

## 〈論文〉

都市ごみ処理施設および一般廃棄物埋立処分場からの  
排水に含まれるマイクロプラスチックの排出特性河合 泰志<sup>1)</sup>, 大下 和徹<sup>2)</sup>, 日下部 武敏<sup>3)</sup>, オルゼック・シルビア<sup>4)</sup>  
田中 周平<sup>5)</sup>, 高岡 昌輝<sup>6)</sup>, 藤原 拓<sup>7)</sup><sup>1)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-3-467 E-mail: kawai.taishi.53x@st.kyoto-u.ac.jp)

<sup>2)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-3-463 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

<sup>3)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-3-462 E-mail: kusakabe.taketoshi.2w@kyoto-u.ac.jp)

<sup>4)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-3-182 E-mail: oleszek.sylwia.2r@kyoto-u.ac.jp)

<sup>5)</sup> 京都大学大学院地球環境学堂

(〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学 総合研究 3 号館 2F E-mail: t-shuhei@eden.env.kyoto-u.ac.jp)

<sup>6)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-3-461 E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp)

<sup>7)</sup> 京都大学大学院工学研究科

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター 1-2-222 E-mail: fujiwara.taku.3v@kyoto-u.ac.jp)

## 概 要

近年問題となっているマイクロプラスチック (MPs) について, 都市ごみ処理施設 1 か所, 一般廃棄物埋立処分場 2 か所の原水や処理水等に含まれる 100  $\mu\text{m}$ ~5 mm の MPs を調査した。各排水試料中 MPs 個数濃度は 0.032 個/ $\text{m}^3$ ~ $2.1 \times 10^6$  個/ $\text{m}^3$  の範囲にあり, 排水処理により 57~99.99% が除去されていた, MPs 排出削減には凝集沈殿では不十分で, 砂ろ過やキレート樹脂塔が有効であると考えられた。日本全国の都市ごみ処理施設, 一般廃棄物埋立処分場からの排水経路での年間 MPs 排出インベントリは, 一般廃棄物埋立処分場で  $1.0 \times 10^6$ ~ $2.4 \times 10^6$  個/年, 都市ごみ焼却施設で  $4.1 \times 10^7$  個/年と算出され, 下水処理場からの処理水経路での年間 MPs 排出インベントリに比べて, 1/1,000 から 1/100 程度小さく, 現時点では影響は小さいと推測された。

キーワード: マイクロプラスチック, 都市ごみ処理施設, 排出原単位, 一般廃棄物埋立処分場, インベントリ

原稿受付 2021.6.25 原稿受理 2021.8.11

EICA: 26(2・3) 68-80

## 1. 研究背景と目的

近年, マイクロプラスチック (MPs) が海洋汚染で問題になっている。MPs とは粒径 5 mm 以下のプラスチック粒子であり, 災害, 河川や海洋への投棄, 工業活動からの排水に含まれるなどして海洋に直接排出されたプラスチックや, それらが日光により劣化したり海岸砂との摩擦による物理的刺激が加わったりして微細片化したものである。2050 年には世界全体で海洋中のプラスチックの重量と魚の重量が同程度になると予測され<sup>1)</sup>, また MPs については生態系への影響の可能性も懸念されており<sup>2)</sup>, MPs の流出・蓄積を抑止するための発生源や流出経路の特定と対策が急務となっている。

特に, 最近では都市ごみの焼却や埋立などが新たな MPs の発生源となることを示唆する報告がなされて

いる。Yang ら (2021) は, 中国の 17 カ所の都市ごみ焼却施設から発生する焼却灰中の 50  $\mu\text{m}$  以上の MPs を調査し, 都市ごみ 1 トンあたり 360 個から 102,000 個の MPs が焼却灰経路で発生し, その再利用や埋立により環境中に放出される可能性に言及している<sup>3)</sup>。また焼却灰だけではなく, 日本の都市ごみ焼却施設においては, ごみピット汚水, プラットフォームなどの場内床洗浄排水, 作業員の生活排水, ごみ収集車の洗浄水, 場合により併設されている粗大・不燃ごみの破碎施設や, PET ボトル, 容器包装プラリサイクル施設からの排水など<sup>4)</sup>, MPs が含まれる可能性が十分にある排水が発生している。さらに近年では, 紙類や厨芥類を対象としたメタン発酵と, その他の廃棄物の焼却を組み合わせたメタンコンバインド方式の採用が増えつつあるが, 紙類, 厨芥類の分離は多くの場合機械的になされ, メタン発酵槽にプラスチックも

混入するため<sup>5)</sup>、その排水にも MPs が含まれていると推測される。しかしながら日本における都市ごみ処理施設からの MPs の排出状況は、現在のところ不明である。

また、He ら (2019) は、中国の都市ごみの直接埋立処分場 6 箇所 (うち閉鎖 2 箇所) の浸出水中の 25 μm 以上の MPs を調査し、0.42~24.58 個/L の MPs が存在しているとし、埋立処分場はプラスチックの Final Sink ではなく、MPs の潜在的な発生源として無視できないことを指摘している<sup>6)</sup>。日本における都市ごみの埋立処分場においては、焼却残渣の埋立が主体ではあるが、中国では焼却灰中に MPs が含まれており<sup>3)</sup>、日本においてもこの可能性を否定できないことも考えると、浸出水経路での潜在的な発生源となり得るが、これらの浸出水中の MPs に関する情報は報告されていない。

そこで、本研究では、日本における都市ごみ処理施設、および一般廃棄物埋立処分場 (以下、本論文では「埋立処分場」と記述する) からの排水に含まれる MPs の排出特性を明らかにすることを目的とした。具体的には、都市ごみのメタンコンバインド方式 (焼却+メタン発酵) の処理施設、および埋立処分場に関しては、焼却残渣を中心として埋め立てられた古い閉鎖施設、および稼働中の比較的新しい施設を対象に、各施設から排出される排水 (原水、処理水) 中の MPs の個数濃度、種類、各施設が有する排水処理プロセスでの除去挙動を明らかにした。また、これらの施設の都市ごみ処理量や排水量から、MPs の排出原

単位を概算し、MPs の排出インベントリを推定、考察した。

## 2. 調査方法

### 2.1 調査対象施設の概要とサンプリングポイント

埋立処分場 2 箇所 (A 埋立処分場、B 埋立処分場) と都市ごみ処理施設 1 箇所 (C 都市ごみ処理施設) を調査対象とした。これらは、同一の自治体により設置、運営されている施設である。概要を **Table 1** にまとめ、以下に詳細を述べる。

#### (1) 埋立処分場

A 埋立処分場と B 埋立処分場における浸出水の原水と処理水を調査対象とした。A 埋立処分場は埋立面積約 240,000 m<sup>2</sup>であり、年間 3.9×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>の処理水を放流している。2000 年に埋立が開始されており、埋立物の組成としては、焼却残渣 (主に、C 都市ごみ処理施設や本自治体の他の都市ごみ処理施設に由来) と、石膏ボードやがれきなどの持込ごみを受け入れてきたが、2009 年 10 月に持込ごみの受け入れを廃止している。現在では、焼却残渣に比べれば少量ではあるが、ガラスや陶器類、汚泥 (側溝や河川管理で出てくるもの) 等も搬入している。浸出水処理としては炭酸ナトリウム添加によるアルカリ凝集沈殿による Ca 除去の後に砂ろ過を行っている。また、B 埋立処分場は、埋立面積約 360,000 m<sup>2</sup>であり、年間 2.0×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>の処理水を放流している。1975 年に埋立が開始され、2000 年で埋立が完了しており、現在は閉鎖されてい

**Table 1** Configurations and capacity of sampling facilities and sampling points

施設名		A 埋立処分場	B 埋立処分場	C 都市ごみ処理施設		
埋立面積または施設規模		埋立面積 240,000 (m <sup>2</sup> )	埋立面積 100,000 (m <sup>2</sup> )	焼却規模: 500 (t/日) メタン発酵規模: 60 (t/日)		
調査対象 排水	種類	浸出水	浸出水	メタン発酵排水	プラント排水	洗煙排水
	処理水量 (m <sup>3</sup> /年)	3.9×10 <sup>5</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>	3.6×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>4</sup>
排水処理フロー (サンプルに下線)	原水	原水	原水	一次脱水 (スクリー プレス脱水)	原水 (P1)	原水 (W1)
	↓ Ca 除去 ↓ 砂ろ過 ↓ 処理水 ↓ 放流	↓ 高速凝集 ↓ 処理水 ↓ 放流	↓ 一次脱水ろ液 (M1) ↓ 砂除去凝集 ↓ 二次脱水 (遠心脱水) ↓ 二次脱水ろ液 (M2) ↓ 硝化・脱窒膜処理 凝集沈殿砂ろ過 ↓ 処理水 (M3) ↓ 放流	↓ 凝集沈殿砂ろ過 消毒 ↓ 処理水 (P2) ↓ 放流	↓ 凝集沈殿砂ろ過 キレート樹脂塔 ↓ 処理水 (W2) ↓ 放流	
放流先	下水道	下水道	下水道	下水道、一部再利用	下水道	
備考			2 回の脱水における脱水残渣もそれぞれ調査 (S1, S2)			

る。埋立物の組成は焼却残渣や土砂がれき等の不燃物であり、可燃物は埋立していなかった。ただし、過去の焼却炉は現在より性能が劣っており、焼却残渣に未燃の生ごみやプラスチックが含まれている可能性がある。浸出水処理としてはポリ塩化アルミニウム (PAC) と高分子凝集剤を用いた高速凝集沈殿処理のみを行っている。

## (2) 都市ごみ処理施設

C 都市ごみ処理施設はメタン発酵施設 (60 t/日) と焼却施設 (500 t/日) のメタンコンバインド型であり、メタン発酵排水 ( $3.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ )、プラント排水 ( $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ )、洗煙排水 ( $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ ) の3つの系列でそれぞれ **Table 1** に示す処理がなされ、最終的に、一部再利用され、下水道に放流されている。メタン発酵排水は、発酵残渣の脱水ろ液が主体である。プラント排水には、灰汚水、場内床洗浄排水、ポイラブロー水、プラットフォーム床洗浄排水、収集車洗浄水、粗大・不燃ごみの破碎施設からの排水などが含まれている。洗煙排水は、焼却施設の湿式排ガス処理装置から発生する排水である。本研究ではこれらの3系列とメタン発酵の脱水残渣を対象として調査した。サンプリングポイントは9箇所、メタン発酵残渣の第一脱水ろ液 (M1)、第二脱水ろ液 (M2)、メタン発酵排水処理水 (M3)、プラント排水原水 (P1)、プラント排水処理水 (P2)、洗煙排水原水 (W1)、洗煙排水処理水 (W2)、およびメタン発酵第一脱水残渣 (S1)、第二脱水残渣 (S2) である (**Table 1**)。

## 2.2 サンプリング方法、および基礎分析

### (1) サンプリング方法

各試料のサンプリング方法や通水量を **Table 2** にま

**Table 2** Sampling method and sample volume

サンプル		サンプリング方法	通水量等 (L)	
A 埋立処分場	原水	目開き 100 $\mu\text{m}$ のネットに通水、別途 20 L 採水	20700	
	処理水	目開き 100 $\mu\text{m}$ のネットに通水、別途 50 L 採水	31200	
B 埋立処分場	原水	目開き 100 $\mu\text{m}$ のネットに通水、別途 10 L 採水	30700	
	処理水	目開き 100 $\mu\text{m}$ のネットに通水、別途 20 L 採水	30500	
C 都市ごみ処理施設	メタン発酵排水	M1	0.04*	
		M2	3.0*	
		M3	3030	
	プラント排水	P1	水槽からポンプを用いて、ホースを通して目開き 100 $\mu\text{m}$ のネットに通水、別途	676
		P2	それぞれ 10 L 採水	2620
	洗煙排水	W1	それぞれ 10 L 採水	3210
		W2		6490
	メタン発酵脱水残渣	S1	それぞれ、1 kg 程度採取	1.48 g*
S2			2.48 g*	

\* MPs 測定のために前処理に用いた量

とめた。方法は試料により異なるため、以下に説明する。なお、本研究ではサンプリングはスポット的に実施したが、時間変動性を考慮するため、将来的にはコンポジットサンプリングが必要である。

2つの埋立処分場では、対象試料の水槽からポンプを用い、ホースを通して目開き 100  $\mu\text{m}$  のプランクトンネット (ナイロンメッシュ (NYTAL) : 13 XX-100) に通水することで試料採取を行った。通水量については、70 L のポリバケツとストップウォッチを用いて採水の前後で流量を測定し、測定時間との積を求め、20,000~31,200 L 程度であった。両処分場ともに最初に処理水の通水を行い、その後原水の通水を実施した。さらに、10 L のポリエチレン製容器を用い、別途基礎分析のための採水を行った。

C 都市ごみ処理施設の排水試料 M1, M2 については、固形物濃度が高かったため、上記と同様の方法で 10 L の採水のみを行い、それぞれ 0.04 L および 3 L を、実験室内で適宜希釈し、プランクトンネットに通水した。排水試料 M3, P1, P2, W1, W2 では、施設にて上記の目開き 100  $\mu\text{m}$  のプランクトンネットによる通水を行った。流量は上記と同様の方法で測定し、通水量は 680~6,500 L 程度と算出された。この施設では、サンプリングでプランクトンネットを通過した排水がすべてプラント排水の原水槽に流入するため、P1 (プラント排水原水) のサンプリングを最初に行い、その後、残りのサンプリングを行った。また同様の方法で別途 10 L の採水を行った。脱水残渣 S1, S2 については各脱水機から 1 kg 程度採取し、実験室内で、それぞれ 1.48 g および 2.48 g を採取した。これらの値は、測定結果のばらつきを抑えること、および個数濃度の測定にかかる労力を考慮して試行錯誤的に決定した。採取後、Milli-Q を用いて試料が均一に分散する程度に希釈して、同様のプランクトンネットに通水した。

なお、ブランク操作として、全てのサンプリング箇所について、サンプリング時に、試料を通水しないプランクトンネットを設置し、前処理、および分析を行ったが、MPs は検出されなかった。

### (2) 基礎分析項目と方法

C 都市ごみ処理施設の脱水残渣 S1, S2 を除く 11 の排水試料については、水温 (赤球温度計)、pH ((株)堀場アドバンスドテクノ製、pH メーター : pH-22B)、電気伝導率 ((株)堀場アドバンスドテクノ製、電気伝導率計 : EC-33) を測定するとともに、蒸発残留物 (Total Solids, TS) および浮遊物質 (Suspended Solids, SS) を下水試験方法に従って測定した<sup>7)</sup>。

### 2.3 MPsの分析方法

各排水試料中のMPsの個数濃度の測定やFT-IRによる定性のためには、MPs以外の、有機物の分解やMPsの比重分離が重要となる。そこで、田中らの方法<sup>8)</sup>にしたがって有機物分解と比重分離等の前処理を行った後、100 μm（長軸）以上、5 mm（長軸）以下のMPsの長軸径、短軸径、個数濃度、および定性分析を実施した。

#### (1) 前処理：過酸化水素による有機物分解、比重分離、および縮分

各サンプルについて行った前処理をTable 3にまとめた。なお、前処理については、実験室内の大気中のMPsのコンタミネーションを防ぐためドラフトチャンバー内で行い、試料を入れたビーカーや容器を静置する際には開口部にアルミホイルで蓋をした。

2つの埋立処分場の排水試料4検体とC都市ごみ処理施設の排水試料M3, P1, P2, W1, W2は、プランクトンネット上の試料をまずMilli-Qを用いて洗浄し、1Lのガラス製密閉保存容器（アズワン（株）製：KP-1000）に移した後、再び目開き100 μmのプランクトンネットで吸引ろ過を行った。その後、プランクトンネット上の試料をH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>（和光純薬：試薬特級、過酸化水素、30%）100~300 mLで1Lのガラス製密閉保存容器に流し込んだ、その後55℃で約1週間静置し有機物分解を実施した。有機物分解の後、吸引ろ過で目開き100 μmのプランクトンネットに再度回収した。

C都市ごみ処理施設の脱水残渣S1は5mmを超える大きなプラスチックごみが複数含まれていたため（Photo. 1）、それらを取り除いてから以下の前処理を行った。C都市ごみ処理施設の排水試料M1, M2および脱水残渣S1, S2について、適量をメスシリンダーあるいは薬さじで測り取った後、同様のプランクトンネットに通水した。その後プランクトンネット上の試料をH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>約300 mLで1Lのガラス製密閉保存

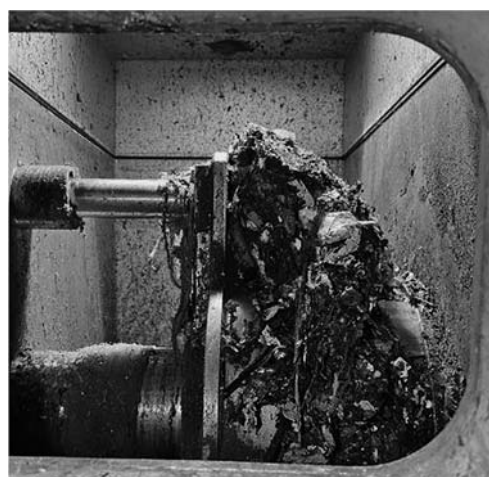


Photo. 1 Dewatered residue (S1) from methane fermentation

容器に流し込んだ。以降は上記と同様の方法で有機物分解、プランクトンネット上への回収を実施した。

有機物分解後の残留物が多かった2つの埋立処分場のサンプルとC都市ごみ処理施設のサンプルM1, M2, P1, W1, S1, S2については、プラスチック以外の無機物を除去するため、NaI水溶液（5.3 M）（和光純薬：FG、よう化ナトリウム）を用いて比重分離を行った。プランクトンネット上のサンプルにNaIを用いて、200 mLビーカーに流し込み10分ほど静置した後、駒込ピペットを用いてプラスチックを含む上澄みをプランクトンネットに回収した。

さらに、上記の前処理後、依然としてプランクトンネット上の残渣が多かったC都市ごみ処理施設の試料M1, M2, S1に対しては四分法を用いて縮分し、その一部を測定した。

#### (2) 実体顕微鏡による長軸径、短軸径、形状および個数濃度の測定

前処理が終わったサンプルをシャーレに移し、実体顕微鏡（（株）島津理化製：STZ-161-TLED）を用いて観察し、短軸径と長軸径を計測した。なお、本調査では、長軸が100 μm未満の粒子や、5mmを超える粒子については対象外とし測定を行わなかった。形状については、目視により各MPsをfragment, sheet, sphere, stick, fiberの5種類に分類することを試みた。sheetは厚みが長軸径や短軸径よりも小さく薄い粒子、sphereは球状の粒子、stickは長軸径が短軸径や厚みより比較的長い棒状の粒子、fiberは繊維状の粒子を表す、さらにこれら4つのいずれにも当てはまらない不規則な形状のものをfragmentと定義した。ただしfiberについてはフーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR）で定性するのが困難であったため、本調査では除外した。ただし、あるMPsにfiberが付着しているものや、繊維が集まり塊になったものはその塊を1つのMPsとみなして測定を行った。なお、結果

Table 3 Pretreatment method of each sample for MPs analysis

対象施設	試料	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	NaI 比重分離
A 埋立処分場	原水	○	○
	処理水	○	○
B 埋立処分場	原水	○	○
	処理水	○	○
C 都市ごみ処理施設	M1	○	○
	M2	○	○
	M3	○	なし
	P1	○	○
	P2	○	なし
	W1	○	○
	W2	○	なし
	S1	○	○
	S2	○	○

における MPs の大きさは、長軸径での大きさを表す。

### (3) FT-IR による MPs の定性

フーリエ変換赤外分光光度計（島津製作所製：FT-IR-ATR, IRSpirit）を用いて各 MPs の定性を行った。まず、バックグラウンド測定を行い、その後試料を台に乗せてサンプルのスペクトルを得た。その後スペクトルライブラリ（ATR-Inorganic2, ATR-Organic2, ATR-Polymer2, 加熱劣化プラスチック）を用い、検出されたスペクトルのピーク数のうち、ライブラリのスペクトルのピークとの一致数を 1,000 点満点に換算したスコアで評価した。具体的には、このスコアが 600 以上の中で最も高い結果を採用することで MPs 成分を同定し、同定できた MPs をカウントした。MPs 以外の無機粒子なども同様の方法でカウントした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 各試料の基礎分析結果

各試料の基礎分析結果を **Table 4** に示す。水温は埋立処分場で 15.0~17.6℃、都市ごみ焼却施設で 22.7~29.0℃であった。pH は全サンプルで 5.17~9.08 の範囲にあった。B 埋立処分場の原水の pH は 9.08 と他のサンプルに比較して高かったが、過去に埋め立てられた焼却残渣に起因するアルカリ成分の影響を受けていると考えられた。また W1 は 5.17 と逆に低かったが、洗煙排水の原水であり、酸性ガス成分の影響を受けていると考えられた。電気伝導率は埋立処分場では各施設の原水と処理水でそれぞれ同程度であったが、都市ごみ焼却施設では 2.05~40.0 mS/cm とサンプルにより様々であった。特に W1, W2 の洗煙排水系が高かったが、酸性ガス中和に伴う塩類を多く含んでいることによると考えられた。SS は原水系では 2.28~18,200 mg/L、処理水系では 0.127~70.1 mg/L であり、各処理の低減効果が窺えた。特にメタン発酵残渣の脱水ろ液 M1, M2 で、それぞれ 18,200 mg/L と 1,730

mg/L と高い値を示し、TS も同様に高かった。W1, W2 も TS は 32,900 mg/L, 19,400 mg/L と高い値を示したが、SS は低く、塩類に起因する溶解性成分の影響を大きく受けているものと考えられた。

脱水残渣の含水率は S1 が 44.9%, S2 で 83.0% であった。S1 の含水率が低かったのは、プラスチック成分が主体であり、脱水性が高かったことに起因するものと考えられる。

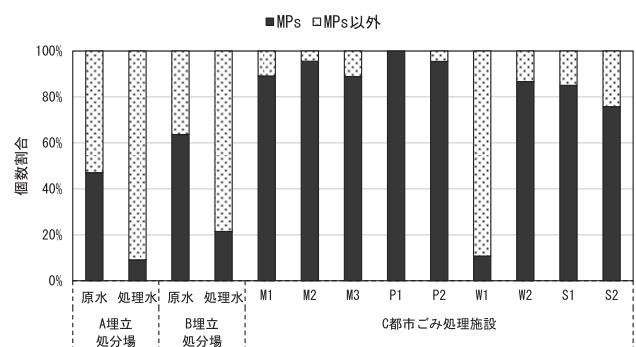
### 3.2 マイクロ粒子中の MPs の割合

まず、各試料における 100 μm 以上 5 mm 以下のマイクロ粒子中の MPs の割合について、**Fig. 1** に示す。比重の大きな粒子は多くのサンプルで NaI により比重分離しており、本結果は、分離後の MPs とそれ以外のマイクロ粒子の比率を示している。図より、埋立処分場では MPs 以外が検出されることが多かった。MPs 以外の成分としては、酸化チタン、SiO<sub>2</sub>、黒変したセルロース等の成分が確認され、これらは燃えがらや覆土を含む埋立物、排水処理装置に使用された鉄、およびコーティング剤の材質等に由来するものと推測された。

一方で C 都市ごみ処理施設では、ほとんどのサンプルで 80% 以上が MPs であった。これは土砂などが混入する可能性が低く、廃棄物に含まれるプラスチックの影響を大きく受けていることによるものと考えられた。この場合も MPs 以外の粒子は、M1, M2, M3, S1 および S2 のメタン発酵排水系については、セルロースや、プロテイン等の有機物系の粒子と CaCO<sub>3</sub> が見られた。特に後者は貝殻などが由来と考えられ、総じて、紙類や、厨芥類の影響を受けているものと推測された。P2（プラント排水処理水）では、水酸化鉄の粒子が観察されたが、プラント排水系にて塩化第二鉄が凝集剤として添加されており、その副生成物の可能性が示唆された。W1（洗煙排水原水）については、MPs の割合が 10% と低かった。これは MPs 以外のマイクロ粒子として、100 μm から 2 mm 程度までの黒色の鉱石のようなものが約 300 個ほど見られたことによる。この物質は、洗煙排水処理系に設置され

**Table 4** Fundamental characteristics of each wastewater sample

対象施設	項目	水温	pH	電気伝導率	TS	SS
	単位	℃	—	mS/cm	mg/L	mg/L
A 埋立処分場	原水	15.8	7.38	7.37	4550	2.28
	処理水	15.0	7.32	7.72	5000	0.127
B 埋立処分場	原水	17.6	9.08	3.32	2030	115
	処理水	16.5	7.99	3.81	4760	1.67
C 都市ごみ処理施設	M1	27.1	7.68	17.3	34900	18200
	M2	27.0	7.74	17.0	11200	1730
	M3	29.0	6.23	10.5	7260	70.1
	P1	22.7	7.02	2.32	439	8.20
	P2	23.1	6.34	2.05	1310	1.67
	W1	26.1	5.17	40.0	32900	29.8
	W2	27.0	7.64	25.2	19400	0.900



**Fig. 1** Ratio of MPs and other micro particles in each sample

た砂ろ過の最上流のろ材として使用されているアンスラサイト<sup>4)</sup>であると考えられた。砂ろ過の逆洗時にこれらの一部が、洗煙排水の原水槽に戻り、サンプリングされたものと推測される。また、このアンスラサイトはW2（洗煙排水処理水）には見られなかったことから、再度砂ろ過に戻り、一部は原水槽との間を循環しているものと考えられる。C都市ごみ処理施設の他の排水系においても、砂ろ過は導入されていたが、アンスラサイトは見られなかった。

### 3.3 検出されたMPsの種類

次に、Table 5に本調査で検出されたMPsの略号、種類と、そのプラスチックの検出された排水系（A埋立処分場、B埋立処分場、C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、プラント排水、洗煙排水）および、これらの2020年におけるプラスチックの国内生産量（t）を示す<sup>9)</sup>。国内生産量の多いPE、PP、PVCは本調査の全ての系列で検出された。同じく生産量の多いPSはC都市ごみ処理施設のみで検出された。検出割合としては、PEが全体の43%、次いでPSが29%、PPが9.5%、PVCが7.4%を占めており、上位4種で全体の89%を占め、順列は少し異なるものの、概ね国内生産量と対応していた。その他、PTFEやEVAなど、国内生産量が比較的少ないプラスチックについては、PURを除き、C都市ごみ処理施設のみで検出され、その割合も低かった。

### 3.4 検出されたMPsの形状

検出された主なMPsをPhoto. 2に示す。これらはすべてfragmentに分類されたものである。(a)はB埋立処分場の原水に含まれる400μmほどの球形に近いPVC粒子で、(b)はC都市ごみ処理施設のM1（第一脱水ろ液）に含まれる長軸が890μm程度の網状のPUR粒子、(c)はC都市ごみ処理施設のP2（プラント排水処理水）に含まれるPE粒子であり、大きさは本調査で検出されたMPsの中でも比較的小さく、500μm未満のものであった。また、(d)はC都市ごみ処理施設のW1（洗煙排水原水）に含まれる4,400μm程度のPP粒子で、本調査で検出された最大のMPsであり、繊維状の物質が混在していた。

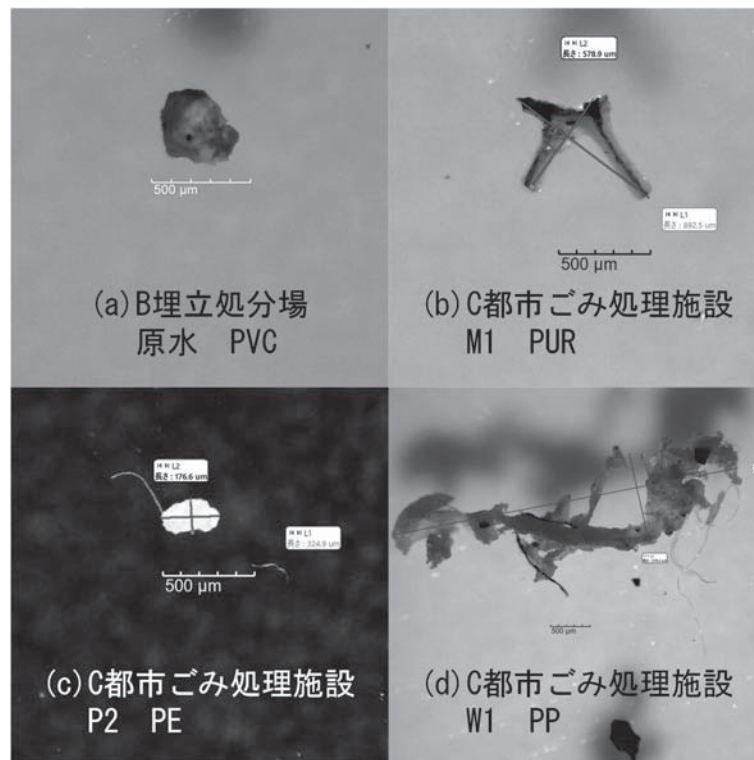
各試料におけるMPsの形状の個数割合をFig. 2に示す。埋立処分場については2箇所ともにfragmentが多くを占めていた。B埋立処分場の処理水ではsheetも存在した。

海外での調査結果と本研究の結果を比較すると、まず形状の分類方法は標準化されてはならず、文献により異なったため、本研究で定義した形状との対応をTable 6に補足し、以下では本研究に対応する区分で表現する。

Yangらの中国における焼却灰に含まれる50μm以上のMPsを対象とした調査では、検出されたMPsを形状により4種類に分類しており、そのなかでもfragmentおよびsphereに相当する区分が高い割合を

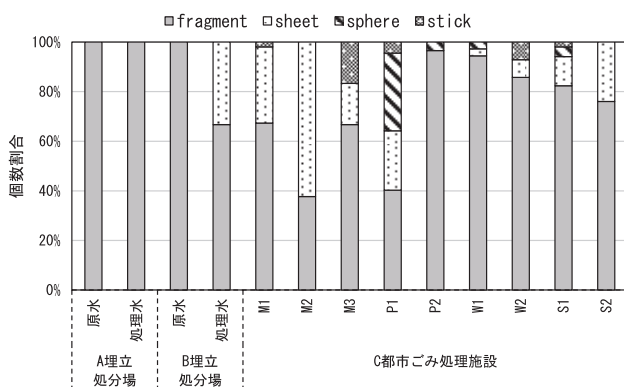
Table 5 Abbreviations, detected process and the domestic production amount of MPs in this study

略号	名称	検出された施設、および処理系列	検出割合 (%)	国内生産量 (t/年)
EP	エポキシ樹脂	C都市ごみ処理施設：洗煙排水	1.3	107,728
EVA	エチレン酢酸ビニル共重合	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水	2.7	176,633
PE	ポリエチレン	A埋立処分場、B埋立処分場 C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、 プラント排水、洗煙排水	43.0	2,069,376
PEs	ポリエステル	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣、洗煙排水	0.63	107,734
PET	ポリエチレンテレフタレート	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水	0.42	485,319
PMMA	ポリメタクリル酸メチル	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣	0.21	129,345
PP	ポリプロピレン	A埋立処分場、B埋立処分場 C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、 プラント排水、洗煙排水	9.5	2,246,815
PS	ポリスチレン	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、 プラント排水、洗煙排水	29	1,057,216
PTFE	ポリテトラフルオロエチレン	C都市ごみ処理施設：メタン発酵排水	0.21	25,066
PUR	ポリウレタン	B埋立処分場 C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、 洗煙排水	3.0	174,916
PVAc	ポリ酢酸ビニル	C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水	2.3	498,571
PVC	ポリ塩化ビニル	A埋立処分場、B埋立処分場 C都市ごみ処理施設：メタン発酵残渣+排水、 プラント排水、洗煙排水	7.4	1,626,549



**Photo. 2** Detected MPs in (a) untreated water at Landfill B, (b) dewatered filtrate (M1) from methane fermentation at MSW treatment plant C, (c) treated plant wastewater (P2) at MSW treatment plant C, and (d) untreated wet scrubber wastewater (W1) at MSW treatment plant C

占めた<sup>3)</sup>。また、He らの中国の埋立処分場浸出水中に含まれる 25  $\mu\text{m}$  以上の MPs を対象とした調査では、



**Fig. 2** Proportion of four different shapes of MPs in all samples

**Table 6** Shape categorization of MPs in different papers

説明	本調査	Yang ら <sup>3)</sup>	He ら <sup>6)</sup>	Su ら <sup>10)</sup>
厚みが長軸径や短軸径よりも小さく薄い粒子	sheet	fragment, film	flake	film
球状の粒子	sphere	—	pellet	granule
長軸径が短軸径や厚みより比較的長い棒状の粒子	stick	—	line	rod
繊維状の粒子	fiber	fiber	—	fiber
上記の4つのいずれにも当てはまらない不規則な形状の粒子	fragment	granule	fragment	fragment
スポンジ状の質感を持つ粒子	—	—	foam	—

形状を5種類に分類しており、fragmentが58.62%と最も多く、ついでsheetが22.87%、stickが14.81%を占めていた<sup>6)</sup>。さらに、Suの中国の埋立処分場浸出水中を対象とした50  $\mu\text{m}$  以上の MPs の調査では、5種類に分類しており、浸出水中ではfiber, fragment, sphereが検出されたと報告している<sup>10)</sup>。そのなかでもfiberが60%を占めており、最も多かった。これらと比較すると、本調査では不規則なfragmentの割合が高くなっているが、これは、2つの埋立処分場では主に焼却残渣を埋立していることによると考えられた。

C都市ごみ処理施設については、全体的にfragmentが多い傾向が見られた。メタン発酵脱水残渣S1, S2ではfragmentが約80%を占めていた。一方、メタン発酵排水系M1, M2, M3ではfragmentの割合が60%程度であり、脱水残渣と比較して少ない傾向にあった。この排水系ではsheetやstickの割合が多く、こういった形状の MPs が脱水ろ液や処理水に抜けやすいことが示唆された。

プラント排水原水P1では、fragment以外の形状の粒子も多く検出され、多様であった。この結果は、プラント排水が収集車洗浄水や破碎施設の排水などの様々な排水から構成されていることによると考えられた。

### 3.5 粒径分布

各試料における粒径割合を **Fig. 3** に示す。棒状の

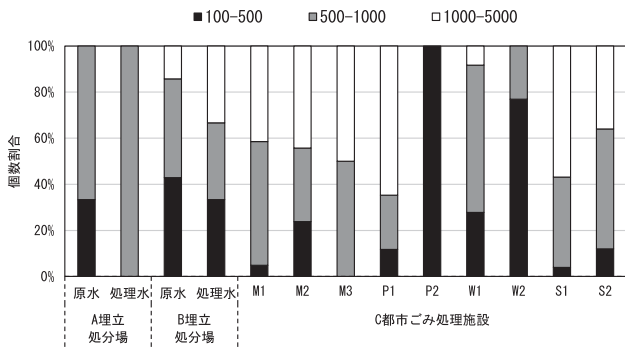


Fig. 3 Particle size distribution of MPs in each sample

MPsを測定する際に長さを大きさとして測定できるよう、顕微鏡で測定された長軸径をMPs粒子の大きさとし、100~500 μm, 500~1,000 μm, 1,000~5,000 μmの3段階で分類した。

まず、埋立処分場の試料に関しては、100~1,000 μmの粒径範囲のMPsがA埋立処分場で100%、B埋立処分場で65~85%を占めていた。Heら(2019)が行った、25 μm以上の粒子を対象とした中国の6箇所の都市ごみ埋立処分場浸出水(原水)を対象とした調査では、100 μm以上の粒子のみが検出されたと報告しており、多くのサンプリングポイントで100~1,000 μmの大きさのMPsの割合が60%を超えていた<sup>6)</sup>、また、Suら(2019)も同様に、中国の1箇所の都市ごみ埋立処分場における埋立時期の異なるエリアからの浸出水(原水)中のMPsを調査し、55%以上が、20~1,000 μmを占めていたとしている<sup>10)</sup>。Yangら(2021)は、中国の16か所の都市ごみ焼却施設の焼却灰中のMPsを測定し、50~1,000 μmのMPsが平均で62%であったとしている<sup>3)</sup>。これらの報告と調査粒径の最小値が異なるため一概には言えないが、概ね同様の傾向にあると考えられた。

C都市ごみ処理施設の粒径分布としては、メタン発酵排水系および脱水残渣のM1, M2, M3, S1およびS2中の1,000~5,000 μmの粒子割合が、平均で45%以上を占めており、比較的粒径の大きなMPsが見られた。これはメタン発酵が、紙類や厨芥類の嫌気分解処理であり、プラスチックは分解されないため、これに由来するMPsが含まれていることによると推察された。Suら(2019)は1箇所の埋立処分場について、浸出水だけではなく、埋め立てられた都市ごみについても同様の調査を行った結果、1,000~5,000 μmの粒子割合が19~52%であったと報告しており<sup>10)</sup>、本調査と同様の傾向がみられた。P1とW1は、同じ原水であるにもかかわらず、粒径分布が異なっている。P1はプラント排水であり、プラットフォームや場内の床洗浄排水を含み、粒径の比較的大きなMPsを含む要素が大きいのに対して、W1は排ガス処理由来の洗煙排水であり、MPsが排水に混入する可能性が低

いことによるものと考えられる。プラント排水と洗煙排水の処理水であるP2とW2では、各原水P1やW1に比べて、粒径分布が細かい方にシフトしており、排水処理の効果が窺えた。

3.6 各排水系でのMPsの除去率および排出特性

Fig. 4に2つの埋立処分場における原水および処理水のMPs個数濃度を示す。A埋立処分場は原水と処理水のMPs個数濃度がそれぞれ0.39個/m<sup>3</sup>, 0.032個/m<sup>3</sup>であり、除去率は92%であった。この処分場で行われている浸出水処理は炭酸ナトリウムによるCa除去と砂ろ過であり、これがMPsの除去に寄与したと考えられる。

B埋立処分場について、個数濃度は原水で0.23個/m<sup>3</sup>, 処理水で0.10個/m<sup>3</sup>であり、除去率は57%にとどまった。内訳をみると、比重の大きなPVCはほぼ除去されたが、比重の小さなPPはほとんど除去されていなかった。この施設で行われている浸出水処理はPACと高分子凝集剤を用いた高速凝集沈殿であり、凝集沈殿のみでは、比重の小さなMPsの除去は限定的であると考えられた。Praaghら(2018)は、都市ごみと産業廃棄物を直接埋め立てているフィンランド、アイスランド、ノルウェーの埋立処分場を対象として浸出水中の50 μm以上のMPsの調査を行っている<sup>11)</sup>。これによると、浸出水原水と浸出水処理水のMPs個数濃度はそれぞれ0~4,510個/m<sup>3</sup>, 0~320個/m<sup>3</sup>であった。原水に比べて処理水の方が個数濃度が増加している埋立処分場もあったが、それ以外の施設では除去率は70~100%であった。除去率の高い埋立処分場ではろ過方式の浸出水処理システムが導入されており、A埋立処分場、およびB埋立処分場の結果から、MPsの排出削減には砂ろ過などの方式が有効であることが示唆された。また、Heら(2018)が行った中国の都市ごみ直接埋立処分場6箇所における浸出水を対象とした100 μm以上のMPs調査では、420~24,600個/m<sup>3</sup>のMPsが存在しており<sup>6)</sup>、Suら(2019)によると、中国・上海の都市ごみの直接埋立処分場の浸出水原水からは4,000~13,000個/m<sup>3</sup>のMPsが検出

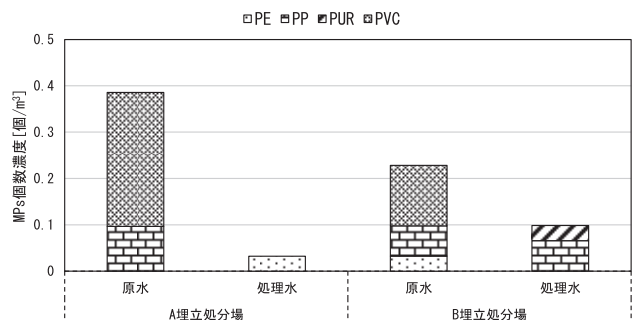


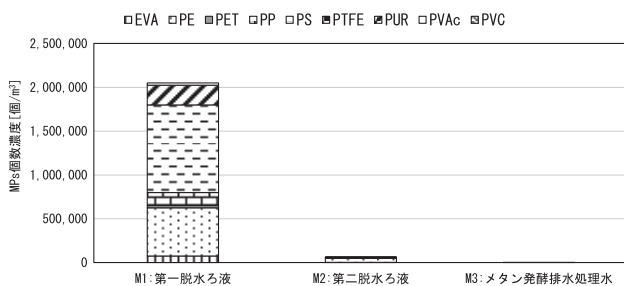
Fig. 4 Abundance of MPs with different polymer types in each landfill leachate sample



されたとしている<sup>10)</sup>。これらの結果は、本調査よりも最大で約  $10^5$  倍高かった。この原因としては、本研究で対象とした埋立処分場は、焼却残渣主体の埋立を行っていることに関連していると考えられる。Yangら(2021)は、中国の都市ごみ1トンあたり360個から102,000個のMPsが焼却残渣経由で発生していることを指摘しており<sup>3)</sup>、本研究での埋立処分場からのMPs濃度が高くなることも想定されたが、測定結果としては低い結果にとどまった。日本の焼却残渣中のMPs濃度が低いか、そもそも埋立てられた焼却残渣中のMPsは浸出水中には移行しにくい可能性が示された。

それぞれに含まれるMPs組成については、原水中の主な成分はPVCとPPであり、86%を占めた。処理水ではPEやPURなど、原水に見られなかったものが検出された。これらは、サンプリングのタイミングが異なることや、処理システムに使用されているプラスチック由来であると推測された。前述した海外の調査事例<sup>6,10,11)</sup>と比較すると、海外の埋立処分場浸出水などにはPE, PP, PS, PVC, PETに加え多様なMPsが含まれていたが、本研究とは異なった。これらの調査は対象粒径や前処理方法が調査ごとに異なるため、それらによる影響も考えられる。しかし、検出された粒径が本調査と等しいHeらの調査結果<sup>6)</sup>と比較しても、本調査で検出されたMPsの方が組成が同様であり、調査対象粒径の影響は考えられにくい。また、前処理方法においては、上記の海外の調査にて検出されたMPsのなかで、5.3MのNaIによる比重分離で回収不可能なものは無かったため、前処理方法に由来する可能性も低いと考えられる。したがって、この結果の違いは、主に、海外の調査対象施設となっている埋立処分場が、ごみを直接埋立しているのに対し、本調査では焼却残渣を多く含むことによるものと考えられた。

**Fig. 5**にC都市ごみ処理施設のメタン発酵排水のMPs個数濃度を表している。M1(第一脱水ろ液)で  $2.1 \times 10^6$  個/ $m^3$ であったものがM3(メタン発酵排水処理水)では  $2.6$  個/ $m^3$ となり、99.99%以上が除去されていた。排水処理は硝化・脱窒、膜処理、凝集沈殿、

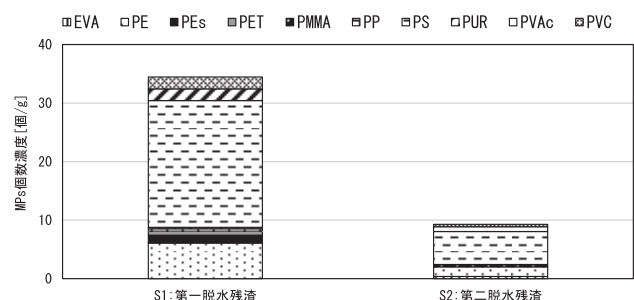


**Fig. 5** Abundance of MPs with different polymer types in wastewater from mechanical dewatering of methane fermentation residue at MSW treatment plant C

砂ろ過であり、これらの結果、多くのMPsが除去されていると考えられた。M1のMPs個数濃度は、中国の埋立地浸出水の最大値よりも100倍ほど高かった。これは都市ごみを直接処理しているだけではなく、排水が雨水などで希釈されることなく発生していることによると考えられた。組成については、M1(第一脱水ろ液)とM2(第二脱水ろ液)ではPEとPSを主な成分としており、2つ合わせて76%, 91%を占めていた。このほかにEVA, PET, PP, PUR, PVAcが存在し、埋立処分場と比較しても多様なMPsが検出された。この排水は直接的な都市ごみ処理に関わる排水であり、この多様性は、海外の都市ごみの直接埋立処分場浸出水の結果<sup>6,10,11)</sup>にも類似していた。

また、**Fig. 6**に脱水残渣S1およびS2中のMPs個数濃度を示す。S1(第一脱水残渣)では34個/g-dry weight, S2(第二脱水残渣)では9.3個/g-dry weightであった。Liら(2018)が行った中国の下水汚泥の調査では、 $37 \mu m$ 以上のMPsが1.60~56.4個/g dry sludgeであり<sup>12)</sup>、本研究でのメタン発酵排水残渣もこの範囲内にあることがわかった。組成の割合は、両脱水残渣ともにPSが60%以上を占め、次いでPEが20%程度占めていた。PVCが両脱水残渣ともに検出されたほか、S1ではPEs, PET, PP, PURが検出され、S2ではEVA, PMMA, PVAcが検出された。これらはメタン発酵排水と同様に、処理したごみに含まれていたものと考えられた。M1, M2も含めて考えると、これらの組成は類似性が認められた。ただし、PVCは脱水ろ液M1, M2には検出されなかったが、脱水残渣S1, S2では検出されており、PVCは脱水残渣に残りやすい傾向があると推測された。一方で、PP, PETおよびPURは、第一脱水系試料のS1やM1では検出されたが、第二脱水系試料のS2やM2では検出されなかったことからサンプリングのタイミングが結果に影響を与えていることも十分に考えられた。

**Fig. 7**はC都市ごみ処理施設のプラント排水および洗煙排水におけるMPs検出数を示している。プラント排水については、P1(原水)で34個/ $m^3$ , P2(処理水)で8.0個/ $m^3$ となり、除去率は76%であっ



**Fig. 6** Abundance of MPs with different polymer types in dewatered residue at MSW treatment plant C

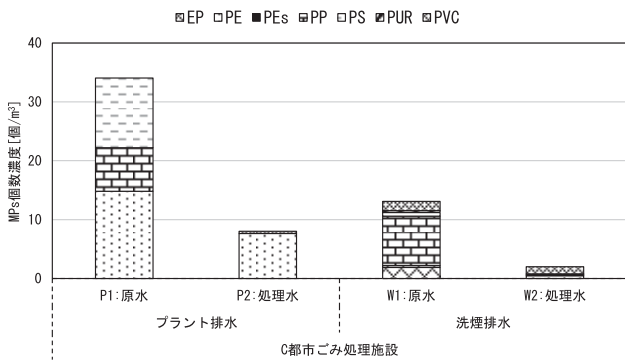


Fig. 7 Abundance of MPs with different polymer types in plant and wet scrubber wastewater at MSW treatment plant C

た。排水処理は凝集沈殿、砂ろ過、消毒であり、砂ろ過を含んでいたものの、除去率はそれほど高くなかった。Fig. 3において、P1に対して、P2は粒径分布が明らかに小粒径側 100~500 μm にシフトしており、粒径の小さな MPs は砂ろ過でも除去しにくいものと考えられた。組成でみると、原水 P1 では一般的に多く使用されている PE, PP, PS が検出され、床洗浄排水などの影響を受けているものと考えられる。PP と PS は完全に除去され、PE も処理水の方では 48% 除去されていた。

洗煙排水について、W1 (原水) と W2 (処理水) の MPs 個数濃度はそれぞれ 13.0 個/m<sup>3</sup>, 1.9 個/m<sup>3</sup> であり、除去率は 86% で、プラント排水系よりも高かった。排水処理は凝集沈殿、砂ろ過、キレート樹脂塔であり、Fig. 3において、W1に対して、W2も粒径分布が小粒径側にややシフトしていた。キレート樹脂塔の構造は、砂ろ過と同様の構造であり、中に 0.35~0.55 mm のキレート樹脂の粒子が 1000 mm の高さで充填されている上、MPs 自体はイオン性を持たないことから、主にキレート樹脂層による物理的ろ過により MPs が除去された可能性が考えられる。したがってこの結果は、砂ろ過に加えて、キレート樹脂の物理的ろ過メカニズムによるものと考えられた。組成については、W1 では PP が最も多く検出され、64% を占めていた。次いで EP が多く、14% を占めていた。その他、PVC, PS, PE, PUR が検出された。処理水 W2 では PVC が最も多く検出され、61% を占めていた。次いで PE が 23% を占め、そのほか PS や PEs が検出された。同施設の M1, M2 (メタン発酵排水脱水ろ液) や P1 (プラント排水原水) では PE や PS が 50% を占めており、これらと比較すると組成に大きな違いが見られた。

### 3.7 排出原単位とインベントリ

排出原単位やインベントリを求めることは、他の施設や MPs 排出源との比較を行う上で重要である。現在国内で廃棄物処理施設関連での MPs 排出調査事例

は皆無であるため、まだまだデータが少なく、処理方式の異なる施設間の変動や時間変動も考えなければならぬが、まずは、本研究で得られたデータを用いて排水経路での排出原単位や日本全国の都市ごみ処理施設、埋立処分場由来の排水経路での年間 MPs 排出インベントリを、概算および推測し、これら施設の影響を見積もった。

具体的には、まず、本調査で得られた埋立処分場や都市ごみ処理施設の処理水中の MPs 濃度や処理水量、埋立面積、および都市ごみ処理量から、MPs の排出原単位を求めた。

埋立処分場については、浸出水が主に降雨に由来することから、埋立面積が浸出水量に比例すると考え、排出原単位を埋立面積あたりの年間 MPs 排出量とし、以下の (1) 式で算出した。

$$EF_{wls} = C_{MPs} V / S \quad (1)$$

ただし、 $EF_{wls}$ : 埋立処分場からの MPs 排出原単位 (個/m<sup>2</sup>/年),  $C_{MPs}$ : 処理水 1m<sup>3</sup>あたりの MPs 個数濃度 (個/m<sup>3</sup>),  $V$ : 年間処理水量 (m<sup>3</sup>/年),  $S$ : 埋立面積 (m<sup>2</sup>)

都市ごみ処理施設については、ごみ処理量が処理水量に比例すると考え、処理対象ごみ t あたりの MPs 排出量を排出原単位とした。C 都市ごみ処理施設では、メタン発酵排水、焼却施設や粗大ごみの破碎処理施設に由来するプラント排水、洗煙排水の処理水がそれぞれ合流後、下水道放流されている。なおこの施設には、容器包装プラスチックなどのリサイクル施設の排水は含まれていない。このため、排出原単位は、以下の (2) 式で算出した。

$$EF_{wtf} = \Sigma(C_{MPs} V) / M \quad (2)$$

ただし、 $EF_{wtf}$ : 都市ごみ処理施設からの MPs 排出原単位 (個/t-ごみ),  $C_{MPs}$ : 処理水 1m<sup>3</sup>あたりの MPs 個数濃度 (個/m<sup>3</sup>),  $V$ : 年間処理水量 (m<sup>3</sup>/年),  $M$ : 年間都市ごみ処理量 (t/年)

排出原単位の算出結果を Table 7 に示す。まず、埋立処分場については、0.024~0.056 個/m<sup>2</sup>/年と求められ、C 都市ごみ処理施設については、1.2 個/t-ごみと

Table 7 Abundance of MPs in effluent, annual effluent volume, landfill area /annual MSW treatment amounts, and MPs emission factors of each facility

対象施設	MPs 個数濃度 (個/m <sup>3</sup> )	年間処理水量 (m <sup>3</sup> /年)	埋立面積 (m <sup>2</sup> ) もしくは 年間都市ごみ処理量 (t/年)	排出原単位 (個/m <sup>2</sup> /年) もしくは (個/t-ごみ)
A 埋立処分場	0.032	3.9×10 <sup>5</sup>	5.1×10 <sup>5</sup>	0.024
B 埋立処分場	0.10	2.0×10 <sup>5</sup>	3.6×10 <sup>5</sup>	0.056
C 都市ごみ処理施設	メタン発酵排水	2.6	3.6×10 <sup>4</sup>	1.7×10 <sup>5</sup> 1.2
	プラント排水	8.0	1.2×10 <sup>4</sup>	
	洗煙排水	2.0	1.0×10 <sup>4</sup>	

算出された。

次にこれらの排出原単位を用いて、日本全国の都市ごみ処理施設、埋立処分場由来の排水経路での年間MPs排出インベントリを求めた。ここで、C都市ごみ処理施設については、メタン発酵施設が併設されつつも、都市ごみ焼却施設を主体とした施設であり、本排出原単位により、日本全国の都市ごみ焼却施設からの排水経路での年間MPs排出インベントリを予測した。

まず、埋立処分場については、環境省による令和元年度一般廃棄物処理実態調査結果<sup>13)</sup>から、全国の埋立処分場の埋立面積の総和である $4.3 \times 10^7$  (m<sup>2</sup>)を日本全国の埋立面積として定義した。A埋立処分場およびB埋立処分場の結果から、日本全国の埋立処分場からの排水経路での年間MPs排出インベントリは、 $1.0 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^6$  (個/年)と算出された。

次に、都市ごみ処理施設については、同様に、環境省による令和元年度一般廃棄物処理実態調査結果<sup>13)</sup>から、令和元年度における全国の焼却施設の年間処理量の総和である $3.4 \times 10^7$  (t/年)を日本全国の年間ごみ処理量として定義した。C都市ごみ処理施設の結果から、日本全国の都市ごみ焼却施設からの排水経路での年間MPs排出インベントリは、 $4.1 \times 10^7$  (個/年)と算出された。

ここで、田中らは、下水処理場からの放流水中に含まれる100  $\mu$ m以上のMPsについて調査し、MPs個数濃度が0.67 個/m<sup>3</sup>であったと報告している<sup>8)</sup>。また、平成30年度下水道統計<sup>14)</sup>から、日本全国での下水処理場からの放流量は $1.4 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>/年と算出された。この値は下水道統計で処理水量から再利用水量を引いた値で定義した。これらの値を用いると、日本全国の下水処理場からの排水経路での年間MPs排出インベントリは $9.4 \times 10^9$  個/年と概算された。

これらの値を比較すると、埋立処分場や都市ごみ焼却施設の年間MPs排出インベントリは、下水処理場の100分の1や1,000分の1程度であり、これらの施設からのMPs排出量はそれほど大きくないことが予想された。埋立処分場においては、雨水の影響を受けないクローズドな施設もあり、また都市ごみ処理施設においてはすべての排水を河川放流しているわけではなく、クローズド化され無放流の施設もあれば、下水道放流の施設もある。さらに、今回調査したC都市ごみ処理施設はメタン発酵排水由来のMPsを含んでおり、メタン発酵施設を併設していないごみ焼却施設では焼却によりプラスチックも分解されるためMPs排出量はより小さくなると考えられる。今後は、各処理施設の方式や排水処理方法などの類型に対応した調査や、全国の施設の排水処理方法や放流先、放流量のデータベース整備も必要となる。最終的には、これ

らを用いて、MPs排出インベントリを精緻化することが必要である。

## 4. 結 論

本研究では、一般廃棄物埋立処分場2箇所、都市ごみ処理施設1箇所を対象に、11種の排水試料、2種の脱水残渣のサンプリングを行い、これらに含まれるMPsの分析および解析を行った。得られた結果や考察、および今後の課題について、以下にまとめる。

- 1) 各試料に含まれる100  $\mu$ m以上5 mm以下のマイクロ粒子中のMPsの割合については、埋立処分場ではMPs以外が検出されることが多く、土砂等を含む埋立物の影響であると推測された。一方で都市ごみ処理施設では、1試料を除き、80%以上がMPsであり、これは土砂の混入可能性が低く、廃棄物中プラスチックの影響を大きく受けていることによると考えられた。
- 2) 本調査で検出された全MPsの個数割合は、PEが全体の43%を占めており最も大きく、次いでPSが29%、PPが9.5%、PVCが7.4%を占めるという結果になった。これらは順列がやや異なるものの、概ねそれぞれの国内生産量と対応していた。
- 3) 検出されたMPsの粒径分布に関して、埋立処分場については、100~1,000  $\mu$ mの粒径範囲のMPsが高い割合を占めていた。これは中国の直接埋立処分場浸出水や焼却灰中のMPs粒径分布と概ね同様の傾向にあった。都市ごみ処理施設では、メタン発酵排水系および脱水残渣、プラント排水で1,000~5,000  $\mu$ mの比較的粒径の大きなMPsの割合が高く、発酵残渣等に依然として含まれるプラスチックの影響と考えられた。
- 4) 各排水試料中のMPsの個数濃度は0.032 個/m<sup>3</sup>~ $2.1 \times 10^6$  個/m<sup>3</sup>という範囲となった。調査を行ったどの排水系も処理水が原水に比べて個数濃度が小さく、排水処理による除去の効果が窺えた。
- 5) 埋立処分場でのMPs除去率と排出特性を考察したところ、MPsの排出削減には凝集沈殿では不十分で、砂ろ過が有効であると考えられた。また、本調査での浸出水原水におけるMPs個数濃度は、海外に比較すると最大で $1/10^5$ 程度となったことから、調査対象が、焼却残渣が埋立主体であり、その中のMPs個数濃度が小さいか、MPsが浸出水に移行しにくい状況となっている可能性が考えられた。
- 6) 都市ごみ処理施設におけるMPs除去率は、メタン発酵排水で99.99%以上、プラント排水で76%、洗煙排水で86%であり、粒径にも依存するが、砂ろ過やキレート樹脂塔の処理効果が窺えた。メタ

ン発酵排水や脱水残渣には、多様な MPs が含まれており、中国の直接埋立地浸出水中 MPs との類似性からも、処理対象物の影響を直接的に受けていると考えられた。

- 7) 各施設からの排水経路での MPs 排出原単位は、埋立処分場で  $0.024\sim 0.056$  個/ $m^2$ /年、都市ごみ処理施設で 1.2 個/t-ごみと算出され、日本における排水経路での年間 MPs 排出インベントリは、埋立処分場で  $1.0\times 10^6\sim 2.4\times 10^6$  個/年、都市ごみ焼却施設で  $4.1\times 10^7$  個/年と算出された。これらは日本の下水処理場からの排水経路での年間 MPs 排出量に比べて、1/1,000 から 1/100 程度小さく、これらの施設が与える MPs 排出の影響は小さいと推測された。
- 8) 全国には様々な処理型式や排ガス処理、排水処理方式、放流先を採用している埋立処分場や都市ごみ処理施設があり、今回の調査はそのうちの 1~2 箇所のみでの調査であった。より正確に MPs 排出インベントリを求め、これらの施設における MPs 排出の影響を評価するために、今後さらに複数の施設での調査をする必要である。

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、現場でのサンプリングにご協力いただいた施設の方々にお世話になりました。記して感謝いたします。また、MPs の分析方法に関しては、京都大学大学院地球環境学環境調和型産業論分野 雪岡聖研究員にご指導いただいた、ここに記して感謝いたします。

なお、本研究は、2020 年度環境研究総合推進費【委託費 (課題調査型研究)】陸域からの排出インベントリ作成と流出制御技術開発 (研究代表者 高知大学 藤原拓) (JPMEERF20201F01)、および 2021 年度環境研究総合推進費【委託費 (戦略的研究開発)】【S-19】テーマ 3 サブテーマ (1) 点源からのマイクロプラスチック排出量の評価と流出抑制技術の開発 (研究代表者 京都大学 藤原拓) (JPMEERF21S11930) により実施されました。

## 参 考 文 献

- 1) World Economic Forum: The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics, pp. 14 (2016)
- 2) 山下麗, 田中厚資, 高田秀重, 海洋プラスチック汚染: 海洋生態系におけるプラスチックの動態と生物への影響, 日本生態学会誌, Vol. 66, No. 1, pp. 51-68 (2016)
- 3) Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J. and He, P., Is incineration the terminator of plastics and microplastics?, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 401, 123429, (2021)
- 4) 廃棄物学会編: コンパクト版廃棄物ハンドブック, オーム社, pp. 387-465 (1997)
- 5) 坪井成浩, 松藤敏彦, 松尾孝之, カナバルエリザ, 東條安匡, 黄仁姫: コンバインド式メタン発酵施設におけるマテリアルフロー分析, 第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, pp. 277-278 (2018)
- 6) He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H., & Lü, F. Municipal solid waste (MSW) landfill: A source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate. *Water research*, Vol. 159, pp. 38-45. (2019).
- 7) 社団法人日本下水道協会: 下水試験方法上巻, pp. 115-118, pp. 298 (2012)
- 8) 田中周平, 垣田正樹, 雪岡聖, 鈴木裕識, 藤井滋穂, 高田秀重: 下水処理工程におけるマイクロプラスチックの挙動と琵琶湖への負荷量の推定, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 75, No. 7, pp. III\_35-III\_40 (2019).
- 9) 経済産業省: 2020 年経済産業省生産動態統計年報化学工業統計編, p. 4, pp. 10-11 (2021)
- 10) Su, Y., Zhang, Z., Wu, D., Zhan, L., Shi, H., & Xie, B. Occurrence of microplastics in landfill systems and their fate with landfill age. *Water research*, Vol. 164, 114968 (2019).
- 11) Praagh, M. van, Hartman, C., & Brandmyr, E., Microplastics in Landfill Leachates in the Nordic Countries. <https://doi.org/10.6027/TN2018-557>. (2018).
- 12) Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., and Zeng, E. Y. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China, *Water Research*, Vol. 142, pp. 75-85 (2018).
- 13) 環境省: 廃棄物処理技術情報, 一般廃棄物処理実態調査結果, 焼却施設, 最終処分場 (2021 年 6 月 15 日閲覧) (2020) ([https://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/r1/index.html](https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/index.html))
- 14) 日本下水道協会: 平成 30 年度版下水道統計, Vol. 75, pp. 102, 103 (2020)

## Emission behaviors of Microplastics in Wastewater from a Municipal Solid Waste Treatment Plant and Landfill Sites

Taishi Kawai<sup>1†</sup>, Kazuyuki Oshita<sup>1</sup>, Taketoshi Kusakabe<sup>1</sup>, Oleszek Sylwia<sup>1</sup>,  
Shuhei Tanaka<sup>2</sup>, Masaki Takaoka<sup>1</sup> and Taku Fujiwara<sup>2</sup>

1) Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

2) Graduate School of Global Environmental Studies Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Taishi Kawai :

(Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

E-mail : kawai.taishi.53x@st.kyoto-u.ac.jp)

### Abstract

Regarding microplastics (MPs), which have become a problem in recent years, we investigated MPs of 100  $\mu\text{m}$  to 5 mm contained in wastewater and treated water at one municipal solid waste (MSW) treatment plant and two landfill sites. The concentration of MPs in each wastewater were in the range of 0.032/ $\text{m}^3$  to  $2.1 \times 10^6/\text{m}^3$ , and 57.0 to 99.9% of MPs were removed by wastewater treatment. Coagulation precipitation was not sufficient to reduce MPs emissions, while sand filtration and chelate resin were considered to be effective. The MPs emission inventory in all of Japan is calculated to be  $1.0 \times 10^6$  to  $2.4 \times 10^6$  pieces/year from the landfill site and  $4.1 \times 10^7$  pieces/year from the MSW incinerator. These values are about 1/1,000 to 1/100 smaller than those of the wastewater treatment plant, and it is estimated that the impact is currently small.

**Key words :** microplastics, municipal solid waste treatment plant, emission factor, landfill site, emission inventory