Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費終了研究成果報告書

数値モデルによる気候・環境変動評価と影響評価 (S-12-3)

平成26年度~平成30年度

Impact assessment of climate and environmental effects using numerical models

<研究代表機関> 九州大学

<研究分担機関> 名古屋大学 京都大学 茨城大学 国立研究開発法人海洋研究開発機構 近畿大学

2019年5月

I. 成果の概要	
1. はじめに (研究背景等)	1
2. 研究開発目的	1
3. 研究開発の方法	2
4. 結果及び考察	6
5. 本研究により得られた主な成果	14
6. 研究成果の主な発表状況	15
7. 研究者略歷	24
Ⅱ. 成果の詳細	
Ⅱ-1 数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評	空価25
要旨	25
1. はじめに	25
2. 研究開発目的	26
3. 研究開発方法	27
4. 結果及び考察	30
5. 本研究により得られた成果	49
6. 国際共同研究等の状況	49
7. 研究成果の発表状況	50
8. 引用文献	55
Ⅱ-2 数値モデルを用いた短寿命微量気体によろ気候変動	の評価 58
要旨	58
1. はじめに	58
2. 研究開発目的	59
3. 研究開発方法	59
4. 結果及び考察	64
5. 本研究により得られた成果	79
6. 国際共同研究等の状況	80
7.研究成果の発表状況	80
8. 引用文献	82
Ⅱ-3 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康への	ラインパクト評価84
要旨	84
1. はじめに	84
2. 研究開発目的	85
3. 研究開発方法	85
4. 結果及び考察	91
5. 本研究により得られた成果	108
6. 国際共同研究等の状況	109
7. 研究成果の発表状況	109
8. 引用文献	111

$\Pi - 4$	短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパク	ト評価 112
要旨	2. 1	112
1.	はじめに	112
2.	研究開発目的	112
3.	研究開発方法	113
4.	結果及び考察	122
5.	本研究により得られた成果	137
6.	国際共同研究等の状況	137
7.	研究成果の発表状況	138
8.	引用文献	139
II - 5	5 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価	
要旨	2 1	140
1.	はじめに	140
2.	研究開発目的	140
3.	研究開発方法	141
4.	結果及び考察	144
5.	本研究により得られた成果	160
6.	国際共同研究等の状況	160
7.	研究成果の発表状況	160
8.	引用文献	161
$\Pi - 6$	5 短寿命大気汚染物質・雲・降水相互作用に伴う領域気候変動	の評価 162
要旨	2	162
1.	はじめに	162
2.	研究開発目的	163
3.	研究開発方法	163
4.	結果及び考察	171
5.	本研究により得られた成果	190
6.	国際共同研究等の状況	191
7.	研究成果の発表状況	191
8.	引用文献	192
Ⅲ. 英文	CAbstract	

I. 成果の概要

課題名 S-12-3 数値モデルによる気候・環境変動評価と影響評価

課題代表者名 竹村 俊彦 (九州大学応用力学研究所 教授)

研究実施期間 平成26~30年度

累計予算額 255,085千円
 (うち平成26年度:54,270千円、平成27年度:51,556千円、平成28年度:48,978千円、
 平成29年度:51,426千円、平成30年度:48,855千円)
 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 短寿命気候汚染物質、SLCP、エアロゾル、オゾン、気候変動、健康影響、農業影響

研究体制

- (1)数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評価(九州大学)
- (2)数値モデルを用いた短寿命微量気体による気候変動の評価(名古屋大学)
- (3) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康へのインパクト評価(京都大学)
- (4) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパクト評価(茨城大学)
- (5) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価(国立研究開発法人海洋研究開発機構)
- (6) 短寿命大気汚染物質・雲・降水相互作用に伴う領域気候変動の評価(近畿大学)

1. はじめに(研究背景等)

パリ協定においては、世界の平均地上気温の上昇を産業革命前の水準と比較して2℃以下に保ち、その上昇 を1.5℃に抑える努力をすることを目的としているが、CO₂などの長寿命の温室効果ガスの排出削減のみでは、今 後数十年の間は全球平均気温の上昇抑制は非常に困難である。そこで、CO₂よりも大気寿命が短くて温室効果 をもたらす物質である短寿命気候汚染物質(SLCPs)を減らすことが、CO₂削減の効果が明らかになる前に地球温 暖化を軽減する方法として模索されている。それは大気質の改善をもたらすことにもなるため、コベネフィットの観 点からも定量的に検討されるべきであることは明白であり、例えば国際的には気候と大気浄化の国際パートナー シップ(Climate and Clean Air Coalition; CCAC)において、研究者および政策決定者がSLCPsの削減を検討して 実行に移しつつある。

大気上端の放射強制力が正である短寿命物質だけではなく、負の放射強制力である物質を含めて、全球規模の濃度分布の把握および放射強制力の見積もりは、これまでの数多くの研究においてなされてきた。しかし、温室効果気体による気候変動・健康影響・農業分野への影響などは研究がなされてきたものの、短寿命物質によるそれらの影響評価が統合的になされた例はない。なお、S-12プロジェクトでは、放射強制力の正負に関係なく、短寿命気候汚染物質(SLCPs)という用語を利用する。

以上のような背景をもとに、本研究課題の参画研究者などが中心となり、全球エアロゾル気候モデル SPRINTARSや全球化学気候モデルCHASERの開発を進め、それらを含む地球システムモデルMIROC-ESMおよ びMIROC-ESM-CHEMの開発が進められてきた。これら数値モデルを用いたSLCPsの全球分布および放射強制 力の計算を行い、その研究結果は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次および第5次評価報告書へ引 用されるなどの成果を収めてきた。SLCPsの輸送過程および気候影響を陽に計算して研究を進めるためには、 CPU・メモリともに大規模なシステムが必要であるが、利用可能な計算機リソースも着実に増加してきたことから、 これまで開発を進めてきた上記の数値モデルを利用したSLCPsの影響評価を実施する環境が整ってきた。

2. 研究開発目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)などにおいて、人為起源エアロゾル全体の地球平均放射強制力は負 であると評価している。したがって、コベネフィットを目指した単純な人為起源エアロゾル関連排出量の削減は、地 球温暖化を加速する可能性があることに留意する必要がある。このことを踏まえて、本研究課題では、標準的な 排出量インベントリから排出量を増減させたデータを与えて、エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSおよび 化学気候モデルMIROC-CHASERによるシミュレーションを実施する。その結果を解析し、SLCPs関連排出量の変 化に対する気象場の感度を定量的に評価する。このシミュレーションの基本部分は、国際的なモデル相互比較プ ロジェクトのプロトコルに準拠しているため、国際的な研究コミュニテイーにも広く貢献するものでもある。

健康影響評価では、SLCPsの濃度変化による健康へのインパクトを評価するために、SLCPsのうち特に健康影響が懸念されるPM2.5とオゾンの長期曝露による健康影響に関する疫学知見を整理統合し、非線形性も含めた 曝露---反応関数を作成する。その上で、PM2.5およびオゾン濃度のシミュレーション結果に基づき、健康影響評価 を行う。農作物収量影響評価では、SLCPsが作物収量に及ぼす影響について、対流圏オゾンによる直接的影響 に加え、SLCPsによる気候変動を介した間接的影響も含めて統合的に評価する。評価の高精度化のために、水 稲収量モデルMATCROの全球モデル化およびオゾン影響プロセスの導入を行う。

以上の研究をベースとして、エアロゾル気候モデル・化学気候モデル両者が含まれるMIROC-ESMを用いて、 S-12プロジェクトで新たに開発するSLCPsに関する複数の排出量シナリオに沿った将来予測シミュレーションを実施する。その結果を、気候変動・健康影響・農作物収量影響の観点から解析し、SLCPsの削減効果を定量化して、 大気汚染および地球温暖化の緩和策を検討する際の科学的な情報を統合的に提供することが、本研究課題の 最終目的である。

3. 研究開発の方法

(1)数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評価

これまでに研究代表者が中心となり開発してきた全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSを使用する。 日本の全球大気海洋結合モデルMIROCに、エアロゾル関係の輸送・気候影響の各過程を組み込む形をとってい る。トレーサーとして陽に計算される物質は、硫酸塩・ブラックカーボン・有機エアロゾル・土壌粒子・海塩粒子と、 硫酸塩の前駆気体である二酸化硫黄と硫化ジメチルである。輸送過程には、発生・移流・対流・拡散・化学反応・ 湿性沈着・乾性沈着が含まれる。発生過程では、乾燥域から舞い上がる鉱物粒子や、海面から発生する海塩粒 子などの自然起源については、風速等の気象条件に依存して計算の各時間ステップ・各空間格子点で計算され る。一方、人間活動起源物質や、自然起源でも気象条件では表現できない発生源(火山など)からの物質につい ては、インベントリデータを入力する。湿性沈着には、上方から落下してくる雨滴や雪に捕捉される過程(wash out) や、エアロゾルや前駆物質を溶解したり凝結核・水晶核の役割をしたエアロゾルを取り込んだりした雲が、雨滴・ 雪に成長して結果的に除去される過程(rain out)がある。乾性沈着は、大気境界層内の乱流により物質が地表 面に落下する過程であり、エアロゾルの場合は重力落下も乾性沈着の1つに含まれる。化学反応に関しては、 SPRINTARS自体には硫黄系のみを含めており、例えば化石燃料起源の二酸化硫黄の発生量のインベントリデー タを入力し、気温や酸化剤濃度に依存して酸化過程を計算して、硫酸塩エアロゾル濃度を陽に計算する。酸化剤 であるOHラジカル・オゾン・過酸化水素の時空間分布データは、同じくMIROCと結合しているS-12プロジェクトの テーマ3のサブテーマ2で用いられる化学気候モデルCHASERの計算結果を利用する。

計算されたエアロゾル濃度の時空間分布は、気候モデル内の関連過程と相互作用することにより、エアロゾル の気候に対する影響の計算に利用される。エアロゾルの気候に対する影響のメカニズムは2つに大別され、1つは エアロゾルが太陽放射・赤外放射を散乱・吸収することにより放射収支に変化をもたらす「エアロゾル・放射相互 作用」である。この相互作用の気候モデル内での取り扱いは、組成ごとのエアロゾル濃度(質量混合比)を大気放 射過程へ渡すことによる。もう1つは、エアロゾルが雲の凝結核や氷晶核となる「エアロゾル・雲相互作用」である。 これは、組成ごとのエアロゾル数濃度に依存した雲粒・氷晶数濃度を計算し、それを用いて雲粒・氷晶粒径を計 算して大気放射過程において雲アルベドの変化を計算すること、また、雲粒・氷晶数濃度依存のautoconversion (雲から降水への変換)を雲・降水過程で計算することにより、雲水量・雲氷量・降水量・降雪量を計算することに より気候モデル内で表現される。これらの過程を経て、気温などの気象要素の変化が計算されることになる。

MIROC-SPRINTARSによるシミュレーションの空間分解能は、その用途に応じて可変であり、利用可能な計算 機リソースや必要な積分時間に応じて決める。本研究課題では、国立研究開発法人国立環境研究所のスーパー コンピュータシステムを利用した。本研究課題では、大別して以下の2つの実験セットを実施した。

● 2010年を基準としたアジア域での1980年の排出量推定を与えたシミュレーション

モデル相互比較プロジェクト1つである HTAP2 (Hemispheric Transport of Air Pollution Phase II) で利用され た EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) が取りまとめた2010年を想定した標準排 出量インベントリをベースとして、S-12プロジェクトのテーマ1から提供された中国・東アジア・アジア全域での 2010年に対する1980年の二酸化硫黄(SO₂)・ブラックカーボン(BC)・有機エアロゾル(OC)の排出量の推定比 を用いた実験をMIROC-SPRINTARSIこより実施した。森林火災・焼き畑起源の排出量データとして、Global Fire Emissions Database (GFED) を用いる。水平空間分解能はT213(全球を640x320に分割;緯度経度約0.56 度)・鉛直56層(シグマ座標)であり、全球エアロゾルモデルとしては高分解能である。この結果から、エアロゾ ルの濃度や放射強制力の30年間の変化を解析する。

● エアロゾル関連排出量を増減させた大気海洋結合モデルによる気象場変化の感度実験 エアロゾル関連排出量の変化に伴う気象場の変動を定量的に解析するために、MIROC-SPRINTARSを用いた 感度実験を行った。特に、影響が最も大きい人為起源エアロゾルである硫酸塩と、国際的にその気候影響の 定量的評価が待たれているブラックカーボン(BC)に注目した実験を行った。実験は、研究代表者も参画してい るモデル相互比較プロジェクトの1つである PDRMIP (Precipitation Driver Response Model Intercomparison Project)の実験設定をエアロゾルについて大幅に拡張したものであり、BCおよび硫酸塩の前駆気体である二 酸化硫黄(SO2)の排出量をそれぞれ全球一様に 0,0.1,0.3,0.5,0.8,1.5,2,5,10倍にした。PDRMIPでは、エア ロゾルによる気候変動の傾向をできるだけ明確に解析する目的で、硫酸塩濃度もしくは二酸化硫黄排出量を5 倍、およびBCの排出量を10倍という非現実的な実験のみが実施された。本研究課題では、現実的な排出量変 化の範囲で複数の設定をすることにより、環境政策へ実際に活用できるような研究成果を創出するようにした。 モデル相互比較とは異なり、単一モデルによる感度実験の利点は、モデル間で異なる物理過程の様々なスキ ームの違いによる不確実性が含まれず、現象そのもののメカニズムを解明しやすくできるところにある。エアロ ゾル関連排出量の基準は、HTAP2での2010年を想定した排出量インベントリとする。排出量を様々な倍率で変 化させた実験は、2種類のモデルにより実施した。1つは、海面水温と海氷は外部データであるHadISSTデータ を与える大気大循環モデルによる実験であり、エアロゾルによる気候変動のうち「速い応答(rapid adjustment)」 のみを抽出するために実施する。もう1つは、海洋大循環モデルを含めた大気海洋結合モデルによる実験であ り、こちらには大気・海洋間のエネルギー交換も含まれるため、「速い応答」と「遅い応答(slow response)」の両 方が含まれる。「遅い応答」は、大気海洋結合モデルの結果と大気モデルによる結果との差として解析する。大 気モデルによる実験は、気候値的な実験であるため積分期間は15年間とする一方、大気海洋結合モデルによ る実験は、平衡実験であるため積分期間を100年間とし、後半50年間を解析対象とした。長期積分が必要であ り、かつ組成ごとに様々排出量を変化させる実験を行うため、水平空間分解能はT85(全球を256x128に分割; 緯度経度約1.4度)・鉛直40層(ハイブリッド座標)である。

(2)数値モデルを用いた短寿命微量気体による気候変動の評価

本研究課題は、化学・エアロゾル気候モデルおよび地球システムモデルを用い、SLCPsにおけるオゾン等の微 量気体成分や、大気化学過程とエアロゾルとの相互作用に着目しながら、過去から現在までの気候変動につい ての定量的な知見を得るとともに、将来のSLCPs削減策について、その効果・影響を総合的に診断するものであ る。最初に、化学・エアロゾル気候モデルのCHASERの精緻化・改良を行い、2000年代を対象とした診断実験を 実施するとともに、国際モデル相互比較プロジェクトであるCCMI(Chemistry-Climate Model Initiative)やHTAP2 (Hemispheric Transport of Atmospheric Pollutants: Phase-2)の各実験を実施した。その際、モデル水平解像度 に起因する不確実性の評価も行った。HTAP2実験の結果を解析することによって、各主要汚染域の排出量削減 が東アジア域の地表オゾン、PM2.5濃度に与える影響を評価した。さらに、東アジア域の排出量削減効果につい て、放射強制力の評価を行い、過去30年間のアジア域における排出量変化が及ぼす影響を推定した。その後、 排出量削減に対する各種SLCPsの全球分布変動やその気候影響を評価するため、SLCPsのうち、とくに対流圏 オゾンとメタンの変動をターゲットとした気候感度実験(平衡気候応答実験)を実施し、結果を解析した。また、成 層圏・対流圏オゾンの長期トレンドを再現する実験を実施し、その要因の定量化を行った。そして、S-12プロジェ クトによって構築されたシナリオによる将来予測実験を解析し、地表オゾン濃度、対流圏オゾン量・エアロゾル・放 射強制力、およびメタン濃度について、将来変動とその要因をシナリオごとに詳しく評価した。その際、テーマ2と 連携しながら、S-12シナリオの構築・グリッド化に貢献した。

(3) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康へのインパクト評価

SLCPs排出削減に伴い、PM2.5やオゾンなどの人に健康影響を及ぼす大気汚染物質濃度が変動する。濃度変動に伴い、予測される健康影響を定量的に評価するために系統的文献レビューを行い、過去の疫学知見に基づき大気汚染物質濃度-健康影響関数を構築した。関数は、線形モデルだけでなく、非線形を仮定した柔軟なモデルについても検討した。この関数から導出されたリスク比と、S-12プロジェクトのテーマ3内で推定されたPM2.5, オゾン濃度の分布情報から、その地域の死亡数に対して大気汚染物質が寄与する割合を表す集団寄与割合 (PAF)を算出し、そのPAFにその地域の死亡数を乗ずることにより、大気汚染が寄与する死亡数を算出し、健康 影響の評価指標とした。また、死亡時の年齢を考慮した大気汚染物質の寄与する損失生存年数(Years Life Lost, YLL)も算出した。

上記の関数と影響評価指標を用い、SLCPsの各組成を変動させた場合の健康影響評価を行った。BC, OC, SO₂それぞれの排出量を2010年レベルの0.3, 0.5, 0.8, 2, 5倍に増減した場合のPM2.5濃度の分布から、それぞれの寄与死亡数、寄与YLLを推定した。同様に、NOx, CO, VOCを0.2~10倍に変動させた場合のオゾン濃度に寄与する死亡数、YLLを推定して、2010年のものと比較した。

次に、テーマ2で構築されたSLCPsのS-12シナリオ(Reference(なりゆきシナリオ), EoPmid(除去対策Midシナ リオ),除去対策Mid+2度目標シナリオ(EoPmid-CCSBLD, EoPmid-RESTRT, EoPmid-RESBLDTRT), EoPmax (除去対策Maxシナリオ))別に大気汚染物質寄与死亡数、寄与YLLを算出し、なりゆきシナリオとの差をシナリオ 間で比較し、健康という観点から、SLCP削減パスに最も最適なシナリオを探索した。

(4) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパクト評価

全球モデルの開発においては、まずモデルの2つの主モジュール(発育推計モジュール及び同化産物分配モジ ュール)のパラメータをグローバルに決定した。パラメータの決定には全球気候データ、全球の作物暦データ、グロ ーバルに収集した水稲生育データを用いた。また本研究課題で用いる水稲収量推計モデルMATCRO-Riceは、 主として水稲にとって好環境条件の日本の水田圃場(つくば市真瀬)の生育データを用いて開発され、グローバル にみたときに各地で生じている水ストレス・窒素ストレス・高温ストレス・低温ストレスといった様々な生育ストレス のプロセスが考慮されていなかった。したがって、MATCRO-Riceのグローバル化にあたっては、これらのプロセ スを考慮する改良も行った。

大気中オゾンが作物生産に影響を及ぼすことは古くから知られており、この影響についてシミュレーションモデ ルを用いて定量的に評価する研究は古くから行われてきた。本研究課題では、オゾン影響のみならず、将来の気 温変化等の気候変動の影響も同時に扱う必要があるため、Collatz+O₃FB型モデル(気孔を通したオゾンの植物体 への取り込みを考慮し、さらに光合成モデルとカップルしたモデル)を基礎とすることにした。MATCRO-Riceは Collatzの光合成-気孔モデルを用いており、これを改良することでオゾン影響プロセスを組み込むことができる。 しかしながら、どのようにオゾン影響プロセスを組み込むべきかについては、よくわかっていなかった。そこで本研 究課題では、既存の研究および実験データを解析することにより、オゾン影響プロセスの組み込みの仕方につい て検討し、モデル化をおこなった。

大気エアロゾルは日射を遮り、これが増加すると、日射エネルギーを利用して光合成を行なっている作物の収 量は一般に低下すると考えられる。そこで本研究課題では、主要エアロゾルであるブラックカーボン(BC)と二酸 化硫黄(以下SO₂)の排出量を変化させた時に収量がどのように変化するかを定量的に評価した。

最後に、サブテーマ1および5より提供された様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響を 推計した。水稲収量の推計には本研究課題で開発したグローバル水稲収量推計モデルMATCROを用い、収量推 計は2011-2049年の各年で実施した。

(5) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価

本研究課題では、SLCPsの複雑な発生・輸送・変質・沈着過程を陽に取り扱うことのできる地球システムモデル MIROC-ESM-CHEMを用いて、様々な気候変動駆動要因の切り分けを目的とした一連の数値シミュレーションを 実施した。境界条件および大気化学・エアロゾル過程を含む全球気候モデルのセットアップを行い、①産業革命 前から現在に至る史実的な歴史気候再現実験をベースライン・シミュレーションとし、それと比較するシミュレーシ ョンとして、②人為起源エアロゾルの濃度を産業革命前で固定したシミュレーション、さらに③それに加えてオゾン の濃度を産業革命前で固定したシミュレーションに関して、それぞれ複数メンバー(n=3)のアンサンブル・シミュレ ーションを実施した。予測結果の不確実性に関する情報を得るとともに、SLCPsの変化によってもたらされる気候 変動のうち、とくに不確実性が大きく定量的な評価が難しいと予想される水循環の変動(降水量をはじめ、海面・ 陸面における熱・水収支等)が、どの程度の堅牢性を持ったシグナルとして現れるかという視点で解析を行った。

さらに、将来に関して、RCP4.5シナリオの2021-2050年をベースライン・シミュレーションとし、それと比較するシ ミュレーションとして、化石燃料・木質燃料起源のSO2、BC、OCの排出量を、RCP4.5比で半分にしたシミュレーショ ンおよびRCP4.5比で2倍にしたシミュレーションに関して、それぞれ複数メンバー(n=3)のアンサンブル・シミュレー ションを実施し、その結果をテーマ内で共有して議論を行うとともに、より現実的なSLCPs削減経路シナリオを用 いたシミュレーションを行うための基礎を構築した。

その後、地球システムモデルを構成する物理気候モデルとエアロゾル輸送モデルを、S-12プロジェクトのテー マ3サブテーマ1で用いているものと同様の最新版に更新し、将来予測シミュレーションを実施するための準備を 行った。これにより、水循環を含む物理気候システムの再現性が向上した最新版の物理気候モデルを用いること が可能となった。さらに、S-12プロジェクトのテーマ2より提供される新しい将来排出シナリオを用いた数値シミュレ ーションを行うために欠かせない硝酸塩エアロゾルを扱える新しいエアロゾルモデルへの更新も実施した。モデル の更新に伴って、エアロゾルと雲の相互作用プロセスがより精緻に表現できるようになったほか、下層雲の分布 が大きく改善され、旧バージョンのモデルに特有の地表面気温や海面気圧等のバイアスが軽減され、予測結果 の信頼度が全体的に向上した。

最後に、2010~2049年の40年間を対象に、S-12の7種類のシナリオを用いてアンサンブル将来予測シミュレー ションを実施した。7メンバーのアンサンブル将来予測シミュレーションの結果を用いることにより、各種類のシナリ オで生じる気候変動やその影響の違いを定量的に評価した。

(6) 短寿命大気汚染物質・雲・降水相互作用に伴う領域気候変動の評価

エアロゾルの雲量や降水量、およびそのフィードバックに伴う領域気候変動を調べるために複数のシナリオに 基づいたMIROC-ESM-CHEMを用いたシミュレーションを行った。大気中にエアロゾルが存在することで太陽光を 散乱・吸収し、エネルギー収支を変化させる効果をエアロゾル・放射相互作用と呼ぶ。また、エアロゾルは複数の 過程を通して気候に影響を及ぼすことが知られており、エアロゾル・雲相互作用と呼ばれる雲を介した気候への 影響もある。MIROC-ESM-CHEMではこれらの効果によりエアロゾルが放射収支の変化を通して循環場に影響を 及ぼす過程がシミュレーションされる。

温室効果気体濃度やエアロゾル排出量、太陽活動などの外部強制力を気候モデルに与えることで、気候変化 の様子を再現するシミュレーションを実施すると気候がどのように変化するか知ることができる。過去における人 為起源エアロゾルの影響を調査するため、1850年から2005年の期間で、全ての強制力を考慮したシミュレーショ ンと人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を1850年に固定したシミュレーションを行った。2種類のシミュレーショ ンの比較から、人為起源エアロゾルの影響を見積もった。

今後は、東アジアの人為起源エアロゾル排出量も減少していくことが予想される。このため、MIROC-ESMによる将来の人為起源エアロゾル漸増・漸減実験を実施した。RCP4.5シナリオ、人為起源エアロゾル前駆物質排出量をゼロとしたシナリオ、RCP4.5シナリオを基準に人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分、2倍にしたシナリオによるシミュレーション結果から、東アジアにおける人為起源エアロゾルの影響を調査した。

S-12プロジェクトのテーマ2で作成された低炭素対策とSLCPs・大気汚染物質対策の組み合わせによる排出シ ナリオに沿ったシミュレーションを実施した。各国・各部門・各物質の排出経路の様々な対策の組み合わせを試算 し、7種類の排出シナリオを準備した。1つは、現状の政策・対策の傾向が継続するような基準シナリオ(Ref)で、こ のシナリオを基準として他のシナリオでの対策の効果を評価することができる。次に、CO2排出経路はRefと同じで、 脱硫装置や脱硝装置の導入など除去対策の導入強度のみを変化させた2種類のシナリオを用意した。Refシナリ オに対して除去装置対策を最大限に強化し、発電プラント・産業プラントおよび運輸に対して、2050年までに全世 界で除去装置100%導入を想定したシナリオ(EoPmax)と除去装置対策を2050年までに先進国で100%、途上国 で50%程度の導入を想定したシナリオ(EoPmid)の2つである。以上の3種類のシナリオは2℃目標に向けた低炭素 対策は考慮していない。大気汚染対策と同時に2℃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 のシナリオを2D-EoPmax-CCSBLD、2D-EoPmid-CCSBLD、2D-EoPmid-RESTRT、2D-EoPmid-RESBLDTRTの 4種類を作成した。2Dは2℃目標の達成を目指す対策であることを示し、CCSは特に発電部門で再生可能エネル ギーよりもCCS付き石炭火力発電を優先的に導入、RESは発電部門でCCS付き石炭火力発電よりも再生可能エ ネルギーの大幅促進を優先的に導入するシナリオである。BLDは民生・業務部門で2050年までに先進国だけで なく途上国もオール電化に近づき、電化できない部分は石炭・灯油・バイオマスではなくガスへシフト、TRTは特に 運輸部門で、2040年以降はEV車が大幅に普及するようなシナリオを想定している。

4. 結果及び考察

(1)数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評価

本研究課題では現実的なエアロゾル関連排出量の変化による気候変化を解明するための独自の実験を実施 した。図1は、硫酸塩とBCの増減それぞれの実験について、地球平均の放射強制力に対する地上気温変化を示 しており、代表的な結果である。気候強制因子による地上気温の変化は、気候感度と瞬時放射強制力(気象場の 変化を含まない気候強制因子による散乱・吸収のみでの放射収支の変化)から伝統的・便宜的に推定されてきた。 BC排出量の変化に伴う瞬時放射強制力は、IPCC報告書等でも硫酸塩と符号が逆で大きさが同程度であると評 価されているため、気温変化への影響も大きいであろうと想定されていた。それは、硫酸塩とBCの気候感度が同 じであるという前提によって成立する。しかし、図1の左図は、BC排出量の現実的な変化の範囲内において、BC 排出量が減少した場合の地上気温の低下は、想定されていたよりもはるかに小さいことを明示している。つまり、 硫酸塩エアロゾルとBCの気候感度は大きく異なることを示唆している。MIROC-SPRINTARSにより計算された気 候感度パラメータ(図1の左図の回帰直線の傾き)は、硫酸塩エアロゾルは1.3 °C W⁻¹ m²である一方、BCはその約 8分の1である0.16 °C W⁻¹ m²という結果を得た。このことは、上述のような、硫酸塩とBCの気候感度は暗に同等で あると仮定した上で瞬時放射強制力を気候影響評価の指標として用いることは正しくないことを意味している。

BC排出量変化に対する平均地上気温の弱い応答の理由は、シミュレーション結果を解析することにより、瞬時



図1 MIROC-SPRINTARSにより計算された(青)硫酸塩(赤)BCの(左)瞬時放射強制力もしくは(右)有効放 射強制力と地上気温変化の関係。各点は各排出量変化率によるシミュレーション結果の全球平均値を示し、 エラーバーは年平均値の標準偏差を示す。

放射強制力が速い応答によって大部分が相殺されることにあることがわかった。この相殺は、大気上端における 晴天放射フラックスの変化と雲放射効果の変化の2つで構成されている。BCの排出量が増加した場合、瞬間放射 強制力に伴い大気中での放射加熱を強めるため、飽和水蒸気圧の上昇で大気中の水蒸気量が増加して、水蒸 気による赤外放射の射出が強まる、つまり放射冷却が強まることになる(晴天放射フラックスの変化)。また、BC 排出量が増加すると大気が安定化し、低層雲が増加して、中・高層雲が減少するため、結果として大気上端での 外向き太陽放射および赤外放射が増加することになる(雲放射効果の変化)。BCの排出量が減少した場合はこ れらの逆の現象が起き、やはり瞬時放射強制力を相殺する方向に働くことになる。また、大気中でも、顕熱および 潜熱の変化は瞬時放射強制力を打ち消す方向に働く。これらの結果、温度変化を伴う遅い応答を駆動するため に必要なエネルギー不均衡は、一部しか残されていないことになる。対照的に、硫酸塩の瞬時放射強制力は、大 気上端と地表面とでほぼ同じ、つまり大気中での放射加熱/冷却をほとんど引き起こさない。その場合、水蒸気 量変化に伴う晴天放射フラックスはほとんど変わらない。一方、硫酸塩増減によって引き起こされる瞬時放射強 制力は、硫酸塩の雲の凝結核の役割を通じた水雲に対するエアロゾル・雲相互作用からなる雲の放射効果によ って強化される。大気中でも、硫酸塩の増減による放射加熱/冷却をほとんど引き起こさないため、顕熱および 潜熱の変化もほとんどない。硫酸塩の場合には、大気上端でのエネルギー不均衡がエアロゾル・雲相互作用に よる放射強制力によって増大し、その結果、海洋とのエネルギー交換を意味する遅い応答によっても完全に相殺 されない。これにより、硫酸塩の場合は、はっきりとした気温変化が生じていることがわかる。一方、BCの場合は、 瞬時放射強制力・速い応答によるエネルギー収支変化・遅い応答によるエネルギー収支変化を統合すると、大気 上端ではほぼバランスする。これが、BCによる気温変化が非常に小さいことの理由であると考えられる。

なお、モデル相互比較PDRMIPにおいて、MIROC-SPRINTARSによってシミュレートされたSO₂排出量5倍に対 する気温変化は、複数のモデル間での不確実性の範囲内である。本研究課題における結果は、現実的な範囲内 でSO₂とBCの排出量を変化させて、それぞれによる地上気温の感度を定量化したものであり、大気上端での瞬時 放射強制力から予想されるBCの地上気温変化の応答が、これまで考えられてきたよりも弱いことを明確に示した。 さらにこの変化により、瞬時放射強制力が与えられることをきっかけとして、大気上端のエネルギー収支だけの変 化ではなく、大気中および潜熱と顕熱フラックスを含む地表面でもエネルギー収支の変化が起こるため、降水量 などの別の気象要素にも影響を及ぼす。BCと硫酸塩の降水量変化に与える影響の差異については、本研究課 題にて若干の解析を実施したが、詳細は今後の研究において解明していく必要がある。

本研究課題の結果は、国連環境計画(UNEP)の下でSLCPsに関する総合的な科学的評価に基づいて活動を 行っているCCACにおいて、BCに対する取り組みを再検討する必要のあることを示唆している。CCACが活動の 初期段階で取りまとめた評価報告書では、瞬時放射強制当たりの気温変化(つまり気候感度)は、すべてのエア ロゾル種に対して、CO2のそれと同じであると仮定されている。その仮定に基づいて、BCの排出量削減に伴う気 温上昇の緩和の見通しが示されて、広く多方面での活動の根拠として利用されているのが現状である。しかし、こ の仮定は、本研究課題で明確となったBC排出量の変化に対する気温変化の感度が弱いことを考慮していないた め、BC排出量の削減による地球温暖化の緩和量を過大評価することになる。人間の健康への影響を回避するた めにBCの削減が必須であることを考えると、本研究課題の結果は、パリ協定の目標達成へ向けて、二酸化炭素・ メタン・亜酸化窒素・ハロカーボンなどの長寿命温室効果気体や、メタン・対流圏オゾン・ハイドロフルオロカーボン といった他のSLCPsの削減を一層促進しなければならないことを提示している。

以上の議論は、BCの排出量変化に対するエネルギー収支の変化を実質的に調整する「速い応答」を検討する ことの重要性を強調している。これは、IPCC AR5において定義されているような、瞬時放射強制と速い応答を含 む「有効放射強制力」が気温変化のより良い予測因子であることを提唱することとなる。図1の右図は、有効放射 強制力に対する地上気温変化を示しているが、MIROC-SPRINTARSによってシミュレートされた気候感度パラメ ータ(図1の右図の回帰直線の傾き)は、硫酸塩とBCでそれぞれ0.43, 0.31°C W⁻¹ m²であり、両者の差は、瞬間放 射強制力を指標として使用した場合よりも小さくなっている。

以上、地球平均の状態について議論したが、SLCPsは大気中で短寿命であるが故に、時空間分布が極めて不均一である。感度実験の結果は、特に北半球の中緯度および高緯度で地表気温の大きな変化をもたらす可能性 を示している。SLCPsの組成ごとに地域規模の気候変動に与える影響を評価するためには、今後の研究での詳 細な分析が必要になる。特に、直接的な災害をもたらし得る極端現象に対するSLCPsの定量的影響評価は、気 候変動の緩和策・適応策を進めていく上で必要な科学的情報である。

(2)数値モデルを用いた短寿命微量気体による気候変動の評価

CCMI実験による微量成分の全球分布変動の要因分離

H27~28年度ではオゾン・エアロゾル前駆物質排出量変動の影響を分離・定量化する実験を実施した。地表 オゾン濃度については、北米・欧州での環境規制等による前駆気体排出量削減により、年平均で2 ppbv以上 のオゾン濃度減少がみられる。一方、アジア域では、中国・インド域での排出量増加を反映し、5-10 pobyの強 いオゾン増加が確認された。地表オゾン分布にみられるこのような変動パターンについては、やはり前駆物質 排出量の変動が支配的な要因であるが、同期間に起きた成層圏オゾン減少や気象場変化(温暖化)による影 響も少なからず(年平均で±1 ppbv程度)寄与していることが示された。また、このようなオゾン変動プロセスを 反映し、この間のオゾン変動による放射強制力(0.074 W m⁻²)については、前駆気体排出量の変化による寄与 (64%)だけでなく、気象場・成層圏オゾンの各変化も重要な寄与(36%)を及ぼしていることが推定された。

CCMIの将来予測実験では、対流圏オゾンやエアロゾルおよびメタンがどのような加熱・冷却を及ぼしている か整理し、温暖化による大気循環変動にともなう成層圏から対流圏へのオゾン輸送増加トレンドにあることも定 量評価された。また、過去50年間におけるメタン増加傾向の各要因を定量化し、メタンのエミッションの増加だ けでなく、大気中でメタンの存在寿命を支配するOHラジカルの濃度変動にも大きく寄与していることが明らかに なった。CCMI実験で明らかになった対流圏オゾンの変動機構については、2000年以降の近年に着目した追加 実験を実施した。この結果、2005年以降で衛星観測等により確認される対流圏オゾン量の正のトレンドは、地 表でのNOx排出量の増加だけでなく、成層圏からのオゾン降下量の増加、メタン増加(メタン増加はオゾン生成 を促進)、航空機からのNOx排出量の増加が重要な役割を演じていることが定量的に示された。

2) アジア域エミッション20%削減感度実験

SLCPs削減シナリオの構築のための基礎知見とするため、アジア域のエミッションを一律に20%削減する感 度実験を実施した。この結果、東アジア域において年平均で3ppbv以上のオゾン濃度低減や、15µg m⁻³以上の PM2.5濃度低減が期待できることがわかった。しかしながら、放射強制力の観点では、BCやオゾンなどの加熱 性物質の削減による冷却が期待できる一方で、硫酸塩・硝酸塩などの冷却性物質の減少による加熱も同時に 発生し、有意な温暖化低減とはならないことが判明した。このような結果はテーマ2とも共有し、S-12シナリオの 策定に貢献した。

3) オゾン前駆気体エミッションの変化に対する放射強制力と気候平衡応答

対流圏オゾンは有害物質であり、重要な温室効果気体でもあるため、前駆気体の排出削減により、濃度低 減が好ましいと考えられる。ここでは、オゾン前駆気体として窒素酸化物(NOx)および一酸化炭素(CO)に着目



(direct) Radiative forcing responses to:

図2 NOxおよびCOのエミッションの段階的変化に対する各種放射強制力の評価。

し、排出量変化に対する放射強制力の感度を精査した(図2)。2008年の排出量を1とし、0~2倍の範囲で段階 的に排出量を変化させる実験の結果によれば、NOx排出量を削減していく場合、対流圏オゾンの減少で冷却 が期待できる一方で、NOx排出にともなって大気酸化能を支配するOHラジカルが減少し、メタンが増加する傾 向にあることが明らかになった。とくに50%以上の削減幅の場合には、オゾン減少による負の放射強制力(冷却) をメタン増加による正の放射強制力(加熱)が上回ることとなり、NOx削減は付加的な温暖化を引き起こしてしま うことがわかった。ただし、同時にCOや揮発性有機化合物(VOCs)の削減を想定する場合には、メタン・COとも に減少が期待でき、NOx削減による加熱降下を部分的に打ち消すことが可能であるが、その効果は相対的に 弱く、40%以上の強いNOx削減の場合には、正味の温暖化となってしまうことが示された。

次に、CHASER(MIROC-ESM)を用い、オゾンの前駆気体の排出量削減に対する平衡気候応答実験を実施 し、微量気体の全球的な排出量削減がどのような気候影響を及ぼすか評価した。この結果、とくにNOx排出量 のみを削減対象とした場合、両半球の高緯度・極域や中緯度(北米や日本付近)で顕著な昇温が目立ち、オゾ ン前駆気体の排出量削減による全球平均の気温変化は、NOxのみ対象の場合、+0.10°C、NOx・CO・VOCsを 対象とした場合、+0.04°Cと、いずれも昇温(温暖化)が確認された。このような昇温は、基本的にはメタン(CH4) の濃度変化によるものであり、オゾンの削減効果だけでなくメタンの濃度変化にも十分注意を払いながら予測・ 検討する必要があることが明らかとなった。

4) S-12共通シナリオによる将来予測実験

最終年度では、テーマ2が構築した排出量削減シナリオに基づき、将来気候の予測実験の結果解析を行った。除去対策による削減を最大限強化するシナリオ(EoPmax)では、インド・中国において、年間平均で10 ppbv 以上のオゾン減少が期待でき、除去対策に加えて、2度目標達成努力を導入した場合には、15 ppbv以上のオ ゾン減少がアジア域に加えて北米域でも確認でき、北半球中緯度のリモート域では5-10ppbvの顕著なオゾン 減少となることがわかった。アジア域では、除去対策(EoPmax)のみの場合、オゾン減少は主にインドや中国に 限定される一方で、2度目標達成努力を含むシナリオでは、日本を含めて10ppbv以上のオゾン濃度減少が期 待できる結果となった。2度目標達成シナリオでは、メタンの濃度減少が想定されており、メタン減少によるオゾ ン生成の抑制も、このような広範囲なオゾン減少に寄与したものと考えられる。対流圏オゾン量としては、除去 対策に加えてエネルギー転換など2度目標達成努力を導入したシナリオでは、2050年までに2DU以上のオゾン 量減少が期待でき、放射強制力の観点でみると、2050年までに、なりゆきシナリオと比較して最大で、0.22 W m⁻²の加熱抑制が期待できることが推定された。この結果から、対流圏オゾン量を減少させるには、前駆気体 (Nox, CO, VOCs)の排出量削減に加え、メタン(CH4)の排出削減が本質的に重要であることが示唆された。この ように、テーマ2で構築されたS-12シナリオによる将来予測実験においても、大気環境改善・温暖化抑制ともに、 メタン濃度の削減の重要性が顕在化する結果を得た。したがって、オゾン・メタン(・エアロゾル)、気候変動、大 気化学変動の相互作用をフルに表現した予測・シナリオ評価が今後さらに求められる。

(3) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康へのインパクト評価

疫学知見を用いた曝露—健康影響関数の構築のための系統的文献レビューでは、PM2.5と全死亡との関連に ついて検討した論文について24件抽出した。各研究について研究対象地域の平均PM2.5濃度とその濃度に対応 するリスク比(RR)を、研究規模で重みづけしたバブルプロット(図3)では、多くの研究が北米とヨーロッパで行わ れており、その濃度域は40μg/m³を超えることはなかった。アジアでの疫学研究においても、対象地域の平均濃 度は50μg/m³を越えなかった。死因別(虚血性心疾患、脳卒中、肺がん、慢性閉そく性肺疾患、急性呼吸器感染 症)の関数についても検討したが、循環器疾患死亡において、高濃度ではRRの増え方が緩やかになったが、肺 がん死亡では、ほぼ線形が保たれた。

2010年時点のPM2.5濃度レベルによる寄与死亡数は、全球で436.7万人と推定され、中国、インドを含むアジア 地域でPM2.5寄与死亡数、YLLともに多かった(図4)。 BC, OC, SO₂排出量を一律に変動させた場合の寄与死亡 数を推定したところ、OCに対する変動が最も大きかった。一方、オゾンによる寄与死亡数は、17.6万人と推定され た。CO, VOXの排出変動に対して、オゾンによる寄与死亡数は大きく変わらなかったものの、NO×の排出量変動 により寄与死亡数は大きく変動した。

S-12シナリオ別解析で2045年までの大気汚染物質寄与死亡数を推定したところ、なりゆきシナリオで、将来の

9



図3 各疫学研究の平均PM2.5濃度 とその濃度のRRとのバブルプロット。 円の大きさは研究規模(対象者の人 数)により重みづけされている。



図4 2010年の濃度レベルによるグリッド別PM2.5寄与死亡数の分布 (人/250km²)。

人口増加(すなわち年間の死亡数増加)に伴い、大気汚染関連死亡数は増えると推定された。SLCPs除去対策を とるいずれのシナリオも、寄与死亡数の増加は抑えられ、除去対策強化継続に加えて2度目標のうち再エネ強 化・電化促進を追加したシナリオ(EoPmid-CCSBLD, EoPmid-RESBLDTRT)の低減効果が大きく、この二つのシ ナリオが2010年時点の寄与死亡数を下回った。また、東アジアや東南・南アジアでの低減効果が圧倒的に大きい ことが示された。オゾン寄与死亡数についても除去対策強化に2度目標を追加したシナリオの方が、除去対策強 化のみのシナリオよりも寄与死亡数の減少幅は大きかった。

(4) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパクト評価

全球化した改良MATCROを用いて国別の収量を計算し、FAOの国別収量と比較した。ここで比較対象とした国 は水稲生産量の上位20カ国であり、全世界の水稲生産量の94.3%を占める。まず1981-2010年平均の収量比較 をみると、相関係数は0.863(P<0.001)であり、推計値と観測値の一致度が高いことがわかった。これは1981-2010 年の各年でみても同様である。相関係数の最低値は2010年の0.702で有意で高い相関を示している。このように 本課題で開発したMATCROは高精度に水稲収量を推計できることがわかった。ただし全体的にみると、低収量 (3000kg/ha以下)の国については、モデル推計値が小さい傾向にある。窒素ストレスに関するパラメーターを改良 することにより、精度を向上させることが考えられ、これは今後の課題としたい。

次に水稲生産量上位20カ国の収量の経年変化(1981-2010年)について国別に推計収量とFAOの統計値を比較した。これによると中国、インド、インドネシアといった3大水稲生産国において、モデル推計値は長期的なトレンドを高精度に再現できていることがわかった。この統計値の長期的なトレンドは肥料投入量の増加の効果が大きく、モデルで窒素ストレスに関するモデル改良を行ったことがトレンドの高い再現性につながったと考えられた。また、例えば1993年の日本では大冷害で水稲の収量が大きく落ち込んだが、モデル改良で低温ストレスを考慮したことにより、この1993年の不作を再現できていることもわかった。しかしながら、例えば生産量上位10カ国については、ミャンマーとブラジルにおいて推計値と統計値の誤差が大きい。これは利用している窒素投入量のデータの誤差や、モデルで灌漑の時系列的な変化を考慮していないことなどが考えられ、これを改良することが今後の課題である。

次にオゾン影響プロセスを組み込んだMATCROを用いてオゾンによる水稲減収率を2001-2010年について推計した(図5)。これによると例えば、九州北部、韓国、中国の北緯30-35度の地域、ネパール、バングラデシュなどでオゾンの影響が大きいことがわかった。また例えば、2009年のバングラデシュや中国の北緯35度の地域のように、年や地域によっては、オゾンが大きな収量減少をもたらしていることがわかった。次にグローバルで平均した水稲減収率の2001-2010年の経年変化を調べた。これよるとオゾンによる水稲減収率は10-15%であることがわかった。しかしながらこの値は、モデルのパラメーターの与え方や考えている品種によっても変化するため、今後



図5 オゾンによる水稲減収率 (2001-2010年平均)。

図6 ブラックカーボン(BC:左)および二酸化硫黄(SO₂:右)を変化させた場合のグローバル平均の水稲収量の変化。

様々な実験に基づく推計を行うことが今後の課題である。

次にブラックカーボン(BC)および二酸化硫黄(SO₂)を変化させた場合の収量変化について記述する前に、その 前提となるBCおよびSO₂の排出量を変化させた場合のPARの全球日射量(直達+散乱)、直達日射量、散乱日 射量の変化および気温と降水量の変化について記述する。ここでは、30年分の推計値の中央値を各グリッドの水 田面積で重み付けした全球平均値について述べる。まずBCの変化をみると、BCを増加させた場合は、全球日射 量が減少し、直達・散乱日射量も減少することが分かった。一方、気温と降水量はほとんど変化しないことが分か った。次に、SO₂の変化をみると、SO₂を増加させた場合、全球日射量・直達日射量が減少するのはBCと同じであ るが、散乱日射量が増加することが分かった。これは作物影響に関して正の効果を持つ可能性もある。気温に関 しては、SO₂を増加させた場合、気温が大きく低下し、降水量に関しては大きく減少した。気温低下の影響は地域 ごとに異なるが、降水量の減少については、作物にとって負の効果をもつ可能性が高い。

これらの影響を受けて、BCおよびSO₂を変化させた場合の水稲収量の変化については、BCの場合、排出量を 変化させてもグローバルに見た時には、大きな収量変化が見られないことがわかった(図6)。一方、SO₂の場合は、 増加させた場合は、大きな収量変化見られないが、減少させたときは、収量が低下することがわかった。これは上 に記述したように気温が上昇したことが大きく寄与していることが考えられた。次に、BCおよびSO₂の排出量を変 化させた場合の水稲収量の変化率をグリッド別にみた。これによるとグローバル平均では大きな収量変化が見ら れなかったBCの場合でも、地域的には大きな収量変化があることがわかった。このような地域的な収量変化は地 域的な日射・気温・降水量の複合効果として現れていると考えられるが、それぞれの地域でどの効果がどれくらい 働いているかを明確にすることは、今後の大きな課題である。

最後にS-12プロジェクトの様々な対策シナリオ別の各年代(2010s, 2030s, 2040s, 2050s)の水稲収量を推計し た。これによると、なりゆきシナリオ(Ref)を含むどの対策シナリオも概ね将来になるつれ収量が低下していくのが わかった。これは温暖化の影響だと考えられた。しかしながら、2040sには多くのシナリオで、なりゆきシナリオより は収量低下が軽減されることわかった。2040sにおけるなりゆきシナリオ(Ref)に対する各対策シナリオの収量変 化については、もっとも収量低下が軽減されるシナリオは、EoPmid-RESBLDTRTでなりゆきシナリオより6.1%収量 が多かった。唯一なりゆきシナリオより収量が低下するのは、対策を最大限実施したEoPmaxで、6.1%の収量減で あることがわかった。また、各対策シナリオにおけるなりゆきシナリオ(Ref)に対する収量変化率をグリッド別にみ ると、どのシナリオ、どの年代においても地域的に収量が増加するところと減少するところがあり、かなり複雑な空 間パターンであることがわかった。このような複雑な空間パターンは、それぞれのシナリオにおける日射・気温・降 水量等の変化の複合的な効果の結果として現れていると考えられた。今後は、どの効果がどの程度寄与してい るかを明らかにすることが課題である。

(5) 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価

人為起源エアロゾル有り/無しで行った歴史気候再現数値シミュレーション結果の比較解析から、現在気候に おける人為起源エアロゾルによる気候変動による水循環の変化として、北半球夏季にはアジアモンスーン/インド 洋/海洋大陸周辺において降水が減少し、熱帯南太平洋(南太平洋収束帯付近)において降水が増加するという 変化が見られた。さらに解析を進めた結果、この降水量変化の東西方向のコントラストは熱帯の立体的な大気循 環の変化と強く関連していることがわかった。降水量と地上風に見られる人為起源エアロゾルによる気候変化の 影響は、東西-鉛直(ウォーカー)循環や、南北-鉛直(ハドレー)循環といった低緯度で卓越する大規模かつ立体的 な循環の変化とつながっており、ウォーカー循環変化の一例として、降水量の減少が見られるインド洋から、降水 量の増加が見られる太平洋へと向かう東向き地上風の偏差が特徴的である。過去の同様の研究では、熱帯の東 西に延びる降水帯(熱帯収束帯)の南下が指摘されていたが、南北方向の変化は似ているものの、それらとは少 し様相が異なる。アジアモンスーン域で降水量が減少する傾向は、過去に報告された数値実験と観測データ解析 に基づく研究結果とも概ね一致している。北半球冬季についても、夏季の状況に似ており、アジアモンスーン/イ ンド洋/海洋大陸周辺において降水が減少し、熱帯南太平洋(南太平洋収束帯付近)において降水が増加する。 熱帯収束帯の南下も見られるものの、上述の東西のコントラストの方が顕著であった。

S-12プロジェクトのテーマ2で開発された複数の将来排出シナリオを用いた数値シミュレーションの解析結果から、エアロゾル・放射相互作用、雲放射強制、地上気温、および降水量の変化について評価を行った(図7)。除去対策(End-of-Pipe:EoP)のみを考慮したシナリオでは、主に東アジアと南アジアを排出源とするSO₂から生成される硫酸塩エアロゾルが減少する効果によって、地表面におけるエアロゾル・放射相互作用による冷却効果が減少し、その一部は雲放射強制(冷却効果)の増大によって相殺されるものの、地上気温は上昇することがわかった。



図7 S-12シナリオを適用したMIROC-ESM-CHEMにより計算された年平均(上)地上気温(下)降水量の偏差 の全球分布。(左)除去対策のみシナリオ(EoPmid)(右)除去対策+2°C目標シナリオの1つ (2D-EoPmid-RESBLDTRT)。

一方、降水量に関しては、上に述べた放射強制の変化が大きな領域の縁辺部で増加するほか、エアロゾル前駆物質の排出源から遠く離れた洋上でも正負の変化が現れることがわかった。除去対策に加えて、2℃目標シナリオでCCSや電化等の取り組みが進められ炭素性エアロゾルや硝酸エアロゾル等の排出源に影響が及んだ際には、東アジアと南アジアに加えて、アフリカ、東南アジア、南米においても、地表面におけるエアロゾル・放射相互作用(冷却効果)が減少し、その一部を雲放射強制(冷却効果)の増大が相殺する傾向が見られた。全球的に見た際には、長寿命温室効果気体の排出削減による温室効果の減少により地上気温の上昇は鈍化し、エアロゾル前駆物質の排出源の近傍の狭い領域でのみ除去対策に起因する地上気温の上昇が生じることがわかった。降水量はシナリオ間で各々異なった変化パターンを示すが、日本南部に注目すると、最も温暖化対策とSLCPs削減対策が進められ農業や健康影響において最良と評価されたシナリオにおいて顕著な降水量の増加が予測された。 今後は、より多くの地球システムモデルを用いて予測の不確実性の評価を進めるとともに、極端気象現象等の視点も含めた地域レベルでの予測研究および影響評価研究を行うことが望ましいと考えられる。

(6) 短寿命大気汚染物質・雲・降水相互作用に伴う領域気候変動の評価

MIROC-ESM-CHEMを用いた19世紀中盤~2000年代初めの排出量インベントリ・シナリオに基づいた気候再 現実験では、全ての強制力を考慮したシミュレーションにおいてエアロゾル光学的厚さは全球平均ではシミュレー ション開始から1980年頃まで増加し、1980年頃から緩やかに減少していた。しかし、東アジアでは20世紀中盤か ら急激にエアロゾル光学的厚さが増加し、2000年頃には東アジアは世界的にみてもエアロゾル濃度の高い地域 となっていた。日射量の変化から算出したエアロゾル・放射相互作用の放射強制力の分布はエアロゾル濃度分布 と対応しており、エアロゾル濃度増加の顕著な地域で大きくなることが示された。エアロゾル・雲相互作用の放射 強制力の分布は雲量変化の分布に対応し、エアロゾル排出量が多い地域だけではなく、その周辺で雲量が大き く変化した地域でも効果が大きく表れた。エアロゾル・放射相互作用およびエアロゾル・雲相互作用による海面水 温や循環場を変化させる影響が含まれるため、より現実のエアロゾル影響に近い効果がみられる。2種類のシミ ュレーション結果を比較すると、全ての強制力を考慮したシミュレーションのほうが人為起源エアロゾル前駆物質 の排出量を固定したシミュレーションよりも気温が低くなっていることがわかった。これは人為起源のエアロゾル増 加がなかった場合、現在よりも温暖化が進行していた可能性を示唆している。また、エアロゾル増加時には下層 雲を中心に雲量が増えており、雲による日傘効果の強化も地上気温の低下に寄与していたとみられる。シミュレ ーション結果より、エアロゾル・放射相互作用およびエアロゾル・雲相互作用を合わせた効果によって地上に到達 する太陽光が遮られ、地上付近が冷やされていたことが示された。地表付近が冷やされ蒸発量が減少することや、 水蒸気の収束が弱まることで、東アジアではエアロゾル増加時に降水量が減少していた。

人為起源エアロゾルが漸増・漸減した場合の気候変動について、MIROC-ESM-CHEMで2021年から2049年の 将来気候予測を行った。2021年に人為起源エアロゾル前駆物質排出量が全てなくなるというシナリオでは気温が 上昇しており、人為起源エアロゾルの削減により温暖化が助長されることがわかる。逆に、RCP4.5シナリオを基 準に人為起源エアロゾル前駆物質排出量が2倍になるというシナリオでは、気候再現実験でみられたような気温 低下が引き起こされた。RCP4.5シナリオの人為起源エアロゾル排出量が2021年から2049年にかけて減少してい くため、シミュレーション期間の後半ではRCP4.5シナリオを基準に人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分に したシナリオのエアロゾル量はzeroシナリオに近い値となった。エアロゾル光学的厚さの変化と気温、降水量、雲 量の変化の関係を解析すると、エアロゾル光学的厚さ変化に伴う各要素の変化は気候再現実験と将来の漸増・ 漸減実験同様の傾向になることがわかった。人為起源エアロゾルの増加によって地表付近の気温は低下し、雲 量は特に下層雲を中心に東アジアではエアロゾル増加に対応して増える、降水量はエアロゾル増加により気温が 低下すると減少する傾向を示した。

S-12プロジェクトのテーマ2で提案された排出シナリオを用いて、MIROC-ESM-CHEMで2010年から2049年の 将来シナリオ実験を実施した。現在の対策を継続(Refシナリオ)すると、2040年代には東アジアではエアロゾル量 が増加してしまうが、提案された他のシナリオではエアロゾル量の減少がみられた。エアロゾルを種類別にみると、 硫酸塩エアロゾルや硝酸塩エアロゾルは除去対策の効果が大きいため、除去対策のみのシナリオでも減少がみ られる。ただ、低炭素対策を組み合わせると、ある程度の除去対策導入でも導入強度を最大限にしたシナリオと 同程度の減少がみられた。BCやOCは除去対策のみではあまり削減されず、民生業務部門での電化対策による



図8 S-12シナリオを適用したMIROC-ESM-CHEMにより計算された東アジア平均の年平均(左)地上気温 (右)降水量の将来予測。

削減の効果が大きい。気温は温室効果気体濃度増加の影響で全てのシナリオで上昇するが、除去対策強度を最 大限にしたシナリオでは東アジア全域的にRefシナリオよりもさらに気温が上昇する(図8)。これは、エアロゾル削 減による地表冷却効果の低減やメタン濃度の増加などが寄与していると考えられる。除去対策に低炭素対策を 組み合わせると、昇温が抑制できるが、もともとエアロゾル量が多いことで削減量も多くなる地域ではエアロゾル による地表冷却効果が大幅に失われるため、低炭素対策による昇温抑制効果が弱まる場合もあることが示唆さ れた。このように、対策による効果には地域差があることが示された。複数の将来シナリオを用いたシミュレーショ ンより、除去対策と2℃目標に向けた低炭素対策を組みわせることで、現状の対策を継続する場合と比べ、東アジ アにおいてエアロゾル削減と温暖化の抑制が実現できることが示唆された。また、現状の対策を継続する場合と 比べ、降水量には増加傾向がみられた(図8)。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

これまで、SLCPsの気候影響の定量的評価について、計算機リソースに制約があったり数値モデルが未熟で あったりしたため、海洋モデルを結合して統合的なフィードバックを考慮した評価を行うことが困難であった。しか し、本研究課題では、テーマリーダーおよびサブテーマリーダー自身が着実に開発してきた数値モデルを利用す ることで、主要な人為起源エアロゾルである硫酸塩とBCやオゾンについて、大気海洋結合系において非常多くの 感度実験を通じた気候影響の定量的理解が可能となった。シミュレーション結果の解析を行うことにより、例えば、 BC排出量削減による地球温暖化緩和が従来想定されていたよりも小さいことをメカニズムとともに解明したこと は、科学的に新しい知見の代表例であり、中間評価においても委員からの評価が高かった。この研究成果は Scientific Reports誌に掲載され、それに伴うプレスリリースも行った。また、オゾン削減のためにNOx排出量を削 減すると、メタンの増加により地球温暖化を誘引してしまう可能性が示され、メタン排出量削減を含めた複合的な 対策の必要性を指摘した。PM2.5とオゾンによる健康影響評価については、暴露一健康影響関係の精緻化によっ て高精度の推定が可能となったほか、死亡時年齢を考慮した損失生存年数や、死亡数減少による経済的便益と いう新たな指標を提示することができた。農作物収量評価については、オゾン影響およびエアロゾルによる直達・ 散乱日射変化を高精度で考慮できる、これまでにない全球作物モデルを構築することができた。

ただし、SLCPsは大気中での寿命が短いが故に、長寿命温室効果気体よりも地域的な科学的評価を詳細に行うことによって、より価値のある科学的知見を生み出すことができるようになる。SLCPsの定量的影響評価自体が 国際的にも始まったばかりのフェーズであるため、S-12プロジェクトにより進展した全球的な影響評価について、 今後は、直接的な災害をもたらし得る極端現象を含めて、地域規模の定量的影響評価に発展させて、行政等の 多方面においてより活用しやすい研究成果を創出していく必要がある。

(2)環境政策への貢献

く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>

本研究課題のシミュレーション結果は、S-12プロジェクトのテーマ2および4を中心として作成された SLCPs最適削減パス探索ツール(http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/)の基本データとし て利用されている。このツールは、今後の気候変動および大気汚染に関わる適応・緩和策策定において 活用されるために作成したものである。また、S-12プロジェクトでは、本研究課題の成果を含めて「SLCP 削減施策に関する提言」としてパンフレットを作成した。これを利用して、気候変動・大気汚染対策に 活用できる新しい知見の普及に引き続き取り組むとともに、日本国内だけではなく、英語版(作成中) を利用して国際的に活用されるように活動を継続する。

本研究課題の研究成果を公表した論文は、IPCC第6次評価報告書(AR6)に引用される予定であり、SLCPs に関する今後の国際的取り組みに影響を与えるものである。また、テーマリーダーによる以下の国際的 活動を通して、本研究課題で得られた成果を普及させた。関連する国際的取り組みにて活用されること が期待される。

- アジアの越境大気汚染に関するセミナーへのパネリスト参加(主催:日米研究インスティテュート /Wilson Center、2015年11月) *米国議会関係者に対するレクチャー
- 気候と大気浄化の国際パートナーシップ (Climate and Clean Air Coalition; CCAC) のScience Policy Dialogueでの講演 (2018年4月)
- 気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 短寿命気候強制因子に関する専門家会合(Expert Meeting on Short-Lived Climate Forcers) 出席(2018年5月) * IPCCの選出により出席
- Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-Based Solutions執筆

6. 研究成果の主な発表状況

(1)主な誌上発表

く査読付き論文>

- K. YUMIMOTO and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 120, 1582-1607, doi:10.1002/2014JD022390 (2015) Long-term inverse modeling of Asian dust: Inter-annual variations of its emission, transport, deposition and radiative forcing.
- T. MICHIBATA, K. KAWAMOTO and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 14, 11935–11948, doi:10.5194/acp-14-11935-2014 (2014) The effects of aerosols on water cloud microphysics and macrophysics based on satellite-retrieved data over East Asia and the North Pacific.
- D. GOTO, T. NAKAJIMA, T. DAI, T. TAKEMURA, M. KAJINO, H. MATSUI, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, N. SUGIMOTO, A. SHIMIZU and T. OHARA: J. Geophys. Res., 120, 6247–6270, doi:10.1002/2014JD021693 (2015) An evaluation of simulated particulate sulfate over East Asia through global model inter-comparison.
- T. SEKIYA, K. SUDO and T. NAGAI: J. Geophys. Res., 121, 2911-2938, doi:10.1002/2015JD024313 (2016) Evolution of stratospheric sulfate aerosol from the 1991 Pinatubo eruption: Roles of aerosol microphysical processes.
- 5) T. MICHIBATA and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 120, 9570-9590, doi:10.1002/2015JD023818 (2015) Evaluation of autoconversion schemes in a single model framework with satellite observations.
- 6) L. TANG, T. NAGASHIMA, K. HASEGAWA, T. OHARA, K. SUDO and N. ITSUBO: Int. J. Life Cycle Assess., doi:10.1007/s11367-015-1001-9 (2015) Development of human health damage factors for tropospheric ozone considering transboundary transport on a global scale.

- 7) Z. KIPLING, P. STIER, C. E. JOHNSON, G. W. MANN, N. BELLOUIN, S. E. BAUER, T. BERGMAN, M. CHIN, T. DIEHL, S. J. GHAN, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, H. KOKKOLA, X. LIU, G. LUO, T. VAN NOIJE, K. J. PRINGLE, K. VON SALZEN, M. SCHULZ, O. SELAND, R. B. SKEIE, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS and K. ZHANG: Atmos. Chem. Phys., 16, 2221–2241, doi:10.5194/acp-16-2221-2016 (2016) What controls the vertical distribution of aerosol? Relationships between process sensitivity in HadGEM3-UKCA and inter-model variation from AeroCom Phase II.
- B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. P. SHINE, T. TAKEMURA, and A. VOULGARAKIS: Geophys. Res. Lett., 43, 2782–2791, doi:10.1002/2016GL068064 (2016) Fast and slow precipitation responses to individual climate forcers: A PDRMIP multi-model study.
- 9) 須藤健悟:大気化学研究, 36, 036A03 (2017) 化学気候モデルで探る大気微量成分の全球変動
- K. UEDA, M. YAMAGAMI, F. IKEMORI, K. HISATSUNE and H. NITTA: J. Epidemiol., 26, 249-257, doi:10.2188/jea.JE20150039 (2016) Associations between fine particulate matter components and daily mortality in Nagoya, Japan.
- 11) 上田佳代、T. Saira、高見昭憲、五藤大輔、大石瑞樹、P. V. L. HUI、安河内秀輔、C. P. HOME: 大気環境学 会誌, 51, 245-256 (2016) 大気中微小粒子状物質の長期曝露が死亡に及ぼす影響: 疫学研究における曝 露と健康影響の評価に関する系統的レビューとメタ解析
- 12) Y. MASUTOMI, K. ONO, M. MANO, A. MARUYAMA and A. MIYATA: Geosci. Model Dev., 9, 4133-4154, doi:10.5194/gmd-9-4133-2016 (2016) A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice Ver. 1) - Part I: Model description.
- Y. MASUTOMI, Y., K. ONO, T. TAKIMOTO, M. MANO, A. MARUYAMA and A. MIYATA: Geosci. Model Dev., 9, 4155-4167, doi:10.5194/gmd-9-4155-2016 (2016) A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice Ver. 1) - Part II: Model validation.
- 14) T. NAKAJIMA, S. MISAWA, Y. MORINO, H. TSURUTA, D. GOTO, J. UCHIDA, T. TAKEMURA, T. OHARA, Y. OURA, M. EBIHARA and M. SATOH: Prog. Earth Planet. Sci., 4, 2, doi:10.1186/s40645-017-0117-x (2017) Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident.
- 15) D. GOTO, K. UEDA, C. F. S. NG, A. TAKAMI, T. ARIGA, K. MATSUHASHI and T. NAKAJIMA: Atmos. Environ., 140, 320-332, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.06.015 (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.
- Y. SATO, Y., H. MIURA, H. YASHIRO, D. GOTO, T. TAKEMURA, H. TOMITA and T. NAKAJIMA: Sci. Rep., 6, 26561, doi:10.1038/srep26561 (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models.
- T. MICHIBATA, K. SUZUKI, Y. SATO and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 16, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016 (2016) The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals.
- 18) T. T. N. TRIEU, D. GOTO, H. YASHIRO, R. MURATA, K. SUDO, H. TOMITA, M. SATOH and T. NAKAJIMA: Atmos. Environ., 153, 163–181, doi:10.1016/j.atmosenv.2017.01.030 (2017) Evaluation of summertime surface ozone in Kanto area of Japan using a semi-regional model and observation.
- 19) S. GHAN, M. WANG, S. ZHANG, S. FERRACHAT, A. GETTELMAN, J. GRIESFELLER, Z. KIPLING, U. LOHMANN, H. MORRISON, D. NEUBAUER, D. PARTRIDGE, P. STIER, T. TAKEMURA, H. WANG and K. ZHANG: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 113, 5804–5811, doi:10.1073/pnas.1514036113 (2016) Challenges in constraining anthropogenic aerosol effects on cloud radiative forcing using present-day spatiotemporal variability.
- 20) C. W. STJERN, B. H. SAMSET, G. MYHRE, H. BIAN, M. CHIN, Y. DAVILA, F. DENTENER, L. EMMONS, J.

FLEMMING, A. S. HASLERUD, D. HENZE, J. E. JONSON, T. KUCSERA, M. T. LUND, M. SCHULZ, K. SUDO, T. TAKEMURA and S. TILMES: Atmos. Chem. Phys., 16, 13579–13599, doi:10.5194/acp-16-13579-2016 (2016) Global and regional radiative forcing from 20% reductions in BC, OC and SO₄ – an HTAP2 multi-model study.

- S. S. PARK, T. TAKEMURA and J. KIM: Atmos. Environ., 152, 98-110, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.12.020 (2017) Effect of temperature-dependent cross sections on O₄ slant column density estimation by a space-borne UV-visible hyperspectral sensor.
- K. MIYAZAKI, K., H. ESKES, K. SUDO, K. F. BOERSMA, K. BOWMAN and Y. KANAYA: Atmos. Chem. Phys., 17, 807–837, doi:10.5194/acp-17-807-2017 (2017) Decadal changes in global surface NOx emissions from multi-constituent satellite data assimilation.
- 23) Y. SATO, D. GOTO, T. MICHIBATA, K. SUZUKI, T. TAKEMURA, H. TOMITA and T. NAKAJIMA: Nat. Commun., 9, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6 (2018) Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model.
- 24) G. MYHRE, G., P. FORSTER, B. SAMSET, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLAESCHNER, T. IVERSEN, S. KHARIN, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. J. L. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. SHINE, C. STJERN, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS, F. ZWIERS and S. G. AALBERGSJO: Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1185–1198, doi:10.1175/BAMS-D-16-0019.1 (2017) PDRMIP: A Precipitation Driver and Response Model Intercomparison Project, Protocol and preliminary results.
- 25) E. GRYSPEERDTA, J. QUAAS, S. FERRACHAT, A. GETTELMAN, S. GHAN, U. LOHMANN, H. MORRISON, D. NEUBAUER, D. G. PARTRIDGE, P. STIER, T. TAKEMURA, H. WANG, M. WANG and K. ZHANG: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 114, 4899-4904, doi:10.1073/pnas.1617765114 (2017) Constraining the instantaneous aerosol influence on cloud albedo.
- 26) M. SAND, B. H. SAMSET, Y. BALKANSKI, S. BAUER, N. BELLOUIN, T. K. BERNTSEN, H. BIAN, M CHIN, T. DIEHL, R. EASTER, S. J. GHAN, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, G. LIN, X. LIU, G. LUO, G. MYHRE, T. VAN NOIJE, J. E. PENNER, M. SCHULZ, O. SELAND, R. B. SKEIE, P. STIER, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, F. YU, K. ZHANG and H. ZHANG: Atmos. Chem. Phys., 17, 12197–12218, doi:10.5194/acp-17-12197-2017 (2017) Aerosols at the Poles: An AeroCom Phase II multi-model evaluation.
- 27) C. W. STJERN, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and F. ZWIERS: J. Geophys. Res., 122, 11462-11481, doi:10.1002/2017JD027326 (2017) Rapid adjustments cause weak surface temperature response to increased black carbon concentrations.
- 28) B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: npj Climate Atmos. Sci., 1, 3, doi:10.1038/s41612-017-0005-5 (2018) Weak hydrological sensitivity to temperature change over land, independent of climate forcing.
- 29) T. B. RICHARDSON, P. M. FORSTERD, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, G. MYHRE, D. OLIVIE, B. H. SAMSET, D. SHAWKI, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: Geophys. Res. Lett., 45, 2815–2825, doi:10.1002/2017GL076520 (2018) Carbon dioxide physiological forcing dominates projected Eastern Amazonian drying.
- 30) K. KOTANI, K. UEDA, X. SEPOSO, S. YASUKOCHI, H. MATSUMOTO, M. ONO, A. HONDA and H. TAKANO: Glob. Health Action, 11(1), 1437882. doi:10.1080/16549716.2018.1437882 (2018) Effects of high ambient

temperature on ambulance dispatches in different age groups in Fukuoka, Japan.

- V. L. H. PHUNG, K. UEDA, S. KASAOKA, X. SEPOSO, S. TASMIN, S. YONEMOCHI, A. PHOSRI, A. HONDA, H. TAKANO, T. MICHIKAWA and H. NITTA: Int. J. Environ. Res. Public Health, 15(2), 307. doi:10.3390/ijerph15020307 (2018) Acute effects of ambient PM2.5 on all-cause and cause-specific emergency ambulance dispatches in Japan.
- 32) H. G. TAKAHASHI, S. WATANABE, M. NAKATA, and T. TAKEMURA: Prog. Earth Planet. Sci., 5:44, doi:10.1186/s40645-018-0197-2 (2018) Response of the atmospheric hydrological cycle over the tropical Asian monsoon regions to anthropogenic aerosols and its seasonality.
- 33) S. S. PARK, T. TAKEMURA and S.-W. KIM: Atmos. Environ., 186, 56-73, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.05.021 (2018) Comparison of aerosol optical depth between observation and simulation from MIROC-SPRINTARS: Effects of temporal inhomogeneous sampling.
- 34) T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, K. OGOCHI, K. SUDO and M. TAKIGAWA: Geosci. Model Dev., 11, 959–988, doi:10.5194/gmd-11-959-2018 (2018) Global high-resolution simulations of tropospheric nitrogen dioxide using CHASER V4.0.
- 35) X. SEPOSO, M. KOND, K. UEDA, Y. HONDA, T. MICHIKAWA, S. YAMAZAKI and H. NITTA: Environ. Int., 120, 525-534. doi:10.1016/j.envint.2018.08.037 (2018) Health impact assessment of PM2.5-related mitigation scenarios using local risk coefficient estimates in 9 Japanese cities.
- 36) G. MYHRE, B. H. SAMSET, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, P. M. FORSTER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, K. P. SHINE, C. W. STJERN, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: Nat. Commun., 9, 1922, doi:10.1038/s41467-018-04307-4 (2018) Sensible heat has significantly affected the global hydrological cycle over the historical period.
- 37) J. TAN, J. S. FU, F. DENTENER, J. SUN, L. EMMONS, S. TILMES, K. SUDO, J. FLEMMING, J. E. JONSON, S. GRAVEL, H. BIAN, D. HENZE, M. T. LUND, T. KUCSERA, T. TAKEMURA and T. KEATING: Atmos. Chem. Phys., 18, 6847–6866, doi:10.5194/acp-18-6847-2018 (2018) Multi-model study of HTAP II on sulphur and nitrogen deposition.
- 38) L. LIU, D. SHAWKI, A. VOULGARAKIS, M. KASOAR, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, S. G. AALBERGSJO, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL and T. TAKEMURA: J. Climate, 31, 4429-4447, doi:10.1175/JCLI-D-17-0439.1 (2018) A PDRMIP multi-model study on the impacts of regional aerosol forcings on global and regional precipitation.
- 39) T. TANG, D. SHINDELL, B. H. SAMSET, O. BOUCHER, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, G. MYHRE, J. SILLMANN, A. VOULGARAKIS, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, T. IVERSEN, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, C. W. STJERN and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 18, 8439–8452, doi:10.5194/acp-18-8439-2018 (2018) Dynamical response of Mediterranean precipitation to greenhouse gases and aerosols.
- 40) J. TAN, J. S. FU, F. DENTENER, J. SUN, L. EMMONS, S. TILMES, J. FLEMMING, T. TAKEMURA, H. BIAN, Q. ZHU, C.-E. YANG and T. KEATING: Atmos. Chem. Phys., 18, 12223-12240, doi:10.5194/acp-18-12223-2018 (2018) Source contributions to sulfur and nitrogen deposition an HTAP II multi-model study on hemispheric transport.
- 41) G. MYHRE, R. J. KRAMER, C. J. SMITH, O. HODNEBROG, P. FORSTER, B. SODEN, B. H. SAMSET, C. W. STJERN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 11399–11405, doi:10.1029/2018GL079474 (2018) Quantifying the importance of rapid adjustments for global precipitation changes.
- 42) C. SMITH, R. KRAMER, G. MYHRE, P. FORSTER, B. SODEN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D.

FLÄSCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, J. MULMENSTADT, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, B. SAMSET, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 12023–12031, doi:10.1029/2018GL079826 (2018) Understanding rapid adjustments to diverse forcing agents.

- 43) T. B. RICHARDSON, P. M. FORSTER, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, G. MYHRE, D. OLIVIE, B. H. SAMSET, D. SHAWKI, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: J. Climate, 31, 9641–9657, doi:10.1175/JCLI-D-17-0240.1.K (2018) Drivers of precipitation change: An energetic understanding.
- S. C. ANENBERG, D. K. HENZE, V. TINNEY, P. L. KINNEY, W. RAICH, N. FANN, C. S. MALLEY, H. ROMAN, L. LAMSAL, B. DUNCAN, R. V. MARTIN, A. VAN DONKELAAR, M. BRAUER, R. DOHERTY, J. E. JONSON, Y. DAVILA, K. SUDO and J. C. KUYLENSTIERNA: Environ. Health Perspect., 126(10):107004. doi:10.1289/EHP3766 (2018) Estimates of the global burden of ambient PM2.5, ozone, and NO₂ on asthma incidence and emergency room visits.
- 45) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Sci. Rep., 9, 4419, doi:10.1038/s41598-019-41181-6 (2019) Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions.
- 46) K. SUZUKI and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 124, 2194–2209, doi:10.1029/2018JD029808 (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.
- 47) Y. MASUTOMI, Y. KINOSE, T. TAKIMOTO, T. YONEKURA, H. OUE and K. KOBAYASHI: Sci. Total Environ., 655, 1009–1016, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.132 (2019) Ozone changes the linear relationship between photosynthesis and stomatal conductance and decreases water use efficiency in rice.
- V. MADHU and K. SUDO: Am. J. Clim. Change, 8, 110-136, doi:10.4236/ajcc.2019.81007 (2019)
 Quasi-Biennial oscillations in atmospheric ozone from the chemistry-climate model and ozone reanalyses.
- 49) Y. MASUTOMI, Y. SATO, A. HIGUCHI, A. TAKAMI and T. NAKAJIMA: J. Agri. Meteorol. (in press) The effects of citizen-driven urban forestry on summer high air temperatures over the Tokyo metropolitan area.

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) T. TAKEMURA: 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Recent studies on effects of aerosols on the climate system with global climate models.
- T. TAKEMURA: Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan (2014) Perspective of researches on aerosol climate effects with global climate models.
- T. TAKEMURA, T. MICHIBATA, K. SUZUKI and K. YUMIMOTO: EarthCARE Workshop 2014, Tokyo, Japan (2014) Application of EarthCARE data in climate models for studies on climate change and air pollution by aerosols.
- 4) T. TAKEMURA and M. CHIN: 13th AeroCom Workshop, Steamboat Springs, CO, USA (2014) Relative contributions of regional emissions to the aerosol radiative forcing based on the AeroCom Phase III / HTAP2 experiment.
- 5) T. TAKEMURA and M. CHIN: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA (2014) Relative contributions of regional and sector emissions to the radiative forcing of aerosol-radiation and aerosol-cloud interactions based on the AeroCom Phase III / HTAP2 experiment.
- K. SUDO, A. WADA, T. TAKEMURA, Z. KLIMONT, J. KUROKAWA and H. AKIMOTO: 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Global modeling and projection of short-lived climate pollutants in an earth system model.
- 7) 須藤健悟、伊藤昭彦:日本気象学会2014年秋季大会、福岡(2014)化学・エアロゾル気候モデルによる全 球窒素沈着シミュレーション
- 8) K. SUDO, A. ITO and Y. KAWABUTI: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA (2014) Interannual

Variabilities in tropospheric constituents during 2000-2010 simulated in a chemistry-aerosol coupled climate model.

- 2014) (PM2.5)が死亡に及ぼす影響の季節変動
- 10) Y. MASUTOMI: 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Assessment of the direct and indirect impacts of SLCPs on agricultural production.
- 11) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice annual meeting, Nanjing, China (2014) MATCRO, regional and global applications.
- 12) 増冨祐司、T. Osborne、T. Wheeler:日本気象学会2014年秋季大会、福岡(2014) Global-MATCRO-Riceの 開発に向けた水稲の生育期間推計
- 13) H. G. TAKAHASHI: 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle, Hague, Netherland (2014) Trend and variability in column-integrated water vapor and water vapor recycling.
- 14) M. NAKATA: ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Impacts of interaction among SLCP, cloud and precipitation on regional climate change.
- 15) M. NAKATA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA (2014) Aerosol impacts on climate and environment over East Asia.
- 16) T. SEKIYA and K. SUDO: 13th Quadrennial IGAC Science Conference on Atmospheric Chemistry, Natal, Brazil (2014) Roles of transport and chemistry processes in global ozone change on multi-decadal time scale.
- 17) 関谷高志、須藤健悟:日本気象学会2014年秋季大会、福岡(2014)大規模火山噴火後の成層圏硫酸エア ロゾルの微物理モデリング
- 18) T. SEKIYA and K. SUDO: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA (2014) Global microphysical simulation of stratospheric sulfate aerosol after Mt. Pinatubo eruption.
- 19) 竹村俊彦:日本気象学会2015年春季大会、つくば(2015) 複数のエアロゾル関連モデル相互比較プロジェ クト対応シミュレーション
- 20) T. TAKEMURA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) Simulations under recent projects on aerosol model intercomparisons.
- K. SUDO, K. MIYAZAKI, N. HUNEEUS, Z. JIANG, R. WANG and P. PATRA: 4th International workshop on Asian Greenhouse Gases, JAMSTEC, Yokohama, Japan (2015) Global and Asian Budgets of Carbon monoxide (CO) & black carbon (BC).
- 22) K. SUDO, E. KAWABUCHI and A. ITO: HTAP2 Global and Regional Model Evaluation Workshop, Boulder, USA (2015) Interannual Variabilities in tropospheric constituents during 2000–2013 simulated in a chemistry-aerosol coupled climate model with HTAP2 emissions.
- 23) 須藤健悟、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2015)2000-2013年における対流圏大気成分の 全球分布と年々変動:化学・エアロゾル気候モデルによる計算
- K. SUDO, E. KAWABUCHI and A. ITO: CCMI (Chemistry-Climate Model Initiative) Workshop, Rome, Italy (2015) Interannual variabilities and long-term trends in tropospheric constituents during the recent decades simulated in CHASER (MIROC-ESM).
- 25) 須藤健悟、長谷川晃一:第21回大気化学討論会、東京(2015)化学気候モデルによる1980~2010年の全 球大気微量成分の再現計算
- 26) K. UEDA, M. YAMAGAMI, F. IKEMORI, K. HISATSUNE and H. NITTA: 第25回日本疫学会学術総会、名古屋 (2015) The association between particulate matter components and daily mortality in Nagoya.
- 27) Y. MASUTOMI: 1st Asia Air Pollution Workshop, Tokyo, Japan (2015) Assessment of the direct and indirect impacts of SLCPs and climate change on agricultural production.
- 28) H. G. TAKAHASHI and S. WATANABE: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) An estimation of direct and indirect effect of aerosols by a coupled global climate model: Different impacts

between the mid-latitude and tropics.

- 29) M. NAKATA: Asian Aerosol Conference, Kanazawa, Japan (2015) Seasonal characteristics of particulate matter over East Asia.
- M. NAKATA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) Impact of aerosols on climate change in East Asia.
- 31) 道端拓朗、竹村俊彦:日本気象学会2015年春季大会、つくば(2015) MIROC-SPRINTARSにおける暖かい 雨の雲微物理スキームの評価
- 32) T. MICHIBATA and T. TAKEMURA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) A study of cloud-to-rain conversion processes for warm cloud over East Asia and the North Pacific from A-Train observations.
- 33) T. SEKIYA and K. SUDO: HTAP2 Global and Regional Model Evaluation Workshop, Boulder, USA (2015) Ozone source-receptor relationships in the CHASER model: Sensitivity to horizontal resolution.
- 34) 関谷高志、須藤健悟:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2015)対流圏オゾンのソース-レセプター関係の 推定:モデル水平解像度の重要性
- 35) 関谷高志、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015) 短寿命気候影響物質の排出量削減感度とその気候影響の評価:モデル水平解像度の影響
- 36) 川渕衣里子、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015)対流圏OHラジカルの全球分布と年々・長期 変動:化学気候モデルによる要因解析.
- 37) 磯野結貴、宮崎和幸、伊藤昭彦、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015) ホルムアルデヒドの全 球分布変動とBVOCsエミッションの寄与:衛星観測およびCHASERモデルによる推定
- 38) T. TAKEMURA: 2nd International Workshop on SLCPs in Asia, Incheon, Korea (2016) Assessment on climate response to aerosol effects based on a coupled atmosphere-ocean general circulation model. [invited]
- 39) T. TAKEMURA, H. IRIE, T. NISHIZAWA, K. AOKI, R. KUDO, A. HIGURASHI, A. SHIMIZU, S. S. PARK and K. YUMIMOTO: International SKYNET Workshop, Rome, Italy (2016) Resent application of SKYNET and AD-Net to aerosol climate models.
- 40) T. TAKEMURA, K. SUDO, K. UEDA, Y. MASUTOMI, S. WATANABE, M. NAKATA, H. G. TAKAHASHI and D. GOTO: International Radiation Symposium 2016, Auckland, New Zealand (2016) Environmental assessment on aerosol effects in Asian region based on modeling studies.
- 41) 竹村俊彦:日本地球惑星科学連合2016年大会、千葉(2016) エアロゾルによる気候変動 数値モデルの開発と影響評価 [招待講演]
- 42) T. TAKEMURA: Yoram Kaufman Memorial Symposium, Greenbelt, MD, USA (2016) Integrated assessment of aerosol effects on atmospheric temperature and precipitation with global climate models.
- 43) T. TAKEMURA: Goldschmidt 2016, Yokohama, Japan (2016) Mineral dust aerosols under the glacial period and anthropogenic global warming simulated by global models.
- 44) T. TAKEMURA, K. SUDO, K. UEDA, Y. MASUTOMI, K. SUZUKI and D. GOTO: 15th AeroCom Workshop, Beijing, China (2016) Climate change and impacts due to aerosol effects in Asian region based on modeling studies.
- 45) 竹村俊彦、鈴木健太郎:日本気象学会2016年秋季大会、名古屋(2016) 大気海洋結合モデルを用いたエア ロゾルによる放射収支変化と気温変化との関係性の検証
- 46) 須藤健悟、磯野結貴、宮崎和幸、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合2016年大会、千葉(2016)衛星観測・ 全球化学輸送モデルによるホルムアルデヒドの全球収支とBVOCSエミッション量の推定
- 47) K. SUDO, 2016: Quadrennial Ozone Symposium 2016, Edinburgh, United Kingdom (2016) Interannual variability and long-term trends in global tropospheric ozone and related chemistry during recent decades.
- 48) K. UEDA, S. TASMIN, M. OISHI, V. L. H. PHUNG, S. YASUKOCHI, Y. UEHARA, A. HONDA and H. TAKANO: 第26回日本疫学会学術総会、米子(2016) Health effects of long-term exposure to PM2.5 and mortality: a

systematic review.

- 49) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice Workshop 2016, Nanjing, China (2016) Update of MATCRO.
- 50) M. NAKATA: International Radiation Symposium, Auckland, New Zealand (2016) Climate response to the effects of anthropogenic aerosols.
- 51) 道端拓朗、竹村俊彦:日本気象学会2016年春季大会、東京(2016)A-Train衛星観測データを活用した気候 モデルにおける暖かい雨の雲微物理過程の評価
- 52) 朴祥緒、J. Kim、H. Lee、竹村俊彦:日本気象学会2016年春季大会、東京(2016)衛星搭載UV-Visibleセン サーでのエアロゾルの有効高度算出
- 53) 上原大和、上田佳代、林政彦、原圭一郎、S. Tasmin、大石瑞貴、A. Phosri、V. P. L. Hui、安河内秀輔、本田 晶子、高野裕久:第57回大気環境学会年会、札幌(2016) 大気エアロゾル中の水溶性成分濃度と急病によ る救急搬送数との関連
- 54) 安河内秀輔、上田佳代、S. Tasmin、大石瑞貴、A. Phosri、V. P. L. Hui、上原大和、本田晶子、高野裕久:第 57回大気環境学会年会、札幌(2016) 暑熱環境下での体感温度と急病による救急搬送数の相関
- 55) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: 2017 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, Tokyo, Japan, Busan, Korea (2017) Temperature responses of anthropogenic aerosols assessed with a coupled-ocean general circulation model.
- 56) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Asian Conference on Meteorology 2017 (2017) Climate responses of anthropogenic aerosols assessed with a coupled-ocean general circulation model MIROC.
- 57) T. TAKEMURA: International Workshop on Asian Dust, Bioaerosols and Environmental Regime Shift, Nagoya, Japan (2017) Operation of an aerosol 7-days forecasting system with a global climate model.
- 58) K. SUDO: Chemistry-Climate Model Initiative Science Workshop, Toulouse, France (2017) Interannual variability and long-term trends in global tropospheric chemistry and aerosols during recent decades and in the future.
- 59) K. SUDO, T. YAMASHITA and T. TAKEMURA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan (2017) Seasonal and interannual variation in aerosol outflow from Asia/China and its controlling factors.
- 60) K. SUDO, T. NAGASHIMA and T. SEKIYA: International Workshop on SLCP Emissions and Impacts in East Asia, Chiba, Japan (2017) Past and future changes in global SLCPs: roles of emission and atmospheric chemistry.
- 61) 須藤健悟、山下剛史、竹村俊彦:日本気象学会2017年秋季大会、札幌(2017)アジア・中国域からのエアロ ゾル流出量の季節・経年変動とその要因
- 62) T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, K. OGOCHI, K. SUDO and M. TAKIGAWA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, (2017) A high-resolution global chemical data assimilation of multiple satellite measurements during NASA's KORUS-AQ campaign.
- 63) 関谷高志、宮崎和幸、大越智幸司、須藤健悟、滝川雅之:日本気象学会 2017年春季大会、東京(2017) 全球化学輸送モデルCHASERによる高分解能対流圏NO₂シミュレーション
- 64) 上田佳代、Seposo Xersus: 第76回日本公衆衛生学会総会、鹿児島(2017) 大気汚染による健康インパクト を地球規模で評価する
- 65) 上田佳代:第49回日本動脈硬化学会総会・学術集会・シンポジウム、広島(2017) 大気汚染が循環器疾患 発症に及ぼす影響の疫学研究における曝露評価
- 66) 上田佳代、Seposo Xersus: 第88回日本衛生学会総会、東京(2018) グローバルにみたPM2.5関連死亡の 推定
- 67) Y. MASUTOMI and T. TAKEMURA: International Workshop on SLCP emissions and impacts in East Asia, Chiba, Japan (2017) Impact assessment of changes in the emission of BC and SO₂ on rice productivity in Asia.
- 68) 中田真木子:日本リモートセンシング学会平成29年度秋季学術講演会、江別(2017) アジアにおける大気エ アロゾルの季節変化特性

- 69) A. PHOSRI, K. UEDA, V. H. L. PHUNG S. YASUKOUCHI, T. SUGIYAMA, L. PAOIN, K. KOTANI, H. HASEGAWA, A. HONDA and H. TAKANO: 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia (2017) Effects of short-term exposure to ambient air pollution on hospital admissions for acute myocardial infarction in Bangkok, Thailand.
- 70) 長谷川博史、上田佳代、本田晶子、高野裕久:第88回日本衛生学会総会(2018) 光化学オキシダントと急病による救急搬送との関連:複数都市における疾患別検討
- 71) 小谷和也、上田佳代、Seposo Xersus、安河内秀輔、松本弘子、小野雅司、本田晶子、高野裕久:第88回日 本衛生学会総会(2018) 夏季の高気温が救急搬送数に与える影響:年齢別の検討
- 72) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Tri-MIP (AerChemMIP-RFMIP-PDRMIP) Workshop, Reading, UK (2018) Sensitivity of meteorological field to changing anthropogenic aerosol emissions assessed with a coupled-ocean general circulation model MIROC-SPRINTARS.
- 73) 竹村俊彦、鈴木健太郎:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018) 大気海洋結合モデルを用いたエアロ ゾル排出量変化による気温変化の解析
- 74) 須藤健悟、趙舒悦、宮崎和幸、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合大会、千葉 (2018) Improving estimation of global BVOCs emissions using ground-based VOCs observations and satellite data of atmospheric HCHO.
- 75) K. SUDO and V. MADHU: 15th Quadrennial IGAC Science Conference on Atmospheric Chemistry, Takamatsu, Japan, (2018) What controls interannual variability and long-term trends in global tropospheric chemistry and aerosols in past and future?
- 76) 須藤健悟、長谷川晃一、竹村俊彦:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018) 微量気体SLCPsの長期 変動と気候影響
- 77) 増冨祐司、竹村俊彦:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018) 大気エアロゾルによる日射量変化がア ジア水稲生産に及ぼす影響の評価
- 78) 増冨祐司、黄瀬佳之:日本農業気象学会2019年全国大会、静岡(2019)作物生産へのオゾン影響モデル− これまでの展開、モデル提案、今後の課題
- 79) 高橋洋、渡辺真吾、鈴木健太郎、竹村俊彦:日本気象学会2018年度秋季大会、仙台(2018) エアロゾルの 大気水循環への影響-プロセスによる分離-
- 80) 中田真木子:日本気象学会2018年度秋季大会、仙台(2018) 東アジア域における短寿命大気汚染物質の 気候への影響
- 81) 中田真木子:第35回エアロゾル科学・技術研究討論会、名古屋(2018) 大気エアロゾルの長期変化とその 気候影響
- 82) 大西貴都、須藤健悟、原圭一郎:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2018) Source attribution and budget analysis of black carbon in Antarctica.
- 83) X. SEPOSO, K. UEDA and Y. HONDA: Planetary Health Annual Meeting, Scotland, UK (2018) Income gap affects efficiency of decision making units in reducing temperature-related deaths.
- 84) A. PHOSRI, K. UEDA, A. HONDA and H. TAKANO: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Health effect of air pollution in Thailand: Recent research development and challenges.
- 85) K. PAOIN, K. UEDA, X. T. SEPOSO J. HAYANO, K. KIYONO, N. UEDA, T. KAWAMURA and H. TAKANO: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) The Association between PM2.5 and Heart Rate Variability in Japan.
- 86) X. SEPOSO, K. UEDA and Y. HONDA: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Efficiency of local decision making units in addressing temperature-related risks in the Philippines.
- 87) X. SEPOSO and K. UEDA: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Public Utility Vehicle Modernization program in the Philippines: a health impact assessment study.
- 88) V. L. H. PHUNG, K. UEDA, A. HONDA and H. TAKANO: Better Air Quality (BAQ) Conference, Sarawak, Malaysia (2018) Needs for scientific evidence on health effects of air pollution in Malaysia.

7. 研究者略歴

研究代表者

竹村 俊彦

東北大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修了、博士(理学)、九州大学応用力学研究所助 手、同研究所准教授、現在、同研究所教授

研究分担者

1) 須藤 健悟

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修了、博士(理学)、海洋研究開発機構研究員、現 在、名古屋大学大学院環境学研究科准教授

2) 上田 佳代

北海道大学医学部卒業、山口大学大学院医学研究科、博士(医学)、国立環境研究所主任研究員、現在、 京都大学大学院工学研究科准教授

3) 増冨 祐司

大阪大学理学部卒業、京都大学大学院地球環境学舎修了、博士(地球環境学)、埼玉県環境科学国際センター主任、現在、茨城大学農学部准教授

4) 渡辺 真吾

九州大学理学部卒業、九州大学大学院理学府修了、博士(理学)、海洋研究開発機構主任技術研究員、 現在、同機構シームレス環境予測研究分野分野長

5) 中田 真木子

東北大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修了、博士(理学)、現在、近畿大学総合社会学部 准教授

Ⅱ. 成果の詳細

Ⅱ-1 数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評価

九州大学応用力学研究所 竹村 俊彦

平成26~30年度累計予算額:87,890千円

(うち平成26年度:18,796千円、平成27年度:17,740千円、平成28年度:16,287千円、
 平成29年度:17,976千円、平成30年度:17,091千円)
 累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究課題では、全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSを用いて、人為起源エアロゾル関連排出 量を増減させた場合の気候変動を定量的に評価した。特に、硫酸塩エアロゾルとブラックカーボンによ る気候変動の差異について詳細に解析した。その際、エアロゾルによる気候変動のメカニズムの解明を 深めるために、海面水温と海氷は外部データを与える大気モデルによるシミュレーションと、それらの 変動も含めた大気海洋結合モデルによるシミュレーションの両者を行った。単一の数値モデルでエアロ ゾル関連排出量を様々に変化させる感度実験を通して、エアロゾル組成ごとの気候変動を定量的に評価 する研究は、国際的に前例がない。

本研究課題の最大の成果は、大気上端での放射強制力の大きさからこれまでに想定されていたブラッ クカーボンによる地上気温の変化が小さいことを、そのメカニズムとともに示したことである。気候変 動や大気汚染の国内外におけるこれまでの対策は、放射強制力と気温変化の関係は化学組成にあまり依 存しないことが前提とされてきた。したがって、本研究課題の成果は、国際的に議論されている気候変 動と大気汚染の最適な同時緩和策策定のための重要な科学的知見となる。ただし、気候変動において重 要なのは気温変化だけではなく、例えば直接的に人命や財産に影響を及ぼす豪雨や熱波などの極端現象 も重要であり、そうした現象に対するエアロゾルの統合的影響評価は今後実施していく必要がある。

シミュレーション結果は、本研究課題が含まれる環境研究総合推進費S-12テーマ3の他サブテーマで実施されたエアロゾルによる健康および農作物収量への影響の評価のために提供されたほか、S-12プロジェクト全体の目的である政策に資する短寿命気候汚染物質の最適削減パス探索の基本材料として利用されたため、当初の研究目的は達成した。かつ、前述のブラックカーボンによる気候変動に関する新しい知見をもたらしたことで、当初想定していなかった研究成果をあげることもできた。

[キーワード]

短寿命気候汚染物質、SLCP、エアロゾル、気候変動、気候モデル

1. はじめに

先進国では、長年にわたる対策の結果、大気汚染の状況は改善されてきた。一方、新興国および発展 途上国では、現在まさに大気汚染が問題となっており、特にアジアでは深刻な社会問題となっている国 家が多い。さらに、その風下側に位置する日本でも、越境飛来による影響が懸念されている。大気汚染 物質は、健康被害をもたらすほか、気候変動を引き起こすことが知られており、短寿命気候汚染物質

(SLCPs) あるいは短寿命気候強制因子(SLCFs)と呼ばれている。その代表格は、大気浮遊粒子状物質 (エアロゾル)やオゾン・メタンである。

しかし、SLCPs/SLCFsが気候変動を引き起こすメカニズムは、物理・化学的に非常に複雑で多岐にわた るため、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の最新報告書である第5次評価報告書(AR5)¹⁾におい ても、その定量的評価はほとんどなされなかった。IPCC AR5では、研究代表者が執筆を務めた第1作業部 会第8章において、SLCPs/SLCFsの濃度変化によるエネルギー収支変化(放射強制力)の評価は主要組成 ごとになされているものの、それらによる気温や降水量などの気象場変化については組成ごとにはなさ れなかった。過去の気候影響評価についてはエアロゾル全体の増加に伴う気象場変化、将来についても 限られたシナリオのみでのエアロゾル全体の増減に伴う気象場変化が若干議論されたのみである。これ は、SLCPs/SLCFsの動態を含む大気海洋結合モデルを用いた実験を数多く行うほどの計算機リソースがど の国でもなかったこと、また、SLCPs/SLCFsの組成ごとの気候影響を定量的に評価できるような計算が可 能なほど数値モデルが成熟していなかったことが理由として挙げられる。

しかし、主要環境問題である気候変動および大気汚染の両者に深く関わるSLCPs/SLCFsの環境影響評価 を定量的に行うことは科学研究として喫緊の課題であり、かつ、それらの最適な削減パスを提示するこ とは政策的・社会的にも喫緊の課題である。パリ協定においては、世界の平均地上気温の上昇を産業革 命前の水準と比較して2℃以下に保ち、その上昇を1.5℃に抑える努力をすることを目的としているが、 CO₂などの長寿命の温室効果ガスの排出削減のみでは、今後数十年の間は全球平均気温の上昇抑制は非常 に困難である。そこで、CO₂よりも大気寿命が短くて温室効果をもたらす物質であるSLCPsを減らすこと が、CO₂削減の効果が明らかになる前に地球温暖化を軽減する方法として模索されている。それは大気質 の改善をもたらすことにもなるため、コベネフィットの観点からも定量的に検討されるべきであること は明白であり、例えば国際的には気候と大気浄化の国際パートナーシップ(Climate and Clean Air Coalition; CCAC)において、研究者および政策決定者がSLCPsの削減を検討して実行に移しつつある。

2. 研究開発目的

そこで、本研究課題では、SLCPs/SLCFsのうち、エアロゾル関連物質の排出量変化に伴う気候変化について、これまでに研究代表者が中心となり開発してきた全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARS²⁾³⁾⁴⁾(図(1)-1)を使用して定量的に評価した。MIROC-SPRINTARSの開発を着実に進めてきたこと、また、エ

全球エアロゾルモデルSPRINTARSの概要



参考文献: Takemura et al. (JGR, 2000; JCLI, 2002; JGR, 2005; ACP, 2009)

*MIROC:東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構などにより開発されている全球気候モデル 図(1)-1 全球エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSの概略。 アロゾルによる気候変化を統合的にかつ詳細に評価するために必要な100年スケールの積分時間のシミ ュレーションを数多く実施できる計算機リソースも整ってきたことから、本研究課題を実行に移せる環 境となった。特に、人為起源エアロゾルの代表格であり、放射強制力の符号が異なる硫酸塩とブラック カーボンの排出量の変化に伴う気候変化(気温・降水量など)を定量的に評価した。また、シミュレー ション結果は、S-12プロジェクトのテーマ3のサブテーマ3および4で行われたSLCPs/SLCFsによる健康お よび農作物収量への影響の評価で利用することとしたほか、テーマ2および4で実施されたSLCPs/SLCFs 削減パスの評価ツールでも利用することにより、最終的には環境政策につながる基礎的情報を創出する ことを目的とした。

ここで注意すべき点は、前節で記したとおり、温室効果をもたらす、つまり放射強制力が正であるSLCPs を削減すればコベネフィットとなるが、放射強制力が負である短寿命物質を削減すると地球温暖化を加 速することになることである。そのため、CCACで陽に対象としている物質は、放射強制力が正であるブ ラックカーボン・オゾン・メタン・ハイドロフルオロカーボンに限定されており、それらをSLCPsと定義 している。一方、硫酸塩・硝酸塩・有機エアロゾルなどの放射強制力は負であり、その結果として、IPCC などでは人為起源エアロゾル全体の全球平均放射強制力は負であると評価している。したがって、単純 な人為起源エアロゾル関連排出量の削減は地球温暖化を加速する可能性があることに留意する必要があ る。放射強制力の正負に関係なく短寿命で気候影響を及ぼす物質をSLCFsと呼ぶ。

3. 研究開発方法

上述のとおり、これまでに研究代表者が中心となり開発してきた全球エアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS^{2) 3) 4)}を使用して様々なシミュレーションを行った。日本の全球大気海洋結合モデル MIROC⁵⁾に、エアロゾル関係の各過程を組み込む形をとっている(図(1)-1)。トレーサーとして陽に計 算される物質は、硫酸塩・ブラックカーボン・有機エアロゾル・土壌粒子・海塩粒子と、硫酸塩の前駆 気体である二酸化硫黄と硫化ジメチルである。輸送過程には、発生・移流・対流・拡散・化学反応・湿 性沈着・乾性沈着が含まれる。発生過程では、乾燥域から舞い上がる鉱物粒子や、海面から発生する海 塩粒子などの自然起源については、風速等の気象条件に依存して計算の各時間ステップ・各空間格子点 で計算される。一方、人間活動起源物質や、自然起源でも気象条件では表現できない発生源(火山など) からの物質については、インベントリデータを入力する。湿性沈着には、上方から落下してくる雨滴や 雪に捕捉される過程(wash out)や、エアロゾルや前駆物質を溶解したり凝結核・氷晶核の役割をした エアロゾルを取り込んだりした雲が、雨滴・雪に成長して結果的に除去される過程(rain out)がある。 乾性沈着は、大気境界層内の乱流により物質が地表面に落下する過程であり、エアロゾルの場合は重力 落下も乾性沈着の1つに含まれる。化学反応に関しては、SPRINTARS自体には硫黄系のみを含めており、 例えば化石燃料起源の二酸化硫黄の発生量のインベントリデータを入力し、気温や酸化剤濃度に依存し て酸化過程を計算して、硫酸塩エアロゾル濃度を陽に計算する。酸化剤であるOHラジカル・オゾン・過 酸化水素の時空間分布データは、同じくMIROCと結合しているS-12プロジェクトのテーマ3のサブテーマ2 で用いられる化学気候モデルCHASER⁶⁾の計算結果を利用する。

計算されたエアロゾル濃度の時空間分布は、気候モデル内の関連過程と相互作用することにより、エ アロゾルの気候に対する影響の計算に利用される(図(1)-1)。エアロゾルの気候に対する影響のメカニ ズムは2つに大別され、1つはエアロゾルが太陽放射・赤外放射を散乱・吸収することにより放射収支に 変化をもたらす「エアロゾル・放射相互作用」である。この相互作用の気候モデル内での取り扱いは、 組成ごとのエアロゾル濃度(質量混合比)を大気放射過程へ渡すことによる。もう1つは、エアロゾルが 雲の凝結核や氷晶核となる「エアロゾル・雲相互作用」である。これは、組成ごとのエアロゾル数濃度 に依存した雲粒・氷晶数濃度を計算し、それを用いて雲粒・氷晶粒径を計算して大気放射過程において 雲アルベドの変化を計算すること、また、雲粒・氷晶数濃度依存のautoconversion(雲から降水への変 換)を雲・降水過程で計算することにより、雲水量・雲氷量・降水量・降雪量を計算することにより気 候モデル内で表現される。これらの過程を経て、気温などの気象要素の変化が計算されることになる。

MIROC-SPRINTARSによるシミュレーションの空間分解能は、その用途に応じて可変であり、利用可能な

計算機リソースや必要な積分時間に応じて決める。本研究課題では、国立研究開発法人国立環境研究所 のスーパーコンピュータシステムを利用した。

本研究課題では、大別して2つの実験セットを実施した。

1) モデル相互比較プロジェクト1つである HTAP2 (Hemispheric Transport of Air Pollution Phase II) で利用された EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) が取りまとめた2010 年を想定した標準排出量インベントリ⁷⁾をベースとして、S-12プロジェクトのテーマ1から提供されたア ジア域での2010年に対する1980年の二酸化硫黄 (SO₂)・ブラックカーボン (BC)・有機エアロゾル (OC) の排出量の推定比を用いた実験をMIROC-SPRINTARSにより実施した。表(1)-1にその推定比を示すが、これらを用いて中国・東アジア・アジア全域からの排出量を1980年にした実験をそれぞれ行った。HTAP2 で利用された2010年のSO₂, BC, OCの排出量分布を図(1)-2に示す。いずれの組成も東アジアおよび南ア ジアからの排出量が非常に多いことが明確である。森林火災・焼き畑起源の排出量データとして、Global Fire Emissions Database (GFED)⁸⁾を用いる (図(1)-3) 。水平空間分解能はT213 (全球を640x320に分 割;緯度経度約0.56度)・鉛直56層(シグマ座標)であり、全球エアロゾルモデルとしては高分解能で ある。この結果から、エアロゾルの濃度や放射強制力の30年間の変化を解析する。

表(1)-1 各地域・各物質の2010年に対する1980年の排出量比。East Asia はモンゴルと北朝鮮。

	China	Korea	Japan	East Asia	Southeast Asia	South Asia
SO_2	0.41	1.72	1.88	0.48	0.42	0.21
BC	0.67	0.48	2.44	0.70	0.59	0.46
OC	0.76	0.64	2.19	0.76	0.69	0.56





図(1)-2 モデル相互比較プロジェクトHTAP2での2010年を想定した標準排出量インベントリの人為起 源SO₂, BC, 0Cの年間合計全球分布。



biomass burning SO2 emission (2010)



図(1)-3 モデル相互比較プロジェクトHTAP2での2010年を想定した標準排出量インベントリの森林火災・焼き畑起源のSO₂, BC, 0Cの年間合計全球分布。

2) エアロゾル関連排出量の変化に伴う気象場の変動を定量的に解析するために、MIROC-SPRINTARS を用いた感度実験を行った。特に、影響が最も大きい人為起源エアロゾルである硫酸塩と、国際的にそ の気候影響の定量的評価が待たれているブラックカーボン(BC)に注目した実験を行った。実験は、研 究代表者も参画しているモデル相互比較プロジェクトの1つである PDRMIP (Precipitation Driver Response Model Intercomparison Project)の実験設定をエアロゾルについて大幅に拡張したものであ り、BCおよび硫酸塩の前駆気体である二酸化硫黄(SO₂)の排出量をそれぞれ全球一様に 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.5, 2, 5, 10倍にした。PDRMIPでは、エアロゾルによる気候変動の傾向をできるだけ明確に解析 する目的で、硫酸塩濃度もしくは二酸化硫黄排出量を5倍、およびBCの排出量を10倍という非現実的な実 験のみが実施された。本研究課題では、現実的な排出量変化の範囲で複数の設定をすることにより、環 境政策へ実際に活用できるような研究成果を創出するようにした。モデル相互比較とは異なり、単一モ デルによる感度実験の利点は、モデル間で異なる物理過程の様々なスキームの違いによる不確実性が含 まれず、現象そのもののメカニズムを解明しやすくできるところにある。エアロゾル関連排出量の基準 は、こちらも図(1)-2で示したHTAP2での2010年を想定した排出量インベントリとする。排出量を様々な 倍率で変化させた実験は、2種類のモデルにより実施した。1つは、海面水温と海氷は外部データである HadISSTデータ⁹⁾を与える大気大循環モデルによる実験であり、エアロゾルによる気候変動のうち「速い 応答(rapid adjustment)」のみを抽出するために実施する。もう1つは、海洋大循環モデルを含めた大 気海洋結合モデルによる実験であり、こちらには大気・海洋間のエネルギー交換も含まれるため、「速 い応答」と「遅い応答(slow response)」の両方が含まれる。「遅い応答」は、大気海洋結合モデルの 結果と大気モデルによる結果との差として解析する。大気モデルによる実験は、気候値的な実験である

ため積分期間は15年間とする一方、大気海洋結合モデルによる実験は、平衡実験であるため積分期間を 100年間とし、後半50年間を解析対象とした。長期積分が必要であり、かつ組成ごとに様々排出量を変化 させる実験を行うため、水平空間分解能はT85(全球を256x128に分割;緯度経度約1.4度)・鉛直40層(ハ イブリッド座標)である。

4. 結果及び考察

1) アジア域での1980年排出量比を考慮したシミュレーション

図(1)-4の左図は、1980年から2010年にかけての各エアロゾルの大気全量の増加率について、中国からの排出量の影響を示している(0.5は50%増の意味)。表(1)-1と照らし合わせると、例えば中国からのS02 排出量自体は59%増加したと設定されている。その結果、中国沿岸部では50%以上の硫酸塩の増加率を示 しており、S02排出量増加率にほぼ並んでいる。また、BCと有機物についても、中国沿岸部では、排出量 増加率(それぞれ33%、24%)と同程度の大気全量増加率が見られる。中国での1980年以降の排出量増加 に伴い、風下側にある日本では、硫酸塩は40%前後、BCは20~25%、有機物は15%前後増加したと推定さ れた。なお、特に硫酸塩において、関東南部のみが他の日本の地域と比較して増加率が低くなっている が、これは関東南部からの排出量自体が原因と考えられる。

図(1)-4の右図は、アジア全域の排出量変化に伴う増加率を示している。表(1)-1に示したとおり、エ アロゾルおよび前駆気体の排出量増加率は、中国よりも南アジア(主にインド)の方が高い。その結果、 特にBCと有機物の排出量のインドでの増加は影響が広範囲に及んでおり、上段と比較すると、日本へも 影響していることが示唆される。一方、硫酸塩については、日本周辺での増加率が、上段(中国の排出 量変化のみ)と比較して小さくなっている。これは、日本自身のSO2排出量が大幅に減少していることが、 中国からの越境飛来の影響をある程度相殺していることを示している。

図(1)-5は、図(1)-3で示したものと同じ実験におけるエアロゾル放射強制力を示す。ここ30年間の中 国の排出量変化に伴うエアロゾル・放射相互作用(エアロゾル直接効果)による放射収支の変化は、中 国沿岸で -2 W m⁻² と計算された。これは、産業革命以降の二酸化炭素増加に伴う正の放射強制力をほ ぼ全て打ち消す大きさである。エアロゾル・雲相互作用(エアロゾル間接効果)の放射強制力は、人為 起源エアロゾルの流出域で雲の多い海上(東シナ海から日本南方の太平洋)で大きく、年平均値の最大 で -2 W m⁻² を超える領域があると推定された。



図(1)-4 2010年排出量実験に対する(上段)BC(中段)有機物(下段)硫酸塩の各エアロゾルの年 平均大気総量の比。(左)2010年排出量実験と中国のみ1980年排出量実験との差(右)2010年排出量 実験とアジア全域1980年排出量実験との差。



図(1)-5 (上段) エアロゾル・放射相互作用(下段) エアロゾル・雲相互作用による大気上端 での年平均放射強制力。(左)2010年排出量実験と中国のみ1980年排出量実験との差(右)2010 年排出量実験とアジア全域1980年排出量実験との差。

2) 大気モデルおよび大気海洋結合モデルを用いたエアロゾル関連排出量変化による感度実験

エアロゾルの気象場(気候状態)に対する影響をシミュレーションにより定量的に評価するためには、 海洋モデルを結合する必要がある。それは、図(1)-5で示したような放射収支の変化に応じて大気の状態 が変化する速い応答の他に、熱容量の大きい海洋がエアロゾルにより変化して、その海洋の変化が大気 の変化をもたらすという遅い応答があるからである。

まず、PDRMIPに提出した、大気海洋結合モデルを用いてSO₂排出量5倍およびBC排出量10倍にした場合 のシミュレーション結果について、地上気温と降水量の変化を図(1)-6に示す。非現実的なエアロゾル排 出量変化の設定にしたのは、現実的な変化の場合には、エアロゾル組成ごとの特性による気象場の変化 がノイズに埋もれてしまう可能性があるためである。国際的には、非現実的な設定であっても、エアロ ゾル組成ごとによる気候影響をできるだけ確実に把握しようとしている段階である。硫酸塩による地上 気温変化は、北半球中高緯度で顕著であり、中緯度では基本的に陸上の方が強い低下傾向を示すという 結果が得られた。ただし、アジアからの人為起源エアロゾル流出域であり雲も多い北太平洋での低下も 大きい。一方、BCは、排出量を10倍にしても気温の変化傾向ははっきりしない。降水量の変化について は、遅い応答をする水循環の変化が大きく反映された結果を示しており、例えば、硫酸塩増加により熱 帯収束帯が南下する傾向が明確である。全般的に降水量の多い海上、特に熱帯で変化量が顕著であるが、 アジア域については陸上でも降水量の変化が大きい地域がある。PDRMIPのエアロゾル関連の研究成果は、



図(1)-6 大気海洋結合モデル版 MIROC-SPRINTARS を用いた平衡実験による年平均(上)地上気温 (下)降水量の変化。(左)SO₂排出量5倍(右)BC排出量10倍。

MIROC-SPRINTARSによる貢献を含めた形で、主にモデル間の不確実性の把握という観点から、複数の論文 で公表されている^{10)11)12)13)14)15)16)17)18)。}

PDRMIPの下に実施した実験を踏まえて、前節での説明のとおり、本研究課題では現実的なエアロゾル 関連排出量の変化による気候変化を解明するための独自の実験を実施した。図(1)-7は、SO₂とBCの排出 量を変動させた場合の大気上端での瞬時放射強制力(instantaneous radiative forcing)を示す。瞬時 放射強制力は、気象場の変化を含まない、エアロゾルによる散乱・吸収のみでの放射収支の変化のこと であり、大気モデルによるシミュレーションにおいて、タイムステップごとにエアロゾルの有無それぞ れで放射過程を2回計算して、その放射収支の差によって計算される。本研究課題で計算された全球平均 瞬時放射強制力は、IPCC AR5に示されている最尤値よりやや小さいものの、不確実性の範囲内である。 瞬時放射強制力は、SO₂(大気中では硫酸塩エアロゾルへ酸化)およびBCの排出量変化に応じて、ほぼ線 形に変化していることが示されている。

気候強制因子による地上気温の変化は、気候感度と瞬時放射強制力から伝統的・便宜的に推定されて きた。図(1)-7から、BCの気候感度が硫酸塩エアロゾルの気候感度と同じである場合、BC排出量減少によ る地上気温変化は、SO₂排出量が増加した場合の変化の3分の2程度であると予想されることを示している。 しかし、図(1)-8は、BC排出量の現実的な変化の範囲内において、BC排出量が減少した場合の地上気温の 低下は、予想されるよりもはるかに小さいことを明示している。つまり、硫酸塩エアロゾルとBCの気候 感度は大きく異なることを示唆している。図(1)-9は、瞬時放射強制力と地上気温変化の関係を示してい る。MIROC-SPRINTARSにより計算された気候感度パラメータ(図(1)-9に示されている回帰直線の傾き) は、硫酸塩エアロゾルは1.3 ℃ W⁻¹ m²である一方、BCはその約8分の1である0.16 ℃ W⁻¹ m²という結果を 得た。このことは、硫酸塩とBCの気候感度は暗に同等であると仮定した上で瞬時放射強制力を気候影響 評価の指標として用いることは、正しくないことを意味している。


図(1)-7 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(青)SO₂(赤)BCの現在の排出量からの変化 に伴う瞬時放射強制力の全球平均値。エラーバーは年平均値の標準偏差を示す。¹⁹⁾



図(1)-8 大気海洋結合モデル版のMIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(青)SO₂(赤)BCの 現在の排出量からの変化に伴う地上気温変化の全球平均値。エラーバーは年平均値の標準偏差を示 す。¹⁹⁾

34



図(1)-9 MIROC-SPRINTARSにより計算された(青)硫酸塩(赤)BCの瞬時放射強制力と地上気温変化の関係。各点は各排出量変化率によるシミュレーション結果の全球平均値を示し、エラーバーは年平均値の標準偏差を示す。回帰直線の相関係数は硫酸塩・BCでそれぞれ1.00, 0.91である。¹⁹⁾

BC排出量変化に対する平均地上気温の弱い応答の理由は、シミュレーション結果を解析することによ り、瞬時放射強制力が速い応答によって大部分が相殺されることにあることがわかった(図(1)-10)²⁰。 図(1)-10は、BCおよび硫酸塩が増加した場合に、全球平均瞬時放射強制力により規格化された数値を示 していることに注意する。この相殺は、大気上端における晴天放射フラックスの変化(図(1)-10のCLR) と雲放射効果の変化(図(1)-10のCRE)の2つで構成されている。BCの排出量が増加した場合、瞬間放射 強制力に伴い大気中での放射加熱を強めるため、飽和水蒸気圧の上昇で大気中の水蒸気量が増加して、 水蒸気による赤外放射の射出が強まる、つまり放射冷却が強まることになる(晴天放射フラックスの変 化)。また、BC排出量が増加すると大気が安定化し、低層雲が増加して、中・高層雲が減少するため、 結果として大気上端での外向き太陽放射および赤外放射が増加することになる(雲放射効果の変化)。 また、大気中でも、顕熱および潜熱の変化は瞬時放射強制力を打ち消す方向に働く。これらの結果、温 度変化を伴う遅い応答を駆動するために必要なエネルギー不均衡は、一部しか残されていないことが図 (1)-10からわかる。対照的に、硫酸塩の瞬時放射強制力は、大気上端と地表面とでほぼ同じ、つまり大 気中での放射加熱/冷却をほとんど引き起こさない。その場合、水蒸気量変化に伴う晴天放射フラック スはほとんど変わらない。一方、硫酸塩増減によって引き起こされる瞬時放射強制力は、硫酸塩の雲の 凝結核の役割を通じた水雲に対するエアロゾル・雲相互作用からなる雲の放射効果によって強化される

(図(1)-10)。エアロゾル・雲相互作用による燃料起源からの硫酸塩の放射強制力は、この研究では-0.36 W m⁻²と計算されており、これはIPCC AR5によるすべての人為起源エアロゾルによる-0.45 W m⁻²と整合的である。さらに、大気中でも、硫酸塩の増減による放射加熱/冷却をほとんど引き起こさないため、顕熱および潜熱の変化もほとんどない。



図(1)-10 MIROC-SPRINTARSにより計算された大気上端での瞬時放射強制力により規格化された大気 上端・大気・地表面での全球平均放射収支変化。²⁰⁾ CLR:晴天大気フラックス(水蒸気による)変 化 CRE:雲放射フラックス変化 LH:潜熱変化 SH:顕熱変化

BCと硫酸塩との間の大気上端でのエネルギー収支の変化における顕著な違いは、瞬時放射強制力の鉛 直構造が異なることから生じる。これは、大気や地表面への異なるエネルギー再分配により、瞬時放射 強制力を相殺または増強する速い応答を引き起こす²⁰⁾。これには、BCの場合には瞬間的放射強制力を相 殺し、硫酸塩の場合には瞬間的放射強制力を強化する雲の応答の影響を含む。硫酸塩の場合には、大気 上端でのエネルギー不均衡がエアロゾル・雲相互作用による放射強制力によって増大し、海洋とのエネ ルギー交換を意味する遅い応答によっても完全に相殺されないことを図(1)-10は示している(つまり、 瞬時放射強制力・速い応答によるエネルギー収支変化・遅い応答によるエネルギー収支変化を統合する と、大気上端で1.0 W m⁻²の不均衡が残っている)。これにより、硫酸塩の場合は、はっきりとした気温 変化が生じていることがわかる。一方、BCの場合は、瞬時放射強制力・速い応答によるエネルギー収支 変化・遅い応答によるエネルギー収支変化を統合すると、大気上端ではバランスしていることを示して いる。これが、BCによる気温変化が非常に小さいことの理由であると考えられる。

なお、モデル相互比較PDRMIPにおいて、MIROC-SPRINTARSによってシミュレートされたSO₂排出量5倍に 対する気温変化は、複数のモデル間での不確実性の範囲内である¹⁰⁾。本研究課題における結果は、現実 的な範囲内でSO₂とBCの排出量を変化させて、それぞれによる地上気温の感度を定量化したものであり、 大気上端での瞬時放射強制力から予想されるBCの地上気温変化の応答が、これまで考えられてきたより も弱いことを明確に示した。さらにこの変化により、前述のとおり、瞬時放射強制力が与えられること をきっかけとして、大気上端のエネルギー収支だけの変化ではなく、大気中および潜熱と顕熱フラック スを含む地表面でもエネルギー収支の変化が起こるため、降水量などの別の気象要素にも影響を及ぼす。 BCと硫酸塩の降水量変化に与える影響の差異については、後ほど示すとおり、S-12プロジェクトの本研 究課題およびテーマ4にて若干の解析を実施したが、詳細は今後の研究において解明していく必要がある。

本研究課題の結果は、国連環境計画(UNEP)の下でSLCPsに関する総合的な科学的評価に基づいて活動 を行っているCCACにおいて、BCに対する取り組みを再検討する必要のあることを示唆している。CCACが 活動の初期段階で取りまとめた評価報告書²¹⁾では、瞬時放射強制当たりの気温変化(つまり気候感度) は、すべてのエアロゾル種に対して、CO₂のそれと同じであると仮定されている。その仮定に基づいて、 BCの排出量削減に伴う気温上昇の緩和の見通しが示されて、広く多方面での活動の根拠として利用され ているのが現状である。しかし、この仮定は、本研究課題で明確となったBC排出量の変化に対する気温 変化の感度が弱いことを考慮していないため、BC排出量の削減による地球温暖化の緩和量を過大評価す ることになる。人間の健康への影響を回避するためにBCの削減が必須であることを考えると、本研究課 題の結果は、パリ協定の目標達成へ向けて、二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素・ハロカーボンなどの長 寿命温室効果気体や、メタン・対流圏オゾン・ハイドロフルオロカーボンといった他のSLCPsの削減を一 層促進しなければならないことを提示している。

以上の議論は、BCの排出量変化に対するエネルギー収支の変化を実質的に調整する速い応答を検討す ることの重要性を強調している。これは、IPCC AR5¹¹において定義されているような、瞬時放射強制と 速い応答を含む「有効放射強制力」が気温変化のより良い予測因子であることを提唱することとなる。 図(1)-11は、有効放射強制力に対する地上気温変化を示しているが、MIROC-SPRINTARSによってシミュレ ートされた気候感度パラメータ(図(1)-11の回帰直線の傾き)は、硫酸塩とBCでそれぞれ0.43,0.31°C W⁻¹ m²であり、両者の差は、図(1)-9で示した瞬間放射強制力を指標として使用した場合よりも小さくなって いる。

ただし、ここで問題となるのが、SLCPs/SLCFsは大気中で短寿命であるが故に、時空間分布が極めて不 均一であることである。例えば、図(1)-12は、SO₂およびBCの排出量を全球一様に現在から0.5倍および2 倍にした本研究課題で行ったシミュレーションの地上気温変化の経度方向平均の緯度分布を示している が、北半球の中緯度および高緯度で地表気温の大きな変化をもたらす可能性を示している。SLCPs/SLCFs の組成ごとに地域規模の気候変動に与える影響を評価するためには、今後の研究での詳細な分析が必要 になるが、この後、本研究課題で実施したシミュレーションで解析できる範囲内において、放射収支変 化や気温・降水量の変化の空間分布の概略を示す。



図(1)-11 MIROC-SPRINTARSにより計算された(青)硫酸塩(赤)BCの有効放射強制力と地上気温変 化の関係。各点は各排出量変化率によるシミュレーション結果の全球平均値を示し、エラーバーは年 平均値の標準偏差を示す。回帰直線の相関係数は硫酸塩・BCでそれぞれ1.00, 0.88である。¹⁹⁾



図(1)-12 大気海洋結合モデル版のMIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(青・水色)SO₂(赤・ 橙)BCの現在の排出量から2倍もしくは0.5倍した場合の地上気温変化の帯状平均緯度分布。¹⁹⁾

本研究課題では、燃料起源エアロゾル関連排出量を0,0.1,0.3,0.5,0.8,1.5,2,5,10倍にした MIROC-SPRINTARSによる感度実験を実施したが、ここでは減少・増加させた代表例として、0.1,0.5,1.5, 2倍にした実験の結果を示していく。図(1)-13は、大気中の硫酸塩とBCの標準排出量を与えた実験との差 を示している。いずれの物質でも、アジア・ヨーロッパ・北アメリカからの排出量が多いが、BCは特に 東アジアおよび南アジアからの発生量が相対的に多い。一方、硫酸塩は中東でも多く、原油生産・利用 に伴うものと考えられる。当然ではあるが、排出量の増減が大きいほど、大気中の量の差も大きい。

図(1)-14と図(1)-15は、硫酸塩およびBCについて、左側に瞬時放射強制力、右側に速い応答を含めた 放射収支変化の大気上端での年平均分布をそれぞれ示す。瞬時放射強制力については、ほぼ全球的に、 硫酸塩は増加すれば負の値で減少すれば正の値、BCは増加すれば正の値で減少すれば負の値と想定どお りの結果が得られている。BCの放射強制力が硫酸塩と比較して小さいためにはっきりしないが、基本的 には図(1)-13で示した発生量が多い地域で瞬時放射強制力の絶対値も大きい。速い応答を含めた放射収 支変化を見ると、硫酸塩の場合はその傾向がより明確に見えてくる。これは、図(1)-10を用いて説明し たとおり、硫酸塩の場合は、雲・エアロゾル相互作用による放射収支変化が、瞬時放射強制力(エアロ ゾル・放射相互作用)と同じ符号であるため、瞬時放射強制力を増強することになるためである。一方、 BCの場合は、硫酸塩の場合に見られるような明確な正負の傾向が見られない。図(1)-10に示すように、 速い応答の放射収支変化は、瞬時放射強制力を打ち消す方向に働いているためであると考えられる。BC の場合にも速い応答の放射収支変化に何かしらの地域性がある可能性はあるが、それは今後の研究の課 題である。そして、図(1)-16には、すべての応答、すなわち、瞬時放射強制力・速い応答・遅い応答の すべてを含めて放射収支変化を示す。硫酸塩の場合は、濃度が低い地域では瞬時放射強制力とは逆符号 である一方、排出量が多い地域であるアジア・ヨーロッパ・北アメリカでは、瞬時放射強制力と同符号 の強い放射収支変化を示している。これは、図(1)-10で示すとおり、硫酸塩の場合は、瞬時放射強制力 および速い応答の放射収支変化を遅い応答で完全に打ち消すことはできず、濃度が高い地域ではその影 響が残ってしまうこと、一方では、硫酸塩の増減により全球規模で気温がそれぞれ低下・上昇し、それ に伴い水蒸気量や雲水量が減少・増加するため、その他の地域ではそれに伴う放射収支変化があると考 えられる。それとは異なり、BCの場合は、すべての放射収支変化を統合すると、その変化がはっきりし なくなってしまう。これは、図(1)-10で示すとおり、瞬時放射強制力は、速い応答と遅い応答とでほぼ 完全に打ち消されることで起こっている。こうした硫酸塩とBCの放射収支の差異は、瞬時放射強制力で 大気中のエネルギー収支変化が起こるかどうかが鍵となっている。



図(1)-13 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(左)SO₂(右)BCの排出量を全球一様に(1 段目)0.1倍(2段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の硫酸塩およびBCの質量鉛直積算 値の標準排出量シミュレーションとの差の年平均分布。



図(1)-14 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源SO₂の排出量を全球一様に(1段目)0.1倍(2 段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の(左)瞬時放射強制力(右)速い応答を含めた (すなわち大気モデルによる)放射収支変化の大気上端での年平均分布。



図(1)-15 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源BCの排出量を全球一様に(1段目)0.1倍(2 段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の(左)瞬時放射強制力(右)速い応答を含めた (すなわち大気モデルによる)放射収支変化の大気上端での年平均分布。



図(1)-16 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(左)SO₂(右)BCの排出量を全球一様に(1 段目)0.1倍(2段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の速い応答および遅い応答を含め た(すなわち大気海洋結合モデルによる)放射収支変化の大気上端での年平均分布。

図(1)-17と図(1)-18は、それぞれ硫酸塩とBCによる地上気温変化分布と気温変化の緯度・高度分布を 示す。北半球中・高緯度に人為起源排出源は集中しているため、硫酸塩による地上気温変動も北半球中・ 高緯度で顕著である。排出量変化が大きいほど気温変化も大きく、ほぼ対流圏全体にわたって変化して いる。一方、BCによる気温変化は、図(1)-8で示したように、全球平均値にすると小さくなるが、人為起 源排出源の多い北半球中・高緯度ではある程度の変化が見られる。BC排出量が増加した場合の熱帯上部 対流圏での気温上昇もはっきりしている。ただし、感度実験ごとに変化する地域にばらつきが大きく、 この点は今後の研究での解析が必要である。なお、MIROC-SPRINTARSによるシミュレーションでは、BC の雪氷面への沈着による地表アルベドの変化は、簡易的なパラメタリゼーションにより考慮されている。 また、硫酸塩・BCのいずれの変化の場合にも、北西大西洋において逆符号の気温変化が見られる。これ は、硫酸塩やBCの濃度変化に伴うエネルギー収支変化により、海流が変化することが要因として考えら れるが、詳細なメカニズムの解明にはさらなる研究が必要である。

これまでは、S0₂とBCの排出量変化(硫酸塩とBCの濃度変化)に伴う放射収支および気温変化について 述べてきたが、本研究課題では、有機エアロゾルの排出量変動に伴う感度実験も実施した。図(1)-19は、 BCと有機エアロゾル両者の排出量を同時に変動させた場合の気温変化を示している。この実験では、燃 料起源だけではなく森林火災・焼き畑起源の排出量も変動させていることに注意が必要である。図(1)-3 で示したとおり、森林火災・焼き畑の主要排出源は、アフリカ中南部・アマゾン・東南アジア・シベリ ア等である。BCと有機エアロゾル両者の排出量を増加させた場合、硫酸塩の場合と同様に、基本的には 排出量が多い地域での気温低下が顕著である傾向が見られる。つまり、有機エアロゾルの増加により、 硫酸塩の場合と同様のメカニズムが働いていると推定できる。ただし、南緯35度付近の上部対流圏の昇 温だけは例外であり、原因は不明である。BCと有機エアロゾル両者の排出量を減少させた場合も、グロ ーバルには硫酸塩の場合と同様の傾向が見られるが、北半球中高緯度の中部および上部対流圏では気温 が低下している。この原因は現時点でははっきりしないが、森林火災・焼き畑起源エアロゾルは、排出 時に燃料起源よりも高高度へ持ち上がること、また、有機エアロゾルは若干の太陽放射の吸収があるこ とが要因としては考えられる。有機エアロゾルは化学組成が多様であり、気候モデルでの光学特性の設 定により気候影響評価が左右されるため、これも今後の研究により取り組むべき課題である。

最後に、硫酸塩およびBCの濃度変化に伴う降水量変化の変化を図(1)-20に示す。硫酸塩の増加による 降水量変化は、海洋混合層モデル(海洋1層)によるMIROC-SPRINTARSを用いた過去の研究²⁾で示したの と同様の傾向が見られる。つまり、太平洋熱帯域では硫酸塩増加によるグローバルな気温低下に伴う熱 帯収束帯の南下による変化が起こること、また、硫酸塩の量が非常に多いアジア域では雲寿命効果によ る降水量減少が起こることがわかる。しかし、後者について、近年の人工衛星データの解析による研究 ²²⁾では、雲寿命効果による降水量減少は自明ではなく、気候モデルが過大評価している可能性を指摘し ている。また、BCの場合は、BCの排出量が増加しても減少しても同様の地域的変化が見られるなど、現 状では理解が困難な結果を得ている。したがって、数値モデルの改良を含めて、SLCFsによる降水量変化 については今後の研究を通じて定量的評価を行うことが必要である。このことは、多方面への被害が甚 大となり得る豪雨・洪水と密接に関わる事象であるため、政策的・社会的に有効な科学的知見へとつな がっていくであろう。



図(1)-17 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源SO₂の排出量を全球一様に(1段目)0.1倍(2 段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の(左)地上気温変化(右)帯状平均緯度高度気 温変化の年平均分布。



図(1)-18 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源BCの排出量を全球一様に(1段目)0.1倍(2 段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の(左)地上気温変化(右)帯状平均緯度高度気 温変化の年平均分布。



図(1)-19 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源および森林火災・焼き畑BCおよび有機エアロ ゾルの排出量を全球一様に(1段目)0.1倍(2段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の(左) 地上気温変化(右)帯状平均緯度高度気温変化の年平均分布。



図(1)-20 MIROC-SPRINTARSにより計算された燃料起源(左)S02(右)BCの排出量を全球一様に(1 段目)0.1倍(2段目)0.5倍(3段目)1.5倍(4段目)2倍した場合の降水量変化の年平均分布。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

これまで、SLCPs/SLCFsの気候影響の定量的評価について、計算機リソースに制約があったり数値モデ ルが未熟であったりしたため、海洋モデルを結合して統合的なフィードバックを考慮した評価を行うこ とが困難であった。しかし、本研究課題では、研究代表者自身が着実に開発してきたエアロゾルの輸送 および気候影響をシミュレートする数値モデルを利用することで、主要な人為起源エアロゾルである硫 酸塩とBCについて、大気海洋結合系において非常多くの感度実験を通じた気候影響の定量的理解が可能 となった。シミュレーション結果の解析を行うことにより、BC排出量削減による地球温暖化緩和が従来 想定されていたよりも小さいことをメカニズムとともに解明したことは、科学的に新しい知見の代表例 であり、中間評価においても委員からの評価が高かった。この研究成果はScientific Reports誌に掲載 され、それに伴うプレスリリースも行い、新知見の普及を図った。

ただし、SLCPs/SLCFsは大気中での寿命が短いが故に、長寿命温室効果気体よりも地域的な科学的評価 をすることが一層重要である。SLCPs/SLCFsの定量的影響評価自体が国際的にも始まったばかりのフェー ズであるため、S-12プロジェクトにより進展した全球的な影響評価について、今後は地域規模の定量的 影響評価に発展させて、行政等の多方面においてより活用しやすい研究成果を創出していく必要がある。

(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>

本研究課題のシミュレーション結果は、S-12プロジェクトのテーマ2および4を中心として作成された SLCP最適削減パス探索ツール(http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/S12/)の基本データとして 利用されている。このツールは、今後の気候変動および大気汚染に関わる適応・緩和策策定において活 用されるために作成したものである。また、S-12プロジェクトでは、本研究課題の成果を含めて「SLCP 削減施策に関する提言」としてパンフレットを作成した。これを利用して、気候変動・大気汚染対策に 活用できる新しい知見の普及に引き続き取り組むとともに、日本国内だけではなく、英語版(作成中) を利用して国際的に活用されるように活動を継続する。

本研究課題の研究成果を公表した論文は、IPCC第6次評価報告書(AR6)に引用される予定であり、 SLCPs/SLCFsに関する今後の国際的取り組みに影響を与えるものである。また、本研究課題の研究代表者 は、以下の国際的活動を通して、本研究課題で得られた成果を普及させた。関連する国際的取り組みに て活用されることを期待している。

- アジアの越境大気汚染に関するセミナーへのパネリスト参加(主催:日米研究インスティテュート /Wilson Center、2015年11月)
 - * 米国議会関係者に対するレクチャー
- 気候と大気浄化の国際パートナーシップ (Climate and Clean Air Coalition; CCAC) のScience Policy Dialogueでの講演 (2018年4月)
- 気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 短寿命気候強制因子に関する専門家会合(Expert Meeting on Short-Lived Climate Forcers)出席
 * IPCCの選出により出席
- Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-Based Solutions執筆

6. 国際共同研究等の状況

- AeroCom (Aerosol Model Intercomparison Project) (http://aerocom.met.no)
 - 代表者:Michael Schulz(Norwegian Meteorological Institute, Norway) Stefan Kinne(Max-Plank Institute for Meteorology, Germany)

Mian Chin (NASA Goddard Space Flight Center, USA)

2003年設立の全球エアロゾルモデル相互比較プロジェクト。MIROC-SPRINTARSは設立当初からアジア で唯一参画している。欧米各研究機関(Max-Plank Institute, Hadlay Centre, Univ. Oslo, NASA GISS, NASA GSFC, NOAA GFDLなど)が参画している。IPCC第4次および第5次評価報告書におけるエアロゾ ルによる気候変動の評価の中心的役割を担った。

• PDRMIP (Precipitation Driver Response Model Intercomparison Project) (https://cicero.oslo.no/en/pdrmip)

代表者:Gunnar Myhre (Center for International Climate Research, Norway) Piers Forster (University of Leeds, UK)

エアロゾルなどの外部強制因子による降水量の変化を中心に解析する気候モデル国際相互比較プロ ジェクト。欧米各研究機関(Max-Plank Institute, Hadlay Centre, NASA GISS, NCARなど)との共 同研究である。

• AerChemMIP (Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project) (https://wiki.met.no/aerocom/aerchemmip/start)

代表者:William Collins (University of Reading, UK)

Jean-Francois Lamarque (National Center for Atmospheric Research, USA)

Michael Schulz (Norwegian Meteorological Institute, Norway)

IPCC AR6のベースとなる気候モデル相互比較プロジェクトCMIP6の1つであり、SLCPs/SLCFsの気候影響の定量的評価を目指している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- T. MICHIBATA, K. KAWAMOTO and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 14, 11935-11948, doi:10.5194/acp-14-11935-2014 (2014) The effects of aerosols on water cloud microphysics and macrophysics based on satellite-retrieved data over East Asia and the North Pacific.
- K. YUMIMOTO and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 120, 1582-1607, doi:10.1002/2014JD022390 (2015) Long-term inverse modeling of Asian dust: Inter-annual variations of its emission, transport, deposition and radiative forcing.
- 3) D. GOTO, T. NAKAJIMA, T. DAI, T. TAKEMURA, M. KAJINO, H. MATSUI, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, N. SUGIMOTO, A. SHIMIZU and T. OHARA: J. Geophys. Res., 120, 6247-6270, doi:10.1002/2014JD021693 (2015) An evaluation of simulated particulate sulfate over East Asia through global model inter-comparison.
- T. MICHIBATA and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 120, 9570-9590, doi:10.1002/2015JD023818 (2015) Evaluation of autoconversion schemes in a single model framework with satellite observations.
- 5) T. MICHIBATA, K. SUZUKI, Y. SATO and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 16, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016 (2016) The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals.
- 6) Z. KIPLING, P. STIER, C. E. JOHNSON, G. W. MANN, N. BELLOUIN, S. E. BAUER, T. BERGMAN, M. CHIN, T. DIEHL, S. J. GHAN, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, H. KOKKOLA, X. LIU, G. LUO, T. VAN NOIJE, K. J. PRINGLE, K. VON SALZEN, M. SCHULZ, O. SELAND, R. B. SKEIE, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS and K. ZHANG: Atmos. Chem. Phys., 16, 2221-2241, doi:10.5194/acp-16-2221-2016 (2016) What controls the vertical distribution of aerosol? Relationships between process sensitivity in

HadGEM3-UKCA and inter-model variation from AeroCom Phase II.

- 7) B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. –F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. P. SHINE, T. TAKEMURA, and A. VOULGARAKIS: Geophys. Res. Lett., 43, 2782–2791, doi:10.1002/2016GL068064 (2016) Fast and slow precipitation responses to individual climate forcers: A PDRMIP multi-model study.
- 8) S. GHAN, M. WANG, S. ZHANG, S. FERRACHAT, A. GETTELMAN, J. GRIESFELLER, Z. KIPLING, U. LOHMANN, H. MORRISON, D. NEUBAUER, D. PARTRIDGE, P. STIER, T. TAKEMURA, H. WANG and K. ZHANG: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 113, 5804-5811, doi:10.1073/pnas.1514036113 (2016) Challenges in constraining anthropogenic aerosol effects on cloud radiative forcing using present-day spatiotemporal variability.
- 9) C. W. STJERN, B. H. SAMSET, G. MYHRE, H. BIAN, M. CHIN, Y. DAVILA, F. DENTENER, L. EMMONS, J. FLEMMING, A. S. HASLERUD, D. HENZE, J. E. JONSON, T. KUCSERA, M. T. LUND, M. SCHULZ, K. SUDO, T. TAKEMURA and S. TILMES: Atmos. Chem. Phys., 16, 13579-13599, doi:10.5194/acp-16-13579-2016 (2016) Global and regional radiative forcing from 20% reductions in BC, OC and SO4 - an HTAP2 multi-model study.
- 10) T. NAKAJIMA, S. MISAWA, Y. MORINO, H. TSURUTA, D. GOTO, J. UCHIDA, T. TAKEMURA, T. OHARA, Y. OURA, M. EBIHARA and M. SATOH: Prog. Earth Planet. Sci., 4, 2, doi:10.1186/s40645-017-0117-x (2017) Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident.
- 11) S. S. PARK, T. TAKEMURA and J. KIM: Atmos. Environ., 152, 98-110, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.12.020 (2017) Effect of temperature-dependent cross sections on 04 slant column density estimation by a space-borne UV-visible hyperspectral sensor.
- 12) Y. SATO, Y., H. MIURA, H. YASHIRO, D. GOTO, T. TAKEMURA, H. TOMITA and T. NAKAJIMA: Sci. Rep.,
 6, 26561, doi:10.1038/srep26561 (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models.
- 13) G. MYHRE, G., P. FORSTER, B. SAMSET, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLAESCHNER, T. IVERSEN, S. KHARIN, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, D. J. L. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. SHINE, C. STJERN, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS, F. ZWIERS and S. G. AALBERGSJO: Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1185-1198, doi:10.1175/BAMS-D-16-0019.1 (2017) PDRMIP: A Precipitation Driver and Response Model Intercomparison Project, Protocol and preliminary results.
- 14) E. GRYSPEERDTA, J. QUAAS, S. FERRACHAT, A. GETTELMAN, S. GHAN, U. LOHMANN, H. MORRISON, D. NEUBAUER, D. G. PARTRIDGE, P. STIER, T. TAKEMURA, H. WANG, M. WANG and K. ZHANG: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 114, 4899-4904, doi:10.1073/pnas.1617765114 (2017) Constraining the instantaneous aerosol influence on cloud albedo.
- 15) M. SAND, B. H. SAMSET, Y. BALKANSKI, S. BAUER, N. BELLOUIN, T. K. BERNTSEN, H. BIAN, M CHIN, T. DIEHL, R. EASTER, S. J. GHAN, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, G. LIN, X. LIU, G. LUO, G. MYHRE, T. VAN NOIJE, J. E. PENNER, M. SCHULZ, O. SELAND, R. B. SKEIE, P. STIER, T. TAKEMURA, K. TSIGARIDIS, F. YU, K. ZHANG and H. ZHANG: Atmos. Chem. Phys., 17, 12197-12218, doi:10.5194/acp-17-12197-2017 (2017) Aerosols at the Poles: An AeroCom Phase II multi-model evaluation.
- 16) C. W. STJERN, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and F. ZWIERS: J. Geophys. Res., 122, 11462-11481, doi:10.1002/2017JD027326 (2017) Rapid adjustments cause

weak surface temperature response to increased black carbon concentrations.

- 17) H. G. TAKAHASHI, S. WATANABE, M. NAKATA, and T. TAKEMURA: Prog. Earth Planet. Sci., 5:44, doi:10.1186/s40645-018-0197-2 (2018) Response of the atmospheric hydrological cycle over the tropical Asian monsoon regions to anthropogenic aerosols and its seasonality.
- 18) Y. SATO, D. GOTO, T. MICHIBATA, K. SUZUKI, T. TAKEMURA, H. TOMITA and T. NAKAJIMA: Nat. Commun.,
 9, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6 (2018) Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model.
- 19) S. S. PARK, T. TAKEMURA and S.-W. KIM: Atmos. Environ., 186, 56-73, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.05.021 (2018) Comparison of aerosol optical depth between observation and simulation from MIROC-SPRINTARS: Effects of temporal inhomogeneous sampling.
- 20) B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: npj Climate Atmos. Sci., 1, 3, doi:10.1038/s41612-017-0005-5 (2018) Weak hydrological sensitivity to temperature change over land, independent of climate forcing.
- 21) T. B., RICHARDSON, P. M. FORSTERD, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, G. MYHRE, D. OLIVIE, B. H. SAMSET, D. SHAWKI, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: Geophys. Res. Lett., 45, 2815-2825, doi:10.1002/2017GL076520 (2018) Carbon dioxide physiological forcing dominates projected Eastern Amazonian drying.
- G. MYHRE, B. H. SAMSET, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, P. M. FORSTER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, K. P. SHINE, C. W. STJERN, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: Nat. Commun., 9, 1922, doi:10.1038/s41467-018-04307-4 (2018) Sensible heat has significantly affected the global hydrological cycle over the historical period.
- 23) J. TAN, J. S. FU, F. DENTENER, J. SUN, L. EMMONS, S. TILMES, K. SUDO, J. FLEMMING, J. E. JONSON, S. GRAVEL, H. BIAN, D. HENZE, M. T. LUND, T. KUCSERA, T. TAKEMURA and T. KEATING: Atmos. Chem. Phys., 18, 6847-6866, doi:10.5194/acp-18-6847-2018 (2018) Multi-model study of HTAP II on sulphur and nitrogen deposition.
- 24) L. LIU, D. SHAWKI, A. VOULGARAKIS, M. KASOAR, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, S. G. AALBERGSJO, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL and T. TAKEMURA: J. Climate, 31, 4429-4447, doi:10.1175/JCLI-D-17-0439.1 (2018) A PDRMIP multi-model study on the impacts of regional aerosol forcings on global and regional precipitation.
- 25) T. TANG, D. SHINDELL, B. H. SAMSET, O. BOUCHER, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, G. MYHRE, J. SILLMANN, A. VOULGARAKIS, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, T. IVERSEN, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, C. W. STJERN and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 18, 8439-8452, doi:10.5194/acp-18-8439-2018 (2018) Dynamical response of Mediterranean precipitation to greenhouse gases and aerosols.
- 26) J. TAN, J. S. FU, F. DENTENER, J. SUN, L. EMMONS, S. TILMES, J. FLEMMING, T. TAKEMURA, H. BIAN, Q. ZHU, C.-E. YANG and T. KEATING: Atmos. Chem. Phys., 18, 12223-12240, doi:10.5194/acp-18-12223-2018 (2018) Source contributions to sulfur and nitrogen deposition an HTAP II multi-model study on hemispheric transport.
- 27) G. MYHRE, R. J. KRAMER, C. J. SMITH, O. HODNEBROG, P. FORSTER, B. SODEN, B. H. SAMSET, C. W. STJERN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 11399-11405, doi:10.1029/2018GL079474 (2018)

Quantifying the importance of rapid adjustments for global precipitation changes.

- 28) C. SMITH, R. KRAMER, G. MYHRE, P. FORSTER, B. SODEN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLÄSCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, J. MULMENSTADT, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, B. SAMSET, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 12023-12031, doi:10.1029/2018GL079826 (2018) Understanding rapid adjustments to diverse forcing agents.
- 29) T. B. RICHARDSON, P. M. FORSTER, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, G. MYHRE, D. OLIVIE, B. H. SAMSET, D. SHAWKI, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: J. Climate, 31, 9641-9657, doi:10.1175/JCLI-D-17-0240.1.K (2018) Drivers of precipitation change: An energetic understanding.
- 30) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Sci. Rep., 9, 4419, doi:10.1038/s41598-019-41181-6 (2019) Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions.
- 31) K. SUZUKI and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 124, 2194-2209, doi:10.1029/2018JD029808 (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.

<その他誌上発表(査読なし)>

1) 竹村俊彦:静電気学会誌, 42, 212-217 (2018) エアロゾルによる気候変動と大気汚染 -気候モデル を用いた研究-

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) T. TAKEMURA: 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Recent studies on effects of aerosols on the climate system with global climate models.
- T. TAKEMURA: Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan (2014) Perspective of researches on aerosol climate effects with global climate models.
- T. TAKEMURA, T. MICHIBATA, K. SUZUKI and K. YUMIMOTO: EarthCARE Workshop 2014, Tokyo, Japan (2014) Application of EarthCARE data in climate models for studies on climate change and air pollution by aerosols.
- 4) T. TAKEMURA and M. CHIN: 13th AeroCom Workshop, Steamboat Springs, CO, USA (2014) Relative contributions of regional emissions to the aerosol radiative forcing based on the AeroCom Phase III / HTAP2 experiment.
- 5) T. TAKEMURA and M. CHIN: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA (2014) Relative contributions of regional and sector emissions to the radiative forcing of aerosol-radiation and aerosol-cloud interactions based on the AeroCom Phase III / HTAP2 experiment.
- 6) 竹村俊彦:日本気象学会2015年春季大会、つくば(2015)複数のエアロゾル関連モデル相互比較プ ロジェクト対応シミュレーション
- 7) 道端拓朗、竹村俊彦:日本気象学会2015年春季大会、つくば(2015) MIROC-SPRINTARSにおける暖か い雨の雲微物理スキームの評価
- 8) T. TAKEMURA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) Simulations under recent projects on aerosol model intercomparisons.
- 9) T. MICHIBATA and T. TAKEMURA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) A study of cloud-to-rain conversion processes for warm cloud over East Asia and the North Pacific from A-Train observations.
- 10) T. TAKEMURA: 2nd International Workshop on SLCPs in Asia, Incheon, Korea (2016) Assessment on climate response to aerosol effects based on a coupled atmosphere-ocean general circulation model. [invited]

- 11) T. TAKEMURA, H. IRIE, T. NISHIZAWA, K. AOKI, R. KUDO, A. HIGURASHI, A. SHIMIZU, S. S. PARK and K. YUMIMOTO: International SKYNET Workshop, Rome, Italy (2016) Resent application of SKYNET and AD-Net to aerosol climate models.
- 12) T. TAKEMURA, K. SUDO, K. UEDA, Y. MASUTOMI, S. WATANABE, M. NAKATA, H. G. TAKAHASHI and D. GOTO: International Radiation Symposium 2016, Auckland, New Zealand (2016) Environmental assessment on aerosol effects in Asian region based on modeling studies.
- 13) 道端拓朗、竹村俊彦:日本気象学会2016年春季大会、東京(2016) A-Train衛星観測データを活用した気候モデルにおける暖かい雨の雲微物理過程の評価
- 14) 朴祥緒、J. Kim、H. Lee、竹村俊彦:日本気象学会2016年春季大会、東京(2016) 衛星搭載UV-Visible センサーでのエアロゾルの有効高度算出
- 15) 竹村俊彦:日本地球惑星科学連合2016年大会、千葉(2016) エアロゾルによる気候変動 数値モ デルの開発と影響評価[招待講演]
- 16) T. TAKEMURA: Yoram Kaufman Memorial Symposium, Greenbelt, MD, USA (2016) Integrated assessment of aerosol effects on atmospheric temperature and precipitation with global climate models.
- 17) T. TAKEMURA: Goldschmidt 2016, Yokohama, Japan (2016) Mineral dust aerosols under the glacial period and anthropogenic global warming simulated by global models.
- 18) T. TAKEMURA, K. SUDO, K. UEDA, Y. MASUTOMI, K. SUZUKI and D. GOTO: 15th AeroCom Workshop, Beijing, China (2016) Climate change and impacts due to aerosol effects in Asian region based on modeling studies.
- 19) 竹村俊彦、鈴木健太郎:日本気象学会2016年秋季大会、名古屋(2016) 大気海洋結合モデルを用い たエアロゾルによる放射収支変化と気温変化との関係性の検証
- 20) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: 2017 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity, Tokyo, Japan (2017) Temperature responses of anthropogenic aerosols assessed with a coupled-ocean general circulation model.
- 21) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Asian Conference on Meteorology 2017, Busan, Korea (2017) Climate responses of anthropogenic aerosols assessed with a coupled-ocean general circulation model MIROC.
- 22) T. TAKEMURA: International Workshop on Asian Dust, Bioaerosols and Environmental Regime Shift, Nagoya, Japan (2017) Operation of an aerosol 7-days forecasting system with a global climate model.
- 23) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Tri-MIP (AerChemMIP-RFMIP-PDRMIP) Workshop, Reading, UK (2018) Sensitivity of meteorological field to changing anthropogenic aerosol emissions assessed with a coupled-ocean general circulation model MIROC-SPRINTARS.
- 24) 竹村俊彦、鈴木健太郎:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018) 大気海洋結合モデルを用いた エアロゾル排出量変化による気温変化の解析

(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) 竹村俊彦:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12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:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト S-12、2015年1月29日、東京大学福武ホール、聴講者約160名)にて講演
- 2) 竹村俊彦:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12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あらたな取り組み」(主催:環境研究総合推進費戦略研究プロジェク トS-12、2016年1月7日、東京大学生産研究所コンベンションホール、聴講者88名)にて講演

- 3) 竹村俊彦:九州大学大学院総合理工学府公開講座「大気と海洋の環境学-地球温暖化から越境汚染まで-」(主催:九州大学大学院総合理工学府、2016年8月20日、九州大学筑紫キャンパス、聴講者64名)
- 4) 竹村俊彦: 久留米市生涯学習センター時事講座「PM2.5・黄砂入門」(主催: 久留米市、2016年8月 27日、久留米市生涯学習センター、聴講者約70名)
- 5) 竹村俊彦:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12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あらたな取り組み」(主催:環境研究総合推進費戦略研究プロジェク トS-12、2017年1月17日、東京大学福武ホール、聴講者109名)にて講演
- 6) 竹村俊彦:第8回気象サイエンスカフェin九州「PM2.5もう一つの顔~大気汚染と気候変動~」(主催:日本気象学会/日本気象予報士会、2017年1月28日、BIZCOLI交流ラウンジ、聴講者約40名)にて 講演
- 7) 竹村俊彦:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12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あらたな取り組み」(主催:環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-12、2019年1月11日、東京大学福武ホール、聴講者92名)にて講演
- 8) 竹村俊彦:百道浜公民館お天気教室「大気汚染と気候変動」(主催:福岡市早良区百道浜公民館、2019 年1月24日、百道浜公民館、聴講者約30名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 竹村俊彦: NHK Eテレ サイエンスZERO (2014年9月7日、スタジオ出演)
- 2) 竹村俊彦:朝日新聞(2016年7月15日朝刊、24頁、「地球温暖化と大気汚染の正確な予測へ挑戦」)
- 3) 竹村俊彦:日経産業新聞(2016年10月6日、8頁、「次世代の先導者」)
- 4) 竹村俊彦、中島映至:サイエンスポータル(2019年2月13日、 https://scienceportal.jst.go.jp/news/newsflash_review/review/2019/02/20190213_01.html、 「大気汚染物質をそっくり減らすと地球温暖化が進むという「不都合な真実」」)
- 5) 竹村俊彦、鈴木健太郎:成果の記者発表(2019年3月14日、 http://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/326、九州大学、「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) 竹村俊彦、鈴木健太郎:西日本新聞(2019年3月15日朝刊、27頁、「汚染物質削減で温暖化が加速か」)

(6) その他

- 1) 竹村俊彦:地球惑星科学振興西田賞(2015)
- 2) 竹村俊彦:日本学術振興会賞(2019)
- 3) 竹村俊彦:日本学士院学術奨励賞(2019)
- 4) 竹村俊彦: Highly Cited Researcher (高被引用論文著者) 選出 (2014~2018年(5年連続))
 *日本に在籍する研究者でGeosciences分野における選出は唯一
- 5) 竹村俊彦:アジアの越境大気汚染に関するセミナーへのパネリスト参加(主催:日米研究インスティテュート/Wilson Center、2015年11月10日、Washington D.C., USA)
 *米国議会関係者に対するレクチャー
- 6) 竹村俊彦:気候と大気浄化の国際パートナーシップ (Climate and Clean Air Coalition; CCAC)の Science Policy Dialogueでの講演 (2018年4月18日、Toronto, Canada)
- 7) 竹村俊彦:気候変動に関する政府間パネル(IPCC)短寿命気候強制因子に関する専門家会合(Expert Meeting on Short-Lived Climate Forcers)出席(2018年5月28~31日、WMO, Geneva, Switzerland)
 * IPCCの選出により出席
- 8) 竹村俊彦: Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-Based Solutions著者

8. 引用文献

G. MYHRE, D. SHINDELL, F.-M. BREON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, J.-F. LAMARQUE, D. LEE, B. MENDOZA, T. NAKAJIMA, A. ROBOCK, G. STEPHENS, T. TAKEMURA and H. ZHANG: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin,

G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Eds.) 659–740 (Cambridge Univ. Press, 2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.

- 2) T. TAKEMURA, T. NOZAWA, S. EMORI, T. Y. NAKAJIMA and T. NAKAJIMA: J. Geophys. Res., 110, D02202, doi:10.1029/2004JD005029 (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model.
- 3) T. TAKEMURA, M. EGASHIRA, K. MATSUZAWA, H. ICHIJO, R. O'ISHI and A. ABE-OUCHI: Atmos. Chem. Phys., 9, 3061-3073, doi:10.5194/acp-9-3061-2009 (2009) A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum.
- 4) T. TAKEMURA: CGER's Supercomputer Monograph Report, 24, 88pp. (2018) Development of a global aerosol climate model SPRINTARS.
- 5) M. WATANABE, T. SUZUKI, R. O'ISHI, Y. KOMURO, S. WATANABE, S. EMORI, T. TAKEMURA, M. CHIKIRA, T. OGURA, M. SEKIGUCHI, K. TAKATA, D. YAMAZAKI, T. YOKOHATA, T. NOZAWA, H. HASUMI, H. TATEBE and M. KIMOTO: J. Climate, 23, 6312-6335, doi:10.1175/2010JCLI3679.1 (2010) Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity.
- K. SUDO, K., M. TAKAHASHI, J. KUROKAWA and H. AKIMOTO: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JD001113 (2002) CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description.
- 7) G. JANSSENS-MAENHOUT, F. DENTENER, J. VAN AARDENNE, S. MONNI, V. PAGLIARI, L. ORLANDINI, Z. KLIMONT, J. KUROKAWA, H. AKIMOTO, T. OHARA, R. WANKMUÜLER, B. BATTYE, D. GRANO, A. ZUBER and T. KEATING: Joint Research Centre, European Commission (2012) EDGAR-HTAP: A Harmonized Gridded Air Pollution Emission Dataset Based on National Inventories.
- 8) J. T. RANDERSON, G. R. VAN DER WERF, L. GIGLIO, G. J. COLLATZ and P. S. KASIBHATLA: doi:10.3334/ORNLDAAC/1191 (2013) Global Fire Emissions Database, Version 3 (GFEDv3.1) data set.
- 9) N. A. RAYNER, D. E. PARKER, E. B. HORTON, C. K. FOLLAND, L. V. ALEXANDER, D. P. ROWELL, E. C. KENT and A. KAPLAN: J. Geophys. Res., 108(D14), 4407 (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century.
- 10) B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. P. SHINE, T. TAKEMURA, and A. VOULGARAKIS: Geophys. Res. Lett., 43, 2782-2791, doi:10.1002/2016GL068064 (2016) Fast and slow precipitation responses to individual climate forcers: A PDRMIP multi-model study.
- 11) G. MYHRE, G., P. FORSTER, B. SAMSET, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLAESCHNER, T. IVERSEN, S. KHARIN, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. J. L. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, K. SHINE, C. STJERN, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS, F. ZWIERS and S. G. AALBERGSJO: Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1185-1198, doi:10.1175/BAMS-D-16-0019.1 (2017) PDRMIP: A Precipitation Driver and Response Model Intercomparison Project, Protocol and preliminary results.
- 12) C. W. STJERN, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, C. J. SMITH, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and F. ZWIERS: J. Geophys. Res., 122, 11462-11481, doi:10.1002/2017JD027326 (2017) Rapid adjustments cause weak surface temperature response to increased black carbon concentrations.
- B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI,
 D. FLASCHNER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON,
 D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: npj Climate Atmos. Sci., 1, 3,

doi:10.1038/s41612-017-0005-5 (2018) Weak hydrological sensitivity to temperature change over land, independent of climate forcing.

- 14) G. MYHRE, B. H. SAMSET, O. HODNEBROG, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, P. M. FORSTER, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. B. RICHARDSON, D. SHAWKI, D. SHINDELL, K. P. SHINE, C. W. STJERN, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: Nat. Commun., 9, 1922, doi:10.1038/s41467-018-04307-4 (2018) Sensible heat has significantly affected the global hydrological cycle over the historical period.
- 15) L. LIU, D. SHAWKI, A. VOULGARAKIS, M. KASOAR, B. H. SAMSET, G. MYHRE, P. M. FORSTER, O. HODNEBROG, J. SILLMANN, S. G. AALBERGSJO, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, T. IVERSEN, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL and T. TAKEMURA: J. Climate, 31, 4429-4447, doi:10.1175/JCLI-D-17-0439.1 (2018) A PDRMIP multi-model study on the impacts of regional aerosol forcings on global and regional precipitation.
- 16) G. MYHRE, R. J. KRAMER, C. J. SMITH, O. HODNEBROG, P. FORSTER, B. SODEN, B. H. SAMSET, C. W. STJERN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J.-F. LAMARQUE, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 11399-11405, doi:10.1029/2018GL079474 (2018) Quantifying the importance of rapid adjustments for global precipitation changes.
- 17) C. SMITH, R. KRAMER, G. MYHRE, P. FORSTER, B. SODEN, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, V. KHARIN, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, J. MULMENSTADT, D. OLIVIE, T. RICHARDSON, B. SAMSET, D. SHINDELL, P. STIER, T. TAKEMURA, A. VOULGARAKIS and D. WATSON-PARRIS: Geophys. Res. Lett., 45, 12023-12031, doi:10.1029/2018GL079826 (2018) Understanding rapid adjustments to diverse forcing agents.
- 18) T. B. RICHARDSON, P. M. FORSTER, T. ANDREWS, O. BOUCHER, G. FALUVEGI, D. FLASCHNER, O. HODNEBROG, M. KASOAR, A. KIRKEVAG, J. -F. LAMARQUE, G. MYHRE, D. OLIVIE, B. H. SAMSET, D. SHAWKI, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and A. VOULGARAKIS: J. Climate, 31, 9641-9657, doi:10.1175/JCLI-D-17-0240.1.K (2018) Drivers of precipitation change: An energetic understanding.
- 19) T. TAKEMURA and K. SUZUKI: Sci. Rep., 9, 4419, doi:10.1038/s41598-019-41181-6 (2019) Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions.
- 20) K. SUZUKI and T. TAKEMURA: J. Geophys. Res., 124, 2194-2209, doi:10.1029/2018JD029808 (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols.
- United Nations Environment Programme (UNEP) and World Meteorological Organization (WMO): 285
 pp. (2011) Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone.
- 22) T. MICHIBATA, K. SUZUKI, Y. SATO and T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Physics, 16, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016 (2016) The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals.

Ⅱ-2 数値モデルを用いた短寿命微量気体による気候変動の評価

名古屋大学大学院環境学研究科 須藤 健悟

平成26~30年度累計予算額:55,875千円

(うち平成26年度:11,886千円、平成27年度:11,292千円、平成28年度:11,294千円、 平成29年度:10,983千円、平成30年度:10,420千円) 累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

短期寿命気候汚染物質(SLCPs)の削減による温暖化抑制・遅延政策においては、BCなどのエアロゾルの排出削減が中心的に議論される傾向にあるが、SLCPsの主要微量気体である対流圏オゾンやメタンにも注目すべきである。また、オゾンを中心とする対流圏大気の化学過程は大気酸化能(OHラジカル濃度)を通じて、メタンの寿命・濃度を間接的に支配するため、窒素酸化物(NOx)排出量の削減など、対流圏オゾン削減に向けた取り組みには、各物質の相互作用を考慮することが求められる。本サブテーマ2の研究では、短寿命微量気体やエアロゾルの結合計算が可能な全球化学・エアロゾル気候モデルCHASER

(MIROC-ESM)を用い、過去から現在までのアジア域〜全球の大気汚染とその気候影響を、観測データと も融合しながら詳細に評価し、各種将来エミッション・シナリオに準拠した近未来~100年規模の予測計 算(CCMIやHTAPなど各種国際モデル相互比較プロジェクト)を通じて、全球の大気質と気候の変動を同 時に検討することを目的とする。とくに、大気化学過程の変動に重点をおきながら、コベネフィット的 観点から各シナリオの影響・効果を評価・整理し、新しい排出シナリオの策定に貢献する。本研究の結 果、アジア域を対象としてSLCPsの排出削減を行う場合、物質・成分によらず一律に削減を行う場合、地 表のオゾン・PM。ュ濃度の低減は期待できるが、放射強制力的観点からは、加熱性物質(BC・オゾン・メ タン)の削減による冷却効果が、冷却性のエアロゾルの減少による加熱によって相殺され、温暖化抑制 的効果はほとんど期待できないことが示された。また、過去のSLCPs変動に着目した再現実験では、対流 圏オゾン分布はNOx等の前駆物質の排出量以外にも成層圏オゾンや気象場の変動に大きく左右されるこ とが明らかになり、対流圏オゾン削減を検討する際には、オゾン層の回復や温暖化傾向(長寿命温室効 果気体変動)を考慮する必要があることがわかった。メタンについても、メタン自体の排出量に加えて、 Nox排出量の増加や温暖化傾向・成層圏オゾン変動が、大気酸化能の変動を通じて過去のメタン変動傾向 に重要な影響を与えていたことが定量的に示された。さらに、対流圏オゾンの削減を意図してNOx排出量 を削減する場合、オゾンの減少により温暖化抑制(冷却)効果が期待できる一方で、OH濃度(大気酸化 能) が減少することでメタンの増加となり、付加的な温暖化 (加熱) となってしまうことが示唆された。 テーマ2で構築されたS-12シナリオによる将来予測実験においても、大気環境改善・温暖化抑制ともに、 メタン濃度の削減の重要性が顕在化する結果を得た。したがって、オゾン・メタン(エアロゾル)、気 候変動、大気化学変動の相互作用をフルに表現した予測・シナリオ評価が今後さらに必要である。

[キーワード]

対流圏オゾン、大気酸化能、メタン、硝酸塩、SLCP

1. はじめに

中国などを中心とするアジアの急速な経済発展は、二酸化炭素などの長寿命の温室効果ガス(LLGHGs) だけでなく、窒素・硫黄酸化物や炭素性粒子などの大気汚染物質の排出量を、過去数十年にわたり、増 加させてきた。とくに、後者は短期寿命気候汚染物質(SLCPs)であるエアロゾルや対流圏オゾンの大気 中濃度を顕著に上昇させ、LLGHGsと同様に現在までの気候変動に深く関与してきた可能性が強い¹⁾。 SLCPsはアジア域の降水量の長期変化にも関与している可能性が指摘されており^{2,3)}、全球規模の気候変 動に加えて、領域規模の気候変動についてもSLCPs変動の寄与の検討が求められる。このようなSLCPsが 及ぼす気候変動の将来予測については、大気汚染低減と温暖化抑制の同時実現を意図したコベネフィッ ト(共便益)の観点からますます議論が活発化している⁴⁾。ここで、健康・農作物被害を削減しながら 地球温暖化も緩和することのできる最適なSLCPs削減策は複雑な相互作用を考慮して設計する必要があ ることに注意が必要である(図(2)-1)。しかしながら、これまでの研究では、黒色炭素(BC)などのエ アロゾルの排出量削減による温暖化低減に重点が置かれており、対流圏オゾン・メタンや大気酸化能(OH ラジカル)などの短寿命微量気体やこれらに関連する大気化学プロセスの役割はほとんど検討・定量化 されてこなかった。そこで、エアロゾルに加えて、微量気体と関連する大気化学反応を十分加味した総 合的な温暖化・大気汚染削減策の構築・提案が急務となっている。



図(2)-1 SLCPが温暖化および健康・農業に与える影響と各物質の相互作用。赤実線および青破線はそれ ぞれ正・負の影響を意味し、線の太さで影響の大きさを示す。各影響についてベネフィットを期待する には、赤線を弱め、青線を強める(弱めない)エミッション削減方法が効果的である。

2. 研究開発目的

サブテーマ2の研究では、短寿命微量気体やエアロゾルの結合計算が可能な全球化学・エアロゾル気候 モデルCHASER (MIROC-ESM)を用い、過去から現在までのアジア域〜全球の大気汚染とその気候影響を、 観測データとも融合しながら詳細に評価する。そのうえで、各種将来エミッション・シナリオに準拠し た近未来〜100年規模の予測計算を実施し、全球の大気質と気候の変動を同時に検討することで、コベネ フィット的観点から各シナリオの影響・効果を評価し、新しい排出シナリオの策定に貢献する。

3. 研究開発方法

本研究は、化学・エアロゾル気候モデルおよび地球システムモデルを用い、SLCPsにおけるオゾン等の 微量気体成分や、大気化学過程とエアロゾルとの相互作用に着目しながら、過去から現在までの気候変 動についての定量的な知見を得るとともに、将来のSLCPs削減策について、その効果・影響を総合的に診断するものである。H26年度は、化学・エアロゾル気候モデルの精緻化・改良を行い、本モデルを用いて2000年代を対象とした診断実験を実施するとともに、国際モデル相互比較プロジェクトであるCCMI

(Chemistry-Climate Model Initiative) やHTAP2 (Hemispheric Transport of Atmospheric Pollutants: Phase-2) の各実験を開始し、初期結果の提出や診断的な解析を行った。H27年度は、CCMIおよびHTAP2 実験を継続して実施し、モデル水平解像度に起因する不確実性の評価も行った。HTAP2実験については、 その結果を利用し、各主要汚染域の排出量削減が東アジア域の地表オゾン、PM2.5濃度に与える影響を評 価した。さらに、東アジア域の排出量削減効果について、放射強制力の評価を行い、過去30年間のア ジア域における排出量変化が及ぼす影響を推定した。H28年度では、CCMI実験の継続実施および解析を行 った。さらに、排出量削減に対する各種SLCPsの全球分布変動やその気候影響を評価するため、SLCPのう ち、とくに対流圏オゾンとメタンの変動をターゲットとした気候感度実験(平衡気候応答実験)を実施 し、結果を整理した。H29年度は、成層圏・対流圏オゾンの長期トレンドを再現する実験を実施し、その 要因の定量化を行った。また、テーマ2と連携しながら、S-12の共通シナリオの構築・グリッド化に貢 献した。H30年度では、構築されたS-12シナリオによる将来予測実験を解析し、地表オゾン濃度、対流圏 オゾン量・エアロゾル・放射強制力、およびメタン濃度について、将来変動とその要因をシナリオごと に詳しく評価した。

(1) 化学・エアロゾル気候モデルの開発・改良

本サブテーマでは、全球化学・気候モデル CHASER ^{5,6,7)}と全球エアロゾル・気候モデルSPRINTARS ⁸⁾、 およびこれらが結合された地球システムモデルMIROC-ESM-CHEM⁹⁾を土台としたモデル開発・研究を行う。 CHASERモデルでは、化学反応に加え、大規模移流輸送、積雲対流による鉛直輸送、人為・自然起源地表 emission、雷による NOx 生成、湿性/乾性沈着が考慮され、光化学過程では対流圏光化学の基本サイク ル(03-NOx-HOx-CO-CH4) と非メタン炭化水素(NMHCs)の酸化反応、硫酸塩・硝酸塩・アンモニウム塩

(S04²-N03⁻-NH4⁺)の生成、および不均一反応が考慮されている。CHASERモデルで計算されたオゾンや各 オゾン前駆気体の分布は各観測値と整合的であり、オゾン生成・消滅過程の表現の妥当性が確認されて いる(Sudo et al., 2002, 2007)。一方、SPRINTARSでは黒色炭素・有機炭素(BC・OC)、土壌ダスト、 海塩の各種エアロゾルの全球分布をシミュレートし、これらの大気放射、雲・降水過程への影響を計算 する。本研究では、これまでの作業により、CHASERとSPRINTARSの両モデルが結合され、エアロゾルとオ ゾン化学の同時計算が可能となっており、二次有機エアロゾル(SOA)の生成過程の計算や、硫酸塩と土 壌ダストとの相互作計算も導入されている。また、黒色炭素(BC)については、水溶性成分(硫酸や低 揮発性VOCs)による表面被覆過程の計算が導入されており、BC粒子の大気中での輸送や除去過程の計算 の精緻化が行われ、東アジアにおける観測データ¹⁰⁾等により検証も実施された。また、CHASER中の化学 反応メカニズムについて、新スキーム^{11,12)}の導入や改良を行い、対流圏オゾンや大気酸化能力(OHラジ カル分布)の計算の精度向上が図られた。

また、平成26年度ではとくに成層圏でのエアロゾルを正確に表現する微物理モデルの導入を重点的に 行なった。本研究では、硫酸エアロゾルの微物理過程(新粒子生成、既存粒子上での硫酸ガスの凝縮、 硫酸エアロゾル同士の衝突)を考慮し、粒径分布を陽に表現するモデルを構築した(図(2)-2)。本モデ ルでは、粒径分布の表現にモーダル法を用いており、3つの正規分布(核形成モード、エイトケンモード、 累積モード)の重ね合せにより粒径分布を表現している。これにより、火山噴火によるエアロゾルの増 加や、その気候への影響をより精緻に表現することが可能となり、成層圏エアロゾル濃度の人為的な増 加による地球冷却効果の検討など、地球工学的な見地の実験についても、より高精度で実施することが 可能となった。

60



図(2)-2 CHASER-SPRINTAS結合モデルにおける硫酸エアロゾル微物理過程の表現。

(2) CCMI過去再現実験

前項で記述した化学・エアロゾル気候モデルを用い、CCMI (Chemistry-Climate Model Initiative) のモデル間相互比較実験を実施した。CCMI実験は過去および将来を対象とした長期実験について、各種 変動要素の変化をすべて考慮する標準実験と、各要素の変動の寄与を分離・定量化するための感度実験 から構成される¹³⁾。変動要素としては、温室効果気体・海面水温、オゾン破壊物質排出量、オゾン・エ アロゾル前駆物質排出量、火山性エアロゾル量、および太陽変動が考慮されている。H26年度では、CCMI の標準実験セット (図(2)-3) のうち、過去の変動再現に関する標準実験 (REF-C1/CISD) を実施した。 オゾン・エアロゾルの前駆物質の排出量については、MACCityデータ¹⁴⁾を用いモデルへの入力・境界値 を作成した。図(2)-4は、本研究で用いたMACCityデータによる、N0x, C0, BC, S0² の長期変動・トレン ド (1960-2010年)を示す。N0x, S0²については、人為起源のエミッションが長期変動の支配的な要因で あり、2000年以降N0x排出量は微増を継続しており、S0²については主に中国の排出量減少を反映し、2008 年を境に増加から減少に転じている。一方で、C0/BCはバイオマス燃焼の年々変動の影響も大きいことが わかる。本実験では、これら前駆気体やエアロゾルの排出量変化に加えて、オゾン破壊物質や火山性エ アロゾルの変動や太陽変動およびQBOの影響も考慮した。また、モデル中の気象場を客観解析データに同 化させるREF-C1SDの実験では、Era-Interim の水平風速場と気温場を用いて、モデル中の各変数に対し て緩和(ナッジング)を適用した。

Name of Reference Simulation	Period	Greenhouse Gases	ODSs	SSTs/SICs	Background & Volcanic Aerosol	Solar Variability	VSLS	QBO	Ozone and Aerosol Precursors
REF-C1	Transient simulation 1960-2010 Appropriate spin up prior to 1960	OBS GHG used for CMIP5 simulations, updated until 2010.	OBS (WMO, 2011)	OBS HadISST1	OBS Surface Area Density data (SAD)	OBS Spectrally resolved irradiance data, Proton ionization, Ap	YES	OBS or internally generated	OBS Based on Lamarque et al. (2010), but annual emissions
REF-C1SD (nudged for CCMs, or CTMs)	Transient simulation 1980-2010	OBS Same as REF-C1	OBS Same as REF-C1	OBS Consistent with met. reanalysis	OBS Same as REF-C1	OBS Same as REF-C1	Same as REF- C1	Same as REF-C1	OBS Same as REF-C1
REF-C2	Transient simulation 1960-2100 10-year spin up prior to 1960	OBS to 2005 then RCP 6.0 (Masui et al., 2011)	OBS + A1 scenario from WMO (2011)	Modeled SSTs	OBS Background SAD	YES Spectrally resolved irradiance data, Proton ionization, Ap	YES	YES	Same as REF-C1 until 2000 + RCP 6.0 scenario in the future

図(2)-3 CCMIプロジェクトの標準実験セットの仕様。"OBS"は指定の観測データを入力や強制力として 使用することを意味する。



図(2)-4 CCMI用エミッションインヴェントリ(MACCity)による主要気体・エアロゾル成分の全球エミ ッション量の変化(1960年~2010年の50年間)。"AN"は人為起源(Noxについては、航空機起源"AIR"も 分けて表示)、"BB"はバイオマス燃焼起源のエミッションを示し、"AN+BB"または"ALL"は合計エミッシ ョン量を示す。BCに関しては、農業燃焼(AGR)、民生(DOM)、FF(化石燃料)、AIR(航空機)、バイ オマス燃焼(BB)のそれぞれの起源ごとに示す。

(3) HTAP2実験

H27年度では、化学・エアロゾル結合気候モデルMIROC-ESM-CHEMを用いて、大陸間・半球規模の大気汚染物質輸送に関するモデル相互比較プロジェクト(TF HTAP)の各種感度実験を行った。また、その結果

を解析し、各主要汚染域の排出量削減が東アジア域の地表オゾン、PM2.5濃度に与える影響を評価した。 また、東アジア域の排出量削減については、放射強制力の評価も行った。水平解像度については、従来 用いていた中解像度(格子サイズ:約300km)と高解像度(格子サイズ:約120km)の2種類の実験を実施 し、モデル水平解像度に起因する不確実性の評価も行った。

(4) 過去30年間のアジア域における排出量変化の影響

中国等における1980年から2010年の排出量増加によって、日本・アジアの大気質やその気候影響はどのように変化してきているかを推定するため、高解像度モデルを用いて、1980年から2010年までのアジア域における排出量の変化が地表オゾン、PM2.5濃度、放射強制力に与える影響の評価を行った。1980年の排出量は、HTAP2実験で用いた2010年の排出量を基準とし、REASインヴェントリにおける各領域の2010年/1980年の排出量比を乗じることで推定した(表(2)-1)。

表(2)-1 REASインヴェントリより算出した各領域の排出量の2010年/1980年比

領域/物質	NOx	CO	NMHCs	SO_2	NH_3	BC	OC
中国	0.16	0.48	0.25	0.41	0.52	0.67	0.76
日本	1.83	3.06	1.19	1.88	1.20	2.44	2.19
韓国	0.17	0.58	0.24	1.72	0.65	0.48	0.64
南アジア	0.21	0.47	0.42	0.21	0.56	0.46	0.56
東南アジア	0.19	0.46	0.37	0.48	0.45	0.59	0.69

(5) S-12シナリオ実験の実施

本サブテーマ2では、テーマ2と連携しながら、S-12の共通シナリオの構築作業に貢献し、将来予測 実験のためのグリッド化作業を担当した(図(2)-5)。最終年度では、構築されたS-12シナリオによる将 来予測実験を解析し、地表オゾン濃度、対流圏オゾン量・エアロゾル・放射強制力、およびメタン濃度 について、将来変動とその要因をシナリオごとに詳しく評価した。



除去対策最大

除去対策強化継続+ 2度目標 (再エネ強化・電化促進)



図(2)-5 S-12テーマ2により作成された燃料起源S0₂/N0xの2010年から2050年の排出量変化(本サブテ ーマの作業によりグリッド化)。

4. 結果及び考察

1) 化学・エアロゾル気候モデルによる成層圏エアロゾルの微物理シミュレーション

上述の新たに導入された成層圏エアロゾルに関する微物理過程の計算の検証・診断として、1991年ピ ナツボ火山噴火の再現計算を行い、観測データと比較した。まず、衛星観測の成層圏エアロゾル光学的 厚さ(以下、SAOD)を本モデルの計算値と比較した結果、噴火時点から1993年後半の期間においては、 モデルはSAOD観測値(50°N~50°S平均)の増加・減少をよく再現することが確認された。また、SAODの 南北分布の時間変化についても、モデルは観測値をよく再現しており、例えば1992年前半の熱帯から北 極域へのエアロゾル輸送の様子も再現することができた(図(2)-6)。また、粒径分布の変化についてモ デルを検証するため、衛星観測から推定された成層圏の有効半径(高度17km以上、50°N~50°S平均)と モデル計算値の比較を行った。その結果、モデルは噴火から1993年後半における有効半径の増加・減少 を良く再現していることが確認された(図(2)-7)。一方、1994年以降については、モデル計算値のSAOD、 有効半径において、負のバイアスが確認された。しかしながら、構築したモデルは火山噴火の影響が大 きい期間の成層圏エアロゾルの挙動をよく再現しており、今後、火山噴火の気候影響評価の高精度化も 期待できる。



図(2)-6 ピナツボ火山噴火にともなう成層圏エアロゾルによる東西平均の光学的厚さ(1020 nm)の時 間発展。



図(2)-7 ピナツボ噴火後の成層圏エアロゾル有効半径の時間発展。

2) CCMI標準実験

H26-28年度では、化学・エアロゾル気候モデル(MIROC-ESM-CHEM)を用い、CCMIのモデル間相互比較 実験を実施した。ここではとくに、標準実験のうち、気象場を客観解析データ(Era-Interim)に緩和さ せるREF-C1SDについての結果を概説する。図(2)-8は本研究で計算された地表付近のオゾン(0₃)および 一酸化炭素(CO)の観測との比較の一例(1979-2010年)である。0₃、C0ともに、観測値にみられる季節 変化や年々・経年変動が定量的にもよく再現されていることがわかる。

wood





1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006

Mauna Loa 20N 156W

図(2)-8 CCMI 実験で計算された地表オゾン0₃(左)・CO(右)の観測値との比較。太線は年平均、細線は月平均を示す。

また、個別の感度実験により、03、COに見られる年々 変動は基本的にはバイオマス燃焼による前駆気体 放出の経年変動に支配されていることが確認され た。とくに1998年にみられる強い正のCOアノマリが 顕著であり、モデルはこの時期に観測されたCO増大 を非常によく捉えることができている。また、Mauna Loaでの0₃については、ENSOに伴う経年変動成分¹⁵⁾ も確認された。ただし、モデルは北半球・中高緯度 の1990年以降のオゾン増加トレンドをやや過小評 価する傾向にあり、COについても南半球ではとくに 2000年以降において顕著な過大評価傾向がみられ る。CH4のシミュレーションについても長期変化傾向 の検証を行った結果、モデルは2000年頃までの継続 的なCH4濃度増加を定量的にもよく捉えることがで きていることが確認され、ピナツボ火山噴火による 1991~1995年のOH濃度変動を介したCH4への影響も よく再現されていた。図(2)-9は札幌における各高 度の03の時系列変動を示す。モデルは各高度にみら



図(2)-9 CCMI実験で計算された札幌にお ける各高度(250/500/850hPa)オゾンの時 系列変化。

れる季節・年変動を定量的によく再現し、10規模のトレンド(太線)についても観測と整合的である。

3) CCMI実験による微量成分の全球分布変動の要因分離

H27~28年度ではオゾン・エアロゾル前駆物質排出量変動の影響を分離・定量化する実験を実施した。 図(2)-10 は、本研究で計算・推定された1980~2010年の30年間のオゾン分布変動について、前駆物質排 出量変動の影響とそれ以外の影響に分離して示したものである。地表オゾン濃度については、上述のよ うに北米・欧州での環境規制等による前駆気体排出量削減により、年平均で2 ppby 以上のオゾン濃度減 少がみられる。一方、アジア域では、中国・インド域での排出量増加を反映し、5-10 ppbvの強いオゾン 増加となっている。季節別でみた場合、特に中国・東アジア域における排出量増加は春季に大きく、日 本付近の4月の平均オゾン濃度は10 ppbv近く上昇したことがわかった。地表オゾン分布にみられるこの ような変動パターンについては、やはり前駆物質排出量の変動が支配的な要因であるが、同期間に起き た成層圏オゾン減少や気象場変化(温暖化)による影響も少なからず(年平均で ±1 ppbv 程度)寄与 していることが示された。一方、東西平均のオゾン分布変動については、前駆気体排出量の増加に伴う 対流圏界面付近のオゾン増加に加えて、気象場変化(水蒸気・雷NOx発生や大気循環の変化)および成層 圏オゾン変化によるオゾン変動もnetのオゾン変動に対して重要な役割を果たしていることがわかった。 また、このようなオゾン変動プロセスを反映し、この間のオゾン変動による放射強制力(0.074 Wm⁻²) については、前駆気体排出量の変化による寄与(64%)だけでなく、気象場・成層圏オゾンの各変化も重 要な寄与(36%)を及ぼしていることが推定された。エアロゾルの地表濃度についても同様の解析を行い、 欧州・北米で顕著な減少(PM2.5として10 µg m⁻³以上)、アジア域で強い増加傾向など、オゾンと同様 の変動パターンを示すことがわかった。また、変動要因としては、人為起源の排出量変動だけでなく、 気象場変動に伴うダスト発生量の変動も重要な寄与を及ぼしていることが確認された。



東西平均オゾン(緯度-高度)

図(2)-10 1980~2010年の全球オゾン分布(ppbv)の変動。上段は、地表オゾン分布(年平均)、下段 は東西平均オゾン高度分布(年平均)であり、それぞれ前駆気体エミッション変動の寄与とそれ以外の 寄与(気象場変動および成層圏オゾン変動)に分けて示す。

また、放射強制力の解析から、過去50年間において、対流圏オゾンとエアロゾルはそれぞれ約0.3W m⁻²の加熱および冷却を及ぼし、互いに相殺する関係にあることが明らかになった。対流圏オゾンの放射 強制力については、NOxなどの前駆気体のエミッション増加だけでなく、大気循環や水蒸気の変動などが 放射強制力変動の重要な要因になっていることも示された。CCMIの将来予測実験では、対流圏オゾンや エアロゾルおよびメタンがどのような加熱・冷却を及ぼしているか整理し、温暖化による大気循環変動 にともなう成層圏から対流圏へのオゾン輸送増加トレンドにあることも定量評価された(図(2)-11)。 また、過去50年間におけるメタン増加傾向の各要因を定量化し、メタンのエミッションの増加だけでな く、大気中でメタンの存在寿命を支配するOHラジカルの濃度変動にも大きく寄与していることが明らか になった(図(2)-12)。さらに、メタンの濃度変化パスをシナリオごとに定量化しているが、その詳細 については本報告では割愛する。

CCMI実験で明らかになった対流圏オゾンの変動機構については、2000年以降の近年に着目した追加実験を実施した。この結果、2005年以降で衛星観測等により確認される対流圏オゾン量の正のトレンドは、 地表でのNOx排出量の増加だけでなく、成層圏からのオゾン降下量の増加、メタン増加(メタン増加はオ ゾン生成を促進)、航空機からのNOx排出量の増加が重要な役割を演じていることが定量的に示された(図 (2)-13)。



図(2)-11 CCMI実験における成層圏から対流圏へのオゾン降下量(Tg yr⁻¹)の将来予測。温室効果気体の増加を考慮するシナリオ(fGHG以外)では、温暖化に伴う成層圏循環の強化によりオゾン降下量は顕 著な増加傾向にある。



図(2)-12 CCMI実験による1960-2010年のメタン増加要因の推定。メタン排出量の増加の影響は、NOx増加や水蒸気・紫外光増加によるOH増加によって大きく抑制され、半減されていることが示されている。



図(2)-13 2005~2017年の対流圏オゾントレンド(北半球)。成層圏からのオゾン降下の増加に加え、 メタンの増加と航空機からのN0x排出量の増加が対流圏オゾンの正のトレンドに大きく寄与している。

4) HTAP2実験におけるエミッション削減応答の検討

ここでは、HTAP2の一環として、感度実験を行い、主要汚染域における20%の人為起源排出量の削減が 東アジア域の地表オゾン濃度、PM2.5濃度に及ぼす影響を推定した。その結果、東アジア域における地表 オゾン濃度、PM2.5濃度は、東アジア域自身の排出量削減で最も大きな減少が期待できることが確かめら れた(図(2)-14)。しかしながら、オゾンの場合は、既存研究と同様に、他の汚染領域における排出量 削減の影響も無視できない大きさであった。また、高解像度モデルの排出量削減に対する地表オゾン濃 度の減少量は、中解像度モデルと比較して10~20%小さく、中解像度モデルは排出量削減の効果を過大 評価する可能性が示唆された。中解像度、高解像度モデルの地表オゾン減少量の差異は、HTAP¹⁶⁾におけ るモデル間のバラつきと比較しても無視できない大きさであった。一方、PM2.5については、オゾンほど 大きな水平解像度依存性は見られなかった。

東アジア域の排出量削減については、全球平均の放射強制力への影響の評価も行った。ここでは、排 出量削減に伴う0Hラジカル濃度の変化がメタン、オゾン濃度を介して放射強制力に与える影響も併せて 評価している。東アジア域の排出量削減では、メタン、オゾンによる冷却効果(合わせて9-10 mWm⁻²)、 エアロゾル直接効果による加熱効果(7-13 mWm⁻²)が相殺し、期待される正の放射強制力の削減効果は かなり限定的であることがわかった。高解像度モデルでは、中解像度モデルに比べて、メタンによる放 射強制力が50%程度大きくなる一方で、オゾン、エアロゾル直接効果による放射強制力はそれぞれ25%お よび40%ほど小さくなることが確認された。全球平均の放射強制力についても、モデルの水平解像度は、 HTAPにおけるモデル間のバラつき^{17,18)}と比べて、無視できない影響を与えていた。


(b) 地表PM2.5濃度



図(2)-14 各汚染領域の排出量削減に伴う東アジア域・年平均の(a) 地表オゾン濃度、(b) 地表PM2.5濃度の変化(単位はそれぞれppbv、μg m⁻³)。

5) 過去30年間のアジア域における排出量変化の影響

ここでは、表(2)-1のような1980[~]2010年のアジア域排出量変化について、高解像度モデルを用いた感 度実験を実施し、アジア域の大気質変化や気候影響を推定し、整理した。

まず、地表オゾン、PM2.5濃度について、中国とアジア全域(東アジア域+東南アジア域+南アジア域) の排出量変化の影響を評価した(図(2)-15)。その結果、中国の排出量増加は、中国自身の地表オゾン、 PM2.5の濃度を増加させる(それぞれ最大30 ppbv, 50 µg m⁻³)だけでなく、日本、韓国や東南アジア 域の地表オゾン、PM2.5濃度も増加させていたことが示された(それぞれ1-5 ppbv、1-5 µg m⁻³)。また、 中国も含めたアジア全域の排出量変化によって、日本のオゾン濃度は増加したが、PM2.5濃度は減少した。 日本でのPM2.5濃度の減少は、硝酸塩、黒色炭素エアロゾルの減少によるものであった。また、インドに ついては、オゾン、PM2.5ともに自国の排出量変化の影響が支配的であった。

また、放射強制力への影響についても評価した結果、中国の排出量変化の影響は、エアロゾル直接効 果による冷却効果(36 mW m⁻²)が、オゾン、メタンによる加熱効果(17 mW m⁻²)を上回り、正味では冷 却効果(19 mW m⁻²)を及ぼしていることが示された(図(2)-16)。アジア全域の排出量変化については、 エアロゾル直接効果による冷却効果(92 mW m⁻²)、オゾン、メタンによる加熱効果(74 mW m⁻²)がとも に大きくなるが、これらが互いに相殺するため、正味の冷却効果(18 mW m⁻²)は、中国の排出量変化の 影響と同程度であった。エアロゾル直接効果への各成分の寄与は、硫酸塩が最も大きく、次いで黒色炭 素が大きい。しかし、硫酸塩と黒色炭素の増加は、それぞれ冷却、加熱効果をもつため、硫酸塩の冷却 効果の一部を黒色炭素が相殺していた。また、硝酸塩や有機炭素についても、無視できない寄与をもつ ことが示唆された。



図(2)-15 中国、アジア全域における1980~2010年の排出量変化が年平均の地表オゾン、 PM2.5の濃度分布に与えた影響(単位はそれぞれppbv、μg m⁻³)。



図(2)-16 (a) 1980年~2010年の中国、アジア全域における排出量削減に伴う、メタン、オ ゾン、エアロゾル直接効果による全球平均・年平均の放射強制力 (mW m⁻²)。(b) エアロゾル 直接効果に対するエアロゾル各成分の寄与。

6) アジア域エミッション20%削減感度実験

SLCPs削減シナリオの構築のための基礎知見とするため、アジア域のエミッションを一律に20%削減す る感度実験を実施した。この結果、東アジア域で年平均で 3ppbv以上のオゾン濃度低減や、15µg m⁻³以 上のPM2.5濃度低減が期待できることがわかった。しかしながら、放射強制力の観点では、BCやオゾンな どの加熱性物質の削減による冷却が期待できる一方で、硫酸塩・硝酸塩などの冷却性物質の減少による 加熱も同時に発生し、有意な温暖化低減とはならないことが判明した(図(2)-17)。このような結果は テーマ2とも共有し、S-12シナリオの策定に貢献した。



図(2)-17 アジア域エミッション20%削減で期待される放射強制力(mW m⁻²)。

さらに、本感度実験に関連し、オゾンの削減効果の推定について、解像度による依存性を確認した。 ここでは、化学気候モデルCHASERについて、従来から使用している水平2.8°格子の中解像度計算に加え、 水平0.56°格子の高解像度計算を行い、高解像度化によるオゾン化学場計算への影響を定量的に評価した。 図(2)-18は、中国域からのオゾン前駆気体エミッション(Nox, CO,およびVOCs)を20%削減した場合の対 流圏オゾン濃度変化の評価を、上述の2種類の水平解像度のモデルで実施したものである。高解像度の 計算に比較すると、低解像度の計算は、ソース域である中国を中心に夏季の地表オゾンを過大評価する 傾向にあることがわかる(これはおもにオゾン生成効率がNOx濃度に対して非線形に応答するためことを 反映していると考えられる)。この傾向は下流にあたるリモート域でも同様であり、年間平均の対流圏 カラム積算オゾン分布にも顕著な差異をもたらすことが確認された(カラムオゾン量の差異については、 前述のオゾン生成効率の非線形性に加え、モデル内の鉛直輸送過程の解像度依存性も寄与している可能 性がある)。この結果、エミッション削減によって期待できるオゾンの放射強制力にも50%程度の差異(低 解像度計算は放射強制力を過大評価)が生じることがわかり、エミッション削減による温暖化抑制効果 の評価・検討には、高解像度の化学気候モデル計算が必要である可能性が示唆された。



図(2)-18 化学気候モデルCHASERの高解像度化(水平2.8°格子→0.56°格子)による対流圏オゾンシミュ レーションへの影響(中国域エミッション20%削減に対する感度)。地表における夏季日中平均オゾン濃 度(左)、年平均対流圏カラムオゾン分布(中央)、および放射強制力分布(右)。

7) オゾン前駆気体エミッションの変化に対する放射強制力

対流圏オゾンは有害物質であり、重要な温室効果気体でもあるため、前駆気体の排出削減により、濃 度低減が好ましいと考えられる。ここでは、オゾン前駆気体として窒素酸化物(Nox)および一酸化炭素 (C0)に着目し、排出量変化に対する放射強制力の感度を精査した。2008年の排出量を1とし、0~2倍の 範囲で段階的に排出量を変化させる実験の結果によれば、Nox排出量を削減していく場合、対流圏オゾン の減少で冷却が期待できる一方で、Nox排出にともなって大気酸化能を支配するOHラジカルが減少し、メ タンが増加する傾向にあることが明らかになった。とくに50%以上の削減幅の場合には、オゾン減少によ る負の放射強制力(冷却)をメタン増加による正の放射強制力(加熱)が上回ることとなり、Nox削減は 付加的な温暖化を引き起こしてしまうことがわかった(図(2)-19)。ただし、同時にCOや揮発性有機化 合物(VOCs)の削減を想定する場合には、メタン・COともに減少が期待でき、Nox削減による加熱降下を 部分的に打ち消すことが可能であるが、その効果は相対的に弱く、40%以上の強いNox削減の場合には、 正味の温暖化となってしまうことが示された。

73



(direct) Radiative forcing responses to:

S-12-3

図(2)-19 NOxおよびCOのエミッションの段階的変化に対する各種放射強制力の評価。

8) オゾン前駆気体エミッションおよびメタンの変化に対する気候平衡応答

次に、CHASER (MIROC-ESM) を用い、オゾンの前駆気体のエミッション削減に対する平衡気候応答実験 を実施し、微量気体の全球的なエミッション削減がどのような気候影響を及ぼすか評価した。ここでは、 EDGAR-HTAPインヴェントリによる2008年を対象としたエミッションデータを用い、エミッション削減と して、N0xのみを対象とした場合および、N0xに加えてC0とV0Csも同時に削減させた場合の2ケースにつ いて、100年間の平衡応答実験を実施し、気候の応答変化を確認した。図(2)-20は、実験期間後半30年間 の平均地表気温変化(℃)を示す。いずれの実験においても、エミッション削減により気温低下が期待 される領域が見られるが、逆に昇温となっている領域も多く、とくにNOxエミッションのみを削減対象と した場合、両半球の高緯度・極域や中緯度(北米や日本付近)で顕著な昇温が目立つ。この結果、オゾ ン前駆気体のエミッション削減による全球平均の気温変化は、NOxのみ対象の場合、+0.10℃、NOx・CO・ VOCsを対象とした場合、+0.04℃と、いずれも昇温(温暖化)が確認された。このような昇温は、基本的 にはメタン(CH₄)の濃度変化によるものである。大気中のメタンは、OHラジカルとの化学反応で除去さ れるが、この0Hは大気中のN0xやC0・V0Csの濃度に大きく依存しているため、オゾン前駆気体の減少によ り大気中のメタン寿命が変化する。とくに、NOxを削減した場合、OHが減少するため、メタン濃度の増加 がもたらされる。この結果、対流圏オゾン量はNOx削減によって減少し気温低下に寄与するものの、その 一方でメタンの増加による昇温が相殺・凌駕し、結果的には昇温となる。実際、メタン濃度を変化させ ずオゾン変動のみによる気候応答をみた実験では、最大で0.16℃の気温低下(温暖化抑制)が確認され た(表(2)-2)。



図(2)-20 オゾン前駆気体の削減による地表気温の平衡応答変化(℃)。NOxに加えCO・VOCsのエミッションをゼロとした実験(左)とNOxエミッションのみをゼロとした実験(右)で、それぞれ現在気候(2000 年代)との差分(℃)を示す。

実験種別 (※"×0"はエミッション削減を示す)	ΔT ₂ [°C]	$RF(O_3)$ [Wm^{-2}]	$RF(CH_4)$ [Wm^{-2}]
NOx+CO+NMVOCs×O(CH4変動あり)	0.04	-0.32	0.19
NOx+CO+NMVOCs×O(CH4変動なし)	-0.16		
NOx×0 (CH ₄ 変動あり)	0.10	-0.23	0.34
NOx×0 (CH ₄ 変動なし)	-0.12		

表(2)-2 オゾン前駆気体のエミッション削減による平衡気候応答と放射強制力。

さらに、上述のオゾン前駆気体削減による気候応答実験について、降水量変動についての同様の評価 も行った。図(2)-21は、それぞれのエミッション削減ケースについて、年間平均の降水量の変動を示し たものである。いずれの実験においても、熱帯域を中心に強い降水量変化が確認されたが、メタン変動 を含めない実験では、誘引される降水量変動の強度は比較的弱く、全球平均の降水量変化も負(減少) となることが確認された。メタン変動を含めた実験では、上述のとおりオゾン前駆気体削減によって全 球的にメタン増加となるため、熱帯域に顕著な降水増加を形成し、全球平均でも降水量増加となること が示された。この結果から、降水量変動に対しては、オゾンよりもメタンの変動がとくに大きな影響を 及ぼす可能性が示唆された(鉛直分布や吸収波長の違いによるものと考えられる)。以上により、気温・ 降水量の両観点で、オゾンの削減効果だけでなくメタンの濃度変化にも十分注意を払いながら予測・検 討する必要があることが明らかとなった。



図(2)-21 オゾン前駆気体の削減による年間平均降水量の平衡応答変化(mm/day)。NOxに加えCO・VOCs のエミッションをゼロとした実験(左2つ)とNOxエミッションのみをゼロとした実験(右)で、それぞ れ現在気候(2000年代)との差分を示す。

9) S-12共通シナリオによる将来予測実験

最終年度では、テーマ2が構築したエミッション削減シナリオに基づき、将来気候の予測実験が行わ れた。この実験では、2010年を起点とし、CO₂等GHGsやSLCPsについて、複数通りの削減シナリオを想定 し、2050年までの変動を予測している。削減シナリオについては、GHGs削減によるいわゆる2度目標達 成のためのシナリオ(CCS: CO2回収、BLD:電化促進、RES:再生エネルギー利用強化)に加えて、SLCPs エミッションを削減する除去対策シナリオ(EoP)も設定されている。各シナリオの削減案による2050 年での地表オゾン濃度の減少幅(標準である「なりゆき」シナリオとの差)を図(2)-22に示す。除去対 策による削減を最大限強化するシナリオ (EoPmax) では、インド・中国において、年間平均で10 ppbv 以上のオゾン減少が期待できる(EoPmidでは、船舶のエミッション設定にミスがあり、海洋上で有意で ない変動がでているため、今回は着目しない)。除去対策に加えて、2度目標達成努力を導入した場合 には、15 ppbv以上のオゾン減少がアジア域に加えて北米域でも確認でき、北半球中緯度のリモート域で は5-10ppbvの顕著なオゾン減少となることが予測されている。地表オゾン削減について、同様の予測を アジア域について示したものが図(2)-23である。除去対策のみの場合(EoPmax)、オゾン減少は主にイ ンドや中国に限定される一方で、2度目標達成努力を含むシナリオでは、日本を含めて10ppbv以上のオ ゾン濃度減少が期待できることがわかる。2度目標達成シナリオでは、メタンの濃度減少が想定されて おり、メタン減少によるオゾン生成の抑制も、このような広範囲なオゾン減少に寄与したものと考えら れる。



図(2)-22 S-12シナリオにより計算された2050年における年間平均地表オゾン濃度の「なりゆき」シナ リオ(標準シナリオ)との差。EoPmaxは除去対策強化、EoPmidは除去対策継続、CCSはCO₂回収、BLDは電 化促進、RESは再生エネルギー強化、をそれぞれ示す。



図(2)-23 図(2)-22と同様、ただしアジア域について。

次に、各シナリオにおける対流圏中のオゾンの存在量の変化を、全球平均カラム濃度(DU)として図 (2)-24に示す。除去対策のみ(EoPmax)では、なりゆきシナリオよりもオゾン量は抑制されるものの、 2050年までオゾン増加傾向が継続することがわかる。脱硝装置導入などによる除去対策によってNOx等の 重要なオゾン前駆気体は減少するが、メタン濃度については増加が想定されているため、対流圏オゾン 量の増加につながったものと考えられる。一方、エネルギー転換など2度目標達成努力を導入したシナ リオでは、メタン濃度の全球的な減少が想定されており、2050年までに2DU以上のオゾン量減少が期待で きる。放射強制力の観点でみると、脱硝装置の導入などの除去対策に加えてエネルギー形態等の積極的 転換を導入した場合、2050年までに、なりゆきシナリオと比較して最大で、0.22 W m⁻² の加熱抑制が期 待できることが推定された。この結果から、対流圏オゾン量を減少させるには、前駆気体(Nox, CO, VOCs)の排出量削減に加え、メタン(CH₄)の排出削減が本質的に重要であることが示唆される。

全球平均のメタン濃度について同様の変化傾向を示したものが図(2)-25である。上述の通り、除去対 策(EoP)のみでは、メタン排出量の積極的削減が行われないため、2050年にかけてメタンは増加傾向と なる一方で、2度目標努力を導入するシナリオ(青線)では、顕著なメタン減少が期待される。さらに、 メタンの大気中での除去・寿命を決定するOHラジカルの変動を考慮した場合(破線)、EoPシナリオでは、 Nox排出量の削減に伴うOHの減少を受け、さらなるメタン増加となることがわかった。2度目標達成努力 を導入する場合には、メタン排出量の減少に伴って、メタンによるOH濃度抑制効果(メタン自体がOHと 反応し、OHを消費する効果)が弱まるため、NOx減少基調にあっても、メタン濃度の増加はほとんど目立 たない。このようなメタン濃度の変化傾向は、上述の対流圏オゾン量の変化パスにも大きく影響してお り、メタン排出量の積極的削減は、効率的な環境改善・温暖化抑制のためのキーとなるものであると提 案される。



図(2)-24 各シナリオによる対流圏オゾン量(平均カラム濃度)の変動傾向予測(単位は、ドブソン単 位、DU)。黒実線が標準「なりゆき」シナリオによる予測。

78



図(2)-25 各シナリオによるメタン濃度変化パス(単位はppmv)。黒実線が標準「なりゆき」シナリオ による予測。破線は各シナリオのNOx等の変動に付随して起こるOH濃度の変動を考慮した場合のメタン変 化を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

CCMIやHTAP2の国際プロジェクトに準拠した実験を継続的に実施し、大気汚染物質(対流圏オゾン・ 関連物質やエアゾル)の輸送や全球分布、およびそれらの長期変動とその要因について詳細な見通しを 得ることができた。また、エミッション削減が及ぼす温暖化削減効果について、オゾン前駆気体を削減 した場合にどのような気候応答がみられるかについて、メタンも含めた多面的な評価を行い、SLCPs削減 効果に関する確度の高い知見・知識を得た。

(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>

本業務の結果は、今後のエミッション削減政策の要である東アジア域を含めて、大気汚染・温暖化抑 制的観点から将来シナリオを策定する上で、重要な科学的知見を与える。とくに、本サブテーマでは、 Nox等削減の場合、大気中OH濃度(大気酸化能)の変動を通じて、メタン濃度が増加し、さらなる温暖化 を誘引してしまう可能性があることを示し、メタン濃度の削減による複合的かつ効率的な環境改善・温 暖化抑制効果を提案している。これらの成果は、これまでほとんど考慮されてこなかった大気化学プロ セスを加味した正確な予測・評価が必要であることを先駆的に提言するものであり、今後の排出量削減 シナリオの策定に寄与するところが大である。また、次期IPCC報告書に向けたモデル間相互比較プロジ ェクトであるCMIP6、CCMI、およびAeroChem-MIPにも、本推進費課題のMIROC/CHASER/SPRINTARSモデルを 用いて参加しており、大気汚染が与える気候影響の理解の高精度化に寄与し、気候政策の策定にも大き く貢献する予定である。

6. 国際共同研究等の状況

・CCMI (Chemistry-Climate Model Initiatives)、化学気候モデルによる大気中微量成分とその気候影響の再現と予測。英国(Leeds大学)、米国(MIT、NCAR、NASA等)、カナダ(Environment and Climate Change Canada, Victoria大学)、ニュージーランド(NIWA)、オーストラリア(Melborune大学、New South Wales大学)、その他。モデル間相互比較実験に本サブテーマのモデルを用いて参加し、結果について共同で議論・論文化を行った。

・本推進費プロジェクトで、インド・コーチン理工大学から研究員(VAZHATHOTTATHIL, Madhu)を雇用 し、共同でサブテーマ2の研究作業にあたった。作業においては当該研究員のオゾン変動解析手法等を 活用し、本サブテーマの化学気候モデルによる計算結果を当該研究員が行っているオゾン変動の要因解 析にも応用するなど共同研究として発展させた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- V. MADHU and K. SUDO: Am. J. Clim. Change, 8, 110-136, doi: 10.4236/ajcc.2019.81007 (2019) Quasi-Biennial Oscillations in Atmospheric Ozone from the Chemistry-Climate Model and Ozone Reanalyses.
- 2) T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, K. OGOCHI, K. SUDO and M. TAKIGAWA: Geosci. Model Dev., 11, 959-988, doi:10.5194/gmd-11-959-2018 (2018) Global high-resolution simulations of tropospheric nitrogen dioxide using CHASER V4.0.
- 3) T. T. N. TRIEU, D. GOTO, H. YASHIRO, R. MURATA, K. SUDO, H. TOMITA, M. SATOH and T. NAKAJIMA: Atmos. Environ., 153, 163-181 (2017) Evaluation of summertime surface ozone in Kanto area of Japan using a semi-regional model and observation.
- 4) T. SEKIYA, K. SUDO and. T. NAGAI: J. Geophys. Res. doi:10.1002/2015jd024313 (2016) Evolution of stratospheric sulfate aerosol from the 1991 Pinatubo eruption: Roles of aerosol microphysical processes.
- 5) 須藤健悟:大気化学研究、36、036A03(2017)化学気候モデルで探る大気微量成分の全球変動

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 須藤健悟:大気環境学会誌、49(2)、A25-A35(2014)地球温暖化-第4講 大気汚染と地球温暖化
- 2) 須藤健悟:大気環境学会誌、53(2)、A53-A70(2018) 大気汚染の気象学-第4講 半球・全球大気汚染の気象学

(2) 口頭発表(学会等)

- K. SUDO, A. WADA, T. TAKEMURA, Z. KLIMONT, J. KUROKAWA and H. AKIMOTO: 2nd ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Global Modeling and Projection of Short-Lived Climate Pollutants in an Earth System Model.
- T. SEKIYA and K. SUDO: 14th Quadrennial IGAC Science Conference on Atmospheric Chemistry, Natal, Brazil (2014) Roles of transport and chemistry processes in global ozone change on multi-decadal time scale.
- K. SUDO, A. ITO and Y. KAWABUTI: Fall Meeting of American Geophysics Union 2014, San Francisco, U.S.A. (2014) Interannual variabilities in tropospheric constituents during 2000-2010 simulated in a chemistry-aerosol coupled climate model.
- 4) T. SEKIYA and K. SUDO: Fall Meeting of American Geophysics Union 2014, San Francisco, U.S.A.

(2014) Global microphysical simulation of stratospheric sulfate aerosol after Mt. Pinatubo eruption.

- 5) 須藤健悟、伊藤昭彦:日本気象学会2014年秋季大会、福岡 (2014) 化学・エアロゾル気候モデルに よる全球窒素沈着シミュレーション
- 6) 関谷高志、須藤健悟:日本気象学会2014年秋季大会、福岡 (2014) 大規模火山噴火後の成層圏硫酸 エアロゾルの微物理モデリング
- K. SUDO, K. MIYAZAKI, N. HUNEEUS, Z. JIANG, R. WANG and P. PATRA: 4th International workshop on Asian Greenhouse Gases, Yokohama, Japan (2015) Global and Asian budgets of carbon monoxide (CO) & black carbon (BC).
- 8) 須藤健悟、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2015)2000-2013年における対流圏大気成 分の全球分布と年々変動:化学・エアロゾル気候モデルによる計算
- 9) 関谷高志、須藤健悟:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2015)対流圏オゾンのソース-レセプター 関係の推定:モデル水平解像度の重要性
- K. SUDO, E. KAWABUCHI and A. ITO: HTAP2 Global and Regional Model Evaluation Workshop, Boulder, U.S.A. (2015) Interannual variabilities in tropospheric constituents during 2000-2013 simulated in a chemistry-aerosol coupled climate model with HTAP2 emissions.
- T. SEKIYA and K. SUDO: HTAP2 Global and Regional Model Evaluation Workshop, Boulder, U.S.A. (2015) Ozone source-receptor relationships in the CHASER model: Sensitivity to horizontal resolution.
- 12) K. SUDO, E. KAWABUCHI and A. ITO: CCMI (Chemistry-Climate Model Initiative) Workshop, CNR, Italy (2015) Interannual variabilities and long-term trends in tropospheric constituents during the recent decades simulated in CHASER (MIROC-ESM).
- 13) 須藤健悟、長谷川晃一:第21回大気化学討論会、東京(2015) 化学気候モデルによる1980~2010年 の全球大気微量成分の再現計算
- 14) 関谷高志、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015) 短寿命気候影響物質の排出量削減感度 とその気候影響の評価:モデル水平解像度の影響
- 15) 川渕衣里子、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015) 対流圏0Hラジカルの全球分布と年々・ 長期変動:化学気候モデルによる要因解析
- 16) 磯野結貴、宮崎和幸、伊藤昭彦、須藤健悟:第21回大気化学討論会、東京(2015) ホルムアルデヒ ドの全球分布変動とBV0Csエミッションの寄与:衛星観測およびCHASERモデルによる推定
- 17) K. SUDO: Quadrennial Ozone Symposium 2016, Edinburgh, United Kingdom, (2016) Interannual variability and long-term trends in global tropospheric ozone and related chemistry during recent decades.
- 18) 須藤健悟、磯野結貴、宮崎和幸、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2016) 衛星観測・ 全球化学輸送モデルによるホルムアルデヒドの全球収支とBV0CSエミッション量の推定
- 19) 山下剛史、須藤健悟:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2016)中国域におけるエアロゾルの収支 解析:濃度と流出量の経年変動
- 20) T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, K. OGOCHI, K. SUDO and M. TAKIGAWA: JpGU-AGU joint meeting 2017, Chiba, Japan, (2017) A high-resolution global chemical data assimilation of multiple satellite measurements during NASA' s KORUS-AQ campaign.
- 21) K. SUDO, T. YAMASHITA and T. TAKEMURA, JpGU-AGU joint meeting 2017, Chiba, Japan (2017) Seasonal and interannual variation in aerosol outflow from Asia/China and its controlling factors.
- 22) K. SUDO: Chemistry-Climate Model Initiative Science Workshop 2017, Toulouse, France (2017) Interannual variability and long-term trends in global tropospheric chemistry and aerosols during recent decades and in the future.

- 23) K. SUDO, T. NAGASHIMA and T. SEKIYA: International workshop on SLCP emissions and impacts in East Asia, Chiba, Japan (2017) Past and future changes in global SLCPs: roles of emission and atmospheric chemistry.
- 24) 須藤健悟、山下剛史、竹村俊彦:日本気象学会2017年秋季大会、札幌、(2017) アジア・中国域から のエアロゾル流出量の季節・経年変動とその要因
- 25) 関谷高志、宮崎和幸、大越智幸司、須藤健悟、滝川雅之:日本気象学会2017年春季大会、東京 (2017) 全球化学輸送モデルCHASERによる高分解能対流圏NO2シミュレーション
- 26) 須藤健悟、長谷川晃一、竹村俊彦:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018) 微量気体SLCPsの長 期変動と気候影響
- 27) 須藤健悟、趙舒悦、宮崎和幸、伊藤昭彦:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2018) Improving estimation of global BVOCs emissions using ground-based VOCs observations and satellite data of atmospheric HCHO.
- 28) 大西貴都、須藤健悟、原圭一郎:日本地球惑星科学連合大会、千葉(2018) Source attribution and budget analysis of black carbon in Antarctica.
- 29) K. SUDO and V. MADHU: 15th Quadrennial IGAC Science Conference on Atmospheric Chemistry, Takamatsu, Japan, (2018) What controls interannual variability and long-term trends in global tropospheric chemistry and aerosols in past and future?

(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

所属する大学等で開催される市民向けのサイエンスカフェや一般公開イヴェント等で、本S-12プロジェクトの成果を適宜紹介し、最新の温暖化対策について対話に努めた。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- M. A. BOLLASINA, Y. MING and V. RAMASWAMY: Science, 334, 502-505, doi:10.1126/science.1204994 (2011) Anthropogenic aerosols and the weakening of the South Asian summer monsoon.
- 3) D. GANGULY, P. J. RASCH, H. WANG and J.-H. YOON: J. Geophys. Res., 117, D13209, doi:10.1029/2012JD017508 (2012) Climate response of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols.
- 4) UNEP/WMO: United Nations Environment Programme (UNEP) Report (2011) Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: summary for Decision Makers.
- K. SUDO, M. TAKAHASHI, J. KUROKAWA and H. AKIMOTO: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JD001113 (2002a) CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description

- 6) K. SUDO, M. TAKAHASHI and H. AKIMOTO: J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001/JD001114 (2002b) CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation.
- 7) K. SUDO and H. AKIMOTO: J. Geophys. Res., 112, D12302, doi:10.1029/2006JD007992 (2007) Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions.
- 8) T. TAKEMURA: Atmos. Chem. Phys., 12, 11555-11572, doi:10.5194/acp-12-11555-2012 (2012) Distributions and climate effects of atmospheric aerosols from the preindustrial era to 2100 along Representative Concentration Pathways (RCPs) simulated using the global aerosol model SPRINTARS.
- S. WATANABE, T. HAJIMA, K. SUDO, T. NAGASHIMA, T. TAKEMURA, H. OKAJIMA, T. NOZAWA, H. KAWASE,
 M. ABE, T. YOKOHATA, T. ISE, H. SATO, E. KATO, K. TAKATA, S. EMORI and M. KAWAMIYA: Geosci.
 Model Dev., 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011 (2011) MIROC-ESM 2010: model description
 and basic results of CMIP5-20c3m experiments.
- 10) Y. KANAYA, H. IRIE, H. TAKASHIMA, H. IWABUCHI, H. AKIMOTO, K. SUDO, M. GU, J. CHONG, Y. J. KIM, H. LEE, A. LI, F. SI, J. XU, P.-H. XIE, W.-Q. LIU, A. DZHOLA, O. POSTYLYAKOV, V. IVANOV, E. GRECHKO, S. TERPUGOVA and M. PANCHENKO: Atmos. Chem. Phys., 14, 7909-7927, doi:10.5194/acp-14-7909-2014 (2014) Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during the period 2007-2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations.
- 11) N. I. BUTKOVSKAYA, A. KUKUI, N. POUVESLE and G. L. BRAS: J. Phys. Chem. A, 109(29), 6509-6520, doi:10.1021/jp051534v (2005) Formation of nitric acid in the gas-phase HO₂ + NO reaction: Effects of temperature and water vapor.
- 12) N. BUTKOVSKAYA, A. KUKUI and G. L. BRAS: J. Phys. Chem. A, 111(37), 9047-9053, doi:10.1021/jp074117m (2007) HNO₃ forming channel of the HO2+NO reaction as a function of pressure and temperature in the ranges of 72-600 torr and 223-323 K.
- 13) V. EYRING, et al.: J. Geophys. Res.-Atmos., 118, 5029-5060, doi:10.1002/jgrd.50316 (2013) Long-term ozone changes and associated climate impacts in CMIP5 simulations.
- 14) C. GRANIER, et al.: Clim. Change, 109, 163-190, doi:10.1007/s10584-011-0154-1 (2011)
 Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980-2010 period.
- 15) T. SEKIYA and K. SUDO: J. Geophys. Res., 117, D18303, doi:10.1029/2012JD018054 (2012) Role of meteorological variability in global tropospheric ozone during 1970-2008.
- 16) A. M. FIORE, et al.: J. Geophys. Res., 114, D04301, doi:10.1029/2008JD010816 (2009) Multimodel estimates of intercontinental source-receptor relationships for ozone pollution.
- 17) M. M. FRY, et al.: J. Geophys. Res., 117, D07306, doi:10.1029/2011JD017134 (2012) The influence of ozone precursor emissions from four world regions on tropospheric composition and radiative climate forcing.
- 18) H. YU, M. CHIN, J. J. WEST, C. S. ATHERTON, N. BELLOUIN, D. BERGMANN, I. BEY, H. BIAN, T. DIEHL, G. FORBERTH, P. HESS, M. SCHULZ, D. SHINDELL, T. TAKEMURA and Q. TAN: J. Geophys. Res. Atmos., 118, 700-720, doi:10.1029/2012JD018148 (2013) A multimodel assessment of the influence of regional anthropogenic emission reductions on aerosol direct radiative forcing and the role of intercontinental transport.

Ⅱ-3 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康へのインパクト評価

京都大学地球環境学堂 上田 佳代・Seposo Xerxes

平成26~30年度累計予算額:44,053千円

(うち平成26年度:9,337千円、平成27年度:8,913千円、平成28年度:8,467千円、

平成29年度:8,890千円、平成30年度:8,446千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

サブテーマ3では、全球におけるSLCP排出に伴う健康へのインパクトを評価するために、系統的な文献 レビューから抽出された大気汚染物質と死亡との関連について検討した疫学知見を統計的手法を用いて 統合することにより、精度の高い大気汚染(PM2.5,オゾン)曝露一健康影響関を構築した。その関数と大 気汚染物質(PM2.5やオゾン)濃度の分布情報とを結合することにより、現在の大気汚染物質関連の疾病 負荷を推定した。

現在のPM2.5、オゾン濃度による寄与死亡数は、それぞれ436.7万人、17.6万人と推定された。対策を 何もしない場合、将来の人口増加(すなわち死亡数の増加)に伴い、さらに寄与死亡数は増えることが 予測された。SLCP除去対策をとることにより、大気汚染物質濃度の低減が図れれば、大気汚染物質によ る寄与死亡数の増加は抑えられることが示された。PM2.5寄与死亡数は、除去対策強化継続に加えて2度 目標のうち再エネ強化・電化促進を追加したシナリオ(EoPmid-CCSBLD, EoPmid-RESBLDTRT)で、2010 年時点の寄与死亡数を下回った。東アジアや東南・南アジアでの低減効果が圧倒的に大きいことが示さ れた。オゾン寄与死亡数についても除去対策強化に2度目標を追加したシナリオの方が、除去対策強化の みのシナリオよりも寄与死亡数の減少幅は大きかった。

[キーワード]

健康影響、死亡、損失生存年数(YLL)、PM2.5、オゾン

1. はじめに

近年、大気汚染物質濃度と疫学知見から得られた曝露と健康アウトカムとの関連を用いて、大気汚染 物質が及ぼす疾病負荷(burden of diseases)を定量的に示す研究がなされている。これらの研究はおも にPM2.5やオゾンによる健康影響を想定しており、それらの曝露による関連死亡数が報告されている。疾 病負荷としての推定された関連死亡数は、大気汚染曝露がなければ起こらなかったかもしれない死亡数 と解釈される。言い換えれば、政策により大気環境が改善し、これらの大気汚染物質濃度が減ることに より、予防できる死亡数と考えることができる。SLCP削減は、気候変動の緩和策として関心が高まって いるが、SLCP削減により、関連する大気中の汚染物質、特に人への健康影響が懸念されるPM2.5やオゾン 濃度が低減すれば、気候変動の緩和とは別に、大気汚染物質関連の健康被害の予防が期待できる。これ から行う政策により期待される健康の効果を定量的に評価するために、疾病負荷評価の枠組みが用いら れる。これらの疾病負荷評価では、疫学知見から推定されたPM2.5の長期曝露一健康影響(死亡リスク) 関数が用いられることが多い。一方、SLCP削減がもたらす健康へのインパクトを定量的に評価するため には、各大気汚染物質濃度の分布情報だけでなく、それらの大気汚染物質への曝露と起こり得る健康事 象との関係を妥当な示す関数が必須である。

この曝露一健康影響関数は、一般的には人を対象とした疫学研究から導出することが多い。しかし、 死亡や疾患の発生は、大気汚染物質だけでなく、年齢、性別、生活習慣(喫煙、飲酒など)、高血圧・ 糖尿病などの既存疾患有無、食生活など、様々な因子に影響を受ける。疫学研究は、単に大気汚染物質 濃度と健康事象の発生との相関をみるのではなく、研究デザインや統計手法を用いて、このような大気 汚染物質以外の要因(交絡因子という)を考慮したうえで、曝露と健康影響の関係性を定量的に評価する。疫学研究で得られる大気汚染物質曝露による健康への影響推定値には統計学的なばらつきがある。 そのため、複数の疫学知見を統合することにより、精度の高い曝露-健康影響関数が得られると期待される。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、全球における大気汚染物質が寄与する健康影響、すなわち疾病負荷を評価すると ともに、SLCP排出削減に伴う大気汚染物質濃度の低減が疾病負荷をどの程度減らすかという健康へのイ ンパクトを評価することを目的とした。その目的を達成するために、以下のことを行った。まず、妥当 性のある健康インパクト評価を行うために、対象となる健康事象について検討し、精度の高い大気汚染 (PM2.5, オゾン)曝露一健康影響関数を構築した。次に、その関数と他の(サブ)グループより提供され る大気汚染物質 (PM2.5やオゾン) 濃度の分布情報とを結合することにより、現在の大気汚染物質関連の 疾病負荷を推定した。個々のSLCP排出変化がどの程度疾病負荷を変化させるかについての感度分析行っ た。さらに、様々なSLCP削減シナリオに基づいて推定された大気汚染物質濃度分布から、シナリオ別に 大気汚染物質関連疾病負荷を推定してシナリオ間で比較した。これらの検討により、健康影響の視点か ら最適なSLCP削減パス探索の道筋を示した。

3. 研究開発方法

(1) SLCP排出削減に伴う健康影響評価の枠組み

SLCP排出削減による健康影響評価をするための枠組みを図(3)-1に示す。テーマ2のSLCP排出削減シ ナリオに基づいて、テーマ3では数値モデルにより大気汚染物質濃度の分布が推定される。サブテーマ 3では図(3)-1の①~④を担当し、大気汚染物質濃度分布を用いて、疾病負荷、すなわち大気汚染物質 が寄与する健康事象(死亡数など)を定量的に評価する。まず、過去の疫学知見に基づき、PM2.5やオ ゾンなどの大気汚染物質濃度と健康事象との関係を示す関数を構築する。その関数から濃度に応じた リスク比 (RR)を推定する。このRRは、その地域の総健康事象発生数に対して大気汚染物質が寄与す る割合を表す集団寄与割合 (PAF)を算出するために用いられる。一般的にこのような健康影響評価で まず用いられる健康事象は、最も重篤な死亡であるため、以後は死亡を例として、枠組について説明 する。

PAFは以下の式にて求められる。

$$PAF = \frac{P_e(RR-1)}{P_e(RR-1)+1}$$
(3)-1

ここでPeは集団における曝露人口の割合を示す。大気汚染は全員が曝露するため、Pe=1となり、上式は、以下の式で表される。

$$PAF = \frac{RR-1}{RR} \tag{3}-2$$

PAFは、その地域の健康事象発生数(死亡や疾患発生)のうち、大気汚染物質が寄与する割合を示している。本サブテーマでは主に死亡に対する影響を対象としているため、その地域の死亡数(N0)が分かれば、以下の式から、大気汚染が寄与する死亡数が得られる。

$$N_{attr} = N_0 \times PAF \tag{3}-3$$

なお、地域の死亡数(*N*₀)は、その地域の人口(*Pop*)と死亡率(*M*₀)の積で求められるため、各国の人口と死亡率の整理を行った。死亡率は世界保健機構(WHO)のMortality Database

(https://www.who.int/healthinfo/statistics/mortality_rawdata/en/)から得た国別の30歳以上の 粗死亡率を用い、基準となる2010年のものを用いた。また、人口に関する情報は、2010年時点のもの を用いた。将来予測では、共通社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathways)のうち中庸シナ リオであるSSP2による国別情報(grid別)の人口を用いた。



図(3)-1 死亡を例にしたSLCP排出削減による健康影響評価のための枠組み。本サブテーマでは、①~④を行った。

本サブテーマでは、健康影響の指標としての死亡数だけでなく、死亡時の年齢を考慮した損失生存 年数(Years of Life Lost, YLL)も用いた(図(3)-2)。地域の総YLL(YLL₀)は以下の式で算出され る。

$$YLL_0 = \sum (疾病障害による死亡率) × (死亡時点での平均余命)$$
 (3)-4

死亡数で評価する場合、1歳で死亡した場合も80歳で死亡した場合もそれぞれ、「1人の死亡」とし て数えられる。実際には、死亡する年齢により、その社会的影響は異なると考える方が自然である。 YLLは本来の寿命に達する前に死亡する(早期死亡)ことにより失われた年数であるため、死亡時の年 齢により重みづけされることになる。すなわち、若いうちに死亡すると、死亡により失われた年数が 多くなり、重みづけが大きくなるのである。YLL以外にも、早期死亡による疾病負荷を示す指標として、 障害調整生存年(Disability-adjusted life years: DALY)があり、これはYLLと存命中の疾病や障害 による疾病負荷を表現した障害生存年数(Years lived with disability: YLD)の和である。YLDは疾病・ 障害の程度により0~1の範囲で重みづけがなされているが、疾病・障害の重みづけは、国・地域・社 会の文化、経済状況などにより大きく異なる。本サブテーマでは、YLLを対象とした。

大気汚染物質か関連するYLLは、死亡と同様、PAFを用いて以下の式で算出される。

$$YLL_{attr} = YLL_0 \times PAF \tag{3}-5$$

上式で用いるYLL₀は世界保健機構(WHO)において整備されている国別YLLの情報を用いた (https://www.who.int/whosis/whostat2006YearsOfLifeLost.pdf)。



図(3)-2 死亡とYLL(損失生存年数)、YLD(障害生存年数)の関係について。

(2) 疫学知見を用いた曝露-健康影響関数の作成

曝露とその健康影響については、時間的観点から、気温や大気汚染物質の日々の変化による健康影響 (短期曝露影響)と、それよりも長い年々の変動による健康影響(長期曝露影響)に分類すること ができる。本サブテーマでは、特に、PM2.5の長期曝露影響による健康影響を対象とした。粒子状物質 は様々な粒子径・成分を含む。PM2.5は粒子径が小さく、粗大粒子に比較して肺胞領域への沈着が多く、 より健康影響が大きい可能性があるため、健康影響に関する疫学研究が蓄積されてきた。PM2.5の長期 曝露影響評価に一般的に用いられるコホート(縦断)研究では、異なるPM2.5曝露レベルにある対象者 を長期間追跡し、新規の健康アウトカム発生を観察する。一般に、健康アウトカムは、年齢、性別、 生活習慣(喫煙、飲酒など)、高血圧・糖尿病などの既存疾患有無、食生活など、様々な因子の影響 を受ける。このような大気汚染物質以外の要因を交絡因子という。交絡因子を考慮しないと、誤った 関係性を得ることになる。コホート研究では、対象者を追跡する時点で詳細な交絡因子に関わる属性 情報を集め、それらを解析に用いる。真の関係性を見出すために、単に大気汚染物質濃度と健康事象 の発生との相関をみるのではなく、交絡因子を考慮し、様々な誤差を除いたうえで、曝露と健康影響 の関係性を定量的に評価するのである。

疫学研究を行うにあたり、理想的には、対象者個人のPM2.5曝露レベルを把握することが望まれるが、 実際には、対象者が居住する地点の粒子状物質濃度を曝露の代替指標として用いることがほとんどで ある。日本や欧米をはじめ先進国では数多くのコホート研究が存在し、これらの既存コホート情報と 地域の粒子状物質濃度を結合することにより、長期曝露の影響を評価することが可能となった。その ため、本サブテーマでは、系統的文献レビューを行い、PM2.5と死亡との関連について検討した疫学研 究を抽出し、その結果を統計学的に統合することにより、PM2.5長期曝露一健康影響関数を構築した。

まず、医学・生物学文献データベースPubMedにて1990年1月1日以降の公表されている英語の論文に ついて文献検索を行った。曝露を示す用語として"air pollutant(s)", "air pollution", "particulate matter", "PM2.5", "PM10"、健康アウトカムを示す用語として"mortality", "death"、

長期曝露を示す用語として"long term", "chronic", "cohort"を組み合わせて行った。

上記キーワードにより文献を検索し、まずタイトル、抄録からスクリーニングを行い、短期曝露影響の検討、疫学・統計手法に関する検討、粒子状物質以外の曝露や死亡以外の健康アウトカムを対象 としたもの、レビュー・総説・論評、明らかに内容が関連ないもの、職業曝露や室内の汚染物質への 曝露に関する研究、リスク評価、実験的検討、曝露評価の検討について除外した。スクリーニングに より選択された論文について、本文の内容を吟味し、健康アウトカムが全死亡("all-cause mortality", "all mortality")、自然死亡("natural-cause mortality")、非事故死亡("non-accidental mortality") であるもの、曝露指標がPM2.5であるもの、研究デザインがコホート研究であるものを抽出した。症例 対照研究は、研究デザインや対象が異なるため、除外した。また、個人の情報を用いない(したがっ て交絡因子を考慮しない)生態学的研究も除外した。さらに、同じコホートデータを用いた再解析・ 拡張解析・重複、心筋梗塞・乳がん・脳卒中など特定の疾患発症後の患者を追跡したコホートも除外 した。また、再解析や拡張解析などの重複するものはオリジナルの研究結果を選択した。最終的に選 択された文献について、研究デザインや交絡因子、バイアスの考慮など、研究の質に関わる項目につ いて評価し十分質が保たれるもののみ解析対象とし、健康アウトカム、曝露、交絡因子、影響推定値 に関する情報を得た。

このように得られた疫学研究の情報に変量効果モデルのメタアナリシスを適用し統合し、影響推定 値である回帰係数βを算出した。該当論文について、各研究で真の効果の大きさはある値を中心にし て分布すると考える変量効果モデルのメタアナリシスにより統合し、単位濃度(10μg/m³)上昇当た りのリスク比(RR)とその95%信頼区間(CI)を算出した。また、研究の行われた地域をアジア、ヨーロ ッパ、北米に分けて、それぞれの地域でも統合した。有意な結果はそうでない結果より公表されやす いという出版バイアスの有無を見るために各研究の影響推定値を横軸に、その影響推定値の推定精度 を縦軸に取ったfunnel プロットを用いて、視覚的に左右対称性を確認した。公表バイアスがなければ プロットは左右対称にばらつくが、公表バイアスが存在すると左右非対称となる。左右非対称である 場合には、trim and fill法を用いた感度分析を行った。すなわち、左右対称となるような研究数を推 定し、その分だけ極端な結果を削除(trim)し、その後に削除した研究を左右対称に配置(fill)し、 PM2.5と死亡との関連を再推定した。

これまでの疫学研究では、曝露一健康影響関数はその地点での濃度(X)、健康影響がみられ始める閾 値(X₀)、濃度と死亡との係数(β)を用いた線形関係を前提としてきた。しかし、PM2.5については、濃 度が高いアジアを含む開発途上地域からの疫学知見がほとんどない。高濃度では必ずしも線形でない 可能性があるため、以下の複数の仮定に基づいて曝露-健康影響関数を作成した。なお、X₀は人為由 来排出源がないと仮定した場合の濃度5.8μg/m³とした。

a. 線形関数は以下の式で表される。閾値濃度X0以下では、リスクはないためRR=1であるが、それ以上ではRRは濃度依存的に増加する。

$$RR = 1, if X \le X_0 (3)-6$$

RR = exp
$$\beta(X - X_0)$$
, if $X > X_0$ (3)-7

b. 線形関係~カットオフレベル以上は一定:カットオフ濃度(50µg/m³)以下は線形(a)、それ以上 はRRは上昇せず、一定とした。

$$RR = 1, if X \le X_0 (3)-8$$

RR = exp^{$$\beta(X-X_0)$$}, if $50 \ge X > X_0$ (3)-9

RR =
$$\exp^{\beta(50-X_0)}$$
, if X > 50 (3)-10

c. 非線形の曝露-健康影響関数:上述のように、アジア地域からのPM2.5長期曝露と死亡との関連を 評価したコホート研究はほとんどなく、PM2.5濃度が高い地域であってもどうような線形関係が保た れるかどうかは不確実なため、他の疫学知見と結合することにより、高濃度域での線形を仮定しな い関数についても探索した。タバコ煙は非常に高濃度の粒子状物質を含む。また、喫煙と死亡との 関係を検討した疫学研究は比較的多い。そこで、喫煙と死亡に関連する疫学研究、PM2.5濃度と死亡 との関連の研究を結合し、非線形回帰分析的手法を用い、PM2.5濃度と死亡リスク比の関数曲線を算 出した。喫煙時のPM2.5曝露濃度は、米国で行われた研究結果をもとに、1日の喫煙本数から算出し た。非線形の式は、以下のように表される。

RR = 1, if
$$X \le X_0$$
 (3)-11

RR = 1 +
$$\alpha \left(1 - \exp^{-\beta (X - X_0)^{\gamma}} \right)$$
, if X > X₀ (3)-12

PM2.5と死亡の疫学知見と、喫煙の疫学知見を結合することにより、パラメータα、β、γを推定し、

それを用いた。また、全死亡だけでなく、PM2.5との関連が示されている疾患(脳卒中、虚血性心疾 患、慢性閉そく性肺疾患、肺がん、急性呼吸器感染症)についても曝露-健康影響関数について構 築した。

オゾンや粒子状物質の個々の成分についても同様の系統的レビューを行った。オゾンの閾値は 33ppbとした。

(3) SLCP各組成を増減した場合の健康影響評価

構築した大気汚染物質濃度-健康影響関数を使って、SLCP各組成を変動させた場合のPM2.5およびオ ゾン濃度関連死亡数およびYLLを推定した。基準となる年は2010年とし、その都市のPM2.5濃度および オゾン濃度における全球の寄与死亡数、寄与YLLを推定した。そして、BC, OC, SO₂それぞれの排出量 を2010年レベルの0.3, 0.5, 0.8, 2, 5倍に増減した場合のPM2.5濃度の分布から、それぞれの寄与死 亡数、寄与YLLを推定した。同様に、NOx, CO, VOCを0.2~10倍に変動させた場合のオゾン濃度に寄与 する死亡数、YLLを推定して、2010年のものと比較した。

疾患別死亡についても同様の解析を行い、地域別の比較を行った。死亡率やその死亡に占める原因 は、国や地域によって異なる。たとえば、日本や欧米などの国々では、高齢者の循環器疾患やがんが 死亡原因の多くを占めるが、アフリカなどの開発途上国では、小児の急性呼吸器感染症が未だに死亡 原因の上位を占める。地域別比較では、世界銀行による一人当たりの国民総所得に基づく国別分類、 すなわち低所得国(LIC)、下位中間所得国(LMIC)、中~上中間所得国(UMIC)、高所得国別(HIC)を用い た。

(4) 様々な削減シナリオを考慮した場合

様々な削減シナリオから得られるPM2.5濃度に曝露一健康影響関数を適用し、それぞれのシナリオ別の疾病負荷(PM2.5寄与死亡数)を推定し、基準(2010年時点)の寄与死亡数との差を算出した。シナリオ別検討では、PM2.5の影響の閾値X₀を0とした。

シナリオは、テーマ2で検討されたReference(なりゆきシナリオ), EoPmid(除去対策Midシナリオ), Kappid=RESBLDTRT), EoPmid=RESBLDTRT), EoPmax (除去対策Maxシナリオ)を用いた。

将来の人口分布は、共通社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)のうちSSP2の もとでの人口(2010-2050年)を用い、死亡率との積で、2010~2050年までの5年毎の総死亡数を算出 した(図(3)-3)。死亡率も変化すると考えられるため、死亡率の将来予測は、United NationsのWorld Population Prospect(2015年版)の地域・国別粗死亡率(Medium Variant)(5年毎)を用いた。人口 予測では、アメリカ地域、西太平洋地域を除いた他の地域は2050年まで増え続けることが予測され(図 (3)-3、左)、それに伴い総死亡数も2010年の5,500万人から2050年の9,000万人弱まで増え続けると予 測された(図(3)-3、右)。

89



図(3)-3 2010~2050年における地域別(アフリカ地域、アメリカ地域、東地中海地域、東南アジア地域、西太平洋地域)の人口推計(左)および推計(右)。

これらから求めた総死亡にPM2.5-死亡関数から算出したRRおよびPAFを用い、シナリオ別PM2.5寄与 死亡数の推定を行った。シナリオで比較するために、なりゆきシナリオの寄与死亡数、YLLをreference として、その差を算出した。

(5)健康インパクト評価指標の検討(日本の事例を用いた検討)

本サブテーマでは、全球での健康インパクト評価を対象とし、寄与死亡数を評価対象としているも のの、大気質改善対策にかかる費用と比較するためには、寄与死亡数を何らかの仮定で、経済的な価 値に変換する必要がある。また、米国を中心に、死亡などの健康事象を減らした場合の経済的便益を 推定するリスク費用便益分析も行われている。このような分析では、死亡リスクを避けるために支払 ってもよいと考える支払意思額から求められる統計的生命価値(Value of statistical life (VSL)) や統計的延命年価値(value of statistical life years (VSLY))が用いられる。VSLYは国、地域や 時代により異なってくるため、妥当性のある推定をするためには、地域別の値を用いることが求めら れる。

そこで、日本において、大気汚染による疾病負荷を推定し、政策によりどの程度、その疾病負荷が 軽減されるかを評価し、PM2.5寄与死亡数、YLLだけでなく、VSLYを用いて、死亡を減らすことによる 経済的便益も推定した。この検討では、PM2.5の短期曝露影響による健康影響に着目し、国内9都市(札 幌市、仙台市、市川市、東京都23区、名古屋市、堺市、神戸市、倉敷市、福岡市)における2002~2008 年のPM2.5と日々の死亡数情報を用いて、PM2.5濃度と外傷を除く全死亡との関連について検討した。 日々の死亡情報は、厚生労働省の統計情報を用いた。各都市の死亡発生はPoisson分布に従うと仮定し て、回帰分析を行った。その際、非線形モデル(Distributed non-linear lag model)を適用し、季節 変動、長期トレンド、曜日、気象条件などの交絡因子を調整した。その後、各都市の結果をメタ解析 にて統合した。

この方法を性別、年齢階級別(0-64歳、65歳以上)別に層別化した解析を行い、影響を推定した。 得られた影響推定値を用い、現状でのPM2.5濃度レベル(平均18µg/m³)による寄与死亡数を推定した。 次に、PM2.5濃度について大気環境基準(年間)である15µg/m3まで減らした場合、WHOの基準である 10µg/m3まで減らした場合について、それぞれ寄与死亡数、YLL、経済的便益としてVSLYを計算した。

YLL₀は、2002~2008年の死亡情報から推定し、YLL₀は、0~64歳の死亡の平均が15.98年、65歳以上が5.29年、女性 7.68年、男性9.34であった。VSLYは以下の式から計算された。

$$VSLY = \frac{VSL_h \times r}{[1 - (1 + r)^{-YLL_0}]}$$
(3)-13

ここで用いたVSL_hは、日本で行われた研究の値372.5×10⁶(円)を用いた。また、年間割引率であるr は、3%とした(誌上発表8)。

4. 結果及び考察

(1) 疫学知見を用いた曝露-健康影響関数の構築

PM2.5と全死亡との関連について検討した論文について24件抽出した。詳細は、誌上発表(2)を参照されたい。このうち、アジアの研究(4件)は、日本、台湾、中国(香港含む)からのものであった。ヨーロッパの研究は6件、北米からは17件であった。コホートは、研究対象地域の全住人あるいは無作為に抽出した住人、特定の職業に従事する者(公務員、教員、看護師、農業従事者、退役軍人、医療従事者、トラック輸送業従事者など)を対象としたものがある。また、女性のみ、男性のみに限定したコホートもある。1990年代に報告された研究では対象者数は数千人であったが、最近ではコホートの対象者数は数万人以上であったが、全住人を対象としたコホートでは100万人を超えるものもあった。

これらの結果について、PM2.5曝露と死亡との関係について線形を仮定して、結果をとうごうした。統 合した影響推定値βは、0.006(95%信頼区間: 0.003, 0.010)であり、そのRRはPM2.5が10μg/m³上昇あ たり、1.06(95%CI: 1.03, 1.10)であった(図(3)-4)。また、funnel plot((図(3)-5)では、左右対 称ではなかった。funnelプロットは出版バイアスの有無を視覚的に評価することに用いられる。本研究

では左右対称ではなく、出版バイアスの可能性がある。





図(3)-4 アジア、ヨーロッパ、北米における、PM2.5が10µg/m³上昇した場合の全死亡のリスク比のフォレストプロット。右が個々の研究における単位濃度当たりのリスク比と95%信頼区間。一番下のひし形が、統合結果である。(誌上発表(2))



図(3)-5 PM2.5の影響推定値に関するfunnelプロット。横軸には各研究の影響推定値($\beta = \ln(RR)$)、縦軸にはその標準誤差をプロットしている。(誌上発表(2))

さらに、各研究について研究対象地域の平均PM2.5濃度とその濃度に対応するRRを、研究規模で重みづけしたバブルプロット(図(3)-6)では、多くの研究が北米とヨーロッパで行われており、その濃度域は40μg/m³を超えることはなかった。アジアでの疫学研究においても、対象地域の平均濃度は50μg/m³を越 えなかった。したがって、高濃度地域でのPM2.5濃度とRRとの関係が線形のままなのか、それとも非線形なのかについては言えない。



図(3)-6 各疫学研究の平均PM2.5濃度とその濃度のRRとのバブルプロット。円の大きさは研究規模、すなわち対象者の人数により重みづけされている。オレンジ色はアジア地域の研究、黄色はヨーロッパ地域、青色は北米からの研究を示す。

線形だけでなく、非線形を仮定した関数についても検討した。図(3)-7の(A)の線形モデルに示すよう に、PM2.5が50µg/m³を超えないレベルでは、疫学研究のRRにはばらつきはあるものの、概ね地域のPM2.5 濃度レベルが高いほど、そのRRも大きくなっている。B)では50µg/m³以上のRRは、それ以上増えず一定と 仮定したカットオフモデルのグラフを示している。(C)は喫煙の疫学研究と統合した非線形モデルのグラ フを示す。喫煙は直接煙を吸い込むため、曝露濃度は非常に高い。喫煙によるPM2.5の曝露濃度は、 5000µg/m³を超えると推定される。(D)は、同じ非線形モデル(C)のPM2.5濃度の幅を(A),(B)と同じく0

5000µg/mを超えると推定される。 (D)は、向し非線形モケル(C)のPM2.5濃度の幅を(A), (B)と向しく0 ~100µg/m³としたものである。3つのモデルを1つに示したのが図(3)-8、である。低濃度では、非線形 モデルのRRが線形モデルのRRより高いが、PM2.5が20µg/m³を超えるあたりから、線形モデルのRRの方が 大きくなる。



図(3)-7 曝露-健康影響関係:線形モデル(A)、50µg/m³をカットオフ値とした場合(B)、非線形モデル(喫煙によるPM2.5濃度の範囲)(C)、非線形モデル(PM2.5は0~100µg/m³の範囲)を示す。A, Bについては、95%信頼区間(点線)も示した。図中の黒点はPM2.5と個々の死亡の疫学研究のPM2.5平均濃度とそのRRを示す。オレンジ色の点は、喫煙と死亡との関連を検討した疫学研究におけるPM2.5濃度とRRを示す。



図(3)-8 PM2.5濃度が100µg/m³以下の場合の曝露一健康影響関数。赤線は線形、青線は50µg/m³以上一定のカットオフモデル、黒線は非線形関数を示す。それぞれの点は、各疫学研究が行われた地域の平均PM2.5 濃度とそのRR、および95%信頼区間である。

全死亡には、大気汚染物質とは関連のない様々な原因の死亡が含まれる。そこで、死因別の関数についても検討した(図(3)-9)。この検討では、非線形を仮定して、喫煙の疫学研究と統合した解析を行った。虚血性心疾患、脳卒中死亡は高濃度になると、RRの増え方が緩やかになった。特に、虚血性心疾患では、低濃度の方がリスクの上昇カーブは急峻である。脳卒中は、50µg/m³を超えるあたりから、カーブが緩やかになった。一方、肺がんはほぼ線形のままであった。

生理学的には曝露一反応関係が線形のままであることは考えづらく、いずれかの濃度で死亡リスクの

上限(プラトー)に達する非線形関数が妥当と考えられる。喫煙の疫学研究との統合結果からは、循環 器疾患は、比較的低い濃度で影響の上限(濃度がそれ以上増えても死亡リスクはそれ以上増えない)の 可能性が示唆された。肺がんには、100µg/m³以下の濃度では影響の上限は認められず、疾患により曝露 一健康影響関数の形に違いがあることが示唆された。



図(3)-9 死因別(慢性閉そく性肺疾患、虚血性心疾患、肺がん、脳卒中)の曝露-健康影響関数。

オゾンの長期曝露(図(3)-10)と死亡との関連について検討した論文についてもレビューを行った。 しかし、オゾン長期曝露と全死亡との関連について報告した研究は数が少なく、メタ解析の結果でも有 意な関連はみられなかった(図(3)-10)。そのため、Jerrett(2009)¹⁾らの論文の推定値(オゾン濃度10ppb あたり呼吸器疾患死亡のRR 1.04)を、以後の解析で用いることとした。オゾンの閾値(X0)は既存研究か ら33ppbとした。

粒子状物質の成分別の検討についても、文献数が少なかった(図(3)-11)ため、本サブテーマでは、PM2.5 の重量濃度と死亡との関連についての影響推定値のみ用いることとした。



図(3)-10 オゾンの長期曝露一と全死亡との関連についてのフォレストプロット。





図(3)-11 元素状炭素(EC, 左上)、有機炭素(0C, 右上)、硫酸塩(Sulfate, 左下)、硝酸塩(Nitrate, 右下)の長期曝露-と全死亡との関連についてのフォレストプロット。

(2) SLCPの各組成を増減した場合の健康影響評価

0.5°×0.5°グリッド別に曝露一健康影響関数に2010年におけるPM2.5濃度分布と人口、死亡率の情報を組み合わせて、PM2.5寄与死亡数を計算し、その空間的分布を示す(図(3)-12)。寄与死亡数は、 アジア、特に中国やインド、およびアフリカで多い。PM2.5による寄与死亡数は、全球で436.7万人と 推定された。カットオフモデルでは、276.2万、非線形モデルでは、419.8万人であった。概して、線 形モデルの推定値が他のモデルの推定値よりも大きい。同様にPM2.5寄与YLL(年)の分布も示す(図 (3)-13)。寄与YLLも同様の傾向がみられた。



図(3)-12 2010年の濃度レベルによるグリッド別PM2.5寄与死亡数の分布(人/250km²)。



図(3)-13 2010年の濃度レベルによるグリッド別PM2.5寄与YLLの分布(年/250km²)。

地域別にみると(図(3)-14)、中国、インドを含むアジア地域でPM2.5寄与死亡数、YLLともに多い。 アジアでのPM2.5関連死亡数は200万人を超えた。これまでの研究のPM2.5寄与死亡数の推定値は300万 ~700万人程度である。本研究では、全年齢を対象としていることや曝露一死亡関数の係数に違いがあ るものの、概ね既存の研究の推定値と一致している。



図(3)-14 地域別2010年の濃度レベルによるPM2.5寄与死亡数と寄与YLL。

次に、BC, 0C, S0₂排出量を変動させた場合の寄与死亡数((3)-15左)と、referenceとの差((3)-15 右)を示す。排出削減による最も寄与死亡数の変動が大きいのが0Cであり、排出をゼロにした場合には、 PM2.5寄与死亡数は2010年レベルに比較して170万人ほど少ない値となった。



図(3)-15 BC(赤), 0C(緑), SO₂(青) 排出量変化によるPM2.5寄与死亡数と基準の寄与死亡数(左)。右側はそれぞれの排出量を0~5倍にした場合のreferenceとの差を示す。

一方、オゾンによる寄与死亡数は、17.6万人と推定された。Nox, C0, V0Cの排出量を変化させた場合の寄与死亡数(図(3)-16左)と、referenceとの差を(図(3)-16右)示す。C0, V0Xの排出変動に対して、オゾンによる寄与死亡数は大きく変わらなかったものの、N0xの排出量変動により寄与死亡数は大きく変動した。



図(3)-16 NOx(オレンジ), CO(灰色), VOC(黒)排出量変化によるオゾン寄与死亡数と基準 推定値の寄与死亡数との差。

本研究で得られたPM2.5とオゾンによる寄与死亡数は、用いる曝露―影響関数や、閾値の設定などに より推定値の変動がみられるが、概ねPM2.5寄与死亡数は数百万、オゾン寄与死亡数は10~数十万規模 であった。死亡への影響のみからみればPM2.5を低減するようなSLCP削減策が優先順位が高いと思われ る。一方、オゾンは長期曝露との関連が明確ではなく、寄与死亡数もPM2.5に比較して小さかったもの の、オゾンの短期曝露影響特に呼吸器疾患への影響は数多くの知見が蓄積されている。短期曝露影響 関数を用いた検討も必要である。本サブテーマでは、一律に排出を減らした結果を示しているが、排 出削減のコストなどを考慮した上で、より現実的な削減政策の優先順位を検討するための知見となり うる。

疾患別死亡の関数を用いた検討も行った。図(3)-17 に示すように、BC、OC、SO2の排出量を2010年

の0, 0.3, 0.5, 0.8倍とした場合のPM2.5関連死亡数(左側)およびYLL(右側)の、2010年時点との 差とその死因別内分けを示した。死亡の原因となる疾患は、国の経済とも関わるため、世界銀行で定 義されている低所得国(LIC,アフリカが多い)、下位中間所得国(LMIC,中国、インドが含まれる)、 中-高位中間所得国(UMIC)、高所得国(HIC)に分けて示したものである。PM2.5関連死亡数、YLLとも にインドと中国を含む下位中間所得層(LMIC)の地域において、SLCP削減による差が大きい。疾患別 では、低~低-中所得国での急性下気道感染症が多い。これらの国では、乳幼児死亡率が高く、その原 因として急性下気道感染症が多いため、PM2.5を減らせば、小児の死亡を減らせることが期待できる。 一方中~高収入国では、高齢者が多いため、肺がんやCOPD(慢性閉そく性肺疾患)、循環器疾患などの 慢性疾患の寄与が大きくなる。また、インド、中国の寄与が非常に大きいことが示されている。



図(3)-17 BC(上段)、0C(中段)、SO₂(下段)の排出量を2010年の0,0.3,0.5,0.8倍とした場合の PM2.5関連死亡数(左側)およびYLL(右側)の2010時点との差とその死因別内分け。低所得国(LIC)、 下位中間所得国(LMIC)、中~上中間所得国(UMIC)、高所得国別(HIC)別に示している。疾患(ALRI: 急性呼吸器感染症、IHD: 虚血性心疾患、STROKE: 脳卒中、COPD: 慢性閉塞性肺疾患、 LC: 肺が ん)の内訳のうち、LMICに含まれるインドと中国は、暗い色(矢印、legendでは、疾患名のあと に"IndChn"と標識している)で示している。

さらに、各死亡原因がPM2.5関連死亡数に占める割合についても地域別に比較した(図(3)-18)。低所 得(LIC)および中国インドを含む下位中間所得国(LMIC(中印含))では、死亡やYLLに占める小児の急性 呼吸器感染症の割合(図中の赤色)が比較的多く、特にBC、0Cにおいて、その割合が大きかった。一 方、高所得国(HIC)では小児の急性呼吸器感染症はほとんどなく、循環器疾患(虚血性心疾患(図中 の青色)、脳卒中(同紫色))および肺がん(同緑色)がその多くを占めた。



図(3)-18 BC(上段),0C(中段),S02(下段)の排出を0にした場合に減少することが期待さ れるPM2.5関連死亡数(AN)およびYLL。左より低所得国(LIC)、中国とインドを含む下位中間所得国 (LMIC(中印含))、中国とインドを除く下位中間所得国(IMIC(中印なし))、中~上中間所得国(UMIC)、 高所得国別(HIC)の結果を示す。棒グラフは、急性呼吸器感染症(赤色)、慢性閉そく性肺疾患(黄 色)、虚血性心疾患(青色)、肺がん(緑)、脳卒中(紫)の割合を示す。

このように疾患別検討を組み合わせることにより、国別の優先順位を検討する材料となり得る。一 方、本サブテーマは死亡のみを対象としており、疾患の発症や増悪についての評価はなされていない。 疾患発症や増悪へのインパクトを評価するためには、個別の疾患発生率や有病率の情報が必要である。 国別のデータが整理されている死亡の評価とは異なり、疾患発生率や有病率は地域により大きく異な り、かつ情報が整備されていない国は多いため、全球レベルでの検討を行う場合には、国別でなく、 地域の平均的な発生率等の情報を用いる必要がある。

(3) 様々な削減シナリオによる大気汚染関連健康影響評価

PM2.5/オゾンの健康影響関数を用いて、テーマ2から提供されたシナリオを元に、2050年までの大 気汚染関連死亡数の予測を行い、2010年と比較することにより健康影響からみたSLCP削減最適パスに ついて検討した。

2010時点でPM2.5の健康影響に閾値はない(X₀=0)と仮定した場合のPM2.5寄与死亡数は、546万人で あり、オゾンの寄与割合はその1/10以下であった。将来の人口増加に伴い、死亡総数は9,000万人まで 増える。それに伴い、大気汚染物質濃度は減っても寄与死亡数は増え、なりゆきシナリオでの2045年 時点のPM2.5関連死亡数1,122万人まで増加した。この2010年時点でのなりゆきシナリオの寄与死亡数 と、各シナリオ別寄与死亡数との差を図(3)-18に示した。なりゆきシナリオでは、将来の人口増加(す なわち年間の死亡数増加)に伴い、大気汚染関連死亡数は増えると推定されたが、SLCP除去対策を加 えるいずれのシナリオも、寄与死亡数の増加は抑えられた(図(3)-19)。また、除去対策強化継続に 加えて2度目標のうち再エネ強化・電化促進を追加したシナリオ(EoPmid-CCSBLD, EoPmid-RESBLDTRT) の低減効果が大きく(図(3)-20左)、この二つのシナリオが2010年時点の寄与死亡数を下回った(図 (3)-19)。地域別では、東アジアや東南・南アジアでの低減効果が圧倒的に大きいことが示された(図 (3)-21)。

オゾン寄与死亡数についても除去対策強化に2度目標を追加したシナリオの方が、除去対策強化のみ のシナリオよりも寄与死亡数の減少幅は大きかった。2度目標のシナリオ間の大きな違いはみられなか った(図(3)-20右)。地域別検討では、除去対策強化継続に2度目標対策を加えたシナリオで、日本、 中国など東アジアを含む西太平洋地域での寄与死亡数低減効果が大きかった(図(3)-22)。



シナリオ別PM2.5寄与死亡数(万人/年)

図(3)-19 シナリオ別PM2.5寄与死亡数



図(3)-20 シナリオ別なりゆきシナリオと比較した場合の各シナリオの寄与死亡数。左がPM2.5 寄与死亡数の差、右がオゾン寄与死亡数の差を示す。



PM2.5関連死亡数(referenceとの差)

図(3)-21 地域別(アフリカ、アメリカ、東地中海、東南アジア、西大西洋地域)シナリオ別PM2.5 寄与死亡数。



図(3)-22 地域別(アフリカ、アメリカ、東地中海、東南アジア、西大西洋地域)シナリオ別オ ゾン寄与死亡数。

(4)健康インパクト評価指標の検討(日本の事例を用いた検討)

これまでは、健康の観点から死亡数を主な評価指標として示してきた。一方で、死亡リスクを経済 的に評価する試みも行われている。日本を例に短期曝露影響関数を用いて、大気質改善による経済的 便益を年齢的に定量化する試みを行った。

各都市における日々のPM2.5と死亡数の情報を用いた解析から得られたPM2.5濃度-死亡リスク比の 関数を図(3)-23に示す。東京ではほぼ線形であったものの、都市によりそのリスクパターンは異なっ た。札幌市、仙台市、市川市、名古屋市、神戸市、では概ね濃度が増えれば死亡リスクも増える正の 関連がみられた。福岡市、倉敷市は、U字型を示した。堺市は有意ではないものの、負の関連がみられ た。都市間の健康影響推定値の異質性には、各都市の住人の属性などが関わることが知られている。 また確率的誤差による部分も含まれるため、メタ解析により結果を統合した。メタ解析の手法を用い て統合した結果(図(3)-24)では、PM2.5短期曝露と死亡リスクとの関係は、PM2.5濃度が70μg/m³まで の範囲であれば、線形を示した。同様に、年齢階級別(64才以下、65歳以上)、性別にPM2.5短期曝露と 死亡との関連についての検討を行い、単位濃度あたりのRRを推定した(表(3)-1)。



図(3)-23 各都市のPM2.5-死亡リスク関数(赤線)とその95%信頼区間。推定には非線形モデルを用いた。(誌上発表(8))



図(3)-24 9都市の統合したPM2.5-死亡関数。PM2.5濃度が70µg/m³以下の範囲では、ほぼ線形であった。(誌上発表(8))

Risk Population	Effects estimate	95 % CI
All-cause	1.0052	(0.9909 - 1.0199)
0-64	1.0030	(0.9792 - 1.0283)
>64	1.0074	(0.9963 - 1.0187)
Female	1.0073	(0.9931 - 1.0216)
Male	1.0058	(0.9924 - 1.0194)

表(3)-1 年齢階級別、性別のPM2.5と死亡の影響推定値(10µg/m³あたり)

(誌上発表(8))

統合したPM2.5短期曝露—死亡リスク関数を用いて、現状の濃度レベル(18µg/m³)、大気環境基準(15µg/m³)、WHOのガイドラインレベル(10µg/m³)までPM2.5濃度を低下させた場合のPM2.5寄与死亡数、 YLL,経済的便益をそれぞれ推定した(図(3)-25)。現状レベルでは、寄与死亡数は約1万人(図(3)-25 の(A))とYLLは約7万年(図(3)-25の(B))と計算された。また、経済的負荷は、約3.35兆円(図(3)-25 の(C))と推定された。大気環境基準(15µg/m³)やWHOガイドライン(10µg/m³)まで濃度を低下するこ とにより得られる経済的便益(図(3)-25の(D))は、現状との差として示しており、PM2.5を15µg/m³ まで低下させることにより1兆円近く、10µg/m³まで低下することにより2兆円以上の経済的便益が得ら れると推定できる。

また、大気汚染の曝露-健康影響関数は、対象者属性によっても異なると考えられており、年齢や 性別の影響推定値(表(3)-1)を用いて、同様の解析を行った。大気質改善による経済便益に明らかな 性差はない(図(3)-27)ものの、比較的若年者死亡を予防することの便益が大きい(図(3)-26)こと が示された。表(3)-2に、それぞれの属性別の結果を示している。


図(3)-25 現状の濃度レベル(18µg/m³,黒色)、日本のPM2.5環境基準(15µg/m³,緑色)、WHO のガイドライン(10µg/m³,青色)レベルまでPM2.5濃度を低減させた場合の寄与死亡数(A),YLL(B), 経済的負荷(C)と経済的便益(D)。経済的便益は、現状レベルとの差とした。(誌上発表(8))



図(3)-26 年齢階級別、現状の濃度レベル、日本のPM2.5環境基準、WHOのガイドラインレベルまで PM2.5濃度を低減させた場合の寄与死亡数(A),YLL(B),経済的負荷(C)と経済的便益(D)。青色は64 歳以上、オレンジ色は64才以下。(誌上発表(8))



図(3)-27 性別、現状の濃度レベル、日本のPM2.5環境基準、WHOのガイドラインレベルまでPM2.5 濃度を低減させた場合の寄与死亡数(A),YLL(B),経済的負荷(C)と経済的便益(D)。灰色は女性、黄

色は男性を示す。(誌上発表(8))

表(3)-2 現状のまま("Do-nothing")、PM2.5の大気環境基準レベル("Japanese Standards")、WHO ガイドラインレベル("WHO Standards")まで下げた場合の属性別寄与死亡数、YLL,経済的負荷、 経済的便益。

Intervention	Mortality Subgroup	Attributable Number	Attributable YLL	Economic burden (by trillions of yen)	Economic benefit [Alternative minus Do-nothing] (by trillions of yen)
Do-nothing	0-64	838.07	13 386.61	0.397501	-
Do-nothing	>64	3 674.16	19 386.68	1.500191	-
	Female	4 934.56	44 491.60	2.125185	-
	Male	4 661.31	43 444.50	2.016131	-
Japanese Standards	0-64	624.07	9 968.43	0.296002	0.101499
	>64	2 735.99	14 436.42	1.117127	0.383064
	Female	3 699.44	33 355.36	1.593252	0.531934
	Male	3 486.53	32 495.31	1.508011	0.508119
	0-64	287.02	4 584.61	0.136135	0.261366
WHO	>64	1 258.32	6 639.49	0.513781	0.98641
Standards	Female	1 719.51	15 503.68	0.740549	1.384636
	Male	1 614.69	15 049.33	0.698395	1.317736

*経済的便益は、現状のままと比較した場合の差を示す。

(誌上発表(8))

このような属性別解析により、地域の状況を反映した妥当な疾病負荷が評価することができた。また、大気質改善により、防ぐことができる健康事象の定量的評価だけでなく、防ぐことのできる社会的損失を金額的価値に換算することにより、政策の効果を事前に予測することが可能となる。

健康影響関数を用いた健康インパクト評価は、関数の精度や大気汚染物質の閾値、シナリオ、大気 汚染物質濃度分布など、様々な前提条件に依存し、不確実性も大きい限界はあるものの、このような 健康影響の枠組みが、大気質改善の政策を支持する知見を提供することが期待される。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

SLCP削減の健康影響評価に用いる、PM2.5の曝露一健康影響関数について、非線形関係も含めて検討した。曝露一健康影響の精緻化により、精度の高い健康影響の推定が可能となった。また、文献レビューにおいて、高濃度での疫学知見の不足が明らかとなった。生理学的には曝露一反応関係が線形のままであることは考えづらく、いずれかの濃度でプラトーに達する非線形が妥当と考えられる。喫煙の疫学研究との統合結果からは、循環器疾患には、影響の上限(濃度がそれ以上増えても死亡リスクはそれ以上増えない)の可能性が示唆された。一方、肺がんには、影響の上限は認められなかった。

大気汚染に関連する疾病負荷研究では、従来は大気汚染が寄与する死亡数が強調されていたが、死亡 時の年齢も考慮したYLLや、死亡を減らすことによる経済的便益という新たな指標を提示することができ た。 SLCP削減シナリオにより、大気汚染物質の寄与死亡数の変動が定量化された。

(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>

大気汚染が寄与する疾病負荷を寄与死亡数、YLLとして定量的に評価し、その空間的分布をしめすこと により、健康へのインパクト、すなわち対策により予防できる健康被害の程度を地域別に示すことがで きた。また、シナリオ別解析により、健康へのインパクトという観点からSLCP削減の優先順位を決定す ることに資する知見を提供することができる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- K. UEDA, M. YAMAGAMI, F. IKEMORI, K. HISATSUNE and H. NITTA: J. Epidemiol., 26(5), 249-257 (2016) Associations between fine particulate matter components and daily mortality in Nagoya, Japan.
- 2) 上田佳代、Tasmin Saira、高見昭憲、五藤大輔、大石瑞樹、Phung Vera Ling Hui、安河内秀輔、Chowdhury Pratiti Home: 大気環境学会誌、51(6)、245-256(2016) 大気中微小粒子状物質の長期曝露が死亡 に及ぼす影響:疫学研究における曝露と健康影響の評価に関する系統的レビューとメタ解析
- 3) D. GOTO, K. UEDA, C. F. S. NG, A. TAKAMI, T. ARIGA, K. MATSUHASHI and T. NAKAJIMA: Atmos. Environ., 140, 320-332, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.06.015 (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.
- 4) S. TASMIN, K. UEDA, A. STICKLEY, S. YASUMOTO, V. L. H. PHUNG, M. OISHI, S. YASUKOUCHI, Y. UEHARA, T. MICHIKAWA and H. NITTA: Sci. Total Environ., 566-567, 528-535, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.054 (2016) Short-term exposure to ambient particulate matter and emergency ambulance dispatch for acute illness in Japan.
- 5) A. PHOSRI, K. UEDA, S. TASMIN, R. KISHIKAWA, M. HAYASHI, K. HARA, Y. UEHARA, V. L. H. PHUNG, S. YASUKOUCHI, S. KONISHI, A. HONDA and H. TAKANO: Environ. Res., 156, 411-419, doi:10.1016/j.envres.2017.04.008 (2017) Interactive effects of specific fine particulate matter compositions and airborne pollen on frequency of clinic visits for pollinosis in Fukuoka, Japan.
- 6) K. KOTANI, K. UEDA, X. SEPOSO, S. YASUKOCHI, H. MATSUMOTO, M. ONO, A. HONDA and H. TAKANO: Glob Health Action, 11, 1437882, doi:10.1080/16549716.2018.1437882 (2018) Effects of high ambient temperature on ambulance dispatches in different age groups in Fukuoka, Japan.
- 7) X. SEPOSO, M. KONDO, K. UEDA, Y. HONDA, T. MICHIKAWA, S. YAMAZAKI and H. NITTA: Environ. Int. 120, 525-534, doi:10.1016/j.envint.2018.08.037 (2018) Health impact assessment of PM2.5-related mitigation scenarios using local risk coefficient estimates in 9 Japanese cities.
- 8) V. L. H. PHUNG, K. UEDA, S. KASAOKA, X. SEPOSO, S. TASMIN, S. YONEMOCHI, A. PHOSRI, A. HONDA,

H. TAKANO, T. MICHIKAWA and H. NITTA.: Int. J. Environ. Res. Public Health, 15(2), pii:E307, doi:10.3390/ijerph15020307 (2018) Acute effects of ambient PM2.5 on all-cause and cause-specific emergency ambulance dispatches in Japan.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 上田佳代、新田裕史: Annual Review 呼吸器 2016、中外医学社、80-84 (2015) II. 疾患の病因と 病態
 4. PM2.5と呼吸器疾患(永井厚志、巽浩一郎、桑野和善編)
- 2) 上田佳代:日本医事新報、4766号、30-35(2015) 大気汚染と脳梗塞・心血管疾患の発生・増悪
- 3) 上田佳代:保健の科学、58、596-600 (2016) PM2.5による健康影響―循環器疾患―

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 上田佳代、NG CHRIS FOOK SHENG、新田裕史:第55回大気環境学会年会、松山(2014) 微小粒子状物 質(PM2.5)が死亡に及ぼす影響の季節変動
- 2) K. UEDA, M. YAMAGAMI, F. IKEMORI, K. HISATSUNE and H. NITTA: 第25回日本疫学会学術総会、名 古屋 (2015) The association between particulate matter components and daily mortality in Nagoya.
- 3) K. UEDA, S. TASMIN, M. OISHI, V. L. H. PHUNG, S. YASUKOCHI, Y. UEHARA, A. HONDA and H. TAKANO: 第26回日本疫学会学術総会、米子 (2016) Health effects of long-term exposure to PM2.5 and mortality: a systematic review.
- 4) 上原大和、上田佳代、林政彦、原圭一郎、SAIRA TASMIN、大石瑞貴、ARTHIT PHOSRI、VERA PHUNG LING HUI、安河内秀輔、本田晶子、高野裕久:第57回大気環境学会年会、札幌(2016)大気エアロゾル中 の水溶性成分濃度と急病による救急搬送数との関連
- 5) 安河内秀輔、上田佳代、SAIRA TASMIN、大石瑞貴、ARTHIT PHOSRI、VERA PHUNG LING HUI、上原大 和、本田晶子、高野裕久:第57回大気環境学会年会、札幌(2016)暑熱環境下での体感温度と急病 による救急搬送数の相関
- 6) 上田佳代、SEPOSO XERSUS:第76回日本公衆衛生学会総会、東京(2017)大気汚染による健康インパ クトを地球規模で評価する
- 7) 上田佳代:第49回日本動脈硬化学会総会・学術集会・シンポジウム、広島(2017)大気汚染が循環 器疾患発症に及ぼす影響の疫学研究における曝露評価
- 8) A. PHOSRI, K. UEDA, V. L. H. PHUNG, S. YASUKOUCHI, T. SUGIYAMA, L. PAOIN, K. KOTANI, H. HASEGAWA, A. HONDA and H. TAKANO: ISEE17, Sydney, Australia (2017) Effects of short-term exposure to ambient air pollution on hospital admissions for acute myocardial infarction in Bangkok, Thailand.
- 9) 長谷川博史、上田佳代、本田晶子、高野裕久:第88回日本衛生学会総会、東京(2018) 光化学オキ シダントと急病による救急搬送との関連:複数都市における疾患別検討
- 10) 小谷和也、上田佳代、SEPOSO XERSUS、安河内秀輔、松本弘子、小野雅司、本田晶子、高野裕久:第 88回日本衛生学会総会、東京(2018) 夏季の高気温が救急搬送数に与える影響:年齢別の検討
- 上田佳代、SEPOSO XERSUS:第88回日本衛生学会総会、東京(2018) グローバルにみたPM2.5 関連死 亡の推定
- 12) X. SEPOSO, K. UEDA and Y. HONDA: Planetary Health Annual Meeting, Scotland, UK (2018) Income gap affects efficiency of decision making units in reducing temperature-related deaths.
- 13) A. PHOSRI, K. UEDA, A. HONDA and H. TAKANO: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Health effect of air pollution in Thailand: Recent research development and challenges.
- 14) K. PAOIN, K. UEDA, X. T. SEPOSO, J. HAYANO, K. KIYONO, N. UEDA, T. KAWAMURA and H. TAKANO: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) The Association between PM2.5 and Heart Rate Variability in Japan.

- 15) X. SEPOSO, K. UEDA and Y. HONDA: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Efficiency of local decision making units in addressing temperature-related risks in the Philippines.
- 16) X. SEPOSO and K. UEDA: ISEE-AC, Taipei, Taiwan (2018) Public utility vehicle modernization program in the Philippines: a health impact assessment study.
- 17) V. L. H. PHUNG, K. UEDA, A. HONDA and H. TAKANO: Better Air Quality (BAQ) Conference, Sarawak, Malaysia (2018) Needs for scientific evidence on health effects of air pollution in Malaysia.

(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) 上田佳代:環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト第4回公開シンポジウム、京都(2018年1月 23日)「SLCPによる健康への影響」
- 2) 上田佳代:第59回大気環境学会年会市民公開フォーラム、福岡(2018年9月14日)「PM2.5大気汚染の最近の状況・解析から健康影響」「PM2.5の健康影響:身近な疑問から最新の研究結果まで」のタイトルにて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 京都新聞(2017年1月24日,18頁)記事「PM2.5濃度上昇で・・・」において、誌上発表1)について 紹介された。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) M. JERRETT, R. T. BURNETT, C. A. POPE 3RD, K. ITO, G. THURSTON, D. KREWSKI, Y. SHI, E. CALLE, and M. THUN: N. Engl. J. Med., 360, 1085-95 (2009) Long-term ozone exposure and mortality.

Ⅱ-4 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパクト評価

茨城大学農学部 增富 祐司

平成26~30年度累計予算額: 22,593千円

(うち平成26年度:4,807千円、平成27年度:4,566千円、平成28年度:4,338千円、

平成29年度:4,555千円、平成30年度:4,327千円)

[要旨]

SLCPが作物収量に及ぼす影響を対流圏オゾンによる直接的影響に加え、気候変動を介した間接的影響 も含めて統合的に評価することを目的に、具体的には以下の4つを実施した。それらは(1) 水稲収量推計 モデルMATCRO-Riceの全球モデル化、(2) MATCROへのオゾン影響プロセスの組み込み、(3) 大気エアロゾ ルによる日射量変化の影響評価、(4) 様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響評価、 である。これらにより、最終的には成り行きシナリオ(Ref)に比べて、いくつかの対策シナリオにおいて 2050年までの温暖化による収量低下を軽減できることがわかった。

[キーワード]

大気汚染、温暖化、作物影響、水稻

1. はじめに

対流圏オゾンは世界の主要穀物収量を現在でも数%~十数%減少させているとの推計があり、これを削減することは世界の食料安全保障において極めて重要である。一方で、今世紀中の地球温暖化の進行は世界の食料生産に甚大な被害をもたらすと予測されており、同時に温室効果ガス/物質も削減しなければならない。このような中、対流圏オゾンやブラックカーボン、メタンといった大気汚染だけでなく気候変動ももたらす短寿命の気候汚染物質(SLCP)の削減が近年注目を集めているが、SLCPによる影響が定量化されなければ、その削減効果は不確定であり、精緻な削減策を検討することは不可能である。

2. 研究開発目的

本課題の最終目的はSLCPが作物収量に及ぼす影響を対流圏オゾンによる直接的影響に加え、気候変動 を介した間接的影響研究の意味る参考図評価することである(図(4)-1)。これによりSLCPの削減効果を定量 化し、大気汚染及び地球温暖化の緩和策を検討する際の科学的な情報を提供する。この最終目的に向け、 本課題では大きく分野で熨平の四つを実行する:(1)水稲収量推計モデルMATCRO-Riceの全球モデル化、 (2) MATCROへのオゾン影響プロセスの組み込み、(3)大気エアロゾルによる日射量変化の影響評価、(4) 様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響評価、である。



図(4)-1 SLCPが作物収量に与える直接的・間接的影響パス。

3. 研究開発方法

(1) 水稲収量推計モデルMATCRO-Riceの全球モデル化

本課題では、陸面過程モデルMATSIROに作物成長モデルを結合させたモデルMATCROを元に全球モデルを 開発する。MATCROの特徴は、気孔コンダクタンスを介した光合成モデルを有していることである。これ により、将来予測される高03環境および高C02環境における03およびC02の気孔を介した相互作用を考慮す ることができる。

MATCR0の作物成長モデルは発育推計モジュールと同化産物分配モジュールの2つから構成される(図 (4)-2)。全球モデルの開発においては、まずこの2つのモジュールのパラメータをグローバルに決定す る必要がある。発育推計モジュールにおいて決定すべきパラメータは成熟日を決定すためのmGDH(成熟ま でに必要な有効成長温度時間(GDH))、出穂日の生育ステージ(hDVS;DVS=GDH/mGDH; DVS=1が成熟を表す) である。また同化産物分配モジュールにおいて決定すべきパラメータは生育期間中の各器官(葉・茎・ 根・穂)への同化産物(グルコース)の分配率である。本研究では、これらのパラメータを全球気候デー タ、全球の作物暦データ、グローバルに収集した水稲生育データを用いて決定した。



MATCROのモデル構造

図(4)-2 水稲収量推計モデルMATCRO-Riceのモデル構造。

図(4)-3に推計したmGDHの空間分布を示す。単位は[℃・hour]である。この図より、地域や気候帯によ ってmGDHが大きく異なることがわかる。例えば、赤道直下のブラジル北部では、80000℃・hour程度であ る一方、中国北部では、40000℃・hour程度である。

次にグローバルに収集した水稲生育データの移植日・出穂日およびサイトごとの気候データより出穂 日の生育ステージ(hDVS)を推計した。サイトごとに多少違いはあるが平均値として本研究ではhDVS=0.7 を用いる。



図(4)-3 mGDH[℃・hour]の空間分布。

図(4)-4にグローバルに収集した水稲生育データから推計した生育ステージごとの葉・穂・根へのグル コース分配率を示す。これによると地上部(Shoot)分配に対する葉へのグルコースの分配は、生育初期は 大きく、徐々に低下していき、出穂前(hDVS=0.7)には0になることがわかる。一方、地上部(Shoot)分配 に対する穂へのグルコース分配は、生育初期は0で、DVS=0.5から増加し始める。またDVS=0.8付近で1と なり、Shootへの分配されたグルコースのすべてが穂に分配されることがわかる。根へのグルコース分配 (全体へのグルコース分配に対する比)は葉と似ており、生育初期が最大で、生育とともに低下し、DVS=0.5 付近でグルコース分配がゼロになることがわかる。



図(4)-4 生育ステージごとの葉(上段左)・穂(上段右)・根(下段)へのグルコース分配率。赤線:モデル 式、プロット:水稲成長データ。

次に、MATCRO-Riceをグローバルに適用するにあたって実施したモデル改良について記述する。まず MATCRO-Riceは主として日本の水田圃場(つくば市真瀬)の生育データを用いて開発された。日本の水田圃 場は一般に水稲にとって好環境条件のため、グローバルにみたとき各地で生じている、水ストレス・窒 素ストレス・高温ストレス・低温ストレスといった様々な生育ストレスのプロセスが考慮されていない。 したがってMATCRO-Riceのグローバル化にあたっては、これらのプロセスを考慮する改良が必要となる。 以下では、上記、4つの生育ストレス(水ストレス・窒素ストレス・高温ストレス・低温ストレス)につい てのモデル改良について記述する。

世界的には、降水のみを用いて水稲を栽培している天水田が多く存在する。天水田では、降水量の少 ない渇水年に水稲は水ストレスを受け、収量が減少する。この水ストレスが収量に及ぼす影響を考慮す るために、このプロセスのモデル化を行った。まず既存の研究により水ストレスは、光合成低下を及ぼ し、収量低下を引き起こすことが報告されている。そこでMATCROでは、土壌の水ポテンシャルに応じて、 光合成を低下させるファクターを導入した。このファクターの式の形やパラメーターは既存の研究のも のを用いた。このモデル改良について、ジャケナン(インドネシア)の天水田で実施された圃場実験のデ ータを用いて検証した。図(4)-5に穂のバイオマス(ほぼ収量に相当する)の変化について、観測値(バツ 印)とモデル推計値(線)を示した。図中の赤線は天水田の結果を表し、青線は水ストレスのない灌漑水田 の結果を表している。まず観測結果をみると、生育後期(Day of year=155近辺)に天水田での穂のバイ オマスが、灌漑水田に比べて大きく低下していることがわかる。一方モデル推計値をみると、同様に生 育後期に天水田で穂のバイオマスが灌漑水田より低くなっており、観測結果とよく一致していることが わかる。この結果からMATCROにより水ストレスによる収量低減効果を精度よく再現できることが確認さ れた。今回はインドネシアの1サイトのみのデータを用いて検証を行ったが、今後は世界の複数のサイト データを使用してモデル検証を実施していくことが課題である。



図(4)-5 穂のバイオマス変化(インドネシア)。Day of year(横軸)は1月1日からの日数。Weight of panicle(縦軸)は穂の乾物重(kg ha⁻¹)。線はモデル推計値、バツ印は観測値。赤:水ストレスあり、青: 水ストレスなし。

次に窒素ストレスの効果についてのモデル改良について記述する。窒素は光合成に必要な主要必須元 素であり、葉内の窒素濃度が低下すると光合成速度が低下し、収量低下に繋がることがわかっている。 現代農業では、化学肥料を農地に投入することにより、収量を増加させてきた。しかしながら、化学肥 料の購入には一定のコストがかかり、未だ化学肥料の投入量が低い国が多く存在する。したがってグロ ーバルに収量を推計するためには、この低窒素投入による窒素ストレスの効果をモデルで考慮する必要 がある。本研究ではまず世界中の圃場データから窒素投入量と葉内窒素濃度の関係を調べた。図(4)-6 に結果を示す。この図よりまず葉内窒素が生育初期には高く、生育が進むにつれて低下していくことが わかる。また窒素投入量が多いほど、葉内窒素濃度が高いこともわかる。本研究では、この結果をもと にモデル式を同定した(図中の線)。



図(4)-6 生育ステージ(DVS: Development Stage)と葉内窒素濃度(Specific leaf nitrogen)の関係。色 の違いは、単位面積当りの窒素肥料投入量(kg ha⁻¹)を表す。プロットは世界各地の圃場実験データ、線 はプロットを基に同定したモデル式。

高温ストレスおよび低温ストレスに関しては、既存の研究の結果(高温ストレス:Boumann et al., 2001、 低温ストレス: Iizumi et al., 2009)をモデルに組み込みんだ。

(2) MATCROへのオゾン影響プロセスの組み込み

大気中オゾンが作物生産に影響を及ぼすことは古くから知られており、この影響をシミュレーション モデルを用いて定量的に評価する研究は古くから行われてきた.これらのモデルは大別すると, Concentration-Based型とFluxed-Based型に分けることができる. Concentration-Based型はオゾン暴露 量と例えば収量減少率を統計的に結びつける統計モデルであり、簡易かつ直感的でわかりやすいという 利点がある. 一方, Fluxed-Based型はオゾン暴露量ではなく, 作物体が吸収したオゾンFlux量を説明変 数にしたモデルである.このモデルは気孔コンダクタンスモデルの組み入れを必要とするため,モデル 形式が多少複雑になるが、実質的に作物に影響を与えると考えられるオゾン吸収量を説明変数にしてい るため、Concentration-Based型より精度が高いとする報告が多く、2000年以降急速に利用が広まった. 一方で近年はFluxed-Basedモデルの発展型として、広域スケールの陸面モデルでよく利用されるCollatz et al. (1991)のような光合成-気孔モデルの中に, Fluxed-Basedのオゾン影響を導入するというモデル (ここではCollatz+0₃FB型モデルと呼ぶ)が提案され、現在はこの流れを組んだモデルが盛んに研究さ れている. このCollatz+03FB型モデルは,光合成の基本的な生理メカニムズが考慮されているため,オ ゾン影響だけでなく、気温や湿度の変化といった他の気象要素の変化を同時扱え、それらの相互作用も 作物生理的メカニズムの観点から評価・解析できる利点がある. 本課題では、オゾン影響のみならず、 将来の気温変化等の気候変動の影響も同時に扱う必要があるため、このCollatz+03FB型モデルを基礎に することにした。幸い、本課題で用いる水稲収量推計モデルMATCRO-RiceはCollatzの光合成-気孔モデル を用いており、これを改良することでオゾン影響プロセスを組み込むことができる。しかしながら、ど のようにオゾン影響プロセスを組み込むべきかについては、これまでのところよくわかっていない。そ

こで本課題では、既存の研究および実験データを解析することにより、オゾン影響プロセスの組み込み の仕方について検討し、モデル化をおこなった。

まず以下にモデルの基礎となるCollatzの光合成-気孔モデルを書き下す。

$$An = GPP(Vcmax, T, I) - RSP(T)$$
(4)-1

$$Gs = m * \left(An * \frac{Rh}{Ch}\right) + b \tag{4} -2$$

$$An = \frac{Gs}{1.6} * (Cb - Ci) = \frac{Gb}{1.4} * (Ca - Cb)$$
(4)-3

ここでAn:純光合成速度; GPP:総光合成速度; RSP:呼吸速度; Vcmax:最大ルビスコ活性; Gs, Gb:気 孔および葉面境界のコンダクタンス; Ci, Cb, Ca:葉内、葉面境界、大気のCO2濃度; T, I, Rh:温度、 日射量,湿度; m, bはモデルパラメーターである。式(4)-1は個葉の光合成モデル(Farquherモデル)を表 しており、気温や日射等の環境条件と葉内窒素濃度から決定されるVcmaxから計算される。式(2)は気孔 コンダクタンスと純光合成速度(厳密には湿度と葉面境界CO2濃度で修正された純光合成速度)の線形関 係を示しており、Ball-Woodraw-Berry (BWB)の関係式と言われている。式(3)はCO2濃度差、コンダクタン ス、純光合成の関係を示しており、物理的なOhmの法則に相当する式である。式(4)-1~(4)-3において、 Vcmax, T, I, Rh, Ca, Gb, m, bは外部から与えられ、未知数はAn, Gs, Ci, Cbの4つ、方程式が4つ(式 (4)-3は二つの方程式)あるので、閉じた方程式系であり、解くことができる。実際には、解析的に解く ことは不可能である、数値的に解くことにより、An, Gs, Ci, Cbを求めることができる。式(4)-1~(4)-3 のうち、式(4)-3は物理的な式であるのでオゾン影響を受けるとは考えられないので、式(4)-1および (4)-2にオゾン影響プロセスの組み込みを検討する。

これまでの研究によって、木においては式(4)-2のパラメーターbがオゾンによって変化することが報告されている。作物についての報告はないため、まず作物においてこれが変化するかの検討を行った。 検討に用いたのは、中国江蘇省の江都区で行われたオゾンFace実験のデータである。オゾンFace実験は、 水田上にオゾン添加が可能なリングを設置し、実験区圃場全体のオゾン濃度を高くする実験である(図 (4)-7)。作物については、オゾン影響感度について品種間差があることがわかっているので、この実験 では、4つの品種(Shan You63:SY; Liang You Pei Jiu:LY; Yang Dao 6:YD; Wu Yun Jing 21:WY)を 対象とした(表(4)-1)。このうちSYはオゾン影響感度が高く(影響を受けやすい)、WYはオゾン影響感度が 小さい(影響を受けにくい)ことがすでにわかっている。



図(4)-7 中国江蘇省の江都区で行われたオゾンFace実験(右:オゾンFace実験、左:対象区)。

Name	Туре	Ozone resistance
Shan You 63	Standard hybrid	Sensitive
Liang You Pei Jiu	New hybrid	
Yang Dao 6	Indica	
Wu Yun Jing 21	Japonica	Resistant

表(4)-1 オゾンFace実験で対象とした水稲品種。

図(4)-8および表(4)-2に、対象区(AMB:黒)およびFace区(FACE:赤)において得られたBWB関係式を示す。 これによると対象区とFace区において統計的に有意な違いが検出されたのは、SYにおけるパラメーター で、中央値でいうと0.066大きくなっていた(表(4)-2)。これは図(4)-8のSY(右上)からもみることができ る。パラメーターbの上昇はコンダクタンスの増大を表し、コンダクタンスの増大は、オゾンの作物体内 への取り込み量を増大させる。SYはオゾン影響感度が大きい品種であり、このコンダクタンスの増大が オゾン影響感度に影響を与えることが推察された。何れにしても本解析から、(1)オゾンによってBWB関 係式が変化すること、(2)その変化には品種間差があること、が示された。前者は作物において初めて報 告された発見である。



図(4)-8 対象区(AMB:黒)およびFace区(FACE:赤)におけるBWB関係式(式(4)-2)。A*はAn*Rh/Cb。プロ ットは実験値、線はプロットから得られた回帰式。

Cultivar Slope Intercept AMB Significance AMB FACE FACE Significance Median Median Median S.D. S.D. Median S.D. S.D. LY 9.62 0.43 8.92 0.60 -0.026 0.018 -0.002 0.024 n.s. n.s. SY WJ 11.44 1.51 10.49 1.35 n.s. 0.008 0.037 0.074 0.030 0.45 0.39 -0.043-0.00610.05 8.70 n.s. 0.017 0.013 n.s. 10.01 0.71 -0.063 0.031 -0.003 0.013 YD 8.28 0.45 n.s. n.s. * P ≤ 0.05.

表(4)-2 対象区(AMB:黒)およびFace区(FACE:赤)におけるBWB関係式のパラメーターm(Slope)および b(Intercept)。

次に式(4)-1へのオゾン影響プロセスの組み込みについて検討する。これまでの研究においてオゾンに よってVcmaxが低下し、収量が低下することが報告されている。本課題でもオゾンFace実験での光合成観 測データを用いて、まずこれを確かめた。図(4)-9に対象区(AMB:青)およびFace区(FACE:赤)における Vcmaxを示す。これによると統計的に有意な差が見られたのは、オゾン影響感度の高いSYのみであったが、 Vcmaxへのオゾン影響について確認できた。これにより、オゾン濃度を説明変数にしてVcmaxを変化させ、 オゾン影響をモデル化するのが適切であると考えられるが、その式の形にはまだ任意性がある。これに 対し、Yamaguchi et al. (2015)は水稲を対象とした実験を行い、積算オゾン吸収量と光合成速度低下が 線形の関係があることを報告している。そこで本研究でもこの報告をベースに定式化することにした。



図(4)-9 対象区(AMB:青)およびFace区(FACE:赤)におけるVcmax。*はP<0.05で有意を示す。

以上の検討により最終的に得られたオゾン影響プロセスを組み込んだ方程式系を以下に書き下す。

$$An = GPP(Vcmax * f_{\alpha}, T, I) - RSP(T)$$
(4)-4

$$Gs = m * f_{\beta} * \left(An * \frac{Rh}{cb}\right) + b * f_{\gamma}$$

$$\tag{4} -5$$

$$An = \frac{Gs}{1.6} * (Cb - Ci) = \frac{Gb}{1.4} * (Ca - Cb)$$
(4)-6

$$f_{\alpha} = 1 - \alpha \int F_{03} \tag{4} -7$$

$$f_{\beta} = 1 - \beta \int F_{O3} \tag{4} - 8$$

$$f_{\gamma} = 1 - \gamma \int F_{O3} \tag{4} -9$$

$$F_{03} = \frac{[O_3]}{\frac{\kappa}{Gb} + \frac{1.67}{Gs}} \tag{4} - 10$$

ここで、 F_{03} :オゾンフラックス; $[G_3]$:大気オゾン濃度; κ :葉面境界の拡散係数比; f_{α} , f_{β} , f_{γ} :オゾ ン影響ファクター; α , β , γ :モデルパラメーターである。本課題では、式(4)-4~(4)-10で与えられ るモデル式によりオゾンによる収量の影響を定量化する。

(3) 大気エアロゾルによる日射量変化の影響評価

大気エアロゾルは日射を遮り、これが増加すると、日射エネルギーを利用して光合成を行なっている 作物の収量は一般に低下すると考えられる.しかしながら、実際には作物は直達日射より散乱日射のほ うが日射利用効率が高く、仮にエアロゾルによって全天日射量が低下したとしても、エアロゾルによっ て散乱された散乱日射量が増加すれば、収量は逆に増加する可能性がある.このように大気エアロゾル が日射量の変化を通して作物収量に及ぼす影響は単純ではなく、科学的にも興味深いが、これまでのと ころほとんど研究されていない.特に経済発展著しいアジアの途上国では大気エアロゾル濃度が高く、 その作物収量への影響を評価すること、また対策の効果を評価することが求められている.そこで本課 題では、大気エアロゾルの主要な原因物質であるブラックカーボン(以下 BC)と二酸化硫黄(以下S0₂)の 排出量を変化させた時に収量がどのように変化するかを定量的に評価することを目的とした.

水稲収量推計には本課題で開発したグローバル水稲収量推計モデルMATCROを用いた。またブラックカ ーボンと二酸化硫黄の排出量変化がもたらす日射量変化についてはサブテーマ(1)より提供されたデー タを用いた。具体的には、ブラックカーボンと二酸化硫黄の排出量を現状から9通り変化(0倍、0.1倍、 0.3倍、0.5倍、0.8倍、1.5倍、2倍、5倍、10倍)させた場合の地上下向き可視光および近赤外領域の日 射データを用いた。その際、作物の直達光と散乱光の光利用効率に違いを考慮するために、それぞれの 波長帯(可視光および近赤外)において直達光と散乱光を区別して利用した。なおここでは日射量変化 に伴う作物収量への間接的影響にのみ着目し、その他の気象変数(気温・降水量・風速・比湿・長波・ 気圧)については現状と同じものを用いた。

日射量変化に伴う間接的影響を評価するのに先立ち、MATCROが直達光と散乱光の違いによる光利用効率の違いを再現できるかどうかを確認した。図(4)-10は水稲の生育期間を4つに分け(移植から出穂日の60日まで;出穂日の60日前から30日前まで;出穂日の30日前から出穂日まで;出穂日から成熟日まで)、 横軸に光合成有効放射(PAR)、縦軸に総光合成速度(GPP)をとり、観測(穴あき丸)とモデル推計値(塗りつぶし丸)を比較したものである。黒のプロットは直達光が優占な場合(直達が70%以上)を示しており、赤のプロットは散乱光が優占な場合(散乱が80%以上)を示している。なお観測はつくば市真瀬の水田フラックスサイトのデータである。この図より、生育初期では直達光と散乱光に光利用効率の違いはないが、出穂の60日前あたりから散乱光では同じPARでもGPPが高く、光利用効率が高いことがわかる。またMATCROもこの光利用効率の違いを再現できていることがわかった。



図(4)-10 光合成有効放射(PAR)と総光合成速度の関係(GPP)。穴あき丸:観測、塗りつぶし丸:モ デル推計値。黒:直達光優占(直達70%以上)。赤:散乱光優占(散乱80%以上)PARは250[micromol/m**2/s] ごとに平均した値。

(4) 様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響評価

サブテーマ(1)および(5)より提供された様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響 を推計する。水稲収量の推計には本課題で開発したグローバル水稲収量推計モデルMATCROを用い、収量 推計は2011-2049年の各年で実施した。考慮した対策シナリオは7シナリオで、それぞれの特徴を表(4)-3 にまとめる。

シテリオコート	
なりゆきシナリオ	現状の政策・対策の傾向が継続するような基準シナリオ
Ref	
除去対策Maxシナリオ	Refシナリオに対してSO ₂ , NOx, BC, OC, PM _{2.5} , PM ₁₀ への除去装置
EoPmax	(End-of-Pipe)対策を <u>"最大限に"</u> 強化するシナリオ。
	End-of-pipe対策を、発電プラント・産業プラントおよび運輸(陸
	上)に対して、2050年までに全世界で100%導入を想定
除去対策Midシナリオ	Refシナリオに対してSO ₂ , NOx, BC, OC, PM _{2.5} , PM ₁₀ への除去装置
EoPmid	(End-of-Pipe)対策を <u>"ある程度"</u> まで促進するシナリオ。
	End-of-pipe対策を、発電プラント・産業プラントおよび運輸(陸
	上)に対して、2050年までに先進国で100%、途上国で50%程度の導
	入を想定
2度目標シナリオ	EoPmaxに加え、2度目標の達成にむけ、特に発電部門で再生可能エ
2D-EoPmax-CCSBLD	ネルギーよりもCCS付き石炭火力発電を優先的に導入。また特に世
	界中の国々の民生・業務部門で、2050年までに先進国だけでなく途
	上国もオール電化に近付く。また電化できない部分は石炭・灯油・
	バイオマスではなくガスヘシフト。
2度目標シナリオ	EoPmidに加え、2度目標の達成にむけ、特に発電部門で再生可能エ
2D-EoPmid-CCSBLD	ネルギーよりもCCS付き石炭火力発電を優先的に導入。また特に世
	界中の国々の民生・業務部門で、2050年までに先進国だけでなく途
	上国もオール電化に近付く。また電化できない部分は石炭・灯油・
	バイオマスではなくガスヘシフト。
2度目標シナリオ	EoPmidに加え、2度目標の達成にむけ、特に発電部門でCCS付き石炭
2D-EoPmid-RESTRT	火力発電よりも、再生可能エネルギーの大幅促進を優先的に導入。
	また特に運輸部門では、世界で2040年以降はEV車(含むP-HEV)が
	大幅普及。また内燃機関車が残る場合は、2050年までにバイオ燃料
	混合50%とする。
2度目標シナリオ	ED-EoPmid-RESTRTに加え、特に世界中の国々の民生・業務部門で、
2D-EoPmid-RESBLDTRT	2050年までに先進国だけでなく途上国もオール電化に近付く。また
	電化できない部分は石炭・灯油・バイオマスではなくガスへシフト。

表(4)-3 影響評価で考慮したそれぞれの対策シナリオの特徴。

4. 結果及び考察

N. L. 11. L. ...

10

(1) 水稲収量推計モデルMATCRO-Riceの全球モデル化

図(4)-11および12にMATCROを用いて計算した国別の収量をFAOの国別収量と比較した結果を示す。ここ で比較対象とした国は水稲生産量の上位20カ国であり、全世界の水稲生産量の94.3%を占める。まず 1981-2010年平均の収量比較(図(4)-11)をみると、推計値と観測値の一致度が高いことがわかる。相関 係数は0.863(P<0.001)であった。これは各年(図(4)-12)でみても同様である。相関係数の最低値は2010 年の0.702で有意で高い相関を示している。このように本課題で開発したMATCROは高精度に水稲収量を推 計できることがわかった。ただし全体的にみると、低収量(3000kg/ha以下)の国については、モデル推計 値が小さい傾向にある。窒素ストレスに関するパラメーターを改良することにより、精度を向上させる ことが考えられ、これは今後の課題としたい。



図(4)-11 国別収量[kg/ha]の統計値(OBS.)と推計値(SIM.)の比較(1981-2010年平均)。図中の数字は相関係数。***はP<0.001を表す。



図(4)-12 国別収量の統計値(OBS.)と推計値(SIM.)の比較(1981-2010年)。CORは相関係数。***はP<0.001 を表す。





次に収量の経年変化について国別にみていく。図(4)-13に水稲生産量の上位20カ国について、推計収 量とFAOの統計値の1981-2010年の比較を示す。これによると中国、インド、インドネシアといった3大水 稲生産国において、モデル推計値は長期的なトレンドを高精度に再現できていることがわかる。この統 計値の長期的なトレンドは肥料投入量の増加の効果が大きく、モデルで窒素ストレスに関するモデル改 良を行ったことがトレンドの高い再現性につながったと考えられる。また例えば1993年の日本では大冷 害で水稲の収量が大きく落ち込んだが、モデル改良で低温ストレスを考慮したことにより、この1993年 の不作を再現できていることもわかる。しかしながら例えば生産量上位10カ国については、ミャンマー とブラジルにおいて推計値と統計値の誤差が大きい。これは利用している窒素投入量のデータの誤差や、 モデルで灌漑の時系列的な変化を考慮していないことなどが考えれ、これを改良することが今後の課題 である。







(2) MATCROへのオゾン影響プロセスの組み込み

図(4)-14および15にオゾン影響プロセスを組み込んだMATCROを用いて推計したオゾンによる水稲減収率の空間分布(図(4)-14:2001-2010年平均;図(4)-15:2001-2010の各年)を示す。これによると例えば、 北九州、韓国、中国の北緯30-35度の地域、ネパール、バングラデシュなどでオゾンの影響が大きいこと がわかる。また例えば、2009年のバングラデシュや中国の北緯35度の地域のように、年や地域によって は、オゾンが大きな収量減少をもたらしていることがわかる。図(4)-16にグローバルで平均した水稲減 収率の2001-2010年の経年変化を示す。これよるとオゾンによる水稲減収率は10-15%であることがわかっ た。しかしながらこの値は、モデルのパラメーターの与え方や考えている品種によっても変化するため、 今後様々な実験に基づく推計を行うことが今後の課題である。



図(4)-14 オゾンによる水稲減収率(2001-2010年平均)。



図(4)-15 オゾンによる各年の水稲減収率(2001-2010年)。















2008













図(4)-15 (つづき)

130



図(4)-16 オゾンによるグローバル平均の水稲減収率(2001-2010年)。

(3) 大気エアロゾルによる日射量変化の影響評価

影響評価結果を示す前にその前提となるブラックカーボン(BC)および二酸化硫黄(SO₂)の排出量を 変化させた場合のPARの全球日射量(直達+散乱)、直達日射量、散乱日射量の変化および気温と降水量 の変化を図(4)-17および18に示す。ここでは水稲のみ着目しているので、図(4)-17および18に示してい る各量は、30年積分値の中央値を各グリッドの水田面積で重み付けした全球平均値である。まずBCの変 化(図(4)-17)をみると、BCを増加させた場合は、全球日射量が減少し、直達・散乱日射量も減少するこ とがわかる。一方、気温と降水量はほとんど変化しないことがわかった。次に、SO₂の変化(図(4)-18) をみると、SO₂を増加させた場合、全球日射量・直達日射量が減少するのはBCと同じであるが、散乱日射 量は増加することがわかる。これは作物影響に関して正の効果を持つ可能性もある。気温に関しては、 SO₂を増加させた場合、気温が大きく低下し、降水量に関しては大きく減少した。気温低下の影響は地域 ごとに異なるが、降水量の減少については、作物にとって負の効果をもつ可能性が高い。



図(4)-17 BCの排出量を変化させたときのPARの全球日射量(直達+散乱:黒点)、直達日射量(赤点)、 散乱日射量(緑点)の変化(上段)および気温と降水量の変化(それぞれ左および右)。



図(4)-18 SO₂の排出量を変化させたときのPARの全球日射量(直達+散乱:黒点)、直達日射量(赤点)、 散乱日射量(緑点)の変化(上段)および気温と降水量の変化(それぞれ左および右)

次に、ブラックカーボンおよび二酸化硫黄を変化させた場合の水稲収量の変化を図(4)-19に示す。図では30年分の各年の収量をボックスプロットを用いて示している。この図よりBCの場合、排出量を変化させてもグローバルに見た時には、大きな収量変化が見られないことがわかった。一方、SO₂の場合は、増加させた場合は、大きな収量変化見られないが、減少させたときは、収量が低下することがわかった。これは図(4)-18で示したように気温が上昇したことが大きく寄与していることが考えられた。



図(4)-19 ブラックカーボン(BC: 左)および二酸化硫黄(SO₂: 右)を変化させた場合のグローバル平均の 水稲収量の変化。

図(4)-20および21にブラックカーボン(BC)および二酸化硫黄(SO₂)の排出量を変化させた場合の水稲 収量の変化率[%]を示す。これによるとグローバル平均では大きな収量変化が見られなかったBCの場合で も、地域的には大きな収量変化があることがわかる。このような地域的な収量変化は地域的な日射・気 温・降水量の複合効果として現れていると考えられるが、それぞれの地域でどの効果がどれくらい働い ているかを明確にすることは、今後の大きな課題である。



図(4)-20 ブラックカーボン(BC)を変化させた場合(0倍:左上、0.5倍:右上、1.5倍:左下、2倍:右下)の水稲収量の変化率[%]。



図(4)-21 二酸化硫黄(SO₂)を変化させた場合(0倍:左上、0.5倍:右上、1.5倍:左下、2倍:右下)の 水稲収量の変化率[%]。

(4) 様々な対策シナリオ下での気候変動による水稲収量への影響評価

図(4)-22に対策シナリオ別の各年代の水稲収量を示す。これによると、なりゆきシナリオ(Ref)を含む どの対策シナリオも概ね将来になるつれ収量が低下していくのがわかる。これは温暖化の影響だと考え られる。しかしながら、2040sには多くのシナリオで、なりゆきシナリオよりは収量低下が軽減されるこ とわかる。表(4)-4になりゆきシナリオ(Ref)に対する各対策シナリオの収量変化を示した。これによる ともっとも収量低下が軽減されるシナリオは、EoPmid-RESBLDTRTでなりゆきシナリオより6.1%収量が多 い。この表からは、唯一なりゆきシナリオより収量が低下するのは、対策を最大限実施したEoPmaxで、 -6.1の収量減であることがわかる。



図(4)-22 対策シナリオ別の各年代の水稲収量。

表(4)-4 なりゆきシナリオ(Ref)に対する各対策シナリオの収量変化[%]。

	2010 s	2020 s	2030s	2040 s
Ref	0.0	0.0	0.0	0.0
EoPmid- RESBLDTRT	-1.8	-3.8	0.2	6.1
EoPmid- CCSBLD	-0.2	1.5	-2.0	2.6
EoPmid- RESTRT	-0.9	-4.9	-6.9	2.9
EoPmax- CCSBLD	-3.5	-6.0	1.4	3.6
EoPmid	-3.3	-6.8	-3.5	0.2
EoPmax	-1.2	-6.5	-10.6	-6.1

図(4)-23に各対策シナリオにおけるなりゆきシナリオ(Ref)に対する収量変化率[%]をグリッド別に示す。 これによるとどのシナリオ、どの年代においても地域的に収量が増加するところと減少するところがあ り、かなり複雑な空間パターンであることがわかった。このような複雑な空間パターンは、それぞれの シナリオにおける日射・気温・降水量等の変化の複合的な効果の結果として現れていると考えられる。 今後は、どの効果がどの程度寄与しているかを明らかにすることが課題である。



図(4)-23 なりゆきシナリオに対する対策シナリオ別の各年代の水稲収量変化率[%]。



図(4)-23 (つづき)

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

全球作物モデルは、これまでに様々なモデルが開発されてきているが、高度なオゾン影響プロセス が組み込まれ、さらにエアロゾルによる直達・散乱日射の変化を高精度に考慮できるモデルを組み込 んでいる全球作物モデルはMATCROだけであり、大気汚染と温暖化の複合的な影響をグローバルに評価 できることが可能となった。

(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>

様々な温暖化・大気汚染対策を実施した際の収量変化に関する成果は、今後IPCCやCCAP等の国際的な 枠組みのみならず、各国の政策や計画づくり等への貢献が期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

国際作物モデル比較・改良プロジェクト(Agricultural Model Inter-comparison and Improvement Project:AgMIP)に参加した。主として水稲モデルグループ(AgMIP-Rice)のワークショップに毎年参加した。参加者・所属等を以下にまとめる。

氏名	所属	玉
Liping Feng	China Agricultural University	China
Cheng Chen	China Agricultural University	China
Chunlei Wang	China Agricultural University	China
Bing Liu	Nanjing Agricultural University	China
Leilei Liu	Nanjing Agricultural University	China
Liang Tang	Nanjing Agricultural University China	China
Yan Zhu	Nanjing Agricultural University	China
Tanguy Lafarge	CIRAD	France
Daniel Wallach	INRA	France
Roberto Confalonieri	University of Milan	Italy
Ermes Movedi	University of Milan	Italy
Livia Paleari	University of Milan	Italy
Yuji Masutomi	Ibaraki University	Japan
Toshi Hasegawa	NARO	Japan
Akio Onogi,	NARO	Japan
Hiroshi Nakagawa	NARO	Japan
Hiroe Yoshida	NARO	Japan
Erina Fushimi	NARO	Japan
Shiori Yabe	NARO	Japan
Tamon Fumoto	NARO	Japan
Camilo Barrios Perez	U. Tokyo	Japan
Tao Li	Applied GeoSolutions	USA
Job Fugice	IFDC	USA
Upendra Singh	IFDC	USA
Ted Wilson	Texas A&M	USA
Yubin Yang	Texas A&M	USA
Ken Boote	University of Florida	USA
Yujing Gao	University of Florida	USA

AgMIP-Riceへの参加者・所属・国

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- Y. MASUTOMI, K. ONO, M. MANO, A. MARUYAMA and A. MIYATA: Geosci. Model Dev., 9, 4133-4154, doi:10.5194/gmd-9-4133-2016 (2016) A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) - Part 1: Model description.
- Y. MASUTOMI, K. ONO, T. TAKIMOTO, M. MANO, A. MARUYAMA and A. MIYATA: Geosci. Model Dev.,
 9, 4155-4167, doi:10.5194/gmd-9-4155-2016 (2016) A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) Part 2: Model validation.
- 3) Y. MASUTOMI, Y. KINOSE, T. TAKIMOTO, T. YONEKURA, H. OUE and K. KOBAYASHI: Sci. Total Environ., 655, 1009-1016, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.132 (2019) Ozone changes the linear relationship between photosynthesis and stomatal conductance and decreases water use efficiency in rice.
- 4) Y. MASUTOMI, Y. SATO, A. HIGUCHI, A. TAKAMI and T. NAKAJIMA: J. Agri. Meteorol. (in press)

The effects of citizen-driven urban forestry on summer high air temperatures over the Tokyo metropolitan area.

<その他誌上発表(査読なし)>

1) T. IIZUMI, Y. MASUTOMI, T. TAKIMOTO, T. HIROTA, A. YATAGAI, K. TATSUMI, K. KOBAYASHI and T. HASEGAWA: J. Agri. Meteorol., 74 (2018) Emerging research topics in agricultural meteorology and assessment of climate change adaptation.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice annual meeting, Nanjing, China (2014) MATCRO, regional and global applications.
- 2) 増富祐司、T. OSBORNE、T. WHEELER:日本気象学会2014年秋季大会、福岡(2014)Global-MATCRO-Riceの開発に向けた水稲の生育期間推計
- 3) Y. MASUTOMI: 2nd. ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Assessment of the direct and indirect impacts of SLCPs on agricultural production.
- 4) Y. MASUTOMI: 1st. Asia Air Pollution Workshop, Tokyo, Japan (2015) Assessment of the direct and indirect impacts of SLCPs and climate change on agricultural production.
- 5) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice Workshop 2016, Nanjing, China (2016) Update of MATCRO.
- 6) Y. MASUTOMI and T. TAKEMURA: International Workshop on SLCP emissions and impacts in East Asia, Chiba, Japan (2017) Impact assessment of changes in the emission of BC and SO₂ on rice productivity in Asia.
- 7) 増富祐司、竹村俊彦:日本気象学会2018年秋季大会、仙台(2018)大気エアロゾルによる日射量変 化がアジア水稲生産に及ぼす影響の評価
- 8) 増富祐司、黄瀬佳之:日本農業気象学会2019年全国大会、静岡(2019)作物生産へのオゾン影響モ デルーこれまでの展開、モデル提案、今後の課題

(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

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- G. J. COLLATZ, J. T. BALL, C. GRIVET and J. A. BERRY: Agri. Forest Meteorol., 54, 107-136, (1991) Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer.
- M. YAMAGUCHI, D. HOSHINO, T. KONDO, R. SATOH, H. INADA and T. IZUTA: J. Agri. Meteorol., 71, 211-217 (2015) Evaluation of O₃ effect on net photosynthetic rate in flag leaves of rice (Oryza sativa L.) by stomatal O₃ flux and radical scavenging enzyme activities.

Ⅱ-5 短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価

国立研究開発法人海洋研究開発機構シームレス環境予測研究分野 渡辺 真吾・高橋 洋

平成26~30年度累計予算額:24,552.5千円

(うち平成26年度:5,224千円、平成27年度:4,962千円、平成28年度:4,714千円、

平成29年度:4,950千円、平成30年度:4,702.5千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

短寿命大気汚染物質(SLCP)が気候の形成や変動に果たす役割の定量的な実態把握の試みは、とりわけ フィードバック過程や地域的な変化が重要となる水循環変化の定量化という側面においてほとんどなさ れて来なかった。この課題に、SLCPと気候システムのフィードバック過程を含んだ地球システムモデル を用いて取り組み、SLCPの水循環に対する影響の現状把握を行い、降水分布および循環場の変化につい て新しい知見を経て論文発表を行った。

さらに、S-12-2において開発されたS-12独自のSLCP将来削減シナリオを、硝酸塩エアロゾル等の過程 を加えた最新の地球システムモデルに入力して数値シミュレーションを行い、主に人為起源エアロゾル 濃度の変化がもたらす直接放射強制、雲放射強制、地上気温の変化に注目した解析を行ったうえで、全 球的な水循環(降水量)の変化について解析結果をまとめた。その結果、多様なエアロゾル削減将来シナ リオ(あるいは経路:パス)のなかで、仮に最も地上気温や降水量に負の影響が生じにくいものを同定 しようとするなら、最適シナリオは地域によって異なる可能性が高いことがわかった。

[キーワード]

短寿命大気汚染物質、気候変動、水循環、地球システムモデル

1. はじめに

現在の気候システムは、自然起源の要因(太陽活動変動や火山噴火等)や、人為起源の長寿命温室効果 気体(LLGHGs)の増加等、多種多様な要因によって特徴づけられているが、その中で、SLCPが果たす役割 の定量的な実態把握の試みは、とりわけフィードバック過程や地域的な変化が重要となる水循環変化の 定量化という側面においては、ほとんど行われてこなかったと言ってよい。当然のことながら、これは 将来予測に関しても同様である。

2. 研究開発目的

本研究「短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価」は、気候変動予測に関する他 のサブテーマ(S-12-3-1) 「数値モデルを用いたエアロゾルによる気候変動の評価」(S-12-3-2) 「数値 モデルを用いた短寿命微量気体による気候変動の評価」(S12-3-6) 「短寿命大気汚染物質・雲・降水相 互作用に伴う領域気候変動の評価」との密な連携のもと、SLCPの複雑な発生・輸送・変質・沈着過程を 陽に取り扱うことのできる地球システムモデルを用いて、様々な気候変動駆動要因の切り分けを目的と した一連の数値シミュレーションを行うことにより、SLCPの水循環に対する影響の現状把握と将来予測 に挑戦するとともに、サブテーマ(S-12-3-3) 「短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う健康へのイン パクト評価」(S-12-3-4) 「短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う農業へのインパクト評価」で行う 健康・農業へのインパクト評価で用いる予測情報の創出・提供を目指したものである。

将来予測シミュレーションにおいては、テーマ(S-12-1)「大気質変化事例の構造解析と評価システムの構築」および(S-12-2)「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」より提供される新規の排出シナリオを用いて気候モデルを駆動するとともに、テーマ(S-12-4)「統合運用システムの

構築」で構築を目指す「統合運用システム」において、気候・環境変動データベースの基盤となる予測 情報を提供する役割を担うことを通じ、〜将来の最適なSLCPの排出削減パスを選択するための科学的根 拠に資する〜環境政策立案へのインプットを行う〜という本戦略的研究開発領域課題(S-12)全体の循環 的連携を完成させることへの貢献を目指した。

3. 研究開発方法

本研究「短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価」では、SLCPの複雑な発生・輸送・変質・沈着過程を陽に取り扱うことのできる地球システムモデルを用いて、様々な気候変動駆動要因の切り分けを目的とした一連の数値シミュレーションを実施した。図(5)-1に、本研究で用いた地球システムモデルの概念図を示す。



図(5)-1 本研究で用いた地球システムモデルの概念図。

図(5)-2に、本研究の5カ年の年次計画ロードマップを示す。平成26年度から平成27年度にかけて、地 球システムモデルの駆動要因(フォーシング)として、過去(20世紀中盤)~現在のSLCPの前駆物質の排出 データと長寿命温室効果気体(LLGHGs)の濃度シナリオを用いた歴史気候再現実験を行うことにより、 SLCPの水循環に対する影響の現状把握を目指した。

平成26年度は、フォーシングおよび大気化学・エアロゾル過程を含む全球気候モデルのセットアップ を行い、①産業革命前から現在に至る史実的な歴史気候再現実験、をベースライン・シミュレーション とし、それに対する対照的な仮想世界のシミュレーションとして、②人為起源エアロゾルの濃度を産業 革命前で固定したシミュレーション、さらに③それに加えてオゾンの濃度を産業革命前で固定したシミ ュレーションに関して、それぞれ複数(n=3)メンバーのアンサンブル・シミュレーションを実施した。 それと並行して、予測結果の不確実性に関する情報を得るとともに、SLCP変化によってもたらされる気 候変動のうち、とくに不確実性が大きく定量的な評価が難しいと予想される水循環の変動(降水量をは じめ、海面・陸面における熱・水収支等)が、どの程度の堅牢性を持ったシグナルとして現れるかとい う視点で解析を行うための準備を行った。

平成27年度は、前年度に実施した実験①と実験②の結果を比較・解析することにより、SLCPの気候場 や水循環に対する影響の現状把握を行い、学術論文として投稿するための準備を行った。さらに、別の 角度からSLCPの影響を評価するために、過去ではなく将来に関して①RCP4.5シナリオの2021-2050年をベ ースライン・シミュレーションとし、それに対する対照的な仮想世界のシミュレーションとして、化石 燃料・木質燃料起源のSO₂、BC、0Cの排出量を②RCP4.5比で半分にしたシミュレーションおよび③RCP4.5 比で2倍にしたシミュレーションに関して、それぞれ複数(n=3)メンバーのアンサンブル・シミュレーシ
ョンを実施し、その結果をテーマ内で共有して議論を行うとともに、より現実的なSLCP削減経路シナリ オを用いたシミュレーションを行うための準備に協力した。



図(5)-2 本研究「短寿命大気汚染物質による気候変動に伴う水循環変動の評価」ロードマップ。

平成28年度から平成30年度にかけて、地球システムモデルを構成する物理気候モデルとエアロゾル輸送モデルを、サブテーマS-12-3-1で用いているものと同様の最新版に更新し、将来予測シミュレーションを実施するための準備を行った。図(5)-3に、平成28~30年度に実施したモデル更新の概要を示す。大気大循環モデルの水平解像度が約2.8°から約1.4°に倍増したことをはじめ、新しい積雲スキームへの更新、浅い積雲スキームの導入、PDF予報型雲スキームの導入、新しい境界層スキームへの更新、部分雪被覆スキームの導入といった水循環を含む物理気候システムの再現性が向上した最新版の物理気候モデルを用いられるように準備を行った。

さらに、テーマ2より提供される新しい将来排出シナリオを用いた数値シミュレーションを行うために 欠かせない硝酸塩エアロゾルを扱える新しいエアロゾルモデルへの更新も実施した。モデルの更新に伴 って、エアロゾルと雲の相互作用プロセスがより精緻に表現できるようになったほか、下層雲の分布が 大きく改善され、旧バージョンのモデルに特有の地表面気温や海面気圧等のバイアスが軽減され、予測 結果の信頼度が全体的に向上した。とくに、全球水循環に影響を与えるエルニーニョ・ラニーニャ現象 等の大気・海洋結合系の表現が向上した。同時に、将来予測シミュレーションを行う上で欠かせない、 過去(20世紀中盤)~現在のSLCPの前駆物質の排出データと長寿命温室効果気体(LLGHGs)の濃度シナリオ をモデルに与えるためのデータ整備を行った。

要素 / モデル	MIROC-ESM@CMIP5	MIROC6	
水平解像度/鉛直層	T42 (2.8∘) – L80	T85 (1.4°) – L81	
積雲スキーム	Arakawa-Schubert	Chikira-Sugiyama	
浅い積雲スキーム	—	Parks and Bretherton	
大規模凝結/雲量	PDF固定/診断型	PDF予報型	
境界層スキーム	M-Y Lv2.0	MYNN Lv2.5	
部分雪被覆スキーム	– SSNOWD		
SPRINTARS	v5.00	v6	
その他の特長	—	ENSO表現が良い	

図(5)-3 平成28~30年度に実施したモデル更新の概要。

図(5)-4に、平成30年度に更新した地球システムモデルの構造の概要を示す。従来の地球システムモデ ルは、大気の化学組成に関する化学反応を大気大循環モデルのフレームワークの中で計算していたが、 S-12-2で開発された複数の将来排出シナリオを用いた数値シミュレーションを平成30年度前半に実行し 終えてSLCPによる気候変動の影響評価を完結させるためには、地球システムモデル全体のスループット を向上させる必要があった。そのため、大きな計算時間を要する大気化学計算を行うモデルは水平解像 度を約2.8°に半減させたうえで、エアロゾル過程を含む水平解像度約1.4°の大気大循環モデルから分 離して、それらの各々を汎用カップラーJcupを用いてときおり情報を交換しながら「ゆるく」結合させ、 同時進行で計算できる仕組みを用いることにした。



図(5)-4 平成30年度に更新した地球システムモデルの構造の概要。

この「ゆるい結合」は、図(5)-4の中で左側にある「親モデル」で計算した水平風速、気温、比湿等の 情報を、右側にある大気化学過程を含む「子モデル」に通信して、それらを用いて「子モデル」の循環 場や温度場を拘束する一方、「子モデル」で計算した化学組成の濃度の情報を「親モデル」に通信して、 それらを用いて「親モデル」の放射過程やエアロゾル過程を拘束することによって成立している。その 際に「子モデル」側の拘束の強さをどのように決めるかが重要であるが、その点については次節の結果 及び考察の箇所で触れる。

表(5)-1に、平成30年度に実施した、S-12-2で開発された複数の将来排出シナリオ(SLCPの排出削減に 関する様々なオプションや社会経済の発展を考慮した将来像に基づくもの)を用いた数値シミュレーシ ョンの概要を示す。西暦2010~2049年の40年間を対象に、7種類のシナリオを用いて、7つの初期値から のアンサンブル将来予測シミュレーションを実施した。それらの総年数は1960年に及ぶ。これはJAMSTEC の「地球シミュレータ」を優先的に使用しながら1ヶ月の間連続して計算を行う必要があるほどの大規模 なシミュレーションであり、その出力データは、主要な変数に限定して月平均で出力したにも関わらず、 総計で26TBに及んだ。7メンバーのアンサンブル将来予測シミュレーションの結果を用いることにより、 7種類のシナリオで生じる気候変動やその影響の違いを定量的に評価することが可能となった。

表(5)-1 平成 30 年度に実施した、S-12-2 で開発された複数の将来排出シナリオを用いた数値シミュレーションの概要。

シナリオ	概要
Ref	なりゆき
EoP-max	除去装置対策Max
EoP-mid	除去装置対策Mid
2D-EoPmax-CCSBLD	2℃ & 除去対策Max & CCS石炭火力 & 電化(民生·業務)
2D-EoPmid-CCSBLD	2℃ & 除去対策Mid & CCS石炭火力 & 電化(民生·業務)
2D-EoPmid-RESTRT	2℃ & 除去対策Mid & 再エネ & 電化(運輸)
2D-EoPmid-RESBLDTRT	2℃ & 除去対策Mid & 再エネ & 電化(運輸+民生・業務)

4. 結果及び考察

表(5)-2に、各年度に実施した数値シミュレーションの概要を示す。以下、各々の数値シミュレーション結果を解析して得られた結果と考察について年次を追って報告する。

年度	実験名	実験の狙い	用いたモデル
H26年度	歴史再現実験 (HIST) 人為起源エアロゾル無 (piAero)	両実験の比較により、 SLCPの水循環に対する 影響の「現状把握」 (Takahashi et al. 2018)	CMIP5版 MIROC-ESM (Watanabe et al. 2011)
H27年度	将来シナリオ実験 (RCP4.5) 人為起源エアロゾル 将来半減実験(x0.5) 将来倍増実験(x2) 将来ゼロ実験(zero)	将来の温暖化環境のもと で人為起源エアロゾル量 を変化させた際の気候シ ステムの感度	CMIP5版 MIROC-ESM (Watanabe et al. 2011)
H30年度	将来シナリオ実験 S−12オリジナルシナリオ から計7種類	多様なエアロゾル削減将 来パスにおいて、水循環 を含む気候システムがた どるパス	CMIP6版 MIROC-ESM-FULL (in prep.)

表(5)-2 各年度に実施した数値シミュレーションの概要。

図(5)-5に、平成26年度に実施した2種類の数値シミュレーション結果に関して、全球平均地上気温と エアロゾル光学的厚さの時系列を示す。歴史再現実験(シミュレーション)においては、エアロゾル光 学的厚さは1950年以後に顕著に増加しているが、これは人為起源エアロゾルを含まない仮想世界実験(シ ミュレーション)の結果との比較から人為起源エアロゾルの急増を示唆している。地上気温の変化に注 目すると、人為起源エアロゾルを含まない仮想世界実験(シミュレーション)においては、長寿命温室 効果気体濃度の増加による地球温暖化が一本調子に進んでいくのに対して、歴史再現実験(シミュレー ション)においては、人為起源エアロゾルの急増に対応して長寿命温室効果気体濃度の増加による地球 温暖化が抑制されている。これらの違いから、過去およそ1970-2000年の間、人為起源エアロゾルは長寿 命温室効果気体濃度の増加による地球温暖化を50%近く緩和してきたということが示唆される。



図(5)-5 平成26年度に実施した2種類の数値シミュレーション結果の比較。

上で述べた数値シミュレーションの結果について、今度は全球平均ではなく全球的な観点での地理分 布について調べた結果を報告する。硫酸塩、有機炭素、ブラックカーボン等、それぞれ特性の異なる人 為起源エアロゾルであるが、ここではそれらを総和としてとらえる。この場合、水循環に影響を及ぼす 経路として、第一に重要と予想されるメカニズムは、直接効果および第1種間接効果を通じた、地表に到 達する太陽放射の遮蔽効果(日傘効果)が地上気温の低下をもたらし、それがクラジウスークラペイロ ンの関係式を通じた可降水量の減少を生じさせ、降水量の減少をもたらす、というものである。一方、 地球上の降水量は様々な要因で偏在しており、エアロゾルの分布も主に排出源に依存して大きく偏在し ているため、人為起源エアロゾルが降水分布に与える影響は必ずしも自明ではない。まずこうしたスト ーリーに沿って、人為起源エアロゾルがもたらす地表面熱収支への影響と、降水分布への影響を確認し て行った。なお、以下で示す結果はいずれも北半球夏季の平均である。

図(5)-6は、1976-2005年の期間で平均したときの、人為起源エアロゾルの光学的厚さを示す。(これ は①歴史再現シミュレーションと②人為起源エアロゾルを含まない仮想世界シミュレーションの差:① -②を取ることで得られる。)大気汚染源とその風下域、つまり、欧州、アジア、北米、アフリカ等で、 顕著な値が見られており、こうした分布は大気大循環モデルを用いた先行研究と整合的である。



taut 1976-2005 piAero-Full

図(5)-7は、同期間に地表に到達する太陽放射量(単位:W/m²)の①-②の違いを示す。図(5)-6と合わ せて見ることにより、人為起源エアロゾルによる日傘効果の大きさが推定できる。北半球中緯度や中央 アフリカおよびアマゾンを中心に、日傘効果の大きな領域(-5 ~ -20 W/m²)が広がっていることが分か る。逆に、チベット高原や北極域で太陽放射量の増加が見られる理由は、以下で見るように地表気温が 低温化するため積雪が増加し、その結果として地表面での反射と、雲やエアロゾル等による下向きの散 乱光が増える効果のためである。



ssrd 1976-2005 piAero-Full

図(5)-7 地表下向き太陽放射量:①-②。北半球夏季1976-2005年の平均。

図(5)-8は、地上2m気温に関する図2と同様の図である(単位:K)。図(5)-7で見た日傘効果の大きな領域を中心に、1-2℃程度の気温の低下が見られる。ここでは地上気温を例に示したが、対流圏下層を中心として、日傘効果を主たる原因とする低温化が生じるため、図(5)-9に示すように、広く北半球を覆うよ

図(5)-6 エアロゾル光学的厚さ: ①-②。北半球夏季1976-2005年の平均。

うに、可降水量に有意な減少が見られる。赤道太平洋で増加が見られる原因は大規模な循環場の変化と 関係がありそうであるが、この点についてはあとで述べる。



T2 1976-2005 piAero-Full

図(5)-8 地上気温:①-②。北半球夏季1976-2005年の平均。



precw 1976-2005 piAero-Full

図(5)-9 可降水量:①-②。北半球夏季1976-2005年の平均。

図(5)-10は、人為起源エアロゾルの降水量への影響を示す(単位:mm/s)。可降水量の減少が見られる 領域、かつ、気候学的に北半球夏季に降水量が多い領域で、顕著な降水量の減少が見られる。例えば東 日本の南岸から東海上にかけては、梅雨前線に伴う降水量が減少するセンスが見て取れる。以下では大 規模な循環場の変化を含めて、全球的な降水分布に対する人為起源エアロゾルの影響を詳細に調べた結 果を報告する。



図(5)-10 降水量:①-②。北半球夏季1976-2005年の平均。

以上で見てきたように、人為起源エアロゾルによる気候影響として北半球夏季には、アジアモンスー ン/インド洋/海洋大陸周辺において降水が減少し、熱帯南太平洋(南太平洋収束帯付近)において降水 が増加するという変化が見られた。さらに解析を進めた結果、この降水量変化の東西方向のコントラス トは熱帯の大気循環の変化と強く関連していることがわかった。図(5)-11aには、北半球夏季の降水量と 地上風の変化の分布を示す。降水量の減少が見られるインド洋から、降水量の増加が見られる太平洋へ と向かう東向き地上風の偏差が特徴的である。過去の同様の研究では、熱帯の東西に延びる降水帯(熱 帯収束帯)の南下が指摘されていたが、南北方向の変化は似ているものの、それらとは少し様相が異な る。アジアモンスーン域で降水量が減少する傾向は、過去に報告された数値実験と観測データ解析に基 づく研究結果とも概ね一致している。図(5)-11bに示す北半球冬季についても、夏季の状況に似ており、 アジアモンスーン/インド洋/海洋大陸周辺において降水が減少し、熱帯南太平洋(南太平洋収束帯付近) において降水が増加する。熱帯収束帯の南下も見られるものの、上述の東西のコントラストの方が顕著 であった。



図(5)-11 降水量と地上風:①-②。(a)北半球夏季、(b)冬季。1976-2005年の平均。

以上に示した降水量と地上風に見られる人為起源エアロゾルによる気候変化の影響は、東西-鉛直(ウ オーカー)循環や、南北-鉛直(ハドレー)循環といった低緯度で卓越する大規模かつ立体的な循環の変化 ともつながっていることが示された。図(5)-12に、本研究のシミュレーション結果の解析から得られた 大規模な立体循環の変化の概略を示す。以上の解析結果をまとめたものを学術論文として投稿し、平成 30年度に出版された¹⁾。



図(5)-12 降水量と大規模循環の変化の概略。

図(5)-13に、平成27年度に実施した数値シミュレーションの概要を示す。将来の温暖化環境のもとで 人為起源エアロゾル量を変化させた際の気候システムの感度を調べるため、西暦2020-2050年の将来シナ リオ実験(RCP4.5)をベースラインとして、人為起源エアロゾル半減実験(x0.5)、2倍実験(x2)、ゼロ実験 (zero)を実施した。図中の表にまとめられているような地上気温および降水量の変化が見られた。各々3 メンバーのアンサンブル実験を行ったが、それら3メンバーを平均した時系列変化に注目すると、人為起 源エアロゾル半減実験の降水量は期間の後半で非線形に増加する傾向が見られた。この傾向がメンバー 数の不足によるミスリードな結果か否かについては、アンサンブルメンバーの追加を必要とするため確 認できていない。



図(5)-13 平成27年度に実施した数値シミュレーションの概要。

図(5)-14は、平成28年度から30年度にかけて実施した地球システムモデルの更新に関する技術的な報告として、「親モデル」にゆるく結合した大気化学過程を含む大気大循環モデルの水平風や気温の場にかける拘束の強さをどのように決定したか、その概要を示している。図の下側2枚のパネルに見られるよ

うに、当初、「親モデル(T85大気)」の水平風や気温を用いて「子モデル(T42-CHASER)」をナッジングし たところ、解像度の違いにより低緯度成層圏における上昇流が不自然に強化されてしまい、その結果、 N20やCH4が上層に過度に輸送され、オゾン分布等にも悪影響を及ぼすことが判明した(用いたナッジン グ時定数は12時間)。そこで、ナッジング時定数を通常のナッジング実験で用いている値よりも短く(1 時間)して力学場の拘束を強くし、逆に大気下層では地表面・海表面温度の日周期変化に応じて気温変化 が滑らかに時間変化するように通信ステップと次の通信ステップとの間で次第にナッジング時定数を長 くする処置を施したところ、この問題が解消された。



図(5)-14 平成28~30年度に実施した地球システムモデルの調整の概要。

ここからは、平成30年度に実施したS-12-2で開発された複数の将来排出シナリオ(SLCPの排出削減に関 する様々なオプションや社会経済の発展を考慮した将来像に基づくもの)を用いた数値シミュレーショ ンの解析結果の概要を示す。西暦2010~2049年の40年間を対象に、7種類のシナリオを用いて、7つの初 期値からのアンサンブル将来予測シミュレーションを実施したものである。各々のシナリオの概要は表 (5)-1に示した。

図(5)-15に、地表面における全球平均した年平均エアロゾル直接放射強制の時系列を示す。各々のシ ナリオに関して7アンサンブルメンバーの平均を取り、さらに年々変動成分を除去したため、滑らかな時 系列となっているが、実際には各々の時系列が重なり合うほどの大きな年々変動が生じていることに注 意が必要である。このグラフから、エアロゾルによる直接効果(冷却効果)は、なりゆきシナリオ(Ref) は年々増加する傾向が見られ(右肩下がり)、除去対策(EoP)のみのシナリオでは横ばい、2℃目標シナリ オではいずれも減少傾向が見られる(右肩上がり)。



図(5)-15 地表面における全球平均した年平均エアロゾル直接放射強制の時系列(Wm⁻²)。

図(5)-16に、各々のシナリオでシミュレートされた、地表面における年平均エアロゾル直接放射強制 の全球分布を示す。除去対策(End-of-Pipe:EoP)のみを考慮したシナリオでは、主に東アジアと南ア ジアを排出源とする亜硫酸ガスから生成される硫酸塩エアロゾルが減少する効果によって、地表面にお けるエアロゾル直接放射強制(日傘効果)が減少する(図(5)-16aおよび図(5)-16b)。さらに、2℃目標シ ナリオでCCSや電化等の取り組みが進められ炭素性エアロゾルや硝酸エアロゾル等の排出源に影響が及 んだ際には、アフリカ、東南アジア、南米においても、地表面におけるエアロゾル直接放射強制(日傘効 果)が減少する(図(5)-16cから図(5)-16f)。これら2℃目標シナリオにおけるエアロゾル直接放射強制(日 傘効果)の減少の差異は、2℃目標の達成やエアロゾル前駆物質の排出削減に関して前提とした技術&政 策オプションの種類や排出削減の強さに応じて現れるものである。



図(5)-16 地表面における年平均エアロゾル直接放射強制の全球分布。

図(5)-17に、地表面における全球平均した年平均雲放射強制の時系列を示す。ここでは短波雲放射強制と長波雲放射強制の和を取った正味の雲放射強制に注目している。各々のシナリオに関して7アンサンブルメンバーの平均を取り、さらに年々変動成分を除去したため、滑らかな時系列となっているが、実際には各々の時系列が重なり合うほどの大きな年々変動が生じていることに注意が必要である。このグラフから、正味の雲放射強制(冷却効果)は、なりゆきシナリオ(Ref)では年々増加する傾向が見られ(右肩下がり)、除去対策(EoP)のみのシナリオでは2030年以降さらに増加が進み、2℃目標シナリオ群では2035年以降いずれも減少がストップする(横ばい)傾向が見られる。2℃目標シナリオにおける横ばい傾向は、図(5)-15で見たエアロゾル直接放射強制の横ばい傾向(すなわち大気中エアロゾル濃度の横ばい傾向)と、後に図(5)-19で示す地上気温の安定化傾向と放射過程を通じて深く関係していると推測される。



図(5)-17 地表面における全球平均した年平均雲放射強制の時系列(Wm⁻²)。

図(5)-18に、各々のシナリオでシミュレートされた、地表面における年平均雲放射強制の全球分布を 示す。ここでは短波雲放射強制と長波雲放射強制の和を取った正味の雲放射強制に注目している。除去 対策のみを考慮したシナリオでは、エアロゾル直接放射強制(大気中エアロゾル濃度に比例)が減少す る東アジアおよび南アジアとその周辺において、負の雲放射強制(冷却効果)が強まることが分かる。こ のことは一見、今までに我々が得ている理解と一致しないため、以下に理論的な推測を述べる。

今回の数値シミュレーションに用いている地球システムモデルでは、大気中エアロゾル濃度が減少し た場合には、雲の粒径が大きくなるとともに寿命が短くなる傾向が現れ、エアロゾルによる負の短波雲 放射強制(雲アルベド上昇による地表面の冷却効果)は弱まることが想定される。つまり正味で負の雲放 射強制(冷却効果)が強まるためには、長波雲放射強制に大きな負の傾向をもたらす変化が現れる必要が ある。長波雲放射強制は、地球放射を主に氷からなる上層雲が吸収して再放射を行うことによって地表 面に正の雲放射強制(加熱効果)をもたらすことを意味する。除去対策によって大気中エアロゾル濃度が 減少した場合には、上層の氷雲の粒径が大きくなるとともに寿命が短くなる傾向が現れ、長波雲放射強 制は弱まる。すなわち、少なくとも今回の数値シミュレーションに用いている地球システムモデルでは、 除去対策を施した際には、エアロゾル前駆物質の排出源の周辺において、正の長波雲放射強制が弱まる 効果が、負の短波雲放射強制が弱まる効果を凌駕することにより、正味で見た際に負の雲放射強制を強 化するということが理論的に推測される。なお、長波雲放射強制の変化は、上層雲の雲量や物性の変化 だけでなく、地上気温の変化にも影響を受ける点に注意が必要である。

一方、2℃目標シナリオ群では、エアロゾル前駆物質の排出源から遠く離れた地域の正味の雲放射強制 の増減が全球平均の増減に大きく寄与する。すなわち、東アジア、南アジアに、アフリカ、東南アジア、 南米を加えた排出源の周辺で生じる負の雲放射強制の強化(図中の青い領域)を、エアロゾル前駆物質の 排出源から遠く離れた地域の負の雲放射強制の減少(図中の赤い領域)を積算したものが凌駕する。この 結果、全球平均の時系列で見た際に、なりゆきシナリオに比べて小さな負の雲放射強制が、とくに 2040-2049年には横ばい状態で維持される。



図(5)-18 地表面における年平均正味雲放射強制の全球分布。

図(5)-19に、全球平均した年平均地上気温の時系列を示す。各々のシナリオに関して7アンサンブルメ ンバーの平均を取り、さらに年々変動成分を除去したため、滑らかな時系列となっているが、実際には 各々の時系列が重なり合うほどの大きな年々変動が生じていることに注意が必要である。このグラフか ら、全球平均地上気温は、なりゆきシナリオ(Ref)では年々上昇する傾向が見られ(右肩上がり)、除去 対策のみを最大限強化した(EoPmax)シナリオでは2030年以降さらに上昇が進み、2℃目標シナリオ群では 2030年以降いずれも上昇が穏やかになる傾向が見られる。今回の数値シミュレーションを終えた2050年 の段階ではまだ全球平均地上気温の上昇が続いているが、長期的な平均で見た場合には2015年から2050 年までの上昇幅は0.5℃程度であることから、仮に2015年時点で産業革命以降1℃弱の温暖化が生じてい たと仮定すると、21世紀末まで実験を続けたとしても、おそらく2℃目標を達成し得るものと推測される。



図(5)-19 全球平均した年平均地上気温の時系列(x0.1 K)。

図(5)-20に、各々のシナリオでシミュレートされた、地上気温変化の全球分布を示す。除去対策(EoP) のみのシナリオでは、北半球の中・高緯度を中心に、なりゆき(Ref)シナリオよりも気温上昇が大きい領 域が広がっている。それらの領域は、図(5)-16aと図(5)-16bに示したエアロゾル直接放射強制(冷却効果) の減少が生じている東アジアや南アジア周辺の領域と対応しているが、それよりも広がりが大きい。ベ ーリング海やオーストラリア大陸等、一部の領域では逆になりゆきシナリオに比べて気温上昇が小さい 領域が広がっている。以上のような地上気温のなりゆきシナリオからの偏差の分布パターンは、少なく とも部分的には、上で説明してきたエアロゾル直接放射強制および雲放射強制の偏差パターンと定性的 に一致している。

2℃目標シナリオ群に関しては、概ね全球的になりゆきシナリオに比べて地上気温が低い傾向が見られ るが、エアロゾル前駆物質の排出源の近傍の地域では、なりゆきシナリオよりも気温上昇が大きい領域 が見られており、長寿命温室効果気体の削減が全球ほぼ一様に長波放射強制を低下させるのに対して、 エアロゾル直接放射強制の削減効果が極めて局所的に現れるという事実を明確に示している。



図(5)-20 年平均地上気温偏差の全球分布。

図(5)-21に、全球平均した年平均降水量の時系列を示す。各々のシナリオに関して7アンサンブルメン バーの平均を取り、さらに年々変動成分を除去したため、滑らかな時系列となっているが、実際には各々 の時系列が重なり合うほどの大きな年々変動が生じていることに注意が必要である。このグラフから、 全球平均降水量は、なりゆきシナリオ(Ref)では年々増加する傾向が見られ(右肩上がり)、除去対策を 強化した(EoP)シナリオでは2025年以降さらに増加が進み、2℃目標シナリオ群の中にはEoPシナリオより もさらに増加するシナリオが見られる。最も降水量の増加が大きいと見込まれるシナリオは 2D-EoPmax-CCSBLD(すなわち除去対策を最大限強化してCCS石炭火力発電を主力として長寿命温室効果 気体の排出削減を行いつつ電化を進めるシナリオ)である。今回の数値シミュレーションを終えた2050 年の段階ではまだ全球平均降水量の増加が続いているが、その増加ペースは2040年代以降やや穏やかに なりつつある傾向が見て取れる。



図(5)-21 全球平均した年平均降水量の時系列(mm d⁻¹)。

図(5)-22に、各々のシナリオでシミュレートされた、降水量変化の全球分布を示す。除去対策(EoP) のみのシナリオでは、東アジアや南アジアのエアロゾル前駆物質の主要排出源に近い陸上ではなく、そ れらの地域から1000km程度も離れた海や島嶼部に、なりゆき(Ref)シナリオよりも降水量が増加する領域 が弧状に広がっている。それらの領域は、図(5)-16aおよび図(5)-16bに示したエアロゾル直接放射強制 (冷却効果)の減少が生じている東アジアや南アジアに見られる地域の周縁部と対応している。これと同 様の傾向は、先に結果を紹介した歴史再現シミュレーションと人為起源エアロゾルをゼロにした想定の シミュレーションとの結果を比較した際にも現れており(例えば、図(5)-12を参照)、大気中のエアロゾ ル濃度の増減が降水量(水循環)にもたらす影響は、単に前駆物質の排出源近くの局所的な応答として現 れるものではなく、大規模な循環場の変化と対になって現れることを示唆している。

2℃目標シナリオ群と除去対策(EoP)のみのシナリオをすべて比較した際には、メカニズムは不明なが ら、EoPmidの降水偏差パターンが最も大規模な構造を持って現れ、次いで2D-EoPmax-CCSBLDのものが大 きいと言う特徴が目につく。すべてのシナリオに共通する偏差パターンというのは見られず、例えば海 大陸周辺に注目すると、EoPmax、EoPmid、2D-EoPmax-CCSBLD の3つのシナリオでは全体的に増加が見ら れるが(図(5)-22aから図(5)-22c)、他のシナリオでは地域によって増えたり減ったりしている。日本周 辺に注目した場合には、2D-EoPmid-CCSBLDおよび2D-EoPmid-RESBLDTRTにおいて、本州・四国・九州の南 岸付近で帯状に降水量が増加する領域が見られる。本研究では10年間の平均値としての降水量の増減に 注目しているが、仮にこうした降水量の増減が梅雨期の雨や熱帯低気圧の去来に関係したものであると したら、災害をもたらすような顕著現象の変化と結びつく可能性もある。今回の解析結果は、「SLCPの 極端な降水イベントへの影響という防災的な観点を加味した上で最適シナリオの選択を行うためには、 今後より詳細なシミュレーションの実施と結果解析が必要になる」という可能性を示唆するものである。

158



図(5)-22 年平均降水量偏差の全球分布。

最後に、本サブ課題S-12-3(5)の5カ年のまとめを記す。冒頭に述べたように、これまでSLCPが気候の 形成や変動に果たす役割の定量的な実態把握の試みは、とりわけフィードバック過程や地域的な変化が 重要となる水循環変化の定量化という側面においてほとんどなされて来なかった。この課題に、SLCPと 気候システムのフィードバック過程を含んだ地球システムモデルを用いて取り組み、SLCPの水循環に対 する影響の現状把握を行い、降水分布および循環場の変化について新しい知見を経て論文発表を行った ¹⁾。

さらに、S-12-2において開発された、S-12独自のSLCP将来削減シナリオを、硝酸塩エアロゾル等の過 程を加えた最新の地球システムモデルに入力して数値シミュレーションを行い、主に人為起源エアロゾ ル濃度の変化がもたらす直接放射強制、雲放射強制、地上気温の変化に注目した解析を行ったうえで、 全球的な水循環(降水量)分布の変化について解析結果をまとめた。その結果、多様なエアロゾル削減将 来シナリオ(あるいは経路:パス)のなかで、仮に最も地上気温や降水量に負の影響が生じにくいもの を同定しようとするなら、最適シナリオは地域によって異なる可能性が高いことがわかった。とくに、 人命に関わるような極端な気象現象(熱波や大雨等)については、地域レベルでの適応策の検討や、複数 の地球システムモデルを用いてモデルに依存した予測の不確実性を評価するような、様々な視点に立っ た後続研究が必要と思われる。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

これまでSLCPが気候の形成や変動に果たす役割の定量的な実態把握の試みは、とりわけフィードバック過程や地域的な変化が重要となる水循環変化の定量化という側面においてほとんどなされて来なかった。この課題に、SLCPと気候システムのフィードバック過程を含んだ地球システムモデルを用いて取り 組み、SLCPの水循環に対する影響の現状把握を行い、降水分布および循環場の変化について新しい知見 を経て論文発表を行った¹⁾。

さらに、S-12-2において開発されたS-12独自のSLCP将来削減シナリオを、硝酸塩エアロゾル等の過程 を加えた最新の地球システムモデルに入力して数値シミュレーションを行い、主に人為起源エアロゾル 濃度の変化がもたらす直接放射強制、雲放射強制、地上気温の変化に注目した解析を行ったうえで、全 球的な水循環(降水量)分布の変化について解析結果をまとめた。

(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>

本報告書および学会や成果報告会等で報告された成果が国内の環境政策に活用されることが期待される。また、学術論文1)が、IPCC 第6次評価報告書等に引用されることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

 H. G. TAKAHASHI, S. WATANABE, M. NAKATA and T. TAKEMURA: Progress in Earth and Planetary Science, 5, 44, doi:10.1186/s40645-018-0197-2 (2018) Response of the atmospheric hydrological cycle over the tropical Asian monsoon regions to anthropogenic aerosols and its seasonality.

<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) H. G. TAKAHASHI: TRENDING NOW WATER 7th International, Hague, Netherlands (2014) Trends and variability in column-integrated water vapor and water vapor recycling.
- 2) H. G. TAKAHASHI and S. WATANABE: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) Estimation of direct and indirect effect of aerosols by a coupled global climate model:

Different impacts between the mid-latitude and tropics.

3) 高橋洋、渡辺真吾、鈴木健太郎、竹村俊彦:日本気象学会2018年度秋季大会、仙台(2018) エアロ ゾルの大気水循環への影響-プロセスによる分離-

(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

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

 H. G. TAKAHASHI, S. WATANABE, M. NAKATA and T. TAKEMURA: Progress in Earth and Planetary Science, 5, 44, doi:10.1186/s40645-018-0197-2 (2018) Response of the atmospheric hydrological cycle over the tropical Asian monsoon regions to anthropogenic aerosols and its seasonality. Ⅱ-6 短寿命大気汚染物質・雲・降水相互作用に伴う領域気候変動の評価

近畿大学総合社会学部 中田 真木子

平成26~30年度累計予算額: 20, 121.4千円

(うち平成26年度:4,220千円、平成27年度:4,083千円、平成28年度:3,878千円、

平成29年度:4,072千円、平成30年度:3,868.4千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

SLCP濃度変化の影響は放射収支を変えるのみならず、雲や降水の変化、および、そのフィードバック に伴う循環場変動を引き起こす。そのため、SLCP濃度の変化に伴い複雑な気候変動が起こる事が予測さ れる。本サブテーマでは、SLCPによってもたらされる気候変動を調査するため、大気海洋結合モデルを 用いたシミュレーション結果の解析を行い、特にエアロゾルに注目し、エアロゾルが雲量や降水量に及 ぼす影響を介した領域気候変動のメカニズムの解明に取り組んだ。エアロゾルは短寿命の物質であるた め局所性の強い分布を持つことが知られており、全球での気候変動のみならず領域スケールでの気候変 動への影響を把握する必要がある。人為起源エアロゾル量が多い東アジアを中心に複数のシナリオに基 づいたシミュレーションを実施した。過去約150年の気候再現実験においては、全ての強制力を考慮した シミュレーションと人為起源エアロゾル排出量を固定したシミュレーションの比較から、人為起源エア ロゾルの増加がなかった場合、現在よりも温暖化が進行していた可能性が示された。気候再現実験や人 為起源エアロゾル排出量を変化させた漸増・漸減実験などの解析から、東アジアにおいて人為起源エア ロゾルの増加により気温の低下、降水量の減少、下層雲を中心とした雲量増加が引き起こされることが わかった。これらの、結果をもとにテーマ2で作成された大気汚染対策と低炭素対策を組み合わせた7種 類のシナリオデータをベースにしたシミュレーション結果を解析した。除去対策のみでは、エアロゾル は減少するが、その影響でより温暖化が促進されてしまうことがわかった。除去対策と低炭素対策を組 み合わせた対策を取ることで、エアロゾル量を減らしながら気温上昇を抑制することができた。しかし、 除去対策と低炭素対策を組み合わせた対策の場合でもエアロゾル濃度低下が著しい地域では、冷却効果 が低減される傾向が見えるなど、SLCPの効果のローカルな影響を見ることの重要性が示唆された。

[キーワード]

エアロゾル、東アジア、大気海洋結合モデル、気候再現実験、将来シナリオ実験

1. はじめに

人間による影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高いと 言われている。人間による影響の代表的なものは二酸化炭素など長寿命温室効果気体の排出量が増えた ことだが、それだけではなく短寿命気候汚染物質(SLCP)の排出量増加も気候システムに変化を与えて いる。深刻な大気汚染の発生や風下地域での越境汚染被害など将来的な大気質の改善や今後数十年の地 球温暖化を効果的に抑止するためにSLCPの削減は有効と考えられている。SLCPは大気中に滞留する時間 (寿命)が短いため、局所性の強い時間空間分布を持つ。このことから、本研究では人為起源汚染物質排 出量が多い東アジアにおける領域規模での気候変動に注目した。SLCPの中でも特に、浮遊粒子状物質 (SPM)、微小粒子状物質(PM_{2.5})として日本においても環境基準が定められ、社会的関心も高い粒子状

物質(エアロゾル)の気候への影響に関する知見を得ることを目指す。

エアロゾルとは大気中を浮遊する固体や液体の微粒子で、発生源にも燃料燃焼など人間の活動に起因 する発生や、砂や海塩の巻き上げのように自然に起因する発生など様々なものが存在する。20世紀には 石炭や石油の消費増加に伴い、人為起源の温室効果気体の排出量が増加したが、それと同時に人為起源 のエアロゾルも大量に大気中へ排出された。エアロゾルには黒色炭素のように大気を暖める性質をもつ エアロゾル、硫酸塩エアロゾルのように地表を冷やす性質をもつエアロゾルがあるが、本研究では硫酸 塩エアロゾルなど大気を暖める性質を持たないエアロゾルもSLCPに含め、その影響を調査している。こ のようにエアロゾル種によって、性質が異なるのはエアロゾルには様々な化学組成があり、硫酸塩エア ロゾルのように太陽光を散乱するものもあれば、黒色炭素のように太陽光を吸収するものもあるからで ある。そして、大気中にエアロゾルが存在することで太陽光を散乱・吸収し、放射エネルギー収支を変 化させる効果をエアロゾル-放射相互作用と呼ぶ。また、エアロゾルは複数の過程を通して気候に影響を 及ぼすことが知られており、エアロゾル-雲相互作用と呼ばれる雲を介した気候への影響もある。これは エアロゾルが雲の発生過程に関与することから、エアロゾルの変化により雲の光学特性が変わり、放射 エネルギー収支に影響を及ぼす効果である。

放射エネルギー収支が変わることで、地球大気の運動は影響を受けるため、エアロゾルを含めSLCP濃度の変化は放射エネルギー収支変化を介して気温のみならず雲や降水の変化、および、そのフィードバックに伴う循環場変動を引き起こす。さらに、SLCP分布の局所性ゆえに、複雑な気候変動が起こる事が予測される。しかしながら、SLCPの気候変動への影響を領域スケールで行った研究は少ない。このような現状を鑑み、本研究は、気候モデルを用いてSLCP・雲・降水相互作用の気候への影響を領域規模で調査することを目指す。

2. 研究開発目的

SLCPによってもたらされる気候変動のうち、エアロゾルの雲量や降水量への影響、及びそのフィード バックに伴う領域規模の気候変動に焦点を当てて調査を行う。テーマ3サブテーマ(1)、(2)、(5)と密に 連携し、大気海洋結合モデルを用いた複数の排出量インベントリ・シナリオに基づいたシミュレーショ ンの解析を実施し、SLCP変化に伴う東アジアの気候変化についての知見を得ることを目的とする。

平成26年度:SLCP・雲・降水相互作用の気候への影響を領域規模で定量的に評価することを目指し、気候再現実験結果の解析を行う。

平成27年度:SLCPによってもたらされる気候変動のうち、エアロゾルの雲量や降水量への影響、及びそのフィードバックに伴う領域規模の循環変動に焦点を当て、気候再現実験結果を解析する。

平成28年度:エアロゾル排出量が減少していく環境におけるエアロゾル影響に注目して、複数の将来シ ナリオに基づいた大気海洋結合モデルシミュレーション結果の解析を行う。

平成29年度:引き続き、複数のシナリオに基づいた大気海洋結合モデルシミュレーション結果の解析を 行うとともに、S-12で作成したシナリオを用いたシミュレーション実施準備を行う。

平成30年度:S-12で作成したシナリオを用いたシミュレーション結果の解析を行い、SLCPによってもたらされる領域規模の気候変動を調べる。

3. 研究開発方法

モデル説明

SLCP濃度変化による領域気候変動を検証するために、排出量インベントリ・シナリオに基づいた気候 モデルシミュレーションを行う。エアロゾルは直接効果、間接効果により放射収支を変化させる。放射 収支は大気循環の機動力であることから、放射収支の変化が循環場に与える影響は無視できない(図 (6)-1)。このようなエアロゾルの影響をより詳細に検討するために、シミュレーションにはMIROC-ESM¹⁾ を使用した。MIROCは東京大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所を中心に開発が行われている大気海 洋結合大循環モデルで、MIROC-ESMはMIROCにエアロゾル輸送過程などの各モデルを結合したものである。 エアロゾル輸送過程はSPRINTARS^{2,3,4)}を基にしており、燃料燃焼など人為起源の発生源から排出される硫 酸塩エアロゾルや炭素性エアロゾル等の人為起源エアロゾルや風による巻き上げや生物由来の発生源か ら排出される自然起源エアロゾルの大気中での振る舞い(発生、移流、拡散、沈着など)を扱っている。 また、エアロゾル直接効果(エアロゾルによる太陽放射、赤外放射の散乱・吸収)および間接効果(エ アロゾルによる雲粒生成機能)も計算に含まれている。これらエアロゾルの直接効果、間接効果により 放射収支が変化し、さらに放射収支の変化を通してエアロゾルの影響は大気循環場の変化にまで及ぶ。 このため雲量や降水量はエアロゾルの増減に伴う影響のみならず、放射収支変化に起因する循環場変化 の影響も受け変動する。MIROC-ESMではこのようなエアロゾルの雲量、降水量への影響、およびそのフィ ードバックによる影響まで含んだシミュレーションを行うことができる。



図(6)-1 エアロゾルの放射場、循環場への影響の模式図。

人為起源エアロゾルは主に燃料消費により大気中に排出された汚染物質によって生成されるため、燃 料消費量が増えるとその濃度も高くなると考えられる。代表的な発生源としては、工場などの事業所や 家庭、自動車や船舶などが挙げられる。人為起源エアロゾル濃度の高い地域では、大気汚染が深刻な問 題となっている。日本においても、エアロゾルは浮遊粒子状物質(SPM)、微小粒子状物質(PM2.5)とし て環境基準が定められ、削減対策が講じられてきている。日本では、大気汚染が深刻だった時代から比 べるとエアロゾル濃度は減少してきているが、近年は越境汚染によるPM2.5高濃度などが危惧されている。 人為起源エアロゾルは自然起源エアロゾルと比べ、粒径が小さくPM2.5は、人為起源エアロゾルとみなす ことができる。図(6)-2はMIROC-ESMで算出された地表付近のPM2.5濃度と衛星観測データなどから導出さ れたPM2.5濃度⁵⁾の2010年の年平均値である。衛星観測データなどから導出された濃度は、MODISやMISRな ど複数の衛星観測データプロダクトのエアロゾル光学的厚さから導出したPM2.5濃度をエアロゾル輸送モ デルシミュレーションや地上でのPM25計測データなどを用いて補正している。このため、PM25のうち土 壌エアロゾルや海塩エアロゾルなど自然起源のエアロゾル濃度と人為起源エアロゾル濃度をそれぞれ表 示することができる。図(6)-2は自然起源エアロゾルを除いたPM。5濃度を示している。濃度分布図から東 アジアは世界的にみてもPM2s濃度が高く、人為起源エアロゾルが大気中に多く浮遊している地域である ことがわかる。 衛星観測データから導出された濃度と比較して、MIROC-ESMによるシミュレーションはア ジア域で過小、南アメリカ大陸で過大傾向がみられるが概ねPM25濃度分布を良く再現している。



図(6)-2 2010年平均の人為起源PM2.5濃度分布(a)衛星観測データ等から導出されたPM2.5濃度から土壌エ アロゾル、海塩エアロゾル濃度を除いた値、(b)MIROC-ESMで計算された地上付近の硫酸塩エアロゾル、 硝酸塩エアロゾル、黒色炭素エアロゾル、有機炭素エアロゾル濃度の合計。

気候再現実験

エアロゾルの雲量や降水量、及びそのフィードバックに伴う気候変動を調べるためにMIROC-ESMを用い て複数のシナリオに基づいたシミュレーションを行う。温室効果気体濃度やエアロゾル排出量、太陽活 動などの外部強制力を気候モデルに与えることで、気候変化の様子を再現するシミュレーションを実施 すると気候がどのように変化するか知ることができる。大気中にエアロゾルが存在することで太陽光を 散乱・吸収し、エネルギー収支を変化させる効果をエアロゾル-放射相互作用と呼ぶ。また、エアロゾル は複数の過程を通して気候に影響を及ぼすことが知られており、エアロゾル-雲相互作用と呼ばれる雲を 介した気候への影響もある。これはエアロゾルが雲の発生過程に関与することから、エアロゾルの変化 により雲の光学特性が変わり、エネルギー収支に影響を及ぼす効果である。エアロゾルは放射収支の変 化を通して大気循環場にも影響を及ぼす。エアロゾルが気候へ与える影響を把握するために、人為起源 のエアロゾルの排出量が増加してきた過去の気候再現実験を行った。過去長期間における人為起源エア ロゾルの影響を調査するため、1850年から2005年のシミュレーションにおいて全ての強制力を考慮した シミュレーション(historical)と人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を1850年に固定したシミュレー ション(piAero)、人為起源エアロゾル前駆物質とOH、H2O2、オゾン濃度を1850年に固定したシミュレー ション(piSLCP)を行った。温室効果気体濃度シナリオやエアロゾル前駆物質排出量データなどはCMIP5 推奨の外部強制力データを使用した。図(6)-3は1900年(1896年~1905年平均)、1980年(1976年~1985 年平均)、2000年(1996年~2005年平均)の人為起源エアロゾル光学的厚さの分布を示している。MIROC-ESM を用いた気候再現実験では、欧米では20世紀後半には人為起源のエアロゾル排出量が減少に転じてきて いるのに対して、東アジアでは20世紀後半もエアロゾル量に増加傾向がみられた。図(6)-4には historicalの種類別エアロゾル光学的厚さの年変化を示しており、水色が硫酸塩エアロゾル、灰色が黒 色炭素と有機炭素を足し合わせた炭素性エアロゾル、黄色が土壌エアロゾル、白色が海塩エアロゾルで ある。図(6)-4(a)は全球で平均したエアロゾル光学的厚さで、1850年以降、硫酸塩エアロゾルなど人為 起源エアロゾルが増加してきたが、20世紀後半には大気汚染対策により全球平均でみるとエアロゾル濃 度は横ばいから緩やかな減少に転じてきていることがわかる。しかしながら、図(6)-4(b)に示した東ア

ジア平均のエアロゾル光学的厚さでは1950年頃から人為起源エアロゾルが急激に増加し、20世紀後半に もエアロゾルの増加が継続している。このことが、現在、東アジアを大気汚染の深刻な地域にしている 原因だと考えられる。全ての強制力を考慮したシミュレーションと人為起源エアロゾル前駆物質の排出 量を1850年に固定したシミュレーションとの比較から、人為起源エアロゾルの影響を見積もる。



図(6)-3 MIROC-ESMによる気候再現実験の1900年(1896年~1905年平均)、1980年(1976年~1985年)、 2000年(1996年~2005年平均)のエアロゾル光学的厚さ分布(全ての強制力を考慮したシミュレーション(historical)と人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を1850年に固定したシミュレーション(piAero)の差(historical-piAero))。



図(6)-4 種類別エアロゾル光学的厚さの年変化(a)全球平均、(b)東アジア(20^oN-50^oN, 100^oE-150^oE)平 均。MIROC-ESMによる気候再現実験のhistoricalシミュレーション。水色は硫酸塩エアロゾル、濃灰色は 炭素性エアロゾル、黄色は土壌エアロゾル、白色は海塩エアロゾルの光学的厚さを示す。

漸增·漸減実験

気候再現実験では、東アジアで人為起源エアロゾルが増加していたが、今後は東アジアの人為起源エアロゾル排出量も減少していくことが予想される。このため、MIROC-ESMによる将来の人為起源エアロゾル漸増・漸減実験を実施した。図(6)-5はRCP4.5シナリオを用いた2021年~2049年の東アジアのエアロゾル光学的厚さの変化の様子を示している。水色は硫酸塩エアロゾル、黒は黒色炭素エアロゾル、灰色は 有機炭素エアロゾル、黄色は土壌エアロゾル、白色は海塩エアロゾル人為起源のエアロゾルが顕物質排 出量が抑制されることに伴いエアロゾル量が減少し、特に硫酸塩エアロゾルの減少が顕著であることが わかる。RCP4.5シナリオに加え、人為起源エアロゾル前駆物質排出量をゼロ(zero)としたシナリオ、 RCP4.5シナリオを基準に人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分(x05)、2倍(x2)にしたシナリオに よるシミュレーション結果から東アジアにおける人為起源エアロゾルの影響を調査した。



図(6)-5 東アジア(20°N-50°N, 100°E-150°E)平均の種類別エアロゾル光学的厚さの年変化。MIROC-ESM によるRCP4.5シナリオシミュレーション。水色は硫酸塩エアロゾル、黒は黒色炭素エアロゾル、灰色は 有機炭素エアロゾル、黄色は土壌エアロゾル、白色は海塩エアロゾル光学的厚さを示す。

S-12将来シナリオ実験

当該課題テーマ2で作成された低炭素対策とSLCP・大気汚染物質対策の組み合わせによる排出シナリオ に沿ったMIROC-ESMによるシミュレーションを実施した。各国・各部門・各物質の排出経路の様々な対策 の組み合わせを試算し、7種類の排出シナリオを準備した。1つ目は、現状の政策・対策の傾向が継続す るような基準シナリオ (Ref) で、このシナリオを基準として他のシナリオでの対策の効果を評価するこ とができる。次に、CO₂排出経路はRefと同じで、脱硫装置や脱硝装置の導入など除去対策の導入強度の みを変化させた2種類のシナリオを用意した。Refシナリオに対してSO₂、NO_x、BC、OC等への除去装置対 策を最大限に強化し、発電プラント・産業プラントおよび運輸に対して、2050年までに全世界で100%導 入を想定したシナリオ(EoPmax)と除去装置対策を2050年までに先進国で100%、途上国で50%程度の導 入を想定したシナリオ(EoPmid)の2つである。以上の3種類のシナリオは2℃目標に向けた低炭素対策は考 慮していない。大気汚染対策と同時に2℃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のシ ナリオを2D-EoPmax-CCSBLD、2D-EoPmid-CCSBLD、2D-EoPmid-RESTRT、2D-EoPmid-RESBLDTRTの4種類を作 成した。2Dは2℃目標の達成を目指す対策であることを示し、CCSは特に発電部門で再生可能エネルギー よりもCCS付き石炭火力発電を優先的に導入、RESは発電部門でCCS付き石炭火力発電よりも再生可能エネ ルギーの大幅促進を優先的に導入するシナリオである。BLDは民生・業務部門で2050年までに先進国だけ でなく途上国もオール電化に近づき、電化できない部分は石炭・灯油・バイオマスではなくガスヘシフ ト、TRTは特に運輸部門で、2040年以降はEV車が大幅に普及するようなシナリオを想定している。実験準 備として、テーマ2で作成された排出量データをMIROC-ESMでのシミュレーションで使用する形式へと変 換した。図(6)-6はS02の排出量分布図で、S02は硫酸塩エアロゾルの前駆物質であり、アジア域の排出量 が多いことがわかる。S0,排出量インベントリと併せて人為起源のOC(図(6)-7)、BC(図(6)-8)、NO、 (図(6)-9)の排出量インベントリの整備を行った。2050年と2010年を比較するとほとんどの物質で減少 傾向がみられるが、シナリオによっては減少量が少ない、あるいは増加している場合もある。これらの シナリオを用いたシミュレーションから気候影響、環境影響の比較検討を行う。



図(6)-6 テーマ2で作成された二酸化硫黄(SO₂)の各シナリオ排出量。Ref (2010)は基準となる Ref シナリオの 2010 年の排出量を示す。全てのシナリオで 2010 年の排出量データは同じである。各シナリオの図は 2050 年と 2010 年の排出量の差を示している。



図(6)-7 テーマ2で作成された有機炭素(OC)の各シナリオ排出量。Ref (2010)は基準となる Ref シ ナリオの 2010 年の排出量を示す。全てのシナリオで 2010 年の排出量データは同じである。各シナリオ の図は 2050 年と 2010 年の排出量の差を示している。



図(6)-8 テーマ2で作成された黒色炭素(BC)の各シナリオ排出量。Ref (2010)は基準となる Ref シ ナリオの 2010 年の排出量を示す。全てのシナリオで 2010 年の排出量データは同じである。各シナリオ の図は 2050 年と 2010 年の排出量の差を示している。



図(6)-9 テーマ2で作成された窒素酸化物(NOx)の各シナリオ排出量。Ref (2010)は基準となる Ref シナリオの 2010 年の排出量を示す。全てのシナリオで 2010 年の排出量データは同じである。各シナリオの図は 2050 年と 2010 年の排出量の差を示している。

4. 結果及び考察

気候再現実験

MIROC-ESMを用いた19世紀中盤~現在の排出量インベントリ・シナリオに基づいた気候再現実験の解析 を行った。排出量インベントリ・シナリオに基づき全ての強制力を考慮したシミュレーション (historical) と人為起源エアロゾルの強制力を除くために人為起源エアロゾルの排出量を固定したシ ミュレーション(piAero)から、エアロゾルの影響を評価した。全球平均エアロゾル光学的厚さは図(6)-4 に示したように、1850年から1980年頃まで増加し、その後減少に転じている。一方、東アジアでは20世 紀中盤から急激にエアロゾル光学的厚さの増加がみられる。東アジアは世界的にみても、エアロゾル濃 度の高い地域である。これは、人口密度が高いことに加え、近年の急速な経済成長に伴い燃料消費量が 増加し人為起源のエアロゾルが大量に排出されていることに起因する。エアロゾル濃度の高い東アジア におけるエアロゾル変化とそれに伴う気象場の変化を調べる。人為起源エアロゾル濃度は特に中国東部 で増加が多く、この地域ではエアロゾル増加に伴い雲粒が小さくなり、雲量が増加していることがシミ ュレーション結果からわかった。

エアロゾル量や雲の変化が日射量に及ぼす影響を評価するため、地表下向き短波放射の変化を調べた。 地上に到達する短波放射の変化より求めたエアロゾル効果のアジア域での分布を図(6)-10に示す。エア ロゾルが短波放射を散乱・吸収することにより地表に到達する短波放射のエネルギーを減少させる直接 効果は、晴天時に地上に到達する短波放射の変化より求めた。エアロゾル増加に伴う雲の光学特性変化 で地表に入射する短波放射エネルギー量が変化する間接効果は、全天と晴天時の地上に到達する短波放 射の変化を用いて算出した。直接効果と間接効果を併せた効果をエアロゾル効果として示している。1900 年(1896-1905年平均)にはエアロゾル効果がほとんど見られないが、2000年(1996-2005年平均)には 東アジアを中心にエアロゾル効果により地上に到達する短波放射が減少していることがわかる。直接効 果の分布はエアロゾル濃度分布と対応しており、エアロゾル濃度増加の顕著な地域で直接効果が大きく なることが示されている。間接効果の分布は雲量変化の分布と似たパターンを示しており、エアロゾル 排出量が多い地域だけではなく、その周辺で雲量が大きく変化した地域でも大きな値となっている。こ のことから、エアロゾルの気候影響は、周辺地域にも及ぶことがわかる。

次に、エアロゾル直接効果と間接効果の経年変化を図(6)-11に示した。晴天時に地上に到達する短波 放射の変化より求めたエアロゾル直接効果は紫色で、全天と晴天時との地上に到達する短波放射の変化 から求めたエアロゾル間接効果は水色で示している。東アジアでのエアロゾル直接効果はエアロゾル量 の増加に比例するように強まっている。本実験結果のエアロゾル間接効果には従来の第一種、第二種効 果に加え、エアロゾルの効果が海面水温や循環場を変化させる効果含まれるため、複雑な年変化を示し ているが、直接効果と間接効果を合わせたエアロゾルの効果は気候再現実験の期間、マイナス方向に増 加している。このことは、エアロゾルによって地上に到達する短波放射が遮られ、地上付近が冷やされ ていたことを示唆している。

171

S-12-3



図(6)-10 地上に到達する短波放射の変化より求めたエアロゾル効果の分布。エアロゾル効果は地上に 到達する短波放射のhistoricalとpiAeroシミュレーションの差から導出、直接効果は晴天時の地上に到 達する短波放射のhistoricalとpiAeroシミュレーションの差から導出、間接効果はエアロゾル効果と直 接効果の差から導出した。上が1896-1905年平均、下が1996-2005年平均を示す。



図(6)-11 1850年から2000年の東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)のエアロゾル直接効果(紫色)、間 接効果(水色)の年変化。直接効果、間接効果の導出方法は図(6)-10と同様。

エアロゾル効果により日傘効果が強まったことで、気温はどのように変化したか全強制力を考慮した シミュレーション(historical)と人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を1850年に固定したシミュレー ション(piAero)における気温の経年変化をみていく(図(6)-12)。黒線は気候再現実験(historical)、 赤線は人為起源エアロゾル固定実験(piAero)、それぞれ細線は1年平均値、太線は11年移動平均値、塗 りつぶしグラフは人為起源エアロゾルの影響による変化量(historical-piAero)を示す。どちらのシミ ュレーションでも、温室効果気体濃度は増加しているため1850年から2000年の気温には昇温傾向がみら れる。しかしながら、historicalでは東アジアでエアロゾル量の急激な増加が始まる20世紀中頃からし ばらくの期間、気温が低下しており、これはエアロゾル増加に伴う影響と考えられる。さらに2つのシミ ュレーション結果の差から求めたエアロゾルの影響による気温変化をみると、明らかな気温減少が認め られる。このことは、人為起源のエアロゾル増加がなかった場合、現在よりも温暖化が進行していた可 能性を明示している。

気温変化に続き、図(6)-13に雲量の経年変化を示している。東アジアでは全強制力を考慮したシミュ レーションと人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を固定したシミュレーションの明確な違いは20世紀 中頃までみられないが、人為起源のエアロゾル濃度増加が顕著になりだした時期から2つのシミュレーシ ョン結果に差異が現れる。全強制力を考慮したシミュレーションでは雲量は微増しているが、人為起源 エアロゾルを固定したシミュレーションでは雲量が減少している。両シミュレーションの差を取ると、 人為起源エアロゾルの影響によって雲量が増加していることがわかる。雲量は高度別の出力もあるため、 上層雲、中層雲、下層雲について、それぞれのシミュレーションの経年変化を調査した。上層雲ではわ ずかに雲量増加傾向がみられるが、両シミュレーションの差異がほとんどなく、エアロゾルの影響が小 さいことがうかがえる。両シミュレーションの差が大きく、エアロゾルの影響が顕著なのは、下層雲で 図(6)-13の全雲量でみられるような、エアロゾル効果で雲量が増加する傾向がみられた。このため、エ アロゾルが増加した東アジアでは、下層雲を中心に雲量が増加したことがわかる。また、雲粒有効半径 も東アジアでは小さくなっており、雲の日傘効果が強化されていたことが示唆される。図(6)-10のエア ロゾル間接効果の分布は雲量変化の分布に対応しており、エアロゾル増加に伴い雲量が増加し、さらに 地上付近を冷却していたと考えられる。一方、人為起源エアロゾル排出量を固定したシミュレーション では、上、中、下層で雲量の減少がみられた。このことからも、エアロゾル増加の影響で、東アジアで は雲量が増加したことがわかる。

全強制力を考慮したシミュレーションでは20世紀中頃から雲量増加がみられる一方で、降水量には減 少傾向がみられる(図(6)-14)。人為起源エアロゾル排出量を固定したシミュレーションではシミュレー ション期間中に長期的な増減傾向はみられないが、人為起源エアロゾルの影響を考慮したシミュレーシ ョンでは、エアロゾルが急増しだした時期から降水量の顕著な減少がみられる。両シミュレーションの 差から求めたエアロゾルの影響による降水量変化から、エアロゾルが増加したことで降水量が減少した ことがわかる。大規模凝結の降水量と積雲対流の降水量を比べると、積雲対流の降水量における減少が 大きい。これをまとめると、エアロゾル増加の影響により気温は低下、雲量は増加、降水量は減少して いることになる。大気海洋結合モデルを用いたシミュレーションより、人為起源のエアロゾルが放射収 支への影響を介して、雲量や降水量の変化にも影響を及ぼしていたことがわかった。



図(6)-12 1850年から2000年の東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)の気温年変化。黒線は気候再現実 験(historical)、赤線は人為起源エアロゾル固定実験(piAero)、それぞれ細線は1年平均値、太線は11 年移動平均値、塗りつぶしグラフは人為起源エアロゾルの影響による変化量(historical-piAero)を示 す。



図(6)-13 1850年から2000年の東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)の雲量年変化。図(6)-12と同様。



図(6)-14 1850年から2000年の東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)の降水量年変化。図(6)-12と同様。

エアロゾル影響による降水変化について、詳細にみていく。水収支の式を月平均より長い時間スケー ルで平均すると、可降水量の時間変化率は無視できるので、降水量の変化量は蒸発量と水蒸気フラック スの収束で説明できる。図(6)-15は2つのシミュレーション結果の差から求めた、降水量(灰色)、蒸発 量(青色)、水蒸気フラックスの収束(紫色)の経年変化である。蒸発量はシミュレーション期間中、 長期的に減少しており、図(6)-12の気温変化の様子と良く一致することから、気温に対応して蒸発量が 変化することがわかる。水蒸気フラックスの収束は蒸発量に比べ年変動が大きいが、20世紀後半には減 少傾向がみられる。エアロゾル量の多い領域では、エアロゾル直接効果や間接効果によって地表付近に 到達する短波放射が減少し、地表付近の気温が下がる。気温が下がることで、上昇流が起きにくくなり、 対流性の雲の発生が抑制される。また、周囲からの水蒸気の収束量が減少する。東アジアはモンスーン の影響で、夏に降水量が多いが、エアロゾルにより地表が冷やされると、夏の海陸コントラストが減少 することが考えられる。これらのことから、エアロゾルが増加することで、地表付近が冷やされ蒸発量 が減少することや、水蒸気の収束が弱まることで、降水量が減少したと考えられる。



図(6)-15 1850年から2000年の東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)の降水量(灰棒グラフ)、蒸発量 (青線)、水蒸気フラックスの収束(紫線)のhistoricalとpiAeroの差の11年移動平均

漸增·漸減実験

今後は東アジアの人為起源エアロゾル排出量も減少していくことが予想されため、MIROC-ESMによる将 来の人為起源エアロゾル漸増・漸減実験の結果を用い、東アジアにおける人為起源エアロゾルの影響を 調査した。RCP4.5シナリオを基準にして、人為起源エアロゾル前駆物質排出量をゼロ(zero)としたシナ リオ、RCP4.5シナリオを基準に人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分(x05)、2倍(x2)にしたシナ リオによるシミュレーションを実施した。図(6)-16にはそれぞれのシナリオの東アジア平均のエアロゾ ル光学的厚さ、気温、雲量、降水量の経年変化を示している。黒線はRCP4.5、紫線はゼロ(zero)、赤 線は半分(x05)、青線は2倍(x2)を示す。RCP4.5シナリオを用いたシミュレーションでは硫酸塩エアロ ゾルなどの人為起源エアロゾルが減少するため2021年から2049年の期間では減少傾向がみられる(図 (6)-16(a) 黒線)。zeroシナリオでは人為起源エアロゾル前駆物質排出量が2021年にゼロとなるが、人為 起源エアロゾル前駆物質排出量がゼロになっても自然起源エアロゾルの発生などがあるため、エアロゾ ル量はゼロにはならないが、かなり低い値となる。RCP4.5シナリオの排出量を基準として半分、2倍とし ているためx05、x2シナリオにおいてもRCP4.5シナリオに比例するようにエアロゾル光学的厚さが減少し ている。人為起源のエアロゾル排出が突然変化した場合の直近の影響を調べるために、漸増・漸減実験 の2021年から2025年の5年平均値を比較した。RCP4.5シナリオと比較して東アジア平均のzeroシナリオで はエアロゾル光学的厚さは3分の1程度となった。一方、2021年に人為起源エアロゾル前駆物質排出量が2 倍となるx2シナリオでは東アジア平均のエアロゾル光学的厚さはRCP4.5シナリオの1.7倍ほどになった。 基準となるRCP4.5シナリオのエアロゾル量が2021年から2049年の期間に減少していくため各シナリオシ ミュレーションのエアロゾル光学的厚さの差は小さくなっていく。x05シナリオでは、シミュレーション 期間終盤ではzeroシナリオと同程度までエアロゾル量が減少している。気温の経年変化は図(6)-16(b) に示しているように、温室効果気体濃度が増加しているためすべてのシミュレーションにおいてこの期 間、気温上昇がみられる。特に、人為起源エアロゾル排出量をゼロにしたシミュレーションで、高い気 温になっている。雲量は変動が大きいが、わずかに減少傾向(図(6)-16(c))、降水量は増加傾向(図 (6)-16(d))となっている。また、エアロゾル量の最も多いシナリオ(x2)で気温が最も低く、雲量が多く、 降水量が少ないという特徴があった。



図(6)-16 東アジア平均(20^oN-50^oN, 100^oE-150^oE)の(a)エアロゾル光学的厚さ(b)気温、(c)雲量、(d) 降水量の年変化。黒線はRCP4.5、紫線はゼロ(zero)、赤線は半分(x05)、青線は2倍(x2)を示す。 (細線は各アンサンブルの年平均、太線はアンサンブル平均の年平均)

人為起源エアロゾル前駆物質排出量変化による気温、降水量、雲量への影響を見積もるために、ゼロ シナリオと各シナリオの差を図(6)-17に示す。赤線は人為起源エアロゾル排出量半分にしたシナリオ、 黒線はRCP4.5シナリオ、青線は人為起源エアロゾル排出量2倍にしたシナリオとゼロシナリオの差を5年 平均している。ゼロシナリオのエアロゾル光学的厚さは自然起源のエアロゾル量とみなせるので、図(6) -17(a)に示したゼロシナリオとの差は人為起源エアロゾル量の変化を示しており、どのシナリオにおい ても人為起源エアロゾル量は減少していることがわかる。エアロゾル光学的厚さの年変化の様子と類似 した変化を示しているのが、低層雲量(図(6)-17(e))で、エアロゾル量の多いシナリオほど低層雲量 が多いことがわかる。そのため、エアロゾル変化の影響が顕著にみられ、エアロゾル光学的厚さの減少 に対応するように低層雲量は減っている。図(6)-17(b)から読み取れるように、気温はエアロゾル量が 多いシナリオほど低くなっており、RCP4.5シナリオでは2030年頃にはゼロシナリオと比べ1度近く気温が 低下、さらに人為起源エアロゾル前駆物質排出量をRCP4.5シナリオから倍増させた場合には-1.5度以下 の気温低下がみられた。これは気候再現実験でみられたようなエアロゾル変化に伴う気温低下が引き起 こされたと考えられる。しかし、RCP4.5シナリオおよびそれを基準にしている半分、倍増シナリオでは 人為起源エアロゾル前駆物質排出量が減少していることから、エアロゾル量の経年減少に伴い、ゼロシ ナリオとの気温差も小さくなっている。このことは、人気源エアロゾル排出量の削減によって、エアロ ゾルによる地上付近の冷却効果が小さくなり、温暖化が助長されているとも言える。2040年代後半には 半分シナリオの気温はゼロシナリオの気温と同程度になっている。降水量は気温と似た年変化を示し、 エアロゾル増加の影響で減少するが、エアロゾル量の差が小さくなるにしたがって、ゼロシナリオとの 差も小さくなっている(図(6)-17(d))。低層雲量については、先に述べたようにエアロゾル減少に伴 い減少している。一方、高層雲量は低層雲量に比較して、エアロゾルの影響による変化は小さいが、2030 年頃から増加している様子がみられる。高層雲量の変化の仕方は低層雲量の変化とは異なり、気温や降 水量の変化に類似し、エアロゾル量の減少により増加していく傾向がみられる。エアロゾル変化に伴う、 気温等の変化は気候再現実験で得られた結果と矛盾しないものであるが、東アジアにおいても人為起源 エアロゾル量が減少していくとエアロゾルの影響は弱まっていくことがわかる。エアロゾル削減経路に ついて考察すると、半分シナリオ(x05)では、シミュレーション期間の後半では気温や降水量もゼロシナ リオに近い値となっており、このことは2021年の時点で人為起源エアロゾル量をゼロにした場合と半減 させた場合で2050年頃には同程度の気候になることを示唆している。



図(6)-17 東アジア平均(20%-50%, 100%-150%)の(a)エアロゾル光学的厚さ、(b)気温、(c)雲量、(d) 降水量、(e)低層雲量、(f)高層雲量の各シナリオとゼロシナリオの差の5年平均。赤線は人為起源エアロ ゾル排出量半分(x05)、黒線はRCP4.5シナリオ(RCP4.5)、青線は人為起源エアロゾル排出量2倍(x2)とゼ ロシナリオ(zero)との差を示す。

気候再現実験で全ての強制力を考慮したシミュレーションでは東アジアにおいてエアロゾル光学的厚 さの顕著な増加が認められるが、人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を固定したシミュレーションで はこのようなエアロゾル光学的厚さの増加が見られない。このことから人間活動に伴うエアロゾル前駆 物質の排出量の増加が東アジアにおいてこの期間のエアロゾル光学的厚さ変化に大きく影響していたこ とがわかる。エアロゾルが増えることで、地表に入射する短波放射が減少させられるため地表付近では 気温が低下することが推測される。しかし、気候再現実験では、人為起源エアロゾル前駆物質の排出量
だけではなく、二酸化炭素などの温室効果気体濃度も増加しているため、シミュレーション結果に表れ る気温変化には複数の要因が含まれている。人為起源エアロゾル前駆物質排出量増加の影響を評価する ために、異なる人為起源エアロゾル排出量を用いたシミュレーションの差を用いた解析を行った。気候 再現実験は全ての強制力を考慮したシミュレーションと人為起源エアロゾル前駆物質の排出量を固定し たシミュレーションの差を用いる。将来の漸増・漸減実験では、気候再現実験とは異なり、東アジアに おいても人為起源エアロゾル前駆物質の排出量が減少していくというシナリオのもとでシミュレーショ ンを行った。シミュレーション期間には温室効果気体濃度も変化していくため、人為起源エアロゾル前 駆物質排出量をゼロとしたシミュレーションとの差でエアロゾルの影響を調査した。このようにして求 めたエアロゾル光学的厚さの差は概ね人為起源エアロゾル量に相当する。気候再現実験と将来実験の大 きな違いは、気候再現実験ではエアロゾル光学的厚さが増加しているが、将来実験では東アジアでもエ アロゾル光学的厚さが減少している点である。図(6)-18に東アジア平均の気候再現実験と漸増・漸減実 験のエアロゾル光学的厚さと気温、降水量、雲量の関係を示す。灰丸は気候再現実験の全ての強制力を 考慮したシミュレーション(historical)と人為起源エアロゾル排出量固定(piAero)との差、黒菱形と緑 三角は将来の漸増・漸減実験のRCP4.5シナリオと人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分にしたシミ ュレーション(x05)それぞれについて人為起源エアロゾル前駆物質排出量ゼロとしたシミュレーション (zero)との差を示している。2種類の実験とも気温や海面水温の変化に伴う雲や降水量さらにはエアロゾ ルヘのフィードバックなどの効果を含み、現実のエアロゾル変化による影響に近い効果を表している。 エアロゾル光学的厚さの変化と気温、降水量、雲量の変化の関係を解析すると、エアロゾル光学的厚さ 変化に伴う各要素の変化は気候再現実験と将来の漸増・漸減実験同様の傾向になることがわかった。人 為起源エアロゾルの増加によって地表付近の気温は低下するという負の相関関係がみられる。雲量は特 に下層雲を中心に東アジアではエアロゾル増加に対応して増える傾向がわかる。降水量はエアロゾル増 加により気温が低下すると減少していく様子を示した。この結果は人為起源エアロゾルの排出削減は温 暖化の促進につながる可能性を示唆しているが、より詳細な将来のシナリオに基づいたシミュレーショ ンを実施し、排出量変化による気候への影響を調査する必要がある。



図(6)-18 東アジア平均(20°N-50°N, 100°E-150°E)のエアロゾル光学的厚さとa:気温、b:降水量、c:雲量の関係。灰丸は気候再現実験の全ての強制力を考慮したシミュレーション(historical)と人為起源エアロゾル排出量固定(piAero)との差、黒菱形と緑三角は将来の漸増・漸減実験のRCP4.5シナリオと人為起源エアロゾル前駆物質排出量を半分にしたシミュレーション(x05)それぞれについて人為起源エアロゾル前駆物質排出量ゼロとしたシミュレーション(zero)との差を示している。

S-12将来シナリオ実験

テーマ2で提案された排出シナリオを用いてMIROC-ESMで将来シナリオ実験を実施した。排出シナリオ は低炭素社会の達成を実現するような経路にしつつ、SLCPや大気汚染物質の排出の相殺・相乗効果を考 慮し、排出経路に差異が現れるようなシナリオになっている。MIROC-ESMによるシミュレーションでは7 種類のシナリオを使用し、シミュレーション期間は2010年から2049年の40年間、各シナリオについて7 つのアンサンブルを実施した。図(6)-19に7シナリオの2040年~2049年平均のエアロゾル光学的厚さと比 較のためCMIP6-historical実験の2000年~2009年平均のエアロゾル光学的厚さを示す。各シナリオのア ンサンブル平均を示している。エアロゾルの分布は比較のためのCMIP6-historical実験(2000年~2009 年平均)、将来シナリオ実験の2040年~2049年平均ともに中国東部やインド北部で値が高い特徴をして おり、大気汚染物質の排出地域分布は40年間で大きく変化しないことが想定されていることがわかる。 しかし、エアロゾル量はシナリオによって異なり、2000年~2009年平均と比べるとなりゆきシナリオと 呼ばれるRefシナリオが最もエアロゾル量が増加していることが明らかで、2000年~2009年平均でもエア ロゾル量が多い中国東部では、エアロゾル光学的厚さがかなり厚くなっている。一方、除去対策の導入 強度を最大限にしたEoPmaxシナリオではこのようなエアロゾル光学的厚さの増加はみられない。また、 除去対策の導入強度がある程度(EoPmid)の場合でも低炭素対策と組み合わせた場合は、EoPmaxと同程 度のエアロゾル削減が見込まれる。



図(6)-19 シナリオごとの2040年~2049年平均エアロゾル光学的厚さ。Historicalは2000-2009年平均。

図(6)-19では2040年~2049年平均の各シナリオのエアロゾル光学的厚さを示したが、次にシナリオ間の比較を行った。図(6)-20は2040年~2049年平均エアロゾル光学的厚さの各シナリオとRefシナリオからの差を示しており、現状の対策を継続した場合に比べ、追加の対策はどの程度効果をもたらすか推察することができる。どのシナリオにおいてもRefシナリオよりはエアロゾル光学的厚さが薄くなっており、特に2D-EoPmax-CCSBLDシナリオでエアロゾルの減少が顕著である。エアロゾル種類別にみると、硫酸塩エアロゾルや硝酸塩エアロゾルは除去対策の効果が大きいため、除去対策のみのシナリオでも減少がみられる。ただ、低炭素対策を組みあわせると、ある程度の除去対策導入(EoPmid)でも導入強度を最大限にしたシナリオ(EoPmax)と同程度の減少がみられた。BCやOCは除去対策のみではあまり削減されず、民生業務部門での電化対策による削減の効果が大きい。



図(6)-20 シナリオごとの2040年~2049年平均エアロゾル光学的厚さのRefシナリオとの差。

Refシナリオと比較した、各シナリオの2040年~2049年平均の気温分布図を図(6)-21に示す。除去対策 強度を最大限にしたシナリオ (EoPmax) では東アジア全域的にRefシナリオよりも気温が上昇する。除去 対策がある程度の場合のシナリオ(EoPmid)ではEoPmaxシナリオほどの気温上昇はみられないが、Refシナ リオと同程度か地域によってはRefシナリオ以上の気温上昇がみられる。除去対策を最大限導入し、CCS 付き石炭火力発電を優先的に導入し、民生・業務部門のオール電化を進めたシナリオ(2D-EoPmax-CCSBLD) ではRefシナリオに比べ、気温が低い地域が目立つ。しかし、中国東部やインド亜大陸北部などではRef シナリオよりも気温が上昇している地域が存在する。除去対策をある程度導入し、CCS付き石炭火力発電 を優先的に導入し、民生・業務部門のオール電化を進めたシナリオ(2D-EoPid-CCSBLD)では、 2D-EoPmax-CCSBLDシナリオよりも東アジアでは気温が低下している。インドでは2D-EoPmax-CCSBLDシナ リオと同程度か地域によっては2D-EoPmax-CCSBLDシナリオよりも気温が高くなっている場所もある。こ のことからも、対策による効果には地域差が存在することがわかる。除去対策をある程度導入し、再生 可能エネルギー大幅促進を優先的に導入し、運輸部門でEV車が大幅普及するシナリオ(2D-EoPid-RESTRT) では、高緯度では2D-EoPmax-CCSBLDや2D-EoPmid-CCSBLDシナリオによる気温低下よりも穏やかな気温低 下にとどまっているが、インド付近においてもわずかに気温低下がみられる。東アジアでは、Refシナリ オに比べると概ね気温低下傾向がみられるが、2D-EoPmax-CCSBLDシナリオと同様に中国東部では気温が わずかに上昇している地域がある。2D-EoPid-RESTRTにさらに民生・業務部門の電化率を高める対策を加 えた2D-EoPid-RESBLDTRTシナリオによる気温変化は2D-EoPid-RESTRTと同様の分布を示している。これら のシナリオ間比較から、除去対策のみでは温暖化を促進してしまうが、低炭素対策を組み合わせること で昇温が抑制できることがわかる。今回の将来シナリオ実験では低炭素対策によりエアロゾル量だけで はなく、温室効果気体濃度も変化しているため、2Dシナリオには温室効果気体濃度低下の影響も含まれ ている。しかし、東アジアはエアロゾル量が多く、もともとエアロゾル量が多いことで削減量も多くな る地域ではエアロゾルによる地表冷却効果が大幅に失われるため、低炭素対策による昇温抑制効果が弱 まる場合もあることが示唆された。



図(6)-21 シナリオごとの2040年~2049年平均気温のRefシナリオとの差。

図(6)-22に各シナリオとRefシナリオとの雲量差の2040年~2049年平均分布を示した。EoPmaxシナリオ では、南シナ海で雲量増加、中国南部で雲量減少、日本付近で雲量増加がみられる。EoPmidシナリオで は中国南部での雲量減少は目立たないが、南シナ海や日本付近では同様に雲量増加がみられる。 2D-EoPmax-CCSBLDシナリオでは東アジアで概ね雲量が増加しており、特に日本付近での雲量増加が顕著 である。2D-EoPmid-CCSBLDシナリオでも東アジアで雲量が増加しているが、南シナ海では雲量の減少傾 向がみられる。2D-EoPmid-RESTRTや2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオでも東アジアでの雲量増加がみられる が、2D-EoPmax-CCSBLDシナリオなどと比べると増加は大きくない。日本付近に注目すると、どのシナリ オにおいても2040年~2049年平均ではRefシナリオよりも雲量が増加することがわかる。高度別に比較す ると、シナリオによる雲量差は上層で顕著で、下層ほどシナリオ差が小さい。中・上層雲ではRefシナリ オの雲量が他のシナリオよりも少なく、全雲量でみた場合のRefシナリオとの差はこれらの影響を反映し ていると考えられる。気候再現実験では全ての強制力を考慮したシミュレーションと人為起源エアロゾ ルの排出量を固定したシミュレーションの雲量差は下層雲の変化を主に反映していたのと比べ、雲量の シナリオ間比較は上層雲変化の影響が強く反映された結果となった。エアロゾルの影響を受けやすい下 層雲はエアロゾル量が最も多いRefシナリオで他のシナリオよりも多くなる傾向がみられた。



図(6)-22 シナリオごとの2040年~2049年平均雲量のRefシナリオとの差。

降水量のRefシナリオとの差を図(6)-23に示す。気温、雲量と同様に2040年~2049年平均でシナリオご とのRefシナリオとの差の分布である。EoPmaxシナリオでは、南シナ海や日本付近で降水量の増加がみら れる。EoPmidシナリオでも南シナ海や日本付近で降水量の増加、中国南部で降水量の若干の減少がみら れる。2D-EoPmax-CCSBLDシナリオでも南シナ海や日本付近で降水量の増加がみられるが、 2D-EoPmid-CCSBLDシナリオでは南シナ海で降水量が減少、日本付近では降水量が増加している。 2D-EoPmid-RESTRTや2D-EoPmid-RESBLDTRTシナリオでも南シナ海や日本付近で降水量の増加傾向がみら れる。図(6)-22の雲量変化分布図と図(6)-23の降水量変化分布図はよく対応しており、特に南シナ海で の雲量、降水量変化は同様の傾向を示している。



図(6)-23 シナリオごとの2040年~2049年平均降水量のRefシナリオとの差。

排出経路による経年の違いを調べるために、シナリオごとのエアロゾル光学的厚さとPM2.5濃度の年変 化を図(6)-24に示した。黒点線がRef、ピンク点線がEoPmax、赤点線がEoPmid、ピンク線が 2D-EoPmax-CCSBLD、赤線が2D-EoPmid-CCSBLD、青線が2D-EoPmid-RESTRT、緑線が2D-EoPmid-RESBLDTRT を示す。全てのシナリオにおいて2010年では同じ排出量のため、シミュレーション開始後のしばらくは シナリオによる差異は少ないが、徐々に差がみられてくる。現状の政策・対策の傾向を継続するような Refシナリオの場合、東アジアではエアロゾル量は2030年ごろまで増加し、その後、緩やかに減少するが、 2040年代もエアロゾル量は現状程度または微増となる。除去装置対策を導入すると、ある程度の導入 (EoPmid)でもエアロゾル削減の効果はみられ、2030年ごろからRefシナリオと比較してかなりエアロゾル 量が減っていくことがわかる。EoPmax、2D-EoPmid-CCSBLD、2D-EoPmid-RESTRT、2D-EoPmid-RESBLDTRT の排出経路が類似していることから、除去対策を最大限導入した効果と、再生可能エネルギー導入など の低炭素対策と除去対策をある程度導入する対策を組み合わせた効果がエアロゾル削減には同程度の効 果をもたらすことがわかる。さらに、除去対策の最大限導入と低炭素対策を組み合わせる (2D-EoPmax-CCSBLD)だと大幅にエアロゾルが削減できる。図(6)-24(b)にはPM2.5濃度の年変化を示して いるが、これは地上付近の硫酸塩エアロゾル濃度、硝酸塩エアロゾル濃度、黒色炭素エアロゾル濃度、

有機炭素エアロゾル濃度の合計値なので、いわゆる人為起源エアロゾルの地上付近濃度とみなせる。PM_{2.5} 濃度の経年変化は図(6)-24(a)のエアロゾル光学的厚さの経年変化と同様の傾向を示しているが、 2D-EoPmid-RESBLDTRTが2049年には2D-EoPmax-CCSBLDと同程度まで濃度を減らしている。このことは、地 上付近の人為起源エアロゾル濃度削減には民生業務部門のオール電化対策が有効であることを示唆して いる。



図(6)-24 東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)(a)エアロゾル光学的厚さ、(b)PM_{2.5}濃度の年変化 (2010年~2049年)黒点線がRef、ピンク点線がEoPmax、赤点線がEoPmid、ピンク線が2D-EoPmax-CCSBLD、 赤線が2D-EoPmid-CCSBLD、青線が2D-EoPmid-RESTRT、緑線が2D-EoPmid-RESBLDTRTを示す。

次に、東アジアの気温、雲量、降水量の変化を図(6)-25に示す。気温は全てのシナリオにおいて上昇 している(図(6)-25(a))。低炭素対策を行っていないRef、EoPmax、EoPmidではより気温が高くなる傾 向がみられる。図(6)-25(b)は雲量の年変化で、2020年頃までは全てのシナリオで減少しており、それ 以降も低炭素対策を行っていないRef、EoPmax、EoPmidでは減少傾向がみられるが、他のシナリオでは明 確な年変化の傾向はみられない。高度別に雲量年変化を調べると、上層雲量ではRefシナリオで顕著な減 少がみられるが、他のシナリオでは明確な傾向は小さく、わずかに増加傾向がみられるシナリオもある。 中層雲の雲量は上層雲よりも変化量が小さいながら、概ね上層雲と同様の年変化傾向を示すが、EoPmax やEoPmidなど除去対策のみシナリオもRefのように減少傾向を示している点が異なる。下層雲の雲量はど のシナリオでもわずかに減少している。上層雲、中層雲と異なり、Refシナリオの雲量が下層雲では最も 多くなっている。このことは、エアロゾル量が多いほど下層雲量が多くなることを示唆している。一方、 降水量の年変化は図(6)-25(c)に示されるように、Refシナリオ以外のシナリオでは増加傾向がみられる。 対流性雲からの降水量と層状性雲からの降水量の経年変化を比較すると層状性雲からの降水量はRefシ ナリオを含め増加しているが、対流性雲からの降水量はRefシナリオで減少傾向がみられ、この影響が降 水量に表れていたと考えられる。



図(6)-25 東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)(a)気温、(b)雲量、(c)降水量の年変化(2010年~2049 年) 黒点線がRef、ピンク点線がEoPmax、赤点線がEoPmid、ピンク線が2D-EoPmax-CCSBLD、赤線が 2D-EoPmid-CCSBLD、青線が2D-EoPmid-RESTRT、緑線が2D-EoPmid-RESBLDTRTを示す。

図(6)-26にシミュレーション期間の前半(2015年~2024年平均)と後半(2040年~2049年平均)の差 を示す。2040-2049年平均の値から2015-2024年平均の値を引いているので、増加している場合は正の値、 減少している場合は負の値となる。東アジア平均のシナリオごとの値となっており、図(6)-24、25に色 が対応するように、黒枠白抜きがRef、ピンク枠白抜きがEoPmax、赤枠白抜きがEoPmid、ピンク塗りつぶ しが2D-EoPmax-CCSBLD、赤塗りつぶしが2D-EoPmid-CCSBLD、青塗りつぶしが2D-EoPmid-RESTRT、緑塗り つぶしが2D-EoPmid-RESBLDTRTで示している。エアロゾル光学的厚さ(AOT)はRefではほとんど変化がな いが、その他のシナリオでは減少しており、2D-EoPmax-CCSBLDで最も減少が多いことがわかる。また、 ある程度の除去対策と低炭素対策を組み合わせることで、除去対策を最大限導入するのと同程度の削減 効果が見込まれることが示されている。エアロゾル種類別の地上付近の濃度を調べると、硫酸塩エアロ ゾル削減には除去対策導入による効果が大きいことと、エアロゾル光学的厚さでみられた傾向と同様、 低炭素対策を組み合わせると最大限の除去対策導入と同程度の削減ができることがわかる。硝酸塩エア ロゾル濃度はRefでは増加しているが、その他のシナリオでは減少している。しかし、除去対策をある程 度導入しただけでは、削減効果が小さく、最大限に導入するか、除去対策のある程度の導入と低炭素対 策と組み合わせることで削減が期待できる結果となった。黒色炭素 (BC) もRefでは増加しており、また、 除去対策のみではあまり削減されず、民生業務部門でオール電化に近づけることが、黒色炭素を削減す る有効な対策であることがわかる。図には示していないが、有機炭素も黒色炭素と同様の傾向となった。 将来シナリオ実験ではエアロゾル量だけではなく、温室効果気体の濃度もシナリオによって異なる。Ref、 EoPmax、EoPmidは概ねRCP6.0に相当する温室効果気体の排出経路、2DシナリオはRCP2.6に類似した温室 効果気体の排出経路をとる。このため、二酸化炭素濃度は全てのシナリオで増加しているが、Ref、EoPmax、 EoPmidで同程度の増加、2Dシナリオはこれより少ない増加となっている。メタン濃度はRef、EoPmax、 EoPmidで増加、2Dシナリオで減少している。ただし、除去対策のみのシナリオではNO_xが減少することで メタンの寿命が延び、メタン濃度が増加している。このため、Refと比較してEoPmax、EoPmidではメタン がより増加している。気温は全てのシナリオで増加しているが、Refや除去対策のみのEoPmax、EoPmid のほうが2Dシナリオよりも上昇が大きい。また、除去対策を最大限にしたEoPmaxではRefよりも気温が高 くなっており、エアロゾル削減による地表冷却効果の低減やメタン濃度の増加などが寄与していると考 えられる。降水量はRefでは変化がみられないが、他のシナリオでは増加している。雲量はRefやEoPmax、 2D-EoPmid-RESTRTで明らかな減少がみられるが、他のシナリオでは変化が小さい。全てのシナリオの平 均をみると、東アジアではエアロゾルが減少、温室効果気体が増加、気温が上昇、降水量が増加、雲量 が減少するという結果となった。



図(6)-26 東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)のエアロゾル光学的厚さ、CO₂濃度、CH₄濃度、地上付 近硫酸塩エアロゾル濃度、硝酸塩エアロゾル濃度、BC濃度、気温、降水量、雲量の2040年~2049年平均 と2015年~2024年平均の差。黒枠白抜きがRef、ピンク枠白抜きがEoPmax、赤枠白抜きがEoPmid、ピンク 塗りつぶしが2D-EoPmax-CCSBLD、赤塗りつぶしが2D-EoPmid-CCSBLD、青塗りつぶしが2D-EoPmid-RESTRT、 緑塗りつぶしが2D-EoPmid-RESBLDTRTを示す。

図(6)-27に東アジア平均のエアロゾル光学的厚さ、CO2濃度、CH4濃度、地上付近硫酸塩エアロゾル濃 度、硝酸塩エアロゾル濃度、BC濃度、気温、降水量、雲量のRefシナリオとの差の2040年~2049年平均を 示す。この結果は現状の対策を続ける場合と比べ、対策の効果はどの程度、将来の物質量や気象要素に 影響を及ぼすかを評価するものである。 色は図(6)-26に対応している。 Refシナリオと比べて、 エアロゾ ル光学的厚さが最も減少しているのは2D-EoPmax-CCSBLDで、これには東アジアで割合の多い硫酸塩エア ロゾルや硝酸塩エアロゾルが除去対策でよく削減されるのに加え、オール電化の普及により炭素性エア ロゾルも削減される効果が表れている。これは地上付近のエアロゾル濃度の変化傾向にもみられ、硫酸 塩エアロゾル濃度はEoPmaxで最も削減され、硝酸塩エアロゾル濃度や黒色炭素濃度は2D-EoPmax-CCSBLD で最も削減されている。二酸化炭素濃度はEoPmax、EoPmidではRefとほぼ同じ濃度のため差がないが、そ の他のシナリオではRefに比べ濃度が低いことがわかる。メタン濃度も同様に2DシナリオではRefよりも 濃度が低くなっているが、EoPmax、EoPmidなどの除去対策のみのシナリオではわずかに濃度が高い結果 となっている。 気温変化は二酸化炭素やメタン濃度のシナリオ間比較の傾向に対応するように、Refより も二酸化炭素やメタン濃度の高いEoPmax、EoPmidで昇温が大きいことがわかる。エアロゾル光学的厚さ 減少が最も大きい2D-EoPmax-CCSBLDよりもEoPmaxやEoPmidでより気温が上昇しているのは、エアロゾル 量減少による冷却効果低減だけではなく、温室効果気体濃度増加による温暖化の効果も気温変化に含ま れているためである。二酸化炭素濃度がほぼ同じ、Ref、EoPmax、EoPmidを比較すると気温はEoPmax、EoPmid、 Refの順に高くなる。これは、エアロゾル光学的厚さの減少量の多い順、EoPmax、EoPmid、Refと同じで、 エアロゾル削減による地表冷却効果の低減を表している。しかし、このシミュレーションでは除去対策 によってエアロゾル削減と同時にメタン消滅反応の抑制によるメタン濃度増加がみられるため、気温変 化にもエアロゾル濃度変化だけではなくメタン濃度の変化も含まれていると考えられる。低炭素対策も 組み合わせている2Dシナリオでは気温はRefに比べ減少していることから、これらの対策の組み合わせに よってエアロゾル量減少による大気汚染改善と温暖化抑制が実現できることがわかる。最も気温低下が 大きいのは2D-EoPmid-CCSBLDシナリオで、温室効果気体濃度の減少やエアロゾル削減量が大きくないこ となどを反映していると考えられる。降水量や雲量はRefシナリオで減少傾向が顕著なことから、他のシ ナリオではRefシナリオの結果と比べると増加傾向がみられる。

東アジアでの将来シナリオごとの特徴をまとめる。現状の政策・対策の傾向が継続するような、基準 シナリオ(Ref)では、2040年代(2040年~2049年平均)には2015年~2026年平均と比べてエアロゾル量 は同程度であるが、二酸化炭素やメタンなどの温室効果気体が増加するため気温は東アジア平均で約0.7 度上昇する。また、降水量はほとんど変化しないが、雲量は上層雲を中心に減少傾向がみられた。この シナリオを基準として他のシナリオでの対策の効果を評価する。

二酸化炭素の排出経路はRefと同じで、脱硫装置や脱硝装置のなど除去装置対策を最大限に強化し、発 電プラント・産業プラントおよび運輸に対して、2050年までに全世界で100%導入を想定したシナリオ

(EoPmax)では、エアロゾル量はエアロゾル光学的厚さで2015年~2026年平均と比べ2040年~2049年平 均で3割強減少する。この減少には除去装置対策による硫酸塩エアロゾルや硝酸塩エアロゾルの削減が効 いている。しかしながら、気温はRefシナリオよりも上昇してしまい、東アジア平均で2015-2026年平均 から約0.9度高くなる。気温上昇の要因としては、エアロゾル減少によりエアロゾルによる地上付近の冷 却効果低減、No_x減少によるメタン濃度の増加が挙げられる。また、エアロゾル減少に対応するように下 層雲に減少傾向がみられた。降水量の経年変化は増加傾向を示していた。EoPmaxとRefの比較は、気候再 現実験などで行った、人為起源エアロゾルがある場合とない場合の比較に近い解析が行える。気候再現 実験のhistorical、piAeroをそれぞれ将来シナリオ実験のRefとEoPmaxとして比較解析を行うと、エアロ ゾルが増加すると気温が減少し、降水量も減少、低層雲が増加するという同様の特徴が得られる。将来 シナリオ実験では、気候再現実験とは異なり、温室効果気体濃度もシナリオにより異なるため、得られ た傾向は必ずしも人為起源エアロゾルによる影響のみとは言えないが、東アジアでは大気汚染対策によ るエアロゾル削減の影響が少なからず気候要素に及ぶことが示唆される結果となった。



図(6)-27 東アジア平均(20°-50°N, 100°E-150°E)のエアロゾル光学的厚さ、CO₂濃度、CH₄濃度、地上付 近硫酸塩エアロゾル濃度、硝酸塩エアロゾル濃度、BC濃度、気温、降水量、雲量のRefシナリオとの差の 2040年~2049年平均。ピンク枠白抜きがEoPmax、赤枠白抜きがEoPmid、ピンク塗りつぶしが 2D-EoPmax-CCSBLD、赤塗りつぶしが2D-EoPmid-CCSBLD、青塗りつぶしが2D-EoPmid-RESTRT、緑塗りつぶ しが2D-EoPmid-RESBLDTRTを示す。

二酸化炭素の排出経路はRefやEoPmaxと同じで、除去装置対策を2050年までに先進国で100%、途上国 で50%程度の導入を想定したシナリオ(EoPmid)では、エアロゾル量は東アジア平均のエアロゾル光学的 厚さで2015-2026年平均と比べ2040年~2049年平均で約2割減少する。EoPmidは除去対策の導入率が EoPmaxよりも低いため、エアロゾルの減少量も小さくなっている。Refシナリオと比べるとわずかである が、気温の上昇も大きくなる。雲量や降水量の増減の方向はEoPmaxと同様となる。除去対策によりメタ ン濃度も変化しているため、EoPmaxとEoPmidを比べるとEoPmaxのメタン濃度が高くなる。低炭素対策を 含んでいないことから、温室効果気体濃度差は2Dシナリオ群と比べ小さいので、EoPmaxやEoPmidとRef の差からエアロゾル変化による影響を見積もると、エアロゾルの変化量に概ね対応するように下層雲の 雲量や気温が変化していた。

2D-EoPmax-CCSBLDは、除去対策を最大限に導入した上に、発電部門で再生可能エネルギーよりもCCS

付き石炭火力発電を優先的に導入、民生・業務部門で2050年までに先進国だけでなく途上国もオール電 化に近づき、電化できない部分は石炭・灯油・バイオマスではなくガスへシフトするようなシナリオで ある。東アジア平均のエアロゾル光学的厚さは2015年~2026年平均と比べ2040年~2049年平均でおおよ そ半減する。エアロゾル削減量でみると、7つのシナリオの中でも最もエアロゾル削減効果がある。低炭 素対策も組み合わせているため、Refと比較して二酸化炭素濃度、メタン濃度も大幅に低下する。気温は 2015年~2026年平均と比べ0.48度の上昇だが、Refと比べると温暖化が抑制されていることがわかる。 2015年~2026年平均と2040年~2049年平均を比べると降水量は増加、雲量は微増している。Refと比較す ると降水量、雲量ともに増加している。

除去対策をある程度導入した上に、2D-EoPmax-CCSBLDと同様に石炭火力発電の導入やオール電化対策 を取り入れた2D-EoPmid-CCSBLDでは、東アジア平均のエアロゾル光学的厚さは2015年~2026年平均と比 べ2040年~2049年平均で約4割削減される。2D-EoPmax-CCSBLDと比べると除去対策の導入率が低いため、 エアロゾルの削減量は少なくなっている。このシナリオでもRefと比較すると二酸化炭素濃度、メタン濃 度も大幅に低下し、気温は2015年~2026年平均と比べ0.45度の上昇にとどまっている。降水量や雲量の 変化は2D-EoPmax-CCSBLDと同程度で変化傾向が類似している。

除去対策をある程度導入、発電部門でCCS付き石炭火力発電よりも再生可能エネルギーの大幅促進を優 先的に導入、運輸部門で、2040年以降はEV車が大幅に普及するようなシナリオを想定した 2D-EoPmid-RESTRTでは、東アジア平均のエアロゾル光学的厚さは2015年~2026年平均と比べ2040年~ 2049年平均で3割強削減されるが、他の2Dシナリオと比較すると、この対策による黒色炭素や有機炭素の 削減量が少ない。気温は2015年~2026年平均と比べ0.51度上昇する。このシナリオにおいても低炭素対 策で二酸化炭素濃度はRefに比べ減少しており、メタン濃度もRefよりも低い。降水量は2015年~2026年 平均と比べ2040年~2049年平均と比較すると増加しているが、他のシナリオと比べるとRefに次いで変化 量が小さい。雲量は2015年~2026年平均と比べ2040年~2049年平均の雲量が減少している。

2D-EoPmid-RESBLDTRTは2D-EoPmid-RESTRTに民生・業務部門でのオール電化対策を組み合わせたシナリ オである。東アジア平均のエアロゾル光学的厚さは約4割減、2015年~2026年平均と2040年~2049年平均 から求めた気温上昇は0.41度となっている。社会経済的な側面や排出経路の特徴などからこのシナリオ がおすすめシナリオとされている。降水量、雲量はRefシナリオと比べると増加しているが、経年変化で は雲量の変化は小さい。

複数の将来シナリオを用いたシミュレーションより、除去対策のみではなく2℃目標に向けた低炭素対 策を組みわせることで、除去対策の導入強度を最大限にするのと同程度のエアロゾル削減が可能である ことが示せた。また、除去対策のみを導入すると、エアロゾル削減により日射を遮る効果が弱まり、温 暖化を促進してしまうことが示唆された。さらに、本シミュレーションでは、除去対策によりメタンの 消滅に関わるNO_x削減効果によりメタン濃度が増加し、さらに温暖化を進める傾向がみられた。低炭素対 策を組み合わせた2Dシナリオでは、現状の対策を継続する場合と比べ、東アジアにおいてエアロゾル削 減と温暖化の抑制が実現できていた。しかし、大気汚染物質がもともと多い地域では、削減量が多いた め、エアロゾル減少による地表冷却効果の低減などで、温暖化抑制が弱まる傾向がみられた。また、現 状の対策を継続する場合と比べ、東アジアでは降水量は増加していた。特に日本付近で降水変化が顕著 なことから、気象災害等の観点からも注視する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

これまでSLCPによる領域気候変動に関する知見が少なかったが、MIROC-ESMによる複数のシミュレーションを実施したことで、SLCPが東アジアの気候に与える影響に関する知見が得られた。

(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>

東アジアでは人為起源エアロゾルが20世紀の温暖化を抑制していたが、大気汚染対策による人為起源 エアロゾルの減少は温暖化を促進してしまう。本研究成果から適切な対策の組み合わせにより、大気質 を改善しながら温暖化の促進を抑える可能性を示せた。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名: Aerosols from multi-perspective aspects

協力案件名: (1) APOLO

(2) NASA/AERONET DRAGON J-ALPS

カウンターパート氏名・所属・国名: (1) Dr. Oleg Dubovik (Lille U., France)

(2) Dr. Brent Holben (NASA/GSFC, USA)

参加・連携状況: (1) エアロゾル、雲の偏光解析を主目的とするAPOLOプロジェクトの基盤システ ムである"GRASP"の近畿大学への導入、試行稼働実施

(2) 2020年春季に長野県で実施予定のエアロゾル集中観測の基盤整備実施

国際的な位置付け:雲との相互作用を含む大気エアロゾル解析は新たな進展が求められており、数値 モデルシミュレーション、地球観測衛星、地上観測、室内実験等、多様な側面からの複合的な解析が 必須である。こういう世界共通認識の下に、日本でもCGOM-C(2017年12月打上)、GOSAT-2(2018 年10月打上)と新たな地球観測衛星が打ち上げられている。新時代に対応すべき地上観測、数値モデ ル、解析アルゴリズムの更新開発を目指す。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- M. NAKATA: Proc. of IEEE/IGARSS, 978-1-4799-5775-0/14, 4135-4138 (2014) Air quality monitoring in mega city.
- 2) M. NAKATA: Proc. of SPIE 9242, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX; and Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVII, 924212, doi:10.1117/12.2066109 (2014) Natural and anthropogenic particles over East Asia.
- 3) M. NAKATA, I. SANO and S. MUKAI: Proc. of IEEE/IGARSS, 978-1-4799-7929-5/15, 2342-2345 (2015) Relationship between aerosol characteristics and impact factor on climate and environment.
- 4) M. NAKATA, I. SANO and S. MUKAI: Proc. of SPIE 10008, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments, 100080Z, doi:10.1117/12.2240153 (2016) Investigation of air pollution and regional climate change due to anthropogenic aerosols.
- 5) M. NAKATA: Proc. of IEEE/IGARSS, 978-1-5090-4951-6/17, 5946-5949 (2017) Response of the climate system to anthropogenic aerosols.
- 6) M. NAKATA, A. YOSHIDA, I. SANO and S. MUKAI: Proc. of SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 104240W, doi:10.1117/12.2277825 (2017) Evaluation of ground-based particulate matter in association with measurements from space.
- 7) M. NAKATA: Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII, 1078614, doi:10.1117/12.2325265 (2018) Analysis of climate change caused by aerosol-cloud-radiation

S-12-3

interaction.

 M. NAKATA: Proc. SPIE 10782, Remote Sensing and Modeling of the Atmosphere, Oceans, and Interactions VII, 107820M, doi:10.1117/12.2324284 (2018) Aerosol impacts on the atmospheric circulation field over Asia.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) M. NAKATA: ABC-SLCP Symposium, Tokyo, Japan (2014) Impacts of interaction among SLCP, cloud and precipitation on regional climate change.
- 2) M. NAKATA: AGU Fall meeting 2014, San Francisco, USA (2014) Aerosol impacts on climate and environment over East Asia.
- 3) M. NAKATA: Asian Aerosol Conference, Kanazawa, Japan (2015) Seasonal characteristics of particulate matter over East Asia.
- 4) M. NAKATA: Asian Conference on Meteorology, Kyoto, Japan (2015) Impact of aerosols on climate change in East Asia.
- 5) M. NAKATA: International Radiation Symposium, Auckland, New Zealand (2016) Climate response to the effects of anthropogenic aerosols.
- 6) 中田真木子:日本リモートセンシング学会 平成29年度秋季学術講演会、江別(2017) アジアにおける大気エアロゾルの季節変化特性
- 7) 中田真木子:第35回エアロゾル科学・技術研究討論会、名古屋(2018)大気エアロゾルの長期変化 とその気候影響
- 8) 中田真木子:日本気象学会2018年度秋季大会、仙台(2018)東アジア域における短寿命大気汚染物 質の気候への影響
 - (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

 環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト第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―短寿命気候汚染物質(SLCP)の影響評価とその削減対策―(主 催:環境省環境研究総合推進費S-12プロジェクト、共催:京都大学、宇宙航空研究開発機構、平成 30年1月23日、京都大学百周年時計台記念館、観客約100名)にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- S. Watanabe, T. Haijima, K. Sudo, T. Nagashima, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori and M. Kawamiya: Geosci. Model Dev., 4, 845-872 (2011) MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments.
- T. Takemura, H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima: J. Geophys. Res., 105, 17853-17873 (2000) Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins.
- 3) T. Takemura, T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben and S. Kinne: J. Climate, 15, 333-352.

(2002) Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model.

- 4) T. Takemura, T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima: J. Geophys. Res., 110, D02202, doi:10.1029/2004JD005029 (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model.
- 5) A. van Donkelaar, R. V. Martin, M. Brauser, N. C. Hsu, R. A. Kahn, R. C. Levy, A. Lyapustin, A. M. Sayer and D. M. Winker: Environ. Sci. Technol., 50, 3762-3772, doi:10.1021/acs.est.5b05833 (2016) Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors.

Ⅲ. 英文Abstract

Impact assessment of climate and environmental effects using numerical models

Principal Investigator: Toshihiko TAKEMURA Institution: Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University E-mail: toshi@riam.kyushu-u.ac.jp Cooperated by: Nagoya University, Kyoto University, Ibaraki University, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Kindai University

[Abstract]

Key Words: Short-lived climate pollutants (SLCPs), aerosols, ozone, climate change, health impact, agricultural impact

Theme 3 of the S-12 project evaluated the impacts of short-lived climate pollutants (SLCPs) and short-lived climate forcers (SLCFs) using numerical models. The global climate change resulting from fluctuations in emissions of SLCPs/SLCFs were calculated using a global aerosol climate model, SPRINTARS, and a chemical climate model, CHASER, which are coupled to a general circulation model, MIROC, and have been developed by the researchers of this theme. One of the primary scientific results is that the decline in surface air temperatures with reduced black carbon (BC) emissions is weaker than expected. The sensitivity of surface air temperature to instantaneous radiative forcing (the energy budget perturbation) at the top of the atmosphere due to scattering and absorption of solar radiation is weaker for BC than for sulfate aerosols. This is because a "rapid adjustment" due to changes in clouds and precipitation offsets instabilities due to weaker absorption of solar radiation with reduced BC emissions. This study also suggests that reducing emissions of nitrogen dioxides (NOx) might cause further warming. NOx emission reduction may lead to lower concentrations of ozone (O₃) in the troposphere, but could also result in an increase in methane (CH₄), which is an important greenhouse gas because of its long atmospheric lifetime. In addition, reduced NOx levels result in decreased concentrations of nitrate aerosols, which cool the atmosphere by scattering sunlight.

This study indicates that the concentration of SLCPs/SLCFs is higher in Asia than in other regions of the world and thus the number of deaths from respiratory and cardiovascular diseases and an overall shortening of life span are estimated to be significant in Asia, based on simulated results from MIROC–SPRINTARS/CHASER. This study also indicates that although rice yields significantly decrease with increasing ozone concentrations, changes in aerosol concentrations have varying effects on rice yields that depend on the region and are due to scattered sunlight that benefits plant growth as well as to direct sunlight.

Research results described above provide basic scientific data that will benefit the search for an optimal SLCP/SLCF reduction pathway as part of the S-12 project. This study also projects SLCPs/SLCFs impacts on climate, health, and agriculture according to emission scenarios developed in Theme 2 of the S-12 project. Simulation results indicate that the optimal scenario should include measures for both end-of-pipe and 2°C global warming targets. Adapting only according to end-of-pipe measures reduces the emission of air pollutants but can accelerate global warming, leading to additional health and agricultural impacts.

Therefore, the ideal emission-reduction strategy for the simultaneous mitigation of global warming and human health issues requires a scenario design that considers the detailed interactions of SLCPs and SLCFs. The S-12 project proposes strategies for SLCP/SLCF reduction based on combined reductions of aerosols, CH₄, and O₃ precursors (NOx, CO, VOCs), considering their mutual interactions. However, detailed analyses will be needed in future studies to investigate the effects of SLCPs/SLCFs on regional climate change, taking account of their heterogeneous spatial distributions that result from their short atmospheric lifetimes.