

氏 名	EKANAYAKA ACHCHILLAGE AYESHA DILRUKSHI
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第234号
学位授与年月日	平成28年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Gas Transport and Thermal properties of Compost-Mixed Landfill Cover Soils under Variable Water Saturation (不飽和条件下のコンポスト混合処分場覆土のガス移動及び熱特性の評価)
論文審査委員	委員長 教 授 川本 健 委 員 教 授 田中 規夫 委 員 准教授 長田 昌彦 委 員 准教授 浅本 晋吾

論文の内容の要旨

Gas and heat transport properties of compost-mixed landfill cover soils control the fate and emission of toxic gases from the landfill and the rate of methane oxidization in the cover.

In this study we measured methane oxidation rates of compost-mixed soils and evaluate the gas transport parameters (gas diffusion coefficient, D_p) and thermal properties (thermal conductivity, λ and heat capacity, HC) of compost-mixed soils in order to understand the potential application of compost-mixed soils as a biological active cover for the mitigation of landfill gas emission. In order to understand the biological reaction of methane oxidation in compost, compostsoil mixture, and landfill cover soil at elevated atmospheric methane concentrations of 8% CH_4 were described using first and zero order reaction kinetics. Results of this study showed that WC for a soil-compost mixture, in both cases showing a significant influence of water status and thus of the diffusion processes in the water and gas phases. According to the results of the methane oxidation batch experimental procedure, the maximum oxidation rate of pure compost higher than that of a compost-soil mixture. Besides, the biological kinetics of methane oxidation based on both zero and first order rates of a 1:10 (w/w) compost-soil mixture was lower than for pure compost, suggesting that the mixing ratio of compost-soil may be improved for landfill final cover soil application.

Further, to understand the material properties of the selected materials, we measured gas diffusivity D_p/D_0 and thermal properties such as thermal conductivity (λ) and heat capacity (HC) of soil, composts and compost-mixed soils (either 1:5 or 1:10) using the hand compacted samples under variably water saturation. Model parameters for gas diffusion (slope C of Penman-Call model), thermal properties (C' and C'' slopes of $\lambda-\theta$ and $HC-\theta$ relationships, respectively) were obtained by fitting the measured data to the PC type gas diffusivity, thermal conductivity and heat capacity linear models. The effects of mixed composts on water retention and gas and heat transport parameters were investigated based on fitted model parameters. Measured water retention data were fitted well by the BC water retention model. The effect of compost mixing and composting material composition for soil water retention, gas diffusion and thermal properties were evaluated based on the measured parameters of BC, PC type gas diffusivity and thermal property models.

Model parameter of gas diffusivity (ε_{th}) related with the BC model parameter (ψ_b) and macroporosity (ε_{100}). Empirical relationships were developed for the ε_{th} - ψ_b non linear relationship.

Results of the parameter analysis showed that, the ε_{th} values increased with increasing compost content, relating non-linearly to the Brooks-Corey bubbling pressure but highly linearly to macro-porosity. The obtained results of this study might be useful for predicting aeration and gas emission in landfill cover soils.

Analogous to the PC model for gas diffusivity, linear λ and HC models were used to fit the measured data. The models captured reasonably well the measured λ and HC data from dry to wet conditions. The model slope C' for λ varied depending on the compost ratio and became lower with increasing compost ratio. The model slope C'' for HC , on the other hand, showed less effect of the compost ratio. The thermal properties under the dry condition, λ_0 and HC_0 , were well correlated to the volumetric solid content, and unique nonlinear relationships between λ_0 and HC_0 and volumetric compost content were seen.

Based on test results from this study, gas and heat transport parameters (D_p/D_0 , λ , and HC) measured for compost materials and compost-mixed soils gave clear linear relationships to their fluid contents (\square for D_p/D_0 and θ for λ and HC). However, the PC type simple linear models used in this study would be useful for a quick assessment of gas and heat transport through compost-mixed landfill cover soils.

In addition, Predictive models for gas diffusivity were tested based on the sensitivity analysis. The tested model predictions were highly deviated from the wet region and well predicted in the dry regions ($\psi > -1,000$ cm H₂O) for soil. Predictive models for the quick assessment of the thermal properties at dry conditions (\square_0 and HC_0) were developed based on their dry bulk densities (ρ_d). Three-phase mixing model was applied by incorporating the impedance factors for thermal conductivity f_λ and heat capacity f_{HC} and based on the λ_0 - σ and HC_0 - σ relations. The modified mixing model is represented by $\square\lambda=\lambda_0+f_\lambda\theta\lambda_w$ and $HC=HC_0+f_{HC}\theta HC_w$. The modified mixing model and existing predicting models were compared. Similarly, predictive models for gas diffusivity were tested based on the sensitivity analysis. The newly developed and modified model for thermal properties might be useful for the assessment of the thermal properties of compost mixed biocovers towards optimal performances.

The results from this study will be helpful towards designing compost-mixed landfill cover soils with optimal heat and gas transport characteristics.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 28 年 2 月 3 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

開発途上国において廃棄物問題は深刻な社会・環境問題となっており、廃棄物処分場およびその周辺域では健康被害の発生や環境劣化が急速に進行している。なかでも、未焼却の一般廃棄物が埋設された一般廃棄物処分場からはメタンなどの温室効果ガスや硫化水素などの有害ガスが発生し、地球環境や廃棄物処分場周辺に及ぼす影響が懸念されている。メタンの大気への放出を抑制する低コスト・低環境負荷な方法の一つとして、最終覆土の微生物活性を高めて、メタン酸化能を向上させる方法がある。本研究では、微生物活性を高めるために有機性コンポストを土壌に混合したコンポスト混合覆土材に注目し、メタン酸化能を調べるとともに、含水量が熱・ガス移動係数にどのような影響を及ぼすのかを室内実験を用いて定量的に明らかにしていくことを目的とした。多くの開発途上国では有機性廃棄物の中間処理としてコンポスト（堆肥）の生産が広く普及しており、本研究結果はコンポスト資材の有効活用法としても期待される。

第 1 章では、研究の背景や目的、関連する既往の研究について記述している。既往の研究については、廃棄物処分場からのメタン放出メカニズムや、メタン放出抑制を目的とした各種バイオカバーに関する研究事例を整理し、これらの既往研究のレビューを行っている。

第 2 章では、室内バッチ試験を行い、含水量の異なるコンポスト資材及びコンポスト混合覆土材のメタン酸化能を定量的に評価した。その結果、コンポスト資材及びコンポスト混合覆土材ともに、メタン酸化能が最大となる適正含水量が存在すること（コンポスト資材が約 80% 含水比、コンポスト混合覆土が約 30% 含水比）、質量ベースで 10% のコンポスト混合によりコンポスト混合覆土材のメタン酸化能が覆土単体の約 4 倍（コンポスト単体の約半分）に上昇することが明らかとなった。また、コンポスト資材及びコンポスト混合覆土材ともに、メタン酸化プロセスの時間変化は、0 次もしくは 1 次反応速度式で表現できることが明らかとなった。

第 3 章では、コンポスト資材及びコンポスト混合覆土材の熱・ガス移動を規定する熱伝導率とガス拡散係数の含水量依存性及び保水性を室内実験で評価した。コンポスト資材及びコンポスト混合覆土材ともに、熱伝導率－体積含水率関係、ガス拡散係数－気相率関係に非常に良好な直線性を示すことが明らかとなった。そして、これらの関係に既存の Penman-Call 式を適合させて得られるパラメータである「ガス拡散に無効な気相率 (ε_{th})」や「傾き（ガス拡散係数では C 、熱伝導率では C')」はコンポスト混合覆土材の熱伝導率とガス拡散係数の含水量依存性にコンポスト混合割合やコンポストの種類の違いが及ぼす影響を整理する上で、有効な指標となることが明らかとなった。例えば、コンポストの混合割合が増加するに従い、 ε_{th} が低下し、 C' が増加すること、コンポストの種類が C に及ぼす影響が小さいこと、等が示された。また、 ε_{th} は保水性曲線から得られる空気侵入値とユニークな関係性があることが示され、 ε_{th} が小さい程、空気侵入値が大きくなった。これは、ガス拡散に寄与する土壌内部とコンポスト粒子内部の空隙形成の違いによるものと考えられた。

第 4 章では、測定された熱伝導率及びガス拡散係数データに対して、予測式の適用を試みている。ガス拡散係数に関しては、Penman-Call 式の他に、既存の WLR 式の適合性が高いことが示された。また、熱伝導率に関しては、乾燥条件における熱伝導率 (λ_0) を乾燥密度の関数として表現し、既存の三相混合モデルに適用した新たな熱伝導率予測式を提案した。新たな予測式は、コンポスト混合覆土材熱伝導率の含水量依存性を比較的良く表現することが確認された。

第 5 章では、第 1 章から第 4 章までに得られた知見をもとに結論を述べるとともに、さらなるコンポスト

混合覆土材の開発・適用に向けての今後の研究展開の方向性を示した。

以上のように、本研究は、有機性コンポストを土壌に混合したコンポスト混合覆土材に注目し、メタン酸化能を調べるとともに、含水量が熱・ガス移動係数に及ぼす影響について室内実験により定量的に調べた。その成果は、今後、廃棄物処分場からのメタン放出抑制を目的とした新たなバイオカバー材の開発・適用に貢献するものであり、既存廃棄物処分場の環境改善に効果的に活用されるものである。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、第2章が国際プロシーディングス論文 Proceedings of the International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS 2013) に、第3章の一部は国際プロシーディングス論文 Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE 2014) に掲載済みである。第4章と第3章の一部を組み合わせた内容は、国際学術雑誌 GSTF International Journal of Geological Sciences (JGES) に掲載済みである。