー部門である。そこで、モントリオール議定書キガリ改正の評価に向けた準備を進めるために、新たにHFCsに係るモジュール設計・開発を行い、モデルに組み込む実験をするためにHFCsに関する排出インベントリの整備や削減対策技術の情報を収集した。また、CH<sub>4</sub>に関する削減対策技術の情報や、また対流圏オゾンの前駆物質と関連のある反応性窒素(NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>)に関する対策技術の情報収集を収集し、それらのガス種の主要な排出源である農畜産部門、水田部門、農耕作部門、固形廃棄物処理部門、汚水処理部門のモジュールの開発および拡張・拡充を進め、SLCFs排出削減の深堀評価に必要とされる要素を新たにモデル分析に組み込むための準備を進めた。

S-20では、テーマ1およびテーマ2と連携して、S-20独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオを策定することを成果目標に掲げている。そこで、S-20の他テーマのリーダーと議論し、S-20における最適緩和シナリオの探索の方法論を検討した。S-20では、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、それぞれの影響評価で用いられる指標や単位が異なるため、従来の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、気候影響、環境影響、社会経済影響で主要な評価軸（例えば、気温変化、降水量変化、健康影響変化、水ストレス人口変化、SLCF削減量変化、経済影響変化など）を設定し、それらの影響評価軸の組み合わせを総合した結果が最善になる解を探索する。また、「全球の最適」を上位として最適解を議論しつつ、SLCFs特有の状況として新興国・途上国（特にアジア域）について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「個別地域の最適」も同時に議論する方法論を設計した。

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

研究代表者である竹村は、Asia Pacific Clean Air Partnership (APCAP)の第2期Science Panel Memberを務めている。これに関連して、政策要綱 Co-control of air pollution and surface air temperature (<https://bit.ly/3oAvtcH>) を執筆・公表し、各国の大気環境および気候変動に関わる政策決定者へ向けて、これまでの研究に基づく科学的知見についてメッセージとして発出した。また、委員会活動を通じて、S-20の研究成果による国際貢献を今後効果的に行う。

研究分担者である花岡は、2021年からClimate and Clean Air Coalition (CCAC)のScientific

Advisory Panel委員を務めている。S-20の研究成果による国際貢献を効果的に行える基盤が構築された。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

S-20の研究遂行により見込まれる行政ニーズは以下のとおりである。

パリ協定の2℃目標/1.5℃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であるという国際的認識があり、2018年公表のIPCC 1.5℃特別報告書においても、非CO<sub>2</sub>気候強制因子排出量の削減も併せて考えなければならないことが全体を通して記載されている。しかし、日本では、その非CO<sub>2</sub>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いない。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とされている。これは、日仏協力の下でCCAC/Efficient Cooling Initiativeを支援することが政策として決定しているが、それを実行するための科学的知見が不足しているということでもある。また、パリ協定で合意したGlobal Stocktake（世界全体の各国の気候変動対策を段階的に強化していく評価）のタイミングが2023年、2028年に予定されており、SLCFs削減対策の深掘りによる議論への貢献が期待される。

以上の行政ニーズを踏まえて、S-20では、これまでの研究で成熟してきた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、具体的な政策立案に必要とされるSLCFs組成別の気候変動・環境影響に関する定量化されたデータベースの構築を実施するほか、影響を最大限緩和するための排出量削減シナリオに関する科学的提案を行う。それらの研究成果は、例えば、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ついて、多面的な便益を考慮した適切な想定に貢献する。また、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を評価することで、2℃目標/1.5℃目標達成への寄与度を示す。また、2020年度に、日本政府が2050年カーボンニュートラルを宣言したことに伴い、気候変動対策で現在様々な動向が進行中であるため、国内政策のニーズに適宜対応していく。例えば、地球温暖化対策計画の中期政策においてSLCFsの規制が検討されていたり、大気汚染物質の環境基準に気候変動の観点を加えて再評価する動きが始まっていたりしており、S-20ではこれらの動向への科学的知見の提供の中心的役割を担える。また、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」の重要分野実行計画には、気候変動メカニズム理解や気候変動予測情報の高度化について記載されており、S-20はこれに適合する。

なお、非CO<sub>2</sub>気候強制因子による気候変動の実態の理解と予測を統合的に行うためには、主要SLCFsすべてを取り扱うことが必須であるため、エアロゾル・メタン・オゾン・それらの前駆物質・代替フロンを研究対象とする。CCAC/Efficient Cooling Initiativeでは、特にHFCsとブラックカーボンの削減に焦点を当てており、S-20ではこれらもカバーできることになる。また、SLCFs関連政策は国際的に活発に動き始めている。IPCC TFIによる作成が決定しているSLCFs排出量推計ガイドラインや、IPCC AR7, CCAC, APCAPなどの国際的ニーズへの貢献も行っていく。

### 5-3. 研究目標の達成状況

戦略的研究開発（I）S-20の研究構想について、前戦略的研究開発課題S-12の成果を踏まえつつ、S-20のテマリーダー（本FSの研究参画者）・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、十分に検討して構築することができた。S-20の総力を結集するためにはテマ間連携が重要となってくるが、テマリーダーによる議論を重ねて、主要な連携の適切な時期について計画した。

S-20テマ1の準備として、最新版MIROC-SPRINTARSの出力結果を観測データと比較して検証を行い、妥当なシミュレーション結果が得られていることを確認した。また、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たことは、当初の目標を大きく上回るものである。

S-20テーマ2の準備として、使用予定の統合陸域シミュレータILSを準備するとともに、機械学習を用いた気候モデル出力のバイアス補正手法についてもアルゴリズムを構成した。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ものであった。また、国内での陸にまつわる様々なプロセスに関する研究者を集めたワークショップを開催し、20件の話題提供、100名を超す参加者が集まり、大変有意義な情報交換・議論を行うことができ、今後の協力体制を築くことができた。

S-20テーマ3の準備として、SLCFs削減対策技術の情報を収集・整備できた。世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルについて、当初のモジュールの設計・開発目標はフロン類に係るものだったが、特にメタンを含めた非エネルギー部門のモジュールの設計・開発および拡張・拡充を進め、S-20における早期大幅排出削減シナリオの探索の準備を進めることができた。また、S-20に向けて独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の方法論を設計することができた。

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

3件

<主な査読付き論文>

- 1) 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 CO<sub>2</sub> concentrations. (IF:4.0)
- 2) Ø. HODNEBROG, G. MYHRE, R. J. KRAMER, K. P. SHINE, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, M. KASOAR, A. KIRKEVÅG, J.-F. LAMARQUE, J. MÜLMENSTÄDT, D. OLIVIÉ, B. H. SAMSET, D. SHINDELL, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, and A. VOULGARAKIS: npj Climate and Atmospheric Science, 3, 43, doi:10.1038/s41612-020-00150-x (2020), The effect of rapid adjustments to halocarbons and N<sub>2</sub>O on radiative forcing. (IF:5.4)
- 3) M. SAND, B. H. SAMSET, G. MYHRE, J. GLIß, S. E. BAUER, H. BIAN, M. CHIN, R. CHECA-GARCIA, P. GINOUX, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, H. KOKKOLA, P. LE SAGER, M. T. LUND, H. MATSUI, T. VAN NOIJE, S. REMY, M. SCHULZ, P. STIER, C. W. STJERN, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, S. G. TSYRO, and D. WATSON-PARRIS: Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, doi:10.5194/acp-2021-51 (2021), Aerosol absorption in global models from AeroCom Phase III. (IF:5.4)

### 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### 6-3. その他発表件数

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

## 7. 国際共同研究等の状況

- 1) 研究機関：Asia Pacific Clean Air Partnership (APCAP)  
 協力案件：Clean Air Brief 2020 “Co-control of air pollution and surface air temperature” 作成  
 カウンターパート：UN Environment Asia Pacific Office  
 概要：各国の大気環境および気候変動に関わる政策決定者へ向けて、これまでの研究に基づくSLCFsに関する科学的知見についてメッセージとして発出した。S-20プロジェクトリーダーである竹村のAPCAP Science Panel Memberとしての活動は継続するため、S-20により得られる科学的知見の政策への貢献の場となるほか、国際的に求められる科学的知見の情報収集の場ともなるため、S-20における研究のフィードバックも得られることが見込まれる。
- 2) 研究機関：Aerosol Comparisons between Observations and Models (AeroCom)  
 協力案件：“Aerosol absorption in global models from AeroCom Phase III” 論文公表  
 カウンターパート：Maria Sand, Bjørn H. Samset, Gunnar Myhre (Center for International Climate Research (CICERO), Norway)他  
 概要：S-20で利用する全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSによるシミュレーション結果を含めて、エアロゾルによる大気放射吸収に関して、モデル間および観測データとの相互比較を行った。エアロゾルおよび大気化学に関するモデル相互比較プロジェクトに引き続き参画していくことで、国際的なSLCFs研究コミュニティ経由でS-20の研究成果を効果的に発出することが可能となる。

## 8. 研究者略歴

### 研究代表者

竹村 俊彦

東京大学大学院理学系研究科修了、博士（理学）  
 現在、九州大学応用力学研究所 教授

### 研究分担者

#### 1) 芳村 圭

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）  
 現在、東京大学生産技術研究所 教授

#### 2) 花岡 達也

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）  
 現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター 主任研究員  
 （2021年4月～ 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）

## II. 成果の詳細

### II-1 短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価のための調査研究

九州大学 応用力学研究所

竹村 俊彦

#### [要旨]

令和3～7年度戦略的研究開発（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」のテーマ1「短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価」の研究計画を確定させるための調査を実施した。S-20のテーマリーダー・戦略FS検討専門部会委員・アドバイザー・環境省担当者との議論を踏まえて、S-20テーマ1の研究開発体制を提案した。また、S-20における研究実施を円滑に開始するために、全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSを用いた予備的シミュレーション実験を行い、人為起源硫酸塩エアロゾルの減少が同量であっても、それに伴う気温上昇は二酸化炭素濃度に依存することを示した。この研究成果を公表した論文内容は、多数の新聞にて紹介されて関心を集めた。

#### 1. 研究開発目的

戦略的研究開発（I）課題にて予定している以下の研究について、事前に必要な検討を行うとともに、研究の本格実施に円滑に入るための準備を行う。

自ら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の気候変動に対する影響を地域規模で定量的に評価する。また、その結果は、テーマ2におけるSLCFs環境影響評価の外力として、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される。

#### 2. 研究目標

自ら開発を進めてきたSLCFsの過程が含まれる複数の数値モデルの利用方法を検討するとともに、戦略的研究開発（I）課題において気候変動評価へ円滑に入れるように、観測データやモデル相互比較を通じた数値モデルの精度検証を進めつつ、研究体制を確定させる。

#### 3. 研究開発内容

戦略的研究開発（I）課題へ移行後に、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を用いて、現在のSLCFs関連排出量基準として地域ごとの排出量を任意に増減させた場合を想定したシミュレーションを行い、SLCFsによる地域規模の気候変動を定量的に評価する。また、同じエアロゾルモデルおよび大気化学モデルは、雲物理過程を陽に表現できる高空間分解能気候モデルNICAMおよび植生や海洋化学過程との相互作用が組み込まれている地球システムモデルMIROC-ESMにも組み込まれているため、それらのモデルを用いて同様のシミュレーションを行い、空間分解能や含まれるプロセスの違いによる相違を評価する。これらのシミュレーションから得られた定量的結果は、テーマ2へ提供することによりSLCFsの陸水・農業・健康への影響評価およびテーマ3へ提供することにより影響緩和シナリオ策定のために利用される。さらに、テーマ3で策定された緩和最適シナリオを導入したシミュレーションを実施して、SLCFsによる気候変動を定量的に示す。

以上の研究を実施するにあたり、課題調査型研究期間中には、上述の気候モデルを用いてSLCFs関連排出量を変動させる実験の設計を行う。各気候モデルの特性を活かした実験を使用できる計算機資源を考慮しながら進める必要があり、効率的に研究を進めるためにはあらかじめ具体的な見通しを立てておくことが望ましい。また、気候モデルによるSLCFsの定量的表現の精度向上を図るために、観測データ

との比較を通じた検証を行う。現在、極軌道衛星であるGOSAT-2, GCOM-Cや、静止気象衛星ひまわり8号といった日本の人工衛星からエアロゾル分布に関する情報を得ることができるため、それらを活用する。2020年頃から運用予定である静止化学衛星からのSLCFsの情報を追加した気候モデルの精度検証は、戦略的研究開発（I）課題期間中にも継続する。さらに、本研究課題の研究代表者が参画しているSLCFs関連のモデル相互比較プロジェクトAeroComおよびAerChemMIPへ継続参加して国際動向の把握に努めるほか、相互比較の新しい結果を利用したモデルの検証も行う。2021年に公表される気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書の直前の時期であり、最新の研究成果が通常時よりも多く出てくることが想定されるため、国際動向の把握は重要である。

#### 4. 結果及び考察

##### （1）戦略的研究開発（I）S-20の構想提案

令和3～7年度戦略的研究開発（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」のテーマ1「短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価」の研究構想について、2FS-2001の研究参画者（S-20のテーマリーダー）・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見を踏まえて、以下のように設計した。

##### ①成果目標

- エアロゾルモデルおよび大気化学モデルが組み込まれた全球気候モデルおよび全球高分解能気候モデル用いたSLCFs関連排出量変化に伴う地域ごと・組成ごとの気候変動の定量的評価
- SLCFsによる平均的气象場の変化および直接的被害をもたらす極端現象の変化の解析
- SLCFsに関するテーマ2での影響評価およびテーマ3での排出量削減緩和シナリオ策定のための計算結果の提供
- テーマ3により策定される複数の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

##### ②研究概要

二酸化炭素などの長寿命温室効果気体と、エアロゾル・メタン・オゾンなどのSLCFsは、いずれも地球表層（大気・海洋・陸面）において、太陽放射や赤外放射の散乱・吸収によりエネルギー収支に影響を及ぼす。しかし、長寿命温室効果気体と比較して、SLCFsは濃度の時空間変動が大きいため、エネルギー収支も地域ごとに大きく異なる。したがって、SLCFsの気候変動に対する影響を定量的に評価するためには、その時空間変動を詳細に解析・検討する必要がある。前戦略研究課題であるS-12では、全球一様のSLCFs排出量の増減比に伴う気候変動の評価を実施した。本プロジェクトでは、これまでに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による気候変動や大気水循環の変動を地域ごと・組成ごとに定量的に評価する。例えば、SLCFsの排出量や大気中の水蒸気量が非常に多く、標高の高い積雪域もあるアジアモンスーン域は、SLCFsによる気候変動が複雑であり定量的にも大きい可能性が非常に高く、このテーマでの主要ターゲットの1つである。その際に、数年～数十年の中・長期的な変動だけではなく、災害を直接的にもたらし得る極端現象に対するSLCFsの影響も定量化する。研究結果は、テーマ2と3における環境影響評価および影響緩和シナリオ策定にて活用する。また、テーマ3により作成される影響緩和シナリオを適用した気候モデルによる将来予測実験を実施して、地域情勢を考慮したSLCFs排出量削減の効果を定量的に検証する。気候モデルによるSLCFsの気候変動評価を行う際に、テーマ内で実施する感度実験で使用する現在のSLCFs関連排出量については、共通のデータベースを利用する。また、静止気象衛星ひまわり8号により得られるエアロゾルの広域分布観測データや、欧米等により2020年以降に打ち上げが予定されている大気化学静止気象衛星による観測データを利用した気候モデルの検証を実施する。



## 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

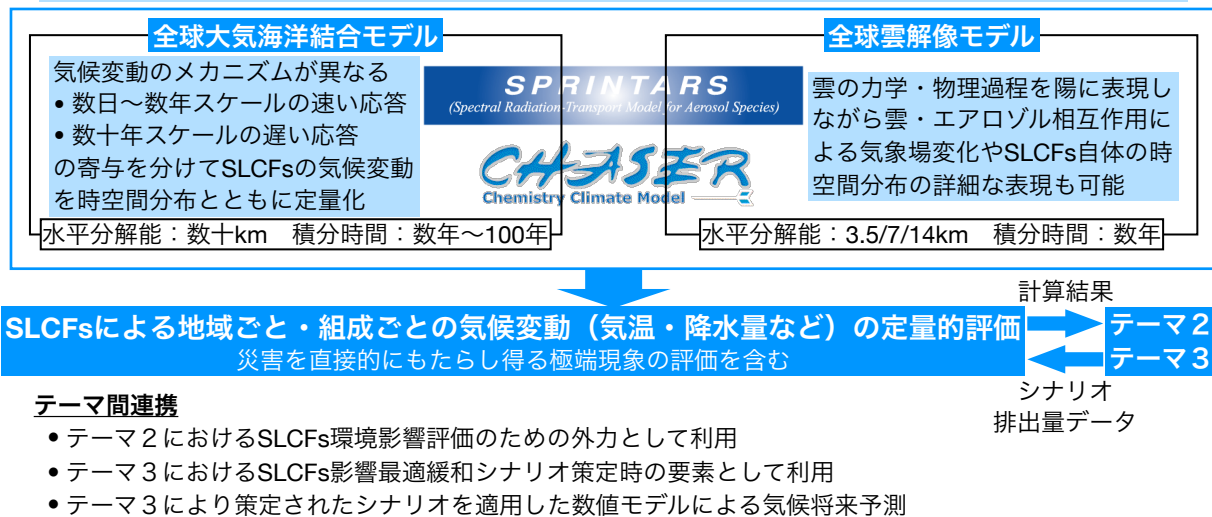


図1. 1 S-20テーマ1「短寿命気候強制因子による地域規模の気候変動評価」の研究概要

### ③サブテーマの研究概要

サブテーマ(1)：エアロゾルによる気候変動の定量的評価

- S-20全体を統括し、SLCFsの地域ごとの気候変動および環境影響の定量的評価に基づいた排出量削減に関する最適緩和シナリオを策定して、気候変動対策に含めるべきSLCFs対策のための科学的根拠を取りまとめる。
- テーマ1の統括として、サブテーマの研究成果を統合する役割を担う。
- エアロゾルモデルSPRINTARSが組み込まれた全球気候モデルを用いて、現在のエアロゾル関連排出量を基準として地域ごと・組成ごとの排出量を任意に増減させた場合を想定したシミュレーション（感度実験）を行い、SLCFsのうちエアロゾル（硫酸塩・ブラックカーボン・有機物）による地域ごとの気候変動を定量的に評価する。
- 感度実験で使用した排出量データおよび感度実験からの気温・降水量などのパラメータの出力をデータセットとして、テーマ2におけるSLCFsによる環境影響評価およびテーマ3における最適緩和シナリオ策定のために提供する。
- テーマ3において策定された複数の影響緩和シナリオを適用して全球エアロゾル気候モデルによるシミュレーションを行い、その計算結果の解析により地域ごとの気候変動の予測される変化を評価する。

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

- 大気化学モデルCHASERが組み込まれた全球気候モデルを用いて、現在の短寿命微量気体関連排出量を基準として地域ごと・組成ごとの排出量を任意に増減させた場合を想定したシミュレーション（感度実験）を行い、SLCFsのうち微量気体（メタンおよびその前駆物質・オゾンおよびその前駆物質・代替フロン）および硝酸塩エアロゾルによる地域ごとの気候変動を定量的に評価する。
- 感度実験で使用した排出量データおよび感度実験からの気温・降水量などのパラメータの出力をデータセットとして、テーマ2におけるSLCFsによる環境影響評価およびテーマ3における最適緩和シナリオ策定のために提供する。
- テーマ3において策定された複数の影響緩和シナリオを適用して全球化学気候モデルによるシミュレーションを行い、その計算結果の解析により地域ごとの気候変動の予測される変化を評価する。

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

- 雲は気候を大きく変化させる重要なファクターである。エアロゾルモデルSPRINTARSおよび大気化学モデルCHASERが組み込まれた雲物理過程を陽に表現できる空間高分解能気候モデルを用いて、現在のSLCFs関連排出量を基準として地域ごと・組成ごとの排出量を任意に増減させた場合を想定したシミュレーションを行う。
- エアロゾルモデルおよび大気化学モデルが組み込まれた従来型の全球気候モデルによるシミュレーション結果と比較することで、雲過程の表現および空間分解能の違いによる計算結果の差異を解析する。その結果、必要と判断した場合は、テーマ2および3へシミュレーション結果を提供する。
- 高分解能であることから、局所的な気象の極端現象を表現できる可能性があるため、SLCFs関連排出量変化に伴う極端現象による影響を定量的に評価する。

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

- SLCFs関連排出量を様々に変化させた全球気候モデル（サブテーマ1, 2）および高分解能気候モデル（サブテーマ3）によるシミュレーション結果の解析を通じて、特に雲・降水などの大気水循環およびエネルギー収支の変動を定量的に評価する。
- 特に水循環変化は、気象災害により人的・経済的被害をもたらさう極端現象と密接に関わっているため、各感度実験について大雨・熱波等の極端現象の頻度および規模の変化に着目して解析する。
- 解析結果は、テーマ2におけるSLCFsによる環境影響評価およびテーマ3における最適緩和シナリオ策定のために提供する。



図1. 2 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」のサブテーマ構成

## (2) 戦略的研究開発 (I) S-20の準備

### ① 予備実験の解析

戦略的研究開発 (I) S-20にて実施する実験の予備実験として、大気海洋結合のMIROC-SPRINTARSを用いて、主要な人為起源短寿命気候強制因子 (SLCFs) である硫酸塩エアロゾルの前駆気体であるSO<sub>2</sub>について、燃料消費起源の排出量を全球一律の比率で数段階に増減させる感度実験を行った。その際のCO<sub>2</sub>濃度を、2000年レベルおよびその2倍の2つのパターンに設定した。その結果、2つのパターンとも硫酸塩エアロゾルの増減量はほぼ同量であるため、エアロゾル・放射相互作用およびエア

ロゾル・雲相互作用による、早い応答も含む有効放射強制力には有意な差はない（図1. 3）。しかし、近い将来に想定される硫酸塩エアロゾル濃度の低下に伴う気温上昇は、同量の硫酸塩エアロゾル濃度の低下であっても、CO<sub>2</sub>濃度が高い状態の方が大きくなることを定量的に示した（図1. 4、図1. 5a）。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（図1. 5b）および水蒸気フィードバック（図1. 5c）が寄与していることを示した。このことは、放射強制力の評価だけでは気温等の具体的な気候変化の定量的評価はできないこと、また、大気汚染対策を実施する場合、同時に温室効果ガス濃度の上昇を抑制しなければ、地球温暖化が加速度的に進行することを示している。この研究成果は査読論文<sup>1)</sup>として掲載され、プレスリリースを行ったところ（<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/537>）、関心が高く、国内計5紙に掲載された。また、American Association for the Advancement of Science (AAAS)のニュースサイトで紹介し、国外の一般向け情報発信も行った（[https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2021-03/ku-apr031021.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-03/ku-apr031021.php)）。

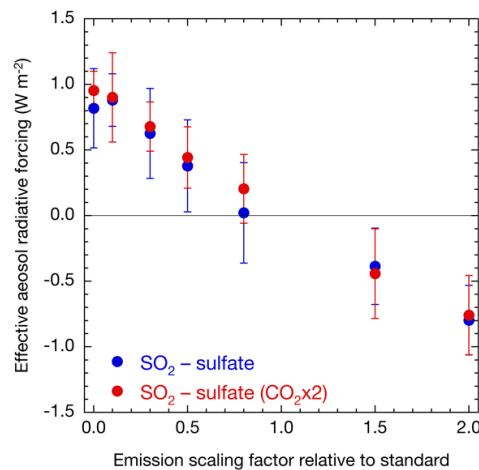


図1. 3 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料消費起源SO<sub>2</sub>排出量を現在の濃度から全球一様の比率で増減させた場合の年平均有効放射強制力。CO<sub>2</sub>濃度を（青）2000年レベル（赤）2000年レベルの2倍に設定。

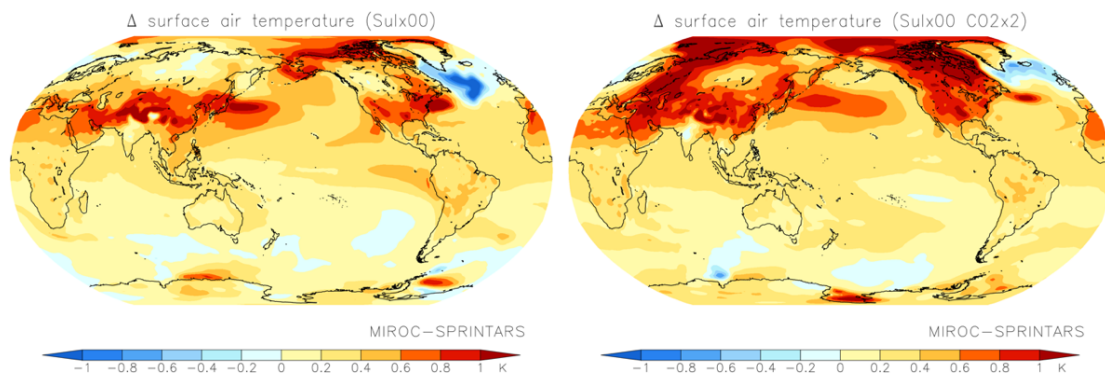


図1. 4 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料消費起源硫酸塩エアロゾルを現在の濃度からゼロにした場合の年平均地上気温変化。CO<sub>2</sub>濃度を（左）2000年レベル（右）2000年レベルの2倍に設定。

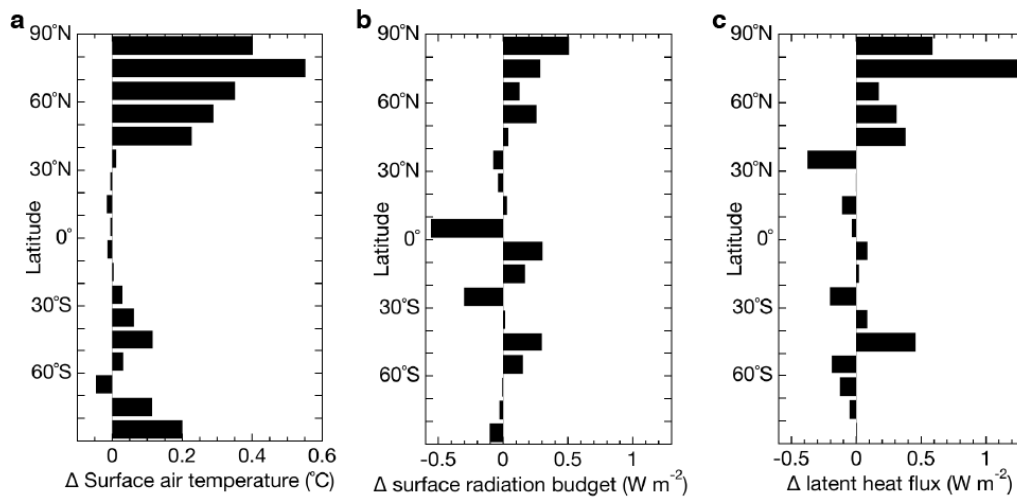


図1. 5 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料消費起源硫酸塩エアロゾルを現在の濃度からゼロにした場合の年平均 (a) 地上気温変化 (b) 地上放射収支変化 (c) 潜熱変化のCO<sub>2</sub>濃度が2000年レベルと2000年レベルの2倍に設定した場合の差。

## ②数値モデルの検証

戦略的研究開発 (I) S-20にて利用予定の最新版MIROC-SPRINTARSの定量的表現の精度向上を図るために、エアロゾルに関する観測データとの比較を行った。エアロゾル濃度は対流圏下層で高いため、定量的には地上観測データを利用して検証することが必要である。受動型センサの多地点展開の観測網としては、NASA Goddard Space Flight Centerの研究グループが世界的に展開するAERONET ([https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/)) と、日本の研究グループが日本・アジアを中心に展開するSKYNET (<http://www.skynet-isdc.org>) がよく知られている。AERONETで10年以上継続観測している世界94地点と、SKYNETの全地点でのエアロゾル光学的厚さとオングストローム指数について、MIROC-SPRINTARSとの比較を行った。その一例として、本研究課題の研究代表者が九州大学応用力学研究所にて管理しているAERONET, SKYNET両者の2018年の月平均データとの比較を示す(図1. 6)。誤差のある月があるものの、MIROC-SPRINTARSによるシミュレーションは概ね観測データを定量的に再現していることが示されている。光学的厚さは年間を通して0.2~0.4程度、オングストローム指数は、黄砂が飛来する春季に相対的に低く、その他の季節では1以上という特徴が一致している。ただし、AERONET, SKYNETの間にも比較的大きな差があることは、数値モデルの比較に利用する際に注意が必要である。

また、静止気象衛星ひまわり8号により得られるエアロゾル光学的厚さの広域分布についても比較を行った。例として、2019年8月と12月のデータを示す(図1. 7)。いずれも、中国およびインドでの高濃度が再現されており、さらに、8月ではシベリア、12月ではオーストラリア東部での大規模森林火災の状況も再現されていることが確認できる。これらのことは、既存の排出量データを与えることによるMIROC-SPRINTARSのエアロゾル空間分布の再現性は高いことを示している。

MIROC-SPRINTARSを用いたPM<sub>2.5</sub>の予測を2007年から毎日実施しており、その予測結果は、多くの新聞等のメディアに掲載されて社会生活のための基盤情報として利用されているほか、各自治体の環境研究所での観測にも活用されている。この事実自体が、厳しい質が求められる一般向けの情報提供において信頼されている証拠であり、S-20における政策に資する情報の創出に耐え得るものであることを示している。

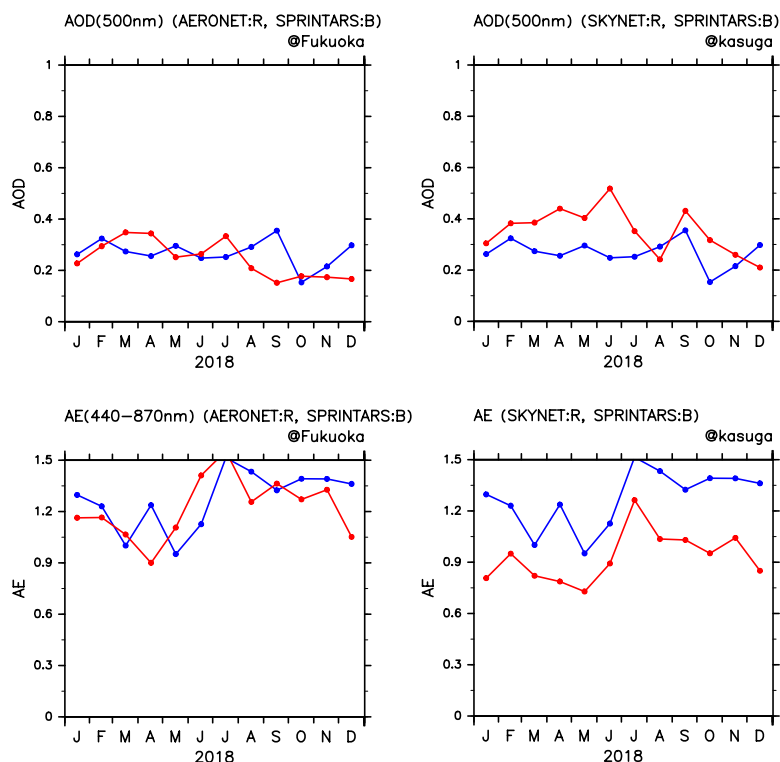


図 1. 6 九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）での2018年の月平均エアロゾル光学的厚さ（上）とオングストローム指数（下）。（青）MIROC-SPRINTARSによるシミュレーション（赤）AERONET（左図）もしくはSKYNET（右図）。

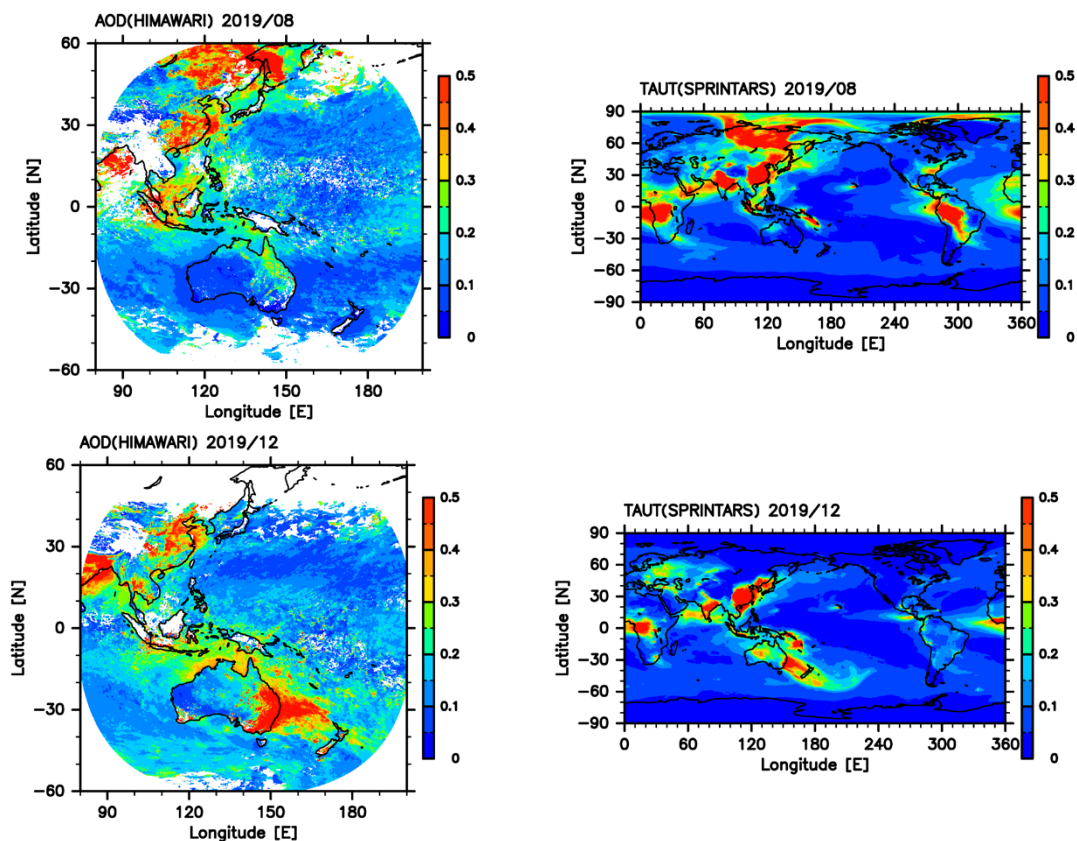


図 1. 7 静止気象衛星ひまわり8号による観測（左）およびMIROC-SPRINTARSによるシミュレーション（右）の月平均エアロゾル光学的厚さ。（上）2019年8月（下）2019年12月。

### ③国際連携の構築

戦略的研究開発（I）S-20のプロジェクト概要にあるとおり、プロジェクトの主要アウトカムの目標は、国内政策だけではなく、国際的枠組に対して最適なSLCFs削減に関する定量的な科学的知見を提供することにある。研究代表者である竹村は、Asia Pacific Clean Air Partnership (APCAP)の第2期Science Panel Memberを務めている。これに関連して、政策要綱 Co-control of air pollution and surface air temperature<sup>3)</sup> (<https://bit.ly/3oAvtcH>) を執筆・公表し、各国の大気環境および気候変動に関わる政策決定者へ向けて、これまでの研究に基づく科学的知見についてメッセージとして発出した。APCAP Science Panel Memberとしての活動はS-20期間中も継続するため、S-20により得られる科学的知見の政策への貢献の場となるほか、国際的に求められる科学的知見の情報収集の場ともなるため、S-20における研究のフィードバックも得られることが見込まれる。

また、IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI)において、温室効果気体と同様に、各国からSLCFsの排出量推計の提出を将来的に求めることを念頭に、SLCFsの排出量推計ガイドラインの新規策定作業が進められている。研究代表者である竹村は、IPCC TFI主催で2018年に開催された第1回Expert Meeting on Short-Lived Climate Forcers (EM-SLCF)に出席したのに続き、2020年に開催予定であった第2回会合の出席者にも選出され出席予定であったが、COVID-19の影響により延期され、2021年に作業が再開されている。IPCC TFIにも、SLCFsに関する科学的知見の提供が求められているため、S-20からの貢献ができるような関係性を継続した。

S-20で利用するエアロゾル気候モデルSPRINTARSや化学気候モデルCHASERは、以前から複数の国際的なモデル相互比較プロジェクトに積極的に参画してきた。本研究期間中も、Aerosol Comparisons between Observations and Models (AeroCom), Precipitation Driver Response Model Intercomparison Project (PDRMIP), Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project (AerChemMIP)における議論に参画し、論文も受理・公表されている。S-20テーマ1においては、エアロゾルおよび大気化学に関するモデル相互比較プロジェクトに引き続き参画していくことで、国際的なSLCFs研究コミュニティから発出する新しい科学的知見の創出に貢献していく。

## 5. 研究目標の達成状況

戦略的研究開発（I）S-20テーマ1の研究構想について、前戦略的研究開発課題S-12の成果を踏まえつつ、S-20の他テーマのリーダー・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、十分に検討して構築することができた。

S-20でのシミュレーション実験の具体的な計画を見据えつつ、その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た。これは当初の目標を超えるものである。また、計画通りに、S-20にて利用予定の最新版MIROC-SPRINTARSの出力結果を観測データと比較して検証を行い、妥当なシミュレーション結果が得られていることが確認できた。国際連携については、モデル相互比較プロジェクトへの参画を通じた研究動向把握のほか、FSの段階から、APCAP政策要綱を執筆・公表することで、国際的および各国の政策のための提言をすることができ、これも当初の目標を超えるものである。

## 6. 引用文献

- 1) Takemura, T., 2020: Return to different climate states by reducing sulphate aerosols under future CO<sub>2</sub> concentrations. *Scientific Reports*, 10, 21748, doi:10.1038/s41598-020-78805-1.
- 2) Suzuki, K., and T. Takemura, 2020: Understanding hydrological sensitivities induced by various forcing agents with a climate model. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, 16, 240-245, doi:10.2151/sola.2020-040.

- 3) Takemura, T., 2020: Co-control of air pollution and surface air temperature. Clean Air Brief 2020, Asia Pacific Clean Air Partnership / UN Environment, <https://bit.ly/3oAvtcH>.

## II-2 短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価のための調査研究

東京大学 生産技術研究所

芳村 圭

### [要旨]

令和3～7年度戦略的研究開発（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」のテーマ2「短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価」の研究計画を確定させるための調査を実施した。S-20のテーマリーダー・戦略FS検討専門部会委員・アドバイザー・環境省担当者との議論を踏まえて、S-20テーマ2の研究開発体制を提案した。また、S-20テーマ2を円滑に推進すべく、S-20テーマ2で使われる予定の統合陸域シミュレータILSを準備するとともに、機械学習を用いた気候モデル出力のバイアス補正手法についてもアルゴリズムを構成した。その他、国内での陸にまつわる様々なプロセスに関する研究者を集めたワークショップを開催し、協力体制を築くことができた。

### 1. 研究開発目的

戦略的研究開発（I）課題にて予定している以下の研究について、事前に必要な検討を行うとともに、研究の本格実施に円滑に入るための準備を行う。

自ら開発してきた健康影響・農作物影響・洪水渇水影響に関する評価モデルを用いて、SLCFsによる環境影響の評価を行う。その際に、テーマ1によるSLCFsの気候影響の定量的評価を基礎情報として利用する。ただし、テーマ1からの情報は、地域規模の詳細な環境影響評価のためには空間分解能が粗いことが想定されるため、ダウンスケーリング手法の導入を検討する。また、影響評価結果は、テーマ2におけるSLCFs環境影響評価の外力として、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される。

### 2. 研究目標

SLCFsを加味して推定した気候・気象・水文諸量を用い、複数セクターにおける影響を評価するにあたり、洪水・水資源、農業、健康分野などのセクターの選別を行う。同時に、詳細な影響評価には欠かせない気候モデル出力のバイアス補正・ダウンスケーリングに関して、新しい機械学習を用いたアプローチでより効率的かつ正確な手法を構築するための準備を整える。

### 3. 研究開発内容

戦略的研究開発（I）課題においては、テーマ1によって推計される、SLCFsの影響を加味した全球気候モデル出力に対して、従来の手法だけではなく、新たな機械学習的な手法を駆使したバイアス補正（BC）・ダウンスケーリング（DS）手法を構築し、日本や東アジアなどを含むいくつかの特定の領域に適用する。並行して、洪水・渇水、農業、健康など、未来社会の構築においていくつかのより重要なセクターを選別し、それらの影響評価モデルを構築する。構築した複数の影響評価モデル及びBC/DS手法を適用した気候モデル実験結果を用いて、SLCFsによる地域規模の環境影響評価を行う。

以上の研究を実施するにあたり、本FS研究課題では、戦略的研究課題（I）でも確実に用いられるように、現業で用いられている全球気象予報結果で効果的に働いた機械学習を用いたBC/DSに関して、テーマ1の全球気候モデルの結果にも使えるかどうかの試行を繰り返し、手法を確立する。計算処理時間に関して、必要に応じて処理時間短縮のためのアルゴリズムの最適化・並列化などの作業を行う。一方影響評価に関しては、扱うセクターを検討し、それらのモデルを改良・構築する。具体的には、洪水・渇水なども扱うことのできる水文モデル、稲や小麦など代表的な作物を網羅した農業モデル、大気汚染物質濃度の変動による健康被害を推計する健康モデル等について、自ら開発してきた統合陸域シミ



ュレータILSへの結合可能性について検討する他、他のセクターについても吟味する。例えば大気物質汚染だけではなく、気温・降水量等の代表的な気候変動による健康影響も加味し、何がどれくらいどのような健康被害をもたらしているのかを調べられるようにする。また、水温・水質をILSに組み込むことで、下痢などの水質由来の疾患も扱うことを検討する。一方、水田などの湿地や、凍土融解、さらに牧畜業から発生するメタンについてのILSでの取り扱いについてもその可能性を検討する。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 戦略的研究開発 (I) S-20の構想提案

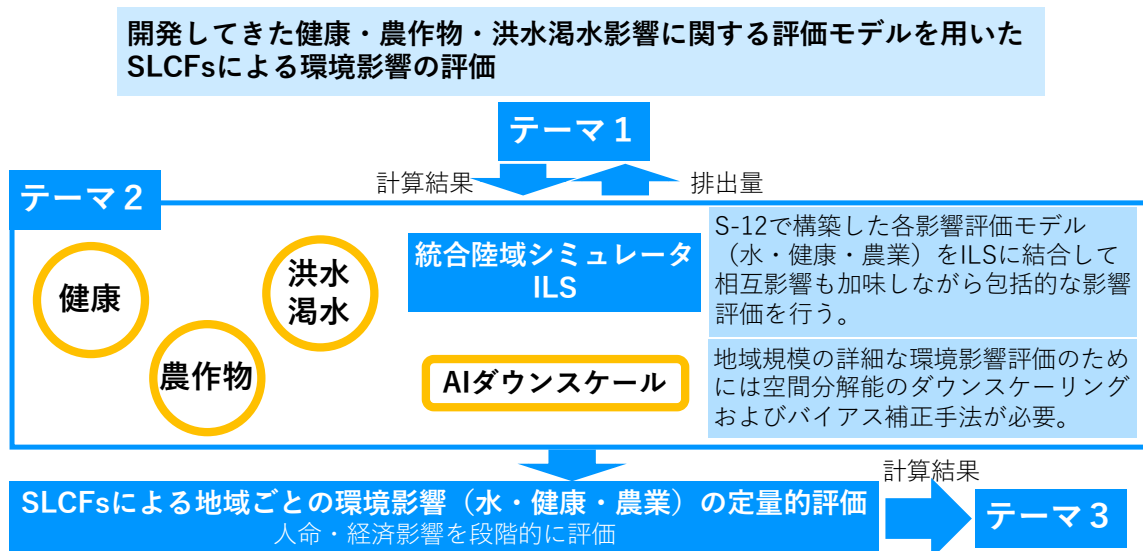
令和3～7年度戦略的研究開発 (I) S-20「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」のテーマ2「短寿命気候強制因子による地域規模の環境影響評価」の研究構想について、2FS-2001の研究参加者 (S-20のテーマリーダー) ・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、以下のように設計した。

##### ①成果目標

- 高度化された統合陸域シミュレータおよび高解像度化されたテーマ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
- 陸域からのSLCFs排出量を能動的に推定可能な統合陸域シミュレータの高度化・改良
- テーマ3により策定されたSLCFs排出量削減に関する最適緩和シナリオを利用して実施されるテーマ1の気候変動のシミュレーション結果を用いた健康影響・農作物影響・洪水渇水影響の評価

##### ②研究概要

前戦略研究課題であるS-12において、SLCFsの排出量増減による健康影響や農作物への影響、或いは洪水・渇水等の水循環などへの影響を評価するフレームワークが確立され、そういった項目の地球全体での定量的な影響評価を世界に先駆けて行うことができた。しかし、テーマ1の項目にも示されている通り、濃度の時空間偏在性の比較的大きなSLCFsによる影響を評価したい場合、地域スケールでの情報を政策決定者或いは市民に提供する必要がある。そのような背景を鑑み、本テーマでは、SLCFs排出量増減の地域ごとの環境影響評価を行うこととする。影響評価を行う項目としては、健康影響・農作物影響・洪水渇水影響を基本とする。それらの環境影響評価は、テーマ1が行う気候モデルによるシミュレーション結果を外力として、各種影響評価モデルを動かすことによって行われる。その際に地域ごとの影響を精度良く評価したい場合には、用いる気象外力が高解像度化されている必要があるが、テーマ1で用いる予定の気候モデルは1格子あたり数十kmスケール程度の空間解像度となる予定である。そのため、比較的低解像度の気候モデルによるシミュレーション結果を高解像度にダウンスケールする役割のサブテーマを設定する。ダウンスケール手法には、古くから用いられてきている力学的ダウンスケールや統計的ダウンスケールに代わる新たな手法として、近年使われ始めている機械学習手法を駆使したものの利用可能性についても検討する。



#### 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

図 2. 1 S-20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」の研究概要

### ③サブテーマの研究概要

サブテーマ(1)：短寿命気候強制因子による陸水変動の定量的評価

- テーマ 2 の統括として、サブテーマの研究成果を統合する役割を担う。
- テーマ 1 で得られる予定のSLCFs関連排出量増減による気候変動を加味した気候モデルシミュレーション結果を用いて、地域ごとの陸域での水循環の変動への影響を定量的に評価する。その際、極端現象についても着目し、規模の大きな洪水・渇水による影響を評価する。
- サブテーマ 4 で得られる予定の高解像度化された気候シミュレーション結果を用いて、さらに詳細な空間スケールでの陸域水循環変動への影響を評価する。
- 上記の影響評価に用いる統合陸域シミュレータ（ILS）をより高度化し、改良する。ILSで採用されている汎用カプラをうまく使い、別途開発されている河川水温・水質モデル、土砂流出モデル、人間活動モデル、地下水モデルなどを結合することで、水循環シミュレーションの精度を向上させる。
- サブテーマ 3 と共同で、陸域からの自然由来・人間由来のSLCFs排出に関わる過程のモデル化を行う。例えば水田や湿地、畜産由来のメタンガスや、燃料使用や火災により発生するブラックカーボン・SO<sub>2</sub>等についてより精緻にモデル化し、テーマ 1 で利用されるモデルとの相互作用を考慮できるモデルを開発する。

サブテーマ(2)：短寿命気候強制因子による健康影響の定量的評価

- テーマ 1 で得られる予定のSLCFs関連排出量増減による気候変動を加味した気候モデルシミュレーション結果を用いて、地域ごとの人類の健康状態への影響を定量的に評価する。
- サブテーマ 4 で得られる予定の高解像度化された気候シミュレーション結果を用いて、さらに詳細な空間スケールでの人類の健康状態への影響を評価する。
- SLCFs排出量に関連する大気汚染物質（PM2.5とオゾン）濃度の変化による健康影響を評価するだけでなく、SLCFsによる気温変化に付随する健康影響も評価する。
- また、熱中症や熱関連疾患・死亡（心臓病など持病が高温により悪化して死亡する）のような、気温変化に付随する健康影響だけを見るのではなく、サブテーマ 1 から得られる予定の洪水などによる感染症を伴う直接的健康被害、あるいは渇水に伴う栄養不良に伴う健康被害

などの評価を行う。

- サブテーマ1と共同で、統合陸域シミュレータへの健康影響モデルの組み込みを行い、SLCFsに対するより精緻な影響評価を行う。

サブテーマ(3)：短寿命気候強制因子による農作物影響の定量的評価

- テーマ1で得られる予定のSLCFs関連排出量増減による気候変動を加味した気候モデルシミュレーション結果を用いて、地域ごとの農作物への影響を定量的に評価する。
- サブテーマ4で得られる予定の高解像度化された気候シミュレーション結果を用いて、さらに詳細な空間スケールでの農作物及び農業活動への影響を評価する。
- 農作物への影響として、オゾンなど直接的に植物生理に影響するものと、大気中のブラックカーボンや硫酸塩などにより直達光および散乱光が変化することによって間接的に影響するものを取り入れた影響評価を行う。
- サブテーマ1と共同で、統合陸域シミュレータへの作物成長モデルの組み込みを行い、SLCFsに対するより精緻な影響評価を行う。
- サブテーマ1と共同で、特に水田由来のメタン排出に関するモデル開発に取り組む。

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

- テーマ1で得られる予定の気候モデルシミュレーションの空間解像度から、必要に応じた時空間ダウンスケーリングを行う。古くから用いられている力学的ダウンスケーリングや統計的ダウンスケーリングに代わる新たな手法として、近年使われ始めている機械学習手法を駆使したものの利用可能性について検討する。
- 天気予報用の数値予報モデルの出力を、衛星やレーダー等からの日々の降水分布観測で学習させた識別器を用意し、テーマ1で得られる予定のSLCFs排出量増減による気候変動を加味した気候モデルシミュレーションからの日々の降水分布に対して適用することで、降水分布のダウンスケーリングおよびバイアス補正を行う。
- 降水と同様、風速や気温等のダウンスケーリングおよびバイアス補正を行い、サブテーマ1・2・3が使用する大気表層の外力をより詳細にかつ高精度化する。



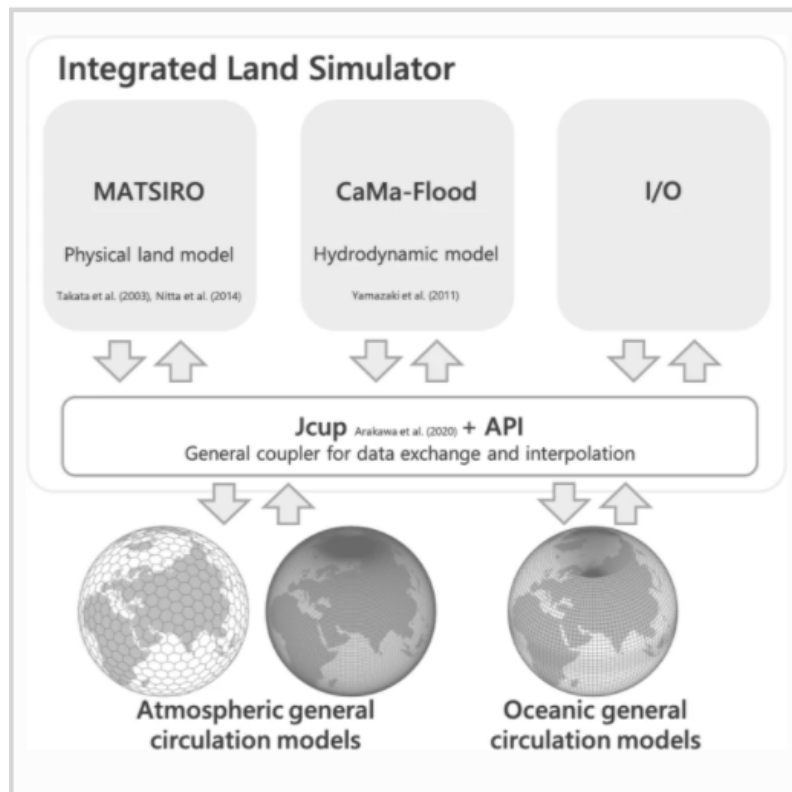


図 2. 3 統合陸域シミュレータ ILS による連成構造の概念図。(Nitta et al., 2020<sup>1)</sup> より)

## ②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開発

戦略的研究開発 (I) S-20テーマ2で用いるための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開発を進めた。日本の一地域を対象として、図 2. 4 で示すように、2007年から2018年の気象庁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）を用いて、MSM-GPV降水量（SIM）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。ブーツストラップ手法を参考に、検証対象とする年を除いた11年間のデータで学習した。機械学習（ML）アルゴリズムには、サポートベクターマシンSVMを使っている。ただし、機械学習だけだと系統的な過小評価があるため、分位マッピング手法（Quantile Mapping）でポストプロセス的にML結果を補正した。その結果をMLQMと名付けた。

図 2. 5 では、1月と7月について、SIM、ML、MLQMのそれぞれの手法から得られた降水量から求めた月平均値及び95パーセンタイルの降水量を示している。OBSはレーダーアメダス降水量データから得られたものである。月平均値と95パーセンタイル値の両方について、MLQMによって精度のより良い降水量が推計できているがわかった。

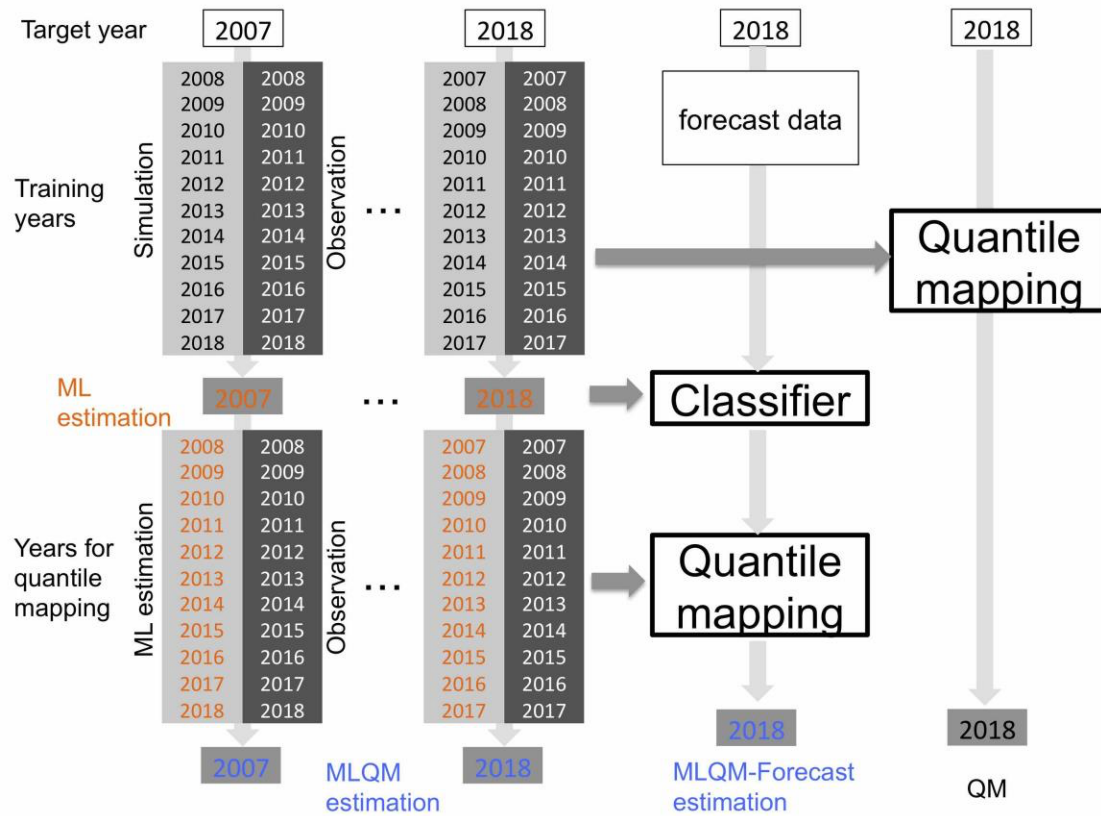


図 2. 4 機械学習を用いた降水量推定方法の概要。12年間（2007年から2018年まで、対象年を除く）の降水量の観測値とシミュレーションデータを学習データセットとして使用した。MLで推定した降水量と同じ12年間（対象年を除く）の観測降水量を用いて、分位値マッピング（MLQM）で降水量を推定する。MLQM-Forecastは、分類器を用いたモデルの予測データと、ML法で生成された累積密度関数を事前に使用して生成される。MLQM-Forecastは、観測降水量とシミュレーション降水量から生成した累積密度関数を用いてモデルの予測データを作成する。

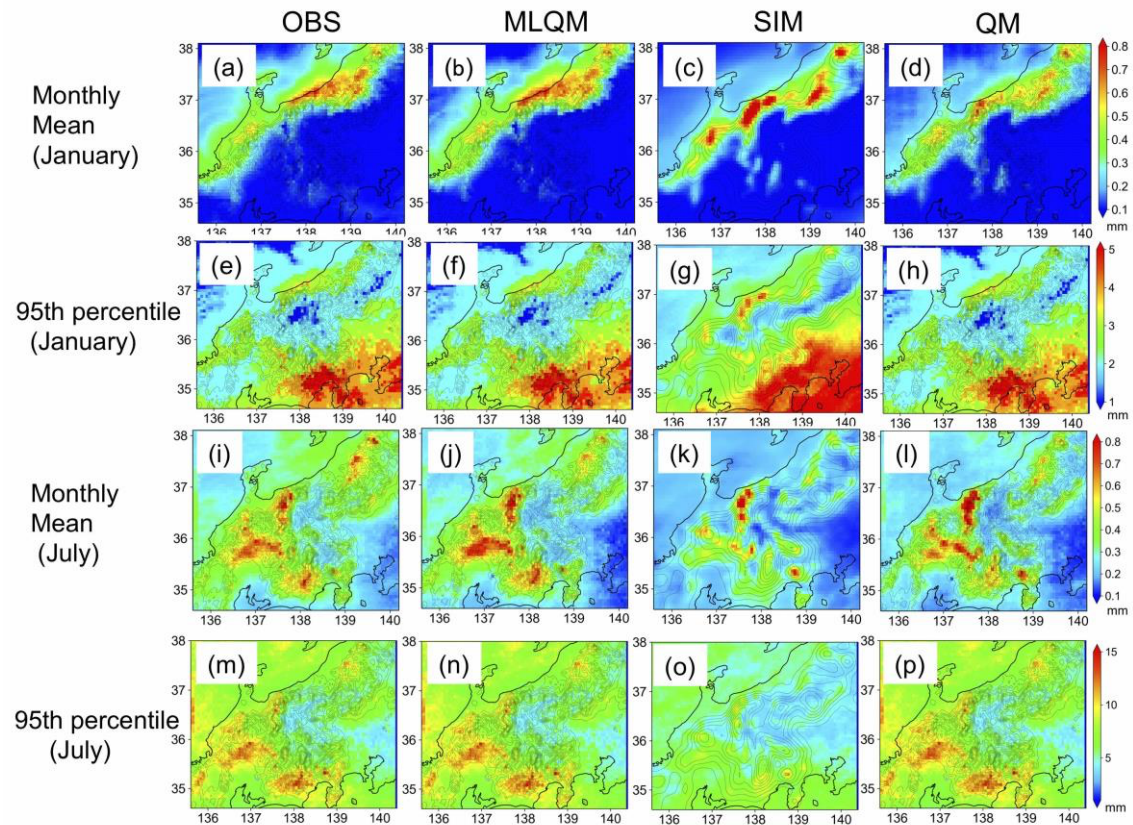


図2. 5 1月と7月の観測降水量（OBS）、分位マッピングを用いたML法による推定降水量（MLQM）、模擬降水量（SIM）、分位マッピングによる推定降水量（QM）における12年間の月平均値と95パーセンタイルの分布。

### ③国内WSの開催

戦略的研究開発（I）S-20テーマ2を推進するにあたり、陸モデルの開発・改良は鍵となる。そのために、テーマ2の4つのサブテーマが協力し合うのはもちろんであるが、それ以外の研究者とも協調し、これまでの気候モデル用の陸面過程モデルでは扱えてこなかった（もしくは過度に簡素化されていた）様々な陸での重要な要素、例えば河川、湖沼、積雪、植生、土壌、地下水、人間活動等について、別途研究されている知見やモデルをより安易かつ物理的な整合性は担保した形で結合させることを目指し、2021年3月に「2020年度次世代陸モデル開発・応用・社会実装に関する合同ワークショップ」をオンライン開催した。20件の話題提供、100名を越す参加者が集まり、大変有意義な情報交換・議論を行うことができた。

## 5. 研究目標の達成状況

戦略的研究開発（I）S-20テーマ2の研究構想について、前戦略的研究開発課題S-12の成果を踏まえつつ、S-20の他テーマのリーダー・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、十分に検討して構築することができた。

S-20テーマ2で使われる予定の統合陸域シミュレータILSを準備することができた。このILSを用いた洪水予測システムに関して、JAXAから表彰を受けたことは、当初の目標を超えるものであった。機械学習を用いた気候モデル出力のバイアス補正手法についてもアルゴリズムの構成は確立し、今後大量のデータを用いた包括的な検証や、実際に影響評価モデルの入力値として使用していく段階に移行していく。その他、国内での陸にまつわる様々なプロセスに関する研究者を集めたワークショップを開催し、協力体制を築くことができたことは、今後のS-20の成功に大きく資する基盤となると考えられる。

## 6. 引用文献

- 1) Nitta, T., T. Arakawa, M. Hatono, A. Takeshima, and K. Yoshimura, 2020 : Development of Integrated Land Simulator, Progress in Earth and Planetary Science (PEPS), doi:10.1186/s40645-020-00383-7.



## II-3 短寿命気候強制因子による環境影響の緩和評価技術の検討のための調査研究

国立環境研究所 社会環境システム研究センター 花岡 達也  
(2021年4月～ 社会システム領域)

### [要旨]

令和3～7年度戦略的研究開発（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」のテーマ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」の研究計画を確定させるための調査を実施した。S-20のテーマリーダー・戦略FS検討専門部会委員・アドバイザー・環境省担当者との議論を踏まえて、S-20テーマ3の研究開発体制を提案した。また、S-20テーマ3における研究実施を円滑に開始するために、SLCFs早期大幅削減の分析に資するSLCFs削減対策技術の情報を収集・整備し、S-20テーマ3で用いる統合評価モデルの核となる世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルAIM/Enduse[Global]を用いて、SLCFs緩和策の地域偏在性に関する評価を行った。また、SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の方法論を設計した。

### 1. 研究開発目的

戦略的研究開発（I）課題にて予定している以下の研究について、事前に必要な検討を行うとともに、研究の本格実施に円滑に入るための準備を行う。

統合評価モデルを用いて、2°C/1.5°C目標および環境影響の低減を考慮したSLCFs・GHGs最適緩和シナリオを探索し、地域別・ガス種別の技術的な潜在削減量や経済影響などを定量的に評価する。その際に、前戦略課題S-12で考慮したエネルギー部門だけでなく、非エネルギー部門の主要なSLCFs排出源も網羅した緩和策を分析し、アジア域の多様性および排出源や潜在削減量の地域偏在性に着目しながら、持続可能で脱炭素な社会にむけた世界の発展経路を探索することが重要である。

### 2. 研究目標

SLCFsシナリオ策定に用いてきた世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルに、新たにフロン類に係るモジュールを組み込み、パリ協定の2度目標を達成しつつ、同時にSLCFsによる健康影響・環境影響を軽減させる早期削減シナリオ評価の準備を進める。また、テーマ間のシナリオ評価結果の共有方法および気候影響・環境影響評価結果のシナリオへの反映方法を検討し、戦略的研究開発（I）課題における本テーマの研究体制を整備する。

### 3. 研究開発内容

前戦略課題S-12では、エネルギー部門に注目し、BC、対流圏オゾンの前駆物質である窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、一酸化炭素（CO）、揮発性有機化合物（NMVOC）、および冷却効果を持つ大気汚染物質である二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）に対して、地球全体およびアジア域を対象に環境影響と温暖化の両方を緩和する排出シナリオを探索した。しかし、削減される大気汚染物質の種類によっては新たな温暖化を促進する可能性があるため、大気汚染物質による健康被害を減らしながら地球温暖化も緩和することのできる最適な短寿命気候強制因子削減策を、さらに探索していく必要がある。そこで戦略的研究開発（I）課題において、エネルギー部門だけでなく、非エネルギー部門における短寿命気候強制因子（メタンやフロン）を加えて緩和対策を評価し、健康影響と温暖化影響の双方を同時解決するためのSLCFsに係る影響緩和シナリオを評価する。また、テーマ1の全球気候モデルによる複雑な相互作用の評価結果やテーマ2による影響モデルによる環境被害や気候影響の評価結果を考慮して、SLCFs影響緩和シナリオを再度探索し、緩和策の費用分析を考慮した、最適な影響緩和シナリオを評価する。

以上の研究を実施するにあたり、本研究課題では、SLCFsシナリオ策定に用いてきた世界多地域多部

門の技術積み上げ型モデルに、新たにフロン類に係るモジュール設計・開発を行い、モデルに組み込む実験をし、モンリオール議定書キガリ改正の評価に向けた準備を進める。またメタンに関する対策技術情報を収集し、メタン排出の評価に係るモジュールの拡充・拡張を進め、さらに対流圏オゾンの前駆物質と関連のある反応性窒素（NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>）に関する対策技術の情報収集を実施し、SLCFs排出削減の深堀評価に必要とされる要素を新たにモデル分析に組み込むための準備を進める。これらを元に、パリ協定の2度目標を達成しつつ、同時にSLCFs削減を進める最適影響緩和シナリオの探索にむけた予備的シナリオ実験を実施し、戦略的研究開発（I）課題に向けた本テーマの研究体制を整備する。

#### 4. 結果及び考察

##### （1）戦略的研究開発（I）S-20の構想提案

令和3～7年度戦略的研究開発（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」のテーマ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」の研究構想について、2FS-2001の研究参画者（S-20のテーマリーダー）・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、以下のように設計した。

##### ①成果目標

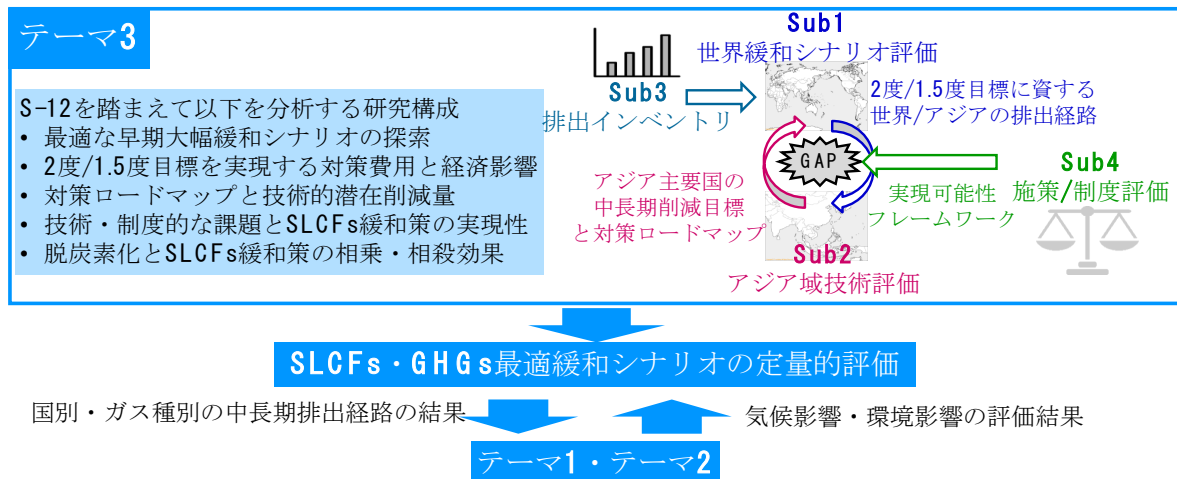
- 脱炭素社会の実現と環境影響の軽減に向けた持続可能な世界・アジア域のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索、およびSLCFs・GHGs排出削減経路における対策費用や経済影響等の定量的評価。
- 1.5℃目標に資するSLCFs・GHGsの早期大幅削減シナリオの探索、および脱炭素対策とSLCFs緩和策の組み合わせによる相乗効果・相殺効果の定量的評価
- パリ協定下のアジア諸国の排出削減目標の大幅な引き上げにむけた対策強化策、対策技術導入による潜在的削減量や技術的・経済的・制度的な課題の下における実現可能性、および主要な排出源の地域偏在性を踏まえた2℃/1.5℃目標の実現に向けた対策ロードマップの作成
- テーマ1による気候影響評価およびテーマ2による環境影響評価を踏まえ、テーマ3による緩和策による社会経済評価と合わせて、S20独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオを策定

##### ②研究概要

気候変動枠組条約のパリ協定（2015）で「世界の平均気温上昇を2℃未満に抑える（2℃目標）とともに1.5℃に抑える（1.5℃目標）努力を追求する」ことが合意されたが、2℃目標の実現には今世紀後半に正味CO<sub>2</sub>排出量をゼロにし、かつ非CO<sub>2</sub>温室効果ガス排出量の大幅削減も必要とされる。また、1.5℃目標の実現には、2050年頃までに正味CO<sub>2</sub>排出量をゼロにするために早期の大幅削減が急務である。前戦略研究課題であるS-12では、エネルギー部門に由来するブラックカーボン（BC）、対流圏オゾン（O<sub>3</sub>）の前駆物質である窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）・一酸化炭素（CO）・揮発性有機化合物（NMVOC）、および冷却効果を持つ硫酸塩エアロゾルの前駆物質である二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）に注目し、2℃目標の達成と環境影響の軽減の両方を考慮した緩和シナリオを探索した。本プロジェクトでは、さらに1.5℃目標の実現に向けて、早期大幅削減を可能とする対策技術の組み合わせや技術的・経済的・制度的な制約を考慮した最適な緩和シナリオを探索する。特に、SLCFsであるBC・対流圏O<sub>3</sub>・代替フロン（HFCs）・メタン（CH<sub>4</sub>）は、早期大幅削減による2℃目標/1.5℃目標への貢献が期待される。また、対策技術の組み合わせによっては、CO<sub>2</sub>と同時に大気汚染物質も削減されて温暖化を促進する可能性があるため、テーマ1による複雑な相互作用の評価や、テーマ2による環境被害や気候影響の評価を考慮して、最適なSLCFs削減策を探索する。これらの課題に対応する統合評価モデルを用いて、全球を網羅しつつ特にアジア域に注目し、エネルギー部門に加えて新たに畜産・農耕・廃棄物・産業プロセスなどの非エネルギー部門の主要なSLCFs排出源も網羅した

緩和策を分析し、持続可能で脱炭素な社会にむけた世界の発展経路を評価する。また、目標の実現に向けたアジア域における技術的・政策的な実現性や有効な緩和策について評価する。

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

図3. 1 S-20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」の研究概要

#### ③サブテーマの研究概要

サブテーマ(1)：統合評価モデルを用いた短寿命気候強制因子の緩和シナリオの定量的評価

- テーマ3の統括として、サブテーマの研究成果を統合する役割を担う。
- 主要なエネルギー部門および非エネルギー部門を網羅し、SLCFs・GHGs・大気汚染物質の緩和策が分析可能な技術選択モデルAIM/Enduse[Global]を構築し、気候変動および環境影響の双方を考慮した世界・アジア域における2°C/1.5°C目標に資する最適な緩和シナリオを策定する。また、分析結果をテーマ1およびテーマ2と共有する。
- サービス需要モデルを用いた経済危機・好機の影響によるエネルギー・サービス需要変動の評価、再生可能エネルギーモデルを用いた再生可能エネルギーの潜在性評価、技術選択モデルAIM/Enduse[Global]による対策技術導入量の評価などを考慮し、経済モデルAIM/CGE[Global]を用いて2°C/1.5°C目標に資する緩和シナリオの実現に必要な対策費用や経済評価を行う。
- 脱炭素化とSLCFs緩和策の相乗効果・相殺効果を評価し、2°C/1.5°C目標に資する緩和シナリオのアジア域における排出経路とパリ協定下でのアジア域の国別削減目標とのギャップを埋める対策・施策をサブテーマ2およびサブテーマ4と連携して評価する。
- アジア域に求められるSLCFs・GHGs排出経路をサブテーマ2に提供し、連携してアジア諸国のSLCFs・GHGsの早期大幅排出削減の可能性を評価する。

サブテーマ(2)：アジア域における短寿命気候強制因子緩和策の技術的潜在性の定量的評価

- 国別の経済発展や主要排出源の差異、同一国内における都市化・電化などの地域偏在性を考慮し、サブテーマ1による2°C目標/1.5°C目標に資する世界の緩和シナリオと整合的な、アジア主要国の国別削減目標の深掘りに向けた部門別緩和策の潜在性を評価する
- 主要なエネルギー部門（発電・産業・運輸・家庭業務部門）および主要な非エネルギー部門

(畜産・農耕・廃棄物・資源採掘・産業プロセス部門)を網羅したSLCFs・GHGs削減対策技術データベースを構築し、削減目標に向けた対策ロードマップを作成する。

- SLCFs・GHGs緩和策の技術的実現性や革新的技術の潜在性、技術的・社会的な制約などを検討し、サブテーマ1と連携して技術選択モデルAIM/Enduseを用いて、主要な国・部門に特化したSLCFs・GHGsの早期大幅排出削減の可能性を定量的に評価する。
- 対策技術データやアジア諸国の対策情報をサブテーマ1に提供し、連携して世界の2°C目標/1.5°C目標に資する緩和シナリオの実現を評価する。

サブテーマ(3)：アジア域における短寿命気候強制因子の排出インベントリの精緻化

- SLCFs関連物質をターゲットとして、アジア域排出インベントリREASのシステムを拡張・拡充する。メタンを対象物質に追加する。更に、S-12における主要発生源を含め、全ての発生源のアジアにおける重要性を精査し、その結果新たに選定された重点発生源を対象に、REASシステムへの追加・詳細化を行う。
- 拡張・拡充されたREASシステムを用い、統合評価モデルによるシナリオ開発の基準データとして必要となる、精緻化されたアジア域SLCFs関連物質排出インベントリを開発し、テーマ3サブテーマ1・2に提供する。また、モデル入力用及び結果解析用データとして、テーマ1・2にも提供する。
- アジア域のSLCFs関連物質排出量の現況及び近年の変動とその要因を取りまとめる。その結果を、サブテーマ1によって策定されるSLCFs関連物質排出量将来削減シナリオと比較評価し、アジア域の現況において、排出量の削減対策として重点を置くべき国・地域、それぞれの国・地域において重要な発生源を明らかにする。
- アジア域における気候変動、大気汚染を主とする大気環境問題の研究及び政策立案のベースとして活用されることが見込まれるため、本研究で開発されたSLCFs関連物質排出インベントリを外部公開する。

サブテーマ(4)：アジア域における短寿命気候強制因子に関わる緩和策の評価

- 主なSLCFの中で特に排出量の多いブラックカーボン(BC)、メタン及びフルオロカーボン(HFCs)の有効な緩和政策・技術に関し、導入のタイミングと普及の速度に関連する財政的、制度的、技術的、社会的障壁がどの程度影響を与えるかを体系的に評価し、定量的な測定を可能にする実現可能性フレームワーク(feasibility framework)を開発する。
- 同フレームワークを用いて、有効なSLCFs緩和政策を評価する。また、同研究結果を用いて、2018年UNEPより発表された「アジア太平洋地域の大気汚染・科学に基づくソリューションレポート」で提示された25の手段についても実現可能性を検討し、情報を系統的に整理し、ソリューションレポートを取りまとめたUNEPのイニシアチブ(アジア太平洋クリーンエアパートナーシップ(APCAP)及び気候と大気浄化の国際パートナーシップ(CCAC))や、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の科学パネルやイニシアチブなどの参加国政府へ研究成果を提供することで、国内政策や国際協力の検討に参照してもらうよう働きかける。
- 主な障壁をいかに克服するか、効果的なアプローチを特定した政策提言をまとめ、アジア地域及びCCACなど国際的な気候と大気環境に取り組むイニシアチブにて、政府関係者のみならず研究者に対し、提言の根拠となった手法と合わせて紹介し、政策策定や国際協力の検討に活用してもらえるように発信する。

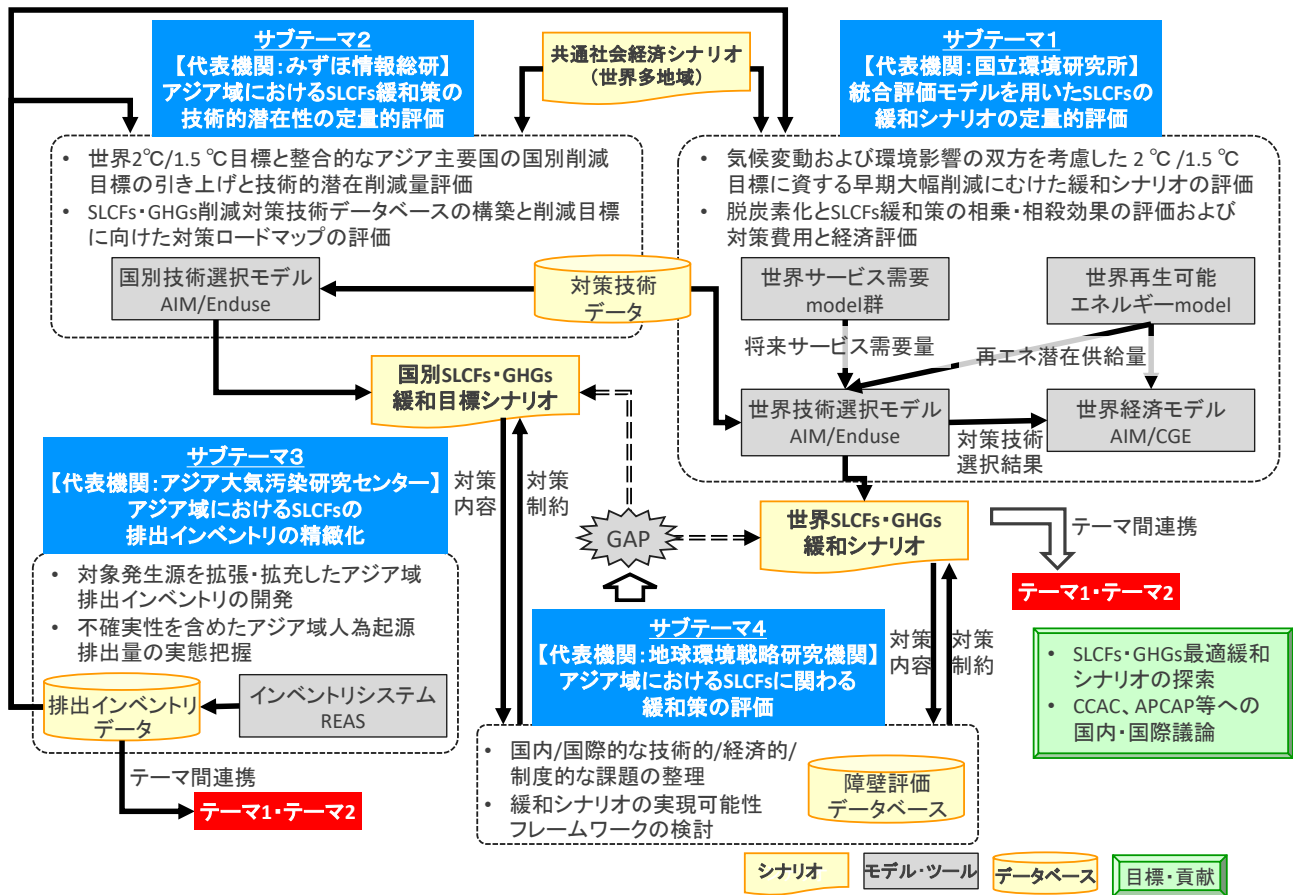


図3.2 S-20テーマ3「短寿命気候強制因子による環境影響の緩和シナリオの定量化」のサブテーマ構成

## (2) 戦略的研究開発 (I) S-20の準備

### ① SLCFs緩和策の地域偏在性に関する分析

戦略的研究課題 (I) S-20テーマ3では、世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルである AIM/Enduse[Global]を核とした統合評価モデルを用いて地域別・部門別・ガス種別の技術的な潜在削減量や排出経路などの評価を行う。そこで、AIM/Enduse[Global]モデルを用いてパリ協定の2度目標を達成しつつ、同時にSLCFs削減を進める最適影響緩和シナリオの探索にむけた予備的シナリオ実験として地域別・ガス種別・部門別の潜在削減量を評価し、アジア域における地域偏在性の特性を分析した。図3.3より、CH<sub>4</sub>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った特徴を示しており、また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ことが示唆された。したがって、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するにあたり、地域別・ガス種別・部門別の特徴を考慮した効率的なSLCFs削減対策の AIM/Enduse[Global]モデルへの導入を探索していく予定である。

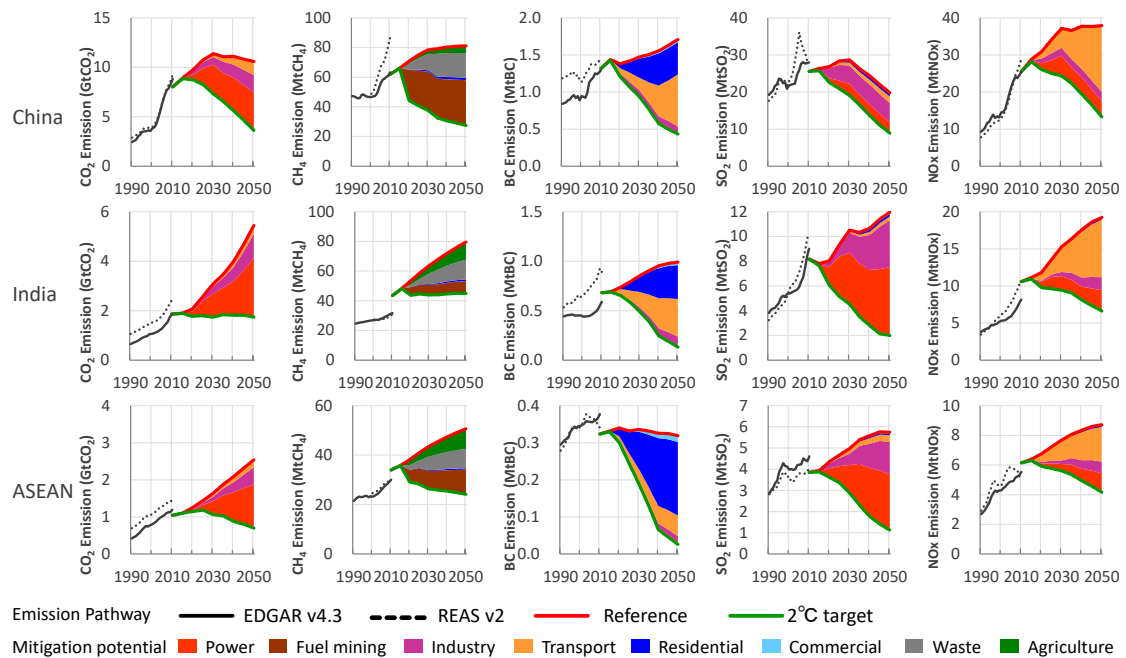


図3. 3 アジア域における地域別・ガス種別の排出経路と部門別の潜在削減量の地域偏在性の評価

## ②SLCFs大幅削減の分析に資する緩和策の技術情報の整備

SLCFsであるBC・CH<sub>4</sub>・対流圏O<sub>3</sub>・HFCsは、早期大幅削減による2°C/1.5°C目標への貢献が期待されるが、特にCH<sub>4</sub>およびHFCsの主要な排出源は非エネルギー部門である。そこで、モントリオール議定書キガリ改正の評価に向けた準備を進めるために、新たにHFCsに係るモジュール設計・開発を行い、モデルに組み込む実験をするためにHFCsに関する排出インベントリの整備や削減対策技術の情報を収集した。また、CH<sub>4</sub>に関する削減対策技術の情報や、また対流圏オゾンの前駆物質と関連のある反応性窒素（NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>）に関する対策技術の情報収集を収集し、それらのガス種の主要な排出源である農畜産部門、水田部門、農耕作部門、固形廃棄物処理部門、汚水処理部門のモジュールの開発および拡張・拡充を進め、SLCFs排出削減の深堀評価に必要とされる要素を新たにモデル分析に組み込むための準備を進めた。図3. 4に農畜産部門および水田部門におけるCH<sub>4</sub>削減技術に関する技術個票の事例を示す。S-20では、これら非エネルギー部門における削減対策技術の個票を基に対策技術データベースについて、SLCFsの早期大幅削減の分析に資するものとなるように継続して拡張・拡充していく予定である。

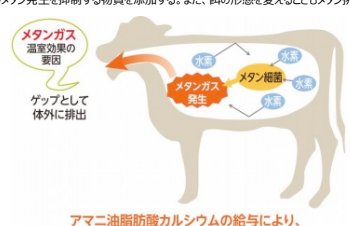
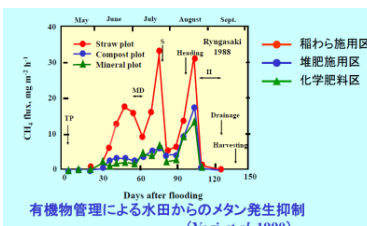
No.	1	No.	8
Name	メタン発生抑制物質の餌への添加	Name	水田の有機物管理方法の変更
Summary	<p>牛に与える飼料に脂肪酸カルシウム、カシューナッツ殻液、トウモロコシエタール発酵残渣 (DDGS) などのメタン発生を抑制する物質を添加する。また、餌の形態を変えることもメタン排出を抑制する。</p>  <p>メタンガス 温室効果の要因 ゲップとして 体外に排出</p> <p>メタン発生</p> <p>アミノ脂肪酸カルシウムの給与により、メタンガスの発生を抑制します。</p> <p>(出典) エチレイウェブサイト <a href="https://www.nichirei.co.jp/csr/environment/action/locality">https://www.nichirei.co.jp/csr/environment/action/locality</a></p>	<p>水田に施用する有機物を、稲わらから有機物の分解が進んだ堆肥に転換することでメタン発生量を抑える。稲わらから稲わら堆肥への転換、稲わらから動物性の堆肥への転換の2種類の転換が存在する。</p>  <p>有機物管理による水田からのメタン発生抑制 (Yagi et al. 1990)</p> <p>(出典) Yagi (1990)</p>	
Parameters	CH4削減率	Parameters	CH4削減率
Reference	<p>・肉用牛肥育試験データに基づく飼料へのアミノ脂肪酸カルシウム添加の経済および環境影響評価 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/jass/30/4/30_119/pdf/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/jass/30/4/30_119/pdf/-char/ja</a></p> <p>・カシューナッツ殻液の給与は泌乳牛のメタン産生量を低減させる <a href="https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2014/nilgs14_s14.html">https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2014/nilgs14_s14.html</a></p>	<p>・農耕地土壌からの温室効果ガスの排出抑制と作物生産 (福島県) <a href="http://www.naro.affrc.go.jp/archive/nias/techdoc/tsuchimizu/27/tsuchimizu27ppt_5.pdf">http://www.naro.affrc.go.jp/archive/nias/techdoc/tsuchimizu/27/tsuchimizu27ppt_5.pdf</a></p> <p>・水田からのメタン発生-食糧生産と地球環境安全とのバランス (農研機構) <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/tropics/6/3/6_3_227/pdf/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/tropics/6/3/6_3_227/pdf/-char/ja</a></p>	
Reduction date	8.1 %	Reduction date	20 %
Cost	<p>ベース 0 円/年/頭</p> <p>対策 5,840 円/年/頭</p> <p>差額 5,840 円/年/頭</p>	<p>ベース 0 円/ha</p> <p>対策 28,000 円/ha</p> <p>差額 28,000 円/ha</p>	
Life time	-	Life time	-
Diffusion amount/rate	<p>現状 0 %</p> <p>2030年度 20 %</p> <p>2050年度 100 %</p>	<p>不明</p> <p>不明</p> <p>シナリオから設定</p> <p>シナリオから設定</p>	
	カシューナッツ殻液の場合		日本の水田からのメタンと畑地からの亜酸化窒素の発生量 (農研機構) の各種土壌結果から平均的な数値を設定。
	追加して使用するためベースは0円とする。		ベースラインとして0円とする。
	16,000円/20kgのルミナップを1日20g使用することを想定。		1t/10aの堆肥を施用。単価は3,000円/とする。また、一方で、化学肥料が減肥される (1tで2kg/10aとする)。化学肥料は2,000円/20kgとする。

図3. 4 有効なCH<sub>4</sub>排出削減対策の個票の事例

### ③SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の方法論

戦略的研究課題 (I) S-20では、テーマ1およびテーマ2と連携して、S-20独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオを策定することを成果目標に掲げている。そこで、S-20の他テーマのリーダーと議論し、S-20における最適緩和シナリオの探索の方法論を検討した。まず、最適緩和シナリオの探索において次の3つの課題を整理した。

- 1) 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。
- 2) 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、最適の議論が異なってくる。
- 3) 世代間衡平性の問題：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。S-20では、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、それぞれの影響評価で用いられる指標や単位が異なるため、従来の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、最適緩和シナリオの評価方法を次のように定めて検討する。
  - ✓ 気候影響、環境影響、社会経済影響で主要な評価軸 (例えば、気温変化、降水量変化、健康影響変化、水ストレス人口変化、SLCF削減量変化、経済影響変化など) を設定し、それらの影響評価軸の組み合わせを総合した結果が最善になる解を探索する。
  - ✓ 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、「個別地域の最適」よりも「全球の最適」を上位として最適を議論する。
  - ✓ 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して、最適を議論する。
  - ✓ 他にも、SLCFs特有の状況としてSLCFs早期大幅削減が1.5度目標/2度目標の実現に向けてどれほど優位であるかを検証するが、SLCFsは大気中寿命が短いガス種であり世代間衡平性への影響は小さいため、「異なる時点間の重み」は考慮せずに最適を議論する。

S-20ではテーマ1、テーマ2およびテーマ3からの実際のシミュレーション結果を用いて、特にアジア域の地域偏在性の着目をし、SLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の方法論を改善していく予定である。特に、特定の地域にとっては最適（ファースト・ベスト）ではなく、上述の方法論の範囲の中でのセカンド・ベストの探索は重要であり、「全球最適」と「地域最適」のギャップを明らかにすることは、最適シナリオの議論における重要な研究要素であると考えられる。

## 5. 研究目標の達成状況

戦略的研究開発（I）S-20テーマ3の研究構想について、前戦略的研究開発課題S-12の成果を踏まえつつ、S-20の他テーマのリーダー・戦略FS検討専門部会委員・環境省担当者との議論や、2FS-2001のアドバイザーの意見に基づき、十分に検討して構築することができた。

S-20テーマ3で用いる世界多地域多部門の技術積み上げ型モデルについて、計画通りにSLCFs削減対策技術の情報を収集・整備した。また、フロン類に係るモジュールの設計・開発だけではなく、メタンを含めた非エネルギー部門のモジュールの設計、開発および拡張・拡充を進めることができた。また、アジア域における潜在削減量の地域偏在性の特徴を分析することで、S-20における早期大幅排出削減シナリオの探索の準備を進めることができた。さらに、S-20に向けて独自のSLCFs・GHGs最適緩和シナリオの探索の方法論を設計することができた。

## 6. 引用文献

特に記載すべき事項はない。



### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

###### 【サブテーマ1】

- 1) 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 CO<sub>2</sub> concentrations. (IF:4.0)
- 2) Ø. HODNEBROG, G. MYHRE, R. J. KRAMER, K. P. SHINE, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, M. KASOAR, A. KIRKEVÅG, J.-F. LAMARQUE, J. MÜLMENSTÄDT, D. OLIVIÉ, B. H. SAMSET, D. SHINDELL, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, and A. VOULGARAKIS: npj Climate and Atmospheric Science, 3, 43, doi:10.1038/s41612-020-00150-x (2020), The effect of rapid adjustments to halocarbons and N<sub>2</sub>O on radiative forcing. (IF:5.4)
- 3) M. SAND, B. H. SAMSET, G. MYHRE, J. GLIß, S. E. BAUER, H. BIAN, M. CHIN, R. CHECA-GARCIA, P. GINOUX, Z. KIPLING, A. KIRKEVÅG, H. KOKKOLA, P. LE SAGER, M. T. LUND, H. MATSUI, T. VAN NOIJE, S. REMY, M. SCHULZ, P. STIER, C. W. STJERN, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, S. G. TSYRO, and D. WATSON-PARRIS: Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, doi:10.5194/acp-2021-51 (2021), Aerosol absorption in global models from AeroCom Phase III. (IF:5.4)

###### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

###### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

##### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

##### <その他誌上発表(査読なし)>

###### 【サブテーマ1】

- 1) T. TAKEMURA: Clean Air Brief 2020, Asia Pacific Clean Air Partnership / UN Environment, <https://bit.ly/3oAvtcH> (2020), Co-control of air pollution and surface air temperature.

###### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

###### 【サブテーマ3】

- 1) 隔月刊誌「地球温暖化」(2021年3月、全国版、28-29頁、「フロン類排出抑制による地球温暖化対策：第3回 注目必須 原材料に使われるHCFC-22の増加と副産物」)
- 2) 隔月刊誌「地球温暖化」(2021年1月、全国版、36-37頁、「フロン類排出抑制による地球温暖化対策：第2回 冷媒フロン類の排出削減効果は大！削減の実態と必要な対策」)
- 3) 隔月刊誌「地球温暖化」(2020年11月、全国版、28-29頁、「フロン類排出抑制による地球温暖化対策：第1回 フロン類排出を見逃すな！オゾン層破壊と地球温暖化への影響」)

**(2) 口頭発表 (学会等)****【サブテーマ1】**

- 1) T. TAKEMURA: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020)  
“Lessons learned from emission fluctuation of greenhouse gases and air pollutants due to restrictions associated with the COVID-19 pandemic.” (招待講演)
- 2) T. TAKEMURA: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020)  
“Dependency of surface air temperature change by sulfate aerosols on CO<sub>2</sub> concentration.”
- 3) 竹村俊彦: 日本流体力学学会年会, オンライン (2020)  
「大気エアロゾルによる気候変動の数値シミュレーション」 (招待講演)

**【サブテーマ2】**

- 1) K. YOSHIMURA: Virtual Global Flood Partnership Conference Week 2, online (2020)  
“Predictability of the floods caused by Typhoon Hagibis in 2019 using Today’s Earth.”
- 2) K. YOSHIMURA and X. WANG: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020)  
“Data assimilation of historical weather using Gaussian transformation.”
- 3) T. NITTA and K. YOSHIMURA: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020)  
“Evaluation of a snow scheme in Integrated Land Simulator.”

**【サブテーマ3】**

- 1) T. Hanaoka, T. Hirayama, G. Hibino, T. Masui: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020)  
“Cobenefits and Tradeoffs in Reducing Short-Lived Climate Forcers and Air Pollutants by Deep Decarbonization in Asia.”

**(3) 「国民との科学・技術対話」の実施****【サブテーマ1】**

- 1) T. TAKEMURA: Kyushu University-UC San Diego Joint Webinar - Climate Change  
“Relationship between air pollution & climate change” (主催: 九州大学, UC San Diego, 2021年3月9日、オンライン、参加者約30名) にて“Relationship between air pollution & climate change”というタイトルで講演

**【サブテーマ2】**

- 1) 芳村圭: 第20回日本気象学会九州支部気象教室 (主催: 日本気象学会九州支部, 2020年11月8日、オンライン、参加者約200名) にて「近年の日本の洪水事例及び洪水予測研究について」というタイトルで講演

**【サブテーマ3】**

- 1) 花岡達也: 慶應義塾大学大学院博士課程教育リーディングプログラム (主催: 慶應義塾大学大学院, 2020年11月13日、オンライン、参加者約10名) にて「世界および日本における気候変動対策の中長期目標」というタイトルで講演
- 2) 花岡達也: 雑司が谷地域文化創造館ちとせ橋コミュニティ塾 (主催: 雑司が谷地域文化創造館, 2021年1月13日、オンライン、参加者約50名) にて「将来の気候変動の予測と世界および日本に

おける気候変動対策の最前線」というタイトルで講演

#### (4) マスコミ等への公表・報道等

##### 【サブテーマ1】

- 1) 毎日新聞（2020年12月11日、全国版、26頁、「PM2.5対策「CO<sub>2</sub>削減を伴わないと地球温暖化加速」」）
- 2) 西日本新聞（2020年12月11日、25頁、「PM2.5削減で気温上昇 温暖化と大気汚染「対策両立を」」）
- 3) 日本経済新聞（2020年12月21日、全国版、11頁、「PM2.5で温暖化が進展」）
- 4) 日経産業新聞（2021年1月25日、全国版、「直談 専門家に問う 大気汚染解決とCO<sub>2</sub>削減同時に」）
- 5) 朝日新聞（2021年1月30日、西部本社版（夕刊）、7頁、「大気汚染物質だけ減ったら温暖化急加速のおそれ」）

##### 【サブテーマ2】

- 1) 読売新聞（2020年10月9日、長野版朝刊、23頁、「[台風19号の教訓]（3）決壊 30時間前に予測（連載）」）

##### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

#### (5) 本研究費の研究成果による受賞

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）

## IV. 英文Abstract

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

Principal Investigator: Toshihiko TAKEMURA

Institution: Kyushu University, Fukuoka, JAPAN

Cooperated by: University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Key Words: Short-lived climate forcers, SLCF, Climate change, Environmental impact, Mitigation, Numerical models

Achieving the goals of the Paris Agreement will be difficult under the current circumstances if emission reductions of long-lived greenhouse gases (GHGs) alone are not enough. Therefore, as stated in the IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C (2018), there is a common international understanding that mitigation measures for short-lived climate forcers (SLCFs) should also be implemented, as the effects of emission control appear in the short term. In this research, a feasibility study of the Strategic Research and Development (I) S-20, necessary studies and analysis of the current situation were conducted in order to quantitatively assess the regional-scale climate change and environmental impacts of SLCFs and to develop scenarios for mitigation. The research concept of S-20 was closely developed based on the results of the previous Strategic Research and Development S-12, and discussions with the theme leaders of S-20 who participated in this feasibility study, committee members, advisors, and the person in charge of Ministry of the Environment. Because collaboration among all themes in S-20 is essential for conducting the S-20 project, the theme leaders discussed and planned the appropriate timing of major collaborations.

In preparation for S-20 theme 1, a preliminary simulation using a global aerosol climate model MIROC-SPRINTARS was conducted, showing that, even if a decrease in anthropogenic sulfate aerosols by the same amount, the associated temperature increase depends on CO<sub>2</sub> concentration. The results of this study have been published as a peer-reviewed paper and were introduced in several newspapers. In preparation for S-20 theme 2, the integrated land simulator ILS was prepared, and algorithms for bias correction methods for climate model output using machine learning were also developed. In addition, a workshop was held to bring together researchers on various processes related to land, and a cooperative framework was established to enhance the S-20 research activity. In preparation for S-20 theme 3, mitigation option database on SLCFs and the corresponding modules of non-energy sectors in the multi-regional and multi-sectoral bottom-up type optimization model were upgraded and expanded in order to promote the preparation of analyzing drastic SLCFs emission reductions. In addition, the methodology how to explore optimal scenarios on mitigating SLCFs and GHGs emissions in both global and regional scales was designed to smoothly carry out the S-20's original optimal scenario analyses.