

地表面温度を用いた土壌熱物性値及び地中熱流量の逆推定法の提案

Direct Estimation of Ground Thermometric Parameter and Ground Conductive Heat Flux,
from Ground Surface Temperature

森脇亮*・神田学**・横山仁***

BY Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA and Hitoshi Yokoyama

The object of this study is to develop a method for estimating both the ground thermometric parameter($\rho c \lambda$) and ground conductive heat flux(G) simultaneously by using the ground surface temperature(T_s). This method is based on the Fourier series expressions of the result of heat transfer equation. The method is tested by a field-measurement. The following results are obtained: 1) The estimated $\rho c \lambda$ have a reasonable value. 2) Estimated diurnal variations of G agree very well with that observed. 3) The spatial distribution of $\rho c \lambda$ is also estimated from the surface temperature distribution obtained by the thermo-graphy.

Key Words : Ground conductive heat flux, thermometric parameter, Area-mean, Remote sensing

1 はじめに

地表面の熱収支を算定する上で、地表面温度は、大気-土壌系をつなげる最も重要なファクターで有ると言える。そのため、リモートセンシングの表面温度情報を各種の熱収支算定に応用する試みが数多くなされている。その代表的なものに、FRM(強制復元法)がある。この方法は、地表面温度と土壌物性値から地中熱流量を簡易に算定するものであり、GCMにおける地熱流計算などで実際に用いられている。一方、領域平均熱収支などを議論する場合には、与えるべき土壌物性値の非均一性そのものが大きな問題となる(例えば、砂田¹⁾)。FRM法を用いて、表面温度情報から土壌物性値の空間分布そのものを逆推定するためには、地熱流量を既知として与えねばならないが、そのためには、熱収支の他項(顕熱・潜熱)の空間分布を正確に推定する必要がある、これが極めて難しいことは周知の事実である。

本研究では、サーモグラフィーの地表面温度情報のみから、土壌物性値と一日の地熱流量変化の空間分布を同時に逆推定する手法を提案する。この手法のポイントは、1) 線形熱伝達方程式のフーリエ級数解の逆問題として捉えること、2) パラメータの逆推定において、顕熱・潜熱の無視しうる夜間の時間帯を利用すること、の2点である。この推定法は、衛星リモートセンシングを用いての広領域土壌物性値の特定や、土壌物性値の長期的な変動に伴う土壌水分変動のモニターなどに利用できる。

* 学生会員 東京工業大学大学院土木工学専攻

** 正会員 工博 東京工業大学工学部開発システム工学科

*** 東京都農業試験場

2 熱流量推定のフロー

熱流量の推定のフローチャートを図-1に示す。また、それに伴う理論を以下に述べる。

2.1 夜間の熱収支式

夜間は日射量が無視できるため、正味放射量は大気からの長波放射と地表面の黒体放射のバランスで決まる。また風が無い夜間には、乱流拡散による顕熱輸送量・潜熱輸送量は抑えられる。従って、風の弱い夜間の熱収支式は式(1)で表せる。

$$L^{\downarrow} - \sigma T_s^4 = G \quad (1)$$

ここで、 $L^{\downarrow}$ ：大気からの長波放射量(Wm^{-2})、 σ ：ステファーンボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_s ：地表面温度(K)、 G ：地中熱流量(Wm^{-2})である。 $L^{\downarrow}$ の空間による非均一性は極めて

小さいため、 G の値はもっぱら T_s の空間分布に左右される。式(1)より、サーモグラフィーによる対象領域の地表面温度の測定値と、赤外放射計による大気放射量の測定値(あるいは気温測定による大気放射量の推定値²⁾)だけで、夜間風の弱い(具体的には風速0.2m以下とした。)ときの地中熱流量を求めることができる。

2.2 地中熱流量の算定式

地中温度は深さと時間の関数で、次のような熱伝導方程式を満たす。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (2)$$

ここで、 θ ：地中温度(K)、 z ：地表面からの深さ(m)、 α^2 ：温度拡散率(m^2s^{-1})である。地表面($z=0$)での温度をフーリエ変換すると、次式のようにフーリエ級数で表せる。

$$\theta_{z=0} = a_0 + \sum_n a_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \quad (3)$$

ここで、 T は周期を示す。また $\theta / \partial z = 0$ ($z \rightarrow \infty$)より式(2)を解くと、地中温度の関数を得る。

$$\theta_{z,t} = a_0 + \sum_n a_n \exp\left(-\frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{n\pi}{T}}\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t - \frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{n\pi}{T}}\right) \quad (4)$$

地中熱流量は、地表面での温度勾配を用いて、次式のように表せる。

$$G = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、 λ ：熱伝導係数($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)である。式(5)に式(4)を代入すると、地中熱流量は次のようにフーリエ級数で表現される。

$$G = \sqrt{\rho c \lambda} \sum_n \sqrt{\frac{2n\pi}{T}} a_n \exp\left(-\frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{n\pi}{T}}\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t - \frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{n\pi}{T}} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

ここで、 ρ ：密度(kgm^{-3})、 c ：比熱($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)である。

2.3 土壌物性値の推定

風の無い夜間のデータを抽出し、式(1)から T_s と $L^{\downarrow}$ の計測値により逆算した G を式(6)に代入することによって、地中熱流量の算定に必要な土壌物性値 $\rho c \lambda$ が逆算できる。この物性値を用いて G の日変化を推定する。土壌物性値は、サーモグラフィーで得られた表面温度を用いるため、領域平均値もしくは任意の地点についての値を求めることができる。

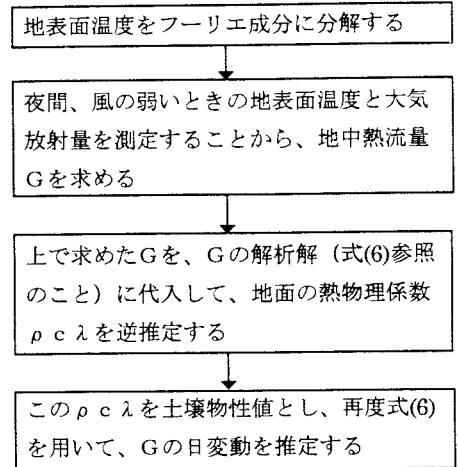


図-1 熱流量推定のフローチャート

3 実際の地表面への適用

次に実際の地表面への適用の可能性を調べるために、屋外測定を行った。

3.1 測定方法

測定場所、日時などについては表1、測定項目を表2、測定の概略図を図-1に示す。測定は6分ごとに行い、48時間連続的に観測した。

3.2 実測結果と推定された値の考察

本手法の妥当性を確認するため、サーモグラフィーによって計測した15cm四方の平均表面温度から領域平均の土壌物性値と熱流量を逆推定する。

(a) 地表面温度のフーリエ級数展開 地表面温度と、それをフーリエ級数で表したものを、図-3に示す。フーリエ級数は式(3)において項数 n を50とったものである。フーリエ級数は実測データの細かい変動まで十分再現していることがわかる。

(b) 熱物理係数の逆推定 次に、ここで得られたフーリエ係数と夜間風の無い時間帯に得られる G を用いて、式(6)より熱物理係数 $(\rho c \lambda)^{1/2}$ を逆推定した。また鉛直方向に測定した二点の地中温度分布より、振幅法¹⁾を用いて温度拡散率 α^2 を算定した(土壌および含水量は鉛直方向に一樣とする)。この値($\alpha^2 = 0.74 \times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)を用いて、 $(\rho c \lambda)^{1/2}$ から熱伝導係数 λ と体積熱容量を求めたところ、本推定法によって求めた各熱物理係数は適当な値を示している(表3)。

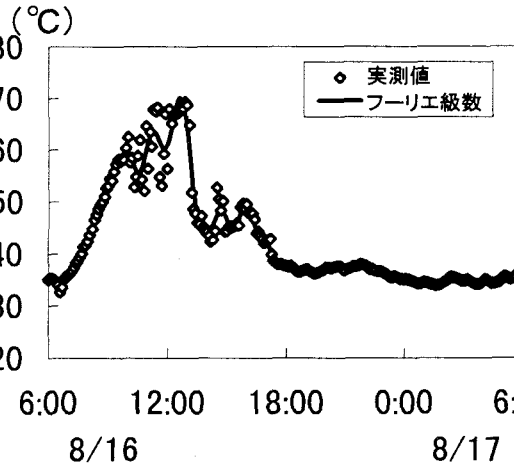


図-3 地表面温度の実測値とフーリエ変換後の日変化(1996.8.16-17)

表1 測定場所、日時

場所	日時
東京都農業試験場圃場	1996年8月16～17日

表2 測定項目と測定機器

項目	観測機器	設置場所
地表面温度	サーモグラフィ	地上 1m
大気放射量	赤外放射計	地上 1m
風速	三杯式風速計	地上 2m
地中温度	熱電対温度計	地下 0.5、5cm
地中熱流量	熱流板	地下 3cm

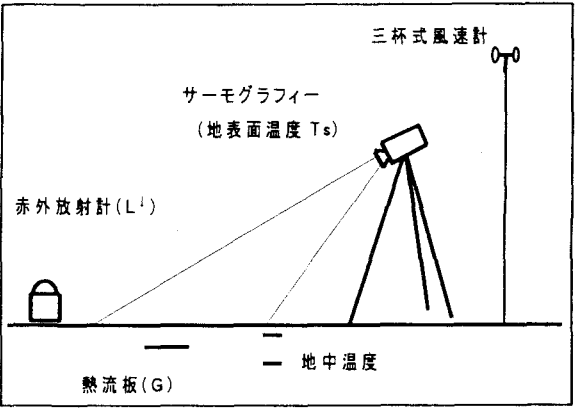


図-2 測定の概略図

表3 熱物理係数の推定値と文献値^{3), 4)}

	$(\rho c \lambda)^{1/2}$ ($\text{Js}^{-1/2} \text{K}^{-1} \text{m}^{-2}$)	熱伝導率 λ ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	体積熱容量 ρc ($\times 10^6 \text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$)
推定値	950	0.3	3.5
文献値	575～866	0.3～2.0	1.1～3.9

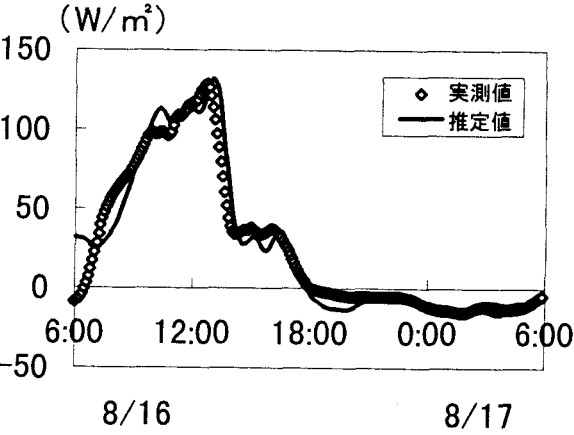


図-4 地中熱流量の実測値と推定値の日変化(1996.8.16-17)

(c) Gの実測値と推定値との比較

(b)で逆推定した土壌熱物理係数の空間平均値を用いて、再び式(6)より地中熱流量の一日の変化を推定した(図-4)。結果を実測値と比較すると、一部高周波数成分によりずれているところもあるが、全体の傾向をよく示している。式(6)を使うにあたっては、実際に熱流板を設置した深さに対応させるために、 $z=0.03\text{m}$ とした。

3. 3 サーマグラフィーによる土壌熱物理係数の空間分布

以上は領域の平均値に関する議論であったが、これをサーモグラフィーによってとらえた地表面温度分布に拡張してみる。図-5はサーモ画像から逆推定された土壌熱物理係数の空間分布である。逆推定された熱物理係数には顕著な非均一性が認められ、その空間分布特性が抽出されている。サーモグラフィーの画像範囲はわずか15cm四方であり、しかも均一に近い圃場で測定を行ったため、土壌物性値の場所による差異はわずかであり、その差が水文学的に有意なものとは思えない。しかし、この手法はわずかな温度分布の差に対応して土壌物理係数の空間パターンが明瞭に逆推定される点が大きな特徴であり、この手法をより広域に応用すれば、個々の地表面状態に対応して水文学的に意味のある熱物理係数の空間分布が逆推定されるであろう。また、 $\rho c \lambda$ は土壌水分の影響をきわめて強く受けているので、長期にわたって土壌物性値の変動を追えば、水分量の変化を抽出できる可能性もある。これらの点については今後の課題とする。

4 まとめ

本研究では、サーモグラフィーによって測定した地表面温度をフーリエ成分に分解することにより地中熱流量を推定した。地中熱流量の算定に必要な土壌熱物理係数は、夜間の熱収支式を用いて間接的に求めた地中熱流量より逆算した。推定された熱物理係数は、一般に報告されている値とよく合っており、また推定法より求めた地中熱流量は、実際に測定した地中熱流量の日変化をよく再現している。以上の結果より、本推定法の有効性が確かめられた。

この推定法は、衛星リモートセンシングによる広領域の土壌物性値および地中熱流量の推定を可能にする他、他分野の研究への応用も期待される。例えば、コンクリート構造物の非破壊検査の一手法として、サーモグラフィーによる表面温度の測定が用いられているが、本推定法はコンクリートの定量的な熱物性値を提供することができる。今後はこの推定法を用いて、空間平均的な顕熱フラックスを測定するシンチレーションメーターとのカップリングにより、領域平均的な熱収支の測定手法の検討を行う予定である。

謝辞 本研究は、文部省科学研究費一般C 07650594「河川・森林周辺の人体の熱環境解析とその評価法の提案(代表者・神田学)」及び河川環境管理財団「河川美化・緑化研究助成(代表者・神田学)」の財政的援助を受けて行われました。また測定場所を提供して下さった東京農業試験場の横山氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 砂田憲吾・伊藤強・虫明功臣・開発一郎(1994)：表層土壌水分の空間分布特性に関する調査と考察、水工学論文集、38、173-178。
- 2) 竹内清秀・近藤純正(1981)：大気科学講座1 地表に近い大気、東京大学出版会、p87
- 3) 農林省土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法、養賢堂、p287-303
- 4) 近藤純正(1994)：水環境の気象学、朝倉書店、p152

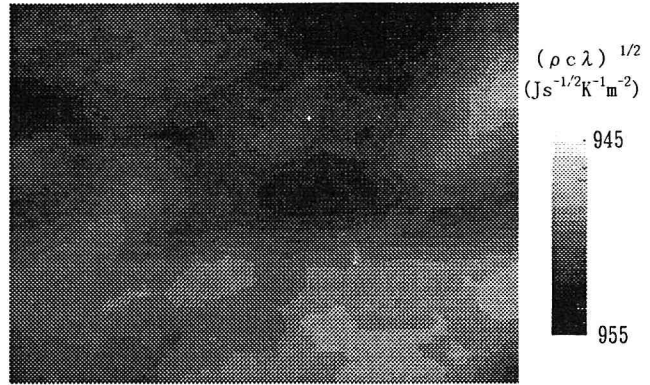


図-5 サーマグラフィーによる土壌熱物理係数の空間分布図