

差温式微流速計による水分フラックスの測定

Measurements of Water Flux by Microflowmeter

谷口 真人*・佐倉 保夫**・古藤田一雄***

Makoto TANIGUCHI, Yasuo SAKURA and Kazuo KOTODA

I はじめに

土壌水の水分移動機構は、水分流動の直接測定の困難さからいまだ不明確であるが、これを解明することは、土壌水の水収支や地下水の涵養機構を知る上で非常に重要である。

従来、不飽和帯での水分フラックスは、ポテンシャル勾配と透水係数の測定から両者の積として求めるか、水分量の変化から推定するものがほとんどである。しかし、特に不飽和上の透水係数の決定などは非常に困難をとめない、観測値の信頼性は十分とはいえない場合が多い。また観測密度の点から、変化の速い現象をとらえることも困難であった。

Bensemann(1964)やByrne *et al.* (1967, 1968)は、土壌中の水分フラックスを直接測定するものとして、水の流れに直角に埋設した線状熱源の、下流側と上流側との温度差を測って水分フラックスを求める測器を開発し、飽和流の測定に用いた。またKawanishi(1975, 1976)は、これを不飽和帯に適用し、土壌水の水分フラックスを直接測定した。しかしこれらの測器は、タイムスケールの比較的大きな現象に対して用いられているにすぎず、現象の変化に対する測器のタイムラグを検討して、非定常な現象について議論されていない。

本研究は、土壌水の水分移動機構を解明するための、水分フラックスを直接測定する測器として、Byrne *et al.* やKawanishiの方法にさらに

若干の改良を加えた差温式微流速計を自作し、温度差から水分フラックスの絶対値が得られることを示すとともに、非定常な現象に対する、差温式微流速計の応答特性を明らかにすることを目的とする。

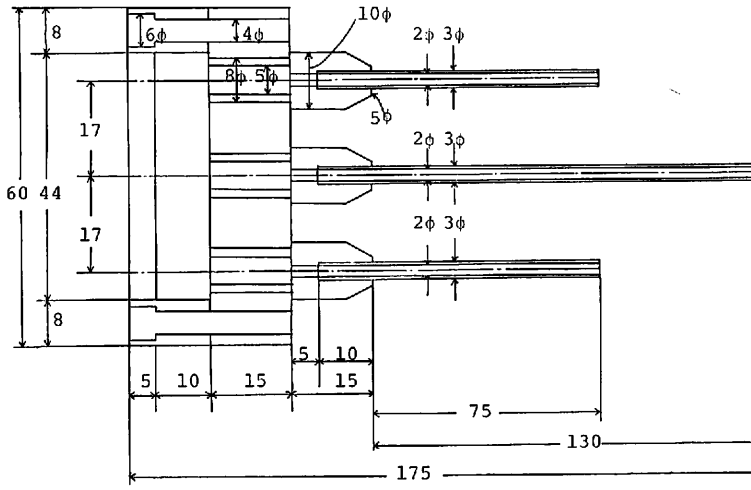
II 差温式微流速計の概要

自作の差温式微流速計の主要構造部分を第1図に、回路およびブロックダイアグラムを第2図に示した。

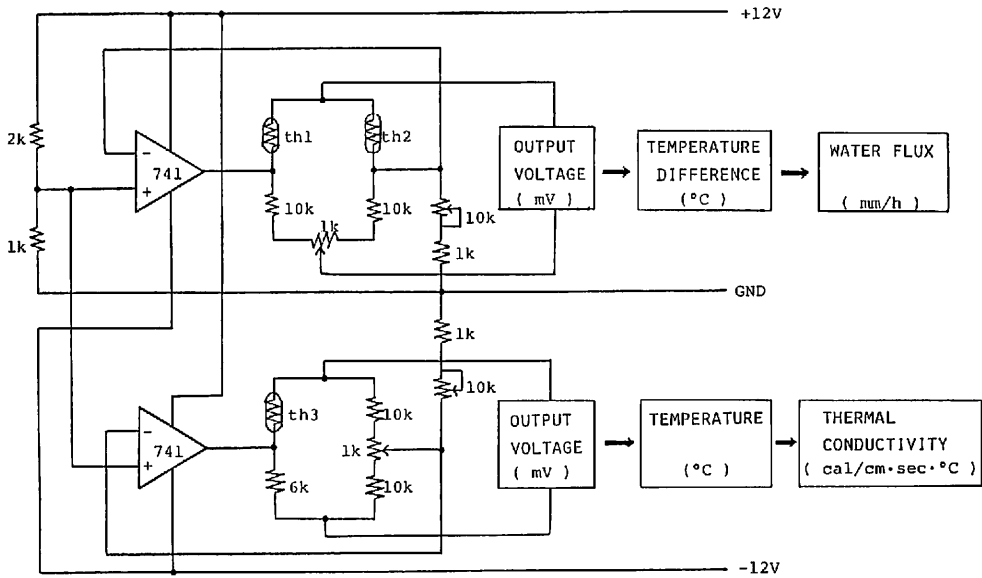
センサー部は、内部にサーミスター(註1)を埋めこんだ、外径3mm、内径2mmの3本のステンレスパイプからなり、パイプの間隔はいずれも1.7cmに固定してある。中央のパイプには線源として、直径0.16mm、長さ30cmのニクロム線を挿入し、これに0.3Aの定電流を流して加熱するようにした。また、サーミスターやニクロム線をステンレスパイプと絶縁させるための方法として、テフロンテープを巻きつけてからパイプ内に挿入する方法を用いた。

測定部は第2図に示すように大きく2つに分けられる。一つは温度差測定部であり、上下2つのサーミスターがブリッジ回路の2辺をなすように組み込まれている。ブリッジ回路へは0.1mAの定電流を流し、抵抗バランスのくずれによる電位差から温度差が測定できるようになっている。測定部のもう一つは温度測定部であり、中央パイプに挿入されたサーミスターの抵抗値の変化から温度が測定される。

* 筑波大学・院・地球科学 ** 千葉大学理学部地学教室 *** 筑波大学水理実験センター (1982年5月8日受理)



第1図 差温式微流速計の構造図



第2図 差温式微流速計の回路図

サーミスター-1とサーミスター-2によって得られる温度差から水分フラックスを、またサーミスター-3によって得られる温度から熱伝導率を、それぞれ得るための理論的基礎を次に示す。

III 理論的基礎

無限長の線状熱源による温度場と、その線源に

直角に流れるフラックス U の定常流を仮定すると、熱伝導の基礎方程式は次のように表わせる (Byrne *et al.*, 1967; Kawanishi, 1975)。

$$(C_s + \theta C_w) \frac{\partial T}{\partial t} K = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \theta C_w u \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(1)$$

ここで

C_s : 土粒子の単位体積当りの熱容量
(cal/cm³・°C)

C_w : 水の単位体積当りの熱容量
(cal/cm³・°C)

θ : 体積含水率

K : 熱伝導率 (cal/cm・sec・°C)

u : 水の流速 (cm/sec)

これを、無限長線状熱源の単位長さ単位時間当りの熱量を q とし、線状熱源の方向を Z 軸とした場合の、点 (x, y) における温度を表わす式に書き換え、さらに定常状態を想定すると、 $t \rightarrow \infty$ の条件により次式が導かれる。

$$T = \frac{q}{2\pi K} e^{\beta z} K_0(\beta r) \dots\dots\dots(2)$$

ここで

$\beta = C_w U / 2K$ (cal/cm²・sec・°C)

$U = \theta u$ (cm/sec)

$K_0(\beta r)$: 0次元の第二種ベッセル関数

$r^2 = x^2 + y^2$

したがって、センサーの下流側の温度 T_1 (サーミスター1) と、上流側の温度 T_2 (サーミスター2) の温度差は次のようになる。

$$T_1 - T_2 = \frac{q}{2\pi K} (e^{\beta a} - e^{-\beta a}) K_0(\beta a) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 a は線状熱源からサーミスターまでの距離を表わす。

よって、上壤の熱伝導率 K と $(T_1 - T_2)$ を測定することにより、 $\beta = C_w U / 2K$ の項の U 、つまり水分フラックスを得ることができる。

また、熱伝導率は、同じセンサーの中央のサーミスターによる温度上昇高を測定する非定常法により、次式で求められる (Buettner, 1955; Blackwell, 1956; Kawanishi, 1964)。

$$K = \frac{q}{4\pi s \log e} \dots\dots\dots(4)$$

ここで

s : Heater の加熱開始からの時間を t とした

時の、 $\log t$ に対するサーミスター3の温度上昇高 (°C)

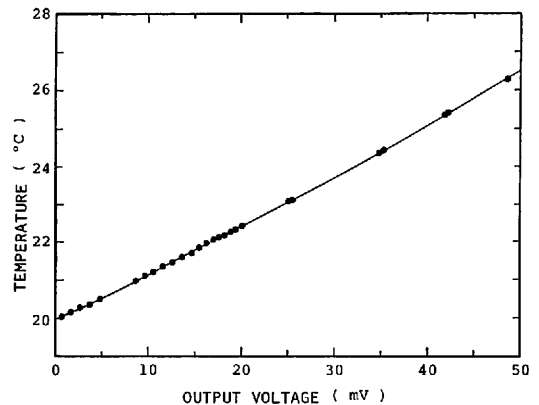
q : 単位時間、単位長さ当りの熱量(註2)
(cal/cm・sec)

IV 検定結果

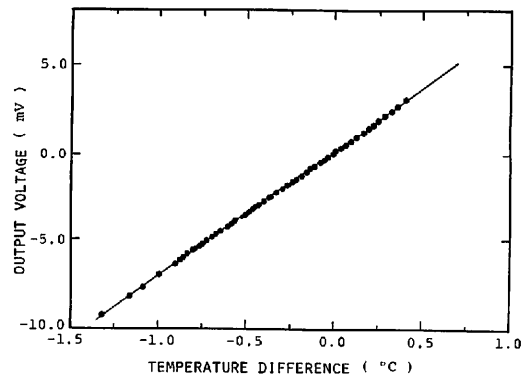
(1) 測器の基礎的検定

マグネティックスター付の恒温槽に、東京電波(株)の水晶温度差計(註3)と自作の差温式微流速計を入れ、温度計(サーミスター3)と温度差計(サーミスター1, 2)の検定を行なった。

温度 (T_3) と出力値の関係を第3図に、温度差 ($T_1 - T_2$) と出力値の関係を第4図に示す。この測器による温度差と出力値の関係は、ほぼ直線で近似でき、再現性も良好であった。また温度と出力値の関係は、2次式でほぼ近似され、第3図に



第3図 温度と出力値の関係



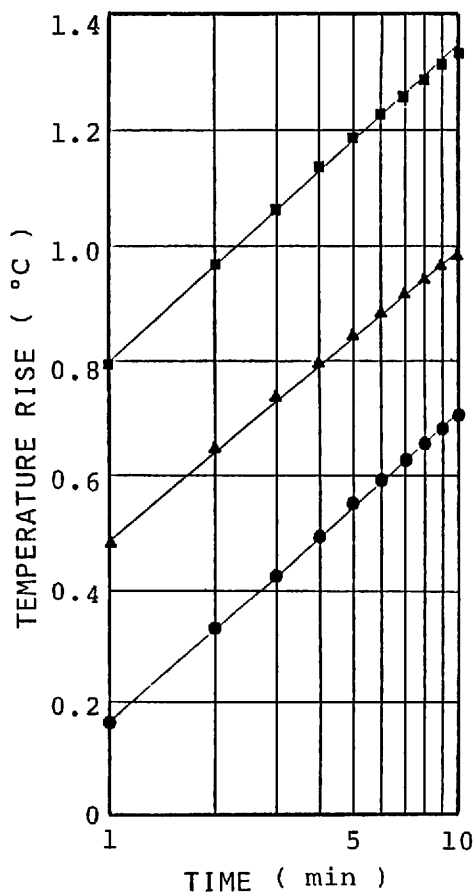
第4図 温度差と出力値の関係

実線で示した。

温度差なしを出力値ゼロとしてとったゼロパランスの、温度依存性を検討した結果、温度差 2°C 以内の測定では、ゼロ点のずれは 0.04mV であった。これは温度に換算すると 0.06°C に相当することから、本実験におけるゼロ点の温度によるずれは無視できる。

(2) 熱伝導率

水分フラックスを得るために必要な熱伝導率は(4)式によって決定されるが、式中 s の決定方法および検定結果を次に示す。第5図はガラスビーズ(注4)を飽和状態にしたコラムに、自作の差温式微流速計を差し込み、中央パイプに埋め込まれたヒーターの加熱開始からの時間と、サーミスター3の温度上昇高を、作製した3つの測器について調

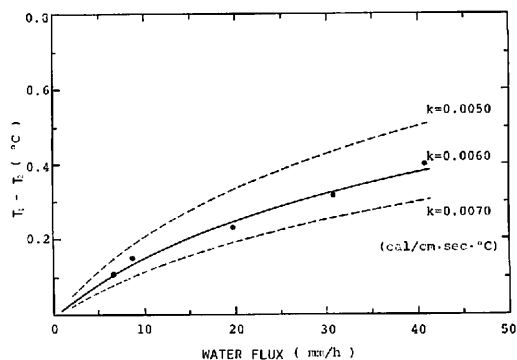


第5図 加熱開始からの温度上昇高

べたものである。(4)式中の s は第5図に引いた直線の傾きに相当し、3つの測器の s の値はそれぞれ 0.520 , 0.505 , 0.525 であった。この値とそれぞれの測器の q の値を(4)式に代入して得られた熱伝導率は 0.00198 , 0.00218 , 0.00203 であり、昭和電工製の迅速熱伝導率計を用いて測定した値 0.00225 よりいくぶん小さいが、ほぼ等しい値を示した。

(3) 温度差と水分フラックス

第6図は、豊浦の標準砂(注5)について行なった降雨浸透実験(注6)により得られた $(T_1 - T_2)$ の実測値と、差温式微流速計の a および q の値を、(3)式に代入して得られた理論曲線を示したものである。 $(T_1 - T_2)$ の実測値は、図に示されているよ



第6図 (3)式から得られた理論曲線と実測値

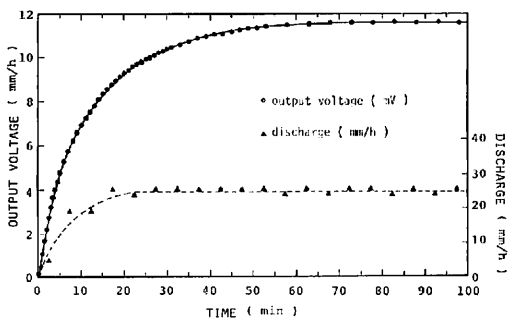
うに、熱伝導率 $K=0.060$ の理論曲線とほぼ一致している。そして、降雨浸透実験において前述の方法で求めた熱伝導率は、決定不可能であった場合を除くと 0.057 から 0.064 の範囲にあり、 0.060 とほぼ等しい値を示した。このことは、前述の方法で熱伝導率が決定されれば、きわめて微小な水分フラックスでも、温度差 $(T_1 - T_2)$ を実測することにより、かなりの精度で水分フラックスが決定できることを示している。

V 非定常特性

差温式微流速計は、IIIで示したように定常流を仮定した測器であるが、非定常な流れに対して、どのように応答するかを調べた結果を次に示す。

(1) パルス変化に対する応答特性

縦15cm横15cm高さ50cmのコラムの中に豊浦の標準砂をつめ、水で飽和状態にし、コラム上端に接続した上部水槽と、コラム下端に接続した下部水槽に水頭差をパルスのにつけ、一定強度の水分フラックスを作った時の、差温式微流速計の出力値と、下部水槽から越流する流出量を図示したのが第7図である。水分フラックスの変化に対して、差温式微流速計による出力値が実際の水分フラックスの絶対値に到達し、一定値を保つまでに

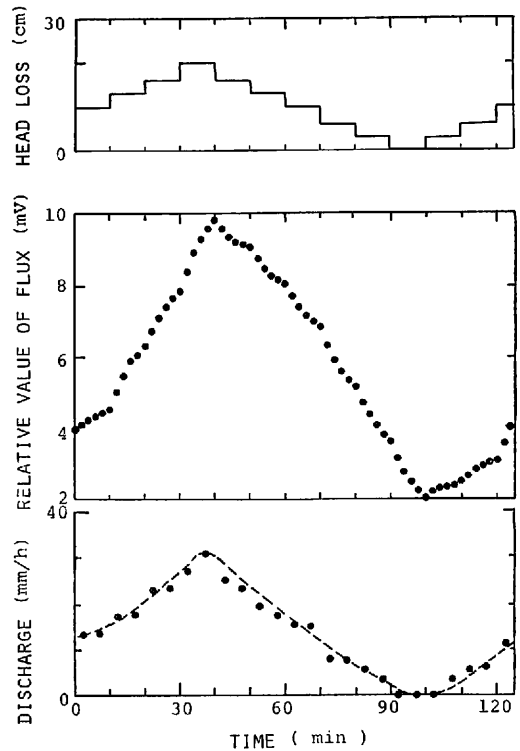


第7図 水分フラックスのパルス状変化に対する応答特性

要する時間は、水分フラックス 0 mm/h から 25 mm/h のパルスの変化に対して約50分であった。ただし、流出量が一定になった後、微流速計の出力値が一定になるまでに要した時間は約30分であった。したがって、この測器によって水分フラックスの絶対値を求める場合、急激な変化に対しては、測器のタイムラグを考慮する必要がある。

(2) ステップ変化に対する応答特性

前述のコラムにおいて、上部水槽と下部水槽の水頭差を10分間隔でステップ状に変化させた時の、差温式微流速計の出力値と下部水槽から越流する流出量を図示したのが第8図である。差温式微流速計の応答をみると、水頭差を変化させると瞬時に出力値も変化する様子が明らかである。このように、差温式微流速計は、水分フラックスの変化を殆んど時間おくれなしでとらえることができるわけであり、非定常流れの変化のタイミングを精確にとらえるのに、きわめて有効であると言える。つまり、この測器を用いて非定常現象にお



第8図 水分フラックスのステップ状変化に対する応答特性

ける変化のタイミングを議論するときは、タイムラグを考慮する必要がないわけである。

VI おわりに

本報では、自作の差温式微流速計について検討してきたが、得られた結論は次のとおりである。

(1) 土壌の熱伝導率が決定されれば、土壌のちがいによらず、温度差から水分フラックスへの変換が可能である。

(2) 水分フラックスのパルスの変化に対して、差温式微流速計の出力値が絶対値（水分フラックスに変換した値）に追いつくのに要する時間は、水分フラックス 0 mm/h から 25 mm/h の変化に対して約30分であった。したがって、この測器を用いて水分フラックスの絶対値を議論する場合は、時間に対して水分フラックスの変化が比較的小さい現象を扱うのが、より有効である。

(3) 水分フラックスのステップ状変化に対する差

温式微流速計の応答はほとんど瞬時であり、水の流動を時間おくれなしでとらえることができる。つまり、差温式微流速計は、非定常流れの現象をとらえるのに有効な測器であるといえる。したがって、この測器は水分移動開始時刻や、水分フラックス一定状態からの変化開始時刻など、水分流動の変化のタイミングをとらえるのに有効である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、本研究に入る端緒を与えられた筑波大学地球科学系の榎根勇教授・高山茂美教授に深く感謝致します。また実験に際し、数多くの助言と御指導を頂いた水理実験センターの泉耕二氏、地球科学系の田中正講師、開発一郎技官に厚く御礼申し上げます。さらに、実験施設および研究の場を快く提供して下さった筑波大学水理実験センターの方々に感謝致します。

注

- (1) 使用したサーミスターの電気抵抗は、 0°C で $15\text{k}\Omega$ 、 100°C で $0.5\text{k}\Omega$ を示し、 B 値は 3400 であった。
- (2) 本実験ではヒーターに 0.15mA の定電流を流して、一定熱量を与えた。
- (3) 測定誤差 0.05°C 、分解能 0.001°C 。
- (4) 粒径 0.066mm 、間隙率 38.9% 、真比重 2.50 。
- (5) 粒径 0.17mm 、間隙率 40.6% 、真比重 2.59 。
- (6) 供試土をつめたコラムに差温式微流速計を埋設し、土壌表面に一定強度の雨を降らせ、不飽和での微流速計の検定を行なった実験。詳細は、谷口真人 (19

82) を参照のこと。

文 献

- 谷口真人 (1982) : 毛管水帯を考慮した不飽和鉛直流に関する実験的研究。筑波大学自然科学類卒業論文 (未公表)。
- Benseman, R. F. (1964) : A microflowmeter for use with water. *Jour. Sci. Instr.*, **41**, 100 - 101.
- Blackwell, J. H. (1965) : The axial-flow error in the thermal-conductivity probe. *Canad. Journ. Phys.*, **34**.
- Buettner, K. (1955) : Evaluation of soil heat conductivity with cylindrical test bodies, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **36** (5), 831 - 837.
- Byrne, G. F., Drummond, J. E. and Rose, C. W. (1967) : A sensor for water flux in soil "Point source" instrument. *Water Resour. Res.*, **3**, 1073 - 1078.
- Byrne, G. F., Drummond, J. E. and Rose, C. W. (1968) : A sensor for water flux in soil 2. "Line source" instrument. *Water Resour. Res.*, **4**, 607 - 611.
- Kawanishi, H. (1964) : On the measurements of the thermal conductivities under the ground. *Res. Bull. Oita Univ.* **2**(4), 21 - 40.
- Kawanishi, H. (1975) : A microflowmeter for soil water in unsaturated zone. *Res. Bull. Oita Univ.* **4**(5), 17 - 27.
- Kawanishi, H. (1976) : Vertical flux of soil water as observed with microflowmeter. *Res. Bull. Oita Univ.* **5**(1), 5 - 14.