

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26740036

研究課題名(和文) 循環資材等の環境安全性評価に資するみず道の影響を考慮した物質動態解析モデルの開発

研究課題名(英文) Development of Numerical Simulation Model considering Water Channel Effect for Environmental Safety Evaluation of By-product/Recycled Materials

研究代表者

石森 洋行 (Ishimori, Hiroyuki)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号：20434722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：廃棄物や循環資材埋立地盤からの化学物質溶出量を正確に評価することを目的として、化学物質の長期溶出特性に及ぼす溶出試験条件(流速、試料粒度、バッチ法とカラム法の違い)を調べるとともに、埋立地盤内に発生する水みちを有効間隙率の点から定量的に評価する手法を開発することで溶出量に及ぼす水みちの影響を調べた。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the leaching amounts of chemicals from landfill sites of waste and byproduct/recycled materials, this study investigated the effects of the leaching test conditions such as fluid velocity, sample particle size, difference of batch method and column method on the long-term leaching behavior of chemicals. Because the water channels generated in the landfill sites had a significant influence on the leaching amount, the testing method for quantitatively evaluating the water channel amount as the effective porosity was developed.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：溶出 数値解析 環境安全性 廃棄物

### 1. 研究開始当初の背景

焼却灰やスラグ等の循環資材を地盤の代替材料として有効利用する場合、これらに含まれる化学物質の溶出や拡散が懸念されるので、その環境安全性評価が強く求められている。多くの場合で、その評価には環告 46 号試験等のピーカーレベルによる溶出試験結果が準用されている。環告 46 号試験で規定される粒径 2mm 以下に粗砕した状態での溶出量評価は、実際に用いられる試料の粒径よりも細かいため、安全側での評価として捉えられてきた。

しかし、現場において大きな粒径をもつ試料を埋め立てた場合、その透水性は代表粒径の二乗に比例するので、このような透水性の高い埋立層に降った雨水は大間隙を選択的に流れ、みず道が発生する。溶出は水分との接触面から生ずるものなので、みず道のある埋立層からの化学物質の溶出量は、環告 46 号試験のように試料をピーカー内に水没させて測定した溶出量に比べると小さくなる。環告 46 号試験は時として安全側過ぎる評価となり有効利用の妨げになる場合がある。また、みず道が存在すると、埋立層に降った雨水はみず道に集中して流れるため、浸透が促進され、溶出した化学物質はその流れに輸送され予想以上に広域まで拡散する。このように、みず道は、周辺環境に及ぼす化学物質の移動時間や濃度の予測を難しくする。

以上より、化学物質の溶出・拡散挙動に及ぼすみず道の影響が大きいと考えられる。環境安全性評価では物質動態の正確な予測が必要であるので、みず道の影響を考慮した物質動態解析モデルを構築する。

### 2. 研究の目的

焼却灰およびスラグ埋立層中に発生するみず道の数理的な表現方法とそのモデルパラメータの決定方法、およびそれらの妥当性について学術的な裏付けを行う。既往研究では、土壌中のみず道を有効間隙率とみなし、有効間隙率をパラメータとした古典的な移流分散方程式の解をトレーサーの破過濃度プロファイルにフィッティングすることで算出している例が多い。しかし、みず道の有効間隙率による表現はまだ仮説の段階であり、現象論的な整合性を検証しなければならない課題が残されており、また土壌よりも不均質性の強い焼却灰やスラグ等の廃棄物試料に対しての適用可能性を検討する必要がある。そこで本研究では X 線 CT により廃棄物埋立層の間隙構造と其中的のみず道を可視化し、CT 画像から得たみず道の体積が、実験結果へのフィッティングから割り出された有効間隙率と等しくなるのかを検討することで、みず道モデルの妥当性を行った。

### 3. 研究の方法

廃棄物埋立層中のみず道が化学物質の溶出挙動に及ぼす影響を調査するために、(1)

粒度を 1-2 mm に調整した銅スラグ、(2) 粒径 2 mm 以下、粒径 10-20 mm、粒径 100 mm の製鋼スラグ、および(3) 粒度 2mm 以下、一辺 25 mm、50 mm、100 mm 角の廃棄コンクリート用いて、シリアルバッチ溶出試験とカラム溶出試験を実施した。

シリアルバッチ溶出試験では、化学物質の溶出速度に及ぼす試料粒度の影響を博することを目的として、方法は、試料と純水を液固比 10 の条件下でハイベッセル容器に入れ、攪拌速度 200 rpm で溶出試験を開始した。溶媒は 1、2、4、8、16、32 日目に新たな純水と置換し、各置換操作で得られる溶媒に含まれる無機物質を ICP 発光分析により定量し、その溶出濃度から単位時間・単位質量の試料からの溶出速度を求めた。一方、カラム溶出試験では内径 30 mm × 高さ 300 mm のアクリル製円筒形カラム (100 mm 角の廃棄コンクリートについては、底面 120 mm × 120 mm の高さ 340 mm のアクリル製矩形カラム) を用いて、カラム容器に所定密度で試料を充填した。その後、透水溶液として純水をカラム上端から下端に向けて通水させ、カラム下端から排出される液体を、1 日間同じ容器に回収し、次のフラクションでは 2 日間別の容器に回収し、さらにその次のフラクションは 4 日間別の容器に回収する等の操作を繰り返した。各容器に回収した液体の無機物質濃度を測定し、単位時間・単位質量の試料からの溶出速度を求めた。

また実施したカラム溶出試験時に発生する水みちを有効間隙率として定量的に評価するために、アクリル容器に粒径 1-2 mm の銅スラグを詰めた供試体 (乾燥密度 1900 kg/m<sup>3</sup>) に対して X 線 CT 分析により間隙構造を評価した。X 線 CT 分析では、任意断面おける CT 画像は縦 1024 pixel、横 1024 pixel (1 pixel あたりの分解能は 0.012 mm) であり、高さ方向に 890 枚 (1 枚 1 枚の間隔は 0.012 mm) とした。撮影した CT 画像は、市販ソフトウェア Scan IP によって三次元立体構造として銅スラグの間隙構造を可視化した。得られた間隙構造は解析空間として FEM 流体解析を行うことで間隙構造を流れる通水溶液の流れを計算した。本計算結果から試料間隙内に発生する流速分布が得られるので、溶出に寄与しない不動水の割合を求めることができる。シリアルバッチ溶出試験とカラム溶出試験においてそれぞれで得られる溶出速度の違いが、水みちの発生 (有効間隙率) とどのような関係があるのかを議論した。

### 4. 研究成果

#### (1) 流速の影響

図-1 は溶出速度に及ぼす攪拌強度の影響を示す。溶出量は攪拌強度とともに増加した。Ca と Si は時間とともに溶出速度が線形的に低下するのに対して、一方で Cu の初期溶出速度は中・後期のそれよりも小さい値を示した。銅スラグの溶出液は初期において pH = 9

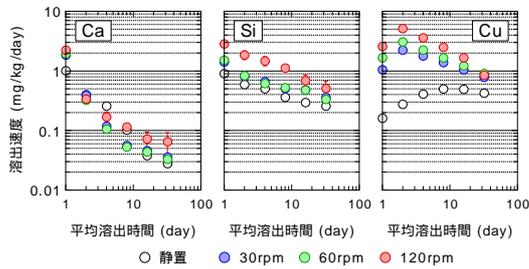


図-1 銅スラグからの Ca、Si、Cu の溶出速度に及ぼす攪拌強度の影響

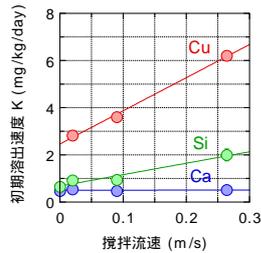


図-2 銅スラグからの Ca、Si、Cu の初期溶出速度に及ぼす攪拌流速の影響

前後の弱アルカリ性を示し、このような pH 域では Cu 水酸化物の沈殿が形成し、見かけ上溶媒相への溶出が抑制されたためだと推察される。Cu と Si の初期溶出速度（溶出試験時間 1 日目の溶出速度）は、図-2 に示すように攪拌流速とともに増加し、120 rpm の攪拌条件における初期溶出速度は静置条件に比べて約 2-3 倍程度の高い値を示した。

## (2) 試料粒度の影響

製鋼スラグの溶出試験結果を図-3 と図-4 に示す。製鋼スラグから顕著に溶出するアルカリと、化学物質の総量として電解質の溶出挙動を調べた。これらの溶出速度の時間変化は、傾向としてトリリニアで表わすことができ、溶出速度が一定（溶解） 溶出速度が時間とともに低下（内部拡散） 溶出速度が急激に低下（枯渇）としてプロファイルが遷移していると考えられる。溶出試験開始直後では、製鋼スラグ表面にある溶解性の物質が溶け出しそれらの溶出が終了後は、次の段階として、製鋼スラグの内部から固体内拡散を通じて徐々に物質が溶出する。最後には製鋼スラグ内部の物質すべてが溶け出し、溶出が停止するものと考えられる。溶出速度の絶対量としては粒径が細かいほどその値は大きい。特に粒径 100 mm の場合では、粒径 2 mm 以下に比べて溶出速度は 1/15 程度に抑制できている。しかし、粒径が細かい試料は早期に枯渇するため、溶出を終える時間としては粒径が細かいほど短くなる。環境基準のように溶出濃度を所定のレベル以下に満たす必要がある場合には、溶出速度の遅い試料粒径が大きいものを選択し溶出濃度を環境基準値以下に制御することも可能と考えられるが、溶出速度の速い試料粒径が細かいものを用いる場合には洗い流しを行い、早期に環境

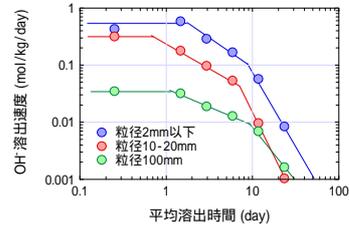


図-3 製鋼スラグからのアルカリ溶出速度に及ぼす試料粒度の影響

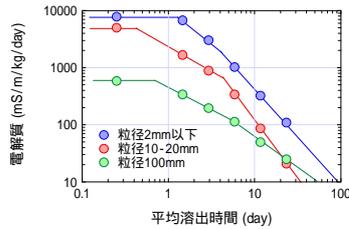


図-4 製鋼スラグからの電解質の溶出速度に及ぼす試料粒度の影響

基準を満たす溶出濃度にまで低下させるかもしくは使用する試料量を制限する必要がある。

## (3) バッチとカラムの溶出試験の違い

粒径 2 mm 以下と 100 mm 角の廃棄コンクリートを用いて、バッチ溶出試験を行った場合とカラム溶出試験を行った場合の試験結果を図-5 に示す。初期溶出速度に着目した比較を図-6 に示す。単位試料量当たりの初期溶出速度は、2 mm 以下試料の場合ではバッチ試験、カラム試験ともほぼ同じであった。試料を水没させたバッチ試験と、同程度の溶出速度

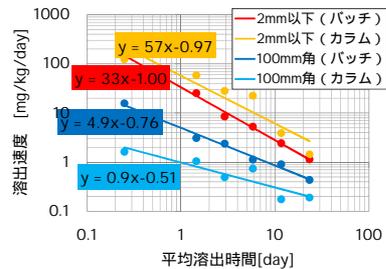


図-5 廃棄コンクリートを用いたバッチ溶出試験とカラム溶出試験の結果

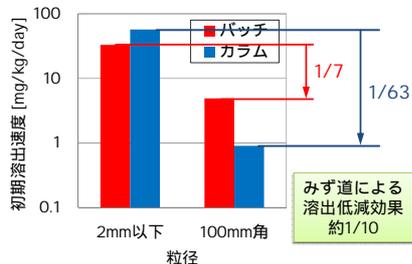


図-6 バッチ溶出試験とカラム溶出試験から得られた初期溶出速度の違い

がカラム溶出試験でも得られたことから、粒径 2 mm 以下試料の場合ではみず道の発生もしくはそれに追従する溶出量の抑制はほとんど現われなかったと考えてよい。一方で 100 mm 角の試料を用いた場合には、バッチ試験（飽和）よりもカラム溶出試験（不飽和）の方が溶出量は約 1/10 倍になっており、これはみず道の発生（不飽和条件）による溶出面積の減少が生じたためだと考えられる。

#### (4) 水みちの影響

試料内に発生する水みちの可視化と、それを有効間隙率として定量的に評価することを、銅スラグを用いて検討した。図-7 に X 線 CT 分析に供した試料と、任意断面の CT 画像、およびそれを立体化して間隙構造を示す。X 線 CT 分析では、被写体の密度分布を CT 画像ではコントラストとして表現できる。銅スラグの土粒子密度は 3,500 kg/m<sup>3</sup> であり、間隙中の空気はほぼゼロであることから、銅スラグと間隙空気には十分な密度差があるため CT 画像には間隙構造が明瞭に写し出すことができた。

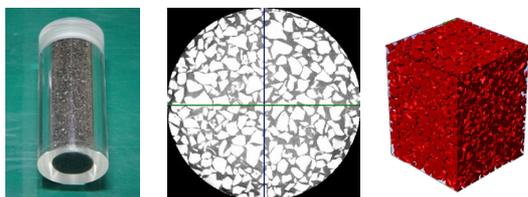


図-7 X線CT分析に供した銅スラグ充填カラム、得られたCT画像、およびCT画像を連結することで推定された銅スラグの間隙構造

また図-8 は、得られた間隙構造を対象にその中を流れる流体の移動を計算した結果である。解析条件は、解析モデルの側方4面を不透水境界として、上部に水位 10 cm の圧力固定境界、下部に水位 0 cm の圧力固定境界を与えた。解析結果では、図のコントラストは間隙内流速を表わしており、間隙内流速が早い部分は通水溶液が選択的に流れることを意味し、すなわちみず道を示唆している。一方で間隙内流速が遅い部分は、たとえその近傍のスラグから化学物質が溶出しても流速が遅いためその溶液は滞留するので、見かけ上溶出には寄与していないことになる。し

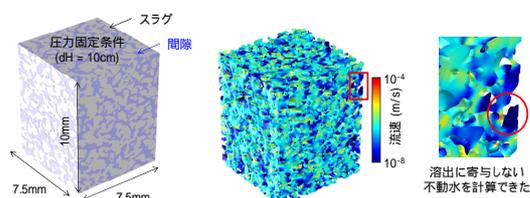


図-8 銅スラグの間隙構造を解析空間とした FEM 流体解析の境界条件と、解析結果として得られた間隙内流速分布

たがって、間隙内流速を高いエリアを溶出に寄与する有効間隙率としてみず道をパラメータ化した。その結果、図-8 に示す解析空間は間隙率 37.8% であり、そのうち、間隙内流速が最大値の 1/100 倍以上をもつ有効間隙率は 25.2% であった。本研究により、土壌や廃棄物、循環資材の埋立地内に発生する水みちを有効間隙率として定量的に評価できる手法を提示することができ、また、水みちの発生に伴い溶出に寄与する反応面積が制限され化学物質の溶出量が抑制されることを明らかにした。

#### 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) Ishimori H., Endo K., Yamada K., Ichikawa T., Yamada M., Osako M. (2015) Radio-Cs Leaching Behaviors and Controlling from MSW Incineration Fly Ash Consolidated by Cement. Proceedings of the 15th International Congress on the Chemistry of Cement, 14, 1-5, on CD-ROM < 査読無し >

(2) 岡本晃尚, 石森洋行, 横山隆明, 建山和由, 釜本英一 (2015) 鉱さいと汚泥を用いた液状化対策改良土の開発. 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 11, 283-286 < 査読あり >

〔学会発表〕(計 12 件)

(1) 石森洋行, 遠藤和人 (2016) 大型実験土槽を用いた放射能汚染廃棄物埋立時の上部隔離層および下部土壌吸着層における雨水浸透とセシウム移行挙動の評価. 全国都市清掃会議, 第 37 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 380-382. 2016 年 2 月 21-22 日, 山口県周南総合庁舎 (山口県)

(2) 石森洋行, 釜本英一, 岡本晃尚 (2015) 建設発生土を用いた液状化対策改良土の提案, 日本建設機械施工協会, 平成 27 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, 193-194. 2015 年 12 月 1-2 日, 機械振興会館 (東京都)

(3) 河村大樹, 佐々木静郎, 門倉伸行, 村上順也, 石森洋行 (2015) 油汚染土壌バイオパイル処理における効果的な酸素供給方法の解析的検討. 土木学会, 第 70 回土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集, 183-184. 2015 年 9 月 16-18 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山県)

(4) 石森洋行, 伊藤隆志, 遠藤和人 (2015) セメント固型化物からの化学物質溶出量に与える試料表面積の影響. 廃棄物資源循環学会, 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 433-434. 2015 年 9 月 2-4 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県)

(5) 岡本晃尚, 石森洋行, 横山隆明, 建山和

由，釜本英一（2015）鉱さいと汚泥を有効活用した液状化対策改良土の性能評価．廃棄物資源循環学会，第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，209-210．2015 年 9 月 2-4 日，九州大学伊都キャンパス（福岡県）

(6) 筒井祐貴，石森洋行，建山和由（2015）固化特性を利用した焼却灰の有効利用に関する研究．廃棄物資源循環学会，第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，205-206．2015 年 9 月 2-4 日，九州大学伊都キャンパス（福岡県）

(7) 石森洋行（2015）1,4-ジオキサン等の有機化合物に対する遮水シートノ遮蔽性能とメカニズムの解明．大阪湾広域臨海環境整備センター，平成 26 年度廃棄物・海域水環境保全に係る調査研究費助成制度成果発表会要旨集，5-8．2015 年 7 月 22 日，天満研修センター（大阪府）

(8) 石森洋行，遠藤和人，肴倉宏史，山田正人，大迫政浩（2015）大型土槽実験による特定一般廃棄物焼却灰埋立時の上部隔離層および下部土壌吸着層における雨水浸透とセシウム移行挙動の解明．環境放射能除染学会，第 4 回環境放射能除染研究発表会要旨集．2015 年 7 月 8-9 日，タワーホテル船堀（東京都）

(9) 遠藤和人，石森洋行，山田正人（2015）特定一般廃棄物の埋立処分による放射性 Cs の動態評価に関する一考察．環境放射能除染学会，第 4 回環境放射能除染研究発表会要旨集．2015 年 7 月 8-9 日，タワーホテル船堀（東京都）

(10) 遠藤和人，皆瀬 慎，石森洋行，浦部朋子（2014）非平衡吸着を考慮したゼオライトシートの吸着性能の評価．廃棄物資源循環学会，第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，491-492．2014 年 9 月 16-17 日，広島工業大学五日市キャンパス（広島県）

(11) 石森洋行，遠藤和人，小保方聡，山田一夫，山田正人，大迫政浩（2014）放射能汚染飛灰セメント固型化物の長期溶出特性．環境放射能除染学会，第 3 回環境放射能除染研究発表会要旨集，146．2014 年 7 月 3-4 日，郡山市民文化センター（福島県）

(12) 石森洋行，遠藤和人，肴倉宏史，山田正人，大迫政浩（2014）放射能汚染廃棄物浸出水を用いた土壌等の吸着特性評価．全国都市清掃会議，第 35 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，315-317，2014 年 1 月 22-23 日，いわて県民情報交流センター（岩手県）

## 6．研究組織

### (1) 研究代表者

石森洋行（ISHIMORI, Hiroyuki）  
立命館大学理工学部，任期制講師  
研究者番号：20434722