

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14031

研究課題名（和文）廃棄物海面処分場の跡地利用促進のための技術と制度に関する研究

研究課題名（英文）Sustainable framework and technologies for utilizing closed coastal landfills

研究代表者

勝見 武（Katsumi, Takeshi）

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：60233764

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）：保有水の水質については、海面処分場では時間とともに水質が悪化し廃止基準に達することは難しいが、海水中の廃棄物に含まれる重金属は難溶性態として存在するものが多く、下部の粘土層で嫌気性雰囲気による沈殿形成等の効果も期待され、重金属の移動性は低いと言える。廃棄物地盤や底部粘土層の工学的特性に関しては、廃棄物地盤の非排水せん断強度は250～650 kPa程度であり、材齢が長くなるほど強度が増加すること、温度変化により砒素の溶出量が変化すること、底部粘土層を貫通するような杭打設を行っても、正規圧密状態であるなどの地盤条件であれば、粘土-杭間の空隙は閉塞され、境界面の漏水もほとんどないこと等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This research showed that, although the quality of internal water of coastal landfill sites can be deteriorated with time, heavy metals in waste exist as a poorly water-soluble form below a seawater level and, besides, precipitation inside clay layer can be expected due to the anaerobic environment. It was also found that waste ground has an undrained shear strength ranging from 250 kPa to 650 kPa, which becomes larger with a longer curing period. The mobility of arsenic is affected by a change in temperature. Through some laboratory tests, it was demonstrated that the installation of piles through the clay layer will have little adverse effect on the hydraulic barrier performance if the clay layer is deformable enough under normally consolidated condition against over-burden pressure.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：廃棄物処分場 跡地利用 地盤材料特性 高度利用 持続可能性 遮水 溶出特性

1. 研究開始当初の背景

我が国特有の処分場形態である廃棄物海面処分場は、高度経済成長を背景に臨海部の土地資源として注目されており、研究代表者からも積極的に跡地利用技術の開発¹⁾を行ってきたにも関わらず、高度な跡地利用は極めて限定されているのが現状である。その要因として、廃棄物層安定化の長期化、維持管理費の増大等が挙げられるが、そもそも廃止基準が厳しく竣工期限内に達成できないことが主因と考えられる。廃棄物海面処分場の廃止基準では「保有水等の水質が2年以上にわたり排水基準に適合」する必要あるが、固相のpHが高いにも関わらず接触する間隙水量が限定的であるためpH低下に極めて長時間を要する²⁾ことが技術的課題として挙げられ、安定化を早めるため排水を促進するなど対策を講じる場合もあるものの、廃止に至るまでの膨大な維持管理費が処分場運営主体の大きな負担となっている。廃棄物海面処分場は膨大な災害廃棄物の発生が予想される巨大地震対応としても極めて重要であり、残余容量の確保・跡地利用も含めて包括的なフレームワークを検討しておく必要があると考えられることから、廃止の考え方そのものを変える、跡地利用の仕方を変える、という2つの視点から廃棄物海面処分場に関する現行制度の変革を図り、現状を打開する必要がある。

2. 研究の目的

廃棄物海面処分場は、高度経済成長を背景に臨海部の土地資源として注目されたにも関わらず、高度な跡地利用を早期に実現するには至っていないのが現状である。その要因として、処分場や地盤汚染に関する環境規制の強化、廃棄物層安定化の長期化、維持管理費の増大等が挙げられるが、そもそも廃止基準が厳しく廃止できないことが大きな要因であり、長期に及ぶ維持管理が処分場運営主体の大きな負担となっている。そのため、廃止の考え方そのものを変える、跡地利用の仕方を変える、という2つの視点から現行制度の変革を図り現状を打開する必要がある。そこで本研究では、廃棄物海面処分場固有の廃止基準策定の可能性を考察するとともに、環境安全性を担保しつつ跡地利用を促進する技術方針を提示することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、(1)既存技術に関する文献調査と廃棄物層の利用可能性に関する実験ならびに解析による、廃棄物海面処分場の長寿命化に資する検討、(2)潜在的な高度技術の適用可能性と環境安全性を考慮した、持続可能な利用形態に関する考察、の2点を通して廃棄物海面処分場のあるべき姿を精査した。特に、廃棄物海面処分場においては構造安定性や環境安全性等に留意しなければならないことから、水位変動や攪乱、温度変化が廃棄物

層の地盤特性、有害物質の溶出特性に及ぼす影響について科学的知見を蓄積しておく必要がある。また、処分場下部に存在する海底粘土層を貫入するような杭打設が、底部遮水層としての機能に及ぼす影響について整理する必要がある。これらの個別要因の影響を明らかにしつつ、処分場の長寿命化に関する課題を体系的に取りまとめた(図-1参照)。

(1) 廃棄物海面処分場の長寿命化に資する検討

現状のように安定化が終了してから土地を引き渡し、港湾事業を開始する形態ではなく、安定化と港湾事業とを並行する跡地利用シナリオも想定される。そのため既存技術を活用し、環境安全性を担保しつつ跡地利用を図る必要がある。活用が想定される既存技術は、1)汚濁物質を拡散させない基礎施工技術、2)跡地利用時のガス等の安全対策技術、3)廃棄物層の安定化促進技術、4)保有水位管理技術、等が挙げられ関連する技術を網羅的に精査する。埋立処分場の廃棄物層は、多種多様なもので構成されており地盤特性の一般化が難しい。これまでも様々な検討がなされてきたものの、室内試験で評価できる供試体サイズには限界があり、廃棄物層のスケール効果については未解明な部分も多く、廃棄物海面処分場の高度利用を阻む大きな要因となっており、科学的な解明が強く求められている。さらに海面処分場は廃棄物埋立護岸で閉じ込められた海水中に廃棄物を投入することから、保有水の水質は埋立の進行とともに悪化する傾向にあることや、嫌氣的雰囲気維持されること、降水による洗い出し効果が期待できない等の理由により、内陸処分場のように廃棄物層全体にわたっての降水浸透は期待できないと考えられることから、海面処分場内での有害物質の動態に関して既往研究の結果も含め整理した。

(2) 持続可能な利用形態に関する考察

廃棄物層の地盤特性を考慮し強度の観点から地盤としての利用可能性を評価する。廃棄物地盤は、材料の不均質性により基礎地盤

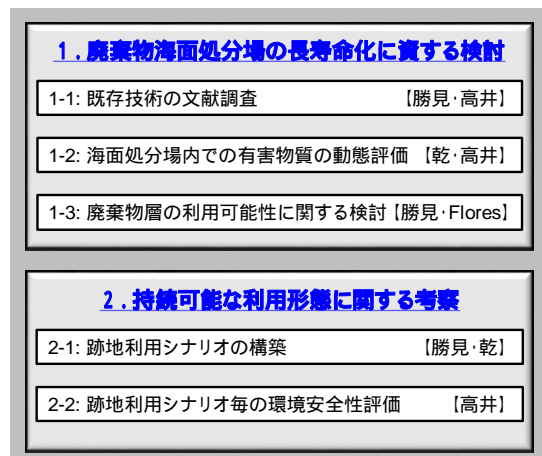


図-1 本研究の実施フレームワーク

として工学特性を保証しがたいため、遮水層として機能する底部粘土層を貫通する杭打設も想定されることから、杭打設による底部粘土層の健全性、遮水性への影響についても議論した。また、欧米で導入が進んでいる地中蓄熱等の利用により跡地利用にインセンティブを付与しうると考えられ、温度変化に対する有害物質の溶出特性変化を明らかにした。

4. 研究成果

本研究の実施により、(1)処分場内の物質動態、(2)廃棄物地盤の強度特性、(3)海底粘土層を貫通する杭打設が遮水性能に及ぼす影響、(4)温度変化に伴う有害物質の移動性変化、の4点について明らかにした。

(1) 処分場内の物質動態

廃棄物処分場の廃止基準とは、廃掃法（廃棄物の処理及び清掃に関する法律）上の廃棄物処分場に対して、そのままの状態であれば維持管理しなくても環境保全上の支障が生じないことを判断するための基準である。つまり、集排水設備によって集水された保有水（廃棄物浸出水）等が廃止基準を満足すれば、処分場としての維持管理が不要となる。したがって、処分場の物質動態の理解は、処分場の廃止の時期を予測する上で重要である。内陸の処分場は、廃棄物が不飽和状態におかれることが多く、浸透水の自然流下にも助けられて雨水浸透水等が排水され、洗い出し効果による安定化が進行し、浸出水の水質は廃止基準へと近づいていく。一方、海面処分場は廃棄物埋立護岸（遮水護岸）で閉じ込められた海水中に廃棄物を投入することから、保有水の水質は埋立の進行とともに悪化する傾向にある¹⁾。また、廃棄物のほとんどが地下水位以下であるため嫌氣的雰囲気となる。降水による洗い出し効果が期待できるのも部分的で、内陸処分場のように廃棄物層全体にわたっての降水浸透は期待できないと考えられ、海面処分場の保有水の水質が廃止基準に達することは難しい。一方で、海水に長期間浸された状態の廃棄物中の重金属は難溶性の形態として存在するものが多いこと²⁾、仮に廃棄物層からの溶出が生じたとしても下部の粘土層で嫌気性雰囲気による沈殿形成等の効果も期待されること³⁾等が、最近の研究により示されており、保有水面以下については重金属の溶出による環境リスクは低いと考えられる。保有水面より上部の箇所については降雨の浸透による洗い出しを促進することで、保有水中の重金属等の汚濁物質の濃度が低下する可能性も示されている^{1), 4)}。

(2) 廃棄物地盤の強度特性

埋立処分場の廃棄物層は、多種多様なもので構成されており地盤特性の一般化が難しい。本研究では、所有する大型三軸圧縮試験装置を用いてスケール効果を考慮した材料特性を評価するとともに、地盤としての利用可能性を評価するとともに、施工時の攪乱が

強度変形特性に及ぼす影響を実験的に評価した。その結果、廃棄物地盤の非排水せん断強度は250～650 kPa程度であり、図-2に示すように材齢が長くなるほど強度が増加すること、これは図-3に示すようにエトリンガイトの生成に代表されるように微子構造の変化によること、供試体寸法を大きくすると内部摩擦角が小さくなること等が明らかになった。

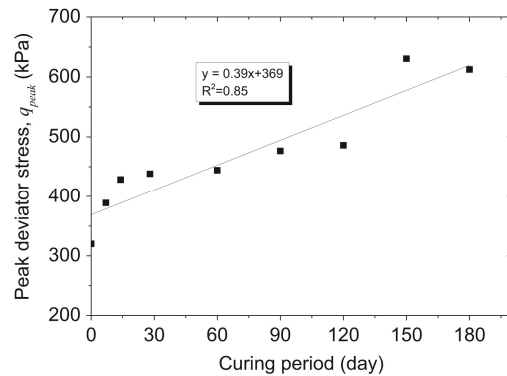


図-2 養生期間とピーク強度の関係

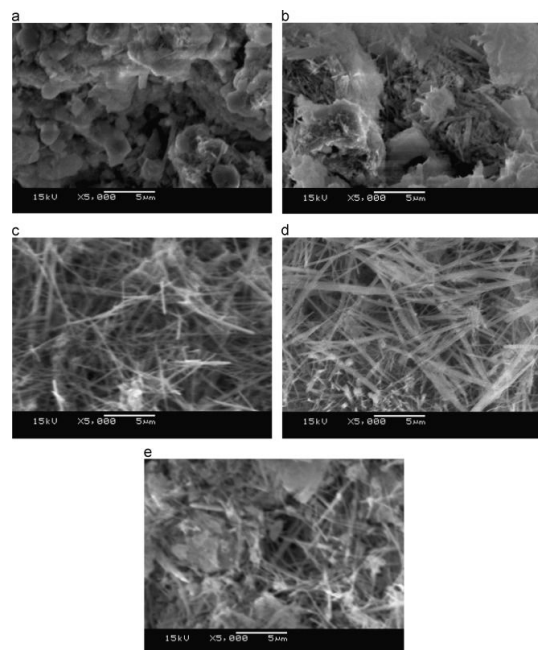


図-3 各養生日数の微子構造 (a: 0日, b: 60日, c: 90日, d: 150日, e: 180日)

(3) 海底粘土層を貫通する杭打設が遮水性能に及ぼす影響

処分場の跡地利用は、利用深度によって表層利用、中層利用、低層利用に分類される。海面処分場のように広大な敷地が提供されるところでは、大規模な施設設置のニーズも高いし、土地そのものの価値を高めるために大規模な施設を設けることが有効な場合もある。海洋埋立地と廃棄物層は適当ではない場合がある。また、海面処分場では海底の粘土層を遮水層として活用しているが、これらは軟弱であり構造物の支持を期待できない。

したがって、図-4 に示すように粘土層下の砂礫層を支持層とする杭を打設することになるが、ここで、粘土層を貫通する杭と地盤の間に生じる空隙が廃棄物浸出水を下部の砂礫層に広げるトリガーにならないか、杭打設に伴い廃棄物の連れ込みが発生しないか、といった点を明らかにする必要があった。

これらの課題に対し、本研究では特に前者について既往の研究成果も踏まえ検討した。具体的には、圧密セルの直径より 1~4 mm 程度径の小さい粘土供試体を作製し、境界部と粘土単体における透水量を個別に算出する。この交通アクセスの整備には、杭基礎などを設けた低層利用の構造物が必須である。このような施設・構造物の基礎地盤として、工学特性が保証されえない

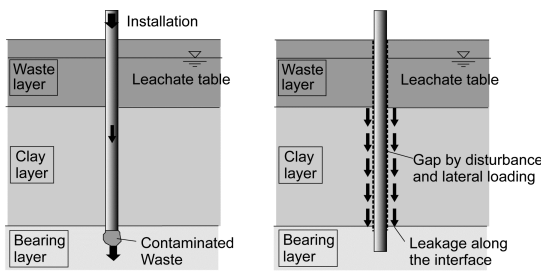


図-4 廃棄物処分場底部の粘土層を貫通する杭打設による影響

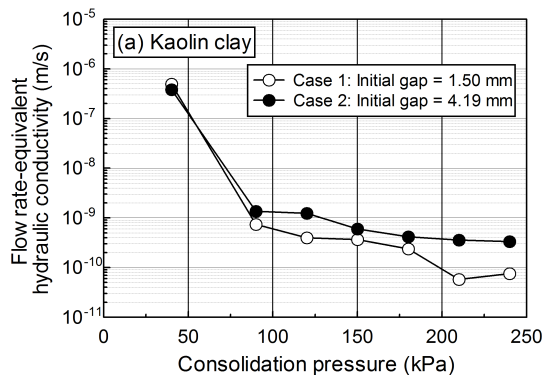


図-5 杭 粘土境界部の換算透水係数

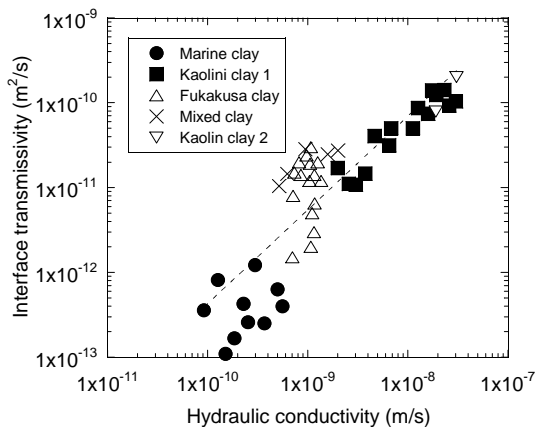


図-6 境界部での界面透水係数と粘土の透水係数の関係

ことで、境界部における透水量を段階荷重により評価した。その結果、粘土が正規圧密状態であるなどの地盤条件であれば、初期空隙の厚さによらず粘土 - 杭間の空隙は閉塞され、境界面の漏水もほとんどないこと(図-5)、境界部における界面透水係数と粘土の透水係数には正の相関があること(図-6)等を明らかにした。

(4) 温度変化に伴う有害物質の移動性変化

地中蓄熱等の高度技術を適用することによりインセンティブを与えることができれば、跡地利用の促進が期待できるが、温度環境の変化が有害物質の溶出に与える影響について十分に研究されていない。そこで、振とう式(図-7)と非振とう式の2種類の溶出試験を 5~60℃ の範囲で実施し、岩石からの



図-7 加熱振とうの様子

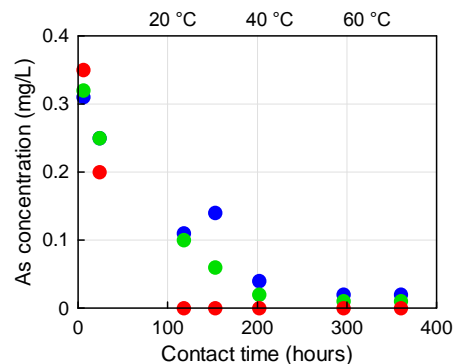


図-8 振とう式溶出試験時の砒素濃度と接触時間の関係

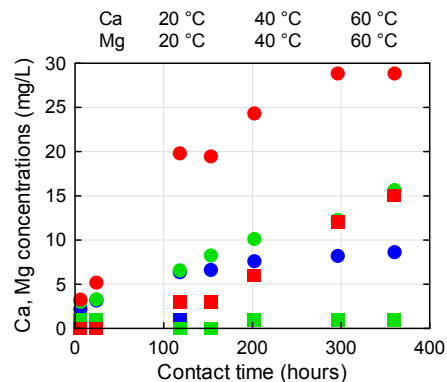


図-9 振とう式溶出試験時の Ca, Mg 濃度と接触時間の関係

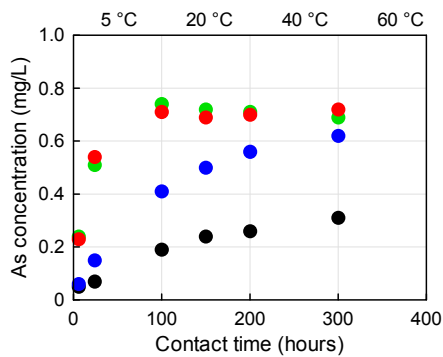


図-10 非振とう式溶出試験時の砒素濃度と接触時間の関係

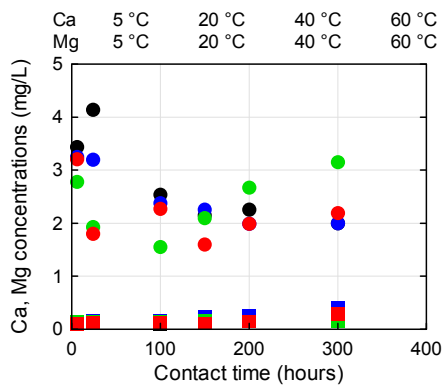


図-11 振とう式溶出試験時の Ca, Mg 濃度と接触時間の関係

砒素の溶出について検討したところ、図-8～11 に示すようにいずれの溶出試験においても温度の上昇はヒ素の溶出濃度の変化を促進する働きがあること、非振とう式試験では時間経過とともにヒ素溶出濃度が増加するのに対し、振とう式試験では接触時間の増加とともに減少すること、その要因として粒子破碎により生じるコロイド態粒子と Ca 等のカチオン濃度の増加が考えられること、等を明らかにした。

<参考文献>

- 1) 乾 徹・島岡隆行・勝見 武：海面処分場の現状と将来性 4. 海面処分場の地盤工学上の課題 その2 汚濁物質の挙動と環境評価，地盤工学会誌，Vol.61, No.6, pp.58-65, 2013.
- 2) Plata, H., Inui, T., Katsumi, T., Oya, Y. and Kamon, M.: Speciation and mobility assessment of zinc in coastal landfill sites with MSW incinerator ash, *Journal of Environmental Engrg.*, Vol.136, No.8, pp.762-768, 2010.
- 3) Kamon, M., Zhang, H., Katsumi, T., and Inui, T.: Biochemical effects on the long-term mobility of heavy metals in marine clay at coastal landfill sites, *Journal of ASTM International*, Vol.3, No.7, ID JAI13326, 2006.
- 4) 古賀大三郎・島岡隆行・花嶋正孝・宮脇健太郎・吉用剛士：海面埋立地における間隙水の循環浄化に関する研究，第23回全国都市清掃研究・

事例発表講演論文集，全国都市清掃会議，pp.355-357，2002.

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 6 件)

Katsumi, T., Okawara, M., Kawashima, M., Endo, K., Sakanakura, H., Iwashita, S., Takai, A., and Inui, T. (2017): Soils recovered from disaster debris—Characterization and utilization—, *Journal of JSCE*, JSCE, Vol.5, No.1, pp.145-156, doi:org/10.2208/journalofjsce.5_1_145

Ghaawd, I., Takai, A., Katsumi, T., and McCartney, J.S. (2017): Pore water pressure prediction for undrained heating of soils, *Environmental Geotechnics*, ICE, Vol.4, Issue EG2, pp.70-78, doi:10.1680/jenge.15.00041

Nguyen, L.C., Inui, T., Ikeda, K., and Katsumi, T. (2015): Aging effects on the mechanical property of waste mixtures in coastal landfill sites, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.55, No.6, pp.1441-1453, doi:10.1016/j.sandf.2015.10.009

Tang, Q., Kim, H., Endo, K., Katsumi, T., and Inui, T. (2015): Size effect on lysimeter test evaluating the properties of construction and demolition waste leachate, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.55, No.4, pp.720-736, doi:10.1016/j.sandf.2015.06.005

Nguyen, C.L., Inui, T., and Katsumi, T. (2015): Scale effects on the shear strength of waste in coastal landfill sites, *Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.52, pp.1824-1828, doi:10.3208/jgssp.VNM-04

Katsumi, T., Inui, T., Takai, A., Oshima, H., and Flores, G. (2015): Geotechnics for land use at coastal landfills, *Proceedings of the XVI ESCMGE: Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, ICE Publishing, pp.2711-2716.

[学会発表](計 4 件)

赤間拓朗，Measuring wood content of soils recovered from disaster waste, *Geo-Environmental Engineering 2016*, 2016年6月2日，ナント（フランス）

赤間拓朗，災害廃棄物由来の分別土に含まれる木くず量の評価，第51回地盤工学研究発表会，2016年9月15日，岡山大学（岡山県岡山市）

高井敦史，汚染地盤での温度変化がもた

らす地盤環境課題，第 51 回地盤工学研究発表会，2016 年 9 月 14 日，岡山大学（岡山県岡山市）
赤間拓朗，災害廃棄物由来分別土の木くず含有量評価における試料量と強熱時間の影響，平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会，2016 年 6 月 11 日，立命館大学（滋賀県草津市）

6．研究組織

(1) 研究代表者

勝見 武 (KATSUMI, Takeshi)
京都大学・地球環境学堂・教授
研究者番号：60233764

(2) 研究分担者

乾 徹 (INUI, Toru)
京都大学・地球環境学堂・准教授
研究者番号：90324706

FLORES, Giancarlo
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号：80598996

高井敦史 (TAKAI, Atsushi)
京都大学・地球環境学堂・助教
研究者番号：30598347