

Ⅱ. その他の予算による調査研究

1. 下水道管路を対象とした総合マネジメントに関する研究

下水道研究室 室 長 岩崎 宏和
研 究 官 川島 弘靖
交流研究員 野田 康江

1. はじめに

国土交通省では、2017年8月に「新下水道ビジョン加速戦略」を策定し、新下水道ビジョンの実現加速の観点から、国が選択と集中により5年程度で実施すべき施策をとりまとめた。新下水道ビジョン加速戦略の重点項目の一つとして、マネジメントサイクルの確立を掲げ、国はマネジメントサイクルの構築による適切な施設管理の実現及び持続可能な下水道事業運営の推進に向けた施策を講じていくこととしている。

このため、国総研では、管路施設に関するマネジメントサイクルの構築を目指し、布設条件や管材の種類など都市の状況に応じた効率的な点検調査手法の開発や、維持管理情報を活用した最適な改築修繕工法の選定手法の開発に着手したところである。

2. 研究内容

研究内容の概要を以下①～③に示す。

① 布設条件や管材の種類など都市の状況に応じた点検調査手法の開発（2018～2020年度）

下水道管路における異常やリスクの発生傾向を分析し、診るべき異常や点検調査頻度を検討する。また、多様な点検調査技術の性能を踏まえ、異常とそれに応じた点検調査技術を整理した上で、都市の状況に応じた最適な点検調査手法について検討する。

② 維持管理情報の活用による計画・設計・施工・維持管理の最適化手法の提案（2018～2020年度）

多様な改築修繕工法の性能、地方公共団体における管路管理の実態、改築修繕の際の評価項目（点検調査結果、管路の残寿命等）を整理し、維持管理情報の活用による最適な改築修繕工法の選定手法について検討する。

③ 維持管理情報を活用した計画設計等への反映事例集の作成（2019～2020年度）

地方公共団体における管路管理の実態調査結果等を基に、維持管理情報を活用した改築修繕の好事例や、改築修繕後の不具合事例を整理し、維持管理情報を活用した計画設計等への反映事例集を作成する。

2018年度は、上記①について、下水道管路のリスクの一つである管路閉塞に着目し、その発生傾向について分析したため、本稿ではその結果について報告する。なお、上記②については、改築修繕工法の性能確認として、業界団体等14者（改築修繕工法31工法）へのヒアリングを実施しているが、その概要については今後の検討と合わせて報告する。

3. 管路閉塞の発生傾向に関する調査

点検調査計画を検討する際、管材の種類別の異常発生傾向やリスクの発生傾向を基にした

リスク評価¹⁾により、点検調査の優先順位を検討することが有効である。しかしながら、既往の報告²⁾では、道路陥没の発生傾向について整理しているが、それ以外のリスクの発生傾向については報告が少ない。今回は、下水道管路におけるリスクの一つである管路閉塞に着目し、地方公共団体へのアンケート調査を行い、その発生傾向を整理した。

3.1. 調査内容

下水道維持管理指針では、下水道管路の計画的維持管理において対応するリスクは、機能不全に起因するものを対象とするとしており、道路陥没、管路閉塞、下水の溢水、臭気の発生、有毒ガスの噴出、地下水・土壌の環境汚染等を例示している。道路陥没については、国総研において 2006 年度から継続的に調査しているところであるが、道路陥没以外のリスクについての調査は実施していなかったため、今回、地方公共団体へのアンケート調査により管路閉塞に関するデータを収集した。なお、下水の溢水、臭気の発生、有毒ガスの噴出等のリスクは、管路閉塞に伴う発生事象と考え、表-1 の内容について調査した。

表-1 アンケートの主な調査内容

調査項目		記入要領
管路閉塞に関する情報	発見年月日	発生年月日を選択
	管路閉塞の発生箇所	本管、人孔、本管と人孔の接続部、取付管、公共樹、取付管と公共樹の接続部、本管と取付管の接続部、不明を選択
	管路閉塞に伴う発生事象	管路閉塞の発見の契機となった事象について、マンホール等からの下水の溢水、逆流による宅内溢水、臭気の発生、有毒ガスの噴出、地下水・土壌の環境汚染、その他を選択 ※その他の場合は、その内容を入力
	管路閉塞の発生原因	管路閉塞の主たる原因について、油脂の付着、モルタルの付着、樹木根侵入、その他を選択 ※その他の場合は、その内容を入力
	管路閉塞への対応状況	管路閉塞の対応に要した日数(0.5日単位)を入力 対応に要した費用(万円単位)を入力 下水道使用者への使用制限について、有、無、不明を選択
管属性に関する情報	布設年度	当該施設の設置年度を入力
	管の材質	コンクリート管(HP)、陶管(CP)、硬質塩化ビニル管(VU)、更生管(RH)、ダクタイル鋳鉄管(DCIP)、硬質瀝青管(ZP)、強化プラスチック複合管(FRP)、ポリエチレン管(PE)、その他、不明を選択 ※その他の場合は、その内容を入力
	土被り	当該施設の土被り(m)を入力
	管径	管径(mm)を入力
	排除方式	合流式、分流式(汚水管)、合流式(雨水管)を選択

調査は、政令指定都市、下水道研究会議参加市、ストックマネジメント通信簿³⁾で得点が100点の地方公共団体を対象とし、2015～2017年度内に発生した下水道管路の異常に伴う管路閉塞（雨天時の流下能力不足による逆流や浸水、マンホールポンプの故障による管路閉塞は調査対象外）について調査し、計111団体から合計9千件程度の回答を得た。

3.2. 調査結果

3.2.1. 材質別・発生箇所別・発生事象別の発生傾向

管路閉塞の発生箇所別・発生事象（管路閉塞発見の契機となった事象）別の整理結果を図-1に示す。本管、人孔、本管と人孔の接続部（以下「本管関連」という。）では約3,100件、取付管、公共樹、取付管と公共樹の接続部（以下「取付管関連」という。）では約5,600件、

本管と取付管の接続部では約 100 件の管路閉塞が発生していた。発生事象としては、本管関連、取付管関連ともに「マンホール等からの下水の溢水」と「逆流による宅内溢水」が多い結果となった。なお、発生事象「その他」の約 2,500 件の内訳は、溢水まで至らない排水不良という回答が約 1,800 件と大半であり、次いでパトロール、点検調査、工事中の発見という回答が約 350 件あった。

図-2 は、材質別・発生箇所別・発生事象の整理結果である。管の材質別の発生件数

としては、コンクリート管、陶管、硬質塩化ビニル管（以下それぞれ「HP 管」、「CP 管」、「VU 管」という。）における発生件数が全体の約 9 割を占めていたため、以降はこの 3 つの材質の発生件数を基に述べる。本管関連では HP 管と VU 管、取付管関連では CP 管と VU 管での発生件数が多くなっている。国総研において別途調査している本管の材質別管きょ管理延長を基に、回答のあった地方公共団体における材質別管きょ管理延長割合を算出したところ、HP 管が 44%、CP 管が 10%、VU 管が 36%であり、本管関連の材質別発生件数割合（HP 管が 37%、CP 管が 11%、VU 管が 39%）と概ね同じ割合であった。取付管関連については、HP 管よりも CP 管及び VU 管の発生件数が突出して多い結果であった。発生事象は、材質を問わず、本管関連では「マンホール等からの下水の溢水」が、取付管関連では「逆流による宅内溢水」が多い結果となった。

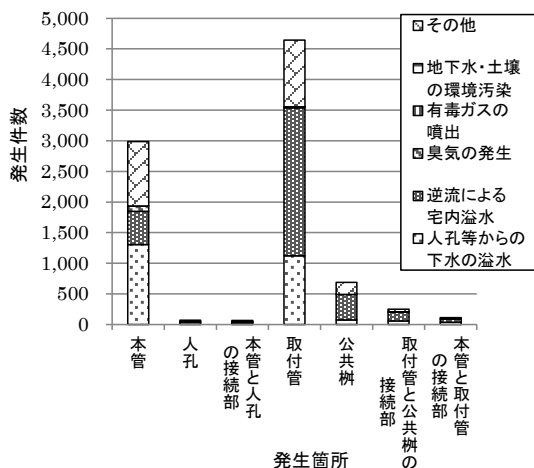


図-1 発生箇所別・発生事象別発生件数

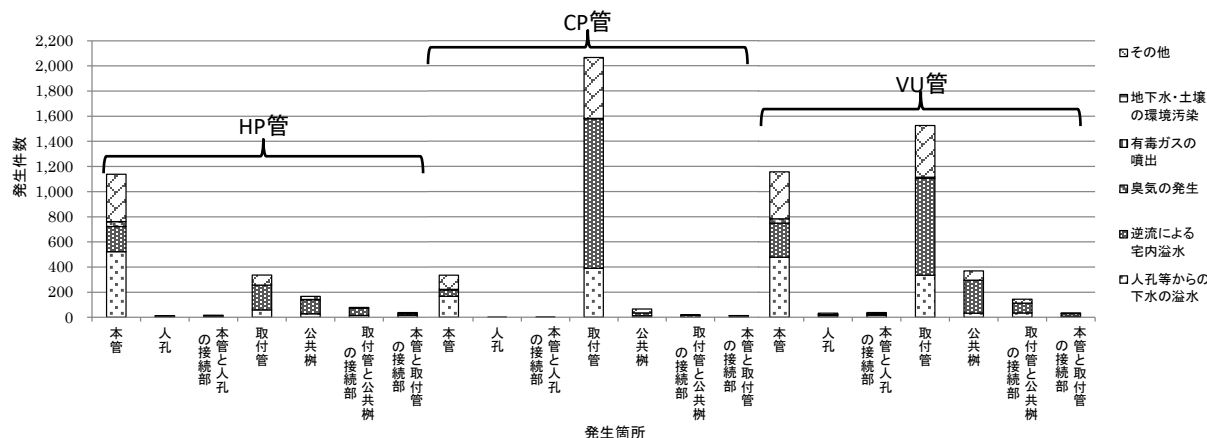


図-2 材質別・発生箇所別・発生事象別発生件数

3.2.2. 材質別・発生箇所別・発生原因別の発生傾向

管路閉塞の材質別・発生箇所別・発生原因別の発生件数を図-3 に示す。発生原因については、本管関連は「油脂の付着」が約 1,600 件と最も多く、取付管関連では「樹木根侵入」が約 2,400 件と最も多かった。発生原因「その他」の内訳については、土砂堆積が約 670 件、異物混入が約 630 件、管の不具合約 430 件（破損が約 290 件、たるみ・勾配不良が約 80 件、

ズレが約 40 件、その他不具合が約 20 件)、他工事による施設損傷・土砂等流入が約 40 件、施工不良が約 20 件、その他・不明が約 620 件であった。発生原因に関する全体的な傾向としては、油脂の付着、土砂堆積、異物混入、他工事起因といった外的要因によるものが多いため、管路閉塞を未然に防止する上では、下水道使用者や他部局を通じた他工事業者への適切な使用等に関する周知が有効であると考えられる。

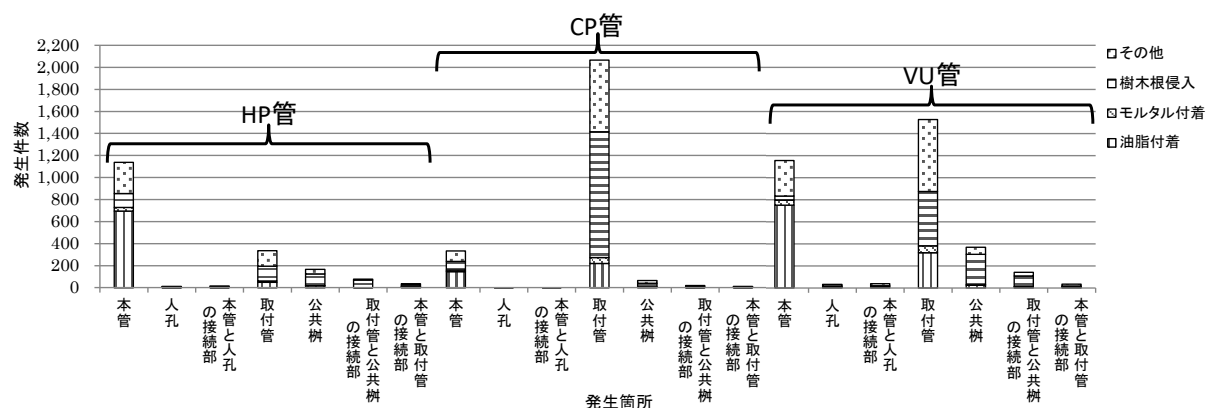


図-3 材質別・発生箇所別・発生原因別発生件数

次に、発生原因割合を図-4に示す。材質を問わず、本管関連では「油脂の付着」が、取付管関連では「樹木根侵入」が発生原因の大半を占めることが分かる。なお、「樹木根侵入」に着目すると、本管関連・取付管関連ともに、VU管よりもHP管及びCP管での割合が大きくなっている。これは、既往の報告⁴⁾にあるように、HP管やCP管では、VU管に比べて継手部の隙間が大きく、管きよ内への樹木根侵入を容易にすることから、発生原因割合も大きくなっていることが想定される。

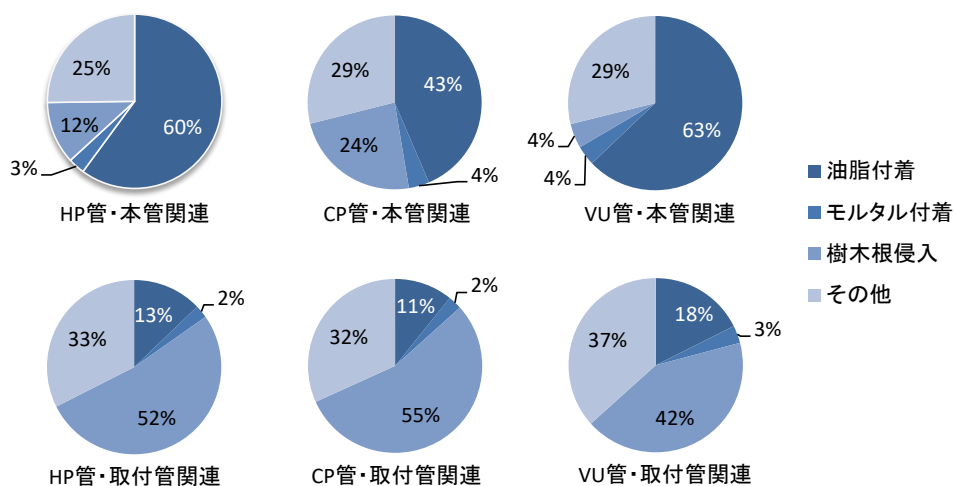


図-4 発生原因割合

3.2.3. 発生原因「樹木根侵入」の発生傾向

発生原因を「樹木根侵入」とする管路閉塞の発生傾向として、管属性（布設年度、排除方式、管径、土被り）との関係を整理した。

図-5 は、材質別の布設年度別発生件数及び 100km あたり発生件数を示したものである。材質別の管きょ延長については、前述した国総研において別途調査している本管の管きょ延長を参考値として用いた。HP 管と VU 管に比べ、CP 管の方が 100km あたり発生件数が多いことが分かる。これは、前述の継手部の隙間が大きく影響していることが想定される。VU 管については、1975 年以降の 100km あたり発生件数が急激に減少しているが、これは、1974 年に製品規格（日本下水道協会規格）が制定され、品質や施工性が確保されたためと考えられる。なお、CP 管における 2005 年度以降の発生件数は少ないが、100km あたり発生件数が高くなっているのは、他の期間に比べて布設延長が極端に短いためである。

図-6 は、排除方式別の発生件数及び 100km あたり発生件数を示したものである。排除方式別の管きょ延長については、下水道統計⁵⁾を参考とした。分流式（雨水管）に比べ、合流式と分流式（污水管）の 100m あたり発生件数が約 10 倍以上となっている。これは、平常時から水分が供給される環境下にあるため、根が急速に成長し、管路閉塞につながっているものと考えられる。

また、発生原因を「樹木根侵入」とする発生割合は、本管関連よりも取付管関連が圧倒的に多いため、管径 250mm 未満における発生割合は約 9 割、土被り 2m 未満における発生割合は約 8 割であった。

3.2.4. 管路閉塞への対応状況

管路閉塞への対応に要した日数（図-7）は、1 日以下が約 9 割であり、管路閉塞に対して早急な対応がとられていると言える。対応費用（図-8）については 10 万円以下が半数であった。また、使用者制限の有無（図-9）については、有りの場合と無しの場合が同程度の割合となった。

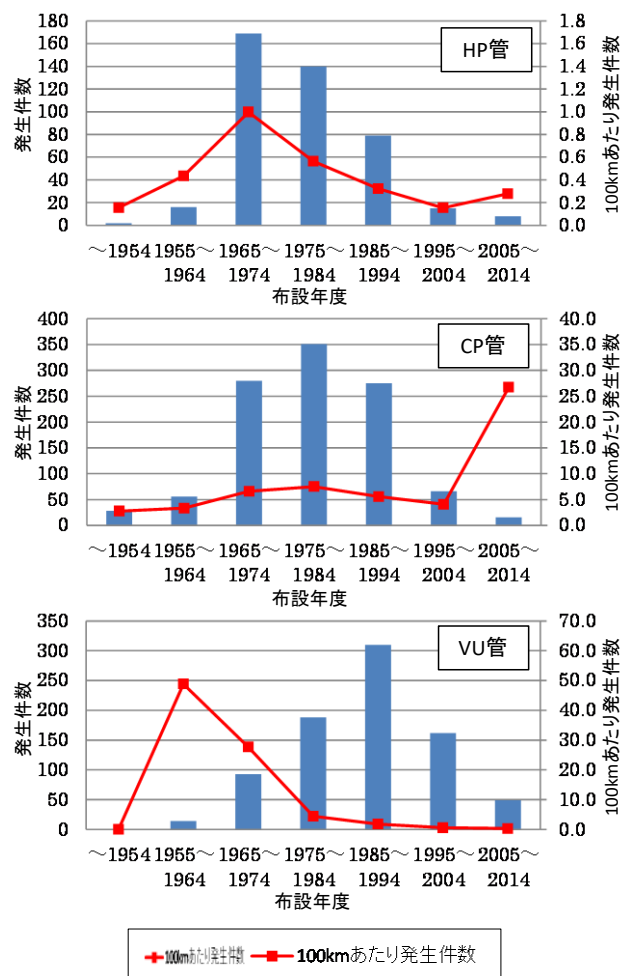


図-5 樹木根侵入の布設年度別発生件数及び 100km あたり発生件数

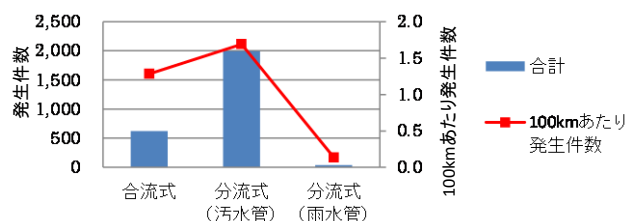


図-6 樹木根侵入の排除方式別発生件数及び 100km あたり発生件数

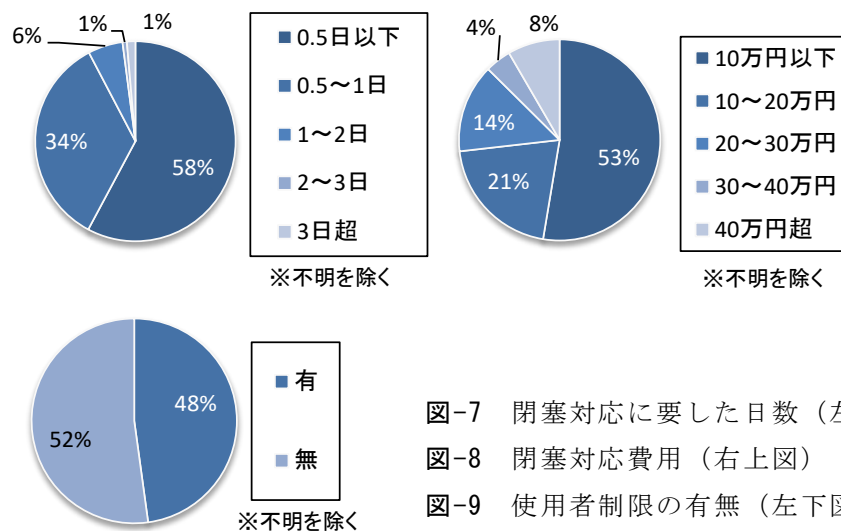


図-7 閉塞対応に要した日数（左上図）

図-8 閉塞対応費用（右上図）

図-9 使用者制限の有無（左下図）

4. まとめと今後の展開

管路閉塞に関するアンケート調査を実施し、その発生傾向について整理した。発生原因に関する全体的な傾向としては、油脂付着、異物混入等の外的要因によるものが多く、計画的な点検調査の他、使用者等への適切な使用の周知の必要性が示唆された。また、樹木根侵入を発生原因とする場合、管の材質、布設年度、排除方式との関連性が見られることから、リスク評価の際に有効な指標になると考えられる。

今後は、下水道管路の異常発生傾向やリスクの発生傾向に関するこれまでの知見とともに、省力化・低コスト化に資する点検調査技術の技術開発動向も踏まえ、計画的維持管理を実施する上での最適な点検調査頻度や方法について検討していく予定である。

維持管理情報の活用による最適な改築修繕工法の選定手法に関する検討については、地方公共団体における管路管理の実態調査を行い、点検調査結果の活用状況や管路の残寿命の考え方等を整理し、工法選定の際の評価項目を検討する予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：下水道維持管理指針総論編マネジメント編 2014 年版、pp.169～173、2014
- 2) 横田敏宏、深谷渉、宮本豊尚：下水道管路施設に起因する道路陥没の現状（2006-2009 年度）、国土技術政策総合研究所資料、第 668 号、90p、2012
- 3) 国土交通省、公益社団法人日本下水道協会：下水道全国データベース、<https://portal.g-ndb.jp/portal/report/detail?kind=2747>
- 4) 深谷渉、飯塚康雄：下水道管きょにおける根系侵入障害に関する一考察、下水道協会誌、Vol.48、No.580、pp.99～106、2011
- 5) 公益社団法人日本下水道協会：平成 28 年度版下水道統計、2018

2. 下水流入物質の挙動把握に関する研究

下水道研究室 室 長 岩崎 宏和
研 究 官 川島 弘靖
研 究 官 中村 裕美

1. はじめに

近年、プラスチックごみが水環境に与える影響について世界的に懸念されており、2015年G7エルマウサミット首脳宣言において、海洋環境の保護に関して「我々は、海洋及び沿岸の生物と生態系に直接影響し、潜在的には人間の健康にも影響し得る海洋ごみ、特にプラスチックごみが世界的課題を提起していることを認識する」と提言された。また、その附属書における行動計画の一つとして「海洋環境に流出するマイクロプラスチックを含む廃棄物について、下水及び雨水を経由するものを削減し、及び予防するための持続可能かつ費用対効果の高い解決策の研究」が位置づけられた。既に水環境中のプラスチックごみに関する研究は開始されているが、海洋汚染や陸域の水環境に関連する研究報告¹⁾²⁾が大半であり、下水道システムにおける研究報告³⁾は少なく、さらに雨天時における下水中のプラスチックごみの挙動に関する研究についてはほとんどない。

そこで、下水道におけるプラスチックごみへの対応を検討する上での基礎資料として活用することを目的として、雨天時における下水中のプラスチック量及び種類を把握するための調査を実施することとした。本稿では、分流式下水道の雨水ポンプ場の流入水についての調査結果について報告する。

2. 調査および分析の方法

(1) 調査概要

雨水排水中に含まれるプラスチック片の数、種類、大きさを把握するため、2019年1月31日（日 合計降水量 15.0 mm、1時間最大降水量 4.5 mm、気象庁 HP より確認）に人口約 14 万人の都市にある分流式下水道の雨水ポンプ場（排水面積 105.4 ha、土地利用状況は、主に住居や田畑）の流入水を調査した。

今回は、試料採集および分析機器の都合上、分析対象は 0.3 mm メッシュのフルイに残留したプラスチック片とした。

採水場所は、写真 1 のとおり雨水ポンプ場流入渠に設置された幅 10 cm×高さ 50 cm 程度の目幅の



写真 1 採水場所（写真中の白丸）

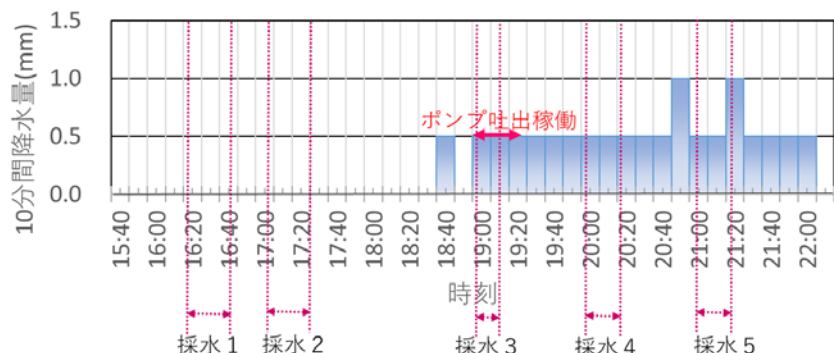


図 1 採水時の降水量

スクリーン前とした。

調査時の降水量と採水時刻、雨水ポンプ稼働時刻の関係を図 1 に示す。採水のタイミングは、前回降雨時の 2018 年 12 月 23 日（日合計降水量 0.5 mm、1 時間最大降水量 0.5 mm、気象庁 HP より）に流入したと考えられる溜水を 1 回（採水 1）、調査日の降り始め時に 1 回（採水 2）、降水量ピーク頃の 3 回（採水 3、4、5）の計 5 回（1 回 180 L、計 900 L）とした。採水のタイミングごとに採水量全量を濾過し残った物質を試料 1～5 とした。採水所要時間は 10～20 分程度だった。

（２）試料採集方法

図 2 のように下記手順で採水とろ過を行った。

- ① 10 L ステンレスバケツを水中に投入し表層水を採水しロープで引き上げる。
 - ② ステンレスバケツ中の水全量を 2.0 mm メッシュ、0.3 mm メッシュのフルイでろ過する。
 - ③ 各フルイ上の残渣を 1 L アルミ容器に水道水で流し入れる。
 - ④ ①～③を繰り返し、180 L 採水分の残渣から試料 1 つを作成する。
- 参考までに、採水 5 で得られた残渣を写真 2 に示す。

（３）分析方法

5 つの試料を下記手順のとおり分析し、プラスチック片の数・種類・大きさを確認した。

- ① 試料を 0.1 mm メッシュ上のフルイに移し、30% 過酸化水素水および硫酸鉄（Ⅱ）を加え、80℃程度まで温度上昇させて酸化処理をする。
- ② 酸化処理後の試料について 5.3 M ヨウ化ナトリウム水溶液（密度 1.6 g/cm³）を用いて比重分離する。（攪拌後 1 日静置）
- ③ 比重分離後、上澄み試料および沈降試料の中でプラスチックである可能性がある物質をピンセットで拾い出す。
- ④ 画像解析ソフト（ImageJ Ver.1.51）により粒子の長軸径、短軸径を調べる。
- ⑤ FT-IR（ブルカー・オプティクス株式会社 ALPHA）と IR 高分子データベースを用いて、プラスチック種類を同定する。

3. 調査結果および考察

検出されたプラスチック片の一例を写真 3 に示す。粒子状、破片、繊維状など様々な形状のプラスチック片を確認した。プラスチック片の個数を採水量で割り算出した数密度を図 3 に示す。各試料のプラスチック片の数密度が最も高かったのは試料 1 で 0.11 個/L、最も低かったのは試料 2 で 0.03 個/L であった。これは、降水量が少なくポンプ場に雨水排水が流入していない状況で 2 回採水し、試料 1 で前回降雨時に滞留していた多くのプラスチック片を採集し

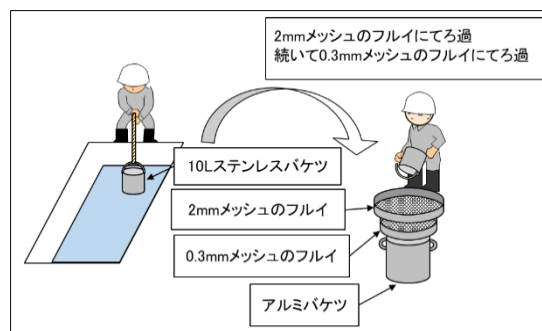


図 2 試料採集方法



写真 2 0.3 mm メッシュのフルイ上の残渣

たため、試料 2 ではプラスチック片の個数が少なくなったと考えられる。

プラスチック片の種類については、試料全てにポリエチレン (PE) とポリプロピレン (PP) が検出され、各試料中のプラスチック個数の 7 割以上と最も多く存在した。

全プラスチック片 61 個の大きさについて、長軸径が 7.0 mm 以上のプラスチック片は 2 個あり、ポリエチレン 1 個 (長軸径 8.8 mm、短軸径 3.0 mm) とポリビニルアルコール (PVA) 1 個 (長軸径 7.8 mm、短軸径 3.5 mm) であった。それ以外の 59 個のプラスチック片は図 4 に示す通り、長軸径が 4.0 mm 以下、短軸径が 2.0 mm 以下だった。

多数あったポリエチレンとポリプロピレンの大きさについて、ポリエチレンは長軸径と短軸径共に 1.0 mm 以内の球状に近いものが多数あった。一方、ポリプロピレンは、長軸径が 0.5 mm から 3.5 mm まで幅広く大きさが違うものがあることが確認された。

4. まとめと今後の課題

今回、分流式下水道の雨水ポンプ場において、流入

水 900 L 中に含まれる 0.3 mm 以上のプラスチック片の数、種類、大きさを調査した結果、以下のことがわかった。

(1) プラスチック片の数密度は 0.03 個/L から 0.11 個/L だった。

(2) 5 つの試料中全てで、プラスチック片の個数の 7 割以上がポリエチレンとポリプロピレンであった。

(3) プラスチック片のほとんどが長軸径 4.0 mm 以下、短軸径 2.0 mm 以下だった。

また、本調査の課題として以下が挙げられる。

(1) 本調査で検出したプラスチック片は長軸径 4.0 mm 以下の小さなものがほとんどであり、本調査時の降水量が、1 時間最大降水量 0.5 mm 程度と小降雨であったため、レジ

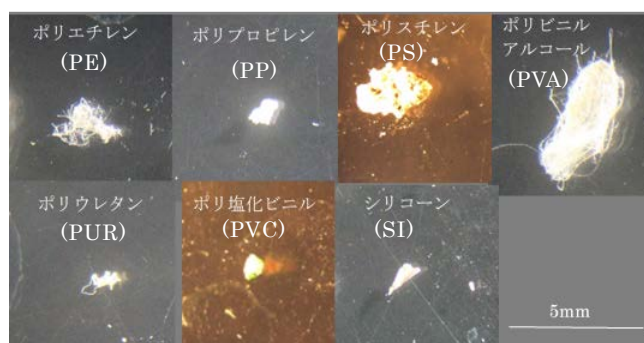


写真 3 試料中のプラスチック片

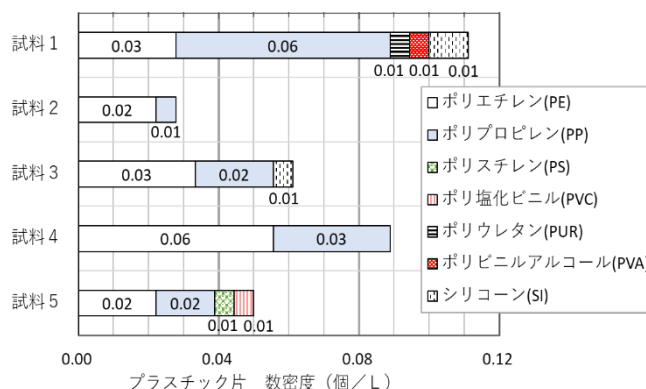


図 3 試料ごとのプラスチック片数密度

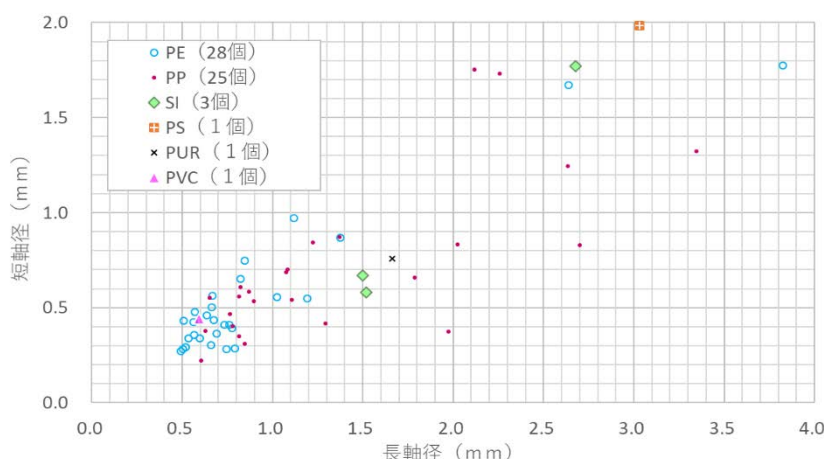


図 4 プラスチック片ごとの長軸径と短軸径

袋やペットボトル等の大きなプラスチックごみは確認されなかった。しかし、国道や商業地域における市街地のごみ堆積状況調査結果 2)によると、レジ袋などのプラスチックごみが確認されており、そのような場所ではレジ袋なども雨水とともにポンプ場に流入している可能性が懸念される。

(2) 下水中のプラスチックの分析方法は確立されていないため、今回は試験的に分析を実施したが、引き続き、文献調査などにより分析事例を収集し、より適切な分析手法を検討する必要がある。

上記の課題について検討した上で、引き続き雨天時における下水中のプラスチックごみについて調査を行う予定である。

謝辞

調査場所の提供にご協力頂いた地方公共団体の皆様、及び本調査にあたりご助言いただいた土木研究所水環境グループ水質チームの鈴木裕識氏に心より謝意を表す。

参考文献

- 1) 高田秀重, 山下麗: 海洋プラスチック汚染概論—研究の歴史, 動態, 化学汚染—, 用水と廃水 Vol.60, No.1, 2018.1
- 2) 二瓶泰雄, 片岡智哉: 市街地のごみ堆積状況と河川水中のマイクロプラスチック汚染状況, 用水と廃水 Vol.60, No.1, 2018.1
- 3) 田中周平: 下水処理過程におけるマイクロプラスチックの除去過程, 用水と廃水 Vol.60, No.1, 2018.1

3. 下水道資源としてのレアメタル回収に関する研究

下水処理研究室 室 長 田 陽 淳
研 究 官 矢 本 貴 俊

1. はじめに

平成27年度版下水道統計¹⁾によると、下水道より脱水汚泥として年間7,408 千t-DSが排出され、そのうち約63%が焼却されている(図-1)。また、焼却炉から排出される焼却灰は年間214 千tであり、そのうち約59%がセメント原料として再利用されている(図-2)。しかし、国内のセメント需要²⁾は年々減少傾向にあり、2017年度のセメント需要はピーク時の1990年と比較し約49%まで減少した(図-3)。今後は、時代と共に変化する経済情勢に適用可能な再利用用途の創出が求められる。

下水汚泥には、種々のレアメタルが含まれていることが海外を中心とした調査研究により報告されている³⁾。レアメタル（希少金属）は、「地殻中における賦存量が少ない金属、又はその抽出が経済的・物理的に非常に困難な金属」を総称するものであり⁴⁾、液晶テレビ、携帯電話、自動車をはじめとするあらゆる製造品に不可欠な素材であるため、その安定供給は我が国の製造業の国際競争力の維持・強化の観点から重要とされている⁵⁾。しかし、現状我が国においてレアメタルを産出する鉱山は存在せず、リサイクルを除く殆どを海外からの輸入に頼っているため⁴⁾、レアメタルの国内供給源の確保は国家的な課題である。このような背景のもと、本研究は、国内の下水処理場から排出される下水汚泥焼却灰の資源的価値を評価するために必要なデータを取得するとともに、レアメタル回収技術についても情報を収集し、下水道によって流域から集められた資源の活用促進のための基礎研究資料として取りまとめることを目的とし、平成30～31年度で実施するものである。

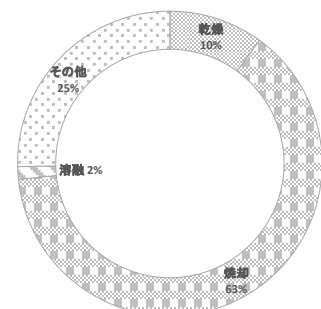


図-1 脱水汚泥の処理

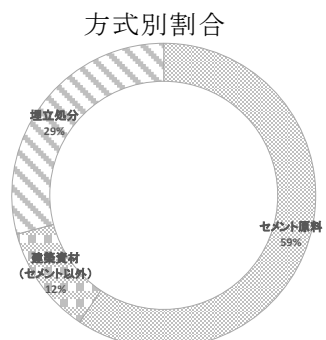


図-2 焼却灰の再利用状況

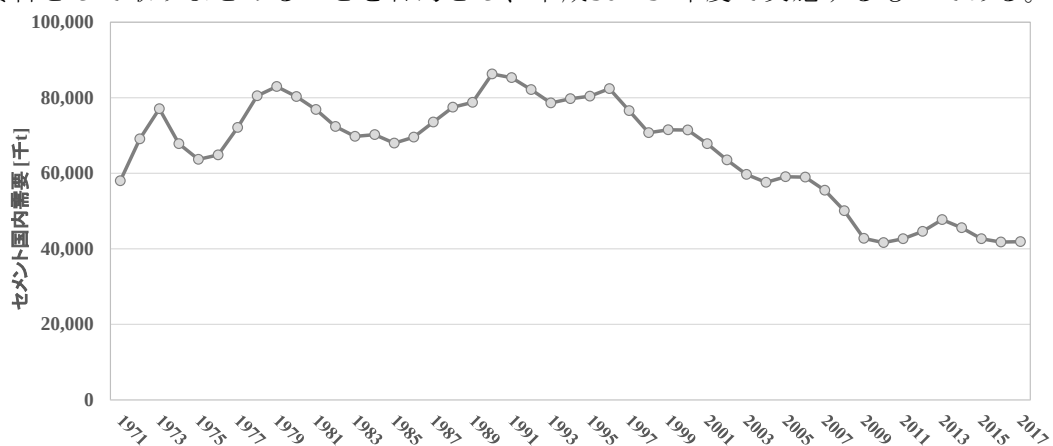


図-3 セメント国内需要の推移

2. 下水汚泥焼却灰に含まれるレアメタル含有量の測定

2.1 調査フィールド・採取試料

調査対象の下水処理場及び採取した試料の概要を表-1に示す。対象処理場の選定にあたり、予め約30箇所の下水処理場へ工業排水流入率(平成29年度実績)に関するアンケート調査を実施した。対象処理場は、生活排水が多く流入する処理場(A群:N=14)、及び工業排水が多く流入する処理場(B群:N=3)の計17処理場(13道府県)を選定した。

採取試料については、各処理場の流動焼却炉から発生する焼却飛灰を採取した。なお、焼却炉を有さない2箇所の処理場については、脱水機から発生する含水率80%程度の脱水ケーキを採取した。採取した脱水ケーキは105-110℃で2時間乾燥後、電気炉を用いて600±25℃で1時間強熱し灰化した。

表-1 調査対象処理場及び採取試料

下 水 処 理 場						試 料	
群	No	処理場	焼却灰発生量[t/年] ^{※1}	工業排水流入率[%] ^{※2}	炉型式	採取試料	焼却灰の色
A 群	1	A	6791	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	山吹茶
	2	B	870	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	赤銅色
	3	C	1285	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	煉瓦色
	4	D	1935	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	樺色
	5	E	297	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	赤銅色
	6	F	832	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	赤銅色
	7	G	792	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	土器色
	8	H	705	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	代赭
	9	I	1592	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	白花色
	10	J	367	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	油色
	11	K	683	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	樺色
	12	L	125	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	伽羅色
	13	M	1352	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	煉瓦色
	14	N	241	20%未満	流動焼却炉	焼却飛灰	樺色
B 群	15	O	-	90%以上	流動焼却炉	焼却飛灰	琥珀色
	16	P	-	90%以上	-	脱水ケーキ	榛色 ^{※3}
	17	Q	-	90%以上	-	脱水ケーキ	錆色 ^{※3}

※1 下水道統計平成26年度版より。記載の無い場合はハイフン(-)とする。

※2 各処理場への工業排水流入率に関するアンケート調査より

※3 処理場から採取した脱水ケーキを、105-110℃で2時間乾燥、600±25℃で1時間強熱灰化し得られた焼却灰の色

2.2 測定方法

焼却灰試料は、ベッセルに約0.5 g を正確にはかり取り、硝酸10mL、塩酸3mL及びフッ化水素酸 3 mLを加えて、軽く蓋をして室温で12時間以上放置後、密閉してマイクロウェーブ試料分解装置により分解を行った。試料分解後は、十分放冷してから密閉容器を空け、ベッセル内の分解物を少量の硝酸（1+100）で洗い込みながら100 mLテフロンビーカーに移した。テフロンビーカーは、ホットプレート上180℃で乾固させないよう液量が3mL程度になるまで加熱し、フッ化水素酸を除去した。放冷後、100mL硝酸（1+100）で100 mLメスフラスコに分解物を洗い込みながら、100 mLに定容した。なお、定容後の全ての試料から残留物が確認されたため、ICP質量分析計で測定する時は、メンブレンフィルターによりろ過してから、試料溶液とした。

試料溶液について、内標準法によりICP-MSで金属含有量[mg/kg・DS]を測定した。なお、標準液にはBeとReの混合標準液及びTe標準液を用いた。測定値は、1.5秒間隔で3回測定

した平均値を採用し、定量下限値は0.02 mg/kg・DSとした。

2.3 測定項目

測定対象元素は、我が国でレアメタルと称されている46元素(Pmを除く)を設定し、参考として、貴金属であるAuとAg、ベースメタルであるCuを加えた計49元素(表-2 灰色部分)とした。

表-2 調査対象処理場及び採取試料

H																		He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La系	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac系																
レアメタル (レアアース には下線)	La系	<u>La</u>	<u>Ce</u>	<u>Pr</u>	<u>Nd</u>	<u>Pm</u>	<u>Sm</u>	<u>Eu</u>	<u>Gd</u>	<u>Tb</u>	<u>Dy</u>	<u>Ho</u>	<u>Er</u>	<u>Tm</u>	<u>Yb</u>	<u>Lu</u>		
	Ac系	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

2.4 金属含有量測定結果

下水汚泥焼却灰試料中の金属含有量測定結果を図-4に示す。Reについては、定量下限値0.02 mg/kg・DSを下回ったが、それ以外の金属元素については、焼却灰中の含有量がICP-MSの定量下限値以上であることを確認した。17検体の中央値が1000 mg/kg・DS以上の元素は、Ti,Mn,Cu,Baであり、100 mg/kg・DS以上の元素はCr,Ni,Yであった。また、V及びWについては、中央値は100 mg/kg・DS以下であったが、処理場によっては1000 mg/kg・DSを上回る結果であった。最大値と中央値の比に着目すると、Ti,Co,Ni,Pd,Ta,Wについては10～100程度であり、処理場毎のばらつきが大きく生じた。

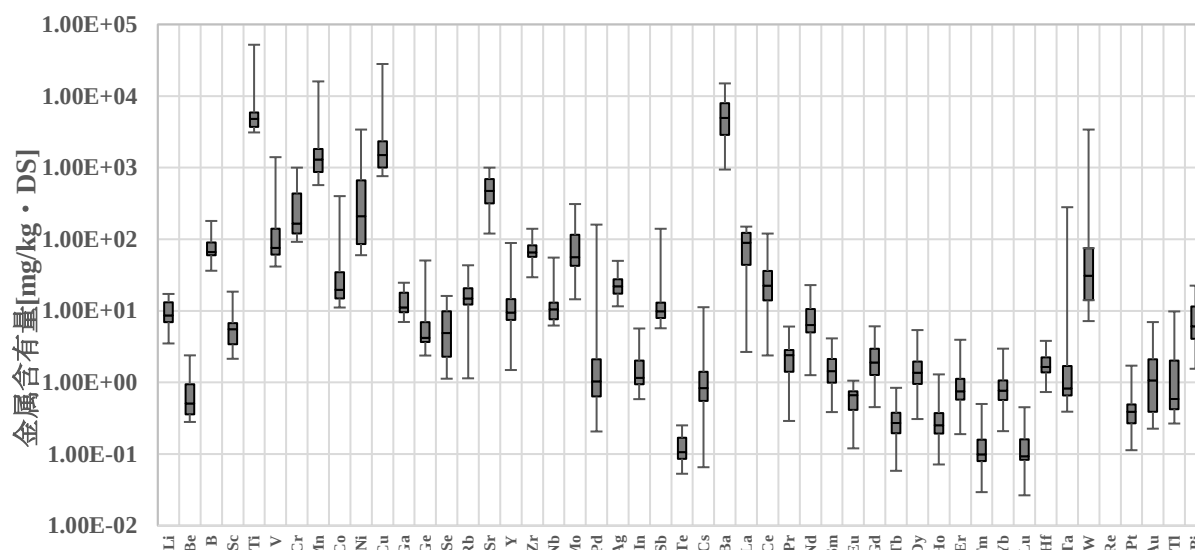


図-4 下水汚泥焼却灰中の金属含有量測定結果

2.5 影響因子の検討

2.4 金属含有量測定結果において、複数の金属元素について、処理場間で10から100倍程度の差が生じていた。下水処理場へ流入する金属の流入源として、工場排水や温泉排水等が挙げられてきたが、これまで詳細に調査された事例は少ないことから、解明されていない部分が多い。ここでは、工業排水流入率が金属含有量へ与える影響について検討した。

表-1に示した、工業排水流入率の異なるA群(N=14)及びB群(N=3)二種類の母集団について、t検定(有意水準5%)を行った。検定結果を表-3に示す。

表-3 t検定の結果

B 群 > A 群	<u>Ti, V, Mn, Co, Ni</u> , Cu, Ge, Y, <u>Nb, Mo</u> , Dy, Er, Yb, Hf, <u>W</u> , Tl
A 群 > B 群	Ba, La, Bi
有意差なし	上記以外の 30 元素

検定を行った結果、測定対象の49元素のうち、30元素は「有意差なし」であった。すなわち、多くの金属元素は工業排水流入率の大小に関係はなく、金属の主たる流入源として工業排水は考えにくいと言える。

一方で、「備蓄対象元素」として指定されている9種類のレアメタル⁴⁾のうち、表-3下線で示す8種類については、工業排水流入率の高いB群に多く含まれる結果となった。これらの元素はレアメタルの中でも流通量が多いため、工場からの排水に含まれている可能性はあるが、本調査では特にB群の母数が少ないことから、外れ値による検定結果への影響も否定できず、今後精査する必要がある。検定結果の一例を図-5に示す。

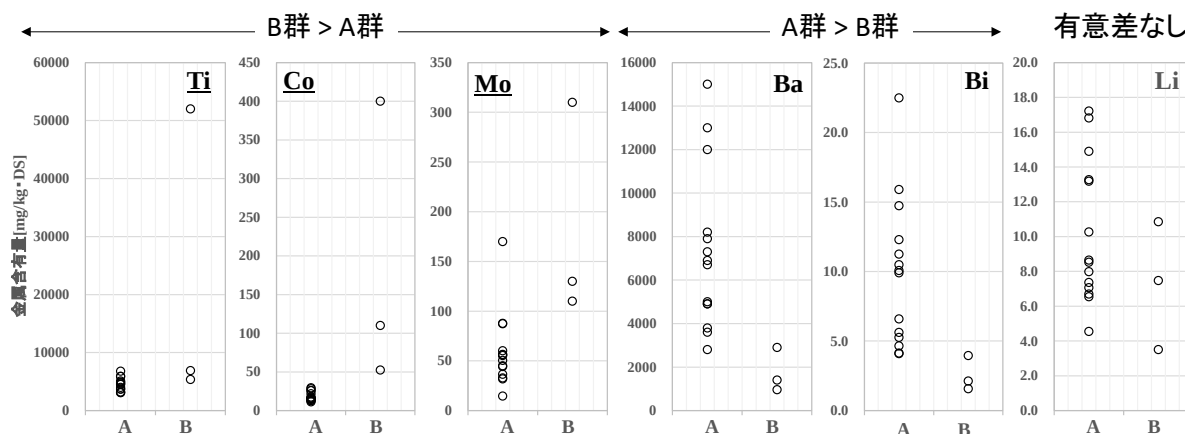


図-5 t 検定結果の一例

Ti : B 群の 1 処理場のみ著しく含有量大きい。

Co : B 群の 3 処理場いずれにおいても、A 群の含有量よりも大きい。

Mo : 傾向としては B 群の方が含有量は大きいですが、A 群にも含有量が高い処理場が見られる。

Ba : 全体的に A 群の方が、含有量が高い。

Bi : 全体的に A 群の方が、含有量が高い。

Li : 両者とも大きな差異は見られない。

2.6 海外における調査事例との比較

本調査で取得した下水汚泥焼却灰中のレアメタル含有量について、海外における調査事例との比較を行った。Oliverらは、ドイツの下水処理場24箇所から下水汚泥焼却灰試料を採取し、ICP-MSにより金属含有量を測定した⁶⁾。国ごとに流入下水の性状や、処理方式等は異なるため、金属含有量の大小について安易に評価することはできないが、参考として比較した。

図-6にドイツの下水処理場(文献：N=24)の中央値および日本の下水処理場(本調査：N=17)の中央値の比較結果を示す。Ba,Ni,La,Mo,Ag,Se,Pt,Pdについては、文献よりも2～10倍程度大きな値を示していた。一方、Zr,Ce,Pr,Hf,Sm,Ndについては、文献の50%以下であった。

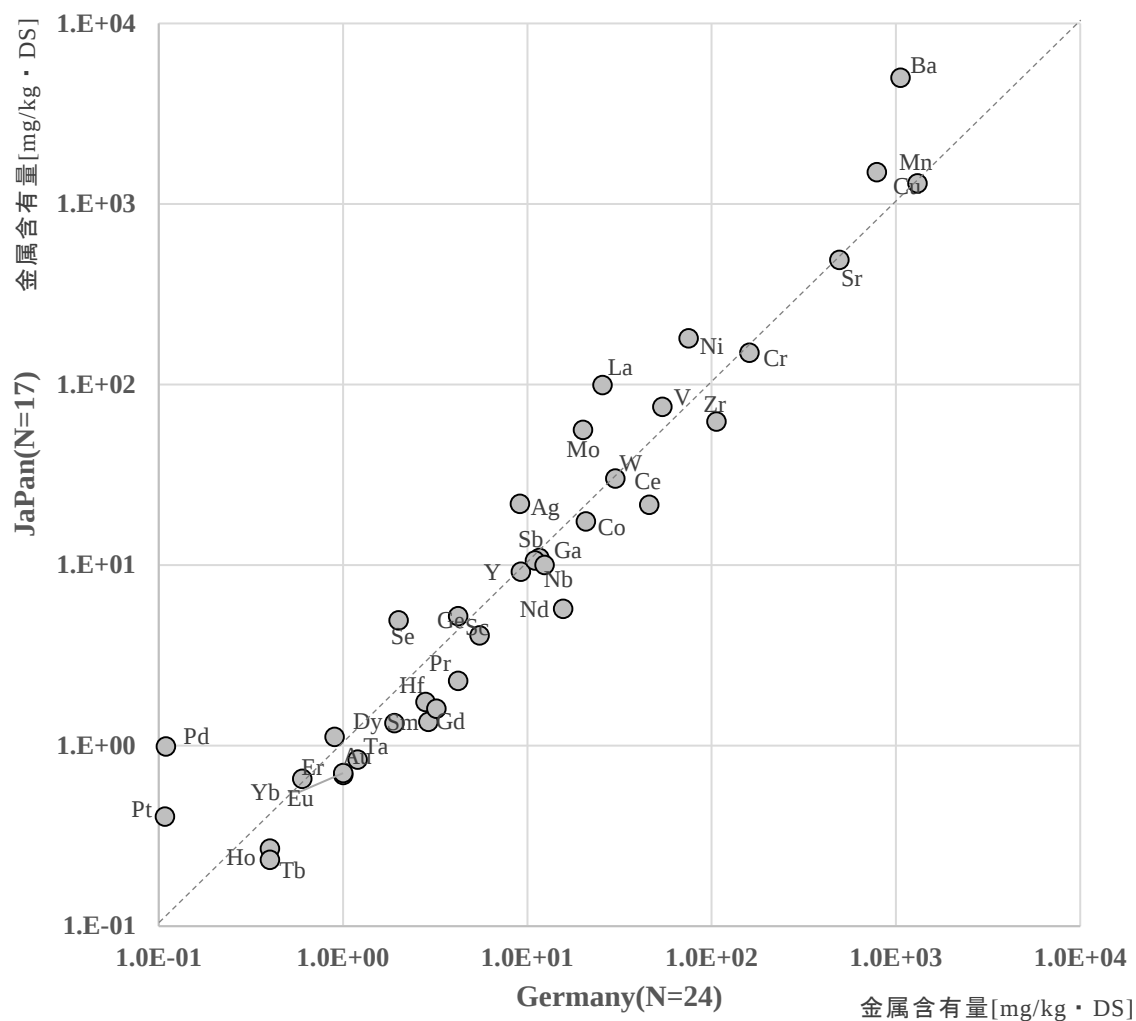


図-6 海外における調査事例との比較結果

3. 下水汚泥焼却灰に含まれるレアメタルの潜在的価値の試算

3.1 試算概要・方法

下水汚泥焼却灰中にレアメタルが含まれていても、回収したレアメタルの価値に対して、回収コストが上回っていた場合は、回収事業として成立しない。ここでは、測定した金属含有量にレアメタルの市場価格乗じることにより、下水汚泥焼却灰中のレアメタルの潜在的価値を試算した。なお、実際に回収を行うためには、精錬・不純物除去を含めて相当量の費用が必要になることが想定されるが、本試算は簡易的な参考値であるため、回収コストについて考慮していないことに留意したい。

以下の式(1)で示すとおり、測定した金属含有量[mg/kg・DS]に USGS より報告されている各種レアメタルの市場価格[\$/kg)を乗ずることにより、下水汚泥焼却灰中に含まれる各種金属の潜在的価値を試算した。

$$\text{潜在的価値[JPY/t・DS]} = \text{含有量[mg/kg・DS]} \times \text{市場価格[$/g]} \quad \text{式(1)}$$

試算に用いたレアメタルの市場価格を表-4 に示す⁷⁾。レアメタルは市場規模が小さいため、急激な需要増加や産出国の資源確保政策等の影響を受けやすく⁸⁾、その市場価格は年変動率が高い。そのため、試算に用いる各種レアメタルの市場価格は直近の5年平均値(2013～2017)とし、ドル円換算についても5年平均値(\$1=116.6505 円)を用いた。

表-4 レアメタルの市場価格

(単位: 円/g)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
1.0	57											0.1					
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
		3,046	1.1	1.2	1.2	0.006		4	1.4	0.7		52	177		6		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
-	0.01	5	0.1	3	2				2,665	67		56		1.0	9		
Cs	Ba	La系	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
-	0.02		66	24	3	276			4,225	4,566		808		2			
Fr	Ra	Ac系															
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			0.4	0.4	-	6		-	43	-	53	32	-	-	-	-	-
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

3.2 試算結果

下水汚泥焼却灰 1 トンあたりのレアメタルの潜在的価値の試算結果を図-7 に示す。下水汚泥焼却灰 1 トンあたりの潜在的価値（17 処理場の中央値）は、Sc,Ti,Au,Pd,Pt,Ag,Cu の順に高かった。また、最大値に着目すると、E 処理場の Pd の資源的価値は 1 トンあたり約 43 万円と試算された。

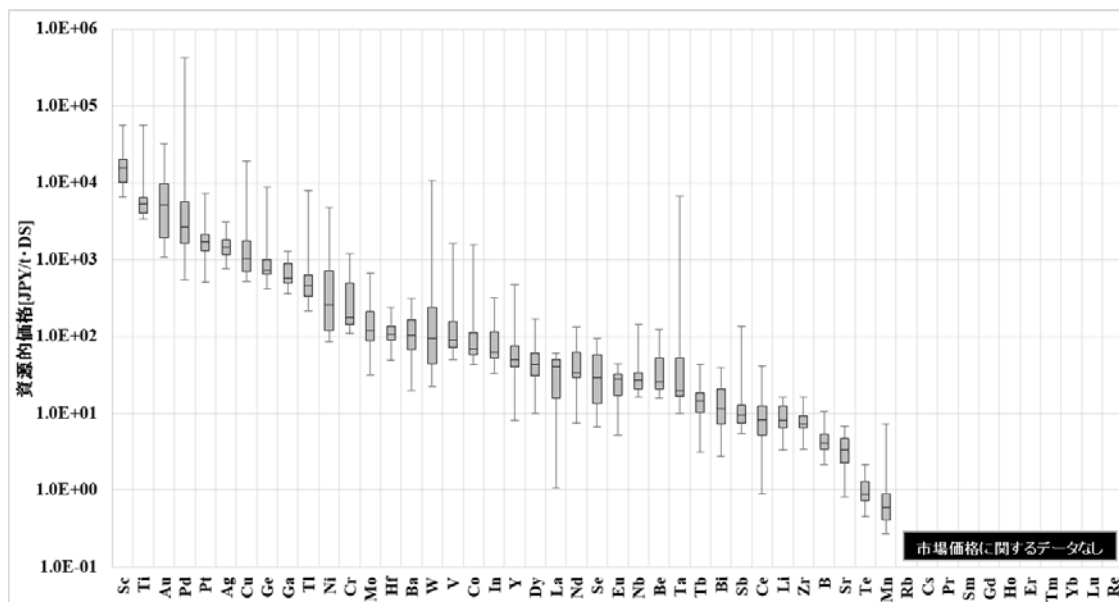


図-7 下水汚泥焼却灰 1 トンあたりの資源的価値

3.3 （参考）鉱石品位との比較

プラチナ(Pt)、パラジウム(Pd)をはじめとする白金族元素は、鉱石中の含有量（以下、鉱石品位という）が低いため、純金属 1g の生産に 1t もの岩石を採掘する必要があると言われている⁹⁾。白金族元素は、宝飾品として使用されるほか、その物理的・化学的特性から工業用需要も旺盛であり、レアメタルの中でも特に高価である。ここでは、参考として世界の主要なパラジウム鉱山の鉱石品位と、下水汚泥焼却灰中のパラジウム含有量を照らし合わせた。

図-8 に示すとおり、3 ヶ所の処理場の下水汚泥焼却灰中のパラジウム含有量は、世界で最もパラジウムを産出している StillWater 鉱山の鉱石品位(約 14.8 g/t-鉱石)を上回っていた。特に、最も含有量の高い E 処理場においては、10 倍以上の高品位であった。また、他の処理場においても、数 g/t 程度のパラジウム含有量であり、主要な鉱脈と遜色ない値であった。

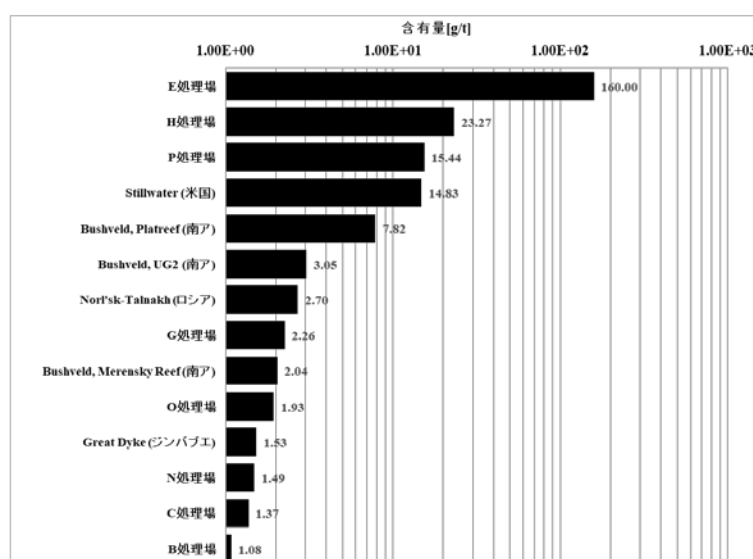


図-8 世界の主要なパラジウム鉱山の鉱石品位と下水汚泥焼却灰中のパラジウム含有量の比較結果

4. まとめ

本調査により得られた知見を以下に示す。

- ・各地の下水処理場から採取した下水汚泥焼却灰を対象に金属含有量の測定を行った結果、Re 以外の全てレアメタルについて 0.02 mg/kg・DS 以上含有されていることを確認した。特に Ba,Ti,Cu,Mn については中央値が 1,000 mg/kg・DS 以上と比較的多く含有されていた。
- ・工業排水流入率が金属含有量へ与える影響について検討した結果、Ti,Co,Mo など一部の元素は工業排水流入率の大きい処理場に多く含まれている結果となったが、その他 30 元素については有意な差が認められなかった。
- ・下水汚泥焼却灰中のレアメタルの潜在的価値を試算した結果、Sc,Ti,Au,Pd,Pt,Ag,Cu の順に高かった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、下水汚泥試料（焼却灰、脱水ケーキ）及び関連情報をご提供下さった 17 ヶ所の下水処理場の関係者に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：平成 27 年度版下水道統計, 2018
- 2) 一般財団法人セメント協会：セメントの需給, <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jh1.html>
- 3) Bas, V., et al., Quantification of Element Fluxes in Wastewaters: A Nationwide Survey in Switzerland, Environmental Science & Technology, Vol.51, pp.10943-10953, 2017
- 4) 大嶋健志：レアメタル資源確保の現状と課題，立法と調査, No.311, 2010
- 5) 高木哲一：日本のレアメタル確保戦略,地質ニュース 670 号,pp.4-7, 2010
- 6) Oliver, K., et al., Complete Survey of German Sewage Sludge Ash, Environmental Science & Technology, Vol.48, pp.11811-11818, 2014
- 7) USGS：Mineral Commodity Summary, 2013～2018
- 8) 西山孝：レアメタル・資源-38 元素の統計と展望-, p.9, 丸善株式会社, p.9, 2009
- 9) レアメタル-技術開発で供給不安に備える-, 独立行政法人産業技術総合研究所レアメタルタスクフォース編, 工業調査会, 2007
- 10) 中川 充:レアメタルテキスト：(2) 白金族元素 *資源地質, 60(2), 123 ～ 140 , 2010