

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00576

研究課題名(和文) 乾燥地域に位置する廃棄物埋立地の安定化シナリオの構築とその実現技術の開発

研究課題名(英文) Scenario building on the stabilization of waste in landfill located in arid region and development of its realization technology

研究代表者

東條 安匡 (Tojo, Yasumasa)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70250470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、乾燥地域に位置する埋立地を対象に、安定化と浸出水の管理戦略等を明確にすることを目的に実施した。具体的な検討事項は、(1)浸出水が発生する期間とその量の予測、(2)蒸発による廃棄物の乾燥過程に関する検討、(3)カラム実験による有機物の分解の検討である。気象データを用いた水収支モデルから乾燥地域での浸出水は埋立廃棄物に由来し、埋立作業が完了すると次第に生成が止むこと、カラム実験と乾燥過程の精緻モデルから、表面の乾燥は迅速に進むが、次第に液状水移動が減少し、埋立層の深部は長期間水分が保持されること、乾燥の促進により有機物の分解は停止すること等が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at clarifying stabilization scenario of the waste and concrete strategy of leachate management for landfill sites located in arid regions. Specific objectives are (1) prediction of the period and amount of leachate generation, (2) elucidating the drying process of waste, and (3) confirmation of the decomposition possibility of organic matter by column experiment. From the water balance model using weather data, it was found that leachate generated from landfill in the dry area mainly originates from waste and its production stops gradually after the filling work is completed. Based on the result obtained by column experiments and the precise model of the drying process, it was revealed that though the surface drying quickly progresses, due to the decreases of the liquid water transfer, the deep part of the landfill layer retains moisture for a long-time. Besides, it also became clear that the decomposition of organic matter ceases due to the promotion of drying.

研究分野：廃棄物処分工学

キーワード：乾燥地域 廃棄物埋立地 浸出水 安定化 内部蒸発 乾燥過程

1. 研究開始当初の背景

廃棄物処分場に関連する技術は主に、湿潤気候下にある先進国で発達してきた。こうした地域では、浸出水の発生は不可避であり、その生成は降雨がある限り続く。そのため、浸出水の生成予測や浸出水の処理は埋立地管理の根幹をなす。しかしながら、乾燥気候下では、蒸発が降雨を卓越し、年間の水収支はマイナスとなる。結果的に浸出水の生成は限定的となり、生成期間も有限になることが想像される。近年、乾燥気候下にある途上国や後進国の巨大都市では、急激な経済発展、人口増大等から廃棄物量が増大し、その廃棄物を処分するための巨大な埋立地が出現している。こうした埋立地では、埋め立てられる廃棄物の含水率が高いため、乾燥地であるにも関わらず浸出水が発生している。埋立地の多くがオープンダンプに極めて近く、集排水システムや処理施設を有していないため、発生した浸出水には、自然に形成される池に貯留して蒸発させるという手法が採られている。こうした埋立地で議論となっているのは、蒸発に委ねるといった浸出水の管理手法は長期的に妥当なのか、水処理施設を建設すべきなのかということである。これらは、いつまで浸出水が発生するかわからないという疑念に由来する。

具体的にこうした埋立地で喫緊に必要なとされている知見は、①どの程度の浸出水が生成する可能性があるのか、②いずれ埋立地から浸出水は生成しなくなるのか、③埋立地内部の廃棄物は乾燥していくのか、④その結果、埋立地には有機物が残存したまま安定化は停止するのか、といったものである。これらの疑問に答えることは、乾燥気候下の埋立地での適切な管理や長期的な安定化に関する基礎的な知見を提供することに繋がると考えられる。

2. 研究の目的

乾燥気候地域の都市ごみ埋立地では、湿潤気候下で確立されてきた埋立地の技術や概念が適用できない点が多々存在する。廃棄物の安定化には水分が不可欠であるが、乾燥地域では蒸発が降雨を卓越するために、安定化に寄与できる水分は限られている。浸出水は廃棄物に由来し、その発生は限定的であるが極めて高濃度になる。こうした条件下で廃棄物は安定化するのか、浸出水にどう対応すべきなのか、不明な点が多い。本研究では、こうした点に関して、①浸出水が発生する期間とその量を予測し、②蒸発による廃棄物の乾燥過程を実験的に検証し、埋立層内部まで乾燥が進行するのかを明らかにする。さらに、③有機物の分解過程をカラム実験により追跡し、廃棄物の安定化が起こりうるのかを明確にする。

3. 研究の方法

(1) 浸出水マクロ水収支モデルによる浸出水

生成の長期予測

本検討では、浸出水の発生予測に先行研究で開発した「時間遅れを考慮した浸出水量予測マクロモデル」を採用した。モデルの全体像を図1に示す。

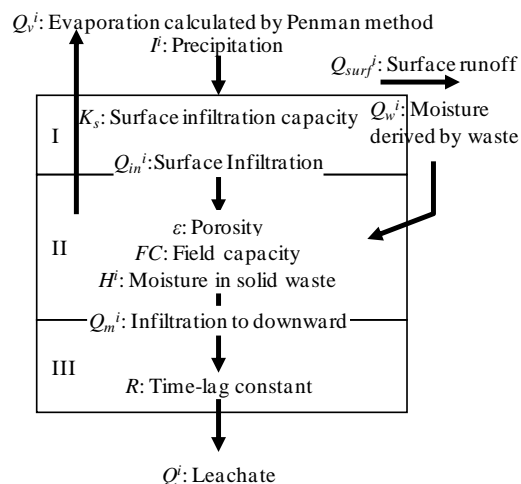


図1 本検討で採用した水収支モデル

図に示すとおり、本モデルは埋立地全体を3つの部分（I表面、II表層、III表層以深）に分割してそれぞれで収支計算を行うものである。図中で添字iを付したものが日毎に計算される変数であり（降水量は気象データ）、添字の無いものが設定すべき定数となる。なお、本研究では、埋め立てられる廃棄物によって持ち込まれる水分を考慮するために次の改良を加えた。(i) 既往のモデルでは、一定の保水限界値を用いていたものを、廃棄物の埋め立てによる保水能の増大を考慮するためにField capacity (FC) および空隙率(ε)を導入した。FCは単位体積あたりの保水限界量と解されるが、FCをその時点の埋立量に乗ずることで、埋立地全体としての保水限界量を算出し、この能力を上回る埋立地内の水分量が浸出水として系外に排出されるとした。(ii) また、可能蒸発水量の算出はPenman法によって行い、算出した可能蒸発水量に空隙率に対する表層保水量の比を乗ずることによって実蒸発水量を算出した。なお、本モデルにおける流入水量は、降水量と埋立廃棄物由来の水分量であり、流出水量は、地表面流出量、蒸発水量、浸出水量である。水分収支計算は日毎に実施した。

浸出水生成予測計算には、一連の気象観測データ日時系列が必要になる。本研究では、年平均気温と年間降水量を基準とするケッペンの気候区分に従って乾燥地域を4区分に分け、4区分に位置する都市で気象データが充実していたイラン、米国、豪州から観測地点を選択し、日時系列の気象データを集めた。気温、降水量、露点温度、風速に関しては、NCDC(NOAA's National Climate Data Center)に存在するデータセットの一つであるGSOD(Global Surfaces Summary of Day Data)から日時系列データを抽出した。また日照時

間は月間値から日データに換算して利用した。抽出した気象観測地点は 18 地点、期間は 2000 年から 2013 年までとした。

選定した気象観測地点に、計算対象とする埋立地が存在すると仮定して予測計算を実施した。埋立地の規模、一日当たりの埋立量については、Iran の Mashhad に実在する埋立地の情報を使用した。覆土の無い途上国の埋立地を想定し、降雨は全て埋立地内に流入するとした。埋立廃棄物の含水率は途上国の実態を元に 70% に設定した。廃棄物の埋め立ては、埋立量と埋め立て容量から、最初の 2 年間とした。この期間中、埋立表面積に対して一様に埋め立てる状況を想定し、埋立物の物性値は変化しないとした。

## (2) 乾燥過程のモデル化と実埋立地を対象とした長期の乾燥化予測

多孔質媒体の乾燥過程は、太陽放射等によって地表面に与えられる熱が媒体の深部方向へ伝わっていく熱移動、含水率勾配（サクシオンポテンシャル勾配）による液状水移動、内部での液状水の蒸発によって生じた水蒸気が間隙内を水蒸気密度勾配によって移動する水蒸気移動の 3 つが関与する。この内、液状水移動については通常の不飽和浸透理論では残留水分率までを対象としており、それ以下の水分を扱うことができない。乾燥は残留水分率以下で起こることから、通常的水分特性曲線や不飽和浸透理論では表現が困難となる。廃棄物の特殊性は、各粒子の間に存在する間隙（比較的大きな間隙）と紙や木、布など廃棄物そのものの粒子の内部にも間隙が存在していることにある。そのため、この内部の水分移動の寄与をどう扱うかを検討する必要がある。

そこで乾燥過程において液状水の移動が無視できるほど小さいのか否かを検証した。まず、模擬人工ごみ（廃棄物の間隙構造を模擬した木、紙、布、プラスチックから作成した試料）を内径 6.9cm、高さ 50cm のカラムに充填し、試料を 0.8% NaCl 溶液に浸漬した後、自然排水させた。その後、カラム表面にランプを照射し、試料を乾燥させた。一定期間の乾燥後、試料を表層から 10 層に分割・回収し、それぞれの分割試料中に含まれる NaCl 量を測定した。

次に、液状水移動について重要な、体積含水率と毛管吸引圧の関係を表す水分特性曲線を測定した。廃棄物では、粒子間間隙と粒子内間隙が存在し、特に低含水率では後者の関与が大きくなると想像された。さらに絶乾状態に近い含水率での吸引圧との関係を得る必要があることから、それぞれ吸引圧の大きさにより、土柱法、遠心法、蒸気圧法の 3 つの方法によって測定した。

上記により得た水分特性曲線、並びに熱移動、液状水移動、水蒸気移動、内部蒸発を連成させたモデルの妥当性を評価するために図 2 に示す装置を用いてカラム実験を行った。

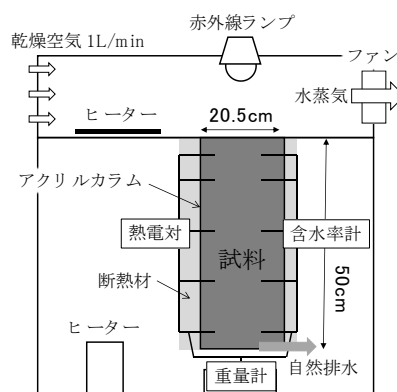


図 2 乾燥過程を追跡するための実験系

模擬事項ごみを充填し、上部から赤外線ランプで照射した。カラム上部のみ開放し、流速 1L/分で乾燥空気を送気した。これらより、表面から乾燥が起こるようにした。測定項目は、全体重量、内部温度、内部体積含水率である。

次に、実規模の埋立地を想定して作成したモデルによる長期的な乾燥に関する数値計算を行った。

## (3) カラムを用いた廃棄物の乾燥と有機物分解過程

降水が無く、乾燥のみが進行するような条件下で埋め立てられた廃棄物層はどのように乾燥するのか、その過程で、有機物の分解はどこまで進行するのかを明らかにするために図 3 に示す実験装置を作成し、模擬廃棄物（途上国の廃棄物を想定した都市ごみ）を充填し、有機物の分解について検討した。装置は 3 台作成し、(ア)乾燥のみ、(イ)流出した浸出水のみ循環、(ウ)流出した浸出水に加水して循環の 3 系列とし、浸出水の循環が廃棄物の安定化に及ぼす影響を評価した。

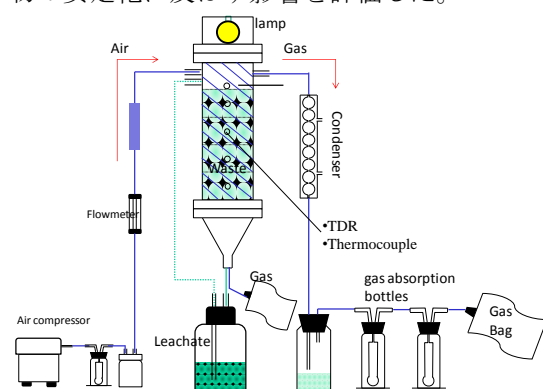


図 3 乾燥条件下での廃棄物の安定化を追跡するためのカラム試験系

測定は浸出水量、浸出水濃度（EC、TOC、TN）、発生ガス量、発生ガス組成である。

## 4. 研究成果

(1) 浸出水マクロ水収支モデルによる浸出水生成の長期予測

結果をイランの2都市を例として図4に示す(それぞれ異なる気候区分)。浸出水の生成は、廃棄物の埋め立てが行われている期間(本計算では2年間)のみで確認できる。このときの浸出水量は、蒸発水量に大きく影響を受けていることが分かる。また、浸出水は埋立完了後すぐに生成しなくなった。こうした浸出水生成パターンは計算を実施した全ての乾燥気候区分に共通していた。以上のことから、乾燥地域の埋立地における浸出水は、埋立廃棄物によって持ち込まれる水分に由来し、降雨には由来しないことが分かった。結果は示さないが、埋立地内部の水分量は、埋立期間中は浸出水が生成しているため限界保水量に等しいものの、埋立完了後には、時間の経過に従い徐々に減少する結果となった。これは、埋立廃棄物が蒸発によって次第に乾燥していくことを意味している。これも浸出水生成パターンと同様、いずれの乾燥気候区分においても同じ傾向にあった。

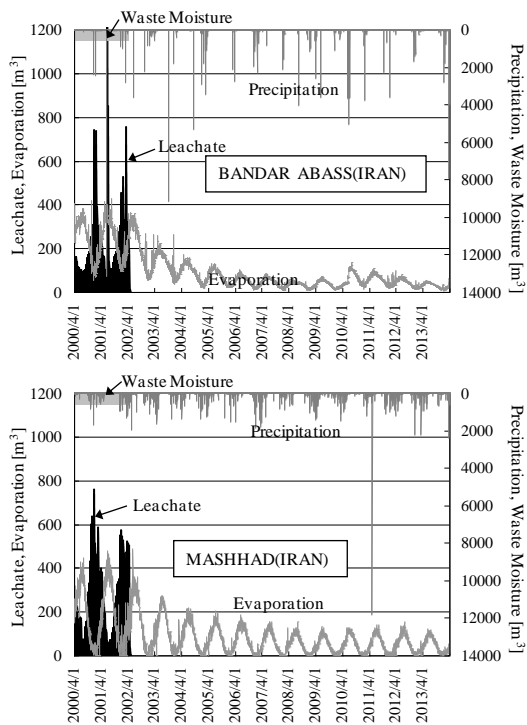


図4 マクロ水収支モデルによる計算結果

## (2) 乾燥過程のモデル化と実埋立地を対象とした長期の乾燥化予測

NaCl を含浸させた乾燥実験の結果、液状水の移動に伴う NaCl の上方移動が認められ、廃棄物の乾燥過程において液状水の移動を無視できないことを確認した。これは、廃棄物の固体中に存在する微細間隙を液状水が移動することを意味する。

模擬廃棄物試料の絶乾に近い含水率にわたる水分特性曲線の測定結果を示す(図5)。測定によって、体積含水率0%付近までの水分特性曲線を測定できた。これは、数値計算において、極めて乾燥した領域における廃棄物の液状水移動を再現できることを意味する。

本実験データを元に、最低含水率を0%とした van-Genuchten モデルの近似曲線も同図中に示した。

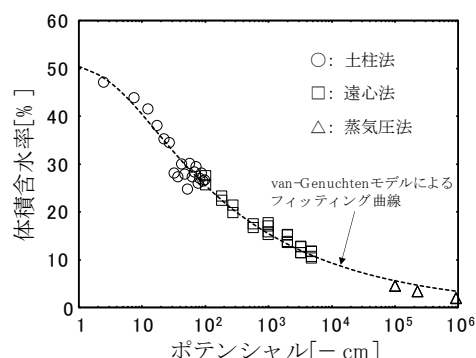


図5 模擬人工ごみの水分特性曲線。

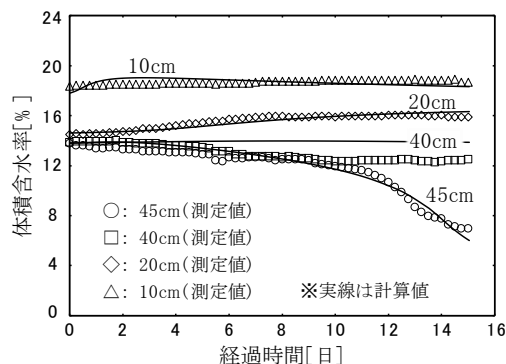


図6 カラム実験における体積含水率の経時変化とその計算値の比較。

図6にカラム実験における体積含水率の測定結果とモデルによる計算結果を示す。モデルにおいてフィッティングしたパラメータは、水蒸気拡散係数および液状水と水蒸気の相変化を表すパラメータの2つである。図6より、モデルによる計算値は測定値を良好に再現した。

作成したモデルが実験結果を良好に再現できたことから、深さ10mの埋立地を想定してモデルを用いたシミュレーションを行った。計算期間は埋立地の管理期間の長さを考慮して30年とした。結果を図7に示す。図7より、廃棄物の乾燥は30年経過後も埋立地表面付近でのみ起き、それ以深に存在する廃棄物は初期含水率を維持する。これは次の通り説明される。乾燥し始める段階では体積含水率が比較的高く、液状水が埋立地表面まで上昇できる。しかし表面の乾燥が進行すると液状水移動に対する抵抗が大きくなり液状水が表面まで移動できなくなる。それ以降の乾燥は、液状水によって埋立地表面からある深度まで上昇した水分が、埋立地内部で蒸発し水蒸気となり、その水蒸気が廃棄物層内を拡散・上昇していくことで起きる。さらに廃棄物が乾燥し、液状水の移動できる位置がより深部に移動していくと、相対的に水蒸気の移動距離が長くなる。すなわち水蒸気の移動速度も低下するため、廃棄物の乾燥速度が低下する。

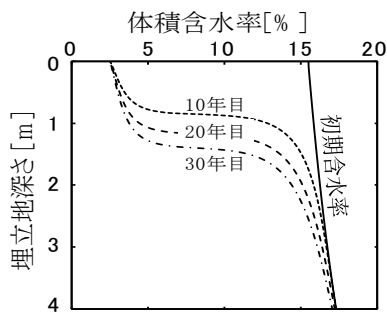


図7 実規模を想定した埋立地の乾燥過程  
(表面付近の体積含水率の変化)

(3) カラムを用いた廃棄物の乾燥と有機物分解過程

結果は示さないが、乾燥のみで浸出水の循環を行わなかったカラムでは、浸出水の発生量は次第に減少し、45週程度で極めて微量になった。TDRによる体積含水率測定値も深さ70cmで20%以下となった。pHは低下したままで酸発酵状態のまま推移した。ガス発生量も僅かであった。すなわち、乾燥の進行で、有機物の微生物分解に至適な雰囲気は形成されず、有機物の多くが残存したまま乾燥していったといえる。一方、浸出水を循環させたカラム、特に加水を行ったカラムでは、100週を経過しても浸出水の発生は継続した。pHも初期は酸性側にあったが、次第に上昇し60週以降は弱アルカリ状態となった。特徴的であったのはガス発生であり、活発なメタン発酵により有機物のガス化が進行した。これらより、乾燥地域における埋立地では、そのまま放置すれば、有機物は残存したまま乾燥することがわかった。したがって、乾燥地域でも早期の安定化を目指すには浸出水の循環が望ましいといえる。

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 Tahereh Malmir, Yasumasa Tojo, Municipal solid waste management in Tehran: Changes during the last 5 years, Waste Management & Research, 査読有り, Vol. 34(5), 2016, pp. 449-456 DOI: 10.1177/0734242X16632056
- ② Tahereh Malmir, Hiroshi Nomura, Yasumasa Tojo, Prediction of Long-term Leachate Generation in a Municipal Solid Waste Landfill in an Arid Climate, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), 査読有り, Vol. 71, No. 7, 2015, pp. III-247-III-258 DOI: 10.2208/jscej.71.III\_247

[学会発表] (計13件)

- ① 池田泰良、東條安匡、松尾孝之、松藤敏彦、乾燥地における高濃度浸出水の合理的な処方法関する研究、第25回衛生工学シンポジウム、2017。
- ② 百瀬大峰、東條安匡、松尾孝之、松藤敏彦、乾燥地域に位置する埋立地における廃棄物の乾燥過程に関する研究、第28回廃棄物資源循環学会研究発表会、2017。
- ③ Taira Ikeda, Yasumasa Tojo, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Study on the feasible treatment process for highly concentrated landfill leachate generated in arid region, The 2017 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 2017。
- ④ 東條安匡、途上国、特に乾燥地域における廃棄物埋立の課題と技術協力の難しさ、日本環境学会第43回研究発表会、2017。
- ⑤ 岡本侃大、東條安匡、松藤敏彦、松尾孝之、乾燥地域を対象とした埋立地中廃棄物の乾燥化シミュレーション、第24回衛生工学シンポジウム、2016。
- ⑥ 糸賀悠里香、東條安匡、松藤敏彦、松尾孝之、乾燥地域の蒸発依存型浸出水処理における悪臭改善に関する研究、第24回衛生工学シンポジウム、2016。
- ⑦ Yasumasa Tojo, Takayuki Matsuo, Hirotaka Momose, Toshihiko Matsuto, What is the appropriate strategy of landfill management in arid climate?, The 9th Intercontinental Landfill Research Symposium, 2016。
- ⑧ Yurika Itoga, Yasumasa Tojo, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Reduction measures of odor generated from leachate treatment by evaporation in arid region, The 2016 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 2016。
- ⑨ Kanta Okamoto, Yasumasa Tojo, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Simulation on the drying process of the waste in landfill under arid climate, The 2016 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 2016。
- ⑩ 百瀬大峰、Tahereh Malmir、田村和樹、東條安匡、松尾孝之、松藤敏彦、乾燥地域の廃棄物埋立地における有機物分解に関する研究、第23回衛生工学シンポジウム、2015。
- ⑪ 野村 弘、東條安匡、松尾孝之、松藤敏彦、乾燥気候地域に位置する都市ごみ埋立地での長期的な浸出水生成予測、第26回廃棄物資源循環学会研究発表会、2015。
- ⑫ Hirotaka Momose, Tahereh Malmir, Kazuki Tamura, Yasumasa Tojo,

Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto:  
Experimental study on the  
biodegradation process of organic  
waste in landfill under arid climate,  
2nd 3R International Scientific  
Conference、2015/5/21-22, Daejeon  
(Korea)

- ⑬ Tahereh Malmir, Hiroshi Nomura,  
Yasumasa Tojo, Toshihiko Matsuto,  
Takayuki Matsuo: Prediction of  
leachate formation under arid climate  
by using water balance Model, 2nd 3R  
International Scientific Conference、  
2015/5/21-22, Daejeon (Korea)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東條 安匡 (TOJO Yasumasa)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70250470

### (2) 研究分担者

なし