

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

SLCPの環境影響評価と削減パスによる気候変動対策の推進
(統合運用システムの構築)

(S-12-4)

平成26年度～平成30年度

Evaluation of SLCP Environmental Impact and Promotion of Climate Change Countermeasures through
Seeking the Optimal Pathway (Development of an integrated operational system)

〈研究代表機関〉
東京大学

〈研究協力機関〉
国立研究開発法人国立環境研究所

2019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. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細	• • • • •	14
(東京大学)		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
III. 英文Abstract	• • • • •	65

I. 成果の概要

課題名	S-12-4 SLCPの環境影響評価と削減パスによる気候変動対策の推進 (統合運用システムの構築)
課題代表者名	芳村 圭 (東京大学生産技術研究所准教授)
研究実施期間	平成26～30年度
累計予算額	107,434千円 (うち平成26年度:26,090千円、平成27年度:20,786千円、平成28年度:19,747千円、平成29年度:20,734千円、平成30年度:20,077千円) 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード SLCP、統合運用システム、NICAM-Chem

研究体制
東京大学

研究協力機関
国立研究開発法人国立環境研究所

1. はじめに(研究背景等)

大気汚染は、特に発展途上国において現在進行形で大きな被害をもたらしている深刻な問題であり、地球全体における将来的な大気質の改善は人間社会にとって重要な課題であると言える。我が国においては、高度成長期を経て公害対策が進み今でこそ深刻な危機としてあまり認識されていないこともあるが、例えば汚染物質の越境輸送や、諸外国との関係性を保つ安全保障の観点からも、その重要性を認識しておくことは極めて重要である。

短寿命気候汚染物質(Short-Lived Climate Pollutants; SLCP)とは、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用を持つ物質と定義される。具体的な主要物質として、メタンと対流圏オゾン、代替フロン(ハイドロフルオロカーボン; HFC)及び黒色炭素粒子(ブラックカーボン; BC)等が挙げられる。BCは化石燃料やバイオマスを燃焼させた際に発生する煤煙の主要成分であり、人間の健康や生態系に影響を及ぼす大気汚染物質の一つでもある。

近年、SLCPの気候影響に注目が集まっている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5)ではSLCPの影響が評価され、大気質改善と気候変動の関係が取り上げられている。また、気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)でもSLCP削減に向けた取り組みが議論された。全球的な地表気温の上昇がすでにかなり進行しているにも関わらず、その主因の二酸化炭素ガスの排出制限がなかなか進まないことの原因の一つとして、明確かつ迅速な効果が得られにくいことがある。一方でSLCPの削減はそのまま大気汚染の改善につながり、短寿命であるということはすなわち迅速な効果が得られやすい。そのような利点により、即効性の高い政策課題として取り上げられやすいことが、IPCCやCOPで注目を集めている理由だと考えられる。その効果として、BCとメタンの削減効果でCO₂の削減効果と同様の効果が得られるという研究例がある。

しかしながら、SLCP削減を通じた地球温暖化緩和策は世界的に注目されている反面、その気候影響は未解明な部分が多い。例えば、人為起源エアロゾルの直接・間接気候影響の放射強制力はAR4とAR5で大きく異なっている。これは、放射強制力への影響メカニズムが複雑なことから、SLCPの時空間変動が激しいために汚染状況が十分に現状把握されていないことに起因している。また、降水量や気温の変化に伴う水資源の変化や洪水・渇水といった水災害への影響まで見積もった研究は、本研究課題によって行われたものを除いて未だかつて存在しなかった。

2. 研究開発目的

S-12課題では、大気質変化事例の構造解析と評価システムの構築(テーマ1)、統合評価モデルの改良とそれを用いた将来シナリオの定量化(テーマ2)、数値モデルによる気候・環境変動評価と影響評価(テーマ3)、統合運用システム、NICAM-Chemの開発(テーマ4)、環境影響評価と気候変動対策の推進(テーマ5)の5つのテーマの活動を行う。本報告はテーマ4についてのものであり、短絡的な削減策にばかり注目が行きがちなSLCPに関して、その気候影響を特に地球規模での水循環の観点から調べるため、モデル開発とそれらを用いたシミュレーション及び解析を行うことを目的とする。より具体的には、次世代に向けた大気化学輸送モデルであるNICAM-Chemの整備及び、領域シミュレーションの精度向上のための地表面過程の高度化を行う。

以上を踏まえ、本概要の3.研究開発方法と4.研究結果及び考察の項では、1) SLCPの気候影響に関する解析、2) NICAM-Chemの開発、3) SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施について述べる。

3. 研究開発の方法

1) SLCPの気候影響に関する解析

S-12テーマ3の研究によって実施された、数値気候モデルMIROC-SPRINTARSによるSLCP気候影響解析のための数値実験データを用いた詳細な解析を行った。特に、テーマ3で得られた主要な成果として、代表的なSLCPであるブラックカーボンは大気上端で著しい正の放射強制力を持つにもかかわらず、その排出量変化がもたらす全球平均地上気温へのインパクトは予想に反して小さいことがMIROC-SPRINTARSモデルによる数値実験によって明らかとなっているため、そのメカニズムを理解するために、テーマ3から提供されたMIROC-SPRINTARSの数値実験データにもとづいて、全球エネルギー収支の変化を詳細に解析した。具体的に用いたデータは、テーマ3で実施されたMIROC-SPRINTARSモデルによる数値実験のうち、硫酸塩の前駆物質である二酸化硫黄とブラックカーボンの排出量をそれぞれ全球一様に様々な倍率(x10, x5, x2, x1.5, x0.8, x0.5, x0.3, x0.1, x0.0; x0.0は排出を無くしたことを意味する)で変化させた実験のデータである。硫酸塩は代表的な光散乱性のエアロゾル、ブラックカーボンは光吸収性のエアロゾルであるため、これら2種類のエアロゾルに対する気候応答の違いを解析することは、光学特性(端的には色)の異なる大気汚染粒子が全球的な気候に対してどのように異なる影響をもたらすのかを定量的に理解する上で重要である。

SLCPによる全球エネルギー収支の変化は、大きく分けて二つの異なる時間スケールで起こることが知られている。すなわち、基本的に大気の変化のみを伴う「速い応答」と呼ばれる短い時間スケールでの応答と、海洋の応答も含めた「遅い応答」と呼ばれる長い時間スケールでの応答が存在する。SLCPによる気候影響を包括的に理解するためには、これらの異なる時間スケールでの応答の両方を理解し、最終的な気候応答に対するこれらの寄与を分けて定量化する必要がある。そこで本研究では、上に述べた倍率で排出量を変化させたそれぞれのケースについて、「速い応答」だけを抜き出すために海面水温を与えた数値実験と、「遅い応答」も含む全応答を定量化するために大気と海洋を結合した数値実験の二種類の実験データを用いた解析を行った。これら二つの実験間の差を取ることで「遅い応答」を取り出すことができ、その結果、「速い応答」と「遅い応答」を分離して定量化することが可能となる。本研究では、解析の対象であるモデル変数の各々について、現在の排出量を与えた標準実験からの各実験の偏差をこれら二つの応答に分けて定量化した。

解析の対象とした具体的なモデル変数は、全球エネルギー収支の要素である全天・晴天における短波・長波放射フラックス(大気上端・大気層・地表面)および顕熱・潜熱フラックスと、これらに深く影響する水蒸気量・降水量・気温である。SLCPによる気候影響を全球規模で包括的にとらえるために、これらの物理量の全球平均値とその排出量変化に対する応答を調べた。

2) NICAM-Chemの開発

全球雲解像大気大循環モデルNICAMのプラットフォームを整備すると共に、大気汚染物質を取り扱うNICAM-Chemモデルを用いた研究を実施した。

まず、東アジア域における大気汚染分布を把握するために、ストレッチ格子系を用いたNICAM-Chemによるエ

アロゾルシミュレーションを実施し、その結果の検証を行った。初期の段階では、日本を対象とした領域規模のシミュレーションを実施し、主に夏季を対象としたモデル検証によって、このモデルが大気汚染物質の都市汚染と越境汚染を概ね再現できることを確かめた。さらに、他の季節におけるモデル再現性も検証するために、2014年10月に打ち上げられた静止衛星ひまわり8号のAHIセンサーによって得られたエアロゾルリトリーバル値を用いた比較を行い、NICAMのエアロゾル再現性を従来に比べて高い時空間分解能で調べた。なお、このモデル実験で用いたNICAMのモデル水平解像度は関東地方付近で最も細かい約10kmを取り、そこから同心円状に離れるにつれて粗くなり、日本全体としては25kmより細かい解像度になるように設定した。また、エアロゾルの輸送過程を現実的に表現するために、風速や温度などの気象場についてはNCEP-FNL再解析データにナッジングするアプローチを採用した。

このモデル検証において特に注目したのは、我が国において大陸からの越境汚染が頻繁に見られる春季で、シベリアからの森林火災の影響が際立っていた2016年5月である。モデルの実験条件に関してGoto et al. (2015) とほぼ同等であるが、異なる点は森林火災起源の炭素性エアロゾルおよびSO₂に関して、ECMWF/CAMS Global Fire Assimilation System (GFAS) の日平均再解析データを利用したことである。一方、モデルの検証に用いたのは、静止衛星ひまわり8号からリトリーバルして導出した可視光のエアロゾル光学的厚さ(AOT)であり、そのデータはJAXAひまわりモニタ(http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html)から提供されているものである。なお、エアロゾルのリトリーバルは、基本的には晴天域でのみ行われるのでひまわり8号のAOT値は欠損もあるため、NICAMとの比較においては、ひまわり8号のAOT値が得られたのと同時刻のモデルデータを用いた。また、衛星観測のものにも不確実性があることを踏まえ、ひまわり8号だけでなく、韓国の静止衛星であるCOMS/GOCIおよび極軌道衛星Aqua/MODISおよびTerra/MODISの結果も用いた比較検証を行った。

次に、S-12テーマ2で推定された大気汚染物質の将来シナリオを用い、NICAM-Chemによる複数の“将来シナリオ実験”を実施した。本実験ではエアロゾル場のみの計算を行ったため、実際に利用したエアロゾルおよび前駆気体の排出フラックスの将来シナリオは、ブラックカーボン(BC)と硫酸塩の前駆気体であるSO₂の2種類の化学物質である。対象年は2030年とし、比較のために基準年を2010年とした。今回考慮したシナリオは、テーマ3における将来シナリオ実験でも共通の4種類とした。

ストレッチ格子を適用したNICAM-Chemの領域高解像度計算を行うことで、計算コストが抑制された条件下で、NICAM-Chemのエアロゾル再現性を十分に確かめられたので、NICAM-Chemの優位性を活かすために、シナリオ実験と並行して全球スケールの高解像度の計算も実施した。この計算ではモデル解像度3.5km~14kmで全球を覆う設定としたが、これは膨大な計算コストを要するため、京コンピュータを最大限利用した。ただし、世界最高性能を有する京コンピュータを利用しても、3.5km解像度の計算は膨大な計算コストを要し、2週間程度の積分しかできない。そこで、14km解像度の実験も並行して行い、3.5km解像度の計算結果と大きな隔たりがないことを確認できたので、14km解像度で1年間の積分を行った。本報告書でも14km解像度で行った数値実験結果を提示する。また、高解像度と低解像度の対比のために、従来型の全球気候モデルで採用されている解像度(200-300km)での実験も行った。

3) SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施

陸域水循環への影響を調べるために、S-12テーマ3で行われた全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSによる現在気候実験と、BCと硫酸塩の前駆気体であるSO₂の排出量をそれぞれ0.5、2、5、10倍に変化させた実験の結果を用いた(それぞれBC実験、SO₂実験と名付ける)。BC排出が増加することで全球規模での温暖化が進む一方、少雨化が進行する。一方で、SO₂排出が増加すると寒冷化に伴い少雨化が進行する。このような異なる水文気候感度が現れる要因は、BCそのものとSO₂増加に伴う硫酸塩エアロゾルの光学特性の違いにあり、結果としてBCは短い時間スケールで降水量を顕著に変化させる一方、SO₂は長い時間スケールでの降水量の気候変化をもたらしている。

ところで、気候モデルの出力結果は系統的なバイアスを持つことが知られており、水資源や水災害への影響を評価する場合に、その影響を受ける可能性がある。そのため本研究では、将来の旱魃変化に関する研究で用いられた手法に倣い、バイアス補正した気象強制力データを作成し、地表面モデルMATSIRO及び河川モデルCaMa-Floodを用いた陸域オフライン実験を行った。このようなオフライン実験の結果は、これまで水熱収支・洪

水・水ストレス等の様々な観点から現実と良く合っていることが確認できており、今回評価したいSLCPの増減による感度をより正確に見積もることができる。モデルに入力する変数は、風速、気温、比湿、地表面気圧、下向き短波・長波放射、雲量、降水量、ダスト・BCの沈着量である。ダスト・BCの沈着量は積雪のエイジングによるアルベドの低下に影響する。水平解像度はMATSIROが緯度経度1度間隔、CaMa-Floodでは0.25度間隔である。

まず、前述のMIROC-SPRINTARSの出力を、T85(水平空間解像度約1.5度)から1度解像度に空間内挿し月単位の気候値を計算した。その上で、JRA25再解析とGPCP降水量から作成されたデータセットELSEに、気候値の差を加算したり、比で乗算したりした。バイアス補正の対象とする変数は、降水量、気温、長波放射、比湿である。そのうち、比で乗算したのは降水量と比湿である。風速、地表面気圧、下向き短波放射、雲量はELSEのデータをそのまま用いた。ダスト・黒色炭素の沈着量は、同モデルによるCMIP5実験の気候値を用いた。土壌・土地利用に関するパラメータを含む各種の陸域境界条件はGSWP2で作成されたデータを用いた。対象は1981-2000年の20年間とし、全部で9種類の実験(BC実験・SO₂実験で其々4種類及びコントロール実験)を行った。

前節で得られたシミュレーション結果から、水ストレス人口を算定した。流域平均した年平均流出量を求め、その流域に住む人口で割ったものが一人当たりの水資源賦存量とする。ファルケンマーク指標によると、水資源賦存量が1000 [m³/year/c]以下だと高ストレス下にあるとされる。本研究ではShen et al. (2014)に従って、水資源賦存量を計算し、ストレスカテゴリーごとに分類した。人口分布データとしてはBengtsson et al. (2006)の1990年のデータを用いた。

前節で得られたシミュレーション結果から、洪水影響を算出した。具体的には、まず、Yoshimura et al. (2008)に倣って確率流量指数(DPI)を求めた。コントロール実験(CTL)から得られたCaMa-Floodの各年の日単位河川流量から20年分の年最大日流量を全てのグリッドで抽出し、ガンベル分布にフィッティングさせることでそれぞれのグリッドでの確率流量曲線の母数を推定し、DPI=100となる流量を求めた。次いで、CTL以外の確率流量曲線及びDPI=100の流量を求め、各実験による100年に一度の流量のCTLに対する増減を見ることで洪水規模の変化を調べた。洪水暴露人口については、CTL実験の確率流量曲線を各実験に対して用い、日流量がCTL実験のDPI=100の流量を超えたグリッドについて、水ストレスの影響人口と同じ1990年の人口分布データと照らし合わせ、そのグリッドに対応する人口全員が洪水に暴露したとして集計した。閾値を連続して超える場合は1回とカウントした。それらの影響人口について、全球での値に加えて大陸ごとに集計したものを用意し、領域ごとの影響評価も行った。

最後に、S-12で提案した、2°C目標に向けた低炭素社会の達成を実現するような排出経路にしつつ、低炭素対策の組み合わせによるSLCP(BC, 対流圏O₃, CH₄)や大気汚染物質(SO₂, NO_x, PM2.5, PM10, CO, NMVOC)の排出の相殺効果・相乗効果を考慮し、SLCPや大気汚染物質の削減のメリット・デメリットを踏まえた、排出シナリオについての水災害・水資源影響評価を行った。

4. 結果及び考察

1) SLCPの気候影響に関する解析

MIROC-SPRINTARS気候モデルを用いた、ブラックカーボン・二酸化硫黄の排出量をそれぞれ増減させた数値実験により、ブラックカーボンおよび硫酸塩の排出量変化がもたらすこのような全球的な気候影響は、図1のように模式的にまとめることができた。ブラックカーボンに対する気候応答(図1上段)では、大気上端での瞬時放射強制力(1)が、水蒸気や気温の鉛直分布変化に伴う晴天大気の放射収支変化(2)と雲の変化に伴う放射収支変化(3)による「速い応答」によって半分程度相殺されるとともに、大気層への加熱を解消するために潜熱(降水)および顕熱の減少(4)が起こる。この結果として正味残る半分程度の(有効)放射強制力が「遅い応答」を駆動し、これが全球平均気温の上昇とそれに連動した全球平均降水量の増加を引き起こす。このことは、ブラックカーボンによって与えられた正の瞬時放射強制力の一部のみしか全球平均気温の上昇には使われず、残りは大気の「速い応答」とそれに付随する降水量の減少を引き起こすことを表している。

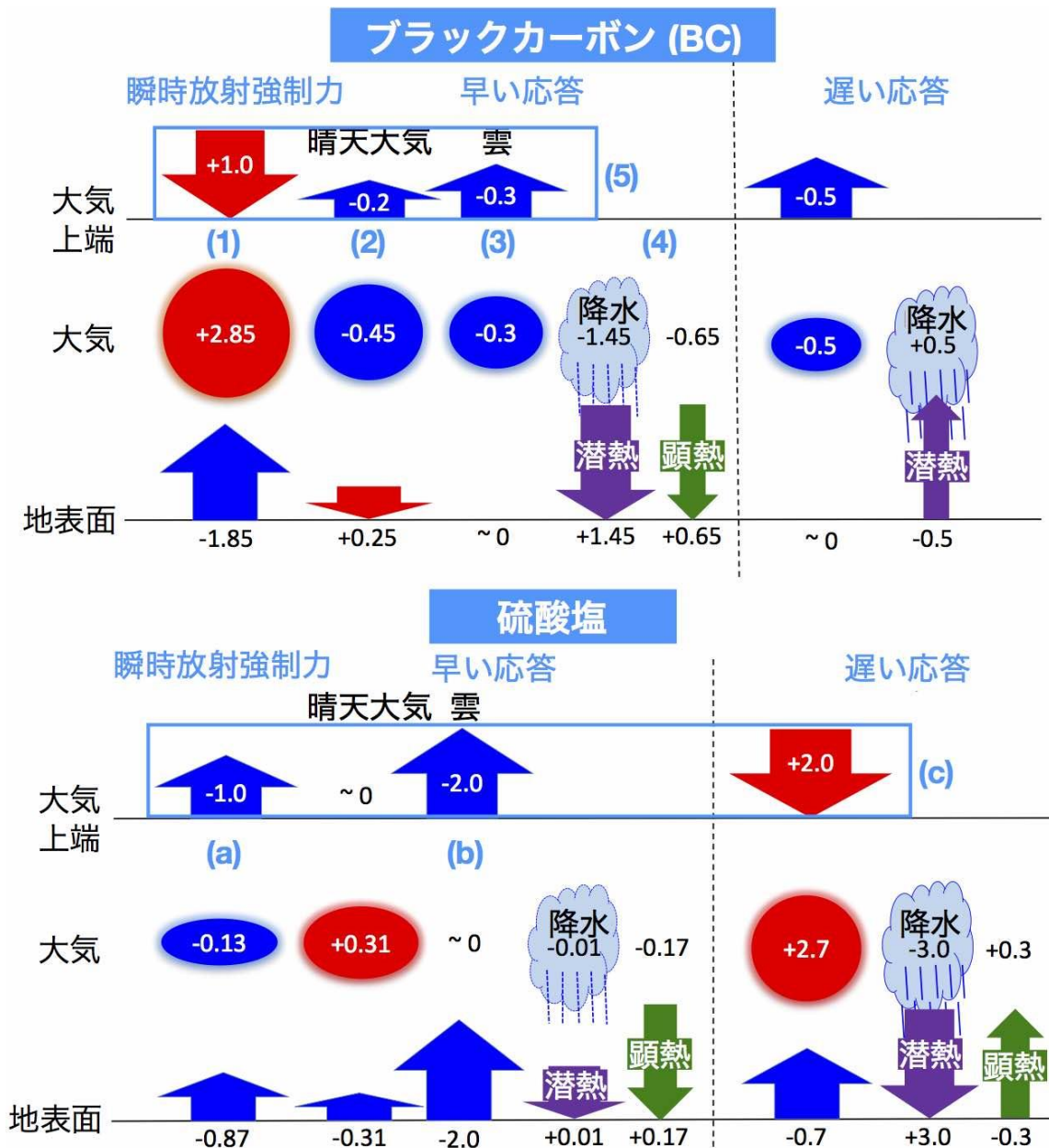


図1: ブラックカーボン(上段)および硫酸塩(下段)の排出量変化によってもたらされる気候影響の模式図。大気上端における瞬時放射強制力の大きさを単位としたときの大気上端・大気層・地表面における各種エネルギーフラックスの全球平均値の変化を大まかな数値で示す。Suzuki and Takemura (2019)より改変。

これに対して、硫酸塩に対する気候応答(図1下段)では、硫酸塩自体が太陽光を散乱することによる負の瞬時放射強制力(a)が雲との相互作用(間接効果)によって大きく増幅され(b)、これらは大気層を素通りして地表面をほぼ直接的に冷却するため、大気層における「速い応答」はほとんど起こらない。その一方で、この大きな負の有効放射強制力が気候系の「遅い応答」を駆動する(c)ために、全球平均気温が顕著に下降するとともに、それと連動して全球平均降水量も減少する。また、「遅い応答」による大気上端での放射収支変化(c)は、有効放射強制力(a+b)を完全には相殺しておらず、海洋が冷却されていることを示唆している。

述べてきた結果は、光学特性の異なるブラックカーボンと硫酸塩エアロゾルでは全球平均での気温と降水量への影響が顕著に異なることをそのメカニズムにまで立ち入って解明したものであり、特にブラックカーボンの温暖化効果が小さいことをエネルギー収支という物理的根拠にもとづいて説明する。これは、本プロジェクトが始動した当初の動機であり国際的な世論でもあるブラックカーボン削減による温暖化緩和の有効性に対して、科学的根拠にもとづいて疑問を投げかける結果でもある。

そこで、MIROC-SPRINTARS実験データの解析から得られたこれらの知見を本プロジェクトで開発した統合運

用システムに導入するために、ブラックカーボンおよび硫酸塩の排出量変化が全球平均気温と全球平均降水量変化にどのように結びついているのかを定量化する簡易的な数式を提案した。これは以下の方程式系で与えられる:

$$\begin{aligned}
 \text{瞬時放射強制:} \quad & \begin{pmatrix} \Delta R_i^{TOA} \\ \Delta R_i^{ATM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma^{TOA} \\ \gamma^{ATM} \end{pmatrix} \Delta \left(\frac{E}{E_0} \right) \\
 \text{有効放射強制:} \quad & \begin{pmatrix} \Delta R_e^{TOA} \\ \Delta R_e^{ATM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon^{TOA} & 0 \\ 0 & \varepsilon^{ATM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_i^{TOA} \\ \Delta R_i^{ATM} \end{pmatrix} \\
 \text{気候応答:} \quad & \begin{pmatrix} \Delta T \\ L\Delta P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\lambda & 0 \\ (\alpha\kappa + \mu)/\lambda & g-1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_e^{TOA} \\ \Delta R_e^{ATM} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

TOA: 大気上端
ATM: 大気層

第1式は、Eで表された排出量の変化を大気上端・大気層における瞬時放射強制力に結びつける式であり、これらがさらに第2式によって有効放射強制力(大気上端および大気層)に関連づけられる。第2式の係数行列では、上で述べた「速い応答」の効果が考慮されている。さらに、この有効放射強制力から第3式によって、全球平均気温および全球平均降水量の応答が得られる。これらの式に現れる係数行列の要素には、放射強制力の efficacy (有効性) や気候感度といった基本的な気候パラメータが含まれ、これらは上に述べた MIROC-SPRINTARS 数値実験データの解析にもとづいて評価される。

本研究では、数値気候モデルの結果から上式のように与えられる排出量と気候応答(気温と降水量の応答)の関係を統合運用システムに導入した。これによって、ブラックカーボンと硫酸塩エアロゾル(の前駆気体である二酸化硫黄)の任意の排出量変化に対して、気温変化と降水量変化を算出することが可能となった。こうして計算された気温と降水量の変化は、さらに本テーマで開発された陸面モデルによるシミュレーションを通じて、陸域水循環に関係する諸量の計算に用いられる。その結果として、後述するように、ブラックカーボンと硫酸塩の排出量変化による水循環・水資源への影響を評価することも可能となった。

2) NICAM-Chemの開発

次世代全球雲解像気候モデルNICAMにSLCP及びその他の大気化学物質の物理化学的影響を組み込んだNICAM-Chemを開発した。NICAM-Chemを用いると、領域から全球までをシームレスに計算可能としつつ、排出されたSLCPが化学輸送過程を経て雲・降水を含む気象場と相互作用する様子を様々な時空間スケールで計算できる(図2)。NICAM-ChemをHPCI京計算機上で稼働させて、世界最高水準の3.5km水平格子で計算されたエアロゾルの全球輸送の様子を示す(図3)。従来の低分解能の気候モデルで必要だった半経験的なエアロゾル・雲相互作用のパラメタリゼーションが不要であり、より第一原理計算に近い結果が得られた。

次に、ひまわり8号のデータとの比較によるNICAM-Chemの検証について述べる。そのために、2016年5月18日に静止衛星ひまわり8号が日本付近で高濃度なエアロゾルを検出したイベントに着目した。ひまわり8号データからは、シベリア森林火災の発生によって大気中に放出されたエアロゾルが日本付近まで輸送されていたことが示唆される。NICAMによる同時期のシミュレーション結果(II成果の詳細図(1)-15参照)によると、ひまわり8号で検知されたエアロゾルのプルーム分布は良く再現され、特に、5月18日の日本時間9時(世界標準時間0時)における日本海および北海道西岸におけるAOTの空間分布は非常に現実的に再現されていることがわかる。静止衛星ひまわり8号はMODISのような極軌道衛星とは異なり、ある特定領域を高時間分解能(日本付近では2.5分おき)で観測することが可能であるため、プルームの輸送を時間方向に追跡して捉えることが可能である。実際、5月18日日本時間9時(世界標準時間0時)から5月18日日本時間15時(世界標準時間6時)までの6時間の間に、プルームは北海道西岸から北海道東岸にまで輸送された様子がひまわり8号で捉えられている。本研究では、ひまわり8号でこのように捉えられたエアロゾルプルームをNICAM-Chemで非常に現実的に再現することに成功したが、これは、データ同化手法に頼ることでこのプルームを再現した先行研究とは一線を画するものである。本

研究で得られた高い再現性は、モデル格子をシームレスに高解像度に設定できるNICAM-Chemの利点を活かすことで可能となった。

次に2016年5月の平均におけるNICAMのエアロゾル再現性に関する比較検証を行った(II成果の詳細図(1)-16参照)。ひまわり8号で見られる日本付近の月平均AOT分布は、中国東岸の海岸線付近や北海道でAOTが1に近い値を示しており、東シナ海でも0.5程度の高い値を示している。一方NICAMでは、ひまわり8号で得られた特徴的なAOT分布は概ね再現できているが、ひまわり8号では捉えていない高濃度ピークが見られた。例えば、日本海におけるAOT値が0.8で、ひまわり8号よりも過大評価であった。また、北海道の東岸でも高いAOT値が見られ、NICAMが過大評価であった。ひまわり8号の観測頻度と数時間程度のプルーム到来の時間的なずれによっても、モデルと静止衛星の差異が生じてしまうが、少なくとも日本海はひまわり8号の観測頻度が高いので、NICAMのAOTは平均的に過大評価である可能性が非常に高い。これは、シベリア森林火災由来のエアロゾルの輸送経路が南にずれてしまっている、あるいは、非現実的に広範囲に拡大してしまっていることが要因であると考えられる。

以上のことから、春季に代表的な越境汚染(森林火災や人為起源物質)の時系列変化はNICAM-Chemでもうまく捉えることができていた。従って、ストレッチ格子法を適用したNICAM-Chemによって、春季および夏季において、日本を対象とした大気汚染物質シミュレーションが概ねうまく行われることが確かめられた。

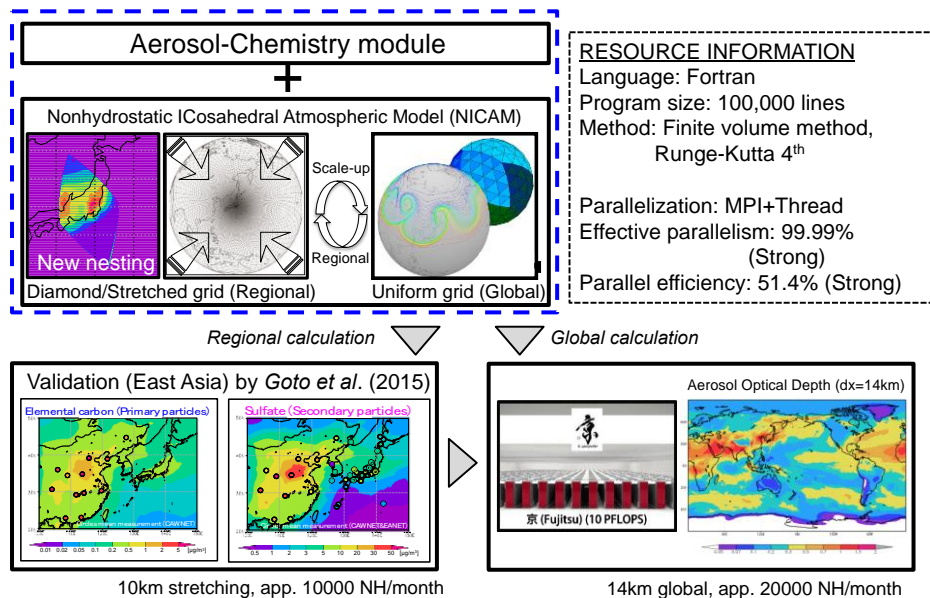


図2: 領域から全球までをシームレスに計算可能なNICAM-Chemモデルの概要。排出されたSLCPが化学輸送過程を経て雲・降水を含む気象場と相互作用する様子を様々な時空間スケールで計算できる。

- 硫酸塩
- 海塩
- 土壌
- 炭素性
- 雲

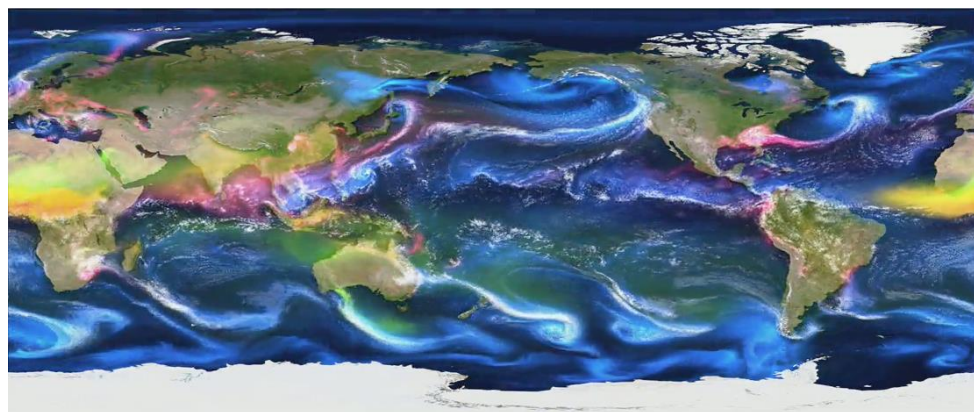


図3:「京」コンピュータ上でNICAM-Chemモデルを世界最高水準の水平解像度で稼働させることで再現された

様々な大気汚染粒子と雲の全球分布の例(2011年11月17日)。従来型の気候モデルでは扱えなかった両者の相互作用を詳細に計算できる。

3) SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施

オフライン手法に基づく、SLCPが気候変化を通して陸域での水災害と水資源に与える影響を評価する手法を構築した。ブラックカーボン(BC)と硫酸塩の前駆気体であるSO₂の排出量が現在の半分から10倍になった場合において、両者にどのような影響が出るのか評価した。

計算されたグリッドごとの流出量を河川流域ごとに集計し、その流域の住民のための水資源として十分か、十分でない場合どれくらい足りていないかを評価した結果、BC実験では、北アフリカをはじめとした地中海周辺地域における減少が著しいことがわかった。一方でアフリカ南部などではストレスの緩和が見られる。SO₂実験では、主にインドでの減少が目立った。また、地中海の北東側から西アジアにかけての増加が特徴的である。水資源賦存量の分布は人口分布に大きく依存し、流出量が増えている地域でも、水資源賦存量は変化しない流域も多かった。一方、日単位河川流量の極値で表現される洪水がどのように変わるのかというと、100年に1度の洪水時の流量は値が大きく、その変化割合は流出のように大きな値とならないことと、これまで見てきた通り、どちらの実験でも全球平均では降水量減少傾向にあるものの、地域的に見ると流出量が増加する場所があり、そのようなところでは洪水の規模も増大していることがわかる。例えばBC10倍実験では、アフリカのコンゴ川やアジアのガンジス・ブラマプトラ川、南米のパラナ川などでは洪水規模の増大が予想されている一方、長江やメコン川、アマゾン川などでは洪水規模は縮小される。SO₂10倍実験ではミシシッピ川、オノリコ川、東欧・中近東の多くの河川などで洪水規模が増大し、東南アジア・東アジアおよび海洋大陸での多くの河川で洪水規模が縮小するとみられる。

図4には、BC・SO₂の排出量を変化させた各実験について、手法の章で説明した水ストレス指標を計算し、高い水ストレス下(水資源賦存量が1000 m³/year/c 以下と定義)にある人口の変化を見積もった。BC半減実験の場合には、1000万人(0.5%)程度減少し、倍増、5倍では同程度増加、10倍実験では5500万人(2%)程度増加するという結果となった。概ね降水量の変化と線形な関係となっている。一方SO₂実験に関しては、半減の場合に2000万人(1%)程度が減少するが、倍増にしても半減の場合と同程度の水ストレス人口の減少が見られた。5倍実験において、CTL実験と同程度のストレスとなり、10倍実験だと8000万人(3%)程度増大する。BC実験の結果とは、降水量変化との関係において大きく異なる結果となった。さらに図5にて、洪水による暴露人口を評価した。CTL実験で推計した100年に一度の規模の洪水によって影響を受ける人口に比して、全ての実験で洪水に暴露する人口が増加する結果となった。一方、降水量変化に対する暴露人口変化の関係性はBC実験とSO₂実験である程度共通していた。

前節までの解析は全球を対象としているが、SLCPによる気候影響は局所的に生じることがわかっているため、より詳細なスケールで見直すべきである。しかしながらそれらの気候モデルの解像度は一般的に粗く(1グリッド100km以上)、あまりに小さいスケールに着目して影響を評価しても意味がない。そのためこの項では、気候変動影響評価研究でよく使われるような大陸ごとにわけて、影響暴露人口を算出した。領域ごとの水ストレス人口について20年中上位5ヶ年の平均・標準偏差を算出した。アフリカ・アジア・東北ユーラシア・オセアニアではBC増に合わせて有意な単調増加がみられる。特に、アフリカ・アジア域ではもともと水ストレス人口が高く(それぞれ6.4億人、16億人)、全球での評価により大きく影響した。南アメリカ・ヨーロッパ・アフリカ・アジア等の多くの地域で、BC半減実験で洪水影響人口が有意に増加する傾向が見られた。また、アフリカ・東北ユーラシア・ヨーロッパでは、BC増加に応じて洪水影響人口が減少することがわかった。

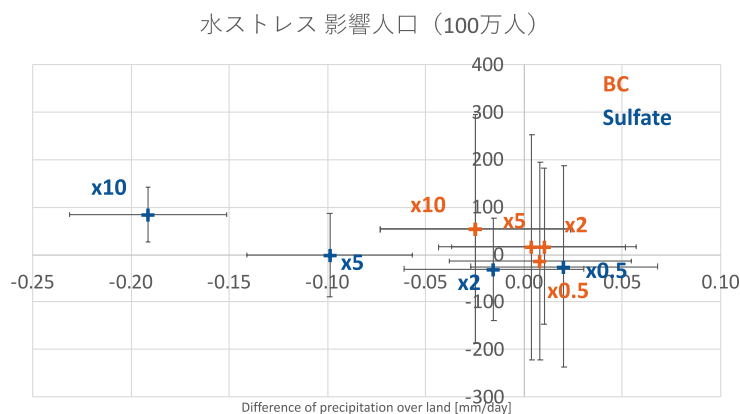


図4: 水ストレス人口変化と全球降水量変化の関係(赤の+がBC実験, 青の+がSO₂実験)。エラーバーは20年間における年々変動の標準偏差を示す。

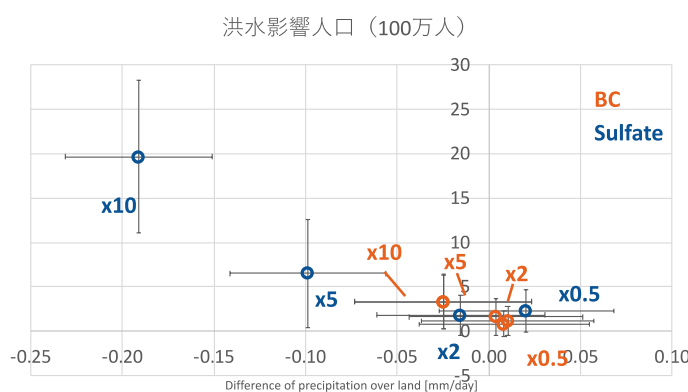


図5: 洪水影響人口変化と全球降水量変化の関係(赤の○がBC実験, 青の○がSO₂実験)。エラーバーは20年間における年々変動の標準偏差を示す。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

MIROC-SPRINTARS気候モデルの結果を全球エネルギー収支の観点から詳細に解析し、黒色炭素と硫酸塩では気候影響のメカニズムが本質的に異なることを見出した。特に、これら2つの大気汚染物質は異なる光学特性を持つために大気層/地表面の放射強制力の内訳が異なり、そのことが気候応答の顕著な違いをもたらしていることを解明した。また、その特徴の違いがもたらす全球エネルギー収支変化の全体像を提示し、全球平均の地上気温と降水量の応答をその中に位置づけて理解した。これによると、黒色炭素は短い時間スケールで降水量を顕著に変化させる一方、硫酸塩は長い時間スケールでの降水量の気候変化をもたらすことがわかり、これら2つの大気汚染物質は地球規模の水循環に対して顕著に異なる影響を及ぼすことが示唆された。また、このエネルギー収支の全体像の中で特に不確実性の大きい雲・降水過程の応答の理解に資するために、雲を解像するNICAM-Chemモデルに基づいて領域規模から全球規模での大気汚染の大気への影響をシームレスに計算できるモデルシステムを開発し、それによるSLCP削減シナリオ実験実施を可能とした。本研究ではさらに、黒色炭素と硫酸塩の排出量増減が陸域水循環へ与える影響を、陸域オフラインモデルシミュレーションを使って調べた。陸域オフラインモデルシミュレーションとは、地表面での気温・風速・湿度・気圧・放射などを陸域モデルのみに与え、陸域の水・熱輸送・河川流量等の挙動をシミュレートするもので、CO₂などによる地球温暖化将来予測研究において、よく用いられている手法である。その結果、①BCとSO₂の増加は共に全球降水量を減少させ、BCでは特に流出量減少に効果が出やすいこと、②降水量及び流出量の地域分布では減少と増大が入り混じり、その分布はBCとSO₂で大きく異なること、③BC排出を制限することで全球での水資源のストレスが緩和する可能性があること、④BCとSO₂共に排出を抑制しても推進しても洪水暴露人口は増大することが示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

まず、黒色炭素の排出削減による地球温暖化の緩和効果は限定的である可能性が高いことを示した。主にテーマ4の成果により、ブラックカーボン(BC)の排出量削減による地上気温の低下は、これまで考えられているよりも小さいことがわかってきた。これは、BC削減による太陽光吸収の減少がもたらす大気不安定化に伴って、雲・降水の変化など「速い応答」の調節機能が働くためである。これにより、太陽光の散乱・吸収によるエネルギー変化(瞬時放射強制力)に対する地上気温変化の感度は、硫酸塩と比較してBCは小さくなる。ただし、BCや硫酸塩の気候に対する影響は地域性が非常に強いので、行政は地域ごとの定量的影響評価について引き続き研究調査を支援すべきである。

さらにテーマ4では、S-12の他のテーマとの連携によって、大気汚染物質の排出の把握、その結果を反映するSLCPの排出に関する技術選択AIMモデルの拡張、それを用いてSLCP排出に関する将来シナリオを探索するシステム、それをさらに気候モデルと組み合わせて気候影響を評価するシステムを開発した。その際詳細な領域計算から全球的な影響評価までをシームレスに行う必要があるため、テーマ4では計算格子を柔軟に設定できるNICAM-Chemを実用的に稼働できるように整備し、世界最高解像度での全球計算を実施可能にした。行政はこれらの最先端のシステムを今後活用して、よりよいシナリオ作りを行うべきである。

また、SLCPの水循環への影響は多大であり、SLCP削減効果はこの観点でも評価する必要があることを明らかとした。BCや硫酸塩の前駆気体であるSO₂の排出量が増減すると、気温や降水量が変化することにより、大洪水に晒される人口が増加する可能性があることを示した。BCの変化は地上気温に対する感度は小さいものの、降水量は顕著に変化するためである。近年顕著に増加しつつある洪水・熱波などの極端現象や、農作物収量、途上国での健康に対してSLCPが及ぼす影響の評価については、国際的にも研究事例が非常に乏しいのが現状である。SLCPが地球の大気や表層のエネルギー収支に及ぼす量や、エアロゾルが雲・降水生成に不可欠な物質であることを考えると、行政はSLCPの総合的な環境影響評価を今後定量的に実施していかなければならない。

以上の成果は、S-12全体で作成した「SLCP削減施策に関する提言」に記載した。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Dai T., Cheng Y., Suzuki K., Goto D., Kikuchi M., Schutgens N.A.J., Yoshida M., Zhang P., Husi L., Shi G., Nakajima T.: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 680–711 (2019)
Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter.
- 2) Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T.M., Choi M., Kim J., Sugimoto N., Shimizu A., Oikawa E., Nakajima T Atmospheric Research, 217, 93–113 (2019)
Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016.
- 3) Suzuki, K., and T. Takemura: J. Geophys. Res. Atmos., 124, doi:10.1029/2018JD029808 (2019)
Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.
- 4) Takemura, T., and K. Suzuki: Scientific Reports, 9: 4419 (2019)
Weak global warming mitigation by reducing black carbon emission.
- 5) Dai T., Cheng Y., Zhang P., Shi G., Sekiguchi M., Suzuki K., Goto D., Nakajima T.: Atmospheric Environment, 190, 99–115 (2018)
Impacts of meteorological nudging on the global dust cycle simulated by NICAM coupled with an aerosol model.

- 6) Saya, A., K. Yoshimura, T. Yoshikane, E.-C. Chang, T. Oki: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, doi:10.1029/2018JD028531 (2018)
Precipitation redistribution method for regional simulations of radioactive material transport during the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident.
- 7) Yoshikane, T., K. Yoshimura: *Scientific Reports*, 8, 9926 (2018)
Dispersion characteristics of radioactive materials estimated by using wind patterns.
- 8) Wei, Z., X. Lee, Z. Liu, U. Seeboonruang, M. Koike, K. Yoshimura: *Earth and Planetary Science Letters*, 488, doi:10.1016/j.epsl.2018.02.015 (2018)
Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia.
- 9) Reuter, J., N. Buening, K. Yoshimura: *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-017-3798-3 (2018)
Evaluating hydrological influences on mid-latitude $\delta^{18}O_p$ in the Middle East.
- 10) 芳村圭: *水文水資源学会誌*, 31, 6, 554-559 (2018)
同位体気象水文学の展望.
- 11) 芳村圭、新田友子、石塚悠太、多田真嵩、鈴木健太郎、竹村俊彦: *土木学会論文集B1(水工学)*, 74, 4, I_217-I_222 (2018)
短寿命気候汚染物質による陸域水循環への影響.
- 12) 森山文晶、芳村圭、筆保弘徳: *土木学会論文集B1(水工学)*, 74, 4, I_157-I_162 (2018)
領域大気海洋結合モデルの不確実性の検証.
- 13) Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima: *Nature Communications*, 9, 985 (2018)
Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model.
- 14) Uchida, J., M. Mori, M. Hara, M. Satoh, D. Goto, T. Kataoka, K. Suzuki, and T. Nakajima: *Mon. Wea. Rev.*, 145, 5059-5082 (2017)
Impact of lateral boundary errors on simulations of convective systems with a non-hydrostatic regional climate model.
- 15) Schutgen, N., S. Tsyro, E. Gryspeerdt, D. Goto, N. Weigum, M. Schulz, P. Stier: *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 9761-9780 (2017)
On the spatio-temporal representativeness of observations.
- 16) Nitta, T., K. Yoshimura, A. Abe-Ouchi: *J. Hydrometeor.*, 18,11, doi:10.1175/JHM-D-16-0105.1 (2017)
Impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with the MIROC5 AGCM and a wetland scheme.
- 17) Okazaki, A. and K. Yoshimura: *Clim. Past*, doi:10.5194/cp-2016-12 (2017)
Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction.
- 18) Wei, Z., K. Yoshimura, L. Wang, D. Miralles, S. Jasechko, X. Lee: *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL072235 (2017)
Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration.
- 19) Ramzan, M., S. Ham, M. Amjad, E.-C. Chang and K. Yoshimura: *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2017/7560818 (2017)
Sensitivity evaluation of spectral nudging schemes in historical dynamical downscaling for South Asia.
- 20) Okata, M., T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T. Y. Nakajima, and H. Okamoto: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 443-468, doi:10.1002/2016JD025441 (2017)
A study on radiative transfer effects in 3D cloudy atmosphere using satellite data.
- 21) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, T. Nakajima: *AIP Conf. Proc.*, 1810, 100002,

- doi:10.1063/1.4975557 (2017)
Validation of high-resolution aerosol optical thickness simulated by a global non-hydrostatic model against remote sensing measurements.
- 22) Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, K. Ono, W. Kim, M. Yokoi, C.-T. Lai: *J. Hydrol.*, 533, 91-102 (2016)
Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan.
- 23) 芳村圭: *水文科学会誌*, 46, 87-99 (2016)
水同位体比情報を用いたデータ同化.
- 24) 芳村圭, 中村晋一郎, 鳩野美佐子, 向田清峻, 石塚悠太, 内海信幸, 木口雅司, 金炯俊, 乃田啓吾, 牧野達哉, 鼎信次郎, 沖大幹: *土木学会論文集B1(水工学)*, 72(2016)
平成27年9月関東・東北豪雨による茨城県常総市における鬼怒川洪水に関する調査及び考察.
- 25) Uchida, J., M. Mori, H. Nakamura, M. Satoh, K. Suzuki and T. Nakajima: *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/MWR-D-15-0271.1 (2016)
Error and energy budget analysis of a non-hydrostatic stretched-grid global atmospheric model.
- 26) Goto D., T. Nakajima, T. Dai, T. Takemura, M. Kajino, H. Matsui, A. Takami, S. Hatakeyama, N. Sugimoto, A. Shimizu and T. Ohara: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 12, 6247-6270 (2015)
An evaluation of simulated sulfate over East Asia through global model inter-comparison.
- 27) Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, W. Kim, Z. Liu, M. Yokoi: *Water Resour. Res.*, doi:10.1002/2014WR016737 (2015)
Partitioning of evapotranspiration using high frequency water vapor isotopic measurement over a rice paddy field.
- 28) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C.F.S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima: *J. Geoscientific Model Development*, 8, 235-259, doi: 10.5194/gmd-8-235-2015 (2015)
Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan.
- 29) 新田友子、芳村圭、阿部彩子: *土木学会論文集B1(水工学)*, 71, 4 (2015)
陸域水循環の再現性向上と気温バイアス 低減に向けた簡易湿地スキームによる感度実験.
- 30) Shi, C. and T. Nakajima: *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 157, 34-41 (2015)
The Eddington approximation calculation of radiation flux in the atmosphere-ocean system.
- 31) Dai, T., N.A.J. Schutgens, D. Goto, G.-Y. Shi, and T. Nakajima: *Environmental Pollution*, 195, 319-329 (2014)
Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model.

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

下記は、全123件から招待講演または基調講演を抜粋したもの

- 1) Nakajima, T.: AOGS, Sapporo, Japan, 2014
“Air pollution in Asia and its effects on the climate and public health.”
- 2) Nakajima, T.: Invited lecture for young scientist session, AOGS, Sapporo, Japan, 2014
“We are the scientist!”
- 3) 芳村圭: 日本気象学会2015年度春季大会(2015)
「全球高解像度シミュレーションに向けた地表面過程モデリング」

- 4) Yoshimura, K.: EGU Leonardo conference 2016, Ourense, Spain, 2016
“Data assimilation with stable water isotope information.”
- 5) Suzuki, K.: Chemistry–Climate Model Initiative (CCMI) Science Workshop, Toulouse, France, 2017
“Significance of cloud and precipitation processes in aerosol effect on climate: Satellite observations and modeling.”
- 6) Suzuki, K.: Aerosol, Cloud, Precipitation and Climate (ACPC) Workshop, Bad Honnef, Germany, 2017
“Combined use of satellite observations and global models for studying aerosol–cloud–precipitation interactions.”
- 7) Yoshimura, K.: International Workshop on Isotopes for Tropical Ecosystem Studies, Costa Rica, 2017
“Data assimilation of Isotopic information for multi centennial atmospheric reanalysis.”
- 8) Suzuki, K.: NITech Lectures on Turbulence and Cloud, Nagoya, Japan, 2018
“Linkage of cloud microphysics to climate: Satellite observations and global modeling.”
- 9) Yoshimura, K.: AOGS2018, Honolulu, 2018
“Data Assimilation of Water Isotope Information for Constraining Hydrometeorological Processes.”
- 10) Suzuki, K.: IGES Workshop on “How can Asia manage air pollution and climate change?: From understanding impacts to implementing solutions”, Tokyo, Japan, 2019
“The atmospheric science view on climate–air pollution linkages.”

7. 研究者略歴

研究代表者

中島 映至(平成26年度)

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程単位修得退学、東京大学大気海洋研究所教授、

現在、宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター参与

芳村 圭(平成27–30年度)

2000年東大工学部卒、02年修卒、06年博士号取得。2002年JST採用、04年東大生研採用(助手)、08年UCSDスクリプス海洋学研究所科学者、10年東大大気海洋研究所准教授、16年東大生産技術研究所准教授

研究分担者

1) 芳村 圭(平成26年度)

2000年東大工学部卒、02年修卒、06年博士号取得。2002年JST採用、04年東大生研採用(助手)、08年UCSDスクリプス海洋学研究所科学者、10年東大大気海洋研究所准教授、16年東大生産技術研究所准教授

2) 鈴木 健太郎(平成27–30年度)

2004年東大大学院理学系地球惑星科学博士修了、07年より在米8年、コロラド州立大博士研究員、NASAジェット推進研究所研究員などを経て15年より東大大気海洋研究所准教授

II. 成果の詳細

II-1 統合運用システムの構築

東京大学

生産技術研究所

大気海洋研究所

大気海洋研究所

芳村 圭

中島 映至（平成26年度）

鈴木 健太郎（平成27年度～30年度）

平成26～30年度累計予算額：107,434千円

（うち平成26年度：26,090千円、平成27年度：20,786千円、平成28年度：19,747千円、平成29年度：20,734千円、平成30年度：20,077千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

SLCP削減を通じた地球温暖化緩和策は世界的に注目されている反面、その気候影響は未だ未解明な部分が多い。例えば、人為起源エアロゾルの直接・間接気候影響の放射強制力はAR4とAR5で大きく異なっている。また、降水量や気温の変化に伴う水資源の変化や洪水・渇水といった水災害への影響まで見積もった研究は、本研究課題によって行われたものを除いて未だかつて存在しない。本研究S-12テーマ4は、大気汚染の限られた側面からの削減策にばかり注目が行きがちなSLCPに関して、その気候影響を特に地球規模での水循環の観点から調べるため、モデル開発とそれらを用いたシミュレーション及び解析を行うことを目的として実施された。より具体的には、次世代に向けた大気化学輸送モデルであるNICAM-Chemの整備及び、領域シミュレーションの精度向上のための地表面過程の高度化を行った。

その結果、SLCPの一つであるブラックカーボン(BC)の排出量削減による地上気温の低下は、これまで考えられているよりも小さいことがその仕組みとともに明らかとなった。すなわち、BC削減による太陽光吸収の減少は大気的不安定化をもたらし、それに伴って雲・降水の変化など「速い応答」の調節機能が働くために、エネルギー収支の変化が地上気温の変化には現れにくいことがわかった。その結果、太陽光の散乱・吸収によるエネルギー変化(瞬時放射強制力)に対する地上気温変化の感度は、硫酸塩と比較してBCは小さくなる。ただし、BCや硫酸塩の気候に対する影響は地域性が非常に強いこともわかった。

また、S-12全体で行った大気汚染物質の排出の把握、その結果を反映したSLCPの排出に関する技術選択を可能とするAIMモデルの拡張、それを用いてSLCP排出に関する将来シナリオを探索する統合運用システムの開発、さらに気候モデルと統合運用システムを組み合わせて気候影響を評価する手法の開発に貢献した。その際詳細な領域計算から全球的な影響評価までをシームレスに行う必要があるため、本テーマでは計算格子を柔軟に設定できるNICAM-Chemを実用的に稼動できるように整備するとともに、世界最高解像度での全球計算を実施可能にした。

さらに、SLCPの陸域水循環への影響は多大であり、SLCP削減効果はこの観点でも評価する必要があることを明らかとした。BCや硫酸塩の前駆気体であるSO₂の排出量が増減すると、気温や降水量が変化することにより、大洪水に晒される人口が増加する可能性があることを示した。特に、BCの変化は地上気温に対する感度は小さいものの、降水量には顕著に影響することがわかった。しかしながら、近年顕著に増加しつつある洪水・熱波などの極端現象に対してSLCPが及ぼす影響の評価については、国際的にも研究事例が非常に乏しいのが現状である。SLCPが地球の大気や表層のエネルギー収支に及ぼす量や、エアロゾルが雲・降水生成に不可欠な物質であることを考えると、SLCPの総合的な環境影響評価は今後ますます重要になってくると考えられる。

[キーワード]

1. はじめに

大気汚染は、特に発展途上国において現在進行形で大きな被害をもたらしている深刻な問題であり、地球全体における将来的な大気質の改善は人間社会にとって重要な課題であると言える。我が国においては、高度成長期を経て公害対策が進み今でこそ深刻な危機としてあまり認識されていないこともあるが、例えば汚染物質の越境輸送や、諸外国との関係性を保つ安全保障の観点からも、その重要性を認識しておくことは極めて重要である¹⁾。

短寿命気候汚染物質 (Short-Lived Climate Pollutants; SLCP) とは、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用を持つ物質と定義される²⁾。具体的な主要物質として、メタンと対流圏オゾン、代替フロン (ハイドロフルオロカーボン; HFC) 及び黒色炭素粒子 (ブラックカーボン; BC) 等が挙げられる。BCは化石燃料やバイオマスを燃焼させた際に発生する煤煙の主要成分であり、人間の健康や生態系に影響を及ぼす大気汚染物質の一つでもある³⁾。

近年、SLCPの気候影響に注目が集まっている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 (AR5) ではSLCPの影響が評価され、大気質改善と気候変動の関係が取り上げられている。また、気候変動枠組条約第21回締約国会議 (COP21) でもSLCP削減に向けた取り組みが議論された。全球的な地表気温の上昇がすでにかなり進行しているにも関わらず、その主因の二酸化炭素ガスの排出制限がなかなか進まないことの原因の一つとして、明確かつ迅速な効果が得られにくいことがある。一方でSLCPの削減はそのまま大気汚染の改善につながり、短寿命であるということはすなわち迅速な効果が得られやすい。そのような利点により、即効性の高い政策課題として取り上げられやすいことが、IPCCやCOPで注目を集めている理由だと考えられる。その効果として、BCとメタンの削減効果でCO₂の削減効果と同様の効果が得られるという研究例²⁾がある。

しかしながら、SLCP削減を通じた地球温暖化緩和策は世界的に注目されている反面、その気候影響は未解明な部分が多い。例えば、人為起源エアロゾルの直接・間接気候影響の放射強制力はAR4とAR5で大きく異なっている。これは、放射強制力への影響メカニズムが複雑なことと、SLCPの時空間変動が激しいために汚染状況が十分に現状把握されていないことに起因している。また、降水量や気温の変化に伴う水資源の変化や洪水・渇水といった水災害への影響まで見積もった研究は、本研究課題によって行われたものを除いて未だかつて存在しない。

2. 研究開発目的

上記のような背景のもと、本研究S-12テーマ4では、短絡的な削減策にばかり注目が行きがちなSLCPに関して、その気候影響を特に地球規模での水循環の観点から調べるため、モデル開発とそれらを用いたシミュレーション及び解析を行うことを目的とする。より具体的には、次世代に向けた大気化学輸送モデルであるNICAM-Chemの整備及び、領域シミュレーションの精度向上のための地表面過程の高度化を行う。

以上を踏まえ、本報告書の3. 研究開発方法と4. 研究結果及び考察の項では、以下の項目について、別々に記載する。

- 1) SLCPの気候影響に関する解析
- 2) シームレスなモデリングシステムの開発
- 3) NICAM-Chemの開発
- 4) SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施
- 5) 先進的かつ統合的な陸域モデルの開発

3. 研究開発方法

3.1 SLCPの気候影響に関する解析

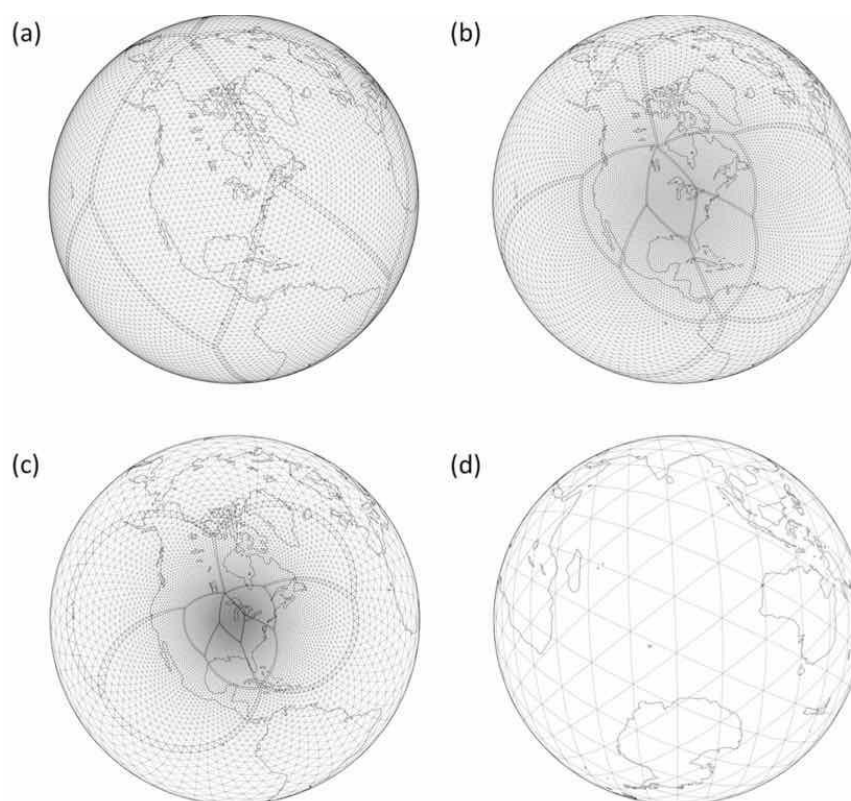
S-12テーマ3の研究によって実施された、数値気候モデルMIROC-SPRINTARSによるSLCP気候影響解析のための数値実験データを用いた詳細な解析を行った。特に、テーマ3で得られた主要な成果として、代表的なSLCPであるブラックカーボンは大気上端で著しい正の放射強制力を持つにもかかわらず、その排出量変化がもたらす全球平均地上気温へのインパクトは予想に反して小さいことがMIROC-SPRINTARSモデルによる数値実験によって明らかとなっているため、そのメカニズムを理解するために、テーマ3から提供されたMIROC-SPRINTARSの数値実験データにもとづいて、全球エネルギー収支の変化を詳細に解析した。具体的に用いたデータは、テーマ3で実施されたMIROC-SPRINTARSモデルによる数値実験のうち、硫酸塩の前駆物質である二酸化硫黄とブラックカーボンの排出量をそれぞれ全球一様に様々な倍率 (x10, x5, x2, x1.5, x0.8, x0.5, x0.3, x0.1, x0.0; x0.0は排出を無くしたことを意味する) で変化させた実験のデータである。硫酸塩は代表的な光散乱性のエアロゾル、ブラックカーボンは光吸収性のエアロゾルであるため、これら2種類のエアロゾルに対する気候応答の違いを解析することは、光学特性 (端的には色) の異なる大気汚染粒子が全球的な気候に対してどのように異なる影響をもたらすのかを定量的に理解する上で重要である。

SLCPによる全球エネルギー収支の変化は、大きく分けて二つの異なる時間スケールで起こることが知られている。すなわち、基本的に大気の変化のみを伴う「速い応答」と呼ばれる短い時間スケールでの応答と、海洋の応答も含めた「遅い応答」と呼ばれる長い時間スケールでの応答が存在する。SLCPによる気候影響を包括的に理解するためには、これらの異なる時間スケールでの応答の両方を理解し、最終的な気候応答に対するこれらの寄与を分けて定量化する必要がある。そこで本研究では、上に述べた倍率で排出量を変化させたそれぞれのケースについて、「速い応答」だけを抜き出すために海面水温を与えた数値実験と、「遅い応答」も含む全応答を定量化するために大気と海洋を結合した数値実験の二種類の実験データを用いた解析を行った。これら二つの実験間の差を取ることで「遅い応答」を取り出すことができ、その結果、「速い応答」と「遅い応答」を分離して定量化することが可能となる。本研究では、解析の対象であるモデル変数の各々について、現在の排出量を与えた標準実験からの各実験の偏差をこれら二つの応答に分けて定量化した。

解析の対象とした具体的なモデル変数は、全球エネルギー収支の要素である全天・晴天における短波・長波放射フラックス (大気上端・大気層・地表面) および顕熱・潜熱フラックスと、これらに深く影響する水蒸気量・降水量・気温である。SLCPによる気候影響を全球規模で包括的にとらえるために、これらの物理量の全球平均値とその排出量変化に対する応答を調べた。

3.2 シームレスなモデリングシステムの開発

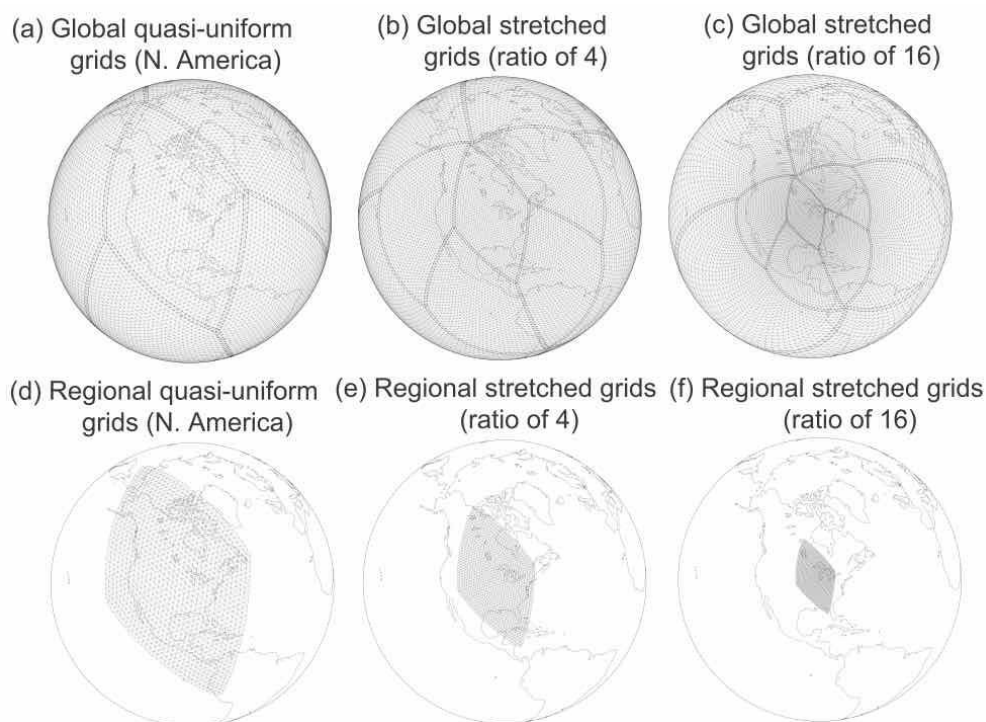
上に述べたMIROC-SPRINTARS数値気候モデルの解析 (結果は4.1に後述) から、SLCPの気候影響評価にとって鍵となるのは雲・降水プロセスの応答メカニズムであることが示唆された。MIROC-SPRINTARSも含めて、全球気候モデルはその解像度が粗いために雲・降水に関わる物理過程を直接解像できないという本質的な問題を抱えており、このことはSLCPの排出量変化によって引き起こされる雲・降水の変化の評価にも大きな不確実性をもたらす。そこで本研究では、従来の全球気候モデルよりも高い分解能で雲を直接解像できるNICAMモデルを基礎として、領域スケールから全球スケールまでを計算資源に応じてシームレスにカバーしながら、大気汚染と気象・気候場との相互作用をシミュレートすることのできるモデリングシステムを開発した。まず、そのためのプラットフォームとして、NICAMモデルを柔軟に利用可能な領域モデルとして整備する開発を実施した。



図(1)-1: Stretch-NICAM (S-NICAM)における格子系の設定の例(Uchida et al. 2016⁴⁾より引用)。

(a)NICAMで標準的に用いられている全球一様格子, (b) (a)と同じ全球格子数でストレッチ比16の変形で得られたストレッチ格子, (c) (b)と同様だがストレッチ比64の場合, (d) (c)の格子配置で得られる地球の反対側の様子。

これを行うひとつめの方法として、NICAMの計算格子の構造をストレッチ格子系に変更するアプローチを採用した。これは、標準仕様のNICAMでは全球一様の格子サイズを持つように設計されているモデル格子系を変形して、ある限られた領域で高い解像度を実現する手法である。具体的には、NICAM格子系の基本である正二十面体格子を分割して得られる格子系において、着目する領域に格子を集める一方、地球の反対側では格子がまばらになるように格子を変形（ストレッチ）する（図(1)-1）。この変形によってトータルの格子数は変化しないので、計算コストを大きく変えることなく、着目する領域で高い解像度を実現できる。さらに、このストレッチ格子系は、格子を全球一様の状態から連続的に変形させて得られるものであるため、高解像度の領域から低解像度の領域までの間で格子サイズが連続的に変化する。これによって、従来の領域モデルにおいてしばしば生じていた、着目する領域とその周囲との間での計算上の不連続性を回避することができ、着目する領域の“外側”で与えられる境界条件をスムーズに感じながら当該領域での計算を実行することが可能となる。本研究で開発されたこのストレッチ格子にもとづくバージョンのNICAMをStretch-NICAM (S-NICAM)と呼ぶ⁴⁾。ストレッチ格子のアプローチはこのような利点を持つ一方で、着目する領域の“外側”においても計算を実施することになるため、領域モデルとして見た場合には“無駄な”計算を行うこととなり、そのぶん計算コストがかかってしまうことになる。

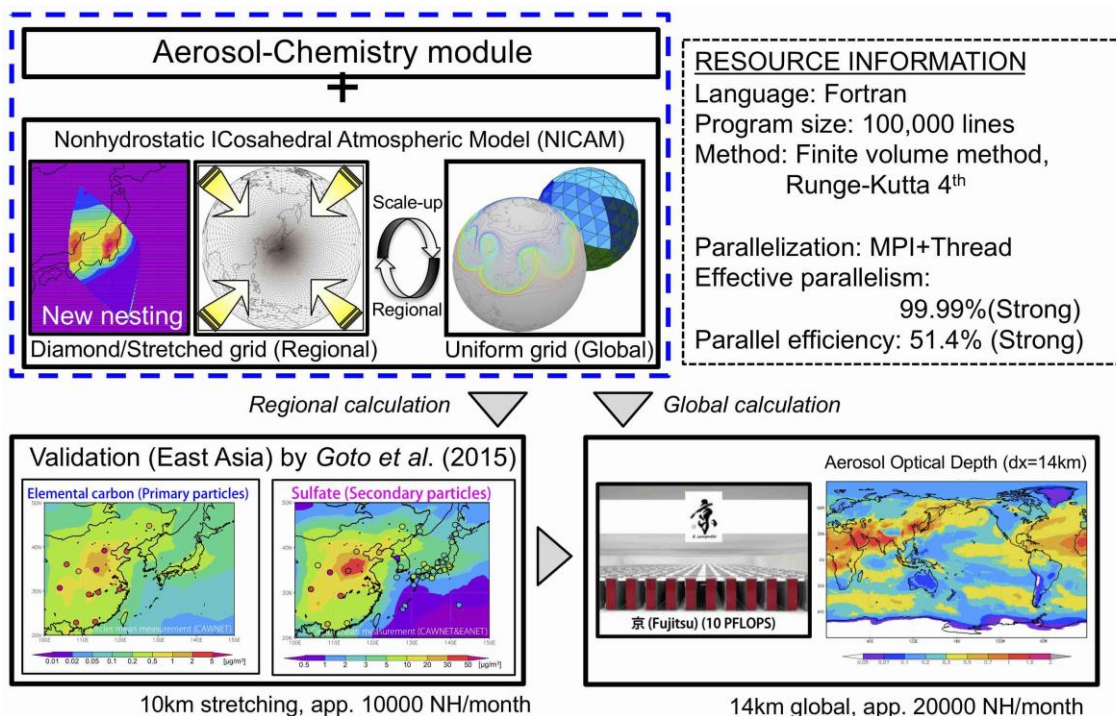


図(1)-2: Diamond-NICAM (D-NICAM)における格子系の例(Uchida et al. 2017⁵⁾より引用)。

そこで本研究では、NICAMを領域モデルとして用いるためのもうひとつのアプローチとして、全球版のNICAMから着目する領域のみを切り出して計算を行うDiamond-NICAM (D-NICAM)の開発も実施した⁵⁾。これは、全球版のNICAMで標準的に用いられている格子系がダイヤモンド型の小領域の連結によって構成されていることを利用して、着目する領域を含むダイヤモンド型領域のみを切り出して境界条件データを与えて計算できるように整備したモデルである(図(1)-2)。D-NICAMでは、全球のうちで着目する限られた領域のみで計算を実施するため計算資源を節約できる。また、物理プロセスのモデル表現(パラメタリゼーション)を親モデルである全球版NICAMと共有しているため、設定された計算領域内部で全球モデルと完全に同一の物理プロセス表現にもとづくシミュレーションが行われることになる。これは、領域モデルに含まれる誤差のうち、全球モデルを純粋に領域モデル化することに伴う境界エラーのみを分離して評価することを可能とする。これによって、領域モデリングの本質的な問題点である境界エラーの不確実性を、物理プロセスの誤差が混在しない形で正確に論じることが可能となる。また、D-NICAMの格子生成の手法をS-NICAMのストレッチ格子と組み合わせることにより、着目するダイヤモンド領域の内部で格子サイズが連続的に変化する格子系を生成することもできる(図(1)-2)。

3.3. NICAM-Chemの開発

上に述べたNICAMモデルのプラットフォームを整備すると共に、大気汚染物質を取り扱うNICAM-Chemモデルを用いた研究(図(1)-3)を実施した。

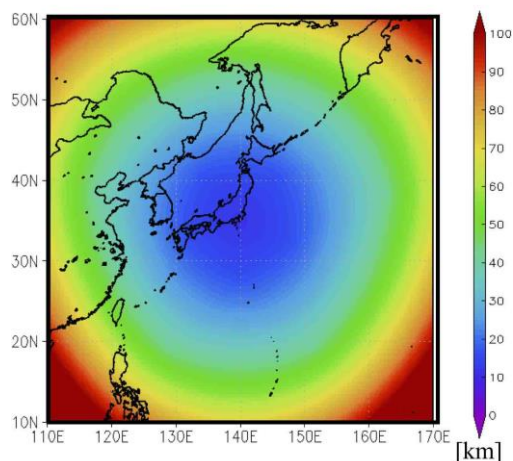


図(1)-3：領域から全球までをシームレスに計算可能なNICAM-Chemモデルの概要。排出されたSLCPが化学輸送過程を経て雲・降水を含む気象場と相互作用する様子を様々な時空間スケールで計算できる。

まず、東アジア域における大気汚染分布を把握するために、ストレッチ格子系を用いたNICAM-Chemによるエアロゾルシミュレーションを実施し、その結果の検証を行った。初期の段階では、日本を対象とした領域規模のシミュレーションを実施し、主に夏季を対象としたモデル検証によって、このモデルが大気汚染物質の都市汚染と越境汚染を概ね再現できることを確かめた⁶⁾。さらに、他の季節におけるモデル再現性も検証するために、2014年10月に打ち上げられた静止衛星ひまわり8号のAHIセンサーによって得られたエアロゾルリトリーバル値^{7),8)}を用いた比較を行い、NICAMのエアロゾル再現性を従来に比べて高い時空間分解能で調べた。なお、このモデル実験で用いたNICAMのモデル水平解像度は関東地方付近で最も細かい約10kmを取り、そこから同心円状に離れるにつれて粗くなり、日本全体としては25kmより細かい解像度になるように設定した(図(1)-4)。また、エアロゾルの輸送過程を現実的に表現するために、風速や温度などの気象場についてはNCEP-FNL再解析データにナッジングするアプローチを採用した。

このモデル検証において特に注目したのは、我が国において大陸からの越境汚染が頻繁に見られる春季で、シベリアからの森林火災の影響が際立っていた2016年5月である。モデルの実験条件に関してGoto et al. (2015)⁶⁾ とほぼ同等であるが、異なる点は森林火災起源の炭素性エアロゾルおよびSO₂に関して、ECMWF/CAMS Global Fire Assimilation System (GFAS) の日平均再解析データを利用したことである。一方、モデルの検証に用いたのは、静止衛星ひまわり8号からリトリーバルして導出した可視光のエアロゾル光学的厚さ(AOT)であり、そのデータ^{7),8)}はJAXAひまわりモニタ(http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html)から提供されているものである。なお、エアロゾルのリトリーバルは、基本的には晴天域でのみ行われるのでひまわり8号のAOT値は欠損もあるため、NICAMとの比較においては、ひまわり8号のAOT値が得られたのと同時刻のモデルデータを用いた。また、衛星観測そのものにも不確実性があることを踏まえ、ひまわり8号だけでなく、韓国の静止衛星であるCOMS/GOCI⁹⁾および極軌道衛星Aqua/MODISおよびTerra/MODISの結果も用いた比較検証を行った。

領域NICAM（ストレッチ格子）



図(1)-4：本研究で用いた領域NICAMモデルのグリッドサイズ。中心（140° E, 35° N）では、最小解像度は11kmである。中心から遠ざかるにつれて、グリッドの大きさが増加するストレッチ格子法を適用した。

次に、S-12テーマ2で推定された大気汚染物質の将来シナリオを用い、NICAM-Chemによる複数の“将来シナリオ実験”を実施した。本実験ではエアロゾル場のみを計算を行ったため、実際に利用したエアロゾルおよび前駆気体の排出フラックスの将来シナリオは、ブラックカーボン（BC）と硫酸塩の前駆気体であるSO₂の2種類の化学物質である。対象年は2030年とし、比較のために基準年を2010年とした。今回考慮したシナリオは表(1)-1で示した次の4種類であり、テーマ3における将来シナリオ実験でも共通のものを使用している。

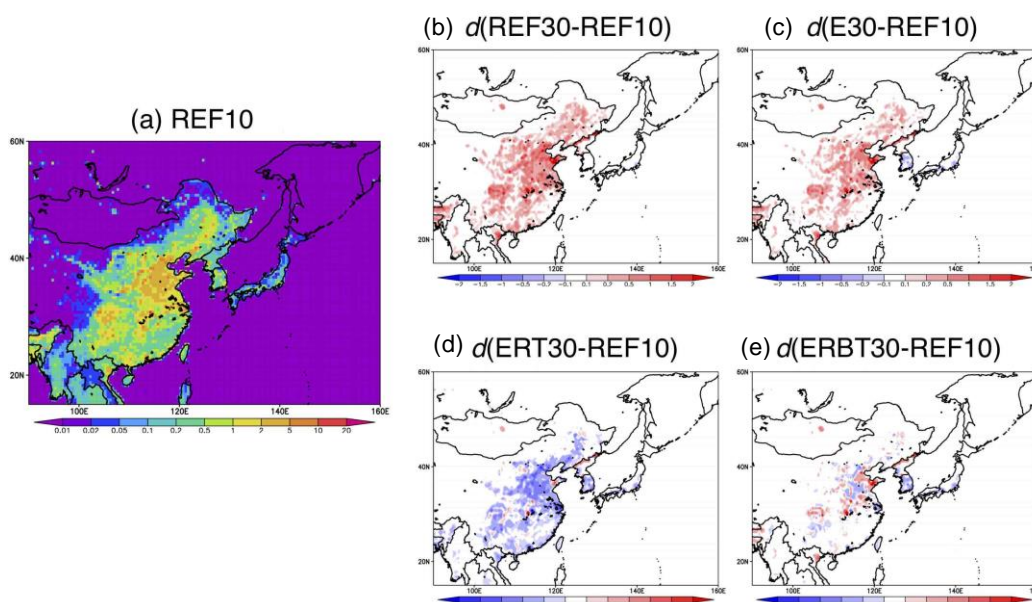
表(1)-1 テーマ2で計算された将来シナリオ

シナリオ名	説明
Reference	CO ₂ 削減を前提とし、現状行われている対策をそのまま進めるなりゆきシナリオ
EoPmid	Referenceに対して、現状の対策以上に対策を進めたシナリオ
2D-EoPmid-RESTRT	EoPmidに対して、2℃目標対策のうち、特に運輸部門のEV化を推進し、再生可能エネルギーを優先したシナリオ
2D-EoPmid-RESBLDTRT	2D-EoPmid-RESTRTに対して、さらに民生部門の電化・ガス化を推進したシナリオ

数値実験はアジアを対象領域として、図(1)-4で示したものと同一の解像度による設定で、2010年と2030年の6-8月を対象期間として実施した。NICAM-Chemでは将来の気象場データを直接計算することができないので、Goto et al. (2016)¹⁰⁾で採用したように、大気海洋結合モデルMIROC4.0による予測計算によって6時間ごとに得られている気象場を境界データとするナッジングにもとづいて計算した。この計算はエアロゾル場のみについて行い、硫酸化学系で必要な酸化物質の入力データとしてはMIROC4.0の境界データとしても利用されたMIROC-CHASERの将来における計算結果を利用した。実施した数値実験の名称と用いたシナリオを表(1)-2にまとめた。また、例としてBCの排出量フラックスのアジアでの分布を図(1)-5に示した。

表(1)-2 本研究で実施した数値実験

数値実験名	用いたシナリオ	対象年
REF10	Reference	2010
REF30	Reference	2030
E30	EoPmid	2030
ERT30	2D-EoPmid-RESTRT	2030
ERBT30	2D-EoPmid-RESBLDTRT	2030



図(1)-5: (a) 2010年におけるBCの排出量フラックスに関する水平分布と、(b-e) 2030年の各シナリオと2010年の基準シナリオとのBCの排出量フラックス差に関する水平分布。単位は $[\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}]$ である。

ストレッチ格子を適用したNICAM-Chemの領域高解像度計算を行うことで、計算コストが抑制された条件下で、NICAM-Chemのエアロゾル再現性を十分に確かめられたので、NICAM-Chemの優位性を活かすために、シナリオ実験と並行して全球スケールの高解像度の計算も実施した。この計算ではモデル解像度3.5km~14kmで全球を覆う設定としたが、これは膨大な計算コストを要するため、京コンピュータを最大限利用した。ただし、世界最高性能を有する京コンピュータを利用しても、3.5km解像度の計算は膨大な計算コストを要し、2週間程度の積分しかできない。そこで、14km解像度の実験も並行して行い、3.5km解像度の計算結果と大きな隔たりがないことを確認できたので、14km解像度で1年間の積分を行った。本報告書でも14km解像度で行った数値実験結果を提示する。また、高解像度と低解像度の対比のために、従来型の全球気候モデルで採用されている解像度(200-300km)での実験も行った。

3.4 SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施

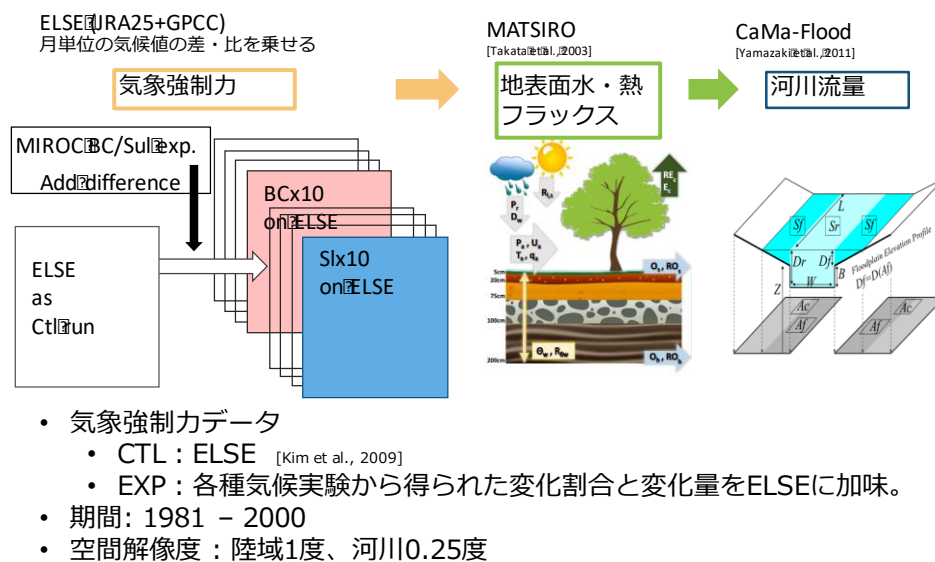
a) 陸域オフライン実験の手順

陸域水循環への影響を調べるために、全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARS¹¹⁾による現在気候実験と、BCと硫酸塩の前駆気体である SO_2 の排出量をそれぞれ0.5、2、5、10倍に変化させた実験¹²⁾の結果を用いた(それぞれBC実験、 SO_2 実験と名付ける)。紙面の都合上、図は省略するが降水量及び地表気温の全球平均に見られる感度は、どちらの実験でも概ね線形に対応している。BC排出が増加することで全球規模での温暖化が進む一方、少雨化が進行する。一方で、 SO_2 排出が増加すると寒冷化に伴い少雨化が進行する。このような異なる水文気候感度が現れる要因は、BCそのものと SO_2 増加に伴う硫酸塩エアロゾルの光学特性の違いにあり、結果としてBCは短い時間スケールで降水量を顕著に変化させる一方、 SO_2 は長い時間スケールでの降水量の気候変化をもたらしている¹³⁾。このこと自体がSLCPの気候影響に関する重要な科学的知見を与えるものであり、本報告書の4.1項に詳細が記述されている。

ところで、気候モデルの出力結果は系統的なバイアスを持つことが知られており、水資源や水災害への影響を評価する場合に、その影響を受ける可能性がある。そのため本研究では、将来の旱魃変化に関する研究¹⁴⁾で用いられた手法に倣い、バイアス補正した気象強制力データを作成し、地表面モデルMATSIRO¹⁵⁾及び河川モデルCaMa-Flood¹⁶⁾を用いた陸域オフライン実験を行った。このようなオフライン

実験の結果は、これまで水熱収支^{15), 17)}・洪水^{15), 18)}・水ストレス¹⁴⁾等の様々な観点から現実と良く合っていることが確認できており、今回評価したいSLCPの増減による感度をより正確に見積もることができる。モデルに入力する変数は、風速、気温、比湿、地表面気圧、下向き短波・長波放射、雲量、降水量、ダスト・BCの沈着量である。ダスト・BCの沈着量は積雪のエイジングによるアルベドの低下に影響する。水平解像度はMATSIROが緯度経度1度間隔、CaMa-Floodでは0.25度間隔である。

まず、前述のMIROC-SPRINTARSの出力を、T85（水平空間解像度約1.5度）から1度解像度に空間内挿し月単位の気候値を計算した。その上で、JRA25再解析とGPCP降水量から作成されたデータセットELSE¹⁷⁾に、気候値の差を加算したり、比で乗算したりした。バイアス補正の対象とする変数は、降水量、気温、長波放射、比湿である。そのうち、比で乗算したのは降水量と比湿である。風速、地表面気圧、下向き短波放射、雲量はELSEのデータをそのまま用いた。ダスト・黒色炭素の沈着量は、同モデルによるCMIP5実験の気候値を用いた。土壌・土地利用に関するパラメータを含む各種の陸域境界条件はGSWP²¹⁾で作成されたデータを用いた。対象は1981-2000年の20年間とし、全部で9種類の実験（BC実験・SO₂実験で其々4種類及びコントロール実験）を行った。実験手順の概略は図(1)-6の通りである。次節以降で説明される指標に関するCTL実験での性能検証は、前述のとおりこれまでに十分確認されているため、この報告書では割愛する。



図(1)-6 オフライン実験手法の概略

b) 水ストレスと影響人口の評価手法

前節で得られたシミュレーション結果から、水ストレス人口を算定した。流域平均した年平均流出量を求め、その流域に住む人口で割ったものが一人当たりの水資源賦存量とする。ファルケンマーク指標²⁰⁾によると、水資源賦存量が1000 [m³/year/c]以下だと高ストレス下にあるとされる。本研究ではShen et al. (2014)²¹⁾に従って、水資源賦存量を計算し、表(1)-3に示すストレスカテゴリーごとに分類した。人口分布データとしてはBengtsson et al. (2006)²²⁾の1990年のデータを用いた。

表(1)-3 ファルケンマークによる水ストレス指標

水ストレス	基準 [m ³ /year/c]
No stress	1700 Q/C
Moderate stress	1000 Q/C <math>< 1700</math>
High stress	500 Q/C <math>< 1000</math>
Extreme stress	<math>q <="" 500<="" c="" math><="" td=""> </math>q>

c) 洪水規模と暴露人口の評価手法

前節で得られたシミュレーション結果から、洪水影響を算出した。具体的には、まず、Yoshimura et al. (2006)¹⁸⁾に倣って確率流量指数 (DPI) を求める。DPIとは、任意の地点・場所における河川流量を比較するために考案された、ある値の河川流量の起こりやすさを何年に1度という単位で表したものである。例えば、大河川の100 m³/sと小河川の100 m³/sとでは意味合いが全く異なり、流量の絶対量で比較することは意味がない。しかしながら、DPIでは例えば前者は1、後者は150などという値で表現され、後者の方が圧倒的に起こりにくいことを明瞭に示すことができる。

コントロール実験 (CTL) から得られたCaMa-Floodの各年の日単位河川流量から20年分の年最大日流量を全てのグリッドで抽出し、ガンベル分布にフィッティングさせることでそれぞれのグリッドでの確率流量曲線の母数を推定し、DPI=100となる流量を求めた。次いで、CTL以外の確率流量曲線及びDPI=100の流量を求め、各実験による100年に一度の流量のCTLに対する増減を見ることで洪水規模の変化を調べた。

洪水暴露人口については、CTL実験の確率流量曲線を各実験に対して用い、日流量がCTL実験のDPI=100の流量を超えたグリッドについて、水ストレスの影響人口と同じ1990年の人口分布データと照らし合わせ、そのグリッドに対応する人口全員が洪水に暴露したとして集計した。閾値を連続して超える場合は1回とカウントした。それらの影響人口について、全球での値に加えて大陸ごとに集計したものを用意し、領域ごとの影響評価も行った。

d) 気候モデルの違いに起因する不確実性の評価

これまでの実験で得られた結果は、一つの気候モデルによるBC及びSO₂の排出増減の気候への影響結果に依存している。実際には、気候モデルによるBC及びSO₂の気候感度は定量的に一致しているわけではなく、領域ごとに注目すると符号さえも合わないことがある。従って、複数の気候モデルを同じSLCPの排出条件で走らせることで得られた気候影響を用いることで、SLCPの水資源・水災害への影響の気候モデルの違いに起因する不確実性を評価した。

e) S-12シナリオ群による水資源・水災害影響評価

S-12では、2°C目標に向けた低炭素社会の達成を実現するような排出経路にしつつ、低炭素対策の組み合わせによるSLCP (BC, 対流圏O₃, CH₄) や大気汚染物質 (SO₂, NO_x, PM2.5, PM10, CO, NMVOC) の排出の相殺効果・相乗効果を考慮し、SLCPや大気汚染物質の削減のメリット・デメリットを踏まえた、排出シナリオを提案している。これらの排出シナリオによる水資源・水災害への影響を評価した。各シナリオの詳細については割愛するが (テーマ2報告書を参照のこと)、ごく簡単には、なりゆきシナリオ (Ref)、除去対策Maxシナリオ (EoPmax)、除去対策中程度シナリオ (EoPmid)、2°C目標除去対策Maxシナリオ (2D-EoPmax-CCSBLD)、2°C目標除去対策中程度シナリオ (2D-EoPmid-CCSBLD)、2°C目標除去対策中程度再生可能エネルギー利用・EV車増加シナリオ (2D-EoPmid-RESTRT)、2°C目標除去対策中程度再生可能エネルギー利用・EV車・オール電化増加シナリオ (2D-EoPmid-RESBLDTRT) の7つを用いた。なお、一部のシナリオに関しては、表(1)-1にも記載をした。

3.5 先進的かつ統合的な陸域モデルの開発

本サブテーマで開発が進められてきた統合陸域シミュレータ (Integrated Land Simulator; ILS) では、これまでにフレームワークの構造改革を行い、陸面過程モデルMATSIRO¹⁵⁾ と河川氾濫モデルCaMa-Flood¹⁶⁾の結合に成功してきた。MATSIROでは蒸発散や土壌水分量の変化、流出、積雪の融解・再凍結などの水・熱輸送を求めるにあたって、土地被覆や土壌分類ごとに推定されたパラメーターを用いて物理過程を解く。またCaMa-Floodでは集水域形状格子を用いて地形をパラメタリゼーションし、物理式を用いて河川水の流下や氾濫を解く。いずれも陸域シミュレーションにおいて盛んに研究・利用されており^{23), 24)}、ある程度信頼性のあるモデルと言えるが、一方で人間活動の影響は一切考慮されてい

い。貯水池による水の貯留や作物生産地への灌漑水の供給による河川流量や土壌水分量などへの影響、及び作物の生長・収穫または枯死など、人間活動が水循環に与える影響は様々であり²⁵⁾、加えて気候モデルと陸面モデルを結合した場合はそれらが相互に作用して長期的に大きな影響を与えることが予想されるため、陸域シミュレーションの高度化においてこれを考慮する必要性は極めて大きい。他にも地下水動態や湖沼における水循環、気候変動や人口増加による土地利用変化など、考慮すべき要素は数多くあり、将来的にはこれらもシステムに組み込んでいく必要がある。現在のところILSでは、MATSIROの出力である流出量をCaMa-Floodが受け取るという形の単純な結合がなされているのみで、カプラーを用いたモデルのソフトな結合に関する知見は十分でない。そこで(1)システムの高度化と(2)ソフト結合における課題の抽出を目的として、全球水資源モデルH08²⁵⁾をILSに結合した。H08は陸面モジュールと河川モジュールに加えて作物生産、取水、灌漑、貯水池操作等の人間活動モジュールを持っており、気象変数を外力として陸面・河川・人間活動を一体的にシミュレーションすることができる。しかし陸面・河川部分は非常に単純な構造となっており、これらのシミュレーションにおいてはMATSIROやCaMa-Floodのような物理モデルを使う方が望ましい。したがって今回は陸面をMATSIRO、河川をCaMa-Floodで計算し、そこにH08の人間活動モジュールを導入するという形を取った。

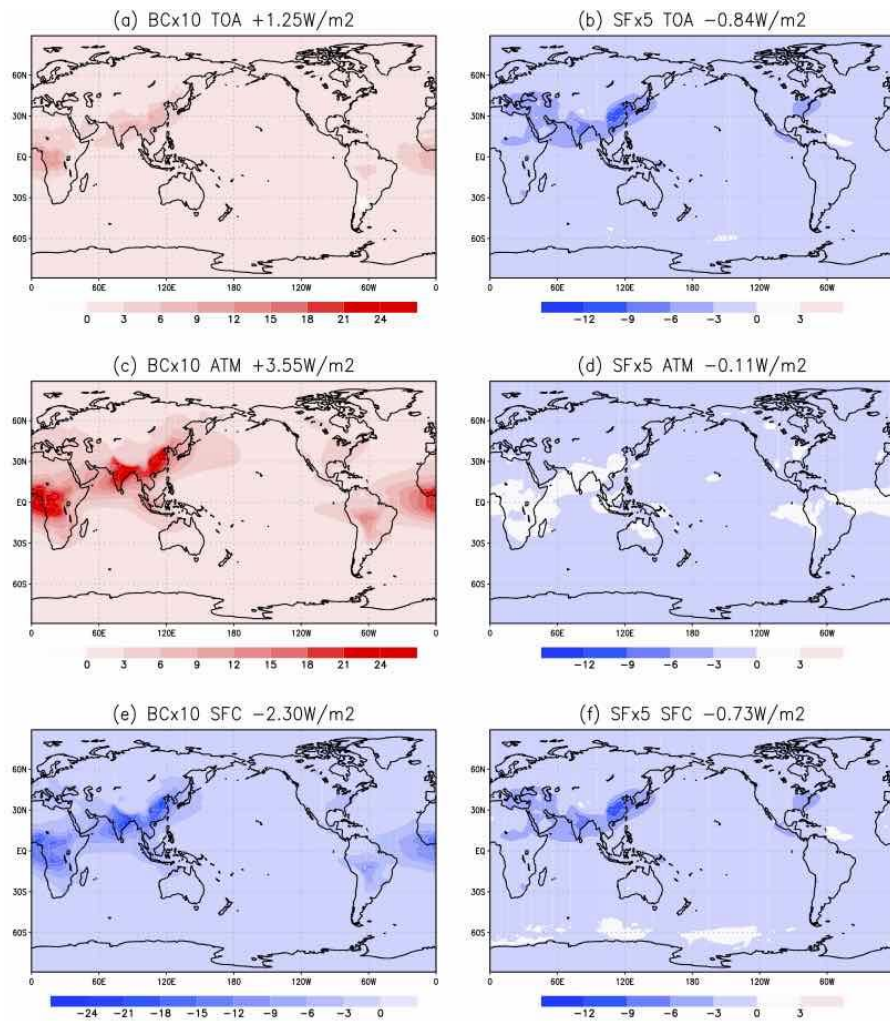
陸面過程モデルMATSIROはモザイク機能を持っており、ひとつの陸面格子に複数のパラメーター(土地被覆など)を与えることができる。これを用いて陸面を2種類に分割し、モザイク1を通常のMATSIRO陸面、モザイク2をH08の耕作地とした。モザイク1の計算結果はH08を結合しない場合と同じである。モザイク2にはH08で計算された葉面積指数(Leaf Area Index; LAI)と灌漑水の供給を反映し、作物生産による陸面への影響をMATSIROで再現した。CaMa-Floodは貯水池をそもそも持たないが、貯水池がある格子の流入量、流出量、河道貯留量をそれぞれ貯水池への流入量、放流量、貯水量とみなして貯水池操作を再現することが可能である。よってH08における貯水池の放流量をCaMa-Floodが受け取って河川氾濫計算に反映することとした。実験はモデルごとにスピニアップを行った上で、1901年から2010年までの110年間について計算した。気象データにはGlobal Soil Wetness Project Phase 3 (GSWP3)²⁶⁾を用いた。陸面の実験はH08を結合しないCTL実験、LAIのみを反映したLAI実験、及びLAIと灌漑水量の両方を反映したCRP実験の3実験を行った。

4. 結果及び考察

4.1 SLCPの気候影響に関する解析

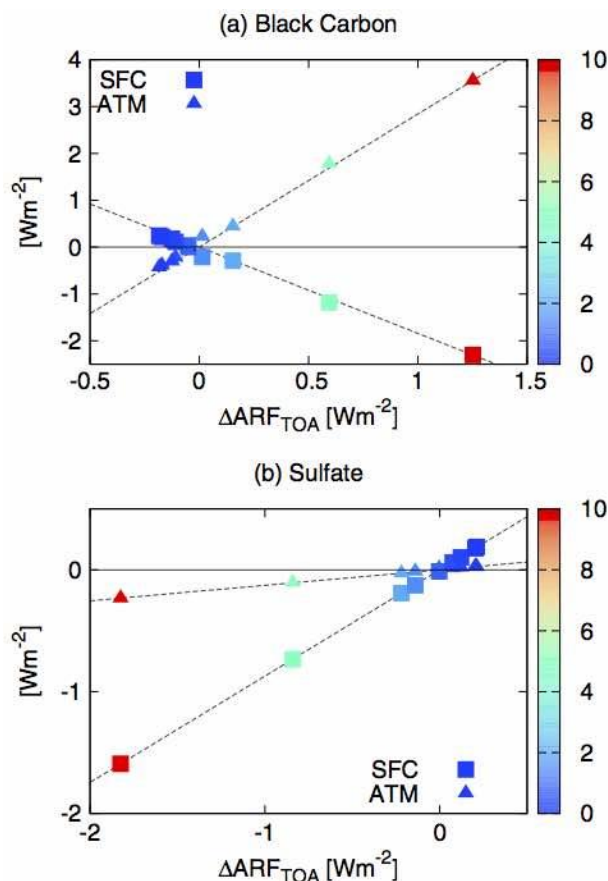
SLCPがもたらす気候影響の駆動力は、大気上端における「瞬時放射強制力」によって定量化される。これは、原因物質であるブラックカーボンや硫酸塩の変化によって生じるエネルギーバランスの崩れを大気上端で測ったものであり、原因物質の排出量変化によって気候システムに加えられる外力を表す。MIROC-SPRINTARS気候モデルでは、これはエアロゾルの有無による放射フラックスの差として出力されるものであり、ブラックカーボン・二酸化硫黄の排出量をそれぞれ10倍・5倍に増加させた場合の大気上端での瞬時放射強制力は図(1)-7上段のような分布を示していた。ブラックカーボンの増加は顕著な正の放射強制力、硫酸塩の増加は顕著な負の放射強制力をそれぞれ全球的に持つことがわかる。

このような大気上端での放射強制力は気候システム全体への外力を表す重要な物理量だが、この外力がさらに大気と地表へどのようにエネルギーを再配分しているのかを見るために、大気層と地表面における放射強制力の分布を図(1)-7中段と下段にそれぞれ示す。ここからわかるように、ブラックカーボンによる瞬時放射強制力は大気を顕著に加熱する一方で地表面を冷却する性質を持ち、両者が打ち消しあった正味の結果として大気上端で正の放射強制力を持つものに対して、硫酸塩では大気層に対する影響は小さく、大気上端での負の瞬時放射強制力は大気を素通りして、ほぼそのまま地表面に対する顕著な冷却としてはたらいっている。



図(1)-7: ブラックカーボン(左列)と硫酸塩(右列)の排出量をそれぞれ10倍,5倍にしたときの大気上端(上段)・大気層(中段)・地表面(下段)における瞬時放射強制力(W/m^2)の全球分布。それぞれの全球平均値を各パネルの右上に数値で示す。Suzuki and Takemura (2019)²⁷⁾より引用。

次に、このような瞬時放射強制力が排出量の倍率の変化に対してどのように変化するかを調べた。このような解析は、SLCPの排出量を現実的な範囲で変化させた場合に、それに伴って気候システムへの外力がどのように変化するかを把握する上で重要である。解析の結果を図(1)-8に示す。図では、様々な倍率での排出量変化に対して、大気層および地表面での放射強制力の値が大気上端での値に対してどのように変化するかをプロットしている。ブラックカーボン(図(1)-8上段)・硫酸塩(図(1)-8下段)のいずれの場合においても、大気層および地表面での放射強制力は大気上端での放射強制力に対してほぼ線形に変化している様子が見られる。また、図(1)-7に見られたブラックカーボンと硫酸塩による放射強制力の大气層と地表面への内訳の特徴が、幅広い倍率の排出量変化に対しても見られることがわかる。図(1)-8に破線で示された回帰直線の傾きから、放射強制力の大气層と地表面の内訳は大気上端での値に対してブラックカーボンではおよそ大気:地表面=3:(-2)、硫酸塩ではおよそ0.1:0.9になっている。

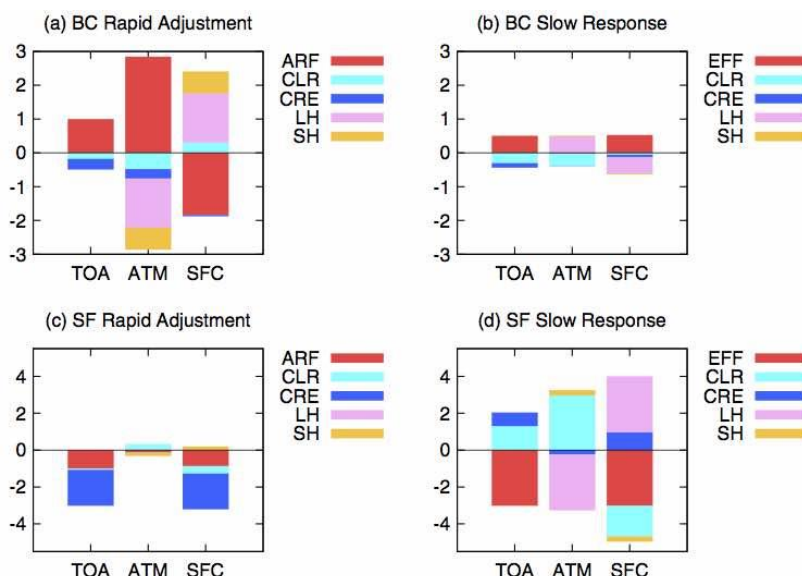


図(1)-8: ブラックカーボン(上段)と硫酸塩(下段)による瞬時放射強制力の大気成分(ATM)と地表面成分(SFC)(ともに縦軸)の大気上端での値(横軸)に対する散布図。色は排出量変化の倍率を表す。Suzuki and Takemura (2019)²⁷⁾より引用。

ブラックカーボンと硫酸塩による大気層と地表面へのこのようなエネルギー再配分の違いは、主に大気の変化を引き起こす「速い応答」と海洋の応答も伴う「遅い応答」の起こりかたに直接影響する。これは前者が主に大気層のエネルギー収支、後者が主に地表面でのエネルギー収支に関係するためである。このことを見るために、ブラックカーボンと硫酸塩による大気上端・大気層・地表面での全球平均エネルギー収支の変化を「速い応答」と「遅い応答」に分けて定量化したものを図(1)-9の棒グラフに示す。このうち、「速い応答」に関するグラフ(図(1)-9左列)には、大気上端・大気層・地表面での瞬時放射強制力とそれに対する様々なエネルギーフラックスの応答が示されており、「遅い応答」に関するグラフ(図(1)-9右列)には、「速い応答」の結果として正味はたらく有効放射強制力とそれに対するエネルギーフラックスの応答が示されている。これによって、光学特性の異なる大気汚染粒子による全球エネルギー収支変化の全体像が初めて定量化された。また、図(1)-8の結果から、エネルギーフラックスの変化は排出量変化に対して比較的線形なので、図(1)-9では大気上端での瞬時放射強制力で規格化されたフラックス変化を示している。

図(1)-9によると、ブラックカーボンと硫酸塩では「速い応答」と「遅い応答」の寄与が顕著に異なることが見て取れる。ブラックカーボンによる顕著な大気加熱は大気層のエネルギーバランスを崩すため、それを元に戻そうとするはたらきが大気自身によって引き起こされる。これは、気温・水蒸気・雲の鉛直分布の変化による放射収支の変化と顕熱・潜熱の変化の組み合わせによって起こり、これらが全体としてブラックカーボンによる大気加熱を相殺してエネルギー収支の変化が解消される。このような大気の「速い応答」の結果として、地表面におけるエネルギー収支も変化する。これは、ブラックカーボン自身が地表面で持つ負の放射強制力も含めて正味での加熱効果をもたらすが、その大きさは大気上端での瞬時放射強制力の半分程度に減ってしまう。この正味での加熱効果が海洋も含む気候系の「遅い応答」を駆動する有効放射強制力となるので、それに呼応して起こる全球平均気温の応答は

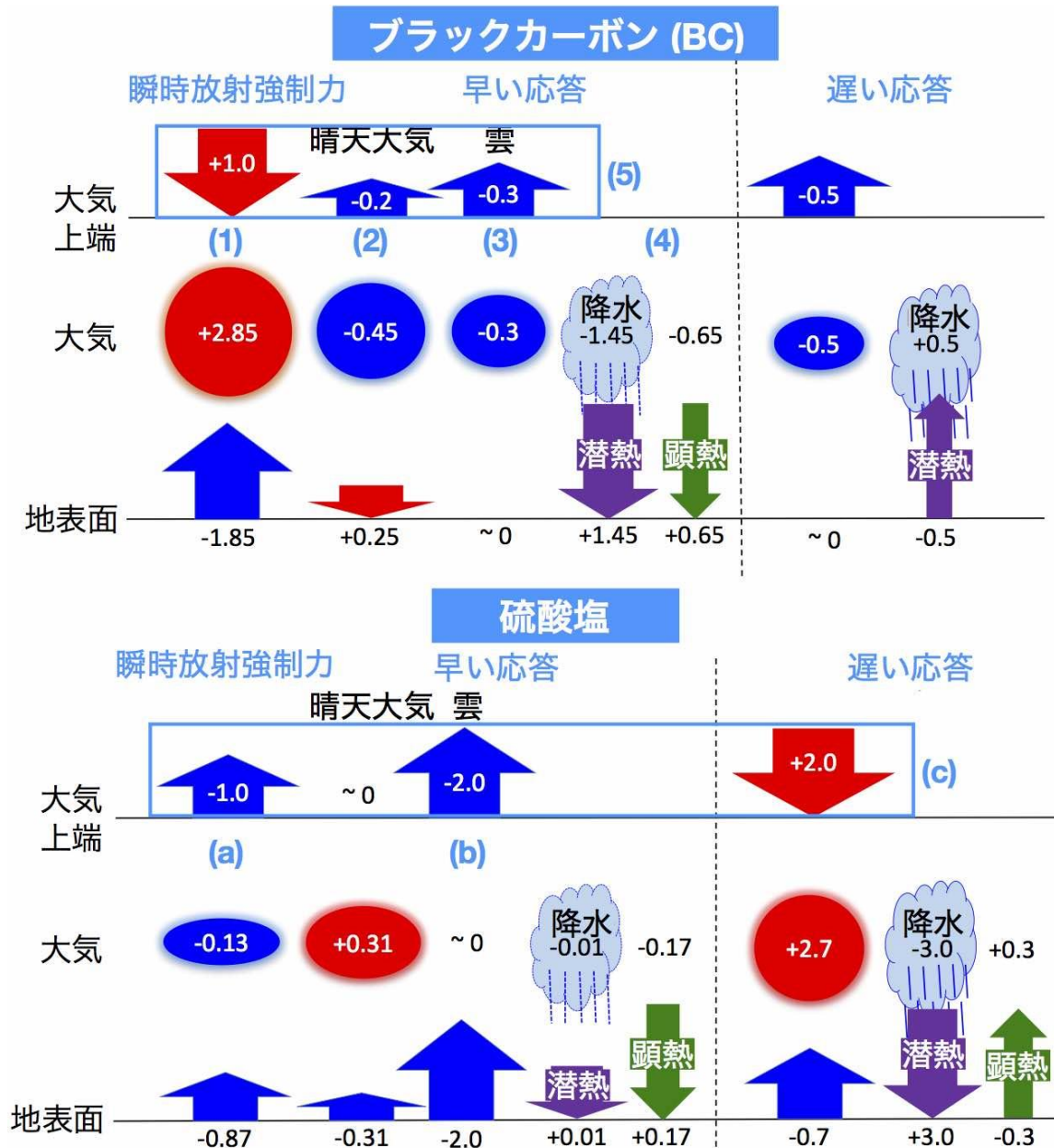
小さくなってしまふことになる。これがブラックカーボンの変化に対して気温変化が小さい理由であり、本研究によって初めて明らかとなった。これに対して、硫酸塩の変化に対しては「遅い応答」が卓越していることも図(1)-9からわかる。これは、硫酸塩による瞬時放射強制力が雲との相互作用によって増幅しながらほぼ直接地表面を冷却し、それが顕著な負の有効放射強制力となって、全球平均気温の顕著な低下を招くためである。



図(1)-9: ブラックカーボン(上段)と硫酸塩(下段)の変化による大気上端(TOA)・大気層(ATM)・地表面(SFC)における全球平均エネルギー収支の変化を「速い応答」(左列)と「遅い応答」(右列)に分けて定量化したもの。大気上端での瞬時放射強制力を単位の大きさとして規格化されたフラックス変化の大きさを示している。ARFは全天下でのエアロゾル放射強制力、CLRは晴天下でのエアロゾル放射強制力、CREは雲放射強制力、LHは潜熱、SHは顕熱、のフラックスをそれぞれ表している。Suzuki and Takemura (2019)²⁷⁾より引用。

図(1)-9からさらにわかることは、ブラックカーボンと硫酸塩の排出量変化に起因するエネルギー収支変化において、放射エネルギーフラックスと顕熱・潜熱フラックスの相対的な寄与が大きく異なることである。ブラックカーボンに対する「速い応答」では、瞬時放射強制力として与えられる大気加熱は、主に潜熱・顕熱フラックスの減少によって解消されている(図(1)-9(a))。これは、ブラックカーボンによる大気加熱が大気を安定化させるために、地表面から大気へのこれらの乱流熱輸送が減少するために起こるが、これは同時に地表面に対しては加熱に働いて、瞬時放射強制力の地表面成分が持つ冷却を上回ることによって正の有効放射強制力を生み出し、「遅い応答」の駆動力となる(図(1)-9(b))。この乱流熱輸送のうち、潜熱フラックスの減少は直接的には地表面から大気への水の蒸発が減少することに対応するが、全球平均では蒸発量は降水量と釣り合っているため、これは「速い応答」によって全球平均降水量が減少することを意味している。この減少は、「遅い応答」で潜熱すなわち降水量が増加する(図(1)-9(b))ことによって一部相殺されるが、降水量の正味での減少を引き起こしていることがわかる。これは後に述べるように、陸域も含めた地球全体の水循環を変調させることになる。この「速い応答」において顕熱の変化が顕著に寄与していることはブラックカーボンによる気候影響の特徴であり、このことも潜熱すなわち降水量の変化を制御している主要な要素のひとつであることがわかった。これに対して硫酸塩による気候影響では、乱流熱輸送の変化は主に「遅い応答」として起こるが、顕熱の寄与は小さく、潜熱の寄与が支配的である(図(1)-9(d))。これは、「遅い応答」に伴う全球平均気温の変化によって水蒸気量が増加し、それによる大気放射冷却の変化とほぼバランスするように潜熱すなわち降水量の変化が起こることを意味している。したがって、硫酸塩の変化による全球平均降水量の変化は、全球平均気温の変化と連動して起こることがわかる。これは、ブラックカーボンによる全球降水量変化が気温変化を伴わない「速い応答」として起こることとは対照的である。

図(1)-9に示されたエネルギー収支の変化から、ブラックカーボンおよび硫酸塩がもたらす気候影響（気温・降水量への影響）の定量化には、いくつかの不確実性が存在することもわかる。特に主要な不確実要因は、大気汚染粒子に対する雲の速い応答（硫酸塩に対する間接効果とブラックカーボンによる準直接効果）および大気安定度の変化とそれによる顕熱の変化である。これらの不確実性は、降水量変化の予測にも不確実性をもたすため、地球規模の水循環変化の定量化にとっても主要な不確実要因となる。本研究では、これらの不確実要因をエネルギー収支の枠組みの中で同定することができた。



図(1)-10: ブラックカーボン（上段）および硫酸塩（下段）の排出量変化によってもたらされる気候影響の模式図。大気上端における瞬時放射強制力の大きさを単位としたときの大気上端・大気層・地表面における各種エネルギーフラックスの全球平均値の変化を大まかな数値で示す。Suzuki and Takemura (2019)²⁷⁾より改変。

ブラックカーボンおよび硫酸塩の排出量変化がもたらすこのような全球的な気候影響は、図(1)-10のように模式的にまとめることができる。ブラックカーボンに対する気候応答（図(1)-10上段）では、大気上端での瞬時放射強制力(1)が、水蒸気や気温の鉛直分布変化に伴う晴天大気の放射収支変化(2)と雲の変化に伴う放射収支変化(3)による「速い応答」によって半分程度相殺されるとともに、大気層

への加熱を解消するために潜熱（降水）および顕熱の減少(4)が起こる。この結果として正味残る半分程度の（有効）放射強制力が「遅い応答」を駆動し、これが全球平均気温の上昇とそれに連動した全球平均降水量の増加を引き起こす。このことは、ブラックカーボンによって与えられた正の瞬時放射強制力の一部のみしか全球平均気温の上昇には使われず、残りは大気の「速い応答」とそれに付随する降水量の減少を引き起こすことを表している。

これに対して、硫酸塩に対する気候応答（図(1)-10下段）では、硫酸塩自体が太陽光を散乱することによる負の瞬時放射強制力(a)が雲との相互作用（間接効果）によって大きく増幅され(b)、これらは大気層を素通りして地表面をほぼ直接的に冷却するため、大気層における「速い応答」はほとんど起こらない。その一方で、この大きな負の有効放射強制力が気候系の「遅い応答」を駆動する(c)ために、全球平均気温が顕著に下降するとともに、それと連動して全球平均降水量も減少する。また、「遅い応答」による大気上端での放射収支変化(c)は、有効放射強制力(a+b)を完全には相殺しておらず、海洋が冷却されていることを示唆している。

述べてきた結果は、光学特性の異なるブラックカーボンと硫酸塩エアロゾルでは全球平均での気温と降水量への影響が顕著に異なることをそのメカニズムにまで立ち入って解明したものであり、特にブラックカーボンの温暖化効果が小さいことをエネルギー収支という物理的根拠にもとづいて説明する。これは、本プロジェクトが始動した当初の動機であり国際的な世論でもあるブラックカーボン削減による温暖化緩和の有効性に対して、科学的根拠にもとづいて疑問を投げかける結果でもある。

そこで、MIROC-SPRINTARS実験データの解析から得られたこれらの知見を本プロジェクトで開発した統合運用システムに導入するために、ブラックカーボンおよび硫酸塩の排出量変化が全球平均気温と全球平均降水量変化にどのように結びついているのかを定量化する簡易的な数式を提案した。これは以下の方程式系で与えられる：

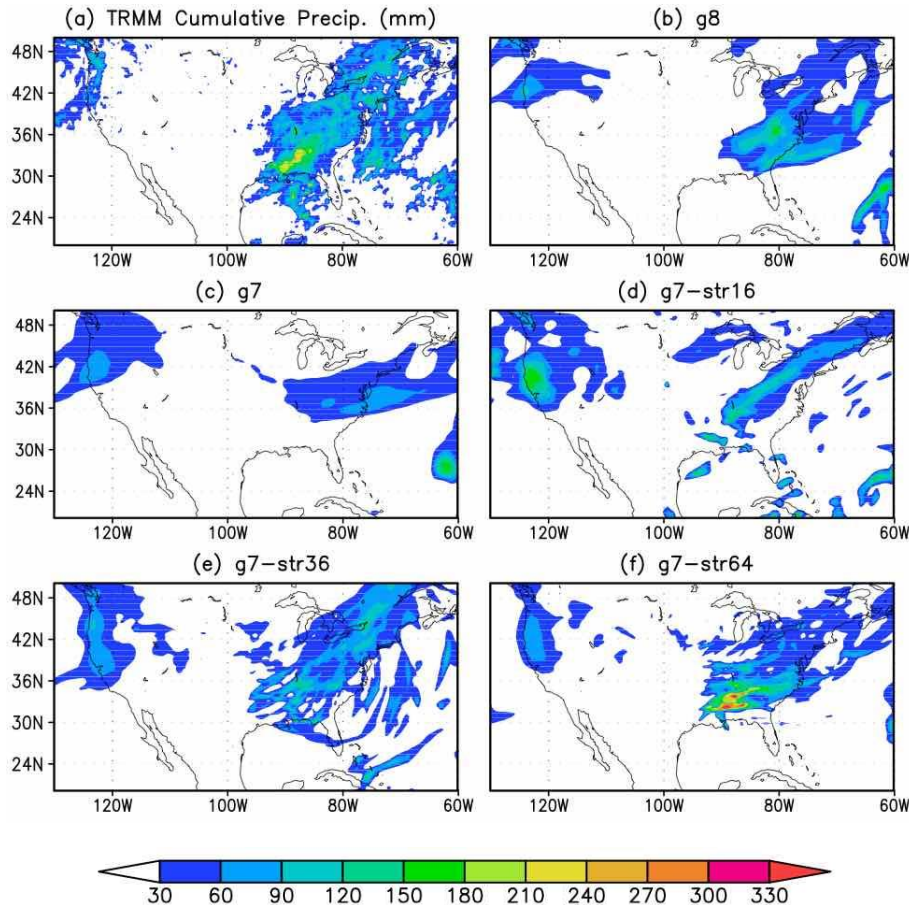
$$\begin{aligned}
 \text{瞬時放射強制:} & \begin{pmatrix} \Delta R_i^{TOA} \\ \Delta R_i^{ATM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma^{TOA} \\ \gamma^{ATM} \end{pmatrix} \Delta \left(\frac{E}{E_0} \right) & \begin{array}{l} \text{TOA: 大気上端} \\ \text{ATM: 大気層} \end{array} \\
 \text{有効放射強制:} & \begin{pmatrix} \Delta R_e^{TOA} \\ \Delta R_e^{ATM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon^{TOA} & 0 \\ 0 & \epsilon^{ATM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_i^{TOA} \\ \Delta R_i^{ATM} \end{pmatrix} \\
 \text{気候応答:} & \begin{pmatrix} \Delta T \\ L\Delta P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\lambda & 0 \\ (\alpha\kappa + \mu)/\lambda & g-1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_e^{TOA} \\ \Delta R_e^{ATM} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

第1式は、Eで表された排出量の変化を大気上端・大気層における瞬時放射強制力に結びつける式であり、これらがさらに第2式によって有効放射強制力（大気上端および大気層）に関連づけられる。第2式の係数行列では、上で述べた「速い応答」の効果が考慮されている。さらに、この有効放射強制力から第3式によって、全球平均気温および全球平均降水量の応答が得られる。これらの式に現れる係数行列の要素には、放射強制力のefficacy（有効性）や気候感度といった基本的な気候パラメータが含まれ、これらは上に述べたMIROC-SPRINTARS数値実験データの解析にもとづいて評価される。

本研究では、数値気候モデルの結果から上式のように与えられる排出量と気候応答（気温と降水量の応答）の関係を統合運用システムに導入した。これによって、ブラックカーボンと硫酸塩エアロゾル（の前駆気体である二酸化硫黄）の任意の排出量変化に対して、気温変化と降水量変化を算出することが可能となった。こうして計算された気温と降水量の変化は、さらに本テーマで開発された陸面モデルによるシミュレーションを通じて、陸域水循環に関係する諸量の計算に用いられる。その結果として、後述するように、ブラックカーボンと硫酸塩の排出量変化による水循環・水資源への影響を評価することも可能となった。

4.2 シームレスなモデリングシステムの開発

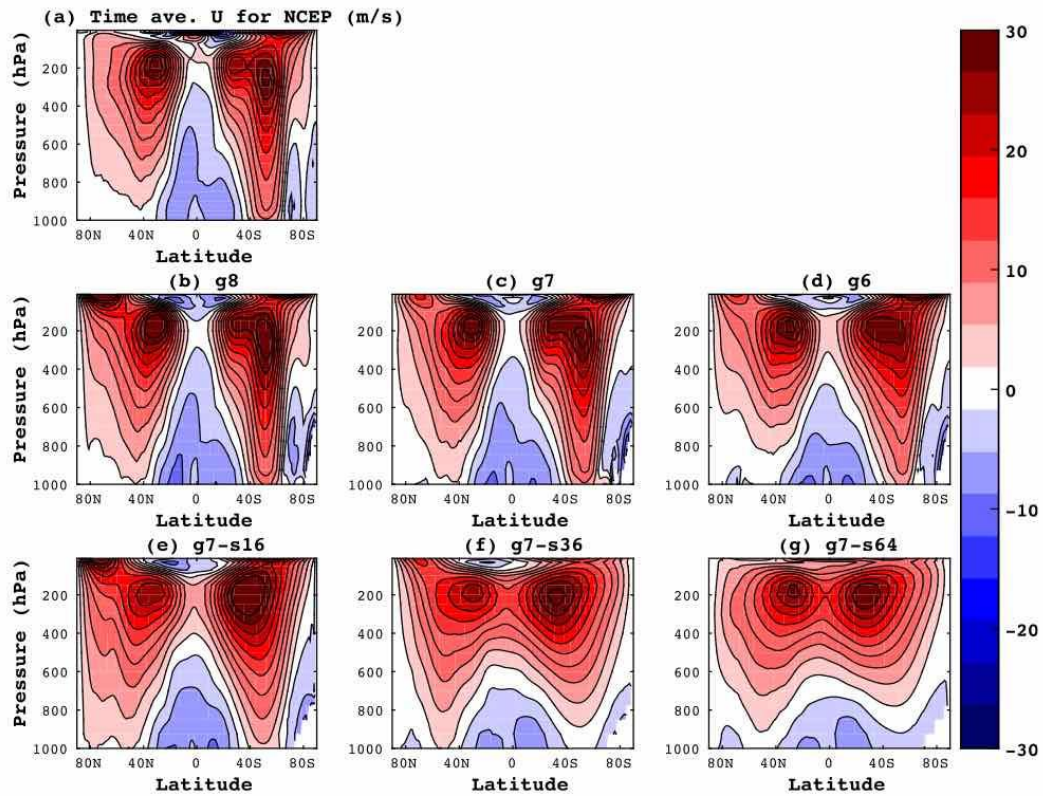
まず、S-NICAMにおいて解像度やストレッチ比の異なる複数の設定でシミュレーションを行い、その結果を衛星観測との比較によって検証した。図(1)-11に示したのはその一例であり、一週間程度の短期シミュレーションで得られた北米大陸上での降水分布をTRMM衛星観測との比較で示している。一様格子の場合には、解像度が高いほど降水分布の再現性は良くなっていることがわかる。ストレッチ格子の場合には、ストレッチ比を大きく設定して当該領域での解像度を上げるほど降水分布の再現性は良くなっている。これらの結果は、数日から一週間程度の短期シミュレーションにおいては、S-NICAMは適切に稼働し、高い解像度から期待される結果を再現することを意味している。



図(1)-11: S-NICAMによってシミュレートされた降水分布の例 (Uchida et al. 2016⁴⁾。

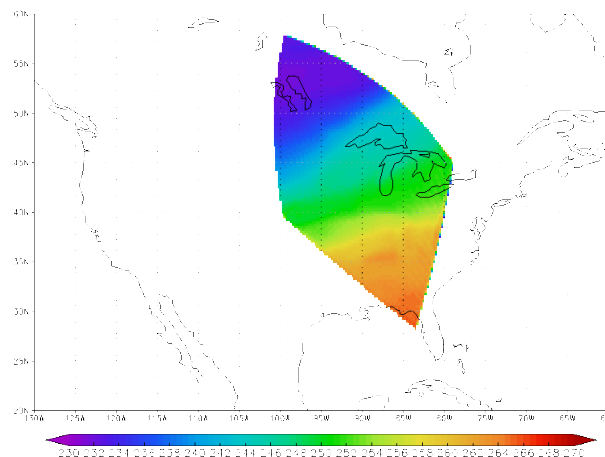
S-NICAMでは着目する領域に対して地球の反対側に位置する領域では格子サイズが粗いため、その領域では気象場の再現性に大きな誤差が生まれ、それが着目する領域に伝播すると考えられる。この影響を評価するために、本研究ではS-NICAMを用いてより長期のシミュレーションを行い、再現される気象場の解像度やストレッチ比への依存性を系統的に調べた。そのような解析の例を図(1)-12に示す。全球的な大循環の場を代表的に表す物理量として、経度方向に平均した東西風の高度-緯度断面図をNCEP-FNL再解析データと比較する形で示している。この比較においても、全球一様格子の場合には、解像度が高いほど大循環場の再現性は良くなることがわかる。一方、ストレッチ格子を用いた場合には、大きなストレッチ比を与えると限られた領域の解像度は高まるものの、全球的には格子サイズが大きな歪みを持ってしまうために、再現される大循環場も歪んでしまうことがわかった。

S-NICAMから得られたこれらの解析結果は、着目する領域の解像度を上げて当該領域での気象場の再現性を高めることと全球的な気候場の再現性との間には時間スケールに依存したトレードオフが存在することを意味しており、S-NICAMを用いた影響評価は比較的短期のシミュレーションを用いて行うべきであることが示唆される。

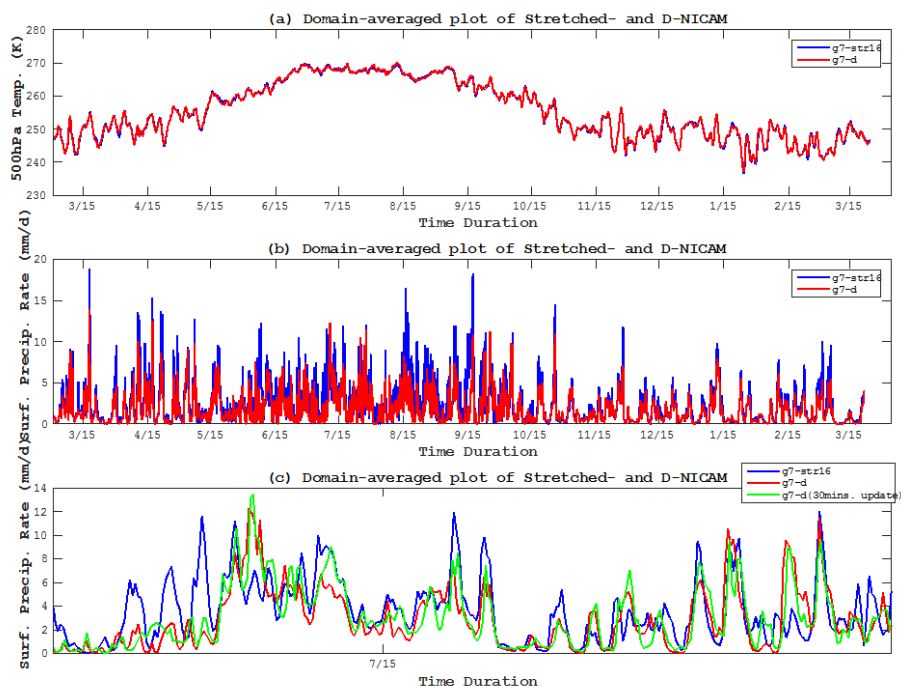


図(1)-12: S-NICAMで再現された帯状平均東西風の子午面断面図の比較⁴⁾。

次に、D-NICAMの再現性に関する評価を行った。D-NICAMでは、図(1)-13に例示されるようなダイヤモンド型の領域が設定され、その領域の外側の境界条件を与えることで、領域内部での計算が行われる。本研究では、この境界化に起因する誤差を評価するために、同じ領域を同じ格子配置でカバーしながら全球で計算を行うS-NICAMとの比較を行った。その際、S-NICAMの計算値をD-NICAMの境界条件データに直接用いる実験を行い、D-NICAMにおいてモデルを領域化したことに起因する誤差を評価した。図(1)-14はその結果を示しており、S-NICAMとD-NICAMで共通の計算領域における温度と降水量の領域平均値の時系列を比較している。これによると、時間変化が比較的緩やかな温度ではS-NICAMとD-NICAMの間の誤差はほとんど見られないのに対して、時間的な変動の激しい降水量はD-NICAMの再現値がS-NICAMより相対的に少ない結果が得られた。そこで、時間分解能のより細かい境界値データを与える感度実験を行ったが、モデル誤差は境界値データの時間分解能にはそれほど依存しないことがわかった。



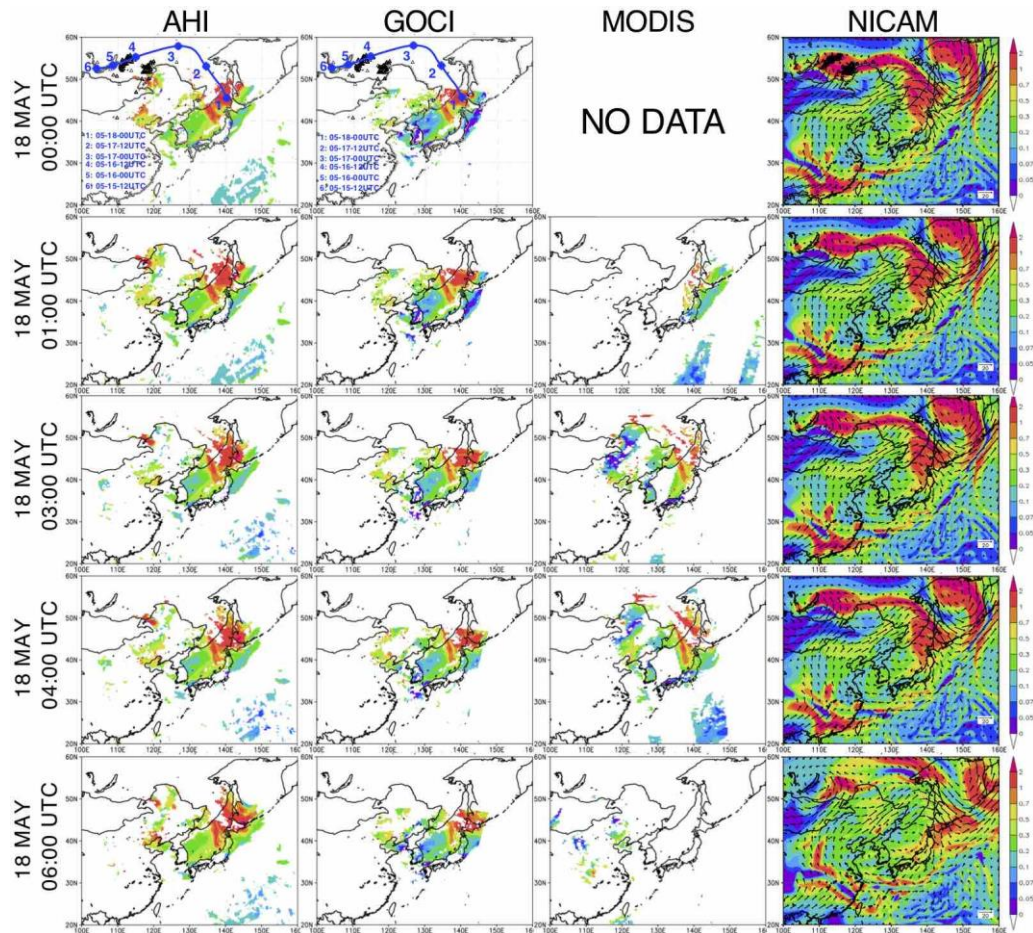
図(1)-13: D-NICAMでの領域設定の例。色は温度場を表す。



図(1)-14: S-NICAM(青)とD-NICAM(赤)から得られた領域平均の(a)500hPa面気温と(b)地表面降水量の時間変化。(c)7月に着目した降水量の比較。時間分解能の高い境界値データを与えたD-NICAMの結果を緑で示す。

4.3 NICAM-Chemの開発

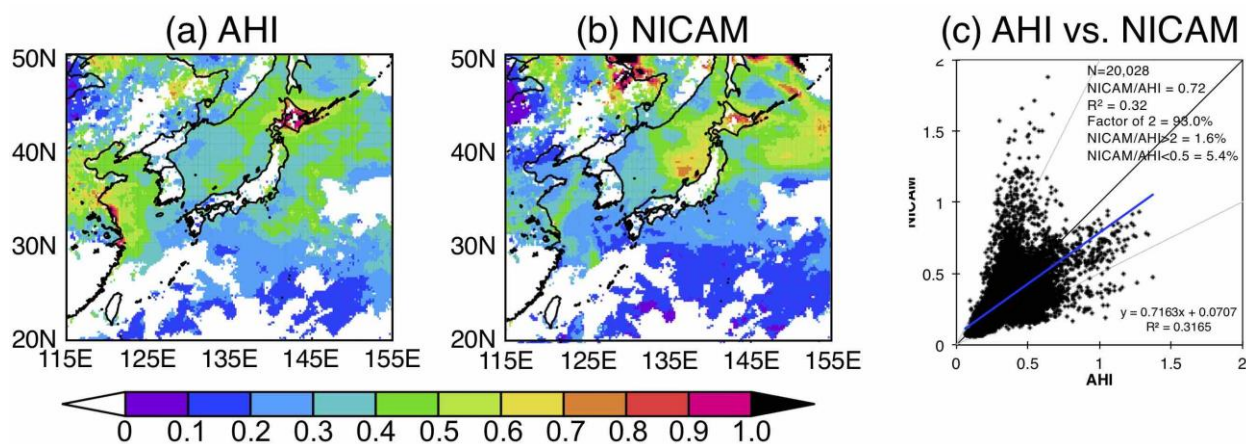
まず、ひまわり8号のデータとの比較によるNICAM-Chemの検証について述べる。そのために、2016年5月18日に静止衛星ひまわり8号が日本付近で高濃度なエアロゾルを検出したイベントに着目した。ひまわり8号データからは、シベリア森林火災の発生によって大気中に放出されたエアロゾルが日本付近まで輸送されていたことが示唆される。図(1)-15に示すNICAMによる同時期のシミュレーション結果によると、ひまわり8号で検知されたエアロゾルのブルーム分布は良く再現され、特に、5月18日の日本時間9時(世界標準時間0時)における日本海および北海道西岸におけるAOTの空間分布は非常に現実的に再現されていることがわかる。静止衛星ひまわり8号はMODISのような極軌道衛星とは異なり、ある特定領域を高時間分解能(日本付近では2.5分おき)で観測することが可能であるため、図(1)-15に示すように、ブルームの輸送を時間方向に追跡して捉えることが可能である。実際、5月18日日本時間9時(世界標準時間0時)から5月18日日本時間15時(世界標準時間6時)までの6時間の間に、ブルームは北海道西岸から北海道東岸にまで輸送された様子がひまわり8号で捉えられている。本研究では、ひまわり8号でこのように捉えられたエアロゾルブルームをNICAM-Chemで非常に現実的に再現することに成功したが、これは、データ同化手法に頼ることでこのブルームを再現した先行研究²⁹⁾とは一線を画するものである。本研究で得られた高い再現性は、モデル格子をシームレスに高解像度に設定できるNICAM-Chemの利点を活かすことで可能となった。ただし、モデルには改善の余地も残されており、シベリア森林火災由来のブルーム以外の大気汚染については、NICAMが必ずしもひまわり8号のAOTを十分に再現できているとはいえない。例えば、北京から渤海にかけては、NICAMはひまわり8号のAOTよりも過小評価傾向である。NICAMのエアロゾル成分を切り分けた解析によって、この過小評価はNICAMにおいて土壌粒子が過小評価されていることが主要因であることがわかった。土壌粒子は、中国内陸のタクラマカン砂漠やゴビ砂漠で風が強く吹くことによって大気中に巻き上げられる粒子であり、その発生過程のモデル化には大きな不確実性が伴っている。従って、特にアジア域における土壌粒子の再現性を向上するには、エアロゾルデータ同化等³⁰⁾の手法を取り入れた境界値の最適化が必要であると考えられる。



図(1)-15: 2016年5月18日00UTC (日本時間9:00) から06UTC (日本時間15:00) までにおけるAOT分布。AHI、GOCI、MODIS、はそれぞれ、ひまわり8号 (AHI)、MODIS、GOCIで観測されたものであり、一番右パネルはNICAMで計算したものである。AHIとGOCIの一番上のパネルに示された青線は、HYSPLITによる広報流関銭解析結果である。また、NICAMの結果に表示された矢印は、高度1kmにおける風を示している。この図はGoto et al. (2019)²⁸⁾の図2から引用している。

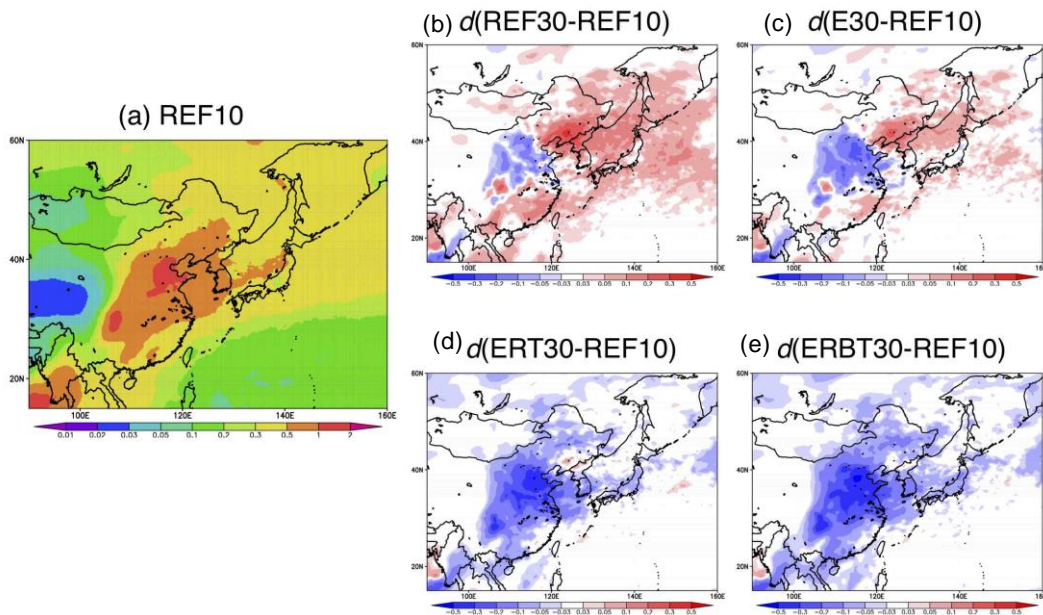
次に2016年5月の平均におけるNICAMのエアロゾル再現性に関する比較検証を行った(図(1)-16)。ひまわり8号で見られる日本付近の月平均AOT分布は、中国東岸の海岸線付近や北海道でAOTが1に近い値を示しており、東シナ海でも0.5程度の高い値を示している。一方NICAMでは、ひまわり8号で得られた特徴的なAOT分布は概ね再現できているが、ひまわり8号では捉えていない高濃度ピークが見られた。例えば、日本海におけるAOT値が0.8で、ひまわり8号よりも過大評価であった。また、北海道の東岸でも高いAOT値が見られ、NICAMが過大評価であった。ひまわり8号の観測頻度と数時間程度のプルーム到来の時間的なずれによっても、モデルと静止衛星の差異が生じてしまうが、少なくとも日本海はひまわり8号の観測頻度が高いので、NICAMのAOTは平均的に過大評価である可能性が非常に高い。これは、シベリア森林火災由来のエアロゾルの輸送経路が南にずれてしまっている、あるいは、非現実的に広範囲に拡大してしまっていることが要因であると考えられる。全領域の1時間値のデータを使った相関をとると、図(1)-16(c)のようになった。相対バイアスは0.72(約30%過大評価)で、相関係数は0.57 ($R^2=0.32$)と正の相関が見られた。また、0.5倍から2倍の範囲内にあるデータは全体の93%であった。

以上のことから、春季に代表的な越境汚染(森林火災や人為起源物質)の時系列変化はNICAM-Chemでもうまく捉えることができていた。従って、ストレッチ格子法を適用したNICAM-Chemによって、春季および夏季において、日本を対象とした大気汚染物質シミュレーションが概ねうまく行われることが確かめられた。

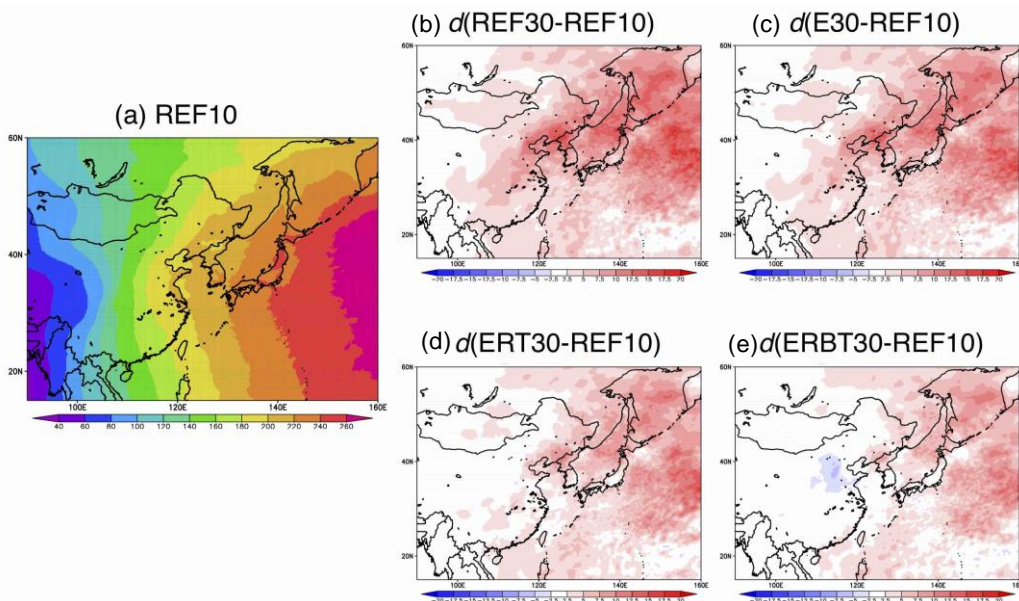


図(1)-16: 2016年5月における (a) ひまわり8号 (AHI) および (b) NICAMモデルによるエアロゾル光学的厚さの水平分布。(c)は(a)および(b)の領域における1時間値を用いてプロットした、ひまわり(横軸)とNICAM(縦軸)の相関図を示しており、パネル中の値はその統計値である。具体的には、Nはサンプリング数、“NICAM/AHI”は相対バイアス、 R^2 は決定係数、“Factor of 2”は誤差2倍の範囲内にある結果の割合、“NICAM/AHI>2”は相対バイアスが2以上の割合、“NICAM/AHI>0.5”は相対バイアスが0.5以下の割合、を示している。この図はGoto et al. (2019)²⁸⁾を追加で解析して得られた結果である。

続いて、シナリオ実験の結果を図(1)-17および図(1)-18に示した。図(1)-17はエアロゾル光学的厚さ(AOT)を示しており、REF30のなりゆきシナリオ(REF30)では、中国でAOTが極大値を持つ領域付近ではAOT値が減少することがわかったが、中国から大気汚染が流出する日本や日本海ではAOTが増加していた。大気汚染対策をさらに強化したEoPmidシナリオ(E30)であっても、対象とする領域内ではAOTが増加する場所があった。更に大気汚染対策を強化した2D-EoPmid-RESTRT(ERF30)および2D-EoPmid-RESBLDTRT(ERBT30)で、ようやく対象領域のほとんどの地域でAOT値が減少することがわかった。これらのAOTの変化は、BCおよび硫酸塩のエアロゾル量の変化によってもたらされている。エアロゾル量の変化は、エアロゾルと雲の相互作用を通じて雲の変化にも影響をもたらし、これらの影響が重なりあった結果として、大気層に吸収される短波放射フラックスが変化する(図(1)-18)。図(1)-18の結果によると、2D-EoPmid-RESTRT(ERF30)であっても大気層の短波フラックスは減少しない場所があり、最も大きな大気汚染対策を講じるシナリオである2D-EoPmid-RESBLDTRT(ERBT30)において、ようやく大気層の短波フラックスが減少する領域が見られるようになった。このことは、現在考えられている大気汚染対策だけでは大気を効果的に冷却するのは難しいことを示しており、より効率的な大気汚染対策を策定する必要性が示唆された。



図(1)-17: (a) 2010年におけるエアロゾル光学的厚さ (AOT) に関する水平分布と、(b-e) 2030年の各シナリオと2010年の基準シナリオとのAOT差に関する水平分布。

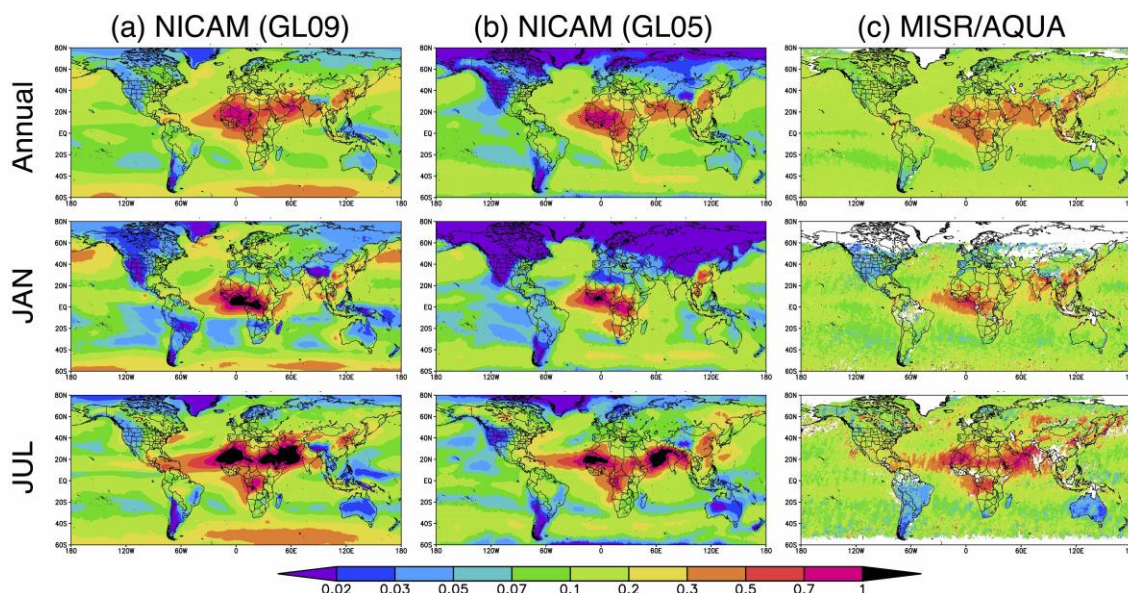


図(1)-18: (a) 2010年における大気層の短波放射フラックスに関する水平分布と、(b-e) 2030年の各シナリオと2010年の基準シナリオとのAOT差に関する水平分布。単位は[W/m²]である。

全球高解像度実験にあたっては、高解像度にした利点を調べるために、NICAM-Chemを用いたエアロゾルシミュレーションの解像度依存性を調べた。これは、大気汚染物質の再現性にとって、モデル解像度の違いによる影響は小さくないと考えられている³¹⁾ためでもある。このために本研究では、NICAM-Chemにおける水平解像度の違いがエアロゾルの再現性にどのような影響を与えるかを調べるために、高解像度 (全球14 km; これは京コンピュータで計算を行った) と低解像度 (全球220 km) の2つの数値実験を行った。図(1)-19はこのような実験から得られたAOTの全球分布を示している。全球的に見て、高解像度 (全球14 km) の計算によって得られたAOTは、低解像度 (全球220 km) の計算によって得られたAOTよりも値が大きくなっていることがわかる。特に、風速に依存して大気中に放出されるダストや海塩粒子は、高解像度計算によって風の再現性が良くなる (低解像度では一般的には過小評価) ため、AOTが増加することが予想される。例えば、7月に発生が多いサハラ砂漠由来のダスト粒子は、高解像度

の結果が低解像度よりも大きく、AOT値が0.3以上のブリュームがカリブ海の中央あたりにまで到達しており、衛星結果とも整合的である。しかし、南緯40-60度で多く発生する海塩粒子については、低解像度よりも高解像度で大きいAOT値は衛星観測に対して過大評価になってしまっている。吸湿性を持つ海塩粒子の再現性は、不確実性の大きい湿性沈着過程のモデル化にも依存するため、高解像度計算における沈着過程の表現に改善の余地があると考えられる。また、人為起源のエアロゾルに関しては、世界の代表的な発生源である中国・インド・北米では、高解像度と低解像度計算によるAOT値はあまり変わらなかった。しかし、ヨーロッパでは高解像度の方が低解像度よりもAOT値が大きく、衛星観測で得られた結果に近づいた。さらに、中緯度で発生したエアロゾルが北極に輸送される様子も解像度の違いによって異なっていることがわかった。これは、NICAMの高解像度計算結果を行ったSato et al. (2016)³²⁾でも指摘されたように、高解像度にすることで中緯度の低気圧の再現性が向上するため、中緯度から極域への物質輸送量が増加するためと考えられる。実際、本研究の計算で得られた極域におけるAOT値を見ると、高解像度のAOT値の方が低解像度のAOT値よりも大きく、衛星結果に近づいていることがわかる(図(1)-19)。

述べてきた結果は、本研究で開発されたNICAM-Chemモデルが、領域から全球、数日から1年に至る幅広い時空間スケールでの大気汚染物質の動態を計算資源に応じた解像度でシームレスに再現できることを示している。この開発によって、SLCPの気候・環境影響を従来型の全球気候モデルに比べて高い精度で評価できる世界的にも類を見ないモデリングシステムを整備することができた。



図(1)-19: (a) NICAM高解像度 (GL09: 全球14kmグリッド格子)、(b) NICAM低解像度 (GL05: 全球220kmグリッド格子)、(c) Aqua衛星に搭載されたMISRセンサーによる観測、によって得られたエアロゾル光学的厚み (AOT: Aerosol Optical Thickness) の年平均値 (上段)、1月平均値 (中段)、7月平均値 (下段)。

4.4 SLCP排出変化による水資源・水災害への影響評価手法の確立及び実施

a) 全球陸域水収支

表(1)-4に、南極を除く全球陸域において平均した代表的な水文諸量を示す。参考のため、0ki and Kanae (2006)³³⁾に示された値も記載している。前述したように、BC排出増加は温暖化をもたらすが、全球の降水量は減少する結果となっており、陸上のみを対象としてもその傾向は変わっていないことがわかる (10倍時に $1.2 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{year}$; 約1%の減少)。一方で SO_2 排出増加は、寒冷化と少雨化が同時に進み、その効果も比較的大きい (5倍時に $4.8 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{year}$; 約4%の減少)。気温変化の違いは、 SO_2 実験では寒冷化が進むため降雪量は増加しているが、BC実験では降雪量も減少していることから推察

できる。

また 蒸発散量については、BC実験でもSO₂実験でも減少が見られる（それぞれBC10倍時に 0.4×10^3 km³/year；約0.5%の減少、SO₂5倍時に 3.5×10^3 km³/year；約4%の減少）。ここで、SO₂実験にて大きな蒸発散量の減少が見られるのは気温が下がっているためだと考えられる。BC実験でも蒸発散量が低下はしているが、その大きさは小さく、気温上昇による蒸発散量増加効果と降水量減少による蒸発散量低下効果の効果が互いに打ち消しあって現れたものと見られる。

引き続き、河川流量について考察を進める。変化量はBC10倍で 0.7 km³/year（約2%）の減少、SO₂5倍で 1.3 km³/year（約4%）の減少となっている。つまり、SO₂実験では、降水量減少割合に対して、蒸発散量と河川流量の減少割合もほぼ同程度であるが、BC実験では、降水量減少に対して、蒸発散量減少が小さめとなり、相対的に河川流量がより大きく減少していることがわかった。

表(1)-4 南極を除く全球陸域における水文諸量（10³km³/year）

	OkI and Kanee (2006)	CTL	BC10	BC10-CTL	SL5	SL5-CTL
Total terrestrial precipitation	111	113.3	112.1	-1.2	108.5	-4.8
Snowfall over land	12.5	10.8	10.6	-0.2	13.0	2.1
Rainfall over land	98.5	102.5	101.5	-1.0	95.6	-6.9
Total terrestrial evapotranspiration	65.5	81.0	80.6	-0.4	77.6	-3.5
Surface runoff	15.3	21.5	21.2	-0.4	20.9	-0.7
Subsurface runoff	30.2	10.7	10.4	-0.3	10.0	-0.7
River Discharge to Ocean	45.5	32.2	31.6	-0.7	30.9	-1.3

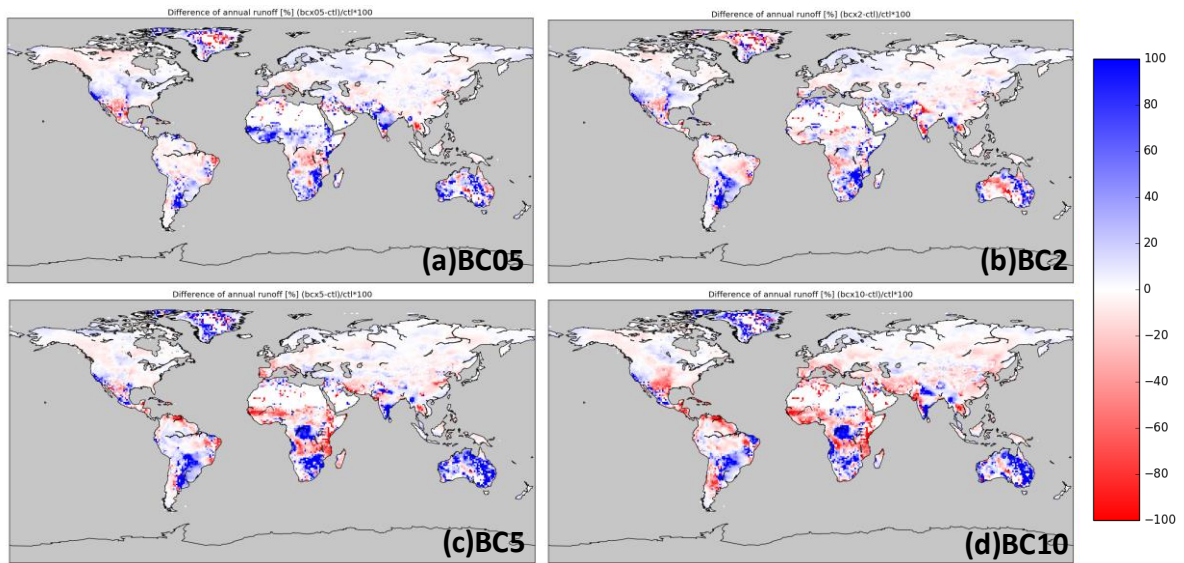
b) 流出量変化の空間分布

図(1)-20と図(1)-21に、それぞれBC排出増加とSO₂排出増加による陸域流出量の変化の空間分布を示す。BCとSO₂それぞれの排出量倍率を変えると、変化量は変わるが、増加・減少する場所の空間分布はあまり変化しなかった（概ね似たような赤と青の分布で、倍率が上がると濃くなり、1を切ると反転する）。この傾向は、SO₂実験でより強く、BC半減・倍増実験では、少し別の傾向が見られた。このことについては、後で再度触れる。

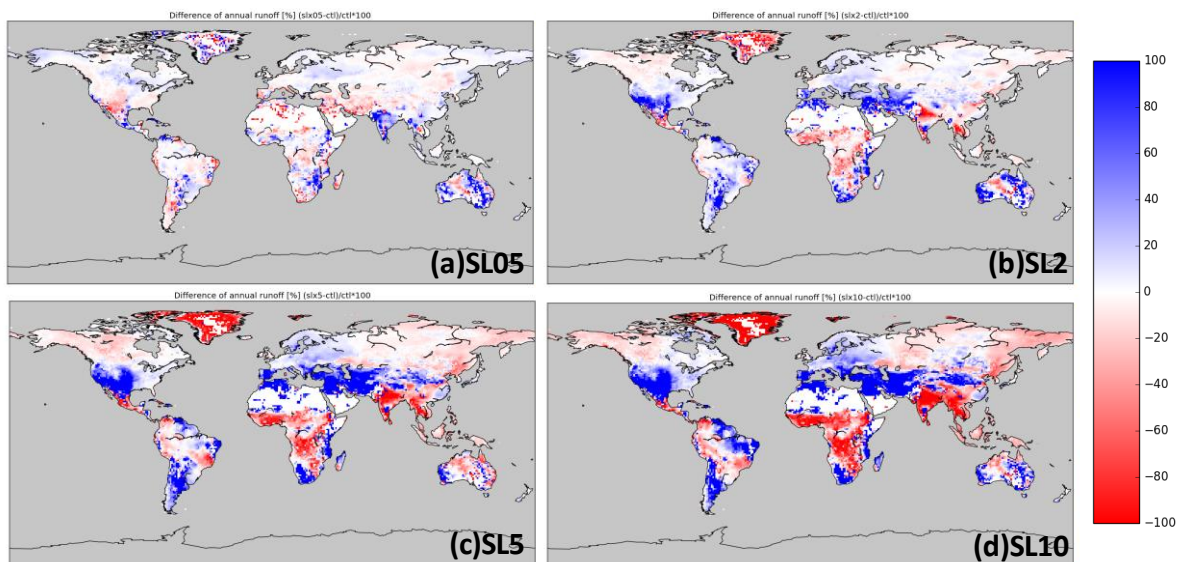
一方で、BC実験とSO₂実験では、発現する変化の空間分布が異なった。SO₂10倍実験は、一般的な気候モデルによるCO₂増加実験での変化を反転させたものによく似た分布をとる³⁴⁾。具体的には、ユーラシア東部や東南アジア、アフリカ中央部で減少し、ヨーロッパや北米南西部で増加していた。相対的に一様な気温低下により水蒸気量が一様に低下し、それに伴い降水量も低下することが基本だが、もともと乾燥している地域では相対的に水蒸気量があまり下がらず、結果的に相対湿度が高まり、降水量があまり変化しないか増加に転じる。そういった理由で比較的乾燥したヨーロッパや北米南西部で流量が増加していると見られる。

BC実験は、SO₂実験と比較して、より細かい空間スケールでの変化が見られた。例えばアフリカ大陸で、SO₂実験では湿潤な中央の赤道帯とその南北のより乾燥した低中緯度帯での変化に大別できるが、BC実験では、赤道帯の狭い範囲（コンゴ共和国あたり）から、南北対象に2回反転が繰り返されている。これは、BCの光学特性として、大気を直接温める効果と地表面を冷却する効果を併せ持つことから、結果として現れる降水量や蒸発散量の変化が、地表面や大気状態によってより複雑に現れるためだと考えられる。また、SO₂実験結果と異なり、BC半減実験の変化が、他のBC増加実験結果の単純な反転ではない箇所（例えば北米や南米など）が見られる。これは、BCによる水文諸量への感度が元々小さく、半減や倍増程度では、大気変動・海洋変動といった気候の内部変動の揺らぎの中に隠れてしまう程度であったことが理由として考えられる。本研究では、一つのモデルによる実験結果を用いているため、これらの変化についての統計的な有意性について定量的に議論することはできない（本質的な意味がな

い)。しかしながら、全球平均で見ると小さな変化ではあるが、時空間を限定して見ると大きくなる、すなわち相対的な有意性も増すということが今回改めて強調したい点の一つである。



図(1)-20 BC実験による流出量の変化量 (%)



図(1)-21 SO₂実験による流出量の変化量 (%)

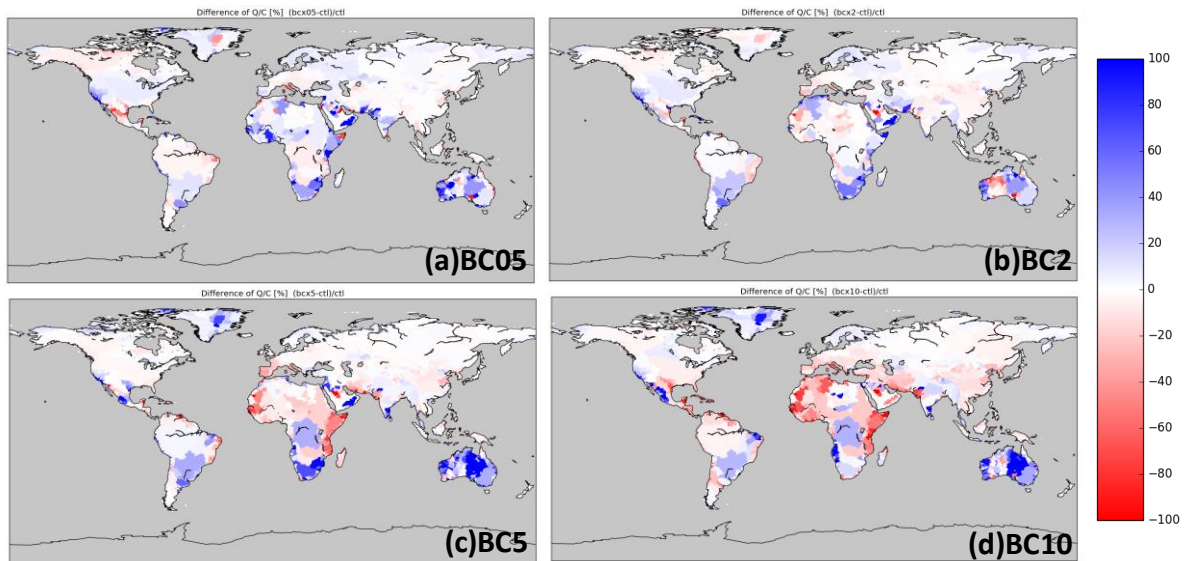
c) 水資源賦存量の評価

この節では、これまでに求めた流出量を河川流域ごとに集計し、その流域の住民のための水資源として十分か、十分でない場合どれくらい足りていないかを評価する。結果を図(1)-22と図(1)-23に、それぞれBC実験とSO₂実験による水資源賦存量のCTL実験と比較した時の変化を示す。BC実験では、北アフリカをはじめとした地中海周辺地域における減少が著しい。一方でアフリカ南部などではストレスの緩和が見られる。SO₂実験では、主にインドでの減少が目立つ。また、地中海の北東側から西アジアにかけての増加が特徴的である。水資源賦存量の分布は人口分布に大きく依存し、流出量に変化している地域でも、水資源賦存量は変化しない流域も多かった。

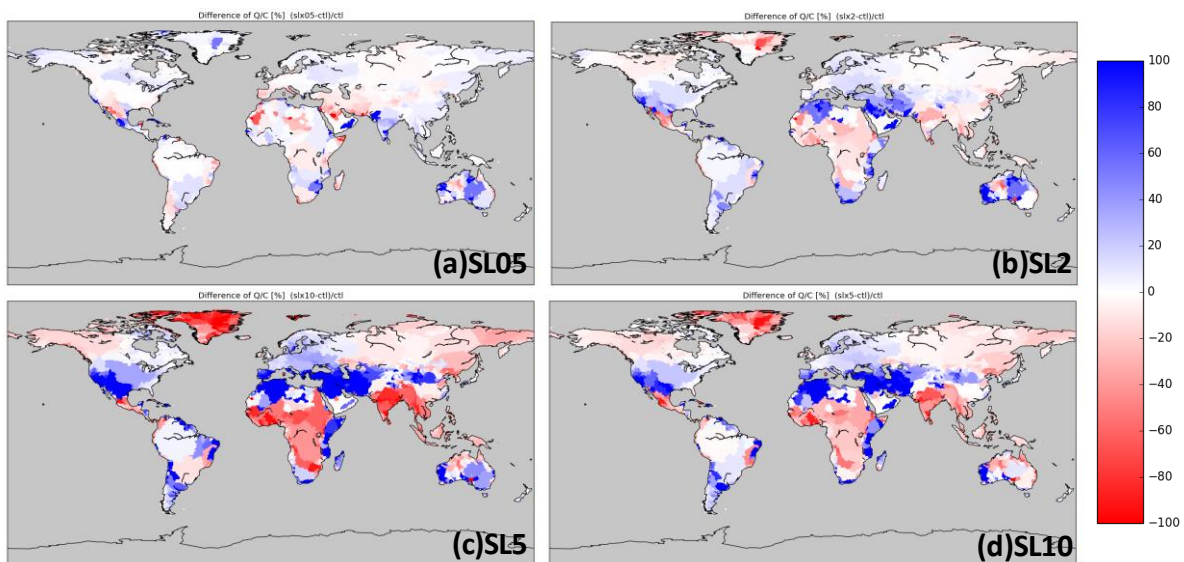
d) 洪水規模の評価

この節では、河川流量の極値がどのように変わるのか解析する。図(1)-24にBC10倍実験及びSO₂10倍実験でのDPI=100に対応する河川流量の変化を示す。100年に1度の洪水時の流量は値が大きく、その変

化割合は流出のように大きな値とならないことと、概ね図(1)-20と図(1)-21に示した流出量変化に追随した分布となっているため、他の倍率の実験は省略している。



図(1)-22 BC実験による水資源賦存量の変化量 (%)



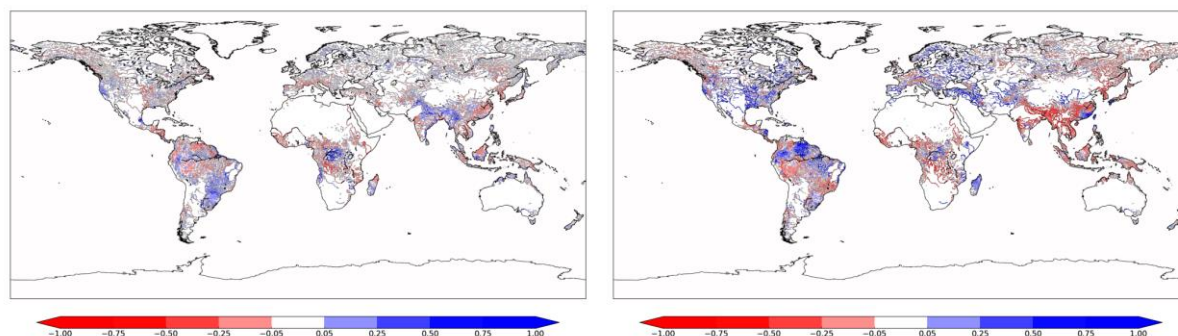
図(1)-23 SO₂実験による水資源賦存量の変化量 (%)

これまで見てきた通り、どちらの実験でも全球平均では降水量減少傾向にあるものの、地域的に見ると流出量が増加する場所があり、そのようなところでは洪水の規模も増大していることがわかる。例えばBC10倍実験では、アフリカのコンゴ川やアジアのガンジス・ブラマプトラ川、南米のパラナ川などでは洪水規模の増大が予想されている一方、長江やメコン川、アマゾン川などでは洪水規模は縮小される。SO₂10倍実験ではミシシッピ川、オノリコ川、東欧・中近東の多くの河川などで洪水規模が増大し、東南アジア・東アジアおよび海洋大陸での多くの河川で洪水規模が縮小するとみられる。

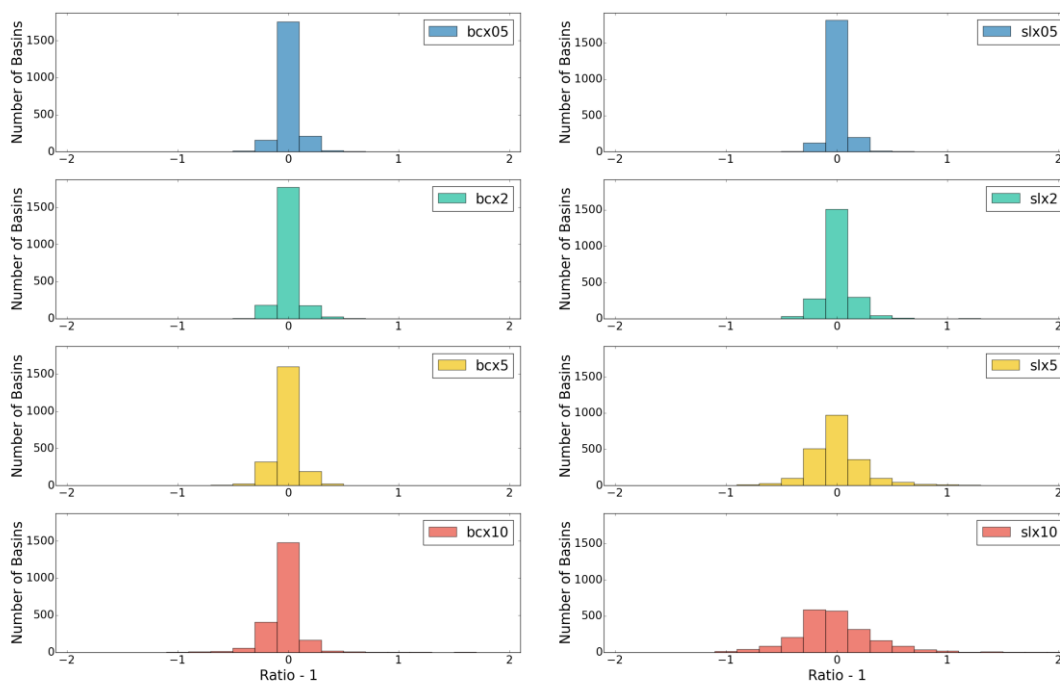
図(1)-25に、CTL実験で100年に一度の洪水と判定された流量ピークが、各実験においてどのように変化したのかをヒストグラムにまとめた。手法の章で触れたように、本サブテーマで実施した実験は、いずれも気候モデルによって推算した長期的な気候変化分を差分(ないし割合)として加味した気象強制力データを使っており、短期変動成分は概ね共通している。そのため、CTL実験で起こった洪水は、別の実験でも同時期同地域に発生することが多いため、このような分析が可能となっている。

この図から伝えるべき重要なことは、全球的に少雨となった場合にも、陸域水循環は局所的な変化

に敏感に反応するため、洪水規模が一様に小さくなるということではなく、小さくなる河川と大きくなる河川が件数としては同等程度になるということである。また、その影響の程度も、局所的な影響を受ける分、大きくなることが多い。SLCPにとどまらず、一般的な気候変化による生態系や人間活動への影響を考える際には、全球スケールに加えて、よりそれらの影響と密接に関わりあう流域スケールで評価しなければいけないことを示す一例であろう。



図(1)-24 (左) BC10倍実験と(右) SO₂10倍実験による年超過確率1/100の流量の変化



図(1)-25 BC・SO₂実験による洪水規模の変化率のヒストグラム。左列はBC実験、右列はSO₂実験。上段より半減・倍増・5倍・10倍実験による結果を示す。

e) 水ストレス・洪水暴露人口の評価

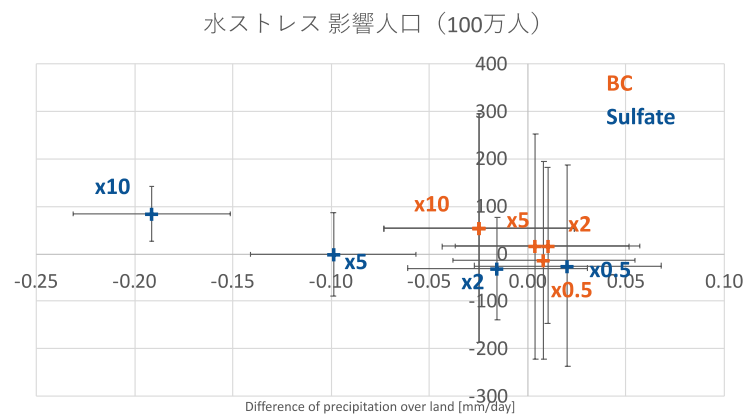
図(1)-26には、BC・SO₂の排出量を変化させた各実験について、手法の章で説明した水ストレス指標を計算し、高い水ストレス下(水資源賦存量が1000 m³/year/c以下と定義)にある人口の変化を見積もった。

BC半減実験の場合には、1000万人(0.5%)程度減少し、倍増、5倍では同程度増加、10倍実験では5500万人(2%)程度増加するという結果となった。概ね降水量の変化と線形な関係となっている。一方SO₂実験に関しては、半減の場合に2000万人(1%)程度が減少するが、倍増にしても半減の場合と同程度の水ストレス人口の減少が見られた。5倍実験において、CTL実験と同程度のストレスとなり、10倍実験だと8000万人(3%)程度増大する。BC実験の結果とは、降水量変化との関係において大きく異なる結果となった。

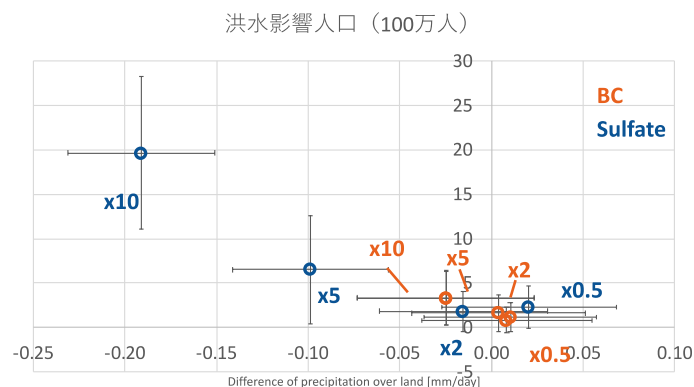
このような降水量の変化に対して非線形な変化を示した原因については、人口分布の空間的な偏在性が第一に挙げられる。人口が密集した地域での局所的な水文量の変化が、地球全体の水ストレス人口を大きく変えてしまうのである。ただし、人口分布の偏在性は空間的には大きいものの、時間的にはあまり大きく変化しないと仮定できるため、本研究で用いた気候モデルなどが、より細かい空間スケール（具体的には、大河川スケール）において不確実性を小さくすることができれば、十分な精度でその影響を評価できることが期待できる。

さらに図(1)-27には、図(1)-26と同様であるが、洪水による暴露人口を評価した。CTL実験で推計した100年に一度の規模の洪水によって影響を受ける人口に比して、全ての実験で洪水に暴露する人口が増加する結果となった。一方、降水量変化に対する暴露人口変化の関係性はBC実験とSO₂実験である程度共通していた。

見方を変えると、図(1)-27は、図(1)-25に示したヒストグラムにそれぞれのグリッドの人口分布をかけたものとなる。そのヒストグラムは両側に広がっているため、人口分布が一様であれば、合計した暴露人口は大きくは増加しないはずである。従って、暴露人口推計についても、人口分布の空間偏在性が大きく影響していることとなる。



図(1)-26 水ストレス人口変化と全球降水量変化の関係（赤の+がBC実験，青の+がSO₂実験）。エラーバーは20年間における年々変動の標準偏差を示す。



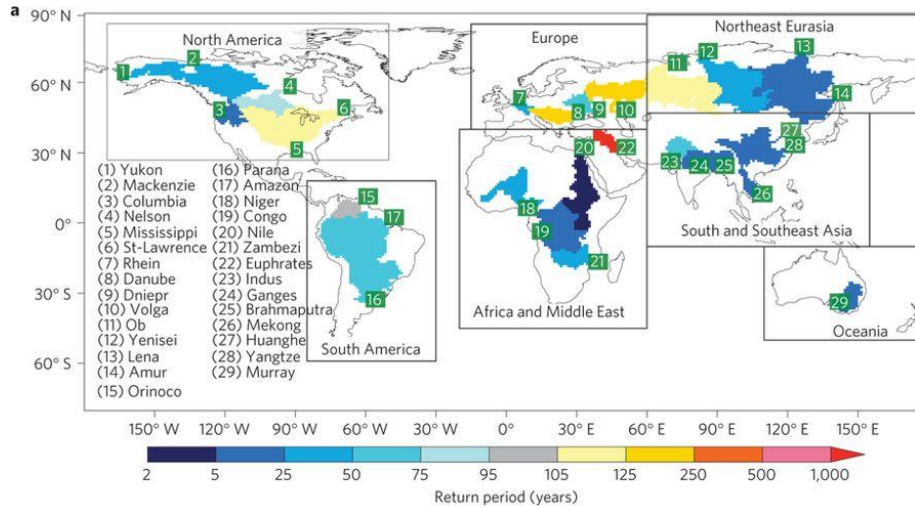
図(1)-27 洪水影響人口変化と全球降水量変化の関係（赤の○がBC実験，青の○がSO₂実験）。エラーバーは20年間における年々変動の標準偏差を示す。

f) 大陸別評価

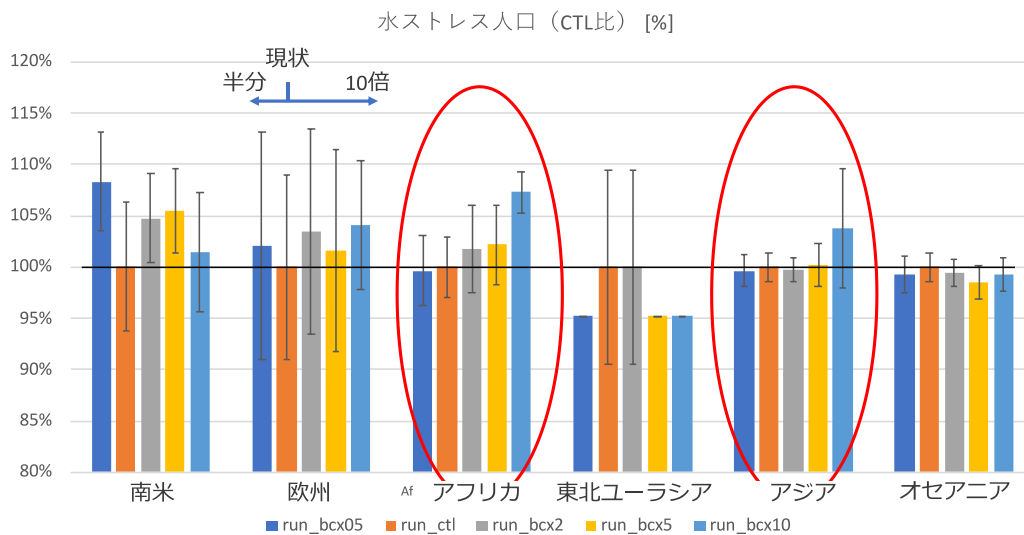
前節までの解析は全球を対象としているが、SLCPによる気候影響は局所的に生じることがわかっている（例えば図(1)-20）ため、より詳細なスケールで見直すべきである。しかしながらそれらの気候モデルの解像度は一般的に粗く（1グリッド100km以上）、あまりに小さいスケールに着目して影響を評価しても意味がない。そのためこの項では、気候変動影響評価研究でよく使われるような、図(1)-28にあ

る大陸ごとにおいて、影響暴露人口を算出した。

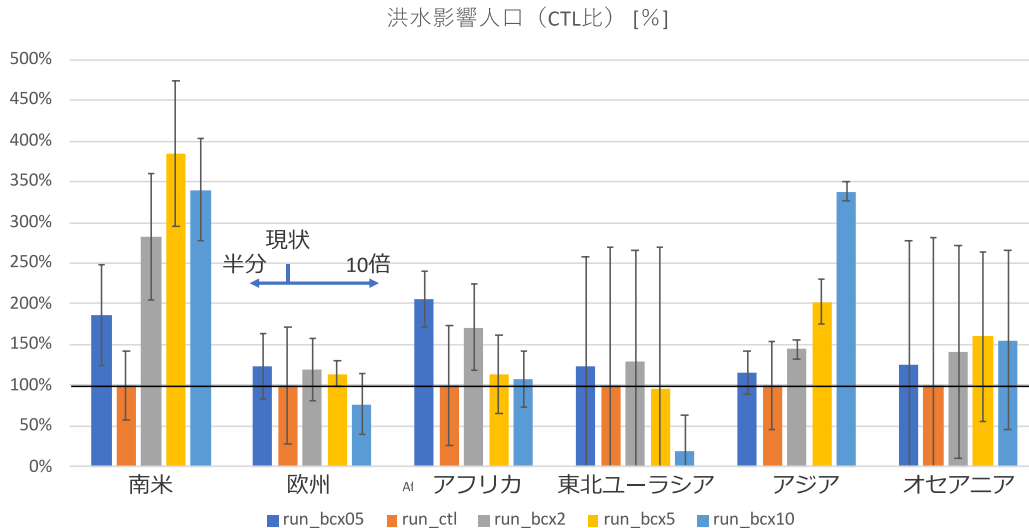
領域ごとの水ストレス人口について20年中上位5ヶ年の平均・標準偏差を算出した（図(1)-29）。アフリカ・アジア・東北ユーラシア・オセアニアではBC増に合わせて有意な単調増加がみられる。特に、アフリカ・アジア域ではもともと水ストレス人口が高く（それぞれ6.4億人、16億人）、全球での評価により大きく影響した。南アメリカ・ヨーロッパ・アフリカ・アジア等の多くの地域で、BC半減実験で洪水影響人口が有意に増加する傾向が見られた。また、アフリカ・東北ユーラシア・ヨーロッパでは、BC増加に応じて洪水影響人口が減少することがわかった。



図(1)-28 本項で扱った大陸の分類（Hirabayashi et al. (2013)³⁴から引用）



図(1)-29 大陸別に集計したBC変化に対する水ストレス人口の変化率。横軸は大陸ごとに並んでいる。各大陸の中の5つのバーグラフのうち左から二つ目は、現行気候における水ストレスであり、ほかの4つの結果に対する基準としている。

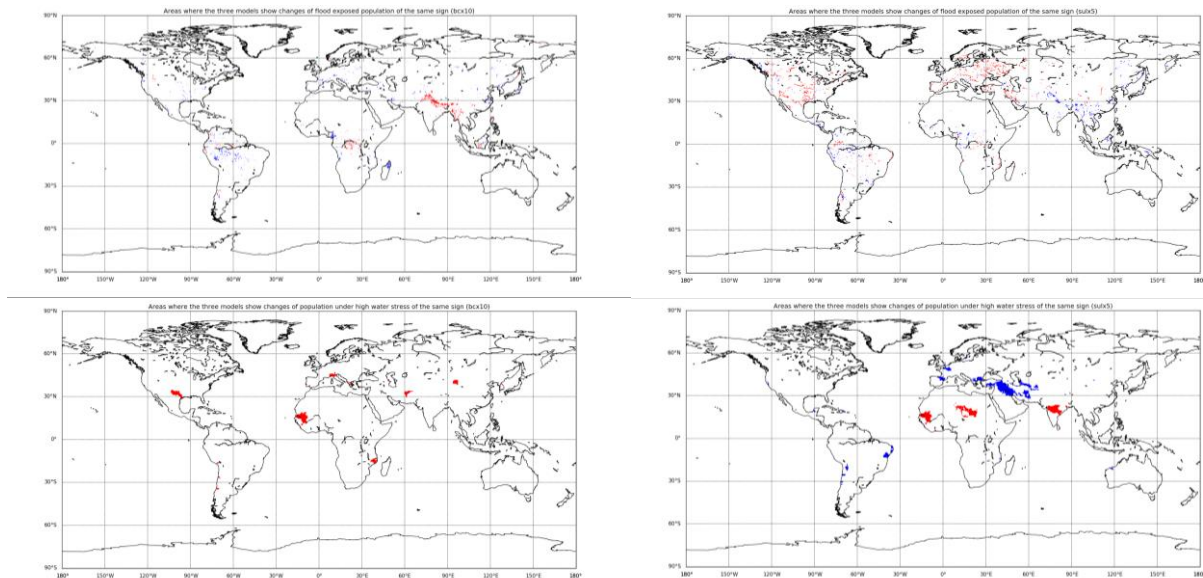


図(1)-30 図(1)-29と同様だが洪水影響人口について

g) 気候モデルの違いに起因する不確実性の評価

モデルの不確実性を明らかにするため、PDRMIPに参加した気候予測モデルHadGEM2とNCAR-CESM2の出力値を用いて、黒色炭素（BC）10倍実験の陸域水循環、水資源と洪水への影響を調べた。また、寒冷化の効果を持つSO₂5倍実験についても影響を調べた。

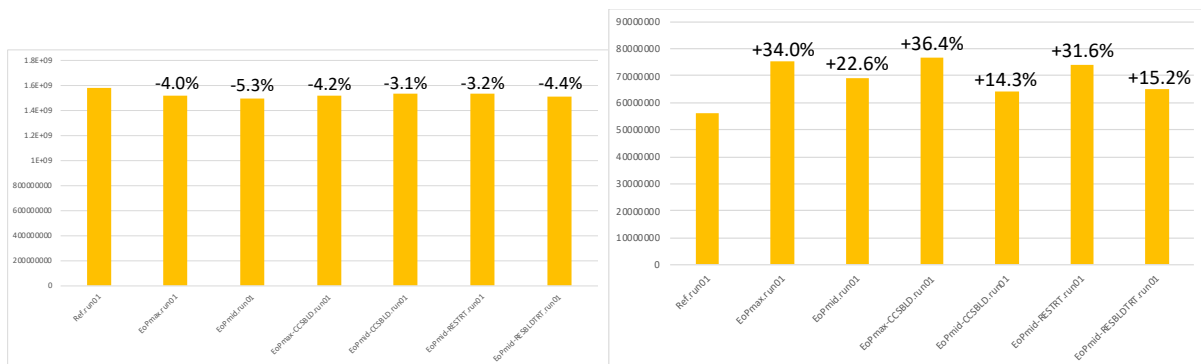
その結果、気候予測モデルの違いによる影響は、特に洪水災害の暴露人口においては、大きいことが判明した。図(1)-31の上2つの図では、3つの異なるGCMによるBC/SO₂感度実験に対して、各グリッドにおいて洪水暴露人口の増加または減少傾向が一致するか否かを赤（増加で一致）と青（減少で一致）で示している。SO₂実験（図(1)-31右上）においては、北米やヨーロッパでは概ね殆どの大河川の本流で洪水暴露人口の増加傾向が一致しているが、南米や南アジアなど、低緯度では減少傾向で一致していることがわかる。しかし、BC実験（図(1)-31左上）では、北米やヨーロッパではあまり一致した傾向は見られず、ネパール及び赤道アフリカ地域で一致した増加傾向が見られる程度である。このことから、BC影響の気候予測モデルの依存性はいまだ相対的に大きいことが伺える。同様に、水資源ストレス人口についても、変化の符号が一致することは少ないことが判明した。例えばSO₂実験では中央アジアやヨーロッパの一部ではストレス人口の減少で一致し、インド中央部やサブサハラ地域では増加する傾向で一致しているものの、ほかは増減傾向が一致しないことが判明し、BC実験ではいくつかの分散した地域でのみストレスが増大する傾向で一致するのみという結果となった。この結果は、一つの気候予測モデル実験による解釈の不確実性を示しており、今後の気候影響評価研究手法のさらなる精緻化の必要性を表す。



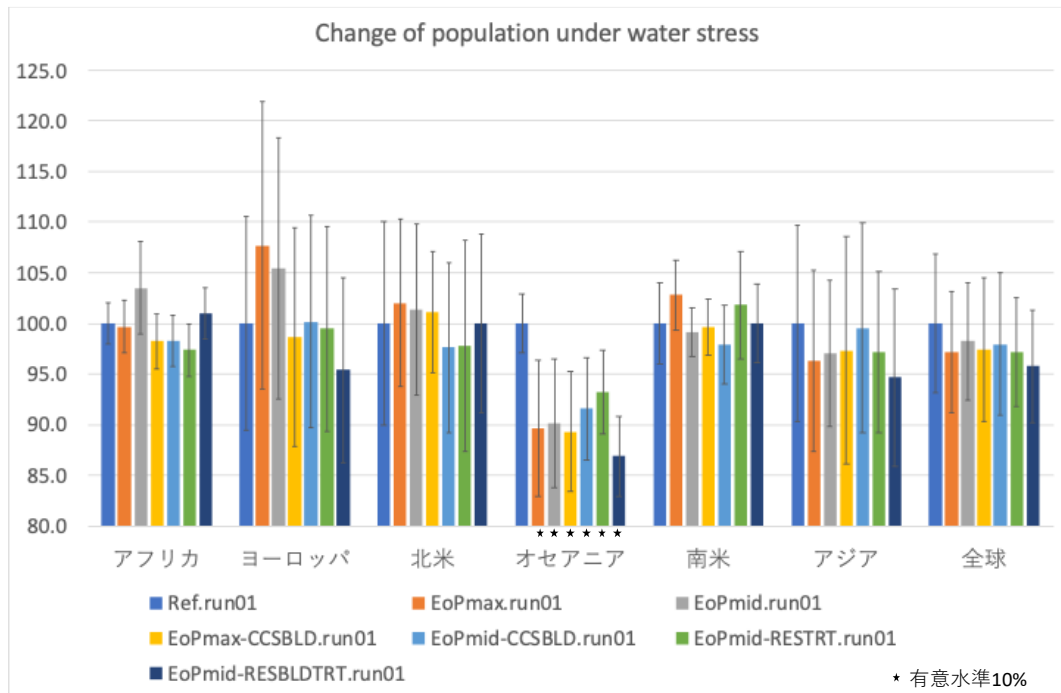
図(1)-31 HadGEM2とNCAR-CESM2とMIROC5-SPRINTARSによる気候予測実験結果を用いた洪水災害暴露人口の増減の一致度(上図)及び水ストレス人口の増減の一致度(下図)。左はBC増減実験、右はSO₂増減実験の結果を示す。赤は洪水暴露人口もしくは水ストレス人口の増大が3つの気候モデルすべてで一致しているグリッドまたは流域、青はその逆のすべてが減少しているグリッドまたは領域を示す。

h) S-12シナリオ群による水資源・水災害影響評価

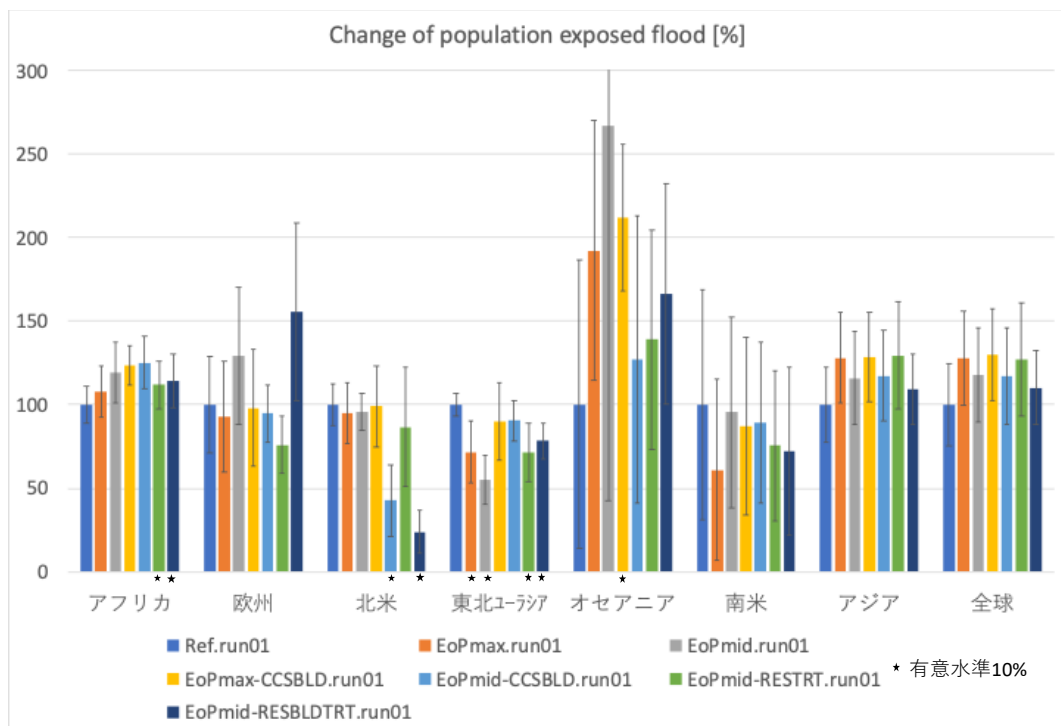
S-12によって提案されている、将来の削減シナリオを考慮した気候モデルによる7つの実験の結果を用いて、実験を行なった。その結果、水ストレスに関しては、どれも成り行きシナリオよりも緩和されることがわかった(図(1)-32左)。中でも一番水ストレス人口を減らす結果となったのは、除去対策Midシナリオであり、S-12の推奨シナリオとされる「2D-EoPmid-RESBLDTRT」(2℃目標除去対策中程度再生可能エネルギー利用・EV車・オール電化増加シナリオ)は2番目の緩和率であった。一方で、洪水暴露人口については、なりゆきシナリオが一番少ないという結果となった。S-12推奨シナリオ「2D-EoPmid-RESBLDTRT」では、暴露人口の増加は比較的小さく、6シナリオ中2番目であった(図(1)-32右)。この結果を大陸ごとに集計し直したのがそれぞれ図(1)-33及び図(1)-34である。



図(1)-32 S-12 SLCPシナリオ別の水ストレス人口(左図)と洪水暴露人口(右図)の平均。棒グラフの上にある数字は、なりゆきシナリオ(Refシナリオ)を基準とした場合の人口の増減を示している。



図(1)-33 各S-12SLCP削減シナリオについて、水ストレス人口に関して図(1)-28に示す大陸ごとに集計し、その増減をなりゆき実験 (Ref) に対する100分率で示したものの。エラーバーで示した範囲は、年々変動の標準偏差を示す。星印は、年々変動を考慮した場合の平均値の差が統計的に有意であることを示している。

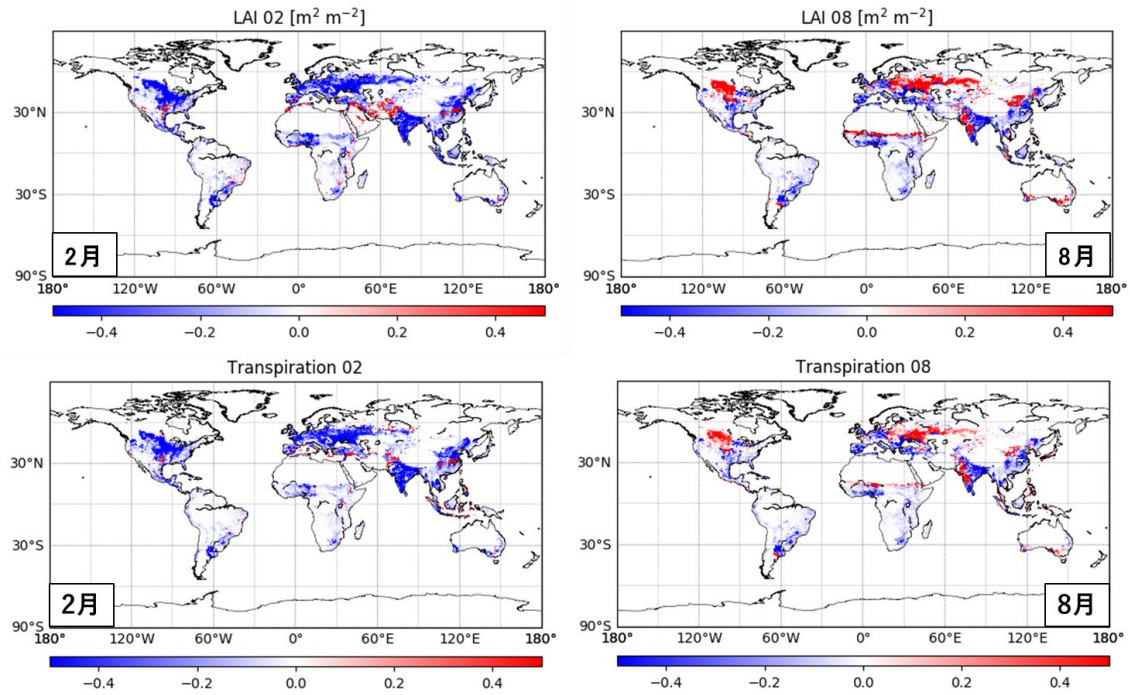


図(1)-34 図(1)-33と同様だが、洪水暴露人口に関して。

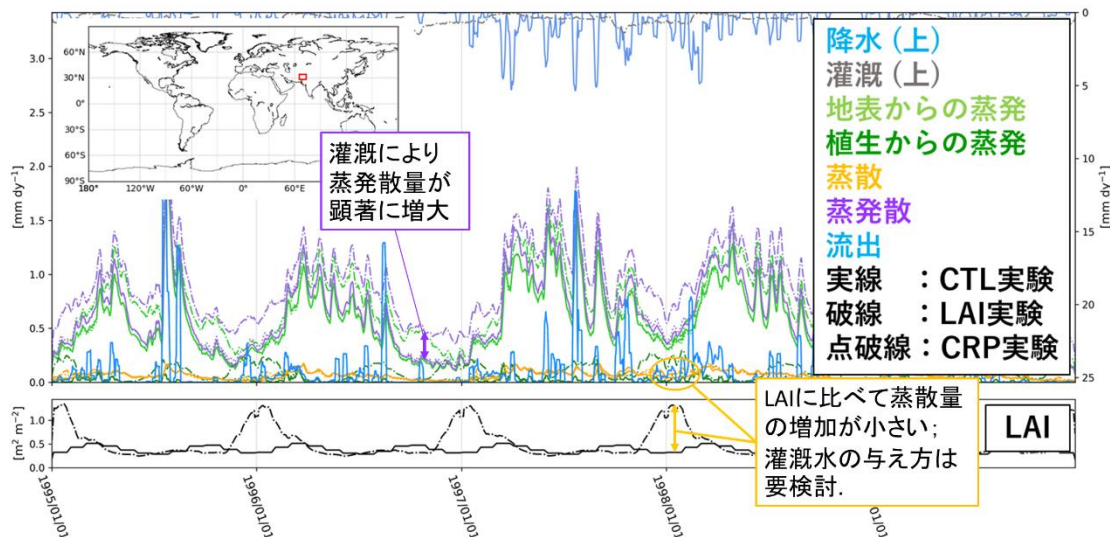
4.5 先進的かつ統合的な陸域モデルの開発

本項目では、S-12研究の先を見据え、陸域モデルがさらなる進化を遂げるための取り組みの結果について報告する。具体的には、次世代陸域シミュレータ ILS に対して、人間活動を陽に表現する H08 モデ

ルを結合させて様々な実験を執り行うための開発状態にあっている。まずLAI実験では、LAIの変化による蒸発散や土壌水分量、地表面温度等の変化が確かめられた。LAIが減少すると植生からの蒸発と蒸散は減少した(図は省略)。土壌からの蒸発の増加により一部は相殺されるが蒸発散量全体としては減少し、その結果土壌水分量の増加や地表面温度の上昇等が見られた。図(1)-35に2月と8月におけるLAIと蒸散量の、結合による変化を示す。



図(1)-35 MATSIROにおけるLAIの変化(上段)とそれに伴う蒸散量(下段)の変化。2001-2010年におけるLAI結合実験(LAI)と非結合実験(CTL)との相対差分(LAI-CTL)/CTL。

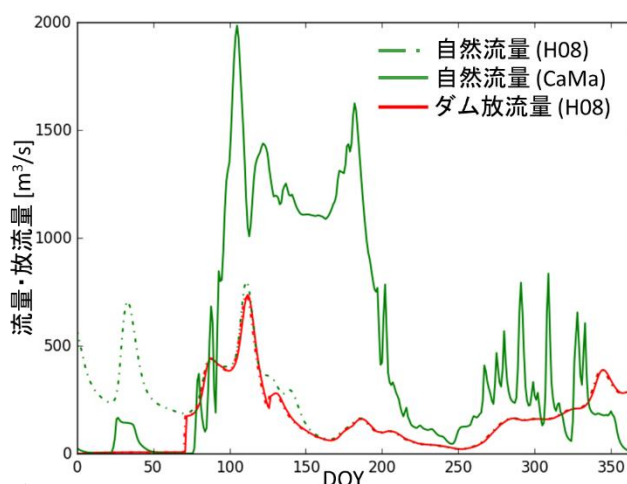


図(1)-36 インド北西部におけるMATSIROの各変数の時系列変化(1995-1998)。

一方でCRP実験では、灌漑の盛んな地域で灌漑水の供給による蒸発散量の増加が見られた(図(1)-36)。LAIが大きい、つまり植生が繁茂している時期は植物からの蒸発が大幅に増加した一方、蒸散の増加は限定的だった。MATSIROに灌漑水を扱うモジュールは存在しないので本実験では降水量に灌漑水を加え

ることで灌漑を表現したが、その結果降水と同様キャノピー遮断の影響を受けることとなり、植生の多い時期はそれが顕著に表れたと考えられる。キャノピー遮断を計算したあとの降水に加える、または直接土壌に与えるなど、より適切な表現方法を検討中である。

次に、H08の貯水池操作をCaMa-Floodで再現することを試みた。H08が河川モジュールを持つことは手法の項(3.5)に述べたとおりである。貯水池はその河道網上に配置されており、流入量、貯水量、操作に関するパラメーター等から放流量が計算される。本実験では、初期時刻での貯水量と各時刻の放流量をH08からCaMa-Floodに送信し、それをCaMa-Floodの河川氾濫計算に反映するという方法を取ったが、これにはいくつか課題があることが判明した。まず両モデルの河道網が異なるため、グリッドが同じでも河川が異なる場合が少なからずあり、例えばH08河道網では本流にある貯水池が、CaMa-Flood河道網ではごく小さな支流にあることとなる、といったケースが生じた。また流量計算のアルゴリズムが異なるため両モデルで同一の河道網を用いることはできない。そこで、H08の貯水池をその依存関係(上下流の位置関係)を保存しながらCaMa-Flood河道網上で最も適切と考えられるグリッドに配置したところ、貯水容量にして約80%の貯水池を配置することが出来た。適切であるかどうかの判断には上流流域面積の誤差率や上流流域メッシュの一致度、元のグリッドとの距離等を用いた。アルゴリズムの改良や手作業での修正を行えばより多くの貯水池を対応付けることが可能であるが、上流流域メッシュが1グリッドしかない小さな貯水池などはグリッドを移動させると流量計算の元となる降水も移動前とは別のグリッドの値を用いることとなるため、その場合河道が対応していても適切な対応付けとは言えず、したがって全ての貯水池を対応付けることはできない。次に、両モデルの自然流量が異なるという問題がある(図(1)-37)。今回H08の流量計算ではH08自身の陸面モジュールの流出量を用いており、一方CaMa-FloodではMATSIROの流出量を用いている。また河道計算のアルゴリズムも異なる。これらの理由によりH08とCaMa-Floodの自然流量に差が生じるのだが、その差が大きい場合はH08の貯水池操作をCaMa-Floodに反映することが難しい、又は貯水池操作の影響を十分に表現できなくなる。気候値等による補正も検討したが、差が大きい場所ではそれも困難なことが予想される結果となり、この点は今後の課題とすることとした。



図(1)-37 Ångermanälven ダム地点(17.25°E, 63.25°N)の自然流量とダム放流量
(m³/s, 日平均, 1991年).

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

MIROC-SPRINTARS気候モデルの結果を全球エネルギー収支の観点から詳細に解析し、黒色炭素と硫酸塩では気候影響のメカニズムが本質的に異なることを見出した。特に、これら2つの大気汚染物質は異なる

る光学特性を持つために大気層/地表面の放射強制力の内訳が異なり、そのことが気候応答の顕著な違いをもたらしていることを解明した。また、その特徴の違いがもたらす全球エネルギー収支変化の全体像を提示し、全球平均の地上気温と降水量の応答をその中に位置づけて理解した。これによると、黒色炭素は短い時間スケールで降水量を顕著に変化させる一方、硫酸塩は長い時間スケールでの降水量の気候変化をもたらすことがわかり、これら2つの大気汚染物質は地球規模の水循環に対して顕著に異なる影響を及ぼすことが示唆された。また、このエネルギー収支の全体像の中で特に不確実性の大きい雲・降水過程の応答の理解に資するために、雲を解像するNICAM-Chemモデルに基づいて領域規模から全球規模での大気汚染の大気への影響をシームレスに計算できるモデルシステムを開発し、それによるSLCP削減シナリオ実験実施を可能とした。本研究ではさらに、黒色炭素と硫酸塩の排出量増減が陸域水循環へ与える影響を、陸域オフラインモデルシミュレーションを使って調べた。陸域オフラインモデルシミュレーションとは、地表面での気温・風速・湿度・気圧・放射などを陸域モデルのみに与え、陸域の水・熱輸送・河川流量等の挙動をシミュレートするもので、CO₂などによる地球温暖化将来予測研究において、よく用いられている手法である。その結果、①BCとSO₂の増加は共に全球降水量を減少させ、BCでは特に流出量減少に効果が出やすいこと、②降水量及び流出量の地域分布では減少と増大が入り混じり、その分布はBCとSO₂で大きく異なること、③BC排出を制限することで全球での水資源のストレスが緩和する可能性があること、④BCとSO₂共に排出を抑制しても推進しても洪水暴露人口は増大することが示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

まず、黒色炭素の排出削減による地球温暖化の緩和効果は限定的である可能性が高いことを示した。主にテーマ4の成果により、ブラックカーボン(BC)の排出量削減による地上気温の低下は、これまで考えられているよりも小さいことがわかってきた。これは、BC削減による太陽光吸収の減少がもたらす大気的不安定化に伴って、雲・降水の変化など「速い応答」の調節機能が働くためである。これにより、太陽光の散乱・吸収によるエネルギー変化(瞬時放射強制力)に対する地上気温変化の感度は、硫酸塩と比較してBCは小さくなる。ただし、BCや硫酸塩の気候に対する影響は地域性が非常に強いため、行政は地域ごとの定量的影響評価について引き続き研究調査を支援すべきである。

さらにテーマ4では、S-12の他のテーマとの連携によって、大気汚染物質の排出の把握、その結果を反映するSLCPの排出に関する技術選択AIMモデルの拡張、それを用いてSLCP排出に関する将来シナリオを探索するシステム、それをさらに気候モデルと組み合わせて気候影響を評価するシステムを開発した。その際詳細な領域計算から全球的な影響評価までをシームレスに行う必要があるため、テーマ4では計算格子を柔軟に設定できるNICAM-Chemを実用的に稼動できるように整備し、世界最高解像度での全球計算を実施可能にした。行政はこれらの最先端のシステムを今後活用して、よりよいシナリオ作りを行うべきである。

また、SLCPの水循環への影響は多大であり、SLCP削減効果はこの観点でも評価する必要があることを明らかとした。BCや硫酸塩の前駆気体であるSO₂の排出量が増減すると、気温や降水量が変化することにより、大洪水に晒される人口が増加する可能性があることを示した。BCの変化は地上気温に対する感度は小さいものの、降水量は顕著に変化するためである。近年顕著に増加しつつある洪水・熱波などの極端現象や、農作物収量、途上国での健康に対してSLCPが及ぼす影響の評価については、国際的にも研究事例が非常に乏しいのが現状である。SLCPが地球の大気や表層のエネルギー収支に及ぼす量や、エアロゾルが雲・降水生成に不可欠な物質であることを考えると、行政はSLCPの総合的な環境影響評価を今後定量的に実施していかなければならない。

以上の成果は、S-12全体で作成した「SLCP削減施策に関する提言」に記載した。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 米国エモリー大学と連携し、気候変動影響評価に関する研究を進めている。東アジアにおける大気汚染と気候変動について解明するため、カウンターパートであるEri Saikawa博士を中心に中国、韓国、日本の大学が参加するEast Asia UNYTE Centerが提案されている。日本側では、米国エモリー大学との連携による気候変動影響評価及び適応策策定研究の実施についてのプロジェクトが東京大学生産技術研究所にて採択された。
- 2) ドイツ、カールスルーエ工科大学のMatthias Schneider博士をカウンターパートとして、大気データ解析における非断熱加熱の代替指標としての水蒸気同位体情報の高度応用に関して共同研究を行なっている。本課題は、日本学術振興会国際共同研究事業のドイツとの国際共同研究プログラム(H31.3-H34.3)に採択された。
- 3) 水同位体比データ同化システムを用いた大気・陸面水循環過程の詳細解明について、米国サンディエゴ州立大学のChun-Ta Lai博士と共同研究を行なった。本課題は、科学研究費補助金国際共同研究加速基金(国際共同研究強化)に採択され、サンディエゴ州立大学に長期滞在し、SLCPによる陸域水循環への影響の検討、降水同位体比と層状性・対流性降雨割合の相関に関する解析を行なった。
- 4) 本研究で行なっている陸域モデル開発に関して、パキスタン National Engineering Services PakistanのMuhammad Hasnain Aslam氏を招へいした。第61回水工学講演会にて「Sediment yield in Jhelum river basin with and without climate change impact in Pakistan」というタイトルで講演いただき、陸域モデルを用いた気候変動の影響評価について議論した。
- 5) 国際原子力機関のCoordinated Research Project (F31005) Isotope-enabled Models for Improved Estimates of Water Balance in Catchmentsに参画している。カウンターパートは、オーストラリア、国際原子力機関のDagnachew Legesse Belachew氏で、13カ国が参加している。同位体情報を用いて水文諸量をより正確に推定し、気候変動が水資源の利用可能性と持続可能性に及ぼす影響の評価を精緻化することを目指している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Dai T., Cheng Y., Suzuki K., Goto D., Kikuchi M., Schutgens N.A.J., Yoshida M., Zhang P., Husi L., Shi G., Nakajima T.: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 680-711 (2019)
Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter.
- 2) Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T.M., Choi M., Kim J., Sugimoto N., Shimizu A., Oikawa E., Nakajima T Atmospheric Research, 217, 93-113 (2019)
Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016.
- 3) Suzuki, K., and T. Takemura: J. Geophys. Res. Atmos., 124, doi:10.1029/2018JD029808 (2019)

- Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.
- 4) Takemura, T., and K. Suzuki: Scientific Reports, 9: 4419 (2019)
Weak global warming mitigation by reducing black carbon emission.
 - 5) Dai T., Cheng Y., Zhang P., Shi G., Sekiguchi M., Suzuki K., Goto D., Nakajima T.:
Atmospheric Environment, 190, 99-115 (2018)
Impacts of meteorological nudging on the global dust cycle simulated by NICAM coupled
with an aerosol model.
 - 6) Saya, A., K. Yoshimura, T. Yoshikane, E.-C. Chang, T. Oki: J. Geophys. Res. Atmos.,
123, doi:10.1029/2018JD028531 (2018)
Precipitation redistribution method for regional simulations of radioactive material
transport during the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident.
 - 7) Yoshikane, T., K. Yoshimura: Scientific Reports, 8, 9926 (2018)
Dispersion characteristics of radioactive materials estimated by using wind patterns.
 - 8) Wei, Z., X. Lee, Z. Liu, U. Seeboonruang, M. Koike, K. Yoshimura: Earth and Planetary
Science Letters, 488, doi:10.1016/j.epsl.2018.02.015 (2018)
Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation
isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia.
 - 9) Reuter, J., N. Buening, K. Yoshimura: Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-017-3798-3
(2018)
Evaluating hydrological influences on mid-latitude $\delta^{18}O_p$ in the Middle East.
 - 10) 芳村圭: 水文水資源学会誌, 31, 6, 554-559 (2018)
同位体気象水文学の展望.
 - 11) 芳村圭、新田友子、石塚悠太、多田真嵩、鈴木健太郎、竹村俊彦: 土木学会論文集B1(水工学),
74, 4, I_217-I_222 (2018)
短寿命気候汚染物質による陸域水循環への影響.
 - 12) 森山文晶、芳村圭、筆保弘徳: 土木学会論文集B1(水工学), 74, 4, I_157-I_162 (2018)
領域大気海洋結合モデルの不確実性の検証.
 - 13) Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima:
Nature Communications, 9, 985 (2018)
Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-
system resolving model.
 - 14) Uchida, J., M. Mori, M. Hara, M. Satoh, D. Goto, T. Kataoka, K. Suzuki, and T.
Nakajima: Mon. Wea. Rev., 145, 5059-5082 (2017)
Impact of lateral boundary errors on simulations of convective systems with a non-
hydrostatic regional climate model.
 - 15) Schutgen, N., S. Tsyro, E. Gryspeerd, D. Goto, N. Weigum, M. Schulz, P. Stier: Atmos.
Chem. Phys., 17, 9761-9780 (2017)
On the spatio-temporal representativeness of observations.
 - 16) Nitta, T., K. Yoshimura, A. Abe-Ouchi: J. Hydrometeor., 18, 11, doi:10.1175/JHM-D-16-
0105.1 (2017)
Impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with
the MIROC5 AGCM and a wetland scheme.
 - 17) Okazaki, A. and K. Yoshimura: Clim. Past, doi:10.5194/cp-2016-12 (2017)
Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate
reconstruction.
 - 18) Wei, Z., K. Yoshimura, L. Wang, D. Miralles, S. Jasechko, X. Lee: Geophys. Res. Lett.,

- doi:10.1002/2016GL072235 (2017)
Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration.
- 19) Ramzan, M., S. Ham, M. Amjad, E.-C. Chang and K. Yoshimura: *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2017/7560818 (2017)
Sensitivity evaluation of spectral nudging schemes in historical dynamical downscaling for South Asia.
- 20) Okata, M., T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T. Y. Nakajima, and H. Okamoto: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 443-468, doi:10.1002/2016JD025441 (2017)
A study on radiative transfer effects in 3D cloudy atmosphere using satellite data.
- 21) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, T. Nakajima: *AIP Conf. Proc.*, 1810, 100002, doi:10.1063/1.4975557 (2017)
Validation of high-resolution aerosol optical thickness simulated by a global non-hydrostatic model against remote sensing measurements.
- 22) Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, K. Ono, W. Kim, M. Yokoi, C.-T. Lai: *J. Hydrol.*, 533, 91-102 (2016)
Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan.
- 23) 芳村圭: *水文科学会誌*, 46, 87-99 (2016)
水同位体比情報を用いたデータ同化.
- 24) 芳村圭, 中村晋一郎, 鳩野美佐子, 向田清峻, 石塚悠太, 内海信幸, 木口雅司, 金炯俊, 乃田啓吾, 牧野達哉, 鼎信次郎, 沖大幹: *土木学会論文集B1(水工学)*, 72 (2016)
平成27年9月関東・東北豪雨による茨城県常総市における鬼怒川洪水に関する調査及び考察.
- 25) Uchida, J., M. Mori, H. Nakamura, M. Satoh, K. Suzuki and T. Nakajima: *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/MWR-D-15-0271.1 (2016)
Error and energy budget analysis of a non-hydrostatic stretched-grid global atmospheric model.
- 26) Goto D., T. Nakajima, T. Dai, T. Takemura, M. Kajino, H. Matsui, A. Takami, S. Hatakeyama, N. Sugimoto, A. Shimizu and T. Ohara: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 12, 6247-6270 (2015)
An evaluation of simulated sulfate over East Asia through global model inter-comparison.
- 27) Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, W. Kim, Z. Liu, M. Yokoi: *Water Resour. Res.*, doi:10.1002/2014WR016737 (2015)
Partitioning of evapotranspiration using high frequency water vapor isotopic measurement over a rice paddy field.
- 28) Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C.F.S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima: *J. Geoscientific Model Development*, 8, 235-259, doi: 10.5194/gmd-8-235-2015 (2015)
Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan.
- 29) 新田友子、芳村圭、阿部彩子: *土木学会論文集B1(水工学)*, 71, 4 (2015)
陸域水循環の再現性向上と気温バイアス 低減に向けた簡易湿地スキームによる感度実験.
- 30) Shi, C. and T. Nakajima: *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 157, 34-41 (2015)
The Eddington approximation calculation of radiation flux in the atmosphere-ocean system.
- 31) Dai, T., N.A.J. Schutgens, D. Goto, G.-Y. Shi, and T. Nakajima: *Environmental*

Pollution, 195, 319-329 (2014)

Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model.

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Hashimoto, M., S. Morimoto, H. Takenaka, and T. Nakajima : 地惑連合大会 (2014)
“A study of multi-pixel and multi-parameter satellite remote sensing for aerosol properties.”
- 2) 及川栄治、西澤智明、中島映至 : 日本気象学会 (2014)
「クラスタリングを用いたAERONETデータのエアロゾルタイプ分類 その2」
- 3) 五藤大輔、中島映至、上田佳代、Ng Chris-Fook-Sheng、村田諒、SALSA project Team : 日本気象学会 (2014)
「都市における大気汚染物質シミュレーションとその健康影響評価」
- 4) 中島映至 : 日本気象学会 (2014)
「大気放射学とそれに関わる気候・環境科学の推進」
- 5) Goto, D., E. Oikawa, K. Suzuki, T. Seiki, and T. Nakajima : 14th Conference on Cloud Physics, Boston, July 7-11, 2014
“Estimating global aerosol optical properties and their radiative forcings by a global model with 14km grid spacing.”
- 6) Hashimoto, M., T. Nakajima, S. Morimoto, H. Takenaka : AMS Radiation, Boston, 2014
“Development and application of a new algorithm of satellite remote sensing using multi-pixel and multi-parameter information for aerosol properties by GOSAT/CAI and other satellite-borne imagers.”
- 7) Nakajima, T., M. Hashimoto, S. Fukuda, S. Morimoto, H. Takenaka, and Y. Yoshida : AMS Radiation, Boston, 2014
“On the capability of aerosol remote sensing by CAI-2 imager aboard the GOSAT-2 satellite.”
- 8) T. Nitta, K. Yoshimura, K. Takata, R. O’ishi, T. Sueyoshi, S. Kanae, T. Oki, A. Abe-Ouchi, and G. E. Liston : 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle, Hague, Netherlands, 2014
“Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model.”
- 9) Dai, T., N. A. J. Schutgens, D. Goto, G. Shi, T. Nakajima : ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan, 2014
“Improvement of aerosol optical properties simulation over eastern Asia with MODIS and assimilation.”
- 10) Goto, D., T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, R. Murata, K. Sudo, S. Misawa, J. Uchida : ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan, 2014
“SALSA Project Team Simulation of SLCP in Japan using a new atmospheric aerosol-chemistry model (NICAM-Chem) with a stretched-grid system.”
- 11) Nakajima, T. : ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan, 2014

- “A thought for seeking optimum mitigation and adaptation paths of SLCP.”
- 12) Goto, D., T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, K. Sudo, R. Murata, S. Misawa, J. Uchida, T. Inoue, H. Tsuruta, M. Satoh, H. Tomita, T. Ohara, and MEXT/RECCA/SALSA Project Team : AOGS 2014, Sapporo, Japan, 2014
 “Simulation of atmospheric aerosols and ozone around Tokyo using a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system.”
- 13) Misawa, S., T. Dai, N. Schutgens, and T. Nakajima : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “A study of regional-scale aerosol assimilation with the Stretch-NICAM atmospheric model.”
- 14) Nakajima, T. : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Air pollution in Asia and its effects on the climate and public health.”
- 15) Nakajima, T. : Invited lecture for young scientist session, AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “We are the scientist!”
- 16) Nakajima, T., D. Goto, H. Takenaka, J. Uchida, T. Inoue, H. Tsuruta, S. Misawa, R. Murata, T. Dai, N. Schutgens, and M. Satoh : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Modeling and observation of aerosols, clouds and radiation for societal issue applications.”
- 17) Nakajima, T., R. Imasu, M. Uematsu, A. Takami, D. Goto, J. Uchida, T. Inoue, H. Tsuruta, S. Misawa, R. Murata, T. Dai, N. Schutgens, K. Ueda, C.F.S. Ng, M. Satoh, Y. Sato, A. Murakami, A. Higuchi: SALSA Project Team : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Development of a seamless assimilation system for atmospheric materials and its applications.”
- 18) Oikawa, E., T. Nakajima, and D. Winker : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Direct radiative forcing of fine mode aerosols using CALIPSO satellite data.”
- 19) Okata, M., T. Nakajima, T. Inoue, Y. Sato, D. Donovan, H. Barker : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “A study of the earth radiation budget using a 3D Monte-Carlo radiative transfer code.”
- 20) Suzuki, K., J. Golaz, A. Bodas-Salcedo, T. Yokohata, M. Wang, T. Koshiro, G. Stephens, and T. Nakajima : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Satellite-based evaluation of the warm cloud processes in global models and its implication for aerosol indirect forcing.”
- 21) Oki, T., Y. Satoh, Y. Pokhrel, H. Kim, K. Yoshimura : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “How Autonomous Adaptation Can Mitigate the Impacts of Climate Change on Water Scarcity?”
- 22) Uchida, J., D. Goto, T. Nakajima : AOGS, Sapporo, Japan, 2014
 “Analyzing a regional limited area and variable length modes in global climate model NICAM.”
- 23) 五藤大輔、中島映至、佐藤正樹 : 第31回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2014)
 「新しい全球エアロゾル化学輸送モデルの開発とその展望」
- 24) Dai, T., N.A.J. Schutgens, D. Goto, G. Shi, and T. Nakajima : Skynet International Workshop, Hefei, China, 2014
 “Improvement of aerosol optical simulation over Eastern Asia with data assimilation.”
- 25) Khatri, P., T. Takamura, H. Irie, H. Kuze, T. Nakajima, and B. Holben : Skynet International Workshop, Hefei, China, 2014
 “Comparison of single scattering albedo retrieved from PREDE sky radiometer and CIMEL

- sun photometer.”
- 26) Nakajima, T., and SKYNET Science Team : Skynet International Workshop, Hefei, China, 2014
 “An overview of the recent progresses in the skyradiometer technology and SKYNET operation.”
- 27) Goto, D., T. Nakajima, R. Murata, H. Yashiro, K. Sudo, T. Dai, S. Misawa, J. Uchida, T. Ohara, and MEXT/RECCA/SALSA Project Team : IGAC2014, Natal, Brazil, 2014
 “Development of simulating aerosols and tropospheric ozone in megacities using a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system.”
- 28) 佐藤雄亮、芳村圭、沖大幹、金炯俊 : 水文・水資源学会 2014 年度総会・研究発表会 (2014)
 「流況への人為影響を考慮した河川渇水の将来予測」
- 29) 新田友子、芳村圭、阿部彩子 : 水文・水資源学会 2014 年度総会・研究発表会 (2014)
 「陸面モデルにおける高緯度陸域水循環の改善に向けた簡易湿地スキームによる感度実験」
- 30) 五藤大輔、中島映至、T. Dai、竹村俊彦、梶野瑞王、松井仁志、原由香里、高見昭憲、畠山史郎、杉本伸夫、清水厚、大原利眞 : 日本気象学会2014年秋季大会 (2014)
 「アジア域における硫酸塩エアロゾル分布に対するホストモデルの不確実性評価」
- 31) Yoshimura, K., Y. Satoh : International Workshop on Risk information on climate change, 2014
 “Study on impact of the water resources management on projected future change of drought.”
- 32) 新田友子、芳村圭、阿部彩子 : 第5回極域科学シンポジウム (2014)
 「陸域水循環の再現性向上と気温バイアス低減に向けた簡易湿地スキームによる感度実験」
- 33) Goto, D., T. Nakajima, M. Satoh, and MEXT/RECCA/SALSA Project Team : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2014
 “Development of aerosol-chemistry transport model coupled to non-hydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) through applying a stretched grid system to regional simulations around Japan.”
- 34) Nitta, T., K. Yoshimura and A. Abe-Ouchi : AGU Fall meeting, San Francisco, 2014
 “A sensitivity study of MATSIRO land surface model with a simple wetland scheme for improvements in the representation of surface hydrology and surface air temperature bias.”
- 35) Oki, T., Y. Satoh, Y. Pokhrel, H. Kim, K. Yoshimura : AGU Fall meeting, San Francisco, 2014
 “Impacts of Autonomous Adaptations on the Hydrological Drought Under Climate Change Condition.”
- 36) Satoh, Y., K. Yoshimura, Y. Pokhrel, H. Kim, T. Oki : AGU Fall meeting, San Francisco, 2014
 “Time series analysis of hydrological drought under climate change with anthropogenic water management.”
- 37) Goto D., T. Nakajima, M. Satoh M., and MEXT/RECCA/SALSA Project Team : The 6th MICS-Asia workshop, Zhuhai, China, 2015
 “Development of an atmospheric aerosol-chemistry model (NICAM-Chem) and its application to regional simulations over East Asia.”
- 38) Satoh, Y., K. Yoshimura, Y. Pokhrel, H. Kim, and T. Oki : EGU annual meeting, Vienna, Austria, 2015
 “The shift in onset of unprecedented hydrological drought as a response to different

- levels of global warming.”
- 39) Wei, Z., A. Okazaki, W. Kim, M. Yokoi, K. Ono, K. Yoshimura : International Symposium on Isotope Hydrology: Revisiting Foundations and Exploring Frontiers, Vienna, Austria, 2015
 “Factors controlling isotopic composition of water vapor over a paddy field, Mase, Japan: using a high frequency in-situ isotope observation and isotope enabled GCM.”
- 40) 芳村圭 : 日本気象学会2015年度春季大会 (2015)
 「全球高解像度シミュレーションに向けた地表面過程モデリング」
- 41) Goto D., T. Nakajima, T. Dai, T. Takemura, M. Kajino, H. Matsui, A. Takami, S. Hatakeyama, N. Sugimoto, A. Shimizu and T. Ohara : 26th IUGG, Prague, Czech Republic, 2015
 “Uncertainty of sulfate aerosols against differences between host climate models.”
- 42) Goto D. : International Workshop on Land Use/Cover Changes and Air Pollution in Asia, Bogor, Indonesia, 2015
 “Assessment of sulfate aerosols and its uncertainty due to clouds using global models.”
- 43) 五藤大輔 : 第2回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会 (2015)
 「全球規模大気環境汚染に関わる統合環境モデリング (hp140046)」
- 44) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, and T. Nakajima : Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan, 2015
 “A model evaluation of global high-resolving simulated aerosol distributions.”
- 45) 五藤大輔、佐藤陽祐、八代尚、鈴木健太郎、中島映至 : 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
 「全球高解像度計算によるエアロゾル分布 (1) モデル検証」
- 46) 新田友子、芳村圭、阿部彩子 : 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
 「簡易湿地スキームを用いた大気陸面結合実験」
- 47) Goto D. : The 13th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ13), Kobe, Japan, 2015
 “Regional simulation of aerosols using NICAM-Chem with a stretched-grid system.”
- 48) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, T. Suzuki, and T. Nakajima : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
 “Simulation and validation of global aerosol distributions using a nonhydrostatic icosahedral atmospheric model with 14 km grid spacing.”
- 49) Uchida, J., T. Nakajima, and K. Suzuki : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
 “Error and energy budget analysis of a non-hydrostatic stretched-grid atmospheric model.”
- 50) Suzuki, K., E. Oikawa, and T. Nakajima : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
 “Characterizing uncertainties in estimates of the direct and indirect aerosol radiative forcings.”
- 51) Nitta, T., K. Yoshimura, and A. Abe-Ouchi : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
 “On the impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with MIROC5 AGCM and the simplified wetland scheme.”
- 52) Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, C.-T. Lai, K. Ono, W. Kim, M. Yokoi : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
 “Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture observed over a rice paddy in Tsukuba, Japan.”

- 53) Goto D. : 2nd International Workshop on SLCs in Asia: Chemistry-climate modeling and its applications, Inchoen, Korea, 2016
 “Seamless global-to-regional simulation of aerosols with 0(10km) grid spacing.”
- 54) Nitta, T. : Joint US-Japan Workshop on Climate Change and Variability, La Jolla, 2016
 “On the impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with MIROC5 AGCM and the simplified wetland scheme.”
- 55) Yoshimura, K. : The 6th Global Precipitation Measurement (GPM) Asia Workshop on Satellite Precipitation Data Utilization, Bangkok, Thailand, 2016
 “Recent rapid advancement of stable water isotope measurement and modeling in precipitation process studies.”
- 56) Hatono, M., K. Mukaida, T. Nitta, T. Arakawa, K. Yoshimura : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016
 “Development of an Integrated Global Hydrological Model with Sediment Dynamics.”
- 57) Wei, Z., K. Yoshimura, X. Lee, L. Wang, D. G. Miralles, S. Jasechko : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016
 “Transpiration accounts for two thirds of global terrestrial evaporation.”
- 58) Yoshimura, K. : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016
 “Future stable water isotope projection with an isotope-AGCM driven by CMIP5 SSTs.”
- 59) Ishitsuka, Y., K. Yoshimura : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016
 “Building the ensemble flood prediction system by using numerical weather prediction data: Case study in Kinu river basin, Japan.”
- 60) Nitta, T., K. Yoshimura, A. Abe-Ouchi : AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016
 “The impact of representing arctic wetlands on summer warm and dry biases over land in MIROC5 AGCM experiment.”
- 61) Yoshimura, K. : EGU Leonardo conference 2016, Ourense, Spain, 2016
 “Data assimilation with stable water isotope information.”
- 62) Yoshimura, K. : 14th International Regional Spectral Model (RSM) Workshop, Rio de Janeiro, Brazil, 2016
 “Development of Regional Earth System Model with RSM.”
- 63) Madakumbura, G., K. Yoshimura : 14th International Regional Spectral Model (RSM) Workshop, Rio de Janeiro, Brazil, 2016
 “Development of River-Atmosphere-Ocean Coupled Regional Model.”
- 64) 芳村圭、鳩野美佐子、藪優太郎、石塚悠太、金炯俊、可知美佐子、沖大幹 : JAXA/EORC水循環ワークショップ (2016)
 「GSMaPを利用した洪水予測シミュレーションに関する現状と課題」
- 65) 芳村圭 : JpGU2016 (2016)
 「平成27年関東・東北豪雨による鬼怒川洪水に関する調査活動を経て」
- 66) Mukaida, K. and K. Yoshimura : Japan Geoscience Union Annual Meeting, Makuhari, Japan, 2016
 “A study on spatial and temporal variability of sediment in rivers using global sediment transport model.”
- 67) Suzuki, K. : AeroCom Workshop, Beijing, China, 2016
 “Process-oriented evaluation of warm cloud microphysics in global models with a synergistic use of multi-sensor satellite observations.”
- 68) Suzuki K., and T. Takemura : AeroCom Workshop, Beijing, China, 2016
 “Energy budget analysis of scattering and absorbing aerosol effects on global

- precipitation with a global aerosol-climate model.”
- 69) Suzuki, K. : CALIPSO-CloudSat Ten-Year Progress Assessment and Path Forward Workshop, Paris, France, 2016
“Cloud microphysics and climate.”
- 70) Suzuki, K. : Japan Geoscience Union Annual Meeting, Makuhari, Japan, 2016
“Synergistic use of multisensor satellite observations for quantification of cloud processes and climate model diagnostics.”
- 71) 鈴木健太郎、G. L. Stephens、J.-C. Golaz : 日本気象学会春季大会 (2016)
「全球平均降雨量の気候変化におけるエアロゾルの寄与」
- 72) Suzuki, K. : Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Science Workshop, Toulouse, France, 2017
“Significance of cloud and precipitation processes in aerosol effect on climate: Satellite observations and modeling.”
- 73) Suzuki, K. : Aerosol, Cloud, Precipitation and Climate (ACPC) Workshop, Bad Honnef, Germany, 2017
“Combined use of satellite observations and global models for studying aerosol-cloud-precipitation interactions.”
- 74) Suzuki, K., Y. Sato, T. Takemura, T. Michibata, D. Goto, and E. Oikawa : AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017
“Energy-based and process-based constraints on aerosol-climate interactions.”
- 75) Suzuki, K. : AeroCom/AeroSat Workshop, Helsinki, Finland, 2017
“Significance of cloud and precipitation processes in aerosol effect on climate.”
- 76) Suzuki, K. : International Workshop on SLCP Emission and Impacts in East Asia, Kashiwa, Japan, 2017
“Differing impacts of absorbing and scattering aerosols on climate and hydrologic cycle.”
- 77) Suzuki, K. : AGU-JpGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Japan, 2017
“Significance of cloud and precipitation processes in aerosol effect on climate.”
- 78) 五藤大輔、菊池麻紀、鈴木健太郎、早崎将光、吉田真由美、永尾隆、杉本伸夫、清水厚、中島映至 : 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
「2016年5月における静止衛星ひまわりを用いたNICAMのエアロゾル再現性の検証」
- 79) 五藤大輔 : 超高解像度大気モデル開発ワークショップ (2017)
「エアロゾル全球高解像度気候実験」
- 80) Yoshimura, K. : 5th International Conference on Reanalysis (ICR5), Rome, Italy, 2017
“Atmospheric reanalysis for multi-centuries using historical weather archives and isotopic proxies.”
- 81) Yoshimura, K. : International Workshop on Isotopes for Tropical Ecosystem Studies, Costa Rica, 2017
“Data assimilation of Isotopic information for multi centennial atmospheric reanalysis.”
- 82) Neluwala, P., K. Yoshimura, J. Hirano, M. Ichino : 水文・水資源学会2017年度総会・研究発表会 (2017)
「Assimilating Various Fields from Historical Documents: Idealized Experiments」
- 83) 竹島滉、芳村圭 : 水文・水資源学会2017年度総会・研究発表会 (2017)
「日本の一級水系における計画降雨継続時間の妥当性に関する検証」
- 84) 板谷知明、芳村圭 : 水文・水資源学会2017年度総会・研究発表会 (2017)

- 「深層学習を用いた水文気象場のダウンスケーリング手法の開発」
- 85) 新田友子、芳村圭、木口雅司、鈴木健太郎、竹村俊彦：水文・水資源学会2017年度総会・研究発表会（2017）
「SLCP（短寿命気候汚染物質）による陸域水循環への影響」
- 86) 野本大輔、芳村圭：第25回地球環境シンポジウム（2017）
「平成 27 年関東・東北豪雨時のつくば市真瀬における水蒸気同位体比時間変動の決定要因に関する研究」
- 87) 藪優太郎、芳村圭、Hyungjun Kim、新田友子、鳩野美佐子、石塚悠太、向田清峻、可知美佐子、沖大幹：第25回地球環境シンポジウム（2017）
「1km解像度陸面モデルによる河川流量の検証」
- 88) Aslam, M.H. and K. Yoshimura：第61回水工学講演会（2017）
“Sediment yield in Jhelum river basin with and without climate change impact in Pakistan”
- 89) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, T. Nakajima：16th AeroCom workshop, Helsinki, Finland, 2017
“Aerosol climatology with 14 km grid spacing using a non-hydrostatic global atmospheric transport model.”
- 90) Goto D., M. Kikuchi, K. Suzuki, M. Hayasaki, M. Yoshida, T. Nagao, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Nakajima：AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017
“Model evaluation using a geo-stationary satellite and in-situ measurements around Japan in May 2016.”
- 91) Neluwala, P., K. Yoshimura, K. Toride, J. Hirano, M. Ichino, A. Okazaki：AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017
“Reconstruction of Historical Weather by Assimilating Old Weather Diary Data.”
- 92) Suzuki, K.：NITech Lectures on Turbulence and Cloud, Nagoya, Japan, 2018
“Linkage of cloud microphysics to climate: Satellite observations and global modeling.”
- 93) Ishitsuka, Y., D. Yamazaki, K. Yoshimura：AGU Fall Meeting, Washington DC, 2018
“Development of an operational early flood forecasting system and 11-year validation of forecast skill over Japan.”
- 94) Okazaki, A., T. Miyoshi, K. Yoshimura, Fuqing Zhang：AGU Fall Meeting, Washington DC, 2018
“An online data assimilation method to assimilate time-averaged observations.”
- 95) Hatono, M., T. Nitta, T. Arakawa, K. Yoshimura：AGU Fall Meeting, Washington DC, 2018
“Modeling Sediment Dynamics at the Global Scale.”
- 96) Nitta, T., T. Arakawa, A. Takeshima, M. Hatono, H. Yashiro, D. Yamazaki, K. Yoshimura：AGU Fall Meeting, Washington DC, 2018
“Development of ILS, Integrated Land Simulator.”
- 97) 井田寛子、芳村圭、沖大幹：第63回水工学講演会（2018）
「生物季節と地球温暖化～サクラ開花への影響～」
- 98) 大沼友貴彦、金炯俊、芳村圭、新田友子、大石龍太、高田久美子：第63回水工学講演会（2018）
「陸域モデル国際相互比較実験（LS3MIP）を想定したMATSIROによる20世紀再現実験」
- 99) 庄司悟、岡崎淳史、芳村圭：第63回水工学講演会（2018）
「気候プロキシデータ同化における観測インパクトの時空間偏在性に関する考察」
- 100) Neluwala, P., K. Yoshimura：The 11th annual ACRE meeting, Tokyo, Japan, 2018

- “Reconstruction of Historical Weather Using Personal Weather Diaries.”
- 101) 新田友子、荒川隆、竹島滉、鳩野美佐子、八代尚、山崎大、芳村圭：気象学会2018年度秋季大会（2018）
「統合陸域シミュレータの開発と気候モデルとの結合に向けた検討」
- 102) 多田真嵩、芳村圭：気象学会2018年度秋季大会（2018）
「水蒸気同位体データ同化による気象予測改善に向けて」
- 103) 芳村圭：気象学会2018年度秋季大会（2018）
「短寿命気候汚染物質による水ストレス・洪水暴露人口への影響」
- 104) 原田央、芳村圭、水谷司：水文水資源学会2018年度研究発表会（2018）
「信号処理分野の先端技術導入による新たな古気候復元手法の提案」
- 105) 吉兼隆生、芳村圭：水文水資源学会2018年度研究発表会（2018）
「機械学習を用いた局地降水予測」
- 106) 新田友子、竹島滉、鳩野美佐子、八代尚、荒川隆、山崎大、芳村圭：水文水資源学会2018年度研究発表会（2018）
「統合陸域シミュレータ（ILS）の開発」
- 107) Yoshimura, K. : AOGS2018, Honolulu, 2018
“Data Assimilation of Water Isotope Information for Constraining Hydrometeorological Processes.”
- 108) Guo, K. Yoshimura : AOGS2018, Honolulu, 2018
“Impacts of Heat Flux Adjustments on the Climate Simulation in a Regional Atmosphere-Ocean Coupled Model RSM-ROMS over the Northwest Pacific Ocean.”
- 109) 多田真嵩、芳村圭：JpGU2018（2018）
「水蒸気同位体データ同化による気象予測改善」
- 110) 吉兼隆生、芳村圭：JpGU2018（2018）
「モデル降水バイアス低減手法の開発」
- 111) 庄司悟、岡崎淳史、芳村圭：JpGU2018（2018）
「気候プロキシを用いたデータ同化による千年紀気候復元」
- 112) 岡崎淳史、三好 建正、芳村 圭、Zhang Fuqing : JpGU2018（2018）
“Toward online data assimilation for the millennium reanalysis.”
- 113) Nitta, T., K. Yoshimura, A. Abe-Ouchi : 8th GEWEX open science conference Canmore, Canada, 2018
“The impact of representing snow-fed wetlands on summer warm and dry biases through land atmosphere interaction in MIROC5 AGCM experiment.”
- 114) Goto D. : AGU Fall Meeting, Washington D.C., USA, 2018
“Global aerosol budget and its radiative forcing using a non-hydrostatic global atmospheric transport model with 14 km grid spacing.”
- 115) Goto D., Sato Y., Yashiro H., Suzuki K., Nakajima T : 2018 International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference, Takamatsu, Japan, September 2018
“Global aerosol climatology with 14 km grid spacing using a non-hydrostatic atmospheric transport model.”
- 116) Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T., Sugimoto N., Shimizu A., Nakajima T. : 15th Annual Meeting: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Honolulu, USA, 2018
“Understanding of Atmospheric Aerosol Behavior Using a Semi-Regional Model, a Geostationary Satellite and in Situ Measurements over Japan in May 2016.”
- 117) Goto D. : Land Cover/Land Use Changes (LC/LUC) and Impacts on Environment in

- South/Southeast Asia -International Regional Science Meeting, Manila, Philippine, 2018
- “Analysis of aerosol transport to Japan by combining seamless regional model and multiple observations including geostationary satellite: A case study of May 2016.”
- 118) 五藤大輔：日本気象学会2018年度秋季大会（2018）
「全球高解像度シミュレーションによるエアロゾル物質収支と放射強制力」
- 119) 鈴木健太郎，竹村俊彦：日本気象学会2018年度秋季大会（2018）
「吸収性・散乱性エアロゾルの全球エネルギー収支への影響」
- 120) Zhao, S., and K. Suzuki : AGU Fall Meeting, Washington D.C., 2018
“The different impacts of black carbon and sulfate aerosols on global and tropical precipitation.”
- 121) Zhao, S., and K. Suzuki : AGU Fall Meeting, Washington D.C., USA, 2018
“The differing impacts of black carbon and sulfate aerosols on ITCZ position.”
- 122) Goto D. : 5th International SKYNET workshop 2019, New Delhi, India, 2019
“Global aerosol simulation with 14 km grid spacing.”
- 123) Suzuki, K. : IGES Workshop on “How can Asia manage air pollution and climate change?: From understanding impacts to implementing solutions”, Tokyo, Japan, 2019
“The atmospheric science view on climate-air pollution linkages.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 東京大学 駒場リサーチキャンパス公開（2014年6月6-7日）にて成果紹介
- 2) 東京大学 大気海洋研究所一般公開（2014年10月24-25日）にて成果紹介
- 3) 東京大学生産技術研究所 千葉実験所公開（2014年11月14日）にて成果紹介
- 4) 第1回公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響軽減に向けたあらたな取り組み」
（主催：環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、2015年1月29日、東京大学本郷キャンパス・福武ホール）にて講演
- 5) 東京大学 駒場リサーチキャンパス公開（2015年6月5-6日）にて成果紹介
- 6) スーパーグローバルハイスクール静岡県立三島北高等学校特別授業（2015年8月5日、聴講者約100名）
- 7) 東京大学 大気海洋研究所一般公開（2015年10月23-24日）にて成果紹介
- 8) 東京大学生産技術研究所 千葉実験所公開（2015年11月13日）にて成果紹介
- 9) こども大学における講演「水のことを学ぼう！！」（2015年12月31日）
- 10) 第2回公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み」
（主催：環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、2016年1月7日、東京大学生産技術研究所コンベンションホール）にて講演
- 11) 東京大学 駒場リサーチキャンパス公開（2016年6月3-4日）にて成果紹介
- 12) 埼玉県立大宮高等学校出張授業「地球水循環と気候」（2016年7月11日、聴講者約50名）
- 13) スーパーグローバルハイスクール静岡県立三島北高等学校特別授業（2016年8月5日、聴講者約100名）
- 14) 東京大学 大気海洋研究所一般公開（2016年10月21-22日）にて成果紹介
- 15) 東京大学生産技術研究所 千葉実験所公開（2016年11月11日）にて成果紹介

- 16) 第3回公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み」
(主催：環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、2017年1月17日、東京大学本郷キャンパス・福武ホール)にて講演
- 17) 東京大学 駒場リサーチキャンパス公開 (2017年6月3-4日)にて成果紹介
- 18) 東京大学生産技術研究所 千葉実験所公開 (2017年10月27-28日)にて成果紹介
- 19) 東京大学 大気海洋研究所一般公開 (2017年10月27-28日)にて成果紹介
- 20) 第4回公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み」
(主催：環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、2018年1月23日、京都大学百周年時計台記念館国際交流ホール)にて講演
- 21) 東京大学 駒場リサーチキャンパス公開 (2018年6月8-9日、参加者約6600名)にて成果紹介
- 22) スーパーグローバルハイスクール静岡県立三島北高等学校特別授業「地球水循環と気候 ～水の同位体からわかる過去と現在そして将来～」 (2018年8月2日、聴講者約80名)
- 23) 東京大学生産技術研究所 千葉実験所公開 (2018年10月26-27日)にて成果紹介、ミニシンポジウム「気候水循環研究の可視化技術の方向性」講演
- 24) 東京大学 大気海洋研究所一般公開 (2018年10月26-27日)にて成果紹介
- 25) サイエンスアゴラ2018におけるミニトーク (2018年11月10日)
- 26) エコプロ2018における展示 (2018年12月6日)
- 27) 第5回公開シンポジウム「地球温暖化と大気汚染による影響の軽減に向けた新たな取り組み」
(主催：環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、2019年1月11日、東京大学本郷キャンパス・福武ホール)にて講演
- 28) 東京大学生産技術研究所芳村研究室Webページ (<http://isotope.iis.u-tokyo.ac.jp/>、2019年4月22日アクセス)にて成果紹介
- 29) 東京大学大気海洋研究所鈴木研究室Webページ (<http://157.82.240.167/>、2019年4月22日アクセス)、Facebook (<https://www.facebook.com/AORI.SuzukiLab>、2019年4月22日アクセス)にて成果紹介
- 30) S-12プロジェクトWebページ (<http://157.82.240.167/~S12/moej-s12/>、2019年4月22日アクセス)にて、S-12全体の成果紹介及び発表資料掲載

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 花王マイカジスタイル ウェブマガジン取材協力 (中島映至、鶴田治雄、上田佳代)
2014年2月10日 なぜこわい? PM2.5が私たちの身体に与える影響 (中島、鶴田、上田)
<http://mykaji.kao.com/8175/>
2014年2月19日 目に見えないから不安・・・PM2.5、どのように対策すべき?
2014年2月20日 現在の大気中のPM2.5濃度を知るなら「そらまめ君」 (鶴田)
<http://mykaji.kao.com/8183/>
2014年2月21日 洗濯物を干してもOK? PM2.5の影響と家事対策 (中島、鶴田、上田)
<http://mykaji.kao.com/8190/>
- 2) マイナビスチューデント記事 (2014年1月5日、中島映至、鶴田治雄
「中国の大気汚染は深刻さを増しています!近い将来、早死にする人が倍に!?)」
- 3) 成果の記者発表 (2016年5月25日、「北極域への「すす」の輸送メカニズムを解明 - 「京」を用いた超高解像度の全球大気汚染物質シミュレーション-)
- 4) 成果の記者発表 (2017年5月10日、「全世界からの植物由来の蒸発量の把握～水の同位体比から解き明かされる地球水循環の詳細～)
- 5) 日刊工業新聞 (2017年5月16日、「蒸散寄与率を解明」)
- 6) 朝日小学生新聞 (2017年6月8日、「『蒸散』研究で地球の未来がわかる」)

- 7) 成果の記者発表（2018年3月13日、「大気中のチリが雲に与える影響を正確に再現－「京」を用いた高解像度の気候シミュレーション－）
- 8) 成果の記者発表（2019年3月15日、「PM2.5 の排出量変化に伴う気温変化は化学組成によって大きく異なることを解明 ～気候変動と大気汚染の最適な同時緩和策策定に貢献～）

(6) その他

- 1) 2014年気象学会気象学会賞（鈴木健太郎）
- 2) 2014年気象学会藤原賞（中島映至）
- 3) 2015年HPCI優秀成果賞受賞（代表：中島映至）
- 4) 2018年気象学会堀内賞（芳村圭）

8. 引用文献

- 1) 国立環境研究所ニュース, 31, 5 (2012)
- 2) Climate and Clean Air Coalition: <http://www.ccacoalition.org/en/science-resources> (2017年9月29日アクセス)
- 3) Bond, T. C. et al.: J. Geophys. Res. Atmos., 118, 11, 5380-5552 (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment.
- 4) Uchida, J. et al.: Mon. Wea. Rev., doi:10.1175/MWR-D-15-0271.1 (2016) Error and energy budget analysis of a non-hydrostatic stretched-grid global atmospheric model.
- 5) Uchida, J. et al.: Mon. Wea. Rev., 145, 5059-5082 (2017) Impact of lateral boundary errors on simulations of convective systems with a non-hydrostatic regional climate model.
- 6) Goto, D. et al.: Geosci. Model Dev., 8, 235-259 (2015) Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan.
- 7) Kikuchi, M. et al.: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(6), 3442-3455 (2018) Improved Hourly Estimates of Aerosol Optical Thickness Using Spatiotemporal Variability Derived from Himawari-8 Geostationary Satellite.
- 8) Yoshida M. et al.: J. Meteorol. Soc. Jpn., 96B, 193-209 (2018) Common retrieval of atmospheric aerosol properties for imaging satellite sensors.
- 9) Choi, M. et al.: Atmos. Meas. Tech., 11, 385-408 (2018) GOCI Yonsei aerosol retrieval version 2 aerosol products: an improved algorithm description and error analysis with uncertainty estimation from 5-year validation over East Asia.
- 10) Goto, D. et al.: Atmos. Environ., 140, 320-332, (2016) Estimation of excess mortality due to long-term exposure to PM2.5 in Japan using a high-resolution model for present and future scenarios.
- 11) Takemura, T. et al.: J. Geophys. Res. Atmos., 110, D2, D02202 (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport - radiation model.
- 12) Samset, B. H. et al.: Geophys. Res. Lett., 43, 6, 2782-2791 (2016) Fast and slow precipitation responses to individual climate forcings: A PDRMIP multi-model study.
- 13) 東京大学, 平成28年度環境研究総合推進費研究委託業務委託業務報告書 (2017)
- 14) 佐藤雄亮, その他: 土木学会論文集B1(水工学), 71, 4, I_391-I_396 (2015) 旱魃の将来変化に対する水資源管理の効果に関する研究
- 15) Nitta, T. et al.: J. Climate, 27, 9, 3318-3330 (2014) Representing variability in

- subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation.
- 16) Yamazaki, D. et al.: *Water Resour. Res.*, 47, 4, W04501 (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model.
 - 17) Kim, H. et al.: *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17402 (2009) Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins.
 - 18) Yoshimura, K., et al.: *Hydrol. Res. Lett.*, 2, 22-26 (2008) Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan.
 - 19) Dirmeyer, P.A. et al.: *BAMS*, 87, 1381-1397 (2006) GSWP-2: multimodel analysis and implications for our perception of the land surface
 - 20) Rijsberman, F. R.: *Agri. Water Manag.*, 80, 5-22 (2006) Water scarcity: Fact or fiction?
 - 21) Shen, Y. et al.: *Hydrol. Sci. J.*, 59, 10, 1775-1793 (2014) Projection of future world water resources under SRES scenarios: An integrated assessment.
 - 22) Bengtsson, M. et al.: *Popul. Environ.*, 28, 2, 113-131. (2006) A SRES based global population dataset for 1990-2100.
 - 23) Watanabe, S. et al.: *Geosci. Model Dev.*, 4, 845 (2011) MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments.
 - 24) Ishitsuka, Y., & Yoshimura, K.: *AGU Fall Meeting Abstracts* (2016) Building the ensemble flood prediction system by using numerical weather prediction data: Case study in Kinu river basin, Japan.
 - 25) Hanasaki, N. et al.: *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1007-1025 (2008) An integrated model for the assessment of global water resources-Part 1: Model description and input meteorological forcing.
 - 26) Kim, H.: <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GSWP3/> (2014) Global Soil Wetness Project Phase 3.
 - 27) Suzuki, K., & Takemura, T.: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, doi:10.1029/2018JD029808 (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.
 - 28) Goto D. et al.: *Atmospheric Research*, 217, 93-113 (2019) Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016.
 - 29) Yumimoto, K. et al.: *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 96B, 133-149 (2018) Assimilation and forecasting experiment for heavy Siberian wildfire smoke in May 2016 with Himawari-8 aerosol optical thickness.
 - 30) Yumimoto, K. et al.: *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5886-5894 (2016) Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite.
 - 31) Ma P.-L. et al.: *Geosci. Model Dev.*, 7, 755-778 (2014) Assessing the CAM5 physics suite in the WRF-Chem model: implementation, resolution sensitivity, and a first evaluation for regional case study.
 - 32) Sato, Y. et al.: *Sci. Rep.*, 6, 26561 (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models.
 - 33) Oki, T., & Kanae, S.: *Science*, 313, 1068-1072, (2006) Global hydrological cycles and world water resources.
 - 34) Hirabayashi, Y. et al.: *Nature Climate Change*, 3, 816-821 (2013) Global flood risk under climate change.

III. 英文Abstract

Evaluation of SLCP Environmental Impact and Promotion of Climate Change Countermeasures through Seeking the Optimal Pathway (Development of an integrated operational system)

Principal Investigator: Kei YOSHIMURA

Institution: The University of Tokyo
 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-City, Chiba 277-8574, JAPAN
 Tel: +81-4-7136-6965 / Fax: +81-4-7136-6965
 E-mail: kei@iis.u-tokyo.ac.jp

[Abstract]

Key Words: SLCP, Integrated operational system, NICAM-Chem

Despite increased attention being paid to possible measures to mitigate global warming through a reduction in short-lived climate pollutants (SLCPs), the climatic impact of SLCPs are still largely unknown. For example, the predicted radiative forcing of climate, via the direct and indirect influences of anthropogenic aerosols, differs greatly between the fourth and fifth IPCC assessment reports (AR4 and AR5, respectively). In addition, no previous studies have estimated the impact of SLCPs on hydrological disasters, such as floods and droughts, or on precipitation and temperature, which can lead to changes in water resources. While previous studies have focused largely on SLCP reduction measures, the purpose of this investigation (S-12 theme 4; S-12-4) was to develop models to investigate the climatic impact of SLCPs, with a particular focus on the global water cycle. To this end, the non-hydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM-Chem), a next generation chemical transport model coupled with a regional-to-global non-hydrostatic atmospheric model, was developed, and advances in land surface modeling were made to improve the fidelity of land-atmosphere simulations.

A major finding of this study was that the surface air temperature decrease due to the reduction of black carbon (BC) emissions was smaller than previously considered. This was explained in terms of global energy budget perturbations resulting from BC-induced changes to atmospheric stability, with only a fraction of the BC-induced energy perturbations being capable of affecting the surface air temperature. This effect was mediated by the so-called "fast response", which includes adjustment of clouds and precipitation to "buffer" the BC-induced warming. Thus, the sensitivity of the surface temperature to energy balance perturbations, quantified by instantaneous radiative forcing, was lower for BC than sulfate; it was also apparent that the influence of BC and sulfate on the climate was spatially heterogeneous.

In addition, S-12-4 contributed to: 1) greater understanding of the actual situation regarding SLCP emissions, 2) enhancement of the Asian-Pacific Integrated Model (AIM,) by enabling selection of technology according to SLCP emissions, 3) development of an integrated operational system that determines future SLCP emission scenarios, and 4) development of a method to assess the climatic impact of SLCPs, based on combined use of a climate model and an integrated operation system. Given that these achievements require seamless simulations from the regional level up to the entire globe for meaningful impact

assessment, NICAM-Chem was developed to allow spatial coordinates to be flexibly configured for practical use. In particular, this enabled global simulations with unprecedentedly high spatial resolutions.

It was found that the impact of SLCPs on the terrestrial water cycle was substantial, but the actual effect of SLCP reduction needs to be evaluated. It was also shown that, if emissions of BC and SO₂, which is the precursor gas of sulfate, increase or decrease, the size of the population exposed to serious flooding may increase due to changes in temperature and precipitation. In particular, it was found that while the surface air temperature is relatively insensitive to BC emissions, changes therein significantly affect precipitation. However, very few international studies have evaluated the impact of SLCPs on extreme phenomena, such as floods and heat waves, despite their incidence having increased remarkably in recent years. Considering the impact that SLCPs have on the energy balance of the Earth's atmosphere and surface, and that aerosols are essential for the formation of clouds and precipitation, a comprehensive environmental impact assessment of SLCPs is critical in the future.