

不飽和領域の原位置計測手法 および解析モデルの研究 成果概要

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
Σ	J1449 96-005	1996. 12.13.
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1996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。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13 三会堂ビル

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理室

不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究

今井久*、雨宮清**、西田 薫***

林為人***、雷興林***、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。この不飽和領域では、酸素を含んだ空気の浸入により岩盤の酸化還元状態が変化し、これに伴い岩盤中の物質移行特性が変化することが考えられる。しかし、現段階ではこの不飽和領域の範囲を定量的に把握する手法は確立されていない。

本研究は、今後数年のうちに岩盤中の不飽和領域をある程度定量的に把握できるための計測手法を開発することを最終目標としている。今年度は（１）不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究、（２）不飽和領域の計測手法に関する基礎研究に関して、岩石試料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：070D0148

事業団担当部課室および担当者：地層科学研究開発室 湯佐泰久

* 株式会社間組技術研究所、** 株式会社間組技術本部原子力部

*** 株式会社ダイヤコンサルタント東京事業本部

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

Hisashi Imai*, Kiyoshi Amamiya*, Kaoru Nishida**

Weiren Lin**, Xinglin, Lei**, Shigeki Senna**

Abstract

It is generally considered that an unsaturated zone may be generated in the vicinity of a drift after excavation. In such a zone, invasion of air containing oxygen possibly changes geochemical environments (redox condition) of the rock mass. However, no measurement technique for quantitative understanding of this unsaturated zone has been developed at this moment.

This work was started to develop the measuring method in the next several years. This year, fundamental information was obtained through laboratory experiments described below using homogeneous rock samples.

- (1) experiments on the mechanism of undersaturation in rock.
- (2) experiments on the measuring method of the extent 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: Yasuhisa Yusa, TONO Geoscience Center, Geological Environment Research Section

* HAZAMA CORPORATION

** DIA CONSULTANTS CO., LTD.

目 次

1. 研究の目的	1-1
2. 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究	2-1
2. 1 前年度までの研究成果	2-1
2. 2 本年度の研究目的と実施概要	2-2
2. 3 湿度センサーによる蒸発量測定の精度検討	2-3
2. 3. 1 検討概要	2-3
2. 3. 2 蒸発量計測方法	2-4
2. 3. 3 計測装置	2-5
2. 3. 4 計測結果	2-6
2. 3. 5 水蒸気拡散解析	2-8
2. 4 均質な岩石試料を用いてのvan-Genuchten式のパラメータの同定	2-11
2. 4. 1 均質な岩石試料の選定	2-11
2. 4. 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の概要	2-11
2. 4. 3 VG式	2-12
2. 4. 4 供試体諸元	2-13
2. 4. 5 蒸発量・水分分布計測	2-13
2. 5 水分特性曲線の計測	2-20
2. 6 相対透水係数同定	2-21
2. 6. 1 試験装置の概要	2-21
2. 6. 2 計測結果	2-22
2. 6. 3 不飽和透水係数の同定	2-24
2. 7 VG式のパラメータのばらつきが解析結果に与える影響検討	2-26
2. 7. 1 解析モデル	2-26
2. 7. 2 解析ケース	2-27
2. 7. 3 解析結果	2-28
2. 8 VG式の適用性についての考察	2-31
2. 8. 1 VG式パラメータの同定方法と同定結果	2-31

2. 8. 2	VG式の適用性についての考察	2-33
2. 9	今年度の成果と課題	2-35
2. 9. 1	今年度の成果	2-35
2. 9. 2	今後の課題	2-36
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	比誘電率測定方法に関する予備検討	3-2
3. 2. 1	比誘電率測定・解析システム	3-2
3. 2. 2	測定法に関する予備検討の結果のまとめ	3-5
3. 3	超音波速度、比抵抗及び比誘電率測定	3-5
3. 3. 1	供試体	3-5
3. 3. 2	超音波速度測定	3-8
3. 3. 3	比抵抗測定	3-14
3. 3. 4	比誘電率測定	3-16
3. 3. 5	試験結果の検討	3-19
3. 4	今年度の成果と課題	3-23
3. 4. 1	今年度の成果	3-23
3. 4. 2	課題	3-25
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	今年度の成果	4-1
4. 1. 2	今後の課題	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	4-6
4. 2. 3	来年度研究の提案	4-7

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。この不飽和領域では、酸素を含んだ空気の浸入により岩盤の酸化還元状態が変化し、これに伴い岩盤中の物質移行特性が変化することが考えられる。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立されているが、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。平成6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。平成7年度はこれまでの研究で得られた知見・課題を踏まえ、室内試験を含めた基礎研究を継続し、上記2項目についてさらに検討した。

2 不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究

2. 1 前年度までの研究成果

平成6年度の不飽和領域のメカニズムに関する基礎研究として最も基本となるマトリックス部に
関し、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、また、不飽和浸透特性として土壌に対して求められたvan-Genuchten式⁶⁾の岩への適用性について室
内実験により以下の検討を実施した。

- (i) 不飽和パラメータ既知試料に対するVG式の適用性検討
- (ii) 供試体寸法（長さ）の不飽和パラメータに与える影響の検討
- (iii) 流出部境界条件の影響の検討

この検討では、使用した岩石の透水係数が予想以上にばらついたためvan-Genuchten式（以下VG式）
の適用性は十分に評価することはできなかった。しかし、本検討を通じて以下のことが明らかとなった。

- ① 不飽和パラメータ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
致した。計測した圧力と同定された不飽和特性に基づいて計算した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 α 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 α 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 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。

また、本検討を通じて以下の課題が挙げられた。

- ① 用いた試料の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。

2. 2 本年度の研究目的と実施概要

本年度の研究目的と実施概要を以下に示す。

(1) 湿度センサーによる蒸発量測定精度の検討

岩石コア上端からの水分フラックスを湿度センサーを用いてより正確に計測することを目的に実験・解析を実施する。昨年度実施した湿度センサー^{*}を用いた蒸発量計測では電子天秤を用いて質量の減少から算定された蒸発量と比較すると、電子天秤を用いて算定された蒸発量は湿度センサーを用いた蒸発量の1.5～2倍となり湿度センサーを用いた蒸発量の精度に疑問が生じた。実際の原位置での計測では天秤による計測は不可能であるため本検討を実施する。コア上端周辺の3次元的な水蒸気拡散により計測誤差が生じたことが考えられる。そのためコア上端での3次元的な拡散を抑制する方法やその効果について実験・解析を実施して検討する。

(※：当センサーは実際には温度と相対湿度を計測するセンサーであり温度・湿度センサーと称するのが正確な表現であるがここで湿度センサーとする。)

(2) 均質な岩石試料を用いてのVG式のパラメータの同定

均質な複数の岩石試料を用いて、同一条件にて昨年同様に渡辺らの方法1)により以下VG式のパラメータの同定を行い、そのばらつきを把握する。

(3) 既存手法を用いた水分特性曲線・相対透水係数の把握

従来からあるpF試験より対象とした岩石の水分特性曲線を求める。境界条件と圧力の経時変化を計測した試験から対象とした岩石の相対透水係数を求める。

(4) VG式のパラメータのばらつきの解析結果に与える影響検討

(2)(3)により得られた不飽和のパラメータを用いて、坑道周辺の浸透流解析を実施し、VG式のパラメータのばらつきが坑道周辺の不飽和領域の広がりを与える影響について検討する。

以上(1)から(4)の試験計測・解析を通じて、岩石に対する不飽和特性の計測・解析方法の評価

を実施し、不飽和領域の広がりメカニズム・モデル化について検討する。

図 - 2.2-1に本研究のフロー図を示す。

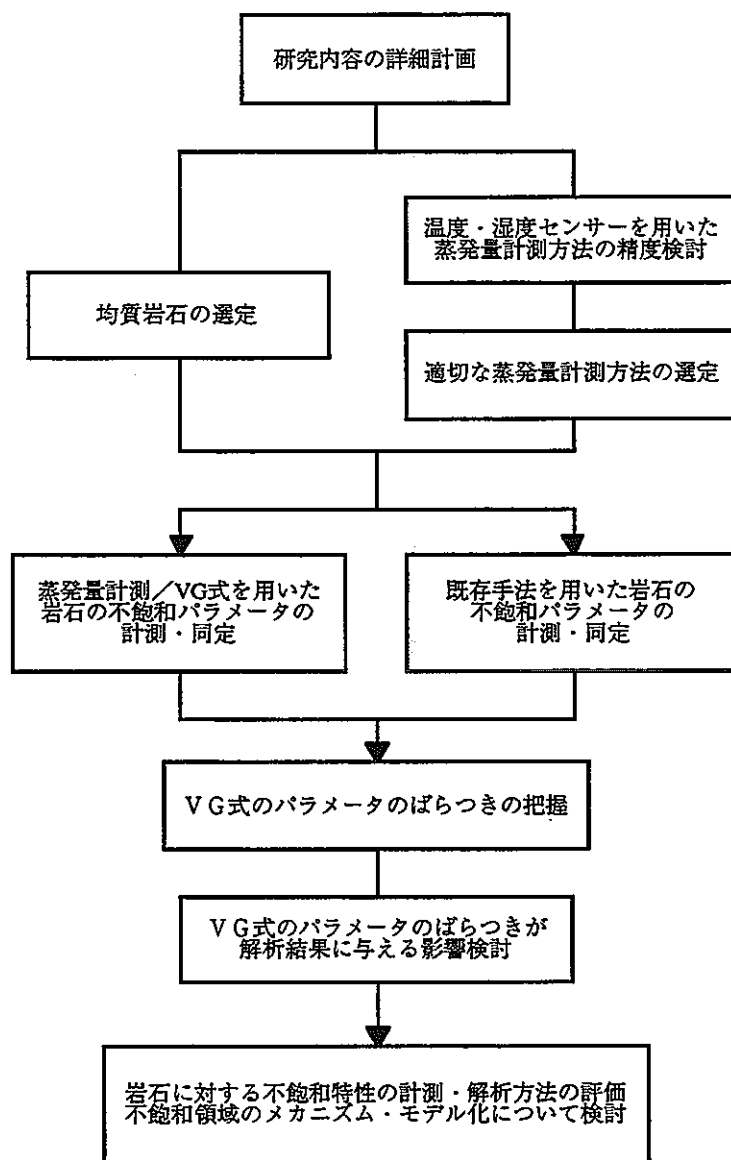


図 - 2.2-1 本年度の不飽和メカニズムに関する研究全体のフロー

2.3 湿度センサーによる蒸発量測定精度検討

2.3.1 検討概要

平成6年度の蒸発量計測には湿度センサーを用いた水分拡散に基づく計測¹⁾と電子天秤を用いた質量減少に基づく計測を実施した。その結果、質量計測からの蒸発量が湿度計測からの蒸発量の1.5～2倍となった。原位置における蒸発量計測では質量計測は不可能であるため、湿度センサーを用いた蒸

発量計測の精度について検討する必要がある。

木村・高橋²⁾の報告によれば岩石コアからの水分拡散はコア周辺部で側方への大きな拡散が生じていることが報じられている。さらに、これは障壁を設けることで側方への水分拡散を抑制でき、質量計測と湿度計測からの蒸発量の差を20%程度に抑え得ると報じている。

上記報告を受けて、本検討では障壁のある場合と、ない場合での蒸発量の比較検討を実施する。試料は標準砂を用いて実施する。始めに下図に示すように高さ約2 cm（水分拡散の厚さに相当）の障壁を付けた状態で湿度センサー、天秤による蒸発量計測を実施する。計測値が定常と見なせる状態での蒸発量が計測された後、障壁を外し、計測を続ける。再び定常と見なせる状態での蒸発量が計測されるまで計測する。

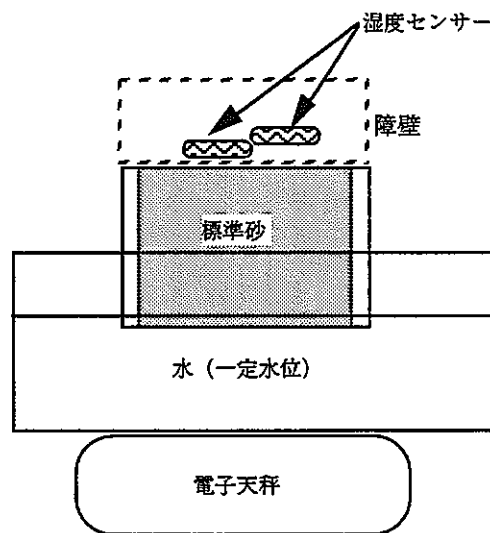


図 - 2.3-1 蒸発量計測状況

上記障壁を設けた場合の検討で、湿度センサーと天秤による蒸発量が同様な値を示した場合には本検討は終了とする。両者の値が同様でない場合は障壁の高さを約4 cmにして同様な実験を実施する。

2. 3. 2 蒸発量計測方法

(1) 湿度センサーを用いた蒸発量計測

岩石からの水分フラックスは、定常・1次元拡散を仮定し、蒸発量として計測する。原位置での岩盤壁面近傍を考えるならば岩盤壁面を直交する気体の流れは0であり、岩盤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。岩盤からの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。

$$E_v = -D \frac{d\theta}{dx} \quad (2.3-1)$$

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）、 θ 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 は岩盤表面に直交した方向の岩盤表面からの距離である。

(2) 天秤を用いた蒸発量計測

計測に用いた試料（岩石コア）は、試料に一定水位を与えるアクリル容器と一体となり、試料表面（コア端面）の岩石部分以外は密閉状態である。このため、試料・アクリル容器全体の質量の減少量は試料を通った水分の蒸発による質量に相当する。従って試料・アクリル容器全体の質量の時間的変化は試料表面からの蒸発量に相当する。蒸発量の算定式 (2.3-2) を以下に示す。

$$E_v = \frac{W_2 - W_1}{A \cdot \Delta t} \quad (2.3-2)$$

E_v は蒸発量、 W_2, W_1 はそれぞれ時刻 t_2 、 t_1 における試料・容器の質量である。 A は試料蒸発面の面積である。 Δt は時刻 t_2 、 t_1 の時間差である。

2. 3. 3 計測装置

(1) 計測装置の構成

計測装置の構成の概要を図 - 2.3-2 に示す。図 - 2.3-2 に示す計測装置は 2 セット（試料 A、B）使用し、温度等の条件を安定させるため、恒温室内の人工気象装置のなかに設置した。

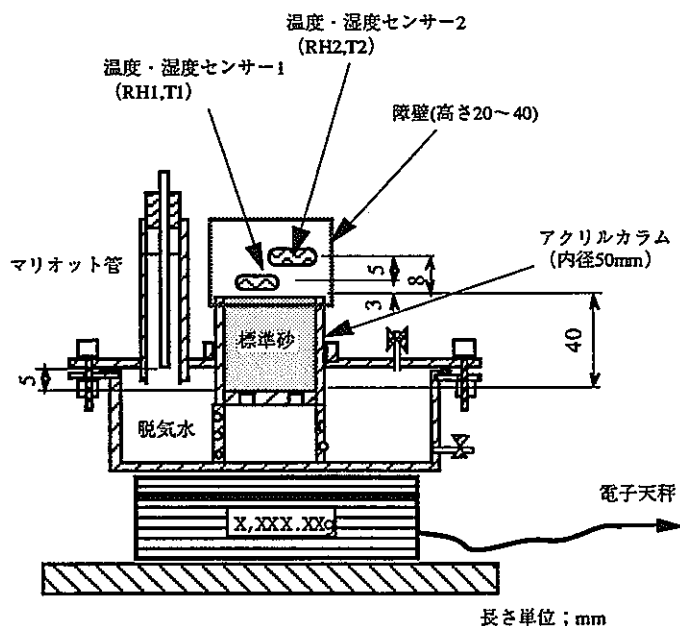


図 - 2.3-2 計測装置の構成の概要

2. 3. 4 計測結果

計測は約 2 3 日間 (545時間) にわたり実施した。代表的計測結果として図 - 2.3-3に試料Aの(d)電子天秤による試料・容器の質量の経時変化、(e)湿度センサーを用いた蒸発量と天秤を用いた蒸発量の経時変化、(f)湿度センサーを用いた蒸発量 E_v と天秤を用いた蒸発量 E_v の比の経時変化をそれぞれ示す。

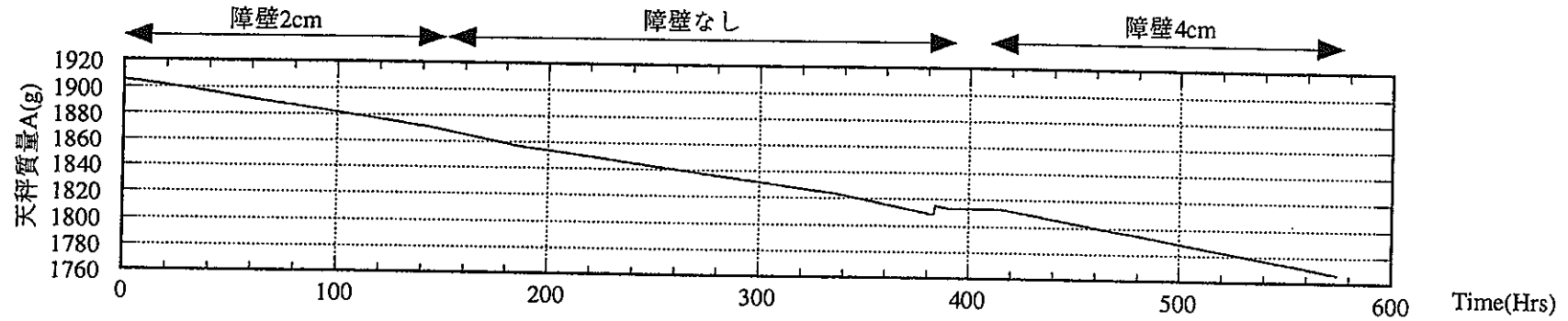
表 - 2.3-1に蒸発量の安定した300時間前後、500時間以降の蒸発量を計測のまとめとして示す。

天秤を用いた蒸発量は1時間の質量の減少から蒸発量を算定したものである。

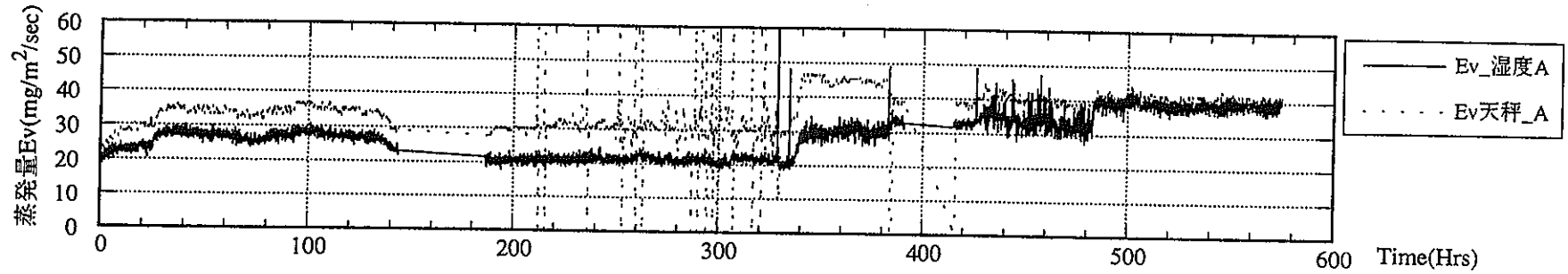
試料Aの天秤計測による質量変化からの蒸発量と湿度センサーによる蒸発量の比をみると、障壁を撤去するとその比は増加し設置すると減少し1に近くなる。最終的に試料Aではその比が約1となり障壁の設置が試料上端からの水蒸気の3次元的な拡散を抑制し1次元拡散状態を作っていると考えられる。すなわち4cm程度の障壁を設置することで、コア上端の蒸発量を湿度センサーを用いてほぼ正確に(大きく見積もって10%程度の誤差以内で)計測できると考えられる。

表 - 2.3-1 蒸発量計測のまとめ

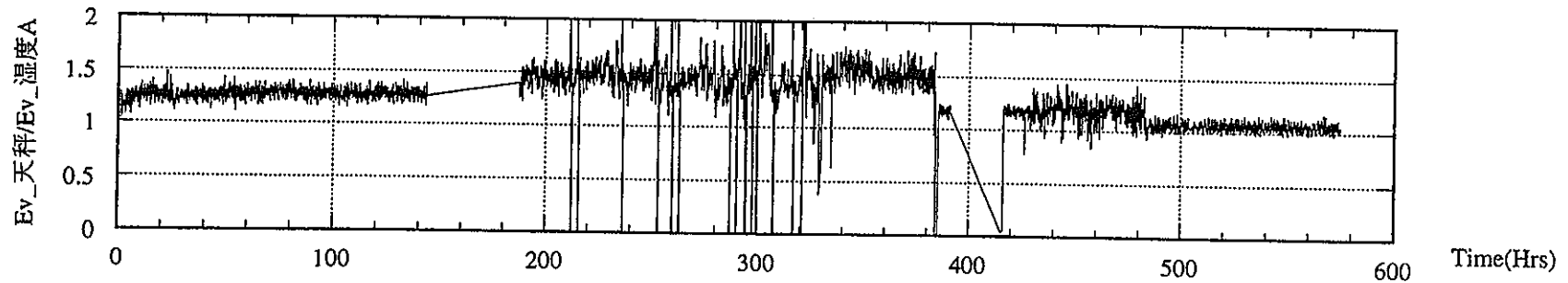
	300時間前後				500時間以降			
	障壁条件	湿度センサ 蒸発量	天秤蒸発量	$E_{v_B}/$ E_{v_A}	障壁条件	湿度センサ 蒸発量	天秤蒸発量	$E_{v_B}/$ E_{v_A}
		E_{v_A} (mg/m ² /sec)	E_{v_B} (mg/m ² /sec)			E_{v_A} (mg/m ² /sec)	E_{v_B} (mg/m ² /sec)	
試料A	なし	22	30	1.36	4cm	38	39	1.03
試料B	2cm	10	—	—	2cm	17	—	—



(d) 電子天秤による試料・容器の質量の経時変化



(e) 湿度センサーを用いた蒸発量と天秤を用いた蒸発量の経時変化



(f) 湿度センサーを用いた蒸発量Evと天秤を用いた蒸発量Evの比の経時変化

図 - 2.3-3 質量、蒸発量、2種類の蒸発量の比の経時変化 (試料A)

2. 3. 5 水蒸気拡散解析

コア上端付近の水蒸気の拡散はどの程度の3次元性を有しているのか数値解析を通じて検討した。

(1) 支配方程式

定常状態における水蒸気分布の支配方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (2.3-3)$$

水蒸気密度 h は相対湿度 RH と飽和水蒸気密度 h_{sat} の積として(2.3-4)式のように表現できる。

$$h = h_{sat} \cdot RH \quad (2.3-4)$$

温度・気圧は変化しないものとする。水蒸気拡散係数および飽和水蒸気密度 h_{sat} は一定値として取り扱える。従って(2.3-3)、(2.3-4)から次式を得る。

$$h_{sat} \cdot D \cdot \frac{\partial^2 RH}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.3-5)$$

ここで $h_{sat} \cdot D$ は定数であり、相対湿度 RH はラプラスの方程式を満足する関数として、飽和浸透流と同様にポテンシャル流れとして解析することができる。

(2) 解析条件

本解析は、コア中心に関する軸対象性を考慮して中心から 90° の範囲を解析対象とした。ここでは①側方に障壁を設けていない場合と、②障壁を設置している場合を比較して両者でどの程度のコア表面からの蒸発量に違いが生じるのかについて検討することにする。

解析の境界条件は、今回標準砂コアを用いて実施した湿度分布状況を基にして設定した。5mm離れた下部センサーと上部センサーの相対湿度の差25%から、相対湿度分布はコア表面から離れるに連れて1mm当たり5%低下するものとした。コア表面で相対湿度100%という条件にした。この条件ではコア表面から3mm離れた下部センサーの位置で相対湿度85%、コア表面から3mm離れた上部センサーの位置では相対湿度60%となる。気温条件は 27°C とした。気温 27°C における飽和水蒸気密度は前出のGoff-Gratchの式より 25.7127g/m^3 である。

昨年の計測結果によるとコア上端より15mmまでは一定勾配で湿度変化をし、それ以上では湿度変化勾配が小さくなっていた。この結果を受けてコア上端より15mm以上は湿度一定とすることにした。同様にコア側部から15mm以上離れた箇所も湿度一定とすることにした。

この条件を1次元水蒸気拡散として水蒸気のフラックスを算定すると次式のように求められる。

$$\begin{aligned}
 e_i &= -D \frac{\partial h}{\partial x_i} \\
 &= -1.11e-1 / 3600 \times 25.7127e+3 \times (0.25 / 0.005) \\
 &= 39.640 \text{ mg/m}^2/\text{sec}
 \end{aligned}
 \tag{2.3-6}$$

ここで水蒸気拡散係数は気温27℃にたいして1.11e-1m²/hourである。

解析領域は図-2.3-5に示すように、コア中心から水平方向に40mm（コア側部から15mm）、周方向に90°、コア表面から鉛直方向に15mmの範囲とした。

境界条件をまとめたものが図-2.3-6である。図中(a)は障壁等を設けて1次元の拡散状況を再現するための境界条件である。(b)は障壁はなく昨年度までの蒸発量計測の実験状況を模擬した条件である。(a)は理想的には側部をNo_Flowとすべきであるが、解析MESHの都合上(a)に示す境界条件を設定した。それらの結果は同じになる。

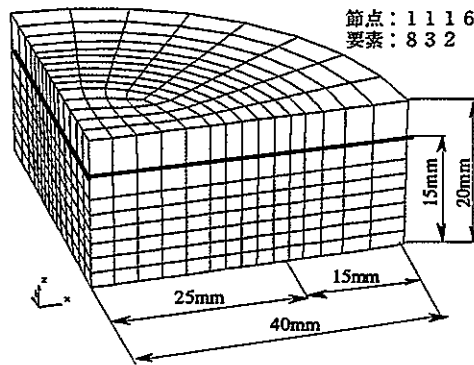
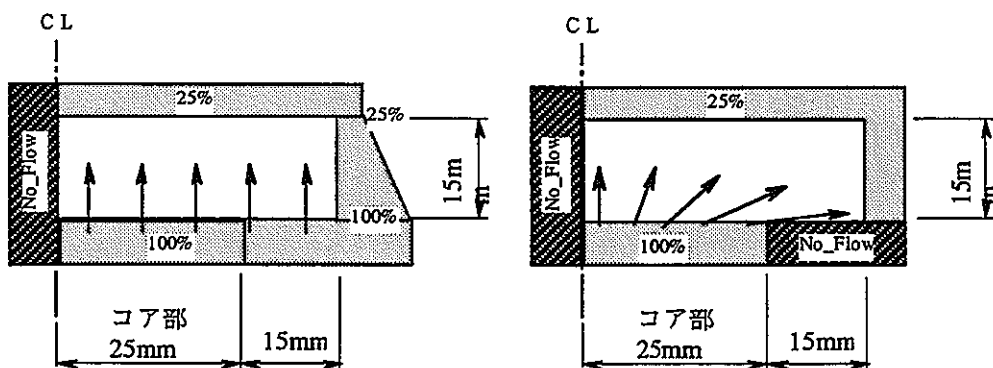


図-2.3-5 メッシュ分割形状



(a) 理想的な1次元拡散

(b) コア周辺の3次元拡散

図-2.3-6 境界条件の設定

(3) 解析結果

図 - 2.3-7にはコア中心からの距離と水蒸気フラックス（蒸発量）の関係を示す。(a)障壁ありの場合距離に関わらず一定値 $39.64\text{mg/m}^2/\text{sec}$ を示し、(2.3-6)式での計算結果と一致している。3次元ではコア側方ほど蒸発量が大きくなり端部では中心部の約2倍となっている。

コア相当部からの全フラックス〈水蒸気流出量 (mg/sec)〉は(a)障壁ありの場合 $1.946\text{E-}2$ (mg/sec) 〈平均蒸発量は $39.64\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 〉、(b)障壁なしの場合 $3.084\text{E-}2$ (mg/sec) 〈平均蒸発量は $62.83\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 〉となっている。(a)障壁ありと(b)障壁なしの蒸発量を比較すると(b)障壁なしの蒸発量は(a)障壁ありの蒸発量の約1.6倍となり、昨年度の湿度センサーからの蒸発量と天秤からの蒸発量の比に相当し、今回の解析から3次元拡散の影響で蒸発量が計測法方により異なったことが理解される。表 - 2.3-2に障壁設置の効果についてまとめて示す。

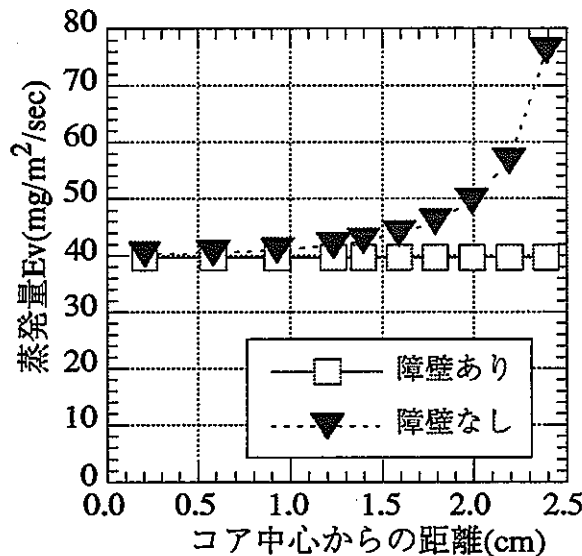


図 - 2.3-7 コア上面内の蒸発量の分布

(4) まとめ

以上の計測、解析を通じて昨年度の計測結果で質量計測からの蒸発量が湿度計測からの蒸発量の1.5~2倍となった主な原因は水蒸気拡散の3次元性の影響であることが明らかになった。

またその対策としてはコア上端部に40mm程度の障壁を設けると3次元性の影響をほぼ除去することができることを実験を通じて確認することができた。

表 - 2.3-2 障壁設置の効果について

	障壁なし			障壁あり		
	湿度センサ蒸 発量	天秤蒸発量	Ev_B/Ev_A	湿度センサ蒸 発量	天秤蒸発量	Ev_B/Ev_A
	Ev_A (mg/m ² /sec)	Ev_B (mg/m ² /sec)		Ev_A (mg/m ² /sec)	Ev_B (mg/m ² /sec)	
解析	62.83	—	—	39.64	—	—
試料A	22	30	1.36	38	39	1.03
試料B	10	—	—	17	—	—
多胡L1	17.8	31.6	1.78	—	—	—
多胡L2	18.7	30.9	1.65	—	—	—

2. 4 均質な岩石試料を用いてのvan-Genuchten式のパラメータの同定

2. 4. 1 均質な岩石試料の選定

均質な岩石の候補として、来待砂岩（鳥根県産）、白浜砂岩（和歌山県産）を対象に、間隙率のばらつき、透水係数、蒸発量の予備試験を行った。

白浜砂岩では蒸発量が10mg/m²/sec程度の値が計測され、間隙率のばらつきも小さいため今回の試料として白浜砂岩を用いることにした。

2. 4. 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の概要

渡辺らの開発した方法⁵⁾は、実験（計測）とVG式に順じた解析からなる。VG式は不飽和特性（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 - 2.4-1）を与えて行う。この条件で発生する鉛直1次元の流れ（蒸発量）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) を最小二乗法を用いて求める逆解析である。

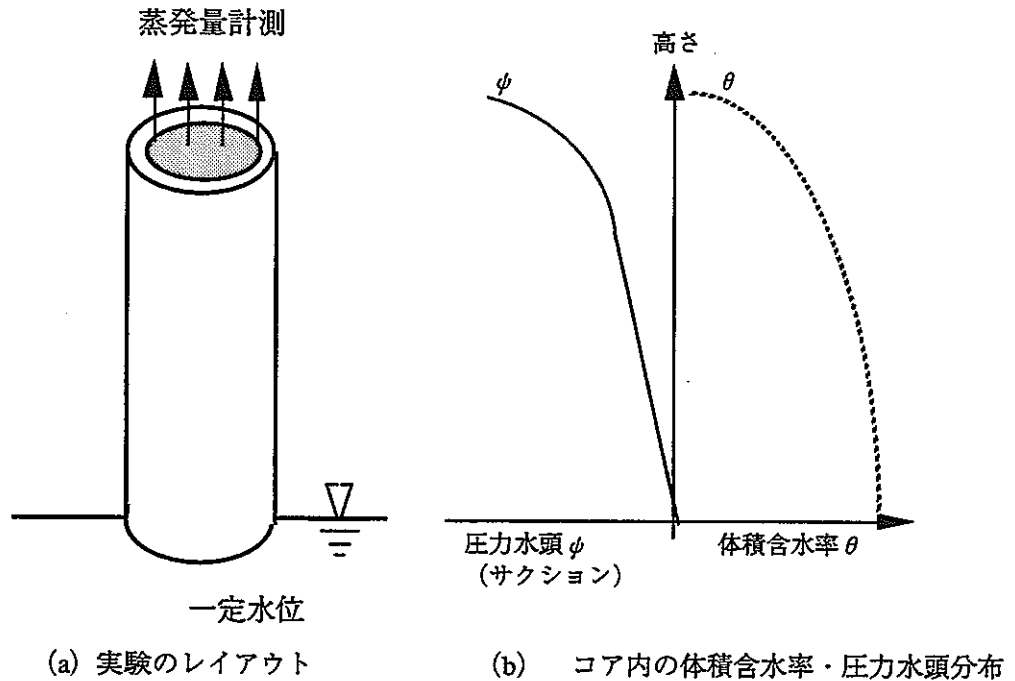


図 - 2.4.1 不飽和特性推定法の概要

2. 4. 3 VG式

VG式⁶⁾ は以下の各式から定義・構成される。

有効飽和度 Se は次式のように定義される。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.4-1)$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小体積含水率である。

有効飽和度 Se と圧力水頭 ψ の関係式は (2.4.2) 式で与えられる。

$$Se = \left\{ 1 + |\alpha\psi|^n \right\}^{-m} \quad (2.4-2)$$

相対透水係数 k_r 、比水分容量 $C(\theta)$ はそれぞれ

$$K_r = Se^{1/2} \cdot \left\{ 1 - (1 - Se^{1/m})^m \right\}^2 \quad (2.4-3)$$

$$C(\theta) = \alpha \cdot (n-1) \cdot (\theta_s - \theta_r) \cdot Se^{1/m} \cdot (1 - Se^{1/m})^m \quad (2.4-4)$$

$$m = 1 - 1/n \quad , \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (2.4-5)$$

で示される。

2. 4. 4 供試体諸元

試験用供試体は6本用意した。各コアの諸元を表-2.4-1に示す。このうち4本(A-1からA-4)は堆積方向に直交する方向にコア抜きしたものである。2本(B-1からB-2)は層理面と平行な方向にコア抜きしたものである。

表 - 2.4-1 供試体諸元

		白浜-A1	白浜-A2	白浜-A3	白浜-A4	白浜-B1	白浜-B2
供試体長さ	L(cm)	10.68	10.24	9.97	10.14	10.22	10.23
直径	D(cm)	4.96	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95
断面積	A(cm ²)	19.32	19.24	19.24	19.24	19.24	19.24
かさ体積	V(cm ³)	206.36	197.06	191.86	195.14	196.68	196.87
乾燥重量	Wd(g)	466.82	447.02	443.43	442.22	446.42	447.39
水中重量	W'(g)	285.02	273.41	271.01	270.89	273.03	273.74
湿潤重量	Ws(g)	499.22	477.15	474.35	473.72	477.22	478.07
体積	V(cm ³)	214.20	203.74	203.34	202.83	204.19	204.33
単位飽和密度	ρ_s	2.331	2.342	2.333	2.336	2.337	2.340
単位乾燥密度	ρ_d	2.179	2.194	2.181	2.180	2.186	2.190
有効間隙率	ne	0.151	0.148	0.152	0.155	0.151	0.150
透水係数	Ks(cm/sec)	5.31E-09	8.13E-09	7.38E-09	1.47E-08	6.38E-09	9.90E-09

2. 4. 5 蒸発量・水分分布計測

試験は2試料同時に実施し、始めに試料A-1,A-2、2回目に試料A-3,A-4を用いて試験を実施した。各試料とも図-2.4-2に示すようにコア上端に高さ4cmの障壁を設置した。

(1) 蒸発量計測

蒸発量は試料A-1、A-2では460時間以降安定しほぼ定常状態に達したと判断した。このときの両者の蒸発量は17mg/m²/secとなった。試料A-3,A-4では500時間ほぼ定常状態に達したと判断され両者の蒸発量は23mg/m²/secとなった。

(2) 水分分布計測

蒸発量計測を終了した試料は速やかにハンマー、鑿(たがね)にて約0.5~1cm程度の厚さに破断した。破断後湿潤重量を測定し炉乾燥した。図-2.4-11に試料内の体積含水率の鉛直分布を示す。

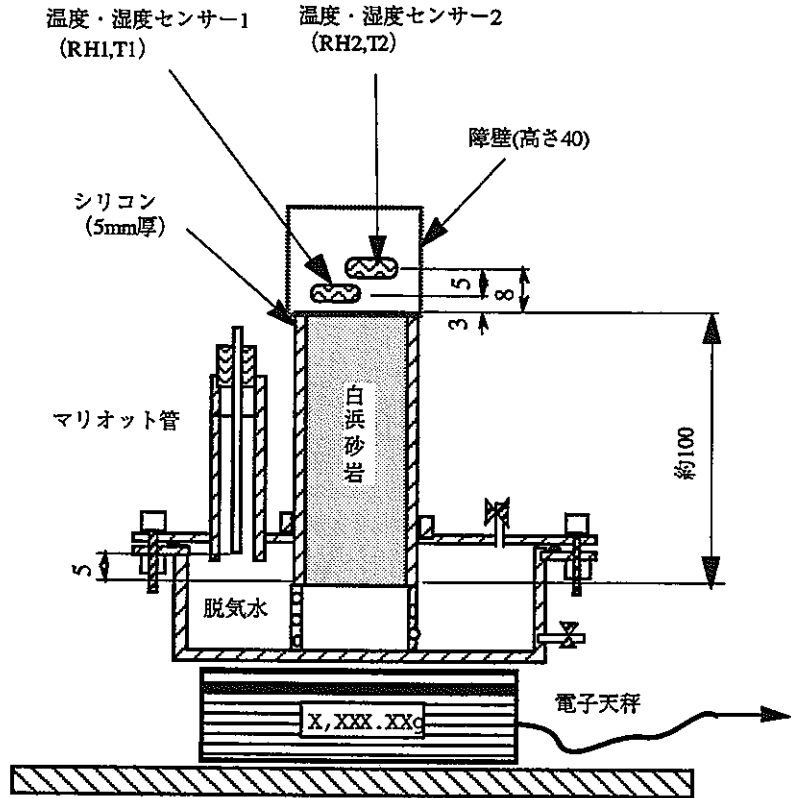


図 - 2.4.2 計測装置の設置状況図

長さ単位；mm

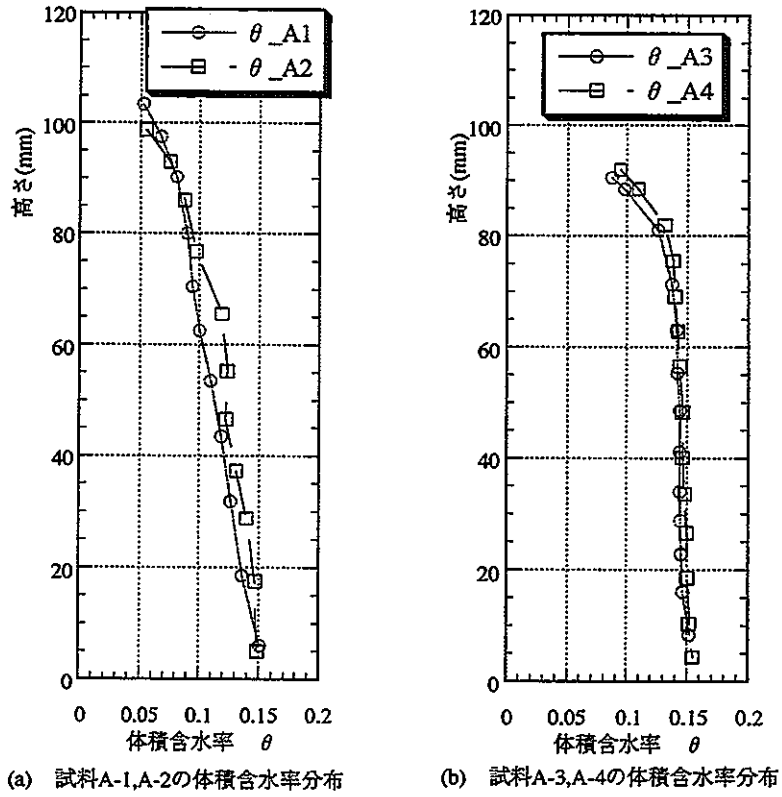


図 - 2.4.3 試料内の体積含水率の鉛直分布

(3) VG式のパラメータ同定

パラメータの同定は人為的方法、Newton_Gauss法⁷⁾の二通りの方法で実施した。VG式のパラメータ n を1に近づけていくと相対透水係数は非常に小さくなり、透水係数マトリクス⁷⁾の成分は桁落ちにより、0.0として計算され計算不能となる。人為的方法では計算不能にならない条件内でVG式のパラメータを① α 、② n 、③ θ_r の順で逐次変化させ、計測された体積含水率の鉛直分布と解析による体積含水率の鉛直分布の差が小さくなるような α 、 n 、 θ_r を求めた。Newton_Gauss法では相対透水係数 K_r が $1.0E-25$ 以下は $1.0E-25$ で一定とし、人為的方法により求められた α 、 n 、 θ_r を初期値として計算した。同定結果を表-2.4.2と図-2.4.4に示す。また各試料A1からA4の2種類の同定方法による水分特性曲線・相対透水係数を図-2.4.5から図-2.4.8に示す。

(i) 最小体積含水率 θ_r について

同定結果から、人為的方法ではすべて θ_r は0.00であるに対し、Newton_Gauss法では0.038~0.092と同定方法で異なり、またNewton_Gauss法ではばらつきが大きい。この原因は、Newton_Gauss法では相対透水係数 K_r の下限値を $1E-25$ とし、計測値と解析との二乗誤差の和を最小にするよう数値解析的に同定していることにあると考えられる。

図-2.4.4(1)では同定された最小体積含水率 θ_r が計測された最小の体積含水率よりも若干大きくなっている。最小含水率 θ_r が計測された最小体積含水率より大きいことは最小体積含水率の定義に反している。これは今回のNewton_Gauss法における同定に際して計測された最小の体積含水率よりも大きくなり得ないという制約条件を設定しなかったためである。結果的に同定された最小体積含水率 θ_r と計測された最小の体積含水率はほぼ近い値であったためそのまま採用した。

(ii) VG式を用いての同定の限界

図-2.4.4(1)(2)では、計測値と同定結果の体積含水率の分布が十分マッチしているとは言い難い結果となっている。この原因として①蒸発量 $20\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec}$ という岩石内のフラックスがその飽和透水係数に対して大きいこと、②体積含水率の鉛直方向の変化が一様に変化していること、の2点が挙げられる。

透水係数が $1E-8\text{cm}/\text{sec}$ 程度で $20\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec}$ のフラックスとなると、少なくとも(飽和状態で)数100以上の鉛直方向の動水勾配(鉛直方向に1cm離れた点で数 $100\text{cmH}_2\text{O}$ 以上のサクションの差のあること)が必要である。体積含水率は鉛直方向1cm当たり約0.01変化している。すなわち蒸発量 $20\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec}$ という岩石内のフラックスが生じるためには、体積含水率約0.01の変化に対して数 $100\text{cmH}_2\text{O}$ 以上のサクションの変化が必要となる。この条件を満足するためには、水分特性曲線($\theta - \psi$ 関係)に関してVG式の

パラメータ α 、 n が十分に小さいことが必要になる。

一方、 n が小さくなると相対透水係数も小さくなり、所定のフラックスを生じさせるためにはより大きな動水勾配が必要となる。ここでフラックスと体積含水率のジレンマに至る。フラックスは解析条件として設定しているため必然的に体積含水率のマッチングがおろそかになる。このため十分な計測値と同定結果の体積含水率の分布が十分マッチするに至らない。すなわちVG式を用いての同定の限界がここに存在するものと考えられる。

表 - 2.4.2 同定結果

項目				白浜-A1	白浜-A2	白浜-A3	白浜-A4
	有効間隙率 n_e	n_e	cm ³ /cm ³	0.151	0.148	0.152	0.155
	透水係数	K_s	cm/sec	0.000	0.000	0.000	0.000
	蒸発量	E_v	mg/m ² /sec	17	17	23	23
人為	飽和体積含水率	θ_s	cm ³ /cm ³	0.1513	0.1479	0.1521	0.1553
	最小体積含水率	θ_r	cm ³ /cm ³	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		α	1/cm	3.900E-05	6.700E-05	4.700E-05	9.100E-05
		n	-	2.8	3	3	3
		m	-	0.6429	0.6667	0.6667	0.6667
Newton-Gauss法	飽和体積含水率	θ_s	cm ³ /cm ³	0.1513	0.1479	0.1521	0.1553
	最小体積含水率	θ_r	cm ³ /cm ³	0.0526	0.0549	0.0862	0.0942
		α	1/cm	2.775E-05	5.577E-05	3.299E-05	6.695E-05
		n	-	1.02566	1.00468	1.20995	1.18336
		m	-	0.0250	0.0047	0.1735	0.1549

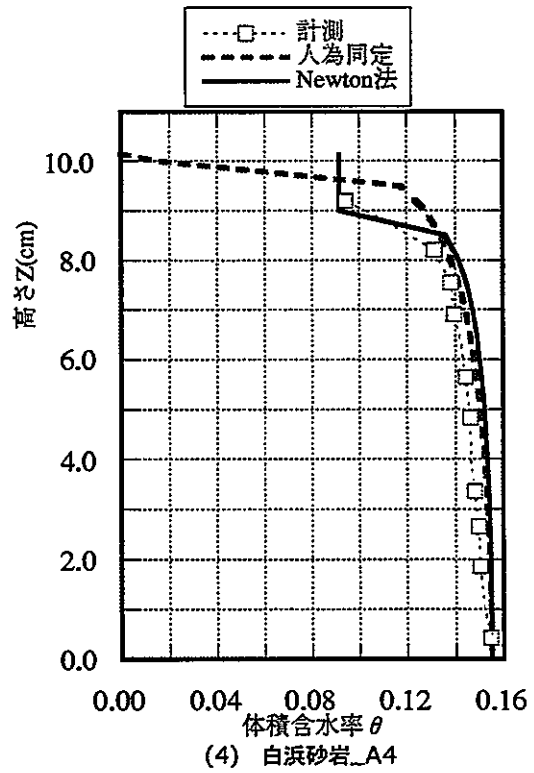
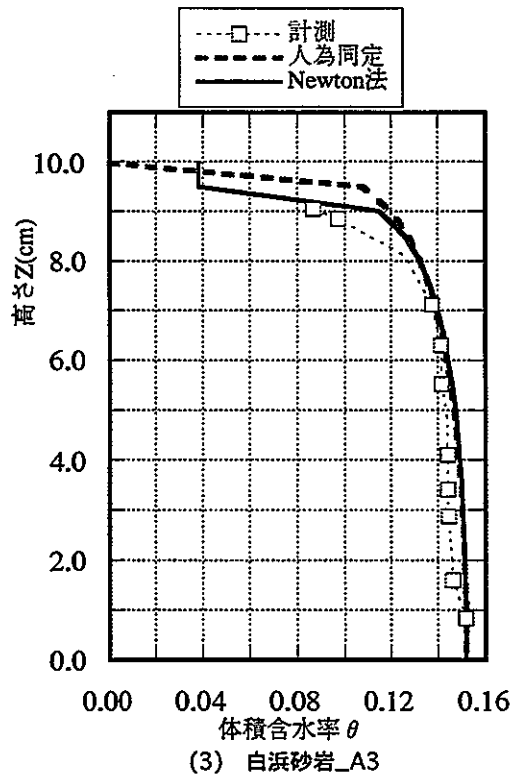
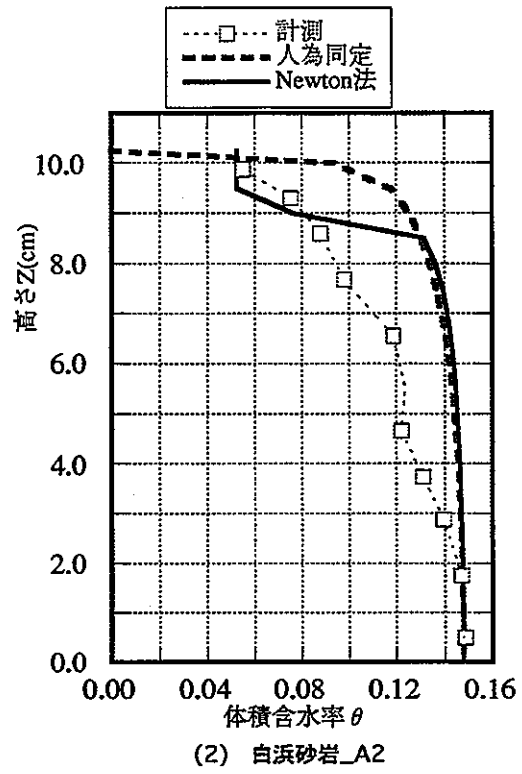
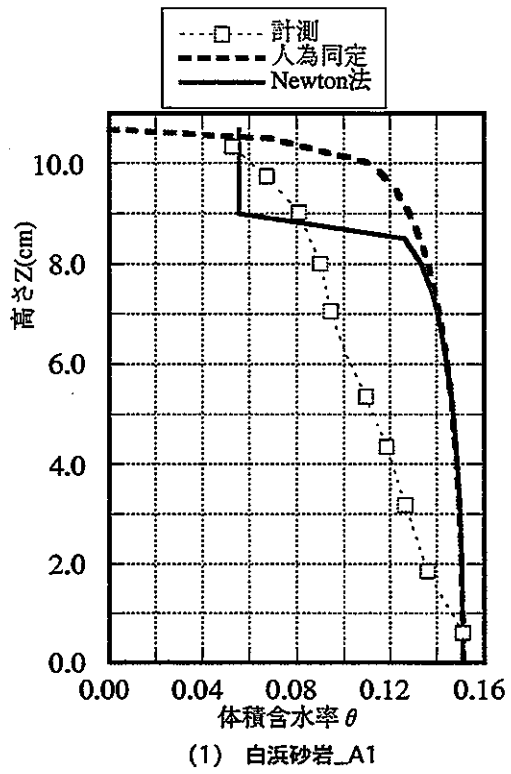


図 - 2.4.4 同定結果による体積含水率の鉛直分布

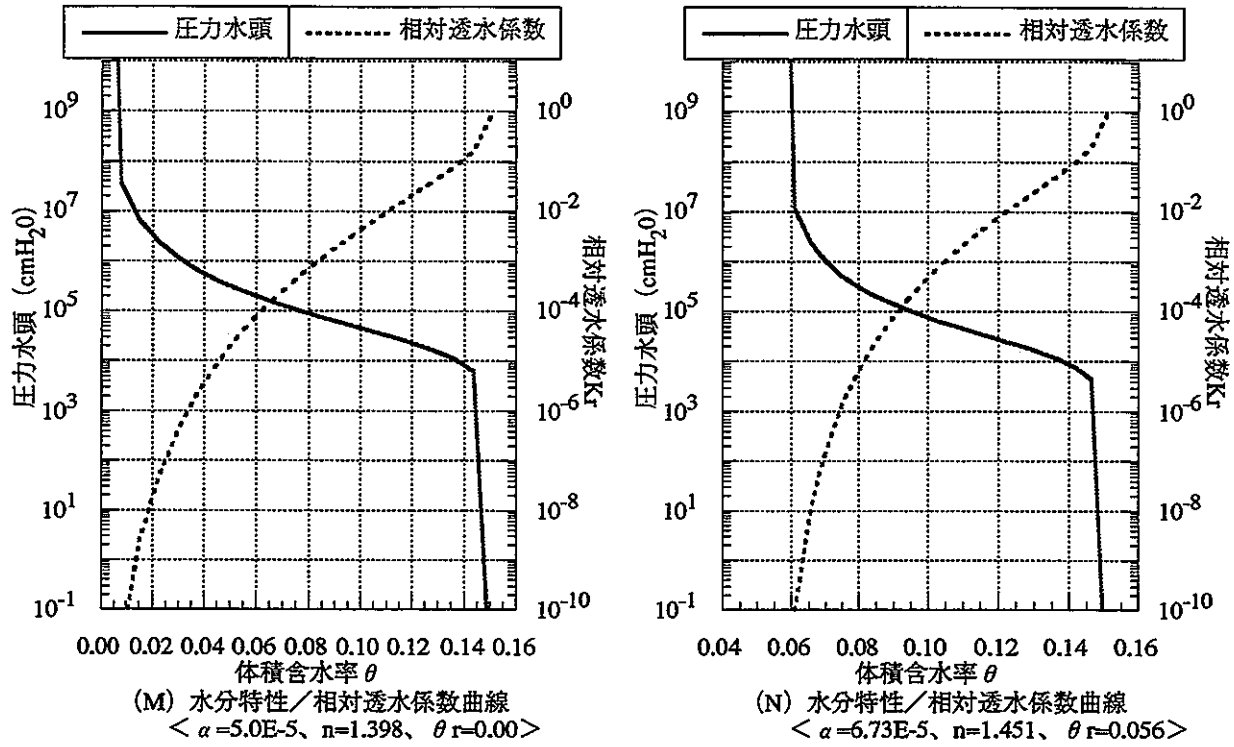


図 - 2.4-5 白浜砂岩_A1より同定された水分特性・相対透水係数曲線

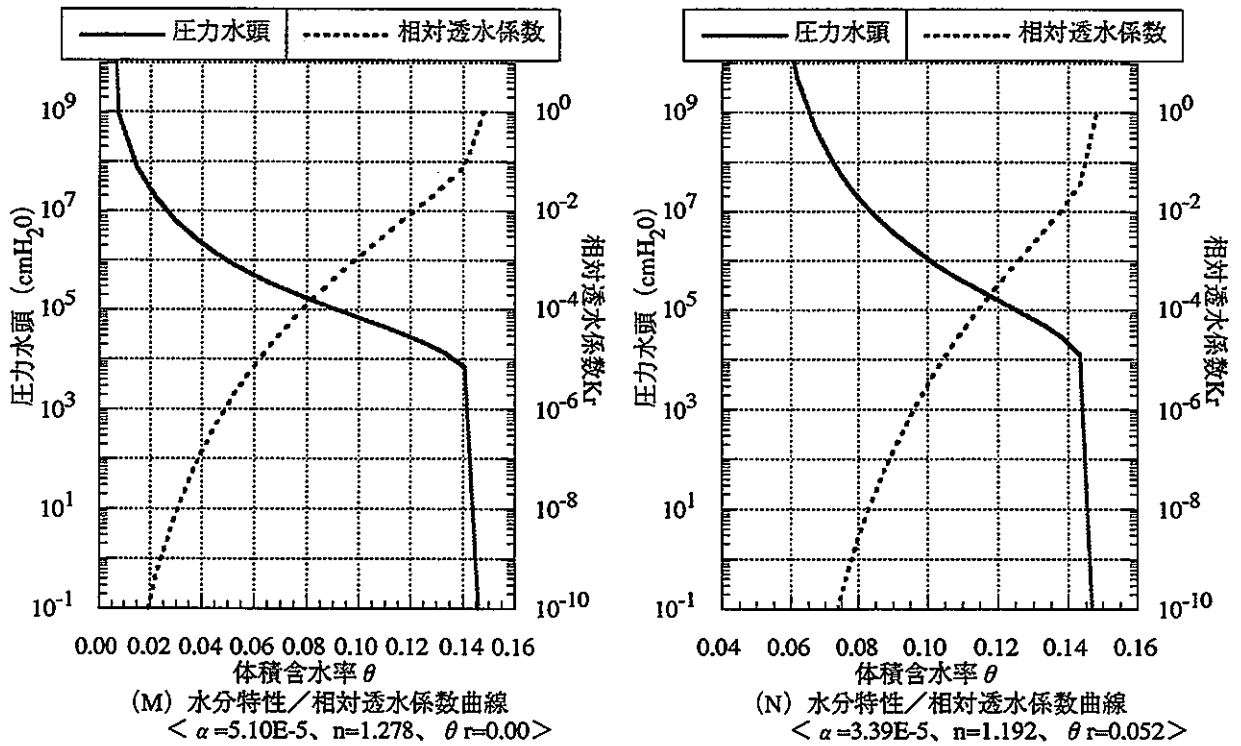
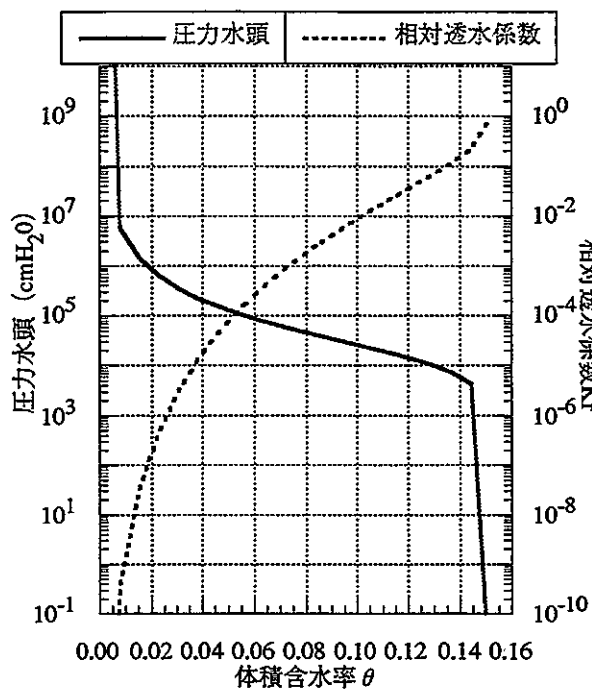
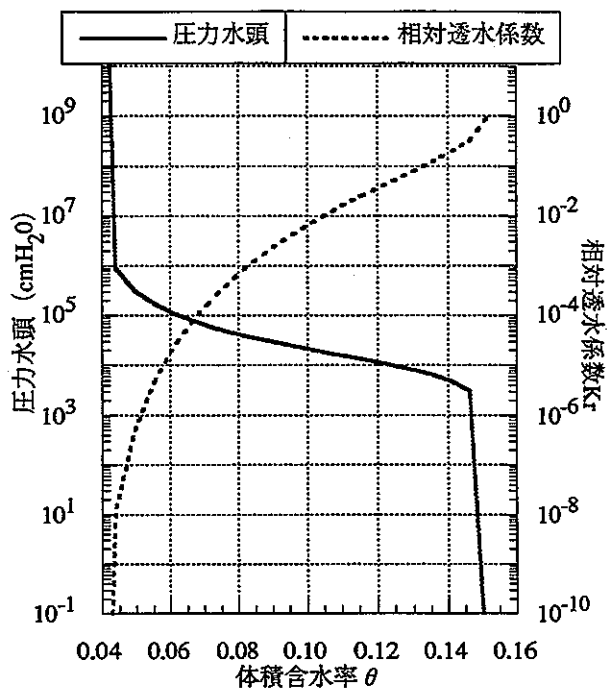


図 - 2.4-6 白浜砂岩_A2より同定された水分特性・相対透水係数曲線

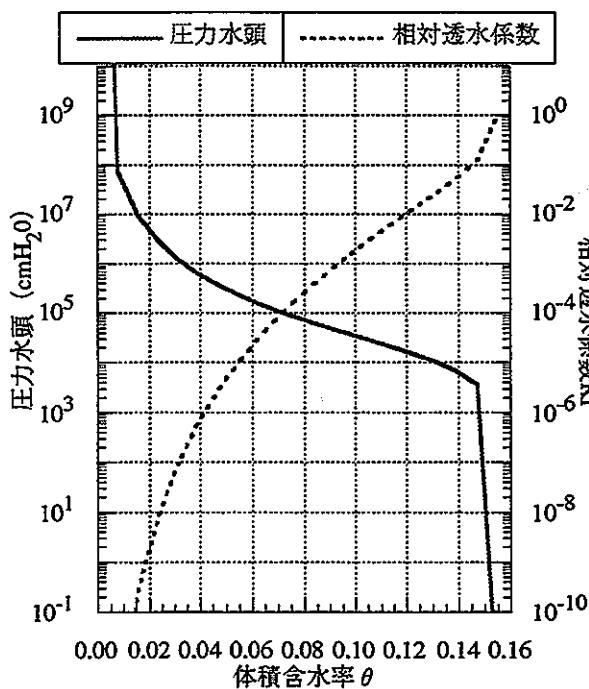


(M) 水分特性/相対透水係数曲線
 $\langle \alpha=7.00E-5, n=1.498, \theta_r=0.00 \rangle$

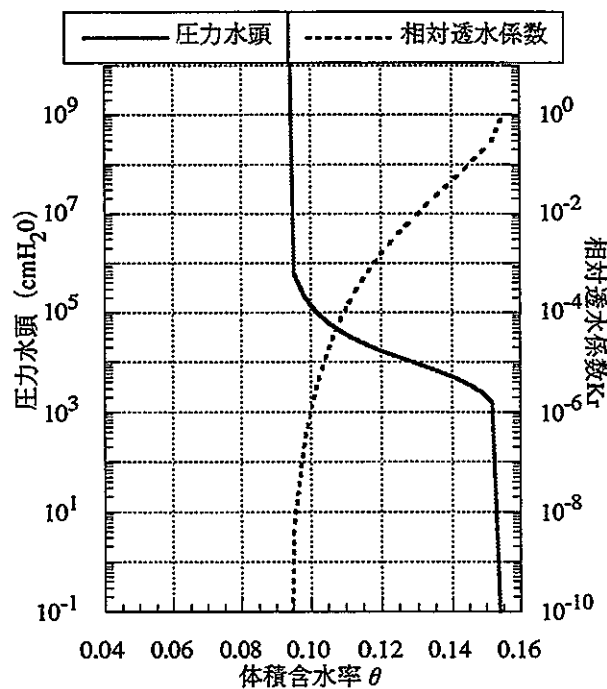


(N) 水分特性/相対透水係数曲線
 $\langle \alpha=9.86E-5, n=1.668, \theta_r=0.038 \rangle$

図 - 2.4-7 白浜砂岩_A3より同定された水分特性・相対透水係数曲線



(M) 水分特性/相対透水係数曲線
 $\langle \alpha=9.12E-5, n=1.340, \theta_r=0.00 \rangle$



(N) 水分特性/相対透水係数曲線
 $\langle \alpha=1.97E-4, n=1.624, \theta_r=0.092 \rangle$

図 - 2.4-8 白浜砂岩_A4より同定された水分特性・相対透水係数曲線

2. 5 水分特性曲線の計測

従来から用いられているpF試験により白浜砂岩の水分特性曲線計測を実施した。試験は土壌物理の分野で使用されるpF試験のうち、土柱法、加圧板法を用いた。土柱法、加圧板法ではサクシオンを水頭換算して1000cm (pF 3) までの計測に留まるためそれ以上のサクシオンについてはサイクロメータを用いて計測した。

計測結果のサクシオンのプロットおよびそれらのVG式でFittingしたもの等を図-2.5-1に示す。ここで□は土柱法、加圧板法による計測結果を示し、○はサイクロメータによる計測結果を示す。

VG式でFitting (Microsoft EXCELのSOLVER機能を使用) したカーブが ψ_VG2 とする太線で、そのパラメータは $\alpha=0.001$ 、 $n=1.237$ 、 $\theta r=0.000$ である。

ψ_VG1 , ψ_VG3 は体積含水率0.14からのプロットの折れ曲がり部をフォローするようにパラメータを変化させてみたケースである。

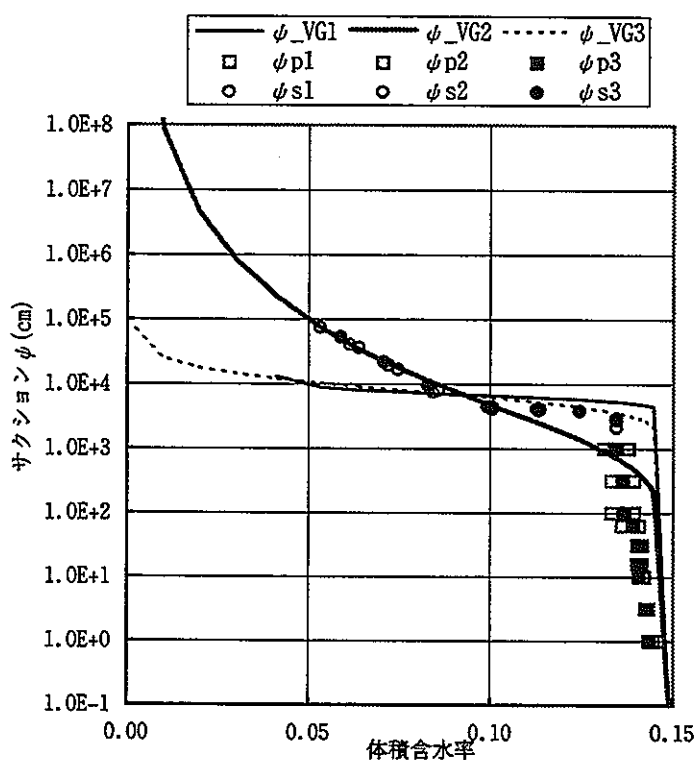


図 - 2.5-1 土柱法、加圧板法、サイクロメータにより得られた水分特性曲線

ψ_VG2 のVG式のパラメータをみると、2. 4で求められたパラメータに対して α は $1.0E-3$ と2オーダー大きく、 n は1.237と2. 4で求められたパラメータに近い値を示している。また最小体積含水率 θr は2. 4では0.5~0.9と大きな値を示したが、 ψ_VG2 では0.0となっている。

ψ_VG1, ψ_VG3 は体積含水率0.14からのプロットの折れ曲がりと体積含水率0.14~0.10にかけての比較的フラットなサクシオンを表現すべく α を ψ_VG2 のパラメータより小さく（折れ曲部のサクシオン値を合わせる効果がある）、 n を大きく（体積含水率の変化に対するサクシオンの変化が小さくなり、フラット部をつくる効果がある）している。2. 4で求められたパラメータと比較すると α は1オーダー大きく、 n は3倍以上大きくなっている。

2. 6 相対透水係数同定

2. 6. 1 試験装置の概要

試験装置の概要を図-2.6-1に示す。試験は飽和した白浜砂岩の角柱（75mm×75mm×300mm）の周囲の1端面を除きシールし、シールのない1端面からの排水条件における内部のサクシオン変化を計測しサクシオン変化を適切に表現しうる相対透水係数を求めるものである。排水条件は全て蒸発量として天秤による質量減少の計測により求めた。サクシオンセンサーとしてはテンシオメータ、サイクロメータを図-2.6-1に示すように設置した。

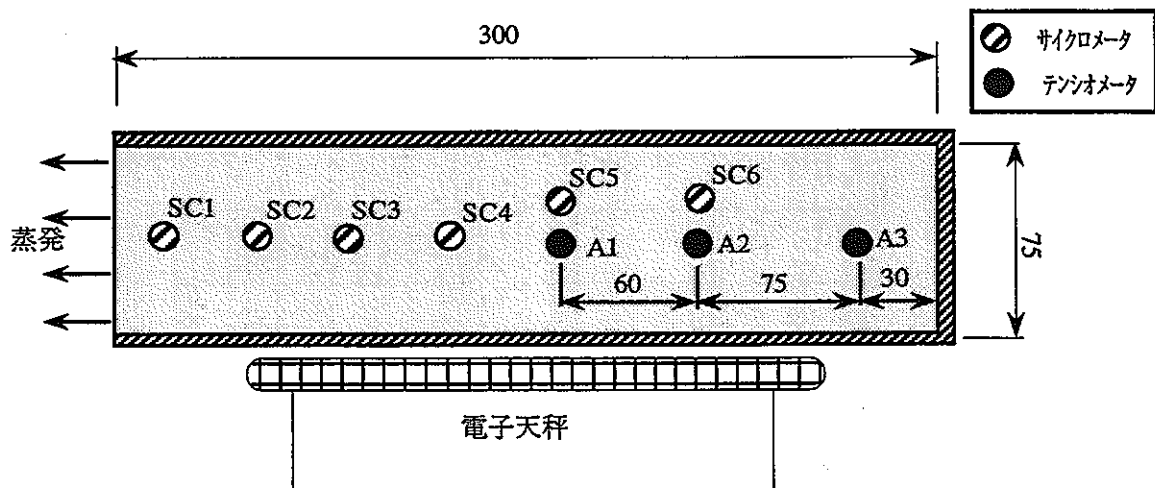


図 - 2.6-1 試験装置の概要

テンシオメータはポラスカップと岩石の密着性を高めるために細粒硅砂を充填し、その中にポラスカップを挿入した。テンシオメータにはOリングを取付け、さらにシリコンで試料の角柱と一体化、気密化させた。充填した細粒硅砂の水分特性曲線は計測していないが、西垣らの検討⁸⁾に依ればテンシオメータ周辺の埋め戻し材が計測対象のサクシオンに追従できなくなるとある値を境にサクシオンの増加がなくなることが示されている。従ってサクシオンの増加が続いている間は計測はほぼ妥当と考えることとした。

サイクロメーターは濡らさないように留意して、供試体に穿孔したサイクロメーターセンサーとほぼ同じ形状の孔に挿入し、供試体コアとシリコンで一体化・気密化させた。

2. 6. 2 計測結果

計測は約950時間継続した。蒸発量の経時変化を図 - 2.6-2に、サクシオン計測結果を図 - 2.6-3に示す。

図 - 2.6-3(a)のテンシオメータによるサクシオン変化をみると300時間までは連続的でスムーズな増加傾向を示している。300時間以降サクシオン増加は収まり、600時間以降減少している。図 - 2.6-3(b)に示すサイクロメータからのサクシオンは増加し続けているが、テンシオメータの示すサクシオンの増加は300~400時間以降横這いとなっている。これは岩石内のサクシオンは増加しているものの、テンシオメータの計測限界に至りテンシオメータのサクシオン値が増加しなくなったことを示すものと考えられる。岩石部のサクシオンがテンシオメータのサクシオンより大きくなることは、テンシオメータから岩石への水分の供給が生じている可能性を示している。従って今回、計測データとして使用可能なものとして300時間までのデータを対象とすることとした。

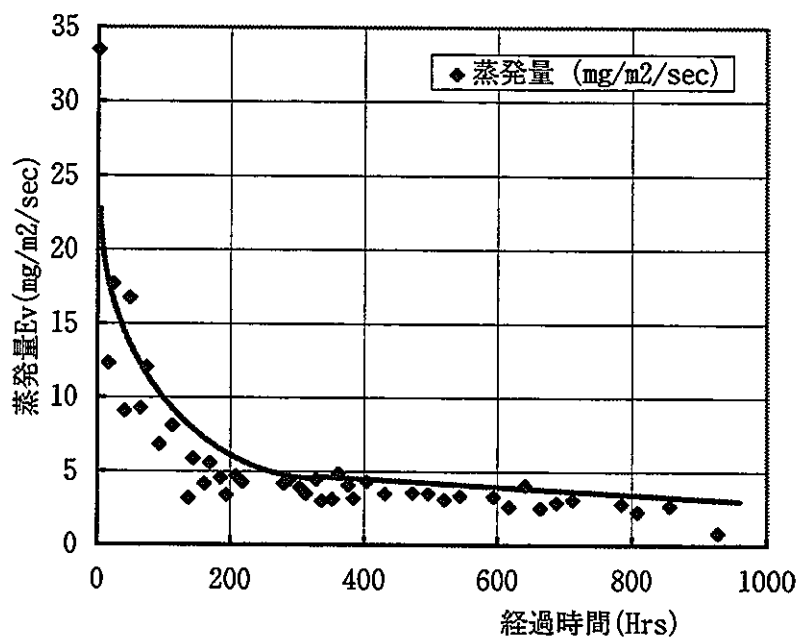


図 - 2.6-2 蒸発量の経時変化

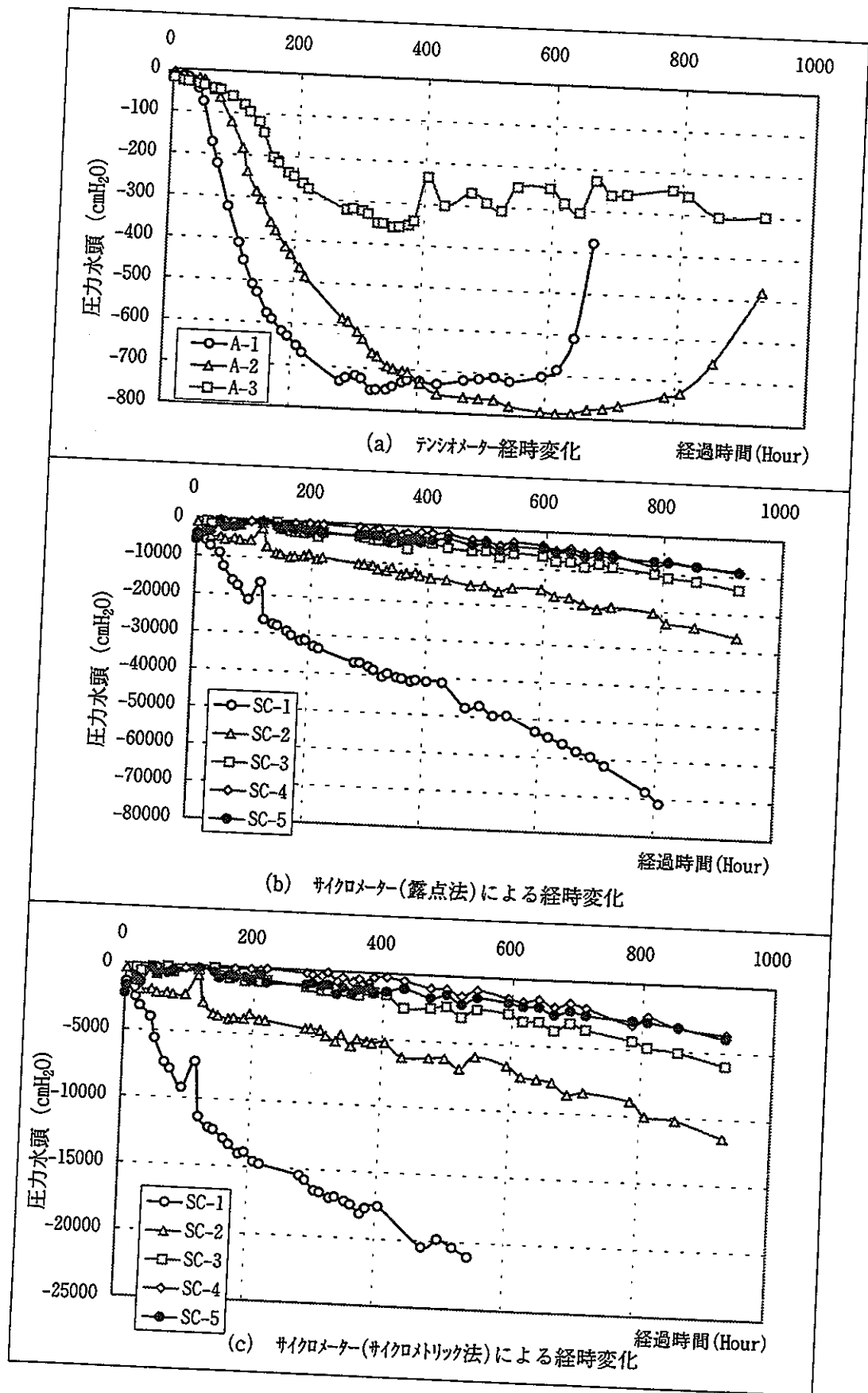


図 - 2.6-3 サクシオン (圧力水頭) 計測結果

2. 6. 3 不飽和透水係数の同定

サクシオン変化カーブが連続的でスムーズなデータの得られている300時間までのテンシオメータの計測値A-1,A-2,A-3を対象に解析と計測されたサクシオンのfittingにより不飽和透水係数の同定を行う。

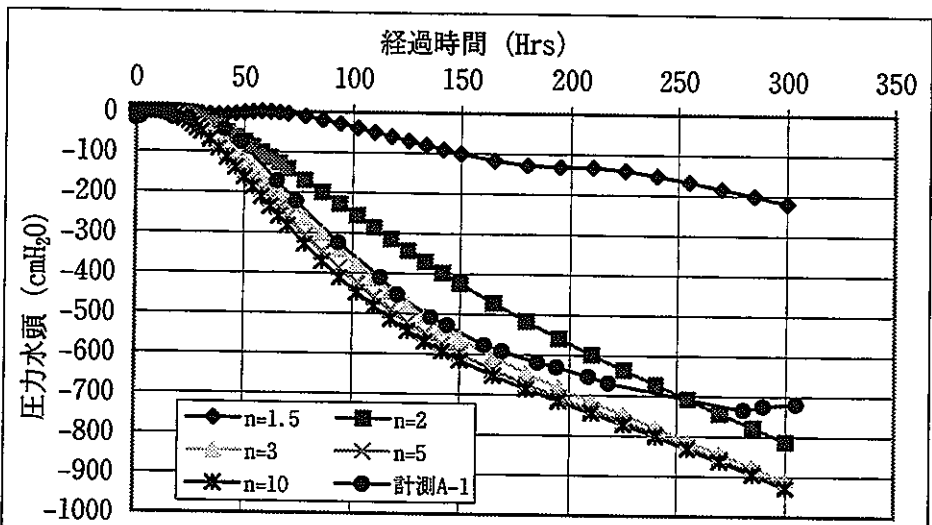
初期条件はサクシオンが0、試料は飽和状態にあるものとした。端部からの蒸発（境界条件）は図-2.6-2の実線のカーブ（プロットの近似曲線）を蒸発量として用いた。

用いた試料の飽和透水係数は直接計測していないが、岩石コア6試料について計測結果を参考に、ここでは飽和透水係数を $1.0\text{e-}8\text{cm/sec}$ と仮定した。飽和体積含水率 θ_s と最小体積含水率 θ_r は2.5の結果($\theta_s=0.149$ 、 $\theta_r=0.00$)を用いた。水分特性曲線も2.5で得た水分特性曲線をVG式で合わせたもの($\alpha=0.001$ 、 $n=1.237$ 、 $\theta_r=0.000$)を用いた。

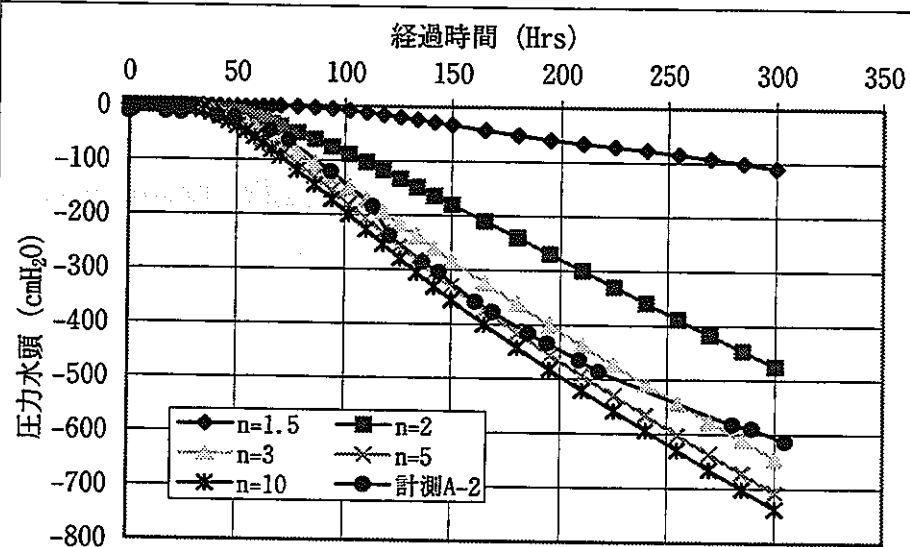
この初期条件、境界条件のもとで300時間の非定常解析を実施して、テンシオメータのサクシオン計測値A-1,A-2,A-3に良くフィットする相対透水係数をもとめる。

ここで、相対透水係数もVG式で表現する。しかし水分特性曲線の n とは独立に相対透水係数用のVG式のパラメータ n を設定するようにしてこの n を同定することとした。同定は人為的に n を変化させて計測値A-1,A-2,A-3と最も調和的な n を探す方法をとった。

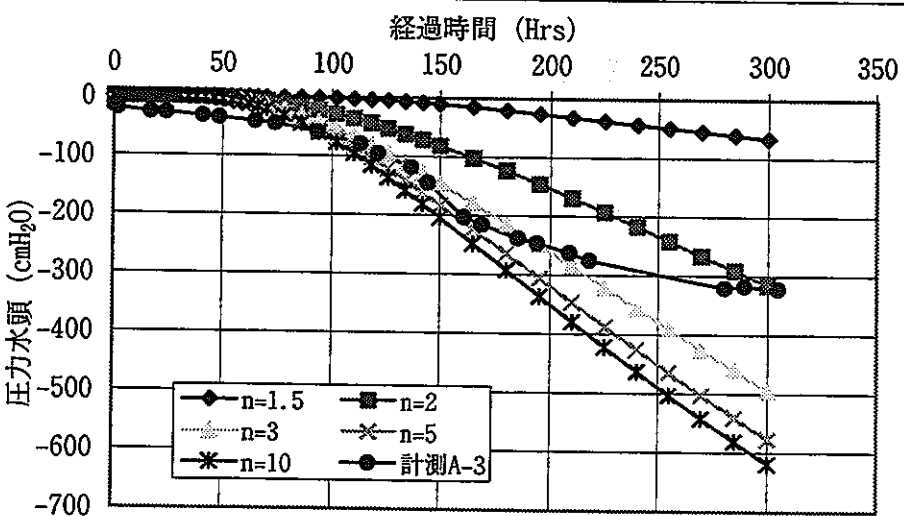
フィティング結果を図-2.6-4に示す。 n は1.5から10.0の範囲で変化させた。もともと計測値とマッチしているのは $n=3.0$ である。 $n=3.0\sim 10.0$ の範囲ではサクシオンの経時変化のカーブの変化は小さい。逆に n を2.0など小さくすると n の変化に対するサクシオンの経時変化のカーブの変化は大きくなる。



(a) テンシオメータA-2との比較



(b) テンシオメータA-2との比較



(c) テンシオメータA-3との比較

図 - 2.6-4 テンシオメータ測定値のフィティング結果

2. 7 VG式のパラメータのばらつきが解析結果に与える影響検討

先の計測からNewton-Gauss法を用いて同定されたVG式のパラメータのばらつきが坑道周辺の不飽和領域の広がりによどのように影響するのかを、鉛直2次元の解析モデルを通じて検討する。

2. 7. 1 解析モデル

解析は土被り150m、直径3mの坑道を対象にし、解析領域を図-2.7-1に示すように水平方向に150m、鉛直方向に250mの矩形の鉛直断面を設定した。境界条件は図-2.7-2に示すように設定した。涵養量、蒸発による坑道からの排水量は解析ケースにより異なる。

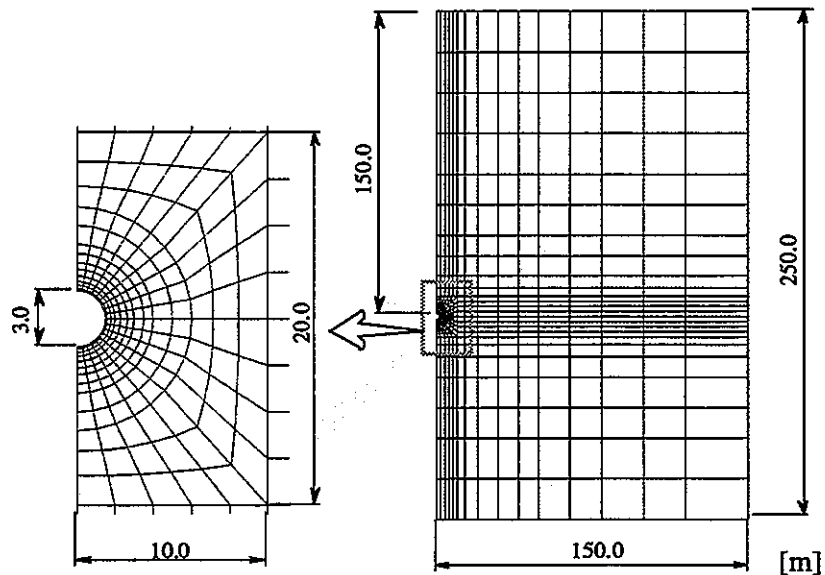


図 - 2.7-1 解析領域

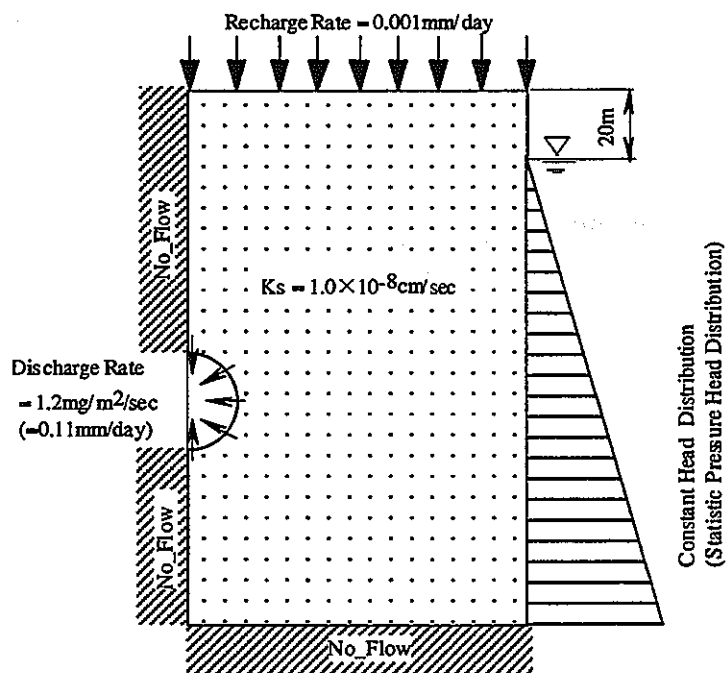


図 - 2.7-2 境界条件

飽和透水係数は全領域均一として今回用いた白浜砂岩の飽和透水係数を参考に $1.0E-8\text{cm/sec}$ とした。

境界条件としては坑道部からの蒸発に伴う湧出量として3種類 ($1.2\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 、 $2.0\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 、 $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$)、上面からの涵養量として 0.001mm/day を設定 (図 - 2.7-2) した。これらの条件は比較的現実的な値であることと、実験から得られたVG式のパラメータのばらつきのなかで不飽和領域が生じ、かつ不飽和領域の広がり比較可能な条件という観点から予察的解析結果を踏まえ設定した。

蒸発量としては今回白浜砂岩を対象に実施した計測で得られた蒸発量の $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 程度が望ましいが、不飽和領域が生じ、かつ不飽和領域の広がり比較可能な条件を考慮し基本とする湧出量としては $1.2\text{mg/m}^2/\text{sec}$ とし、一部参考とする解析においてのみ $2.0\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 、 $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ を適用した。

2. 7. 2 解析ケース

解析は2. 4で得られたVG式のパラメータ α 、 n の最大値、最小値の組み合わせについて4ケース、さらに2. 5で水分特性曲線から推定された α 、 n 、 θ_r について1ケース、2. 5の水分特性曲線と2. 6で得られた相対透水係数を組み合わせた1ケース、その他境界条件の異なるもの4ケース、合計10ケースについて定常解析を実施した。表 - 2.7-1に各ケースに用いたパラメータを示す。

CASE6、CASE9では2. 6で説明したように、水分特性曲線に係わるVGパラメータの n と相対透水係数に係わる n を別々に定義している。

表 - 2.7-1 各ケースに用いたパラメータ

	Ks (cm/sec)	θ_s	θ_r	α (1/cm)	n	Ev (mg/m ² /sec)	
case-1	1.0e-8	0.15	0.05	2.0e-4	1.67	1.2	
case-2					1.19		
case-3				3.3e-5	1.67		
case-4					1.19		
case-5			0.00	1.0e-3	1.237		2.0
case-6					1.237/3.0(†)		
case-7			0.05	3.3e-5	1.67		2.0
case-8					1.19		
case-9			0.00	1.0e-3	1.237/3.0(†)		20
case-10					0.05		

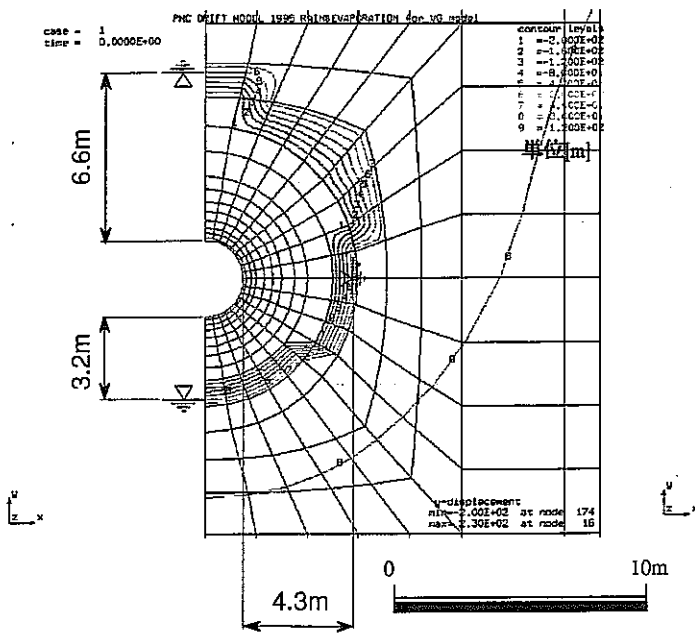
†：相対透水係数に対する n

2.7.3 解析結果

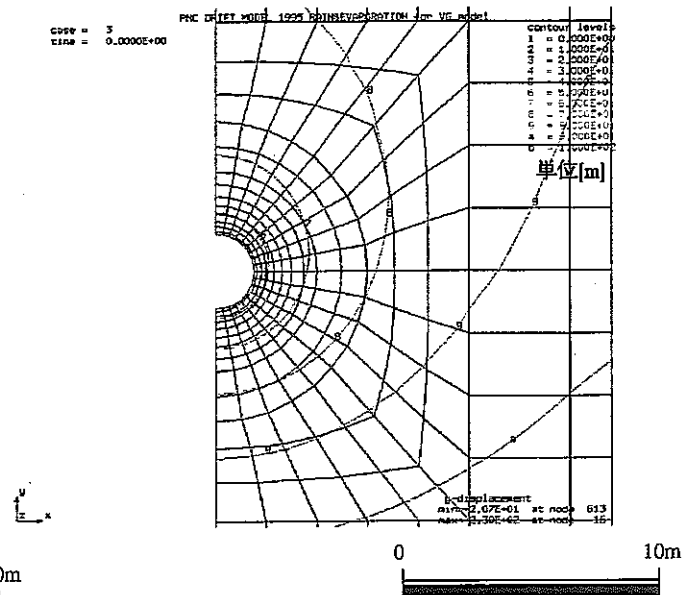
解析結果のまとめとしてVG式のパラメータと不飽和領域の広がりとの関係を表-2.7-2に示す。ここで不飽和領域の広がり、坑壁から圧力水頭0.0の位置までとした。圧力水頭分布の代表的なもの(CASE-1、CASE-3、CASE-4、CASE-9)を図-2.7-3に示す。解析においては相対透水係数が小さくなり桁落ちによる計算不能を避けるため相対透水係数の最小値を1.0E-25とする条件を適用した。

表-2.7-2 解析結果のまとめ <†: 相対透水係数に対するn>

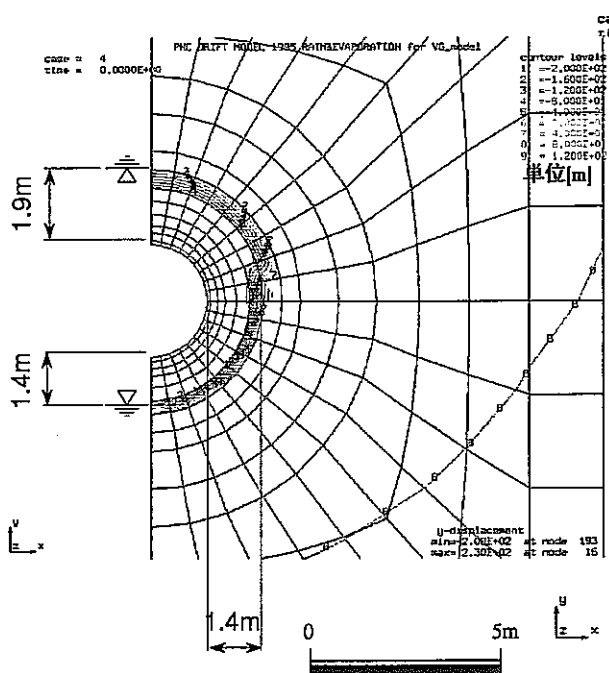
	α (1/cm)	n	不飽和状況	鉛直下方 (m)	水平方向 (m)	鉛直上方 (m)	収束
CASE1	2.0E-4	1.67	不飽和あり	3.2	4.3	6.6	○
CASE2	2.0E-4	1.19	不飽和あり	11.1	25.3	26.0	×
CASE3	3.3E-5	1.67	飽和	—	—	—	○
CASE4	3.3E-5	1.19	不飽和あり	1.4	1.4	1.9	○
CASE5	1.0E-3	1.237	飽和	—	—	—	○
CASE6	1.0E-3	1.237/3.0(†)	飽和	—	—	—	○
CASE7	3.3E-5	1.67	飽和	—	—	—	○
CASE8	3.3E-5	1.19	不飽和あり	11.4	11.7	17.2	○
CASE9	1.0E-3	1.237/3.0(†)	不飽和あり	1.1	1.3	1.5	○
CASE10	3.3E-5	1.67	異常	—	—	—	×



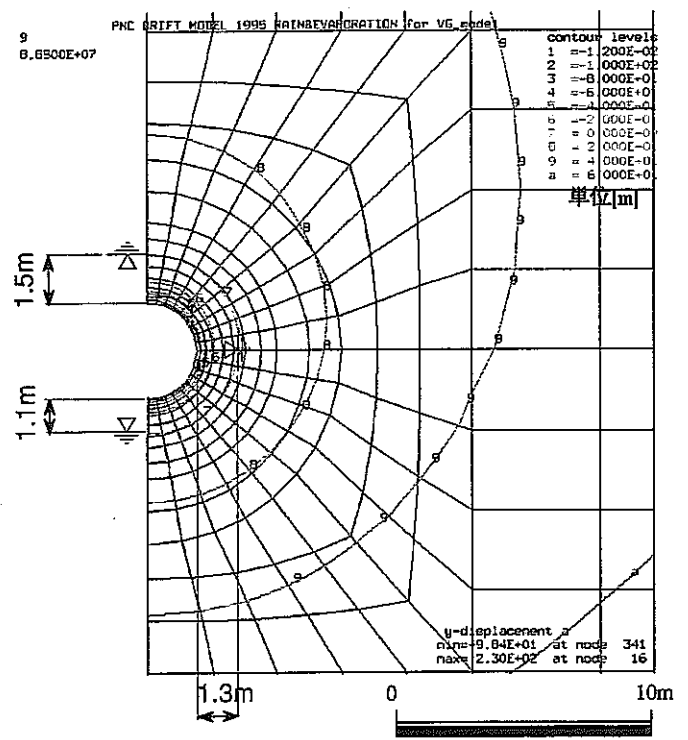
(a) CASE-1 坑道周辺拡大



(b) CASE-3 坑道周辺拡大



(c) CASE-4 坑道周辺拡大



(d) CASE-9 坑道周辺拡大

図 - 2.7-3 圧力水頭分布の代表的な解析結果

以下解析結果から考えられることを項目別に示す。

(1) VG式のパラメータが不飽和領域の広がりを与える影響

今回の計測を通じて得られたVG式のパラメータ α のばらつき ($\alpha = 3.3e-5$ から $2.0e-4$) については、CASE1,3の比較より、不飽和が3~6m程度生じる場合から全く生じない場合までの影響を生じうる可能性があることが解析結果からわかる。

今回の計測を通じて得られたVG式のパラメータ n のばらつき ($n = 1.19$ から 1.67) についても不飽和領域の広がりには大きな影響を有することがわかった。

CASE5,6はCASE1~CASE4とVG式のパラメータの同定方法が異なる。いずれも不飽和領域は発生していない。

CASE7,8はCASE3,4のVG式のパラメータとそれぞれで等しく、蒸発量による湧水量を $2.0\text{mg/m}^2/\text{sec}$ とした場合である。設定した蒸発量による湧水量の境界条件の影響がわかる。CASE3のように不飽和領域が生じている場合、1.2から $2.0\text{mg/m}^2/\text{sec}$ と変化するだけで不飽和領域が大きく変化することがわかる。今回試料を対象に計測された蒸発量より1桁ほど小さい蒸発量の設定であるが蒸発量の小さな違いが不飽和領域の広がりには大きく影響を与えることがわかる。

(2) 試験条件に近い設定での解析結果

CASE9はCASE6と同じVG式のパラメータ (相対透水性係数) を使い、計測された蒸発量に近い蒸発量 $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ を設定したケースである。ここでのパラメータは水分特性曲線と相対透水性係数を独立に設定し、それらの同定方法としては最も従来からの計測原理に則った方法に依っている。

計算結果は本ケースでも不飽和領域が発生するが、他の不飽和領域が発生したケースとは異なり桁落ちによる計算不能を避けるため最小値を $1.0E-25$ とする条件を適用せずに解析結果が得られている。このため不飽和領域内のサクシオン値は現実的値をとり、体積含水率の変化も他のケースとは異なり不飽和領域内で連続的な変化をしている。

(3) 計測された蒸発量に近い蒸発量を設定した場合の解の異常

CASE10は参考として解析結果を示したものである。本来この鉛直2次元の解析の境界条件としては本来CASE9のように計測された蒸発量に近い蒸発量 $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 程度の条件を設定すべきであるが、透水性係数やVGパラメータの組み合わせに対して $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ では流量が大きすぎ、非線形の収束に至らず、不飽和域が非常に広がり異常な結果を示した。本ケースはそのような異常解の一例を示すものである。

以上のように今回得られたVG式のパラメータをモデル例に適用すると、解析上は3～6mの不飽和領域の発生する場合から不飽和領域の全く生じない場合まで、解析結果の不飽和領域の広がりには違いが生じることが確認された。またCASE9に示したように相対透水係数を水分特性曲線とは独立に同定した結果を適用したケースでは計測された蒸発量に近い蒸発量 $20\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec}$ に対して、サクシオンや体積含水率の分布も実現象に近いと思われる解析結果が得られることが確認された。

2. 8 VG式の適用性についての考察

2. 8. 1 VG式パラメータの同定方法と同定結果

今回白浜砂岩の不飽和特性パラメータを以下の3種類の方法で同定した。

- ①一次元流れの定常場で、境界条件（一端：フラックス、一端：水位）・飽和透水係数・間隙率・体積含水率の分布を計測し、境界条件・飽和透水係数・間隙率を用いて体積含水率分布にマッチするVG式パラメータを同定する方法
- ②pF試験等により水分特性曲線を計測し、その水分特性曲線にマッチするVG式パラメータを同定する方法
- ③一次元流れの非定常場で、境界条件（一端：フラックス、一端：No_Flow）・飽和透水係数・間隙率・圧力の経時変化を計測し、境界条件・飽和透水係数・間隙率と上記②で計測された水分特性曲線を用いて圧力の経時変化にマッチする相対透水係数のVG式パラメータ n を水分特性曲線の n とは独立に同定する方法

上記の方法で得られた水分特性曲線・相対透水係数の代表例を用いてVG式の適用性について考察する。はじめに水分特性曲線・相対透水係数の代表例について概要を示す。①の方法で得られた水分特性曲線、相対透水係数の代表的なもの、②の方法で得られた水分特性曲線、相対透水係数、③の方法で得られた相対透水係数を図-2.8-1,2に示す。

(1) 水分特性曲線 (図-2.8-1)

$\psi_{\text{①min}}$ ($\alpha=3.3\text{E-}5, n=1.19, \theta_r=0.05$) は①の方法で得られた水分特性曲線のVG式のパラメータ α 、 n が最小のもの組み合わせで、体積含水率に対してサクシオン値が大きい水分特性曲線を示す。

$\psi_{\text{①Max}}$ ($\alpha=2.0\text{E-}4, n=1.67, \theta_r=0.05$) は①の方法で得られた水分特性曲線のVG式のパラメータ α 、

nが最大のものの組み合わせで、体積含水率に対してサクシオン値が小さい水分特性曲線を示す。これら①の方法による水分特性曲線は体積含水率の計測は実施しているがサクシオンの計測は実施せずに求められたものである。

ψ ② ($\alpha=1.0E-3, n=1.237, \theta_r=0.00$) は②の方法で得られた水分特性曲線を示す。この曲線は水分特性曲線の計測原理に順じたもので、サクシオン計測と体積含水率計測を実際に実施した結果である。従ってこの曲線が白浜砂岩本来の水分特性曲線と考えることができる。

(2) 相対透水係数 (図 - 2.8-2)

Kr①min ($n=1.19, \theta_r=0.05$) は①の方法で得られた相対透水係数曲線のVG式のパラメータ n が最小のもので、体積含水率に対して相対透水係数が小さい値を示す。

Kr①Max ($n=1.67, \theta_r=0.05$) は①の方法で得られた相対透水係数曲線のVG式のパラメータ n が最大のもので、体積含水率に対して相対透水係数が大きい値を示す。

Kr② ($n=1.237, \theta_r=0.00$) は②の方法で得られた相対透水係数曲線であり、水分特性曲線からVG式に基づき算定されたものである。

Kr③ ($n=3.0, \theta_r=0.00$) は③の方法で得られた相対透水係数曲線であり、水分特性曲線からVG式に基づき算定されたものである。この相対透水係数曲線は白浜砂岩に対して実施した試験計測のデータを最も多く反映した結果と考えることができ、その観点からは最も信頼性の高い相対透水係数曲線と考えることもできる。

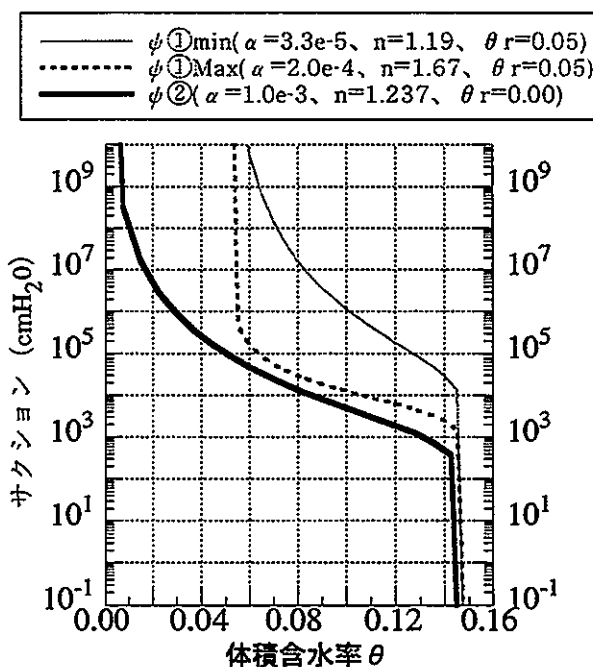


図 - 2.8-1 同定された水分特性曲線の代表例

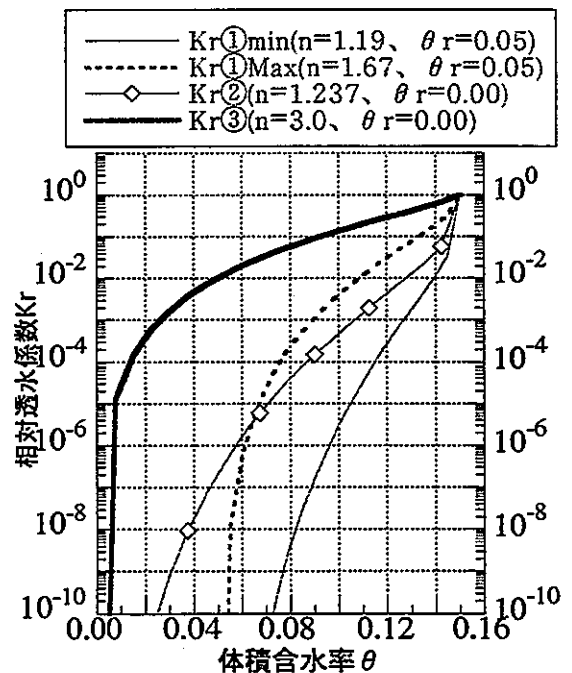


図 - 2.8-2 同定された相対透水係数曲線の代表例

2. 8. 2 VG式の適用性についての考察

(1) 2. 8. 1の①の同定方法によるVG式の岩石への適用性

始めに2. 8. 1の①の同定方法すなわち渡辺らが提唱したVG式と蒸発量計測を用いた岩石の不飽和特性の計測方法の適用性について検討する。

その計測方法より本来の水分特性曲線と考えられる図-2.8-1の ψ ② ($\alpha=1.0E-3, n=1.237, \theta_r=0.00$)の曲線は、①の同定方法の結果 ψ ①min ($\alpha=3.3E-5, n=1.19, \theta_r=0.05$) および ψ ①Max ($\alpha=2.0E-4, n=1.67, \theta_r=0.05$)より小さいサクシオンとなっている。同一体積含水率におけるサクシオンの差は2オーダー以上の違いが認められる。また得られた水分特性曲線(VG式のパラメータ)や相対透水係数を用いて、坑道周辺の不飽和領域の広がりシミュレーションを行うと、今回実施した4試料の不飽和特性の違いは、不飽和領域の広がり予測結果の違いとなって現れている。

2. 6. 3不飽和透水係数の同定においてnを変化させた場合のサクシオンの経時変化の計算を実施したが、nが3より小さい場合、nの変化によるサクシオンの経時変化への大きいことが確認された。今回同定されたパラメータnは2以下の小さい数値でありそのために予測結果の違いが大きくなったと考えることもできる。しかし2. 4. 4(3)にて今回のような透水係数の小さい岩石においてはnは小さい値をとることが多いと考えられる。このことは、今回実施した計測・同定のレベルでは、岩石の不飽和特性をもとめそこから不飽和領域の広がり予測する場合予測結果はかなり計測・同定の影響を受けるものといえる。

図-2.4-13に示す①の同定方法で得られた水分特性曲線・相対透水係数はA-1,2とA-3,4で2つのグループに分けられる。この違いは昨年度の計測結果や感度解析でも確認されたが蒸発量の差(試験条件の差)がひとつの原因であると考えられる。実験において実験条件を様々検討し、同時に計測した二つの試料とともにA-1,2とA-3,4で2つのグループの蒸発量を一致させるよう努めたが蒸発量を制御することは今回用いた装置では難しかった。

試料上端では含水量が高さ方向で著しく変化していると考えられ、上端部で試料を細かく破断できなかったA-3,4では体積含水率が試料上端部でA-1,2に対して大きくでたことが2つのグループに分けられるひとつの原因と考えられる。このことはなんらかの方法で試料上端付近の体積含水率分布を2,3mmの分解能で計測すること等が可能であればVG式のパラメータの同定結果が変わりうることを示唆していると考えられる。

従って少なくとも今回の計測方法を用いてVG式を岩石に適用する場合、計測上の分解能・試験条件制御の問題により岩石の不飽和特性の推定結果が変わりうる。さらに現在の計測誤差の不飽和特性推定結果へ影響は、不飽和領域の広がりシミュレーション結果へも影響を与えるため、今回の検討から

は本手法の不飽和特性推定方法としての適用は現時点では十分な実用段階に達してはいないと考えられる。

(2) 水分特性曲線から推定される相対透水係数の曲線の妥当性

既存のpF試験、マイクロメータを用いた体積含水率とサクシオン計測結果から図 - 2.8-1の ψ ② ($\alpha = 1.0E-3, n=1.237, \theta_r=0.00$) 曲線を求め、これから相対透水係数は $n=1.237$ でVG式を用いて表現される。

一方、③の同定方法により水分特性曲線とは独立に相対透水係数 (VG式の形式で) 同定した。このフラックスは蒸発量として把握されたもので液相とともに、気相としての水分移動も含めた相対透水係数を意味する。液相と気相の両者の③の同定方法による相対透水係数に占める寄与率は定量化していないが、③の同定方法による相対透水係数は液相を対象としたものよりも大きい値を示すことが考えられる。図 - 2.8-2をみると $n=3.0$ で示される相対透水係数は $n=1.237$ で示されるものより (比較する体積含水率によるが) 数オーダー大きくなっている。仮に②の同定方法による相対透水係数が液相の相対透水係数を示すとすると、 $n=1.237$ と $n=3.0$ で示される相対透水係数の差が気相の寄与率と考えることができる。このパラメータを用いた鉛直2次元の解析CASE9は、計測された蒸発量に近い蒸発量 $20\text{mg/m}^2/\text{sec}$ を設定したケースである。このケースで不飽和領域が発生するが、他の不飽和領域が発生したケースとは異なり桁落ちによる計算不能を避けるため最小値を $1.0E-25$ とする条件を適用せずに解析結果が得られている。このため不飽和領域内のサクシオン値は現実的値をとり、体積含水率の変化も他のケースとは異なり不飽和領域内で連続的な変化をしている。この③のような同定方法による相対透水係数の曲線の設定は不飽和領域を予測する際に現実的解をもたらし、実用性があるものと考えられる。

今回実施した岩石内の気相としての水分フラックスの寄与が考えられる場合には、VG式 (VGモデル) の特性として水分特性曲線から得られる相対透水係数は、実現象 (サクシオン応答等) を説明することを考えると適用が難しいものと考えられる。

内容的にやや重複するが、岩石中のフラックスは水としての液相の移動以外に水蒸気としての気相の水分移動が考えられる。昨年度の計測でも確認されたが、透水係数が砂と岩石では5オーダー程度異なるが、蒸発量はオーダーで変わらない。気体分子として岩石の空隙内を通過するのであれば、水のような粘性の影響はなく比較的容易に空隙を通過できるものと考えられる。このためフラックスを考慮しない圧力・水分平衡を前提として求められた水分特性曲線を介してVG式の与える相対透水係数より蒸発量としてフラックスを計測する試験を用いての相対透水係数は見かけ上大きくなるものと考えられる。

2. 9 今年度の成果と課題

今年度の研究成果と今後の課題について述べる。

2. 9. 1 今年度の成果

本年度は不飽和メカニズムの基礎研究として

- (1) 湿度センサーによる蒸発量測定精度の検討
- (2) 均質な岩石試料を用いてのvan-Genuchten式のパラメータの同定
- (3) VG式のパラメータのばらつきの解析結果に与える影響検討
- (4) 既存手法を用いた水分特性曲線・相対透水係数の把握

を実施した。上記計測・解析・検討を通じて得られた成果は以下のとおりである。

- ① コア上端では水蒸気の3次元的な拡散が生じている。このため ϕ 50mmのコアに対しては1次元の拡散を仮定する場合に比較して1.5倍程度の蒸発量が多くなることが実験・解析を通じて明らかにされた。
- ② 上記のコア上端において、約4cmの障壁をコア周辺に設置することで3次元拡散の影響を除去できることが確認された。
- ③ ほぼ均質な岩石を用いて蒸発量計測と体積含水率の分布からVG式のパラメータを同定した結果、同じ体積含水率に対するサクシオンや相対透水係数は大きい場合で約2オーダーの違いが生じた。
- ④ 上記VG式のパラメータのばらつきは、坑道周辺の不飽和領域を解析的に予測する際の解析結果に不飽和領域が発生する場合、発生しない場合などの違いを生じる影響を与えうることが確認された。また今回の解析では、不飽和領域が発生する場合でその範囲は壁面から数m～十数mであった。
- ⑤ 土壌の水分特性を計測する土柱法、加圧板法が岩石にも適用しうること、さらにより大きいサクシオンに対してはサイクロメータを用いた計測を適用しそれらを合わせて整合性のあると考えられる水分特性曲線が得られることが確認された。
- ⑥ 水分特性曲線から得られる相対透水係数よりも、岩石内の水分フラックスを蒸発として計測した場合得られる相対透水係数は数オーダー大きくなると考えられ、このような場合VG式の適用は難しいものと考えられた。
- ⑦ 上記事項および飽和透水係数が数オーダー異なる試料に対しても蒸発量は同オーダーである計測結果から、岩石内の水分フラックスには岩石空隙内部の水蒸気（気相）としての水分移動が存在すると推察された。

2. 9. 2 今後の課題

本年度の不飽和メカニズムの基礎研究を通じて挙げられる今後の課題は以下のとおりである。

- ① 今後岩石の不飽和特性を把握していく手段としては、2通りのアプローチが考えられる。(a)岩石空隙内部の水分フラックスを液相・気相に分離して取り扱う方法、(b)液相・気相を一括して水分フラックスと捉え、水分特性曲線と独立した水分フラックスの評価方法（モデル）を開発していく方法である。限られた時間の中ではいずれかを選択していく必要がある。
- ② 昨年度、今年度実施した体積含水率分布の解析は実測値と十分マッチしているとは言い難い。これに対して、上記(a)あるいは(b)のアプローチにて適切なモデル化の方法を検討しておく必要がある。
- ③ 現在までの計測は、室内規模コアレベルの小さいスケールのものであり、より原位置規模に近い適応性の検討が望まれる。
- ④ 実際の岩盤内の不飽和状態を考慮すると、亀裂が不飽和領域にどのように関与しているのかを明らかにしておく必要性が挙げられる。

【参考文献】

- 1) 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,No4,pp.11 - 18, (1989)
- 2) 木村 強、高橋 学 : 乾燥湿潤過程での岩石内の水分移動に関する実験的研究、資源と素材、pp.71-77, (1995)
- 3) 空気調和・衛生工学会編 : 空気調和衛生工学便 I 基礎篇、pp. 186 - 193,(1991)
- 4) 国立天文台編 : 理科年表平成6年、pp.442-443,(1994)
- 5) 梶和大、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,No2,pp.23 - 30, (1994)
- 6) 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)
- 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、広岡光太郎 : 原位置における負の間隙水圧の計測方法に関する研究、不飽和地盤の透水にかかわる諸問題シンポジウム発表論文集、pp.111-116,(1996)
- 9) 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) 多胡砂岩以外の代表的な岩石試料（来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩、稲田花崗岩）のコア供試体（各2個ずつ）について、超音波速度～含水量、比抵抗～含水量、比誘電率～含水量の関係を求める。これらの物理量の不飽和領域計測への適用性を、広範囲の岩石について再検討する。
- (2) 比誘電率測定のためのTDRプローブの設置方法、TDR波形の読み取り方法を再検討し、測定精度や再現性の向上を図る。

図3.1-1 に本研究のフロー図を示す。本年度用いた4種類の岩石試料の基本物性値を表3.1-1に示す。

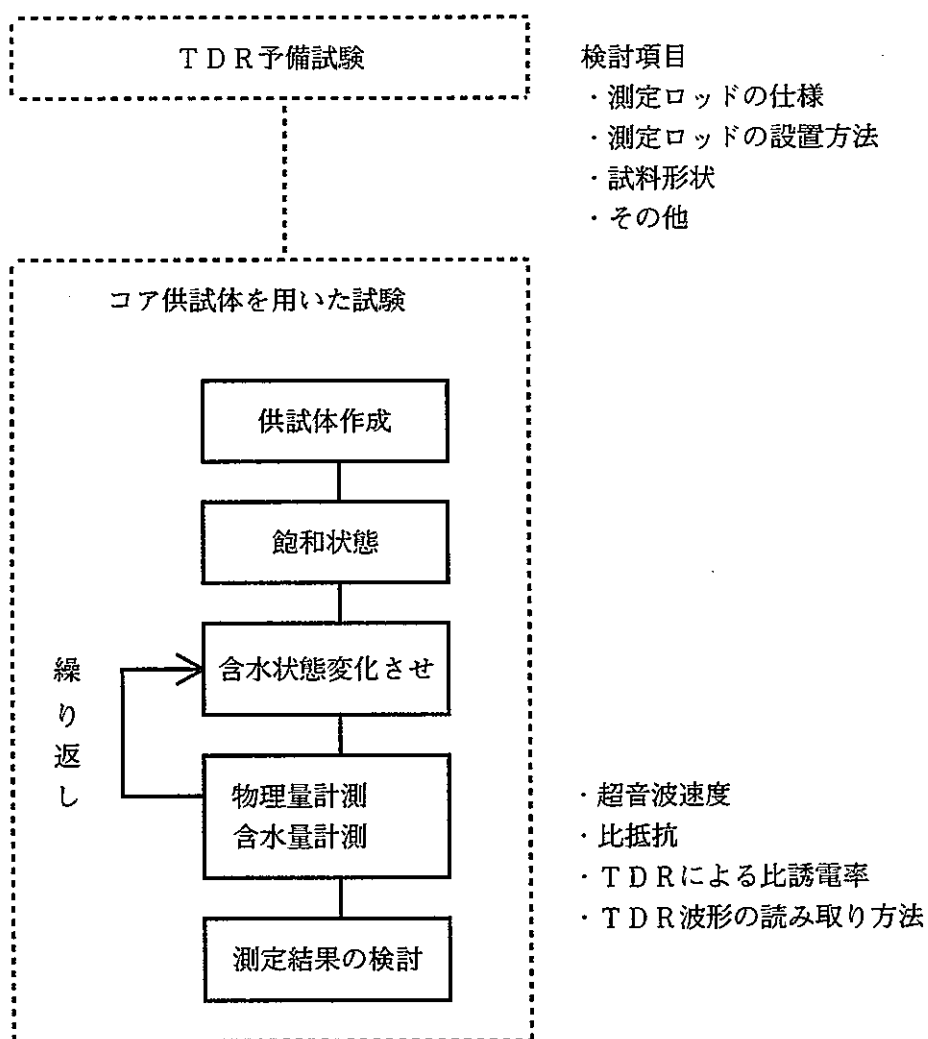


図3.1-1 研究の方法フロー図

表3.1-1 岩石試料の密度、有効間隙率及び吸水率

岩種 (記号)	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³	有効間隙率 %	吸水率 %
来待砂岩 (KS)	2.21	1.99	21.5	10.8
白浜砂岩 (SS)	2.40	2.27	13.1	5.79
白河熔結凝灰岩 (SWT)	2.24	2.00	24.3	12.1
稲田花崗岩 (IG)	2.63	2.62	0.95	0.36

3. 2 比誘電率測定方法に関する予備検討

3. 2. 1 比誘電率測定・解析システム

従来、岩石・岩盤工学の分野において、比誘電率測定手法は確立されていないため、比誘電率測定結果の再現ができるようにすることおよびデータの読み取り精度を向上させるために、測定データ（波形データ）をデジタル方式で記録して比誘電率を求める解析システムを用いることとした。

表3.2-1 比誘電率測定・解析システム

名称およびメーカー	型式名	主な仕様	備考
TDRケーブルテスター SONY-TEKTRONIX	1502B	出力インピーダンス 50Ω+1% 垂直軸 感度 0.5~500mρ/Div 精度 フルスケールで±3% 水平軸 距離カール分解能 0.004フィート 感度 0.025~50m/Div レンジ 2.5~500m Vp 0.30~0.99 空気を1.0とした伝播速度 RS232Cインターフェース内蔵 電源 AC100Vおよび内蔵電池	
パソコン	NB-466VLD	DX2(66MHz), 8MBメモリ, 200MBHDD MS-DOS6.2, MS-WINDOWS3.1	
データ採取変換ソフト MyTDR (株)ダイヤコンサルタント開発		RS-232Cを介してTDRデータを採取、変換する。分解能14bit、分割データを自動にリンクし、変換する。	本試験時 使用
波形変換ソフトQSCSIWIN (株)ダイヤコンサルタント開発		SEG仕様対応の波形解析ソフト 波形記録の整理、データ読み取り、 波形対比、印刷出力	

比誘電率測定装置は、TDR (Time-Domain Reflectometry) と呼ばれるケーブルテスター (Tektronix 1502B、公称Freq.1.75GHz) を用いることとしたが、デジタル波形データを取得するために、RS232Cインタフェース付きの仕様とした。計測システムの構成を表3.2-1に示し、また、比誘電率測定・解析システムの概要図を図3.2-1に示す。

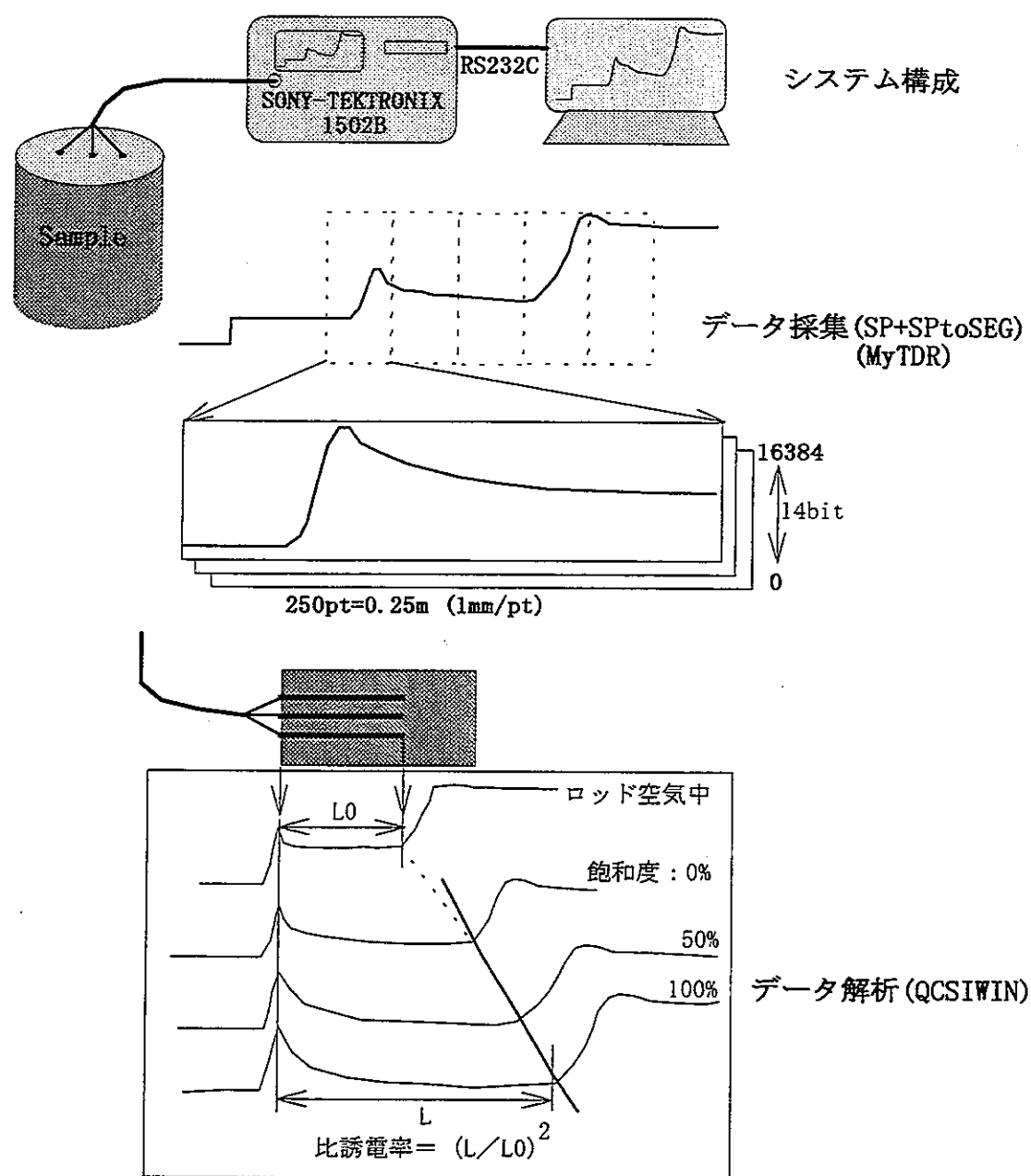


図 3.2-1 TDR測定解析システム

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。

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

ここで

L：ロッドの長さ [L]

C：真空中の電磁波速度 (3×10^8 m/sec、光速) [L/T]

T：電磁波の往復時間 [T]

TDR装置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。TDRの表示値を岩石の比誘電率に換算する式を以下に誘導する。

$$V_{air} = c / \sqrt{\epsilon_{air}}$$

$$V_{samp} = c / \sqrt{\epsilon_{samp}}$$

$$L_{air} = L0 / V_{air} \cdot V_{air}$$

$$L_{samp} = L0 / V_{samp} \cdot V_{air}$$

ここで V_{air} : 空気中における電磁波速度

V_{samp} : 岩石中における電磁波速度 [L/T]

ϵ_{air} : 空気中での比誘電率 [-]

ϵ_{samp} : 岩石中での比誘電率 [-]

L_{air} : 空気中でのTDR表示値 [L]

L_{samp} : 岩石中でのTDR表示値 [L]

L0 : ロッド長 [L]

上式より

$$(L_{samp}/L_{air})^2 = (V_{air}/V_{samp})^2$$

$$= \epsilon_{samp} / \epsilon_{air}$$

$$\epsilon_{samp} = (L_{samp}/L_{air})^2 \cdot \epsilon_{air}$$

ただし、空気中の比誘電率 ϵ_{air} は今回は1としている。

また、TDR表示長さの読み取りは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で行った。

3. 2. 2 測定法に関する予備検討の結果のまとめ

測定法について検討した結果のまとめを、表3.2-3に示す。

表3.2-3 予備検討結果のまとめ

項目	内容	主な結果
ロッド長, 径, 本数	ロッド寸法、本数の影響 空气中、水中、岩石試料中	<ul style="list-style-type: none"> ・ロッドの長さによる影響は認められない。 ・ロッド径が小さいほど反射波振幅が大きく、比誘電率の測定に有利と思われる。 ・ロッド3本の方は2本より反射波の勾配がやや大きいので、読み取りやすい。
電磁波影響範囲	ロッド周囲の影響範囲 ロッド先端からの影響範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・ロッド3本の場合、電磁波の影響範囲の直径は両側ロッド間隔の1.4倍以内である。 ・ロッド3本の場合、ロッドの先端から両側ロッド間隔の0.5倍程度は電磁波の影響範囲である。
ロッド設置方法	隙間あり、なし、クリームで充填 隙間の大小	<ul style="list-style-type: none"> ・設置方法（隙間の有無、充填材の種類）による影響は顕著である。 ・隙間有り而未充填の場合、比誘電率を過小評価。隙間が大きいほど、過小評価の程度が大きい。
孔間隔及び試料形状	間隔2cmと3cm 円柱形と立方体	<ul style="list-style-type: none"> ・試料の直径が10cmの場合、ロッド間隔2cmと3cmの違いによる影響は認められない。 ・電磁波の影響範囲外では試料形状の影響はない。
ロッド露出部	ロッド露出部有無の影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ロッドの露出部は小さいほど、波形が滑らかであり、余分な反射波もなく、測定データを読み取り易い。

これらの結果を踏まえ、試験条件は供試体が直径10cm×長さ13cm、ロッド径が約5mm、ロッド長が10cm、ロッド本数が3本、ロッド間隔が3cm、また、ロッドの設置は打ち込み方法を用いることとした。ただし、現場での設置を想定すると、特に空洞からの設置深度が大きくなると、その作業が困難と推測できるため、さらに他の設置方法や充填材の検討が必要と考えられる。

3. 3 超音波速度、比抵抗及び比誘電率測定

3. 3. 1 供試体

超音波速度、比抵抗及び比誘電率測定の手順を図3.3-1に示す。

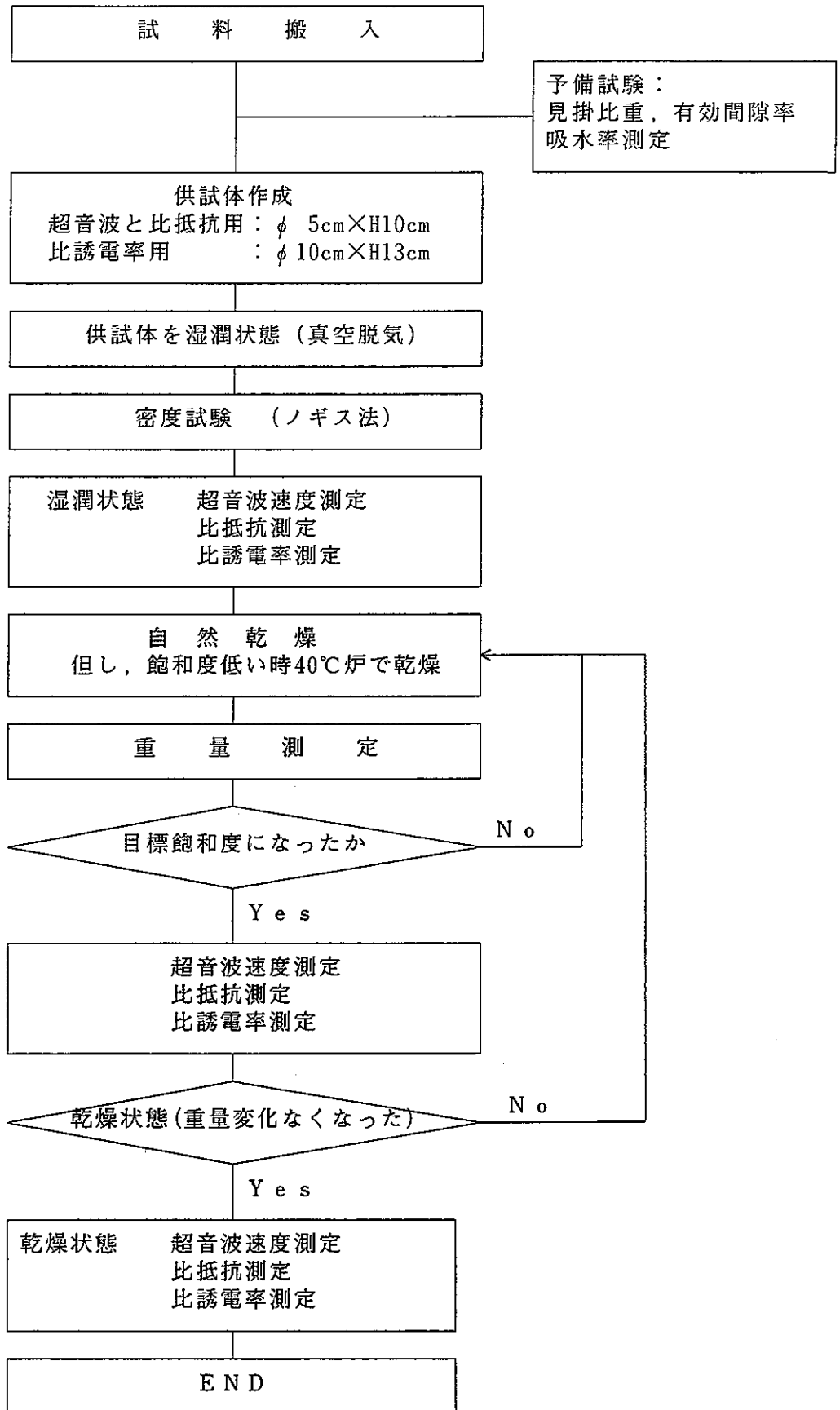


図3.3-1 コア供試体の測定手順フロー

超音波速度及び比抵抗測定は同一供試体を用い、その寸法は $\phi 5\text{cm}\times\text{H}10\text{cm}$ とし、1岩種につき2供試体で、計8供試体とした。比誘電率測定用供試体の寸法は $\phi 10\text{cm}\times\text{H}13\text{cm}$ とし、供試体個数は、超音波速度及び比抵抗測定と同様とした。また、超音波測定と比抵抗測定用及び比誘電率測定用の全ての供試体の一覧及び基本物性値を表3.3-1に示す。

表3.3-1 供試体の一覧表

岩種	供試体番号	測定内容	概略寸法 mm	湿潤密度 cm^3	乾燥密度 cm^3	吸水率 %	有効間隙率 %
来待砂岩	KS5-1	超音波速度、比抵抗～	$\phi 50\times\text{H}100$	2.201	1.987	10.8	21.4
	KS5-2	体積含水率、飽和度の関係		2.206	1.990	10.9	21.6
	KS10-1	比誘電率～体積含水率、	$\phi 100\times\text{H}130$	2.215	2.002	10.6	21.3
	KS10-2	飽和度の関係		2.210	1.994	10.9	21.7
白浜砂岩	SS5-1	超音波速度、比抵抗～	$\phi 50\times\text{H}100$	2.395	2.272	5.42	12.3
	SS5-2	体積含水率、飽和度の関係		2.402	2.275	5.56	12.7
	SS10-1	比誘電率～体積含水率、	$\phi 100\times\text{H}130$	2.399	2.265	5.90	13.4
	SS10-2	飽和度の関係		2.399	2.266	5.84	13.2
白河熔結凝灰岩	SWT5-1	超音波速度、比抵抗～	$\phi 50\times\text{H}100$	2.229	1.990	12.0	23.9
	SWT5-2	体積含水率、飽和度の関係		2.233	1.989	12.2	24.4
	SWT10-1	比誘電率～体積含水率、	$\phi 100\times\text{H}130$	2.243	1.997	12.4	24.7
	SWT10-2	飽和度の関係		2.252	2.012	11.9	24.0
稲田花崗岩	IG5-1	超音波速度、比抵抗～	$\phi 50\times\text{H}100$	2.631	2.623	0.328	0.860
	IG5-2	体積含水率、飽和度の関係		2.636	2.627	0.341	0.895
	IG10-1	比誘電率～体積含水率、	$\phi 100\times\text{H}130$	2.633	2.623	0.377	0.989
	IG10-2	飽和度の関係		2.631	2.621	0.403	1.06

比誘電率測定用の測定孔は3本、孔中心の間隔が3cmで、孔の深さが10cmとした。3本のロッド測定孔は1つの平面内に配置する。花崗岩以外の3岩種の測定孔の直径は5.6mm～6.0mmであり、花崗岩の場合、測定孔の径は7.2mm～7.4mmであった。供試体が飽和後にロッドの設置を行ったが、0.2mm刻みで用意した数種類の直径のロッド（真鍮製、長さ100mm）から最も径が合うロッドを選択して供試体の測定孔に打ち込んだ。比誘電率測定用供試体及び測定ロッドの状況を模式的に図3.3-2に示す。

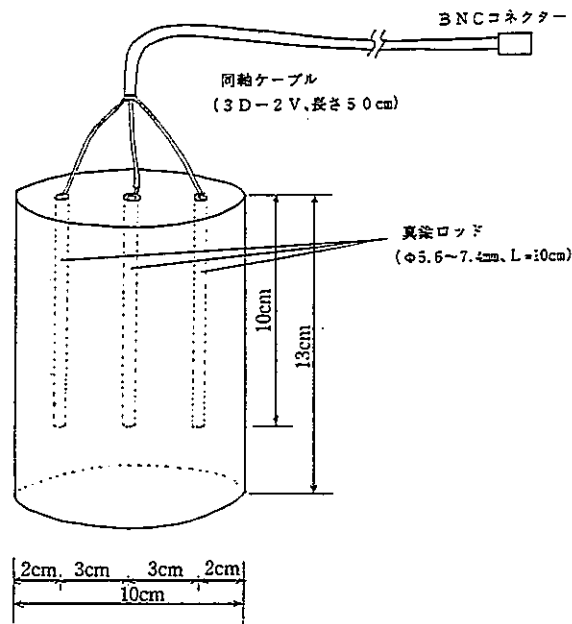


図3.3-2 比誘電率測定用の供試体及び測定ロッド

3. 3. 2 超音波速度測定

超音波速度測定試験はコア供試体の含水状態を変化させながら10数状態において実施した。P波測定は63kHzと400kHz、S波測定は33kHzと400kHzの振動子を用いた。供試体の含水変化に伴う超音波速度の測定結果を図3.3-1～図3.3-4に各岩種ごとに図示した。測定結果について以下に述べる。

①来待砂岩 (KS5-1、KS5-2)

飽和状態で2.9～3.1km/secを示すP波速度は含水量の減少に伴い漸減し、飽和度50～60%、体積含水率0.12付近で最低値(2.6～2.9km/sec)を示した後、増加傾向に転ずる。絶乾状態の速度は3.2～3.4km/secで飽和状態より大きな速度値を示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして13～28%である。

飽和状態で1.6～1.7km/secを示すS波速度は含水量の減少に伴い飽和状態～飽和度50%、体積含水率0.10～0.12付近までほぼ一定値を示すが、その後P波と同様増大する傾向を示し、絶乾状態で1.95～2.1km/secを示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして19～24%である。

なお、来待砂岩の2試料間にはP波、S波ともに比較的大きな速度値のバラツキが認められる。

②白浜砂岩 (SS5-1、SS5-2)

飽和状態で2.8～2.9km/secを示すP波速度は含水量の減少に伴い漸減し、飽和度25～30%、体積含水率0.03～0.04付近で最低値(2.3～2.4km/sec)を示した後、急増する。絶乾状態においては飽和状態よりわずかに大きな速度値2.9～3.0km/secを示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして21～25%で

ある。

飽和状態で1.3km/secを示すS波速度は含水量の減少に伴い飽和状態～飽和度25～30%、体積含水率0.03～0.04付近まで漸増するが、その後P波と同様に急激に増加し、絶乾状態では2.0～2.1km/secの速度を示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして54～62%である。

白浜砂岩の2試料はP波、S波ともに速度変化曲線のバラツキは0.1km/sec以下で大きな差は認められない。

③白河熔結凝灰岩 (SWT5-1、SWT5-2)

飽和状態で2.6km/secを示すP波速度は含水量の減少に伴い漸減し、飽和度25～40%、体積含水率0.07～0.09付近で最低値(2.0～2.2km/sec)を示した後、増加に転ずる。絶乾状態においては飽和状態よりやや大きな速度値2.8km/secを示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして23%程度である。

飽和状態で1.3km/secを示すS波速度は含水量の減少に伴い飽和状態～飽和度25～40%、体積含水率0.07～0.09付近まで来待砂岩と同じようにほぼ一定値を示すが、その後P波と同様増加に転じ、絶乾状態では1.6～1.7km/secの速度を示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして31～36%程度である。

白河熔結凝灰岩の2試料の速度変化曲線はP波に0.2km/sec程度のバラツキが認められるが、S波には大きな差は認められない(0.1km/sec程度以下)。

④稲田花崗岩 (IG5-1、IG5-2)

飽和状態で5.6～5.7km/secを示すP波速度は含水量の減少に伴い絶乾状態に至るまで減少する傾向を示すが、飽和度50%、体積含水率0.005付近からは変化曲線の勾配が緩やかになる傾向が認められる。絶乾状態では3.7～3.8km/secの速度にまで低下する。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして35%程度である。

飽和状態で2.9～3.1km/secを示すS波速度は含水量の減少に伴い飽和状態～飽和度50%、体積含水率0.005付近まで漸減する傾向が認められるがその後はほぼ一定値を示す。絶乾状態では2.5～2.7km/secを示す。速度の最大変化量は飽和状態を基準にして19%程度である。

稲田花崗岩の2試料の間にはP波、S波ともに速度変化曲線のバラツキは0.3km/sec程度以下となっている。

超音波センサーの違いによる速度の違いは明瞭とは言えない結果となった。稲田花崗岩を除いて、P波速度が最低値を示した後、増加傾向に転ずる含水量はS波速度がそれまでほぼ一定～漸増傾向から増加に転ずる含水量とほぼ一致している。稲田花崗岩においても速度の変化曲線の勾配が変わる含水量はP波、S波速度で一致している。

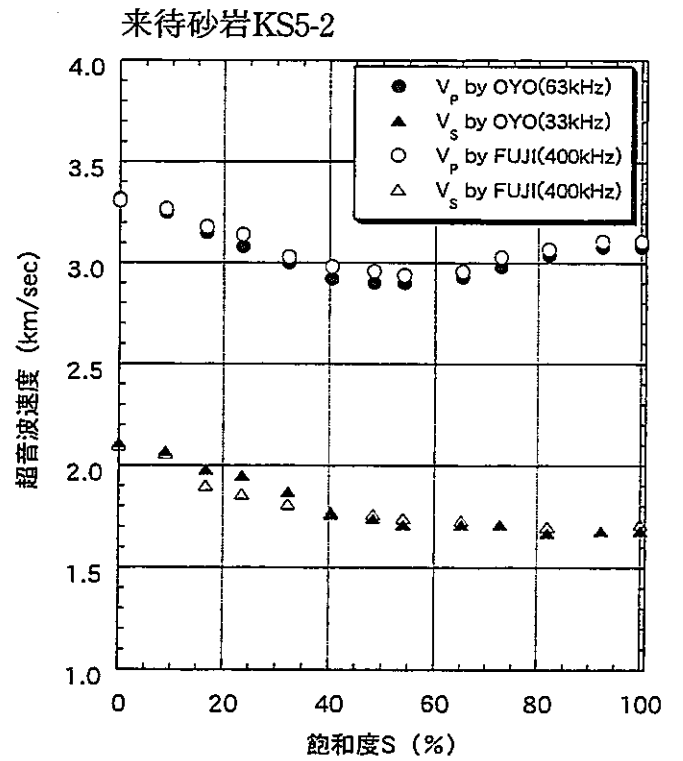
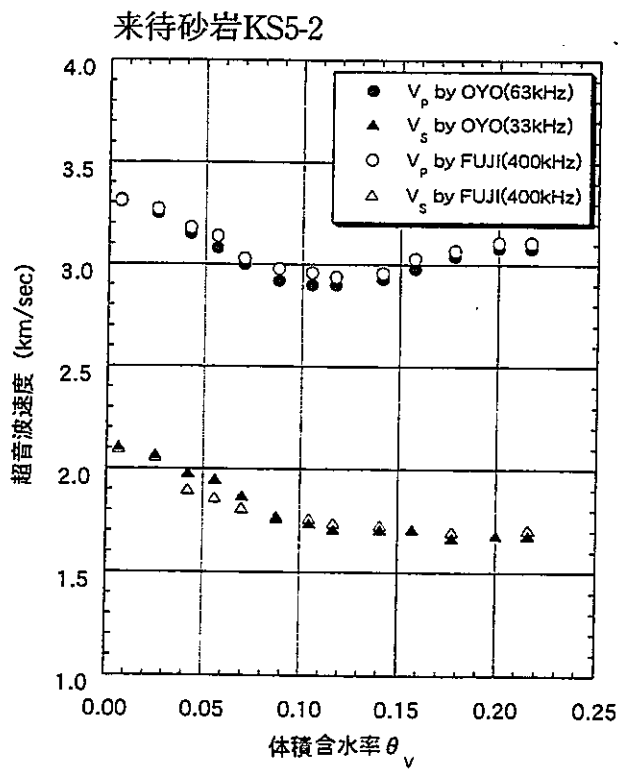
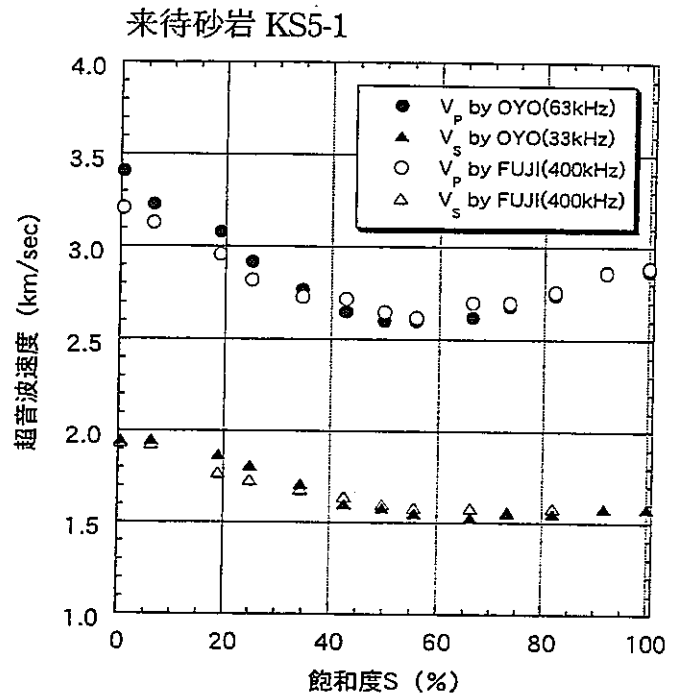
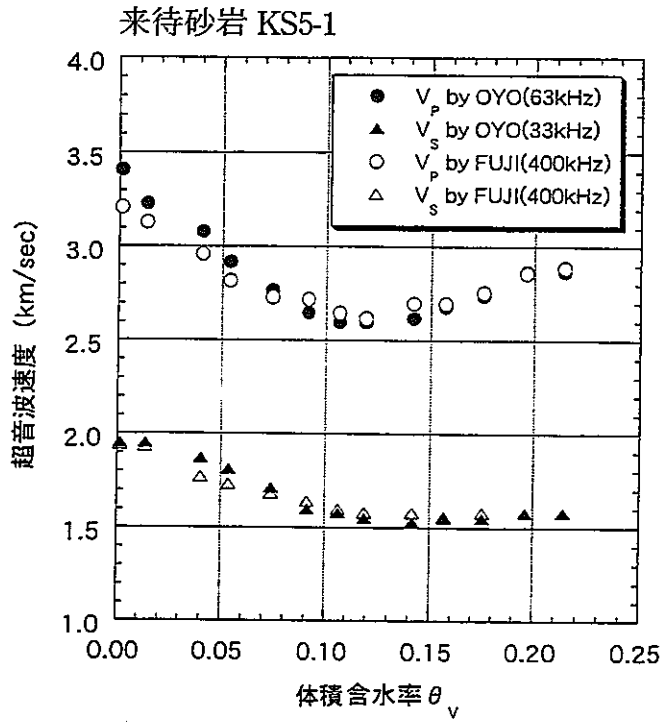


図3.3-1 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度との関係
(来待砂岩)

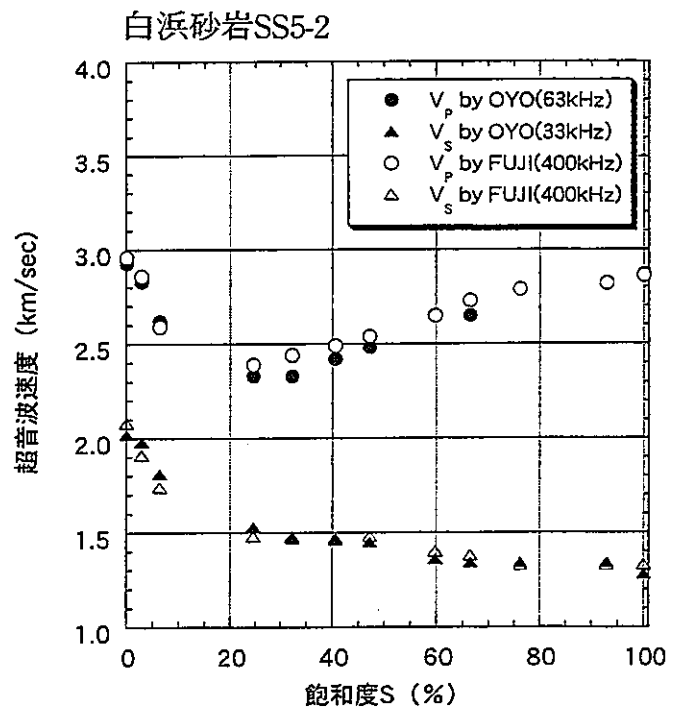
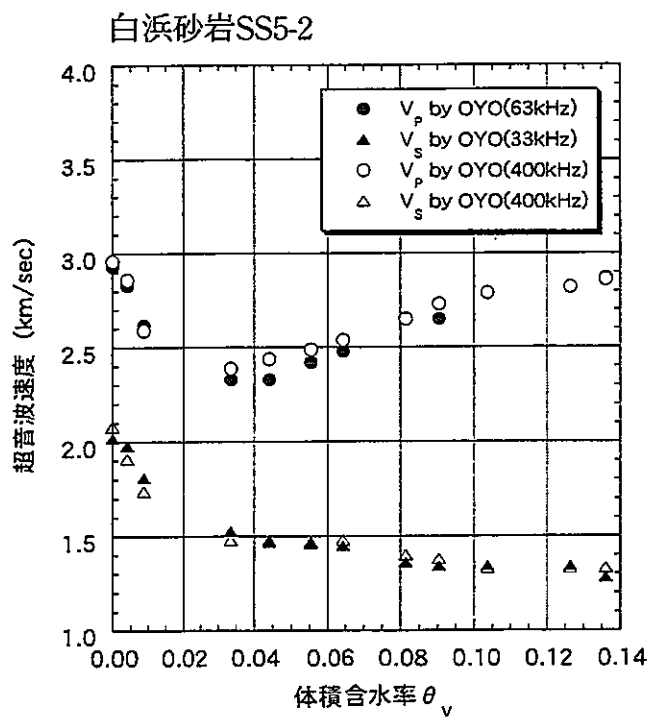
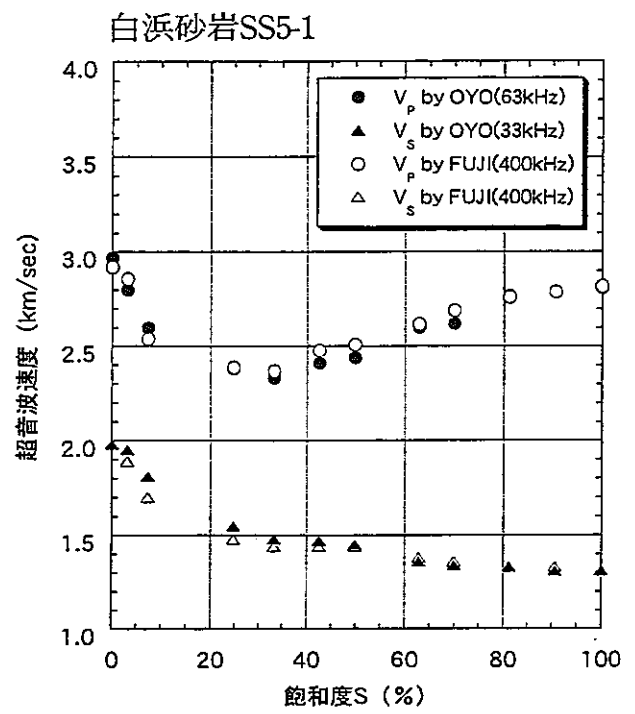
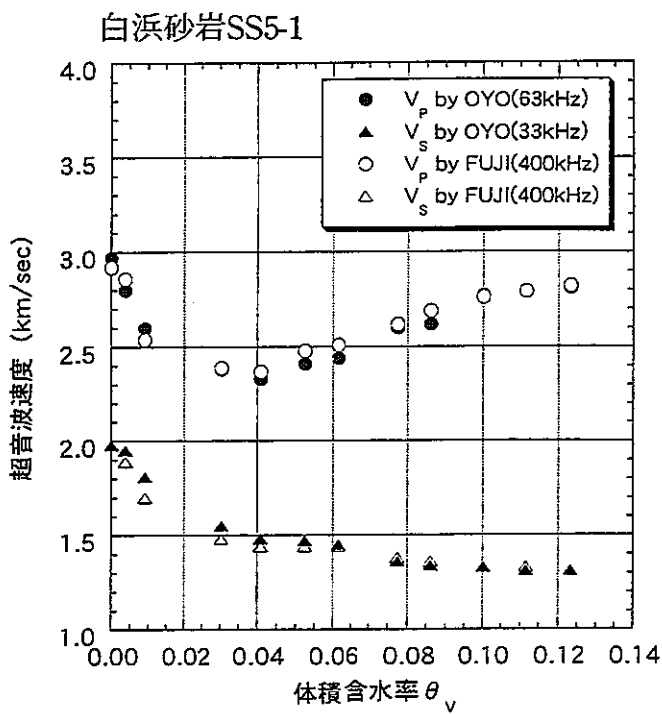


図3.3-2 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度との関係 (白浜砂岩)

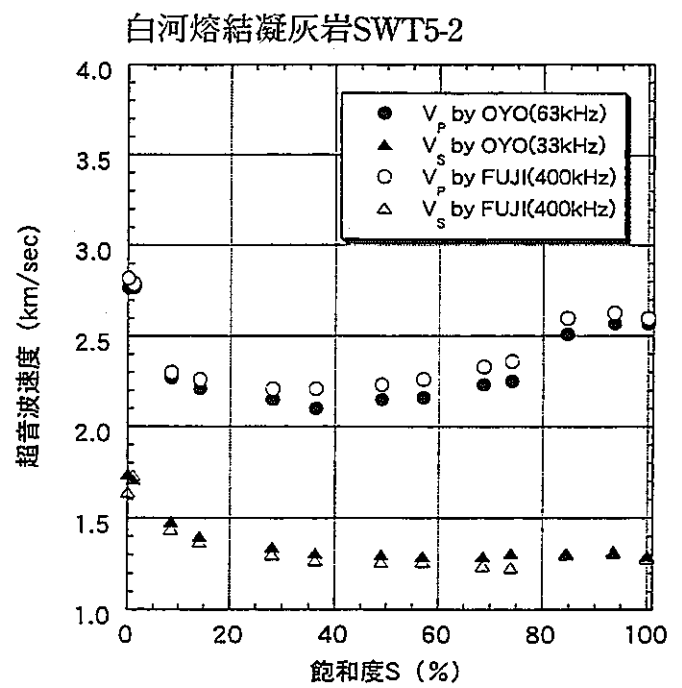
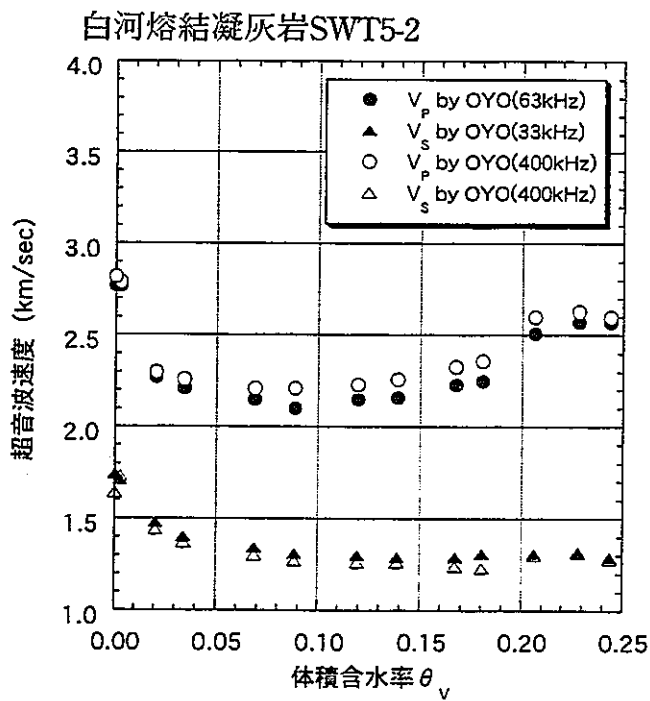
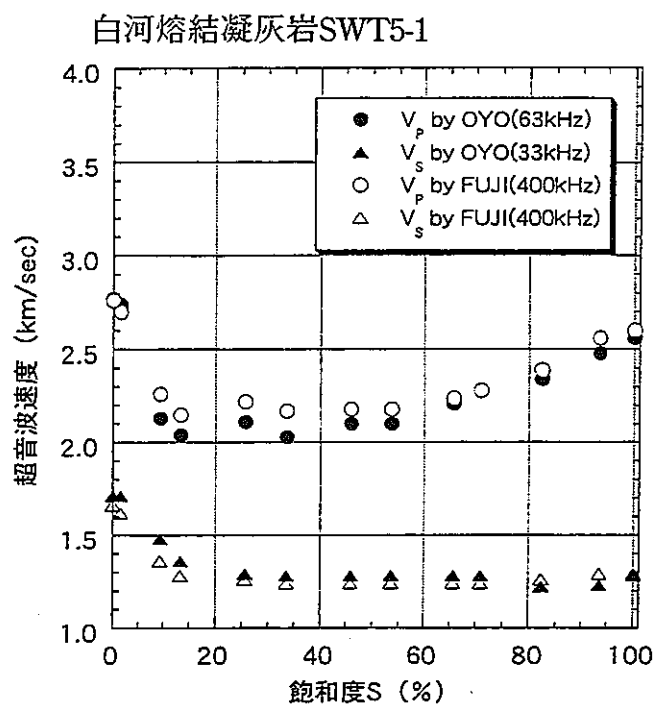
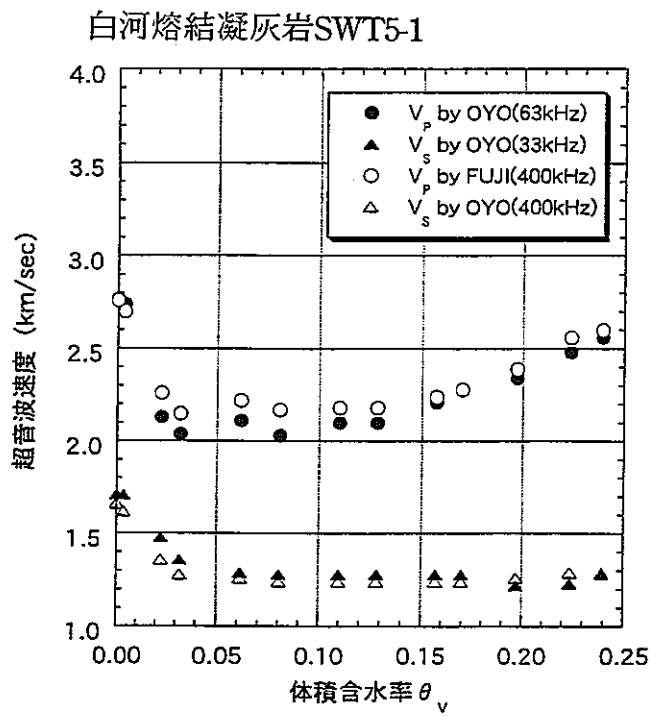


図3.3-3 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度との関係
(白河熔結凝灰岩)

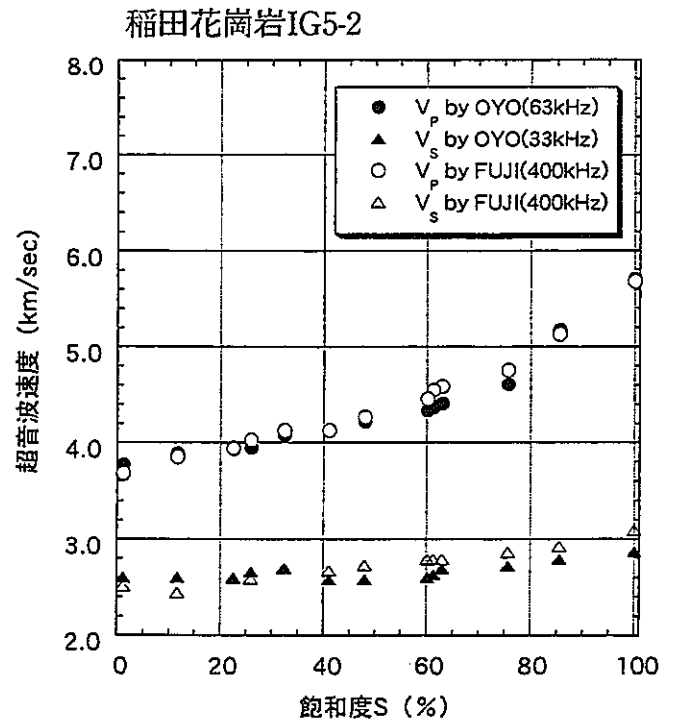
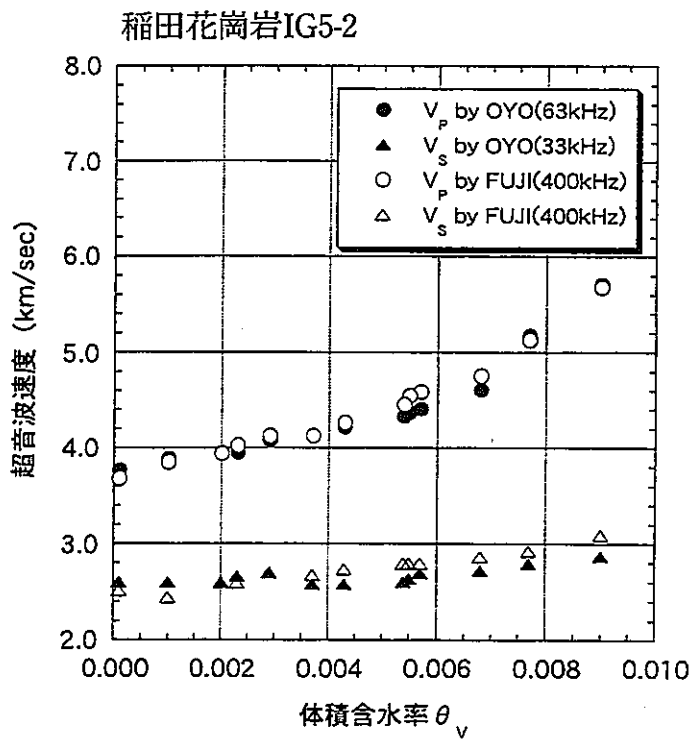
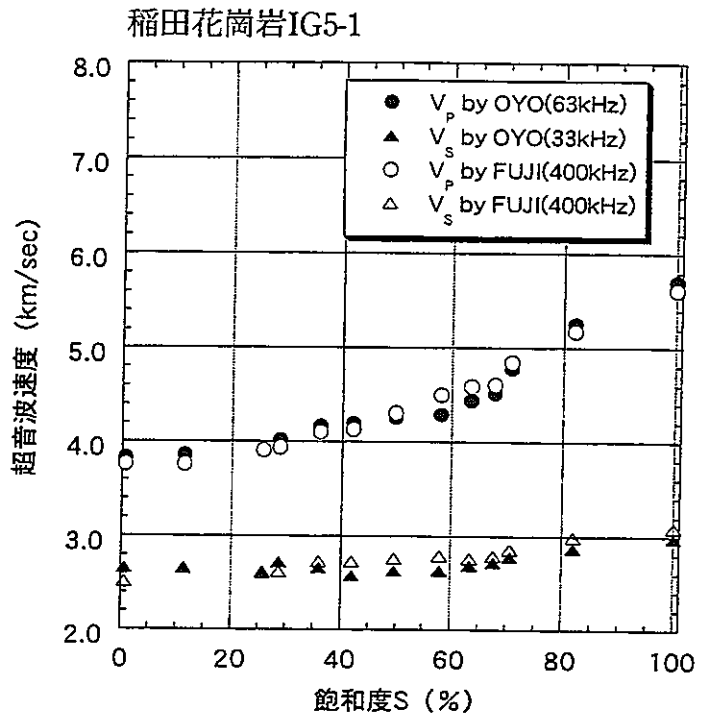
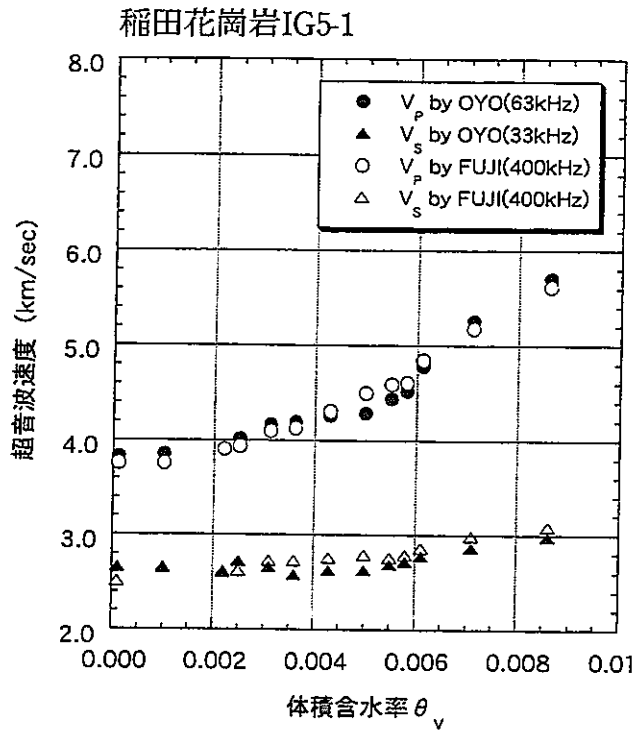


図3.3-4 体積含水率および飽和度と超音波伝播速度との関係
 (稲田花崗岩)

3. 3. 3 比抵抗測定

比抵抗測定は超音波速度測定と同様にコア供試体の含水状態を変化させながら10数状態において実施した。図3.3-5には全岩種の体積含水率および飽和度と比抵抗の関係を示す。測定結果について以下に述べる。

①来待砂岩 (KS5-1、KS5-2)

飽和状態での比抵抗は約 $100 \Omega \cdot m$ である。含水量の減少に伴い飽和状態～飽和度40～50%、体積含水率0.07付近までは比抵抗はほぼ一定かもしくはわずかながら増加する傾向を示すが、その後急激な増加に転ずる。

②白浜砂岩 (SS5-1、SS5-2)

飽和状態での比抵抗は $70 \sim 130 \Omega \cdot m$ である。含水量の減少に伴い、飽和状態～飽和度25～30%、体積含水率0.03～0.04付近までは比抵抗はほぼ一定の値を示すがその後急激に増加する。

③白河熔結凝灰岩 (SWT5-1、SWT5-2)

飽和状態での比抵抗は $190 \sim 210 \Omega \cdot m$ である。含水量の減少に伴い、飽和状態～飽和度25～30%、体積含水率0.05付近まで比抵抗はほぼ一定の値を示すが、その後急激に増加する。

④稲田花崗岩 (IG5-1、IG5-2)

飽和状態での比抵抗はおよそ $30 k \Omega \cdot m$ である。含水量の減少に伴い、飽和状態～飽和度70%、体積含水率0.006～0.007付近まで比抵抗はほぼ一定の値を示すが、その後増加する。増加の勾配は飽和度45%、体積含水率0.0035付近で変化する様子が見てとれる。

比抵抗がそれまでのほぼ一定値から増加に転ずる含水量は、稲田花崗岩を除いて他の岩石試料では、P波、S波速度の変化傾向が急変する含水量とほぼ一致するかもしれないがやや比抵抗の方が乾燥側による傾向を認めることができる。稲田花崗岩についても比抵抗の増加勾配が変化する含水量は速度変化曲線で指摘した含水量よりやや乾燥側に寄っている。

稲田花崗岩を除く他の岩石試料では比抵抗変化曲線の傾向はS波速度の変化傾向に良く似ている。一方、稲田花崗岩においては比抵抗変化曲線の傾向はS波速度の変化傾向と似ず、むしろP波速度の変化曲線と正反対の傾向にあることが見てとれる。

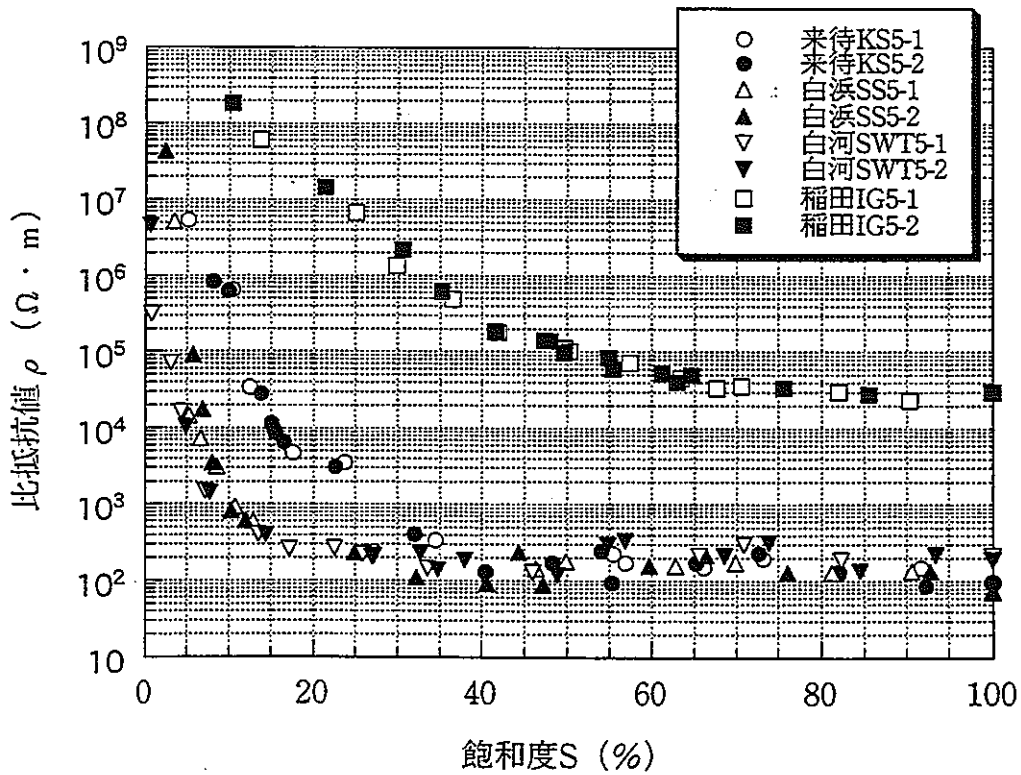
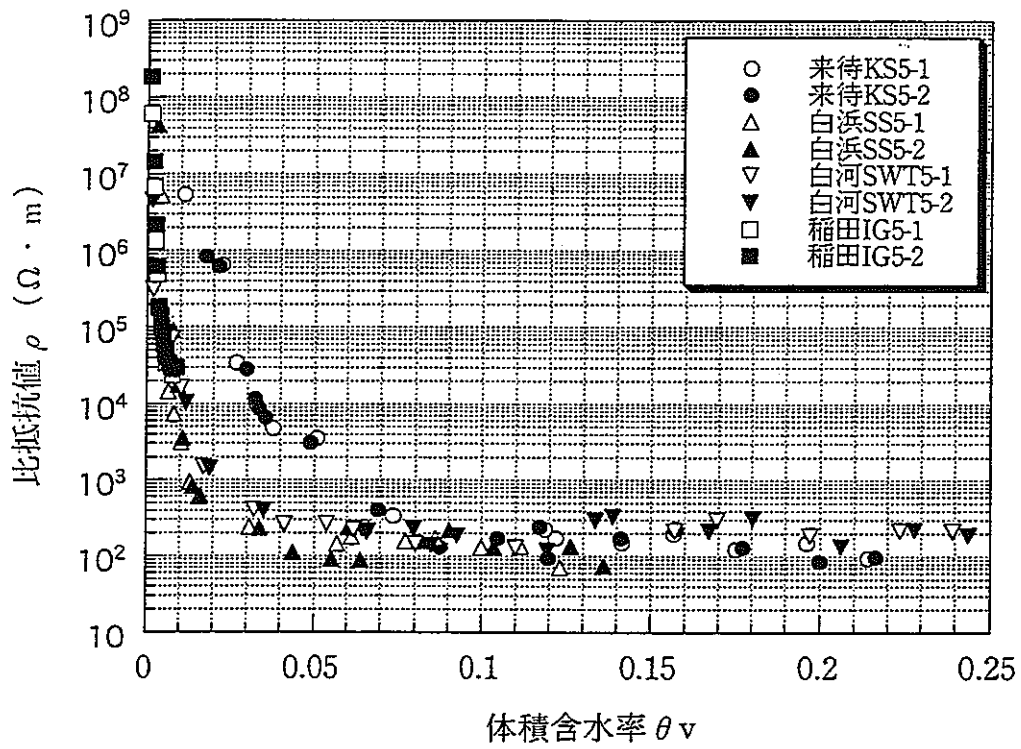


図3.3-5 体積含水率および飽和度と比抵抗の関係 (全岩種)

3. 3. 4 比誘電率測定

比誘電率測定は供試体の含水を飽和から変化させながら10数状態において実施した。図3.3-6には全岩種の体積含水率および飽和度と比誘電率の関係を示す。測定結果については以下に述べる。

①来待砂岩 (KS10-1、KS10-2)

含水量の減少に伴い比誘電率は12～5の範囲をおおむね直線的に減少する。飽和状態での比誘電率は直線からは大幅に上方に離れる傾向を示している。KS10-2試料においてはその離れは著しい。2試料の間には比誘電率に最大1.0以上のバラツキが認められる。

②白浜砂岩 (SS10-1、SS10-2)

含水量の減少に伴い比誘電率は10～4の範囲をおおむね直線的に減少する。飽和状態での比誘電率は直線からは上方に離れる傾向を示している。2試料間のバラツキはほとんどない。

③白河熔結凝灰岩 (SWT10-1、SWT10-2)

含水量の減少に伴い比誘電率は11～4の範囲をおおむね直線的に減少する。飽和状態での比誘電率は直線から上方に著しく離れる傾向を示している。2試料の間には比誘電率にほぼ0.5程度以下のバラツキが認められる。

④稲田花崗岩 (IG10-1、IG10-2)

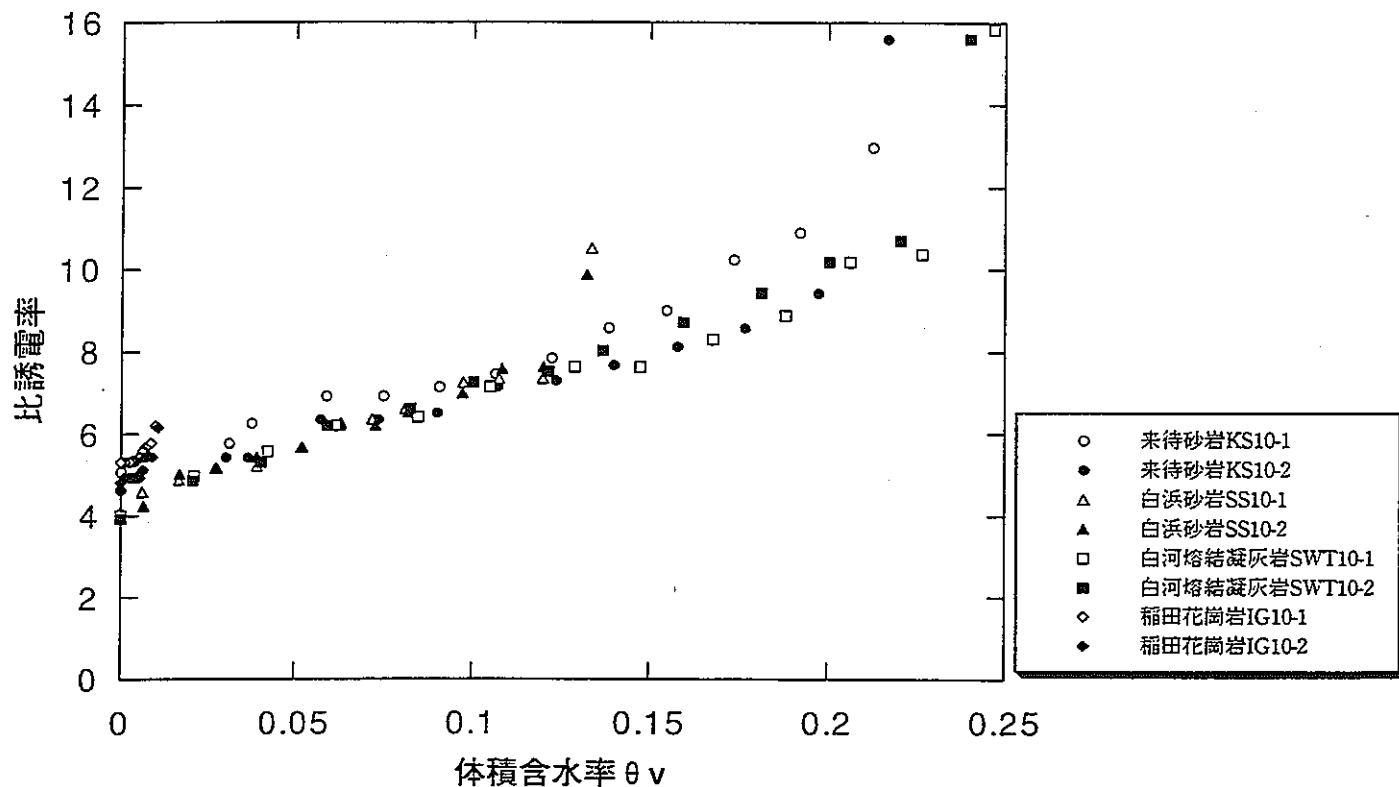
含水量の減少に伴い比誘電率は6～4.5の範囲をおおむね直線的に減少する。比誘電率の変化範囲が他の岩石試料に比べて小さいために、直線からのデータのバラツキも小さいものとなっている。2試料の間には比誘電率にほぼ0.5以下のバラツキが認められる。

比誘電率の変化については、含水量の減少に伴い比誘電率がほぼ直線的に減少する傾向が全試料に共通して認められ、全岩種に共通の比誘電率の回帰直線を求め、図3.3-7に示す。

異なる岩種・試料間でのバラツキは小さく、次に示す全岩種共通の直線式を求めることができる。

$$\begin{aligned} \epsilon &= 30.116 \theta_v + 4.5872 & \epsilon &: \text{比誘電率} \\ R^2 &= 0.9106 & \theta_v &: \text{体積含水率} \end{aligned}$$

全試料の比誘電率



全試料の比誘電率

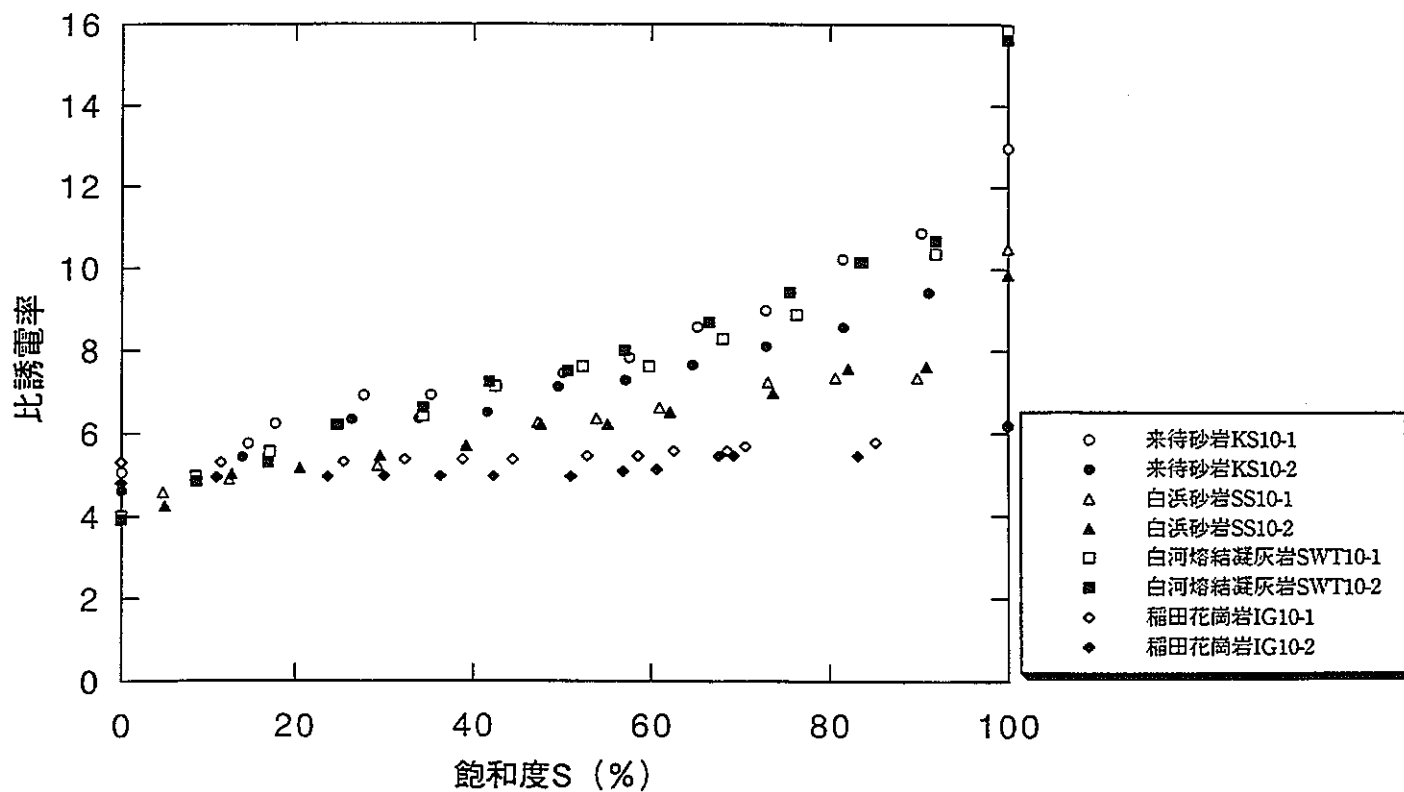


図3.3-6 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係 (全岩種)

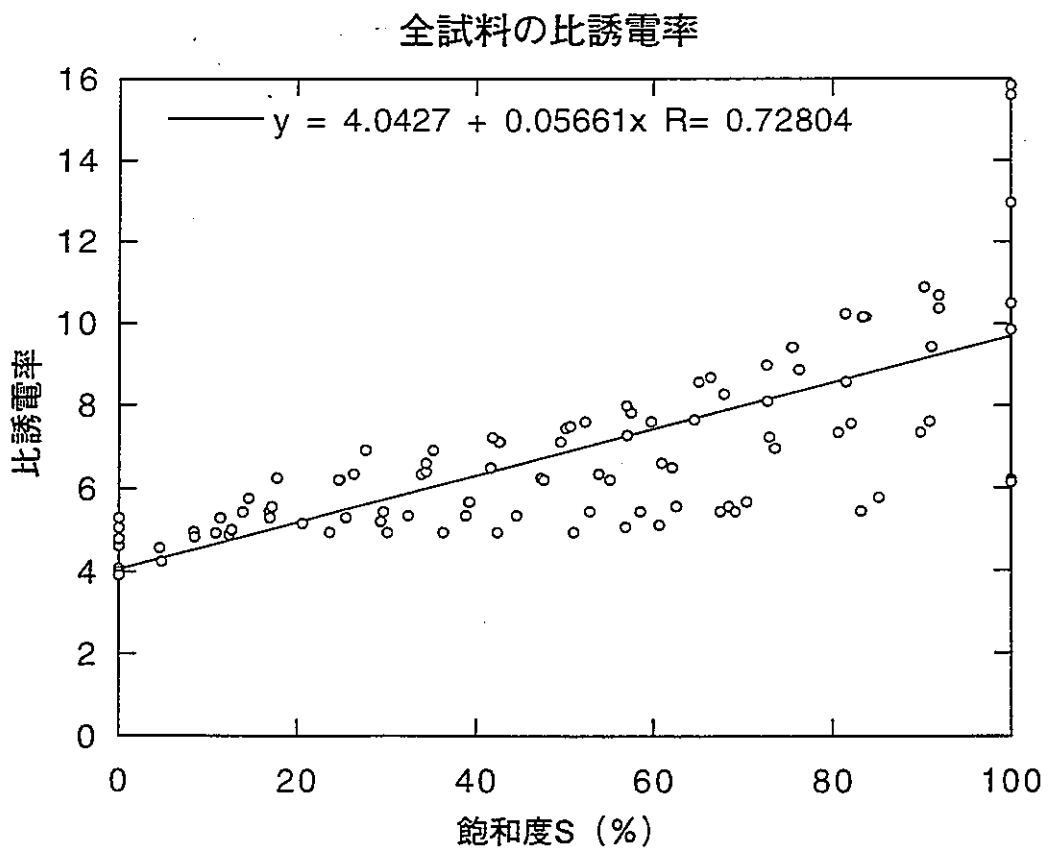
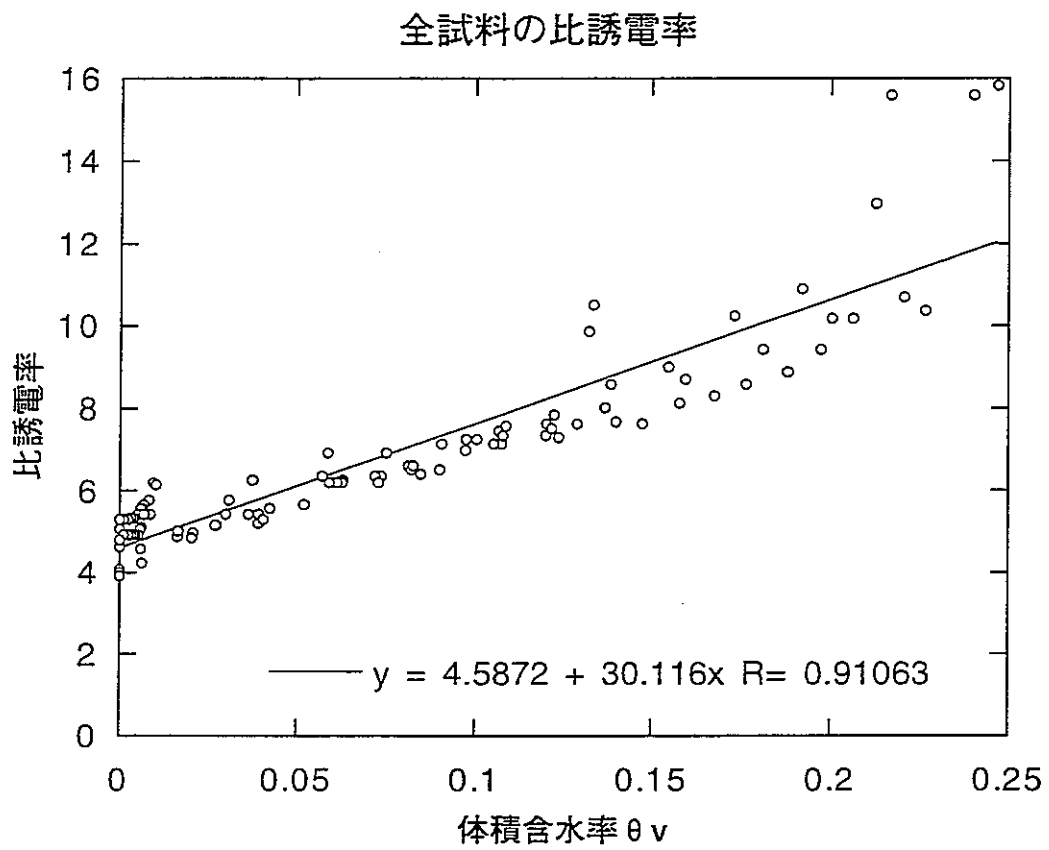


図3.3-7 体積含水率および飽和度における全岩種統一の比誘電率の回帰直線

3. 3. 5 試験結果の検討

(1) 昨年度の結果との対比

今年度の測定結果と昨年度の結果を対比すれば次のように言える。

①含水量による超音波速度の変化傾向は、多胡砂岩は特徴的である。特に、広い範囲の含水状態（飽和度10～90％）にわたって、P波、S波速度ともに一定である変化曲線は、今回用いた岩石試料では認められない。

②多胡砂岩の比抵抗の変化傾向は、乾燥過程で比抵抗が増加する含水量は岩種によって多少の差があるものの、今回用いた岩石試料の特徴ときわめて良く似ている。稲田花崗岩ではかなり大きな飽和度から比抵抗が漸増し始めるので、他の岩石試料とはメカニズムに違いがあることを示唆している。

③多胡砂岩の含水量による比誘電率のおおむね直線的な変化傾向は、今回用いた岩石試料とほぼ同じ傾向を示している。特に飽和含水状態において直線から上方へ離れる傾向は今回も来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩で明瞭に認められた。今回は測定ロッドの周囲にケラチンクリームを充填していないことから、この現象はケラチンクリームの影響でないことがわかった。

(2) 含水量測定方法としての評価

含水量測定方法としての観点から今回の物理量測定結果を評価する。

①超音波速度測定

- ・今回用いた岩石試料ではP波速度は飽和～絶乾状態にわたって含水量によって大幅な変化を示しているが、稲田花崗岩以外はその変化曲線は中央部で極小値をとるような複雑な変化を示している。
- ・稲田花崗岩ではP波速度は全含水状態にわたって含水量とともに単調に減少する傾向を示している。
- ・S波速度の変化は稲田花崗岩を除いて、高含水状態ではほぼ一定であるが、飽和度20～40％以下の低含水状態で大きく急上昇する傾向を示している。従って、低含水状態においては含水量の評価の指標となり得る。稲田花崗岩は、高含水状態では含水量の減少に伴ってS波速度は減少するが、飽和度20％以下の低含水状態では含水量によらずほぼ一定のS波速度を示しており、他の岩種と逆の傾向を示した。
- ・粗粒な来待砂岩、白河熔結凝灰岩は同一岩種でも試料間のバラツキが大きい。特に来待砂岩ではバラツキの程度が大きいですが、変化曲線の傾向は良く似ている。
- ・以上の知見および超音波速度が不均質性やき裂などの影響を受けやすいことを考慮すると、速度値から含水量を一義的に決定することは困難と考えられる。

②比抵抗測定

- ・稲田花崗岩でやや異なるものの、多胡砂岩を含む他の岩石試料ではほぼ同じ比抵抗変化曲線を示して

おり、飽和度で20～40%以下の低含水状態で含水量の減少に伴い急激な増加傾向を示す。従って、飽和度で20～40%以下の低含水状態においては含水量評価の指標になり得ると考えられる。

- ・ 稲田花崗岩では飽和状態～飽和度70%付近まで比抵抗はほぼ一定で、飽和度70%以下で比抵抗値が急激に増加する傾向を示しており、比抵抗変化のはじまりが高含水側に寄っている。
- ・ 超音波速度で大きなバラツキを示す来待砂岩においても、比抵抗変化曲線は一致しており、試料間のバラツキが小さい。
- ・ 比抵抗変化曲線は稲田花崗岩を除いて、S波速度の変化曲線によく似ている。稲田花崗岩では両者は似ていない。むしろ、P波速度の変化曲線と正反対の傾向を示す。
- ・ 40%～100%ではほぼ一定値を示す。
- ・ 以上の知見よりすべての飽和度の範囲において含水量を推定することは困難と考えられる。

③比誘電率測定

- ・ 各岩種間、各試料間でのバラツキは超音波速度測定、比抵抗測定に比べて小さく、比誘電率の変化曲線は全含水範囲にわたってほぼ1つの直線式で近似できるので、含水量変化の指標としては今回用いた3物理量の中で最も有効と考えられる。
- ・ 今回用いた全試料についての比誘電率～体積含水率、比誘電率～飽和度の関係について見ると、飽和含水状態の測定値が一部直線から外れる他は良く近似できると言って良い。この傾向は昨年度の多胡砂岩の例と全く同じである。
- ・ 比誘電率の直線からのバラツキの程度は飽和状態で最大6程度に達することがあるものの、飽和状態以外ではおおむね1以内である。体積含水率にすると最大で0.05程度のバラツキと評価される。
- ・ 稲田花崗岩についても比誘電率～体積含水率、比誘電率～飽和度の間に直線関係は認められるものの、体積含水率は飽和状態でも0.01と小さいので比誘電率の含水量による変化量も最大1程度と小さい。
- ・ 飽和状態で比誘電率が直線から上方に外れる傾向は今回も明瞭に認められた。この原因は現時点では不明である。

(3) TDR波形の読み取り誤差

TDR波形上でロッド先端からの反射波の立ち上がり点の読み取り値は、読み取りのための接線の引き方によって多少誤差を含むが、今回の場合TDR表示値にして最大でも0.5cm程度であると考えられる。

TDR表示値から比誘電率を求める場合の誤差の伝播式は次式で与えられる。

$$\Delta \epsilon = 2 (L/L_0) \cdot (\Delta L/L_0)$$

ここで $\Delta \epsilon$: 比誘電率の誤差 [—]

ΔL : TDR表示値の読み取り誤差 [L]

L : 真の TDR 表示値の読み取り値 [L]

L0 : ロッド長 [L]

TDR 表示値 L=23cm (比誘電率 5.29 相当) であった場合、ロッド長 L0=10cm であるので比誘電率の計算誤差 $\Delta \epsilon$ は次のように見積られる。

$$\Delta \epsilon = 2 (23/10) \cdot (0.5/10) = 0.23$$

従って、比誘電率の計算誤差はおおむね 0.3 程度以下と考えて良いと思われる。仮に $\epsilon = 5.29 \pm 0.3$ で、全岩種統一の比誘電率と体積含水率の回帰直線 (図 3.3-7、 $\epsilon = 4.5872 + 30.116 \theta_v$) を用いて、体積含水率を推定すると $\theta_v = 0.0233 \pm 0.0100$ となる。すなわち、0.5cm の TDR 表示長さの読み取り誤差は比誘電率の誤差 $\Delta \epsilon = 0.3$ 以下 (相対誤差 $0.3/5.29 = 5.7\%$)、推定される体積含水率の誤差 $\Delta \theta_v = 0.01$ (相対誤差 $0.01/0.0233 = 42.9\%$) を発生させることを見積もることができる。

また、TDR 表示値 L=35cm (比誘電率 12.25 相当) であった場合、比誘電率の計算誤差は次のように見積られる。

$$\Delta \epsilon = 2 (35/10) \cdot (0.5/10) = 0.35$$

仮に $\epsilon = 12.25 \pm 0.35$ で、上記回帰直線を用いて体積含水率を推定すると $\theta_v = 0.254 \pm 0.012$ となる。すなわち、0.5cm の TDR 表示長さの読み取り誤差による比誘電率の誤差は $\Delta \epsilon = 0.35$ (相対誤差 2.9%)、推定される体積含水率の誤差は $\Delta \theta_v = 0.012$ (相対誤差 4.7%) となる。

(4) 電磁波の減衰

TDR を実際の地山で用いる場合にどの程度の深度まで測定が可能かを予備的に検討する。

平面電磁波が媒質中を伝播する時の減衰式は次式で表すことが出来る。

$$A_r = A_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot r) \dots\dots\dots (3.4.1)$$

ここに A_r : 距離 r での受信振幅

A_0 : 発信振幅

α : 減衰定数 (1/m)

r : 伝播距離 (m)

減衰定数 α は角周波数 ω によって変わり、次のように表せる。

$$\alpha = \omega \left[\frac{\epsilon \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

岩盤のように電気伝導度が小さく、TDR のように電磁波の周波数が高い場合には

$\sigma / \omega \epsilon \ll 1$ となり

$$\alpha = 60 \pi \sigma / \sqrt{\epsilon_r} \dots\dots\dots (3.4.2)$$

$$\alpha = 60\pi / \rho \sqrt{\epsilon_r}$$

のように表せる。

ここに ω : 電磁波の角周波数 ($2\pi f$, f は周波数)

ϵ : 媒質の絶対誘電率 (F/m)

μ : 媒質の絶対透磁率 (H/m)

σ : 媒質の導電率 (S/m、比抵抗 ρ の逆数)

ϵ_r : 媒質の比誘電率 (無次元)

従って、岩盤中を伝播する平面電磁波の減衰係数 α は岩盤の比抵抗 ρ と比誘電率 ϵ_r の平方根に逆比例することがわかる。電磁波は x m 進むごとに $\exp(-\alpha \cdot x)$ 程、振幅が減衰をする。反射波はその2乗倍、すなわち $\exp(-2\alpha \cdot x)$ 減衰することになる。

一般的な岩盤を例にとって比抵抗 ρ を $500 \Omega \cdot m$ 、比誘電率を10と仮定した時の電磁波の反射波の振幅の減衰程度を図3.3-8に示す。

測定器とロッド間のケーブルは同軸ケーブルを使用するので、装置の性能上振幅の減衰は500m程度までは問題としなくて良い。TDRの場合2本のロッド間を伝播する電磁波を利用しており、厳密な意味では平面電磁波ではないと考えられるが、上記の検討結果を参考にすれば、代表的な岩盤中でのTDR測定は5m程度までのロッド長さを目安としておくのが良いと考えられる(振幅の減衰程度1/3を波形の読み取り限界と仮定した)。

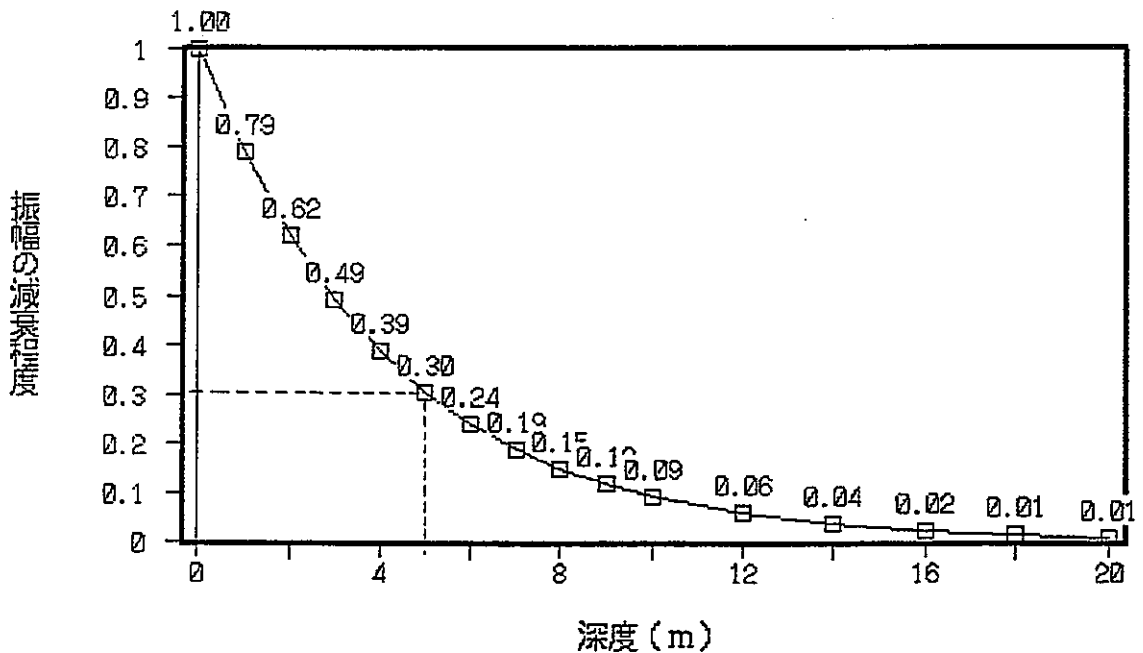


図3.3-8 平面電磁波の反射波の減衰曲線 (入射波を1として)

3. 4 今年度の成果と課題

3. 4. 1 今年度の成果

①来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩、稲田花崗岩の4岩種、各2試料づつについて含水量による超音波速度、比抵抗、比誘電率の変化を測定し、それぞれの変化の特徴を調べた。

②超音波速度の変化の特徴は来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩についてはほぼ共通しており、P波速度は上に凹な変化曲線を、S波速度は高含水状態ではほぼ一定であるが低含水状態で含水量の減少に伴い急激に増加する傾向を示す。稲田花崗岩については他の堆積岩試料とは全く異なる変化様式を示し、P波については右上がりの曲線を、S波については高含水状態で右上がり、低含水状態はほぼ一定の変化を示した。

③速度の変化量は岩種によって異なるが、飽和含水状態を基準にするとおおむねP波で13~35%、S波で19~62%である。比較的粗粒な来待砂岩と白河熔結凝灰岩では試料間のバラツキが目立った。また、岩種間での速度変化曲線のバラツキは大きい。

④比抵抗の変化の特徴は全試料についてはほぼ同じであり、高含水状態ではほぼ一定、飽和度20~40%程度以下の低含水状態になると含水量の減少に伴い急激に増加する傾向を示した。稲田花崗岩については比抵抗が増加する点は他の試料より高い飽和度側にある。比抵抗がそれまでの一定値から増加し始める含水量は超音波速度の変化に特徴があらわれる含水量とほぼ同じかやや乾燥側にあり、両者の間に密接な関連性があることを示唆している。

比抵抗変化曲線の傾向は稲田花崗岩を除く他の岩石試料（多胡砂岩を含む）ではS波速度の変化曲線に良く似ている。稲田花崗岩においては両者は似ていず、むしろP波速度変化曲線と正反対の傾向を示している。同一岩種の試料間のバラツキは顕著ではない。

⑤比誘電率の変化については、含水量の減少に伴い比誘電率がほぼ直線的に減少する傾向が全試料に共通して認められた。飽和状態のデータはほぼ全部が直線から外れる傾向を示した。今年度はケラチンクリームを使用しなかったにも関わらず、昨年度と同様の傾向が認められた。

異なる岩種・試料間でのバラツキは小さく、次に示す全岩種共通の直線式を求めることができる。

$$\epsilon = 30.116 \theta v + 4.5872$$

ϵ : 比誘電率

$$R^2 = 0.9106$$

θv : 体積含水率

⑥含水量測定の見点から検討すると、比誘電率測定が最も精度良く含水量を推定することができると思われる。推定精度は全岩種共通の推定式を用いた場合で体積含水率にして最大幅0.05程度と評価されるが、岩種を固定した場合の推定精度はもっと向上するであろう。

超音波速度、比抵抗についてもそれぞれ含水量に対して特徴的な変化を示すことから、含水量推定の補助指標として用いることが有効と考えられる。

⑦岩種別に超音波速度、比抵抗、比誘電率の変化傾向を表3.4-1にまとめて示す。

表3.4-1 含水量変化に伴う物理量変化の特徴

岩石試料	有効間隙率(%)	超音波伝播速度	比抵抗	比誘電率
来待砂岩	21.3~21.7	<ul style="list-style-type: none"> ・ P波は中央部で上に凹な変化曲線を示す。 ・ S波は高含水状態で一定低含水状態で増加する。 ・ 試料によるバラツキ有り。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高含水状態で一定 ・ 飽和度40%以下の低含水状態で急増 ・ 試料によるバラツキは少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 含水状態に対して直線の関係。 ・ 飽和状態で直線から外れる。
白浜砂岩	12.3~13.6	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 試料によるバラツキは少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 飽和度20%以下で急上昇 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ
白河熔結凝灰岩	23.9~24.7	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 試料によるばらつきは少しあり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 白浜砂岩に同じ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 低含水状態でも直線からの外れが認められる。
稲田花崗岩	0.86~1.06	<ul style="list-style-type: none"> ・ P波は単調減少の変化を示す。 ・ S波は高含水状態で減少、低含水状態では一定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的高飽和度で増加を始める傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 含水状態に対して直線関係。
全 体		<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ大 ・ 1対1の対応でないものもある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ中。 ・ 飽和度40~100%ではほぼ一定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ小。 ・ 含水量により有意な変化を示す。

⑧ TDRプローブの設置方法

予備試験の結果次のことが明らかとなった。

・電磁波の影響範囲

電磁波の影響範囲はかなり狭い範囲であり、計測孔の軸方向では孔底より2～3 cm程度（孔間隔の0.7～1.0倍）で、また、周囲方向ではロッド3本の場合、影響範囲は両側ロッドの間隔の1.4倍程度である。

・ロッド長、径、本数

ロッド長、径および本数について、さほど明瞭ではないものの、ロッドはある程度以上長く、細く、わずかではあるが2本より3本の方が測定に有利な傾向が認められた。

・ロッドの設置方法

ロッド設置方法は測定結果に大きく影響する。ロッド周囲の隙間がないように計測孔径と同サイズのロッドを直接に計測孔に打ち込むことが理想的である。ただし、原位置での設置を想定すると特に空洞からの設置深度が大きくなると、その作業が困難になると推測できる。

・ケラチンクリームの影響

ロッド周囲の隙間を充填するためのケラチンクリームの影響は波形の立ち上がりが鈍くなり、反射位置も変化する傾向として認められた。従って、ケラチンクリームはない方が良い。

3. 4. 2 課題

- ①室内試験の測定方法については、昨年度と今年度の実験によってほぼ方法が確立しつつあると考えられるが、原位置試験への展開については実施方法をはじめとして今後の課題である。
- ②現在までの室内試験はインタクトな岩石試料を用いたものであり、原位置への適用にあたっては亀裂の影響、不均質性の影響等を考慮する必要があると考えられる。
- ③本研究の目的は不飽和領域の計測手法の開発を目的としており、含水状態による物理量の変化のメカニズムを解明することではない。しかし、今回得られた同一試料による複数の物理量の変化特性データ間には関連性が認められ、このようなデータはほとんど知られていないことから将来貴重なデータになるものと考えられる。
- ④今回のような室内試験は大変手間と時間がかかる試験である。しかし、本研究を含め今後より詳細な岩盤特性を調べる必要性が増えると考えられるので、自動化測定の方角性を検討する必要がある。
- ⑤同一岩種でも試料間のバラツキ等を考えると、単独の測定値を基に含水量を予測することは精度的に問題がある。従って、比較的長期にわたるモニタリング測定によって岩盤特性の履歴を把握することで含水状態の変化を推定することが望ましいと考えられる。

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 今年度の成果

本年度は不飽和メカニズムの基礎研究として

- (1) 湿度センサーによる蒸発量測定精度の検討
- (2) 均質な岩石試料を用いてのvan-Genuchten式のパラメータの同定
- (3) VG式のパラメータのばらつきの解析結果に与える影響検討
- (4) 既存手法を用いた水分特性曲線・相対透水係数の把握

を実施した。上記計測・解析・検討を通じて得られた成果は以下のとおりである。

- ① コア上端では水蒸気の3次元的な拡散が生じている。このため ϕ 50mmのコアに対しては1次元の拡散を仮定する場合に比較して1.5倍程度の蒸発量が多くなることが実験・解析を通じて明らかにされた。
- ② 上記のコア上端において、約4cmの障壁をコア周辺に設置することで3次元的な拡散の影響を除去できることが確認された。
- ③ ほぼ均質な岩石を用いて蒸発量計測と体積含水率の分布からVG式のパラメータを同定した結果、同じ体積含水率に対するサクシオンや相対透水係数は大きい場合で約2オーダーの違いが生じた。
- ④ 上記VG式のパラメータのばらつきは、坑道周辺の不飽和領域を解析的に予測する際の解析結果に不飽和領域が発生する場合、発生しない場合などの違いを生じる影響を与えることが確認された。また今回の解析では、不飽和領域が発生する場合でその範囲は壁面から数m～十数mであった。
- ⑤ 土壌の水分特性を計測する土柱法、加圧板法が岩石にも適用しうること、さらにより大きいサクシオンに対してはサイクロメータを用いた計測を適用しそれらを合わせて整合性のあると考えられる水分特性曲線が得られることが確認された。
- ⑥ 水分特性曲線から得られる相対透水係数よりも、岩石内の水分フラックスを蒸発として計測した場合得られる相対透水係数は数オーダー大きくなると考えられ、このような場合VG式の適用は難しいものと考えられた。
- ⑦ 上記事項および飽和透水係数が数オーダー異なる試料に対しても蒸発量は同オーダーである計測結果から、岩石内の水分フラックスには岩石空隙内部の水蒸気（気相）としての水分移動が存在すると推察された。

4. 1. 2 今後の課題

本年度の不飽和メカニズムの基礎研究を通じて挙げられる今後の課題は以下のとおりである。

- ① 今後岩石の不飽和特性を把握していく手段としては、2通りのアプローチが考えられる。(a)岩石空隙内部の水分フラックスを液相・気相に分離して取り扱う方法、(b)液相・気相を一括して水分フラックスと捉え、水分特性曲線と独立した水分フラックスの評価方法(モデル)を開発していく方法ことである。限られた時間の中ではいずれかを選択していく必要がある。
- ② 昨年度、今年度実施した体積含水率分布の解析は実測値と十分マッチしているとは言い難い。これに対して、上記(a)あるいは(b)のアプローチにて適切なモデル化の方法を検討しておく必要がある。
- ③ 現在までの計測は、室内規模コアレベルの小さいスケールのものであり、より原位置規模に近い適応性の検討が望まれる。
- ④ 実際の岩盤内の不飽和状態を考慮すると、亀裂が不飽和領域にどのように関与しているのかを明らかにしておく必要性が挙げられる。

4. 1. 3 来年度研究の提案

本研究は、坑道周辺に形成されると考えられている不飽和領域を解析的に予測する手法を開発・確立することを目的としている。今後の研究の方向としては、今年度までの成果、今年度の課題を踏まえ以下の検討を提案する。

本年度の検討から、従来の飽和不飽和浸透流解析に順じて岩石に対する不飽和特性のモデル化の開発を行う際、不飽和特性の水分特性曲線と相対透水係数は独立なものとしてモデル化を行うと現実的解が得られる可能性が示唆された。この知見を受け、本年度は不飽和特性の水分特性曲線と相対透水係数は独立なものとして既存のモデルを中心にその適用性の検討を実施し、岩石に対し適用性のある不飽和特性モデルの選出、開発を行う。

適用性の判定は、94年度、95年度に実施した多胡砂岩白浜砂岩を対象に既存の計測データを用いて検討する。検討は水分量やサクション、フラックスの関係の整合性の観点で進める。

上記検討にて少なくとも室内試験レベルで岩石に対し適用性のある不飽和特性モデルの選出、開発およびその検証を行う。

4. 2 不飽和領域の計測手法に関する基礎研究のまとめ

4. 2. 1 成果

- ①来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩、稲田花崗岩の4岩種、各2試料づつについて含水量による超音波速度、比抵抗、比誘電率の変化を測定し、それぞれの変化の特徴を調べた。
 - ②超音波速度の変化の特徴は来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩についてはほぼ共通しており、P波速度は上に凹な変化曲線を、S波速度は高含水状態ではほぼ一定であるが低含水状態で含水量の減少に伴い急激に増加する傾向を示す。稲田花崗岩については他の堆積岩試料とは全く異なる変化様式を示し、P波については右上がりの曲線を、S波については高含水状態で右上がり、低含水状態はほぼ一定の変化を示した。
 - ③速度の変化量は岩種によって異なるが、飽和含水状態を基準にするとおおむねP波で13~35%、S波で19~62%である。比較的粗粒な来待砂岩と白河熔結凝灰岩では試料間のバラツキが目立った。また、岩種間での速度変化曲線のバラツキは大きい。
 - ④比抵抗の変化の特徴は全試料についてほぼ同じであり、高含水状態ではほぼ一定、飽和度20~40%程度以下の低含水状態になると含水量の減少に伴い急激に増加する傾向を示した。稲田花崗岩については比抵抗が増加する点は他の試料より高い飽和度側にある。比抵抗がそれまでの一定値から増加し始める含水量は超音波速度の変化に特徴があらわれる含水量とほぼ同じかやや乾燥側にあり、両者の間に密接な関連性があることを示唆している。
- 比抵抗変化曲線の傾向は稲田花崗岩を除く他の岩石試料（多胡砂岩を含む）ではS波速度の変化曲線によく似ている。稲田花崗岩においては両者は似ていず、むしろP波速度変化曲線と正反対の傾向を示している。同一岩種の試料間のバラツキは顕著ではない。
- ⑤比誘電率の変化については、含水量の減少に伴い比誘電率がほぼ直線的に減少する傾向が全試料に共通して認められた。飽和状態のデータはほぼ全部が直線から外れる傾向を示した。今年度はケラチンクリームを使用しなかったにも関わらず、昨年度と同様の傾向が認められた。

異なる岩種・試料間でのバラツキは小さく、次に示す全岩種共通の直線式を求めることができる。

$$\begin{aligned}\epsilon &= 30.116 \theta v + 4.5872 & \epsilon &: \text{比誘電率} \\ R^2 &= 0.9106 & \theta v &: \text{体積含水率}\end{aligned}$$

- ⑥含水量測定の観点から検討すると、比誘電率測定が最も精度良く含水量を推定することができると考えられる。推定精度は全岩種共通の推定式を用いた場合で体積含水率にして最大幅0.05程度と評価されるが、岩種を固定した場合の推定精度はもっと向上するであろう。

超音波速度、比抵抗についてもそれぞれ含水量に対して特徴的な変化を示すことから、含水量推定の補助指標として用いることが有効と考えられる。

⑦岩種別に超音波速度、比抵抗、比誘電率の変化傾向を表3.4-1にまとめて示す。

表4.2-1 含水量変化に伴う物理量変化の特徴

岩石試料	有効間隙率(%)	超音波伝播速度	比抵抗	比誘電率
来待砂岩	21.3~21.7	<ul style="list-style-type: none"> ・ P波は中央部で上に凹な変化曲線を示す。 ・ S波は高含水状態で一定低含水状態で増加する。 ・ 試料によるバラツキ有り。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高含水状態で一定 ・ 飽和度40%以下の低含水状態で急増 ・ 試料によるバラツキは少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 含水状態に対して直線関係。 ・ 飽和状態で直線から外れる。
白浜砂岩	12.3~13.6	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 試料によるバラツキは少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 飽和度20%以下で急上昇 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ
白河熔結凝灰岩	23.9~24.7	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 試料によるばらつきは少しあり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 白浜砂岩に同じ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 来待砂岩に同じ ・ 低含水状態でも直線からの外れが認められる。
稲田花崗岩	0.86~1.06	<ul style="list-style-type: none"> ・ P波は単調減少の変化を示す。 ・ S波は高含水状態で減少、低含水状態では一定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的高飽和度で増加を始める傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 含水状態に対して直線関係。
全 体		<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ大 ・ 1対1の対応でないものもある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ中。 ・ 飽和度40~100%ではほぼ一定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種間のバラツキ小。 ・ 含水量により有意な変化を示す。

⑧TDRプローブの設置方法

予備試験の結果次のことが明らかとなった。

- ・電磁波の影響範囲

電磁波の影響範囲はかなり狭い範囲であり、計測孔の軸方向では孔底より2～3 cm程度（孔間隔の0.7～1.0倍）で、また、周囲方向ではロッド3本の場合、影響範囲は両側ロッドの間隔の1.4倍程度である。

- ・ロッド長、径、本数

ロッド長、径および本数について、さほど明瞭ではないものの、ロッドはある程度以上長く、細く、わずかではあるが2本より3本の方が測定に有利な傾向が認められた。

- ・ロッドの設置方法

ロッド設置方法は測定結果に大きく影響する。ロッド周囲の隙間がないように計測孔径と同サイズのロッドを直接に計測孔に打ち込むことが理想的である。ただし、原位置での設置を想定すると特に空洞からの設置深度が大きくなると、その作業が困難になると推測できる。

- ・ケラチンクリームの影響

ロッド周囲の隙間を充填するためのケラチンクリームの影響は波形の立ち上がりが鈍くなり、反射位置も変化する傾向として認められた。従って、ケラチンクリームはない方が良い。

4. 2. 2 課題

- ①室内試験の測定方法については、昨年度と今年度の実験によってほぼ方法が確立しつつあると考えられるが、原位置試験への展開については実施方法をはじめとして今後の課題である。
- ②現在までの室内試験はインタクトな岩石試料を用いたものであり、原位置への適用にあたっては亀裂の影響、不均質性の影響等を考慮する必要があると考えられる。
- ③本研究の目的は不飽和領域の計測手法の開発を目的としており、含水状態による物理量の変化のメカニズムを解明することではない。しかし、今回得られた同一試料による複数の物理量の変化特性データ間には関連性が認められ、このようなデータはほとんど知られていないことから将来貴重なデータになるものと考えられる。
- ④今回のような室内試験は大変手間と時間がかかる試験である。しかし、本研究を含め今後より詳細な岩盤特性を調べる必要性が増えると考えられるので、自動化測定の方角性を検討する必要性がある。
- ⑤同一岩種でも試料間のバラツキ等を考えると、単独の測定値を基に含水量を予測することは精度的に問題がある。従って、比較的長期にわたるモニタリング測定によって岩盤特性の履歴を把握することで含水状態の変化を推定することが望ましいと考えられる。

4. 2. 3 来年度研究の提案

昨年度と今年度の室内試験によって岩石試料の含水量推定の指標として比誘電率が最も有望であり、超音波速度、比抵抗についても補足的な指標として組み合わせることでより高精度化が計れる可能性があることがわかった。

そこで、来年度はTDRに目標を絞ってフィールドで適用するための実験を提案する。

①原位置での測定方法については次のような方法が考えられる。

- ・孔径の大きなボーリング孔を深度を変えて複数ヶ所掘削し、その孔底から小孔径の測定孔を数10cm掘孔する方法。
- ・測定孔を1カ所とし、測定ロッドの中段に反射波が生じるような節をつける方法。
- ・含水量のコントロールがし易い模擬岩盤を室内あるいは屋外に設けて測定実験をする方法。

②最初の原位置試験は測定孔が削孔し易く、有効孔隙率の大きな堆積岩での実施が望ましい。

③原位置の岩盤を扱う場合には、室内試験と異なり次のような要因の影響を考慮する必要があることに留意する。

- ・岩盤のゆるみ
- ・亀裂
- ・異方性
- ・不均質性

④併せて、原位置で採取した岩石試料の室内試験も必要である。

⑤計測機器の開発は原位置実験後、もしくは並行して実施の必要がある。