

JAERI-M

9705

サーミスター型センサーによる
不飽和層土壌中の水流速測定

1981年9月

武部慎一・山本忠利・和達嘉樹

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

サーミスター型センサーによる
不飽和層土壌中の水流速測定

日本原子力研究所・東海研究所環境安全研究部
武部慎一・山本忠利・和達嘉樹

(1981年9月8日受理)

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、不飽和層（通気層）土壌中における放射性核種の移動速度を水の移動速度と対比させて評価するため、サーミスター型センサーを用いた水流速測定装置を試作し、土壌中における水流速の測定を行った。本装置は、土壌内に埋設した数本のサーミスター型センサーを用いて、水の移動に伴う熱伝導度（温度）変化を逐次測定することにより、土壌中水流速を実測する方式を採用している。水流速測定の結果より、土壌中の水分量が比較的低い範囲において、本装置は土壌中水流速の測定が可能であることが分かった。

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

Shinichi TAKEBE, Tadatoshi YAMAMOTO and Yoshiki WADACHI

Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 8, 1981)

As a part of radiological safety studies for ground disposal of radioactive wastes, a measuring apparatus of water flow rate with thermistor type sensor was made as preliminary one and the measurement of water flow rate in the soil was carried out, in order to evaluate by comparison of the migration rate of water with that of radionuclide in an unsaturated soil. The water flow rate can be determined by measuring the change of the thermal conductivity (temperature) of soil around the several thermistor type sensors set in a soil. Particularly at the region of low water content in the soil, the water flow rate was able to measure successfully by this apparatus.

Keywords : Ground disposal, Radioactive Wastes, Radiological Safety Studies, Thermistor Type Sensor, Unsaturated Soil, Water Flow Rate, Water Content, Thermal Conductivity

目 次

1. まえがき	1
2. 水流速測定装置の概要	1
2.1 サーマスター型センサー	1
2.2 定電流加熱電源	2
2.3 パルス変換器	2
3. 土壌中の水流速測定の方法と結果	2
3.1 土壌への水の流下方法	2
3.2 測定データの解析方法	3
3.3 土壌中の水流速測定の結果	3
4. まとめ	4
参考文献	4

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of measuring apparatus of water flow rate	1
2.1 Thermistor type sensor	1
2.2 Heating source	2
2.3 Pulse converter	2
3. Experimental method and results for measurement of water flow rate in soil	2
3.1 Downward flow water in soil	2
3.2 Analysis of measured data	3
3.3 Results for measurement of water flow rate in soil	3
4. Concluding remarks	4
References	4

1. ま え が き

原子力施設から発生する放射性廃棄物を陸地処分するにあたっては、事前に自然環境への影響を評価しておかなければならない。そのため、人工バリアーを通して処分廃棄物から漏出する放射性核種の環境中移行経路の中で、不飽和層（通気層）中での移行について正確に把握する必要がある。

筆者らは、陸地処分の安全性に関する基礎的研究の一環として、安全評価上重要な放射性核種の通気層中移動に関して、小規模および中規模の通気層地中モデル装置により、放射性核種の通気層土壤中における移動、分布状況を調べてきた。^{1)~5)} これらの研究結果から、土壤中における放射性核種の移動速度は水の移動速度にきわめて密接に関係することが分かっている。したがって、放射性核種の土壤中移動実験に際しては、土壤中の水流速を実測できる装置が必要となった。

通気層土壤中の水流速測定には、これまで熱電対、サーミスター等のセンサーを用いた方法、^{6), 7)} および塩、色素、³H等のトレーサーを用いた方法が^{8)~10)} 一般に利用されている他、最近、光、超音波^{11), 12)} および中性子等を用いた方法が開発されている。筆者らは、これらの数多くある方法の中で、化学的吸着を伴わず土壤中の水流速を検知でき、かつ装置の製作が比較的簡単である、サーミスター型のセンサーを用いた測定装置を試作した。本装置は、センサーを土壤内に数本埋設し、水の移動に伴うセンサー自体の温度変化を逐次測定することにより、土壤中の水流速を実測する方式である。

本報では、試作開発したサーミスター型センサーによる水流速測定装置の概要を述べるとともに、不飽和状態土壤中の水流速測定の方法と結果について報告する。

2. 水流速測定装置の概要

本装置は熱線流速計の一種であり、検出器にサーミスター型センサーを使用している。この装置の概要をFig.1に示す。装置全体としては、サーミスター型センサー、定電流加熱電源およびパルス変換器等より構成されている。土壤内の水流速は最大6箇所同時に測定可能である。

2.1 サーミスター型センサー

土壤中の水分量変化に伴うニクロム線ヒーターからの熱伝導度変化（温度変化）をサーミスターにより電氣的に検知できる、大きさが $3\text{ mm } \phi \times 600\text{ mm L}$ である棒状サーミスター型センサーである。水流速の測定にあたっては、あらかじめ水の移動に対して直角に接触するように、6本のセンサーを土壤中に一定の間隔で埋設しておく。使用したセンサーの構造をFig.2

1. ま え が き

原子力施設から発生する放射性廃棄物を陸地処分するにあたっては、事前に自然環境への影響を評価しておかなければならない。そのため、人工バリアーを通して処分廃棄物から漏出する放射性核種の環境中移行経路の中で、不飽和層（通気層）中での移行について正確に把握する必要がある。

筆者らは、陸地処分の安全性に関する基礎的研究の一環として、安全評価上重要な放射性核種の通気層中移動に関して、小規模および中規模の通気層地中モデル装置により、放射性核種の通気層土壤中における移動、分布状況を調べてきた。^{1)~5)} これらの研究結果から、土壤中における放射性核種の移動速度は水の移動速度にきわめて密接に関係することが分かっている。したがって、放射性核種の土壤中移動実験に際しては、土壤中の水流速を実測できる装置が必要となった。

通気層土壤中の水流速測定には、これまで熱電対、サーミスター等のセンサーを用いた方法^{6), 7)}、および塩、色素、³H等のトレーサーを用いた方法^{8)~10)}が一般に利用されている他、最近、光、超音波および中性子等を用いた方法^{11), 12)}が開発されている。筆者らは、これらの数多くある方法の中で、化学的吸着を伴わず土壤中の水流速を検知でき、かつ装置の製作が比較的簡単である、サーミスター型のセンサーを用いた測定装置を試作した。本装置は、センサーを土壤内に数本埋設し、水の移動に伴うセンサー自体の温度変化を逐次測定することにより、土壤中の水流速を実測する方式である。

本報では、試作開発したサーミスター型センサーによる水流速測定装置の概要を述べるとともに、不飽和状態土壤中の水流速測定の方法と結果について報告する。

2. 水流速測定装置の概要

本装置は熱線流速計の一種であり、検出器にサーミスター型センサーを使用している。この装置の概要をFig.1に示す。装置全体としては、サーミスター型センサー、定電流加熱電源およびパルス変換器等より構成されている。土壤内の水流速は最大6箇所同時に測定可能である。

2.1 サーミスター型センサー

土壤中の水分量変化に伴うニクロム線ヒーターからの熱伝導度変化（温度変化）をサーミスターにより電氣的に検知できる、大きさが $3\text{ mm}\phi \times 600\text{ mm L}$ である棒状サーミスター型センサーである。水流速の測定にあたっては、あらかじめ水の移動に対して直角に接触するように、6本のセンサーを土壤中に一定の間隔で埋設しておく。使用したセンサーの構造をFig.2

に示す。センサーの先端部には芝浦電子製NSB型のサーミスターが取り付けられている。その外側にはニクロム線ヒーターが巻き込まれている。測定時には一定の電流がヒーターに供給される。さらにこれらが露出しないようにガラスのコーティングが施こされている。サーミスターとヒーターのリード線はSUS製の保護管の中に挿入してある。センサーの先端部は保護管に接着され、それらは一体となっている。

2.2 定電流加熱電源

サーミスター型センサーのニクロム線ヒーターに一定の電流を供給し、センサー自体を加熱させる電源である。その電気回路をFig.3に示す。本電気回路には各チャンネルに一定電流を供給できるように組み込んでいる。加熱時におけるセンサーの温度は、不飽和状態（土壤中の水分量が比較的低い状態）土壤中における水の移動を測定するので、土壤中に埋設した際、最大50°Cになるように設定した。なお、温度が50°C以上になると、水の局部的蒸発によるボイドの発生が起こり、水流速測定に支障を来す。

2.3 パルス変換器

サーミスターで検知した温度による抵抗値の変化を電圧値に変換し、その検出出力（モニター出力）の変化を微分型のパルス出力として取り出す機器である。Fig.4にパルス変換器の電気回路を示す。パルス状の電圧出力は、土壤中の埋設センサーに接続した各チャンネルに設定電圧値をそれぞれ固定しておき、水の移動に伴う温度変化から生じたサーミスターの電圧変化の中で、設定電圧値以上に検出された範囲を矩形パルスとして各チャンネル毎に取り出す。

その他、水の移動に伴うセンサーの時間的電圧変化、およびパルス状の電圧変化を記録できる記録計（東森電気製D-8-1型）が取り付けられている。

3. 土壤中の水流速測定の方法と結果

3.1 土壤への水の流下方法

水流速測定実験においては、カラムの大きさが50 cm ϕ \times 60 cm hの地中モデル装置（Photo. 1）に不飽和層（通気層）モデルを人工的に形成させたものを使用した。このモデルの形成は、原研東海研究所敷地内より採取した土壤を乾燥した後、空隙率約40%で高さ40 cmまで充填して行った。採取した土壤は密度2.63 g/cm³、モード径350 μ の海岸砂である。

サーミスター型センサーは、2.1において述べたように、Fig.5に示すごとく土壤中の水の移動に対して直角になるように土壤表面から5 cmの深さのところより一定の間隔（5 cm）を置き、水みちを生じないよう配慮して6本埋設した。

に示す。センサーの先端部には芝浦電子製NSB型のサーミスターが取り付けられている。その外側にはニクロム線ヒーターが巻き込まれている。測定時には一定の電流がヒーターに供給される。さらにこれらが露出しないようにガラスのコーティングが施こされている。サーミスターとヒーターのリード線はSUS製の保護管の中に挿入してある。センサーの先端部は保護管に接着され、それらは一体となっている。

2.2 定電流加熱電源

サーミスター型センサーのニクロム線ヒーターに一定の電流を供給し、センサー自体を加熱させる電源である。その電気回路をFig.3に示す。本電気回路には各チャンネルに一定電流を供給できるように組み込んでいる。加熱時におけるセンサーの温度は、不飽和状態（土壌中の水分量が比較的低い状態）土壌中における水の移動を測定するので、土壌中に埋設した際、最大50°Cになるように設定した。なお、温度が50°C以上になると、水の局部的蒸発によるボイドの発生が起こり、水流速測定に支障を来す。

2.3 パルス変換器

サーミスターで検知した温度による抵抗値の変化を電圧値に変換し、その検出出力（モニター出力）の変化を微分型のパルス出力として取り出す機器である。Fig.4にパルス変換器の電気回路を示す。パルス状の電圧出力は、土壌中の埋設センサーに接続した各チャンネルに設定電圧値をそれぞれ固定しておき、水の移動に伴う温度変化から生じたサーミスターの電圧変化の中で、設定電圧値以上に検出された範囲を矩形パルスとして各チャンネル毎に取り出す。

その他、水の移動に伴うセンサーの時間的電圧変化、およびパルス状の電圧変化を記録できる記録計（東森電気製D-8-1型）が取り付けられている。

3. 土壌中の水流速測定の方法と結果

3.1 土壌への水の流下方法

水流速測定実験においては、カラムの大きさが50 cm ϕ \times 60 cm hの地中モデル装置（Photo. 1）に不飽和層（通気層）モデルを人工的に形成させたものを使用した。このモデルの形成は、原研東海研究所敷地内より採取した土壌を乾燥した後、空隙率約40%で高さ40 cmまで充填して行った。採取した土壌は密度2.63 g/cm³、モード径350 μ mの海岸砂である。

サーミスター型センサーは、2.1において述べたように、Fig.5に示すごとく土壌中の水の移動に対して直角になるように土壌表面から5 cmの深さのところより一定の間隔（5 cm）を置き、水みちを生じないよう配慮して6本埋設した。

乾燥土壌を用いた水流速測定実験の場合には、土壌への水の流下はポンプを用いてタンク内の水を汲み上げ、スプリンクラーにより土壌表面に均一散水して行った。なお、含水（不飽和状態）土壌を用いた水流速測定実験の場合には、前記の実験終了後、一昼夜水抜きを行った不飽和層モデルを用いた。使用した含水土壌中における三相分布曲線をFig.6に示す。土壌表面より深さ25 cmまでは土壌中の水分率が10%以下に保持されている。

3.2 測定データの解析方法

土壌中に埋設したサーミスター型センサーより検出される電圧値は、水の流下に伴ってFig.7に示すような曲線および矩形パルスとして記録計に描かれる。

Fig.7のa)は、水が流下する前に一定電流をセンサーに供給し、センサー自体を発熱平衡状態に維持しているとき、検出された時間的電圧変化を示している。b)は、水がセンサー先端部に到達したときの電圧低下の過程を示したものである。このような低下は、水がa)の発熱平衡状態にあるセンサー周辺土壌に浸透すると、センサー自体の熱が奪われ、その結果、センサーの温度が下がったため生じたものである。電圧低下値 ΔH は水の移動速度が速いほど大きくなる。c)はb)の曲線を微分回路を通して矩形パルス（パルス幅0.5 sec）として変換したものである。

土壌中の水流速測定値 v は、次式により求められる。

$$v = \frac{\ell}{t} \quad (1)$$

ここで、 ℓ は土壌表面からセンサーまでの距離（cm）、 t は水の到達時間（min）である。したがって、水の到達時間 t として前記のb)およびc)を基にして読み取った値を用いれば、土壌表面から測定点までの平均水流速 v （cm/min）が計算できる。グラフ（時間的電圧変化）より水の到達時間 t を求めるにあたっては、c)のパルスの方が読み取り易いので、水流速測定実験においてはc)のパルスを記録させた。

3.3 土壌中の水流速測定の結果

水流速の測定実験では、乾燥土壌および含水（不飽和状態）土壌の2種類の土壌について実施した。土壌表面への水の流下は1.0 cm/minの散水速度でスプリンクラーにより行った。なお、カラム内土壌表面における散水速度の均一性はきわめて良好（±10%以下）であった。

乾燥土壌中および含水土壌中における水流速測定の実験結果をTable 1に示す。表中の水流速は土壌表面から測定点までの平均水流速である。乾燥土壌中における水流速の実測値はいずれの測定点においても散水速度より小さな値を示し、深さが増すにつれて速くなる傾向があった。これは、土壌表面近傍では乾いた土壌の粒子表面を薄くとりまくように流れ（一様不飽和流^{13), 14)}、垂直方向への流れの他にまわり込みの流れが起きているため、深部では浸透水が一様に押し出されるためと考えられる。つぎに、含水土壌中における水流速の実測値は、土壌表面近傍では散水速度とほぼ同じ値を示すが、深部では散水速度の約2倍の値を示した。深部におい

ては土壤中に保持されていた水が上部より浸透してきた水により押出される（片寄り不飽和流¹⁴⁾）ので、局部的にピストン現象が生じ、見掛け上、速い水流速が見受けられた。さらに、土壤中の水分量が増加する（飽和状態）と、各測定点の電圧変化（矩形パルス）は部分的に重なり合うので、測定不可能になる。

これらのことから、サーミスター型センサーを用いた本水流速測定方式は、片寄り不飽和流および飽和流が生じていない場合、即ち水分の少ないときの一様不飽和流の場合において有効であることが確認された。

4. ま と め

以上の結果をまとめて以下に示す。

- 1) 乾燥土壤中の水流速は、表面近傍では散水速度より小さく、深部に行くに従って大きくなり、散水速度に近づいた。
- 2) 含水土壌中の水流速は、表面近傍では散水速度とほぼ等しく、深部では水の押し出しによるピストン現象（片寄り不飽和流状態）が現われ、散水速度より大きな値が実測された。
- 3) したがって、本装置は、土壤の水分量が少ないときの一様不飽和流の水流速測定に有効であることが分かった。

今後、土壤の水分量が多いときの不飽和流および飽和流の水流速測定の場合に適用できるような装置を試作開発する必要がある。

おわりに、本研究を行うにあたり、多くの便宜を与えて下さった環境安全研究部の今井和彦部長に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 武部慎一, 松鶴秀夫, 和達嘉樹: JAERI-M 7642 (1978).
- 2) 武部慎一, 和達嘉樹: JAERI-M 8044 (1979).
- 3) 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: JAERI-M 8824 (1980).
- 4) 山本忠利, 武部慎一, 大貫敏彦, 西村敏郎, 和達嘉樹: JAERI-M 9171 (1980).
- 5) 山本忠利, 武部慎一, 和達嘉樹: 保健物理, (投稿中)
- 6) 川西博: 水温の研究, 24, 5211 (1980).
- 7) G.F. Byrne, J.E. Drummond and C.W. Rose: Water Resour. Res., 4, 607 (1968).
- 8) 木村重彦: 農業土木試験場報告, 9号, 1 (1980).
- 9) 落合敏郎: 日本地下水学会誌, 14, 11 (1968).

ては土壤中に保持されていた水が上部より浸透してきた水により押出される（片寄り不飽和流¹⁴⁾）ので、局部的にピストン現象が生じ、見掛け上、速い水流速が見受けられた。さらに、土壤中の水分量が増加する（飽和状態）と、各測定点の電圧変化（矩形パルス）は部分的に重なり合うので、測定不可能になる。

これらのことから、サーミスター型センサーを用いた本水流速測定方式は、片寄り不飽和流および飽和流が生じていない場合、即ち水分の少ないときの一様不飽和流の場合において有効であることが確認された。

4. ま と め

以上の結果をまとめて以下に示す。

- 1) 乾燥土壤中の水流速は、表面近傍では散水速度より小さく、深部に行くに従って大きくなり、散水速度に近づいた。
- 2) 含水土壌中の水流速は、表面近傍では散水速度とほぼ等しく、深部では水の押し出しによるピストン現象（片寄り不飽和流状態）が現われ、散水速度より大きな値が実測された。
- 3) したがって、本装置は、土壌の水分量が少ないときの一様不飽和流の水流速測定に有効であることが分かった。

今後、土壌の水分量が多いときの不飽和流および飽和流の水流速測定の場合に適用できるような装置を試作開発する必要がある。

おわりに、本研究を行うにあたり、多くの便宜を与えて下さった環境安全研究部の今井和彦部長に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 武部慎一, 松鶴秀夫, 和達嘉樹: JAERI-M 7642 (1978).
- 2) 武部慎一, 和達嘉樹: JAERI-M 8044 (1979).
- 3) 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: JAERI-M 8824 (1980).
- 4) 山本忠利, 武部慎一, 大貫敏彦, 西村敏郎, 和達嘉樹: JAERI-M 9171 (1980).
- 5) 山本忠利, 武部慎一, 和達嘉樹: 保健物理, (投稿中)
- 6) 川西博: 水温の研究, 24, 5211 (1980).
- 7) G.F. Byrne, J.E. Drummond and C.W. Rose: Water Resour. Res., 4, 607 (1968).
- 8) 木村重彦: 農業土木試験場報告, 9号, 1 (1980).
- 9) 落合敏郎: 日本地下水学会誌, 14, 11 (1968).

ては土壤中に保持されていた水が上部より浸透してきた水により押出される（片寄り不飽和流¹⁴⁾）ので、局部的にピストン現象が生じ、見掛け上、速い水流速が見受けられた。さらに、土壤中の水分量が増加する（飽和状態）と、各測定点の電圧変化（矩形パルス）は部分的に重なり合うので、測定不可能になる。

これらのことから、サーミスター型センサーを用いた本水流速測定方式は、片寄り不飽和流および飽和流が生じていない場合、即ち水分の少ないときの一様不飽和流の場合において有効であることが確認された。

4. ま と め

以上の結果をまとめて以下に示す。

- 1) 乾燥土壤中の水流速は、表面近傍では散水速度より小さく、深部に行くに従って大きくなり、散水速度に近づいた。
- 2) 含水土壌中の水流速は、表面近傍では散水速度とほぼ等しく、深部では水の押し出しによるピストン現象（片寄り不飽和流状態）が現われ、散水速度より大きな値が実測された。
- 3) したがって、本装置は、土壤の水分量が少ないときの一様不飽和流の水流速測定に有効であることが分かった。

今後、土壤の水分量が多いときの不飽和流および飽和流の水流速測定の場合に適用できるような装置を試作開発する必要がある。

おわりに、本研究を行うにあたり、多くの便宜を与えて下さった環境安全研究部の今井和彦部長に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 武部慎一，松鶴秀夫，和達嘉樹：JAERI-M 7642 (1978)。
- 2) 武部慎一，和達嘉樹：JAERI-M 8044 (1979)。
- 3) 武部慎一，山本忠利，和達嘉樹：JAERI-M 8824 (1980)。
- 4) 山本忠利，武部慎一，大貫敏彦，西村敏郎，和達嘉樹：JAERI-M 9171 (1980)。
- 5) 山本忠利，武部慎一，和達嘉樹：保健物理，（投稿中）
- 6) 川西博：水温の研究，24，5211 (1980)。
- 7) G.F. Byrne, J.E. Drummond and C.W. Rose: Water Resour. Res., 4, 607 (1968)。
- 8) 木村重彦：農業土木試験場報告，9号，1 (1980)。
- 9) 落合敏郎：日本地下水学会誌，14，11 (1968)。

- 10) 佐藤乙丸, 堀口泰裕: Radioisotopes, 25, 171 (1976).
- 11) H. Brandt: J. Acous. Soci. Amer., 32, 171 (1960).
- 12) 大貫敏彦, 山本忠利, 富永洋, 和達嘉樹: 第28回応用物理学関係連合講演会予稿集, p.27 (1981).
- 13) 中野政詩: 土と基礎, 29-5 (280), p. 83 (1981).
- 14) 中野政詩: 土と基礎, 29-6 (281), p. 71 (1981).

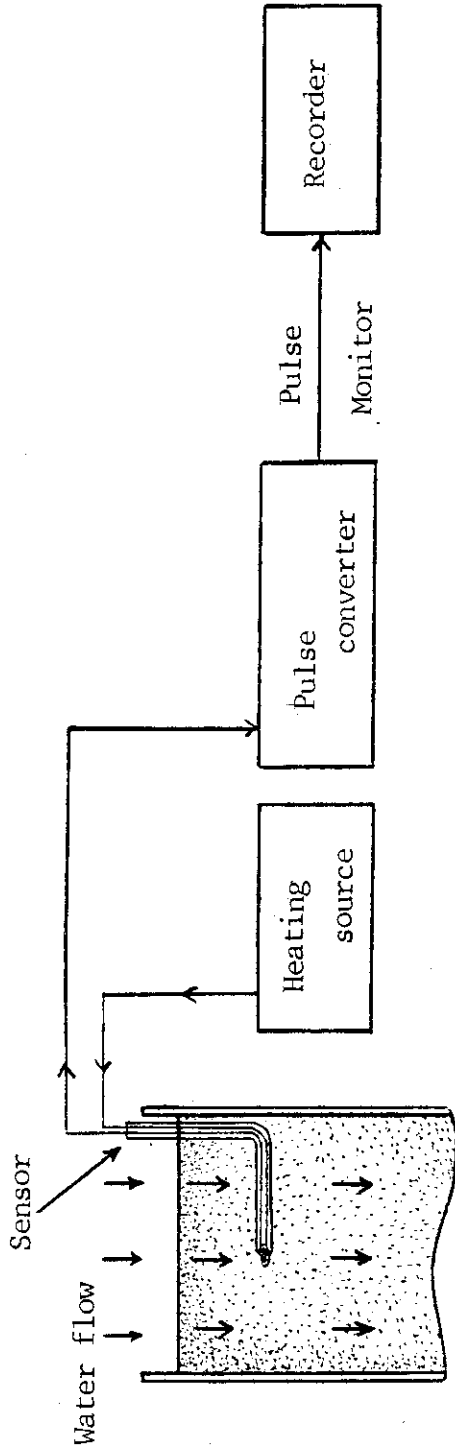


Fig. 1 Schematic illustration of experimental arrangement

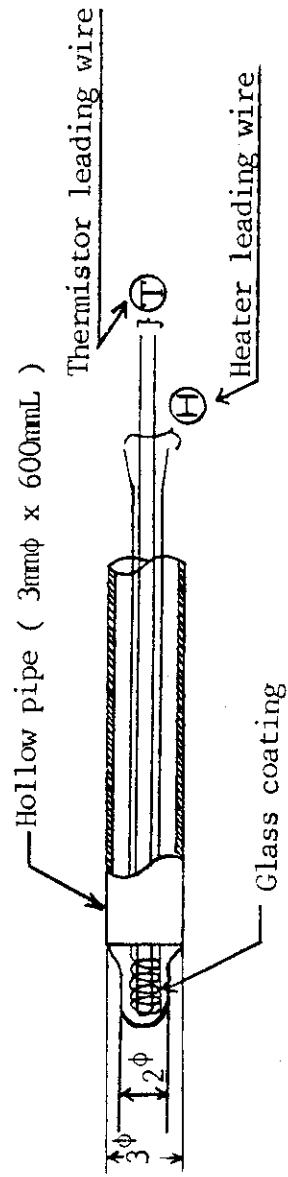


Fig.2 Structure of thermistor type sensor

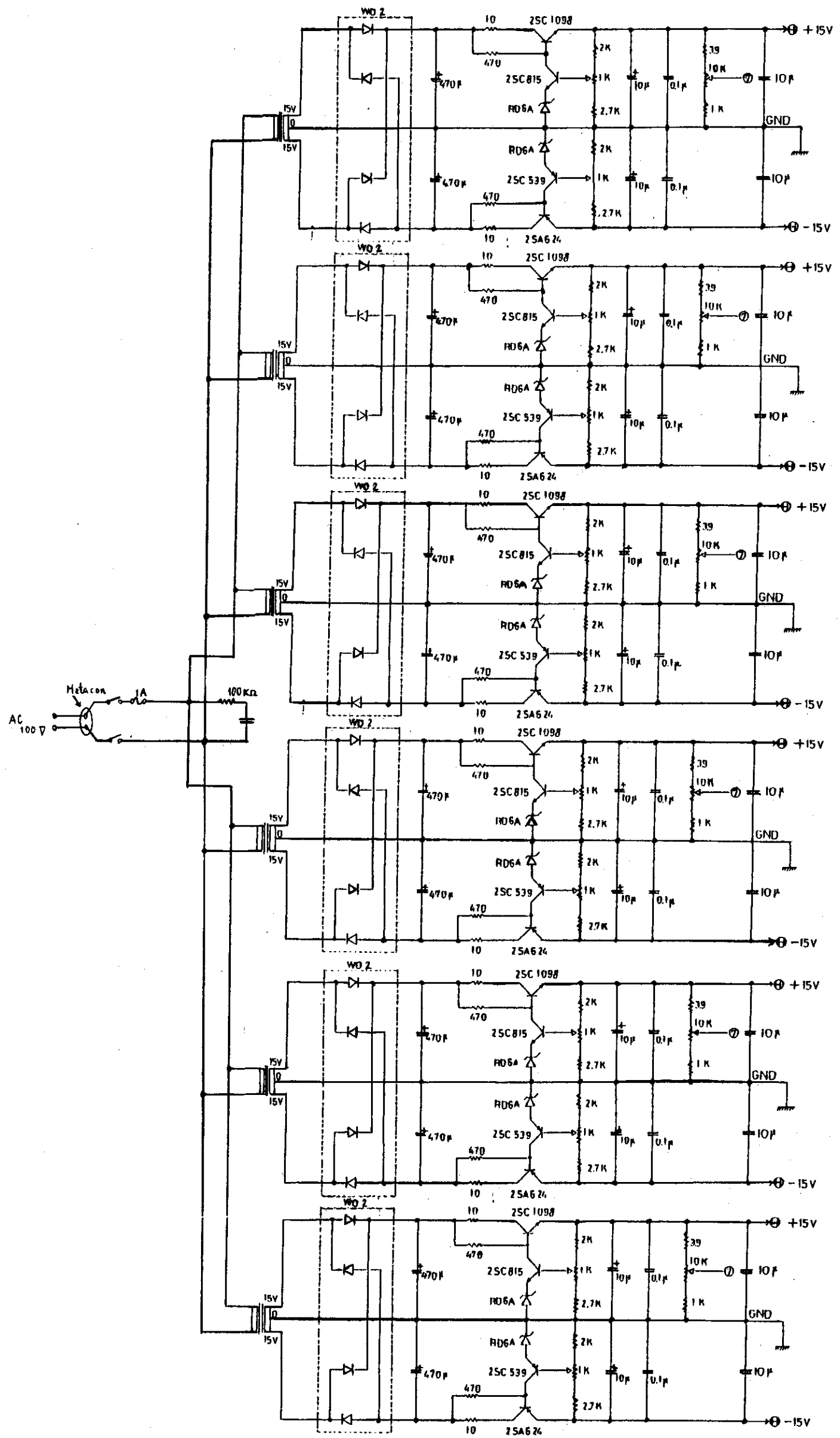


Fig.3 Electrical circuit for heating source

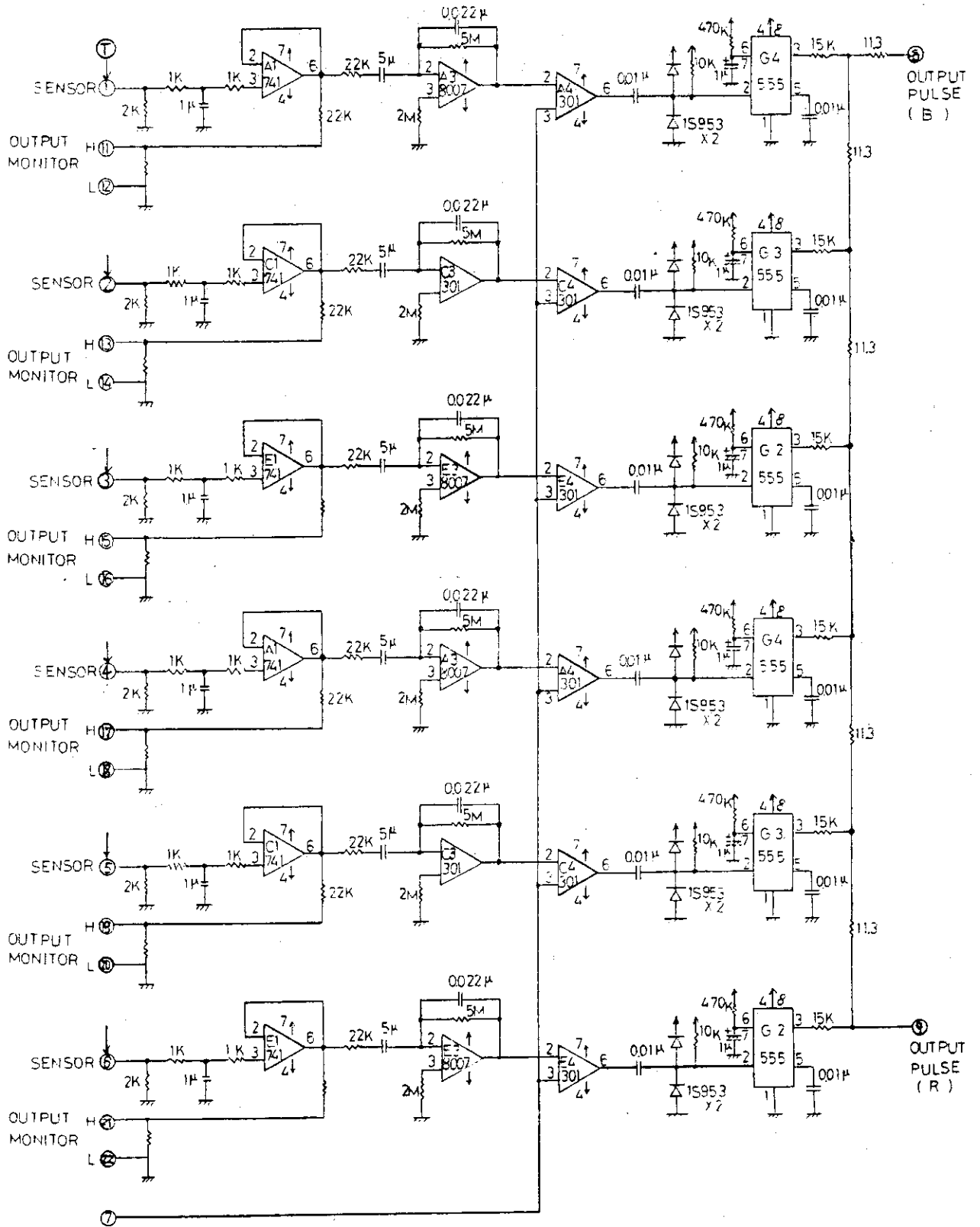


Fig.4 Electrical circuit for pulse converter

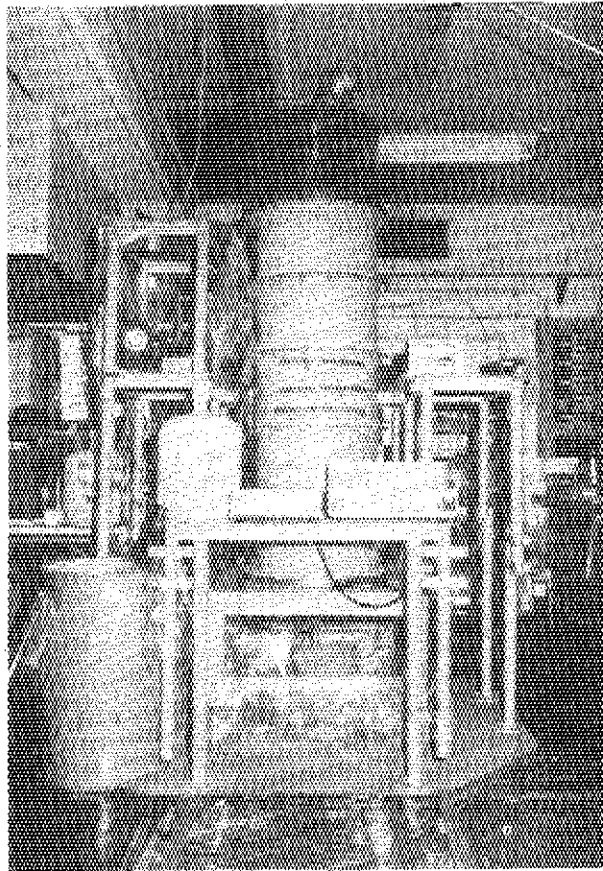


Photo 1 Soil layer model apparatus

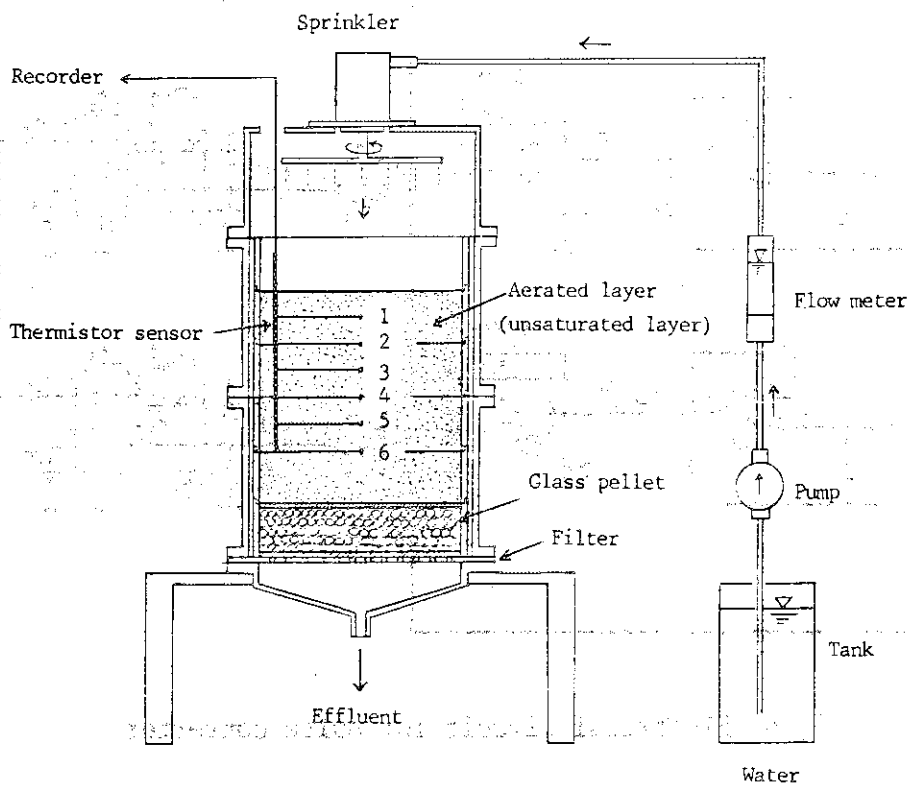


Fig.5 Measured point in soil layer model apparatus

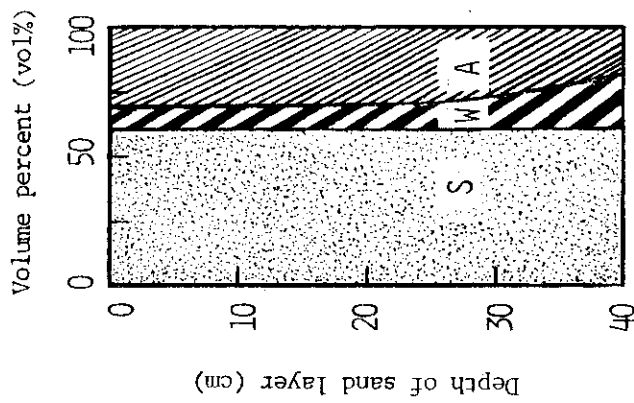


Fig. 6 Three phase distribution curve
 W; Water retention ratio (vol%)
 S; Solid ratio (vol%)
 A; Porosity (vol%)

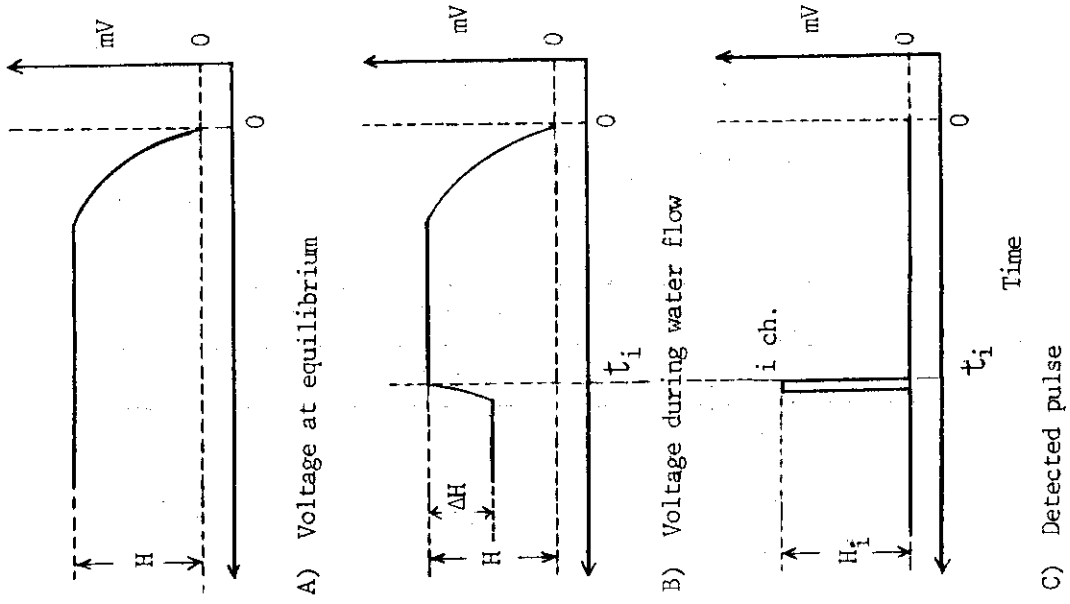


Fig. 7 Variation in voltage of sensor with water flow

Table 1 Observed values of water flow rate in two soils

Sensor No.	Depth (cm)	Water flow rate (cm/min)	
		Dry soil	Wet soil
1	5	0.46	-
2	10	0.67	1.25
3	15	0.75	1.67
4	20	0.87	2.08
5	25	0.89	1.98
6	30	0.91	1.76