

# 緩衝材の飽和透水特性-Ⅱ

- 海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -

( 試験報告 )

2003 年 3 月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)  
ファックス:029-282-7980  
電子メール:jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2003

緩衝材の飽和透水特性-II  
- 海水系地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -  
(試験報告)

菊池広人\*\*，棚井憲治\*，松本一浩\*\*，佐藤治夫\*，上野健一\*，鐵剛志\*\*

要 旨

核燃料サイクル開発機構（以下，サイクル機構）では，「第2次取りまとめ」までに地層処分場における人工バリア，地下施設の設計および性能評価に資するため，圧縮ベントナイトの基本特性について降水系地下水（蒸留水で模擬）を想定したデータの拡充を行ってきた。

本報告書においては，これまでに得られた成果を踏まえ，実際の地質環境下を考慮したこれまでにデータがほとんど得られていない海水系地下水条件下における圧縮ベントナイトの水理特性を把握するため，熱（温度）や塩濃度の影響に関するデータを拡充するとともに，これら関係式の一般化を行った。また，海水系地下水（人工海水で模擬）が緩衝材の透水係数に及ぼす影響について報告する。

試験の結果，透水係数は温度の上昇に伴い大きくなることが分かった。また，透水係数の温度依存性を確認するため，多孔質体の透過抵抗を表す固有透過度を用いて整理を行い，次のように関係式の一般化を図った。

$$k = \exp(-47.155 + 15.138 r_b - 7.878 r_b^2)$$

ここで， $k$  [ $m^2$ ]は固有透過度， $r_b$  [ $Mg/m^3$ ]は有効粘土密度である。

「第2次取りまとめ」までに取得された降水系データと海水系データを比較すると降水系に比べ，1桁程度透水係数が大きくなった。また，乾燥密度が低密度から高密度になるに従って，透水係数は降水系データに近づく傾向があることが分かった。この要因のひとつとして，土壌学的に研究がなされている微細構造の変化が考えられることから，圧縮ベントナイト中のスメクタイト層間距離の測定を行ったが，顕著な変化は見られなかった。

---

\* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

\*\* 検査開発株式会社

## Hydraulic characteristics of Buffer Material-II

- The influence which saline water exert on hydraulic properties of bentonite buffer material -  
(Testing Document)

Hirohito KIKUCHI\*\*, Kenji TANAI\*, Kazuhiro MATSUMOTO\*\*,  
Haruo SATOU\*, Kenichi UENO\*, and Takeshi TETSU\*

### Abstract

By the second progress report(H12) on research and development for the geological disposal of HLW in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) extended the database on basic properties of compacted bentonite, and this was mainly obtained by using distilled water as test fluid.

This report presents influence of dry densities, silica sand content and temperature on the hydraulic properties of compacted bentonite under condition of marine-based groundwater, which was simulated by use of synthesized seawater.

We found that hydraulic conductivity increases with increasing temperature, and the relationship between effective clay density and intrinsic permeability is obtained by the following equation.

$$k = \exp(-47.155 + 15.138 r_b - 7.878 r_b^2)$$

where  $k$  is intrinsic permeability[m<sup>2</sup>],  $r_b$  is effective clay density[Mg/m<sup>3</sup>].

Intrinsic permeability using synthetic seawater as test fluid is about ten times higher than that under distilled water condition.

Difference between them however becomes smaller with increasing dry density.

We also examined the smectite layers distance after test samples, but remarkable change was not found between them.

---

\* Barrier performance group, Waste isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

\*\* Inspection Development Corporation

## 目 次

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 1. はじめに                     | 1    |
| 2. 試験装置概要                   | 2    |
| 3. 試験手法                     | 2    |
| 3.1 試験手順                    | 2    |
| 3.2 試験後試料の取り扱い              | 3    |
| 4. 試験条件                     | 3    |
| 4.1 試験材料                    | 3    |
| 4.2 試験パラメータ                 | 5    |
| 5. 試験結果および考察                | 6    |
| 5.1 試験精度の確認                 | 6    |
| 5.2 透水係数の温度依存性              | 9    |
| 5.3 透水係数の温度依存性の検討           | 12   |
| 5.4 透水性に及ぼす人工海水の影響評価        | 17   |
| 5.4.1 試験条件                  | 19   |
| 5.4.2 試験結果および考察             | 21   |
| 6. まとめ                      | 25   |
| 7. おわりに                     | 26   |
| 8. 参考文献                     | 27   |
| Appendix (人工海水の密度および粘性係数測定) | 付(1) |

## 目 次

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 図 2-1  | 透水試験装置外略図   | 2  |
| 図 4-1  | クニゲル V1 粒度分布  | 4  |
| 図 4-2  | ケイ砂の粒径加積曲線  | 5  |
| 図 5-1  | 供試体構成要素   | 7  |
| 図 5-2  | 透水係数の温度依存性 (ベントナイト単体試料)                               | 11 |
| 図 5-3  | 透水係数の温度依存性 (ケイ砂混合体試料)                                 | 11 |
| 図 5-4  | 温度と固有透過度 (ベントナイト単体試料)                                 | 15 |
| 図 5-5  | 温度と固有透過度 (ケイ砂混合体試料)                                   | 15 |
| 図 5-6  | 乾燥密度と固有透過度の関係   | 16 |
| 図 5-7  | 有効粘度密度と固有透過度  | 16 |
| 図 5-8  | 透水係数の比較   | 18 |
| 図 5-9  | 団粒構造と構造単位の分類  | 18 |
| 図 5-10 | ベントナイトの構造概念図 [内部間隙 (層間) と外部間隙の定義]                     | 19 |
| 図 5-11 | 構造変化予想図 (a) 蒸留水系の一次構造 (パッケージ)                         | 19 |
| 図 5-11 | 構造変化予想図 (b) 人工海水系の一次構造 (パッケージ)                        | 19 |
| 図 5-12 | 水分拡散セル  | 20 |
| 図 5-13 | 押し出し治具  | 20 |
| 図 5-14 | 底面間隔の予備試験結果 (乾燥密度 $1.2[\text{Mg}/\text{m}^3]$ , 蒸留水)  | 23 |
| 図 5-15 | 底面間隔の予備試験結果 (乾燥密度 $1.2[\text{Mg}/\text{m}^3]$ , 人工海水) | 23 |
| 図 5-16 | 底面間隔測定結果 (供試体表面からの測定点 10mm)                           | 24 |

## 目 次

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 表 4-1 | クニゲル V1 の鉱物組成            | 3  |
| 表 4-2 | ケイ砂の化学組成                 | 4  |
| 表 4-3 | 試験条件                     | 6  |
| 表 4-4 | 人工海水の化学分析結果              | 6  |
|       |                          |    |
| 表 5-1 | 供試体状態量の測定結果              | 8  |
| 表 5-2 | 透水係数算出値                  | 10 |
| 表 5-3 | 人工海水の密度および粘性             |    |
| (1)   | 人工海水の密度                  | 12 |
| 表 5-3 | 人工海水の密度および粘性             |    |
| (2)   | 人工海水の粘性係数                | 12 |
| 表 5-4 | 固有透過度算出値                 | 14 |
| 表 5-5 | 試験条件                     | 20 |
| 表 5-6 | 測定条件 (X線回折装置設定)          | 21 |
| 表 5-7 | 回折ピークの定性結果               | 24 |
| 表 5-8 | 測定後の飽和度および乾燥密度の確認 (蒸留水)  | 25 |
| 表 5-9 | 測定後の飽和度および乾燥密度の確認 (人工海水) | 25 |

## 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、止水性、自己シール性、応力緩衝性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性などが長期にわたり維持されることが期待されている。これらの要求性能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイト（以下、圧縮ベントナイト）は、非常に低い透水性により水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨潤し、圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目を充填する機能、陽イオン核種を吸着する陽イオン交換能などを有しており、緩衝材として最も有力な材料であると考えられている。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、「第2次取りまとめ」（サイクル機構、1999）までに地層処分場における人工バリア、地下施設の設計および性能評価に資するため、圧縮ベントナイトの基本特性について降水系（蒸留水）を中心としたデータの拡充を行った。

本報告書においては、これまでに得られた成果を踏まえ、これまでにデータがほとんど得られていない海水性地下水条件下における圧縮ベントナイトの水理特性を把握するため、熱（温度）や塩濃度の影響に関するデータを拡充するとともに、これら関係式の一般化を行うことによって、国の安全審査基本指針の策定に必要となる基盤情報を整備することを目的とし、圧縮ベントナイト供試体の乾燥密度、ケイ砂混合率、試験温度をパラメータとして人工海水を用いた透水試験を実施するとともに、これらが緩衝材の透水係数に及ぼす影響について考察を行ったので報告する。

## 2 試験装置概要

一般に土を対象とした透水試験では、水頭圧を利用した定水位あるいは変水位透水試験装置が用いられる。高密度に圧縮成型したベントナイトは、極めて低透水性であるため、本試験では、図 2-1 に示すようなコンプレッサーの圧縮空気圧を利用した定水位型の透水試験装置（地盤工学会，1990）を用いた。

試験装置は以下に示すとおり、コンプレッサー（圧縮空気圧：0.1～0.7[MPa]）、加圧タンク（材質：透明アクリル）、恒温槽（温度範囲：20～110[ ]）、試験カラム（材質：SUS316）、電子天秤（測定精度：±0.01[g]）、から構成される。

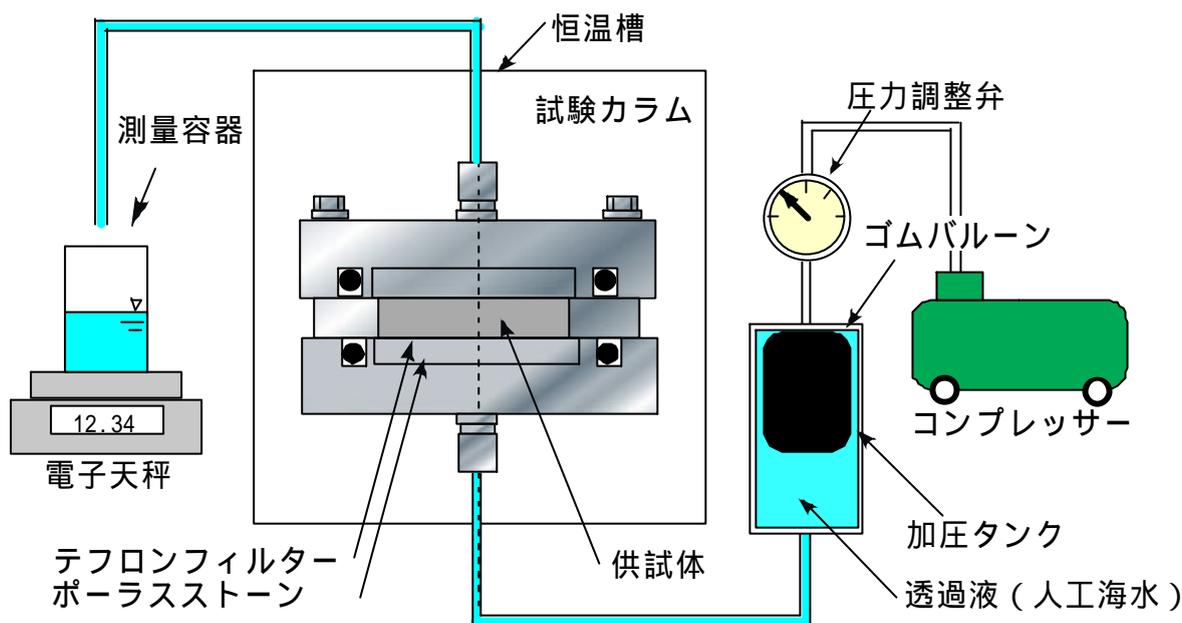


図 2-1 透水試験装置概略図

## 3 試験方法

### 3.1 試験手順

本試験は、所定の乾燥密度に圧縮成型したベントナイト供試体を透水試験カラムで拘束し、恒温槽内に設置する。恒温槽を所定の温度条件に設定し、コンプレッサーからゴムバルーンを介して加圧タンクへ圧縮空気を送り、ベントナイト供試体へ透過液を供給する。ベントナイト供試体の両端には、フィルターとしてポラスストーン（孔径 $2\mu\text{m}$ ）とテフロンフィルター（孔径 $1\mu\text{m}$ ）を置く。ポラスストーンは、透過液を分散させベントナイト供試体に均一に浸潤させるために用いる。また、テフロンフィルターは、ベントナイト粒子がポラスストーンに侵入し、目詰まりを起こすことを防ぐために用いた。透過液がベントナイトに浸潤し、ベントナイトが飽和すると、透過した液が測量容器に流れ、電子天秤にて時間当たりの透過量を測定する。

### 3.2 試験後試料の取り扱い

試験終了後には試験カラムを解体し、ベントナイト供試体に水みちとなるヒビ割れ等がないことを確認した後、土の含水比測定方法（地盤工学会，1990）に従って24時間110℃で炉乾燥して含水比の測定を行う。ベントナイト供試体の乾燥重量と拘束状態における供試体体積から実乾燥密度を求め、試験が所定の乾燥密度で行われたかを確認するとともに、炉乾燥で失われた水分量から含水比を求め、飽和度の確認を行う。

## 4 試験条件

### 4.1 試験材料

ベントナイトには、クニゲル V1（クニミネ工業製 山形県月布産 Na 型ベントナイト）を用いた。クニゲル V1 の鉱物組成（伊藤ほか，1993）を表 4-1 に、クニゲル V1 の粒径分布を図 4-1 に示す。

本測定においては、ふるい試験（日本ベントナイト工学会，1977）とピペット法（粘度ハンドブック，1987）で求めたベントナイトの粒径分布とレーザー回析式粒度分布測定装置（島津製作所製 測定方式：レーザー回析/散乱法，測定範囲：0.03～700 μm）による二方法によってベントナイト（クニゲル V1）の粒径分布測定を行った。

表 4-1 クニゲル V1 の鉱物組成

| 鉱物種    | 定量結果 [ wt% ] |           |
|--------|--------------|-----------|
| スメクタイト | 46～49        |           |
| 石英     | 29～38        | (0.5～0.7) |
| 玉髄     |              | (37～38)   |
| 斜長石    | 2.7～5.5      |           |
| 方解石    | 2.1～2.6      |           |
| 苦灰石    | 2.0～2.8      |           |
| 方沸石    | 3.0～3.5      |           |
| 黄鉄鉱    | 0.5～0.7      |           |

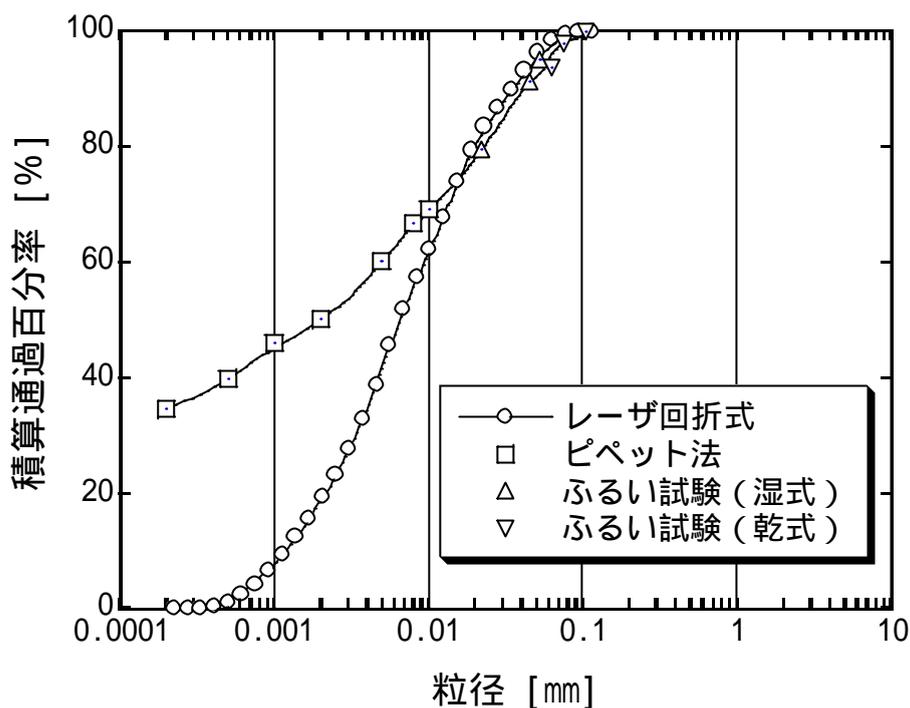


図 4-1 クニゲル V1 粒度分布

また、試験にはベントナイトクニゲル V1 とケイ砂を混合した試料（以下、ケイ砂混合体という）を用いた。使用したケイ砂においては、3号ケイ砂と5号ケイ砂を質量比 1 : 1 で混合したものをを用いた。ケイ砂の化学組成（佐藤ほか，1990）を表 4-2 に、粒径加積曲線を図 4-2 に示す。

表 4-2 ケイ砂の化学組成

| 成分 [wt%]                       | 3号ケイ砂 | 5号ケイ砂 |
|--------------------------------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 94.6  | 99.78 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.32  | 0.05  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.13  | 0.01  |
| TiO <sub>2</sub>               | -     | 0.03  |
| MgO                            | -     | <0.01 |
| Na <sub>2</sub> O              | -     | 0.01  |
| K <sub>2</sub> O               | -     | 0.01  |
| Ig. loss                       | -     | 0.12  |

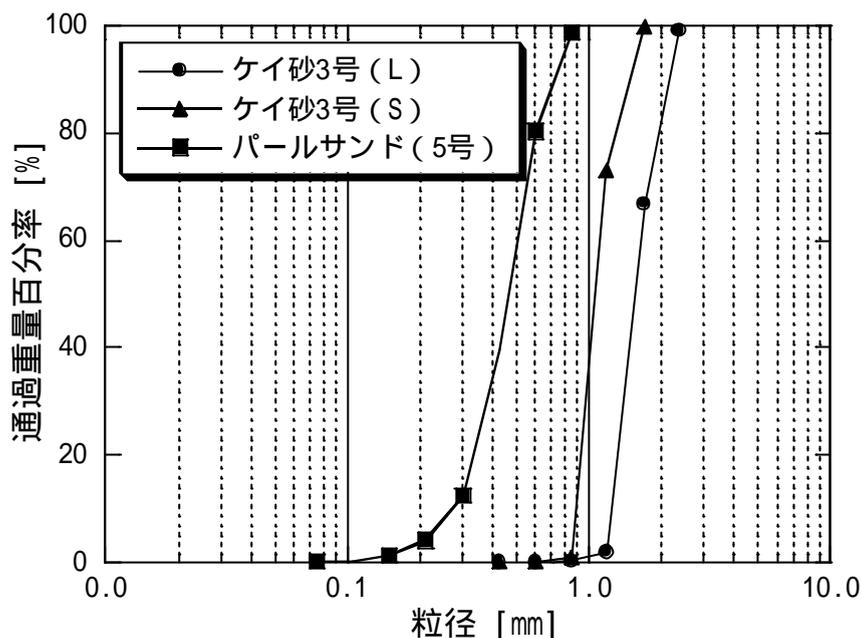


図 4-2 ケイ砂の粒径加積曲線

#### 4.2 試験パラメータ

試験条件を表 4-3 に示す。本試験においては、地層中に存在する海水の影響を調べるため、透過液として ASTM D-1141-98 基準で作製した人工海水を用いて透水試験を実施した。人工海水の化学分析結果を表 4-4 に示す。

試験温度は、性能評価上のベントナイトの熱変質を考慮して 100 以下に設定し、25～90 までの昇温過程と 90～25 までの降温過程において試験を行った。また、供試体厚さおよび供給水の供給圧力を供試体乾燥密度および供試体へのケイ砂混合率などによって調整した。高密度に圧縮成型した供試体については、極めて低透水性であるため、透過液量を確保（過少による測定誤差）する観点から供試体厚さを 5mm とし、供給圧力を大きくした。一方、低密度に圧縮成型した供試体については、逆に透過液量が過多になり透過液が測定容器をオーバーフローしてしまうことを防ぐため、供試体厚さを 10mm とし、供給圧力を小さくしてそれぞれ試験を行った。なお、黒澤らによるコロイド透過試験（黒澤ほか，2002）を実施した際、試験の途中で供試体への長期間の加圧給水が原因と思われるコロイドの破過が認められたという知見があることから、給水圧力においては、各密度に対して膨潤応力以下で圧力調整を行い、透過液を通水した。

表 4-3 試験条件

|                           | ベントナイト単体試料                 | ケイ砂混合体試料    |
|---------------------------|----------------------------|-------------|
| 試料                        | ベントナイト (クニゲル V1)           |             |
| 乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ] | 1.2、1.4、1.6、1.8            | 1.4、1.6、1.8 |
| ケイ砂混合率 [%]                | 0                          | 30          |
| 試験温度 [ ]                  | 25、60、90                   |             |
| 供試体寸法 [mm]                | 50 × h10、 50 × h5          |             |
| 供給圧力 [MPa]                | 0.1 ~ 0.5                  |             |
| 透過液                       | 人工海水 ( ASTM D-1141-98 基準 ) |             |

表 4-4 人工海水の化学分析結果

| 分析項目                          | 含有量[ppm] | 分析法             |
|-------------------------------|----------|-----------------|
| Cl <sup>-</sup>               | 19200    | JIS-K-0102 35.1 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 2740     | JIS-K-0102 41.2 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 140      | JIS-K-0102 25.2 |
| F <sup>-</sup>                | 1.2      | JIS-K-0102 34.1 |
| Br <sup>-</sup>               | 65       | JIS-K-0102 37.1 |
| BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> | 26       | JIS-K-0102 47.1 |
| Na <sup>+</sup>               | 10300    | JIS-K-0102 48.2 |
| K <sup>+</sup>                | 410      | JIS-K-0102 49.2 |
| Ca <sup>2+</sup>              | 420      | JIS-K-0102 50.2 |
| Mg <sup>2+</sup>              | 1310     | JIS-K-0102 51.2 |
| Sr <sup>2+</sup>              | 61       | 鉍泉試験法           |

人工海水のイオン強度：約 0.72 ( NaCl : 約 0.42 )

## 5 試験結果および考察

### 5.1 試験精度の確認

3.2 項に記したように、試験後の試料状態の確認を行った。

一般には、土質材料は図 5-1 に示すように供試体構成要素は ( 中野政詩, 1991 ), 固相・液相・気相で構成される。

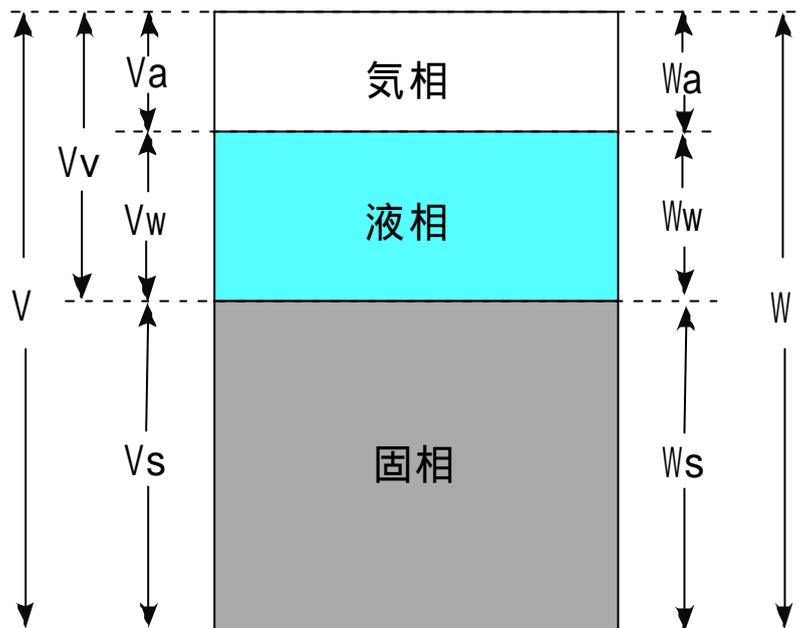


図 5-1 供試体構成要素

圧縮ベントナイトの構成要素をベントナイト粒子およびケイ砂からなる固相・液相・および気相の三要素に分けて考えると，供試体の含水比  $w$  [%]，乾燥密度  $r_d$  [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]， $n$  間隙率 [-]，飽和度  $S_r$  [%] の関係は次式 ((1) ~ (4)) のようになる。

ここで， $r_s$  [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ] はベントナイト（または，ベントナイトとケイ砂）の土粒子密度である。

$$\text{含水比} : w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{乾燥密度} : r_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$$\text{間隙率} : n = \frac{V_v}{V} = \left(1 - \frac{r_d}{r_s}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{飽和度} : S_r = \frac{V_w}{V_v} = \left(\frac{1}{0.01} - 1\right) \cdot w \cdot r_s \quad (4)$$

試験後の試料について，目視による水みちとなるようなひび割れがないことを確認し，上記に示す式より，試験後の実乾燥密度および飽和度を求めた。実乾燥密度および飽和度を表 5-1 に示す。その結果，試験前後における乾燥密度の変化は全ての試料において，所定乾燥密度の  $\pm 0.30 \text{Mg}/\text{m}^3$  未満であった。また，飽和度については，99 ~ 121% 程度の範囲であった。飽和度を求める過程で，ベントナイトの土粒子密度  $2.70 \text{Mg}/\text{m}^3$  を採用するが（鈴木ほか，1992），天然の粘土質岩を精製した粗製のバラツキから必ずしも土粒子密度は一定

の値を示すものではないため、飽和度は必ずしも 100%になる訳ではなく、その前後に分布する。また、ケイ砂の土粒子密度は、3号・5号ケイ砂（重量比 1：1）で  $2.682 \text{ Mg/m}^3$  を用いた（佐藤ほか，1990）が、ケイ砂もベントナイトと同様に土粒子密度のバラツキを考慮しておく必要がある。

表 5-1 供試体状態量の測定結果

|                          | 予定乾燥密度 $r_d$<br>[ $\text{Mg/m}^3$ ] | 含水比<br>$w$ [%] | 間隙率<br>$n$ [-] | 飽和度<br>$S_r$ [%] | 実乾燥密度 $r_d$<br>[ $\text{Mg/m}^3$ ] |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------------------------|
| ベントナイト<br>単体試料           | 1.2                                 | 48.14          | 55.29          | 105.10           | 1.207                              |
|                          |                                     | 48.09          | 55.05          | 106.03           | 1.214                              |
|                          |                                     | 44.86          | 54.88          | 99.58            | 1.218                              |
|                          | 1.4                                 | 34.40          | 48.01          | 100.56           | 1.404                              |
|                          |                                     | 37.55          | 48.11          | 109.36           | 1.401                              |
|                          |                                     | 35.42          | 47.86          | 104.17           | 1.408                              |
|                          | 1.6                                 | 27.33          | 39.81          | 111.56           | 1.625                              |
|                          |                                     | 26.76          | 39.81          | 109.26           | 1.625                              |
|                          |                                     | 27.42          | 39.73          | 112.28           | 1.627                              |
|                          | 1.8                                 | 22.51          | 33.64          | 119.90           | 1.792                              |
|                          |                                     | 22.01          | 33.23          | 119.41           | 1.803                              |
|                          |                                     | 22.48          | 33.28          | 121.65           | 1.801                              |
| ケイ砂<br>混合<br>体<br>試<br>料 | 1.4                                 | 33.11          | 47.23          | 99.21            | 1.415                              |
|                          |                                     | 33.71          | 46.77          | 102.90           | 1.428                              |
|                          |                                     | 33.90          | 46.68          | 103.87           | 1.430                              |
|                          | 1.6                                 | 27.55          | 40.51          | 108.51           | 1.596                              |
|                          |                                     | 26.74          | 40.13          | 107.51           | 1.606                              |
|                          |                                     | 26.54          | 40.03          | 106.61           | 1.608                              |
|                          | 1.8                                 | 19.45          | 33.36          | 104.89           | 1.799                              |
|                          |                                     | 19.64          | 33.17          | 106.87           | 1.804                              |
|                          |                                     | 20.53          | 33.68          | 109.18           | 1.791                              |

## 5.2 透水係数の温度依存性

土壌中の水の動きは、一般に Darcy の法則に従うといわれており、次式で表される。ここで、 $Q$  [m<sup>3</sup>/s]は透過液流量、 $k$  [m/s]は透水係数、 $A$  [m<sup>2</sup>]は供試体断面積、 $i$  [-]は動水勾配を表す。

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad (5)$$

透過液流量 $Q$ は、電子天秤によって計測される積算透過液流量と経時時間の関係から、時間当たりの透過液量が一定とみなせる範囲において、最小自乗法による直線の傾きから求める。(5)式を用いて得られた透水係数算出値を表 5-2 に示す。また、温度と透水係数の関係を図 5-2、5-3 に示す。

グラフの横軸は、今回の試験の最高温度である 90 を中心に、25~90 の昇温過程と、90~25 の降温過程を表している。図 5-2、5-3 に示す測定結果から昇降温過程における同一温度での透水係数は、多少バラツキが見られる。このバラツキの原因としては、透過量の過少による測定誤差によるものであると考えられるが、ほぼ妥当な値が得られていると推察される。

温度と透水係数の関係からは、いずれの条件においても、昇温過程と降温過程における同一温度での透水係数はほぼ同程度の値を示し、透水係数の温度の上昇に伴い大きくなることが分かる。

また、ベントナイト単体試料とケイ砂混合体を比較すると、ベントナイト単体試料の透水係数は、乾燥密度 1.2~1.8[Mg/m<sup>3</sup>]までの範囲において約 2 桁程度の差が生じるが、ケイ砂を混合することによって透水係数に及ぼす乾燥密度の影響は小さくなることが分かる。

上記結果から、透水係数は温度による影響および供試体の乾燥密度とベントナイト含有量に依存して変化することが分かった。

表 5-2 透水係数算出値

| 温度<br>[ ] |    | 透水係数[m <sup>3</sup> /s]  |          |          |          |                          |          |           |
|-----------|----|--------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|-----------|
|           |    | ベントナイト単体                 |          |          |          | ケイ砂混合体試料                 |          |           |
|           |    | 乾燥密度[Mg/m <sup>3</sup> ] |          |          |          | 乾燥密度[Mg/m <sup>3</sup> ] |          |           |
|           |    | 1.2                      | 1.4      | 1.6      | 1.8      | 1.4                      | 1.6      | 1.8       |
| 昇温過程      | 25 | 4.23E-11                 | 1.33E-11 | 1.39E-12 | 2.24E-13 | 4.52E-11                 | 1.62E-11 | 2.11 E-12 |
|           |    | 3.79E-11                 | 1.66E-11 | 1.30E-12 | 2.18E-13 | 4.35E-11                 | 1.42E-11 | 2.24 E-12 |
|           |    | 4.97E-11                 | 1.54E-11 | 1.21E-12 | 2.51E-13 | 4.31E-11                 | 1.54E-11 | 2.38 E-12 |
|           | 60 | 5.69E-11                 | 2.29E-11 | 2.94E-12 | 4.56E-13 | 6.22E-11                 | 3.01E-11 | 4.34 E-12 |
|           |    | 5.29E-11                 | 2.15E-11 | 2.48E-12 | 4.48E-13 | 6.47E-11                 | 2.88E-11 | 4.48 E-12 |
|           |    | 6.39E-11                 | 2.56E-11 | 2.67E-12 | 4.67E-13 | 6.14E-11                 | 2.93E-11 | 4.67 E-12 |
|           | 90 | 7.15E-11                 | 3.22E-11 | 4.00E-12 | 6.00E-13 | 7.80E-11                 | 4.20E-11 | 6.20 E-12 |
|           |    | 6.35E-11                 | 3.22E-11 | 4.79E-12 | 6.74E-13 | 1.70E-10                 | 4.26E-11 | 6.44 E-12 |
|           |    | 7.67E-11                 | 3.22E-11 | 4.09E-12 | 6.09E-13 | 7.28E-11                 | 3.99E-11 | 6.50 E-12 |
| 降温過程      | 60 | 5.70E-11                 | 2.30E-11 | 2.69E-12 | 4.69E-13 | 6.22E-11                 | 3.01E-11 | 4.31 E-12 |
|           |    | 5.32E-11                 | 2.25E-11 | 2.38E-12 | 4.28E-13 | 6.47E-11                 | 2.91E-11 | 4.48 E-12 |
|           |    | 6.44E-11                 | 2.67E-11 | 1.67E-12 | 4.62E-13 | 6.14E-11                 | 2.93E-11 | 4.69 E-12 |
|           | 25 | 4.33E-11                 | 1.37E-11 | 1.67E-12 | 2.67E-13 | 4.51E-11                 | 1.49E-11 | 2.18 E-12 |
|           |    | 3.80E-11                 | 1.71E-11 | 1.80E-12 | 2.80E-13 | 4.36E-11                 | 1.45E-11 | 2.24 E-12 |
|           |    | 5.00E-11                 | 1.54E-11 | 1.61E-12 | 2.61E-13 | 4.34E-11                 | 1.36E-11 | 2.38 E-12 |

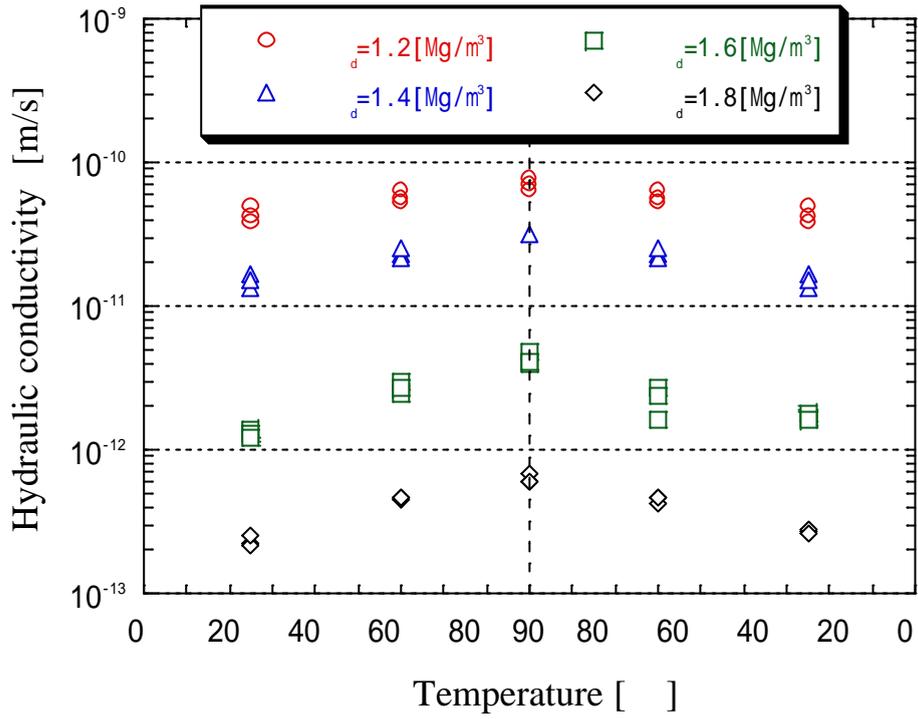


図 5-2 透水係数の温度依存性 (ベントナイト単体試料)

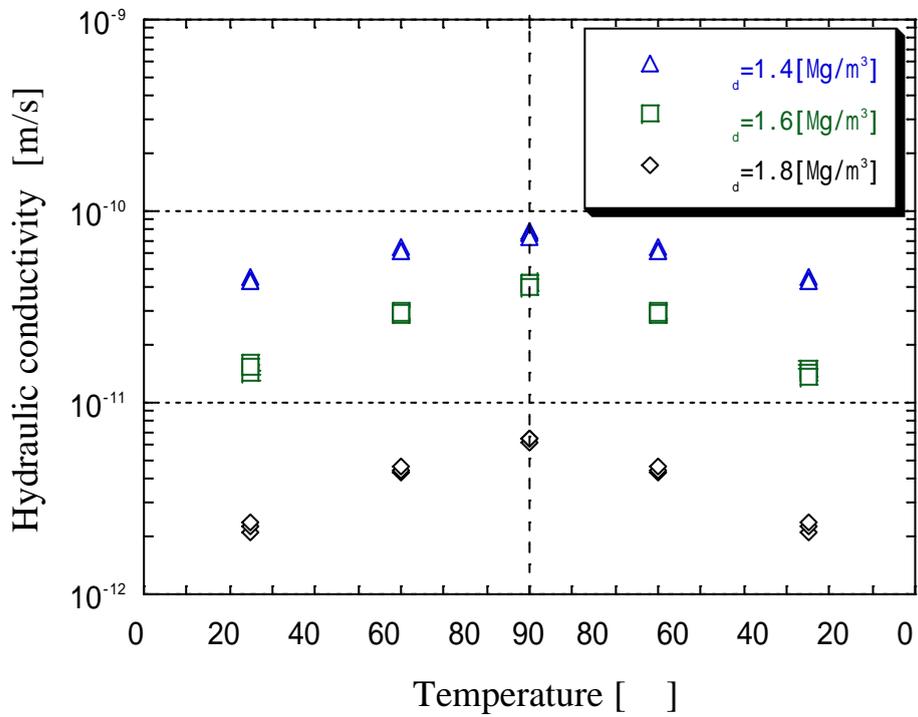


図 5-3 透水係数の温度依存性 (ケイ砂混合体試料)

## 5.3 透水係数の温度依存性の検討

透水係数の温度依存性の要因のひとつに、圧縮ベントナイト中を透過する水の物性温度（密度・粘性係数）による変化が考えられる。そこで、岩石等の多孔質体の透水性を評価する際に用いられる固有透過度（JACOB BEAR, 1979）の概念を用いて整理を行った。固有透過度は、粒径分布・粒子の形状・屈曲度・空隙率など多孔質体自身の構造特性に由来する透過抵抗を表すものであり、次式で求められる。ここで  $k$  [m/s] は透水係数、 $k$  [m<sup>2</sup>] は固有透過度、 $r$  [kg/m<sup>3</sup>] は人工海水の密度、 $g$  [m/s<sup>2</sup>] は重力加速度、 $\mu$  [Pa・s] は人工海水の粘性係数を表す。各温度における人工海水の密度と粘性係数を表 5-3 に示す。

なお、人工海水の密度測定(日本工業規格, 2001; 理科年表, 2000)に関しては、比重瓶法(ゲイリュサック形温度計・ピクノメータ)を用い、粘性係数の測定(日本工業規格, 1991; 理科年表, 2000)に関しては、粘性測定法(オストワルド粘度計)を用いた。Appendix に測定結果を示す。

$$k = kr_g / m \quad (6)$$

表 5-3 人工海水の密度および粘性

## (1) 人工海水の密度

| 温度[ ] | $r$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 温度[ ] | $r$ [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-------|--------------------------|-------|--------------------------|
| 0     | 1.0286                   | 45    | 1.0180                   |
| 10    | 1.0277                   | 50    | 1.0158                   |
| 15    | 1.0272                   | 60    | 1.0100                   |
| 20    | 1.0266                   | 70    | 1.0056                   |
| 25    | 1.0254                   | 80    | 0.9996                   |
| 30    | 1.0221                   | 90    | 0.9933                   |
| 40    | 1.0196                   |       |                          |

## (2) 人工海水の粘性係数

| 温度[ ] | $m$ [mPa・s] | $n$ [mm <sup>2</sup> /s] | 温度[ ] | $m$ [mPa・s] | $n$ [mm <sup>2</sup> /s] |
|-------|-------------|--------------------------|-------|-------------|--------------------------|
| 10    | 1.3548      | 1.3183                   | 45    | 0.6149      | 0.6041                   |
| 15    | 1.1760      | 1.1449                   | 50    | 0.5555      | 0.5468                   |
| 20    | 1.0355      | 1.0086                   | 60    | 0.4670      | 0.4620                   |
| 25    | 0.9135      | 0.8909                   | 70    | 0.4047      | 0.4024                   |
| 30    | 0.8166      | 0.7990                   | 80    | 0.3547      | 0.3549                   |
| 40    | 0.6793      | 0.6663                   | 90    | 0.3184      | 0.3206                   |

試験で得られた透水係数 $k$ より，固有透過度 $k$ を(6)式で求め，固有透過度算出値を表5-4に示す。また，温度と固有透過度の関係を整理したものを図5-4，5-5に示す。

その結果，図中に示すように，固有透過度は温度によらずほぼ一定の値を示していることから，温度によってベントナイトの構造特性は変化せず，透水係数にみられる温度依存性は，海水系においても降水系と同様に密度および粘性係数の温度による変化で説明出来ることが分かった。

さらに，温度によらず一定である固有透過度を，乾燥密度と固有透過度の関係で整理し，図5-6に示す。これより，乾燥密度が大きくなると固有透過度が小さくなることが分かる。また，ベントナイトにケイ砂を混合することによって固有透過度が大きくなることが分かる。

圧縮ベントナイトの乾燥密度 $r_d$  [Mg/m<sup>3</sup>]と固有透過度 $k$  [m<sup>2</sup>]との関係から，固有透過度は，乾燥密度およびケイ砂混合率 $R_s$  [%]に依存して変化する。

また，砂の体積を除いてベントナイトの乾燥密度を計算した指標である有効粘土密度 $r_b$  [Mg/m<sup>3</sup>]は次のように定義される。ここで， $r_s$  [Mg/m<sup>3</sup>]はケイ砂の土粒子密度を表す。

$$r_b = \frac{r_d(100 - R_s)}{100 - r_d \frac{R_s}{r_s}} \quad (7)$$

有効粘土密度で固有透過度を整理すると，固有透過度はケイ砂混合率に関係なく図5-7のような関係が得られ，(8)式のように表現できる。なお，本式においては，乾燥密度1.2～1.8[Mg/m<sup>3</sup>]の範囲におけるクニゲルV1およびケイ砂混合体を用いた場合における有効粘土密度 $r_b$ と人工海水の固有透過度 $k$ の間のみとする。

$$k = \exp(-47.155 + 15.138r_b - 7.878r_b^2) \quad (8)$$

表 5-4 固有透過度算出値

| 温度<br>[ ° ] | 固有透過度[m <sup>2</sup> ]   |          |          |          |                          |          |          |
|-------------|--------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|
|             | ベントナイト単体試料               |          |          |          | ケイ砂混合体試料                 |          |          |
|             | 乾燥密度[Mg/m <sup>3</sup> ] |          |          |          | 乾燥密度[Mg/m <sup>3</sup> ] |          |          |
|             | 1.2                      | 1.4      | 1.6      | 1.8      | 1.4                      | 1.6      | 1.8      |
| 25          | 3.84E-18                 | 1.21E-18 | 1.26E-19 | 2.03E-20 | 4.11E-18                 | 1.47E-18 | 1.92E-19 |
|             | 3.44E-18                 | 1.51E-18 | 1.18E-19 | 1.98E-20 | 3.95E-18                 | 1.29E-18 | 2.03E-19 |
|             | 4.51E-18                 | 1.40E-18 | 1.10E-19 | 2.28E-20 | 3.92E-18                 | 1.40E-18 | 2.16E-19 |
| 60          | 2.68E-18                 | 1.08E-18 | 1.39E-19 | 2.14E-20 | 2.93E-18                 | 1.42E-18 | 2.05E-19 |
|             | 2.49E-18                 | 1.01E-18 | 1.17E-19 | 2.11E-20 | 3.05E-18                 | 1.36E-18 | 2.11E-19 |
|             | 3.01E-18                 | 1.21E-18 | 1.26E-19 | 2.20E-20 | 2.89E-18                 | 1.38E-18 | 2.20E-19 |
| 90          | 2.34E-18                 | 1.05E-18 | 1.31E-19 | 1.96E-20 | 2.55E-18                 | 1.37E-18 | 2.03E-19 |
|             | 2.08E-18                 | 1.05E-18 | 1.57E-19 | 2.22E-20 | 2.52E-18                 | 1.39E-18 | 2.10E-19 |
|             | 2.51E-18                 | 1.05E-18 | 1.34E-19 | 1.99E-20 | 2.38E-18                 | 1.30E-18 | 2.12E-19 |

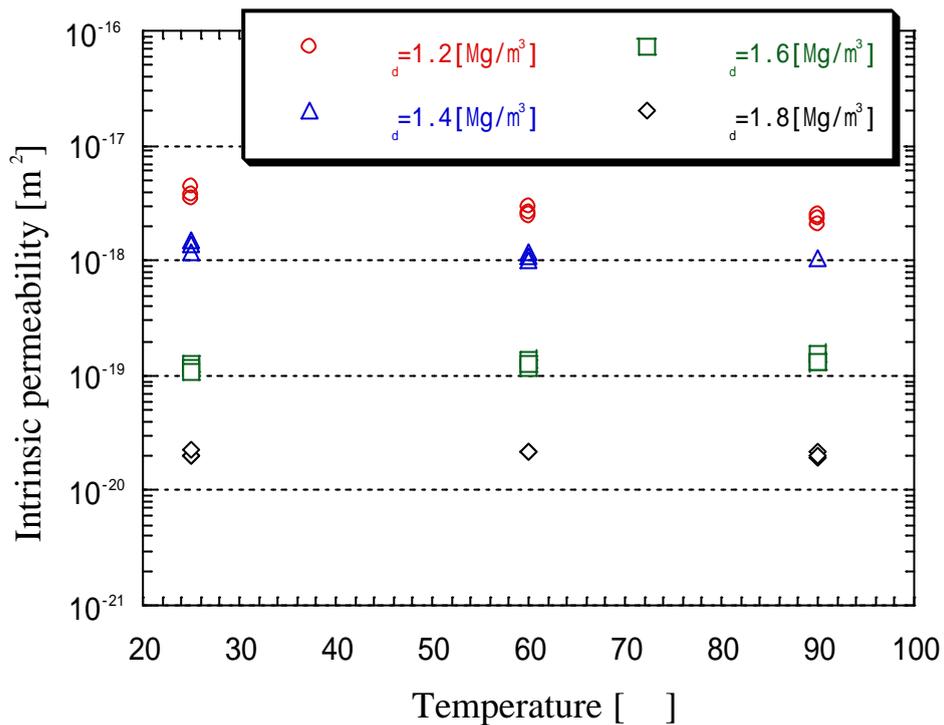


図 5-4 温度と固有透過度（ベントナイト単体試料）

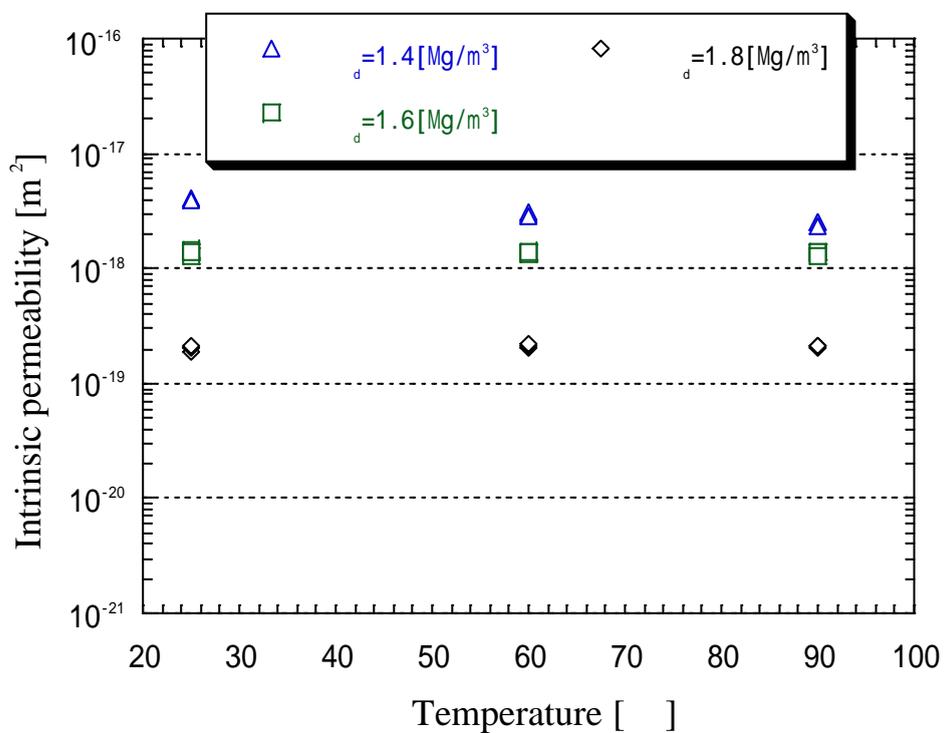


図 5-5 温度と固有透過度（ケイ砂混合体試料）

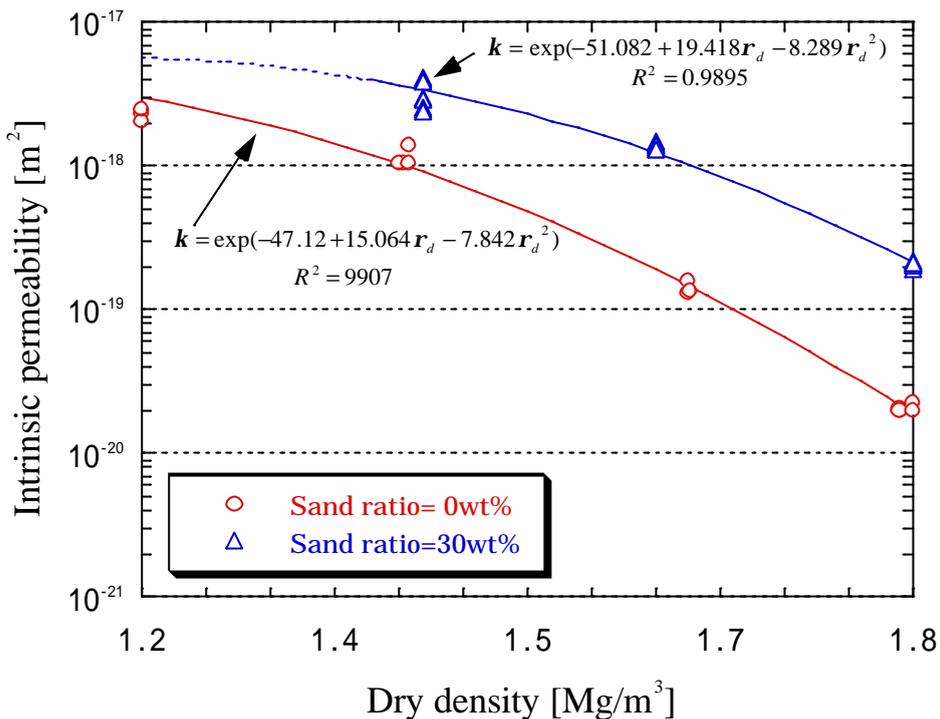


図 5-6 乾燥密度と固有透過度の関係

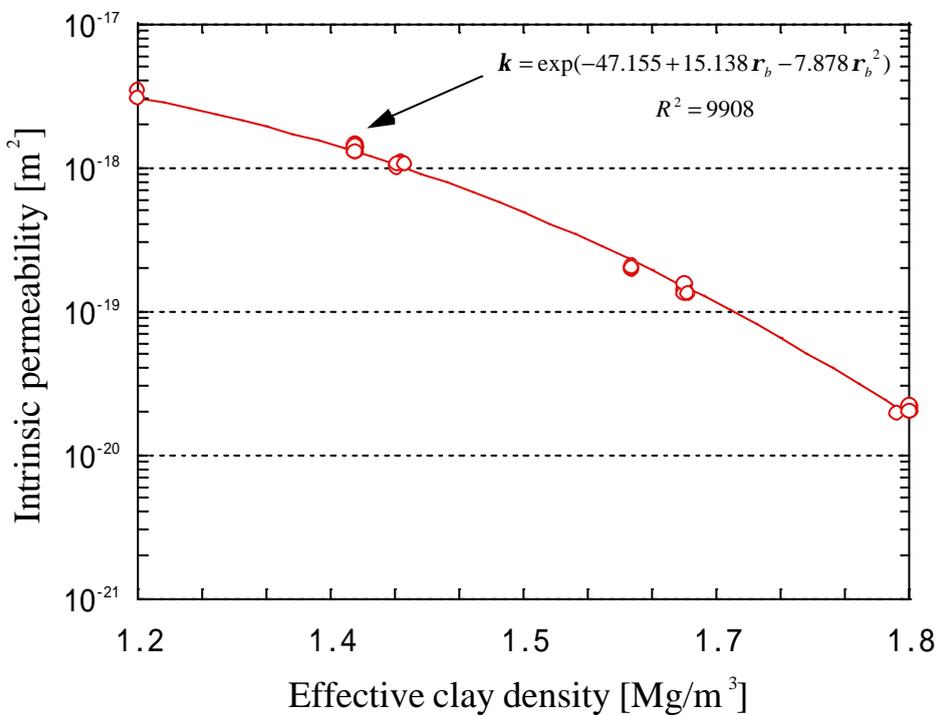


図 5-7 有効粘土密度と固有透過度

#### 5.4 透水性に及ぼす人工海水の影響評価

図 5-8 に第 2 次取りまとめまでに取得された降水系データ(松本ほか, 1997)と海水系データ(菊池・棚井, 2002)の比較を行った。図から人工海水を流体とした場合, 蒸留水に比べ, 圧縮ベントナイトの透水係数は 1 桁程度大きくなることが分かる。また, 人工海水を流体とした場合, 密度が低密度から高密度になるにしたがって, 透水係数は蒸留水に近づく傾向があることが分かる。

透水係数に及ぼす人工海水の影響においては, 土壌学的に研究がなされている微細構造(粘土ハンドブック, 1987)の変化が要因の一つとして考えられる。

土壌の微細構造には, 単粒構造と団粒構造の二つの考え方があり, 一般的に図 5-9 に示す団粒構造であると考えられ, ベントナイトについても構成粒子が団粒構造をとると考えられている(Yong, 1999)。ベントナイトの団粒構造を考える上で一次構造の粒子の定義が重要であり, スメクタイトで構成される団粒は含水するとより低次の団粒に分離し, やがては一次粒子まで分離する。したがって, 多量の水に分散した粒子単体が一次構造(パケット)に相当する。また, その粒子が配列した二次構造(クラスタ), さらにクラスタが集合して一つの粒子形成した構造が三次構造(ペッド)となり, それらの凝集体が高次構造と考えられている。

これら団粒構造を持つベントナイトのスメクタイト結晶は, 図 5-10 示すベントナイトの構造概念から人工海水の浸潤によって, 図 5-11 (a) に示す蒸留水に比べ, パケット内の内部間隙(Internal Pore)が図 5-11 (b)のように狭くなり, 外部間隙(External Pore)の占める割合が多くなることによって, 水の移行経路が拡大し, ベントナイトの透水性が低下したと考えられる。そこで, ベントナイト中の間隙構造の変化を測定するため, エックス線回折装置を用いてベントナイト中の底面間隔を測定し, 人工海水がこれらの微細構造に及ぼす影響について評価を行った。

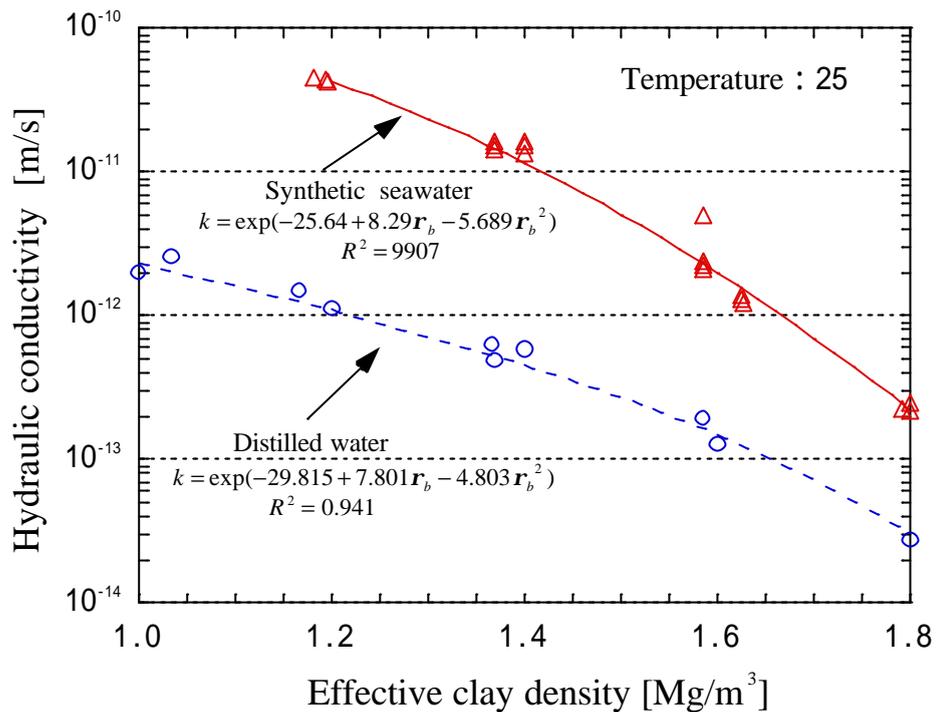


図 5-8 透水係数の比較

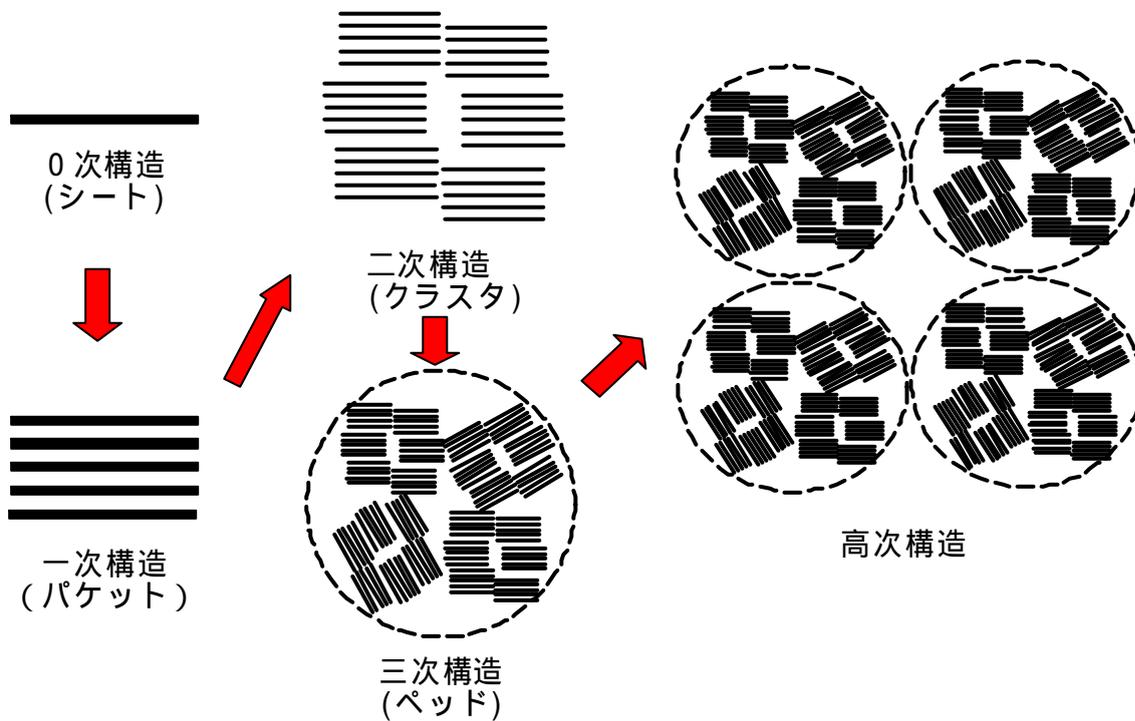


図 5-9 団粒構造と構造単位の種類

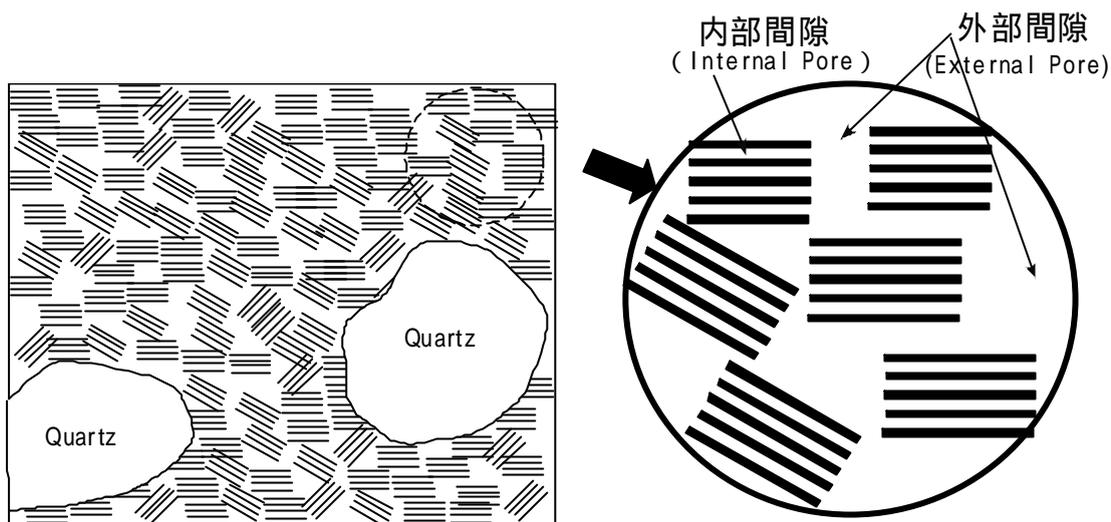


図 5-10 ベントナイトの構造概念図  
〔内部間隙（層間）と外部間隙の定義〕

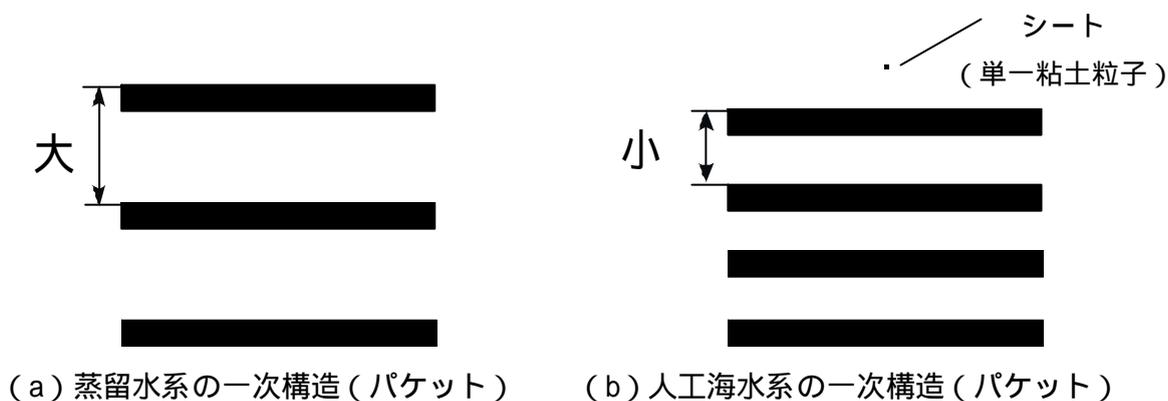


図 5-11 構造変化予想図

#### 5.4.1 試験条件

ここでは、蒸留水および人工海水を用いて浸潤飽和後のスメクタイト結晶の層間の変化をエックス線回折法（XRD 装置）により測定した。試験には、水分拡散試験セルを用い（図 5-12 参照）、供試体は拘束リング内でベントナイト粉末を所定の乾燥密度に圧縮充填して作製する。供試体の寸法は 20[mm]×h20[mm]である。供試体の上下にはセラミックフィルター（孔径 5 $\mu$ m）が置かれ、供試体との間にはテフロンフィルター（孔径 2 $\mu$ m）を有する。浸潤液は上下部の浸潤口から一様に供試体中へ浸潤する。供試体飽和後、上下部の両拘束蓋を取り外し、拘束リングを押し出し治具（図 5-13 参照）に固定する。ピストンと連結しているデジタルインジゲータを読むことにより、供試体は浸潤面から 2mm づつ押し出され 10 等分の薄片に切削される。切削後、その切削断面の底面間隔をエックス線回折装置にて測定を行った。

なお、本測定に使用した X 線は、通常の測定で用いられている CuK -ALPHA1 / 40 kV

/ 20 mA を使用し，走査範囲は 2 / で，蒸留水試験 (D,W,) の場合，不純物として含まれている石英 (Quartz) の確認のために，2~30° (石英のトップピークは 26.5° 付近に現れる。) で行った。人工海水試験 (S,W,) の場合は，石英の確認に加えて NaCl などの確認も行うために，2~35° (NaCl のトップピークは 31.7° 付近に現れる。) で行った。

試験条件を表 5-5 に，測定条件 (エックス線回折装置設定) を表 5-6 に示す。

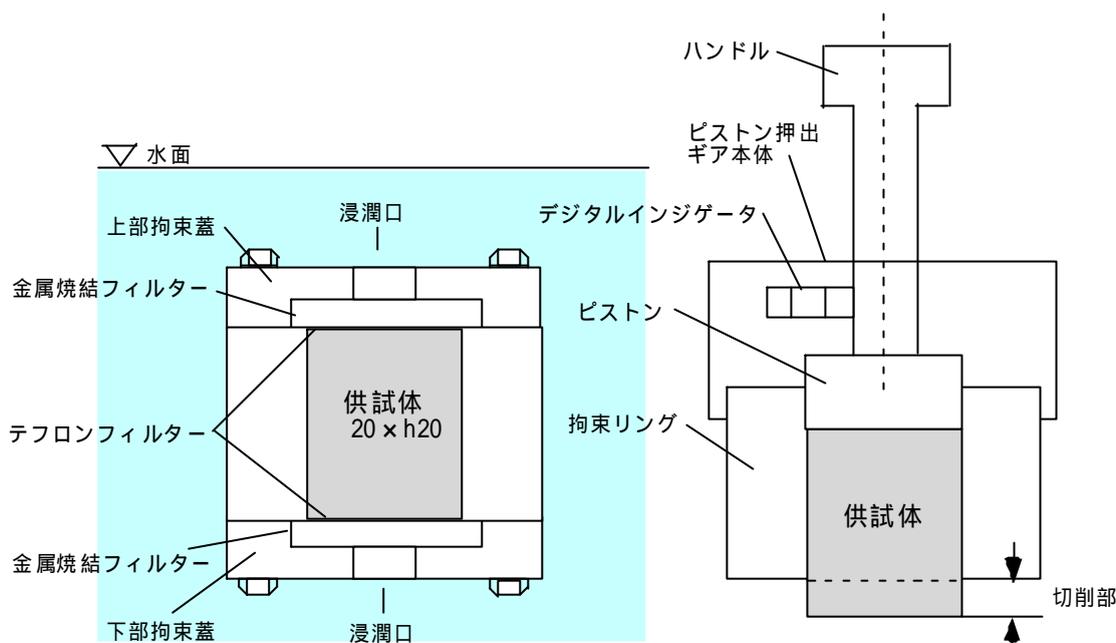


図 5-12 水分拡散試験セル

図 5-13 押し出し治具

表 5-5 試験条件

|                           |                      |                            |
|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| 試料                        | ベントナイト単体試料 (クニゲル V1) |                            |
| ケイ砂混合率 [wt%]              | 0                    |                            |
| 乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ] | 1.2, 1.4, 1.6, 1.8   |                            |
| 初期含水比 [%]                 | 10                   |                            |
| 供試体寸法 [mm]                | 20 x h20             |                            |
| 浸潤液                       | 蒸留水                  | 人工海水<br>(ASTMD-1141-98 基準) |
| 試験温度 [ ]                  | 室温                   |                            |
| 試験数                       | 1 ~ 2                |                            |

表 5-6 測定条件 (X線回折装置設定)

|                  |                           |                  |                      |
|------------------|---------------------------|------------------|----------------------|
| X線               | Cu K-ALPHA1<br>/40kV/20mA | カウンタ             | シンチレーショ<br>ン<br>カウンタ |
| ゴニオメータ           | RINT2000                  | アタッチメント          | 標準試料ホルダ<br>ー         |
| フィルタ             | 未使用                       | モノクロメータ          | 全自動<br>モノクロメータ       |
| 走査モード            | 連続                        | スキャンスピー<br>ド     | 1.000° / min         |
| 走査軸              | 2 /                       | スキャンステッ<br>プ     | 0.010°               |
| 走査範囲<br>(D,W,試料) | 2.000° ~<br>30.000°       | 走査範囲<br>(S,W,試料) | 2.000° ~<br>35.000°  |
| 発散スリット<br>(DS)   | 1/2deg.                   | 散乱スリット<br>(SS)   | 1/2deg.              |
| 受光スリット<br>(RS)   | 0.3mm                     | 試料切断部 (測<br>定点)  | 8 mm , 10 mm , 12 mm |
| 室温               | 21 ~ 26                   | 湿度               | 25 ~ 37%             |

## 5.4.2 試験結果および考察

本測定を行う前に、測定深度の違いによる底面間隔の変化の確認および適切な測定深度を決定するため予備測定を行った。予備測定としては、蒸留水および人工海水ともに乾燥密度  $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$  の試料を用い、右図に示すように供試体表面から中央付近までを約 2 mm 間隔で細かく測定した。その結果、図 5-14、図 5-15 に示すように蒸留水、人工海水ともにどの深度においても底面間隔は特に変化しないことが確認され、測定深度は、試料中央である 10mm とその前後の 8, 12mm の 3 点を測定点とすることとした。

本測定においては、予備測定にて決定した一供試体あたり測定点 3 点について底面間隔の測定を行った。ここでは、一例として、測定点 10mm における各乾燥密度ごとの蒸留水と人工海水の測定結果を合わせて図 5-16 に示す。測定の結果、蒸留水および人工海水ともに乾燥密度  $1.2$  および  $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$  においては、ほぼ 18.5 の 3 層であり、乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  では 15.8 の 2 層と 17.8 の 3 層の混在が確認された。また、乾燥密度  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  では、ほぼ 15.3 の 2 層構造が確認された。さらに図からも分かるように、蒸留水と人工海水を浸潤液とした場合においては、供試体の底面間隔には顕著な変化は見られなかった。このことは、ベントナイト中におけるスメクタイトの層間距離には変化が見られないことを示している。

一方、クニゲル V1 は、不純物として石英や可溶性塩などを多く含有していることもあり、含水した際に必ずしも外部から調整した塩濃度が反映されたこととは限らないことも考えられ、イオン強度に大きな変化が無かったことにより結果的に変化が見られなかったことも考えられる。

また、ベントナイトはイオン強度が高くなると膨潤量および膨潤応力が低下するとともに、凝集してコロイドの安定性も悪くなることが知られている。このことから、スメクタイトの積層体が凝集して層間とは異なる大きな外部間隙が生じたものと予想される。

なお、測定後の試料確認として、回折ピークの定性結果を表 5-7 に、また、3.2 項に記したように、測定後の飽和度および乾燥密度を表 5-8、5-9 に示す。回折ピークの定性結果としては、ベントナイトを主として構成されているモンモリロナイト、バイデライトが測定され、不純物としては、石英のみが測定された。

また、乾燥密度は、所定の乾燥密度の  $\pm 0.03 \text{ Mg/m}^3$  未満であり、飽和度については、96～103%程度の範囲であった。

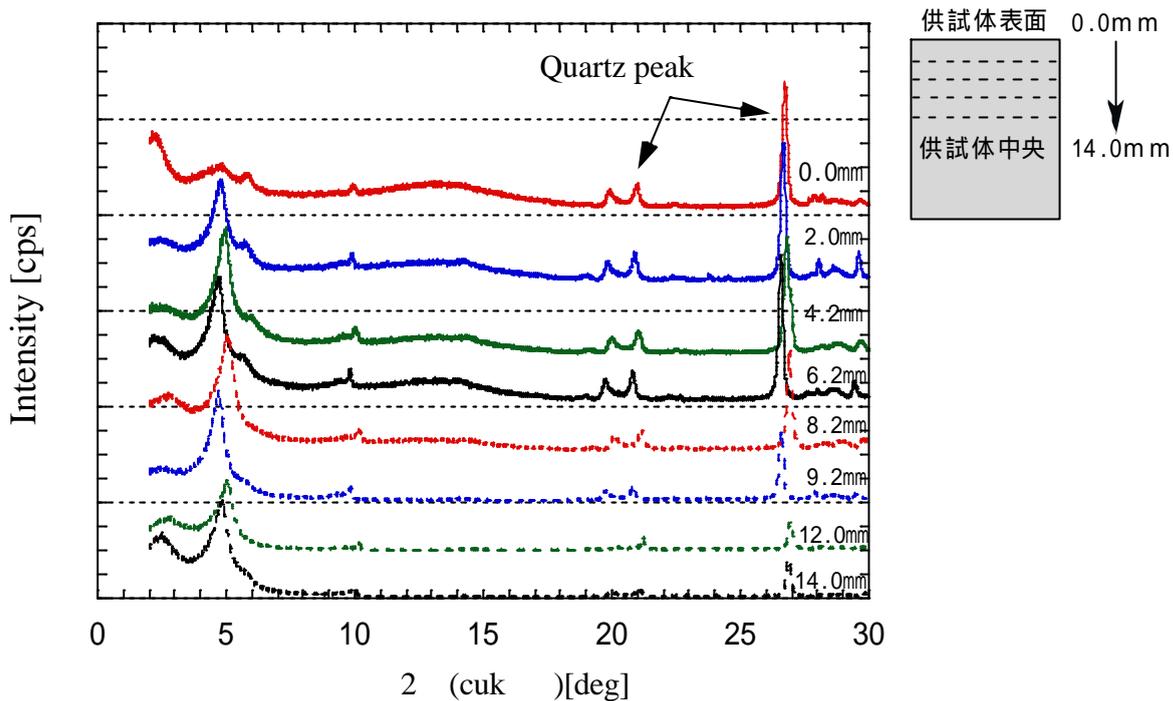


図 5-14 底面間隔の予備測定結果  
(乾燥密度  $1.2[\text{Mg}/\text{m}^3]$ , 蒸留水)

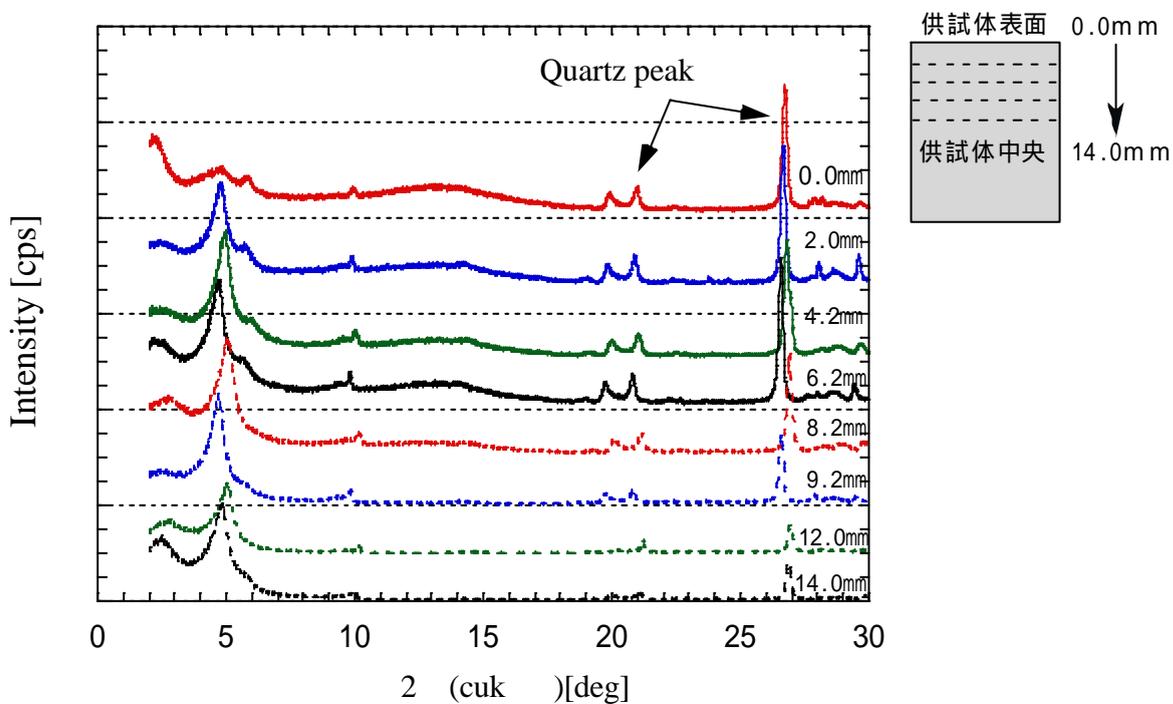


図 5-15 底面間隔の予備測定結果  
(乾燥密度  $1.2[\text{Mg}/\text{m}^3]$ , 人工海水)

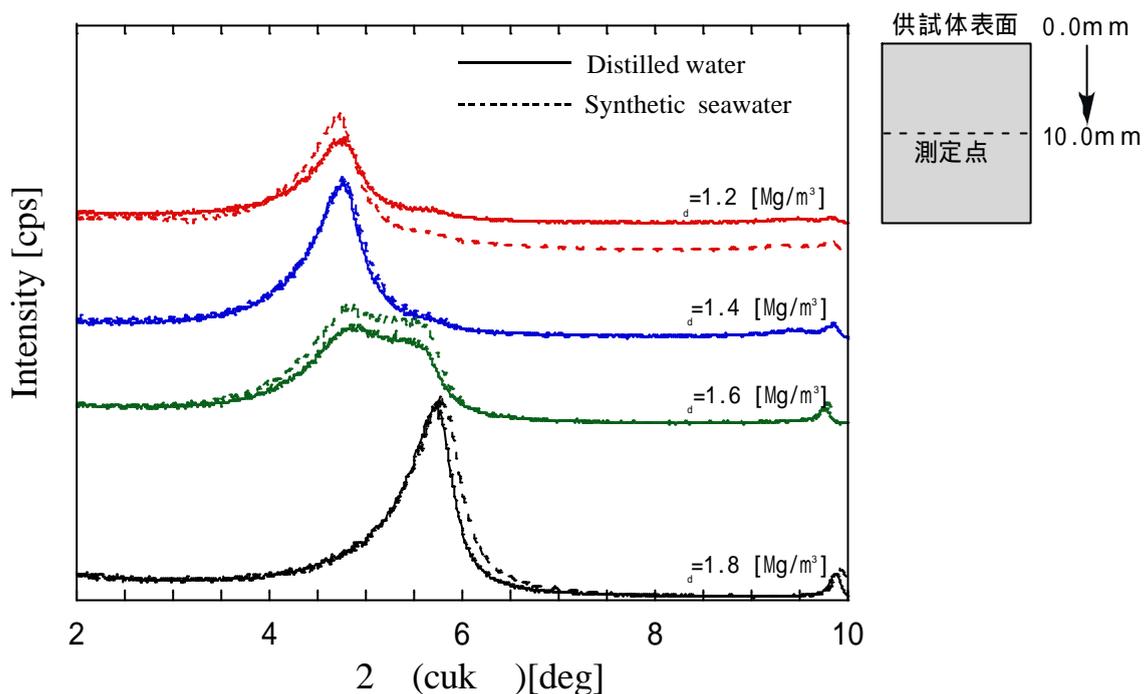


図 5-16 各乾燥密度における底面間隔測定結果  
(表面からの測定点 10mm)

表 5-7 回折ピークの定性結果

| 乾燥密度[Mg/m <sup>3</sup> ] | 蒸留水  | 人工海水   |
|--------------------------|--|--|
| 1.2                      | Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             | Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             |
| 1.4                      | Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             | Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             |
| 1.6                      | Na-Montmorillonite-15A ,<br>Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz | Na-Montmorillonite-15A ,<br>Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz |
| 1.8                      | Na-Montmorillonite-15A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             | Na-Montmorillonite-18A ,<br>Na-Beidellite-12A , Quartz                             |

表 5-8 測定後の飽和度および乾燥密度の確認（蒸留水）

| NO.  | 成型圧<br>[kgf] | 含水比[%] | 間隙率[%] | 飽和度[-] | 乾燥密度<br>[Mg/m <sup>3</sup> ] |
|------|--------------|--------|--------|--------|------------------------------|
| 1.2A | 80           | 45.14  | 55.08  | 99.40  | 1.21                         |
| 1.2B | 84           | 44.56  | 55.55  | 96.26  | 1.20                         |
| 1.2C | 71           | 45.15  | 55.61  | 97.31  | 1.20                         |
| 1.4A | 230          | 33.60  | 47.54  | 100.11 | 1.42                         |
| 1.4B | 250          | 34.19  | 47.24  | 103.09 | 1.42                         |
| 1.6A | 480          | 26.24  | 40.82  | 103.72 | 1.60                         |
| 1.6B | 480          | 24.27  | 39.52  | 100.28 | 1.63                         |
| 1.6C | 490          | 24.61  | 39.87  | 100.19 | 1.62                         |
| 1.8A | 1330         | 18.24  | 33.09  | 99.55  | 1.81                         |
| 1.8B | 1510         | 18.27  | 32.56  | 102.15 | 1.82                         |

表 5-9 測定後の飽和度および乾燥密度の確認（人工海水）

| NO.  | 成型圧<br>[kgf] | 含水比[%] | 間隙率[%] | 飽和度[-] | 乾燥密度<br>[Mg/m <sup>3</sup> ] |
|------|--------------|--------|--------|--------|------------------------------|
| 1.2A | 100          | 44.24  | 54.96  | 97.88  | 1.22                         |
| 1.2B | 110          | 45.73  | 54.49  | 103.10 | 1.23                         |
| 1.4A | 230          | 33.63  | 47.24  | 101.41 | 1.42                         |
| 1.6A | 560          | 25.84  | 40.70  | 101.68 | 1.60                         |
| 1.8A | 1200         | 18.29  | 32.98  | 100.39 | 1.81                         |

## 6 まとめ

本研究では、実際の地質環境条件下を考慮するため、人工海水を用いた緩衝材としての圧縮ベントナイトの飽和透水特性の把握を目的として、供試体の乾燥密度、ケイ砂混合率、および試験温度をパラメータとして透水試験を実施した。また、上記パラメータが緩衝材の透水係数に及ぼす影響に関して考察を行った。

以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 透水係数は、供試体の乾燥密度、ケイ砂混合率、および試験温度に依存して変化し、供試体の乾燥密度が小さくなるほど、ケイ砂混合するなど、また、温度が高くなるほど透水係数は大きくなることが分かった。
- (2) 透水係数の温度依存性に関して検討を実施し、多孔質体の透過抵抗を表す固有透過度を用いて整理を行った。その結果、第2次取りまとめ同様、固有透過度は温度によらず一定であり、透水係数にみられる温度依存性は、圧縮ベントナイトの

構造特性の変化によるものではなく、供試体を透過する溶媒の密度と粘性係数の温度による物性の変化で説明できる。また、乾燥密度  $1.2 \sim 1.8 [\text{Mg}/\text{m}^3]$  の範囲における有効粘度密度と人工海水の固有透過度の関係式を得た。

- (3) 第2次取りまとめまでに取得された降水系データと海水系データの比較を行った結果、人工海水を溶媒とした場合、降水系に比べ圧縮ベントナイトの透水係数は1桁程度大きくなることが分かった。また、乾燥密度が低密度から高密度になるにしたがって、透水係数は降水系に近づく傾向があることが分かった。
- (4) (3)の結果を踏まえ、透水性に及ぼす人工海水の影響評価に関して、土壌学的に研究がなされている微細構造変化に着目し、降水系および海水系のスメクタイト層間距離の変化を確認するため、エックス線回折装置を用いて底面間隔の測定を行った。その結果、供試体の底面間隔には顕著な変化は見られなかった。(ベントナイト中におけるスメクタイトの層間距離には変化が見られないことを示している。)一方、クニゲル V1 は、不純物として石英や可溶性塩などを多く含有していることもあり、含水した際に必ずしも外部から調整した塩濃度が反映されたこととは限らないことも考えられ、イオン強度に大きな変化が無かったことにより結果的に変化が見られなかったことも考えられる。また、ベントナイトはイオン強度が高くなると膨潤量および膨潤応力が低下するとともに、凝集してコロイドの安定性も悪くなることが知られている。このことから、スメクタイトの積層体が凝集して層間とは異なる大きな外部間隙が生じたものと予想される。

## 7 おわりに

本研究では、透水試験における試験試料にクニゲル V1 を、試験水に人工海水を用いて圧縮ベントナイトの透水係数の測定を行い、有効粘度密度と固有透過度について関係式の一般化を行った。

今後、高レベル放射性廃棄物の処分事業化に向け、資源の有効活用の観点から外国産ベントナイト(MX-80 など)の利用も考えられる。そのため、海外産ベントナイトに係るデータを文献などより収集し、例えばモンモリトナイト含有率などによる関係式の一般化や、あるいは、海外産ベントナイトとクニゲル V1 との性能比較を通じた適用性評価など、いくつかの評価手法について検討し、国の安全審査基本指針に必要な基盤情報の整備を行っていくことも必要である。

さらに、地下水化学が透水係数に及ぼす影響を把握することも今後の課題の一つと言える。

## 8 参考文献

- ・ 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ?地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-020 ~ 024 ( 1999 )
- ・ (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説 ( 1990 )
- ・ 日本ベントナイト工業会：日本ベントナイト工業会標準会標準試験方法。( 1977 )
- ・ 粘土ハンドブック第二版：日本粘土学会編。( 1987 )
- ・ 伊藤雅和，岡本真由美，柴田雅博，佐々木康雄，壇原徹，鈴木啓三，渡辺隆：“ベントナイトの鉱物組成分析”，動燃技術資料，PNC TN8430 93-003 ( 1993 )
- ・ 佐藤信二，雨宮清，山形順二，広瀬郁郎，原啓二，石川博久，湯佐泰久，佐々木憲明：“緩衝材の熱-水-応力連成試験 ?緩衝材大型試験設備の概要および加熱試験計画について-” 動燃技術資料，PNC TN8410 90-060 ( 1990 )
- ・ 黒澤進，諸岡幸一，上田真三：“圧縮成型ベントナイト中のコロイドの移行試験 3wt%NaCl 溶液及び Ca 型ベントナイトを用いた検討 ” サイクル機構技術資料，技術資料手続中，( 2003 )
- ・ 中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会 ( 1991 )
- ・ 鈴木英明，柴田雅博，山形順二，広瀬郁郎，寺門一馬：“緩衝材の基本特性 ( I )”，動燃技術資料，PNC TN8410 92-057 ( 1992 )
- ・ JACOB BEAR：Hydraulics of Groundwater，McGraw-hill publishing company ( 1979 )
- ・ 日本工業規格：化学製品の密度及び比重測定方法，JIS K 0061。( 2001 )
- ・ 日本工業規格：液体の粘度-測定方法，JIS Z 8803 ( 1991 )
- ・ 国立天分台編：理科年表 平成 13 年 ( 2000 )
- ・ 松本一浩，菅野毅，藤田朝雄，鈴木英明：“緩衝材の飽和透水特性”，動燃技術資料，PNC TN8410 97-296 ( 1997 )
- ・ 菊池広人，棚井憲治：“圧縮ベントナイトの膨潤応力測定手法の標準化および海水環境条件下における透水性に関する一考察”，日本原子力学会，第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集，p.2.19-1 ( 2002 )
- ・ R.N.Yong：“Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers”，Eng.Geol.,54,3-14 ( 1999 )

# Appendix

(人工海水の密度および粘性係数測定)

## 目 次

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 1 人工海水の密度測定             | 付(3)  |
| 1.1 測定装置 -----          | 付(3)  |
| 1.2 測定方法および測定条件 -----   | 付(3)  |
| 1.2.1 測定方法（校正） -----    | 付(3)  |
| 1.2.2 測定方法（操作） -----    | 付(4)  |
| 1.2.3 測定条件 -----        | 付(4)  |
| 1.3 密度測定結果 -----        | 付(5)  |
| 2 人工海水の粘性係数測定           |       |
| 2.1 測定装置 -----          | 付(9)  |
| 2.2 測定方法および測定条件 -----   | 付(9)  |
| 2.2.1 測定条件 -----        | 付(9)  |
| 2.2.2 測定方法 -----        | 付(10) |
| 2.2.3 結果の整理 -----       | 付(10) |
| 2.3 人工海水の粘性係数測定結果 ----- | 付(10) |
| 3 参考文献 -----            | 付(13) |

## 図 目 次

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 図 1-1 密度測定装置 -----          | 付(3)  |
| 図 1-2 人工海水の密度測定結果 -----     | 付(5)  |
| 図 2-1 粘性測定装置 -----          | 付(9)  |
| 図 2-2 温度と粘性係数の関係 -----      | 付(11) |
| 図 2-3 NaCl 濃度と粘性係数の関係 ----- | 付(11) |

## 表 目 次

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 表 1-1 測定条件 -----           | 付(4)  |
| 表 1-2 人工海水の密度測定結果（1） ----- | 付(6)  |
| 表 1-2 人工海水の密度測定結果（2） ----- | 付(7)  |
| 表 1-2 人工海水の密度測定結果（3） ----- | 付(8)  |
| 表 2-1 測定条件 -----           | 付(9)  |
| 表 2-2 人工海水の粘性係数測定結果 -----  | 付(12) |

## 1 人工海水の密度測定

## 1.1 測定装置

一般に、液体の密度測定に関しては、浮ひょう法・比重瓶法・振動式密度計法・天秤法などがある（日本規格協会，2001）。本試験においては、密度測定の基本原理に従い高い精度が得られると考えられる比重瓶法（ゲーリュウサック形）を用いて試験を行った。

測定装置は図 1-1 に示すとおり、ゲーリュウサック形温度計付比重瓶（50[ml]）およびゲーリュウサック形ピクノメータ（50[ml]）、恒温グローブボックス（温度範囲：10～90[ ]）、電子天秤（測定精度：±0.0001[g]）、温度計（JIS規格：最小目盛 0.5[ ]）、湯せん用器具（トレー）から構成される（日本規格協会，2000）。

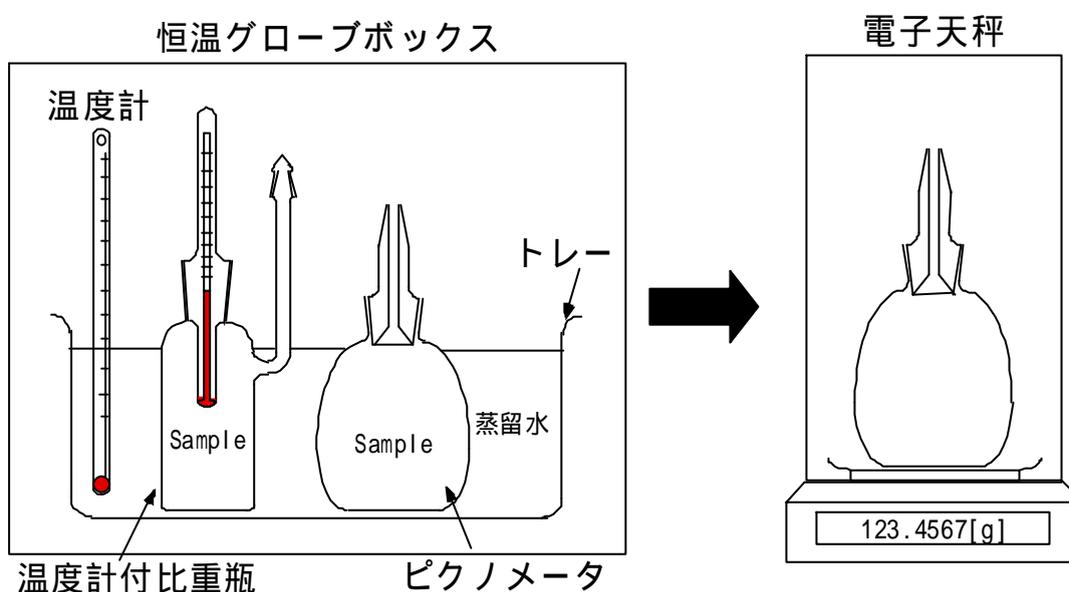


図 1-1 密度測定装置

## 1.2 測定方法および測定条件

## 1.2.1 測定方法（校正）

乾燥洗浄した比重瓶を 1mg の桁まで量り、これを  $W_0$  とする。

あらかじめ設定温度より 1～3 低い温度に調整した蒸留水を気泡が残らないように注意深く比重瓶に満たし、設定温度 ±0.1 に保った恒温槽にそのけい部まで入れる。

30 分以上放置し、温度が一定になった後、ほぼ同温に保った栓を差し込み、過剰な蒸留水をピペット又は細かく切ったろ紙で吸い取り、液面を標線又は蓋の細孔上端に合わせる。（温度計付比重瓶の場合は、温度計付の栓を差し込む）

恒温槽から比重瓶を取り出し、外面を清浄な乾燥している布でぬぐい水分を除

き，蓋のある比重瓶のある場合は蓋を付けて設定温度近くまで放置する。

測定温度が室温より低い場合は，比重瓶の表面に結露する場合があるため，その表面を良くぬぐって全質量を測定する。これを $W_1$ とする。

～ から比重瓶の水当量( $W_1 - W_0$ )を求める。水当量は測定温度ごとに測定する。

### 1.2.2 測定方法（操作）

洗浄乾燥した比重瓶の質量を 0.1 の桁まで量り，これを $W_0$ とする。

これにあらかじめ測定温度より 1 ~ 3 低い温度に調整した人工海水を満たし，校正の 2~5 によって試料を満たした比重瓶の質量を $W_2$ とする。

2.1 の ~ と同様に比重瓶の水当量( $W_2 - W_0$ )を求める。水当量は測定温度ごとに測定する。

なお，温度変換による水分の蒸発等があるため恒温グローブボックス内での作業とした。また，ゲーリュウサック形温度計付比重瓶においては，付属の温度計が 40 までしか測定できないため，試験温度の設定を 40 までとした。

### 1.2.3 測定条件

測定条件を表-1 に示す。

表 1-1 測定条件

| 試験方法        | 比重瓶法                            |  |
|-------------|---------------------------------|--|
|             | ゲーリュウサック形<br>温度計付比重瓶 ( test-1 ) | ゲーリュウサック形<br>ピクノメータ ( test-2 )                                   |
| 試験試料        | 蒸留水<br>人工海水 ( ASTM-1141-98 基準 ) |  |
| 試験温度<br>[ ] | 0 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40 | 0 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40 ,<br>45 , 50 , 60 , 70 , 80 , 90 |
| 試験数         | 10                              | 5  |

1.4 密度測定結果

密度は、次式によって算出し、小数点以下4桁までとする。

$$D = [(W_2 - W_0) / (W_1 - W_0)] \times (r_w - r_a) + r_a$$

ここに、 $D$ ：試料の密度[g/cm<sup>3</sup>]

$W_0$ ：比重瓶の見掛けの質量[g]

$W_1$ ：比重瓶を水で満たしたときの見掛けの質量[g]

$W_2$ ：比重瓶を試料で満たしたときの見掛けの質量[g]

$W_2 - W_0$ ：比重瓶中の試料の見掛けの質量[g]

$W_1 - W_0$ ：試料と同体積の水の質量 = 比重瓶の水当量[g]

$r_w$ ：各温度ごとの水の密度[g/cm<sup>3</sup>]

$r_a$ ：各温度ごとの空気の密度[g/cm<sup>3</sup>]

人工海水の密度測定結果を表 1-2 に示す。また、図 1-2 に test-1, test-2 にて測定した人工海水の密度測定結果の平均値と文献値 (Riley and Skirrow, 1975; 国立天文台編, 1998) を示す。なお、今回用いた人工海水の Cl 含有量は 19200 [ppm] であり、文献に記載される Cl 含有量は 19056 [ppm] である。

図から test-1, test-2 とともに測定温度 40[ ]までしか比較は行えなかったが多少人工海水の Cl 含有量が多いことから文献値より高い密度となっている。また、test-2 においては、測定温度 90[ ]まで人工海水の密度を求めた。

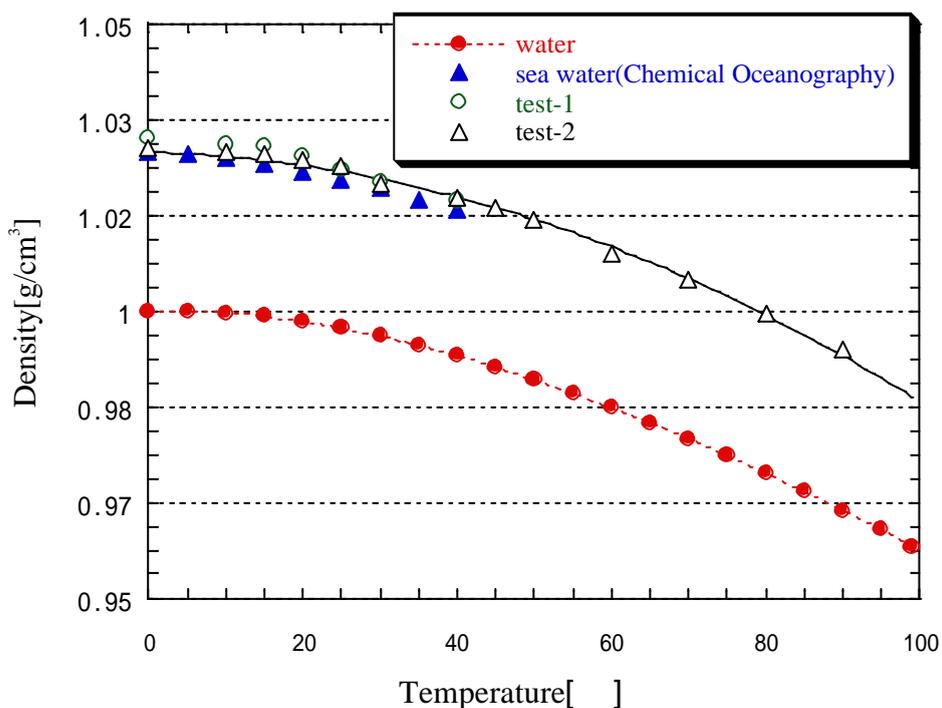


図 1-2 人工海水の密度測定結果

表 1-2 人工海水の密度測定結果 (1)

| 温度<br>[ ] | 水の密度<br>$r_w$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 空気の密度<br>$r_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-1<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ]  | test-1<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-2<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ]                | test-2<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|--|---|--|---|
| 0         | 0.99984                            | 0.001293                            | 1.031152<br>1.028832<br>1.030308<br>1.030721<br>1.0306<br>1.029359<br>1.030432<br>1.029587<br>1.03083<br>1.029775    | 1.0302                                    | 1.028216<br>1.028293<br>1.028891<br>1.028504<br>1.028447 | 1.0285                                    |
| 10        | 0.99970                            | 0.001247                            | 1.027293<br>1.026653<br>1.019519<br>1.027577<br>1.027242<br>1.026774<br>1.038100<br>1.042351<br>1.027100<br>1.026892 | 1.0293                                    | 1.0273<br>1.0276<br>1.0278<br>1.0274<br>1.0283           | 1.0277                                    |
| 15        | 0.99910                            | 0.001226                            | 1.029028<br>1.028276<br>1.02847<br>1.028856<br>1.029037<br>1.028391<br>1.028748<br>1.028735<br>1.029761<br>1.028752  | 1.0288                                    | 1.0269<br>1.0275<br>1.0277<br>1.0271<br>1.0266           | 1.0272                                    |
| 20        | 0.99820                            | 0.001205                            | 1.027294<br>1.026487<br>1.026764<br>1.027003<br>1.027272<br>1.026714<br>1.026966<br>1.02697<br>1.028099<br>1.026886  | 1.0270                                    | 1.0265<br>1.0264<br>1.0276<br>1.0261<br>1.0263           | 1.0266                                    |

表 1-2 人工海水の密度測定結果 (2)

| 温度<br>[ ] | 水の密度<br>$r_w$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 空気の密度<br>$r_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-1<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ]   | test-1<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-2<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ]                | test-2<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| 25        | 0.99704                            | 0.001184                            | 1.024896<br>1.024111<br>1.024497<br>1.025621<br>1.024849<br>1.024235<br>1.02443<br>1.024538<br>1.025615<br>1.024357 | 1.0247                                    | 1.025345<br>1.025536<br>1.027368<br>1.024252<br>1.024358 | 1.0254                                    |
| 30        | 0.99565                            | 0.001165                            | 1.021911<br>1.02195<br>1.022694<br>1.022201<br>1.022718<br>1.022673<br>1.022787<br>1.022627<br>1.023918<br>1.022798 | 1.0226                                    | 1.022892<br>1.023232<br>1.023546<br>1.01819<br>1.022534  | 1.0221                                    |
| 40        | 0.99222                            | 0.0011236                           | 1.01982<br>1.019689<br>1.018309<br>1.018809<br>1.020058<br>1.01837<br>1.018741<br>1.018795<br>1.020529<br>1.01973   | 1.0193                                    | 1.02203<br>1.019638<br>1.01961<br>1.017614<br>1.019043   | 1.0196                                    |
| 45        | 0.99021                            | 0.0011052                           |   |   | 1.018351<br>1.017478<br>1.01784<br>1.017739<br>1.0184    | 1.0180                                    |
| 50        | 0.98804                            | 0.001014                            |   |   | 1.015416<br>1.015763<br>1.01575<br>1.016045<br>1.016     | 1.0158                                    |
| 60        | 0.9832                             | 0.0010544                           |   |   | 1.010843<br>1.011337<br>1.010511<br>1.009838<br>1.007632 | 1.0100                                    |

表 1-2 人工海水の密度測定結果 (3)

| 温度<br>[ ] | 水の密度<br>$r_w$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 空気の密度<br>$r_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-1<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-1<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] | test-2<br>実測値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ]                | test-2<br>平均値<br>$D$ [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| 70        | 0.9777                             | 0.0010241                           |   |   | 1.002744<br>1.006559<br>1.005403<br>1.005686<br>1.007572 | 1.0056                                    |
| 80        | 0.9718                             | 0.0009967                           |   |   | 0.997686<br>1.000194<br>0.999574<br>0.999401<br>1.001311 | 0.99963                                   |
| 90        | 0.96532                            | 0.0009724                           |   |   | 0.993478<br>0.993031<br>0.993205<br>0.992992<br>0.994014 | 0.99334                                   |

## 2 人工海水の粘性係数測定

### 2.1 測定装置

液体の粘性測定に関しては、その液体がニュートン流体もしくは非ニュートン流体のいずれかに定義づけられる。ニュートン流体の粘性測定においては、毛細管粘度測定法、落球粘度測定法などがあり、また、非ニュートン流体の粘性測定においては、回転粘度測定法などがある（日本規格協会，1991）。本試験においては、使用液がニュートン流体であり、また、比較的簡便に測定が行える毛細管粘度測定法（オストワルドの粘度計）を用いて粘性係数の測定を行った。測定装置を図2-1にとおり、オストワルドの粘度計（1号瓶）、恒温グローブボックス（温度範囲：10～90[ ]）、測定用時計、温度計から構成される（日本規格協会，2000）。

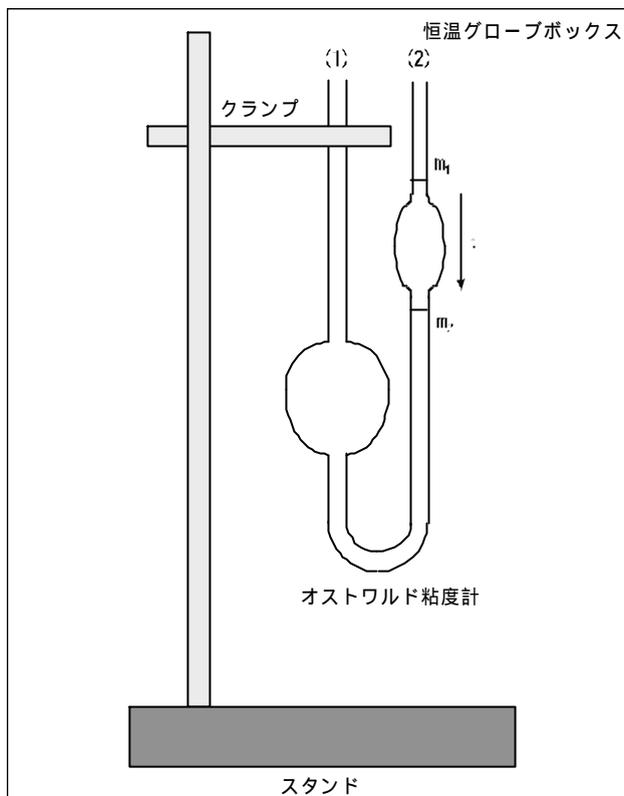


図 2-1 粘性測定装置

### 2.2 測定方法および測定条件

#### 2.2.1 測定条件

測定条件を表 2-1 に示す。

表 2-1 測定条件

|         |  |
|---------|--|
| 測定方法    | オストワルド粘度計                                      |
| 試験試料    | 蒸留水・人工海水                                       |
| 測定温度[ ] | 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90 |
| 繰り返し数   | 3  |

## 2.2.2 測定方法

- (1) 恒温グローブボックス内に試験試料およびオストワルド粘度計を入れ，所定の温度になるまで加熱する。
- (2) 試験試料およびオストワルド粘度計が所定の温度になった後，試験試料を 5～8cc 程度粘度計内に注入する。
- (3) 吸引にて標線  $m_1$  の位置より 5～10mm 上まで試料面を上げた後，自然流下させ試料面が測時球の標線間（ $m_1 \sim m_2$ ）を通過するために要する時間を数回計測する。

## 2.2.3 結果の整理

測定した試験試料の流出時間の平均値を次式に代入して動粘性を算出する。

$$n = \frac{t_2}{t_1} \times n_1 \quad (3)$$

$n$  : 人工海水の動粘性 [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]

$n_1$  : 既知（蒸留数）試料の動粘性 [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]

$t_1$  : 既知（蒸留数）試料が  $m_1$  から  $m_2$  間を通過した時間 [sec]

$t_2$  : 人工海水が  $m_1$  から  $m_2$  間を通過した時間 [sec]

動粘性を算出した後，次式にて粘性係数を算出する。

$$m = n \times r \quad (4)$$

$m$  : 人工海水の粘性係数 [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ]

$r$  : 人工海水の密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

## 2.3 人工海水の粘性係数測定結果

表-2 に測定結果および図-3 に温度と粘性係数の関係を示す。図から温度の上昇とともに粘性係数が低下することが分かる。また，図-4 に本試験によって測定されたデータの妥当性を確認するため，NaCl 濃度と粘性係数の関係を示す。なお，人工海水の NaCl 濃度は約 3% である。図から各温度ともに，NaCl 濃度が上がるにつれて粘性係数も同様に上がることが分かる。また，人工海水の粘性係数において文献値（国立天文台編，1998；日本化学学会編，1975）と比較したがほぼ妥当な値が測定されたと言える。

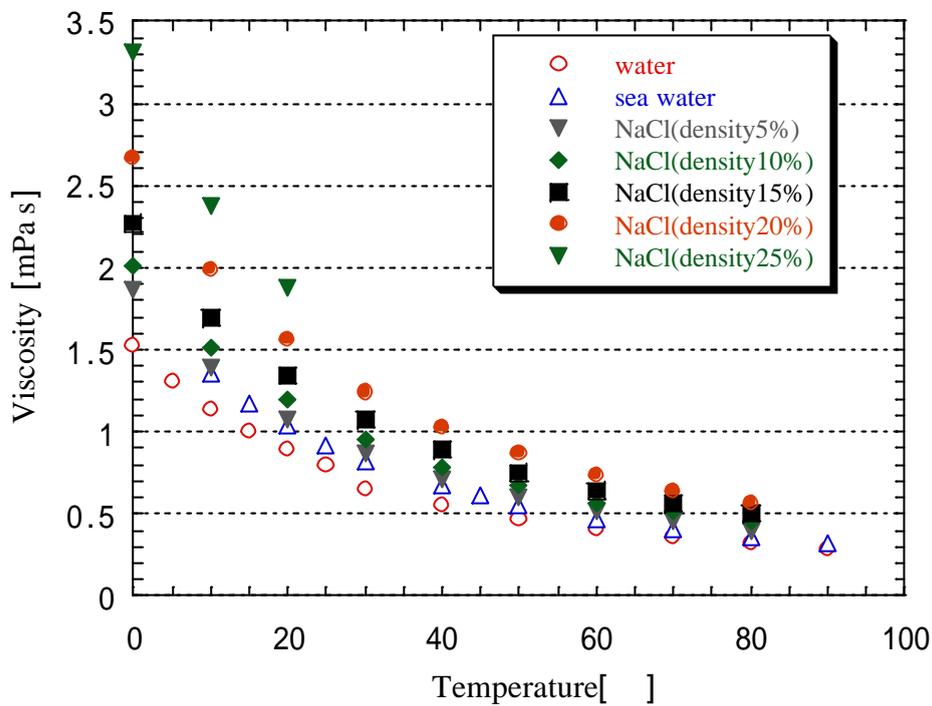


図 2-2 温度と粘性係数の関係

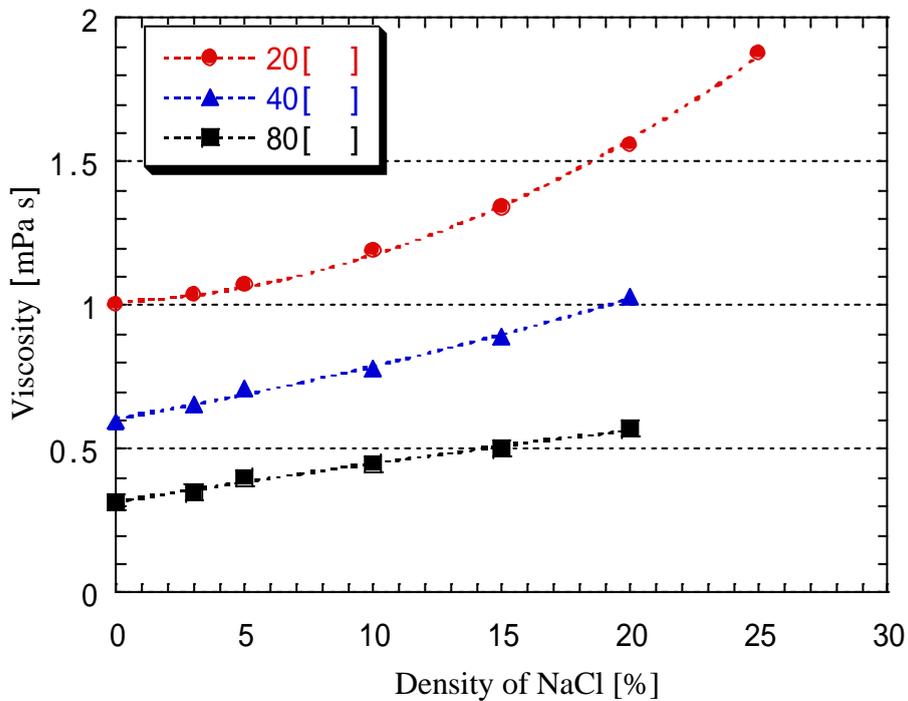


図 2-3 NaCl 濃度と粘性係数の関係

表 2-2 人工海水の粘性係数測定結果

| 温度<br>[ ° ] | 水                                    |                   | 人工海水              |                                   |                                |                            |                                  |
|-------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
|             | 動粘性<br>$n_1$<br>[mm <sup>2</sup> /s] | 測定時間<br>$t_1$ [s] | 測定時間<br>$t_2$ [s] | 動粘性係数<br>$n$ [mm <sup>2</sup> /s] | 密度<br>$r$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 粘性係数<br>$m$ [mPa·s]        | 粘性係数<br>平均値<br>$\bar{m}$ [mPa·s] |
| 0           | 1.792                                |                   |                   |                                   | 1.0285                         |                            |                                  |
| 10          | 1.307                                | 204<br>204<br>204 | 206<br>206<br>205 | 1.3191<br>1.3185<br>1.3173        | 1.0277                         | 1.3556<br>1.3551<br>1.3538 | 1.3548                           |
| 15          | 1.139                                | 180<br>180<br>180 | 181<br>180<br>181 | 1.1450<br>1.1450<br>1.1445        | 1.0272                         | 1.1762<br>1.1762<br>1.1756 | 1.1760                           |
| 20          | 1.0038                               | 152<br>151<br>151 | 152<br>152<br>152 | 1.0042<br>1.0106<br>1.0111        | 1.0266                         | 1.0309<br>1.0375<br>1.0379 | 1.0355                           |
| 25          | 0.893                                | 140<br>141<br>140 | 140<br>140<br>140 | 0.8930<br>0.8867<br>0.8930        | 1.0254                         | 0.9157<br>0.9092<br>0.9157 | 0.9135                           |
| 30          | 0.801                                | 131<br>130<br>131 | 130<br>131<br>130 | 0.7949<br>0.8072<br>0.7949        | 1.0221                         | 0.8125<br>0.8250<br>0.8125 | 0.8166                           |
| 40          | 0.658                                | 106<br>107<br>106 | 108<br>107<br>108 | 0.6704<br>0.6580<br>0.6704        | 1.0196                         | 0.6836<br>0.6709<br>0.6836 | 0.6793                           |
| 45          | 0.602                                | 97<br>98<br>98    | 98<br>98<br>98    | 0.6082<br>0.6020<br>0.6020        | 1.0180                         | 0.6192<br>0.6128<br>0.6128 | 0.6149                           |
| 50          | 0.554                                | 90<br>91<br>91    | 90<br>90<br>90    | 0.5512<br>0.5444<br>0.5449        | 1.0158                         | 0.5599<br>0.5530<br>0.5535 | 0.5555                           |
| 60          | 0.475                                | 79<br>79<br>79    | 77<br>77<br>77    | 0.4631<br>0.4627<br>0.4616        | 1.0100                         | 0.4677<br>0.4674<br>0.4662 | 0.467                            |
| 70          | 0.413                                | 70<br>71<br>71    | 69<br>69<br>69    | 0.4042<br>0.4021<br>0.4010        | 1.0056                         | 0.4065<br>0.4044<br>0.4032 | 0.4047                           |
| 80          | 0.365                                | 63<br>63<br>63    | 61<br>61<br>61    | 0.3543<br>0.3556<br>0.3546        | 0.99963                        | 0.3542<br>0.3555<br>0.3545 | 0.3547                           |
| 90          | 0.326                                | 56<br>57<br>57    | 56<br>55<br>56    | 0.3223<br>0.3189<br>0.3205        | 0.99334                        | 0.3201<br>0.3168<br>0.3184 | 0.3184                           |

### 3 参考文献

- ・日本規格協会：“化学製品の密度及び比重測定方法”，JIS K 0061（2001）
- ・日本規格協会：“液体の粘度 - 測定方法”，JIS Z 8803（1991）
- ・日本規格協会：“化学分析用ガラス器具”，JIS R 3503（2000）
- ・国立天文台編：理科年表 平成 11 年（1998）
- ・J.P.Riley and G.Skirrow：Chemical Oceanography（1975）
- ・日本化学会編（改定 2 版）：化学便覧（基礎編 II）（1975）