

「廃棄物の適正処理・水処理に係る調査研究助成制度」  
研究成果発表会  
要旨集

令和4年7月

大阪湾広域臨海環境整備センター



# 目次

	ページ
1. 一般廃棄物処理施設の地域貢献(環境学習)とその運営改善へ向けた調査研究(その2)..... 1 京都大学大学院地球環境学堂	准教授 浅利 美鈴
2. 化学物質に対する遮水シートの遮蔽性能とメカニズム、及び経年劣化に関する基礎的研究..... 5 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域	主任研究員 石森 洋行
3. 酸化鉄汚泥を用いた硫化水素放出抑制材としての実用化に関する研究開発(その2)..... 9 地方独立行政法人山口県産業技術センター 企業支援部	専門研究員 猪野 陽佳
4. 埋立処分場浸出水の超高効率かつ安定した窒素除去を実現するテーラーメイド型anammoxプロセスの開発(その2)..... 13 北海道大学大学院工学研究院環境創成工学部門	准教授 押木 守
5. 生ごみと浄化槽汚泥の地域内循環による資源・エネルギー回収手法の開発(その3)..... 17 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻	講師 日高 平
6. ごみ焼却排ガス処理を目的とした重曹の真空加熱による多孔質薬剤の開発..... 21 北海道大学大学院工学研究院 環境工学部門 廃棄物処分工学研究室	准教授 黄 仁姫
7. 電気化学的プロセスによる廃棄物処分場浸出水のPOPsの分解処理技術の開発..... 25 神戸大学 大学院農学研究科	助教 吉田 弦



## 一般廃棄物処理施設の地域貢献（環境学習）とその運営改善へ向けた調査研究（その2）

○浅利 美鈴 （京都大学大学院地球環境学堂）  
鈴木 榮一 （京都大学大学院地球環境学堂）

### 1. 調査研究の目的

令和2年度の研究成果発表会では、一般廃棄物施設に附随する環境学習施設及び学習機能（以下、「施設」という）への全国調査<sup>1)</sup>から、「運営者の意識や関心からみた環境学習施設・設備の課題」をとりあげ報告した。本調査研究は、令和2年度調査から得た結果を基に実施した好事例施設への調査から、環境学習機能及びその運営改善への糸口を見だし、一般廃棄物処理施設の普遍的な可能性、そして地域拠点としての可能性をさぐることを目的とする。

### 2. 調査研究方法

令和2年度の全国調査は、施設運営の現状を把握できたものの、各々の施設の運営内容や運営に対する考え方、運営者の価値観や意欲内容、および運営課題や独自のノウハウを取得するまでには至らなかった。それらは言語的で、用いた調査票（アンケート回答用紙）の自由記述欄だけでは限界があった。

そこで、令和2年度の全国調査で得た「施設と地域との関係性」および「施設運営者の意識」を指標に、上位20位の好事例施設を選定し、それらの運営者へ個別に面談調査した。そして、各施設運営者から得た発語テキストデータを量的研究として統計解析を行い、さらに質的研究の分析を行った。

発話データ収集の面接法は、予め質問項目を用意しながらも順番や内容を対象者の反応によって質問を発展させることができる「半構造化面談（半構造化インタビュー）」（澤田 2001）<sup>2)</sup>（フリック 2002）<sup>3)</sup>を採用した。面談シナリオは、つぎの2つのテーマを軸に、施設運営全体を俯瞰するイメージで構成した。

- (ア) 施設（学習設備）の計画・設計への運営現場からの認識・評価等
- (イ) 施設運営における地域との関わりへの認識・評価等

{質問の流れ}

- 1). 序盤（施設開設および計画/設計について）
- 2). 中盤（運営内容について）
- 3). 終盤（地域との関係、施設の地域拠点について）
- 4). 本インタビューの感想について

なお、面談対象者の利益、人権、プライバシー、個人情報、調査のプロセスや倫理的配慮等に関して書面等で説明し、あらかじめ面談承諾書（同意書）をいただいた。

---

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学物理系校舎北棟7階 浅利美鈴研究室、Tel:075-753-5922、浅利美鈴 E-mail:mezase530@gmail.com、鈴木榮一 E-mail:heikuro1@gmail.com

キーワード：環境学習施設（学習機能）、地域貢献、施設運営改善、運営者の向上心、半構造化面接（インタビュー）

### 3. 研究結果と考察

全国調査結果から選出した好事例上位 20 施設に、本調査を依頼したところ 8 施設（4 割）の辞退があり、同意書を得られた 12 施設への調査を実施した。取材で得られた発話時間は、12 施設のべ 20 時間ほどであった。

表 1：12 施設の特性や被取材者等

	郵便番号	施設設置者	環境学習施設名称	開館年・月	運営契約	環境学習施設・機能の運営者	被取材者	施設計画に対する運営者や市民の関わり
1	206-0035	多摩ニュータウン環境組合	リサイクルセンター「エコにこセンター」	1998年4月	業務委託（随意契約）	NPO法人東京・多摩リサイクル市民連邦	NPO・事務局長	× (市民の設置要望のみ)
2	243-0417	高座清掃施設組合	高座クリーンセンター・環境プラザ	2019年4月	DBO（長期）	施設組合及び処理施設運用会社（DBO 三菱重工環境・化学エンジニアリング）	施設組合・事務局長	△（DBO）
3	381-0026	長野広域連合	ながの環境エネルギーセンター	2019年3月	DBO（長期）	処理施設運用会社（DBO 日立造船）	DBO・担当者	△（DBO）
4	417-0801	富士市	富士市新環境クリーンセンター	2020年10月	指定管理者（7年半）	指定管理者（クリーン工房）	富士市・担当者	△（DBO・市民組織）
5	431-0201	浜松市	西部清掃工場環境啓発施設「えこはま」	2009年4月	DBOの孫請け、業務委託（単年度）	DBO(SPC 浜松グリーンウェブ株式会社)→運営管理会社（JFE環境テクノロジー）→NPO法人エコライフはままつ	NPO・事務局長	○ (DBO・市民運営NPO)
6	470-1202	豊田市	豊田市環境学習施設eco-T「エコット」	2007年6月	業務委託（単年度）	NPO法人とよたエコ人プロジェクト	NPO・事務局長	○ (市民運営NPO)
7	561-0806	豊中市・伊丹市	豊中市伊丹市クリーンランド（ごみ焼却施設、豊中伊丹スリーR・センター）	2012年4月	業務委託（3年間）	NPO法人 豊中・伊丹環境政策フォーラム	NPO・事務局	○ (市民運営NPO)
8	666-0103	猪名川上流広域ごみ処理施設組合	国崎クリーンセンター啓発施設「ゆめはたる」	2009年4月	指定管理者（7年）	指定管理者（トータルメディア開発研究所）	指定管理者・所長	△（市民組織参画）
9	669-6331	北但行政事務組合	クリーンパーク北但	2016年8月	DBO（長期）	施設組合及び処理施設運用会社（DBO タクマ）	施設組合・事務局長、DBO担当者	△（DBO）
10	675-0155	加古郡衛生事務組合	リサイクルプラザ・はりま里彩来館	1998年4月	直営	加古郡衛生事務組合	事務組合・担当者	×
11	709-4611	津山圏域資源循環施設組合	津山圏域クリーンセンターリサイクルプラザ	2016年4月	業務委託（5年間）	公益財団法人 岡山県環境保全事業団	事務組合・担当者	×
12	812-0051	福岡市	リサイクルプラザ・臨海3Rステーション	2001年4月	業務委託（単年度）	臨海3R共同事業体（NPO法人エコネットふくおか、他2団体）	館長・NPO理事長	×

調査の結果について 12 施設の特性や被取材者等を表 1 にまとめた。12 施設中、5 施設の施設運営に市民団体や NPO の主体的な関与がみられた。また 4 施設の施設計画に市民や NPO（非営利団体）の関与があり、計画から運営まで同一組織が関わる DBO（Design-Build-Operate）方式を含むと、6 割以上の施設に運営者の施設計画への関与がみられた。好事例施設における施設計画には、市民や運営者の知見が何らかの形で活かされている傾向が明らかになった。また運営者には、市民活動の流れや民間企業からの転身者も少なからずおり、多様な経験に裏付けられた運営内容が理解できた。さらに地域との関係においても、多彩な事業を継続的に展開し、地域の拠点として担われていることが明らかになった。

取材で得られた発話データの階層クラスター分析・テーマ分類（表 2）、及び共起ネットワークによる分析（図 1）、および KJ 法によって得られた質的分析結果（表 3）からも、「施設（設備）」、「運営者（組織）」、「地域（利用者）」の三つのテーマが明確に示され、好事例施設運営者の能動的な運営姿勢、そして地域・参加者を重視する姿勢を確認できた。

表 2：クラスター分析によるテーマ分類

	テーマ	クラスター分析による抽出語
1	環境学習業務	講座、年間、事務、業務、エコ、関係
2	連携対象	団体、当時、活動、NPO、市民、行政
3	事業運営計画	提案、行う、管理、事業、運営、環境、学習、センター、リサイクル、基本、計画
4	地域の活用	啓発、地域、施設、地元、利用、実際
5	啓発	問題、考える、自分、見る
6	見学	小学校、見学、先生、使う
7	所属本体	清掃、工場
8	運営者の活動	展示、本当に、出す、最初、一番、イベント、年、月、一つ、子ども、毎年、新しい、話、感じ、行く、一応、状態、出る
9	参加者の活動	多い、持つ、結構、作る、形、全部、入れる、言う、今、思う、市、前、入る、ボランティア、来る、人

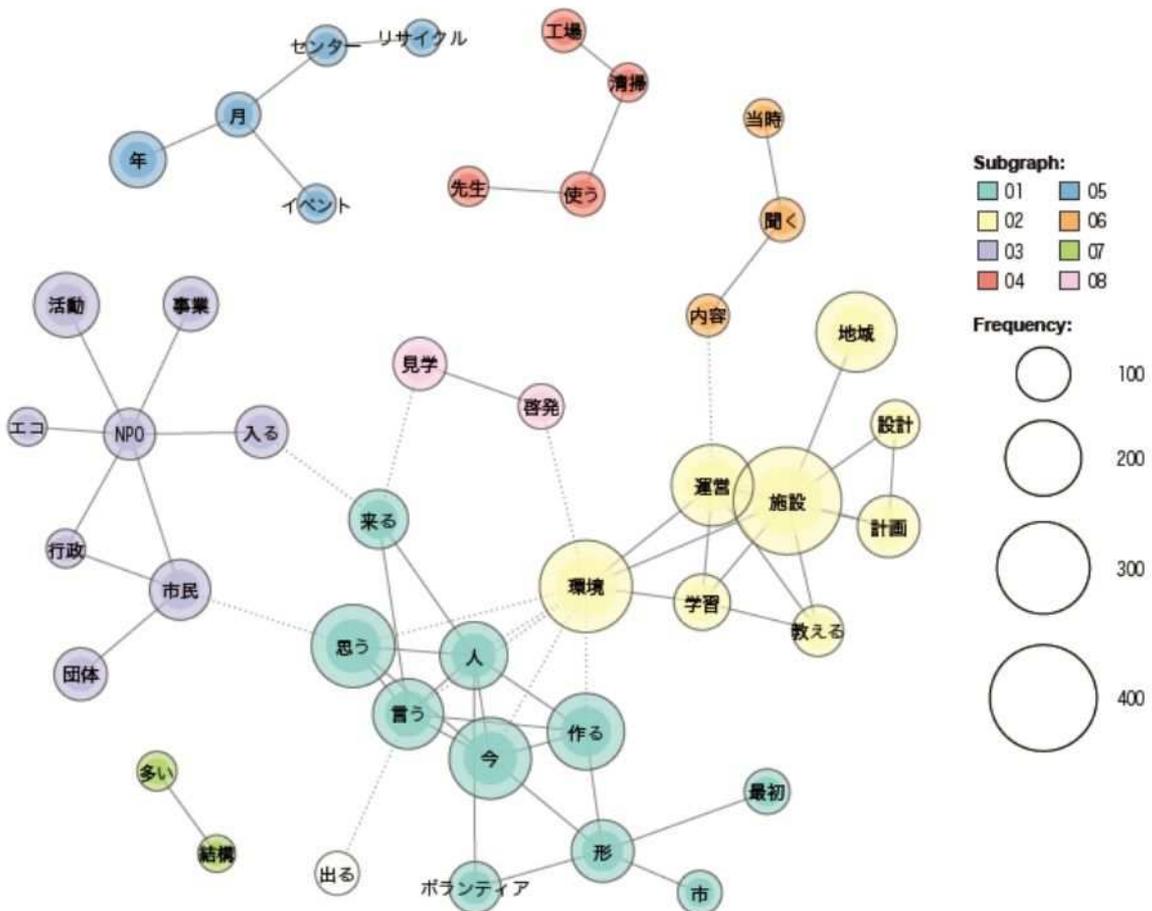


図 1： 12 施設の発話における共起ネットワーク（出現回数 45～500）

表3：KJ法によるカテゴリ分類

テーマ	上位カテゴリ	下位カテゴリ
施設（設備）	運営者の計画への関わり	市民が主体的に計画に関わる
		運営経験者の所属するコンサル委託（行政の主導）
		DBOで処理運用も含め一括民間主導
	施設・設備への運営者の意識とアクション	DBOや市民計画関与は、運営者の異同でも問題なし 箱（施設）に、運営者が全て一から揃えた 仕様書通りの設備と運営現場に若干の乖離
運営者（組織）	多彩な運営者キャリアや所属	民間企業から中途採用、専任
		民間企業や行政から、NPO所属へ（指定管理や委託）
		民間企業（DBOや指定管理）、財団法人（委託）
		施設組合（行政）が主軸にDBO企業と連携
	積極的な事業活動（境学習等）	様々な新規事業を次々に企画し、向上心が高い
		当初計画通りに粛々と実施
		地域のみならず全国活動も実施
		ボランティアを毎年養成、ガイド対応等で活躍
		里山保全活動等の活動ボランティアが多数いる
		運営内容が行政の仕様書に縛られ事業提案が難しい
地域（利用者）	積極的な地域との関係性	新たな環境学習プログラム等を次々に作成
		行政の環境政策にも関係した活動を実施
		施設見学や出前
		地域循環共生圏構想の事業にも参画している
		地域通貨を活用した環境施策等、地域活動の拠点
		地元の水環境等を活用して活発に活動
地域の文化（音楽・芸術等）拠点		
		温泉やプールを併設し、市民の認知も高い

#### 4. 結論

本取材調査と分析結果から、好事例（グッドプラクティス）施設の要因は、運営者が関わる施設計画も一因と認められるが、運営者の能動的なアクティビティやモチベーションの高さにあることも明らかになった。また、好事例施設には、運営者のみならず、行政や市民などの周辺環境にもモチベーションの高さが面談時に垣間見られ、地域やステークホルダーとの良好な関係も運営向上へ向けた良い相乗効果を生み出していることも確かめられた。

今後は、施設運営者のモチベーションがどこから生み出されるのか、2年間の調査研究をさらに推し進め、新たな運営改善や評価手法の開発をめざす所存である。

#### 5. 引用・参考文献等

- 1) 令和2年度「廃棄物の適正処理・水処理に係る調査研究費助成制度」（大阪湾広域臨海環境整備センター）浅利美鈴「一般廃棄物処理施設の地域貢献（環境学習）とその運営改善へ向けた調査研究」
- 2) 澤田英三.(2001). 質的調査-観察 面接 フィールドワーク. 心理学研究法入門-調査 実験から実践まで.
- 3) フリック・ウヴェ.(2002). 質的研究入門人間の科学のための方法論. 小田博志他訳. pp.94-121 春秋社

化学物質に対する遮水シートの遮蔽性能とメカニズム、及び  
経年劣化に関する基礎的研究

○石森洋行（国立環境研究所）

## 1. 調査研究目的

遮水シートの遮蔽原理を研究し、長期耐久性予測を合理的に説明可能な遮蔽メカニズムを構築する。長期実験と数値解析の両面からの検証により、細密構造と化学物質の分子径の関係解析を行う。その目的は、日本の最終処分場の浸出水特性や長寿命化への対応であり、具体的には、低分子量・親水性物質の重金属等無機物質や、環境基準にある1,4-ジオキサン等、さらには喫緊の課題である高分子量・両親媒性物質（親水性と疎水性をもつ）のフッ素化合物 POPs に対して正確な長期耐久性評価を与えることである。

欧米を中心とした既往研究では、BTEX等の低分子量・疎水性物質が対象とされてきた。本調査研究ではこれまで先入観から遮蔽可能とされてきた親水性物質の挙動をも詳らかにする。既存概念にとらわれず長期試験によって確かな裏付けを得ることで、将来新たに要警戒化学物質が現れた場合でも正しい予測ができる包括的な遮蔽メカニズムを構築する。

## 2. 調査研究方法

### 2. 1 遮水シートの長期遮蔽性能評価

塩化ビニル製 (PVC) の 0.5 mm 厚遮水シートを用いた長期拡散透過試験を実施した。本試験では、各シートの表面（入口）を所定濃度に調整した供与液に浸し、背面（出口）まで供与液を通過させた際の、入口と出口濃度の時間変化から、シートへの親和性（分配係数）と透過性（拡散係数）を求めるものである。供与液には、多いベンゼンを標準物質とし、高分子量・疎水性のビスフェノール A (BPA)、低分子量・親水性の1,4-ジオキサン (1,4-DX)、及び代表的な水和物質である塩化ナトリウムを混合した溶液を用いた。

### 2. 2 拡散係数に与える細孔特性と分子径の影響評価

遮水シート通過に要する時間は長期耐久性に係る指標であり、分配係数のみならず拡散係数にも左右される。既往研究の少ない拡散係数を数値実験によりモデル化した。解析手法は分子動力学シミュレーションに準じ、外力にはブラウン運動と分子間力、及び効力を考慮した。細孔径と分子径を変化させたパラメータスタディにより、細孔通過時の拡散係数を細孔径と分子径を引数とした関数で表現した。この妥当性は、上記の拡散透過試験で得た実測値と突き合わせることで検証した。

---

代表連絡者氏名 = 石森洋行； 連絡先 = 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2 国立環境研究所；  
電話番号 = 029-850-2692； E-Mail = ishimori.hiroyuki@nies.go.jp；  
キーワード = 遮水シート、有機化合物、1,4-ジオキサン、長期遮蔽性、予測モデル

## 2. 3 遮水シート劣化時の遮蔽性評価に係る基礎的検討

遮水シートは紫外線・高温・乾湿サイクル・化学的劣化・微生物侵食によって劣化する。このような劣化が化学物質のミクロな物質輸送に与える影響の解明を目指す。特に最終処分場最深部における環境下における微生物侵食に着目し、遮水シートの経年劣化が生じるのかを把握するために、既往研究およびヒアリング調査を行った。その結果をもとに処分場最深部における長期的な遮蔽性評価を行うための遮水シートの劣化促進手段と評価方法を検討した。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 塩化ビニル製遮水シート(新品)の遮蔽性

図-1に拡散透過試験結果の一覧を示す。厚さ0.5mmのPVC遮水シートに対して、ベンゼン、ビスフェノールA、1,4-ジオキサンを透水溶液として用いた拡散透過試験の結果である。図中のプロットは実測値であり、実線はシミュレーション結果である。遮水シート内での物質挙動を拡散方程式で表現できるものと仮定した場合、吸着性と透過性はそれぞれ分配係数と拡散係数というパラメータで表現できる。実験結果に最も適合する分配係数と拡散係数は、それぞれ、ベンゼンに対して169、 $5.9 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 、ビスフェノールAに対して313、 $4.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 、1,4-ジオキサンに対して1、 $6.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ であった。分配係数は遮水シートに対する親和性に依存する。疎水性の遮水シートに対してベンゼン及びビスフェノールAの有機溶媒は親和性が強いいため高い分配係数を示した。一方で1,4-ジオキサンは水に完全溶解するという親水性も合わせもつため、疎水性の遮水シートには全く吸着せず分配係数は1となった。拡散係数は遮水シート内の透過性であり、化学物質の大きさに依存すると考えられる。分子の大きさは、ベンゼンで0.73 nm、ビスフェノールAで1.28 nm、1,4-ジオキサンで0.78 nm程度であると考えられており、本試験で得られた拡散係数は小さな分子径であるほど高い値を示した。以上より、本拡散透過試験から得られた分配係数と拡散係数は、各化学物質の疎水性と大きさに対してほぼ整合した結果であった。

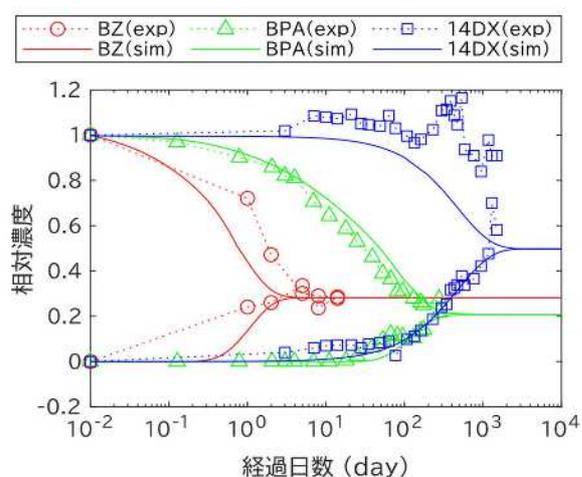


図-1 厚さ0.5mm PVCシートを用いた拡散透過試験の結果(図中のBZはベンゼン、BPAはビスフェノールA、14DXは1,4-ジオキサンを表わす)

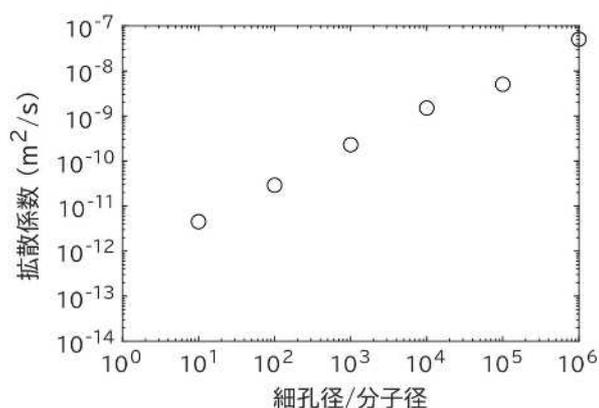


図-2 分子動力学シミュレーションから推定した遮水シート内の拡散係数に及ぼす細孔径と分子径の関係(細孔率1%の場合)

### 3. 2 遮蔽メカニズムを説明するための理論モデルとシミュレーション結果

図-2 は拡散係数に与える細孔特性と分子径の影響評価を、分子動力学シミュレーションによって推定した結果である。その目的は、遮蔽メカニズムが遮水シートの細孔径に対する化学物質の分子径の大小関係によって説明できるかを検証するために行った。特に疎水性の遮水シートと親水性の 1,4-ジオキサンが相反する特性をもちながら、拡散透過試験で長期計測を継続すると数年かけて徐々に遮水シートを通過する挙動がみられたことを説明するために（図-1 を参照）、遮水シートにも微細な貫通孔が少なからず存在するという新たなメカニズム（仮説）を考えたためである。この仮説を検証するために顕微観察や X 線 CT 分析を試みたものの、分解能の面から遮水シートの貫通孔は捉えられなかったため、別の検証手段として、これまでの拡散透過試験の結果が貫通孔を有すると仮定した遮水シートに対する分子動力学シミュレーションによって推定できるのかを議論したものである。ここで考える新しいメカニズムの利点とは、遮水シートとは相反する親水性の化学物質に対して通過しないと結論付けてきた従来の考え方に対して、図-1 に示す 1,4-ジオキサンに対する長期的な遮蔽性能評価が可能になり、また拡散透過試験を行わずとも細孔径と分子径の大小関係から対象化学物質が透過するか否かを容易に判断できる点にある。分子動力学シミュレーションは従来から計算コストが著しいことが問題のひとつとして挙げられており、本調査研究期間では細孔率 1%における拡散係数と細孔径、及び分子径の関係性評価にとどまっているが、今後は異なる細孔率に対しても同様の計算を行うことで拡散透過試験から求めた拡散係数と同等の値を与える遮水シートの細孔特性を明らかにできることが、本調査研究によって示唆された。

### 3. 3 最終処分場最深部における遮水シートの劣化とその影響因子

最後に廃棄物最終処分場最深部における遮水シートの経年劣化に係る文献調査の結果を述べる。ゴムやプラスチックは紫外線や酸化によって劣化はするものの、基質となり得る成分は含まれていないため微生物等の侵食は受けないと考えられてきた。そのため、遮水シートやフレキシブルコンテナバック等の経年劣化に係る研究は、地表面上に置かれた状態のものが日射によって酸化劣化する挙動に着目した事例が多い。一方で処分場最深部では日射は届かないため、遮水シートの遮蔽性に及ぼす酸化劣化の影響をみた研究はほとんどなかったものと考えられる。しかし大武ら(1996)の研究によれば、土壌内に 30 年間地中に埋まっていた低密度ポリエチレン (LDPE) に、微生物侵食によるハチの巣状の崩壊が認められたと報告している。同様に Albertsson (1988)も低密度ポリエチレンに分解に伴う質量現象を報告している。一般に微生物侵食の受けやすさは、エステル結合>エーテル結合>アミド結合>ウレタン結合>炭素-炭素結合と考えられており、ポリエチレンは炭素-炭素結合のみから構成され、ポリ塩化ビニルのように可塑剤の添加もなく、水分も寄せ付けない非極性である。そのため、LDPE がすべて分解されるには数千年間を要するものと考えられてきたが、上記大武ら(1996)によって生分解速度は従来の見解よりもかなり大きいと指摘している。日射の影響を受けない土壌内または廃棄物処分場最深部において経年劣化が生じる要因は、空気接触による酸化劣化と微生物侵食による酸化劣化による複合機構によって生じるという見解を示している。これは土壌内または廃棄物処分場最深部に存在する遮水シートが空気との接触により酸化劣化すると分子構造に変化が起り、水を吸着させやすくする。水分があると微生物が生存し代謝の過程で生成した酵素が遮水シートの低分子化

させそれを基質として微生物侵食をさらに促進させることとなる。またこれらを更に促進させる要因として銅や鉄などの遷移金属や腐植等の基質の存在があり、いずれも最終処分場浸出水には存在し得る成分であり、日射が無い条件でも遮水シートの経年劣化は生じるものであり、その劣化に伴う遮蔽性の変化を調査する研究は必要だと結論付けた。

その評価には経年劣化した遮水シートの準備が必要であるが、実サンプルの入手が困難な場合、プラスチックの分野で生分解性を高めるためのノウハウが役立つと考えられる。ジクミルポエルオキシドや植物オイル、でんぷん等を適量加えることで約1カ月間で酸化劣化した高分子材料を準備することができる。その後、廃棄物最終処分場最深部を模した環境内に養生することで、処分場環境下での微生物侵食による経年劣化を模擬することができ、大武ら(1995)は約9か月間の実験を通じて微生物侵食に伴う細孔発生をLDPEで実現している。このような既往研究の実験手法や評価方法は、廃棄物最終処分場の遮水シートの経年劣化評価手法にも応用できると考えられる。ただし、これらは遮水シートの製作段階でジクミルポエルオキシド等の添加材を加える必要があることからメーカーとの連携が不可欠である。

#### 4. 結論

- (1) 遮水シートを用いた長期の拡散透過試験を行い、その透過時間は、遮水シートに対する化学物質の吸着性（分配係数）と透過性（拡散係数）によって決まることがわかった。分配係数は化学物質の疎水性（オクタノール水分配係数）に依存し、拡散係数は化学物質の大きさに依存するものと考えられるが、拡散透過試験の結果はこれに整合するものであった。
- (2) 本来遮水シートに吸着することの無い親水性の1,4-ジオキサンの透過挙動を説明するために、遮水シートには少なからず貫通孔を有するという新しい仮説を立て、それを検証するために貫通孔をもつ遮水シートの透過性（拡散係数）を分子動力学シミュレーションによって計算評価し実験結果との比較を試みた。本調査研究では細孔率1%を過程したシミュレーション結果しか得られていないが、今後細孔率を変化させたシミュレーションを続けて行うことで、分子動力学シミュレーションと拡散透過試験の結果を比較できるようになり、遮水シートの細孔特性を推定できる可能性を示した。
- (3) 遮水シートの経年劣化は日射の影響を受けない土壌内、または最終処分場最深部であっても起こり得ることが既往文献調査によってわかった。そのメカニズムは空気との接触による遮水シート表面の酸化劣化（親水化）から始まり、そこに付着した水分に微生物が集まることで酵素による遮水シートの低分子化を引き起こし、それを基質として更に微生物活動が活発になるためだと考えられた。また浸出水中の銅イオンや鉄イオン、及び腐植の存在も微生物侵食を促進する要素であることがわかった。また、経年劣化した遮水シートの遮蔽性評価を行うにあたり、劣化促進方法とその評価方法についても整理した。

## 酸化鉄汚泥を用いた硫化水素放出抑制材としての 実用化に関する調査研究（その2）

地方独立行政法人山口県産業技術センター ○猪野陽佳、前英雄  
福岡大学環境保全センター 柳瀬龍二

### 1.研究目的

産業廃棄物の安定型最終処分場において、硫化水素が発生し悪臭問題や硫化水素中毒と思われる事故が報告されてきた。硫化水素の発生は国立環境研究所によって、埋立処分された廃石膏ボードに起因することが報告されている<sup>1)</sup>。これを受け、廃石膏ボードの安定型処分場への埋立を禁止し、廃石膏ボードから紙を除去した後に管理型最終処分場へ埋立処分する方法へ転換した。しかし、管理型最終処分場へ廃石膏ボードを埋立処分した場合においても、埋立廃棄物の種類や埋立環境次第では硫化水素が発生する可能性がある。特に海面埋立地のような、海面部の廃棄物が常に滞水した嫌気的環境にある場合には重要な問題である。一方、硫化水素の発生を抑制する材料の利用も進んでいる。硫化水素の放出抑制方法として、吸収剤を用いる方法<sup>2)</sup>や石灰とコンクリート混合物を覆土として利用する方法<sup>3)</sup>など多くの報告がなされているが、いずれの方法も新たに費用が発生するものである。そこで、コストをかけずに石膏ボードなどの硫化水素発生源となる廃棄物を最終処分場へ埋め立てることが可能になる方法を模索することが急務である。

本研究では、「廃棄物を廃棄物で制する」の考え方で、コストのかからない不要の産業廃棄物を硫化水素発生抑制材として活用し、埋立処分場からの硫化水素の発生を抑制させる方法に着目した。安定的に廃棄される酸化鉄を含む汚泥（以後、酸化鉄汚泥と表記）を利用し、埋め立てされる廃石膏ボードからの硫化水素発生に対する抑制効果について検討した。使用した酸化鉄汚泥は、主成分が  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  や  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、その他微量成分として Ni や Ti を含んでいる。石膏ボード破砕物（以後、石膏と表記）と酸化鉄汚泥を、埋立処分場を模した埋立実験槽<sup>4)</sup>に充填し、硫化水素の発生状況をモニターすることで、酸化鉄汚泥の硫化水素の発生抑制効果を評価した。

### 2.調査研究方法

#### 2.1 酸化鉄汚泥による硫化水素抑制および吸着効果の検討

本実験で使用する実験槽は管理型処分場を想定した埋立実験槽<sup>4)</sup>を用いた。埋立実験槽は、実験槽底部から 15cm を滞水させ、海面埋立地を想定した嫌気性埋立構造とした（図 1）。また、散水量は山口県の平均降水量を週 1 回、埋立実験槽上部に設置した散水管より水道水を散水した。埋立実験槽上部には、散水時に水の流入を容易にするため三方コックを介して容量 2L のテドラーバックを取り付け、埋立実験槽上部空間の気体が一時的に流入する構造とした。培養温度は季節の温度変化の影響も調査すべく、温調を行わない室内にそのまま静置させた。試験期間は約 2 年間とし、サンプリングは週 1 回とし、検知管を用いてテドラーバック中の硫化水素を測定した。

【連絡先】猪野陽佳 地方独立行政法人山口県産業技術センター 技術支援部 材料技術 G  
〒755-0195 山口県宇部市あすとぴあ 4 丁目 1 番 1 号 TEL:0836-53-5057 FAX:0836-53-5070  
Email: [ino-haruka@iti-yamaguchi.or.jp](mailto:ino-haruka@iti-yamaguchi.or.jp) 【キーワード】3R、廃棄物、硫化水素

本実験での硫化水素発生源は石膏を使用し、図2に示すように酸化鉄汚泥との埋立条件は①基準となる石膏粉のみを高さ50cmまで充填、②酸化鉄と石膏粉を5:5（重量比）で混埋立、③酸化鉄と石膏粉を3:7（重量比）で混埋立、④真砂土（覆土）と酸化鉄汚泥を5:5（重量比）で混埋立、⑤真砂土（覆土）と酸化鉄汚泥を7:3（重量比）で混埋立とした。これら5つの実験槽を用いて①、②、③の実験槽では、酸化鉄汚泥による石膏からの硫化水素発生抑制効果を比較検討し、①、④、⑤の実験槽では、覆土に使用した酸化鉄汚泥による石膏から発生する硫化水素の吸着効果を比較検討した。

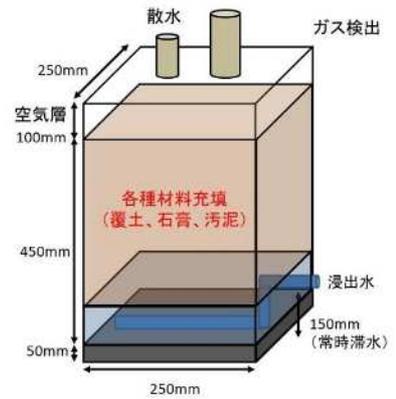


図1.埋立実験槽概要図

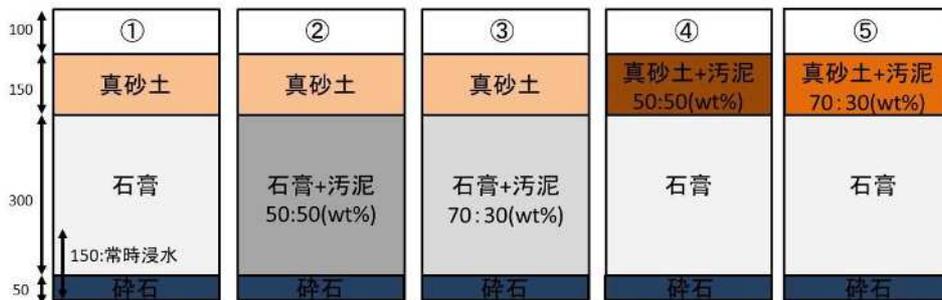


図2.各埋立実験槽の充填状態

## 2.2 ハンドリング性を改善した酸化鉄汚泥による硫化水素抑制効果の検討

令和2年度の検討結果から、酸化鉄汚泥を石膏と混合して埋め立てることで硫化水素抑制効果があることを明らかにしたが、酸化鉄汚泥を実際に埋立地で使用するには、酸化鉄汚泥が粘土質であり、運搬時や石膏等との攪拌時に運搬車や重機に酸化鉄汚泥が付着する可能性が高く、ハンドリング性に課題がある。そこで、図3に示すようにA:基準となる石膏のみを充填、B:酸化鉄汚泥スラリーと石膏を交互に充填（石膏:汚泥=7:3）、C:常時滞水状態となる高さより3cm高い18cmの高さまで酸化鉄汚泥+石膏（石膏:汚泥=7:3）を充填し、高さ50cmまで石膏を充填した実験槽を用意した。これら3つの実験槽を用い、実験槽上部、浸出水の硫化水素濃度等を測定し、ハンドリング性を改善した施工方法においても酸化鉄汚泥が硫化水素抑制効果を有するか検討した。なお、覆土による気相中の硫化水素の吸着を防ぐため、本実験では覆土を使用していない。

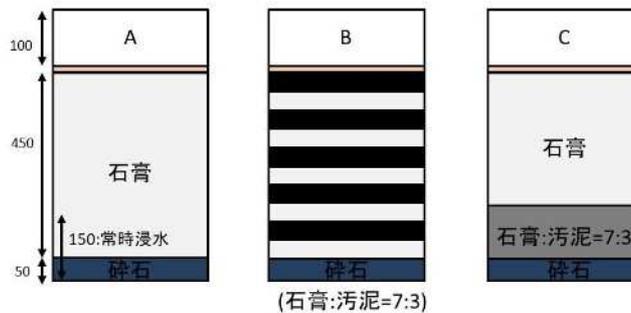


図3.各埋立実験槽の充填状態

### 3.研究結果および考察

#### 3.1.酸化鉄汚泥による硫化水素抑制および吸着効果の検討結果

##### 3.1.1.埋立実験槽上部における硫化水素濃度の経時変化-1

②、③の石膏と汚泥を混合した場合、および④、⑤の真砂土と汚泥を混合した場合は、約2年間実験槽上部において硫化水素は検出されなかった(図4)。しかし、①石膏のみを埋め立てた場合には40日を経過した後、実験槽上部において硫化水素が検出されたが、その後、硫化水素は検出されなかった。他の実験槽では2年間硫化水素は検出されなかった。酸化鉄汚泥または覆土により硫化水素が吸着されたため、上部空間の硫化水素は低濃度であったと予想される。

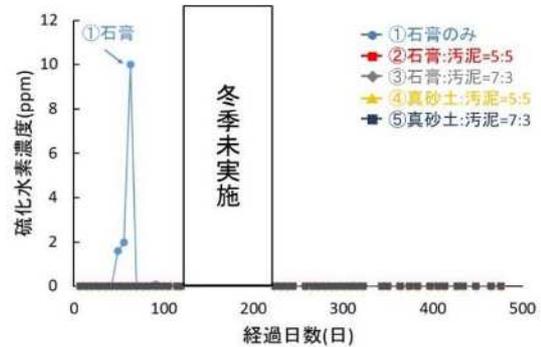


図4.実験槽上部空間の硫化水素濃度の経時変化

##### 3.1.2.埋立実験槽下部から流出される浸出水における硫化水素濃度の経時変化-1

浸出水における硫化水素については、1年目、2年目ともに①、④、⑤の実験槽からは10 ppm以上検出されていた(図5)。一方で、②、③の石膏と酸化鉄汚泥を共に埋め立てた実験槽においては大幅な減少が見られ最大で6 ppmであった。特に③の石膏+汚泥(70:30)において、硫化水素濃度は最大で0.3ppmであり、2年目においても硫化水素を抑制できていた。②、③により硫化水素濃度に差が出た理由は、酸化鉄汚泥は含水率が約50%で粘土質であるため攪拌が難しく、石膏と酸化鉄汚泥の混ざり具合に差があったためと推測される。

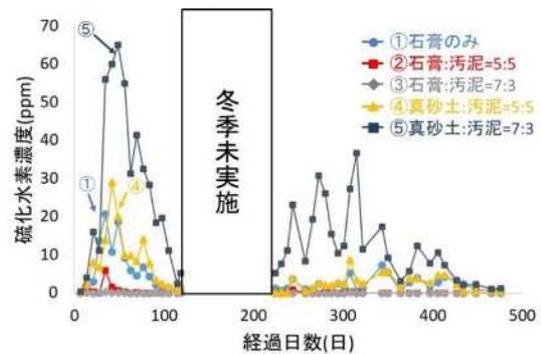


図5.浸出水から発生した硫化水素濃度の経時変化

#### 3.2.ハンドリング性を改善した酸化鉄汚泥による硫化水素抑制効果の検討結果

##### 3.2.1.埋立実験槽上部における硫化水素濃度の経時変化-2

A 石膏のみ、C 海拔面以下埋立では、3週間を経過すると350 ppmを超える硫化水素が検出された(図6)。その後も約3か月間にわたり100 ppmを超える硫化水素が検出された。一方でB 交互埋立の場合は初期に硫化水素が24 ppm検出されたが、その後は徐々に減少し、1ヶ月を経過すると1 ppm程度まで硫化水素濃度が減少した。この結果から、硫化水素の発生を抑制するには石膏と酸化鉄汚泥が触れていることが重要であると予想される。

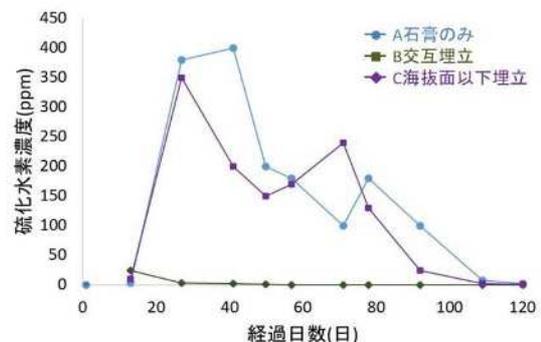


図6.実験槽上部空間の硫化水素濃度の経時変化

### 3.2.2.埋立実験槽下部から流出される浸出水における硫化水素濃度の経時変化-2

全ての実験槽（A～C）の浸出水から、1ヶ月を経過すると硫化水素が検出された（図7）。特にAの実験槽では最大で50ppmを超える硫化水素が検出され、気温の高低によらず硫化水素の発生が確認された。B交互埋立およびC海拔面以下埋立の実験槽では、A石膏のみ埋め立てた実験槽と比較すると大幅に硫化水素の発生が抑制されていた。B,Cどちらの実験槽においても検出された硫化水素は最大で5ppmであった。この結果から、浸出水における硫化水素の発生は、海拔0m付近の影響が大きいことが予想される。

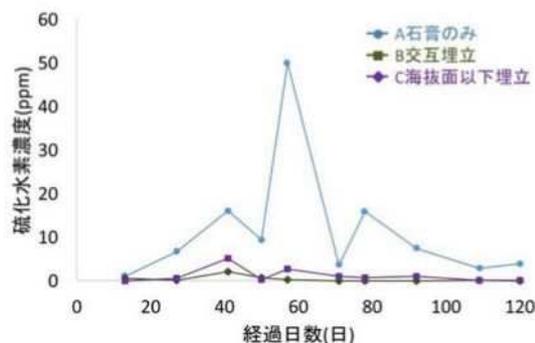


図7.浸出水から発生した硫化水素濃度の経時変化

## 4.結論

本実験で用いた最終処分場を模した小型の埋立実験槽において、得られた結果を以下に示す。

- (1)酸化鉄汚泥を混埋立、または覆土材として使用することで、気相中への硫化水素放出は抑制可能であった。
- (2)浸出水の曝気に伴い発生した硫化水素は酸化鉄汚泥を覆土材として使用した場合は放出されることを確認した。一方、酸化鉄汚泥を埋立地全体に混埋立、または海拔0m付近を混埋立することで硫化水素の放出は抑制可能であった。
- (3)酸化鉄汚泥を混埋立てすることで、有機物の量に関係なく気相中、浸出液への硫化水素の放出抑制ができることを確認した。
- (4)硫化水素の発生を抑制するには、酸化鉄汚泥と石膏が接することが重要であると確認した。

以上のことから、現在廃棄物として埋立処分されている酸化鉄汚泥を最終処分場における硫化水素発生抑制材として有効活用できることが確認できた。

表1.埋立実験槽を用いた硫化水素放出状況

	①	②	③	④	⑤	A	B	C
硫化水素（地表）	×	○	○	○	○	×	△	×
硫化水素（浸出液）	×	△	○	×	×	×	△	△

硫化水素抑制濃度 ○：1ppm未満、△：1～10ppm、×：10ppm以上

## 5.参考文献

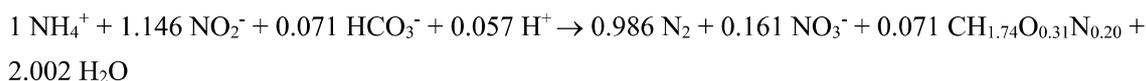
- 1)井上雄三,国立環境研究所研究活動報告,第188号.
- 2)武下俊宏,樋口壯郎,花嶋正孝,廃棄物学会研究発表講演論文集,1224-1226,2004
- 3) C. Plaza, Q. Xu, T. Townsend, G. Bitton and M. Booth,Journal of Environmental Management, Vol.84, No.3,314-322,2007
- 4)正本博士,松清敦史,重松幹二,松藤康司,柳瀬龍二,廃棄物資源循環学会論文集,Vol.23, No.3, pp.144-153,2012.

## 埋立処分場浸出水の超高効率かつ安定した窒素除去を実現するテーラーメイド型 anammox プロセスの開発(その2)

○押木 守、岡部 聡 (国立大学法人 北海道大学)

### 1. 研究背景および目的

管理型最終処分地から発生する浸出水は、生物易分解性有機物濃度が低い(BOD <200 mg/L)一方、高濃度のアンモニア性窒素(250 mg/L)、無機塩類 (例えば, Ca 2,000 mg/L, Cl<sup>-</sup> 10,000 mg/L)を含有している. 従って、浸出水の適切な処理は閉鎖性水域における富栄養化現象の防止、ひいては流域の水環境保全のために不可欠である. 浸出水処理として従来生物処理(硝化・脱窒法)が適用されてきたが、メタノール添加を伴うこと、余剰汚泥発生量が多いこと、温室効果の強い N<sub>2</sub>O ガスを発生することが問題視されている. 管理型最終処分地の埋立てが終了した後も省令にて定められる廃止基準に適合するまでの長期間にわたり浸出水処理は継続されるため、省コストかつ温室効果ガス排出量に配慮した浸出水処理技術が強く求められている. 嫌気性アンモニウム酸化(anaerobic ammonium oxidation, anammox)プロセスは、以下のような量論反応で進行する微生物反応であり、1990 年代に下水処理場から発見された比較的新規な生物プロセスである.



Anammox反応は、従来の硝化・脱窒法と比べて、1) 省エネルギー(曝気動力を6割削減)、2) 余剰汚泥発生量が少ない(7割削減)、3) 脱窒反応のための電子供与体の投与が不要、4) 温室効果ガス(N<sub>2</sub>O)発生量が少ないという特徴を有し、次世代型窒素除去技術として社会実装が進められている.

本研究の目的は、埋立処分場浸出水への嫌気性アンモニウム酸化(anammox)プロセスの適用を念頭にanammox細菌の増殖・競合に及ぼす塩濃度の影響を明らかにすることにある. 本年度は塩濃度がanammox細菌の増殖・競合に及ぼす影響を中心に調査を進めた. 具体的には、1) 異なる塩濃度で運転する膜分離型anammoxリアクター内でのanammox細菌の競合をモニタリングする試験、2) anammox細菌の塩濃度耐性を決定する細胞内浸透圧調整機構を解明する実験、3)異なる塩濃度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度条件下でのanammox細菌の増殖速度を表現する数学モデルの構築を行った.

### 2. 調査研究方法

#### 2.1 Anammox細菌の培養

本研究ではanammox細菌 *Candidatus Brocadia sinica* (*Brocadia*属), *Ca. Kuenenia stuttgartiensis* (*Kuenenia*属), *Ca. Jettenia caeni* (*Jettenia*属), *Ca. Scalindua sp. husus a-7* (*Scalindua*属)を調査に用いた. Anammox細菌の培養には2L容積の膜分離型リアクター(MBR)を用いた. 膜分離ユニットとして中空糸膜(ポリエチレン製, 0.1 μm 孔径)ユニットをリアクター内に設置し、微生物細胞をリアクター内に完全に滞留させた状態で連続運転を行った. ペリスタルティックポンプMP-1000 (Eyela)で連続的に基質を供給し、リアクター内の水位は水位センサー(HL-S1A, アズワン)と連動させたペリスタルティックポンプで一定に調整した. 嫌気条件を保つ目的でMBR内は連続的にAr:CO<sub>2</sub>ガス(95:5)でパージした. pH調整は行わず、水温は室温(25°C)とした. MBRへ供給した基質は以下の組成である: CaCl<sub>2</sub> (86 mg L<sup>-1</sup>), MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O (99 mg L<sup>-1</sup>), KHCO<sub>3</sub> (500 mg L<sup>-1</sup>), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (24.4 mg L<sup>-1</sup>), 0.5 mL

---

押木 守 〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目 北海道大学工学部 A棟 A3-12号室  
011-706-7597/oshiki@eng.hokudai.ac.jp [キーワード: 浸出水, 排水処理, 窒素除去, anammox]

trace element solution I, 0.5 mL trace element solution II. ここへ等モル量のNH<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>およびNaNO<sub>2</sub>を添加し、窒素負荷を調整した. 塩濃度の調整は人工海水SEALIFE (マリンテック)の添加によって行った. 本MBRを用いて各anammox細菌を培養することで, 全菌の9割以上をanammox細菌が占めるような高度集積物を得ることができ, 本バイオマスを以下の試験へ供した.

## 2.2 異なる塩濃度におけるanammox細菌の競合: MBRを用いた長期競合試験

2種類以上のanammox細菌を1個のMBR内で連続培養し, 各anammox細菌の存在量の変動を遺伝子定量によってモニタリングした. 上述のMBRから培養液を採取し, 2種類以上のanammox細菌が等量存在するように培養液を植菌したMBRを新たに運転した. この際, 各MBR培養液中のanammox細菌の存在量は, 後述する方法で事前に遺伝子定量し, 16S rRNA遺伝子コピー数が同量となるように植菌した. 基質中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度は, 運転当初は2~4 mM (窒素負荷 0.06~0.12 kgN m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>)とし, anammox活性に応じて10 mMずつ段階的に上昇させた. MBRの運転条件は基質中の塩濃度, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度が異なる以外は上述のMBRと同様の運転条件とした. 遺伝子定量について, anammox細菌の存在量を定量する目的で, 16S rRNA遺伝子コピー数を定量PCR法で定量した. 定期的にバイオマス懸濁液1 mLを採取し, 遠心分離で集菌した. 集菌で得られたバイオマスペレットからゲノムDNAをFastDNA SPIN Kit (Qbiogene)を用いて抽出した. 抽出DNA中の*B. sinica*, *K. stuttgartiensis*, *Scalindua* sp.の16S rRNA遺伝子コピー数を定量PCR法(TaqMan probe法)で定量した. 検量線は各anammox細菌の16S rRNA遺伝子を含むプラスミドDNAを10<sup>5</sup>~10<sup>8</sup> copies/μLとなるように段階希釈して調整した.

## 2.3 浸透圧調整機構の解明: 細胞内K<sup>+</sup>, トレハロース, グルタミン酸, グルタミン濃度の定量

Anammoxの細胞内で蓄積される浸透圧調整分子を同定する目的で<sup>1</sup>H-NMR測定を行った. Anammox菌体を凍結乾燥し, 重水D<sub>2</sub>O下に懸濁させた後, <sup>1</sup>H-NMR測定へ供した. 比較標準物質として, トレハロース, ベタインのNMR測定を行い, ピークシフト, ピークの一致度から同定を行った.

浸透圧調整分子の定量として, K<sup>+</sup>, トレハロース, グルタミン酸, グルタミン濃度を定量した. K<sup>+</sup>は融合結合プラズマ(ICP)発光分光分析法, トレハロースは<sup>1</sup>H-NMR法および酵素アッセイ法(Trehalose Assay Kit, Megazyme), グルタミン酸, グルタミンは酵素アッセイ法(Glutamine Assay Kit, 同仁化学)で定量した. タンパク質濃度はLowry法(DC-protein assay kit, Bio-rad)で定量し, 標準物質には牛血清アルブミンを用いた.

## 2.4 Monod式によるanammox細菌増殖速度のモデリング

Monod式(下式)により, 異なる基質濃度でのanammox細菌の増殖速度を計算した. 計算によって得られた増殖速度 $\mu$ へ各塩濃度での相対anammox活性を乗じ, 各塩濃度での増殖速度を求めた.

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{S+K_s} \quad (\mu: \text{増殖速度 } d^{-1}, \mu_{max}: \text{最大比増殖速度 } d^{-1}, S: \text{NO}_2^- \text{濃度 } \mu\text{M}, K_s: \text{半飽和定数}$$

$\mu\text{M})$

## 3. 結果と考察

### 3.1 異なる塩濃度下での連続競合培養試験によるanammox細菌の塩耐性の評価

2種類以上のanammox細菌を単一MBR内で連続培養し, 両者の存在量を定量PCR法でモニタリングした. 昨年度の試験では*B. sinica*, *J. caeni*および*K. stuttgartiensis*について塩濃度0%で培養を実

施していたが, *Scalindua*を加え, より幅広い塩濃度の範囲で試験を実施した. 試験結果を表1に示す. *Brocadia*属細菌については塩濃度が0%より高い条件では*Kuenenia*, *Scalindua*のどちらよりも増殖が下回った. *Kuenenia*は*Brocadia*および*Scalindua*の中間の位置づけとなり, 塩濃度0.25%~1.5%において, 増殖が上回った. *Scalindua*は3種の中で最も高い塩濃度で増殖が上回り, 特に2.25%以上では*Scalindua*が必ず優占種となった. 表1に示す各塩濃度でのanammox細菌の優占種は昨年度に実施した回分培養試験の結果から推測される関係とほぼ合致しており, 塩濃度がanammox細菌の活性・増殖へ及ぼす影響を明確に示している.

**Table 1 Summary of the long-term competition experiments using MBR.** Asterisk indicates that *Brocadia* did not proliferate well in the MBR at the salinity condition of higher than 0.25%.

Species	Salinity (%)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2	2.25	2.5	3
B ■ vs J ◆ vs K ▲	■	▲	▲							
B ■ vs K ▲	■	▲	▲							
B ■ vs S ●			■※1	■	●					
K ▲ vs S ●						▲	▲	●	●	●

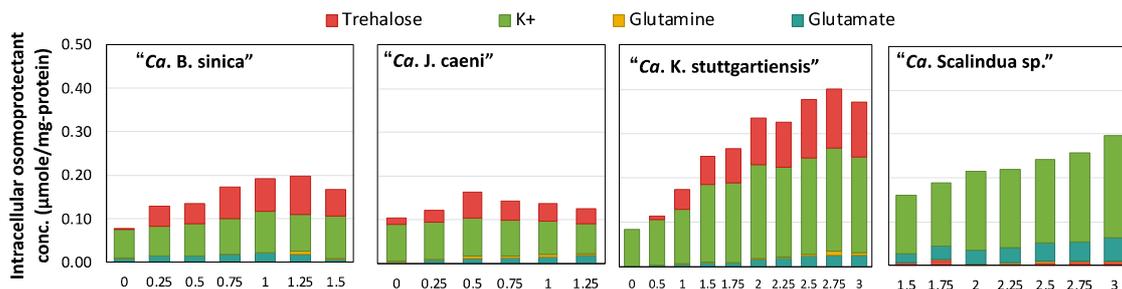
B■: "*Ca. B. sinica*", J◆: "*Ca. J. caeni*", K▲: "*Ca. K. stuttgartiensis*", S●: "*Ca. Scalindua sp.*"

### 3.2 Anammox細菌が塩濃度に応答するための細胞内浸透圧調整機構の解明

前節より, anammox細菌は細菌種に応じて, 至適塩濃度が異なることは明らかである. この背景として, 細胞内浸透圧を調整する機構がanammox細菌種ごとに異なるという仮説を考え, 浸透圧調整に関与する物質の細胞内濃度を測定することを目指した. 先だつて, anammox細菌の細胞内に貯蔵されうる糖類を分析するため, <sup>1</sup>H-NMR解析を行った. 塩濃度1%または1.5%で培養した*Kuenenia*属細菌の菌体からトレハロースおよびベタインと推定されるNMRピークが検出された. また, これらのピーク強度は塩濃度1.5%の方が強く, より多くの量が細胞内に蓄積していたと考えられた.

浸透圧調整に関与する物質として, K<sup>+</sup>, トレハロース, ベタイン, グルタミン酸, グルタミンの細胞内濃度を定量した. 図1に示すように, K<sup>+</sup>およびトレハロースが主要な浸透圧調整物質として検出された. 4種のanammox細菌間で比較すると, 淡水性と考えられる*Brocadia*, *Jettenia*は両者で同じ程度の濃度域を示したのに対し, *Kuenenia*はより高いK<sup>+</sup>濃度を示した. 最も塩耐性が高く, 好塩性であると考えられる*Scalindua*は, K<sup>+</sup>濃度は*Kuenenia*と同程度であるが, 浸透圧調整物質の総量としては*Kuenenia*よりも低かった. これはベタインなど, 今回の定量対象とした物質以外の浸透圧調整物質が*Scalindua*の細胞内では蓄積されていたことを示唆している.

以上より, Anammox細菌の細胞内浸透圧の調整機構を調査した結果, K<sup>+</sup>およびトレハロースの蓄積が主要な浸透圧調整機構であり, 浸透圧調整物質を蓄積できる能力の差がanammox細菌の

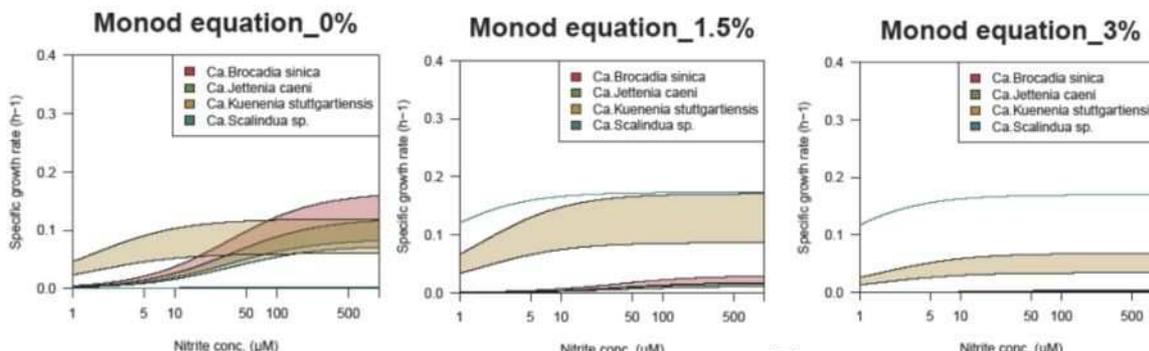


**Fig. 1** Concentrations of intracellular osmolytes. The concentrations of osmolytes were determined by chemical analyses (See Material and methods).

塩耐性の違いを生み出していると考えられる。Anammox細菌の塩耐性機構を化学分析レベルで明らかにした先行研究はなく、本研究で初めて塩耐性機構について詳細な知見を得ることができた。

### 3.3 異なる塩濃度条件でのanammox細菌増殖速度のモデリング

Anammox細菌の増殖速度を異なる塩濃度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度条件でモデリングした。図2に示す通り、異なる塩濃度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度下での各anammox細菌の増殖速度を表現するモデルを構築した。図3で予測される増殖速度の関係は表1に示すanammox細菌の競合関係と合致しており、塩濃度がanammox細菌の増殖に及ぼす影響を表現するモデルとして妥当であると考えられた。



**Fig. 2.** Influence of salinity (0 to 3%) and NO<sub>2</sub><sup>-</sup> concentrations on the growth rates of anammox

## 4. 結論

- 連続競合培養試験において、昨年度に得られた成果を裏付ける成果が得られた。*Scalindua*属細菌は最も塩耐性が高く、続いて、*Kuenenia*, *Brocadia*の順であった。処理対象とする浸出水の塩濃度を事前に測定し、装置のスタートアップに用いるanammox細菌種を選定すべきである。
- Anammoxs細菌は細胞内のK<sup>+</sup>、トレハロース濃度を増加させることで塩濃度に耐性を示す。塩耐性が高いanammox細菌はこれらの蓄積能が高く、至適塩濃度域を決定していると考えられる。
- 塩濃度0~3%条件下でのanammox細菌の増殖速度を表現する数学モデルを構築した。数学モデルは短期・連続培養試験で観察されたanammox細菌の競合関係を表現できており、塩濃度、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度に応じて最も最適なanammox細菌種を推定するために利用することができる。

謝辞: 本研究は令和3年度「廃棄物の適正処理・水処理に係る調査研究助成制度」(課題番号030004)の助成を受けて実施した。ここに記し、深く感謝の意を表す。

## 生ごみと浄化槽汚泥の地域内循環による資源・エネルギー回収手法の開発（その3）

○日高 平（京都大学大学院工学研究科）

戸荻丈仁（公立鳥取環境大学環境学部）

### 1. 調査研究目的

今後の人口減少時代に向けて、生活排水および生ごみなど廃棄物の処理システムの仕組みを抜本的に見直し、ごみ収集も含めた排水・廃棄物管理を最適化し、これまでのエネルギー消費型処理システムではなく、エネルギー回収型システムへ転換することが求められている。本研究では、メタン発酵および肥料利用を組み合わせることで、地域内の資源・エネルギー循環を確立し、遠方への埋立処分削減に貢献するシステムを提案する（図1）。①浄化槽汚泥と生ごみをまとめて回収することを想定した乳酸発酵による生ごみの貯蔵技術、および②混合メタン発酵汚泥の光合成細菌の培養による肥料としての高品質化技術について、③これまでの実験結果をふまえた導入効果を評価することを目的とした。そのために、模擬生ごみの貯蔵および嫌気性消化実験、消化汚泥の肥料価値向上を目的とした光合成細菌の培養実験を行った。

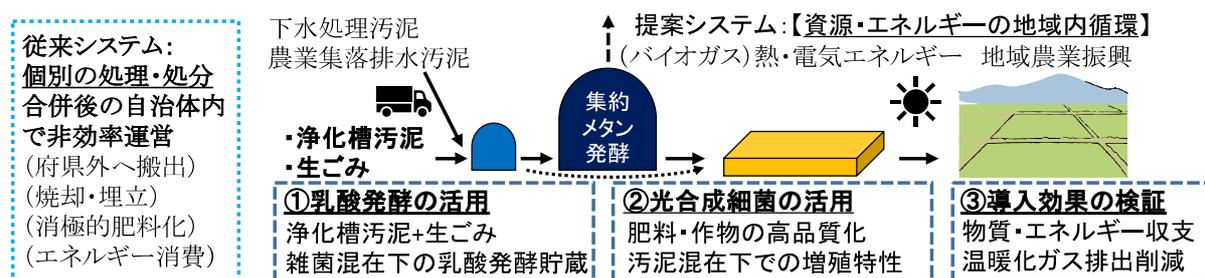


図1 本研究の全体概要

### 2. 調査研究方法

#### (1) 浄化槽での生ごみ貯蔵を想定した貯蔵・嫌気性消化実験およびその導入評価

##### 1.1. 生ごみの連続式貯蔵実験

乳酸発酵環境の持続性を検証するために、乳酸発酵環境を阻害する混合微生物源として浄化槽汚泥を模擬生ごみとともに連続的に投入して貯蔵実験を行った。Run-1では模擬生ごみのみを、Run-2・3では模擬生ごみ+浄化槽汚泥を投入した。そして、貯蔵模擬生ごみを対象とした嫌気性消化実験を行い、メタンガスとして回収可能かを検証した。

日高 平

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻水環境工学分野

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-223

TEL (075)383-3350, FAX (075)383-3351, hidaka.taira.4e@kyoto-u.ac.jp

キーワード：廃棄物系バイオマス、混合嫌気性消化、乳酸発酵、メタン発酵、光合成細菌

## 1.2. 導入効果の評価

提案システムの導入効果の評価として、LCCO<sub>2</sub> 排出量の算定を行った。検討対象としたプロセスは、廃棄物処理工程、排水処理工程およびエネルギー回収工程である。廃棄物処理工程はごみ収集工程、焼却工程、焼却灰運搬工程、埋立工程およびごみ焼却発電工程から構成された。排水処理工程は、浄化槽水処理工程（デイスポージャー処理を含む）、汚泥処理工程（浄化槽汚泥運搬を含む）から構成された。それぞれの工程を建設段階および運用段階に分けて LCCO<sub>2</sub> 排出量を算定した。

### (2) 混合嫌気性消化汚泥を用いた光合成細菌の培養

#### 2.1. 光合成細菌の培養およびコマツナ栽培試験

下水汚泥から集積培養した光合成細菌培養液を植種して、下水混合消化汚泥脱離液に酢酸を添加して、人工気象器内で振盪させながら培養した。光合成細菌の挙動について、*pufM* 遺伝子数の測定を含めて、考察した。肥料効果の検証は、肥料取締法に基づく栽培試験に準じ、ノイバイエルポットにバーミキュライトを充填し、コマツナ“浜美2号”を3週間栽培して行った。

#### 2.2. 導入効果の評価

一般的な小規模処理場を想定して、光合成細菌を用いた消化脱離液の肥料利用を考慮した場合の処理水量および施肥面積を導出することで、光合成細菌を用いた嫌気性消化汚泥の肥料利用の実用性を評価した。

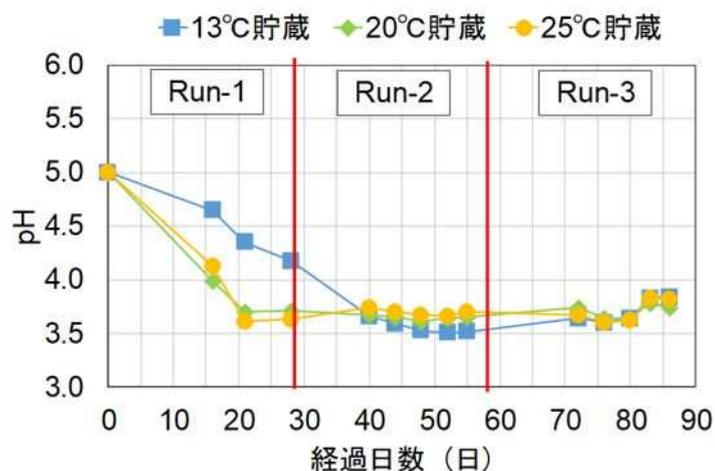


図2 模擬生ごみ貯蔵の連続式実験での pH の経時変化例

## 3. 結果と考察

### (1) 浄化槽での生ごみ貯蔵を想定した貯蔵・嫌気性消化実験およびその導入評価

#### 1.1. 生ごみの連続式貯蔵実験

pH 変化例について、図2に示す。貯蔵温度 20°C および 25°C の条件では、20 日あたりまで pH が下がり続け、その後 3.6~3.8 程度で安定した。貯蔵温度 13°C の条件では、40 日以降に同様の

pH で安定し始めた。pH の低下は投入した模擬生ごみの酸生成により進み、3.6~3.8 程度まで低下した後は酸生成を担う微生物の活性が低下したため、変動が小さくなったと考えられた。

浄化槽汚泥を乳酸菌と競合する細菌源として投入しても、乳酸菌が優占されている状況は崩れず、安定して乳酸発酵が行われていることが確認された。SS が初期状態に比べ 80%程度の値となっており、家庭で発生する生ごみの大部分を浄化槽内に留め、固形性有機物として回収することが可能であると考えられた。嫌気性消化実験では、バイオガス発生率として、0.3 NL/gVS-added 程度の値が得られた。

## 1.2. 導入効果の評価

LCCO<sub>2</sub> 排出量を評価した結果、従来の生ごみと浄化槽汚泥を独立して回収するプロセスに比べ、138 kg-CO<sub>2</sub>/(戸・年) の削減が可能であることが示された。また、浄化槽汚泥の回収頻度の影響を検討した。提案プロセスの排水処理工程における回収頻度と LCCO<sub>2</sub> 排出量の関係を、図 2 に示す。浄化槽汚泥の回収頻度の増加が LCCO<sub>2</sub> 排出量の増加に大きな影響を与えることが示された。

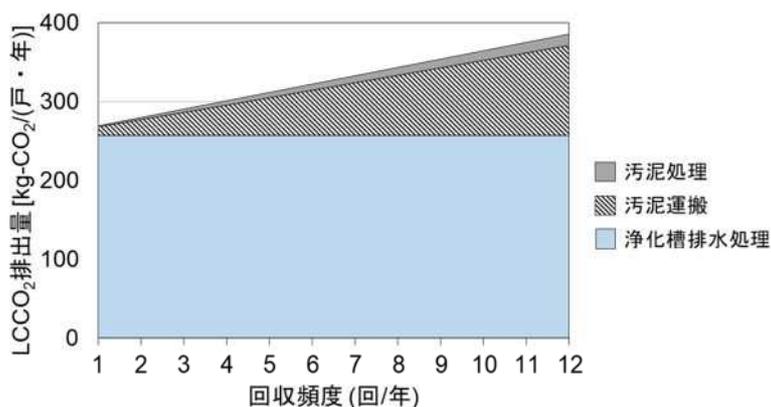


図 2 提案プロセスの排水処理工程における回収頻度と LCCO<sub>2</sub> 排出量の関係

## (2) 混合嫌気性消化汚泥を用いた光合成細菌の培養

### 2.1. 光合成細菌の培養およびコマツナ栽培試験

下水混合消化脱離液に酢酸を基質として添加して培養した際の *pufM* 遺伝子数の経時変化を図 3 に示す。カロテノイド濃度の増加に比例して *pufM* 遺伝子数の増加が確認され、比増殖速度は、0.0116 h<sup>-1</sup>であった。

コマツナ栽培試験の結果例として、新鮮重量について図 3 に示す。CSA4 (光合成細菌を継続培養した混合消化脱離液) と CSD (混合消化脱離液) を比較すると、Tukey 法において 5%水準で有意に差がなかったものの、個別に t 検定を有意水準 5%で行ったところ、有意差が示され、光合成細菌の効果が考えられた。混合消化脱離液で集積培養した光合成細菌を含む培養液は、無機肥料と同等もしくはそれ以上の肥料としての有用性が確認された。

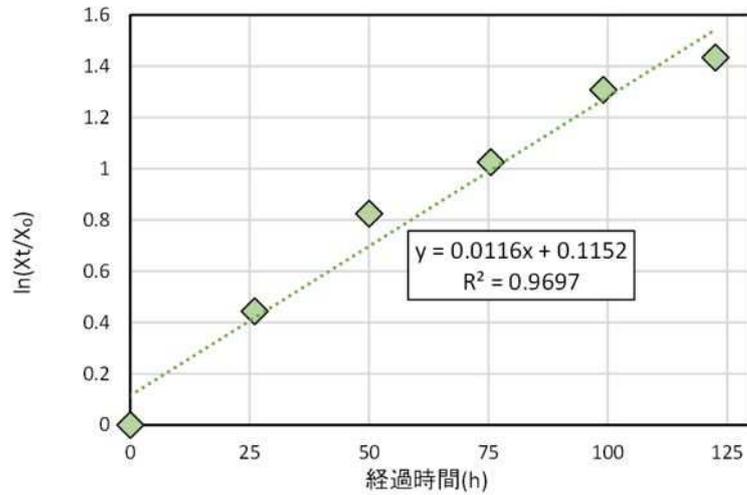


図3 下水混合消化脱離液での培養による *pufM* 遺伝子数の経時変化

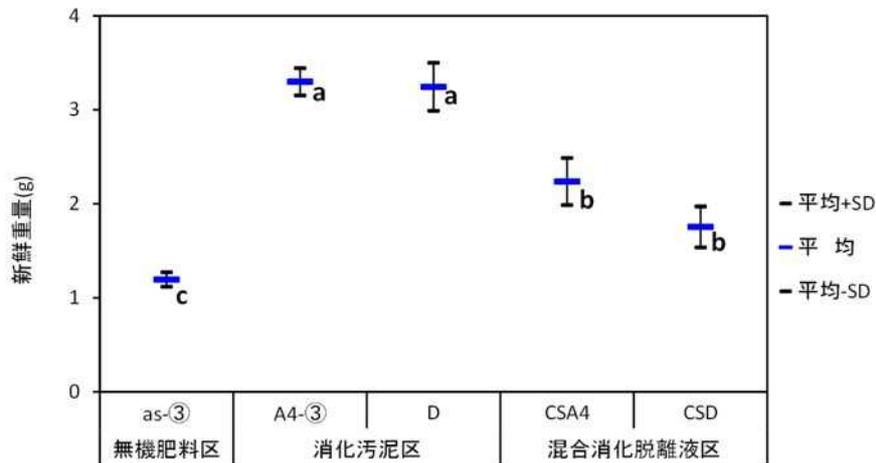


図4 栽培試験における新鮮重量の平均値および標準偏差

## 2.2. 導入効果の評価

光合成細菌を用いた場合に増加する汚泥肥料としての消化脱離液は、発生量および施肥面積の観点において、混合消化汚泥の肥料利用を行っている自治体の事例と比較して、肥料利用の実用性が確認された。

## 4. 結論

以上のように、浄化槽での生ごみ貯蔵および光合成細菌による消化汚泥の高品質化に関して、現場を想定した実験および評価により、提案システムの実現可能性が示された。

## 謝辞

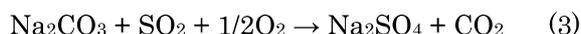
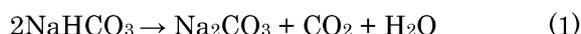
本研究を行うにあたり、実験試料採取において、地方公共団体関係各位の協力を得ております。実験にあたっては、研究室の関係者にお世話になりました。ここに記して、謝意を表します。

# ごみ焼却排ガス処理を目的とした重曹の真空加熱による多孔質薬剤の開発

○黄 仁姫（北海道大学）

## 1. はじめに

ごみ焼却施設における廃棄物エネルギー利用の高度化方策の一つとして高効率乾式排ガス処理技術の開発が求められている。ごみ焼却排ガス中の HCl と SO<sub>x</sub> は、粉末のアルカリ剤をバグフィルター入口の煙道に噴霧し中和除去される。重曹はそのアルカリ剤の一つであるが、国内よりヨーロッパ等での使用実績が多い。反応効率を上げるために 20 μm 程度またはそれ以下に微粉化した重曹を煙道に吹き込むことが一般的であるが、その際に式(1)のように炭酸ナトリウム (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) に分解し、酸性ガスと反応する (式(2)、(3))。式(1)の反応は 140°C 以上で進行するが、180~220°C ではさらに多孔質化が進み反応効率の高いアルカリ剤となる<sup>1)</sup>。



酸性ガスとの反応効率が高いと薬剤の過剰吹込みが要らないために捕集灰量が減少する。また、捕集灰中に未反応の薬剤量も少なくなり、最終処分時に浸出水の高 pH 化を避けることができ、重金属溶出抑制のための安定化処理薬剤の消費量も削減できるメリットがある。しかし、重曹は消石灰と比べコストが高い。その理由として微粉化に相当のエネルギーを使う上に、微粉重曹の貯留槽内での架橋防止のため分散助剤等を添加していることがあげられる。そこで、重曹を微粉化せず、真空加熱処理を行うことであらかじめ多孔質化した炭酸ナトリウムを製造し、酸性ガス除去に用いる方法を検討した。先行研究では粗重曹を 180°C、30kPa で真空加熱し得られた炭酸ナトリウムが微粉重曹から得られた炭酸ナトリウムと同等またはそれ以上の HCl 除去性能を有することを確認した<sup>2)</sup>。本研究では、真空圧、加熱時の昇温速度、長時間の加熱時間が粗重曹から得られる多孔質炭酸ナトリウムの細孔特性に及ぼす影響を調べた。また、先行研究では評価できなかった SO<sub>x</sub> の除去性能を検討し、ごみ焼却排ガス処理に適した多孔質炭酸ナトリウムの製造条件を見出すことを目的とした。

## 2. 研究方法

試料として用いた粗重曹と微粉重曹の平均粒子径と比表面積は、247μm、0.108m<sup>2</sup>/g と 22μm、3.061m<sup>2</sup>/g である。粗重曹の多孔質化のための製造条件として、真空圧、昇温速度、加熱継続時間を検討した。真空圧は 2~101kPa (常圧) の範囲で調節した。加熱温度はバグフィルターの運転条件より 180°C と、180°C までの昇温速度は、約 0.7、1.5、7°C/min の 3 パターンとした。加熱継続時間は設定温度での加熱時間として 0.5~24h とした。図 1 に実験に用いたラボスケール装置を示す。先行研究より SUS 製の反応容器のサイズを大きくし、ボックス型ヒーター内で加熱する方式に装置を改良した。反応容器に粗重曹 40g を入れ、キャップを閉め、密閉した後にヒーター内に設置する。真空ポンプの電源を入れ、真空引きを開始し、反応器内の圧力を制御しながら昇温する。180°C に至ると一定時間加熱処理を行う。また、比較のため、微粉重曹を 180°C、常圧下で加熱し作成した炭酸ナ

---

黄 仁姫 (ファン インヒー)

【連絡先】 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究院 環境工学部門

廃棄物処分工学研究室、Tel./fax: 011-706-6827、E-mail: [hwang@eng.hokudai.ac.jp](mailto:hwang@eng.hokudai.ac.jp)

【キーワード】 ごみ焼却、乾式排ガス処理、重曹、多孔質炭酸ナトリウム、真空加熱

トリウムを用いた（以下 REF とする）。

各試料の比表面積は Autosorb (6AG、ユアサイオニクス) より測定した。ガラスセルに試料を入れ、窒素ガス吸着を行い、multi-point BET 法より比表面積を、BJH 法により細孔分布を求めた。試料の表面形状は、高分解能電界放射型走査型電子顕微鏡 (JSM-7400F、日本電子) で観察した。製造した炭酸ナトリウムの酸性ガス除去試験は、SUS 製の反応管内に試料を充填し、180℃で 360ppm の SO<sub>2</sub> ガスまたは 1830ppm の HCl ガスを一定時間反応させ、未反応ガスは吸収液に吸収させた。排ガス中の水分が酸性ガス除去に及ぼす影響を調べるための実験では、排ガス流量に対する水蒸気添加率が 20 vol% となるよう、一定流量の蒸留水を水蒸気発生装置に注入した。反応終了後、吸収液を回収し、陰イオンクロマトグラフィー (IC2010、TOSOH) で濃度を測定し、ガス入口濃度との関係から、ガス除去率を求めた。

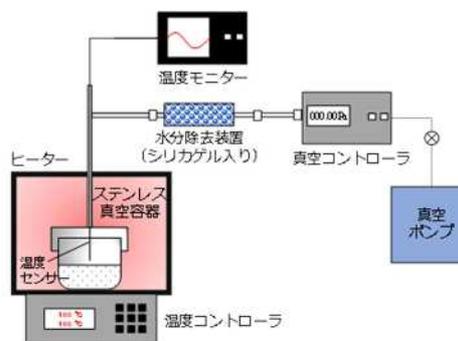


図1 ラボスケール実験装置

### 3. 結果と考察

#### 3.1 真空圧の比表面積への影響

図2に昇温速度 1.5℃/min、加熱維持時間を 0.5h に固定し、圧力を 2~101kPa で変化させた時の比表面積の結果を示す。先行研究同様、真空度が高くなると、比表面積は大きくなる。90kPa の低い真空度でも、常圧加熱したものと比べ、比表面積は大きくなる。4kPa 以下になるとその傾向は顕著となり、微粉重曹を加熱して得られたものより比表面積が大きくなった。

#### 3.2 昇温速度と加熱継続時間の比表面積への影響

図3に圧力 101、51、4kPa の3条件に対し、加熱継続時間を 0.5h にし、昇温速度を変えた時の炭酸ナトリウムの比表面積を示す。どちらの圧力でも昇温速度による比表面積の違いは見られなかった。次に、圧

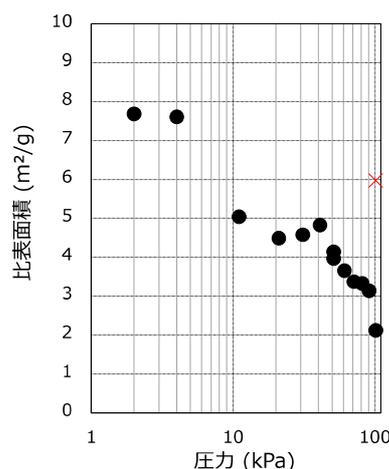


図2 圧力と比表面積の関係

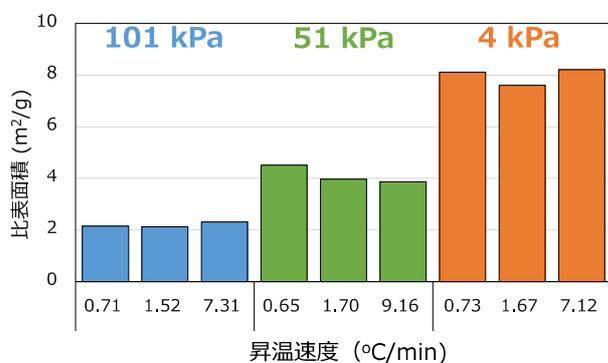


図3 昇温速度と比表面積の関係

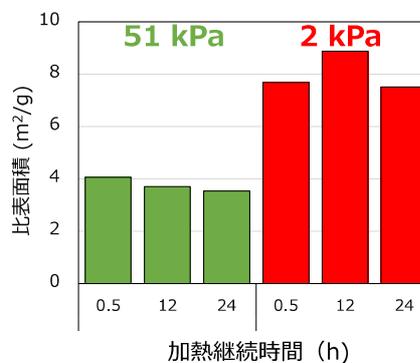


図4 加熱継続時間と比表面積の関係

力を 51 と 2kPa の 2 条件に対し、昇温速度を 1.5°C/min にして加熱時間を 12h と 24h に延長した時の比表面積の増加可能性を調べた (図 4)。2kPa、12h 下で得られた比表面積が、0.5h、24h 加熱で得られたものと比べやや増加したが、その増加分は 16%とわずかであった。50kPa では時間延長により、ほとんど比表面積が変わっていないことから、加熱時間が比表面積に与える影響は限定的であると判断した。以上より、今回検討した条件のうち、真空圧が炭酸ナトリウムの比表面積に最も影響していることがわかった。

### 3.3 製造した炭酸ナトリウムの細孔特性

図 5 に常圧加熱と真空加熱で得られた炭酸ナトリウムの SEM 画像を示す。どちらも多孔質化が進んでいることが見受けられる。細孔はミクロ孔 (2nm 以下)、メソ孔 (2~50nm)、マクロ孔 (50nm 以上) に分類される。画像のスケールからマクロ孔の形成を確認できるが、真空加熱で得られた炭酸ナトリウムの表面により細かい細孔が発達していることがわかった。

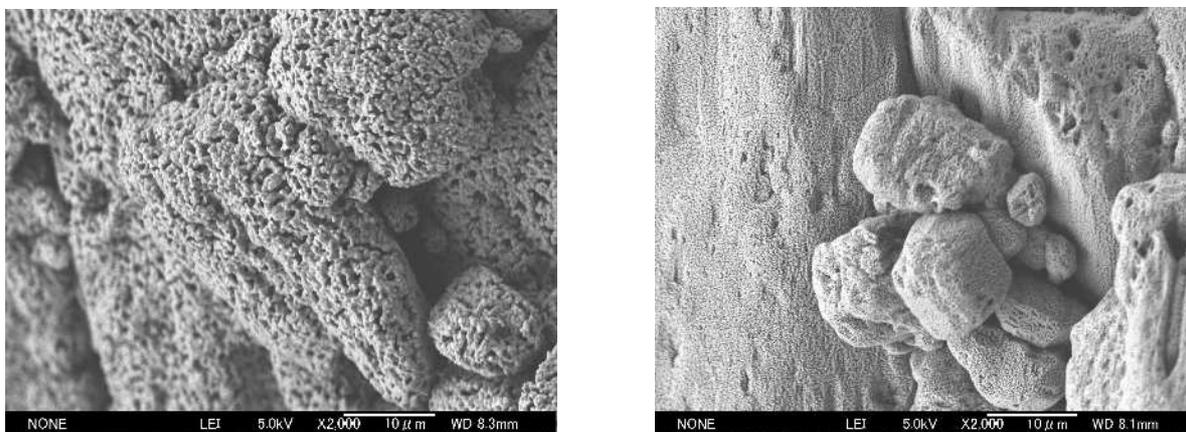


図 5 粗重層から製造した多孔質炭酸ナトリウムの SEM 画像  
(左 : 101kPa 常圧加熱、右 : 2kPa 真空加熱)

ここで、常圧加熱と真空加熱で得られた炭酸ナトリウムのメソ孔分布を BJH 法より解析した。その結果を図 6 に示す。2kPa の真空加熱で得られた炭酸ナトリウムには 3~20nm のメソ孔が最も多く分布していることが確認できる。SEM 画像より常圧加熱した試料には大きい細孔が、真空加熱した試料には小さい細孔が発達していることが観察できたが、細孔分布の解析結果でも同様の傾向が見られた。真空度の高いほど (低圧のほど) 重曹の分解で生成した CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O ガスが固体表面から放出しやすくなり、より細かい細孔が発達したと推察した。

### 3.4 酸性ガス除去性能の評価

図 7 に製造した炭酸ナトリウムの比表面積と SO<sub>2</sub> 除去率の関係を示す。比表面積が大きくなるにつれ、

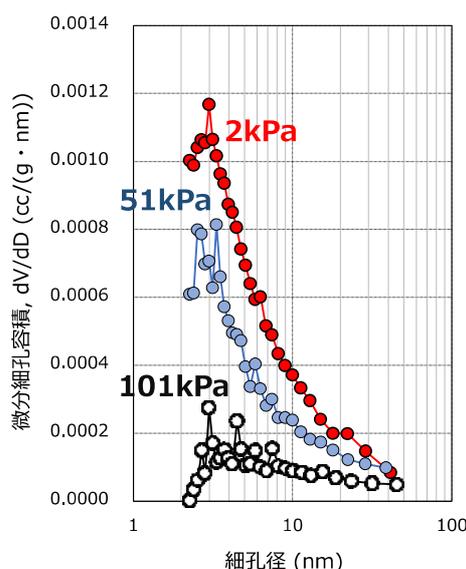


図 6 炭酸ナトリウムの細孔分布

除去率も増加傾向を示し、大よそ比表面積  $4\text{m}^2/\text{g}$  以上で微粉重曹の常温加熱したものと同様またはそれ以上の  $\text{SO}_2$  除去性能を持つことがわかった。次に、排ガス中の水蒸気が酸性ガス除去に及ぼす影響を調べるために、排ガスに対する水蒸気添加率 20% の条件で  $\text{HCl}$  および  $\text{SO}_2$  除去試験を行った。図 8 に示すように、水分添加によって  $\text{HCl}$  と  $\text{SO}_2$  ともに除去率が高くなる結果となった。多孔質炭酸ナトリウムの表面に付着した水分に酸性ガスが捕捉されやすくなり、除去率が向上した可能性が考えられるが、そのメカニズムについては今後さらなる検討が必要である。

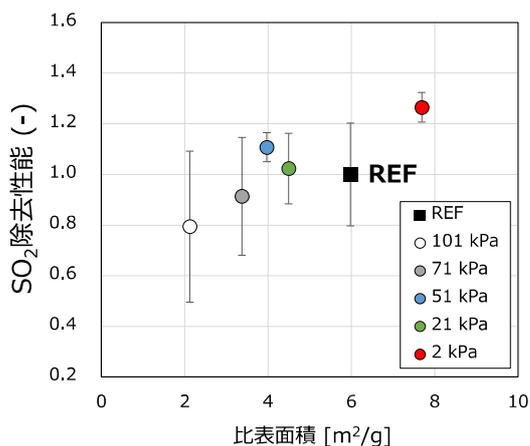


図 7 比表面積と  $\text{SO}_2$  除去率の関係  
( $180^\circ\text{C}$ 、排ガス中水分なし)

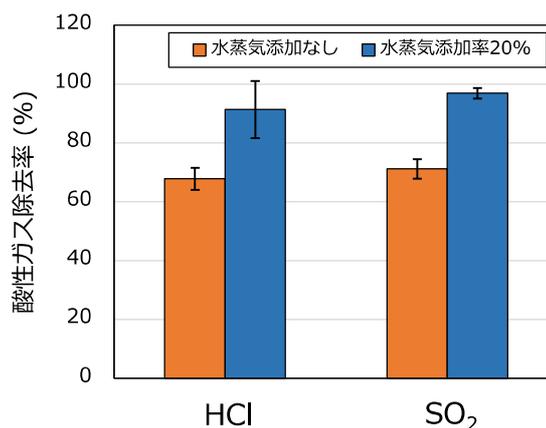


図 8 水分有無と酸性ガス除去率の関係  
( $51\text{kPa}$  で製造した多孔質炭酸ナトリウム)

#### 4. 結論

重曹を用いた酸性ガスの乾式処理において、高い除去率を得るために行っていた重曹の微粉化の代わりに重曹を粉砕せず真空加熱し多孔質の炭酸ナトリウムをあらかじめ製造し、酸性ガス処理に用いる方法を検討した。多孔質炭酸ナトリウムの製造条件として、圧力の以外に昇温速度、加熱継続時間も検討したが、比表面積の増加効果は得られず、圧力が多孔質炭酸ナトリウムの比表面積に支配的な製造条件であることがわかった。比表面積  $4\text{m}^2/\text{g}$  以上の炭酸ナトリウムであれば、既存の微粉重曹と同等の酸性ガス除去性能が得られること、なおかつ、そのような多孔質炭酸ナトリウムは粗重曹を  $180^\circ\text{C}$ 、 $50\text{kPa}$  の低真空圧で 30 分程加熱することで製造できることが確認できた。一方、排ガス中の水分の存在が多孔質炭酸ナトリウムによる酸性ガス除去性能を向上する可能性が示唆された。その現象を明らかにするために、今後、多様な排ガス条件（温度、水分濃度など）での酸性ガス除去性能を調べる必要がある。

#### 参考文献

- 1) 倉田ほか：新乾式高効率排ガス処理システムの実証試験、タクマ技報、Vol.10、No.1、pp.40-49、2002.
- 2) In-Hee Hwang et al.: Dry scrubbing of municipal solid waste incineration flue gas using porous sodium carbonate produced via vacuum thermal treatment of sodium bicarbonate、Journal of Material Cycles and Waste Management Research 23、pp.1609-1616、2021.

## 電気化学的プロセスによる廃棄物処分場浸出水の POPs の分解処理技術の開発

○吉田 弦（神戸大学 大学院農学研究科）

矢吹 芳教・伊藤 耕二・亀岡 寛史（(地独) 大阪府立環境農林水産総合研究所）

### 調査研究目的

近年、廃棄物埋立処分場からは PFOA（PerFluoroOctanoic Acid：ペルフルオロオクタン酸）や PFOS（PerFluoroOctaneSulfonic acid：ペルフルオロオクタンスルホン酸）などの POPs を含んだ浸出水が発生していることが明らかになってきた。本研究グループは国内の廃棄物処分場浸出水など環境中の POPs 等の調査を精力的に実施しており、その効率的な分析手法や濃度実態を明らかにしてきた。その中で POPs 廃棄物処理の制度的なあり方の検討が開始されているが、浸出水に残存する POPs 等の現地における適切な処理方法はいまだ開発されていない。活性炭吸着や凝集などにより POPs を除去することが可能ではあるが、吸着や凝集後の化学物質の処理が必要になることが大きな課題である。また、活性炭の場合、その再生コストが高いことなどから最適手法とは言い難い。そのため POPs の分解処理技術が求められる。分解処理としては物理化学的技術である促進酸化法（Advanced Oxidation Processes：AOPs）が優れているが、コスト面の課題が大きい。そこで本研究では AOPs の中でも省エネルギー型の分解処理技術である電気化学的酸化プロセスに着目した。

本研究における最終目標は、国内の最終処分場の浸出水に含まれる残留性有機汚染物質（POPs）の電気化学的除去プロセスを開発することである。電気化学的酸化プロセスが処分場浸出水中の PFOA や PFOS などの POPs の分解特性に及ぼす影響を明らかにすることで、省エネルギー型の処理技術開発の設計指針となるような知見を獲得し、処分場における POPs 等の長期的な適正管理に資することを目指している。これらのことから、本助成における研究目的は、電気化学的酸化処理における PFOA および PFOS の処理特性と、プロセス全体のエネルギー消費量を明らかにすることとした。対象溶液は PFOA を添加した人工廃水と、PFOA と PFOS が含有した廃棄物処分場浸出水とした。

### 調査研究方法

本研究では人工廃水および廃棄物処分場浸出水に対して、電気化学的酸化処理を行った。リン酸緩衝液に PFOA を約 100,000 ng/L となるように添加して、人工廃水とした。関西地区の廃棄物処分場より浸出水を採取して実験に供した。電気化学酸化法では、金属が溶出しない不溶性電極を用いるのが望ましい。本研究では、Ti/Pt および BDD をそれぞれ陽極とした。Ti/Pt は活性電極、BDD は代表的な不活性電極である。Ti/Pt はチタン電極の表面に白金が塗布された電極である。また、BDD はチタン電極の表面にホウ素とダイヤモンドが塗布された電極である。陰極には、Ti プレートを用いた。

---

吉田 弦

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学農学研究科

078-803-5909

yoshidag@person.kobe-u.ac.jp

## 結果と考察

### 電気化学的酸化処理による人工廃水中の PFOA の分解

図 1 に電気化学的酸化処理による人工廃水中 PFOA 濃度の経時変化を示す。初期濃度 97,000 ng/L の PFOA は電気化学処理 1 時間で 6,800 ng/L と大幅に減少した。さらに処理 2 時間で 510 ng/L となり、初期値の 1%未満となった。2 時間以降もわずかに減少傾向が観察され、処理開始 6 時間後の PFOA 濃度は 95 ng/L となった。処理開始 1 時間後の除去率は 93.0%、処理開始 2 時間後の除去率は 99.5%となった。また、処理開始 6 時間後の除去率は 99.9%となった。このことから、BDD を用いた電気化学酸化処理により PFOA の分解が可能であることが明らかになった。

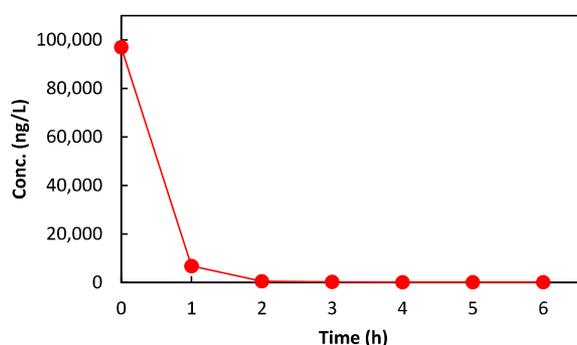


図 1 電気化学的酸化処理による人工廃水中 PFOA 濃度の経時変化

### 電気化学的酸化処理による浸出水中 POPs の分解

図 2 は BDD を陽極に用いた電気化学的酸化処理による浸出水中の PFOA および PFOS 濃度の経時変化を示す。処理開始 3 時間で PFOA は 1,400 ng/L から 80 ng/L まで大きく減少した。このことから、浸出水中の PFOA に対しても人工廃水と同様に、効率的に除去できることが明らかとなった。一方で、PFOS は減少傾向を示したが、その減少速度は 3 時間の処理で 87 ng/L から 53 ng/L までと、PFOA と比較して小さかった。この差異は化合物の種類が影響したものではなく、その初期濃度が影響した可能性が高いと考えられる。動力学的解析より、処理対象物質が低濃度の場合、除去効率が低下することが明らかとなった。PFOA の初期濃度が 1,400 ng/L であるのに対し、PFOS はわずか 87 ng/L であり、この差異により除去率が変化したものと考えられる。

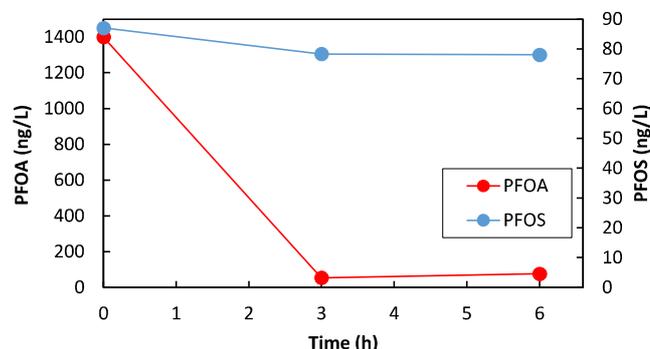


図2 BDD電極を用いた電気化学的酸化処理による浸出水中 POPs 濃度の経時変化

図3にTi/Pt電極を用いた電気化学的酸化処理による浸出水中のPFOAおよびPFOS濃度の経時変化を示す。処理開始3時間でPFOA濃度は1,400 ng/Lから80 ng/Lまで大幅に減少した。一方で、PFOS濃度は87 ng/Lから80 ng/Lとその減少率は小さいものであった。これらの結果は、陽極にBDDを用いた場合と概ね同様の挙動であった。Ti/PtはBDDと比較して、電位窓が小さく生成する酸化剤の酸化力が低いとされる。このことから、PFOAの除去はTi/Ptのような比較的酸化力の低い電極材料を用いることでも、達成できる可能性が示された。これはプロセスの設計コストを抑えることにも繋がると考えられる。

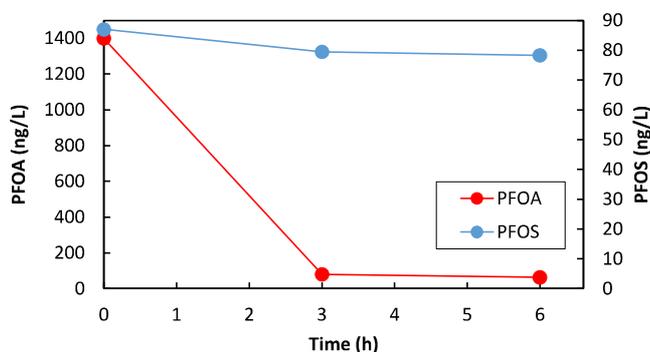


図3 Ti/Pt電極を用いた電気化学的酸化処理による浸出水中 POPs 濃度の経時変化

### 消費エネルギー

浸出水中の POPs 除去において電気化学的酸化処理の適用するために、プロセスのエネルギー消費量を算出した。浸出水の処理におけるエネルギー消費量は溶液 1m<sup>3</sup> あたり、BDDを用いた場合 120 kWh、Ti/Ptを用いた場合 61 kWh となった。また、人工廃水の処理に要するエネルギー消費量は 38 kW/h となった。浸出水の処理において、Ti/PtがBDDよりも少ない消費エネルギー量になった理由は、セルの電位が低かったためと考えられる。セル電位は電極間距離や、電極の抵抗などにより変化する値である。今回使用した BDD 電極を電位が小さくなるように最適化することで、さらなるエネルギー量の削減が期待できる。

## 結論

廃棄物処分場浸出水の POPs 除去プロセスを構築するために、人工廃水および浸出水に対して電気化学的酸化処理を実施し、以下の知見を得た。

- ① PFOA 濃度約 100,000 ng/L の人工廃水に対して BDD を陽極に用いた電気化学的酸化処理を実施した。処理開始 1 時間後の除去率は 93.0%、処理開始 2 時間後の除去率は 99.5%となった。また、処理開始 6 時間後の除去率は 99.9%となった。このことから、BDD を用いた電気化学的酸化処理により PFOA の分解が可能であることが明らかになった。また、最初の 1-2 時間で大部分の PFOA を除去できることも明らかとなった。ただし動力学的解析により PFOA 濃度が減少すると、処理効率が低下することが示された。
- ② PFOA および PFOS が含まれた浸出水に対して電気化学的酸化処理を実施した。陽極が BDD、Ti/Pt いずれの場合でも、処理開始 3 時間で PFOA は 90%以上減少した。このことから、浸出水中の PFOA に対しても人工廃水と同様に、効率的に除去できることが明らかとなった。一方で、PFOS は減少傾向を示したが、その減少速度は PFOA と比較して小さかった。この差異は化合物の種類が影響したのではなく、初期濃度が影響した可能性が高いと考えられる。
- ③ 浸出水中の POPs 除去において電気化学的酸化処理の適用するために、プロセスのエネルギー消費量を算出した。浸出水の処理におけるエネルギー消費量は溶液 1m<sup>3</sup>あたり、BDD を用いた場合 120 kWh、Ti/Pt を用いた場合 61 kWh となった。また、人工廃水の処理に要するエネルギー消費量は 38 kW/h となった。PFOA1g あたりのエネルギー消費量は、BDD を用いた場合 89 kWh、Ti/Pt を用いた場合 47 kWh となった。また、人工廃水の処理に要するエネルギー消費量は 0.42 kW/h となった。

以上から、電気化学的酸化処理により PFOA に代表される浸出水中の POPs を除去できる可能性が示された。一方で対象物質の濃度が低い場合は処理性能が低下し、エネルギー消費量が大きくなることが示唆された。そのため、他のプロセスとの組み合わせも検討する必要があると考えられる。また、種々のパラメータと分解特性の関係を解明することで、現地で運用可能なプロセスの構築を目指す必要がある。