

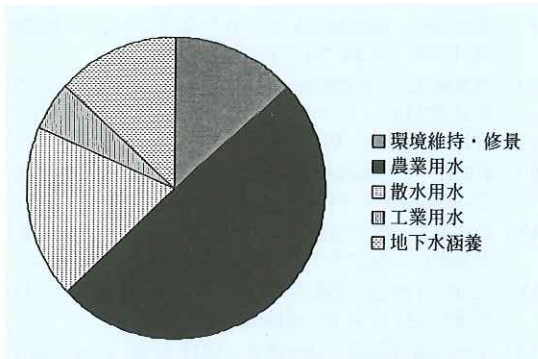
下水処理水再利用システムの課題

小越眞佐司* 鈴木 穰**

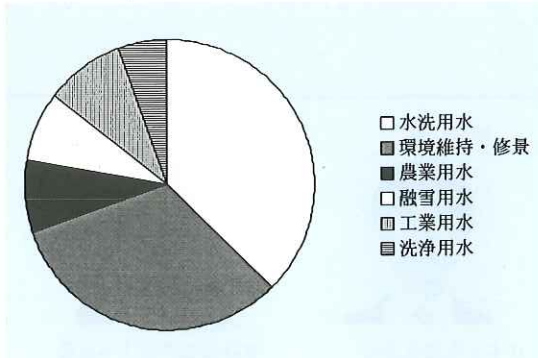
1. はじめに

大気や水は地球規模で循環している資源ある。しかし、水は地理的に偏在し、その恩恵を全ての生物が等しく享受することはできない。水の偏在は人類の持続的な発展における主要な制限要因の一つであり、これを克服するための技術が常に求められてきた。人口の増加や気候変動によって、水問題は今後さらに深刻化すると予想されており、その解決のため、降雨を貯えて利用するという伝統的手法に加えて、新たな水利用技術が必要とされている。

下水処理水再利用は、都市の持続的な発展のために必要な水を確保する手段として有力である。



(a) 総利用水量：カリフォルニア州：434×10⁶m³(1999年)



(b) 総利用水量：日本：206×10⁶m³(1997年)

図-1 日本とカリフォルニア州の再利用比較

都市における水の利用には、飲用の他に様々な質的レベルを要求する多くの用途があるが、現状では、ほとんどの用途に飲用水が用いられている。そのため、水利用機器の多くは、飲用水の水質を前提としており、下水処理水のような異質な水を利用するための材質・構造にはなっていない。最近、福岡市や東京都で相次いで発生した再利用システムにおける機器の閉塞・腐食のトラブルもその様な材質・構造が一因となって生じたものであった。

このように、新たな水利用技術としての下水処理水再利用には、未解決の技術的課題がいくつか残されており、その中には、再利用システムが稼働した後に、明らかになったものもある。下水処理水再利用が、都市の水利用システムとして一定の役割を果たすためには、これらの問題が認知され、対策が明らかになり、受け入れの合意形成がされる、といった一連の手続きが必要である。本報文は、現在明らかになっている、下水処理水再利用システムのいくつかの課題と、その対策について述べるものである。

2. 日本の下水処理水再利用の現状と課題

2.1 日本の下水処理水再利用の現状

世界の水再利用は、都市排水を、農業用の灌漑に利用することが中心である。イスラエルやメキシコを初め、多くの国々では、下水、および、その処理水が、灌漑用に利用されている。これに対し、我が国の再利用は、都市における非飲用用途への利用が中心である。図-1¹⁾は、米国カリフォルニア州における水の再利用と、我が国の水の再利用(下水道を経ずに、業務ビル等で、浄化槽を介して再利用する、個別循環利用を含み、工場等における、工程水等の循環利用を除く)を、比較したものである。水洗用、修景・環境維持用水等、都市の非飲用用途への利用率が、農業用への利用率をはるかに上回る、日本の水再利用の特徴が示されている。

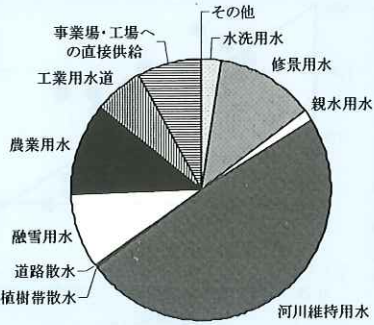


図-2 日本の下水処理水再利用の用途別割合

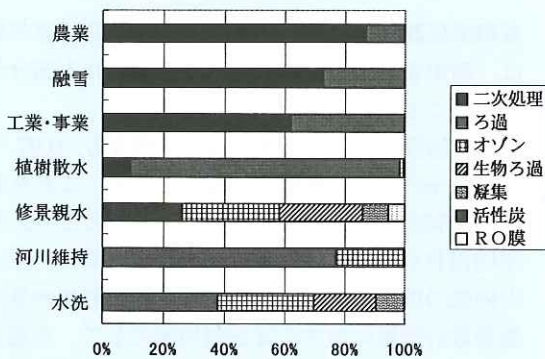


図-3 再利用用途と再生処理法

図-2²⁾は、個別循環方式による再利用を除いた、公共下水道を介して行われる再利用だけの用途別年間利用水量割合を示したものである。

図-1の、日本における水の再利用の用途別割合と比較して、水洗トイレ用水の利用割合が、著しく低いことがわかる。このことは、日本の水再利用の

主用途の一つである水洗用水には、主として、個別循環の浄化槽処理水が当てられ、もう一つの主用途である、修景用水や環境維持用水には、公共下水道の処理水が利用されている、ということを示している。

図-3²⁾は、下水処理水の再利用に際して、下水処理場でどのような付加処理を行っているかを、再利用用途別に、年間処理水量の比率として表している。図-3から、農業用水、事業場用水および融雪用水には、ほとんど、「付加処理無し」か「ろ過処理」程度で用いられるのに対し、水洗用水、修景・親水用水、および河川維持用水では、ろ過処理のほか様々な付加処理を行った高度処理水が、多く用いられていることがわかる。

2.2 下水処理水再利用の費用

下水処理水再利用の費用は、主として、再生水を利用先へ送るための費用と、付加的な処理のための費用からなる。これらの費用は、施設の整備に要した費用の償却費と、維持のために年々必要な補修費、および運転管理のための維持管理費に分けることができる。

下水処理水の再利用費用に関するアンケート調査から²⁾、再利用のための施設の償却費は、その施設が償却期間内に処理可能な再生水量をもとにした、再生水 1m³あたりの単位償却費として、再生処理法別に、表-1に示す値が得られた。このうち、オゾン施設の単位施設償却費と施設規模との関係を、図-4に示した。

施設規模の増大と共に、単位施設償却費は低下す

表-1 再生処理施設の単位償却費 (円/m³ ; 管渠は円/m³/km)

	塩素消毒	ろ過	オゾン	生物ろ過	活性炭	逆浸透	管渠
平均値	4.6	10.0	31.8	121	42.3	869	11.1
データ数	5	42	16	3	2	2	53
最高	11.5	34.1	92	259	61.7	1,062	28.5
最低	0.33	1.25	3.9	17.6	22.9	675	0.02

表-2 再生処理施設の単位維持管理費 (円/m³ ; 管渠は円/m³/km)

	ろ過	オゾン	生物ろ過	凝集ろ過	凝集+活性炭	逆浸透	管渠
平均値	64.4	48.2	25.2	103	273	311	26.4
データ数	21	10	2	2	2	1	24
最高	431	101	30.7	10.3	498	—	261
最低	0.97	8.4	19.7	195	48.3	—	0.07

る傾向にあり、スケールメリットが認められた。比較的多くの回答が得られた、ろ過施設と管渠についても、同様の傾向が認められた。

同じアンケート調査によれば、[年間維持管理費] / [年間再利用水量 (実績値)] で算出される、再生水 1m³ あたりの単位維持管理費は、表-2 に示す通りである。ろ過施設の単位維持管理費の最高は 431 円で、より高度な逆浸透膜処理の維持管理費を上回った。ろ過施設の維持管理費は、逆浸透膜処理より安いと考えられるので、施設能力と再利用水量を調べたところ、再利用水量が施設能力と比較して相当小さいケースが認められた。そこで、ろ過施設の単位維持管理費と利用率 (日平均再利用水量の施設能力 (m³/日) に対する割合 (%)) の関係をプロットしたところ (図-5)、両者の間には両対数紙上で逆相関関係が認められ、利用率が極端に低いろ過施設で、単位維持管理費が大変高くなっていることがわかった。維持管理費には、施設の運転に伴って固定的に必要なとされる経費が含まれ、低い利用率でも固定的経費を削減できないため、単位維持管理費が高くなったものと考えられる。その影響は施設規模によって異なると考えられるので、施設規模と利用率を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、

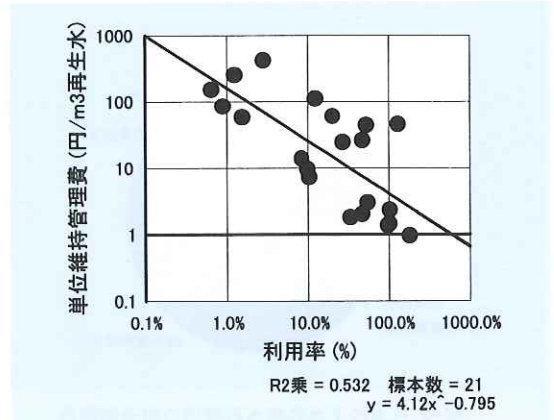


図-5 利用率と単位維持管理費 (ろ過施設)

重相関係数は 0.81 で、ろ過施設の単位維持管理費は、利用率と施設規模によって決定される部分が多いことがわかった。

配水施設 (管渠等) の単位維持管理費も、0.07 ~ 261 円/m³ の広い範囲に分布している。これを日平均再利用水量に対してプロットしたところ、日平均再利用水量と単位維持管理費の間には、図-5 と同様の関係が認められた。日平均再利用水量の管渠設計流量に対する比を利用率として、ろ過池の場合と同様に、規模 (設計流量) と利用率を説明変数として重回帰分析を行った結果、重相関係数は 0.87 で、ろ過施設の場合と同様に、利用率と施設規模が管渠の単位維持管理費を決定する重要な因子であることがわかった。

先に表-1 に示した単位償却費は、利用率 100% を前提としているので、実際の再利用水 1m³ あたりの費用は、利用率によってかなり大きい影響を受けると考えられる。

表-1, 2 とは別に、再生処理法別に、各再生施設の建設費と総補修費 (調査時までの年平均補修費 × 耐用年数) の総和を求め、各々を各再生施設の供給可能再生水量 (処理能力 × 耐用期間) の総和で除して、再生水 1m³ 当

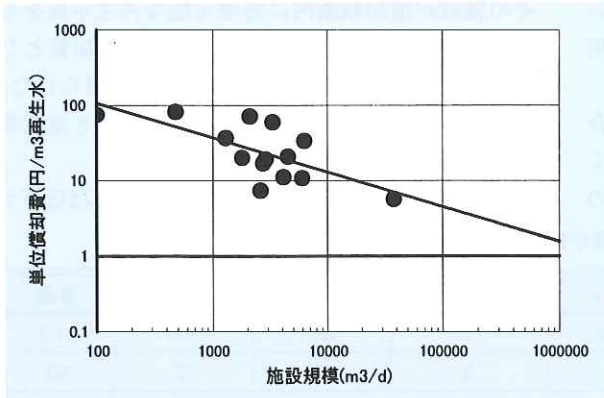


図-4 規模と建設費 (オゾン処理施設)

表-3 再生利用の推定標準原価 (平成 9 年価格、円/m³)

再生処理法	塩素	ろ過	オゾン	生物ろ過	凝集ろ過	凝集+活性炭	逆浸透
原価	10.2	19.3	61.1	80.9	92.8	118.3	1,224
内訳	償却費	5.6	13.4	34.8	55.3	48.9	63.4
	補修費	0.4	0.7	2.1	2.1	1.7	4.9
	維持管理費	4.2	5.2	24.2	23.6	42.3	50.0
							312

(注) オゾンはろ過+オゾン処理、生物ろ過は生物ろ過+オゾン処理、凝集ろ過は凝集ろ過+オゾン処理、活性炭は凝集ろ過後活性炭処理、逆浸透は凝集ろ過等の前処理を含む

たり標準償却費、標準補修費を求めた(表-3)。管路については、建設費および補修費の全再生施設の総和を、設計流量×耐用期間の全再生施設の総和で除して、再生水 1m³ 当たり標準償却費と標準補修費とした。維持管理費については、再生処理法別に、各施設が回答した維持管理費(年額)を合算し、年間再利用水量の合算値で割って、再生水 1m³ 当たりの標準維持管理費を求めた。そして、標準償却費、標準補修費、および標準維持管理費の和として、平成9年度末時点の標準的な再生利用原価を再生処理法別に推定した(表-3)。

2.3 再生水料金

このように、再生処理法や規模によっては、かなりの再利用費用を必要とすることがわかった。我が国の下水処理水再利用々途は、修景・親水用水利用や河川維持用水、あるいは冬季の融雪用水等、都市の公共サービス部門での利用が主である。使用者が供給者と同じ部局であることから、必要な経費を料金として回収する例は少ない。水洗用水としての利用では、協定に基づいて料金を徴収している場合が多いが、その料金は、再利用のために要する費用と、上水道料金を勘案して定められ、表-4に示す様な値になっている。

都市用水に次いで利用水量が多い工業、農業用水や特定事業者への供給では、大部分二次処理水がそのまま供給されるが、下水道側が負担した管路施設や運転管理経費に応じて、料金徴収が行われている場合もある。

下水処理水の再利用が、新たな水利用手法として定着し、持続性のある事業として行われていくには、経済的にも成り立つことが必要である。そのため、受益者が限定される場合には、料金による費用回収をはかることが必要と考えられる。一方、不特定多数を利用者とする場合は、公共サービス事業又はPR事業として、評価を受けることになると考えられる。

表-4 再生水の料金(円/m³)

	水洗用水	事業所供給	修景・親水	散水
平均値	200	14	4.85	35
データ数	8	5	2	1
最高	356	18	6.7	—
最低	90	10	3	—

2.4 下水処理水再利用に伴う問題と対策

下水処理水再利用では、再生水の水質に起因して生じる問題がいくつか指摘されている。

水質に起因する問題としては、(1)臭気、着色など外観の問題、(2)環境用水利用などで生じる藻類の繁茂や付着による臭気、外観の悪化、(3)ロータンクなどの内面に生じる微生物スライムとその剥離による外観の悪化、(4)管渠腐食と給水機器の閉塞、等が実際に生じている。

また、(5)水系感染についても、新たな病原微生物を視野に入れた検討が必要である。

(1)から(3)の問題に対しては、多くの場合、薬剤の添加、清掃頻度の増加等で対処されており、抜本的な再生処理水質改善が行われることもある。臭気やスライムの発生は、残留塩素の消失後に生じる場合が多く、基本的な対策として、再生水中の残留塩素保持が重要である。そのため、土木研究所では、合理的な残留塩素管理法を検討している。(4)の問題に関する土木研究所の調査で、再生水の塩類濃度が上水より高いことが腐食の原因の一つであることがわかった。したがって、再生水管の防食対策を十分に行う必要があり、特に小口径管では、非金属配管材料の使用が望ましいと考えられる。

現在まで、「下水処理水循環利用技術指針(案)」³⁾や、「下水処理水の修景・親水用水利用水質検讨マニュアル(案)」⁴⁾に、基準値や目標値が示され、これらに則った再生処理が行われているが、先述の(1)から(4)のような問題が生じており、何らかの見直しが必要と考えられる。一方、(5)の問題は、現在までのところ発生しておらず、現行の基準等がそれなりの効果を有していると考えられる。土木研究所が主催する高度処理会議では、再生水を介して病原微生物に感染する、リスク対策の検討を進めている。例えば、水道管との誤接続が生じると、クリプトスポリジウム症の集団発生のような、危険性が否定できないので、より安全な再利用が可能にするため、厳密な誤接続対策を行う等、制度面での検討も必要であると考えられる。

3. 都市における水の再利用方式について

都市内で人工的に構築される水

の再利用形態は、「下水処理水循環利用技術指針(案)」³⁾によれば、閉鎖循環方式、開放循環方式、および他用途供給方式に大別される。

下水処理が直接利用されるのは、閉鎖循環方式のうちの広域循環方式と他用途供給方式である。2.1で述べたように、我が国の水再利用のうち水洗トイレ用水は、多くは、浄化槽処理水を利用する個別循環方式で行われている。「我が国では歴史的な経緯から、個別循環方式が先行実施されている。」という事情は別にして、個別循環利用方式と広域循環方式の何れが望ましいか検討する。

3.1 個別循環方式の利点・欠点

個別循環方式では、

- (1) 排水の発生源で処理し、発生源で再利用されるため、上水利用量の削減と同時に下水の排出量も削減される。そのため、大規模な施設の建設に際して、上水供給能力が不足する場合のほかに、下水管渠の流下能力に余裕がない場合にも、導入を要請されることがある。但し、雨水利用が同時に行われる場合には、上水利用量の削減量ほど下水排出量は削減されない。
- (2) 自治体側では中水道施設の必要が無く、都市全体としてみた場合に再生水配水施設費が削減できる。
- (3) 分散配置になるため、事故や災害によるリスクが分散され、大規模災害時に、都市または地域全体で機能を失う可能性が低くなる、と考えられる。
- (4) 汚水系排水と雑排水系排水の、二元排水系が採用されている場合が多く、再利用に雑排水系だけを用いる方式では、色度、COD が低い再生水を得ることができる。

以上の様な個別循環方式の利点は、広域循環方式での欠点となる。

一方、個別循環方式の欠点としては、

- (5) 建物内の施設の利用状況によって、排水発生量が大きく変動し、必要な水量を確保出来ない場合がある。そのため、上水補給や大容量貯水槽の設置が必要になる。
- (6) 小規模の処理施設が、都市内に数多く設置されることになり、2.2で述べたように単位水量あたりの建設費の点で不利である。
- (7) 都市全体で見た場合に、施設数が増えることによって、管理費や水質検査費等の固定的経費

が増加し、機器点数が増えることで、修繕や点検費用が増加する等、運転管理費の点でも不利である。

これらの点は広域循環方式の利点ということになる。

3.2 水再利用方式の選定を巡る課題

このように、個別循環方式、広域循環方式には各々メリット・デメリットがあるが、水の再利用に伴うコストという点から、再利用の密度が一つの判断基準になると考えられる。即ち、広域循環方式において、単位管渠長あたりの送水量がある値以下になると、管渠関連のコスト増大が規模拡大によるコスト低減を上回るようになり、総コストが個別循環方式を上回る点に至る、と考えられる。したがって、利用密度が高く、単位管渠長あたりの送水量が多い都市中心部では、広域循環方式が適していると考えられる。

現状では、個別循環方式による利用が、件数でも水量でも、非常に多くなっている。その基本的な理由は、個別循環方式が先行して実施されたこと、既成市街地での中水道網の建設があまり進められていないことである。また、広域循環の供給区域内でも、下水道への排水に必要な除害施設設置に伴う費用が加わると、水料金(再生水料金+下水道使用料+除害施設費用)が、個別循環方式のコストより高くなる場合があり、個別循環方式を採用する理由の1つになっている。その他に、広域循環で供給される水質が、個別循環方式で得られる水質より悪く、要求水準に達しない場合にも個別循環方式が用いられている。

以上のような問題がない場合、先に実施された個別循環施設の処理機械装置の償却期間が終了する頃に、比較的速やかに個別循環から広域循環への切換が可能になると考えられる。経済的、水質的問題に対しては、例えば、除害施設についての条件緩和、再生水水料金引き下げ、供給水質向上等を検討する必要があると考えられる。

再生水の利用密度が低い地域では、個別循環利用の方が合理的である。ここでは、水量水質の安定性や、安全性の確保が重要な課題である。現在、再生施設は浄化槽の一部として扱われているが、水循環施設としての観点から、システム全体の安定性や安全性を確保することを主眼にした、浄化槽とは異なる規準等の制定について検討する必要

があると考えられる。

4. おわりに

水の再生利用について、現状と今後の課題について述べた。

排水の人為的な再利用は、新しい水利用法であり、再利用に関する制度や基準は、未だ十分に整備されていない。これらは、再生水が様々な形態で利用される中から課題が提示され、逐次解決されて行く過程で整備が進むものと考えられる。福岡市で下水処理水の広域循環利用が始まってから20年が経過し、原水となる二次処理水の水質改善や高度処理法の技術的な進歩、あるいは現場経験に立脚した再利用施設の設計・管理手法の改善等によって、下水処理水は都市における新しい水資源として着実に利用実績を高めてきた。未解決の問題や新たに生じた問題もあるが、それらを解決し、豊かな水環境を創造することが都市の持続可能な発展につながると考えられる。

参考文献

- 1) Ogoshi M. Suzuki Y., Asano T. : Water Reuse in Japan, IWA Proceeding of 3rd International Symposium on Wastewater Reclamation Recycling and Reuse.
- 2) 鈴木稔、小越眞佐司：下水処理水再利用システムの評価に関する調査, 土木研究所資料第 3661 号, pp.139-144
- 3) 建設省：下水処理水循環利用技術指針(案), 昭和 56 年 3 月
- 4) 建設省高度処理会議：下水処理水の修景・親水用水質検討マニュアル(案), 平成 2 年 3 月
- 5) (社) 公共建築協会：排水再利用・雨水利用システム計画基準・同解説, 平成 9 年版, 平成 10 年 1 月

小越眞佐司*



建設省土木研究所
下水道部三次処理研究室
主任研究員
Masashi OGOSHI

鈴木 稔**



同 三次処理研究室長
Yutaka SUZUKI