

G-2 北東アジアにおける砂漠化アセスメント及び早期警戒体制(EWS)構築のためのパイロットスタディ

(2) 砂漠化指標の長期的モニタリングのための観測手法の標準化

国立大学法人東京大学気候システム研究センター	高橋正明
国立大学法人東京大学工学系研究科	小池俊雄
国立大学法人千葉大学 リモートセンシング研究センター	本多嘉明

<研究協力者>

千葉大学リモートセンシング研究センター	梶原康司
首都大学東京都市環境科学研究科	松本淳
東京大学気候システム研究センター	岩尾航希
東京大学大学院工学系研究科	太田 哲・Hui LU

平成16～18年度合計予算額	43,347千円
(うち、平成18年度予算額	14,200千円)

「※上記の予算額には、間接経費10,004千円を含む」

[要旨] 本サブテーマは、広域スケール・長時間スケールでの砂漠化指標の取得のための手法の標準化と指標の整備を目的とした。数年以上のオーダーで顕在化する砂漠化プロセスを正確に把握するために、砂漠化の最も重要な指標の一つと考えられている土壌侵食量の推定を行った。その推定に際し、これまで推定誤差の問題となってきた累積誤差を避けるために、土壌侵食量に影響する要因を直接リモートセンシングなどによって取得する手法の開発に重点を置いた。風食については、オーストラリアのCSIROにおいて開発されたWind Erosion Assessment Model (WEAM)を用いた。これらのパラメータのうち、従来長期間の推定が難しかった土壌水分について、衛星リモートセンシングによる直接測定を試みた。土壌中の体積散乱と土壌表面での表面散乱を記述できる放射伝達モデルを開発し、それを北東アジア乾燥域における衛星観測データに適用した。これらのデータを用いて、北東アジア乾燥域の風食量推定を行った。過去の主要都市におけるダスト観測データを用いた発生量の空間分布と長時間変動、また過去の風食推定研究との風食量の総量の整合性を検証し、妥当な値であることを確認した。水による土壌侵食(水食)については、米ミシガン大学により作成されたRevised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)を用いた。サブテーマ3と共同し、現地の土壌水食実験より土壌パラメータを取得すると共に、推定された水食量を現地データと詳細に比較調整し、妥当な値を得たのを確認し、北東アジア乾燥域全域に適用した。

[キーワード] 砂漠化指標、モニタリング、風食、水食、マイクロ波リモートセンシング

1. はじめに

これまで砂漠化評価のために広域モニタリングで用いられてきたのは、その殆どが気候指標(主

に降水量)と植生量指標(主に正規化植生指数; Normalized Differentiate Vegetation Index NDVI)であった。このような気候・植生量指標の組み合わせによる評価は、早ばつなどの短期的早期警戒体制にはその効果が実証されているが、様々な要素が複雑に作用しあった結果として数年以上のオーダーで健在化する砂漠化プロセスを正確に評価するには不十分である。EWSアドホックパネルは、砂漠化の時間的変動とオーダーが符合し、かつ土地生産力の弾力性と深く関連する土壌に関する指標を得ることの重要性を指摘している。更に、植生の量的特徴については、放牧強度に対して減少しない例も指摘されており、量的特徴を含めた多様な指標による観測が砂漠化モニタリングに要求されている。

2. 研究目的

そこで本サブテーマでは、様々な要素が複雑に作用しあった結果として数年以上のオーダーで顕在化する砂漠化プロセスを正確に把握するために、土壌侵食に関する指標の取得を通じて、その時間変動のマッピングを行う。砂漠化指標観測という目的上、広域かつ長時間スケールの観測が求められるため、近年の先進的なセンサに加え、数十年前から用いられてきたセンサによる観測手法の開発に重点を置いた。

3. 研究方法

土壌侵食は風によるもの(風食)と降雨によるもの(水食)がある。以下にそれぞれの詳細を説明する。さらに、植生タイプを考慮した植生量の推定の試行についても言及する。

1) 風食

a. モデルによる風食量の推定

まず風食モデルについても既存のモデルを包括的にレビューした(表1)。風食モデルは主に耕作地における風食の作物への影響に焦点を当てたものが多く、今回調べた4つのモデルのうち3つは耕地を対象にしたものであった。また時間ステップ、入力パラメータ等もモデルごとに大きく異なる傾向にあった。本研究対象地である放牧草地を対象にしたものは1つ CSIRO/CaLM WEAM (Wind Erosion Assessment Model) のみであり、元来広域スケールでの推定を対象としていること、また放牧草地に対する広域でのパラメータライズ手法を含めて設計されていることなどから、WEAMの利用が最適であると判断された。

図1にWEAMの概要を示す。WEAMの特徴は(1)物理プロセスモデルであること、(2)サルテーション、サスペンション及び団粒破壊の過程を明示的に取り扱うこと、(3)様々な土壌侵食に影響を与えるパラメータを包括的に扱うこと、などが挙げられる。WEAMは、オーストラリア(Shao and Leslie、1997)、北東アジア地域(Shao *et al.*、2002)において用いられてきた。WEAMが求める主な入力パラメータは(1)風速、(2)団粒及び完全分散状態の粒径分布、(3)表面粗度長、(4)土壌水分量である。

風速データはECMWF再解析データ(ERA40)の6時間ごとのデータを用いた。団粒及び完全分散状態の粒径分布はOkayasu and Takeuchi (2004)により設定した。表面粗度は衛星画像(NOAA AVHRR PALデータセット)から得られた葉面積指数を用いて推定した。表面粗度を構成するもう

ひとつの重要な要素としてのレキは現在その空間分布を推定する手法が無く、今回は考慮していない。

土壌水分量は後述のリモートセンシングから得られたデータを用いた。ただしそのデータは毎6時間ごとに全ピクセルのデータがあるわけではないので、NOAH陸面モデルをナッジングする形で用いた。NOAH陸面モデルに入力するパラメータとしては気象データ、植生及び土壌の物理性が必要で、気象データはECMWF 再解析データ (ERA40)、植生は衛星画像(PAL)、土壌の物理性は土性を図化した後USDAの土性・土壌物理性の対応データを用いて推定した。

以上のパラメータを1988年から2002年に渡り取得し、モデル計算を行った。計算の時間間隔は6時間に設定した。

表1 主要な風食モデルの性質

機関・名称	空間スケール	想定される土地利用	時間ステップ	入力パラメータ	出力変数
USDA WEQ 経験モデル	圃場	耕地	一年	土壌タイプ、植生、粗度、 気象、圃場長	クリープ(土壌粒子が地表面をころがること)及びサルテーション粒子の移動量
USDA RWEQ 経験モデル	圃場	耕地	一日	風速、放射、風向、降水量、 気温 土性、有機物含量、炭酸カルシウム含量、レキ含量 植物残渣量、作物高 耕作スケジュール、農具、うねの高さと間隔、灌漑スケジュール 圃場長、幅、もしくは直径、斜面長と角度	クリープ及びサルテーション粒子の移動量
USDA WEPS プロセスモデル	圃場	耕地	一日	数百 (詳細なパラメータを得なくてもモデルを駆動できるようなインターフェースを備えている)	サルテーション、クリープ、サスペンション(小粒径の粒子が上空に舞い上げられること)粒子量及び堆積。 圃場の地表変化もシミュレート。
CSIRO/CaLM WEAM プロセスモデル	点	草地	瞬間	団粒・完全分散粒径分布、降水量、蒸発量、風速、 葉面積指数、群落高	クリープ、サルテーション、サスペンションされる粒子の量を粒径ごと。

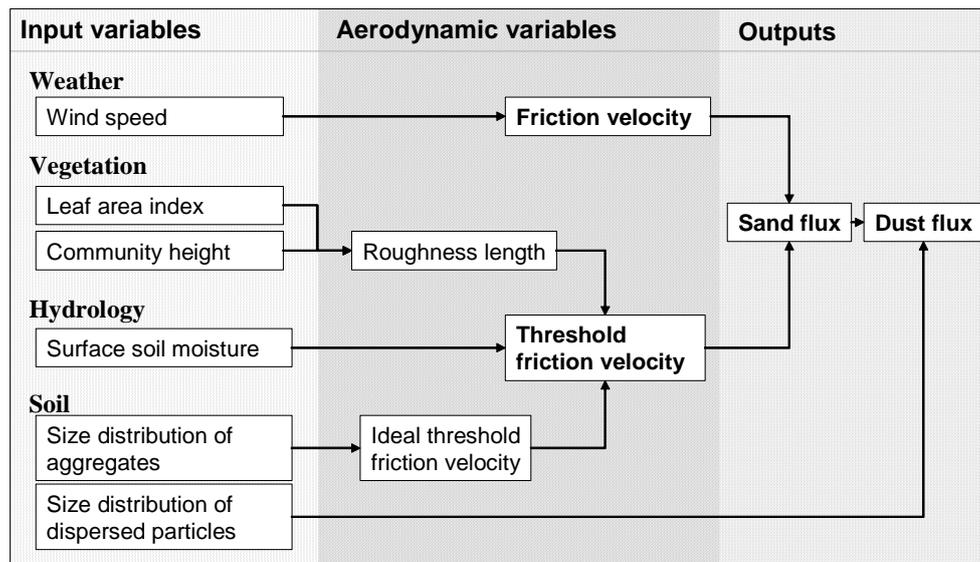


図1 WEAM の構造

表2 WEAMに入力したパラメータ

変数	データセット / モデル
風速	▶ ECMWF ERA/40 6時間毎風速データ
植生	▶ Pathfinder AVHRR Land (PAL) データセット
土壤水分	▶ NOAH/OSU 陸面モデルをリモートセンシングによる推定値にナッジング
雪の被覆	▶ ECMWF ERA/40 6時間毎積雪データ
団粒粒径分布	▶ Okayasu and Takeuchi (2004) のモデルを利用

b. マイクロ波リモートセンシングによる土壤水分の推定

以下の手順により行った。

i) 土壤水分アルゴリズムの構築と検証

マイクロ波放射伝達過程に関するフィールド観測、数値シミュレーション研究の成果もとに、マイクロ波放射計による土壤水分アルゴリズムの骨格を構築し、モンゴルでのAMSR-Eおよび地上観測データに適用して、算定された土壤水分データの検証を行なう。

ii) 土層のマイクロ波放射伝達過程の理解とモデル化

乾燥・半乾燥状態での低周波数から高周波数にわたるマイクロ波の放射伝達特性を理解するために、衛星搭載センサと同様の性能を持つ地上設置型マイクロ波放射計を用いた観測実験を行い、特に土壤水分量、土壤表面粗度、土壤粒径がマイクロ波放射伝達過程に与える影響を把握する。この結果に基づき、乾燥・半乾燥状態で低周波数から高周波数に適用可能なマイクロ波放射伝達モデルを開発し、その精度を検証する。

iii) モンゴルでの土層のマイクロ波放射伝達モデルの補正

モンゴルでの衛星同期観測データを用い、地上観測の土壤水分と地温をモデルに入れて輝度温度を算出し、SSM/I観測輝度温度に最も合うように、マイクロ波放射伝達モデルの補正を行なうと

ともに、モデルパラメータを調整する。

iv) モンゴルでの土壌水分の長期変動特性

得られたマイクロ波放射伝達モデルと（１）で得られた土壌水分算定アルゴリズムを用いて、1988年以降の同国の土壌水分データセットを作成し、その長期変動特性を検討する。

2) 水食

a. モデルによる水食量の推定

水食モデルは、大きくは経験的なもの、概念的なもの、物理的なものの3つに分類される。経験的モデルで最も代表的なものはUSLE(Universal Soil Loss Equation)モデルであるが、これに改良を加えたものがRUSLEモデルである。RUSLEは、数回の修正を経て、2003年に最新版がUS Department of Agriculture (USDA)から提供されている。RUSLEでは、1)降雨要素（強度、量、エネルギーなど）、2)傾斜度、3)斜面長、4)土壌の性質、5)作物と栽培管理といったパラメータから、任意の圃場の土壌侵食量を推定することができる（図2）。ただし経験モデルであるために、実測値による調整が不可欠である。本研究課題では、サブテーマ3において、水食プロットを設置し、水食量を実測した。図2における土壌のパラメータに、その実測値より求めたパラメータが入力されている。

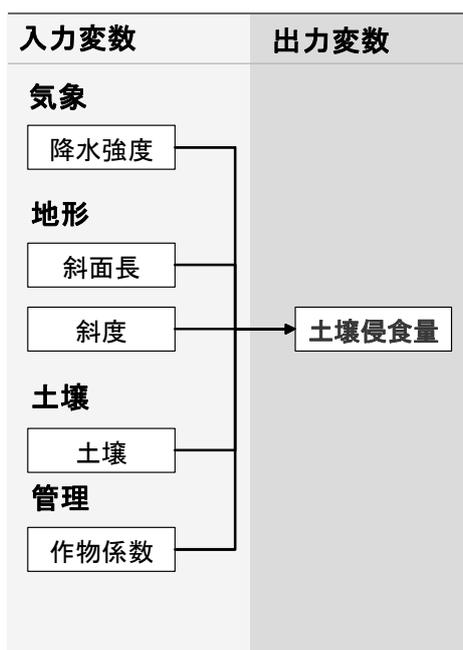


図2 RUSLEの構造

要求されるパラメータに対して、表3に示すようなデータセットを用いて入力し、1988年～1999年についてのシミュレーションを行った。この中で、地形および土壌は全時期について同一のデータを入力している。時系列変化をするのは、降雨強度および作物係数である。このうち、降雨強度はかならずしも降水量に比例せず、突発的な嵐などの強雨による影響が強く出る値であって、これまでその変動傾向については明らかにされてこなかった。よって、次節にて、この降雨係数の計算の詳細およびその変動傾向についての把握も行った。

表3 RUSLEに入力したパラメータ

変数	データセット / モデル
降雨強度	▶ ECMWF ERA/40 6時間毎降水データ
斜面長/ 斜度	▶ GTOPO30 1km DEM
土壌	▶ サブテーマ3の水食試験区 による実測値
作物係数 (植被率で代用)	▶ Pathfinder AVHRR Land (PAL) データセット

b. 降雨係数の計算と変動の傾向

降雨係数(R)は以下のように定義される。

$$R = \Sigma(E \cdot I_{30})$$

I_{30} : 一連の降雨中の最大30分間雨量の1時間換算値

E: 一連の降雨の降雨エネルギー

なお、降雨係数は一連の降雨ごとの値を一定期間（一日、一月）累計することにより求められ、一連の降雨は降雨開始から降雨終了（6時間以上続く無降雨の始まり）までで定義される。一連の降雨の降雨量が12.7mm以下の場合は累計から除外する。また、降雨エネルギー(E)は一連の降雨の中で積算することにより求められる。

$$E = \Sigma(E_k \cdot r)$$

r: 降雨量

E_k : 単位雨量あたりの降雨エネルギー

I: 降雨強度として

$$I < 76.2 \text{ mm/h の時 } E_k = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$$

$$I > 76.2 \text{ mm/h の時 } E_k = 0.283$$

降雨データはECMWFの客観解析データERA40を用い、1982-2002年にわたり降雨係数を算出した。このデータの降雨量は対流性降雨(cp)と大規模凝結(lp)に別れており、空間解像度は緯度・経度方向に2.5度、時間間隔は6時間で与えられている。具体的には、まず各時間における降雨量($r=cp+lp$)と、降雨強度($I=r/6$)から導かれる E_k の積を、一連の降雨で累計してEを求める。そしてその値と I_{30} の積をその降雨の降雨係数として定義するのだが、 I_{30} に関しては、データは6時間間隔でしか与えられていないので、cpは1時間で起きた、lpは6時間で起きたと仮定し、 $(cp + lp/6)$ の一連の降雨中の最大値とした。最終的に得られた一連の降雨の降雨係数Rを日々の降雨量をもとに分配して日データを、更にそれを月々で累計して月データを作成した。

降雨量に関しては他に、定点観測・衛星観測・客観解析を組み合わせたCMAPの月平均データと、NCDCにより提供された北東アジア68点の定点観測データを用いている。1999年における定点観測

データは、欠損値や明らかに異常と分かるデータを多く含んでいたため解析から除外した。大気場の解析にもERA40を用いるが、移動性擾乱のトラッキングを行う際には、1.125度メッシュの高解像度のものを用いた。トラッキングは500hPaの高度場が極小となる格子点を結ぶことにより行い、低気圧の位置を以前の位置から推定した後に、最も近い低気圧をトラックする方法を用いた。トラックの初めの点を発生源とし、最も近い低気圧が1000km以上離れている場合低気圧は消失したものとした。なおトラック可能な期間が24時間よりも短い場合は解析から除外した。

3) 植生タイプを考慮した植物量推定

まず、(a) 現地調査において、灌木の進入した草地と植被率の一定な灌木の無い草地の位置を明らかにし、かつ灌木の群落については群落の分布状態を計測する。次に、(b) 現地調査と同期した人工衛星NOAAのAVHRRセンサの取得データを解析し、灌木の進入した草地と、そうでない草地の判別をおこなう。

a. 現地調査

モンゴル国ドントゴビ県マンダルゴビ周辺の草地にて実施した。観測ポイントは以下の7箇所である。便宜上S1からS7までの番号をつける。

- S1. 非常に疎な草地。この地点は5年ほど前と比較すると植被率が減少している。また灌木が徐々に進入しつつあるが、まだ灌木が群落をなすほどではない。
- S2. S1 から 2km 近傍にある低地で比較的湿潤な草地。しかしながら植被率は大きくない。
- S3. S1 から 2 k m 近傍にあり、S1 と同様灌木の進入が見られる草地。このポイントでは約30%程度が灌木の幼木となっているが、ここでもまだ群落をなすには至っていない。
- S4. 5 k m 四方に渡ってほぼ一定の植被率で、比較的植被率の高い地域。灌木の進入はない。
- S5. 灌木が優占する地域。
- S6. 本プロジェクトで設定された Low Land Site。
- S7. 本プロジェクトで設定された灌木サイト。

今回の計測では、灌木の無い草地では草丈および植被率、灌木のあるポイントでは草丈（灌木と灌木以外を区別）および灌木群落の分布状態を計測した。植被率はデジタルカメラによる垂直方向からの写真をもとに算出した。また、灌木の分布状態は30m×30mのコドラートを設定し、コドラート内のすべての群落について被覆面積、平均樹高を計測した。

b. 人工衛星データによる草地の判別

モンゴル国自然環境省リモートセンシングセンターによって受信されたNOAA/AVHRRセンサのデータを使用した。NOAA/AVHRRは9日間で同一軌道に戻る軌道であるため、連続する9日間は、同一点を異なったセンサ角度で観測する。したがって、昨年度開発した多角観測をもとにした新たな植生指標を適用するためのデータは、現地観測と同期して取得されたことになる。

この画像からP1、P2、P3のこの3つのパラメータを画像化し、現地観測地点における3パラメータの比較を行なった。

4. 結果・考察

a. モデルによる風食量の推定

図3に風食量（サルテーション粒子のフラックス）の、全シミュレーション期間における平均を

示す。風食の中心はムウス砂地・クプチ砂漠・バダインジャラン砂漠・トンガリ砂漠及びその周辺のゴビ砂漠・ゴビステップの地域に位置している。次いで風食量の核になるのは、タクラマカン砂漠を擁するタリム盆地に位置している。また、東部のホンシャンダク砂地・ホルチン砂地周辺においても相当量の風食の発生が見受けられる。

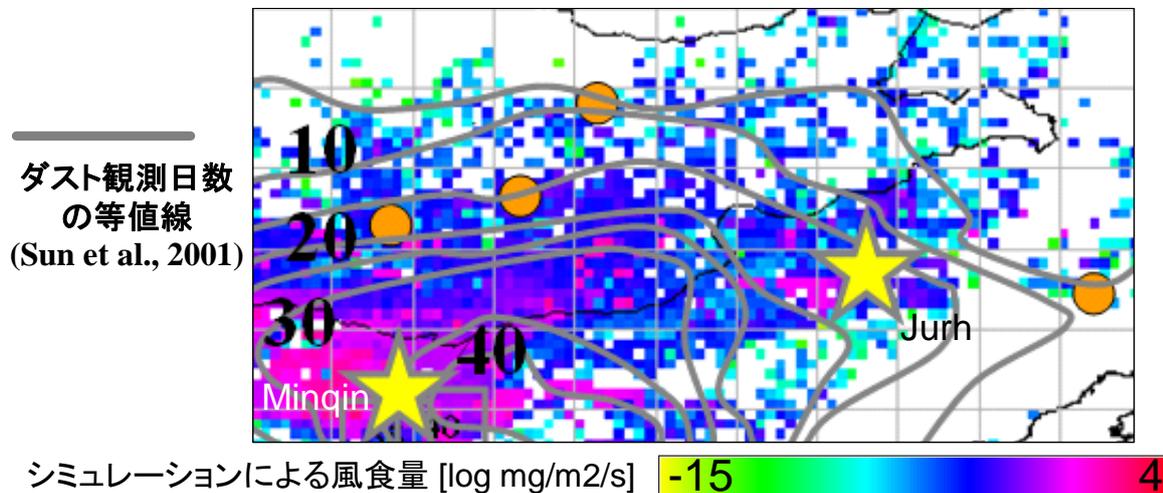


図3 WEAMによる風食量推定。橙色の円はサブテーマ3における調査地。灰色の線分はSun et al. 2001 によるダスト観測日数の等値線。星マークは、図4で時系列を比較した街の位置を示す。

この分布範囲はサンドストームが最も発生する地域として報告されている地域とかなり一致していることがわかる (Sun et al., 2001)。ただしSun et al. (2001) のデータは、気象局によるダスト発生日数であり、ダスト発生だけでなく、風上側から流れているダストの影響も受けている。北東アジアのダストは春季3～4月にピークになり、卓越風は北西である。このことは、本研究で示した風食の空間分布に対して、ダスト観測日数が南東側により多く広がっていることと整合的である。

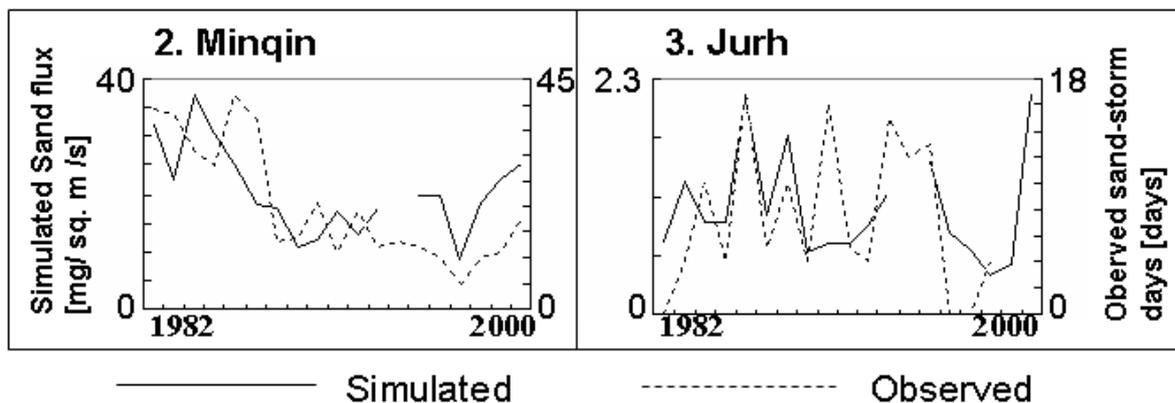


図4 図3に示した2都市における、シミュレーションによる風食量と、Sun et al. 2001によるダスト発生日数を重ねたグラフ。

また、図4には、図3で星型で示した位置にある2都市における、シミュレーションによる風食量と、Sun et al. 2001によるダスト発生日数を重ねたグラフである。一年毎の変動については、いくつか大きい誤差が見られるものの、20年スケールの変動傾向はよく捉えられていることがわかる。

表4 既往の風食量推定モデルによる値と、本研究による値の比較

著者	シミュレーション条件	対象範囲	風食量	本モデルシミュレーションにおける風食量
Shao <i>et al.</i> (2002)	2000/4/5 20:00 ~4/11 20:00、 <22 μ m	北東アジア 乾燥地全域	27.6 Tg	41.86 Tg
Gong <i>et al.</i> (2003)	2001/3~5月 <41 μ m	北東アジア 乾燥地全域	252.8 Tg	559.56 Tg

さらに、表4に、既往の風食量推定モデルによる値と、本研究による値を示した。それぞれシミュレーション条件が異なるために、既往研究のシミュレーション条件に整合する計算結果の部分を集計し比較した。既往文献の風食量に対して、ある程度大きい値が得られているが、双方共に類似したオーダーに収まっている。

b. マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分の推定

i) 土壌水分アルゴリズムの構築と検証

AMSR/AMSR-Eによる土壌水分観測手法の国際比較実験より、当グループのアルゴリズムが世界で最も優れた性能を示すことが認められた。宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、当グループのアルゴリズムを用いて全地球土壌水分プロダクツを定常的に作成している(JAXA)。

また、統合地球水循環強化観測実験プロジェクト(CEOP)とAMSR/AMSR-E検証実験により、本プロダクツがモンゴルにおいて、地上観測値と推定値の差の絶対値の平均が2.98% (単位の%は体積含水率) を得ている (小池ら、2004; Tamagawa, *et al.*, 2003)。そこで、この全地球土壌水分プロダクツを用いて定常的な土壌水分モニタリングが可能であると判断する。

ii) 土層のマイクロ波放射伝達過程の理解とモデル化

地上観測実験：放射伝達特性を詳しく理解するために、砂層を対象として、その厚さや含水率、砂層の下層境界条件を金属や電波吸収材に変化させて観測実験を実施した。写真1や図5は観測実験の概要を表しており、東京大学農場(西東京市)の実験圃場に2つの地上マイクロ波放射計を設置し、両放射計の共通の観測フットプリントをターゲット領域とし、ここに金属板もしくは電波吸収剤を置き、その上に観測対象である砂層を築いた。その両隣はそれぞれの放射計の参照地面とした。土壌水分と地温は6本のTDRと10本の白金センサを用いて、鉛直、空間分布を計測し、地表面温度は赤外温度計を用いて計測した。なお、実験時には土壌のサンプリングを行い、土壌水分土壌密度を計測した。

モデル開発：砂層は図6にあるように多くの球形粒子が密につめられたスラブ構造としてモデル化された。砂層を均一な媒体と仮定すると、放射伝達モデルは下記のように表現できる(Tsang *et al.*, 1977):

$$\mu \frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} I_v(\tau, \mu) \\ I_h(\tau, \mu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_v(\tau, \mu) \\ I_h(\tau, \mu) \end{bmatrix} - (1 - \omega_0) B(\tau) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} P_{VV} & P_{VH} \\ P_{HV} & P_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_v(\tau, \mu') \\ I_h(\tau, \mu') \end{bmatrix} d\mu' \quad .1$$

ここで、 $I_p(\tau, \mu)$ は光学的厚さ τ での放射強度、 ω_0 は単一散乱アルベド、 $B(\tau)$ はPlankの放射則、 P_{ij} は散乱位相関数である。

式(1)については、離散的な手法(G.Liu, 1998)とHenyey-Greenstein位相関数を用いることによって効率よく解を得ることができる。表面散乱にはAIEMを、土壌粒子の体積散乱の計算には稠密媒体の放射伝達モデル(DMRT)を用いた。また、図7にあるように観測角によって生じる陰が引き起こす地表面反射率の低下(Shadowing効果)を地表面粗度と関連付けて表面散乱モデルに取り入れた。この効果を定量的に把握するため、写真2にあるように、実験的に地表面粗度を調整した。

モデルの検証：砂層内での体積散乱の効果をモデルがどの程度表しているかを検証するために、乾燥条件下で、下層境界条件として輝度温度の低い鉄板と輝度温度の高い電波吸収剤の両方を用いたデータと比較したところ、図8、9にあるように、開発したモデルの妥当性が示された。モデルによって地表面散乱の影響をどの程度表現できるかを検証するために、湿潤条件下で様々な粗度状態に対して実験を行い、性能を評価した。その結果、図10に示すように、粗度が大きくなるにつれて垂直偏波で放射率が低下し、水平偏波では増加する傾向が表現でき、また垂直偏波では定量的にも高い精度であったが、水平偏波では過小評価となった。



写真1 2台の地上マイクロ波放射計
(東京大学農場(西東京市)の実験圃場)

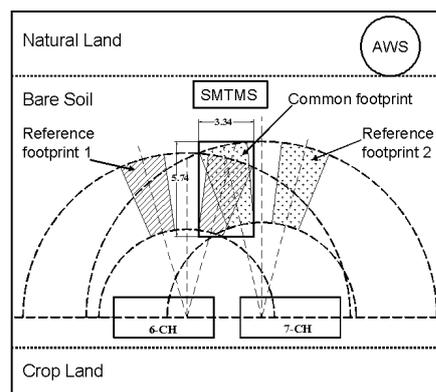


図5 地上マイクロ波放射計観測実験
フットプリント

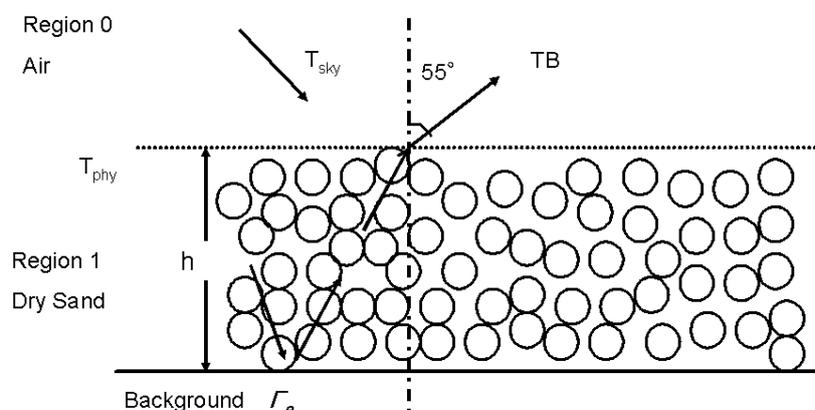


図6 放射伝達モデルの幾何的な構成

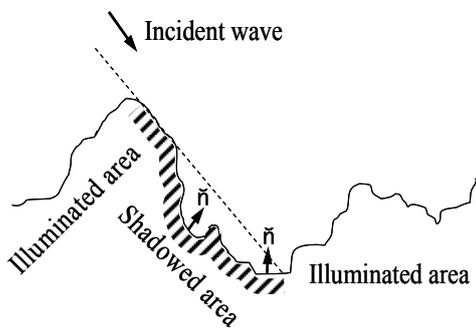


図7 shadowing効果の導入



写真2 地表面粗度の形成

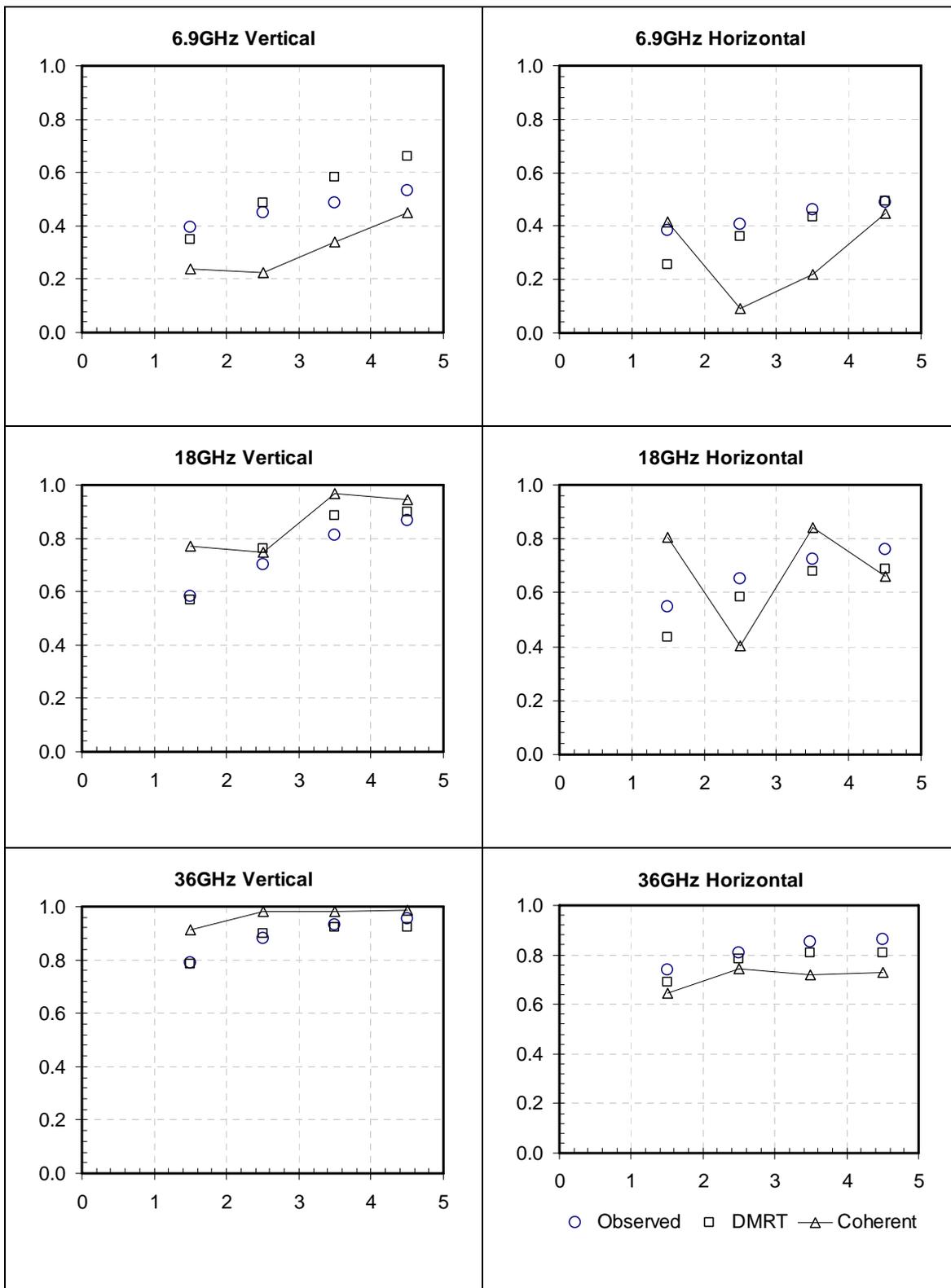


図8 金属板を下部境界条件としたときの見かけの放射率の検証結果。
 ○：観測値、□：本研究のモデルの結果、△：コヒーレントモデル(既存)の結果

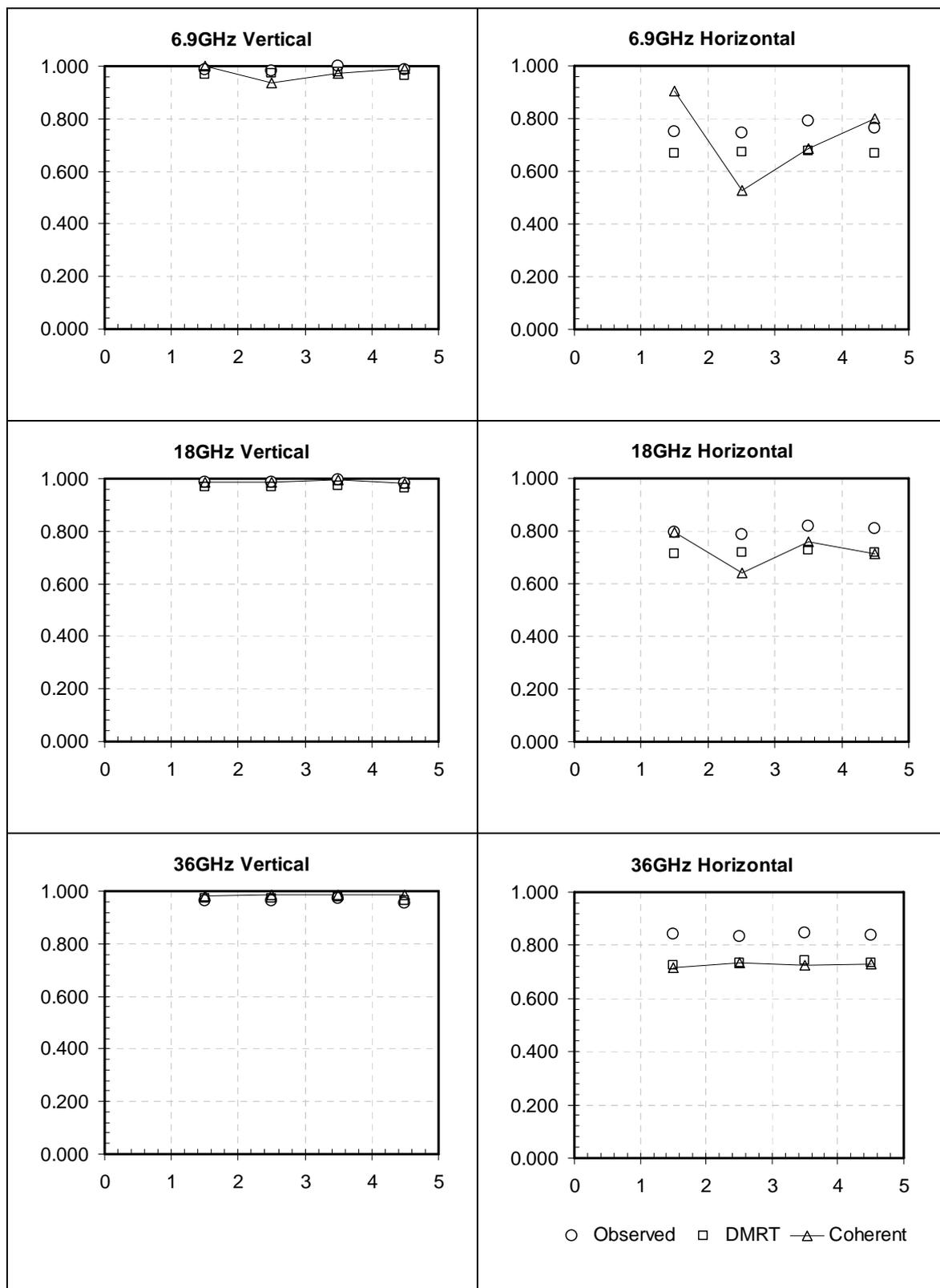
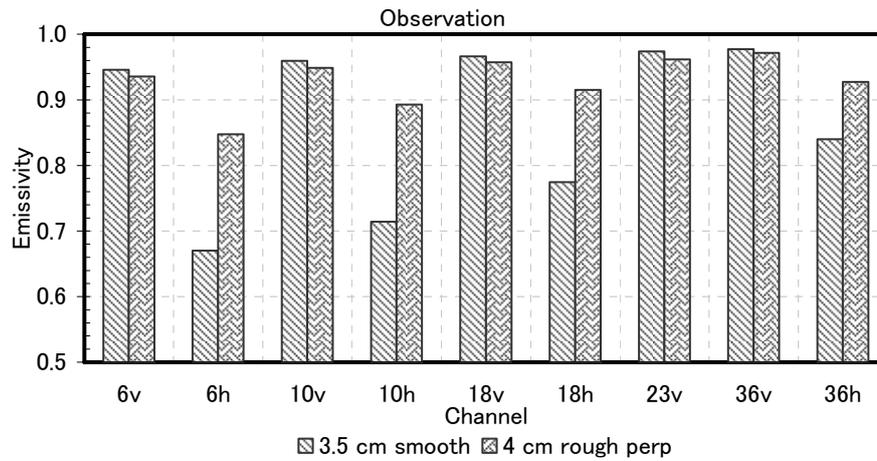
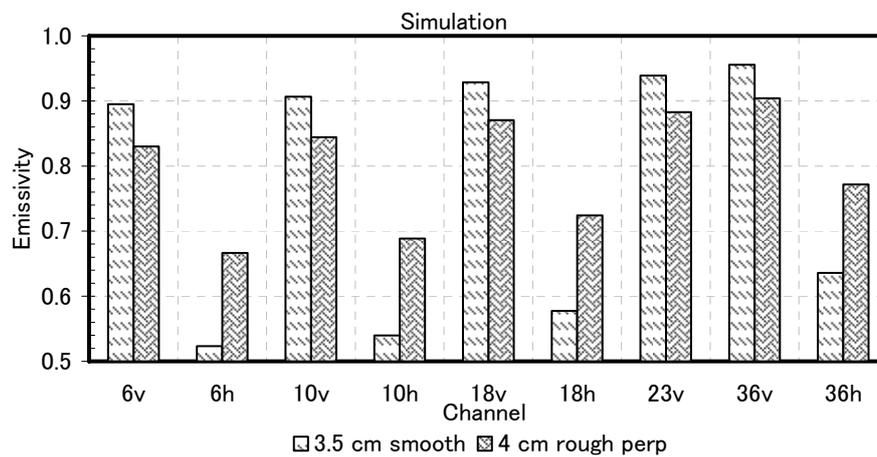


図9 電波吸収剤を下部境界条件としたときの見かけの放射率の検証結果。
 ○：観測値、□：本研究のモデルの結果、△：コヒーレントモデル(既存)の結果



(a) 観測値

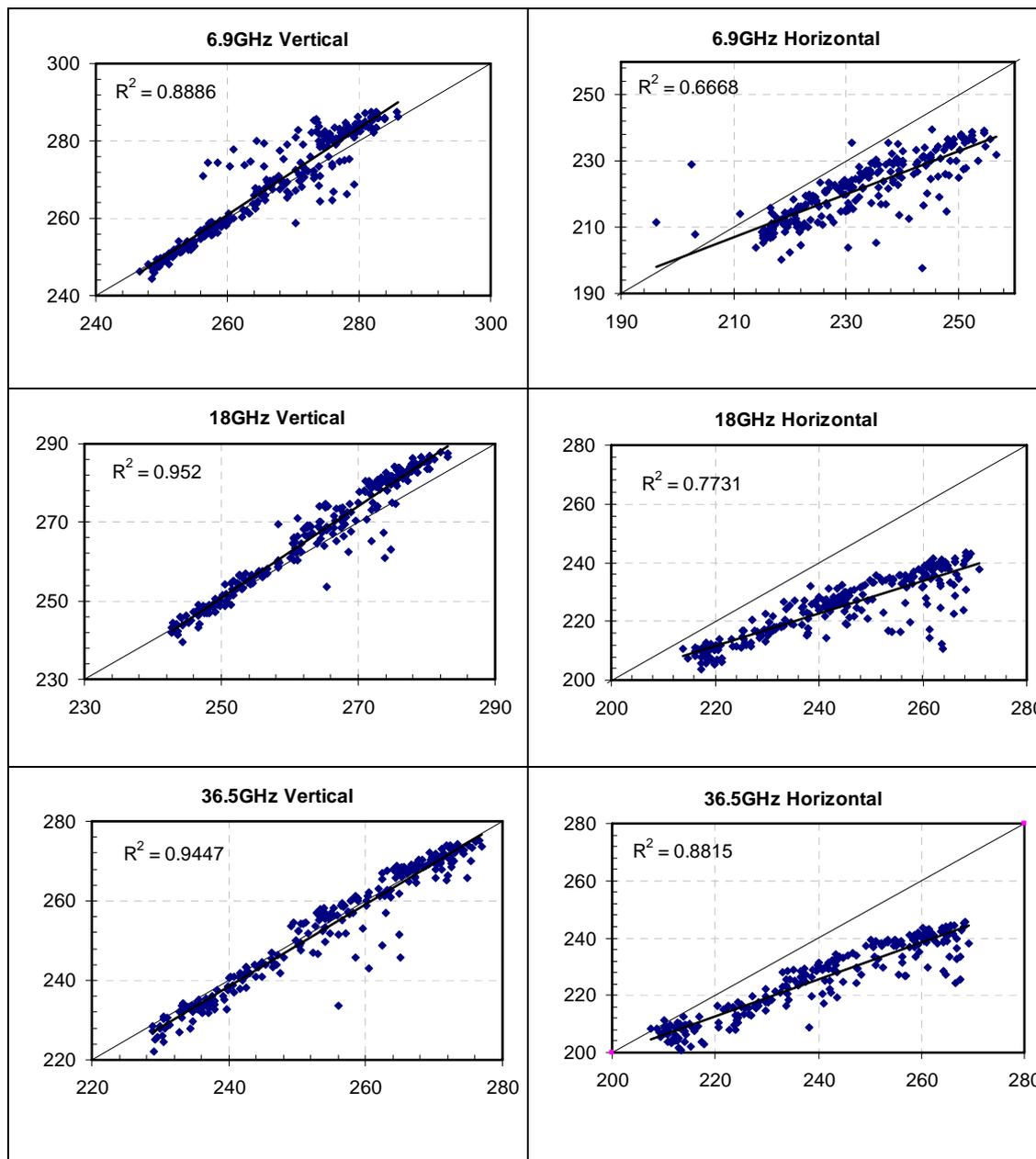


(b) モデルによるシミュレーション結果

図10 観測値とモデルによる地表面粗度の比較

iii) モンゴルでの土層のマイクロ波放射伝達モデルの補正

本研究で開発されたモデルをモンゴルに適用したところ、乾燥状態から湿潤状態まで広い範囲にわたって、モデルによる算定輝度温度は衛星による観測値と適合度が良好であった。ただし図11に示すように、垂直偏波では定量的にも高い精度であったが、水平偏波では過小評価となった。



：横軸AMSR-E推定輝度温度モデルによる：縦軸、観測輝度温度による

図11 モンゴルにおけるモデル検証結果

そして、モンゴルでの衛星同期観測データを用い、地上観測の土壌水分と地温をモデルに入れて輝度温度を算出し、SSM/I観測輝度温度に最も合うようにパラメータ調整を行った。その結果、地表面粗度パラメータについてはRMS高さ4.6mm、相関長さ10.3mm、土粒子径については19GHzで16.8mm、37GHzで8.3mmを得た。これらの条件で、土壌水分

(体積含水率)を1%刻みで0~20%、地温を1K刻みで270~320Kの範囲についてモデル計算を行った。

はじめに、積雪と植生の影響が少ない5月のデータを用いてSSM/I観測輝度温度とモデルの輝度温度が最も良く合うようにSSM/I観測輝度温度を補正した(表5-(a))。次に、放射伝達モデルに植生層の効果を導入し、6~8月のSSM/Iデータを用いて推定した土壌水分と地上観測の土壌水分が合うようにSSM/I観測輝度温度を微調整した(表5-(b))。

表5 観測輝度温度の補正量

	最適化の段階	
	(a)輝度温度	(b)土壌水分
19GHz-V	-7K	-9K
19GHz-H	-8K	-8K
37GHz-V	-2K	-2K
37GHz-H	0K	+4K

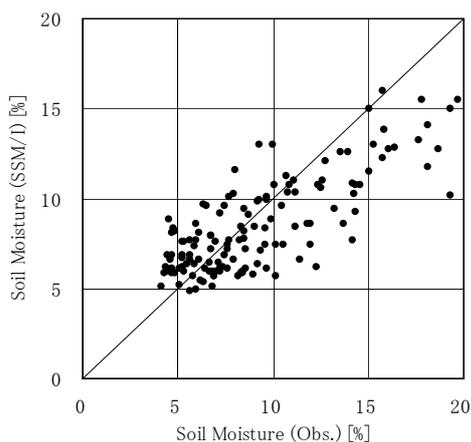


図12 土壌水分推定結果

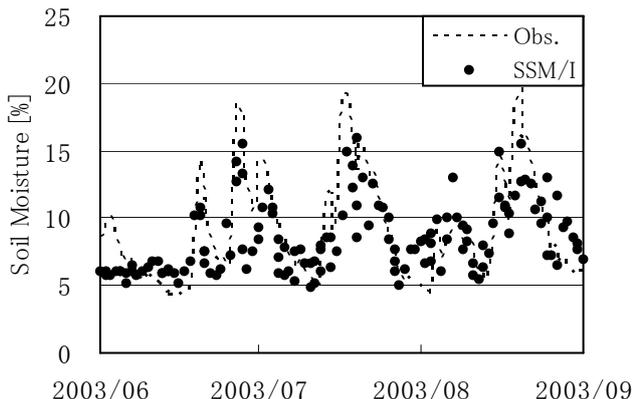


図13 土壌水分推定結果(時系列)

本アルゴリズムを衛星同期観測データ(6~8月)に適用した結果を図12、13に示す。地上観測値と推定値の絶対値の平均は2.00%(単位の%は体積含水率)で、RMS誤差は2.55%(同)であり、AMSR-Eと同等である可能性が示された。また図12にあるように、土壌水分が低い領域では比較的合っているが、土壌水分が高い領域では過小評価となっている。これは、輝度温度の補正の際に傾斜を付ける(輝度温度に応じた補正量を与える)などで改善する可能性はあるが、本質的には放射伝達モデルで十分に表現できていない点があると考え、今後の検討課題とする。

iv) モンゴルでの土壌水分の長期変動特性

近年の気候変動による当該地域の土壌水分の長期的な変動傾向を明らかにするため、検証サイトを含んだ2.5度四方の領域について、対象の1988-2006年の19年間の6、7、8月(JJA)の平均土壌水分量を算出し、全球降水気候プロジェクト(GPCP)による同地域の同じ3カ月間の日降水量とともに

に、その長期変動傾向を検討した。図14にあるように、土壌水分量と降水量の年々変動よく一致しており、1994年までは土壌水分、降水量ともに比較的高い傾向にあるが、1995年以降両方ともに低い値を示している。さらに、モンゴル全体で1988～2006年の19年間の長期にわたるデータセットを作成し、図15に示す。これより、この間モンゴル全土で乾燥化傾向にあり、特に北東部で顕著であることが明らかとなった。

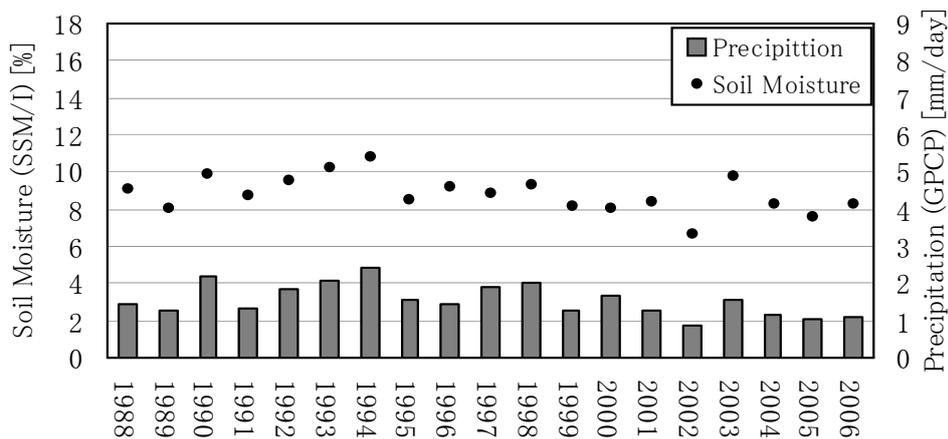


図14 検証サイトを含む2.5度四方の領域の夏季(6、7、8月)の平均土壌水分、日降水量の1988～2006年の長期変動

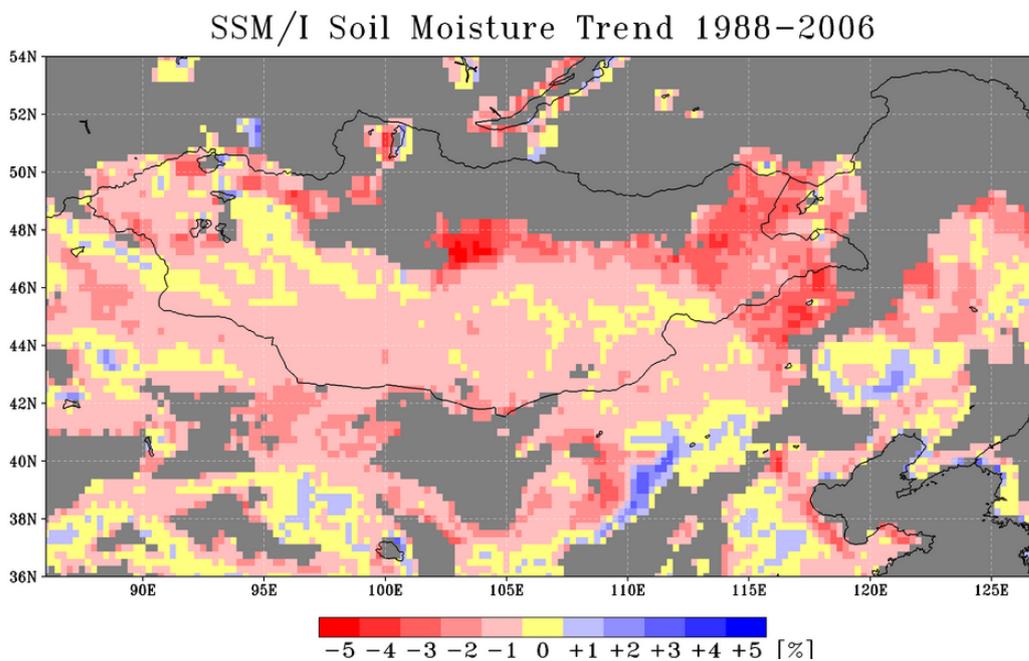


図15 モンゴル全体の夏季(6、7、8月)の平均土壌水分の1988～2006年の長期変動

2) 水食

a. モデルによる水食量の推定

RUSLEにより推定された1988～1999年における水食量の年平均分布を図16に示す。水食量は概ね傾斜地で多くなっている。モンゴル国は北部に山脈が集中しており、山脈の内部はタイガ林となっているため、植被により浸食が少ない一方で、山脈の縁辺部の草原地帯で非常に水食量が多いことがわかる。また図16右下の水食が強い部分は中国の大興安嶺、図16左下はアルタイ山脈の東端、ゴビアルタイ山脈であり、これらの地域は地形が山がちであるものの比較的乾燥しており、水食に対して脆弱であることがわかる。

対象地域全体の水食量は0.58 t/ha/yrであり、水食試験区による実測値0.5～1.6t/ha/yrと整合的である。

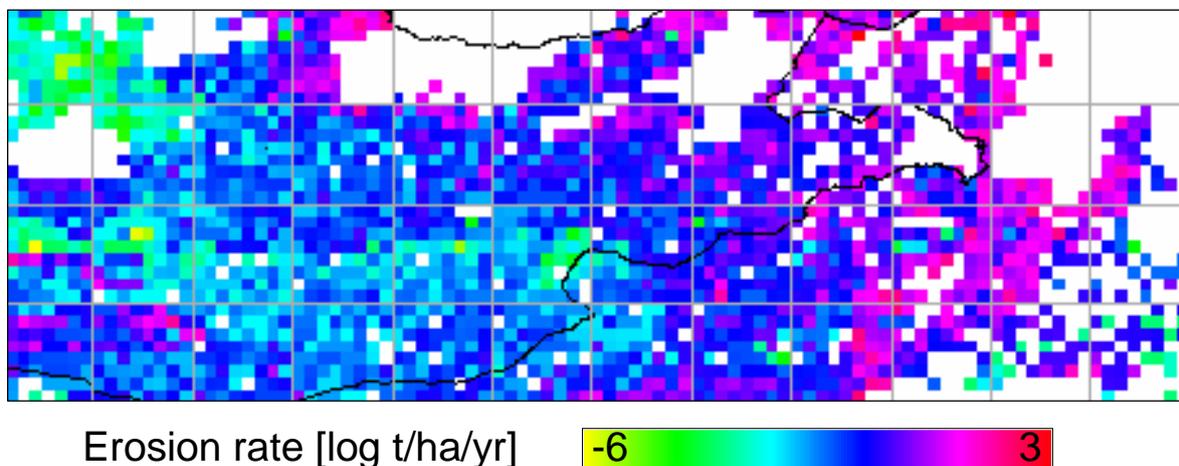


図16 RUSLEによって推定された水食量の分布（1988～1999年の平均）

b. 降雨係数の計算と変動の傾向

図17には降雨係数算出に用いたERA40の降雨量と、実際に算出した降雨係数の7月における分布を示している。降雨係数は降雨量と同様な分布を示すが、降雨の多い領域と少ない領域のコントラストが鮮明になっており、特に中国の沿岸部では相対的に大きい値を示している。この領域ではモンスーンに伴う南からの水蒸気フラックスが大きい(図省略)ので、一度の降雨イベントが強い降雨をもたらすことが考えられる。また、上記降雨係数の算出では小規模な降雨は降雨係数に累計されないことも、降雨量と降雨係数の分布に相違を生じる要因となっている。

各地点で高い降雨係数を記録したときの気象場の特徴を捉えるため、4地点の調査対象地(Mandalgobi: MG、Kerlen-Bayan-Ulan: KBU、Bulgan: BG、ナイマン旗ステーション:NY)に注目して降雨係数に閾値を設定し、気象場の合成解析を行った。実際には各地点に対応してERA40の格子点は分布していないので、その最寄りの格子点で代表させている。各地点で平均的な降雨係数の値が大きく異なるので、MG、KBU、NY、BGにおいて夏季(6-8月)にそれぞれ5、5、10、0以上の値を示し、かつその前後12時間内にそれ以上の値を示すイベントがない場合に注目した結果、それぞれ20、36、39、3の降雨イベントが選択されたので、これらのイベントから合成場を

作成した。BGにおいては3回しか降雨係数を示すイベントがなかったことに注意しておく。

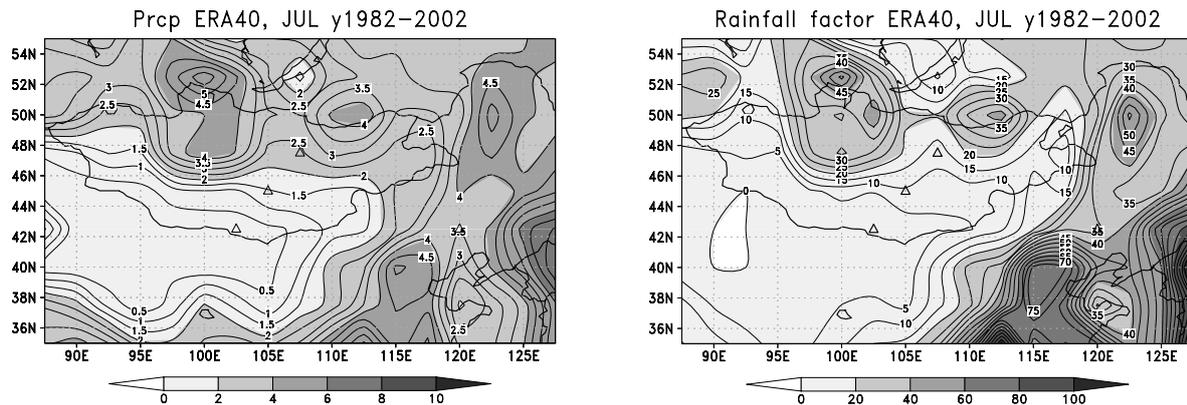


図17 1982-2002年で平均した[左]ERA40の7月降雨量分布(mm/day)と、それを基に算出した[右]ERA40の降雨係数の分布。

図18には各点の降雨イベントに対する合成場を示しており、500hPにおける高度の気候値からの偏差(等値線)と、鉛直積分した水平方向の水蒸気フラックスの気候値からの偏差(ベクトル)、そして6時間雨量(陰影)を示している。どの点の降雨イベントも総観規模の低気圧を伴っており、その東もしくは北で等高線線の勾配が大きくなっているのがわかる。この領域では温度勾配も大きくなっていることから(図省略)前線の構造が示唆され、そこに主に南方から水蒸気が流れ込むことにより降雨を引き起こしている。またこの合成場の時間発展を調べると(図省略)、どの点の降雨に関与する低気圧も西もしくは北西から移動してきていた。夏季においてこの地域の上層には西風ジェットが存在するので、これらの擾乱はこのジェットに沿って発達する傾圧性擾乱と考えられる。一方、降水システム自体に注目すると、MG、KBUにおいては低気圧と共に西から、BG、NYでは南から移動してくる様子が見られた。特にBGにおいては合成するイベントが3度しかなかったのだが、降雨帯がチベット高原北東の裾に沿って南東から伸びてきており、地形の影響が示唆される。

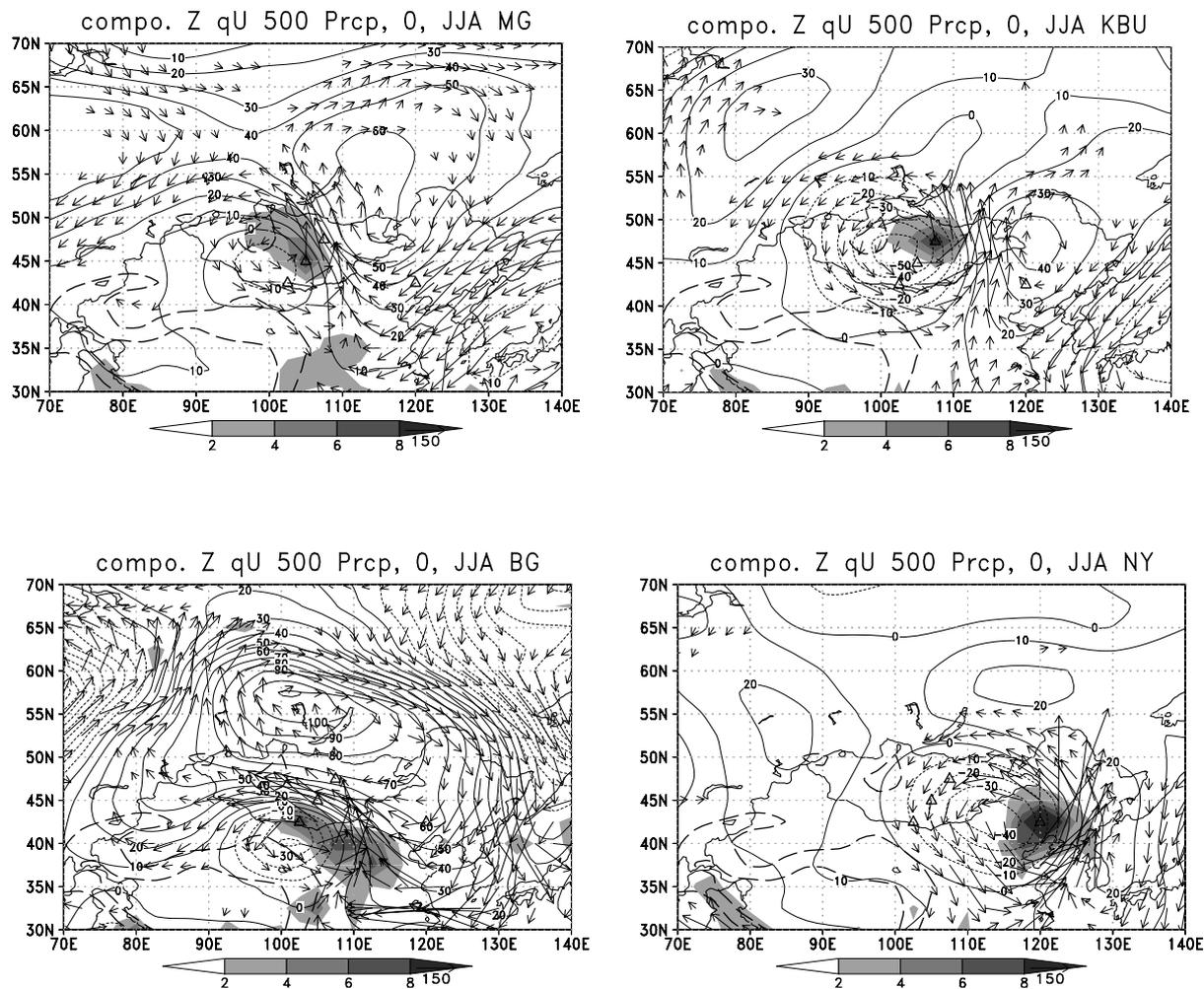


図18 各点(MG、KBU、BG、NY)で夏季に強い降雨係数がみられたときの大気場の合成図で、500hPaにおけるジオポテンシャルハイトの偏差(等値線、m)と、鉛直積分した水平方向の水蒸気フラックスの偏差(ベクトル、 kg/m s)、6時間雨量(陰影、mm)を示している。太い破線は2000と4000mの地表面高度を示している。

これら夏季における移動性の低気圧がどこで形成され、どのように移動してくるのか調べるためトラッキング解析を行った。1967-2002年の夏季において低気圧をトラックした結果、3636の低気圧が図19に示す領域(70-140E、30-70N)の上空を通過しており、そのうち北東アジア(90-120E、35-55N)を通過したトラックのみを全て図19[左上]に示している。北東アジアにおける降雨に参与する低気圧の多くはその北西、西シベリアから移動してきており、逆にモンゴル南西部の乾燥域では低気圧の通過自体が少ないことが分かる。さらに全領域を通過した低気圧のトラックとその発生源を、頻度分布として示したのが図19[右上]と[右下]である。やはり西シベリアからモンゴル北東部にかけてトラックの頻度が高い領域が分布しており、これが夏季における降雨量分布と関係していることが考えられる。またその発生源に注目すると、複雑な地形を擁するモンゴル北部からシベリア南部で頻繁に低気圧が発生している。つまり西から移動してくる低気圧に加え、ここで発生する低気圧も北東アジアにおける降雨量に影響することが示唆される。またチベット高

原上でも高い頻度で低気圧が発生しているが、その多くはチベット高原上で消失してしまうことが見て取れる。

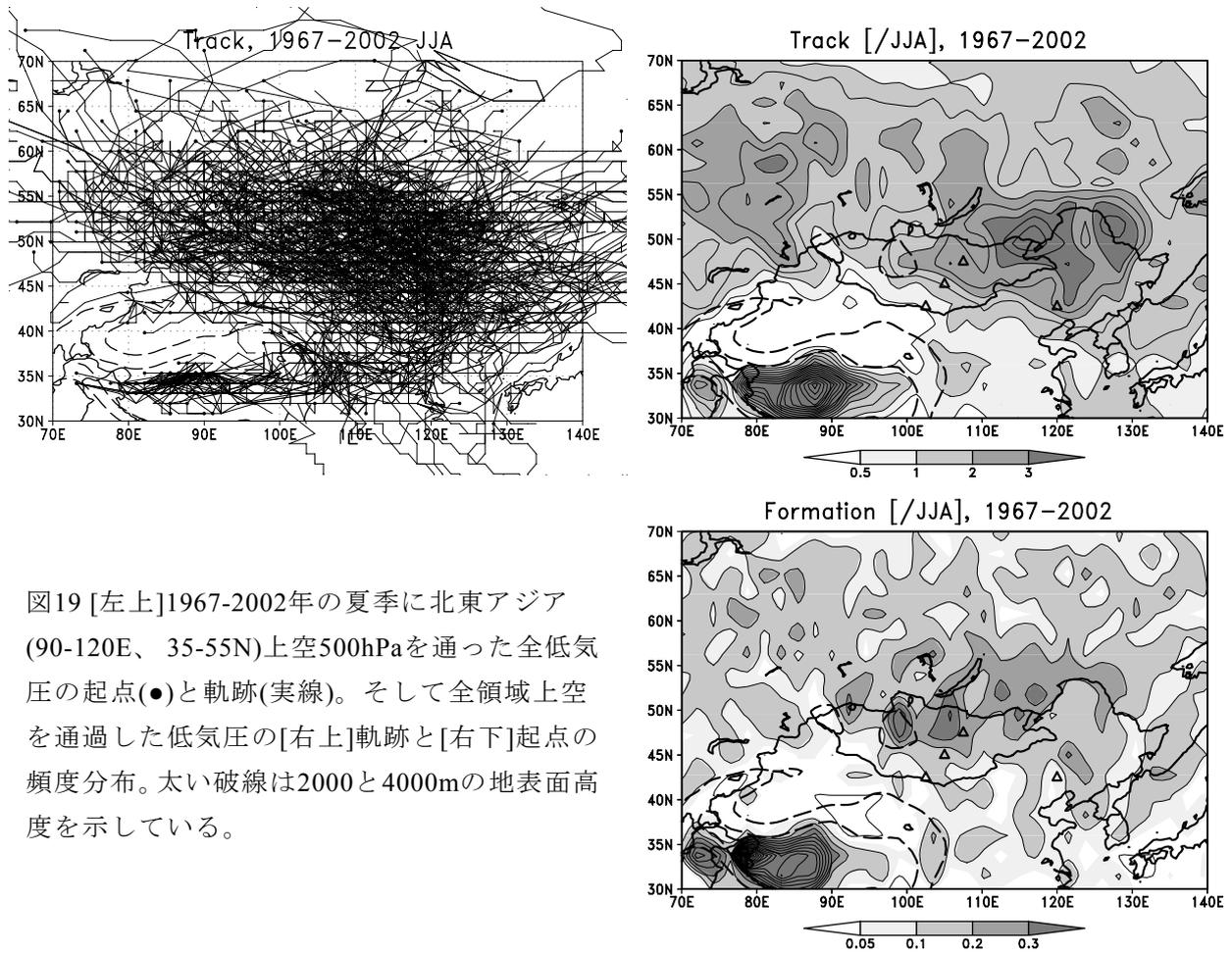


図19 [左上]1967-2002年の夏季に北東アジア(90-120E、35-55N)上空500hPaを通った全低気圧の起点(●)と軌跡(実線)。そして全領域上空を通過した低気圧の[右上]軌跡と[右下]起点の頻度分布。太い破線は2000と4000mの地表面高度を示している。

3) 植生タイプを考慮した植物量推定

各観測地点における平均草丈と標準偏差を図20に示す。

S3、S5、S7の観測点における草丈の標準偏差はS1、S2、S4、S6と比較して大きくなっているが、これらの地点はすべて灌木のある草地である。S3の地点は灌木の群落は無いが、植物の被覆面積の約30%以上が灌木である。灌木が優占するS5とS7のポイントでは30m四方のコドラート中、それぞれ145および142の群落(すべての面積を計測するために、単木の状態の株も群落として数に含めた)があり、それらの被覆率はそれぞれ35.3%と31.5%とほぼ同程度の被覆率であった。

衛星画像から推定したパラメータを図4に示す。S1～S3およびS6に関してはほとんど差異が見られない。したがって、灌木の侵入していない草地と灌木が侵入しつつあるがまだ群落をなすほどではない草地の判別は本手法では困難であると言わざるを得ない。しかしながら、灌木群落の存在する草地では明らかにP2の値が他に比較して大きくなっており、30%程度の被覆率で群落を形成している草地であれば判別可能なことが明らかとなった。

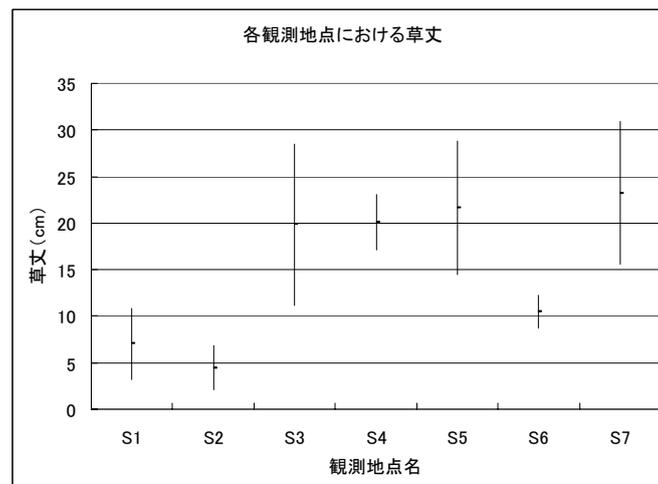


図20 各観測地点における平均草丈と標準偏差

今回の現地観測では、(1)平均草丈が5～7 cm程度の草地(S1、S2)／(2)草丈が10cm程度の草地(S6)／(3)草丈が20cm程度の草地(S4)／(4)灌木が侵入しているが群落を形成していない草地(S3)／(5)灌木が優占する草地(S5、S7)の5つのパターンで植被率を計測することができた。人工衛星データによる、灌木の侵入した草地の判別能力は、幼木や群落を形成していない箇所は現状ではまだ困難であるが、30%程度の被覆率で群落を形成している草地であれば判別可能なことが明らかとなった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 1) 風食・水食の推定は、これまで期間、時間解像度、空間解像度が砂漠化のモニタリングに整合していなかった。今回は詳細な時間・空間解像度の広域かつ長期間の砂漠化指標の整備と精度の向上を目指したことで、砂漠化のモニタリングに足る指標を整備することができた。
- 2) AMSR/AMSR-EアルゴリズムをSSM/Iに拡張し、観測輝度温度を簡便な方法で補正するSSM/Iアルゴリズムが提案され、モンゴルでの地上—衛星同期観測データを用いて、土壌水分算定の妥当が示され、乾燥・半乾燥帯での土壌水分の長期変動性観測手法が確立した。
- 3) SSM/Iの1988～1999年の土壌水分データセットを作成して、モンゴル地上検証サイト周辺2.5度四方の領域について土壌水分の変動を調べた結果、1991年までの比較的乾燥した期間のあと湿润化した定常的な期間が続いていることが示された。一方、モンゴル全体で1988～2006年の19年間の長期土壌水分データセットを作成したところ、この間同国全体で乾燥傾向にあることが示された。
- 4) 土壌水食量の推定に必要な降雨係数を、客観解析データから1982-2002年において算出した。夏季において大きい降雨係数をもたらす原因となっていた移動性低気圧についてトラッキング解析を行った結果、モンゴル北東部で高い頻度で低気圧が通過し、逆にモンゴル南部から南西における乾燥域では、低気圧の通過自体が少ないことが分かった。また低気圧のトラックは、西シベリアからモンゴル北東部にかけて高い頻度で見られ、加えて複雑な地形を持つモンゴル北部で発生する低気圧も北東アジアにおける降雨に関与することが示唆された。

(2) 地球環境政策への貢献

- 1) 広域・長時間スケールの砂漠化指標の整備は、本研究課題の重要な成果の一つとして、これまで2005年10月にナイロビで開催されたUNCCD COP7において、砂漠化EWSに対する日本政府の公式提案として報告されたほか、2006年9月に開催されるCRIC5研究調査室においても、本研究課題の成果がCSTに関連する貢献も含めて報告された。さらに、専門家会合(GoE)を通してCOP8に報告されることが決定している。
- 2) マイクロ波リモートセンシングの成果は、地球観測の政府間協力組織 (Group on Earth Observation (GEO)) の9つの公共的利益目標の一つが農業と砂漠化であり、本手法は、今後深刻な変動が予測されている半乾燥帯の環境モニタリング手法として活用される。

6. 引用文献

- 1) Gao, Q. and J. Reynolds (2003) Historical shrub-grass transitions in the northern Chihuahuan Desert: modeling the effects of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient. *Global Change Biology* 9, 1475-1493.
- 2) JAXA: http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index_j.htm
- 3) Koike, T (2004) The Coordinated Enhanced Observing Period – an initial step for integrated global water cycle observation, *WMO Bulletin*, 53(2), 1-8.
- 4) Liu, G. (1998) A fast and accurate model for microwave radiance calculations, *Journal of the Meteorological Society of Japan* 76, 335-343.
- 5) Okayasu, T. and Takeuchi, K. Classification of the size distribution of soil aggregates in arid and semi-arid regions in East Asia. (2004) *Journal of Environmental Information Science* 32, 63-70.
- 6) Shao, Y., E. Jung and L. M. Leslie (2002) Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. *Journal of Geophysical Research* 107, 4814, doi:10.1029/2001JD001493.
- 7) Shi, J., L. Jiang, L. Zhang, K.-S. Chen, J.-P. Wigneron, A. and Chanzy (2005) A parameterized multifrequency-polarization surface emission model. *IEEE Trans. on Geosci. and remote sensing*, 43, 2831-2841.
- 8) Sun, J., M. Zhang and T. Liu (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate. *Journal of Geophysical Research* 106, 10325-10333.
- 9) Tamagawa, K. et al. (2003) Comprehensive CEOP intercomparison of in-situ data, satellite products and model outputs are underway, *GEWEX News Letter*, 13, 5.
- 10) Tsang, T. and J. A. Kong (1977) Theory of thermal microwave emission from a bounded medium containing spherical scatterers, *Journal of Applied Physics* 48, 3593-3599.
- 11) Tsang, T., J. A. Kong (2001) *Scattering of Electromagnetic Waves: Advanced Topics*, Wiley, New York.
- 12) 小池俊雄、中村佳照、開発一郎、Gombo Davaa、松浦直人、玉川勝徳、藤井秀幸 (2004) 改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)による土壌水分・植生水分観測手法の開発、水工学論文

集 48、 217-222.

7. 国際共同研究等の状況

マイクロ波リモートセンシングによるモンゴルの観測データは、世界気候研究計画(WCRP)全球エネルギー・水循環観測実験研究(GEWEX)統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)のリファレンスサイトの活動の一環として取得されたものである。研究分担者(小池)は、Lead ScientistとしてCEOP全体の実施責任者である。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Iwao, K. and M. Takahashi: Geophysical Research Letters 33, L16703,
doi:10.1029/2006GL027119
“Interannual change in summertime precipitation over northeast Asia”
- 2) 太田哲, 小池俊雄, Hui LU, David N. KURIA, 筒井浩行, Tobias GRAF, 開発一郎, Gombo DAVAA, 松浦直人: 水工学論文集, 51, 205-210 (2007)
“特殊センサー・マイクロ波画像装置(SSM/I)による土壌水分の長期観測手法の開発”

<その他誌上発表>

- 1) 太田哲, 小池俊雄, Hui LU, David N. KURIA, 筒井浩行, Tobias GRAF, 開発一郎, Gombo DAVAA, 松浦直人: 水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集 5, 43-48 (2006)
“特殊センサー・マイクロ波画像装置(SSM/I)によるモンゴルにおける土壌水分の長期変動傾向”
- 2) Iwao, K. and M. Takahashi: Proceedings of the 2006 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, 39-42 (2007)
“A seesaw pattern of summertime precipitation over North Eurasia and associated Rossby waves”
- 3) 岩尾航希, 高橋正明: 平成18年度「異常気象と長期変動」研究集会報告、108-114 (2007)
“北ユーラシアにおける夏季降水量の経年変化とロスビー波”
- 4) 岩尾航希, 高橋正明: 北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ報告、43-46 (2007)
“北東アジア-シベリア間の夏季降水量の経年変化とロスビー波”

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 岩尾航希, 高橋正明, 松本淳: 日本気象学会2005年度春季大会(2005)
「夏季北東アジア乾燥域における降水量の経年変化と気候変化」
- 2) 岩尾航希, 高橋正明, 松本淳: 2006年度日本気象学会春季大会 (2006)
「夏季北東アジア乾燥域における1980年以降の気候変化」

- 3) Iwao K. and M. Takahashi: University Allied Workshop (2006)
“Inter-annual change in summertime precipitation over North-East Asia”.
- 4) 岩尾航希、高橋正明: 2006年度日本気象学会秋季大会 (2006)
「夏季北ユーラシアにおける降水量の南北振動モード」
- 5) 岩尾航希、高橋正明: 「異常気象と長期変動」研究会 (2006)
「北ユーラシアにおける夏季降水量の経年変化とロスビー波」
- 6) Iwao K. and M. Takahashi: International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia (2006)
“A seesaw pattern of summertime precipitation over North Eurasia and associated Rossby waves”.
- 7) 太田哲、小池俊雄、Hui LU、David N. KURIA、筒井浩行、Tobias GRAF、開発一郎、Gombo DAVAA、松浦直人: 第5回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ (2006)
「特殊センサー・マイクロ波画像装置(SSM/I)によるモンゴルにおける土壌水分の長期変動傾向」
- 8) 岩尾航希、高橋正明: 北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ (2007)
「北東アジア-シベリア間の夏季降水量の経年変化とロスビー波」

(3) 出願特許

該当なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

該当なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

該当なし

(6) その他

該当なし