

サーモモジュールを利用した土壌中の熱フラックス測定

百瀬年彦*・粕渕辰昭**

Measurement of Soil Heat Flux Using a Thermo-module

Toshihiko MOMOSE* and Tatsuaki KASUBUCHI**

* Division of Engineering, Saint Mary's University, Halifax, B3H3C3, Canada

** Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan

Abstract

Measurement of soil heat flux using a thermo-module was examined. The measuring principle is almost the same to a traditional heat flux plate method, however, the measurement accuracy of the temperature difference of the thermo-module is much higher than that of the traditional thermo-pile. It was considered that the utilization of thermo-module allowed to measure the soil heat flux accurately even under the soil layer of small temperature gradients. Relation between the thermo-module output and one-dimensional steady heat flux was examined in agar-gel. As a result, the thermo-module output was proportional to the heat flux in a wide range. Using this relation, the soil heat flux in a field was determined. In order to confirm the reliability of the thermo-module method, the heat storage flux in soil layer was compared between the thermo-module method and the calorimetric method. Both results corresponded closely. These showed that the thermo-module method was effective as the heat flux meter.

Key words : thermo-module, heat flux plate method, soil heat flux, field measurement

1. はじめに

土壌の熱フラックスは、耕地における熱収支を把握するうえで、重要なパラメータであり、正確な測定が求められる。

土壌の熱フラックスは、熱流板によって測定できる。熱流板は、土壌の温度環境の乱れを防ぐため、土壌の熱伝導率に近いもの、そして小さく薄いものを使うことが望ましいとされる。通常、アクリルなど熱伝導率が既知の薄板に銅-コンスタンタンなどの熱電対を複数回巻いてシールしたものが市販され用いられている。この熱電堆によって温度差を測定し、フーリエ則に基づいて熱フラックスを求めている。このタイプの熱フラックス計は、熱電対1対では熱起電力が約 $40\mu\text{V K}^{-1}$ と非常に小さいので、正確な温度差を測定するために、熱電対の巻数を増やし、熱電堆として測定感度を上げることが不可欠である。

一方、電子冷蔵庫などに用いられるサーモモジュール（ペルチェ素子）は、その熱起電力が極めて大きく、薄板の形状をしている。その測定感度は、サーモモジュールを構成する素子の対数に依存するが、40 mm 角の正方形、厚さ約 5 mm で約 52 mV K^{-1} というものも廉価で市販されている。この感度は、1300 対の熱電対を用いた熱流板と等しい。したがって、サーモモジュールは、微小な温度差を測定でき、温度勾配が小さな土層においても、熱フラックスを正確に測定できると考えられた。また、サーモモジュールが、土壌の熱フラックスセンサーとして利用できることは、Weaver and Campbell (1985) も示唆している。しかし、フィールドにおける測定は行われていない。

そこで、本研究では、サーモモジュールを用いて、耕地における土壌中の熱フラックスを測定し、その有効性を検討することを目的とした。

* セントメリーズ大学工学科 B3H 3C3 ノバスコシア州ハリファックス 932 Robie street

** 山形大学農学部 〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町 1-23

キーワード：サーモモジュール、熱流板法、土壌の熱フラックス、フィールド計測

2. 試料および方法

2.1 サーモモジュールのキャリブレーション

市販のサーモモジュール (CP 1.4-127-10L, Melcor 社, Photo 1) を用いた。サーモモジュール (40 mm×40 mm×5 mm) は写真のように熱電素子を薄いセラミック板ではさんだ形状になっていて側面がむき出しになっている。そこで、これを熱フラックスセンサーとして利用するために、側面をシリコン樹脂 (コーキング剤) で覆い防水して用いた。次に、サーモモジュール出力と熱フラックスとの関係を求めた。

Fig. 1 にサーモモジュールのキャリブレーション装置を示す。試料容器には、発泡スチロール製の箱 (内寸 30 cm×30 cm×20 cm, 厚み 3 cm) を用い、底面にアルミニウム板 (厚み 2 mm) を取り付け付けた。底面から 0, 1, 2, 3, 4 cm に熱電対、底面から 2 cm に 4 つのサーモモジュールを水平に設置した。試料には、寒天ゲル (1%) を用いた。センサーの設置方法およびキャリブレーション装置の組み立ては以下のようにした。まず、熱電対を設置するために、各深さの位置に穴を開けたアクリル板を底面に対して垂直に固定し、それぞれの穴に熱電対を挿入し固定した。ただし、0 cm の熱電対に関しては、エポキシ系接着剤を用いて底面に接着した。その後、試料容器に液状の試料を下面から 2 cm まで入れ、室温でゲル状にし、その表面に 4 つのサーモモジュールを置いた。さらに、液状の試料を底面から 4 cm まで入れ、室温で冷却した。試料がゲル状になったことを確認し、ここに水道水を入れた。この水は、上部の水槽の役割を持つ。この試料容器を下部の水槽にアクリル製の支柱を用いて設置した。上部および下部の水槽に温度コントローラ

(Thermo Minder, TAITEC 社) を取り付け、恒温水槽とした。これらの恒温水によって、試料に定常温度勾配を発生させた。

下部の水槽を 30°C に固定し、上部の恒温水槽の温度を変化させた。その温度条件を Table 1 に示す。各センサーの出力を、15 分間隔でデータロガー (GK-88, (株) イー・エス・ディ) を用いて測定した。温度分布の線形性とサーモモジュール出力の安定性ととの両面からセンサーとしての性能を調べた。このため、定常状態における温度勾配と試料の熱伝導率とによって熱フラックスを算出し、サーモモジュール出力と比較した。試料 (寒天

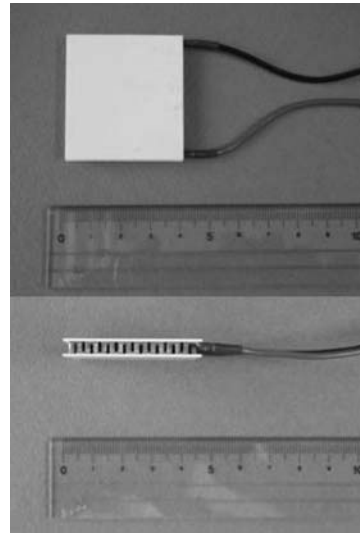


写真-1 サーモモジュール
Photo 1 Thermo-module

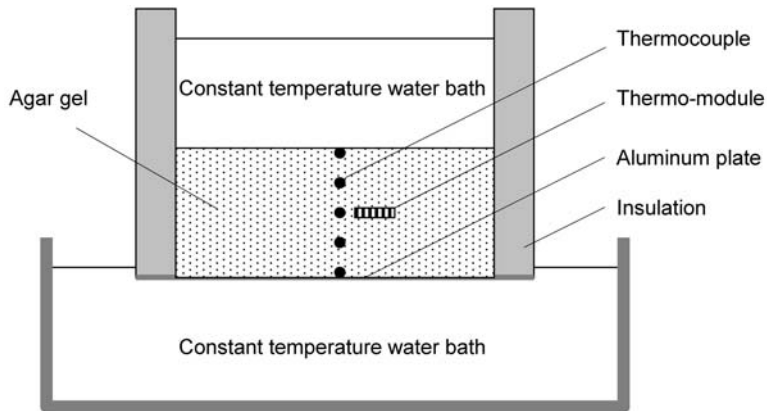


図-1 熱フラックスセンサーとしてのサーモモジュールのキャリブレーション装置
Fig. 1 Apparatus for calibration of thermo-module as a heat flux sensor

表-1 上部および下部の恒温水槽温度

Table 1 Temperatures at the upper and bottom water bath for each experiment

	Temperature at the upper water bath /°C	Temperature at the bottom water bath /°C
Exp. 1	26	30
Exp. 2	28	30
Exp. 3	32	30
Exp. 4	34	30
Exp. 5	36	30
Exp. 6	38	30
Exp. 7	40	30
Exp. 8	45	30

表-2 各土壌層における固相率と土粒子密度

Table 2 Volumetric solid content and soil particle density for each soil layer

Soil layer	V_{-s} / $m^3 m^{-3}$	ρ_s / $kg m^{-3}$
10-20 cm	0.35	2630
20-30 cm	0.43	2630
30-40 cm	0.45	2630

ゲル1%)の熱伝導率には、30°Cにおける水の熱伝導率(0.62 Wm⁻¹K⁻¹, Liley, 1985)を用いた。

2.2 耕地における土壌中の熱フラックス, 温度, 含水量測定

1998年7月19日から7月28日までの10日間にわたり、山形県立農業試験場庄内支場(現・農業生産技術試験場庄内支場)(山形県鶴岡市)の畑圃場(土壌名: グライ低地土, 土性: CL)において、熱フラックス, 温度, 水分量を測定した。深さ10, 20, 30, 40 cmに熱電対とサーモモジュールを設置し、データロガー(GK-88)を用いて15分間隔で測定し、60分毎に平均した。また、同じ深さにTDRセンサー(TRIME-MUX6, IMKO社)を1本ずつ設置し、土壌水分を60分間隔で測定した。各深さにおける固相率(V_s)および土粒子密度(ρ_s)をTable 2に示す。土粒子密度は、ピクノメータ法(Blake and Hartge, 1986)によって測定した。

3. 結果および考察

3.1 熱フラックスメーターとしてのサーモモジュールのキャリブレーション

Fig. 2に定常状態における寒天内の温度分布を示す。温度分布は線形であらわされた。各温度分布の傾き, 切

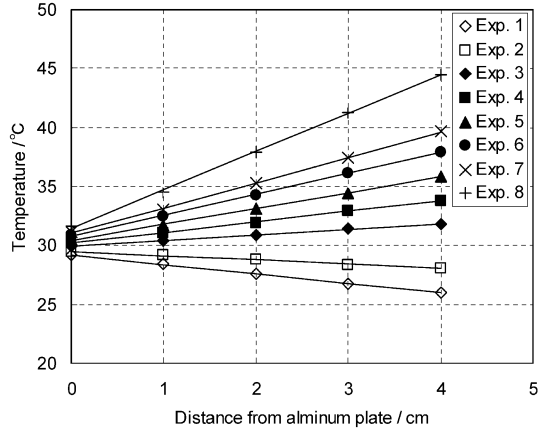


図-2 定常状態における温度分布

Fig. 2 Temperature distribution under steady-state condition

表-3 各実験における傾き, 切片, 相関係数

Table 3 The values of gradient, intercept, and correlation coefficient for each experiment

	Gradient /°C cm ⁻¹	Intercept /°C	Correlation coefficient
Exp. 1	-0.79	29.2	0.999
Exp. 2	-0.36	29.5	0.992
Exp. 3	0.48	30.0	0.998
Exp. 4	0.89	30.2	0.997
Exp. 5	1.34	30.5	0.999
Exp. 6	1.78	30.8	0.999
Exp. 7	2.15	31.0	0.999
Exp. 8	3.25	31.5	0.999

片, 相関係数を Table 3 に示す。寒天内における熱フラックス (q) は, 次式から求めた。

$$q = \lambda \cdot \nabla T \tag{1}$$

ここで、 λ は水の熱伝導率、 ∇T は温度勾配である。この熱フラックスとサーモモジュール出力との関係(キャリブレーション結果)を Fig. 3 に示す。両者は比例関係にあることが明らかとなった。相関係数はすべてのセンサーに対して、0.999 を超えた。各センサーのキャリブレーション結果を Table 4 に示す。

3.2 土壌中における熱フラックス

Fig. 4, 5, 6 に土壌中の熱フラックス, 土壌温度, 体積含水率の経日変化を示す。土壌中の熱フラックスは, サーモモジュール出力を各センサーのキャリブレーション式に代入することによって求めた。計測開始から5日

目 (204 day of year) に、深さ 10, 20 cm の体積含水率は増加した。これは、降雨による影響と考えられる。

Fig. 4 における各深さの熱フラックスの差 ($\Delta q_{\text{thermo-module}}$) は、その層における貯留熱量となる。そこで、サーモジュールによる熱フラックス測定の信頼性を確かめるために、各層 (10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm) の $\Delta q_{\text{thermo-module}}$ を温度積分法による貯留熱量 ($\Delta q_{\text{calorimetric method}}$) と比較した。 $\Delta q_{\text{calorimetric method}}$ は次式で表される。(例えば、粕淵, 1982)

$$\Delta q_{\text{calorimetric method}} = C_p \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \cdot \Delta x \quad (2)$$

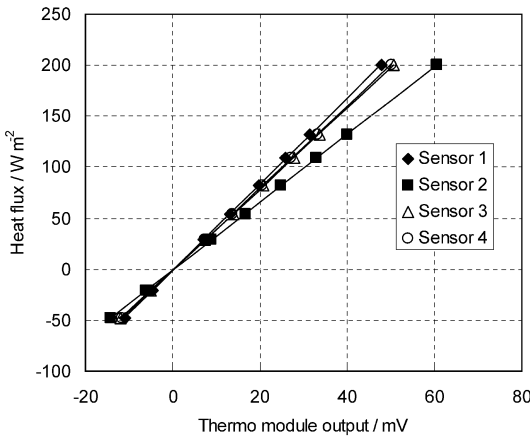


図-3 サーモジュール出力と熱フラックスとの関係
Fig. 3 Relation between thermo-module output and heat flux under steady-state condition

ここで、 C_p は土壌の体積比熱、 T は温度、 t は時間、 x は深さである。 C_p は次式で表される。

$$C_p = C_w \cdot \rho_w \cdot \theta + C_s \cdot \rho_s \cdot V_s \quad (3)$$

ここで、 C_w は水の比熱 ($4179 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; Liley, 1985), ρ_w は水の密度 (997 kg m^{-3} ; Liley, 1985), θ は体積含水率、 C_s は固相の比熱 (752 J kg K^{-1} ; 粕淵, 1982), ρ_s は土粒子密度、 V_s は固相率である。なお、 C_w と ρ_w は、簡便のため、 27°C における物性値を用い、 C_s は、同じ土性を持つ試料の物性値を用いた。 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ (単位時間当たりの温度変化) は次式で近似した。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{([T(x_1, t_1) - T(x_1, t_2)] + [T(x_2, t_1) - T(x_2, t_2)])}{2 \Delta t} \quad (4)$$

一方、 $\Delta q_{\text{thermo-module}}$ は、次式で近似した。

表 4 各センサーに対するキャリブレーション結果
Table 4 The values of gradient, intercept, and correlation coefficient for each sensor

	Gradient / $\text{W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$	Intercept / W m^{-2}	Correlation coefficient
Sensor 1	4.27	-1.40	0.9998
Sensor 2	3.36	-1.21	0.9999
Sensor 3	4.01	-0.96	0.9999
Sensor 4	4.07	-1.11	0.9999

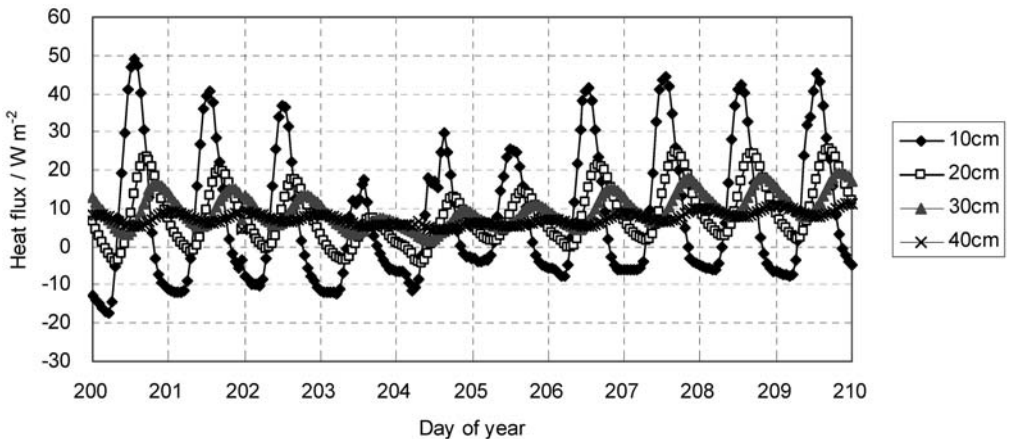


図-4 土壌の熱フラックスの経日変化
Fig. 4 Change in soil heat flux with time

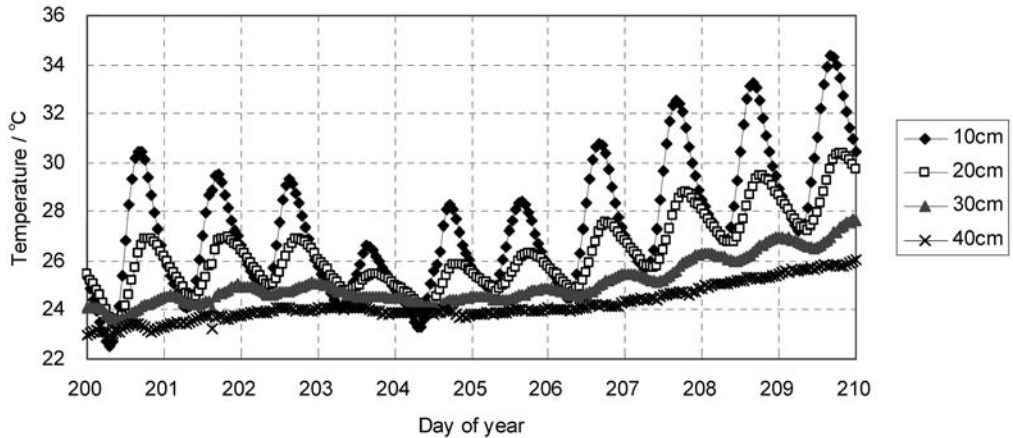


図-5 土壌温度の経日変化
Fig. 5 Change in soil temperature with time

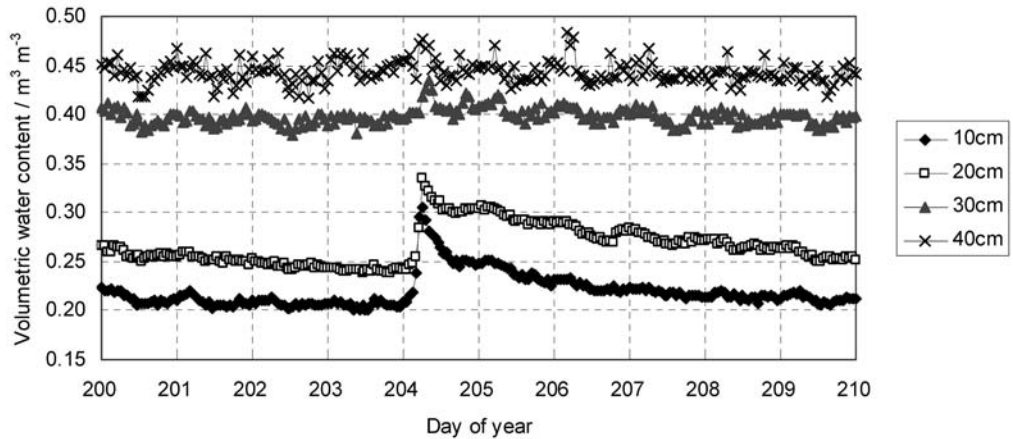


図-6 土壌水分の経日変化
Fig. 6 Change in soil water with time

$$\Delta q_{\text{thermo-module}} = \frac{([q(x_1, t_1) - q(x_1, t_2)] + [q(x_2, t_1) - q(x_2, t_2)])}{2} \quad (5)$$

サーモモジュールと温度積分法とから求めた貯留熱量の比較を Fig. 7 に示す。サーモモジュールによる貯留熱量は、連続した滑らかな周期変化が得られた。一方、温度積分法による貯留熱量は、データのばらつきが大きい。今回の計測で用いたデータロガー（GK-88）の分解能は $2.5 \mu\text{V}$ であるので、熱電対の温度測定の精度は約 0.0625°C となる。これに対し、サーモモジュール（熱起

電力 52 mV K^{-1}) は、熱電対の 1300 分の 1°C の温度差を測定することができる。この違いが、貯留熱量の変化を連続的に捉えられるかどうか大きく影響すると考えられた。これは、サーモモジュールを熱フラックスセンサーとして用いることの利点である。

両測定法による貯留熱量を Root mean square error (RMSE), すなわち、次式を用いて比較した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta q_{\text{thermo-module}_i} - \Delta q_{\text{calorimetric method}_i})^2} \quad (6)$$

ここで、 n はデータ数である。各土壌層における RMSE

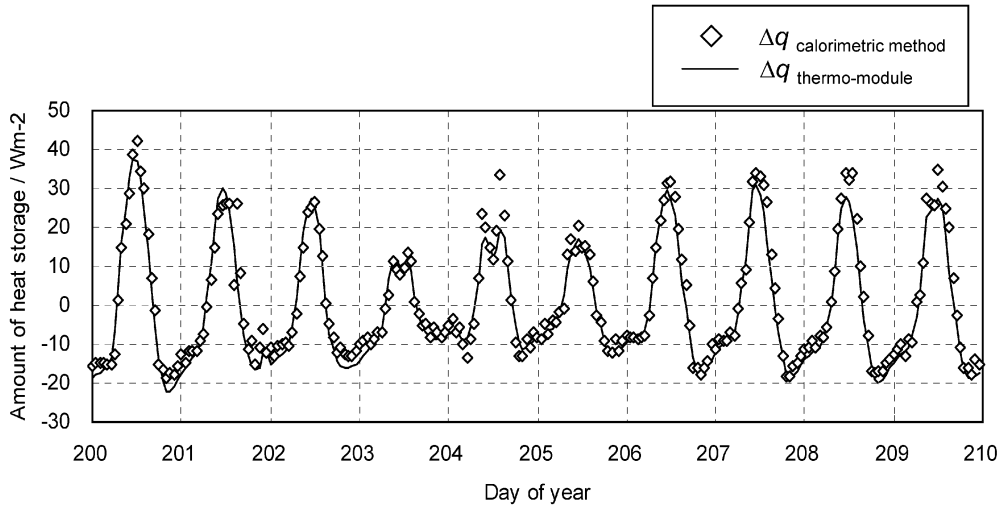


図-7 (a) サーモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (10-20 cm)

Fig. 7 (a) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (10-20 cm)

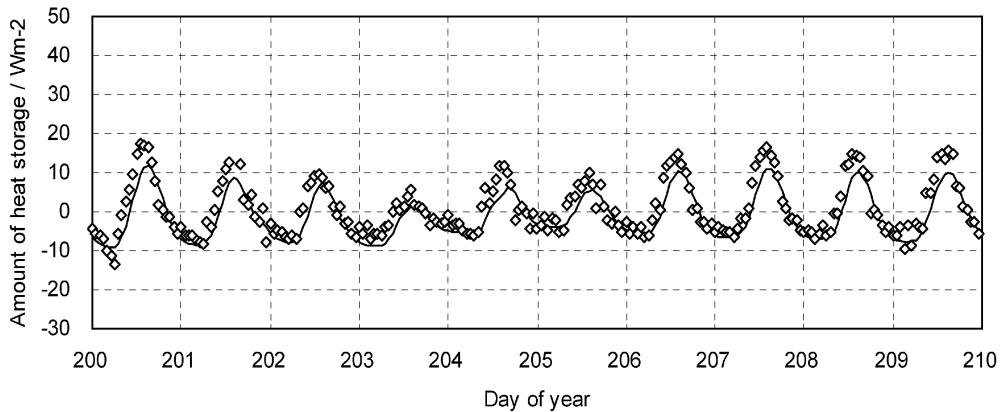


図-7 (b) サーモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (20-30 cm)

Fig. 7 (b) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (20-30 cm)

は、 3.4 W m^{-2} (10-20 cm)、 3.5 W m^{-2} (20-30 cm)、 3.6 W m^{-2} (30-40 cm)であり、深さに関係なく、ほぼ一定の値を示した。このことは、これらの値が、サーモジュールによる貯留熱量に対する温度積分法のばらつきを示していると考えられた。これらの値は、土壌層 10-20 cm における貯留熱量の最大値に対して 10% 程度であり、両測定法による貯留熱量はよく一致したといえる。以上のことから、サーモジュールによる熱フラックス測定が優れた結果をもたらすことを示すことができた。

3.3 サーモジュールによる熱フラックス測定の誤差要因

熱流板による熱フラックス測定は、土壌水移動を遮断するため、降雨直後や地温変化の大きな層では大きな誤差を生じると言われている (岡田, 1983)。確かに、Fig. 7において、土壌層 10-20 cm の降雨日 (204 day of year) における両測定法の貯留熱量の差は、計測期間中で最も大きな値を示した。また、土壌層 10-20 cm および 20-30 cm におけるサーモジュールによる貯留熱量のピーク値は、温度積分法のそれよりも小さい値を示した。これらの結果は、サーモジュールによる熱フラックス測定

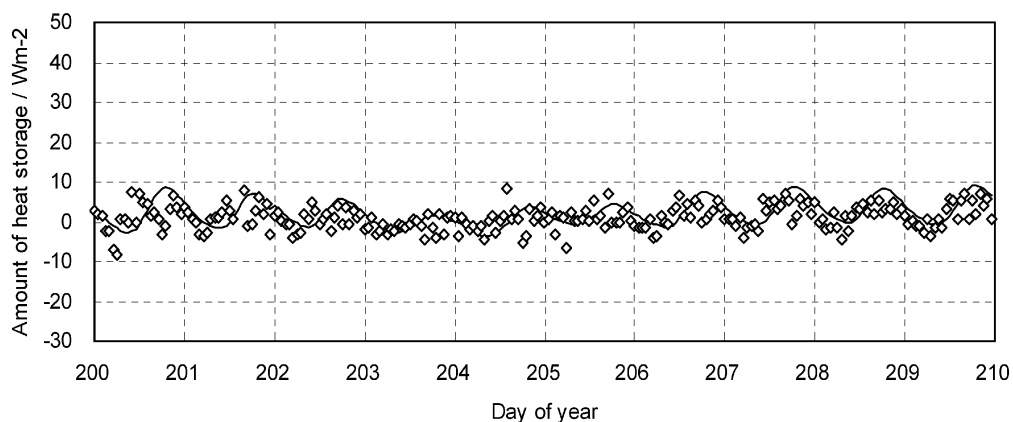


図-7 (c) サーモモジュール法と温度積分法による貯留熱量 (30-40 cm)

Fig. 7 (c) Heat storage fluxes estimated by thermo-module method and calorimetric method (30-40 cm)

もまた、従来の熱流板と同様に、センサー自身が土壌水移動を遮断することによって、誤差を生じる可能性があることを示唆している。

土壌水移動が大きい表層付近では、温度勾配も大きい。このため、本研究で用いたサーモモジュールよりも小さな熱起電力のものを使用することも十分可能である。面積が小さいサーモモジュールを用いることによって、土壌水移動を遮断することによる誤差はさらに小さくできると考えられる。この検討は今後の課題に残された。

4. 結 論

熱フラックスメーターとしてサーモモジュールを用いる方法を検討した。温度勾配下における熱フラックスとサーモモジュールの出力とは、比例関係にあることを明らかにした。この関係式を利用して、土壌中の熱フラックスを測定した。この測定値（サーモモジュールによる貯留熱量）と温度積分法による貯留熱量とを比較した結果、両者はよく一致した。サーモモジュールによる土壌の熱フラックス測定は、熱収支を把握するための有効な

方法となるであろう。

引 用 文 献

- Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986) : Particle density. In : Method of soil analysis ; Part 1-Physical and mineralogical methods, 2nd edn. (ed. A. Klute), pp. 377-379. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Liley, P.E. (1985) : Thermophysical properties. In : Handbook of heat transfer fundamentals, 2nd edn. (eds. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and E.N. Ganic), Chapter 3. McGraw-Hill, New York.
- Weaver, H.L. and Campbell, G.S. (1985) : Use of peltier coolers as soil heat flux transducers. Soil Science Society of America Journal, **49** : 1065-1067.
- 岡田益己 (1983) : 地中伝導熱量の測定. 農業気象, **38** : 419-422.
- 粕渕辰昭 (1982) : 土壌の熱伝導率に関する研究. 農技研報告 B33 : 1-54.

要 旨

耕地における土壌の熱フラックスを測定するための方法を検討した。本方法は、従来の熱流板法とほぼ同じ原理に基づいた測定法であるが、センサーにサーモモジュールを用いるため、測定感度が大幅に改善される。このため、温度勾配が非常に小さな土層においても、精度良く熱フラックスを測定することが可能になると考えた。そこで、1次元の定常熱フラックスを発生させた試料に、サーモモジュールを設置し、キャリブレーションを行った。その結果、広範囲にわたり、熱フラックスとサーモモジュール出力とは比例関係にあることが明らかとなった。この関係式を用いて、耕地における土壌中の熱フラックスを測定した。この値の信頼性を検討するために、熱フラックスと温度積分法とから求めた貯留熱量を比較し、両者は良く一致することを明らかにした。以上の結果、サーモモジュールを用いる熱流板法が有効なことが明らかとなった。

受稿年月日：2007年9月7日

受理年月日：2007年12月4日