

JAERI - M
84-231

サーミスター型センサーによる飽和層土壤中の
水流速測定

1985年1月

山本 忠利・斎藤 和明*・武部 慎一・和達 嘉樹

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

サーミスター型センサーによる飽和層土壤中の水流速測定

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
山本 忠利・斎藤 和明*・武部 慎一・和達 嘉樹

(1984年11月30日受理)

飽和層（帯水層）土壤中における放射性核種の移動速度を水の移動速度と関連して評価するため、サーミスター型センサーを用いたパルス加熱検出方式による水流速測定装置を試作し、土壤中における水流速測定に関する基礎的検討を行った。本装置は土壤中にヒーターとセンサーを埋設し、ヒーターにパルス加熱を行い、センサーが検出した温度変化を計ることにより、土壤中の水流速を求めるものである。本測定法により飽和層土壤中の水流速測定が可能であることを確認した。また、測定における最適条件を見出した。

* 現在、三井造船エンジニアリング（株）

JAERI-M 84-231

Measurement of Water Flow Rate in Saturated Soil
by Thermistor Type Sensor

Tadatoshi YAMAMOTO, Kazuaki SAITOH*, Shinichi TAKEBE and
Yoshiki WADACHI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 30, 1984)

In order to evaluate by comparison of the migration rate of water with that of radionuclide in a saturated soil, a measuring apparatus of water flow rate with thermistor type sensor was made for trial and the measurement of water flow rate in the soil was carried out by heat pulse method. The water flow rate can be determined by measuring the change of temperature detected with a thermistor type sensor set in the soil after heating to the state of pulse by a heater. Thus, the water flow rate in the saturated soil was able to measure successfully by this method, and an optimum condition for measurement was also found out.

Keywords : Water Flow Rate, Saturated Soil, Thermistor Type Sensor,
Heat Pulse Method, Ground Disposal, Low Level Waste,
Radionuclide Migration

* Sanzo Engineering Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 測定装置および測定方法	2
2.1 測定装置の概要	2
2.1.1 検出部	2
2.1.2 制御部	2
2.1.3 記録部	3
2.1.4 帯水層槽部	3
2.2 帯水層土壌への通水方法	3
2.3 水の移動に伴う温度変化の検出方法	4
3. 水流速測定条件の検討	8
3.1 ヒーター加熱時間	8
3.2 センサーとヒーターの間隔	8
4. 水流速測定への適用	11
5. あとがき	15
参考文献	15

Contents

1.	Introduction	1
2.	Measuring apparatus and method of measurement	2
2.1	Outline of measuring apparatus	2
2.1.1	Detector	2
2.1.2	Controller	2
2.1.3	Recorder	3
2.1.4	Aquifer layer vessel	3
2.2	Feed water to aquifer layer	3
2.3	Detection of temperature change accompanying with water movement	4
3.	Examination on condition for measurement of water flow rate ..	8
3.1	Heating time of heater	8
3.2	Distance between heater and sensor	8
4.	Application for measurement of water flow rate	11
5.	Remarks	15
	References	15

1. ま え が き

原子力施設から発生する低レベル放射性廃棄物の陸地処分に関する安全性研究の一環として、日本原子力研究所では58年度より環境シミュレーション試験を実施している¹⁾。上記試験は、処分施設から何らかの原因により放射性核種が地中に漏出した場合における核種地中移動の検討を、自然の地層を再現した地中シミュレーション装置により行うものである。

放射性核種の地中移動速度は、これまでの地中モデル装置等の基礎研究から、水の地中移動速度に依存することを確認している²⁾。したがって、放射性核種の地中移動性の評価にあたっては、水の地中移動速度を知ることが必要となる。

飽和層（帯水層）中における水流速の測定には、これまで一般に色素、電解質等のトレーサーによる直接的方法^{3), 4)}、ならびに熱伝対、サーミスター等のセンサーによる間接的方法^{5), 6)}が用いられている。前者は、流体中に化学物質を添加し、その挙動を解析して水流速を求める方法であるので、トレーサーの吸着の問題が生じ、余り好ましい方法とは言えない。

そこで筆者らは、地中シミュレーション装置のうち帯水層用装置の水流速測定法として、吸着等の化学変化が起こらない、サーミスター型センサーを用いた後者の間接的方法をとりあげることとした。そして、パルス加熱検出方式による水流速測定装置を試作し、水流速測定に関する基礎的検討を飽和層（帯水層）土壌について行った。

本測定実験では、土壌中にヒーターとセンサーを埋設し、ヒーターにパルス加熱を行い、センサーが検出した土壌の温度変化を読み取り、飽和層土壌中の水流速との関係を求めた。本報告は、帯水層槽を使用して各種条件下で測定実験を行い、本方式（パルス加熱検出方式）により水流速測定の可能性を調べた結果について述べる。

2. 測定装置および測定方法

2.1 測定装置の概要

本装置は検出部、制御部、記録部および帯水層槽部とから成り立ち、その概要をFig.1に示す。なお、本装置は3チャンネルの同時測定が可能であるが、本測定実験では1チャンネルのみ使用した。

2.1.1 検出部

本検出部はニクロム線ヒーター、サーミスター型センサーおよびある間隔でこれらを固定できるホルダーから成り立ち、その構造をFig.2に示す。

ヒーターは2.1.2の制御部で設定された電流をパルス状に印加して加熱される。センサーはヒーターにより加熱された土壌の温度変化を電気信号に変換する。それらの仕様は以下のとおりである。

1) ヒーター

型 式	ニクロム線 (7 Ω)
絶 縁 管	セラミックス
ヒーターシール材	耐熱シールセメント
保 護 管	ステンレス (5 mm φ)

2) センサー

型 式	サーミスター (10 kΩ / 0 °C)
センサー被覆材	ガ ラ ス
保 護 管	ステンレス (3 mm φ)

3) ホルダー

材 質	ステンレス
ヒーター・センサー間隔	5 ~ 20 mm

2.1.2 制 御 部

本制御部は、ヒーターにパルス状の印加電流を与えるパルス発生器、印加電流を供給する印加電源、センサーで検知した温度を電気信号に変換してレコーダーに出力させる増巾器から成り立ち、パルス時間および印加電流値を変化させられるようになっている。(Photo.1 参照)

それらの仕様を以下に示す。

1) パルス発生器

型 式	コンデンサー型
パルス時間	20, 40, 60, 80, 100 sec

2) 印加電源

型 式	両波整流式
電 圧	DC 12 V
電 流	0 ~ 2 A (独立可変)

3) 増巾器

型 式	IC方式
出力値	0 ~ 50 °C (0 ~ 100 mV) (並列抵抗簡易直線化)

2.1.3 記録部

本記録部は、前記ヒーターの印加パルスおよびセンサーで検知した温度変化を連続的に記録するものであり (Photo. 2 参照)、それらの仕様を以下に示す。

型 式	卓上 2 ペンレコーダー
チャートスピード	2, 6, 8 cm/min & cm/hr
感 度	1, 2, 5, 10, 20, 50 V & × 10 mV

2.1.4 帯水層槽部

本帯水層槽部は帯水層槽、注入ポンプ (0 ~ 50 ml/min)、水タンク (100 ℓ)、および流量計 (0 ~ 50 ml/min) から成り立ち、帯水層槽の仕様を以下に示す。(Photo. 3 参照)

型 式	円筒形
寸 法	66 mm φ × 300 mm L
材 質	透明アクリル樹脂

2.2 帯水層土壌への通水方法

帯水層槽には、飽和層 (帯水層) モデルを人工的に形成させた。このモデルは原研東海研究所敷地内より採取した砂からシルトと粗砂を取り除き、次いで水洗、乾燥した調整砂 (0.25 ~ 0.84 mm) を透明アクリル製の円筒カラム内に充填したものである。土壌の種類による水流速測定の影響については、前記の調整砂の他に、粗砂 (0.84 ~ 1.68 mm) および豊浦砂 (平均 0.22 mm) を使用した。

水の流入は Fig. 1 に示すごとく、水タンクから水をポンプアップし、流量計を通して帯水層槽に注入した。また、帯水層槽内に空気が入り込まないように流出管を立ち上げた。このようにして形成させた帯水層槽の中央に検出部 (ヒーターおよびセンサー) を垂直に差し込んだ。検出部における水流速 v は、槽の内径 D 、水の流量 Q とすると、 $v = Q / \frac{\pi}{4} D^2$ である。

水流速の検量線を求めるにあたっては、検出部における実際の水流速がショートパス等の影響により上記計算式と異なるかどうかを確認しておく必要がある。そこで染料 (ローダミン B) を用いた目視観測による方法および電解質 (HCl, NaCl 等) 添加による電気抵抗変化の検出による方法で水流速を測定し、前記計算式と相違ないことを確認した。

2.3 水の移動に伴う温度変化の検出方法

本測定実験においては、水の流れに対してヒーターを上流側、センサーを下流側に、ある間隔 a で土壌中に設置し、前記 2.2 で示した方法により水流速 v を設定した。次いで、制御部でパルス時間および電流値を設定して、ヒーターに印加電流を流し、センサーで検知した土壌の温度変化を増巾器を通して記録計に記録し、これを読み取った（記録計にはヒーターパルス信号（Fig.3）も記録される）。これらの代表的な温度変化を Fig.4 に示す。加熱してから t_1 秒後に急激に温度が上昇し、 t_2 秒後の最大ピークを経てなだらかに下降する。この図より設定した水流速 v に対応した検出上昇温度 Δh を求めた。

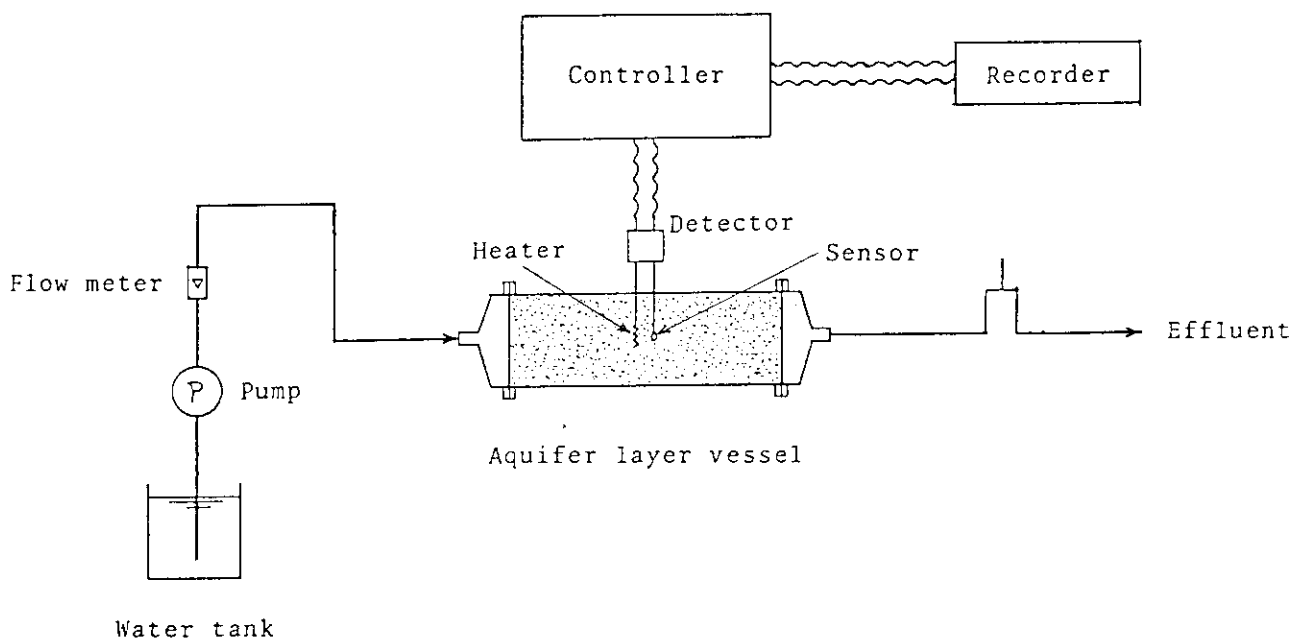


Fig. 1 Schematic illustration of measuring apparatus of water flow rate

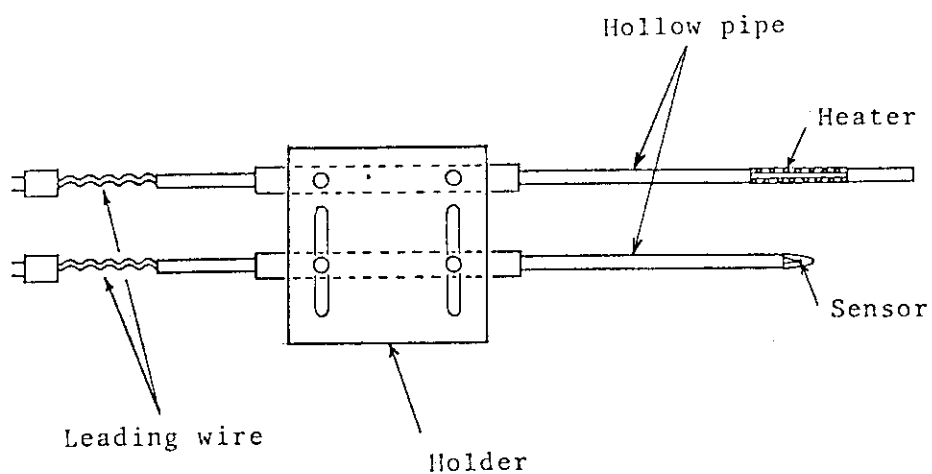


Fig. 2 Structure of detector

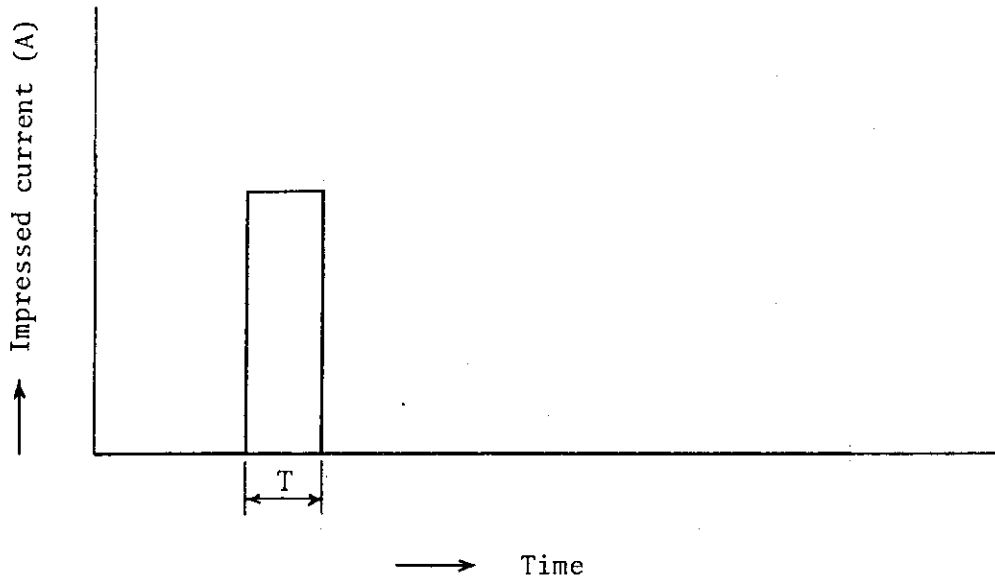


Fig. 3 Pulse signal curve of heater

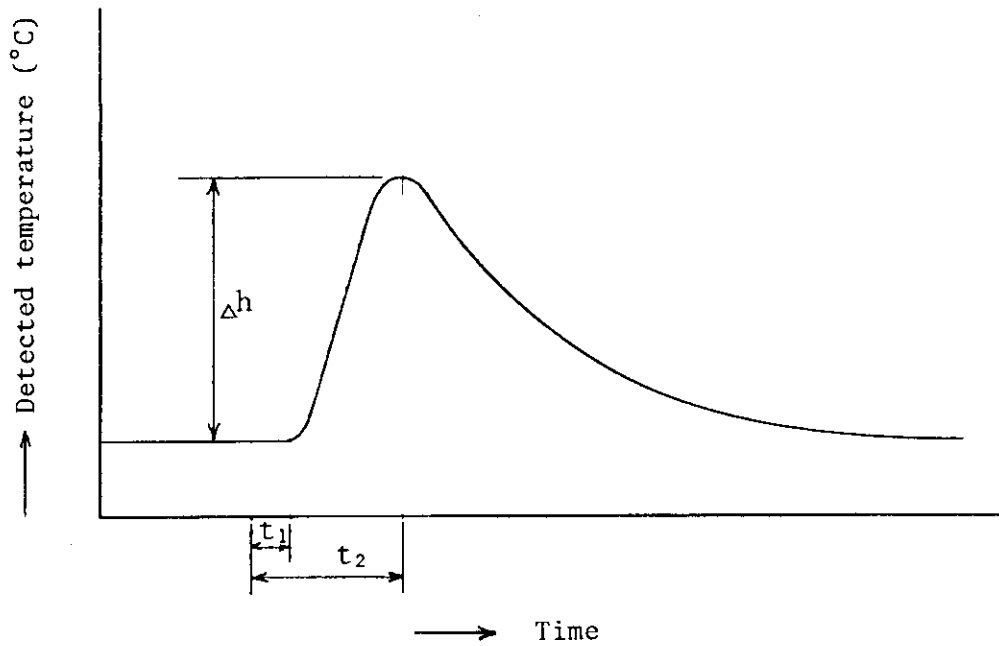


Fig. 4 Temperature curve detected by sensor

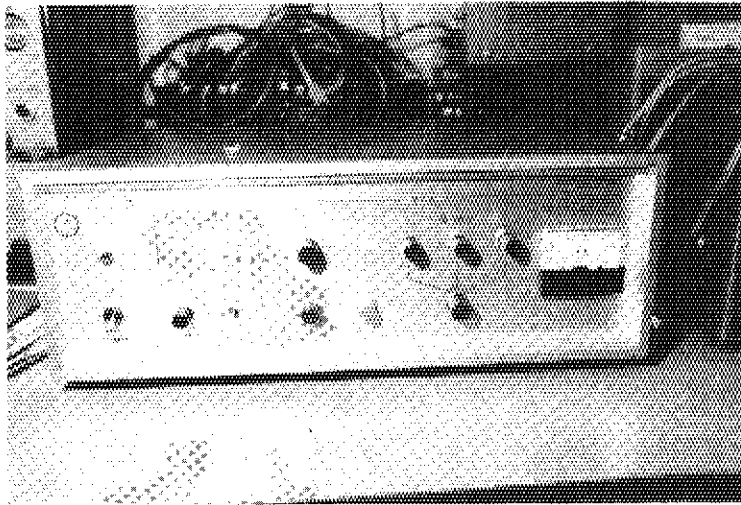


Photo. 1 Controller

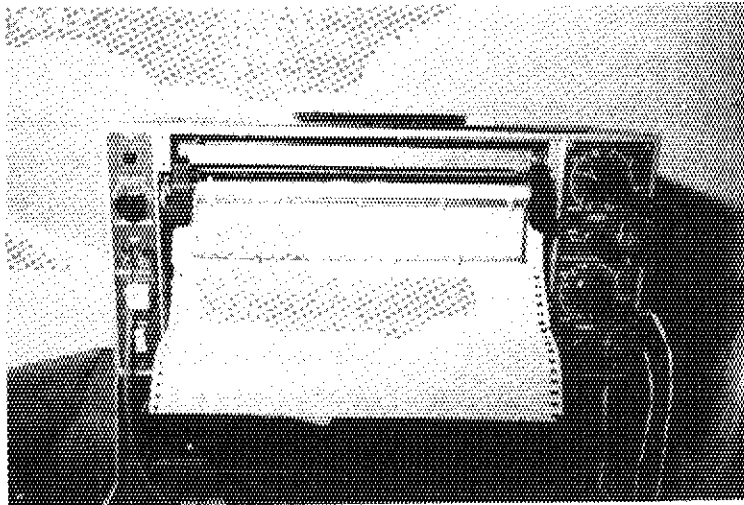


Photo. 2 Recorder

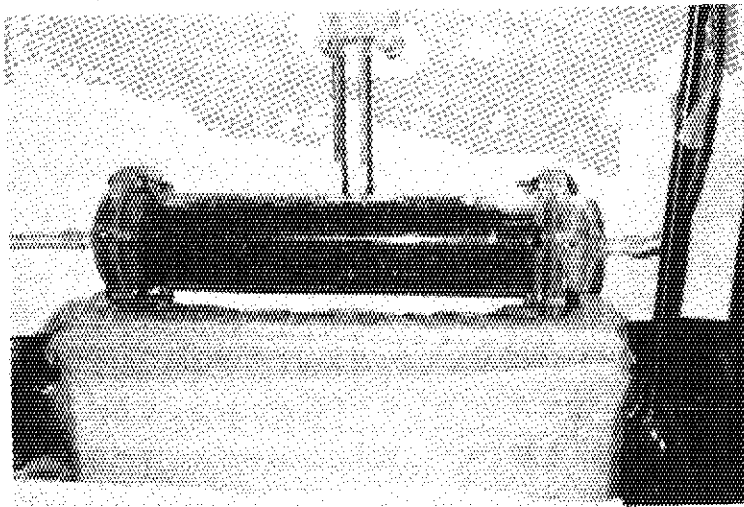


Photo. 3 Aquifer layer vessel

3. 水流速測定条件の検討

水流速 v と検出上昇温度 Δh の関係を支配する因子としては、①ヒーターの加熱時間 T 、②ヒーター加熱電流値 A 、③ヒーター、センサー間の距離 a であり、その他に④土壌の種類も考えられる。

そこで測定条件の検討実験では、②ヒーター加熱電流値(1.5 A)を一定にし、④土壌を原研敷地より採取し調整した砂に限定し、前記の①と③を種々組み合わせて、水流速 v と検出上昇温度 Δh との関係を調べた。

3.1 ヒーター加熱時間

ヒーター、センサー間距離 a を一定($a = 10$ mm)とし、ヒーターの加熱時間 T を5, 20, 60 secと変化させた場合、水流速 v と検出上昇温度 Δh の間には、Fig. 5に示すように本水流速範囲ではそれぞれの加熱時間において比例関係が成り立つことが確認された。この関係は a が5 mm, 15 mmおよび20 mmにおいても同様の結果を示した。その他、この直線の傾きは加熱時間が長くなるに従って大きくなり、各水流速において検出上昇温度は加熱時間に比例することも分かった。

Fig. 5の結果をもとに加熱時間と単位水流速当りの検出上昇温度との関係を示したのがFig. 6である。この図から、加熱時間を増加するほど水流速測定の検出感度を比例的に上げることが分かる。しかしながら、ヒーターの寿命等を考慮すると現実的には加熱時間は20 sec程度が良いものと思われる。この条件($T = 20$ sec, $a = 10$ mm)下では、単位水流速当りの検出上昇温度 $\Delta h/v$ は $0.27^\circ\text{C}/\text{mm}/\text{min}$ となる。

3.2 センサーとヒーターの間隔

3.1と同様に、加熱時間 T を一定($T = 20$ sec)とし、ヒーター、センサー間距離 a を5, 10, 15, 20 mmと変化させた場合、水流速 v と検出上昇温度 Δh の間には、Fig. 7に示すように本水流速範囲ではそれぞれのヒーター、センサー間距離において比例関係が成り立つことが確認された。また、センサーとヒーターの間隔が短くなるに従って、直線の傾きが大きくなることも見出された。この関係は T が5 secおよび60 secにおいても同様の結果を示した。

つぎに、ヒーター、センサー間距離と単位水流速当りの検出上昇温度との関係をFig. 8に示す。この図から、ヒーター、センサー間距離を短くするほど水流速測定の検出感度は急激に上がることが分かる。しかしながら、ヒーター、センサー間距離が短くなるほどその間隙に入る土壌の充填状態の変化が測定に大きく影響してくる危険性があること、また検出部の寸法精度も要求されるため現実的にはヒーター、センサー間距離は10 mm程度が良いものと思われる。

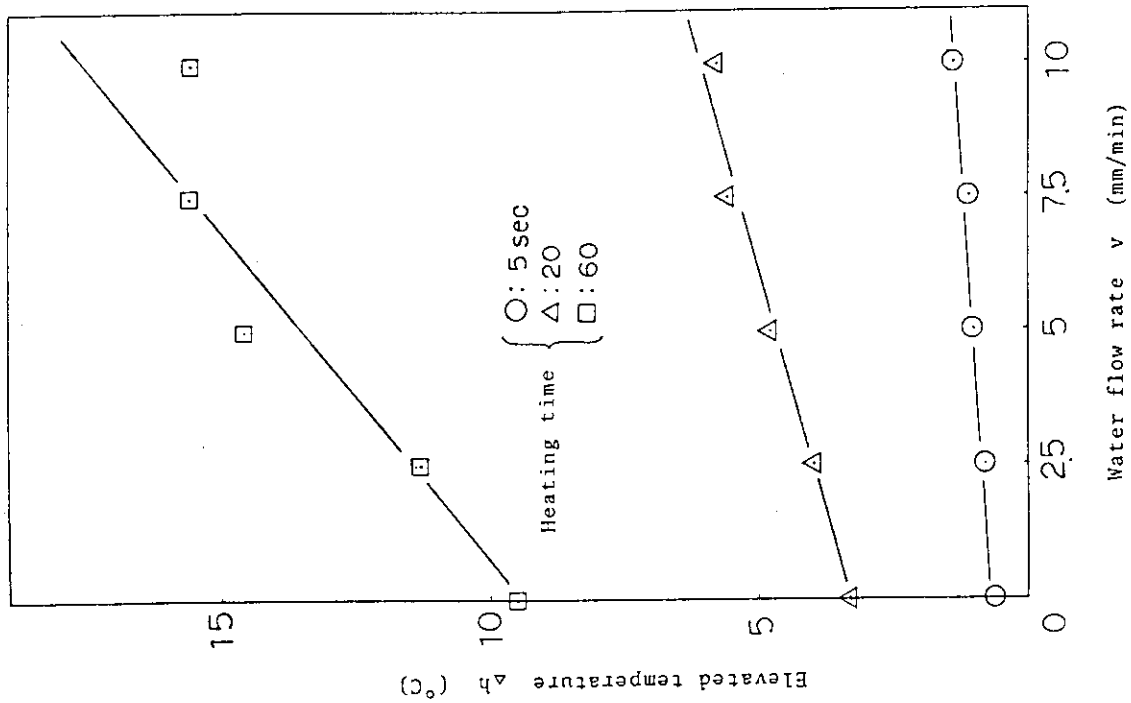


Fig. 5 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different heating times ($a = 10$ mm)

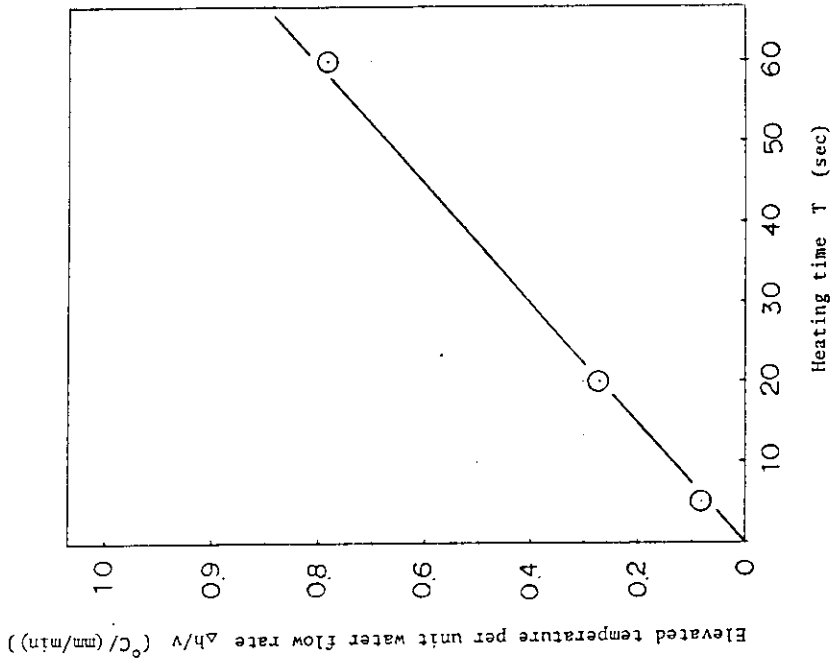


Fig. 6 Effect of heating time on elevated temperature per unit water flow rate ($a = 10$ mm)

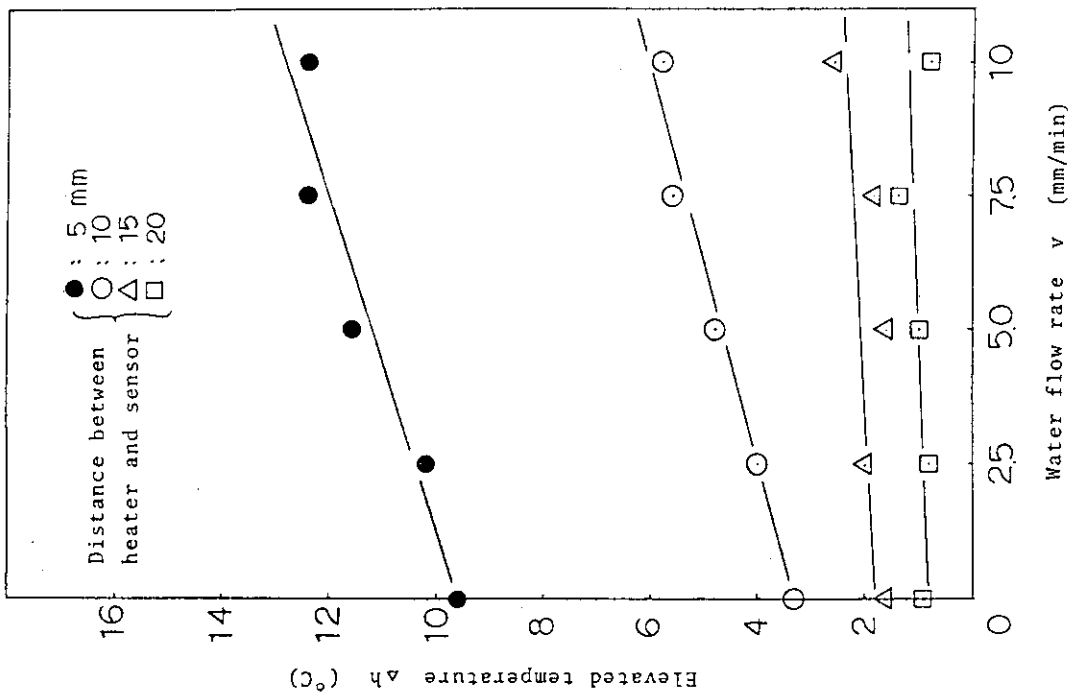


Fig. 7 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different distances (T = 20 sec)

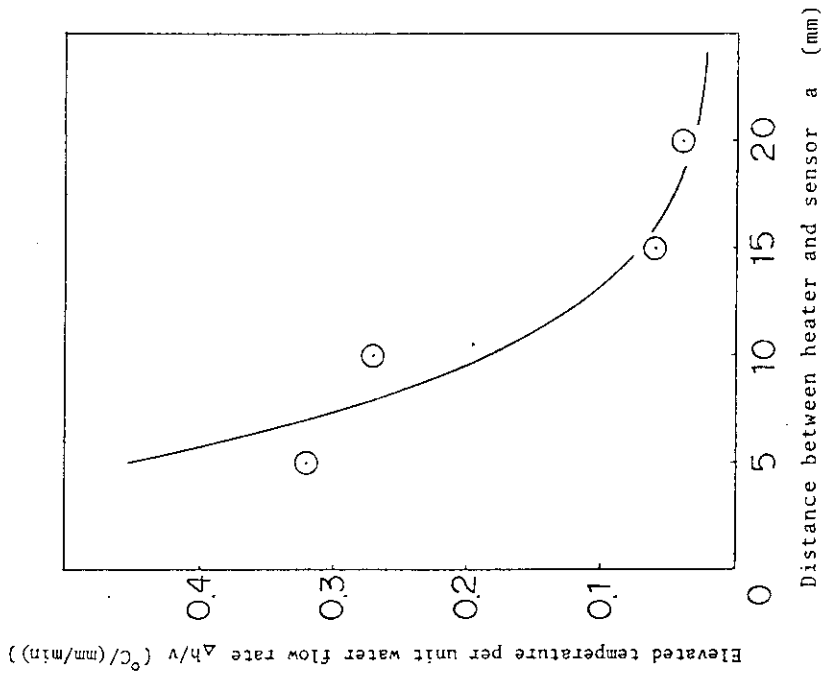


Fig. 8 Effect of distance on elevated temperature per unit water flow rate (T = 20 sec)

4. 水流速測定への適用

以上の水流速測定条件の検討結果より，検出上昇温度 Δh (°C) は，ヒーター加熱時間 T (sec)，ヒーター，センサー間距離 a (mm)，および水流速 v (mm/sec) との間には一般的に下記の関係式が成り立つことが予想される。

$$\Delta h = \frac{\alpha \cdot e^{A \cdot v} \cdot T}{a^B}$$

上記における α ， A および B は土壌の種類および測定条件によって決まる定数である。

いま $\frac{\alpha \cdot T}{a^B} = C$ (一定) と仮定すれば，上記の両辺を対数でとると， $\log \Delta h = A' \cdot v + C'$ ($C' = \log C$) で表わすことができる。

前章の結果を片対数グラフに書き表わすと，Fig. 9~12 となり，それらの値が直線上に乗っていることが分かる。本実験で使用した調整砂について，これらの図から求めた A' および C' の値を T ， a の各条件ごとにまとめたものが Table 1 である。この表から T ， a を設定すれば検出上昇温度 Δh から水流速 v を計算により求めることができる。

さらに，水流速測定に及ぼす土壌の種類の影響について検討を加えた。実験では，調整砂，粗砂および豊浦砂を用いて，水流速 v と検出上昇温度 Δh との関係を求めた。その結果を Fig. 13 に示す。この図から直線の傾きは 1.粗砂 ($A'=0.158$, $C'=1.24$)，2.調整砂 ($A'=0.075$, $C'=1.19$) 3.豊浦砂 ($A'=0.050$, $C'=1.31$)，の順で大きなことが分かる。これは土壌の粒子径の大きさの順 1.粗砂 (0.84~1.68 mm)，2.調整砂 (0.25~0.84 mm)，3.豊浦砂 (平均 0.22 mm) と良く一致している。すなわち，単位水流速当りの検出上昇温度は粒径が大きくなるほど高くなり，土壌の種類に大きく左右される。

Table 1 Calibration curve of sandy soil controlled

Condition during measurement		Value of slope A'	Value of intercept C'
a (mm)	T (sec)		
5	5	0.024	0.79
	20	0.024	2.30
10	5	0.063	-0.37
	20	0.063	1.28
	60	0.063	2.25
15	5	0.041	-0.92
	20	0.041	0.46
	60	0.041	1.63
20	5	0.046	-1.61
	20	0.046	-0.22
	60	0.046	0.85

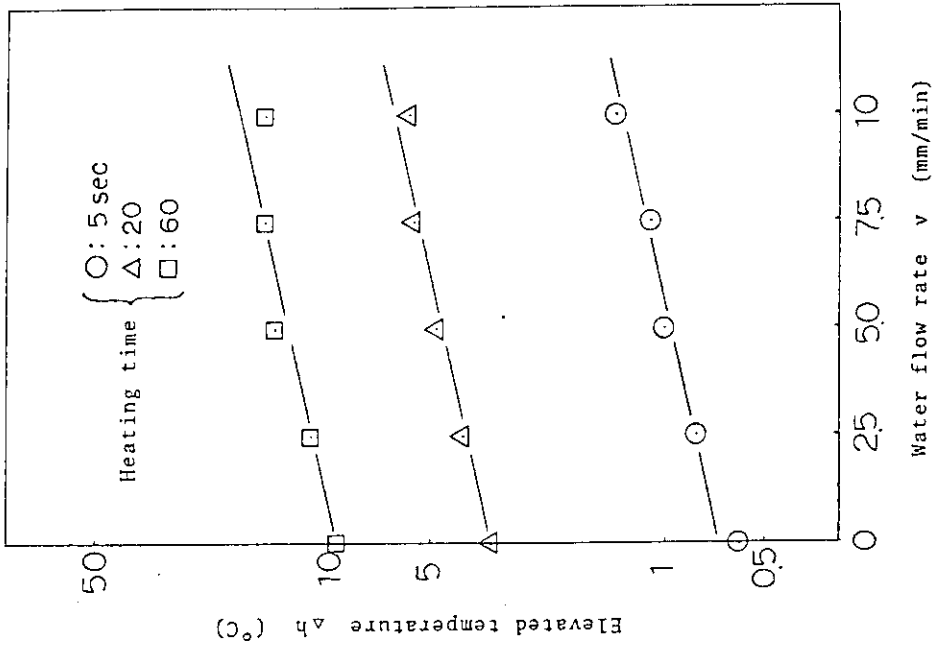


Fig. 10 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different heating times ($a = 10$ mm)

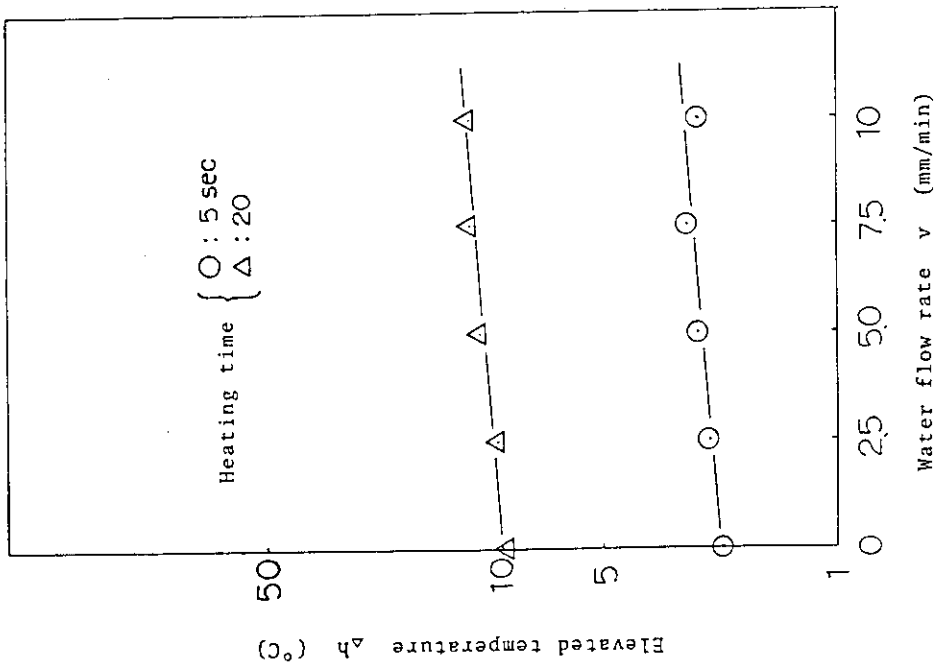


Fig. 9 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different heating times ($a = 5$ mm)

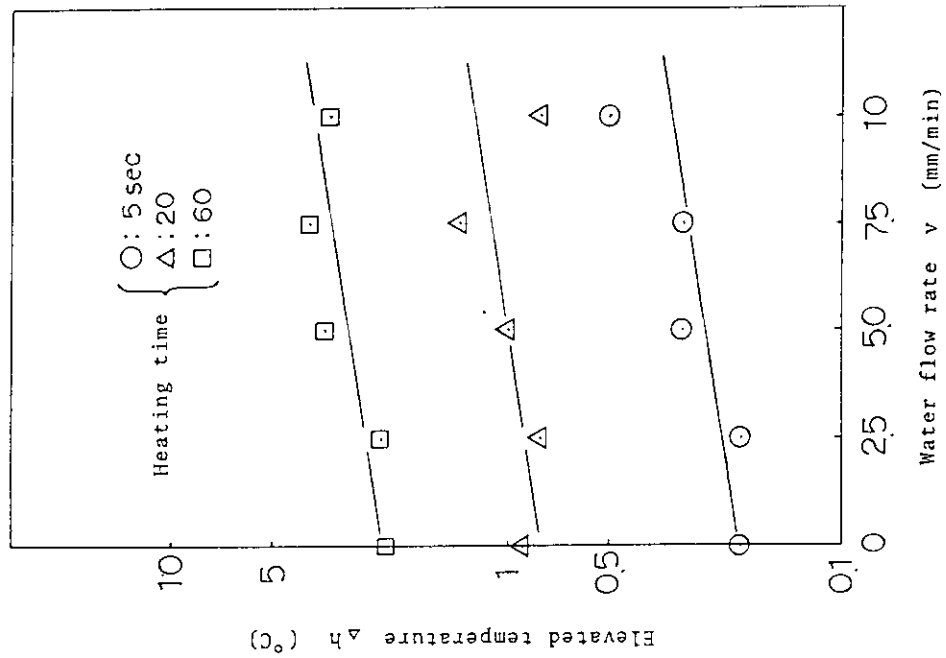


Fig. 12 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different heating times (a = 20 mm)

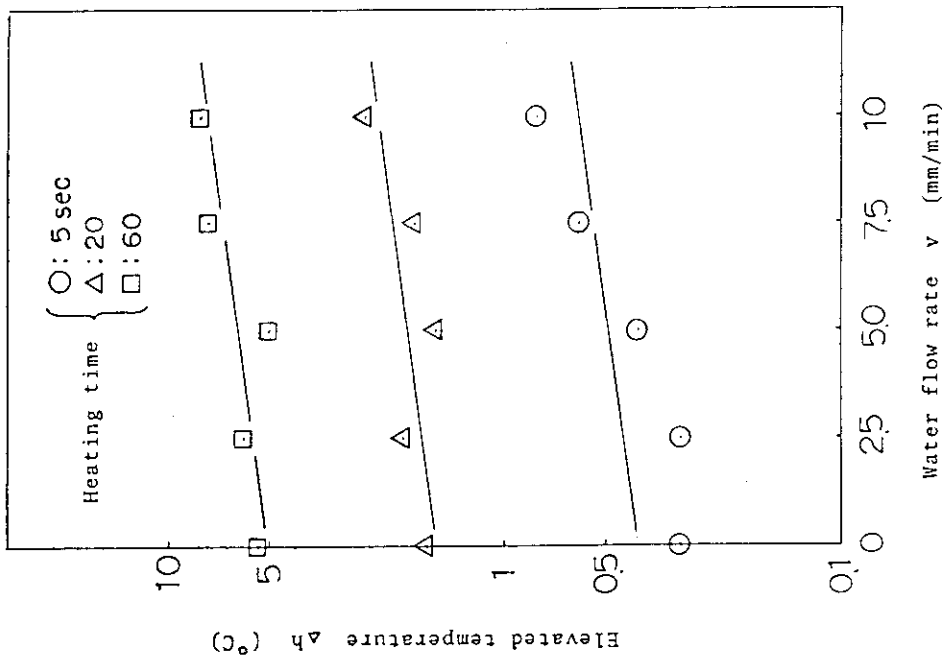


Fig. 11 Relationship between water flow rate and elevated temperature at different heating times (a = 15 mm)

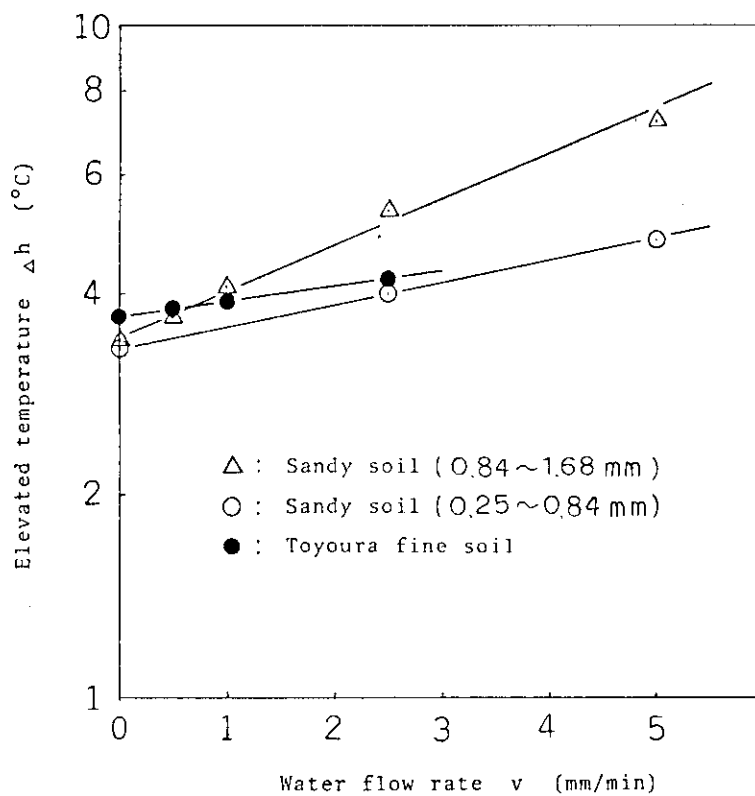


Fig. 13 Relationship between water flow rate and elevated temperature in various soils ($a = 10$ mm, $T = 20$ sec)

5. あとがき

以上の測定実験により、本方式による水流速測定が可能であることが明らかになった。また、測定条件としての重要因子である加熱時間およびヒーター、センサー間の距離についても有効な知見を得た。しかしながら、同一測定条件の下でも検出部の埋設に伴って土壌の充填状態が変化するため、データのバラツキが観察されるという問題点もあった。

したがって、測定精度との絡みから下記に示す内容について今後検討を加える必要がある。

- 1) 検出部埋設くり返しによる再現性の問題
- 2) 低流速範囲 (2.5 mm/min以下)における測定の可能性
- 3) 水流速による温度変化の面積値等の解析法の検討
- 4) センサー 2 本による測定法の検討

参考文献

- 1) 和達嘉樹, 他: 日本原子力学会誌, 24, 182 (1982)
- 2) 大貫敏彦, 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: 保健物理, 18, 11 (1983)
- 3) 落合敏郎: 日本地下水学会誌, 14, 11 (1968)
- 4) 木村重彦: 農業土木試験場報告, 9号, 1 (1980)
- 5) 川西博: 水温の研究, 24, 5211 (1980)
- 6) G. F. Byrne, J. E. Drummond and C. W. Rose: Water Resour. Res., 4, 607 (1968)

5. あとがき

以上の測定実験により、本方式による水流速測定が可能であることが明らかになった。また、測定条件としての重要因子である加熱時間およびヒーター、センサー間の距離についても有効な知見を得た。しかしながら、同一測定条件の下でも検出部の埋設に伴って土壌の充填状態が変化するため、データのバラツキが観察されるという問題点もあった。

したがって、測定精度との絡みから下記に示す内容について今後検討を加える必要がある。

- 1) 検出部埋設くり返しによる再現性の問題
- 2) 低流速範囲 (2.5 mm/min以下) における測定の可能性
- 3) 水流速による温度変化の面積値等の解析法の検討
- 4) センサー 2 本による測定法の検討

参考文献

- 1) 和達嘉樹, 他: 日本原子力学会誌, 24, 182 (1982)
- 2) 大貫敏彦, 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: 保健物理, 18, 11 (1983)
- 3) 落合敏郎: 日本地下水学会誌, 14, 11 (1968)
- 4) 木村重彦: 農業土木試験場報告, 9号, 1 (1980)
- 5) 川西博: 水温の研究, 24, 5211 (1980)
- 6) G. F. Byrne, J. E. Drvmmond and C. W. Rose: Water Resour. Res., 4, 607 (1968)