

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630217

研究課題名(和文)電磁波加熱と加水によるベントナイト材料の接合可能性

研究課題名(英文) Possibility on binding of bentonite based materials by electromagnetic wave raying and water putting

研究代表者

小峯 秀雄 (Komine, Hideo)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90334010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高レベル放射性廃棄物の地層処分施設で用いられるブロック型ベントナイト緩衝材は、単体では非常に低い透水性を有しているが、処分孔を充填するには、多数のベントナイトブロックを積み上げて施工しなければならない。この場合、単体としての遮水性は十分であるものの、ブロック間の隙間部分における遮水性能が懸念事項として挙げられている。本研究では、この懸念事項の解決を目指して、若干の水分添加と電磁波照射により生じる「電磁波加熱」を活用したベントナイトブロック間の接合技術の可能性を実験的に追求した。その結果、一定の条件において、ベントナイトブロックの接合できることを確認することができた。

研究成果の概要(英文)：In the disposal facility of high-level radioactive waste, bentonite blocks will be used as artificial barriers. It is necessary to use a lot of pieces of bentonite block to fill up the disposal pit. A bentonite block is very low hydraulic conductivity, however, water migration of contact part between bentonite blocks is a cause for concern. To solve this concern, this study has researched the possibility on binding of compacted bentonite blocks by electromagnetic wave raying and water putting through laboratory experiments. From the experimental results, the conditions of possible bonding has be clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：ベントナイト 電磁波加熱 加水 接合 高レベル放射性廃棄物地層処分

### 1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の建設は、環境地盤工学が貢献できる一主題である。同施設では、粉体状のベントナイトを高圧で機械的に締固めてブロック状に成型したものをを用いて人工バリア層を構築することが、候補の一つとして挙げられている。これは、原位置転圧では達成が困難な乾燥密度  $1.8\sim 1.9 \text{ Mg/m}^3$  程度のブロックに成型できる技術として有力視されている。図1は、高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概念(上左)、処分孔とベントナイトブロックの設置状況の概念(上右)、北海道の幌延にある研究施設に展示されているベントナイト

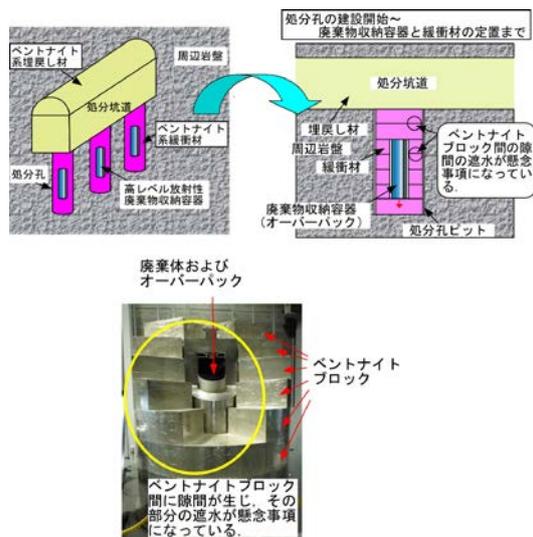


図1 高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概念とベントナイトブロックの設置状況の様子

ブロックの模型の例(下)である。

ブロック型ベントナイトは、単体では非常に低い透水性を有し、人工バリアとして十分な性能を有しているが、処分孔を充填するには、多数のベントナイトブロックを積み上げて施工しなければならない(図1上右、下参照)。この場合、単体としての遮水性は十分であるものの(参考文献: Komine, H. Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 134, No. 4, pp. 497-508, 2008.04.), ブロック間の隙間部分における遮水性能が懸念事項として挙げられている。

### 2. 研究の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設では、人工バリアとしてブロック型ベントナイト緩衝材(前述図1参照)の利用が考えられている。ブロック型ベントナイト緩衝材は、

単体では非常に低い透水性を有し、人工バリアとして十分な性能を有しているが、処分孔を充填するには、多数のベントナイトブロックを積み上げて施工しなければならない。この場合、単体としての遮水性は十分であるものの、ブロック間の隙間部分における遮水性能が懸念事項として挙げられている。この懸念事項の解決を目指して、本研究では、若干の水分添加と電磁波照射により生じる「電磁波加熱」を活用したベントナイトブロック間の接合技術の可能性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

上述の目的に基づき、ベントナイトブロック間の隙間部分における遮水性能の懸念事項を解決することを目指して、ベントナイトブロック間を若干の水分添加と電磁波照射により、接合させる技術の可能性を実験的に調査した。高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトにおいて、所定の締固め密度を達成できる施工方法としては、原位置での締固め方法と工場内でブロック成型する方法が有力と考えられ、技術開発が進められている。原位置締固め工法については、参考文献「増田良一、朝野英一、雨宮清、茂呂吉司、小菅一弘、小峯秀雄: 原位置締固め工法によるベントナイト系緩衝材施工技術の実証的検討, 土木学会論文集, No. 777/VI-65, pp. 59-72, 2004. 12. 3」を例とする成果が、また、ベントナイトブロック成型については、参考文献「小峯秀雄、緒方信英、中島晃、高尾肇、植田浩義、木元崇宏: 高レベル放射性廃棄物処分のためのブロック型緩衝材の製作方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 735/VI-59, pp. 203-208, 2003. 06.」の成果があり、図2に示すようなドーナツ型成型ベントナイト系緩衝材の成型に成功している。

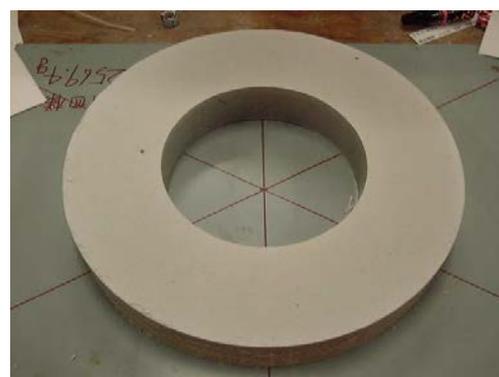


図2 ドーナツ型緩衝材の1/5縮尺模型の一例

本研究では、図2のようなブロック状のベントナイトの接合を想定し、次の2種類の方法、すなわち接合面に蒸留水を塗布した後に電磁波加熱する第1接合実験と、ほぼ均一な含水状態のベントナイトブロックに電磁波加熱する第2接合実験により、締固めたベントナイトの接合実験を行った。

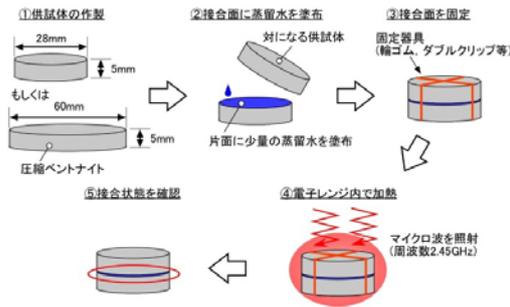


図3 第1接合実験の概要

第1接合実験では、図1に示す地層処分施設におけるベントナイトブロックを模した供試体を用い、「接合面における蒸留水の塗布」と2.45GHzのマイクロ波の数秒間の照射によって接合可能性を実験的に調査した。第1接合実験のポイントは、「接合面における蒸留水の塗布」にある。図3に、第1接合試験の概要を示す。使用したベントナイトは、山形県月布産のベントナイトA（クニゲルV1・クニミネ工業製、自然含水比7.7~8.0%）である。供試体は、初期乾燥密度は1.6~1.8 Mg/m<sup>3</sup>を目標として、静的締固めにより作製した。供試体寸法は、直径28mmと60mm、高さ5mmと10mmのものを用いた。

次に第2接合実験は、ベントナイトAに対して、塩飽和水溶液を用いた「蒸気圧法によるベントナイトの含水比調整」を用いて、7.82~7.85%、10.43~11.07%および15.11~16.06%の3種類の範囲にある含水状態に調整し、目標乾燥密度1.6 Mg/m<sup>3</sup>と2.0 Mg/m<sup>3</sup>で作製したブロックに対して、電磁波加熱を行う接合実験である。すなわち、図3の第1接合実験の②の箇所において、接合面に塗布することなく、上記の含水状態と電磁波加熱による接合実験であり、その他の手順は図3と同様である。供試体寸法は、直径28mm、高さ5mmのものを用いた。

第1および第2接合実験における電磁波加熱の条件は、700W、2.45GHzという一般的な電子レンジの仕様とした。

#### 4. 研究成果

第1接合実験の結果は、次のとおりである。表1に示す接合可能性判定基準に基づき、第1接合実験の結果を総括すると表2および表3に示す結果となった。

図4には、接合状態の様子を例示した。ベントナイトAでは、供試体直径28mm、高さ5mmの場合、マイクロ波が供試体の加水した部分に十分に照射されたと推察され、接合状

表1 接合可能性判定基準

記号	状態	詳細
○	接合可能	接合する
△	接合可能	接合するが直後~翌日には分離する
×	接合不可能	接合しない

表2 第1接合実験における接合可能性の評価結果（直径60mm）

直径(mm)	60			
高さ(mm)	10	5		
目標乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.6	1.8		
固定の方法	ダブルクリップ		輪ゴム	
照射時間(sec)	4	10	7	10
接合可能性	△	○	○	△

表3 第1接合実験における接合可能性の評価結果（直径28mm）

直径(mm)	28	
高さ(mm)	5	
目標乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.6	1.8
固定の方法	ダブルクリップ	固定無し
照射時間(sec)	10	10
接合可能性	○	×

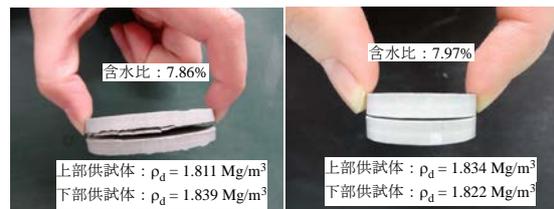


図4 左：直径60mm、右：直径28mmの各接合状況

態が良好と判断された（図4右参照）。複数のダブルクリップや輪ゴムを使用し供試体を固定した場合に、良好な接合が確認され、供試体の固定が不十分な場合には、部分的な膨潤により接合面に発生した隙間からの蒸発量が多く、良好な接合ができなかった。

電磁波加熱は、ニクロム線等の発熱体を利用した誘導加熱と誘電体の誘電損失に伴う誘電加熱とに大別される（参考文献「松村竹子：マイクロ波化学への招待1マイクロ波化学の原理-、日本化学会、化学と教育54巻7号、2006.」）。本試験では、図5上に示す誘電加熱を利用している。極性を有する水分子が、電気双極子として高周波電源の作用下に存在している場合、電圧が作用することにより、通常ランダムな方向を向いている電気双極子が一方向に整列する。交流電源では、電圧が周期的に変化するため、電圧極性の反転に追随する形で電気双極子も反転する。反転による摩擦等により、電場の変化に対して双極子の配列変化が時間遅れするため、誘電損失が生じ、電力が消費され発熱する（参考文献「松村竹子：マイクロ波化学入門(その2)、日本化学会、化学と教育52巻6号、2004.」）。物質がマイクロ波電磁界に置かれたときのマイクロ波の浸透深さDについては、図5下に示すような結果が報告されている。この結

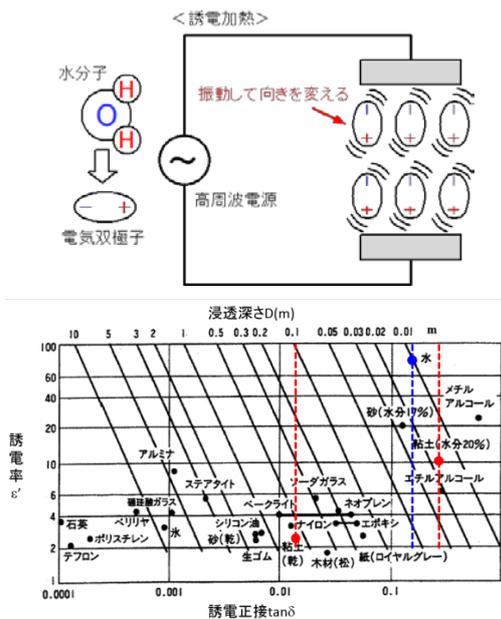


図5 誘電加熱の概念図(上)と誘電加熱によるマイクロ波の浸透深さに関する既往研究(下)

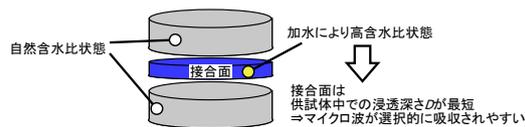


図6 供試体中のマイクロ波の選択的吸収の概念図

果は、電磁波周波数 2.45GHz の誘電加熱における浸透深さである。図中の右側に位置する物質は、浸透深さ D が小さくなるため、選択的にマイクロ波が浸透する。乾燥状態の粘土の D は 0.1m 程度であり、0.01m 程度の水と比較して十分に大きい。含有水分が 20% の粘土は水よりも短い D を有している。接合試験におけるマイクロ波浸透性のイメージを図 6 に示す。ベントナイト供試体中の接合面は高含水比状態にあり、マイクロ波が選択的に吸収されやすい状態になることから、接合が可能となったものと推察される。

次に第 2 接合実験の結果を以下に述べる。今回実施した表 4~6 の条件では良好な接合は確認できなかった。前述の第 1 接合実験では、接合面に集中的な水の層があるのに対し、第 2 接合実験では、蒸気圧法により供試体全体に水分が浸み込んでいる状態である。電磁波は水分に選択的に照射されることから、直接加水と蒸気圧法による水分の存在形態が接合へ影響を与えることが考えられる。

しかし、蒸気圧法により調整したケースにおいても、含水比が増加するに伴い接合の可能性が高くなることが表 4~6 の結果においても認められる。このことから固定方法や電磁波の照射時間も影響していると考えられる。多量的水分と堅固な固定により、比較的良好な接合が可能と考えられる。一方、長時間の電磁波照射は水分の過剰蒸発やブロッ

表 4 第 2 接合実験における接合可能性の評価結果(その 1)

照射時間	含水比	7.82~7.85 %	
	目標乾燥密度	1.6 Mg/m <sup>3</sup>	2.0 Mg/m <sup>3</sup>
5 sec	固定なし	×	×
	輪ゴム	×	×
	ダブルクリップ	×	△
10 sec	固定なし	×	×
	輪ゴム	×	△
	ダブルクリップ	×	×

表 5 第 2 接合実験における接合可能性の評価結果(その 2)

照射時間	含水比	10.43~11.07 %	
	目標乾燥密度	1.6 Mg/m <sup>3</sup>	2.0 Mg/m <sup>3</sup>
5 sec	固定なし	△	×
	輪ゴム	△	×
	ダブルクリップ	△	△
10 sec	固定なし	×	△
	輪ゴム	×	△
	ダブルクリップ	×	△

表 6 第 2 接合実験における接合可能性の評価結果(その 3)

照射時間	含水比	15.11~16.06 %	
	目標乾燥密度	1.6 Mg/m <sup>3</sup>	2.0 Mg/m <sup>3</sup>
5 sec	固定なし	△	△
	輪ゴム	△	△
	ダブルクリップ	△	△
10 sec	固定なし	×	△
	輪ゴム	×	△
	ダブルクリップ	△	△

クの破壊を招いた。特に乾燥密度が 1.6(Mg/m<sup>3</sup>) の供試体の実験ケースでは、ダブルクリップ固定の力に耐えられなく破壊が生じた。固定の力に耐える強度を持ちながら、一定の水分を保持できる状態にあるブロックが、加水と電磁波照射による接合に適していると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) Komine, H.: Design flow of specifications of bentonite-based buffer from the viewpoint of self-sealing capability using theoretical equations for swelling characteristics, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol. 2, No. 53, 2016, pp. 1833-1836. <http://dx.doi.org/http://doi.org/10.>

3208/jgssp\_JPN-007

- 2) 小峯秀雄：放射性廃棄物処分に対する地盤工学の役割，地盤工学会誌，査読有，Vol. 63, No. 6, 2015, pp. 1-3.

〔学会発表〕（計6件）

- 1) 伊藤大知，小峯秀雄，諸留章二，関口高志，三浦玄太：ベントナイト原鉱石の膨潤圧特性から観た緩衝材における膠結作用の定量評価の試み，第52回地盤工学研究発表会，2017. 07. 13. 「名古屋国際会議場（愛知県名古屋市）」
- 2) 伊藤大知，小峯秀雄：ベントナイト原鉱石の結晶構造分析による緩衝材の固結等長期変化の推察，GeoKanto2016，2016. 10. 21. 「日本科学未来館（東京都江東区）」
- 3) 小峯秀雄：ベントナイト系材料の膨潤圧・膨潤変形特性と透水係数に関する理論的連結の可能性とその活用，第51回地盤工学研究発表会，2016. 09. 15. 「岡山大学（岡山県岡山市）」
- 4) 石川麻衣，小峯秀雄，諸留章二：メチレンブルー吸着量試験における光源の違いによるハローの退色の評価—画像処理を利用した再現性の高い定量評価法の構築に向けて—，第51回地盤工学研究発表会，2016. 09. 14. 「岡山大学（岡山県岡山市）」
- 5) 谷野由宗，小峯秀雄：ベントナイトブロック接合における電磁波浸透の効果メカニズム，2015. 09. 02. 「北海道科学大学（北海道札幌市）」
- 6) 小峯秀雄，小栗光：電磁波加熱と加水による締固めたベントナイトの接合に関する予備実験，第49回地盤工学研究発表会，2014. 07. 16. 「北九州国際会議場（福岡県北九州市）」

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.f.waseda.jp/hkomine/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
小峯 秀雄 (Komine, Hideo)  
早稲田大学 理工学術院 教授  
研究者番号：90334010
- (2) 研究分担者  
( )  
研究者番号：
- (3) 連携研究者  
( )  
研究者番号：
- (4) 研究協力者  
小栗 光 (Oguri, Hikaru)  
元茨城大学大学院生（現・安藤ハザマ）  
谷野由宗 (Tanino, Yoshimune)  
元早稲田大学学部生（現・五洋建設）  
石川麻衣 (Ishikawa, Mai)  
元早稲田大学学部生（現・大成建設）  
伊藤大知 (Ito, Daichi)  
早稲田大学大学院生