

# 不飽和領域の原位置計測手法 および解析モデルの研究

(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

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

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

## 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ぬ。

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

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. 研究の目的及び範囲 .....1-1

1. 1 研究の目的 .....1-1

1. 2 研究の範囲 .....1-1

1. 3 研究の内容 .....1-1

1. 3. 1 研究計画の検討 .....1-1

1. 3. 2 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究 .....1-1

1. 3. 3 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究 .....1-2

1. 3. 4 実験に用いた岩石試料 .....1-2

参考文献 .....1-6

2. 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究 .....2-1

2. 1 概要 .....2-1

2. 1. 1 目的 .....2-1

2. 1. 2 実施内容 .....2-1

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

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の概要 .....2-2

2. 2. 2 VG式 .....2-2

2. 2. 3 蒸発量計測 .....2-6

2. 2. 4 不飽和パラメーターの同定方法 .....2-16

2. 3 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 .....2-18

2. 3. 1 標準砂を用いた不飽和浸透特性推定法の検証実験 .....2-18

2. 3. 2 使用した岩石試料 .....2-43

2. 3. 3 供試体長さの影響の検討 .....2-52

2. 3. 4 境界条件の影響の検討 .....2-92

2. 4 圧力計測手法の適用性検討 .....2-105

2. 4. 1 圧力計測装置 .....2-105

2. 4. 2 実験 .....2-105

2. 5	考察	2-118
2. 5. 1	蒸発量、VG式パラメータ $\alpha$ 、 $n$ 、透水係数の体積含水率に与える影響	2-118
2. 5. 2	コア内の不均質性が及ぼす体積含水率への影響	2-120
2. 6	今年度の成果と課題	2-123
2. 6. 1	今年度の成果	2-123
2. 6. 2	課題	2-124
	参考文献	2-125
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	3-4
3. 2. 1	測定手順	3-4
3. 2. 2	超音波速度測定	3-6
3. 2. 3	比抵抗測定	3-14
3. 2. 4	電磁波速度測定	3-22
3. 2. 5	供試体分割による含水量測定	3-34
3. 2. 6	考察	3-43
3. 3	ブロック供試体を用いた室内試験	3-51
3. 3. 1	予備試験	3-53
3. 3. 2	ブロック供試体の準備	3-61
3. 3. 3	超音波速度測定	3-65
3. 3. 4	比抵抗測定	3-70
3. 3. 5	電磁波速度測定	3-76
3. 3. 6	大ブロックの分割による含水量測定	3-85
3. 3. 7	考察	3-97
3. 4	今年度の成果と課題	3-107
3. 4. 1	今年度の成果	3-107
3. 4. 2	課題	3-108
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 .....4-5

4. 2. 3 来年度研究の提案 .....4-6

## 1. 研究の目的及び範囲

### 1. 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。

### 1. 2 研究の範囲

- (1) 研究計画の検討
- (2) 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究
- (3) 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究

### 1. 3 研究の内容

#### 1. 3. 1 研究計画の検討

これまでの研究および本年度の研究に基づき、動力炉・核燃料開発事業団作成の研究計画を検討し、詳細化する。

#### 1. 3. 2 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究

原位置計測より得られた不飽和領域の分布の妥当性は、直接原位置で確認することが困難なため、数値解析により検証するという方法が考えられる。しかし、数値解析を行うためには、不飽和現象のメカニズムを解明しモデル化する必要がある。

平成5年度の研究では不飽和領域はいろいろな物理量(ポテンシャル、水質変化、透水係数など)で定義し得ることがわかった。また、不飽和領域の発生要因としては大きく以下の2項目が抽出された。



①岩盤深部からの地下水の供給量と坑道壁面からの湧水量あるいは蒸発量のバランス

- ・マトリックス部および亀裂部の透水性
- ・マトリックス部および亀裂部の不飽和浸透特性

②溶存ガスの気泡化 (Degassing)

平成6年度は、最も基本となるマトリックス部の不飽和浸透特性について、土壌に対して求められた van-Genuchten式の岩への適用性を検証するための基礎研究として、同式中の2つのパラメータの同定手法の適用性を室内試験により検討した。ただし、不飽和の定義としては土質の分野で一般化しているポテンシャルによる基準を用い、負圧=不飽和と仮定した。

### 1. 3. 3 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究

岩盤中の不飽和領域を把握するための計測項目として以下の項目があげられる。

- ①沈澱物、 ②水質変化、 ③含水率、 ④間隙水圧
- ⑤透水係数、⑥弾性波速度、⑦比抵抗、 ⑧電磁波速度

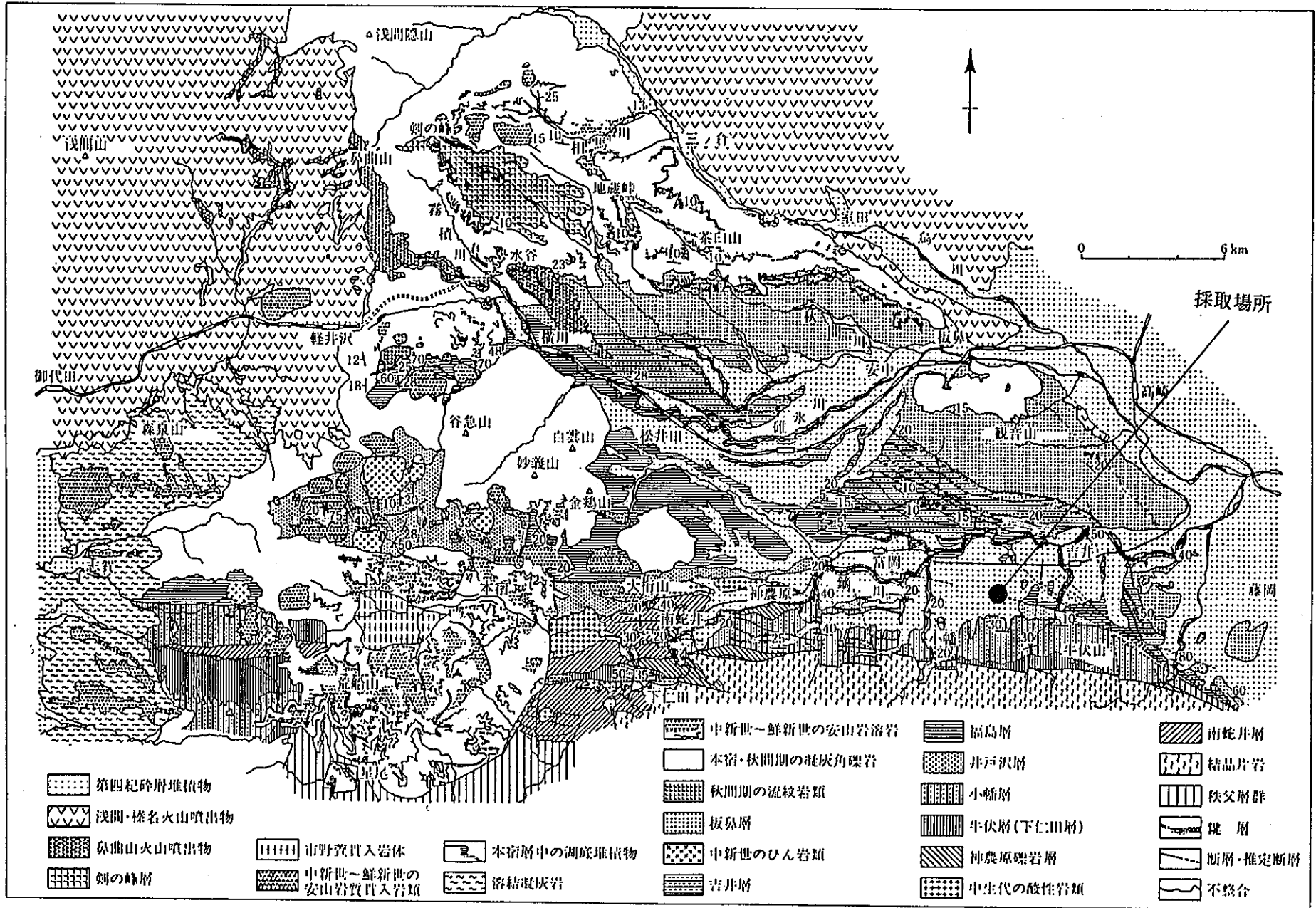
①～⑤のような計測は測定点の位置によって測定値が大きくばらつくと考えられるため、不飽和領域の分布を把握するためには多数の計測点を必要とする。一方、既存の研究により含水状態によって変化することが知られている⑥～⑧の物理量を用いたトモグラフィなどの物理探査的な計測は、面的な広がりをもった物理量の分布を把握するのに適している。

平成6年度は、⑥～⑧の物理量に着目し、数cmスケールのコアを用いた室内試験によりこれらの物理量と含水量の関係を求めた。また、より大きなスケールのブロック中に不均一な含水分布を作り、物理量を測定した。これらの物理量の計測値から、コア試験から求めた物理量と含水量の関係をを用い、含水量分布の推定をする。さらに、ブロックを割って各部分の重量から求めた含水量の分布と比較することにより、⑥～⑧の物理量の不飽和領域計測への適用性を検討した。

### 1. 3. 4 実験に用いた岩石試料

室内実験用の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。

図1.3-1に採取位置を示す。また、表1.3-1にはこの地域の地質層序表を示す。大森ら<sup>1)</sup>によれば、同地点の砂岩層は中新世中期の板鼻層に属す。板鼻層は藤岡の南方から安中を経て横川の北方まで広く分布する。主に砂岩層・礫岩層で、下部の海成層から上部の陸成層に連続的に移り変わる。層厚は800m以上であ



群馬県南部の地質図 (野村・秋間研グループ, 1981)

図1.3-1 岩石試料採取場所

る。

実験に用いた岩石は地元の採石会社に依頼して採石山の切羽において、岩質が比較的均質な部分から切り出した。

表1.3-1 採取場所付近の地質層序表

富岡・下仁田地域の層序区分対比表（高柳ほか、1978に加筆）

時代	藤本 小林 (1938)	渡部 (1952)	松丸 (1967, 1977)	神沢ほか (1968)	千地 紺田 (1978)	高柳ほか (1978)	野村・秋間 団研G (1981)
中世	板鼻層	板鼻層	板鼻層	板鼻層	板鼻層	板鼻層	板鼻層
	富岡層	吉井層	吉井層	吉井層	吉井層	原市層	吉井層
庭谷層			庭谷層				
新期	富岡層	福島層	原田篠層	福島層	原田篠層	曾木層	福島層
				曾木泥岩層 原田篠砂泥互層		原田篠層	
前期	井戸沢層	井戸沢層	井戸沢層	井戸沢層	井戸沢層	井戸沢層	井戸沢層
	牛伏層	牛伏層	牛伏層	牛伏層	牛伏層	額部層	牛伏層

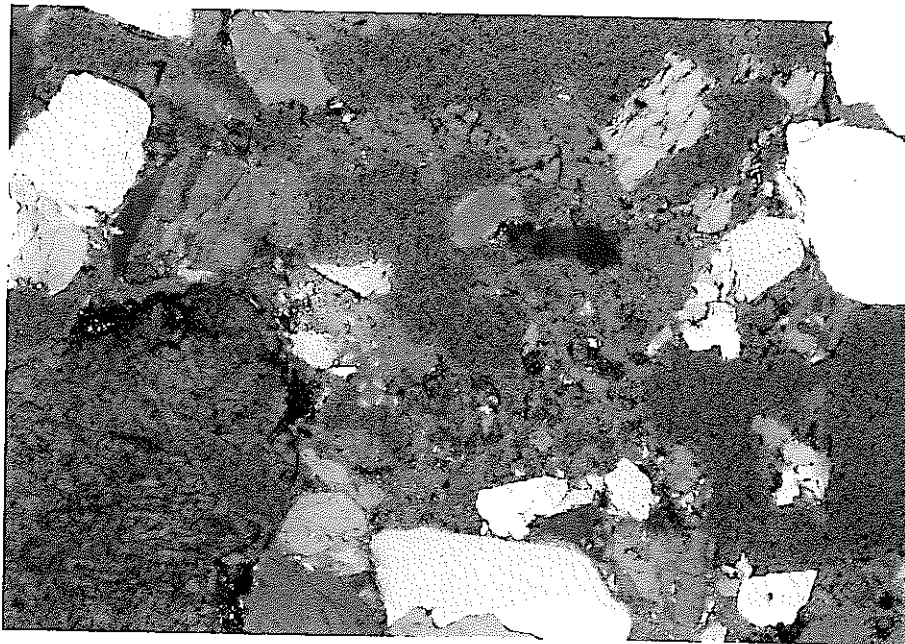
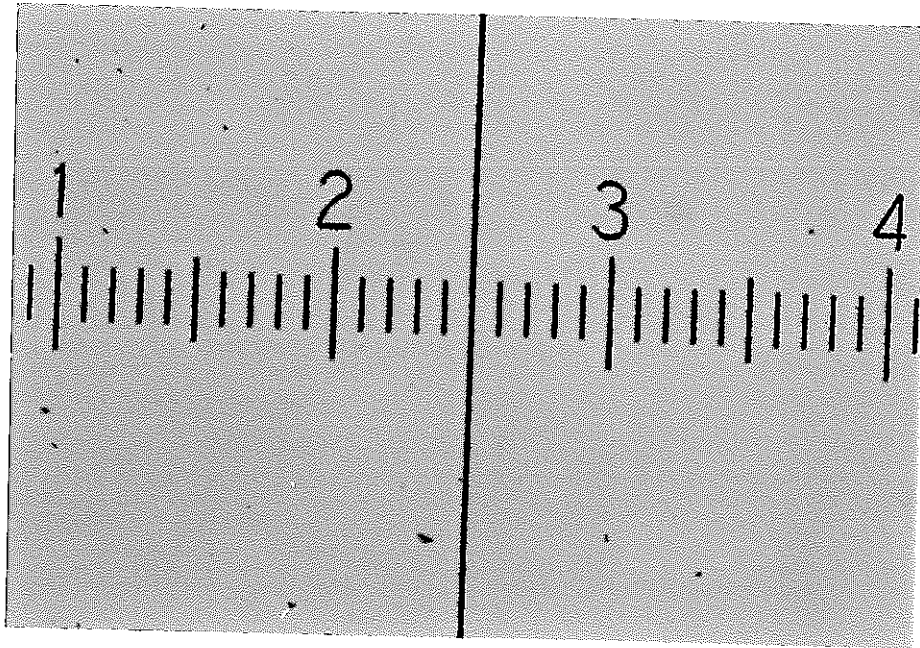
多胡砂岩の鉱物組成を以下に示す。

石英 52%

長石 8%

粘土鉱物 40%

写真1.3-1には多胡砂岩の顕微鏡写真を示す。



上の写真はスケールで単位はmm

写真1.3-1 多胡砂岩の顕微鏡写真

**【参考文献】**

- 1) 大森昌衛、端山好和、堀口万吉 : 日本の地質 3、関東地方、共立出版(株)、pp. 117-119(1986).

## 2 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究

### 2. 1 概要

#### 2. 1. 1 目的

不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究の第一段階として、最も基本となるマトリックス部に関して、その透水性と境界条件（地下水の供給量および蒸発量）によりどのように不飽和領域が形成されるかを室内実験により検討する。また、マトリックス部の不飽和浸透特性について土壌に対して求められたvan-Genuchten式<sup>1)</sup>の岩への適用性を検証するための基礎研究として、同式中の2つのパラメーターの同定手法の適用性を室内試験により検討する。

不飽和領域の定義としては土質分野で一般化しているポテンシャルによる基準を用い、負圧=不飽和と仮定する。

#### 2. 1. 2 実施内容

2. 1. 1の目的に対し、本年度は岩盤マトリックス部を対象として以下の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（Φ5cm×h20cm, 10cm, 5cm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の概要

渡辺らの開発した方法<sup>2)</sup>は、実験（計測）とVG式に順じた解析からなる。VG式の詳細については後述するが、不飽和特性（飽和度あるいは含水量と相対透水係数および負の圧力水頭(サクション)の関係)を2つのパラメーターで表す式で、含水量と相対透水係数の関係あるいは含水量と負の圧力水頭の関係の一方が決まると他の一方も決まる特徴を有する式である。

計測は対象とする岩盤のコア（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-2.2.1）を与えて行う。実験手順を図-2.2.2に示す。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時）の蒸発量、圧力水頭、さらにコア軸方向の含水量分布を計測する。

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）を最小二乗法を用いて求める逆解析である。

#### 2. 2. 2 VG式

van GenuchtenはMualenの提案（式2.2.1）した不飽和透水係数モデルを用いて不飽和特性曲線の解析式の誘導を試みた。

$$k_r(\psi) = S_e^{1/2} \cdot \left[ \int_0^{S_e} \frac{1}{\psi(x)} / \int_0^1 \frac{1}{\psi(x)} dx \right]^2 \quad (\text{式 } 2.2.1)$$

ここで $k_r(\psi)$ は相対透水係数、 $\psi$ は圧力水頭、 $S_e$ は有効飽和度である。有効飽和度 $S_e$ は次式のよう

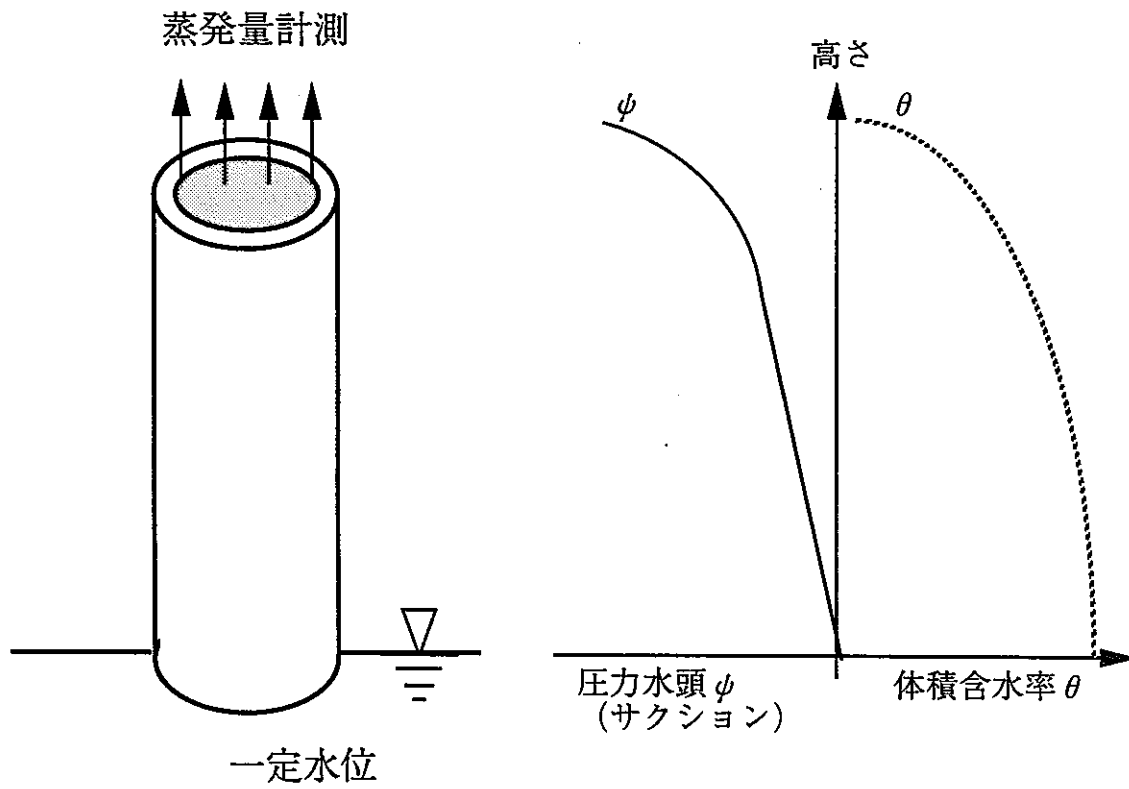


図 - 2. 2. 1 室内実験模式図

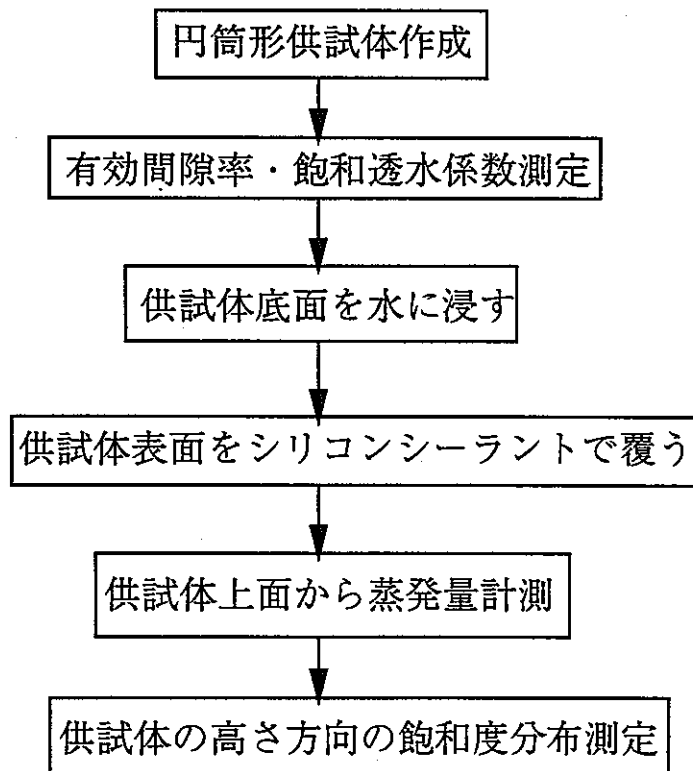


図 - 2. 2. 2 実験手順



に定義される。

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

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。

有効飽和度  $Se$  と圧力水頭  $\psi$  の関係式として土壌水分保水特性曲線によく用いられる式を拡張し (式 2. 2. 3、従来  $m=1$  として用いられていた) を van Genuchten は導入し、

$$Se = \left\{ 1 + |\alpha\psi|^n \right\}^{-m} \quad (\text{式 2. 2. 3})$$

これを (式 2. 2. 1) に代入し、相対透水係数  $k_r$ 、比水分容量  $C(\theta)$  を予測する式を導いた。

$$k_r(\psi) = Se^{1/2} \cdot \left\{ 1 - Se^{1/m} \right\}^2 \quad (\text{式 2. 2. 4})$$

$$C(\theta) = \alpha \cdot (n-1) \cdot (\theta_s - \theta_r) \cdot Se^{1/m} \cdot (1 - Se^{1/m})^m \quad (\text{式 2. 2. 5})$$

$$m = 1 - 1/n \quad , \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (\text{式 2. 2. 6})$$

ここで  $\alpha$ 、 $n$  は土壌固有のパラメーターである。ここで  $\alpha$  は地下水流動媒体の負の圧力水頭 (サクション) と関連する。大きな負の圧力水頭を生じる媒体 (小さな間隙を有する媒体) ほど  $\alpha$  は小さな値をとる傾向にある。 $n$  は水分特性曲線の傾に相当するパラメーターであり、内在する間隙の大きさ分布を表す量である<sup>2)</sup>。図 - 2. 2. 3 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。

式 2. 2. 3 を圧力水頭  $\psi$  について記したものが式 2. 2. 3' である。

$$|\psi| = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1}{Se^m} - 1 \right)^{1/n} \quad (\text{式 2. 2. 3'})$$

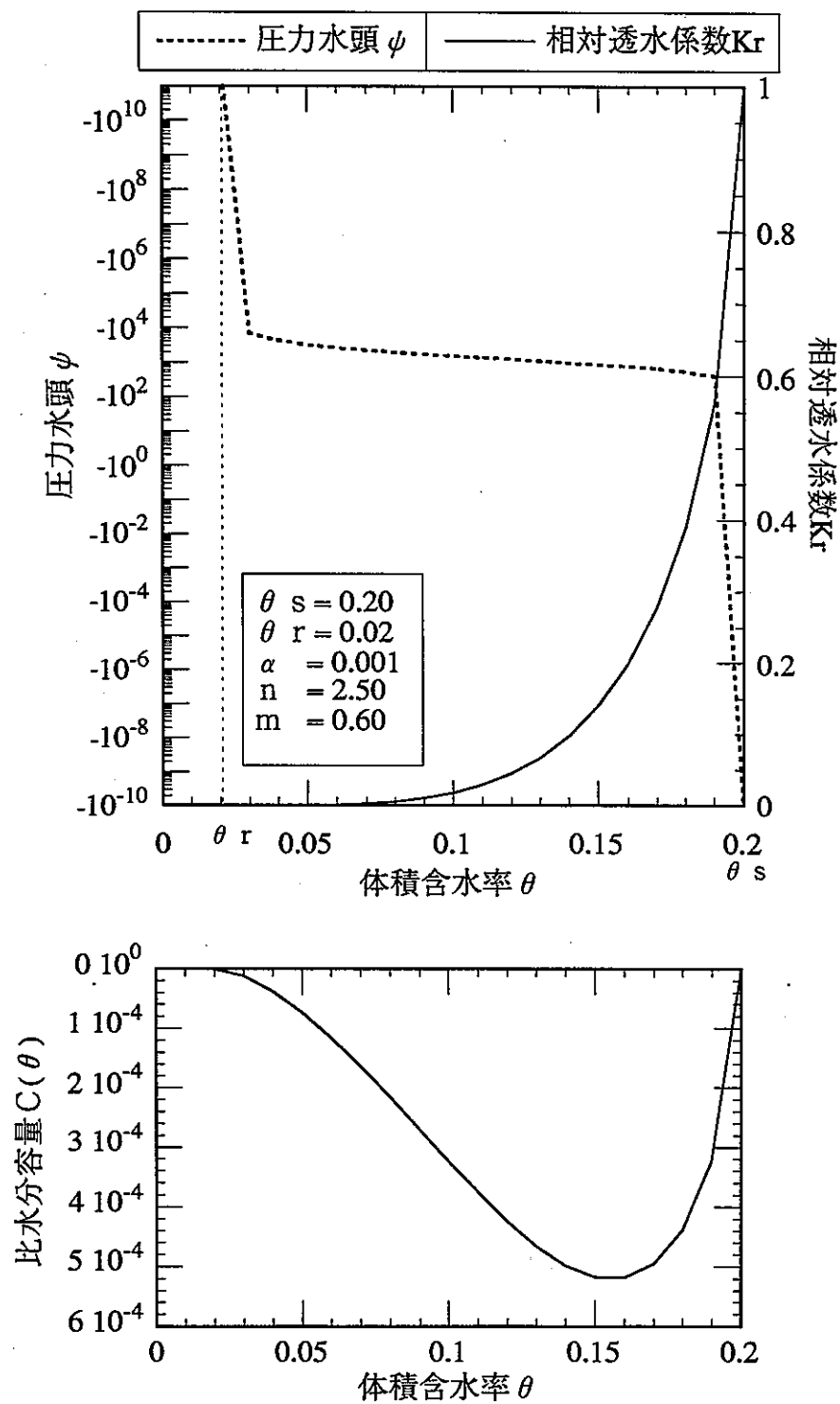


图 - 2. 2. 3 体積含水率、相对透水係数、压力水頭、比分量

図 - 2. 2. 4 に  $\theta_r=0.0$ 、 $\theta_s=0.16$  の場合の  $\alpha$ 、 $n$  の変化による  $\theta - \psi$  関係、 $\theta - K_r$  関係の変化を示す。図 - 2. 2. 4 (a) は  $n$  一定で、 $\alpha$  が 10 倍ごとに变化したときの圧力水頭  $\psi$  を示している。 $\alpha$  が 10 倍になると圧力水頭  $\psi$  は  $1/10$  となることがわかる。(b) は  $\alpha$  が一定で、 $n$  が变化したときの圧力水頭  $\psi$  を示している。 $n$  の変化により体積含水率  $\theta$  に対する圧力水頭  $\psi$  の傾きが異なっていることがわかる。(c) は  $n$  の変化に対する相対透水係数  $K_r$  の関係を示す。この図から  $n$  が小さくなると相対透水係数  $K_r$  も小さくなることがわかる。

## 2. 2. 3 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

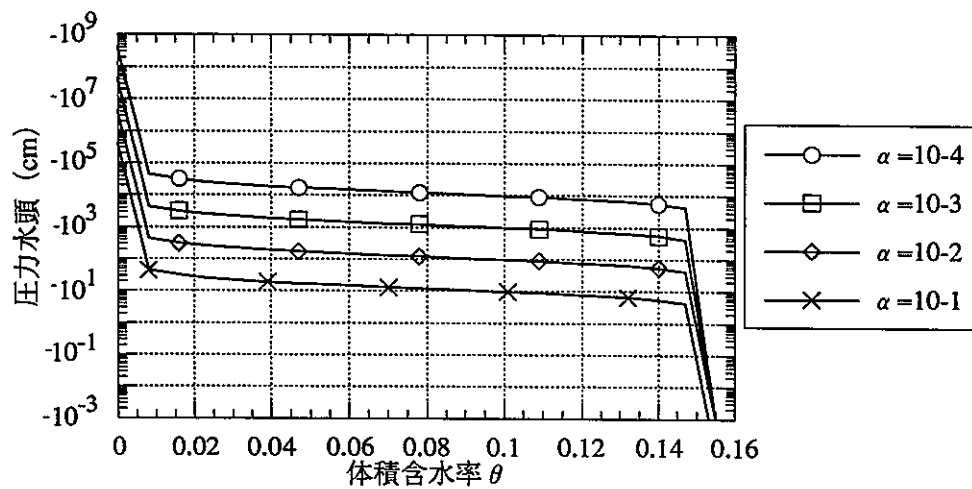
岩石に含まれる水は、岩石内の不飽和領域内に含まれる空気や岩石表面の空気と接触する。水分の空気中への蒸発は、水蒸気の空気中への一方向拡散と考えられ、水蒸気の空気中への水蒸気濃度の差による輸送量（ここではこれを蒸発量  $E_v$  として）は次式で表される。

$$E_v = -D \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{式 2. 2. 7})$$

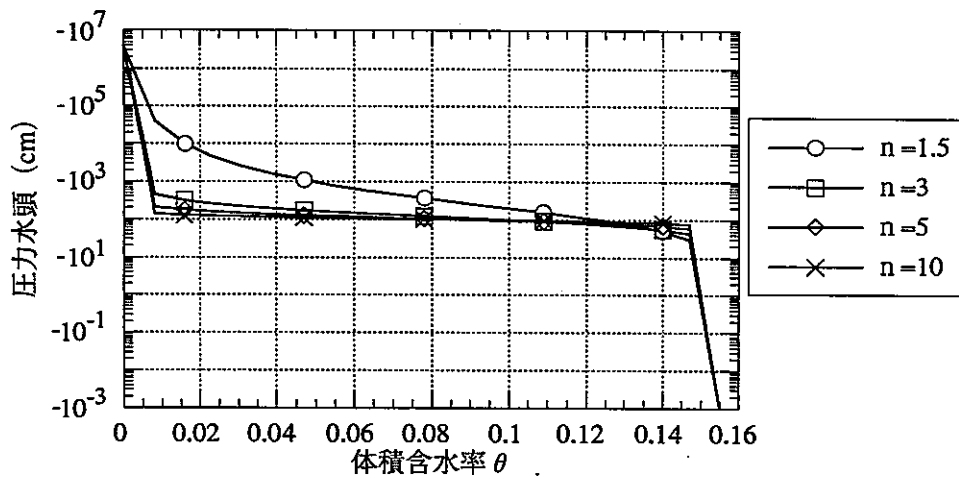
ここに、 $E_v$  は蒸発量（水蒸気の空気中への水蒸気拡散による輸送量）、 $\theta$  は絶対湿度（空気中の水分濃度）、 $D$  は水蒸気の空気中への拡散係数（水蒸気拡散係数）、 $x$  は岩石表面に直交した方向の岩石表面からの距離である。この式から蒸発量は岩石表面からの距離の異なる 2 点の絶対湿度の差を計測し、水蒸気拡散係数がわかれば蒸発量が算定しうることがわかる。絶対湿度、水蒸気拡散係数については、(ii)、(iii) に示す。

#### (ii) 相対湿度・絶対湿度・気温

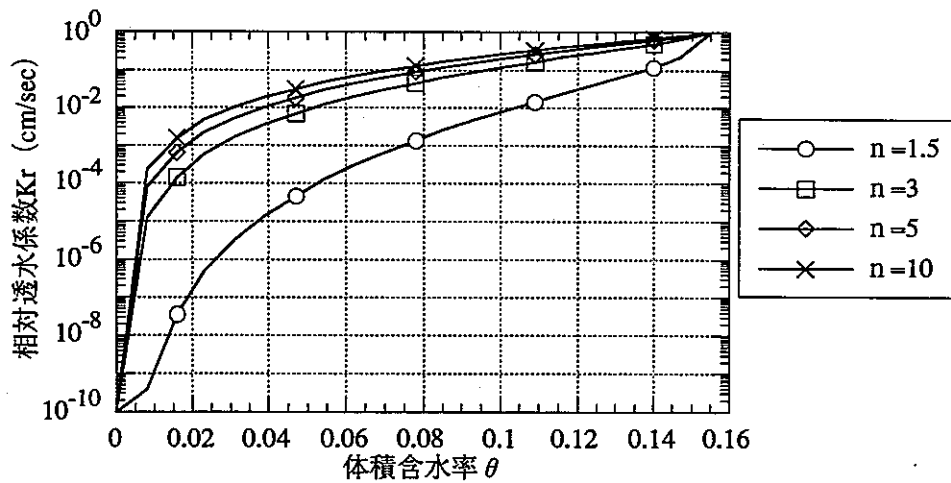
岩石表面等の局所部位で絶対湿度を直接計測するためには、電気抵抗式湿度計（サーミスター）



(a)  $\alpha$  の変化と圧力水頭 ( $n=3$ )



(b)  $n$  の変化と圧力水頭 ( $\alpha=10^{-2}$ )



(c)  $n$  の変化と相対透水係数 ( $\alpha=10^{-4}$ )

図 - 2. 2. 4 VG式パラメータ  $\alpha$ 、 $n$  の変化に伴う相対透水係数、圧力水頭の変化

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。

表 - 2. 2. 1、図 - 2. 2. 5 に理科年表<sup>4)</sup>からの温度と飽和水蒸気量の関係（気圧の影響はその変動幅は小さいとしてここでは考慮しない。）を示す。ここで温度と飽和水蒸気量は10℃毎のデータで、各温度間での線形補間では精度上不十分と考えられる。このため温度0℃～40℃を対象として3次関数で温度と飽和水蒸気量を近似することとした。この結果から温度0℃～40℃における温度と飽和水蒸気密度の関係式は次式（図 - 2. 2. 6）とした。

$$\rho = 4.84E-3 + 3.74E-4 \times t + 4.91E-6 \times t^2 + 3.68E-7 \times t^3 \quad (\text{式} 2. 2. 8)$$

ここに、 $\rho$  は飽和水蒸気密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $t$  は温度 (℃) である。

表 - 2. 2. 1 温度と飽和水蒸気密度

温度 (℃)	飽和水蒸気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
0	0.00485
10	0.00940
20	0.01729
30	0.03037
40	0.05120
50	0.08300
60	0.13020
70	0.19820
80	0.29330
90	0.42350
100	0.59800

理科年表 (物22) より

### (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、関係式が示されている。ここでは空気調和衛生工学便 I 基礎篇、空気調和・衛生工学会編<sup>5)</sup>から、蒸気拡散係数と温度・気圧の関係式とその式から10℃毎の水蒸気拡散係数算定結果、および20℃毎の蒸気拡散係数を表 - 2. 2. 2 および図 - 2. 2. 7 に示す。渡辺らは上田の式<sup>6)</sup>やWinkeimann<sup>6)</sup>の実測値等を検討し上田の式を基礎に水蒸気拡散係数を算定している<sup>2)</sup>。いずれの場合も、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

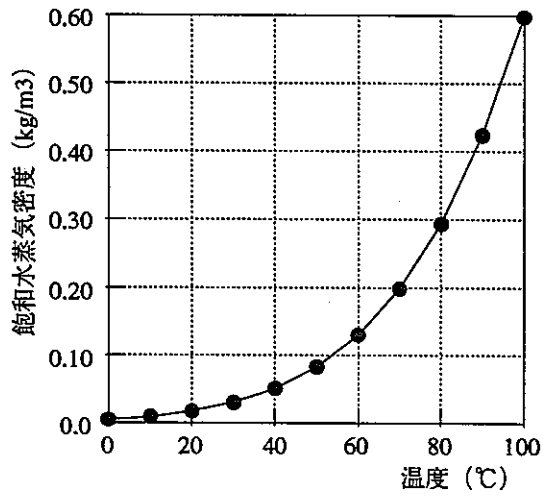


図 - 2. 2. 5 温度と飽和水蒸気密度

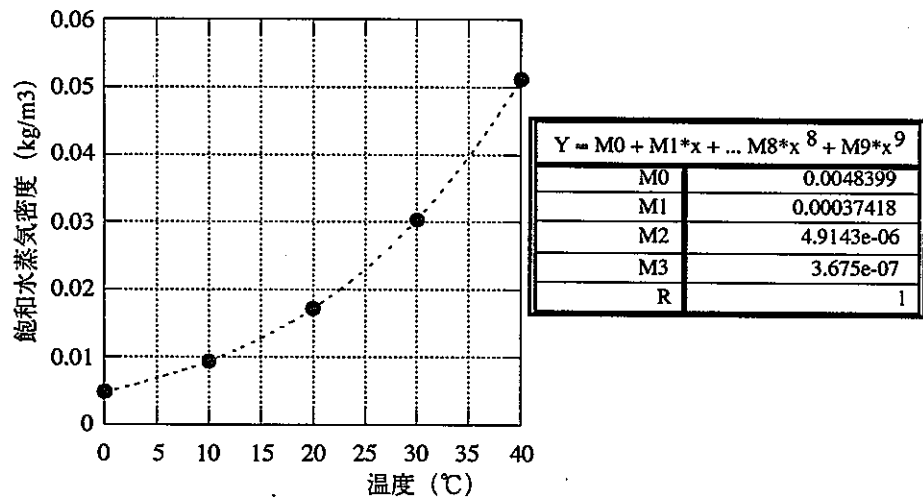


図 - 2. 2. 6 温度と水蒸気密度の関係の3次式による近似

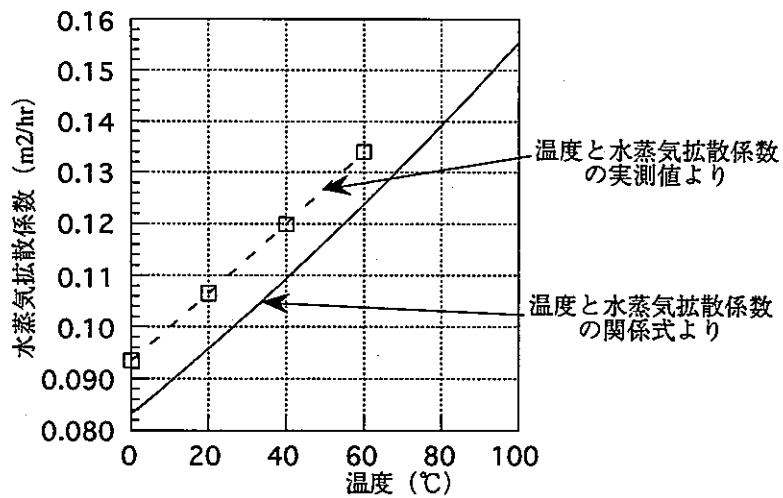


図 - 2. 2. 7 温度と水蒸気拡散係数

発量に与える影響は、計測後でも容易に評価・見直しが可能であり、今回の水蒸気拡散係数は空気調和衛生p.I-190,表5.19に示される内田の示した値を温度に応じ線形補間し算定することとした。

表 - 2. 2. 2 温度と飽和水蒸気密度

温度 (°C)	蒸気拡散係数*	蒸気拡散係数**
	m <sup>2</sup> /hr(1atm)	m <sup>2</sup> /hr
0	8.3200E-02	9.3500E-02
10	8.9407E-02	
20	9.5837E-02	1.0650E-01
30	1.0249E-01	
40	1.0937E-01	1.2000E-01
50	1.1647E-01	
60	1.2379E-01	1.3400E-01
70	1.3134E-01	
80	1.3911E-01	
90	1.4710E-01	
100	1.5532E-01	

( \* 空気調和衛生 式5.128より \*\* 空気調和衛生p.I-190,表5.19)

(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。図 - 2. 2. 8 に蒸発量計測システムの構成を示す。

(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。

図 - 2. 2. 9 にセンサーの形状を示す。

表 - 2. 2. 3 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	

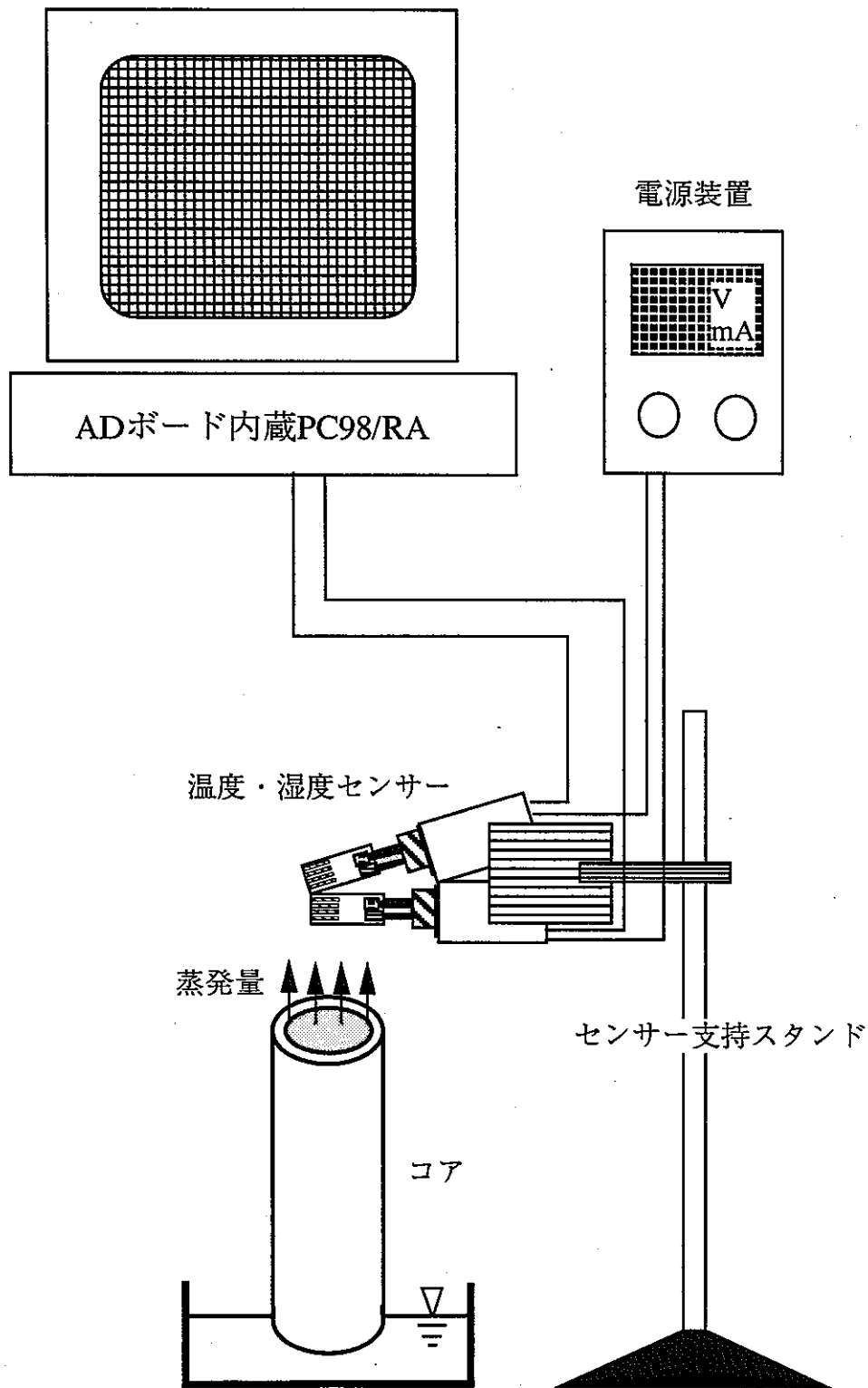
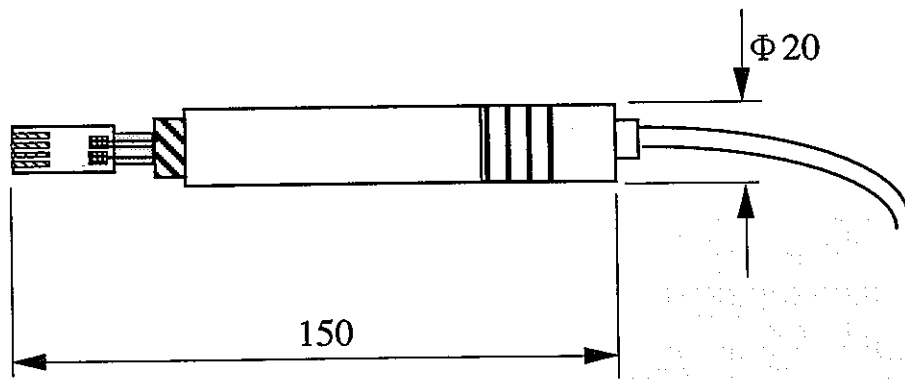
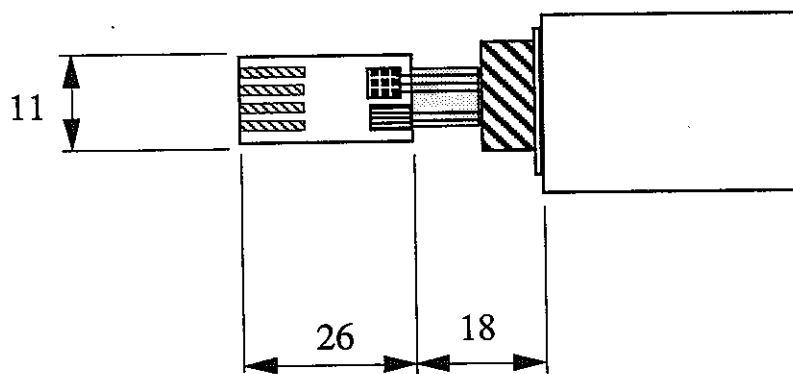


図 - 2. 2. 8 蒸発量計測システムの構成

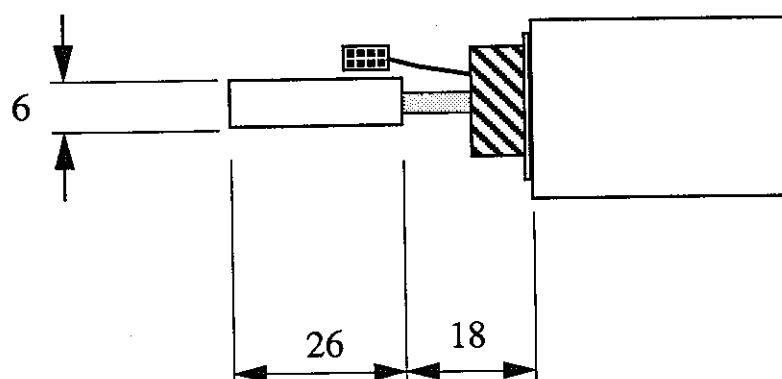




(a) センサー全体



(b) センサー部拡大上面図



(c) センサー部拡大側面図

寸法単位mm

図 - 2. 2. 9 温度・湿度センサーの形状

(3) 計測の妥当性検討

(i) 温度計測誤差とその影響検討

2点の相対湿度・温度を計測し、蒸発量計測を実施する際、温度計測の誤差は、蒸発量算定結果に誤差をもたらす。今回使用したセンサーの温度計測誤差は±0.5℃である。(市販されている温度計の精度の高いもの(分解能0.1℃)で、その精度は高々±0.3℃である。)この誤差は、蒸発量計測に際し十分に小さいものとはいえない。そのため温度計測誤差の蒸発量計測結果に与える影響を検討しておく。

今回の実験で対象とする温度は20℃、40℃近辺であるため、蒸発量計測のための温度・湿度センサーが設置されている2点の温度は等しくその真の温度は38.5℃の場合、21.5℃の場合を想定する。2点の温度・湿度センサーの相対湿度計測値が40%、50%としたとき、±0.5℃という精度(誤差)が蒸発量計測にどの程度の影響を与えるか試算する。ここでセンサー1とセンサー2の関係は、センサー2がセンサー1より蒸発量計測で計測対象部に近いほうのセンサーに相当する。

CASE-1、CASE-3は、センサー2が+0.5℃に誤差を有し、センサー1が-0.5℃の誤差を有する場合であり、CASE-2、CASE-4は、センサー2が-0.5℃に誤差を有し、センサー1が+0.5℃の誤差を有する場合である。表-2.2.4に各CASEでの、各センサーの相対湿度、センサー表示温度、表示温度からの絶対湿度を示し、一番下の行に、絶対湿度の差を示している。1.0℃程度の温度変化(図-2.2.7)では水蒸気拡散係数の変化は小さいのでこの絶対湿度の差の違いが、蒸発量の温度計測誤差の影響ということになる。

CASE-1とCASE-2、CASE-3とCASE-4を比較すると、2倍近い差が生じていることがわかる。

表-2.2.4 温度計測精度(誤差)が蒸発量計測に与える影響の試算

	CASE-1	CASE-2		CASE-3	CASE-4
40%	38℃	39℃	40%	21℃	22℃
センサー2	0.0188136	0.0196468	センサー2	0.0074392	0.0079624
50%	39℃	38℃	50%	22℃	21℃
センサー1	0.0245585	0.0235170	センサー1	0.0099530	0.009299
絶対湿度差	0.0057449	0.0038702		0.0025138	0.0013366

数値は絶対湿度(kg/m<sup>3</sup>)

上記の試算は、温度計測誤差が、最も大きくなる場合を示したものであるが、温度計測の蒸発量計測に与える影響が大きいことを示す一例といえる。このため、温度計測誤差をできるだけ小さく

する目的で、今回使用した6個の温度・湿度センサー（それぞれ記号でS1A, S1B, S2A, S2B, S3A, S3Bとする）の温度センサーのキャリブレーションを実施し、センサー表示値からの温度補正式を作ることにした。

方法は2つの温度状態に対しての、各センサー表示値とアースマン式温度・湿度計（温度計は水銀式で最小目盛0.2℃）の乾球の読み値を正規温度として両者の対比により行った。補正式は、線形近似によりもとめた。

$$T = a \cdot t + b \quad (\text{式 2. 2. 9})$$

ここで、Tは補正された温度、tはセンサー表示値、a、bはそれぞれ補正係数である。Tに正規温度、tに正規の温度に対応したセンサー表示値を代入し、a、bに関する連立方程式を作る。この式からa、bは次式にて算定される。

$$a = \frac{1}{\det} \begin{vmatrix} 23.8 & 1 \\ 37.0 & 1 \end{vmatrix}, \quad b = \frac{1}{\det} \begin{vmatrix} t_{23.8} & 23.8 \\ t_{37.0} & 37.0 \end{vmatrix}, \quad \det = \begin{vmatrix} t_{23.8} & 1 \\ t_{37.0} & 1 \end{vmatrix}$$

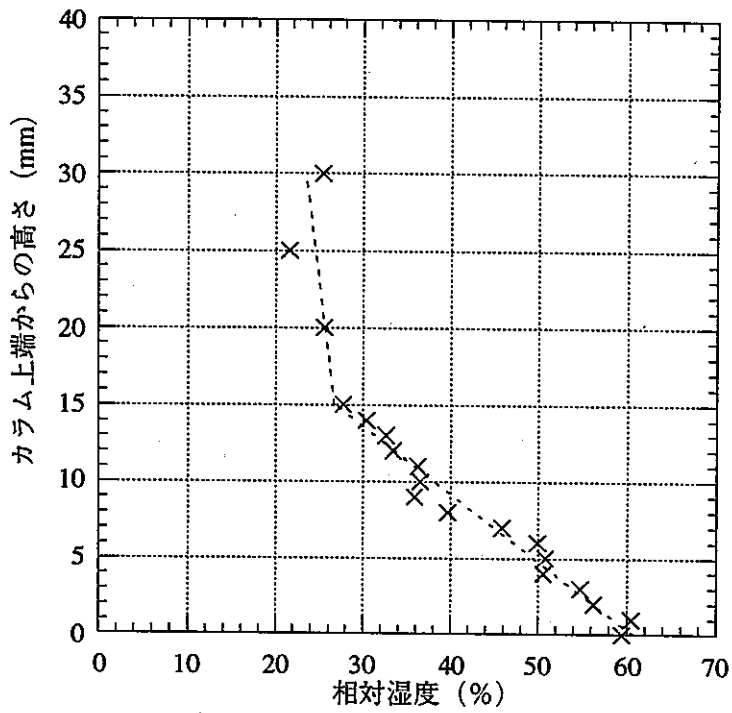
ここに、 $t_{23.8}$ 、 $t_{37.0}$ は、それぞれ各センサーの23.8℃、38.0℃における表示値である。

表 - 2. 2. 5 各センサーの温度補正係数

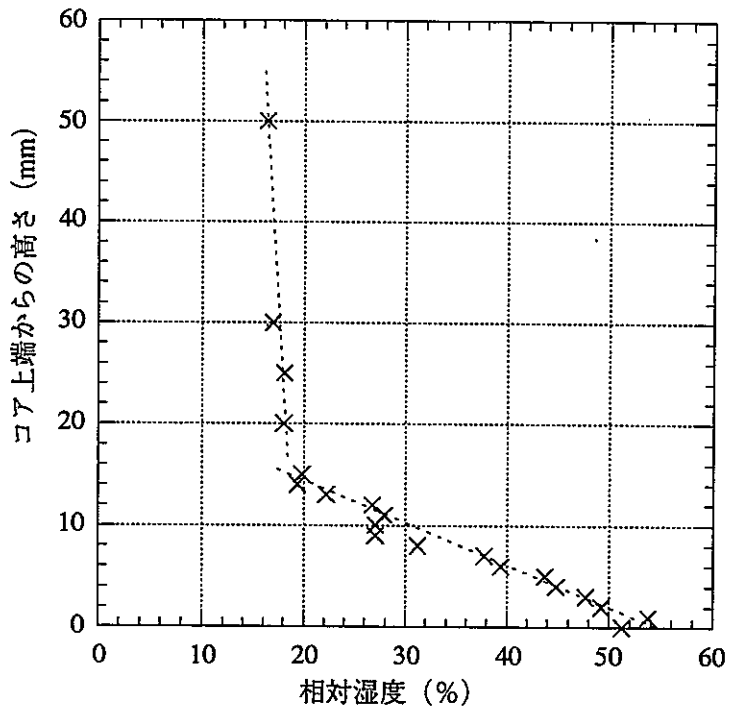
センサー		S1A	S1B	S2A	S2B	S3A	S3B
正規温度							
23.800	$t_{23.8}$	23.506	24.004	23.389	23.750	23.535	23.711
37.000	$t_{37.0}$	36.572	37.134	36.694	37.207	36.890	36.865
補正係数							
	a	1.0103	1.0053	0.9921	0.9809	0.9884	1.0035
	b	0.0529	-0.3320	0.5956	0.5036	0.5382	0.0061

#### (ii) 水蒸気拡散領域の検討

今回実施する蒸発量計測は絶対湿度差による水蒸気拡散を前提に計測するもので、蒸発量計測部法線方向に絶対湿度が一定勾配で変化している状態でなければならない。このことを確認するため、標準砂の実験、および岩石（L1供試体）を用いた実験において、蒸発面法線方向（本実験においては鉛直方向と一致）の湿度分布を測定した。測定結果が、図 - 2. 2. 10である。(a)は



(a) 標準砂カラム上の相対湿度分布



(b) 多層砂岩コア上の相対湿度分布

図 - 2. 2. 10 供試体上部の相対湿度分布

標準砂、(b)は多胡砂岩での計測結果である。(a)(b)いずれも蒸発面から15mmまで一様な勾配で相対湿度が低下している。このことから、蒸発量の計測は、蒸発面から15mmまでの範囲で行わなければならない。

## 2. 2. 4 不飽和パラメーターの同定方法

### (1) 逆解析手法

最小二乗法を用いた未知パラメーター同定手法の主なものには、ニュートン・ガウス法、マルカート法、修正マルカート法<sup>7)</sup>などがある。これら数値解析手法を用いて同定パラメータ解析（逆解析）を実施する際、各パラメータの変化量をあらかじめ適当に設定して、各パラメータの変化量に対する残差二乗和の変化割合を算定する。VG式の $\alpha$ は、取りうる値の幅が広く、 $\alpha$ の変化に対して相対透水性係数の変化量が大きく、初期に与える $\alpha$ の設定とそのときの変化量の設定等あらかじめ計算者が試行錯誤によりそれらの設定をしておく必要がある。また、VG式の $n$ は、相対透水性係数の形状を決定する。しかし、同定試行過程で、相対透水性係数が非常に小さくなり、計算上、桁落ちが生じ透水マトリックスが0となり、計算が中断してしまう。このため、今回は解析対象が1次元・定常で計算時間が短く容易なため、人為的にパラメータ $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ を逐次変化させ、実測された体積含水率（あるいは有効飽和度）と与えたパラメータ $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ に基づく解析から得られる体積含水率を二乗誤差最小とするパラメータ $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ を同定することとした。図-2・2・11 パラメータ $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ の同定手順を示す。

同定解析における収束条件は、通常計測値と解析値との差（あるいは差の二乗値）が一定値を下回る場合またはパラメータ変化に対する誤差量の減少がある値を下回る場合収束と判定する。今回は、あらかじめそれら収束判定のための規定値は設けず、各計測点における有効飽和度の計測値と解析値の差の二乗の合計値（ $Er\_Se$ ）がパラメーター変化に伴い変化する量を次式のように誤差減少率と称して定義し、1%を収束判定の目安値とした。

$$\text{誤差減少率 (\%)} = (\text{今回の}Er\_Se - \text{前回の}Er\_Se) / \text{前回の}Er\_Se \times 100 \quad (\text{式}2.2.10)$$

上式ではパラメータ変化量を十分小さくとれば誤差減少率は1%を下回することは自明である。パラメータは人為的に変化させるため極端に小さくすることはほとんどないが、判定時にはこの点に留意を要する。収束判定の妥当性については実際の同定計算時に再度検討することとした。

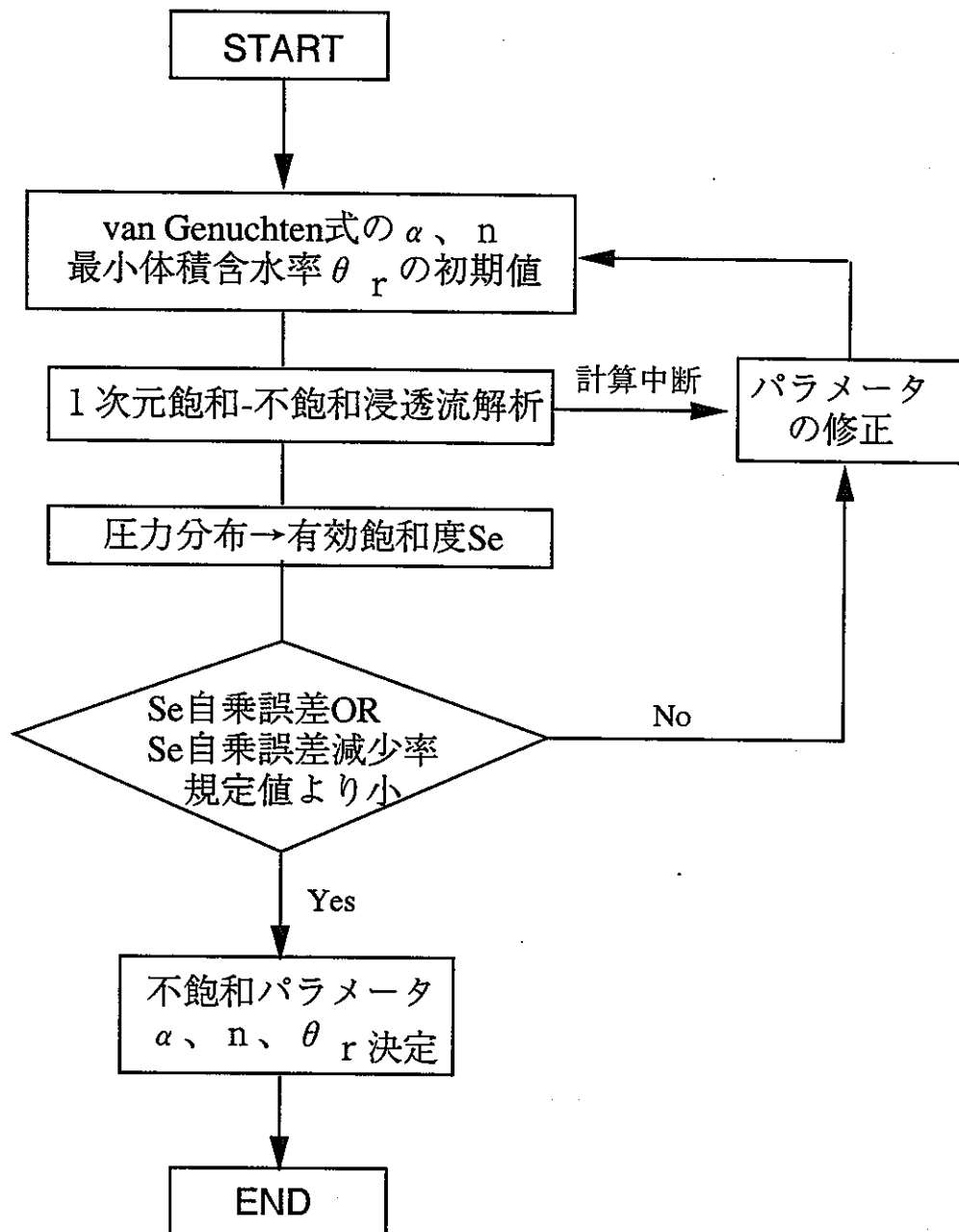


図 - 2. 2. 11 パラメータ同定手順

## 2. 3 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

### 2. 3. 1 標準砂を用いた不飽和浸透特性推定法の検証実験

#### (1) 実験の目的

土質分野の不飽和研究において最もよく研究され、不飽和浸透特性も既に計測されてい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) 実験手順

実験は以下の手順（図 - 2. 3. 1 参照）で実施した。

- ① 供試体カラムの組立
- ② 脱気水の注入
- ③ 標準砂の充填・締め固め
- ④ 透水試験
- ⑤ 蒸発量計測機器の設置・計測開始
- ⑥ 蒸発量計測
- ⑦ 定常状態の確認・計測終了
- ⑧ 含水量の計測
- ⑨ 解析

#### (3) 実験条件

##### (i) 計測機器

実験に使用した主な機器は以下のとおりである。

- ①蒸発量計測用温度・湿度センサー1組（センサー2個で1組）

センサーは下部センサーにS1A, 上部センサーにS1Bを用いた。

- ②水位設定・供試体固定アクリル容器

形状は図 - 2. 3. 2に示す。

図 - 2. 2. 1に示す方法では、側方をシールしたコアに一定水位を与える盆状の容器で十分であるが、今回の実験では蒸発量計測の妥当性を確認する目的で蒸発散逸を重量減少として計測する目的もあるため、図に示す容器とした。このためこの容器は小さいながらマリOTT管を有し外部からの水の補給無しに一定水位を保つことができる設計にしてある。ここで問題となるのは容器からの水の散逸が容器にセットした供試体コア以外から生じないことの保証を得ておくこととなる。このため、岩石コアの代わりに不透水とみなせるプラスチックの直径5cm、長さ5

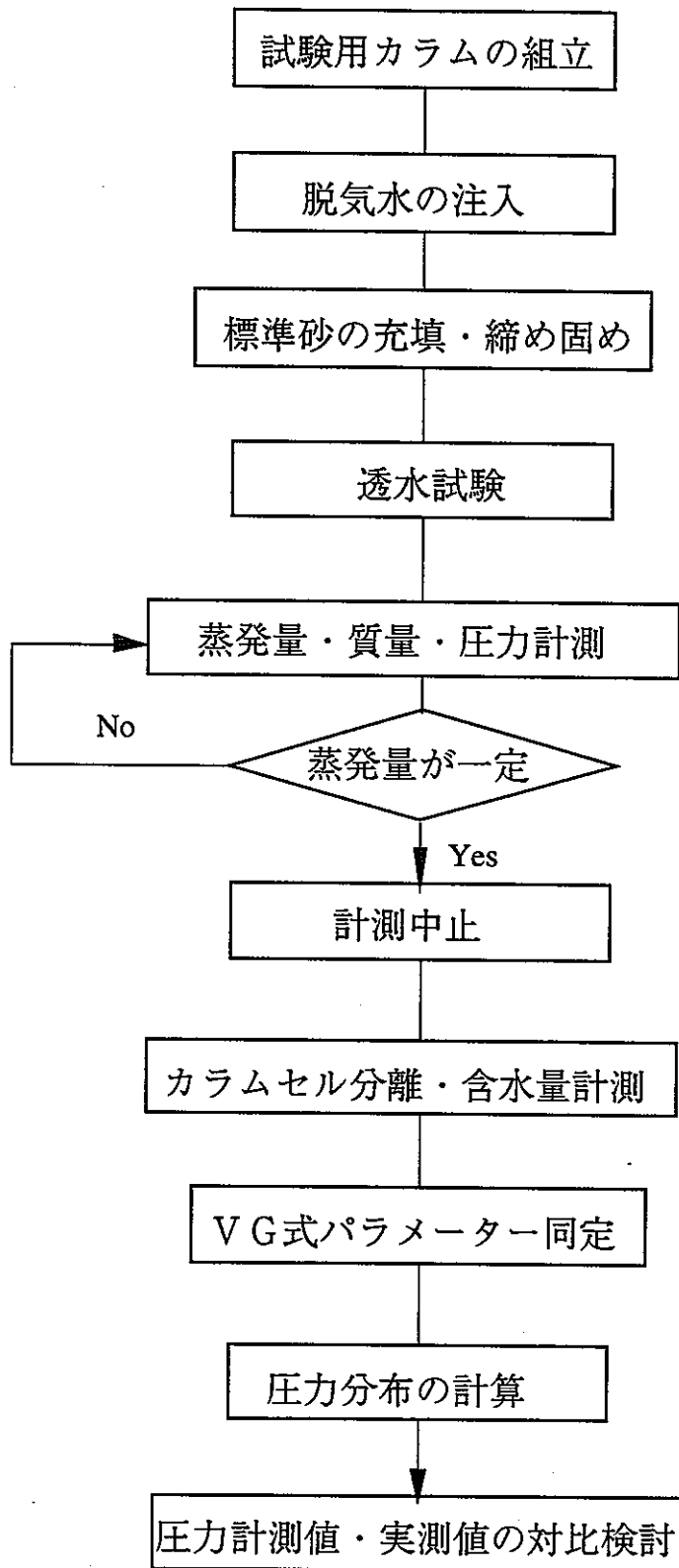


図 - 2. 3. 1 標準砂実験手順



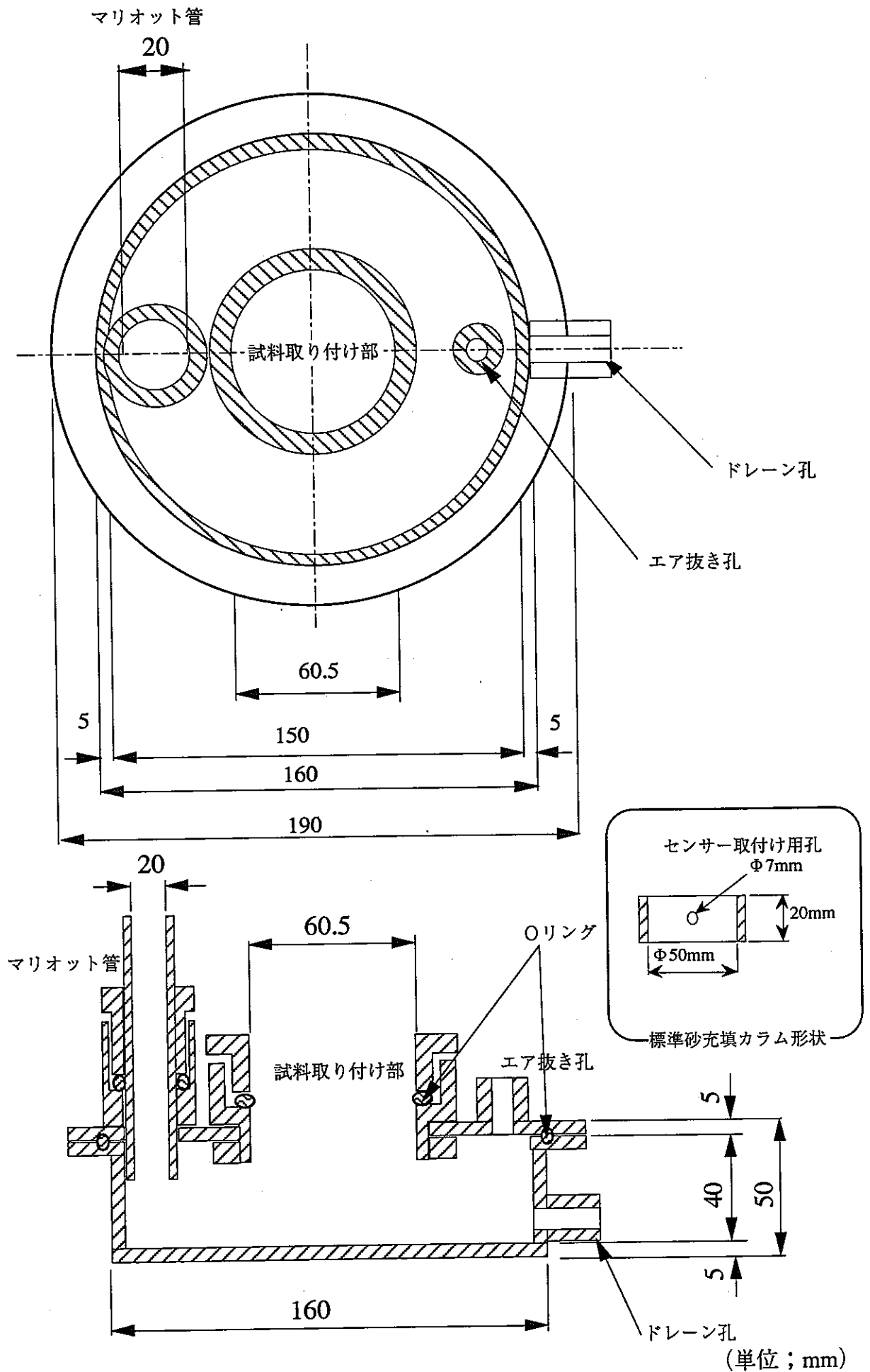


図 - 2. 3. 2 アクリル容器形状

5 cmのコアのダミーを用いて、実験を実施した。実験はシリコンで側方をシールしたダミーのコアを容器にセットし、室温20℃、相対湿度20%程度の実際の岩石コアとほぼ同じ条件で約70時間放置し、その間の重量変化を計測するものである。この結果、重量は0.43 g減少した。直径5 cmのコアからの蒸発量に換算すると0.86mg/sec/m<sup>2</sup>に相当する。これは重量計測からの蒸発量を評価する際、1 mg/sec/m<sup>2</sup>程度大きく蒸発量を見積る可能性があることを示唆している。この点については実験結果の検討時に留意しておく必要がある。

③小型テンシオメーター；サンケイ理科製土壌感圧水分センサー3セット

形状、諸元は図-2.3.3、図-2.3.4に示す。

④電子天秤；島津製作所 EB-3200 H

秤量：3200 g、読み取り限度：10mg、直線性：±20mg

⑤センサー支持スタンド2個

⑥データ計測・蒸発量演算用パソコン

PC98RA：AD変換ボード等付属

(ii) レイアウト

実験装置の計測時のレイアウトを図-2.3.5に示す。

(iii) 実験期間

蒸発量計測期間；1995年1月5日～9日

(iv) 環境設定

実験は多少人の出入りのある恒温室で実施した。このため、装置はレイアウトの図-2.3.5に示すように段ボール箱で被い、気流や温度変化の計測への影響を極力抑えることとした。同室のエアコン設定温度は20℃とした。

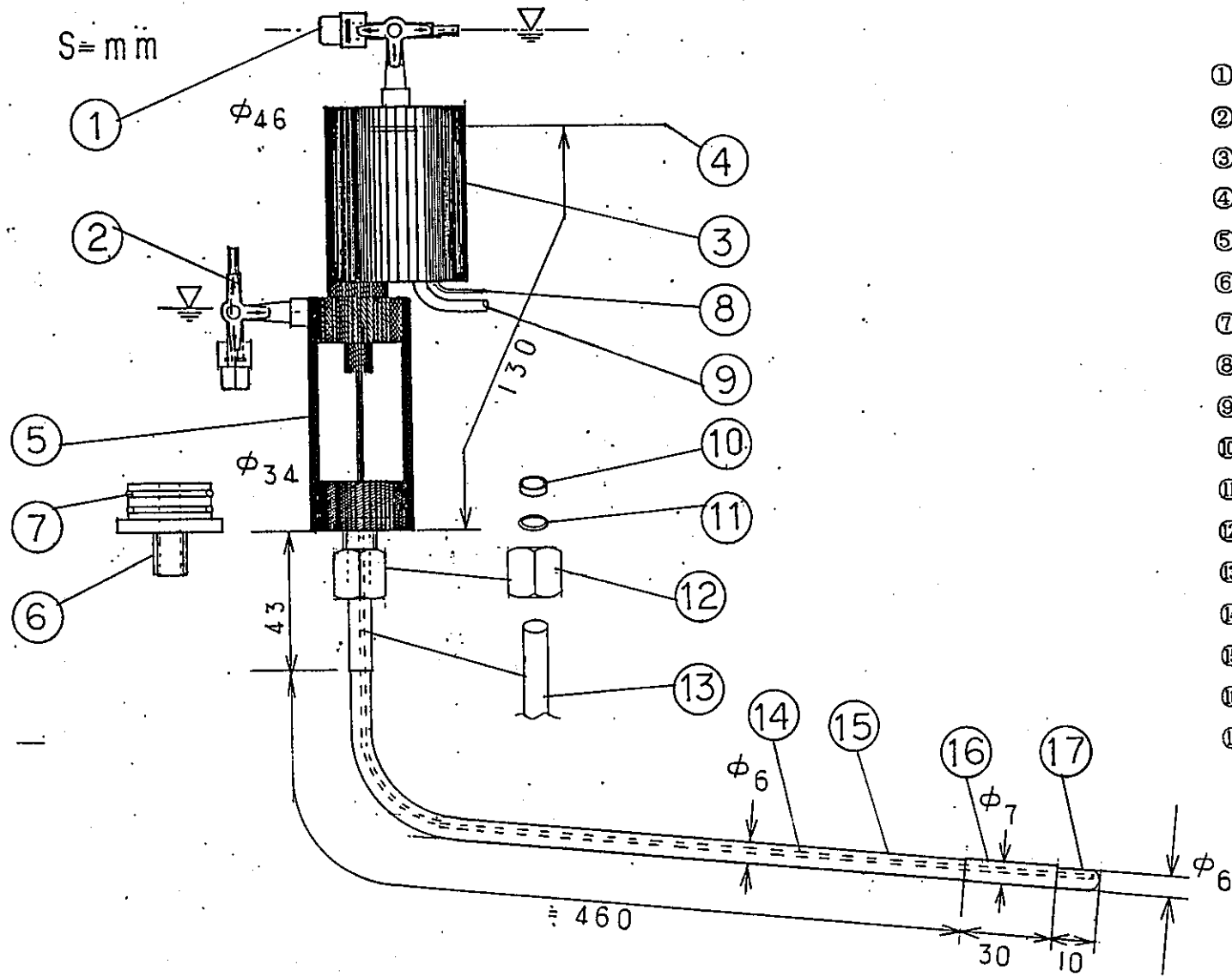
(4) 実験の方法・留意点

以下に各項目の実施方法・留意点を述べる。

①供試体カラムの組立

標準砂を岩石コアと同様に直径5 cmの円筒形にするため、内径5 cmの亚克力製容器を用い、亚克力製容器に標準砂を充填する。亚克力製容器は、標準砂内部の含水量分布を計るため、高さ2 cmのものを複数積み重ねて用いた。各容器は、真空シリコングリスを塗り、透明なビニルテープで巻いて一体化させた。さらに密封性（亚克力カラム継ぎ目からの漏水・エアーの侵入を防ぐ）

# SK型土壤感圧・水分センサ L型

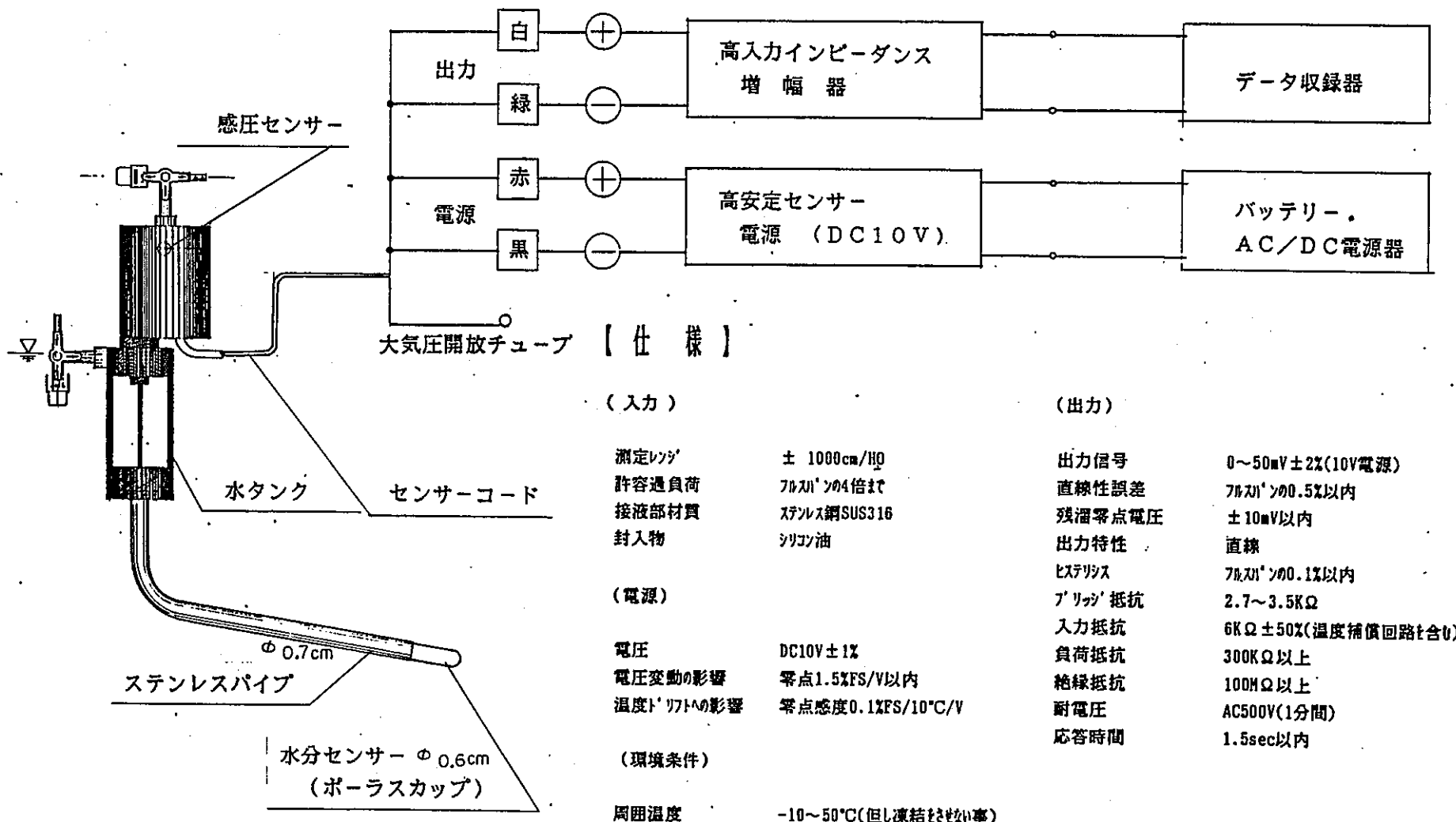


- | 名称             |
|----------------|
| ① 給水コック        |
| ② 排水コック        |
| ③ 感圧センサ        |
| ④ 受圧部 (位置)     |
| ⑤ 水タンク         |
| ⑥ 水タンク受器       |
| ⑦ Oリング         |
| ⑧ エアチューブ       |
| ⑨ センサコード       |
| ⑩ 樹脂リング        |
| ⑪ Oリング         |
| ⑫ ロックナット       |
| ⑬ ステンレスパイプ (A) |
| ⑭ 給水チューブ       |
| ⑮ フレキチューブ      |
| ⑯ ステンレス継手      |
| ⑰ 水分センサ        |

図 - 2. 3. 3 テンシオメーター形状

# SK型埋設土壤水分計測用感圧センサーと 高入力インピーダンス増幅器の接続方法

2-23



(入力)

測定レンジ ± 1000cm/H<sub>2</sub>O  
 許容過負荷 70kg/m<sup>2</sup>の4倍まで  
 接液部材質 ステンレス鋼SUS316  
 封入物 シリコン油

(電源)

電圧 DC10V ± 1%  
 電圧変動の影響 零点1.5%FS/V以内  
 温度ドリフトの影響 零点感度0.1%FS/10°C/V

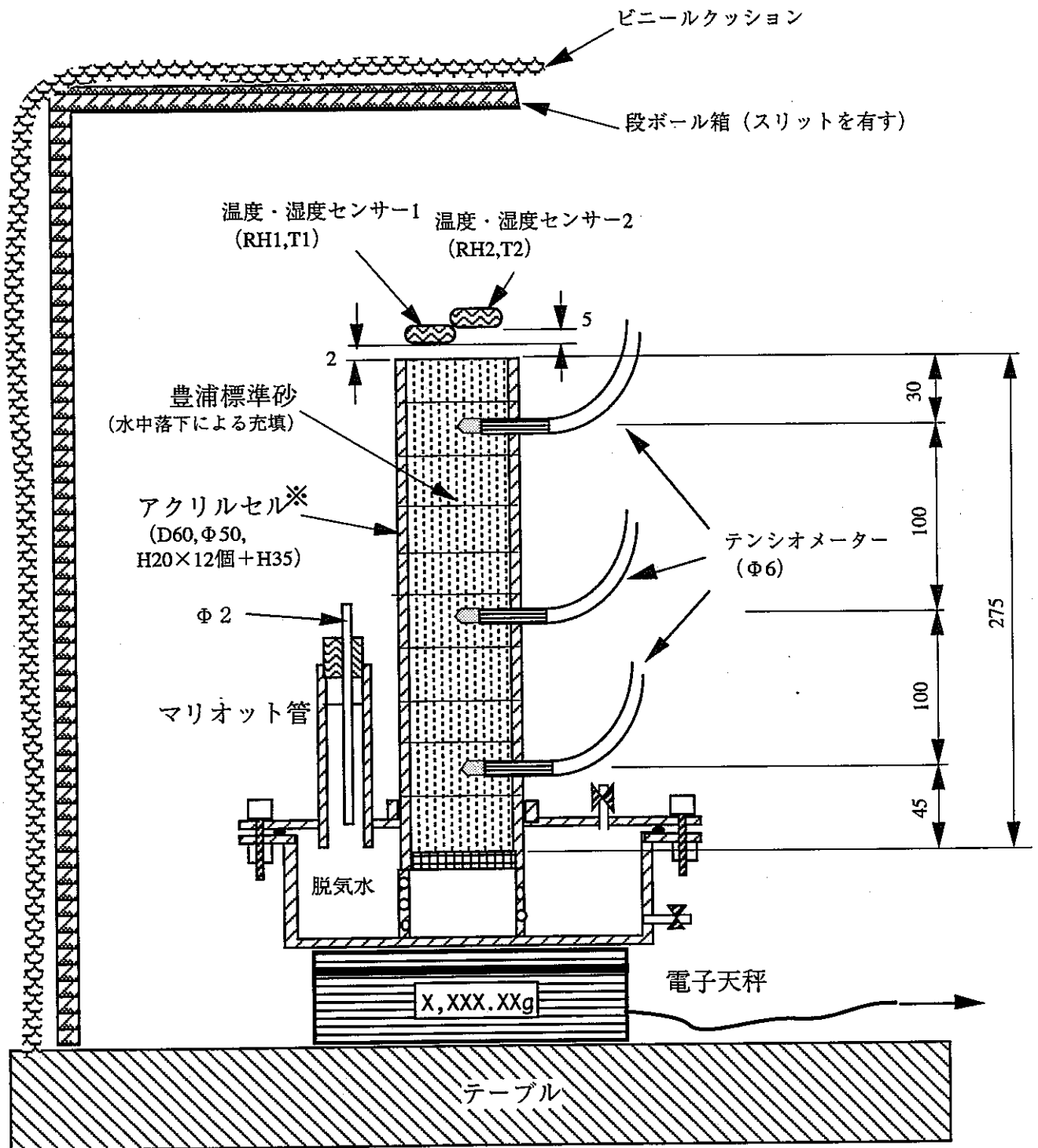
(環境条件)

周囲温度 -10~50°C(但し凍結を避けたい事)

(出力)

出力信号 0~50mV ± 2%(10V電源)  
 直線性誤差 70kg/m<sup>2</sup>の0.5%以内  
 残留零点電圧 ± 10mV以内  
 出力特性 直線  
 ヒステリシス 70kg/m<sup>2</sup>の0.1%以内  
 ブリッジ抵抗 2.7~3.5KΩ  
 入力抵抗 6KΩ ± 50%(温度補償回路を含む)  
 負荷抵抗 300KΩ以上  
 絶縁抵抗 100MΩ以上  
 耐電圧 AC500V(1分間)  
 応答時間 1.5sec以内

図-2.3.4 テンシオメーター諸元



(単位 ; mm)

図 - 2. 3. 5 実験装置概要

を確保するため、テープ継ぎ目に、シリコンシーラントを塗り、側部を覆うシリコンの膜を形成させた。テンシオメーターは孔のあいたカラムにあらかじめセットし、孔とセンサーは、シリコンにて固定した。カラムは透水試験に備え、1カラム余分に設置した。

#### ②脱気水の注入

- 脱気水は、容器下方のドレーンから注入し、内部にエアーが残らないよう留意した。

#### ③標準砂の充填・締め固め

- 使用する標準砂は炉乾燥後、デシケーターにて常温としたものを使用した。

- 充填前、使用する標準砂の重量を計測しておく。

- 充填は水中落下による締め固め法を用いた。

- 充填に先立ち、アクリルカラム底部の小穴から砂の落下を防ぐためアクリルカラム底部にナイロンメッシュを2重に敷いた。

- 充填終了後標準砂残量を計測し、充填前・充填終了後の差から標準砂充填量、有効間隙率を算定する。

#### ④透水試験

- 透水試験は図 - 2. 3. 6 に示す設定で実施し、ある水頭差 $\Delta H$ に対し、流出が定常となった状態での流出量 $Q$ 、流出 $Q$ に要する時間 $T$ を計測する。(図 - 2. 3. 7)

- 水頭差 $\Delta H$ は3種類変化させ、それぞれで流出量 $Q$ 、流出 $Q$ に要する時間 $T$ を計測した。

- 試験は標準砂と同様に3種類の動水勾配に対し行い、そのときの流量を時間、断面積で除し、単位面積重量と動水勾配の傾きから透水係数を算定した。

#### ⑤計測機器の設置・計測開始

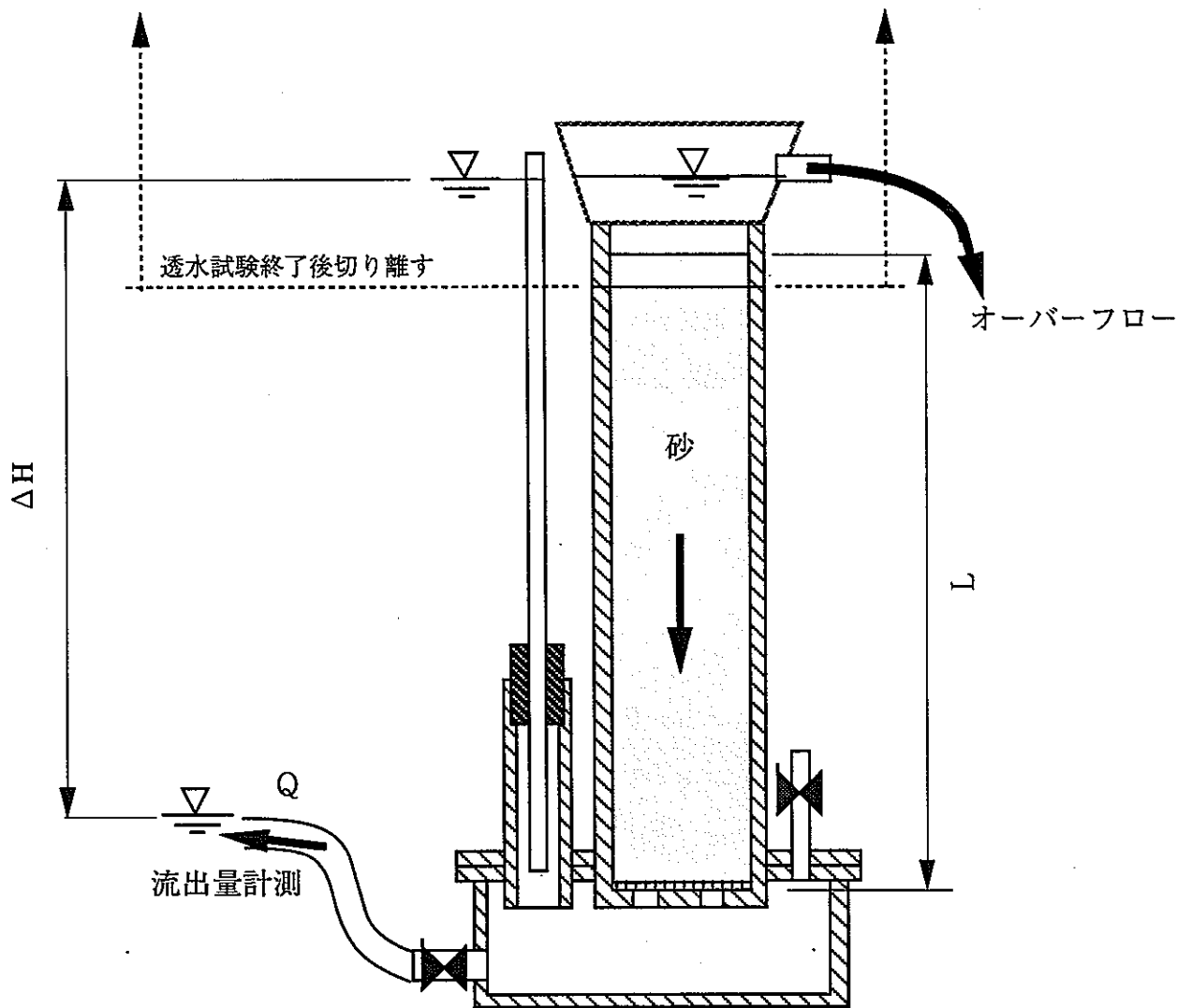
- 透水試験終了後、透水試験に使用したオーバーフロー容器、上部カラム、下流部チューブを取り外す。

- 供試体を電子天秤に載せる。

- マリオット管の水位を標準砂カラム最上部にセットする。

- 天秤に重量既知の物体を載せ、天秤表示の確認をする。(これは、供試体に接続されているテンシオメーターのチューブが天秤上になく感圧センサーに接続されているため、天秤読み値を補正するための(キャリブレーションのため)実施した。)

- 蒸発量計測のための温度・湿度センサーを標準砂上にセットする。2つのセンサーは、標準砂上面と平行になるよう留意する。下部センサーと標準砂上面とは約2mm離し、2つのセンサーは標準砂からの距離が5mm(センサー間隔を5mmに設定)異なるよう設置する。



$$Q = -K_s \cdot (\Delta H / L) \cdot A$$

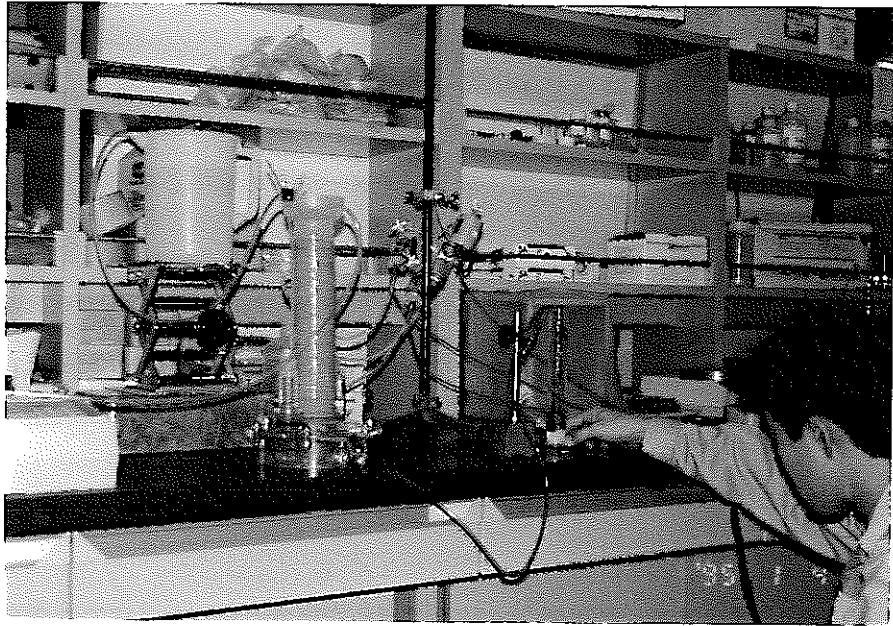
$$K_s = -Q / (\Delta H / L) / A$$

$Q$  ; 単位時間当りの流出量

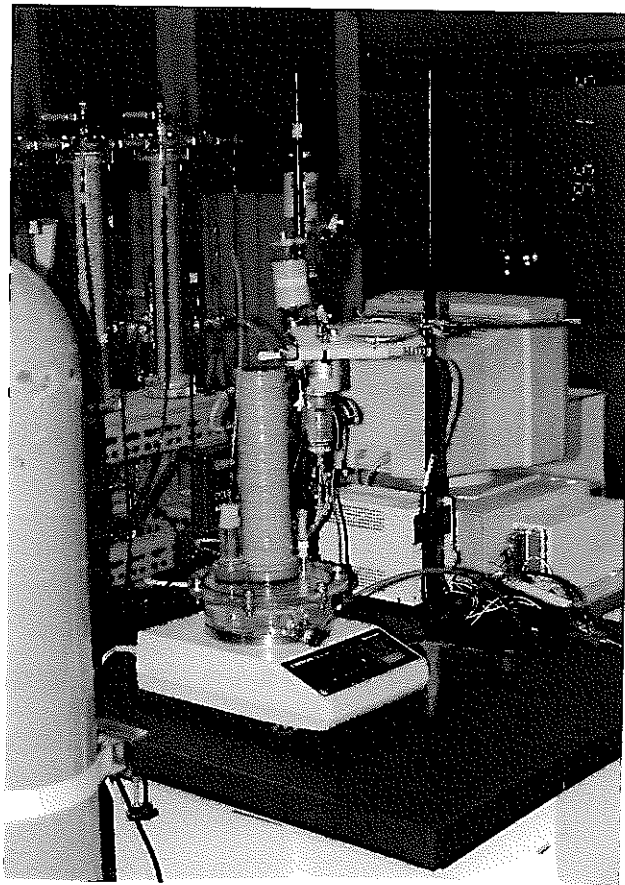
$K_s$  ; 飽和透水係数、 $A$  ; 断面積

$\Delta H$  ; 水頭差、 $L$  ; 砂柱長

図 - 2. 3. 6 透水試験概要図



(a) 透水試験



(b) 実験概要

図 - 2. 3. 7 標準砂を用いた実験状況写真



- 各計器の電源をONにし、計測値の出力、計測値の計算機への入力を開始する。

#### ⑥計測

- この時点では、標準砂カラム最上部に地下水面が存在しており、静水圧状態にある。この時点のテンシオメーターの出力値にて、テンシオメーターの電圧から水位へ変換する際の補正値を決める。
- テンシオメーターからの出力が安定したことを確認したのち、下の排水バルブを少し開き、マリOTT管の水位を所定の水位となるように下げ、速やかにバルブを閉じる。水位設定方法は図 - 2. 3. 8 に注水時から含めて示す。
- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、重量、水圧の計測を継続する。

#### ⑦定常状態の確認・計測終了

- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、水圧の計測値が定常となった時点で計測を終了する。

#### ⑧含水量の計測

- 計測終了後、速やかに、カラム巻いているシリコン、ビニルテープをカラム継ぎ目にて切り離し、上段から、カラム中の水分を有する標準砂を（既に重量のわかっている）シャーレーに移し、重量を計測する。
- 上記作業を各カラムに対して実施する。
- シャーレーを乾燥炉に入れ、110℃にて、24時間乾燥させる。
- 乾燥後、デシケーターにて冷やす。
- 各シャーレーの重量を計測し、乾燥前後の重量差から含水量を算定する。

#### ⑨ 解析

- 計測された蒸発量、下端部の水位、飽和透水係数から1元定常浸透解析により、計測された体積含水率を最もよく再現するVG式のパラメータを同定する。

### (5) 実験結果

#### (i) 間隙率

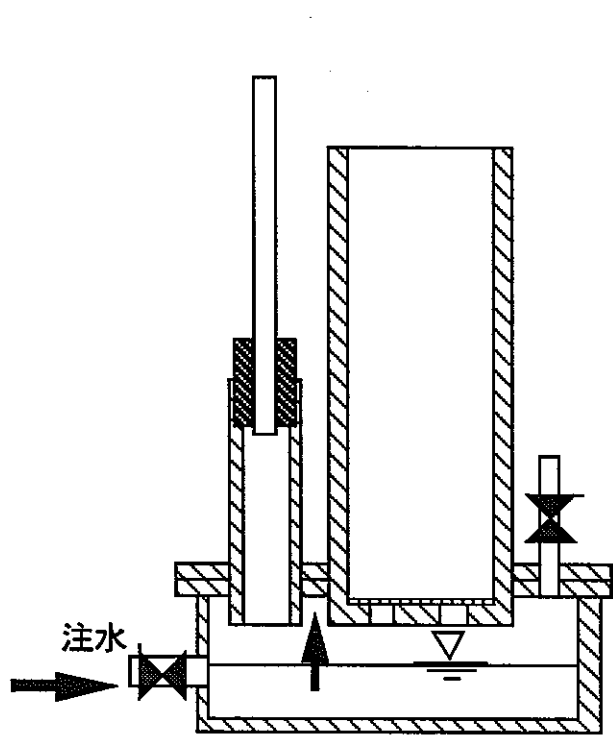
使用した砂の重量、充填対象の体積（アクリルカラム体積）、標準砂の真比重  $G_s$  ( $2.64 < \text{土質試験法、土質工学会編より} >$ ) として算定した。算定した間隙率は0.461である。

#### (ii) 透水試験

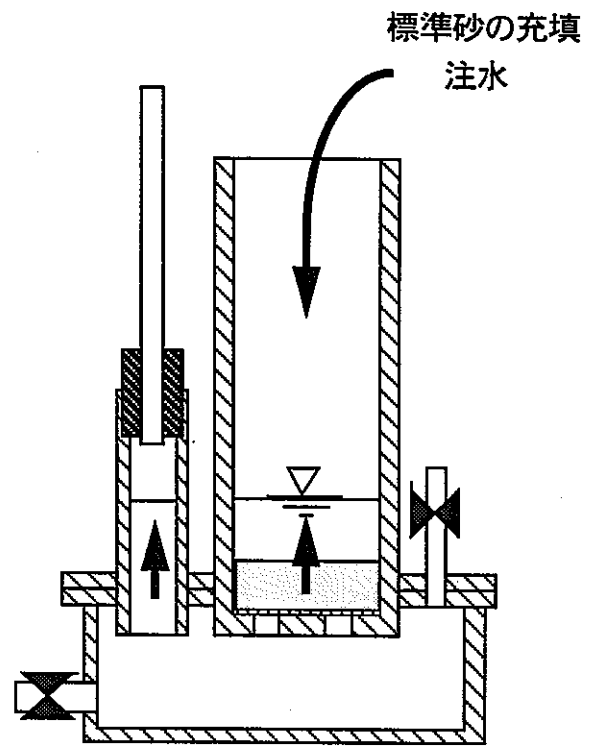
透水試験結果（図 - 2. 3. 9）から  $3.25 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$  である。

#### (iii) 温度・湿度・蒸発量の経時変化

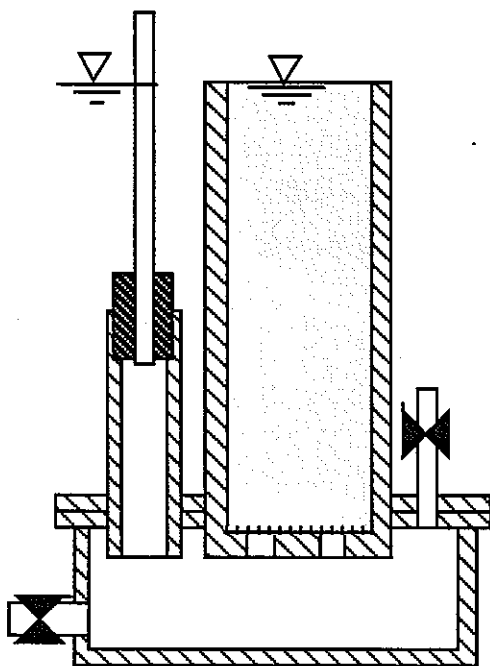
図 - 2. 3. 10 に温度・湿度・蒸発量の経時変化を示す。ここで温度、相対湿度は10分毎の



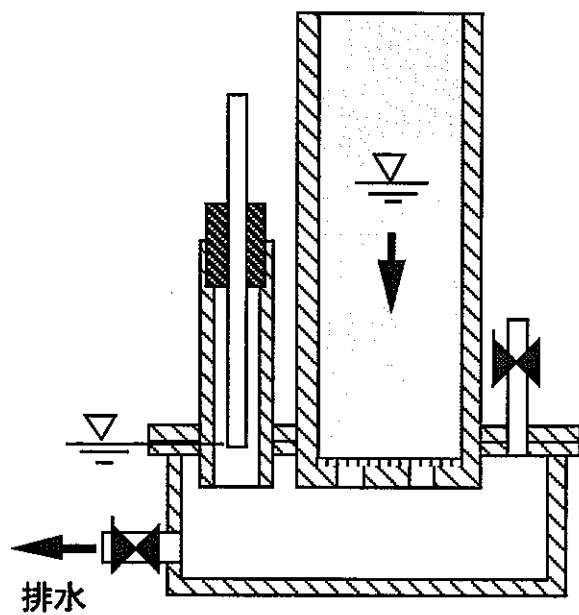
(a) 初期注水



(b) 注水と標準砂充填



(c) 透水試験時および蒸発量計測開始直前



(d) 蒸発量計測開始  
排水はマリョット設定水位まで実施

図 - 2. 3. 8 水位設定方法

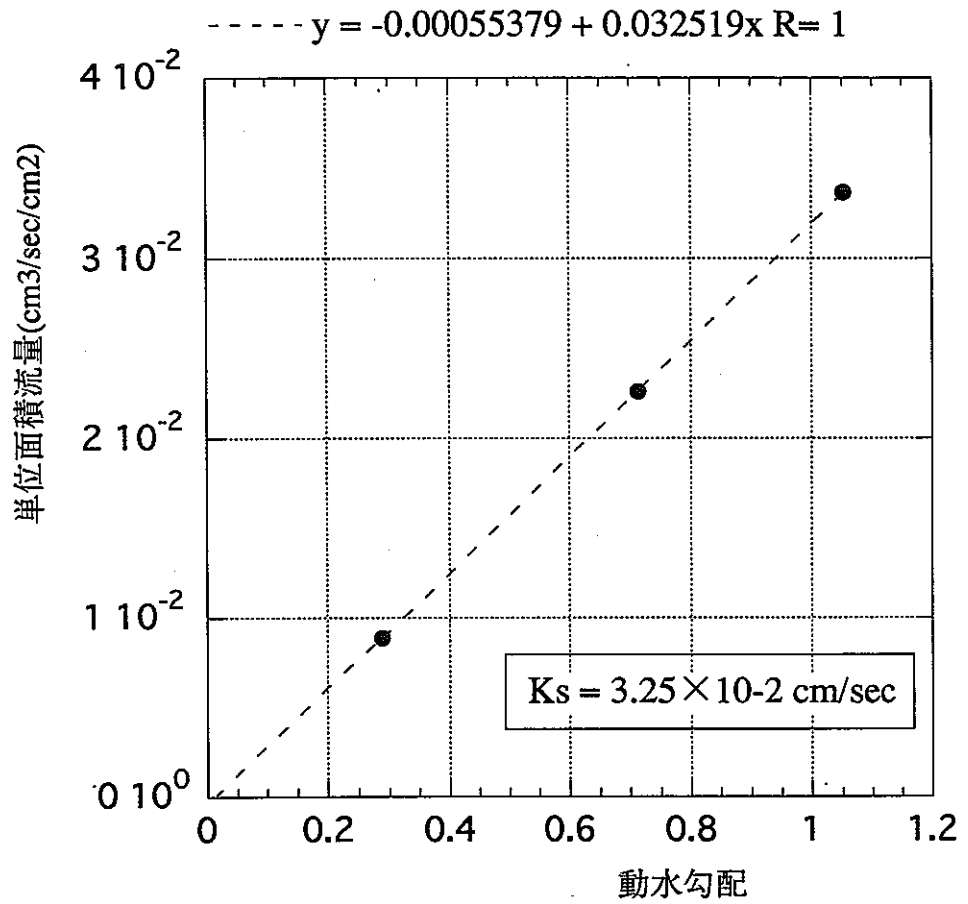


圖 - 2. 3. 9 標準砂透水試驗結果

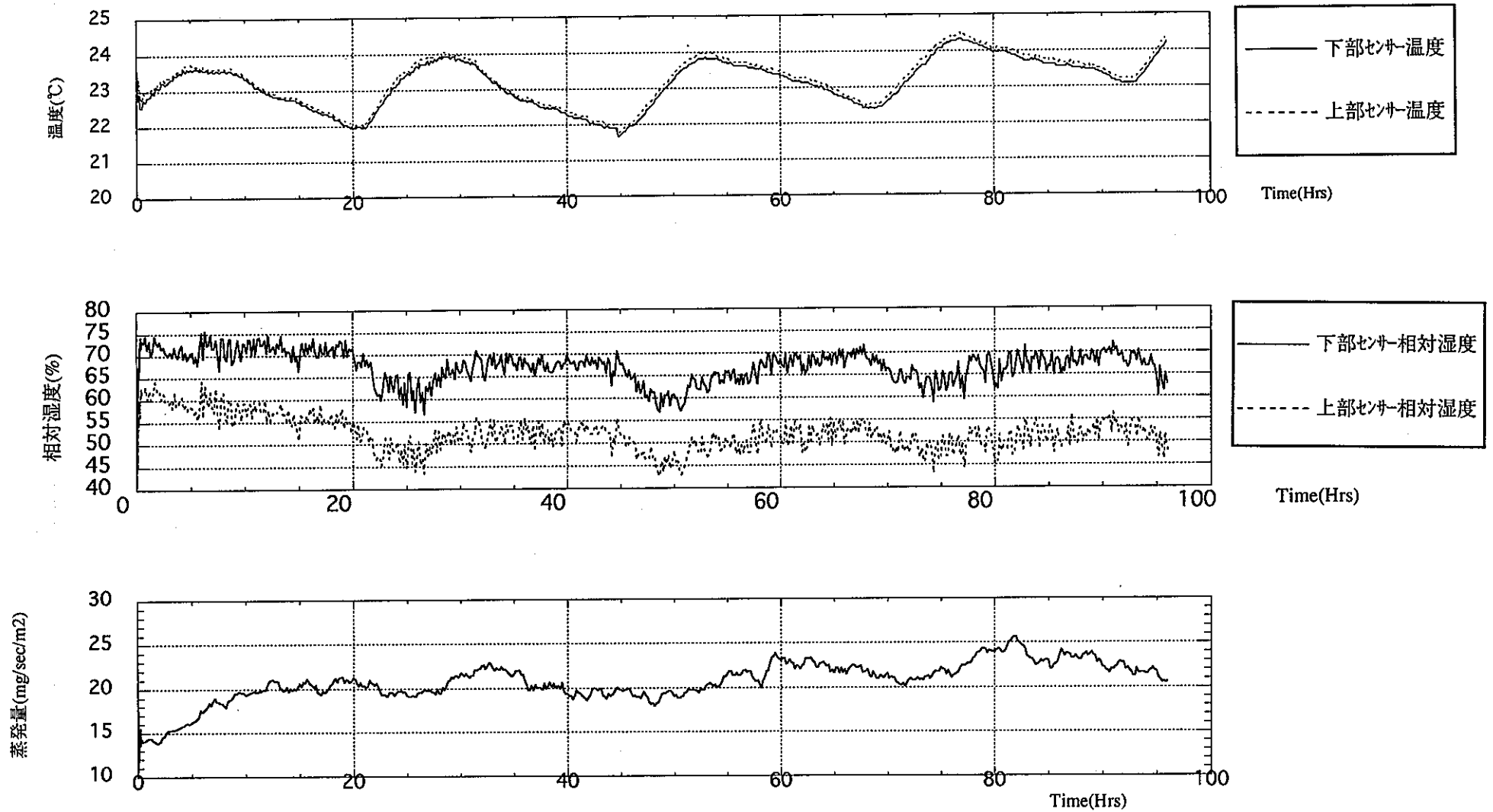


図 - 2. 3. 10 温度・湿度・蒸発量の経時変化

値をプロットしている。蒸発量は10分毎の値を1時間（6点の時系列値）にわたる移動平均した結果を示している。

多少人の出入りのある恒温室で実験は行い、さらに段ボール箱および保温材で覆い実験したが温度は外気の日較差の影響と考えられる約2℃の幅の変動をしている。また多少全体的に温度上昇の傾向が見える。

相対湿度も温度変化からやや遅れて同様に変動している。蒸発量計測のため岩石コア上面に設置した1対のセンサーで、岩石コア上面に近い下部センサーの相対湿度は上部センサーの相対湿度より約15%大きくなっている。

蒸発量も温度変化ほどではないが日変動の傾向が見え、全体にやや上昇傾向にある。

#### (iv) 重量の経時変化

図 - 2. 3. 11 に電子天秤からの重量の経時変化および温度・湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化を示す。ここで電子天秤の表示値は実線、初期重量から温度・湿度計測による蒸発量に基づく重量変化を破線で示す。

電子天秤を用いた重量計測は、テンシオメーターチューブが、天秤外の感圧センサーと接続されており、計測初期段階で、チューブの影響とみられる曲線状の重量減少傾向を示している。60時間以降はほぼ直線性を示しており、一定の蒸発量となっていると考えられる。55時間にて突然重量が変化しているのは、内部確認のため一度実験装置を覆っていた保温箱をとりはずした影響である。

破線で示した温度・湿度計測による蒸発量に基づく重量変化は、計測初期からほぼ直線性を示し、ほとんど初期から蒸発量は定常となっているように見える。一方、図 - 2. 3. 10 に温度・湿度計測による蒸発量の経時変化見ると平均約20mg/sec/m<sup>2</sup>の蒸発量に対し、2～3 mg/sec/m<sup>2</sup>の幅で変動している。この変動が破線で示した温度・湿度計測による蒸発量に基づく重量変化に現れない理由は、平均約20mg/sec/m<sup>2</sup>の蒸発量に対し、2～3 mg/sec/m<sup>2</sup>の変動幅で変動幅が小さくまた周期的な変動をしているため重量の変動は微量であるためと考えられる。

60時間以降、電子天秤及び温度・湿度計測による蒸発量に基づく重量変化は、両者ともほぼ直線性を示しており、ここで定常と判断して蒸発量を算定した結果を図中に示している。電子天秤を用いて重量計測から算定される蒸発量は42.1mg/sec/m<sup>2</sup>、温度・湿度計測による蒸発量は18.4mg/sec/m<sup>2</sup>となっている。

#### (v) 圧力計測

図 - 2. 3. 12 に圧力水頭 (cm) の経時変化を示す。この図から20時間でほぼ定常状態に達

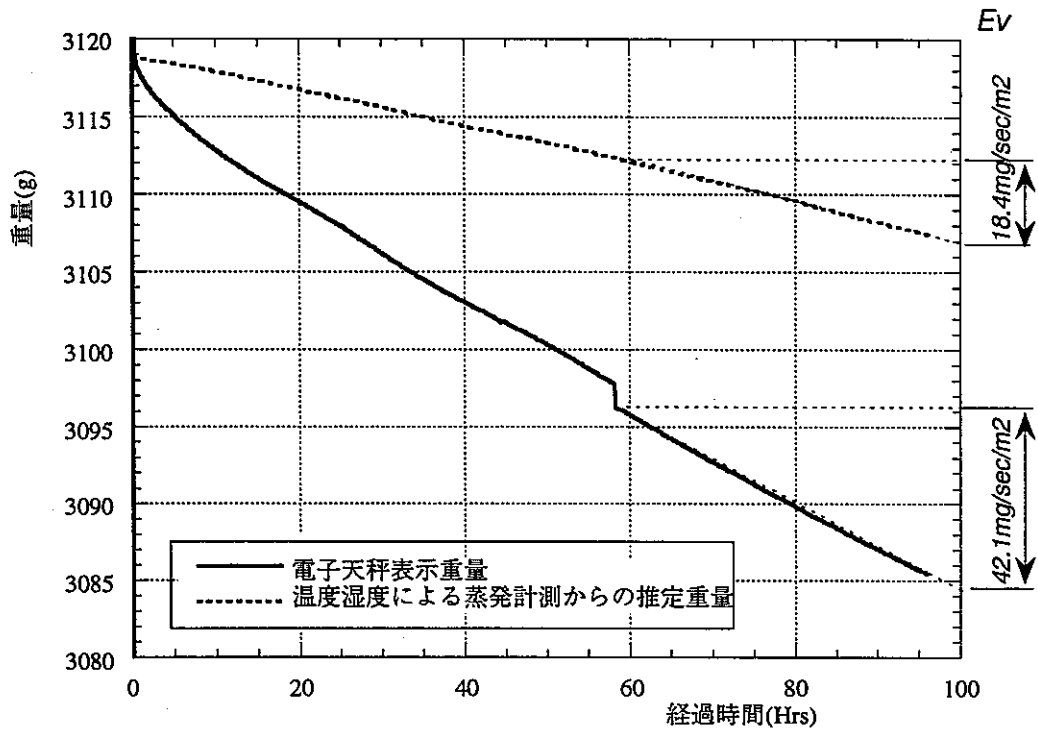


図 - 2. 3. 1 1 電子天秤計測による重量および  
温度湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化

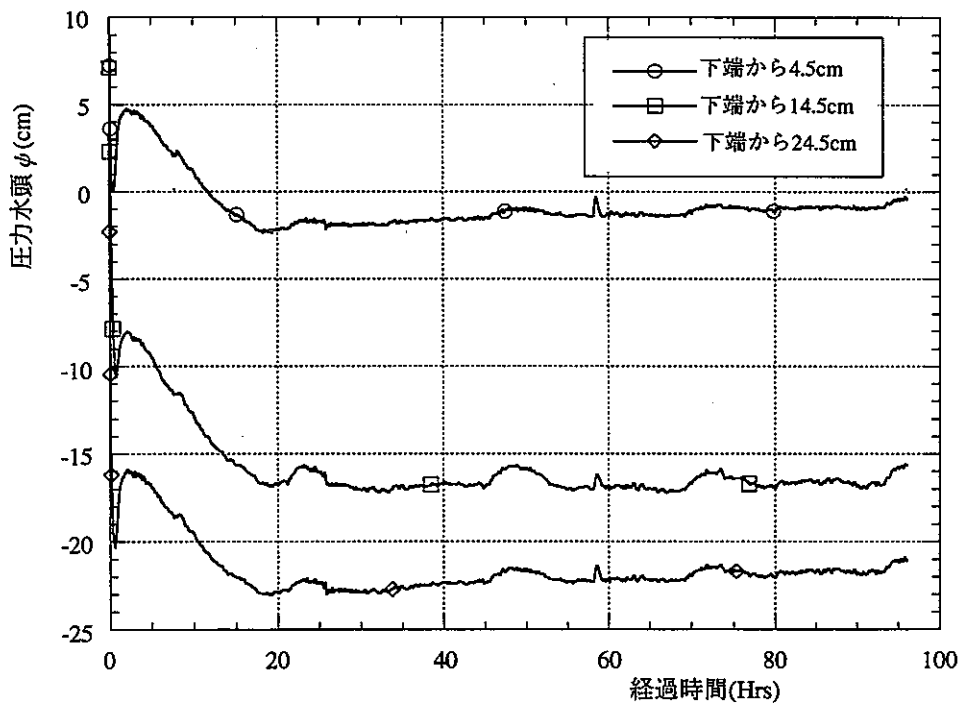


図 - 2. 3. 1 2 テンシオメーターにより計測された圧力水頭の経時変化

していると考えられる。各センサーの計測値は圧力水頭で、標準砂柱底部から上方4.5 cmで-1.3cm、標準砂柱底部から上方14.5 cmで-16.0cm、標準砂柱底部から上方24.5 cmで-22cmであった。

(vi) 体積含水率

表 - 2. 3. 1 および図 - 2. 3. 1 3 に体積含水率計測結果とその鉛直方向分布を示す。体積含水率の高さ方向の分布は、最下計測点で大きく、最上計測点で小さくなっている。他の10個の計測点ではほぼ同じような体積含水率を示している。

(5) 不飽和パラメーターの同定

(i) 不飽和パラメーターの同定解析時の境界条件

不飽和パラメーターの同定解析時の境界条件として、コア下部の水位1 cm、蒸発量40 mg/sec/m<sup>2</sup> (4.0×10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>/sec/cm<sup>2</sup>) とした。蒸発量の測定は、温度・湿度センサーを用いた蒸発量計測と、電子天秤を用いた重量計測の2種類実施した。図 - 2. 3. 1 1 にその結果を示したが、両者では2倍以上の蒸発量の違いがある。温度・湿度センサーを用いた蒸発量計測では、小さな気流の影響、拡散の3次元性等の影響による誤差も考えられるため、水の収支を把握するには重量変化を把握しておく方が確実性が高いものと考え、電子天秤を用いた重量計測の蒸発量から試料上端部からの流量(蒸発量)の境界条件を設定することとした。

具体的には、2. 3. 1 (3) (i) ②の誤差等も考慮して40.0mg/sec/m<sup>2</sup>を同定解析の境界条件とした。この設定については、後で蒸発量の同定結果への影響の検討を実施することとした。

(ii) 不飽和パラメーターの同定結果

不飽和パラメーターの同定過程・同定結果を表 - 2. 3. 2 及び図 - 2. 3. 1 4 に示す。同定結果は  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.072, 1.22)$  となった。二乗誤差として有効飽和度、体積含水率それぞれについて示している。同定過程を以下に説明する。

- ①初期値  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.01, 0.069, 1.22)$  として開始した。
- ②始めに n に関して実測値・解析値の二乗誤差の検討(1回~5回)した。
- ③ n = 1.22 から n = 1.25 に大きくすると二乗誤差は増加する(1回~2回)ため、n = 1.22 から n = 1.20 に小さく(3回目)した。
- ④二乗誤差は減少しているが、1回目(n = 1.22)より二乗誤差は大きいため、n = 1.22 より大きく n = 1.25 より小さい n = 1.23 (4回目)について計算した。
- ⑤4回目は1回目(n = 1.22)より二乗誤差は大きく、残る可能性のある n = 1.21 について計算(5回目)した。しかし1回目(n = 1.22)より二乗誤差は大きく、二乗誤差の変化量も4回目から5

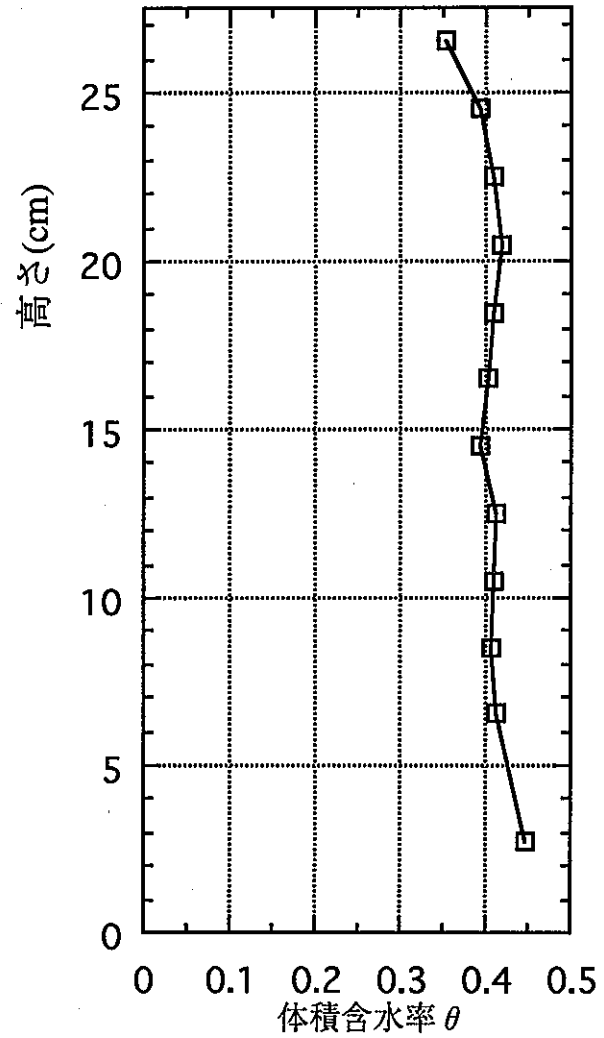


図 - 2. 3. 13 体積含水率鉛直方向分布

表 - 2. 3. 1 体積含水率計測結果

高さ (cm)	$\theta$
26.50	0.352
24.50	0.392
22.50	0.410
20.50	0.417
18.50	0.408
16.50	0.402
14.50	0.393
12.50	0.412
10.50	0.409
8.50	0.405
6.50	0.412
2.75	0.448



回目に見られるように1%を下回るようになったためnに関する検討を終了し、 $n=1.22$ とした。

⑥  $\alpha$  に関しては6回～11回で検討した。検討時の  $\alpha$  の修正方法・修正値決定の基本的考え方は上記

①から⑤のnに関する場合と同様である。

⑦  $\theta_r$  についての検討は、12回目～13回目で実施した。

⑧  $\theta_r$  は0より小さくならないため、 $\theta_r=0.00$ とし、同定解析を終了とした。

同定されたVG式のパラメータ  $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率  $\theta$ 、圧力水頭  $\psi$ 、相対透水係数  $K_r$  の関係を図-2.3.15に示す。図-2.3.16に体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の計測結果と同定されたパラメータによる解析結果の対比を示す。体積含水率  $\theta$ 、有効飽和度  $S_e$  に関し、計測結果・解析結果は、ほぼ一致している。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。

表 - 2. 3. 2 パラメータ同定過程 (豊浦標準砂)

繰り返し回数	$\theta$ r	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_ $\theta$	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.01	0.06900	1.22	1.962E-02	3.991E-03		
2	0.01	0.06900	1.25	2.128E-02	4.328E-03	8.44	
3	0.01	0.06900	1.20	2.073E-02	4.217E-03	-2.56	
4	0.01	0.06900	1.23	1.975E-02	4.018E-03	-4.72	
5	0.01	0.06900	1.21	1.994E-02	4.056E-03	0.94	
6	0.01	0.06800	1.22	1.978E-02	4.023E-03	-0.80	
7	0.01	0.07000	1.22	1.951E-02	3.969E-03	-1.36	
8	0.01	0.07100	1.22	1.945E-02	3.956E-03	-0.33	
9	0.01	0.07500	1.22	1.963E-02	3.993E-03	0.96	
10	0.01	0.07300	1.22	1.945E-02	3.957E-03	-0.92	
11	0.01	0.07200	1.22	1.943E-02	3.952E-03	-0.13	
12	0.02	0.07200	1.22	2.027E-02	3.942E-03	4.32	
13	0.00	0.07200	1.22	1.883E-02	4.001E-03	-7.11	○

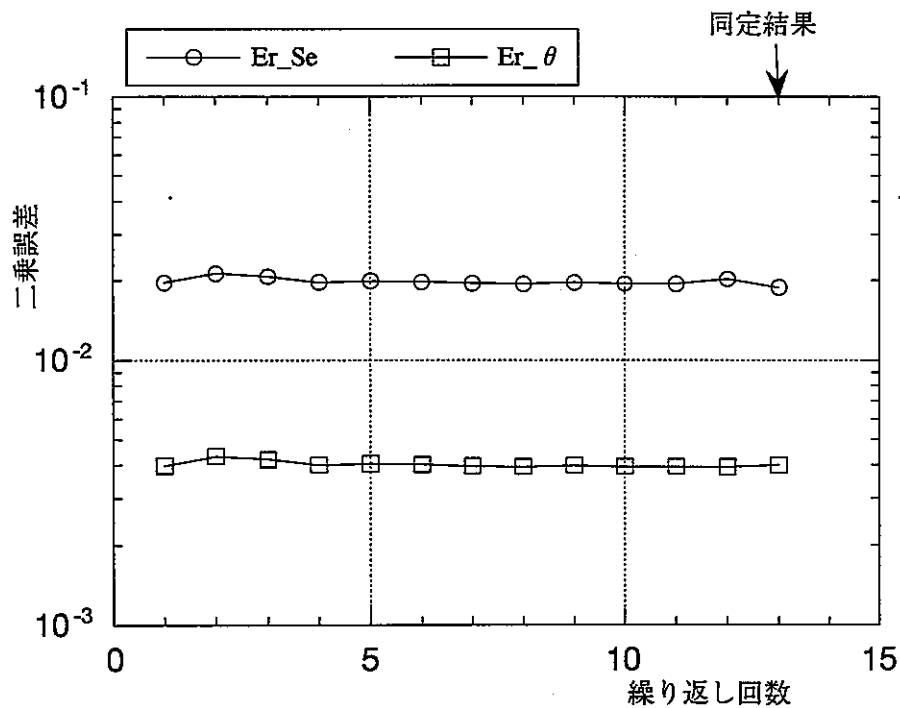


図 - 2. 3. 1 4 標準砂の同定過程における二乗誤差の低減状況

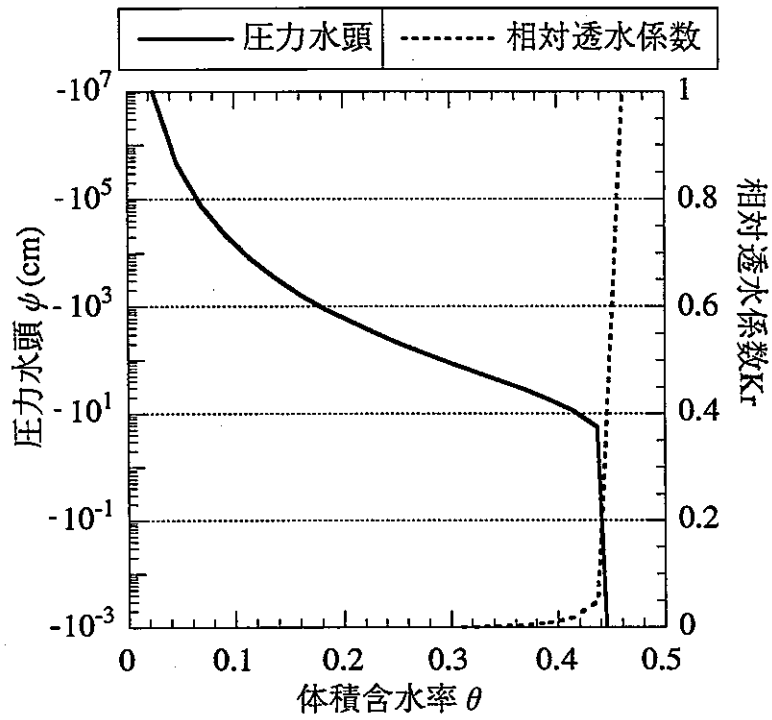


図 - 2. 3. 15 同定された体積含水率、圧力水頭、相対透水係数の関係

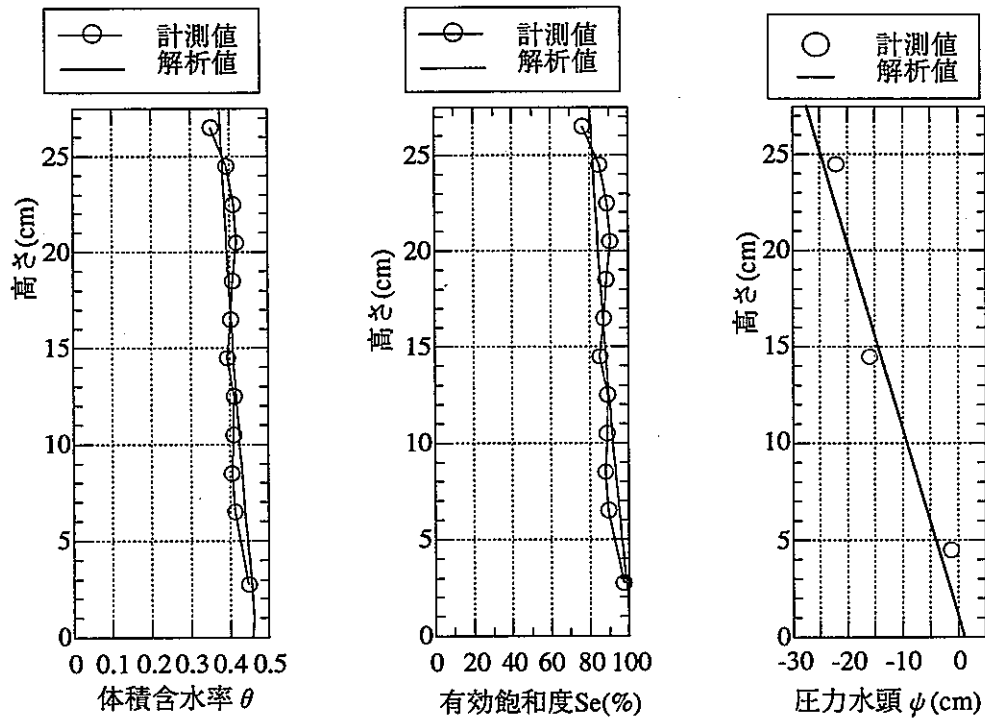


図 - 2. 3. 16 同定された体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布

## (6) 蒸発量の影響

本実験ケースで、蒸発量が体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布に与える影響を解析的に検討してみた。設定した条件は表 - 2. 3. 3 に示す。解析結果を図 - 2. 3. 17 に示す。この結果から蒸発量が体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布に与える影響が小さいことが理解される。

このことから、本ケースに関しては、蒸発量として温度・湿度センサーからの蒸発量を用いても、電子天秤からの蒸発量を用いても同定解析結果にほとんど変わらないことが推測される。

表 - 2. 3. 3 蒸発量の影響解析条件

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	Ev(mg/sec/m <sup>2</sup> )
CASE - 1	0.00	0.46	0.08	1.22	15.0
CASE - 2	0.00	0.46	0.08	1.22	150.0
CASE - 3	0.00	0.46	0.08	1.22	1.5
CASE - 4	0.00	0.46	0.08	1.22	30.0

## (7) 考察・まとめ

表 - 2. 3. 4 に各種土壌・岩石に対する既往のVG式パラメータ同定結果<sup>8)</sup>を示す。また下の表 - 2. 3. 5 に、表 - 2. 3. 4 に示されている標準砂のVG式パラメータ同定結果および今回の実験で得られた同定結果を示す。

これ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. 4 に示す各種土質のパラメータを見ると、 $\alpha$ 、n はばらつき、今回の実験結果は、No.3の細砂に比較的近い $\alpha$ 、n、 $\theta_s$  の値となっている。各種土質および豊浦標準砂について求められた各パラメータの値やそれらのばらつきを考えると今回同定された結果はほぼ妥当な結果であると判断できる。ただし、標準砂は感度解析の結果、蒸発量の変化に対し、圧力、含水量分布はあまり変化しない特性が明かとなり、今後、透水係数等物性の異なる他の試料に対しては注意が必要であると考えられる。

表-2.3.4 各種試料のVGパラメータ同定結果<sup>8)</sup>

No.	試料名	同定結果			既知パラメータ	
		$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n	$\theta_r$	$k_s$ (cm/s)	$\theta_s$
1	砂丘砂	0.0356	4.793	0.042	$2.864 \times 10^{-2}$	0.403
2	標準砂	0.0522	5.678	0.00	$2.084 \times 10^{-2}$	0.300
3	細砂	0.0632	1.405	0.00	$4.000 \times 10^{-3}$	0.410
4	砂質土	0.0147	6.656	0.221	$2.000 \times 10^{-3}$	0.565
5	砂	0.0574	1.629	0.00	$1.200 \times 10^{-3}$	0.365
6	アカホヤ	0.0307	1.871	0.412	$1.000 \times 10^{-2}$	0.785
7	クロニガ	0.0605	1.442	0.473	$3.000 \times 10^{-2}$	0.739
8	クロボク	0.0241	1.713	0.437	$3.000 \times 10^{-2}$	0.800
9	クロボク	0.0268	3.249	0.581	$7.000 \times 10^{-4}$	0.801
10	粘質土	0.0476	1.248	0.078	$5.000 \times 10^{-3}$	0.535
11	関東ローム	0.0115	1.487	0.218	$4.500 \times 10^{-3}$	0.760
12	シラス	0.0167	3.116	0.128	$1.000 \times 10^{-4}$	0.600
13	沖積土	0.0165	3.220	0.426	$1.810 \times 10^{-4}$	0.697
14	泥岩	0.0759	1.455	0.021	$1.700 \times 10^{-7}$	0.580
15	細砂	0.0380	2.712	0.016	$2.380 \times 10^{-2}$	0.300
16	標準砂	0.0218	12.318	0.00	$2.560 \times 10^{-2}$	0.411
17	シラス	0.0286	4.78	0.294	$2.254 \times 10^{-4}$	0.520
18-1	マサ土	0.111	2.08	0.075	$9.000 \times 10^{-3}$	0.348
18-2	マサ土	0.102	2.13	0.199	$3.100 \times 10^{-2}$	0.517
18-3	マサ土	0.0349	2.06	0.270	$6.200 \times 10^{-3}$	0.554
19	マサ土	0.070	1.82	0.110	$3.300 \times 10^{-4}$	0.338

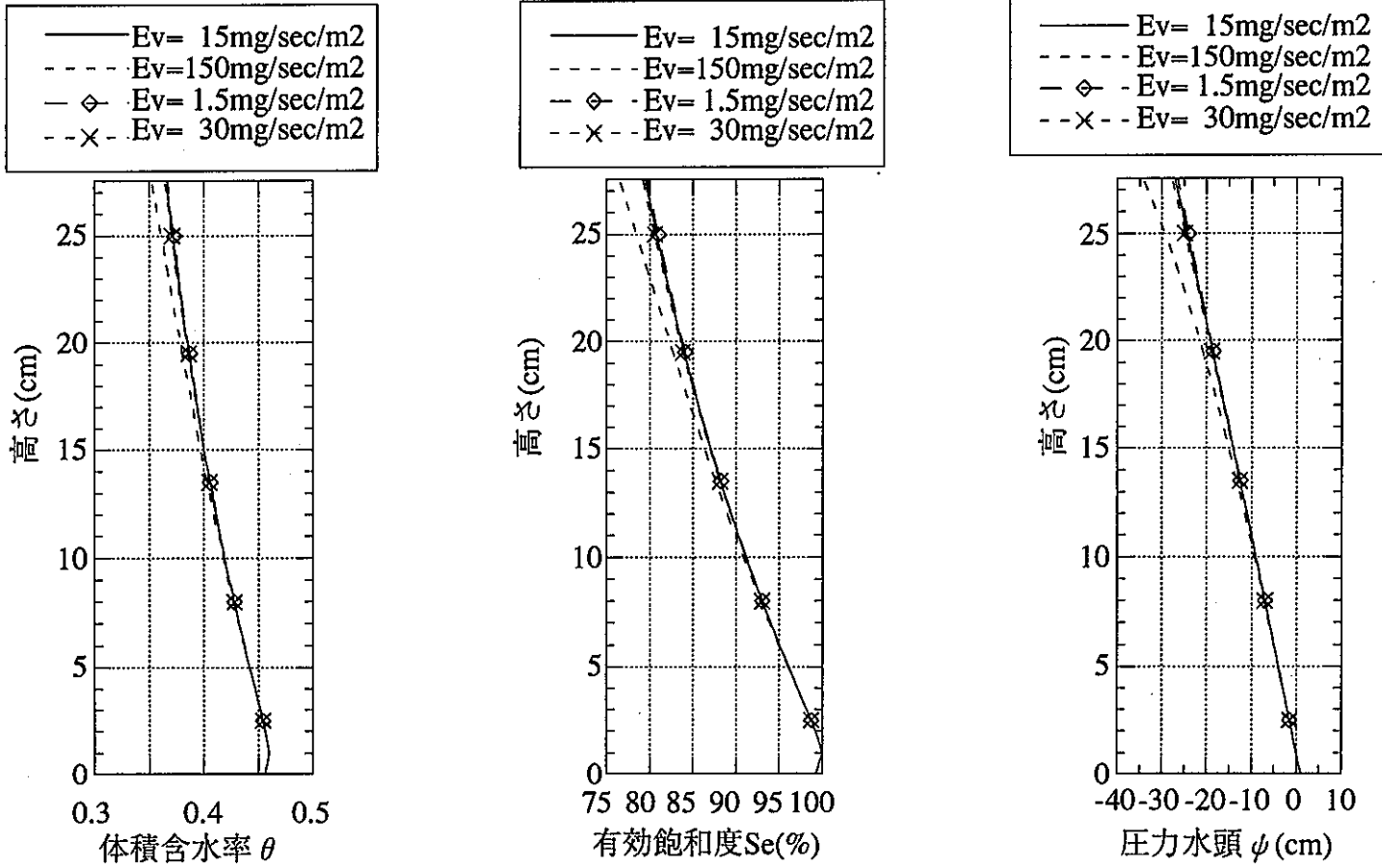


図 - 2. 3. 17 蒸発量の影響解析結果 ( $\theta_r = 0.0$ ,  $\alpha = 0.08$ ,  $n = 1.22$ )

表 - 2. 3. 5 既に求められた標準砂のVGパラメータと今回の実験で得られたVGパラメータ

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$
標準砂 No.2	0.00	0.30	0.0522	5.678
標準砂 No.16	0.00	0.411	0.0218	12.318
今回の結果	0.00	0.46	0.072	1.22

以上、既往のVG式パラメータの結果およびそれらパラメータのばらつき、および圧力計測の実測と解析結果との対比により、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. 3. 2 使用した岩石試料

### (1) 供試体の作成

供試体コアは、多胡砂岩堆積時の粒子やその後の地盤変動・断層等による不均質部が極力コア内部に生じないように留意しコア成形を行った。成形したコアの写真を図 - 2. 3. 18 に示す。供試体の形状を表 - 2. 3. 6 に示す。

表 - 2. 3. 6 各供試体の形状

供試体	高さ		直径						平均直径 mm	平均高さ mm	平均断面積 cm <sup>2</sup>
	mm		mm		mm		mm				
	H1	H2	上1	上2	中1	中2	下1	下2			
S1	53.25	53.10	50.00	49.90	50.00	50.00	50.00	50.00	49.98	53.18	19.62
S2	57.35	57.30	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	49.95	49.99	57.33	19.63
M1	104.05	103.20	51.65	51.80	51.80	51.80	51.85	51.80	51.78	103.63	21.06
M2	108.55	108.35	49.95	49.95	49.95	49.95	49.95	49.95	49.95	108.45	19.60
L1	201.25	201.56	52.10	52.15	52.10	51.90	52.00	51.95	52.03	201.41	21.26
L2	200.45	200.40	52.05	51.85	51.85	51.85	51.60	51.70	51.82	200.43	21.09
L3	201.10	201.00	51.45	51.65	51.75	51.85	52.20	52.10	51.83	201.05	21.10
L4	201.10	201.15	50.25	49.70	49.25	49.40	49.05	49.30	49.49	201.13	19.24
L5	201.10	200.95	52.40	49.85	52.30	50.90	52.50	52.40	51.73	201.03	21.01
L6	200.75	201.25	50.25	49.50	50.65	50.00	49.90	50.20	50.08	201.00	19.70
L7	200.90	201.30	53.05	49.70	51.65	49.05	52.00	49.35	50.80	201.10	20.27
L8	199.65	199.30	51.45	51.10	51.65	51.60	52.10	52.05	51.66	199.48	20.96

### (2) 有効間隙率

有効間隙率は、110℃中に24時間供試体を入れ乾燥し、乾燥後の重量（乾燥重量W<sub>d</sub>）を計測し、その後供試体を浸水し、真空ポンプで24時間脱気をかけ飽和した重量（飽和重量W<sub>w</sub>）を計測する。さらに飽和した供試体の水中重量（W'）を計測し、有効間隙率 n<sub>e</sub>は下式により算定した。

$$n_e = \frac{(W_w - W_d)}{(W_w - W')} \quad (\text{式2. 3. 1})$$

ここに、上式分母（W<sub>w</sub> - W'）は体積（排水体積）Vに相当する。

各供試体の有効間隙率算定時の諸重量、諸単位重量および有効間隙率（飽和体積含水率 θ<sub>s</sub>）を表 - 2. 3. 7 に示す。



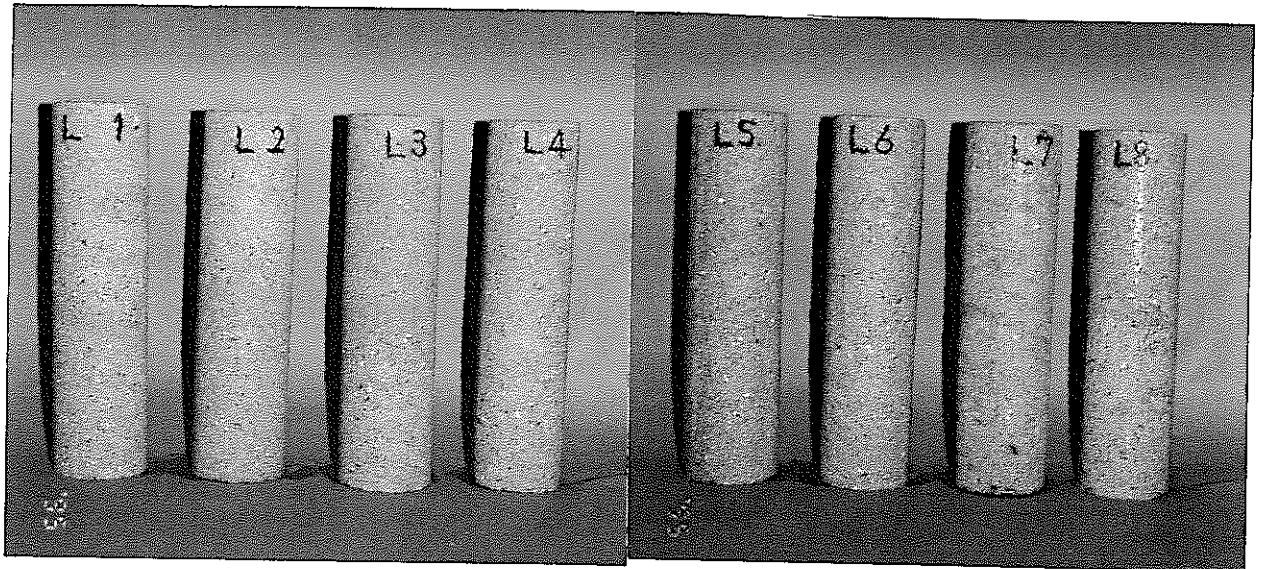
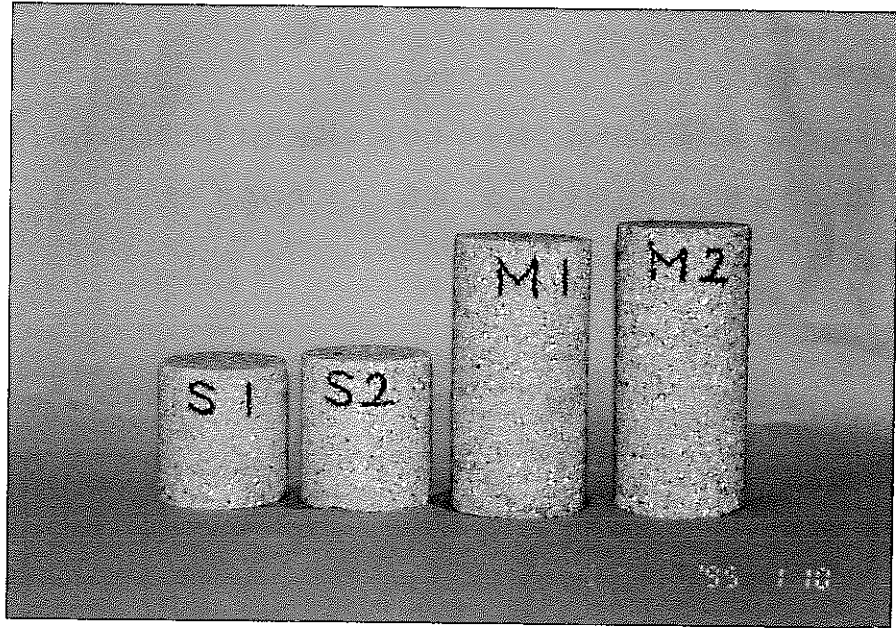


図 - 2. 3. 18 成形したコアの写真

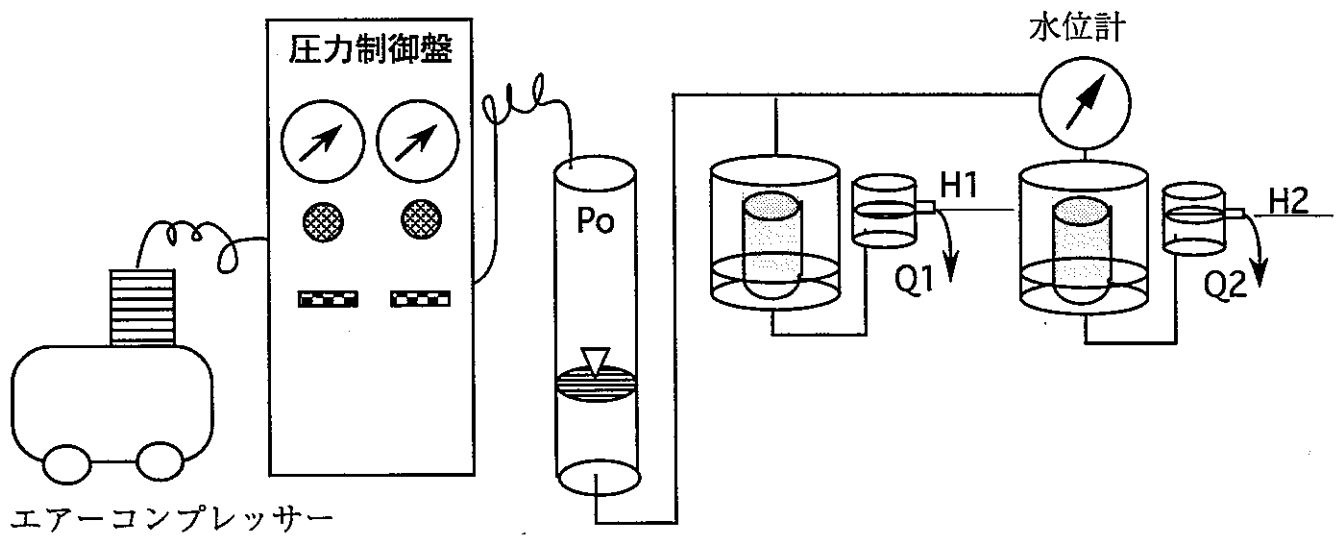
表 - 2. 3. 7 各供試体の有効間隙率

	飽和重量 Ww (g)	乾燥重量 Wd (g)	水中重量 W' (g)	体積 V (cm <sup>3</sup> )	有効空隙率 ne	飽和单位体積重量 $\gamma_o$ (gf/cm <sup>3</sup> )	乾燥単位体積重量 $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )
S1	241.61	226.14	139.10	102.51	0.1509	2.3570	2.2060
S2	250.47	226.92	139.89	110.58	0.2130	2.2651	2.0521
M1	498.22	457.37	285.45	212.77	0.1920	2.3416	2.1496
M2	485.27	439.02	281.99	203.28	0.2275	2.3872	2.1597
L1	987.04	911.37	564.31	422.73	0.1790	2.3349	2.1559
L2	976.47	905.01	558.56	417.91	0.1710	2.3366	2.1656
L3	968.40	901.74	550.46	417.94	0.1595	2.3171	2.1576
L4	908.02	845.11	518.39	389.63	0.1614	2.3305	2.1690
L5	964.58	901.78	553.53	411.05	0.1528	2.3466	2.1938
L6	951.44	892.81	542.65	408.79	0.1434	2.3275	2.1840
L7	914.14	833.82	512.42	401.72	0.1999	2.2756	2.0756
L8	967.38	887.87	552.18	415.20	0.1915	2.3299	2.1384

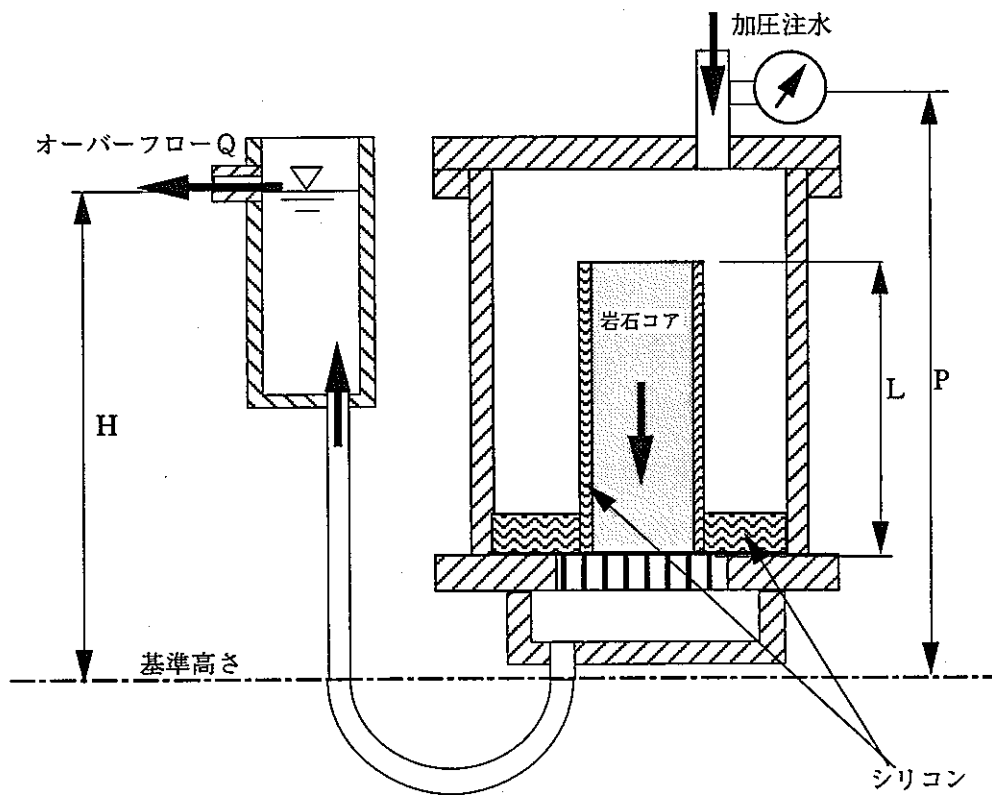
### (3) 透水係数

透水係数は定水位定常法により算定した。供試体の側部はシリコン（厚さ5mm）で覆い、シールした。飽和重量・水中重量計測終了後、供試体コア表面を空中にて表面乾燥し、内径60mmの型に供試体コアを入れ型とコアの隙間に自己接着タイプの流動性の高いシリコンを流し込んで供試体と一体させた。シリコンを流し込み24時間養生後脱型した。その後シリコン表面をビニルテープで巻き、再び真空ポンプで24時間脱気をかけ飽和させ、透水試験を実施した。用いた透水試験装置の概要図を図-2.3.19に、その写真を図-2.3.20に示す。

透水試験時では、供試体両端の全水頭（差）、供試体長さ、任意時間の流出量をメスシリンダーによって計測する。また、蒸発量も計測し、流出量の補正を行った。試験は標準砂と同様に3種類の動水勾配に対し行い、そのときの流量を時間、断面積で除し、単位面積重量と動水勾配の傾きから透水係数を算定した。各供試体の単位面積重量と動水勾配の関係を図-2.3.21、22に示す。透水係数を表-2.3.8に示す。



(a) 試験装置の構成



$$K_s = Q / \{(P-H)/L\} / A$$

$K_s$ ; 飽和透水係数 (cm/sec)、 $Q$ ; 流量 (cm<sup>3</sup>/sec)、  
 $P$ ; 加圧圧力水頭 (cm)、 $H$ ; オーバーフロー水位 (cm)、  
 $L$ ; 供試体長さ (cm)、 $A$ ; 供試体断面積 (cm<sup>2</sup>)

(b) 透水試験の内容

図 - 2. 3. 19 透水試験装置の概要

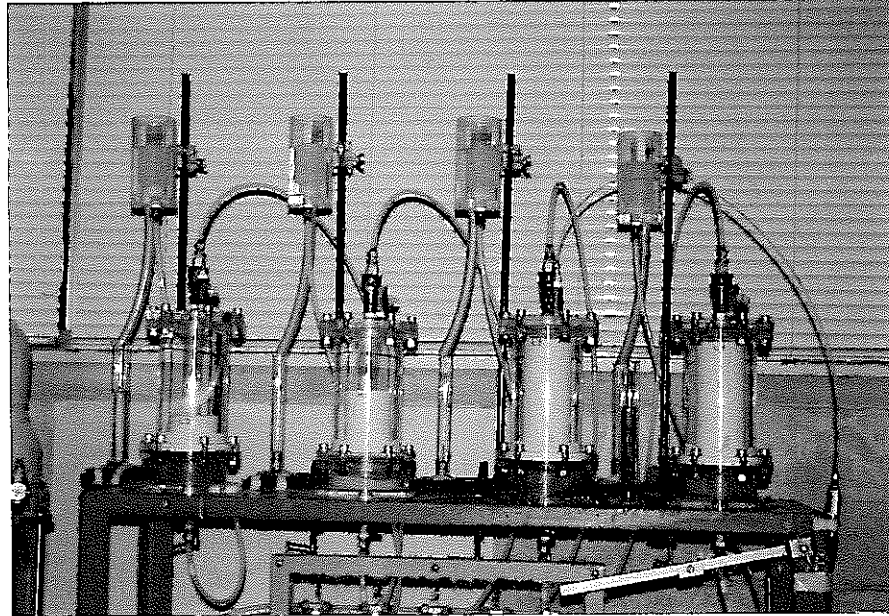
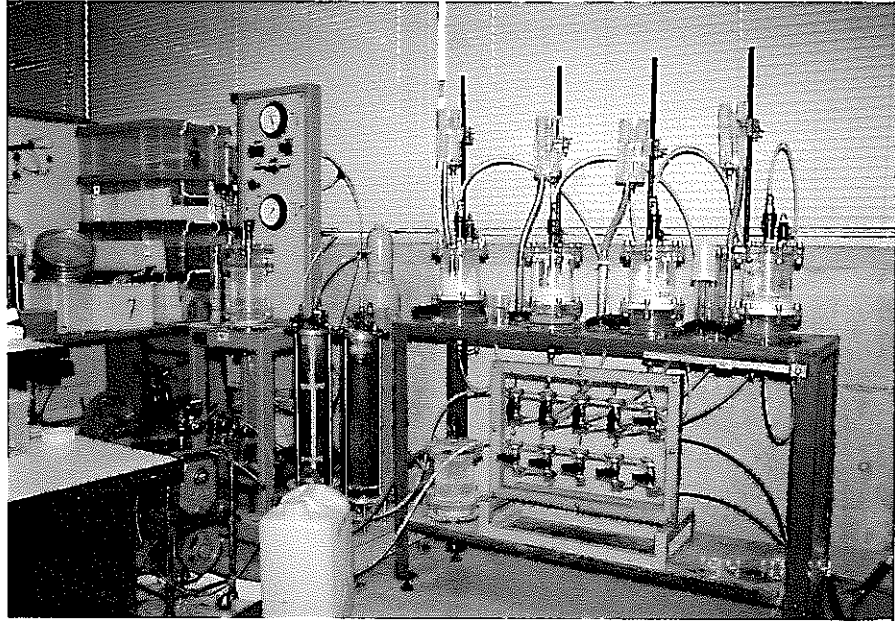


図 - 2. 3. 20 透水試験装置の写真

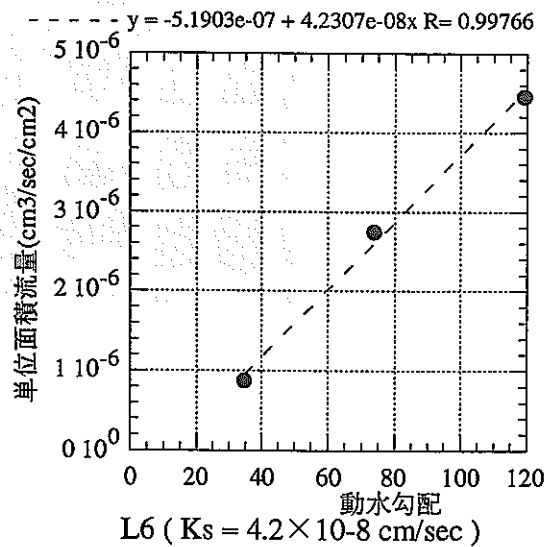
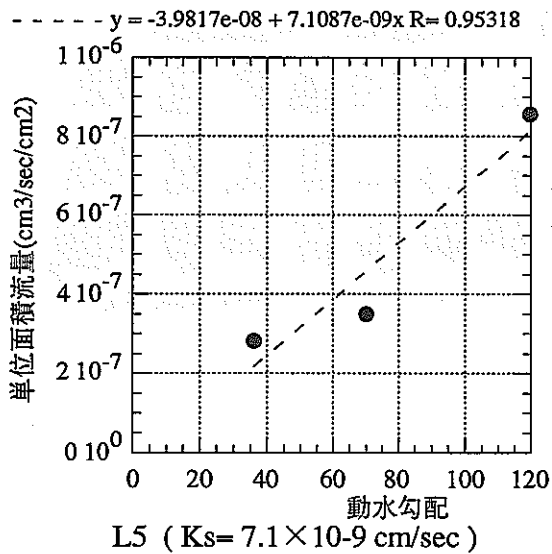
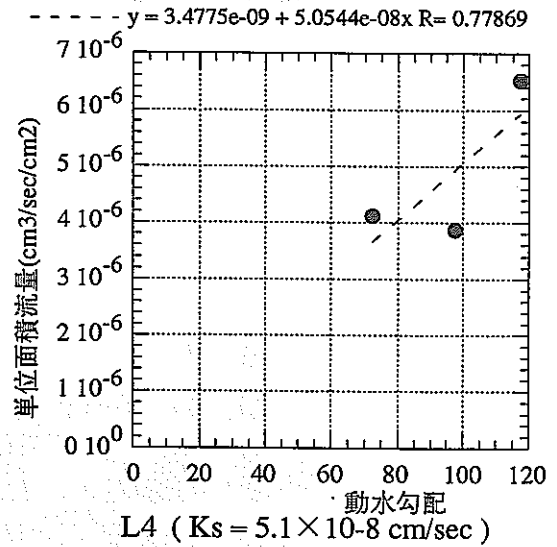
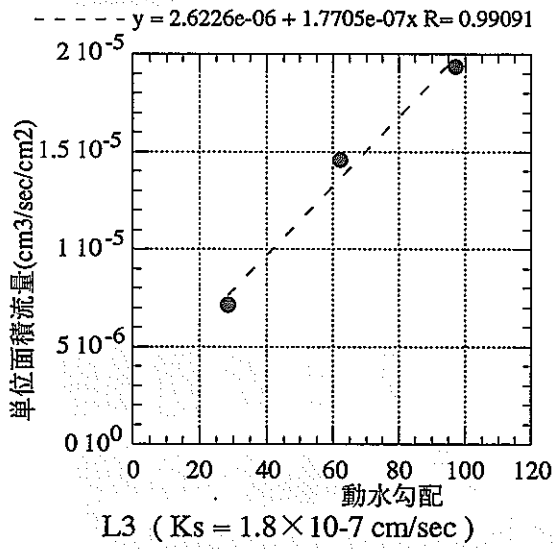
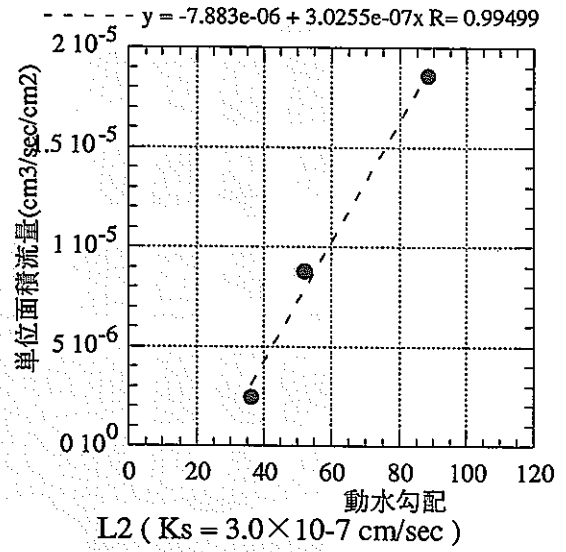
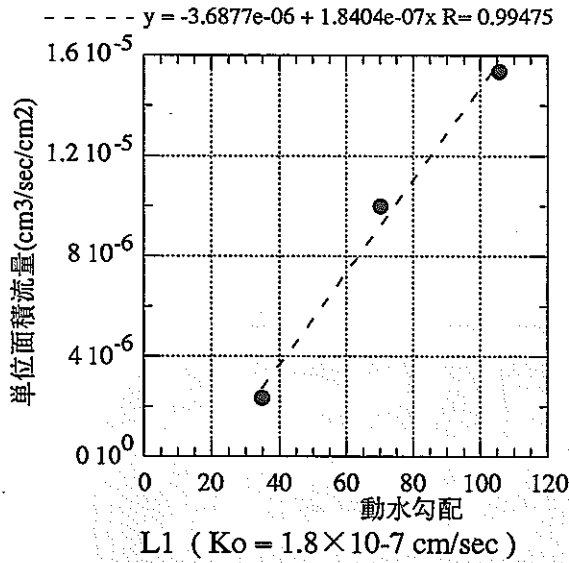


図 - 2. 3. 21 L 1 から L 6 の透水試験結果

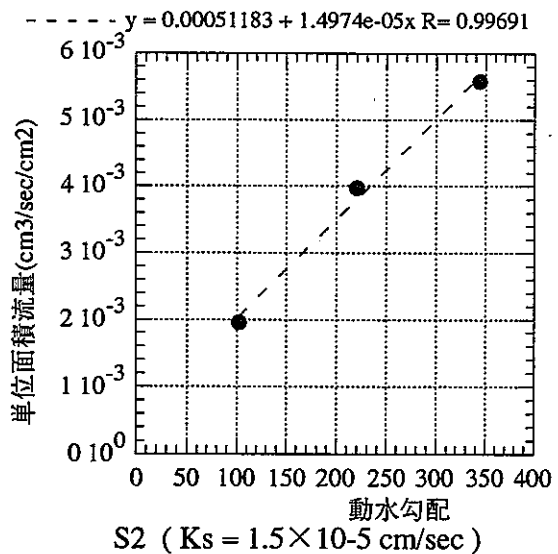
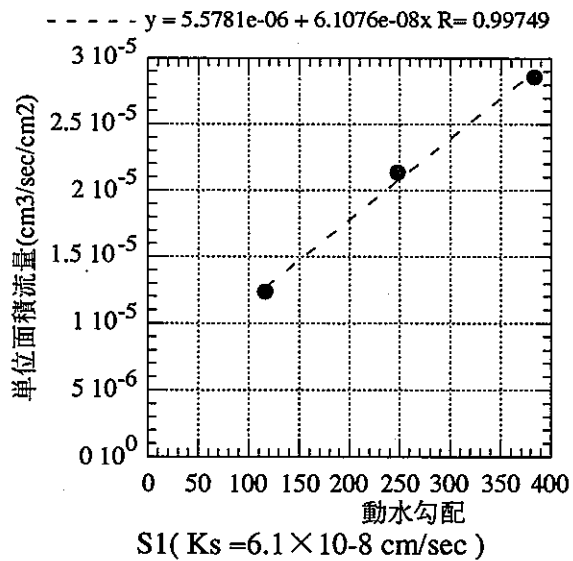
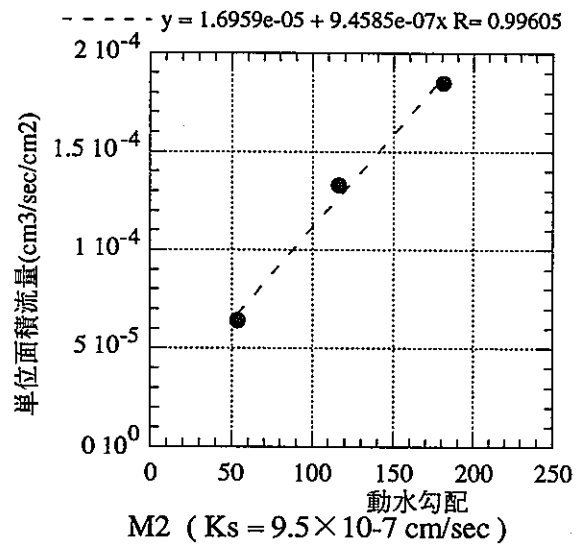
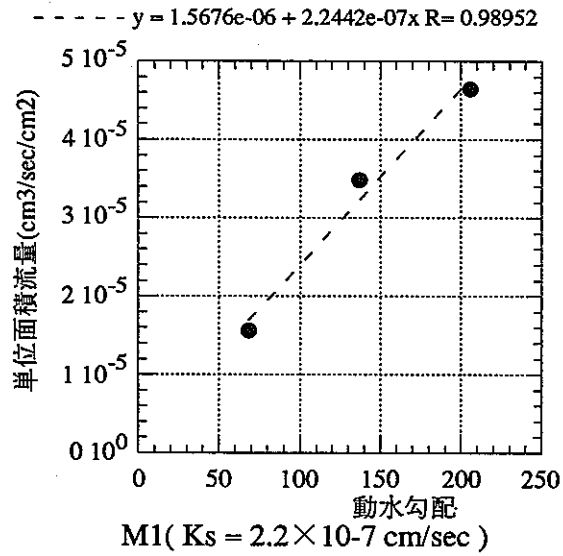
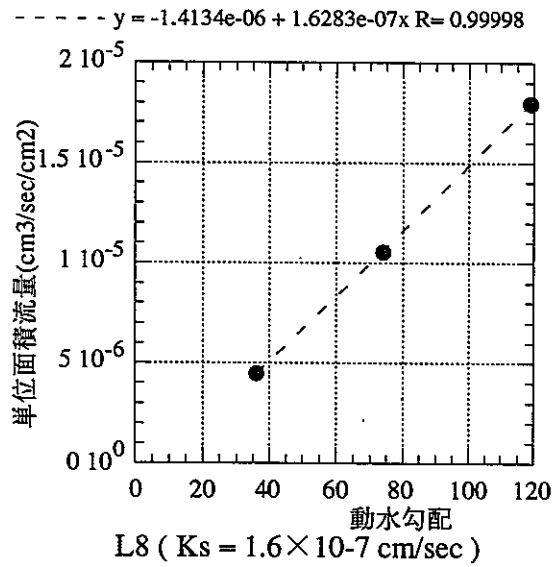
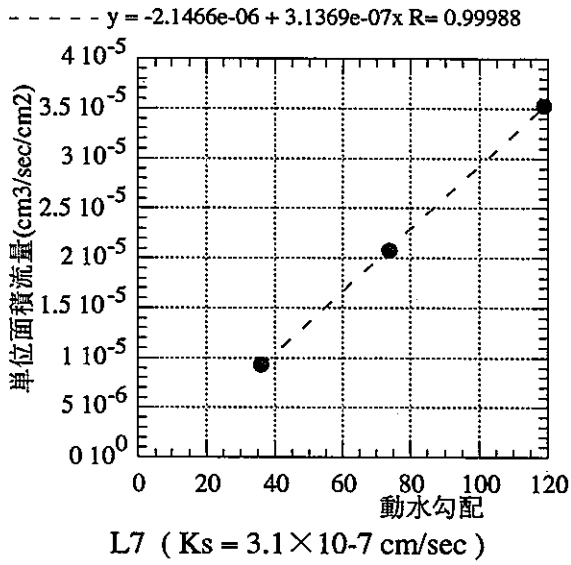


図 - 2. 3. 22 L7、L8、M1、M2、S1、S2の透水試験結果

表 - 2. 3. 8 透水係数

供試体	飽和透水係数 $K_s(\text{cm/sec})$
S1	6.1E-08
S2	1.5E-05
M1	2.2E-07
M2	9.5E-07
L1	1.8E-07
L2	3.0E-07
L3	1.8E-07
L4	5.1E-08
L5	7.1E-09
L6	4.2E-08
L7	3.1E-07
L8	1.6E-07

(5) 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-2.3.9にまとめておく。

表-2.3.9 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下表にまとめておく。

表-2.3.10 各供試体の用途

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

※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



### 2. 3. 3 供試体長さの影響の検討

#### (1) 実験の目的

試体長さの異なる試料（Φ 5cm× h 20cm, 10cm, 5cm程度の3種類）に対して蒸発量計測とVG式を用いた不飽和特性同定手法を適用し、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) 実験手順

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) 実験条件

##### (i) 供試体

使用した供試体はL1,L2,L4,L6,M1,M2,S1,S2である。ここでL4,L6は次節「2. 4 圧力計測手法の適用性検討」で使用した供試体であるが、環境（温度）設定が同じであるためパラメータの同定まではここで扱うこととする。

##### (ii) 計測機器

実験に使用した主な機器は以下のとおりである。

##### ①蒸発量計測用温度・湿度センサー3組（センサー2個で1組）

今回使用した6個のセンサーは以下のように配置した。

表 - 2. 3. 1 1 各試料への温度・湿度センサーの配置

供試体	L 1	L 2	L 4	L 6	M 1	M 2	S 1	S 2
上部センサー	S 1 B	S 1 B	S 3 B	S 3 B	S 2 B	S 2 B	S 3 B	S 3 B
下部センサー	S 1 A	S 1 A	S 3 A	S 3 A	S 2 A	S 2 A	S 3 A	S 3 A

##### ②水位設定・供試体固定アクリル容器

形状は図 - 2. 3. 2 に示す。

③小電子天秤；島津製作所 EB - 3200 H

秤量：3200 g、読み取り限度：10m g、直線性：±20m g

④センサー支持スタンド2個

⑤データ計測・蒸発量演算用パソコン

PC98RA：AD変換ボード等付属

(iii) レイアウト

実験装置の計測時のレイアウトを図 - 2. 3. 23 およびその写真を図 - 2. 3. 24 に示す。

図中供試体は1個示されているが、写真に見られるようにL1,M1,S1およびL2,M2,S2はそれぞれ同時に実施した。

(iv) 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)

(v) 環境設定

実験は多少人の出入りのある恒温室で実施した。このため、装置はレイアウトを図 - 2. 3. 23 に示すように段ボール箱で被い、気流や温度変化の計測への影響を極力抑えることとした。同室のエアコン設定温度は20℃とした。

(4) 実験の方法・留意点・

以下に各項目の実施方法・留意点を述べる。

①供試体の設置

- コア側部のシリコンとアクリル容器との間から空気が侵入しないように、シリコンの成形に留意し、シリコン容器の間には入念にシリコングリスを塗布した。

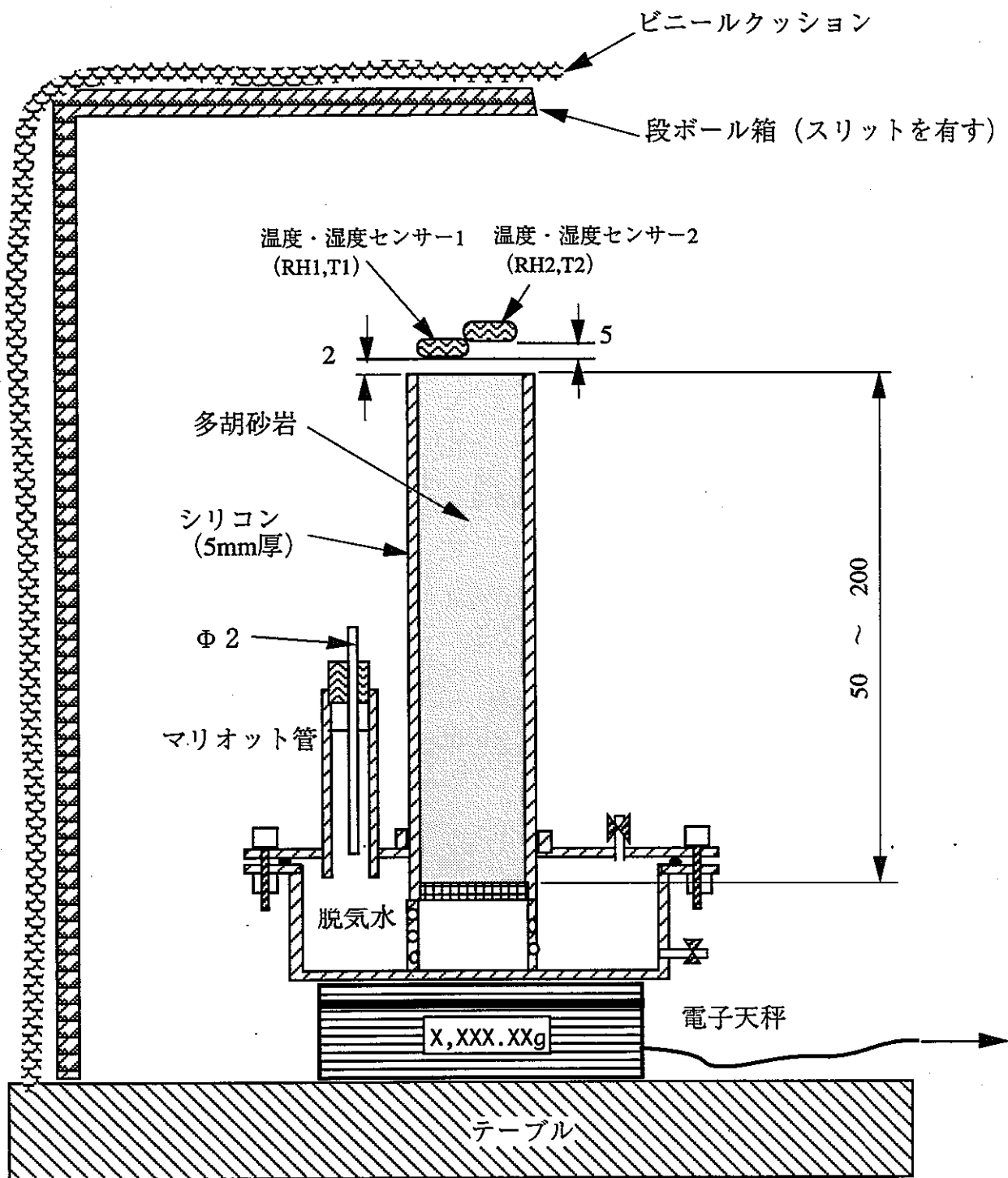
②脱気水の注入

- 脱気水は、容器下方のドレーンから注入し、内部にエアーが残らないよう留意した。

③計測機器の設置・計測開始

- 供試体を電子天秤に載せる。

- 蒸発量計測のための温度・湿度センサーを岩石試料上にセットする。2つのセンサーは、岩石試料上面と平行になるよう留意する。下部センサーと岩石試料上面とは約2mm離し、2つのセンサーはコアからの距離が5mm(センサー間隔を5mmに設定)異なるよう設置する。



長さ単位 ; mm

図 - 2. 3. 23 実験概要図

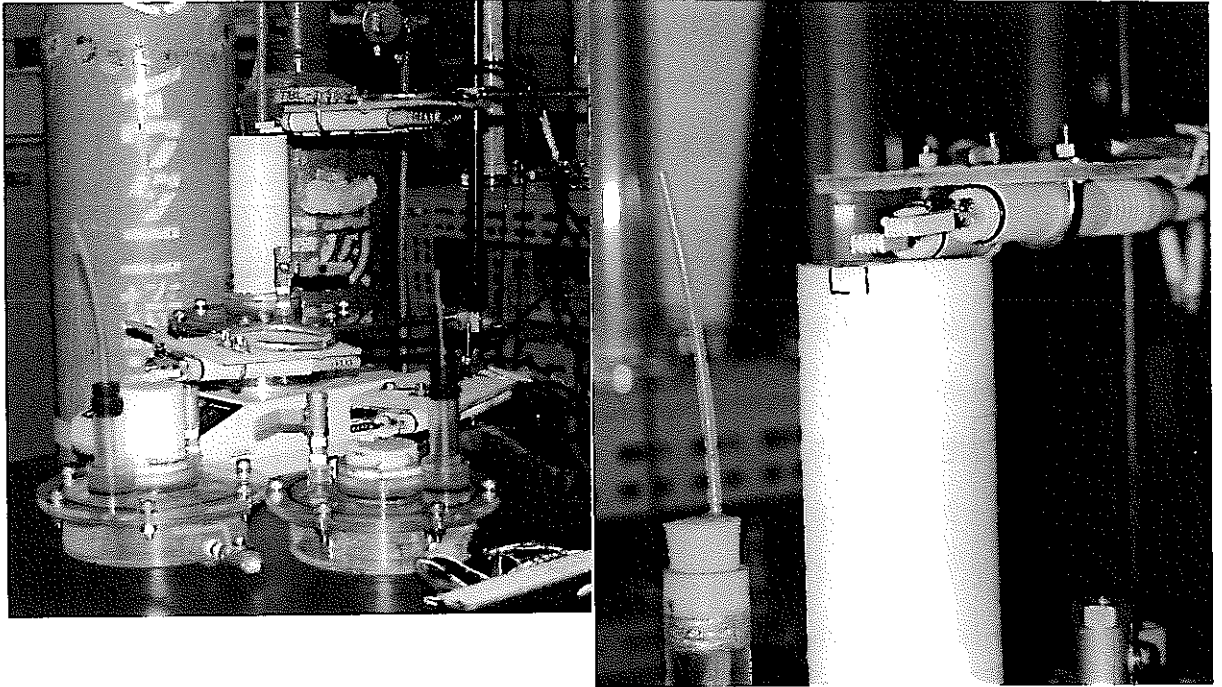


図 - 2. 3. 24 実験状況写真

- 各計器の電源をONにし、計測値の出力、計測値の計算機への入力を開始する。

#### ④計測

- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、重量、水圧の計測を継続する。

#### ⑤定常状態の確認・計測終了

- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、水圧の計測値が定常となった時点で計測を終了する。

#### ⑥含水量の計測

- 計測終了後、速やかに、コア周囲のシリコンおよびシリコン補強用ビニルテープをカッターナイフにて切り離す。

- コア下部から、コアをハンマー、鑿（鋼鉄製ノミ）にて破断する。破断の厚さは1.5cm程度を目安に行う。

- 破断したコア小片は（既に重量のわかっている）シャーレーに移し、重量を計測する。図-2.3.25に破断計測後のシャーレーに入ったコア小片の写真とコア破断に使用したハンマー、ノミの写真を示す。

- 上記作業を全コアに対して実施する。

- シャーレーを乾燥炉に入れ、110℃にて、24時間乾燥させる。

- 乾燥後、デシケーターにて冷やす。

- 各シャーレーの重量を計測し、乾燥前後の重量差から含水量を算定する。

#### ⑦解析

- 計測された蒸発量、試料下端の水位（0.5 cm）、飽和透水係数から1元定常浸透解析により、計測された体積含水率を最もよく再現するVG式のパラメータを同定する。

### (4) 実験結果

#### (i) 温度・湿度・蒸発量の経時変化

図-2.3.26～33に温度・湿度・蒸発量の経時変化を示す。

#### ①L1、M1、S1:

図-2.3.26～28はL1、M1、S1の温度・湿度・蒸発量の計測結果である。同時に同一箇所にて計測を実施した。計測時間は約50時間、標準砂の場合のように気温の日変動（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。気温の変動は各試料ともほぼ同じ変化挙動を示している。蒸発は試料により多少変化特性がことなるが、気温の日較差に伴う周期的な変化（L1、M1、S1を通じ約8mg/sec/m<sup>2</sup>の変化幅）を示すものの、50時間における全体的な変化傾向はあまり認められない。また、渡辺ら<sup>2)</sup>の同様な実験では（周期的な変動は見られないが）透水

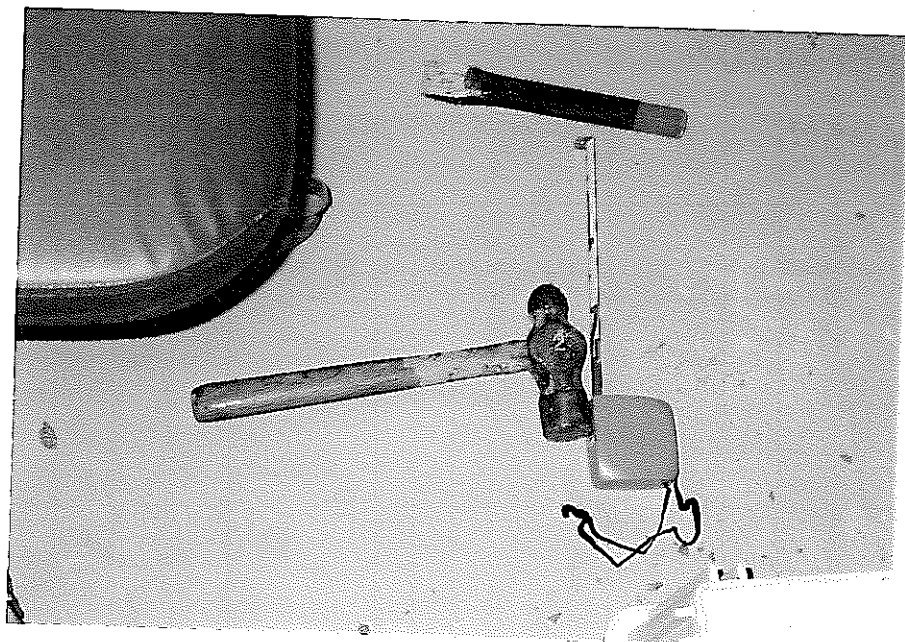


図 - 2. 3. 25 破断したコア小片とコア破断に使用したハンマー、鑿の写真

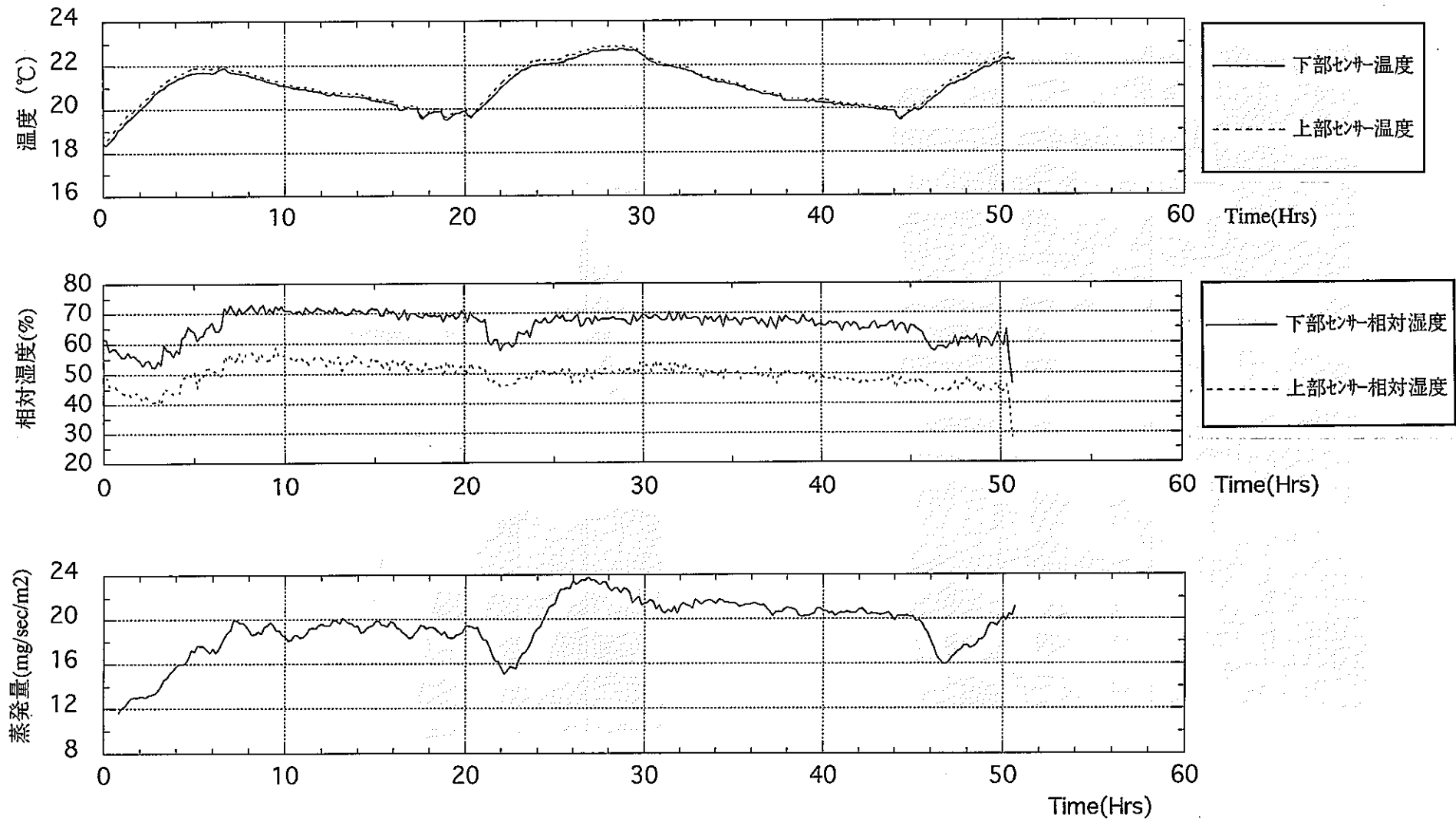


図 - 2. 3. 26 L1 の温度・湿度・蒸発量の経時変化

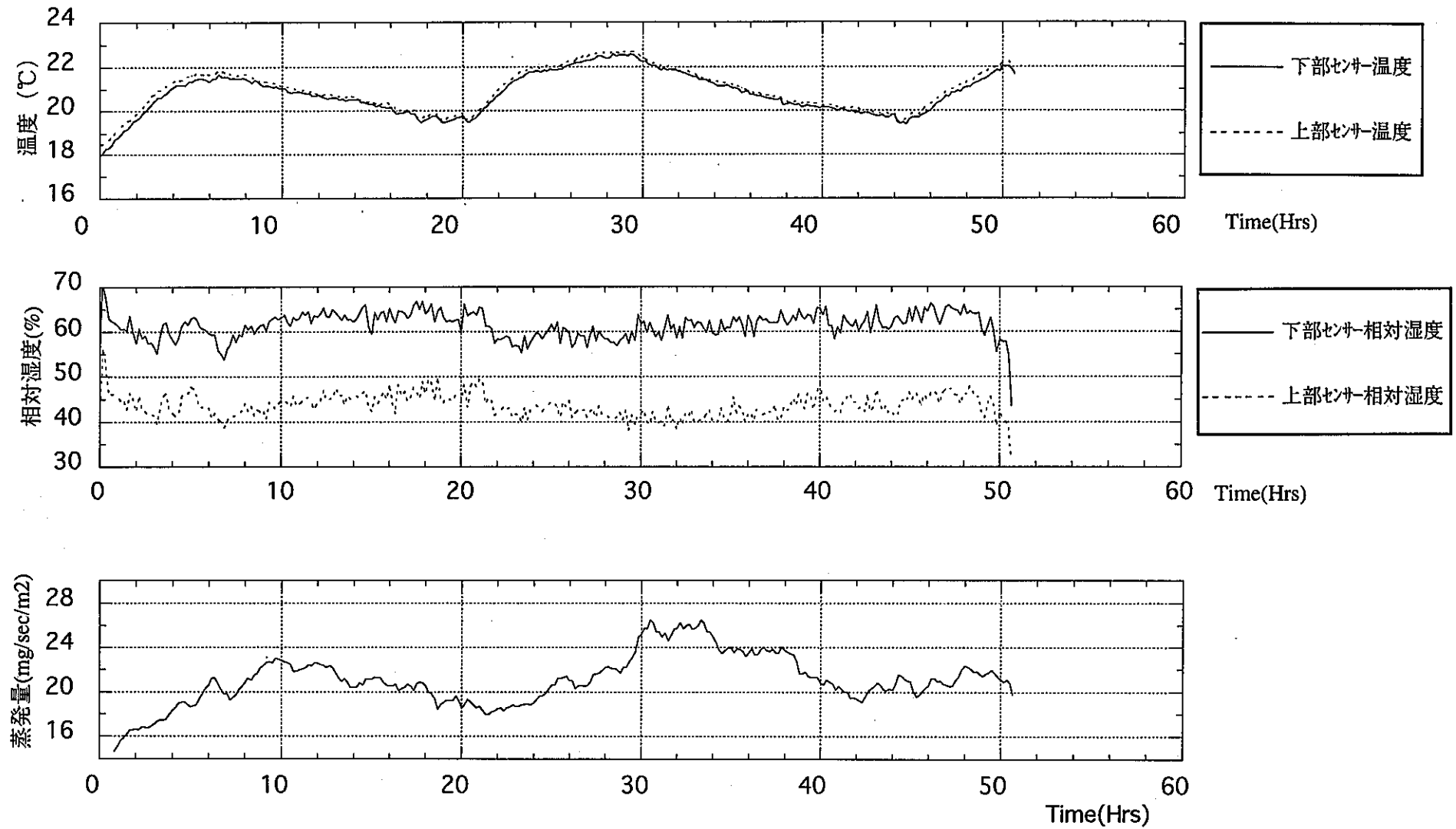


図 - 2. 3. 27 M1の温度・湿度・蒸発量の経時変化



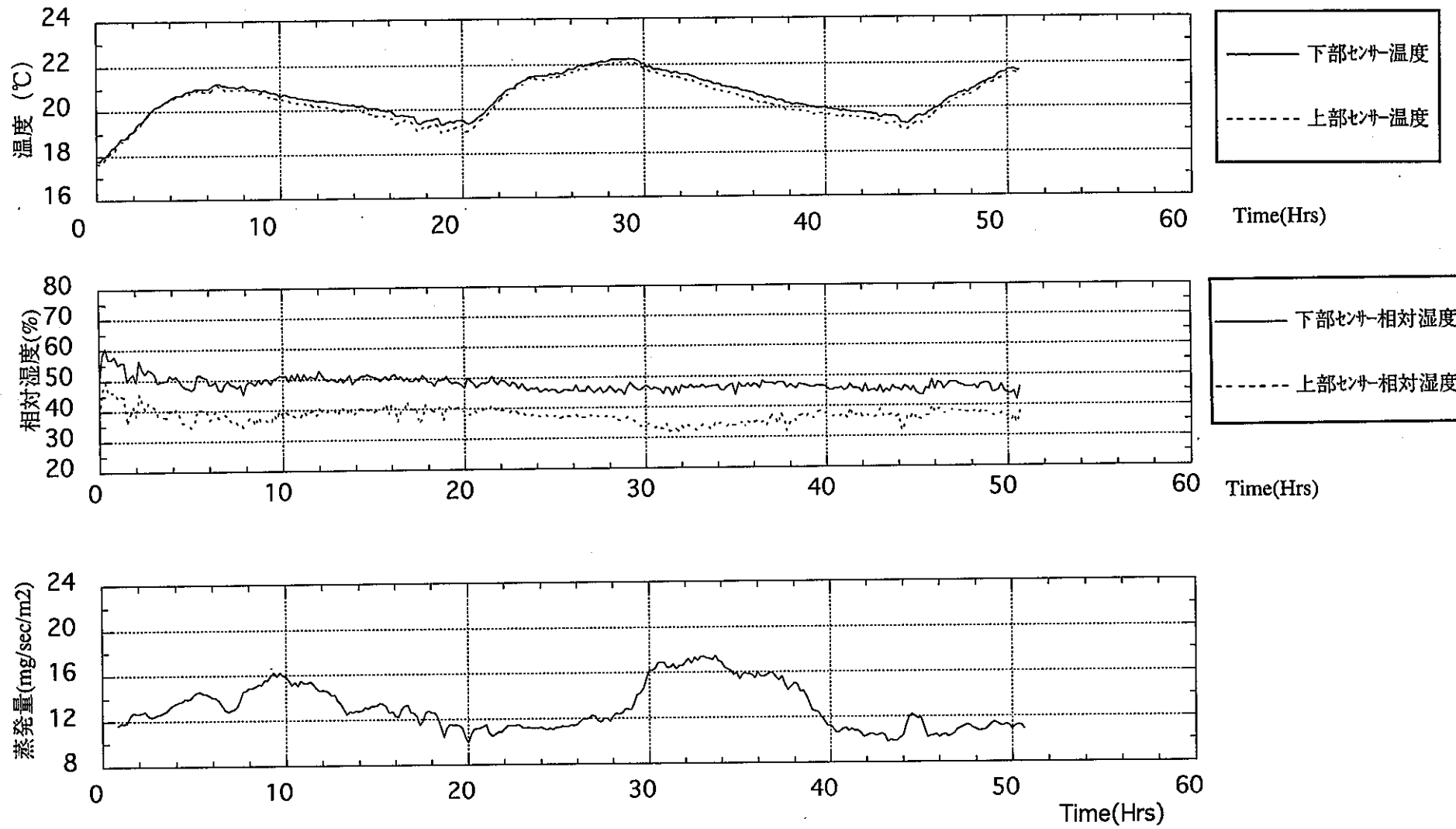


図 - 2. 3. 28 S1の温度・湿度・蒸発量の経時変化

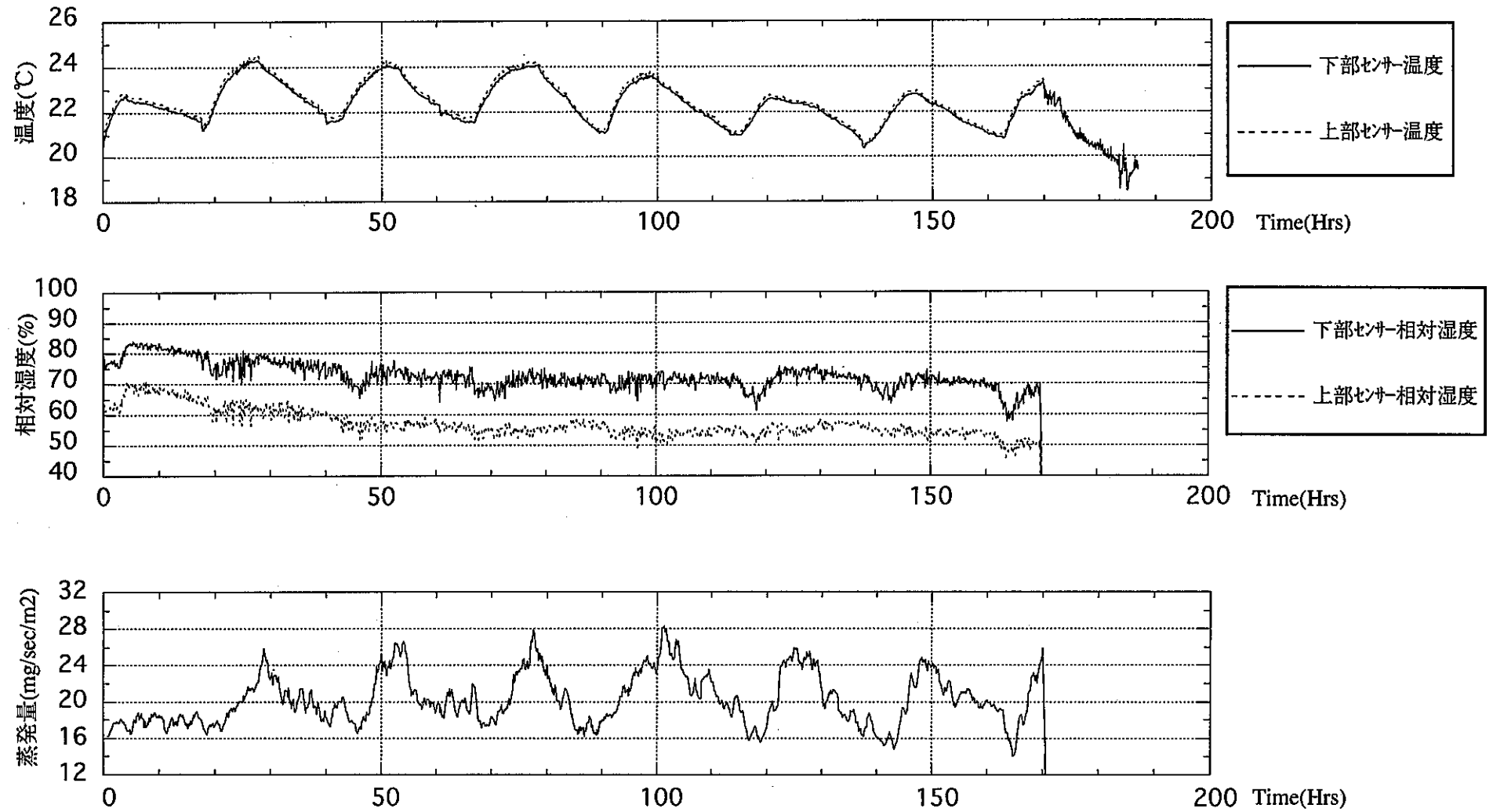


図 - 2. 3. 29 L2の温度・湿度・蒸発量の経時変化

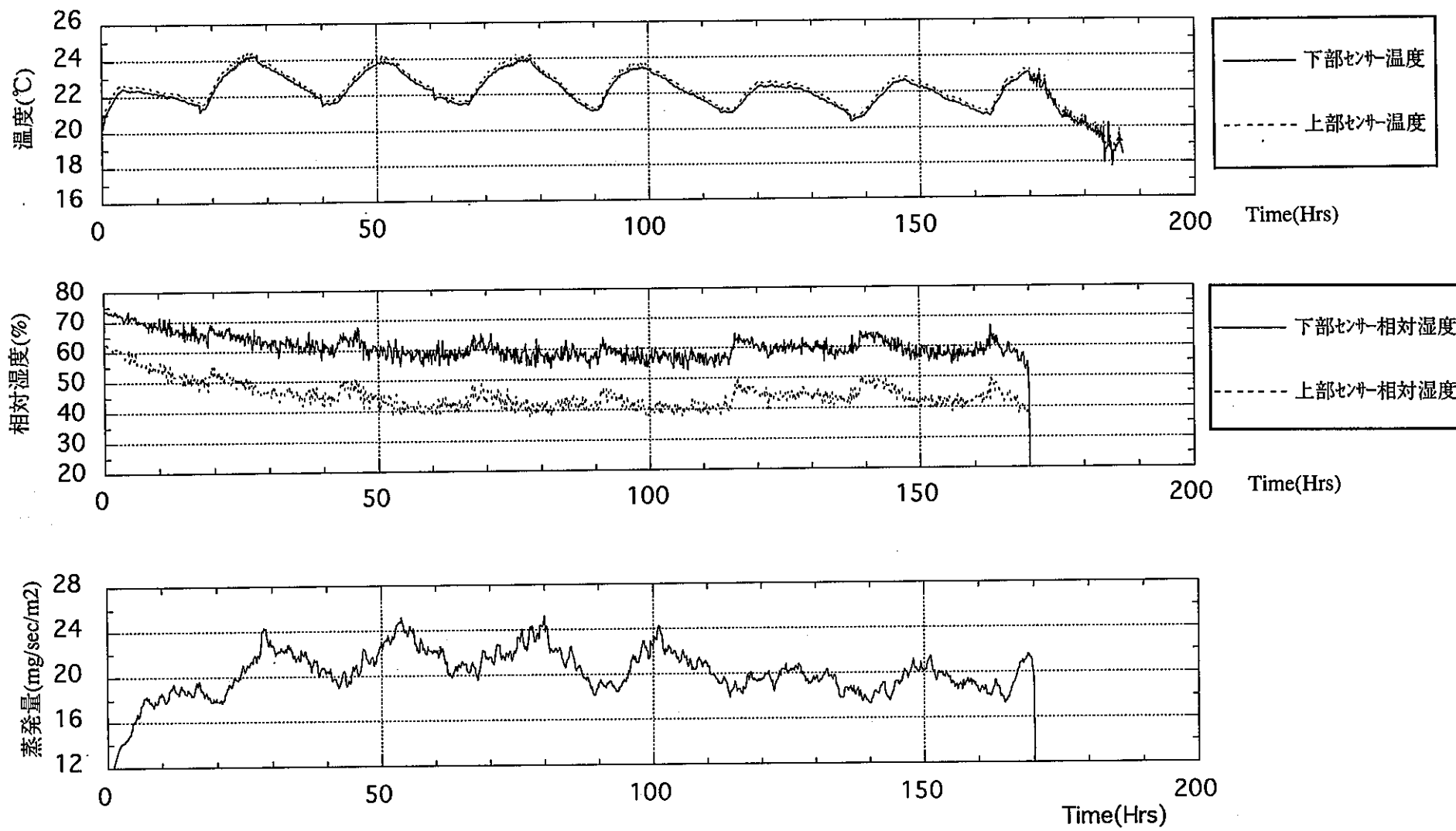


図 - 2. 3. 30 M2の温度・湿度・蒸発量の経時変化

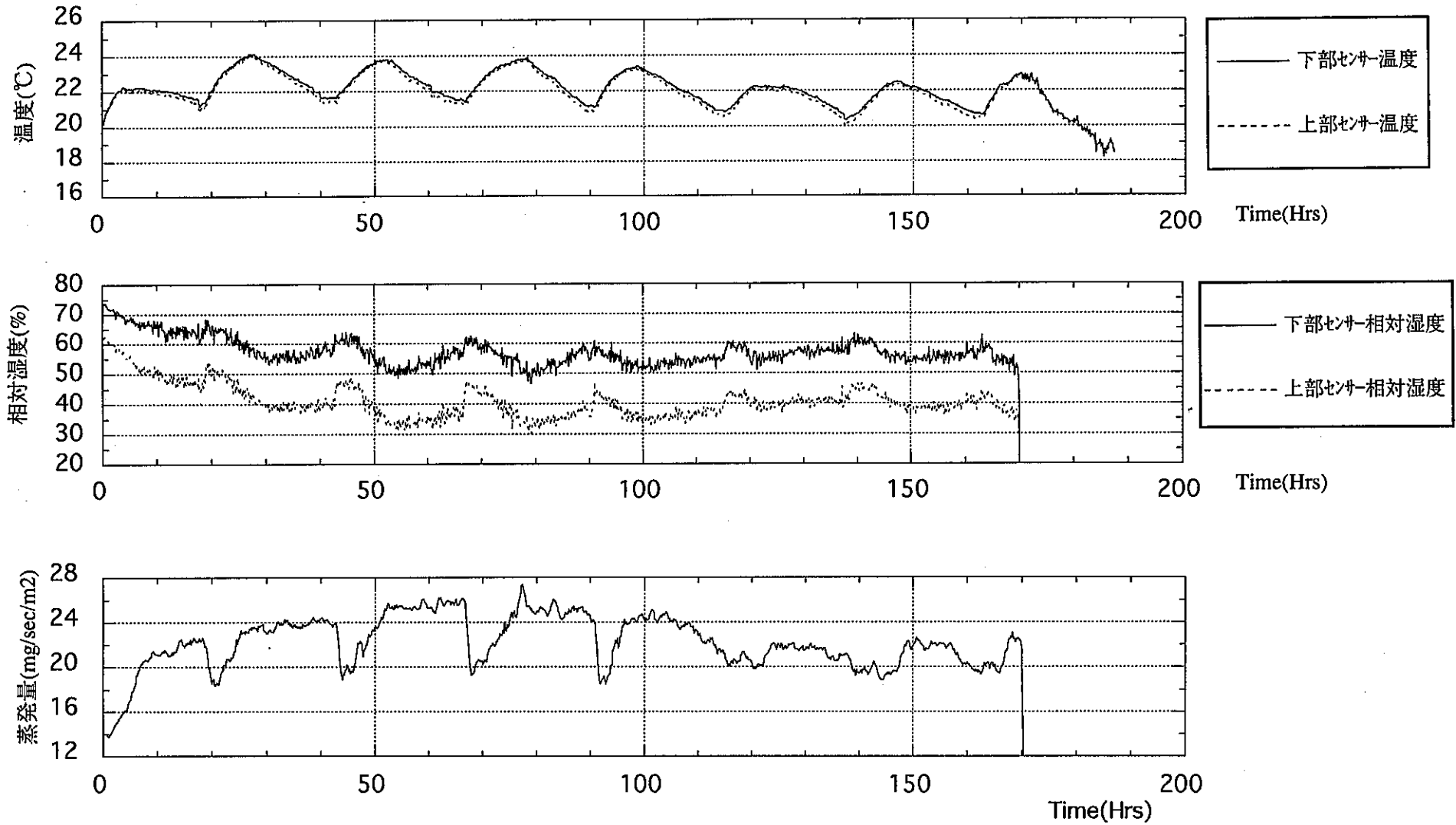


図 - 2. 3. 31 S2の温度・湿度・蒸発量の経時変化

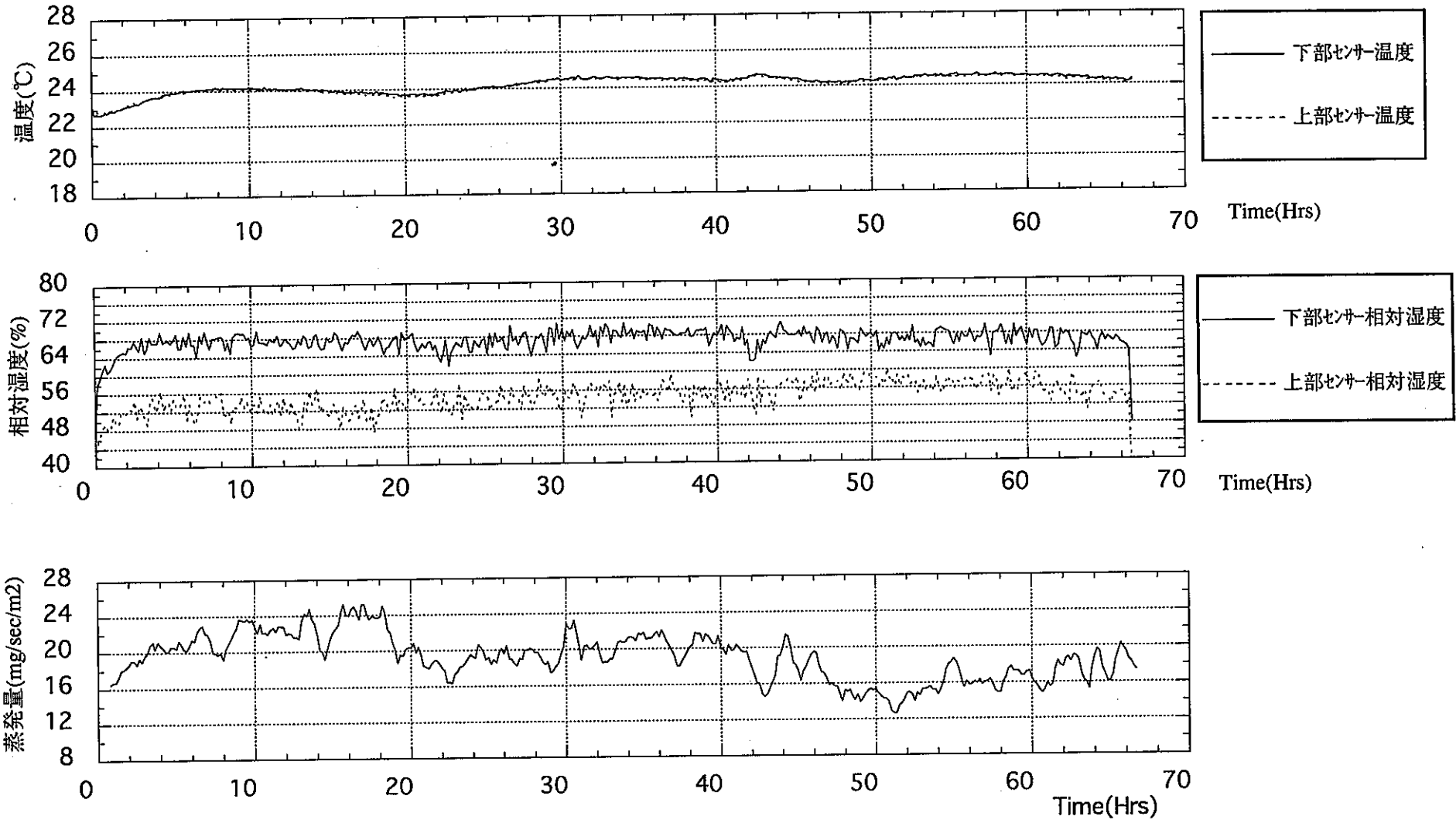


図 - 2. 3. 32 L6の温度・湿度・蒸発量の経時変化

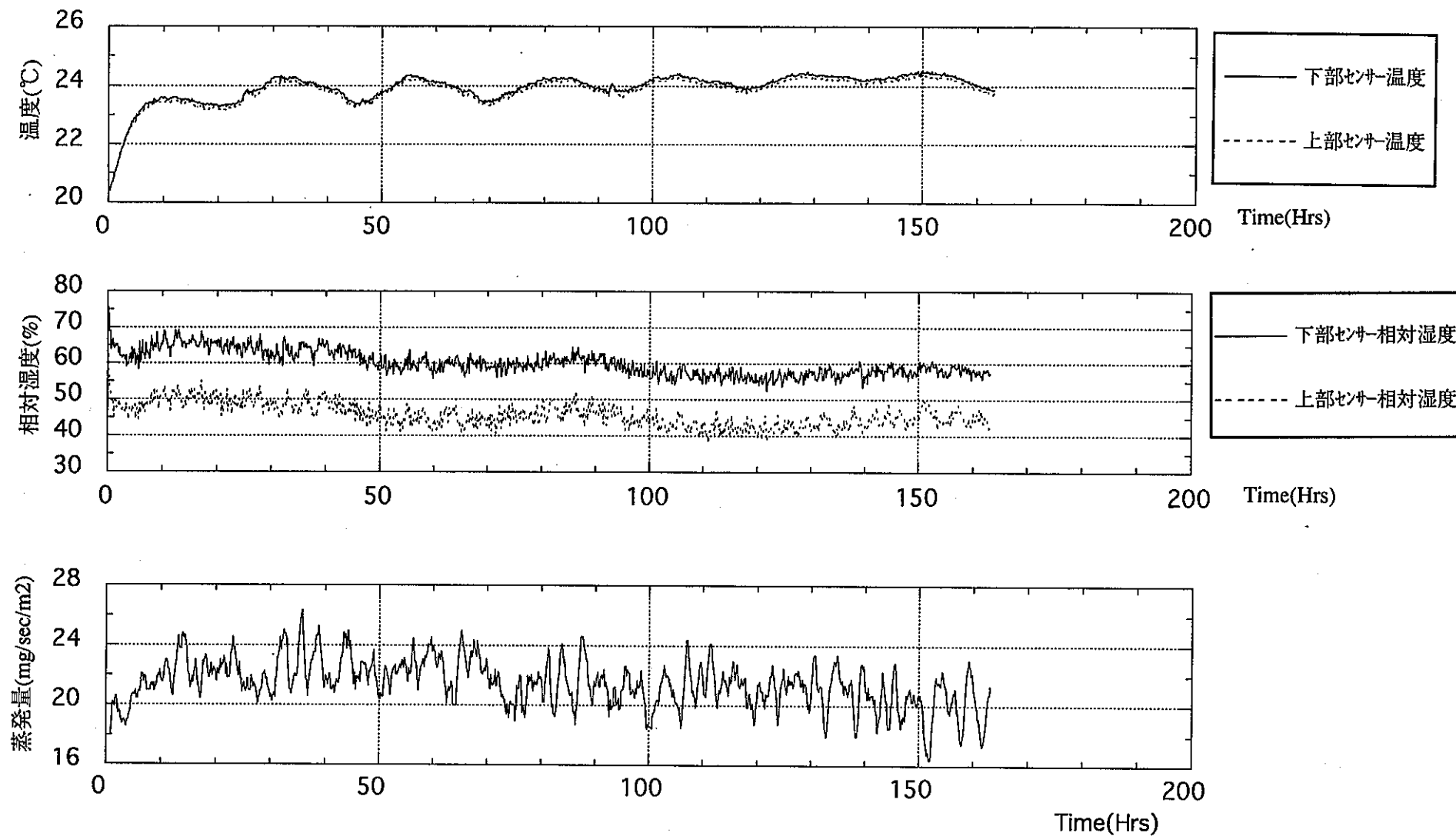


図 - 2. 3. 33 L4 の温度・湿度・蒸発量の経時変化

係数の小さい ( $10^{-10}$  cm/secオーダー) の花崗岩で約50時間でほぼ定常に到っている。このため本ケースは使用試料の透水係数が花崗岩より大きく、より早く定常に達し易いものと考え計測時間50時間で計測終了とした。

② L 2、M 2、S 2 :

図 - 2. 3. 29 ~ 31 は L 2、M 2、S 2 の温度・湿度・蒸発量の計測結果で同時に同一箇所にて実施した。計測時間は約170時間、これは L 1 の体積含水率計測結果で、その鉛直分布が上方で下方に比べ大きな値を示していたため、定常に至るにはより長期の時間が必要と考えられたためである。L 1、M 1、S 1 の場合のように気温の日変動 (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。気温の変動は各試料ともほぼ同じ変化挙動を示している。蒸発は L 2、M 2 はほぼ同様な周期的変化特性を示している。S 2 は蒸発量ピーク時に経時的にフラット状態が生じている。試料により多少変化特性が異なるが、いずれも気温日較差に伴う周期的な変化 (L 2、M 2、S 2 を通じ約  $12\text{mg/sec/m}^2$  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。

③ L 6 :

図 - 2. 3. 32 は L 6 の温度・湿度・蒸発量の計測結果である。L 6 は L 1、L 2 に認められた気温の日変動を極力避けるため、より恒温性の高い条件を求めて L 1 や L 2 と異なる恒温室にて実験を実施した。この恒温室は L 1 や L 2 を実施した恒温室より狭く、密閉製の高い恒温室である。このため、L 1、L 2 の場合のより気温の日変動 (約 1℃) が小さく抑えられている。相対湿度は細かな変動は示すものの全計測時間を通じほぼ一定値を示している。蒸発量は約  $4\text{mg/sec/m}^2$  の変化幅を示し、全体的に減少する傾向が見られる。L 6 は圧力センサーを取付けた試料で、圧力計測も実施していたが、圧力センサー (サイクロメーターのセンサー) の一つが試料から外れ始めたため計測を中断した。

④ L 4 :

図 - 2. 3. 33 は L 4 の温度・湿度・蒸発量の計測結果である。L 4 も L 6 同様に L 1、L 2 に認められた気温の日変動を極力避けるため、より恒温性の高い条件を求めて L 1 や L 2 と異なる恒温室にて実験を実施した。このため、L 1、L 2 の場合のより気温の日変動 (約 1℃未満) が小さく抑えられている。相対湿度は細かな変動を示し、全計測時間を通じ減少傾向をしめしている。蒸発量は約  $5\text{mg/sec/m}^2$  の変化幅を示し、全体的にわずかではあるが減少する傾向が見られる。

蒸発量の全体的な減少は認められるが、その量も小さく、また重量計測結果（ほぼ一様な現象傾向が確認される）も参考にして約160時間で計測終了とした。

## (ii) 重量の経時変化

図 - 2. 3. 34 ~ 37 に L1, L2, L6, L4 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。

L1, L2, L6, L4 各ケースとも、電子天秤による重量変化（実線）と温度・湿度計測に基づく蒸発量から推定される重量変化（破線）を示している。

### ① L1、L2 :

図 - 2. 3. 34 に L1、図 - 2. 3. 35 に L2 の重量計測結果を示すが、いずれも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（L1 : 31.6mg/sec/m<sup>2</sup>、L2 : 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（L1 : 17.8mg/sec/m<sup>2</sup>、L2 : 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。

### ② L6 :

図 - 2. 3. 36 に L6 の重量計測結果を示す。電子天秤による重量変化（実線）は著しく変動している。これは、岩石試料に、テンシオメーター、サイクロメーターが取付けてあり、標準砂でも見られた、天秤外部との接続の影響が現れたことが著しく重量計測値が変動した理由の一つに挙げられる。またサイクロメーターセンサーが途中離脱したようにセンサーの接続が安定していなかったことも理由の一つと考えられる。40時間における変動は、計測途中試料を含む計測装置の覆い（段ボールの保温箱）を一度取り外したためである。

温度・湿度計測に基づく蒸発量から推定される重量変化（破線）は、安定した重量の低減を示している。

### ③ L4 :

図 - 2. 3. 37 に L4 の重量計測結果を示す。この試料もテンシオメーター、サイクロメーターを取付けているため、初期に天秤重量計測値（実線）の非線形な重量低減を示している。20時間、90時間にて重量が上がっているのはテンシオメーターとサイクロメーターのセンサー取り付け



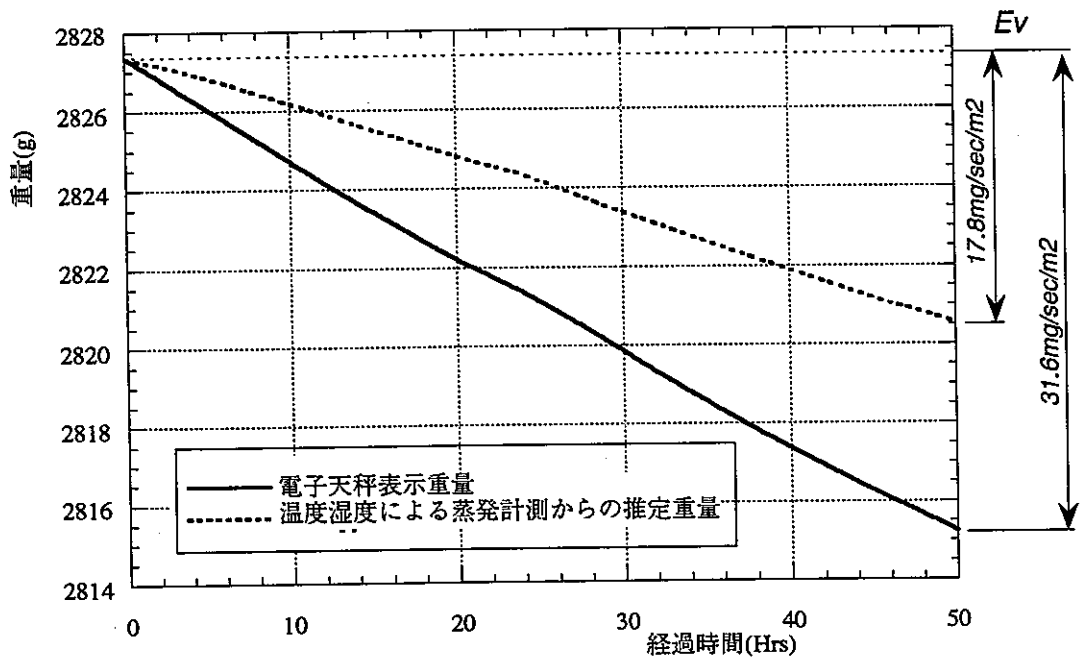


図 - 2. 3. 34 L1の電子天秤計測による重量および  
温度湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化

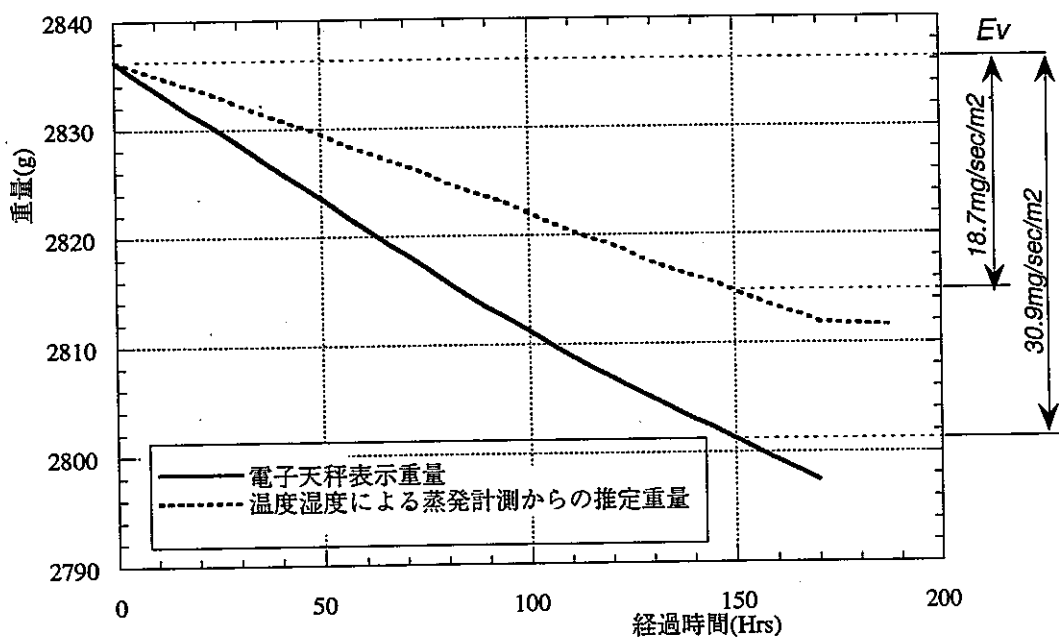


図 - 2. 3. 35 L2の電子天秤計測による重量および  
温度湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化

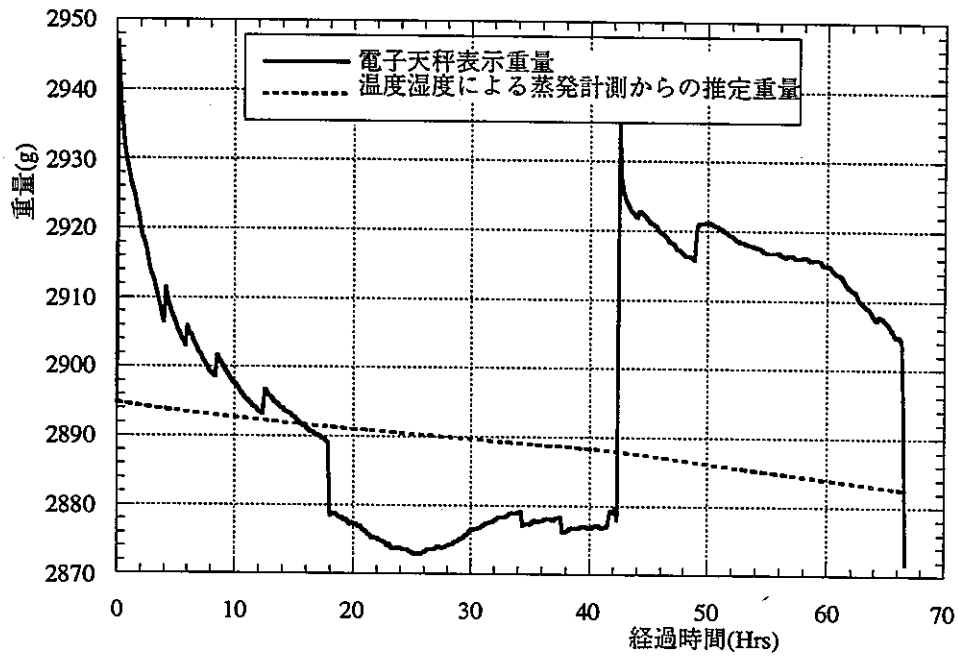


図 - 2. 3. 36 L 6 の電子天秤計測による重量および  
温度湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化

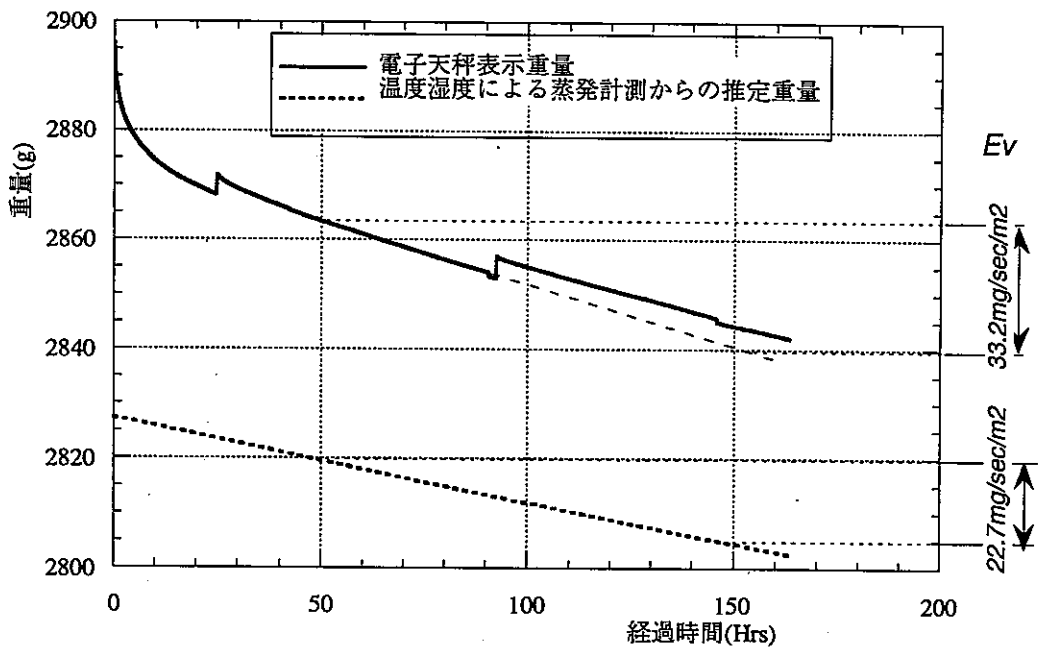


図 - 2. 3. 37 L 4 の電子天秤計測による重量および  
温度湿度計測による蒸発量から推定される重量の経時変化

の状態を確認したときのものである。このような重量計測の段差はあるものの、天秤による重量計測結果は、50時間以降ほぼ一様な低減を示し、センサーの外部との接続の影響がほぼなくなり、蒸発量もほぼ一定になっていることが推察される。50時間から150時間の間の電子天秤による重量計測に基づいた蒸発量は図に示すように $33.2\text{mg/sec/m}^2$ 、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は $22.7\text{mg/sec/m}^2$ となっている。

### (iii) 体積含水率

図 - 2. 3. 38 に体積含水率計測の鉛直方向分布を示す。

- ① 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いるように見えるが高さ2 cm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。
- ② S2 は高さ1.3 cm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。
- ③ 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。
- ④ 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。
- ⑤ 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10 cm、10 cmから15 cm、15 cmから上端と、大きく3つの傾きを持っている。15 cm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。

## (5) 不飽和パラメータの同定

### (i) 同定対象の供試体

図 - 2. 3. 38 の体積含水率の鉛直方向分布から、S1, M1, L6における体積含水率は鉛直方向に対してほとんど変化していないか、あるいは逆に上方向大きくなっている。これは理論的にあり得ない現象であるため、不飽和パラメータの同定は不可能と判断される。そこで同定対象の供試体はL1, L2, L4, M2, S2とした。

### (ii) 不飽和パラメータの同定解析時の境界条件

コア下部の水位：0.5 cm (各供試体共通)

蒸発量： $30\text{mg/sec/m}^2$

L4についてはテンシオメーター、サイクロメーターが付属しており天秤外の系と接続してい

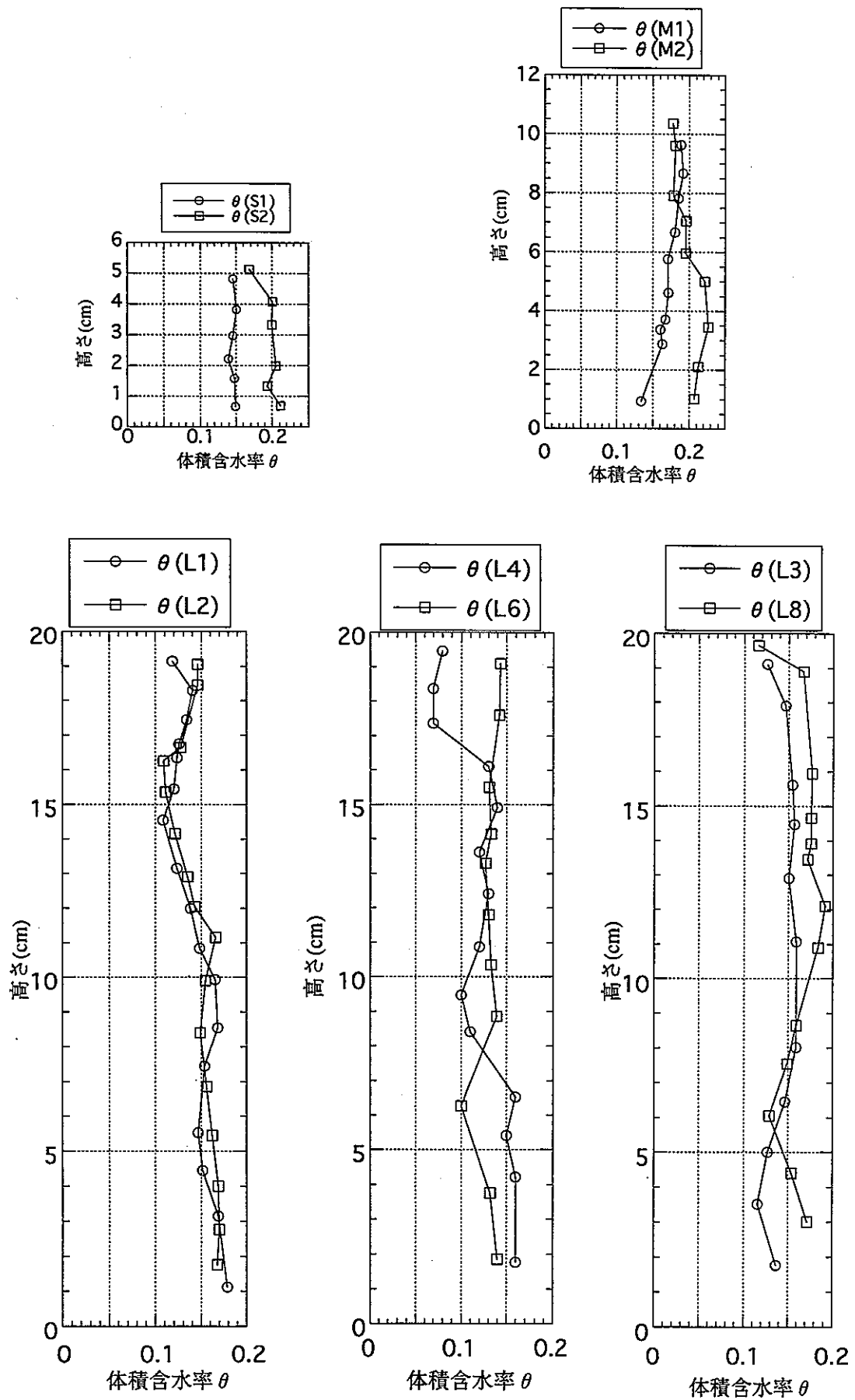


図 - 2. 3. 38 体積含水率計測の鉛直方向分布

るため、重量計測への影響が考えられる。実際にその影響が重量変化の曲線部の現れにより確認されるが、その影響の無いと考えられる重量変化の直線部に着目し\*重量計測から蒸発量を算定することとした。L1,L2,L4いずれの場合も温度・湿度センサーからの蒸発量より重量計測からの蒸発量の方が大きくなっている。

※（本試験レイアウトにおける電子天秤による重量計測においてはテンシオメーター、サイクロメーターが試料に付属して天秤外の系と接続しているため重量計測が適切に行われない懸念がある。そのため、あらかじめ重量のわかっている物をテンシオメーター、サイクロメーターが付属してある状態で載せ、天秤外の系と接続していることによる荷重計量への影響が無いことを確認した。しかしこの確認は長時間にわたるものでなかったため、緩やかな外の系との接続による荷重再配分の影響を把握しきれなかったものとする。重量計測の途中から重量変化の直線部が生じているのは、外の系との接続による荷重再配分が終了したためと考えられ、重量変化の直線部では天秤計測はほぼ正常な計測値を示すものと考えられる。）

ここでは、標準砂の境界条件設定時に述べたものと同じ考えに基づいて、基本的に重量計測結果の蒸発量から、解析に使用する蒸発量を設定することとした。

しかし、重量計測をしていないM2,S2については、L1,L2,L4いずれの場合も天秤の重量計測からの蒸発量と温度・湿度センサーからの蒸発量の比が同じような値（L1：31.6/17.8=1.8,L2：30.9/18.7=1.7,L4：33.2/22.7=1.5）を示していることから（その因果関係は明確でないが）L2の天秤による重量計測からの蒸発量と温度・湿度センサーからの蒸発量の比を温度・湿度センサーからの蒸発量（経時計測結果の平均蒸発量）に適用し、蒸発量とした。さらに、2.3.1(3)(i)②に示した誤差等も考慮して、表-2.3.12に示す境界条件の設定とした。

表-2.3.12 同定解析に用いた境界条件（蒸発量）

供試体	L1	L2	L4	M2	S2
蒸発量(mg/sec/m <sup>2</sup> )	30.0	30.0	30.0	35.0	30.0

(iii) 不飽和パラメーターの同定過程・結果

不飽和パラメーターの同定過程を表-2.3.13から表-2.3.17に示す。二乗誤差として有効飽和度、体積含水率それぞれについて $Er_{Se}, Er_{\theta}$ でそれぞれで示している。誤差減少率は $Se$ について算定している。二乗誤差判定・備考のSTOPは計算上透水マトリックスの桁落ちによる計

算不能を示している。○は同定結果を示し、ABNORMALは解析結果としての圧力等が異常な場合を示している。図-2.3.39、図-2.3.41から図-2.3.44に同定過程の繰り返しによる二乗誤差の減少状況をグラフとして示す。

#### (L1)

供試体L1の同定過程・同定結果を表-2.3.13、図-2.3.39に示す。同定結果は $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.000406, 2.69)$ となった。供試体L1は岩石を対象とした同定解析の最初のケースであるため、解析方法・精度の妥当性を検討するため必要と思われるパラメータの組み合わせについても追加解析を実施した。同定過程・収束判定理由および同定解析の妥当性検討について以下に説明する。

#### 同定過程・追加解析

- ①初期値 $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.00055, 3.50)$ とした。
- ②1回目～9回目までは相対透水係数が小さすぎ計算不能である。
- ③10回目～15回目はnに関する検討を実施している。
- ④nに関し、実測と解析の二乗誤差の減少率は十分小さくはないが、ここでは $n=2.70$ を仮に固定し、 $\alpha$ の検討に移った。これは、3つの未知パラメータの同定問題で、1パラメータについて詳細な検討をしても、他のパラメータの影響で詳細な検討は無駄になる可能性が大きいと考えるからである。
- ⑤16回目～20回目で $\alpha$ に関する検討を実施している。
- ⑥21回目～22回目で $\theta_r$ に関する検討を実施している。
- ⑦23回目から $\alpha$ 、nについてより詳細な検討を実施している。
- ⑧二乗誤差の減少率に関しては、27回目で1%を下回り収束、同定計算終了とした。  
二乗誤差の最小なものは24回目であったが、上端部における負の圧力水頭値が $10^5$ m以上で出力桁数を越えてしまったため、ここで異常値(ABNORMAL)として取り扱うこととした。
- ⑨28回目～34回目は $\alpha$ 、nについてより詳細( $\alpha$ については $1e-6$ 、nについては $1e-2$ まで同定する目的)な検討を実施する目的で実施してみた結果である。
- ⑩35回目は $\alpha$ の体積含水率、圧力水頭に与える影響を確認するために実施した。

表 - 2. 3. 13 パラメータ同定過程 (L1)

繰り返し回数	$\theta_r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.00	0.000550	3.50	9.397E-01	3.011E-02		STOP
2	0.00	0.000550	2.50	9.397E-01	3.011E-02		STOP
3	0.00	0.000650	2.50	9.397E-01	3.011E-02		STOP
4	0.00	0.001000	2.50	9.397E-01	3.011E-02		STOP
5	0.00	0.010000	2.50	9.319E-01	2.986E-02		STOP
6	0.00	0.010000	5.00	9.396E-01	3.011E-02		STOP
7	0.00	0.000600	4.00	9.397E-01	3.011E-02		STOP
8	0.00	0.001000	4.00	9.397E-01	3.011E-02		STOP
9	0.00	0.010000	4.00	9.392E-01	3.009E-02		STOP
10	0.00	0.000400	4.00	7.650E-01	2.451E-02		
11	0.00	0.000400	3.50	6.749E-01	2.163E-02	-11.77	
12	0.00	0.000400	3.00	5.287E-01	1.694E-02	-21.67	
13	0.00	0.000400	2.50	9.397E-01	3.011E-02		STOP
14	0.00	0.000400	2.70	4.048E-01	1.297E-02	-23.43	
15	0.00	0.000400	2.60	9.397E-01	3.011E-02		STOP
16	0.00	0.000350	2.70	5.764E-01	1.847E-02	42.39	
17	0.00	0.000450	2.70	9.397E-01	3.011E-02		STOP
18	0.00	0.000420	2.70	9.397E-01	3.011E-02		STOP
19	0.00	0.000410	2.70	9.397E-01	3.011E-02		STOP
20	0.00	0.000405	2.70	3.905E-01	1.251E-02	-32.26	
21	0.05	0.000400	2.70	9.720E-01	1.617E-02	148.92	
22	0.02	0.000400	2.70	5.579E-01	1.411E-02	-42.60	
23	0.00	0.000405	2.65	9.397E-01	3.011E-02		STOP
24	0.00	0.000405	2.66	3.771E-01	1.208E-02	-61.20	ABNORMAL
25	0.00	0.000400	2.69	4.007E-01	1.284E-02	6.24	
26	0.00	0.000405	2.69	3.869E-01	1.240E-02	-3.44	
27	0.00	0.000406	2.69	3.845E-01	1.232E-02	-0.62	○
28	0.00	0.000408	2.69	3.801E-01	1.218E-02	-1.13	
29	0.00	0.000408	2.67	9.397E-01	3.011E-02		STOP
30	0.00	0.000408	2.68	9.397E-01	3.011E-02		STOP
31	0.00	0.000409	2.69	9.397E-01	3.011E-02		STOP
32	0.00	0.000409	2.66	9.397E-01	3.011E-02		STOP
33	0.00	0.000408	2.66	9.397E-01	3.011E-02		STOP
34	0.00	0.000406	2.66	9.397E-01	3.011E-02		STOP
35	0.00	0.000390	2.69	4.333E-01	1.388E-02	14.00	

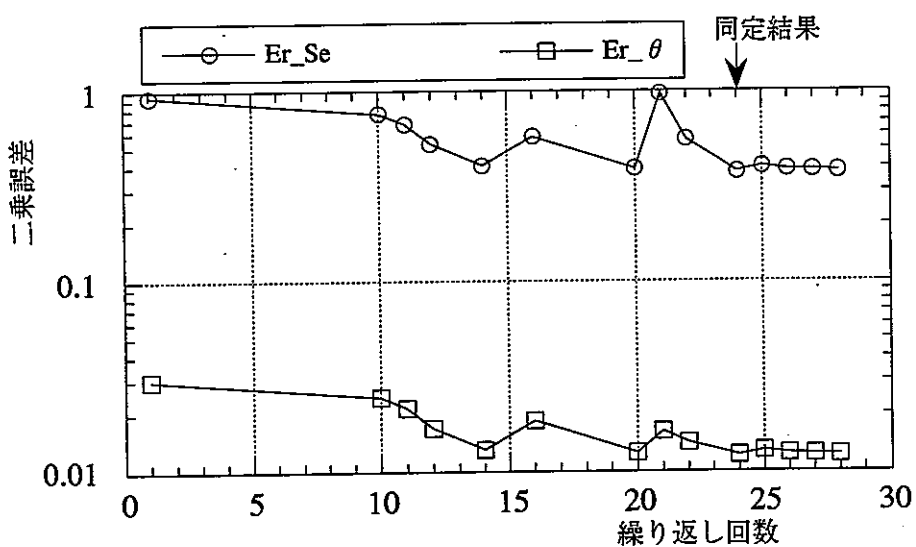


図 - 2. 3. 39 L1 同定過程における誤差二乗和減少状況

## 同定解析の妥当性検討

図 - 2. 3. 40 に

- (a) 実測体積含水率  $\theta$  及び 22 回目、24 回目、27 回目、35 回目のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  に対しての体積含水率  $\theta$  の供試体高さ方向の分布
- (b) 22 回目、24 回目、27 回目、35 回目のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  に対しての圧力水頭  $\psi$  の高さ方向の分布

を示す。

体積含水率に関する図（図 - 2. 3. 40）から、パラメータ  $\alpha$ 、 $n$  の変化に対して高さ 0 から 15 cm までは解析による体積含水率  $\theta$  はほとんど変化を示さず、同定解析のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  修正の効果は、上方 5 cm の計測値と解析値との差を小さくすることに現われている。22 回目、24 回目、27 回目、35 回目のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  の変化は  $\alpha$  で 0.00039 から 0.000406、 $n$  で 2.66 から 2.70 である。上端部に関してはパラメータ変化の影響が顕著に現われているが、上端部の体積含水率を計測することは困難である。また今回の計測においても上端部の体積含水率は計測されていないため上端部へのパラメータ修正の影響の実測値との対比による評価は行えない。

圧力水頭については対比する実測データはないが、パラメータ変化に対して体積含水率の場合と同様に高さ 0 から 15 cm まではほとんど圧力水頭の変化は認められず、変化は上端に現われている。

以上の解析実測結果から、 $\alpha$  で 0.00039 から 0.000406、 $n$  で 2.66 から 2.70 の変化、言い換えると  $\alpha$  で有効数字 2 桁、 $n$  で有効数字 3 桁程度の評価（同定精度）を実施しておけばほぼ妥当なパラメータが得られるものと考え、以降供試体は、基本的に  $\alpha$  で有効数字 2 桁、 $n$  で有効数字 3 桁の評価をしていくこととする。

最小体積含水率  $\theta_r$  については 0.00 と 0.01 程度の小さな値について検討し、 $\theta_r$  が 0.00 でない方が二乗誤差が小さい場合  $\theta_r$  について  $\alpha$ 、 $n$  同様に検討することとする。精度的には飽和体積含水率  $\theta_s$  が 0.15 から 0.23 程度であるため有効数字 2 桁までの検討とする。

同定終了後体積含水率の実測値、解析値の高さ方向の分布を比較し、問題がある場合は再検討することとする。



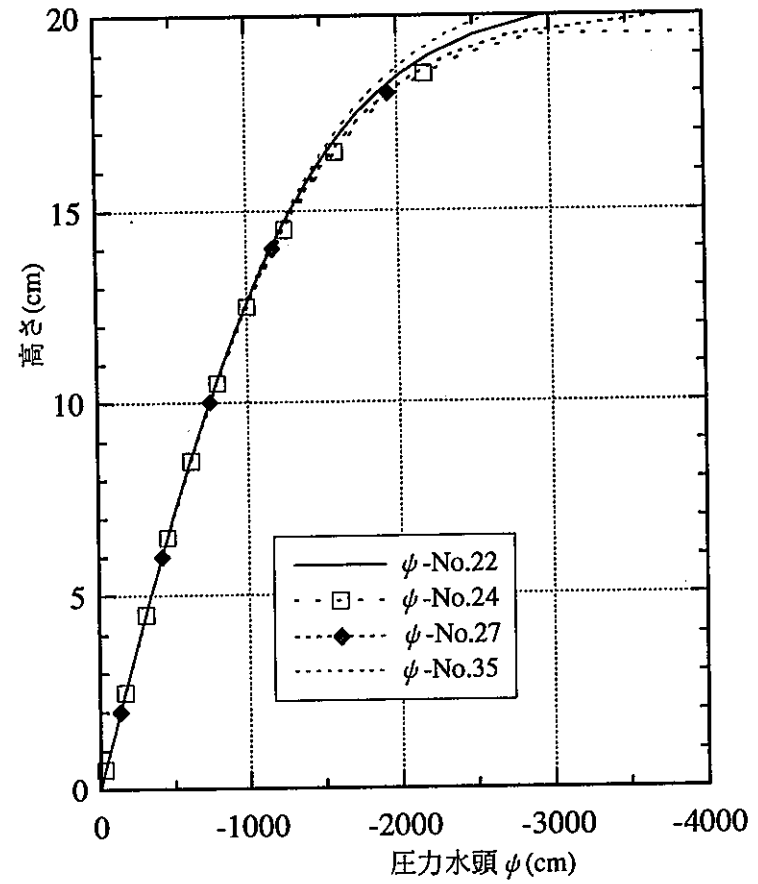
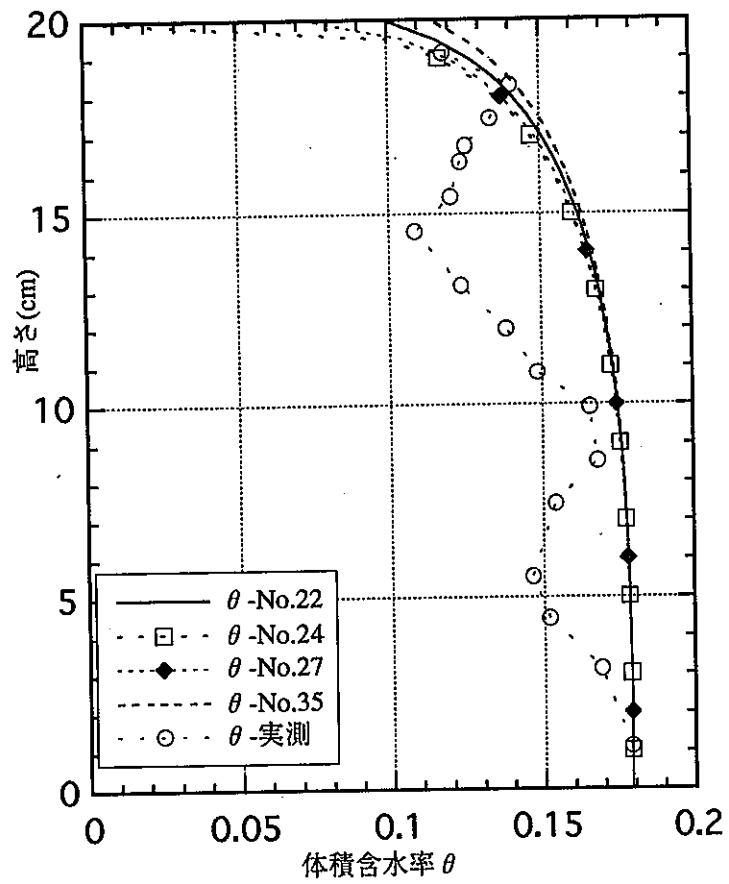


図 - 2. 3. 40 同定途中の体積含水率、圧力水頭の分布

(L2)

供試体L2の同定過程・同定結果を表-2.3.14、図-2.3.41に示す。同定結果は $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.000407, 1.79)$ となった。L2の $\alpha$ はL1と非常に近い値のため、両者の違いを把握する目的で例外的に3桁まで求めることとした。同定過程および収束判定理由について以下に説明する。

- ①初期値 $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.000405, 2.66)$ とした。
- ②1回目から2回目は $\theta_r$ に関する計算を実施している。
- ③2回目から6回目は $n$ に関する計算を実施している。
- ④6回目から9回目は $\alpha$ に関する計算を実施している。
- ⑤8回目から12回目は $n$ の3桁目に関する算定の計算を実施している。
- ⑥12回目から15回目は $\alpha$ の3桁目に関する算定の計算を実施している。
- ⑦13回目で収束とみなせるが、ここでは $\alpha=0.000408$ 、 $0.000409$ の可能性（大きな変化は期待されないが念のため）についても検討し、最終的に13回目のパラメータを同定計算の解とした。

(M2)

供試体M2の同定過程・同定結果を表-2.3.15、図-2.3.42に示す。同定結果は $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0020, 1.81)$ となった。同定過程および収束判定理由について以下に説明する。

- ①初期値 $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0001, 4.22)$ とした。
- ②1回目から2回目は $n$ に関する計算を実施している。
- ③2回目から6回目は $\alpha$ に関する計算を実施している。
- ④6回目から18回目は $n$ に関する計算を実施し、 $n=1.81$ としている。
- ⑤18回目から22回目は $\alpha$ に関する計算を実施し、 $\alpha=0.0020$ としている。
- ⑥22回目から23回目は $\theta_r$ に関する計算を実施し、 $\theta_r=0.00$ としている。
- ⑦以上から17回目のパラメータを同定計算の解とした。

(S2)

供試体S2の同定過程・同定結果を表-2.3.16、図-2.3.43に示す。同定結果は $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0004072, 1.79)$ となった。同定過程および収束判定理由について以下に

説明する。

- ①初期値  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0001, 4.00)$  とした。
- ②1回目から9回目は  $\alpha$  に関する計算を実施している。
- ③10回目から19回目は  $n$  に関する計算を実施し、 $n=2.48$ としている。
- ④19回目から21回目は  $\alpha$  に関する計算を実施し、 $\alpha=0.0020$ としている。
- ⑤21回目から22回目は  $\theta_r$  に関する計算を実施し、 $\theta_r=0.00$ としている。
- ⑥以上から17回目のパラメータを同定計算の解とした。

(L4)

供試体L4の同定過程・同定結果を表-2.3.17、図-2.3.44に示す。同定結果は  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.00014, 3.62)$  となった。同定過程および収束判定理由について以下に説明する。

- ①初期値  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0001, 4.22)$  とした。
- ②1回目から6回目は  $\alpha$  に関する計算を実施している。
- ③6回目から18回目は  $n$  に関する計算を実施している。
- ④18回目から26回目は  $\alpha$  の3桁目に関する算定の計算を実施している。
- ⑤26回目から27回目は  $\theta_r$  に関する計算を実施している。
- ⑥16回目から17回目の二乗誤差減少率は1%を越えているが、可能性のあるパラメータについて18回目以降検討した結果、最終的に17回目のパラメータを同定計算の解とした。

表 - 2. 3. 14 パラメータ同定過程 (L2)

繰り返し回数	$\theta r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.05	0.000405	2.66	9.922E-01	1.453E-02		
2	0.00	0.000405	2.66	4.737E-01	1.385E-02	-52.26	
3	0.00	0.000405	2.00	3.299E-01	9.646E-03	-30.36	
4	0.00	0.000405	1.50	5.562E-01	1.626E-02		STOP
5	0.00	0.000405	1.70	5.563E-01	1.627E-02		STOP
6	0.00	0.000405	1.80	2.471E-01	7.226E-03	-25.09	
7	0.00	0.000415	1.80	2.472E-01	7.227E-03	0.01	
8	0.00	0.000400	1.80	2.501E-01	7.314E-03	1.20	
9	0.00	0.000410	1.79	2.466E-01	7.211E-03	-1.41	
10	0.00	0.000410	1.77	5.563E-01	1.627E-02		STOP
11	0.00	0.000410	1.78	2.497E-01	7.302E-03	1.27	
12	0.00	0.000405	1.79	2.459E-01	7.189E-03	-1.54	
13	0.00	0.000407	1.79	2.458E-01	7.188E-03	-0.02	○
14	0.00	0.000409	1.79	2.462E-01	7.200E-03	0.16	
15	0.00	0.000408	1.79	2.460E-01	7.192E-03	-0.10	

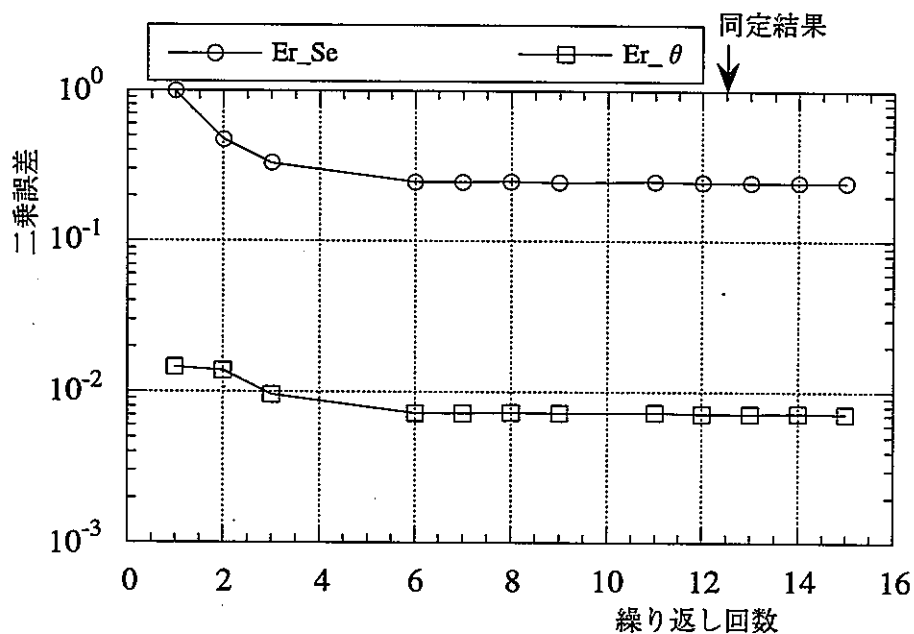


図 - 2. 3. 41 L2の同定過程における二乗誤差の低減状況

表 - 2. 3. 15 パラメータ同定過程 (M2)

繰り返し回数	$\theta r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.00	0.0001	4.22	1.878E-01	9.720E-03		
2	0.00	0.0001	3.22	1.878E-01	9.720E-03	0.00	
3	0.00	0.0010	3.22	1.856E-01	9.608E-03	-1.15	
4	0.00	0.0100	3.22	1.855E-01	9.601E-03		STOP
5	0.00	0.0050	3.22	1.876E-01	9.707E-03		STOP
6	0.00	0.0020	3.22	1.663E-01	8.606E-03	-10.43	
7	0.00	0.0020	3.00	1.596E-01	8.260E-03	-4.02	
8	0.00	0.0020	2.00	7.639E-02	3.954E-03	-52.13	
9	0.00	0.0020	1.50	1.848E-01	9.566E-03		STOP
10	0.00	0.0020	1.80	4.590E-02	2.376E-03	-39.92	
11	0.00	0.0020	1.70	1.860E-01	9.628E-03		STOP
12	0.00	0.0020	1.75	1.863E-01	9.640E-03		STOP
13	0.00	0.0020	1.76	1.863E-01	9.642E-03		STOP
14	0.00	0.0020	1.77	1.863E-01	9.644E-03		STOP
15	0.00	0.0020	1.78	1.864E-01	9.646E-03		STOP
16	0.00	0.0020	1.79	4.735E-02	2.451E-03	3.17	
17	0.00	0.0020	1.81	4.547E-02	2.354E-03	-3.97	○
18	0.00	0.0020	1.82	4.575E-02	2.368E-03	0.60	
19	0.00	0.0022	1.82	1.863E-01	9.642E-03		STOP
20	0.00	0.0018	1.82	6.592E-02	3.412E-03	44.10	
21	0.00	0.0021	1.82	1.864E-01	9.648E-03		STOP
22	0.00	0.0019	1.82	5.344E-02	2.766E-03	-18.93	
23	0.01	0.0020	1.81	5.100E-02	2.413E-03	-4.56	

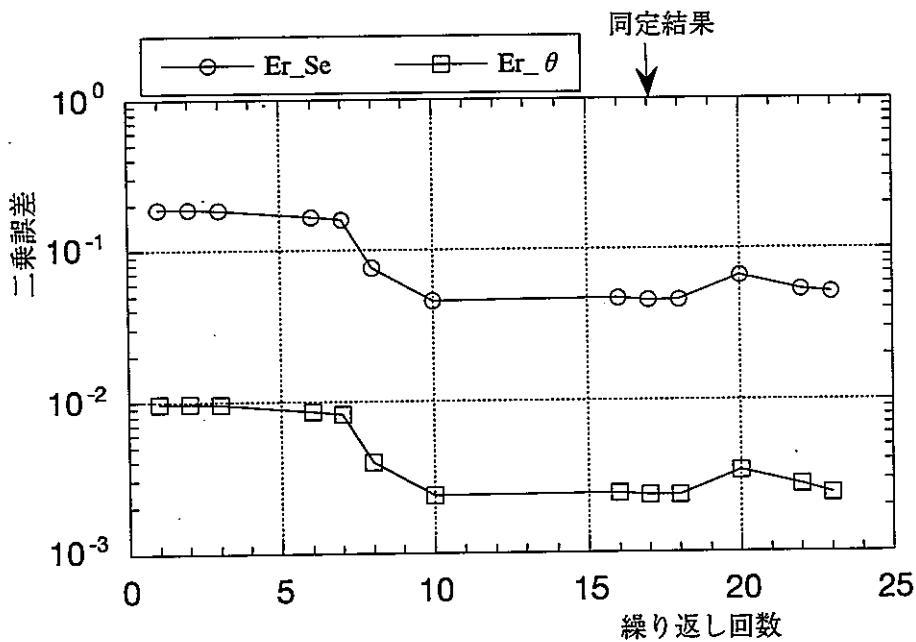


図 - 2. 3. 4 2 M2の同定過程における二乗誤差の低減状況

表 - 2. 3. 16 パラメータ同定過程 (S 2)

繰り返し回数	$\theta r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.00	0.0001	4.00	6.148E-02	2.789E-03		
2	0.00	0.0001	4.20	6.148E-02	2.789E-03	0.00	
3	0.00	0.0010	4.20	6.148E-02	2.789E-03	0.00	
4	0.00	0.0100	4.20	6.147E-02	2.789E-03	-0.02	
5	0.00	0.0500	4.20	5.023E-02	2.279E-03	-18.29	
6	0.00	0.1000	4.20	3.463E+00	1.571E-01		STOP
7	0.00	0.0800	4.20	2.360E+00	1.071E-01		STOP
8	0.00	0.0700	4.20	1.636E+00	7.422E-02		STOP
9	0.00	0.0600	4.20	9.047E-01	4.105E-02		STOP
10	0.00	0.0500	3.20	3.764E-02	1.708E-03	-25.06	
11	0.00	0.0500	2.50	2.304E-02	1.045E-03	-38.79	
12	0.00	0.0500	2.00	2.091E-01	9.488E-03		STOP
13	0.00	0.0500	2.20	2.419E-01	1.098E-02		STOP
14	0.00	0.0500	2.30	2.558E-01	1.161E-02		STOP
15	0.00	0.0500	2.40	2.682E-01	1.217E-02		STOP
16	0.00	0.0500	2.49	2.280E-02	1.034E-03	-1.06	
17	0.00	0.0500	2.48	2.255E-02	1.023E-03	-1.07	○
18	0.00	0.0500	2.46	2.749E-01	1.247E-02		STOP
19	0.00	0.0500	2.47	2.760E-01	1.252E-02		STOP
20	0.00	0.0520	2.48	3.204E-01	1.454E-02		STOP
21	0.00	0.0510	2.48	2.984E-01	1.354E-02		STOP
22	0.01	0.0500	2.48	2.618E-02	1.079E-03	16.10	

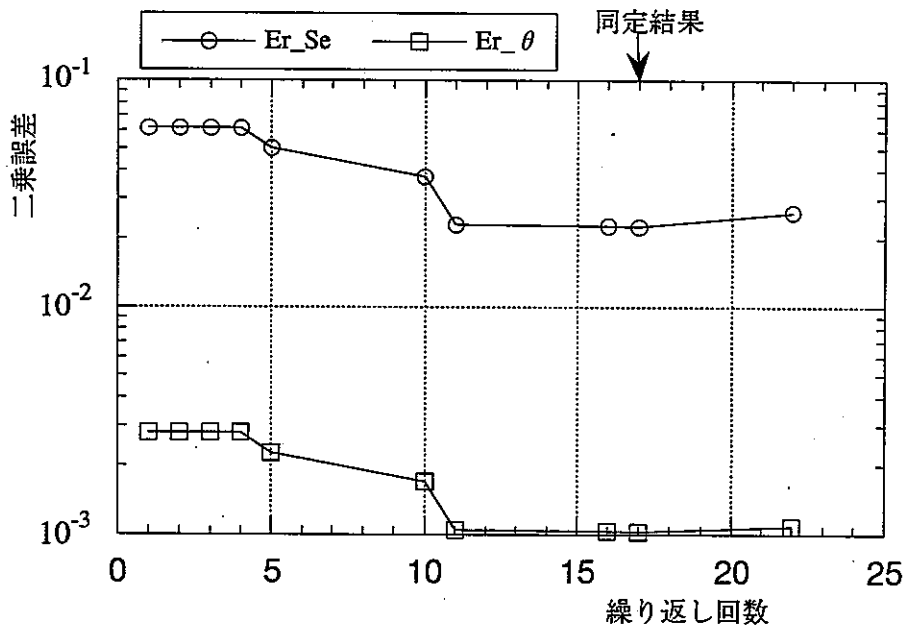


図 - 2. 3. 43 S 2 の同定過程における二乗誤差の低減状況

表 - 2. 3. 17 パラメータ同定過程 (L 4)

繰り返し回数	$\theta r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	判定・備考
1	0.00	0.00010	4.22	1.235E+00	3.218E-02		
2	0.00	0.00020	4.22	1.334E+00	3.476E-02		STOP
3	0.00	0.00019	4.22	1.334E+00	3.476E-02		STOP
4	0.00	0.00015	4.22	1.334E+00	3.476E-02		STOP
5	0.00	0.00011	4.22	1.181E+00	3.077E-02		
6	0.00	0.00014	4.22	8.381E-01	2.183E-02	-29.05	
7	0.00	0.00014	4.52	9.234E-01	2.405E-02	10.18	
8	0.00	0.00014	4.02	7.683E-01	2.001E-02	-16.80	
9	0.00	0.00014	3.02	1.334E+00	3.476E-02		STOP
10	0.00	0.00014	3.52	1.334E+00	3.476E-02		STOP
11	0.00	0.00014	3.42	1.334E+00	3.476E-02		STOP
12	0.00	0.00014	3.30	1.334E+00	3.476E-02		STOP
13	0.00	0.00014	3.70	6.281E-01	1.636E-02		
14	0.00	0.00014	3.60	1.334E+00	3.476E-02		STOP
15	0.00	0.00014	3.65	6.029E-01	1.570E-02		
16	0.00	0.00014	3.64	5.977E-01	1.557E-02	-0.85	○
17	0.00	0.00014	3.62	5.874E-01	1.530E-02	-1.73	
18	0.00	0.00014	3.61	1.334E+00	3.476E-02		STOP
19	0.00	0.00013	3.62	8.054E-01	2.098E-02		
20	0.00	0.00012	3.62	9.654E-01	2.515E-02	19.87	
21	0.00	0.00013	3.62	7.863E-01	2.048E-02	-18.55	
22	0.00	0.00013	3.62	7.666E-01	1.997E-02	-2.51	
23	0.00	0.00015	3.62	1.334E+00	3.476E-02		STOP
24	0.00	0.00015	3.62	1.334E+00	3.476E-02		STOP
25	0.00	0.00014	3.62	1.334E+00	3.476E-02		STOP
26	0.00	0.00014	3.62	6.112E-01	1.592E-02		
27	0.01	0.00014	3.62	7.008E-01	1.606E-02	14.65	

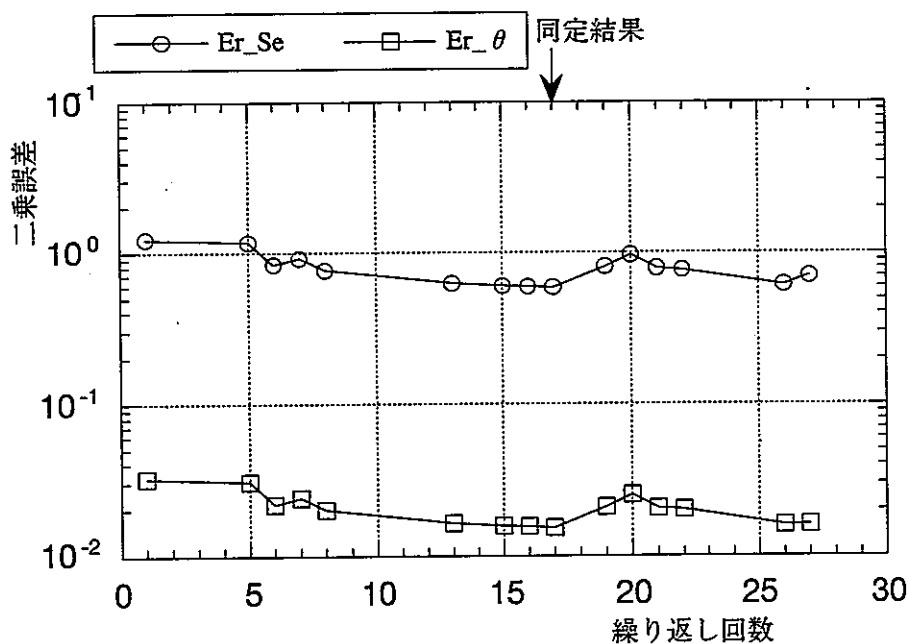


図 - 2. 3. 44 L 4 の同定過程における二乗誤差の低減状況

(6) 同定結果

同定された  $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率、圧力水頭、相対透水係数の関係曲線を図 - 2. 3. 45 から図 - 2. 3. 47 に示す。図 - 2. 3. 48 から図 - 2. 3. 52 に体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果を示す。

体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果を見ると、L1、L2、L4 という長さ 20 cm のものは、下端より 5 cm から 18 cm 程度までの間で、計測値された体積含水率  $\theta$  あるいは有効飽和度  $S_e$  は同定されたパラメータに基づく解析値より小さくなっている。表現を変えると、下端と上端以外の部分では、計測値された体積含水率  $\theta$  あるいは有効飽和度  $S_e$  は同定されたパラメータに基づく解析値より小さくなっている。

これまでの結果を表 - 2. 3. 18 にまとめる。

表 - 2. 3. 18 同定結果および蒸発量、飽和透水係数

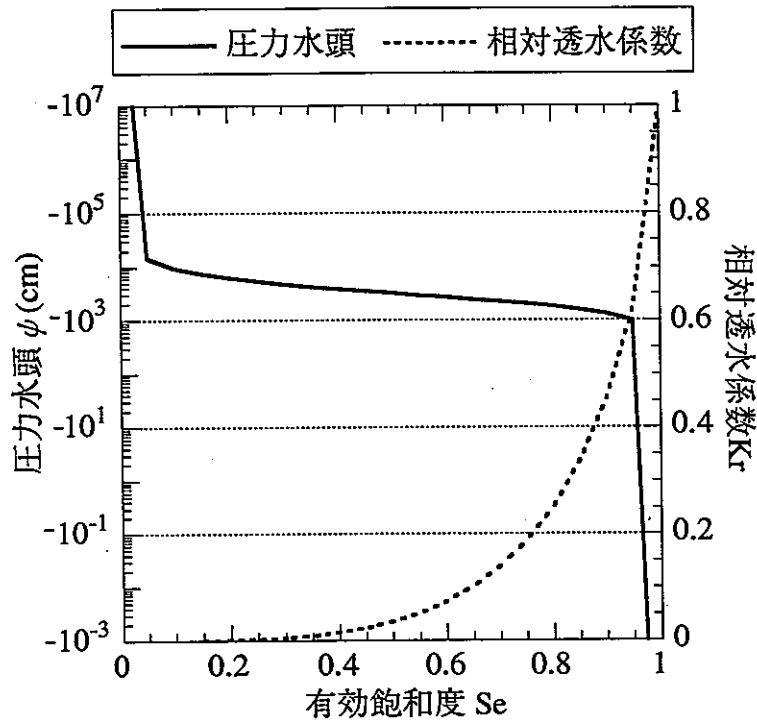
	供試体高さ	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	蒸発量	飽和透水係数
	cm		cm-1		mg/sec/m <sup>2</sup>	cm/sec
L1	20.1	0.00	0.000406	2.69	30.0	1.8E-07
L2	20.0	0.00	0.00041	1.79	30.0	3.0E-07
L4	20.1	0.00	0.00014	3.62	30.0	5.1E-08
L6	20.1				30.0	4.2E-08 ※
M1	10.4				30.0	2.2E-07 ※
M2	10.8	0.00	0.00200	1.81	35.0	9.5E-07
S1	5.3				30.0	6.1E-08 ※
S2	5.0	0.00	0.05000	2.48	30.0	1.5E-05

※ 今回実験を実施した供試体のうち、L6 は計測途中で圧力計測用センサーが外れ実験を中止した。また、M1、S1 は計測された試料の長さ方向の体積含水率が上方ほど大きくなり、上方ほど蒸発により乾燥するという減少を示さず、同定不可能と判断されたため同定解析は L6、M1、S1 に対しては実施しなかった。

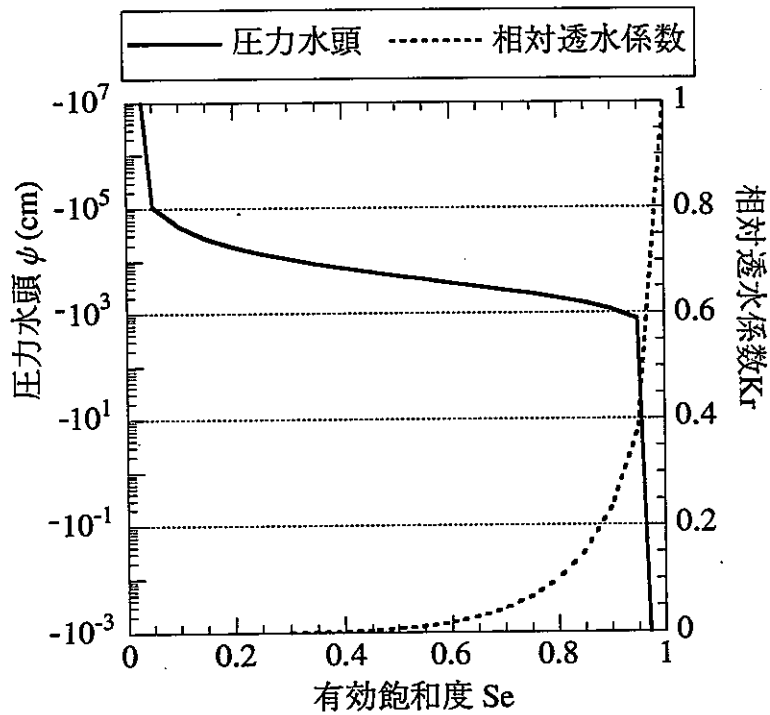
この表からは、以下のことがわかる。

- ① 長さ約 20 cm 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 20 cm の L1, L2, L4 の  $n$  は最大と最小で 2 倍程度の違いがある。
- ③ L1 と L2 の  $\alpha$  はほぼ同じ値となっている。
- ④ M2 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。



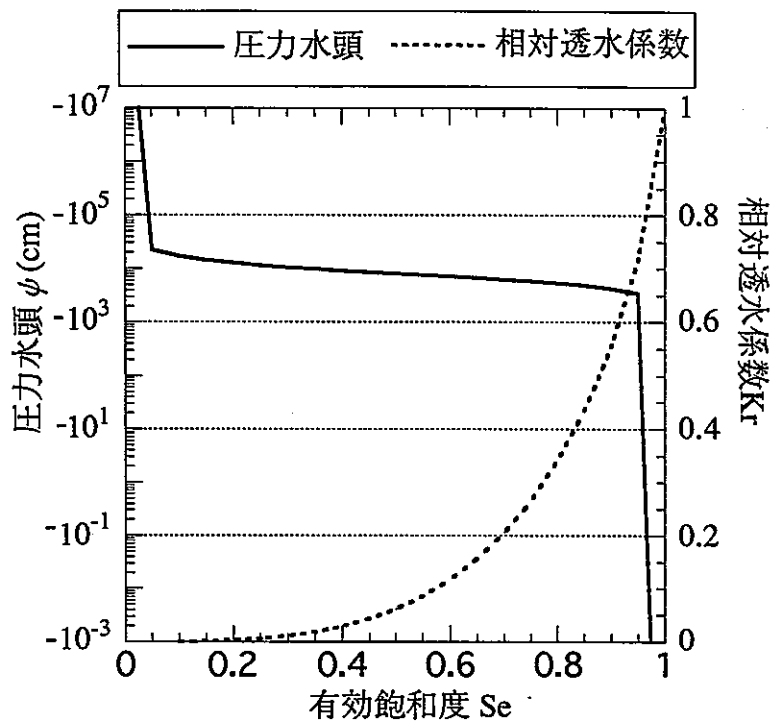


L1の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.179, \alpha: 0.000406, n: 2.69$ )

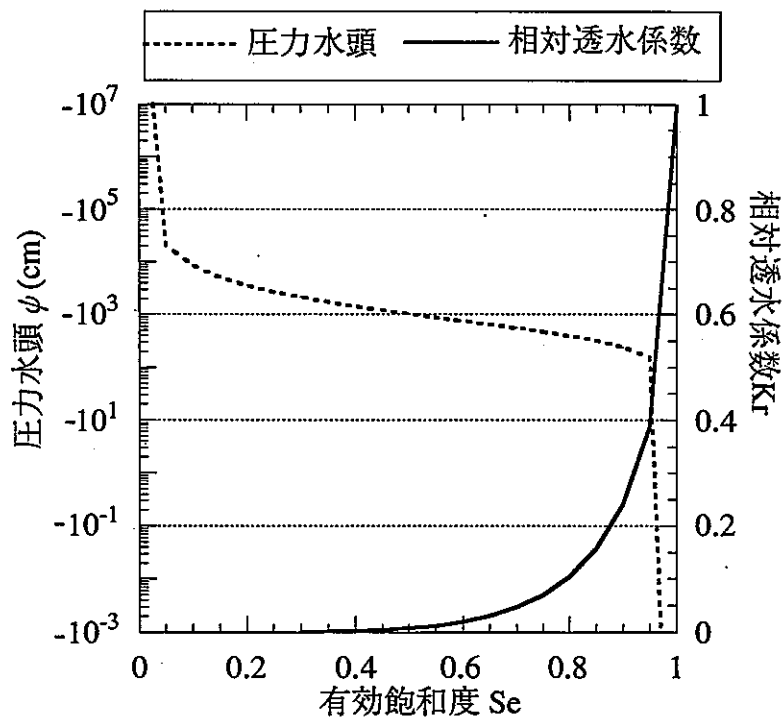


L2の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.171, \alpha: 0.00041, n: 1.79$ )

図 - 2. 3. 4 5 同定された  $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率、压力水頭、相对透水係数の関係曲線



L4の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.161, \alpha: 0.00014, n: 3.62$ )



M2の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.228, \alpha: 0.002, n: 1.81$ )

図 - 2. 3. 46 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

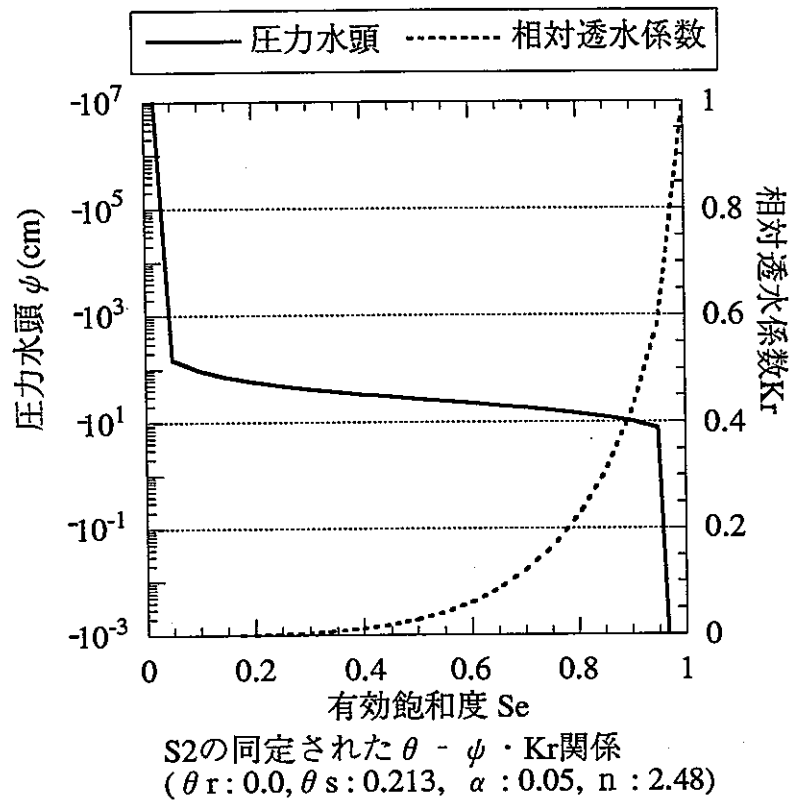


図 - 2. 3. 47 同定された  $\alpha$ 、 $n$  に対する体積含水率、圧力水頭、相対透水係数の関係曲線

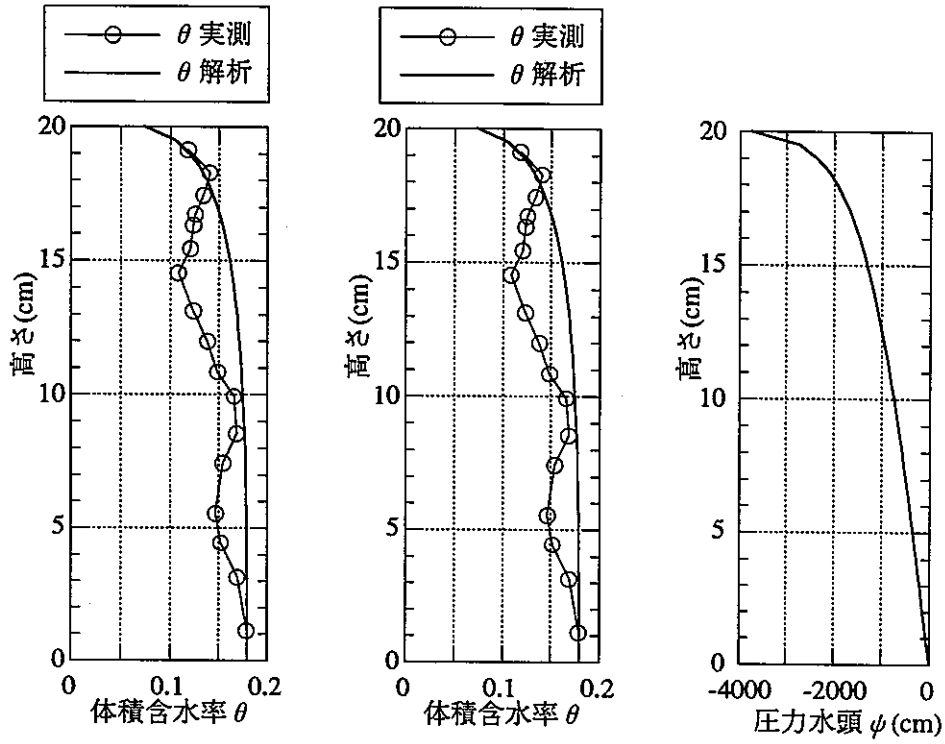


図 - 2. 3. 4 8 L 1 の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

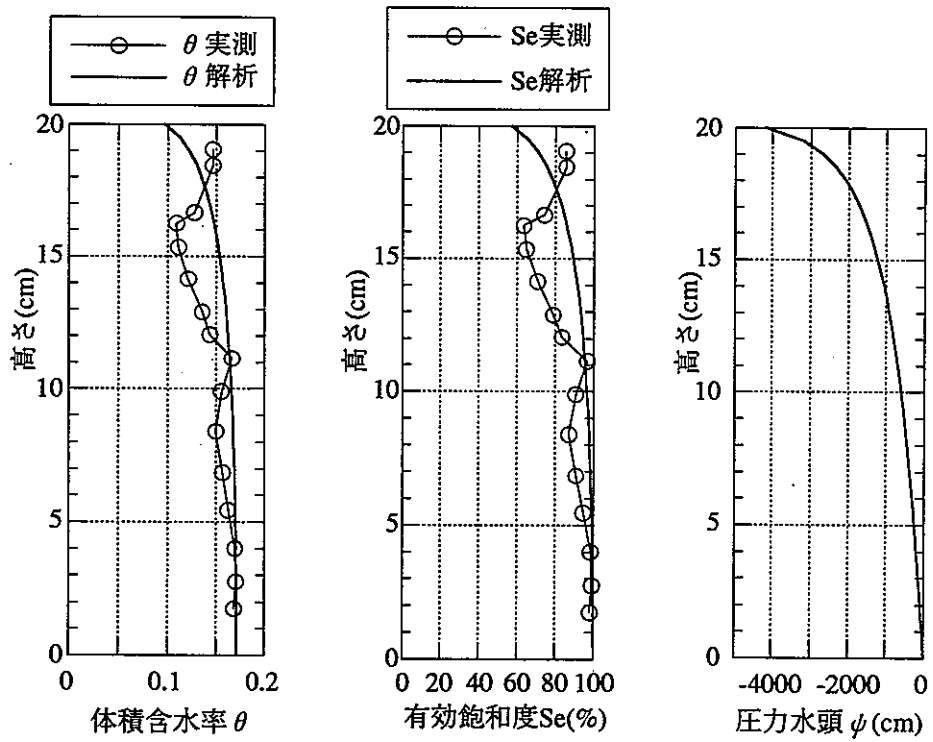


図 - 2. 3. 4 9 L 2 の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

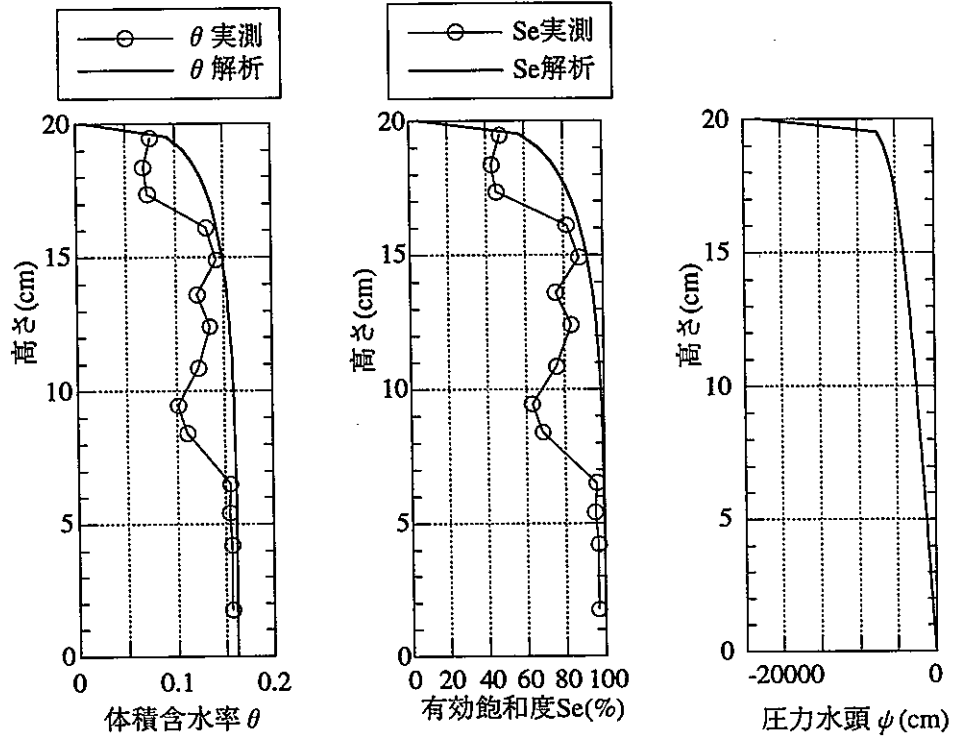


図 - 2. 3. 50 L4の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

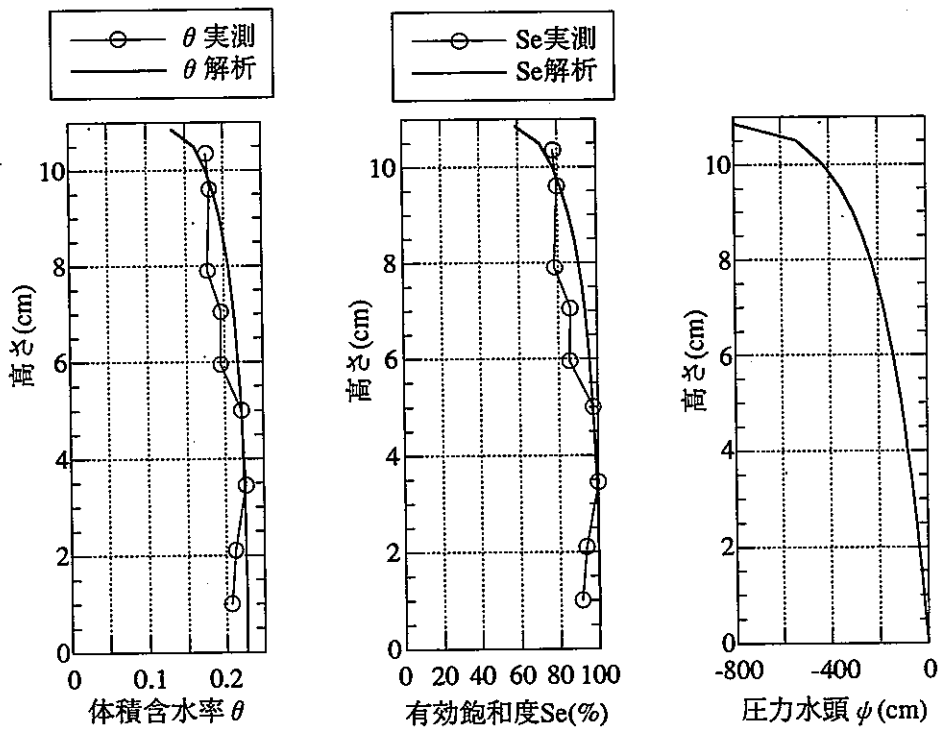


図 - 2. 3. 51 M2の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

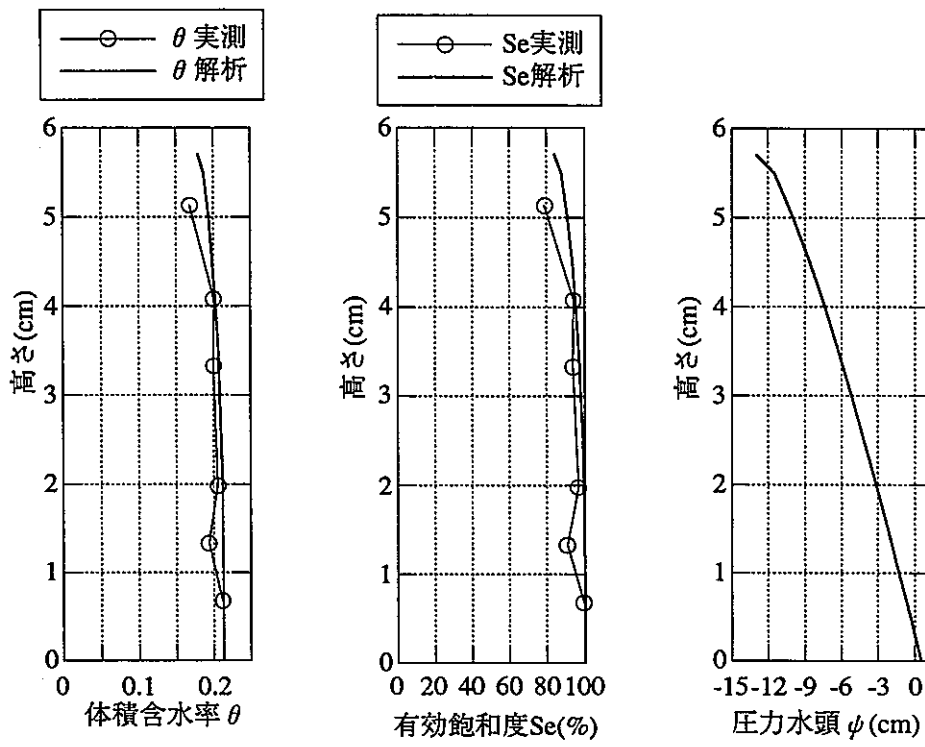


図 - 2. 3. 5 2 S 2 の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

- 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、L 1、L 2 に対し、M 2 は 3～5 倍、S 2 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。

## (7) 考察

本実験の目的は、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）に対して蒸発量計測とVG式を用いた不飽和特性同定手法を適用し、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ことである。この件についてここで考察する。

表-2.3.15に示すように、長さ20cmの試料はL1、L2、L4の3試料、長さ10cmの試料はM2の1試料、長さ5cmの試料はS2の1試料である。(6)の①～⑥から、今回の実験結果として蒸発量を用いて同定されるVG式のパラメータ $\alpha$ は、試料の長さおよび透水係数 $K_s$ と関連していると考えられる。

今回行った蒸発量を用いた1次元定常流れのVG式を用いた解析では、蒸発量（流量）が等しく透水係数が異なる場合、試料内部の動水勾配の違いとなって現れる。動水勾配は試料全長に対して平均的に考えると上下端の圧力差を試料長さで除したものがある。今回のケースのように下端部の条件が同一の場合には、動水勾配は上端の負圧の大きさと試料長さの違いで決まる。上端の負圧の大きさは解析上VG式のパラメータ $\alpha$ によるため、試料長さの違いがない場合は透水係数の違いが、同定されるVG式のパラメータ $\alpha$ の違いとなって現れる。単位面積当りの蒸発量 $E_v$ 、試料長さ方向の平均動水勾配 $I(\alpha)$ 、試料長さ方向の平均透水係数 $K_a$ とするとこれらは次式のように示される。

$$I(\alpha) = E_v / K_a \quad (\text{式2.3.2})$$

今回の実験では蒸発量が等しく、長さの違いは2倍から4倍、透水係数と同定されたパラメータ $\alpha$ はオーダー的な違いを示している。長さと同定されたパラメータ $\alpha$ に着目すると長さの影響が現れているように考えられるが、長さの違い以上に透水係数と同定されたパラメータ $\alpha$ の違いの方が大きいため、同定されたパラメータ $\alpha$ の違いは長さの違いというより試料毎の透水係数の違いによるものと考えられる。

コアの透水係数は、コア長さ方向の平均透水係数である。コア内部に透水性の不均質が有る場合、透水係数の長さ依存性が生じうる。今回の多胡砂岩のように堆積層面と直交方向の透水係数を対象

とする場合、特にこの傾向が顕著になる。堆積層に薄い粘土質層などが挟まっている場合、堆積層面と直交方向の透水係数は、透水性の小さい粘土層に支配され小さな透水係数となる。このような透水性の小さな薄層が或る頻度で挟在している場合、コア長が長いほど透水性の小さな薄層を含む可能性が高まる。つまり長い供試体ほど透水係数が小さく、結果的にVG式のパラメータ $\alpha$ が小さくなる。このことは考え方によるとVG式のパラメータ $\alpha$ の長さ依存性と解釈することもできる。

従って、今回同定された長さの異なるVG式のパラメータ $\alpha$ の違いは、透水係数が異なったようにVG式のパラメータ $\alpha$ も試料個々の有する特性の違いとして考えることもできる。

また、見方を変えると上記のように長さ依存性を生じうるコア寸法（長さ）は、不飽和特性を評価使用とするには不十分なコア長さ、即ち代表寸法（REV）として不適切な長さであると考えられることもできる。今回用いた多胡砂岩の有する不均質性の空間的広がり（規模）に対し、少なくとも10cm程度のコア長では多胡砂岩の有する不飽和特性を評価するには不十分であったと考えられることもできる。

今回実験に使用した試料は（長さの違いに対し透水係数は異なったものであったが、）極力均質で試料の肌合い等同じようなものを選択しており、空隙形状等に関連のあると考えられる毛管圧特性すなわちVG式のパラメータ $\alpha$ は各試料でオーダー的に異なることは考え難い。また、表-2. 3. 4の種々の土質、岩石（透水係数では $10^{-2}$ cm/secオーダーから $10^{-7}$ cm/secのオーダー）の $\alpha$ ほとんどのものが0.01のオーダーを示している。このことから、供試体長さが違って蒸発量はほとんど変わらないということを考慮すると供試体長さの違いで、推定されるVG式のパラメータが影響を受ける可能性は十分に考えられる。

以上、本実験の結果をまとめると以下のようになる。

- ① 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かった。
- ② 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。
- ③ 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た。



## 2. 3. 4 境界条件の影響の検討

### (1) 実験の目的

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) 実験手順

2. 3. 3 (2) に準じる。

### (3) 実験条件

#### (i) 供試体

使用した供試体はL3,L8である。

#### (ii) 計測機器

実験に使用した主な機器は以下のとおりである。

#### ①蒸発量計測用温度・湿度センサー2組（センサー2個で1組）

表 - 2. 3. 19 各試料への温度・湿度センサーの配置

供試体	L 8	L 3
上部センサー	S 1 B	S 1 B
下部センサー	S 1 A	S 1 A

#### ②水位設定・供試体固定アクリル容器

形状は図 - 2. 3. 2 に示す。

#### ③小電子天秤；島津製作所 EB - 3200 H

秤量：3200 g、読み取り限度：10m g、直線性：±20m g

#### ④センサー支持スタンド2個

#### ⑤データ計測・蒸発量演算用パソコン

PC98RA：AD変換ボード等付属

#### ⑥人工気象装置

#### (iii) レイアウト

実験装置の計測時のレイアウト写真を図 - 2. 3. 53 に示す。

#### (iv) 実験期間

蒸発量計測期間； 1995年2月20日～27日（163.2時間、供試体L3,L8）

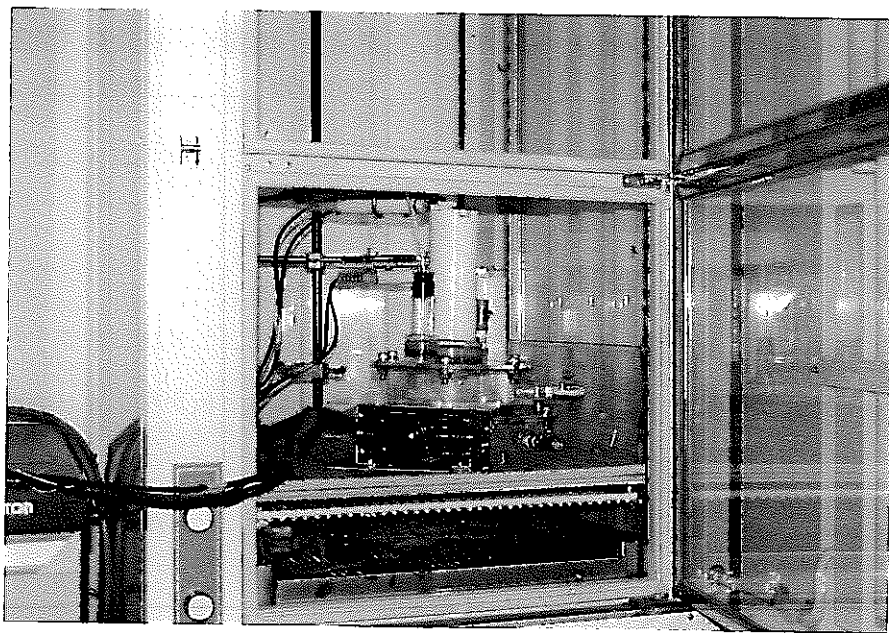
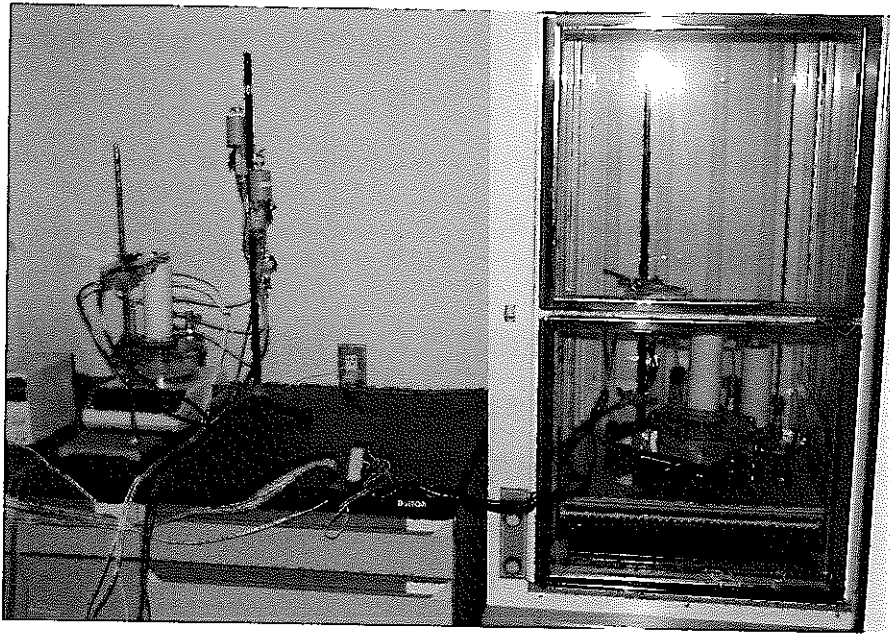
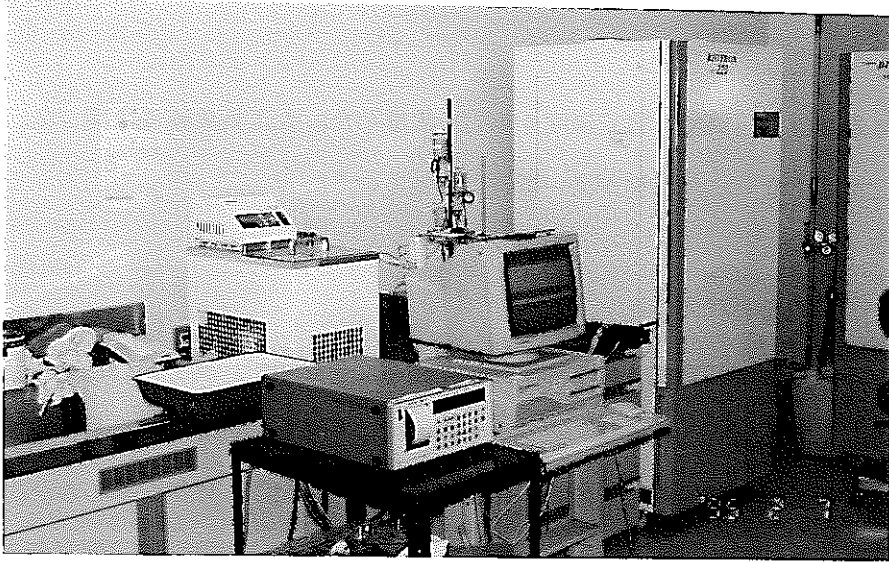


図 - 2. 3. 53 実験装置・人工気象装置のレイアウト写真

(v) 環境設定

実験は人工気象装置を用いて、設定温度40℃で実施した。人工気象装置は図-2.3.53に示すように2重構造となり、保温性が高い構造となっている。

(4) 実験結果

(i) 温度・湿度・蒸発量の経時変化

図-2.3.54、55に温度・湿度・蒸発量の経時変化を示す。30時間経過後はL3、L8共に温度が一定し、しかも対をなす2個のセンサーの温度は一致している。蒸発量は時間と共に低下している。L8では42時間経過時に蒸発量が突然増加しているがこれは供試体の台が約3mm下がってしまい、センサーとの距離が大きくなってしまったため、台を元に戻したら蒸発量が上がった。L8では蒸発量の経時的減少の原因の一つにセンサー位置の変化が挙げられる。本ケースにおいては3mmのセンサー位置の違いが蒸発量計測に大きな影響を与えていることがわかる。

L3、L8共に60時間経過後には定常に達していることが図から判断できる。この時の蒸発量はL3が $36\text{mg/sec/m}^2$ 、L8が $32\text{mg/sec/m}^2$ である。

(ii) 重量の経時変化

L3,L8の重量は、実験開始直前、および直後に計測し、その重量差から蒸発量を算定した。表-2.3.20に重量計測結果および蒸発量（重量計測からの蒸発量と温度・湿度計測からの蒸発量）を示す。重量計測から推定される蒸発量は温度・湿度計測からの蒸発量に比べて約2倍となっている。

表-2.3.20に重量計測結果および蒸発量

供試体	直前重量	直後重量	経過時間	蒸発量 (重量)	蒸発量 (温湿)
	g	g	sec	mg/sec/m <sup>2</sup>	mg/sec/m <sup>2</sup>
L3	2823.05	2786.00	251580	69.8	36
L8	2811.70	2777.60	251580	64.2	32

(iii) 体積含水率

図-2.3.38に体積含水率計測の鉛直方向分布を示す。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。

(5) 不飽和パラメーターの算定

(i) 不飽和パラメーターの同定解析時の境界条件

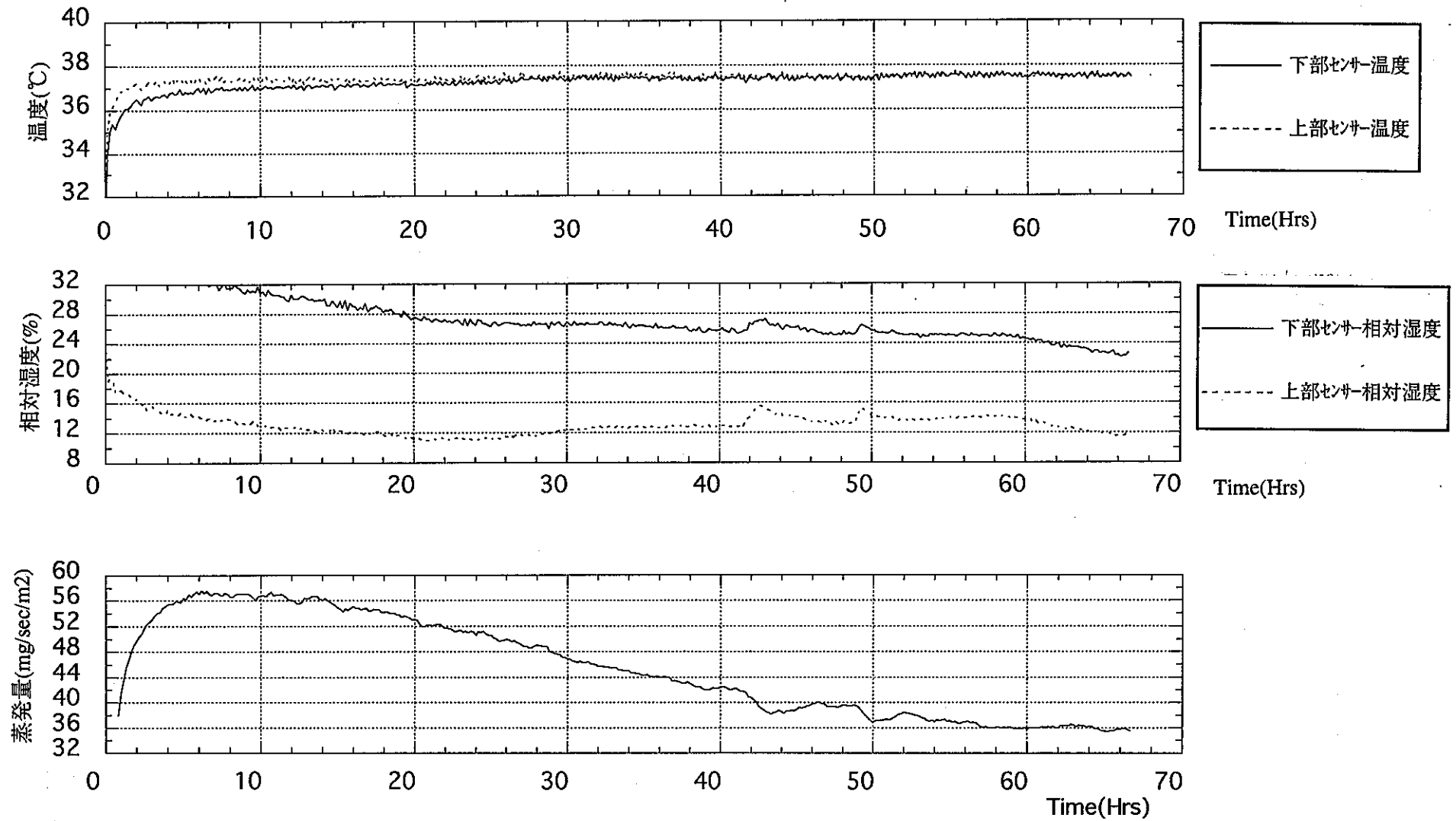


図 - 2. 3. 54 L3の温度・湿度・蒸発量の経時変化

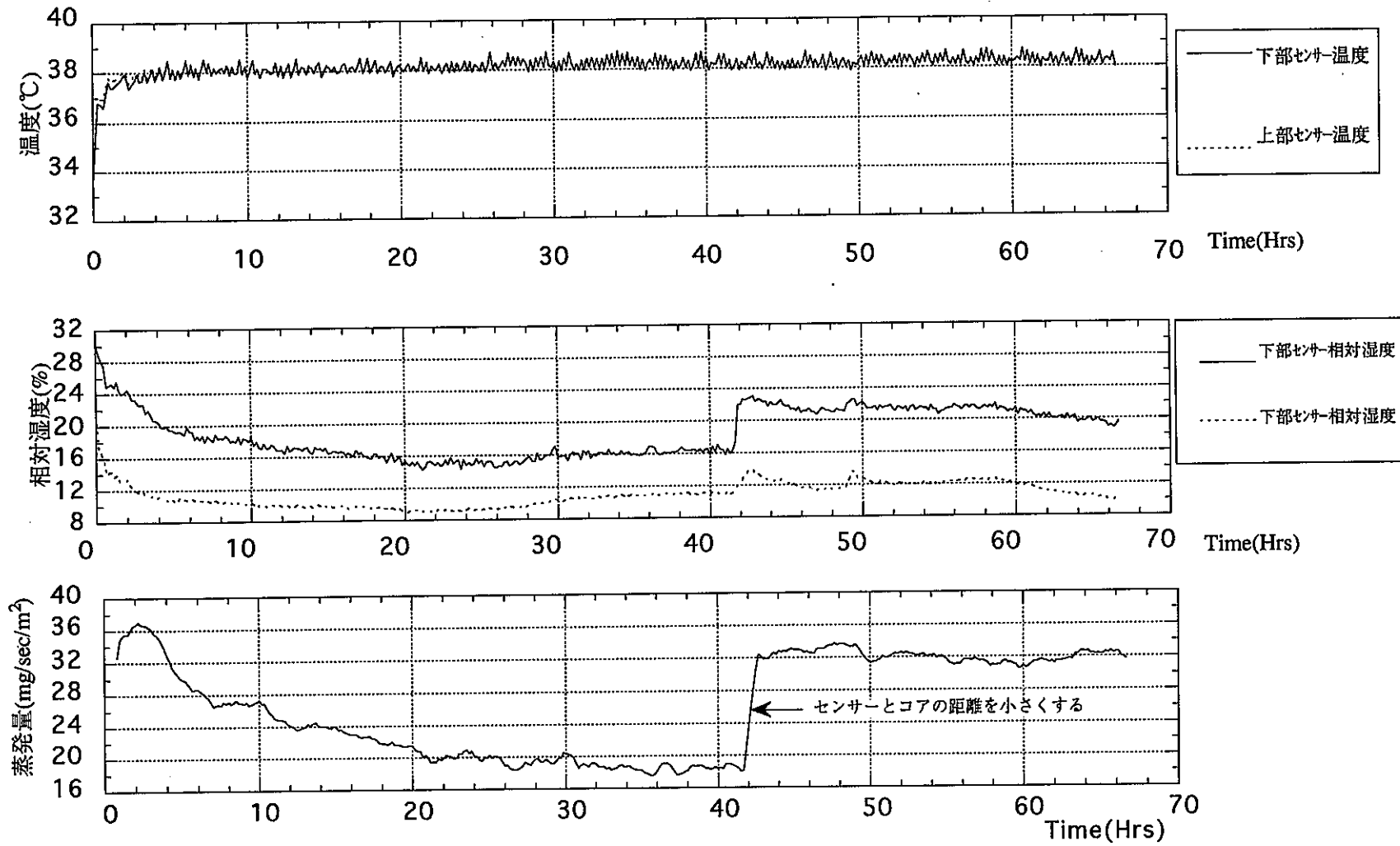


図 - 2. 3. 55 L8の温度・湿度・蒸発量の経時変化

コア下部の水位：0.5 cm（各供試体共通）

蒸発量：60mg/sec/m<sup>2</sup>

表 - 2. 3. 20 に示すように重量計測から推定される計測開始から終了までの平均的な蒸発量と温度・湿度計測に基づく定常と判断されたときの蒸発量では約2倍程度の違いがある。ここでも、標準砂、L1、L2 などと同様に電子天秤による重量計測に基づく蒸発量を境界条件として用いることとする。

L3、L8の温度・湿度計測からの蒸発量の経時変化を見ると、蒸発量は時間の経過と共に減少している。L3、L8に対しては、実験中連続的に重量計測することはできなかったが、天秤での重量計測も同様な傾向を示すものと考えられる。この減少量を蒸発量に定量的に反映させることは難しいが、少なくともこのような蒸発量の経時的減少がある場合に、表 - 2. 3. 20 に示す初期と終了時の重量差から単純に算出された蒸発量は、最終的な定常状態となった蒸発量よりも大きくなる。このため表 - 2. 3. 20 に示す重量差から単純に算出された蒸発量より小さい値を蒸発量として設定しておく必要がある。さらにL3よりL8のほうが蒸発量の経時的減少が小さいこと等を考え合わせ（実際の蒸発量は重量計測から算定される蒸発量からより小さい。実際の蒸発量と重量計測から算定される蒸発量の差はL8よりL3の方が大きくなる。）、電子天秤による重量計測に基づく初期と終了時の重量差から得られた蒸発量より小さな値としてL3、L8共通で60mg/sec/m<sup>2</sup>を同定解析の蒸発量とした。

## (ii) 不飽和パラメーターの同定結果

不飽和パラメーターの同定過程をL3については表 - 2. 3. 21及び図 - 2. 3. 56、L8については表 - 2. 3. 22及び図 - 2. 3. 57に示す。全計測点における計測値と解析値との差の二乗値の合計を、有効飽和度 $S_e$ 、体積含水率 $\theta$ それぞれについて $Er_{Se}$ 、 $Er_{\theta}$ で示している。誤差減少率は $Er_{Se}$ について算定している。算定方法は(式2. 2. 10)に示したとおりである。

表中判定・備考のSTOPは計算上透水マトリックスの桁落ちによる計算不能を示している。○は同定結果を示している。L3、L8の同定過程・結果について以下に示す。

### (L3)

供試体L3の同定過程・同定結果を表 - 2. 3. 17に示す。同定結果は $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.00025, 4.32)$ となった。同定過程および収束判定理由について以下に説明する。

①初期値 $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.004, 3.52)$ とした。

- ② 1回目から2回目は  $n$  に関する計算を実施している。
- ③ 2回目から3回目は  $\alpha$  に関する計算を実施している。
- ④ 3回目から4回目は  $n$  に関する計算を実施し、 $n$  の変化量0.2に対し二乗誤差変化率が1%を下回っていることから、 $n=4.32$ としている。
- ⑤ 4回目から13回目は  $\alpha$  に関する計算を実施し、 $\alpha=0.00025$ としている。
- ⑥ 14回目は  $\alpha$  に関し再度検討しているが、 $n=4.32$ とした9回目と二乗誤差はほとんど変わらず  $n=4.32$ で妥当であることを再確認している。
- ⑦ 15回目は9回目に対する  $\theta_r$  に関する計算を実施し、 $\theta_r=0.00$ としている。
- ⑧ 以上から9回目のパラメータを同定計算の解とした。

(L8)

供試体L8の同定過程・同定結果を表-2.3.3に示す。同定結果は  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.00023, 4.31)$  となった。同定過程および収束判定理由について以下に説明する。

- ① 初期値  $(\theta_r, \alpha, n) = (0.00, 0.0004, 4.22)$  とした。
- ② 1回目から9回目は  $\alpha$  に関する計算を実施し、 $\alpha=0.00023$ としている。
- ③ 10回目から19回目は  $n$  および  $\theta_r$  に関する計算を実施し、 $\theta_r=0.00$ 、 $n=4.31$ としている。
- ④ 以上から11回目のパラメータを同定計算の解とした。

表 - 2. 3. 21 パラメータ同定過程 (L3)

繰り返し回数	$\theta_r$	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_θ	Er_Se減少率 %	コメント
1	0.00	0.00400	3.52	1.976E-01	5.028E-03		STOP
2	0.00	0.00400	4.52	1.977E-01	5.030E-03		STOP
3	0.00	0.00010	4.52	1.967E-01	5.005E-03		
4	0.00	0.00010	4.32	1.964E-01	4.997E-03	-0.16	
5	0.00	0.00080	4.32	1.977E-01	5.030E-03		STOP
6	0.00	0.00050	4.32	1.977E-01	5.030E-03		STOP
7	0.00	0.00020	4.32	1.717E-01	4.367E-03	-12.60	
8	0.00	0.00030	4.32	1.977E-01	5.030E-03		STOP
9	0.00	0.00025	4.32	1.486E-01	3.781E-03	-13.42	○
10	0.00	0.00028	4.32	1.977E-01	5.030E-03		STOP
11	0.00	0.00027	4.32	1.977E-01	5.030E-03		STOP
12	0.00	0.00026	4.32	1.582E-01	4.024E-03	-7.87	
13	0.00	0.00024	4.32	1.495E-01	3.803E-03	-5.49	
14	0.00	0.00024	4.22	1.488E-01	3.784E-03	-0.49	
15	0.05	0.00025	4.32	3.199E-01	3.836E-03	115.09	

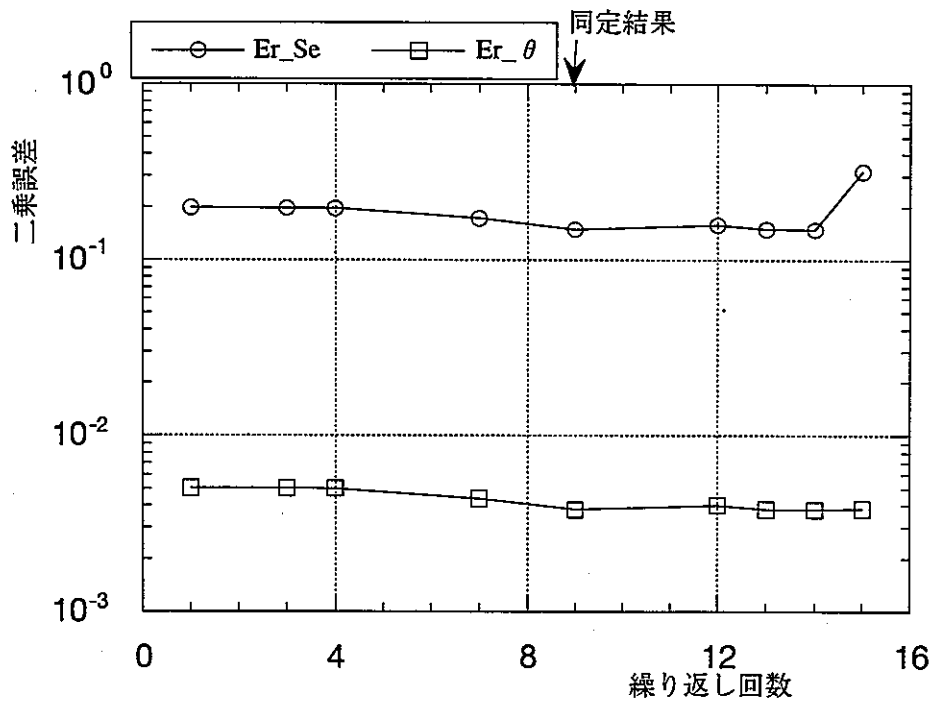


図 - 2. 3. 56 L3の同定過程における二乗誤差の低減状況



表 - 2. 3. 22 パラメータ同定過程 (L 8)

繰り返し回数	$\theta$ r	$\alpha$ cm-1	n	Er_Se	Er_ $\theta$	Er_Se減少率 %	コメント
1	0.00	0.000400	4.22	4.366E-01	1.601E-02		STOP
2	0.00	0.000300	4.22	4.366E-01	1.601E-02	0.00	STOP
3	0.00	0.000200	4.22	3.183E-01	1.167E-02	-27.08	
4	0.00	0.000190	4.22	3.420E-01	1.254E-02	7.44	
5	0.00	0.000210	4.22	2.917E-01	1.070E-02	-14.70	
6	0.00	0.000250	4.22	4.366E-01	1.601E-02		STOP
7	0.00	0.000230	4.22	2.529E-01	9.273E-03	-13.33	
8	0.00	0.000235	4.22	4.366E-01	1.601E-02		STOP
9	0.00	0.000233	4.22	2.614E-01	9.585E-03	-40.13	
10	0.00	0.000233	4.02	4.366E-01	1.601E-02		STOP
11	0.00	0.000233	4.12	4.366E-01	1.601E-02		STOP
12	0.00	0.000233	4.32	2.542E-01	9.320E-03	-2.76	
13	0.00	0.000230	4.32	2.528E-01	9.270E-03	-0.55	
14	0.00	0.000230	4.42	2.553E-01	9.361E-03	0.99	
15	0.00	0.000230	4.40	2.546E-01	9.338E-03	-0.25	
16	0.00	0.000230	4.35	2.533E-01	9.290E-03	-0.52	
17	0.01	0.000230	4.32	2.823E-01	9.300E-03	11.45	
18	0.00	0.000230	4.33	2.529E-01	9.275E-03	-10.41	
19	0.00	0.000230	4.31	2.526E-01	9.265E-03	-0.11	○

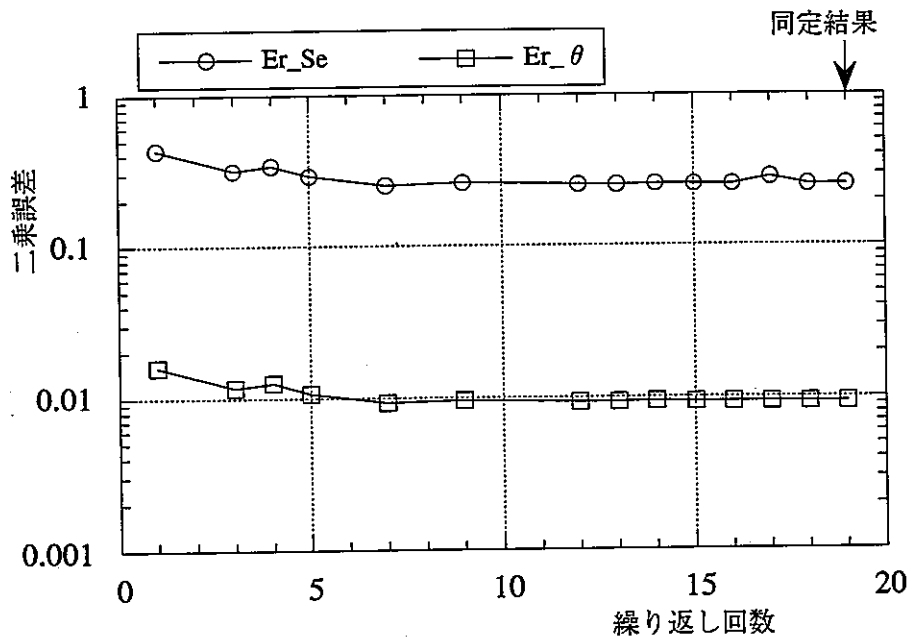


図 - 2. 3. 57 L 8 の同定過程における二乗誤差の低減状況

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を図 - 2. 3. 58 に示す。図 - 2. 3. 59、60 に体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果を示す。

体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果を見ると、L3、L8とも上方においては計測値と同定されたパラメータに基づく解析結果は良好な一致を示している。下部での体積含水率計測値は、鉛直方向の計測された体積含水率の分布傾向および解析結果の分布傾向に比べ小さくなっている。体積含水率が部分的に小さくなっている似たような現象は、L3、L8のみならずL1など他の試料でも確認されている。試料内部の不均質性の検討が必要と考えられる。

表 - 2. 3. 23 に境界条件（蒸発量）の異なる5種類の供試体の同定結果および蒸発量、飽和透水係数を示す。L4を除き透水係数もほぼ同じ供試体の蒸発量の違いに関する比較となっている。L1とL2、L3とL8はいずれも  $\alpha$ 、 $n$  はそれぞれにほぼ等しい値となっている。

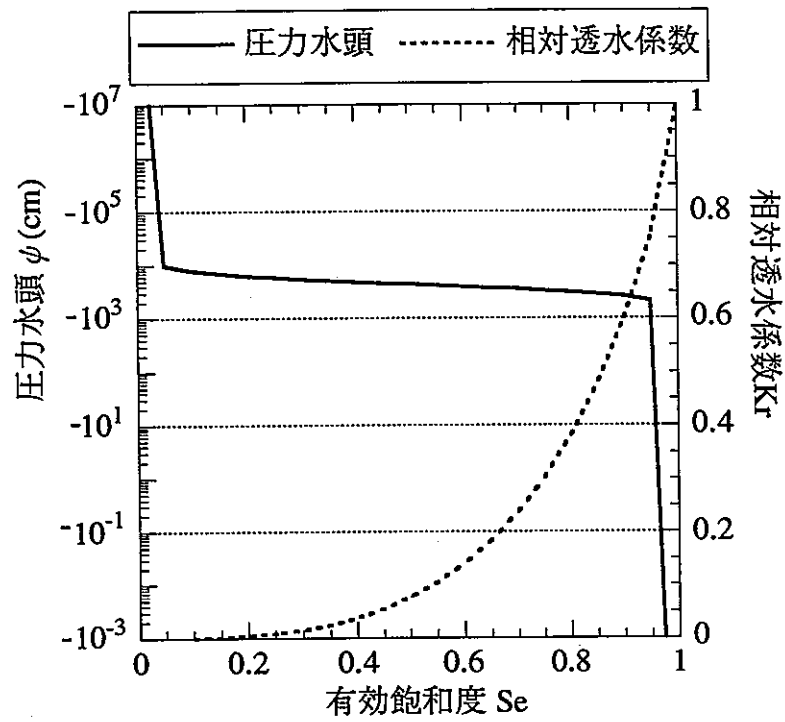
表 - 2. 3. 23 同定結果および蒸発量、飽和透水係数

	供試体高さ	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	蒸発量	飽和透水係数
	cm		cm-1		mg/sec/m <sup>2</sup>	cm/sec
L1	20.1	0.00	0.000406	2.69	30.0	1.8E-07
L2	20.0	0.00	0.00041	1.79	30.0	3.0E-07
L4	20.1	0.00	0.00014	3.62	30.0	5.1E-08
L3	20.1	0.00	0.00025	4.32	60.0	1.8E-07
L8	19.9	0.00	0.00023	4.31	60.0	1.6E-07

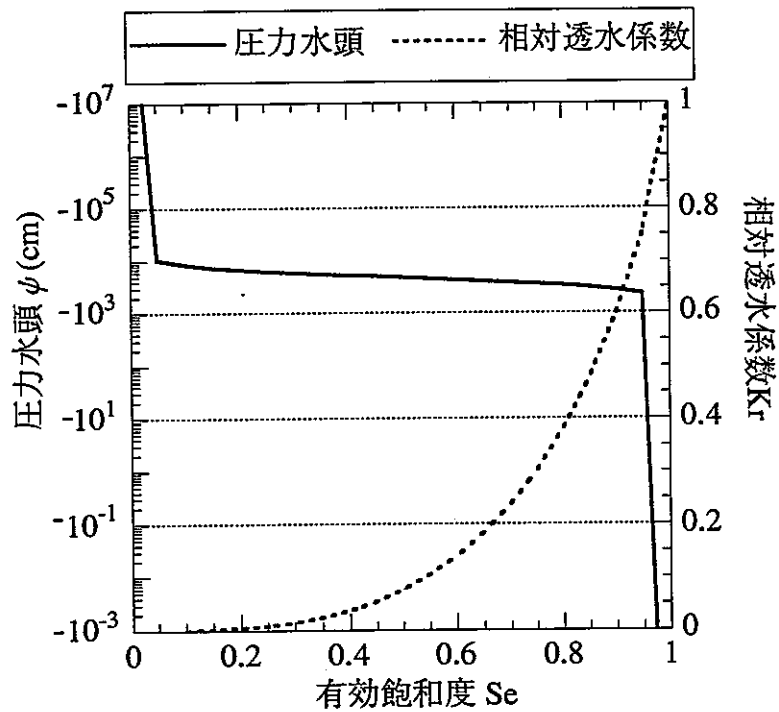
#### (6) 考察・まとめ

表 - 2. 3. 23 に各試料の蒸発量、飽和透水係数および同定結果を示している。L1、L2、L3、L8はの境界条件（蒸発量）以外はほぼ同条件の試料である。同定されたVG式のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  は境界条件の違いに対応するような  $\alpha$ 、 $n$  の値の違いが確認され、境界条件がパラメータ同定結果に影響を与えていることが推察される。

図 - 2. 3. 48、49及び図 - 2. 3. 59、60の下端から高さ15cmの圧力をみると、L3、L8は、L1、L2の約2倍の大きさの負の圧力水頭を示し、動水勾配が2倍となって蒸発量の違いに見合う流量が試料下方から上方に生じていることが確認される。上端の圧力水頭はL1、L2とL3、L8で顕著な差異は認められないが、これは高さ15cmから上端にかけては水分特性曲線（図 - 2. 3. 45、図 - 2. 3. 58）の傾いた（圧力水頭の変化に対し、有効飽和度の



L3の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.160, \alpha: 0.00025, n: 4.32$ )



L8の同定された  $\theta - \psi \cdot K_r$  関係  
 ( $\theta_r: 0.0, \theta_s: 0.192, \alpha: 0.00023, n: 4.31$ )

図 - 2. 3. 58 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

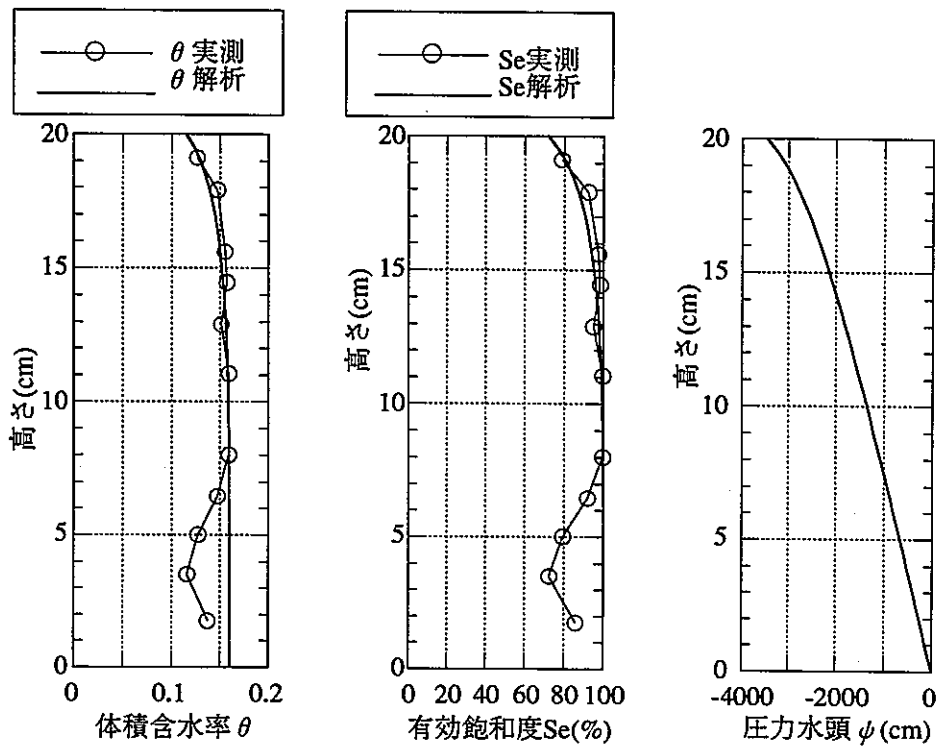


図 - 2. 3. 59 L3の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

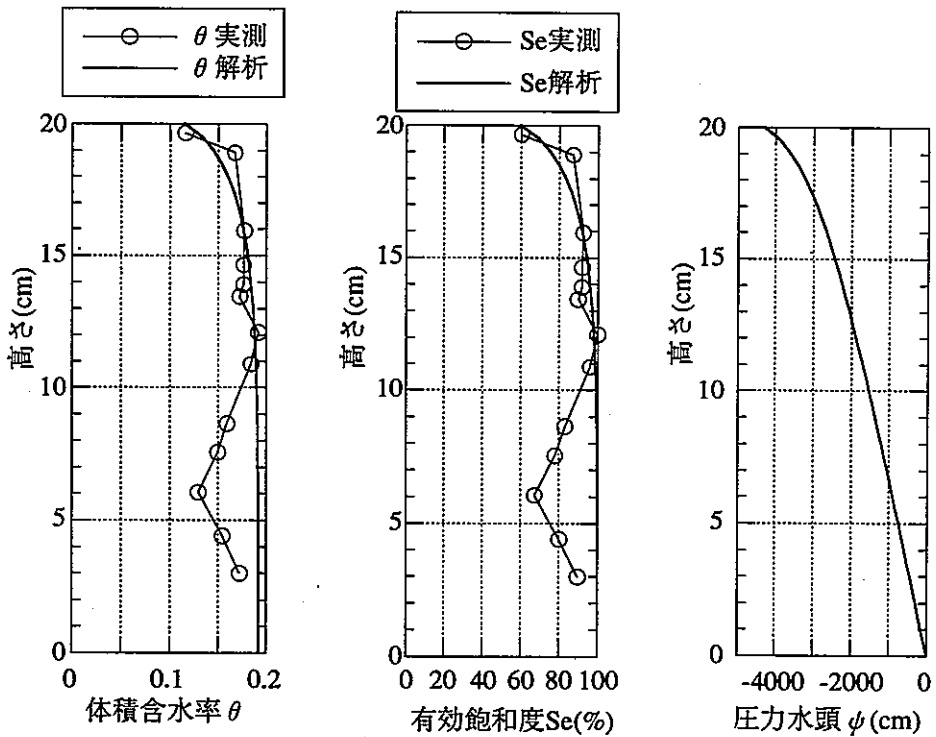


図 - 2. 3. 60 L8の体積含水率、有効飽和度、圧力水頭の鉛直分布の実験結果・同定結果

変化の大きい) 区間に相当し、小さな圧力の変化に対して有効飽和度変化が大きく、このため相対透水係数の違い (L 1、L 2のほうがL 3、L 8より相対透水係数が小さい) により蒸発量の違いに見合う流量が試料下方から上方に供給されていると考えられる。

L 1、L 2、L 3、L 8は同一岩種で、同じブロックから採取し、ほぼ等しい透水係数を有する試料であり、その不飽和特性もほぼ同じものと考えられる。不飽和特性はほぼ同じで体積含水率の鉛直方向の分布も同じものと仮定するならば、境界条件の違いは、VG式のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  の同定結果に影響を与えないといえる。

$\alpha$ 、 $n$  が同じで蒸発量 (試料内の流量) が変化する場合、内部の圧力分布が変化する。境界条件の違いが、VG式のパラメータ  $\alpha$ 、 $n$  の同定結果に影響を与えないということを証明するためには境界条件が違う場合に内部圧力も境界条件に応じて変化する、解析結果と一致することを示すことが一つの有効な手段であると考えられる。

以上、本実験により、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は、流出部境界条件 (蒸発量) の違いが不飽和特性同定結果に影響を与える可能性のあることが推察された。

## 2. 4 圧力計測手法の適用性検討

### 2. 4. 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（サクション）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。サイクロメーターはサイクロメトリック法（乾湿球法）とハイグロメトリック法（露点法）の2種類の方法で相対湿度が測定できる。両方とも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。

サイクロメトリック法では、熱電対の冷却を終えた後に、結合部（湿球）の水滴が蒸発していく過程の温度モニタリングする。これと水滴の形成されていないもう一つの熱電対（乾球）との温度差から、相対湿度を読み取る。

一方、ハイグロメトリック法は、水滴が形成される結合点で熱電対の冷却と、水蒸気の凝縮による潜熱の発生とが平衡するように制御し、そのときの温度つまり露点温度を求めるものである。この露点温度から相対湿度、さらに化学ポテンシャルが計算される。

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. 4. 2 実験

#### (1) 実験の目的

既存の負圧計（テンシオメーター、サイクロメーター）を供試体に設置し、圧力計測を実施する。その圧力計測値と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石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) 実験方法・手順

2. 3. 3 (2) に準じる。

#### (3) 実験条件

##### (i) 供試体

使用した供試体はL6,L4である。

(ii) 計測機器

実験に使用した主な機器は以下のとおりである。

①蒸発量計測用温度・湿度センサー3組 (センサー2個で1組)

②水位設定・供試体固定アクリル容器

形状は図-2.3.2に示す。

③小電子天秤；島津製作所 EB-3200H

秤量：3200g、読み取り限度：10mg、直線性：±20mg

④センサー支持スタンド2個

⑤データ計測・蒸発量演算用パソコン

PC98RA：AD変換ボード等付属

⑥テンシオメーター：標準砂実験と同一センサー使用

⑦サイクロメーター：WESCOR社製 HR-33T使用

(iii) レイアウト

実験装置の計測時のレイアウトを図-2.4.1およびその写真を図-2.4.2に示す。

(iv) 実験期間

蒸発量計測期間；第1回1995年2月 7日～10日 (66.7時間、供試体L6)

第2回1995年2月20日～27日 (163.2時間、供試体L4)

(v) 環境設定

実験は多少人の出入りのある恒温室で実施した。このため、装置はレイアウトを図-2.4.1に示すように段ボール箱で被い、気流や温度変化の計測への影響を極力抑えることとした。同室のエアコン設定温度は20℃とした。

(4) 実験の方法・留意点

2.3.3および2.3.4との重複を避けるためここではセンサーの取付けに限り述べる。

(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6cm (PA2)、9cm (PA1)、12cm (PA3) に取付けた。この位置はL1、L2の同定解析の結果 (図-2.3.41、42)、高さ12cmで約-1000cm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 (-1000cm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) 12cmとして設置した。

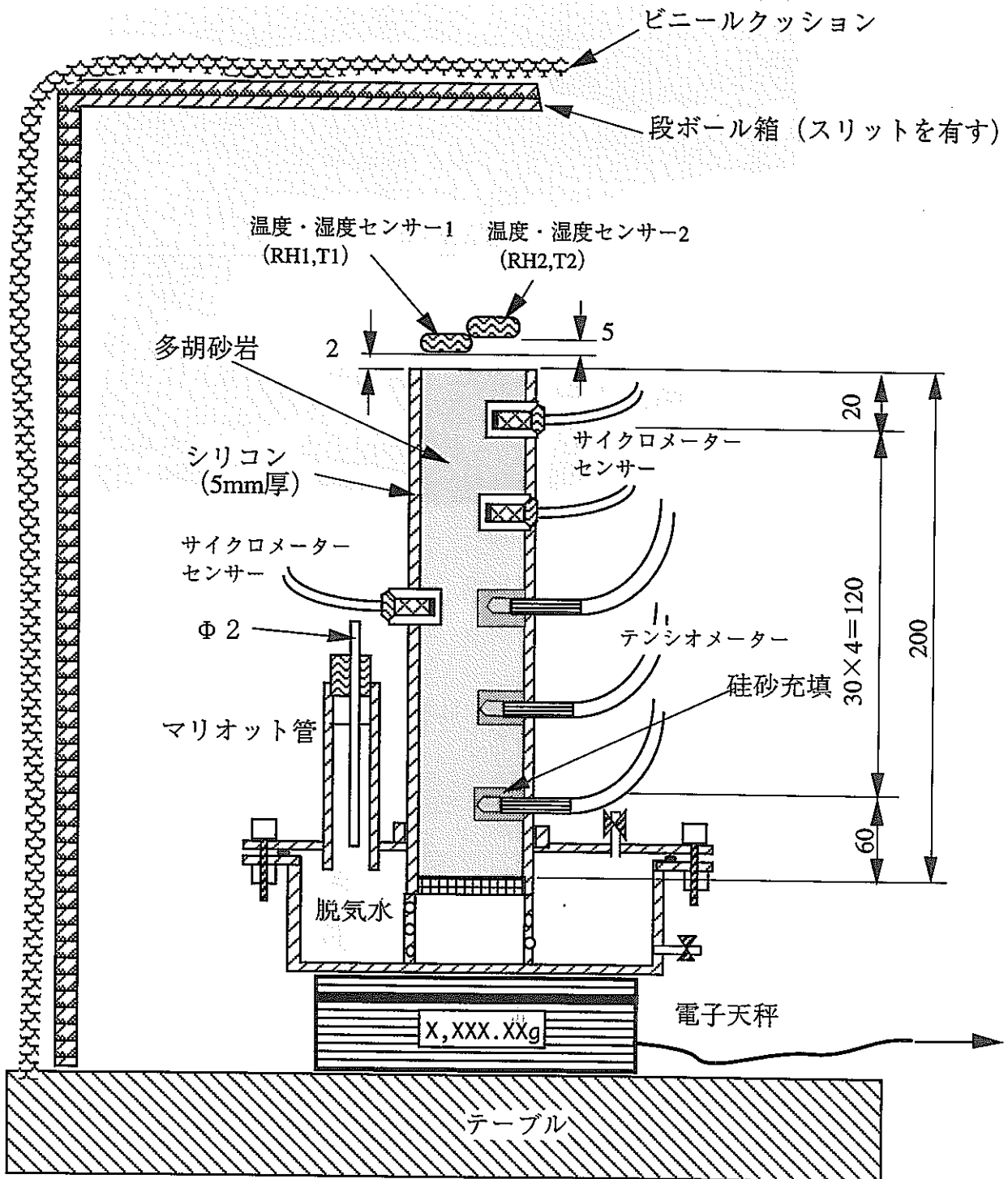


図 - 2. 4. 1 圧力計測実験概要



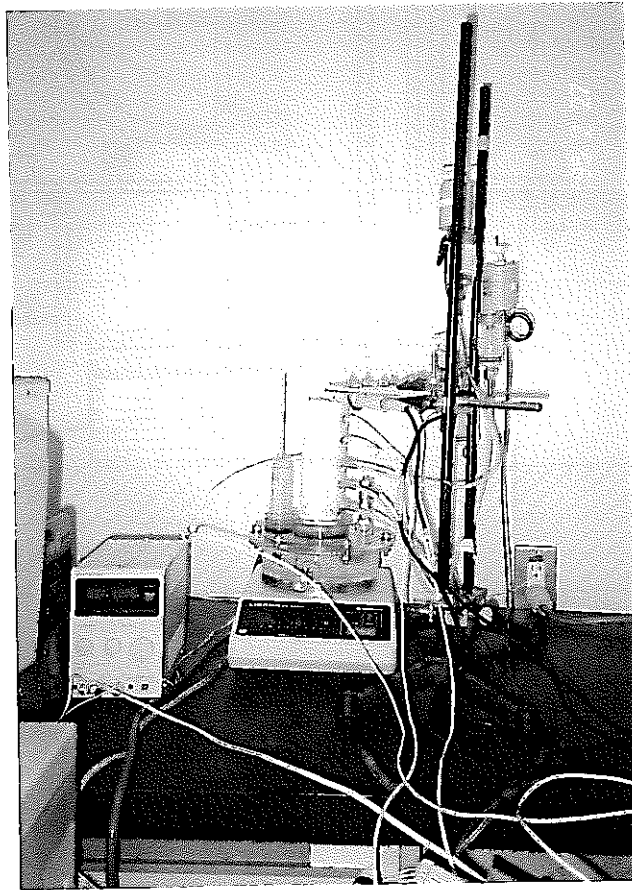
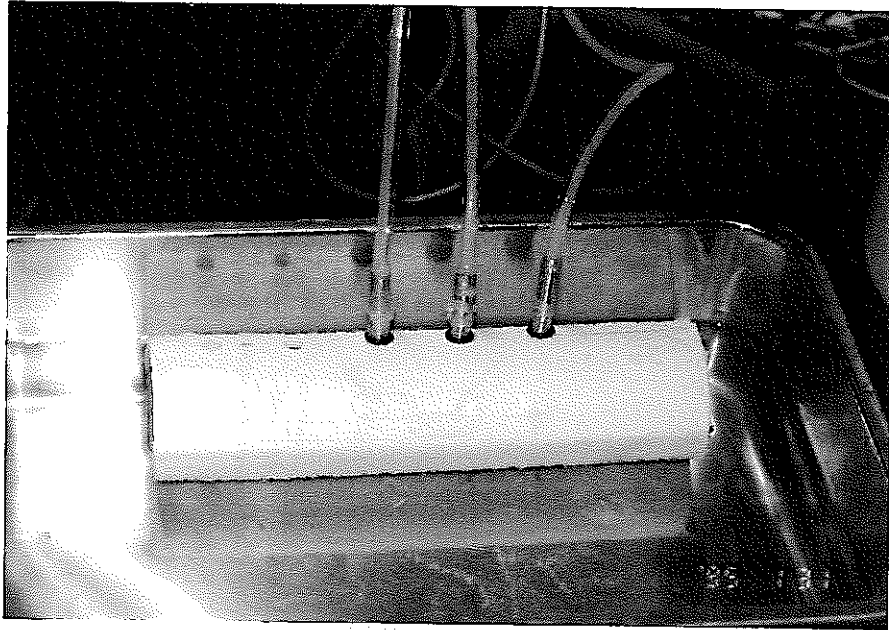


図 - 2. 4. 2 実験装置の計測状況写真

- テンシオメーターのポーラスカップと岩石の密着性を高めるために細粒珪砂を充填し、その中にポーラスカップを挿入した。
- テンシオメーターにはOリングを取付け、さらにシリコンでコア側部のシリコンと一体化、気密化させる。テンシオメーター設置時の写真を図 - 2. 4. 2 に示す。

(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 L 1、L 2 の同定解析の結果 (図 - 2. 3. 48、49)、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、SC 1、SC 2、SC 3 とする。
- サイクロメーターは濡らさないように留意して供試体コアとシリコンで一体化させる。
- サイクロメーターのコードは比較的堅いためセンサー部がコアから離脱しやすい。センサーの離脱防止対策としてセンサーコードを固定しておいた。

図 - 2. 4. 3 にサイクロメーターの写真を示す。

(5) 実験結果

実験結果は、L 6 は途中センサーの離脱により中断したため、以降 L 4 に関して説明する。

(i) 蒸発量と重量計測

蒸発量と重量計測結果は図 - 2. 3. 32、36 に示す。計測結果の内容については 2. 3. 3 (4) (i) (ii) に記載している。

(ii) 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. 4. 4 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 (図 - 2. 4. 4) 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。

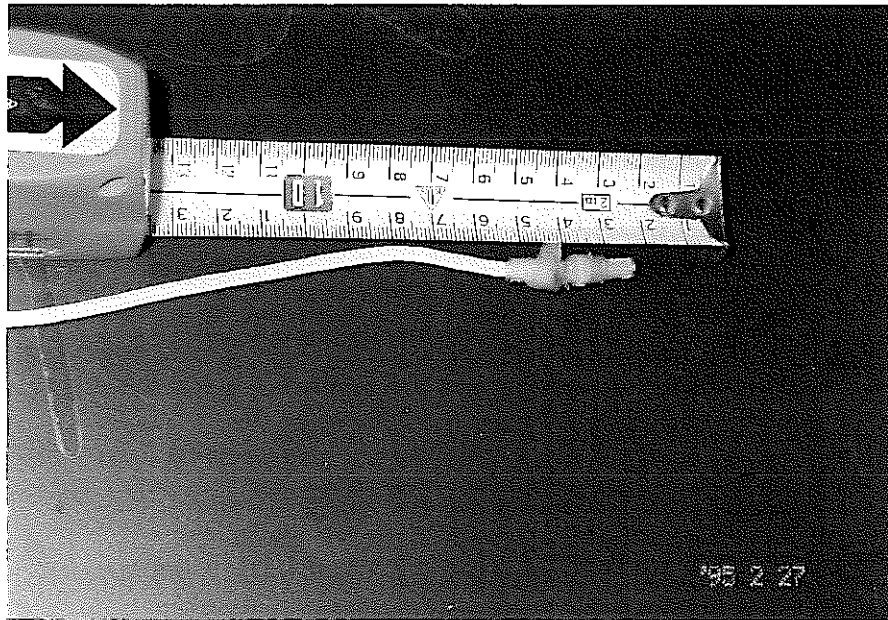
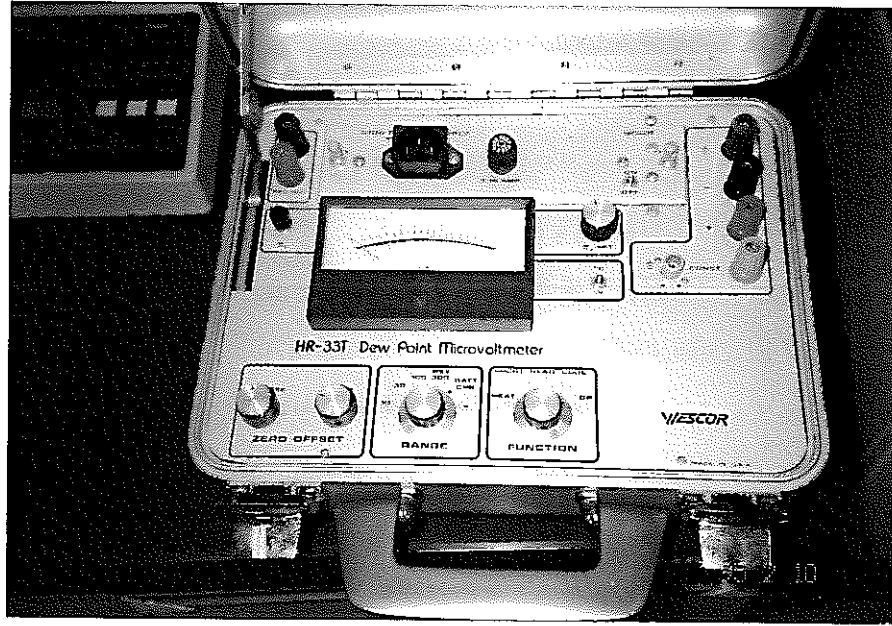
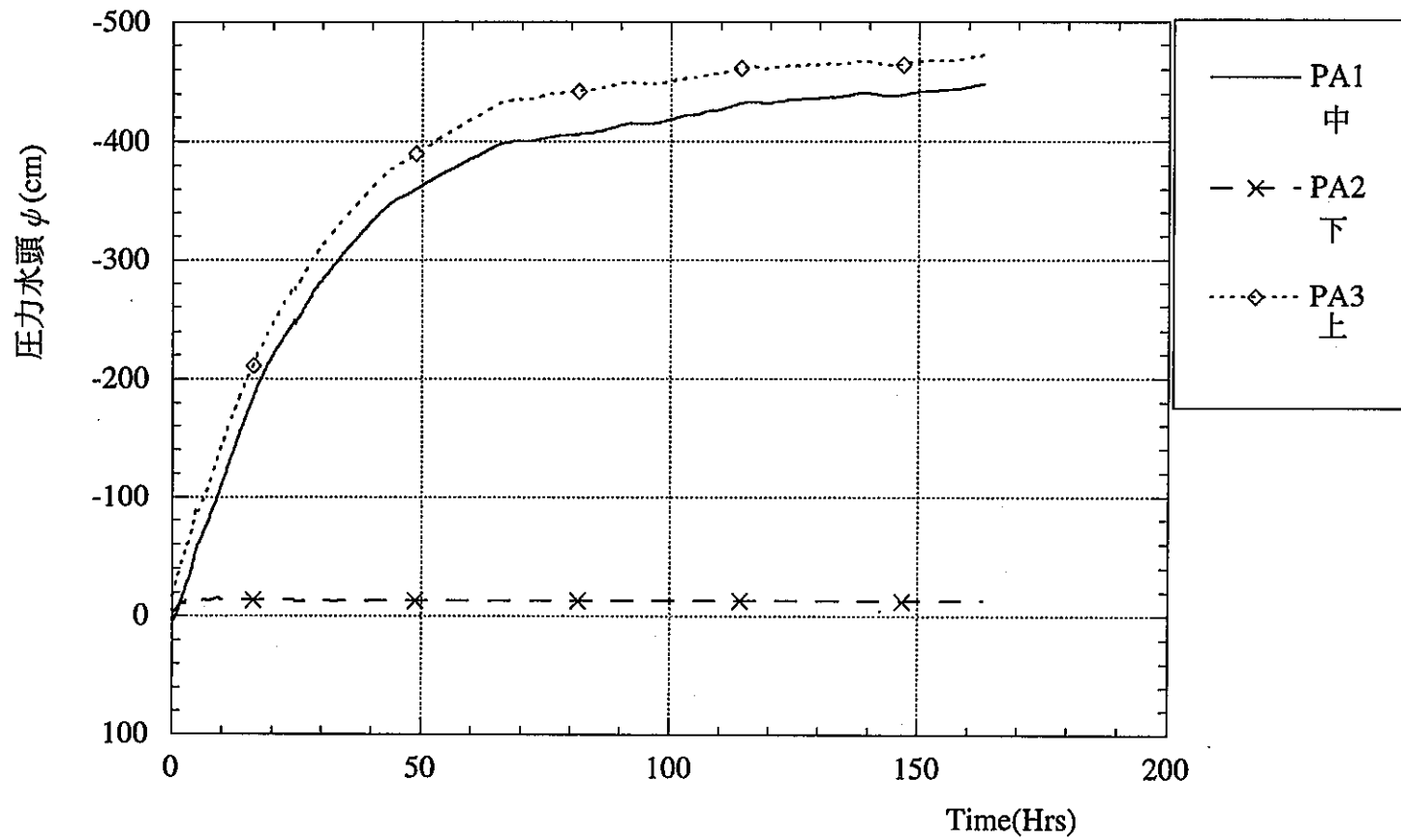


図 - 2. 4. 3 サイクロメーターの写真

図 - 2 . 4 . 4 L4のテンソメーターによる圧力水頭  $\psi$  経時変化

160時間目における圧力水頭 $\psi$ は

9cm : -445cm

12cm : -469cm

を示している。

(iii) 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-2.4.5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-2.4.1のようにまとめられる。

表-2.4.1 サイクロメーターによる計測結果

センサー	$\pi$ 値	温度 ( $^{\circ}$ C)	露点法			サイクロメトリック法		
			( $\mu$ V)	(bar)	(cm)	( $\mu$ V)	(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 ( $\mu$ V)  $\div$  0.75 = -bar

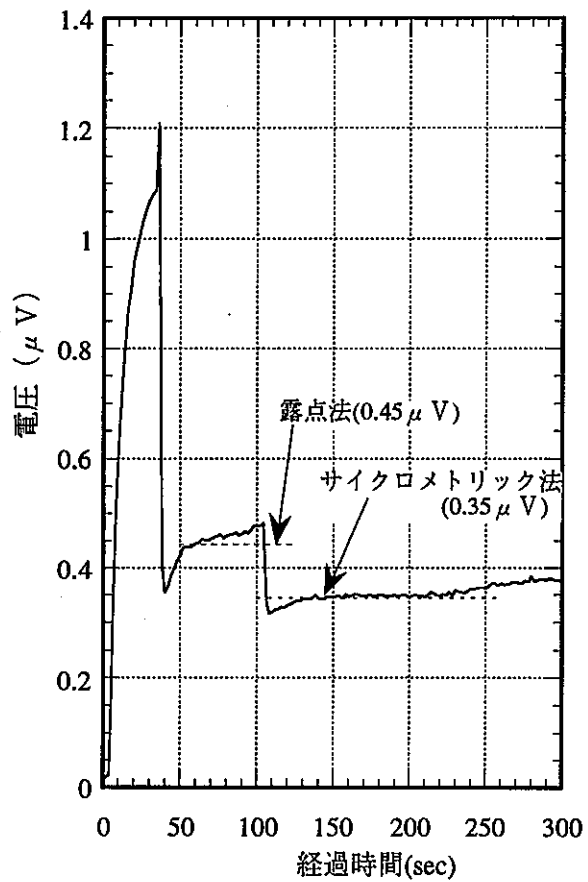
※ サイクロメトリック法 : 読み取り値 ( $\mu$ V)  $\div$  (0.325 + 0.027 $\times$ 温度) = -bar

(6) 考察

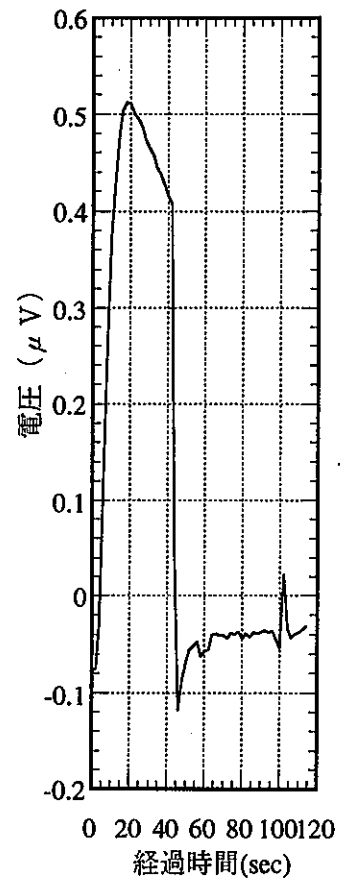
(i) 圧力計測の適用性

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、今回細粒珪砂を埋め戻しに用い、珪砂でポーラスカップと岩石の隙間を密着させた。これは珪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。珪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。

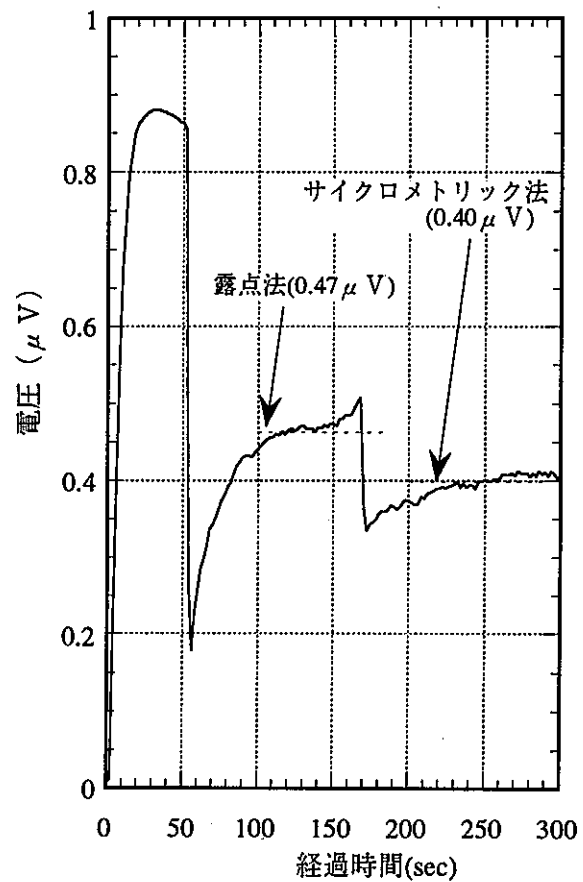
真の圧力は不明であり、計測値の妥当性を評価することはできないが、経時変化を見ると連続的な変化を示し、少なくともセンサー位置の上下関係に関してそれほど矛盾のある計測値は示しておらず、



(a) SC 1 (試料下端より12cm)



(b) SC 2 (試料下端より15cm)



(c) SC 3 (試料下端より18cm)

図-2.4.5 サイクロメーターによる電圧計測結果

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が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-2.4.6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-8cm/sec）を乗じ蒸発量に換算した結果が表-2.4.2である。この表から計測された蒸発量（30mg/sec/m<sup>2</sup>）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。

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-2.4.6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-8cm/sec)を乗じ蒸発量に換算した結果が下の表である。この表から計測された蒸発量(30mg/sec/m<sup>2</sup>)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。



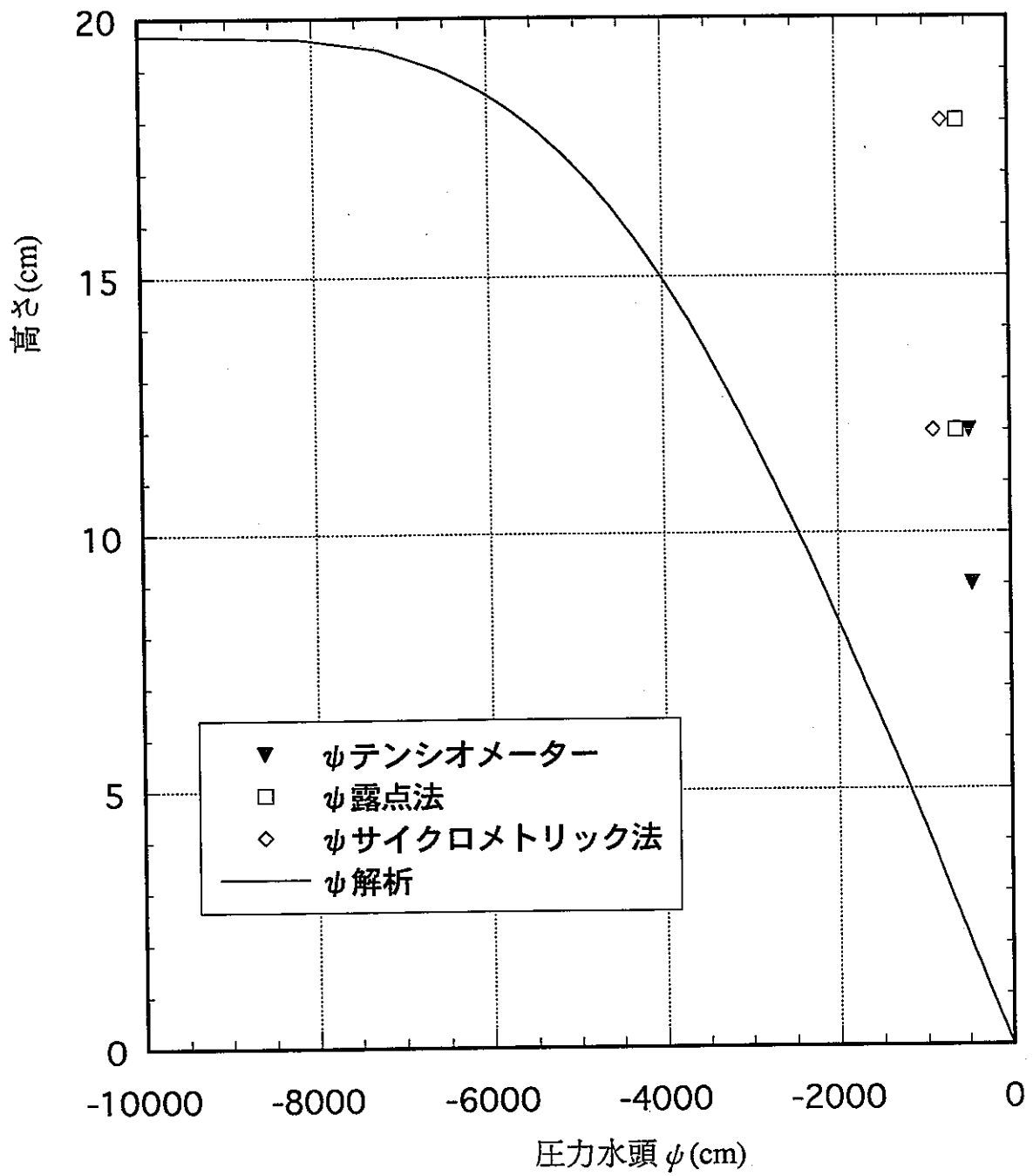


図 - 2. 4. 6 L4 の同定解析と計測の圧力比較

表 - 2. 4. 2 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		mg/sec/m <sup>2</sup>
デジタイザー	-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。

## 2. 5 考察

ここでは、本章を通じての成果に基づき、以下の2点について検討した。

- ①蒸発量、VG式パラメータ $\alpha$ 、 $n$ 、透水係数の体積含水率に与える影響
- ②コア内の不均質性が及ぼす体積含水率への影響

### 2. 5. 1 蒸発量、VG式パラメータ $\alpha$ 、 $n$ 、透水係数の体積含水率に与える影響

今回の検討で取り扱った各パラメーターの試料内部の体積含水率分布に関して感度解析的な検討を行った。目的は今回のVG式に基づく1次元飽和不飽和浸透現象において各パラメーターの影響度等を把握しておくことにある。

検討はL1、L2で得られたVG式のパラメータを基に、条件を設定した。検討した条件は以下の8ケースである。対象物の長さは一律20cmとした。1次元定常解析であるため20cmより短い試料に対する検討は20cmでの解析結果を参照すれば良いことになる。

表 - 2. 5. 1 解析条件

	透水係数 $K_s$	蒸発量	$\alpha$	$n$
	cm/sec	mg/sec/m <sup>2</sup>	cm-1	
CASE-1	2.00E-07	30	0.000040	2.5
CASE-2	2.00E-07	15	0.000040	2.5
CASE-3	2.00E-07	32	0.000040	2.5
CASE-4	2.00E-07	30	0.000042	2.5
CASE-5	2.00E-07	30	0.000038	2.5
CASE-6	2.00E-07	30	0.000040	2.6
CASE-7	2.00E-07	30	0.000040	2.4
CASE-8	2.00E-06	30	0.000040	2.5

基本条件としては上の表に示すCASE-1とした。図 - 2. 5. 1 にCASE-1に対し蒸発量、 $\alpha$ 、 $n$ 、透水係数 $K_s$ を変化させた場合の体積含水率の鉛直分布を示している。

#### (1) 蒸発量 $E_v$

蒸発量を変えると体積含水率が大きく変わってくることが図から読み取れる。蒸発量32 mg/sec/m<sup>2</sup>は、本条件で計算可能な最大蒸発量に相当する。これは供試体上端での相対透水係数が小さくなり過ぎ数値計算上で透水係数=0となってしまうためである。15 mg/sec/m<sup>2</sup>程度の蒸発量で

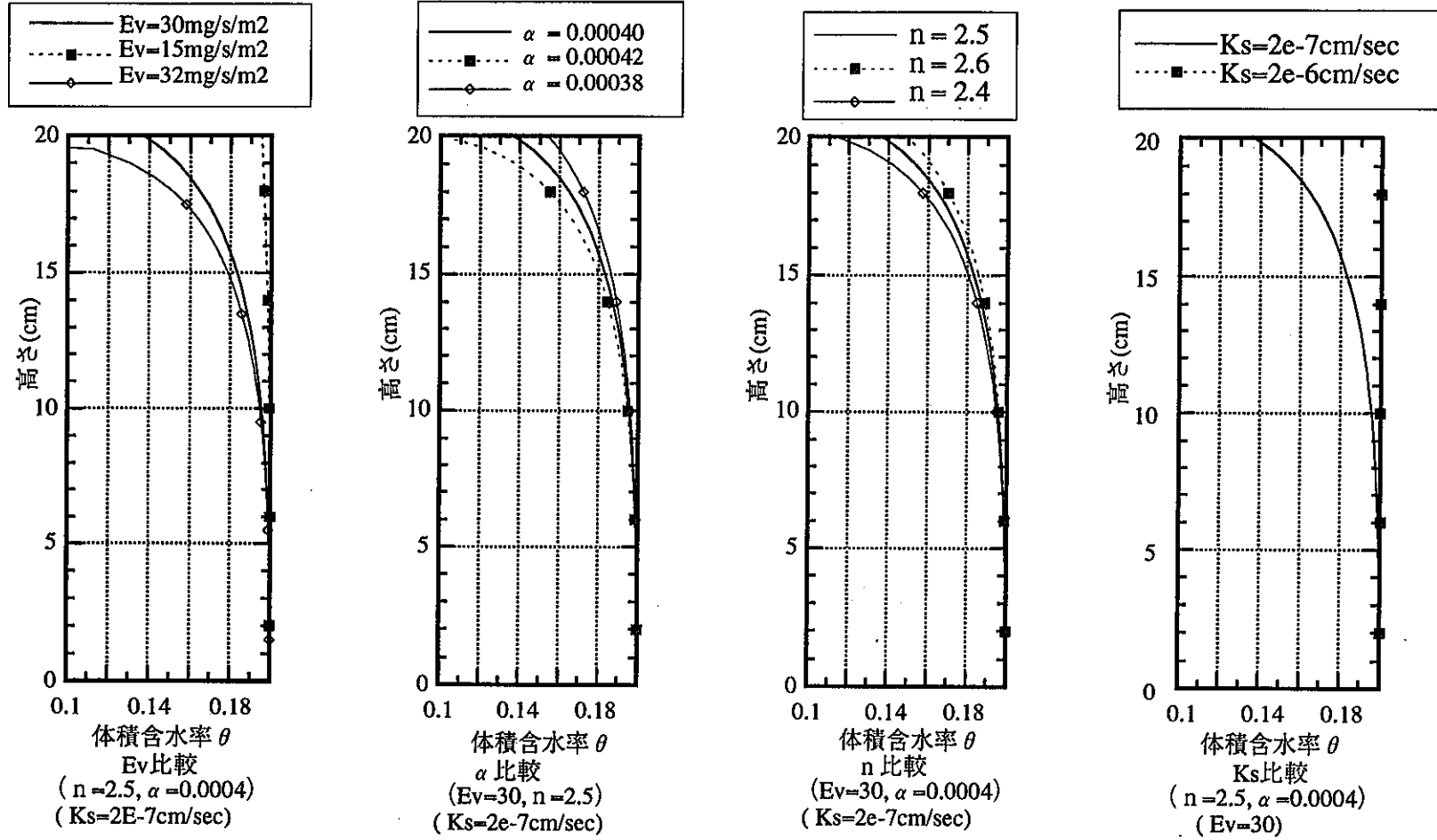


図 - 2. 5. 1 蒸発量、 $\alpha$ 、 $n$ 、透水係数 $Ks$ を変化させた場合の体積含水率の鉛直分布

は体積含水率の鉛直方向の分布にあまり変化が認められず、今回の手法で不飽和パラメーターを同定する場合計測された蒸発量が大きい方が体積含水率分布の特徴が把握しやすく、同定精度がよくなることがわかる。

上方ほど体積含水率の差が大きく、試料長さが長いほど同定精度は高まるであろうことが推察される。

透水係数、不飽和特性が同じで、蒸発量を増やした場合、ある量から水分の供給が十分になされなくなり、本ケースでいえば蒸発量  $32 \text{ mg/sec/m}^2$  以上の蒸発量は発生しないことになる。しかし今回の実験では、試料 L 3、L 8 で  $60 \text{ mg/sec/m}^2$  もの蒸発量が記録されており、例えば水蒸気移動など、浸透以外のメカニズムで水分移動が生じていることが考えられる。

#### (2) $\alpha$

$\alpha$  が有効数字 2 桁の場合の下1桁の値が 2 変化した場合の体積含水率の変化を示しているが、その影響は上端に顕著で、有意な変化は上方 5 cm に限られている。上方ほど体積含水率の差が大きく、試料長さが長いほど同定精度は高まるであろうことが推察される。

#### (3) $n$

$n$  が有効数字 2 桁の場合の下1桁の値が 1 変化した場合の体積含水率の変化を示している。体積含水率に与える影響としては、その影響は上端に顕著で、有意な変化は上方 5 cm に限られている。上方ほど体積含水率の差が大きく、試料長さが長いほど同定精度は高まるであろうことが推察される。

#### (4) 透水係数 $K_s$

透水係数  $K_s$  が 1 オーダー変化した場合の体積含水率の変化を示している。1 オーダー大きくなると体積含水率は鉛直方向にほとんど変化しなくなる。このことは、同一蒸発量・同一不飽和特性で透水係数が異なる場合、体積含水率の鉛直方向分布は鉛直方向にほぼ一定値となり、不飽和特性を同定できないケースが生じうることを示している。

### 2. 5. 2 コア内の不均質性が及ぼす体積含水率への影響

2. 3. 4 (5) で指摘したように、計測された体積含水率には部分的に小さい箇所が見受けられる。体積含水率の分布は理想的には、鉛直下方から上方に減少するものと考えられる。しかし、今回の計測では表 - 2. 5. 2 で示すように、下方でも含水率の小さい箇所（特にアンダーライン）がみられた。この原因のひとつにコア内の不均質性が考えられる。このため、コア内の不均質性について、単位体積重量に着目し、以下の検討を実施した。

表 - 2. 5. 2 L8,L3,L6における体積含水率  $\theta$  の鉛直分布

L8	高さ cm	$\theta$	L3	高さ cm	$\theta$	L6	高さ cm	$\theta$
	3.00	0.172		1.76	0.137		1.85	0.140
	4.40	0.154		3.51	0.116		3.75	0.132
	6.05	0.129		5.01	0.127		6.25	0.106
	7.55	0.149		6.46	0.147		8.85	0.139
	8.65	0.159		8.01	0.159		10.35	0.133
	10.90	0.184		11.06	0.159		11.80	0.130
	12.10	0.191		12.91	0.151		13.30	0.127
	13.45	0.172		14.46	0.157		14.15	0.133
	13.90	0.176		15.61	0.155		15.50	0.131
	14.65	0.176		17.91	0.147		17.60	0.142
	15.95	0.177		19.11	0.126		19.10	0.143
	18.90	0.167						
	19.65	0.116						

(1) 破断した各小片の体積含水率の算定方法

破断した各小片の体積含水率は次式により算定される。この式は、コアにおける乾燥単位体積重量と破断した各小片の乾燥単位体積重量が等しいという前提に導かれている。

$$\theta = \frac{(w - w_d)}{v} = \frac{(w - w_d) \cdot W_d}{(W_w - W_w') \cdot w_d} = \frac{(w - w_d)}{w_d} \cdot \gamma_d \quad (\text{式 2. 5. 1})$$

$$\gamma_d = \frac{W_d}{(W_w - W_w')} \quad (\text{式 2. 5. 2})$$

$$v = \frac{w_d}{\gamma_d}, \left( \frac{w_d}{\gamma_{ds}} \right) \quad (\text{式 2. 5. 3})$$

ここに、 $\theta$ ；破断した小片の体積含水率、 $W_w$ ；コアの飽和重量、 $W_w'$ ；コアの水中重量、 $w_d$ ；コアの乾燥重量、 $w$ ；破断した小片の破断直後の重量、 $w_d$ ；破断した小片の乾燥重量、 $\gamma_d$ ；コアの乾燥単位体積重量、 $v$ ；破断した小片の体積、 $\gamma_{ds}$ ；破断した小片の乾燥単位体積重量である。破断した小片の乾燥単位体積重量  $\gamma_{ds}$  が把握されているならば、正確な小片の体積は上式のカッコで示したものとなる。

(2) 検討

破断した各小片の体積含水率の算定方法として (式 2. 5. 1) で算定式を示したが、乾燥単位体積重量がコアのものと、破断した各小片のもので異なる (不均質性が存在する場合) 場合には、算定される体積含水率は乾燥単位体積重量の差に比例して異なることとなる。そこで、破断した各小片の乾燥単位体積重量を計測した。計測結果を表 - 2. 5. 3 に示す。

表 - 2. 5. 3 破断した小片の乾燥単位体積重量

供試体	容器 No.	高さ (cm)	重量 (g)	体積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> )
L8	114	6.05	76.00	32.90	2.31
L8	33	18.90	101.78	43.70	2.33
L3	30	3.51	53.30	24.00	2.22
L3	105	5.01	43.83	17.90	2.45
L3	110	11.06	152.20	67.00	2.27
L6	100	6.25	103.93	44.50	2.34
L6	86	17.60	95.26	42.20	2.26

L8(6.05cm)の体積含水率は0.129であり、その上下の体積含水率（表 - 2. 5. 2）からは、0.15程度となることが想定される。L8(18.90cm)の体積含水率は0.167である。L8(18.90cm)はL8(6.05cm)より上方に位置するため、均質な岩石を対象とした場合理論的には体積含水率はL8(18.90cm)の方が小さいと考えられる。コアによる乾燥単位体積重量の1.163（=0.15/0.129）倍となることが考えられる。ここでL8(18.90cm)がL8(6.05cm)より大きな体積含水率を示している理由として乾燥単位体積重量の不均質が考えられる。しかしながら計測されたものはL8(6.05cm)では2.31 g/cm<sup>3</sup>、L8(18.90cm)では2.33 g/cm<sup>3</sup>であり、ほとんど差がない。

L3(3.51cm)、L3(5.01cm)における体積含水率はそれぞれ0.116、0.127で上下の体積含水率（表 - 2. 5. 2）と比較して小さい値を示している。上下の体積含水率（表 - 2. 5. 2）からは0.14程度となることが想定される。またこの2点より上位にあるL3(11.06cm)における体積含水率は0.167と大きな値を示している。これらの体積含水率のばらつきは乾燥単位体積重量の不均質に起因する場合を想定し各小片の乾燥単位体積重量を計測した結果が表 - 2. 5. 2に示すとおりである。L3(11.06cm)は体積含水率が大きい乾燥単位体積重量は下位の2点と変わらないか逆に小さい。

同様に、L6(6.25cm)では体積含水率0.106であり、その上下の体積含水率と比較すると、0.135程度となることが想定される。これが乾燥単位体積重量に起因するならば、L8(6.05cm)における乾燥単位体積重量はコアによる乾燥単位体積重量の1.274（=0.135/0.106）倍となることが考えられる。しかしながら計測されたものは2.34 g/cm<sup>3</sup>、L6(17.60cm)では2.26 g/cm<sup>3</sup>であり1.035（=2.34/2.26）倍、期待されるほどの差は認められない。

以上のことから、コア下方に生じた含水率の小さい箇所は、コア内部の乾燥単位体積重量の不均質性に起因したものでないと考えられることができる。

## 2. 6 今年度の成果と課題

### 2. 6. 1 今年度の成果

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。
- 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. 6. 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。

【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、Vol. 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3.1-1 には本研究のフロー図を示す。表3.1-1 には用いた供試体の一覧表を示す。

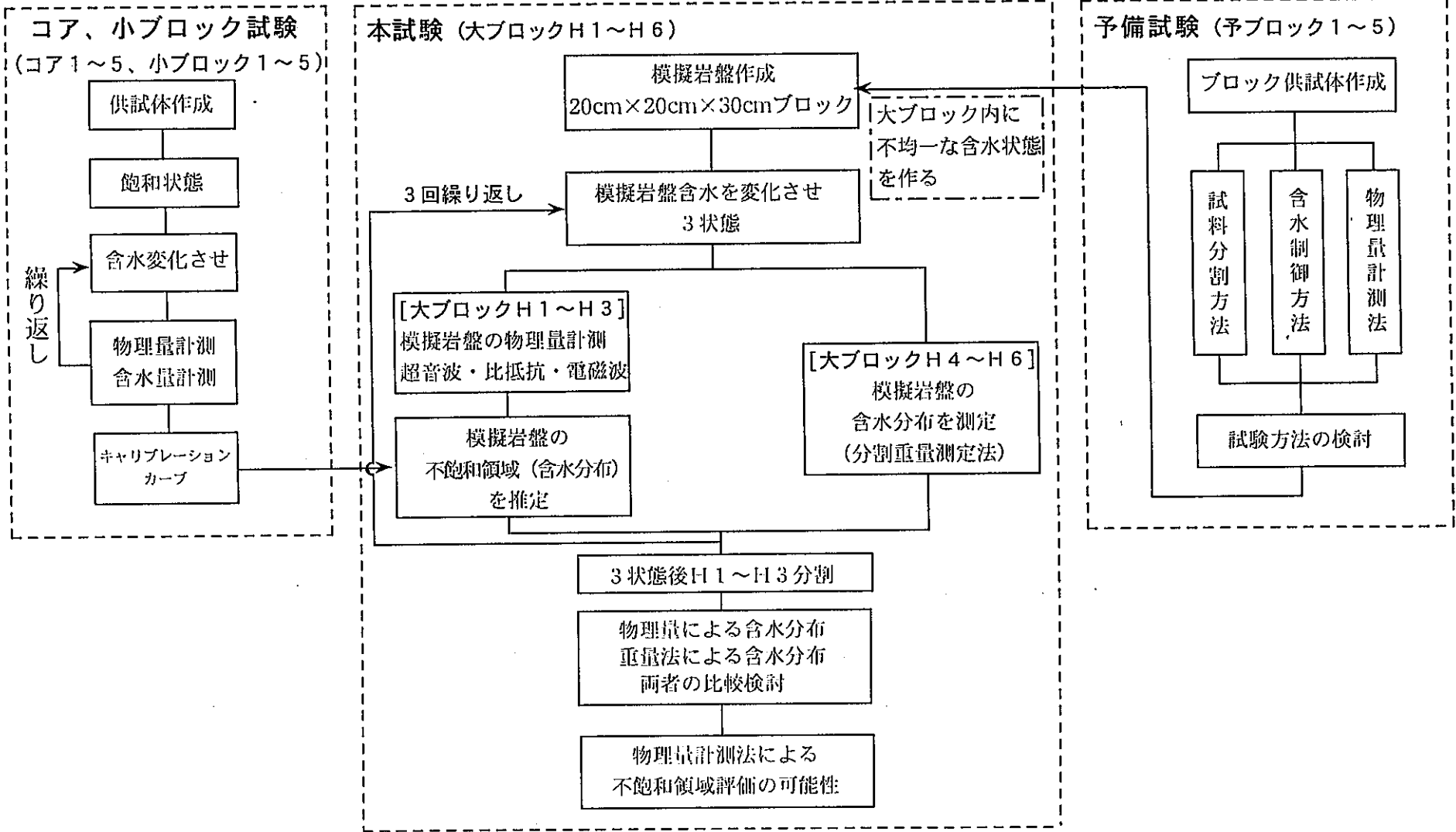


図3.1-1 研究の方法フロー図

表3.1-1 供試体の一覧表

供試体	測定内容	概略寸法 mm	体積 cm <sup>3</sup>	有効間 隙率%
コア1 コア2 コア3	超音波速度, 比抵抗 ~体積含水率 飽和度の関係	φ50×100	188.28 188.10 187.87	18.2 17.5 16.5
コア4 コア5	分割含水量測定	φ50×100	187.96 187.31	17.3* 20.7*
小ブロック1 小ブロック2 小ブロック3	電磁波速度(比誘電率) ~体積含水率 飽和度の関係	100×100×200	2018.75 2011.82 2021.66	18.0 15.6 21.3
小ブロック4 小ブロック5	分割含水量測定	100×100×200	2020.34 2019.15	23.9* 13.6*
予ブロック1 予ブロック2 予ブロック4 予ブロック5	予備試験, 物理量測定 予備試験, 含水制御 予備試験, 含水制御 予備試験, 含水制御	200×200×300	- - - -	- - - -
大ブロックH1 大ブロックH2 大ブロックH3	超音波速度測定ブロック 比抵抗測定ブロック 電磁波測定ブロック 状態3測定後 分割含水量測定	200×200×300	12,148.2 12,162.1 12,063.5	15.8* 16.3* 20.4*
大ブロックH4 大ブロックH5 大ブロックH6	分割含水量測定(状態1) 分割含水量測定(状態2) 分割含水量測定(状態3)	200×200×300	12,054.5 12,081.8 12,061.9	18.4* 17.2* 16.6*

\*) 分割試料の平均値を示す。

### 3. 2 コア供試体を用いた室内試験

#### 3. 2. 1 測定手順

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。また、測定手順は図3.2-1に示したとおりである。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。

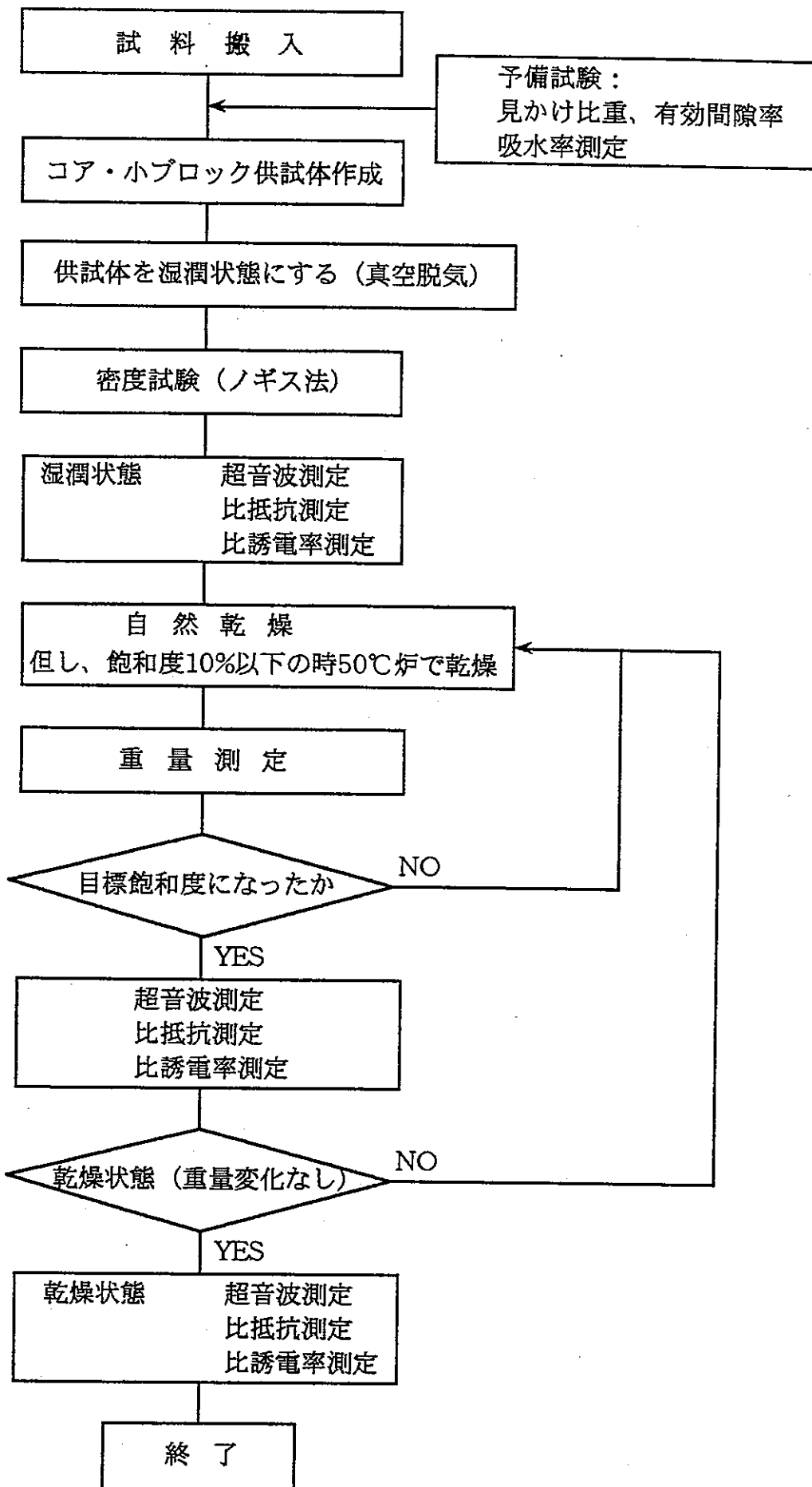


図3.2-1-コア供試体の測定手順フロー

### 3. 2. 2 超音波速度測定

#### (1) 供試体及び測定方法

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。供試体と超音波振動子との接触状態を良くするために、120#の砥石を装着した平面研削盤で供試体の上下両面を平行かつ平滑に研磨した。また、所定の含水量変化に対応する重量減少量の目安を得るために、コア供試体の近傍から採取した長さ約5cmのコア試料を用いて、見かけ比重・有効間隙率・吸水率の予備試験を実施した。

超音波速度測定試験は、物理探鉱技術協会「岩石試料の速度測定要綱」（1962年）に準拠して実施した。所定の測定状態で、縦波（P波）および横波（S波）の伝播速度の測定を行った。

具体的な試験方法は以下に示すとおりとした。

- ・コア供試体の両端面をそれぞれ発振側として、超音波の伝播時間を2回測定した。2回の測定結果が5%以上異なった場合、再測定を行うこととした。
- ・超音波の波形をフロッピーディスクに記録した。試験終了後にそれを再出力し、同一シリーズの波形を対比しながら初動を確認して超音波の伝播時間を読み取り、供試体を通過するのに要するP波（S波）の時間を測定して、供試体の長さより各々のP波（S波）伝播速度を算出した。
- ・各々の振動子については、各含水状態における測定条件（ゲインおよびレンジ）を同一とした。
- ・超音波速度を測定する際、振動子と供試体との接触不良を防ぐために約0.5kgf/cm<sup>2</sup>の圧力で圧着し、P波についてはさらにケラチンクリームを塗布した。一般的に、超音波振動子と供試体の間にはグリースあるいはワセリンを塗布するが、これらは電気絶縁性があり比抵抗の測定に支障があるため、導電性のあるケラチンクリーム（フクダ電子㈱製）を用いた。

#### (2) 測定装置

超音波伝播速度測定システムの概要は図3.2-2に示した。測定装置は応用地質㈱製ソニックビューア170（MODEL-5228）を用いた。振動子は応用地質㈱製P波用振動子（MODEL-5211, 63kHz）、S波用振動子（MODEL-5212, 33kHz）、富士セラミックス製P波用振動子（0.428×8, 400kHz）、S波用振動子（S0.428×8, 400kHz）の4種類とした。

表3.2-1には超音波速度測定機器一覧表を示す。



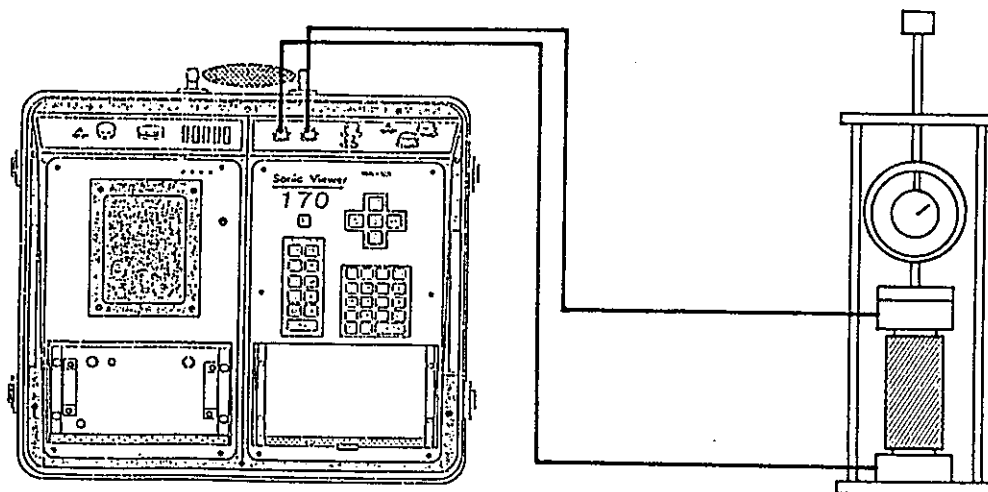


図3.2-2 超音波伝播速度測定システムの概要図

表3.2-1 超音波速度測定機器一覧表

名称およびメーカー	型式名	主な仕様
測定装置 ソニックビューア170 OYO	MODEL-5228	利得 2倍～1000倍 A/Dコンバーター 8ビット サンプリングレゾ 50, 100, 200, 500 1000, 2000 nsec レコード長 2 Kワード ディスクレット 3.5インチ, MS-DOS
振動子 OYO	MODEL-5211 (P波)	63KHz
	MODEL-5212 (S波)	33KHz
(株)富士ゼミックス	0.4Z8×8 (P波)	400KHz
	S0.4Z12×8 (S波)	400KHz

### (3) 測定結果

表3.2-2～表3.2-4 にコア供試体の含水変化に伴う超音波速度の測定結果一覧表を示す。図3.2-3～図3.2-5 にコア供試体別に体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係を示す。

飽和度100～90%の範囲で、飽和度の低下とともにP波速度がやや低下する傾向が認められる。これに対してS波速度では逆にやや上昇する傾向が明らかに認められる。飽和度10～90%付近の範囲ではいずれの供試体ともP波、S波ともにほぼ一定の速度となっている。飽和度5～10% (体積含水率1～4%付近) になるとP波およびS波速度ともにやや速度が低下する傾向を示すが、飽和度0～5%の部分ではP波速度およびS波速度ともに速度の上昇が認められる。

表3.2-2 超音波伝播速度測定結果一覧表 (コア1)

状態	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	超音波							
				OYO-P(63kHz)		OYO-S(33kHz)		FUJI-P(400kHz)		FUJI-S(400kHz)	
				時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)
1	436.35	99.24	18.03	27.6	3.65	52.0	1.94	26.8	3.75	51.2	1.97
2	433.14	89.86	16.33	28.2	3.57	50.4	2.00	27.6	3.65	52.8	1.91
3	428.58	76.53	13.91	28.4	3.54	49.8	2.02	28.0	3.59	50.4	2.00
4	426.24	69.69	12.66	28.2	3.57	50.4	2.00	28.0	3.59	52.8	1.91
5	421.37	55.45	10.08	28.2	3.57	50.0	2.01	28.2	3.57	48.8	2.06
6	417.78	44.96	8.17	28.4	3.54	50.8	1.98	28.2	3.57	50.4	2.00
7	415.23	37.50	6.81	28.4	3.54	51.0	1.97	28.4	3.54	51.6	1.95
8	413.20	31.57	5.74	28.6	3.52	51.4	1.96	28.4	3.54	52.8	1.91
9	410.47	23.59	4.29	28.8	3.49	49.8	2.02	28.4	3.54	52.4	1.92
10	407.36	14.50	2.63	29.0	3.47	52.2	1.93	28.4	3.54	50.8	1.98
11	405.90	10.17	1.86	29.2	3.45	49.4	2.04	29.2	3.45	52.8	1.91
12	405.37	8.68	1.58	29.6	3.40	50.6	1.99	29.8	3.38	52.8	1.91
13	405.10	7.89	1.43	30.0	3.35	52.0	1.94	30.0	3.35	54.2	1.86
14	404.73	6.81	1.24	30.8	3.27	53.0	1.90	31.4	3.20	54.4	1.85
15	404.34	5.67	1.03	29.2	3.45	52.2	1.93	30.4	3.31	54.0	1.86
16	404.26	5.44	0.99	29.2	3.45	49.0	2.05	29.8	3.38	52.8	1.91
17	404.09	4.94	0.90	29.6	3.40	49.0	2.05	29.6	3.40	54.8	1.84
18	403.90	4.38	0.80	29.6	3.40	50.6	1.99	29.6	3.40	54.4	1.85
19	403.51	3.24	0.59	29.6	3.40	49.4	2.04	29.4	3.42	55.6	1.81
20	403.35	2.72	0.50	29.6	3.40	51.8	1.94	29.4	3.42	54.0	1.86
21	402.62	0.00	0.12	28.9	3.48	45.6	2.21	28.0	3.59	52.0	1.94

表3.2-3 超音波伝播速度測定結果一覧表 (コア2)

状態	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	超音波							
				OYO-P(63kHz)		OYO-S(33kHz)		FUJI-P(400kHz)		FUJI-S(400kHz)	
				時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)
1	439.83	99.82	17.51	26.4	3.81	51.6	1.95	26.8	3.75	52.4	1.92
2	437.67	93.27	16.36	27.4	3.67	49.8	2.02	27.6	3.65	54.8	1.84
3	434.10	82.46	14.47	28.0	3.59	49.8	2.02	28.0	3.59	54.4	1.85
4	431.65	75.03	13.16	28.0	3.59	50.6	1.99	28.0	3.59	52.4	1.92
5	427.14	61.36	10.77	28.2	3.57	49.6	2.03	28.0	3.59	54.4	1.85
6	424.39	53.03	9.30	27.8	3.62	48.8	2.06	28.0	3.59	54.0	1.86
7	421.61	44.61	7.83	27.8	3.62	51.8	1.94	28.0	3.59	53.2	1.89
8	418.99	36.67	6.43	28.0	3.59	50.0	2.01	28.0	3.59	53.2	1.89
9	416.07	27.82	4.88	28.4	3.54	49.0	2.05	28.4	3.54	53.2	1.89
10	414.28	22.39	3.93	28.6	3.52	52.8	1.91	28.4	3.54	54.0	1.86
11	413.10	18.82	3.30	29.2	3.45	52.0	1.94	28.8	3.49	53.6	1.88
12	412.01	15.52	2.72	28.8	3.49	50.5	1.99	29.2	3.45	54.4	1.85
13	408.91	6.12	1.07	29.6	3.40	51.6	1.95	29.4	3.42	52.4	1.92
14	408.65	5.33	0.94	29.6	3.40	50.8	1.98	29.4	3.42	54.8	1.84
15	408.42	4.64	0.81	28.8	3.49	49.2	2.05	29.2	3.45	54.4	1.85
16	408.36	4.45	0.78	28.4	3.54	49.2	2.05	29.2	3.45	54.0	1.86
17	408.23	4.06	0.71	28.8	3.49	50.0	2.01	29.2	3.45	52.4	1.92
18	408.00	3.36	0.59	29.6	3.40	48.0	2.10	29.2	3.45	53.6	1.88
19	407.88	3.00	0.53	29.2	3.45	48.8	2.06	29.8	3.38	54.8	1.84
20	407.05	0.48	0.09	29.2	3.45	48.0	2.10	28.2	3.57	53.2	1.89

表3.2-4 超音波伝播速度測定結果一覧表 (コア3)

状態	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	超音波							
				OYO-P(63kHz)		OYO-S(33kHz)		FUJI-P(400kHz)		FUJI-S(400kHz)	
				時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)	時間( $\mu$ s)	速度(km/s)
1	440.36	100.00	16.53	26.4	3.81	49.8	2.02	26.0	3.87	52.0	1.94
2	438.26	93.33	15.41	26.8	3.75	48.8	2.06	26.4	3.81	54.0	1.86
3	434.69	81.82	13.51	27.2	3.70	48.6	2.07	26.8	3.75	52.8	1.91
4	431.83	72.60	11.99	27.0	3.73	48.6	2.07	26.8	3.75	54.4	1.85
5	428.77	62.73	10.36	27.0	3.73	48.4	2.08	26.4	3.81	51.6	1.95
6	425.55	52.35	8.64	27.0	3.73	48.6	2.07	26.8	3.75	49.6	2.03
7	422.83	43.58	7.20	27.0	3.73	47.8	2.11	26.8	3.75	52.4	1.92
8	420.42	35.82	5.91	26.8	3.75	47.8	2.11	26.8	3.75	47.6	2.11
9	417.06	24.98	4.13	27.2	3.70	48.4	2.08	26.8	3.75	54.0	1.86
10	414.26	15.96	2.63	27.8	3.62	48.8	2.06	26.8	3.75	53.2	1.89
11	412.76	11.12	1.84	27.8	3.62	50.6	1.99	27.0	3.73	53.6	1.88
12	412.35	9.80	1.62	28.0	3.59	48.3	2.08	28.0	3.59	52.0	1.94
13	412.05	8.83	1.46	28.4	3.54	50.6	1.99	28.4	3.54	50.8	1.98
14	411.64	7.51	1.24	27.6	3.65	51.0	1.97	28.2	3.57	53.2	1.89
15	411.24	6.22	1.03	27.8	3.62	50.4	2.00	28.0	3.59	54.0	1.86
16	411.15	5.93	0.98	27.8	3.62	50.6	1.99	28.0	3.59	52.4	1.92
17	410.94	5.25	0.87	28.2	3.57	49.6	2.03	27.8	3.62	54.8	1.84
18	410.80	4.80	0.79	28.4	3.54	49.4	2.04	27.8	3.62	53.2	1.89
19	410.52	3.90	0.64	28.2	3.57	48.8	2.06	29.2	3.45	50.8	1.98
20	410.41	3.55	0.59	27.6	3.65	48.4	2.08	27.6	3.65	51.6	1.95
21	409.49	0.00	0.10	28.0	3.59	37.8	2.66	26.8	3.75	50.8	1.98

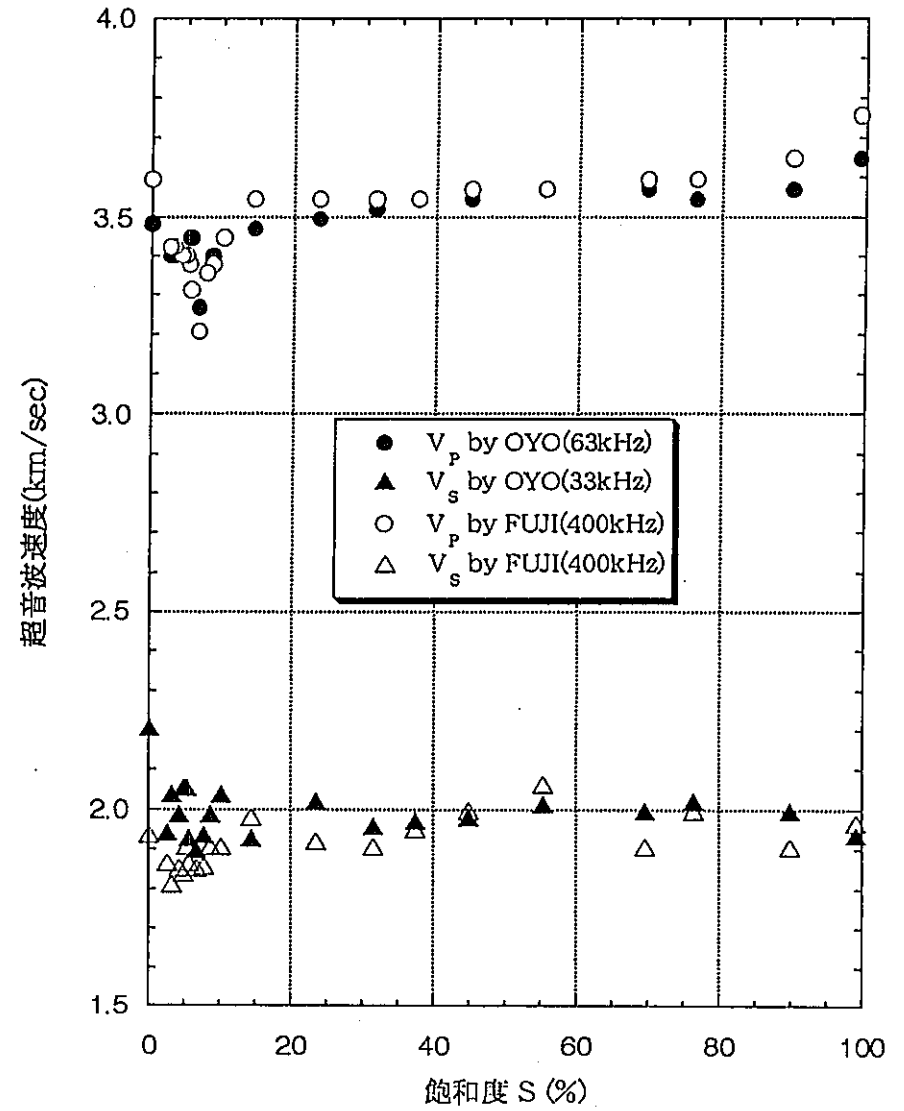
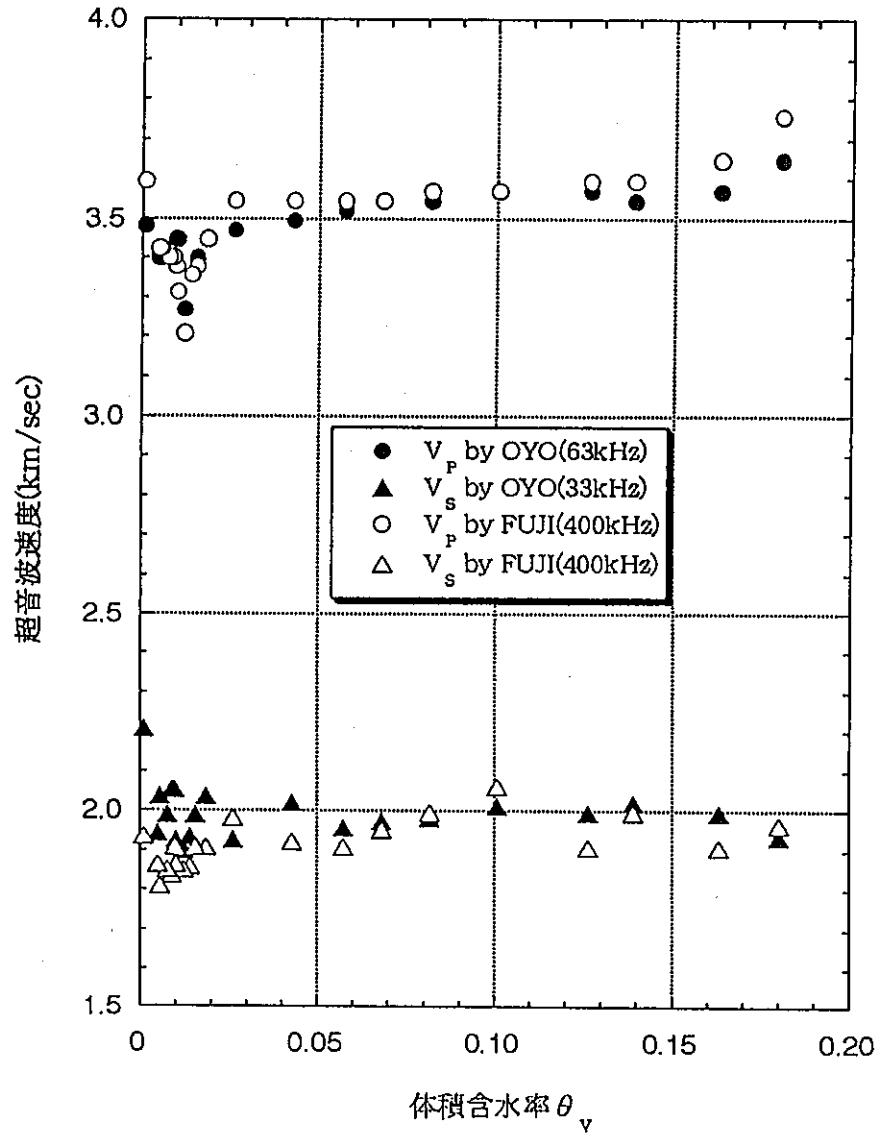


図3. 2-4 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア 1)

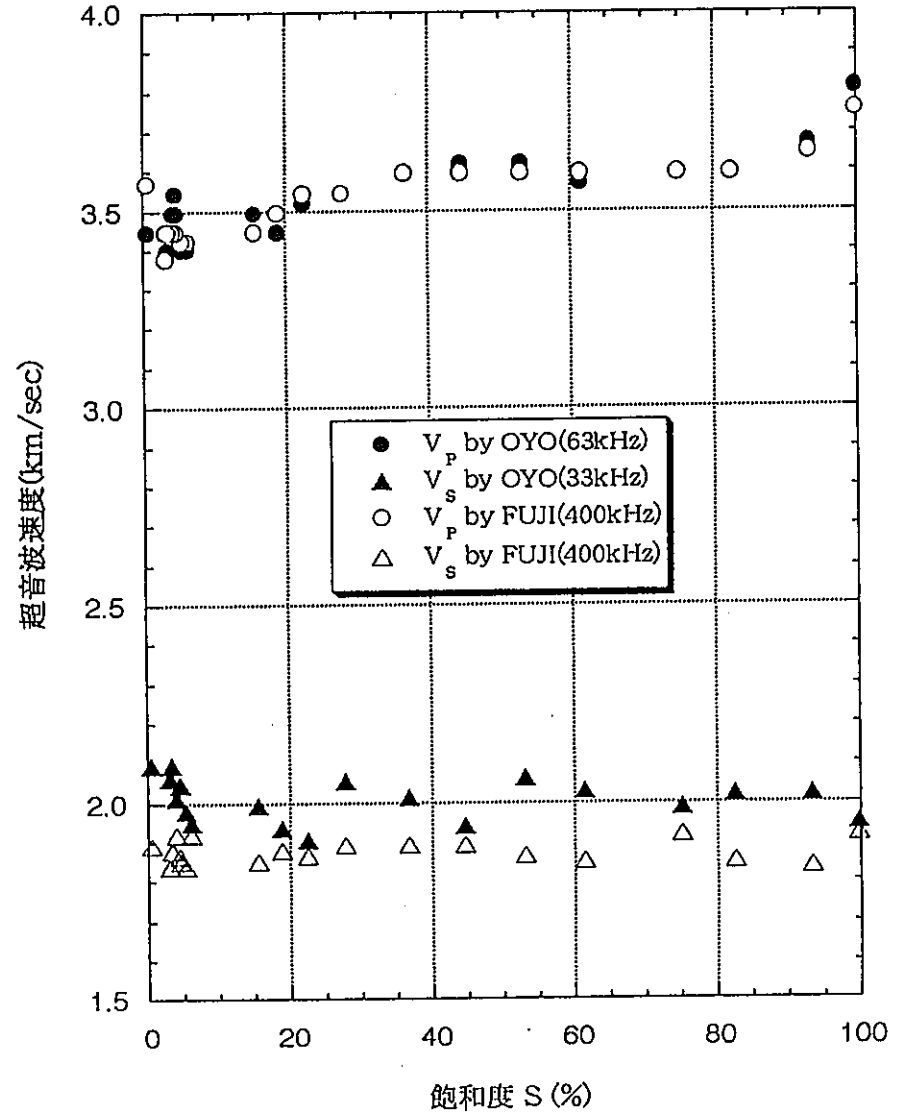
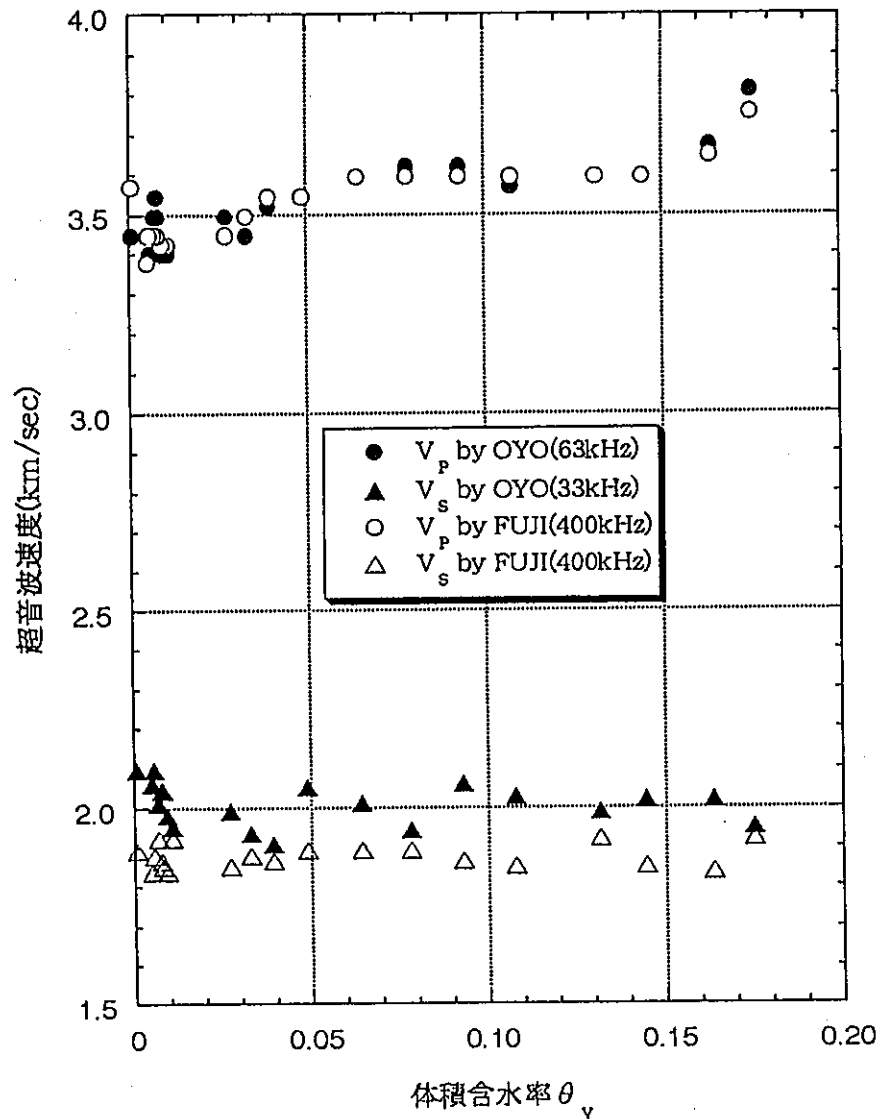


図3. 2-5 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア 2)

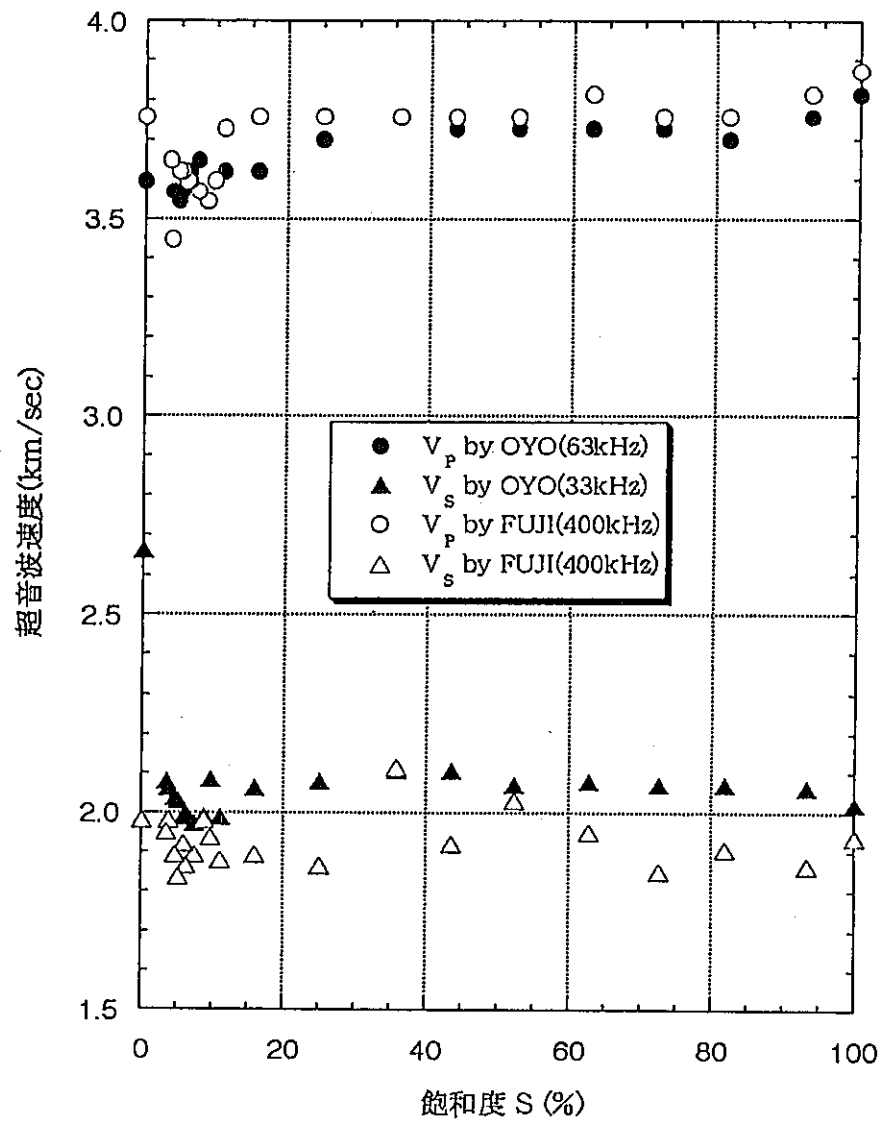
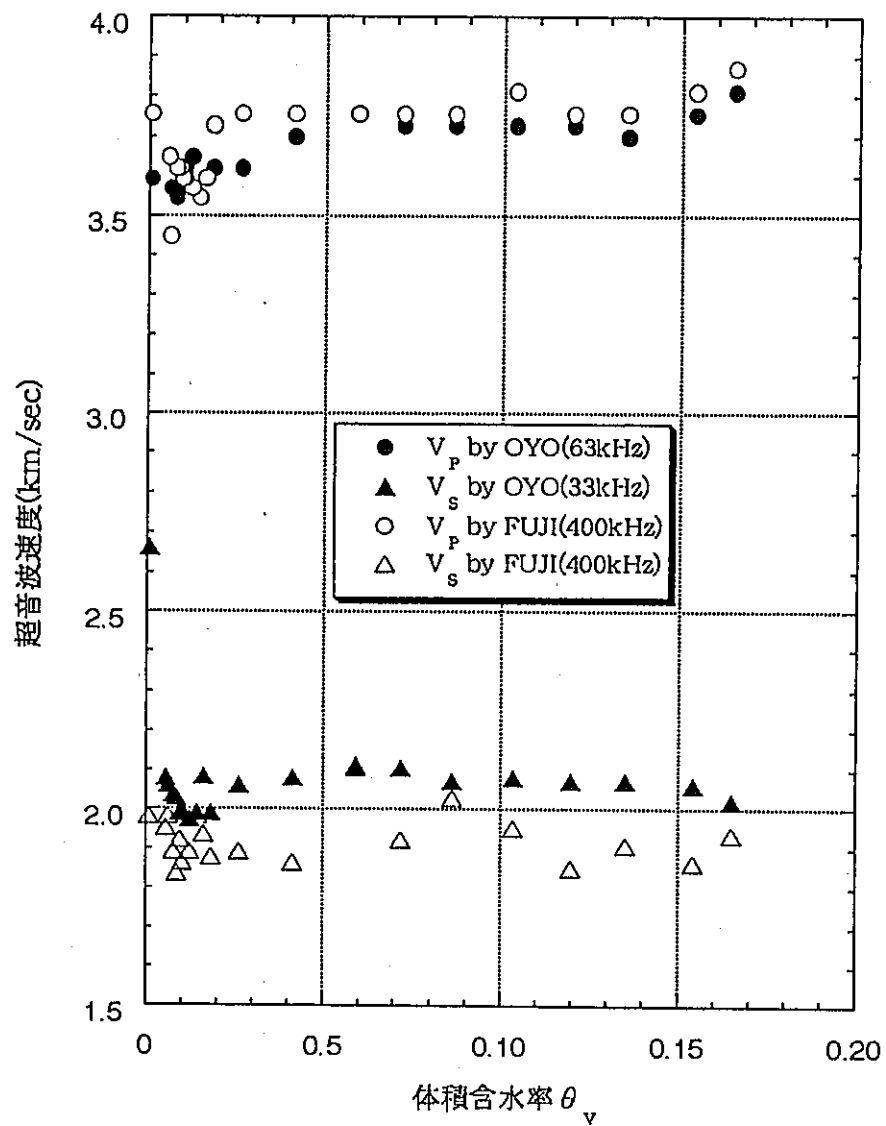


図3.2-6 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度の関係 (コア3)

### 3. 2. 3 比抵抗測定

#### (1) 供試体及び測定方法

比抵抗測定は超音波速度測定に用いたものと同じコア供試体（コア1～3）を用いた。含水量を変化させた一連の測定も超音波速度測定と同時に実施したので、含水量の変化のさせ方およびコアのサイズ・個数は超音波速度測定と全く同じである。すなわち、含水量の変化は重量測定によって見当をつけ、所定の重量になったら内部の含水状態を均一にするためにサランラップで2～3重に包装して24時間おいた後に測定を実施した。

試験個数は3個、コア内部の含水状態の均質性を見るために実際に割って含水状態の分布を確認するための試料は2個である。コア直径は約50mm、コア長は約100mmであり、コア軸方向が本試験で用いるブロック試料の水平面に一致するように採取した。

#### (2) 測定装置

測定はGS社方式の4電極サンプルホルダーを用いて実施した。これは白金ネット（#80、C：電流電極、P：電位電極）を電極とし、0.1N（約1%濃度）KCl溶液を含ませたる紙（F）をP・F・C・F・試料・F・C・F・Pの順にならべて試料を挟み込む方式である。

図3.2-7に測定模式図を、図3.2-8に測定システム構成図を示す。実際の測定では測定電流I（mA）と測定電位V（mV）とから抵抗R（Ω）を測定し、岩石試料の比抵抗ρはRから下記の式を用いて換算する。

$$R = V / I$$

R：抵抗（Ω）

V：測定電位（mV）

I：測定電流（mA）

$$\rho = R \cdot S / L$$

ρ：比抵抗（Ω・m）

S：試料の断面積（m<sup>2</sup>）

L：試料の長さ（m）

測定には0.5Hzの正弦波信号を用い50Hzのサンプリングレートで2サイクル分の測定を行った。測定時にはアクリル製の箱からなるコア固定装置の中に測定試料を固定し、およそ10kgfの力で電極部を試料両端面に押し付けた。これは約0.5kgf/cm<sup>2</sup>の圧力に相当する。また、コア固定装置は蓋付きの箱であり、箱中の底面付近に水を張っておくことで、測定時のコア表面からの水分乾燥を防いだ。写真3.2-1には測定システムの外観写真を示す。表3.2-5には比抵抗測定機器一覧表を示す。



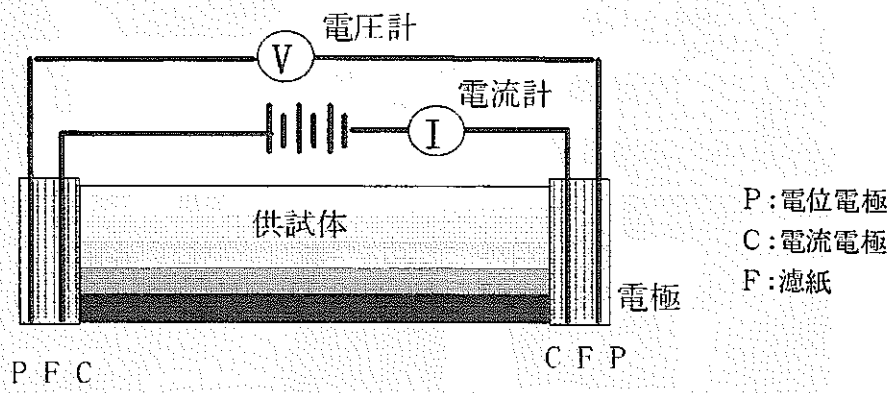


図3.2-7 測定模式図

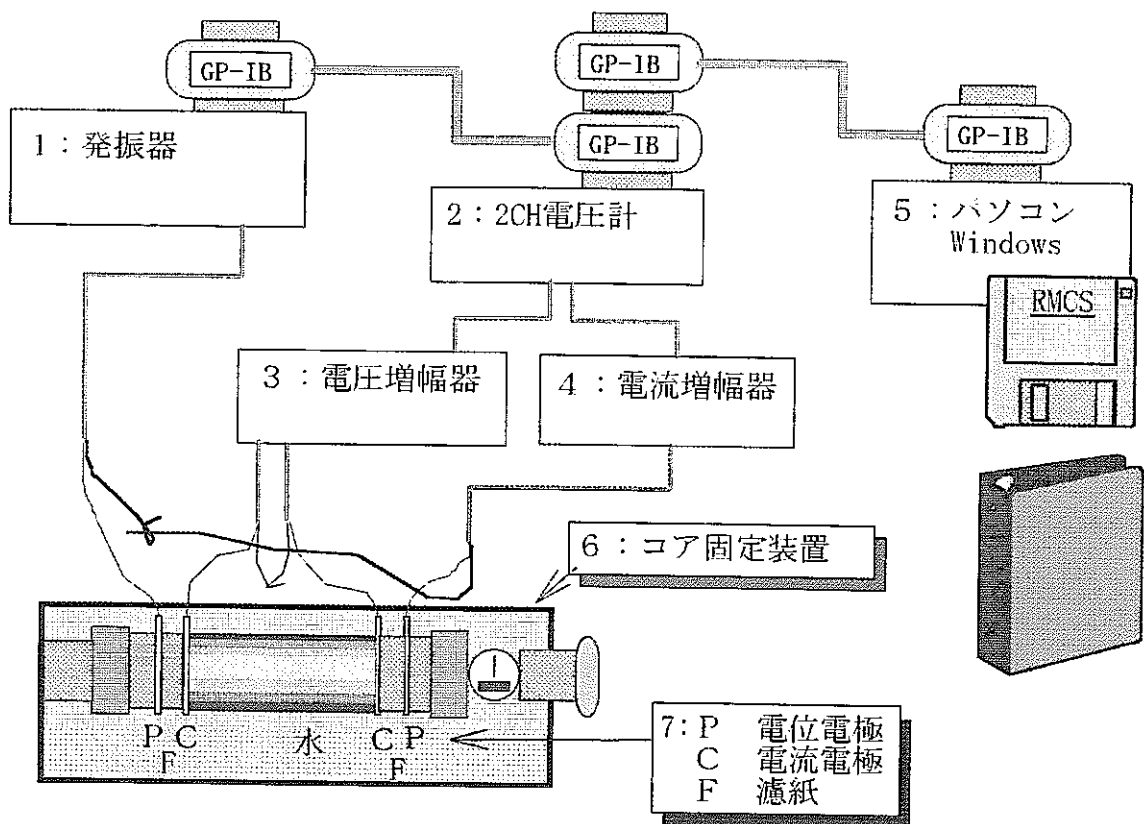


図3.2-8 測定システム構成図



写真3. 2-1 測定システムの外観写真

表3. 2-5 比抵抗測定機器一覧表

名称およびメーカー	型式名	主な仕様
1)発振器 WaveTEK社	WaveTEK 178 50MHz Programable Waveform synthesizer	周波数: 0.001-1 KHz 波形 : sine, square..... 電圧 : 0.2, 0.5, 1v.....
2)電圧計 KeithLEY社	194A High Speed Voltmeter	1Hz-1MHz, 16bit, 64KW
3)電圧増幅器 NF回路	P-61 Differential Amplifier	入力インピーダンス>1Gohm
4)電流増幅器 KeithLEY社	428 Current Amplifier	Gain : 1E6
5)パソコン Compaq社 GP-IBボード Nation. Inst.	PRESARIO CDS 520 GP-IB TURBO	SX66MHz, HDD : 420MB
6)圧固定装置 技研工業		アクリル製, 圧長可変式 圧着力ゲージ圧表示計 (最大20kgf)
7)電極 (網)ダイヤコンタクト		白金ネット(#80) 濾紙(厚み0.25mm) 直径50mm

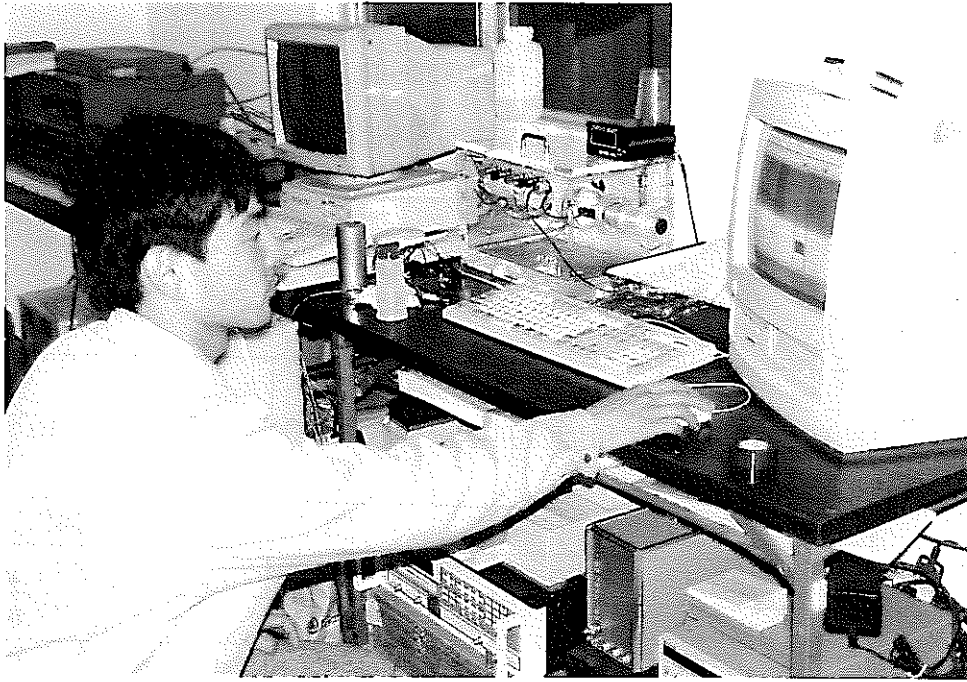


写真3. 2-2 コア試料の比抵抗測定状況

(3) 測定結果

表3.2-6～表3.2-8 にコア1～コア3の比抵抗測定結果を示す。図3.2-9 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。

表3.2-6 コア1の比抵抗測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	比抵抗値( $\Omega \cdot m$ )
1	436.35	99.24	18.03	342.1
2	433.14	89.86	16.33	334.1
3	428.58	76.53	13.91	278.6
4	426.24	69.69	12.66	343.8
5	421.37	55.45	10.08	351.7
6	417.78	44.96	8.17	354.7
7	415.23	37.50	6.81	343.6
8	413.20	31.57	5.74	421.7
9	410.47	23.59	4.29	541.1
10	407.36	14.50	2.63	818.3
11	405.90	10.17	1.86	991.4
12	405.37	8.68	1.58	1149.1
13	405.10	7.89	1.43	1449.6
14	404.73	6.81	1.24	1444.7
15	404.34	5.67	1.03	2849.3
16	404.26	5.44	0.99	8151.5
17	404.09	4.94	0.90	4078.4
18	403.90	4.38	0.80	6263.2
19	403.69	3.77	0.69	12988.0
20	403.51	3.24	0.59	24413.0
21	403.35	2.72	0.50	9549.2
22	402.62	0.00	0.12	計測不能

表3.2-7 コア2の比抵抗測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	比抵抗値( $\Omega \cdot m$ )
1	439.83	99.82	17.51	469.0
2	437.67	93.27	16.36	418.8
3	434.10	82.46	14.47	343.3
4	431.65	75.03	13.16	383.7
5	427.14	61.36	10.77	373.7
6	424.39	53.03	9.30	397.1
7	421.61	44.61	7.83	381.2
8	418.99	36.67	6.43	447.0
9	416.07	27.82	4.88	612.1
10	414.28	22.39	3.93	497.0
11	413.10	18.82	3.30	710.7
12	412.01	15.52	2.72	910.0
13	410.91	12.18	2.14	1295.9
14	410.30	10.33	1.81	1494.2
15	409.76	8.70	1.53	2915.0
16	408.91	6.12	1.07	3942.5
17	408.65	5.33	0.94	4298.3
18	408.42	4.64	0.81	5947.3
19	408.36	4.45	0.78	10062.0
20	408.23	4.06	0.71	12599.0
21	408.13	3.76	0.66	18429.0
22	408.00	3.36	0.59	31888.0
23	407.88	3.00	0.53	45812.0
24	407.05	0.48	0.09	計測不能

表3.2-8 コア3の比抵抗測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	比抵抗値( $\Omega \cdot m$ )
1	440.36	100.00	16.53	514.6
2	438.26	93.33	15.41	481.1
3	434.69	81.82	13.51	371.8
4	431.83	72.60	11.99	442.5
5	428.77	62.73	10.36	399.6
6	425.55	52.35	8.64	464.0
7	422.83	43.58	7.20	429.9
8	420.42	35.82	5.91	497.6
9	417.06	24.98	4.13	889.3
10	414.26	15.96	2.63	938.2
11	412.76	11.12	1.84	1146.5
12	412.35	9.80	1.62	1557.0
13	412.05	8.83	1.46	1488.1
14	411.64	7.51	1.24	1890.8
15	411.24	6.22	1.03	2647.2
16	411.15	5.93	0.98	4151.9
17	410.94	5.25	0.87	6661.1
18	410.80	4.80	0.79	9127.2
19	410.74	4.61	0.76	10249.0
20	410.52	3.90	0.64	14339.0
21	410.41	3.55	0.59	27404.0
22	409.49	0.00	0.10	計測不能

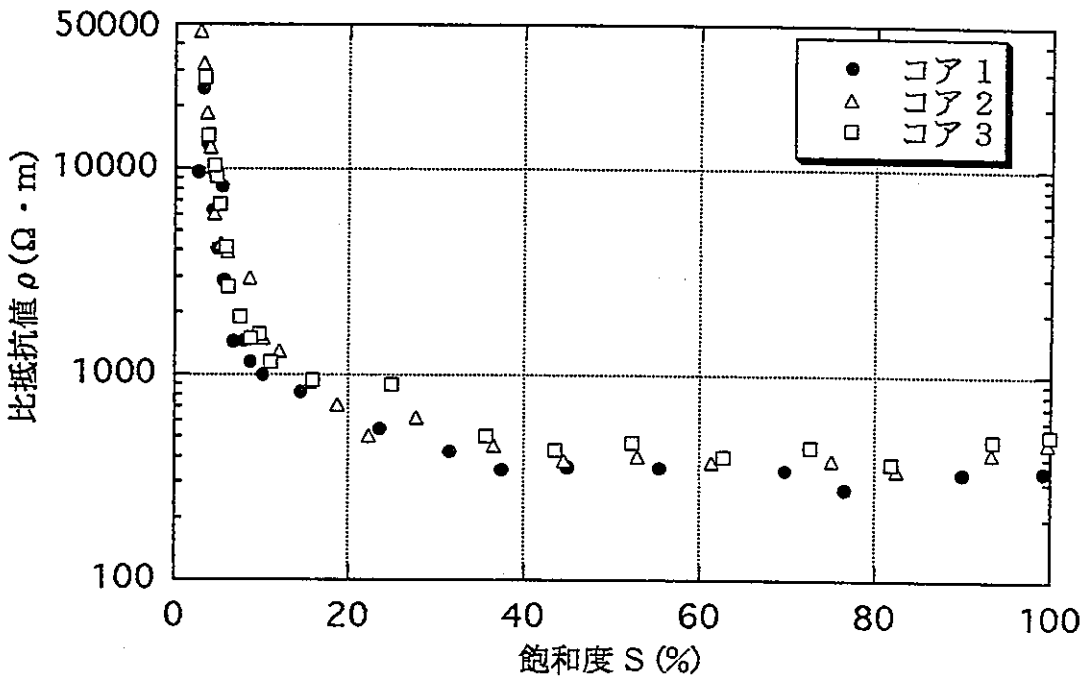
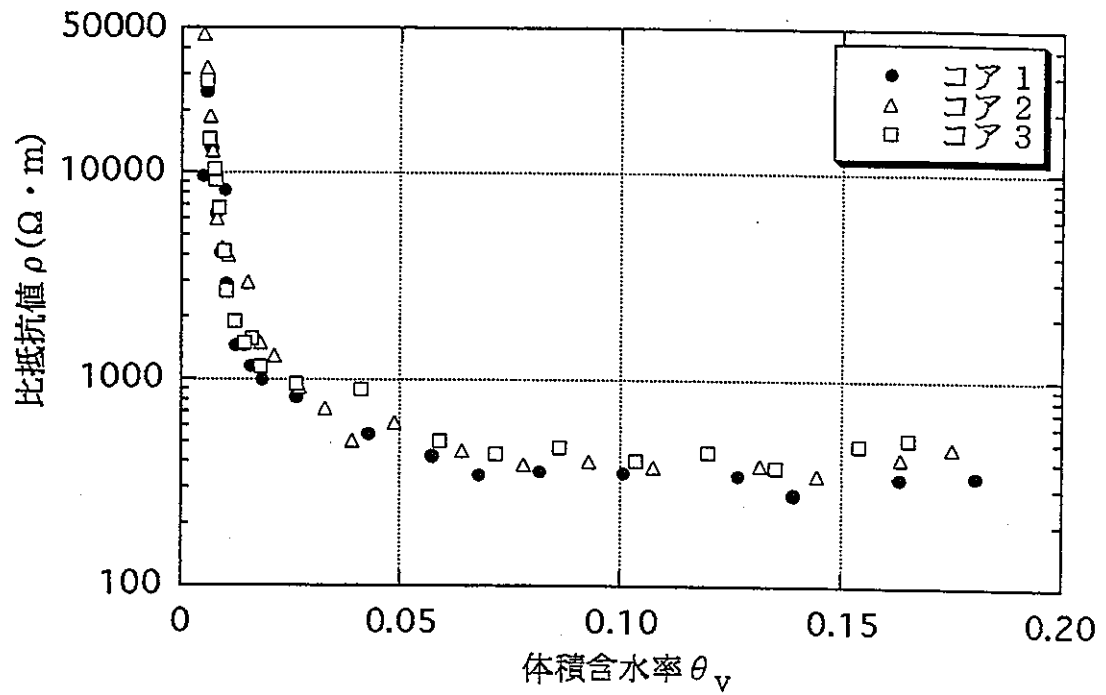


図3.2-9 体積含水率および飽和度と比抵抗の関係 (コア1、2、3)

### 3. 2. 4 電磁波速度測定

#### (1) 供試体及び測定方法

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3.2-10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3.2-10を参照）。

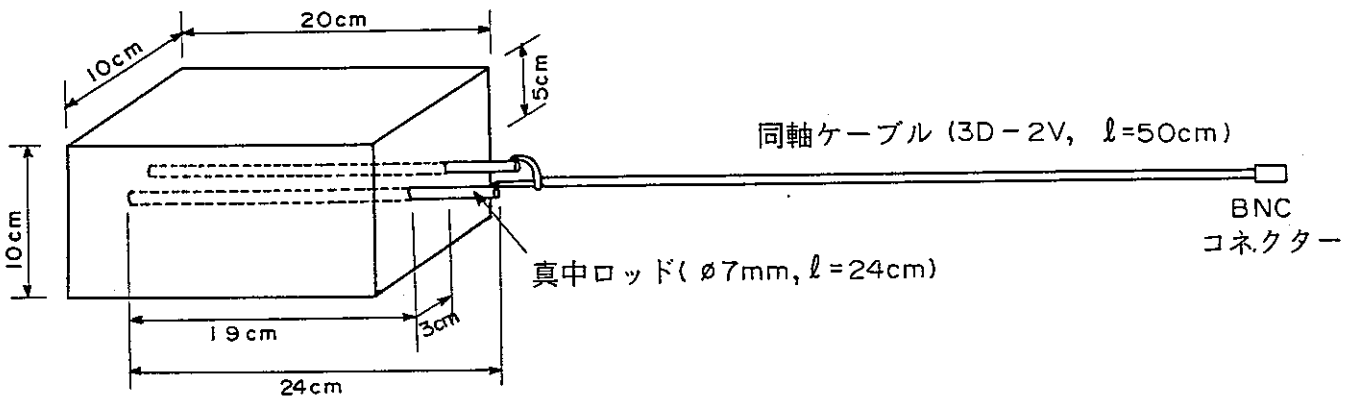


図3.2-10 電磁波測定用の供試体および測定ロッド

小ブロック供試体は測定ロッドを設置する前に水浸状態で気泡が出なくなるまで（約7日間）真空脱気して飽和状態とした。水浸には水道水（電気伝導度約 $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、比抵抗 $67 \Omega \cdot \text{m}$ ）を用いた。

供試体は飽和含水状態にした後、測定用ロッドを埋設するとともにロッドに同軸ケーブルを接続した。ロッドは直径7mm、長さ24cmの真中製の丸棒で、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。ロッド周囲の空気間隙はロッド挿入時の状態で直径にして1mm未満であった。また同軸ケーブルは長さ50cmで、特性インピーダンス $50 \Omega$ のもの（3D-2V）を使用し、測定器側はBNCコネクタとし、測定器付属のケーブルに接続できるようにした。

同軸ケーブルのロッド側は外套被覆を30mm剥いて、外側のシールド部を分離して2芯の平行コードにし、端の5mm部分をロッド端部の5mm部分に重ねてハンダ付けをした（図3.2-10を参照）。分離したシールド部分には熱収縮チューブを保護のために被せた。

含水量の変化のさせ方は他の物理量測定の場合と全く同じである。すなわち、含水量の変化は重量測定



によって見当をつけ、所定の重量になったら内部の含水状態を均一にするためにサラップで2～3重に包装して24時間おいた後に測定を実施した。なお、自然乾燥状態で重量変化が見られなくなる、飽和度5～10%以下からは、50℃での炉乾燥で乾燥させた。また、最後の絶乾状態はケーブルの耐熱性を考慮して80℃で2日間の炉乾燥とした。

## (2) 測定装置および原理

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 μs) 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。

図3.2-11 にTDR測定の実験原理を模式図で示した。測定ロッドに電磁波パルスを送り込むと先端で反射して返ってくるが、この時の往復時間Tを測定すれば岩石の比誘電率εは次式を用いて求めることが出来る。

$$\varepsilon = (CT/2L)^2$$

ここで

L : ロッドの長さ

C : 真空中の電磁波速度 ( $3 \times 10^8$  m/sec)

T : 電磁波の往復時間

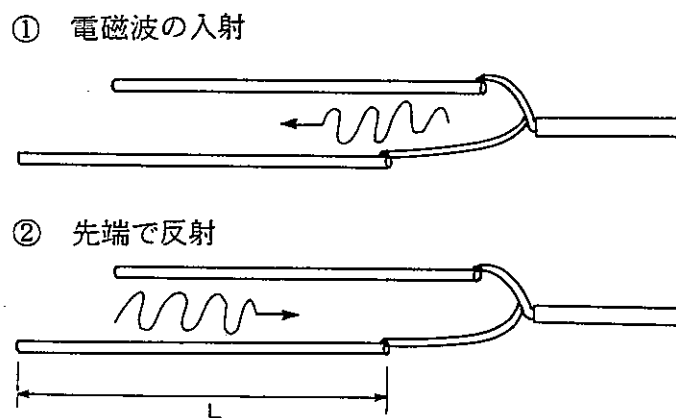


図3.2-11 電磁波速度測定の実験原理

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3.2-12に模式的示す。また、図3.2-13～図3.2-15 にTDRの測定記録例を示す。

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。

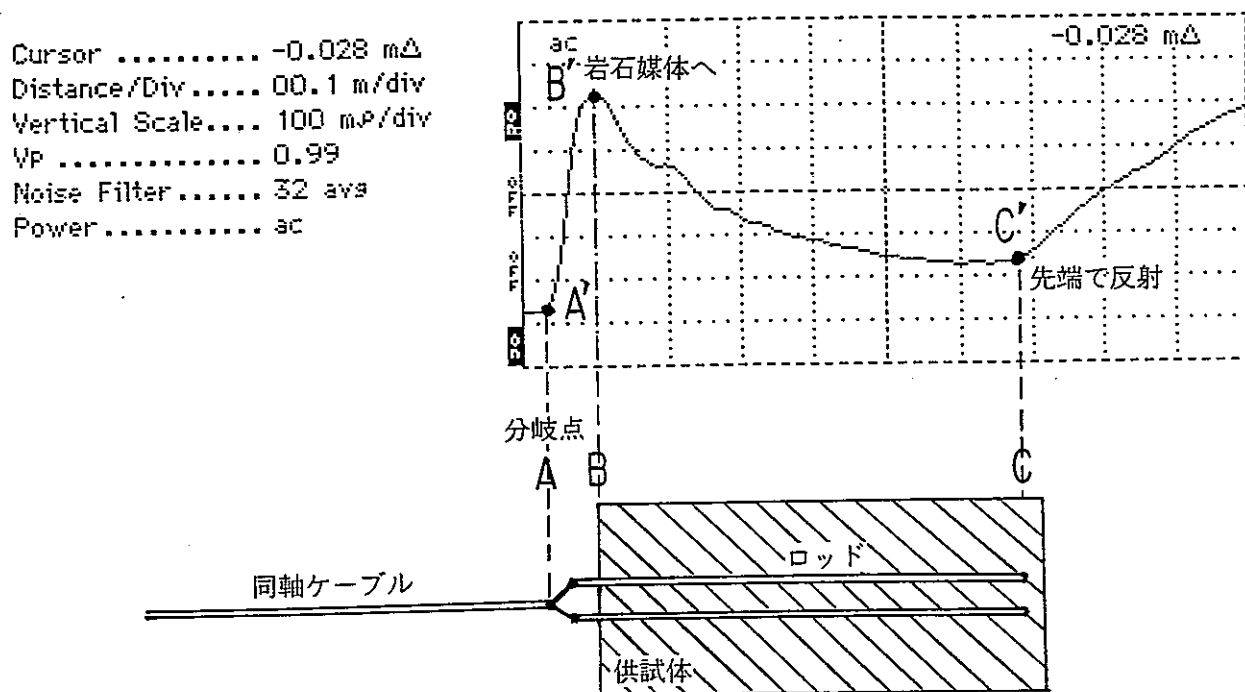
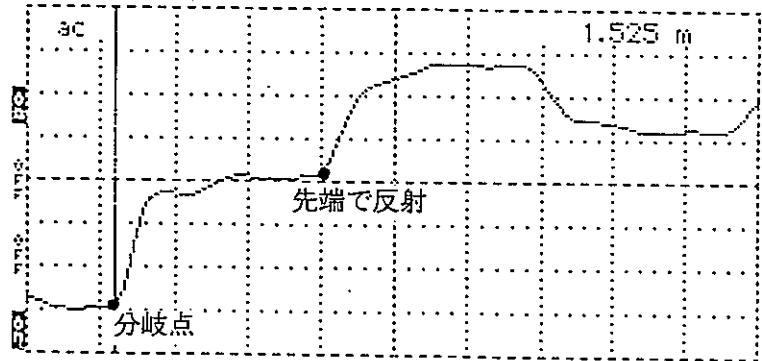


図3.2-12 電磁波速度測定波形とロッドとの関係

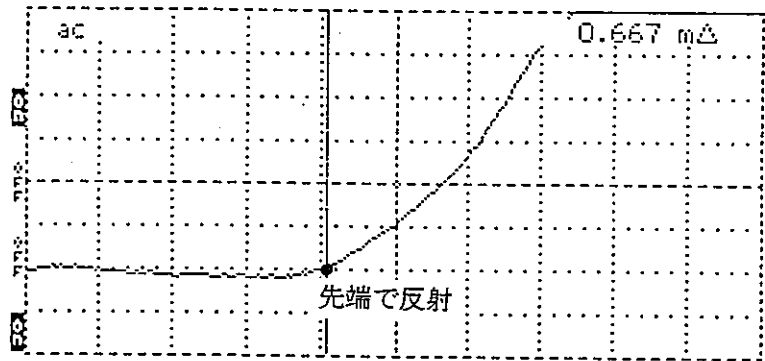
Cursor ..... 1.525 m  
 Distance/Div ..... 00.1 m/div  
 Vertical Scale .... 200 mV/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



カーソルの位置が同軸ケーブルから平行コードへの変換点  
 左端から4Div目の立ち上がりがロッド先端からの反射点  
 横軸のスケールを縮めて見ている。

図3.2-13 TDR記録例 (ロッドを空中においた場合)

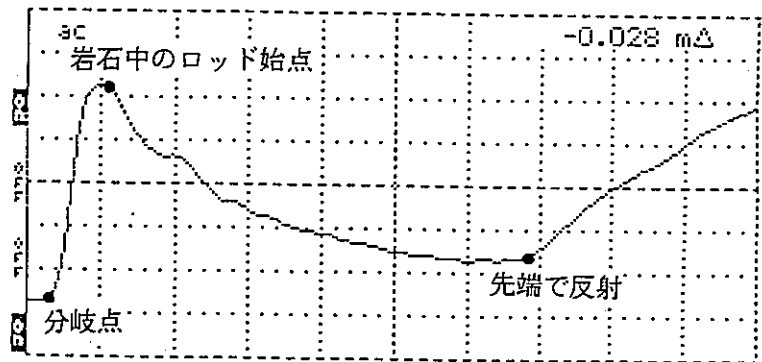
Cursor ..... 0.667 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mV/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



カーソルの位置がロッド先端からの反射点  
 横軸スケールは最小スケール

図3.2-14 TDR記録例 (飽和含水した小ブロック, NO.1試料)

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



含水した試料中では図のように振幅が減衰する。  
 横軸のスケールを縮めて見ている。  
 左端の立ち上がりが起点, 7Div目の立ち上がりが反射点

図3.2-15 TDR記録例 (含水した大ブロック中の記録)

今回の測定では、反射信号が明瞭に読み取れたロッドに取り付けた同軸ケーブルの特性インピーダンスが変化する外套被覆を剥いた箇所（図3.2-12、A点）を信号の起点とし、電磁波速度は空気中の速度を用いて測定を実施した。ロッドは5cm部分が試料の外にでており、同軸ケーブル部と併せると約7.5cm部分が試料の外にある計算になる。

試料内部（図3.2-12、B～C）の電磁波速度を計るために、試料の外にでてこの部分（図3.2-12、A～B）の影響を補正する必要から、長さを種々変えたロッドを作成して測定ロッド長と空気中でのTDR表示値との関係を求めた。測定器は縦横軸のスケールが可変になっているが、読み取り精度を高めるために、今回の実験を通じて全て距離軸（水平軸）は最小フルスケールの0.025m/Divを用い、信号強度軸（垂直軸）のスケールはほぼ一定にして行った。

図3.2-16 に実際のロッド長とTDR表示長さ（図3.2-12、A～C）の関係を示す。

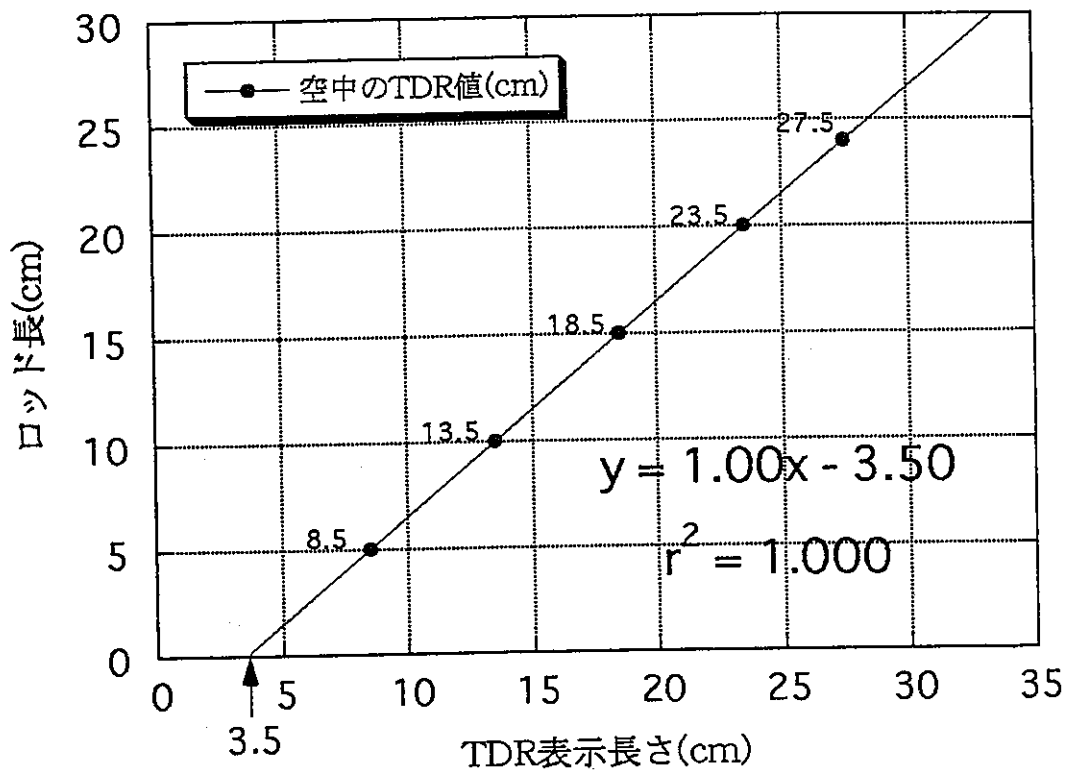
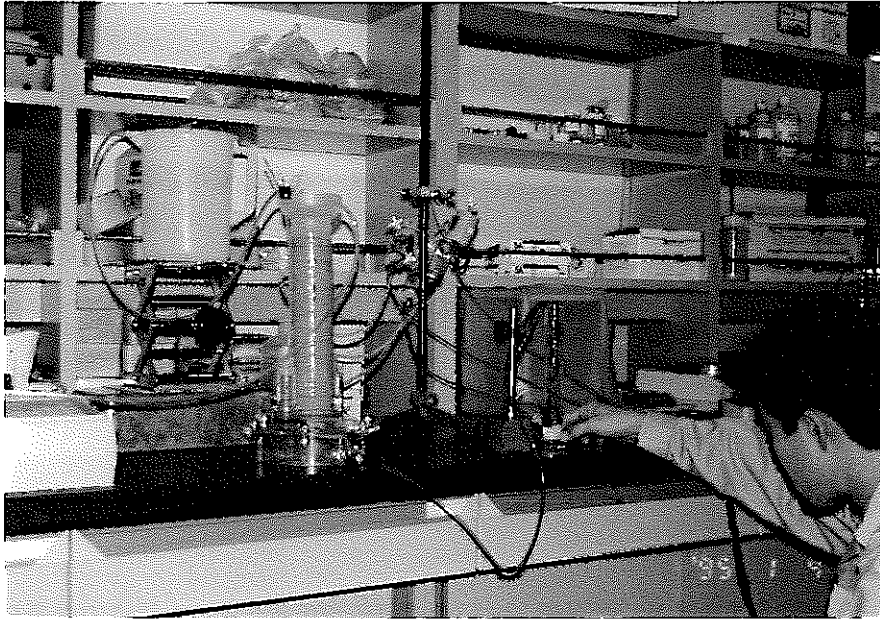
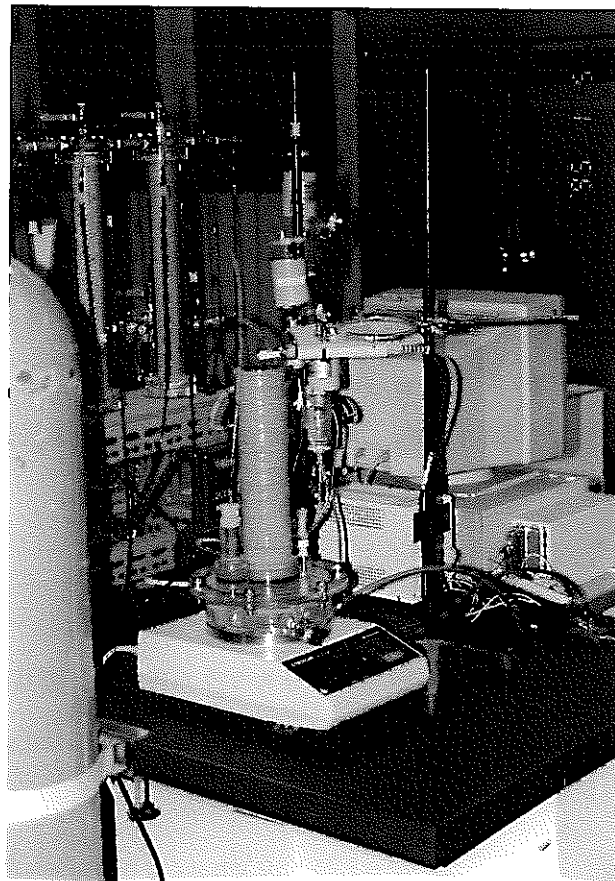


図3.2-16 測定ロッド長と表示長さの関係

この結果から、試料外部のロッド及び平行ケーブル部分（A～B）に対するTDR表示値は8.5cmであることがわかる。従って、岩石内部（B～C）に対応するTDR表示値を得るためにはA～Cに対応した



(a) 透水試験



(b) 実験概要

図 - 2. 3. 7 標準砂を用いた実験状況写真

- 各計器の電源をONにし、計測値の出力、計測値の計算機への入力を開始する。

#### ⑥計測

- この時点では、標準砂カラム最上部に地下水面が存在しており、静水圧状態にある。この時点のテンシオメーターの出力値にて、テンシオメーターの電圧から水位へ変換する際の補正値を決める。
- テンシオメーターからの出力が安定したことを確認したのち、下の排水バルブを少し開き、マリOTT管の水位を所定の水位となるように下げ、速やかにバルブを閉じる。水位設定方法は図 - 2. 3. 8 に注水時から含めて示す。
- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、重量、水圧の計測を継続する。

#### ⑦定常状態の確認・計測終了

- 蒸発量が安定するまで、蒸発量、水圧の計測値が定常となった時点で計測を終了する。

#### ⑧含水量の計測

- 計測終了後、速やかに、カラム巻いているシリコン、ビニルテープをカラム継ぎ目にて切り離し、上段から、カラム中の水分を有する標準砂を（既に重量のわかっている）シャーレーに移し、重量を計測する。
- 上記作業を各カラムに対して実施する。
- シャーレーを乾燥炉に入れ、110℃にて、24時間乾燥させる。
- 乾燥後、デシケーターにて冷やす。
- 各シャーレーの重量を計測し、乾燥前後の重量差から含水量を算定する。

#### ⑨ 解析

- 計測された蒸発量、下端部の水位、飽和透水係数から1元定常浸透解析により、計測された体積含水率を最もよく再現するVG式のパラメータを同定する。

### (5) 実験結果

#### (i) 間隙率

使用した砂の重量、充填対象の体積（アクリルカラム体積）、標準砂の真比重 $G_s$ （ $2.64 < \text{土質試験法、土質工学会編より} >$ ）として算定した。算定した間隙率は0.461である。

#### (ii) 透水試験

透水試験結果（図 - 2. 3. 9）から $3.25 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ である。

#### (iii) 温度・湿度・蒸発量の経時変化

図 - 2. 3. 10 に温度・湿度・蒸発量の経時変化を示す。ここで温度、相対湿度は10分毎の

表3.2-9 には測定機器一覧表を示す。

表3.2-9 TDR測定機器一覧表

名称およびメーカー	型式名	主な仕様
TDRケーブルテスター SONY-TEKTRONIX	1502B	出力インピーダンス $50\Omega \pm 1\%$ 垂直軸 感度 $0.5 \sim 500m\Omega / Div$ 精度 フルスケールで $\pm 3\%$ 水平軸 距離カール分解能 $0.004$ フィート 感度 $0.025 \sim 50m / Div$ レンジ $2.5 \sim 500m$ $V_p$ $0.30 \sim 0.99$ 空気を $1.0$ とした伝播速度 チャートレコーダ内蔵 電源 AC100Vおよび内蔵電池

(3) 測定結果

表3.2-10 ~表3.2-12 に比誘電率の測定結果を示す。図3.2-17 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。

表3.2-10 小ブロック1の比誘電率測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	TDR表示値 (m)未補正	比誘電率
1	4809.6	100.00	17.99	0.667	9.383
2	4791.2	94.93	17.08	0.611	7.664
3	4772.0	89.65	16.12	0.594	7.177
4	4755.7	85.16	15.32	0.589	7.037
5	4736.7	79.93	14.38	0.584	6.898
6	4690.9	67.29	12.10	0.561	6.276
7	4667.0	60.74	10.93	0.556	6.145
8	4636.9	52.43	9.43	0.546	5.887
9	4609.3	44.83	8.06	0.534	5.585
10	4583.4	37.70	6.78	0.517	5.170
11	4559.6	31.16	5.60	0.507	4.933
12	4550.3	28.57	5.14	0.499	4.748
13	4535.0	24.37	4.38	0.491	4.566
14	4518.7	19.89	3.58	0.470	4.106
15	4491.2	12.32	2.22	0.463	3.958
16	4479.8	9.18	1.65	0.443	3.550
17	4479.1	8.97	1.61	0.440	3.491
18	4462.4	4.39	0.79	0.424	3.183
19	4446.5	0.00	0.00	0.420	3.109



表3.2-11 小ブロック2の比誘電率測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	TDR表示値 (m)未補正	比誘電率
1	4866.1	99.84	15.55	0.639	8.502
2	4854.0	95.98	14.95	0.611	7.664
3	4848.2	94.13	14.66	0.584	6.898
4	4829.3	88.10	13.72	0.568	6.462
5	4809.4	81.75	12.73	0.556	6.145
6	4789.1	75.28	11.72	0.550	5.990
7	4749.2	62.52	9.74	0.536	5.634
8	4721.5	53.68	8.36	0.527	5.412
9	4693.3	44.69	6.96	0.515	5.122
10	4672.8	38.15	5.94	0.506	4.910
11	4655.0	32.47	5.06	0.503	4.840
12	4642.3	28.41	4.42	0.497	4.702
13	4635.4	26.20	4.08	0.491	4.566
14	4624.5	22.72	3.54	0.488	4.499
15	4598.7	14.49	2.26	0.459	3.875
16	4588.6	11.29	1.76	0.446	3.610
17	4588.4	11.21	1.75	0.431	3.316
18	4572.1	6.00	0.93	0.427	3.240
19	4553.3	0.00	0.00	0.425	3.202

表3.2-12 小ブロック3の比誘電率測定結果

番号	重量(g)	飽和度(%)	体積含水率(%)	TDR表示値 (m)未補正	比誘電率
1	4693.9	100.00	21.29	0.707	10.717
2	4675.5	95.73	20.38	0.654	8.968
3	4655.0	90.97	19.37	0.611	7.664
4	4637.6	86.93	18.51	0.601	7.376
5	4616.7	82.07	17.47	0.592	7.121
6	4544.7	65.33	13.91	0.578	6.733
7	4517.4	58.99	12.56	0.568	6.462
8	4479.1	50.09	10.66	0.553	6.067
9	4450.5	43.44	9.25	0.542	5.785
10	4421.3	36.66	7.81	0.522	5.290
11	4404.9	32.86	6.99	0.509	4.980
12	4376.3	26.21	5.58	0.498	4.725
13	4316.6	12.34	2.63	0.460	3.895
14	4299.2	8.30	1.77	0.444	3.570
15	4298.7	8.18	1.74	0.431	3.316
16	4277.2	3.19	0.68	0.421	3.127
17	4263.5	0.00	0.00	0.420	3.109

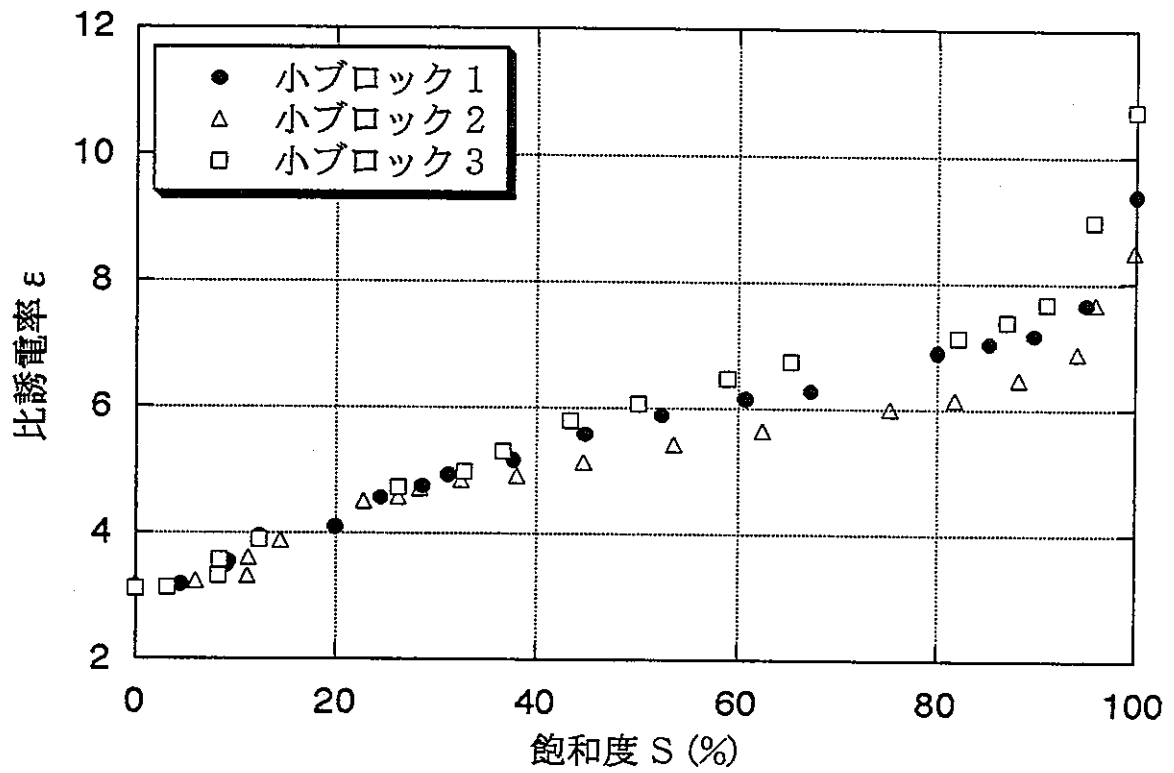
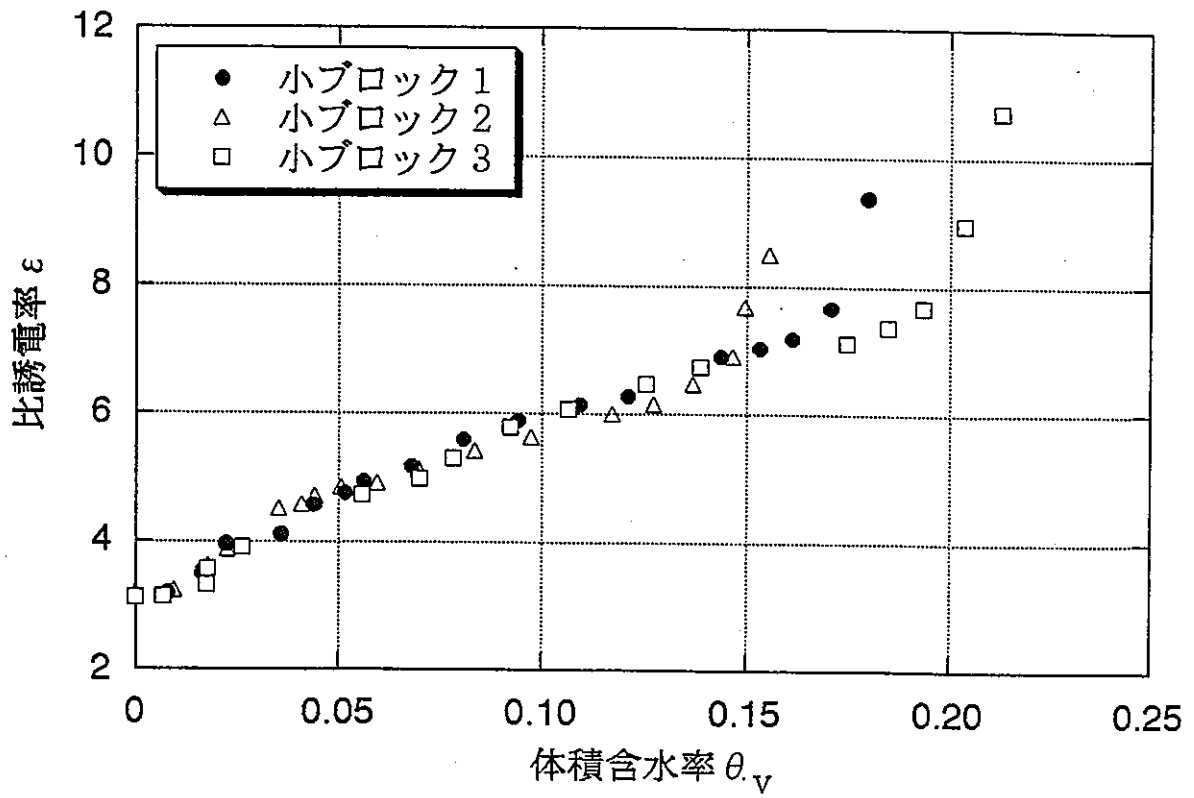


図3.2-17 体積含水率および飽和度と比誘電率の関係 (小ブロック1, 2, 3)

### 3. 2. 5 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。

#### (1) 測定方法

供試体の含水量測定は建設省「土木試験基準(案)」に定められている岩石の密度・含水比・飽和度・有効間隙率・吸水率試験方法 KDK S 0501 に準拠して行った。供試体の有効間隙率、測定時の飽和度および体積含水率の測定方法は以下に示すとおりとした。ここで、重量測定は0.01gまで測定可能な電子天秤を使用した。

- a. 供試体を成形後、真空ポンプで気泡が出なくなるまで約7日間程度真空脱気を行って強制湿潤状態とした。
- b. 真空脱気を終了してから供試体をそのまま浸水して約24時間後に、湿潤状態の供試体の水中および空中重量を測定した。
- c. 所定の測定終了後、供試体を恒温乾燥炉に入れ、110°Cで48時間以上強制乾燥した。乾燥後、乾燥デシケータの中で試料が室温になるまで自然冷却させて、乾燥空中重量を測定した。

上述のように測定した各状態の重量から供試体の有効間隙率、測定時の飽和度および体積含水率を次式により求めた。

$$\text{供試体の有効間隙率} = \frac{W3 - W2}{W3 - W4} \times 100\%$$

$$\text{測定時の飽和度} = \frac{W1 - W2}{W3 - W2} \times 100\%$$

$$\text{測定時の体積含水率} = \frac{W1 - W2}{W3 - W4} \times 100\%$$

ここで、W1：測定時の空中重量、 W3：強制湿潤状態の空中重量  
W2：強制乾燥状態の空中重量、 W4：強制湿潤状態の水中重量

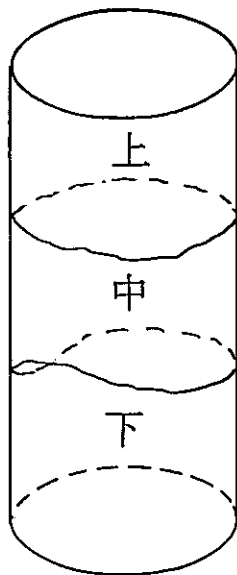
#### (2) 供試体の分割

分割して含水量を測定するための供試体コア4、コア5、小ブロック4および小ブロック5は、物理量測定に用いた供試体と全く同じ乾燥過程においた。すなわち、乾燥時にはサランラップ包装を外して室内

乾燥状態においた。所定の重量に達した後、供試体はサランラップで包装し丸1日間放置後に行った。

図3.2-18に供試体分割の模式図を示す。超音波速度と比抵抗測定のコアはほぼ均等に上部、中部および下部の3つに分割した。電磁波測定の小ブロックは、あらかじめ供試体をほぼ3等分する位置に深さ10mm程度の切れ目を入れておいたので、これを用いてまず上部、中部および下部に分割し、上部と下部の側面部分を切り離してその中心部を含水測定試料に、また中部については前後の側面部分を切り離し、中心部、左側部および右側部を計3個採取した。コア供試体および小ブロック供試体の分割状況を写真3.2-5～写真3.2-7に示す。

(a) コア、3試料採取



(b) 小ブロック、5試料採取

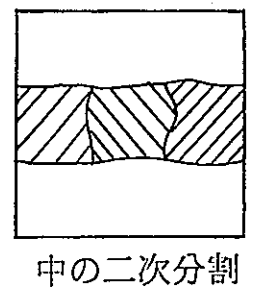
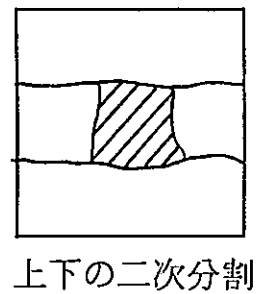
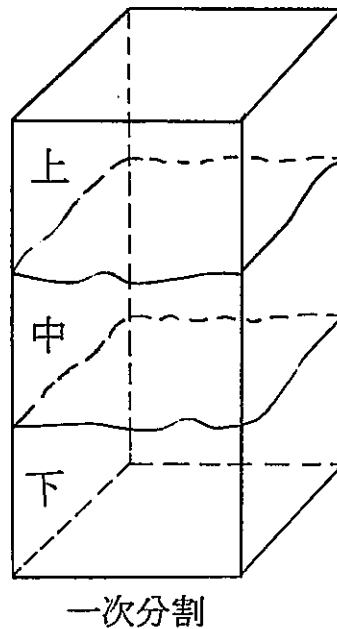


図3.2-18 供試体分割の模式図

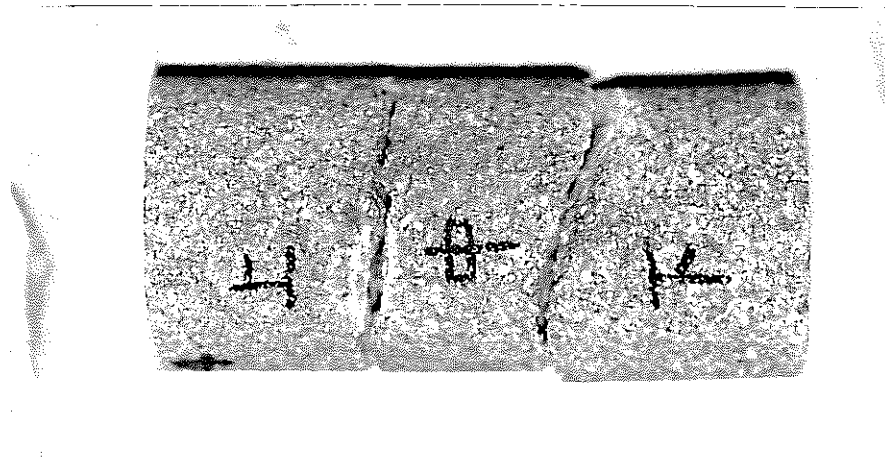


写真3.2-5 コアの分割状況



写真3.2-6 小ブロックの分割状況 (一次分割)

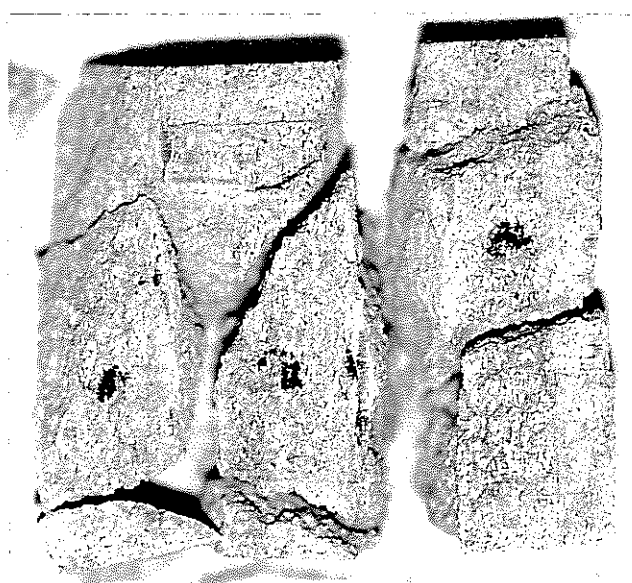


写真3.2-7 小ブロックの分割状況 (中央部の二次分割)

(3) 試験結果

表3.2-13～表3.2-16に供試体分割による含水状態の分布の測定結果を示し、図3.2-19～図3.2-22には体積含水率および飽和度の分布を示す。

これらの結果から、分割時供試体内部はほぼ均一な含水状態であったと言える。

表3.2-13 供試体分割による含水状態の分布の測定結果 (コア4)

供試体番号	位置	体積含水率(%)	飽和度(%)	有効間隙率(%)
4-T	上部	11.9	69.7	17.1
4-M	中部	11.8	68.1	17.3
4-B	下部	10.9	62.6	17.5

表3.2-14 供試体分割による含水状態の分布の測定結果 (コア5)

供試体番号	位置	体積含水率(%)	飽和度(%)	有効間隙率(%)
5-T	上部	4.81	21.8	22.0
5-M	中部	4.83	23.5	20.6
5-B	下部	4.46	22.9	19.4

表3.2-15 供試体分割による含水状態の分布の測定結果 (小ブロック4)

供試体番号	位置	体積含水率(%)	飽和度(%)	有効間隙率(%)
4-T	上部	13.1	56.4	23.3
4-M-L	中部 左側部	13.2	57.2	23.0
4-M-C		13.4	55.0	24.3
4-M-R		14.6	58.7	24.8
4-B	下部	13.9	57.5	24.2

表3.2-16 供試体分割による含水状態の分布の測定結果（小ブロック5）

供試体番号	位置	体積含水率(%)	飽和度(%)	有効間隙率(%)
5-T	上部	11.1	80.4	13.8
5-M-L	中部 左側部	10.1	76.3	13.3
5-M-C	中心部	11.6	85.7	13.6
5-M-R	右側部	10.6	83.4	12.7
5-B	下部	12.0	82.7	14.5



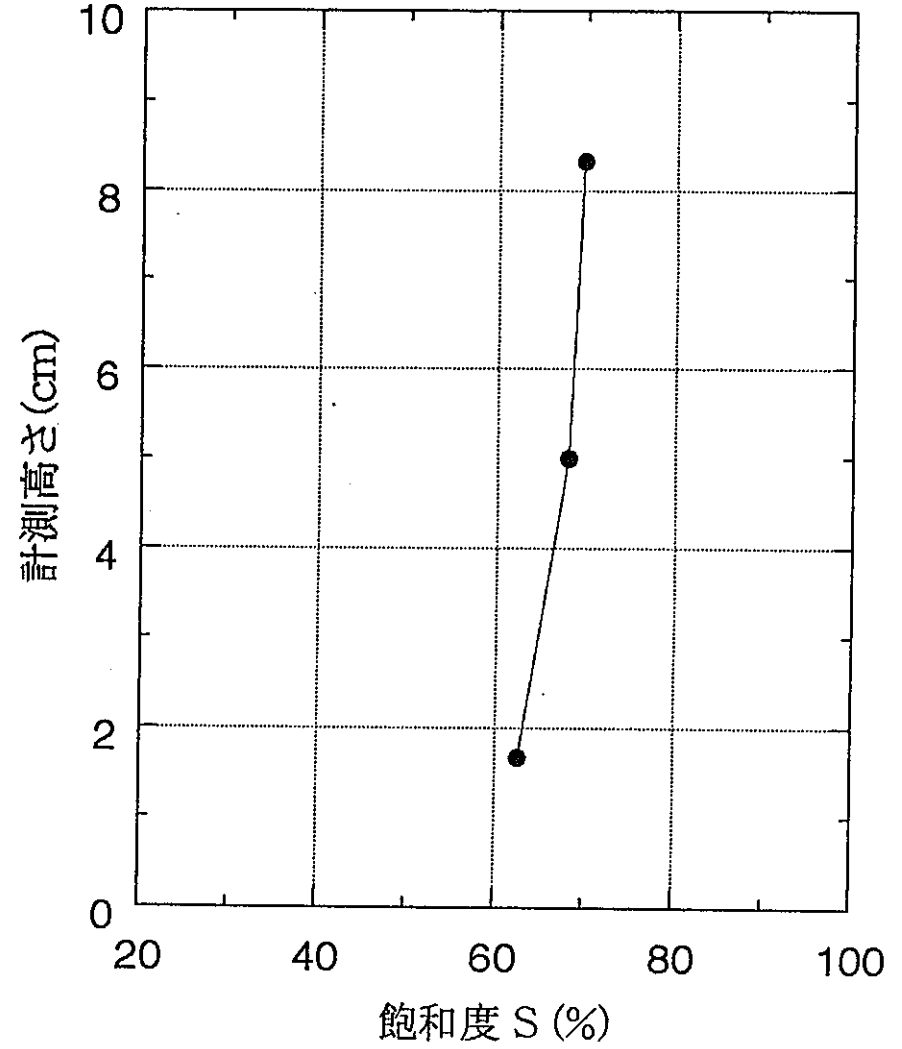
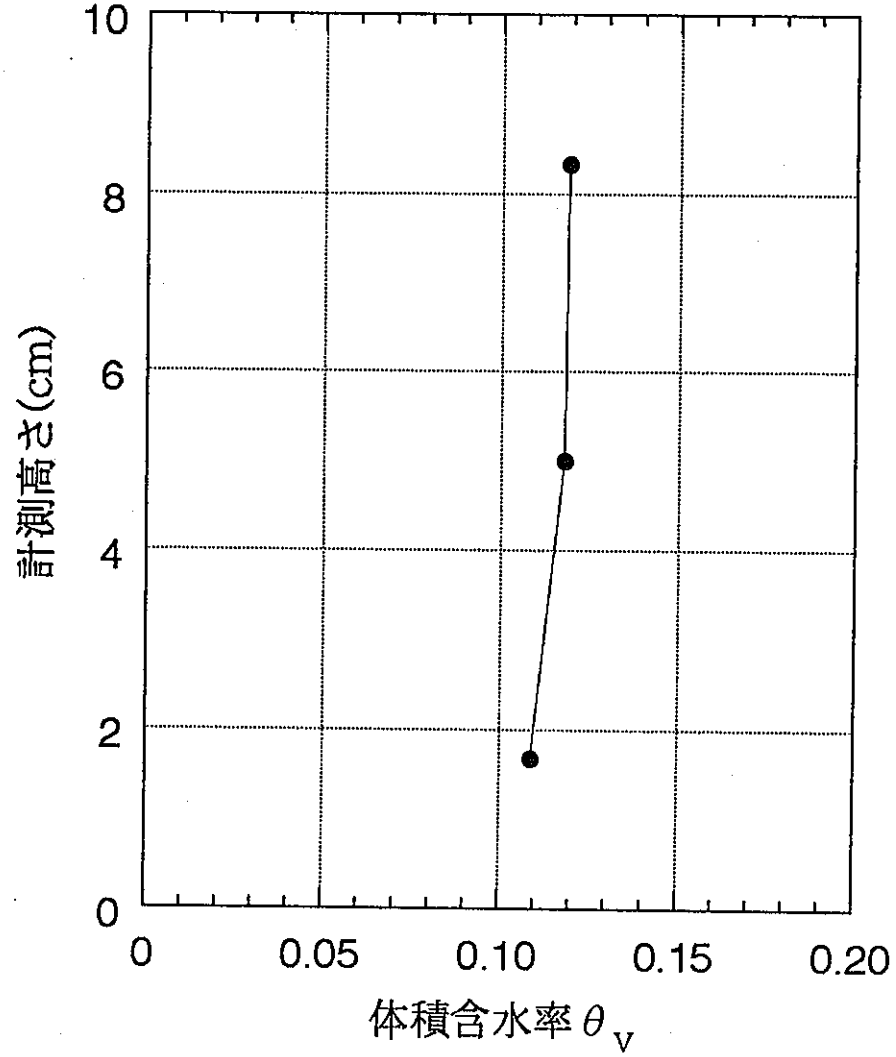


図3.2-19 高さ方向の体積含水率および飽和度の分布 (コア試料4)

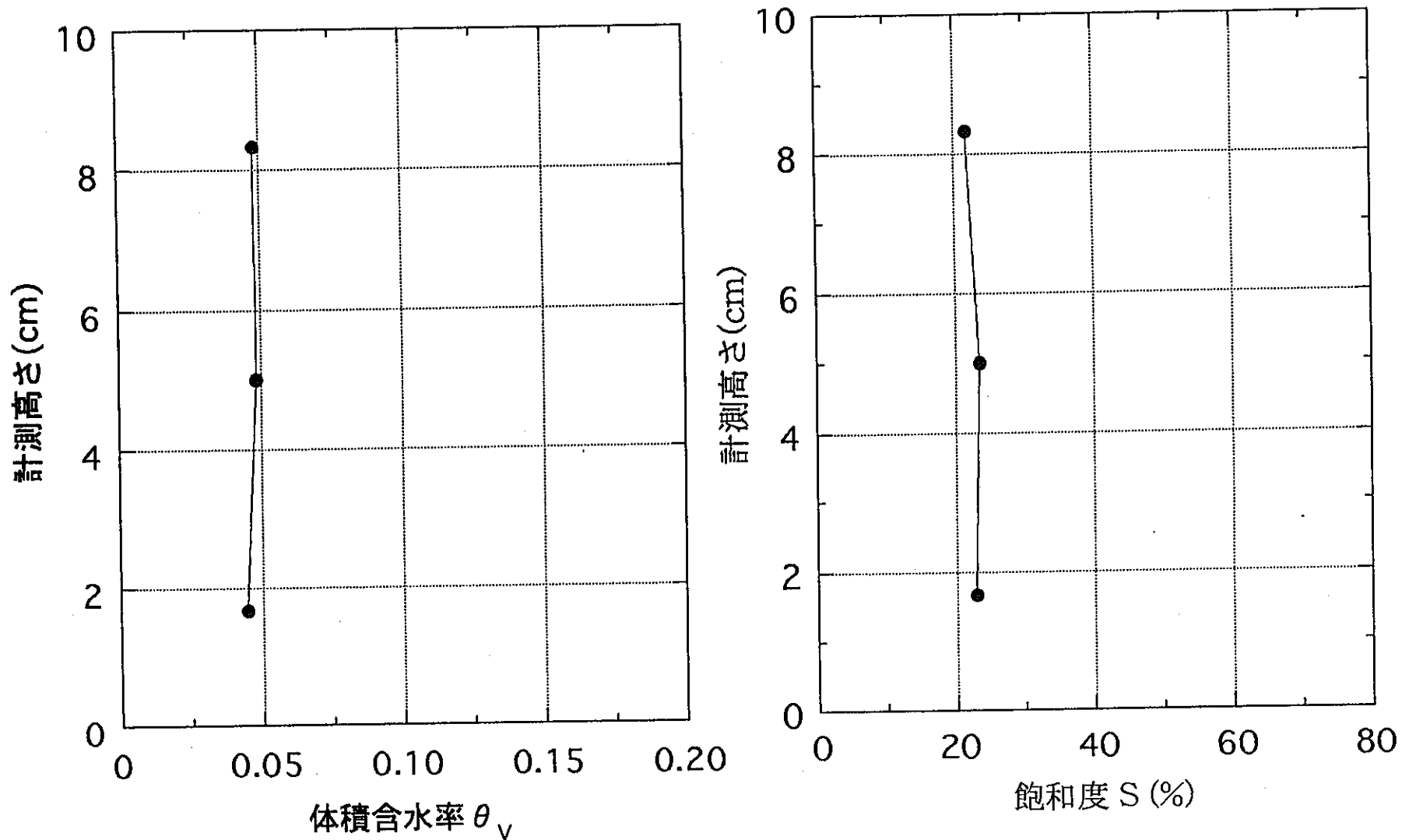


図3.2-20 高さ方向の体積含水率および飽和度の分布 (コア試料5)

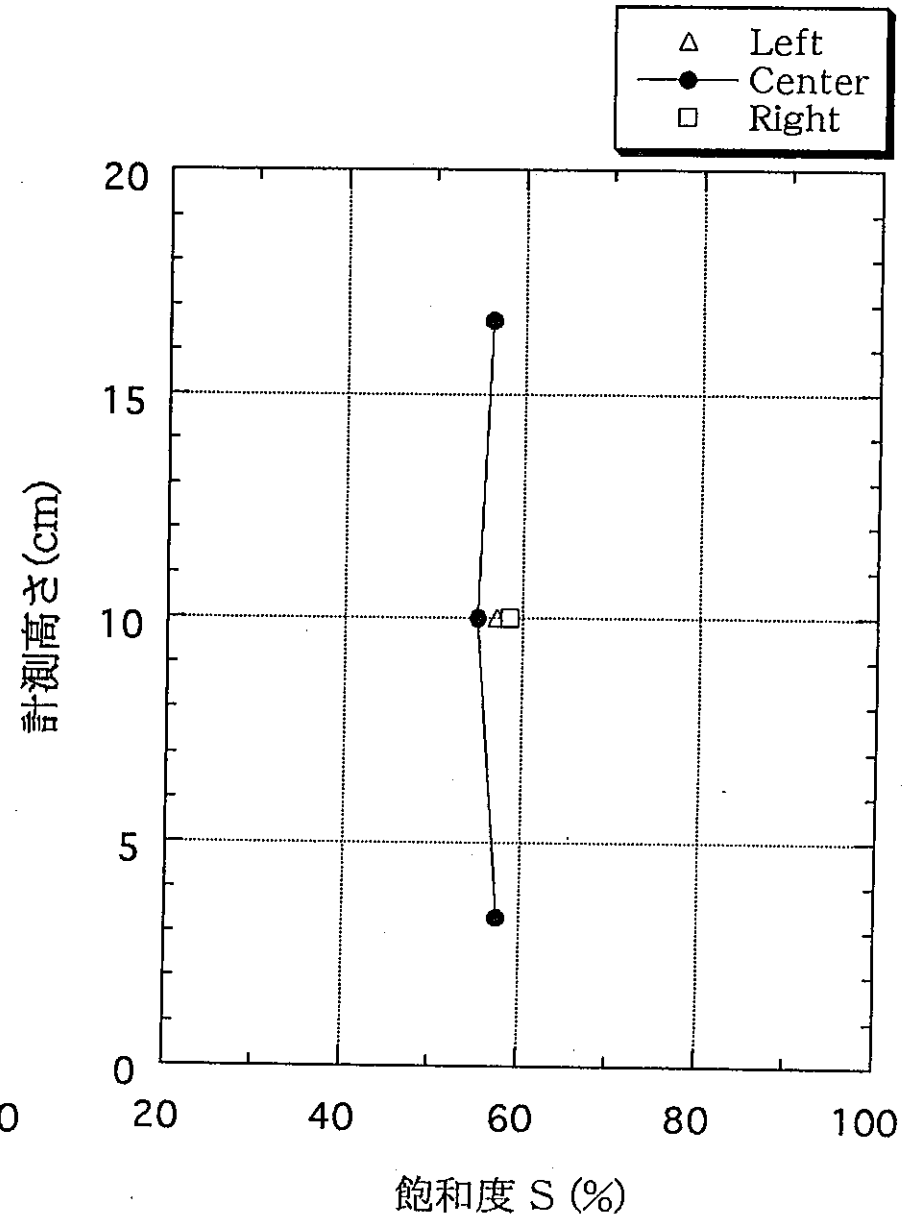
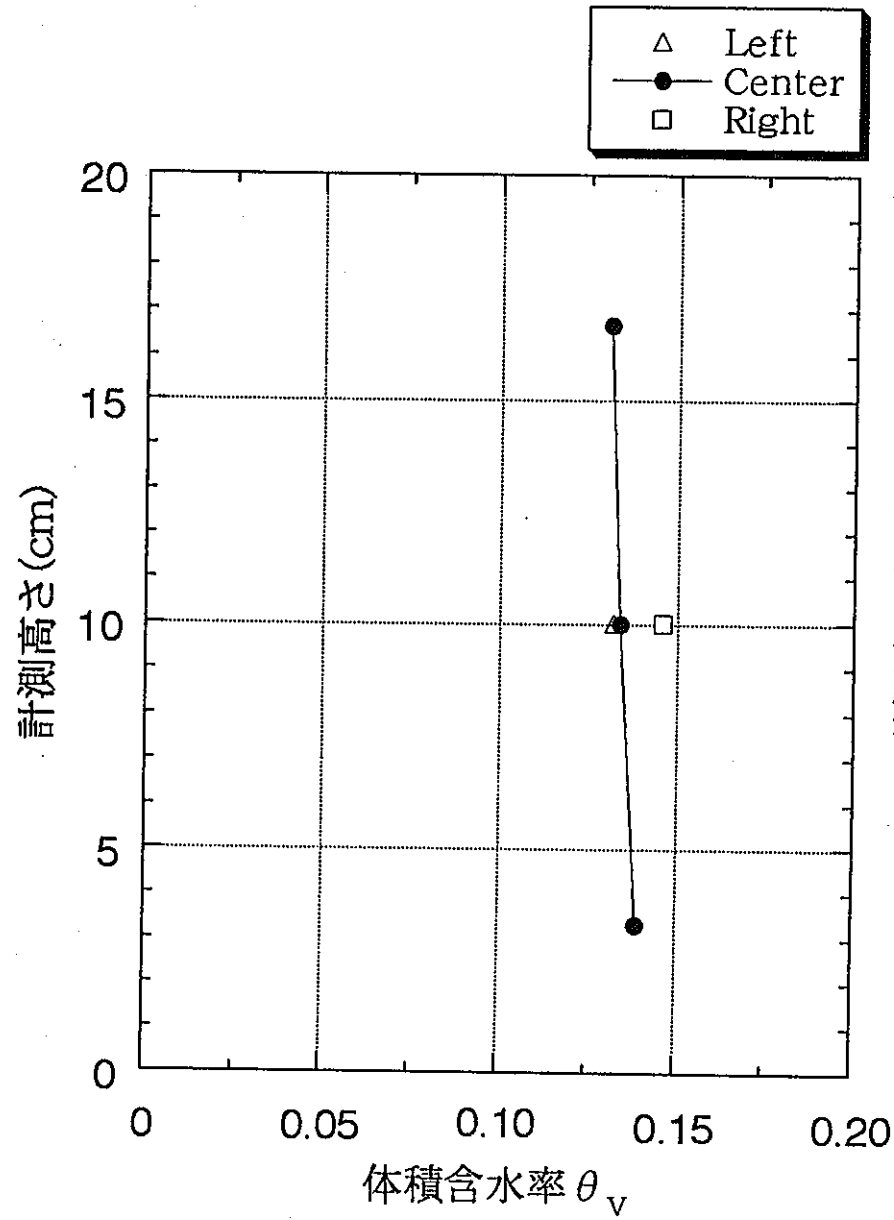


図3.2-21 高さ方向の体積含水率および飽和度の分布 (小ブロック4)

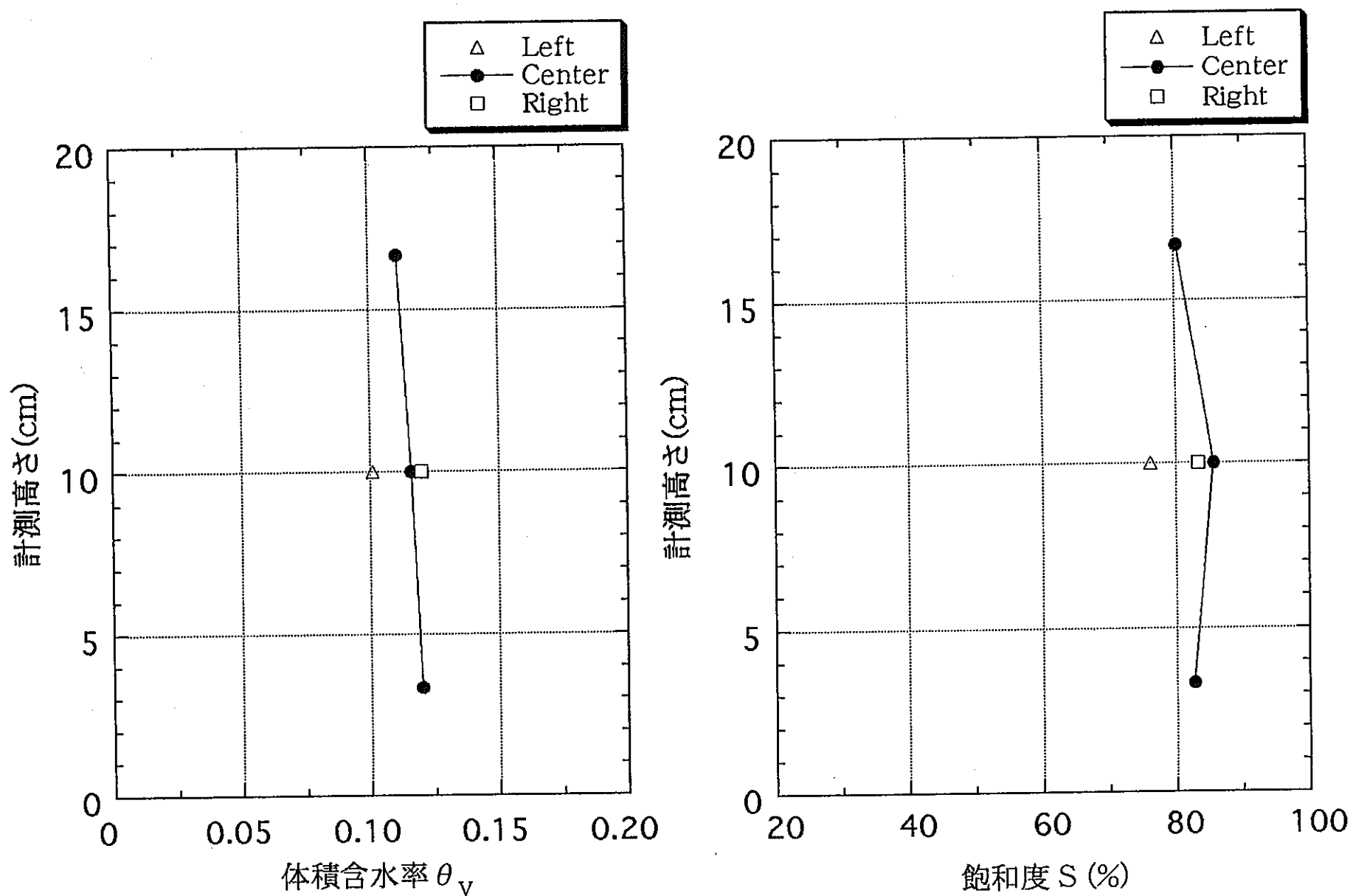


図3.2-22 高さ方向の体積含水率および飽和度の分布 (小ブロック5)

### 3. 2. 6 考察

#### (1) 超音波速度

図3.2-23および図3.2-24に3供試体まとめて、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。この現象は以下のように説明できると考えられる。

- ・ 間隙水の体積弾性率は大きいので高含水状態では間隙水のために岩石全体の体積弾性率が増加し、体積弾性率の影響を強く受けるP波速度が大きくなる。
- ・ 一方、体積弾性率の影響を受けず、剛性率と密度によって決まるS波速度（S波速度  $V_s = \sqrt{\mu / \rho}$ 、 $\mu$ ：剛性率、 $\rho$ ：密度）は、間隙水の剛性率は0なので影響は受けないが高含水状態では間隙水によって密度が増加することによってS波速度が低下する傾向を示すと考えられる。
- ・ 低含水状態でP波、S波速度のいずれも増加するのは間隙水の表面張力によって粒子間結合力が強まったためと考えられる。

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關係に整合的である（平成5年度報告書、3-38頁を参照のこと）。

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。

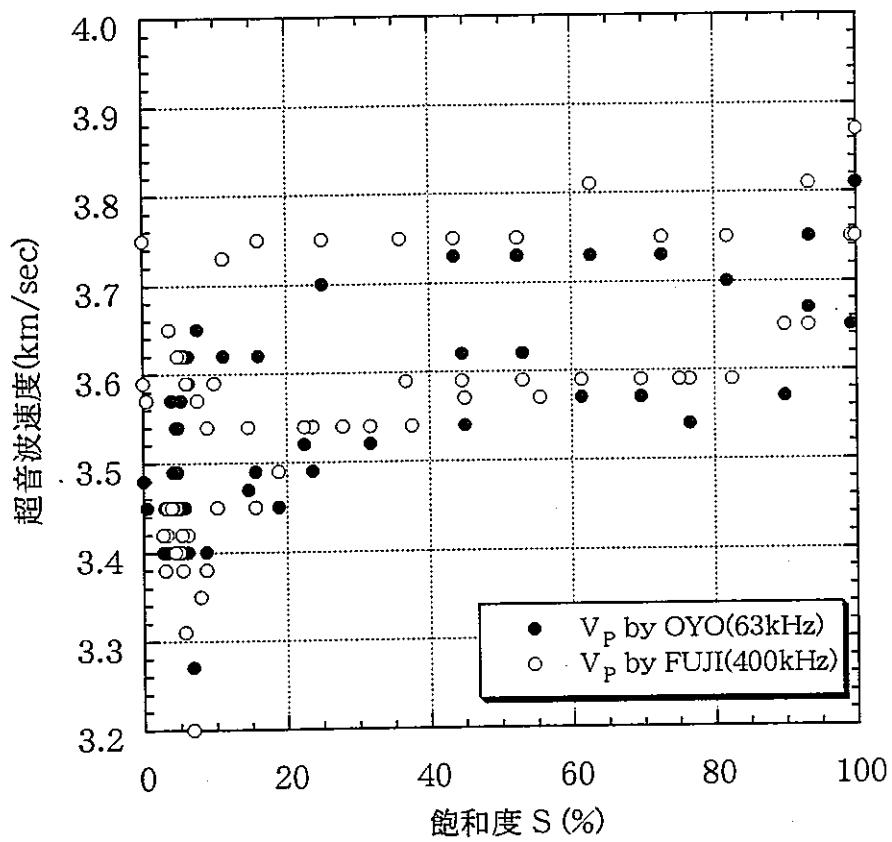
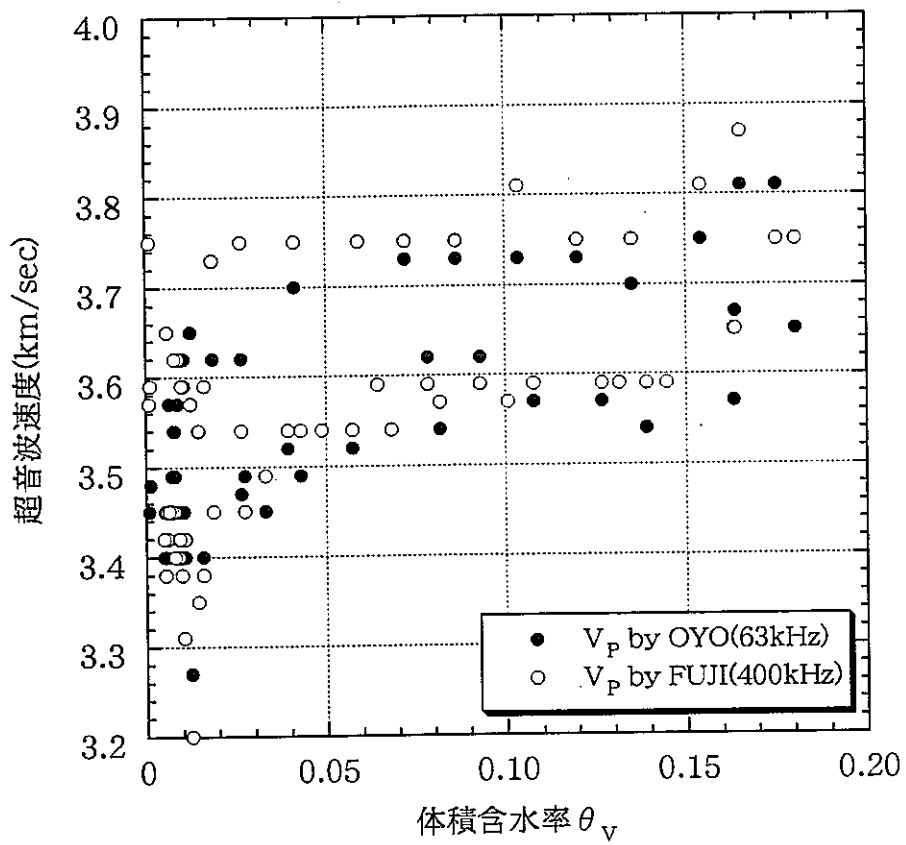


図3.2-23 体積含水率および飽和度と超音波速度 (P波) の関係

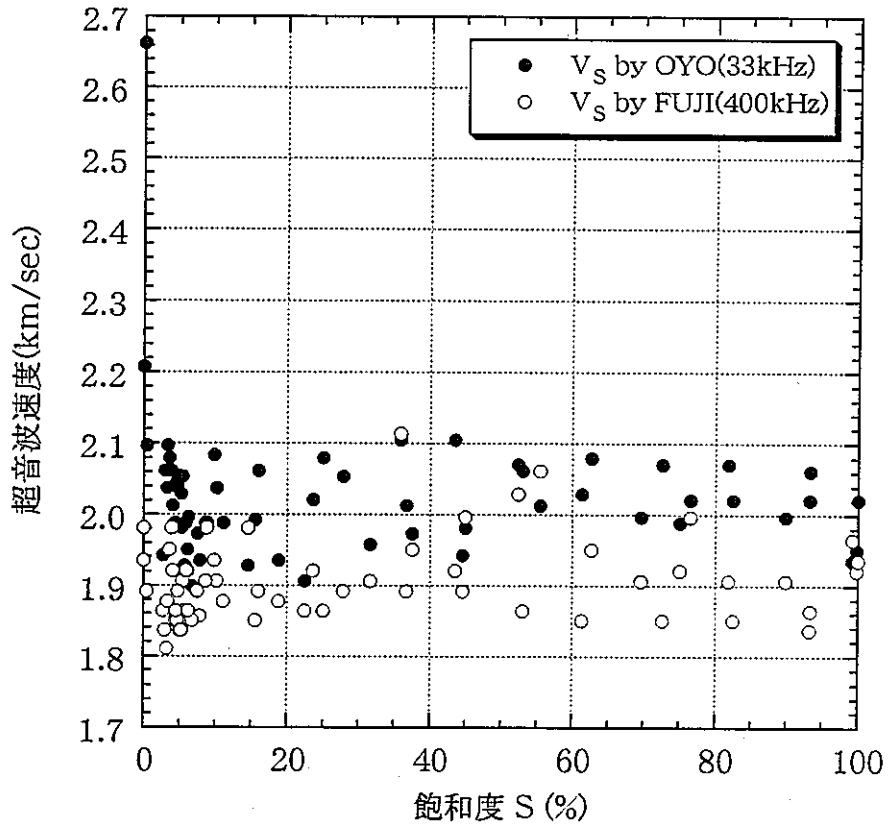
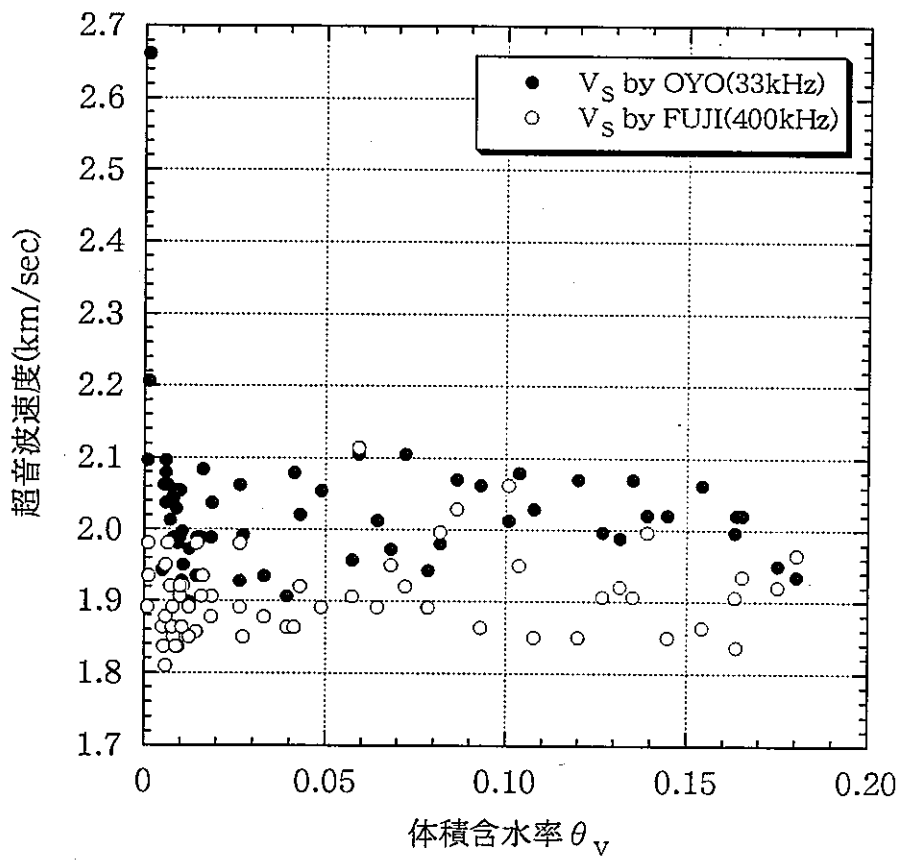


図3.2-24 体積含水率および飽和度と超音波速度（S波）の関係

## (2) 比抵抗

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。

$$\rho = a_1 \cdot S^{-n}$$

ここで  $a_1$  : 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

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図3.2-25に示す。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。

回帰式は次式で示される。

体積含水率

$$\rho = 28.23 \cdot \theta v^{-1.118} \quad (\Omega \cdot m) \quad \theta v : \text{体積含水率}$$

飽和度

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

多胡砂岩の比抵抗の変化は飽和度0~20% (体積含水率0~5%) で急激な変化を示すが、飽和度20~100% (体積含水率5%以上) ではほぼ一定であることから、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。



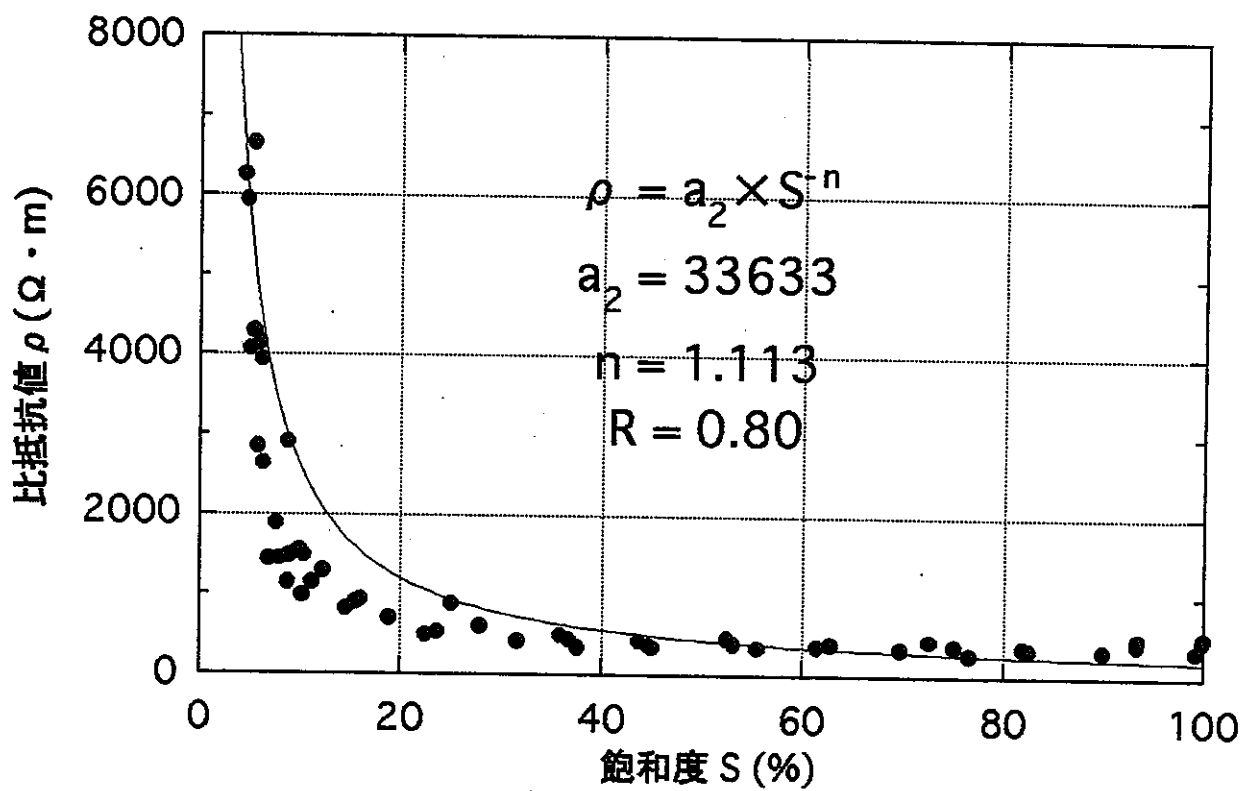
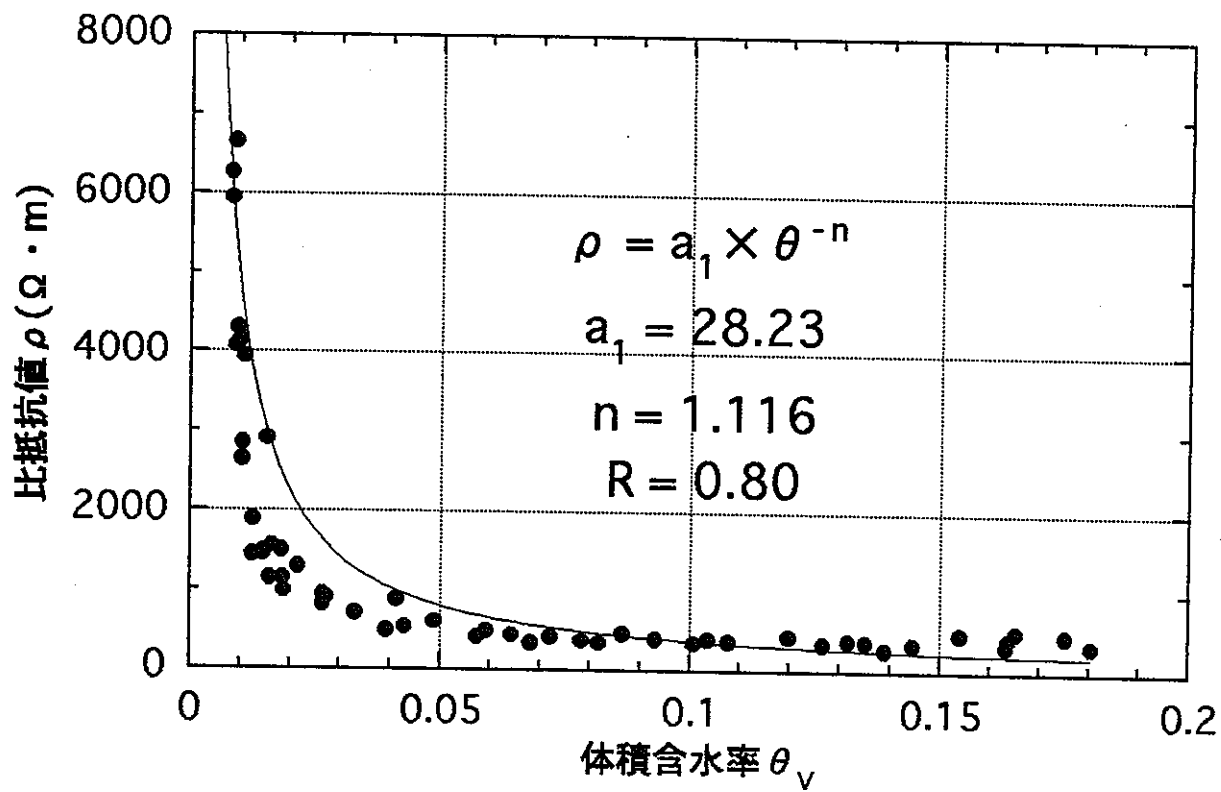


図3. 2-25 体積含水率および飽和度と比抵抗との関係のアーチー式による表現

### (3) 電磁波速度

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3.2-26に示す。回帰式は次式で示される。

比誘電率  $\epsilon$  ~ 体積含水率  $\theta v$

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

比誘電率  $\epsilon$  ~ 飽和度  $S$

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

$\epsilon$  : 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。現時点では次のような原因が考えられる。

#### ①測定ロッドの周囲に充填した導電性のケラチンクリームによる影響

ケラチンクリームの比誘電率が十分小さく、測定に影響を与える領域内の間隙中に時間の経過とともに含有成分が拡散したとすれば、測定した比誘電率が拡散の進行とともに低下した可能性が考えられる。

ケラチンクリームの導電性は含有成分であるNaClによる。後述するように比抵抗測定の本試験結果から、NaClの拡散があった可能性が否定できないことから、TDR測定においても何等かの影響があった可能性がある。ただし、NaClの水溶液の比誘電率は70程度(0.1~0.5モル)であり、水の比誘電率とあまり変わらないので影響は少ないと考えられる。導電性により電磁波パルスが減衰し、そのため図3.2-14の反射点が読み取り難くなっている可能性は考えられる。ケラチンクリーム自体の比誘電率は不明である。

#### ②岩石の誘電体的性質との関係

間隙水の表面積が小さい領域に相当するので岩石の誘電体としての働きが飽和度によって比較的急激に変わることも考えられる。

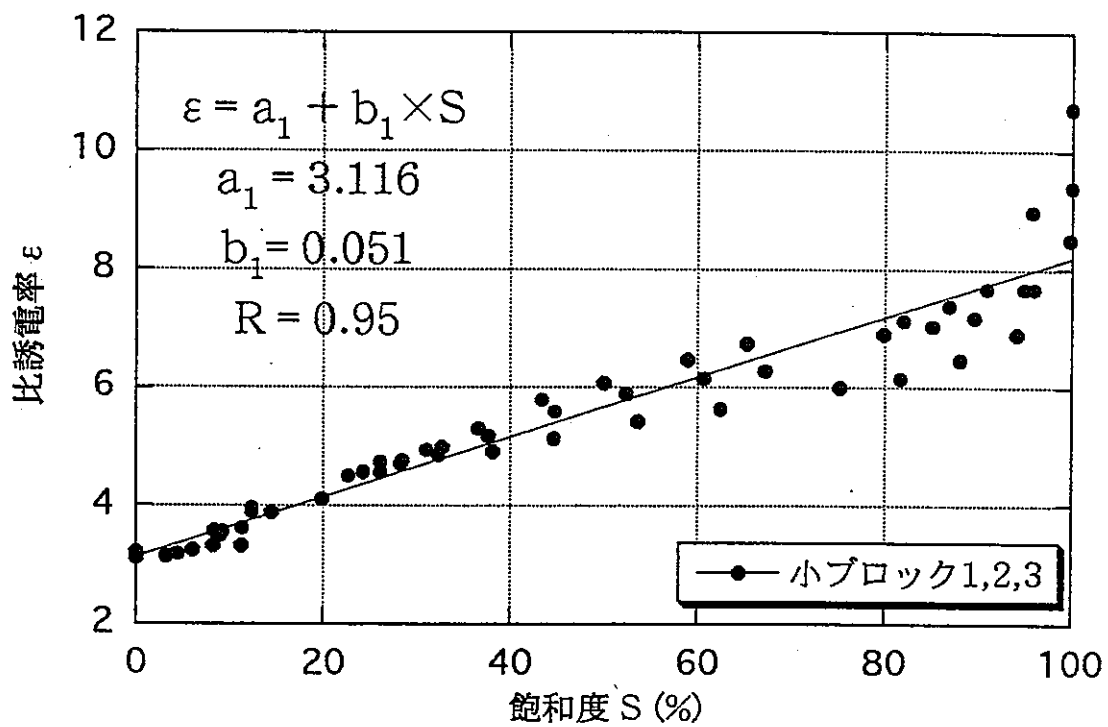
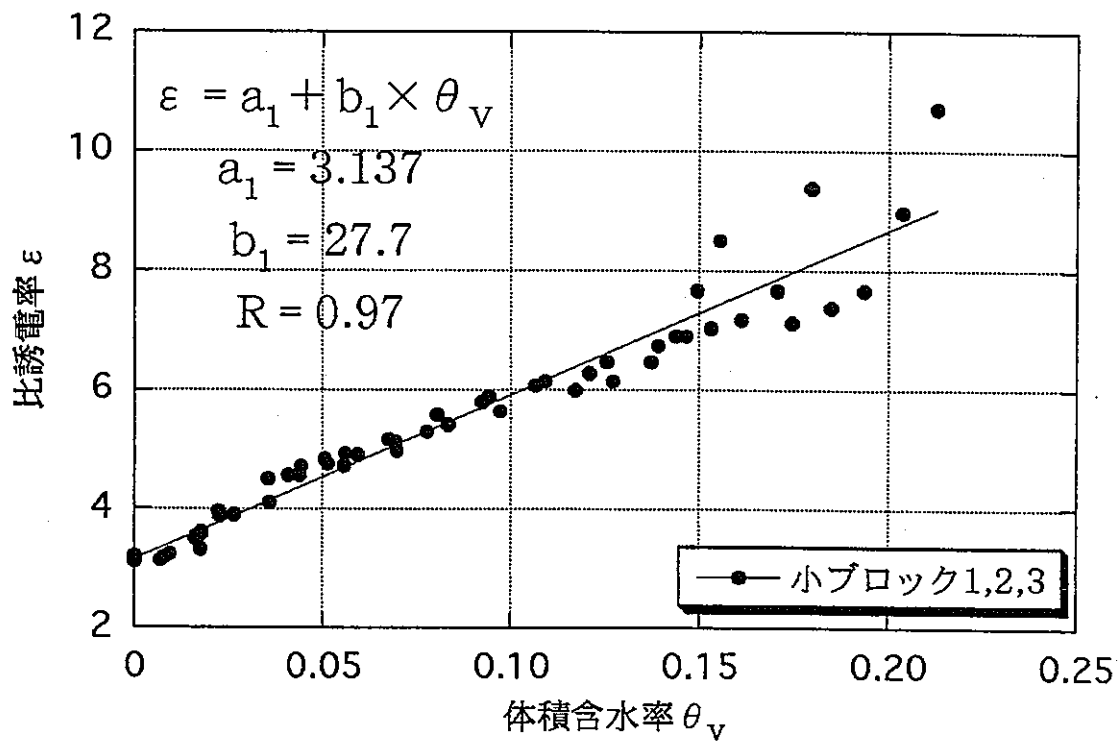


図3.2-26 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係の直線式による表現

#### (4) 物理量～含水量の関係の特徴

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3.3-1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3.3-2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。

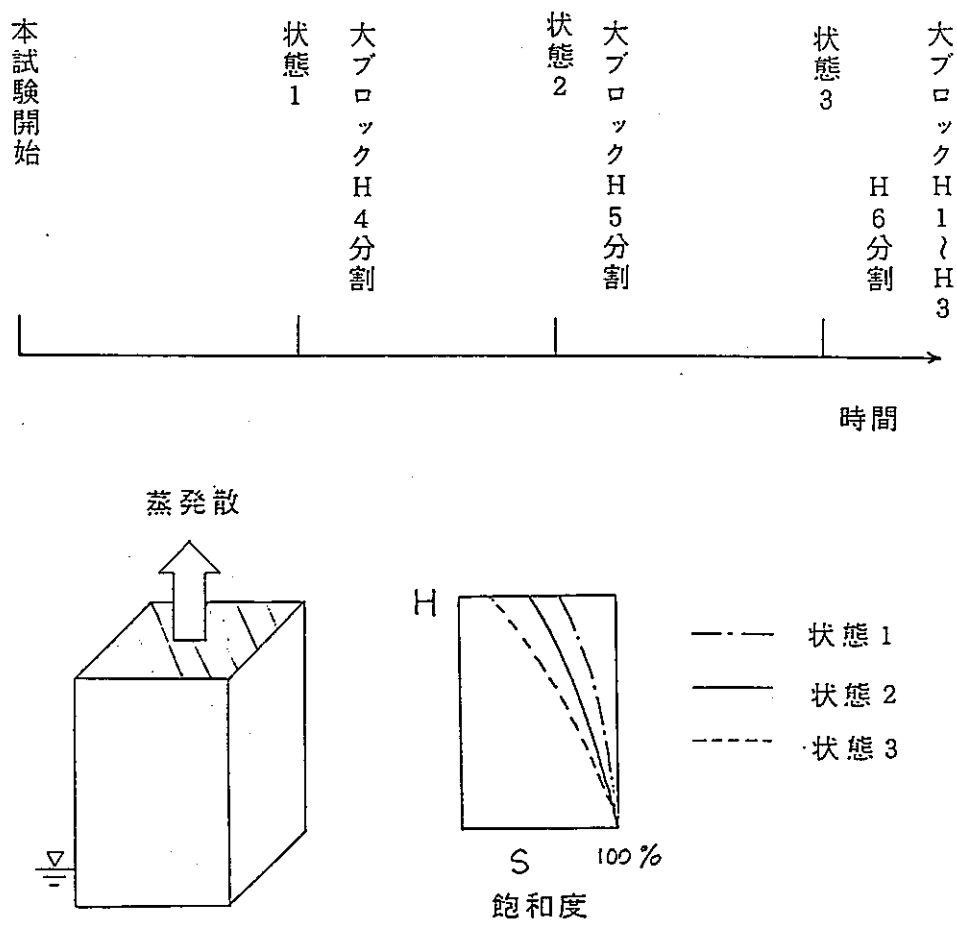


図3.3-1 3含水状態の概念図

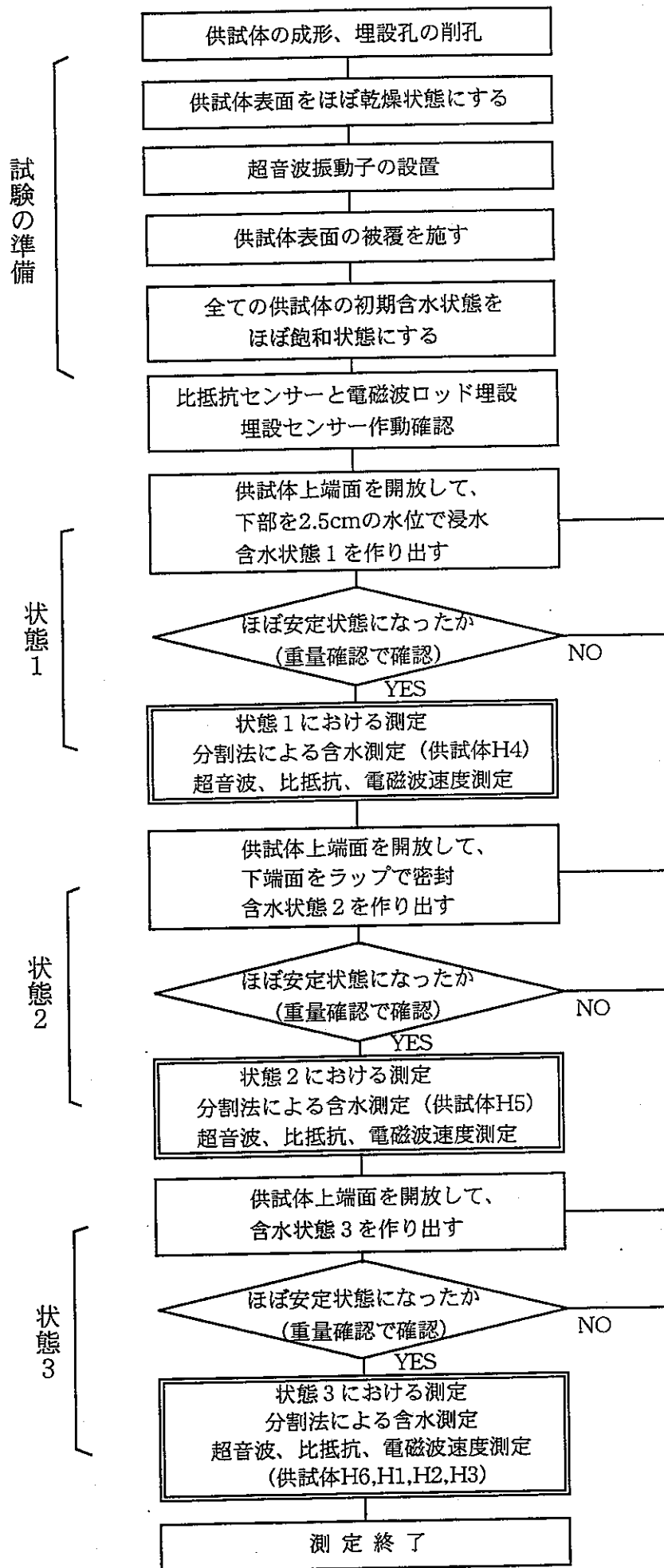


図3.3-2 ブロック供試体を用いた本試験のフロー

### 3. 3. 1 予備試験

この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。

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。

#### (1) 含水状態の制御予備試験

##### (i) 湿潤過程

試験は供試体を飽和状態にした後、乾燥過程を用いて実施することとした。そのために十分時間をかけて脱気した水道水に供試体を完全水浸した時の供試体重量の経時変化を測定した。

図3. 3-3 に測定結果を示す。この結果からおよそ140時間（6日）間試料を水浸することでほぼ重量変化のない状態になることがわかった。ブロック供試体は大きいために脱気水浸が困難であったので、便宜上この状態を飽和状態と見なした。

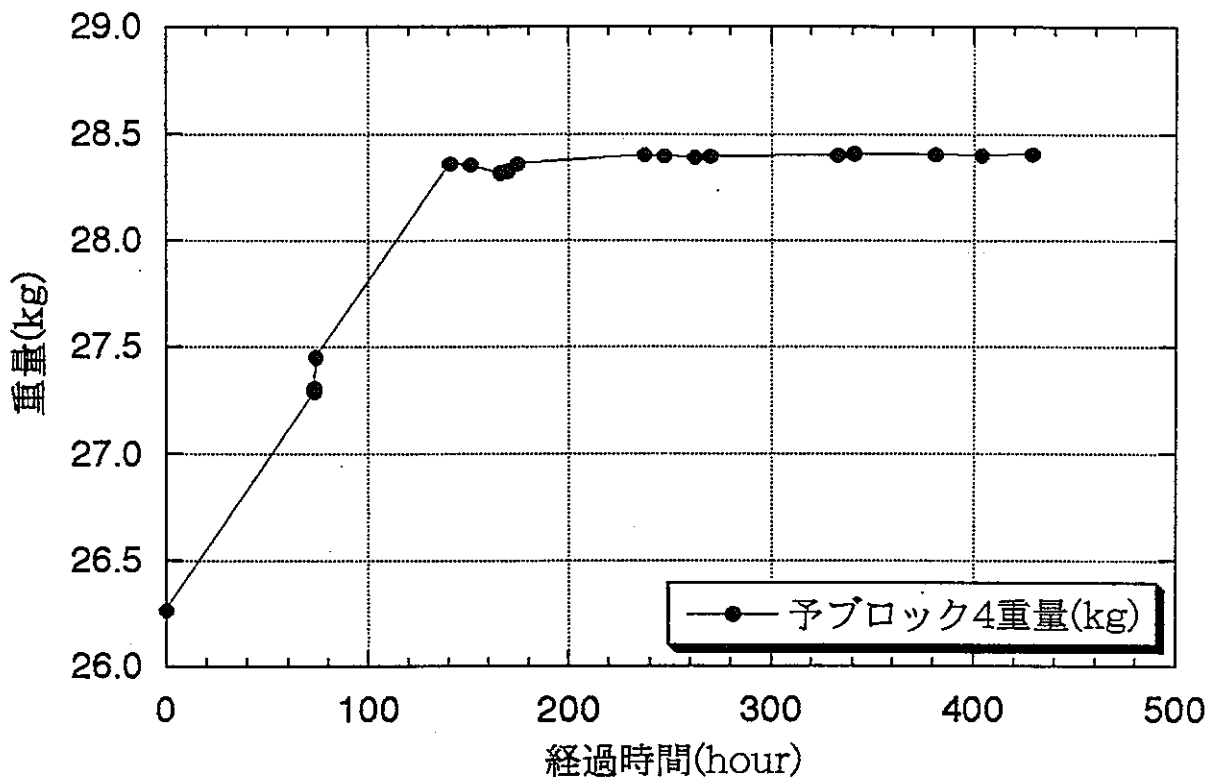


図3. 3-3 湿潤過程での供試体重量の変化（予ブロック4）

(ii)乾燥過程

ブロック供試体内部に不均一な含水分布状態を3状態を構成するために、下記に示す異なる境界条件を用意して、乾燥過程の供試体重量の経時変化を測定した。本試験用供試体と同一寸法、境界条件の3供試体を用いた。

- ・状態A：ブロック供試体下部を低定水位（水深2.5cm）で浸水し、上端面に乾燥した気流を与え、さらにライト照射を加えた状態。
- ・状態B：ブロック供試体下部を低定水位（水深2.5cm）で浸水し、上端面に扇風機で室内乾燥状態の気流（弱風）を加えた状態。
- ・状態C：ブロック供試体下部を低定水位（水深2.5cm）で浸水した定常状態。
- ・状態D：ブロック供試体下部を低定水位（水深2.5cm）で浸水し、上端面に乾燥材（粒状シリカゲル）をおいて上からサランラップで覆った状態。
- ・状態E：ブロック供試体下部を中定水位（水深7.5cm）で浸水した定常状態。
- ・状態F：ブロック供試体下部を高定水位（水深12.5cm）で浸水した定常状態。

図3.3-4～図3.3-6 に測定結果を示す。

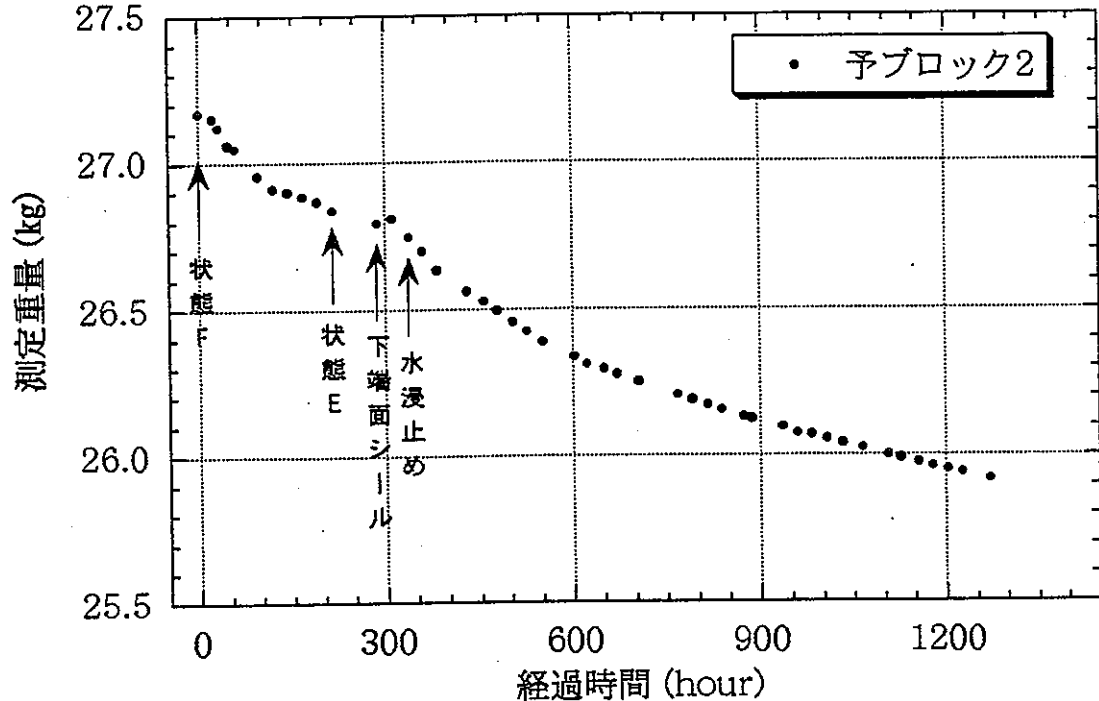


図3.3-4 乾燥過程での供試体重量の変化（予ブロック2）



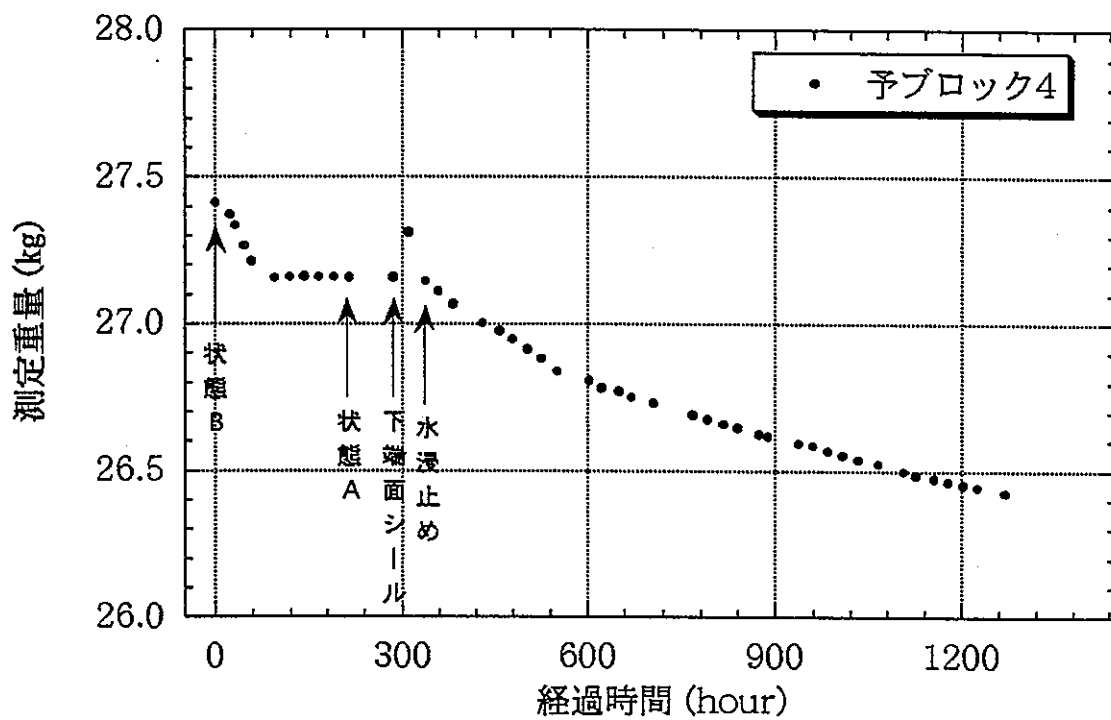


図3.3-5 乾燥過程での供試体重量の変化（予ブロック4）

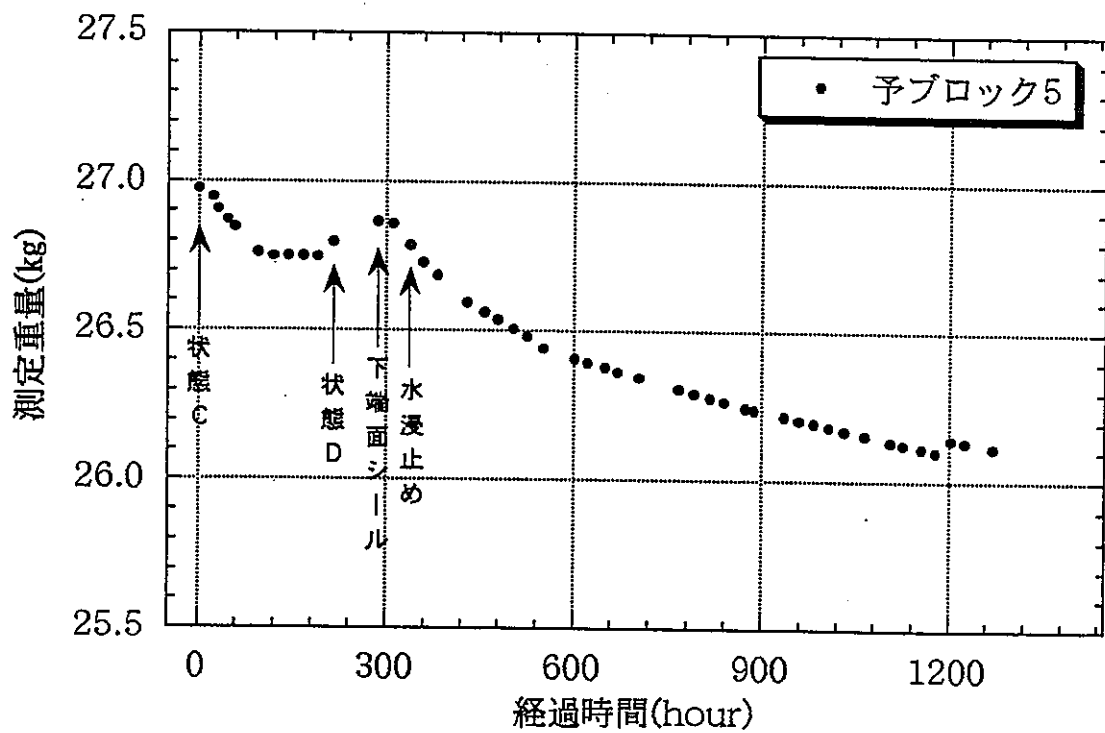


図3.3-6 乾燥過程での供試体重量の変化（予ブロック5）

この結果から、次のことがわかった。

- ・ 下端部だけを水浸した場合、水浸深さによって重量変化の仕方に大きな違いがない。
- ・ 下端部だけを水浸した場合、いずれの境界条件でもおよそ120時間（5日間）でほぼ定常状態になる。  
（予ブロック2の供試体で重量が減少し続けているのは、シリコン被膜の厚さが1～2mm程度で薄い  
ため側面からの蒸発があったものと考えられる）。
- ・ いずれの境界条件を用いても供試体重量の変化に大きな違いはなかった。
- ・ そのため、320時間（2週間）後に水浸を取りやめて、下端面にサランラップを巻き、水の供給を断  
って重量の経時変化を調べたが、ほぼ重量は漸減の傾向を示している。

以上の予備試験の結果をもとにして、測定を実施する日を次のように決定した。

状態1：下端面を2.5cm水浸してから168時間（7日）後

状態2：状態1の後水中から取り出し、下端面をサランラップで巻いて水の供給を断ってから168時間  
（7日）後。状態1開始からは336時間（14日）後。

状態3：状態2と同じ経過でさらに168時間（7日）後。状態1開始からは504  
時間（21日）後。

## （2）物理量計測の予備試験

超音波速度、比抵抗および電磁波速度の測定方法を検討するために、センサーの設置方法、形状、測定  
信号の大きさなどについて予備試験を実施した。

### （i）超音波速度測定

20cmの試料長について超音波信号が透過するかどうかを見るために、室内乾燥状態の試料を用いて、両  
端面にセンサーを圧着あるいは接着させて試験測定を実施した。その結果、センサーを供試体表面に接着  
すれば測定できることがわかった。

### （ii）比抵抗測定

比抵抗測定のための電極センサーの設置方法の検討を行った。比抵抗測定の場合には電極の接地状況が  
測定上重要な要因となる。白金製の環状電極とセンサー設置用孔との接地を十分なものにするために、導  
電性のケラチンクリームを用いることにした。このケラチンクリームの影響を見るためと電極センサーの  
性能を見るために予備試験を行った。

ケラチンクリームは空気中で乾燥し、導電性を次第に失うので、ある程度の含水状態である必要がある。

そこで、NO. 1（上部）センサーはケラチンクリーム塗布後、約90分間空気乾燥してから予備試験用の供試体に設置した。また、NO. 2（下部）センサーはケラチンクリーム塗布直後に供試体に設置した。電極センサーは本試験で用いたものと全く同じものを用いた。

図3. 3-7 に比抵抗測定予備試験の結果を示す。

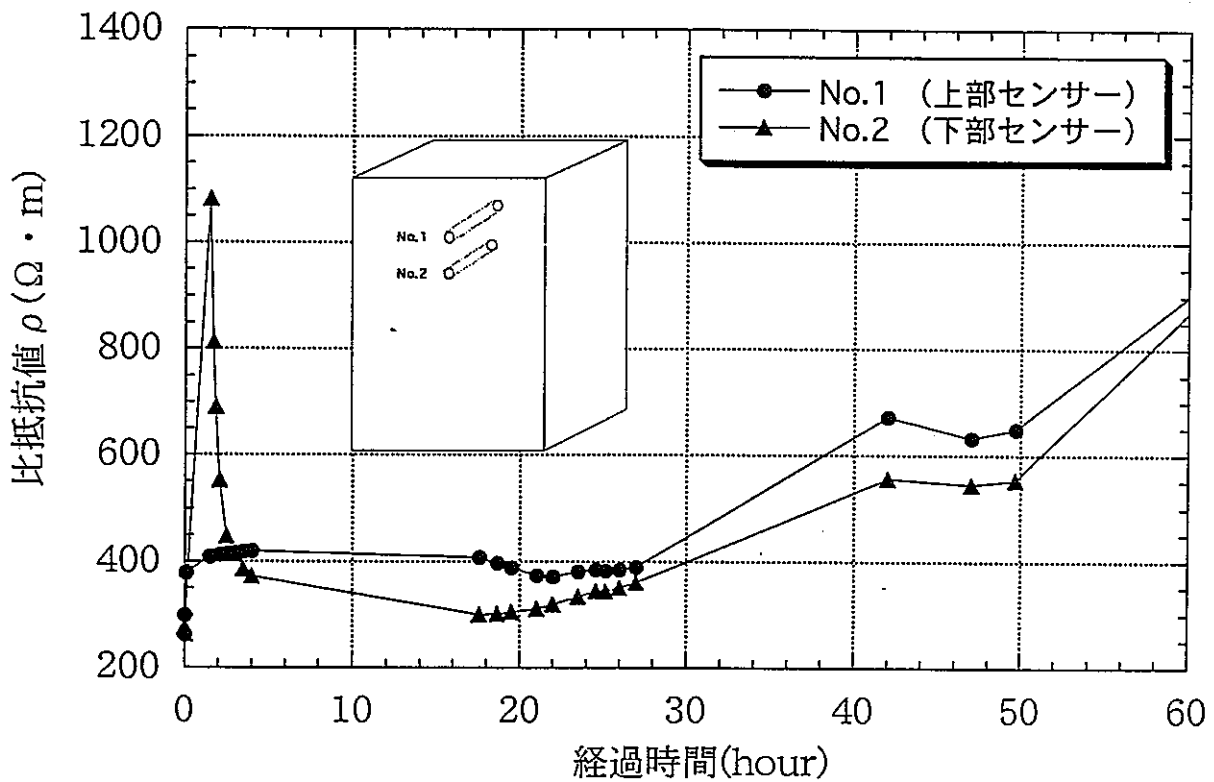


図3. 3-7 比抵抗測定予備試験の結果

図から、およそ4時間程度でケラチンクリームと周囲の供試体の含水状態がバランスして比抵抗値はほぼ同じ値を示すようになり、設置時のケラチンクリームの含水状態にあまり依存しないことが読み取れる。2つのセンサーで値に差があるのは同一供試体の電極センサー設置位置による境界条件の影響あるいは電極特性の違いによるものと考えられる。室内乾燥状態の大ブロックを用いた。

センサー設置位置による境界条件の影響試験を実施した。図3.3-8 に試験時の状況を示す。

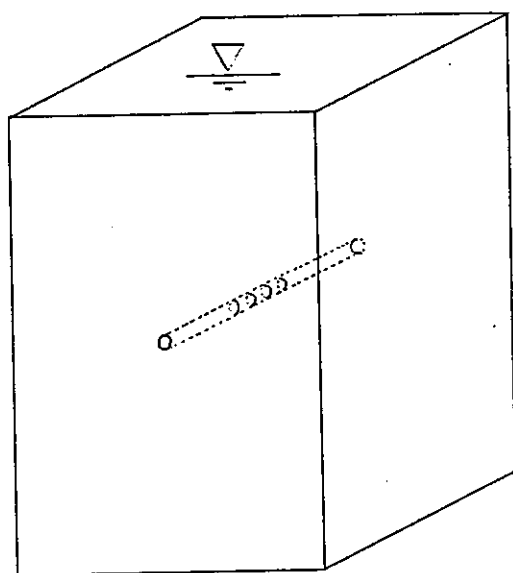


図3.3-8 センサー設置位置による境界条件の影響試験

透明アクリル板を用いて測定ブロックと同じ大きさ（内径で縦20cm×横20cm×高さ30cm）の水槽を製作し、水道水で一杯にして各電極センサーの設置位置において水道水の比抵抗を測定した。水道水の真の比抵抗は電気伝導度計を用いて測定した。電極センサーによる比抵抗値を電気伝導度計による比抵抗値 $\rho_w$ （ $68.32 \Omega \cdot m$ ）と比較することにより、境界条件の影響を見ることが出来る。

この試験では境界条件の影響の他に、電極センサー固有の特性とともに電極が点電極ではなく環状電極であることの影響も見ている。今回用いている等間隔4極法（ウェンナー法）の電極配置では点電極を用いた場合の電極配置係数（ある電極配置で測定した抵抗から比抵抗を求めるための換算係数）は良く知られている $4\pi a$ （ $a$ は電極間隔）であり、通常はこの値が用いられることが多いが、今回の研究では電極径に比べて電極間隔が短いために点電極の仮定が成り立たず、正しい比抵抗値を求めるためには電極配置係数に対する補正も必要である。この電極配置係数に対する補正値を解析的に求めることは大変難しい計算を必要とするので、水槽内での境界条件の影響に含めて補正係数を求めた。

表3.3-1 に境界条件影響試験の結果を示す。表中の比抵抗 $\rho_i$ は電極センサーを用いて測定した抵抗 $R$ から点電極の電極配置係数を用いて計算した比抵抗を示し、補正係数 $G_b$ は電気伝導度計を用いて測定した水槽水の比抵抗値 $\rho_w/\rho_i$ によって求めた。

表3.3-1 境界条件影響試験の結果

測定レベル 最上部 5	抵抗 (Ω) R	比抵抗 (Ω・m) $\rho_i = 4\pi aR$	補正係数 Gb $\rho_w / \rho_i$
5	175.8	33.14	2.06
4	177.4	33.44	2.04
3	179.2	33.78	2.02
2	180.3	33.99	2.01
1	181.1	34.14	2.00

この結果から、センサーおよびセンサー位置による測定値の違いは3%以内にあることがわかる。

(iii)電磁波速度測定

TDRケーブルテスターの測定性能、ロッド直径、および設置方法などを調べるために予備試験を実施した。

直径7mmの真中製の丸棒を、長さ5、10、15、20、24cmの5種類、それぞれ2本ずつ用意し、水道水を満たした水槽（ブロック供試体と同じサイズ）内に中心間隔を3cmに保った状態でロッド部分の全長を浸して（ロッドの端部を水面に一致させた）測定した。

写真3.3-1 に試験状況を示す。水道水の電気伝導度は $147.7\mu\text{S}/\text{cm}$ 、試験時の水温は $16.3^\circ\text{C}$ であった。

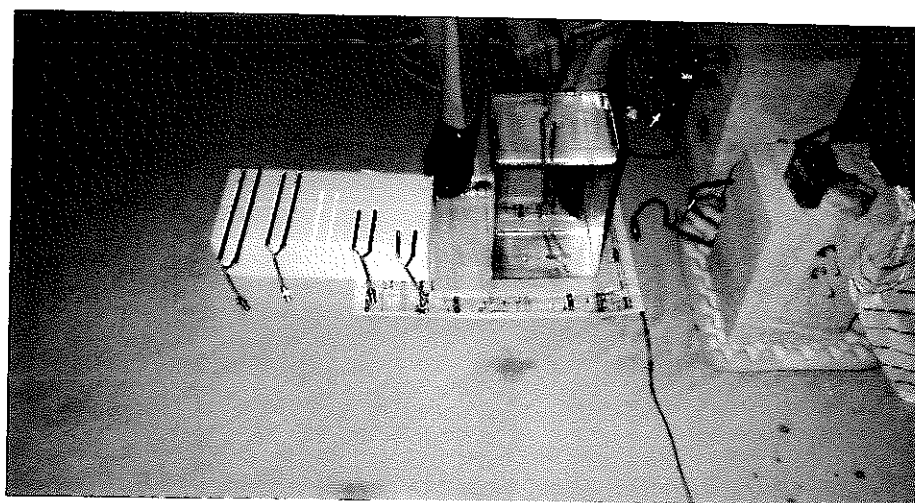


写真3.3-1 TDR測定ロッド水中試験の状況

図3.3-9 には水中での実際のロッド長とTDR表示長さ（図3.2-12参照）の関係を示す。

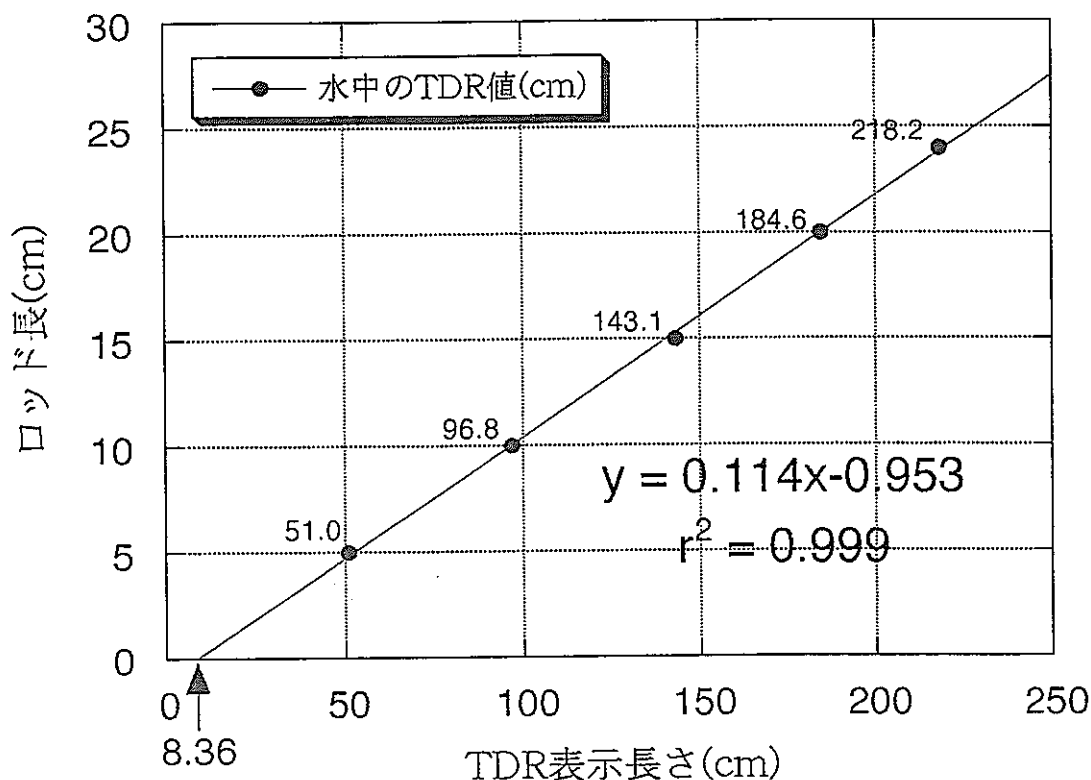


図3.3-9 測定ロッド長とTDR表示長さの関係（水中）

なお、同じ測定を空中で実施した結果は図3.3-16 に既に示した。この結果から、水道水の比誘電率を次のように求めることができる。

$$\frac{\epsilon_{\text{wat}}}{\epsilon_{\text{air}}} = \left( \frac{218.2 - 51.0}{24.0 - 5.0} \right)^2 = 8.8^2 = 77.44$$

ここで  $\epsilon_{\text{wat}}$  : 水の比誘電率

$\epsilon_{\text{air}}$  : 空気の比誘電率

$\epsilon_{\text{air}} = 1$  として  $\epsilon_{\text{wat}} = 77.44$  が得られる。通常、水の比誘電率は80程度であり、この比誘電率は、妥当な値と考えられる。ロッド直径については、直径10mmと7mmの2種類を用意して空中で比較測定を実施したが、全く同じ値を示した。そのため、測定ロッドの占める体積がより小さい直径7mmのロッドを用いることとした。測定孔との間の間隙は直径にして1mm以下であった。

### 3. 3. 2 ブロック供試体の準備

#### (1) ブロック供試体の形状、寸法および側面処理

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(H4~6)と超音波伝播速度(H1)、比抵抗(H2)、電磁波測定用(H3)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20cm×横20cm×高さ30cm(初期重量約27kg)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、あらかじめ含水分布測定用ブロック供試体(大ブロックH4、H5、H6)の周囲に深さ2.5cmの切れ目を入れた(図3.3-10参照)。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ら7.5cm、12.5cm、17.5cm、22.5cmとした。下端部と上端部とは端面部を含むので7.5cm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。

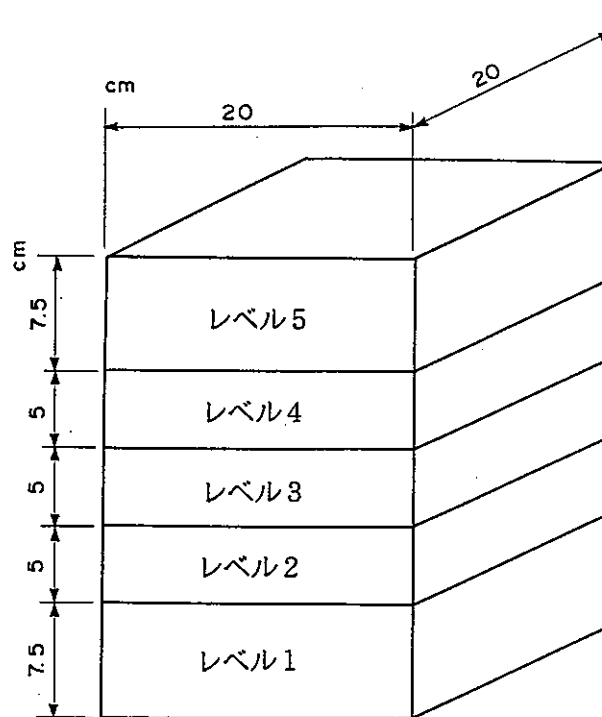


図3.3-10 分割のための切れ目位置

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。

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10 mmの貫通孔を5本削孔した。

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7 mm、中心間隔3 cm、長さ19 cmの不貫通孔を各々2本、計10本掘孔した。

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次元的にするために、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5 mm程度にした。

大ブロックH1は接着剤を用いてセンサーを固定するために、まずセンサーを固定した後にシリコンゴムを塗布し、それから浸水処理を施した。大ブロックH2およびH3はセンサー設置にケラチンクリームを用いるために測定孔を削孔した後にシリコンゴムを塗布し、浸水処理をした。浸水処理終了後に取り出してセンサーを設置した。含水量測定のため的大ブロックH4、H5およびH6は側面全周に切れ目を入れた後、シリコンゴムを塗布し、浸水処理をした。浸水処理は重量変化が認められなくなるまでとしたが、予備試験の結果を参考にして10日間以上とした。

## （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。

表3.3-2 および図3.3-11 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安と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  
 状態1の測定日 2月14日  
 状態2の測定日 2月21日  
 状態3の測定日 3月1日

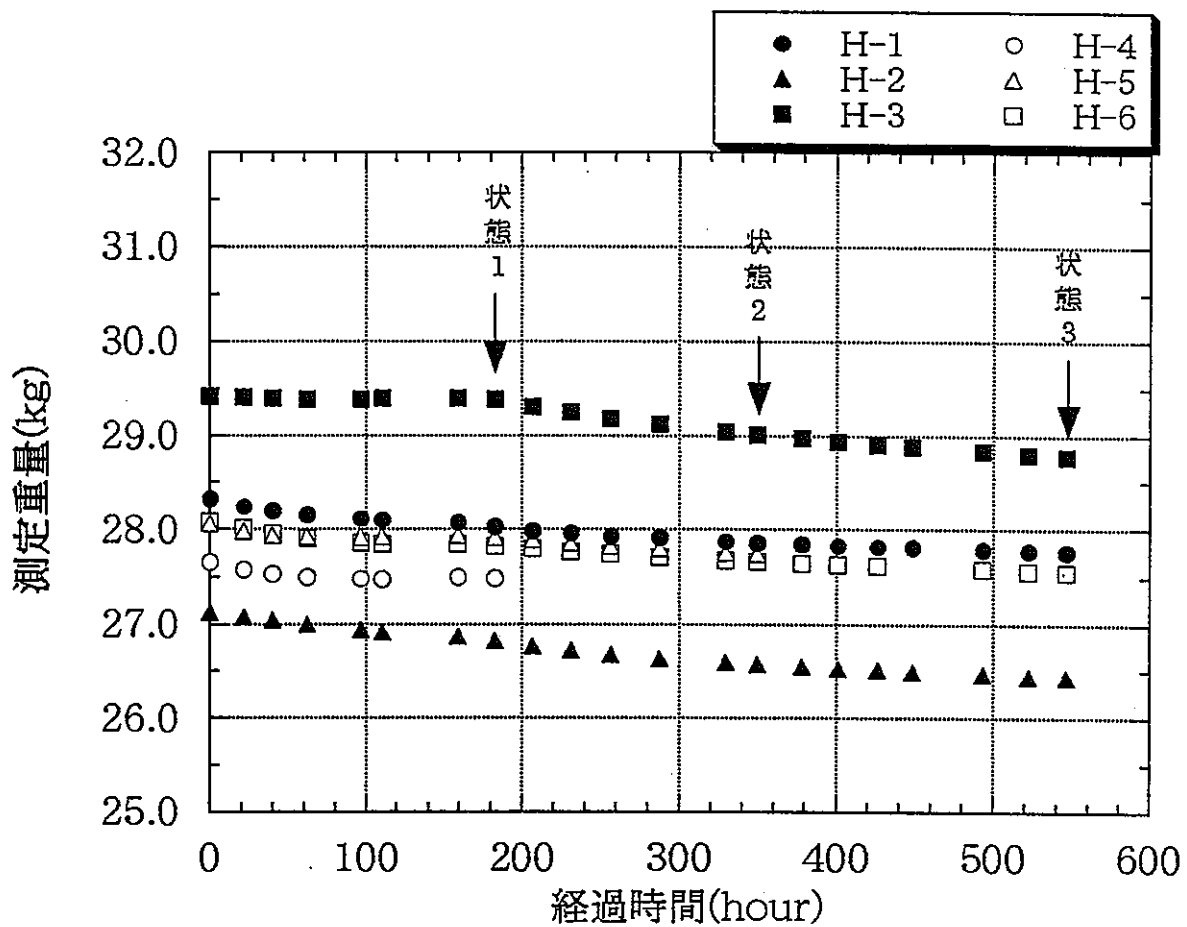


図3.3-11 ブロック供試体重量の経過時間変化図

表3.3-2 大ブロック重量の経過時間変化一覧表

番号	経過時間(hour)	H-1重量(kg)	H-2重量(kg)	H-3重量(kg)	H-4重量(kg)	H-5重量(kg)	H-6重量(kg)	備考
1	0.00	29.652	29.697	29.420	27.659	28.065	28.089	
2	18.83	29.567	29.649	29.402	27.578	27.986	28.020	
3	40.00	29.525	29.618	29.393	27.537	27.939	27.960	
4	62.25	29.480	29.574	29.383	27.499	27.924	27.903	
5	96.83	29.440	29.515	29.380	27.483	27.921	27.859	
6	110.58	29.427	29.492	29.396	27.479	27.927	27.852	
7	159.25	29.399	29.445	29.390	27.502	27.942	27.852	
8	182.25	29.356	29.399	29.380	27.485	27.918	27.826	状態1(H-4分割)
9	206.75	29.312	29.342	29.309	-----	27.895	27.809	
10	231.25	29.284	29.295	29.242	-----	27.862	27.775	
11	256.75	29.260	29.251	29.182	-----	27.832	27.746	
12	287.50	29.239	29.212	29.122	-----	27.801	27.718	
13	329.75	29.208	29.166	29.044	-----	27.759	27.681	
14	349.75	29.192	29.147	29.013	-----	27.742	27.666	状態2(H-5分割)
15	378.25	29.176	29.123	28.974	-----	-----	27.648	
16	401.25	29.163	29.106	28.942	-----	-----	27.633	
17	426.25	29.150	29.086	28.910	-----	-----	27.618	
18	448.25	29.140	29.070	28.883	-----	-----	-----	
19	493.25	29.119	29.045	28.835	-----	-----	27.583	
20	522.25	29.106	29.025	28.803	-----	-----	27.568	
21	546.25	29.096	29.014	28.780	-----	-----	27.558	状態3(H-6分割)

### 3. 3. 3 超音波速度測定

#### (1) 測定方法

図3.3-12 に示すように、大ブロックH1の底面から5、10、15、20、25 cmの5レベルで、両対面にそれぞれP波速度とS波速度振動子を1個ずつ貼付した。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。写真3.3-2 に測定状況を示す。

#### (2) 測定装置

コア供試体と同様に、超音波測定装置は応用地質(株)製のソニックビューア170を用い、振動子は(株)富士セラミックス製の400kHz (P波、S波とも)のものを用いた。ブロック供試体の側面にシリコン被覆処理を施したため、圧着方式の応用地質製の振動子では測定不可能となる。超音波測定の具体的な手順はおおむねコア供試体の場合と同様であるが、大ブロックでは振動子を供試体の側面に接着剤で固定した点異なる。

#### (3) 測定結果

図3.3-13 および図3.3-14 に波形記録を示す。

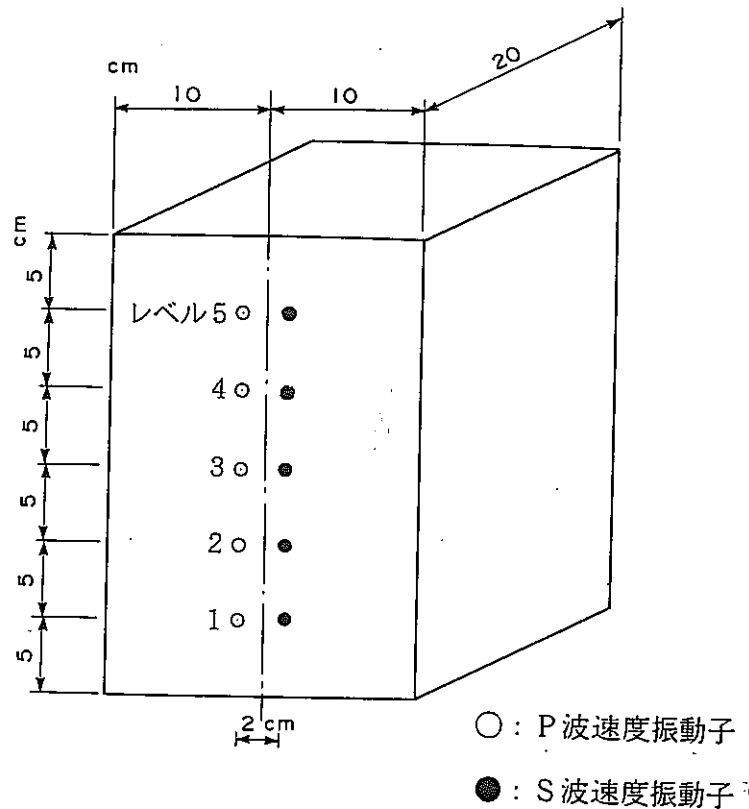


図3.3-12 超音波測定用ブロックのセンサー配置図

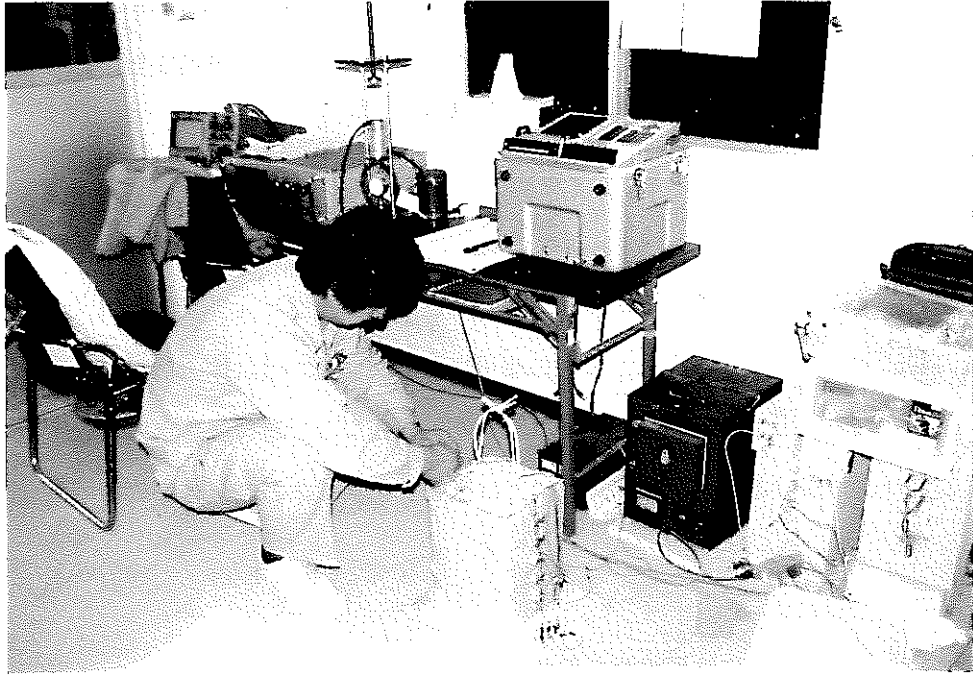


写真3. 3-2 超音波測定状況

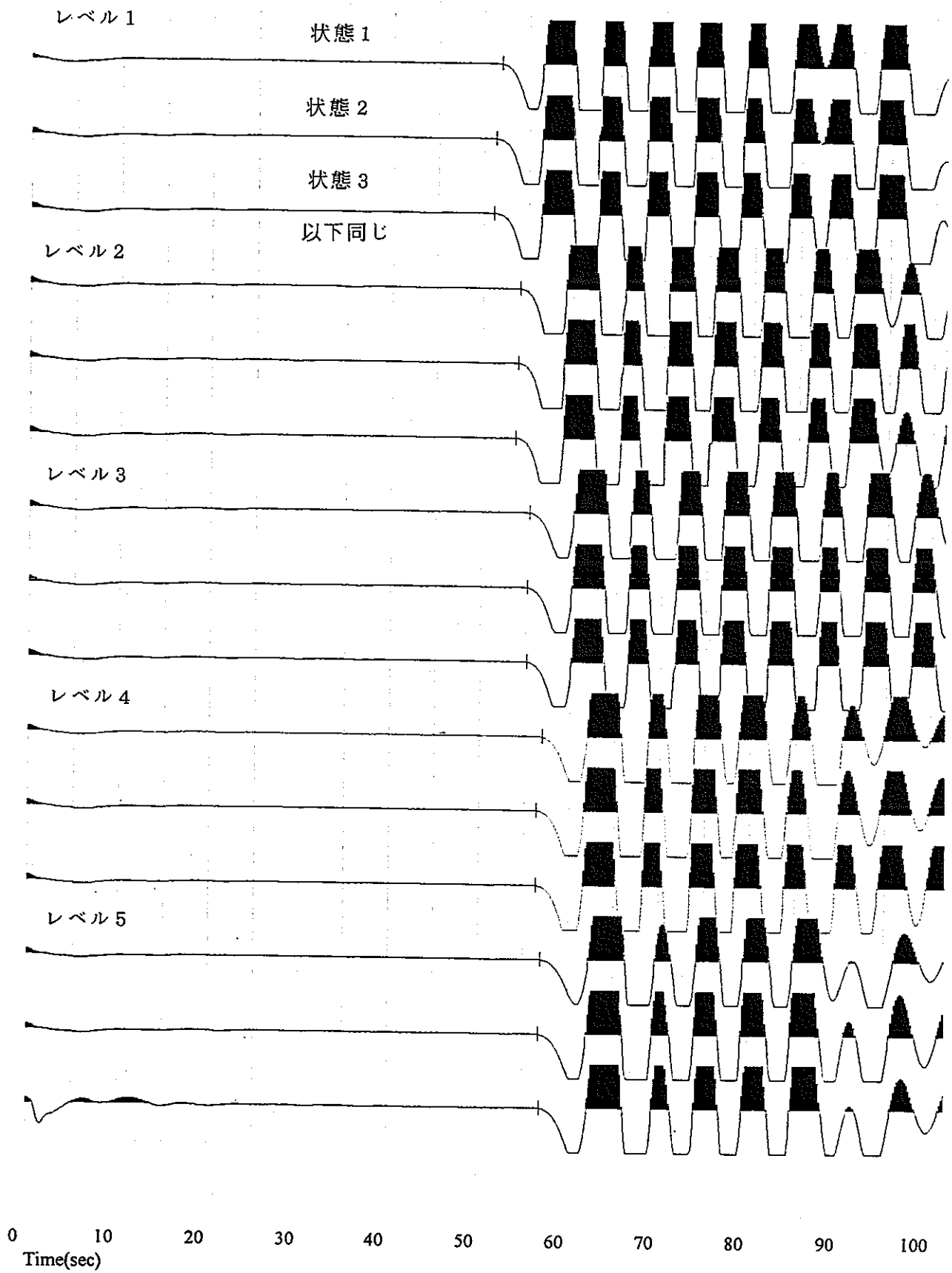


図3.3-13 P波振動子の波形記録 (400kHz)

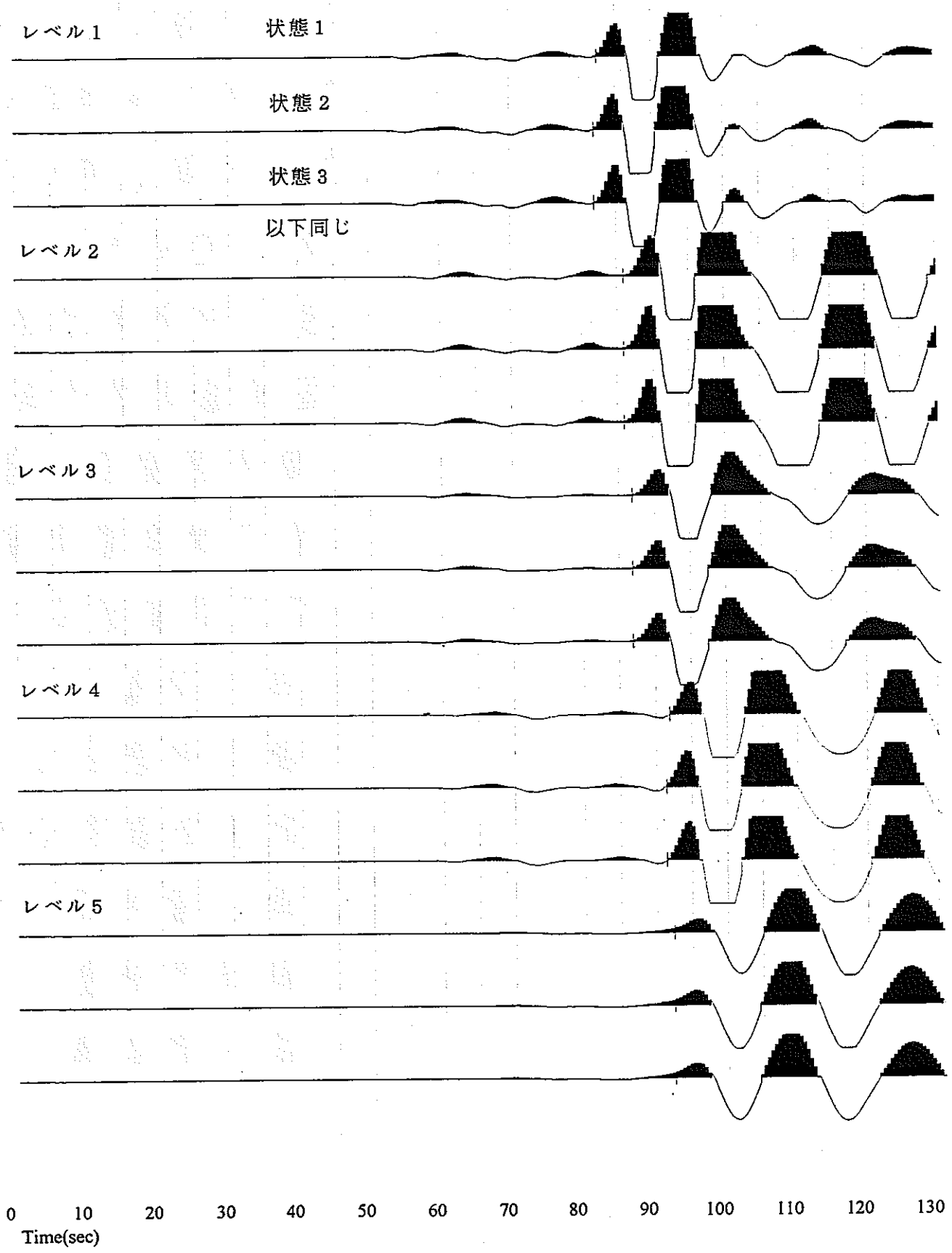


図3.3-14 S波振動子の波形記録 (400kHz)

表3.3-3 には測定結果一覧表を、図3.3-15 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3.3-3 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

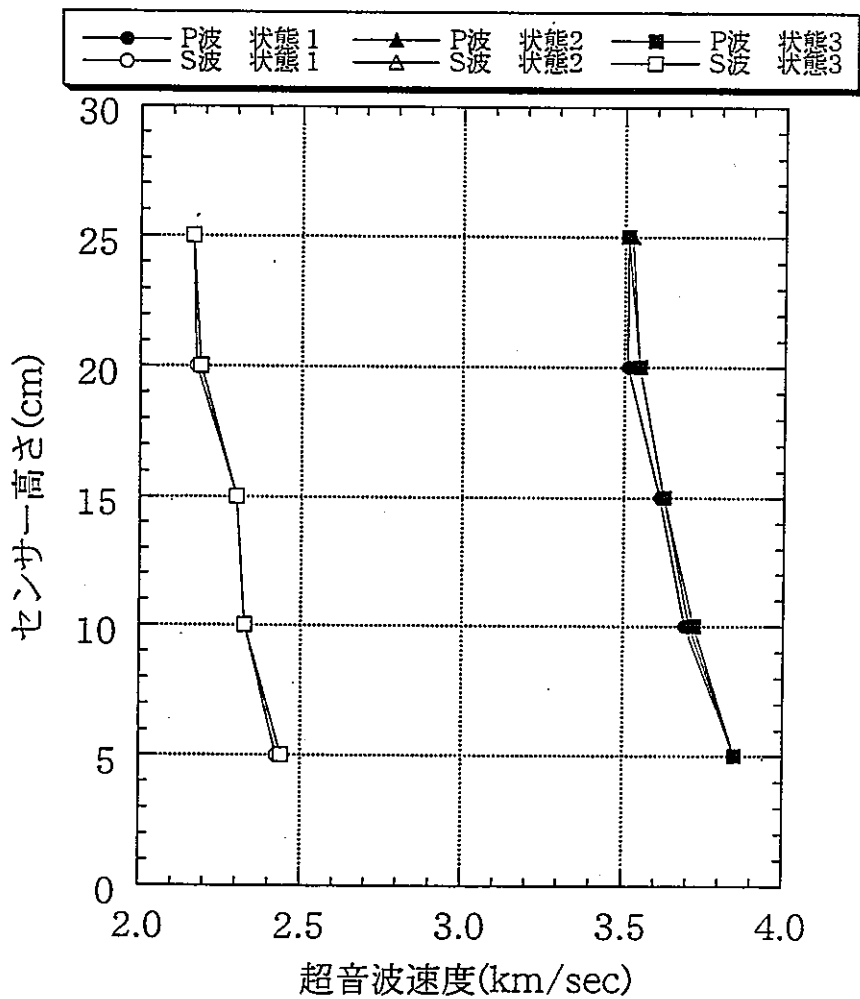


図3.3-15 超音波速度 (P波、S波) - センサー位置の関係

### 3. 3. 4 比抵抗測定

#### (1) 測定方法

比抵抗の測定は環状電極を用いた等間隔4極法（ウエンナー配置）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3.3-16 に電極センサーの概要図を示す。

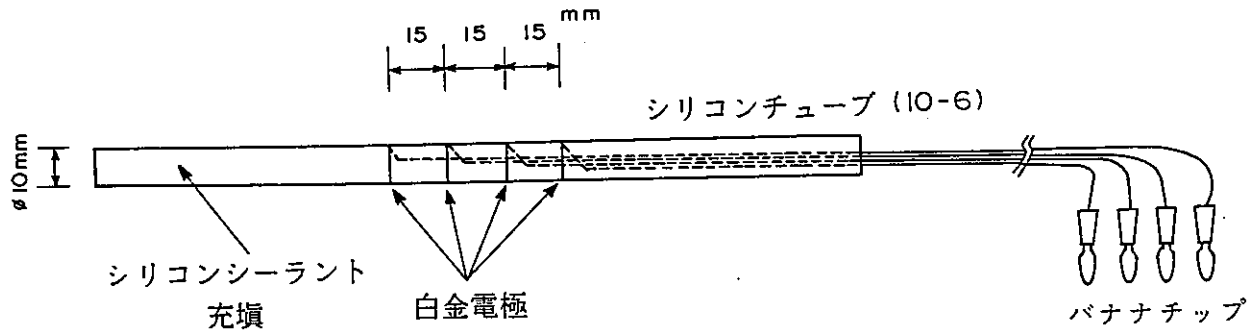


図3.3-16 比抵抗測定用の電極センサー概要図

シリコンチューブ（外径10mm、内径6mm）の外周に15mmの等間隔で4箇所白金線（直径0.28mm）を1巻きし、電極とした。リード線（7本/0.12mm、ビニールコード）はシリコンチューブの中を通して試料の外に出す構造とし、シリコンチューブ内はシリコンシーラント（透明タイプ）を充填した。

測定用の大ブロックH2は図3.3-17に示すように正面側の側面中心線上に高さ方向に5cm間隔で直径10mmの測定孔を裏側面まで貫通させた後、シリコンシーラントを測定孔を塞いで厚く塗り、水浸状態にした。水浸による重量変化が認められなくなった後、測定ブロックに貫通させた測定孔の位置のシリコン被膜をカッターナイフで切り取り、電極センサー表面に導電性のケラチンクリームを塗ってから、電極センサーを押し込んだ。挿入後、測定孔周辺部の試料側面には再度シリコンシーラントを塗って含水状態が変化しないようにした。なお、4電極の中央が試料の中心にくるように設置した。リード線の測定器側はバナナチップを取り付けた。図3.3-18には等間隔4極法（ウエンナー法）による測定模式図を示す。



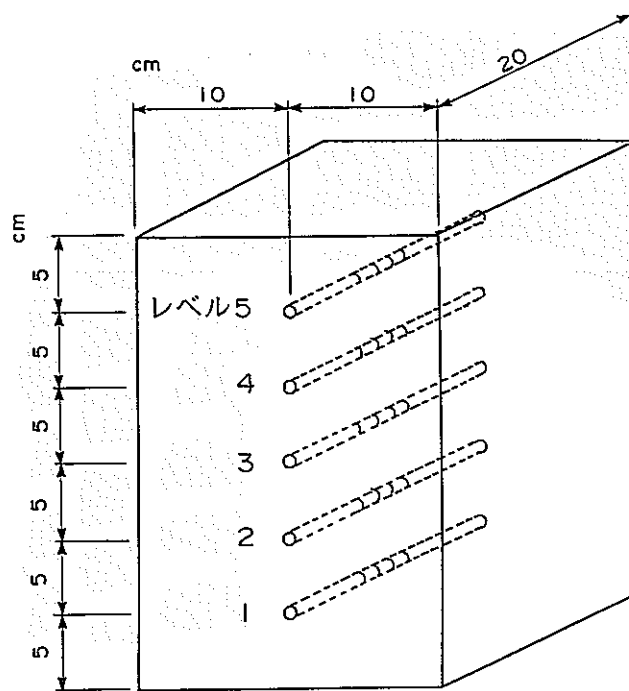


図3.3-17 比抵抗測定ブロックのセンサー配置図

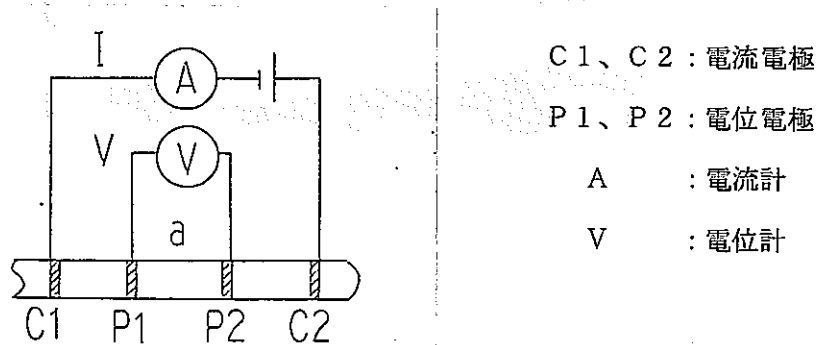


図3.3-18 等間隔4極法による測定模式図

比抵抗の計算式を次に示す。

$$\rho = 4 \pi a \cdot Gb \cdot V / I \quad \text{ここで、} \rho : \text{比抵抗} (\Omega \cdot \text{m})$$

$$= 4 \pi a \cdot Gb \cdot R \quad a : \text{電極間隔} (\text{m})$$

Gb : 補正係数

V : 測定電位 (V)

I : 測定電流 (A)

R : 抵抗 ( $\Omega$ )

測定電流は 1 mA、測定信号は約 0.3Hz を用いた。写真 3.3-3 には比抵抗測定ブロックを示す。

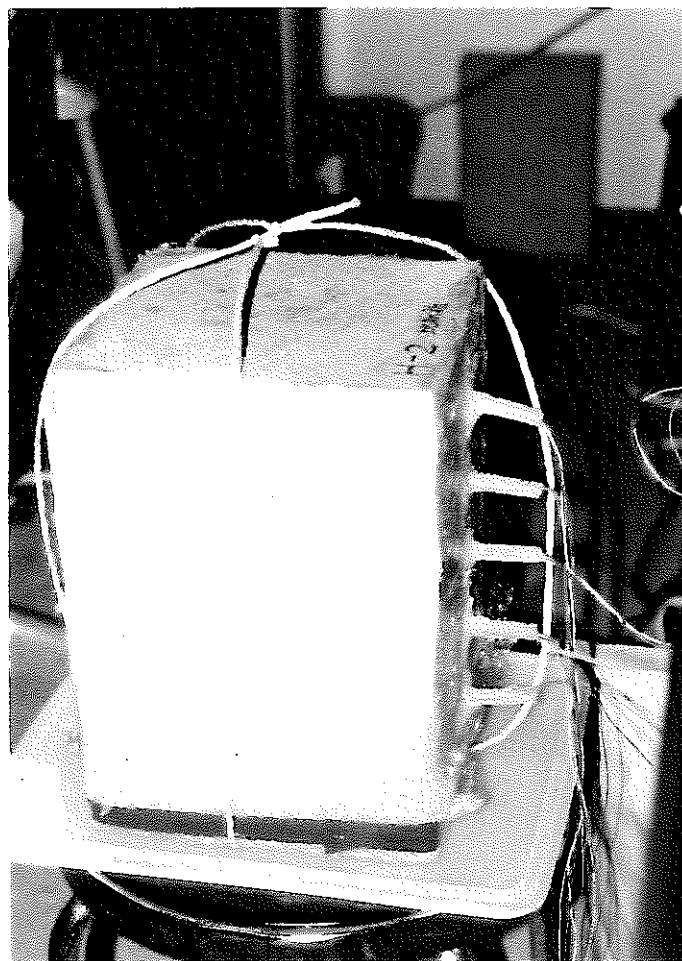


写真 3.3-3 比抵抗測定ブロック

(2) 測定装置

表3.3-4 には比抵抗測定機器一覧表を示す。

表3.3-4 比抵抗測定機器一覧表

名称およびメーカー	型式名	主な仕様
電気探査装置 McOHM  OYO	MODEL-2115	トランスミッター 電圧 400Vp-p 電流 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200mA レシーバ 入力インピーダンス 1M $\Omega$ 測定レンジ -0.6~+0.6, -6~+6(オートレンジ) 分解能 0.001 $\Omega$ スタック 1, 4, 16, 64 回
電極センサー (株)ダイヤコンタクト	等間隔4極法	直径10mm, 電極間隔15mmの環状電極 シリコンチューブ, 白金(直径0.28mm)線

写真3.3-4 に電極センサーを示す。

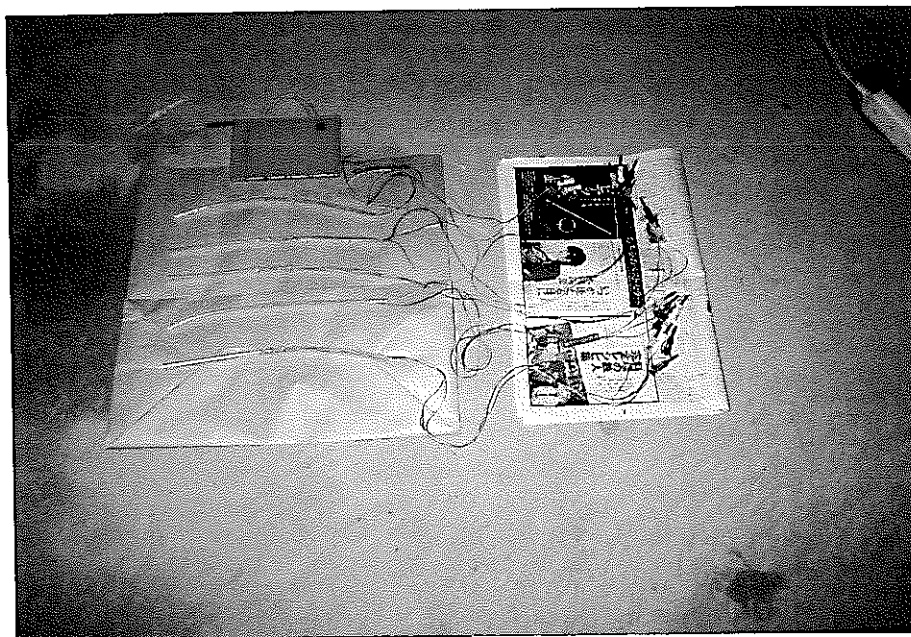


写真3.3-4 電極センサー

(3) 測定結果

表3.3-5 に測定結果一覧表を示す。図3.3-19 に3状態での大ブロックH2内部の比抵抗分布を示す。

表3.3-5 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(前述、予備試験の項、3-57頁)である。比抵抗は換算係数 $\times$ 測定抵抗 $R$ によって求める。

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。

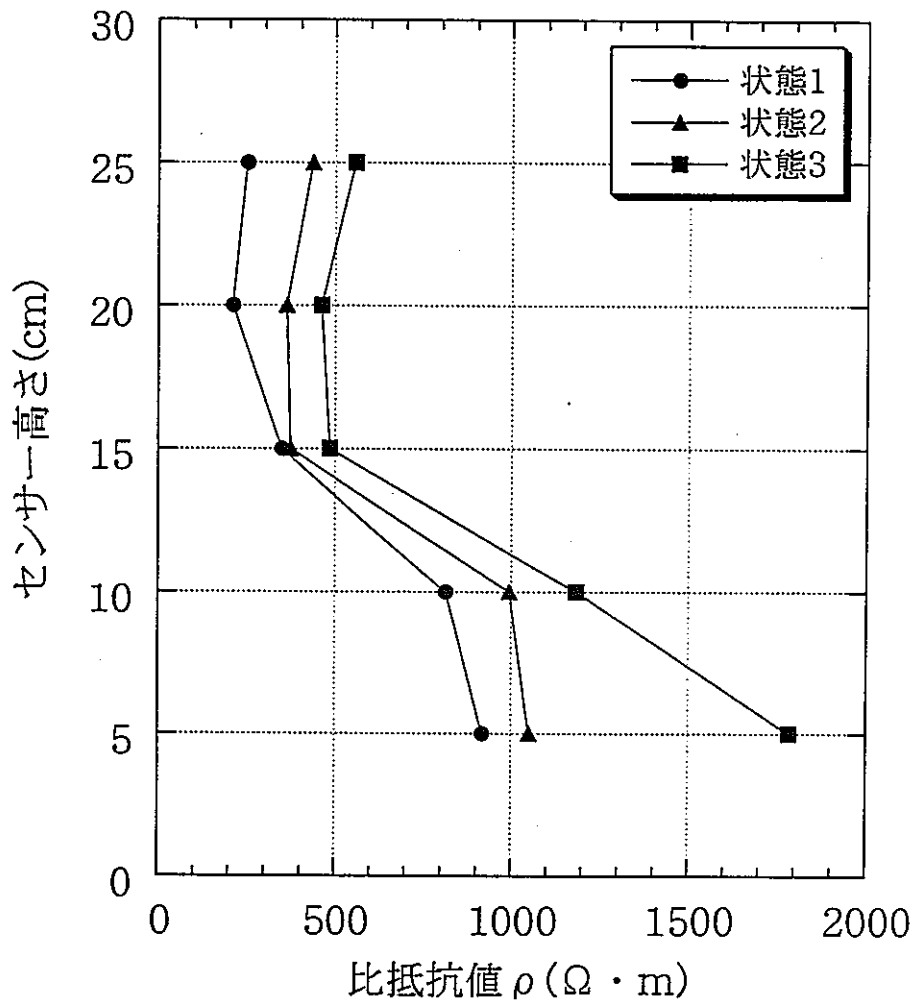


図3.3-19 比抵抗値－センサー位置の関係

### 3. 3. 5 電磁波速度測定

#### (1) 測定方法

電磁波測定用大ブロック H 3 は、図 3. 3-20 に示すように正面側面の高さ方向に 5 cm 間隔で水平に中心間隔 30 mm になるように 2 孔ずつ、直径 7 mm の測定孔を削孔した。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 19 cm 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 1 cm を残して止めてある。写真 3. 3-5 には TDR 測定ブロックを示す。

電磁波測定用のロッドは小ブロック 1～3 に用いたものと全く同じものを用いた。すなわち、ロッドは直径 7 mm、長さ 24 cm の真中製の丸棒で、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。ロッド端の 5 cm 部分は供試体から外にでていいる。また同軸ケーブルは長さ 50 cm で、特性インピーダンス 50  $\Omega$  のもの（3 D - 2 V）を使用し、測定器側は BNC コネクターとし、測定器付属の同軸ケーブルに接続できるようにした。

同軸ケーブルのロッド側は外套被覆を 30 mm 剥いて、外側のシールド部を分離して 2 芯の平行コードにし、端の 5 mm 部分をロッド端部の 5 mm 部分に重ねてハンダ付けをした。平行コード部のシールド線側は熱収縮チューブを被せてある。

測定原理および測定器の表示値から岩石の比誘電率を求める方法などは、3. 2. 4 節に述べたとおりである。写真 3. 3-6 に測定状況を示す。

比抵抗測定と同じように、測定用ブロック供試体は測定孔を削孔した後、測定孔を塞ぐようにシリコンシーラント被膜をしてから、浸水処理をした。浸水処理で重量変化が認められなくなってから、測定孔周辺のシリコンをカッターナイフで切り取り、ロッドを挿入し、口元部分は再度シリコン被膜処理を施した。

#### (2) 測定装置

測定装置は小ブロック試料で用いたものと全く同じものである（3. 2. 4 節参照）。

#### (3) 測定結果

表 3. 3-5 に測定結果一覧表を、図 3. 3-20～図 3. 3-22 に測定記録を示す。図中のカーソル位置が測定ロッドの先端からのパルスの反射に対応する TDR 表示値の読み取り位置を、画面右上の数字が読み取り値を示す。

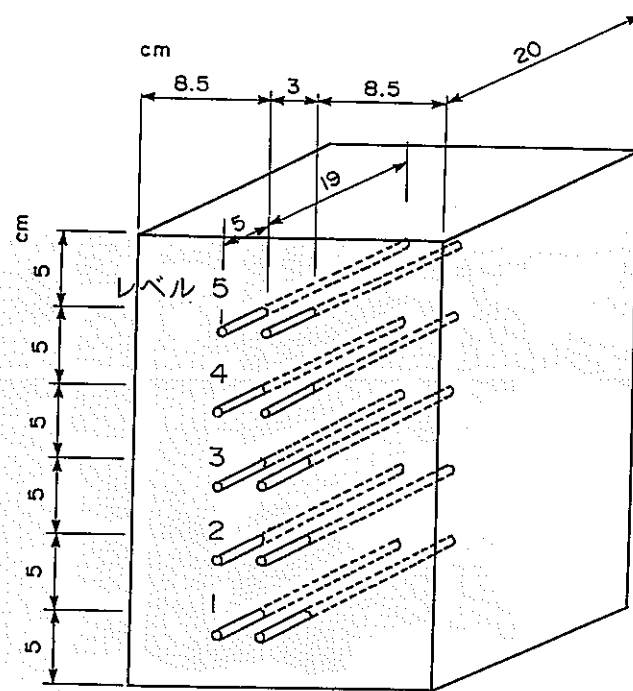


図3.3-20 TDR測定ブロックのセンサー配置図

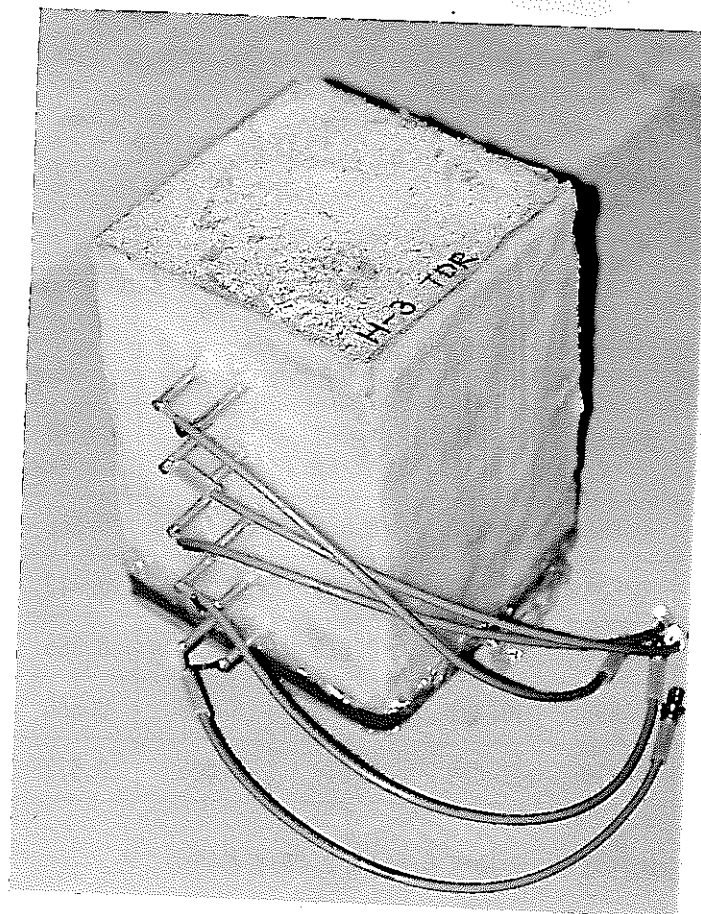


写真3.3-5 TDR測定ブロック

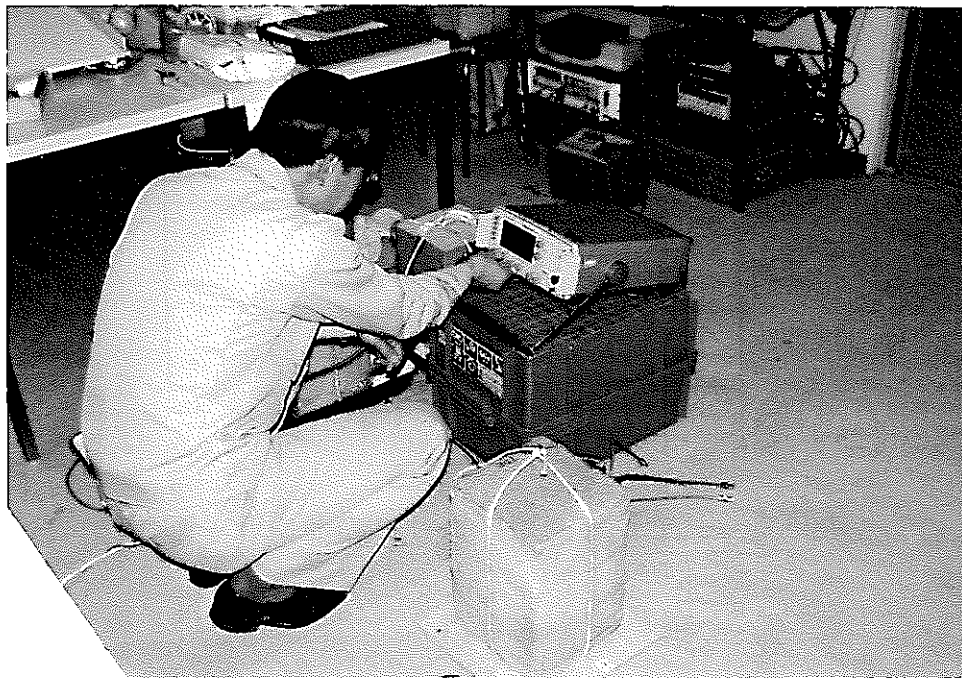


写真3.3-6 TDR測定状況

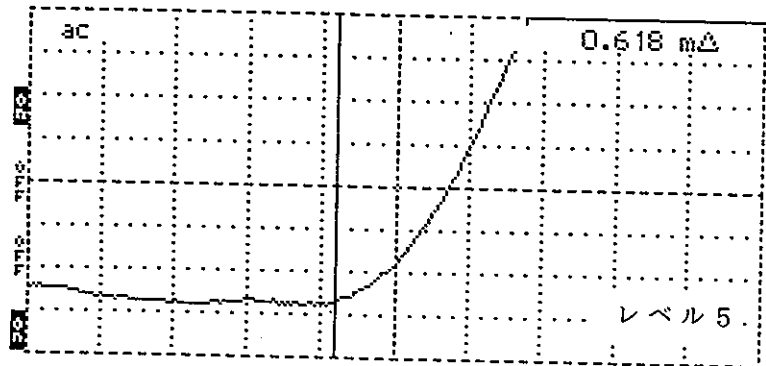
表3.3-5 TDR測定結果一覧表

測定レベル	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:最上部 1:最下部	0.618	7.870	0.577	6.705	0.550	5.990
	0.634	8.349	0.589	7.036	0.573	6.597
	0.672	9.545	0.615	7.781	0.585	6.925
	0.696	10.341	0.628	8.168	0.586	6.953
	0.716	11.029	0.610	7.635	0.577	6.705

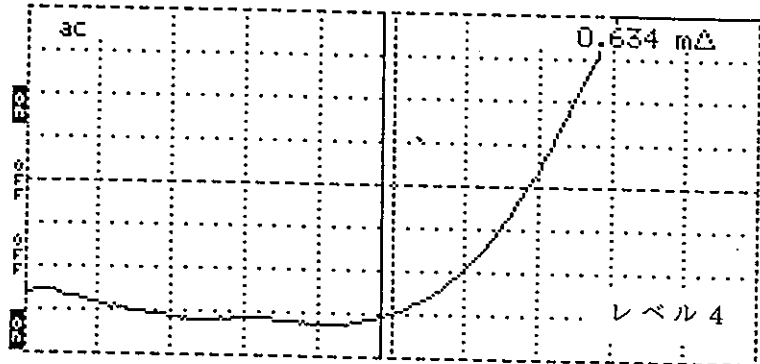
\*表示値から比誘電率への換算方法は3.2.4節を参照のこと。



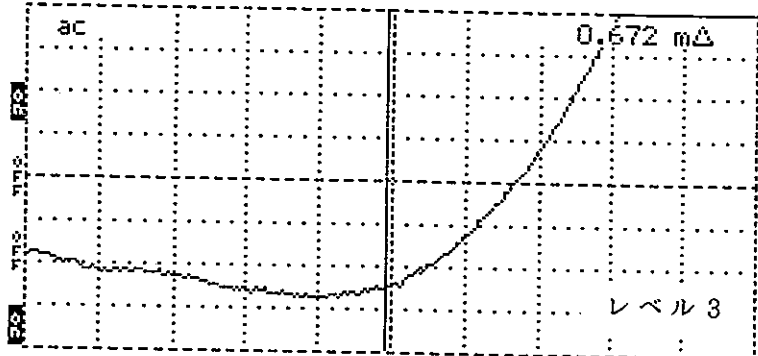
Cursor ..... 0.618 mΔ  
 Distance/Div..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avs  
 Power..... ac



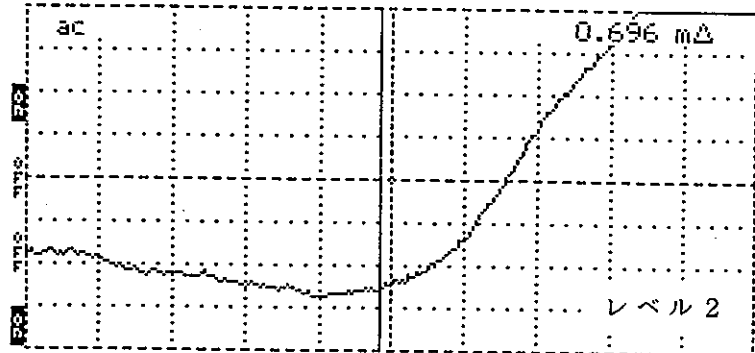
Cursor ..... 0.634 mΔ  
 Distance/Div..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.672 mΔ  
 Distance/Div..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.696 mΔ  
 Distance/Div..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.716 mΔ  
 Distance/Div..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 32 avs  
 Power..... ac

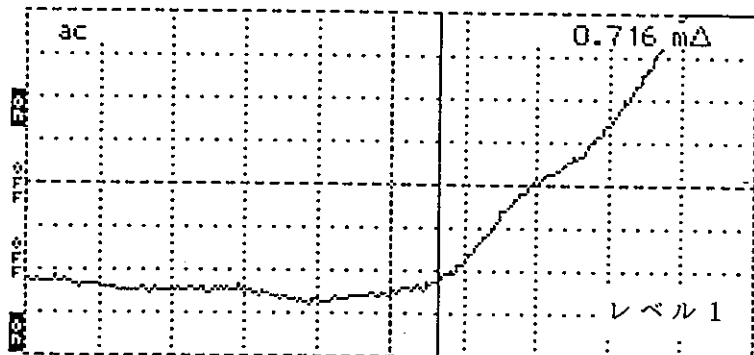
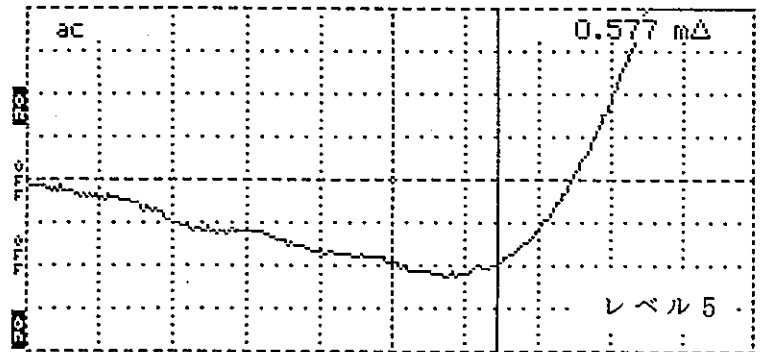
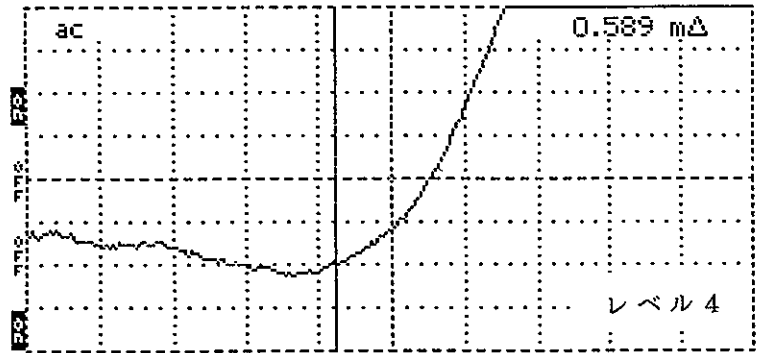


図3.3-20 状態1の測定記録

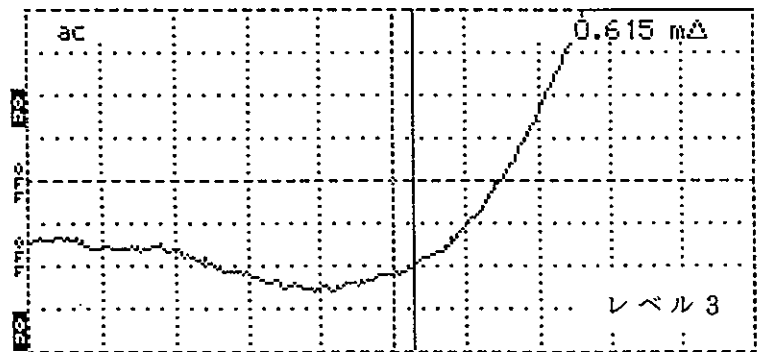
Cursor ..... 0.577 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 64 avs  
 Power..... ac



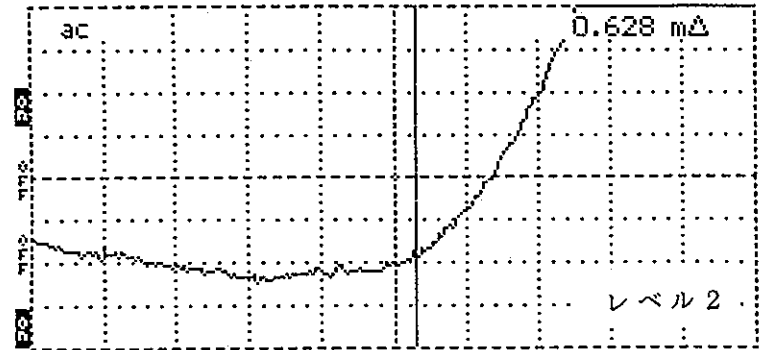
Cursor ..... 0.589 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 64 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.615 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 64 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.628 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 64 avs  
 Power..... ac



Cursor ..... 0.610 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale.... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter..... 64 avs  
 Power..... ac

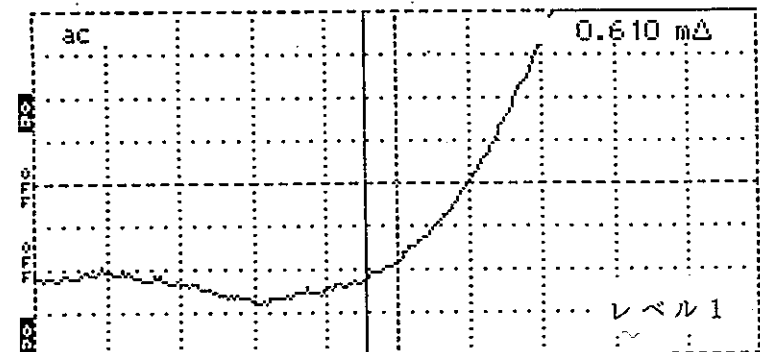
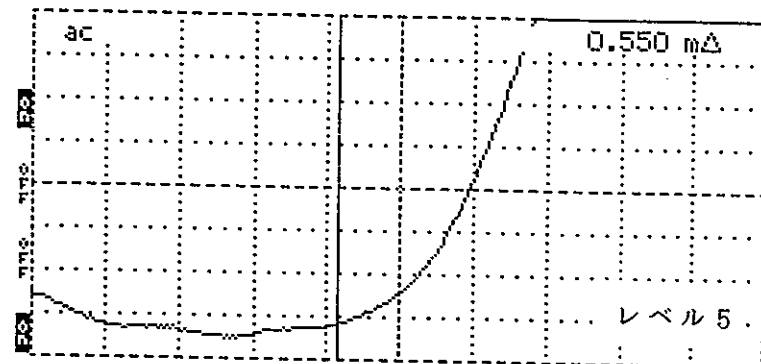
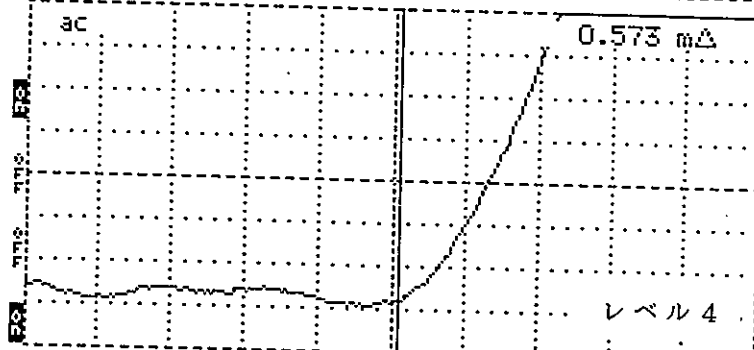


図3.3-21 状態 2 の測定記録

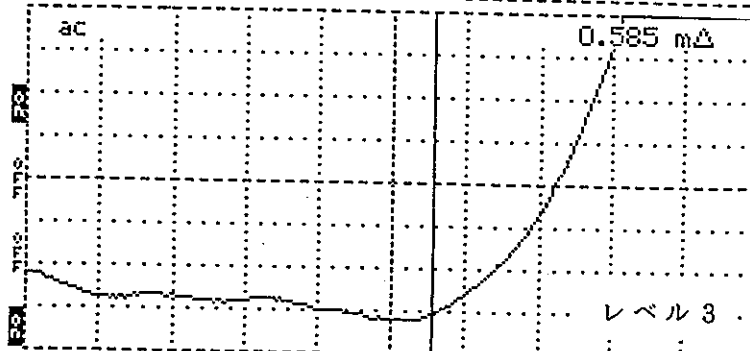
Cursor ..... 0.550 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



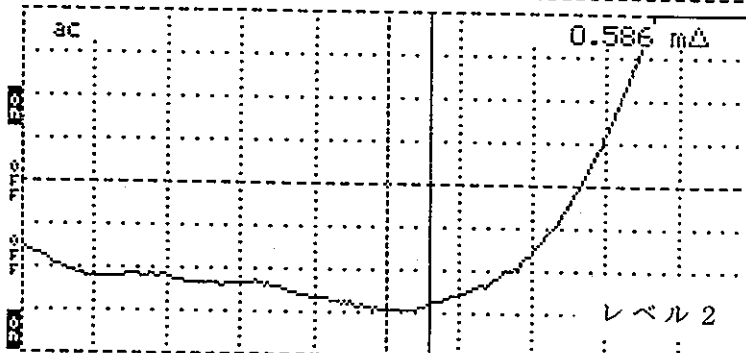
Cursor ..... 0.573 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



Cursor ..... 0.585 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



Cursor ..... 0.586 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac



Cursor ..... 0.577 mΔ  
 Distance/Div ..... .025 m/div  
 Vertical Scale .... 14.9 mP/div  
 VP ..... 0.99  
 Noise Filter ..... 32 avs  
 Power ..... ac

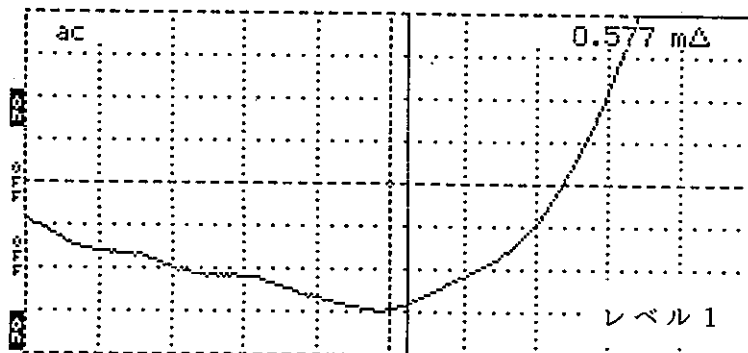


図3.3-22 状態3の測定記録

3状態での大ブロックH3の比誘電率分布を図3.3-23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。

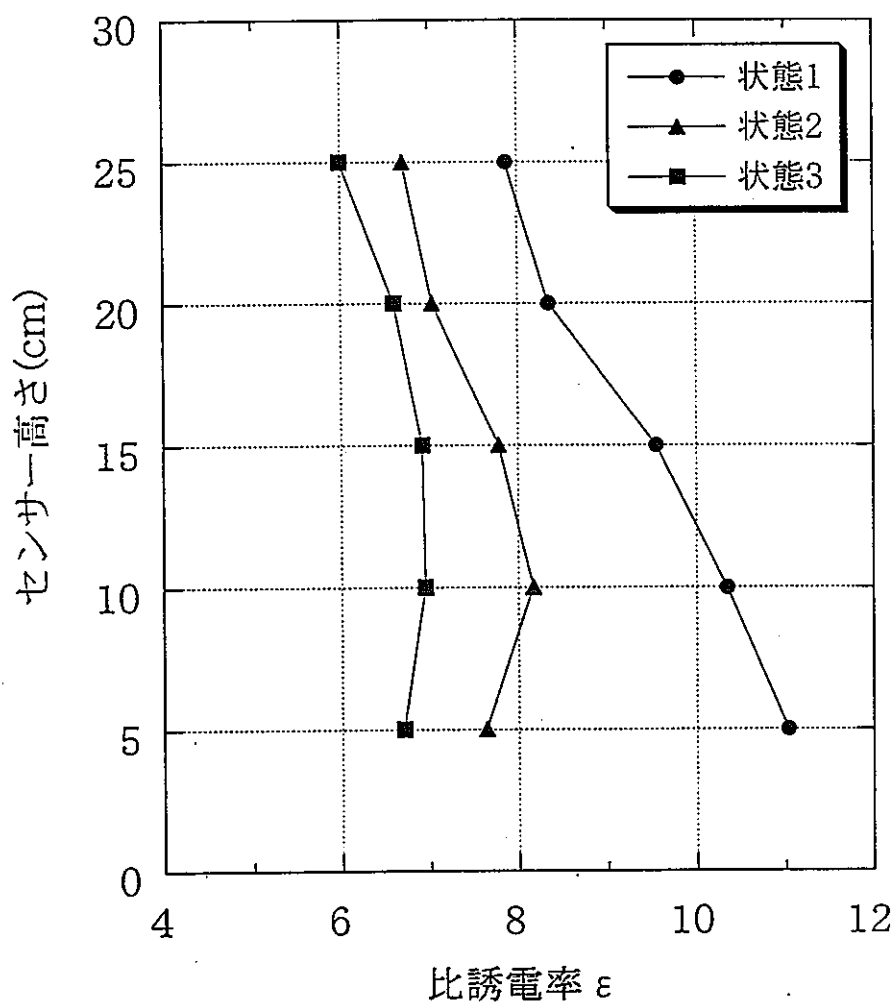


図3.3-23 比誘電率—センサー位置の関係

表3.3-6 および図3.3-24 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3.3-11）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。

表3.3-6 比誘電率の経過時間による変化一覧表

番号	経過時間(hour)	比誘電率 $\epsilon$					備考
		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	
1	0.00	13.535	13.885	11.524	10.545	9.675	
2	18.83	14.762	13.227	9.643	8.968	8.410	
3	40.00	14.400	11.135	9.643	8.812	8.258	
4	62.25	13.380	10.648	9.480	8.594	8.018	
5	110.58	13.188	10.614	9.577	8.594	7.929	
6	159.25	13.112	10.375	9.610	8.594	7.988	
7	182.25	11.029	10.341	9.545	8.349	7.870	状態1測定
8	206.75	9.415	9.873	8.874	8.319	7.811	
9	231.25	8.625	9.159	8.410	7.811	6.898	
10	256.75	8.078	8.625	8.078	7.121	6.678	
11	329.75	7.840	8.288	7.899	7.092	6.760	
12	349.75	7.635	8.168	7.781	7.037	6.705	状態2測定
13	378.25	7.433	7.929	7.490	6.842	6.356	
14	401.25	7.347	7.433	7.009	6.733	6.329	
15	426.25	6.787	7.092	6.925	6.733	6.303	
16	448.25	6.624	6.925	6.760	6.543	6.276	
17	493.25	6.624	6.678	6.760	6.543	6.067	
18	522.25	6.597	6.651	6.678	6.409	5.990	
19	546.25	6.705	6.953	6.925	6.597	5.990	状態3測定

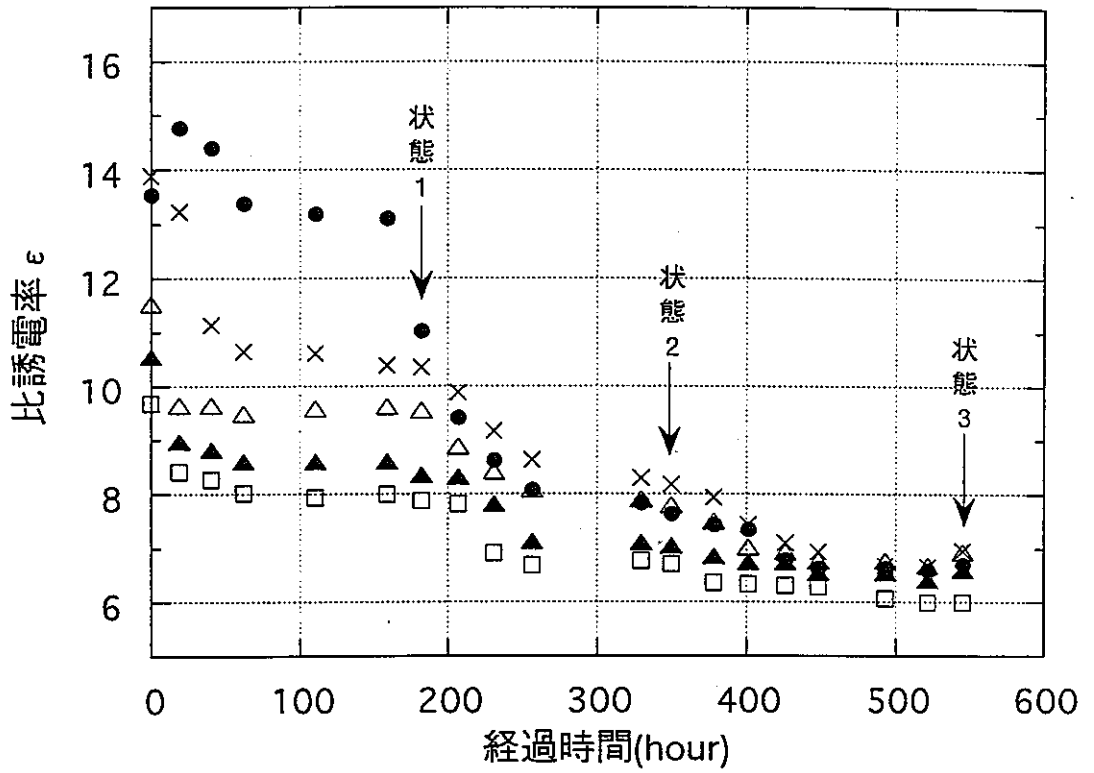
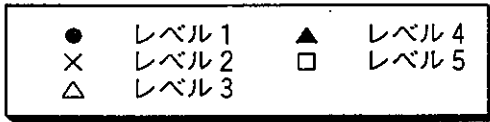


図3.3-24 比誘電率の経過時間による変化図

### 3. 3. 6 大ブロックの分割による含水量測定

#### (1) 分割および測定方法

大ブロックの分割はたがねを用いて、まず5レベルに分割した(写真3.3-7を参照)。次に切れ目によって一次元流れが妨げられることによる含水の不規則分布の影響を除去するため、周囲3cmほどを切り離して、残りの部分を9個に分割した。含水測定用ブロックについて、中心部、前面部、左側部、右側部および後面部から計5個のサンプルを採取して含水量測定を行った(図3.3-25および写真3.3-8を参照)。

物理量測定ブロックについては、中心部、前面部および後面部の3個(超音波の伝播方向、比抵抗センサーおよび電磁波測定ロッドの埋設孔方向に一致)を採取した。

測定方法は3.2.5 コア供試体分割による含水量測定と同様とした。試料を分割後に速やかに重量を測定した。

#### (2) 測定結果

表3.3-7～表3.3-12に分割したブロックの含水量測定結果を示す。図3.3-26～図3.3-31にはブロック内の体積含水率および飽和度の高さ方向の分布を示す。

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、体積含水率の分布ではH6を除く全ブロック、飽和度の分布ではH5、H6ブロックの下端面に近い部分では局部的に小さくなる傾向が認められる。

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。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が大きい含水量を示している。H2とH6は両者の中間にある。これらの結果は供試体個々のばらつきを示しているものと考えられる。

図3.3-32には各供試体の各測定レベルについて有効間隙率～体積含水率および飽和度の関係を示す。有効間隙率と飽和度の間には明瞭な相関関係は認められないが、有効間隙率と体積間隙率の間には正の相関が認められる。

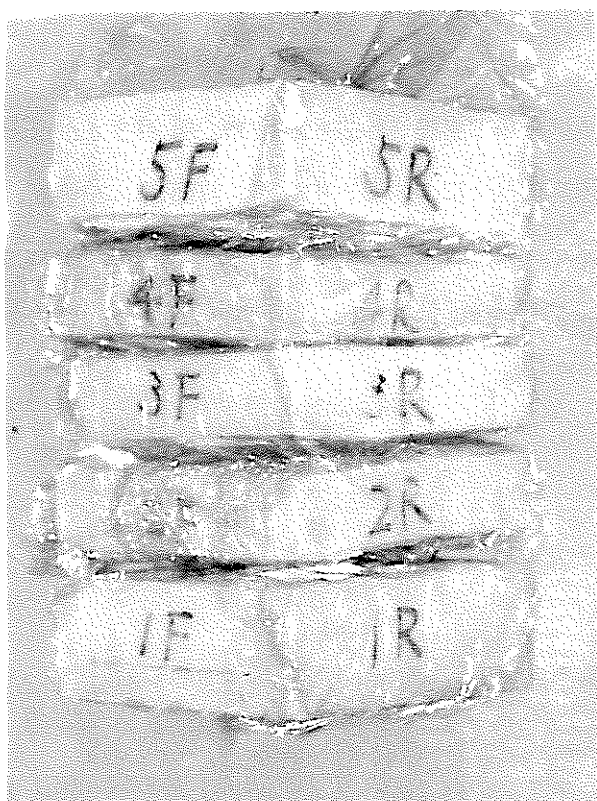


写真3.3-7 ブロック試料の分割状況

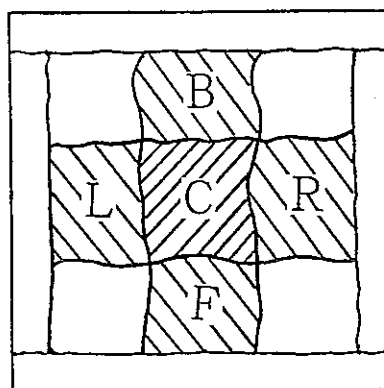


図3.3-25 模式的な分割図



写真3.3-8 ブロック試料の分割状況



表3.3-7 大ブロックH-1の含水分布(状態3)

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	4.4	—	4.4	—	6.3	5.0	22.1	—	23.9	—	37.2	27.7	18.4
25.0	6.0	—	5.7	—	6.3	6.0	33.1	—	31.4	—	37.2	33.9	17.8
20.0	7.1	—	6.9	—	6.6	6.8	39.2	—	40.3	—	42.7	40.7	16.8
15.0	7.5	—	7.6	—	7.1	7.4	41.3	—	47.4	—	49.2	46.0	16.2
10.0	7.4	—	7.8	—	7.2	7.5	47.8	—	47.3	—	54.6	49.9	15.0
5.0	7.9	—	7.6	—	6.2	7.2	46.1	—	49.3	—	61.0	52.1	14.2
2.5	6.4	—	6.7	—	6.5	6.5	51.4	—	58.3	—	61.8	57.2	11.4

大ブロックH1

表3.3-8 大ブロックH-2の含水分布(状態3)

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	6.5	—	6.1	—	6.1	6.2	35.0	—	31.2	—	29.4	31.9	19.6
25.0	9.3	—	6.7	—	8.5	8.2	48.9	—	34.5	—	43.2	42.2	19.4
20.0	8.7	—	8.6	—	8.6	8.5	56.3	—	49.9	—	45.6	50.6	17.2
15.0	9.2	—	9.1	—	9.4	9.2	67.6	—	49.6	—	55.7	57.6	16.3
10.0	9.4	—	9.6	—	10.8	9.9	56.3	—	64.7	—	73.6	64.9	15.4
5.0	9.4	—	9.4	—	9.2	9.3	59.0	—	63.6	—	75.7	66.1	14.3
2.5	9.2	—	9.1	—	8.8	9.0	69.7	—	79.6	—	76.7	75.3	12.0

大ブロックH2

表3.3-9 大ブロックH-3の含水分布（状態3）

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度 S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	8.2	—	7.8	—	8.6	8.2	57.6	—	51.5	—	53.3	54.1	15.2
25.0	11.0	—	10.8	—	8.0	9.9	57.0	—	63.6	—	57.2	59.3	16.7
20.0	10.5	—	11.5	—	11.4	11.1	57.3	—	61.5	—	60.2	59.7	18.7
15.0	13.7	—	14.2	—	16.1	14.7	70.4	—	70.6	—	79.6	73.5	20.0
10.0	15.8	—	15.7	—	15.8	15.8	66.2	—	65.8	—	65.4	65.8	23.9
5.0	16.7	—	19.2	—	17.7	17.9	69.9	—	79.8	—	74.2	74.6	23.9
2.5	16.7	—	18.0	—	16.8	17.2	70.6	—	82.0	—	75.3	76.0	22.6

大ブロックH3

表3.3-10 大ブロックH-4の含水分布（状態1）

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度 S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	—	—	10.1	8.0	8.9	9.0	—	—	48.8	43.0	44.9	45.6	19.6
25.0	10.5	10.4	11.2	9.6	10.3	10.4	54.2	53.0	61.5	58.2	56.4	56.7	18.4
20.0	11.5	11.3	11.0	11.8	10.5	11.2	69.0	61.7	68.0	73.4	65.3	67.5	16.7
15.0	13.3	12.6	13.1	13.7	14.0	13.3	68.6	66.1	71.8	72.6	72.2	70.3	19.0
10.0	15.9	14.8	13.3	17.2	13.6	15.0	72.1	75.8	71.7	77.0	72.4	73.8	20.3
5.0	13.4	13.2	13.4	14.1	12.7	13.4	75.5	79.1	78.0	77.1	80.6	78.1	17.1
2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

大ブロックH4

表3.3-11 大ブロックH-5の含水分布（状態2）

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度 S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	4.7	5.8	5.7	5.0	6.7	5.6	30.8	35.0	46.1	38.0	47.1	39.4	14.3
25.0	8.0	8.3	8.5	8.1	9.5	8.5	50.5	50.6	63.2	64.7	70.6	59.9	14.3
20.0	11.4	11.5	11.9	11.9	11.2	11.6	75.2	73.9	76.9	70.1	73.6	73.9	15.7
15.0	13.9	15.0	13.3	12.7	13.8	13.7	80.0	79.0	78.8	76.3	77.0	78.2	17.6
10.0	16.0	15.9	15.6	15.3	16.5	15.9	86.2	85.0	84.3	82.4	90.8	85.7	18.5
5.0	17.6	18.0	16.5	17.4	17.8	17.5	88.2	90.7	83.9	90.8	90.0	88.7	19.7
2.5	16.6	17.3	17.0	16.8	16.8	16.9	83.0	81.0	82.0	85.2	79.9	82.2	20.6

大ブロックH5

表3.3-12 大ブロックH-6の含水分布（状態3）

計測高さ (cm)	体積含水率 $\theta_v$ (%)						飽和度 S (%)						有効間隙率 Average(%)
	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	Forward	Left	Center	Right	Back	Average	
27.5	5.7	5.5	5.9	5.5	5.3	5.6	35.8	35.5	34.7	34.4	33.5	34.8	16.0
25.0	7.7	7.5	7.3	7.8	8.5	7.8	45.3	42.8	44.3	51.8	46.8	46.2	16.8
20.0	9.2	8.4	8.7	9.1	8.6	8.8	58.4	49.7	50.7	52.8	49.8	52.3	16.9
15.0	10.4	9.6	10.2	9.4	9.5	9.8	74.6	57.7	64.2	52.8	51.4	60.1	16.5
10.0	11.8	12.1	11.3	10.7	10.6	11.3	69.2	73.6	75.7	79.4	72.2	74.0	15.3
5.0	12.7	12.1	11.9	12.3	12.4	12.3	73.9	65.2	62.9	74.0	76.9	70.6	17.5
2.5	13.5	11.4	14.2	12.6	12.6	12.9	71.5	62.1	73.2	71.8	73.1	70.3	18.3

大ブロックH6

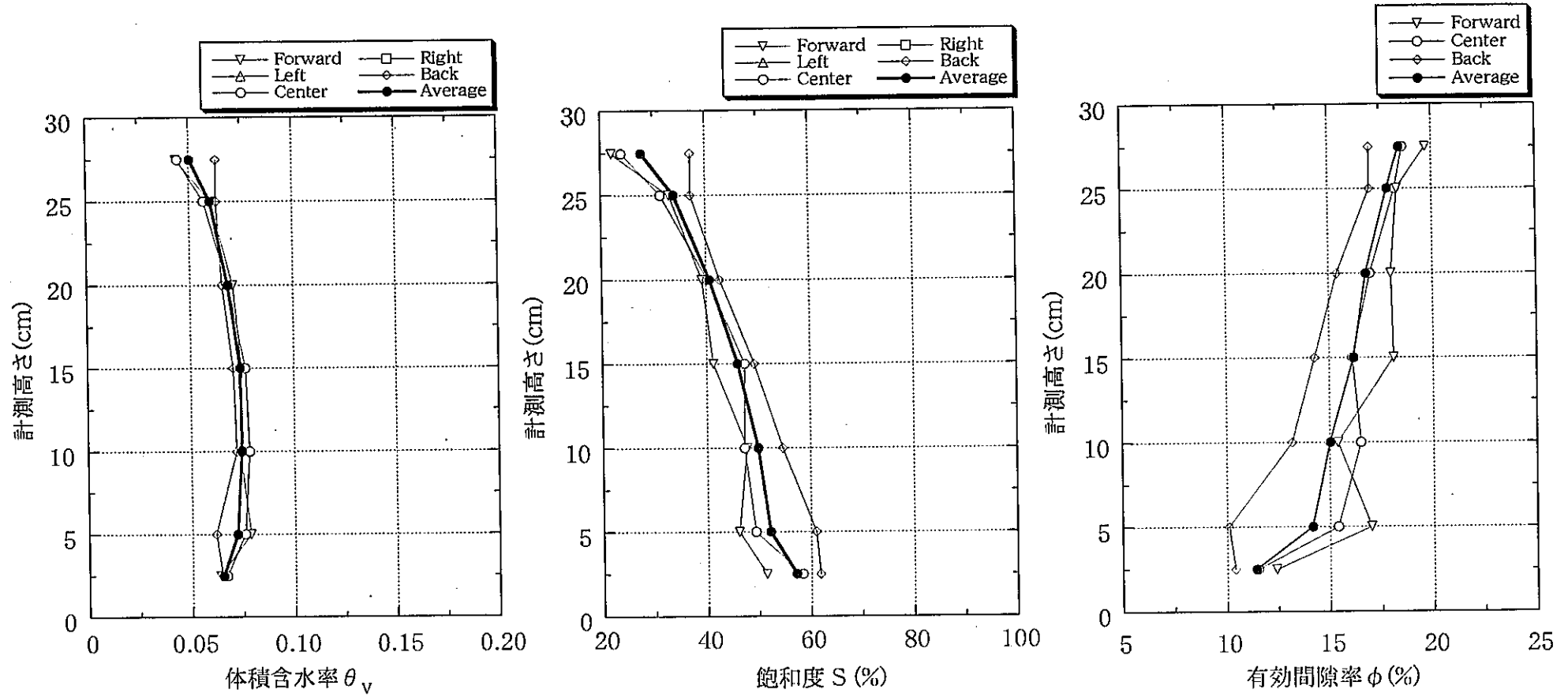


図3.3-26 体積含水率および飽和度の分布 (大ブロックH1、状態3)

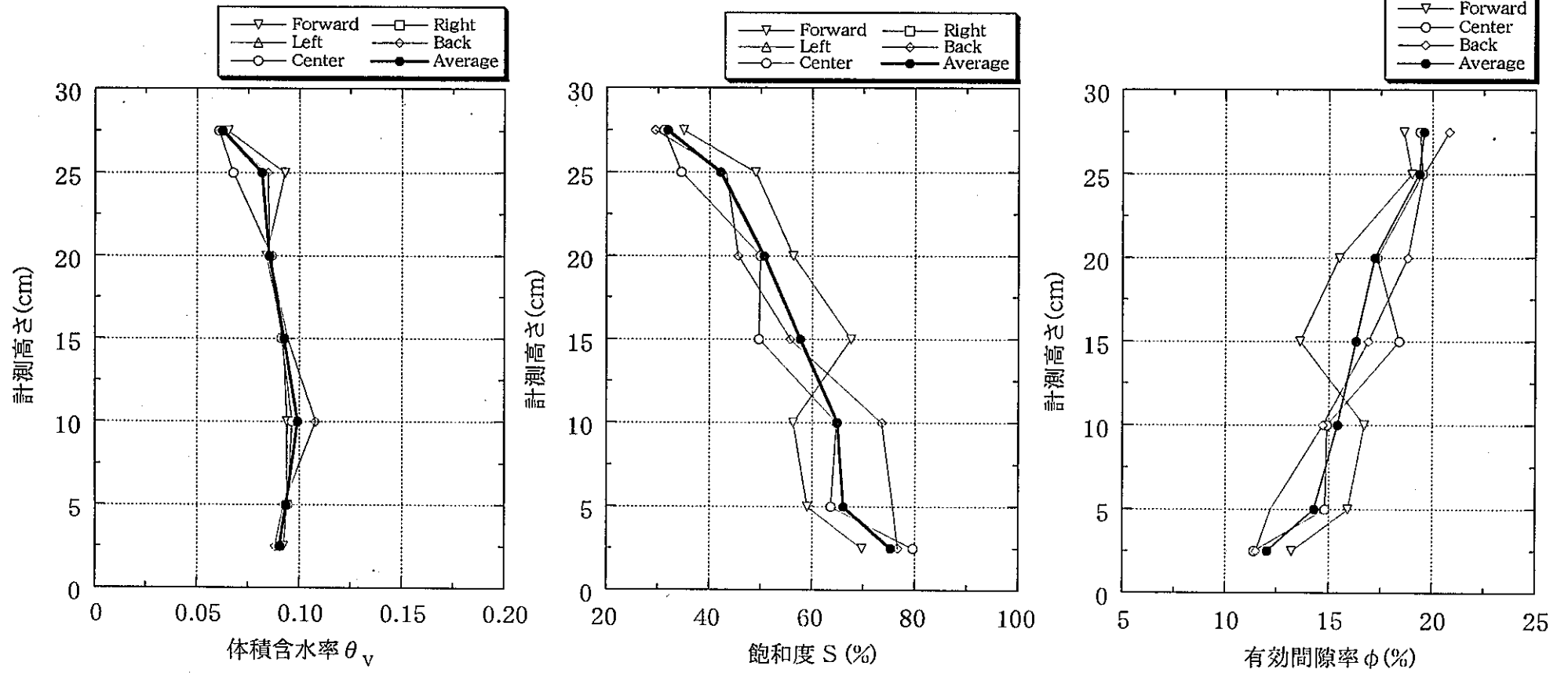


図3.3-27 体積含水率および飽和度の分布（大ブロックH2、状態3）

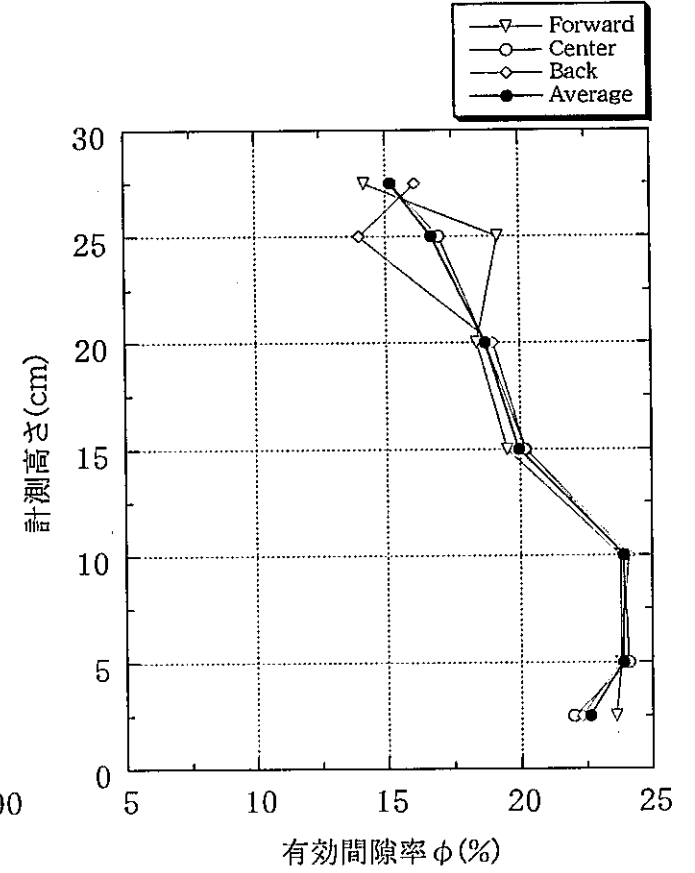
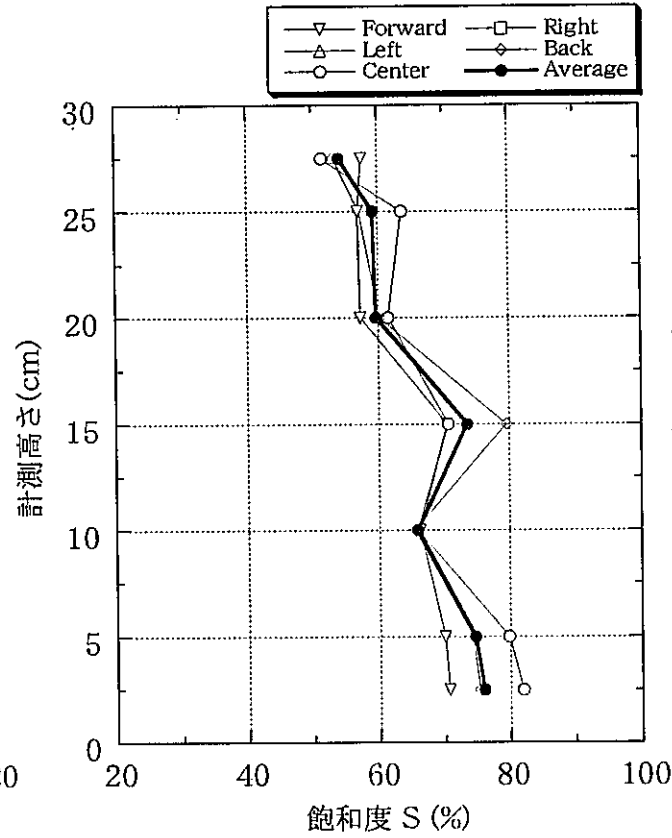
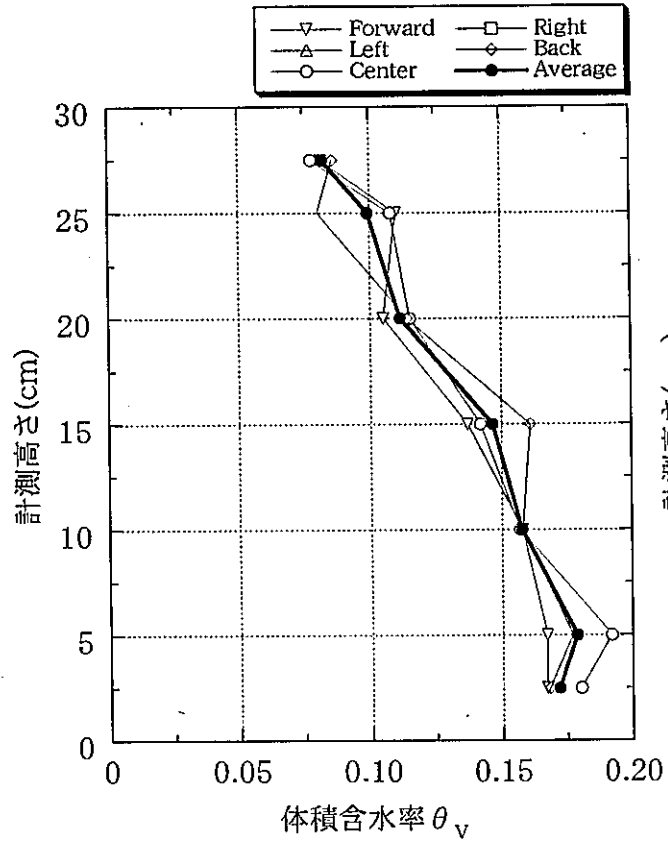


図3.3-28 体積含水率および飽和度の分布 (大ブロックH3、状態3)

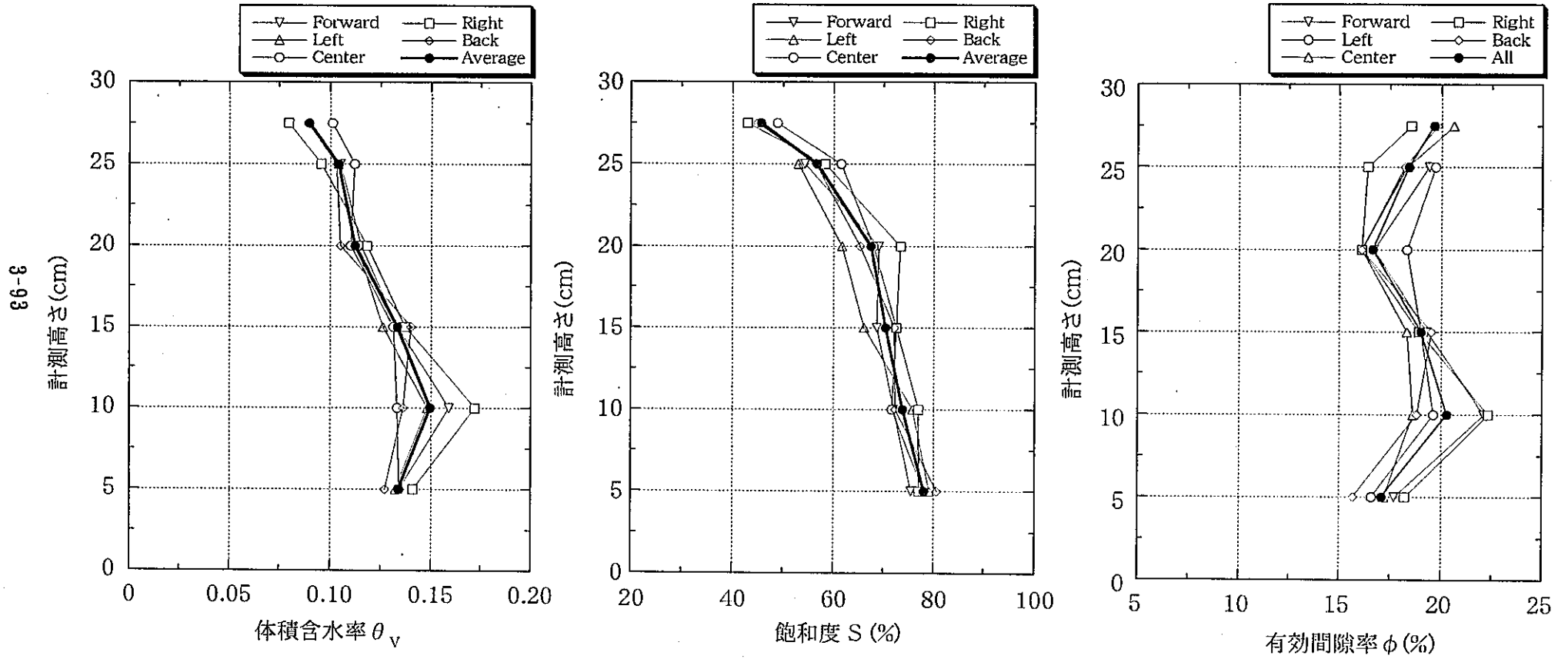


図3.3-29 体積含水率および飽和度の分布 (大ブロックH4、状態1)

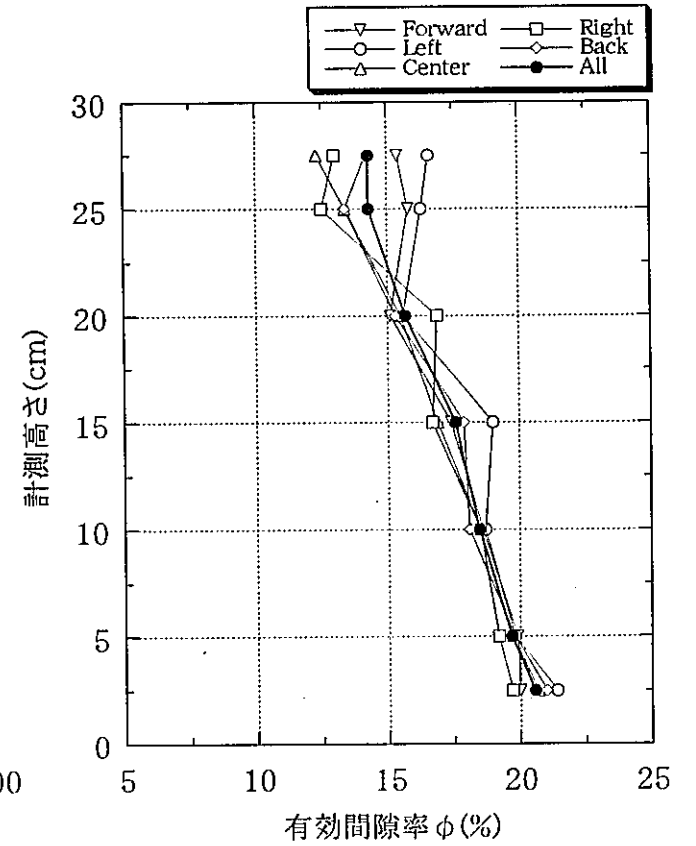
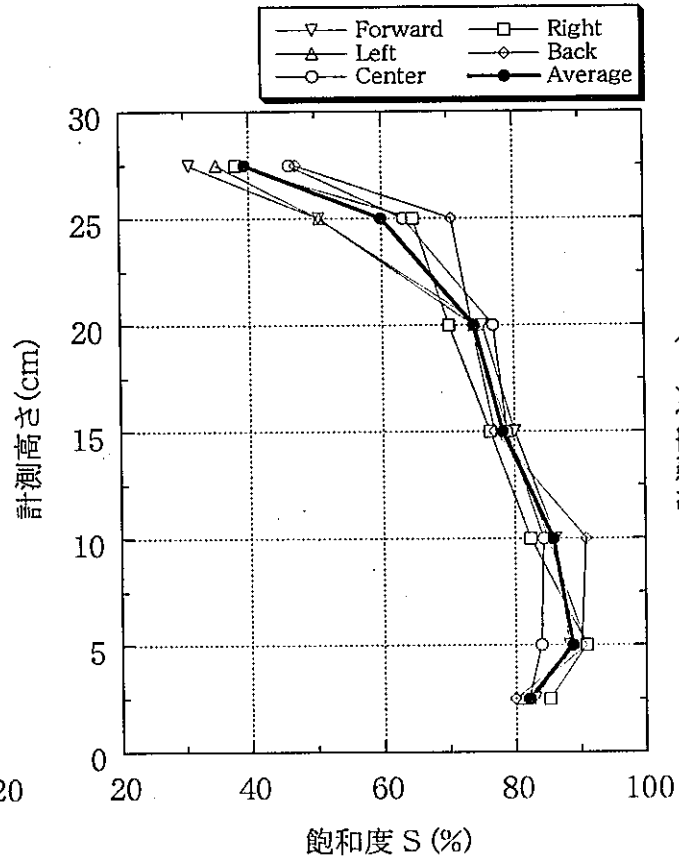
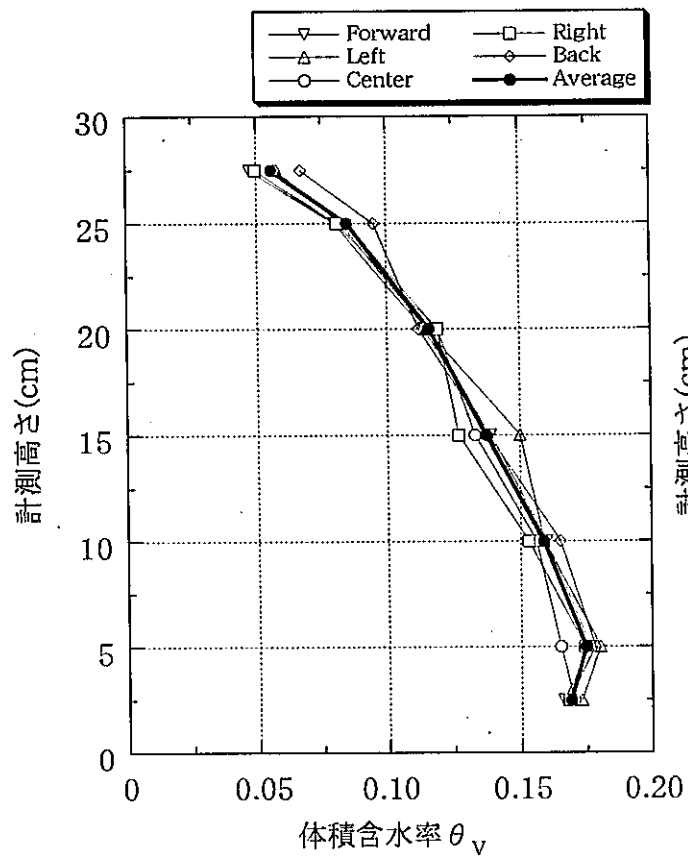


図3.3-30 体積含水率および飽和度の分布 (大ブロックH5、状態2)



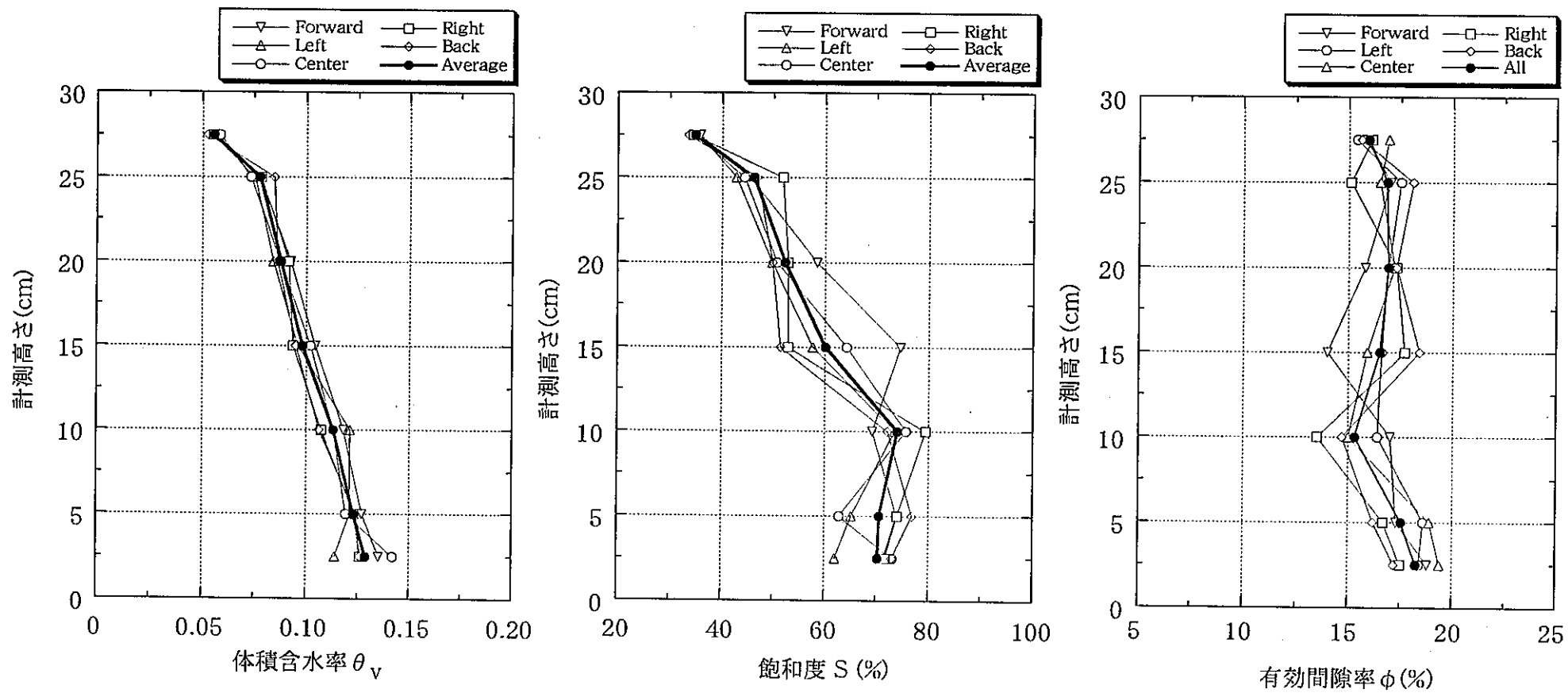


図3.3-31 体積含水率および飽和度の分布 (大ブロックH6、状態3)

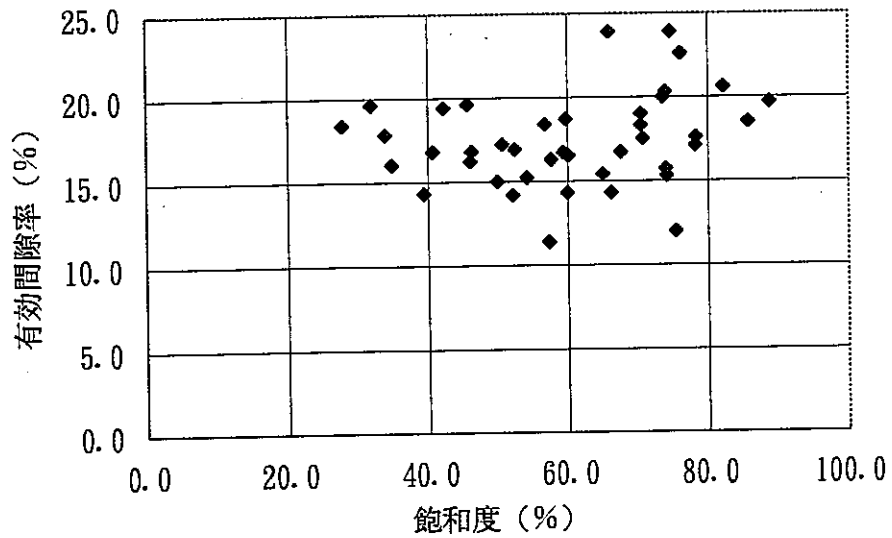
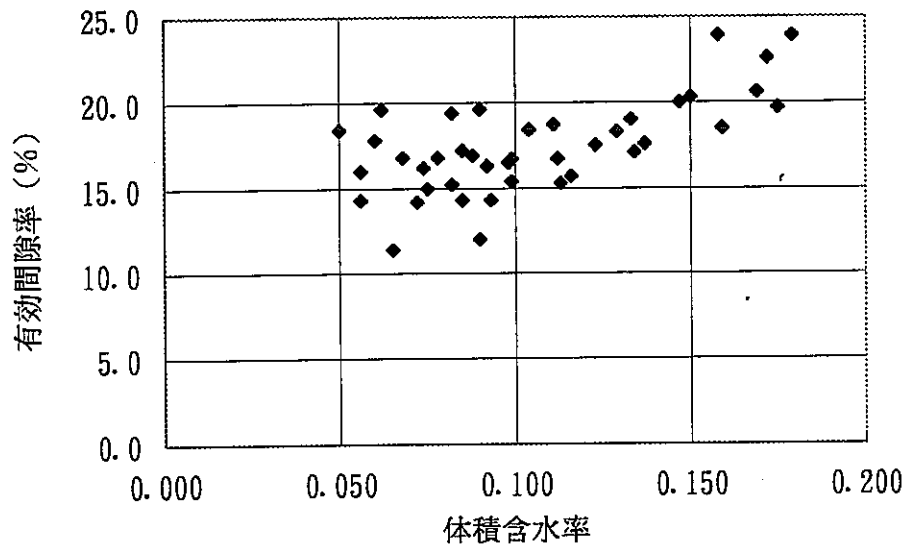


図3.3-32 有効間隙率～体積含水率および飽和度の関係

### 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3.2-23、図3.2-24）。
- ・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3.2-25）。
- ・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3.2-26）。
- ・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（図3.3-26～図3.3-31）。
- ・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適当と考えられる。
- ・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適当と考えられる。

図3.3-33～図3.3-35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3.2-23、図3.2-24）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3.2-25）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。また、電極周囲に塗布したケラチンクリームの影響が現れた可能性も現時点では否定できない。すなわち、状態1の測定より前の含水状態が大きな段階でケラチンクリーム中の導電性成分である塩化ナトリウムが電極周囲の間隙水中に拡散して塩化ナトリウムの濃度が薄くなり、電極周囲の比抵抗値が全体として上がった可能性も考えられる。
- ・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

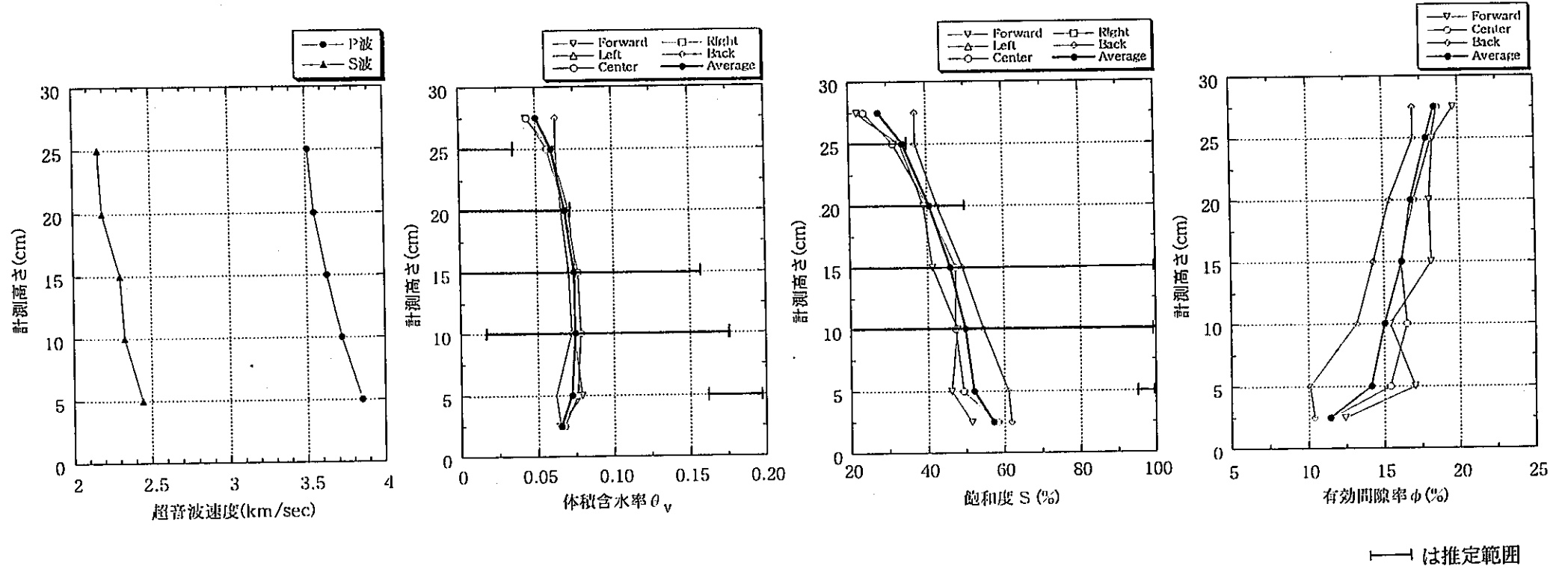


図3.3-33 超音波速度、体積含水率、飽和度および有効間隙率の分布  
(状態3、大ブロックH1)

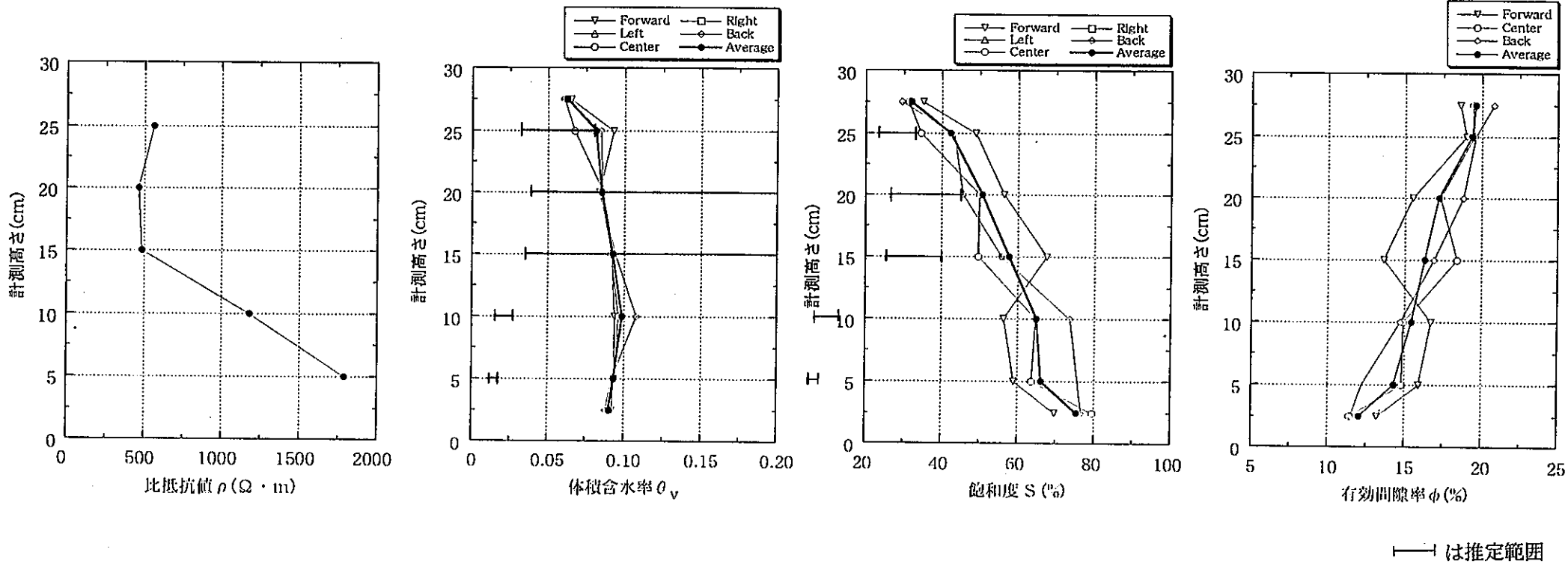
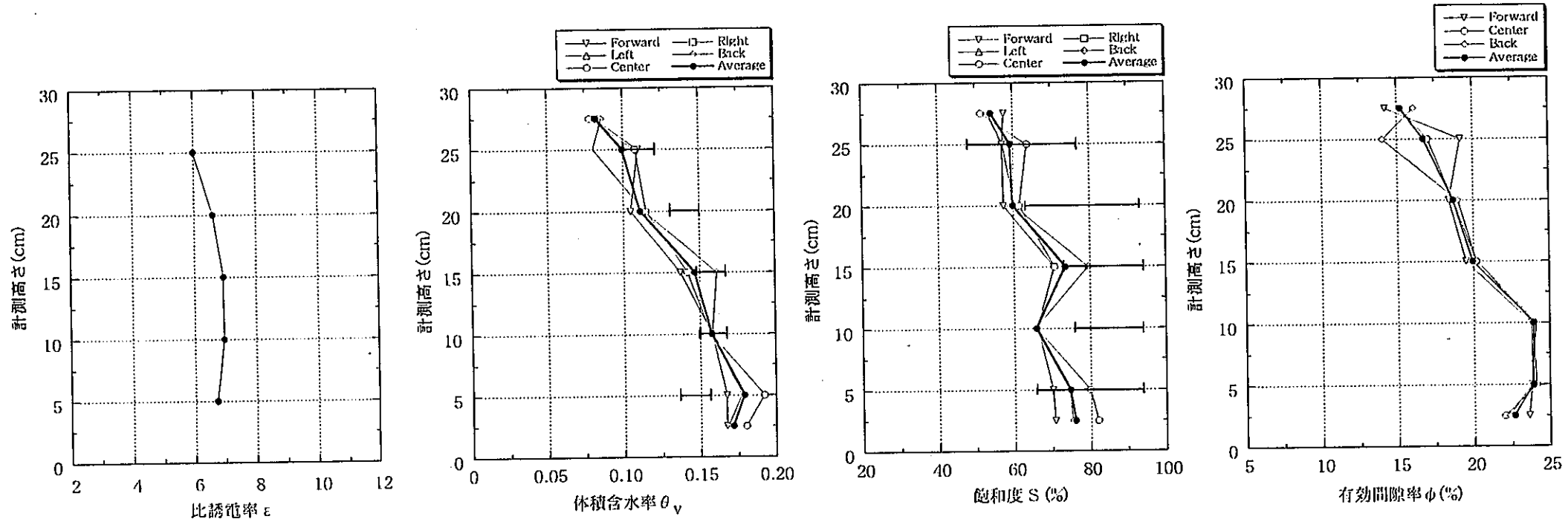


図3.3-34 比抵抗、体積含水率、飽和度および有効間隙率の分布  
(状態3、大ブロックH2)

—|— は推定範囲



—|— は推定範囲

図3.3-35 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)

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3.2-26）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3.3-33～図3.3-35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3.3-33の超音波速度の計測高さ5cm、図3.3-34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3状態で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を表3.3-13～表3.3-15に示した。表中には実際に大ブロックを分割して重量測定によって求めた体積含水率および飽和度の測定値も併せて示した。状態1および状態2についてはそれぞれ同じ含水および乾燥過程をたどった別の大ブロック（H4、H5）、状態3については測定ブロック（H3）そのものを分割して求めた含水分布を示している。図3.3-36～図3.3-38には、これらの関係を図示した。

推定値はH 3ブロックの比誘電率から推定した値、測定平均値はH 5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。

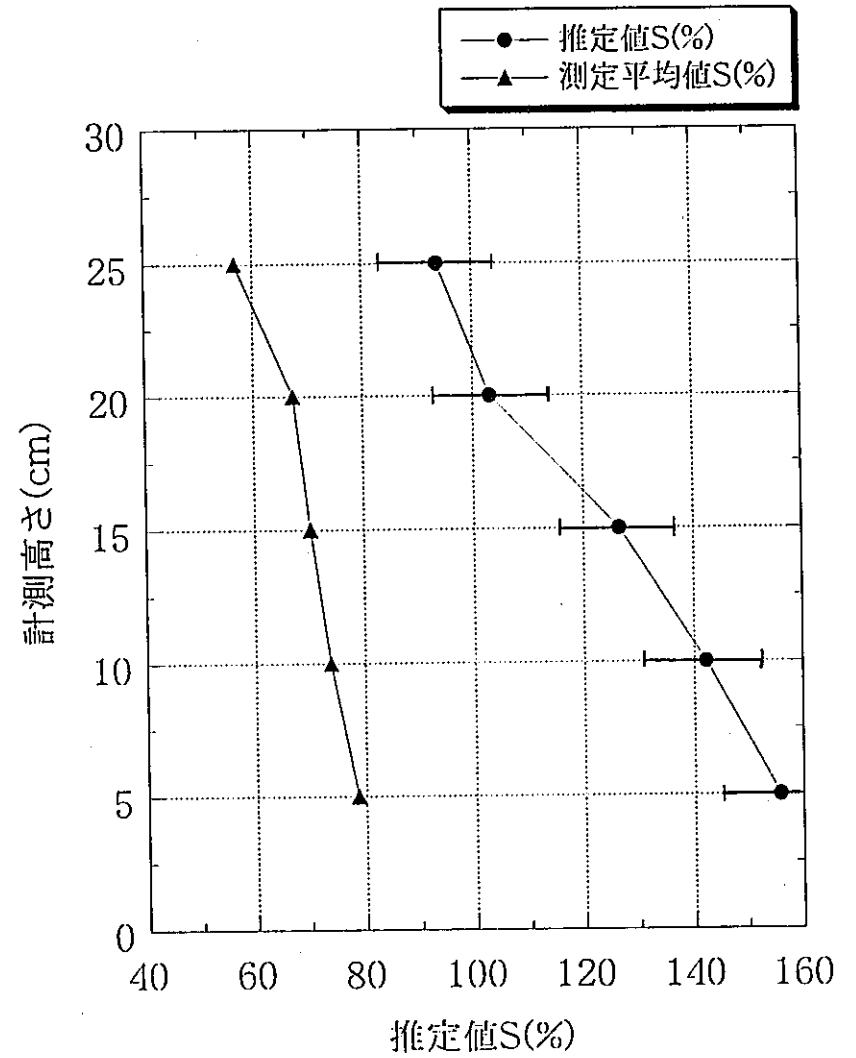
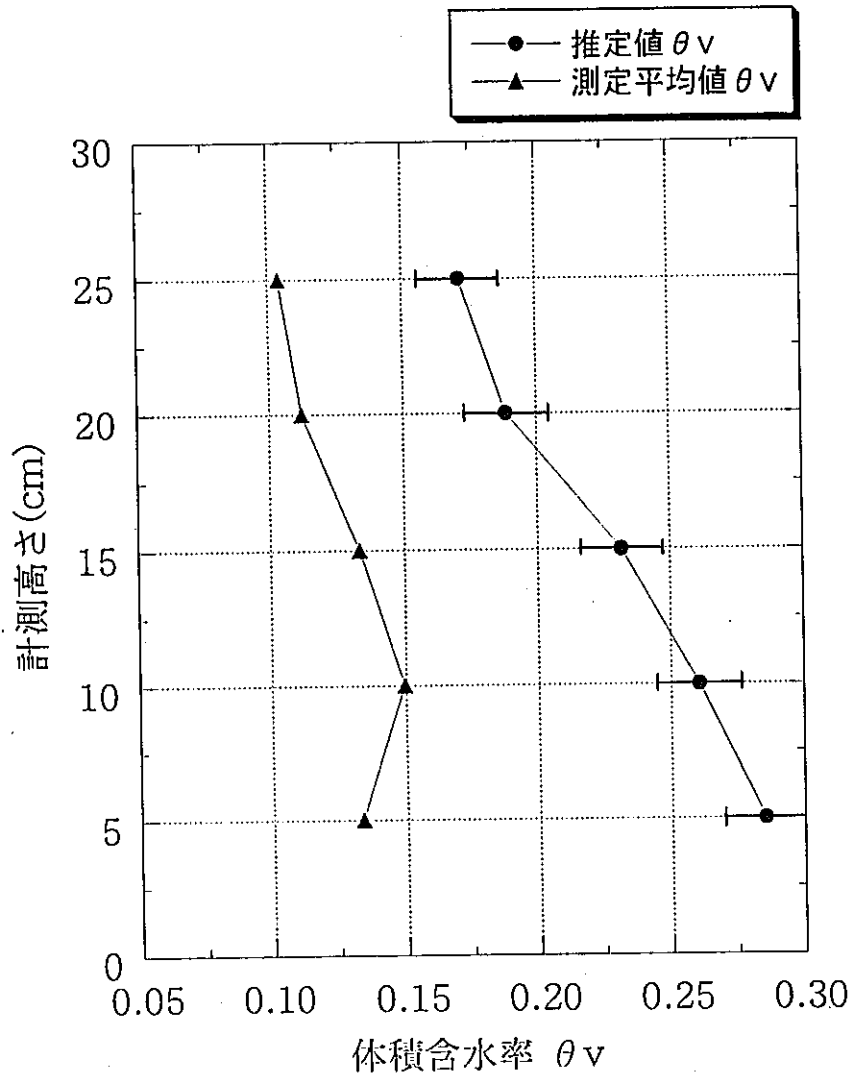


図3.3-36 含水状態の推定値と測定値の比較 (状態1、大ブロックH4)



推定値はH 3ブロックの比誘電率から推定した値、測定平均値はH 3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。

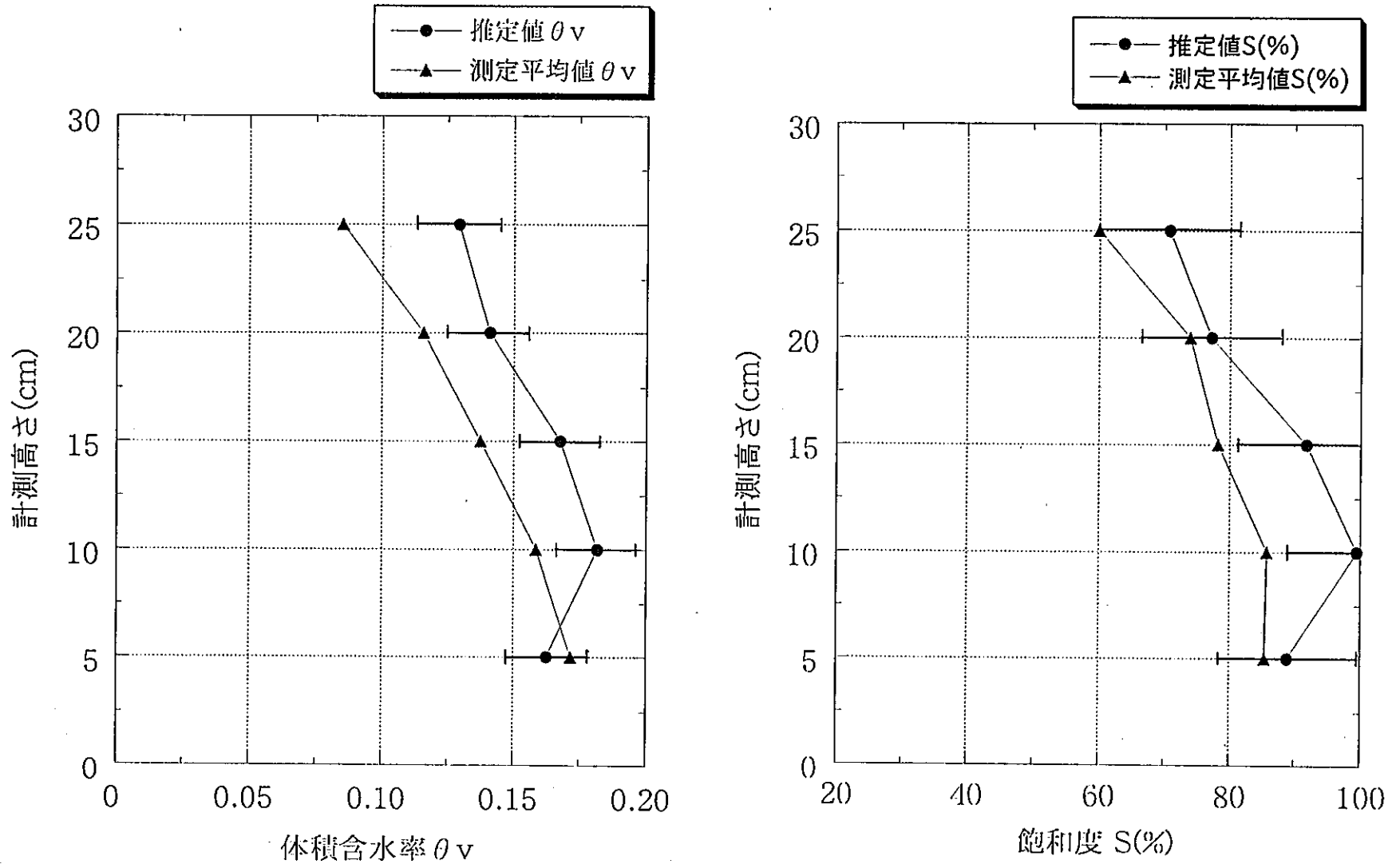


図3.3-37 含水状態の推定値と測定値の比較 (状態2、大ブロックH5)

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H4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。

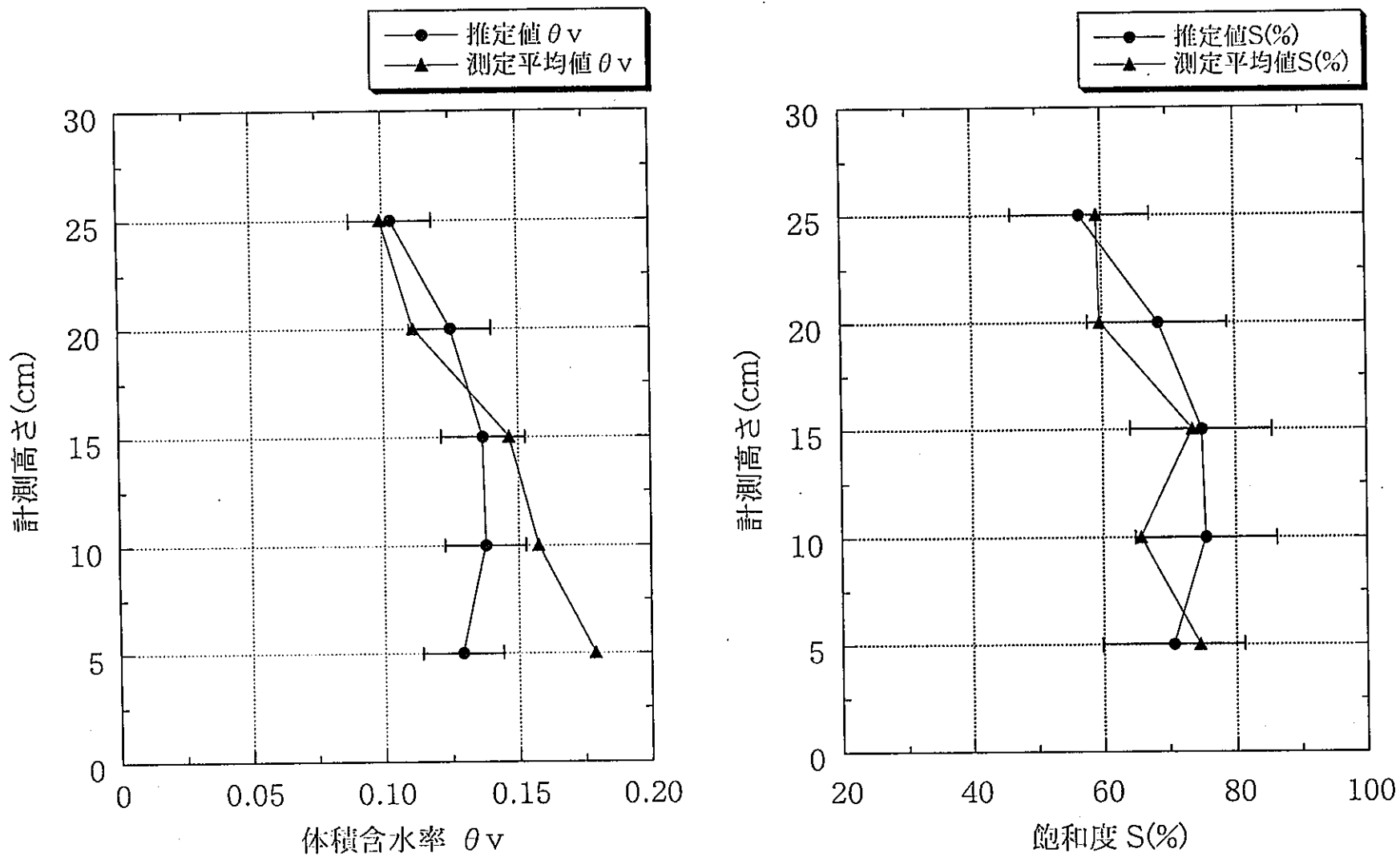


図3.3-38 含水状態の推定値と測定値の比較 (状態3、大ブロックH3)

表3.3-13 大ブロック内の体積含水率および飽和度の分布（状態1）

測定レベル 5:最上部 1:最下部	比誘電率 $\epsilon$	$\theta_v$ (%)		$\theta_v$ (%)の測定値	S (%)		S (%)の測定値
		大ブロックH3		大ブロックH4	大ブロックH3		大ブロックH4
		推定値	推定値 -測定値	平均値	推定値	推定値 -測定値	平均値
5	7.870	17.11	7.24	9.87	93.58	41.08	52.50
4	8.349	18.84	7.62	11.22	103.01	35.75	67.35
3	9.545	23.16	9.82	13.34	126.55	56.29	70.26
2	10.341	26.04	11.08	14.96	142.22	68.42	73.80
1	11.029	28.52	15.16	13.36	155.77	77.71	78.06

表3.3-14 大ブロック内の体積含水率および飽和度の分布（状態2）

測定レベル 5:最上部 1:最下部	比誘電率 $\epsilon$	$\theta_v$ (%)		$\theta_v$ (%)の測定値	S (%)		S (%)の測定値
		大ブロックH3		大ブロックH5	大ブロックH3		大ブロックH5
		推定値	推定値 -測定値	平均値	推定値	推定値 -測定値	平均値
5	6.705	12.90	5.89	7.01	70.65	20.99	49.66
4	7.036	14.09	2.51	11.58	77.17	3.23	73.94
3	7.781	16.78	3.04	13.74	91.83	13.61	78.22
2	8.168	18.18	2.32	15.86	99.45	13.71	85.74
1	7.635	16.26	-0.92	17.18	88.96	3.49	85.47

表3.3-15 大ブロック内の体積含水率および飽和度の分布（状態3）

測定レベル 5:最上部 1:最下部	比誘電率 $\epsilon$	$\theta_v$ (%)		$\theta_v$ (%)の測定値	S (%)		S (%)の測定値
		大ブロックH3		大ブロックH3	大ブロックH3		大ブロックH3
		推定値	推定値 -測定値	平均値	推定値	推定値 -測定値	平均値
5	5.990	10.31	0.38	9.93	56.57	-2.70	59.27
4	6.597	12.51	1.38	11.13	68.52	8.85	59.67
3	6.925	13.69	-0.98	14.67	74.98	1.45	73.53
2	6.953	13.79	-1.98	15.77	75.53	9.73	65.80
1	6.705	12.90	-4.97	17.87	70.65	-3.98	74.63

状態1および2について推定値と測定値が一致していないことは、各時点における大ブロックH3とH4、H3とH5の含水状態が同じであるとする仮定が十分成り立たなかったことを示していると考えられる。状態3については推定値と測定値は全般的にかなり良い一致を示すが、回帰式による推定値が特に体積含水率15%以上において回帰直線のフィッティングがあまり良くないため（図3.2-26）、体積含水率15%以上の範囲では推定精度が良くないことがわかる。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、これら的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。

### 3. 4 今年度の成果と課題

平成6年度の実験の成果と課題について以下に述べる。

#### 3. 4. 1 今年度の成果

- 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。

今回の実験の成果を表3.4-1にまとめた。

表3.4-1 今年度の実験の成果

試験方法	17, 小ブロック試験	本試験	備考
超音波測定	含水による変化が小さい。	センサー位置による速度の違いが認められた。	間隙中の含水状態にあまり敏感でないことがわかった。本試験では岩質のばらつきの影響があらわれた。
比抵抗	低含水状態を除き含水による変化が小さい。	センサー位置による比抵抗の違いが認められた。	間隙中の含水状態にあまり敏感でないことがわかった。本試験の結果は岩質のばらつきの影響かセンサー装着方法のためか現時点では不明である。
TDR	含水による変化が概ね直線的な傾向を示す。	含水状態に対応した変化を示した。小ブロック試験とも整合的な結果が得られた	比誘電率は含水量と良い対応関係を示す。岩石中の含水量で十分有望と考えられる。測定、解析方法の検討がさらに必要である。

### 3.4.2 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. 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。

#### 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。

- 均質性の高い岩石の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、サイクロメータ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。

今回の実験の成果を表4.2-1にまとめた。

表4.2-1 今年度の実験の成果

試験方法	17, 小ブロック試験	本試験	備考
超音波測定	含水による変化が小さい。	センサー位置による速度の違いが認められた。	間隙中の含水状態にあまり敏感でないことがわかった。本試験では岩質のばらつきの影響があらわれた。
比抵抗	低含水状態を除き含水による変化が小さい。	センサー位置による比抵抗の違いが認められた。	間隙中の含水状態にあまり敏感でないことがわかった。本試験の結果は岩質のばらつきの影響かセンサー装着方法のためか現時点では不明である。
TDR	含水による変化が概ね直線的な傾向を示す。	含水状態に対応した変化を示した。小ブロック試験とも整合的な結果が得られた	比誘電率は含水量と良い対応関係を示す。岩石中の含水量で十分有望と考えられる。測定、解析方法の検討がさらに必要である。

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を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。