

モンゴル国ヘルレン川流域における 土壌特性の推定に関する研究

環境システム工学課程
水文気象研究室 村上 圭亮
指導教員 教授 陸 旻皎

1. はじめに

現在、モンゴルや中国北東部を中心とするアジア北東部は、比較的狭い範囲において、湿潤域が乾燥域へと変化しており、それに伴った森林－草原－砂漠という地表面の明確な変遷域(エコトーン)が形成されている。

モンゴルのような放牧地で問題となるのが過放牧である。過放牧地における砂漠化防止の対策として、□土地資源の把握、□放牧体系の構築、□農民への啓蒙、□フォローアップという4つのステップによる研究と、啓蒙活動が必要であるとしている(Novikoff, 1983)。過放牧による影響は土地ごとに異なるので、個々の立地ごとに最適な管理手法を検討していく必要がある(Takeuchi et al., 1995)。

以上のようなことから、本研究では、モンゴル国ヘルレン川流域を研究対象地域として、KherlenBayan-Ulaan(以後 KBU)における土壌特性の推定を行なった。

2. 使用データ

今回、モンゴル国ヘルレン川流域におけるKBUの土壌特性の推定を行なうに当たって、研究課題名「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明」といい、英語名の頭文字からRAISE(レイズ)と称されている研究プロジェクトのデータの一部(温度・土壌含水率)を用いている。固相率には(Asano, 2007)のものを用いた。データ期間としては、2003年3月24日17:30から2005年3月23日17:00までの2年分を用いた。



図1 モンゴル国 Kherlenbayan-Ulaan

3. 手法

3.1 GNU Octave の fft 関数について

GNU Octave に実装されている離散フーリエ変換の関数(fft 関数)を使い実験的に検証した。振幅の分かる sin 波を入力して振幅とスペクトルの関係を検討すると振幅は以下の式で表されることが分かった。

$$A = \frac{2S}{N} \quad (1)$$

A は振幅、 S はスペクトル、 N はデータ数である。

3.2 深さと時間による温度変化

時間や深さにともなう温度の変動を求めるためには、以下に示す連続方程式を解く必要がある。

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial G}{\partial z} \quad (2)$$

$\rho_s c_s$ は土壌の体積の熱容量、 G は地中熱フラックス密度である。この連続方程式を解くことで以下の熱輸送式が得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

κ は熱拡散率であり以下で表される。

$$\kappa = \frac{k}{\rho_s c_s} \quad (4)$$

式3 から、土壌が無限に深く、一様の熱的特性をもち、地表面温度が正弦曲線的に変動すると仮定すると、式(5)のように温度は任意の深さ、時間における関数で表される。

$$T(z, t) = T_{ave} + A(0) \exp(-z/D) \sin[\omega(t - \theta) - z/D] \quad (5)$$

T_{ave} は日平均地表面温度、 ω は日角振動数 ($7.3 \times 10^{-5} [s^{-1}]$)、 D は制動深さと呼ばれる。“- θ ”は正弦関数内の位相を調整し、 $t = \theta$ のときに正弦関数内の括弧内が地表面 ($z = 0$) でゼロになる。ある特定の深さにおける地温日変化の振幅だけを求めたい場合も多く、そのとき正弦関数は-1 から+1 の間の値をとるので、式5 から地温日変化の振幅を次のように表す。

$$A(z) = A_{ave} + A(0) \exp(-z/D) \quad (6)$$

振幅は、マイナスの値をとらないためプラスで表現できる。

D は制動深さを表し、次式から求められる。

$$D = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega}} \quad (7)$$

制動深さは、温度の変動が到達する地中の深さについて有用な情報を与える。たとえ、地表面温度が正弦曲線的に変動しない場合でも、日周期や年周期の温度変化がどの程度の深さまで到達

するかについてのよい指標となる。制動深さの地温の振幅が、地表面温度の振幅の $1/e$ (約 0.37) 倍に減衰する深さに相当することを示す。式7 から熱拡散率を求めた。制動深さは、振幅が Octave によって取り出されているので以下の式から制動深さ D を求めた。

$$D = \frac{z}{\ln[A(0)/(T(z) - T_{ave})]} \quad (8)$$

土壌の体積熱容量 $\rho_s c_s$ は、各土壌構成要素の熱容量の合計である。土壌は通常、鉱物・水・空気で構成されるため、熱容量は次式によって計算できる。

$$\rho_s c_s = \phi_m \rho_m c_m + \phi_w \rho_w c_w + \phi_g \rho_g c_g \quad (9)$$

ϕ_m, ϕ_w, ϕ_g はそれぞれ、鉱物の体積率(石英)、体積含水率(液相率)、空気の体積率(気相率)を示しており、 ρ は密度、 c は比熱を示している。添え字 m, w, g はそれぞれ、鉱物、水、空気を表している。以下の式から熱伝導率を推定した。

$$k = \kappa(\rho_s c_s) \quad (10)$$

3.3 経験式

土壌の熱伝導率が各構成要素の熱伝導率の重み付き合計値で計算できるとして次式で表される(De Vries, 1963)。

$$k_{soil} = \frac{\phi_w \xi_w k_w + \phi_g \xi_g k_g + \phi_m \xi_m k_m}{\phi_w \xi_w + \phi_g \xi_g + \phi_m \xi_m} \quad (11)$$

ϕ, ξ, k はそれぞれ各構成要素の体積率、重み係数、熱伝導率であり、添字 w, g, m は水、気体、鉱物を示している。今まで、重み係数は1として熱伝導率は算出され評価されてきた。重み係数は1で適切か確認するために今回は制動深さ

から推定できた熱伝導率と、今までの研究と尾の滋養に重み係数を1として計算した熱伝導率を比較した。両者を比較し大きなズレが生じると今までの評価は大きく修正されることになると考えられる。

3.4 重み係数

以下のように重み係数が計算できる。

$$\xi_g = \frac{2}{3[1+g_a(k_g/k_f-1)]} + \frac{1}{3[1+g_c(k_g/k_f-1)]}$$

$$\xi_w = \frac{2}{3[1+g_a(k_w/k_f-1)]} + \frac{1}{3[1+g_c(k_w/k_f-1)]}$$

$$\xi_m = \frac{2}{3[1+g_a(k_m/k_f-1)]} + \frac{1}{3[1+g_c(k_m/k_f-1)]}$$

ξ_g, ξ_w, ξ_m は、それぞれ空気、水、固体の重み係数を示している。 g_a は鉍質土壌の場合、約0.1であり、有機質土壌の場合は0.33である。 g_c は $1-2g_a$ で計算できる。KBUの土壌は炭素含有率が少なく、土層も有機物が集積する土層、O層ではなくその下のA層から土層が形成されているため(浅野, 2004)、鉍質土壌の値を用いた。 k_f は、流体の熱伝導率であり、次式で定義されている。(Campbell et al., 1994)。

$$k_f = k_g + f_w(k_w - k_g) \quad (12)$$

k_g は水蒸気相のみかけの熱伝導率であり、次式で完全に表現できる。

$$k_g = k_a + \frac{\lambda \Delta h_r f_w \hat{\rho} D_v}{p_a - e_a} \quad (13)$$

$\hat{\rho}$ は空気のマール密度、 λ は水の蒸発潜熱、 D_v は土壌の水蒸気拡散係数、 k_a は空気の熱伝導率、

h_r は土壌中の相対湿度(乾燥土壌では、土壌中で蒸発がおり、水蒸気が長い間土壌中に滞在するため相対湿度を1とした)、 p_a は大気圧であり、 e_a は土壌中の相対湿度を1としたため飽和水蒸気圧と同じ値を用いた。 f_w は無次元の流れ係数であり、以下の式で提案されている。(Campbell et al., 1994)。

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{-q}} \quad (14)$$

定数 θ_0 は土壌中の潜熱輸送の流れが分断される含水率、定数 q はその分断がどの程度早く生じるかを規定する。両定数とも土性と関連し、土性が細くなるほど増加する傾向がある。 θ_0 は粗砂の約0.05から重粘土の0.25までの範囲にある。 q はおよそ2から6の範囲にあり、粗い土壌ほど一般に低い値をとる。しかし、未だにこの2つには明確な定義はない。

4. 結果

温度データを Octave によってフーリエ変換することで、日周期と年周期のスペクトルが卓越していることが分かり、振幅も計算できた。また、日周期の温度変化がどの程度まで到達するかの指標となる日制動深さを推定することができ、この深さは約0.126[m]となった。これは、熱が深くまで伝わらないことを示している。式10から推定できた熱伝導率を以下に示す。

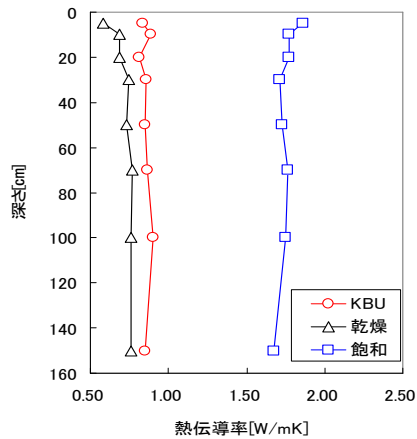


図2 制動深さからの熱伝導率

次に式 11 の経験式より重み係数を今までと同じように 1 として熱伝導率を計算した図を以下に示す。

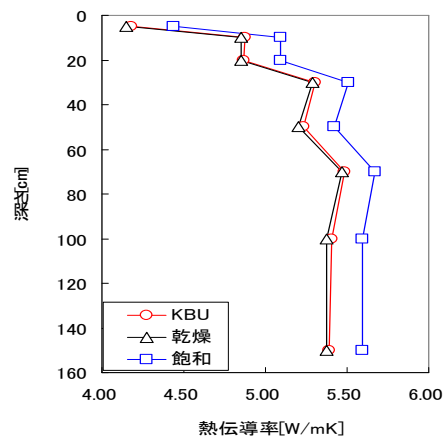


図3 重み係数 1 での熱伝導率

制動深さから推定した熱伝導率と比較すると大きなズレが生じているため重み係数を 1 として経験式を活用することはヘルレン川流域において、熱・水環境の評価を正しく行なえていないことが考えられる。また、熱伝導率は大きくずれているため、他の場所においても重み係数を 1 とすることは、その場所の熱・水環境を評価するうえで正しくないと考えられる。それぞれの深さの θ_0 , q における重み係数を用いて、熱伝導率を近似できた。以下にその値を示す。

表 1 KBU 土壌における重み係数

深さ [cm]	q	θ_0	ξ_g	ξ_w	ξ_m
5	2	0.10	1.85	0.82	0.19
10	6	0.10	1.69	0.66	0.12
20	2	0.10	1.64	0.63	0.11
30	2	0.10	1.56	0.57	0.89
50	2	0.10	1.61	0.60	0.10
70	2	0.10	1.50	0.52	0.07
100	3	0.10	1.58	0.58	0.09
150	5	0.05	1.61	0.60	0.10

これらの重み係数を式 11 の経験式に代入して、再度熱伝導率を計算した図を以下に示す。

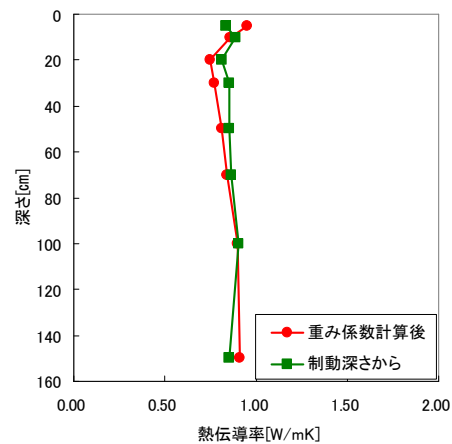


図4 重み係数推定(KBU 土壌)の熱伝導率

重み係数を推定することで、制動深さからの熱伝導率に近似することができた。これは、今まで重み係数を 1 として熱伝導率を算出していた場所に大きく影響を与えることが考えられる。

5. 結論

データから制動深さ・熱伝導率を推定できた。経験式(De Vries, 1963)を用いるとき、重み係数を 1 とすると正しく熱伝導率が推定できないことが認められた。推定できた重み係数を用いることで KBU 土壌において、どのような土壌含水率についても熱伝導率が推定できると考えられる。