

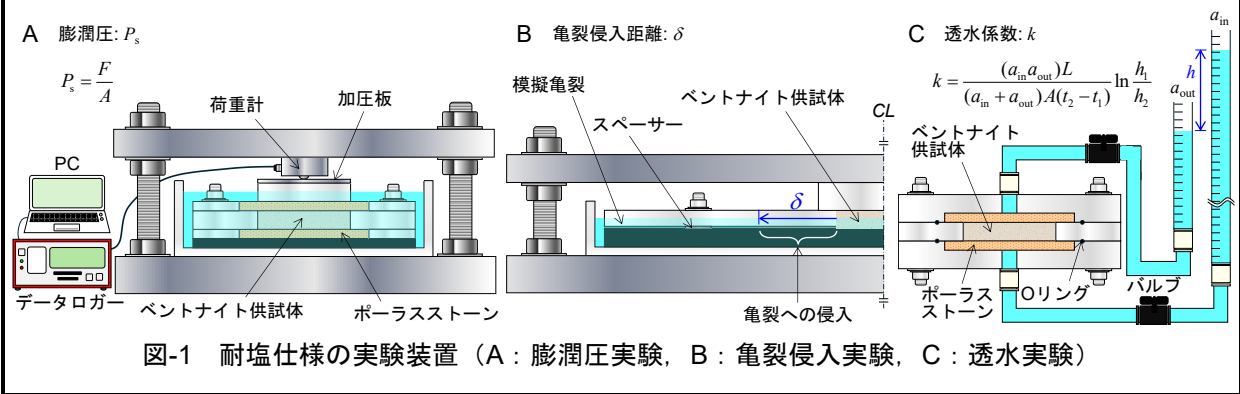
研究成果報告書

研 究 題 目	ベントナイト系材料の膨潤・亀裂侵入特性と透水性に及ぼす塩分濃度履歴の影響の定量的解明		実 施 年 度
			2023～2024 年度
代 表 研 究 者	所 属	鳥取大学 学術研究院 工学系部門	
	氏 名	河野 勝宣	印

1. 研究の目的・背景

2050 年のカーボンニュートラルの実現、さらに、エネルギー源の安定的な確保の観点からも原子力発電は、我が国において重要なエネルギー源の選択肢の一つである。一方で、原子力発電の運転によって避けては通れない課題として地層処分事業が挙げられる。2020 年に北海道寿都町および神恵内村において、地層処分施設選定に向けて全国初の文献調査が始まった。これにより、我が国では地層処分がより現実味を帯びた重要課題として注目されている。特に、科学的特性マップ（経済産業省 資源エネルギー庁）で示されたように、沿岸から 20 km 程度を目安とした範囲が廃棄物の輸送の面からも地層処分地として好ましいとされている。オルキルオト（フィンランド）とフォルスマルク（スウェーデン）の事例からもわかるように、我が国においても最終処分地が沿岸部に建設される可能性が極めて高く、これは中国地方の沿岸部においても十分可能性がある。沿岸部では、降水系地下水と海水系地下水が存在し、かつ、それらの塩淡境界は気候変動による海水準変動に伴って変化するため、地下水中の塩分濃度も変化することが考えられる。したがって、沿岸部での建設を想定して、緩衝材として用いられるベントナイト系材料の性能に及ぼす海水系地下水の塩分濃度履歴の影響を評価することは非常に重要である。ベントナイトの膨潤特性や透水性に及ぼす塩分濃度の影響について検討した例は、これまでに非常に多く見られるが、数万年オーダーの時間スケールを考える地層処分において、例えば、気候変動による塩分濃度の変遷に着目し、様々な塩分濃度の履歴を与えてベントナイトの膨潤特性、亀裂侵入特性、透水性を評価しようとする試みはほとんどない。また、これらの諸特性の関係性を明らかにした研究例もほとんどない。

本報告書では、様々な塩分濃度環境下（精製水および NaCl 溶液：0.1, 0.6, 1.0 mol/L）でかつ、その濃度を様々な時間間隔で変化させ、ベントナイトの膨潤圧、亀裂侵入距離および透水係数に及ぼす塩分濃度履歴の影響およびこれら諸特性の関係性について、実験的に検討した結果について報告する。いずれの実験装置（図-1）も自製し、治具やボルト類はすべて耐塩仕様とした。実験は、「一度でも塩分環境に曝されたベントナイトの性能は、塩分濃度を低下させても元に戻らないのか」、あるいは、「塩分濃度がゼロの環境下で飽和させた場合、その後の塩分の作用は影響するのかわからないのか、どの程度影響するのか」等に注視して進めた。また、これらの実験挙動を表現できる簡易モデルを構築し、理論的考察を行うことで、実験結果の検証を行った。



2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

各種実験開始後 600 日間の結果を図-2 に示す。実験条件は、図-2 に示すように、精製水および NaCl 溶液（0.1, 0.6, 1.0 mol/L）の 4 ケース（Case-1～4）を全期間一定で、また、塩分濃度履歴については、塩分濃度を徐々に増加 or 低下させる条件の 2 ケース（Case-5, 6）、さらに、塩分濃度を一気に増加 or 低下（を繰り返す）条件の 2 ケース（Case-7, 8）の合計 8 ケースである。塩分濃度の違い（Case-1～4）によってベントナイトの膨潤圧 P_s 、亀裂侵入距離 δ 、透水係数 k に違いが見られた。特に、0.1 mol/L の比較的低い塩分濃度でさえ、 P_s は精製水浸漬ベントナイトに比べて 5 割ほど低下してしまうことがわかった。一方、塩分濃度履歴を与えた実験結果（Case-5～8）に着目すると、 P_s と k については、塩分濃度に依存して大きな変化が見られることがわかった。これらの実験結果について、図-3 に示すような NaCl 溶液環境下におけるベントナイト中のモンモリロナイトの水和反応による層間膨潤とモンモリロナイト粒子表面の拡散電気二重層による膨潤挙動に基づいて考察することで、実験結果の傾向を概ね説明することができた。すなわち、NaCl は水に電離するため、水分子が Na^+ と Cl^- に引き寄せられて、それぞれのイオンを取り囲んでいる状態である（水和反応）。高塩濃度になるにつれて水分子が溶液中のイオンで使われるため、モンモリロナイト層間に入ってくる水分子の量が少なくなる。そのため、交換性陽イオンとの水和が妨げられ、層間の膨潤圧が低下したと考えられる。また、本研究では供試体間隙およびモンモリロナイト層間に既に精製水または NaCl 溶液が入った状態での溶液交換となる。そのため、モンモリロナイト層間のイオン濃度と外部から与える溶液のイオン濃度差（濃度勾配）による浸透圧の発生により、外部から与える溶液の濃度が（相対的に）高いときは水分子が層間から排水、濃度が低いときは逆に層間に吸水されることで、 P_s 、 k の変化の様相に違いが見られたと考えられる。さらに、得られた膨潤圧データを考慮して、ベントナイトの亀裂侵入現象の定式化を試み、いくつかの解析を実施し、これらの実験結果を表現できる簡易モデルを構築^{成果1)}できた。

以上より、当初の計画通りの実験・解析結果、さらに、今後の発展研究のヒントや地層処分バリア材の性能評価に資する貴重な知見を得ることができたため、計画に対する達成度は 100% と言える。

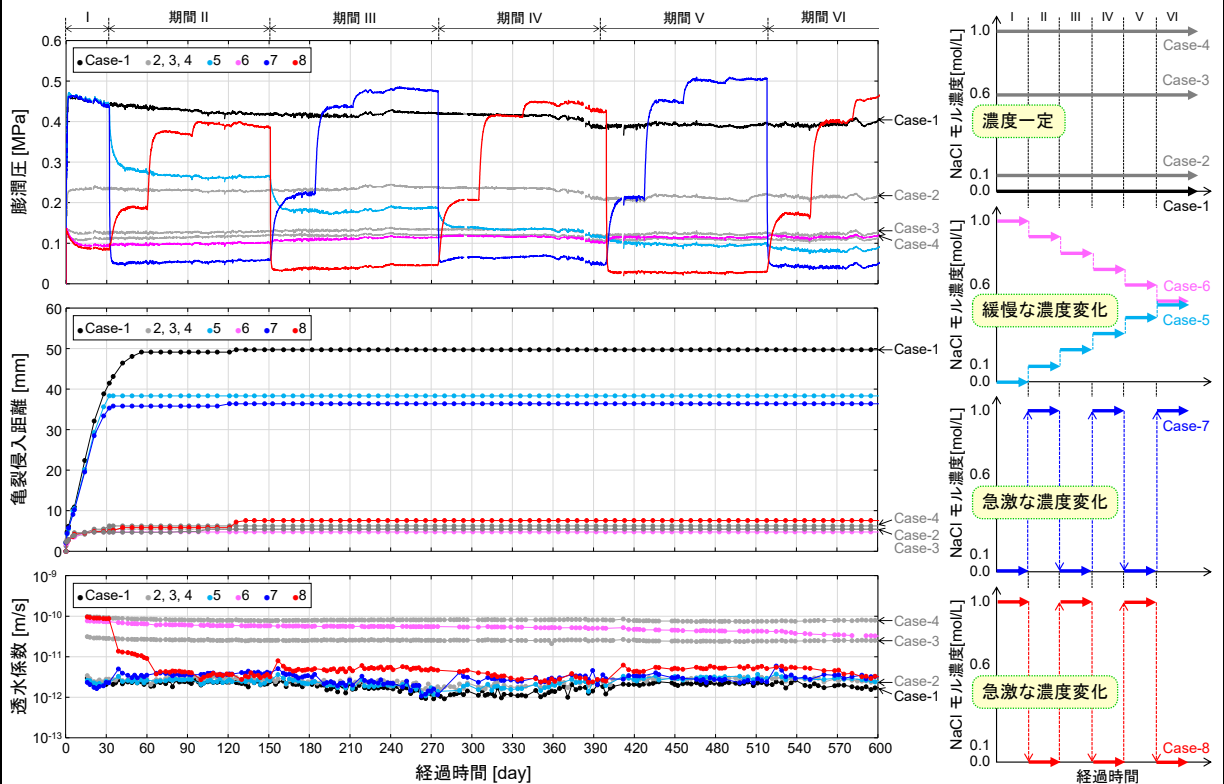
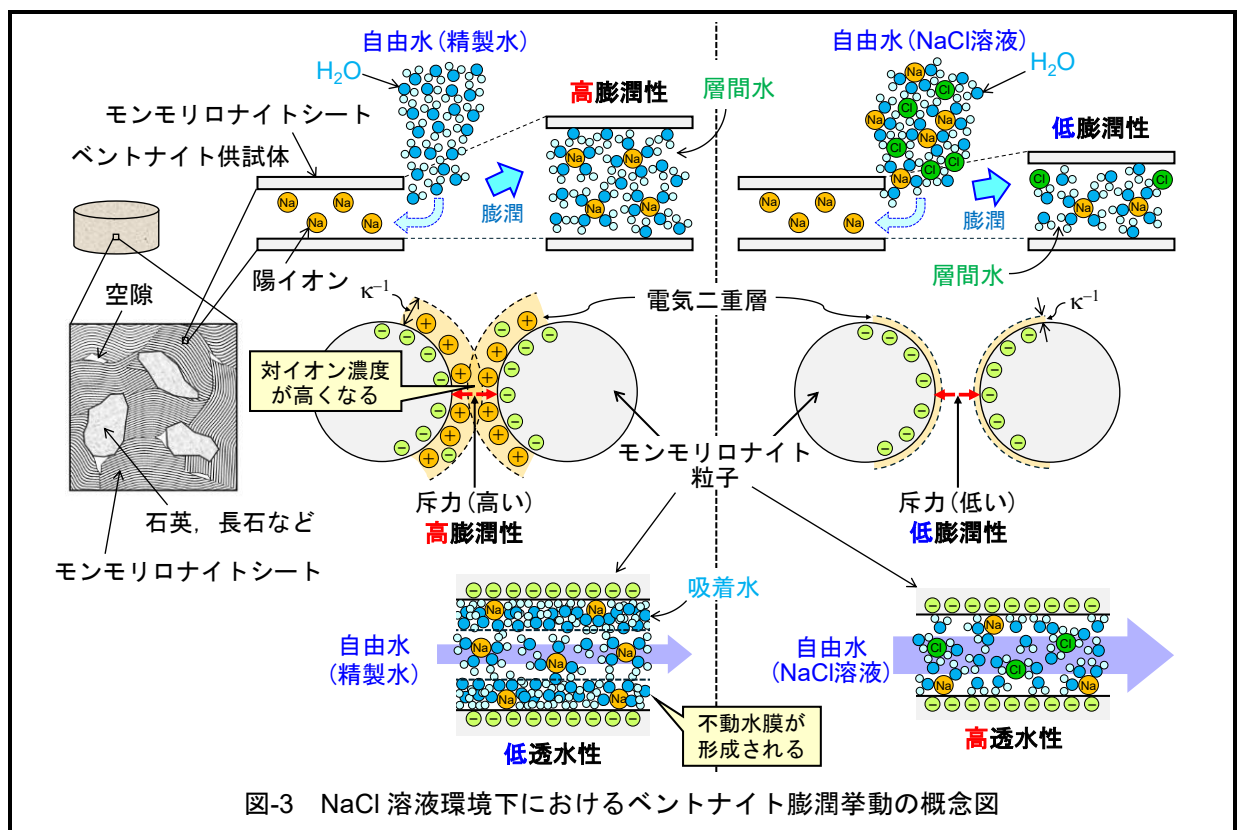


図-2 様々な塩分濃度履歴を与えたベントナイトの膨潤圧、亀裂侵入距離、透水係数



3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

各費目における申請時の計画（計 1,600,000 円）に対する実績（計 1,600,000 円）を示し、計画時と異なる部分について記載する。なお、品名・使途の詳細については、会計報告書に記載した。

「設備備品費」（計画：300,000 円，実績：509,416 円）：部材・製品の価格高騰により、計画時よりも超過した。なお、小型圧縮型ロードセルおよび圧力計については、別予算で補填して購入した。

「消耗品費」（計画：280,000 円，実績：411,923 円）：予備実験において、予期せぬ複数の問題点が抽出され、その改善等を行うにあたり、購入する物品が増えたため、計画時よりも超過した。

「借料損料」（計画：100,000 円，実績：0 円）：分析使用料として計上していたが、別予算で実施のプロジェクトに合わせて本研究で使用する試料の分析を実施できたため、使用料は別予算で賄うことができた。浮いた費用は、新たに必要になった「旅費」に流用した。

「資料費」（計画：80,000 円，実績：8,580 円）：インターネットで電子データでの取得、図書館で入手可能であったため、必要最低限の文献のみ購入した。浮いた費用は、新たに必要になった「その他」に流用した。

「印刷費」（計画：80,000 円，実績：0 円）：「資料費」と同様の理由。浮いた費用は、新たに必要になった「旅費」に流用した。

「旅費」（計画：200,000 円，実績：376,970 円）：計画時には含まれていなかったが、日本材料学会学術講演会における資料収集および本研究に関する足利大学での意見交換・資料収集のための旅費が新たに必要になった。さらに、第 59 回地盤工学研究発表会の開催地が北海道旭川市であったため、計画時よりも超過した。

「謝礼金」（計画：340,000 円，実績：0 円）：本研究の一部を所属機関研究室の卒論テーマとして取り扱うことが可能となったため、学生への謝金の支払いが必要なくなった。浮いた費用は、設備備品費・消耗品に流用した。

「その他の諸経費」（計画：240,000 円，実績：293,111 円）：研究発表会参加料および英文誌「Clay Science」投稿論文の英文校正の費用が新たに必要となった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

ベントナイト緩衝材の膨潤圧の低下、流出（亀裂侵入距離）および透水係数の上昇は、地層処分において好ましくない事象であることは言うまでもない。しかし、適度な塩分濃度の存在により、膨潤圧は少しの低下で、かつ、流出は抑え、低透水性も担保できる最適解を見つけられる可能性があることを本研究結果から見出した。このような観点から、沿岸域における地層処分の「地下水シナリオ」の設定のための適切なバリア材の性能評価に結び付ける必要があり、発展課題として検討する計画である。しかし、実際の処分環境では、地下水の化学組成を制御することは現状難しく、緩衝材の性能要件は、原子力発電環境整備機構（NUMO）等によって設定された膨潤圧および透水係数の設計目標値との関連で評価する必要がある。したがって、今後、さまざまな塩分条件下での緩衝材の挙動の範囲を定量的に示すことが課題となる。

一方で、本実験結果より、溶液の塩分濃度履歴の与え方により、ベントナイト緩衝材の膨潤・流出・侵入・透水挙動をコントロールできる可能性があること見出した。ベントナイトは天然材料であり、環境負荷も少ないことから、地層処分のバリア材に限らず、沿岸部においてベントナイトを利用する場合（例えば、ベントナイト系の遮水シートやベントナイト混合土を用いた浸水や遮水対策）において、本研究成果は非常に有益な情報になるものと考えられる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【学術論文】

- 1) **Kohno, M.**, Kaneuji, Y.: Experimental study on swelling and intrusive behavior of bentonite under various solutions and its simple model construction, *Acta Geotechnica*, **19**(9), pp.5833-5853, 2024.
- 2) **Kohno, M.**, Kondo, S., Nishimura, T.: Swelling, outflow, and permeability characteristics of bentonite in sodium chloride solutions of various concentrations (論文投稿中)
- 3) **Kohno, M** *et al.*: *Soils and Foundations* (論文執筆中)

【発表】

- 4) **Kohno, M.**, Kondo, S., Nishimura, T.: Swelling, outflow, and permeability characteristics of bentonite in NaCl solutions of various concentrations, *9th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement (Clay Conference 2024)*, 2024.
※本研究発表により、日本粘土学会学術振興賞を受賞。
- 5) **Kohno, M.**, Nishimura, T., Kato, M., Nara, Y.: Effects of clay-mineral type on permeability of rock materials having a single macro-fracture filled with clay minerals, *Cou Frac 2024 - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application*, 2024.
- 6) **河野勝宣**, 近藤 駿, 佐藤 和, 金澤伸一, 飯田輝良: 塩分濃度履歴を与えたベントナイトの膨潤・流出・透水実験, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 7) **河野勝宣**, 近藤 駿: ベントナイトの膨潤圧・流出距離・透水係数に及ぼす塩分濃度履歴の影響, 第 76 回（令和 6 年度）公益社団法人土木学会中国支部研究発表会, 2024.
- 8) **河野勝宣**, 岩城夏歩, 西村 強: ベントナイトで充填された巨視き裂を含む幌延泥岩および万成花崗岩の透水性, 日本材料学会第 72 期学術講演会, 2024.