

【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 (JPERF20205001)

【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）

研究代表機関：国立研究開発法人国立環境研究所

研究代表者：清水厚

研究実施期間：令和2(2020)年度～令和4(2022)年度

研究分担機関：気象庁気象研究所・東京大学・鳥取大学

1. 研究開発背景等、2. 研究開発目的

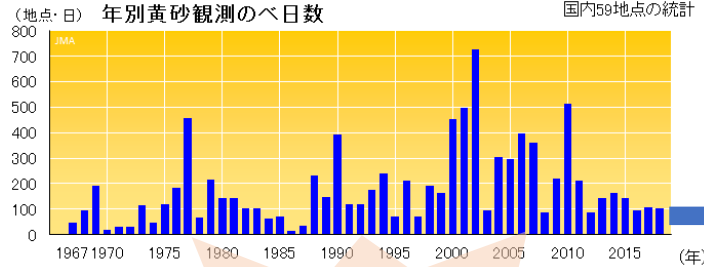
日中韓環境大臣会合(TEMU)黄砂共同研究(TEMU DSS)

WG1(黄砂観測と早期警報システム構築)/WG2(黄砂の発生源対策)→中期計画(2020-2024)において**気候変動が黄砂に与える影響の評価**に関する研究を行うことが求められる

※他に日蒙環境政策対話でも黄砂は課題

日本における黄砂の経年変化

ソース:気象庁HP



一方、気象現業での黄砂目視観測は縮小

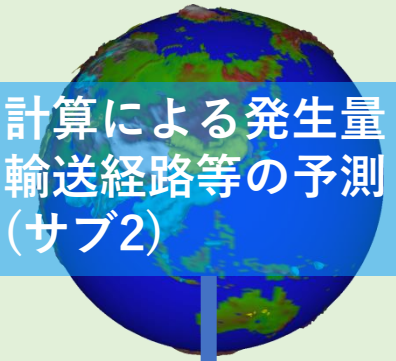
今後は？
また将来PM2.5環境基準超過に対する黄砂の寄与は？

長期変動の検出には別指標が必要→大気汚染監視(SPM,PM2.5等)の活用



NIESライダーネットワークの定量的黄砂情報を参照値に新指標を導出(サブ1)

気象庁エーロゾルモデル MASINGAR mk-2



計算による発生量・輸送経路等の予測(サブ2)

モデル改良のためには地表面情報(植生等)の精緻化が必要

乾燥地におけるフィールド実験からパラメータ取得(サブ3)



日中韓+蒙による黄砂の将来変動に関する共通理解、発生源対策の最適化

[5-2001]

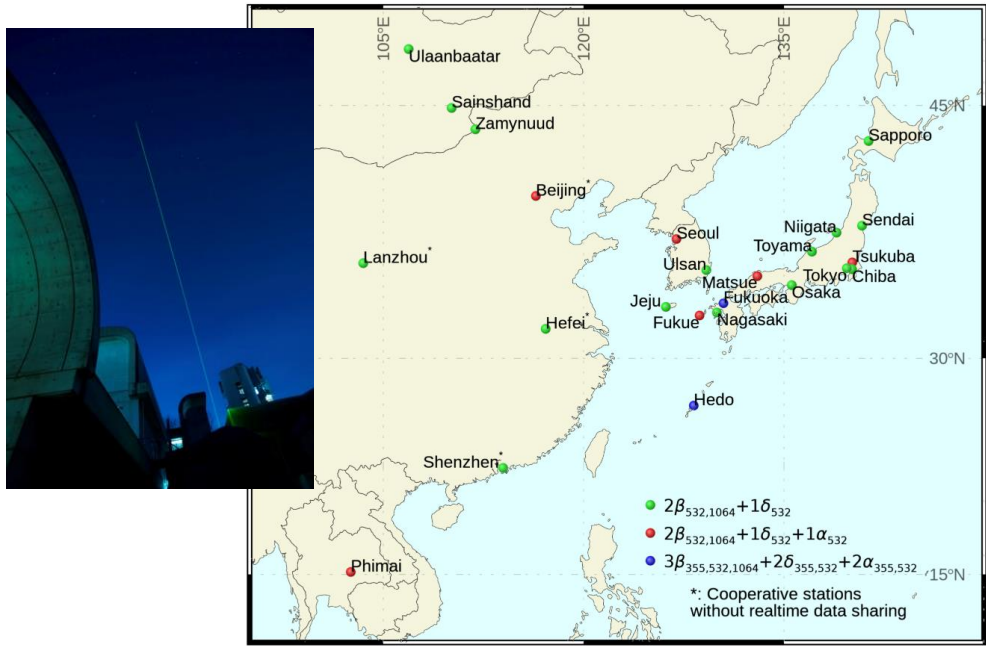
3. 研究目標及び研究計画

[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TEM DSS WGにおける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	サブテーマ2	サブテーマ3
実施機関	国立環境研究所	気象庁気象研究所	東京大学・鳥取大学
サブテーマ名称	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	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	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
目標	常監データによる黄砂判定、モンゴル内観測の充実、PM2.5環境基準への黄砂影響評価	モデルによる過去実験、複数シナリオによる将来予測、モデル改良と現業への反映	発生源の地表面情報・飛砂実態の解明とモデル改善への情報提供、生態系保全条件の提案
令和2年度計画	常監データからの黄砂検出、モデル検証データ提供	過去長期計算、CMIP6温暖化標準シナリオ計算実験	植生・地表面・人間活動の予備解析と野外実験準備
令和3年度計画	観測継続、大気中黄砂と飛砂との比較	複数シナリオ計算実験、地表面パラメータ取り込み	フィールドにおける観測実験・サブ2への指標提供
令和4年度計画	将来の環境基準影響評価、簡易観測ネットワーク充実	黄砂将来変化とりまとめ、現業モデルへの反映作業	複数年変化の評価、生態系保全条件の現地への提示

赤枠は研究計画変更済みの項目

1. ライダーネットワークの性能維持

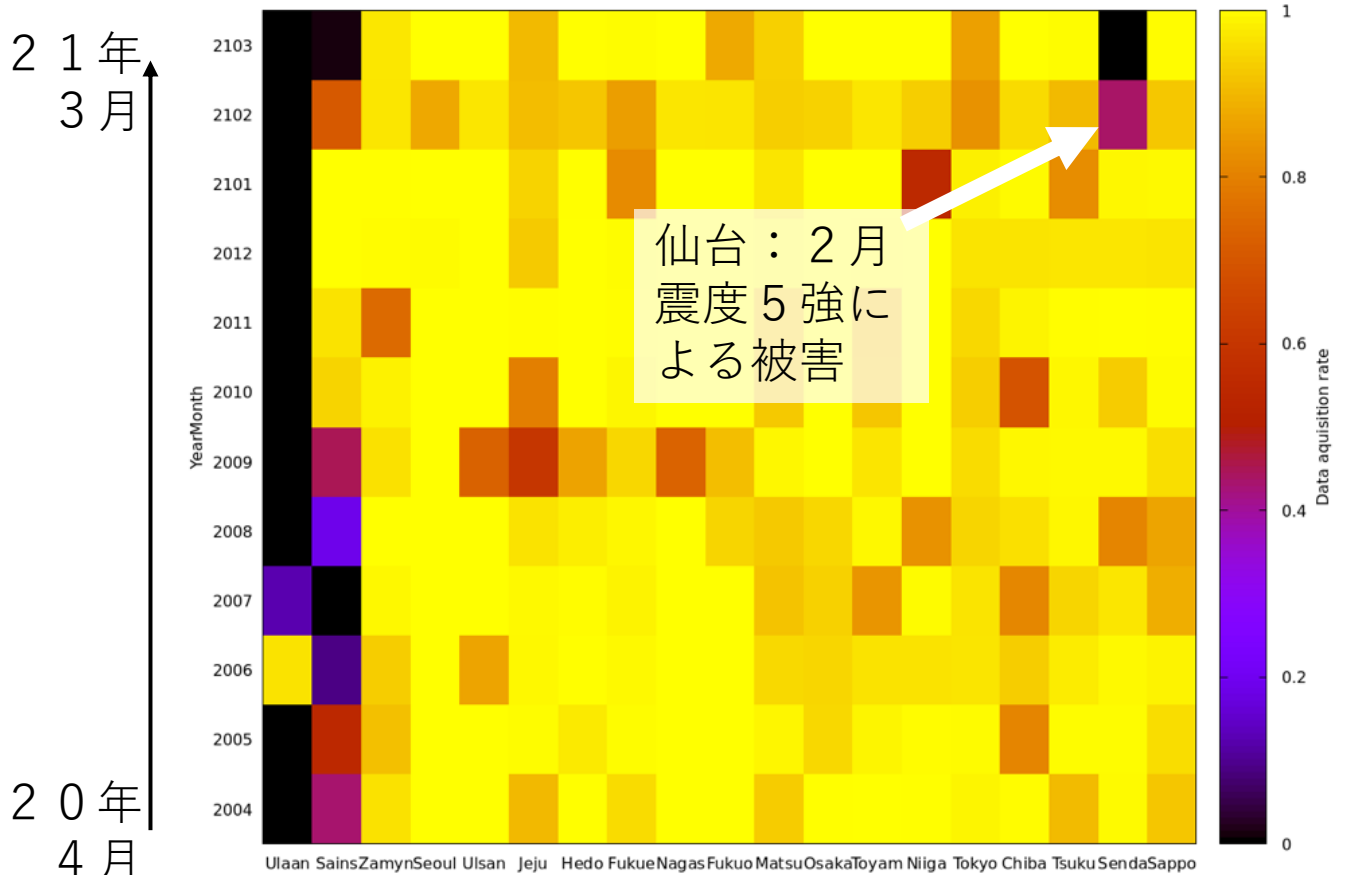


- モンゴルライダー改修 → 延期
- 韓国ライダー定常メンテナンス → 延期
- 国内ライダー定常メンテナンス → 実行



国外ライダーに関しては研究計画変更 (2021.1.18付) により2年度目以降に実施

2020年度における各ライダーの月別データ取得率



モンゴル | 韓国 | 日本

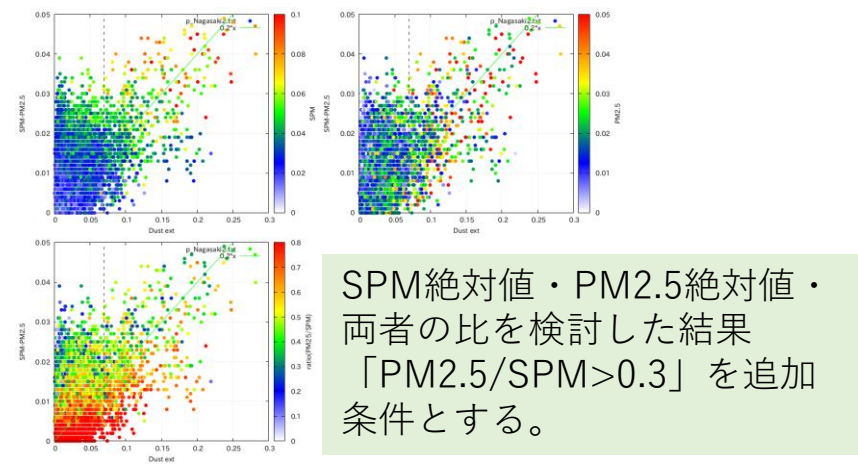
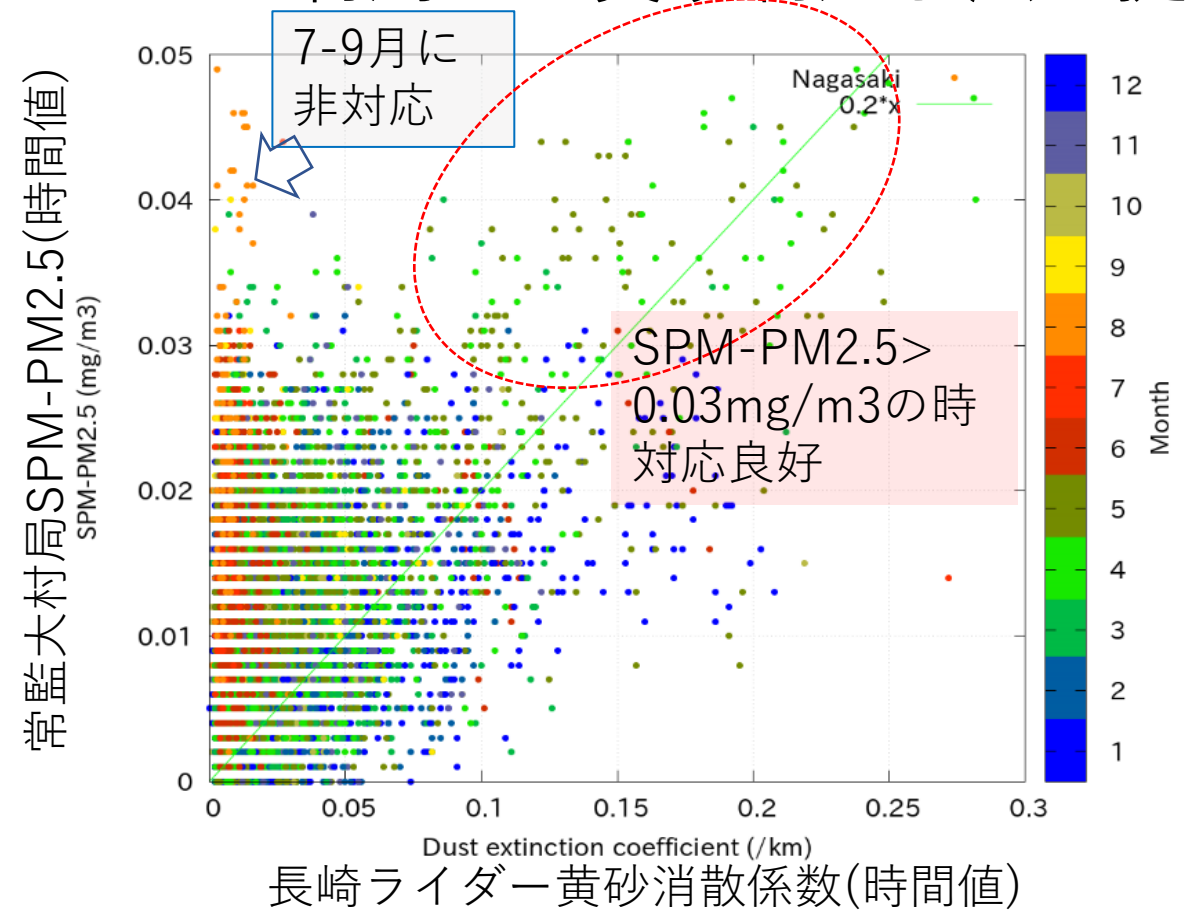
殆どのライダーにおいて観測を継続し、環境省黄砂飛来情報HPにもリアルタイムでデータ提供実施

2. 大気汚染常時監視測定局データを利用した黄砂判定手法の提案

背景：既存の黄砂観測の限界

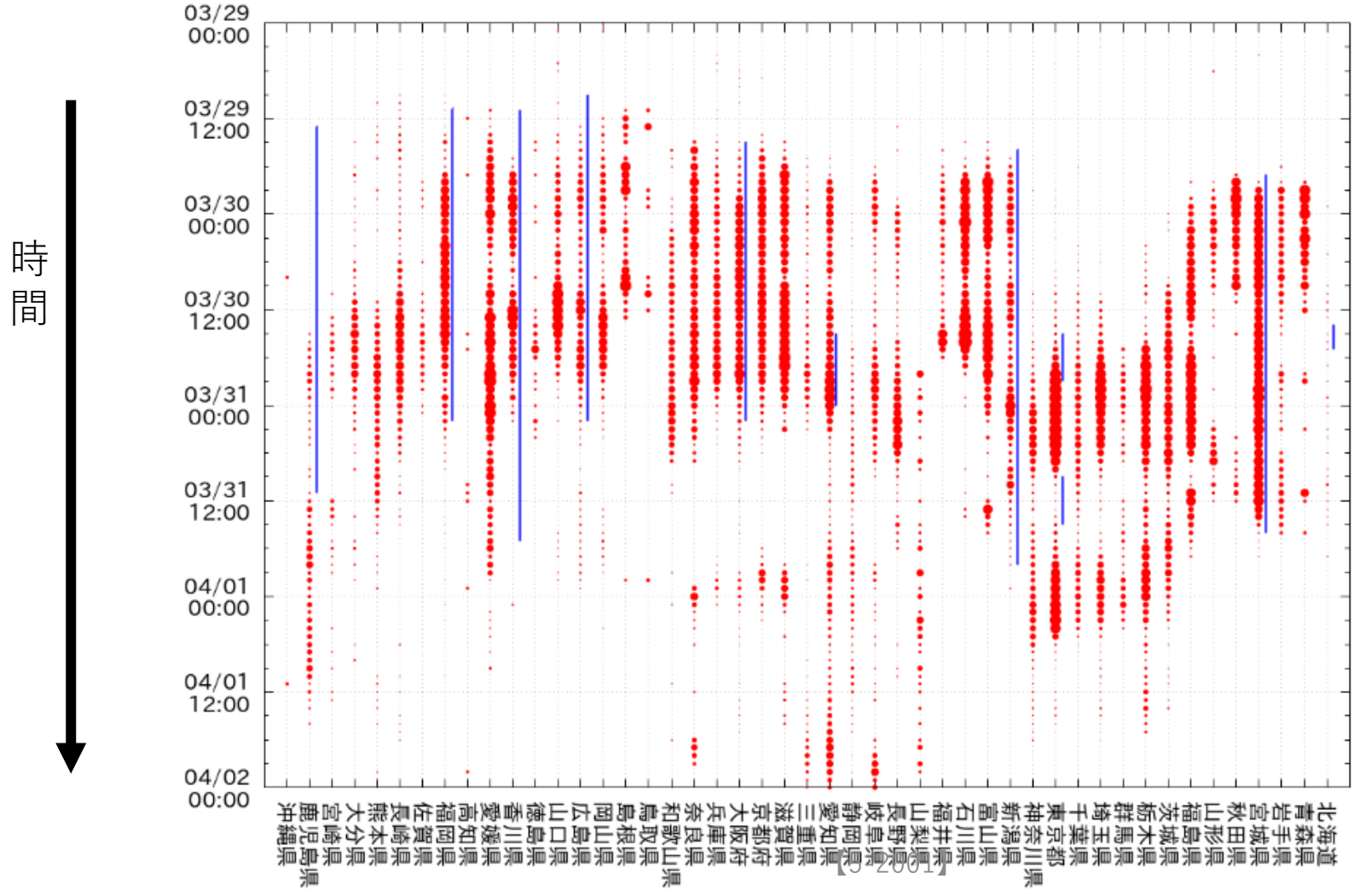
- 気象庁黄砂目視観測59地点→11地点
- PM2.5成分測定→四季x2週間、日単位
- ライダー→本推進費含め研究ベース

長期変動監視のため、持続的かつ定量的な黄砂判定手法が必要→常監局データから黄砂を判定する←ライダーによる過去の黄砂観測結果を参照値として活用

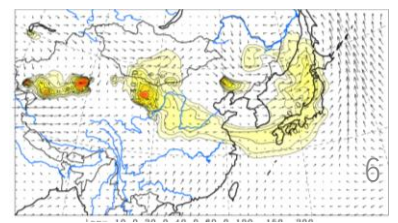


提案：「7-9月を除き、SPM-PM2.5 > 0.03mg/m3かつPM2.5/SPM > 0.3の時、黄砂とみなす」

2. 大気汚染常時監視測定局データを利用した黄砂判定手法の提案 (つづき) 2021年3月末黄砂における全国への適用例

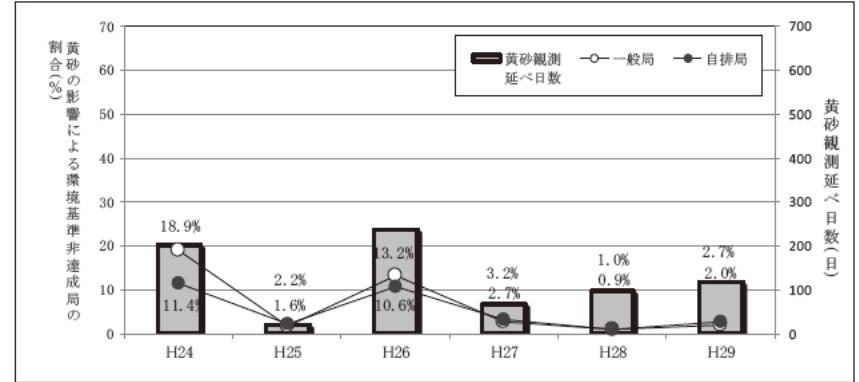


- 赤丸の直径：
県内で条件を満たした局の割合に比例
- 青線：気象庁黄砂観測地点における黄砂時間帯
- ✓ 関東に遅れて届き、東海では持続時間が長いなどの特徴
- ✓ 一部を除き気象庁黄砂時間帯と対応
- ✓ 検証は困難だがモデルによる水平分布とも一部対応

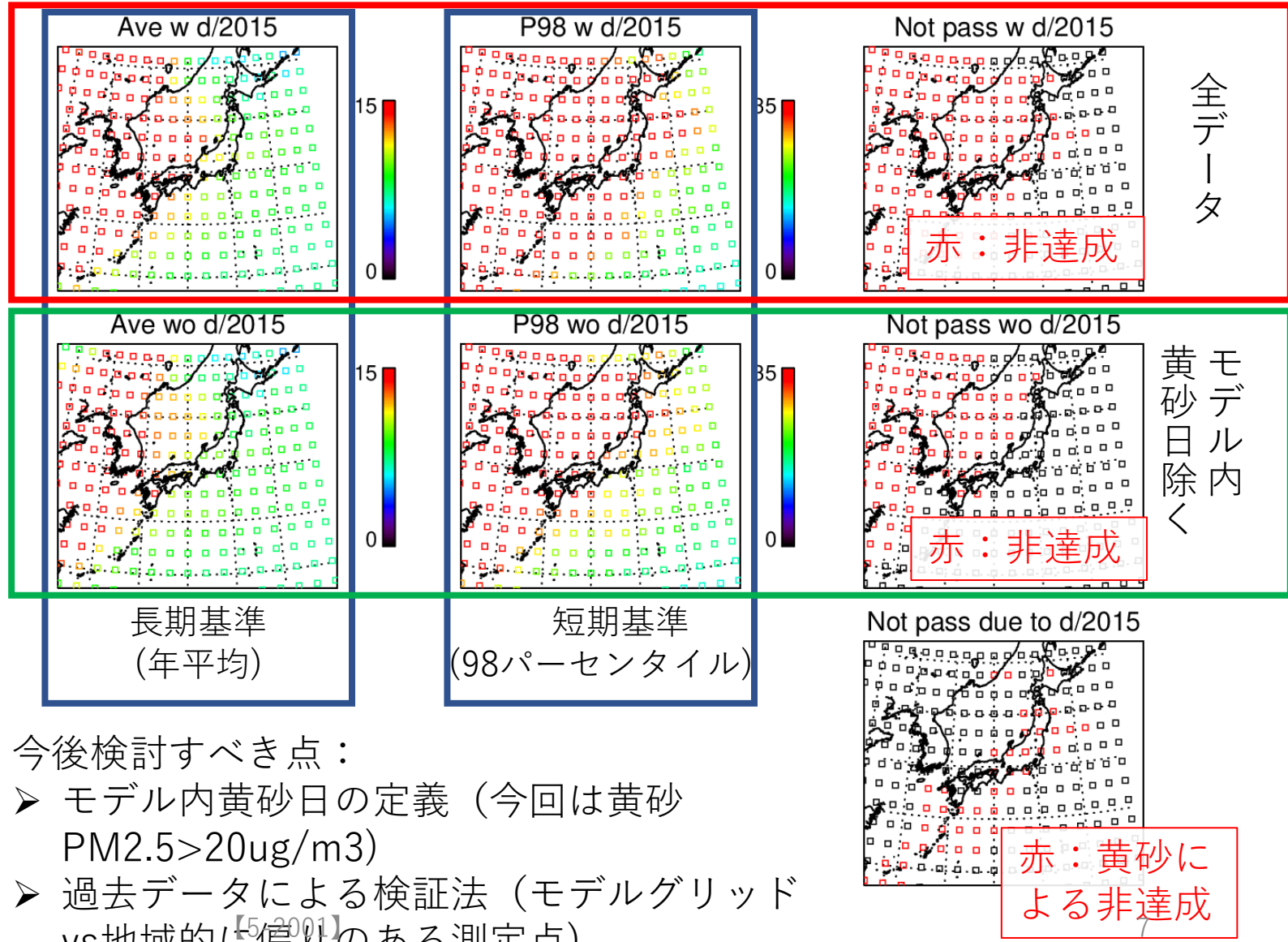


3. PM2.5環境基準に対する黄砂の寄与評価 (準備)

図7-2-12 黄砂の影響による環境基準達成状況



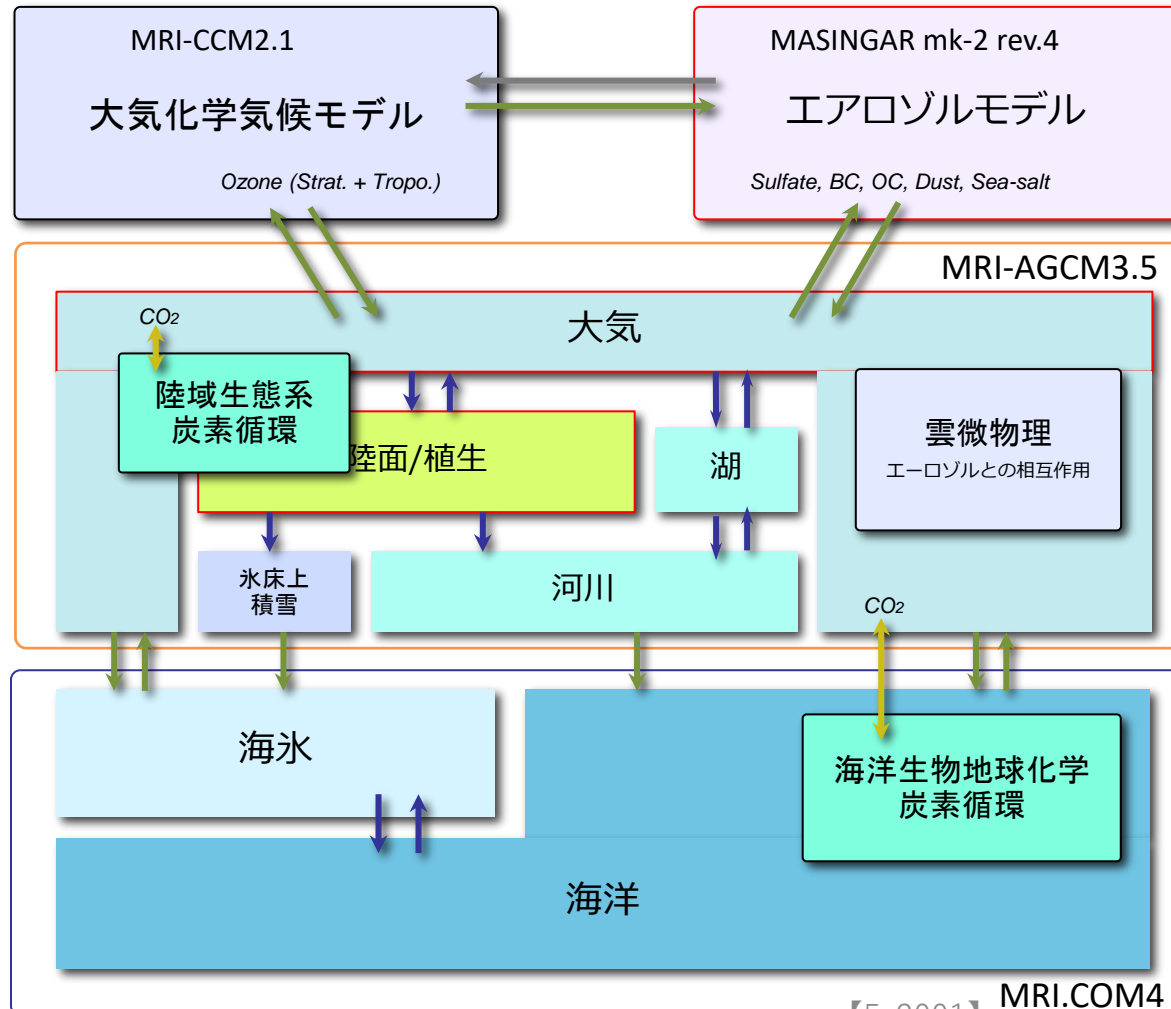
環境省大気汚染状況報告書では、PM2.5環境基準が非達成となった局のうち、何割が黄砂の影響でそうだったのかを見積もっている→将来のこの情報を数値モデルの予測計算結果から導出するため、過去計算結果を利用して手順の策定を行った。



- 今後検討すべき点：
- モデル内黄砂日の定義 (今回は黄砂 PM2.5>20ug/m3)
 - 過去データによる検証法 (モデルグリッド vs 地域的に偏りのある測定点)

気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM2)

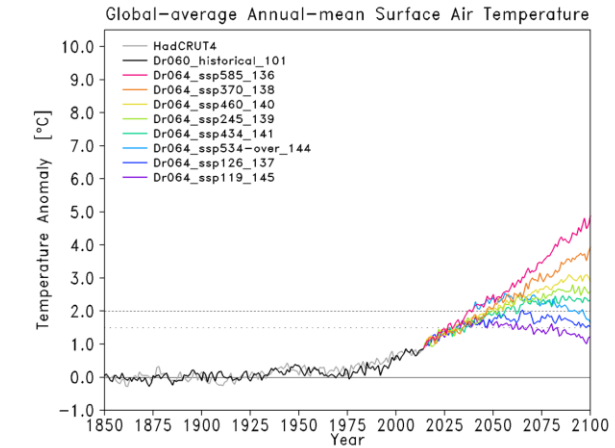
CMIP6に向けて、気候モデルの開発を実施。観測から得られた知見をモデルに反映。様々な改良を実施(エアロゾル、放射、雲、積雲対流、重力波抵抗、化学反応、海洋など)。



ダスト放出過程

- ・ 大気モデルの気象データ
- ・ 陸域生態系モデルの土壌データ
- ・ Shaoスキーム (1996) に準拠して摩擦速度等から計算
- ・ 粒径は10区分 (0.1~10 μ m)
- ・ 外部混合を仮定
- ・ 湿性沈着過程を改良

[Yukimoto, Kawai, Koshiro, Oshima, et al., 2019]



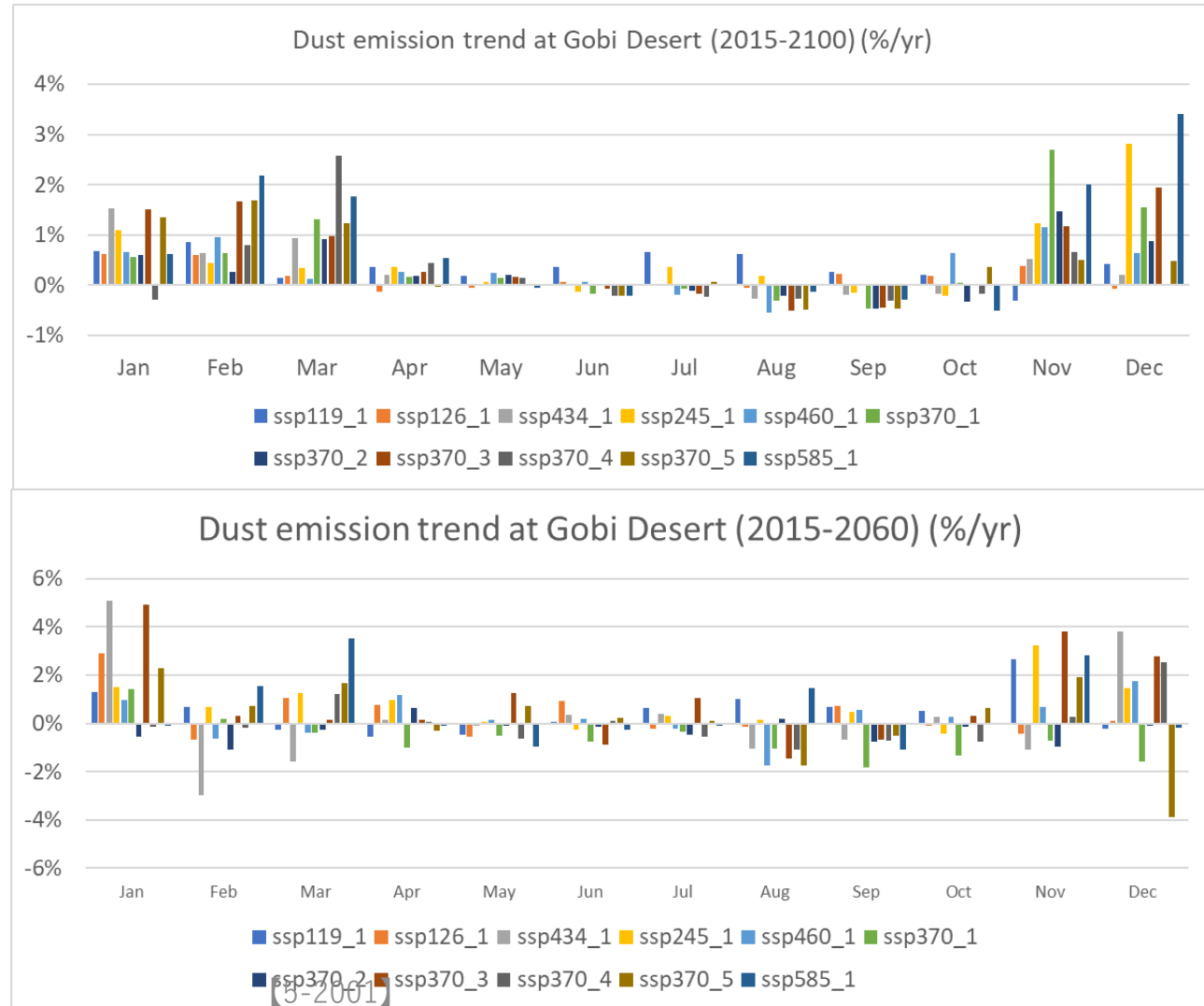
ゴビ砂漠における黄砂発生量変化

気象研地球システムモデル（MRI-ESM2）を用いた将来予測実験にて、日本への影響の大半を占めるゴビ砂漠における月平均黄砂発生量変化傾向を調べた（図）

総放出量で見ると大きな増減は見られなかったが、特に2090年代は寒候期において黄砂放出量が増加する結果が主流となった（上図）

月毎の最大黄砂発生量（顕著イベントの指標）に関しても同様の傾向を示した（図略）

一方、予測期間中期の2050年代等に関しては、2090年代ほど顕著な傾向は見られなかった（下図）



黄砂発生量と関係の深い要素

ゴビ砂漠における黄砂発生量と関係が深いと推定できる各種パラメータとの相関関係を調べた（左：ナッキング実験、右：歴史実験）

相関係数	積雪量	受食性	葉面積	地中温度	摩擦速度	土壌水分	相関係数	積雪量	受食性	葉面積	地中温度	摩擦速度	土壌水分
Jan	0.13	-0.03	-0.24	0.06	0.55	0.07	Jan	-0.12	0.13	0.17	0.15	0.54	-0.13
Feb	-0.05	0.09	0.15	0.20	0.55	-0.07	Feb	-0.26	0.31	0.42	0.50	0.55	-0.11
Mar	-0.23	0.14	0.43	0.38	0.51	-0.08	Mar	-0.11	0.20	0.21	0.03	0.74	-0.10
Apr	0.19	-0.03	-0.16	-0.19	0.64	0.13	Apr	0.01	0.06	0.01	-0.38	0.84	-0.01
May	0.04	0.14	0.17	-0.20	0.71	-0.15	May	-0.01	0.06	-0.13	-0.46	0.80	0.04
Jun	0.17	-0.16	-0.17	-0.30	0.65	-0.03	Jun	0.17	-0.16	-0.19	-0.38	0.71	0.06
Jul	-0.12	0.10	0.00	-0.06	0.64	-0.07	Jul	0.07	-0.13	-0.07	-0.33	0.69	0.01
Aug	0.07	0.02	-0.11	-0.05	0.71	-0.11	Aug	0.14	0.17	-0.16	-0.29	0.75	-0.09
Sep	0.52	0.09	-0.32	-0.41	0.65	0.00	Sep	0.00	0.22	0.24	-0.03	0.65	-0.02
Oct	0.54	0.05	-0.18	-0.34	0.68	0.22	Oct	-0.21	0.21	0.27	0.26	0.50	-0.18
Nov	-0.03	0.21	0.33	0.18	0.44	-0.15	Nov	0.00	0.02	0.03	-0.06	0.60	-0.11
Dec	0.25	-0.27	-0.11	-0.09	0.48	0.09	Dec	0.04	0.03	0.09	0.03	0.64	-0.06
Annual	-0.32	0.26	0.07	0.45	0.75	0.35	Annual	-0.40	0.39	0.14	0.50	0.75	0.09

ナッキング実験、歴史実験共に同様の結果が得られた。このことから、気象場をナッキングしない歴史実験、将来予測実験において黄砂発生量の評価に用いることができると考えられる

年間を通じて常に相関が最も高いのは摩擦速度（地表付近風速）であった

寒候期（特に融雪期）には積雪量と弱い負の相関、地中温度と弱い正の相関が見られた

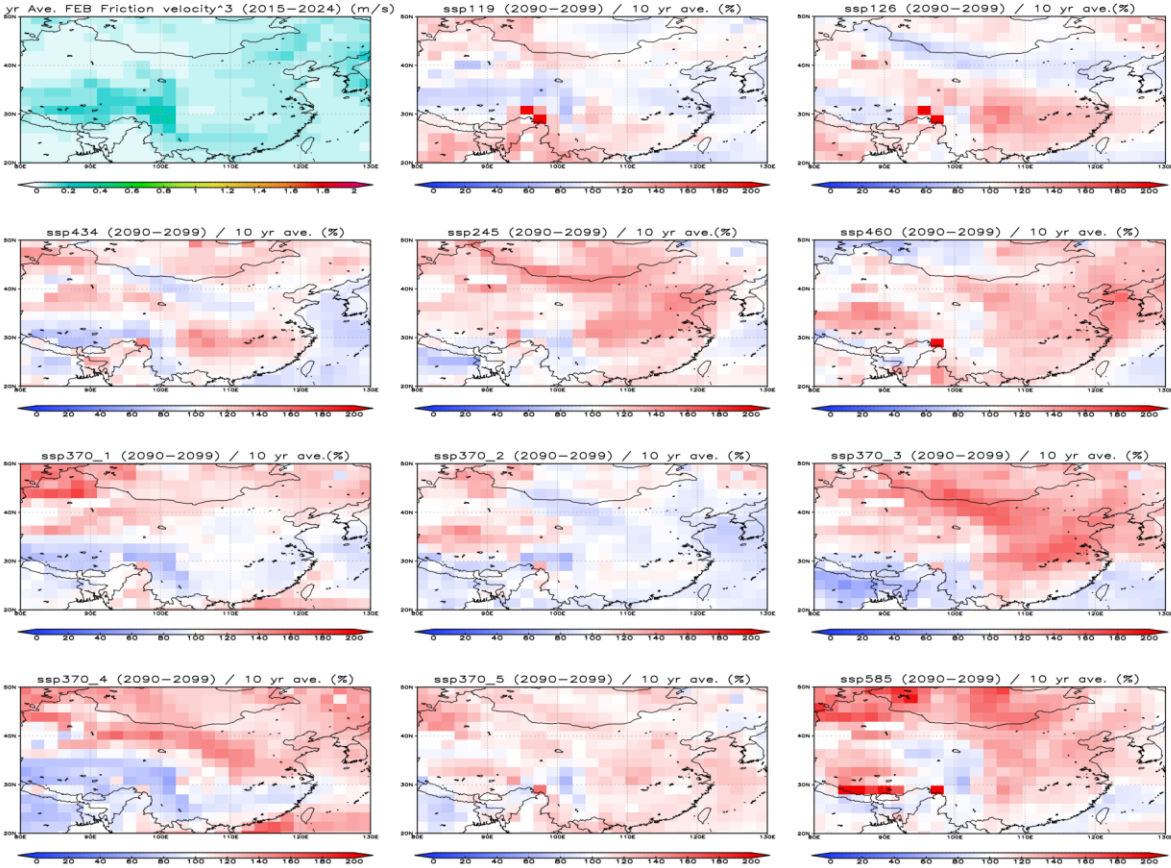
摩擦速度の変化、輸送経路の変化

温暖化が促進するシナリオ (ssp585、ssp370等) においてゴビ砂漠周辺摩擦速度の増加が著しい

黄砂発生量増加の主因になっていると考察できる

日本付近とゴビ砂漠付近の地表付近黄砂濃度比を計算したところ、寒候期は日本付近の黄砂濃度はゴビ砂漠の約10%、暖候期は3%前後で気候変動に伴う大きな変化は見られなかった (図略)

※11~2月に日本への飛来が微減傾向を示したが、詳細な解析が必要



2月の摩擦速度地理分布を示す

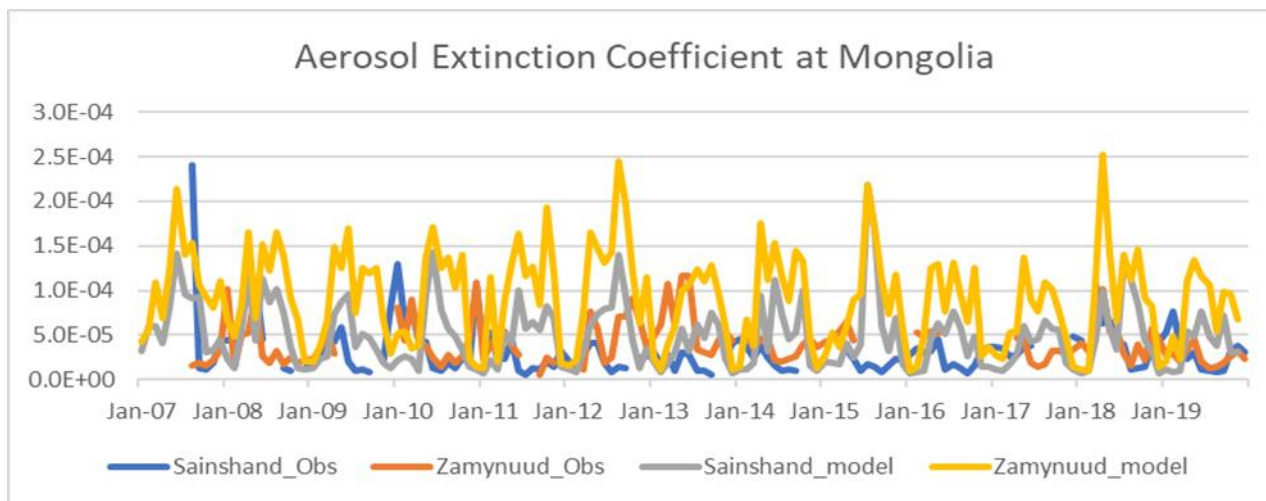
左上が基準年 (2015~2024年) の平均値で、11枚の図は左上から右下に温暖化が進む実験結果を配置した (ssp119、ssp126、ssp434、ssp245、ssp460、ssp370 (5メンバー)、ssp585)。摩擦速度の3乗 (モデルの黄砂放出計算に用いられる量) の基準年 (2015~2024年) に対する比を示す

テーマ間連携

サブテーマ1より黄砂発生源付近のライダー観測データ入手

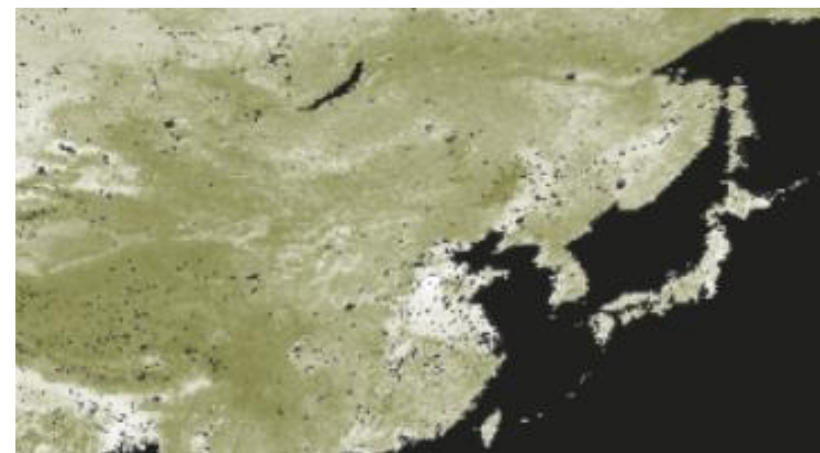
ナッジング実験等との比較により、黄砂発生量トレンド等の比較検証

モデルの過大評価傾向を確認するが、発生量変化トレンドは概ね一致傾向を示した



サブテーマ3より黄砂発生に大きな影響を与えるレキ被覆率（右図）、枯れ草等の最新のデータセット入手

水平解像度の問題があるため、まずは領域化学輸送モデル（NHM-Chem）への導入作業を実施中



サブテーマ1、3に過去再現実験結果を提供した

解析結果

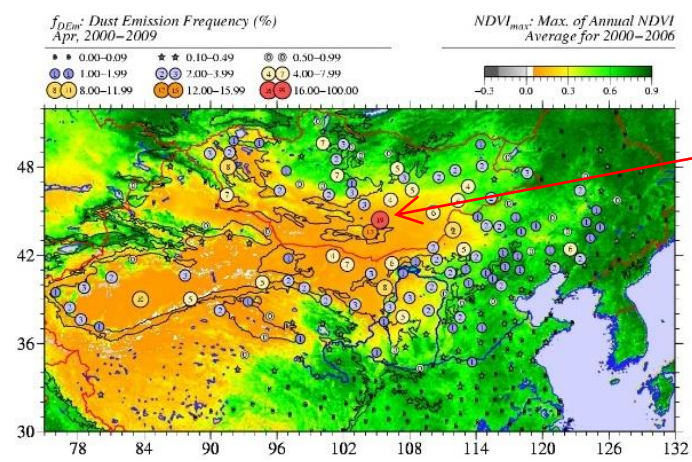
歴史実験（1850～2014年）、ナudging実験（1970～2019年）

- ・ 黄砂発生量は観測（ライダー）、モデル共に微減傾向
- ・ 年間を通じて摩擦速度と正の相関が見られた
- ・ 寒候期において積雪量と弱い負の相関、地中温度と弱い正の相関が見られた

将来予測実験（2015～2100年）

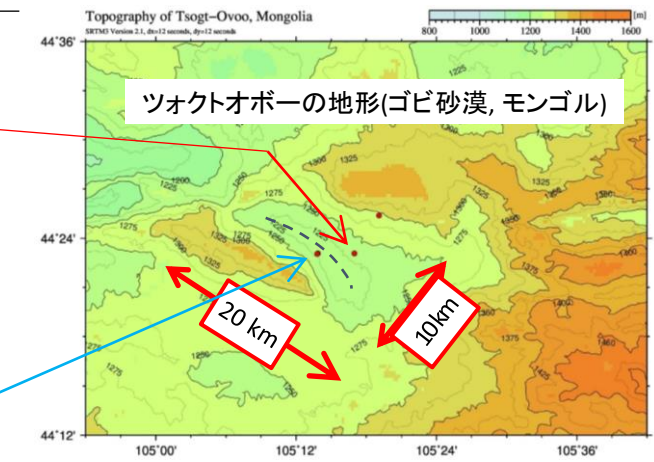
- ・ 温暖化によって黄砂の総発生量に大きな変化はない見込
- ・ 月毎の黄砂発生量を見ると、2050年代は大きな変化はないものの2090年代になると特に寒候期において黄砂の発生量が増加する実験結果が多かった（約1%/yr）
- ・ 温暖化が促進するシナリオで摩擦速度の増加傾向が見られた
- ・ 黄砂輸送経路に大きな変化は見られなかった（寒候期に日本への輸送が微減？）

現地調査をメインとしたレキ、枯れ草の飛砂への影響



(メインサイト)
鳥取大学黄砂観測サイト
ツォクトオボー (モンゴル)
・ゴビ砂漠北部
・降水量: 98.3 mm/年

(サブサイト14a)

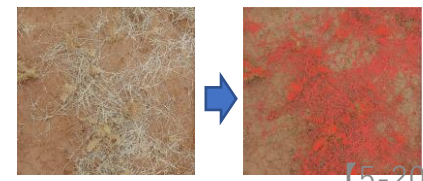
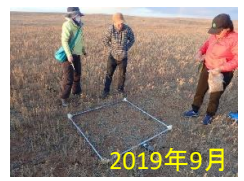


サブサイト14aと14bは300mほどしか離れていないため、地図上では同一地点に見える。サブ14bの写真は省略。

- 【調査地点】** ツォクトオボー (モンゴル南ゴビ県)
- ・ **定常観測地点**：メインサイト (2012年3月観測開始) とサブサイト14a, 14b (2014年3月観測開始) の計3箇所において気象・飛砂観測を実施。
 - ・ **特別観測地点**：2018年, 2019年4-5月に、特にレキ量に着目して気象・飛砂観測を実施。

【現地観測・調査項目】

- ・ **風向・風速** ※メインサイト (渦相関法) とサブサイト14a (プロファイル法) においては粗度長 (z_0) を見積もることが出来る。
- ・ **飛砂カウント数**
- ・ **レキ**：被覆率($SC\%$ [%])、高さ(h [mm])、長さ(b [mm])
- ・ **枯れ草**：枯れ草量(M_d [gm^{-2}])・被覆率($VC\%$ [%])：2019年9月、2020年5月以降
※2020年5月以降、現地住民 (元測候所長) による調査。2020年5-8月はデータ量に問題あり。



画像解析による枯れ草被覆率の見積もり

【GIS・衛星データ】

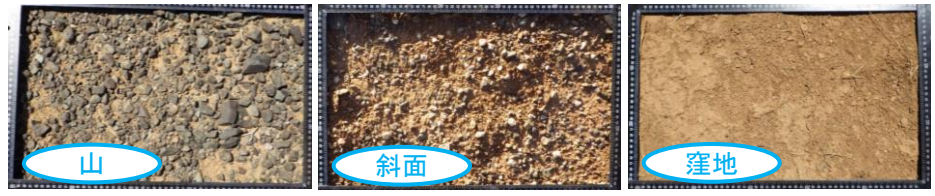
- ・ レキ体積比率：Coarse Fragment, SoilGrids (ISRIC), 水平解像度250m
- ・ MODIS NDVI：MOD13A1, MYD13A1プロダクト, 水平解像度500m
※ NDVI:正規化植生指数。光合成活動、光合成を行う植物量の指標。
- ・ MODIS Band 6 (1.6 μm), Band 7 (2.1 μm), 水平解像度500m。STI = Band6 / Band7を計算。
※STI (Soil Tillage Index):枯れ草といった植物残渣量の指標として期待。

● **コロナ禍の影響と対応**

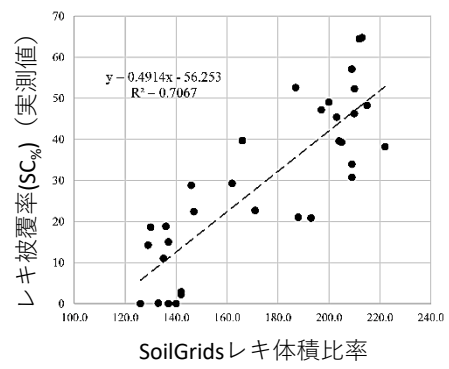
- ・ 春季(3-5月)、夏季(8-9月)に現地観測・調査を予定していたが、新型コロナ(COVID-19)の影響で渡航出来なくなった。
- ・ 2020年度はIRIMHEによる代行調査を実施してきたが、調査項目を減らした。2021年3月以降は、全観測地点で粗度長測定を予定していたが、ロックダウンのため代行調査を実施できていない。
- ・ プロジェクト開始前に取得済みの現地データ及びGIS・衛星データを利用した解析を実施した。

レキの飛砂への影響 (Buyantogtokh et al. 2021, accepted)

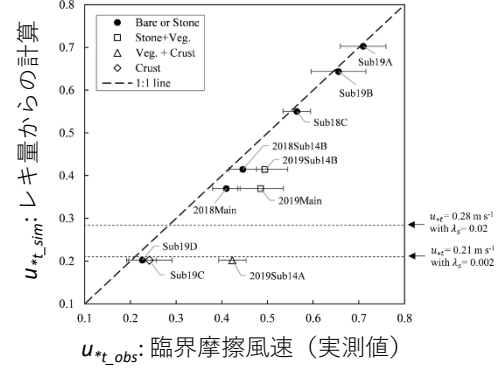
- ① レキ被覆率 $SC_{\%}$ 、粗度密度 λ_s はともに、山で最も高く、窪地において最も低かった (図①)。
- ② SoilGridsレキ体積比率データと本研究の調査で得られたレキ被覆率 $SC_{\%}$ には、高い相関関係($R^2=0.71$)があった (図②)。
- ③ 植物やクラストが存在していなければ、レキ測定値から見積もった臨界摩擦速度 u_{*t_sim} (式1) と観測から見積もった臨界摩擦速度 u_{*t_obs} が高相関であり、ほぼ1:1の関係であったことから、既存モデルが有効であることを確認出来た (図③)。



図①：山、斜面、窪地におけるレキの様子 (例)



図②：SoilGridsレキ体積比率 (横軸) と本研究の現地調査で得られたレキ被覆率 $SC_{\%}$ の関係。



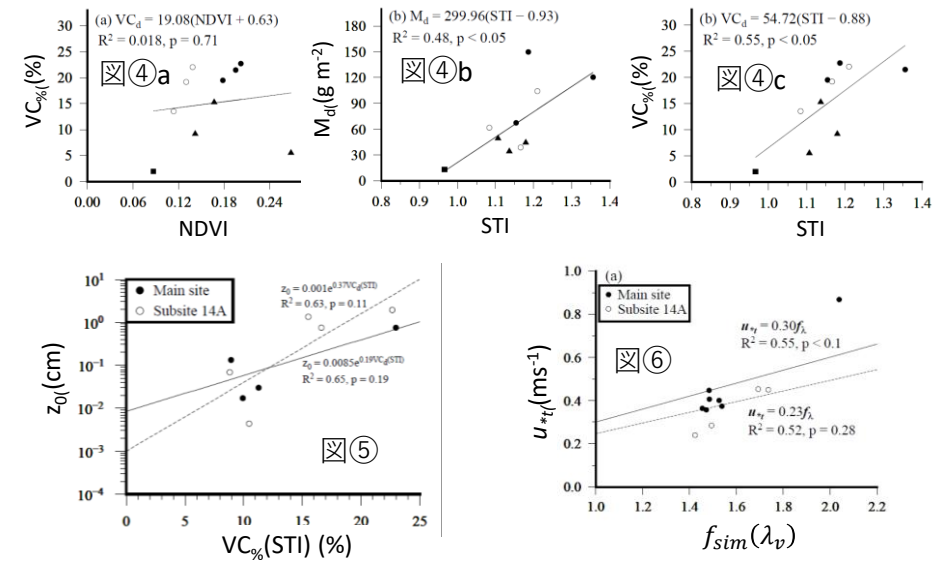
図③：飛砂と風速の実測値から得られた臨界摩擦速度 u_{*t_obs} (横軸) とレキ測定値から見積もった臨界摩擦速度 u_{*t_sim} 。植物、クラストが存在しない結果は黒丸で示している。

$$u_{*t_sim} = u_{*t0}(d_s)f(\lambda_v, \lambda_s)f(w)f(s_c)f(s_{cr}) \dots \text{式1}$$

- $f(\lambda_v, \lambda_s)$: 補正関数 (粗度効果)
- $f(w) = f(s_c) = f(s_{cr}) = 1$: 土壌水分、塩分濃度、クラストの補正関数

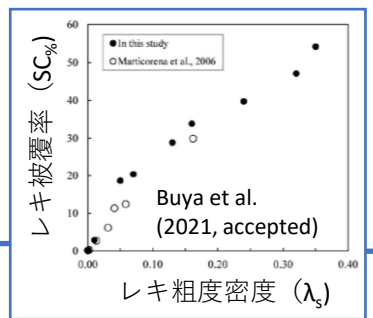
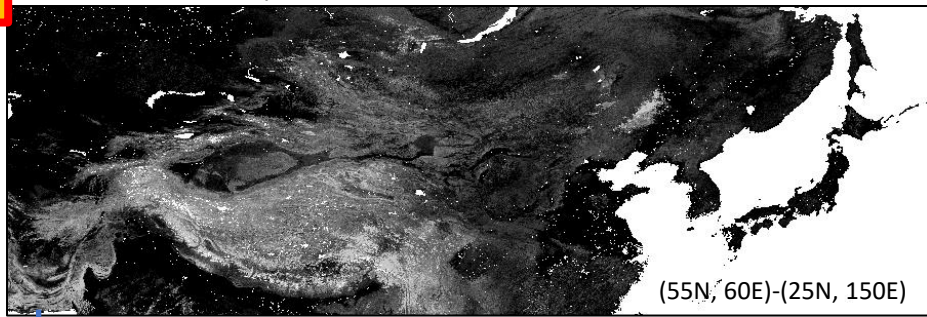
枯れ草の飛砂への影響 (Wu et al. 2021, accepted)

- ④ NDVIと枯れ草量($R^2=0.15, p=0.12$)(図なし)、被覆率($R^2=0.02, p=0.71$)(図④a)に相関はなかったが、STIと枯れ草量($M_d = 299.96 \cdot (STI - 0.93), R^2=0.48, p<0.05$)(図④b)、被覆率($VC_{\%} = 54.72 \cdot (STI - 0.88), R^2=0.55, p<0.05$)(図④c)には有意な相関関係が見られた。
- ⑤ STIから見積もった被覆率 $VC_{\%}$ (STI)と粗度長 z_0 に有意な関係は無かったが、 $VC_{\%}=0.0$ のときの粗度長は妥当な値だった (図⑤)。
- ⑥ 被覆率 $VC_{\%}$ を式2・式3 (次スライド) 代入して粗度影響関数 $f_{sim}(\lambda_v)$ を見積もり、観測で得られた臨界摩擦速度 u_{*t_obs} との関係を調べたところ、メインサイトでやや有意($p<0.1$)であったが、サブサイト14aでは有意な関係は無かった。しかし、 $VC_{\%}=0.0$ のときの臨界摩擦速度は妥当な値だった (図⑥)。



メインサイト(レキ有り) : $z_0=0.0085(\text{cm}), u_{*t}=0.30 (\text{m s}^{-1}), u_{10t}=6.68 (\text{m s}^{-1})$
 サブ14a (レキ無し) : $z_0=0.0010(\text{cm}), u_{*t}=0.23 (\text{m s}^{-1}), u_{10t}=5.31 (\text{m s}^{-1})$

レキ被覆率(SC%) : (SoilGridsレキ体積比率データ) × (図②)

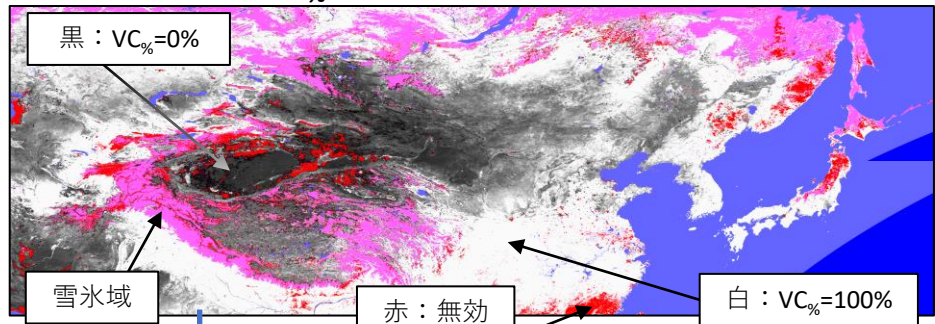


黒 : SC%=0%
白 : SC%=100%

$$\lambda = \frac{\sum b_i h_i}{S} = \frac{nbh}{S}$$

レキ粗度密度(λ_s)

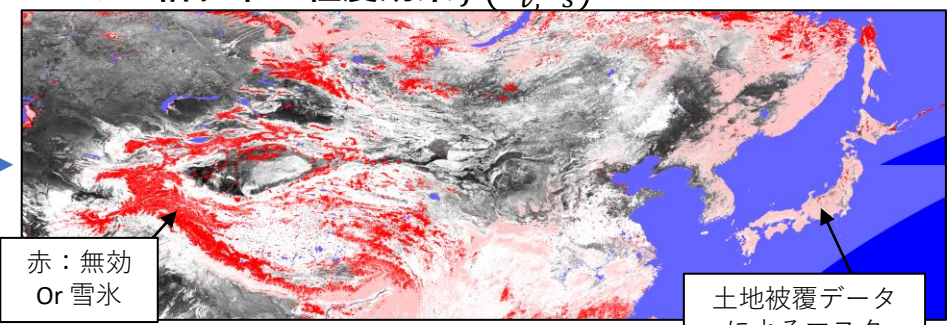
枯れ草被覆率(VC%) : (STI) × (図④c) 2019年4月7日(DOY=097)



$$\lambda_v = -0.35 \ln(1 - 0.01 \cdot VC\%) \quad \text{式2}$$

枯れ草粗度密度(λ_v)

レキと枯れ草の粗度効果 f(λ_v, λ_s) 2019年4月7日(DOY=097)



臨界摩擦速度 (u_{*t})

$$u_{*t_sim} = u_{*t0}(d_s)f(\lambda_v, \lambda_s)f(w)f(s_c)f(s_{cr}) \dots$$

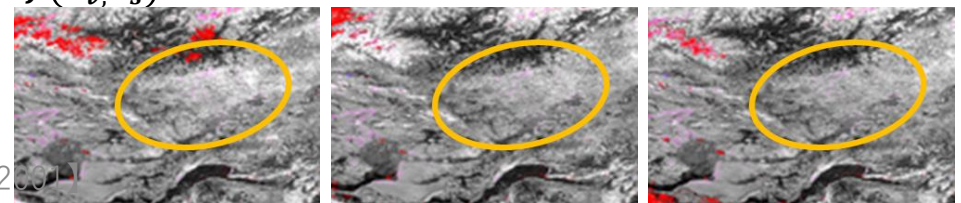
- u_{*t0}(d_s): クラスト、塩類集積が無い、乾いた裸地状態の臨界摩擦速度
- f(λ_v, λ_s): 補正関数 (粗度効果)

$$f_\lambda = \left[(1 - \delta_v m_v \lambda_v)(1 + \beta_v m_v \lambda_v) \left(1 - \delta_s m_s \frac{\lambda_s}{1 - A_v} \right) \left(1 + \beta_s m_s \frac{\lambda_s}{1 - A_v} \right) \right]^{0.5}$$

ツォクトオポー観測サイトの様子



f(λ_v, λ_s) ゴビ砂漠付近拡大図



ダスト発生源の生態系保全に向けた地表面条件の解明

【対象地】

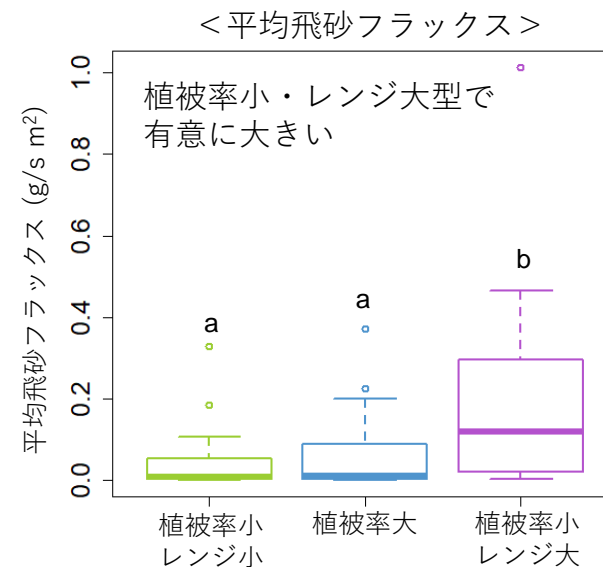
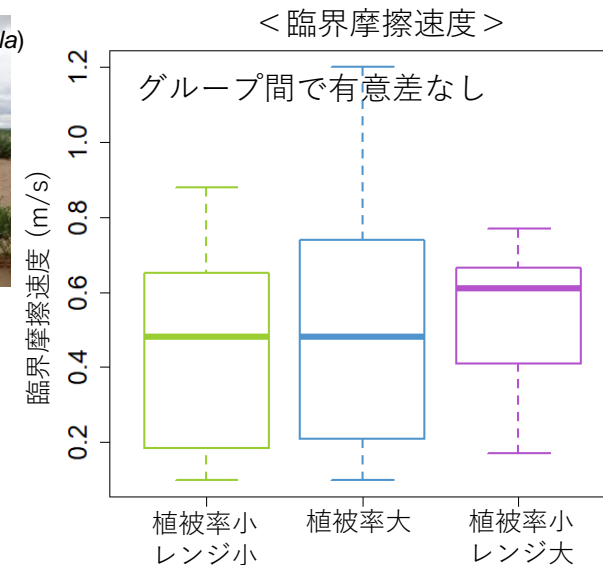
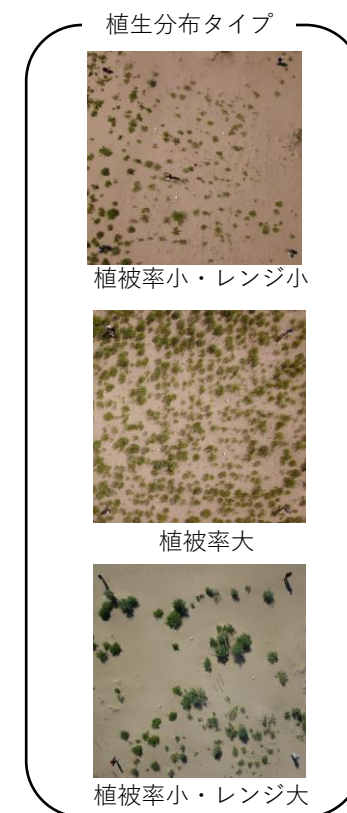
- 中国・フルンボイル市[TEMM DSS WG2共同研究サイト]
- マメ科灌木が優占する流動砂丘

【方法】

- 植被率および灌木間の距離（バリオグラム算出時に求められる「レンジ」を算出）の異なる3タイプの調査区で植生調査、飛砂観測、気象観測を実施

【結果】

- 臨界摩擦速度：今回設定した3タイプ間では有意差なし
→より多様な植生タイプを追加して比較する必要がある
- 飛砂フラックス：植被率が同程度の場合、レンジが小さい方が飛砂フラックスが小さい
→灌木間距離が小さい方が風食抑制効果が大きくなる



- 植被率だけでなく灌木の分布様式も風食抑制に影響を与える
- 灌木間距離が大きい植栽地では、補植など(5-200%)を含む継続的な維持管理が必要

ダスト発生源の生態系保全に向けた地表面条件の解明

【対象地】

- モンゴル・ツォクトオボー
- ヒユ科灌木等が優占するゴビステップ

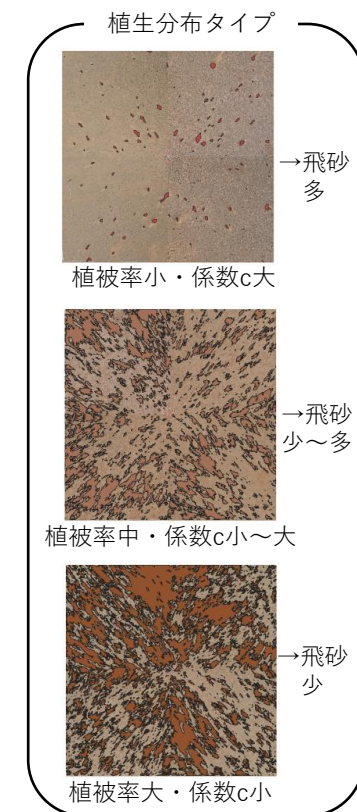


【方法】

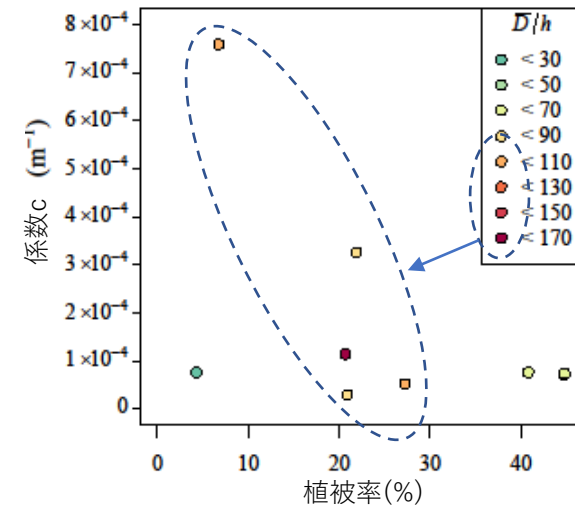
- 植被率および灌木間の距離（異方性バリオグラムによるレンジから \bar{D}/h ($= 2r_{uv}/h$)を算出)の異なる3タイプの調査区で植生調査、飛砂観測、気象観測を実施

【結果】

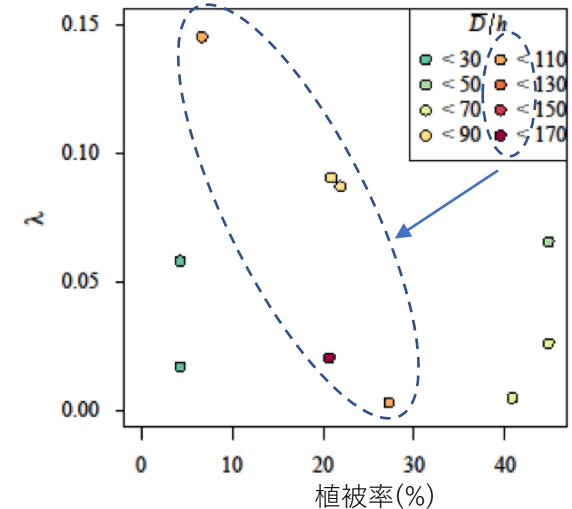
- 係数 c と植被率・灌木間距離：灌木間距離が大きいときには植被率の増加により係数 c は減少する
→ 植被率の飛砂への影響は灌木の空間分布によって異なる
- roughness density (λ)と植被率・灌木間距離：灌木間距離が大きいときには植被率の増加により λ は減少する
→ 植被率と λ の関係は灌木の空間分布によって異なる



< 係数 c と植被率・灌木間距離 >



< λ と植被率・灌木間距離 >



- 臨界摩擦速度と飛砂量はいずれも灌木の空間分布の影響を受ける
- 飛砂発生量を推定する際には植生の空間分布を考慮することが必要

6. 研究の進捗状況と環境政策等への貢献(1)進捗状況

	サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3
進捗状況	一部次年度へ先送り	計画通り	一部次年度へ先送り
(理由)	モンゴルでのライダー更新の延期	予定された実験計算を実行、サブテーマ1/3にデータ供給実施	モンゴルでの発生源フィールド観測の延期
(対応)	<ul style="list-style-type: none"> 研究計画変更・直接経費繰越により2年度目以降に実施予定 R4年度に予定していたPM2.5環境基準超過への黄砂の影響評価に着手 		<ul style="list-style-type: none"> 研究計画変更、直接経費繰越により2年度目以降に実施予定 現地調査の一部を委託、衛星観測を含む既存データの解析を実施
目標達成見通し	ライダー更新は入国許可後に実施予定、常監データ利用黄砂検出やPM2.5環境基準への黄砂寄与評価は達成の見込み	達成の見込み	サブ2へのパラメータ提供は達成見込み(精度向上を継続)、植生保全に向けても入国許可後に実験・観測を行うことで達成可能

➤行政がすでに活用した成果

- 日中韓環境大臣会合(TEMU)黄砂共同研究第1・第2作業部会年次会合（日本からは各サブテーマリーダー・環境省参加）において中期計画に沿った研究活動進捗として報告
- ライダーにより計測された黄砂濃度を環境省ホームページ「黄砂飛来情報」からリアルタイムで提供

➤今後活用が見込まれる成果

- 常監データによる都道府県単位黄砂判定は長期変動監視手段として活用できるほか、黄砂の環境影響評価（疫学研究など）への応用が見込まれる
- 地表面情報の向上を含め本課題内で改良が進む黄砂予測システムは気象庁による黄砂情報・数値予報業務の改善に繋がるほか、将来気候計算におけるダスト発生量の信頼度向上をもたらす。
- 植生と飛砂の関連性が明らかになり、発生源における持続的な生態系維持のための緑化・植生管理に関する提言に繋がる

7. 研究成果の発表状況

	サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3
誌上発表（査読有）	1	20	3
口頭発表	1	6	8
報道発表		1	