

災害廃棄物由来の分別土有効利用に関する研究

— 千葉科学大学に設置された屋外模擬土槽における実験結果のまとめ —

The study of utilizing method of separated waste materials from natural disasters

— analytical results and interpretation of the outside experiment of the
simulated actual size containers settled at Chiba Institute of Science —

安藤 生大

Takao ANDO

東日本大震災で発生した災害廃棄物の分別土の有効利用と安定性評価、特に蓄熱発火の危険性を明らかにする目的で、有機物の含有量が異なる2種類の屋外模擬土槽を千葉科学大学内に設置して、その容積、土槽内温度、発生ガス組成、排水組成の各変化を15ヶ月間にわたって検討した。その結果、以下が明らかとなった。

- (1) 有機物を高含有する土槽においては、容積の減少量の見積もりが約6%に達した。
- (2) 土槽内部の温度上昇時には、土槽内から発生したCO₂濃度が増加する一方、O₂濃度は低下した。このことから、土槽内部では好気発酵が起きていると判断した。
- (3) 土槽内からの排水は、雨水、土槽の充填物（赤松と真砂土）、及び土槽内部での微生物の活動の影響を受けたと判断できる。
- (4) 外気温が15°Cを超えると土槽内での好気発酵による発熱により土槽内の温度も上昇するが、外気温が低下するとこれに応じて土槽内温度も低下し、15°Cを下回ると好気発酵自体が阻害されることが確認できた。

以上より、本土槽の実験条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では、土槽内部において蓄熱よりも放熱が卓越しており、蓄熱発火の危険性はないと結論することができた。

1. はじめに

災害廃棄物や津波堆積物由来の分別土には木くずや微小粒径の有機物が混入しており、その腐敗性等の理由から有効利用の妨げになっている。災害廃棄物の処理物である分別土の適正かつ合理的な有効利用を推進し、復興資材として利用される出口戦略を明確化するためは、そ

の安定性を評価することがきわめて重要となる^{1)~3)}。特に、多量の有機物を含有する災害廃棄物においては、自然発火の危険性も考慮する必要がある。どの程度の有機物含有が危険であるかの判断を行う上では、実大模擬試験によって蓄熱発火に至るメカニズムを評価する必要がある。従来から、有機物を含有する災害廃棄物からは、そこに含有される木くず等の有機物からの有機炭素成分の溶出、酸素消費、好気発酵による二酸化炭素の発生、嫌気化（嫌気ゾーンの形成）によるメタンガス・水素等の可燃ガスの発生が懸念されている。特に、嫌気ゾーンの形成には、発生した災害廃棄物の積み上げ法や全体の高さについても重要な因子と考えられる。

本研究は、平成27年度環境研究総合推進費補助金循

連絡先：安藤生大 tando@cis.ac.jp

千葉科学大学危機管理学部環境危機管理学科

*Department of Environmental Risk and Crisis Management,
Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba
Institute of Science*

(2017年10月3日受付, 2017年12月14日受理)

環型社会形成推進研究事業として行った「災害廃棄物由来の分別土有効利用における木くず等有機炭素含有量の評価(3K152005)」の一部をまとめたものである。本研究では、平成27年10月～平成28年末までの約15ヶ月間にわたって千葉科学大学内に設置した2種類の模擬土槽を用いた実証試験結果をまとめた。具体的には、発火危険性が疑われるする有機物を高含有する土槽とそうでない土槽の2種類の実大模擬土槽を準備し、その容積、土槽内温度、発生ガス組成、排水組成の各変化傾向から、蓄熱発火の危険性を評価した結果をまとめた。

2 実験方法

2.1 屋外実験槽

屋外模擬土槽は、千葉科学大学マリーナキャンパス内の図書館の北東部の一面に設置した(図1)。土槽Aには赤松から作成したかんな屑を100%、土槽Bには重量比でかんな屑3%と真砂土97%の混合物を充填した。充填密度は、乾燥質量で土槽Aが 0.095 Mg/m^3 、土槽Bが 1.06 Mg/m^3 とした。各土槽の内部は、厚さ5cmのポリウレタンの壁材で覆い、その外側は厚さ3cmの木材の壁材で覆った。土槽の下部は地面から約20cmが基礎(砂利とコンクリート)となっており、上面は土槽Bに用いた真砂土を約10cm覆土した。

2.2 容積変化

容積変化量は、各土槽の上面に固定したレーザー距離計(ボッシュ株式会社製GLM250VF Professional、測定精度 $\pm 1.0\text{mm}$)を用いて、土槽上面に配置した4点のターゲット(ボルト)までの距離を測定することで求めた(図2中の白破線)。

2.3 気象観測

気象観測は、模擬土槽から北に10mの地点に設置したDAVIS INSTRUMENTS社製 気象観測装置を用いて測定した(図3)。データの取得間隔は、15分毎とし、外気温、湿度、風向、風速、降雨量を測定した。採取・編集ソフトウェアは、WeatherLink 5.8.1を使用した。本研究では、湿度、風向、風速については検討していない。図2の右側の装置は、万が一に発火した際に、現場の状況等を把握するための遠隔カメラ装置である。

2.4 槽内温度

槽内の温度測定は、約2mと約1mのシース式K型熱電対を、土槽の周辺4点と中心1点に、それぞれ土槽上面より土槽内に差し込んで測定した(図4)。この時、温度測定点の位置を、土槽下部より1000mmの位置を「上面」とし、400mmの位置を「下面」とした。つまり、土槽内での温度測定点(図4中のT)は、上面に5点、下面

に5点設置した。また、各土槽の北側下部には空気導入口を設けた。

温度データの記録は、日置電気株式会社製温度ロガー(LR5021)を用いて行った。データ採取は日置電気株式会社製データコレクタ(LR5092)を使用した。温度データ読み取りソフトウェアはLR5000 ユーティリティを使用した。

2.5 発生ガス

2.5.1 採取方法

槽内から発生したガスの採取は、先端が閉鎖し、先端の20cmの周囲に多数の孔が空いているガス抜き管(長さ1.5m、経1cm)を土槽内に5点配置して測定した(図4中のG)。このガス抜き管は、土槽の周辺4点と中心1点に、それぞれ土槽下部より40cmの「下面」の深さに差し込んで配置した。

ガスの採取は、120ml容のプラスチック製シリンジとアルミ製テトラパックを用いて行った(図5)。最初にガス管内および接続パイプ内に溜まったガスを抜き取る目的で、空抜きを3回行った後、500mlの内部ガスを採取した。採取にあたっては自作の接続コックを用いて、大気との混入を最小限に抑えた。

2.5.2 ガス組成の分析方法

CO_2 と CH_4 の測定は、島津製作所製ガスクロマトグラフィ GC-2014を用いて行った。データ処理システムはクロマトパックC-R8Aを用いた。分析条件は、検出器をTCDとし、キャリアガスはアルゴンを用い、カラム流量を 20.0ml/min とした。カラムは、SUSカラム(シンカーボン-ST 50-80)とガラスカラム(サンパック-S 80-100)を用いた。カラム温度は 150°C 、ING温度は 140°C 、TCD検出器温度は 200°C とした。各階のガスの注入量は、 0.5ml とした。また、四種混合標準ガス($\text{CH}_4=21.4\%$ 、 $\text{CO}_2=27.3\%$ 、 $\text{H}_2=0.90\%$ 、 $\text{Ar}=\text{Balance}$: 特注)を用いた、絶対検量線法により測定を行った。

CO 、 H_2S 、 O_2 の測定は、GASTEC製の検知管を用いて行った。 CO はNo.1M(測定範囲 0.05% ～ 4.0%)、 H_2S はNo.4M(12.5ppm ～ 500ppm)、 O_2 はNo.31B(3% ～ 24%)を用いた。

2.6 排水測定

2.6.1 排水の採取方法

各模擬土槽はコンクリート製の基礎の上に作られている。この基礎にはロート状の凹みと排水路が作られており、土槽を通過した雨水の集水と排水ができる構造となっている。ここには、約5Lの排水が溜まる構造となっており、降水等によりこれを越えた場合には、随時オーバーフローする構造となっている。



図1 屋外模擬土槽完成時の外観

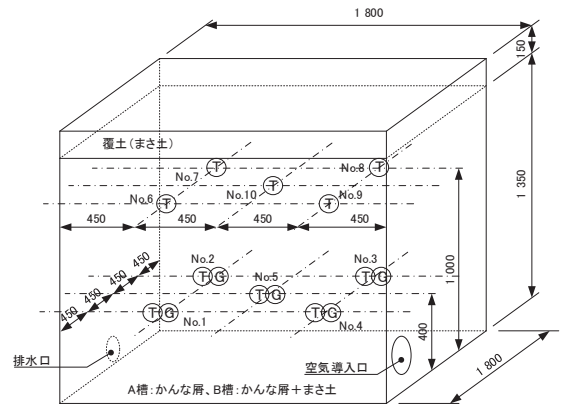


図4 温度やガス等のサンプリング位置図 (mm) (T: 温度測定点、G: 発生ガス測定点)

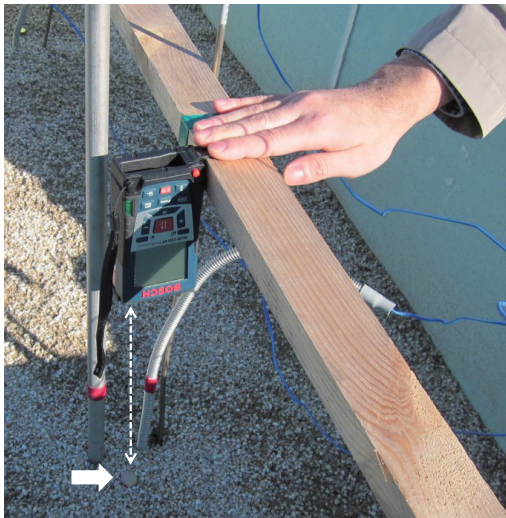


図2 土槽の上面に設置したレーザー距離計とターゲット (白矢印)



図5 発生ガスの採取(引き抜き)の様子



図3 気象ステーションと遠隔カメラ



図6 排水の採取の様子

排水の採水は、開閉式の排水口から2Lのプラスチック製バケツを介して、2Lのプラ容器2本と1Lのプラ容器1本に採取した(図6)。採水後、速やかに実験室に持ち帰りpH、電気伝導度、溶存酸素量、酸化還元電位の4つの項目について測定を行った。

2. 6. 2 排水の測定方法

(1) 水素イオン濃度 (pH)

Lutron製マルチ水質チェッカー(PH-230SD)と、Lutron製PH電極(PE-11)を用いて、pH=4.00と7.00の2点の校正液にて補正したのち、測定した。

(2) 電気伝導度 (EC)

Lutron製マルチ水質チェッカー(WA-2017SD)と、Lutron製導電率プローブ(CDPB-03)を用いて、校正液(1.413mS/cm)にて補正したのち、測定した。

(3) 溶存酸素量 (DO)

Lutron製マルチ水質チェッカー(WA-2017SD)と、Lutron製溶存酸素プローブ(OXPB-11)を用いて測定した。

(4) 酸化還元電位 (ORP)

東亜DKK製ポータブルORP計(RM-30P)と、東亜DKK製ORP複合電極(PST-2739C)を用いて測定した。

3. 結果と考察

3. 1 容積変化

模擬土槽の上面に固定したレーザー距離計から、土槽上面に設置したターゲットまでの距離の変化を図7に示した。この図の横軸は2015年10月から2016年末の15ヶ月間とし、縦軸はレーザー距離計からターゲットまでの距離の4点平均値とした。赤は土槽Aとし、青は土槽Bの変化とした。

赤松の木くず100%の土槽Aでは、期間を通じて約8cmの変化が確認できた。各土槽とも実験開始時には135cmの内容物を充填したことから、この減少量は全体の約6%の体積縮小と判断できる。一方で赤松を重量の3%のみ含む土槽Bでは、実験期間を通してほぼ一定の値で推移したことから、体積縮小は無かったと判断した。

3. 2 気温と槽内温度の変化

外気温の最高気温(オレンジ色)と最低気温(緑色)、降水量(灰色)の変化を図8に示した。この図の横軸は2015年9月から2016年末の16ヶ月間とし、第一縦軸(左側)に温度、第二縦軸(右側)に降水量を示した。ここで示した各日の最高温度と最低温度のデータは、15分毎にロガーで記録した1日分のデータ(24×4=96点)から、最高気温と最低気温を抽出して求めた。降水量は、各日の合計値を示した。温度変化の傾向により、実験期間を次ぎの3期に分割した。第1期は実験当初から12月末までの温度低下期間とし、第2期は2016年1月から8

月までの温度上昇期間とし、第3期は9月から12月までの2回目の温度低下期間とした。期間を通じての最低気温は第2期の2016年の1月10日に-1.4℃を記録し、最高気温は同様に第2期の8月9日に33.0℃を記録した。

次に、土槽Aの内部温度変化を図9に示した。赤色線は上面の5点平均値、桃色線は下面の5点平均値とした。上面と下面の温度差は、第1期で上層が約3℃高く、第2期ではほぼ同様となり、第3期では上層の方が下層よりも約2℃高い傾向が見られた。一方、土槽Bでは、全期間の温度変化傾向は土槽Aとほぼ同様に推移したが、上面と下面の温度差は確認できなかった。

図10は、最高気温と最低気温の範囲を黒色で示し、そこに土槽Aの内部温度の変化傾向(赤色線:上面の5点平均値、桃色線:下面の5点平均値)と、降水量(灰色)を示した。表示項目は、図8と同様とした。図10からは、土槽Aの内部温度変化は、外気温の温度変化と同様に推移したことが分かる。細かく見ると、第1期の初期において上面の内部温度が外気温の最高温度よりも高くなった。この原因としては何らかの発熱現象が考えられるが、本研究では土槽Aに充填した赤松の好気発酵による発熱と解釈している。また、第3期においても上面の温度が下面よりも高い傾向が確認できたが、この原因としては1)日中の直射日光による昇温の影響、2)実験槽内の熱が主に地面と空気導入口を介して放熱されたこと、等の理由が考えられる。特に2)を検証する目的で、第3期の2016年10月23日から12月12日までの土槽Aにおける10カ所の測定点毎の温度変化を図11に示した。図中の黒線が空気導入口に最も近い測定点であるが、これが常に最低の温度を示した。この原因は、空気導入口からの放熱と考えられる。

以上をまとめると、土槽Aにおいては、好気発酵による発熱反応が起きている可能性が高いが、土槽内部においては蓄熱よりも放熱が卓越していることが明らかとなった。それゆえ、本土槽の条件(規模や断熱仕様、資材の充填方法等)では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。

3. 3 発生ガスの変化

実験期間を通じて、土槽A、土槽Bとも水素、メタン、硫化水素、一酸化炭素の発生は確認できなかった。また、土槽Bは基本的に土槽Aの変化傾向と同じなので、ここでは変化量の大きい土槽Aのみを論じる。

土槽AにおけるO₂とCO₂の体積%(以後、“vol%”)の変化傾向を図12に示した。この図では、横軸を期間、縦軸をvol%とした。それぞれは、採取した5ヶ所のガス分析値の平均値とした。O₂の2016年の8月9日から2016年の9月21日までの分析値は、機器の不具合により採取できなかったため空白とした。なお、土槽BはO₂、

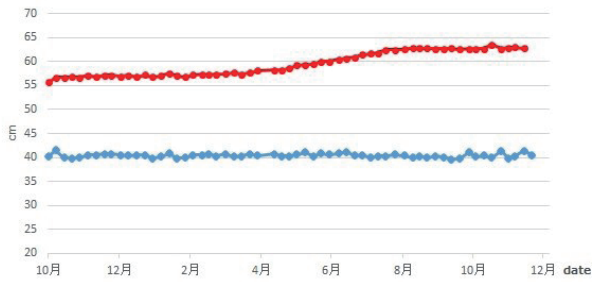


図7 土槽表面のターゲットまでの距離の変化
(4点平均) (赤丸：土槽A、青丸：土槽B)

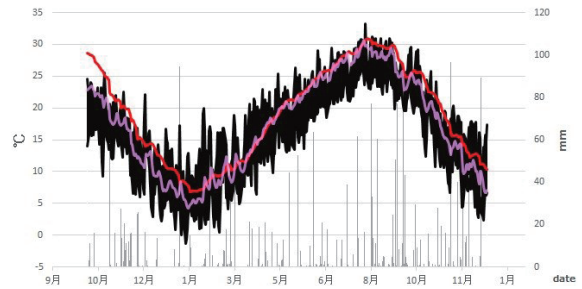


図10 土槽Aの槽内温度変化 (赤色：上面の平均温度、
桃色：下面の平均温度、黒色：各日の最高と最低気温範囲)

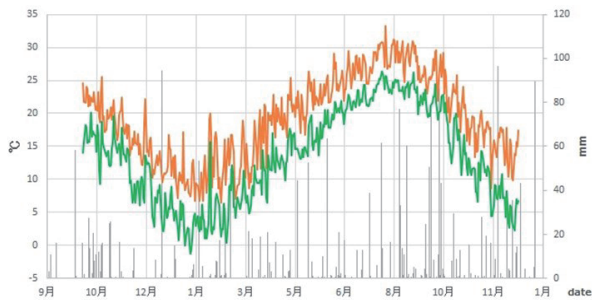


図8 外気温 (最高温度：褐色、最低温度：緑色)
と降水量 (灰色棒)

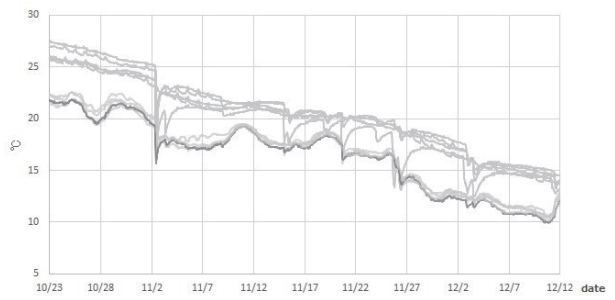


図11 土槽A内の各測定点における温度変化 (黒色
の線は空気導入口に近い測定点での変化)

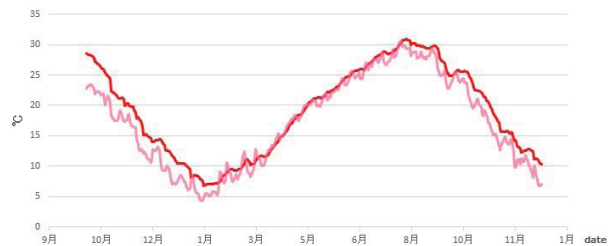


図9 土槽Aの槽内温度変化 (赤色：上面の平均
温度、桃色：下面の平均温度)

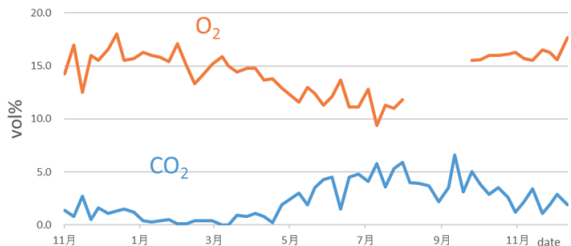


図12 土槽Aから発生した二酸化炭素と酸素の変
化 (青色：二酸化炭素、褐色：酸素)

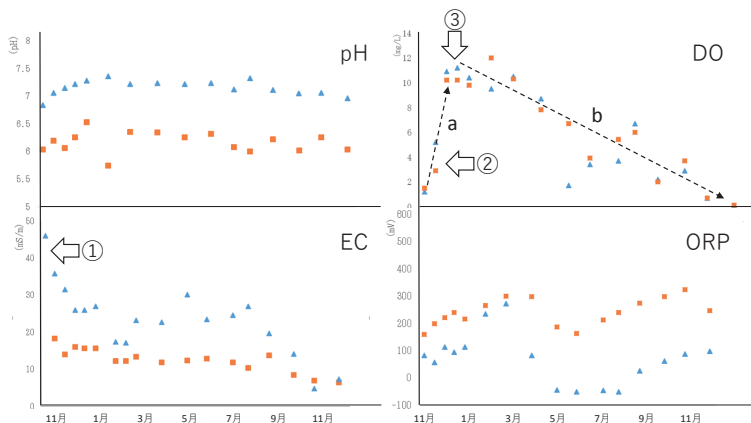


図13 土槽 (褐色四角) A、土槽 (青色三角) Bにおける
pH、EC、DO、ORPの変化

CO₂とも土槽Aと比較して発生量が少ないながら、ほぼ同様の变化傾向を示したため、ここでは土槽Aのみを扱う。

槽内温度の変化傾向から分割した第1期～第3期を適応すると、槽内温度が下降から上昇する第1期と第2期ではO₂が減少し、CO₂は一定から上昇した。第3期では、O₂が上昇し、CO₂が下降した。期間を通じて、O₂の最大値は実験初期の2015年12月20日に18vol%を記録し、最低値は2016年8月3日に9vol%を記録した。また、CO₂の最大値は2016年9月10日に7vol%を記録した。

土槽内の温度が上昇した際の、CO₂の発生量の増加とそれに伴うO₂の低下は、充填した赤松の好気性発酵が原因と判断できる。特にCO₂の発生については、外気温が15°Cを上回ると発生が確認できるが、これを下回ると1 vol%以下ないしは発生しなくなる傾向が確認できた。土槽の内部温度は、外気温に応じて変化していることは明らかであり、これは土槽の断熱性能が不十分なことが原因と考えられる。仮に、冬期においても好気性微生物の活動に適した槽内温度と思われる15°C以上を保持できた場合には、発熱が継続した可能性が高い。2017年8月以降にO₂が上昇しているが、これは第3期の温度低下により好気性微生物の活動が低下したことにより、O₂の消費が抑制されたためと考えられる。

以上より、土槽内の発生ガスの変化傾向と、外気温、及び土槽内部の温度変化傾向からは、好気発酵による発熱が起きていると結論できる。赤松は発火危険性のある有機物であるが、それが好気発酵により発熱したとしても、堆積高さが低い等の理由で土槽内からの放熱が卓越した場合には、蓄熱されることはない。よって、本土槽の条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では蓄熱よりも放熱が卓越しており、それゆえ、蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。

3. 4 排水

土槽A、BにおけるpH、EC、DO、ORPの各変化傾向を図13に示した。

期間を通じて、pHとECは常に土槽Aに比べて土槽Bが高い結果となった。これは、土槽Bに含まれた真砂土からのカルシウム等の塩類の溶出と、赤松からの有機酸の溶出によるものと判断できる。特に土槽BのECは、実験開始直後に上昇した（矢印①）が、この原因は初期の降雨により塩類が高濃度で溶出したためと考えている。

DOは土槽A、Bとも実験開始直後に低い値（矢印②）となっているが、この原因は好気性発酵に伴う槽内のO₂消費によるものと考えられる。その後、降雨によりO₂を多く含んだ雨水が土槽内に流入したため急激に上昇（破線a）したが（矢印③）、2017年2月頃から減少に転じた（破線b）。この原因は土槽内の好気性発酵によるO₂消費による減少と解釈している。

ORPの変化については、土槽内の充填物、雨水、微生物の活動に強く影響されていると考えられる。しかし、本研究では、今回のデータに対する明確な解釈ができていない。このため、化学的、生物学的酸素要求量等のデータも加味した上で、更なる検証が必要と考えている。

4. まとめ

東日本大震災で発生した災害廃棄物の分別土の有効利用と安定性評価、特に蓄熱発火の危険性を明らかにする目的で、有機物の含有量の異なる2種類の屋外模擬土槽を千葉科学大学内に設置して、その容積、土槽内温度、発生ガス組成、排水組成の各変化を検討した。その結果、以下が明らかとなった。

- (1) 容積変化については、有機物を高含有する土槽Aの減少量の見積もりが、約6%に達した。
- (2) 土槽内の温度変化からは、有機物を高含有する土槽Aにおいて、好気発酵による発熱反応が起きている可能生が高い。しかし、土槽内部では蓄熱よりも放熱が卓越しており、外気温に応じて土槽内部温度が低下することから、本土槽の条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。
- (3) 土槽内から発生したCO₂とO₂の変化に着目すると、両者には強い負の相関が認められた。すなわちCO₂濃度が増加すると、O₂濃度は減少する傾向が確認できた。加えて、CO₂濃度の増加時には土槽内部の温度も上昇していることから、土槽内部では好気発酵が起きていると判断できる。この好気発酵の開始と終了の目安としては、外気温の変化と対応させると、15°Cを超えた場合に好気発酵が進み、これを下回ると好気発酵が阻害される傾向が確認できた。
- (4) 各土槽からの排水の分析結果からは、①土槽を構成する有機物と真砂土の影響から、pH、ECとも土槽Aが常に低い値となり、②DOは雨水と土槽内部の好気発酵の影響を受けた変化をしていると判断できた。しかし、③ORPの変化については、今後の検討が必要であることが明らかとなった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、国立研究開発法人国立環境研究所、資源循環・廃棄物研究センター、循環利用・適正処理処分技術研究室、遠藤和人主任研究員、竹崎聡氏には、様々な助言や支援を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。本研究は、平成27年度環境研究総合推進費補助金(3K152005)を使用した。

参考文献

- 1) 遠藤和人, 山田正人: 埋立廃棄物の封じ込め機能とその維持. 廃棄物資源循環学会誌, vol.27, No.1, 18-26, 2016.
- 2) 朝倉宏, 山田正人, 遠藤和人, 井上雄三, 小野雄策: 覆土と廃棄物層の透過性改善による早期安定化の促進, 環境技術, vol.38, No.4, 255-261, 2009.
- 3) 小野雄策, 遠藤和人, 東條安匡: 早期安定型最終処分場技術: 廃棄物特性や中間覆土が埋立地や浸出水に与える影響, 廃棄物資源循環学会誌, vol.26, No.1, 22-34, 2015.