

(13)

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 ～阿武隈川流域を対象として～

Evaluation of Water Reclamation for Decreasing Damages of Water Shortage  
on the Basis of Infectious Risks -A Case Study in the Abukuma Watershed-

橋本剛志\*, 渡部徹\*, 大村達夫\*

Koshi HASHIMOTO\*, Toru WATANABE\* and Tatsuo OMURA\*

**ABSTRACT;** Wastewater reclamation is one of most effective countermeasures for water shortage in the urbanized area. However, there are high infectious risks without the appropriate treatment of wastewater due to a huge number of pathogens. In this study, infectious risks by poliovirus through wastewater reclamation in the Abukuma watershed were evaluated under various scenarios. For predictive evaluation of water shortage in the watershed, fluctuations of river flow rate at the intake point of drinking water were represented with the matrix of simultaneous probability of flow rates in consecutive two days. Water qualities (total coliforms and SS) were also determined with matrices between river flow rate and them. When the inactivation efficiency of poliovirus by disinfection was higher than 3 logs, the damage of water shortage could be decreased by wastewater reclamation without any increase of infectious risk. In case of lower inactivation efficiency, infectious risks would exponentially increase with decrease of damage of water shortage. In the worst case in reclaiming secondary effluent, wastewater reclamation for decreasing 500 % day of damage of water shortage caused ten times as high infectious risk as that without reclamation.

**KEY WORDS;** Risk Evaluation, Pathogens, Infectious Risk, Virus, Wastewater Reclamation, Water Shortage, Matrix of probability

## 1. はじめに

我が国では、小規模のものを含めると昭和30年以降渇水（水の供給が一時的に需要を下回る状態<sup>1)</sup>）が発生しなかった年はなく、また、すべての都道府県で渇水が生じている。渇水の原因は主に気象条件によるものであるが、それと同時に、水需要の増加が渇水の規模を大きくさせる原因の一つになっている。水需要増加の背景には、都市への急激な人口や産業の集中、土地利用形態や産業構造の変化、家族構成や生活様式の変化などがある。

現在の渇水対策には主に水の相互融通と新たな水資源開発の2点があげられる<sup>2)</sup>。相互融通の具体的な方法は、事業体、流域を超えた水道の広域化、あるいは農業用水、工業用水、生活用水などの用途間をまたがる水利権の転用である。これらによる効果としては渇水被害の平滑化や供給予備力の共有があげられるが、一方で渇水被害は広範囲にわたって発生することが多く、隣接する水系間の導水・融通は容易ではないとの報告もある<sup>1)</sup>。また、長距離間の導水管を布設するためには莫大なコストを必要とする。水資源開発については一般にダム開発が検討されているが、建設用地の不足、自然保護に対する気運の高まりなどにより、実際に新しいダムを建設することは困難な状況である。

このように従来の手法による水源確保に多くを望めない現在、新たな水資源として下水処理水の再利用に大きな注目が集まっている。その利点は、都市下水水量の変動が河川水の変動と比較して小さく、安定した水量を常に確保できること、水資源が最も必要とされる都市域内での水の確保が可能であることである。近年の下水処理技術の向上に伴い、下水道普及率の高い大都市を中心としてこの下水処理水再利用は導入され始めており<sup>3)</sup>、今後、さらに多くの地域で実施されていくものと予想される。

---

\* 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University)

しかしながら、下水処理水中には病原微生物が存在していることを示す報告もあり<sup>1, 5)</sup>、その再利用により水系感染症が流行する危険性（リスク）は否定できない。したがって、下水処理水再利用システム導入のためには、感染リスクを含め、事前に社会に対する利益・不利益を総合的に評価し、システムの最適な構造を見出す必要がある。既往の研究においても下水処理水再利用に伴う感染リスク評価は行われているが<sup>6)</sup>、再利用による渇水被害の低減を同時に評価した例はなく、下水処理水再利用の有効性と危険性を定量的に比較するに至っていない。本研究では下水処理水再利用システム最適化手法を構築するための第一段階として、河川流量データから渇水被害を再現するための確率的手法を提案し、それを利用した下水処理水再利用シミュレーションを行う。その結果から、下水処理水再利用による渇水被害の低減および病原微生物感染リスクを評価することを本研究の目的とする。

2. 河川流量の再現と渇水被害の評価

下水処理水再利用シミュレーションのためには、将来の渇水の状況を予測する必要がある。計画水文学の分野においては、水資源計画などを目的とした河川流量に関する水量模擬発生モデルとして線形確率過程やAR(1)過程によるモデルなどが提案されている<sup>7)</sup>。しかしながら、それらの方法は流量の発生確率分布は得られるものの、渇水において最も深刻な問題となる渇水状況の継続性を十分に表現することはできない。そこで、本論文では河川流量の実測データをもとにした確率マトリックス演算<sup>8)</sup>により、1日ごとの流量を再現することで年間を通した渇水被害の評価を行うこととした。ここで提案する流量再現手法は、流量の連続性を重視しているため渇水被害を評価するのに適している。

2. 1 対象地域

阿武隈川中流域に位置する福島市を下水処理水再利用シミュレーションの対象とする。阿武隈川は、福島・宮城両県を流れる、流域面積5400km<sup>2</sup>（全国第11位）、幹線流路延長239km（全国第6位）の河川であり、狭い流域の中に人口・資産が集中した状況となっている。阿武隈川流域の降水量は、山間部では1500～1800mm、平野部で1200～1300mm程度であり（全国平均は約1800mm）、比較的降水量の少ない地域である。このような状況から、阿武隈川流域は将来的に下水処理水再利用が導入される可能性をもった地域と言える。

2. 2 河川流量レベルと渇水基準の設定

渇水評価のために福島市取水点付近の阿武隈川の流量を表1のようにレベル分けした。この流量レベルの分割では、全体の22%がレベル19に含まれているが、ここでの研究の目的が渇水評価にあるため、流量が大きい場合についてはあまり考慮されていない。渇水流量（1年を通じ355日以上はこれより下回らない流量）は27.68m<sup>3</sup>/sであり、これは表1の流量レベル4以下に相当する。シミュレーションではこれを渇水の基準と定め、河川流量がこのレベル4以下の日には流量維持を優先させて取水量を制限することとした。

2. 3 流量再現のためのデータセット

河川流量を再現する場合、一つの方法として雨量データからの再現というものが考えられる。しかしながら、降雨量、降雨地域、降雨時間を同時に予測することは非常に困難である。また、それらのデータから流量に変換する必要があるが、その作業は非常に複雑なものとなる。したがって、ここで提案する流量再現手法は、過去の実測データから流量を再現する方法を選択した。流量再現のために用いたのは、阿武隈川福島流量観測所で計測された1日

表 1 流量レベルの設定

| 流量レベル | 流量 (m <sup>3</sup> /s) | 全データ*に対する割合 |
|-------|------------------------|-------------|
| 0     | 0～5                    | 0.0%        |
| 1     | 5～10                   | 0.0%        |
| 2     | 10～15                  | 0.3%        |
| 3     | 15～20                  | 0.6%        |
| 4     | 20～25                  | 3.1%        |
| 5     | 25～30                  | 5.9%        |
| 6     | 30～35                  | 7.8%        |
| 7     | 35～40                  | 10.0%       |
| 8     | 40～45                  | 9.8%        |
| 9     | 45～50                  | 7.4%        |
| 10    | 50～55                  | 6.2%        |
| 11    | 55～60                  | 5.3%        |
| 12    | 60～65                  | 4.3%        |
| 13    | 65～70                  | 4.1%        |
| 14    | 70～75                  | 3.5%        |
| 15    | 75～80                  | 3.0%        |
| 16    | 80～85                  | 2.8%        |
| 17    | 85～90                  | 2.1%        |
| 18    | 90～95                  | 1.8%        |
| 19    | 95以上                   | 22.0%       |

\* 1980～1999

ごとの流量データ 20 年分<sup>3)</sup> (1980～1999 年, n=7290) である。

## 2. 4 確率マトリックスの作成

流量の再現にはある 1 日の流量を前日の流量と関係づける確率マトリックスを用いた。確率マトリックスとは、実測データに基づく生起確率によって 2 つの異なる事象を関係付ける行列である。例えば、事象 A に対する事象 B の関係であれば、マトリックスの  $(i, j)$  成分は事象 A のレベルが  $i$  の時に事象 B のレベルが  $j$  になる条件付確率となる。このことを数式にすると式 (1) のように表される。

$$P = [p_{ij}] \quad (1)$$

ここで,  $p_{ij} = \Pr[B = j | A = i]$ ,  $\sum_{j=0}^{B_{\max}} p_{ij} = 1$ ,

A: 事象 A のレベル      B: 事象 B のレベル       $i = 0, 1, \dots, A_{\max}$

流量を再現するにあたり、考慮すべき重要な要素として①季節ごとの流量特性、②流量変動の連続性の 2 点が挙げられる。①については実測データから各月ごとの確率マトリックスを作ること、②については、流量を再現する当日が流量増加過程にあるか減少過程にあるかを反映できるように、確率マトリックスを流量増加時と減少時に分けて作成した。上記の要素①、②については渇水年と豊水年のばらつきも考えられるが、実測データが限られているためこの違いは考慮せず、どちらの年も含む形でマトリックスを作成した。確率マトリックス  $Q$  は以下の式 (2) で表される。

$$Q^+ = [p_{ij}^+] \quad (\text{流量増加時}) \quad Q^- = [p_{ij}^-] \quad (\text{流量減少時}) \quad (2)$$

ただし、マトリックスの要素については、

$$p_{ij}^+ = \Pr[Q = j | Q_{-1} = i, q_{-2} - q_{-1} \geq 0], \quad p_{ij}^- = \Pr[Q = j | Q_{-1} = i, q_{-2} - q_{-1} < 0]$$

$$\sum_{j=0}^{19} p_{ij}^+ = 1 \quad \sum_{j=0}^{19} p_{ij}^- = 1$$

$Q$ : ある日の流量レベル (0～19)       $Q_{-1}$ : 前日の流量レベル (0～19)

$q_{-1}$ : 前日の流量       $q_{-2}$ : 前々日の流量

## 2. 5 モンテカルロ法による流量再現

1 日ごとの流量決定にはモンテカルロ法を適用している。第  $n$  日目の流量  $q_n$  の計算手順は以下に示すとおりである。

①表 1 に従って  $q_{-1}$  をレベル  $i$  に変換する。

$$q_{-1} \rightarrow i$$

②前日の流量レベルが  $i$  のときの確率分布を  $n$  が属する月の確率マトリックスより抽出する。

| 流量レベル | 0        | 1        | 2        | ... | $x$      | ... | 19        |
|-------|----------|----------|----------|-----|----------|-----|-----------|
| 確率    | $p_{i0}$ | $p_{i1}$ | $p_{i2}$ | ... | $p_{ix}$ | ... | $p_{i19}$ |

$$\sum_{j=0}^{19} p_{ix} = 1$$

③コンピュータにより一様乱数  $\xi_1$  ( $0 < \xi_1 \leq 1$ ) を発生させる。

④  $\sum_{x=0}^{j-1} p_{ix} \leq \xi_1 < \sum_{x=0}^j p_{ix}$  となる  $j$  を第  $n$  日目の流量レベルとする。

⑤第  $n$  日目の流量はレベル内一様分布とし、再度乱数  $\xi_2$  を発生させて式 (3) を用いて計算する。

$$q_n = j \times 5 + \xi_2 \times 5 \quad (3)$$

$j \times 5$ : レベル  $j$  内での最小値

$$\xi_2 \times 5: 0 \leq \xi_2 \times 5 < 5$$

⑥第  $n+1$  日目へ。 ( $n+1 > 366$  となった時点で終了。)

ただし例外として、以下の点については別の設定としている。

・第 1 日目 (1 月 1 日) は 1 月の各流量レベルの生起確率分布に従ってモンテカルロ法を適用している。計算方法は手順③～⑥と同様である。

・手順⑥について、流量レベル $j$ が19の場合の流量 $q_{19}$ は式(4)を用いて計算する。

$$\begin{aligned} q_{19} &= 235.67 + 281.43 \times (\xi_2 - 0.5) \\ &= 95 + 281.34 \times \xi_2 \end{aligned} \quad (4)$$

これは $q_{19}$ の期待値が $95\text{m}^3/\text{s}$ を超える日の平均流量 $235.67\text{m}^3/\text{s}$ となるよう、 $95\text{m}^3/\text{s}$ から $376.34\text{m}^3/\text{s}$ までの一様分布を仮定している。

## 2. 6 再現データの妥当性の検討

### (1) 流量変動に関する比較

図1および図2は実測データと再現データの流量変動を示したグラフである。それらを比較すると、その形状はかなり似ていることがわかる。特に実測データにみられる滑らかな増減過程が再現においても十分に表すことができている。これは増加時と減少時について別々の確率マトリックスを設定した効果と考えられる。また、梅雨期や台風による流量増加、夏季や冬季の流量減少などが再現されており、季節ごとの流量特性が反映されている。

### (2) 各流量レベルの発生日数に関する比較

図3は全実測データと全再現データの各流量レベルの平均発生日数を示したグラフである。この図では各流量レベルの発生日数はほぼ等しい。再現データが実測データに対する予測として適合しているかどうかを調べるため、 $\chi^2$  (カイ2乗) 適合度検定を行ったところ、有意水準10%で帰無仮説は棄却されず、よく適合しているという結果が得られた。

さらに、実測データにみられる特徴的な発生日数パターンが再現されているかを検証する。後述する下水処理水再利用シミュレーションでは、渇水の頻度や程度により下水処理水の再利用率が決められる。したがってここでのパターン分けは、渇水が少ないまたは多いパターンに加え、その中間的なパターンとしての2種類を定めた。各パターンは以下に示すとおりである。

- ・パターン1 (図4)：レベル19を除いてレベル6～8の発生日数にピークがみられる。(図3に示した平均発生日数に近い最も平均的なパターン。)
- ・パターン2 (図5)：レベル19を除いて目立った発生日数の大きな偏りはみられない。(平均的なパターンに近いが、パターン1に比べて渇水は少ない。)
- ・パターン3 (図6)：レベル4以下の発生日数が多い。(渇水が多いパターン。レベル4以下が40日を超え、渇水年に相当すると考えられる。)
- ・パターン4 (図7)：レベル19の発生日数が著しく多い。(渇水が少ないパターン。レベル19が100日を超え、豊水年に相当すると考えられる。)

図8～11に示した試行1～4は、20回の試行のうち発生日数の分布に関して図4～7に示した実測

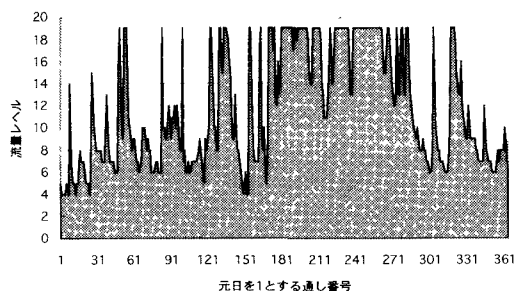


図1 実測データの流量変動

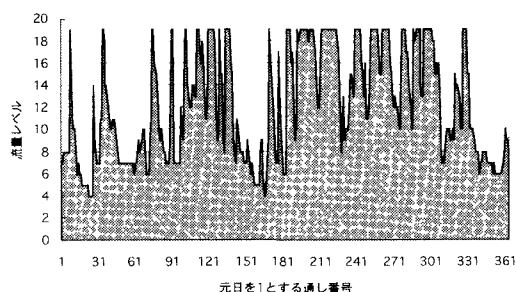


図2 再現データの流量変動

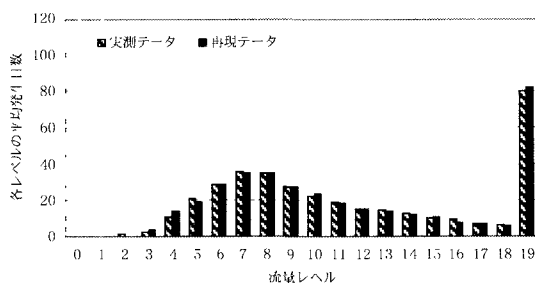


図3 各流量レベルの平均発生日数

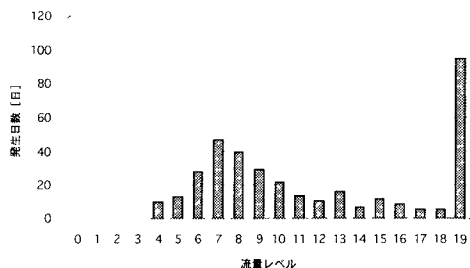


図4 各流量レベルの発生日数 (1993 年)

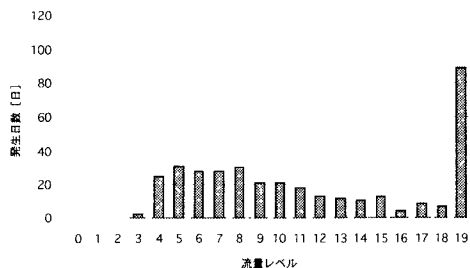


図5 各流量レベルの発生日数 (1985 年)

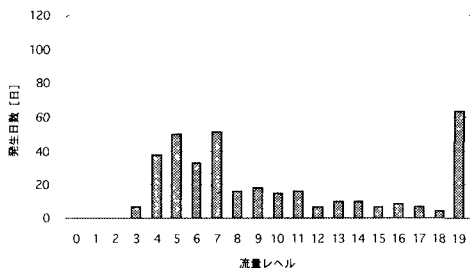


図6 各流量レベルの発生日数 (1992 年)

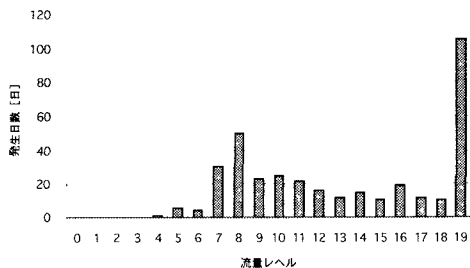


図7 各流量レベルの発生日数 (1983 年)

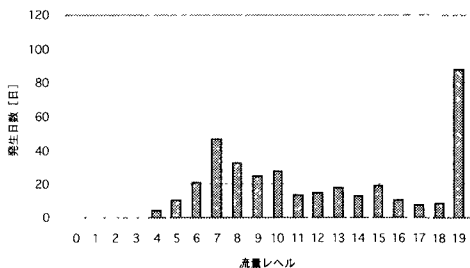


図8 各流量レベルの発生日数 (試行1)

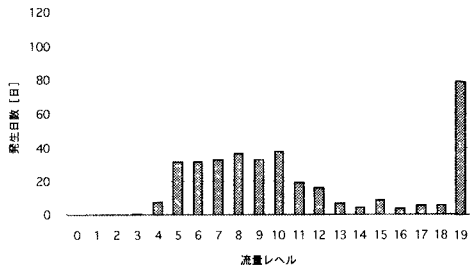


図9 各流量レベルの発生日数 (試行2)

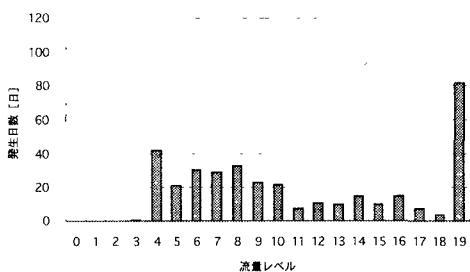


図10 各流量レベルの発生日数 (試行3)

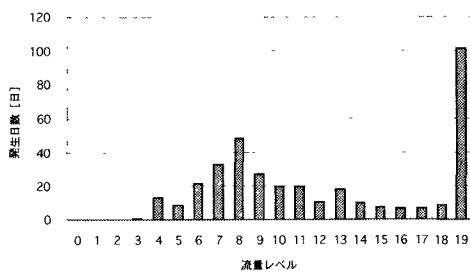


図11 各流量レベルの発生日数 (試行4)

データそれぞれに似た傾向を示したものである。

実測データ20年分と再現データ20年分(試行20回分)を各パターンに分類すると、表2のような発生回数および割合であった。この表を見ると、再現データの場合はパターン1および2の割合が増えている。パターン1と2は比較的図3の分布に近いことから、再現データにおいては平均的な分布を示すことが多くなったことがわかる。パターン1および2が増加し

表2 各パターンの発生回数とその割合

|       | 実測データ |     | 再現データ |     |
|-------|-------|-----|-------|-----|
|       | 発生回数  | 割合  | 発生回数  | 割合  |
| パターン1 | 10    | 50% | 12    | 60% |
| パターン2 | 3     | 15% | 6     | 30% |
| パターン3 | 3     | 15% | 1     | 5%  |
| パターン4 | 4     | 20% | 1     | 5%  |

ターン3および4のような極端な例が少なくなった理由としては、マトリックスを1つにしたために渇水年や豊水年といった長期的な傾向が反映されなかったためであると考えられる。しかしながら、各流量パターンの発生頻度は実測データと必ずしも一致しないものの、渇水年（パターン3）や豊水年（パターン4）も少なくとも1度はシミュレーションで再現されており、これらのケースにおいても下水処理水再利用による渇水被害の低減と感染リスクの増大を比較することは可能である。

### (3) 渇水の発生日数に関する比較

本研究で議論する下水処理水再利用においては、流量が渇水基準である流量レベル4以下になる日が特に重要である。したがって、流量を再現するにあたっては小さい流量が十分に表現されている必要がある。

実測データで流量レベル4以下になる日は年間最多で73日、最少で0日であり、再現データでは20回の試行のうち最多で43日、最少で4日であった。各レベルご

表3 渇水の発生日数とその割合

| レベル | 実測データ |     | 再現データ |     |
|-----|-------|-----|-------|-----|
|     | 発生日数  | 割合  | 発生日数  | 割合  |
| 0   | 0     | 0%  | 0     | 0%  |
| 1   | 3     | 1%  | 0     | 0%  |
| 2   | 20    | 7%  | 5     | 1%  |
| 3   | 44    | 15% | 76    | 21% |
| 4   | 229   | 77% | 282   | 78% |

との内訳は表3に示すとおりである。実測データと比較して、再現データの場合はレベル3または4になる割合が大きく、レベル1または2になる割合が小さくなっている。これは前節で述べたのと同様に、実測データに比べ再現データがより平均化されていることを示す結果である。

## 3. 下水処理水再利用シミュレーション

### 3.1 水利用システムのモデル化

下水処理水再利用シミュレーションのため、現行の水利用システムを図12のように簡略化した。ただし、この図は後述の下水処理水再利用シナリオを考慮して描かれている。福島市では阿武隈川から水道原水を取水し、浄水処理後の水道水は様々な用途で利用される。また、福島市の下水処理水は再び阿武隈川へ放流される。福島市とその周辺地域の人口から水利用人口は30万人とし、1人360l/日の水を使用することとした。このとき、河川からの取水量は1.25m<sup>3</sup>/sとなる。

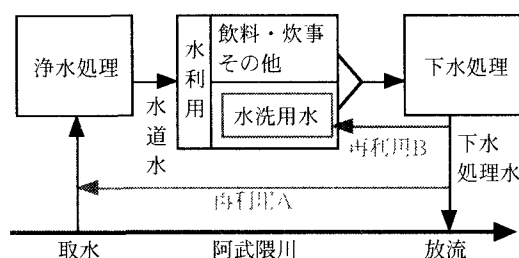


図12 水利用システムのモデル

### 3.2 下水処理水再利用シナリオ

下水処理水再利用による感染リスクは、以下の2つのシナリオの下に算出される。図13に各流量レベル時の再利用水量を図示した。この図のように、流量レベル4以下の日は渇水の規模に応じて段階的に取水量を制限することとした。

#### 〈シナリオA〉下水処理水を上水道の原水に混ぜるシナリオ

河川からの取水量が制限される日は、下水処理水によって不足分が補われる（図12中の矢印A）。この場合、水道原水取水口上流部に下水処理水放流口を設けるケースと同様に、下水処理水が取水された河川水によって希釈されることとなる。再利用される下水処理水量は不足量に対して50%または100%とし、前者をシナリオA-1、後者をシナリオA-2とする。浄水処理後の水道水は使用用途は限定されず、通常どおり飲料用にも非飲料用にも使われる。このシナリオと似たケースとして、下水処理水が水道水源に放流されるケースは近年多く見られるようになった。

#### 〈シナリオB〉下水処理水の再利用用途を水洗用水に限定するシナリオ

水洗用水の基礎的生活水量に占める割合は約23.5%である<sup>9)</sup>。シナリオBでは、この水洗用水のみに下水処理水を使用し（図12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。

また、全てのシナリオにおいて、再利用される下水処理水を消毒後の処理水と消毒前の二次処理水の2通りに設定し、下水処理レベルによる感染リスクの違いを検証する。

### 3. 3 渇水低減効果の算出

渇水の規模を示す指標の一つとして累加不足率<sup>10)</sup>がある。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、再利用を行った場合の年間累加不足率の減少分として定義する。シナリオAの場合は供給可能量を増やすことにより、シナリオBの場合は上水計画給水量を減らすことでそれぞれ渇水低減効果を得る狙いがある。

### 3. 4 感染リスクの算出

#### (1)対象とする病原微生物

感染リスク算出に用いる病原微生物はpoliovirus1とする。poliovirus1はポリオ（急性灰白髄炎）の原因となる腸管系ウイルスである<sup>11)</sup>。ポリオは先進諸国では予防接種などにより事実上根絶されているが、本研究でpoliovirus1を対象とした理由は、水系感染症を引き起こす腸管系ウイルスの多くがpoliovirus1と同様にenterovirus属に属しており、処理プロセスや河川中でも似た挙動を示す可能性が高いからである。

#### (2)用量－反応モデル

感染リスク算出のための用量－反応モデル（dose-response model）はいくつか提案されているが、本研究ではベータ分布感染確率モデル<sup>11)</sup>を用いることとした。このモデルは、病原微生物が人体に取り込まれた量によって感染能力が異なるとしたモデルである<sup>11)</sup>。この相互関係がベータ分布で表される確率モデルであるとして、式（5）のように感染確率が算出できる。

$$P(D(t)) = 1 - [1 + \{D(t)/\beta\}]^{-\alpha} \quad (5)$$

ここで、 $P(D(t))$ : 1回の曝露で感染する確率、 $D(t)$ : 曝露量 [個]、 $\alpha$ 、 $\beta$ : パラメータ（本論文ではRoseら<sup>12)</sup>がpoliovirus1に対して提案している $\alpha=0.5$ 、 $\beta=1.14$ を採用した。）、 $t$ : シミュレーション開始日を1とする通し日数番号である。シミュレーションでは1人当たり2l/日<sup>11)</sup>の水を飲み、0.001ml/日の水洗用水を誤って摂取すると仮定しており、曝露量はそれぞれの水に含まれるウイルス量ということになる。また、1度感染した人は免疫を獲得するため再感染しない。

$t$ 日目における感染者数は、式（6）により算出される。

$$I(t) = \left\{ N - \sum_{T=1}^{t-1} I(T) \right\} \times P(D(t)) \quad (6)$$

ここで、 $I(t)$ :  $t$ 日目の感染者数 [人]、 $N$ : 人口 [人] である。ただし  $I(t)$  は整数として取り扱い、小数第1位は四捨五入した。また、感染者の初期値は0とした。

年間感染リスク  $R$  は式（7）により算出される。

$$R = \sum_{t=1}^{365} I(t) / N \quad (7)$$

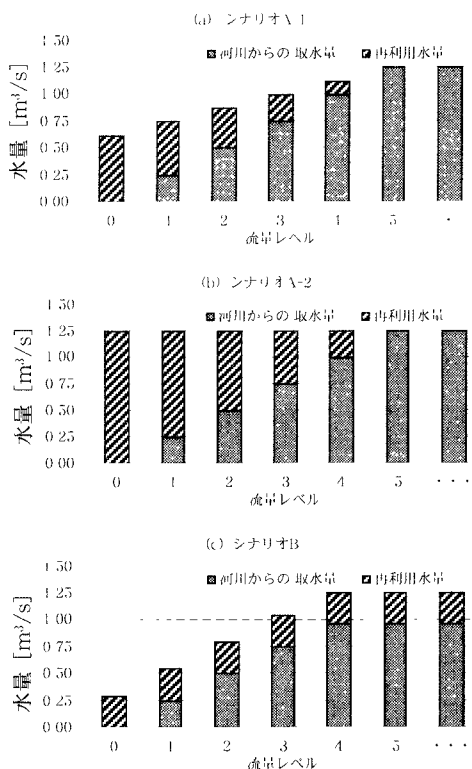


図 13 各水量レベルに応じた河川からの取水量および再利用水量

### (3)感染リスク算出における仮定

#### 1)ウイルス濃度

阿武隈川におけるウイルスの検出データがないため、河川水中のウイルス濃度は、平常時における一般的な数値である大腸菌群数の1/50000とした<sup>9)</sup>。感染者はウイルス濃度 $10^6$ 個/gの糞便を1日200gずつ、30日間連続で排泄し続けることとした<sup>9)</sup>。下水中のウイルス濃度は、前日の感染者数と1日1人当たりの排水量360l/日(水使用量と同じ)から決定する。ただし、対象地域の下水道普及率が100%に達した場合を想定する。本来であれば下水処理場への流達率や検出方法によりウイルス濃度が変わってくると考えられるが、ここでは最も危険な状況として全てのウイルスが下水処理場まで到達することとした。

#### 2)浄水処理

凝集・沈殿・砂濾過のウイルスに対する除去効率( $R = -\log_{10}(N_{out}/N_{in})$ 、ただし、R: 除去効率[-],  $N_{out}$ : 流出水中の微生物濃度,  $N_{in}$ : 流入水中の微生物濃度)は処理場の運転管理状況によって大きく異なることが知られている<sup>13)</sup>。大腸菌群の場合、凝集・沈殿・砂濾過による除去効率は1.7~2.9と報告されている<sup>13)</sup>。一方、腸管系ウイルスに対する除去効率についての研究例は少なく、これまで報告されている値としては、腸管系ウイルスに対する除去効率で3.2, 1.3<sup>14)</sup>、enterovirusに対しては1.4<sup>15)</sup>がある。これらの値は大腸菌群に対する除去効率とほぼ同等のレベルにあるため、ウイルスについても大腸菌群同様の除去効率が得られると仮定した。

さらに、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>11)</sup>ため、ウイルスに対する除去効率は水温とSSの積に比例すると仮定し、式(8)によって決定する。

$$R = 0.002425 \times a \times b + 1.6927 \quad (8)$$

ただし、a: 水温[°C], b: SS[mg/l]。この式は、取水地点付近で得られた95個の水温・SS同一日データ<sup>16)</sup>から、水温[°C]とSS[mg/l]の積が最小のときの除去効率を1.7に、最大のときの除去効率を2.9になるとし、その2点間を結ぶ直線で表したものである。シミュレーションでは水温は各月ごと一定とし、実測データ(各月8データ程度)から算出した平均値を用いた。

塩素(遊離塩素)消毒による不活化率は $3\log(99.9\%)$ とした<sup>13)</sup>。この値に関してはpoliovirus1での研究事例はないため、他の消毒方法でpoliovirus1とほぼ同じ不活化率(クロラミン、二酸化塩素による消毒とともに99%程度<sup>13)</sup>)であったrotavirus SA11の不活化率と同じであると仮定している。

#### 3)下水処理

普通沈殿によるウイルス除去率として0~20%が、活性汚泥法で75~99%が報告されている<sup>9)</sup>。これらの値を参考に二次処理までのpoliovirus1の除去率を90%とする。さらに、消毒処理により $3\log$ のウイルス不活化が起こるものとする。消毒の効果は、処理水の水質によって変わり<sup>13)</sup>、二次処理水の消毒では $1\log$ 程度である。しかし、再利用を見込んだ高度処理後の処理水であれば $3\log$ 程度のウイルス不活化は十分期待できる<sup>17)</sup>。

#### 4)水質レベルの設定および確率マトリックスの作成

シミュレーションには1日ごとの河川流量、河川水中の大腸菌群数、SSのデータが必要となる。実測データにおける流量と大腸菌群数の関係は図14のようになるが、この図に示すように両者の関係を単純な式で回帰するのは困難であるため、シミュレーションに用いる大腸菌群数は確率マトリックスを用いて流量をもとに算出する

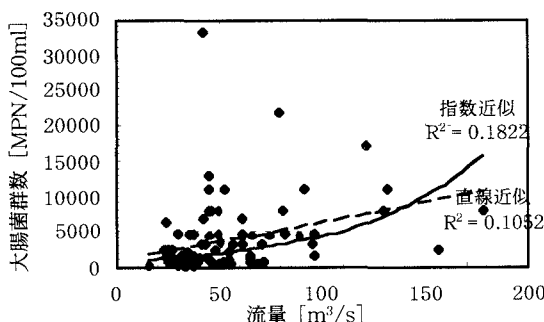


図14 流量と大腸菌群数の関係(取水地点付近)

表 4 大腸菌群数レベルの設定

| 大腸菌群数<br>レベル | 大腸菌群数<br>(個/100ml)   | データ数 |
|--------------|----------------------|------|
| 0            | $0 \sim 10^{1.5}$    | 0    |
| 1            | $10^{1.5} \sim 10^2$ | 0    |
| 2            | $10^2 \sim 10^{2.5}$ | 4    |
| 3            | $10^{2.5} \sim 10^3$ | 22   |
| 4            | $10^3 \sim 10^{3.5}$ | 30   |
| 5            | $10^{3.5} \sim 10^4$ | 31   |
| 6            | $10^4 \sim 10^{4.5}$ | 7    |
| 7            | $10^{4.5} \sim 10^5$ | 1    |
| 8            | $10^5 \sim 10^{5.5}$ | 0    |
| 9            | $10^{5.5}$ 以上        | 0    |

表 5 SSレベルの設定

| SSレベル | SS (mg/l) | データ数 | SSレベル | SS (mg/l) | データ数 |
|-------|-----------|------|-------|-----------|------|
| 0     | 0~2       | 0    | 10    | 20~22     | 11   |
| 1     | 2~4       | 0    | 11    | 22~24     | 3    |
| 2     | 4~6       | 5    | 12    | 24~26     | 3    |
| 3     | 6~8       | 1    | 13    | 26~28     | 6    |
| 4     | 8~10      | 7    | 14    | 28~30     | 3    |
| 5     | 10~12     | 9    | 15    | 30~32     | 1    |
| 6     | 12~14     | 14   | 16    | 32~34     | 2    |
| 7     | 14~16     | 10   | 17    | 34~36     | 1    |
| 8     | 16~18     | 10   | 18    | 36~38     | 1    |
| 9     | 18~20     | 6    | 19    | 38~40     | 8    |

ことにした。SSについても同様の理由から確率マトリックスを用い、流量をもとに算出した。

確率マトリックス作成のためには、流量と同様に大腸菌群数、SSについてもレベルを設定する必要がある。大腸菌群数、SSについてのレベル設定をそれぞれ表4、5に示す。レベル設定は、出現確率が1つのレベルに集まらないように考慮した。

### 5)シミュレーションの流れ

1日ごとの感染者数は以下に示す①～⑩の手順で求められる。シミュレーションのフローチャートを図15に示す。

- ①流量（1日分）をデータファイルから読み込み、流量レベルが決定。
- ②確率マトリックスにより、大腸菌群数、SSについてのそれぞれの濃度レベルごとの生起確率分布が決定。
- ③②の確率分布に従い、モンテカルロ法により水質（大腸菌群数・SS）レベルが決定。

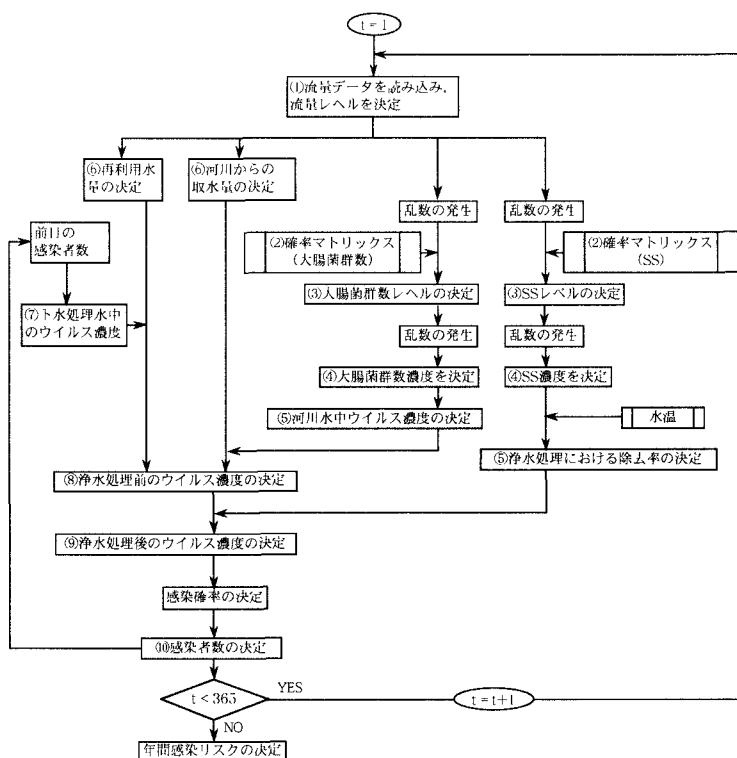


図 15 シミュレーションの流れ

④レベル内での生起確率分布が一様分布であると仮定して、モンテカルロ法により大腸菌群数とSSの濃度が決定。

⑤④で決定した大腸菌群数から河川水中のウイルス濃度が決定。同時に、SSと水温から式(8)により浄水処理におけるウイルス除去効率が決定。

⑥①で決定した流量レベルより、河川からの取水量および下水処理水の再利用水量が決定。

⑦前日の感染者数から下水処理水中のウイルス濃度が決定。

⑧河川水と再利用水のウイルス濃度から浄水処理前の原水中ウイルス濃度が決定。

⑨⑤で決定した除去効率と⑧で決定したウイルス濃度から浄水処理後のウイルス濃度が決定。

⑩⑦と⑨で決定したそれぞれのウイルス濃度から式(6)により感染者数が決定。

以上①～⑩の手順を365日分繰り返し、式(7)により年間感染リスクが算出される。

## 4. 再現流量データを用いた下水処理水再利用シミュレーションの結果と考察

### 4. 1 年間感染リスクの算出結果と考察

図16および図17はそれぞれ二次処理水と消毒処理水を再利用した場合の年間感染リスク算出結果である。この図では流量の4つのパターンごとに感染リスクを示している。ただし、感染リスク算出のためには前述の再現流量データ(n=20)を利用し、それぞれの再現データについて乱数の系列を変えて各10回ずつ計算を行い、その平均値を計算結果としている。

まず、消毒前の二次処理水を再利用に用いた場合(図16)であるが、再利用しない場合と比較して、シナリオA・Bともに感染リスクは上昇している。シナリオAの場合であれば再利用割合の大きいシナリオA-2(不足量の100%を下水処理水で補充)でのリスクの上昇が著しく、特に渇水日数の多いパターン3では再利用しない場合の約10倍の感染リスクとなっている。それに比べてパターン4では渇水日数が少ないため、感染リスクの上昇は1.3倍程度である。シナリオBの場合は、全てのパターンで再利用を行わない場合に比べ6倍前後の感染リスクとなっている。すなわち、たとえ0.001ml/日程度の水洗用水の誤飲でさえも無視できない。

消毒処理水を用いた場合(図17)、シナリオAでは再利用しない場合と比較してほとんど差はない。これは再利用に用いられる消毒処理水のウイルス濃度が河川水と同じ程度まで低く抑えられていることを表している。シナリオBの場合も再利用による感染リスクの増加は見られなかった。

流量パターンの違いに着目すると、流量レベルが19となる日が多いパターン4では、渇水日数の多いパターン3と比較して感染リスクは高くなっている。これは流量が大きい日は大腸菌群数も多くなるという実測データの傾向が反映された結果であると考えられる。大腸菌群数とウイルス濃度の関係は単純

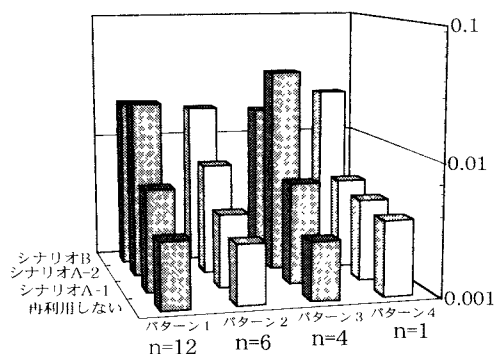


図16 二次処理水を再利用した場合の年間感染リスク

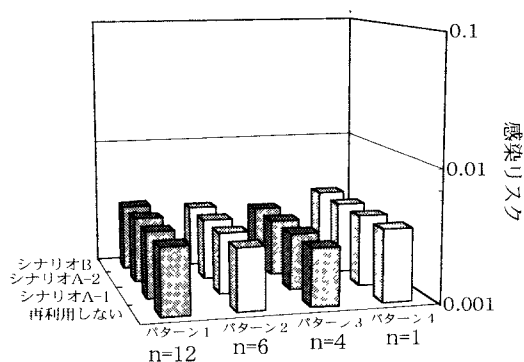


図17 消毒処理水を再利用した場合の年間感染リスク

な比によって仮定したが、一般的に大腸菌群数は降雨時に増加することが知られている。一方、ウイルスについては詳しく知られていないため、この仮定が降雨時（流量増加時）にも当てはまるかどうかはモニタリングなどによって検証する必要がある。

以上より、下水処理水を再利用する場合に二次処理水を使用することがたいへん危険であることが示唆された。現在、我が国における再利用水の水質基準は、水洗用水の場合だと大腸菌群数が10個/ml以下とされている<sup>13)</sup>。福島市にある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>18)</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。

#### 4. 2 渇水低減効果の算出結果と考察

20回の試行について渇水低減効果を算出した結果、その平均はシナリオA-1で224%・day、A-2で448%・day、シナリオBでは354%・dayであった。再利用なしの場合、取水制限による不足分は補充されないため渇水低減効果は得られない。取水制限による不足量の100%が下水処理水で補充されるシナリオA-2の渇水低減効果は、その年の渇水に対する最大効果とすることができ、シナリオA-1ではその50%の渇水低減効果が得られることになる。シナリオBでは最大渇水低減効果に対して約80%の渇水低減効果が得られた。具体的には、20回の試行のうち15回が80%を超え、残りの5回も50～70%の範囲にあり、全ての試行でシナリオA-1以上の渇水低減効果が得られた。

#### 4. 3 年間感染リスクと渇水低減効果の関係

図18および図19はそれぞれ二次処理水と消毒処理水を再利用した場合の感染リスクと渇水低減効果の関係をプロットしたグラフである。二次処理水を再利用した場合、シナリオAにおいては渇水低減効果の増大に伴って感染リスクが上昇している。この関係は、シナリオA-2において渇水低減効果が400%・day以上の場合によく近似され、この場合、両者の関係は $y = 5.8 \times 10^{-4} \times e^{0.0047x}$  (x: 渇水低減効果 [%・day], y: 感染リスク) という式で表される。このとき、渇水低減効果が500%・day増加すると感染リスクは約10倍になる。一方、消毒処理水を再利用した場合（図19）、渇水低減効果に対して感染リスクはほぼ一定である。

水道水源の一部として下水処理水を再利用する場合、図18のように渇水低減効果が大きいほど感染リスクは高くなると予想されるが、適切な下水処理が施されれば図19のように感染リスクの上昇は見られない。このように、poliovirus1を対象とした感染リスク評価からは、十分なウイルス除去をすることにより、下水処理水の再利用は渇水に対してたいへん有効な対策と言える。下水処理水再利用のためにはその他の病原微生物や化学物質によるリスク評価が必要であり、その際には除去率、用量－反応モデル、河川水中の濃度等のリスク物質に関するパラメータを精査した上で、本論文で提案した方法を適用することが可能である。

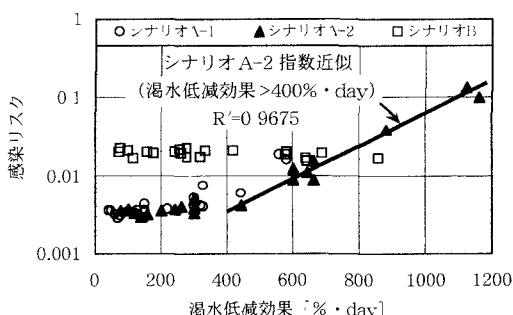


図18 二次処理水を再利用した場合の渇水低減効果と年間感染リスクの関係

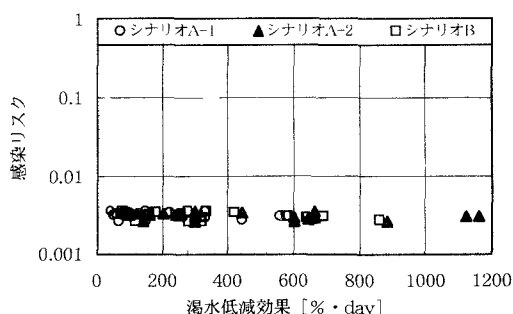


図19 消毒処理水を再利用した場合の渇水低減効果と年間感染リスクの関係

## 5. 結論

本論文では、阿武隈川の流量を確率マトリックスを用いて再現する手法を提案した。その再現データを用いた下水処理水再利用シミュレーションを行うことで、将来の下水処理水再利用による poliovirus1 に対する感染リスク、ならびに渇水低減効果を算出した。その結果として以下の結論を得た。

- ・本手法により下水処理水の処理程度や再利用用途に応じた感染リスクおよび渇水低減効果を予測することが可能となった。
- ・二次処理水を再利用する場合、水道水源の一部としての利用、水洗用水としての利用のどちらについても感染リスクは非常に高くなる。特に、二次処理水を水道水源の一部として再利用する場合、感染リスクは指数関数的に増加する。このとき、500%・day の渇水低減効果の増加に伴い感染リスクは約 10 倍となる。
- ・水道水源の一部として、または水洗用水として下水処理水を再利用する場合、3log のウイルス除去を可能とする消毒を施すことで感染リスクの上昇を防ぐことができる。
- ・渇水被害の低減のため、下水処理水の再利用はたいへん有用である。水道水源の一部として再利用する場合だけでなく、再利用用途を水洗用水に限定する場合においても累加不足率を平均 8 割程度減少させることができる。

**謝辞：**本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)「流域内の水循環利用における病原微生物の挙動解明とそのリスク評価」(研究代表者：大村達夫)および同若手研究(B)「病原微生物感染リスクと渇水リスクとのトレードオフによる下水処理水再利用の最適化」(研究代表者：渡部徹)によって行われたことを報告する。

## 参考文献

- 1) 池淵周一：水環境工学，森北出版株式会社，2001.
- 2) (財) 水道技術研究センター：水環境の健全化に向けた総合施策検討調査報告書
- 3) 浅野孝・丹保憲仁監修，五十嵐敏文・渡辺義公編著：水環境の工学と再利用，北海道大学図書刊行会，1999.
- 4) A. H. Havelaar *et al.*: F-specific RNA Bacteriophages Are Adequate Model Organisms for Viruses in Fresh Water, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.59, No.9, pp.2956-2962, 1993.
- 5) K. Yano *et al.*: A Practical Method for the Concentration of Viruses from Water Using Fibriform Cellulose and Organic Coagulant, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.27, No.3-4, pp.295-298, 1993.
- 6) H.Tanaka *et al.*: Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data, *Water Environ. Res.*, 70, 1, pp.39-51, 1998.
- 7) 土木学会編：土木工学ハンドブック，pp.555-556，技報堂出版，1989.
- 8) 日本河川協会：流量年表，33-52，1980-1999.
- 9) 土木学会編：土木工学ハンドブック，p.2572，技報堂出版，1989.
- 10) 金子光美：水の消毒，(財)日本環境整備教育センター，1997.
- 11) 金子光美：水質衛生学，技報堂出版，1996.
- 12) J. B. Rose, and C. P. Gerba.: Use of risk assessment for development of microbial standards, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.24, No.2, p.29, 1991.
- 13) (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.
- 14) P.Payment *et al.*: Clostridium perfringens and Somatic Coliphages as Indicator of the Efficiency of Drinking Water Treatment for Viruses and Protozoan Cysts, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.59, No.8, pp.2418-2424, 1993.
- 15) A.H.Havelaar *et al.*: Removal and Inactivation of Viruses by Drinking Water Treatment Processes under Full Scale Conditions, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.31, No.5-6, pp.55-62, 1995.
- 16) 福島県：水質年報，平成 8-11 年度，1998-2001.
- 17) 高度処理会議：ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生処理法検討マニュアル（案），p.101，2001.
- 18) (財) 福島県下水道公社：維持管理年報，12，1999.