

シンポジウム特集：須藤俊男先生メモリアルシンポジウム

21世紀の粘土科学—粘土科学の過去・現在・未来—21世紀への跳躍と夢

高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト粘土の
役割と技術開発動向

小峯秀雄

茨城大学工学部都市システム工学科
〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1Role of Bentonite-Clay for High-Level Radioactive Wastes Disposal
and Trend of Engineering Development

Hideo KOMINE

Ibaraki University, Faculty of Engineering, Department of Urban and Civil Engineering
4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-city, Ibaraki, 316-8511, Japan

1. 我々の次の世代のために

近年、原子力発電所から排出される放射性廃棄物や管理型廃棄物などの処分が、社会において重要な課題とされている。このような廃棄物の処分は、現在社会活動を支えている我々の世代のみならず、子孫にも大きく影響する可能性を持った重要な問題であることを念頭において考えなければならない。著者が講義や講演の際、廃棄物の処分問題に触れるとき、必ず「子孫への影響」を強調することにしている。なぜなら、廃棄物処分事業があたかも厄介者・迷惑事業であるかのような扱いをされることが時にあるからである。廃棄物処分に金銭をつぎ込むことを好まない企業・組織は、おそらく現時点での自己の価値観のみによって先のように判断しているものと推察する。しかし、現時点での技術レベルに応じて廃棄物を適切に処理・処分すらしめないという行為は、我々の子供や孫たちに対し、言い訳することの出来ない負の遺産を残すことになることを考えていただきたい。我々の次の世代のためにも、現在保有している廃棄物の適切な処理・処分の考え方や実施計画の構築、実施に当たって必要となる技術の開発や実際の処分事業の推進を進めていくことが、社会活動の中核を担う我々の世代の使命であると考えている。

管理型産業廃棄物の場合は、実際、地中に処分する方法が採られている。放射性廃棄物の処分においても、埋設深度の違いはあるが、同様に地中に埋設して処分する方法が有力と考えられ、それに応じた技術開発が進められている。これらの廃棄物を地中に処分する際には、周辺環境となる地盤と廃棄物を隔離する遮水層が非常に重

要な役割を果たす。この遮水層にベントナイトをはじめとする粘土材料が利用もしくは有望視されている。

本論文では、まさに21世紀のビッグプロジェクトである高レベル放射性廃棄物処分事業に着目し、その概要とベントナイト粘土に期待されている役割について述べる。また、高レベル放射性廃棄物処分事業におけるベントナイト粘土に関連する技術開発の動向の一例として、著者が開発した新しい膨潤評価式の概要とそれを利用した設計事例について紹介する。さらに、この発展途上である高レベル放射性廃棄物処分技術において、粘土科学の活躍が期待されている課題について私見を述べる。

2. 高レベル放射性廃棄物処分事業のスケジュール

高レベル放射性廃棄物の処分は2030年前後に施設の建設および操業開始が予定されており、約50年間の操業が行われることになっている。操業後、施設の閉鎖を行った後も、300年程度の管理を行っていく予定となっている。処分スケジュール等については、(財)原子力発電環境整備機構のホームページ (<http://www.numo.or.jp/>) に詳細が記されているので、そちらを参照されたい。以上のように、非常に長い期間を要する事業であり、まさに世代を越えた大プロジェクトであると言える。現在、社会活動の中核を担う我々の世代の使命は、このスケジュールを念頭に、現在までに取得されている実験データや知識に基づき最善と考えられる方法を選択すると共に、その選択理由を国民や次の世代に正確に伝える努力をすることであると考えている。有限の知識や実験データの下で技術開発をしなければならないという宿命を負って

いる以上、最大限努力するとともに、次の世代の人々がその世代の価値観で適切と思われる道を選択できるように、我々の世代の選択理由を正確に伝えていく必要がある。

3. 高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト粘土の役割

日本における高レベル放射性廃棄物とは、原子力発電所から排出される使用済み燃料を再処理する際に発生する廃液を固化したものである¹⁾。これらは高い放射能を有するので環境汚染と公衆の放射線被曝を防止する目的で、放射能が低減するまでの長期間にわたり人間の生活圏から隔離する必要がある。現在、我が国ならびに欧米各国で考えられている高レベル放射性廃棄物の有力な処分方法は、地下数百mより深い地盤中に廃棄物の収納容器を埋設処分する方法である^{2,3)}。Fig.1は、廃棄物収納容器を縦に定置する方式の高レベル放射性廃棄物処分施設の概要の一例を示している⁴⁾。このような処分施設の建設に際し、廃棄物収納容器と周辺地盤との間を埋め戻す材料の開発が必要とされており、ベントナイトを主体とした材料が有力視されている。

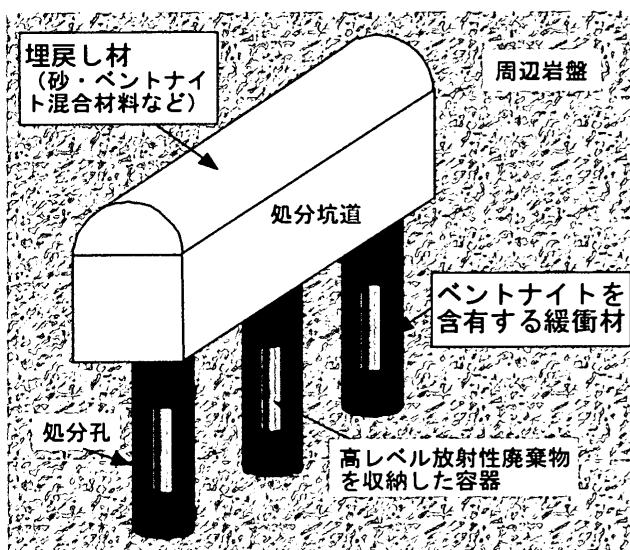


Fig.1 高レベル放射性廃棄物の地下処分施設とベントナイト粘土の利用箇所

この材料には、放射性核種を長期間隔離する必要性や廃棄物から発生する熱の対策等から、非常に高い止水性や膨潤性、熱伝導性等が要求されておりベントナイトの利用が考えられている。ベントナイトの止水性や膨潤性、熱伝導性は締固めることにより、いっそう向上するので、実際の処分では、高圧で締固めて利用することが有望視されている。また、ベントナイトのみで実施することは経済的ではないので、比較的安価な砂や現地発生土をベントナイトに混合して利用することも考えられている。このようなベントナイトを含有する土質材料は緩衝材と呼ばれており、長期間にわたり廃棄物を人間の生活圏か

緩衝材には、この隙間部分を膨潤変形により充填する役割が期待されている。この役割は自己シール性と呼ばれている。

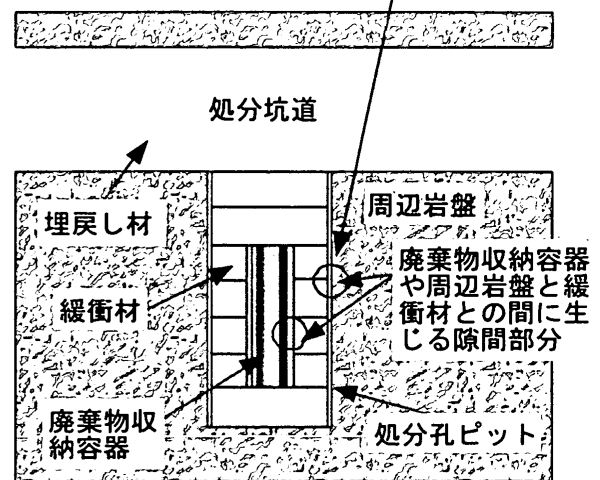


Fig.2 緩衝材の自己シール性の概念

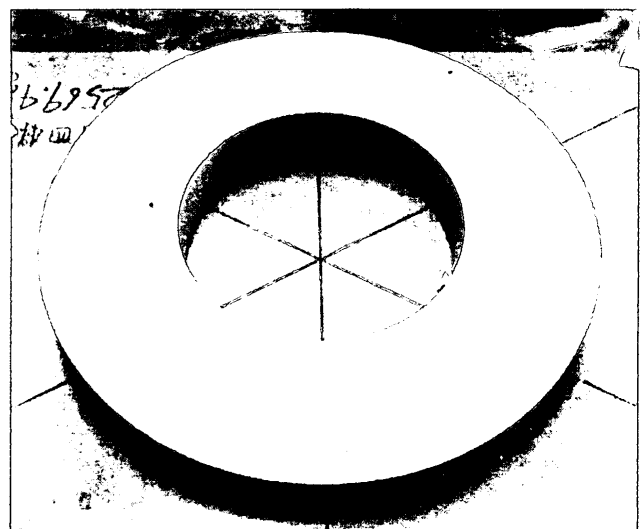


Fig.3 ドーナツ型緩衝材ブロック
(外径：約330mm, 内径170mm, 厚さ50mm)

ら隔離することは勿論のこと、処分施設の建設に伴い生じる廃棄物収納容器や周辺地盤との間の隙間部分を膨潤変形により充填する役割、すなわち自己シール性が期待されている。Fig.2に自己シール性の概念図を示す。1000年以上に渡って放射性廃棄物と人間の生活圏とを隔離することが期待されているが、そのために必要な止水性を緩衝材が保有するためには、乾燥密度が $1.6\sim 2.0\text{ Mg/m}^3$ 程度になるように締固める必要があると考えられている^{2,3)}。したがって、現地における締固め転圧では、上記の乾燥密度を確保することは困難であり、現在のところ、工場においてブロック状に製作したもの（模型をFig.3に例示）を処分孔ピットに搬入し設置する方法が有力と考えられている。

以上のように、ベントナイトを使用した緩衝材は、高

レベル放射性廃棄物の処分技術において重要な役割を期待されている。ベントナイト系緩衝材に期待されている多くの役割の内、本論文では、ベントナイトの膨潤性とそれによる自己シール性に着目し、著者が提案している新しい膨潤評価式の概要とそれを利用した設計事例について次章で紹介する。

4. ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性と自己シール性能

ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材は、高レベル放射性廃棄物の処分技術において、自己シール性という重要な役割 (Fig.2 参照) を期待されている。この観点からの緩衝材・埋戻し材の設計や施工管理が予想されるとともに処分施設の力学的安定性を検討する上で、膨潤挙動に関する実験データを蓄積するが必要とされている。様々な材料条件や環境条件を設定し膨潤挙動を数値計算により定量的に評価することができれば、自己シール性や処分施設の力学的安定性の観点から、緩衝材や埋戻し材の概略設計が可能となることから、その定量的な評価方法の確立が強く求められている。本章では、材料条件や環境条件を設定し膨潤挙動を数値計算により定量的に評価できる著者提案の新しい膨潤評価式の概要とその妥当性について報告するとともに、実際の高レベル放射性処分施設の概略設計における利用の一例を紹介する。

4.1. ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の概要

著者は、化学的な環境条件に大きく影響を受ける膨潤特性の評価を可能とするため、Gouy-Chapman theory と呼ばれる粘土鉱物結晶レベルの膨潤現象を評価できる拡散二重層理論⁵⁾を利用して、締固めたベントナイトのみに適用できる膨潤評価式を提案した^{6,7)}。この評価式は、ベントナイトの交換性陽イオンを単一と仮定し定式化したものであり、砂・ベントナイト混合材料の膨潤挙動の評価やベントナイトに含有される交換性陽イオンの種類や組成による膨潤挙動の違いについて評価することは困難であった。実際の緩衝材や埋戻し材では、経済性の観点から、比較的安価な砂や現地発生土をベントナイトに混合して利用することや、海外産のベントナイトを利用することも考えられている^{2,3)}。そこで、砂・ベントナイト混合材料や海外産ベントナイトへ適用可能とするため、砂とベントナイトの配合割合および含有される交換性陽イオンの種類や組成を考慮できる新しい膨潤評価式を構築する必要がある。

著者が参考文献 6, 7 で提案した「締固めたベントナイトの膨潤評価式」では、モンモリロナイトの結晶の層間に水を吸水することにより生じる膨潤がベントナイトの膨潤挙動を支配すると考え、モンモリロナイトの結晶層間への水の浸入による反発力を拡散二重層理論に基づき定式化している (後述の式(1-a)~(1-d))。一方、結晶

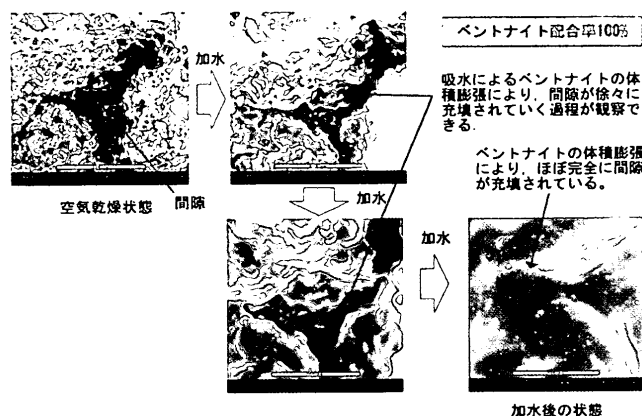


Fig.4 緩衝材中のベントナイト膨潤挙動の電子顕微鏡観察

間には引力であるファンデルワールス力も作用すると考えられ、これについても考慮している (後述の式(1-e))。

また、実際の緩衝材・埋戻し材中には間隙やモンモリロナイト以外の膨潤性をあまり示さない鉱物粒子も含まれているので、これらの影響を考慮できるようにするための新しい理論式が必要となる。著者は、Fig.4 に示すように、ベントナイトが膨潤し緩衝材中の間隙が充填されることを確認した。また、室内の膨潤実験の結果も踏まえ、緩衝材・埋戻し材の膨潤圧および膨潤変形の発生プロセスを考察し、Fig.5 に示すモデルを提案した⁸⁾。

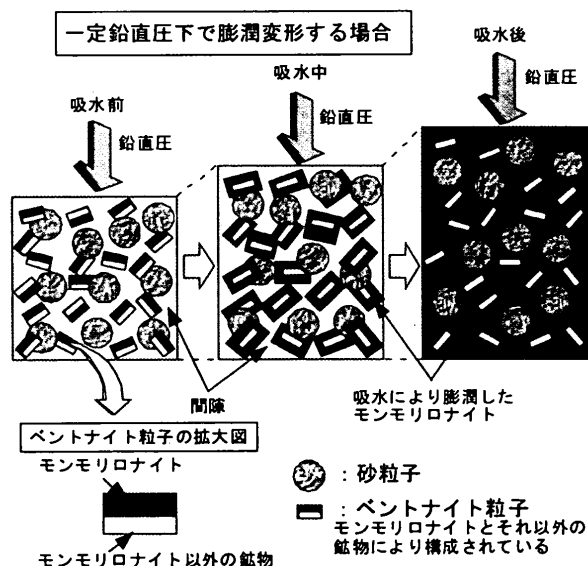


Fig.5 緩衝材・埋戻し材中のベントナイトの膨潤挙動イメージ

このモデルに基づき、緩衝材・埋戻し材中のモンモリロナイトの膨潤挙動を評価できるパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ϵ_{sv}^* (%)」を定義し、その算出式を誘導した (後述の式(1-f)~(1-h))。この式によれば、緩衝材・埋戻し材の膨潤率 (=膨潤変形量/緩衝材・埋戻し材の初期体積×100) の最大値、すなわち最大膨潤率とモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ϵ_{sv}^* が

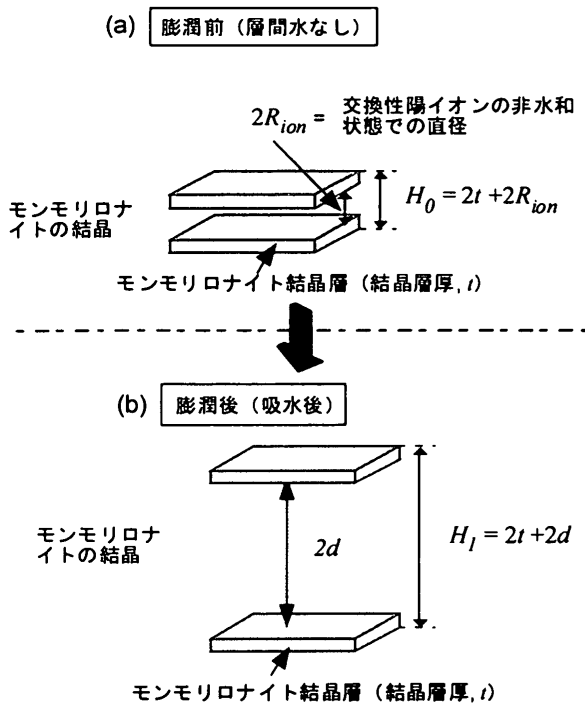


Fig.6 結晶レベルから見たモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ

関係づけられる。また、砂とベントナイトの質量比率に関するパラメータであるベントナイト配合率 α (%) を導入しており、砂とベントナイトの配合割合を考慮できるようにしている。

一方、著者は Fig.6 に示すようなモンモリロナイトの結晶レベルの膨潤挙動を考え、モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* (%) と平行二粒子間距離の1/2に相当するパラメータ d の関係を参考文献⁷⁾において定義した(後述の式(1-i))。

また、既往の研究から、ベントナイトの膨潤挙動は周辺の水の性質など周辺環境条件に大きく影響を受けることが知られている¹⁰⁾⁻¹²⁾。したがって、モンモリロナイトの膨潤変形に伴う環境条件の変化も考慮する必要がある。後述の式(1-j)はモンモリロナイト結晶層の膨潤変形に伴う間隙水のイオン濃度の変化を評価する式である。後述の式(1-k)はベントナイトの比表面積を算出するための式であり、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率の影響を考慮できるようにしている。

上記の理論を基本に、さらにベントナイトの主要な交換性陽イオンである Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} の4種類に対して、それぞれの交換性陽イオンに起因する粘土結晶層間に作用する反発力と引力を算出し、各イオンの交換容量を用いて加重平均し評価する方法を新たに考案した(後述の式(1))。

新たに提案されるベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式は次の通りである。詳しい膨潤評価式の誘導は、参考文献^{8,9)}を参照されたい。

【ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式】

$$p = \frac{1}{CEC} \sum_{i=Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}} [EXC_i \{ (f_r)_i - (f_d)_i \}] \quad (\text{kPa})$$

(なお、 p は反発を正とする。) (1)

$$(f_r)_i = 2nkT(\cosh u_i - 1) \times 10^{-3} \quad (\text{kPa}) \quad (1-a)$$

$$u_i = 8 \tanh^{-1} \left[\exp(-\kappa_i d_i) \tanh \left(\frac{z_i}{4} \right) \right] \quad (1-b)$$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{2n\nu_i^2 e^{\prime 2}}{\varepsilon k T}} \quad (1-c)$$

$$z_i = 2 \sinh^{-1} \left(96.5 \times \frac{EXC_i}{S} \sqrt{\frac{1}{8\varepsilon nkT}} \right) \quad (1-d)$$

$$(f_d)_i = \frac{A_h}{24\pi} \left[\frac{1}{d_i^3} + \frac{1}{(d_i+t)^3} - \frac{2}{(d_i+t/2)^3} \right] \times 10^{-3} \quad (\text{kPa}) \quad (1-e)$$

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_0 + 1) \right\} \quad (\%) \quad (1-f)$$

$$\times \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad (1-f)$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (1-g)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (1-h)$$

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \{ t + (R_{ion})_i \} + (R_{ion})_i \quad (\text{m}) \quad (1-i)$$

$$n = \frac{n_0 (\text{mol/m}^3) \times N_A}{1 + \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100}} \quad (\text{個数/m}^3) \quad (1-j)$$

$$S = \frac{C_m}{100} S_m + \left(1 - \frac{C_m}{100} \right) S_{nm} \quad (\text{m}^2/\text{g}) \quad (1-k)$$

ここに、

p : ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の発生する圧力 (kPa) (なお、 p は反発を正とする。)

$(f_r)_i$: 交換性陽イオン i に起因する反発力 (kPa) (i は Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} のいずれかの交換性陽イオンを示す。以下に記述される i はこれと同様の意味である。)

$(f_d)_i$: 交換性陽イオン i に起因する引力 (kPa)

EXC_i : 交換性陽イオン i の交換容量 (mequiv./g)

CEC : 陽イオン交換容量 (mequiv./g)

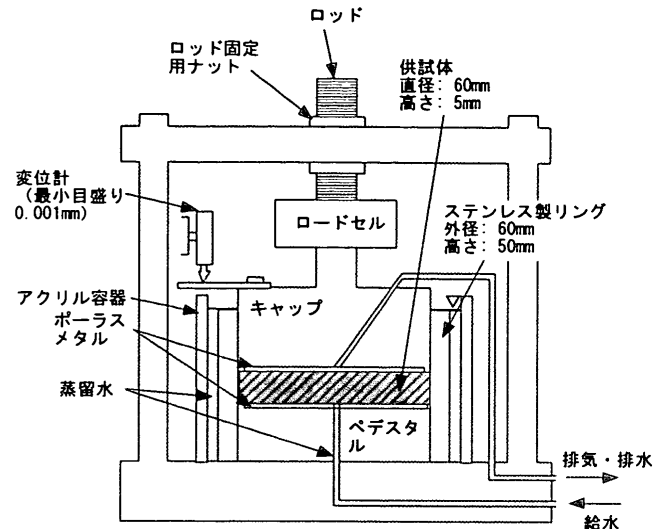
- d_i : 交換性陽イオン i の時の結晶層間距離の1/2 (m)
 v_i : 交換性陽イオン i の価数
 e' : 電子電荷 ($=1.602 \times 10^{-19}$ C)
 k : Boltzmann 定数 ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T : 絶対温度 (K)
 n : 緩衝材・埋戻し材中の間隙水の補正イオン濃度 (個数/m³)
 n_0 : 緩衝材・埋戻し材中の間隙水のイオン濃度 (mol/m³)
 ϵ : 間隙水の誘電率 (C² J⁻¹ m⁻¹)
 A_h : Hamaker 定数 (モンモリロナイトの場合, $=2.2 \times 10^{-20}$ J)
 t : モンモリロナイトの結晶層厚 ($=9.60 \times 10^{-10}$ m)
 ϵ_{smax} : 緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率 (%)
 e_0 : 緩衝材・埋戻し材の初期間隙比
 C_m : ベントナイトのモンモリロナイト含有率 (%)
 ρ_{a0} : 緩衝材・埋戻し材の初期乾燥密度 (Mg/m³)
 α : 緩衝材・埋戻し材のベントナイト配合率 (%) (全土質材料の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率)
 ρ_m : モンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³)
 ρ_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)
 ρ_{sand} : 砂粒子密度 (Mg/m³)
 $(R_{ion})_i$: モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン i の非水和半径 (m)
 N_A : アボガドロ数 ($=6.023 \times 10^{23}$)
 S : ベントナイトの比表面積 (m²/g)
 S_m : モンモリロナイトの比表面積 (m²/g)
 S_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積 (m²/g)

「ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式」は ϵ_{sv}^* とパラメータ d を介して、様々な材料条件 (ベントナイトの種類, 乾燥密度やベントナイトの配合率等) や環境条件 (温度や地下水の水質等) に応じて、緩衝材・埋戻し材の発生する圧力 p とその最大膨潤率 ϵ_{smax} の関係を計算することができる。

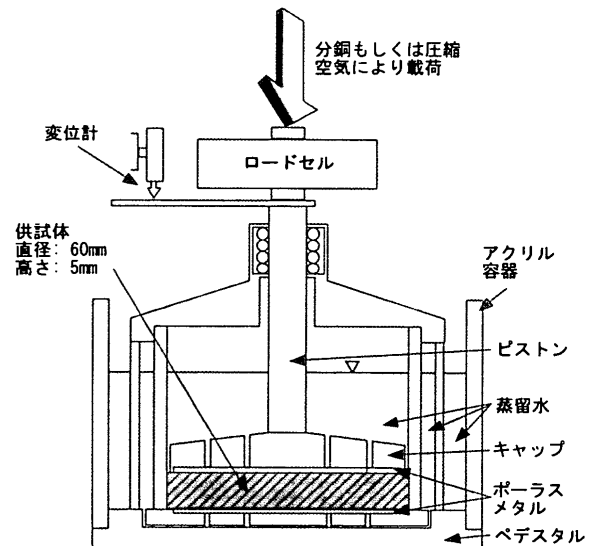
4.2. ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤特性と膨潤評価式による予測結果

本節では、緩衝材・埋戻し材の膨潤変形や膨潤圧に関する室内実験結果と前節で紹介した膨潤評価式による予測結果を比較し、その妥当性について述べる。

使用した試料は、山形県月布産のベントナイト (クニミネ工業製, クニゲル V1) と三河珪砂 6 号である。これらの試料を締め固めて作製した供試体を用い、膨潤変形しないよう拘束した状態で鉛直方向の膨潤圧を測定する膨潤圧実験と、一定の鉛直圧下における一次元膨潤変形量を測定する膨潤変形実験の 2 種類を行った。Fig.7 に各実験で使用した装置の概要を示す。供試体の寸法は直径 60 mm, 高さ 5 mm, 初期乾燥密度は 1.19~2.27



(a) 膨潤圧実験装置



(b) 膨潤変形実験装置

Fig.7 使用した実験装置の概要

Mg/m³ の範囲に、ベントナイトの配合率は 5~100% の範囲にあった。

Fig.8 に上記の供試体の膨潤圧に関する、Fig.9 に膨潤変形に関する実験結果を例示する。ここで、最大膨潤圧とは膨潤圧の時間変化において計測された最大値であり、最大膨潤率は膨潤率 (=一次元膨潤変形量/供試体の初期高さ×100) の時間変化曲線に対して双曲線近似を行い、その漸近線の値として求めた^{7,9)}。

Figs.8,9 の結果から分かるように、緩衝材・埋戻し材の膨潤特性は初期乾燥密度、ベントナイト配合率および鉛直圧に大きく影響を受けることが分かる。この実験結果に対し、先に述べた膨潤評価式による計算結果を Figs.8,9 に曲線で併記した。Tables 1~3 に膨潤評価式で必要となるパラメータの設定値を示す。各パラメータは、使用したベントナイトおよび砂の物性にに基づき設定

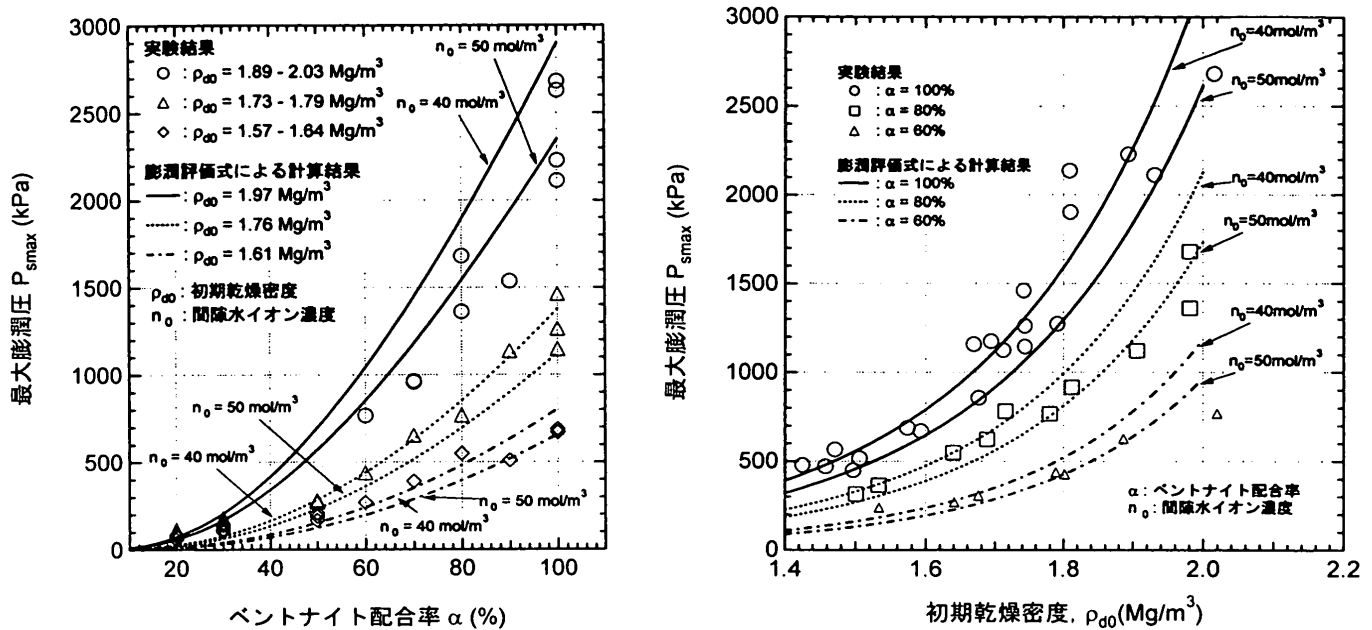


Fig.8 緩衝材・埋戻し材の膨潤圧特性と膨潤評価式による予測結果の比較

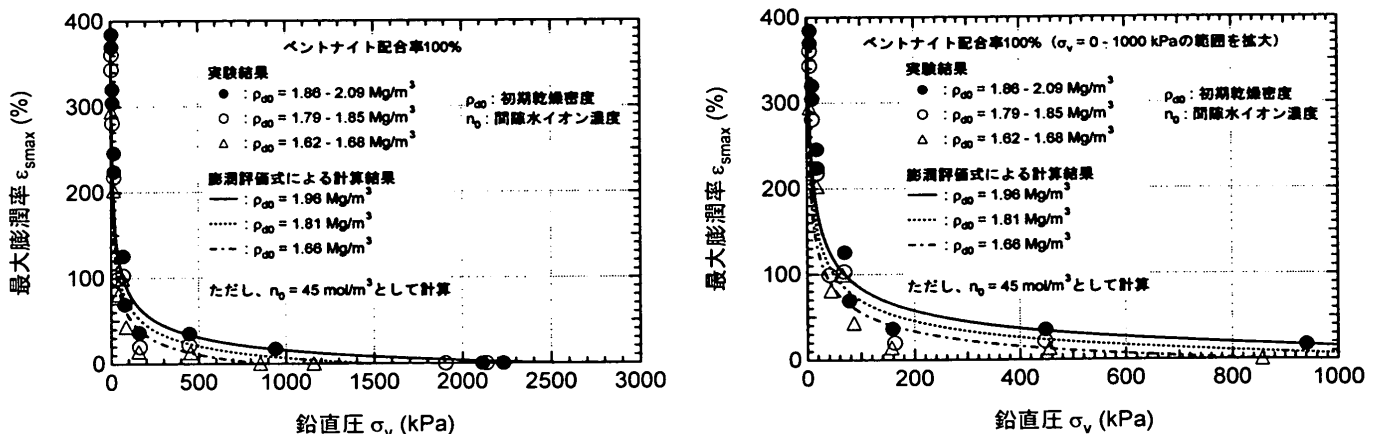


Fig.9 緩衝材・埋戻し材の膨潤変形特性と膨潤評価式による予測結果の比較

しており、その詳細は参考文献9を参照されたい。

これらの図から分かるように、4.1.に述べた膨潤評価式による予測結果と室内実験で得られた結果は良好に一致しており、提案した評価式が十分妥当であると考えられる。

4.3. 緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式による自己シール性評価

緩衝材には、Fig.2に示すような周辺地盤や廃棄物収納容器との間に生じる隙間を充填し、かつ十分な止水機能を有するための自己シール性が期待されている。先に提案した膨潤評価式は、ある条件下における緩衝材・埋戻し材の膨潤による最大変形量と最大圧力が算出できる。さらに、評価式中の定数である、非水和イオン半径、温度、モンモリロナイト含有率、間隙水のイオン濃度、緩衝材・埋戻し材の乾燥密度等を変化させることにより、使用する材料や処分施設周辺の環境条件を考慮した検討が可能である。この膨潤評価式を用れば、緩衝材から処

分孔壁面までの距離と、その隙間を充填した後の緩衝材の発生圧力との関係を求めることにより自己シール性の評価が実施できる。ここでは、緩衝材から処分孔壁面までの隙間の幅 (Fig.2参照) を50mmであると仮定し、これを充填し十分な止水機能を有するために必要な緩衝材の乾燥密度および厚さの試算を行った。試算を行う上での前提条件として、①廃棄物収納容器、緩衝材、緩衝材と周辺地盤との隙間、周辺地盤を一次元モデルとする、②緩衝材が膨潤変形し、処分孔壁面に接した状態で発生する圧力は1000 kPa以上、とした。①では、緩衝材が1000 kPa以上の圧力を発生している状態において、隙間の隅々まで体積膨張し充填しており、十分な止水機能を発揮していると仮定したものである。実際、カナダでは緩衝材の膨潤変形後に必要な圧力を1000 kPaとしており¹³⁻¹⁵⁾、これを参考に①のように仮定した。なお、周辺地盤が岩盤であれば、1000 kPaの圧力では悪影響を与えないとしている¹³⁻¹⁵⁾。

Fig.10に試算結果を示す。膨潤評価式中の変数は、

Table 1 膨潤評価式における材料パラメータの設定
(クニゲル V1 相当)

モンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m	2.77 Mg/m ³
モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 ρ_{nm}	2.81 Mg/m ³
砂の土粒子密度 ρ_{sand}	2.66 Mg/m ³
モンモリロナイトの比表面積 S_m	810 m ² /g
モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積 S_{nm}	0 m ² /g
ベントナイトのモンモリロナイト含有率 C_m	48%
陽イオン交換容量 CEC	0.732 mequiv/g
交換性 Na イオン量 EXC_{Na^+}	0.405 mequiv/g
交換性 Ca イオン量 $EXC_{Ca^{2+}}$	0.287 mequiv/g
交換性 K イオン量 EXC_{K^+}	0.009 mequiv/g
交換性 Mg イオン量 $EXC_{Mg^{2+}}$	0.030 mequiv/g
交換性 Na イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Na}$	0.098 nm
交換性 Ca イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Ca}$	0.1115 nm
交換性 K イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_K$	0.133 nm
交換性 Mg イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Mg}$	0.0835 nm
交換性 Na イオンの価数 v_{Na}	1
交換性 Ca イオンの価数 v_{Ca}	2
交換性 K イオンの価数 v_K	1
交換性 Mg イオンの価数 v_{Mg}	2
モンモリロナイト結晶層厚 l	9.60×10^{-10} m

Tables 1~3に示した通りである。緩衝材の乾燥密度は 1.6~2.0 Mg/m³ の範囲で変化させ、ベントナイト配合率100%と80%に相当する緩衝材・埋戻し材を想定した。

Table 2 膨潤評価式における物理定数

電子電荷 e'	1.602×10^{-19} C
Boltzmann 定数 k	1.38×10^{-23} J/K
Hamaker 定数 A_h	2.2×10^{-20} J
Avogadro's 数 N_A	6.023×10^{23}

Table 3 膨潤評価式における環境条件パラメータ

間隙水の誘電率 ϵ	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12}$ C ² /(J·m)
温度 T	295 K
緩衝材・埋戻し材中の間隙水のイオン濃度 n_0	膨潤変形実験に対して 20 mol/m ³ 膨潤圧実験に対して 40~50 mol/m ³

Fig.10の試算結果から、自己シール性の機能を満足するためには、緩衝材のベントナイト配合率が100%の場合、乾燥密度2.0 Mg/m³において約200 mmの緩衝材厚さが必要と試算された。また、乾燥密度1.8 Mg/m³において約390 mmの緩衝材厚さが必要と試算された。また、ベントナイト配合率80%の場合、乾燥密度2.0 Mg/m³において約330 mmの緩衝材厚さが必要であると試算された。

5. 粘土科学の活躍が期待される課題

ベントナイトを使用した緩衝材は、高レベル放射性廃棄物の処分技術において重要な役割を期待されている。ベントナイト系緩衝材に期待されている止水性および膨潤性 (Fig.2 参照)、熱伝導性など工学的な機能は1000年以上に亘って有効である必要があることから、長期健

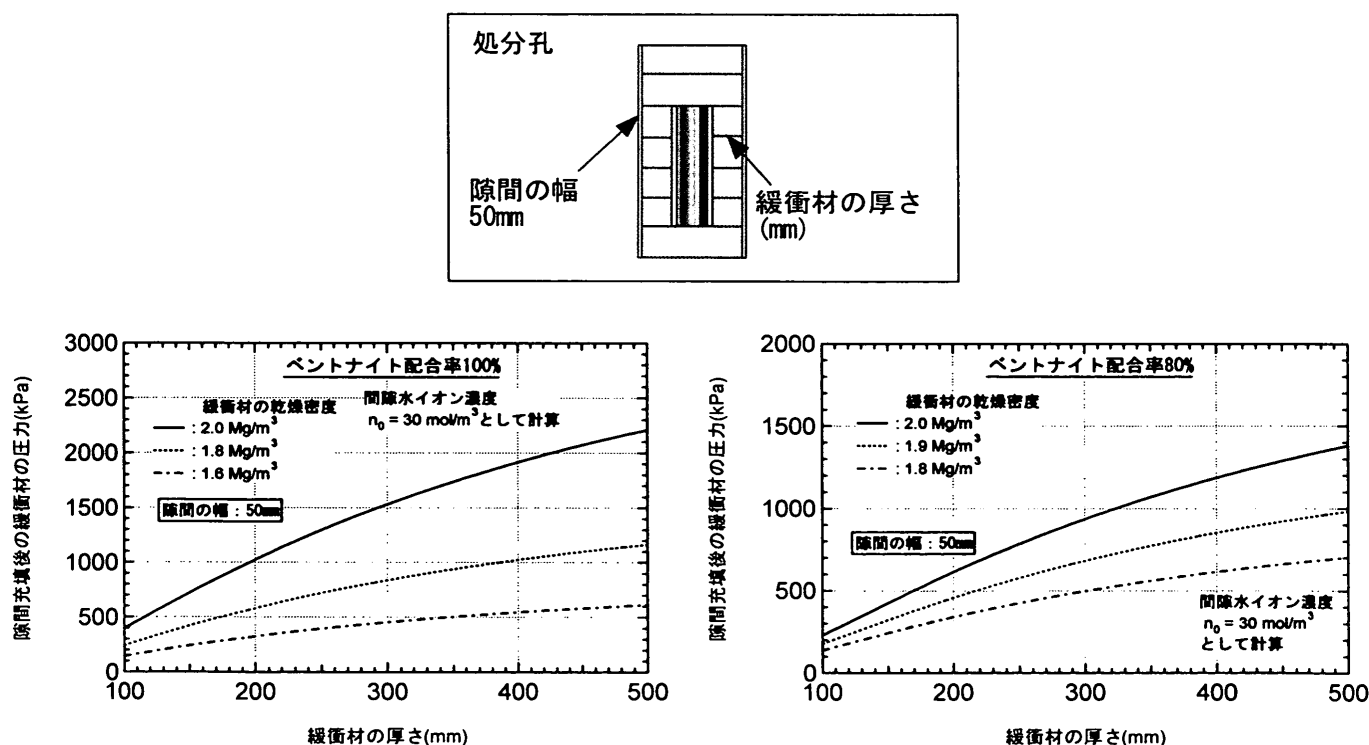


Fig.10 提案する膨潤評価式を用いた緩衝材の密度、ベントナイト配合率および寸法の計算例

全性や化学的緩衝性など、工学的機能を長期間に亘って維持するための材料特性も重要な要求性能となっている。このような長期健全性等については、非常に限られた研究事例しかなく、粘土科学分野の研究者に大きく期待されることである。また、このような地下処分施設の建設では丈夫な支保工を用いる必要があり、これに大量のセメントコンクリートが使われることが考えられる。したがって、セメントが創り出す特殊な化学的雰囲気の中で、ベントナイトを主体とした緩衝材や埋戻し材が設置されることから、このような環境下でのベントナイトの長期健全性が新しい研究課題になるとともに、このような環境下での止水性能や膨潤挙動などの機械的性質の変化も把握する必要がある。その他にも、還元的雰囲気にある地下深部に長期にベントナイトが設置されるのだが、その際の材質・物性の変化は如何なるものか？バクテリアの影響はどうか？等、新しい研究課題は尽きないのである。粘土科学分野の研究者が活躍する場面は、大いにあるものと思われる。

6. 結 論

本論文における主な結論を列挙すると以下の通りである。

- (1) ベントナイトに含有される膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトの膨潤挙動に着目して、緩衝材・埋戻し材の膨潤圧および膨潤変形のプロセスをモデル化した。また、粘土鉱物結晶レベルの膨潤現象を評価できる拡散二重層理論と上記モデルに基づく評価式を組み合わせることにより、緩衝材・埋戻し材の膨潤圧および膨潤変形の評価式を提案した。
- (2) 提案した膨潤評価式による予測結果と室内実験で得られた結果とを比較した結果、提案した評価式が十分妥当であることを確認するとともに、膨潤評価式を利用して自己シール性の観点から緩衝材の密度や寸法の概略設計例を紹介した。
- (3) 高レベル放射性廃棄物処分技術において、粘土科学の活躍が期待されている課題について私見を述べた。

引用文献

- 1) 財原子力環境整備センター (1998) 放射性廃棄物データブック, 148p.
- 2) 核燃料サイクル開発機構 (1999) 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—総論レポート. JNC TN1400 99-020.
- 3) 財電力中央研究所, 電気事業連合会 (1999) 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.
- 4) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1992) SKB91 Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety, SKB Technical Report 92-20.
- 5) Mitchell, J. K. (1993) Fundamentals of soil behavior (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc., pp.111-130.
- 6) Komine, H. and Ogata, N. (1994) Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 31-4, pp.478-490.
- 7) Komine, H. and Ogata, N. (1996) Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33-1, pp.11-22.
- 8) Komine, H. and Ogata, N. (1999) Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. Soils and Foundations, 39-2, 83-97.
- 9) 小峯秀雄, 緒方信英 (1999) 高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案—砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響—, 電力中央研究所研究報告 U99013.
- 10) Iwata, S. and Tabuchi, T. (1988) Soil - water interactions, Marcel Dekker, Inc., pp.131-193.
- 11) Van Olphen, H. (1991) An introduction to clay colloid chemistry (Second Edition), Krieger Publishing Company Malabar, pp.92-110.
- 12) Kanno, T. and Wakamatsu (1992) Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol.29, pp.1102-1107.
- 13) Atomic Energy of Canada Limited (1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives, AECL-10719 COG-93-8, Whiteshell Laboratories Pinawa, Manitoba R0E 1L0.
- 14) Dixon, D. A., Gray, M. N., Cheung, S.C.H. and Daxidson, B.C. (1987) The hydraulic conductivity of dense clay soils in geotechnique in resource development, Proceedings of the 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, pp.389-396.
- 15) Dixon, D. A. and Gray, M. N. (1996) Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and the USA, Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics (IS-Osaka '96), Vol.1, pp.43-48.