

Ⅶ－31 阿武隈川中流域における下水処理水再利用による渇水低減効果と感染リスクの評価

東北大学 学生員 橋本剛志

東北大学 正会員○渡部 徹 大村達夫

1. はじめに

近年、わが国では水需要の増加や渇水の頻発を背景として、新しい水利用システムの構築が重要な課題となっており、その一環として下水処理水の再利用が盛んに行われるようになってきている。本研究では、阿武隈川中流域を対象として下水処理水再利用のシミュレーションを行い、それに伴う渇水低減効果および病原微生物による感染リスクを算出した。

2. シミュレーション方法

2-1. 水利用システムのモデル

図1は福島市における水利用システムを簡単に表したモデルである。福島市黒岩を基準地点（図1中の地点0）とし、取水後に浄水処理、水利用、下水処理を経て、福島市下流側で放流される。これと同時に下水処理水の再利用が行われるが、これは2-4節に述べるシナリオに従うものとした。

2-2. 確率マトリックス¹⁾

シミュレーションではインプットとして河川の水量（1日1データ）を用いている。感染リスク算出のためには水質（本研究の場合、大腸菌群数とSS）のデータを必要とするが、これらは河川の水量から確率マトリックスを用いて求めることとした。確率マトリックスの (i,j) 成分は、水量レベル i の時に水質レベルが j になる条件付確率で表される。評価地点0における水量レベルに対する水質レベルの条件付確率マトリックス QC_0 は式（1）のように表される。

$$QC_0 = [a_{ij}] \quad (1)$$

ここで、 $a_{ij} = \Pr[C_0 = j | Q_0 = i]$, $\sum_{j=0}^{C_{\max}} a_{ij} = 1$,

Q_0 : 評価地点0の水量レベル, C_0 : 評価地点0の水質レベル, $i=0,1,\dots,Q_{\max}$.

以上の理論をもとに、阿武隈川黒岩観測所（地点0）

での実測データ²⁾より作成した確率マトリックス（大腸菌群数の場合）を表1に示す。

2-3. シミュレーションにおける仮定

①水需要 都市の人口を30万人とし、1人360l/日の水を使用すると仮定した。このとき河川からの取水量は $1.25\text{m}^3/\text{s}$ となる。

②ウイルス濃度 河川水中のウイルス濃度は大腸菌群数の $1/50000$ とする³⁾。また、感染者はウイルス濃度 10^6 個/g³⁾の糞便を1日200gずつ、30日間連続で排泄し続け³⁾、1回感染した人は再感染しない。また、下水のウイルス濃度は前日の感染者人数と水使用量から決定する。

③浄水処理 一般に水温が低いときや濁質が少ないときは凝集・沈殿・急速砂濾過の効率性は下がることが知られている³⁾。そこでウイルスの除去効率 $(R = \log_{10}(N_{\text{in}}/N_{\text{out}}))$ 。ただし、 R : 除去効率(-), N_{in} : 流入水中の微生物濃度, N_{out} : 流出水中の微生物濃度)は水温とSSの積に比例すると仮定し、式（2）によって決定する。この除去効率から、除去率は式（3）により求められる。

$$R = -0.002425 \times a \times b - 1.6927 \quad (2)$$

$$r = \{1 - 10^R\} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 a : 水温(°C), b : SS(mg/l), r : 除去率(%). また、塩素消毒による除去率は $3\log(99.9\%)$ とする³⁾。

④下水処理 二次処理までのウイルス除去率は $1\log(90\%)$ とし³⁾、塩素消毒は③の場合と同様 $3\log$ とする。

2-4. 下水処理水再利用シナリオ

シミュレーションは以下に述べるシナリオA・Bに従って行われる。それぞれのシナリオにおける河川からの取水量および再利用水量は表2に示すとおりである。

A. 下水処理水を上水道の原水に混ぜるシナリオ 水需要に応じて河川から取水されるが、河川の水量があるレベル以下のときには取水量が制限され、下水処理水によって不足分の一部または全部が補充される（図1中の矢印A）。浄水処理後の使用用途は限定されず、浄水処

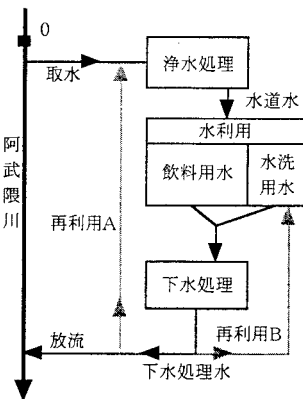


図1 阿武隈川における水利用システムのモデル

表1 確率マトリックス
(水量－大腸菌群数について、平成8～11年の調査データより作成)

流量(m^3/s) レベル	大腸菌群数 (CFU/100ml)										データ数
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0～5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
5～10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
10～15	0.000	0.000	0.250	0.250	0.250	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000	4
15～20	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1
20～25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.800	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	5
25～30	0.000	0.000	0.000	0.333	0.556	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	9
30～35	0.000	0.000	0.143	0.214	0.571	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	14
35～40	0.000	0.000	0.000	0.667	0.222	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	9
40～45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.500	0.200	0.100	0.000	0.000	10
45～50	0.000	0.000	0.000	0.333	0.167	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	6
50～55	0.000	0.000	0.000	0.200	0.400	0.200	0.200	0.000	0.000	0.000	5
55～60	0.000	0.000	0.000	0.667	0.000	0.333	0.000	0.000	0.000	0.000	3
60～65	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3
65～70	0.000	0.000	0.000	0.333	0.500	0.167	0.000	0.000	0.000	0.000	6
70～75	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	4
75～80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.750	0.250	0.000	0.000	0.000	4
80～85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2
85～90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1
90～95	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1
95以上	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.500	0.250	0.000	0.000	0.000	8
データ数	0	0	4	22	30	31	7	1	0	0	95

理後に飲料用にも非飲料用にも使われる。

B. 下水処理水の再利用用途を水洗トイレ用水に限定するシナリオ 水洗トイレ用水の基礎的生活水量に占める割合は約23.5%である³⁾。この水洗トイレ用水に下水処理水を使用し(図1中の矢印B)、水道水は今までどおり河川水のみを原水とする。

2-5. 感染リスクの算出方法

1人当たり2l/日³⁾の水を飲み、0.01ml/日の水洗用水を誤って摂取すると仮定し、式(4)に示すβモデル⁴⁾を用いて1日の感染リスクを算出する。

$$P(D)=1-[1+(D/1.14)]^{-0.5}$$
 (4)

ここで、P(D):1回の曝露で感染する確率、D:曝露量。さらに、年間感染リスクPは式(5)により算出される。

$$P=(\text{年間感染者延べ人数})/(\text{人口})$$
 (5)

また、再利用に下水処理水(塩素消毒あり)を使用した場合と二次処理水(塩素消毒なし)を使用した場合の2通りについてシミュレーションを行い、下水の処理効率による感染リスクの違いを検証する。

2-6. 渇水低減効果の算出方法

渇水低減効果を算出するにあたり、まず給水制限%・dayを算出する。給水制限%・dayとは、(1-供給可能量/上水計画給水量)の百分率にその給水制限が実施された日数を乗じることで求まる、渇水の規模を示す指標の一つである。渇水低減効果は下水処理水再利用を行った場合と行わなかった場合の給水制限%・dayの差として算出する。

3. シミュレーション結果および考察

シミュレーションを行った結果を表3に示す。一般に病原微生物による感染リスクが論じられる際、許容レベルは年間のリスクで10⁻⁴(人口1万人に対し感染者1人)以下とされているが、実態調査では10⁻³程度のリスクがあると推定されている³⁾。したがって表3で示した下水処理水再利用を行わない場合の感染リスク2.00×10⁻³は、実際に起こり得る値である。このことを踏まえると、まず塩素消毒後の処理水を再利用する場合、シナリオA

では下水処理水を再利用した方が、むしろ感染リスクは低くなった。シナリオBでは再利用を行わない場合と同じ感染リスクである。一方、消毒前の二次処理水を再利用をした場合の感染リスクは塩素消毒をした場合に比べて10～500倍大きい。このことは、塩素消毒が下水処理水の再利用に伴うリスクを大幅に減少させることができることを示している。しかしながら、消毒副生成物の問題もあり、今回設定した3logのウイルス除去を可能とする塩素に替わる、例えばオゾンや紫外線などによる除去・不活化処理を検討する必要がある。我が国における現在の再利用水の水質基準として、水洗用水の場合は大腸菌群数が10個/ml以下とされている。福島市の下水処理場で観測された二次処理水中の大腸菌群数は0.1～8.5個/ml程度²⁾であり、この基準を十分満たしているが、ウイルス感染リスクから考えると再利用前のウイルス除去・不活化は不可欠である。

渇水に関しては、処理水の再利用用途を水洗トイレ用水に限定したシナリオにおいてもかなりの低減効果を期待できることが明らかとなった。

4. おわりに

本研究では、下水処理水再利用のシミュレーションを行い、それに伴う渇水低減効果および病原微生物による感染リスクを算出した。しかしながら、渇水低減効果と感染リスクを直接比較し、総合的にどれだけのリスクが生じるのかを判断する基準が確立できていない。したがって、今後は社会にとってのリスクを最も低く設定するためのモデルを構築していくことが必要である。

5. 参考文献

- 1) 池淵周一:水環境工学, 森北出版株式会社, pp. 94-142, 2001.
- 2) 福島県:水質年報, 平成8-11年度, 1998-2001.
- 3) 金子光美:水の消毒,(財)日本環境整備教育センター, 1997.
- 4) 金子光美:水質衛生学, 技報堂出版, p. 439, 1996.

表2 各シナリオにおける河川からの取水量および再利用水量

水量 レベル	下水処理水の 再利用を行わない		シナリオA				シナリオB	
			不足量の50%を 下水処理水で補う		不足量の100%を 下水処理水で補う		処理水の再利用用途を 水洗用水に限定する	
	河川からの 取水量	再利用水量	河川からの 取水量	再利用水量	河川からの 取水量	再利用水量	河川からの 取水量	再利用水量
0	0	0	0	0.625	0	1.25	0	0.29
1	0.25	0	0.25	0.5	0.25	1	0.25	0.29
2	0.5	0	0.5	0.375	0.5	0.75	0.5	0.29
3	0.75	0	0.75	0.25	0.75	0.5	0.75	0.29
4	1	0	1	0.125	1	0.25	0.96	0.29
5以上	1.25	0	1.25	0	1.25	0	0.96	0.29

(単位: m³/s)

表3 下水処理水再利用による渇水低減効果および感染リスクの算出結果

下水処理水 再利用シナリオ	下水処理水の 再利用を行わない	シナリオA		シナリオB
		不足量の50%を 下水処理水で補う	不足量の100%を 下水処理水で補う	処理水の用途を 水洗用水に限定
渇水低減効果(%・day)	0	820	1640	1310
感染リスク	塩素消毒処理水	1.94×10 ⁻³	1.87×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³
	二次処理水	1.83×10 ⁻²	3.56×10 ⁻¹	9.99×10 ⁻¹