

Ⅱ. その他の予算による調査研究

1. 液状化等により被災した管路に関する 情報収集及び傾向分析

下水道研究室	室長	岡安 祐司
	研究官	平出 亮輔
	研究官	濱田 知幸
	交流研究員	山路 昂央

1. はじめに

下水道分野の地震に対する防災、減災のための手引書として『下水道施設の耐震対策指針と解説（以下、耐震指針という）』がある。1981年に耐震指針の初版（1981年当時は『下水道施設地震対策指針と解説』）が発刊されて以降、これまでに3回の改定が行われ、阪神・淡路大震災（1995年）、新潟中越地震（2004年）、東日本大震災（2011年）等の巨大地震の教訓を踏まえた耐震化手法が示されてきた¹⁾。しかしながら、下水道管路施設（重要な幹線等）の耐震化は2017年度末で50%程度である。今後も耐震化の整備の推進には、多くの費用と時間が必要であるため、効率的な整備計画が重要となる。このため、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研という）では、地方公共団体の耐震化の支援を目的に、地震で被災した下水道管路施設の基本諸元及び被災情報等をまとめた下水道管路地震被害データベース（以下、DBという）を運用公開している。

2018年（平成30年）に発生した平成30年北海道胆振東部地震（以下、本地震という）において、多くの下水道管路施設が被災したため、国総研では（1）DBの更新を目的に情報収集及び整理、（2）そのデータを用いて傾向分析、（1）及び（2）で整理した情報を踏まえて、国総研下水道研究室が開発中である地震発生時に管路の被災率及び必要調査人数等を算出する下水道地震被害即時推定システムの精度向上に関して検討を行った。また、本地震では地盤の大規模な液状化により、土砂が流動したとの報告があるため、基礎地盤が流出した際に埋戻し部の液状化対策工法に与える影響を把握することを目的に、国総研内で基礎実験を行ったので本稿ではそれらの結果について紹介する。

2. データベースの整理について

収集したデータは、本地震における被災路線のテレビカメラ報告書（人孔目視調査報告書）や災害査定等の情報であり、各地方公共団体に依頼して収集した。次に、管属性（管種、管径、土被り等）や施工方法等の管路施設情報、地形条件、計測震度等の地震関連情報を用いて整理を行った。なお、耐震化施工状況については、各地方公共団体へのヒアリング、仕様書等の発注資料や報告書等で確認した。以上を踏まえて傾向分析を行った。

3. 下水道管路施設の被害傾向分析

3.1 平成30年北海道胆振東部地震概要

2018年9月6日3時7分に発生した本地震は、胆振地方中東部を震源として、陸のプレート内で発生する逆断層型地震であった²⁾。震源の深さは37kmであり、地震規模（エネルギー）を

表 1 埋戻し土の液状化対策概念図(緊急提言当初) 4)

埋戻し方法	埋戻し土の締固め	砕石による埋戻し	埋戻し土の固化
概要	良質土で締固め(締固め度90%程度以上)ながら、埋戻す。	地下水位以深を透水性の高い材料(砕石)で埋戻す。	地下水位以深をセメント固化改良土等で埋戻す。
概念図			
液状化対策の効果	十分な締固めを行うことにより、埋戻し部の過剰間隙水圧を小さくすることが出来るため、液状化に対する効果は大きい。	マンホール・管路近傍部の過剰間隙水圧が消散するため、液状化に対する効果は大きい。	埋戻し部が非液状化層となるため、液状化に対する効果は大きい。

表すマグニチュードは6.7、揺れの強さを表す震度は最大7を観測した³⁾。写真1及び写真2は現地調査を行った際の写真である。

3.2 傾向分析の結果

本地震で下水道管路が被災した5地方公共団体の472スパン(人孔被災を含むと761スパン)を対象に被災情報整理を行い、DBの更新を行った。なお、被災延長は、総延長8,515kmに対して20kmであった。

図1は本地震における布設年度別被災延長と被災率(被災延長/布設総延長)を示したものである。なお、布設年度が確認できない地方公共団体があったため、対象は4地方公共団体となる(総延長8,396km、被災延長19km、被災率0.2%)。1998年度から2003年度の被災率は1.9%と被害が集中している。これは、1998年から複数の地方公共団体が本格的に下水道整備を開始したが、埋戻し土の液状化対策工法(表1参照:①埋戻し部の締固め度を90%以上により過剰間隙水圧を小さくする、②砕石等による埋戻しにより過剰間隙水圧を消散させる、③地下水位以深を固化改良土で埋戻して非液状化層とする)が示される以前であったため、被災した下水道管路が、対策工法で施工されていないことが原因と思われる。このため、埋戻し土の液状化対策工法が示された2004年度から2017年度の被災率は0.3%と低い値であった。

このことから、被災率が低く抑えられているのは、埋戻し土の液状化対策工法が普及している効



写真1 下水道管路施設と道路の崩壊



写真2 マンホール周辺の道路陥没

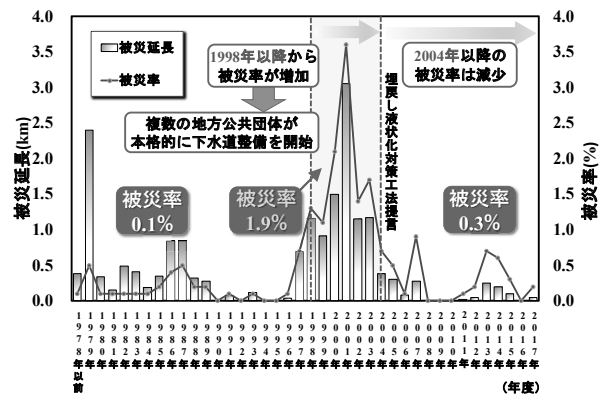


図1 布設年度別被災延長

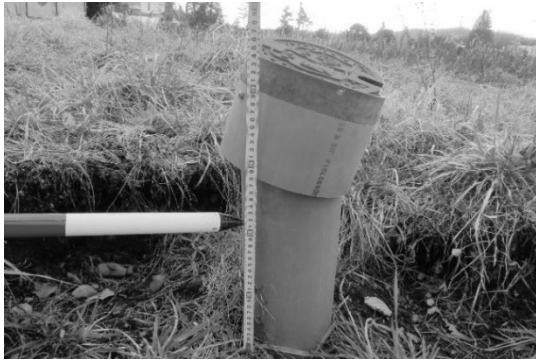


写真3 公共ます浮上状況

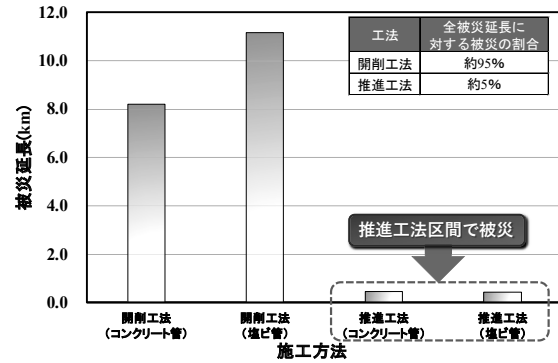


図2 施工方法別被災延長

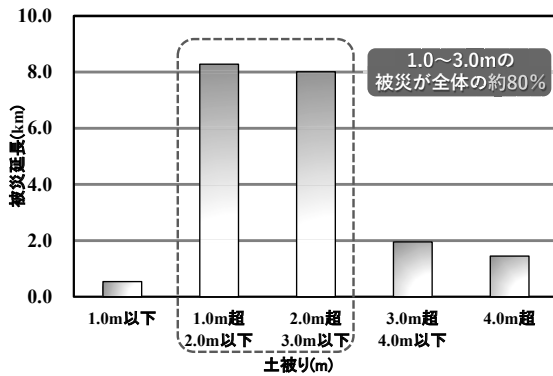


図3 土被り別被災延長

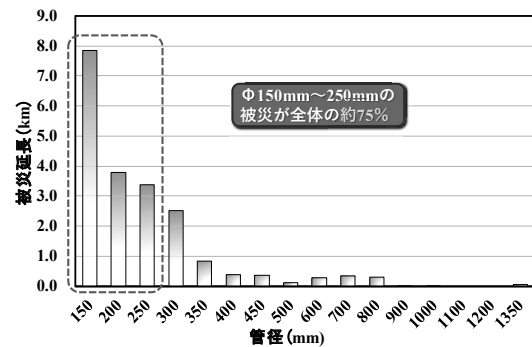


図4 管径別被災延長

果であり、有効に機能しているものと推測される。なお、2004年度から2017年度の被災については、液状化対策工法の未施工や施工方法の認識違い、特殊な被災事例があったことを、地方公共団体へのヒアリング、現地調査等で確認した。特殊な被災事例としては、下水道管路の本管で適切な施工が行われたものの、末端の公共ます及び取付管が液状化対策工法未施工であったこと、かつ、傾斜地の低い箇所地下水位が高い状況であったことにより、公共ます及び取付管で浮き上がり（写真3）が発生したことで本管自体も引っ張られて被災したものと推察される。

図2は本地震の施工方法別被災延長を管種別に集計したものである。推進工法の区間より開削工法の区間での被災が顕著であり、全被災延長に対する開削工法区間の割合は約95%であった。これは、推進工法に比べ開削工法が一般的に土被りの浅い施工となり、地震による地盤変状の影響を受けやすいことが一因と考えられる。なお、図3のとおり開削工法で施工された箇所の土被り1.0~3.0mに被害が集中しており、平成28年（2016年）熊本地震（以下「熊本地震」）も同様の傾向であった。熊本地震では一般的に総延長に対する開削工法区間の延長割合が高いことと、土被りが浅く、埋戻しの液状化など地盤変位の影響を受けやすいためであったと考えられている⁵⁾。次に、本地震における大きな特徴として、これまでの地震であまり見られなかった推進工法用硬質塩ビ管が被災しており、全被災延長に対する推進工法区間の割合は全体の約5%であった。さらに、本地震における管径別の被災延長（図4）では小口径管に被災が集中しており、φ150~250mmが全体の75%であった。ただし、本地震における被災情報整理では布設工法別、土被り別等において、被災しなかった下水道管路も含めた布設総延長の把握が困難であったため、被災率の算出までには至っておらず、今後の課題の一つである。次に、コンクリート管の被災要因は主としてクラックや継手ズレが多く、その割合は全体の約60%に及

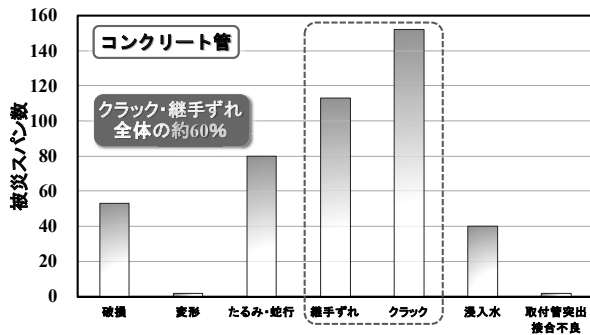


図5 コンクリート管被災傾向

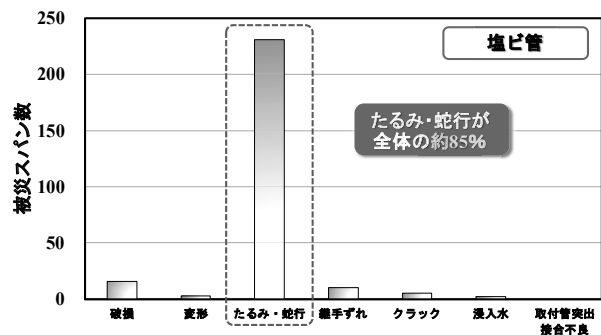


図6 塩化ビニル管被災傾向

表2 最大震度別における各震度別の被災率

震度	被災率(%)		
	北海道 胆振東部地震	最大震度7の 地震	最大震度6強及び 6弱の地震
7	20.1	6.4	
6強	7.8	2.6	2.0
6弱	0.1	0.5	0.2
5強	0.2	0.2	0.0

※1 阪神・淡路大震災以降の地震を対象としている。
 ※2 阪神・淡路大震災及び東日本大震災は除く。

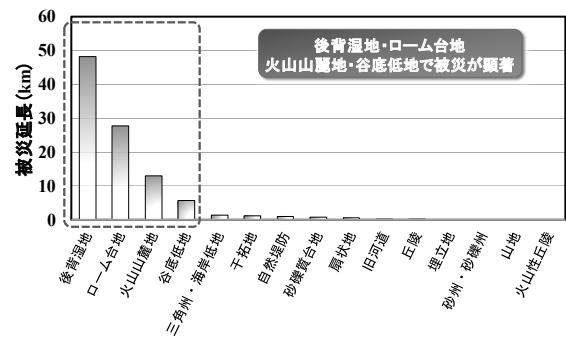


図7 下水道管路の微地形分類別被災延長

んでいる(図5)。この原因としては、開削部・立坑部の埋戻し土(山砂)の締固め不足に起因した地盤変状と推察される。また、塩化ビニル管の被災要因については、ほぼたるみ・蛇行であり、その割合は全体の約85%であった(図6)。

表2に本地震、阪神・淡路大震災以降に発生した最大震度7の地震(プレート型地震の東日本大震災と震度階級設定が異なる阪神・淡路大震災は除く)、最大震度6強及び6弱を計測した地震における震度別の被災率をそれぞれ示す。本地震における被災率は震度が大きいほど増大する傾向にあり、その被災率は震度7で20.1%、震度6強で7.8%、震度6弱で0.1%であり、最大震度7を記録した地震の被災率と最大震度6強及び6弱を計測した地震の被災率においても同様の傾向がみられる。なお、どのケースも震度6弱以下は被災率1%以下と低い値であることから、震度6弱以下の地域では下水道管路施設が大きく被災する可能性は低いと考えられる。しかし、本研究において下水道管路の被災率は地盤状況等を考慮していないため、さらなる傾向分析が必要である。

図7に下水道管路の微地形分類別被災延長を集計した結果を示す。なお、過去の調査において熊本地震のデータも同様に収集整理しており、本地震に加えてそのデータも含めるものとする。被災した下水道管路は後背湿地、ローム台地、火山山麓地、谷底低地に集中しており、治水地形分類では後背湿地、土地分類基本調査図においては扇状地性低地及び三角州性低地等での被災が多い傾向にある。

4. 下水道地震被害即時推定システムの精度向上に関する検討

4.1 下水道地震被害即時推定システム

近年、大地震が頻発しており、南海トラフ地震等の広域で甚大な被害が予想される巨大地震

表 3 下水道地震被害即時推定システムにおける検討項目及び現状の考え方

検討項目	現状	改善点
① 計測震度別の被災率	「大規模地震による被害想定手法および想定結果の活用に関するマニュアル」（平成18年3月）で設定した震度階級別により推定被災延長を算出。	本システムにおいて震度5強以下の被災率を一律0%とした。
② 布設年度別被災延長と被災率	現状の被害推定システムでは1997年以前施工の管路延長が被災すると設定。	埋戻し土の対策工法が示される2004年度より前の管路が被災するものとして設定を変更。
③ 微地形区分別の被災延長	P_L 値は内閣が公表している「南海トラフ巨大地震の被害想定について(第一次報告)」の設定値を使用。 P_L 値が不明な場合は「下水道の地震対策マニュアル2014年版」（日本下水道協会）および「東北地方整備局における即時震害予測システム(SATURN)の開発」（国総研）を参考に微地形区分から液状化危険度(A~D)に読み換え。	谷底低地、ローム台地、火山山麓地の液状化危険度ランクをAに変更。
④ 必要編成人数	過去の大規模地震に関する文献や資料では被災時の調査人数が公表されていないことから、現状では東日本大震災の仙台市における日進量で算出。	1日あたりの調査日進量及び必要編成人数の整理を行った結果、日進量を5km、1班あたりの投入人数を5人に変更。
⑤ 使用する地震データ	地震情報取得プログラムを用いて防災科学技術研究所（防災科研）HP上の強震観測網（K-NET、KiK-net）の公開データより取得。	気象庁発表震度でも計算を可能となるようにシステムを変更。

の発生が危惧されている。下水道は公衆衛生の向上等に大きく貢献する重要なライフラインの一つであるため、下水道の被災は都市生活や市民生活等に大きな影響を及ぼす。また、管路やマンホールは道路下に埋設されていることが多いため、地震発生時に下水道管路施設の破損や変位に伴う交通障害等を、地震発生後の調査により早急に把握することが重要である。そのため、下水道分野では大地震が発生した際、各地方公共団体において下水道施設の被害状況を把握するために調査を行い、必要に応じて応急復旧を行う場合がある。しかしながら、発災直後は人命救助が最優先であり、さらに住民対応や職員自身の被災等により、下水道管路施設の点検に必要な人員が確保できず、被災情報の把握が難しい状況が続く可能性がある。このため、発災直後は支援機関へ被災現場の情報が届かない“情報の空白期”が発生する。

そこで国総研では、大地震が発生した直後の情報の空白期においても各地方公共団体の概算被災管路延長と必要調査人数を推定し、迅速な支援体制構築を可能とする下水道地震被害即時推定システム（以下「本システム」）の開発を進めている。計算方法は、被害推定システム（Microsoft Excel）に各市町村の震度情報を入力することで対象市町村の管種、液状化危険度もしくは液状化指数（ P_L 値）の情報から被災率を決定し、各市町村の管路ごとの総延長より推定被災延長を算出する。さらに、過去の地震時の実績を整理した1日当りの点検延長、1班当りの点検編成人数を用いて推定被災延長より必要点検人員数を算出する。なお、計算は市町村単位で行い、データベースは「下水道統計」（日本下水道協会）をベースに作成している。

本研究では下水道管路施設の被害傾向分析で整理した情報を踏まえ、市町ごとに選定している液状化危険度と P_L 値の選定方法の見直しによる精度向上、被災率の見直しによる精度向上、支援人数の見直しによる精度向上の検討を行った。

4.2 下水道地震被害即時推定システムの精度向上及び利便性の向上に関する検討

本検討においては、本システムの精度及び利便性を向上させることを目的に、表 3 に示す 5 つの項目について検討を行った。

4.2.1 計測震度別の被災率の検討（表 3①）

表 4 は本システムで使用している震度階級（以下「震度」）別による液状化危険度ごとの管種別平均被災率を示したものである。管種別平均被災率は阪神・淡路大震災（1995年）及び新潟県中越地震（2004年）を整理して算出されており、震度5弱以上で被災率が設定されていた。しかし、表 2 の結果により、本システムにおける震度5強以下の被災率を一律0.0%に変更した。

4.2.2 布設年度別被災率の検討（表 3②）

本システムでは、下水道施設の耐震対策と解説の改定があった1997年を基準に、それ以前に施工された管路を未耐震として設定した。なお、1997年の改定は阪神・淡路大震災を受けて工

学的な解析により耐震設計の考え方が示された。設計対象地震動としてレベル1地震動（施設の供用期間内に1～2度発生する確率を有する地震）及びレベル2地震動（発生確率は低いが大きな強度を持つ地震動）の2段階地震動の想定や管路については引張り、圧縮、曲げ等の地震による外力を分散させる構造の考え方等が示されたため、1997年以降に施工された管路は耐震済みとした。しかし、図1の整理結果により、本システムでは埋戻し土の対策工法が示される2004年度より以前の管路が被災するものとして設定を変更した。

4.2.3 微地形区分別の液状化危険度の検討（表3③）

図8は本地震及び熊本地震の微地形区分別の被災延長を整理したものである。本システムにおいて最も液状化危険度が高いAに位置付けられている後背湿地での被災が多いものの、液状化危険度が低いC及びDにおいても被災が顕著であるため、谷底低地、ローム台地、火山山麓地の液状化危険度ランクをAに変更した（表5参照）。なお、今回の集計では被災延長のみを対象としており、より明確に被災傾向を掴むためには、直接的な被災しやすい条件を示す指標である被災率を算出する必要がある。今後は被災率を把握し、必要に応じて震度ごとに液状化危険度や管種別の被災率を見直し、本システムの精度向上に繋げていきたい。

4.2.4 必要編成人数の検討（表3④）

過去の大規模地震に関する文献等では被災時の調査人数などは公表されていない。そのため、現状では1次調査（応急復旧及び2次調査の必要性の判断）及び2次調査（本復旧工場の必要性判定及び災害査定資料作成の必要な情報の確保）の日進量は東日本大震災で被災した地方公共団体の実績値を採用し、1次調査及び2次調査の日進量を4km、1班当たりの編成人数を4名としている。本検討においては平成30年北海道胆振東部地震等で被災した17の地方公共団体を対象にアンケート調査を行い、1班あたりの調査日進量及び必要編成人数の整理を行った結果、日進量を5km、1班当たりの編成人数を5名に変更した。

表4 液状化危険度別、PL値、震度階級別、平均被災率

管種	液状化危険度	PL値		震度階級				
		計測震度	5弱	5強	6弱	6強	7	
		基準値	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	
塩ビ管 陶管	A～D	ALL	0.0(1.0)	0.0(2.3)	5.1	11.3	24.8	
鉄筋コンクリート 管他	A	15<PL	0.0(0.6)	0.0(1.3)	3.0	6.5	14.5	
	B	5<PL≤15	0.0(0.5)	0.0(1.0)	2.2	4.8	10.7	
	C	0<PL≤5	0.0(0.4)	0.0(0.9)	2.0	4.5	9.8	
	D	PL=0	0.0(0.4)	0.0(0.9)	1.9	4.2	9.2	

※（ ）内の数値は旧システムにおける被災率である。

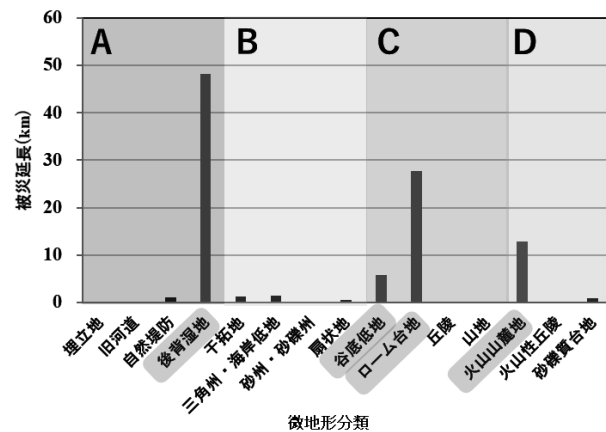


図8 微地形区分別の被災延長

表5 微地形区分別の液状化危険度

No.	微地形区分	液状化危険度
1	埋立地	A
2	旧河道・旧池沼	A
3	自然堤防	A
4	後背湿地	A
5	砂州・砂丘間低地	A
6	干拓地	B
7	三角州・海岸低地	B
8	砂丘	B
9	砂州・砂礫州	B
10	河原	B
11	河道・水路	B
12	扇状地	B
13	谷底低地	(C)※→A
14	ローム台地	(C)※→A
15	丘陵	C
16	山地	D
17	山麓地	D
18	火山地	D
19	火山山麓地	(D)※→A
20	火山性丘陵	D
21	岩石台地	D
22	砂礫質台地	D
23	礫・岩礁	D
24	湖沼	D

※（ ）内は旧システムで設定されている危険度である。

4.2.5 使用する地震情報の検討（表 3⑤）

これまでの計算は地震発生後に発表される防災科学研究所（以下「防災科研」）・強震観測網データを基に被災率を算出していたが、全ての地方公共団体に観測地点が設置されていない場合や同じ地方公共団体において防災科研と気象庁の発表震度に相違がみられる（表 6 参照）。そこで、本システムでは気象庁が発表する震度でも算出が行えるように改良を行った。

表 6 防災科研及び気象庁の計測震度

地震発生日	被災団体	気象庁発表震度	防災科研計測震度
2018/9/6	北海道胆振東部地震	厚真町	7
		安平町	6強
		むかわ町	6弱 (5.97)
		日高町	6弱 (5.50)
		札幌市	5強 (5.00)
2016/4/16	熊本地震	益城町	7
		熊本市	6強 (6.00)
		宇土市	6弱 (6.20)
		宇城市	—
		嘉島町	6弱 (6.00)
		八代北部流域	5強 (5.45)
		阿蘇市	—
御船町	6強 (6.25)		

4.3 下水道地震被害即時推定システムの精度検証

上述した 4.2.1～4.2.5 で検討した結果に基づき、更新した被害推定システムの計算値と実績値の比較検証にはモデル地区 2 箇所（地方公共団体 A、地方公共団体 B）を選定して精度（計算値/実績値×100）検証を行った。本システムの精度（%、本システムによる被災延長/実地震被災延長×100）は地方公共団体 A で 6%から 46%、地方公共団体 B で 52%から 98%となり、どちらにおいても精度は上昇した（表 7 参照）。さらに震度の詳細を確認すると、地方公共団体 A において震度（代表値）と推定震度分布（防災科研クライシスレスポンスサイト⁴⁾）に相違があったため、これまで市町村単位で設定していた震度を処理区ごとに変更して計算を行った。その結果、本システムにより算定された被災延長は 5.19km となり、その精度は約 76%に上昇した。今後は、推定震度分布の活用や微地形区分別の被災率を整理すること等により、さらなる精度向上に努めていきたい。

表 7 防災科研及び気象庁の計測震度

項目	単位	地方公共団体 A		地方公共団体 B	
		改良前	改良後	改良前	改良後
(A) 計測震度	—	6強		7	
(B) 液状化危険度	—	C	A	D	A
(C) 本システムによる被災延長	(km)	0.39	3.39	11.45	21.54
(D) 実地震被災延長	(km)	6.84		21.94	
(E) 精度 (C) ÷ (D) × 100	(%)	6	46	52	98

※ (C) 及び (D) はコンクリート管・塩ビ管・陶管の合計

5. 鋼製水槽を使用した土砂流出状況把握のための実証実験

5.1 研究目的

本地震では、大規模な液状化に伴う基礎地盤の流出により下水道管路施設が被災した事象が報告されていことから、国総研では基礎地盤流出に伴う埋戻し部への影響を把握するために、簡易的な室内実験を国総研水質実験施設にある大型鋼製水槽を使用して行った（写真 4）。



写真 4 鋼製水槽全景

5.2 実験内容及び条件

本実験は国総研内水質実験施設において、L8.5m×W2.0m×H3.5m（水槽内寸法）の鋼製水槽は下部に設置された鋼製扉を開くことにより人工的に土砂を流出させる構造となっている。

実験は、改良土で埋戻しを行う場合（実験 1）と砕石等の透水性の高い材料で埋戻しを行う場合（実験 2）の 2 パターン行い、実験回数は各 1 回行った（表 8）。また、簡易的に管を敷設し、改良土で埋戻す場合は下水道用硬質塩化ビニル管、透水性の高い材料（砕石等）で埋戻す

表 8 実験概要

	使用する埋戻し材	埋め戻し方法	布設管	実験回数
実験 1	①底面部材：珪砂 ②埋戻し材：改良土 ※埋戻しに適していること	底面部：珪砂を約 30cm 巻出し厚：20cm 締固め度：90%以上 土被り厚：60cm(最小)	下水道用硬質塩化 ビニル管 φ 200	1 回
実験 2	①底面部材：珪砂 ②埋戻し材：碎石等の透水性の 高い材料 ※10%通過粒径(D ₁₀)が 1mm 以 上の碎石又は排水効果の確認 されている材料	底面部：珪砂を約 30cm 巻出し厚：20cm 締固め度：90%以上 土被り厚：60cm(最小)	下水道用リップ付 硬質塩化ビニル管 φ 200	1 回

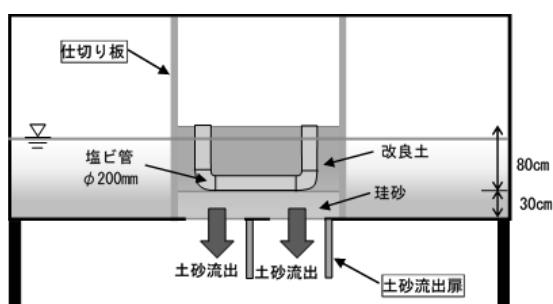


図 9 改良土埋戻し(実験 1)

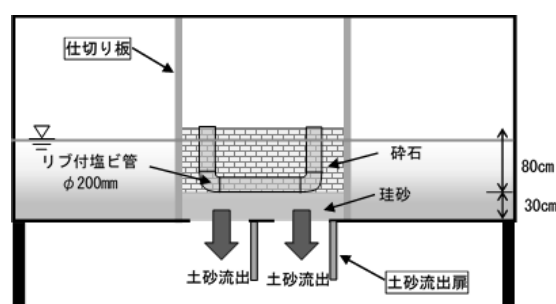


図 10 碎石埋戻し(実験 2)

場合は下水道用リップ付き硬質塩化ビニル管を用いて、管径は污水管最小（標準）φ 200、土被り厚は 60cm とした（図 9 及び 10）。なお、実験は以下の手順で行った。

- ①各実験ではアクリル側壁面にモルタル製のカラーマーカー（約 3cm 角の立方体）を横 50cm、縦 20cm メッシュ（2.6m×0.8m 内に 24 個設置）で埋設する（写真 5）。締固めはエンジン式ランマーを使用して、締固め度 90%以上を目標に埋戻し及び締固めを行った。なお、埋戻し材の締固め度の計測は約 20cm 毎に RI 試験機により測定した。
- ②埋設模型製作後、仕切り壁の両側の水槽に、土砂の厚さの 8 割程度の高さまで湛水し、土砂に水を浸潤させ、地下水面を設定する（写真 6）。なお、地下水位が十分に安定した状態を確認後に実験を行う。
- ③埋戻し土の区間の土砂流出扉（底部扉）を開放し、土砂の流出状況を観察する（写真 7）。底部扉からの土砂の流出がほぼ収まった時点で実験を終了する。
- ④土砂の流出後の状況をカメラで撮影し、埋戻し土の流出及び沈下の状況を観察する。埋戻し土の沈下状況については、地表面の沈下量を 50cm メッシュ（2.6m×2.5m 内に 36 点計測）で計測する（写真 8）。

5.3 実験結果

改良土による埋戻しを行った実験では、底面部材が流出しても、埋戻し材は中空状態で水槽内に残った（写真 9 及び 10）。一方、碎石による埋戻しを行った実験では、土砂流出扉の開放と同時に、底面部材とともに扉上部の碎石も崩落し、大部分の埋戻し材が流出した（写真 11 及び 12）。



写真5 マーカー設置状況



写真6 地下水位設定



写真7 土砂流出扉解放状況



写真8 地盤高の計測



写真9 実験1 実験終了後

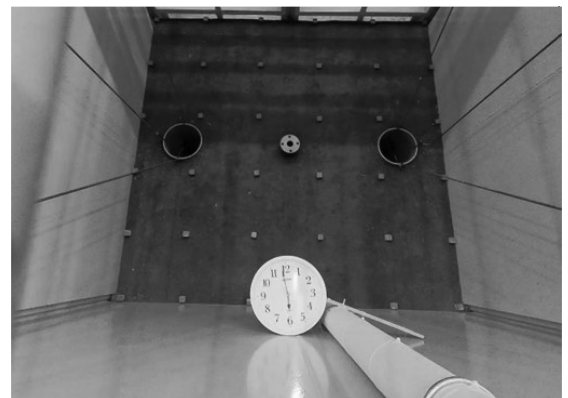


写真10 実験1 実験終了後(地盤面状況)



写真11 実験2 実験終了後



写真12 実験2 実験終了後(地盤面状況)

改良土、砕石それぞれ 90%以上の締固めを行ったが、改良土による埋戻しの方が底面部材の流出に対して、埋戻し材流出の抑止力が高い結果となった。一方、管路模型の変形や損傷は、どちらの実験でも生じなかったが、改良土の場合、仮に管路が長く、部分的に沈下が生じた場合、管路に大きなせん断力が作用する可能性がある。土砂流出に伴う管路施設への影響については、埋戻し工法条件のほか、施設規模をより広い範囲で再現した検討が今後必要と考えられる。

6. まとめ

本研究は、下水道管路地震被害データベースの更新を目的に被災情報整理及びその結果に基づき傾向分析を行った。加えて、その整理した情報を活用して、地震発生時に管路の被災率を算出する下水道地震被害即時推定システムの精度向上に関して検討を行った。

埋戻し土の液状化対策工法が提言された 2004 年度からの被災率が低く、工法普及の効果による有効性が推察された。また、開削工法の土被り 1.0~3.0m で被害が集中し、コンクリート管ではクラックや継手ズレ、塩ビ管ではたるみ・蛇行の被災要因が主であった。なお、これまでの地震ではあまり見られなかった推進工法用硬質塩化ビニル管での被害を確認した。次に、過去の地震も含めた被災率の整理では震度 6 弱以下の被災率が 1%以下と低い値であった。なお、微地形区分では後背湿地、ローム台地、火山山麓地、谷底低地に被害が集中していた。

下水道地震被害即時推定システムは、さらなる精度向上のために地震データの蓄積を行うとともに、気象庁発表震度や防災科学研究所計測震度のみではなく、地震後に公表される推定震度分布（防災科研クライシスレスポンスサイトなど）により精度検証を行い、被害推定システムの精度向上に努めていきたい。

土砂流出状況把握のための実証実験では、改良土による埋戻しを行った実験においては、底面部材が流出しても、埋戻し材は中空状態で水槽内に残った。一方、砕石による埋戻しを行った実験では、土砂流出扉の開放と同時に、底面部材とともに扉上部の砕石も崩落し、大部分の埋戻し材が流出した。

謝 辞

平成 30 年北海道胆振東部地震における下水道管路施設の被害傾向分析を進めるに当たり、関連資料の提供等にご協力いただいた地方公共団体の皆様に、心より敬意を表します。

参考文献

- 1) 下水道施設の耐震対策指針と解説－2014年版－、社団法人日本下水道協会、2014年5月9日発行
- 2) 平成30年北海道胆振東部地震被害検証報告書、平成30年北海道胆振東部地震被害検証委員会、2019年5月
- 3) 地震データベース検索（震央地名:胆振地方中東部、2018/9/6 3:07:59.3）、気象庁（<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>）、閲覧日 2020年6月8日
- 4) 下水道地震対策技術検討委員会報告書－新潟県中越地震の総括と地震対策の現状を踏まえた 今後の下水道地震対策のあり方－、下水道地震対策技術検討委員会、2005年8月
- 5) 平成28年熊本地震における下水道管路施設被災の特徴、国土技術政策総合研究所資料 No.997、2017年11月

2. 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 岡安 祐司
主任研究官 川島 弘靖
交流研究員 原口 翼

1. はじめに

国土交通省では、「新下水道ビジョン加速戦略」（平成 29 年 8 月）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ており、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。また、「社会情勢の変化等を踏まえた下水道事業の持続性向上に関する検討会報告書」（平成 31 年 3 月）において、下水道管路に起因する道路陥没事故の発生を効果的に抑制するため、きめ細やかな維持修繕基準の整備・強化を図る等の提言がなされている。

このため、国土技術政策総合研究所（国総研）では、下水道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、布設条件や管種など各都市の状況に応じた効率的な点検調査手法や、点検調査結果等の維持管理情報を活用した、最適な改築修繕工法等の選定手法の開発を行っている。

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（平成 30 年～令和 2 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（平成 30 年～令和 2 年度）
多様な修繕改築工法の性能、地方公共団体における管路管理の実態、修繕改築の際の評価項目（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修繕改築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（令和元年～令和 2 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、修繕改築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。

令和元年度は、研究概要①において、点検調査技術の整理や管種や管径等の諸元情報や異常項目による劣化傾向の分析、施設の重要性を踏まえた点検調査頻度の検討を実施し、研究概要②および③においては、地方公共団体への修繕改築工法選定に関する実態調査を行うとともに、実態調査結果から維持管理情報を活用した修繕改築修繕工法の事例整理を実施した。本稿では、研究概要①について先行実施し、劣化傾向の分析や点検調査頻度の検討結果について報告すべき成果が得られたので報告する。

3. 劣化傾向の分析

3.1. 健全率予測式による劣化傾向の分析

国総研がデータを随時蓄積している管きよ劣化データベース（平成30年度末時点）を基に、管種・管径等の諸元情報や異常項目といった条件毎に、ワイブル分布式やマルコフ遷移確率モデルによる健全率予測式を作成し、信頼区間の中央値による劣化傾向の分析を行った。

ここでは、条件別で作成した健全率予測式について、特徴があったものについて述べる。なお、緊急度と、緊急度を評価するための3つの診断項目の1つである管1本ごとの評価から算定する不良発生率に基づくランク（以下、「管1本ごととスパン評価」という。）の定義¹⁾について表1に示す。

まず、コンクリート管の管径250超～800mm未満の条件と、管径800mm以上の条件に分類して比較した健全率予測式を図1に例示する。コンクリート管の管径250超～800mm未満の管は、管径800mm以上の管と比較すると、経過年数50年においても緊急度IIの割合が多いことを示している。その一方で陶管は、管径250mm以下の方が、経過年数50年において緊急度IIの割合が少ないことが読み取れる（図2）。また、コンクリート管と陶管のそれぞれの図において、経過年数による緊急度Iの割合に大きな違いは確認出来なかった。

続いて、コンクリート管及び陶管で作成した管1本ごととスパン評価における健全率予測式について図3に示す。管1本ごととスパン評価を算定する項目は、基本的に清掃等で除去できる異常項目を除いた、管の破損、クラック、継手ズレ、浸入水の4項目である。コンクリート管と陶管を比較すると、陶管の方が早く劣化する傾向にあることが分かる。さらに陶管においては、40年経過時点で全体の約半数、50年経過時点で全体の約3/4が、管1本ごととスパン評価のラ

表1 緊急度及び管1本ごととスパン評価の定義¹⁾

項目	ランク	判定	内容
緊急度	I：重度	速やかに措置が必要	腐食、たるみ、管1本ごととスパン評価による3つの診断項目より算出
	II：中度	簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる	
	III：軽度	簡易な対応により必要な措置を5年以上に延長できる	
管1本ごととスパン評価	A：重度	異常が著しい	破損・クラック・継手ズレ・浸入水等の管の不良発生率に基づいて判定
	B：中度	異常が少ない	
	C：軽度	異常が殆どない	

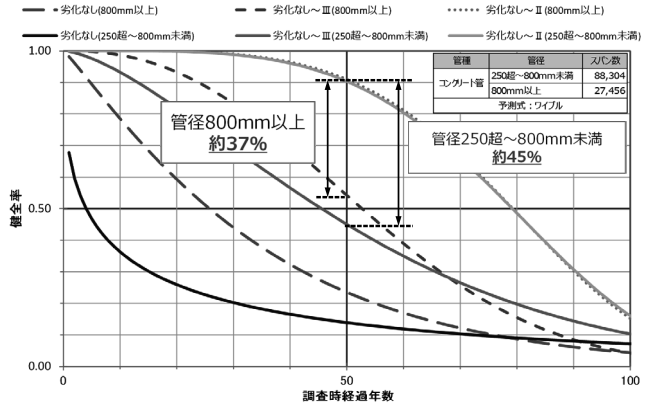


図1 コンクリート管における管径250超～800mm未満と管径800mm以上の比較

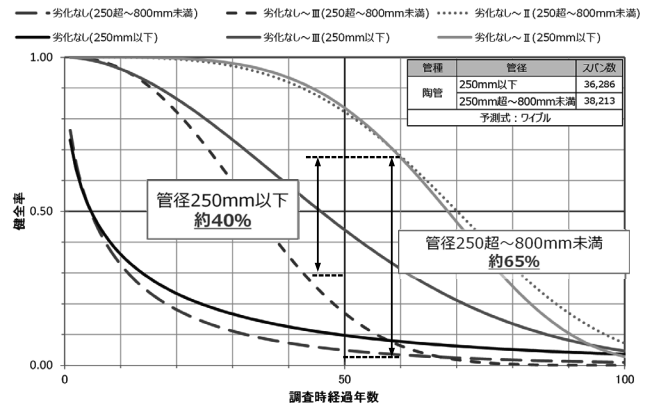


図2 陶管における管径250mm以下と管径250超～800mm未満の比較

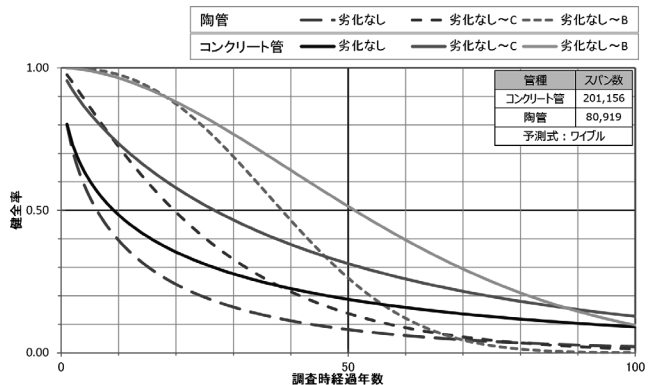


図3 コンクリート管と陶管における管1本ごととスパン評価の比較

ンク A であることが確認された。

3.2. 管種別による管きょ異常発生位置の整理

下水道管きょの異常発生傾向の分析として、6都市の地方公共団体から収集した約 16,000 スパンの管きょ調査データを基に、管種別による管きょの異常発生位置を整理した。

6都市から収集した管種別の管きょ調査データについて図 4 に、更に異常項目別の発生個所数を表 2 に示す。

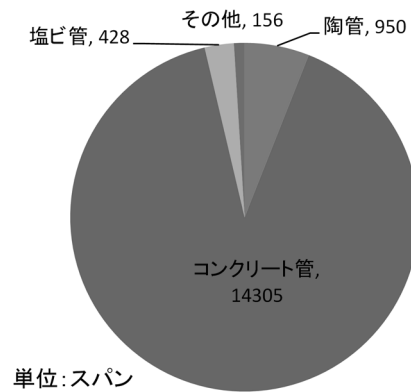


図 4 6都市から収集した管種別の管きょ調査データ

表 2 6都市における異常項目別発生個所数

	腐食	たるみ	破損	クラック	ズレ	浸入水	突出し	木の根	扁平	変形
コンクリート管	5,149	16,376	19,177	7,566	18,407	18,784	6,150	1,958	0	0
陶管	122	186	1,865	663	1,654	409	554	343	0	0
塩ビ管	1	475	109	17	95	74	51	5	4	13
合計	5,272	17,037	21,151	8,246	20,156	19,267	6,755	2,306	4	13

分析にあたり、表 3 に示す通り管口からの異常発生距離と路線延長で区分し、異常発生傾向を異常ランク (A,B,C) に分類した後、発生数と発生割合でグラフ化した。なお、本稿では管種毎に特徴的な傾向が確認出来た異常項目について記述する。

最初に、コンクリート管の腐食の発生数と発生割合について示す。図 5 では、腐食は路線延長が長くなると数が増える傾向がみられたとともに、図 6 では管口から 5 m 以上の距離で A ランクの発生割合が多くなる傾向が確認できた。

表 3 異常発生距離と路線延長の区分

管口からの異常発生距離		路線延長	
0m以上 5m未満	5m未満	15m以下	15m超 ~ 30m以下
		30m超	
5m以上 15m未満	15m未満	15m以下	15m超 ~ 30m以下
		30m超	
15m以上	15m未満	15m以下	15m超 ~ 30m以下
		30m超	

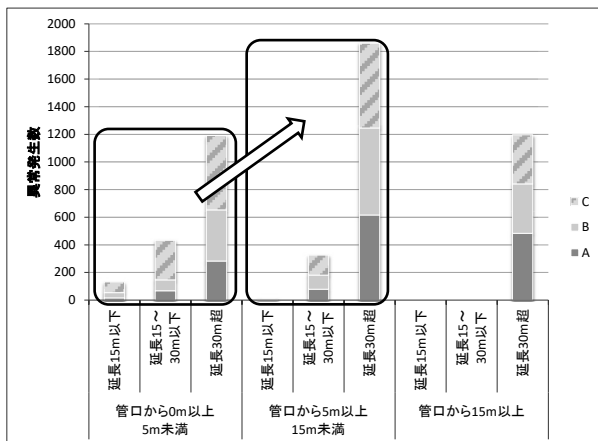


図 5 コンクリート管腐食発生数

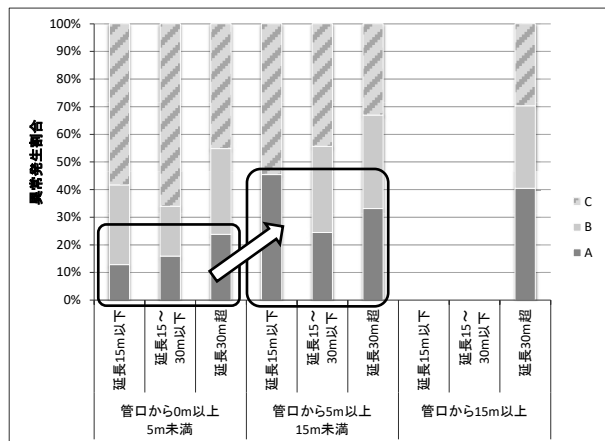


図 6 コンクリート管腐食割合

次に、コンクリート管の破損について、図7では腐食と同じく管口から5m以上の距離における発生数が多いことが分かるが、その一方で図8を見ると、ABランクの発生割合は管口付近に多いことが分かる。

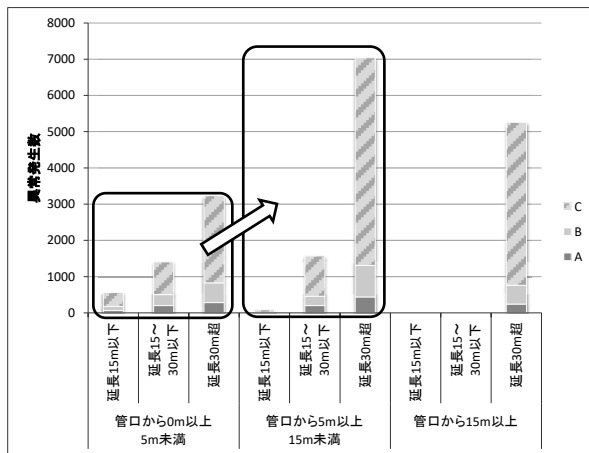


図7 コンクリート管破損発生数

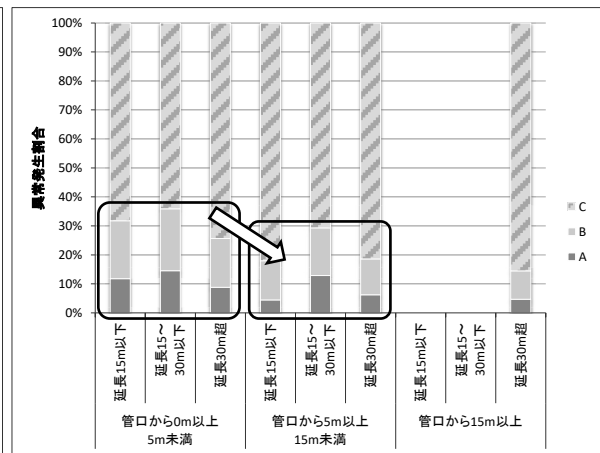


図8 コンクリート管破損発生割合

続いて、陶管の破損について、図9に示す通り、発生数は管口から離れた場所に発生する傾向が確認できるが、図10の発生割合では管口付近にAランクが集中している。コンクリート管と同じく、破損は管口付近に悪いランクが発生しやすい傾向があることが読み取れる。

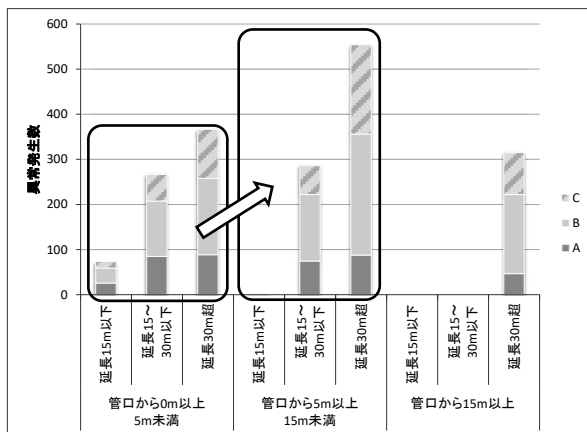


図9 陶管破損発生数

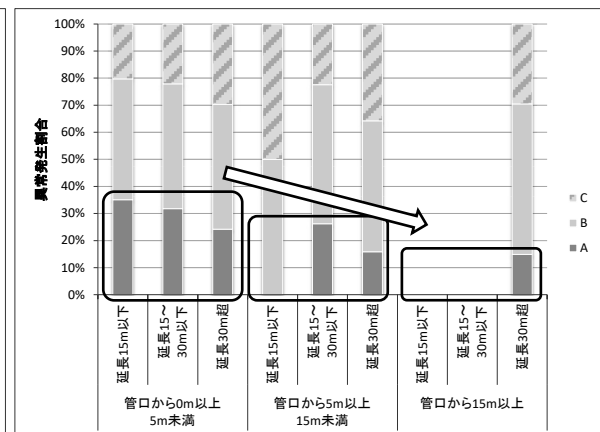


図10 陶管破損発生割合

一方、陶管のクラックについては、図11、図12に示す通り管口付近に集中しており、Aランクの発生割合も管口付近に集中している傾向が確認できた。

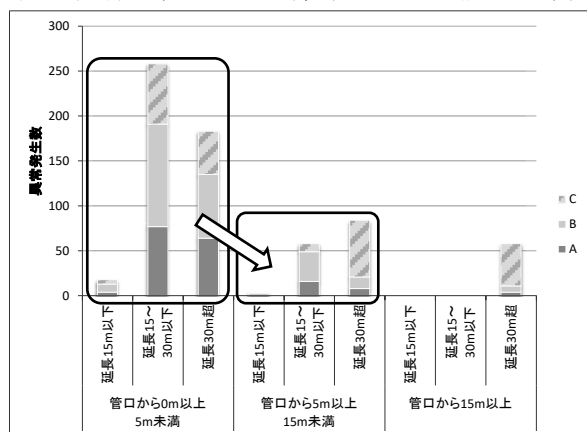


図11 陶管クラック発生数

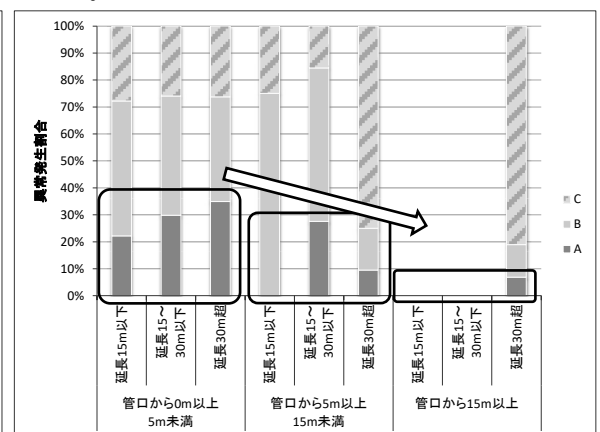


図12 陶管クラック発生割合

塩ビ管については、コンクリート管や陶管と比較すると収集したデータ数が少なく、さらに発生している異常データが少ないことから、コンクリート管や陶管と同列で比較することは難しいが、簡易的な傾向が確認出来るかという観点で整理した。

本稿では、塩ビ管で発生した異常内容のうち発生数の多かった「たるみ」と「破損」について整理した。まず、塩ビ管のたるみについて図13、図14に示す。図13に示すように、管口付近に集中している部分もあるが、延長30mを超える管きょについては管口から離れた箇所でも発生しており、特定の位置で発生する傾向が見られない。また、発生割合についても傾向は確認できなかった。

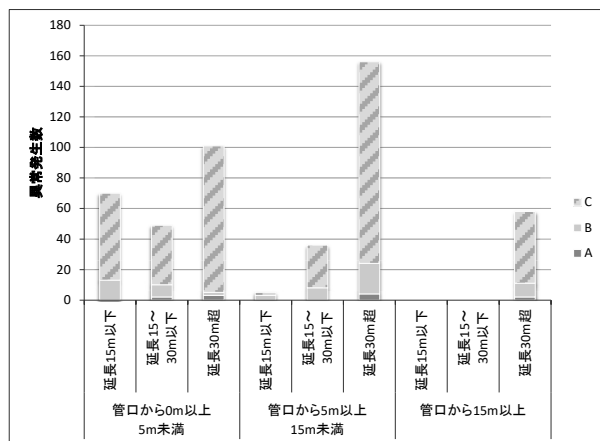


図13 塩ビ管たるみ発生数

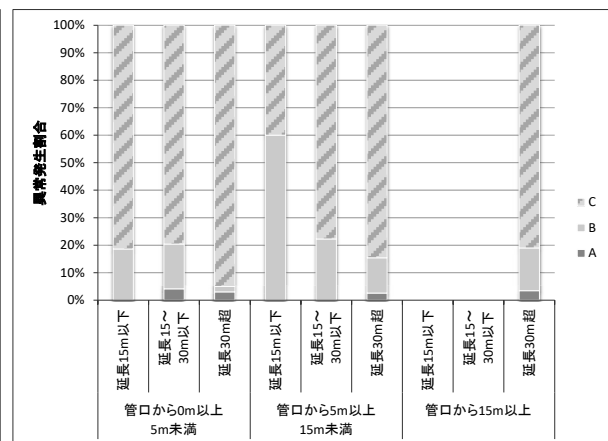


図14 塩ビ管たるみ発生割合

次に、塩ビ管の破損について図15、図16に示す。発生数は管口から離れた箇所に多い傾向が見られたが、Aランクの発生割合が多いのは管口付近に集中しており、コンクリート管や陶管と同じ結果となった。

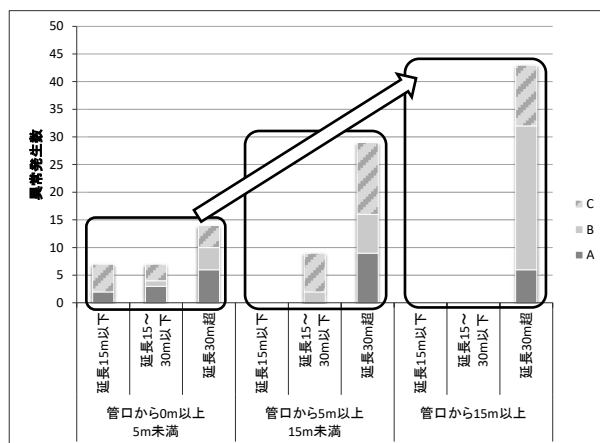


図15 塩ビ管破損発生数

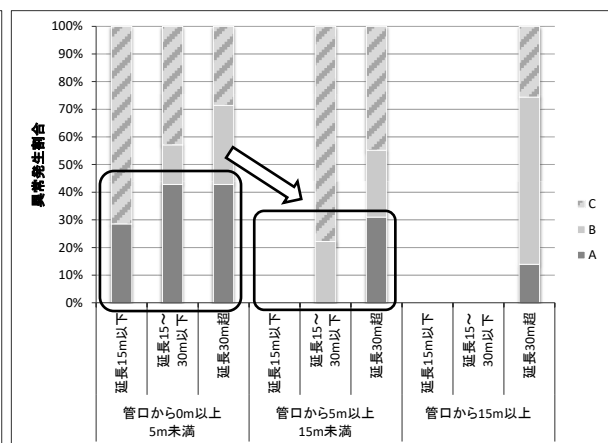


図16 塩ビ管破損発生割合

4. 対策の判断基準となる緊急度に遷移する時期と施設の重要性に応じた点検調査頻度の検討

維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドラインでは、個々の管路施設で劣化状況は様々であり、劣化発生要因も様々であることから、点検調査の頻度を一律で設定することは適切ではなく、個々の施設情報や過去の点検調査結果等に基づき、経年劣化進行度や重要度等を勘案して頻度を設定することが望ましい²⁾とされている。

国総研では、健全率予測式を用いた信頼性重視保全（RCM：Reliability-Centered Maintenance）の考え方に基づく調査頻度の設定方法³⁾について提示してきたところである。これは、不具合を発見できる時点である点P（潜在的な不具合：Potential failure）と機能停止に至る不具合の点F（機能的な不具合：Functional failure）の時間的間隔（P-F間隔）から頻度を設定する考え方である。本検討では新たな考え方として、対策の判断基準となる緊急度に遷移する時期と施設の重要性に応じた点検調査頻度の設定方法について検討した。

なお、平成27年度の下水道法改正により、腐食のおそれの大きい箇所については5年に1回以上の点検頻度を定められているため、本検討の対象外としている。

地方公共団体によって対策の判断基準となる緊急度は異なるが、本検討では緊急度I及びIIを対象とした。また、施設の重要性は、ストックマネジメントにおけるリスク評価の過程で行う被害規模（影響度）の評価結果を踏まえ、「最重要管理」「重要管理」「通常管理」の3つの管理区分に分類し、図17に示すような事故発生時における社会的影響の大きさを考慮して分類した。

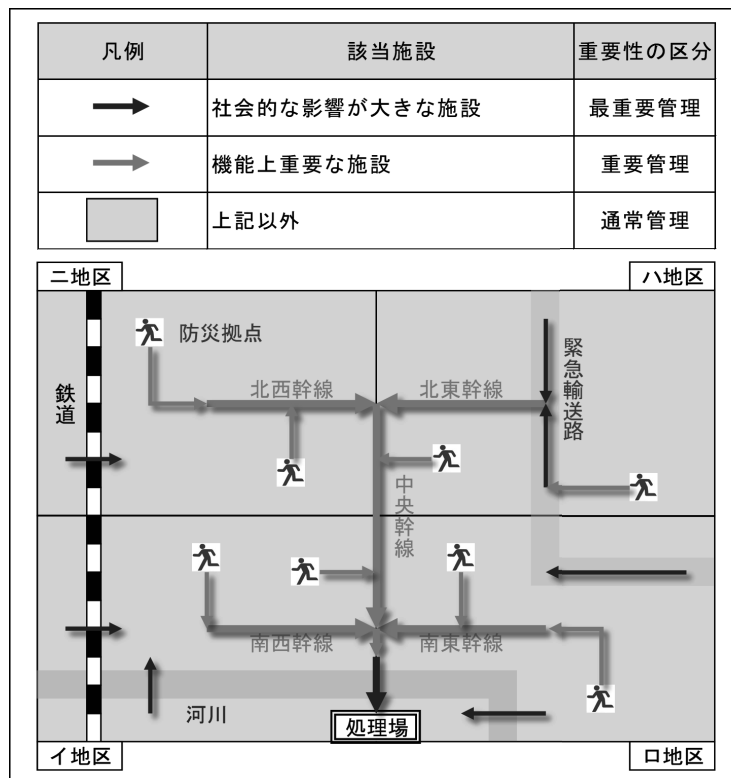


図17 事故発生時における社会的影響の大きさを考慮した施設の重要性の分類²⁾

次に、対策の判断基準となる緊急度I及びIIの割合を劣化保有率と考え、健全率予測式の健全率の最大値（＝健全）である1.0を劣化保有率0%とした。ここでは、施設の重要性に応じて劣化保有率（%）を、「最重要管理：5%」「重要管理：20%」「通常管理：40%」と、重要性の高い施設の劣化保

有率が低くなるように設定し、施設の重要性毎の劣化保有率と健全率予測式の交点を点検調査の着手時期として管種毎に検討した。なお、本検討において使用する健全率予測式は、過年度報告⁴⁾でもあるように、全管種・陶管・コンクリート管においてワイブル分布による健全率予測式がマルコフ遷移確率モデルに比べ相関が高いワイブル分布で検討し、塩ビ管については、調査結果のデータ数が少なく偏りが発生しておりワイブル分布では正確な式を得ることが出来なかったため、マルコフ遷移確率モデルにて検討した。

管種別の健全率予測式を利用して点検調査着手時期を設定した例を図18に示す。コンクリート管と陶管については、最重要管理は約10年、重要管理は約25年となり、通常管理の着手時期は、コンクリート管約40年、陶管約35年と異なる結果となった。その一方で塩ビ管は最重要管理約25年、重要管理約50年という結果だが、通常管理は87年と着手時期までの期間が長くなることから、通常管理は標準耐用年数である50年と設定した。

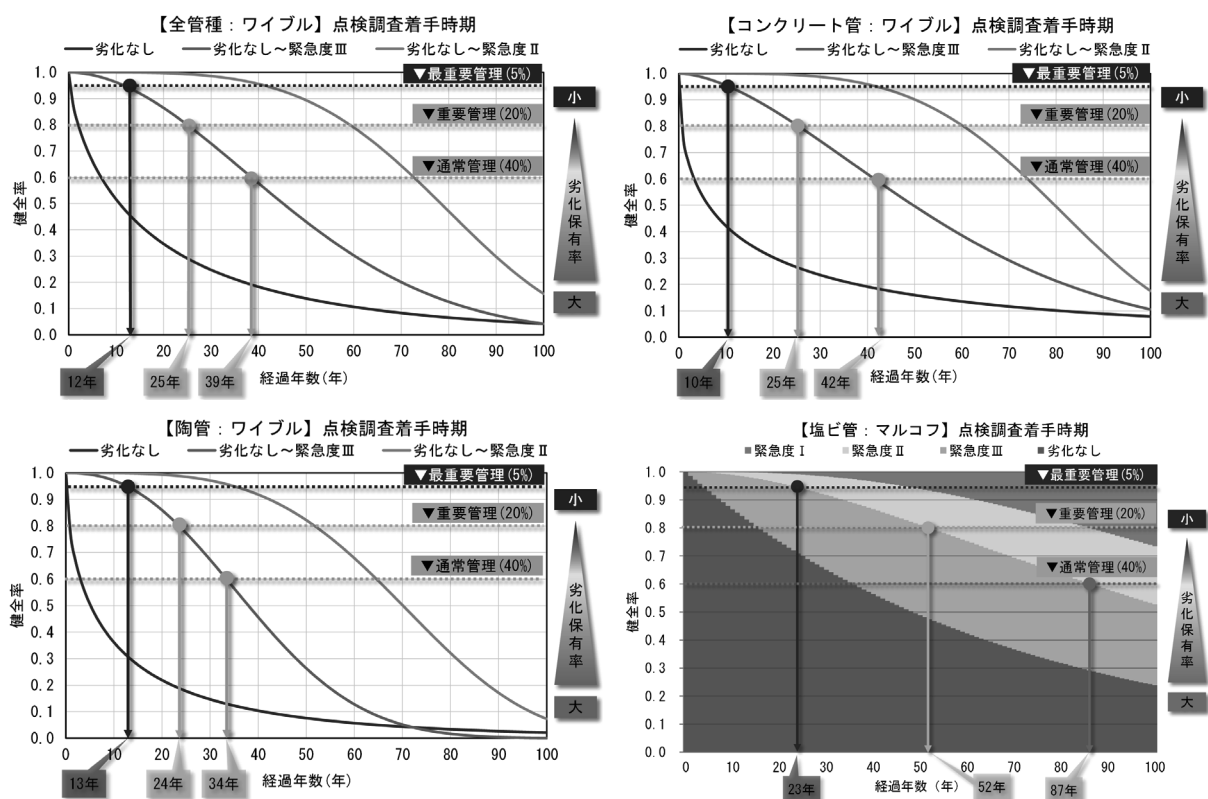


図18 管種別の施設の重要性に応じた点検調査着手時期の設定例

また、2回目以降となる点検調査の頻度は、前回の点検調査結果における緊急度判定によって次の点検調査時期が変わるように検討した。前回の点検調査時に緊急度I及びIIと判定された場合、布設替えまたは更生を実施するものとして点検調査の着手時期と同じ年数とした。また、劣化なしと判定された場合も点検調査の着手時期と同じ年数とした。緊急度IIIと判定された場合は、必要に応じて修繕を実施し、次の点検調査時期を予防保全の観点から、点検調査の着手時期で設定した年数の概ね1/2以下と設定した。本検討で設定した管種や施設の重要性に応じた点検調査着手時期と頻度の結果を表4に示す。なお、点検調査の着手時期及び頻度は5年単位で整理している。

表4 管種別の施設の重要性に応じた点検調査着手時期と頻度の結果

頻度	前回点検・調査結果			最重要管理	重要管理	通常管理
	管種	判定	対策区分			
着手時期 (1回目)	全管種	—	—	10年	25年	40年
	コンクリート管					35年
	陶管					50年
	塩ビ管					
頻度 (2回目以降)	全管種	劣化なし	—	10年	25年	40年
		緊急度Ⅰ	改築を実施			
		緊急度Ⅱ	必要に応じて 修繕を実施			
		緊急度Ⅲ				
	コンクリート管	劣化なし	—	10年	25年	40年
		緊急度Ⅰ	改築を実施			
		緊急度Ⅱ	必要に応じて 修繕を実施			
		緊急度Ⅲ				
	陶管	劣化なし	—	10年	25年	35年
		緊急度Ⅰ	改築を実施			
		緊急度Ⅱ	必要に応じて 修繕を実施			
		緊急度Ⅲ				
塩ビ管	劣化なし	—	25年	50年	50年	
	緊急度Ⅰ	改築を実施				
	緊急度Ⅱ	必要に応じて 修繕を実施				
	緊急度Ⅲ					10年

5. まとめと今後の課題

劣化傾向の分析では、諸元項目別の健全率予測式と管種毎の異常発生位置より分析を行った。管径で分類した健全率予測式はコンクリート管の管径 800 mm 以上の方が劣化の速度が緩やかであり、陶管については管径 250 mm 以下の管の方が劣化の速度が緩やかであった等、細かく分析することでより詳細に予測することが出来ると推測される。また、異常発生位置の分析では、異常項目によって管口付近に発生するものや、管口から離れた箇所に発生するもの、異常発生数は少ないが異常が発生した際の AB ランクの割合が大きくなる傾向を確認出来た。

対策の判断基準となる緊急度に遷移する時期と施設の重要性に応じた点検調査頻度の検討では、健全率予測式を使った新たな考え方によって、管種と施設の重要性によって変化する点検調査の着手時期と頻度について検討した。本検討で設定した点検調査頻度については、施設の重要性に応じた劣化保有率を任意で変更することで、点検調査の着手時期と頻度を検討出来るため、維持管理情報が少なく独自に点検調査頻度の設定が困難な都市については活用が期待される。

令和2年度は、スクリーニング調査で発見できる異常を考慮した点検調査技術の選定方法や、スクリーニング調査や詳細調査を選定する際の判断基準についてケーススタディによるコスト試算を実施し、より具体的な点検調査手法について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (公社)日本下水道協会、下水道維持管理指針 実務編、2014年
- 2) 国土交通省下水道部・国土技術政策総合研究所下水道研究部、維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドライン(管路施設編)、2020年3月
- 3) 深谷ら、下水道管きよの調査頻度に関する提案、下水道協会誌論文 Vol.49 No.600 2012年10月
- 4) 横田ら、平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.5~20、2011年9月

3. 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 岡安 祐司
研究官 濱田 知幸
研究官 中村 裕美

1. はじめに

プラスチックは我々の生活に浸透し、利便性と恩恵をもたらしている。一方、世界全体で年約 800 万トンのプラスチックごみが海洋に流出しているという試算や、2050 年には海洋中のプラスチックごみの重量が魚の重量を超えるという試算もある¹⁾。こうした地球規模での資源・廃棄物制約への対応は、SDGs(持続可能な開発のための 2030 アジェンダ)でも求められている²⁾。

下水道施設においても、洗濯排水中の化学繊維や路面排水等に由来するプラスチックが流入していることが予想されるが、これらについての調査事例は少なく、特に雨水排水中の実態については殆ど調査が行われていない。雨水排水中に含まれるプラスチック片は、そのまま雨水ポンプ場等から公共用水域へ放出される可能性がある。そこで、雨水ポンプ場において、雨天時に流入するプラスチック片の数、種類、大きさについて調査した。

2. 調査内容

2. 1 調査対象施設

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、人口 15 万人程度の中規模都市において、分流式下水道の雨水ポンプ場 2 カ所、合流式下水道ポンプ場 1 カ所で採水調査を行った。本研究では、0.3mm 以上のプラスチック片を対象とした。

(1)A ポンプ場

分流式下水道の雨水ポンプ場で、集水区域は 105ha で様々な用途地域(商業地域、近隣商業地域、中高層住居専用地域)、市街化調整区域を持つ。H31.1.31(日合計降水量 15.0 mm、1 時間最大降水量 4.5 mm)に流入口において、採水した。採水日以前の降雨は H30.12.23(日合計降水量 0.5 mm)であり、採水日までの先行無降雨日数は 39 日だった。

(2)B ポンプ場

合流式下水道の汚水ポンプ場で、集水区域は、116ha で駅を中心とする主要部(商業地域)の排水を受け持っている。R1.10.12(日合計降水量 135.0 mm)にスクリーン手前(以後、流入口)とスクリーンを通過後のマンホール(以後、放流口)にて採水した。採水前日に日合計降水量 21mm の降雨があり、先行無降雨日数は 1 日未満であった。

B ポンプ場の運転方法は、時間最大汚水量の 2 倍を超えたとき、雨水滞水池に一時貯留を開始し、後日下水処理場に送水している。なお、雨水滞水池への貯留が困難になったときには放流を開始している。スクリーン幅は 25mm であり、自動除塵機で除渣している。

(3)C ポンプ場

分流式下水道の雨水ポンプ場で、集水区域は 147 ha で主に低層住居専用地域、近隣商業地域を用途地域に持つ。R1.10.12(日合計降水量 135.0 mm)に吸水槽ゲートの直上マンホール流入口(以後、流入口)と吐出槽(以後、放流口)にて採水した。B ポンプ場と同日に調査を行っており、先行無降雨日数は 1 日だった。

C ポンプ場は降雨量が少ないときは自然流下で排水される構造となっており、雨水ポンプが稼働したタイミングで採水した。スクリーン幅は 50mm であり、自動除塵機で除渣している。

2. 2 対象降雨及び採水方法

(1) A ポンプ場

調査時の降水量³⁾と採水時刻の関係を図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。採水所要時間は 10~20 分程度/回だった。

(2) B ポンプ場・C ポンプ場

調査時の降水量³⁾と採水時刻の関係を図2に示す。B ポンプ場はポンプ場内への流入が確認された R1.10.12 の 9:00 から「流入口」、「放流口」で採水を開始し、9:50 まで 3 回採水を行った。ポンプ場への流入と並行して、貯留槽への一時貯留も行われていた。

C ポンプ場は、ポンプが稼働し始めた R1.10.12 の 13:00 から 14:10 まで 3 回採水を行った。

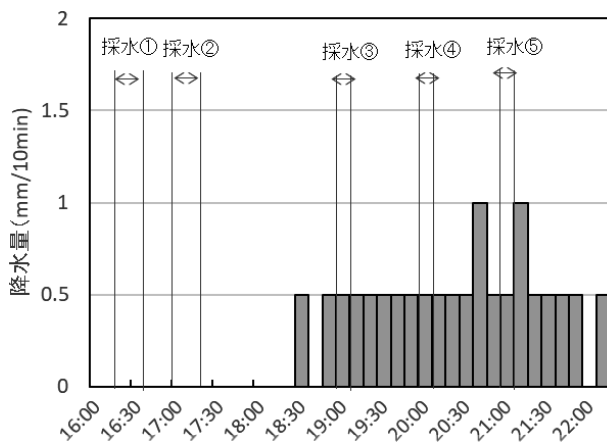


図1 A ポンプ場近傍の降雨量と採水状況

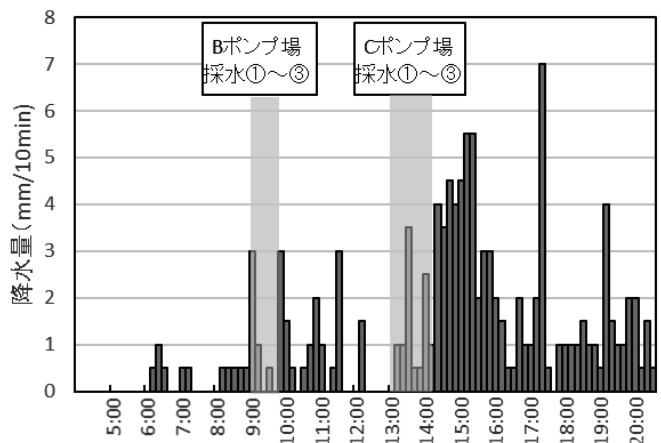


図2 B、C ポンプ場近傍の降雨量と採水状況

(3) 採水方法

試料採取方法の概要を図3に示す。

- ① A ポンプ場 : 10 L ステンレスバケツを用いて、表層水を 180L 採水する。
B、C ポンプ場 : 水中ポンプ(取込み異物径 8mm)を用い、1m³ 採水する。
- ② ステンレスバケツ中の水全量を 2.0mm メッシュ、0.3 mm メッシュのふるいでろ過する。
- ③ 各ふるい上の残渣を 1 L アルミ容器に水道水で流し入れる。作業を繰り返し、A ポンプ場については 180L 分の残渣から、B、C ポンプ場については 1m³ 採水分の残渣から試料 1 つを作成する。

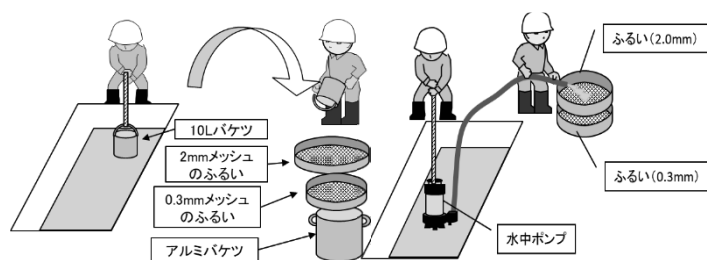


図3 試料採取方法(左:A ポンプ場、右:B、C ポンプ場)

2. 3 プラスチックの同定方法

採取した試料に含まれる物質について、以下の処理を行い、プラスチック種類を同定した。

- ① 物質を 0.1 mm メッシュ上のふるいに移し、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 5.3M 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（フルー・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

検出されたプラスチックの一例を写真 1 に示す。粒子状のもの、破片のようなもの、繊維のようなものなど様々な形状のプラスチック片が確認された。

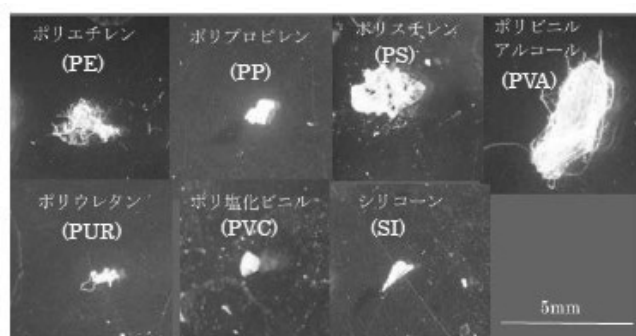


写真1 試料中のプラスチック片

3. 1 流入口（A～C ポンプ場）

。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 4 に示す。A ポンプ場の数密度について、採水①が 0.11 個/L で最も高く、最も低かったのは採水②で 0.03 個/L だった。B ポンプ場の数密度について、最も高かったのは採水①で 0.12 個/L、最も低かったのは採水③で 0.05 個/L だった。C ポンプ場の数密度について、最も高かったのは採水①で 0.31 個/L、最も低かったのは採水②で 0.06 個/L だった。

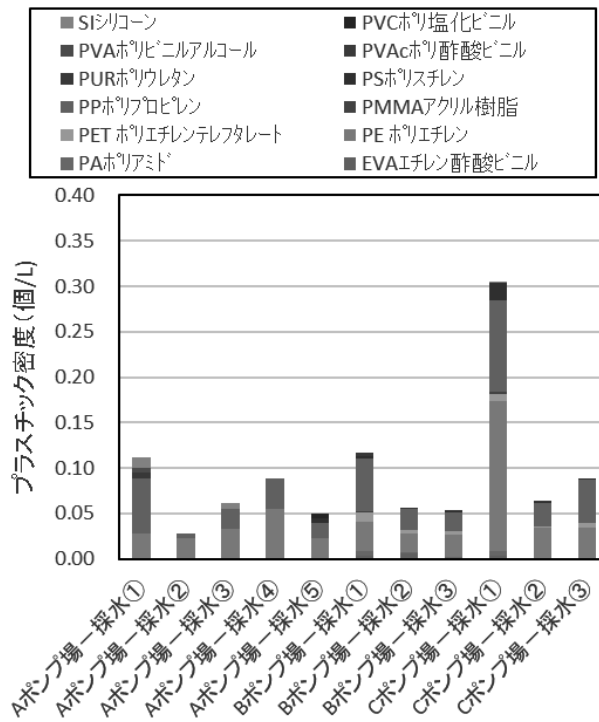


図4 流入口における試料中のプラスチック数密度

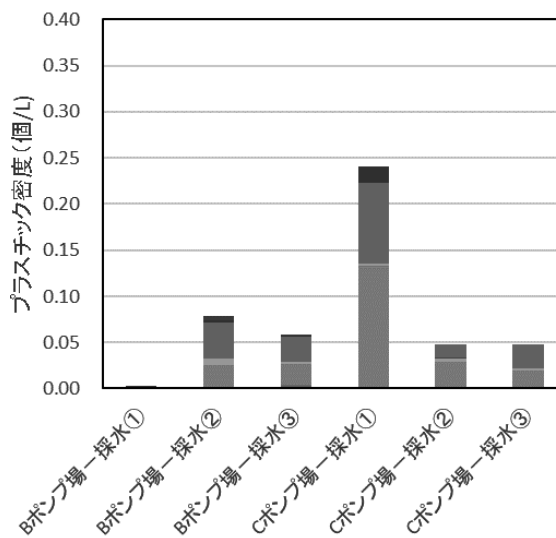


図5 放流口における試料中のプラスチック数密度

3. 2 放流口 (B ポンプ場、C ポンプ場)

B ポンプ場の数密度を図5に示す。採水②が0.08 個/Lで最も高く、採水①が0.003 個/Lで最も低かった。C ポンプ場の数密度は、採水①が0.24 個/Lで最も高く、採水②が0.05 個/Lで最も低かった。

3. 3 プラスチック数密度の影響因子の整理

① 降雨期間中のプラスチック数密度の変化

Aポンプ場の流入口において、長期滞留水していた高密度から始まり (採水①)、場内に雨水が流れ込んでくると希釈により一旦密度が下がり (採水②)、雨水流入とともに数密度が上

がった。一方でBポンプ場とCポンプ場の流入口においては、採水初期の数密度が高くなった。しかし、降雨開始のタイミングと採水のタイミングが一致していないため、ファーストフラッシュによるものかは判断できなかった。本調査では雨水流入期間における数密度変化の傾向を十分に把握できなかったため、今後も連続的な調査データを充実させつつ継続的にモニタリングすることが重要であることが示唆された。

② 調査条件（ポンプ場）

流入口における平均値は、Aポンプ場の平均数密度0.07個/Lに対して、Bポンプ場、Cポンプ場は0.08個/L、0.15個/Lであった。本調査においては、市街化調整地域を含むAポンプ場が低かった。

用途地域等の人口密度の他、先行無降雨日数、降雨強度などにより数密度が変わるものと考えられ、諸条件によるトレンドを把握するために、同一サイトにおいて継続的にモニタリングすることが重要であることが示唆された。

③ 流入口と放流口の比較

放流口の採水を行ったBポンプ場、Cポンプ場について、流入口と放流口の数密度平均値を比較すると、Bポンプ場は流入口0.08個/L、放流口0.05個/L、Cポンプ場は流入口0.15個/L、放流口0.11個/Lとなり、本調査においては放流口の平均数密度が若干低くなった。

表 1 流入口と放流口のプラスチック密度比較

		平均プラスチック密度 (個/L)
流入口	Aポンプ場※	0.07
	Bポンプ場	0.08
	Cポンプ場	0.15
放流口	Bポンプ場	0.05
	Cポンプ場	0.11

※Aポンプ場について降雨時(採水③～⑤)の3回採水の平均値

3. 4 プラスチックの種類と寸法

① プラスチックの種類

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) が検出された。プラスチック片のうちポリエチレンの比率は、流入口において、Aポンプ場47.5%、Bポンプ場34.1%、Cポンプ場51.4%であった。放流口において、Bポンプ場34.8%、Cポンプ場52.8%であった。また、プラスチック片のうちポリプロピレンの比率は、流入口において、Aポンプ場41.0%、Bポンプ場45.6%、Cポンプ場37.9%であった。放流口において、Bポンプ場48.6%、Cポンプ場38.0%であった。

採水ポンプ場や採水箇所によらず、ポリエチレンとポリプロピレンの合計で、採取したプラ

スチック片の概ね80%以上を占めており、雨水ポンプ場においてはこれらのプラスチック片の流入が多いことが示唆された。また、流入口と放流口におけるプラスチック片の種類傾向に差は見られなかった。

② 寸法

流入口、放流口におけるポンプ場毎のプラスチックの寸法を示す。Bポンプ場、Cポンプ場の寸法は平均で長軸径2.6～3.0mm、短軸径1.1～1.3mmであり、流入口と放流口で殆ど変わらなかった。

表2 プラスチックの寸法

		長軸径 (mm)		短軸径 (mm)		プラス チック数 (個)
		平均 値	中央 値	平均 値	中央 値	
流入 口	Aポンプ場	1.9	0.8	0.9	0.5	61
	Bポンプ場	2.8	2.3	1.3	1.0	314
	Cポンプ場	2.7	1.8	1.1	0.8	517
放流 口	Bポンプ場	2.6	2.1	1.2	0.9	194
	Cポンプ場	3.0	2.2	1.2	0.9	370

4. まとめ

雨天時の合流式汚水ポンプ場、分流式雨水ポンプ場の流入口、放流口で採水し、0.3mmふるいでろ過して採取したプラスチック片の数、寸法、種類の調査を行った。プラスチックの種類はポリエチレンとポリプロピレンで8割以上を占めており、流入口は0.07～0.15個/L、放流口は0.05～0.11個/Lであり、放流口のプラスチック数密度が若干低くなった。

一方で、降雨期間中のプラスチック数密度や降雨条件や先行無降雨日数による傾向を見出すことができなかった。降雨期間中の継続的な採水の他、既存の路面負荷対策調査⁴⁾にあるように水質センサーによる計測による他の指標との相関関係を調査するなどモニタリング手法を確立する必要がある。また、ポンプ場において除去されるし渣及び沈砂の分析などを通じ、ポンプ場におけるプラスチック収支について、詳細な調査を引続き実施する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、調査計画の立案やとりまとめについて丁寧にご助言いただいた岐阜大学（研究当時 土木研究所水環境研究グループ水質チーム）の鈴木裕識准教授に謝意を表す。また、採水にご協力いただいた地方公共団体の担当者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：令和元年度 環境・循環型社会・生物多様性白書、2019
- 2) 国際連合：The 2030 Agenda for Sustainable Development、2015
- 3) 気象庁HP
- 4) 藤生和也他、雨天時における路面排水負荷対策に関する調査、国土技術政策総合研究所資料、No.323、2006

4. 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 田嶋 淳
研究官 栗田 貴宣
研究員 長寄 真

1. はじめに

平成 29 年度に国土交通省が策定した「新下水道ビジョン加速戦略」では、重点項目として下水道の活用による付加価値向上が定められており、資源・エネルギー利用の促進が求められている。

経済産業省ではレアメタルとは、「地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属のうち、工業需要が現に存在する（今後見込まれる）ため、安定供給の確保が政策的に重要であるもの」と定義しており、液晶テレビ、携帯電話、自動車をはじめとする様々な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。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、海外からの輸入に頼っているため、レアメタルの確保に向けた対応策の一つとしてリサイクルは重要である。下水汚泥にレアメタル等の金属資源が含まれていることが海外の調査によって明らかにされている¹⁾²⁾。我が国の下水汚泥についても、レアメタル等が含まれている可能性はあるが含有量を調査した事例は少ない。

本研究では、国内の下水処理場から排出される下水汚泥焼却灰のレアメタル等の金属資源的価値を評価するために必要なデータを取得し、下水道によって流域から集められたレアメタル等の金属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（令和元年度）で実施したものである。

2. 研究方法

2.1 対象箇所・採取試料

レアメタル等の流入要因として第一に工場からの排水に着目し、主に工業排水を処理する（工業排水流入率 90%以上）下水処理場を選定した。第二に温泉にはレアメタルが含まれていることが分かっているが³⁾、温泉については様々な泉質があるので、本調査では pH に着目し、アルカリ性、酸性の温泉が湧出する地域の下水処理場を選定した。併せて比較対象として主に家庭排水を処理する（工業排水流入率 20%未満（一部不明含む））下水処理場を地域、処理規模に偏りが出ないよう選定し、計 42 箇所（総試料数：N=43）を調査対象下水処理場とした。なお、工業排水流入率については各処理場へのアンケート調査より得た。

採取試料は、焼却灰（N=22）、脱水汚泥（N=20）、炭化汚泥（N=1）である。また、採取時期は 2018 年 12 月～2019 年 2 月（N=17）及び 2019 年 12 月～2020 年 2 月（N=26）の 2 回である。

2.2 測定項目・測定元素

測定対象元素は経済産業省でレアメタルとして指定されている 46 元素（Pm を除く）に、貴金属である金（Au）と銀（Ag）、ベースメタルである銅（Cu）を加えた合計 49 元素とした。ただし、2019 年度に採取した下水汚泥試料については、2018 年度に採取した試料の金属含有量の中央

値に市場価格を乗ずることで下水汚泥の金銭的価値を試算し、金銭的価値が低いと思われる元素を測定対象元素から除外した。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	H																	He		
2	Li	Be	N=43										N=17		B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6	Cs	Ba	La系	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7	Fr	Ra	Ac系	※N=43の元素：2018年度採取試料+2019年度採取試料																
				※N=17の元素：2018年度採取試料																
La系	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
Ac系	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

図1 測定対象元素

焼却灰、炭化汚泥については、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°C 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、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 (Agilent 7900x) 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。

脱水汚泥については焼却灰、炭化汚泥と金属含有量の比較を可能にするために 105-110°C で 2 時間乾燥後、電気炉を用いて 600±25°C で 1 時間強熱灰化後、焼却灰、炭化汚泥と同様の手順により金属含有量の測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 下水汚泥に含まれるレアメタル等金属含有量

下水汚泥中のレアメタル等の金属含有量測定結果を図 2 に箱ひげ図で示す。図 1 で示す通り、N=17 の元素は塗りつぶし無し、N=43 の元素は塗りつぶし有りの箱で示した。また、ひげは最小～最大を表すが、最小部分のひげが無い元素については当該元素の含有量が定量下限値未満であった試料が存在したことを示す。

49 元素のうち、30 元素はすべての試料から検出され、その他の元素についてもレニウム (Re) を除き概ね 90%以上の試料から検出された。よって我が国の下水汚泥にもレアメタル等の金属資源が

含有されていることが確認された。また、チタン (Ti)、マンガン (Mn)、銅 (Cu)、バリウム (Ba) については金属含有量の中央値が 1000 mg/kg・DS を超えており他元素と比較し多く含有している傾向にあった。

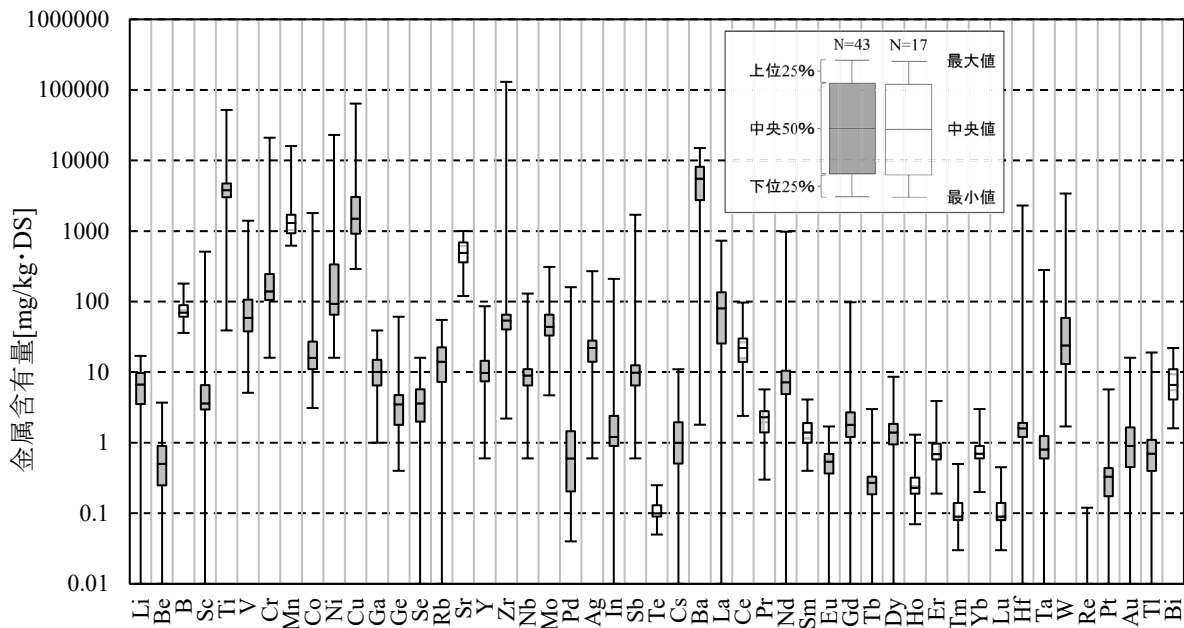


図2 金属含有量測定結果

3.2 流入要因の推定

レアメタル等の流入要因として、工業排水がレアメタル等の含有量へ与える影響を検討するために、主に生活排水が流入する下水処理場を A 群、主に工業排水が流入する下水処理場を B 群とし、この 2 群について t 検定 (有意水準 5%) を行った結果を表 1 に示す。

表 1 t 検定の結果

A 群 > B 群	Se, Rb, Cs, Ba, Bi
B 群 > A 群	なし
有意差無し	その他 44 元素

検定を行った結果、測定対象元素 49 元素の内、44 元素が「有意差無し」であり、加えて工業排水に多く含有していると判定される元素も存在しなかった。工業排水の流入割合がレアメタル等の含有量へ与える影響は少ないと考えられる結果となった一方で、含有量の中央値と最大値の比が 100 倍以上となった、下水処理場毎のばらつきが大きい元素については、12 元素中 9 元素で主に工業排水が流入する下水処理場の試料が最大値となった。すなわち、全般的な傾向として、工業排水には家庭排水と比較してレアメタル等が多く含有されているとは言い難いが、中には突出してレアメタル等が含有する工業排水が存在することが示唆された (図 3 二重丸)。

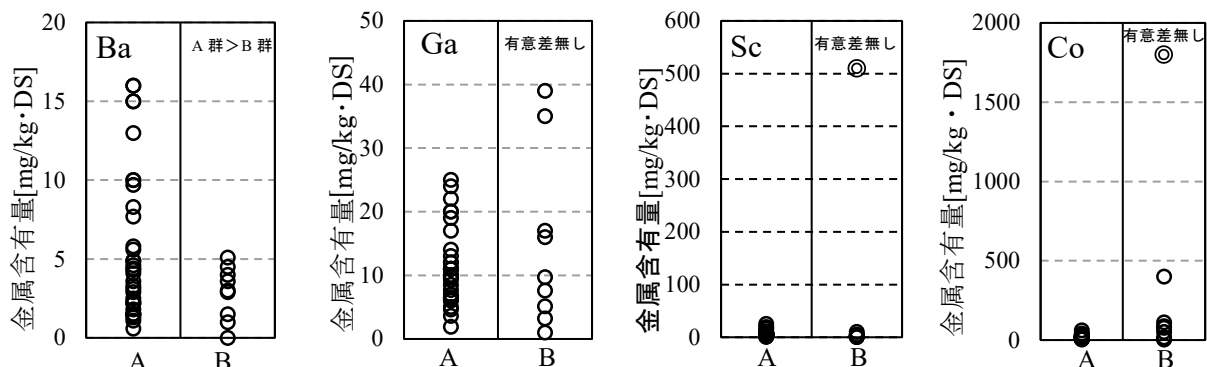


図3 工業排水の影響 (一例)

なお、温泉排水に関しては特徴的な傾向を見出すことはできなかった。

3.3 採算性の検討

一般に金属の製造は鉱山から鉱石を採取し、その鉱石から不純物を取り除くための精錬の工程を経る必要がある。下水汚泥焼却灰からレアメタルを製造する際の精錬にかかるコストが鉱石の場合と等しいと仮定し、文献⁴⁾を参考に鉱山から採取される鉱石に含まれる元素濃度（以下、粗鉱品位という）と下水汚泥に含まれる金属含有量を比較することにより採算性を検討した。文献から得ることができた22元素の粗鉱品位のデータについて、元素毎に下水汚泥に含まれる金属含有量と粗鉱品位を比較した結果を表2に示す。22元素のうち、13元素は下水汚泥の金属含有量が粗鉱品位を上回る試料数が0であった。その他の元素についても粗鉱品位を上回る試料数が1～5の範囲で多数を占めており、採算性は低いことが確認された。一方で、パラジウム(Pd)、銀(Ag)、金(Au)については、粗鉱品位を上回る試料数が10を超えていた。含有量(中央値)を他の元素と比較すると、パラジウム(Pd)が49元素中41位、銀(Ag)が15位、金(Au)が35位であり下水汚泥に特段多く含有している元素とは言えないが、粗鉱品位が他の元素の粗鉱品位の約1/10以下であることから下水汚泥の金属含有量が粗鉱品位を上回る試料が比較的多くなったと考えられる。

表2 下水汚泥中の金属含有量と粗鉱品位の比較

元素名	粗鉱品位を上回った試料数 /全試料数	粗鉱品位 (mg/kg)
Li	0/43	1400
Be	0/43	800
Ti	0/43	310000
V	0/43	1400
Cr	0/43	230000
Mn	0/17	250000
Co	0/43	2300
Ni	2/43	10200
Cu	5/43	8400
Ge	0/43	240
Se	0/43	2000
Zr	1/43	3700
Mo	0/43	1000
Pd	11/43	1.1
Ag	33/43	13
In	3/43	10
Sb	0/43	9900
Ta	1/43	170
W	0/43	12000
Re	0/43	100
Pt	3/43	1.4
Au	17/43	1.1

3.4 賦存量・供給率・金銭的価値

下水汚泥に含まれるレアメタル等の金属含有量の中央値(g/t・DS)を用いて、国内の下水汚泥の年間発生量⁵⁾当たりに換算した賦存量、供給率および金銭的価値を表3に示す。

賦存量(t/年)については、金属含有量の中央値に下水汚泥の年間発生量を乗ずることで算出した。

なお、本研究では焼却灰および脱水汚泥を強熱灰化した試料を測定しているため年間汚泥発生量から有機分を除去した値を用いる必要がある。ここでは下水汚泥の有機

表3 賦存量・供給率・金銭的価値の試算結果

元素	中央値 (g/t・DS)	賦存量 (t/年)	供給率 (%)	金銭的価値 (百万円/年)
Li	6.7	3.1	0.05%	3.8
Be	0.5	0.2	0.73%	13.6
B	70	32.7	0.11%	1.3
Sc	3.6	1.7	-	4803.5
Ti	3800	1775.0	0.73%	1889.2
V	59	27.6	0.90%	47.0
Cr	140	65.4	0.01%	74.5
Mn	1300	607.2	0.09%	0.4
Co	16	7.5	0.07%	35.5
Ni	93	43.4	0.01%	60.6
Cu	1500	700.7	0.05%	468.3

分を 80%⁶⁾とし、年間汚泥発生量を 1/5 倍した約 46 万 t を試算に用いた。

供給率 (%) については、先述の賦存量から年間輸入量を除すことで算出した。なお、年間輸入量はベリリウム (Be)、ホウ素 (B)、ルビジウム (Rb)、テルル (Te)、セシウム (Cs)、バリウム (Ba)、ハフニウム (Hf)、タリウム (Tl)、ビスマス (Bi) については「鉱物資源マテリアルフロー2011 (独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)」からデータを得た。その他の元素については、「鉱物資源マテリアルフロー2018」からデータを得た。また、ハイフン (-) が付されている元素についてはデータが存在しなかった。多数の元素で供給率が 1% を下回っている一方で、ゲルマニウム (Ge)、金 (Au) に関しては 10% 近く、セレン (Se) は約 20% であり高い値を示した。

なお、ルビジウム (Rb) については供給率が約 654% と 100% を大きく超えているが、これは輸入量が 1 トン以下 (1 トンとして試算) と極端に少ないためである。

金銭的価値 (円/年) については先述の賦存量に各種金属の市場価格を乗ずることで算出した。レアメタルは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⁷⁾、その市場価格は変動が大きい。そのため、試算に用いる各種金属の市場価格⁸⁾は直近の 5 年平均値 (2014~2018) とした。

試算の結果、スカンジウム (Sc)、ルビジウム (Rb)、チタン (Ti)、金 (Au)、パラジウム (Pd)、銀 (Ag)、プラチナ (Pt)、銅 (Cu)、ゲルマニウム (Ge) の順に金銭的価値が高く、年あたり 1 億円を超えていた。また、全元素の金銭的価値の総額は約 165 億円と試算された。なお、スカンジウム (Sc)、ルビジウム (Rb)、チタン (Ti)、金 (Au) の 4 元素で総額の約 8 割を占めている。

Ga	10	4.7	4.97%	227.9
Ge	3.5	1.6	9.29%	262.5
Se	3.6	1.7	20.51%	8.5
Rb	14	6.5	653.94%	3982.5
Sr	490	228.9	2.46%	1.7
Y	9.7	4.5	0.45%	21.6
Zr	54	25.2	0.11%	70.7
Nb	9	4.2	0.08%	10.5
Mo	44	20.6	0.07%	45.8
Pd	0.6	0.3	0.47%	800.7
Ag	22	10.3	0.48%	620.9
In	1.2	0.6	0.15%	28.9
Sb	9.8	4.6	0.05%	4.2
Te	0.1	0.05	0.29%	0.4
Cs	1	0.5	0.41%	108.6
Ba	5500	2569.1	4.42%	53.4
La	80	37.4	2.17%	11.6
Ce	22	10.3	0.12%	3.2
Pr	2.3	1.1	-	7.4
Nd	7.2	3.4	-	18.9
Sm	1.4	0.7	-	4.5
Eu	0.54	0.3	-	7.6
Gd	1.8	0.8	-	5.8
Tb	0.27	0.1	-	7.5
Dy	1.4	0.7	-	18.0
Ho	0.23	0.1	-	0.7
Er	0.69	0.3	-	2.2
Tm	0.09	0.04	-	0.3
Yb	0.7	0.3	-	2.2
Lu	0.09	0.04	-	0.3
Hf	1.6	0.7	0.03%	82.0
Ta	0.8	0.4	0.07%	8.5
W	24	11.2	0.13%	43.4
Re	0.01	0.01	-	1.1
Pt	0.33	0.2	0.33%	583.2
Au	0.9	0.4	8.76%	1872.9
Tl	0.7	0.3	3.40%	220.7
Bi	6.6	3.1	0.84%	4.8

4. まとめ

本調査により得られた知見を以下に示す。

- 全国各地の下水処理場から採取した下水汚泥についてレアメタル等の金属含有量の測定を行った結果、49 元素のうち、30 元素についてはすべての試料から検出され、また、残りの 19 元素についてはレニウム (Re) を除き、概ね 90%以上の試料から検出された。特に多く含有されていたのはチタン (Ti)、マンガン (Mn)、銅 (Cu)、バリウム (Ba) である。
- 工業排水が金属含有量へ与える影響について検討した結果、全般的な傾向として、工業排水には生活排水と比較してレアメタル等が多く含有されているとは言い難いが、中には突出してレアメタル等が含有する工業排水が存在することが示唆された。
- 下水汚泥焼却灰からレアメタルを製造する際の精錬にかかるコストが鉱石の場合と等しいと仮定し、採算性を検討した結果、多くの元素でほとんどの試料が粗鉱品位未満であることが明らかになり、採算性は低いことが確認された。一方でパラジウム (Pd)、銀 (Ag)、金 (Au) については、粗鉱品位を上回る試料が比較的多かった。
- 賦存量から年間輸入量を除すことで供給率を試算した結果、多数の元素で供給率が 1%を下回っている一方、ゲルマニウム (Ge)、金 (Au) は 10%近く、セレン (Se) は約 20%であり高い値を示した。
- 金銭的価値を試算した結果、スカンジウム (Sc)、ルビジウム (Rb)、チタン (Ti)、金 (Au)、パラジウム (Pd)、銀 (Ag)、プラチナ (Pt)、銅 (Cu)、ゲルマニウム (Ge) の順に金銭的価値が高く、全元素の総額は約 165 億円であった。

謝辞

本研究の実施にあたり、下水汚泥試料（焼却灰、脱水汚泥）及び関連情報をご提供下さった 42 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) Oliver, Krüger et al., Complete Survey of German Sewage Sludge Ash, Environmental Science & Technology, Vol.48, pp.11811-11818, 2014
- 2) Ban Vriens et al., Quantification of Element Fluxes in Wastewaters: A Nationwide Survey in Switzerland, Environmental Science & Technology, Vol.51, pp.10943-10953, 2017
- 3) 正路 直己、温泉水中に含まれる元素とレアメタル、衛研ニュース、No.160、p2、2011 年 6 月
- 4) (独) 物質・材料研究機構、材料環境情報データ No.18 「概説 資源端重量」、2009 年 3 月
- 5) 国土交通省 HP、資源・エネルギー循環の形成、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html
- 6) 国土交通省 HP、下水汚泥資源利用の現状と課題、<https://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/gyosei/sign1st/04.pdf>
- 7) 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
- 8) USGS : Mineral Commodity Summary, 2015~2019