

本資料は 年 月 日付けで  
登録区分変更する。 [東海事業所技術情報室]

# 不飽和領域の原位置計測手法 および解析モデルの研究 成果概要

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

株 式 会 社 間 組  
株式会社ダイヤコンサルタント

本資料の全部または一部を復写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
  
電話:029-282-1122(代表)  
ファックス :029-282-7980  
電子メール:jserv@inc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

この資料は、  
ものです。ついで  
漏洩がないよう  
注意して下さい

に開示する  
示又は内容  
いよう特に

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸 959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター 環境地質課

1995年3月

## 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究

雨宮清\*、今井久\*\*、千々松正和\*\*

西田 薫\*\*\*、林為人\*\*\*、先名重樹\*\*\*

### 要 旨

岩盤内に空洞を掘削した場合、その周辺岩盤には不飽和領域が発生すると考えられる。この不飽和領域を定量的に評価することは安全性能評価上必要であり、これを原位置で計測する技術を確立しなければならない。

本研究は、今後数年のうちに岩盤中の不飽和領域をある程度定量的に把握できるための計測手法を開発することを最終目標としている。今年度は(1)不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究、(2)不飽和領域の計測手法に関する基礎研究に関して、岩石試料(多胡砂岩)を用いた室内実験を行い、基礎的な知見を得た。

---

本報告書は、株式会社間組および株式会社ダイヤコンサルタントが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：060D0198

事業団担当部課室および担当者：環境地質課 榊利博

\* 株式会社間組技術本部原子力部、\*\* 株式会社間組技術研究所

\*\*\* 株式会社ダイヤコンサルタント東京事業部

MARCH, 1995

A study on in-situ measuring method and modeling technique of an unsaturated zone

Kiyoshi Amamiya\*, Hisashi Imai\*, Masakazu Chijimatsu\*

Kaoru Nishida\*\*, Weiren Lin\*\*, Shigeki Senna\*\*

#### Abstract

It is thought that an unsaturated zone may be generated in the proximity of a drift after excavation. Quantitative estimation of the extent of the unsaturated zone is necessary in the point of safety assessment of underground facilities. Thus, an establishment of the technique to measure this zone is need.

However, at this stage, even the definition of the unsaturated zone is not clear. Then this work was started to develop the measuring method for grasping the spread of this area quantitatively in several years. This year, fundamental information was obtained through experiments, carried out with coarse sandstone on the following categories.

- (1) study on the mechanism of unsaturated zone
- (2) study on the measuring method of unsaturated zone

---

Work performed by HAZAMA CORPORATION and DIA CONSULTANTS CO., LTD. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC).

PNC Liaison:Toshihiro Sakaki, TONO Geoscience Center, Geological Environment Research Section

\* HAZAMA CORPORATION

\*\* DIA CONSULTANTS CO., LTD.

## 目 次

1. 研究の目的 .....	1-1
2. 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究 .....	2-1
2. 1 実施項目 .....	2-1
2. 2 蒸発量計測を用いたV G式による不飽和浸透特性推定法 .....	2-1
2. 2. 1 蒸発量計測を用いたV G式による不飽和浸透特性推定法 .....	2-1
2. 2. 2 蒸発量計測 .....	2-4
2. 3 豊浦標準砂に対する蒸発量計測を用いたV G式による不飽和浸透特性推定法の 適用性検討 .....	2-6
2. 4 多胡砂岩に対する蒸発量計測を用いたV G式による不飽和浸透特性推定法の 適用性検討 .....	2-9
2. 5 圧力計測手法の適用性検討 .....	2-18
2. 5. 1 圧力計測装置 .....	2-18
2. 5. 2 圧力計測手法の適用性実験 .....	2-18
2. 6 まとめ .....	2-24
参考文献 .....	2-26
3. 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究 .....	3-1
3. 1 概要 .....	3-1
3. 2 コア供試体を用いた室内試験 .....	3-1
3. 2. 1 試験方法 .....	3-1
3. 2. 2 供試体分割による含水量測定 .....	3-4
3. 2. 3 超音波速度測定 .....	3-4
3. 2. 4 比抵抗測定 .....	3-8
3. 2. 5 電磁波速度測定 .....	3-10
3. 2. 6 考察 .....	3-12
3. 3 ブロック供試体を用いた室内試験 .....	3-12
3. 3. 1 予備試験 .....	3-12
3. 3. 2 試験方法 .....	3-13

3. 3. 3	超音波速度測定	3-19
3. 3. 4	比抵抗測定	3-20
3. 3. 5	電磁波速度測定	3-20
3. 3. 6	大ブロックの分割による含水量測定	3-23
3. 3. 7	考察	3-24
3. 4	まとめ	3-30
4.	まとめ	4-1
4. 1	不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究のまとめ	4-1
4. 1. 1	成果	4-1
4. 1. 2	課題	4-2
4. 1. 3	来年度研究の提案	4-3
4. 2	不飽和領域の計測手法に関する基礎研究のまとめ	4-4
4. 2. 1	成果	4-4
4. 2. 2	課題	4-4
4. 2. 3	来年度研究の提案	4-5

## 1. 研究の目的

岩盤内に空洞を掘削した場合、その周辺岩盤には不飽和領域が発生すると考えられる。この不飽和領域を定量的に評価することは安全性能評価上必要であり、これを原位置で計測する技術を確立しなければならない。土質の分野においては不飽和現象に関する基礎的研究は比較的盛んに行われておりその定義やメカニズム等の基本的な事項についてはある程度確率されているが、土中の不飽和領域を定量的に把握するための計測手法に関する研究はここ数年やっと緒についたばかりであり、岩盤中の不飽和領域については現在のところ計測手法はもとよりその定義さえも明確でない。

本研究は、今後数年のうちに岩盤中の不飽和領域をある程度定量的に把握できるための計測手法を開発することを最終目標としている。平成5年度は岩盤中の不飽和領域の発生メカニズム等の基本事項、計測手法および解析手法に関して海外の研究事例を含め広範囲に調査し、基礎情報を収集した。そこで得られた知見に基づき、今年度は(1)不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究、(2)不飽和領域の計測手法に関する基礎研究に関して、岩石試料(多胡砂岩)を用いた室内実験を行った。

実験に用いた岩石試料は透水係数が $10^{-7}$  cm/sec程度と大きいこと、比較的均質であること、取得が比較的容易であることを選定条件に捜した結果、群馬県多野郡甘楽町産の多胡砂岩(粗粒砂岩)を用いることとした。

## 2. 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究

### 2.1 実施項目

最も基本となるマトリックス部に関して、以下の2項目〔(1),(2)〕を実施する。

#### (1) 蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式<sup>1)</sup>による不飽和浸透特性推定法の適用性検討

蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式（以下VG式とする）による不飽和浸透特性推定法（1994、渡辺他）の適用性を以下の3項目に対して検討する。

##### (i) 不飽和パラメーター既知試料に対する適用性検討

土質分野において最もよく研究され、その不飽和浸透特性が既知である豊浦標準砂を対象に蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式による不飽和浸透特性推定法の適用性を確認する。

##### (ii) 供試体寸法（長さ）の不飽和パラメーターに与える影響の検討

供試体長さの異なる試料（ $\Phi 5\text{cm} \times h 20\text{cm}$ ,  $10\text{cm}$ ,  $5\text{cm}$ 程度の3種類）に対して同手法を適用し、長さの違いによる不飽和浸透特性推定結果への影響を調べる。

##### (iii) 流出部境界条件の影響の検討

供試体上端の温度・湿度の条件設定により蒸発量を変化（2種類）させその不飽和浸透特性推定結果への影響を調べる。

#### (2) 既存の負圧計測方法の適用性の検討

上記試験の一部に、既存の負圧計（テンシオメーター、サイクロメーター）を設置し、圧力計測を実施する。その圧力計測値とVG式から得られる不飽和特性より推定した圧力計算値との比較等により、VG式の適用と合わせて既存の負圧計を岩盤マトリックス部に設置した場合の適用性について検討する。

### 2.2 蒸発量計測を用いたVG式による不飽和浸透特性推定法

#### 2.2.1 蒸発量計測を用いたVG式による不飽和浸透特性推定法

不飽和特性推定方法<sup>2)</sup>は、実験（計測）とVG式に順じた逆解析からなる。

VG式は不飽和特性（有効飽和度 $S_e$ あるいは体積含水率 $\theta$ と相対透水係数 $K_r$ および負の圧力水頭 $\psi$ （サクシオン）の関係）を2つのパラメーター $\alpha$ 、 $n$ で表す式で、有効飽和度 $S_e$ と圧力水頭 $\psi$ の関係（式2.1）が決まると有効飽和度 $S_e$ と相対透水係数 $K_r$ の関係（式2.2）も決まる特徴を有する式である。



$$Se = \{ 1 + |\alpha\psi|^n \}^{-m} \quad (\text{式 2. 1})$$

$$k_r(\psi) = Se^{1/2} \cdot \{ 1 - Se^{1/m} \}^2 \quad (\text{式 2. 2})$$

ここで  $\alpha$ 、 $n$  は土壌固有のパラメーターであり、 $n$ と $m$ は次式の関係がある。

$$m = 1 - 1/n \quad , \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (\text{式 2. 3})$$

有効飽和度 $Se$ は次式のように定義される。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{式 2. 4})$$

ここで、 $\theta$ は体積含水率、 $\theta_s$ は飽和体積含水率、 $\theta_r$ は最小体積含水率である。図 - 2. 1 に体積含水率 $\theta$ に対する相対透水係数 $K_r$ 、圧力水頭 $\psi$ 、比水分容量 $C(\theta)$ の関係を示す。

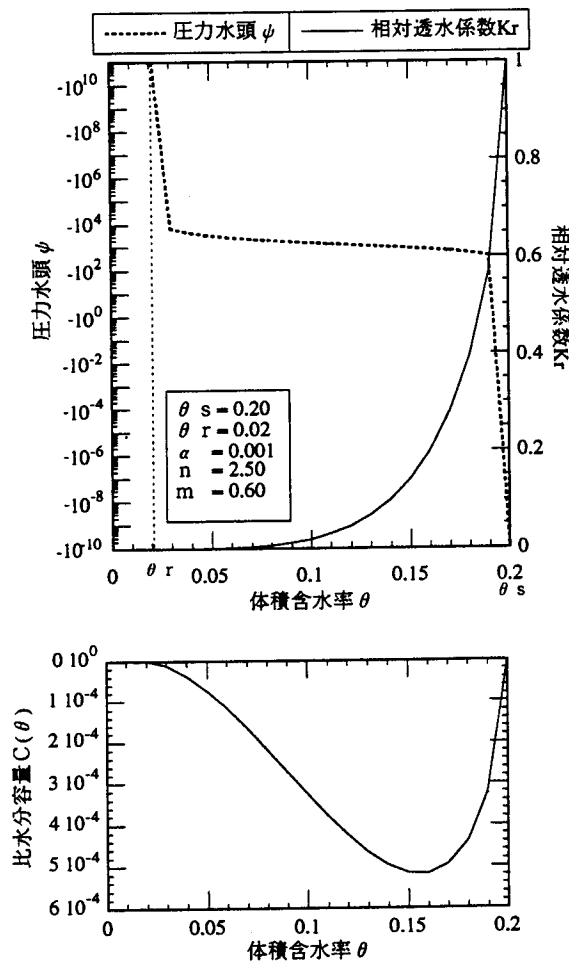
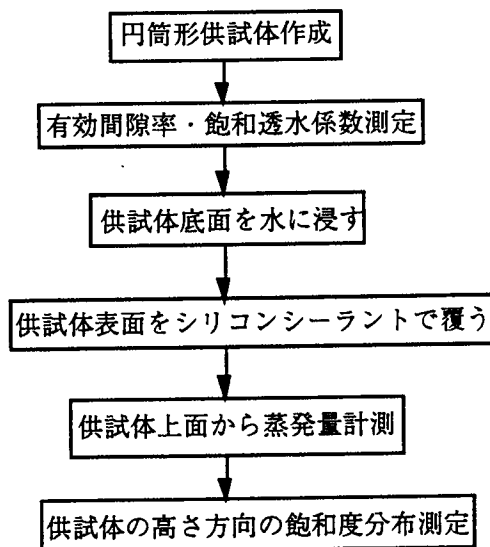
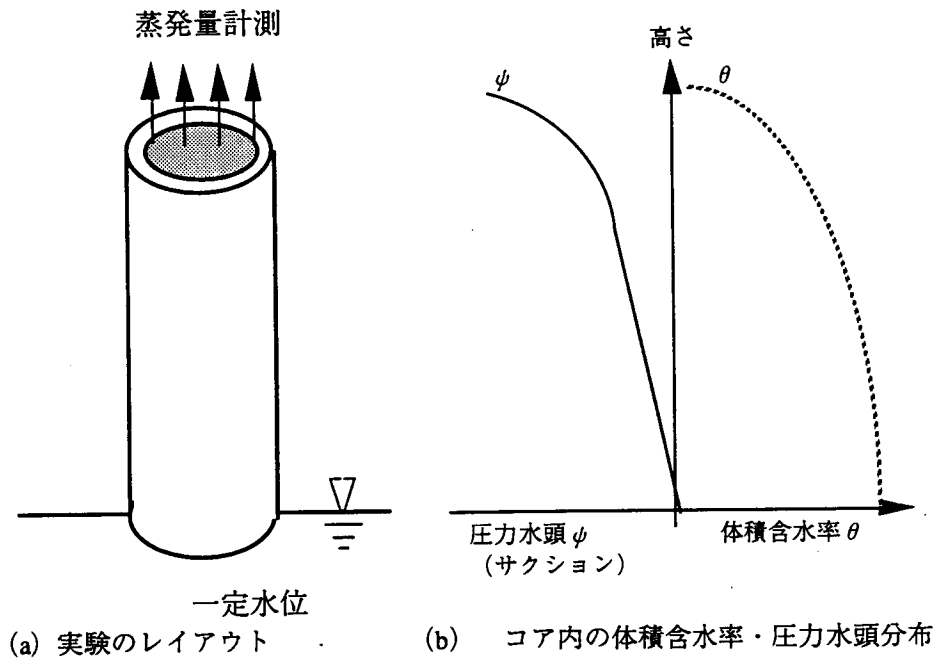


図 - 2. 1 体積含水率、相対透水係数、圧力水頭、比水分容量

実験は対象とする透水係数と有効間隙率の計測された岩盤のコア（断面積が一定の柱状供試体、飽

和透水係数・有効間隙率既知) の側方をシールし、その一方の端面に一定水位を、他の端面は自由に水分が蒸発できる条件 (図 - 2. 2 (a) ) を与えて行う。この条件で発生する鉛直 1 次元の流れが蒸発が定常となる時 (コア内の水分移動が定常となるとき) の蒸発量、とコア軸方向の含水量分布を計測する。

解析は設定された一定水位、計測された蒸発量を境界条件として、計測解析は上記計測条件のコア軸方向の実測含水量分布がと最も良く一致する不飽和浸透特性 (VG 式の 2 つのパラメーター  $\alpha$ 、 $n$ ) を最小二乗法<sup>7)</sup> を用いて同定する逆解析である。



(c) 不飽和浸透特性推定法の流れ

図 - 2. 2 不飽和浸透特性推定法の概要

## 2. 2. 2 蒸発量計測

### (1) 蒸発量計測の原理

坑道周辺などにおける岩石中の飽和領域から不飽和領域に到る水分の移動は、坑道等の壁面において岩石内から岩石外部に流出することにより生じる。岩石の透水係数が小さく、岩石外部に流出する水分が岩石壁面部を液体として流出せずに空気中に蒸発する場合、蒸発量が岩石からの流出量として把握される<sup>3)</sup>。定常状態を仮定し、岩石壁面近傍を考えるならば岩石壁面を直交する気体の流れは0であり、岩石からの水分の蒸発による流出は空気中における水分（水蒸気）拡散として捉えることができる。

#### (i) 水蒸気拡散

岩石に含まれる水は、岩石内の不飽和領域内に含まれる空気や岩石表面の空気と接触する。水分の空気中への蒸発は、水蒸気の空気中への一方向拡散と考えられ、水蒸気の空気中への水蒸気濃度の差による輸送量（ここではこれを蒸発量 $E_v$ として）は次式で表される。

$$E_v = -D \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{式 2. 5})$$

ここに、 $E_v$  は蒸発量（水蒸気の空気中への水蒸気拡散による輸送量）、 $\theta$  は絶対湿度（空気中の水分濃度）、 $D$  は水蒸気の空気中への拡散係数（水蒸気拡散係数）、 $x$  は岩石表面に直交した方向の岩石表面からの距離である。この式から蒸発量は岩石表面からの距離の異なる2点の絶対湿度の差を計測し、水蒸気拡散係数がわかれば蒸発量が算定しうることがわかる。絶対湿度、水蒸気拡散係数については、(ii)、(iii) に示す。

#### (ii) 相対湿度・絶対湿度・気温

岩石表面等の局所部位で絶対湿度を直接計測するためには、電気抵抗式湿度計（サーミスター）を用いて相対湿度を、熱電対等を用いて温度計測を行う。温度から飽和水蒸気量（飽和時絶対湿度）を算定し、相対湿度を乗じて絶対湿度を算定する。温度に対する絶対湿度の変化特性<sup>4)</sup>を図-2.3に示す。

#### (iii) 水蒸気拡散係数

水蒸気拡散係数については、数種類の計測値、関係式<sup>5)</sup>が示されている。温度に対する水蒸気拡散係数の変化特性を図-2.3に示す。

水蒸気拡散係数は、温度変化に対し、ほぼ線形に変化し、式および実験等で得られた実測値の違いは、水蒸気拡散係数で約10%であり、水蒸気拡散係数の蒸発量に与える影響は、計測後でも容

易に評価・見直しが可能である。今回の水蒸気拡散係数は実測値<sup>6)</sup>を温度に応じ線形補間し算定することとした。

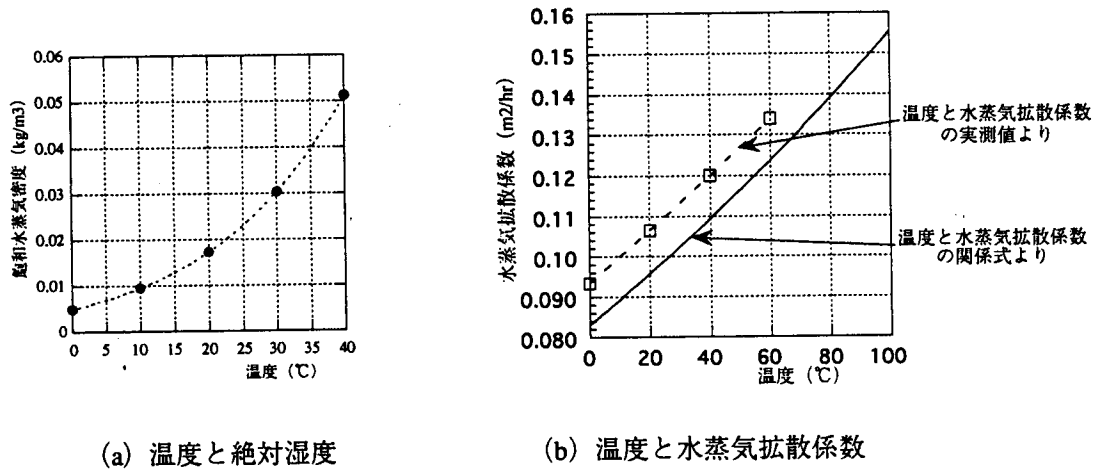


図 - 2. 3 温度に対する絶対湿度と水蒸気拡散係数

(2) 蒸発量計測システム

(i) 計測システム

計測システムは、一対の温度・湿度センサー、電源装置、データ収録・蒸発量算定用パソコン、ADボード、センサー固定スタンドからなる。

(ii) 温度・湿度センサー

温度・湿度センサーは共和電業(株)製KHL-110を用いた。その諸元は以下のとおりである。

表 - 2. 1 温度・湿度センサーKHL-210諸元

	湿度	温度
動作電圧	DC+8~24 V	DC+8~24 V
動作電流	0.1 mA (無負荷時)	0.08 mA (無負荷時)
出力電圧	10 mV/%RH	10 mV/°C
出力インピーダンス	150 KΩ	1 KΩ
精度	±3 %RH	±0.5 °C
応答時間	2 min	
使用環境温度	0~60 °C	

## 2.3 豊浦標準砂に対する蒸発量計測を用いたVG式による不飽和浸透特性推定法の適用性検討

### (1) 目的

土質分野において最もよく研究され、その不飽和浸透特性が既知である豊浦標準砂を対象に蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式による不飽和浸透特性推定法の適用性を確認する。

### (2) 方法

長さ275mmの標準砂供試体を図-2.4のようにセットし、上端面からの蒸発量を温度・湿度センサーおよび電子天秤の2種類の 방법으로計測する。体積含水率は図に示すアクリルセルを分離し、各セルごとに砂の体積含水率を計測して体積含水率の鉛直方向分布を求める。

ここで同定されたVG式の不飽和パラメータ $\alpha$ 、 $n$ の妥当性を検討するため図-2.4に示すテンシオメーターにて圧力水頭を計測した。

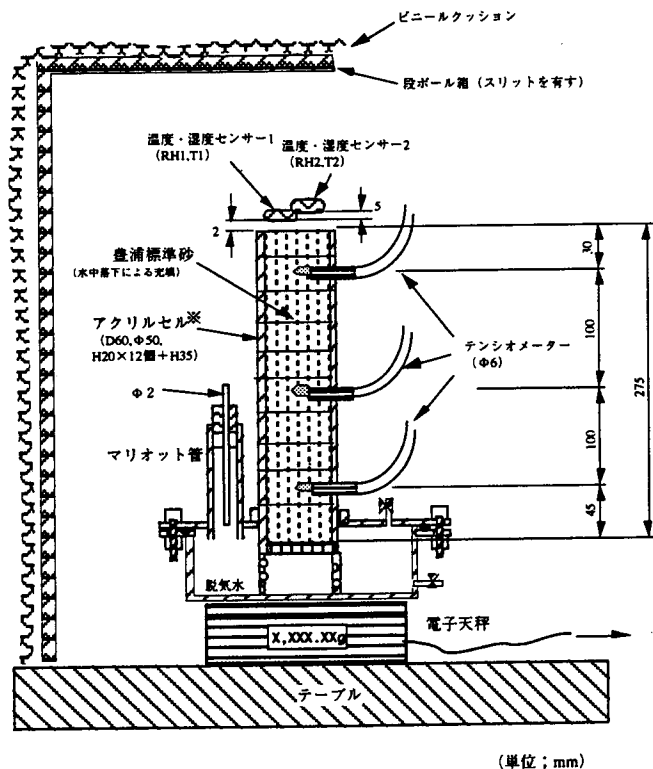


図-2.4 標準砂の実験レイアウト

### (3) 結果

各計測結果を表-2.2に示す。

表-2.2 計測結果

有効間隙率	飽和透水係数	蒸発量 (重量計測)	蒸発量 (温度湿度計測)
0.461	$3.25 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$	$42.1 \text{ mg/sec/m}^2$	$18.4 \text{ mg/sec/m}^2$

蒸発量の計測値は、重量計測によるものと温度湿度計測によるもので2倍以上の差がみられる。温度湿度計測によるものは水蒸気移動の3次元性の影響が考えられる。一方重量計測については事前に計測誤差等を含めその妥当性を吟味しているため重量計測による蒸発量を用いることとし、その有する誤差を考慮し不飽和パラメータの同定では $40\text{mg/sec/m}^2$ を設定した。同定されたVG式の不飽和パラメータ $\alpha$ 、 $n$ および豊浦標準砂の既往の報告事例<sup>8)</sup>を合わせて表-2.3に示す。

表-2.3からわかるように既往の同定結果は、 $\alpha$ 、 $n$ で2倍程度の違いが生じている。今回の結果は既往の結果と比べ、 $\alpha$ に関してやや大きく、 $n$ は小さくなっている。

表-2.3 豊浦標準砂の同定結果・既往の報告事例

	有効間隙率	飽和透水係数 (cm/sec)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$
今回の結果	0.46	$3.25 \times 10^{-2}$	0.072	1.22
報告事例1	0.30	$2.08 \times 10^{-2}$	0.052	5.68
報告事例2	0.41	$2.56 \times 10^{-2}$	0.022	12.32

計測された体積含水率、有効飽和度、圧力水頭と同定された不飽和パラメータにより計算された体積含水率、有効飽和度、圧力水頭を合わせて図-2.5に示す。

圧力水頭は、テンシオメーターによる計測結果と解析結果を対比して示している。ここで、両者は完全には一致していないが、圧力分布傾向は両者ほぼ一致している。

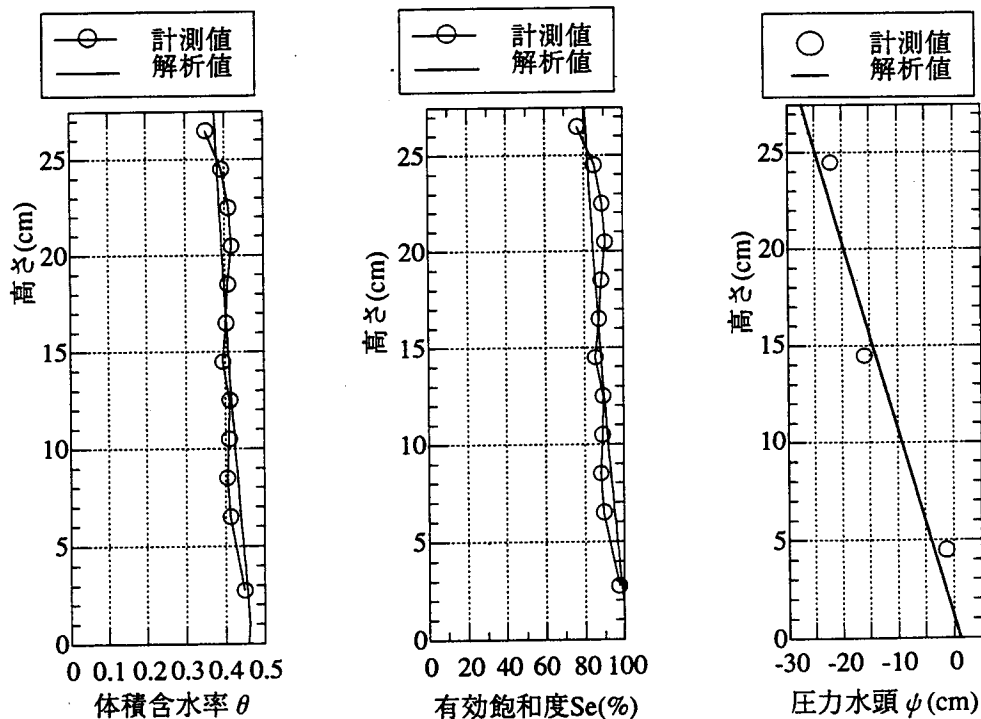


図-2.5 体積含水率、有効飽和度、圧力水頭

### (3) 考察

既往のVG式パラメータの報告事例のばらつきを考慮すると今回の同定結果も既往の報告事例と同じオーダーにあり、ほぼ妥当な不飽和パラメータが得られていると考えられる。また圧力計測の実測と解析結果はほぼ一致し、圧力比較からも妥当な不飽和パラメータが得られていると考えられる。以上のことから蒸発量計測とVG式を併用した不飽和特性の同定方法はほぼ妥当なものと考えられる。

## 2. 4 多胡砂岩に対する蒸発量計測を用いたVG式による不飽和浸透特性推定法の適用性検討

### (1) 目的

- ① 供試体長さの異なる試料対して同手法を適用し、長さの違いによる不飽和浸透特性推定結果への影響を調べる。
- ② 供試体上端の温度・湿度の条件設定により蒸発量を変化（2種類）させその不飽和浸透特性推定結果への影響を調べる。

### (2) 実験方法

実験の基本的方法は、2. 3に記した方法で、実験レイアウトも基本的に図 - 2. 4に準じる。供試体の長さは20cm、10cm、5cmと変化させた。上端面の境界条件としては、気温を20℃、40℃と変化させた。

実験は以下の手順で実施した。

- ① 供試体の設置
- ② 脱気水の注入
- ③ 蒸発量計測機器の設置・計測開始
- ④ 蒸発量計測
- ⑤ 定常状態の確認・計測終了
- ⑥ 含水量の計測
- ⑦ 解析

### (3) 供試体諸元・用途

上記各計測による各供試体の諸元（乾燥重量 $W_d$ 、体積 $v$ 、有効空隙率 $n_e$ 、乾燥単位体積重量 $\gamma_d$ 、平均直径 $D$ 、平均高さ $H$ 、平均断面積 $A$ 、飽和透水係数 $K_s$ ）を表 - 2. 4にまとめておく。

表 - 2. 4 各供試体の諸元

供試体	$W_d$ (g)	$v$ (cm <sup>3</sup> )	$n_e$	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$D$ (mm)	$H$ (mm)	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$K_s$ (cm/sec)
S1	226.14	102.51	0.151	2.21	49.98	53.18	19.62	6.10E-08
S2	226.92	110.58	0.213	2.05	49.99	57.33	19.63	1.50E-05
M1	457.37	212.77	0.192	2.15	51.78	103.63	21.06	2.20E-07
M2	439.02	203.28	0.228	2.16	49.95	108.45	19.60	9.50E-07
L1	911.37	422.73	0.179	2.16	52.03	201.41	21.26	1.80E-07
L2	905.01	417.91	0.171	2.17	51.82	200.43	21.09	3.00E-07
L3	901.74	417.94	0.160	2.16	51.83	201.05	21.10	1.80E-07
L4	845.11	389.63	0.161	2.17	49.49	201.13	19.24	5.10E-08
L5	901.78	411.05	0.153	2.19	51.73	201.03	21.01	7.10E-09
L6	892.81	408.79	0.143	2.18	50.08	201.00	19.70	4.20E-08
L7	833.82	401.72	0.200	2.08	50.80	201.10	20.27	3.10E-07
L8	887.87	415.20	0.192	2.14	51.66	199.48	20.96	1.60E-07

上記各供試体の用途、実験における位置づけを表 - 2. 5にまとめておく。



表 - 2. 5 各供試体の用途

供試体長さ	20 cm	10 cm	5 cm
境界条件1	L1、L2	M1、M2	S1、S2
(20℃)	L4、L6		
境界条件2	L3、L8		
(40℃)			

※L1、L2は連続重量計測実施  
 L3、L8は開始・終了時重量計測実施  
 L4、L6は圧力・連続重量計測実施  
 M1、M2、S1、S2は圧力・重量計測ともに実施しない

(4) 実験期間

蒸発量計測期間；第1回1995年1月 5日～ 9日 ( 50.7時間、供試体L1,M1,S1)  
 第2回1995年1月23日～31日 ( 187.0時間、供試体L2,M2,S2)  
 第3回1995年2月 7日～10日 ( 66.7時間、供試体L6)  
 第4回1995年2月20日～27日 ( 163.2時間、供試体L4)

(5) 結果

(i) 計測結果

実験における計測結果として、①温度・湿度・蒸発量の経時変化、②重量の経時変化、③体積含水率のコア鉛直方向分布を示す。経時変化は計測時間が最も長い試料L2を代表例として示す。

①温度・湿度・蒸発量の経時変化

図 - 2. 6に温度・湿度・蒸発量の経時変化を示す。計測時間は約170時間である。気温の日変動(約3℃)の影響と考えられる蒸発量、相対湿度の変動がみられる。気温日較差に伴う周期的な変化(約12mg/sec/m<sup>2</sup>の変化幅)を示すものの、170時間における全体的な変化傾向はあまり認められない。計測を何時間継続していけば、周期的変動はあるものの定常状態に達したと判断できる決定的根拠は十分ではないが、ほぼ一様な周期変動、170時間における全体的な変化傾向はあまり認められない点さらに蒸発による実験装置全体の重量変化特性(重量の経時変化として後述)等を考慮して170時間で計測終了とした。

②重量の経時変化

図 - 2. 7にL2の電子天秤からの重量の経時変化および蒸発量から推定される重量の経時変化を示す。実験初期から重量変化はほぼ一定の割合で減少している。

電子天秤による重量変化(実線)のほうが温度・湿度計測に基づく蒸発量から推定される重量変

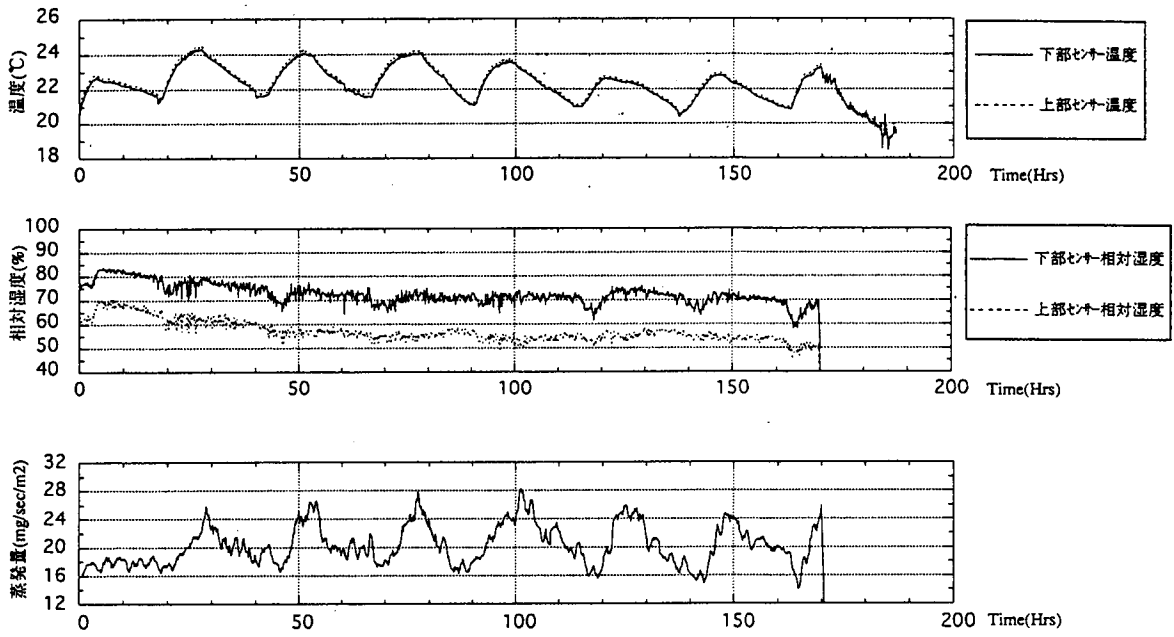


図 - 2. 6 温度・湿度・蒸発量の経時変化

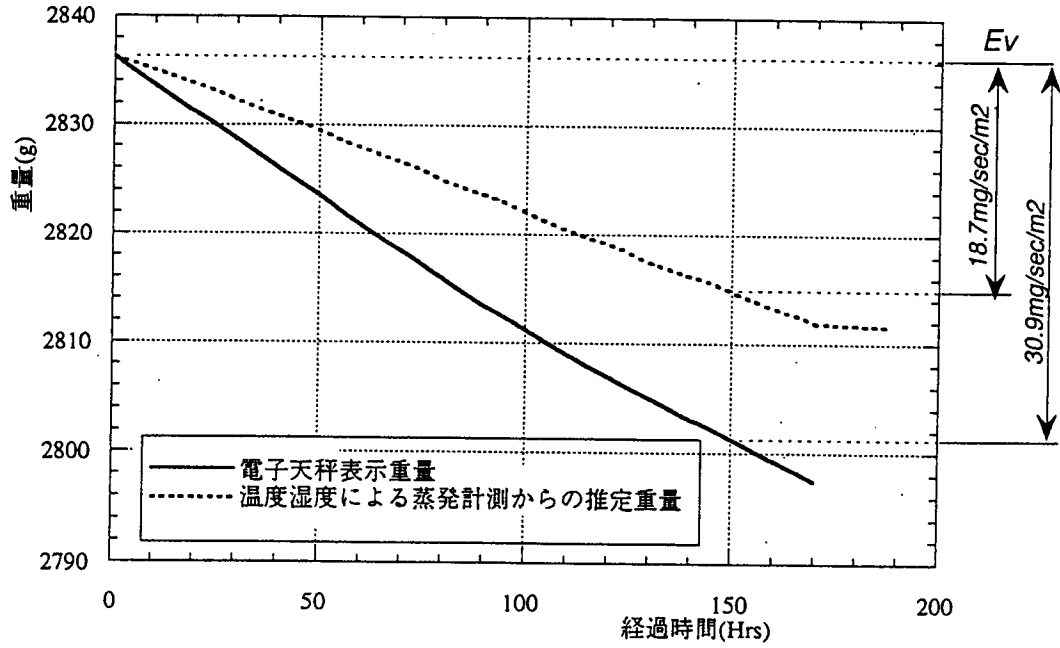


図 - 2. 7 L2の電子天秤からの重量の経時変化および蒸発量から推定される重量の経時変化

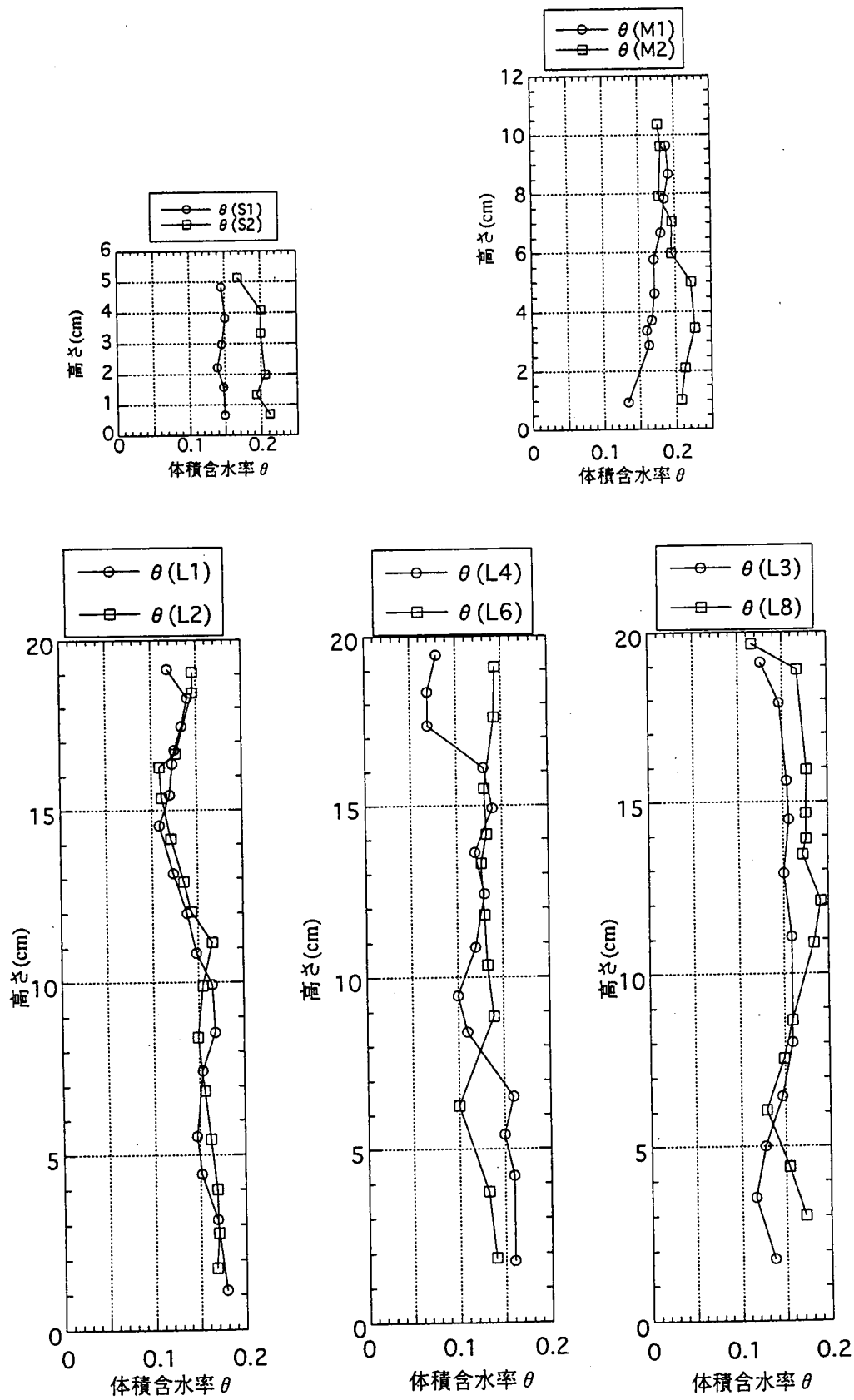


図 - 2. 8 体積含水率の鉛直方向分布

化(破線)より大きくなっている。この重量の時間に対する変化割合が蒸発量に相当すると考えるが、電子天秤による重量変化からの蒸発量(30.9mg/sec/m<sup>2</sup>)のほうが温度・湿度計測に基づく蒸発量から推定される重量変化からの蒸発量(18.7mg/sec/m<sup>2</sup>)より大きくなっている。より詳細な検討も必要と思われるが、このグラフからは一定割合での重量減少即ち蒸発量がほぼ一定となっていることが推測され、定常状態に達していると考えられる。

### ③体積含水率

図-2.8に体積含水率計測の鉛直方向分布を示す。

S1は試料高さ方向にほぼ一様な体積含水率分布を示している。上端でわずかに体積含水率が小さくなって見えるように見えるが高さ2cmにおける体積含水率より大きく、試料の高さ方向に関しほぼ一様な体積含水率と見られ、パラメータ同定は難しい。S2は高さ1.3cmほどで一度体積含水率は小さくなっているが、この点を除けば高くなるに連れ小さくなる傾向がみられる。

M1は下方ほど体積含水率は小さく、パラメータ同定は不可能である。M2は、下部2点を除き、下方から上方に体積含水率が小さくなる傾向が見られる。

L1、L2は良く似た体積含水率の分布傾向を示している。下端から10cm、10cmから15cm、15cmから上端と、大きく3つの傾きを持っている。15cmから上端では上方ほど大きな体積含水率となる傾きを示している。全体的に見ると下方から上方へ体積含水率は小さくなる分布である。L3、L8共に高さ5cmほどで体積含水率は小さくなり、高さ10cmまで増加している。高さ10cmから18cmまではほぼ一様な値を取り、上端で小さな体積含水率となっている。

#### (ii) パラメータ同定結果

各供試体の長さ、物性値、計測値、同定結果をまとめて表-2.6に示す。この表からは、以下のことがわかる。

- ①長さ約20cmのL1,L2,L4の $\alpha$ は同じオーダーの値となっている。
- ②長さ約20cmのL1,L2,L4の $n$ は最大と最小で2倍程度の違いがある。
- ③L1とL2の $\alpha$ はほぼ同じ値となっている。
- ④M2はL1,L2,L4より $\alpha$ で1オーダー大きく、S2はM2よりさらに1オーダー大きくなっている。
- ⑤上記③④より、 $\alpha$ は試料の長いものほど小さく、短いものほど大きい。
- ⑥ $n$ の変化は特に供試体長さに関わらない。
- ⑦供試体長さに関わらず蒸発量は変わらない。
- ⑧今回使用した試料は試料長さにより透水係数が異なる。すなわち、L1、L2に対し、M2は

3～5倍、S2は50～100倍程度の透水係数になっている。

⑨  $\alpha$ は透水係数の大きいものほど大きい。

表 - 2. 6 各供試体の長さ、物性値、計測値、同定結果

供試体	供試体長さ cm	飽和透水係数 Ko(cm/sec)	蒸発量 mg/sec/m <sup>2</sup>	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$ cm-1	n	備考
S1	5.3	6.1E-08	30	0.151				※
S2	5.7	1.5E-05	30	0.213	0.00	0.16	1.6	
M1	10.4	2.2E-07	30	0.192				※
M2	10.8	9.5E-07	35	0.228	0.00	0.21	1.22	
L1	20.1	1.8E-07	30	0.179	0.00	0.000406	2.69	
L2	20.0	3.0E-07	30	0.171	0.00	0.00041	1.79	
L4	20.1	5.1E-08	30	0.161	0.00	0.00014	3.62	
L6	20.1	4.2E-08	30	0.143				*
L3	20.1	1.8E-07	60(40℃)	0.160	0.00	0.00025	4.32	
L8	19.9	1.6E-07	60(40℃)	0.192	0.00	0.00023	4.31	

※同定不能、\*トラブルにより中止

図 - 2. 9～2. 13に同定されたパラメータに基づく体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布を示す。

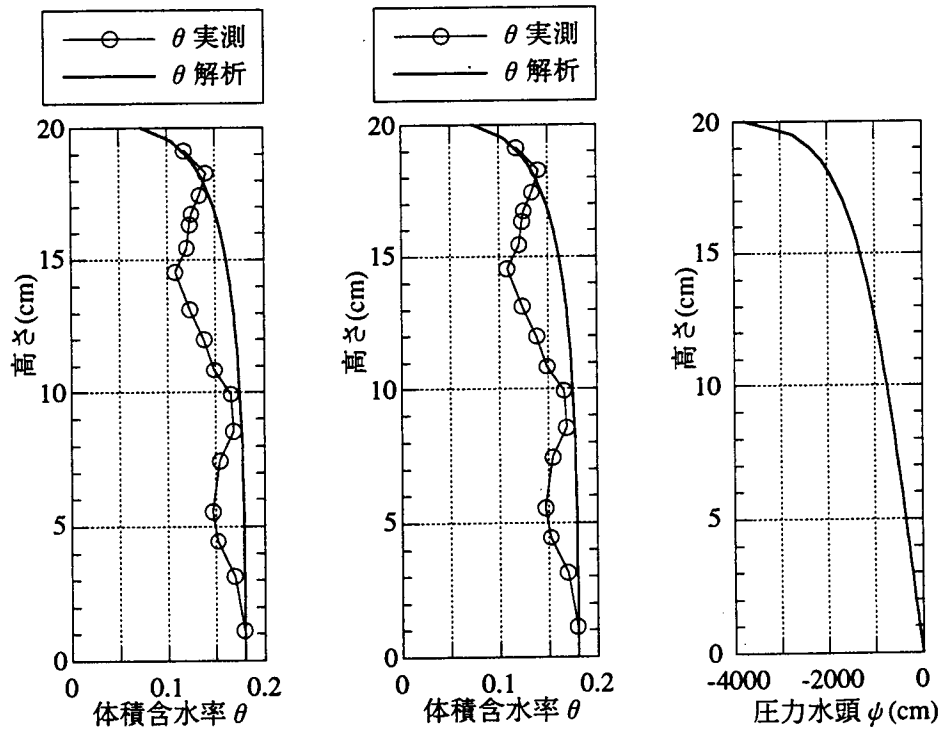


図 - 2. 9 L1の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

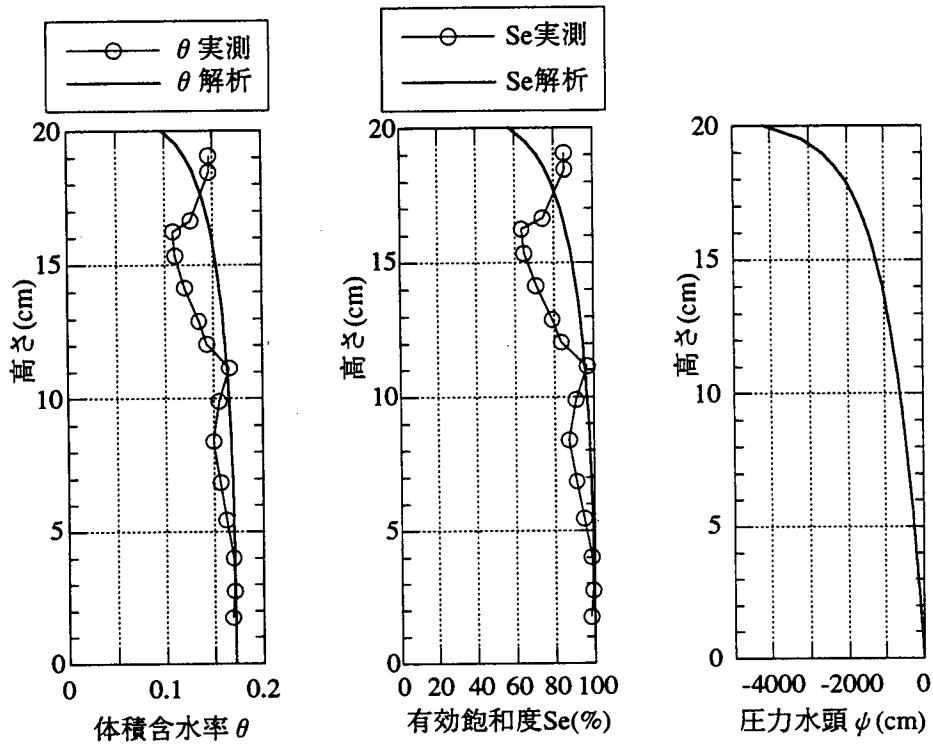


図 - 2. 10 L 2 の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

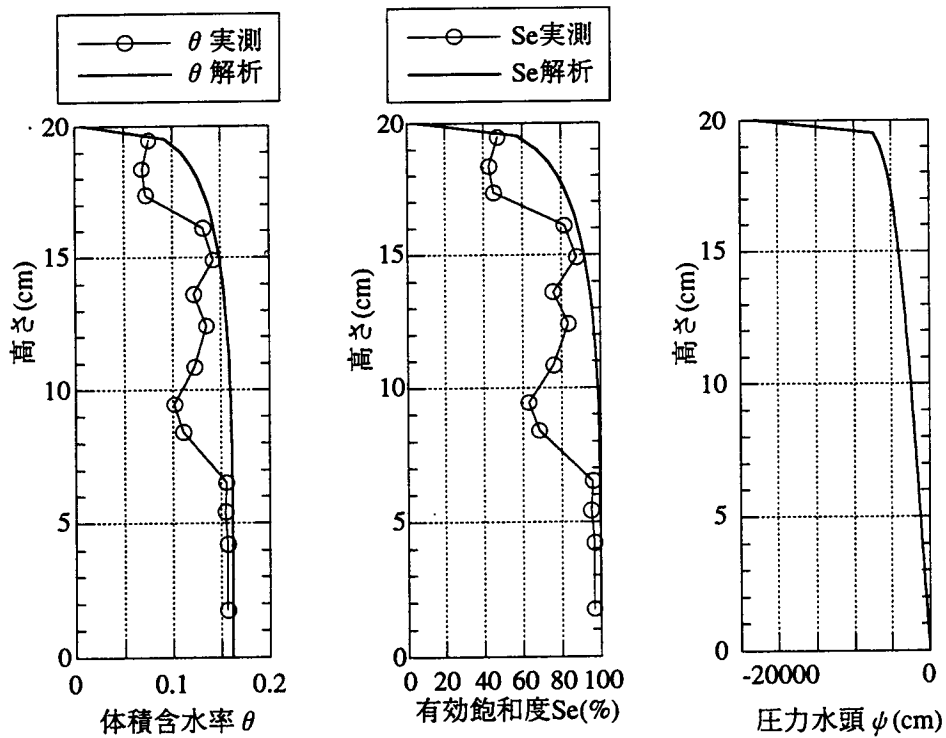


図 - 2. 11 L 4 の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

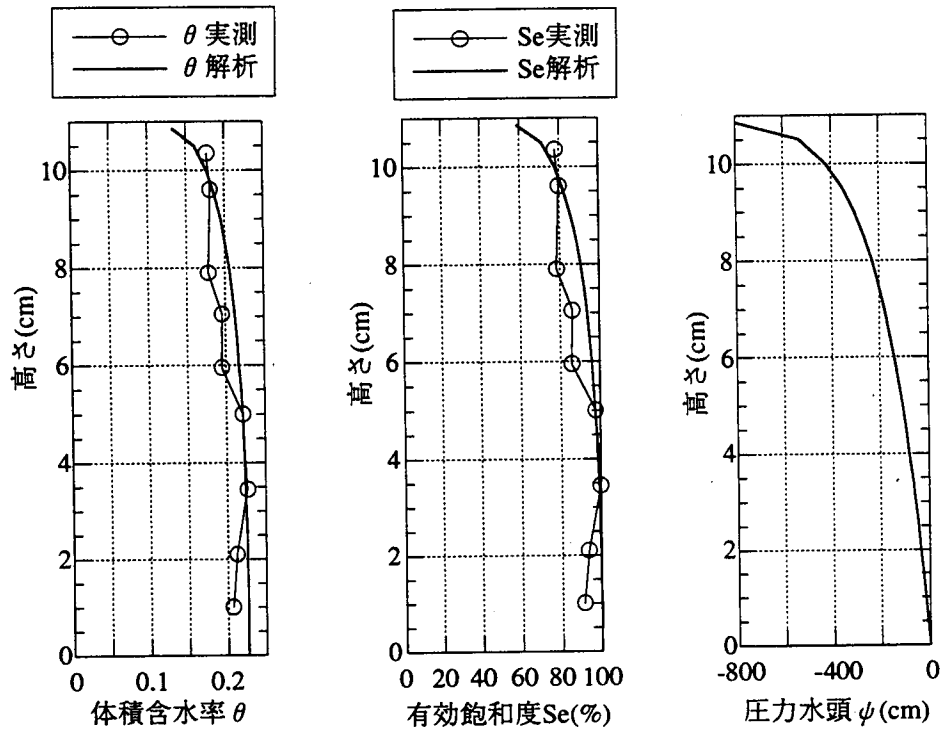


図 - 2. 1 2 M2の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

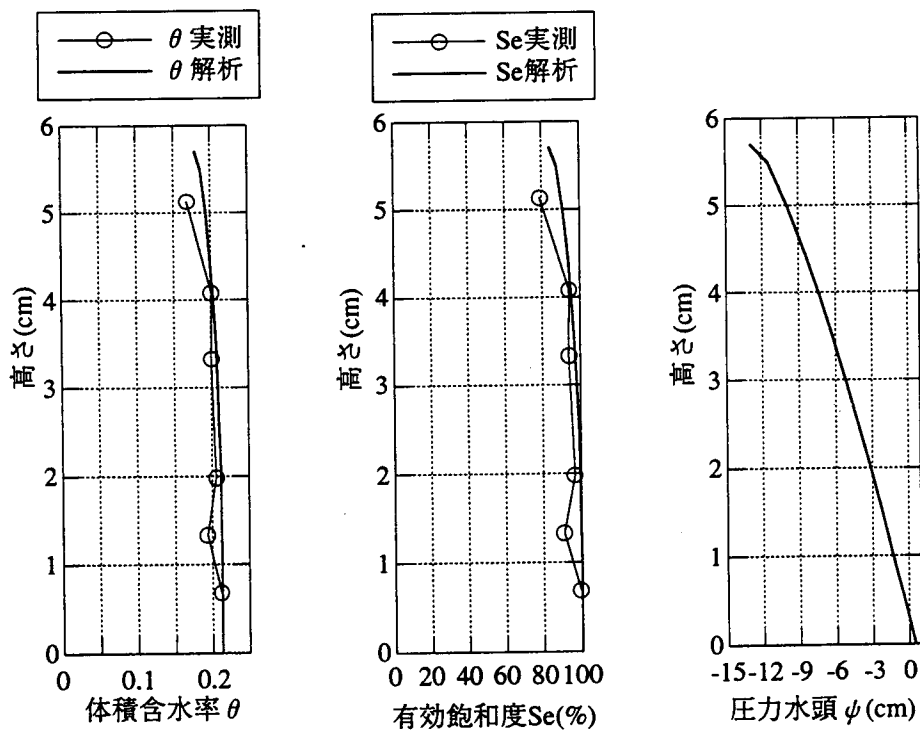


図 - 2. 1 3 S2の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

図 - 2. 14 に同定された  $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率、圧力水頭、相対透水係数の関係曲線の代表例として L2、L3 の結果を示す。

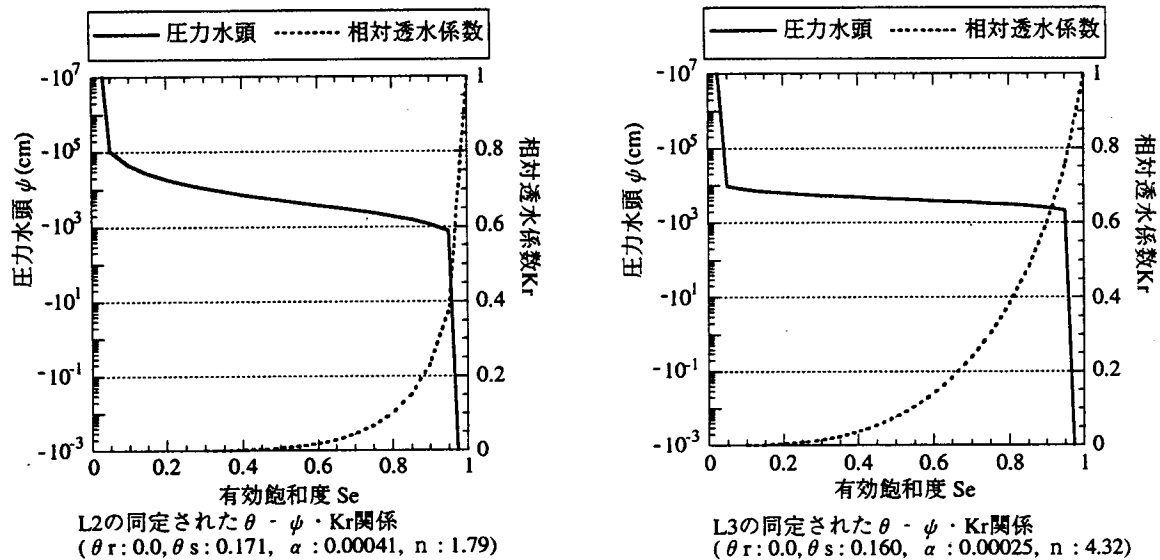


図 - 2. 14 同定された  $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率、圧力水頭、相対透水係数の関係曲線

### (5) 考察

本実験からは、供試体の長いものほど透水係数が小さくなっていったために、試料長さの違いと透水係数の違いの影響が混在し、厳密に試料長さのVG式のパラメータ同定結果に与える影響を十分に評価することはできないと考えられる。

蒸発量は供試体長さに係らずほぼ等しいこと、既往の計測データから、透水係数の変化に係わらずVG式のパラメータ  $\alpha$  はそれほど大きな変化をしていないという知見を考慮すると、供試体長さは不飽和特性同定結果に影響を与えうることが推察された。

岩石の有する不均質性による透水係数のコア長依存性の影響として、コア長の違いにより同定される不飽和特性が変化する可能性のあることが推察される。

境界条件の違いにより同定されたVG式のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  には境界条件の影響と考えられる明瞭な違いが確認される。この表から境界条件がパラメータ同定結果に影響を与える可能性のあることが推察される。



## 2. 5 圧力計測手法の適用性検討

### 2. 5. 1 圧力計測装置

#### (1) テンシオメーター

テンシオメーターはポーラスカップとこれに連結した圧力計からなる。ポーラスカップと圧力計の間は気密に脱気水で満たされ、ポーラスカップからしみだそうとする水と土壌水との連結から土壌の負の圧力（サクシオン）を計測する装置である。計測範囲は理論的に-1000cmH<sub>2</sub>Oまで計測可能であるが、実際には-800cmH<sub>2</sub>Oまでが限界とされている。

#### (2) サイクロメーター

サイクロメーターは熱電対を利用してその出力電圧から相対湿度を測定し、これから土壌中の化学ポテンシャル（≒負の圧力水頭）を間接的に求めるセンサーである。熱電対に電流を流すとその結合点が冷却する現象（ペルチェ効果）を利用し、土中の空気中の湿分をスクリーンゲージ内の熱電対の結合点に凝集させる。サイクロメーターで測定される化学ポテンシャルは、水頭で912～74100(cmH<sub>2</sub>O)の範囲にある。

### 2. 5. 2 圧力計測手法の適用性実験

#### (1) 実験方法

実験の基本的方法は、2. 3、2. 4に記した方法で、実験レイアウトは図-2. 15に示す。

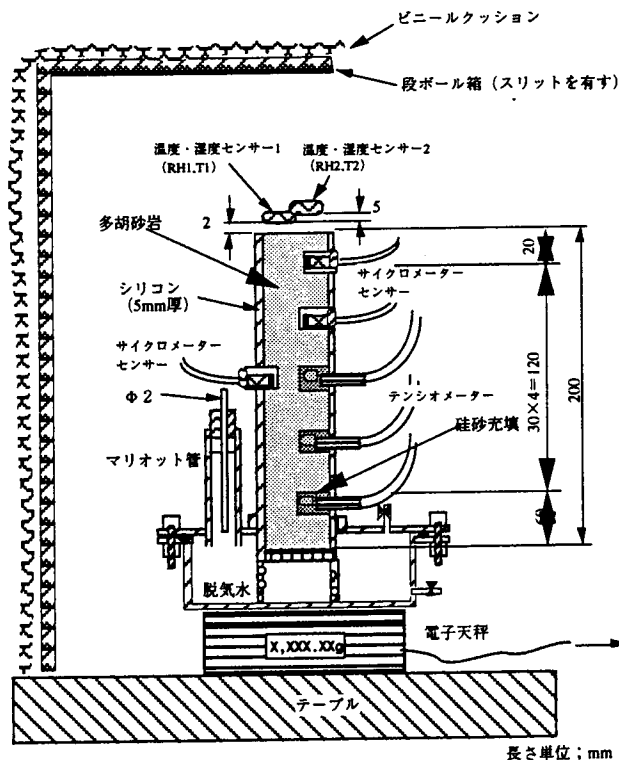


図-2. 15 実験レイアウト

(i) テンシオメーター取付け

テンシオメーターは試料下端から6 cm (PA2)、9 cm (PA1)、12 cm (PA3) に取付けた。この位置はL1、L2の同定解析の結果から、高さ12 cmで約-1000 cmの圧力水頭となっているためテンシオメーター取付けの上限を(-1000 cmはテンシオメーターの計測限界を越えるが上限付近での適用性を見ることも興味深いため) 12 cmとして設置した。

(ii) サイクロメーター取付け

サイクロメーターは試料下端より12 cm、15 cm、18 cmの位置に取付けた。これもL1、L2の同定解析の結果から、高さ12 cmで約-1000 cmの圧力水頭となっているため、この位置がサイクロメーターの計測下限と考え、それより上方に3 cm間隔でサイクロメーターを取付けた。センサーは、下端に取付けたものから順に、SC1、SC2、SC3とする。

(2) 実験結果

ここでは、実験結果として圧力計測について述べる。

(i) テンシオメーターによる計測

テンシオメーターによる圧力水頭の計測値経時変化を図-2.16に示す。このグラフからPA1の値はほとんど変化をしていない。これはポーラスカップセンサーの設置、あるいは感圧センサー等の空気の混入やポーラスカップのシリコンによる閉塞等のトラブルが原因と考えられる。そのためPA1の表示値は検討から除外することとする。

PA2とPA3に着目すると、計測開始50時間までは圧力の低下速度は大きく、50時間以降から低下速度が小さくなっている。計測は160時間(約1週間)以上実施しているが、160時間時点で圧力は低下しており、十分定常に達してはいないことがわかる。しかしながら、実験開始50時間の圧力の変化と比べかなり変化が小さくなったこと、および蒸発量や重量計測結果から蒸発量はほぼ定常と判断されるため定常と見なし、この時点の圧力計測を定常時の圧力とすることとした。

160時間目における圧力水頭 $\psi$ は

9cm : -445cm

12cm : -469cm

を示している。

(ii) サイクロメーターによる計測

サイクロメーターによる電圧計測結果を図-2.17に示す。電圧はセンサー冷却時に上昇し、露点計測モードに変更後急降下し一度変化の小さい状態となる。このときの値が露点法の電圧とな

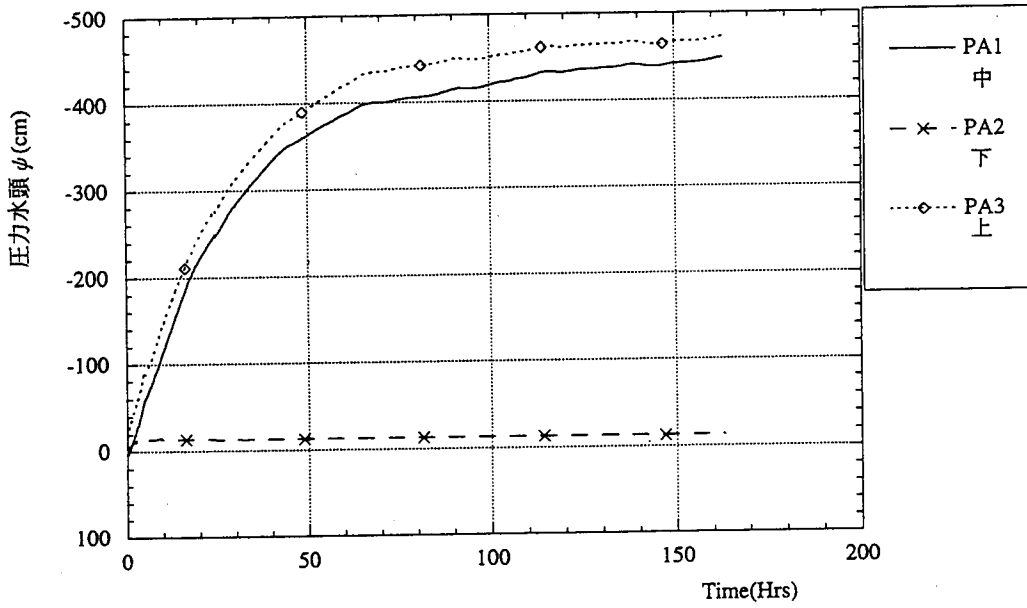


図 - 2. 16 テンシオメーターによる圧力水頭の計測値経時変化

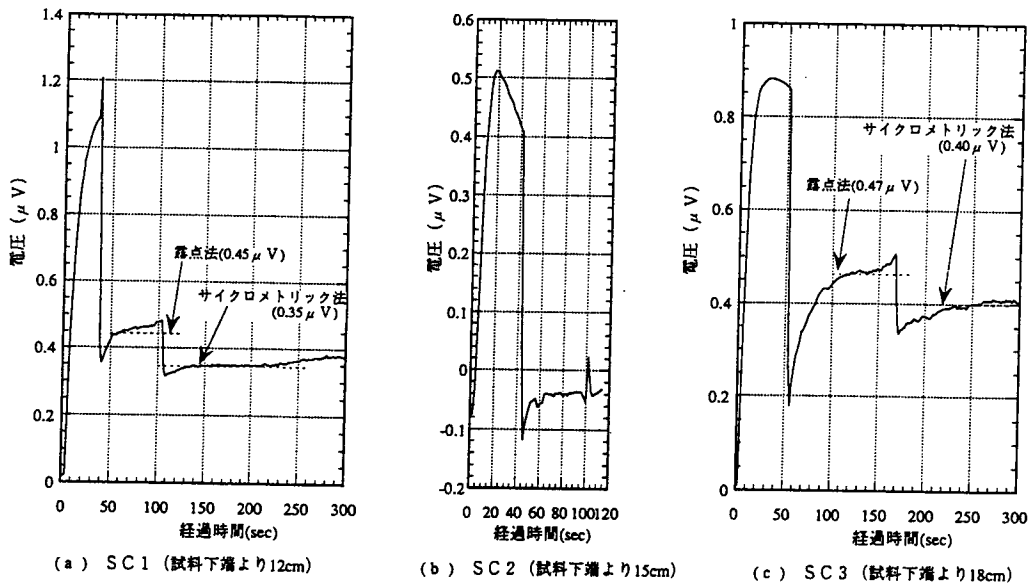


図 - 2. 17 サイクロメーターによる電圧計測結果

る。その後モードをサイクロメトリックモードに変更すると再び電圧は降下し変化の小さい状態となる。このときの値がサイクロメトリック法の電圧となる。SC2はセンサー冷却一気の電圧が0以下に降下してしまい計測不可能となった。これはセンサートラブルと考えられ、以降SC1、SC3を検討対象とする。計測結果は表-2.7のようにまとめられる。

表-2.7 サイクロメーターによる計測結果

センサー	π値	温度 (℃)	露点法			サイクロメトリック法		
			(μV)	(bar)	(cm)	(μV)	(bar)	(cm)
SC1	59	23	0.45	0.60	-600	0.35	0.79	-790
SC3	57	23	0.47	0.63	-630	0.40	0.90	-900

※ 露点法 : 読み取り値 (μV) ÷ 0.75 = -bar

※ サイクロメトリック法: 読み取り値 (μV) ÷ (0.325 + 0.027×温度) = -bar

## (6) 考察

### (i) 圧力計測の適用性

通常土壌のサクションを計測するテンシオメーターを岩石に適用してみた。土壌に設置する場合、掘削しポーラスカップを所定の位置に設置、さらに掘削した土壌でポーラスカップを埋め戻し土壌に密着させ設置終了となる。岩石の場合土壌のように埋め戻しポーラスカップを岩石に密着させることは難しく、今回細粒硅砂を埋め戻しに用い、硅砂でポーラスカップと岩石の隙間を密着させた。これは硅砂をポーラスカップの延長と考え、岩石に密着するポーラスカップを岩石内に形成するという考え方である。硅砂の充填が適切になされていれば、計測値は妥当なものと考えられる。真の圧力は不明であり、計測値の妥当性を評価することはできないが、経時変化を見ると連続的な変化を示し、少なくともセンサー位置の上下関係に関してそれほど矛盾のある計測値は示しておらず、妥当な計測が行われていると考えられる。

サイクロメーターの計測範囲は水頭で-912~-74100(cmH<sub>2</sub>O)の範囲にあり、サイクロメーターの示した値はこの計測範囲外にある。そのため計測された値の信頼性は低いものの、露点法からサイクロメトリック法にかけての計測された電圧の変化は、マニュアルに示されているような変化挙動を示し、正常に作動していると考えられる。計測された結果もテンシオメーターの計測結果と比較し、値は合っていないが、オーダー的には同じである。またテンシオメーターの計測値はまだ変化している過程(圧力低下中)でもあり、両者はより近い値を示す可能性を有している。

テンシオメーター、サイクロメーターともにその精度的な課題は残すものの、計測結果は考えられるいくつかの事象に対して調和的傾向を示し、今後の不飽和領域内の岩石の圧力計測には適用の可能性のあるものと考えられる。

(ii) 圧力計測値と同定解析のパラメータを用いた圧力値

図 - 2. 18 に L4 の同定解析からの圧力水頭の鉛直分布とテンシオメーター、サイクロメーターから計測された圧力を併記して示す。

図から明らかなように同定されたパラメータを用いた解析による負圧は上端で-10000cmを越える値（絶対値としてより大きな値）を示している。下端からの高さが15cmにおいては約-4000cmの圧力水頭を示している。テンシオメーター、サイクロメーターから計測された圧力値と比較すると両者間にはオーダー的な隔りがある。実際-4000cmの圧力水頭が生じるのであれば、テンシオメーターやサイクロメーターの挙動から考えて（計測精度は十分ではないが作動は圧力変化に対する挙動等はほぼ正常と考えられるため）、今回適用を試みたテンシオメーターやサイクロメーターの計測値も負圧としてもっと大きな値を示してもよいように思われる。

同定解析のパラメータ同定の収束終了を多少変えて、同定解析のパラメータを用いた圧力値の見直しをすることも考えられるが、上端の圧力は変化するものの、高さ15cmより下の圧力分布が直線性を示す部分では、透水係数、動水勾配および流量の関係から考えて、ほとんど変化しないものと考えられる。

計測された圧力値から動水勾配、さらにそれに透水係数（ $5.1E-8\text{cm/sec}$ ）を乗じ蒸発量に換算した結果が表 - 2. 8 である。この表から計測された蒸発量（ $30\text{mg/sec/m}^2$ ）と比べ小さい蒸発量となっている。これに相対透水係数を乗じるとさらに小さな蒸発量となる。まだ圧力計測の妥当性が確認されていないが、仮にこれらの傾向が妥当であるならば、現在考えている以外の水分移動メカニズムを考慮していく必要が生じてくると考えられる。

表 - 2. 8 圧力計測から算定される動水勾配と蒸発量

計測方法	圧力水頭		位置水頭		動水勾配	蒸発量
	下センサー	上センサー	下センサー	上センサー		
	cmH <sub>2</sub> O	cmH <sub>2</sub> O	cmH <sub>2</sub> O	cmH <sub>2</sub> O		
テンシオメーター	-445	-469	9	12	7	4
露点法	-600	-630	12	18	4	2
サイクロメトリック法	-790	-900	12	18	17	9

計測結果はまだその妥当性を確認したわけではないが、同定されたパラメータを用いた解析の結果と圧力計測から考えられる事項との不整合性を説明するには、例えばVG式の適用やダルシー則を不飽和領域に拡張した1次元飽和不飽和浸透流解析と実際の水分移動のメカニズム（水蒸気の試料内の移動など）との違いなどを検討しておく必要がある。またこのような議論は圧力計測結果に基づいたものであり、圧力計測の妥当性を確認したうえで同様の実験・検討をし不飽和領域内の水分移動メカニズムの検討をすすめていく必要があると考えられる。

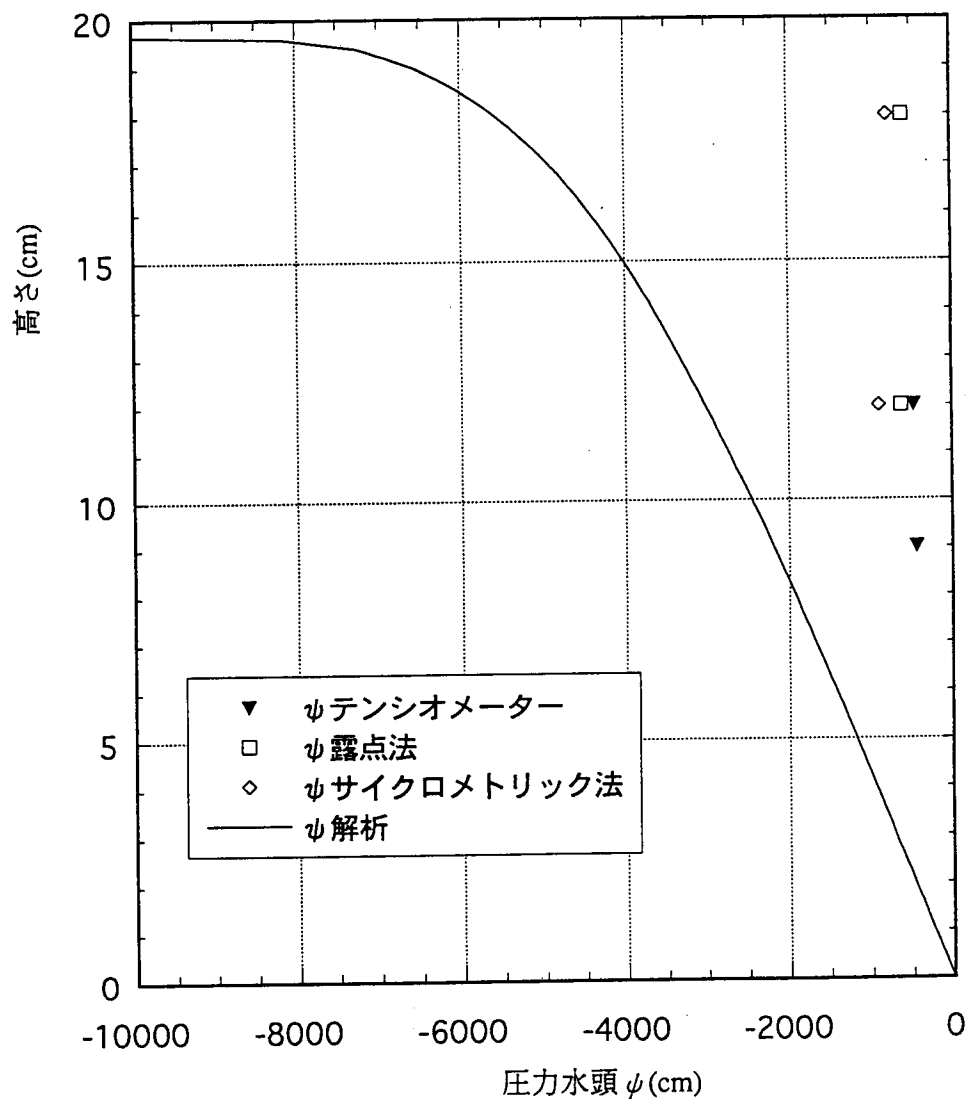


図 - 2. 18 に L 4 の同定解析からの圧力水頭の鉛直分布とテンシオメーター、サイクロメーターから計測された圧力水頭

## 2. 6 まとめ

### (1) 成果

上記検討を通じて得られた成果は以下のとおりである。

- ① 不飽和パラメーター既知試料として豊浦標準砂を対象に蒸発量とVG式による不飽和特性の推定法の適用性の検討を実施した。同定された不飽和特性は既存の豊浦標準砂の不飽和特性とほぼ一致をした。計測した圧力と同定された不飽和特性に基づく圧力値とは良く一致し、本手法の妥当性が確認できた。
- ② 多胡砂岩では、供試体長さが大きいほど透水係数が小さくなる傾向が見られ、供試体長さが大きいほどVG式のパラメータ $\alpha$ は小さくなった。nについては供試体長さの違いによるnの有意な違いは認められなかった。供試体長さは不飽和特性同定結果に影響を与えうることが推察された。
- ③ 流出部境界条件（蒸発量）が変化すると、VG式のパラメータ $\alpha$ も同じオーダーで変化することが確認された。流出部境界条件（蒸発量）の違いは不飽和特性同定結果に影響を与える可能性のあることを確認した。
- ④ 流出部境界条件（蒸発量）の違いは不飽和特性同定結果に影響を与える可能性のあることを確認した。
- ⑤ 透水係数が大きく異なる（数オーダー異なる）岩石および砂の場合でも、蒸発量はそれほど大きく変わらないことが確認された。
- ⑥ テンシオメーターを岩石の負圧計測に適用しうる可能性のあることが確認された。
- ⑦ サイクロメーターを岩石の負圧計測に適用しうる可能性のあることが確認された。

### (2) 課題

本年度の不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究を通じて挙げられる課題は以下のとおりである。

- ① 今回用いた試料では、不均質性による供試体相互の透水係数等のばらつきのため、結果の評価が一部困難となった。供試体長さや境界条件依存性を調べるためには、不均質性の小さい試料を用いて同一条件で同様な不飽和パラメータが得られることを確認しておく必要がある。
- ② 温度・湿度計測から求めた蒸発量と、蒸発に伴う重量減少から算定した蒸発量は、重量計測からの蒸発量が温度・湿度計測からの蒸発量の1.5～2倍となった。原位置での蒸発量は重量計測に拠る方法は不可能であり、この原因がどこにあるのかを今後明らかにしておく必要がある。

- ③ 逆解析においてパラメータの修正を計算上の桁落ち等のため人為的に起こった。今後はパラメータの修正方法、計算上の桁落ち対策等を検討する必要がある。
- ④ 数オーダー透水係数が異なる岩石・砂で、なぜ蒸発量があまり変わらないのか、またそのメカニズムを把握しておく必要がある。
- ⑤ 今回の実験では蒸発量計測時間は長いもので約1週間で、十分定常状態に到るにはより時間を要すものと考えられ、蒸発量計測時間はより長期間実施する必要がある。
- ⑥ 透水係数など試料のばらつきが多く、実験結果の評価が難しかった。今後の試験岩石はより均質な岩石を用いる必要がある。また、他の岩石でも蒸発量を計測し、岩石からの蒸発量は岩石の種類やその透水係数に依存しないのかを確認しておく必要がある。
- ⑦ 現状で、岩石内空隙の負圧を計測する手法が確立されていない。同定された不飽和特性の妥当性を吟味するためには負圧を計測する手法を開発しておく必要がある。



【参考文献】

- 1) van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, No. 5, pp. 892 - 898 (1980)
- 2) 堤和大、渡辺邦夫、菅伊三男、山脇真二 : 岩石の不飽和特性の逆推定法、応用地質、Vol. 35, No. 2, pp. 23 - 30, (1994)
- 3) 渡辺邦夫、柳澤孝一ほか : 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 (その1) 測定方法と室内実験、応用地質、Vol. 30, No. 4, pp. 11 - 18, (1989)
- 4) 国立天文台編 : 理科年表平成6年、pp. 442-443, (1994)
- 5) 空気調和・衛生工学会編 : 空気調和衛生工学便覧 I 基礎篇、pp. 186 - 193, (1991)
- 6) 上田政文 : 水蒸気勾配および拡散係数の測定、応用物理、Vo. 25, No. 4, pp. 144-149, (1956)
- 7) 中川徹、小柳義夫 : 最小二乗法による実験データ解析、pp. 95 - 111, (1986)
- 8) 西垣誠、竹下裕二 : 室内および原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究、pp. 32-33, (1993)

### 3. 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究

#### 3. 1 概要

今年度行った実験内容と主な目的を以下に示す。

##### ①コア供試体および小ブロックを用いた室内試験

供試体内部の含水状態を均一になるように制御し、超音波速度、比抵抗、電磁波速度の物理量と含水量（飽和度、体積含水率）の関係を求める。

##### ②大ブロック供試体を用いた室内試験

供試体内部を不均一な含水状態にし、測定した超音波速度、比抵抗、電磁波速度の物理量の分布から①で得られた関係を用いて、含水量の分布を推定する。実際に大ブロックを分割して測定した含水量と推定含水量とを比較検討することによって含水量推定に有効な物理量の評価をする。

図3-1 には本研究のフロー図を示す。

#### 3. 2 コア供試体を用いた室内試験

##### 3. 2. 1 試験方法

超音波伝播速度、比抵抗および電磁波速度と含水量の関係（キャリブレーションカーブ）を求める。大ブロック供試体と同じ岩石のコア供試体および小ブロック供試体を用いて、含水状態を変化させながら20状態程度において上記3種の物理量の計測を行った。原位置の坑道掘削に伴って、周囲の岩盤が飽和状態から不飽和状態への経路で変動すると予想されるので、コア供試体と小ブロック供試体も飽和状態から徐々に含水量を減らしながら物理量の計測を行うこととした。ほぼ所定の重量まで減量してから、コア供試体・小ブロック供試体内部の含水分布を均一にするために、供試体をラップで密封して約24時間後に物理量の計測を行った。

測定に用いた供試体はコア1～3および小ブロック1～3のそれぞれ3個ずつであり、コア4と5、小ブロック4と5は供試体内部の含水状態の均一性を確認するために分割して含水量を測定するのに用いた。超音波伝播速度および比抵抗測定には同一供試体（コア1～3）を用いることとし、同一ブロックより採取した3供試体について実施した。供試体は直径50mm×長さ100mmの円柱状で測定する軸方向は大ブロックの測定方向に一致するように切り出した。

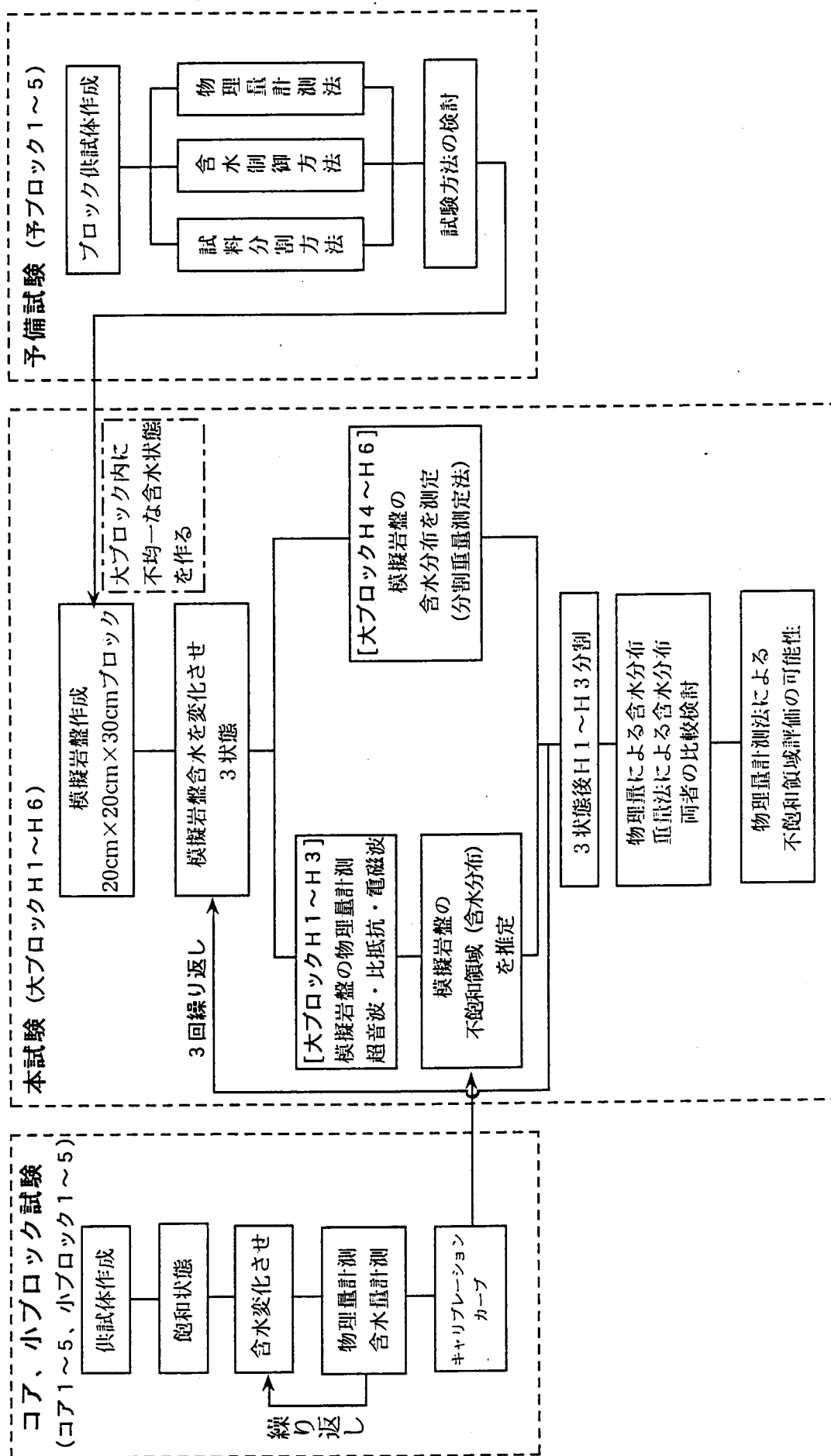


図3-1 研究の方法フロー図

電磁波測定に用いる供試体（小ブロック 1～3）は縦100mm×横100mm×長さ200mmの直方体とした。図3-2 に示すとおり、小ブロックの長手方向に測定ロッドの埋設孔を削孔した。埋設孔は2本で、孔中心間隔が30mm、孔径7mm、深さ190mmである。削孔は長さ30cm、ビット径7mmの特製ダイヤモンドビットを用いて行った。

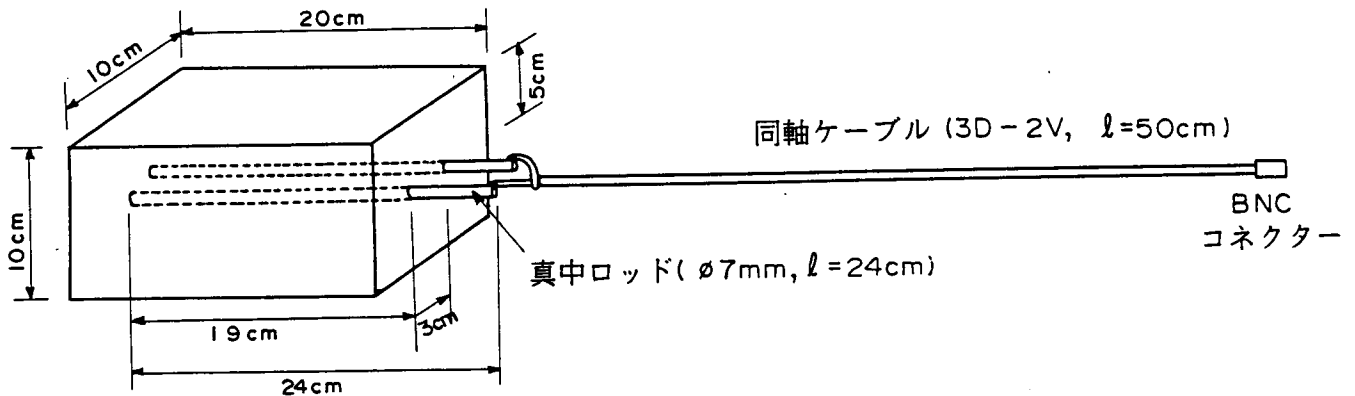


図3-2 電磁波測定用の供試体および測定ロッド

電磁波の測定装置はTDR（Time-Domain Reflectometry）と呼ばれるケーブルテスター（Tektronix 1502B、公称パルス幅 25  $\mu$ s）である。同軸ケーブルを介してパルス信号を送り、信号がロッド端部で反射して帰ってくるまでの時間を計測することで電磁波の伝播速度を計測することが出来る。ただし、TDRケーブルテスターはケーブルの故障箇所を検出するための測定器であるので、結果はケーブル内を伝播する電磁波速度を設定して故障箇所までの距離で表示される。岩石試料中で測定した電磁波の波形記録とロッドの長さとの関係を図3-3 に模式的示す。

今回の試験では反射波の往復時間は図中に示すように反射波の立ち上がり点を読み取ったが、反射波の立ち上がり波形に引いた接線と反射波形以前の基準線に引いた接線との交点を読みとる方法も良く用いられている。TDRの表示値を岩石の比誘電率に換算する式を以下に示す。

$$\varepsilon_{\text{sample}} = (L_{\text{sample}} / L_{\text{air}})^2 \cdot \varepsilon_{\text{air}}$$

ここで  $\varepsilon_{\text{air}}$  : 空気中での比誘電率 [-]

$\varepsilon_{\text{sample}}$  : 岩石中での比誘電率 [-]

$L_{\text{air}}$  : 空気中でのTDR表示値 [L]

$L_{\text{sample}}$  : 岩石中でのTDR表示値 [L]

Cursor ..... -0.028 mΔ  
 Distance/Div..... 00.1 m/div  
 Vertical Scale..... 100 mV/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avg  
 Power..... ac

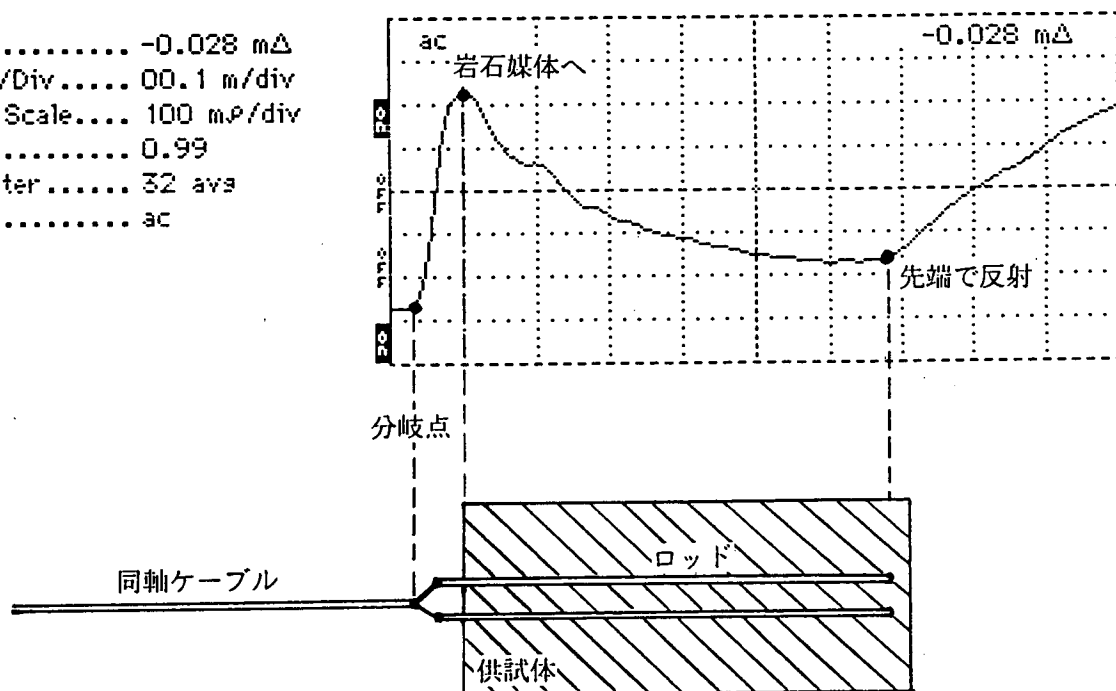


図3-3 電磁波速度測定波形とロッドとの関係

### 3. 2. 2 供試体分割による含水量測定

コアおよび小ブロック供試体内部の含水状態の均一性を確認するために、それぞれの供試体について異なる2含水状態を選び、供試体分割による含水量測定を行った。試験結果は、分割時供試体内部はほぼ均一な含水状態であったことを示した。

### 3. 2. 3 超音波速度測定

図3-4～図3-6に供試体別に、超音波速度（P波、S波）～体積含水率および飽和度の関係を示す。今回用いた多胡砂岩では、飽和度90～100%付近の高含水範囲、飽和度0～10%の低含水範囲において、P波およびS波速度ともに変化が認められた。すなわち、飽和度90～100%付近の高含水範囲においてP波速度がやや大きくなり、S波速度がやや小さくなる傾向を示した。また、飽和度0～10%の低含水範囲においてP波およびS波速度ともにやや増加する傾向を示した。

今回認められた速度変化の傾向はほぼ一定な速度を示す中間的な含水状態の範囲が飽和度10～90%と幅広いことを除けば、これまで報告されている超音波速度と含水状態の関係に整合的である（平成5年度報告書、3-38頁を参照のこと）。

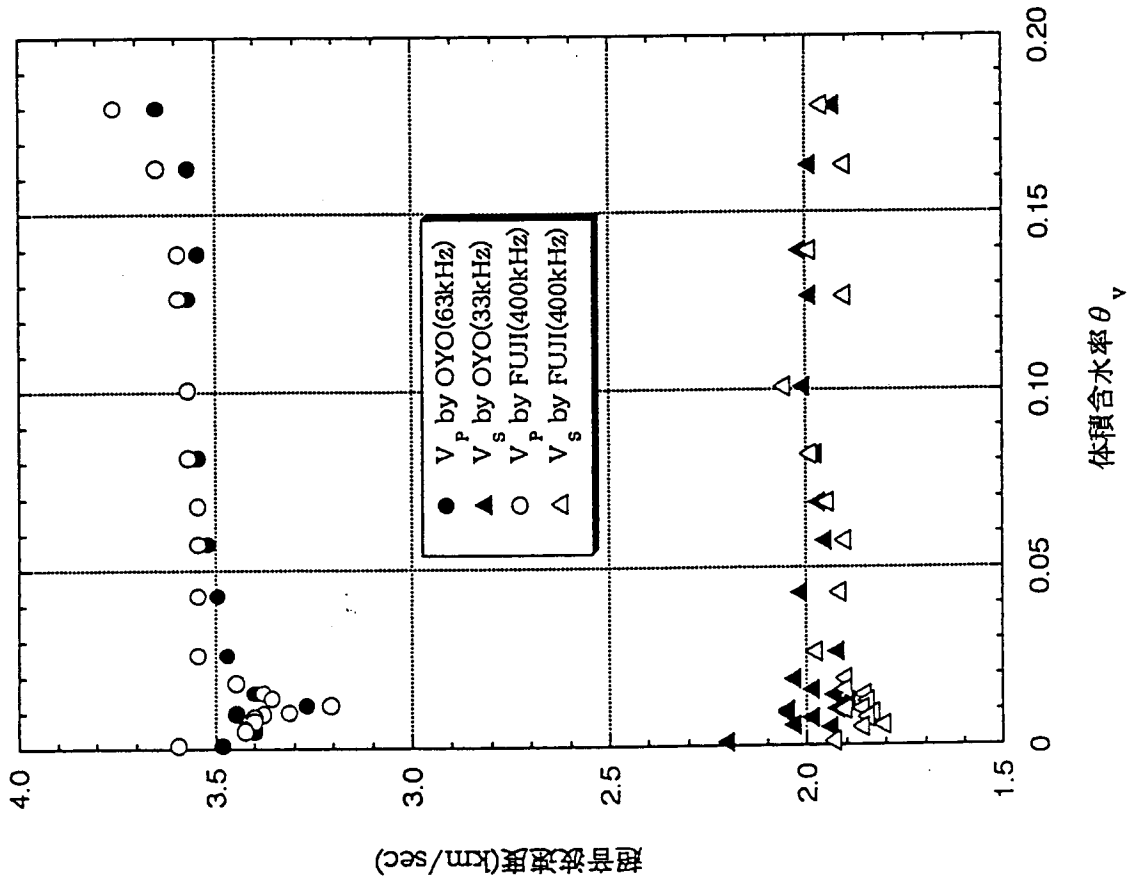
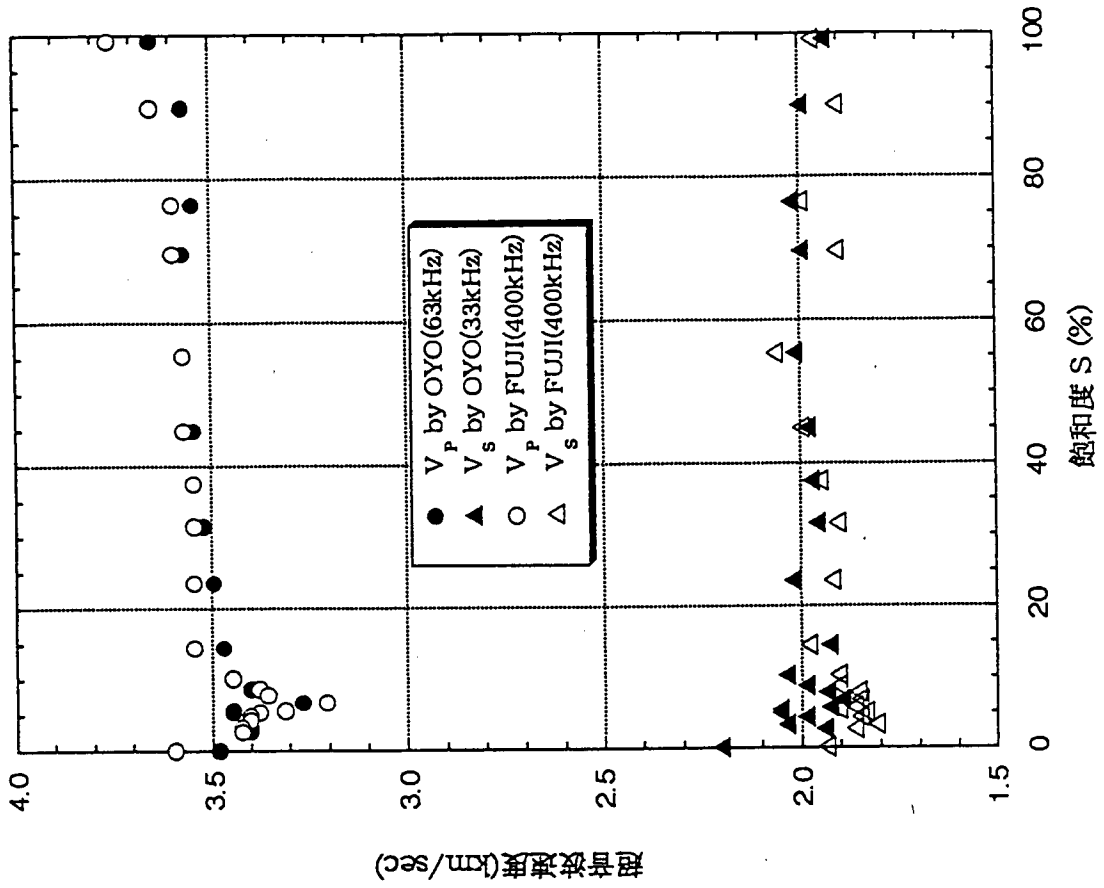


図3-4 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア1)

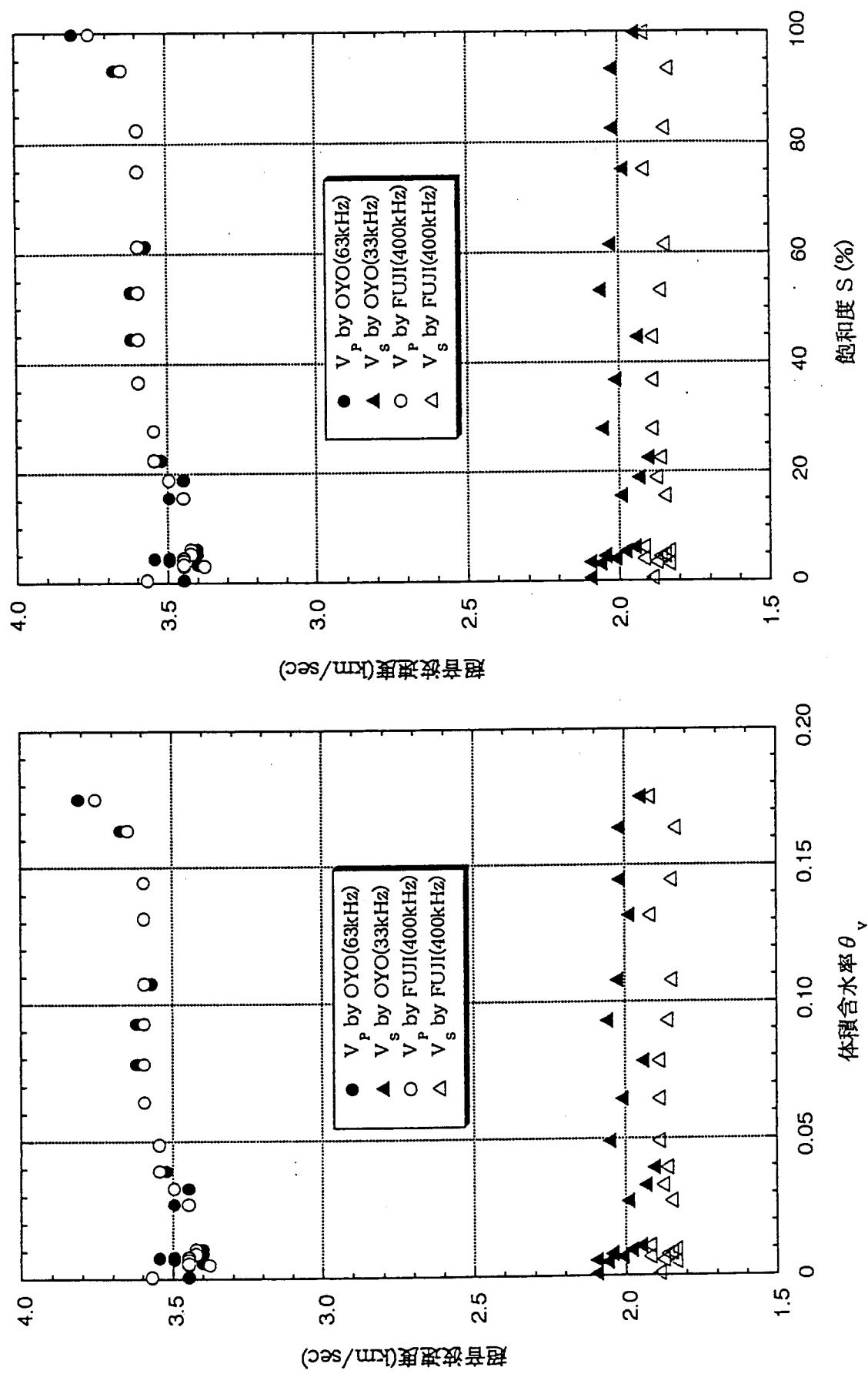


図3-5 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア2)

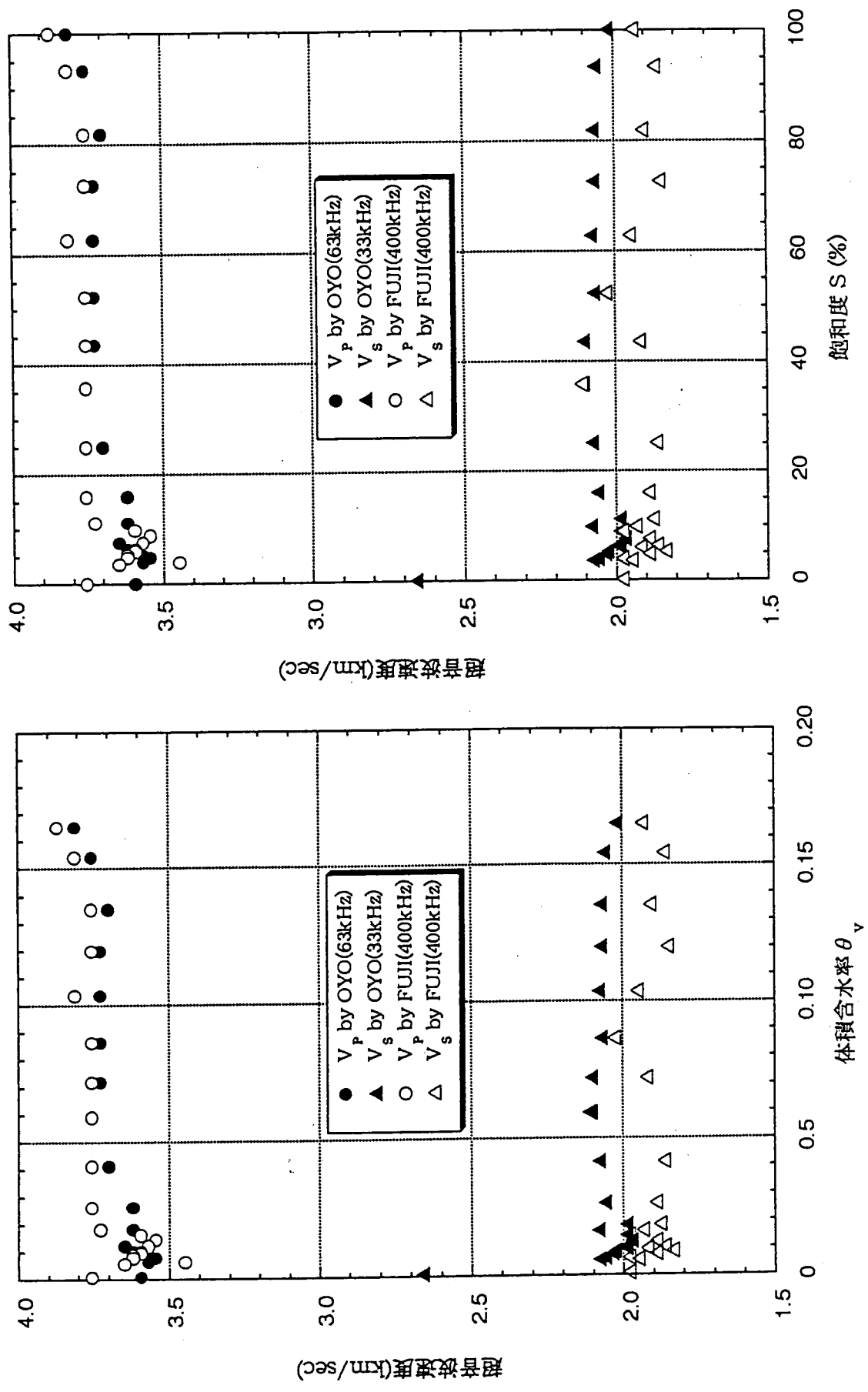


図3-6 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア 3)



今回の試験結果では含水状態の広い範囲にわたって超音波速度に有意な変化が見られなかったので、超音波速度の変化曲線は含水量を推定するためのキャリブレーション曲線としては適当とは言えない。また、今回の試験では供試体による測定値のばらつきも認められた。

### 3. 2. 4 比抵抗測定

図3-7 に体積含水率および飽和度と比抵抗の関係を示す。

3 供試体をとおして体積含水率 5 ~ 17%、飽和度 20 ~ 100% の範囲で比抵抗値がほとんど変化していない結果となった。体積含水率で 2% 以下、飽和度で 20% 程度以下において急激な比抵抗の上昇が認められる。

含水状態の変化に伴う岩石試料の比抵抗値の変化はアーチーの式を用いて表されることが多い。アーチーの式は次式で示される。

$$\rho = a \phi^{-m} S^{-n} \rho_w$$

ここで  $\rho$  : 岩石の比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$a$  : 定数

$\phi$  : 間隙率

$S$  : 飽和度

$\rho_w$  : 間隙水の比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$m$  : 膠結係数

$n$  : 飽和指数

今回の試験では同一岩石供試体を用いているため間隙率および間隙水の比抵抗は一定と見なせるのでアーチーの式は次のように変形できる。

$$\rho = a_1 \cdot S^{-n} \quad a_1 : \text{定数}$$

なお、飽和度と体積含水率とは同一供試体では正比例関係にあるので体積含水率についても次の式が成立するはずである。

$$\rho = a_2 \cdot \theta v^{-n}$$

ここで  $a_2$  : 定数

図中にはコア試験の結果にアーチーの式を適用して体積含水率および飽和度についてそれぞれ回帰分析を行った結果を示す。アーチーの式による曲線は飽和度 10 ~ 40% (体積含水率 1 ~ 5%) の範囲で測定値よりやや大きい値を示しているが、全体的な傾向はほぼ表している。

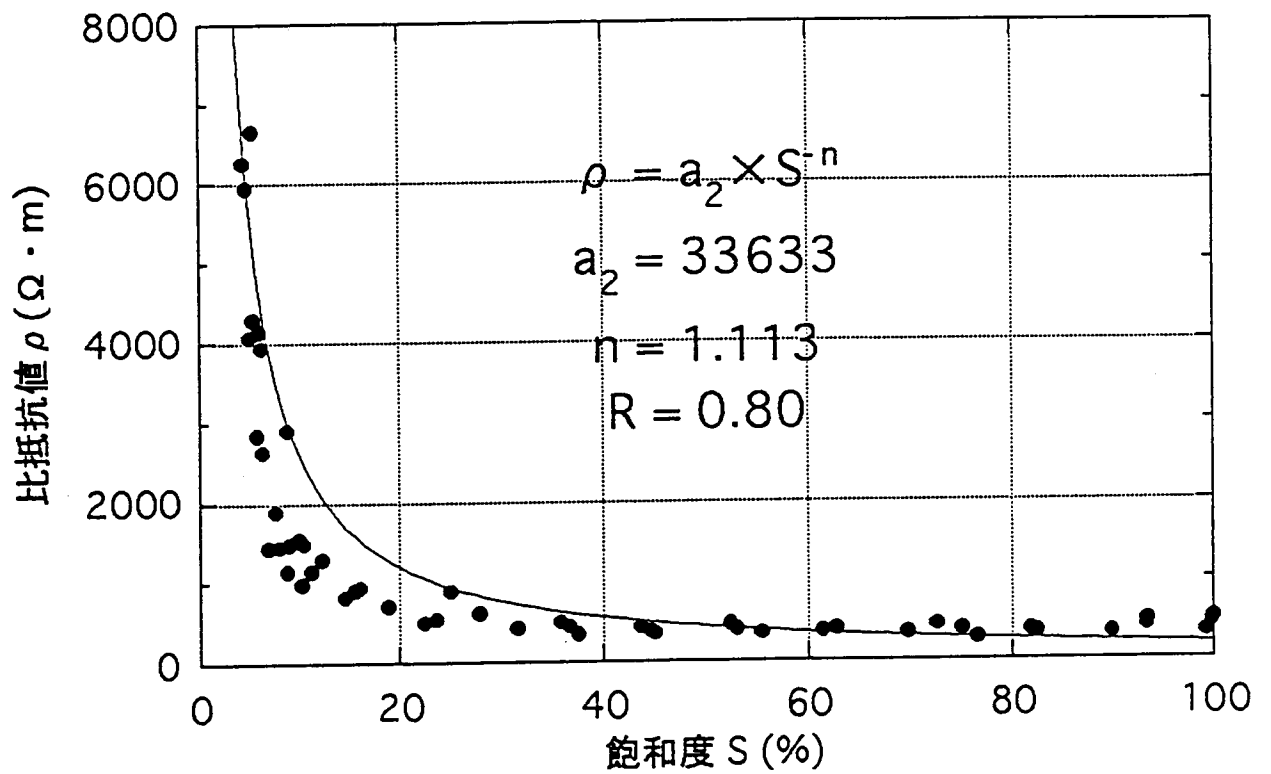
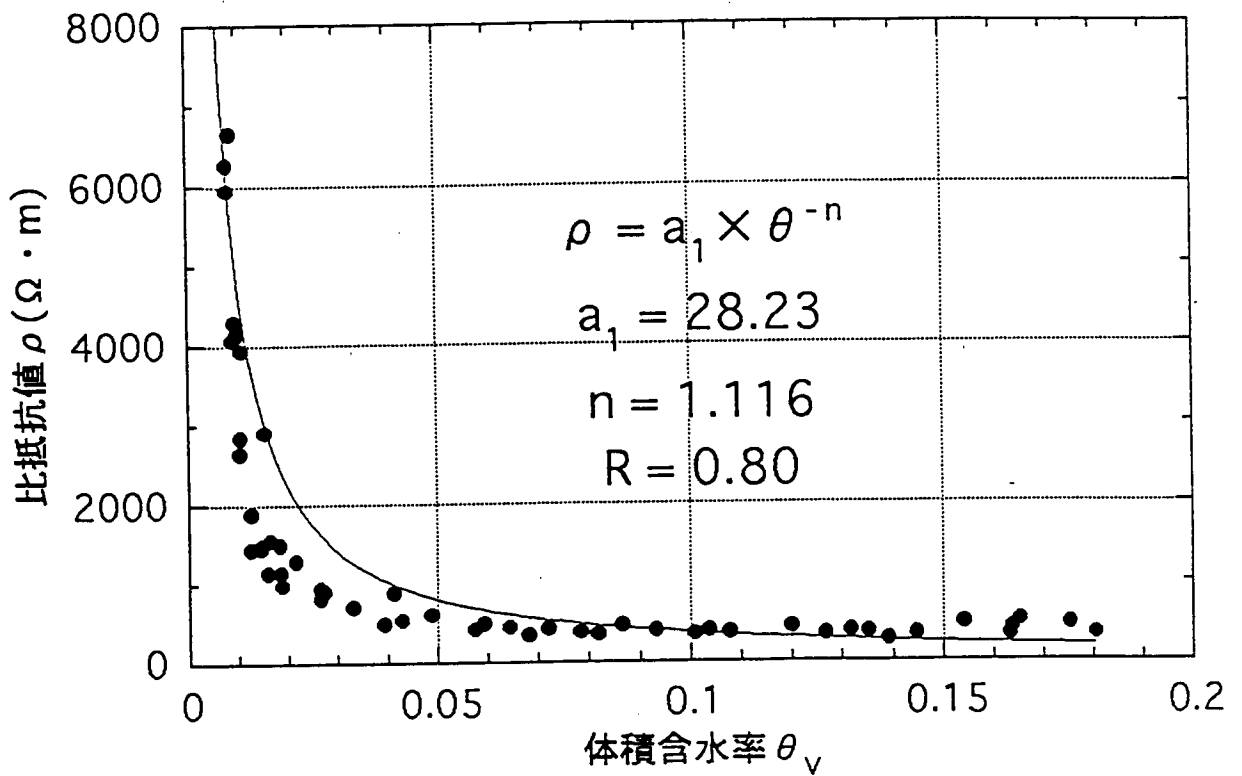


図3-7 体積含水率および飽和度と比抵抗の関係

回帰式は次式で示される。

体積含水率

$$\rho = 28.23 \cdot \theta v^{-1.116} \quad (\Omega \cdot m) \quad \theta v : \text{体積含水率}$$

飽和度

$$\rho = 33633 \cdot S^{-1.113} \quad (\Omega \cdot m) \quad S : \text{飽和度 (\%)}$$

多胡砂岩の比抵抗変化曲線の傾向から、飽和度20~100% (体積含水率5%以上) を対象とする場合、含水量を推定するための校正曲線としては適当とは言えない。

### 3. 2. 5 電磁波速度測定

図3-8 に体積含水率および飽和度と比誘電率の関係を示す。

試料によって飽和状態の体積含水率に差があったが、飽和度が90~100%の範囲で比較的急激に比誘電率が減少する傾向が認められた。また、飽和度10%以下でもやや非線形性が見られるが、飽和度10~90%間は直線に近いほぼなめらかな曲線を示している。

体積含水率および飽和度と比誘電率の関係については線形性が認められるので直線回帰分析を行った。その解析結果を図中に示す。回帰式は次式で示される。

比誘電率  $\varepsilon$  ~ 体積含水率  $\theta v$

$$\varepsilon = 3.137 + 27.7 \cdot \theta v$$

比誘電率  $\varepsilon$  ~ 飽和度  $S$

$$\varepsilon = 3.116 + 0.0508 \cdot S$$

$\varepsilon$  : 比誘電率  
 $\theta v$  : 体積含水率  
 $S$  : 飽和度 (%)

供試体を分割して含水量分布を測定した結果から小ブロック中の含水状態はほぼ均一であったと考えられることから、飽和度90~100%付近で比誘電率が含水量の低下に伴って比較的急激に減少する傾向については、含水状態の不均一性に起因するものとは考えにくい。また、仮に不均一な含水分布が供試体中に形成されていたとしても、通常は測定ロッド周りはその外側に比べて含水量が多いと考えられ、その場合むしろ曲線は図中で上側に膨らむ曲率を示すはずであり、今回得られたデータとは逆の傾向を示すものと考えられる。このことから、この現象の原因は測定上の別の原因によるものか、もしくは何らかの物理的なメカニズムに起因する可能性も考えられる。

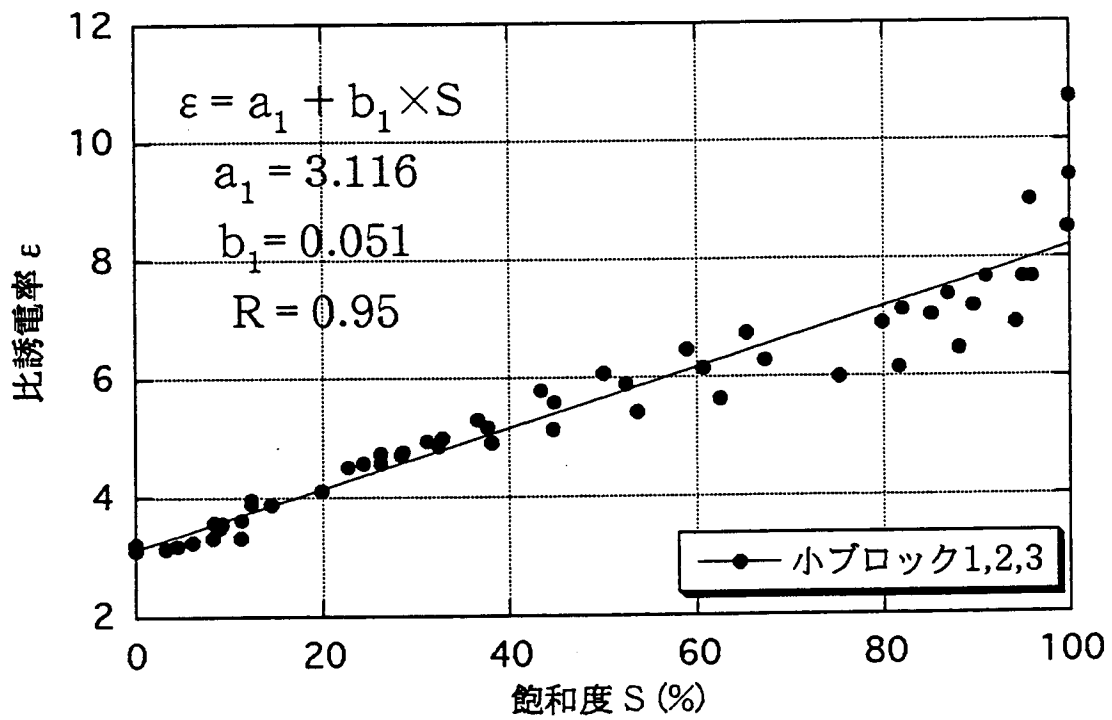
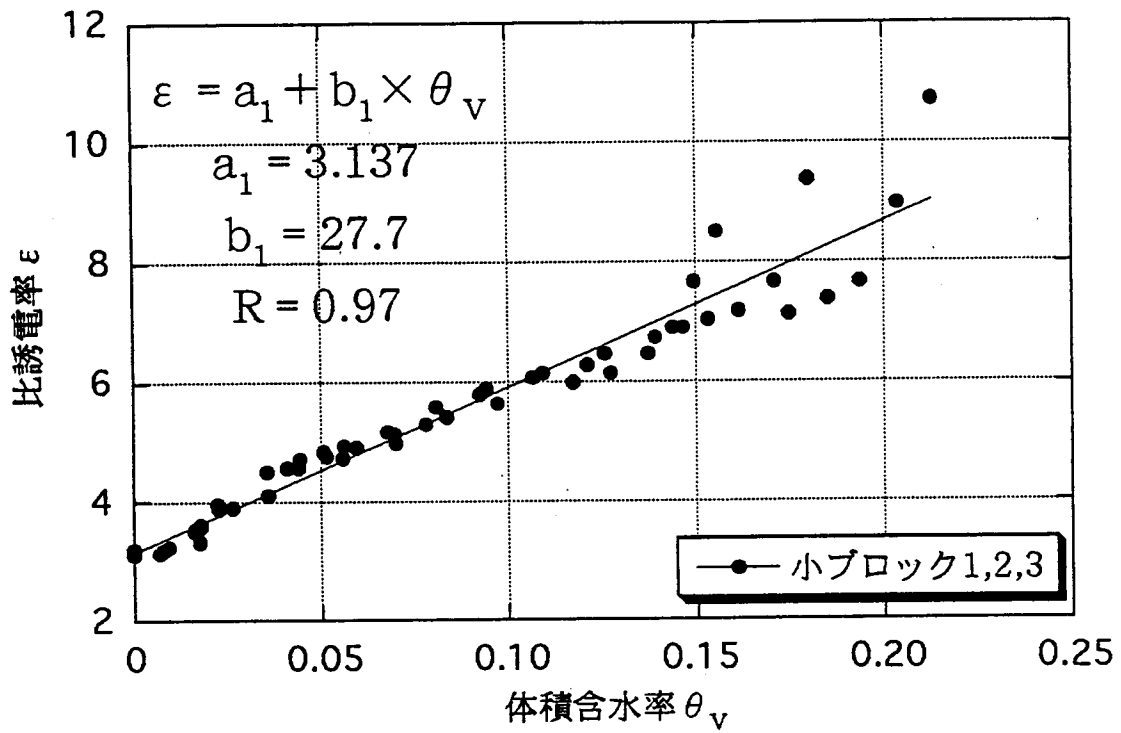


図3-8 体積含水率および飽和度と比誘電率の関係

### 3. 2. 6 考察

今回用いた物理量～含水量の関係の特徴を比べると以下のことが言える。

- ・超音波速度（P波）は飽和度0～10%、90～100%の範囲では含水量によって変化する傾向が認められた。
- ・比抵抗は飽和度0～20%の範囲で急激な変化を示した。
- ・比誘電率は飽和度0～100%の範囲でほぼ直線的な変化を示した。

これらの特徴から、単独の物理量による推定精度は低くても、複数の物理量を組み合わせることにより詳細な評価ができる可能性が考えられる。

### 3. 3 ブロック供試体を用いた室内試験

異なった境界条件（浸水、密閉、開放）を設定することにより、自然岩石のブロック供試体内部に図3-9のような不均一な3含水状態（水分の移動がほぼ安定した状態）を作り出す。これらの状態で、高さ方向の5箇所において物理量（超音波伝播速度、比抵抗、電磁波速度）の計測と試料分割法による含水分布測定を同時に行う。両者の関係を検討して、これらの物理量の計測による不飽和領域の間接測定方法の可能性を評価する。ブロック供試体を用いた本試験のフローを図3-10に示す。含水分布状態測定（大ブロックH4～6）、超音波伝播速度（H1）、比抵抗（H2）、電磁波速度測定（H3）は各々のブロック供試体で実施するが、すべての供試体はほぼ同様な含水分布を有することを前提とする。状態1および状態2の測定が終了した時点で含水測定ブロックH4およびH5をそれぞれ分割して含水量の分布を確認する。最後の状態3における測定が終了後には、含水測定ブロック（H6）と物理量測定ブロック（H1～3）を全部分割して含水分布を確認する。

#### 3. 3. 1 予備試験

今回行ったような試験は従来ほとんど実施されておらず、試験方法そのものが実施可能かどうか調べる必要がある。よって、本試験と同岩種・同寸法（20×20×30cm）のブロックを用いて、含水制御および物理量測定方法等について予備試験を実施した後、本試験を実施した。供試体には、本試験と同じように4側面にシリコンシーラントでシーリング処理を行った多胡砂岩を用いた。

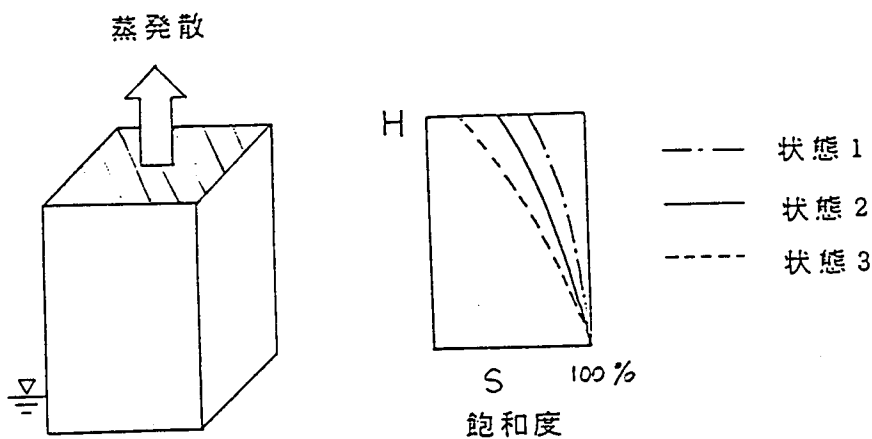
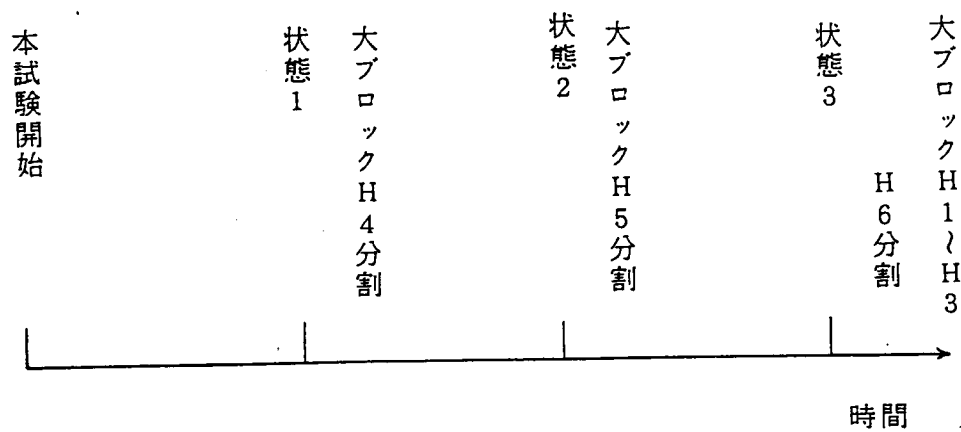


図3-9 3 含水状態の概念図

### 3. 3. 2 試験方法

#### (1) ブロック供試体

本試験に用いるブロック供試体は、分割して重量測定による含水量分布測定用の3 供試体 (H 4 ~ 6) と超音波伝播速度 (H 1)、比抵抗 (H 2)、電磁波測定用 (H 3) の3 供試体で計 6 個である。各々の供試体は同一寸法で、縦 20 cm × 横 20 cm × 高さ 30 cm (初期重量約 27 kg) の直方体とし、供試体の長手方向は鉛直方向となり、各高さにおける物理量の測定方向は水平方向である。

含水量分布測定のための試料分割作業の際、試料内部も含水量の変化を起こしてはならないので、通常の岩石切断機は使用できず、たがねで分割することとした。ほぼ所定の位置で分割できるように、あらかじめ含水量分布測定用ブロック供試体 (大ブロック H 4、H 5、H 6) の周囲に深さ 2.5 cm の切れ目を入れた。切れ目の位置は測定ブロックの各高さにおけるセンサー位置を中心に挟み込む位置に対応させて下端面か

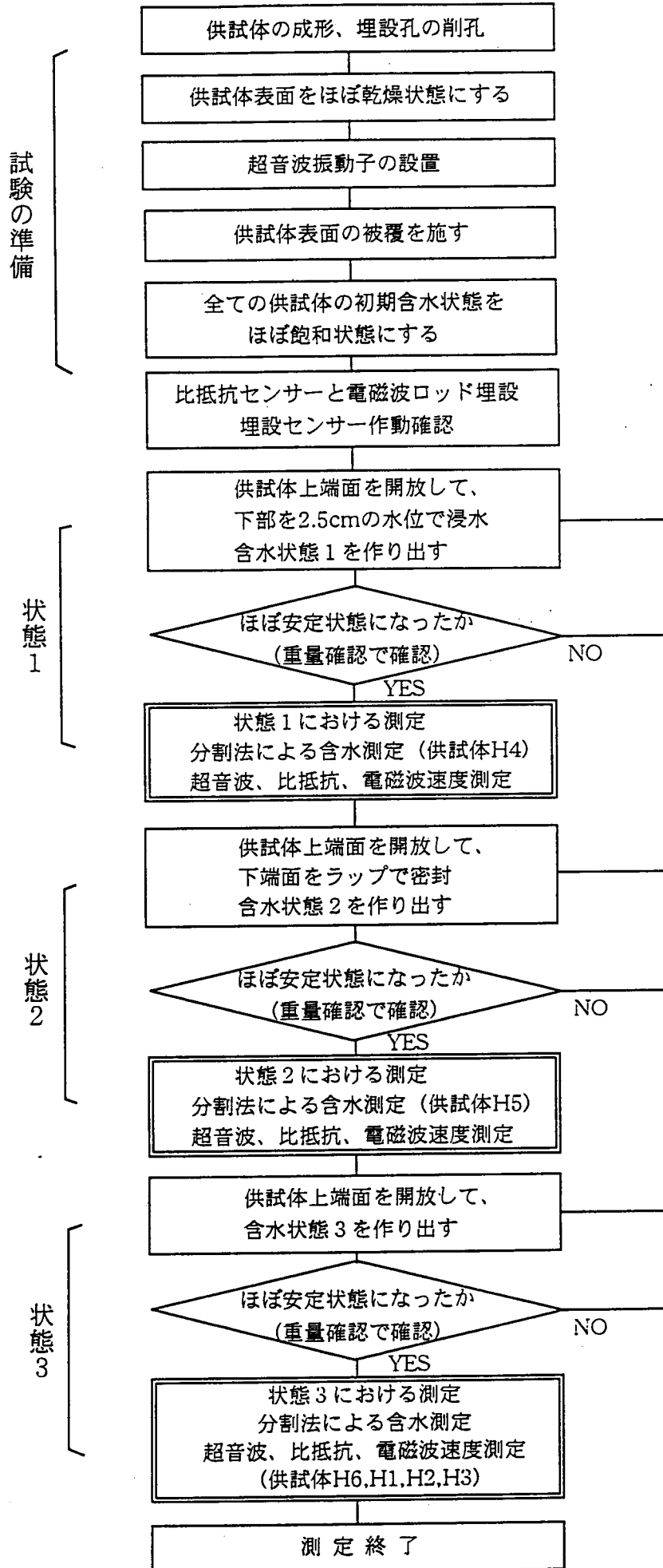


図3-10 ブロック供試体を用いた本試験のフロー

ら7.5 cm、12.5 cm、17.5 cm、22.5 cmとした。下端部と上端部とは端面部を含むので7.5 cmの厚さになっている。なお、切れ目で区切られた部分は下部から上部への順に、レベル1～レベル5と称する。

予備試験の結果、(株)富士セラミックス製の超音波振動子を用いた場合に、超音波は20 cmの供試体を十分透過することがわかったので、超音波センサーをブロック供試体（大ブロックH1）の側面に接着剤を用いて貼りつけることとした。貼付位置は下端面から5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cmの位置である（図3-11）。P波速度とS波速度振動子の間隔は約2 cmであり、S波速度の振動方向は水平とした。

比抵抗測定用供試体（大ブロックH2）は、電極センサーを埋設のため、超音波速度測定用ブロックの振動子貼付け位置と同じ高さで左右の中心線位置に直径10mmの貫通孔を5本削孔した。比抵抗の測定は環状電極を用いた等間隔4極法（ウェンナー配置）を採用することとし、測定ブロックに削孔した孔に挿入する電極センサーを製作した。図3-12 に電極センサーの概要図を、図3-13 には比抵抗測定用の電極センサー配置図を示す。

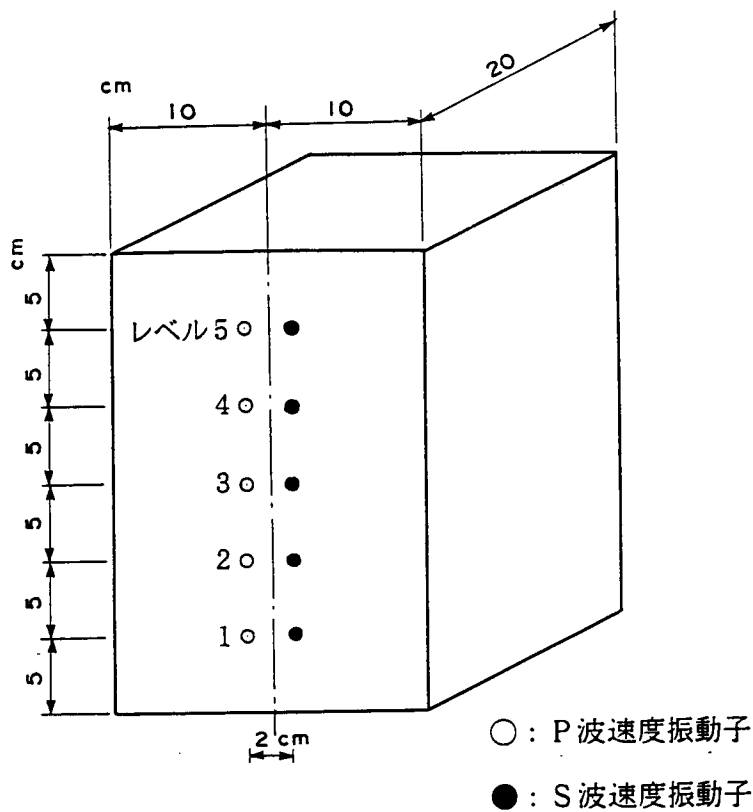


図3-11 超音波測定用ブロックのセンサー配置図



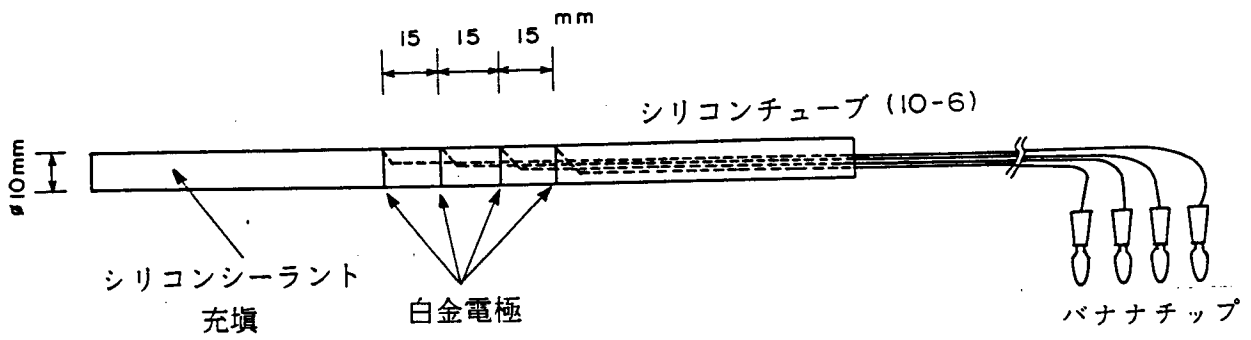


図3-12 比抵抗測定用の電極センサー概要図

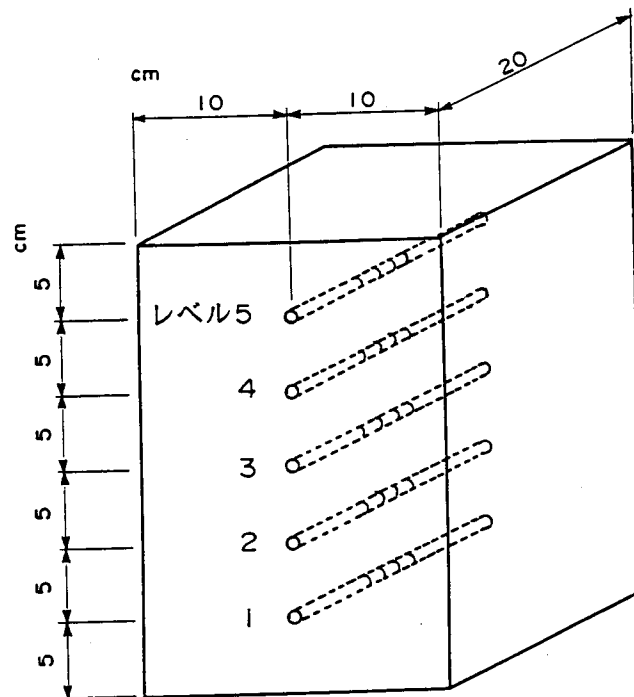


図3-13 比抵抗測定ブロックのセンサー配置図

電磁波測定ブロック供試体（大ブロックH3）は、電磁波測定ロッド埋設孔として、超音波測定ブロックおよび比抵抗測定ブロック供試体と同じ高さの5レベルで直径7mm、中心間隔3cm、長さ19cmの不貫通孔を各々2本、計10本掘孔した（図3-14）。水平方向の2孔の中心が試料側面の中心線に一致している。測定孔の深さは19cmとしてあり、供試体内で電磁波パルスの反射が生じるように裏側側面まで1cmを残して止めてある。測定ロッドの埋設にあたっては導電性のクリーム（ケラチンクリーム）を流し込んだ後にロッドを挿入して、ロッド周辺に空気間隙が出来ないように処置をした。

供試体の同一高さレベルでの含水分布を均一に、かつ水分移動を1次元にするために、シリコンゴム（信越シリコン、KE-45-TS）を供試体に3回重ね塗りし、その上に粘性の高いシリコンゴム（信越シリコン、シーラント45）を塗り、全体の厚さを5mm程度にした。

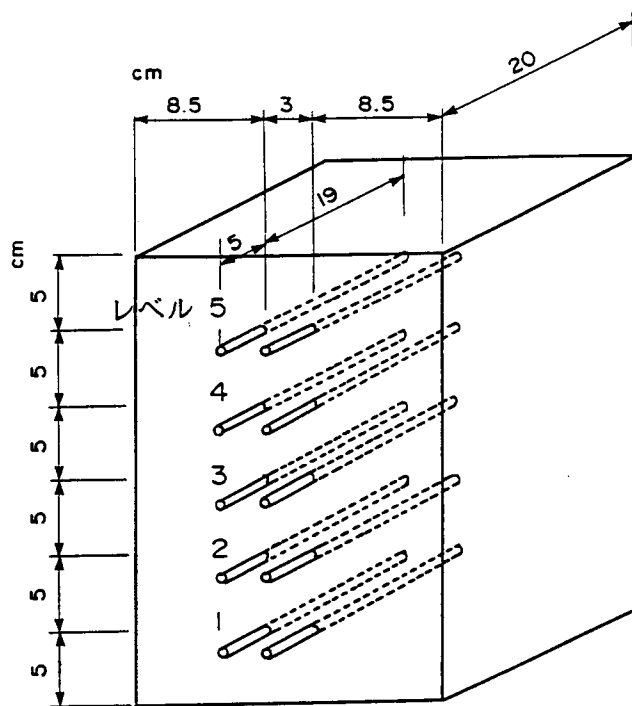


図3-14 TDR測定ブロックのセンサー配置図

## (2) 大ブロックの重量変化

コア供試体と同様、原位置で掘削に伴って坑道周辺に不飽和領域が生じる現象と同一な含水変化の経路にするため、脱気水道水（電気伝導度約 $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）を用いて10日間浸水処理をした後、乾燥過程の境界条件を与えた。図3-15 に大ブロック重量の経過時間変化を示す。

図には完全水浸状態から取り出して乾燥過程に入った時点を目準にして重量変化を示している。各ブロックによって重量の違いはあるが、重量変化の傾向はほぼ同じであることがわかる。図中には実際に測定を実施した時点も示した。状態1の測定前後で重量変化の傾向に明らかな差が認められる。これは、状態1の測定までは下端部を水浸しているが、状態1の測定直後には水浸を取り止めて、サランラップで下端面をラッピングしたことの影響を示している。

実際に測定を実施した日を次に示す。

- 状態1の開始日     2月7日（下端部 2.5cm 水浸、上端面は室内乾燥状態）
- 状態1の測定日     2月14日（測定後水浸取り止め、下端面ラッピング、上端面は室内乾燥状態）
- 状態2の測定日     2月21日（同じ状態を継続）
- 状態3の測定日     3月1日（同じ状態を継続）

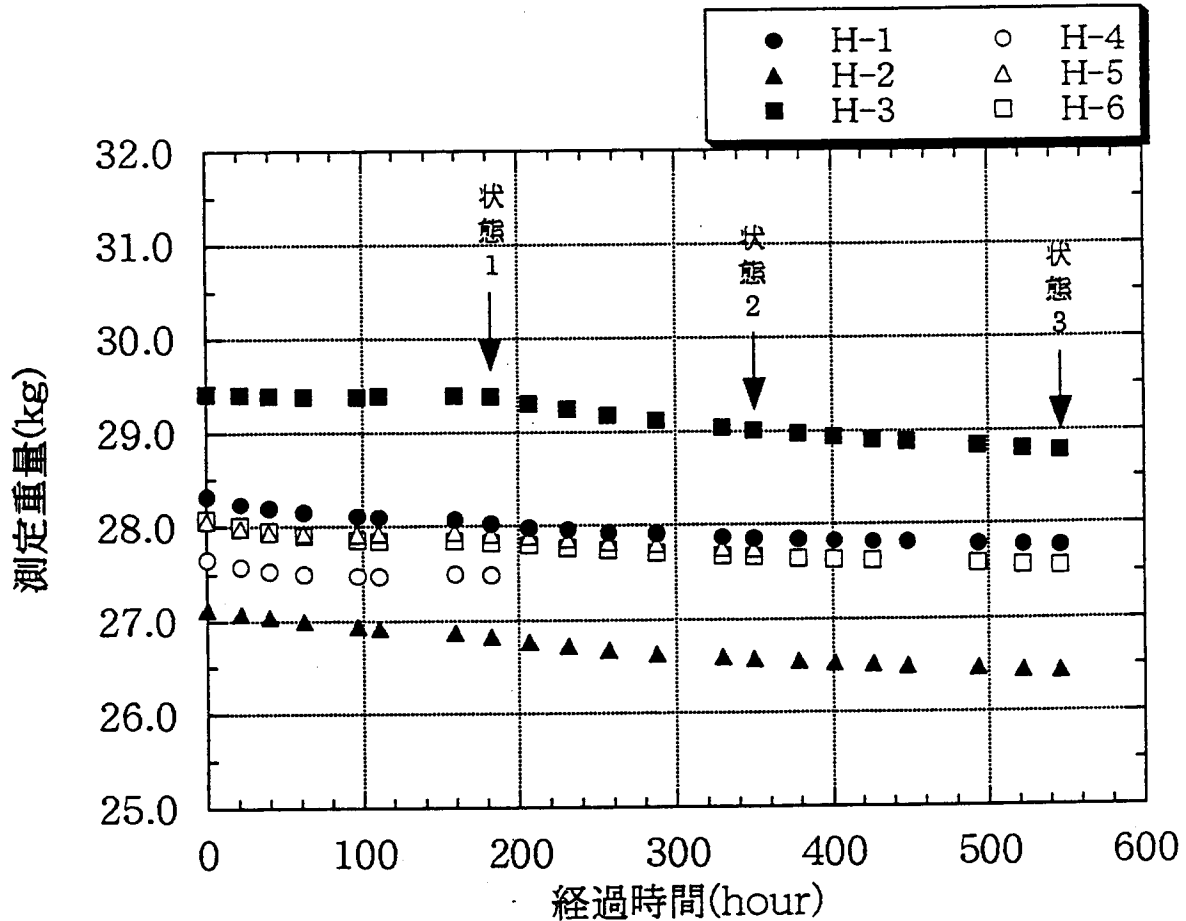


図3-15 ブロック供試体重量の経過時間変化図

### 3. 3. 3 超音波速度測定

表3-1 には測定結果一覧表を、図3-16 には3状態での伝播速度分布を示す。P波、S波ともに高さとともに速度が減少する傾向が明瞭に認められる。また、状態1～3でほとんど変化が認められない。

表3-1 測定結果一覧表

測定 レベル	センサー 位置 * cm	センサー 間距離 cm	状態1の速度		状態2の速度		状態3の速度	
			P波 km/sec	S波 km/sec	P波 km/sec	S波 km/sec	P波 km/sec	S波 km/sec
5	25.0	20.160	3.512	2.164	3.524	2.164	3.512	2.164
4	20.0	20.163	3.512	2.176	3.549	2.188	3.549	2.188
3	15.0	20.165	3.613	2.301	3.626	2.301	3.626	2.301
2	10.0	20.168	3.693	2.328	3.707	2.328	3.721	2.328
1	5.0	20.170	3.849	2.426	3.849	2.441	3.849	2.441

\* 下端面からの距離

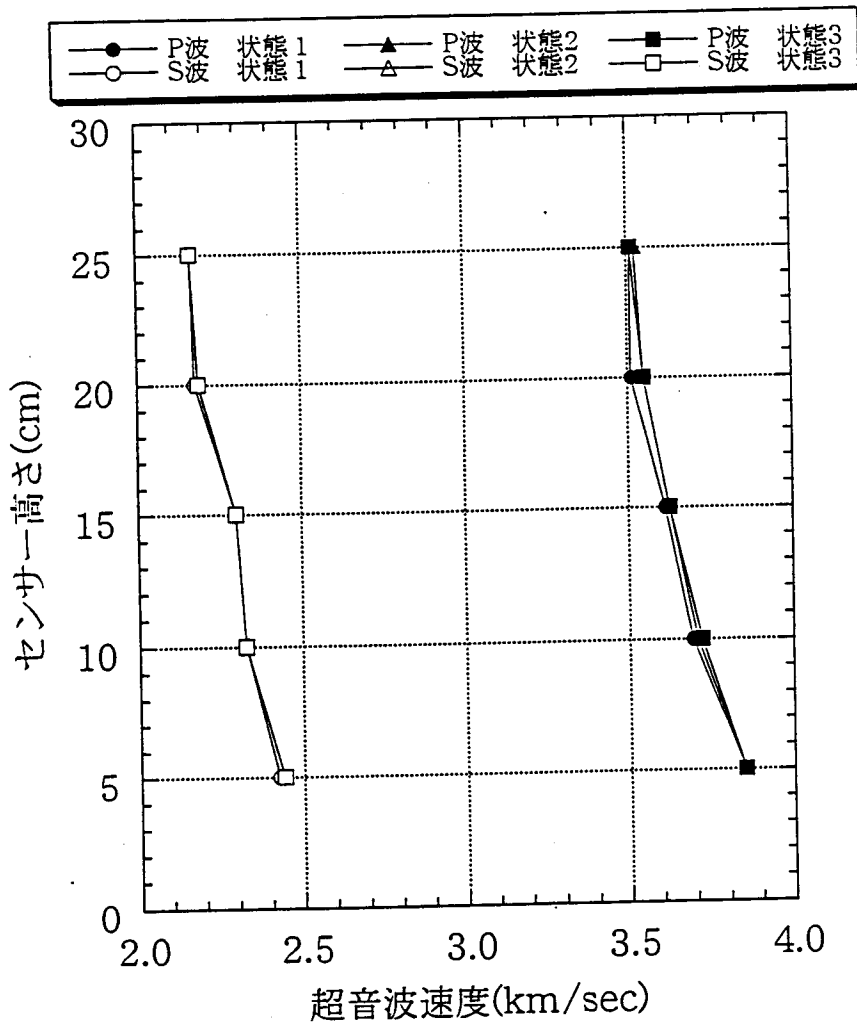


図3-16 超音波速度 (P波、S波) - センサー位置の関係

### 3. 3. 4 比抵抗測定

表3-2 に測定結果一覧表を示す。図3-17 に3状態での大ブロックH 2内部の比抵抗分布を示す。

比抵抗値の高さ方向分布は、含水状態が大きいと考えられる下部のレベル1 および 2 で比抵抗値は大きく、中ほどより上部のレベル3～5で小さい値となった。また、状態1から状態3へ乾燥が進むにつれて比抵抗値が大きくなる傾向を示した。

表3-2 比抵抗測定結果一覧表

測定レベル 5:最上部 1:最下部	* 換算 係数	状態1		状態2		状態3	
		R (Ω)	比抵抗 (Ω・m)	R (Ω)	比抵抗 (Ω・m)	R (Ω)	比抵抗 (Ω・m)
5	0.388	647.3	251.2	1122.	435.3	1438.	557.9
4	0.385	545.6	210.1	942.8	363.0	1196.	460.5
3	0.381	912.1	347.5	980.1	373.4	1272.	484.6
2	0.379	2144.	812.6	2624.	994.5	3119.	1182.1
1	0.377	2434.	917.6	2788.	1051.1	4737.	1785.8

\* 換算係数=  $4\pi a \cdot Gb$ 、ここで  $4\pi a$  (aは電極間隔)は等間隔4極法に対する電極配置係数、Gbは境界条件・電極特性・環状電極であることを考慮した補正係数である。比抵抗は換算係数×測定抵抗Rによって求める。

### 3. 3. 5 電磁波速度測定

表3-3 に測定結果一覧表を示す。

3状態での大ブロックH 3の比誘電率分布を図3-18 に示す。含水量がより多いと考えられる供試体下部ほど比誘電率が大きく、含水量がより少ないと考えられる供試体上部ほど比誘電率が小さくなる傾向を示している。また、状態1から状態3に至る過程で乾燥が進むにつれて各レベルともに比誘電率が小さくなる傾向にある。

状態2および状態3で最下部のレベル1がレベル2より小さい比誘電率を示すのは、試料底面にサラップを巻いていたものの、底面から水分の乾燥があったことを示していると考えられる。

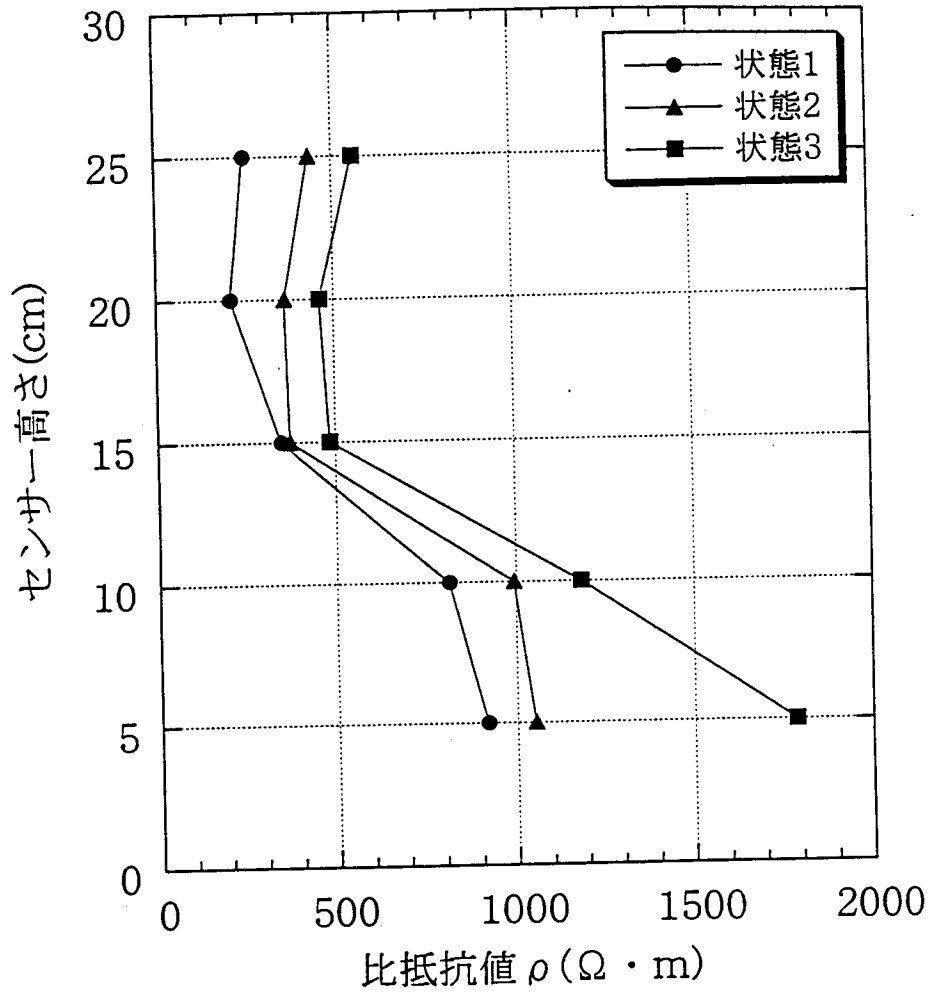


図3-17 比抵抗値－センサー位置の関係

表3-3 TDR測定結果一覧表

測定レベル 5:最上部 1:最下部	状態1		状態2		状態3	
	表示値 (m)	比誘電率 $\epsilon$	表示値 (m)	比誘電率 $\epsilon$	表示値 (m)	比誘電率 $\epsilon$
5	0.618	7.870	0.577	6.705	0.550	5.990
4	0.634	8.349	0.589	7.036	0.573	6.597
3	0.672	9.545	0.615	7.781	0.585	6.925
2	0.696	10.341	0.628	8.168	0.586	6.953
1	0.716	11.029	0.610	7.635	0.577	6.705

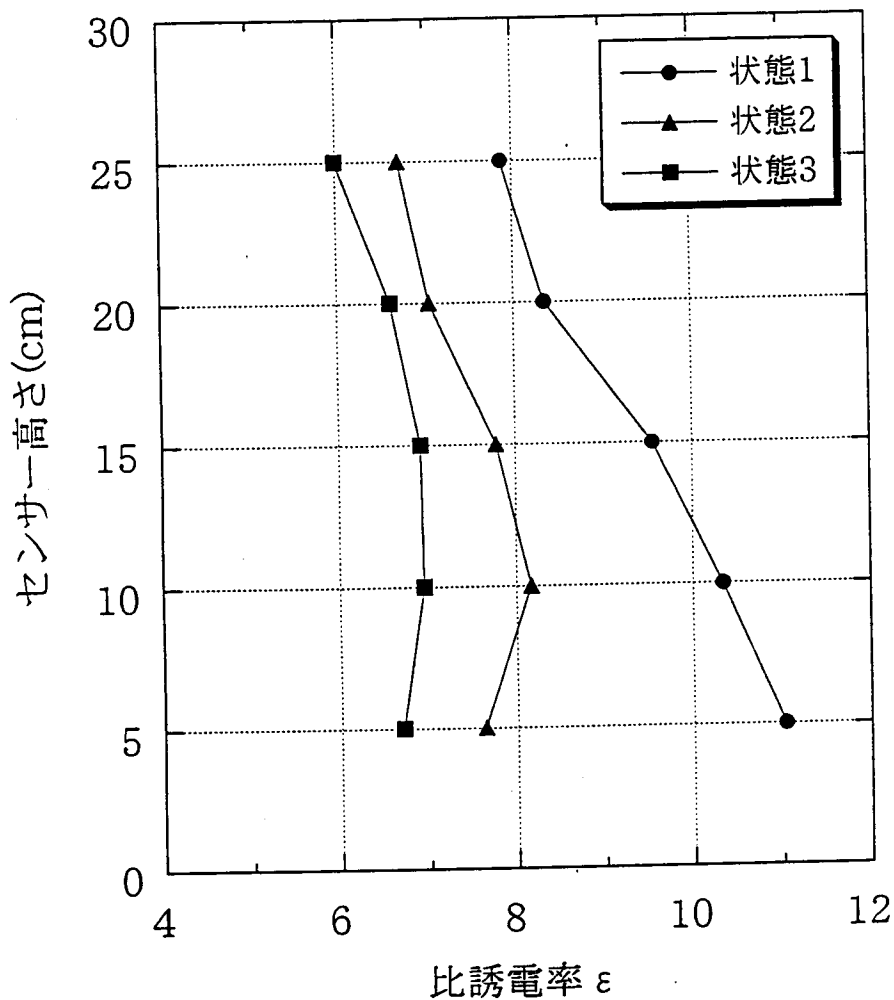
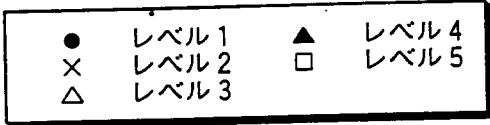


図3-18 比誘電率－センサー位置の関係

図3-19 には比誘電率の経時変化を示す。図中には状態1、2、3測定時の対応位置も併せて表示してある。この結果によれば、時間が経過するに伴って、いずれの測定レベルでも比誘電率は減少する傾向を示している。特に、測定レベル1における状態1測定前後での減少が著しい。また、経過時間0の測定値は測定ロッド装着直後における値を示しており、次の18時間後の測定値との間の変動が大きいことがわかる。これは、測定ロッド装着直後にはロッド周りで含水状態が不均一であることを示していると考えられる。

状態1の測定前後で比誘電率の変化傾向に明らかな差がある。これは大ブロックの重量の経時変化曲線の傾向(図3-14)に良く一致しており、大ブロック内部の含水状態の変化傾向を表しているものと考えられる。



### 経過時間 - 比誘電率

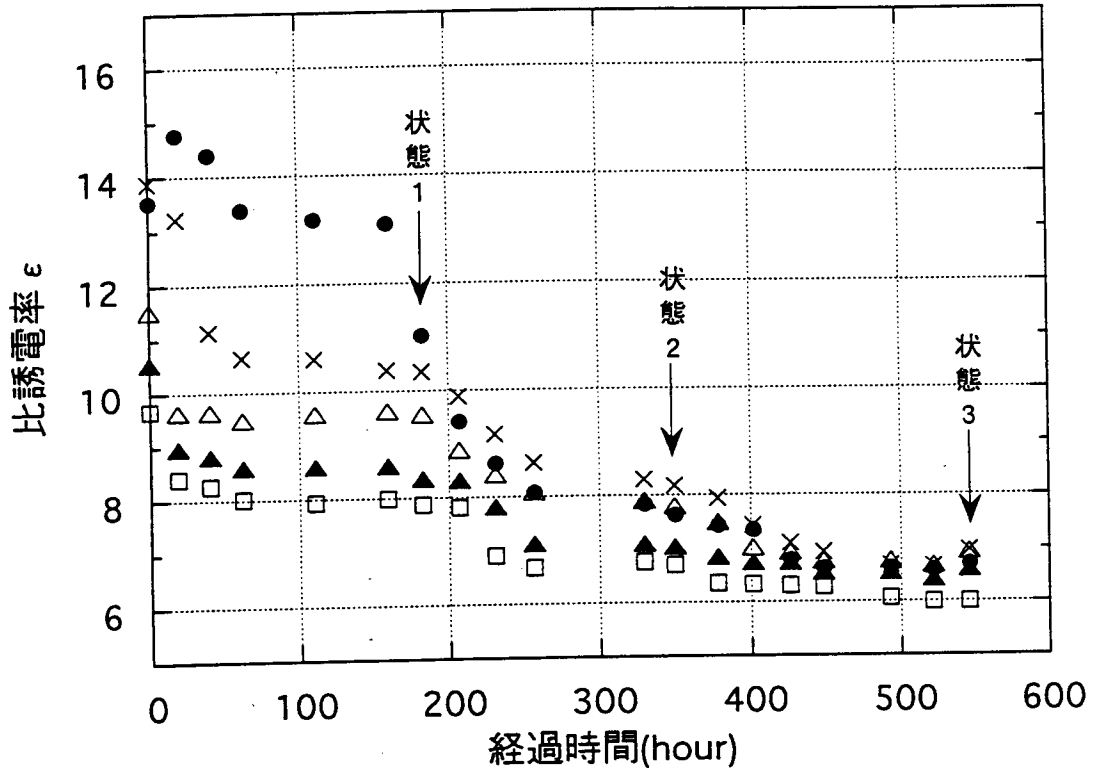


図3-19 比誘電率の経過時間による変化図

#### 3. 3. 6 大ブロックの分割による含水量測定

大ブロックを分割し、内部の含水状態を重量測定によって求めた。供試体別に見るといずれの大ブロックにおいても体積含水率、飽和度は下部ほど大きく、上部ほど小さくなる全般的な傾向が認められる。ただし、一連の乾燥過程にある3状態でのH4～H6ブロックの含水量は体積含水率および飽和度のいずれにおいてもH5ブロック（状態2）が最も大きく、次いでH4ブロック（状態1）、H6ブロック（状態3）の順となっていること、同時に分割したH1～H3、H6ブロックについて見ると体積含水率および飽和度のいずれにおいてもH1が小さく、H3が大きく、H2とH6は両者の中間にあること等、供試体個々のばらつきが認められた。



### 3. 3. 7 考察

コアおよび小ブロックを用いた試験結果の主要な点を以下にまとめて述べる。

- ・コア供試体のP波、S波速度は飽和度90~100%の高含水範囲および飽和度0~10%の低含水範囲において、変化が認められるものの、飽和度が10~90%の範囲でともにほぼ一定値を示す(図3-4~図3-6)。
- ・コア供試体の比抵抗は飽和度が20~100%の範囲でほぼ一定値を示し、飽和度20%以下で急激な増加を示す(図3-7)。
- ・コア供試体の比誘電率は体積含水率および飽和度とほぼ直線的な関係にある(図3-8)。
- ・本試験で用いた多胡砂岩の大ブロック内部の含水量分布は分割法による重量測定の結果、飽和度が20~90%の範囲にあり、ほとんどの部分は飽和度が30~80%の範囲にあった。
- ・従って、多胡砂岩を用いた今回の試験に限って言えば、含水状態による超音波速度および比抵抗変化曲線は測定値から含水量を推定するためのキャリブレーション曲線として不相当と考えられる。
- ・今回の試験項目の中ではTDRによる比誘電率の変化曲線が唯一含水量を推定するためのキャリブレーション曲線として相当と考えられる。

図3-19~図3-21には大ブロックH1、H2およびH3について、状態3における超音波速度、比抵抗、比誘電率と含水状態(体積含水率、飽和度)および同ブロックの有効間隙率の高さ方向の分布を並べて示した。これらの図から以下のことがわかる。

- ・コア試験の結果(図3-4~図3-6)からはH1ブロックの飽和度の範囲では超音波速度(特にS波)の変化がほとんどないことから、大ブロックH1の示す超音波速度の高さ方向の分布は有効間隙率の不均一分布に見られる供試体内部の高さ方向の岩質の不均質性に起因している可能性が高い。
- ・コア試験の結果(図3-7)からはH2ブロックの飽和度の範囲では比抵抗の変化がほとんどないことから、大ブロックH2の示す比抵抗の高さ方向の分布は有効間隙率の不均一分布に見られる供試体内部の高さ方向の岩質の不均質性に起因している可能性が高い。コア試験では3供試体は有効間隙率が16.5~18.2%の狭い範囲に入っており、ほぼ同じ比抵抗変化曲線を示しているがH2ブロック下部は有効間隙率が12~16%の範囲にあるため異なる比抵抗変化を示した可能性が考えられる。
- ・大ブロックH3の示す比誘電率の高さ方向の分布は体積含水率の分布と良い対応関係を示しており、体積含水率15%以上で若干精度が劣るが、小ブロックを用いた試験結果(図3-8)とほぼ整合した結果となっている。有効間隙率の分布も高さ方向に変化しているが、空気の比誘電率1、岩石の比誘電率3~5に比べて水の比誘電率は約80と大きいので、今回測定した比誘電率と有効間隙率との直接の関連性は体積含水率との関連性に比べて小さいと考えられる。
- ・図3-20~図3-22にはコアおよび小ブロックを用いた試験結果から推定した体積含水率と飽和度の推

定分布範囲を併せて示した。これによれば、今回用いた物理量の中ではTDR測定による比誘電率を用いた場合の推定精度が最も良いことがわかる。超音波速度および比抵抗を用いた場合の推定精度は比誘電率を用いた場合に比べて全般的に悪いことは明らかである。特に図3-20の超音波速度の計測高さ5cm、図3-21の比抵抗の計測高さ5および10cmのデータは測定値と推定分布範囲が全く一致していない。

これらの場合、両物理量の高さ方向の変化は含水量よりむしろ有効間隙率のばらつきに起因していると考えられる。これは、推定分布範囲を求めるのに用いたコア試験の結果（キャリブレーション曲線）が場合によっては大ブロック内部の含水量の推定に適用出来ない可能性があることを示唆するものである。TDRによる電磁波速度測定の有効性の評価を以下に試みる。

小ブロック供試体を用いた試験結果の回帰式を変形して、比誘電率から体積含水率および飽和度の推定式を求めると次式が得られる。

$$\theta v = 0.03614 \cdot \varepsilon - 0.1134 \quad (R^2 = 0.941)$$

$$S = 19.69 \cdot \varepsilon - 61.34 \quad (R^2 = 0.903)$$

ここで、 $\theta v$  : 体積含水率

S : 飽和度 (%)

$\varepsilon$  : 比誘電率

回帰直線の周りに測定値が正規分布をしているものと仮定して求めた体積含水率および飽和度の標準誤差は次のとおりである。

$$\text{体積含水率 } \theta v \text{ の標準誤差} = \pm 0.0155 \quad (\pm 1.55\%)$$

$$\text{飽和度の標準誤差} = \pm 10.4\%$$

本試験の比誘電率の測定値から上式を用いて計算した体積含水率および飽和度の推定値と測定値との関係を図3-23に図示した。図中には標準誤差の範囲も併せて示した。

今回の実験では測定ブロックとは別に、含水測定用の大ブロックH4～H6を用意した。測定ブロックH1～H3も含めた含水量測定の結果から、これらの大ブロック相互の間で有効間隙率の差など岩質のばらつきがあることがわかった。また、同一ブロック内でも有効間隙率の不均一分布に見られるように岩質の差があることが判明した。こうした、岩質のばらつきはコア供試体間では小さく、供試体サイズが大きくなる小ブロック、大ブロックの順にばらつきの程度も大きい傾向がある。このような場合には今回用いた程度の大きさの大ブロック間で含水状態が同じという仮定は成立しない。この仮定が成立するような岩石試料が存在するか否かは現時点では明らかでない。

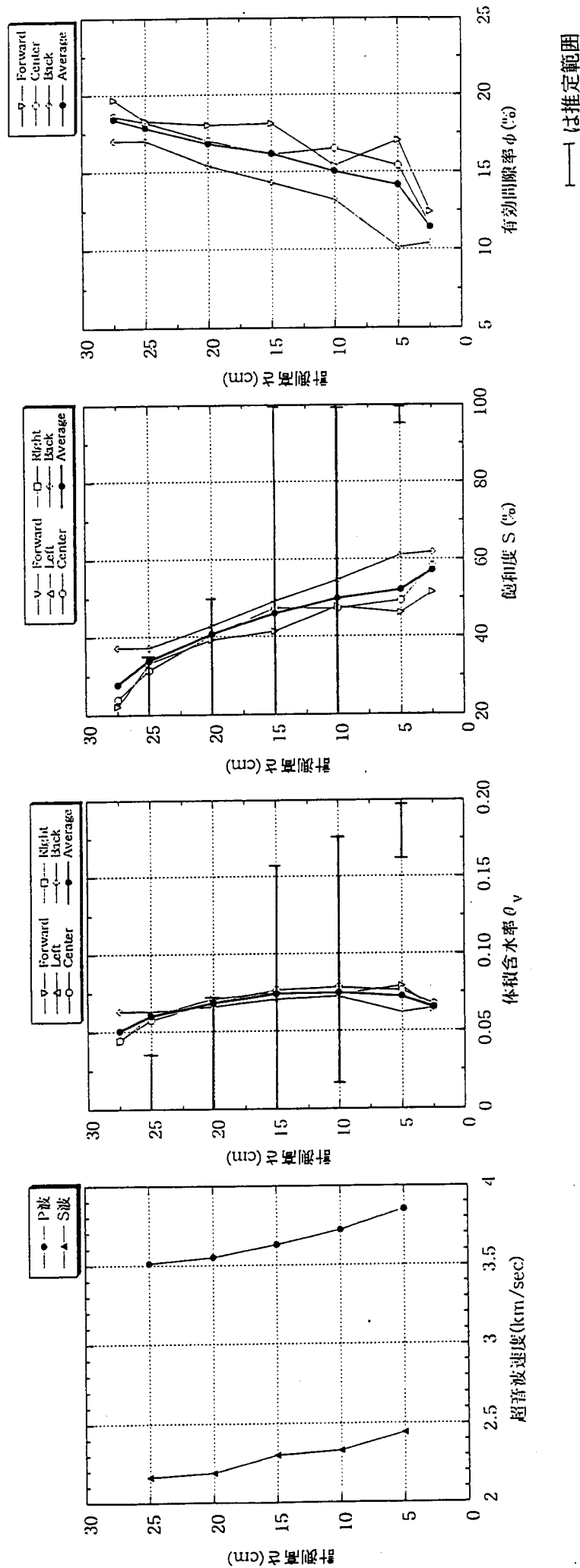


図3-20 超音波速度、体積含水率、飽和度および有効間隙率の分布

(状態3、大ブロックH1)

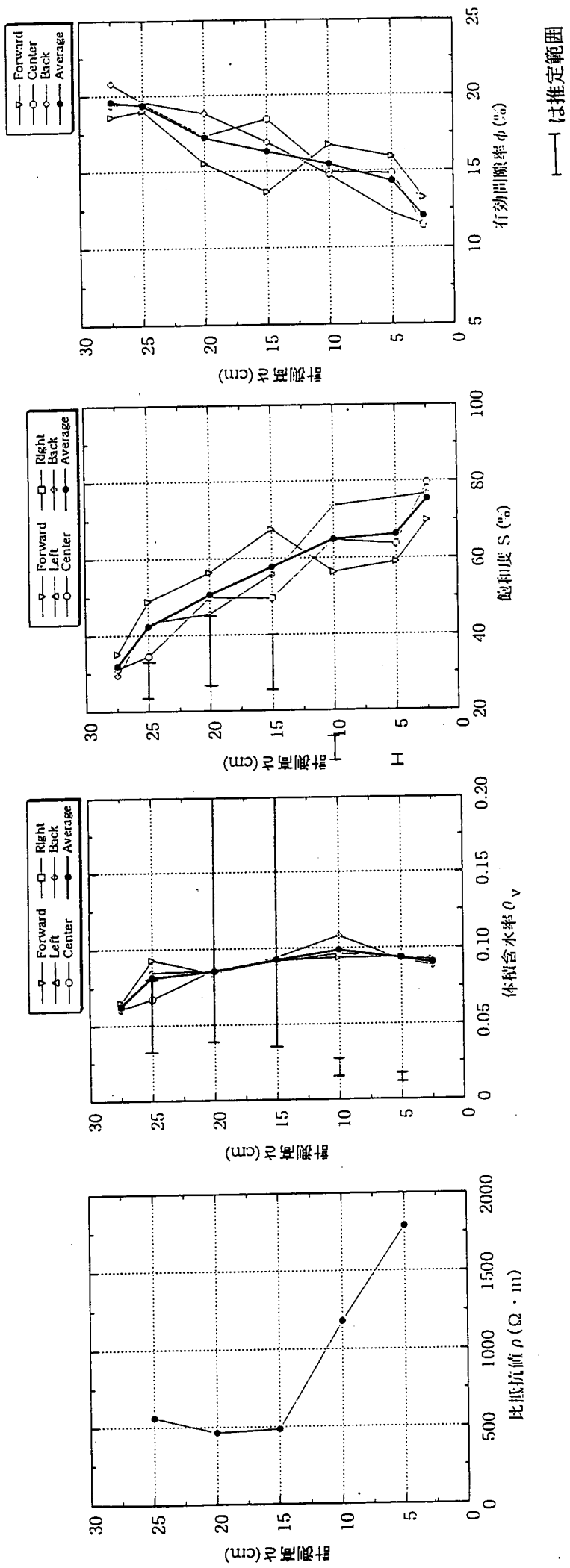


図3-21 比抵抗、体積含水率、飽和度および有効間隙率の分布

(状態3、大ブロックH2)

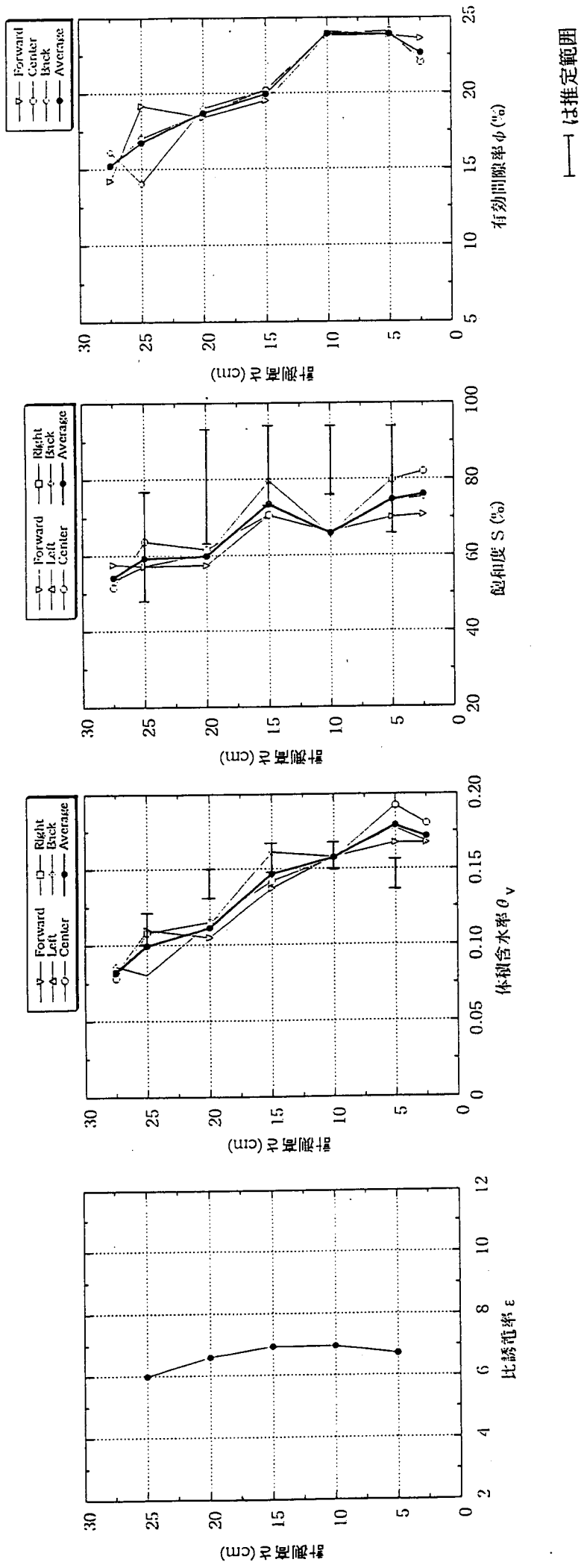


図3-22 比誘電率、体積含水率、飽和度および有効間隙率の分布

(状態3、大ブロックH3)

— は推定範囲

推定値はH3ブロックの比誘電率から推定した値、測定平均値はH3ブロックを分割して測定した値を示す。|—|は推定範囲を示す。

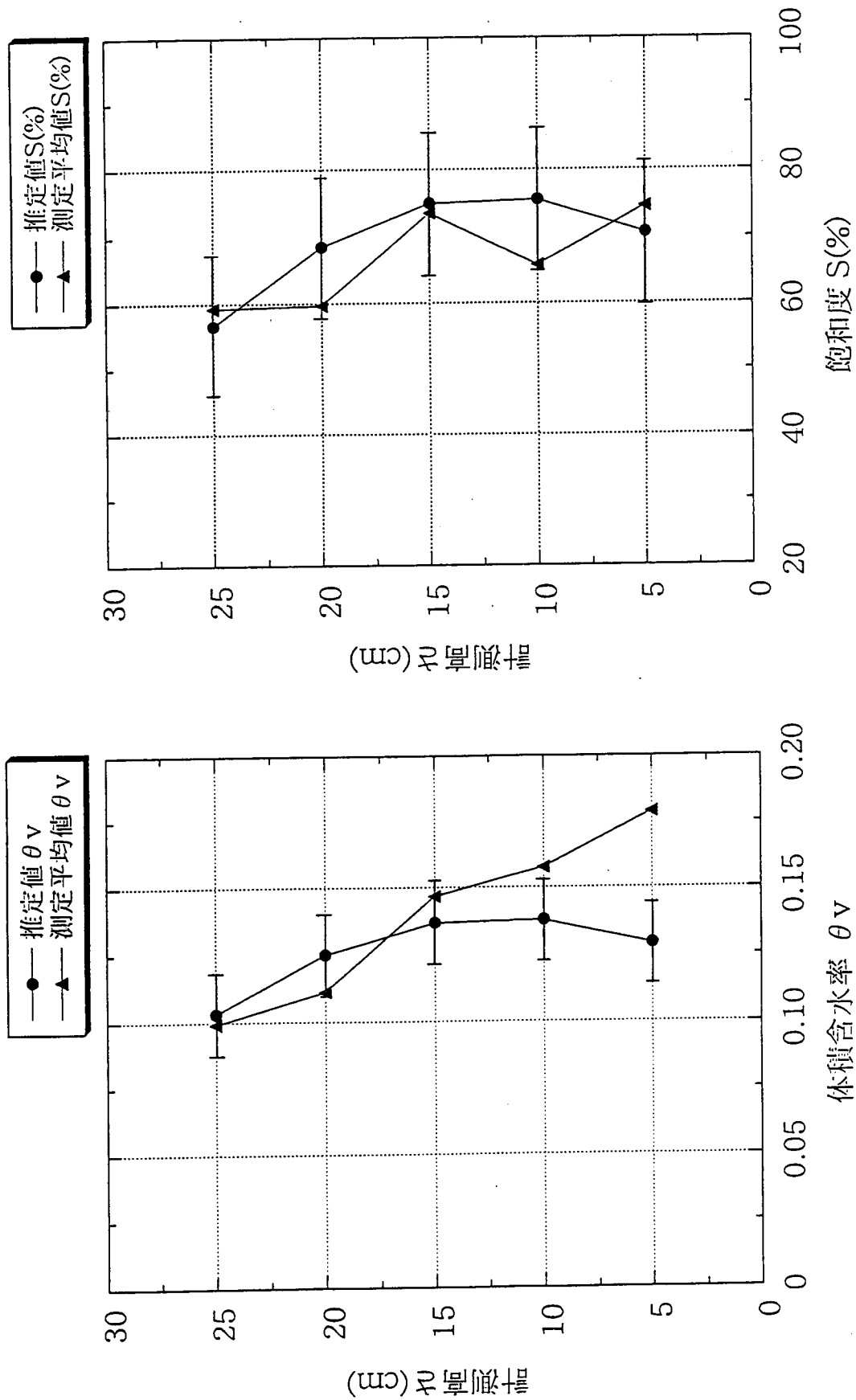


図3-23 含水状態の推定値と測定値の比較 (状態3、大ブロックH3)

### 3. 4 まとめ

平成6年度の実験の成果と課題について以下に述べる。

#### (1) 成果

- ①コアおよび小ブロックを用いた超音波速度、比抵抗、比誘電率の測定は含水量の変化きざみを細かくしたことで、試料内部の含水状態の均一性の達成、超音波センサーを4種類用いたことなど測定精度の向上に細心の注意を払って実施した。そのため測定結果の信頼性はきわめて高いと考えて良い。
- ②多胡砂岩における超音波速度は供試体によるばらつきはあるが、飽和度が10～90%の範囲でP波が3.5～3.8km/sec、S波が1.9～2.1km/sec程度であった。詳細に見ると飽和度0～10%では飽和度の減少とともに $V_p$ 、 $V_s$ は増加し、90～100%では飽和度の減少とともに $V_p$ は減少する傾向は認められたが、飽和度10～90%の範囲では $V_p$ 、 $V_s$ の有意な変化は見られなかった。
- ③多胡砂岩における比抵抗は飽和度20～100%で300～500  $\Omega \cdot m$ 程度でほとんど変わらず、20%以下で急激に増加する傾向を示した。
- ④TDR測定によって求めた比誘電率は体積含水率および飽和度と直線に近いきわめて明瞭な対応関係を示した。ただし、体積含水率15%（飽和度80%）以上で非線形性およびブロックごとのばらつきが見られた。
- ⑤今回の多胡砂岩を用いた室内試験において、TDRによる比誘電率の測定が最も精度良く含水状態を推定することができた。
- ⑥超音波速度、比抵抗および比誘電率はそれぞれ含水量に対して特徴的な変化を示すことから、単独の物理量による推定精度は低くても、複数の物理量を組み合わせることでより精度の高い推定ができる可能性も考えられる。

#### (2) 課題

- ①今回用いた試料は透水係数が $10^{-7}$  cm/sec程度という条件で多胡砂岩（粗粒砂岩）を選び、試料の均質性には特別の注意を払った。しかし、外見上は均質に見えても試料によって岩質のばらつきがあったため、試験結果の評価が一部困難となった。従って、ブロック試料相互における含水状態は同じと仮定し、含水測定用の供試体を物理量測定用とは別に用意することは適当でないと考えられる。
- ②大ブロックでの比抵抗の測定結果が下部で大きな比抵抗を示したことは、岩質の不均質性が影響していると考えられる。しかし、ケラチンクリーム中のNaClの間隙水中への拡散の影響の可能性も現時点では完全に否定できないので、原位置で比抵抗を測定する場合には電極センサーの設置方法について工夫が必要になる。

③今回の実験ではTDRを用いた比誘電率測定が含水状態の推定方法として最も有望と考えられる結果となった。ただし、本年度用いた測定方法では測定値の読み取り方法に改良の余地があること、比誘電率と体積含水率あるいは飽和度の関係を表す回帰式の選び方、比誘電率を測定する方法は他にも考えられることなどが課題としてあげられる。



#### 4. まとめ

##### 4. 1 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究のまとめ

###### 4. 1. 1 成果

本年度は不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究として

###### (1) 蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式による不飽和浸透特性推定法の適用性検討

(i) 不飽和パラメーター既知試料に対する適用性検討

(ii) 供試体寸法（長さ）の不飽和パラメーターに与える影響の検討

(iii) 流出部境界条件の影響の検討

###### (2) 既存の負圧計測方法の適用性の検討

を実施した。上記検討を通じて得られた成果は以下のとおりである。

- ① 不飽和パラメーター既知試料として豊浦標準砂を対象に蒸発量とVG式による不飽和特性の推定法の適用性の検討を実施した。同定された不飽和特性は既存の豊浦標準砂の不飽和特性とほぼ一致をした。計測した圧力と同定された不飽和特性に基づく圧力値とは良く一致し、本手法の妥当性が確認できた。
- ② 多胡砂岩では、供試体長さが大きいほど透水係数が小さくなる傾向が見られ、供試体長さが大きいほどVG式のパラメータ $\alpha$ は小さくなった。nについては供試体長さの違いによるnの有意な違いは認められなかった。供試体長さは不飽和特性同定結果に影響を与えることが推察された。
- ③ 流出部境界条件（蒸発量）が変化すると、VG式のパラメータ $\alpha$ も同じオーダーで変化することが確認された。流出部境界条件（蒸発量）の違いは不飽和特性同定結果に影響を与える可能性のあることを確認した。
- ④ 流出部境界条件（蒸発量）の違いは不飽和特性同定結果に影響を与える可能性のあることを確認した。
- ⑤ 透水係数が大きく異なる（数オーダー異なる）岩石および砂の場合でも、蒸発量はそれほど大きく変わらないことが確認された。
- ⑥ テンシオメーターを岩石の負圧計測に適用しうる可能性のあることが確認された。
- ⑦ サイクロメーターを岩石の負圧計測に適用しうる可能性のあることが確認された。

#### 4. 1. 2 課題

本年度の不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究を通じて挙げられる課題は以下のとおりである。

- ① 今回用いた試料では、不均質性による供試体相互の透水係数等のばらつきのため、結果の評価が一部困難となった。供試体長さや境界条件依存性を調べるためには、不均質性の小さい試料を用いて同一条件で同様な不飽和パラメータが得られることを確認しておく必要がある。
- ② 温度・湿度計測から求めた蒸発量と、蒸発に伴う重量減少から算定した蒸発量は、重量計測からの蒸発量が温度・湿度計測からの蒸発量の1.5～2倍となった。原位置での蒸発量は重量計測に拠る方法は不可能であり、この原因がどこにあるのかを今後明らかにしておく必要がある。
- ③ 逆解析においてパラメータの修正を計算上の桁落ち等のため人為的におこなった。今後はパラメータの修正方法、計算上の桁落ち対策等を検討する必要がある。
- ④ 数オーダー透水係数が異なる岩石・砂で、なぜ蒸発量があまり変わらないのか、またそのメカニズムを把握しておく必要がある。
- ⑤ 今回の実験では蒸発量計測時間は長いもので約1週間で、十分定常状態に到るにはより時間を要すものと考えられ、蒸発量計測時間はより長期間実施する必要がある。
- ⑥ 透水係数など試料のばらつきが多く、実験結果の評価が難しかった。今後の試験岩石はより均質な岩石を用いる必要がある。また、他の岩石でも蒸発量を計測し、岩石からの蒸発量は岩石の種類やその透水係数に依存しないのかを確認しておく必要がある。
- ⑦ 現状で、岩石内空隙の負圧を計測する手法が確立されていない。同定された不飽和特性の妥当性を吟味するためには負圧を計測する手法を開発しておく必要がある。

#### 4. 1. 3 来年度研究の提案

本年度の成果を踏まえ、以下の3点の検討を提案する。

- ① 温度・湿度計測から求めた蒸発量と、蒸発に伴う重量減少から算定した蒸発量は、重量計測からの蒸発量が温度・湿度計測からの蒸発量の1.5～2倍となった。原位置での蒸発量は重量計測に拠る方法は不可能であり、この原因がどこにあるのかを今後明らかにしておく必要がある。

このため以下の検討を実施する。

- 温度・湿度計測による蒸発量算定に与える影響要因の検討
- 温度・湿度計測から適切に蒸発量計測を実施し得る計測方法の検討

- ② 不均質性の小さい試料を用いて同一条件で同様な不飽和パラメータが得られることを確認し、多胡砂岩以外の均質性の高い岩石に対してより定常性を吟味した上で蒸発量計測を行い、蒸発量計測を用いたvan-Genuchten式による不飽和浸透特性の同定を行う。この中で以下の検討を行う。

- 均質度の高い岩石のVGモデル不飽和パラメータ同定時の再現性検討
- VGモデル以外のモデル適用性の検討
- パラメータの修正方法、計算上の桁落ち対策等を検討

- ③ 岩の不飽和領域内での負圧計測手法は未だ確立されていない。本年度研究の過程においても、負圧計測がなされれば、より結論を明確にできた点も多い。そこで、本年度適用を試みたテンシオメーター、サイクロメーターにて負圧の定量的な評価ができるよう、負圧計測とその妥当性を示すための検討をおこなう。

#### 4. 2 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究のまとめ

平成6年度の実験の成果と課題について以下に述べる。

##### 4. 2. 1 成果

- ①コアおよび小ブロックを用いた超音波速度、比抵抗、比誘電率の測定は含水量の変化きざみを細かくしたことで、試料内部の含水状態の均一性の達成、超音波センサーを4種類用いたことなど測定精度の向上に細心の注意を払って実施した。そのため測定結果の信頼性はきわめて高いと考えて良い。
- ②多胡砂岩における超音波速度は供試体によるばらつきはあるが、飽和度が10～90%の範囲でP波が3.5～3.8km/sec、S波が1.9～2.1km/sec程度であった。詳細を見ると飽和度0～10%では飽和度の減少とともに $V_p$ 、 $V_s$ は増加し、90～100%では飽和度の減少とともに $V_p$ は減少する傾向は認められたが、飽和度10～90%の範囲では $V_p$ 、 $V_s$ の有意な変化は見られなかった。
- ③多胡砂岩における比抵抗は飽和度20～100%で300～500 $\Omega \cdot m$ 程度でほとんど変わらず、20%以下で急激に増加する傾向を示した。
- ④TDR測定によって求めた比誘電率は体積含水率および飽和度と直線に近いきわめて明瞭な対応関係を示した。ただし、体積含水率15%（飽和度80%）以上で非線形性およびブロックごとのばらつきが見られた。
- ⑤今回の多胡砂岩を用いた室内試験において、TDRによる比誘電率の測定が最も精度良く含水状態を推定することができた。
- ⑥超音波速度、比抵抗および比誘電率はそれぞれ含水量に対して特徴的な変化を示すことから、単独の物理量による推定精度は低くても、複数の物理量を組み合わせることでより精度の高い推定ができる可能性も考えられる。

##### 4. 2. 2 課題

- ①今回用いた試料は透水係数が $10^{-7}$ cm/sec程度という条件で多胡砂岩（粗粒砂岩）を選び、試料の均質性には特別の注意を払った。しかし、外見上は均質に見えても試料によって岩質のばらつきがあったため、試験結果の評価が一部困難となった。従って、ブロック試料相互における含水状態は同じと仮定し、含水測定用の供試体を物理量測定用とは別に用意することは適当でないと考えられる。
- ②大ブロックでの比抵抗の測定結果が下部で大きな比抵抗を示したことは、岩質の不均質性が影響していると考えられる。しかし、ケラチンクリーム中のNaClの間隙水中への拡散の影響の可能性も現時点では完全に否定できないので、原位置で比抵抗を測定する場合には電極センサーの設置方法について工夫が必要になるだろう。

③今回の実験ではTDRを用いた比誘電率測定が含水状態の推定方法として最も有望と考えられる結果となった。ただし、本年度用いた測定方法では測定値の読み取り方法に改良の余地があること、比誘電率と体積含水率あるいは飽和度の関係を表す回帰式の選び方、比誘電率を測定する方法は他にも考えられることなどが課題としてあげられる。

#### 4. 2. 3 来年度研究の提案

本研究では坑道周辺に形成されるであろう不飽和領域の広がり把握する方法の開発を目指している。そのために検討する方法は将来物理探査的手法への展開が可能である必要があると考えている。従って、本研究は必ずしもいわゆる水分計の岩盤への適用性の検討や開発を目指しているわけではない。今年度は、超音波速度、比抵抗、電磁波速度の3物理量について粗粒砂岩への適用性を検討した。今年度の成果を踏まえ、次の4つの方向が考えられる。

①今回用いた多胡砂岩以外の均質な砂岩あるいは泥岩を用いて超音波速度、比抵抗、比誘電率に着目した試験を実施する。

TDR測定に関して以下の内容を検討する。

- ・測定ロッドの設置方法
- ・測定精度の検討
- ・振幅データの検討

②花崗岩などの結晶質岩を用いて試験を実施する。

- ・結晶質岩においてTDR測定の適用性を検討する。

③TDR測定以外にも、新しい手法も加えて試験を行う。

その他として例えば、誘電率検層あるいは電磁現象を利用した方法なども同じ比誘電率を求める観点で検討の必要があると考えられる。

④フィールドでの適用性試験

この内、平成7年度の研究内容として①を提案する。原位置計測に対応した計測機器の開発は開発方法の具体的な見通しが得られてからでないと着手できないため、現時点では平成8年度以降に行うことが望ましいと考えられる。