

## 阿武隈川における下水処理水再利用に伴う病原微生物感染リスクの評価

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，これは次節に述べるシナリオに従うものとした．

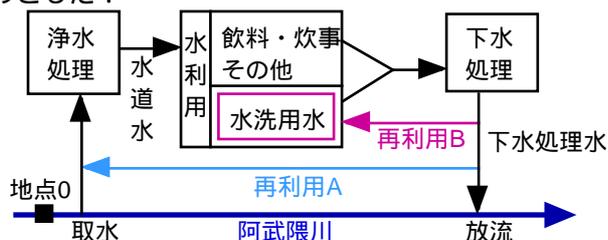


図1 水利用システムのモデル

#### 2-2. 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及び再利用水量は表1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50%(シナリオA-1),または100%(シナリオA-2)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<sup>1)</sup>．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．

#### 2-3. シミュレーションにおける仮定

水需要 都市の人口を30万人とし，1人0.360m<sup>3</sup>/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108000m<sup>3</sup>/日となる．

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<sup>2)</sup>．また，感染者はウイルス濃度10<sup>6</sup>個/g<sup>2)</sup>の糞便を1日200gずつ，30日間連続で排泄し続け<sup>2)</sup>，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．

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・急速砂濾過の効率は下がることが知られている<sup>3)</sup>．そこでウイルスの除去効率 ( $R = \log_{10}(N_{in}/N_{out})$ ,  $R$ : 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(1)によって決定する．この除去効率から，ウイルス除去率は式(2)により求められる．

$$R = -0.002425 \times a \times b - 1.6927 \quad (1)$$

$$r = \{1 - 10^R\} \times 100 \quad (2)$$

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<sup>1)</sup>．

下水処理 二次処理までのウイルス除去率は $1 \log(90\%)$ とし<sup>2)</sup>，塩素消毒は同様 $3 \log$ とする．

#### 2-4. 確率マトリックス<sup>3)</sup>

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

表1 各シナリオにおける河川からの取水量及び再利用水量(単位: m<sup>3</sup>/日)

河川水量 (m <sup>3</sup> /s)	水量 レベル	シナリオA-1		シナリオA-2		シナリオB			
		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		
0~5	0	0	0	0	54000	0	108000	0	25380
5~10	1	21600	0	21600	43200	21600	86400	21600	25380
10~15	2	43200	0	43200	32400	43200	64800	43200	25380
15~20	3	64800	0	64800	21600	64800	43200	64800	25380
20~25	4	86400	0	86400	10800	86400	21600	82620	25380
25~	5以上	108000	0	108000	0	108000	0	82620	25380

シナリオA-1: 不足量の50%を下水処理水で補う．シナリオA-2: 同じく100%を補う．シナリオB: 再利用水の用途を水洗用水に限定．

取水量は最大1.25m<sup>3</sup>/s.

Key words: 病原微生物, 下水処理水再利用, 感染リスク, 渇水低減効果

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06 TEL 022-217-7484 FAX 022-217-7482

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。

$$QC_0 = [a_{ij}]_{i=0,1, \dots, Q_{max}}^{j=0,1, \dots, C_{max}} \quad (3)$$

ここで、 $a_{ij} = \Pr[C_0 = j | Q = i]$ 、 $a_{ij} = 1$ 、 $Q_0$ : 評価地点0の水量レベル、 $C_0$ : 評価地点0の水質レベル、 $i=0,1, \dots, Q_{max}$ 。

シミュレーションでは、この確率マトリックスで表される確率分布に従ってモンテカルロ法により感染リスクを算出した。

### 2-5. 感染リスクの算出方法

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

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

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

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

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. 湯水低減効果の算出方法

湯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、 $(1 - \text{供給可能量} / \text{上水計画給水量})$ 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、湯水の規模を示す指標の一つである。湯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

シミュレーションの結果を図2、図3に示す。ただし、感染リスクは5回の試行による平均値である。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<sup>2)</sup>。したがって図2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 $2.1 \times 10^{-3} \sim 3.4 \times 10^{-3}$ 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(結果として1999年は取水制限がされず、再利用が行われなかった。)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ほぼ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した場合の感染リスクは塩素消毒をした場合に比べて1.5~500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、塩素消毒による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<sup>4)</sup>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。

湯水に関しては、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、それに伴う湯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、湯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。

### 参考文献

- 金子光美: 水質衛生学, 技報堂出版, 1996.
- 金子光美: 水の消毒, (財)日本環境整備教育センター, 1997.
- 池淵周一: 水環境工学, 森北出版株式会社, pp.94-142, 2001.
- (財)福島県下水道公社: 維持管理年報, 第12号, 1999.

最後に、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金により行われたことを付記する。

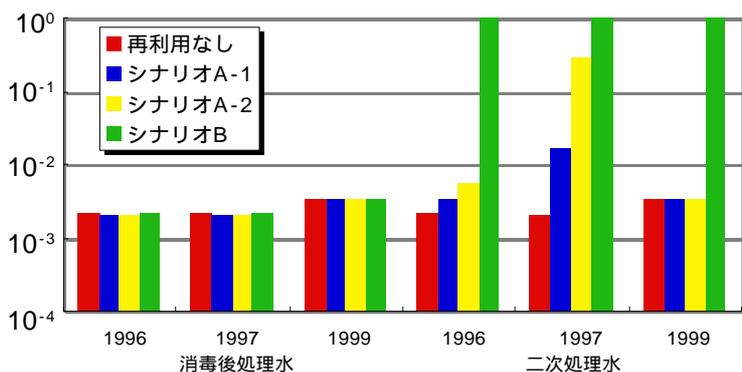


図2 感染リスク算出結果

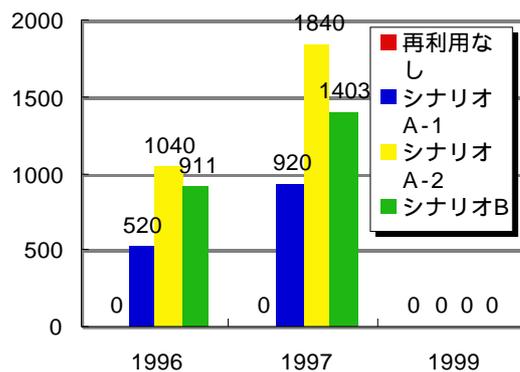


図3 湯水低減効果算出結果