

# 下水道資源の有効利用の現在地

Status quo of effective use of sewage resources

加藤 裕之<sup>1\*</sup>・片山 浩之<sup>2</sup>

Hiroyuki KATO<sup>1\*</sup> and Hiroyuki KATAYAMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科 下水道システムイノベーション研究室

<sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科 都市衛生工学研究室

<sup>1</sup> Sewage System Innovation Lab, School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Environmental Public Health Engineering Lab, School of Engineering, The University of Tokyo

## 摘 要

日本の下水道普及率は令和2年度末で80%を超え、合併浄化槽等を含めると污水処理人口普及率は約90%となった。人口減少が進むとともに老朽化施設が増大し、財政的にも厳しくなる中で、今後の下水道システムには、その機能の持続性を確保しつつ、世界的な課題である地球温暖化防止と地域における循環型社会の形成等に貢献していくことが求められる。本稿では、人類の存続に不可欠で世界的かつ地域の重要課題である、「エネルギーと食糧の確保」、そして「感染症対策に貢献する下水道資源の有効利用の現状と今後の展望」について述べる。まず、下水汚泥等の有効利用の現状を概説し、次に、「下水道資源の農業利用」を先進的に行っている地域を対象に資源循環を普及するための促進方策を分析する。さらに、新型コロナウイルスの世界的蔓延を契機として注目される、下水疫学調査についての現状と将来展望について述べ、最後に地域の自立と地球環境に貢献する下水道システムの目指すべき姿を展望する。

キーワード：下水疫学、下水汚泥の農業利用、下水道資源、コロナウイルス

Key words : wastewater-based epidemiology, agricultural use of sewage sludge, sewage resources, coronavirus

## 1. はじめに

国民の生活関連インフラである下水道の污水処理人口普及率は令和2年度末で80%となり合併浄化槽等を含めた污水処理人口普及率は92%に達した。全国約1,700の市町村が下水道事業を実施しているところであり(国土交通省, 2021a), 下水道システムから発生する汚泥, 処理水, 熱, CO<sub>2</sub>等をエネルギー及び肥料等の地域資源として利用することは、地域の脱炭素社会構築への貢献, 温室効果ガスの一つであるN<sub>2</sub>O対策及び富栄養対策としての窒素循環システム構築, 地域自立のための循環型社会・循環型経済の構築などの観点からきわめて重要である。しかしながら、例えば全国の年間下水道汚泥発生量約230万t(乾燥ベース)の約75%(2019年)は有効利用されているものの、その多くはセメント利用等の汚泥中の無機分の利用であり、バイオマスである下水汚泥の有機分の資源利用は遅れているなど、地域資源としての活用は不十分である。

本稿においては、まず、廃棄物として処理されて

きた下水汚泥等の資源利用の現状について概説する。また、下水道政策のみならず、食糧政策、窒素循環への貢献、そして令和3年5月に農林水産省が策定した「みどりの食料システム戦略」(農林水産省, 2011)において推進することが求められているものの普及が遅れている下水汚泥の農業利用については、その普及促進の方策を先進事例をもとに考察する。さらに、コロナの蔓延が人類にとっての大きな課題となるなか、下水がもつウイルス情報により感染者の事前予測と予防保全システムに貢献することが社会から求められているところであり、本稿では、下水疫学調査の最新動向と将来展望について記すこととする。

これにより、人類の存続に不可欠で世界的かつ地域の重要課題である、エネルギーと食糧の確保、そして生命を脅かす感染症対策に下水道資源がいかに貢献しうるのか、その現在地点と今後の発展可能性、更には今後の社会における下水道システムの役割・将来像等の展望について述べることとする。

受付：2021年12月12日、受理：2022年5月25日

\* 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部8号館, E-mail : h\_kato@env.t.u-tokyo.ac.jp

## 2. 下水道が有する資源のエネルギー利用等の概況

### 2.1 下水汚泥の有効利用の状況

下水汚泥が有する有機物の利用状況を図1に示す。国土交通省下水道政策研究委員会「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会」によれば、下水汚泥の持つ有機物量は年間約187万tであり、そのうち、エネルギー利用されているのは24%、農業利用されているのは10%であり、合わせて34%に過ぎないとされている(国土交通省, 2021)。エネルギー利用は、主に下水汚泥の消化に伴い発生するメタンガスの活用による発電である。現在、有機物として資源利用されていない残り66%の活用に向けて様々な政策が推進されているところであり、特に、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(Feed-in Tariff 略称 FIT)でメタン発酵による消化ガスは1kwhあたり39円(税抜き)と、太陽光等に比較して高額で取引されるため民間活用も含めてその利用は着実に進んでいる。また、国土交通省により、エネルギー利用のための消化槽や肥料化するための施設等に対して財政的支援が行われている。平成19年度に下水汚泥を利用したガス発電施設は全国で22箇所に過ぎなかったが、令和元年度には118箇所にまで増加している。

また、下水汚泥と地域の他の廃棄物を混合して消化することによるエネルギー利用を行っている地域もある。愛知県の豊橋市では、下水処理場に、し尿、浄化槽汚泥、生ごみを受け入れて一体的に消化を行い、発生したガスで発電を行っている。豊橋市を含め令和元年5月末時点で地域バイオスを受け入れている処理場を表1に示す(日本下水道協会, 2020)。

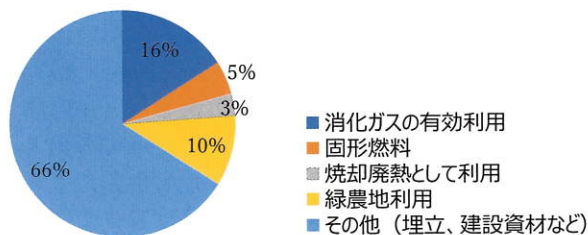


図1 下水汚泥の有する有機物の有効利用の内訳(有機物量)。(国土交通省, 2021)

### 2.2 下水熱の利用

下水汚泥以外の下水道資源のエネルギーでは、下水の水温が年間を通じて一定していることからヒートポンプ等を利用した下水熱の地域冷暖房利用や融雪利用が全国32箇所(令和2年8月時点)。(国土交通省, 2020)で行われている。これには、下水処理水の熱を用いるものと、図2のように処理場に収集される前の管路中の下水の熱を用いるものがある。

### 2.3 下水道資源のエネルギー利用の現状評価と展望

本章では、下水道資源のエネルギー利用について述べた。エネルギー利用については着実に推進が図られていると言える。その要因としては、固定価格買取制度や国の下水道政策による財政的支援、また、人口減少やし尿処理施設等の老朽化により、地方公共団体が、施設改築と維持管理に必要となるコストを低減するため、廃棄物関係施設の統合化の動きがあることが後押ししていると考えられる。

現在、政府主導で脱炭素に向けた政策が推進されている。新たな2030年目標として、温室効果ガス46%減(2013年度比)も掲げられた。財政支援、新たな技術開発はもちろんのこと、官民連携や広域化政策と一体的に下水道資源のエネルギー利用は推進されるべきと考える。

このためには、前述した下水汚泥と他の廃棄物の一体的な利用など、総合的な行政政策の視点から地域一体となった事業を行うことが必要である。

## 3. 下水道資源の農業利用についてのイノベーション普及理論からの考察

### 3.1 下水道資源の農業利用の実態と課題

前述したように、下水汚泥の有機物のうち、農業

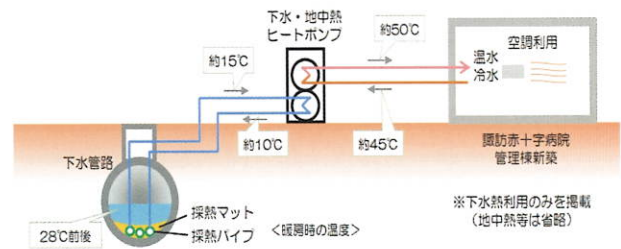


図2 下水道管路中の下水熱を利用するシステム例。(国土交通省, 2018)

表1 下水処理場における地域バイオマスの受け入れ(令和元年5月末時点)。

供用開始	実施箇所	処理場名	受け入れている他のバイオマス
平成29年	愛知県豊橋市	バイオマス活用センター	下水汚泥, し尿・浄化槽汚泥, 生ごみ
平成29年	石川県中能登町	バイオマス発酵施設	下水汚泥, し尿・浄化槽汚泥, 生ごみ, 農業集落排水汚泥, 食品加工廃棄物
平成27年	新潟県新潟市	中部下水処理場	刈草
平成27年	栃木県鹿沼市	黒川終末処理場	し尿・浄化槽汚泥, 生ごみ
平成25年	北海道恵庭市	恵庭下水終末処理場	家庭系生ごみ, し尿, 浄化槽汚泥
平成23年	富山県黒部市	黒部浄化センター	浄化槽汚泥, 農業集落排水汚泥, コーヒー粕, 生ごみ(ディスポージャー経由)
平成23年	北海道北広島市	北広島市下水処理センター	し尿, 浄化槽汚泥, 家庭系・事業系生ごみ
平成23年	兵庫県神戸市	東灘処理場	木くず, 事業系食品廃棄物
平成19年	石川県珠洲市	珠洲市浄化センター	浄化槽汚泥, 農業集落排水汚泥, し尿, 事業系食品廃棄物

利用されている割合は10%に過ぎない。その理由としては、「下水」という言葉のもつ「汚いもの」「臭いもの」というイメージなど様々な要因が考えられるが、近年、地域と一体となって下水汚泥等を地域の農業に活用することに成功している地域が現れてきた。特に、国土交通大臣賞循環のみち下水道賞(2012年)、日本水大賞「未来開拓賞」(2013年)さらに、低炭素杯2017環境大臣賞グランプリ受賞など数々の表彰を受けている佐賀市は最も先進的な都市である。筆者(加藤)は、10年前から佐賀市役所及び農家の方、環境NPOの方々と交流し継続的に本地域をインタビュー等により調査をしてきた。

その調査結果をもとに、本稿では、下水汚泥の農業利用の普及について、イノベーションの普及理論の視点から分析した。

### 3.2 佐賀市浄化センターと汚泥利用の推移

佐賀市の浄化センターは昭和53年に供用開始されており、平成30年度の実績では流入下水量(日平均)は約5万2千m<sup>3</sup>で、処理水は本庄江川を経て有明海に放流されている。現在、下水汚泥は、消化槽でメタン発酵し、消化ガスは自家発電で利用されている。この後、消化汚泥は処理場内でコンポスト化される。そして、低コストで再利用するために処理場に農家等に取りに来てもらう形で販売されている(20円/kg)。なお、汚泥肥料の販売が開始された平成23年度からの購入者(延べ人数)の推移を図3に示す。着実に増加しているとともに、農家だけでなく家庭内でのガーデニング利用など小口の利用者が多いこともわかる(小口の数について線形回帰を点線で示した)。

### 3.3 ロジャースのイノベーション理論による普及因子からの考察

佐賀市の下水汚泥の農業利用はなぜ普及したのかについて、イノベーション普及理論の教科書的な原典であるRogersの「イノベーションの普及」(Everett M. Rogers, 1962及び改訂版2003)で指摘されている普及を加速させる4因子の視点から考察する(表2)。ロジャースの普及理論では、おおそ疫学モデル、つまりインフルエンザなどの感染症が人と人の接触

を通じて伝染していく現象をイノベーション普及過程の基本モデルとしており(三藤, 2007)、普及を加速させる4因子について論じている(この他マイナスの因子として「複雑性」を含めると5因子をあげている)。

因子の1つ目は「比較優位性」である。既存の技術や製品と比較してコストのまたは効果等が優位かどうかという視点である。佐賀市の農家である的場氏にヒアリングを行った結果ではこれまでの化学肥料に比べて9割も肥料代が削減されたとのことである。また、佐賀市役所の汚泥処分費についても、産業廃棄物処分場に脱水汚泥として運搬して引き取ってもらうよりも年間3,000万円程度の削減になっているとのことである。つまり、両者にとって経済的メリットがある仕組みとなっている。

2つ目は「試行可能性」という視点である。新しい事業に取り組む場合、規模が大きいと失敗した場合の損失も大きくなる。そこで、まずは小さい規模など試行的に実施できるイノベーションかどうかという視点である。佐賀市の農家にインタビューしたところ、その多くが田畑の一部のみに汚泥肥料を使用する試行から取り組んでいた。

3つ目は「観察可能性」という視点である。イノベーションの効果の観察が容易で、それが分かりやすく説明でき、誰にでも理解できるものかどうかという視点である。農業は成果である農作物を見ることができる、味わえる技術である。事実、佐賀の農家の方からは、初めは半信半疑であるが、自分自身が行った結果、または他者が汚泥肥料を施肥して出来た農作物を見て効果を確信したという声を聞いた。

4つ目は「両立可能性(連続性)」である。新技術を導入しても、これまで使っていた技術の使い方との大きなギャップがなく使いこなせるかどうかという視点である。佐賀市では、汚泥肥料を使ってもらうため、地域の環境NPO法人(循環型環境・農業の会)が農家向けの農業勉強会を定期的に行い、施肥の方法等をレクチャーし、両立可能性(連続性)を確保するような仕組みを構築している(図4)。

筆者も10回程度は参加している本勉強会では、外部からの施肥の専門家の講義と農家の体験談、そして勉強会の合間での歓談で構成される。歓談の時間は、農家から農家へ施肥の方法や農作物の出来具

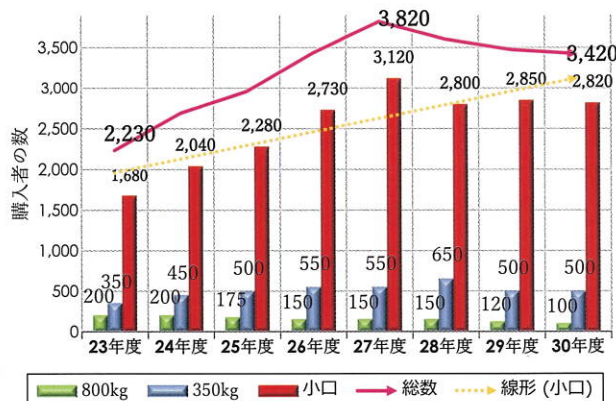


図3 佐賀市の汚泥肥料の購入者の推移(佐賀市役所提供)。

表2 普及の加速因子。

普及の加速因子	因子の内容
(1)比較優位性	コストや技術、名声が既存の方法に比べて有利であること
(2)試行可能性	小規模な試験等により、イノベーションを体験できること
(3)観察可能性	イノベーションの結果が他の人に見られる機会があること
(4)両立可能性	既存のやり方、価値観との乖離が少ないこと



図4 農業勉強会(NPO 法人 循環型環境・農業の会提供).

合などを語り合う場となっている。これは、Rogersの普及理論において二つに大別される普及システムの両方の役割を果たしている。一つは、専門技術者の指導という集中型普及システムであり、もう一つは普及システムの成員間の水平的なネットワークを利用した分散型普及システムである。

以上、佐賀市を事例をロジャースの普及理論における四つの因子の視点から分析した。佐賀市の担当者に聞いたところ、本理論の存在は知らなかったとのことであるが、期せずして観察性、試行性があるという農業利用の特徴を生かした現場の取組が行われていたと言える。イノベーションの地域での普及を考える上では、大いに参考になる理論と言えるであろう。

### 3.4 イノベーションの共進化について

さて、イノベーションの進化の視点から考察するRogersの理論においては、イノベーションに対して、採用者が使用する中で独自に変更を加え、改善していくことを「再発明」として普及拡大に貢献するものとしているが、開発者から採用者に提供されるイノベーションそのものは変化しないものと仮定されている。これに対して、三藤はイノベーションと、それを活用する社会は相互に影響を及ぼし合いながら共に進化すると主張する。イノベーションが、市場に出ると、開発者は苦情を含めた使用者の声を反映して新たなイノベーションを興す。同時に、使用者もイノベーションの存在を前提としたライフスタイルを形成していくことを指摘し、これを「共進化」と呼んで、電気製品の普及を実例に実証している(三藤, 2007)。この理論は、現在であればスマホの進化と我々の日常生活を考えると理解しやすい。佐賀市においても、農家の独自の工夫など使用者自身による「再発明」だけでなく、使用している農家との対話により、コンポスト製造側が資材の配合を改良するなど、より良い汚泥肥料づくりが行われてきている。例えば、一部の農家との協力で、製造者側が地元の廃材となっていた竹チップを混合したり、河川敷の竹林を配合する改良など、使用者である農家との対話と試行で改善を繰り返していくことが観察された。結果として、農家側の下水汚泥肥料の品質への信頼感が高まり、その使用は定着してきている。

### 3.5 イノベーターの共通性と伝道師の存在について

Rogers理論に触れられていない点として、下水汚泥の農業利用を地域で始める人には、どのような共通性があるのかについて以下のインタビューによって考察した。インタビューの対象としたのは、元・佐賀市職員で職員時代から一貫して佐賀市による汚泥の堆肥化とその地域への普及に取り組んでいる前田氏(2021年8月10日、佐賀市役所にて実施)、また、比較対象として秋田県大仙市で下水汚泥肥料の堆肥化を行い地域の農家に販売している上野台堆肥生産協同組合の藤井代表(2021年11月16日、上野台堆肥生産協同組合事務所にて実施)、岩見沢市で下水汚泥を自分の農地で堆肥化し、市役所の依頼により地域に配布して普及に成功した農家の峯氏(2021年10月19日、東京大学にて実施)の三名である。市役所職員、生産協同組合代表、農家、とそれぞれ立場は異なるものの、それぞれの地域で独自に下水汚泥の肥料化をした開発者であり、地域への普及拡大にも成功した。この三者に対して、汚泥肥料による農業利用に取り組んだ目的と動機等についてインタビューを行った。なお、この三地域は、下水汚泥の農業利用に関して、これまでに国土交通大臣賞「循環のみち下水道賞」を受けた三地域である。

まず、佐賀市の前田氏は、「地域の健康」の実現を自分の使命として一貫して活動している。実現のためには低化学肥料の農作物を作りたいと考え、市職員ながら微生物の働きなどを独学で学んで知識をつけて実験した。そして、市役所内及び市会議員を説得して、下水汚泥の処分方法を焼却からコンポストに変更した。前田氏は、困難で誰も手がけてないけれど人の役に立つこと、人の喜びにつながる事が一番のエネルギーと語る。「自分が手掛けたことに人が共感してつながりが広がっていく、これが大きなやりがいであり楽しい」と語った。

次に、上野台堆肥起用同組合の藤井氏について述べる。藤井氏は過去に酪農をやっていたが、牛が化学肥料の草を食べなかった。良好な土づくりが出来なかったことに後悔して微生物農法に興味を持ち、良い土づくり、良い作物、人の健康のための汚泥肥料の開発に着手したと語る。藤井氏の肥料は、地域の農家に好評で完売が続いているとのことである。また、同組合が生産した肥料により農地の連作障害などの深刻な問題を解決した農家による「極楽饒土研究会」という普及活動組織が存在している。その会長の鈴木氏によれば、藤井氏の土づくりへの想いと技術に共感して地域での普及活動をしているとのことである(2021年11月16日、上野台堆肥生産協同組合事務所にてインタビューを実施)。

岩見沢市の農家の峯氏は、原料を海外からの輸入に頼る化学肥料では、原材料の確保とコスト面から日本の農業の持続性は確保できないと考え、積雪状

態の厳しい環境下で独自に下水汚泥と地域の稲藁等の有機質をコンポスト化した混合肥料を開発した人物である。地域の「循環」農法、地球温暖化対策、生物多様性に向けた農業に取り組んでいる。岩見沢市役所は長らく下水汚泥の農業利用に取り組んできたが、生産された汚泥肥料の品質に課題があり人気がなく処理場に山積みの状態が続いた。峯氏が独自に堆肥化技術を開発し、さらに、地域の農業への想いに共感した市役所職員である斎藤氏が他の農家に峯氏の施肥の方法等を精力的に伝えたことで、現在は需要に対して汚泥肥料が不足するほど地域で普及している(斎藤氏には2021年10月11日にインタビューした他、数回、現地を案内いただいている)。

以上、2021年に行ったインタビューにもとづく三氏の信条について述べた。そこに共通するのは、地域の健康のため、日本の持続的な農業のため、という利他の精神である。これが、困難を克服し新たなイノベーションを生むエネルギーとなっていると感じた。

そして、その想いと技術に共感した者、佐賀市であれば農業勉強会等で普及を担う環境NPOの中心メンバー、上野台堆肥起用同組合であれば極楽饒土研究会の鈴木会長、岩見沢市役所であれば市職員の斎藤氏が、言わば伝道師として地域にイノベーションを普及させる役割を担っている。

#### 4. 下水情報という新たな資源と社会

##### 4.1 下水疫学調査

下水道管路網は街中に張り巡らされており、下水道のサービスエリアをカバーしている。なお、行政的には下水道は国土交通省が管轄で、農村集落排水は農林水産省が管轄しているため厳密には下水道とは呼ばないが、ここではそのような污水収集網を区別をせずにすべて下水道と呼ぶことにする。

下水には糞便や尿など様々な汚染物を集める機能があるが、実は、この中には様々な情報が含まれている。例えば、医薬品やその代謝物などを測定することにより地域の使用状況などを推測する情報が得られる。また、米国で問題となっているオピオイドなどの麻薬性薬物の濫用に対しても、マンホールにおける調査などで実態を把握するための試みが行われている。ウイルスに関しては、世界保健機関(WHO)が主導しているポリオウイルス撲滅プログラムにおいて、まだポリオウイルスが残っている国や地域において下水などの水系の調査による感染状況の把握が行われている。このように、下水に含まれている情報を地域の健康状態に関連する疫学情報として使用するアプローチを下水疫学調査と呼んでいる。

新型コロナウイルスについても、多くの感染者が糞便中にウイルスを排出していることがわかり

(Wölfel *et al.*, 2020)、下水を調べることにより、地域の感染状況を調べることができると考えられている。なお、糞便中のウイルス濃度は個人差や感染経過の影響が大きく、簡単に1,000倍程度のずれは生じ得る。また、場合によっては糞便中のウイルスではなく、歯磨き等において排出される唾液に含まれるウイルスが下水に入ってきたものを計測している可能性もあることを付け加えておく。

このように、下水疫学調査は有用であると期待でき、海外においては社会実装されている。一方、日本においてはあまり導入が進んでいないのが現状であり、そのため本稿では、下水疫学調査の必要性と今後の方向性について論じる。

##### 4.2 コロナウイルスと共存する社会に向けて

2019年末に中国の武漢から世界に拡がった新型コロナウイルスは、2020年から2021年にかけて猛威を振るった。2021年11月には、新しい変異株であるオミクロン株が南アフリカで出現し、12月の執筆時点で世界に広がっている状況である。今後の感染流行状況についても予断を許さない。日本では多くの年代にワクチンが行きわたってきており、感染は小康状態にあるとみられるが、これによってコロナウイルスの根絶に向かうとは考えにくい。どちらかと言えば、コロナウイルスが存在しても構わない強靱な社会の構築に向けて、治療薬の開発やワクチン接種が進められていると理解している。ワクチン以外にも、マスクの着用や会合のオンライン化、飲食の人数制限など、コロナ以前の世界に比べて少し異なる社会、すなわちコロナウイルスと共存する社会を形作っていく必要がある。人それぞれのリスク感覚の違いを相互理解し尊重しながら、感染抑制のための施策について痛みと効果を睨みながら試行錯誤しているのが現在地かと思われる。これからも、流行状態の変化や、新しい変異株、あるいは感染したことに対する社会の目が緩和されるなどすれば、ルールもそれに応じて変えていくべきであろう。

コロナウイルスと共存する社会では、ワクチン効果による無症状感染者の増加が一つの問題となる。これはブレイクスルー感染と呼ばれるもので、ワクチンのおかげで本人は無症状であるにもかかわらず、体内でウイルスは増加するため、他人に感染させる可能性を有している状態になる。新しい変異株であるオミクロン株は、ワクチン接種者でも多く感染しているという報告があり、これからはこのような事態に対応していかなければならないと考えられる。また、若年層への感染も増えている。現在、日本では新型コロナウイルスのワクチン接種は12歳以上と定められており、感染を十分に防ぐのは難しいかもしれない。ただ、新型コロナウイルスは若年層に対する病原性が高くないため、それほど大きな健康被害は生じないと考えられるものの、一方で無症状者の増加は考えられる。

無症状者は身近に有症の感染者がいたり重症化リスクの高い人がいたりすれば検査を受けることもあるかもしれないが、そのような事情がなければ、医者にかかることがないので、必然的にPCR検査を受けないことになる。このように、PCR検査を受けない感染者が増える可能性、あるいはすでに増えている可能性が考えられる。

#### 4.3 新規感染者数の情報価値

2021年の夏までは、東京の、あるいは日本全体の一日あたりの「新規感染者数」は、コロナウイルスの感染状況を表すもっとも信頼性の高いパラメータとして社会的に受け入れられていたとみられる。新規感染者数というデータは、主に有症者、あるいは陽性判明者との濃厚接触が疑われる人を対象に、唾液または鼻咽喉ぬぐい液を採取して、それに対して行われるPCR検査の結果を集計したものである。これは、それぞれの人に対する治療方針を決めるために必要な検査の結果を、新型コロナウイルスの感染流行状況を把握する疫学情報として転用している、ということになる。このような人を対象とした検査はこれからも続くが、疫学情報として転用する妥当性が低くなりつつある、という状況が生まれつつある。

すなわち、今から迎えるコロナウイルスと共存する社会では、「新規感染者数」という情報が、その時の新型コロナ感染症の流行状況をあらわすパラメータとして信頼できるものでなくなっていく、ということになる。コロナウイルス感染後に症状が出て重症化のリスクを恐れて検査に来た人のうちの感染者数、また、いわゆる濃厚接触者の追跡検査や海外からの入国者の検疫における検査など、何らかの必要性に迫られて検査をした人のうちの感染者の数を表示しているだけであり、一定程度の情報価値は持ち続けるだろうが、社会全体の感染者数を代表するものではなくっていくということになる。

#### 4.4 街中PCRの限界

政府では、基本的対処方針を踏まえ、感染再拡大や感染源を早期に探知するよう、事業所、大学等において幅広くPCR検査を行って感染状況をモニタリングするとともに、そのデータを分析して感染拡大の予兆や感染源を早期に探知し、早期の対応につなげていく試みを実施している。その情報は、内閣官房が発出しているホームページから閲覧することが可能である(内閣官房, 2021)。

例えば東京都では週に1万件を超える検査をして、感染の最盛期でも陽性者が50人に満たず、感染状況を表すパラメータとして使いにくい。あるいは、街中に出てこられる人というのは基本的には感染していないと思っている人であり、その人たちの中の感染者数と、実際の社会全体の感染状況との関係性はなかなか整理がつかない。

また、この方法では非常に多くのPCR検査を実

施しているが、感染流行を把握するための方法としては非常に効率が悪い。PCR検査自体もさることながら、検査のための検体を収集するためにかかっている見えないコストはかなり膨大なものになると考えられる。また、その割に、検査に参加する被験者が全人口からどのような偏りがあるのかが不明で、科学的な検証には耐えないデータになると考えられる。

また、個人情報の管理などもなかなか実務的には厄介な問題である。日本では、いまだに陽性者に対する社会的差別や偏見があり、陽性者は不当に扱われる恐れを抱いていると思われる。また、例えばワクチン接種者で無症状感染者となった場合、本人も無症状で周りにも感染をさせずに終了することも十分に考えられる。その場合、本人が無症状感染者であることを知ることに、どのような積極的な意味があるか。もちろん、陽性判明後には感染を拡げないための努力ができるというメリットはあるが、もともと周りに感染を広げるリスクがあまり大きくない場合は、感染したことを人に知られることによる損失のほうが人生に重大な影響がある可能性も十分に考えないといけない(Murakami *et al.*, 2020)。

#### 4.5 下水中のウイルスを調べる

水中ウイルスの測定においては、臨床検体などと比較してウイルス濃度が低いことが多いため、ウイルス濃縮などの前処理が必要になることが多い。また、ウイルス濃縮に際して、様々な夾雑物をも濃縮してしまうこともあるので、ウイルスを精製する必要がある。

これまでも、ノロウイルスなど、水系感染するウイルスを対象に様々な手法が開発されてきたので、ウイルス濃縮法は既存の方法が存在した。ただ、新型コロナウイルスとはウイルス粒子の表面特性が異なるため、それらのウイルス濃縮法はあまり有用でないことが分かってきた(Torii, S., *et al.*, 2022)。そのため、様々な手法の最適化や、新しい方法など、水中のコロナウイルスの測定法の開発は重要な研究対象となっている。

ウイルス測定の感度を上げるためには、より大容量の下水試料からウイルスを濃縮すればよいが、その場合は多くの夾雑物からウイルスを精製する必要がある。技術的な困難が生じることがある。また、ウイルスの精製ではなく、ウイルスの遺伝子を抽出する際に精製する工夫もあり、研究開発としてはそのあたりに様々な努力がなされたところである(Torii *et al.*, 2022)。

その後はウイルスをPCR法により測定する。新型コロナウイルスの場合は、遺伝子がRNAなので、逆転写反応を行ってRNAをcDNAに転写してからPCR法を行うことになる。これらの流れは、一般的な臨床検体と全く同じであり、検査結果に関しては信頼性が高いものが得られている。

#### 4.6 下水疫学調査の有用性

下水道に流れ込む水は、最終的に下水処理場において処理されて放流される。すなわち、水はすべて下水処理場に到達するので、下水処理場に届く流入水は下水サービスエリアすべての情報を含むことになる。

感染者は、すぐにPCR検査をしてもらえないわけではない。感染後、症状が出るまで一定期間あり、その後、保健所と相談するなり医者に診てもらいなりして検査実施の運びとなる。その検体が検査機関に送付され、PCR検査が行われる。それに対し、下水管路の流下時間は日本の場合多くは1日以内であり、その日のうちに検査結果が判明する検査体制を構築することは可能である。すなわち、臨床検体の検査結果を集計するよりも早くに街中の感染流行状況を把握することも可能であると考えられる。

下水には、感染の有無、症状の有無にかかわらず、その地域すべての人の糞便が流れ込んでくる。そのため、無症状の感染者の情報についても含まれていることになる。よって、下水試料をうまく測定することができれば、多くの人の感染状況に関する情報を取り出すことが可能となる。その対象人数を考えれば、驚くほどの低コストで検査が実施可能となる。また、その時点では、誰が感染しているのかという情報は含まれないため、隔離措置を行うなどはできないが、一方で(おそらく)無症状の感染者が存在しているかどうか、という情報は得られることになる。

試料の採取場所は、下水処理場に限る必要はない。例えばマンホールで試料採取が可能であれば、そのマンホールの上流に位置する区域に限定した調査が可能である。あるいは、施設排水を採取すれば、当該施設において感染者が存在しているかどうかを調べることが可能となる。

#### 4.7 施設排水の調査

下水疫学調査の情報を効果的に活用できそうな施設として、例えば以下のような施設が考えられる。コロナ患者を受け入れていない病院、養護老人ホームなどの高齢者施設など、感染者がいたらすぐに対応が必要な施設では情報の有用性が高い。また、大学キャンパス・学生寮、あるいはスポーツ選手寮・選手村などでは、対面で行う試合や行事の実施の可否の判断に重要な情報が提供できると考えられる。

このようにして、下水疫学調査を活用すれば、感染拡大防止と社会経済活動の両立に向けた措置を実施できるようになると考えられる。下水疫学調査は例えば毎日試料を採取するというような高頻度な検査が可能であり、感染者の早期発見・隔離によりクラスター発生を未然に防止するなど、適切な感染拡大リスク管理につなげることが期待できる。

下水疫学調査については、世界各国でその重要性が認識され、社会実装が進められている。例えば、

アメリカではアリゾナ大学(Betancourt, *et al.*, 2021)やカリフォルニア大学サンディエゴ校などの例が有名であるが、大学の寮などにおいて排水の調査が日常的に行われ、クラスター化することを未然に防いでいることなどが紹介されている。また、オランダでは300か所にのぼる下水処理場における調査データが公表されている(RIVM, 2021)。

#### 4.8 日本における下水疫学調査の状況

日本では、なかなか下水疫学調査が進まなかった。他国に比べ、感染者が少ないために下水中の新型コロナウイルスの濃度が低かったことも一つの原因である。また、同じ理由から、施設等における陽性事例に対して、風評被害を恐れるケースや、対応を事前に定めておくことが難しいケースなどがあり、社会実装までなかなか進んでいないのが現状である。

公益社団法人日本水環境学会は、COVID-19タスクフォースを2020年5月に設置し、下水及び水環境中の新型コロナウイルスの検出・除去・リスク管理に関する国内外の情報収集・発信に努めてきた。筆者もそのメンバーの一人として、測定法の開発や評価等に貢献してきた。

日本においては、下水中に含まれる新型コロナウイルスの濃度が低いこともあり、検出感度を高めるための研究が盛んに行われ、現在では世界で最も検出感度の鋭敏な手法になってきている。測定する立場からは、測定結果が陰性であった場合に、ウイルスが不在であったのか、あるいは検出感度が足りなかった/検出操作が失敗したのか、という点に確証を持ちたいという動機があり、そのような努力が必要とされた背景もある。

例えば、北海道大学及び塩野義製薬が開発した方法は、従来の方法に比べて100倍の検出感度を有する測定法であり、結果的に定量性を高めることにも成功している。また、島津テクノロジーが下水PCR検査サービスを開始している。

このように、日本には技術的に優れた手法が存在しており、今後は社会実装により有効活用されることが期待されている。今後、結果の使い方との組み合わせを工夫することにより、社会的な有用性が飛躍的に向上する可能性を秘めており、下水道システムが果たす役割の一つとして期待が高まっている。

### 5. 下水道システムの役割の転換と今後の展望

地方都市を中心に進む人口減少の中で、地域経済や雇用を確保していくことが社会的な課題となっている。一方で、国際的に見ると、地球環境問題への貢献、不安定なエネルギーや食糧についての自給率の向上が求められている。さらに、コロナウイルスに代表される感染症等の深刻な健康問題が地域産業や市民活動に歯止めをかける。

これらの輻輳した問題の一体的な解決を図っていくために地域の基礎インフラである下水道システムも積極的に貢献していく必要がある。これまでは、生活環境改善や水環境保全のために施設整備を最重要課題として下水道事業は推進されてきたが、今や日本の下水道システムは完成しつつあり、収集される膨大な下水にはエネルギーや情報等の多くの未利用資源がある。その活用は未だ端緒であるが、下水道システムを今後は「社会への資源還元システム」に転換していくという展望を持ち、本稿で述べたような、効率的かつ効果的な技術の研究開発とその社会への適用、農業利用で述べたような普及方策を活用することで、下水道システムが地域の自立と持続性をもたらす、ひいては地球環境問題にも貢献できる社会インフラになると考える。

## 6. おわりに

本稿では、国際的な問題であるとともに地域の重要課題である、エネルギー、食糧、健康に貢献する下水道システムの役割と、その進展状況、今後の展望について概説した。

大きな転換期にある下水道、その現在地点を知り、今後の可能性を検討いただく参考となれば幸いです。

## 謝 辞

本調査の実施にあたって、下水汚泥の農業利用に関しては、佐賀市役所、地元の農家やNPOの方々、また、岩見沢市役所及び農家、秋田県・上野台堆肥のから多大の御協力をいただいた。

## 引用文献

- Betancourt, W. Q., Schmitz, B. W., Innes, G. K., Gerba, C. P., Pepper, I. L. et al. (2021) COVID-19 containment on a college campus via wastewaterbased epidemiology, targeted clinical testing and an intervention. *Science of the Total Environment*, 779, 146408.
- Everett M. Rogers(1962 及び改訂版 2003)イノベーションの普及, 翔泳社.
- 国土交通省(2018)下水熱に係る取り組み事例集. <https://www.mlit.go.jp/common/001233624.pdf>
- 国土交通省(2020)下水熱による地域熱供給箇所(令和2年8月末). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001370195.pdf>
- 国土交通省(2021a)令和2年度末の汚水処理人口普及状況について(報道発表資料). [https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13\\_hh\\_000477.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000477.html) (2022年5月25日確認)

国土交通省(2021b)脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会 第一回委員会(2021年10月1日), 資料3, 下水道が有するポテンシャルと現状の取り組みについて. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001466673.pdf>(2022年5月25日確認)

三藤利男(2007)イノベーション・プロセスの動力学, 芙蓉書房出版.

Murakami, M., Hata, A., Honda, R. and Watanabe, T. (2020) Letter to the Editor: Wastewater-Based Epidemiology Can Overcome Representativeness and Stigma Issues Related to COVID-19. *Environmental Science & Technology*, 54, 5311.

内閣官房(HP) <https://corona.go.jp/monitoring/> (2021年12月現在)

公益社団法人日本下水道協会(2020)令和2年度下水道白書「日本の下水道」.

農林水産省(2021)みどりの食料システム戦略. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>(2022年5月25日確認)

オランダ RIVM (HP) <https://www.rivm.nl/en/coronavirus-covid-19/weekly-figures>(2022年5月25日確認)

Torii, S., Oishi, W., Sano, D., Haramoto, E. and Katayama, H. et al. (2022) Comparison of  $\gamma$ -polyethylene glycol precipitation procedures for the RT-qPCR based recovery of murine hepatitis virus, bacteriophage phi6, and pepper mild mottle virus as a surrogate for SARS-CoV-2 from wastewater. *Science of the Total Environment*, 807, 150722.

Wölfel, R., Corman, V. M., Guggemos, W., Seilmaier, M. and Wendtner, C. et al. (2020) Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*, 581, 465-469.

### 加藤 裕之/Hiroyuki KATO



東京大学大学院都市工学科・下水道システムイノベーション研究室特任准教授。1986年早稲田大学大学院理工学研究科修了。同年4月建設省下水道部に入省。2016年国土交通省下水道事業課長。2020年より現職。博士(環境科学・東北大学)内閣府地域活性化伝道師。下水道資源による地域循環システムの構築形成、国内外の官民連携PPPについての研究を行っている。著書「フランスの上下水道経営」など。

### 片山 浩之/Hiroyuki KATAYAMA



東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授。東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻修了, 博士(工学)。1998年同助手, 2016年日越大学へ派遣, 2019年より現職。水中ウイルスの測定を中心的な研究テーマとしており, 東京湾における水浴リスク, 上水道の微生物リスク, また近年では新型コロナウイルスの下水疫学調査などの研究を進めている。水に関する様々な分野の研究者の知を融合させる場「東大waterフォーラム」の座長を務める。