

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：12401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860012

研究課題名（和文） 廃棄物処分場の覆土内部における水・熱・溶質・ガス挙動解析と環境リスク評価

研究課題名（英文） Mass and heat transport in landfill covers and environmental risk assessment

研究代表者

濱本 昌一郎 (HAMAMOTO SHOICHIRO)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30581946

研究成果の概要（和文）：本研究では、様々な物理的条件（締固め度や水分条件）を有する処分場覆土を用いて、覆土内の物質輸送特性、特にガス輸送特性把握に向けた室内実験を実施した。これらの実験結果と国内外の異なる土壌を用いて得られた物質・熱輸送係数測定値を整理することで、覆土の物理的性質を考慮した覆土内の溶質・ガス・熱同時輸送解析に資する輸送係数予測モデルを構築した。構築した予測モデルを用いて、覆土内部での温室効果ガス動態に関する数値解析を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, using landfill covers with different physical properties such as compaction levels or moisture conditions, laboratory experiments for understanding gas transport characteristics were conducted. By combining the obtained results from the laboratory experiments with literature data for mass and heat transport parameters for variably-textured soils, unified predictive models for mass and heat transport parameters were proposed, which enable to simulate gas, solute, heat transport in landfill covers with different physical properties.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011年度	1,140,000	342,000	1,482,000
総計	2,390,000	717,000	3,107,000

研究分野：地盤環境工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：廃棄物処分場、覆土、物質移動、環境リスク

## 1. 研究開始当初の背景

一般廃棄物処分場埋立地では有機物分解やガス発酵に由来して内部に多量の熱が発生すると同時に、埋立廃棄物に起因して、メタンなどの温室効果ガスやトリクロロエチレンなどの有毒な揮発性有機化合物(VOC)が発生する。このような熱やガス類の発生は、一般廃棄物を未焼却のまま投棄する開発途上国の処分場では極めて顕著である。先進国の焼却灰を中心とした管理型廃棄物処分場においても、覆土内部のガス収集層や廃棄物

内部に埋設されたガス抜き管が十分に機能しない場合問題となり、覆土内ジオメンブレン下のガス溜まりに起因する最終覆土機能の低下などが報告されている。また、処分場内部で多様に存在する有機汚濁成分や重金属等の有害物質は、内部保有水に溶解・分配し、降雨による水の浸潤に伴い溶質態として処分場内部を移動する。これら溶質態汚染物質は、処分場ライナーに欠損が生じた場合、浸出水の地圏環境への漏えいを許し、広範囲の土壌・地下水汚染を引き起こす危険性がある。

る。このように、廃棄物処分場内で生成される環境影響物質（温室効果ガス類も含むガス態・溶質態の汚染物質と定義）の環境リスク評価には、処分場内部での水、熱、ガス態・溶質態汚染物質の連成挙動を正確に把握ことが必要不可欠である。

一般的な廃棄物処分場では、廃棄物の露出による悪臭や火災の防止、地盤安定性の向上、雨水排除や雨水浸透の制御といった目的から廃棄物層の上に覆土層が施工される。近年では、最終覆土のガス交換能をコントロールすることにより、メタン酸化を促進した温室効果ガス放出の抑制や、中間覆土に浸透性反応材料を導入し、内部保有水の浄化を促進するなど、処分場覆土に新たな機能を加える試みが積極的に行われている。

このように、最適な覆土造成は、処分場覆土内の物質（水・ガス・溶質）・熱挙動を制御する上で有効な工学的アプローチとなりうる。しかし、覆土内部の物質・熱移動に関しては未解明な点が多く、科学的知見に基づいて最適な覆土造成法を提案する試みは少ないのが現状である。特に、廃棄物処分場覆土層は、通常雨水の浸透制御や地盤安定性のため極めて高い締固め状態にあることに加え、埋立廃棄物の存在に起因して高温・高ガス圧力環境、高塩分環境下にある。これら複雑な物理・化学的環境が、通常自然地盤を対象として構築されてきた物質・熱挙動モデルの適用を困難なものとしている。

覆土内部の水・熱・溶質・ガス挙動は各種物質・熱輸送係数（例えば、水：透水係数、熱：熱伝導度、ガス：ガス拡散係数など）によって記述される。物質・熱輸送係数は、処分場周辺における環境影響物質の環境リスク評価モデルに直接組み込まれる重要なパラメータであり、正確な物質・熱輸送係数予測モデルの構築は、覆土層内の物質・熱輸送を把握・予測する上で必要不可欠である。申請者は、これまで主に自然土壌を対象とし、地盤の物理的性質（粒径サイズや締固め強度）がガス態・溶質態物質輸送係数に及ぼす影響について明らかにし、物質輸送係数の予測モデルを構築してきた。しかし、覆土内部で見られるような物理的・化学的環境に適した影響因子（高圧力、高温度、高締固め度、高塩分濃度）を考慮した物質・熱輸送係数予測モデル構築に関する研究はほとんどなく、これらの予測式を統合した処分場内部で生成される環境影響物質の運命予測モデル構築に関する研究も極めて少ないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、処分場覆土内部における水・熱・溶質・ガスの同時挙動を解明し、覆土層の物理・化学環境を考慮した物質・熱輸

送係数予測モデルを構築することである。さらに、構築する予測モデルを統合して覆土内部の環境影響物質に関する運命予測モデルを構築する。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料採取

本研究では埼玉県環境科学国際センター協力のもと国内（埼玉県）の廃棄物処分場を対象サイトとした。

### (2) 覆土内部の物質挙動把握

覆土層内部の物質挙動、特にガス挙動に注目し、室内カラム実験により、覆土の水分条件、締固め度、ガス種の違いが覆土内部のガス移動特性に及ぼす影響を調べた。

埼玉県内の廃棄物処分場から採取した最終覆土を異なる含水比条件に調整し、異なる締固め度にてステンレス製コア(100 cm<sup>3</sup>)に充填した。試料を充填したコアを用いて、ガス拡散係数測定装置並びに通気係数測定装置により、覆土の締固め度と水分状態が覆土試料のガス拡散性と透気性に及ぼす影響について調べた。

また、一次元カラム試験装置を用いて、ガス種の違いが覆土内のガス分散特性に与える影響について調べた。カラムは内径 5cm、長さ 30cm のアクリル製で、インレットチャンパーに差圧計、アウトレットチャンパーにガス採取口と酸素電極を取り付けてある。所定の含水比に調整した試料を乾燥密度 1.55 (g cm<sup>-3</sup>) でカラムに充填し、トレーサーガスとしてメタン 100%、二酸化炭素 100%、酸素ガス (20%) のいずれかをインレットチャンパーを通して異なる流量でカラムに注入した。得られたアウトレットチャンパー内のトレーサーガス濃度の時間変化に対して、所定の境界・初期条件下で得られるカラム内のガス移動を表す移流分散方程式の解析解を適合させ、異なる流量条件下での各ガス種に対するガス分散係数を算出した。

自然条件下では、降雨や乾燥により土壌は吸水と排水過程を繰り返す。吸水と排水過程での覆土内でのガス移動特性変化を調べるため、吸水・排水過程での水分調整が可能な 1 次元カラム実験装置を用いて、吸水・排水過程でのガス輸送パラメータ（ガス拡散係数と通気係数）の変化について調べた。

### (3) 覆土および覆土-有機資材混合土のメタン酸化能

本研究では、覆土内部で生じるメタン酸化現象にも注目し、バッチ試験により、異なる水分条件に調整した覆土のメタン酸化能の評価と、覆土に有機資材としてコンポストを混入することによるメタン酸化能の促進効果を調べた。異なる水分状態に調整した覆土

試料に、3種類の異なるコンポストを10:1の割合で混合したものを、250ml ボトルに投入した。その後、ヘッドスペース部をメタン濃度約8%に調整し、30度条件下で長期保存した。ヘッドスペース部のメタン・酸素濃度の減少、並びに二酸化炭素濃度の増加に関する時間変化を測定することで、異なる試料でのメタン酸化能を評価した。

#### (4) 物質・熱輸送係数間の相関関係把握と予測モデル構築

処分場覆土を含む国内外の異なる土性を有する土壌を用いて得られた溶質拡散係数、ガス拡散係数、熱伝導率、電気伝導度データを整理し、各物質輸送係数間との相関関係を調べた。また、得られた相関関係を考慮し、各物質・熱輸送係数に適用可能な汎用的で簡便な予測モデルを構築した。構築した予測モデルを用いて、異なる締固め度条件における覆土層を介した廃棄物処分場から温室効果ガス放出についてシミュレーションを行い、メタン酸化を促進させ、メタン放出を抑制するための最適な覆土施工法を提案した。

### 4. 研究成果

#### (1) 試料採取

国内（埼玉県）の廃棄物処分場を対象サイトとし、表層50cmから最終覆土を採取した。原位置の乾燥密度は1.8程度であり極度に締固められた状態であることを確認した。

#### (2) 覆土内部の物質挙動把握

平成22年度は、埼玉県内から採取した廃棄物処分場最終覆土および砂試料を用いて、覆土層内部の物質挙動を再現するための室内カラム実験を行なった。

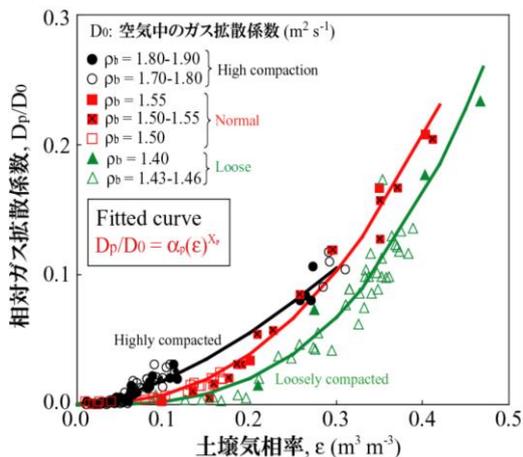


図1 異なる締固め度を有する覆土試料のガス拡散係数

最終覆土を異なる締固め度で突き固めた試料を用いて、ガス拡散係数と透気係数を調

べた結果、図1に示すように、試料の締固め度が高いほど高いガス拡散係数値を得た。この結果は、試料の締固め度が高いほど同一気相率条件では体積含水率の低下を招くことに起因している。この影響は特に低気相率条件（湿潤条件）で顕著であった。同様な傾向が通気係数についても得られた。

覆土内における多成分ガス移動特性に注目し、ガス種の違いがガス移動特性に及ぼす影響について調べた。具体的には、廃棄物処分場の最終覆土と3種類のガス（空気（酸素）、メタン、二酸化炭素）を用いて次元カラム実験および通気・拡散係数測定実験を行い、ガス移動パラメータ（分散係数・透気係数・拡散係数）を測定した。結果、メタンガスは他のガス種に比べ低分子量・低粘性係数に起因して、高い透気特性およびガス拡散特性を有していることが分かった。またメタンガスは、図2に示すように、メタンガスは同気相率条件で酸素および二酸化炭素よりも高い分散長を示した。このことから、メタンガスは高いガス移動特性に起因して微細な間隙ネットワークに容易に侵入し、高いガス分散特性を有していることが明らかになった。

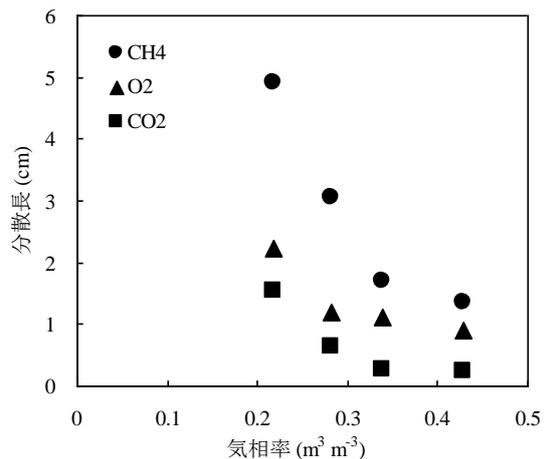


図2 異なる水分条件におけるガス分散長

砂を用いた室内ガス移動実験では、土壌の浸潤・脱水過程で生じる土壌水ヒステリシス現象が、ガス移動特性に影響を与え、脱水過程で覆土内のガス移動は吸水過程よりも促進されることが分かった。また、同じ砂を用いた熱移動実験から、砂の粒径サイズに加え、粒形の違いによる粒子間の接触数の違いが熱伝導性に影響を与えることが明らかになった。平成22年度に実施した最終覆土と砂を用いたガス・熱移動実験から、覆土層内部のガス・熱挙動をより正確に把握するためには、覆土層の水分条件や締固め度に加え、覆土材料（粒径・粒形）の違いや、生成されるガス種、土の吸水・脱水履歴についても十分考慮する必要があることが明らかになった。

平成 23 年度は、埼玉県内から採取した廃棄物処分場最終覆土を用いて、覆土内のメタン酸化能を有効に機能させるための最適な物理・化学条件および堆肥等の混入による効果を調べた。三種類の異なる組成（窒素・リン・カリウム成分）を有する堆肥を覆土に混合させた試料のメタン酸化能を調べ、またメタン酸化能が最も効率的に働く最適な水分条件と混合割合を明らかにした。また、覆土のメタン酸化能を Michael-Menten 式で表現することが出来ることを確認した。加えて、堆肥・覆土混合試料を異なる締固め度で突き固めた試料を用いて、ガス輸送係数（ガス拡散係数・通気係数）を測定し、堆肥・覆土の混合割合、試料の締固め度、ガス輸送係数、Michael-Menten 式のパラメータとの関係性を明らかにした。特に、Michael-Menten 式のパラメータとガス輸送係数から間接的に求まる間隙の屈強度の間には良い相関関係が見られた。

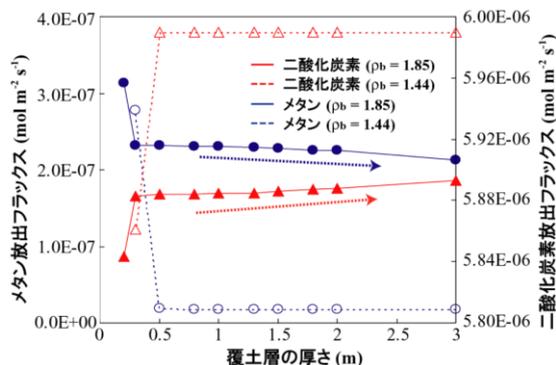


図 3 異なる覆土厚さおよび締固め度を有する覆土からの温室効果ガス放出速度

処分場覆土を含む国内外の異なる土性を有する土壌を用いて得られた溶質拡散係数、ガス拡散係数、熱伝導率、電気伝導度データから、各物質輸送係数間での相関関係を明らかにした。またアーチー式に基づいて、これら物質・熱輸送係数に適用可能な簡便な予測モデルを提案した。さらに、異なる締固め度を有する覆土試料を用いて得られたガス輸送係数の測定結果から、覆土の締固め度を考慮したガス輸送係数予測モデルを提案した。これらの予測モデルを統合することで、覆土の物理化学的条件を考慮した、覆土内の溶質・ガス・熱同時輸送解析を可能とする物質・熱輸送予測モデルを構築した。構築した予測モデルに加え、メタン酸化能に関する室内試験から得られた Michael-Menten 式のパラメータ値を用いて、廃棄物処分場からのメタン放出量に関する数値解析を行い、覆土の締固め度と厚さがメタン放出量に与える影響について調べた。結果、図 3 に示すように覆土層の厚さは覆土内のメタン酸化能に大きく影

響し、覆土厚さの減少により覆土内のメタン酸化能が低下し、高いメタン放出リスクを有することが示唆された。

## 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 8 件)

- ① Dissanayaka, S., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Moldrup. 2012. Thermal properties for peaty soils under variable saturation: Effects of the liquid phase impedance factor and volume shrinkage, *Vadose Zone Journal*. doi: 10.2136/vzj2011.0092. (査読有)
- ② Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, T. Komatsu. 2012. Organic Matter Fraction Dependent Model for Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Variably Saturated Soils. *Vadose Zone Journal*. doi: 10.2136/vzj2011.0065. (査読有)
- ③ Hamamoto, S., K. Kawamoto, and T. Komatsu. 2012. Gas and Heat Transport in Variably-Compacted Landfill Cover at Variably-Saturated Condition. *Proceedings of the International Symposium on Advancies in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development* 48-54. (査読有)
- ④ Hamamoto S., P. Moldrup, K. Kawamoto, P. N. Wickramarachchi, M. Nagamori, and T. Komatsu. 2011. Effect of Extreme Compaction on Gas Transport Parameters and Estimated Climate Gas Exchange for a Landfill Final Cover Soil, *ASCE, J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 137: 653-662. (査読有)
- ⑤ Wickramarachchi, P., K. Ranasinghe, S. Hamamoto, K. Kawamoto, U. P. Nawagamuwa, P. Moldrup, and T. Komatsu. 2011. Gas Transport Parameters for Compacted Reddish Brown Soil in Sri Lankan Landfill Final Cover, *ASCE journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste*, 15: 285-295. (査読有)
- ⑥ Hamamoto S., P. Moldrup, K. Kawamoto, and T. Komatsu. 2011. Two-region Extended Archie's Law Model for Soil Air Permeability and Gas Diffusivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75: 795-806. (査読有)
- ⑦ Wickramarachchi, P., K. Kawamoto, S. Hamamoto, M. Nagamori, P. Moldrup, and T. Komatsu. 2011. Effects of Soil Compaction and Size Fractions on Gas Transport Parameters In Variably Saturated Landfill Final Cover Soil, *Waste Management*, 31: 2464-2472. (査読有)

- ⑧ Sasanuma K., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Sasaki, and T. Komatsu 2011. Effect of water retention hysteresis on gas transport parameters in soils. Proceedings of the Thirteenth International Symposium of the Thirteenth International Symposium, Japan Society of Civil Engineers 223-226. (査読有)

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① Hamamoto, S. K. Kawamoto, and T. Komatsu. Gas and Heat Transport in Variably-Compacted Landfill Cover at Variably-Saturated Condition. International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development. 2012年3月19日スリランカ・ゴール
- ② Dissanayaka, S., S. Hamamoto, K. Kawamoto, and T. Komatsu. Thermal properties for peaty soils under variable saturation: Effects of the liquid phase impedance factor and volume shrinkage. 2012年3月19日スリランカ・ゴール
- ③ Sasanuma, S. Hamamoto, K. Kawamoto, and T. Komatsu. K. Effect of water retention hysteresis on gas transport parameters in soils. the Thirteenth International Symposium, Japan Society of Civil Engineers. 2011年8月26日 京都大学防災研究所
- ④ Hamamoto, S. K. Kawamoto, and T. Komatsu. 2011. Effects of moisture content and shrinkage on soil-thermal properties for peat soils. International Conference on Sustainable Built Environments (ICSBE), Special Session: Natural systems to control “Water Resources Pollution” and “Water Hazards” 2010年12月14日 スリランカ・キャンディー

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱 本 昌 一 郎 (HAMAMOTO SHOICHIRO)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30581946