

緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数

1996年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数

実施責任者：石川博久*、石黒勝彦*

報 告 者：鈴木英明**、藤田朝雄*、菅野 毅*

要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアおよび、その周辺岩盤から成るニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の地圧変化などの現象が相互に影響することが予想される。このような、熱-水-応力連成現象を評価することは、ニアフィールド環境の明確化の観点から重要な課題の一つである。

動燃事業団では、熱-水-応力連成現象を評価するために、個々の現象に関わるメカニズムを明らかにするための研究とともに、大型緩衝材試験設備（BIG BEN）を用いての連成現象の観察や、これを解析する手法およびコードの開発を行っている。

本報告は、緩衝材の候補材であるベントナイトを対象に、熱-水-応力連成現象解析のための入力データとなる水分ポテンシャルと水分拡散係数について、その体積含水率および温度依存性を実験的に明らかにし、定式化を行ったものである。

*環境技術開発部 地層処分開発室

**検査開発（株）

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1.はじめに | 1 |
| 2.水分ポテンシャルの測定 | 2 |
| 2.1 水分ポテンシャル | 2 |
| 2.2 測定方法 | 3 |
| 2.3 水分ポテンシャルの算出 | 5 |
| 2.4 ベントナイト試料 | 7 |
| 2.4.1 ベントナイトの鉱物組成 | 7 |
| 2.4.2 ベントナイトの物理特性 | 8 |
| 2.5 試料調整 | 9 |
| 2.6 試験条件 | 10 |
| 2.7 試験結果および考察 | 12 |
| 2.7.1 水分特性曲線のヒステリシス | 12 |
| 2.7.2 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線の比較 | 14 |
| 2.7.3 水分特性曲線の温度依存性 | 15 |
| 2.7.4 水分特性曲線のモンモリロナイト含有率依存性 | 20 |
| 2.8 まとめ | 23 |
| 3.水分拡散係数の測定 | 24 |
| 3.1 試験方法 | 24 |
| 3.2 試験条件 | 25 |
| 3.3 試験結果および考察 | 26 |
| 3.3.1 水分分布 | 26 |
| 3.3.2 水分拡散係数の算出 | 28 |
| 3.4 実験式 | 32 |
| 3.4.1 実験式の考え方 | 32 |
| 3.4.2 解析による実験式の検討 | 39 |
| 3.5 まとめ | 46 |
| 4.KID BEN（室内小型三連成試験装置）試験 | 47 |
| 4.1 試験方法および条件 | 47 |
| 4.2 試験結果 | 50 |
| 4.2.1 膨潤応力測定結果 | 50 |
| 4.2.2 水分分布 | 51 |
| 4.3 水分拡散係数妥当性の評価 | 52 |
| 4.4 まとめ | 54 |
| 5. 結語 | 55 |
| 6. 参考文献 | 56 |

1.はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体定置後のニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の地圧変化などの現象が相互に影響することが予想される。このような、熱－水－応力連成現象を評価することは、ニアフィールド環境の明確化の観点から重要な課題の一つである。

熱－水－応力連成現象を明らかにするためには、まず、個々の現象に関わるメカニズムを明らかにする必要があるが、このうち地下水の浸入は、緩衝材に膨潤圧を発生させたり、伝熱性を変化させるなど熱や応力に影響を及ぼす大きな要因と考えられる。

不飽和圧縮ベントナイト中の水分は、水蒸気と液状水の二相で移動すると言われているが⁽¹⁾⁽²⁾、両者を明確に分けて取り扱うことが難しいことから、一般に両者を合わせた見かけの水分拡散係数（以下、水分拡散係数）を用いた拡散モデルを用いて、その移動が解析される例⁽³⁾⁽⁴⁾が多い。しかし、このような簡易モデルでは、熱や応力との連成現象を詳細に把握することが困難なため、そのモデル化においては、水蒸気と液状水の二相流としての取扱いが必要となる。不飽和圧縮ベントナイト中の水蒸気と液状水の二相流については、密度の低いベントナイトでの水分拡散係数と体積含水率の相関から、低含水領域で水蒸気移動が、高含水領域では液状水移動が卓越すると推察されている⁽²⁾。このような二相流としての取扱いをするためには、水蒸気および液状水の各々の移動が存在するという証明がなされなければならない、さらに、それぞれの水分拡散係数を把握する必要がある。

これまでに、熱－水－応力連成現象の解析に適用することを目指して、不飽和圧縮ベントナイト中の水分ポテンシャルと水分拡散係数を測定し、それらの密度依存性及び温度依存性を調べている。更に、得られた水分拡散係数について、Philip & Vries 式⁽⁵⁾及び Darcy 式を用いて、液状水移動において定義されたものか、あるいは水蒸気移動において定義されたものかを調べ、ベントナイト中の水の移動形態が解明されてきている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

また、熱－水－応力連成モデルの開発も着実に進んでおり、国際共同研究「DECOVALEX」の中でこれまでに開発したモデルを用いての解析評価を実施している⁽⁸⁾。

本論は、熱－水－応力連成現象の解析に直接用いる入力データを定式化することを目的に、不飽和圧縮ベントナイト中の水分拡散係数と水分ポテンシャルを測定し、それらの体積含水率および温度依存性を調べ、その定式化を行った。また、熱－水－応力連成試験を室内にて実施する装置として製作された KID BEN（室内小型三連成試験装置）を用いた試験で得られた水分分布を用いて、上記の水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表わす実験式の妥当性の評価を行ったので報告する。

2.水分ポテンシャルの測定

2.1 水分ポテンシャル

土中水のポテンシャルは、土粒子と水の結びつきの程度を表し、土中の水分移動や吸水のしやすさなどの性質に係わるものである。土中水のポテンシャルは土の水分量や土の種類によって大きく変化し、水分量との関係を表す水分特性曲線は不飽和浸透など不飽和土中の水分移動の解析に用いられる。

一般に、土中水は、土粒子表面からの吸着力、土粒子間隙に発生する表面張力（毛管圧）、さらに土粒子の荷電により吸着されているイオンの影響（浸透圧）などを受けて吸引され拘束されており、土粒子からの影響の程度によって氷に近い構造を持つようなものから、通常の液体状のものまで、様々な状態の水として存在しているとされている。これらの土中水の存在状態を表わす化学ポテンシャルは、同一温度で大気圧下にある純水の化学ポテンシャルよりも低下している。その要因には次のようなものがある。

- (1) 毛管圧による低下 φ_m （マトリックスポテンシャル）
- (2) 浸透圧による低下 φ_o （浸透ポテンシャル）
- (3) 位置エネルギーの差 φ_g （重力ポテンシャル）

従って、土中水の全ポテンシャル ψ は次のように表わせる。

$$\psi = \varphi_m + \varphi_o + \varphi_g \quad (2.1)$$

後述するサイクロメータ法では、全ポテンシャルが計測されるが、これには主にマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルが含まれる⁽⁹⁾。

本論では、サイクロメータによって計測されるポテンシャルを水分ポテンシャルとすることとする。

純水と比べた化学ポテンシャルの低下量は、大気圧を基準にとると負の圧力を示す。この負の圧力の絶対値がサクションであり、土壌物理の分野では習慣的に圧力水頭の単位[m]（もしくは[cm]）を用いることが多い。

2.2 測定方法

水分ポテンシャルの測定方法には、吸引法、土柱法、加圧板法、サイクロメータ法などがあり、測定するポテンシャルの領域により使い分けられる⁽⁹⁾。この内、サイクロメータ法は $-10^3 \sim -10^6$ [cm]のポテンシャル領域の測定に適していることや、比較的短時間で測定できることから、サイクロメータ法によりベントナイト試料の水分ポテンシャルの測定を行った。測定に用いたサイクロメータ（SC-10A : Decagon Device社製）は熱電対サイクロメータと呼ばれるもので、ナノボルトメータ（NT-3: Decagon Device社製）に接続された熱電対の接点を湿球として、試料と平衡にある水蒸気の相対湿度を求めるものである。

試験装置の概略図を図2.1に示す。

サイクロメータを恒温恒湿グローブボックス内に静置し、内蔵の温度計で周囲の温度と平衡になっていることを確認する。試料をサイクロメータ内のサンプルホルダーに入れ、試料とチャンバー内の湿度を平衡にするため約30分間放置する。次に、試料が置かれたチャンバー内に湿球（熱電対を純水で濡らしたもの）を移す。湿球近傍の空気は飽和蒸気圧になっているため、湿球は蒸発によって潜熱が奪われ温度が低下する。一方、湿球の温度低下によって外部から湿球に向かう熱流が生じ顕熱が発生する。湿球の温度は潜熱と顕熱が釣り合う温度で平衡に達する。この時の出力電圧とチャンバー内の温度をナノボルトメータにて読み取る。計測された出力電圧と温度から水分ポテンシャル（サクシオン）を算出する。本装置は、最小レンジで0.1マイクロボルトを計測することができ、これはサクシオンで約100[cm]に相当する。また、チャンバー内の温度を0.1℃で計測できる精度を有する。

出力電圧の測定終了後、試料の重量を測定し、炉乾燥（110℃で24時間）により含水比を求める。

以上より、サクシオンと水分量の関係（水分特性曲線）を得る。

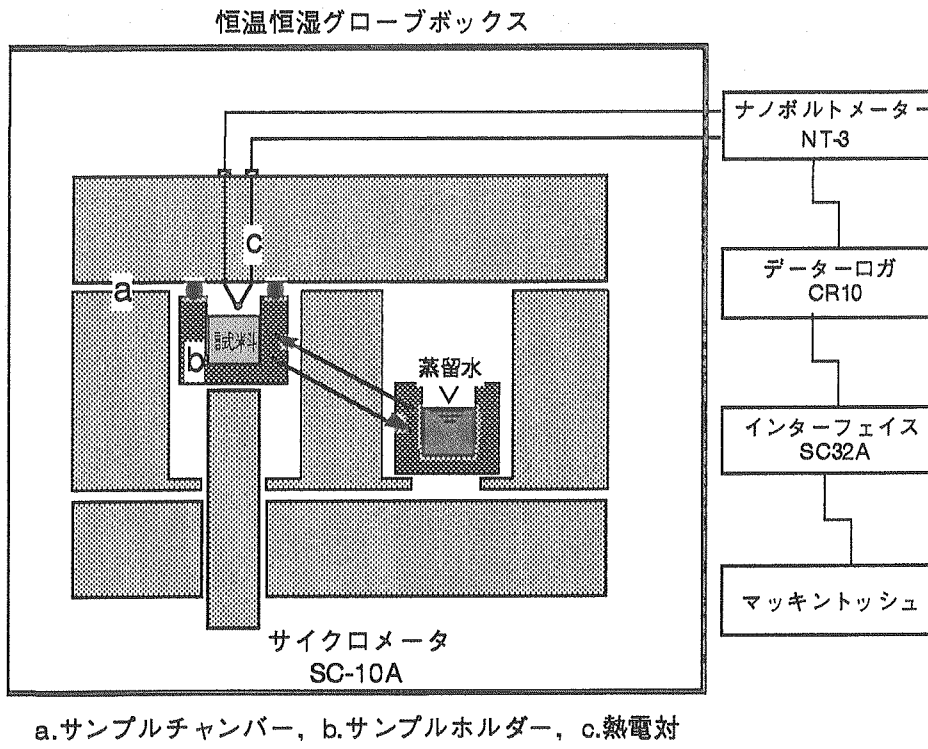


図2.1 試験装置

2.3 水分ポテンシャルの算出

水のポテンシャルエネルギー ψ と相対湿度 p/p_0 の間には次の関係がある⁽¹⁰⁾。

$$\psi = \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.2)$$

ここで、 ψ は単位重量当りのポテンシャル、 M は水の分子量、 R は気体定数、 T は絶対温度、 p および p_0 はその温度における試料の水蒸気圧と飽和水蒸気圧である。

湿球の熱収支を考えると、試料表面の水蒸気圧 p と湿球表面の水蒸気圧 p_{0w} の差と、湿球の温度低下 ΔT との関係は次式で与えられる。

$$p_{0w} - p = \gamma * \Delta T \quad (2.3)$$

ここで、 $\gamma *$ は見かけのサイクロメータ定数であり、後述するキャリブレーションにより求められる。また、チャンバーの温度（試料温度）を T_d 、湿球の温度を T_w とすると、

$$\Delta T = T_d - T_w \quad (2.4)$$

である。飽和水蒸気圧 p_0 と温度 T との関係の ΔT 区間の平均勾配を s とすると、

$$p_0 - p_{0w} = s \Delta T \quad (2.5)$$

となり、(2.5) 式と (2.3) 式より、以下の関係が得られる。

$$\begin{aligned} p/p_0 &= 1 - [(s + \gamma *) / p_0] \Delta T \\ &= 1 - c \Delta T \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、(2.6) 式中の $[\]$ 内を c としたが、この c は湿球の温度低下 1 K あたりの相対湿度の低下量であり、すなわちサイクロメータの感度を表わす。

飽和水蒸気圧 p_0 は温度の関数として次の近似式で算出できる⁽¹⁰⁾。

$$p_0(T) = \exp(52.57633 - 6790.4985/T - 5.02808 \ln(T)) \quad (2.7)$$

ここでの p_0 の単位は kPa、 T は絶対温度である。

(2.5) 式より、勾配 s は

$$s = (p_0(Td) - p_0(Tw)) / \Delta T \quad (2.8)$$

となる。ここで、 $p_0(Td)$ および $p_0(Tw)$ はそれぞれ (2.7) 式より算出できる。

サイクロメータ定数 γ^* は、相対湿度が分かっている塩溶液を測定することにより設定することができる。本試験では既知の相対湿度を保つものとして KCl飽和溶液 (相対湿度0.86⁽⁹⁾) を用いた。

例えば、KCl飽和溶液を測定した結果、出力電圧が $105[\mu V]$ 、チャンバーの温度が $25.0[^\circ C]$ (=298.15K) とすれば、本サイクロメータの感度は $60[\mu V/^\circ C]$ なので⁽¹¹⁾、湿球の温度低下 ΔT は、

$$\Delta T = 105/60 = 1.75(K) \quad (2.9)$$

となる。よって (2.6) 式の c は、

$$c = (1 - 0.86) / 1.75 = 0.08(K^{-1}) \quad (2.10)$$

となる。また、湿球温度は、

$$Tw = 298.15 - 1.75 = 296.4(K) \quad (2.11)$$

となるので (2.7) 式から、

$$p_0(Td) = 3.167, \quad p_0(Tw) = 2.852 \text{ (kPa)} \quad (2.12)$$

となり (2.8) 式から、

$$s = (3.167 - 2.852) / 1.75 = 0.18(kPaK^{-1}) \quad (2.13)$$

となる。(2.12) (2.13) および (2.6) 式より γ^* は次のように設定される。

$$\gamma^* = cp_0(Td) - s = 0.08 \times 3.167 - 0.18 = 0.0734(kPaK^{-1}) \quad (2.14)$$

2.4 ベントナイト試料

2.4.1 ベントナイトの鉱物組成

水分ポテンシャルの測定に用いたベントナイトは、クニゲルV1（山形県月布産、クニミネ工業（株）製）、クニゲルV1と同一鉱床から産出される精製ベントナイトのクニピアF（山形県月布産、クニミネ工業（株）製）、さらに、海外で標準的材料として研究例の多い米国ワイオミング産のMX-80の三種類である。各ベントナイトの鉱物組成を表2.1～2.3に示す。三種類のベントナイトは、粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とし、各ベントナイトでその含有量に違いが認められる。

表2.1 クニゲルV1の鉱物組成⁽¹²⁾

| 鉱物種 | wt% |
|----------|---------|
| モンモリロナイト | 46～49 |
| 石英、玉髄 | 29～38 |
| 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 |

表2.2 クニピアFの鉱物組成⁽¹²⁾

| 鉱物種 | wt% |
|----------|-------|
| モンモリロナイト | 98～99 |
| 石英、方解石 | 1～2 |

表2.3 MX-80の鉱物組成⁽¹³⁾

| 鉱物種 | wt% |
|----------|------|
| モンモリロナイト | 75 |
| 石英 | 15.2 |
| 長石 | 5~8 |
| 方解石、苦灰石 | 1.4 |
| 黄鉄鉱 | 0.3 |
| 雲母 | <1 |
| カオリナイト | <1 |
| その他の鉱物 | 2 |
| 有機物 | 0.4 |

2.4.2 ベントナイトの物理特性

各ベントナイトの物理特性をまとめて表 2.4に示す。表中の真比重は、ベントナイト試料の間隙率や飽和度、体積含水率などの状態量を知るために必要であるが、各ベントナイトともに天然の粘土質岩を精製したものであり鉱物組成のばらつき等から必ずしも一定の値を示すものではない。しかしながら、試験の評価上、統一した値を用いなければならず、これまでの比重試験(JIS A 1202)および結晶構造からの算出結果⁽¹⁴⁾より、各ベントナイトともに真比重を2.7とした。また、液性限界、塑性限界、塑性指数、収縮限界の測定方法は土質工学会基準で定められている土の液性限界・塑性限界試験方法JSF T 141-1990)と土の収縮定数試験方法JSF T 145-1990)に従って得られたものである⁽¹⁵⁾。

表2.4 ベントナイトの物理特性

| 物理特性 | クニゲルV1 | クニピアF | MX-80 |
|-------------|--------|-------|-------|
| 真比重 Gc | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| 液性限界 wL [%] | 416 | 993 | 450 |
| 塑性限界 wp [%] | 21 | 42 | 37 |
| 塑性指数 Ip [%] | 395 | 951 | 413 |
| 収縮限界 ws [%] | 11 | 10 | 13 |

2.5 試料調整

(1) 含水比調整

a) 吸水過程の含水比調整方法

大気放置のベントナイト粉末（含水比約8%）を炉乾燥（110℃、24時間）にて乾燥試料（含水比0%）とする。その後、水分調整装置（回転するドラム内のベントナイト粉末に超音波加湿器により発生させた霧を噴霧し吸水させる装置）を用い、所定の水分量に調整する。この過程で、5分間隔でサンプリングを行い保存する。本方法により吸水過程試料の含水比を約0%から40%の間で多数用意する。

b) 脱水過程の含水比調整方法

上記の吸水過程で得られた含水比約15%のベントナイト粉末を110℃の恒温槽を用いて乾燥させていく過程で5分間隔でサンプリングを行い保存する。本方法により脱水過程試料の含水比を約11%から0%の間で多数用意する。

(2) 測定用試料

a) 圧縮成型体

上記の方法で含水比調整を行ったベントナイト試料を専用の金型を用いて直径φ13mm、高さ9mmの寸法に所定の乾燥密度で圧縮成型する。その後、金型より抜き出しサイクロメータのサンプルホルダーに入れ測定用試料とする。

b) 粉末ベントナイト

上記の方法で含水比調整を行ったベントナイト試料を約0.3gを採取し、サイクロメータのサンプルホルダーに入れ測定用試料とする。

2.6 試験条件

水分ポテンシャルと水分量の関係は水分特性曲線と呼ばれている。一般に土の場合、この水分特性曲線にはヒステリシスがあり、乾燥過程（脱水曲線）と浸潤過程（吸水曲線）で得られる結果が異なると言われている⁽¹⁾。

実際の処分場における緩衝材は、地温や廃棄体からの発熱による脱水過程や地下水の浸潤による吸水過程の履歴を受けることが予想される。このため、緩衝材中の水移動を解析するためには、脱水曲線、吸水曲線を使い分ける必要がある。したがって、試験では、まず圧縮ベントナイトの脱水過程、吸水過程の水分特性曲線のヒステリシスを確認することとした。次に、試料の圧縮による影響を調べるために、圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線を比較する。さらに、温度をパラメータとして三種類のベントナイトの測定を行い、水分特性曲線の温度依存性、モンモリロナイト含有率依存性について検討を行うこととした。個々の試験条件を以下に示す。

(1) 水分特性曲線ヒステリシスの確認試験

前述した含水比調整方法により得られた吸水過程および脱水過程の粉末ベントナイトを乾燥密度 $1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$ に圧縮成型し、水分ポテンシャルの測定を行う。圧縮ベントナイトの含水比は $0[\%]$ から理論飽和含水比の $18.5[\%]$ の間である。試験条件を表2.5に示す。

表2.5 水分特性曲線ヒステリシスの確認試験

| ベントナイト | クニゲルV1 | |
|-------------------------------|----------------------|----------------|
| 試料 | 圧縮ベントナイト（吸水過程） | 圧縮ベントナイト（脱水過程） |
| 含水比 [%] | 0～約18 | 約12～0 |
| 乾燥密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ | 1.8 | |
| 寸法 [mm] | $\phi 13 \times$ 高さ9 | |
| 試験温度 $[\text{C}]$ | 25 | |

(2) 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの比較試験

吸水過程のベントナイトを用いて、圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分ポテンシャルの比較を行う。試験条件を表2.6に示す。

表2.6 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの比較試験

| ベントナイト | クニゲルV1 | |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| 試料 | 圧縮ベントナイト (吸水過程) | 粉末ベントナイト (吸水過程) |
| 乾燥密度 [g/cm ³] | 1.8 | — |
| 含水比 [%] | 0～約18 | 0～約40 |
| 寸法 [mm] | φ13×高さ9 | — |
| 試験温度[°C] | 25 | |

(3) 各種ベントナイトの温度パラメータ試験

クニゲルV1およびクニゲルV1と同一鉱床から産出される精製ベントナイトのクニピアF、さらに海外で標準的材料として研究例の多い米産のMX-80の三種類のベントナイトについて、温度をパラメータとして水分ポテンシャルの測定を行う。試験条件を表2.7に示す。

表2.7 温度パラメータ試験

| | |
|-----------|--------------------|
| ベントナイト | クニゲルV1、クニピアF、MX-80 |
| 試料 | 粉末ベントナイト (吸水過程) |
| 含水比 [%] | 0～約40 |
| 試験温度 [°C] | 25、40、60 |

2.7 試験結果および考察

2.7.1 水分特性曲線のヒステリシス

試験で得られた圧縮ベントナイトの水分ポテンシャルと含水比の関係（以下、水分特性曲線という）について、吸水過程を図2.2に、脱水過程を図2.3に示す。図中縦軸のサクシヨンは水分ポテンシャルを圧力水頭の単位で表したものである。また、図中の数字は含水比調整の順番を示す。すなわち、図2.2における"1"は大気放置の粉末ベントナイト（含水比約8%）を圧縮成型したときの測定値、"2"は大気放置の粉末ベントナイトを炉乾燥させ含水比0%とし、これを圧縮成型したときの測定値、"3"~"9"は含水比0%の粉末ベントナイトに水分を吸水させていく過程で、これを圧縮成型したときの測定値である。また、図2.3の数字は吸水過程で得られた含水比約15%の粉末ベントナイトを脱水させていく過程で、これを圧縮成型し測定した順番を示す。

一般に土の場合は、吸水過程と脱水過程で水分特性曲線にヒステリシスがあると言われているが⁽¹⁾、図2.4に示すように今回の圧縮ベントナイトを用いた測定では水分特性曲線に顕著なヒステリシスは見られなかった。

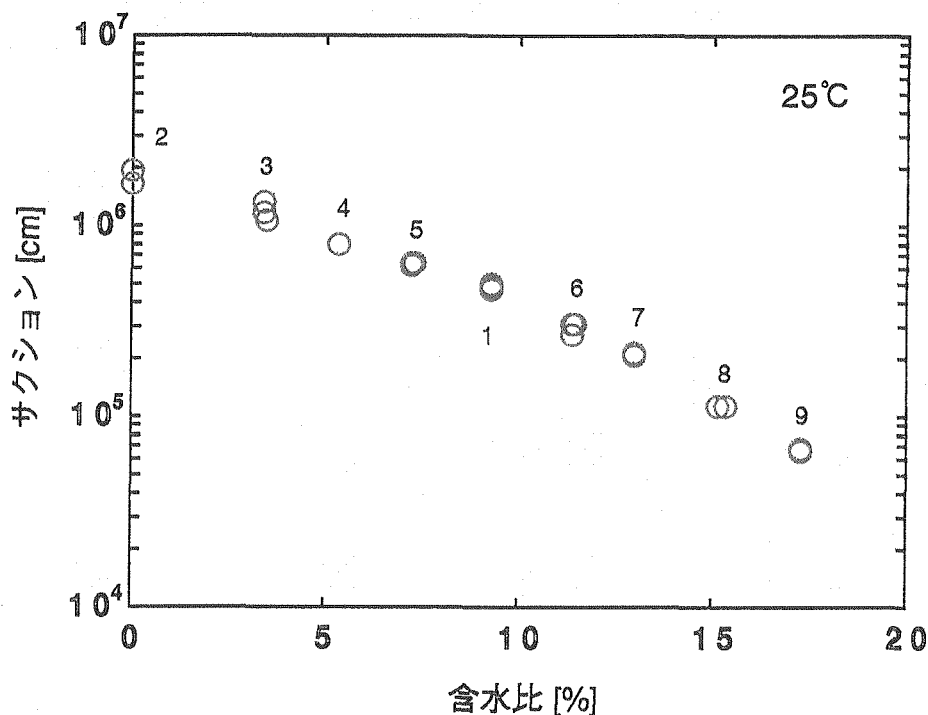


図2.2 吸水過程の水分特性曲線

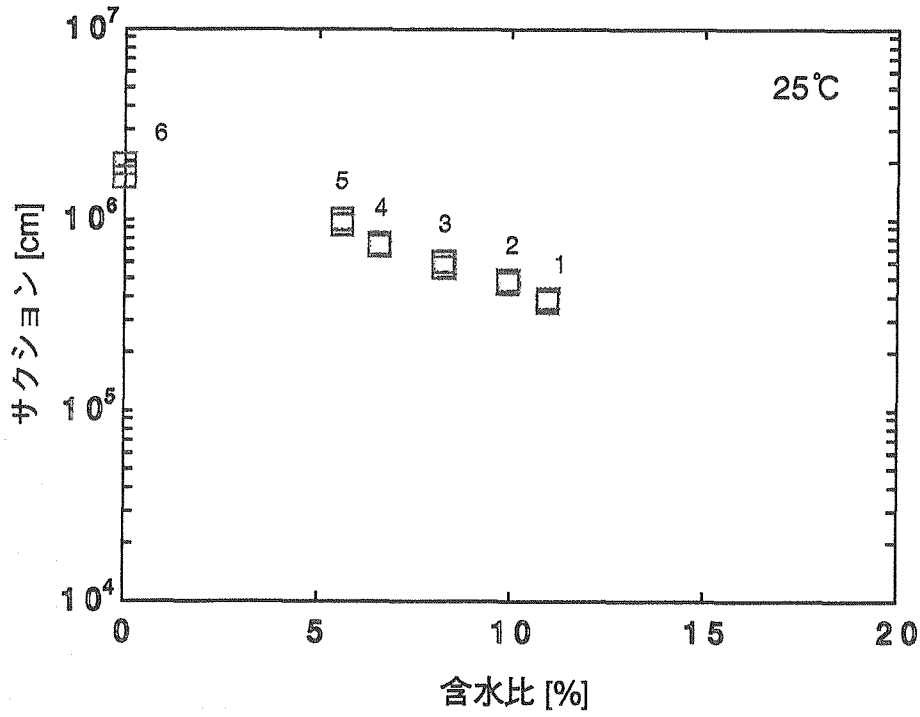


図2.3 脱水過程の水分特性曲線

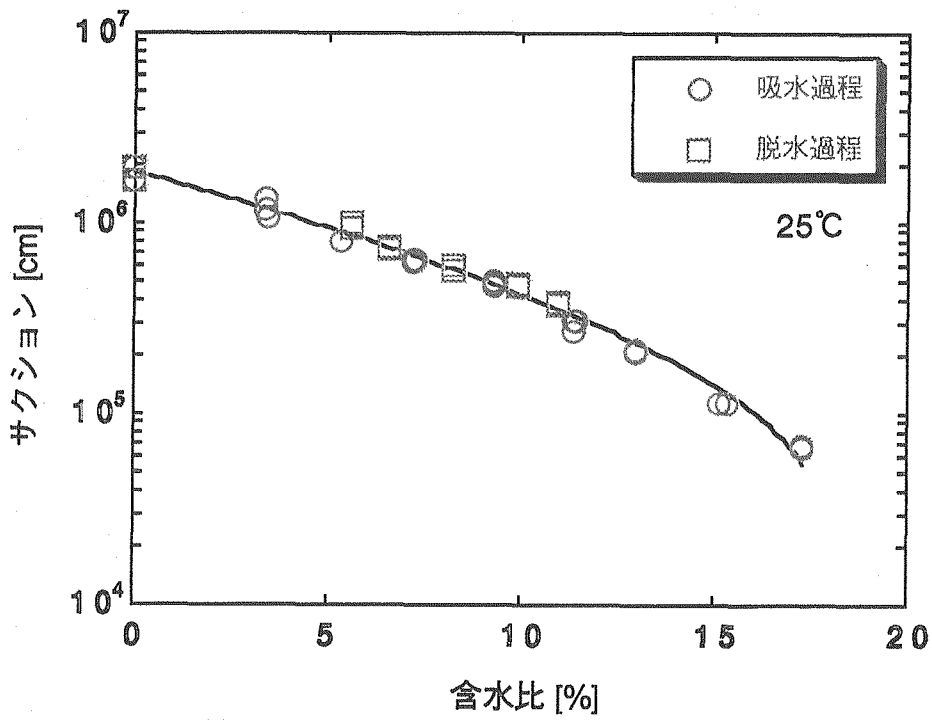


図2.4 吸水過程と脱水過程の水分特性曲線の比較

2.7.2 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線の比較

吸水過程における粉末ベントナイトの水分特性曲線を前述した圧縮ベントナイトの測定結果と合わせて図2.5に示す。その結果、双方の水分特性曲線には顕著な相違は見られなかった。

また、これまでに報告されたデータ⁽⁶⁾と合わせて図2.6に示す。ベントナイトの水分特性曲線は、粉末、圧縮成型体、さらに成型体の密度による顕著な相違は見られないことが分かる。

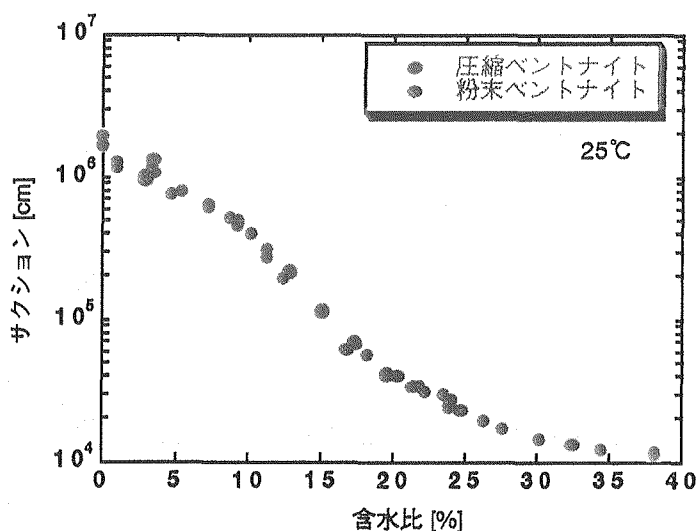


図2.5 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線の比較 (1)

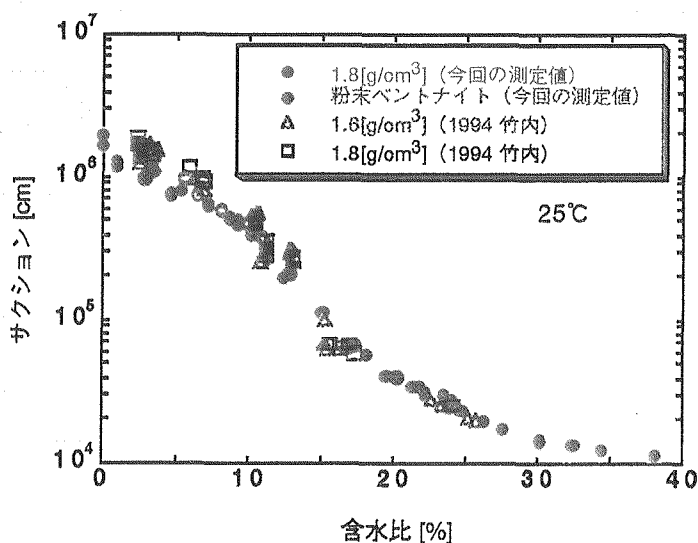


図2.6 圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線の比較 (2)

2.7.3 水分特性曲線の温度依存性

各温度における水分ポテンシャル測定結果について、クニゲルV1を図2.7に、クニピアFを図2.8に、MX-80を図2.9にそれぞれ示す。各ベントナイトともに温度の上昇にともないサクシオンが低下する傾向が見られる。

クニゲルV1について、各温度における水分特性曲線の近似曲線（実験式）を図2.10.1～2.10.3に示す。各温度での実験式は次の通りである。

$$\Psi = a \cdot \exp(-9.5 \times 10^{-3} w^2) + 3.5 \times 10^5 w^{-0.95} \quad (2.15)$$

ここで、 Ψ はサクシオン[cm]、 w は含水比[%]である。

また、係数 a は図2.11に示すように温度と線形関係にあり次のように表せる。

$$a = -1.37 \times 10^4 T + 1.23 \times 10^6 \quad (2.16)$$

ここで、 T は温度[°C]である。したがって、クニゲルV1の水分特性曲線の温度依存性を表す実験式は次のようになる。

$$\Psi = (-1.37 \times 10^4 T + 1.23 \times 10^6) \times \exp(-9.5 \times 10^{-3} w^2) + 3.5 \times 10^5 w^{-0.95} \quad (2.17)$$

ここで、 Ψ はサクシオン[cm]、 w は含水比[%]、 T は温度[°C]である。サクシオンと含水比および温度との関係を三次元で表したものを図2.12に示す。

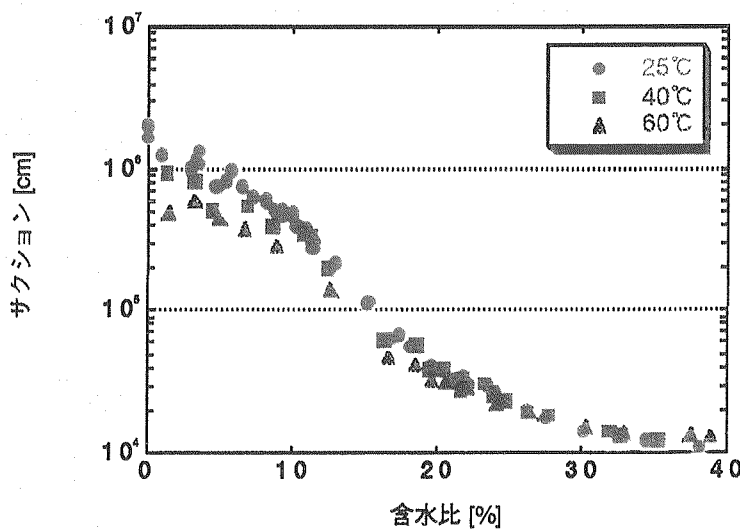


図2.7 クニゲルV1の水分特性曲線

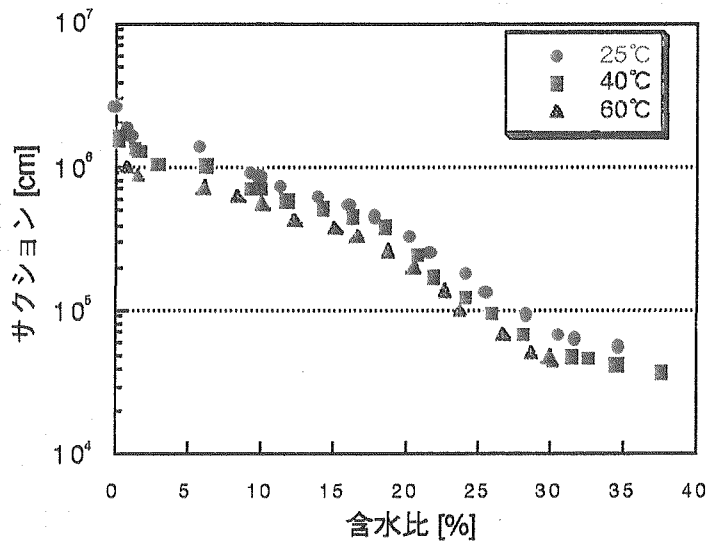


図2.8 クニピアFの水分特性曲線

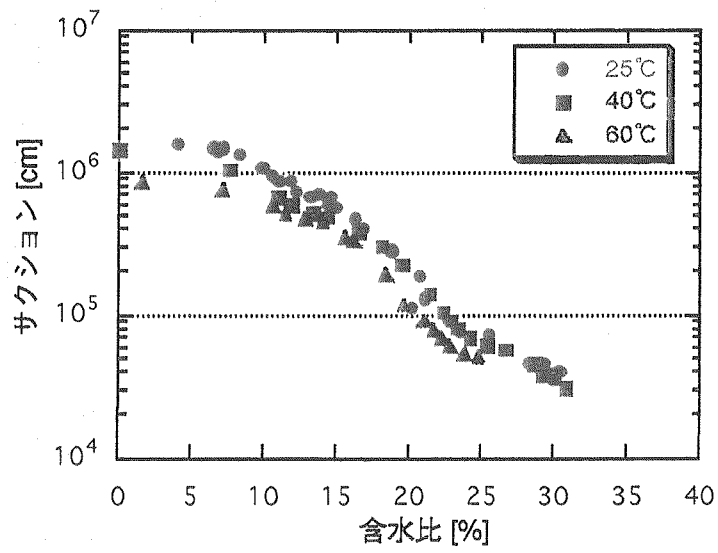


図2.9 MX-80の水分特性曲線

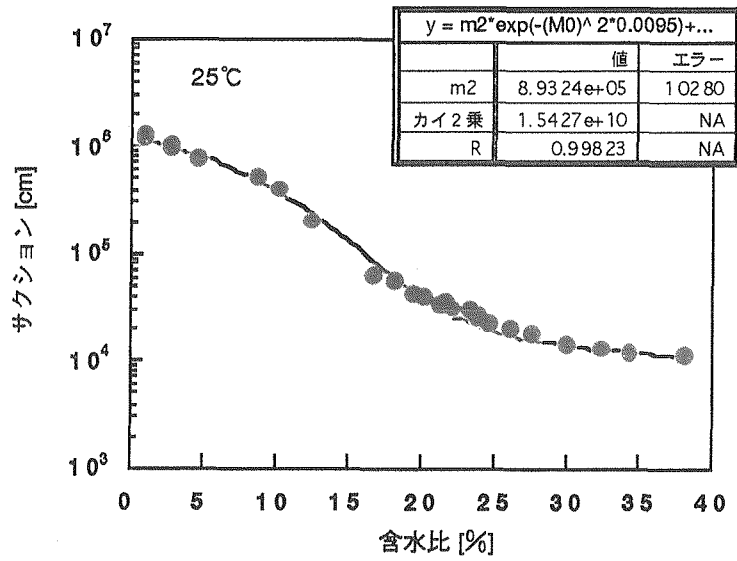


図2.10.1 クニゲルV1の水分特性曲線（試験温度25°C）

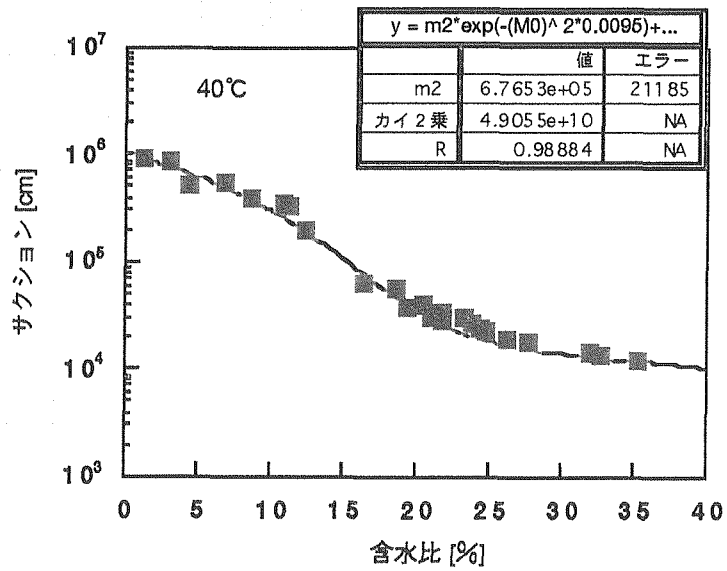


図2.10.2 クニゲルV1の水分特性曲線（試験温度40°C）

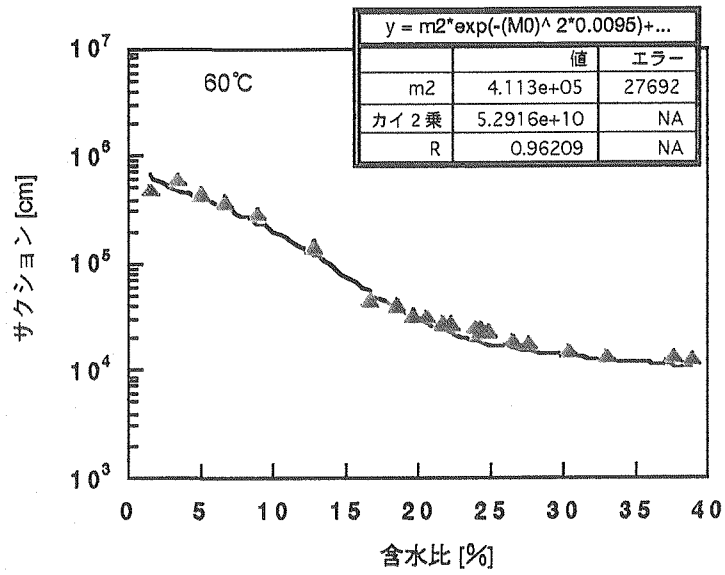


図2.10.3 クニゲル V1の水分特性曲線（試験温度60℃）

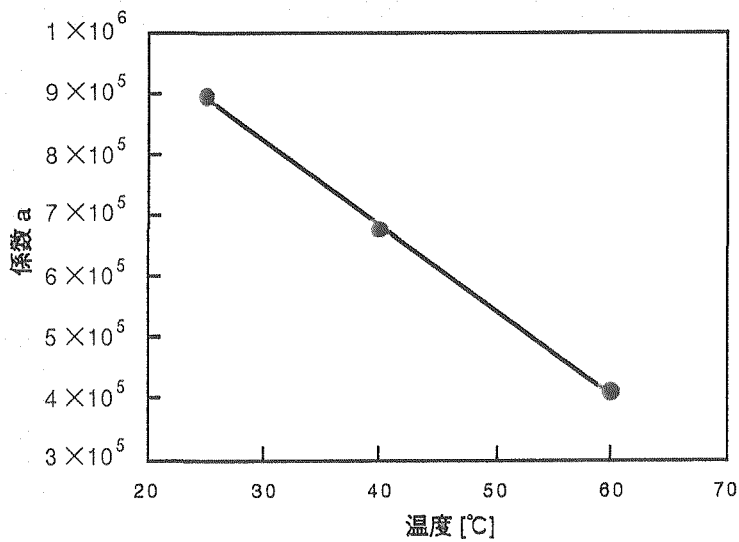


図2.11 温度と係数aの関係

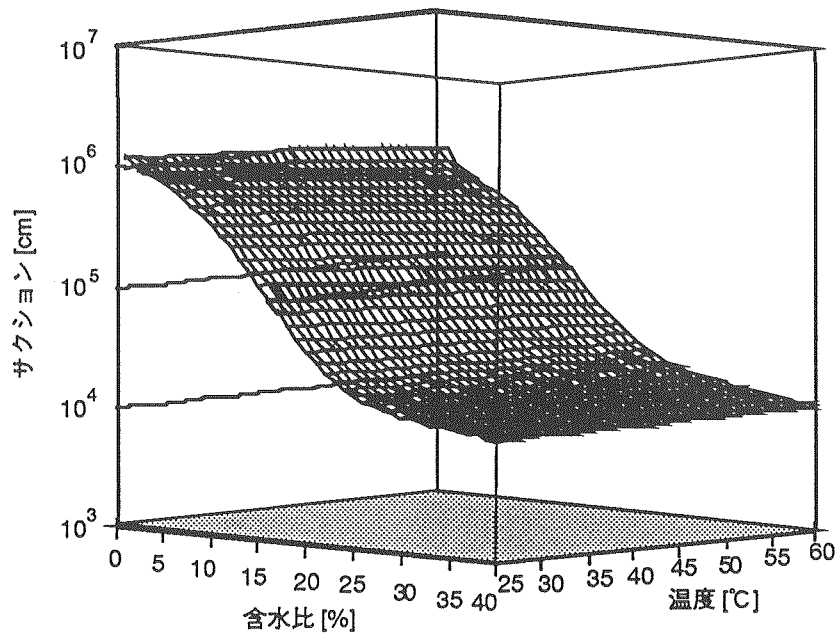


図2.12 サクション、含水比、温度の関係

2.7.4 水分特性曲線のモンモリロナイト含有率依存性

各種ベントナイトの水分特性曲線を比較するため、試験温度25℃の測定結果を図 2.13.1に、40℃を図 2.13.2に、60℃を図 2.13.3にそれぞれ示す。いずれの温度においても水分ポテンシャルはクニピアFが最も大きく、次いでMX-80、クニゲルV1の順であることが分かる。これはベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの含有率に依存するものと考えられる。

そこで、ベントナイトの保水が全てモンモリロナイトによるものと仮定し、

$$w_{mon} = \frac{w}{R_{mon}} \quad (2.18)$$

とする。ここで、 w_{mon} はモンモリロナイト基準含水比[%]、 w は含水比[%]、 R_{mon} はモンモリロナイト含有比[-]である。各ベントナイトのモンモリロナイト含有率を表 2.1~2.3に示した平均値（クニゲルV1で0.475、クニピアFで0.985、MX-80で0.75）とし、モンモリロナイト基準含水比とサクシヨンの関係で整理すると図 2.14.1~2.14.3のようになる。これより、いずれの温度においても水分特性曲線はベントナイトの種類によらず一本の曲線で概ね表せることが分かる。このことから、ベントナイトの水分ポテンシャルはモンモリロナイト含有量に大きく支配されることが分かる。

モンモリロナイト基準含水比とサクシヨンの関係を表す実験式は、前節で示したクニゲルV1の水分特性曲線の温度依存性を表す実験式 (2.17) と (2.18) 式の関係を用いることにより、

$$\Psi = (-1.37 \times 10^4 T + 1.23 \times 10^6) \times \exp(-9.5 \times 10^{-3} (w_{mon} R_{mon})^2) + 3.5 \times 10^5 (w_{mon} R_{mon})^{-0.95} \quad (2.19)$$

と表すことができる。ここで、 Ψ はサクシヨン[cm]、 w_{mon} はモンモリロナイト基準含水比[%]、 R_{mon} はモンモリロナイト含有比[-]である。

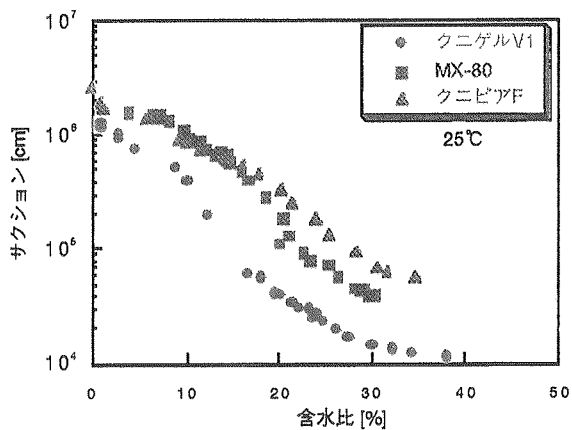


図2.13.1 各種ベントナイトの水分特性曲線（試験温度25℃）

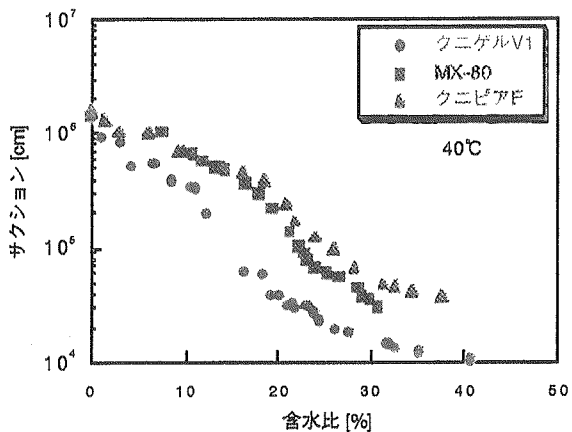


図2.13.2 各種ベントナイトの水分特性曲線（試験温度40℃）

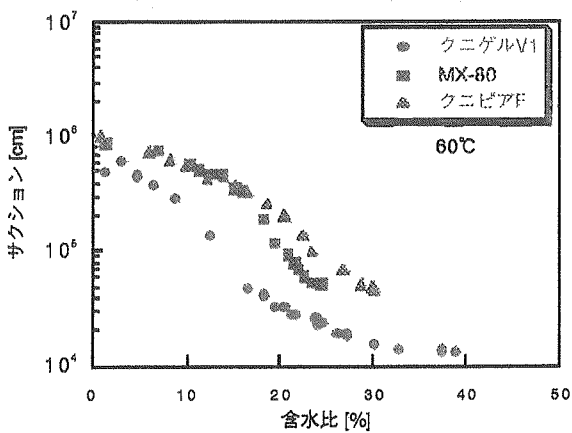


図2.13.3 各種ベントナイトの水分特性曲線（試験温度60℃）

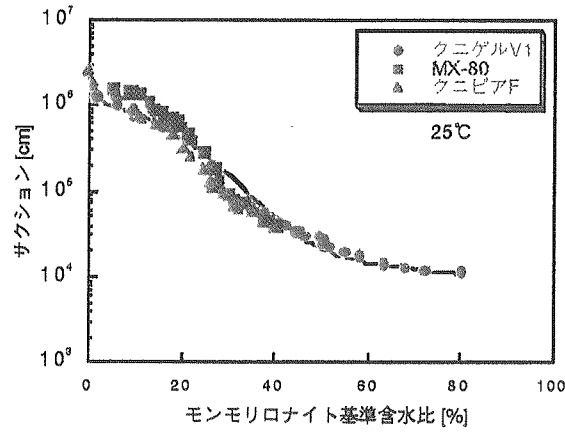


図2.14.1 モンモリロナイト基準含水比とサクシヨンの関係（試験温度25℃）

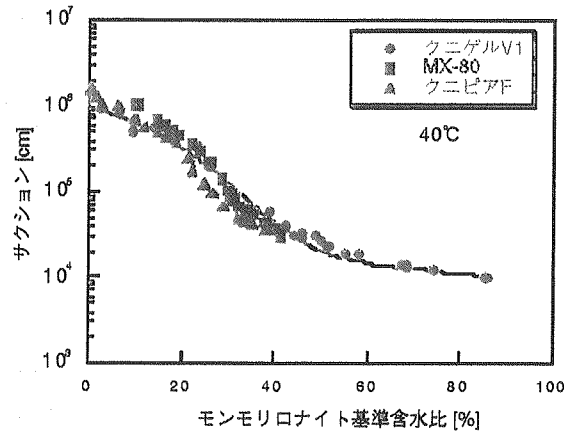


図2.14.2 モンモリロナイト基準含水比とサクシヨンの関係（試験温度40℃）

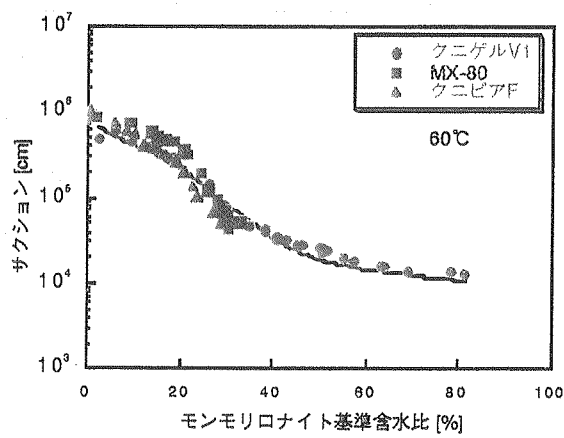


図2.14.3 モンモリロナイト基準含水比とサクシヨンの関係（試験温度60℃）

2.8 まとめ

熱-水-応力連成現象の解析に用いる入力データを定式化することを目的として、ベントナイトの水分ポテンシャルの測定を行った。

試験は、まず圧縮ベントナイトの吸水、脱水過程の水分ポテンシャルを測定し、水分特性曲線のヒステリシスを確認した。次に、圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの水分特性曲線の比較を行った。さらに、モンモリロナイト含有率が異なる三種類のベントナイトについて、温度をパラメータとして水分ポテンシャルの測定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) クニゲルV1圧縮成型体の水分特性曲線には吸水過程、脱水過程での顕著なヒステリシスは観察されなかった。
- (2) 粉末状のクニゲルV1とこれを圧縮した場合の水分特性曲線には顕著な相違は見られなかった。さらに圧縮成型体の密度依存性もないことから、試料の状態により水分特性曲線に大きな相違はないものと考えられる。
- (3) 温度の上昇とともに、水分ポテンシャルが低下し、水分特性曲線の温度依存性が確認された。さらにクニゲルV1については水分特性曲線の温度依存性を表す実験式を得ることができ、実際に解析に用いるデータとしての定式化を行なうことができた。
- (4) 水分ポテンシャルは精製ベントナイトのクニピアFが最も大きく、次いでMX-80、クニゲルV1の順であった。これをモンモリロナイト含有率で整理した結果、ベントナイトの水分ポテンシャルはモンモリロナイト含有率に大きく支配されていることが分かった。さらに、水分ポテンシャルのモンモリロナイト基準含水比依存性および温度依存性を表わす実験式を得ることができた。

今回のサイクロメータによる水分ポテンシャルの測定では、粉末ベントナイトにしても圧縮ベントナイトにしても、非拘束な状態で測定を行っている。ベントナイトは層状体であるモンモリロナイトを主成分としており、水分をその層間に取り込むことにより体積を増加させていく。しかし、実際の処分場においては、緩衝材は周辺岩盤やオーバーパックによって拘束されると考えられるため、今後は、ベントナイトを拘束状態で計測できる装置の開発を行い、ここで得た結果との比較を行う予定である。

3. 水分拡散係数の測定

3.1. 試験方法

不飽和な圧縮ベントナイトの水分拡散係数を求めるために、図3.1に示すステンレス製の装置を用いて水の浸潤試験を行った。ベントナイトにはクニゲルV1を用いた。試験手順を以下に示す。

- (1) 粉末ベントナイトを炉乾燥（110℃、24時間）により乾燥試料とする。
- (2) この乾燥試料を図3.1に示す試験カラムの試料リング内（内径 ϕ 20mm×高さ20mm）で乾燥密度1.8[g/cm³]に圧縮充填する。
- (3) 孔径5 μ mの金属焼結フィルター、および孔径2 μ mのテフロンフィルターで試料の両端を挟み試験カラムを組み立てる。
- (4) ホットプレート、投げ込み式チラーを使用し、所定の温度に保たれた蒸留水の中に試験カラムを漬け、試験カラムの下端から試料に蒸留水を浸潤させる。試験カラム上端の空気口は試料内部の空気を外部に放出するためのものである。なお、試料中の温度が水温とほぼ同じになることを事前の試験で確認している。
- (5) 所定の時間経過後、試料リング内の圧縮ベントナイトをカウンター付き押し出し具を用いて、2mmずつの薄片に10分割する。試験温度40℃、60℃では試料中に浸潤した水分が蒸発する可能性があるため、約5分間、25℃の蒸留水で冷却してから本作業を行った。
- (6) 10分割した各薄片の水分を炉乾燥（110℃、24時間）にて蒸発させ、その重量差より含水比、および体積含水率を求める。

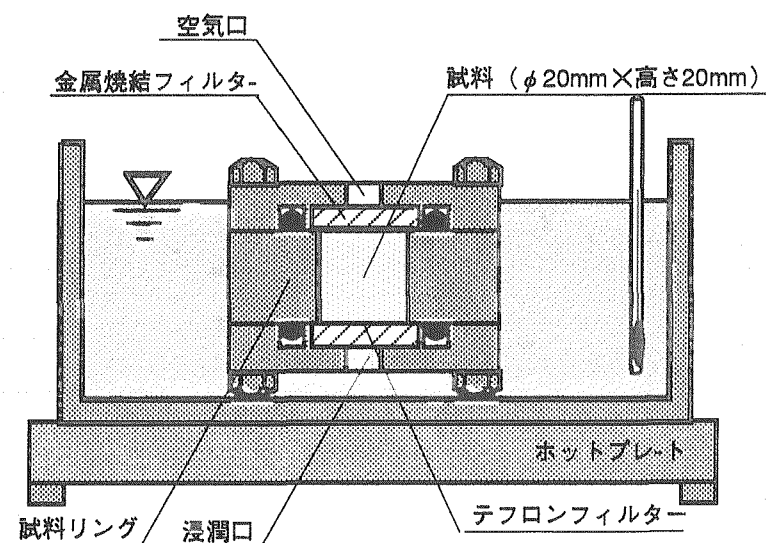


図3.1 浸潤試験装置

3.2 試験条件

試験条件を表3.1に、浸潤時間を表3.2に示す。

表3.1 試験条件

| | |
|--------------------------|--|
| 試料 | クニゲルV1 |
| 乾燥密度[g/cm ³] | 1.8 |
| 初期含水比[%] | 0 (=初期体積含水率 ; 0 [cm ³ /cm ³]) |
| 試料寸法 [mm] | φ 20×高さ20 |
| 試験温度[°C] | 25、40、60 (水温) |
| 浸潤液 | 蒸留水 |

表3.2 浸潤時間

| 試験温度 [°C] | 浸潤時間 [h] |
|-----------|----------------------------|
| 25 | 8、16、24、48、72、96 |
| 40 | 2、4、6、8、16、24、48、72、96、120 |
| 60 | 2、4、6、8、16、24、48、72 |

3.3 試験結果および考察

3.3.1 水分分布

不飽和な圧縮ベントナイトの水の浸潤試験により得られた体積含水率と浸潤面からの距離との関係（以下、水分分布図という）を、試験温度25℃の場合を図3.2.1に、40℃を図3.2.2に、60℃を図3.2.3に各々示す。

図中には各実測値を通る近似曲線（以下、水分分布曲線という）を実線で示す。この時、浸潤面は圧縮成型時の乾燥密度 $1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$ において飽和しているものと仮定し、理論飽和体積含水率の $0.333[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ とした。

これらの図より、各温度ともに時間の経過にともない試料全体に水分が増加していく様子が読み取れる。また、各温度での同一浸潤時間の水分分布を比較すると、温度が高いほど試料全体の水分が多いことが分かる。

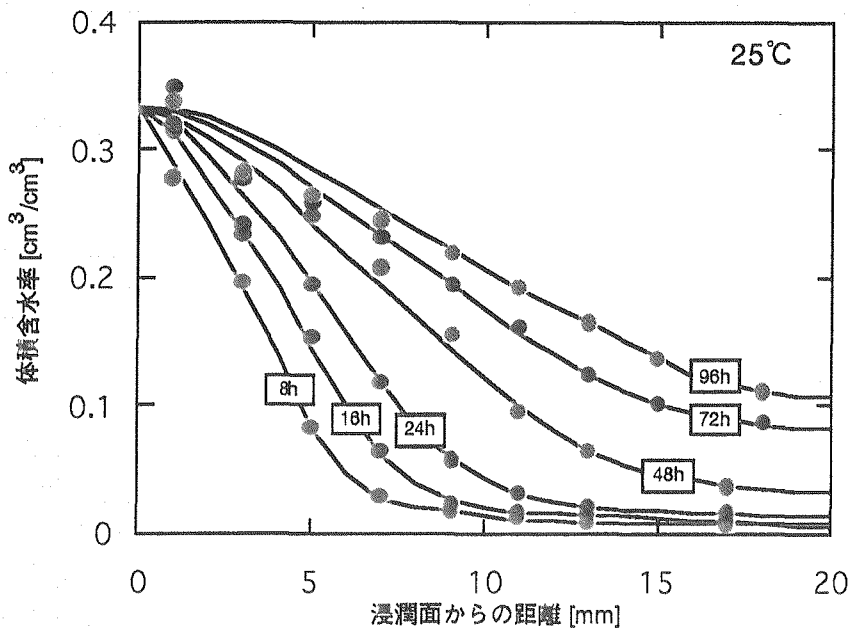


図3.2.1 水分分布図（試験温度25℃）

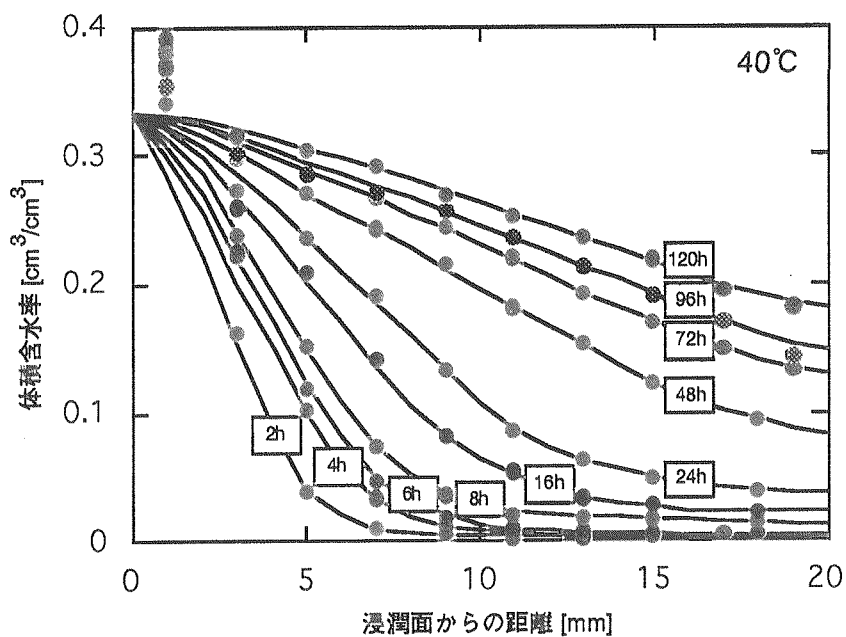


図3.2.2 水分分布図 (試験温度40°C)

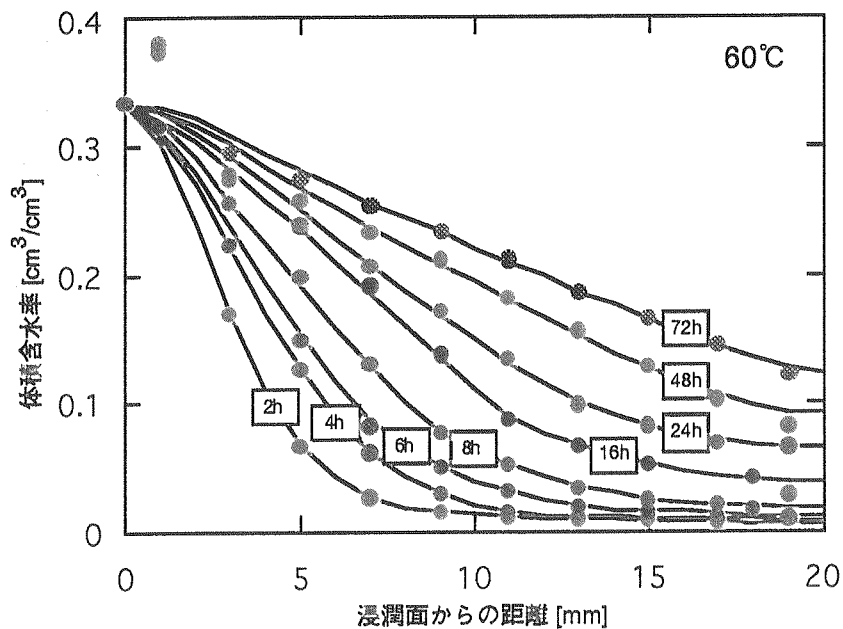


図3.2.3 水分分布図 (試験温度60°C)

3.3.2 水分拡散係数の算出

等温条件下における不飽和な圧縮ベントナイト中の水の移動は、水蒸気移動にしても液状水移動にしてもDarcy型の式を用い、次式で表わされる。

$$q = -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad (3.1)$$

ここで、 q はフラックス、 D_{θ} は水分拡散係数、 θ は体積含水率、 Z は試料中における浸潤面からの位置を表す。

したがって、試料中のある位置 Z に着目した場合、時刻 t_1 から t_2 における水分拡散係数 D_{θ} は、前述した水の浸潤試験によって得られた水分分布曲線を用いて、次式により計算することができる⁽⁶⁾。

$$D_{\theta} = \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} (\theta_{t=t_2} - \theta_{t=t_1}) dz}{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)_{Z=z_i}^{t=t_2} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)_{Z=z_i}^{t=t_1} \right\}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (3.2)$$

ここで、 t は浸潤時間、 l は試料長さ、 z_i ($0 \leq z_i \leq 1$)は試料の浸潤面からの位置を示す。(3.2)式により求めた水分拡散係数を次式で与えられる平均的な体積含水率に対してプロットし、試験温度25℃を図3.3.1に、40℃を図3.3.2に、60℃を図3.3.3に各々示す。

$$\theta = \left\{ \begin{array}{cccc} \theta_{t=t_1} & + \theta_{t=t_1} & + \theta_{t=t_2} & + \theta_{t=t_2} \\ Z=z_i-1/2\Delta z_i & Z=z_i+1/2\Delta z_i & Z=z_i-1/2\Delta z_i & Z=z_i+1/2\Delta z_i \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

その結果、水分拡散係数は体積含水率に依存して変化し、体積含水率の低領域、高領域で水分拡散係数が大きくなるU字型の分布を示すことが分かる。これは、低水分領域では水蒸気移動が卓越し、また、高水分領域では液状水移動が卓越するというこれまでの検討結果と一致する⁽⁷⁾。

さらに、温度の上昇とともに、このU字型の分布全体が上昇し、水分拡散係数には顕著な温度依存性が見られる。

ここで、水分拡散係数が体積含水率に対してU字型の分布を示すことについて検討を行なった。上記(3.2)式では、分母が浸潤面からのある位置における時刻 t_1 と t_2 の平均水分勾配、また、分子は同じくフラックスを示す。したがって、体積含水率の低高領域においてフラックスが大きい場合、あるいは、平均水分勾配が小さい場合に水分拡散係数が大きくなり、水分拡散係数は体積含水率に対してU字型の分布を示すことになる。そこで、フラックスの経時変化を図3.4.1、図3.4.3、図3.4.5に、体積含水率と平均水分勾配の関係を図3.4.2、図3.4.4、図3.4.6にそれぞれ示す。これらの図より、平均水分勾配は体積含水率の低高領域で小さくなることが分かる。また、フラックスのオーダーに対して平均水分勾配のオーダーが大きいことから、平均水分勾配の値が水分拡散係数の大小に大きく寄与する。このため、水分拡散係数は体積含水率の低高領域で大きくなるU字型の分布を示すものと考えられる。

また、フラックスの経時変化において、試験温度25℃では浸潤時間72時間以降、40℃では48時間以降、60℃では24時間以降にフラックスが急激に変化している。この理由としては、大気と接している試料の反浸潤面からの水分の蒸発などがその原因と考えられる。

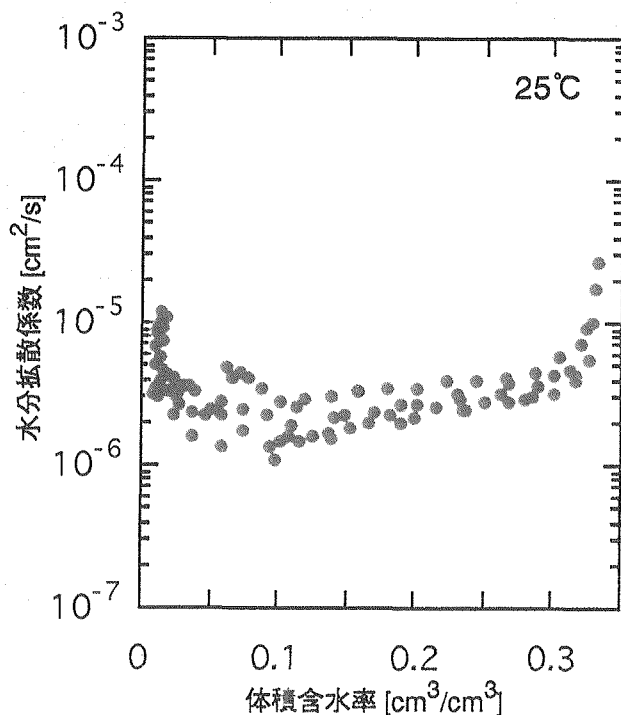


図3.3.1 水分拡散係数 (試験温度25℃)

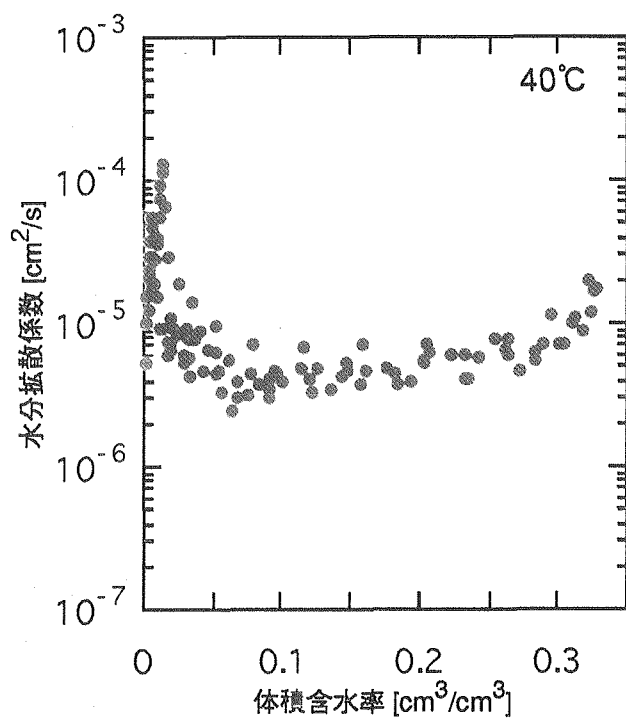


図3.3.2 水分拡散係数 (試験温度40°C)

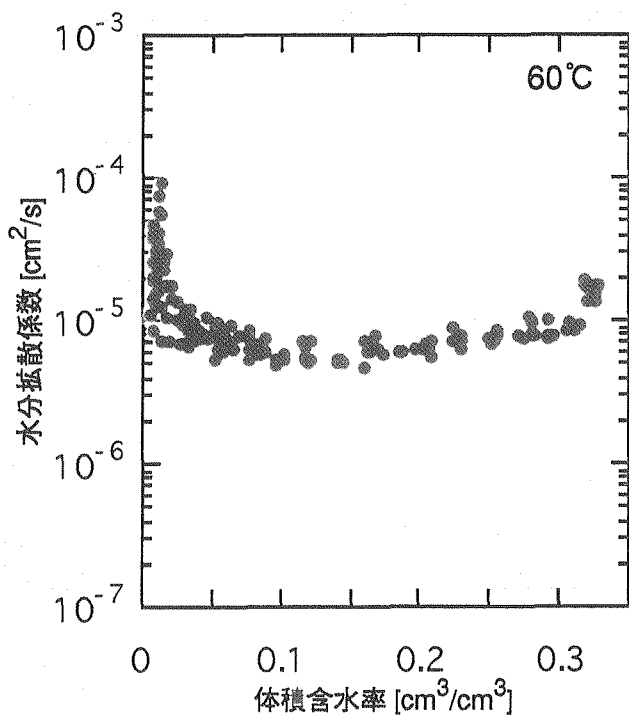


図3.3.3 水分拡散係数 (試験温度60°C)

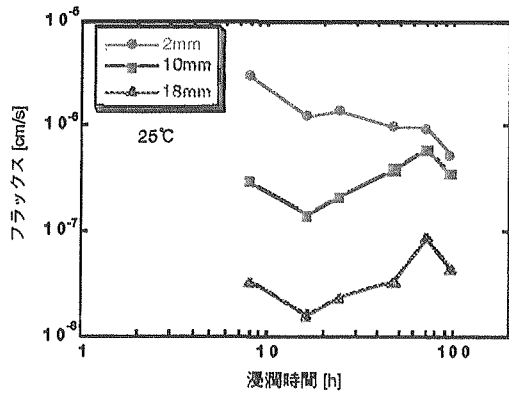


図3.4.1 フラックスの経時変化 (25°C)

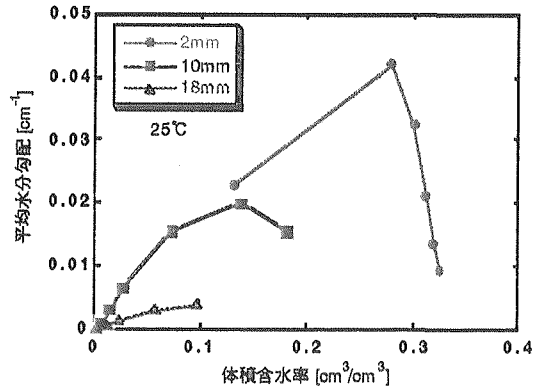


図3.4.2 体積含水率と平均水分勾配 (25°C)

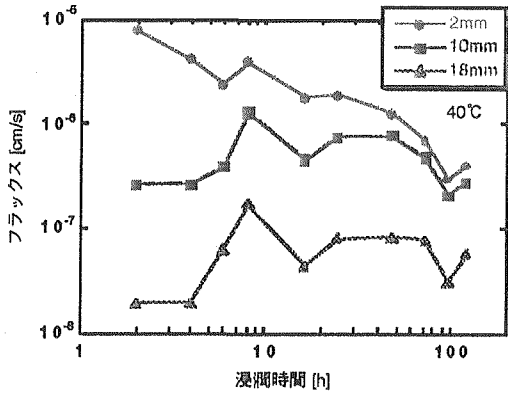


図3.4.3 フラックスの経時変化 (40°C)

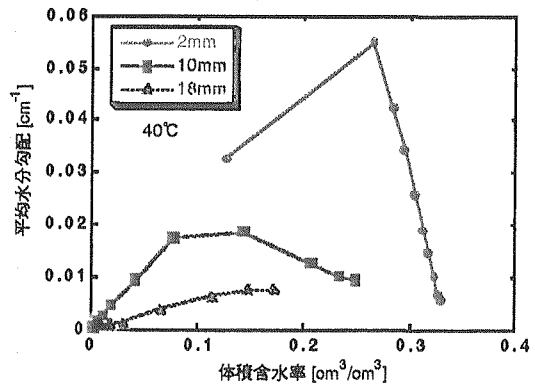


図3.4.4 体積含水率と平均水分勾配 (40°C)

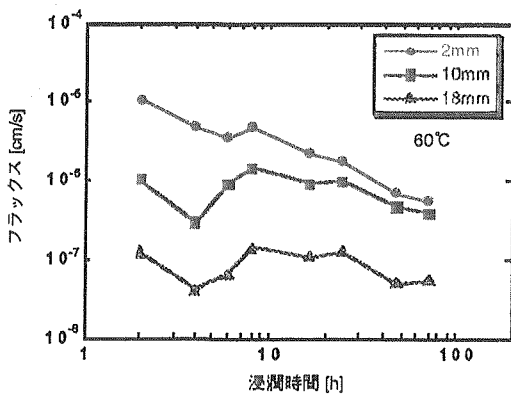


図3.4.5 フラックスの経時変化 (60°C)

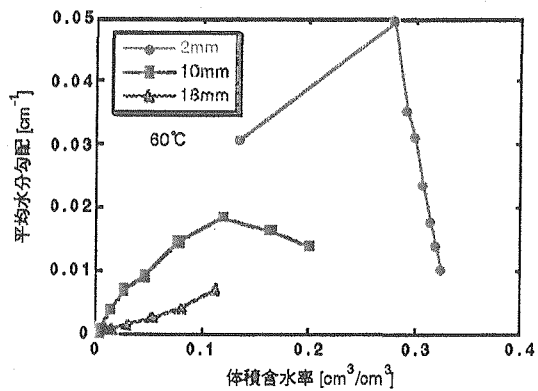


図3.4.6 体積含水率と平均水分勾配 (60°C)

3.4 実験式

3.4.1 実験式の考え方

等温状態における圧縮ベントナイト中の水分は、水蒸気および液状水の二相で移動することが知られており⁽¹⁾、水分拡散係数 D_θ は、水蒸気による拡散係数 $D_{\theta v}$ と液状水による拡散係数 $D_{\theta l}$ によって次のように表せる。

$$D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v} \quad (3.4)$$

圧縮ベントナイト中の水分は、乾燥状態では、水蒸気のみのものであり、また、飽和状態 θ_{sat} では液状水のみで移動するというこれまでの検討結果より⁽⁷⁾、

$$\lim_{\theta \rightarrow \theta_{sat}} D_{\theta v} = 0 \quad (3.5)$$

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} D_{\theta l} = 0 \quad (3.6)$$

の関係が成り立つ。ここで最も単純な漸近線を持つ関数として双曲線、

$$f(\theta) = \frac{a}{\theta - b} + c \quad (3.7)$$

を用いて、水蒸気による拡散係数 $D_{\theta v}$ と液状水による拡散係数 $D_{\theta l}$ を求める。ここで a, b, c は係数である。

水蒸気による拡散係数 $D_{\theta v}$ および液状水による拡散係数 $D_{\theta l}$ はそれぞれ (3.5) 式、(3.6) 式および (3.7) 式より、

$$D_{\theta v}(\theta) = \frac{a_1(\theta - \theta_{sat})}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_{sat})} \quad (3.8)$$

$$D_{\theta l}(\theta) = \frac{a_2\theta}{b_2(\theta - b_2)} \quad (3.9)$$

となる。ここで、 a_1, a_2, b_1, b_2 は係数、 θ_{sat} は飽和時の体積含水率である。

したがって、水分拡散係数 D_θ は以下のようになる。

$$D_\theta = \frac{a_1(\theta - \theta_{sat})}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_{sat})} + \frac{a_2\theta}{b_2(\theta - b_2)} \quad (3.10)$$

この仮定を用いることにより、乾燥時 (=体積含水率 $0[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) で、

$$D_{\theta_v}(0) = \frac{a_1\theta_{sat}}{b_1(b_1 - \theta_{sat})} \quad (3.11)$$

また、飽和時 (=体積含水率 $0.333[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) において、

$$D_{\theta_l}(\theta_{sat}) = \frac{a_2\theta_{sat}}{b_2(\theta_{sat} - b_2)} \quad (3.12)$$

と有限な値を持つことになる。

以上より、各試験温度での水分拡散係数と体積含水率の関係を表す近似曲線は図3.5.1~3.5.3のようになる。

今回の試験条件 (乾燥密度 ; $1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、初期体積含水率 ; $0[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) における(3.10) 式の各係数は表3.3のようになる。

表3.3 実験式中の係数

| | θ_{sat} | a_1 | a_2 | b_1 | b_2 |
|------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| 25°C | 0.333 | $1.36\text{e-}7$ | $-6.19\text{e-}7$ | $1.32\text{e-}3$ | 0.392 |
| 40°C | 0.333 | $2.56\text{e-}7$ | $-3.07\text{e-}6$ | $4.53\text{e-}3$ | 0.489 |
| 60°C | 0.333 | $4.19\text{e-}7$ | $-5.81\text{e-}6$ | $-3.68\text{e-}3$ | 0.577 |

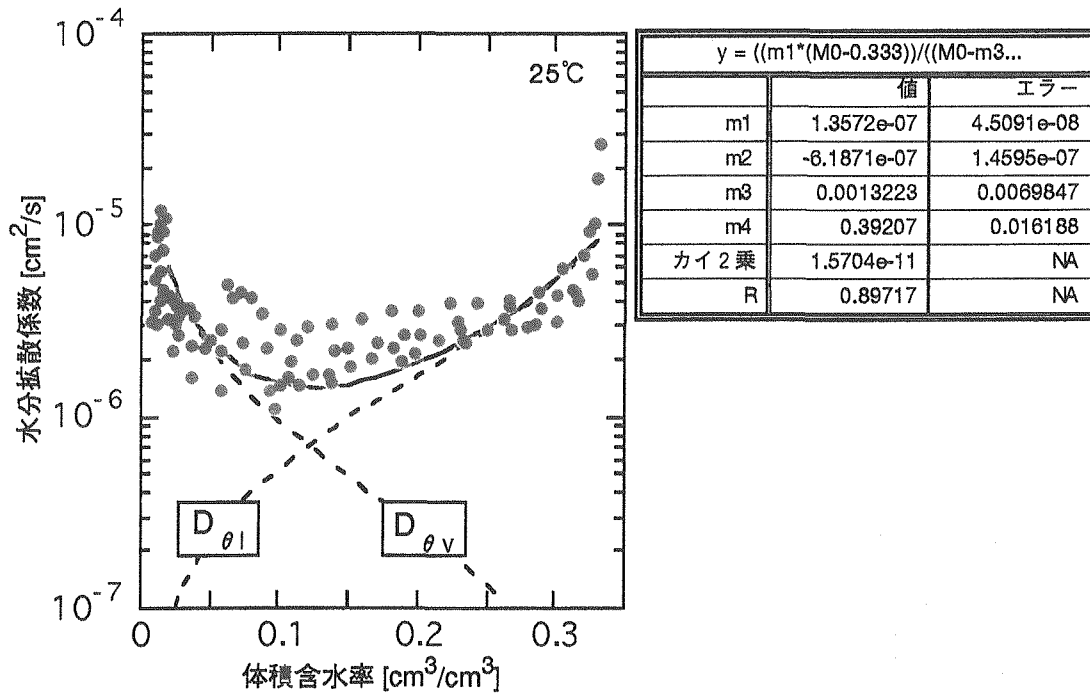


図3.5.1 体積含水率と水分拡散係数 (試験温度25°C)

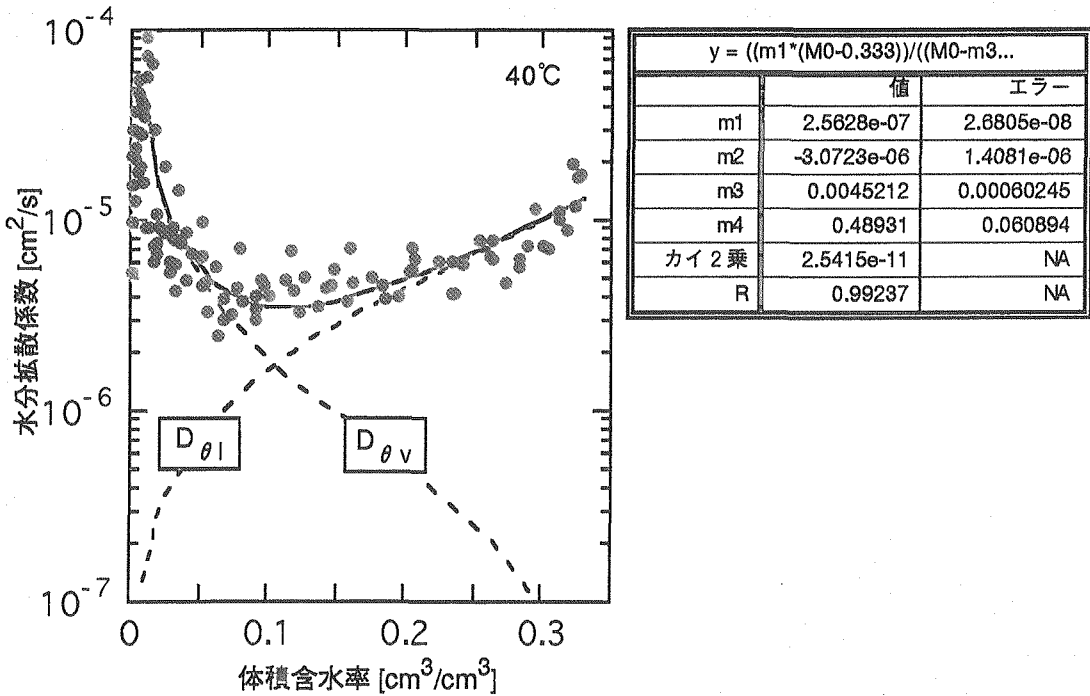


図3.5.2 体積含水率と水分拡散係数 (試験温度40°C)

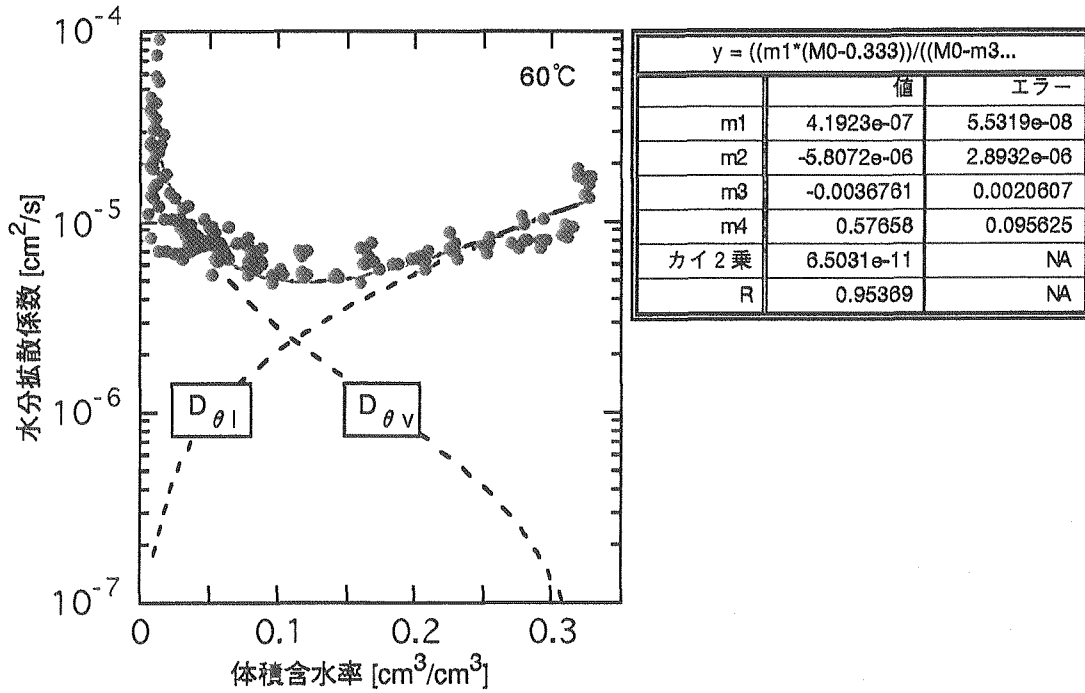


図3.5.3 体積含水率と水分拡散係数（試験温度60℃）

ここで、(3.10)式における各係数について検討をおこなった。前述したように、水分拡散係数が乾燥時および飽和時において有限の値を持つためには、(3.10)式における係数 b_1 は負の値、また、係数 b_2 は0.333以上でなければならない。そこで、各温度における係数 b_1 を負の値を示した60℃の値 ($=-3.68 \times 10^{-3}$) とした。また、係数 a_1, a_2, b_2 は図3.6.1~3.6.3に示すように温度に対して線形であり、次式のような関係になる。

$$a_1 = 8.10 \times 10^{-9} T - 6.72 \times 10^{-8} \quad (3.13)$$

$$a_2 = -1.48 \times 10^{-7} T + 2.98 \times 10^{-6} \quad (3.14)$$

$$b_2 = 5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1} \quad (3.15)$$

ここで T は温度[℃]である。

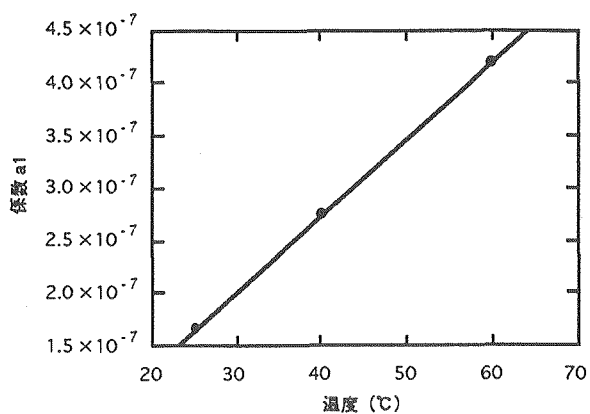


図3.6.1 温度と係数a1の関係

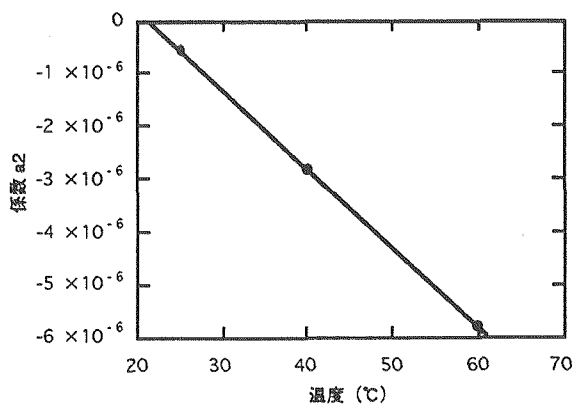


図3.6.2 温度と係数a2の関係

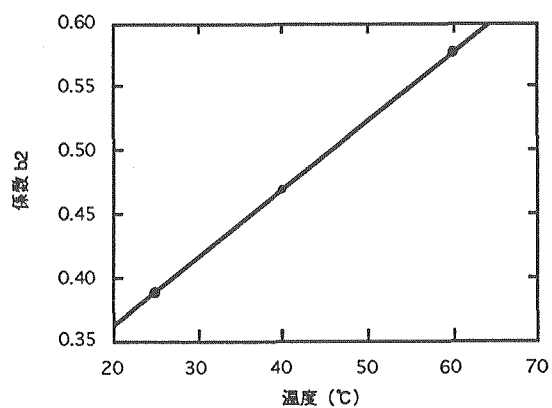


図3.6.3 温度と係数b2の関係

したがって、(3.10) 式は次式のようにになる。

$$D_{\theta} = \frac{(8.10 \times 10^{-9} T - 6.72 \times 10^{-3})(\theta - 0.333)}{(\theta + 3.68 \times 10^{-3})(-3.68 \times 10^{-3} - 0.333)} + \frac{\theta(-1.48 \times 10^{-7} T + 2.98 \times 10^{-6})}{(5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1})(\theta - (5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1}))}$$

(3.16)

(3.16) 式による近似曲線を図3.7.1～3.7.3に示す。いずれの温度においても、浸潤試験の結果より求めた水分拡散係数を良く再現していることが分かる。

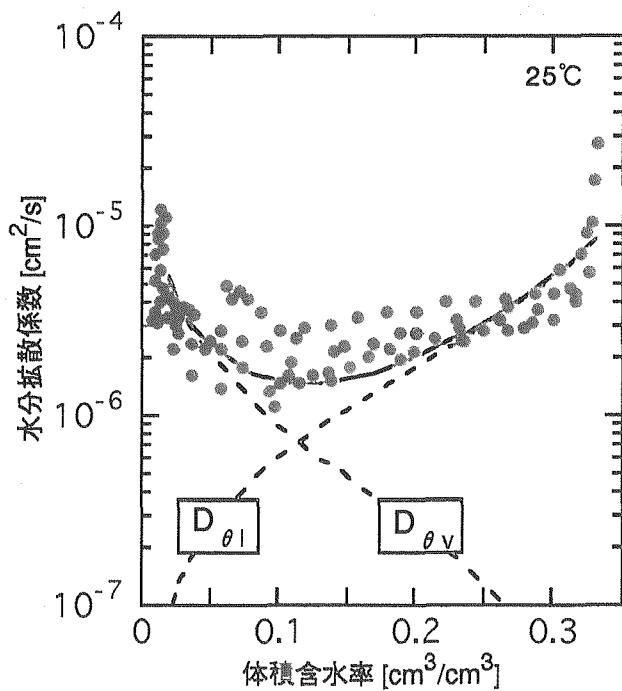


図3.7.1 体積含水率と水分拡散係数（試験温度25℃、3.16式による）

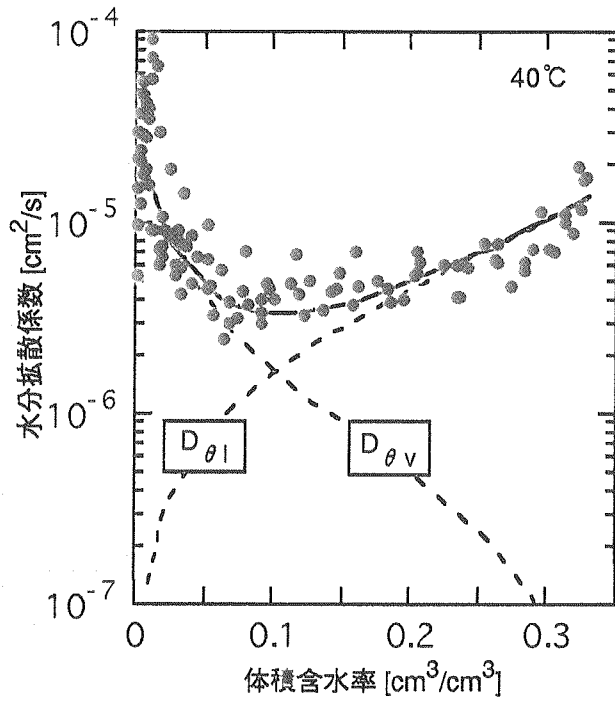


図3.7.2 体積含水率と水分拡散係数（試験温度40℃、3.16式による）

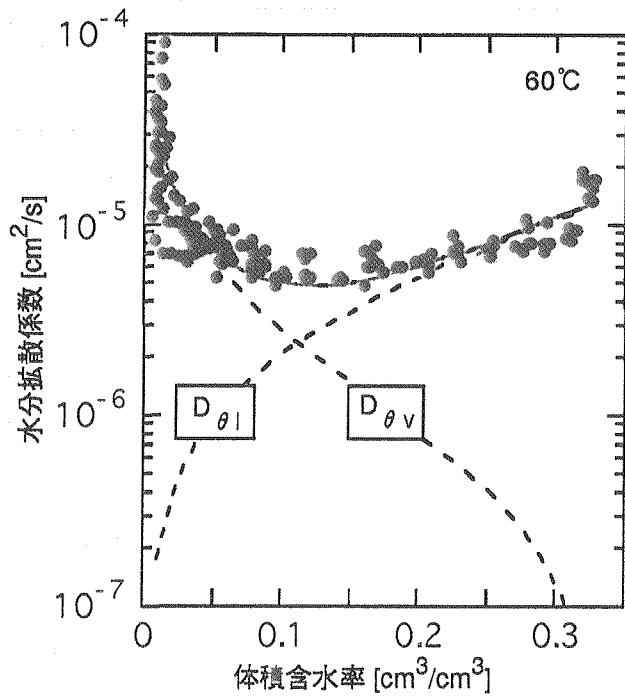


図3.7.3 体積含水率と水分拡散係数（試験温度60℃、3.16式による）

3.4.2 解析による実験式の検討

前節で得られた水分拡散係数の妥当性を検討するために、(3.16)式を用い数値解析を実施し、浸潤試験で得られた水分分布図(図3.2.1~3.2.3)との比較を行った。

浸潤試験は一次元であるので、連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial Z} = 0 \quad (3.17)$$

ここで θ は体積含水率、 t は浸潤時間、 q はフラックス、 Z は試料中の位置を示す。また、等温条件下の水の移動を表わすDarcy式は次のようになる。

$$q = -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad (3.18)$$

(3.17)、(3.18)式より次のような支配方程式となる。ここで D_{θ} は水分拡散係数を示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \quad (3.19)$$

解析に用いた諸条件を表3.4に示す。また、解析には、有限要素法汎用非線形構造解析システムFINAS⁽¹⁶⁾を用いた。

表3.4 解析条件

| | |
|---|--|
| 初期体積含水率[cm ³ /cm ³] | 0 (=含水比0%) |
| 浸潤面における体積含水率[cm ³ /cm ³] | 0.333 (=飽和含水比18.5%) |
| 境界条件 | $\frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0$ |

解析結果を実測値と合わせて図3.8.1~3.8.3に示す。図中の実線は計算値を、点は実測値を示す。

その結果、試験温度25℃では、図3.8.1に示すように計算値は実測値を良く再現しており、これは図3.7.1に示した水分拡散係数の近似曲線が妥当であることを示している。しかし、試験温度40℃、60℃では、浸潤時間の短いところで実測値よりも計算値のほうが小さい結果となった(図3.8.2、図3.8.3)。

試験温度40℃、60℃において、実測値と計算値に相違が見られるのは、浸潤時間の短いところであり、試料中の水分が少ないときである。そこで、水分拡散係数と体積含水率の関係を表わす近似曲線（図3.7.2、図3.7.3）において、低領域での水分拡散係数を大きくし、つまり、(3.10) 式中の係数 a_1 を大きくし、再度解析を行った。

試験温度40℃では、図3.9に示すように係数 a_1 を 4.0×10^{-7} とした場合、浸潤時間の短いところにおいても計算値は実測値との良い一致をみることができた。

係数 a_1 が温度に対して線形だと仮定すると、試験温度60℃の係数 a_1 は図3.10に示すように 7.5×10^{-7} となり、その関係式は以下のようになる。

$$a_1 = 1.76 \times 10^{-8} T - 3.04 \times 10^{-7} \quad (3.20)$$

ここで、 T は温度[℃]である。この値を用いて試験温度60℃のときの解析を行った。解析結果を図3.11に示す。これより、浸潤時間の短いところにおいても計算値は実測値との良い一致をみることができた。

したがって、水分拡散係数と体積含水率および温度との関係を表わす実験式は以下のようになる。

$$D_\theta = \frac{(1.76 \times 10^{-8} T - 3.04 \times 10^{-7})(\theta - 0.333)}{(\theta + 3.68 \times 10^{-3})(-3.68 \times 10^{-3} - 0.333)} + \frac{\theta(-1.48 \times 10^{-7} T + 2.98 \times 10^{-6})}{(5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1})(\theta - (5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1}))} \quad (3.21)$$

ここで、 D_θ は水分拡散係数[cm²/s]、 θ は体積含水率[cm³/cm³]、 T は温度[℃]である。(3.21) 式による体積含水率と水分拡散係数の関係を図3.12.1～3.12.3に、水分拡散係数と体積含水率および温度との関係を三次元で表したものを図3.13に示す。

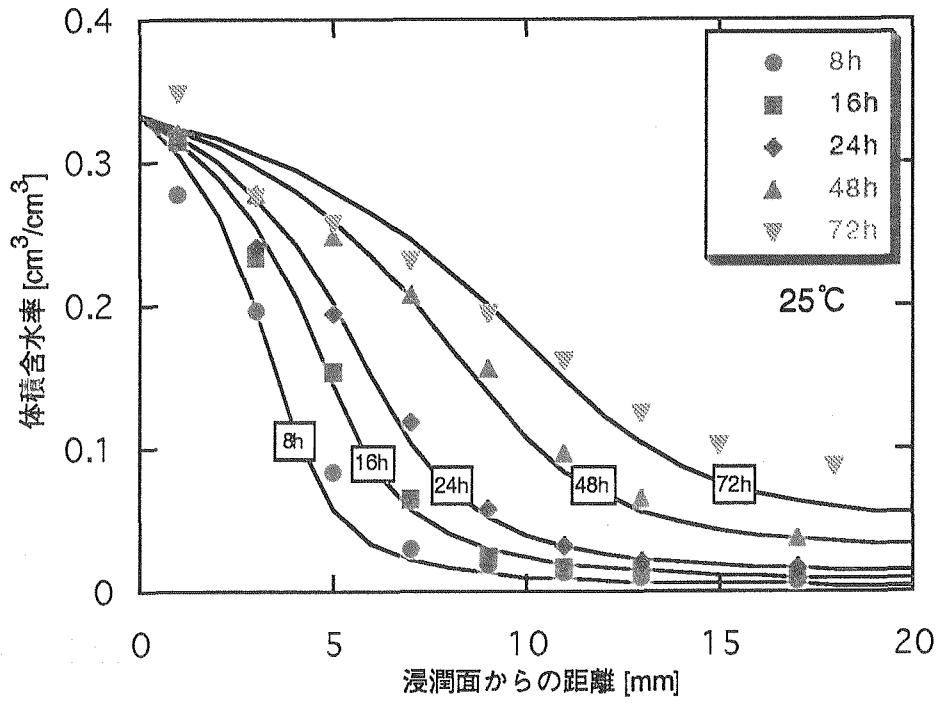


図3.8.1 解析結果 (試験温度25°C)

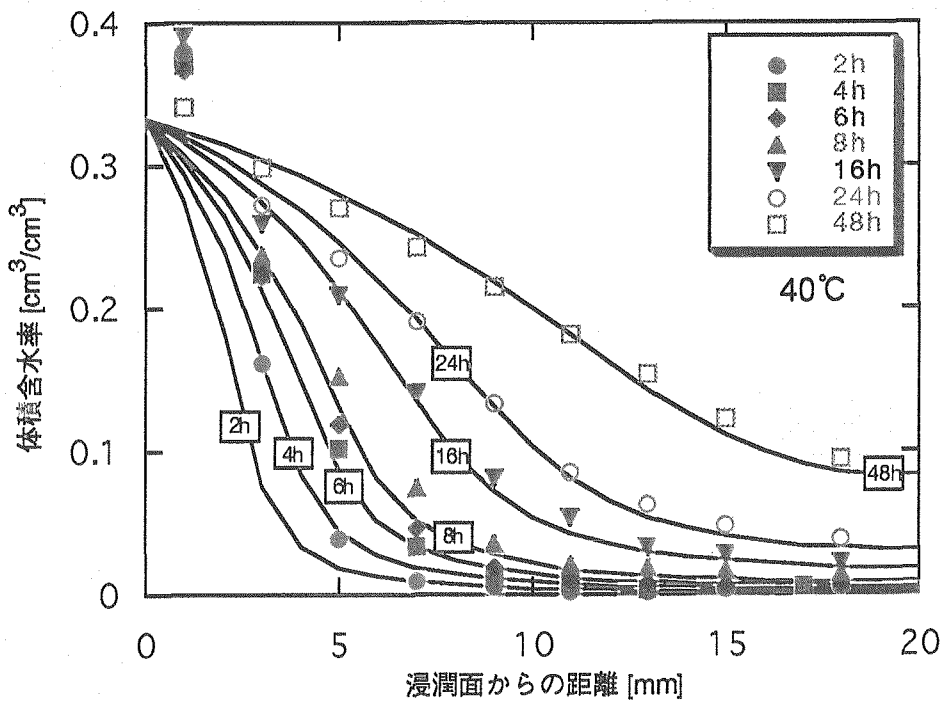


図3.8.2 解析結果 (試験温度40°C)

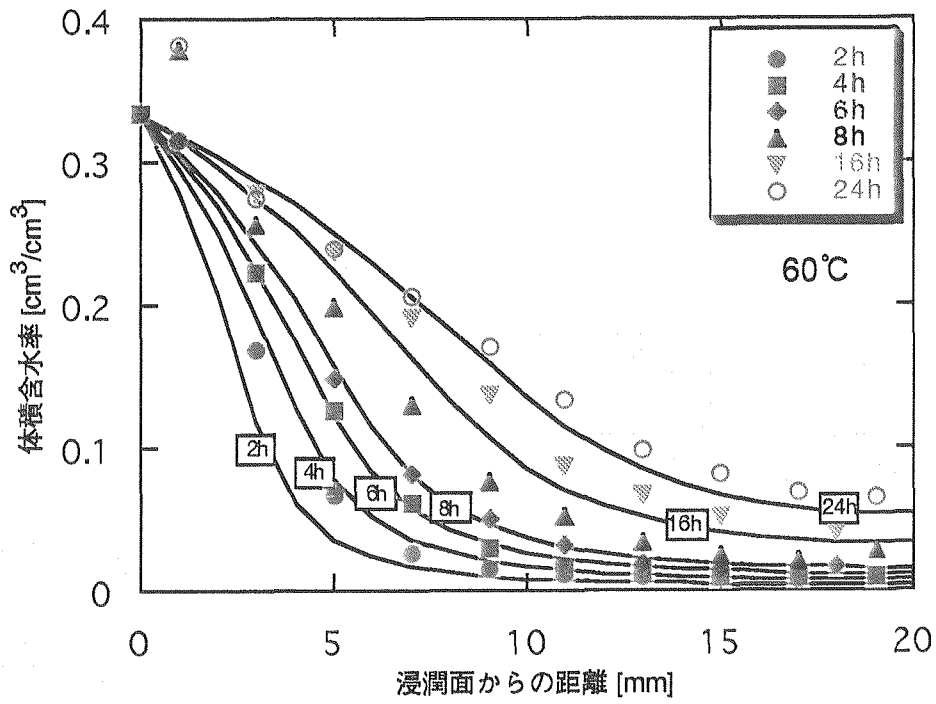


図3.8.3 解析結果 (試験温度60°C)

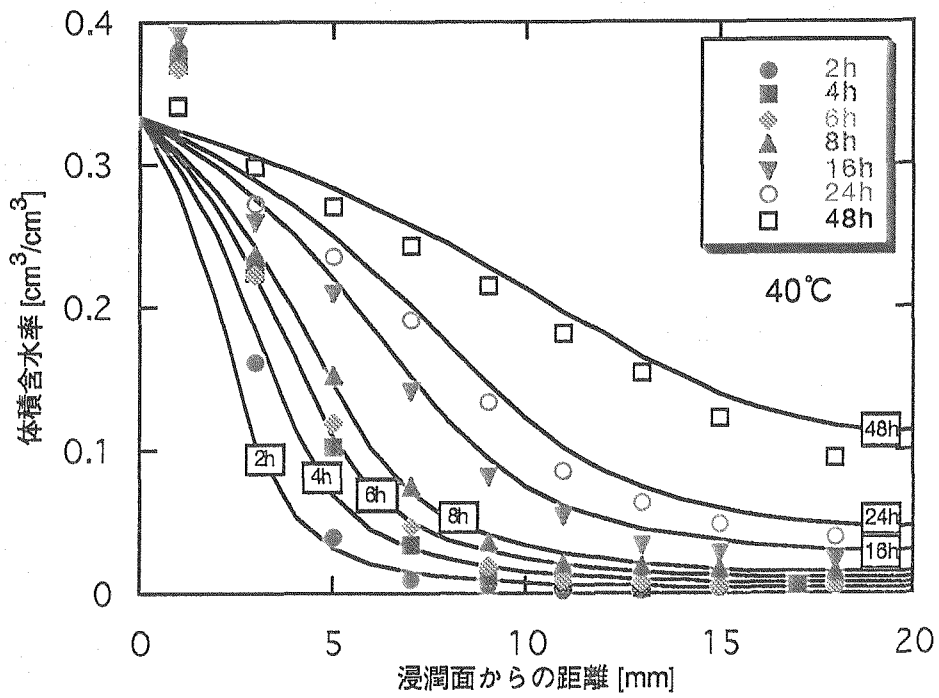


図3.9 解析結果 (試験温度40°C、係数 $a_1=4.0 \times 10^{-7}$)

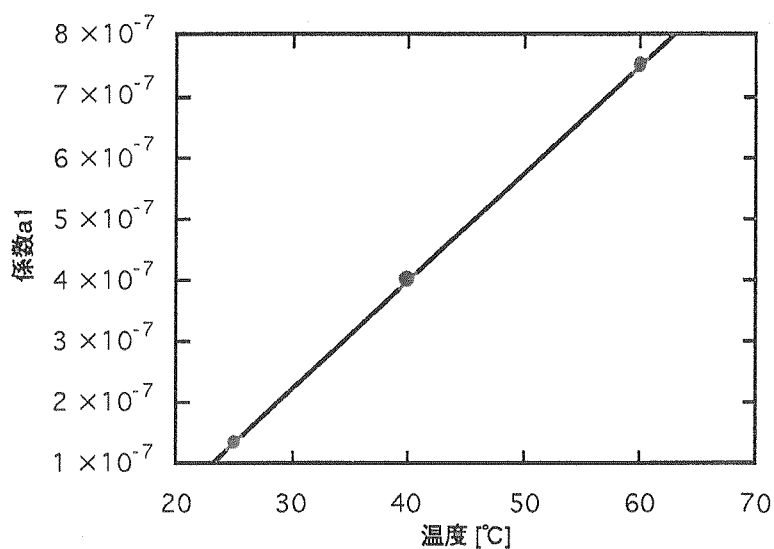


図3.10 温度と係数a₁の関係

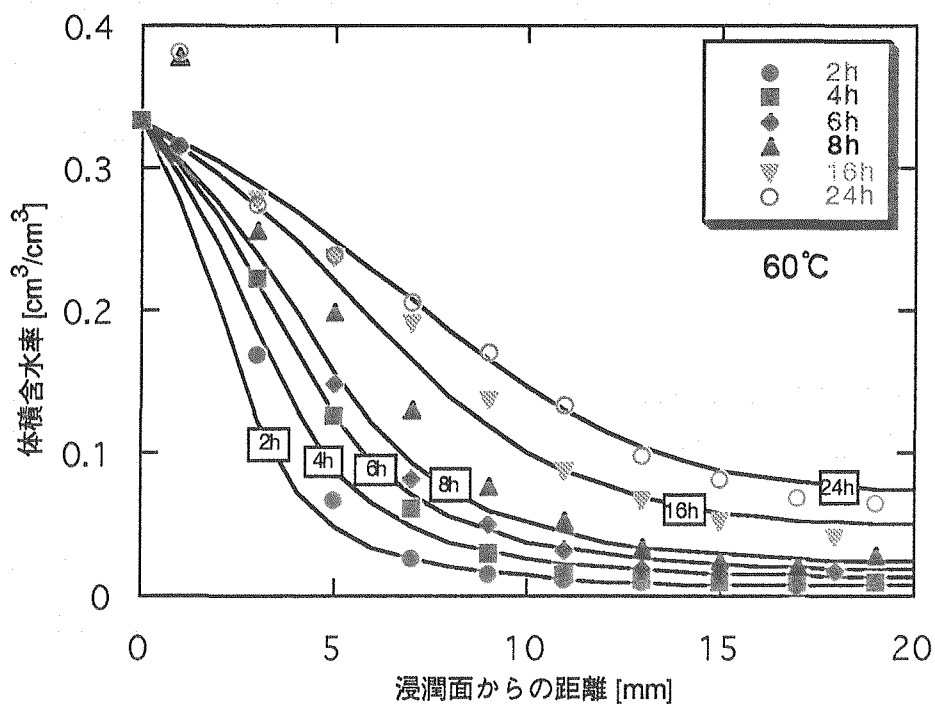


図3.11 解析結果 (試験温度60°C、係数a₁=7.5×10⁻⁷)

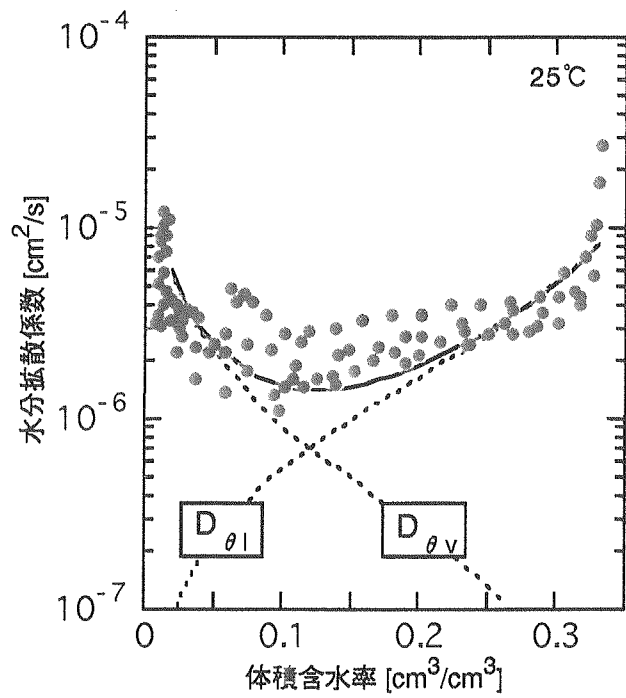


図3.12.1 体積含水率と水分拡散係数（試験温度25℃、3.21式による）

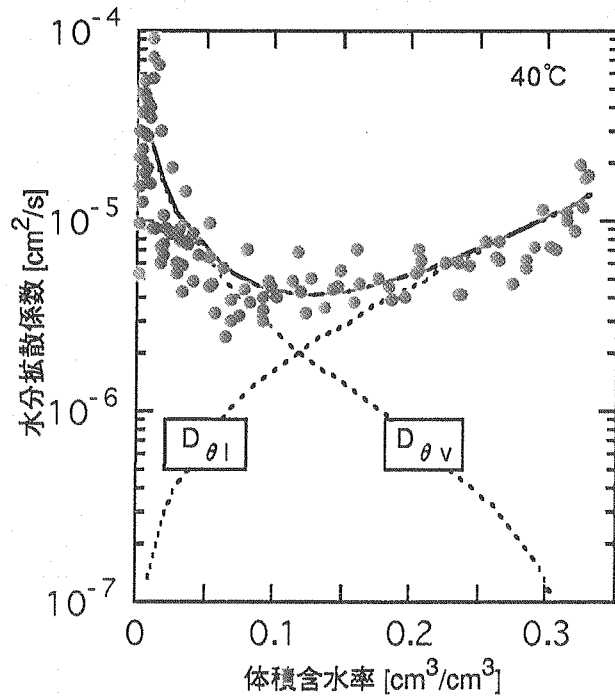


図3.12.2 体積含水率と水分拡散係数（試験温度40℃、3.21式による）

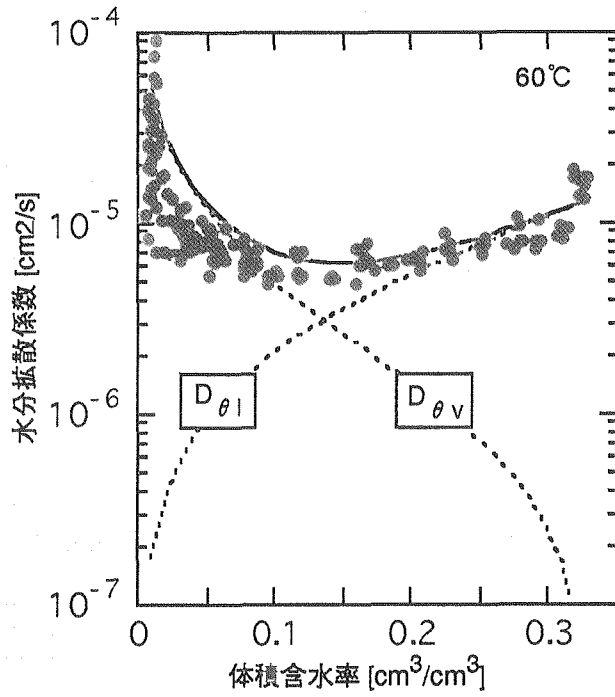


図3.12.3 体積含水率と水分拡散係数（試験温度60°C、3.21式による）

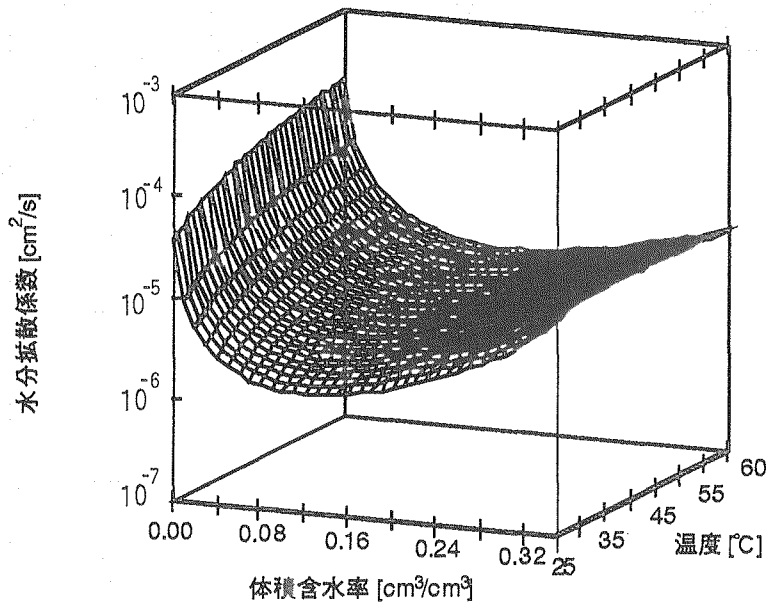


図3.13 水分拡散係数と体積含水率および温度との関係

3.5 まとめ

熱-水-応力連成現象の解析に用いる入力データを定式化することを目的として、不飽和な圧縮ベントナイトへの水の浸潤試験を温度をパラメータとして実施し水分拡散係数を測定した。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 水分拡散係数は体積含水率に依存して変化し、体積含水率の低領域、および高領域で水分拡散係数が大きくなるU字型の分布を示し、低水分領域では水蒸気移動が卓越し、高水分領域では液状水移動が卓越するというこれまでの検討結果と一致する。このようなU字型の分布になる理由としては、平均水分勾配が体積含水率の低高領域において小さくなるためである。
- (2) 体積含水率に対しU字型の分布を示す水分拡散係数は、その分布全体が温度とともに上昇し、水分拡散係数の温度依存性が確認された。
- (3) 水蒸気移動、液状水移動の二相流を考慮した形で水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表す実験式が得られ、実際に解析に用いるデータとしての定式化を行なうことができた。

4.KID BEN（室内小型三連成試験装置）試験

4.1 試験方法および条件

熱-水-応力連成現象をモデル化するためには、個別の現象に係わるメカニズムを明らかにするための試験とともに、これらを組み合わせた連成試験を実施し、連成現象を観察する必要がある。

これまで、熱-水-応力の連成試験は、連成現象の観察と、これを解析する手法の開発を目的に製作された大型緩衝材試験設備（BIG BEN）を用いて実規模大で実施されてきている⁽¹⁷⁾。

室内において連成試験を行う装置として、室内小型三連成試験装置（以下、KID BENという）の製作を行った。KID BENの概略図を図4.1に、試験カラムの仕様を表4.1に、センサーの仕様を表4.2に示す。

装置の概略を以下に記す。

本装置で用いる圧縮ベントナイト試料の寸法は、直径 ϕ 50mm、高さ100mmであり、試料は、装置内において粉末のベントナイトを軸方向の上下からピストンによって圧縮成型して作られる。本装置には、試料の周方向に10ヶの圧力変換器、軸方向に1ヶのロードセルが取り付けられ、膨潤応力の分布が測定できる。また、試料の上下両端には循環式恒温水槽に接続された加熱室が有り、試料の上下両端に任意の温度差を設けることができる。試料中の温度分布は7本の熱電対により測定される。また、試料上部より試料に水を供給できる構造となっている。ベントナイトの水分は、装置より試料を押し出し、10分割して測定される。このような構造を有するKID BENを用いて、

- (1) 等温条件下における水の浸潤試験により圧縮ベントナイト中の水の浸潤状況、膨潤応力分布を観察するための試験
- (2) 温度勾配下における圧縮ベントナイト中の温度分布、水の移動状況および膨潤応力の分布を観察するための試験
- (3) 温度勾配下において水を浸潤させた場合の、水の浸潤状況、膨潤応力の分布、温度分布を測定する試験

が可能である。

今回、上記試験のうち等温条件下における水の浸潤試験を実施し、膨潤応力分布の測定、および浸潤過程における水分分布の測定を行った。

さらに、本試験によって得られた水分分布について、第3章で得られた水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表す実験式を用いて浸潤解析を行い、これらの比較を行うことで第3章で示した実験式の妥当性の評価を行った。

試験条件を表4.3に示す。

表4.1 KID BEN試験カラムの仕様

| | 材質 | 備考 |
|-----------|--------|---------------|
| 本体外枠 | SUS304 | — |
| 本体内枠（断熱材） | アクリル | 内径50[mm] |
| 伝熱板 | 銅 | — |
| 循環式恒温水槽 | — | 使用温度範囲約20～90℃ |

表4.2 センサーの仕様

| | メーカー名 | 型式名 | 仕様 |
|-------|----------|------------------|---------------------------------|
| 圧力変換器 | (株)共和電業 | PGM-100KD | 定格出力 100 [kgf/cm ²] |
| ロードセル | (株)共和電業 | LM-2TS | 定格出力 2 [tf] |
| 熱電対 | 東洋熱科学(株) | シース熱電対 | K |
| データロガ | (株)共和電業 | UCAM-10B,USB-51A | — |

表4.3 KID BEN試験条件

| | |
|---------------------------|---|
| ベントナイト | クニゲルV1 |
| 試料寸法 [mm] | φ 50 × 高さ100 |
| 乾燥密度 [g/cm ³] | 1.8 |
| 初期含水比 [%] | 9.8 (=体積含水率0.176 [cm ³ /cm ³]) |
| 試験温度 | 室温 (約25℃) |
| 浸潤時間 [h] | 1000, 2000, 7800 |
| 浸潤液 | 蒸留水 |

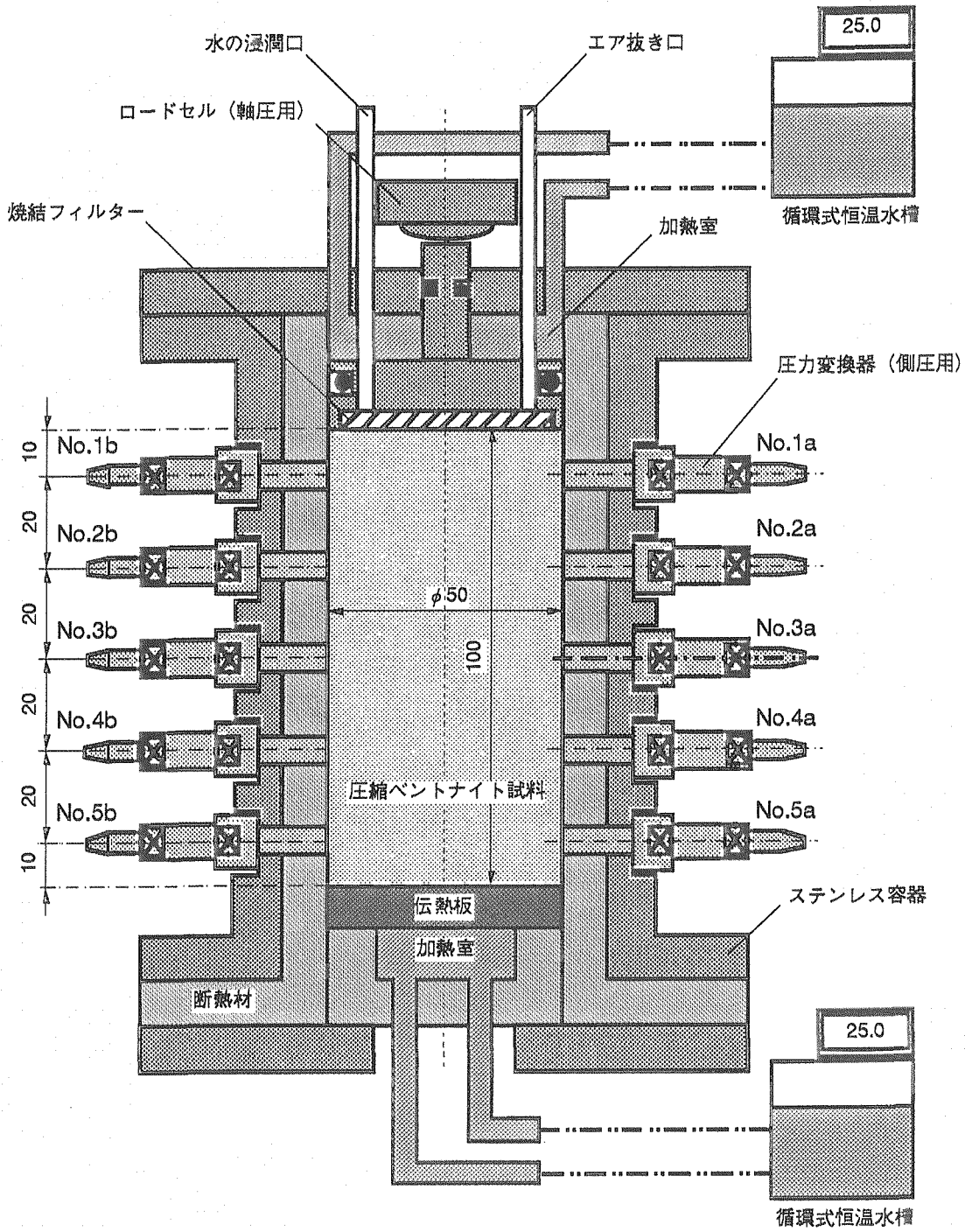


図4.1 KID BEN概略図

4.2 試験結果

4.2.1 膨潤応力測定結果

水の浸潤にともなう膨潤応力の経時変化を図4.2に示す。測定は7800時間行った。図中凡例の軸圧は、図4.1に示すロードセルによって、No.1a~5bは側圧測定用の圧力変換器によって測定されたものである。

その結果、

- (1) ロードセルによって計測された軸方向の膨潤応力は、これまで膨潤応力測定装置（試料寸法 $\phi 20\text{mm} \times$ 高さ 20mm ）によって取得された値と同等の約 3.7MPa であった。しかし、これまでに報告されているような膨潤応力のピークは観察されなかった⁽¹⁴⁾。
- (2) 側方の膨潤応力は浸潤面に近いほど早く発生し、最大で約 7MPa のピーク圧が見られる。また、浸潤面に遠いほどその値が大きくなる傾向が見られた。
- (3) 約 6000 時間以降に各測定点における膨潤応力は約 $4\sim 5\text{MPa}$ の間で一定となり、膨潤応力の分布の幅が浸潤初期に比べて小さくなった。

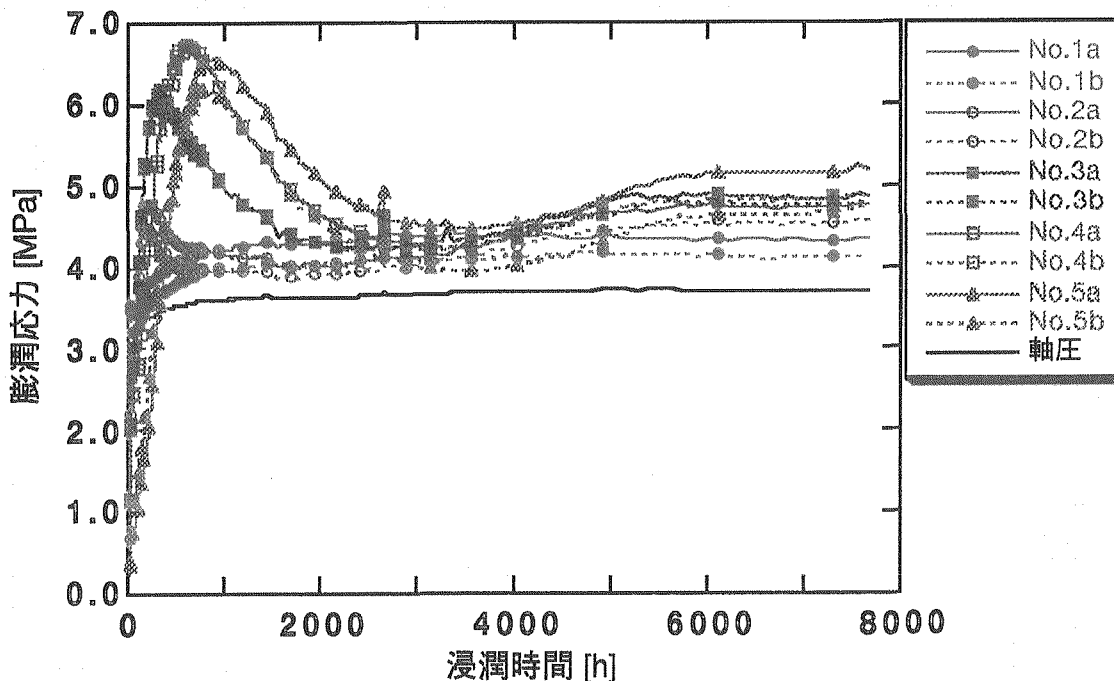


図4.2 膨潤応力の経時変化

4.2.2 水分分布

KID BENでの等温条件下における水の浸潤試験により得られた試料中の水分分布を図4.3～4.5に示す。図4.3は浸潤時間1000時間後に、図4.4は2000時間後に、図4.5は前述した膨潤応力分布の測定終了時（浸潤時間7800時間）に水分分布を測定したものである。

その結果、浸潤時間1000時間では試料中に含水比18～10[%]、2000時間では含水比19～14[%]の水分勾配が形成されていること、また、浸潤時間7800時間では試料中の水分は理論飽和含水比（18.5%）に近い値でほぼ一定であった。

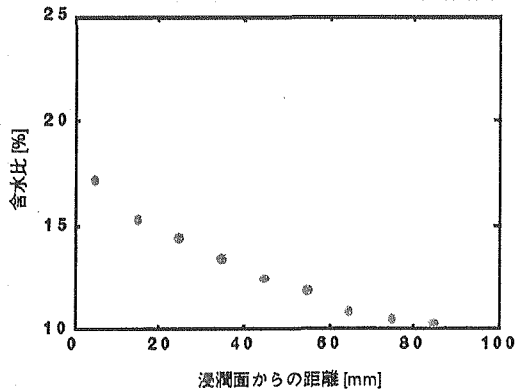


図4.3 水分分布（浸潤時間1000h）

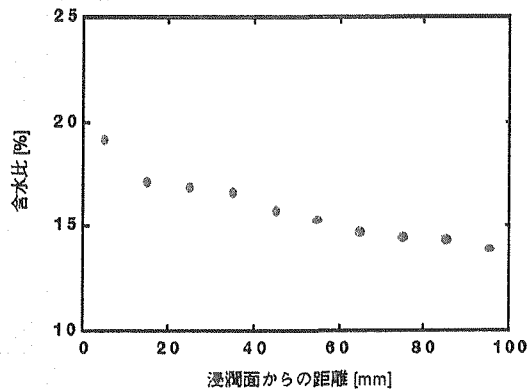


図4.4 水分分布（浸潤時間2000h）

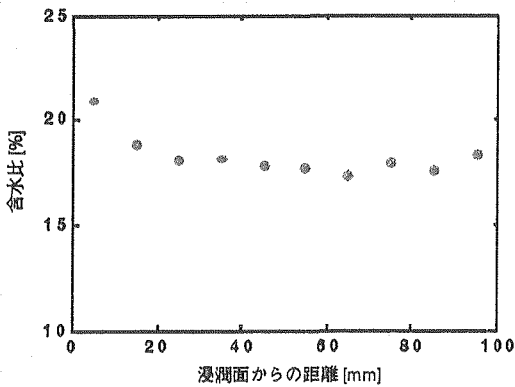


図4.5 水分分布（浸潤時間7800h）

4.3 水分拡散係数の妥当性の評価

ここでは、第3章で得られた水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表わす実験式の妥当性を評価するために、第3章(3.21)式による時間毎の水分分布を、有限要素法汎用非線形型構造解析システムFINASを用いて計算し、これがKID BENにより得られた1000時間後、2000時間後、7800時間後の水分分布を再現するかどうかを調べた。解析は第3章と同様、FINASを用いた。

解析に用いた諸条件を表4.4に示す。

表4.4 解析条件

| | |
|---|--|
| 初期体積含水率[cm ³ /cm ³] | 0.176 (=初期含水比9.8%) |
| 浸潤面における体積含水率[cm ³ /cm ³] | 0.333 (=飽和含水比18.5%) |
| 境界条件 | $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$ |

解析結果を実測値と合わせて、1000時間後の場合を図4.6に、2000時間後を図4.7に、7800時間後を図4.8にそれぞれ示す。

その結果、各浸潤時間ともに実線で示した解析結果は、KID BENにより得られた実測値を良く再現していることが分かる。これは、第3章で示した水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表わす実験式が妥当であることを示している。

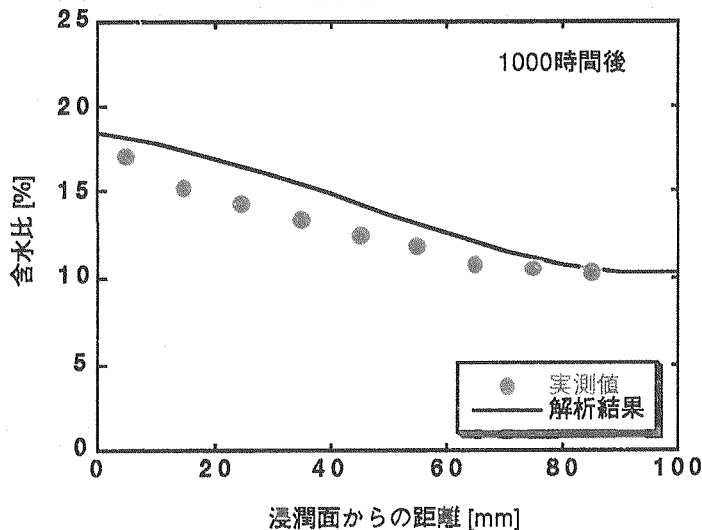


図4.6 水分分布の実測値と解析結果の比較 (浸潤時間1000h)

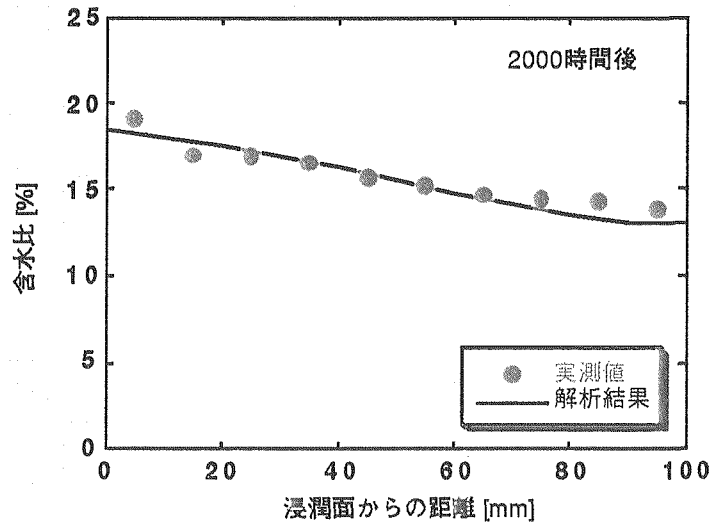


図4.7 水分分布の実測値と解析結果の比較（浸潤時間2000h）

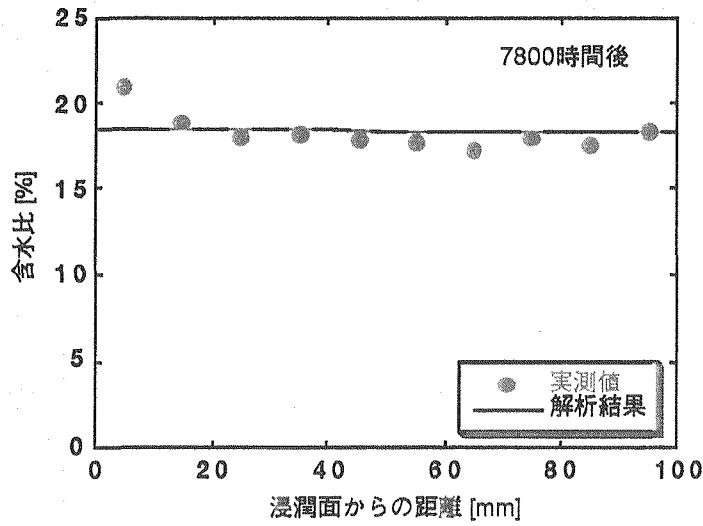


図4.8 水分分布の実測値と解析結果の比較（浸潤時間7800h）

4.4 まとめ

室内における熱-水-応力の三連成試験装置 (KID BEN) を用いて、等温条件下での水の浸潤試験を実施し、膨潤応力の経時変化、および浸潤過程における水分分布の測定を行った。さらに第3章で得られた水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表す実験式を用いて浸潤解析を行い、これがKID BENにより得られた水分分布を再現するかどうかを調べた。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 試料軸方向に発生する膨潤応力は、これまでに報告されている値と同等の約3.7[MPa]であった。
- (2) 試料周方向に発生する膨潤応力は浸潤面に近いほど早く発生し、最大で約7[MPa]のピーク圧が見られること。また、その値は浸潤面に遠いほど大きい。
- (3) 水の浸潤が進み、約6000時間以降に各測定点における膨潤応力は4～5[MPa]の間で一定となり、膨潤応力の分布の幅が浸潤初期に比べ小さくなる。
- (4) 浸潤時間1000時間では試料中に18～10[%]の水分勾配が観察され、この時、膨潤応力には最大で3[MPa]の分布の幅が、浸潤時間2000時間では試料中に19～14[%]の水分勾配が観察され、この時、膨潤応力には最大で1.5[MPa]の分布の幅が見られる。また、試料中の水分勾配がほとんど無くなる7800時間後には、膨潤応力も一定となる。
- (5) 第3章で得られた水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表す実験式での解析結果が、KID BENで得られた各浸潤時間での水分分布を良く再現することから、この実験式の妥当性が示された。

5. 結語

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体定置後のニアフィールド環境を評価するためには、緩衝材中で生じる熱-水-応力連成現象の観察とこれを解析する手法およびコードが必要である。

本報告は、緩衝材の候補材であるベントナイトを対象に、熱-水-応力連成現象解析のための入力データとなる水分ポテンシャルと水分拡散係数について、その体積含水率および温度依存性を実験的に明らかにし、定式化を行ったものである。

また、熱-水-応力連成試験を室内にて実施する装置として製作された KID BEN（室内小型三連成試験装置）による試験で得られた水分分布を用いて、上記の水分拡散係数の体積含水率および温度依存性を表す実験式の妥当性を示した。

今後は、このKID BENを用いて温度勾配条件での試験を実施し、温度勾配による水の移動メカニズムの検討と水分拡散係数を取得して行く。さらに水の浸潤と組み合わせた連成試験を実施して行く予定である。

6. 参考文献

- (1) 中野政詩 (1991) : 土の物質移動学「東京大学出版会」
- (2) 中野政詩・雨宮 悠・藤井克巳・石田朋靖・石井明俊 (1984) : 拘束された不飽和粘土の浸潤と膨潤圧、「農業土木学会論文集」、Vol.112,pp.55~66.
- (3) 山形順二・鈴木英明・柴田雅博 (1992) : 緩衝材の特性試験 (II) 「動燃技術資料 PNC TN8410 92-169」
- (4) L.Borgesson (1985) : "Water flow and swelling pressure in non-saturated bentonite clay barriers,"Engineering Geology,Vol.21,pp.229~237.
- (5) Philip,J.R.and de Vries,D.A. (1957) : "Moisture movement in porous materials under temperature gradient,"Transactions,American Geophysical Union,Vol.38,No.2,pp.229~237.
- (6) 竹内真司・原 啓二 (1994) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材中の水分の気・液二相移動、動燃技報,No.89 別刷「動燃技術資料 PNC TN8410 93-302」
- (7) 竹内真司・原啓二・中野政詩 (1995) : 圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態「地盤工学会論文報告集」、Vol .35 , No.3 ,, pp .129 ~ 137 .
- (8) L.Jing , J.Rutqvist , O.Stephansson , C.-F.Tsang , F.Kautsky (1994) : "DECOVALEX - Mathematical Models of Coupled T-H-M Processes for Nuclear Waste Repositories Report of Phase II,"SKI Report 94:16
- (9) 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 晶・西村 拓 (1995) : 土壌物理環境測定法「東京大学出版会」
- (10) 塩沢 晶 (1991) : サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定、「土壌の物理性」、Vol.62,pp53~61.
- (11) Decagon Devices Inc. SC-10A Thermocouple psychrometer sample changer operator's manual.
- (12) 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 (1993) : ベントナイトの鉱物組成分析「動燃技術資料 PNC TN8430 93-003」
- (13) M.MULLER-VONMOOS G.KAHR "MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON WYOMING BENTONIT MX-80 UND MONTIGEL" NAGRA NTB 83-12(1983)
- (14) 鈴木英明・柴田雅博・山形順二・広瀬郁郎・寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I) 「動燃技術資料PNC TN8410 92-057」

- (15) H.ISHKAWA,K.AMEMIYA,Y.YUSA,N.SASAKI(1990) : "COMPARISON OF FUNDAMENTAL PROPERTIES OF JAPANESE BENTONITES AS BUFFER MATERIAL FOR WASTE DISPOSAL"Proceedings of the 9th International Clay Conference ,Strasbourg, 1989,V.C.FARMER and Y.TARDY(Eds) Sci.Geol., Mem.,87,p.107-115,Strasbourg,1990
- (16) 岩田耕司 (1990) : 汎用非線形構造解析システム FINASの開発と利用「動燃技報,No.76,PNC TN1340 90-004」
- (17) 茂呂吉司・藤田朝雄・菅野 毅・小林 晃 (1994) : 緩衝材大型試験設備 (BIG BEN) における熱-水-応力連成試験、「放射性廃棄物研究」、Vol.1,No.1.,pp.77~83.