

## 【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 (JPMEEERF20205001)

### 【重点課題】

主：【重点課題⑯】 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. はじめに(研究背景等)、 2. 研究開発目的

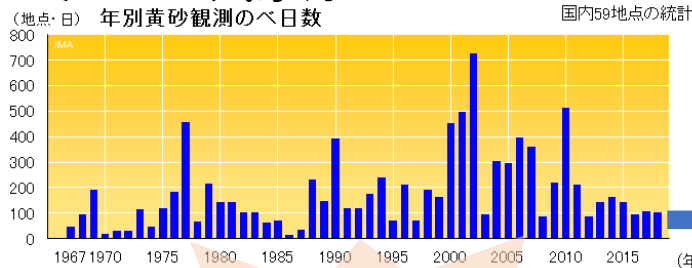
日中韓環境大臣会合(TEMU)黄砂共同研究(TEMU DSS)

※他に日蒙環境政策対話でも黄砂は課題

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

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



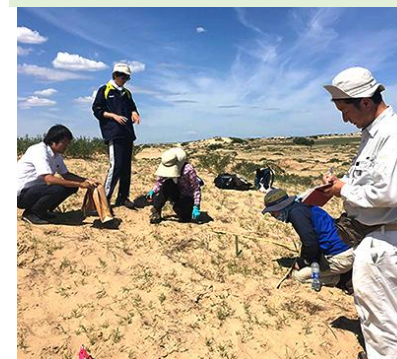
NIESライダーネットワークの定量的黄砂情報を参照値に新指標を導出(サブ1)

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

[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	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	<ul style="list-style-type: none"><li>ライダー観測網を維持してモデル検証用データを得る</li><li>常監局データによる黄砂判定手法を開発する</li><li>モンゴル国内で簡易装置による黄砂観測ネットワーク形成(3地点)</li><li>飛砂・黄砂関係の調査</li><li>PM2.5環境基準超過への黄砂の寄与率推定</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>全球エアロゾルモデルによる過去計算等でモデルの特性を把握</li><li>他サブとの協力でモデルを改良</li><li>複数シナリオによる将来計算の実施</li><li>黄砂発生・輸送・気象条件の変化取り纏め</li><li>気象庁モデルへの組み込み作業</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>地表面情報や飛砂について野外観測・実験により解明、6種類以上の地表面パラメータを取得</li><li>数値モデル改良に資する指標を3つ以上設定してサブテーマ2へ提供</li><li>発生源の生態系保全に必要な植生・土地利用条件について提案</li></ul>

# 1. ライダーネットワークの維持

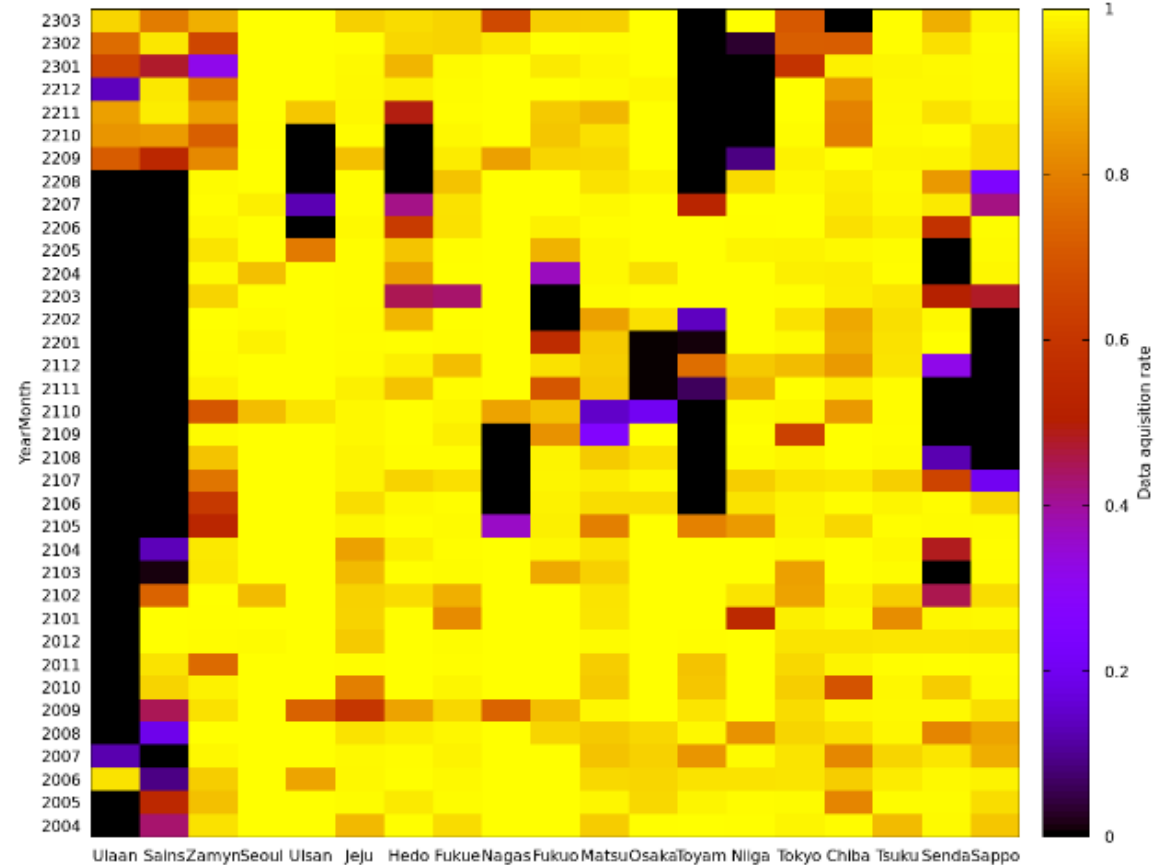


2020/2021年度は国外地点のメンテナンスを実施出来なかったが、2022年度に

- モンゴル3地点でレーザー・PCの入れ替え実施
- 韓国3地点で定常メンテナンス実施

また執行できなかった旅費は交換用レーザーヘッド・電源のオーバーホールに活用

各ライダーのデータ取得率(2020.4-2023.3)

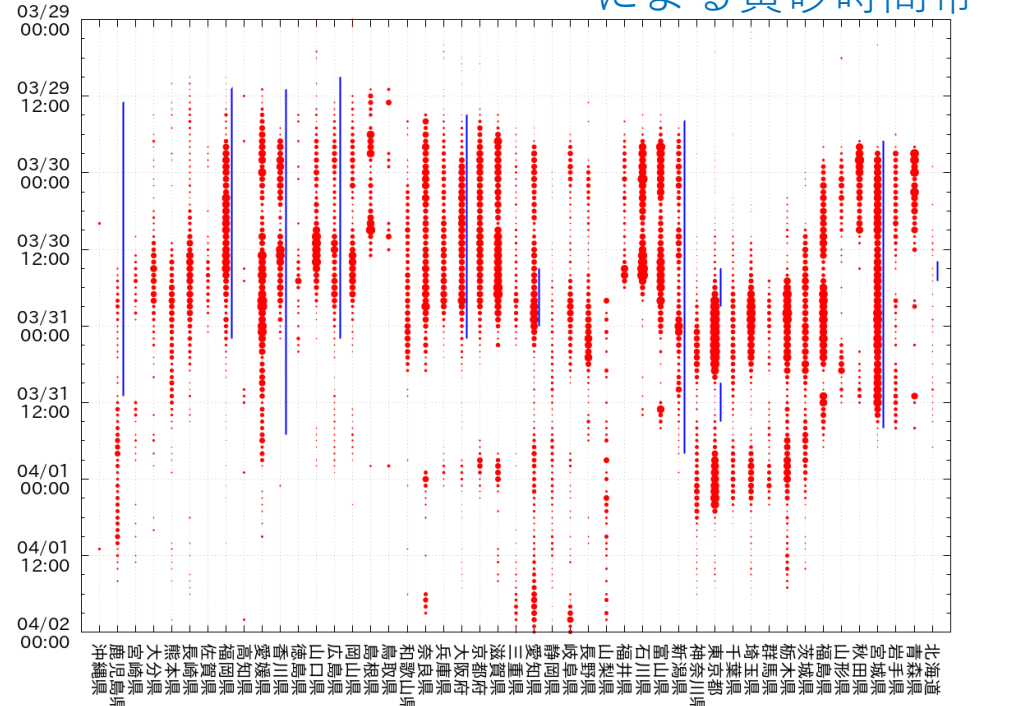


## 2. 大気汚染常時監視測定局データを利用した黄砂判定

ライダーによる黄砂消散係数を真値とみなし、「 $SPM-PM2.5 > 30 \mu g/m^3$ かつ $PM2.5/SPM > 0.3$ 、ただし7-9月を除く」を満たす局が都道府県内で40%を超えた時間を黄砂とする基準を提案。

2021年3月末の全国的な黄砂に適用した事例

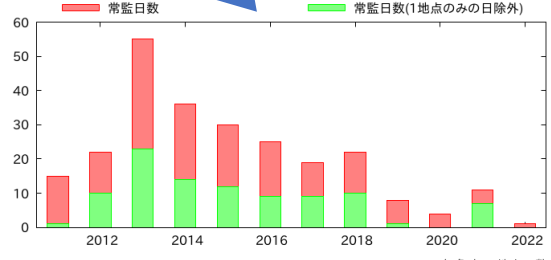
青線は気象台発表による黄砂時間帯



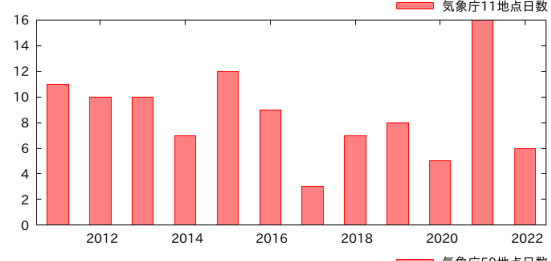
← 沖縄・九州                      東北・北海道 →

2011-2022年の年間黄砂日数・黄砂のべ日数の比較

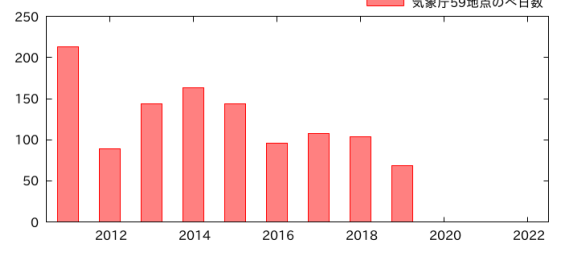
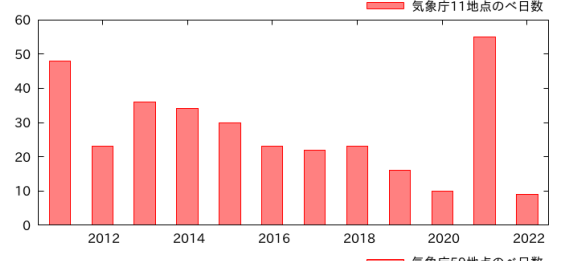
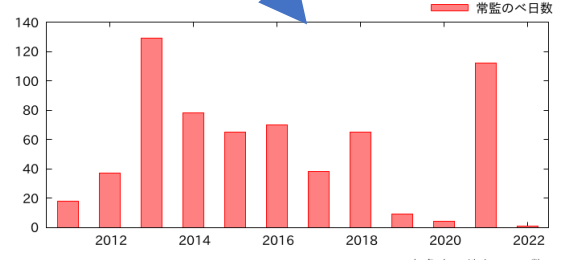
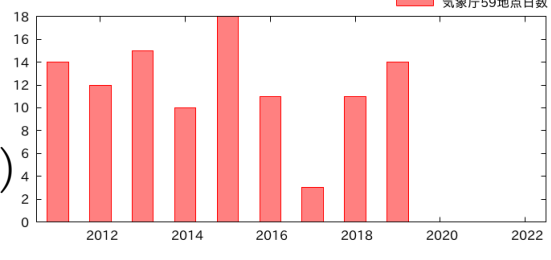
常監局データ



気象庁11地点



気象庁59地点 (~2019)





### 3. 簡易黄砂測定装置によるネットワーク形成 (途中)

背景:

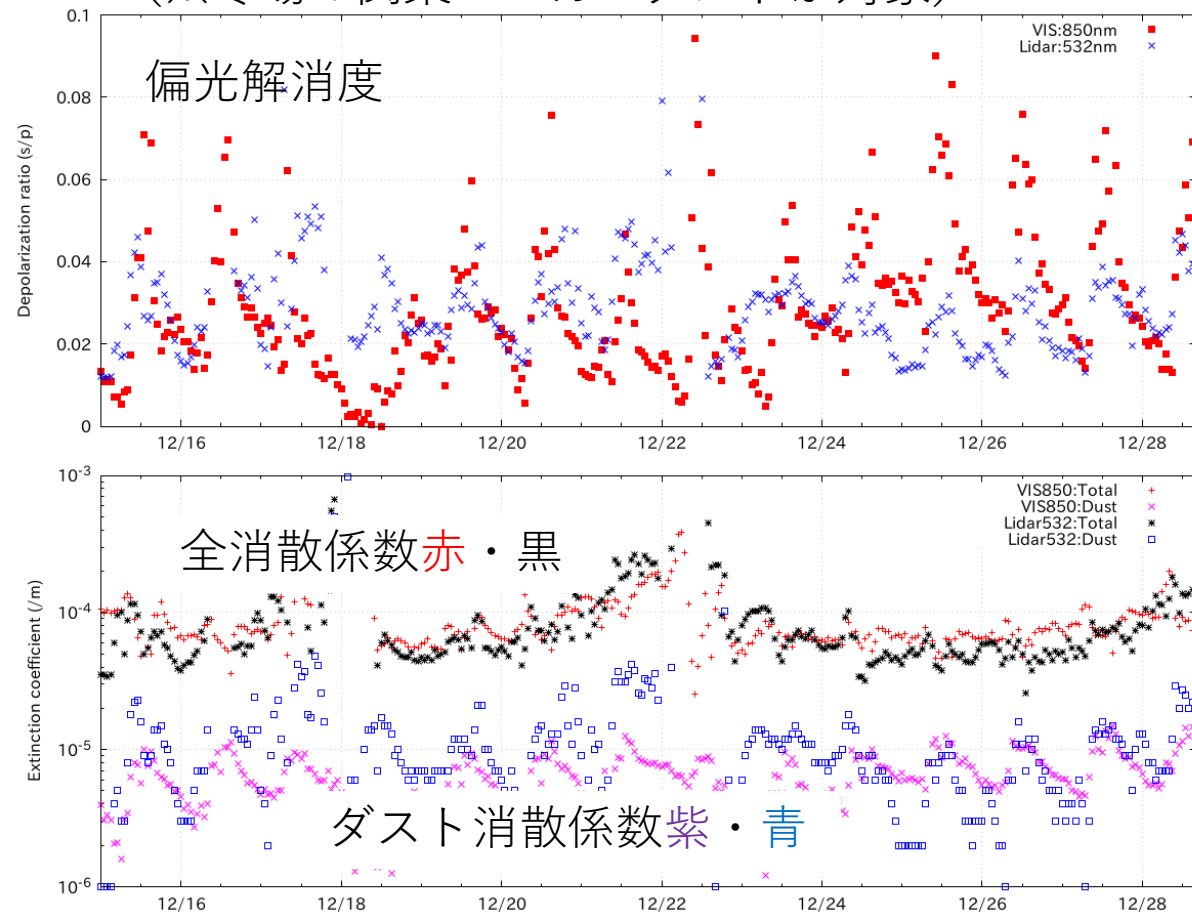
計画段階では光学式粒子計(OPC)をモンゴル国内に配置してライダー網よりも維持管理が容易な観測ネットワークを3点以上で構築する予定だったが、COVID-19による渡航制限の影響により設置地点調査などが困難となり、小型視程計を利用した簡易型非球形検出手法を国内で検証することとした。



LED利用視程計(波長850nm)に偏光デバイスを付加し、非球形粒子による消散係数を取得

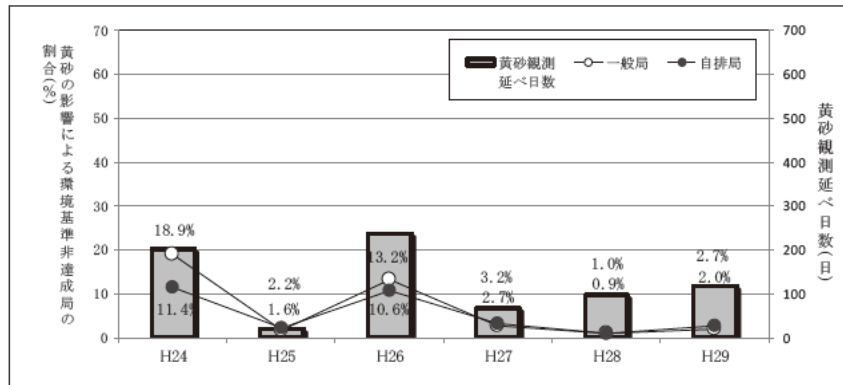
ダスト消散係数 $>0.01/\text{km}$ でライダーと相関、国内でも利用可能

つくばライダー下層結果との比較  
(※冬場の関東ローカルダストが対象)



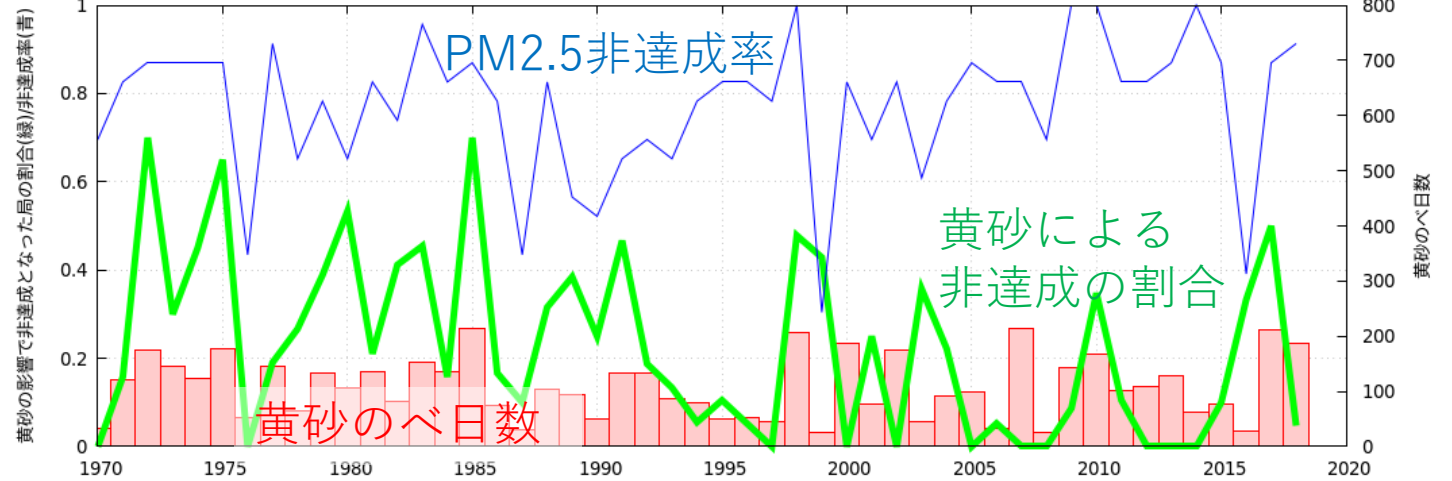
### 3. PM2.5環境基準に対する黄砂の寄与評価

図7-2-12 黄砂の影響による環境基準達成状況

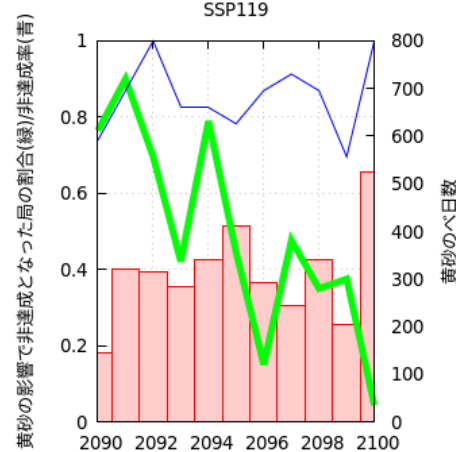


環境省大気汚染状況報告書では、PM2.5環境基準が非達成となった局のうち、何割が黄砂の影響でそうだったのかを見積もっている→サブテーマ2の将来シナリオに基づいたエアロゾル計算結果(黄砂・非黄砂含む)を利用して気候変動時(2090-2100)の黄砂によるPM2.5環境基準非達成状況を推定→シナリオによらず2倍程度

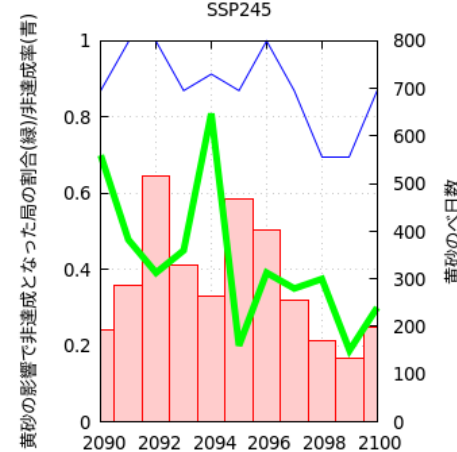
再現実験(1970-2018) 22.7% Historical



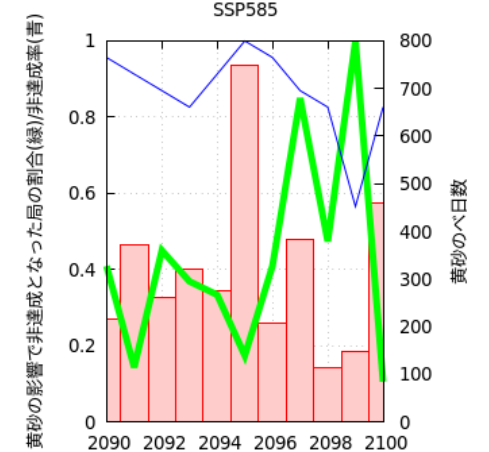
SSP1\_1.9 49.2% SSP119



SSP2\_4.5 42.1% SSP245

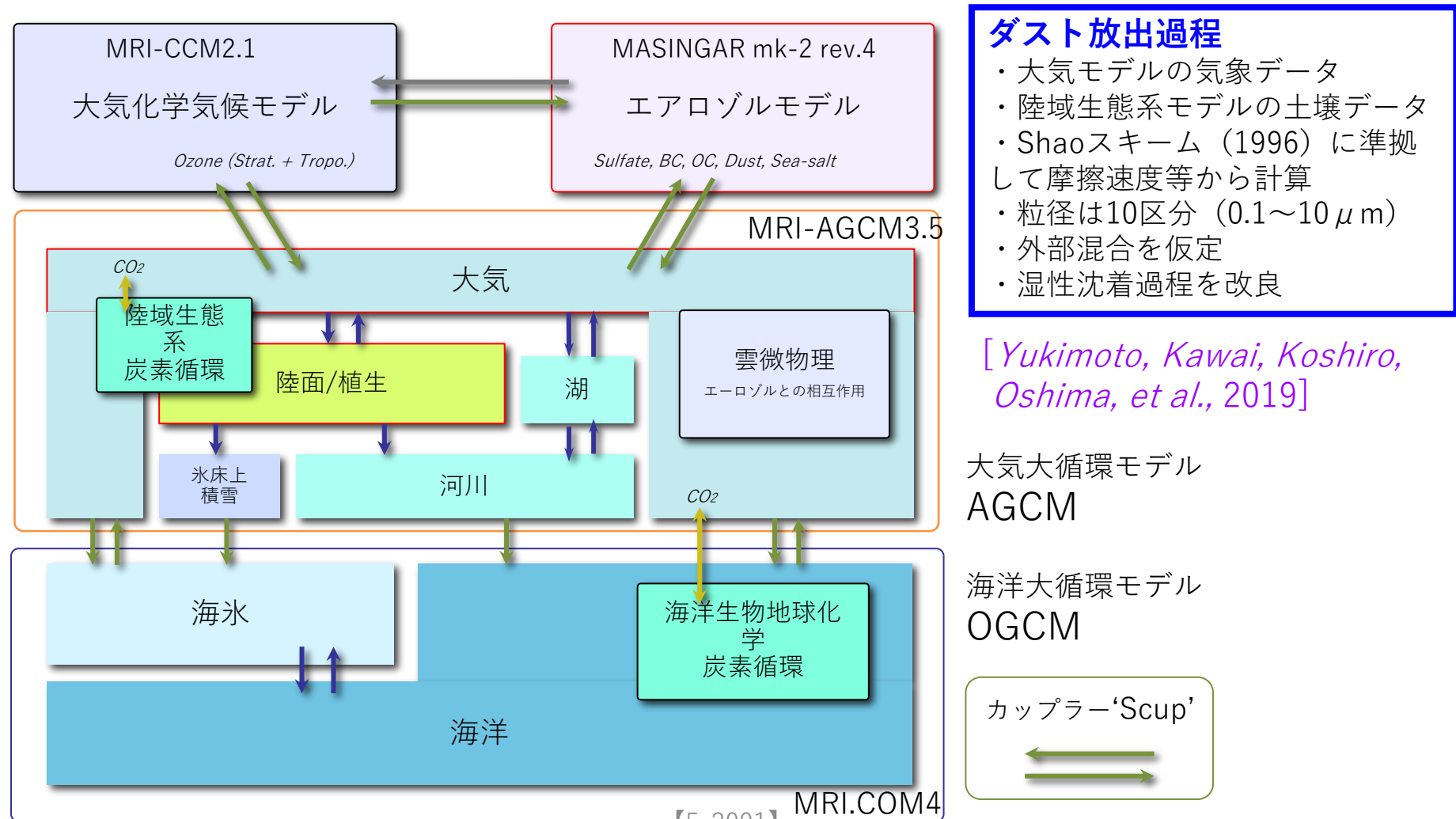


SSP5\_8.5 42.9% SSP585



# 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 μm)
- ・外部混合を仮定
- ・湿性沈着過程を改良

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

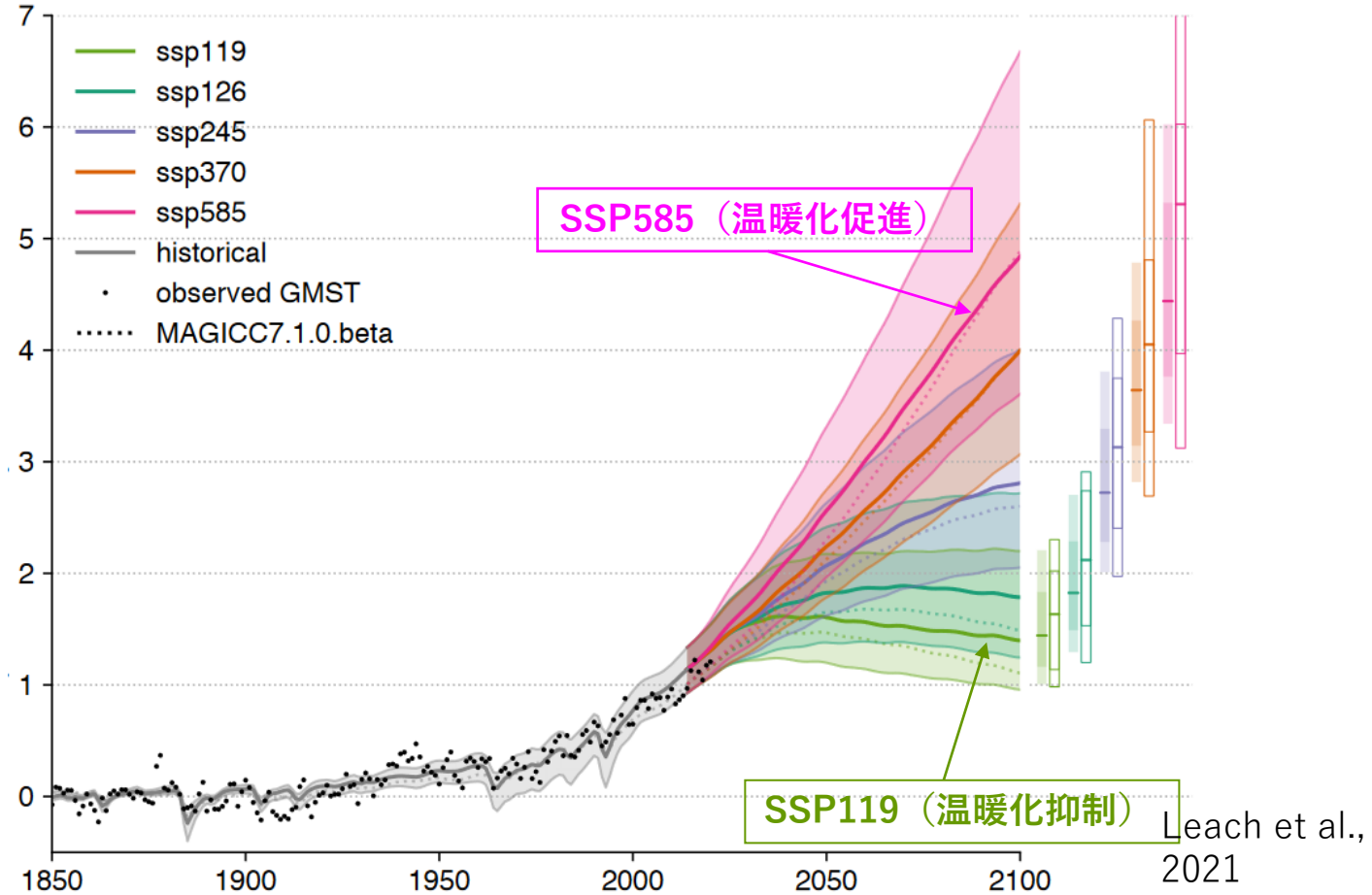
大気大循環モデル  
AGCM

海洋大循環モデル  
OGCM



# 気候シナリオについて

産業革命以降  
から2100年ま  
での世界平均  
気温の変化

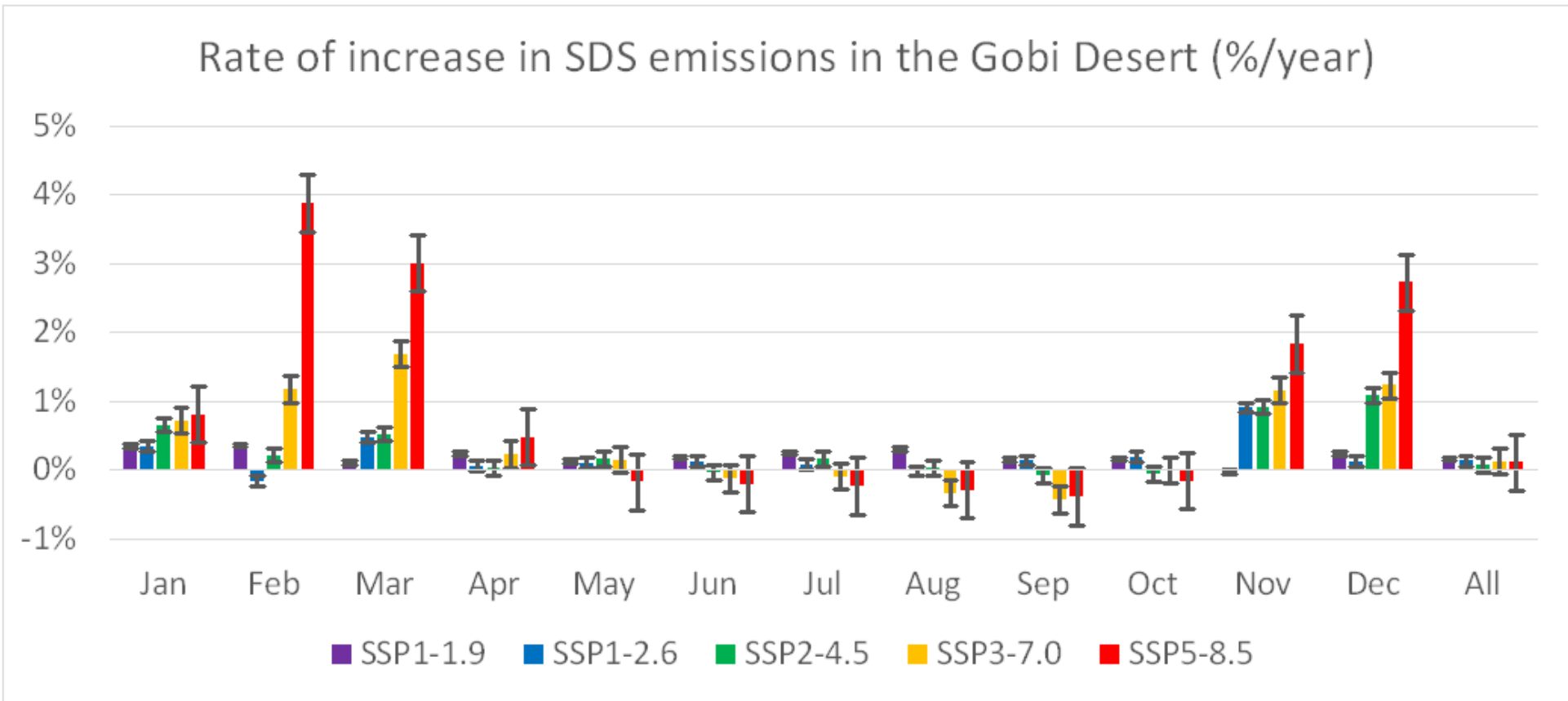


過去再現実験として1979~2019まで気象場をJRA-55でナッジングした実験を行った  
共通の温暖化シナリオ (5種類) を用いて1850年から2100年までの数値シミュレーションを行った  
各シナリオについて5メンバーのアンサンブル実験を行った  
5種類のシナリオについてのアンサンブル平均を取り議論する

【5-2001】

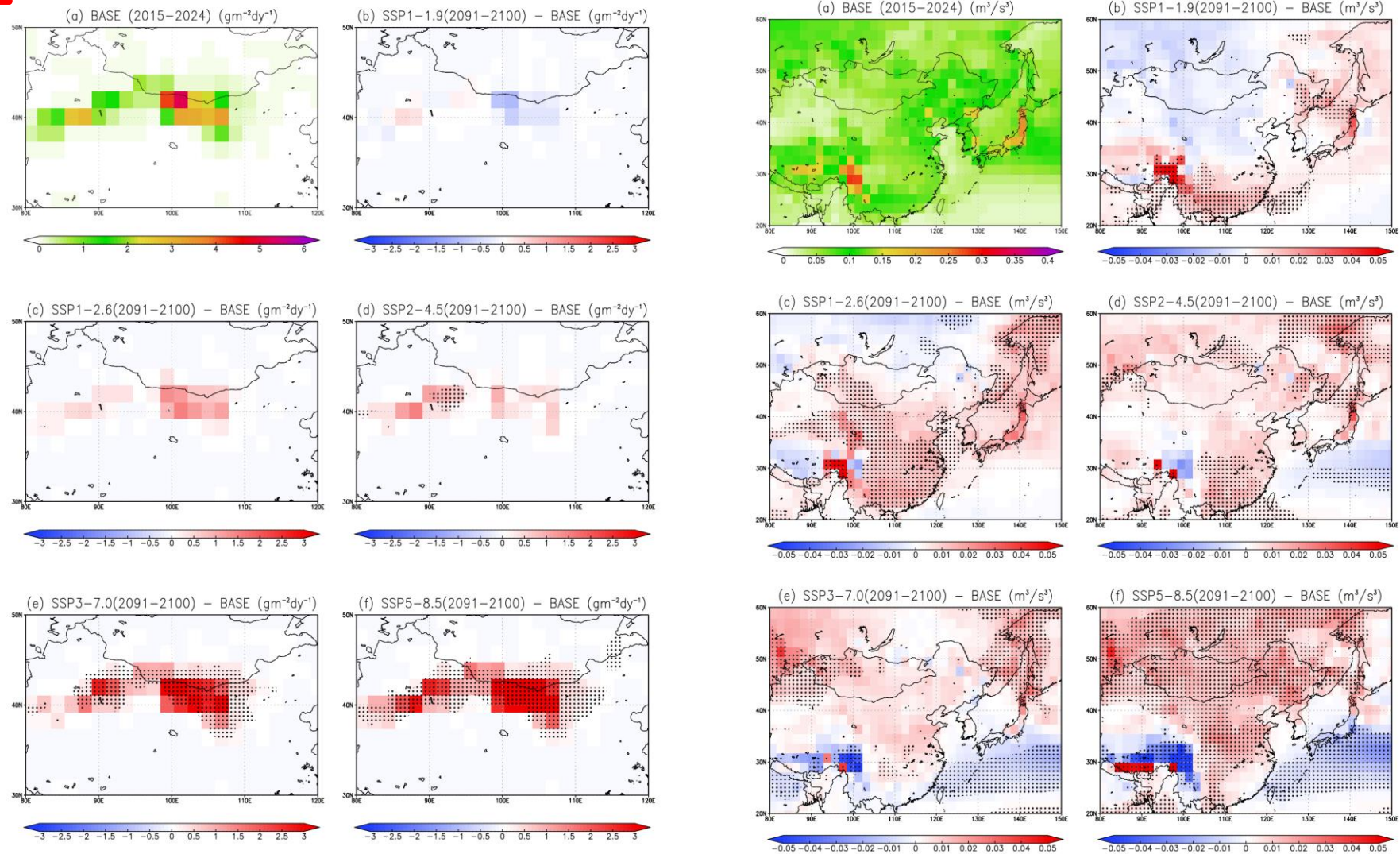
将来予測実験の結果はサブテーマ1に提供 (SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5) した

# ゴビ砂漠における黄砂放出量の傾向



2015年から2100年までのゴビ砂漠の砂嵐排出量の増加率 (%/yr)  
棒グラフは、各共有シナリオのアンサンブル平均を示す  
社会経済経路 (SSP) シナリオのアンサンブル平均を示し、エラーバーはその誤差範囲を示す  
紫、青、緑、オレンジ、赤は、SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 の各シナリオを示す

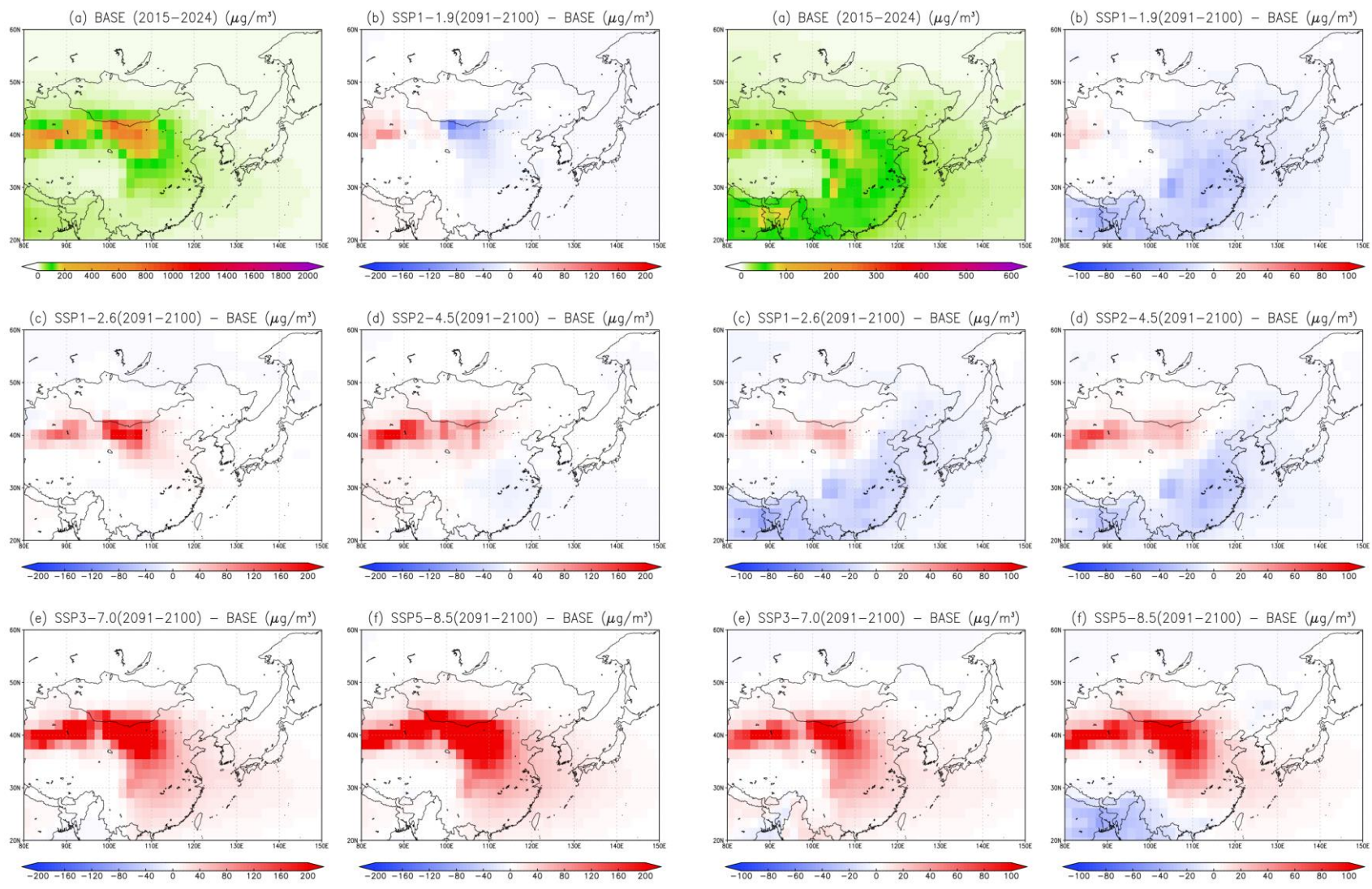
# 将来の黄砂放出量と摩擦速度



3月の戈壁砂漠における黄砂放出量（左）と東アジアにおける摩擦速度の三乗（右）を示す  
 左上は基準年（2015～2024）の平均値、右上から右下に向かってSSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、  
 SSP3-7.0、SSP5-8.5の将来（2091～2100）と基準年の差を示す  
 網掛けは統計的に有意な領域を示す

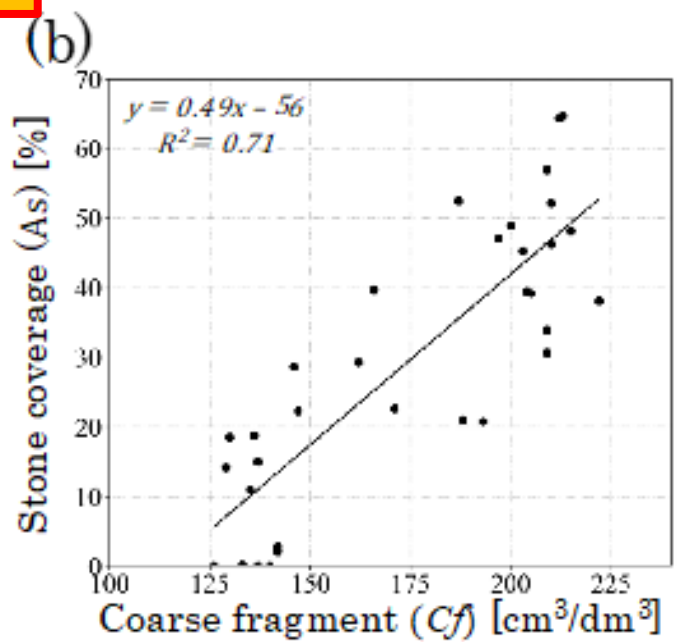


# 将来の黄砂濃度とPM2.5濃度



3月の東アジアにおける黄砂濃度（左）とPM2.5濃度（右）を示す  
左上は基準年（2015～2024）の平均値、右上から右下に向かってSSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5の将来（2091～2100）と基準年の差を示す

# レキ被覆率と植生データ (サブ3より受領)

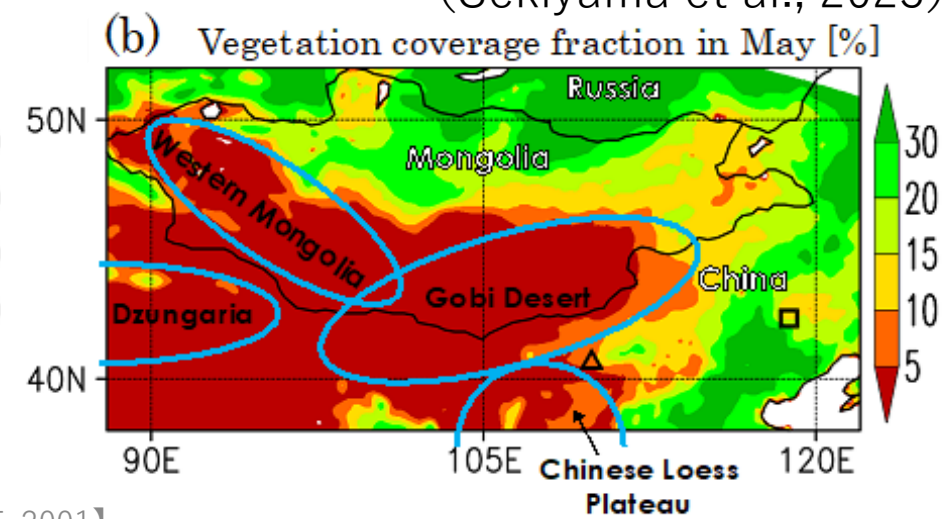
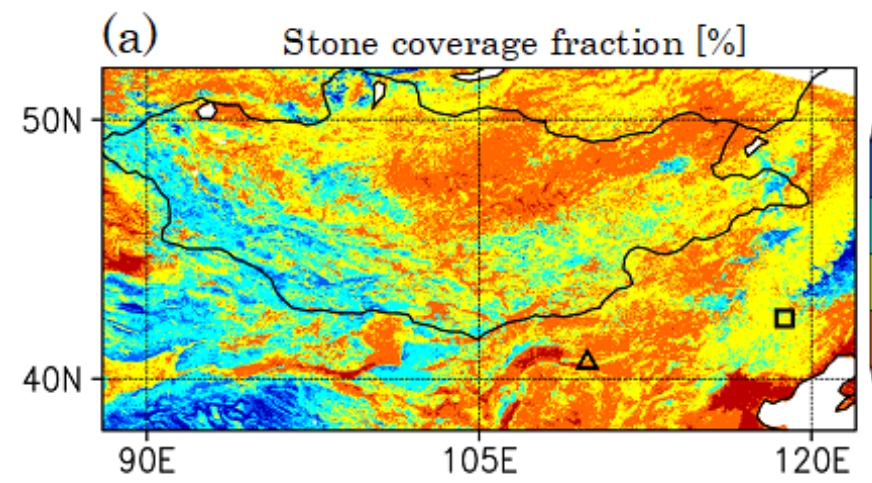


(上左) ゴビ砂漠の同じ場所でSoilGrids 2.0によって算出された粗大レキの体積分率とBuyantogtokhら(2021; 2022)によって測定されたレキ被覆率の比較。

(下左) 上左図に示した式を用いてSoilGrids 2.0の粗い破片の割合から推定したレキ被覆率

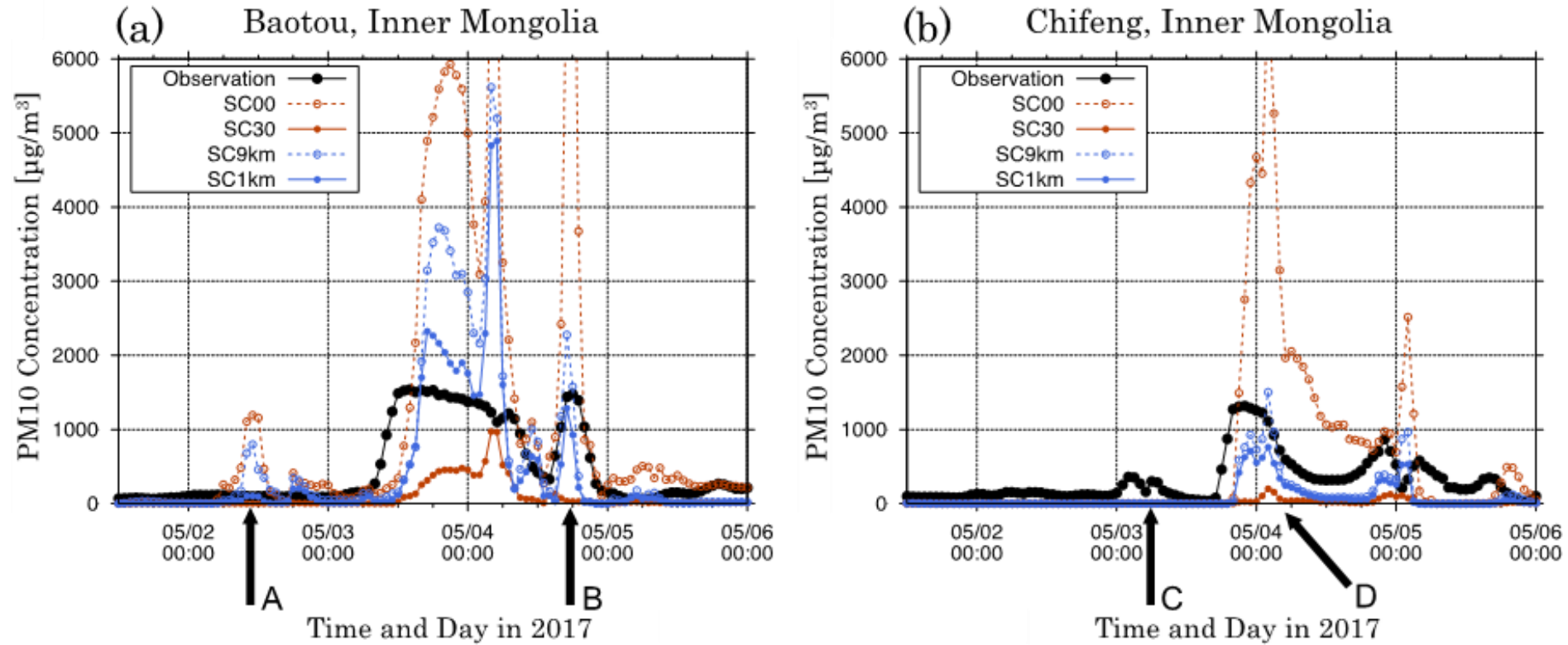
(下右) NHM-Chem-Dustに搭載された5月の植生被覆率。開いている三角形は内モンゴル自治区のBaotou、四角形は内モンゴル自治区のChifengをそれぞれ示している

(Sekiyama et al., 2023)





# NHM-Chem-DUSTと観測値の比較検証



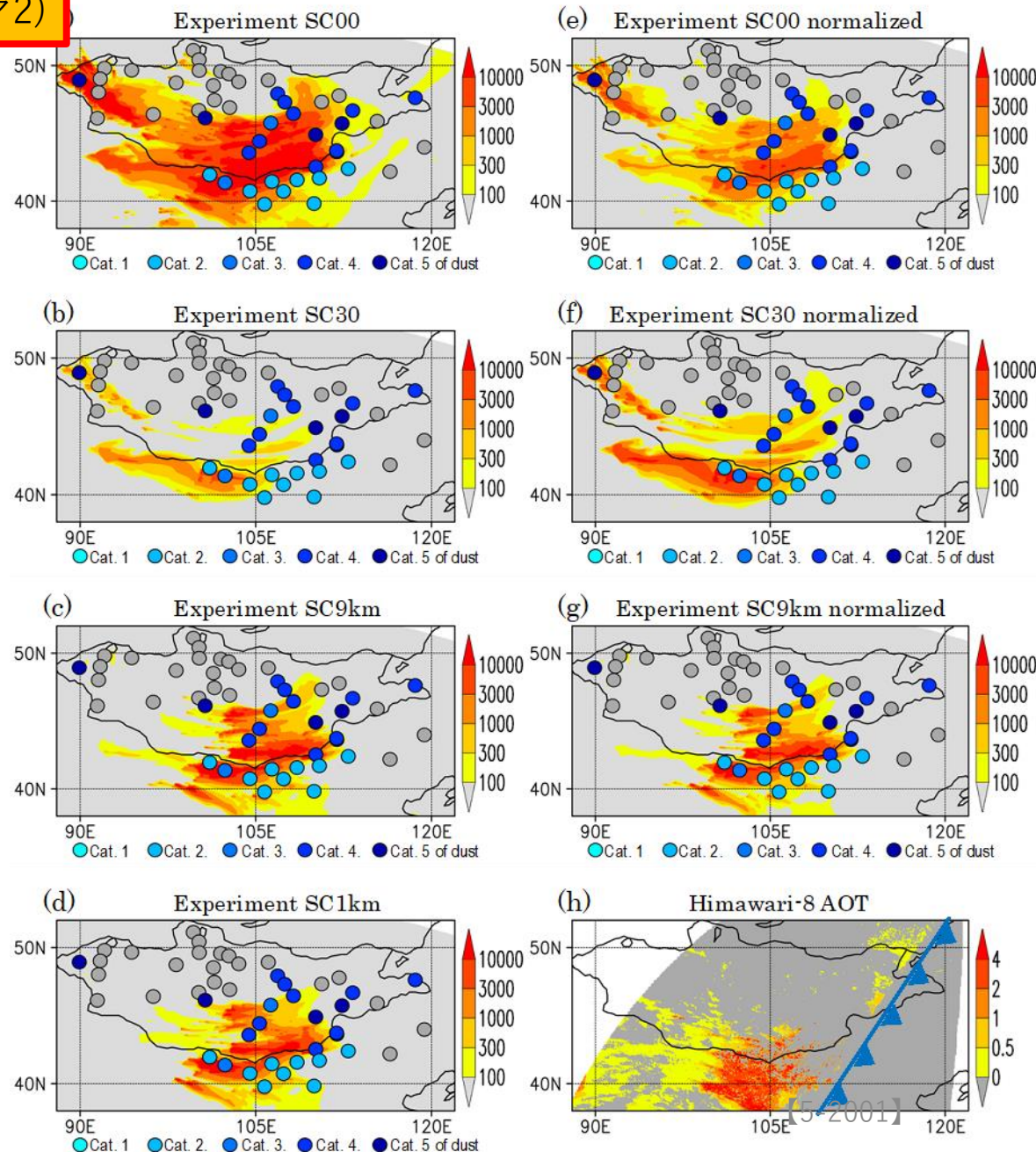
PM10質量濃度の観測値とモデル化されたダスト濃度の時系列 (a) 内モンゴル自治区Baotou、(b) 内モンゴル自治区Chifeng。時刻はUTC。

(Sekiyama et al., 2023)

SC00：レキ被覆率0%固定、SC30：レキ被覆率30%固定、SC9km：レキ被覆率をSoilGrids 2.0とし、水平解像度9km、SC1km：レキ被覆率をSoilGrids 2.0とし、水平解像度1km

Observation：日中韓黄砂共同研究WG1より提供<sup>[5-2001]</sup>

# 黄砂水平分布検証



(a)-(g) 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SYNOPダ  
ストレポート (カテゴリー1、2、  
3、4、5の青丸)

灰色の丸は、ダストイベント以  
外を報告した観測所を示す

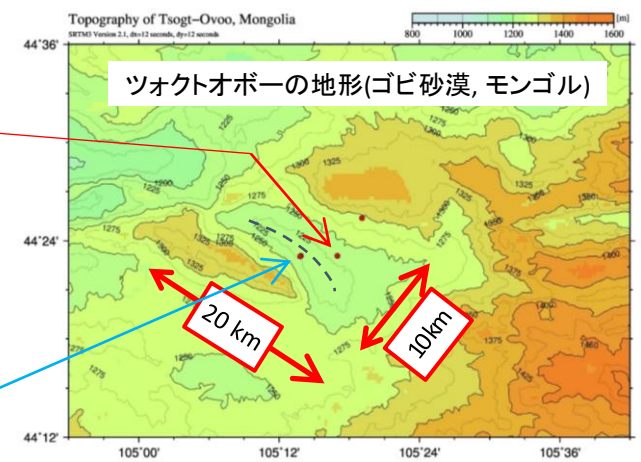
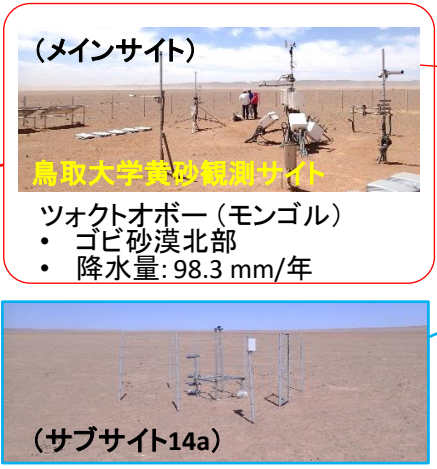
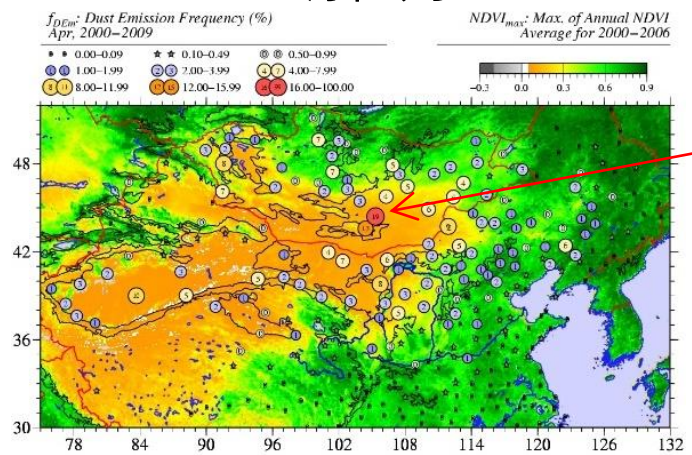
左段はオリジナルのものを示す

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  
うに標準化した濃度を示す

(h) 同時刻のひまわり8号の衛星  
観測によるAOT  
※衛星観測AOT上に寒冷前線  
のおおよその位置が描かれている。

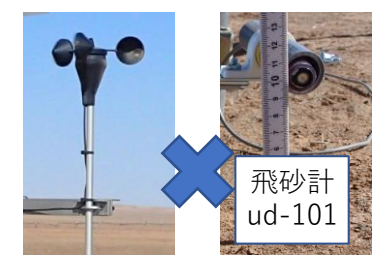


# ダスト数値モデル精度向上に向けた地表面パラメータの取得と指標の設定 観測データによるレキ、枯れ草の飛砂への影響の解明



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。

## 観測：臨界摩擦速度



臨界風速 ( $u_t$ )  
飛砂が開始する風速

粗度長 ( $z_0$ )

臨界摩擦速度 ( $u_{*t}$ )

臨界摩擦速度：飛砂が発生し始める摩擦速度 (乱流を考慮した風速)

## 数値モデルの妥当性の評価

数値モデル：臨界摩擦速度  

$$u_{*t\_sim} = u_{*t0}(d_s)f(\lambda)f(w)f(s_c)f(s_{cr}) \dots \quad \text{式(1)}$$

補正関数 (レキ、枯れ草等の粗度効果)  

$$f(\lambda) = (1 - m_\gamma \delta_\gamma)^{0.5} (1 + m_\gamma \beta_\gamma \lambda)^{0.5} \quad \text{式(2)}$$
 (Raupach et al., 1993)

補正関数 (土壌水分、塩分濃度、クラスト)  

$$f(w) = f(s_c) = f(s_{cr}) = 1 \quad \text{式(3)}$$

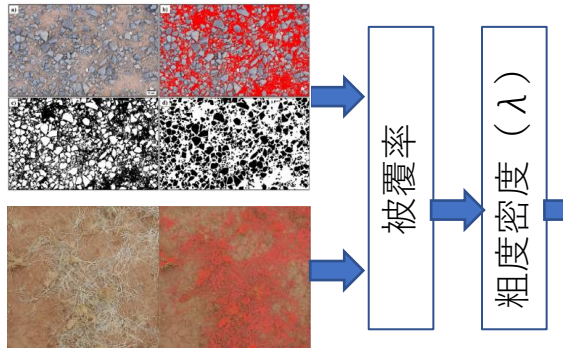
### 【調査内容】

- ・ ツォクトオボー (モンゴル南ゴビ県)
- ・ 常時観測：メインサイト (2012年3月～)、サブサイト14a, 14b (2014年3月～) の3地点における気象・飛砂観測。
- ・ 観測 (2018年春, 2019年春)：レキ調査、気象・飛砂観測。
- ・ 観測 (2019年9月)：枯れ草予備調査。(推進費：2020年4月～2023年3月)

### 【コロナ禍の影響と対応】

- ・ 推進費期間中の現地調査は実施できなかった。
- ・ IRIMHEによる代行調査は実施したが、調査項目を減らした。
- ・ 推進費開始前のデータを解析 (ただし、データ不足)。

### 観測：レキ、枯れ草



画像解析によるレキ (上) と枯れ草 (下) の被覆率の見積もり

# レキ効果 (レキの飛砂への影響)

(Buyantogtokh et al. 2021)

- ① **地形とレキ分布**：レキ被覆率 $SC_{\%}$ 、粗度密度 $\lambda_s$ 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 **広域推定 (→次スライド)**：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 **既存モデル有効性の確認**：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)。

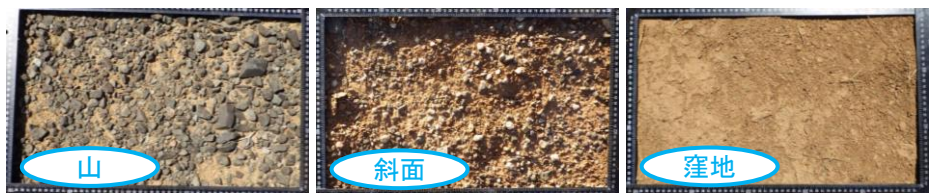


図1：山、斜面、窪地におけるレキの様子 (例)

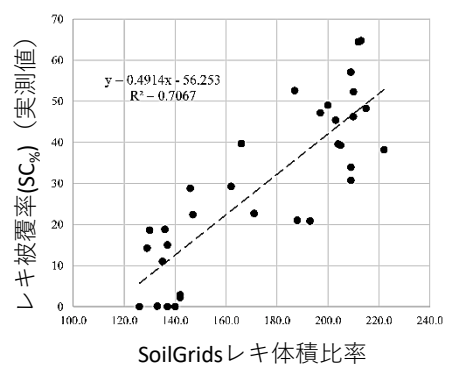


図2：SoilGridsレキ体積比率 (横軸) と本研究の現地調査で得られたレキ被覆率 $SC_{\%}$ の関係(Sekiyama et al. 2023)。

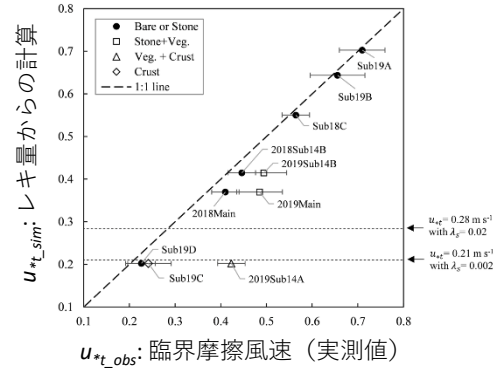
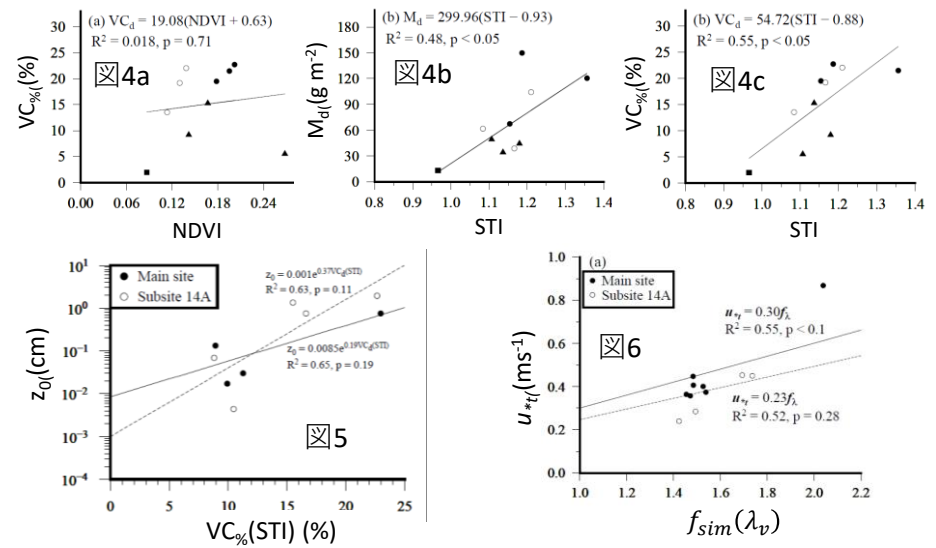


図3：飛砂と風速の実測値から得られた臨界摩擦速度 $u_{*t\_obs}$  (横軸) とレキ測定値から見積もった臨界摩擦速度 $u_{*t\_sim}$ 。植物、クラストが存在しない結果は黒丸で示している。

# 枯れ草効果 (枯れ草の飛砂への影響)

(Wu et al. 2021)

- ④ **枯れ草被覆率推定に有効な衛星観測指数STI (→次スライド)**：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による粗度長推定**：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 **既存モデル有効性の確認**：被覆率 $VC_{\%}$ から粗度補正関数 $f(\lambda)$ 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)： $z_0=0.0010(\text{cm}), u_{*t}=0.23 (\text{m s}^{-1}), u_{10t}=5.31 (\text{m s}^{-1})$

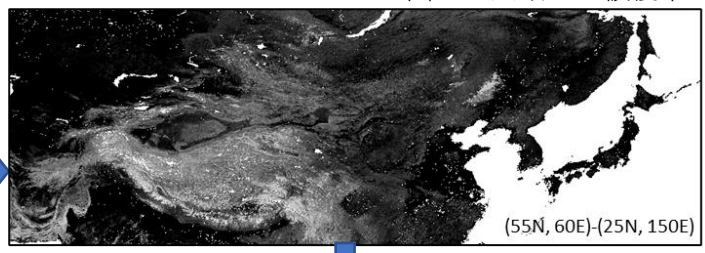


# レキ効果のモデルへの応用

(Sekiyama et al. 2023)

## 【レキの広域推定】

結果② (前スライド)  
 $As = 0.49 Cf - 56$   
 Cf: SoilGridsレキ体積比率 [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]  
 As: レキ被覆率 [%]



## サブ2に提供

- NHM-Chem-Dustにレキ効果を導入
- レキ効果導入による精度向上

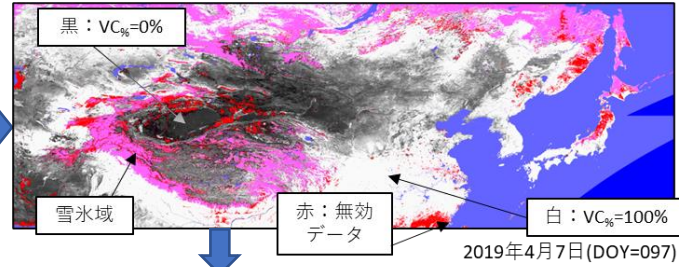
# 枯れ草効果のモデル応用の可能性

(Wu et al. 2023)

## 【枯れ草の広域推定】

結果④ (前スライド)  
 $VC\% = 54.72 \cdot (STI - 0.88)$   
 STI: Soil Tillage Index (土壌耕起指数)  
 $STI = B6 / B7$   
 B6, B7: MODISバンド6, 7  
 VC%: 枯れ草被覆率 [%]

図8: 広域枯れ草被覆率 (例)



領域データは用意できないが、地点データは用意できる。

衛星データの異常値、無効ピクセルを処理するアルゴリズムが完成していないため、**サブ2に提供できていない**

## 【地点 (気象台) における枯れ草効果の検証】

ダスト発生: 観測と予測  
 FO, FX, XO, XXはそれぞれの頻度。

SYNOP現在天気 (観測)  
 • ダスト発生あり: ww=07-09, 30-35, 98  
 • ダスト発生なし: ww=その他

		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 $u > u_t$	<b>FO</b> 的中	<b>FX</b> 空振り
	ダスト発生: なし $u < u_t$	<b>XO</b> 見逃し	<b>XX</b> 的中 (高頻度)

$u$ : 風速 (観測値)  
 $u_t$ : 臨界風速  
 粗度長の見積もりが不可能なため、臨界摩擦速度 ( $u_{*t}$ ) が得られない。

モデル精度評価指数  
 スレット・スコア(TS)  
 $TS = FO / (FO + FX + XO)$

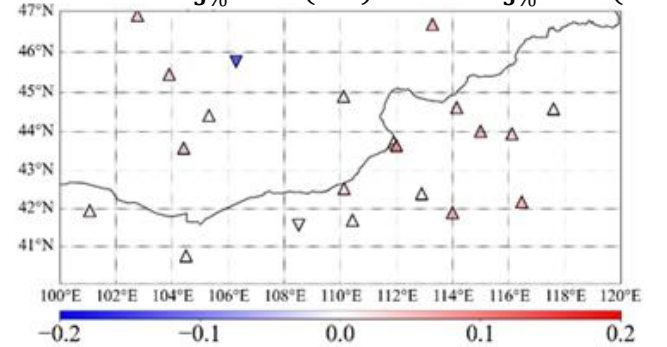
## 2種類の臨界風速

$u_{t5\%}$ : 枯れ草効果**非考慮**の臨界風速  
 統計期間中の臨界風速5パーセントイル。場所毎に値は異なるが、毎年、同じ値。  
 $u_t(STI)$ : 枯れ草効果**考慮**の臨界風速  
 枯れ草指数(STI)を反映した臨界風速。場所、年によって、値が異なる。

## 2種類のスレット・スコア(TS)

$TS_{5\%}$ : 枯れ草効果**非考慮**のTS  
 $u_{t5\%}$ を使用  
 $TS(STI)$ : 枯れ草効果**考慮**のTS  
 $u_t(STI)$ を使用

図9 4月 (2001-2021年)  
 $\nabla$ :  $TS_{5\%} > TS(STI)$   $\Delta$ :  $TS_{5\%} < TS(STI)$



- ⑦ 4月は枯れ草効果を考慮すると、ほとんどの地点でモデル精度向上を示唆する結果 ( $\Delta$ :  $TS_{5\%} < TS(STI)$ ) が得られた (図9)。
- ⑧ 3月 (図無し) は、枯れ草効果を考慮しても精度向上しない。土壌の凍結融解、積雪といった枯れ草以外の効果を考慮する必要あり。



# 合成開口レーダー(SAR)を用いた臨界摩擦速度( $u_{*t}$ )の広域推定

(Buyantogtokh et al. 2022)

- **これまでの結果の課題**：レキ、枯れ草以外に、クラスト等の粗度物質が存在する。それらが混在した状態の粗度効果を評価する手法を有していない。
- **異なる手法による $u_{*t}$ 推定**：粗度に感度がある合成開口レーダー(SAR)後方散乱強度を用いた臨界摩擦速度( $u_{*t}$ )推定法を開発した。
- SARは土壌水分にも感度があるため、地表面が乾燥した時のみを解析対象とした。

- ⑪ SAR強度は常に山領域において高い(臨界摩擦速度が高い) (図12)。これは結果①(山領域にレキが多い)と一致する。
- ⑫ 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れていたことが原因で(図13左) Sub-Site19D付近のSAR強度は高かったが(図12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13右) SAR強度が低かった(図12右)と考察できる。

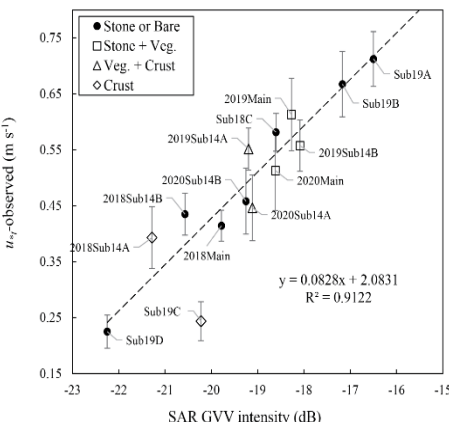


図10：SAR後方散乱強度(横軸)と臨界摩擦速度( $u_{*t}$ ) (縦軸)の関係。

⑨ 強い相関(図10) → SAR強度による臨界摩擦速度( $u_{*t}$ )推定可能を示唆。  
(条件：地表面の乾燥、低塩分濃度。)

⑩ SAR強度による、臨界摩擦速度の広域推定例(図11)。

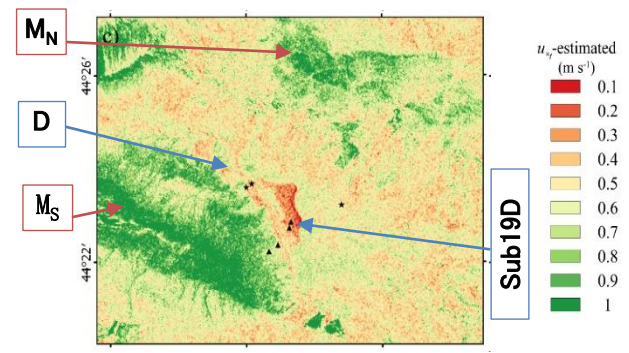
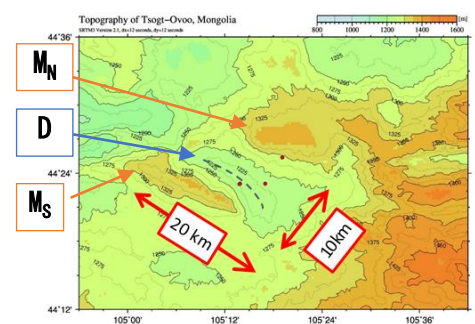


図11：SAR後方散乱強度から推定した臨界摩擦速度の広域分布例(2019年5月)。M<sub>N</sub>とM<sub>S</sub>は山領域、Dは窪地領域。



ツォクトオボーの地形。  
M<sub>N</sub>, M<sub>S</sub>：山領域。  
D：窪地領域。

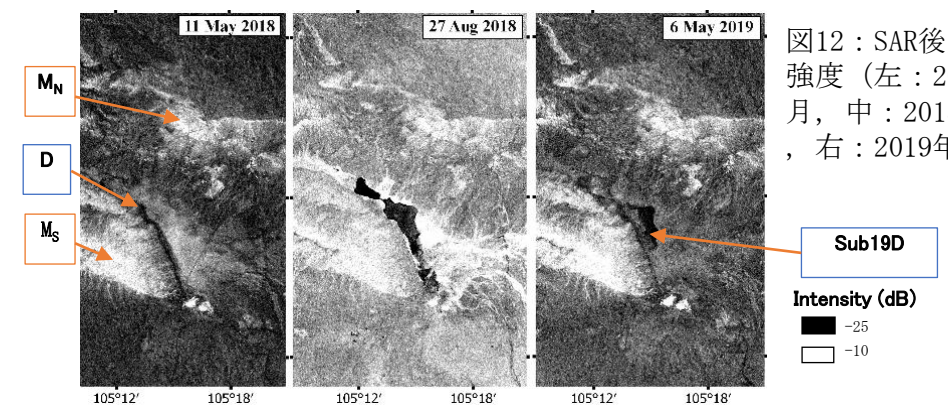


図12：SAR後方散乱強度(左：2018年5月，中：2018年8月，右：2019年5月)。



2018年春：地面はクラストが形成され、枯れ草に覆われていた。  
2018年夏：多雨のため、雨水が窪地に集まり、湖が形成された。  
2019年春：何らかの理由でクラストが崩壊。砂はさらさら(粒子がくっついていない)。

図13：窪地(Sub-Site19D付近)の様子(左：2018年3月，中：2018年8月，右：2019年5月)。

# 大気中の黄砂（微粒子）と地表面付近の飛砂の比較

- **2022年度研究計画**：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に両データの比較を行う。
- **黄砂（微粒子）**：AD-Net2地点（図14）のダスト消散係数
  - サインシャンド (SS: Sainshand) AD-Net
  - ザミンウド (ZU: Zamynud) 東アジアライダーネットワーク
- **飛砂**：飛砂観測データは存在しないため、風速と臨界風速から**飛砂指数Q'**を見積もった。

- 風速：JRA-3Q 地上風速 JRA-3Q：気象庁第3次長期再解析データ
- $u_{t5\%}$  : 枯れ草効果**非考慮**の臨界風速
- $u_t$ (STI): 枯れ草効果**考慮**の臨界風速

**飛砂水平フラックス(Q) (White 1979) 式(4)**

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

**飛砂指数(Q')：飛砂フラックスに比例**

$$Q' = \begin{cases} u^3 \left(1 - \frac{u_t}{u}\right) \left(1 + \frac{u_t^2}{u^2}\right) & \dots u_t < u \\ 0 & \dots u_t \geq u \end{cases} \quad \text{式(5)}$$



図14：AD-Net

- **解析期間**：2008-2021年
- **解析月**：3月, 4月, 5月

- ⑬ サインシャンド4月とザミンウド3月、4月において、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 ( $\alpha_d$ ) 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15)。
- ⑭ その他は、弱い相関あるいは相関無しだった (図無し)。

強い相関がない原因として、浮遊ダストによって消散係数が大きい飛砂がない場合 (y軸近傍のプロット) などが考えられる。

気象台でダスト発生が観測されたときのみをプロット (図16)

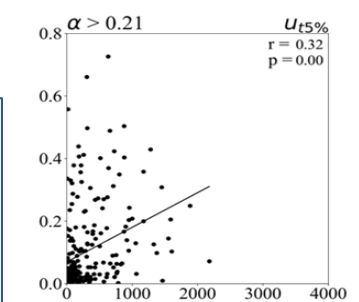


図15：飛砂指数（横軸）とダスト消散係数（縦軸）の例（3月のサインシャンド，枯れ草効果非考慮）。

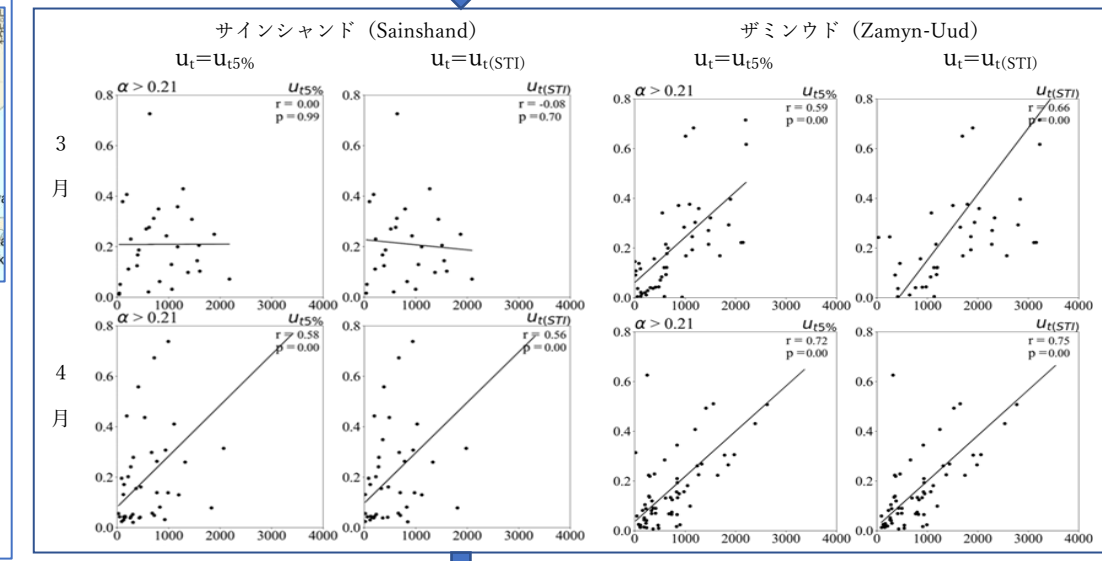


図16：気象台においてダスト発生が観測されたときのみ、飛砂指数（横軸）とダスト消散係数（縦軸）。5月の図は省略。

ダスト発生定義  
現在天気：ww=07-09, 30-35, 98

- ⑮ 比較的高相関だったサインシャンド4月とザミンウド3月、4月においてのみ、相関係数が増加。  
→ これら3つの事例については、浮遊ダストを考慮すべき。

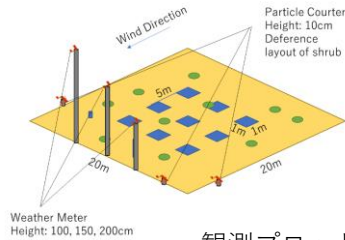
- ⑯ ザミンウド3月のみ枯れ草効果非考慮 ( $u_{t5\%}$ ) から考慮 ( $u_t$ (STI)) にすると相関係数が増加。  
→ 枯れ草効果が有効と考えられる。



# 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

## 【方法】

- ヒユ科灌木等が優占するゴビステップにおいて、植被率・灌木間距離の異なる3タイプの調査区を対象に、下記の観測を実施した。
  - ✓ 植生調査(植被率、群落高、灌木間距離)
  - ✓ 飛砂観測 (ud-101、測定高: 0.1 m)
  - ✓ 気象観測 (3高度 (2.1, 1.6, 1.1 m) での風向・風速・気温)



観測プロット・測器配置図(左)および飛砂計(右)

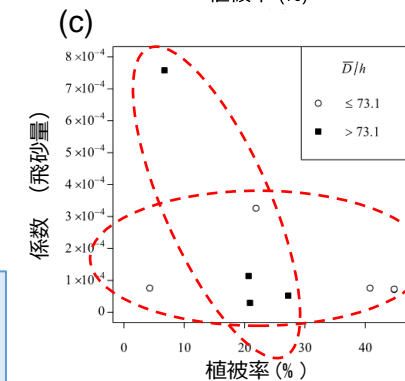
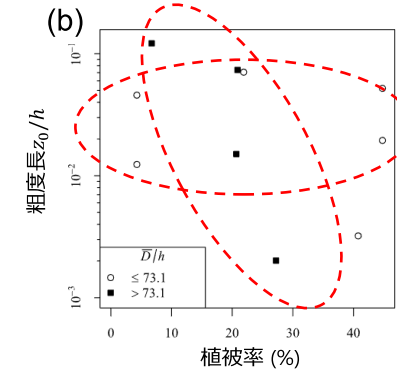
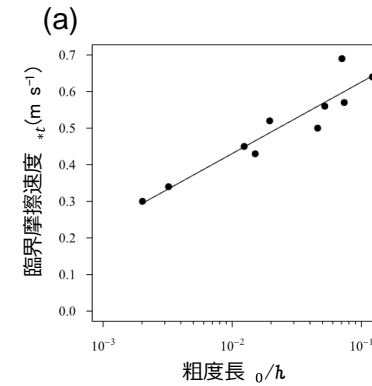
灌木間距離が大きく不均質な植生タイプ

灌木間距離が小さく均質な植生タイプ

## 【結果】

- 臨界摩擦速度と粗度長 $z_0$ とは線形関係を示した。
- 灌木間距離が大きく、不均質な分布の場合(■)は、植被率が小さいと多くの飛砂が発生した。植被率の増加に伴い、粗度長の減少が観測された。
- 灌木間距離が小さく、均質な植生の場合(○)は、植被率の変化に対して粗度長はあまり変化せず、植被率が小さくても飛砂発生が抑制されることが示唆された。

- 灌木が優占する植生において植生が風食に及ぼす影響を評価する際には、灌木の空間分布を考慮することが重要
- 不均質な植生条件下では、風食が発生する植被率の閾値が増加 → とくに植被率25%前後で植生の空間分布の変化に注意が必要



臨界摩擦速度 $u_{*c}$ と粗度長 $z_0/h$ の関係

粗度長 $z_0/h$ と植被率の関係(b)および係数cと植生の関係(c)

$D^-/h$ は灌木間距離の割合を示す。

# 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

## 【方法】

- ニトラリア科灌木等が優占するゴビステップにおいて、植被率・灌木間距離の異なる4タイプの調査区を対象に、下記の観測を実施
  - ✓ 灌木空間分布 (灌木パッチサイズ、位置)
  - ✓ 飛砂観測 (ud-101 (3機)、測定高: 0.1 m)
  - ✓ 気象観測 (3高度 (2.1, 1.6, 1.1 m) での風向・風速・気温)
- 空間分布を考慮した新規植生指標を開発し、既存指標 (植被率、植生高、側方植被率等) と飛砂フラックスの推定精度を比較  
※区分回帰および対数回帰にて決定係数で指標の説明力を比較

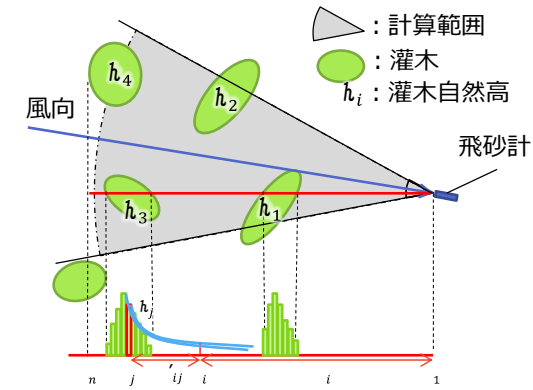


図 灌木の空間分布と指標計算の模式図  
TH: 計算範囲内の灌木自然高( $h_i$ )の総和  
HAE: 灌木がその風下に及ぼす影響を考慮

## 【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唆
- 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
- 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

- 他の植生タイプでもより詳細な解析を進め、新規指標の有効性や汎用性を検証することで、風食抑制に関わる植生閾値の検出、最適な緑化樹種や植栽配列の提案が可能

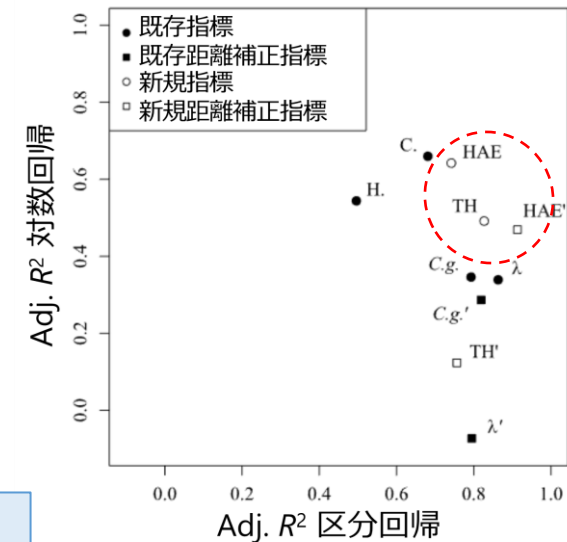


図 既存指標および新規指標における区分回帰(閾值的関係を推定)および対数回帰(少量の飛砂も重視)の決定係数の平均値。  
C: 植被率, H: 灌木高,  $\lambda$ : lateral cover, C.g.: canopy gap(以上既存指標)。

5-2. 環境政策等への貢献

TEMM-DSS(日中韓3カ国環境大臣会合-黄砂共同研究)  
 WG1(監視・予測) ←年次会合→ WG2(発生源対策)

成果の共有・  
観測データ提供

成果の共有

成果の共有・  
植生管理手法提言

サブテーマ1

サブテーマ2

サブテーマ3

黄砂日・煙霧日の  
ライダーデータ提供

専門家として参画・助言

環境省水・大気環境局大気環境課  
 黄砂問題検討会(座長・清水)  
 「黄砂飛来状況調査報告書」(年次)

環境省黄砂飛来HPへ  
リアルタイムで  
ライダーデータ提供

気象庁現業黄砂予測モ  
デルの改良へ・  
世界気象機関(WMO)の  
SDS-WASへ成果報告

発生域における土地管  
理知見の提供、日蒙環  
境政策対話への貢献





## 5-3. 研究目標の達成状況

[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。

⇒目標どおりの成果をあげた

各サブテーマの達成状況に加え、TEM DSS年次会合における成果発表や日蒙協力態勢の強化(サブ1・3における調査委託等)が進められた。

	サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3
評価結果	目標どおりの成果をあげた	目標どおりの成果をあげた	目標どおりの成果をあげた
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ライダー観測網を維持してモデル検証用データを得る</li> <li>○常監局データによる黄砂判定手法を開発する</li> <li>△モンゴル国内で簡易装置による黄砂観測ネットワーク形成(3地点)</li> <li>○飛砂・黄砂関係の調査</li> <li>○PM2.5環境基準超過への黄砂の寄与率推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○全球エアロゾルモデルによる過去計算等でモデルの特性を把握</li> <li>◎他サブとの協力でモデルを改良</li> <li>○複数シナリオによる将来計算の実施</li> <li>○黄砂発生・輸送・気象条件の変化取り纏め</li> <li>○気象庁モデルへの組み込み作業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地表面情報や飛砂について野外観測・実験により解明、6種類以上の地表面パラメータを取得</li> <li>◎数値モデル改良に資する指標を3つ以上設定してサブテーマ2へ提供</li> <li>○発生源の生態系保全に必要な植生・土地利用条件について提案</li> </ul>

## 6. 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	全体
誌上発表（査読有）	5	34	8	41 (重複を除く)
誌上発表（査読無）			2	2
口頭発表	7	11	22	40
「国民との科学・ 技術対話」の実施	3	1	3	7
マスコミ等への公 表・報道等	3	3	3	9

代表的な論文（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

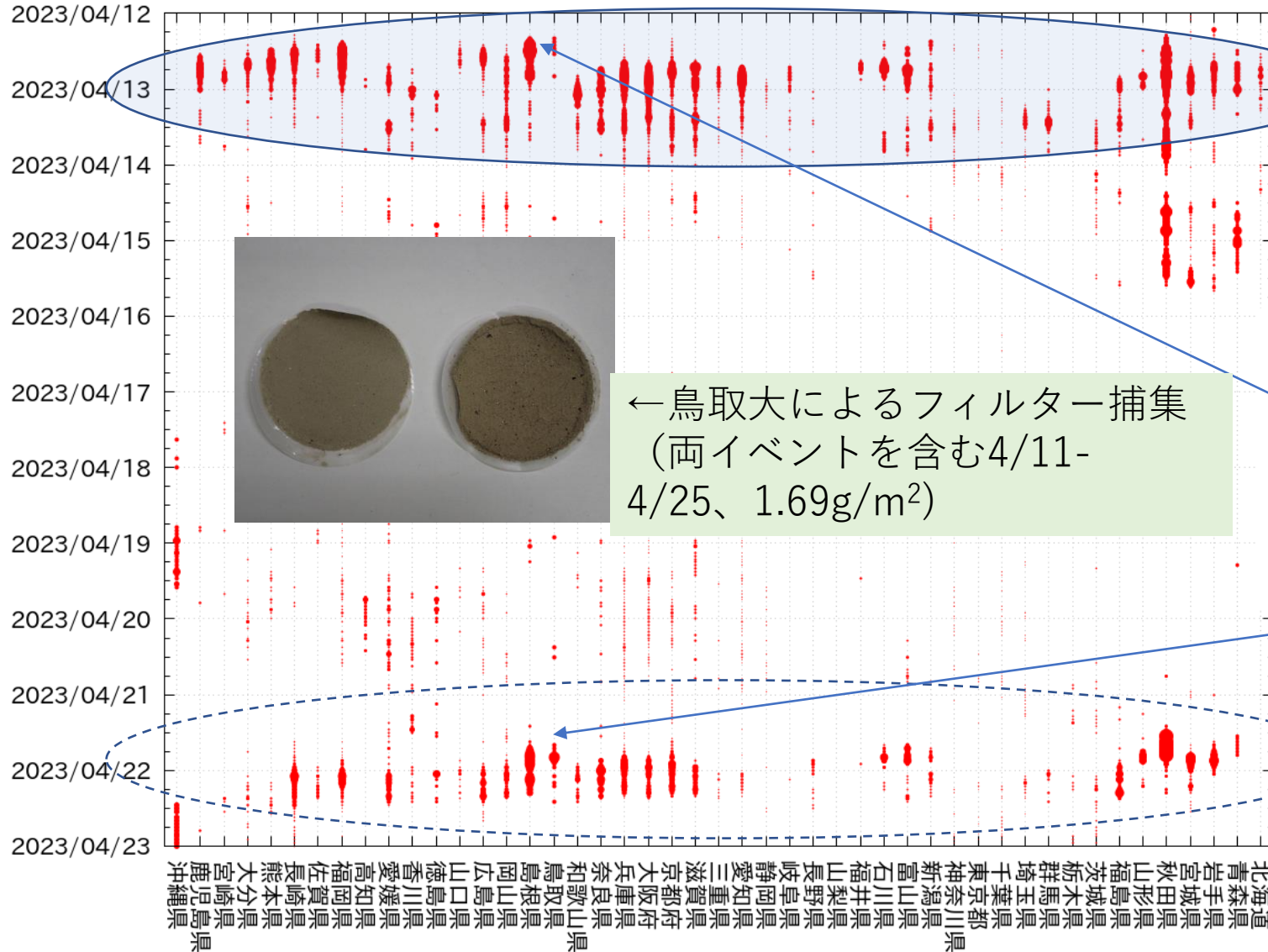
サブ1ライダーデータで検証されたサブ2全球モデルにより将来気候での黄砂発生量を計算

代表的な論文（2）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

サブ3から提供されたレキ被覆率データをサブ2領域モデルに取り入れ、TEMM-DSSで共有された中国国内PM10データ等を用いて黄砂の再現性が向上することを実証

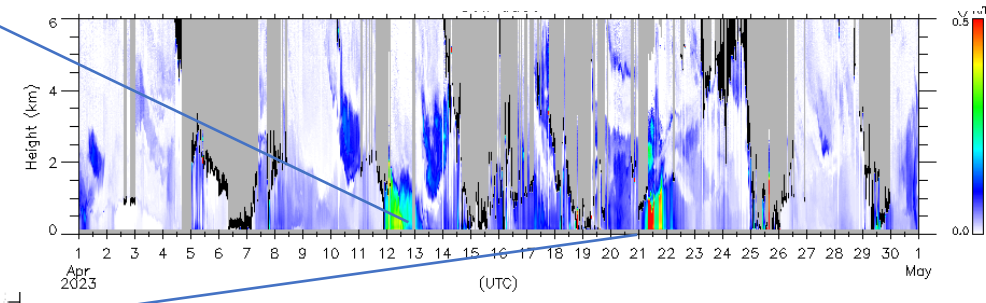
付録：2023年4月の黄砂

常監局データによる黄砂検出



気象台による黄砂発表→マスコミでも盛んに取り上げられる→当課題担当者(清水・眞木・黒崎)もコメント

松江ライダーによる4月の黄砂消散係数



気象台発表なし、マスコミも取り上げず→これらを見逃さない研究が重要