

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5-2001 気候変動に伴う黄砂の発生・輸送に関する変動予測と
その検出手法に関する研究
(JPMEERF20205001)

令和2年度～令和4年度

Prediction and Detection of Variability in Asian Dust
Emission and Transport Affected by Climate Change

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

気象庁気象研究所
東京大学
鳥取大学

〈研究協力機関〉

○図表番号の付番方法について

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

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

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	15
II-1 黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出 （国立研究開発法人国立環境研究所）	15
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測 （気象庁気象研究所）	26
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明	37

(東京大学・鳥取大学)

要旨

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

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細	・・・・・・・・・・	52
Ⅳ. 英文Abstract	・・・・・・・・・・	61

I. 成果の概要

課題名 5-2001 気候変動に伴う黄砂の発生・輸送に関する変動予測とその検出手法に関する研究

課題代表者名 清水 厚 (国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域
広域大気研究室主幹研究員)

重点課題 主：【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び
評価・解明に関する研究

副：【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (5-8) 将来の気候変動が黄砂に与える影響の評価に関する
研究

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

101,517千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和2年度：37,050千円、令和3年度：33,345千円、令和4年度：31,122千円)

研究体制

(サブテーマ1) 黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出 (国立研究開発法人国立環境研究所)

(サブテーマ2) 全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測 (気象庁気象研究所)

(サブテーマ3) 乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明 (東京大学・鳥取大学)

研究協力機関

研究協力機関はない

本研究のキーワード 黄砂、気候変動、地表面状態、地球システムモデル、ライダー観測、レキ被覆率、飛砂、灌木間距離

1. はじめに（研究背景等）

ユーラシア大陸内部の乾燥地における強風によって自由対流圏まで巻き上げられた土壌粒子は、偏西風により数千km風下域へ輸送され、黄砂現象として地域の気環境・生態系などに影響を与えている。発生源近傍（中国・モンゴル）では農牧業に被害をもたらす他、日本では微小粒子状物質（PM_{2.5}）環境基準非達成日のうち黄砂の影響によるものが過去5年度において2-10%と報告され（環境省大気汚染状況報告書）、小児喘息・早期胎盤剥離等と黄砂の関連も報告されている。気象庁による黄砂延べ観測日数は2000年頃に過去50年のピークを示し、発生源地表面の乾燥化といった気候変動の影響が推測されたものの、その後は減少傾向が見られ、巻き上げ後の水平輸送経路の変動など様々な要因によって国内黄砂は増減すると考えられる。また黄砂はそれ自身の放射特性や氷晶核としての役割を通じ温暖化に対して影響を与える。このような状況の下、日中韓環境大臣会合（TEMM）ではDust&SandStorm（DSS）の共同研究に関する2つのワーキンググループ（WG）を2007年に立ち上げ、大気中動態（WG1）と発生源状況（WG2）を対象に3か国による共同研究が続けられている。同WG1の次期中期計画（2020-2024）では、新たに黄砂の中長期変動に関する予測と監視が新たな研究項目として策定された。また黄砂の予測・警報のために世界気象機関（WMO）のSDS-WASがアジア域でも稼働しており、TEMM DSS同様に日本から予測手法の改善といった貢献が期待されている。さらに黄砂発生源であるモンゴル・日本間の環境政策対話では、黄砂の監視などを両国が共同して推進することが合意された。このような背景を踏まえ、本研究では気候変動に伴う黄砂の変動（発生・輸送）について地球システムモデルによる将来予測を含めた研究を行い、成果をTEMM DSS WGsやWMO/SDS-WASを通じて関係国間で共有する。

2. 研究開発目的

本研究では「黄砂の発生・輸送状況の監視」「黄砂の数値モデリング」「乾燥域地表面・植生の実態解明」の3テーマから今後数十年に渡る黄砂の変動に関する研究を実施する。まず監視においては、国立環境研究所（NIES）が東アジア域に展開するライダーネットワークによる発生源近傍から下流域に渡る定量的黄砂観測を継続した上で大気汚染常時監視データ等各国の大気環境モニタリング結果との対比を行い、縮小が進みつつある黄砂目視観測（気象現業）に代わって将来に渡り持続的に利用が可能となる客観的黄砂指標の導出・提案を行う。また過去データを利用して黄砂のこれまでの長期変動を検出する。黄砂の数値モデリングにおいては、気象庁で黄砂予報業務にも利用される全球モデルによる過去から将来に渡る長期計算から黄砂の発生量・輸送フラックスの年々変動などを算出し、実観測や他のモデルとの比較を通じて黄砂の長期変動を引き起こすメカニズムの解明を行うとともに、国内でのPM_{2.5}環境基準超過を引き起こす黄砂の頻度等を見積もる。また地表面サブテーマから得られる植生状況等の情報を取り入れるなどモデル改良を実施し、黄砂の中期予報の改善を行う。乾燥域地表面に関しては、気象条件や社会活動の変化による植生の変動を推定するために、モンゴルにおいて様々な条件下における植生実験を通じてその脆弱性を明らかにし、今後の変動予測に必要なパラメータを取得する。この結果は数値モデルにおいて活用される他、乾燥地における適切な環境管理の提案にも繋がる。これらによって得られる成果は、TEMM傘下の両DSSワーキンググループを通じて三カ国およびモンゴルで共有し、各国での環境行政（発源地の生態系管理を含む）にフィードバックする他、ライダーによる輸送状況の監視は環境省黄砂飛来情報ホームページに対する情報提供、数値モデルの改良は気象庁黄砂予報の直接の改善に繋がる。

3. 研究目標

全体目標	今後予想される気候変動に伴い、東アジア域の黄砂が長期的にどの様に変化するか、その要因や下流域大気環境に与える影響の推定・評価を行う。過去から将来に渡る黄砂の動態について全球数値モデルにより計算を行うが、そのために必要となる地表面変動に関する情報の収集やモデル検証に必要なライダー観
------	--

	測およびそれ以外の黄砂検出手法の検討も併せて行い、将来のPM2.5国内環境基準(短期)非達成に対する黄砂の寄与を推定する。これらの結果をTEMM DSS WGにおける次期中期計画に沿って参加国で共有する他、日蒙での環境政策対話において重要なテーマとされる黄砂分野について現地における研究協力態勢(カウンターパート：モンゴル気象環境監視局NAMEM)を強化する。
--	--

サブテーマ1	黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出
サブテーマリーダー/所属機関	清水厚/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	約20地点のライダーネットワークにより黄砂の3次元動態を継続的に観測し数値モデル検証用データを作成するとともに、SPM/PM2.5常時監視データから黄砂を検出する手法について考案し、判定可能率などの利用指標を示す。モンゴル国内で持続可能な簡易型黄砂検出ネットワークを3地点以上で形成するほか、飛砂と大気中ダスト濃度の関係についてサブテーマ3と共同で調査を行う。将来の大気環境におけるPM2.5環境基準非達成に対する黄砂の寄与率をサブテーマ2による将来予測結果をもとに推定する。

サブテーマ2	全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測
サブテーマリーダー/所属機関	眞木貴史/気象庁気象研究所
目標	全球エアロゾルモデルを用いた過去実験等によりモデルの特性を把握する。他のサブテーマと協力しつつ全球エアロゾルモデルの改良を進める。黄砂の季節内予測実験および複数シナリオによる将来予測実験を実施する。これらの結果より、黄砂の発生量、輸送経路、黄砂発生源における気象条件の変化を取り纏めると共に黄砂の季節予測の可能性を評価する。改良されたモデルを気象庁の黄砂予測業務に反映させる作業を進める。

サブテーマ3	乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明
サブテーマリーダー/所属機関	大黒俊哉/東京大学
目標	発生源域の地表面情報および飛砂発生の実態を野外観測・実験により解明し、地表面変動に関わるパラメータを6つ以上取得したうえで、数値モデルの精度向上に資する指標を3つ以上設定し、サブテーマ2に提供する。発生源の生態系保全に必要な植生・土地利用等の地表面条件を提案する。

4. 研究開発内容

本課題は、気候変動かにおける黄砂の長期的変動について様々な観測手法を通じてその監視を行うサブテーマ1、数値モデルを利用した将来予測やモデルの改良を行うサブテーマ2、変動要因の一つである地表面状況の解明を行いモデル改良に資するデータ提供を行うサブテーマ3から構成されている(図-0.1)。以下、この3つのサブテーマ間連携も含めて内容を記載する。

研究体制とサブテーマ間の連携、研究成果の活用方針

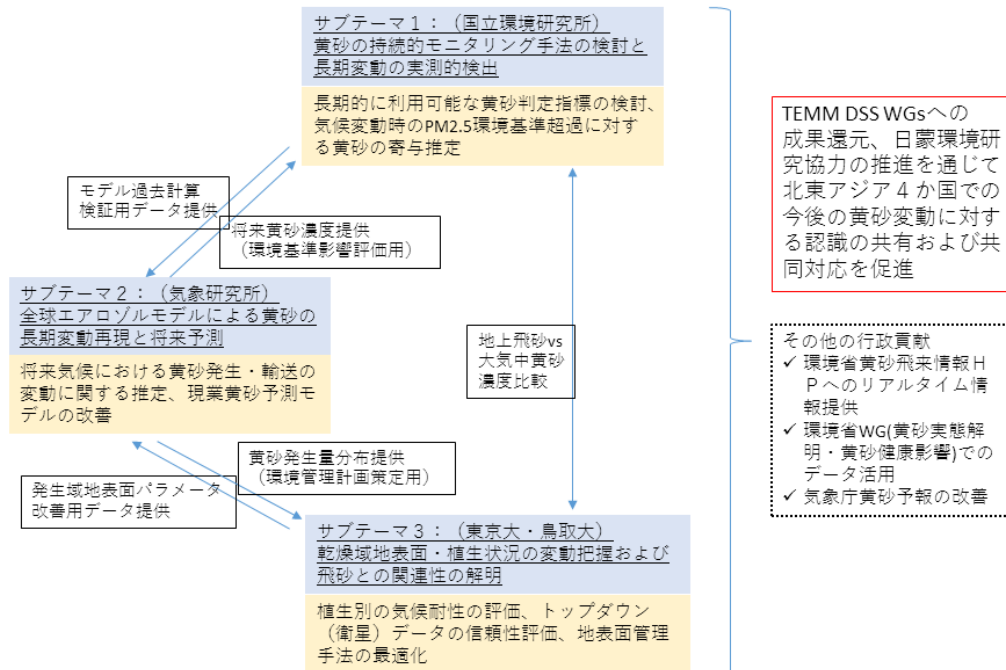


図-0.1 本課題を構成する3サブテーマとその連携、成果活用の方向性

4-1 黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出（サブテーマ1）

本サブテーマでは、黄砂の長期変動を実証的に検出するための手法の検討を行った。まず、これまで環境省や国立環境研究所が中心となって東アジア域で展開してきたライダー観測ネットワークAD-Netの維持作業を行った。また、AD-Net自体ほとんどが研究ベースで設置されており将来的に確実な運用が見込めるとは限らないので、大気環境常時測定監視局（常監局）において得られるPM2.5とSPMを組み合わせ黄砂を検出する手法を検討した。さらに、簡易な黄砂検出手法として偏光型視程計の導入を試み、日本国内のローカルダストによって検証を行った。研究計画では簡易黄砂検出ネットワークをモンゴル国内に展開する予定であったがCOVID-19による渡航制限の影響を受け実際の展開には至らなかった。またPM2.5環境基準非達成に対する黄砂の寄与度合について将来の変動を推定するため、サブテーマ2の全球エアロゾルモデルによる成分別PM2.5の過去・将来計算結果を入手し、通年での環境基準達成度合いおよび黄砂日を除いた場合の達成度合いを比較することで黄砂の寄与を推定するルーチンを開発し、21世紀初頭と21世紀末の状況を比較した。この他、モデル検証に有用な過去のライダー観測データをサブテーマ2に提供し、地表面飛砂と大気中黄砂濃度との関連を調査するためにサブテーマ3にゴビ砂漠域に設置されたライダーによる黄砂消散係数を提供した。

4-2 全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測（サブテーマ2）

気象研究所において長年開発が続けられてきた全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2を用いて、過去の再現実験およびIPCC AR6の5つのSSPシナリオに沿った将来計算を行った。特にゴビ砂漠に着目して黄砂の発生量やそれと関連が強いと考えられるパラメータ（土壌水分等）との相関について解析した。また発生源から日本域への輸送状況を質量輸送フラックスの観点から調査した。再現実験の黄砂発生量の検証においてサブテーマ1のライダーネットワークのうちモンゴル2地点における地上付近の黄砂消散係数とモデル内のエアロゾル消散係数の比較を行った。サブテーマ3からは発生源におけるレキ被覆率データの提供を受け、この情報を領域化学輸送モデルNHM-Chemに組み込むことでレキ被覆率や黄砂発

生サブモデルが黄砂発生量に与える影響や実際の黄砂イベントにおける再現性に関して調査した。

4-3 乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明（サブテーマ3）

ゴビ砂漠におけるダスト発生量と密接に関連する飛砂の発生量を正確に予測するため、土壌の受食性に影響を及ぼしているレキや植生（枯れ草）による粗度密度を決定するため現地調査結果を用いた定式化を行った。レキについては地表面写真からレキの大きさや高さを推定するため実際の計測値と比較した。枯れ草については普及している手法である枯れ草被覆面積割合を利用する。これらパラメータの面的広がりについては、レキについては土壌パラメータデータベースであるSoilGridsを利用、枯れ草についてはMODISによる指標STIを利用し、さらにこれら全ての効果を含む臨界摩擦速度推定のために合成開口レーダー(SAR)を用いる手法を検討した。このうちレキの広域分布については実際にサブテーマ2のモデルに組み込める形で提供した。また飛砂と大気中黄砂濃度の関連については、両者のパラメータが同一地点で取得されていないため、風速を用いた飛砂指数とサブテーマ1から提供されるライダーによる黄砂消散係数を利用した。

またダスト発生源における植生管理に資するパラメータとして植生の空間分布を表す指標を開発するため、ゴビ砂漠における飛砂と臨界摩擦速度との関係が灌木の空間分布にどういった影響を受けるかを調査した。さらに植生の空間分布に関連するパラメータについて飛砂との間で回帰分析を行い、植生指標の説明力について考察した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5-1-1 黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出（サブテーマ1）

ライダー観測ネットワーク(AD-Net)の維持については、COVID-19の影響により特に2020/2021年度には海外(韓国・モンゴル)地点で活動が滞ったものの、2022年度には全ての地点で定常メンテナンスを実施したほか、特にモンゴル3地点ではレーザーやPCを入れ替えるなど長期運用に繋がる作業を実施した。この結果、国立環境研究所において準リアルタイムで処理されたライダーデータは環境省黄砂飛来情報ホームページにも安定的に供給され国民向けにも黄砂の実態を明らかにすることができた。研究ベースのライダーに依存しない持続的な黄砂検出手法の一つとして常監局におけるSPMとPM_{2.5}の差分(SPM-PM_{2.5})についてライダーによる黄砂消散係数を黄砂の真値として検討した結果「SPM-PM_{2.5}>30 μg/m³、ただし7-9月を除き、PM_{2.5}/SPMが0.3以下の場合も除く」という閾値が得られた。さらに、都道府県単位に黄砂状態を決定するために「県内の常監局の40%が上述の基準を満たした場合に黄砂」とすることで、1時間単位で全都道府県について黄砂・非黄砂を決定することが可能となった。2021年3月末の顕著な黄砂事例にこの手法を適用すると、日本全体での黄砂の状況が明確に示され、また気象庁目視観測結果とも概ね良い対応が得られた。また、国内でPM_{2.5}観測が整備された2011年以降について本手法を適用して年々の黄砂日数・黄砂のべ日数を気象庁観測結果と比較すると(図-1.5)、2010年代の黄砂の減少傾向や2020年に黄砂が特異的に多かったことなど、共通の傾向が明らかになった。

モンゴル国内において、ライダーよりも設置や維持が簡易な装置で黄砂観測ネットワークの構築を目指した。COVID-19による渡航制限の影響を受け、現地側で設置候補地点の選定が行えず、いまだにネットワークそのものは形成されていないが、そのために検討された装置の日本国内ローカルダストによる検証が行われた。つくばの国立環境研究所において、偏光型視程計を用いた黄砂消散係数の連続観測結果と、ライダーによる黄砂消散係数(地上付近)の結果が比較され、関東平野冬季の日中に浮遊する土壌性ダストが検出された。ライダーとの相関は黄砂消散係数0.01/km以上で高まっており、国内に到達する一般的な黄砂を検出する能力は十分持ち合わせていることが確認された。

サブテーマ2の全球エアロゾルモデルで計算された過去・将来の成分別PM_{2.5}質量濃度を利用して、日

本周辺のグリッドにおける黄砂日を決定し、その上で通年データによるPM2.5環境基準(日平均PM2.5質量濃度の年平均が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下(長期基準)、同98パーセンタイル値が $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下(短期基準)を同時に満たすこと)の達成状況を調査した。更に黄砂日を除いて同様の調査を行うことで、PM2.5環境基準非達成に対して黄砂が与える影響を調べたところ、20世紀後半から21世紀初頭にかけて非達成の20%程度が黄砂によるものと推定されたのに対して21世紀末にはいずれの温暖化シナリオ(3種類のSSP)でも非達成の40%程度が黄砂によるものという結果が得られた。気候変動が進行した場合、黄砂による国内大気環境への影響は大きく、引き続き監視や国際協力に基づく対策が重要であることが示された。



図-1.5 2011-2022年の黄砂日数(左)および黄砂のべ日数(右)の変動。上段が本手法によるもの、中段が気象庁(11地点)によるもの。下段は気象庁が59地点で観測していた2019年までの結果。上段の黄砂日数では、1日あたり1地点のみ黄砂となった日を除外した結果(緑色)も示した。

5-1-2 全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測(サブテーマ2)

気象研究所の全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2を含む地球システムモデルMRI-ESM 2.0による過去再現実験では、黄砂消散係数についてサブテーマ1から提供されたライダーによる観測結果を用いた検証が行われ、絶対値自体は過大評価傾向ながら季節変化や2000年代の経年変動は再現されており、その経年変動の要因としては摩擦速度(地表付近の風速)の減少が見いだされた。このようにモデルの信頼度を確認した上で、地球温暖化シナリオ(SSP1-1.9/1-2.6/2-4.5/3-7.0/5-8.5)に基づく各5アンサンブルメンバーの数値実験を行い、21世紀末の黄砂発生量・輸送量の推定を行った。ゴビ砂漠周辺における黄砂の年間発生量についてはシナリオ間の差が少なく、増加傾向もはっきりしなかった。一方で、早春や晩秋には温暖化が進行するシナリオ(SSP3-7.0/5-8.5)において黄砂発生量の増大が見られ(図-2.7)、その要因として摩擦速度の増加や地面温度の上昇に伴う積雪量の減少が見いだされた。またその影響は下流域である日本周辺でもPM2.5濃度上昇として見られ、PM2.5環境基準達成には将来も黄砂の影響が無視できないことが示唆された。

モデル内部の地表面状態(小石=レキ・植生・クラスト等)を改良するためにサブテーマ3からレキ被覆率、植生分布等のデータ提供を受けるとともに、レキ被覆を考慮した黄砂発生モジュールについても提供を受けた。水平解像度の差からこれを全球モデルに組み込むのではなく、領域化学輸送モデルNHK-

Chemへ組み込んだうえで様々な解像度や被覆率有効性のもとで実験を行って実測値と比較した。なおこの実測値との比較の際、中国国内のPM10濃度については日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS)ワーキンググループI内のデータ共有として中国環境保護局から提供されたものを活用したほか、ひまわり8号による観測結果も活用した。観測結果を最もよく再現したのは空間解像度1kmかつレキ被覆率を考慮した場合で、レキ被覆率をモデルに組み込むことの有効性を世界で初めて示すことができた。また黄砂発生量はモデルの空間解像度に対する依存が強く、レキに関する過程を全球モデル(解像度数キロメートル以上)に組み込むために適切なパラメタリゼーションが必要となることも示唆された。今後の方向性としては、全球モデル(地球システムモデル)の空間解像度を上げていくとともに地表面過程の導入を行って実験しつつ、今回のように素過程を別のモデルで評価することや、黄砂が気候変動に与える影響(本課題で注目した気候変動による黄砂の変動とは逆方向)についても評価を行うことが重要である。

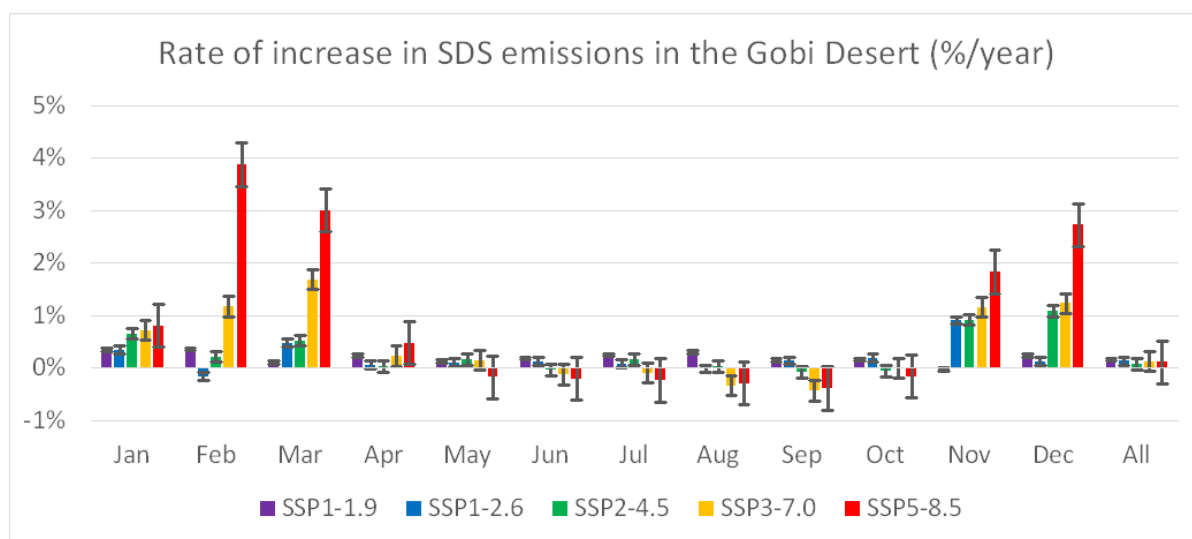


図-2.7：ゴビ砂漠の黄砂発生量増加率(2015～2100年)

5-1-3 乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明(サブテーマ3)

前述の全球エアロゾルモデルの精度向上のため、黄砂発生域の地表面に関する様々なパラメータが飛砂発生量へ与える影響を明らかにし、それらがどのように面的に分布しているのかを人工衛星データ等から推定する手法を開発した。飛砂発生を抑制する、地表面を覆う小石(レキ)の被覆率について現地観測結果と体積比率データベースSoilGridsとの対応を確認(図-3.5)した上で、SoilGridsから面的な被覆率へ換算する手法を開発した。この結果(図-3.6)はサブテーマ2へ提供され、モデルに組み込まれた場合の精度向上が実際に示された。これとは別に飛砂を抑制する枯れ草の効果については、MODISで取得される複数の指数の中からSTI(土壌耕起指数)が枯れ草推定に有効であることを示し、これを用いて広域の枯れ草被覆率を作成する方法を開発した。その結果自体はまだモデルに組み込まれていないが、気象台データを用いた解析では実際に枯れ草の効果モデルに組み込むことの有用性が示唆された。さらにこの両者の効果を含む臨界摩擦速度(飛砂が発生し始める地表面風速に関連)を推定するために合成開口レーダー(SAR)の後方散乱強度が有効であることを示した。またサブテーマ1と連携して地表面飛砂と大気中の黄砂量を対比させたところ、気象台黄砂時の黄砂量(黄砂消散係数)と飛砂指数との相関が見られ、枯れ草効果があることも確認された。

黄砂発生域の土地管理に有用な植生に関する指標を開発するため、灌木の空間分布を調査して飛砂との関係を調べた。灌木の空間分布は植被率-飛砂量の関係に影響を与えることが明らかになり(図-3.18)、飛砂を抑制するために必要な植被率の閾値が灌木間距離が大きく不均一な場合には高まることが分かった。また既存の植生指標と飛砂との関係は観測スケール等の影響を受けてロバストではないことが示さ

れ、これに対して植被率・高さ・空間分布の3要素をすべて含む新規指標Height Area Effort (HAE)が飛砂を総合的に示し、飛砂発生閾値推定に有効であることを示した。これとは別に、測定が容易な新規指標Total Height (TH)も開発し、簡便なものでありながら飛砂イベントをバランスよく再現することから放牧地の管理や植生管理の目標策定に有用な指標であることが示された。

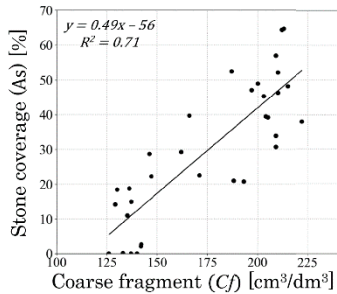


図-3.5 SoilGrids 2.0のレキ体積比率（横軸）と現地観測のレキ被覆率（縦軸）。

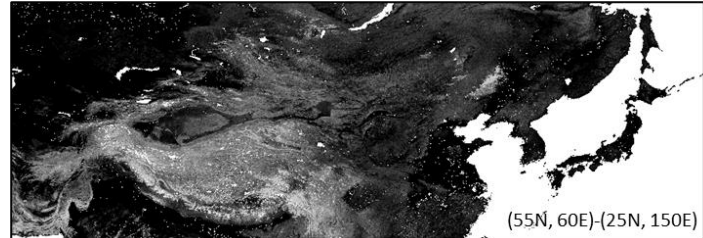


図-3.6 SoilGrids 2.0のレキ体積比率データと図-3.5の結果を利用して推定した広域レキ被覆率。黒領域はレキ被覆率0.0、白領域は1.0を表している。

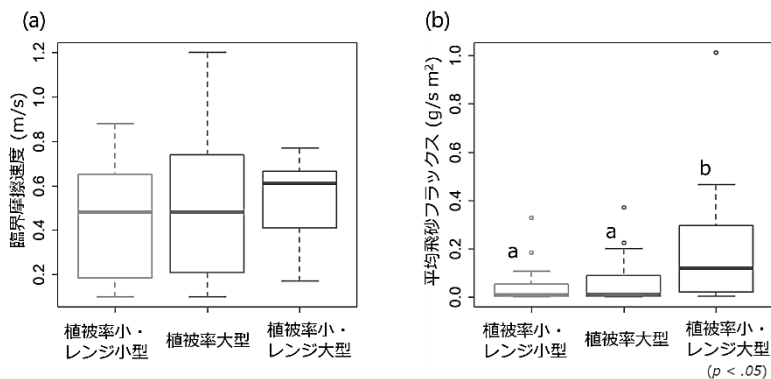


図-3.18 フルンボイルにおけるグループ間の臨界摩擦速度(a)と飛砂フラックス(b)の比較

5-2. 環境政策等への貢献

本研究では、気候変動に伴う長期的な黄砂の変動を主なターゲットとしており、この3年間の成果が直接行政に活用されるケースのほかに将来の施策検討の方向性を示唆する結果も多く得られている。地球システムモデルによる将来計算実験から得られた今後の黄砂発生量や輸送の変動傾向、およびPM2.5環境基準非達成に与える黄砂の影響については今後の国内大気汚染(粒子)改善に向けた手法を検討する上で黄砂が無視できないものであることを示している。全球エアロゾルモデルの改良についても本研究で行われたように発生源地表面情報を取り入れ、気象庁で現業に利用されるモデルそのものの改良が行われれば、一般向け気象情報等を通じた黄砂に関する注意喚起がより精密に行われ、市民生活の質改善にも繋がることを期待される。

<行政等が既に活用した成果>

2020年から2022年にかけて毎年開催された日中韓環境大臣会合傘下の黄砂共同研究(TEMM-DSS)第一作業部会(WG1)会合・第二作業部会(WG2)会合において、本研究課題の概要や進捗状況を報告し、発表内容等が議事録に記載された。また、同共同研究の研究計画作成においても本課題の進捗を踏まえて気候

変動に伴う黄砂の変動等を含む形での研究計画の策定等が行われている。また、世界気象機関（WMO）の砂塵嵐警戒評価計画（SDS-WAS）にも本推進費の活動状況を適宜インプットしており、刊行物（Airborne Dust Bulletin）や報告書等に記載された。

サブテーマ1によって維持されたライダーネットワークAD-Netから得られた黄砂消散係数は、環境省黄砂飛来情報HP (<http://www2.env.go.jp/dss/kosa/>) から広く一般向けにリアルタイムで公開された。また、環境省水・大気環境局の「黄砂問題検討会」において毎年作成された黄砂飛来状況調査報告書においても黄砂日や煙霧日の実態を把握するために活用されてきた。TEMM-DSS WG1における各年の黄砂イベント時データ共有にも提供され、各国のモデル検証などに利用可能な状態を維持した。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本課題で用いている全球エアロゾル解析・予測システムは気象研究所の地球システムモデルを構成する要素でありこの改良は地球システムモデルの高度化に直結しているほか、気象庁の黄砂情報提供業務や数値予報業務の改善において活用が期待できる。本研究の成果は世界気象機関（WMO）砂塵嵐警戒評価計画（SDS-WAS）の各種会合において報告を行っており、黄砂の気候変動研究を先導する研究として活用されることが見込まれる。

砂漠地表面の状態に対して大雑把な仮定を設定することでレキ（小石）効果と枯れ草効果を組み込んだダスト数値モデルは存在するが、そのシミュレーション精度は低い。本研究で構築した広域レキデータ、枯れ草データをサブテーマ2に提供することで、黄砂数値モデルの精度向上に期待出来る。これより、気象庁の黄砂予測現業サービス及びIPCCで将来気候計算が行われているESM（地球システムモデル）のダスト発生量の信頼度向上に貢献できる。TEMM-DSSにおいてWG1とWG2の連携が課題となっているが、モデル精度向上を目的とした地表面データのサブテーマ3からサブテーマ2への提供はWG1とWG2の連携研究例になると考えられる。ダスト発生域における植生分布と飛砂発生の関係についての成果は、ダスト発生を抑制するための緑化や植栽管理技術の開発につながり、ダスト発生域での持続的な土地管理に関する知見提供を通じたTEMM-DSS WG2や日蒙環境政策対話への貢献が期待される。

サブテーマ1により提案された大気環境常時監視測定局データを用いた黄砂の検出結果は、2018年度まで環境省環境保健部環境安全課が実施した黄砂健康影響疫学調査のような黄砂の環境影響に関する調査において気象庁黄砂日からは決定できない都道府県別黄砂データとして活用されることが見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>今後予想される気候変動に伴い、東アジア域の黄砂が長期的にどの様に変化するか、その要因や下流域大気環境に与える影響の推定・評価を行う。過去から将来に渡る黄砂の動態について全球数値モデルにより計算を行うが、そのために必要となる地表面変動に関する情報の収集やモデル検証に必要なライダー観測およびそれ以外の黄砂検出手法の検討も併せて行い、将来のPM2.5国内環境基準(短期)非達成に対する黄砂の寄与を推定する。これらの結果をTEMM DSS WGにおける次期中期計画に沿って参加国で共有する他、日蒙での環境政策対話において重要なテーマとされる黄砂分野に</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u> サブテーマ2において改良が進められた全球エアロゾルモデルにより将来における黄砂の発生・輸送の状況を様々な温暖化シナリオのもとで計算し、黄砂量の増加とこれに寄与するパラメータが示された。またサブテーマ1によるライダー観測がモデル検証に利用された他、サブテーマ3から提供された地表面パラメータが黄砂再現性の向上に繋がることを示した。大気常時監視データから黄砂を判定する手法や将来気候におけるPM2.5環境基準非達成への黄砂の影響を推定する手法も提案された。これらの結果はTEMM DSS WGの年次会</p>

<p>ついて現地における研究協力態勢(カウンターパート：モンゴル気象環境監視局NAMEM)を強化する。</p>	<p>合や拡大ワークショップでも情報共有され、東アジア域での黄砂変動に関する共通理解の促進に繋がった。モンゴルでのライダー更新や地表面情報の現地研究者によるデータ取得を通じて日蒙連携の強化が行われた。</p>
---	--

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
<p>約20地点のライダーネットワークにより黄砂の3次元動態を継続的に観測し数値モデル検証用データを作成するとともに、SPM/PM2.5常時監視データから黄砂を検出する手法について考案し、判定可能率などの利用指標を示す。モンゴル国内で持続可能な簡易型黄砂検出ネットワークを3地点以上で形成するほか、飛砂と大気中ダスト濃度の関係についてサブテーマ3と共同で調査を行う。将来の大気環境におけるPM2.5環境基準非達成に対する黄砂の寄与率をサブテーマ2による将来予測結果をもとに推定する。</p>	<p>ほぼ目標どおりの成果をあげた。 ライダーネットワークについて特にモンゴル3地点の機器全般入れ替え等、長期利用を念頭に置いた維持整備活動を行い安定的なデータ取得を可能とし、環境省黄砂飛来情報ホームページにも定常的なデータ供給を行った。常時監視データから都道府県・1時間単位で黄砂を判定する手法を提案した。COVID-19による渡航制限の影響を受けてモンゴルにおける簡易型黄砂検出ネットワークの形成には至らなかったが、偏光型視程計を用いて土壌粒子を分離検出できることを国内において実証した。サブテーマ3に大気中ダスト濃度のデータを提供して飛砂との関連性調査に活用された。サブテーマ2から提供された将来大気環境におけるPM2.5環境基準達成状況について検討を行い、黄砂によりPM2.5環境基準非達成が生じる地点の割合が将来増加する傾向であることを示した。</p>

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>全球エアロゾルモデルを用いた過去実験等によりモデルの特性を把握する。他のサブテーマと協力しつつ全球エアロゾルモデルの改良を進める。黄砂の季節内予測実験および複数シナリオによる将来予測実験を実施する。これらの結果より、黄砂の発生量、輸送経路、黄砂発生源における気象条件の変化を取り纏めると共に黄砂の季節予測の可能性を評価する。改良されたモデルを気象庁の黄砂予測業務に反映させる作業を進める。</p>	<p>目標どおりの成果をあげた。 全球エアロゾルモデルを用いた過去実験によりモデルが黄砂の発生状況を再現できていることを確認した。全球エアロゾルモデルの改良を進め、5つの温暖化シナリオを用いた将来予測実験を行い、黄砂発生量の変化とその要因について考察を行った。その結果、早春と晩秋において温暖化の進展に伴う積雪量の減少が黄砂の発生量の大幅な増加をもたらす可能性を示唆した。これらの季節は低気圧の移動により物質が遠方に輸送されやすい時期であることから黄砂の下流域への輸送量も増加することが示された。これらの結果より、黄砂の季節予報も定性的には可能であると考えられる。これらの研究成果は研究協力者である気象庁の担当官と共有しており、今後の黄砂予測業務への反映が期待できる。加えて、他のサブテーマか</p>

	ら提供を受けた地表面状態データや黄砂発生プロセス情報を領域化学輸送モデルに組み込み、モデルの黄砂再現性が改善すること確認できた。
サブテーマ3目標	目標の達成状況
発生源域の地表面情報および飛砂発生の実態を野外観測・実験により解明し、地表面変動に関わるパラメータを6つ以上取得したうえで、数値モデルの精度向上に資する指標を3つ以上設定し、サブテーマ2に提供する。発生源の生態系保全に必要な植生・土地利用等の地表面条件を提案する。	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>飛砂発生に影響する地表面パラメータとして、(1)レキ被覆率$SC\%$、(2)レキ粗度密度λ_s、(3)MODIS衛星データから得られる枯れ草指標STI、(4)枯れ草被覆率$VC\%$、(5)枯れ草粗度密度λ_v、(6)レキと枯れ草をあわせた粗度影響関数$f(\lambda_v, \lambda_s)$を取得した。指標については、(1)広域のレキ被覆データ$SC\%$、(2)枯れ草被覆率データ$VC\%$、(3)レキと枯れ草をあわせた粗度影響関数データ$f(\lambda_v, \lambda_s)$を作成し、サブテーマ2に提供した。とくにレキ被覆データについてはモデルに組み込むことの有効性が確認され、モデル精度の向上に貢献した。ダスト発生源の生態系保全については、飛砂量と植被率の関係は空間分布の影響を受けることを明らかにするとともに、注意すべき植被率のレンジを具体的に示した。また、飛砂発生に関わる植生指標を新規に開発し、放牧地管理および植生管理の目標策定に有用であることを示した。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

41 件（Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細に含まれるサブテーマごとの論文数合計は 47 件だが、サブテーマ間での重複を除外すると 41 件）

<主な査読付き論文>

- 1) Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. SOLA, 18, 218-224(IF:2.349).
- 2) Wu, J., Y. Kurosaki, T. T. Sekiyama, and T. Maki, 2023: Effects of Dry Vegetation Coverage Estimated from the MODIS Soil Tillage Index on Dust Occurrence: Verification by Surface Synoptic Observations, Journal of the Meteorological Society of Japan, 101, 67-77(IF:3.356).
- 3) Sekiyama, T. T., Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, 2023: Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia. J. Geophys. Res.-Atmos., 128, e2022JD037295 (IF:5.217)
- 4) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, B. Gantsetseg, A. Davaadorj, M. Ishizuka, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka and T. Maki, 2021: Effect of stones on the sand saltation threshold during natural sand and dust storms in a stony desert in Tsogt-Ovoo in the Gobi Desert, Mongolia. J. Arid Land, 13, 653-673 (IF:2.483)
- 5) Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Mak, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. Geoscientific Model Development, 14, 2235-2264(IF:6.892).
- 6) Kono, A. and T. Okuro, 2021: Spatial distribution of shrubs impacts relationships among saltation, roughness, and vegetation structure in an East Asian rangeland. Land, 10, 1224 (IF:3.9)
- 7) 森育子, 清水厚, 西村理恵, 中戸靖子, 2022: 黄砂現象時の粗大粒子中の硝酸イオン, 硫酸イオン及び水溶性有機化合物濃度の経時変化: 2019 年10 月の黄砂の大阪府域における事例解析. 地球環境, 27 (3), 229-233 (IF:不明)
- 8) Wu, J., Y. Kurosaki, B. Gantsetseg, M. Ishizuka, T.T. Sekiyama, B. Buyantogtokh and J. Liu, 2021: Estimation of dry vegetation cover and mass from MODIS data: Verification by roughness length and sand saltation threshold. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 102, 102417 (IF:7.672)
- 9) Kim M.-H., Yeo H., Park S., Omar A., Nishizawa T., Shimizu A., Kim S.-W. (2021) Assessing CALIOP-Derived Planetary Boundary Layer Height Using Ground-Based Lidar. Remote Sensing, 13 (1496) (IF:5.349)
- 10) Kong, K., B. Nandintsetseg, M. Shinoda, M. Ishizuka, Y. Kurosaki, T. Bat-Oyun and B. Gantsetseg, 2021: Seasonal variations in threshold wind speed for saltation

depending on soil temperature and vegetation: A case study in the Gobi Desert.
 Aeolian Res., 52, 1-11 (IF:3.988)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	40件
「国民との科学・技術対話」の実施	7件
マスコミ等への公表・報道等	9件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	0件

7. 国際共同研究等の状況

●【日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS)第一作業部会(WG1)】

カウンターパート：LI Liang（中国環境保護局（CNEMC））、RYOO Sang Boom（韓国気象庁（KMA））
 参加・連携状況：毎年1回会合を開催してデータ共有等を通じた共同研究を実施し、成果を論文集に取り纏めている。令和2年10月（オンライン）、平成3年9月（同）、平成4年11月（韓国・済州島）に開催された会合に参加し、本研究課題の成果等を発表した。また平成3年9月の会合では拡大ワークショップも開催され、WGメンバー外を対象としたアウトリーチセッションでの講演や関係者による本共同研究の今後の方向性に関する議論等も行われた。

国際的な位置づけ：日中韓環境大臣会合、日中韓局長級会合の合意を経て設置されている。

●【日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS)第二作業部会(WG2)】

カウンターパート：Lyu Shihai（中国環境科学研究院）、Lee Eun-Ju（ソウル国立大学）ほか
 参加・連携状況：毎年1回、日本、中国、韓国の三カ国で現地共同調査を行うとともに、会合を開催して成果を発表・共有している。令和2年度以降はコロナ禍により現地調査が中止となったが、会合は令和2・3・4年とも開催され、本研究課題の成果が報告されている。

国際的な位置づけ：日中韓環境大臣会合、日中韓局長級会合の合意を経て設置。

●【世界気象機関砂塵嵐警戒評価システム(SDS-WAS)】

カウンターパート：A. Baklanov（WMO 事務局）、X. Zhang（中国気象局（CMA））、RYOO Sang Boom（韓国気象庁（KMA））

参加・連携状況：2～3年に1度程度会合を開催して観測データ、予測データ等の共有を進めている。令和4年11月にKMAの主催によりハイブリッドで開催された会合に参加した。

国際的な位置づけ：世界気象機関（WMO）の世界天気研究計画（WWRP）におけるプロジェクト

●【エアロゾル予測のための国際協調(International Cooperative for Aerosol Prediction, ICAP)】

カウンターパート：Pete Colarco・GSFC/NASA・米国、Angela Benedetti・欧州中期気象予報センター・英国、Jeff Reid・米国海軍研究所・米国

連携状況：気象研究所はICAPの主要参加機関であり、NASA・米国海軍研究所・欧州中期気象予報セン

ターと協力してエアロゾルモデル相互比較・年次会合開催・論文共同執筆を進めている。

国際的な位置づけ：ICAPは参加者のボランタリーな互助組織であるが、主要メンバーが所属する組織は全球エアロゾルモデルの自主開発能力を持つ現業予報機関のみで構成されており、世界最高水準のエアロゾル（黄砂、PM2.5等）予報技術の相互比較の場となっている。

●モンゴル気象環境監視局(NAMEM)との国際連携

サブテーマ1ではモンゴル3地点（ウランバートル・サインシャンド・ザミンウード）におけるライダー観測の継続や風向風速計によるデータ取得をNAMEMと共同で実施し、国立環境研究所とNAMEM間でMoUを締結するなど協力関係の継続・強化に努めている。

8. 研究者略歴

研究代表者

清水 厚（サブテーマ1代表）

京都大学大学院理学研究科修了、博士（理学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域広域大気研究室主幹研究員

研究分担者

1) 眞木 貴史（サブテーマ2代表）

京都大学理学部卒業、学士、現在、気象庁気象研究所全球大気海洋研究部第三研究室長

2) 大黒 俊哉（サブテーマ3代表）

東京大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、東京大学大学院農学生命科学研究科教授

3) 黒崎 泰典（サブテーマ3分担）

筑波大学地球科学研究科修了、博士（理学）、現在、鳥取大学乾燥地研究センター教授

II. 成果の詳細

II-1 黄砂の持続的モニタリング手法の検討と長期変動の実測的検出

国立研究開発法人国立環境研究所

地域環境保全領域	広域大気研究室	清水 厚
地球システム領域	大気遠隔計測研究室	西澤 智明
地球システム領域	大気遠隔計測研究室	神 慶孝

【要旨】

気候変動に伴う黄砂の飛来状況を的確に把握するために必要な観測体制の整備や手法の提案を行った。現状の黄砂の観測は、主に気象庁が11地点の気象台で実施している目視観測が過去からの連続性などから最も頻繁に利用されるものとなっている。これは職員の主観的判断によるものであり、関連情報として視程（水平方向の見通し）が記録されるが黄砂の量的指標であるとは言い難い。また2020年以前には59地点で行われていた観測が11地点に減らされたように、今後の取扱いについても不明な点がある。一方、ライダー観測による黄砂の鉛直分布観測を行うAD-Netは、黄砂の濃度を定量的に示してきたが、一部地点を除き研究ベースであるために持続性に不安があった。これらを踏まえ本サブテーマでは黄砂の持続的観測体制整備として(1)ライダーネットワークの安定的維持(2)大気汚染常時監視測定局データを用いた黄砂判定(3)モンゴル国内の簡易黄砂測定ネットワーク形成、を行った。(1)ではモンゴル3地点のライダー構成要素の一新のほか韓国・日本でのライダーメンテナンス(レーザーのオーバーホールを含む)、(2)ではSPMとPM_{2.5}の差分などを利用した判定基準提案とこれを利用した黄砂イベントの解析および2012年度以降の中長期変動傾向の確認、(3)では偏光型超小型視程計による非球形(土壌性)粒子の検出手法の検討を行った。これらの活動を通じて、当初目標をほぼ達成(モンゴル国内の簡易測定ネットワークの確立までには至らず)した上で、得られた成果は日中韓三カ国環境大臣会合(TEMM)傘下の黄砂共同研究(TEMM-DSS)において報告されたほか、ライダーによる測定結果は環境省黄砂飛来情報ホームページを通じて一般向けに公開されるなど、行政にも活用された。

1. 研究開発目的

東アジア域のエアロゾルとして特に春季において重要と考えられる黄砂は、自然起源粒子に分類される鉱物性(土壌性)の粒子である。その発生は地表面状態や気象条件に左右されるが、ひとたび大気中に放出されると基本的に化学反応を伴わずに大気中を輸送され、重力沈降や沈着といった物理過程を経て除去される。ユーラシア大陸内部(モンゴル・中国内モンゴル等)の乾燥・半乾燥地域で強風により地上から巻き上げられた粒子は上空の偏西風により東方へ輸送され、日本上空にも発生から2-3日で到達する。更にその後西部太平洋方面へ進み、高高度を通過した場合には北米大陸まで達する。この黄砂により、大気中の微粒子重量濃度は上昇し環境基準超過の引き金になるほか、人間の呼吸器に取り込まれて感受性の高い集団に対して健康影響を及ぼすことが示されている。また日本域においても土壌粒子による太陽放射の吸収や氷晶核としての作用から地球温暖化にも影響を及ぼすほか、酸性雨の中和や貧栄養海域への栄養塩供給といった役割も示されてきた。このように多彩な環境影響を及ぼす黄砂の到来は、気象学的には各地の気象台において目視により長年観測されてきた。しかし近年、黄砂を観測する気象台の数が大幅に減少(59地点から11地点)し、気候変動に伴う黄砂の長期的変動を的確に掴むことが難しくなる恐れがある。気象庁によるこれまでの観測によれば日本に到来する黄砂は20世紀後半に増加傾向が見られ、2000年前後にピークを迎えたのちに緩やかな減少傾向を示している。この黄砂の変化傾向と、全地球的な気候変動との関連は十分に明らかではないが、これを今後解明していくために必要な事は長期的に安定した黄砂の観測を行うことである。前述のように、気象庁における黄砂観測地点は2020年に大幅に減少した。これに対して国立環境研究所が中心となって整備したライダー(レーザーレ

ライダー)による黄砂・エアロゾル観測ネットワーク(AD-Net)では定量的な黄砂鉛直分布を15年以上に渡って提供してきた。そこで本研究では、まずこのAD-Netによる安定的な黄砂観測を持続するための環境を整備するとともに、更に气象台・ライダー以外の手法で黄砂を検出する方法を検討する。さらに、長期的な黄砂の変動に伴い国内大気環境に与える影響がどのように変動するのかを数値モデル計算結果から推定する手法を検討する。以上の研究により、日中韓参加国環境大臣会合(TEMM)傘下で展開されている日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS)ワーキンググループI(WG1)の中期活動計画(MTAP;2021-2025)に対して黄砂と気候変動の関連性解明の観点から貢献を行う。

2. 研究目標

約20地点のライダーネットワークにより黄砂の3次元動態を継続的に観測し数値モデル検証用データを作成するとともに、SPM/PM_{2.5}常時監視データから黄砂を検出する手法について考案し、判定可能率などの利用指標を示す。モンゴル国内で持続可能な簡易型黄砂検出ネットワークを3地点以上で形成するほか、飛砂と大気中ダスト濃度の関係についてサブテーマ3と共同で調査を行う。将来の大気環境におけるPM_{2.5}環境基準非達成に対する黄砂の寄与率をサブテーマ2による将来予測結果をもとに推定する。

3. 研究開発内容

3.1 ライダーネットワークを用いた持続的な黄砂観測体制の整備、およびライダー以外の手法による黄砂検出の検討

日本における黄砂の観測は気象庁が各地の气象台や特別気象観測所(旧測候所)において職員の目視によって行われてきた。これに対して、国立環境研究所が環境省や大学等と共同でライダー(レーザーライダー)を用いた定量的黄砂観測ネットワークを構築してきた。具体的には、2波長偏光ミー散乱ライダーを用いて対流圏全域を連続的に観測するネットワーク(AD-Net、図-1.1)を整備し、黄砂消散係数と呼ばれる土壌性粒子の光学的濃度を準リアルタイムで導出し国立環境研究所や環境省のホームページを通じて提供してきた¹⁾。気象庁の黄砂観測には歴史的な連続性、ライダーネットワークによる黄砂観測には定量性や鉛直分布の把握が可能といった利点があるが、いずれも持続可能性には不安な点があり、気候変動に伴う大気環境の変化によって黄砂がどのように変動するかを監視するには一抹の不安が残る。気象庁の黄砂観測地点は2020年にそれまでの59地点から11地点までに減少し、例えば各都道府県における黄砂の健康影響に関する疫学調査を行う際に当該都道府県のデータが今後存在しないことになる。またライダーネットワークに関しては環境省が設置した5地点を除き研究ベースで整備されたものである(現業ではない)ために競争的資金の状況に運用が左右される点で安定的とは言い難い。そこで、これらとは別に日本国内において長期的に持続可能な黄砂検出手法を検討した。情報源として、地方自治体が大気環境の監視のために業務として実施している大気汚染常時監視測定局(常監局)のデータを利用した。2010年度以降、大気中の微粒子観測として従来からのSPM(粒径10 μ m以上の粒子を100%カット)の他にPM_{2.5}(粒径2.5 μ m以上の粒子を50%カット)が監視対象となった。黄砂(土壌性)粒子は人為汚染粒子に比べて粒径が大きいため、黄砂時にはSPMが顕著に上昇するのに対してPM_{2.5}はそこまで変動しないことが定性的に知られている。本研究では、ライダーによって測定された黄砂消散係数を定量的な黄砂濃度指標として利用し、SPMやPM_{2.5}の利用方法を定義した。具体的には長崎におけるライダーデータのうち2014年から2020年までの通年・時間単位データと、ライダーに最も近い常監局(大村大気測定局)で得られたSPMおよびPM_{2.5}の時間値とを同時刻で対比し、判定基準の策定を目指した。



図-1.1 ライダー観測ネットワークAD-Netの観測地点分布図。中国では国外へのリアルタイムデータ転送が禁じられているため観測は行っていない。

3.2 持続可能な簡易型黄砂検出ネットワークの形成、飛砂と大気中ダスト濃度の関係性調査

これまでライダーネットワークは日中韓蒙において運用されてきたが、黄砂発生源の一つで日本国内へ飛来する黄砂の主要なソースであるゴビ砂漠には2地点でしかライダーは運用されていない。ライダーは設置・運用のコストが高くこれ以上地点が増える見込みはないため、ゴビ砂漠周辺で詳細な発生状況を把握するためにはライダー以外の黄砂観測手法を展開する必要がある。現在、PM_{2.5}やPM₁₀といった質量濃度は光学的粒子計数計(OPC)の原理に基づく簡易な測定手法で安価・小型なものが入手可能であるが、例えば森林火災等を原因とした非黄砂の粒子(主に球形粒子)が混在した場合に、黄砂を量的に計測することは困難である。前述のPM_{2.5}とSPMの組み合わせのように粒径分布の情報から卓越する粒子の種類を特定することは可能(それにより黄砂日を定義する)であるが、粒子種別毎の濃度を得ることは難しい。過去の環境研究総合推進費5-1502で利用した偏光OPCは粒径毎の非球形粒子の割合を推定できる大変に優れた測定装置で、得られる値もライダーによる黄砂消散係数とよく対応していた²⁾が、その設置と運用はライダーほどではないにせよ簡易とは言い難い。そこで本項目ではさらに簡易な光学式測定装置の評価を行った。これは市販されている小型視程計を消散係数の測定装置として利用し、これに偏光デバイスを組み合わせることで非球形粒子による消散係数を得てライダーによる黄砂消散係数に相当するものを導出する。視程計自体は小型(ポータブルUSBハードディスク程度)かつUSBでPCと接続するだけで計測が可能であり、専用のコンテナや空調設備等が不要である。このような簡易計測装置について、モンゴル側カウンターパートであるNAMEMと協議の上、同機関傘下の測定所に設置することを計画していたが、COVID-19による渡航制限により研究実施期間中に設置地点の事前調査などが行えず、日本国内における性能評価を行うに留まった。

またサブテーマ1/3間の連携として、発生源近傍の大気中の黄砂濃度が発源地表面状態とどのように関連しているのについて比較を行った。具体的には、サブテーマ1でライダーによって計測された黄砂消散係数を高度1km以下で平均化し6時間分解能で提供した。地点はモンゴル国内サインシャンド(Sainshand)およびザミンウード(Zamynnuud)で、期間は2008年から2022年までの春季(3-5月)である。

3.3 将来の大気環境におけるPM_{2.5}環境基準非達成に対する黄砂の寄与率推定

環境省から毎年刊行されている大気汚染状況報告書では、PM_{2.5}の環境基準達成状況の項目内に「黄砂によって非達成となった局の割合」が示されている。大気環境改善のための様々な施策のうち、黄砂に関連するものは国外に発生源が局在し自然現象由来であるという点で対策が他の発生源とは大きく異なるために特にこのような記述がなされていると考えられる。実際の算定方法は「黄砂の影響は各自治体の報告による」とのみ書かれているために明らかではないが、以下では気象台が発表する黄砂日を統計から除いた上で日平均値の年平均(長期基準)・98パーセンタイル値(短期基準)を改めて求め、年間では基準超過となっていた地点で黄砂日を除くと基準を超過しなかった場合に「黄砂によって非達成」と判断したものとみなした。この方法を将来の大気環境において同様に実施するために、サブテーマ2において計算された21世紀末(2090-2100年)の地上エアロゾル濃度(黄砂によるPM_{2.5}とそれ以外によるPM_{2.5})を利用して日本域の格子点上で日平均値を定義し、更にモデル内での黄砂日判定基準を設定することで通年および黄砂日以外の長期・短期基準達成率を算出して黄砂による非達成率を算出した。

4. 結果及び考察

4.1 ライダーネットワークを用いた持続的な黄砂観測体制の整備、およびライダー以外の手法による黄砂検出の検討

ライダーネットワーク(AD-Net)において、定常的に(年1回程度)行う必要があるレーザーのフラッシュランプや劣化した光学フィルターの交換を各地点で行ったほか、モンゴルの3地点(ウランバートル、サインシャンド、ザミンウード)においては15年程利用し続けてきたレーザーそのものの入れ替えやPCの更新を行った。モンゴルの他、韓国3地点についてはCOVID-19による渡航制限からいずれも2022年まで実施を遅らせる必要があったため、それ以前にデータが取得できなくなる、あるいはデータ質が劣化する地点もあったものの、2022年にはこれらの点を解決して安定したデータ取得を回復した。図2-1に、2020年4月から2023年3月までの地点別データ取得率を示す。2021年度に停止していたモンゴル2地点や、2022年度に停止した韓国蔚山などの観測を復活させた。これらの活動により、環境省黄砂飛来情報ホームページにも安定したデータ供給を行った。また黄砂消散係数・球形粒子消散係数等はnetCDF形式で国立環境研究所のAD-Netホームページから準リアルタイムで公開され、過去の観測結果も含めてサブテーマ2の数値モデルによって計算される黄砂濃度の検証に用いられた他、日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS)ワーキンググループ1で取り組むデータ共有や、環境省黄砂問題検討会における2021年度黄砂飛来状況の解析においても活用された。

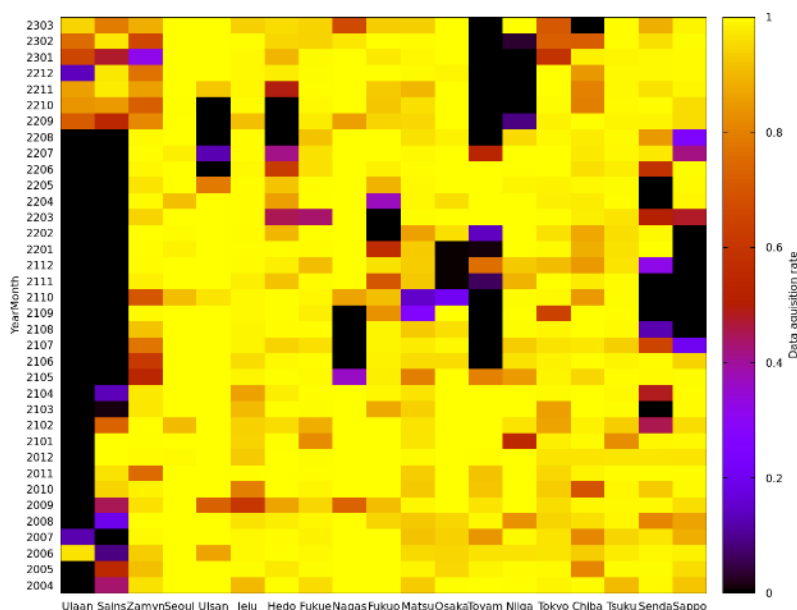


図-1.2 月別のライダーデータ取得率(2020年4月から2023年3月)。左からモンゴル・韓国・日本の観測地点をほぼ西から東へ並べ、年月は下から上に進む。明色ほどデータ取得率が高く、黒い部分はライダー観測が行われていない。

ライダー以外の手法により黄砂を検出する目的では、黄砂時に見られる大粒子卓越を検出するための方法としてSPMとPM2.5の差分を利用することとした。図1-3は長崎のライダーで観測された地上付近の黄砂消散係数と、長崎県内の常監局で最もライダーに近い大村局のSPMとPM2.5の差分(SPM-PM2.5)を1時間値同士で比較したものである。これによると、まずライダーと常監局ともに増加している領域(右上)として「SPM-PM2.5>30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 」が一つの黄砂判定条件として考えられた。その上で、ライダーの

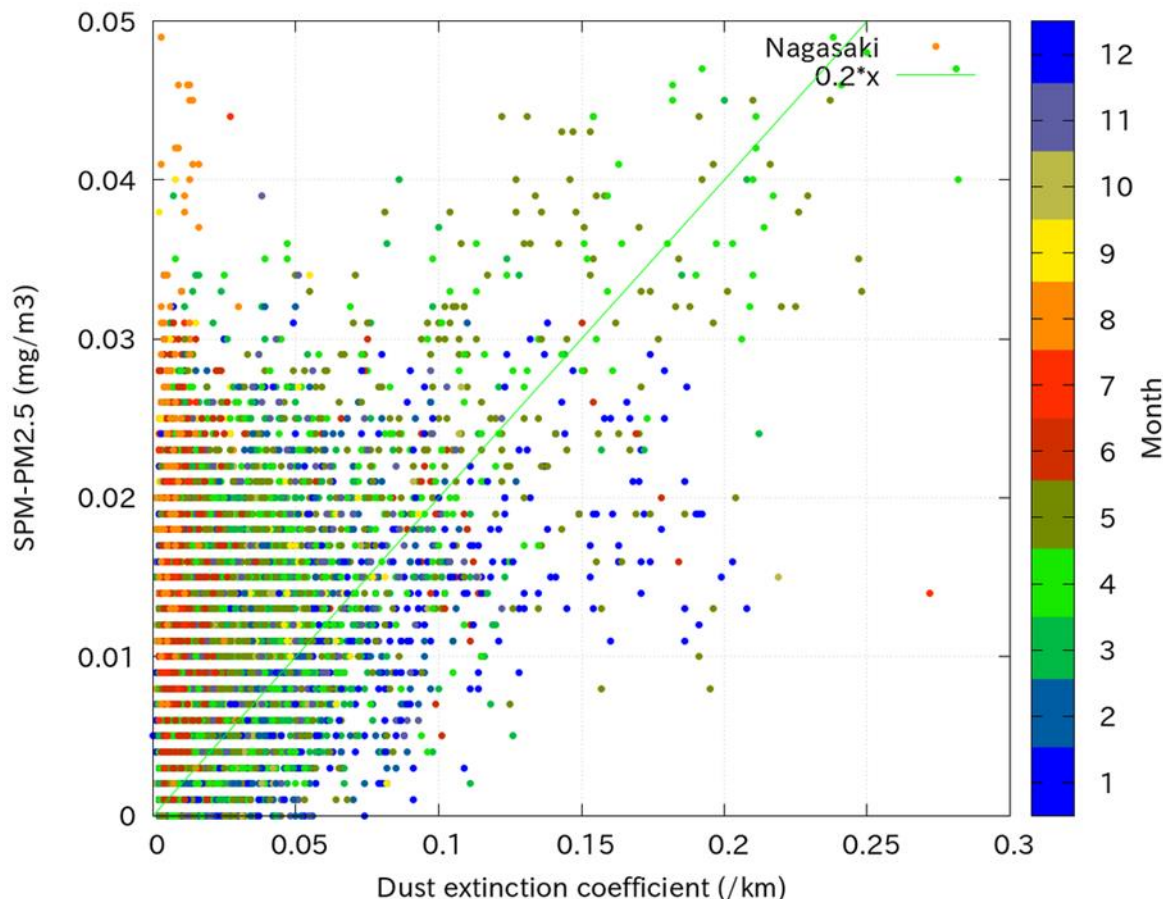


図-1.3 長崎ライダーによる黄砂消散係数(横軸)と大村大気測定局におけるSPM-PM2.5(縦軸)の対応。値は1時間単位、データは2014年から2018年で黄砂消散係数は高度0-1kmの平均。色の違いはデータが取得された月を表す(右カラーバー)。

値が小さいが常監局の値が大きい領域(左上)が存在する。月別の色分け表示を利用すると、左上領域は主に暖候期(7-9月)に見られる。SPMの測定では温湿度の調整が行われておらず、高温多湿の環境では吸湿性粒子の質量が増えるのに対してPM2.5計測では吸湿性補正が行われるので、両者の差は開く傾向がある。また過去の気象庁による黄砂日について1961年以降7-9月に見られた例はないので、ここでは7-9月に黄砂判定を行わないことで誤判定を避けることとした。更にこの散布図の左上領域について解析すると、PM2.5とSPMの比(PM2.5/SPM)が0.3以下になる場合が多く見られた(図は省略)。大粒子が卓越する場合にはPM2.5/SPMは小さくなるのが期待されるが、これが極端な場合にはやはりSPMが過大評価されている可能性が高い。このため、PM2.5/SPMが0.3以下の場合も黄砂とはみなさないことを条件とした。この手法を、2021年3月末から4月に掛けて日本へ到達した黄砂イベント時に適用した結果を図-1.4に示す。これによると、2021年3月29日の午後西日本の日本海側で黄砂が見られ始め、数時間後には北陸から東北日本海側までの広い領域で黄砂判定が行われた。関東周辺にはそれよりも1日以上遅れて黄砂が到達し、一旦それが終了した後の3月31日後半から再び黄砂状態となり、それは東海から近畿方面にも弱いながら広がった様子が見られる。気象台における結果と比較すると黄砂を観測した10地点中鹿児島と東京を除く8地点では概ね対応が良かった。

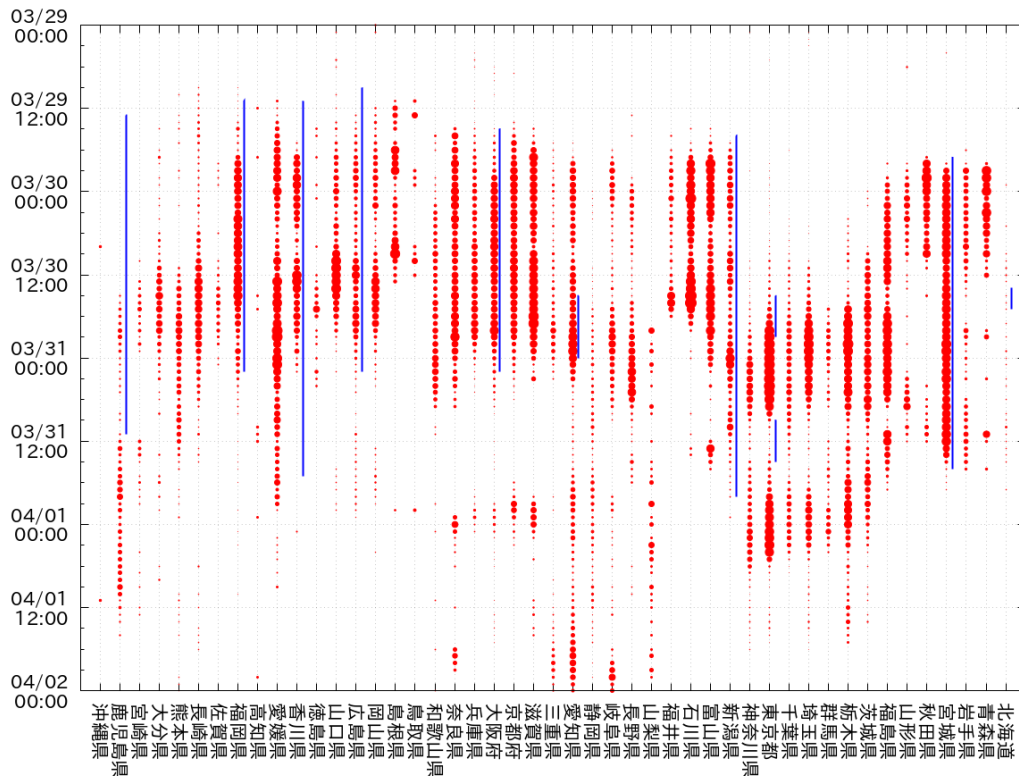


図-1.4 2021年3月末の黄砂イベントに際し各県内の常監局データで黄砂判定がなされた曲の割合(赤丸の大きさ)。値は1時間毎で縦軸の時刻は上から下、横軸は都道府県を西から順(都道府県コードの逆順)に並べた。図中の青線は該当する県の気象台が黄砂観測を発表した時間帯。

以上の閾値を利用してライダー周辺の個々の常監局データで黄砂判定を行うと近距離であっても黄砂の有無が分かる場合が多いことが分かった。仮に黄砂が一様に水平分布していても、ローカルな発生源を持つ粒子の濃度次第ではそのような結果が得られることが考えられるが、全国約1500の常監局で個別に黄砂判定を行うメリットはあまりないため、ここでは都道府県内での統計を行うこととした。即ち、同一県内の常監局で上記基準を満たす局が全局の40%を超えた時にその県を黄砂状態とする。この40%という値に依存して黄砂の出現頻度が変化することになるが、これは上述の2021年春の黄砂において全国分布の時間的な推移から導かれた値である(図は省略)。これにより、1時間単位で都道府県ごとに黄砂の有無を判定する基準とし、黄砂日の決定としては該当都道府県で1時間でも黄砂と判定された時間があつた日を黄砂日とする。

更に、黄砂の長期変動を監視するためにこの手法を過去年度に遡って適用した。2011年から2022年までの年ごとの黄砂日数および黄砂のべ日数を気象庁による統計と比較したものが図-1.5である。日本におけるPM2.5環境基準が制定されたのが2009年で、2013年1月に北京のPM2.5が $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に達したことなどが報道され国内でもPM2.5測定の重要性が認識されるまで、常監局のうちPM2.5測定が開始された地点数は少なかった。このため、図-1.5の初期2年間には十分な測定点がないために傾向がそれ以後と異なったものと考えられる。この2年間を除くと、2010年代の黄砂の減少傾向や2020年に黄砂が特異的に多かったことがそれぞれの手法で見られている。ただし、月別に見た場合の黄砂日数や黄砂のべ日数には図-1.6に見られるように大きな差がある。気象庁目視はあくまで地上で職員が目視で天空の状況を主観的に判断した結果であるのに対して本手法は大粒子が多く見られたことを統計的に検出しようとするものであるため、全ての結果が一致する必要があるとまでは言えない。しかしながら本手法で6月に黄砂日数が多いのは前述した通り下記のSPM過大評価との関連が考えられるため、可能であれば気象情報によるスクリーニング等も今後検討が必要である。一方でこのような月別の差があつても長期変動が同じように見えたということは、黄砂が多い年には全ての月で多い(つまり特定の月に黄砂が多い

ことでその年の日数が増えたりしない) ことを示唆しており、両者の特徴を踏まえた上で本手法を長期変動の監視のために応用することは可能であると考えられる。



図-1.5 2011-2022年の黄砂日数(左)および黄砂のべ日数(右)の変動。上段が本手法によるもの、中段が気象庁(11地点)によるもの。下段は気象庁が59地点で観測していた2019年までの結果。上段の黄砂日数では、1日あたり1地点のみ黄砂となった日を除外した結果(緑色)も示した。

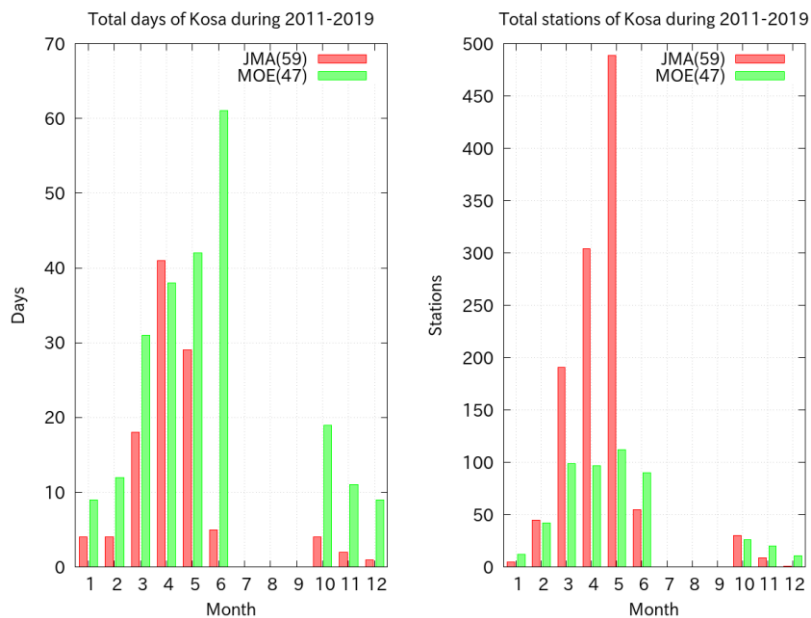


図-1.6 2011年から2019年の黄砂日数(左)と黄砂のべ日数(右)について月別にカウントした結果。緑が本研究の手法、赤が気象庁59地点での日数。

今回提案された手法による黄砂判定のメリットを示すと、以下の通りとなる。

- ・気象庁目視やライダーによる観測が限られた都道府県において実施されるのに対し、全都道府県での黄砂日特定が可能となる。例えば黄砂による健康影響に関する疫学調査を全国的に行う場合、健康側のデータが都道府県別に集約されることが多いのに対して曝露データとして気象庁目視やライダーでは該

当する都道府県のもものが存在するとは限らなかった。近傍の地点の曝露データを利用することが考えられるが、到来時間の差や地形の影響による水平方向の濃度差など、完全に一致したデータとは言い難い。このような場合に、全国的に展開された常監局データに基づく黄砂判定はより正確な曝露指標となることが考えられる。

- ・1時間分解能のデータセットが作られる。

常監局におけるPM_{2.5}測定値は本来24時間平均がFRMによる秤量との等価性が保証されているもので、必ずしも1時間単位の精度までは保証されていない。しかしながら前述の図-1.4でも見られるように県内の閾値超過割合まで加味した統計結果は安定しており、これにより1時間単位で黄砂判定を行うことは可能であると考えられる。気象庁目視観測の場合でも個々の気象記録では黄砂の開始時刻や終了時刻が分単位で記録されているが、一般に用いられる情報としては「黄砂日」としてまとめられたものが大半であり、これに比較すると本手法において一律に作成可能な1時間単位の黄砂判定結果は応用性が高い。

一方、更に改善を行うべき点としては以下が挙げられる。

- ・黄砂の強度に関する情報の不足

ライダーによる黄砂消散係数は黄砂質量濃度(TSP)との対応などが既に示されている通り量的な情報であり、気象庁目視は黄砂のみに起因するとは限らないが同時に得られる視程(水平の見通し距離、消散係数に逆比例)が黄砂濃度の指標として使える場合がある。今回の手法ではSPM-PM_{2.5}の絶対値を使うことも考えられるが、別の考え方として県内で基準を満たした局の割合を利用することも考えられる。前述の通り、県内で40%の局が基準を満たした場合黄砂とするが、この割合が更に高いほど確実な黄砂、つまり高濃度の黄砂と考えることもできる。

4.2 持続可能な簡易型黄砂検出ネットワークの形成、飛砂と大気中ダスト濃度の関係性調査

簡易型黄砂観測機器として、市販されているLEDを利用した小型視程計を偏光観測型に改良して様々な粒子が混在する大気粉塵の中から非球形の土壌粒子を検出するようにした。まず、視程型は波長850nmの赤外光をLEDから射出し、大気中で後方に散乱された光を検出することで大気の混濁状態を計測する。出力は視程(水平方向の見通し距離)およびその逆数に比例する消散係数である。通常の視程計では無偏波のまま全エアロゾル消散係数(σ)を得る。これとは別の視程計の送信部に偏光子を取り付けて送信光を直線偏波とし、受信部には送信部と直交する向きの偏光子を取り付けて偏波状態が変化した後方散乱光のみを受信する。大気中に球形粒子のみが存在する場合は後方散乱で偏波状態は変化しないため信号は受からいのに対し、非球形(土壌)粒子が存在する場合は有限の信号が受信される。これによって得られた消散係数 σ_s はライダーでは得られない偏光消散係数である。 σ と σ_s を用いて偏光解消度 $\delta = \sigma_s / (\sigma - \sigma_s)$ を導出し、ライダーによる黄砂消散係数の導出³⁾と同様に地上付近の黄砂消散係数($\sigma_D = \sigma * \delta / 0.35$)を導出する。この手法による土壌粒子の検出は2022年度に実施したが黄砂シーズンは試験期間に含まれず、以下では関東における冬季の地元由来土壌粒子(ローカルダスト)の検出について議論する。なお上述の通り、偏光解消度の導出には2種類の消散係数が必要なために通常型と偏光型2台の視程計が必須だが、黄砂消散係数のみが必要な場合、 $\sigma \ll \sigma_s$ が満たされるならば $\sigma_D = \sigma * \sigma_s / \sigma / 0.35 = \sigma_s / 0.35$ となり通常型を用いて全エアロゾル消散係数 σ を得る必要はない。モンゴル・中国・韓国に比べ日本国内では σ_s は小さいことが多く、偏光型視程計のみでも簡易型黄砂検出ネットワークを形成することは可能であると考えられる。

図-1.6は、2022年12月に取得された2種類の超小型視程計による消散係数の時系列である。この時期に乾燥した関東平野におけるローカルダストが日中浮揚する様子が見られ、ライダーによる黄砂消散係数(非球形の土壌粒子による消散係数)が日周変化を示していた(図下段青口)。これと概ね周期が一致して視程計から導出された黄砂消散係数も上昇している。ライダーと視程計による黄砂消散係数の散布図(省略)によれば、黄砂消散係数が0.01/kmを超える領域で相関が見え始めており、黄砂の疫学研究で利用されたカットオフ0.07/km⁴⁾を検出することは十分可能であると考えられる。

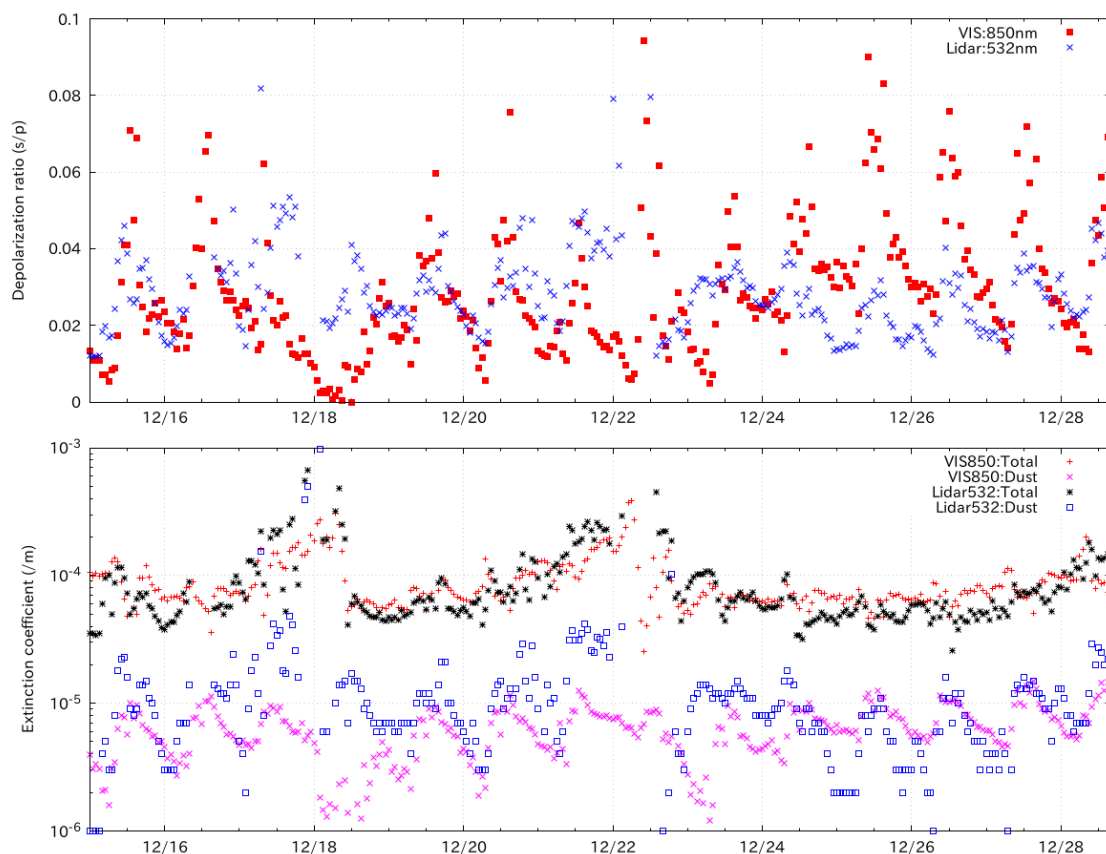


図-1.7 2022年12月15日から29日までの偏光解消度(上段)およびエアロゾル消散係数・黄砂消散係数(下段)の時系列。上段の赤■が視程計(850nm)、青×がライダー(532nm)の結果。下段は視程計(赤+)とライダー(黒*)による全エアロゾル消散係数および視程計(紫×)とライダー(青□)による黄砂消散係数。

発生源付近における地上での飛砂と、大気中の黄砂粒子濃度(黄砂消散係数)の関係性についてはサブテーマ3に関する「成果の詳細」(II-3)において解析結果の説明がなされている。

4.3 将来の大気環境におけるPM_{2.5}環境基準非達成に対する黄砂の寄与率推定

サブテーマ2(気象研究所)から地球システムモデルによるエアロゾルの3次元分布の計算結果が提供された。計算条件の詳細は本報告書成果の詳細サブテーマ2に譲るが、過去計算については1970-2019年の気象場でナudgingした結果、将来計算についてはIPCC AR6におけるSSPシナリオ(SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5)に基づく気象場と人為汚染排出源インベントリを用いたものである。

まず、数値モデル内での黄砂日を設定するために黄砂PM_{2.5}重量濃度を用いた閾値を検討した。過去計算から日本国内23グリッドで黄砂のべ日数が2010年代に100日・点程度となる日平均黄砂PM_{2.5}重量濃度として45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を採用した。これによって定義された黄砂日を考慮して再現実験や将来計算で得られた「PM_{2.5}環境基準非達成グリッドにおいて黄砂日を除くと達成となるグリッドの割合」を図-1.8に示す。過去約50年では平均22.7%のグリッドで黄砂の影響によりPM_{2.5}環境基準が非達成と判定されたが、将来気候においては3種類のSSPシナリオによる2090-2100の11年間平均で42-49%がそのようなグリッドとなり、黄砂が環境基準超過に与える影響が相対的に大きいという結果が得られた。

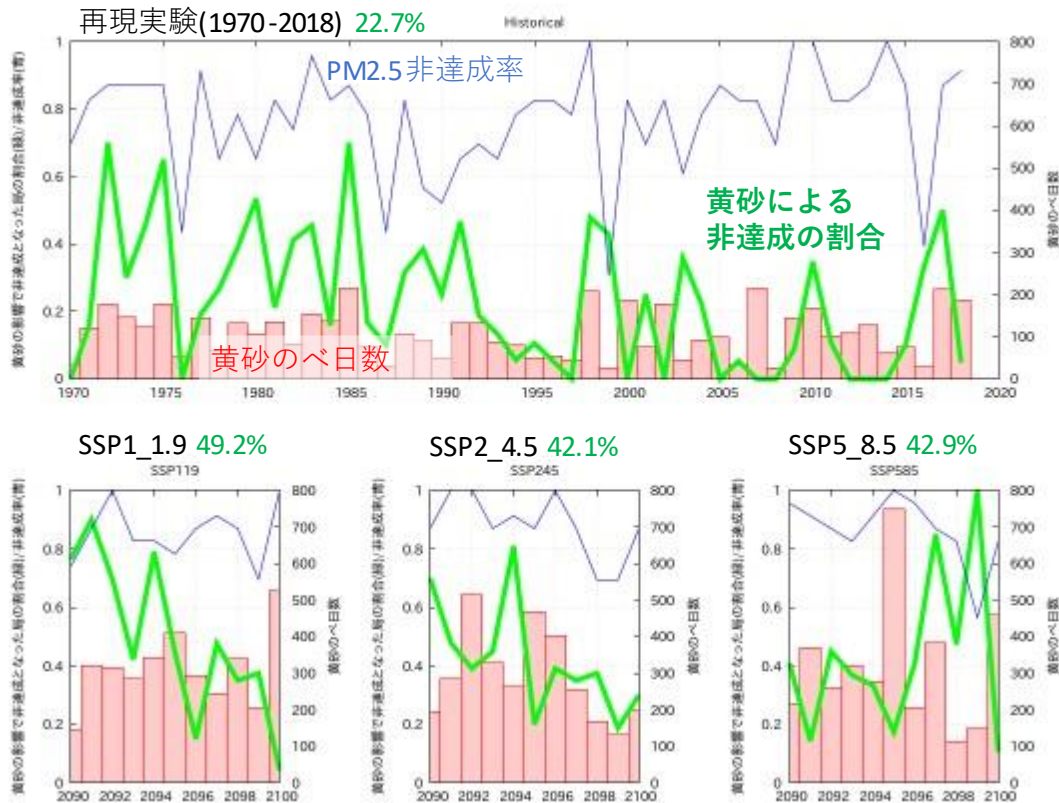


図-1.8 (上段)過去計算(1970-2019)におけるPM2.5環境基準非達成グリッドの割合(青線)、同黄砂による非達成局の占める率(緑太線)、黄砂のべ日数(赤ボックス)、(下段)3種類のSSPシナリオに基づく将来計算(2090-2100)における結果。左からSSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5。

これらの計算結果は上述の黄砂日設定のための閾値や、PM2.5環境基準(長期・短期)そのものの変更によって左右される。このため、得られた絶対値そのものの意味よりも相対的な傾向が気候変動に伴う黄砂の環境影響の変動を示すと考えられる。

5. 研究目標の達成状況

ほぼ全ての項目において目標を達成した。

ライダーネットワークに関しては日韓蒙20地点で装置の維持作業を進めることで運用を続け、解析結果を準リアルタイムでAD-Netサーバー上に提供しており、これは世界気象機関の全球大気監視(WMO/GAW)のContributing networkとしての活動にもなっている。環境省黄砂飛来情報ホームページにも地表付近の黄砂濃度として情報提供を行い、国民向けに分かりやすい情報発信を行うことに貢献した。大気環境常時監視測定局のデータを用いた黄砂の検出手法を検討し、国内でPM2.5観測網が充実した過去10年程度について気象庁目視結果と整合性のある長期変動を示した。

モンゴル国内における簡易型黄砂検出ネットワークの形成についてはCOVID-19により現地設置地点の事前調査等が制約されたため達成できていないが、この目的に沿った簡易測定装置(偏光型小型視程計)の性能評価を日本国内で実施した。地上の飛砂と大気中黄砂濃度の関係については過去のライダー観測データをサブテーマ3に提供することによる貢献した。

PM2.5の環境基準非達成に与える黄砂の影響については、サブテーマ2から提供された過去・将来の大気環境計算結果(黄砂およびその他のエアロゾルによるPM2.5時空間分布)を用いて21世紀末における環境基準非達成に対する黄砂の寄与度合いを推定することに成功した。

6. 引用文献

- 1) Shimizu A., Nishizawa T., Jin Y., Kim S.W., Wang Z., Batdorj D., Sugimoto N. (2016) Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia. *Optical Engineering*, 56 (3), 031219
- 2) 清水厚ほか、環境研究総合推進費5-2001終了研究成果報告書、
https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/end_houkoku/5-1502.pdf
- 3) Sugimoto N., Uno I., Nisikawa M., Shimizu A., Matsui I., Doug X., Chen Y., Quan H. (2003) Record heavy Asian dust in Beijing in 2002-observations and model analysis of recent events. *Geophys.Res.Lett.*, 30 (12), 42-1-42-4
- 4) Ueda K., Shimizu A., Nitta H., Inoue K. (2012) Long-range transported Asian Dust and emergency ambulance dispatches. *Inhalation Toxicology*, 24 (12), 858-867

II-2 全球エアロゾルモデルによる黄砂の長期変動再現と将来予測

気象庁気象研究所

全球大気海洋研究部	第三研究室	眞木 貴史
全球大気海洋研究部	第三研究室	関山 剛
全球大気海洋研究部	第三研究室	大島 長

[要旨]

今後予想される気候変化に応じて東アジア域の黄砂がどのように変化するかを調べるため、気象研究所が開発を継続してきた全球エアロゾルモデル (MASINGAR mk-2) を構成要素とする地球システムモデル (MRI-ESM 2.0) 等を用いた研究を行った。まずMRI-ESM2.0を現実的な気象場を用いて駆動した過去再現実験や結合モデル相互比較実験 (CMIP-6) に準拠した歴史実験等を行い、過去再現実験についてサブテーマ1等から提供を受けた観測データを用いた検証を行い、モデルの性能を確認した。モデルは黄砂の過大評価傾向等はあるものの、黄砂発生量の季節変化や2000年代の東アジアにおける黄砂濃度等の減少傾向を再現できており、その主な要因が摩擦速度 (地表付近の風) の減少に起因していることが見いだされた。このことから、このモデルを用いた黄砂発生量の傾向等を評価することが可能であることが分かった。次に主要な地球温暖化シナリオ (SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5) について歴史実験から引き継ぐ形で5アンサンブルメンバーの実験を行い、黄砂の発生量や濃度、輸送経路等について調べた。黄砂の年間総発生量は温暖化シナリオ間の違いは小さく、特段の増加傾向等は見られなかった。一方、早春と晩秋においては特に温暖化が進展するシナリオ (SSP3-7.0、SSP5-8.5) において摩擦速度の増加と地面温度の上昇に起因する積雪量の減少が主な要因となって黄砂の発生量が大きく増大することが分かった (例えばSSP5-8.5シナリオで3月のゴビ砂漠における黄砂発生量増加率が3%年など)。これにより、ゴビ砂漠では特に黄砂濃度の増大により将来のPM2.5濃度も増加し、その影響は下流域である日本にも及ぶことが分かった。将来においては、人為起源エアロゾルの排出量は環境対策等の進展により概ね減少するとみられているが、PM2.5濃度等の環境基準を達成するためには、黄砂等の自然起源エアロゾルの動向に注意を払う必要性が示唆された。また、早春と晩秋は低気圧の移動等により物質が効果的に遠方に輸送される時期であるが、黄砂発生量の増大により黄砂の輸送量も大きく増加する結果が得られた。地表面状態のモデルへの導入に関しては、サブテーマ3よりレキ被覆率と植生分布等のデータとレキ被覆を考慮した黄砂発生モジュールの提供を受けた。全球モデルとの水平解像度のギャップを考慮してまず気象研究所が開発を継続している領域化学輸送モデル (NHM-Chem) への導入を実施した。提供を受けたレキ被覆率とレキを考慮した黄砂発生過程をNHM-Chemの黄砂放出過程に組み込み、空間解像度を1kmと9km、レキ被覆率の効果を調整した実験を行った。日中韓黄砂共同研究第一作業部会に参画している中国環境保護局より提供を受けたPM10濃度データや中国、モンゴルの気象機関が実施している地上気象観測や衛星観測 (ひまわり8号) との比較検証を行った結果、空間解像度1kmのモデルでレキ被覆率を考慮したモデルの結果が最も各種観測データの再現性が高くなった。このことにより、世界で初めて現実のレキ被覆率データをモデルに組み込むことの有効性を示すことができた。一方、このプロセスを用いた黄砂発生量はモデルの空間解像度大きく依存することも分かった。今後、全球モデル (水平解像度数十km~百km) にこの過程を組み込むためには、パラメタリゼーション等の調整が必要なことも示唆している。今後は、地球システムモデルの空間解像度を上げ、より適切な地表面状態を導入した実験を行うと共に、他のモデル結果も用いた解析や黄砂の変動が気候変動に与える効果等を評価していくことが重要である。

1. 研究開発目的

近年、2015年に採択されたパリ協定などを受けて世界各国で地球温暖化を抑止する取り組みが行われているが、その成否は不明である。地球温暖化にエアロゾルが及ぼす影響は2021年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書においても温室効果ガスと比較して不確かさが大きく、まだ十分理解されているとはいえない。今後は環境対策の進展などにより人為起源エアロゾルの排出量は減少に向かうと推定されているが、地球温暖化に伴い黄砂を始めとする自然起源エアロゾルの放出量がどのように変化するかは未だに分かっておらず、今後の重要な研究課題である。本研究では今後予想される気候変動に伴い、東アジア域の黄砂が長期的にどのような様に変化するか、その要因や下流域大気環境に与える影響について地球システムモデルを用いた推定及び評価を行う。この推定や評価の際には、複数の温暖化シナリオや初期値を用いて統計的な有意性を加味しつつ黄砂発生に関わるメカニズムや関連の深い要素等に注目した解析を行う。検証に必要な観測データやモデルの改良や評価等に必要な地表面関連データは他のサブテーマから提供を受ける。

2. 研究目標

全球エアロゾルモデルを用いた過去実験等によりモデルの特性を把握する。他のサブテーマと協力しつつ全球エアロゾルモデルの改良を進める。黄砂の季節内予測実験および複数シナリオによる将来予測実験を実施する。これらの結果より、黄砂の発生量、輸送経路、黄砂発生源における気象条件の変化を取り纏めると共に黄砂の季節予測の可能性を評価する。改良されたモデルを気象庁の黄砂予測業務に反映させる作業を進める。

3. 研究開発内容

気象研究所では、気候変動予測等を目的として地球システムモデル（MRI-ESM2、Yukimoto et al., 2019¹⁾）の開発を行ってきた。MRI-ESM2は地球システムを構築する大気、海洋、陸面、河川、エアロゾル、大気化学等の各モデルがカップラーを経由して情報のやり取りを行うモデルである（図-2.1）。MRI-ESM2において本課題で重要な位置を占める全球エアロゾルモデル（MASINGAR mk-2、Tanaka and Chiba, 2005²⁾）は気象研が長年改良を重ねてきたモデルであり、2004年より気象庁の黄砂予測情報提供業務において利用されるなど実績には定評がある。このモデルは、第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）に参加している多くのモデルの

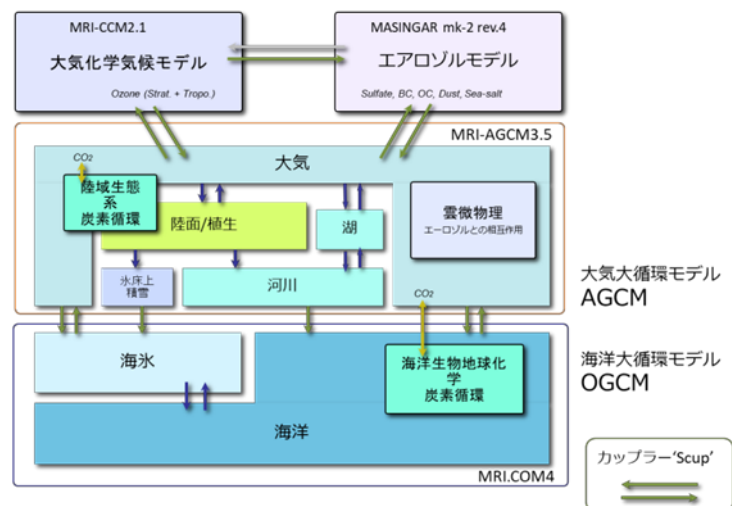


図-2.1：気象研究所地球システムモデルの概要

中でも歴史実験等における気温の再現性がトップクラスであり、放射収支等の取り扱いに優れたモデルである（行本、2022³⁾）。このモデルを用いた全球および北極域における人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力の推定（Oshima et al., 2020⁴⁾）など、優れた研究成果が多数発表されている。

MASINGAR mk-2は主要なエアロゾル（ダスト（黄砂）、海塩、硫酸塩、有機炭素等）に関して外部混合を仮定し、ダストと海塩に関しては粒径毎にそれぞれ10個のビンに分割して扱い、結合される大気モデルや陸面モデルの各種パラメータの状況に応じて発生量が算出される。エアロゾルの輸送は大気モ

デルによる移流・拡散過程（乱流・積雲）が取り扱われ、沈着過程では湿性沈着と乾性沈着が取り扱われる。

本課題では、CMIP6実験に独自の過去再現実験の結果を加えた解析を実施した。CMIP6実験に関しては、歴史実験を1850年から2014年末まで5つのメンバーで実施した。将来予測実験に関しては、SSPシナリオに沿って5つの温暖化シナリオ（SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5）の計算を行った（図-2.2）。ちなみに、この5つのシナリオにおける地上全球平均気温の2081~2100年平均と1995~2014年平均との差はそれぞれ95%信頼区間で0.13℃-1.25℃、0.40℃-2.05℃、1.27℃-3.00℃、1.95℃-4.38℃、and 2.40℃-5.57℃である。これらの5つのシナリオに関して歴史実験におけるアンサンブルを引き継ぐ形で5つのアンサンブル実験を行った。このことにより、統計的有意性を加味した解析を実施することが可能となった。しかしながら、これらのCMIP6関連実験では、気象場に関して観測データの同化は行われなため、サブテーマ1や3が実施する各種観測データと定量的な比較することは難しい。そこで本課題独自の実験としてMRI-ESM2に気象庁が作成した再解析気象データ（JRA-55）をナッジングした実験を1970年から2019年末まで別途実施した。加えて、極軌道衛星（MODIS、GCOM-C）から得られる観測データをデータ同化するシステムを試験的に運用中であり、計算結果はJAXAのひまわりモニタ、国際的な相互比較プロジェクト（ICAP、VFSP-WAS）に準リアルタイム提供中である。

CMIP6関連実験におけるMRI-ESM2の解像度は大気がTL159（120km相当）、MASINGAR mk-2がTL95（180km相当）で、データ同化実験はTL479（40km相当）である。本課題ではまずゴビ砂漠（東経90°~110°、北緯35°~45°）における黄砂発生量の変化に着目した。モデルとの定量的な比較としてサブテーマ1において実施しているライダー観測のうち、モンゴルのゴビ砂漠にある2地点

（Sainshand、Zamynnuud）の観測データの提供を受け、ライダー観測によるダスト

消散係数とMRI-ESM2が計算したエアロゾル消散係数を比較した。ライダー観測データにおける観測の下限は約300mであるため、モデルも地表から約300mの地点を抽出して比較した。気象場はナッジングしているものの、モデルにはバイアス等が存在するため両者の絶対値に加えてトレンドや季節変動に着目した解析を行った。比較期間は2007年から2019年である。後述するように、過去再現実験の結果、モデルは黄砂の発生量を過大評価する傾向はあったものの、2000年代におけるゴビ砂漠付近における黄砂の減少傾向や黄砂発生量の季節変化傾向を再現することができていたため、将来予測実験においても黄砂発生量や濃度の定量的な値ではなく変化傾向やその要因分析に利用できるものと判断した。

CMIP6実験に関しては、歴史実験、将来予測実験に関して日本で観測される黄砂の主要な供給源であるゴビ砂漠に着目して発生量のトレンドや発生量との関係が深いと思われる量（摩擦速度、積雪量、土壌水分、地中温度、植生指数等）との相関関係を解析した。また、黄砂輸送の指標として発生源であるゴビ砂漠付近と日本周辺における黄砂の濃度比と黄砂の質量輸送フラックスに着目し、月毎、温暖化シナリオ・アンサンブルメンバー毎にこの濃度比がどのように変化するかを調査した。また、日本付近に至る黄砂の輸送経路の変化を確認するために、ゴビ砂漠付近と日本付近での月平均黄砂濃度やその比が温暖化に伴いどのように変化するかを調べた（Maki et al., 2022⁵）。

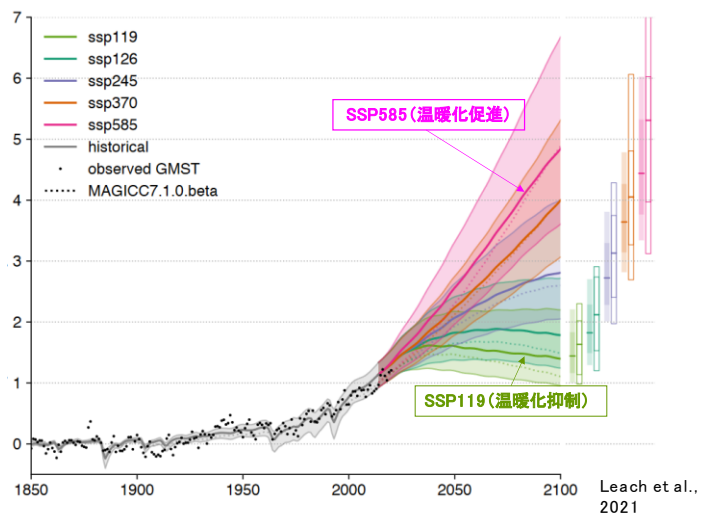


図-2.2：歴史実験と将来予測実験における地上気温変

テーマ間連携の一環として、サブテーマ3よりゴビ砂漠周辺における礫被覆率に関するデータを受領した(図-2.3)。また、併せて、レキ被覆による黄砂放出過程に関するサブモデル(Buyantogtokh et al., 2021⁶⁾)の提供も受けた。これらのデータやサブモデルは想定しているモデルの空間解像度が数kmであり、現在将来予測実験に用いている全球エアロゾルモデルの空間解像度(180km)とのギャップが非常に大きく、そのまま全球モデルに導入することは非常に困難であった。このため、この空間解像度がそれほど変わらない領域化学輸送モデルにこれを導入してインパクト等を調べることにした。気象研究所では、大気汚染気象業務等で活用するために領域化学輸送モデル(NHM-Chem; Kajino et al., 2021⁷⁾)の開発を継続してきた。このモデルは、目的に応じてエアロゾル等の諸過程を3つの複雑さでシミュレートすることができ(図-2.4)、エアロゾルと雲・降水の相互作用等も取り扱えるコミュニティモデルである。今回はNHM-Chemの黄砂発生過程にレキ被覆率データとレキ被覆による黄砂発生サブモデルを組み込んだ(NHM-Chem-DUST)。この際に、NHM-Chem-DUSTの空間解像度を9kmと1km、礫被覆率を考慮しない実験、一律30%とした実験、サブテーマ3より提供を受けたデータを用いた実験等を行い、礫被覆率の取り扱いやモデルの空間解像度が黄砂の再現性に与える影響等を評価した。NHM-Chem-DUSTの結果は、日中韓黄砂共同研究第一作業部会に参画している中国環境保護局より提供を受けたPM10濃度観測データ、中国・モンゴルが世界気象機関の元で行っている地上気象観測、衛星観測(ひまわり8号)による黄砂分布により定量的、定性的な比較検証を実施した(Sekiyama et al., 2023⁸⁾)。

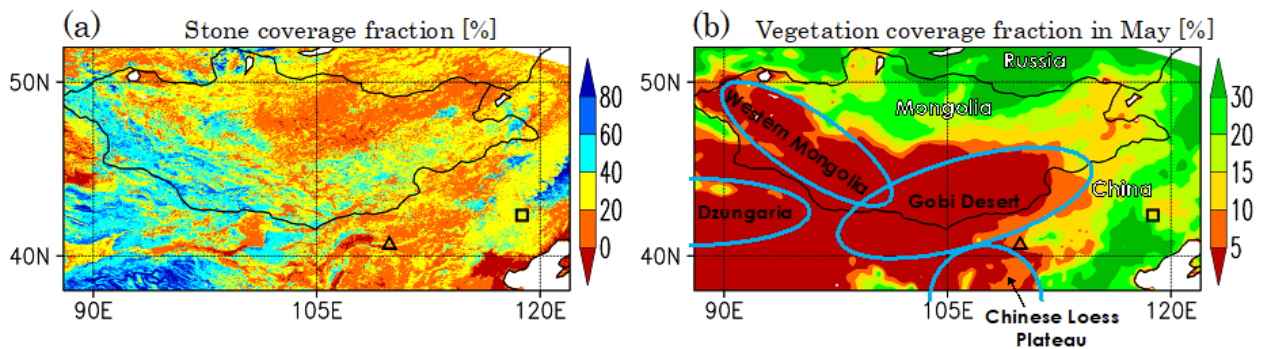


図-2.3 : ゴビ砂漠周辺における礫被覆率(左)と植生被覆率(右)

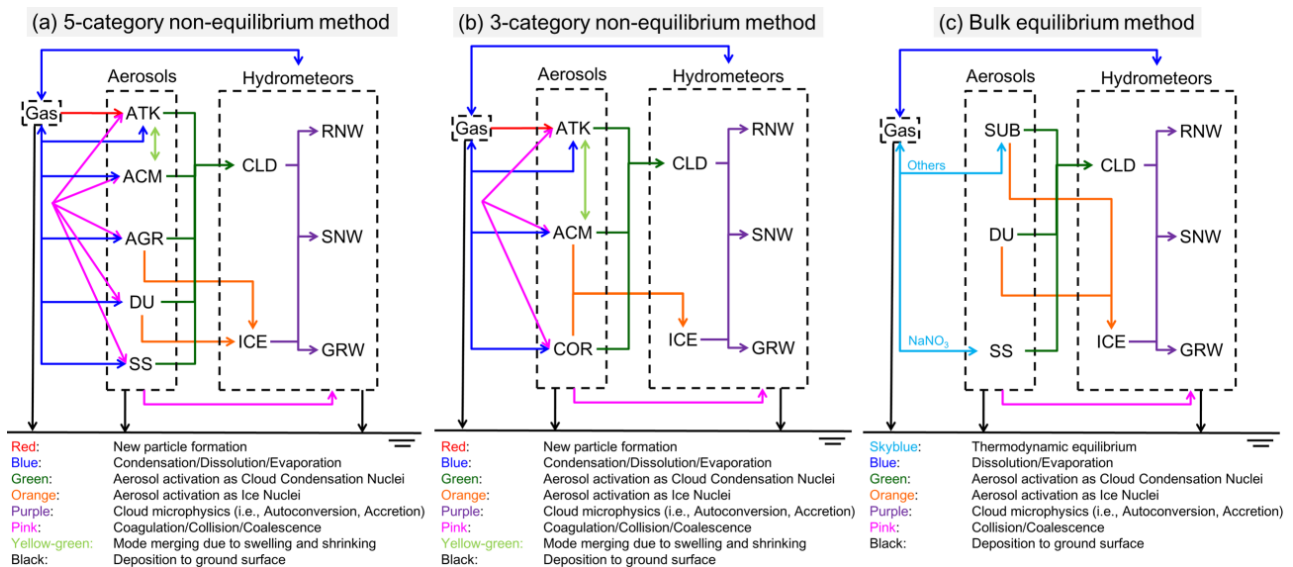


図-2.4 : 領域化学輸送モデル(NHM-Chem)の概念図(Kajino et al., 2021)

4. 結果及び考察

図-2.5にライダー観測データと気象場のナッジングを行ったMASINGAR mk-2による月平均消散係数の比較図を示す。両地点とも観測されたピークとモデルのピークは定性的によく一致している。絶対値としては、モデルの方が過大評価傾向を示しているが、これはMASINGAR mk-2が比較的黄砂を過大評価する傾向を示すことと対応している。この主な要因としては、モデルの空間解像度が粗く（180km相当）、ライダー観測が捉えている現象との空間代表性が異なることも要因の一つ

として考えられる。一方で、2地点における消散係数のトレンドはライダー観測がSainshand、Zamynnuudでそれぞれ -1.4×10^{-6} 、 -3.2×10^{-7} であり、モデルがそれぞれ -1.1×10^{-6} 、 -1.7×10^{-6} と共に減少傾向を示している。これを年間の増加率に直すとライダー観測がそれぞれ $-2.0\%/年$ 、 $-0.8\%/年$ であるのに対してモデルはそれぞれ $-1.9\%/年$ 、 $-1.7\%/年$ とよく一致している。このモデルはゴビ砂漠における黄砂発生傾向を概ね捉えているものと考えられる。また、黄砂濃度の平均的な季節変化に関する比較も実施したが（図略）、一部モデルの粗い解像度に起因する夏季のモデル過大評価傾向が見られたものの、他の季節に関しては観測から得られた季節変化を概ね再現することができた。これらの結果より、MASINGAR mk-2の基本的な性能を確認し、過去の黄砂の発生量変化傾向や季節変化等を再現できていることから、このモデルを用いて地球温暖化時の黄砂発生量の傾向を評価することができることが分かった。

図-2.6は、歴史実験と過去再現実験によるゴビ砂漠における黄砂発生量変化傾向を月別に纏めたものである。歴史実験は5つのアンサンブルメンバーの結果があるが、メンバー間のばらつきは大きい。また、黄砂の発生量が多くなる暖候期に関しては黄砂の発生量が減少傾向を示すことが多く、年間を通して見ると微減傾向である。黄砂発生量のトレンドはライダーと比較すると小さいが、これは解析期間が異なるためであると考えられる。

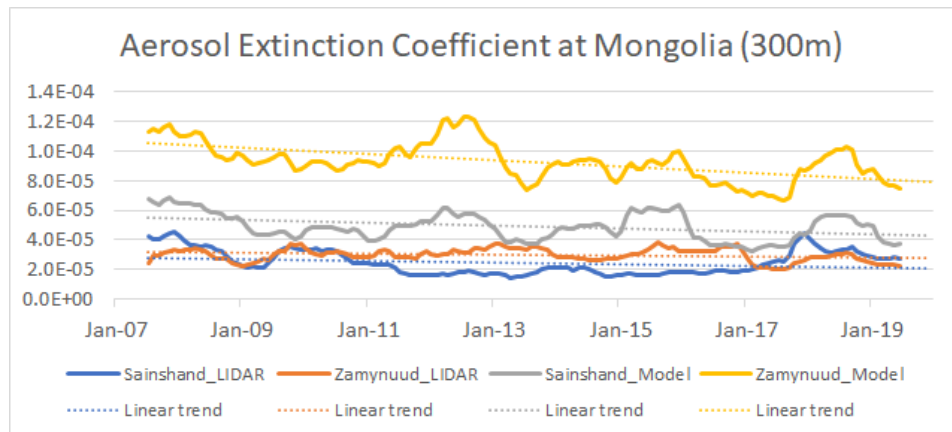


図-2.5：ライダー観測とモデル過去実験の比較（2007～2019年）

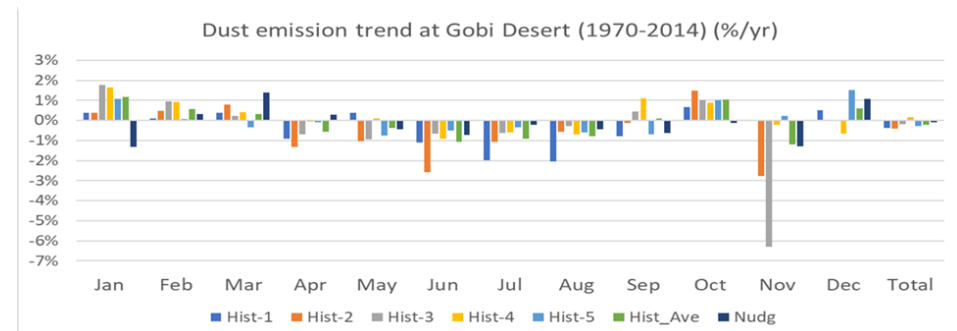


図-2.6：ゴビ砂漠の黄砂発生量増加率（1970～2014年）

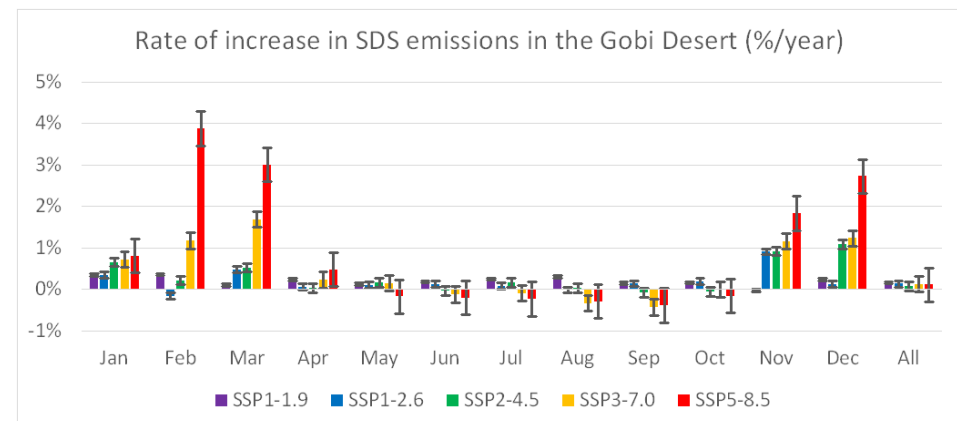


図-2.7：ゴビ砂漠の黄砂発生量増加率（2015～2100年）

次に、黄砂発生量変化の要因を確かめるためにゴビ砂漠における月毎の黄砂発生量とそれに関連が深いと考えられる量の相関関係調べた（表略）。年間を通じて摩擦風速との相関が最も高く、黄砂発生量の相関が高いと想定していた積雪量に関しては、春季において若干

表-2.1： SSP5-8.5シナリオにおける黄砂発生量と各要素の相関関係

SSP5-8.5	Snow equivalent water	Erodibility	Leaf area index	Soil temperature	Friction velocity	Soil moisture	Roughness length
Jan	-0.30	0.28	0.21	0.21	0.57	-0.18	0.27
Feb	-0.34	0.34	0.27	0.48	0.44	-0.08	0.35
Mar	-0.39	0.37	0.53	0.64	0.59	-0.14	0.50
Apr	-0.24	0.26	0.28	0.15	0.79	-0.26	0.27
May	-0.10	0.09	0.04	-0.21	0.84	-0.32	0.09
Jun	0.02	0.02	-0.04	-0.27	0.74	-0.21	0.01
Jul	0.11	-0.02	0.01	-0.20	0.69	-0.20	-0.11
Aug	0.10	-0.06	-0.05	-0.20	0.69	-0.19	-0.09
Sep	0.00	0.08	-0.05	-0.23	0.65	-0.18	0.01
Oct	-0.05	0.02	0.09	-0.18	0.71	-0.10	0.11
Nov	-0.38	0.28	0.35	0.40	0.55	-0.22	0.40
Dec	-0.31	0.29	0.19	0.37	0.46	-0.08	0.28
All	-0.29	0.51	-0.11	0.32	0.68	-0.01	-0.28

の負相関（積雪量が増えると黄砂発生量が減る）が、地中温度と若干の正相関が見られた。土壌水分は当初想定していたほどの相関関係は見られなかった。2021年は久しぶりに春先に黄砂が多く日本で観測されたが、この年のゴビ砂漠における積雪量の少なさと関連があるものとみられる。次に将来予測実験の結果を示す。ゴビ砂漠周辺（東経90～110°、北緯35～45°）における黄砂の発生量変化傾向を月ごとにアンサンブル平均を取ったものが図-2.7である。図-2.7を見ると、ゴビ砂漠周辺における年間の総黄砂発生量（右端）は全ての温暖化シナリオにおいて現状と大きな変化は見られない。一方、季節毎に見ると早春（2～3月）と晩秋（11～12月）に関しては、地球温暖化の進展に伴い、この地域における黄砂の発生量が大きく増加するという興味深い結果が得られた。一方で暖候期においては、温暖化が進むシナリオでゴビ砂漠周辺の黄砂発生量がやや減少する傾向が見られた。このため、年間総発生量には大きな変化が見えなかったものと考えられる。ゴビ砂漠における黄砂発生量変化の要因を確かめるためにゴビ砂漠における月毎の黄砂発生量とそれに関連が深いと考えられる量の相関係数を表1に示す。表1の内、太

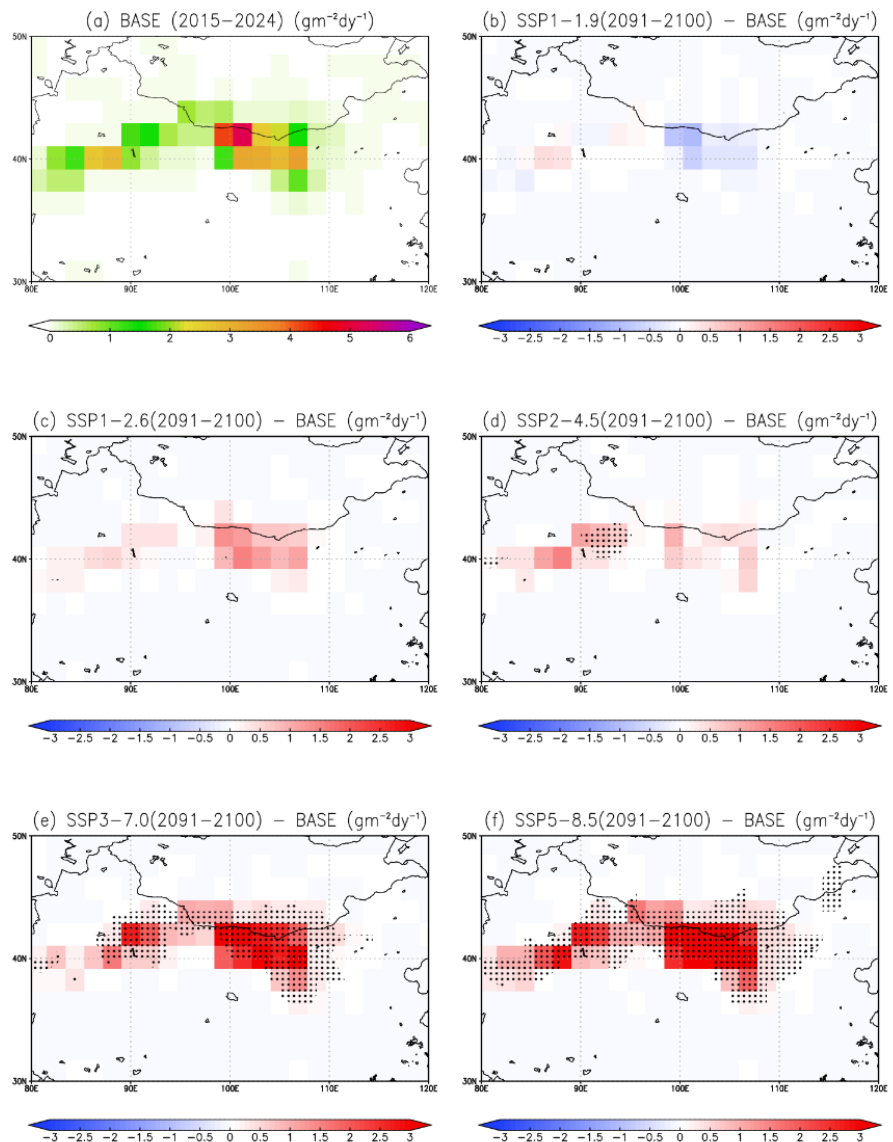


図-2.8：ゴビ砂漠の黄砂発生量（基準年（2015～2024年；左上）と2090年代と基準年の差）

字は統計検定の結果、相関が有意であることを示している。表-2.1を見ると、年間を通じて摩擦風速

(Friction velocity) と黄砂発生量の相関が最も高く、年間平均では0.68と高い相関を示している。ただ、早春や晩秋においてやや相関係数が低い季節が見られる。積雪量に関しては、摩擦風速との相関がやや低い早春と晩秋において若干の負相関（積雪量が増えると黄砂発生量が減る）が、地中温度と若干の正相関が見られる。これは地中温度が高くなると積雪量が少なくなることを示唆している。土壌水分は当初想定していたほどの相関関係は見られなかった。表1はSSP5-8.5シナリオのみの結果を示したが、他のシナリオでも同様の結果であった（表略）。次に、将来予測実験における黄砂発生量変化の空間分布を示す。図-2.8に黄砂の総発生量が大きくかつ温暖化による黄砂発生量増加傾向が比較的大きかった3月について、ゴビ砂漠付近での

基準年（2015～2024年）の黄砂発生量（図-2.5左上）と、各温暖化シナリオにおける2090年代と基準年の黄砂発生量変化の空間分布を示す。温暖化が余り進展しないシナリオ（SSP1-1.9など）では基準年との差は小さく、統計的に有意な領域も見られなかったが、温暖化が促進するシナリオ（SSP3-7.0、SSP5-8.5）では、有意にゴビ砂漠の主要な放流域において黄砂発生量が有意に増加することが分かった。このことは、表-2.1の相関係数が示すとおり摩擦速度の増加（図略）、温暖化の進展に基づく地中温度の上昇に起因する積雪量の減少（図略）がその要因となっていることが推測できる。これらの結果として、地球温暖化が進むシナリオにおいては、黄砂濃度が大きく変化する早春と晩秋においてPM2.5濃度も大きく変化する。図-2.9は3月におけるPM2.5濃度の基準年と各温暖化シナリオにおける2090年代と基準年との差を示す。各温暖化シナリオでは人為起源エアロゾルの排出量は基準年と比較して概ね減少する傾向にある。このため、温暖化が余り進展しないシナリオ（SSP1-1.9、SSP1-2.6）においては、PM2.5濃度も東アジアの多くの領域で減少傾向を示す。しかし、主に黄砂濃度の大幅な増加（図略）により、特に温暖化が進展するシナリオ（SSP3-7.0やSSP5-8.5）においてPM2.5濃度が基準年と比較して発生源近傍で特に大きく増加することが分かった。この影響は下流域の日本にも及んでおり、温暖化が促進するシナリオにおいては黄砂発生量の増加により環境基準の達成状況にも影響

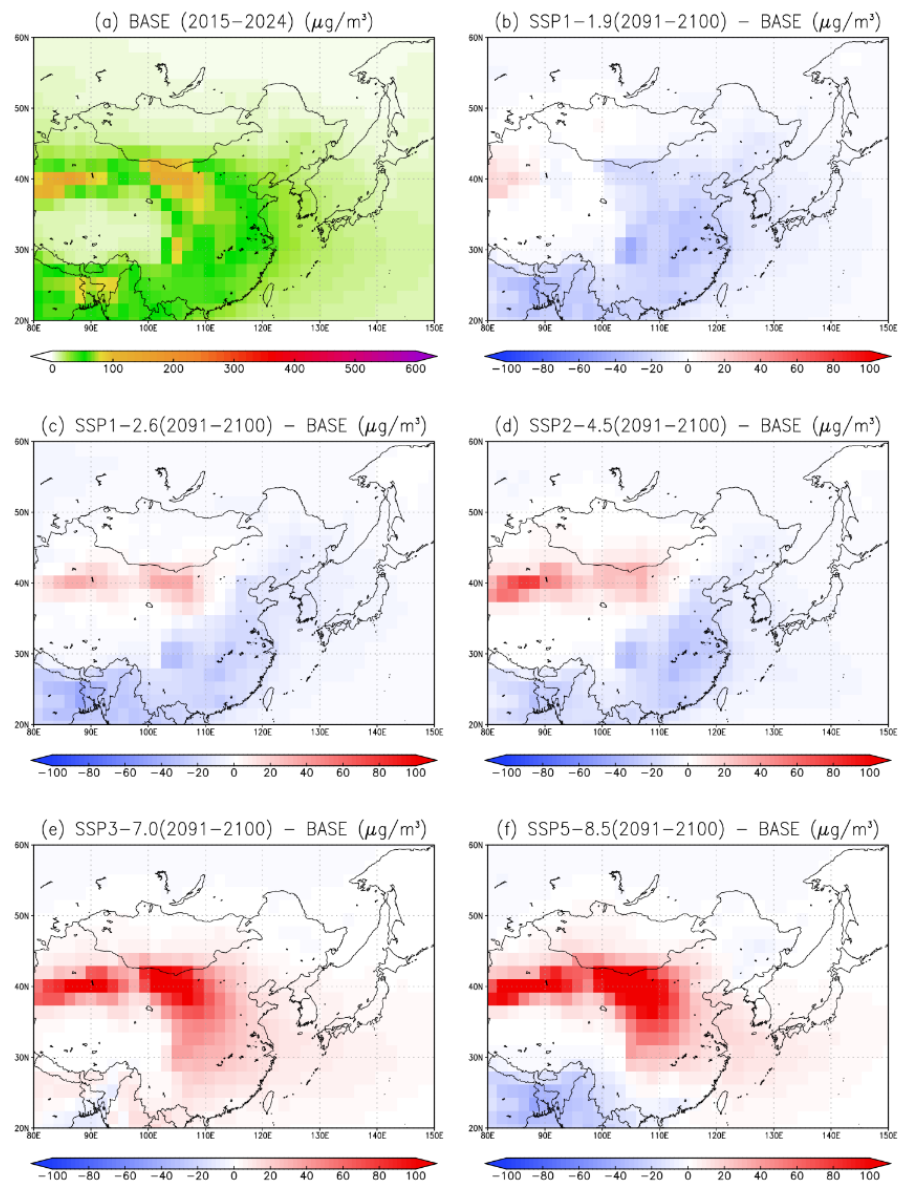


図-2.9：PM2.5濃度分布（基準年（2015～2024年；左上）と2090年代と基準年の差）

することが示唆された。このことに影響していると考えられるのが黄砂輸送量の変化である。温暖化により特にゴビ砂漠付近の黄砂発生量が増加すると見られる早春や晩秋は移動する低気圧システムにより物質がより効率的に遠方に輸送されやすい季節である。そこで、ゴビ砂漠における黄砂が概ね放出された後と考えられる東経120°などの断面を通り東向きに輸送される黄砂量を調べてみた(図-2.10)。その結果、3月の黄砂の東向き質量フラックスが地球温暖化の進展に伴いこの季節の北緯30~40°付近の特に対流圏下層(800hPa~900hPa)付近で大きく増加することが分かった。SSP5-8.5シナリオでは、この黄砂輸送の増加のピークが基準年と比較してやや北偏している。これらの結果より、黄砂は温暖化の進展によってより遠方に輸送されることを示唆しており、気候変動による黄砂の変動のみならず黄砂による気候変動への影響や、社会や生態系などに与える影響も今後着目していく必要性を示していると言える。

次に、NHM-Chem-DUSTを用いた結果を示す。図-2.11は日中韓黄砂共同研究第一作業部会に参画している中国環境保護局より提供を受けた中国内

モンゴル自治区の2地点におけるPM10観測値

とモデルシミュレーションの結果を示す。礫被覆率を考慮しない(SC00)と、黄砂濃度が観測値と比較して非常に大きく計算されている。一方、礫被覆率を30%に固定すると観測された濃度より著しく過

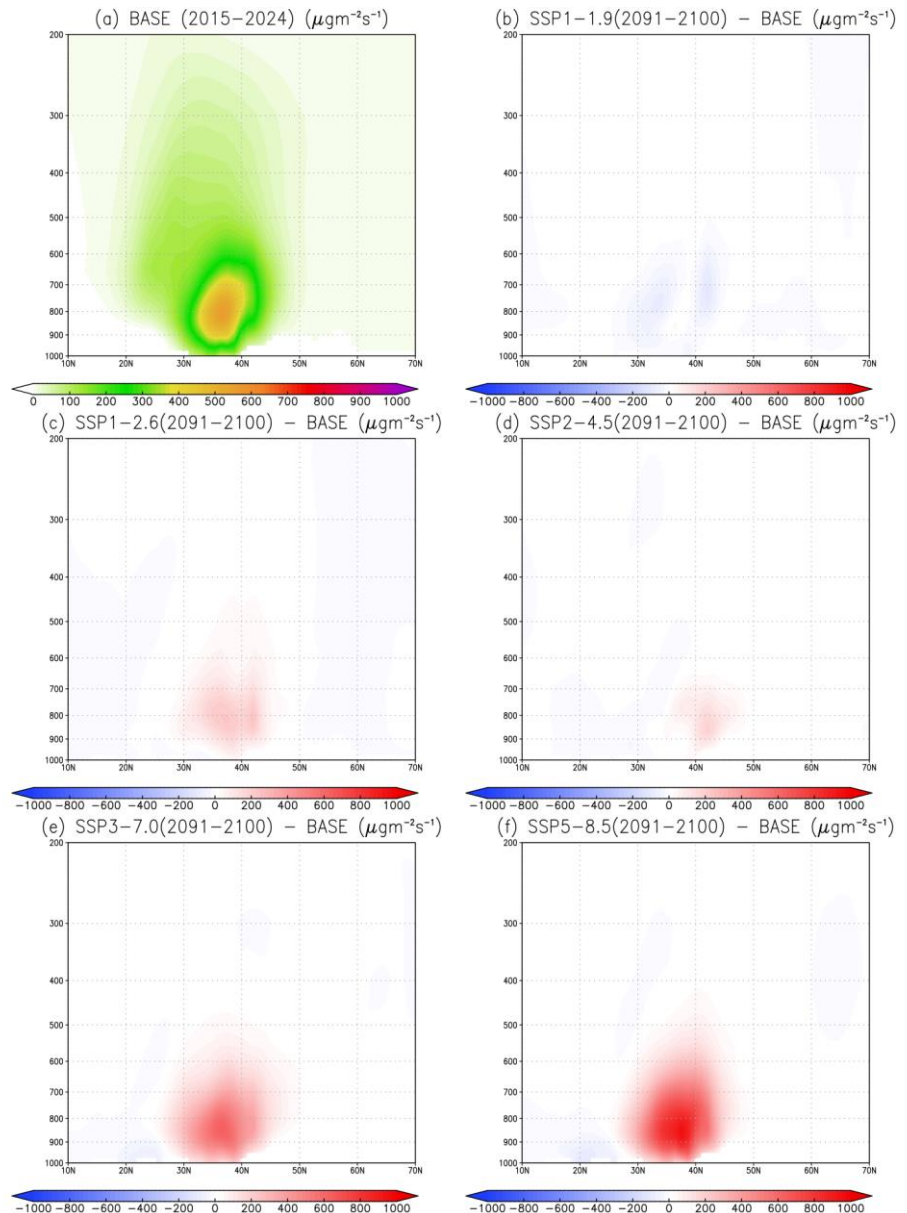


図-2.10：黄砂の質量輸送フラックス（基準年（2015~2024年；左上）と2090年代と基準年の差）

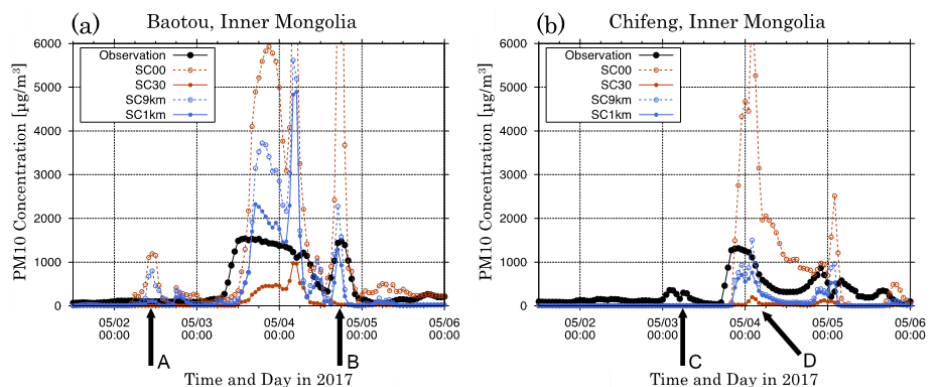


図-2.11：領域化学輸送モデルと観測値の比較（PM10濃度）

小評価となる。適切な礫被覆率を与える (SC1km) ことにより、比較的観測値をよく再現できていることが分かる。この際、モデル解像度を粗くすると (SC9km)、モデルシミュレーションの結果がやや過大となる。このことから、黄砂発生過程においては礫被覆率を適切に取り扱う必要があることやモデルの空間解像度によるパラメータ調整の重要性が分かった。次に、モデル計算結果の空間分布を調べたのが図-2.12である。(a)～(g)は 2017年5月3日 09:00UTCのモデル計算による地表面ダスト濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$) とWMOの地上気象観測による黄砂有りの観測報告 (カテゴリー1、2、3、4、5の青丸) を示す。灰色の丸は、黄砂イベント以外を報告した観測所を示す。左段は各実験におけるモデルオリジナル結果を示し、右段は、放出されたダストの総量が実験SC1kmと同じになるように調整した濃度を示す。(h)は 同時刻のひまわり8号の衛星観測によるAOTと寒冷前線のおおよその位置が描かれている。どの計算結果も概ね黄砂観測によく対応しているが、SC1kmが尤もよく地上気象観測による黄砂分布との対応がよいことを示している。他の実験も、総発生量を調整することによって、地上気象観測による黄砂分布との対応が改善することが分かった。このように、黄砂の発生量は地表面状態に非常に敏感であり、今後これらのデータセットの精緻化等が望まれる。今回は先に述べた解像度の違いから領域化学輸送モデルを用いた開発を行ったが、一般により粗い空間解像度を持つ全球モデルに適用する際のパラメタリゼーション手法を検討していく必要があるものと考えられる。

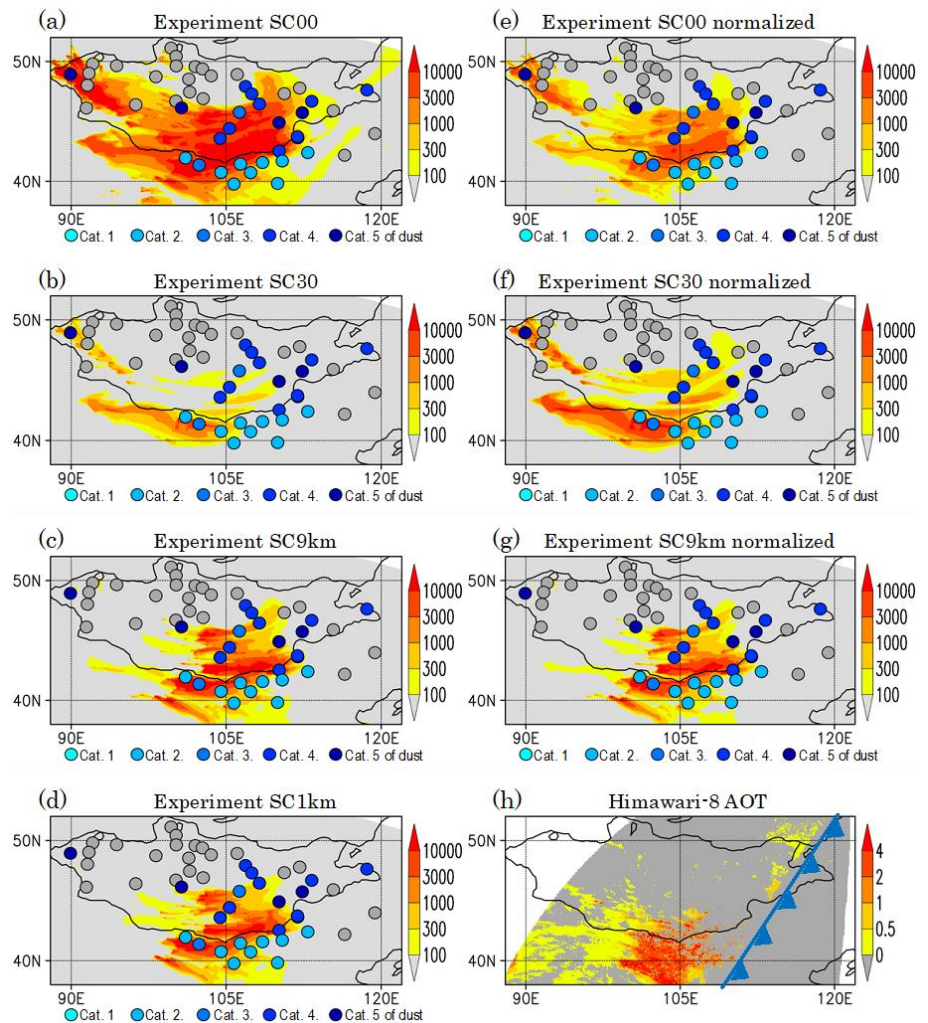


図-2.12：領域化学輸送モデルと衛星観測（右下）、地上気象観測による黄砂（水色～青色）の分布

5. 研究目標の達成状況

○計画の進捗状況

計画通りの成果を挙げたことに加えて、一部では計画以上の進捗が見られた。当初の目標通り、全球エアロゾルモデルを用いて過去再現実験や歴史実験を実施し、サブテーマ1より提供を受けた観測データとの比較検証を行いつつ黄砂の発生量等の年々変動を求めることができ、モデルが黄砂発生量の課題傾向はあるものの、黄砂発生量の変化傾向や季節変化等を再現できていることが確認できた。また、黄砂の発生量と関連の深い地表付近のパラメータに関する知見を得ることもできた。将来予測実験に関しても主要な5つのシナリオ全てについて5メンバーアンサンブル実験を行った結果、統計的有意性も加味した要因に関する解析を行うことができた。将来予測実験の結果、温暖化の進展により黄砂の総発生量そのものは現在と大きく変化しないものの、早春や晩秋においては地球温暖化による積雪量の減少と地表付近の風速の増大により黄砂の発生量が大きく増加するという興味深い結果を得ることができた。このことにより黄砂の定性的な季節予測の可能性を確認することができた。加えて、地球システムモデルや全球エアロゾルモデルの評価論文を多数公表することができ、計画以上の進捗があった。これらモデルデータはサブテーマ1、3に提供済である。また、サブテーマ3より地表面状態に関するデータの提供を受け、水平解像度のギャップを考慮して領域化学輸送モデルに組み込み、世界で初めてレキ効果を考慮することで黄砂の再現性が向上することを示しつつレキ被覆の取り扱いの重要性等を確認できた。また、データ同化実験に関しても極軌道衛星 (MODIS) や静止気象衛星 (ひまわり8号、9号) から得られるエアロゾル光学的厚さ観測データを同化するシステムを試験運用中であり、結果は様々な国際相互比較計画 (ICAP、VFSP-WAS) や宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に提供している。

6. 引用文献

- 1) Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97.
- 2) Tanaka, T. Y., and M. Chiba, 2005: Global Simulation of Dust Aerosol with a Chemical Transport Model, *MASINGAR. J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 83A, 255-278.
- 3) 行本誠史、2022 : 気象研究所における気候モデルの歩み、*天気*、6、299-317.
- 4) Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, 2020: Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 38.
- 5) Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2. 0. *SOLA*, 18, 218-224.
- 6) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, B. Gantsetseg, A. Davaadorj, M. Ishizuka, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka and T. Maki, 2021: Effect of stones on the sand saltation threshold during natural sand and dust storms in a stony desert in Tsogt-Ovoo in the Gobi Desert, Mongolia. *J. Arid Land* 13, 653-673.
- 7) Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geoscientific Model Development*, 14, 2235-2264.

- 8) Sekiyama, T. T., Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, 2023: Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 128, e2022JD037295.

II-3 乾燥域地表面・植生状況の変動把握および飛砂との関連性の解明

東京大学大学院農学生命科学研究科
鳥取大学乾燥地研究センター

大黒 俊哉
黒崎 泰典

〔要旨〕

ダスト数値モデルの精度向上を実現するため、現地観測データを用いてレキ、枯れ草等の飛砂発生への影響を解明するとともに、それらの面的広がりを推定する手法を開発した。レキについては、現地観測のレキ被覆率とSoilGridsレキ体積比率データには高い相関があることを明らかにしたうえで、得られた関係式からレキ体積比率をレキ被覆率に変換することで広域レキ被覆率データを作成する手法を開発した。これらの結果はサブテーマ2に提供され、レキ被覆率データをモデルに組み込むことの有効性が確認された。枯れ草については、MODIS衛星データで得られる複数の枯れ草指数と枯れ草被覆率の関係から、STI(土壌耕起指数)が枯れ草推定に有効であることを明らかにしたうえで、STIを用いた広域枯れ草被覆率データを作成する方法を開発した。衛星データの異常値処理アルゴリズムが未完成のため、枯れ草効果の広域データのサブテーマ2への提供には至らなかったものの、気象台データとSTIを用いた解析を行った結果、枯れ草効果の組み込みがモデル精度を向上させること示唆する結果が得られた。また、レキや枯れ草、クラスト等複数の粗度物質が混在している状態での臨界摩擦速度 (u_{*t}) の妥当性を評価するため、粗度に感度のある合成開口レーダー(SAR)の後方散乱強度と u_{*t} との関係を解析した。その結果、SAR強度の時間・空間変化が現地の土壌・地表面の変化に対応していることが確認され、SAR強度による臨界摩擦速度推定の有効性が示唆された。サブテーマ1における大気中の黄砂(微粒子)と地表面付近の飛砂との関連を明らかにするため、ライダー観測から得られるダスト消散係数と、枯れ草効果なし/ありの2つ飛砂指数の比較を行ったが、両者の間に強い相関は認められなかった。その原因を調べるため、気象台で黄砂発生が観測されたときのみを解析対象としたところ、ザミンウドの3月においては相関が増加し、枯れ草効果も確認された。

また、ダスト発生に対する植生の空間分布の影響を検証し、またその知見にもとづき土地管理およびダスト発生の予測に適用可能な植生の空間分布を表す指標を開発した。まず、優占種である灌木の空間分布を調査するとともに、飛砂・気象観測を行い、両者の関係を解析した。その結果、飛砂量と植被率の関係は空間分布の影響を受け、灌木間距離が大きく不均質な植生では、飛砂抑制に必要な植被率の閾値が均質な分布に比べ大きくなり、より多くの飛砂が発生するリスクが高いことが明らかになった。つぎに、植被率および灌木の空間分布が異なる複数のサイトにおいて、植生調査および飛砂・気象観測を行うとともに、空間分布を考慮した新規指標を開発し、空間分布を考慮しない既存指標と飛砂量の推定精度を比較した。その結果、既存指標は一定の説明力を有するものの、飛砂量の程度や観測スケールによる影響が大きく、頑健性は高くないことが示された。これに対し、植被率、高さ、空間分布の3つの植生要素をすべて加味した新規指標Height Area Effect (HAE)は総合的に飛砂を最もよく説明し、飛砂発生の閾値推定に有効であること、より簡便な新規指標Total Height (TH)は、少量～多量の様々な飛砂イベントをバランス良く指標し、かつ容易に測定が可能であることから、放牧地管理および植生管理の目標策定に有用な指標であることがそれぞれ示された。

1. 研究開発目的

ダスト数値モデルの精度を向上させるためには、地表面での飛砂発生の予測精度を向上させる必要がある。しかし、レキや枯れ草等のモニタリング困難な土壌・地表面パラメータが存在するため、ダスト数値モデルの精度向上を妨げている。レキについては、ISRIC(世界土壌センター)からSoilGridsレキ体積比率データが公開されているが、これを直接ダストモデルに応用することはできない。植物については、緑色の(光合成が活発な)植生量はNDVI(正規化植生指数)で推定できるが、黄砂発生時の枯れ草の推定は困難である。枯れ草指標としてSTI(土壌耕起指数)が有効であるという報告があるが、検証

が不十分である。一方、植生存在下におけるダスト発生過程の解明においてはこれまで、空間的に均質な植生分布を仮定しており、不均質な分布を特徴とする乾燥地においては風食量の過小評価につながる指摘されている。近年、空間的な不均質性を考慮した数値モデルが提案されているが、実際の飛砂量と植生の空間分布の関係を検証した研究はほとんどない。

そこで本課題では、ダスト数値モデルの精度向上を実現するため、レキ、枯れ草等の飛砂発生への影響を解明するとともにそれらの面的広がりを推定し、これらの成果をサブテーマ2に提供すること、サブテーマ1における大気中の黄砂（微粒子）と地表面付近の飛砂との関連を明らかにするための両データの比較を行うことを目的とする。さらに、飛砂発生に対する植生の空間分布の影響を検証し、またその知見にもとづき土地管理およびダスト発生の予測に適用可能な植生の空間分布を表す指標を開発することを目的とする。

2. 研究目標

発生源域の地表面情報および飛砂発生の実態を野外観測・実験により解明し、地表面変動に関わるパラメータを6つ以上取得したうえで、数値モデルの精度向上に資する指標を3つ以上設定し、サブテーマ2に提供する。発生源の生態系保全に必要な植生・土地利用等の地表面条件を提案する。

3. 研究開発内容

(1) ダスト数値モデル精度向上に向けた地表面パラメータの取得と指標の設定

ダスト（黄砂）の発生は飛砂（水平方向の砂粒の跳躍運動）の地表面への衝突によって引き起こされる。このため、ダスト数値モデルの精度を向上させるためには飛砂の予測精度を向上させなければならない。飛砂の発生は、風の飛砂を引き起こす能力（侵食能）と土壌・地表面の飛砂の発生しやすさ（受食性）のバランスで決まる。侵食能は摩擦速度（ u_* 、乱流を考慮した風速）で表現できるが、単純化して風速（ u ）で表現することもある。受食性は土壌粒径、土壌水分、レキ分布、植生分布、土壌クラストなど様々な土壌・地表面要素で決定し、臨界摩擦速度（ u_{*c} 、飛砂が開始する摩擦速度）で表現できる。臨界摩擦速度より大きい摩擦速度の風が吹いたとき飛砂が発生する。

日本に飛来する黄砂の最大の発生源はゴビ砂漠である。中国語でゴビはレキ砂漠を意味するとおり、ゴビ砂漠の特徴の一つはレキ砂漠が多いことである。しかしながら、レキの飛砂発生への影響（レキ効果）を導入したダストモデルは存在しない。植生の飛砂発生への影響も大きい。しかしながら、衛星による夏季の植生（光合成をする植生）の観測事例はたくさん存在するが、黄砂発生シーズンの植生（枯れ草）を衛星観測で定量化を試みた研究はわずかであるため、枯れ草の飛砂発生への影響（枯れ草効果）を導入したダストモデルも存在しない。

本課題では、ダスト数値モデルの精度向上を実現するため、レキ、枯れ草の飛砂発生への影響の解明と、レキ、枯れ草の面的広がりの推定を実現し、これらの成果をサブテーマ2に提供することを目的とする。また、推進費3年目（2022年度）の計画において、サブテーマ1における大気中の黄砂（微粒子）と地表面付近の飛砂との関連を明らかにするための両データの比較を行うとしている。

1) レキ、枯れ草の飛砂発生への影響（レキ効果、枯れ草効果）の解明

当初、レキ、枯れ草の飛砂発生への影響を解明するための観測をゴビ砂漠北部に位置するモンゴル国南ゴビ県ツォクトオボー（Tsogt-Ovoo）において実施する予定であったが、新型コロナウイルス蔓延のため、2019年度までに取得したデータの解析を実施することでレキ効果と枯れ草効果の解明を進めた。このためデータはやや不足気味であり、枯れ草については季節外れの2019年9月に実施した予備調査データを使用した。

図-3.1のとおり、野外調査・観測を行ったツオクトオボーには窪地とそれを挟むように南北に小さな山が存在する。観測データ及びこれまでの目視による経験から窪地が大きなダスト発生源であり、その原因は降雨時に山から雨水で運ばれた細かい土壌粒子が窪地に堆積しているからと考えられる。これは過去の文献に示されている内容と一致する。一方、多雨年には窪地に雨水が集まることで植物が繁茂し、翌年春は枯れ草として残っているため、黄砂が発生しにくい傾向がある。

数値モデルで採用される臨界摩擦速度の理論値 (u_{*t_sim}) は式-3.1で表される。 $u_{*t0}(d_s)$ は粒径 d_s の砂粒の臨界摩擦速度であり、 $f(\lambda)$ 、 $f(w)$ 、 $f(s_c)$ 、 $f(s_{cr})$ はそれぞれ、レキや植物といった粗度物質、土壌水分、塩類、土壌クラストの補正関数であり、それぞれの土壌・地表面要素の臨界摩擦速度への影響度合いを示している。本研究の調査地では塩類の影響はほとんど確認されず、また地表面が乾いた状態のときのみをデータ解析の対象としたため、 $f(w) = f(s_c) = 1$ とみなせる。

$$u_{*t_sim} = u_{*t0}(d_s)f(\lambda)f(w)f(s_c)f(s_{cr}) \dots \quad (3.1)$$

レキ、枯れ草の飛砂フラックス（単位時間に単位距離（飛砂の移動方向に直交する幅）を通過する飛砂量）への影響はこれらの被覆面積の影響（被覆効果）および粗度物質（地表面の凸凹）としての乱流への影響（粗度効果）の2つが存在するが、臨界摩擦速度 (u_{*t}) への影響は粗度効果のみと見なせる。粗度効果を決定するパラメータである粗度密度 (λ) は、側面から見たときの粗度物質の断面積の単位面積内の総和であり、粗度物質の補正関数は式-3.2で表される (Raupach et al. 1993¹⁾)。ここで $\beta_r=202$ 、 $\delta_\gamma=1.45$ 、 $m_\gamma=0.16$ である。

$$f_\lambda = f(\lambda) = (1 - m_\gamma \delta_\gamma)^{0.5} (1 + m_\gamma \beta_r \lambda)^{0.5} \quad (3.2)$$

粗度密度 (λ) を見積もるため、レキ、枯れ草の被覆面積、高さといった物理量を測定した。レキ、枯れ草の被覆面積は地表面を撮影した写真の画像解析から見積もった (図-3.2)。レキの高さを見積もるため、まず、ランダムに選んだレキの長径、短径と高さ（地表面より上の高さ）を実際に直尺で測定した。長径と短径から幅の概算（長径^{0.5}×短径^{0.5}）を見積もり、幅と高さの比 ($\langle h \rangle / \langle b \rangle$)、 $\langle h \rangle$: 高さの平均、 $\langle b \rangle$: 幅の平均) を画像解析で得られるレキ1つずつの幅にかけ算することでレキの高さを推定した ($\lambda = \sum b_i h_i / S = \sum b_i^2 \langle h \rangle / \langle b \rangle / S$ 、 b_i と h_i は個々のレキの幅と高さ、 S は測定した地表面の面積)。枯れ草の高さは実測値ではなく、大気化学のコミュニティーモデル（ソースコードが公開され、広く一般に使用が認められているモデル）であるWRF-Chemに組み込まれているShaoスキームで採用されている式-3.3で見積もった (Shao 2008²⁾; Wyatt and Nickling, 1997³⁾)。VC%は枯れ草被覆率(%)であり、測定した地表面面積 S 内に対する枯れ草被覆面積の割合である。

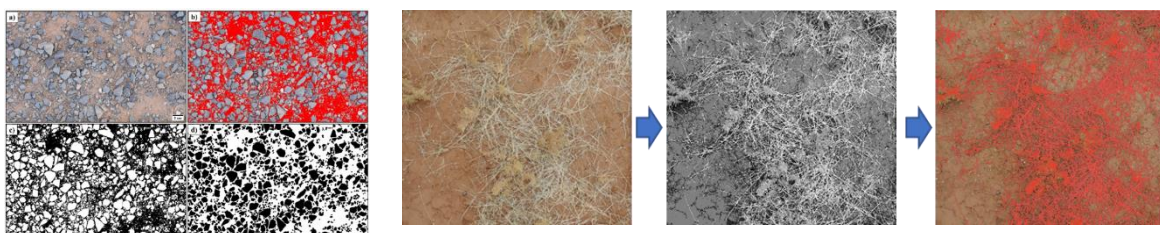


図-3.2 地表面の写真からレキ（左）と枯れ草（右）を画像解析から見積もる例。

$$\lambda = -0.351 \ln(1 - 0.01 \cdot VC\%) \quad (3.3)$$

$f(w) = f(s_c) = 1$ の環境で測定したため、クラスト効果を見積もることができる場合 ($f(s_{cr}) = 1$)、補正関数 f_λ

と臨界摩擦速度 (u_{*t}) は比例関係にある。レキと枯れ草の物理量測定方法の詳細は、それぞれ Buyantogtokh et al. (2021)⁴⁾、Wu et al. (2021)⁵⁾に示されている。

臨界摩擦速度 (u_{*t}) を見積もるためには、風速および飛砂の観測が必要である。本来、超音波風速計による風速観測あるいは複数高度の風速観測から粗度長 (z_0) を見積もり、この粗度長と風速から摩擦速度 (u_*) を得るべきであるが、レキ調査地点のほとんどが1高度の風速しか測定していなかったため、レキの物理量から粗度長 (z_0) を見積もるといった代替手法で解析を進めた。風速はカップ風速計 (S-WSB-M003, Onset社) を高度1.7mに設置、飛砂は圧電飛砂計 (ud-101, 中央工測) を高度0.1mに設置して測定した。臨界摩擦速度はBagnold (1941)⁶⁾の瞬時法 (instantaneous method) で瞬間値を見積もり、観測期間の平均臨界摩擦速度を計算した。レキ物理量から得られた補正関数 f_λ と風速と飛砂の観測で得た臨界摩擦速度 (u_{*t}) を比較することで、観測で得られたレキ物理量、臨界摩擦速度の妥当性及びダスト数値モデルにおいても採用されている補正関数 f_λ の妥当性を確認する。

枯れ草調査地点においては予備調査であったため風速測定を行っていなかった。そこで、2-2) 節に示す衛星観測による枯れ草指数と上記の観測による枯れ草被覆率 ($VC\%$) の比較から妥当な枯れ草指数を選定し、摩擦速度 (u_*) を見積もることができる2地点について、妥当な枯れ草指数から推定される補正関数 f_λ と臨界摩擦速度を比較した。

2) レキ、枯れ草効果の広域推定 (面的広がり) の推定

地点スケールにおいてレキ効果と枯れ草効果の妥当性を示すことができても、これらの成果を東アジアあるいは全球といった広域のダスト数値モデルに応用するためにはレキ、枯れ草の広域分布を推定する必要がある。

2-1) レキの広域推定法

International Soil Reference and Information Centre (ISRIC, 国際土壌照合情報センター) が全球250 mメッシュ解像度の土壌の各種パラメータをSoilGrids 2.0データセット (Poggio et al. 2021⁷⁾) において公開している。この中にレキ体積比率データ情報が公開されている。ツオクトオボーの33地点の観測で得られたレキ被覆率とSoilGridsレキ体積比率を比較した。詳細はSekiyama et al. (2023)⁸⁾に示されている。

2-2) 枯れ草の広域推定法

衛星による緑色の植生 (光合成をする植生) の観測事例はたくさん存在するが、黄砂発生シーズンの茶色の植生 (枯れ草) を衛星観測で定量化した研究はわずかである。数少ない先行研究を参考にして、様々な枯れ草指数 (Soil Tillage Index: $STI = B6/B7$, Normalized Difference Tillage Index: $NDTI = (B6-B7)/(B6+B7)$, Normalized Difference Indices 5 and 7: $NDI5 = (B2-B6)/(B2+B6)$, $NDI7 = (B2-B7)/(B2+B7)$, Normalized Difference Senescent Vegetation Index: $NDSVI = (B6-B1)/(B6+B1)$, Crop Residue Cover: $CRC = (B6-B4)/(B6+B4)$) と光合成をする植生を対象とした非常に有名な指標 $NDVI = (B2-B1)/(B2+B1)$ ($B1 \sim B7$ は衛星センサーMODISのバンド) と10地点の現地調査から得た枯れ草被覆率 ($VC\%$) の関係を調べ、各指標の妥当性を評価した。妥当な指標を用いて広域枯れ草被覆率を推定した。詳細は、Wu et al. (2021)⁵⁾に示されている。

2-3) 合成開口レーダー (SAR) を用いた臨界摩擦速度の広域推定法

2-1) 節と2-2) 節はレキと枯れ草のそれぞれの粗度効果についての評価手法である。しかし、実際にはレキと枯れ草、さらにクラスト等のその他の粗度物質が混在する。将来的にはこれらが混在した状態での臨界摩擦速度 (u_{*t}) の妥当性を評価する必要がある。そこで、粗度に感度のある合成開口レーダー (SAR) の後方散乱強度と臨界摩擦速度 (u_{*t}) の関係を確認し、その結果からツオクトオボー周辺領域の臨界摩擦速度の空間分布を推定しその妥当性を吟味した。本研究で用いたSARデータは衛星Sentinel-1の観測で得られたものである。詳細は、Buyantogtokh et al. (2022)⁹⁾に示されている。

3) レキ、枯れ草効果の成果のモデル応用の可能性評価

レキ効果の観測結果とレキの広域推定結果はサブテーマ2に提供し、これらのモデル応用の結果はSekiyama et al. (2023)⁸⁾において発表された。サブテーマ2の報告を参照されたい。

枯れ草については、その効果の結果と広域推定する手法は得られたが (4. 結果及び考察を参照され

たい)、衛星データの異常値処理のアルゴリズムを作成できていないため、枯れ草効果の広域プロダクトをサブテーマ2に提供できていない。しかし、気象台毎の衛星で得られる枯れ草指数にもとづく臨界風速(u_t)を推定する手法を考え、枯れ草効果の有無によるダスト発生予測精度の向上の可能性について、予測精度評価指数の1つであるスレット・スコア(TS)を用いて吟味した。枯れ草効果を考えない臨界風速は過去21年間(2001-2021年)の5パーセンタイル($u_{t5\%}$)とし、Kurosaki et al. (2011)¹⁰⁾の手法で見積もった。枯れ草効果を考慮した臨界風速は $u_{t(STI)} = u_{t5\%} \cdot f_\lambda / f_{\lambda 5\%}$ とした(f_λ は枯れ草の補正関数、 $f_{\lambda 5\%}$ はその5パーセンタイル)。この研究では気象台における粗度長の推定は不可能と判断し、摩擦速度(u_*)ではなく風速(u)で議論することとした。気象台において、臨界風速以上の風が吹いたとき($u > u_t$)、「ダスト発生あり」と予測したとする。予測におけるダスト発生の有無と気象台観測のダスト発生の有無の回数を表-3.1のように表すとき、スレット・スコアは $TS = FO / (FO + FX + XO)$ で表される。枯れ草を考慮しない時($u_t = u_{t5\%}$)と比べて考慮したとき($u_t = u_{t5(STI)}$)の方がスレット・スコアが大きい場合($TS_{5\%} < TS(STI)$)、その地点では他の地表面要素より、枯れ草がダスト発生に大きく影響していると解釈できる。一方、 $TS_{5\%} > TS(STI)$ の場合は、枯れ草以外の地表面要素が臨界風速の決定に大きく貢献していると解釈できる。3月、4月の2つの月について $u_{t5\%}$ と $u_{t5(STI)}$ を見積もり、上記の解析を行った。詳細は、Wu et al. (2023)¹¹⁾に示されている。

		観測	
		ダスト発生：あり	ダスト発生：なし
予測	ダスト発生あり	FO	FX
	ダスト発生なし	XO	XX

表-3.1 風速と臨界風速から予測したダスト発生有無の回数と気象台観測のダスト発生有無の回数。

4) 大気中の黄砂(微粒子)と地表面付近の飛砂の比較

推進費3年目(2022年度)の計画において、サブテーマ1における大気中の黄砂(微粒子)と地表面付近の飛砂との関連を明らかにするための両データの比較を行うとした。サブテーマ1の大気中の黄砂(微粒子)データは、東アジアライダーネットワーク(AD-Net: Asian dust and aerosol lidar observation network)のモンゴル国ドルノゴビ県サインシャンド(Sainshand; 44.87° N, 110.12° E)と同国同県のザミンウド(Zamyn-Uud; 43.72° N, 111.90° E)におけるライダー観測データがある。しかし、この両地点における飛砂データは存在しないため、枯れ草効果の成果(Wu et al. 2021⁵⁾; Wu et al. 2023¹¹⁾)を活用して枯れ草効果なし/ありの2つ飛砂指数を作成し、これらとライダー観測から得られるダスト消散係数の比較を行った。ライダーデータが存在する2008~2021年、ダストシーズンである3月、4月、5月の3ヶ月を解析対象とした。

式-3.4は数値モデルで使用される飛砂フラックスの式である(White 1979¹²⁾)。

$$Q(d) = \begin{cases} c_0 \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}(d)}{u_*}\right) \left(1 + \frac{u_{*t}(d)^2}{u_*^2}\right) & \dots u_{*t}(d) < u_* \\ 0 & \dots u_{*t}(d) \geq u_* \end{cases} \quad (3.4)$$

この式で飛砂フラックスを見積もるためには摩擦速度(u_*)、臨界摩擦速度(u_{*t})、砂の粒径分布(粒径 d の砂粒の頻度)が必要になる。しかし、サインシャンドとザミンウドにおける粗度長が不明であるため摩擦速度(u_*)、臨界摩擦速度(u_{*t})は得られない。また、信頼できる砂の粒径分布の入手も出来ていない。こういったことから、摩擦速度(u_*)と臨界摩擦速度(u_{*t})の代わりに風速(u)と臨界風速(u_t)を採用し、粒径を必要としない式-3.5を飛砂指数とした。また、本研究では飛砂指数(Q')とダスト消散係数(α_d)の比例関係を議論するだけであるため、定数となる $C_0(\rho_a/g)$ を省略した。

$$Q' = \begin{cases} u^3 \left(1 - \frac{u_t}{u}\right) \left(1 + \frac{u_t^2}{u^2}\right) & \dots u_t < u \\ 0 & \dots u_t \geq u \end{cases} \quad (3.5)$$

風速は気象庁第3次長期再解析データJRA-3Q（気象庁 2021¹³；気象庁 2022¹⁴）の地上風速を用いた。JRA-3Qの時間間隔は6時間、グリッドサイズは $0.375^\circ \times 0.375^\circ$ である。ライダー観測地点がグリッドの端に位置することがあるため、4グリッド $0.750^\circ \times 0.750^\circ$ （東西約59km×南北約83kmに相当）を解析領域とした。地上風速はこの4グリッドの平均値とした。枯れ草効果を考慮するとき用いる、衛星データから得られる枯れ草指数もこの解析領域の平均値を用いた。

前節と同様に、枯れ草効果を考えない臨界風速はそれぞれの解析月（3月、4月、5月）について、解析期間14年間の5パーセンタイル（ $u_{t5\%}$ ）とし、 $u_{t5\%}$ はKurosaki et al. (2011)¹⁰の手法で見積もった。3)節に示したWu et al. (2023)¹¹の手法により、枯れ草効果を考慮した臨界風速は $u_{t(STI)} = u_{t5\%} \cdot f_\lambda / f_{\lambda 5\%}$ とした（ f_λ は枯れ草の補正関数、 $f_{\lambda 5\%}$ はその5パーセンタイル）。Kurosaki et al. (2011)¹⁰の手法は風速とダスト発生の有無の情報が必要であり、同論文では気象台観測の風速と現在天気データを用いた。本研究では、風速は上記のとおりJRA-3Qの地上風速を用い、ダスト発生の有無についてはライダーデータ（高度120～210mの6時間平均値）を用いた。ダスト発生の閾値はShimizu et al. (2017)¹⁵に倣ってダスト消散係数 $0.07/\text{km}$ （ $\alpha_d > 0.07/\text{km}$ のときダスト発生）を試してみたが風速 3ms^{-1} 以下においてもダスト発生となる事例が頻発するため、妥当な値の臨界風速5パーセンタイル（ $u_{t5\%}$ ）を見積もることができなかった（飛砂は植物が全くなく乾いた理想的な条件で約 $6\sim 7\text{ms}^{-1}$ の風速で発生すると言われている）。そこで、閾値として $0.14/\text{km}$ 、 $0.21/\text{km}$ を試し、最終的に $0.21/\text{km}$ を採用した。

（2）ダスト発生源の生態系保全に向けた地表面条件の解明

ダストの発生過程、とくに植生存在下における発生過程の解明においてはこれまで、空間的に均質な植生分布を仮定しており、不均質な分布を特徴とする乾燥地においては風食量の過小評価につながる指摘されている。近年、空間的な不均質性を考慮した数値モデルが提案されているが、実際の飛砂量と植生の空間分布の関係を検証した研究はほとんどない。一方実用面においては、研究知見の土地管理への応用が妨げられていると指摘されており、乾燥地における土地管理実務に応用可能な、風食抑制に関する植生指標の策定が求められている。本課題では、飛砂発生に対する植生の空間分布の影響を検証し、またその知見にもとづき土地管理およびダスト発生の予測に適用可能な植生の空間分布を表す指標を開発することを目的とする。

1) 灌木の空間分布が飛砂発生、粗度と植生構造の関係に与える影響の検証

まず、ダスト発生域である中国内モンゴル自治区フルンボイル草原（以下フルンボイル）およびモンゴル国南ゴビ県ツォクトオボー（以下ツォクトオボー）において取得した飛砂観測および植生分布データを用いて、植生と飛砂発生の相互関係を、植生の分布の不均質性を考慮して検証した。具体的な調査・解析方法は以下の通りである。

飛砂観測は圧電飛砂計（ud-101、中央工測）を用いて、測定高7-10cm、20秒（フルンボイル）または10秒（ツォクトオボー）の観測頻度で観測を行った。サイト内の飛砂の不均質性を平均化するためにサイトあたり3箇所を観測を行い、その平均値を用いた。気象観測は携帯型風向風速計（5500 Weather Meter, Kestrel）を用いて、3高さ（フルンボイル：約1, 1.3, 1.6m、ツォクトオボー：約1.1, 1.6, 2.1m）で観測を行った。飛砂数、風向・風速などから飛砂発生イベントを同定し、このイベントを解析単位とした。1分間飛砂数からUdo et al. (2008)¹⁶の式を用いて飛砂フラックスを推定した。また10分間平均風速データから、重相関係数を用いた最大相関法を用い粗度 z_0 および地面修正量 d_0 を推定した。推定した粗度 z_0 および地面修正量 d_0 を用いて1分ごとの摩擦速度 u_* を推定し、臨界摩擦速度 u_{*t} およびOwen (1964)¹⁷の式における係数 c を算出した。以上の解析においては風向・風速・気温などから大気の状態が中立であると推定される時刻のデータのみを用いた。

植生分布については、フルンボイル草原では、対象地に優占するマメ科灌木*Caragana microphylla*を対象に、サイト内灌木個体の高さを全数調査したうえで灌木の空間分布をUAV空撮画像によって把握した。ツォクトオボーでは、対象地の斜面部に優占する*Salsola passerina*および*Anabasis brevifolia*の群落を対象に、調査サイトの写真を射影変換した画像から、support vector machineによる画像分類および目視判読により灌木の空間分布を把握した。本研究では灌木の空間分布より推定さ

れる灌木間距離 \bar{D} を空間分布の不均質性の指標とした。灌木間距離 \bar{D} の推定にはセミバリオグラムを用いた。セミバリオグラムの推定から、空間的自己相関がなくなる空間スケールを示すレンジ r_v を推定した。平均風向に対する異方性バリオグラムから単方性レンジ r_{uv} を推定し、灌木の平均高 h に対する灌木間距離の割合 $\bar{D}/h (= 2r_{uv}/h)$ を算出し、灌木の空間分布の指標として用いた。

以上のデータを用い、フルンボイルでは、レンジ r_v と植被率によって8サイトを3グループに区分し、グループ間で臨界摩擦速度 u_{*t} および飛砂フラックスを比較した。ツオクトオボーでは、粗度 z_0 から群落高で標準化した粗度長 z_0/h を算出し、臨界摩擦速度との関係を検証した。また、摩擦速度の大きさに依存しない飛砂フラックスの大きさを示す指標として係数 c を用い、係数 c および粗度長 z_0/h と植生分布（植被率・灌木間距離 \bar{D}/h ）の関係を検証した。

2) 植生の空間分布を考慮した飛砂発生に対する植生指標の開発・検証

つぎに、放牧地管理・保全の実務上有益な指標の策定を目指して、複数の植生指標の飛砂発生に対する説明力を検証した。具体的な方法は以下の通りである。

モンゴル国ツオクトオボーの*Nitraria sibirica*が優占する灌木ステップにおいて、植被率および灌木の空間分布が異なる4つのサイトを選定し、植生調査および飛砂・気象観測を行った。植生については、灌木パッチを楕円と仮定して長短軸、向き、サイト内の位置を記録し、灌木の空間分布を把握した。飛砂については、灌木の空間分布の違いを捉えるよう各サイトに圧電飛砂計を3機設置し（測定高：0.1 m）、飛砂フラックスを推定した。気象観測については上記1)と同様に、携帯型風向風速計を用いて3高さ（2.1, 1.6, 1.1 m）での風向・風速・気温観測を行った。

飛砂発生に関する植生指標については、空間分布を考慮しない既存指標として植被率、群落高、lateral cover λ を、灌木間の裸地の長さでパッチサイズを間接的に指標する既存指標としてcanopy gap、観測点からの距離を考慮した改変指標としてlateral cover λ' 、canopy gap' を算出した。これに対し、新規指標としては、灌木による風下の地表面保護効果を記述するHeight Area Effect (HAE)および観測点からの距離を考慮したHAE'、パッチサイズと個体数により空間分布を記述するTotal Height (TH)および観測点からの距離を考慮したTH' をそれぞれ算出した。

以上の植生指標と飛砂フラックスとの関係を、単回帰、区分回帰および対数回帰モデルにより検証した。各指標、飛砂フラックスは、サイトごとの飛砂イベントを単位に平均して用い、指標・計算範囲の比較には自由度調整済み決定係数を用いた。ここで、区分回帰および対数回帰モデルは植生指標と飛砂フラックスとの閾值的な関係を示すが、区分回帰では閾值的関係を明確に推定し、飛砂量が大きいケースを重視するのに対し、対数回帰では、少量の飛砂量も重視しており、飛砂に関する異なる評価軸を表している。

4. 結果及び考察

(1) ダスト数値モデル精度向上に向けた地表面パラメータの取得と指標の設定

1) レキの飛砂発生への影響（レキ効果）の解明、広域推定とダストモデルへの応用

レキ物理量および臨界摩擦速度の観測から、植物やクラストが存在していなければ、臨界摩擦速度の実測値 u_{*t_obs} とレキ物理量から見積もった臨界摩擦速度 u_{*t_sim} が高相関の関係にあり、また、ほぼ1:1の関係であるという結果が得られた（図-3.3）。レキ被覆率、粗度密度は山で最も高く、窪地において最も低いといった地形依存の関係が見られた（図-3.4）（Buyantogtokh et al. 2021）⁴⁾。

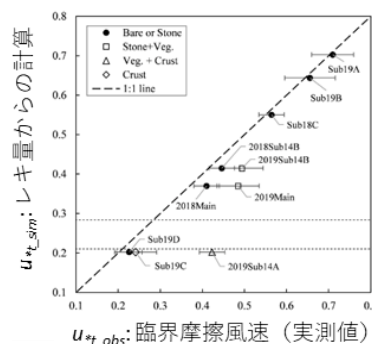


図-3.3 臨界摩擦速度の実測値 u_{*t_obs} とレキ物理量から見積もった臨界摩擦速度 u_{*t_sim} 。植物、クラストが存在しない結果は黒丸で示している。

図-3.5はツォクトオポーの33地点についてのSoilGrids 2.0のレキ体積比率と現地観測で得られたレキ被覆率の関係を示しており、有意な相関が見られる。これはSoilGridsデータが地形に対応してレキが分布しているためと考えられる。この結果をもとに推定したレキ被覆率の広域分布が図-3.6である。このデータをサブテーマ2に提供し、サブテーマ2ではレキ効果を導入したダスト数値モデルを開発し、2017年4月29日～5月7日のダストイベントの計算を実施した(Sekiya et al. 2023)⁸⁾。

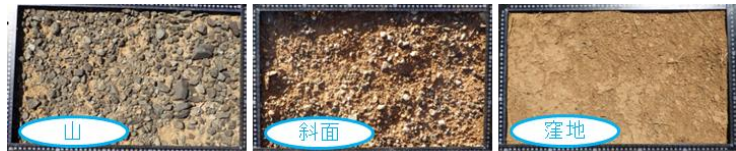


図-3.4 山、斜面、窪地におけるレキの様子(例)。

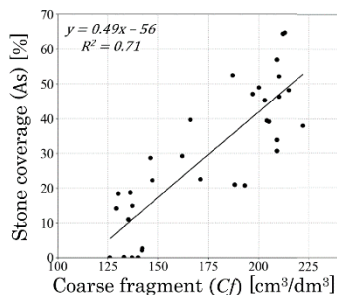


図-3.5 SoilGrids 2.0のレキ体積比率(横軸)と現地観測のレキ被覆率(縦軸)。

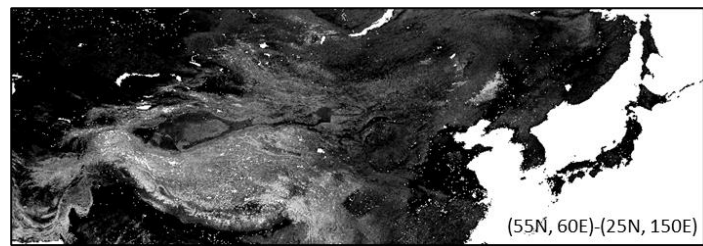


図-3.6 SoilGrids 2.0のレキ体積比率データと図-3.5の結果を利用して推定した広域レキ被覆率。黒領域はレキ被覆率0.0、白領域は1.0を表している。

2) 枯れ草の飛砂発生への影響(枯れ草効果)の解明、広域推定

3. 研究開発内容の2-2)節に示した枯れ草指数のうち枯れ草被覆率と有意な相関関係があったのはSTI ($R^2=0.55$, $p<0.05$) (図-3.7)とNDTI ($R^2=0.57$, $p<0.05$) だけであり、このことはMODISのバンド6と7の組み合わせが枯れ草推定に有効であることを示唆している。光合成をする植生を対象とした指標NDVIは枯れ草被覆率と相関がなく ($R^2=0.018$, $p=0.71$)、このことは黄砂が最も発生する季節の数値シミュレーションにおいてNDVIを利用すると予測精度低下を引き起こすことを示唆している。STIとNDTIの結果はほぼ同じであるため、本研究ではサヘル地域のダストについてSTIで議論を行った Kergoat et al. (2017)¹⁸⁾に倣って、STIから枯れ草被覆率 ($VC_{\%}(STI)$) を見積もった。STIで見積もった枯れ草被覆率と超音波風速計(Main site)と3高度の風速(Subsite 14A)で見積もった粗度長 (z_0) に有意な相関関係は存在しなかったが、枯れ草が存在しない ($VC_{\%}(STI)=0\%$) ときの粗度長は妥当な値であるという結果が得られた(図-3.8)。 $VC_{\%}(STI)$ を式-3.2、式-3.1に代入して得られる補正関数 (f_{λ})

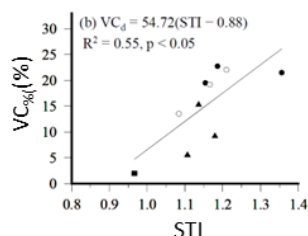


図-3.7 枯れ草指数STIと枯れ草被覆率(VC%)の関係。

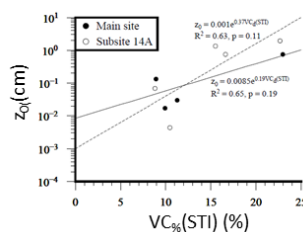


図-3.8 枯れ草指数STIで見積もった枯れ草被覆率 ($VC_{\%}(STI)$)と粗度長の関係。

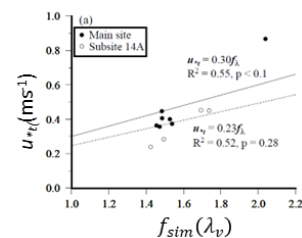


図-3.9 枯れ草指数STIで見積もった補正関数 f_{λ} と臨界摩擦速度 (u_{*t}) の関係。

と臨界摩擦速度 (u_{*t}) に有意な相関関係は存在しなかったが、枯れ草が存在しないときの臨界摩擦速度は妥当な値であるという結果が得られた(図-3.9)。

STIと枯れ草被覆率の結果（図-3.7）を利用した枯れ草被覆率の広域推定例が図-3.10である。衛星データの異常値、無効ピクセルが存在し、これら进行处理するアルゴリズムが完成していないため、枯れ草効果の広域プロダクトをサブテーマ2に提供できていない。

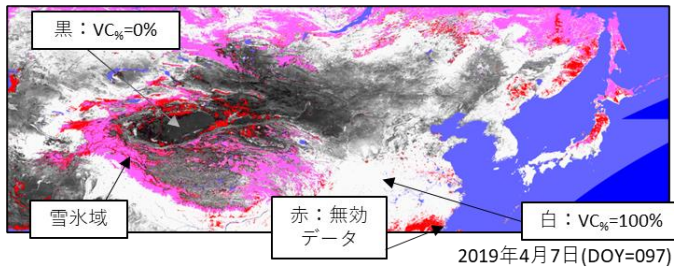


図-3.10 STIを用いて推定した広域枯れ草被覆率の例。黒領域が枯れ草被覆率0%、白領域が100%を表している。

3) 枯れ草効果のモデル応用の可能性評価

枯れ草を考慮しない時 ($u_t = u_{t5\%}$) と考慮したとき ($u_t = u_{t5\%(\text{STI})}$) のスレット・スコアの差 ($\Delta \text{TS} = \text{TS}(\text{STI}) - \text{TS}_{5\%}$) を図-3.11に示す。3月はスレット・スコアが増加した地点数 ($\text{TS}_{5\%} < \text{TS}(\text{STI})$) と減少した地点数 ($\text{TS}_{5\%} > \text{TS}(\text{STI})$) はほぼ同じであった。これは、枯れ草以外のたとえば土壌の凍結融解や積雪といった地表面要素が臨界風速の決定に大きく貢献していることを示唆しており、枯れ草効果を導入するだけではモデル精度が向上しないことを示している。一方、4月はほとんどの地点においてスレット・スコアが増加し、減少した地点はわずかであった。これは、4月は枯れ草効果がダスト発生の大きな原因であり、枯れ草効果を導入することでモデル精度が向上することを示唆している。

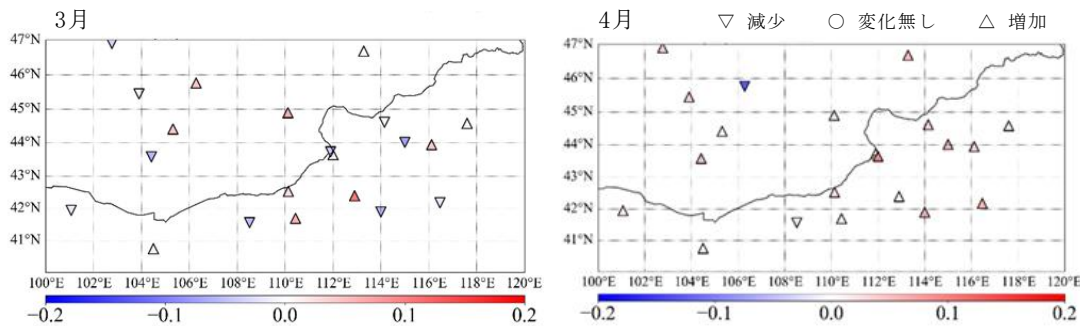


図-3.11 枯れ草を考慮しない時 ($u_t = u_{t5\%}$) と考慮したとき ($u_t = u_{t5\%(\text{STI})}$) のスレット・スコアの差 ($\Delta \text{TS} = \text{TS}(\text{STI}) - \text{TS}_{5\%}$)。左図は3月、右図は4月の結果。

4) 合成開口レーダー(SAR)を用いた臨界摩擦速度の広域推定

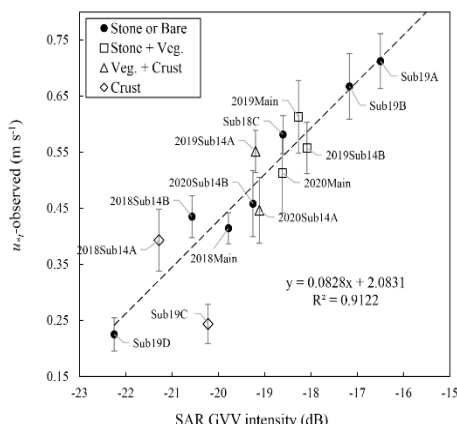


図-3.12 SAR後方散乱強度（横軸）と臨界摩擦速度の関係。

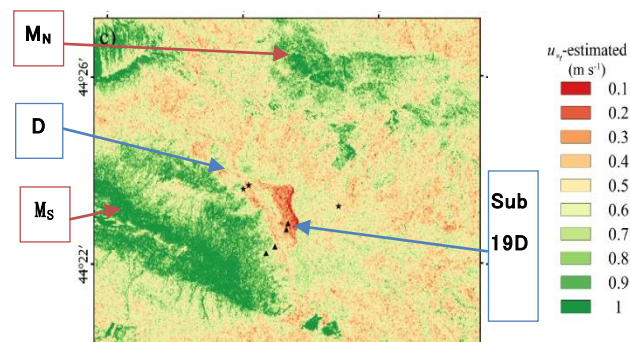


図-3.13 SAR後方散乱強度から推定した臨界摩擦速度の広域分布例（2019年5月）。 M_N と M_S は山領域、Dは窪地領域（参照：図-3.1）。

図-3.12は合成開口レーダー(SAR)後方散乱強度と現地観測で得られた臨界摩擦速度に強い相関関係があることを示しており、地表面が乾燥（式-3.1において、 $f(w) \approx 1$ ）、塩分がほとんど存在しない

($f(s_c) \equiv 1$)ときは、SAR後方散乱強度から臨界摩擦速度を推定できることを示唆している。この結果を利用して推定した臨界摩擦速度の水平分布例を図-3.13に示す。図-3.14は2018年5月、2018年8月、2019年5月の合成開口レーダー(SAR)後方散乱強度を示している。図-3.4が示すとおり山領域にはレキがたくさん存在するが、この結果に一致するようにSAR強度は山領域において常に高い値(臨界摩擦速度が高い値)である。一方、窪地のSAR強度は時間とともに変化している。2018年春はクラストと枯れ草に覆っていたことが原因で(図-3.15左)Sub-Site19D付近のSAR強度は高かったが(図-3.14左)、2019年春はクラストが崩壊しさらさらの砂のみに覆われていたことが原因で(図-3.15右)SAR強度が

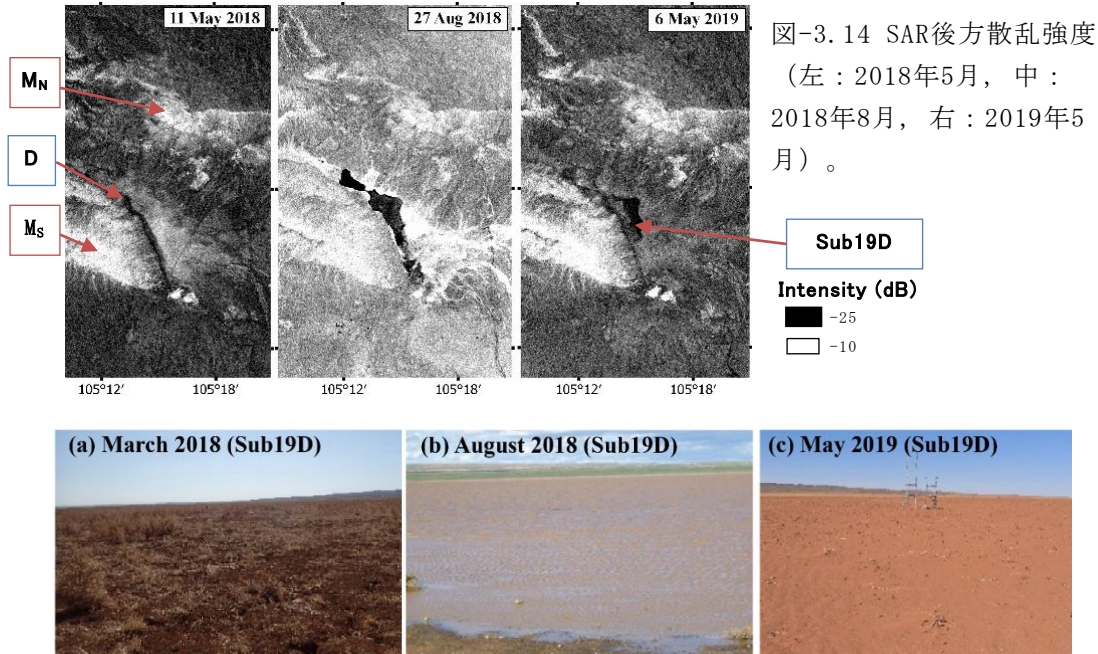


図-3.14 SAR後方散乱強度
(左：2018年5月，中：
2018年8月，右：2019年5
月)。

図-3.15 窪地 (Sub-Site19D付近) の様子 (左：2018年3月，中：2018年8月，右：2019年5月)。

低かったと考察できる(図-3.14右)。こういったSAR強度の時間・空間変化が現地の土壌・地表面の変化に対応していることも、SAR強度による臨界摩擦速度推定の可能性を高めている。

5) 大気中の黄砂(微粒子)と地表面付近の飛砂の比較

サインシャンドの4月とザミンウドの3月、4月においてのみ、枯れ草効果非考慮($u_{t5\%}$)、考慮($u_{t(STI)}$)に係わらず、飛砂指数(Q')とダスト消散係数(α_d)の間には相関関係が見られたが、強い相関ではなかった(図なし、但しx軸、y軸は図-3.16と同じ)。その他については、p値はすべて0.00であるものの、弱い相関あるいはほぼ相関がなかった。この原因として、(1)風上から移流してきたダストあるいは観測地点付近で発生したダストが浮遊することでダスト消散係数が大きい飛砂がほとんどない場合(y軸近傍のプロット)、(2)ライダー観測地点の狭い範囲のみ強風が吹くことによって発生するローカルダストによってダスト消散係数が大きい、解析領域(東西約59km×南北約83km)平均の風速が小さい場合(y軸近傍のプロット)、(3)地上付近にダストは漂っているが解析対象である高度120~210mにダストが漂っていない場合(x軸近傍のプロット)が考えられる。(1)についてはライダー観測地点の近くに气象台が存在することを利用して、气象台においてダスト発生が観測されたときのみをプロットしてみたところ(図-3.16)、比較的相関が高かったサインシャンドの4月とザミンウドの3月、4月の3つの事例においてのみ、相関係数が高くなった。この結果はこれらの地点、月については移流あるいは浮遊ダストを考慮すべきであることを示唆している。この3つの事例について、枯れ草効果の有無をしてみる。ザミンウドの3月のみ枯れ草効果非考慮($u_{t5\%}$)から考慮($u_{t(STI)}$)にすると相関係数が大きく増加しているため枯れ草効果が有効であると考えられる。しかし、残りの2つの事例については相関係数にほぼ変化が無いため、枯れ草効果のみではダスト数値モデルの精度向上を期待できないことを示唆している。(2)についても、ライダー観測地点の近くに气象台が存在することを利用して、气象台観測の風速とJRA-3Qの地上風速の比較といった検証方法があるが、実施できていない。

(3)については、飛砂は地上で発生する現象であるため、ライダーデータの高度はできるだけ低い方が良く考えられるが、ライダーは非同軸構成のため高度120m以下では後方散乱光が十分に望遠鏡視野内に戻ってこないため消散係数の推定精度が低いことを考慮すると、現解析高度（120～210mの平均値）より下層の状況を調べることは難しい。

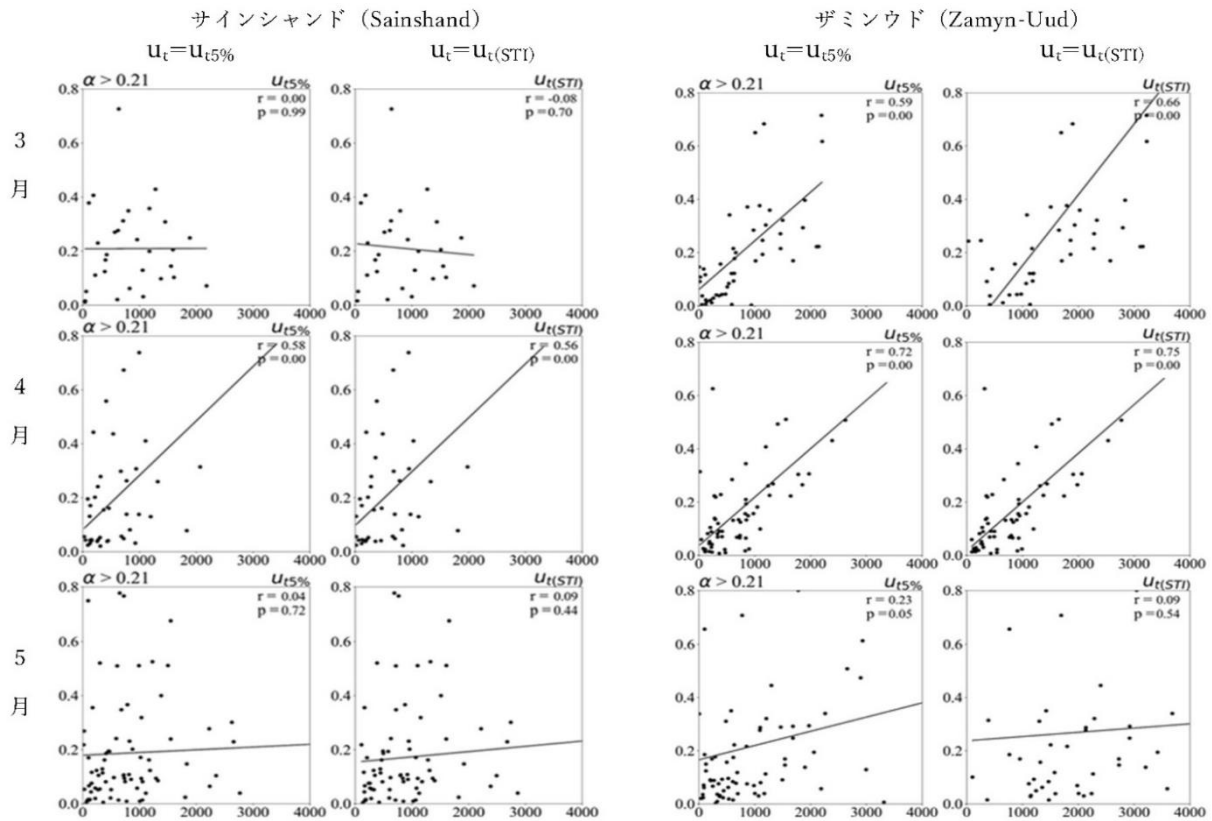


図-3.16 サインシャンドとザミンウドにおける飛砂指数（横軸）とダスト消散係数（縦軸）。 $u_t(5\%)$ は枯れ草効果非考慮、 $u_t(STI)$ は枯れ草効果考慮を意味する。気象台においてダスト発生が観測されたときのみをプロット。ダスト発生は現在天気 $ww=07-09, 30-35, 98$ で定義した。

(2) ダスト発生源の生態系保全に向けた地表面条件の解明

1) 灌木の空間分布が飛砂発生、粗度と植生構造の関わりに与える影響の検証

フルンボイルにおいて、灌木の分布はサイトによって異なり、同程度の植被率でもレンジ r_v が異なるサイトが見られた。方位ごとのレンジ r_{uv} を推定した結果、灌木が列状に分布するサイトでは、裸地面が続く方向でレンジ r_{uv} が大きくなり、レンジが灌木間に存在する裸地の長さを指標することが確認された。8サイトは植被率およびレンジ r_v の大小で「植被率小・レンジ小型」、「植被率大型」および「植被率小・レンジ大型」の3グループに分類されたが、グループ間で臨界摩擦速度 u_{*t} に有意な差は見られなかった（図-3.18 (a)）。一方で飛砂フラックスは「植被率小・レンジ大型」で他のグループに比ベ有意に大きくなった（図-3.18 (b)）。植被率が同程度するとき、灌木間距離が大きいことは灌木の空間分布がより不均質であることを示す。既往研究においては0-15%の植被率において植被率の増大によって臨界摩擦速度も大きくなる傾向にあることが示されている。フルンボイルの調査サイトでは植被率が8.7-32.9%程度であり、本対象地における植被率の範囲では臨界摩擦速度の変化が検出されなかった可能性が考えられた。

ツオクトオボーにおいて、臨界摩擦速度 u_{*t} は粗度長 z_0/h に比例し、 $u_{*t} = 0.34 + 0.13(z_0/h - 1)$ ($R^2 = 0.81, p < 0.001$)の式で表された（図-3.19(a)）。この粗度長 z_0/h は、不均質な植生下での風向の変化に伴う粗度長の変化を反映している。この関係は、臨界摩擦速度と λ が線形関係にあるというShao(2008)¹⁹⁾の主張を支持するものである。粗度長と植被率・灌木間距離 \bar{D}/h の重回帰分析の結果、粗度長と植被率の関係は灌木間距離の影響を受けることがわかった。すなわち、灌木間距離が大きいとき

は植被率の増加に伴い粗度長が減少するが、灌木間距離が小さいときは植被率によって粗度長はあまり変化しなかった (図-3.19(c))。植生存在下の風の流れは、植被率によって(1) isolated roughness flow (vegetation cover < 16%), (2) wake interference flow (16—40%), (3) skimming flow (> 40%) の3段階で生じるとされ(Wolfe and Nickling 1993²⁰; Mayaud & Webb 2017²¹)、(2)および(3)の段階では一定以上の植被率では植被率の増加に伴い粗度長が減少すると指摘されている (e.g. Liu et al. 2021)²²)。これまで植生存在下の風の流れは植被率で説明されてきたが、本結果は粗度長と植被率の関係が空間分布の影響を受けることを示唆している。

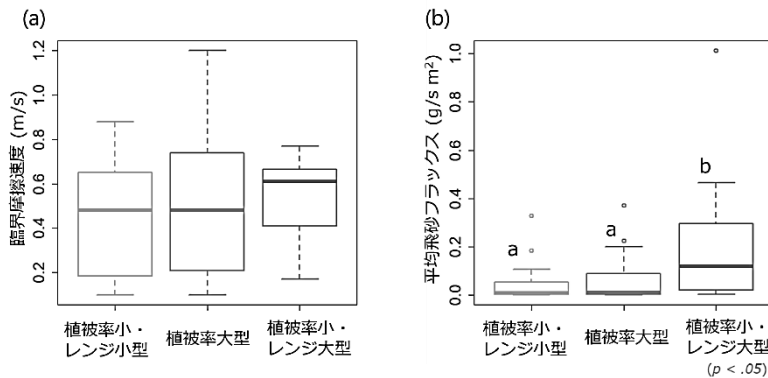


図-3.18 フルンボイルにおけるグループ間の臨界摩擦速度 (a) と飛砂フラックス (b) の比較

係数 c と植被率・灌木間距離 \bar{D}/h の重回帰分析の結果、灌木間距離 \bar{D}/h が大きいとき、植被率の増加に伴い係数 c が減少した一方で、灌木間距離が小さいときは植被率に対して係数 c はほとんど変化せず、少量の植生で飛砂を抑制し、灌木間距離が植被率の閾値に影響を与えていることがわかった (図-3.19(b))。これは、均質な植生では個々の灌木の保護領域が独立しているため少量の植生でも飛砂を抑制しうるためと考えられた。これに対し不均質な植生では、個々の灌木の保護領域が重複して裸地面が連続するため、植生が少ないときは飛砂がよく発生する一方で、植被率の増加は直接的に保護領域の増加に繋がるため、植被率の増加に伴い飛砂は顕著に抑制されると考えられた。

ツォクトオポーの調査サイトは主に植被率で3つに分類されたが (図-3.20(a))、灌木間距離 \bar{D}/h は植被率が中程度 (25%程度) のときに多様な値を取り、大きくなる傾向を示した (図-3.20(b))。これは、資源の不均質性により、灌木の成長とともに灌木パッチが次第に連結されていくためと考えられた。

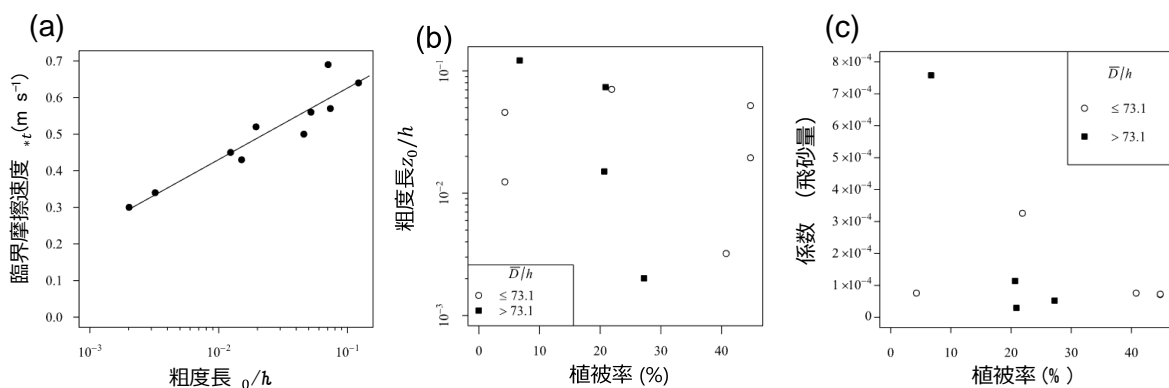


図-3.19 ツォクトオポーにおける臨界摩擦速度と粗度長 z_0/h の関係 (a)、および粗度長 z_0/h (b)、係数 c (c) と植生の関係。 \bar{D}/h は灌木間距離の割合を示す。

以上のように、飛砂発生に対する植生の被度、高さ、空間分布の複合的な関係を粗度長を介して検証した結果、臨界摩擦速度は粗度で説明され、粗度長と植被率の関係は空間分布の影響を受けること、飛

砂量と植被率の関係は空間分布の影響を受け、不均質な分布では閾値が増加することが明らかになった。とくに植被率25%前後の環境下では、植生の空間分布の変化にも注意を払う必要があることが示唆された。

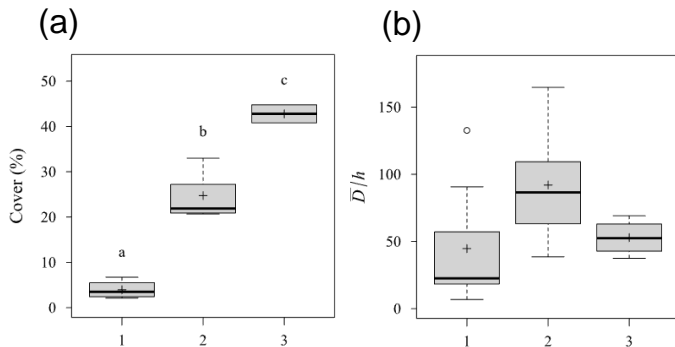


図-3.20 主に植被率で分類された3つのサイト群における植被率(a)および灌木間距離(b)の違い。

2) 植生の空間分布を考慮した飛砂発生に対する植生指標の開発・検証

植生指標を比較した結果、既存の指標は計算範囲を適切に選択すれば指標と飛砂の閾值的な関係を説明できることがわかった。一方で少量の飛砂の説明力は高くはない (lateral cover λ , canopy gap)。また、観測スケールによる影響が大きく、計算範囲に対する頑健性は高くはないことが示された。これに対し新規指標であるHAEおよびHAE' は少量・多量の飛砂を最もよく説明し、飛砂発生を推定するのに最良の結果を示した。また、THはより簡便な指標でありながら、閾值的な関係、少量の飛砂という飛砂の2つの側面を比較的良好に指標することが示された (図-3.21)。

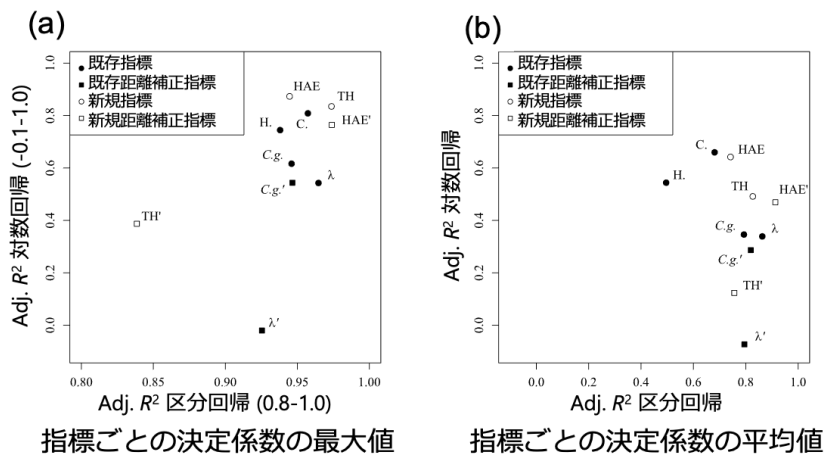


図-3.21 既存指標および新規指標における区分回帰および対数回帰の決定係数の最大値 (a) および平均値 (b)。計算範囲は $25-50\bar{h}$, $15-90^\circ$ とした (\bar{h} : サイトの群落高)。

従来、風食に対する植生の空間分布の指標には植被率が多く用いられてきた (Webb et al. 2020²³)。一方で近年、乾燥地景観に特有な不均質な植生分布を考慮する必要性が議論されており、不均質な分布を説明する植生指標として灌木間距離 (canopy gap) が用いられている (Webb et al. 2014²⁴, 2021; Li et al. 2013²⁵)。しかしこれらは植生管理の観点では利用しにくいという欠点があった。

本研究で新たに提案した新規開発指標HAE'、HAEは、植被、高さ、空間分布の3つの植生要素をすべて加味しており、飛砂を最も詳細に説明する最良の指標であること、THは飛砂の異なる側面をバランスよく指標し、かつ放牧地管理者の実務者が容易に測定可能であることから、放牧地管理および植生管理の目標策定に有用な指標であることが示された。

5. 研究目標の達成状況

当初の目標を十分達成することができた。ダスト数値モデル精度向上に向けた地表面パラメータの取得については、飛砂発生に影響する地表面パラメータとして、(1)レキ被覆率 $SC_{\%}$ 、(2)レキ粗度密度 λ_s 、(3)MODIS衛星データから得られる枯れ草指標STI、(4)枯れ草被覆率 $VC_{\%}$ 、(5)枯れ草粗度密度 λ_v 、(6)レキと枯れ草をあわせた粗度影響関数 $f(\lambda_v, \lambda_s)$ を取得した。また、地形とレキ量の関係、レキと枯れ草の飛砂への効果を解明し、さらにSoilGridsのレキ体積比率データ(250mメッシュデータ)と現地取得したレキ被覆率データに高相関関係があること、MODIS衛星データ(500mメッシュデータ)で得られるSTIによる枯れ草量推定法を開発したことで、広域のレキ分布、枯れ草分布を推定することが可能となった。指標については、レキと枯れ草の被覆効果(黄砂発生面積が減少する効果)を表現するための(1)広域のレキ被覆データ $SC_{\%}$ 、(2)2019年4月の枯れ草被覆率データ $VC_{\%}$ 、風応力減少効果(風の黄砂を発生させる力がレキや枯れ草に奪われる効果)を表現するための(3)レキと枯れ草をあわせた粗度影響関数データ $f(\lambda_v, \lambda_s)$ といった3つの指標データを作成し、サブテーマ2に提供した。とくにレキ被覆データについてはモデルに組み込むことの有効性が確認され、モデル精度の向上に貢献した。

ダスト発生源の生態系保全に向けた地表面条件の解明については、飛砂量と植被率の関係は空間分布の影響を受け、不均質な分布では閾値が増加することを明らかにした。とくに植被率25%前後の環境下では、植生の空間分布の変化にも注意を払う必要があることを示した。また、本研究で新たに提案した植生指標のうち、植被率、高さ、空間分布の3つの植生要素をすべて加味した新規指標Height Area Effect (HAE)は総合的に飛砂を最もよく説明し、飛砂発生の閾値推定に有効であること、より簡便な新規指標Total Height (TH)は、少量~多量の様々な飛砂イベントをバランス良く指標し、かつ容易に測定が可能であることから、放牧地管理および植生管理の目標策定に有用な指標であることを示した。以上のように、パラメータ取得および指標の設定、生態系保全に向けた地表面条件の解明ともに有用な結果を得ることができた。

6. 引用文献

- 1) Raupach, M.R., Gillette, D.A., Leys, J.F., 1993. The effect of roughness elements on wind erosion threshold. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 98, 3023-3029.
- 2) Shao, Y., 2008. *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Springer. Dordrecht.
- 3) Wyatt, V., Nickling, W., 1997. Drag and shear stress partitioning in sparse desert creosote communities. *Can. J. Earth Sci.* 34, 1486-1498.
- 4) Buyantogtokh, B., Kurosaki, Y., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Gantsetseg, B., Davaadorj, A., Ishizuka, M., Sekiyama, T.T., Tanaka, T.Y., Maki, T., 2021. Effect of stones on the sand saltation threshold during natural sand and dust storms in a stony desert in Tsogt-Ovoo in the Gobi Desert, Mongolia. *J. Arid Land* 13, 653-673.
- 5) Wu, J., Kurosaki, Y., Gantsetseg, B., Ishizuka, M., Sekiyama, T.T., Buyantogtokh, B., Liu, J., 2021. Estimation of dry vegetation cover and mass from MODIS data: Verification by roughness length and sand saltation threshold. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 102.
- 6) Bagnold R.A., 1941. The physics of blown sand and desert dunes. *Prog. Phys. Geogr.*, 18, 91-96.
- 7) Poggio, L., de Sousa, L.M., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., Ribeiro, E., Rossiter, D., 2021. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7, 217-240.
- 8) Sekiyama, T.T., Kurosaki, Y., Kajino, M., Ishizuka, M., Buyantogtokh, B., Wu, J., Maki, T., 2023. Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 128, e2022JD037295.
- 9) Buyantogtokh, B., Kurosaki, Y., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Ishizuka, M., Gantsetseg, B., Batjargal, G., 2022. Estimating the sand saltation thresholds from Sentinel-1 SAR

- data in the Gobi Desert, Mongolia. *J. Arid. Environ.*, 202, 104772.
- 10) Kurosaki, Y., Shinoda, M., Mikami, M., 2011. What caused a recent increase in dust outbreaks over East Asia? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11702.
- 11) Wu, J., Kurosaki, Y., Sekiyama, T.T., Maki, T., 2023. Effects of dry vegetation coverage estimated from the MODIS Soil Tillage Index on dust occurrence: Verification by surface synoptic observations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 101, 67-77.
- 12) White, B., 1979. Soil transport by winds on Mars. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 84, 4643-4651.
- 13) 気象庁, 2021. 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和2年), 気象庁数値予報開発センター, 115-124.
- 14) 気象庁, 2022. 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 133-138.
- 15) Shimizu, A., Sugimoto, N., Nishizawa, T., Jin, Y., Batdorj, D., 2017. Variations of Dust Extinction Coefficient Estimated by Lidar Observations over Japan, 2007-2016. *SOLA*, 13, 205-208.
- 16) Udo, K., Kuriyama, Y., Jackson, D.W.T., 2008. Observations of wind-blown sand under various meteorological conditions at a beach. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 113.
- 17) Owen, P.R., 1964. Saltation of uniform grains in air. *J. Fluid Mech.* 20, 225-242.
- 18) Kergoat, L., Guichard, F., Pierre, C., Vassal, C., 2017. Influence of dry-season vegetation variability on Sahelian dust during 2002-2015. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5231-5239.
- 19) Shao, Y., 2008. *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Springer. Dordrecht.
- 20) Wolfe, S.A., Nickling, W.G., 1993. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Prog. Phys. Geogr.* 17, 50-68.
- 21) Mayaud, J.R., Webb, N.P., 2017. Vegetation in drylands: Effects on wind flow and aeolian sediment transport. *Land* 6, 64.
- 22) Liu, J., Kimura, R., Miyawaki, M., Kinugasa, T., 2021a. Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments. *Catena* 197, 104976.
- 23) Webb, N.P., Kachergis, E., Miller, S.W., McCord, S.E., Bestelmeyer, B.T., Brown, J.R., Chappell, A., Edwards, B.L., Herrick, J.E., Karl, J.W., Leys, J.F., Metz, L.J., Smarik, S., Tatarko, J., Van Zee, J.W., Zwicke, G., 2020. Indicators and benchmarks for wind erosion monitoring, assessment and management. *Ecol. Indic.* 110, 105881.
- 24) Webb, N.P., Herrick, J.E., Duniway, M.C., 2014. Ecological site-based assessments of wind and water erosion: Informing accelerated soil erosion management in rangelands. *Ecol. Appl.* 24, 1405-1420.
- 25) Li, J., Okin, G.S., Herrick, J.E., Belnap, J., Miller, M.E., Vest, K., Draut, A.E., 2013. Evaluation of a new model of aeolian transport in the presence of vegetation. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118, 288-306.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 森育子, 清水厚, 西村理恵, 中戸靖子 (2022) 黄砂現象時の粗大粒子中の硝酸イオン, 硫酸イオン及び水溶性有機化合物濃度の経時変化: 2019年10月の黄砂の大阪府域における事例解析. 地球環境, 27 (3), 229-233 (IF:不明)
- 2) Maki T., Tanaka T.Y., Koshiro T., Shimizu A., Sekiyama T.T., Kajino M., Kurosaki Y., Okuro T., Oshima N. (2022) Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere), 18, 218-224 (IF:2.349)
- 3) Park S., Kim M.H., Yeo H., Shim K., Lee H.J., Kim C.H., Song C.K., Park M.S., Shimizu A., Nishizawa T., Kim S.W. (2022) Determination of mixing layer height from co-located lidar, ceilometer and wind Doppler lidar measurements: Intercomparison and implications for PM2.5 simulations. Atmospheric Pollution Research, 13 (2), 101310 (IF:4.831)
- 4) Kim M.-H., Yeo H., Park S., Omar A., Nishizawa T., Shimizu A., Kim S.-W. (2021) Assessing CALIOP-Derived Planetary Boundary Layer Height Using Ground-Based Lidar. Remote Sensing, 13 (1496) (IF:5.349)
- 5) Kajino M., Deushi M., Sekiyama T. T., Oshima N., Yumimoto K., Tanaka T.Y., Ching J., Hashimoto A., Yamamoto T., Ikegami M., Kamada A., Miyashita M., Inomata Y., Shima S., Khatri P., Shimizu A., Irie H., Adachi K., Zaizen Y., Igarashi Y., Ueda H., Maki T., Mikami M. (2021) Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. Geosci. Model Dev., 14, 2235-2264 (IF:6.892)

【サブテーマ2】

- 1) Zanis, P., Akritidis, D., Georgoulas, A. K., Allen, R. J., Bauer, S. E., Boucher, O., Cole, J., Johnson, B., Deushi, M., Michou, M., Mulcahy, J., Nabat, P., Olivié, D., Oshima, N., Sima, A., Schulz, M., Takemura, T., and Tsigaridis, K., 2020: Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study. Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 8381-8404 (IF:7.197).
- 2) Allen, R. J., S. Turnock, P. Nabat, P. Neubauer, U. Lohmann, D. Olivié, N. Oshima, et al., 2020: Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 9641-9663 (IF:7.197).
- 3) Mori, T., Y. Kondo, S. Ohata, Y. Zhao, P. R. Sinha, N. Oshima, H. Matsui, N. Moteki, and M. Koike, 2020: Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. Journal of Geophysical Research Atmosphere, 125, e2019JD032240 (IF: 5.217) .
- 4) Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, 2020: Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. Progress in Earth and Planetary Science, 7, 38 (IF: 3.875).

- 5) Moseid, K. O., M. Schulz, T. Storelvmo, I. R. Julsrud, D. Olivie, P. Nabat, M. Wild, J. N. S. Cole, T. Takemura, N. Oshima, S. E. Bauer, and G. Gastineau, 2020: Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 16023–16040(IF:7.197).
- 6) Thornhill, G. D., W. J. Collins, R. J. Kramer, D. Olivie, R. B. Skeie, F. M. O'Connor, N. L. Abraham, R. Checa-Garcia, S. E. Bauer, M. Deushi, L. K. Emmons, P. M. Forster, L. W. Horowitz, B. Johnson, J. Keeble, J.-F. Lamarque, M. Michou, et al., 2021: Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols - a multi-model comparison. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 853–874(IF:7.197).
- 7) Allen, R. J., L. W. Horowitz, V. Naik, N. Oshima, F. M. O'Connor, S. Turnock, S. Shim, P. Le Sager, T. van Noije, K. Tsigaridis, S. E. Bauer, L. T. Sentman, J. G. John, C. Broderick, M. Deushi, G. A. Folberth, S. Fujimori, and W. J. Collins, 2021: Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions. *Environmental Research Letters*, 16, 034010 (IF:6.947).
- 8) Amino, T., Y. Iizuka, S. Matoba, R. Shimda, N. Oshima, T. Suzuki, T. Ando, T. Aoki, and K. Fujita, 2021: Increasing dust emission from ice free terrain in southeastern Greenland since 2000. *Polar Science*, 27(IF: 2.355).
- 9) Koike, M., K. Goto-Azuma, Y. Kondo, H. Matsui, T. Mori, N. Moteki, S. Ohata, H. Okamoto, N. Oshima, K. Sato, T. Takano, Y. Tobo, J. Ukita, and A. Yoshida, 2021: Studies on Arctic aerosols and clouds during the ArCS project. *Polar Science*(IF: 2.355).
- 10) Aizawa, T., M. Ishii, N. Oshima, S. Yukimoto, and H. Hasumi, 2021: Arctic warming and associated sea ice reduction in the early 20th century induced by natural forcings in MRI-ESM2.0 climate simulations and multi-model analyses. *Geophysical Research Letters*, 48(IF:5.576).
- 11) Jones, C. D., J. E. Hickman, S. T. Rumbold, J. Walton, R. D. Lamboll, R. B. Skeie, S. Fiedler, P. M. Forster, J. Rogelj, M. Abe, M. Botzet, K. Calvin, C. Cassou, J. N. S. Cole, P. Davini, M. Deushi, M. Dix, J. C. Fyfe, N. P. Gillett, T. Ilyina, et al., 2021: The Climate Response to Emissions Reductions due to COVID-19: Initial Results from CovidMIP. *Geophysical Research Letters*, 48(IF: 5.576).
- 12) Mori, T., Y. Kondo, S. Ohata, K. Goto-Azuma, K. Fukuda, Y. Ogawa-Tsukagawa, N. Moteki, A. Yoshida, M. Koike, P. R. Sinha, N. Oshima, H. Matsui, Y. Tobo, M. Yabuki and W. Aas, 2021: Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 126, e2020JD034110 (IF:5.217).
- 13) Hattori, S., Y. Iizuka, B. Alexander, S. Ishino, K. Fujita, S. Zhai, T. Sherwen, N. Oshima, R. Uemura, A. Yamada, N. Suzuki, S. Matoba, A. Tsuruta, J. Savarino, N. Yoshida, 2021: Isotopic Evidence for Acidity-driven Enhancement of Sulfate Formation after SO₂ emission control. *Science Advances*, 7(19), eabd4610(IF:14.98).
- 14) Parrish, D. D., Derwent, R. G., Turnock, S. T., O'Connor, F. M., Staehelin, J., Bauer, S. E., Deushi, M., Oshima, N., Tsigaridis, K., Wu, T., and Zhang, J., 2021: Investigations on the Anthropogenic Reversal of the Natural Ozone Gradient

- between Northern and Southern Mid-latitudes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 9669-9679(IF:7.197).
- 15) Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatrri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Mak, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geoscientific Model Development*, 14, 2235-2264(IF:6.892).
 - 16) Ohata, S., Mori, T., Kondo, Y., Sharma, S., Hyvärinen, A., Andrews, E., Tunved, P., Asmi, E., Backman, J., Servomaa, H., Veber, D., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Krejci, R., Zieger, P., Koike, M., Kanaya, Y., Yoshida, A., Moteki, N., Zhao, Y., et al., 2021: Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 6723-6748(IF:4.184).
 - 17) Ohata, S., Koike, M., Yoshida, A., Moteki, N., Adachi, K., Oshima, N., Matsui, H., Eppers, O., Bozem, H., Zanatta, M., and Herber, A. B., 2021: Arctic black carbon during PAMARCMiP 2018 and previous aircraft experiments in spring. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 15861-15881(IF:7.197).
 - 18) Aizawa, T., N. Oshima, and S. Yukimoto, 2022: Contributions of anthropogenic aerosol forcing and multidecadal internal variability to mid-20th century Arctic cooling-CMIP6/DAMIP multimodel analysis. *Geophysical Research Letters*, 49 (IF: 5.576).
 - 19) Zanis, P., D. Akritidis, S. Turnock, V. Naik, S. Szopa, A. K. Georgoulias, S. E. Bauer, M. Deushi, L. W. Horowitz, J. Keeble, P. Le Sager, F. M. O'Connor, N. Oshima, K. Tsigaridis, T. van Noije, 2022: Climate change penalty and benefit on near surface ozone: A global perspective based on CMIP6 Earth System Models. *Environmental Research Letters*, 17, 024014 (IF:6.947).
 - 20) Bowman, H., Turnock, S., Bauer, S. E., Tsigaridis, K., Deushi, M., Oshima, N., O'Connor, F. M., Horowitz, L., Wu, T., Zhang, J., and Parrish, D. D., 2022: Changes in anthropogenic precursor emissions drive shifts in the ozone seasonal cycle throughout the northern midlatitude troposphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 3507-3524(IF:7.197).
 - 21) Whaley, C. H., Mahmood, R., von Salzen, K., Winter, B., Eckhardt, S., Arnold, S., Beagley, S., Becagli, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Damani, S. M., Dong, X., Eleftheriadis, K., Evangeliou, N., Faluvegi, G., Flanner, M., (略), Oshima, N., et al., 2022: Model evaluation of short-lived climate forcings for the Arctic Monitoring and Assessment Programme: a multi-species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 5775-5828(IF:7.197).
 - 22) Adachi, K., N. Oshima, N. Takegawa, N. Moteki, and M. Koike, 2022: Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, 3, 134(IF:7.290).
 - 23) Hassan, T., R. J. Allen, W. Liu, S. Shim, T. van Noije, P. Le Sager, N. Oshima, M. Deushi, C. A. Randles and F. M. O'Connor, 2022: Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic Meridional Overturning Circulation through radiative forcing effects. *Communications Earth & Environment*, 3, 149(IF:7.290).

- 24) Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. SOLA, 18, 218-224(IF:2.349).
- 25) Zeng G., O. Morgenstern, J.H.T. Williams, F.M. O' Connor, P.T. Griffiths, J. Keeble, M. Deushi, L.W. Horowitz, V. Naik, L.K. Emmons, N.L. Abraham, A.T. Archibald, S.E. Bauer, B. Hassler, M. Michou, M.J. Mills, L.T. Murray, N. Oshima, L.T. Sentman et al., 2022: Attribution of stratospheric and tropospheric ozone changes between 1850 and 2014 in CMIP6 models. Journal of Geophysical Research Atmosphere, 127, e2022JD036452(IF:5.217).
- 26) Iizuka, Y., Uemura, R., Matsui, H., Oshima, N., Kawakami, K., Hattori, S., Ohno, H., and Matoba, S., 2022: High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland. Journal of Geophysical Research Atmosphere, 127, e2022JD036880(IF:5.217).
- 27) Ushijima, Y., H. Tsujino, K. Sakamoto, M. Ishii, T. Koshiro, N. Oshima, 2022: Effects of Anthropogenic Forcings on Multidecadal Variability of the Sea Level Around the Japanese Coast Simulated by MRI-ESM2.0 for CMIP6. Geophysical Research Letters, 49, e2022GL099987(IF: 5.576).
- 28) Yukimoto, S., N. Oshima, H. Kawai, M. Deushi, and T. Aizawa, 2022: Role of Interhemispheric Heat Transport and Global Atmospheric Cooling in Multidecadal Trends of Northern Hemisphere Precipitation. Geophysical Research Letters, 49(IF: 5.576).
- 29) Brown, F., G. A. Folberth, S. Sitch, S. Bauer, M. Bauters, P. Boeckx, A. W. Cheesman, M. Deushi, I. D. Santos, C. Galy-Lacaux, J. Haywood, J. Keeble, L. M. Mercado, F. M. O'Connor, N. Oshima et al., 2022: The ozone-climate penalty over South America and Africa by 2100. Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 12331-12352(IF:7.197).
- 30) von Salzen, K., Whaley, C. H., Anenberg, S. C., Dingenen, R. V., Klimont, Z., Flanner, M. G., Mahmood, R., Arnold, S. R., Beagley, S., Chien, R.-Y., Christensen, J., Eckhardt, S., Ekman, A. M. L., Oshima, N. et al., 2022: Clean air policies are key for successfully mitigating Arctic warming. Communications Earth & Environment, 3, 222(IF:7.290).
- 31) Whaley, C. H., Law, K. S., Hjorth, J. L., Skov, H., Arnold, S. R., Langner, J., Pernov, J. B., Bergeron, G., Bourgeois, I., Christensen, J. H., Chien, R.-Y., Deushi, M., Oshima, N. et al., 2023: Arctic tropospheric ozone: assessment of current knowledge and model performance. Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 637-661(IF:7.197).
- 32) Wu, J., Y. Kurosaki, T. T. Sekiyama, and T. Maki, 2023: Effects of Dry Vegetation Coverage Estimated from the MODIS Soil Tillage Index on Dust Occurrence: Verification by Surface Synoptic Observations, Journal of the Meteorological Society of Japan, 101, 67-77(IF:3.356).
- 33) Sekiyama, T. T., Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, 2023: Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia, J. Geophys. Res.-Atmos., 128, e2022JD037295 (IF:5.217)
- 34) 大島長, 2022: 気候システムでエアロゾルがもたらす便益と不利益. エアロゾル研究, 37, 189-200.

【サブテーマ3】

- 1) Kono, A., and T. Okuro, 2021: Spatial distribution of shrubs impacts relationships among saltation, roughness, and vegetation structure in an East Asian rangeland. *Land*, 10, 1224(IF:3.9)
- 2) Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0. *SOLA*, 18, 218-224(IF:2.349)
- 3) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, B. Gantsetseg, A. Davaadorj, M. Ishizuka, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, and T. Maki, 2021: Effect of stones on the sand saltation threshold during natural sand and dust storms in a stony desert in Tsogt-Ovoo in the Gobi Desert, Mongolia. *J. Arid Land*, 13, 653-673(IF:2.483)
- 4) Kong, K., B. Nandintsetseg, M. Shinoda, M. Ishizuka, Y. Kurosaki, T. Bat-Oyun, and B. Gantsetseg, 2021: Seasonal variations in threshold wind speed for saltation depending on soil temperature and vegetation: A case study in the Gobi Desert. *Aeolian Res.*, 52, 1-11(IF:3.988)
- 5) Wu, J., Y. Kurosaki, B. Gantsetseg, M. Ishizuka, T. T. Sekiyama, B. Buyantogtokh, and J. Liu, 2021: Estimation of dry vegetation cover and mass from MODIS data: Verification by roughness length and sand saltation threshold. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 102, 102417(IF:7.672)
- 6) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, M. Ishizuka, B. Gantsetseg, and G. Batjargal, 2022: Estimating the sand saltation thresholds from Sentinel-1 SAR data in the Gobi Desert, Mongolia. *J. Arid. Environ.*, 202, 104772(IF:2.759)
- 7) Wu, J., Y. Kurosaki, T. T. Sekiyama, and T. Maki, 2023: Effects of dry vegetation coverage estimated from the MODIS soil tillage index on dust occurrence: Verification by surface synoptic observations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 101(1), 67-77(IF:3.356)
- 8) Sekiyama, T. T., Y. Kurosaki, M. Kajino, M. Ishizuka, B. Buyantogtokh, J. Wu, and T. Maki, 2023: Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 128, e2022JD037295(IF:5.217)

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

- 1) 大黒俊哉：北海道芝草研究会報，46，3-8（2022）「持続可能な土地管理にむけた草原生態系の保全・再生」
- 2) 大黒俊哉，山田晋：ランドスケープ研究，86，302-305（2023）「在来の草本植物を用いた緑化の現状と可能性」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 清水厚, 西澤智明, 神慶孝 (2022) SPM・PM_{2.5} を利用した黄砂検出結果と気象庁目視観測結果の比較. 日本気象学会2022年度秋季大会, 同予稿集, 468
- 2) 清水厚, 西澤智明, 神慶孝 (2022) AD-Net/そらまめ/気象台観測から見た2021年3月の黄砂現象. 第40回レーザーセンシングシンポジウム, 同予稿集, 60-62
- 3) 清水厚, 西澤智明, 神慶孝, 杉本伸夫 (2022) LED利用視程計から得られた消散係数とライダー観測結果との比較. 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会, 同講演要旨集, 141-142
- 4) Shimizu A., Nishizawa T., Jin Y., Sugimoto N. (2022) A difference of the Depolarization Ratio Detected at Locally Generated Dust Layers and Transported Asian Dust Layers over Japan with AD-Net. The 30th International Laser Radar Conference, Abstracts
- 5) 清水厚, 西澤智明, 神慶孝 (2021) 大気環境常時監視データを利用した日本国内における黄砂イベントの検出. 日本気象学会2021年度春季大会, 同予稿集, 111
- 6) 清水厚 (2021) 持続可能な黄砂監視に向けた常時監視局データの活用. 第38回エアロゾル科学・技術研究討論会, 同要旨集
- 7) 清水厚, 杉本伸夫, 神慶孝, 西澤智明, 櫻井元樹, 鈴木公治 (2021) LED利用小型視程計とAD-Netライダーによるエアロゾル観測結果の比較. 第39回レーザーセンシングシンポジウム, 同予稿集, 139-140

【サブテーマ2】

- 1) Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, Effective Radiative Forcing Estimates of Anthropogenic Aerosols in MRI-ESM2, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 2020年7月, オンライン
- 2) 眞木貴史, 田中泰宙, 関山剛, 大島長, 小木昭典, 弓本桂也, 鎌田茜, 大竹潤, 齋藤篤思, 上清直隆, Recent DSS related activities at the Japan Meteorological Agency and Meteorological Research Institute, 日中韓黄砂共同研究第一作業部会会合, 2020年10月, (オンライン)
- 3) Oshima, N., S. Yukimoto, M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, T. Y. Tanaka, and K. Yoshida, Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0, Tri-MIPathlon-3, 2021年12月, イギリス, (オンライン)
- 4) Maki, T., T. T. Sekiyama, N. Oshima, J. Ohtake, Y. Nagai, T. Y. Tanaka, M. Kajino, K. Yumimoto, and A. Shimizu, Current project and activities in Japan, 8th SDS-WAS Asian node RSG meeting, 2022年10月, 韓国, 済州
- 5) Maki, T., Recent DSS related activities at the Meteorological Research Institute, The 15th Meeting of Working Group (I) for Joint Research on Dust and Sand Storms, 2022年11月, 韓国, 済州
- 6) Oshima, N., M. Deushi, T. Aizawa, and S. Yukimoto, Impacts of Short-lived Climate Forcers on the Arctic Climate by MRI-ESM2.0 and Multi-model Analyses, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), 2023年3月, 東京都立川市
- 7) 眞木貴史, 田中泰宙, 関山剛, 大島長, 梶野瑞王, 気象研究所地球システムモデルを用いた黄砂発生量予測, 大気化学討論会, 2020年11月, (オンライン)
- 8) 大島長, 行本誠史, 出牛 真, 神代 剛, 川合秀明, 田中泰宙, 吉田康平, 気象研究所地球システムモデルを用いた人為起源気体とエアロゾルによる有効放射強制力の推定, 第25回大気化学討論会, 2020年11月, 名古屋市

- 9) 大島長, 気象研究所地球システムモデルを用いた北極気候研究(放射強制力、20世紀前半の北極温暖化、COVID-19による気候影響評価), ArCS II 第2回全体会合, 2021年6月, (オンライン)
- 10) 大島長, アイスコア観測と全球モデル計算との比較, グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2021年9月, オンライン
- 11) 大島 長, アイスコアと気象研究所地球システムモデルによるエアロゾル沈着量の長期変化, グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会, 2022年11月, 北海道函館市

【サブテーマ3】

- 1) Kimura, K., A. Kono, S. Yamada, T.F. Koyanagi and T. Okuro, The 9th East Asian Federation of Ecological Societies (EAFES) International Congress: Online (2021) “The facilitation effects of sand fixing plant *Caragana microphylla* on native grass *Agropyron cristatum* in Hulun Buir Grass land, China.”
- 2) Kimura, K., A. Kono, S. Yamada, T.F. Koyanagi and T. Okuro, International Consortium of Landscape and Ecological Engineering (ICLEE) 2021 International Conference: Online (2021) “Protecting effect of sand fixing plant from grazing on native grass in arid land of Northern Asia.”
- 3) Okuro, T., The 14th Meeting of Working Group II for Joint Research on DSS among Japan, China and Korea: Online (2021) “Comparison of nurse effect between different countermeasures for dryland rehabilitation in Northeast China.”
- 4) Okuro, T. and Y. Kurosaki, The 14th Meeting of Working Group II for Joint Research on DSS among Japan, China and Korea: Online (2021) “Prediction and detection of variability in Asian dust emission and transport affected by climate change.”
- 5) Okuro, T. and Y. Kurosaki, The 15th Meeting of Working Group II for Joint Research on DSS among Japan, China and Korea: Online (2021) “Prediction and detection of variability in Asian dust emission and transport -Introduction of research activities funded by ERTDF.”
- 6) 大黒俊哉, 北海道芝草研究会講演会: オンライン (2022) 持続可能な土地管理にむけた草原生態系の保全・再生.
- 7) Okuro, T., and U. Jamsran, The 1st International Conference Natural and Biological Resources Technologies, Ulaanbaatar, Mongolia (2022) “Two steps of landscape and ecological engineering approaches for restoration of degraded grasslands towards sustainable use of biological resources in Mongolia.”
- 8) Kong, K., B. Nandintsetseg, M. Shinoda, M. Ishizuka and Y. Kurosaki, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Online (2020) “What are the main land-surface processes affecting saltation activities in a dust hotspot of the Mongolian desert steppe?”
- 9) Wu, J., Y. Kurosaki, T.T. Sekiyama and T. Maki, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2022, Chiba (2022) “Effects of non-photosynthetic vegetation cover on dust occurrence in the Gobi region.”
- 10) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, M. Ishizuka, B. Gantsetseg and G. Batjargal, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2022, Chiba (2022) “Estimating the sand saltation thresholds from Sentinel-1 SAR data in the Gobi Desert, Mongolia.”
- 11) Kono, A., and T. Okuro, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (2020) “Effects of various vegetation factors on sand saltation from the viewpoint of roughness.”

- 12) Okuro, T., JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (2020) “Comprehensive research for land system science towards sustainable land management in Asia.”
- 13) Okuro, T., The 34th International Geographical Congress (IGC): Online (2021) “Network of comprehensive researches and education for restoration and sustainable land management of degraded landscapes in Asia and Africa.”
- 14) 大橋陽樹, ウンダルマー・ジャムスラン, 大黒俊哉, 日本生態学会第69回全国大会: オンライン (2022) 「モンゴル・ゴビステップにおける高ストレス耐性種*Chloris virgata*の分布特性」
- 15) 服部紘依, ウンダルマー・ジャムスラン, 大黒俊哉, 日本生態学会第69回全国大会: オンライン (2022) 「モンゴルの荒廃草原における高ストレス耐性種*Chloris virgata*の成長特性。」
- 16) Kimura, K. and T. Okuro, The 13th International Congress of Ecology (INTECOL 2022): Online (2022) “Potential of the combination of artificial biocrust and microbial biomineralization as land rehabilitation method.”
- 17) 木村圭一, 大黒俊哉, 日本生態学会第70回全国大会: オンライン (2023) 「土地修復技術としての微生物による鉱物形成作用とバイオクラストの併用の可能性」
- 18) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, M. Ishizuka, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, A. Tsunekawa and M. Tsubo, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Online (2020) “Effect of stone on threshold friction velocity in Tsogt-Ovoo, Mongolia: Observation and Model simulation.”
- 19) Wu, J., Y. Kurosaki, G. Batdelger, A. Cahppell, M. Ishizuka, and B. Buyantogtokh, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Online (2020) “Monitoring dry-season vegetation mass at a dust hotspot (Tsogt-Ovoo) in the northern Gobi Desert.”
- 20) Buyantogtokh, B., Y. Kurosaki, A. Tsunekawa, M. Tsubo, B. Gantsetseg, A. Davaadorj, M. Ishizuka, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka and T. Maki, American Geophysical Union (AGU) Fall meeting 2021, Online (2021) “Effect of stones on the sand saltation threshold during natural sand and dust storms in a stony desert in Tsogt-Ovoo in the Gobi Desert, Mongolia.”
- 21) Wu, J., Y. Kurosaki, G. Batdelger, B. Batjargal, M. Ishizuka, T. Sekiyama and J. Liu, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2021, Online (2021) “Estimation of non-photosynthetic vegetation amount in the northern Gobi Desert using MODIS satellite data.”
- 22) Wu, J., Y. Kurosaki, G. Batdelger, B. Batjargal, M. Ishizuka, T. Sekiyama and J. Liu, American Geophysical Union (AGU) Fall meeting 2021, Online (2021) “Improved estimations of dry vegetation cover and mass using MODIS data at a dust hotspot in the Gobi Desert.”

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 日中韓黄砂共同研究(TEMM-DSS) ワーキンググループ1 年次会合における拡大ワークショップでの外部向け講演(2021年9月30日、オンライン)
- 2) 京都大学生存圏研究所主催生存圏フォーラム特別講演会における招待講演(2021年10月30日、ハイブリッド(京都府宇治市きはだホール+オンライン))
- 3) 国立環境研究所公開シンポジウムにおけるポスター発表(2022年6月23日、オンライン)

【サブテーマ2】

- 1) 気象研究所研究成果発表会(2022年12月12日) 「地球システムモデルを用いた黄砂の長期変

化等について」、眞木貴史

【サブテーマ3】

- 1) 黒崎泰典，鳥取大学乾燥地研究センター，JST鳥取大学ジュニアドクター育成塾（2022）モンゴル～黄砂研究の最前線～.
- 2) 山中典和，黒崎泰典，鳥取大学乾燥地研究センター，令和4年度鳥取大学地域連携エクステンション第6回講義（10月16日）「砂漠化と黄砂」<https://sites.google.com/tottori-u.ac.jp/learning-extension/%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0>
- 3) JST鳥取大学ジュニアドクター育成塾令和4年度探究プログラム「鳥取に飛来する黄砂」<https://www.jst.go.jp/cpse/fsp/event/pdf/theme2022.pdf>

（4）マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

- 1) 日本テレビZIP(2021年3月31日、2021年の黄砂の動向について解説インタビュー)
- 2) NHKニュースウォッチ9(2023年4月11日、近年の黄砂の傾向に関して解説インタビュー)
- 3) NHKサタデーウォッチ9(2023年4月15日、ライダーによる黄砂観測の紹介、環境省黄砂飛来情報HPの説明)

【サブテーマ2】

- 1) 成果の記者発表（2021年5月7日、プレスリリース、「コロナ禍によるCO₂等排出量の減少が地球温暖化に与える影響は限定的」）
- 2) 成果の記者発表（2022年7月11日、プレスリリース、「対流圏で採取したエアロゾル粒子から隕石由来の物質を電子顕微鏡分析で検出し、それらが成層圏から流れてきていることを示しました」）
- 3) 成果の報道番組での紹介（2023年4月11日、テレビ東京、ワールドビジネスサテライト冒頭の黄砂飛来予測と将来変化について）

【サブテーマ3】

- 1) NHK NEWS WEB(2023年4月12日、2023年4月12-13日の黄砂について解説インタビュー)
- 2) テレビ朝日 グッド！モーニング(2023年4月13日、2023年4月12-13日の黄砂について解説インタビュー)
- 3) TBS サンデーモーニング(2023年4月16日、地球温暖化に伴う今後の黄砂について解説インタビュー)

（5）本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

（6）その他の成果発表

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Prediction and Detection of Variability in Asian Dust Emission and Transport Affected by Climate Change

Principal Investigator: Atsushi SHIMIZU

Institution: National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa,

Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, JAPAN

Tel: +81 29 850 2489 / Fax: +81 29 850 2579

E-mail: shimizua@nies.go.jp

Cooperated by: Meteorological Research Institute, The University of Tokyo, Tottori University

[Abstract]

Key Words: Asian dust, Climate change, Soil surface condition, Earth system model, Lidar observation, Coverage of stone, Flying sand, Intershrub distance

This project was dedicated to the investigation of the relationship between climate change and the long-term variability of Asian dust. It comprised three subthemes: monitoring, numerical experiments, and parameterization of surface conditions in source regions. The outcomes obtained were conveyed to East Asian countries via the framework of the Tripartite Environment Ministers Meeting Joint Research on Dust and Sand Storms (TEMM-DSS).

Continuous monitoring of Asian dust was conducted by the AD-Net lidar observation network, and a sustainable dust detection method based on surface air-quality monitoring was proposed. A SPM-PM_{2.5} threshold value was determined for dust detection and applied to a severe dust event in March 2021. In addition, annual variations in the number of Asian dust days determined by this method were compared with those reported by the Japan Meteorological Agency. The impacts of Asian dust exceeding national standards for PM_{2.5} were examined based on numerical predictions of future atmospheric conditions.

Historical experiments and future projections using a global aerosol model with five warming scenarios were conducted to investigate changes in DSS emissions and the factors contributing to the changes. The results suggested that the decrease in snow cover associated with warming in early spring and late autumn might significantly increase DSS emissions and PM_{2.5} concentrations in the Gobi Desert and its downstream regions. In addition, it was confirmed that the model's DSS reproducibility could be improved by incorporating data on surface conditions and information on DSS emission processes provided by the results of the other subthemes into a regional chemical transport model. To improve numerical dust models, observation data on surface conditions were analyzed. The results showed that (1) Raupach's model worked well with observed stone and dead vegetation coverages; (2) SoilGrids 2.0 global mesh data correlated with the observed stone coverage; and (3) the Soil Tillage Index (STI) obtained from satellite data correlated with the observed dead grass coverage. These results were used to develop a methodology for producing data on the spatial extent of these coverages. Investigation

of the impact of the spatial distribution of vegetation on dust emission revealed that the risk of sand and dust emissions increased when vegetation was heterogeneous with large intershrub distances. Novel vegetation indices related to sand and dust emissions were also developed, and their usefulness in setting goals for land and vegetation management was demonstrated.