

差温式微流速計の不飽和浸透流計測への適応性に関する研究

名古屋大学大学院 ○佐藤 誠
 名古屋大学工学部 正会員 松林宇一郎
 名古屋大学工学部 正会員 高木 不折

1 はじめに 流域に降った雨はどのような流出過程を経て流域末端へ到達するのを知ることが、水文学の上で重要な課題であり、今日まで多くの研究がされている。これらの中には、流域全体を対象とした巨視的、長期的な流れのとらえ方をしているものが多い。本研究では熱をトレーサーとして、局所的な流れをとらえる差温式微流速計を製作した。これを用い自然斜面へ適用する際、含水率や熱伝導率などのパラメータの影響を明らかにし、熱伝導率などの測定上の問題点を解明し、さらに測定精度の向上、流れの方向の推定法の確立を検討する。

2 差温式微流速計の概要 差温式微流速計の原理は、流れの中に熱を与えたとき熱の広がり方が流れにより歪められることを利用し、熱源からある程度はなれた地点の温度により流速を推定するものである。図1に示すようにZ軸に沿う無限長の線状熱源を考え、その線状熱源に直角に流れるX軸に沿う定常流(Darcy Flux)を仮定すると熱伝導の基礎方程式は次のように表せる。

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

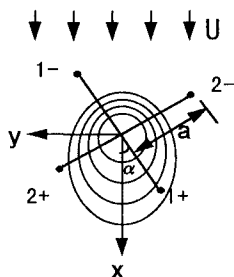


図1 熱源付近の温度場

測定時間を短くするために各プローブの温度差の時間変化を用いる。

$$\frac{d\Delta T_1}{dt} = \frac{q}{4\pi K t} 2 \sinh(\beta \alpha \cos \alpha) e^{-\frac{a^2}{4kt} - \beta^2 kt}, \quad \frac{d\Delta T_2}{dt} = \frac{q}{4\pi K t} 2 \sinh(\beta \alpha \sin \alpha) e^{-\frac{a^2}{4kt} - \beta^2 kt} \quad (2)$$

C_s, C_w : 土粒子, 水の単位体積当たりの熱容量 ($\text{cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$); u : 実質流速 (cm/sec)

θ : 体積含水率 (cm^3/cm^3); K : 熱伝導率 ($\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C})$); $r^2 = x^2 + y^2$

$\beta = C_w U / 2K$ ($1/\text{cm}$); $U = \theta u$: 断面平均流速 (cm/sec); $k = K / (C_s + \theta C_w)$ (cm^2/sec)

3. 差温式微流速計の構成 差温式微流速計の主要部分は、図2の通りである。それぞれのパイプの内部には、温度測定用のサーミスターが埋め込んである。サーミスターは熱に対して非常に敏感に抵抗値が変化する抵抗体である。中央パイプにはサーミスタと熱源として電気抵抗が 6Ω で、直径 0.32mm 、長さ 30cm のニクロム線を挿入してある。これに 0.3A の定電流を流して熱源とする。プローブ間の温度差をブリッジ回路で電圧差に変換し測定する。

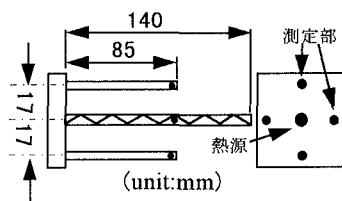


図2 差温式微流速計の主要構造部

4. 土壌特性と熱伝導率 今回用いた微流速計の諸元及び砂、水の物理量を次に示す。

$q = 0.0074$ ($\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{sec})$); $a = 1.7$ (cm); $C_s = 0.2$ ($\text{cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$); $C_w = 1.0$ ($\text{cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$)

微流速計で使用するパラメータのうち水や土の熱容量は、物質特有の値であり状態によって変化しない。

しかし熱伝導率 K は、含水率や土の単位体積重量などの土壌特性と何らかの関係があると考えられる。そこで、水が静止状態での中央熱源の温度変化を調べる非定常法によりこれを求めた。

$$K = \frac{q}{4\pi s \log e} \quad (3)$$

s : 加熱開始からの時刻を t とした時の $\log(t)$ に対する中央熱源の温度上昇高 ($^{\circ}\text{C}$)

しかし, s の値にばらつきがあったので, 体積含水率 θ , 乾燥単位体積重量 γ_d との関係調べ,
 $s = -1.42\theta - 0.504\gamma_d + 1.37$ とした。

5. 不飽和浸透流速の計測 直径10cmの塩化ビニルパイプに水で満たしながら均質に砂を詰め微流速計を差し込んだ。微流速計から5cm下方にはTDRという体積含水率を電氣的に測定できる装置をつけた。水供給は塩ビパイプに注射針を多数取り付けたものを作成し模擬降雨の形で行った。降雨強度はコントロールによって変えることができる。実験の手順は以下の通りである。

- (1) 砂を詰め一定強度で長時間水を散水し定常状態を作る。
- (2) 含水率の変化を観察し, 定常状態になったら中央パイプの熱源のスイッチをいれる。
- (3) 計測時間は30分とし, 1分毎に計測する。
- (4) 実験後カラムを解体し乾燥単位体積重量を求める。

以上の手順で降雨量を変え, 繰り返し実験を行った。

流速の推定値の妥当性を判断する方法として, 計算値と実験値の差の最小2乗和による簡便な方法を用い β を求める。得られた結果をプロットすると図3のようになる。

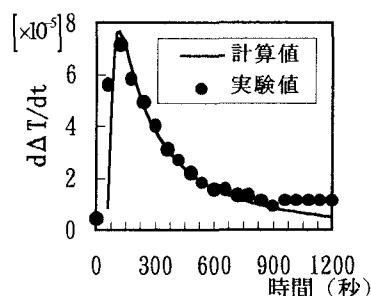


図3 実験値, 計算値

6. 実験結果及び考察 流速ベクトルの推定として実測値に式

(2) を適用して U と α を求めればよい。流速は式(2)と実験結果を同定することで β を求めることにより流速を求めることができる。次に角度 α は式(2)で角度 α が双曲線関数の中にのみ入っていることに着目し, 式(2)の比をとると, 時間の項が消去され簡単な次式となる。

$$\frac{d\Delta T_1}{dt} \bigg/ \frac{d\Delta T_2}{dt} = \frac{\sinh(\beta \alpha \cos \alpha)}{\sinh(\beta \alpha \sin \alpha)} \quad (4)$$

実験からこの比を求めることにより角度を推定する。表1に実験結果を示す。流れの方向がわかっている水分フラックスの計測では精度良く計測できる流速の適用範囲は30mm/hrから90

表1 推定角度, 流速

実際 角度	推定 角度	降雨強度 R (mm/hr)	推定流速 U (mm/hr)	U/R
0	0	75.6	76.3	1.01
0	0	56.0	58.2	1.04
0	0	25.0	15.7	0.63
30	31	75.4	74.0	0.98
30	32	61.3	31.0	0.54
30	28	50.4	74.0	1.47
45	41	68.5	74.0	1.08
45	49	64.5	39.5	0.61
45	46	43.3	42.5	0.98

mm/hrである。この範囲なら誤差10%の精度で計測することができる。角度は, 流速にほとんど影響されずに計測することができる。2組の測定センサーにより得られる温度差の比は, 流速と, 方向角の関数であるが, この比の値は, 流速の変化による影響は方向角による影響に比べ無視できるほど小さい。今後の課題及び改善点として, 流速が30mm/hrより下回る範囲での流速の推定精度の改善, 方向がわからない流れの流速の推定精度の改善, 流速や方向が計測途中で変わるなどの現地観測で考えられる流れの計測方法など検討していきたい。

参考文献

- 1) Kawanishi, H : A microflowmeter for soil water in unsaturated zone. Oita Univ. 1976
- 2) 清水和彦: 差温式微流速計の不飽和浸透流計測への応用に関する研究, 名古屋大学卒業論文, 1995