

# モンゴル草地における植生調査と パターン展開法を用いた土壌水分推定

関山絢子\*・島田沢彦\*\*・豊田裕道\*\*・横濱道成\*\*\*

(平成 21 年 11 月 19 日受付/平成 22 年 3 月 12 日受理)

要約：本研究では、モンゴル草地における植生調査とパターン展開法を応用した土壌水分推定手法について、現地調査データへの適用を試みた。調査はモンゴルのトブ県、ドンドゴビ県とヘンティ県における牧草地や耕作放棄地など多様な土地利用状況における全 10 箇所を対象地とした。植生調査は、植被率の算出と坪刈りによる植物種の同定を行った。次に、可視・近赤外波長域 (350–1050 nm) が観測可能なセンサを持つ分光放射計を用いて、土壌分光反射率を測定した。分光反射率は、衛星画像への適用を考慮に入れ測定波長域を 4 バンドに分類し、解析では各バンドの平均値を利用した。植生調査の結果、いずれの調査地においてもイネ科植物が生息していた。また、植被率が同程度の地域でも、土壌水分量に差異が認められた。著者は、既にパターン展開法を応用した土壌水分推定手法を報告している。屋外実験により測定した土壌分光反射曲線 (反射パターン) が、土壌含水比の低下に伴い直線形状に近づいたことから、パターン展開法を応用し、土壌含水比が低い場合の特性を示す直線モデルパターンを考案したものである。現地調査で測定した土壌分光放射率データを用いて土壌水分推定を行った結果、パターン展開により算出した直線モデルパターン展開係数と土壌含水比の間に有意な関係が示された ( $r^2=0.72$ )。この際、土壌タイプの考慮は行わなかったことから異なるタイプの土壌を対象にした場合でも良好な精度の土壌水分推定値が得られることが示された。

キーワード：パターン展開法, 土壌水分, 反射パターン, 可視・近赤外波長域, モンゴル草地

## 1. はじめに

近年、モンゴル国においてゾドと言われる異常寒波により、家畜大量死の被害が発生している。寒さによる凍死や食糧不足が大きな原因である。しかし、夏季の少雨に起因した土壌水分不足による草地の貧弱化も原因の一つと示唆されている。モンゴル草地における牧草の生育は土壌水分に依存していることが報告されていることから<sup>1)</sup>、この時期の土壌水分状態を把握することが、ゾドの危険性を空間的に予測する上で重要である。そのためには、広域的かつ反復的に地表面情報の収集が可能な衛星リモートセンシングが有用である。

既往の研究において植生被覆のある地域については、植被率と植生活性度の推定<sup>2)</sup>、草地の地表面分光反射率を用いた葉面積指数 (LAI) とクロロフィル濃度推定<sup>3)</sup> など植生情報抽出に関する研究が多数であり、土壌状況にまで言及されていない。

一方、裸地土壌を対象とした場合マイクロ波を用いた土壌水分推定に関する研究が多く報告されている。マイクロ波の後方散乱強度は、土壌水分の増加に伴い強くなることが知られている<sup>4-6)</sup>。しかし、マイクロ波は地表面の粗度にも敏感に反応するため<sup>7)</sup>、含水比情報のみを抽出すること

は困難である。他に、水の吸収波長帯を利用した土砂の水分含有量推定法が報告されている<sup>8-10)</sup>。しかし、水の吸収波長帯は比較的長い近赤外と中間赤外に存在し、この波長帯にセンサを持たない衛星が多いことから利用可能な衛星画像が限定される。また、土壌水分が増加すると可視・近赤外域の分光反射率は低下することが知られており、この関係を利用した研究が多く報告されている<sup>11,12)</sup>。光学衛星センサと同波長域のセンサを持つ分光放射計を用いた土壌水分推定に関する研究として、土壌水分の増加による分光反射率の低下について言及した例<sup>13)</sup>があるが、推定手法の確立には至っていない。また、土壌分光反射率は赤色域を横軸、近赤外域を縦軸にとった散布図において、プロットが直線状に並ぶことが知られている<sup>14)</sup>。プロットの近似直線はソイルラインと呼ばれる。プロットは含水比が低いほど原点近くに位置するため、この関係を利用し含水比推定を行った研究<sup>15)</sup>もあるが、ソイルラインの分布は土壌タイプに依存することから、様々な土壌を対象とした場合への適用が困難である。

関山らは分光放射計による屋外実験を行い、可視・近赤外波長域における土壌分光反射特性を用いた土壌水分推定法を提案した<sup>16)</sup>。この手法は、青色・緑色・赤色・近赤外波長域における 4 バンド分光反射率の総和で各バンド反射

\* 東京農業大学大学院農学研究科農業工学専攻 (sekiyama@rsch.tuis.ac.jp, 東京情報大学総合情報学部環境情報学科)

\*\* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

\*\*\* 東京農業大学生物産業学部生物生産学科

率を除することで正規化し、正規化された分光反射曲線（以下反射パターン）を利用している。土壌水分特性を反映する反射パターンとしてパターン展開法<sup>17)</sup>において直線モデルパターン（詳細：2章）を考案し、これを用いて土壌水分推定を行った。

本研究ではモンゴル草地における植生調査と直線モデルパターンを用いた土壌水分推定手法について、現地測定データへの適用を試みた。

## 2. 屋外実験データを用いた

### パターン展開法による土壌水分推定

関山らは、モンゴルの首都ウランバートル近郊の牧草地および耕作放棄地の表層土（4採集点）、東京農業大学の神奈川県厚木中央農場（2採集点）、東京都多摩丘陵試験農場（1採集点）とマレーシア、バルタム河流域のヤシ農場（1採集点）の表層土を分光反射率測定のための対象サンプルとした。

採集した土壌の分光反射測定は、2006年4月28日午前10時～13時、東京農業大学校舎屋上にて行った。測定日は晴天であり太陽高度は $60^\circ \sim 80^\circ$ であった。土壌は採集点別に円形の容器（高さ3cm、直径15cm）に入れ、表面を均一にした。分光放射計（英弘精機、MS-720、波長分解能：350-1050nm）は、サンプル表面から20cmの高さに設置した。センサ視野角25度である。

全採集地における土壌の含水比WC（乾燥重量比）を炉乾法により乾燥状態（ $WC=0\%$ ）にした後、各採集地の土壌に水を段階的に添加し、含水比を $0 \sim 22.9\%$ の間で4～8段階に変化させた。各含水比段階における土壌サンプル（ $N=53$ ）表面の分光反射率を測定した。

測定データは、LANDSAT-TM・ETM+、ALOS-AVNIR2、IKONOS、QuickBirdなど光学衛星の画像データへの適用を考慮に入れ、バンド1（470-502nm、青色域）、バンド2（539-580nm、緑色域）、バンド3（637-668nm、赤色域）、バンド4（802-870nm、近赤外域）の各バンド波長域における平均値を算出しこれを使用した。さらに、上記4バンド分光反射率の総和で各バンド反射率を除することで正規化した。これを正規化土壌バンド反射率 $S_i$ （バンド番号： $i=1-4$ 、 $S_1+S_2+S_3+S_4=1$ ）とした<sup>18)</sup>。

一般に、土壌は右上がりの直線的な分光反射率曲線を示し、土壌水分の増加に伴い可視・近赤外域における分光反射率は低下することが知られている。しかし、正規化した土壌バンド反射率は、土壌水分の増加に伴い可視域ではわずかに減少するが、近赤外域では増加を示した。これらの土壌水分増加に伴う反射率変化量は、可視域と比較して近赤外域の方が大きいいため、土壌反射パターンにおいて、赤色域から近赤外域の傾きが大きくなっていることが確認された（図1）。そこで、土壌反射パターンは、土壌水分が多い場合の傾きが急な形状に対し、土壌水分が少ない場合、平坦な直線形状に近づくと仮定した。

全採集地土壌の全含水比段階における土壌反射パターン（ $N=53$ ）を用いてクラスター分析を行った。その結果、土壌反射パターンは2つの土壌クラスに分類可能であった。

いずれのクラスにおいても、土壌水分増加に伴う土壌反射パターンの変化は同様の傾向であった。

以上のことから、パターン展開法において土壌水分特性を反映する反射パターンとして、直線モデルパターン $P_{fi}$ （ $P_{fi}=0.25$ 、 $P_{f1}+P_{f2}+P_{f3}+P_{f4}=1$ ）を考案した。パターン展開法を応用すると、測定した土壌反射パターン $S_i$ は以下のように展開できる。

$$S_i = C_{sf} P_{fi} + C_{ss} P_{si} \quad (1)$$

$S_i$ は、 $P_{fi}$ と土壌パターン $P_{si}$ の2パターンの線形和で構成される。 $P_{si}$ について、展開される土壌反射パターン $S_i$ （式1の左辺）、すなわち測定した土壌反射パターンと区別するため、ここでは土壌パターンと定義する。各バンド反射率には全採集地土壌の乾燥状態（ $WC=0\%$ ）の平均値を用いた。各パターンの構成割合であるパターン展開係数は、最小二乗法により算出される。直線モデルパターン $P_{fi}$ と土壌パターン $P_{si}$ の展開係数はそれぞれ $C_{sf}$ 、 $C_{ss}$ とした。 $WC$ と $C_{sf}$ の間には負の相関が認められ（ $R^2=0.56$ ）、土壌クラスごとの $WC$ と $C_{sf}$ との関係における決定係数は、クラスを分けない関係のそれより高かった（図2。土壌クラス1： $R^2=0.71$ 、土壌クラス2： $R^2=0.74$ ）。以上の結果から、 $C_{sf}$ は土壌水分推定のための有効な指標になり得ることが示された。

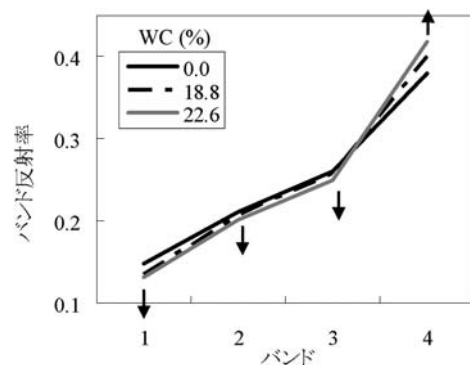


図1 土壌含水比（WC）による土壌反射パターンの変化<sup>17)</sup>  
図中矢印はWCの増加によるバンド反射率の変動方向

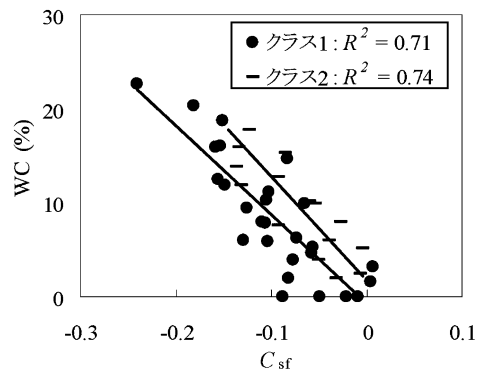


図2 各土壌クラスにおける土壌含水比（WC）と直線モデルパターン展開係数（ $C_{sf}$ ）の関係<sup>17)</sup>

### 3. 現地調査概要

#### 1) 調査対象地

モンゴルは国土の大半が半乾燥地に属し、そのほとんどが草地である。首都ウランバートルを含む中部地域は年降水量が400 mm以下であり、年降水量のうち70-80%が6月から8月に集中する。ウランバートル近郊では、近年過放牧や農地拡大による草地劣化が問題となっている<sup>19,20)</sup>。

著者らは、ウランバートルがあるトブ県の放牧地や耕作放棄地、首都から約200 km離れたドンドゴビ県の半沙漠地やヘンティ県の放牧地など、全10ヶ所を調査対象地とした(図3a)。2006年8月12日~16日および2007年8月8日~16日の9時から12時に調査を行った(表1)。調査日や対象地は、光学衛星LANDSAT-TMの撮影日・撮影地域を基に、放牧地、耕作放棄地、半沙漠地など多様な草地環境を選択した。調査日はいずれも快晴であり、太陽高度は40°-50°であった。

各調査対象地において、1辺が40 mの方形区(図3b)を設置し、方形区内が10 m間隔の格子となるようテープを張った。方形区内において、裸地土壌の分光放射輝度測定、表層土壌採取、植被率算出のための地表面画像撮影、坪刈りによる植生調査を行った。

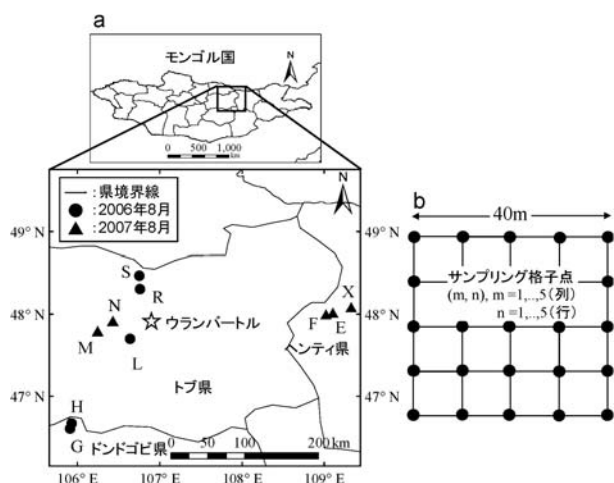


図3 モンゴルにおける現地調査地域 (a) 調査方形区 (b)

表1 現地調査地位置情報および土地利用状況

調査地	緯度 (N)	経度 (E)	土地利用状況	県名
E	48°01' 04.2"	109°06' 53.7"	放牧地	ヘンティ
F	48°00' 09.7"	109°01' 30.4"	放牧地	ヘンティ
G	46°36' 28.8"	105°53' 57.8"	半沙漠地	ドンドゴビ
H	46°40' 39.2"	105°54' 51.2"	半沙漠地	ドンドゴビ
L	47°40' 59.9"	106°38' 46.6"	放牧地	トブ
M	47°46' 59.2"	109°14' 51.7"	放牧地	トブ
N	47°54' 55.0"	109°26' 09.6"	放牧地	トブ
R	48°18' 41.3"	106°46' 16.7"	耕作放棄地	トブ
S	48°28' 42.3"	106°45' 58.0"	放牧地	トブ
X	48°05' 16.4"	109°20' 16.8"	放牧地	ヘンティ

#### 2) 土壌分光放射輝度測定

分光放射計を用い、各方形区内の中心(格子点  $m, n=3$ , 3)において、裸地土壌が測定範囲を100%覆うように分光放射輝度を測定した。センサ視野角は10度である。各分光放射輝度測定の直後には、毎回校正白色板の輝度を測定した。各対象物の分光放射輝度は3回測定し、その平均を測定値として使用した。なお、調査地 R では測定を行っていない。

測定した分光放射輝度値は、校正白色板の輝度値で除することで分光反射率に変換した。土壌の分光反射率は、可視・近赤外波長域における4バンド反射率に変換した後、2章で述べた方法と同様に、全バンド反射率の総和により各バンド反射率を除することで正規化し、正規化土壌バンド反射率を  $S_i$  とした。

#### 3) 表層土壌採取、植被率算出のための地表面画像撮影および植生調査

方形区の各格子点において、約50 cm<sup>3</sup>の表層土壌(深度3~5 cm)を採取した(1方形区25サンプル)。2007年は、格子点  $m=1\sim5$  および  $n=1, 3, 5$  に該当する箇所のみ採取した。また、調査地 R (2006年)と調査地 E (2007年)の土壌採取は行っていない。採取した土壌は質量を測定し、炉乾法(100°C, 24時間以上)により含水比(WC)を測定後、乾燥状態(WC=0%)で保管した。

次に、植被率算出のため、格子点を中心とした直径30センチ円が含まれる高さからデジタルカメラ(CASIO QV-4000GX)で地表面を撮影した。各格子点の取得画像は、目視により緑色の植生を判別し、Photoshop CS3(Adobe社)を用いた塗り分けデジタイジングにより、植生ピクセルを抽出した。取得画像を直径30センチ円で切り取り、円内の総ピクセル数と植生ピクセルにより植被率を算出した。

植生調査は、方形区内においてランダムに3箇所選択し、1 m<sup>2</sup>の坪刈りを行い、植物種を同定した。

### 4. 現地調査結果

#### 1) 土壌反射パターン

全調査地における土壌反射パターンを示す(図4)。各調査地において、バンド4における反射率の差異が最も大きく、バンド1とバンド2においても多少の差異が認められた。また、他の調査地と比較して、調査地 E の土壌反射パターンは、バンド1からバンド2の傾きが小さい。調査地 S の土壌反射パターンはバンド3とバンド4の傾きが大きくバンド4の反射率も他の調査地と比較して最も大きかった。

#### 2) 土壌含水比と植被率および植生状況

各調査地における土壌の含水比 WC および植被率 VC を示す(表2)。WC は、ほとんどの調査地において10%以下を示し、非常に乾燥した状態であった。多少のばらつきが認められるが、調査地の土地利用状況(表1)による特徴は確認できなかった。調査地 S の WC が13.4%と最も高く、VC も80%を超えていたことから、WC の多寡が植生

に影響を与えていることが考えられる。

各調査地の植物科名を表 3 に示す。いずれの調査地においてもイネ科植物が存在しており、バラ科やキク科植物も多くの調査地で生息していた。調査地 R はキク科植物がコロニーを形成して繁茂していた。調査地 M は植生が点在しているものの、非常に疎らで裸地状態の場所が多くみられた。

調査地 X の VC は、他の調査地のそれと比較して著しく低い。地表面のほとんどがリターで覆われ、裸地土壌は確認できなかった。さらに、この調査地の含水比 WC が低かったことを考慮すると、調査時は土壌中の水分が少なく

乾燥した状態にあったが、降雨により十分な土壌水分が保持されれば、VC が増加するものと推察される。さらに、調査地 X は乾燥状態にあったものの、植物種が他の調査地と比較して多いことから乾燥耐性のある植生である可能性が考えられる。

調査地 M は調査地 X に次いで VC が低い。調査地 X よりも約 6 倍の含水比 WC を示している。したがって、土壌中に水分が保持されているが、過放牧状態にあったために VC が低くなった可能性が考えられた。

3) パターン展開係数の算出

測定した全ての土壌反射パターンを用いてパターン展開を行った。式 1 のとおり直線モデルパターン  $P_{fi}$  ( $=0.25$ ) と土壌パターン  $P_{si}$  を用いて展開した。土壌パターン  $P_{si}$  については、全調査地の反射率平均値を用いた ( $P_{s1}, P_{s2}, P_{s3}, P_{s4}: 0.13, 0.19, 0.27, 0.41$ )。算出される直線モデルパターン展開係数、土壌パターン展開係数はそれぞれ  $C_{sf}$ 、 $C_{ss}$  とした。

5. 直線モデルパターン展開係数を用いた土壌水分推定

測定した土壌反射パターンをパターン展開することにより算出された、直線モデルパターン展開係数  $C_{sf}$  と含水比 WC を用いて回帰分析を行ったところ、負の相関が認められた (図 5)。したがって、関山らが行った屋外実験と同様に、現地調査データを用いた場合においても土壌反射パターンは含水比が低下すると、直線形状に近づくことが示され、 $C_{sf}$  が土壌水分推定のための有効な指標であることが明らかとなった。

ここでは、土壌タイプの分類は行わなかったが、土壌の分光反射率は、土性、腐植や粘土鉱物など物理的・化学的組成の影響を受けることが知られている<sup>22,23)</sup>。しかし、本研究では正規化された反射パターンを利用することにより、土壌の差異による反射特性の差異が無くなり、土壌水分による反射パターンの変化のみ抽出することが可能であったと考えられる。したがって土壌タイプの分類を行わなくても土壌水分推定が可能であることが示された。図 5 が示すように、WC が 15% 以下と乾燥状態であっても、土

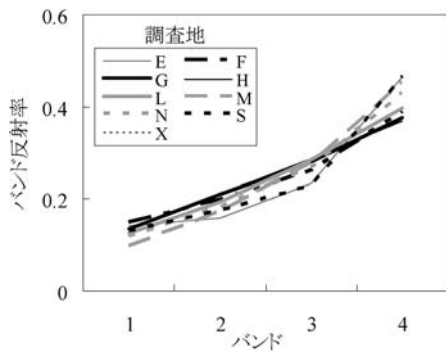


図 4 各調査地における裸地土壌の反射パターン

表 2 各調査地における植被率 (VC) と土壌含水比 (WC) および土壌乾燥密度

調査地	VC (%)	WC (%)	土壌乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )
E	52.2	—	—
F	64.2	2.60	—
G	32.3	2.34	1.35
H	42.0	1.34	1.36
L	54.5	2.86	1.09
M	19.4	9.67	—
N	38.1	7.95	—
R	54.7	—	—
S	81.6	13.4	0.66
X	13.9	1.53	—

表 3 坪刈り調査による各調査地の植物科名リスト (各調査地内の科名は五十音順)

調査地	E	F	G	H	L	M	N	R	S	X
科名	アカネ	イネ	アカザ	アカザ	アカザ	イネ	イネ	アブラナ	アカネ	アカザ
	イネ	カヤツリグサ	アブラナ	イネ	アブラナ	キク	キク	イネ	イネ	アブラナ
	キキョウ	キク	アヤメ	カヤツリグサ	イネ	バラ	バラ	イラクサ	キキョウ	イネ
	キク	ジンチョウゲ	イネ	キク	カヤツリグサ	ヒルガオ		オオバコ	キク	キク
	バラ	ナデシコ	キク	シソ	キク	マオウ		キク	キンボウゲ	ゴマノハグサ
	フウロソウ	バラ	ゴマノハグサ	マメ	シソ	マメ		バラ	シソ	ジンチョウゲ
	マメ	マツムシソウ	バラ	ユリ	マメ			マメ	セリ	タデ
	ヤナギ	ユリ	マメ		ユリ			ムラサキ	ナデシコ	バラ
	ネギ		ユリ						バラ	ヒルガオ
									フウロソウ	マメ
									マメ	ユリ
									リンドウ	

\*詳細な植物種と学名は付表を参照

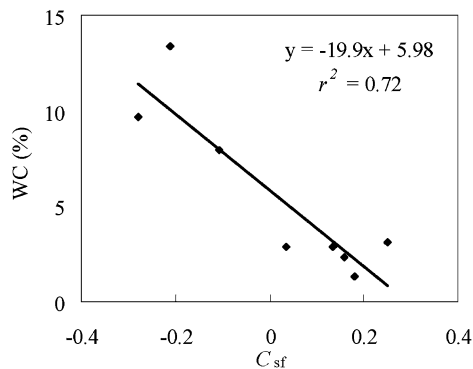


図 5 現地調査データによる含水比 (WC) と直線モデルパターン展開係数 ( $C_{sf}$ ) の関係。

土壌水分推定が可能であったことから、直線モデルパターンを用いたパターン展開による土壌水分推定手法は、モンゴル草地における土壌水分分布の僅かな差異も抽出できると考えられる。

現地調査を行った地域の土壌は、栗色土と灰褐色砂漠土であり<sup>24)</sup>、異なる土壌型に分類されている。この他、土壌色を左右する有機物の測定や、粒度分析による土性の判定などを行い、詳細な土壌情報を把握することにより、直線モデルパターンを用いた土壌水分推定手法の適用範囲を明確にする予定である。

## 6. 結 言

本研究では、モンゴル草地における植生調査と、現地調査データを用い、パターン展開法を応用した土壌水分推定手法の適用を試みた。

調査地 X の植被率 VC は、他の調査地のそれと比較して著しく低かったが、地表面のほとんどがリターで覆われ裸地土壌は確認できなかった。さらに含水比 WC が低かったことを考慮すると、調査時は土壌中の水分が少なく乾燥状態にあったが、十分な水分が保持されれば VC が増加することが考えられた。また、この調査地は、含水比 WC が低かったが植物種が多かったことから、乾燥耐性のある植生が生育していたことが考えられた。調査地 M において、植被率 VC は低いと土壌中の水分は保持されていたことから、この地域は過放牧状態である可能性が考えられた。

モンゴル草地において測定した土壌反射パターンを用い、直線モデルパターンと土壌パターンを用いてパターン展開を行った。算出された直線モデルパターン展開係数  $C_{sf}$  は含水比 WC との間に良好な負の相関が認められ、土壌タイプの分類を行わない場合においても土壌水分推定指標として有用であることが示された。

謝辞：本研究は、文部科学省「学術フロンティア推進事業」として「東アジアにおける陸圏・水圏を統合した環境情報システムの研究」のプロジェクトの一環として行われた。

### 参考文献

- 1) 近藤昭彦・開発一郎・平田昌弘・アザヤ ドルゴスレン、

2005. モンゴル草本植物のフェノロジーとバイオマスの年々変動. *沙漠研究*, 14 (4), 209-218.
- 2) 沖 一雄・大政謙次・稲村實, 2002. ミクセル分解による植生リモートセンシングのための植生被覆率と活性度の分離—室内実験におけるミクセル分解手法の評価—. *農業気象*, 58 (1), 33-39.
- 3) DARVISHZADEH, R., SKIDMORE, A., SCHLERF, M., ATZBERGER, C., CORSI, F. and CHO, M., 2008. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 63 (4), 409-426.
- 4) CHEN, S.K., YEN, K.S. and HUANG, P.W., 1995. A simple model for retrieving bare soil moisture from radar-scattering coefficients. *Remote Sens. Environ.*, 54 (2), 121-126.
- 5) ULABY, T.F., CIHLAR, J. and MOORE, K.R., 1974. Active microwave measurement of soil water content. *Remote Sens. Environ.*, 3 (3), 185-203.
- 6) 大久保彰人・高木潤治・黒柳直彦・波多江直之・田村正行, 1999. 衛星データと同期調査による広域土壌水分の推定. *日本リモートセンシング学会誌*, 19 (1), 30-44.
- 7) TANSEY, J.K. and MILLINGTON, A.C., 2001. Investigating the potential for soil moisture and surface roughness monitoring in dry lands using ERS SAR data. *Int. J. Remote Sens.*, 22 (11), 2129-2149.
- 8) ISHIYAMA, T., SUGIHARA, S., TSUCHIYA, K., LIU P.-J. and LU, G.F., 1992. Variation of sand reflectance with moisture content. *J. Arid Land Stud.*, 2, 39-43.
- 9) LIU, W., BARET, F., GU, X., TONG, Q., ZHENG, L. and ZHANG, B., 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 81 (2-3), 238-246.
- 10) LIU, W., BARET, F., GU, X., ZHANG, B., TONG, Q. and ZHENG, L., 2003. Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data. *Int. J. Remote Sens.*, 24 (10), 2069-2083.
- 11) ÅNGSTRÖM, A., 1925. The albedo of various surface of ground. *Geografiska Annaler*, 7, 323-342.
- 12) BOWERS, S.A. and HANKS, R.J., 1965. About the soil line concept in remote sensing. *J. Soil Sci.*, 100 (3), 130-138.
- 13) 瀬口昌洋・渡辺 潔・林 念人, 1991. 衛星リモートセンシングによる土壌情報の抽出に関する研究 (I). *佐賀大農叢*, 70, 101-110.
- 14) BARET, F., JACQUEMOUD, S. and HANOCQ, J.F., 1993. Reflection of radiant energy from soils. *Adv. Space Res.*, 13 (5), 281-284.
- 15) ZHAN Z., QIN Q., GHULAN A., WANG D., 2007. NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, 50 (2), 283-289.
- 16) 関山 純子・島田 沢彦・豊田 裕道・横濱 道成, 2010. 可視・近赤外域分光反射特性を用いた土壌水分推定. *沙漠研究*, 19 (4), 525-535.
- 17) 藤原 昇・村松加奈子・阿波 忍・羽澄 妙子・落合 史生, 1996. 衛星データ解析のためのパターン展開法の開発. *日本リモートセンシング学会誌*, 16 (3), 17-34.
- 18) 小野 朗子・藤原 昇・小野 厚夫, 2002. Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形効果と大気効果の抑制. *日本リモートセンシング学会誌*, 22 (3), 318-327.
- 19) 安成 哲三, 2003. モンゴル草原はどう維持されてきたか—生態気候システム学的序説—. *科学*, 73 (5), 555-558.
- 20) 藤田 昇, 2003. 草原植物の生態と遊牧地の持続的利用. *科学*, 73 (5), 563-569.
- 21) 杉田 倫明, 2003. 水循環プロセスと生態系との関わり. *科学*, 73 (5), 559-562.

- 
- 22) 松永俊朗, 1994. 近赤外分析法の土壌分析への適用. *農業技術*, **49** (1), 16-20.
- 23) MOUAZEN, A.M., KAROUI, R., BAERDEMAEKER, D. and RAMON, H., 2005. Classification of soil texture classes by using soil visual near infrared spectroscopy and factorial discriminate analysis techniques. *J. Near Infrared Spectrosc.*, **13** (4), 231-240
- 24) 久馬一剛, 2001. モンゴルの土壌. *ペドロジスト*, **45** (1), 56-64.

# Estimation of Soil Moisture Using Pattern Decomposition Method and Vegetation Survey in Mongolian Grasslands

By

Ayako SEKIYAMA\*, Sawahiko SHIMADA\*\*, Hiromichi TOYODA\*\*  
and Michinari YOKOHAMA\*\*\*

(Received November 19, 2009/Accepted March 12, 2010)

**Summary** : In this study, we conducted the measurements of soil spectral reflectance and soil moisture content, and vegetation surveys over ten plots within the prefectures of Tov, Dundgovi and Henti of Mongolian grasslands. We attempted to apply a method for estimating soil moisture content to the field measured data. We also collected the data of vegetation species by the quadrat method, and calculated the vegetation cover ratio. The soil spectral reflectance of land surface was measured using a spectroradiometer which had a sensor in visible and near infrared wavelength (Wavelength range : 350–1050 nm). For an application to satellite imagery of optical sensors, four spectral bands were selected to be analyzed. The estimation method of soil moisture content by applying pattern decomposition has already been reported. In this investigation, we found that the soil spectral reflectance curve was steep when the soil moisture content is high, and becomes flat when the soil moisture content is low. Thus, in the pattern decomposition method, the flat model pattern is defined as the spectral reflectance pattern that corresponds to completely dried soil. The pattern decomposition coefficient for the flat model pattern was calculated from the pattern decomposition method using flat model pattern. The result of application of the suggested method to soil reflectance pattern from field survey showed a negative correlation ( $r^2=0.72$ ) between soil water content and the pattern decomposition coefficient for the flat model pattern. This high correlation was shown throughout all the soil types in this study. The result of vegetation survey showed that there was a difference of soil water content between the two survey plots where low vegetation cover ratios were recorded. The reason for this result was assumed to be the effect of soil moisture deficiency or overgrazing.

**Key words** : Pattern decomposition method, Soil moisture, Reflectance pattern, Visible and near infrared wavelength, Mongolian Grasslands

---

\* Department of Agricultural Engineering, Graduate school of Agriculture, Tokyo University of Agriculture (Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Environment Information)

\*\* Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

\*\*\* Department of Bioproduction, Faculty of Bio-Industry, Tokyo University of Agriculture

付表 各調査地における植生調査により同定した植物の学名、科名および草丈。草丈を測定していない場合は—。調査地はアルファベット順。各調査地内の科名は五十音順。

調査地	学名	科名	草丈(mm), 平均±S.E
E	<i>Galium verum</i>	アカネ科	—
E	<i>Poa attenuata</i>	イネ科	—
E	<i>Elytrigia repens</i>	イネ科	—
E	<i>Adenophora tricuspidata</i>	キキョウ科	—
E	<i>Aster alpinus</i>	キク科	—
E	<i>Heteropappus biennis</i>	キク科	—
E	<i>Pentaphylloides fruticosa</i>	バラ科	—
E	<i>Potentilla anserina</i>	バラ科	—
E	<i>Geranium pratense</i>	フウロソウ科	—
E	<i>Allium mongolicum</i>	ネギ科	—
E	<i>Sophora flavescens</i>	マメ科	—
E	<i>Salix rosmarinifolia</i>	ヤナギ	—
F	<i>Carex pediformis</i>	カヤツリグサ科	—
F	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	—
F	<i>Poa attenuata</i>	イネ科	—
F	<i>Stipa glareosa</i>	イネ科	—
F	<i>Dianthus versicolor</i>	ナデシコ科	—
F	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	—
F	<i>Artemisia frigida</i>	キク科	—
F	<i>Echinops latifolius</i>	キク科	—
F	<i>Artemisia laciniata</i>	キク科	—
F	<i>Stellera chamaejasme</i>	ジンチョウゲ科	—
F	<i>Allium polymyzum</i>	ユリ科	—
F	<i>Gypsophila dovirica</i>	ナデシコ科	—
F	<i>Pentaphylloides fruticosa</i>	バラ科	—
F	<i>Potentilla anserina</i>	バラ科	—
F	<i>Scabiosa comosa</i>	マツムシソウ科	—
G	<i>Chenopodium serotinum</i>	アカザ科	153.2±3.5
G	<i>Chenopodium glaucum</i>	アカザ科	—
G	<i>Corispermum delinatum</i>	アカザ科	—
G	<i>Ptilotichum canescens</i>	アブラナ科	543.3±0.4
G	<i>Iris lactea</i>	アヤメ科	23.8.0±2.0
G	<i>Stipa glareosa</i>	イネ科	176.0±1.1
G	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	225.0±2.0
G	<i>Elytrigia repens</i>	イネ科	—
G	<i>Saussurea salicifolia</i>	キク科	—
G	<i>Artemisia frigida</i>	キク科	212.0±1.1
G	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	238.0±2.0
G	<i>Saussurea amara</i>	キク科	72.7±1.0
G	<i>Serratula marginata</i>	キク科	—
G	<i>Cymbaria mongolica</i>	ゴマノハグサ科	120.3±0.6
G	<i>Corispermum mongolium</i>	アカザ科	—
G	<i>Potentilla bifurca</i>	バラ科	153.0±3.5
G	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	170.7±1.2
G	<i>Allium mongolicum</i>	ユリ科	—
H	<i>Chenopodium aristatum</i>	アカザ科	54.7±0.4
H	<i>Chenopodium glaucum</i>	アカザ科	81.0±1.9
H	<i>Chenopodium acuminatum</i>	アカザ科	—
H	<i>Corispermum delinatum</i>	アカザ科	—
H	<i>Stipa glareosa</i>	イネ科	130.3±1.2
H	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	203.0±1.4



付表 (続き)

調査地	学名	科名	草丈(mm), 平均±S.E
H	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	イネ科	—
H	<i>Elytrigia repens</i>	イネ科	—
H	<i>Agropyron cristatum</i>	イネ科	277.7±2.0
H	<i>Carex duriuscula</i>	カヤツリグサ科	—
H	<i>Artemisia frigida</i>	キク科	176.7±1.3
H	<i>Heteropappus altaicus</i>	キク科	—
H	<i>Panzeria alashanica</i>	シソ科	161.0±3.7
H	<i>Caragana microphylla</i>	マメ科	282.3±3.9
H	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	165.3±0.9
H	<i>Allium mongolicum</i>	ユリ科	113.0±0.5
L	<i>Chenopodium aristatum</i>	アカザ科	—
L	<i>Chenopodium glaucum</i>	アカザ科	—
L	<i>Corispermum delimatum</i>	アカザ科	73.7±0.7
L	<i>Corispermum mongolicum</i>	アカザ科	84.7±1.2
L	<i>Chenopodium serotinum</i>	アカザ科	—
L	<i>Dontostemon integrifolius</i>	アブラナ科	—
L	<i>Agropyron cristatum</i>	イネ科	—
L	<i>Carex duriuscula</i>	カヤツリグサ科	120.3±1.2
L	<i>Artemisia frigida</i>	キク科	131.0±0.2
L	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	183.0±0.5
L	<i>Heteropappus altaicus</i>	キク科	64.7±0.7
L	<i>Panzeria locorata</i>	シソ科	—
L	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	109.0±0.4
L	<i>Caragana microphylla</i>	マメ科	234.7±3.0
L	<i>Allium mongolicum</i>	ユリ科	—
M	<i>Agropyron cristatum</i>	イネ科	—
M	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	—
M	<i>Stipa krylovii</i>	キク科	—
M	<i>Stipa krylovii</i>	キク科	—
M	<i>Stipa krylovii</i>	キク科	—
M	<i>Potentilla bifurca</i>	バラ科	—
M	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	—
M	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	—
M	<i>Caragana phygmaea</i>	マメ科	—
M	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	—
M	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	—
M	<i>Convolvulus ammannii</i>	ヒルガオ科	—
M	<i>Convolvulus ammannii</i>	ヒルガオ科	—
M	<i>Ephedra sinica</i>	マオウ科	—
N	<i>Agropyron cristatum</i>	イネ科	—
N	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	—
N	<i>Stipa glareosa</i>	キク科	—
N	<i>Cleistogenes squarrose</i>	イネ科	—
N	<i>Potentilla bifurca</i>	バラ科	—
N	<i>Saussurea salicifolia</i>	キク科	—
N	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	—
N	<i>Heteropappus altaicus</i>	キク科	—
R	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	アブラナ科	—
R	<i>Stipa glareosa</i>	イネ科	547.3±1.8
R	<i>Achnatherum splendens</i>	イネ科	—
R	<i>Leymus chinensis</i>	イネ科	—
R	<i>Agropyron cristatum</i>	イネ科	—
R	<i>Elytrigia repens</i>	イネ科	—
R	<i>Elymus secalimus</i>	イネ科	725.7±0.4

付表 (続き)

調査地	学名	科名	草丈(mm), 平均± S.E
R	<i>Urtica angustifolia</i>	イラクサ科	—
R	<i>Plantago virginica</i>	オオバコ科	245.0±2.7
R	<i>Artemisia macrocephala</i>	キク科	464.3±8.8
R	<i>Artemisia annua</i>	キク科	367.0±3.0
R	<i>Potentilla depressa</i>	バラ科	248.0±2.2
R	<i>Medicago falcata</i>	マメ科	—
R	<i>Lappula intermedia</i>	ムラサキ科	—
S	<i>Galium verum</i>	アカネ科	446.3±4.2
S	<i>Stipa glareosa</i>	イネ科	127.0±0.6
S	<i>Elytrigia repens</i>	イネ科	666.0±5.4
S	<i>Poa pratensis</i>	イネ科	—
S	<i>Adenophora tricuspidata</i>	キキョウ科	—
S	<i>Kalimeris integrifolia</i>	キク科	311.0±1.9
S	<i>Thalictrum minor</i>	キンボウゲ科	194.3±4.2
S	<i>Aconitum barbatum</i>	キンボウゲ科	—
S	<i>Phlomis tuberosa</i>	シソ科	339.3±5.5
S	<i>Carum carvi</i>	セリ科	—
S	<i>Dianthus versicolor</i>	ナデシコ科	—
S	<i>Pentaphragma fruticosum</i>	バラ科	315.3±1.1
S	<i>Potentilla tanacetifolia</i>	バラ科	353.7±3.7
S	<i>Rosa acicularis</i>	バラ科	—
S	<i>Sanguisorba officinalis</i>	バラ科	411.3±8.3
S	<i>Potentilla bifurca</i>	バラ科	—
S	<i>Geranium eriostemon</i>	フウロソウ科	—
S	<i>Trifolium lupinaster</i>	マメ科	385.0±6.8
S	<i>Campanula glomerata</i>	リンドウ科	—
X	<i>Filifolium sibiricum</i>	キク科	—
X	<i>Aster alpinus</i>	キク科	—
X	<i>Echinops latifolius</i>	キク科	—
X	<i>Leontopodium ochroleucum</i>	キク科	—
X	<i>Cymbaria dahurica</i>	ゴマノハグサ科	—
X	<i>Stipa glareosa</i>	キク科	—
X	<i>Stellera chamaejasme</i>	ジンチョウゲ科	—
X	<i>Polygonum angustifolium</i>	タデ科	—
X	<i>Chenopodium glaucum</i>	アカザ科	54.3±0.5
X	<i>Chenopodium acuminatum</i>	アカザ科	—
X	<i>Corispermum mongolicum</i>	アカザ科	—
X	<i>Kochia prostrata</i>	アカザ科	—
X	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	アブラナ科	222.3±1.8
X	<i>Stipa gobica</i>	イネ科	118.7±1.4
X	<i>Stipa baicalensis</i>	イネ科	—
X	<i>Achnatherum splendens</i>	イネ科	873.3±4.6
X	<i>Artemisia adamsii</i>	キク科	292.3±0.4
X	<i>Artemisia macrocephala</i>	キク科	292.7±1.5
X	<i>Heteropappus altaicus</i>	キク科	153.0±2.8
X	<i>Cymbaria dahurica</i>	ゴマノハグサ科	—
X	<i>Potentilla bifurca</i>	バラ科	28.7±0.2
X	<i>Convolvulus ammannii</i>	ヒルガオ科	50.0±0.5
X	<i>Caragana microphylla</i>	マメ科	—
X	<i>Allium polyrrhizum</i>	ユリ科	202.7±0.7
X	<i>Allium mongolicum</i>	ユリ科	203.0±2.9