

## 水戸市廃棄物第一最終処分場の廃止措置早期完了プロジェクト

〔事業責任者〕

（自治体等側）

水戸市・生活環境部・清掃事務所・小吹清掃工場長 **石川 慶一**

（大学側）

茨城大学大学院・理工学研究科・教授 **小林 薫**

### 連携先

茨城大学，水戸市生活環境部清掃事務所

### プロジェクト参加者

小林 薫（理工学研究科・教授 担当：全体総括，報告会及び意見交換会の主催・企画）

斎藤 利光（水戸市生活環境部清掃事務所・所長 担当：自治体側のとりまとめ）

石川 慶一（水戸市生活環境部清掃事務所小吹清掃工場・工場長 担当：自治体側事業担当責任者，大学との連絡調整，関連情報の提供）

藤田 貴之（水戸市生活環境部清掃事務所小吹清掃工場・施設管理係長 担当：報告会及び意見交換会の実施）

高野颯一郎（水戸市生活環境部清掃事務所小吹清掃工場・施設管理係 担当：報告会及び意見交換会の実施時の資料・器機の準備）

### プロジェクトの実施概要

#### ①プロジェクトの目的

水戸市廃棄物第二最終処分場は，焼却灰埋め立て完了（満杯）となり，廃止措置が進められ平成31年1月にその工事が完了した。また，廃止措置開始から既に24年経過している水戸市廃棄物第一最終処分場では，現在でも廃棄物最終処分場から排水される浸出水量は， $\text{pH}=10.5\sim 11$ の強アルカリで，外部に放流するためには水処理施設で中和させるための長期にわたる膨大な水処理費等が必要である。加えて，最悪の場合には，水処理施設の耐用

年数を既に過ぎており，プラント設備の更新時期も迫っている状況である（だましだまし使用している状況），水戸市としては想定外の事態に陥っている。この緊急性の高い課題に対し，茨城大学では，現位置における降雨量，覆土・埋立焼却灰への降雨浸透量，表面排水量および浸出水量とその $\text{pH}$ の変化を継続的に計測した結果を基にした検討により，浸出水の $\text{pH}$ 低下メカニズムに及ぼす降雨浸透量の影響を明らかにした（H30年度 茨城大学都市システム工学科 卒業研究（安部加奈子：廃棄物最終処分場廃止措置時の降雨浸透能の把握と浸出水の $\text{pH}$ 低下に関する研究））。

しかし，浸出水の $\text{pH}$ 低下メカニズムを明らかにできたものの，研究成果を基に試算した廃止措置完了までに要する期間は100年以上を要する結果となった（水戸市の事業担当責任者にはH31年2月に報告済み）。このことから，浸出水の $\text{pH}$ 低下メカニズムを考慮した効果的・効率的かつ経済的な $\text{pH}$ 低下対策方法を早急に見出すことが求められた。

以上より，廃止措置開始から24年経過している水戸市廃棄物第一最終処分場を対象に，2019年度は水戸市小吹清掃工場から排出される焼却灰を提供頂き，大学において室内実験で廃棄物最終処分場に埋め立てられた焼却灰と同密度に調整した焼却灰層の $\text{pH}$ 低下促進対策法を研究・検討し，早期廃止措置を完了させる目途を立て，長期間に渡る膨大な維持管理費（主に水処理費用）の削減を実現する。なお，本プロジェクトの2年目（2020年度）には，現地における $\text{pH}$ 低下促進対策法の効果を室内土槽実験により検証を行い，水戸市と共に早期社会実装の目途を付けることに繋げることを目的とする。

## ②連携の方法及び具体的な活動計画

廃止措置から 24 年経過した廃棄物第一最終処分場の廃止措置完了のため、浸出水の pH 低下を促進する方法に苦慮していると共に、廃棄物第二最終処分場での計画的 pH 低下法も同様に苦慮している。このような状況下において、pH 低下促進対策方法を大学と連携して研究開発し、早期廃止措置を完了させるために水戸市は以下の役割を担う。

- I. 本プロジェクトに関わるキックオフ・中間および最終ミーティングの招集と開催（開催に伴う開催会場の準備およびプロジェクトリーダーなどの必要機材準備含む）
- II. 廃棄物第一、第二最終処分場の浸出水の水量、pH 値データの整理と中和作業に要した薬品類の投入量、投入時期等の経時的な情報、データ類の整理と提供
- III. 廃棄物第二最終処分場の覆土、廃棄物層への浸透挙動及び雨量計による（昨年度から継続している）計測実施許可、データ公表時の許可・不許可などの承認手続きなどを担う。
- IV. 水戸市小吹清掃工場から排出される焼却灰を実験用として提供および実験後の引取り・処分を行う。
- V. pH 低下促進対策方法の社会実装のための、設計者、施工者などへのヒアリング時における協力および意見交換会への参画
- VI. 他の地方自治体の状況など情報収集を実施する。

また、廃棄物最終処分場の早期廃止措置を完了させるために大学は以下の役割を担う。

- I. 本プロジェクトに関わるキックオフ・中間および最終ミーティングの共同開催
- II. 提供いただいた浸出水の水量、pH 値及び中和作業に要した薬品類の投入量、投入時期等の経時的な情報、データ類を統合して、降雨浸透量、浸出水量と pH 値の相関関係などを分析・評価を担う。

- III. 昨年度成果である「pH 低下メカニズム」を考慮した、効果・効率的かつ経済的な pH 低下対策方法（案）の提案と実現可能性に関するヒアリングの実施・情報収集を担う。
- IV. pH 低下対策方法（案）の実験室内レベルでの効果確認のための実験計画書作成、実験装置の作製、効果の検証および成果の学協会への公表を担う。

## ③期待される成果

全国 3 千数百箇所に及ぶ廃棄物最終処分場において、類似課題を抱えている地方自治体は多数ある（H30 年度のヒアリングより）。このような深刻な状況下において、廃棄物最終処分場の廃止措置時の浸出水を計画的に pH 値を低下させることを可能とする pH 低下促進対策法が確立できれば、長期間に亘る水処理費用と水処理プラント設備の更新を不要とする廃止措置が可能になり、大幅な維持管理費の削減を実現できる。加えて、水戸市のみならず財政が厳しい類似課題を抱える全国の地方自治体へソリューションを水戸市発で提供（大いに社会貢献）できる。

## プロジェクトの実施成果

### ① 活動実績

以下に、本プロジェクトにおける活動実績について示す。

- I. 意見交換会、最終報告会および現地の計測データ等の回収などの活動実績
  - i) 4/8 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など（水戸市第二最終処分場）：茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
  - ii) 4/26 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など（水戸市第二最終処分場）：茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
  - iii) 5/24 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など（水戸市第二最終処分場）：茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛

- iv)6/21 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- v)8/2 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- vi)9/5 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- vii)10/9 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- viii)10/17 雨量計と土壌水分センサのデータ回収及び動作確認(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- ix)11/18 雨量計と土壌水分センサのデータ回収・焼却灰の提供(水戸市第二最終処分場・小吹清掃工場):水戸市 石川慶一氏, 茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- x)12/19 雨量計と土壌水分センサのデータ回収・焼却灰の受け取り(水戸市第二最終処分場・小吹清掃工場):水戸市 石川慶一氏, 茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- xi)1/20 雨量計と土壌水分センサのデータ回収など(水戸市第二最終処分場):茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛

以下には意見交換会, 報告会の実績を示す。

- i)6/28 水戸市第一最終処分場廃棄物早期 pH 低下に向けた対応策の検討に関する意見交換(飛鳥建設(株)品川本社 5F 応接室) 北海道大学 石井先生, 飛鳥建設 関 真一氏, 茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- ii)7/16 水戸市第一最終処分場に関するヒアリング(水戸市第二最終処分場) 水戸市 石川慶一氏 他 2 名, 茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛
- iii)2/19 本研究プロジェクトの成果を水戸市生活環境部清掃事務所へ報告(最終報告会

の開催, 水戸市小吹清掃工場会議室):水戸市 石川慶一氏, 高野 颯一郎氏, 茨城大学 小林 薫, B4 金子卓寛

## II. 調査・研究活動の実績

### i. 最終処分場覆土への降雨浸透挙動と降雨パターンの関係

#### 1) 計測概要

最終処分場の覆土は, 周辺の公共工事等で生じた残土等が用いられた。

覆土への降雨浸透挙動を把握するための計測は, 埋め立てが完了した最終処分場において覆土施工時に土壌水分センサを深度方向に複数設置し, 覆土内の含水状態(体積含水率)の変化を計測し, 浸出水の pH 低下に寄与しない降雨パターン(降雨強度と降雨継続時間の組み合わせパターン)を把握した。また, 降雨パターンは, 最終処分場から約 5 km 離れた水戸気象台の降雨量データおよび場内に新たに設置した雨量計(最終処分場近傍の局所的な短時間強雨データの収集)の両データを基に整理・分析を行った。

図-1 には, 覆土内へ埋設した土壌水分センサの深さを示す。覆土表面から深さ 145 cm (No.1) の廃棄物層と覆土表面から深さ 100 cm (No.2) および 20 cm (No.3) の覆土に, 計 3 ヶ所/断面埋設した。土壌水分センサは, 汎用性の高い EC-5 (METER 社製), 雨量計には ECRN-100 (METER 社製) を用いた(写真-1 参照)。

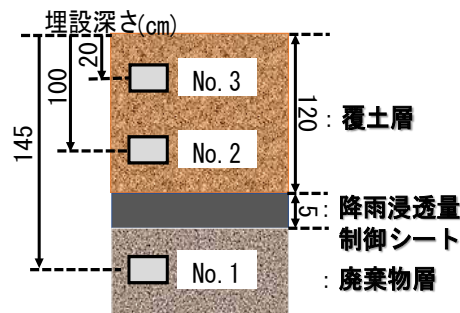


図-1 計測用土壌水分センサの埋設深さ<sup>1)</sup>

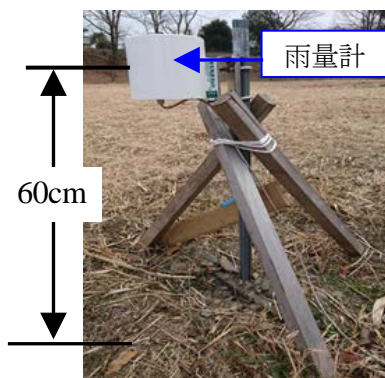
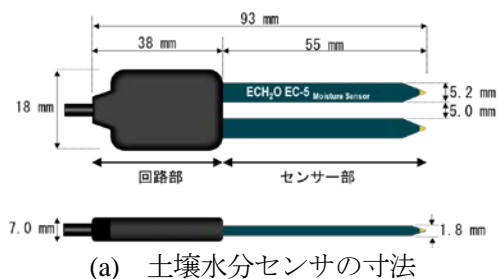


写真-1 土壌水分センサと雨量計の外観<sup>2)</sup>

## 2) 計測結果と考察

図-2 に体積含水率と降雨量データの抜粋を示す。なお、全計測期間としては、第1期：2018/9～2019/3<sup>3)</sup>で、第2期：2019/4/8～2020/1/7<sup>2)</sup>である。

計測結果より、廃棄物層に埋設した土壌水分センサ No.1 は、埋設当初より焼却灰が飽和状態を示しており、降雨浸透が生じたとしても体積含水率に変化が生じておらず、以降の検討ではセンサ No.1 の計測データは検討から除いた。

図-3 は、計測結果を一部拡大して降水量と体積含水率の関係を示す。降雨に伴う土壌水分センサ No.2 の体積含水率の変動は、センサ

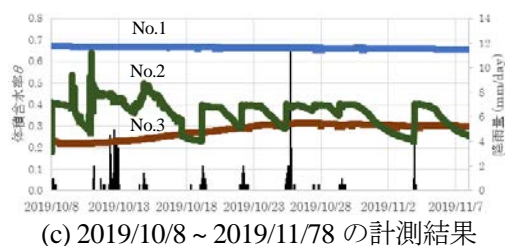
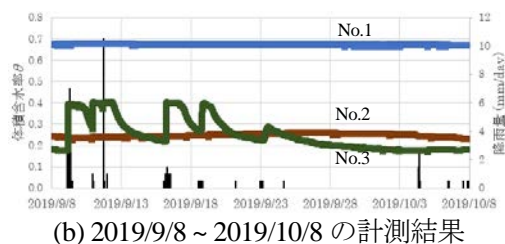
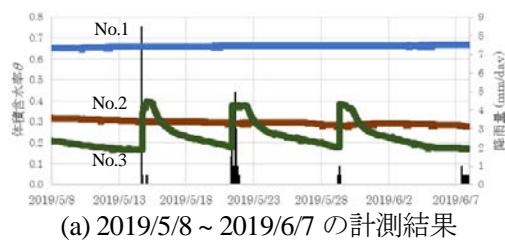
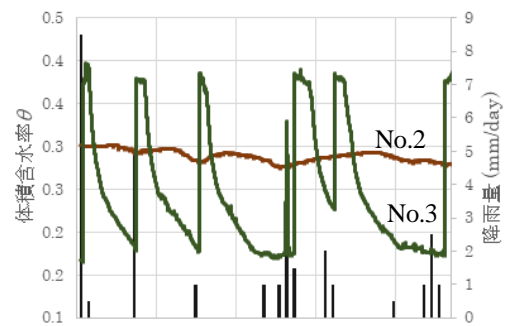


図-2 降雨量と土壌水分センサによる No.1～No.3 センサの計測結果 (抜粋)



No.3 に比較して小さいことが分かる。しかし、No.2 においても、埋設深さが異なり浸透時間を要することなどから、降雨開始から体積含水率の変動が見受けられるまでにはタイムラグは生じているものの、小さく変動していることがわかる。

以上より、浸出水の pH 低下に寄与しない降雨パターン（降雨強度と降雨継続時間の組み合わせパターン）を検討するため、降雨量

とセンサ No.2 と No.3 の体積含水率の変動を基に検討を実施した。検討は、まず 10 分間の降水量計測データを一時間当たりの降雨強度 (mm/h) に変換した上で、後述する降雨継続時間内の平均降雨強度を算出した。また、降雨継続時間としては、本研究では 6 時間、12 時間および 18 時間の間に再び降雨が発生した場合には降雨継続時間として定義し整理・分析を行った。なお、前記の 6 時間、12 時間および 18 時間と定義して評価したが、3 種類ともに大きな変化は無かったため、以下には 12 時間に設定した場合について示す。

降雨浸透挙動と降雨パターンによる分類分けは、埋設深度の異なる土壤水分センサ (No.2 と No.3) の体積含水率変動の有無によって行う。降雨に伴い土壤水分センサ No.2, No.3 の両方に反応がない場合、×印「反応無」、センサ No.3 のみに反応がある場合、▲印「覆土表面のみに反応有」、両センサに反応がある場合は、●印「反応有」とする。

図-4 および図-5 (拡大図) に平均降雨強度と降雨継続時間に伴う降雨浸透挙動の分類分けを示す。図-5 の点線より下部 (↓方向) の領域の降雨パターンについては、覆土の深部まで浸透しないことが確認できた。例えば、0.5mm/h 未満であれば、降雨継続時間が 5 時間程度であっても覆土の深部にまでは降雨浸透は達しない。

以上より、最終処分場の廃止措置に伴う覆土設計にあたっては、建設位置付近の年降水量を基に、水処理棟の処理能力を考慮して、浸透制御を行うためのシート設置の検討を行う。しかし、焼却灰の pH を低下させるための洗い出しに寄与する降雨浸透量は、年降水量が全て焼却灰まで浸透するのではなく、降雨パターンによっては焼却灰に達しないことが確認できた。このことから、降雨パターンを考慮した降水量を基にシート設置の検討を行う必要があると考えられる。加えて、pH 低下に寄与する降雨浸透量が設計時の年降水量に比較して少なくなることから、洗い出しに

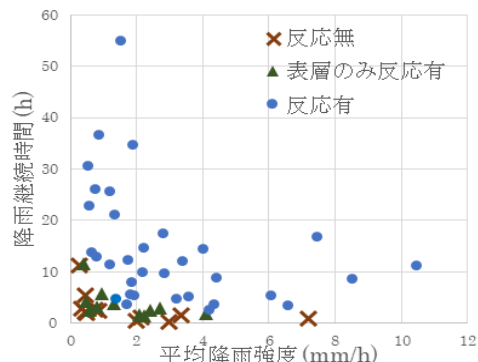


図-4 平均降雨強度と降雨継続時間の関係

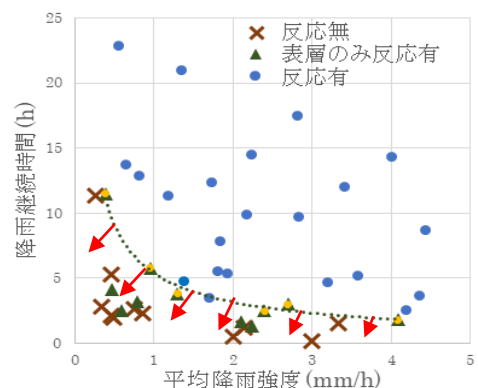


図-5 平均降雨強度と降雨継続時間の関係 (拡大図)

よる pH 低下に要する時間は想定以上になるものと考えられる。今後の最終処分場の廃止措置に伴う覆土 (浸透制御シートを含む) の設計は、降雨パターンを考慮した年降水量を算出した上で行う必要があると考えられる。

## ii. 空気透気による焼却灰の pH 低下に関する基礎的実験

### 1) 実験概要

焼却灰については、4.75 mm 以上の粒子の 8 割以上で粒子内部に固形物が確認されており、固形物には溶融物やガラス、陶器、石、金属などが核として存在している。核の周りを微細粒子が取り巻くという特異的な構造を有している<sup>4)</sup>。したがって、本実験では焼却灰のみを抽出するため 2 mm ふるいを通過した焼却灰を用いた (写真-2)。



写真-2 焼却灰 2 mm ふるい通過分

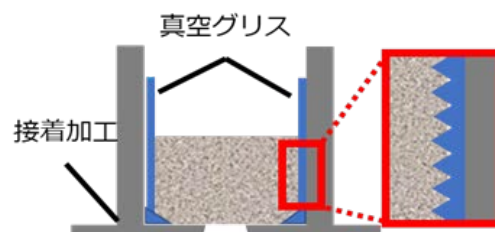


図-6 器具内壁への真空グリスを塗布して供試体を作製



写真-3 実験器具類の外観<sup>2)</sup>



写真-4 本研究で用いた pH 測定器

写真-3に実験器具の概要を示す。真空ポンプにはミニポンプ(Σ-100HN II, 柴田科学製)を使用した。また、図-6には、焼却灰に空気透気を行う際に、供気体設置器具の内壁と焼却灰の間の空隙を無くして、漏気しない様にするために、真空グリスを円筒カラムの内壁に 1mm 程度塗布した上で焼却灰を投入して供試体を作製した。

実験ケースとしては、①空気透気速度を一定 (50 l/min) にして、空気透気量 (50,100, 1,000 及び 10,000 l) の 4 ケース) を変化させて焼却灰の浸出水 pH に及ぼす影響を確認する実験、②空気透気量を一定 (50 l) にして、空気透気速度 (0.5, 1.0 及び 1.5 l/min の 3 ケース) を変化させて焼却灰の浸出水 pH に及ぼす影響を確認する実験及び空気透気量 100 l, 空気透気速度 1.0 l/min の条件で、供試体の高さ 50 mm にした場合の供試体高さごとの pH 低下量を確認する実験を実施した。

実験手順は、以下に示す通りである。

- ①円筒カラム実験装置底部に金網(250 μm), 不織布を置き, カラム本体と土台をボルトで固定した(写真-3 参照)。
- ②焼却灰を 10 mm×2 層で高さ 20 mm になるように突固め棒を用いてゆっくり投入後に締固めて作製した。
- ③取り付けた真空ポンプを用いて、供試体の下端部より空気を吸引し、焼却灰へ空気を透気させた。空気透気量(L), 空気透気速度(L/min)を真空ポンプ側で制御した。
- ④供試体に所定の空気透気を与えた後、供試体を水道水(pH = 7.53)に浸し、浸出水の pH を pH 測定器(写真-4)により測定した。
- ⑤供試体の高さ 50 mm を用いた実験では、所定の空気透気を与えた後、供試体を高さ方向に 10 mm にスライスして、各試料を水道水(pH = 7.53)に浸し、浸出水の pH を pH 測定器により測定した。

## 2) 実験結果と考察

図-7には空気透気量と浸出水のpHの関係について示す。空気透気量が増加すれば、供試体のpHは低下することが分かる。焼却灰の浸出水の初期pHは10.54であった。供試体への空気透気量を、50、100、1,000および10,000ℓの順で増加させた場合の各pHは、10.1、9.7、9.2および9.0と低下する傾向を示した。焼却灰への空気透気によって浸出水のpHを低下させることが可能であることが確認できた。

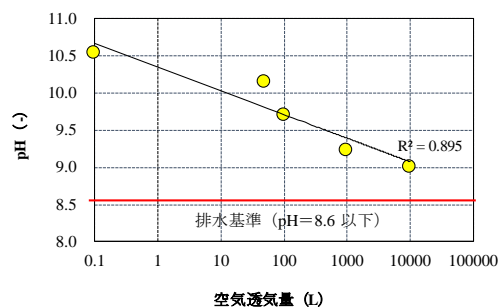


図-7 空気透気量と浸出水のpHの関係  
(空気透気速度は0.5 ℓ/min)

図-8は、供試体への空気透気速度と浸出水のpHの関係を示す。空気透気量を50ℓ一定とし、供試体への空気透気速度を変化させた場合、本実験の範囲(0.5、1.0および1.5 ℓ/min)ではpH低下への影響が無いことを確認した。空気透気速度の上げることは、時間当たりの空気透気量を増加させることには効果があるが、透気速度でpH低下効率を向上させることはできないものと考えられる。

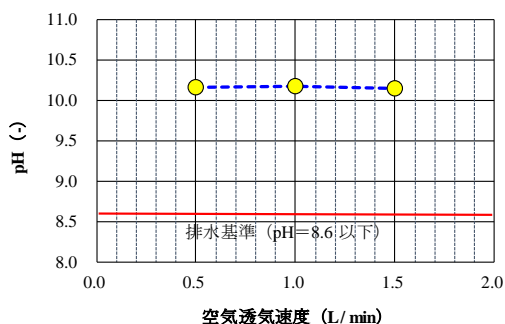


図-8 空気透気速度と浸出水のpHの関係  
(空気透気量は50 ℓ)

図-9は、所定の空気透気速度で、所定の空気透気量を供試体に与えた後の供試体高さごとのpHを示している。空気透気の方法は、下端部から空気を吸引していることから、空気は上面から入り、下面へと通過している。実験結果より、供試体への空気透気量は同じであっても供試体内のpHは異なり、上面ほどpHの低下が大きいことを見受けられる。このことから、最終処分場の様な焼却灰の厚さが10数m～数十mの場合には、効果的にpHを低下させるためには、空気透気距離を考慮したpH低下計画を立案する必要があることが明らかになった。

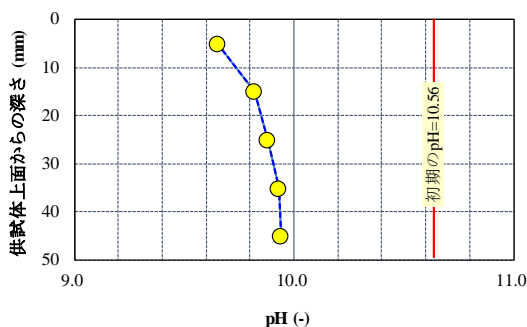


図-9 供試体高さごとのpHの関係  
(空気透気量 100 ℓ, 透気速度 0.5 ℓ/min)

### ② プロジェクトの達成状況

本研究による現地調査・計測および室内実験により、以下の知見が得られた。

- ・焼却灰のpHを低下させるための洗い出しに寄与する降雨浸透量は、年降水量が全て焼却灰まで浸透するのではなく、降雨パタ

ーンによっては焼却灰に達しないことを確認した。

- ・降雨パターンを考慮した降水量を基にシート設置の検討を行う必要がある。
- ・焼却灰への空気透気によって浸出水のpHを低下させることが可能であることを確認した。
- ・空気透気速度の上げることは、時間当たり

の空気透気量を増加させることには効果があるが、透気速度でpH低下効率を向上させることはできない。

- ・ 供試体への空気透気量は同じであっても供試体内の深さによりpHは異なり、上面ほどpHの低下が大きいことが見受けられた。このことから、最終処分場の様な焼却灰の厚さが10数m～数十mの場合には、効果的にpHを低下させるためには、空気透気距離を考慮したpH低下計画を立案する必要がある。
- ・ 得られた成果は、学協会などへ発信しており、類似課題を抱える自治体にも寄与することができた。加えて、本研究に取り組む中で、課題解決時の事前ヒアリングでは、北海道大学およびゼネコンの協力を得ることができ、より強固な体制で取り組む土台を構築することができた。

### ③ 今後の計画と課題

本研究成果は、地方自治体が抱える課題解決の糸口を見出すことができた。今後は以下の課題を解決し、水戸市と連携を図りながら、早期社会実装の目途を付ける必要がある。

- ・ 焼却灰への空気透気によるpH低下効果の効率を高めるための方法を、室内土槽実験を実施し、実験的に高効率な方法を見出す。
- ・ 現地の規模の大きな最終処分場へ空気透気法の展開を想定した施工法を協力体制にあるゼネコン等のアドバイスもいただきながら確立する。
- ・ 類似課題を有する他の地方自治体の対策技術や研究開発成果についても調査を行う。

**謝辞：**本研究は、茨城大学社会連携センター支援事業 戦略的地域連携プロジェクトによる支援を頂いた。また、北海道大学 循環共生システム研究室 石井一英先生、飛島建設 関真一氏の貴重なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1)金子卓寛, 小林 薫, 増子直也: 廃棄物最終処分場覆土の降雨浸透挙動と降雨パターンに関する検討, 第16回地盤工学会関東支部研究発表会, pp.269-270, 2019。
- 2)金子卓寛: 廃棄物最終処分場における浸出水のpH低下促進に関する基礎的研究, 茨城大学都市システム工学科卒業研究, 40p, 2020。
- 3)安部加奈子: 廃棄物最終処分場廃止措置時の降雨浸透能の把握と浸出水のpH低下に関する研究, 茨城大学都市システム工学科卒業研究, 52p, 2019。
- 4)大寺泰輔, 島岡隆行, 中山裕文: 一般廃棄物焼却灰の粒子性状と生成過程に関する一考察, 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.473-479, 2003。