

DALY を指標とした下水処理水再利用による健康リスク評価

東北大学大学院工学研究科 正会員○渡部 徹，大村達夫
同 上 学生員 橋本剛志，阿部欽章

1. はじめに

近年，下水処理水再利用は多くの地域で導入されており，水道水源としての再利用も検討されつつある¹⁾。しかし，下水処理水再利用においては病原微生物や消毒副生成物による健康被害の発生が懸念されるため，それら健康被害のリスクを事前に評価することが必要である。本研究では，下水処理水再利用を取り入れた水利用システムにおいて発生する病原微生物感染リスクと，消毒副生成物による発ガンリスクをそれぞれ評価した。さらに，DALY（障害調整生存年）²⁾という健康指標を用いて，2つのリスクの総合化を行った。

2. 下水処理水再利用シミュレーション

2.1 シミュレーションの方法および下水処理水再利用シナリオ

河川水を水道水源として利用する都市の水利用モデルおよび下水処理水再利用シミュレーションは，筆者らが開発した手法³⁾を用いて行った。この方法では，渇水日（流量 25m³/s 以下）に水道原水である河川からの取水が制限され，その不足分を補うために下水処理水が再利用される。再利用のシナリオは2つ用意し，シナリオ 1 では取水制限による不足分の50%が，シナリオ 2 では100%が下水処理水によりそれぞれ補充される。

2.2 下水処理水再利用に関する評価項目

1) 渇水低減効果：渇水の規模を示す指標として累加不足率（単位：%・day）を採用した⁴⁾。これは毎日の節水率の累積和である。下水処理水再利用による渇水低減効果は，この累加不足率の減少分として定義した。

2) 感染リスク：感染リスクは rotavirus を対象として評価した。感染リスク算出における仮定は表1に示す通りである⁵⁾⁶⁾。リスク算出のための用量－反応モデルは，Rose & Gerba(1991)が提案したベータ分布感染確率モデル⁷⁾を用いた。

3) 発ガンリスク：発ガンリスク算出の対象とした消毒副生成物は，クロロホルム，ブロモジクロロメタン，ジブロモクロロメタン，ブロモホルムのトリハロメタン（THM）4物質である。シミュレーション

では，河川水由来の THM は対数正規分布に従うと仮定し，阿武隈川で観測された THM 生成能データ（総 THM 生成量の平均値 107μg/L，最大値 410 μg/L，最小値 23 μg/L，n=12）をもとにして算出した。また河川水中の THM 前駆物質の30%が取水後の浄水過程で除去されることとした⁸⁾。また，下水処理水由来の THM 濃度の決定には，表2に示す THM 生成能測定実験および揮発率測定実験の結果を使用した。ここで，揮発率測定実験は揮発性物質である THM の貯水池での揮発を想定している。THM 生成能測定実験では下水二次処理水に段階的に塩素を注入し，遊離残留塩素濃度が1mg/L となるときの THM 濃度を GC/MS で測定した。シミュレーションでは1日ごとに水道水中 THM 濃度を算出し，年間総曝露量から U.S.EPA が提案する Slope Factor⁹⁾を用いて年間の発ガンリスクを求めた。ただし，クロロホルムの場合はこの Slope Factor が提案されていないため，許容濃度を超える確率を発ガンリスクとした。

2.3 DALY による健康リスク評価

感染リスクと発ガンリスクを同一の尺度で扱うために本研究では DALY（障害調整生存年）という指標を用いた。DALY は損失生存年数（YLL）と障害生存年数（YLD）の合計値である（図1）。YLL は早期死亡による損失余命を示したもので，病気に影響を受けない場合の期待余命と特定の病気での死亡による寿命の損失年数から推定される。YLD は，障害の発生期間に日常生活への障害負担を定量化した係数（健康を1，死を0）を掛けたものであり，非致死的健康影響を示す。

3. 結果と考察

図2(a)および(b)は，それぞれ消毒後の二次処理水，未消毒の二次処理水を再利用したときの感染リスクと渇

表1 感染リスク算出における仮定⁵⁾⁶⁾

項目	仮定
ウイルス濃度	河川水中 大腸菌群数の1/50000
	感染者糞便中 10 ⁶ 個/g（1人200g/日排泄）
浄水処理除去率	凝集・沈殿・砂濾過 1.7～2.9log(平均99.5%)
	消毒 3log（99.9%）
下水処理除去効率	二次処理まで 1log（90%）
	消毒 3log（99.9%）
水利用者の摂取水量	1日2ℓ

表2 THM 生成能および揮発率測定実験の結果

	Chloroform	BDCM	DBCM	Bromoform	TTHM
THM 生成能 [μg/L]	166.8	129.2	46.7	4.5	347.2
揮発率 [%]	58.2	71.4	67.5	66.4	65.9

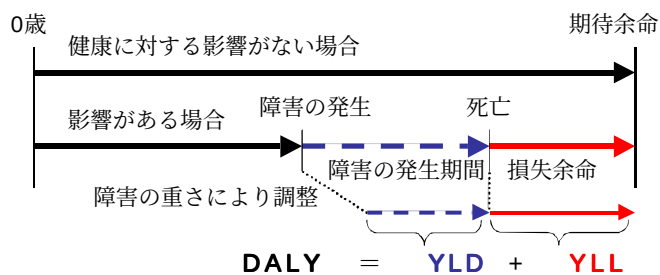


図1 DALY の概念図

キーワード：下水処理水再利用，健康リスク，DALY，病原微生物，消毒副生成物

連絡先（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06，TEL: 022-217-7483，FAX: 022-217-7482）

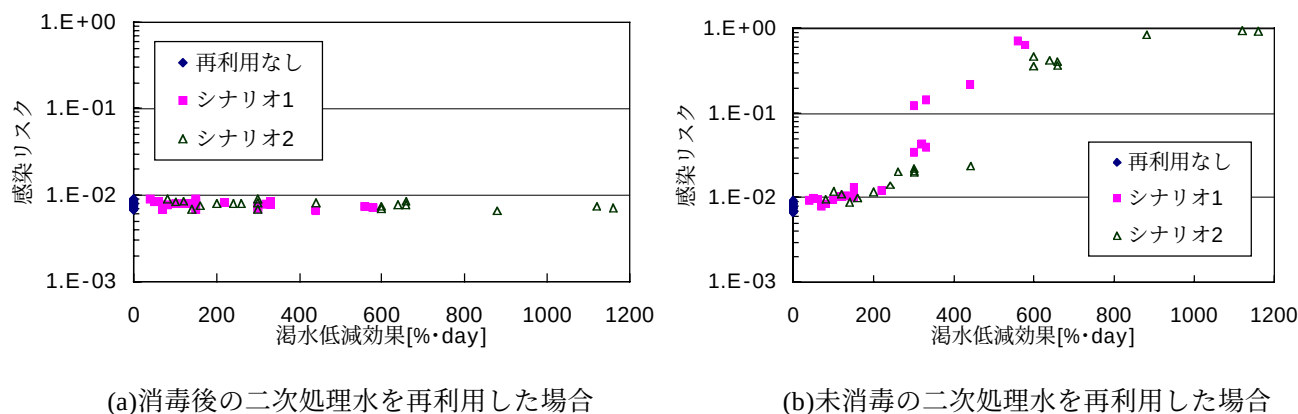


図2 下水処理水再利用における感染リスクと渇水低減効果の関係

水低減効果の関係を示している。渇水低減効果が大きいほど、再利用水量が多かったことを意味する。消毒後の二次処理水を再利用した場合（図2(a)）は、再利用水量の増加による感染リスクの増加は見られず、再利用なしの場合とほぼ同等であった。一方、未消毒の二次処理水を再利用した場合（図2(b)）は、渇水低減効果が 200%・day を超えると急激に感染リスクが増加した。

発ガンリスクの算出結果はシナリオ 1, 2 ともに再利用なしの場合と同じ範囲（約 4.5×10^{-6} /年）にあり、下水処理水再利用の影響は見られなかった。また、感染リスク低減を目的とした消毒の強化を想定して、下水処理過程の消毒で生成する THM 濃度を 2 倍にして計算してみたが、この場合でも発ガンリスクの上昇はほとんど見られなかった。これは下水処理水の THM 生成能が河川水と同程度、あるいはそれ以下のレベルにあり、水道水の THM 濃度が、下水処理水ではなく河川水の THM 生成能に依存していたためである。

図3(a)は消毒後の二次処理水を再利用した場合の DALY である。ここでは、シナリオ 1, 2 に加えて、下水処理水による補充率が 20, 40, 60, 80% の場合についても同様の計算を行った。図には各補充率で得られる DALY の平均値を示した。このケースでは、再利用によって感染、発ガンの両リスクはほとんど増加せず、DALY の合計値も再利用なし（補充率 0%）の場合とほぼ同等であった。補充率 0% のケースを現状の DALY と考えると、下水処理水再利用の導入による健康被害の増大は起こらないことが分かる。また、DALY 合計値のうち感染による DALY は 2 年程度、発ガンによる DALY は 7~11 年であったため、発ガンによる健康被害の方が社会的優先度の高い懸案事項と言える。図3(b)は未消毒の二次処理水を使用した場合の DALY である。補充率 20% 以下では消毒後の処理水を使用した場合と差はないが、補充率がそれ以上になると感染による DALY の増加が顕著になる。このことより、下水処理水再利用においては感染リスクの増大を防ぐことが重要であり、下水処理過程の消毒において少なくとも 3log のウイルス除去を施せば、現状と同等のレベルの安全性を確保することができる。

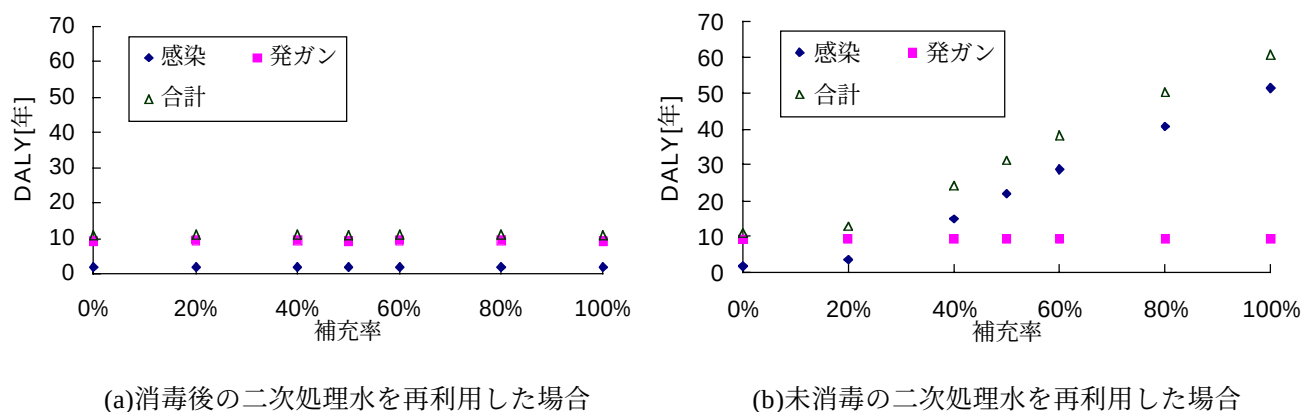


図3 水道原水の不足量に対する下水処理水再利用量の割合（補充率）と DALY の関係

謝辞：本研究の一部は、文部科学省人・自然・地球共生プロジェクト「アジア・モンスーン地域における水資源に関わるリスクマネジメントシステムの構築」（研究代表者：大村達夫）によって行われた。

参考文献

- 1) 浅野孝ら監修，五十嵐敏文ら編著：水環境の工学と再利用，北海道大学図書刊行会，1999.
- 2) Murray, C. J. L. et. al.: THE GLOBAL BURDEN OF DISEASE, Harvard University Press, 1996.
- 3) 橋本剛志ら：病原微生物感染リスクにもとづく渇水被害低減のための下水処理水再利用の評価，環境工学研究論文集，Vol.39, pp.123-134, 2002.
- 4) 土木学会編：土木工学ハンドブック，技報堂出版，1989.
- 5) 金子光美：水の消毒，（財）日本環境整備教育センター，1997.
- 6) （社）水環境学会「水中の健康関連微生物」研究委員会：水中の健康関連微生物シンポジウム講演集，1995.
- 7) Rose, J. B. and C. P. Gerba: Use of risk assessment for development of microbial standards, Wat. Sci. Tech., 24, No.2, pp.29, 1991.
- 8) 丹保憲仁：水道とトリハロメタン，技報堂出版，1983.
- 9) U. S. Environmental Protection Agency: Integrated Risk Information System (<http://www.epa.gov/iris/index.html>).