

九州工業大学 正 員 保里昌平

学生員 ○宅野弘行

学生員 城戸昌司

1. まえがき 熱線式流速計は空気、水などの気体、液体の流速測定に現在広く用いられており、その特徴の一つは微小流速の測定が可能なことである。特にポーラスな媒質中では熱線の加熱による自然対流が発生しにくいので更に微小な流速が測定出来る。この特徴を有効に生かせば浸透流測定には最適である。現在利用されている熱線式流速計の式は L. V. King⁽¹⁾ (1913) が発表した定常解に基づいているのであるが、媒質の熱特性(熱伝導率、温度拡散率、熱容量)が流速測定に影響することの不便さが上げられる。本研究は上述の式を新たに非定常解に改めたことが最大の特徴である。これによれば媒質が流体の場合は原理的に媒質の熱特性に無関係に流速測定が可能である。媒質がポーラスな場合は浸透流体の熱容量の値のみが流速測定に必要であるが、流体が水の場合熱容量は 1000 Kcal/m^3 と既知なので問題はない。実際にガラスビーズに水を浸透させ新しい式の有効性を実験により、とも確かめることが出来たので報告する。

2. 測定理論 等方均質なポーラス媒質中に一様な定常浸透流 V が存在しており、浸透流の流向を x 軸にとれば、熱伝導方程式は次式で表わされる。

$$C\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + C_f \rho_f V \frac{\partial \theta}{\partial x} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

θ は温度、 t は時間であり、 C , ρ , λ は $V=0$ の場合の媒質の比熱、密度、熱伝導率で C_f , ρ_f は浸透流体の比熱及び密度である。今、 x 軸上に長さが無限の直線的線状熱源を考え、時刻 $t=0$ からステップ関数的にこれより一定の熱を放出すると線状熱源からは任意の点の時間 t における温度は(1)式を解いて求められる。その結果は円筒座標 ($x=r \cos \alpha$, $y=r \sin \alpha$) を用いると(2)式となる。ただし、 $t < 0$ の時 $\theta=0$ ($0 \leq r < \infty$) としてある。

$$\frac{4\pi\lambda\theta}{g} = e^{\frac{C_f\rho_f V r}{2\lambda} \cos \alpha} \int_0^\infty e^{-\left(\frac{C_f\rho_f V r}{4\lambda}\right)^2 \frac{1}{\beta} - \beta} \frac{d\beta}{\beta} \quad (2)$$

上式で g は線状熱源の単位長さ当りの発熱量、 β は積分変数、 λ は媒質の温度拡散率で $\lambda/C\rho$ で表わされる。(2)式で V をパラメータとして計算すると図-1 の様になる。 V が大きいほど $(4\pi\lambda\theta/g)$ は一定値に早く収斂し、その大きさも小さくなる。後者の関係は現在使用されている熱線式流速計の基本的原理である。本研究は前者の關係に着目して流速を求めようとするものである。(2)式を変形させれば $\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\lambda\theta}{g} \right)_{t=\infty} = \left(\frac{4\pi\lambda\theta}{g} \right)_t$ なる時に $\frac{r^2}{4kt} = \frac{C_f\rho_f V r}{4\lambda}$ の關係を誘導することが出来る。この時の時間を t_{90} と表わせば、

$$V = (C\rho/C_f\rho_f) (r/t_{90}) \quad (3)$$

となる。特に媒質が流体であれば $C\rho = C_f\rho_f$ であるから(3)式は

$V = r/t_{90}$ となり、 t_{90} は流体が r の距離を移動する時間と一致する。媒質がポーラスな場合は $C\rho/C_f\rho_f$ の値が必要であるが、あらかじめ V が既知の状態では r と t_{90} を求め $C\rho/C_f\rho_f$ を知ることが出来る。それが出来ない時は $C_f\rho_f$ は流体の熱容量で水の場合は 1000 Kcal/m^3 であるから $C\rho$ 値が測定されれば良いことになり $C\rho = \lambda/\kappa$ の關係により λ と κ の値から求められる。その方法は次の様におこなう。(2)式で $V=0$ とおけば、

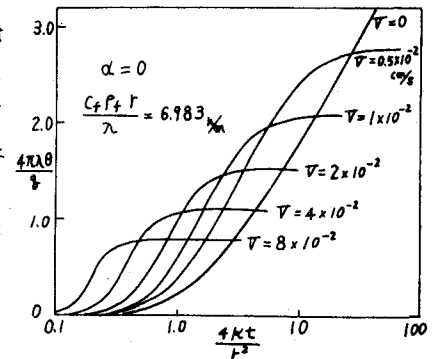


図-1 (2)式の計算結果

$$\frac{4\pi\lambda\theta}{g} = \int_{\frac{r^2}{4kt}}^{\infty} e^{-\beta} \frac{d\beta}{\beta} \quad (4)$$

となり、上式は Van de Held (1948) により提唱された線状熱源による熱伝導率測定法の理論式となる。²⁾ すなわち、図-1 の $V=0$ の曲線が時間 t の増加に従って一定の勾配 ($\ln 10 = 2.3 \dots$) に漸近するので、その範囲に t_1, t_2 を取ればそれぞれの時間での温度 θ_1, θ_2 から λ は次式で求められる。

$$\lambda = \frac{g (\log t_2 - \log t_1) \cdot \ln 10}{4\pi (\theta_2 - \theta_1)} \quad (5)$$

この場合 r が小さいほど早く直線に漸近するため線状熱源自体の温度を利用することになる。次に $V=0$ の時、線状熱源から r の点の温度を測定し $4\pi\lambda\theta/g$ を縦軸に $\log t$ を横軸に取り、図-1 の $V=0$ の曲線と重ねて、 t に対応する $4kt/r^2$ の値が T であらうとすれば λ は次式により求められる。

$$\lambda = Tr^2 / 4t \quad (6)$$

次に流向の測定であるが、測定結果から前述の方法で求めた諸数値が(6)式の等号を満足するように $\cos\alpha$ を求めると α が求まり、 α の符号は異なる α の点で測定された結果と比較して求める。

3. 実験装置及び方法 長さが無限の線状熱源を実際に作ることは不可能であるが、長さが直径に対して十分に長ければ、これを無限とみなすことが出来る。³⁾ 図-2 は長さが45mm、直径が1mmの線状ヒータの中央にマイクロ熱電対を張り付けたもので線状熱源と温度計の両方を兼ね備えている。

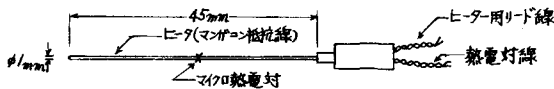


図-2
線状熱源「プローブ」

これを定水位透水試験のモールドの側面に穴をあけ適当な配置になるように何本の挿入し実験をおこなった。媒質には粒径が74~200 μ のガラスビーズを浸透流体には良く脱気した蒸留水を使用した。

4. 実験結果及び考察 $V=0$ の時の測定

結果は、図-3 と図-4 に示される。図-3 より(5)式を用いれば $\lambda = 0.716 \text{ kcal/mhr}$ となり図-4 より(6)式を用いれば $K = 1.04 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ となる。 $V = 1.62 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の時に $r = 0.5 \text{ cm}$ $\alpha = 0$ 及び $r = 0.5 \text{ cm}$ $\alpha = 45^\circ$ の2点の温度の測定結果は図-5 の様になった。 α が異なっても r が等しいため $\ln t$ はほぼ等しい値となっている。(5)式より $V =$

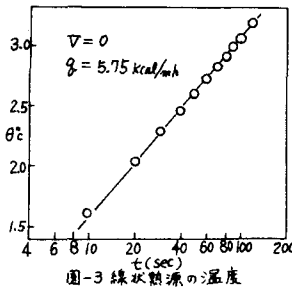


図-3 線状熱源の温度

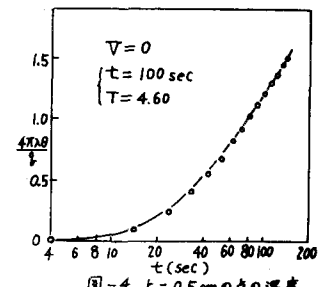


図-4 $r = 0.5 \text{ cm}$ の点の温度

$1.40 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ となり α は 25° 及び 47.7° となった。 V と α は実際とはほぼ等しい値である。種々の V の値に対しても同様の結果が得られた。

5. 結論 本方法によれば 10^{-3} cm/sec 程度の浸透流の流速測定が可能である。流向のみを測定する場合は更に小さな流速 (10^{-4} cm/sec) 程度が可能である。また従来のトレーサを投入する方法に比べて薬品による水質汚濁の問題が無いことも見逃せない長所であろう。現位置地下水調査への応用が期待される。

〔参考文献〕 1). Louis Vessort King; "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid" Phil. Trans. A, vol. 214, 1914.

2). 斎藤武, 岡垣理; 北大工研究報告, 14 (昭31-4)

3). J.H. Blackwell; "Transient-Flow Method for Determination of thermal Constants of Insulating Materials in Bulk." J. Appl. Phys. 25, 1954.

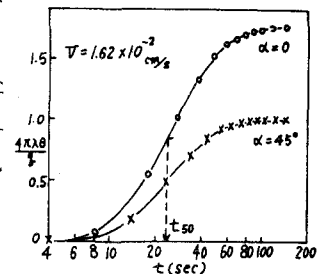


図-5 $r = 0.5 \text{ cm}$ $\alpha = 0$ 及び 45° の点の温度