

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	YU Rongguang
論文題目	Temperature Effects on Hydraulic and Buffering Performances of Soil-bentonite Mixture (ソイルベントナイトの遮水性と緩衝能に及ぼす温度の影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、モンモリロナイト系粘土鉱物を主成分とするベントナイトと砂質土の混合物であるソイルベントナイトを対象に、温度変化がその性能に及ぼす影響を評価したものである。ベントナイトは水と接触すると水分子を静電的に取込み膨潤する性質を有するため、ソイルベントナイトは高い遮水性能を発揮し、地盤汚染を封じ込める鉛直遮水壁や廃棄物処分場の底部遮水工として国内外で広く用いられてきた。近年は、エネルギー需要の拡大に伴い地中蓄熱等の地盤温度の変化を伴う新たな地盤技術が普及しつつあるが、地盤温度の上昇は有害物質を含む地盤中の化学物質の移動性に影響を及ぼしうることから、鉛直遮水壁を補助的に利用することがあり、そのような場合には遮水壁にも付随的に温度上昇が生じることになる。また、一部の海外の国のように一般廃棄物を直接埋め立てる場合は、その生分解による発熱に底部遮水工のソイルベントナイトが曝される。もとより、地表面付近では地盤温度の日変動・季節変動や、気候変動に伴う地下温暖化に恒常的に曝されているものの、温度変化がソイルベントナイトの性能に及ぼす影響については十分に明らかにされていないのが現状である。本論文はこのような課題に着目し、温度がソイルベントナイトの性能に及ぼす影響を、吸着性と遮水性に着目して各種室内実験により定量化するとともに、得られたデータの解釈により粘土鉱物の結晶表面で生じるミクロな現象の解明を図ったものである。論文は6章からなっており、以下に各章の内容を説明する。</p> <p>第1章は序論であり、諸外国における地盤汚染や廃棄物処分の現状や、本論文で主題となるベントナイトの膨潤性とその主たる原理である拡散電気二重層理論等について、基本事項を概説している。また、ソイルベントナイトに関する既往研究をレビューし、地中蓄熱との併用時や廃棄物の生分解時に懸念されるソイルベントナイトの温度上昇を指摘し課題を整理するとともに、地下温暖化に関する最新の知見に関する情報を整理することで、本論文の新規性と目的を明確にしている。</p> <p>第2章では、ソイルベントナイトが有するイオン吸着能と温度の関係を評価している。本章では、20～50°Cの恒温条件で所定濃度の塩化カルシウム溶液にソイルベントナイトを投入し、最大72時間の振とう後の溶液中の化学物質濃度の変化を測定することで、ソイルベントナイトに含まれる鉱物の結晶</p>			

が発揮しうる吸着能を，バッチ試験により求めている。その結果，温度によらず24時間で Ca^{2+} の吸着と Na^{+} の脱着が平衡に達すること， Ca^{2+} の吸着には，モンモリロナイトに含まれる交換性 Na^{+} とのイオン交換とモンモリロナイト結晶表面への直接的吸着の両者が寄与するが，イオン交換が優先的に起こること，イオン交換は吸熱反応であり直接的吸着は発熱反応として整理できること等を明らかにしている。

第3章では，ソイルベントナイト層の遮水性に及ぼす温度の影響を議論している。著者は，供試体温度を任意に調節可能な透水試験システムを自ら開発し，成型したソイルベントナイトに20～60°Cの恒温条件下で0.1 Mと1.0 Mの CaCl_2 溶液を通水し，透水係数や浸出水の化学特性を評価している。実験の結果から，60°Cの条件では間隙体積の3倍程度の通水量が得られるまで透水係数が相対的に高くばらつくがそれ以降は安定した値を示すこと，透水係数は温度が高くなるほど大きくなる傾向を示すものの，一般的な性能基準の $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ を満足すること，透水係数の上昇は通水溶液の粘性と密度の温度依存性で一意的に説明でき，20～60°Cの範囲では温度によらず同等の固有透過度を有すること等を明らかにしている。

第4章では，成型体としてのソイルベントナイト層のイオン緩衝能を議論している。前章では透水試験時の通水量から遮水性について議論しているが，本章では透水試験で得られた浸出水に対する化学分析結果に基づき，ソイルベントナイト層の緩衝能を評価している。実験結果から，ソイルベントナイト層の緩衝能は，通水溶液の Ca^{2+} モル濃度が相対的に低い場合は通水溶液とモンモリロナイト結晶層間で生じる物理化学的相互作用の温度依存性が顕著に表れるものの， Ca^{2+} モル濃度が非常に高い場合にはソイルベントナイト層の透水性の温度依存性が支配的であることを指摘している。さらに，0.1 Mの CaCl_2 溶液を通水した場合には，温度上昇によりソイルベントナイト層の Ca^{2+} に対する緩衝能が低下するが，1.0 Mの CaCl_2 溶液を通水した場合には温度が高くなっても Ca^{2+} に対する緩衝能は低下せず，第2章で得られた結果との不一致が確認されたことから，ベントナイト粒子表面に吸着された Ca^{2+} がモンモリロナイトの結晶表面に取り込まれた水分子やイオンの移動を抑制した可能性を指摘している。

第5章は，各章で得られた成果に実務的意義と解釈を与えている。0.1 Mと1.0 Mの溶液中の Ca^{2+} 濃度の違いによって異なる傾向が得られたことから，現場の地下水に含まれる化学物質濃度が高い場合と低い場合に切り分けて，懸念される温度上昇の影響を整理している。

第6章は結論であり，論文を総括するとともに今後の課題を示している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

ソイルベントナイトは、その高い遮水性能から、地盤汚染の封じ込めや廃棄物処分場のバリア材として国内外で広く用いられており、温度変化を伴う環境条件下にその適用が広がりつつある。本論文は、モンモリロナイト系粘土鉱物を主成分とするベントナイトと砂質土の混合物であるソイルベントナイトを対象に、温度変化がその性能に及ぼす影響を評価したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、異なる温度条件でのソイルベントナイトのイオン吸着能を定量化した。ソイルベントナイトの吸着能にはベントナイトの性能が支配的であるものの、異なる温度で性能を詳細に評価した事例は国内外で見られない。本論文では、多くの実験結果に基づき、分散系ではイオン交換と粘土鉱物表面への直接的吸着が起こるが、イオン交換が優先的であることを述べている。また、イオン交換と直接的吸着はそれぞれ吸熱反応と発熱反応として整理しうることを指摘しており、粘土の科学特性に関して新たな知見を提示している点で学術的価値が高い。

第二に、ソイルベントナイト層の遮水性能と温度の関係を明らかにした。ベントナイト単体の遮水性能と温度の関係に関する研究事例は2000年頃から見られるが、一般的な土にベントナイトを混合したソイルベントナイトの挙動は複雑であり、検討された事例はない。本論文では、地中蓄熱や廃棄物の生分解で想定される60°C程度までの温度上昇であれば、初期膨潤により透水係数は一般的な性能基準を満足することを実証しており、ソイルベントナイトの適用範囲の拡大に貢献しうることから、実務的意義が高い。

第三に、ソイルベントナイト層の化学的吸着における新たなメカニズムの可能性を指摘した。ベントナイトと化学物質の反応は、モンモリロナイト結晶表面での化学的・静電気的作用でこれまで説明されてきた。しかし、本論文ではそれだけでは十分に説明できない実験結果が得られたことから、ベントナイト粒子表面に吸着されたCa²⁺がモンモリロナイトの結晶表面に取り込まれた水分子やイオンの移動を抑制しうる可能性を指摘しており、粘土の科学特性に関する知見の高度化に寄与しうる示唆を与えている。

以上のように、本論文はソイルベントナイトの性能に及ぼす温度の影響について多くの実験結果を示すとともに、熱—水—化学物質の連成問題の高度化に大きく寄与した。よって本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降