

VII-20

信頼性理論に基づく下水処理水再利用での水系感染に対する安全性評価方法

建設省土木研究所 正会員 田中 宏明*

University of California at Davis Prof. Takashi Asano**

1. はじめに

人類と病原性微生物との戦いは、人類の歴史と同じ長さがあると言われている。近代、上下水道の普及により我が国のような先進国では水系感染症はほぼ克服できるものと思われてきた。しかし最近、米国をはじめとした先進諸国ではむしろ水系感染症の増加が報告されており、昨年我が国においても水道からの *Cryptosporidium* による感染症が報告されるなど、病原性細菌以外にもウイルスや原虫等の新たな水系感染微生物の制御が一層強く求められ始めている。一方、下水処理水を水資源として再利用することは今後とも一層期待されるところである。しかし、再利用では環境中でおこる病原性微生物の減少などの redundancy が、河川や湖などの自然の水域と比べ小さいため、再利用サイドでのより信頼性の高い処理の実現が期待される。そこで、ここでは米国を中心として水道の浄水プロセスなどの病原性微生物に対するバリアが持つべき機能がリスクアセスメントにより評価され始めていること¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を踏まえ、下水処理水再利用で要求される処理機能レベルを、信頼性工学の考え方から評価する方法を提起する。

2. 信頼性理論を用いた再利用の安全性の定義

水系感染についての許容リスクレベルは USEPA が 1989 年に定めた年間許容感染リスク¹²⁾が恐らく現在唯一の公的規範である。年間許容感染リスクを P_a とすると年間の曝露回数を n とするとき、1 回当たりの許容曝露リスク P_{a^*} は $P_{a^*} = 1 - (1 - P_a)^{1/n}$ と表せる。病原性微生物の用量作用モデルは、1980 年代に大きく発展し、いくつかの病原性細菌、腸管系ウイルス、原虫について、指数モデルとベータモデルが最もよく用いられている^{10) 11)}。 P_{a^*} を満足する許容微生物濃度 C_{a^*} は、1 回当たり摂取する水量 V によって表せられるので、指数モデルの場合、 $C_{a^*} = -\ln(1 - P_{a^*})/V$ 、ベータモデルの場合、 $C_{a^*} = [(1 - P_{a^*})^{-1/\alpha} - 1] \beta/V$ と表せる。 α, β, γ は病原性微生物の感染性を表すパラメーターである。ここで、再利用に使用する原水の病原性微生物濃度を C_s とするとき、人が直接曝露される水の病原性微生物濃度 C^* を環境での減衰効果の結果としての残留率 E と、処理プロセスでの対数除去率 R で表現すると、 $C^* = C_s 10^{-R} E$ となる。許容される年間感染確率 C_{a^*} が与えられるならば、信頼性として、システムが failure を起こさない確率と定義される⁵⁾ので、ここでは failure として、再利用水の利用による感染リスクがある許容リスクを満足できないことと設定すると、再利用の信頼性は次に表す時間的確率 p と定義される。

$$p = \text{Prob}[C^* \leq C_{a^*}] = \text{Prob}[C_s \leq C_{a^*} 10^R/E]$$

未消毒の下水の 2 次処理水ではいくつかの病原性微生物濃度は時間的には対数正規分布に従うことが報告されている（例えば参考文献 8）や 9））ので、もし原水 C_s が対数正規分布に従う、つまり $\log C_s \sim N(\mu, \sigma)$ なら、

$$p = \Phi[(\log(C_{a^*} 10^R/E) - \mu)/\sigma] = \Phi[(\log C_{a^*} + R - \log E - \mu)/\sigma]$$

と表現できる。ここで Φ は標準正規累積関数である。従って下水処理水再利用の信頼性は、原水の病原性微生物の分布の性格 μ, σ の他、再利用での除去率 R 、環境での減衰効果 E 、さらに許容すべき 1 回の曝露当たりのリスクレベルによって決定されることを意味する。逆にもし、必要な信頼性 p_a が与えられるとき、再

キーワード 下水処理水再利用、信頼性、感染リスク、ウイルス、処理機能

〒305 つくば市大字旭 1 Tel.0298-64-2386/Fax.0298-64-2817*;Dept.of Civil & Environ. Eng., University of California, Davis, Davis CA 95616, USA*

利用施設に求められる必要な対数除去率 R は次のように求められる。

$$R = \sigma \Phi^{-1}(pa) + \mu + \log E - \log Ca^*$$

3. ケーススタディー

この信頼性理論を用いて下水処理水再利用で必要となる再利用施設での処理レベルを試算してみることとする。我が国では下水あるいは処理水中の個々の病原性微生物の長期的なモニタリングデータは皆無であるため、カリフォルニア州で過去に測定された4つの未消毒下水処理水に含まれる腸管系ウイルスデータ⁸⁾を基に議論を進める。シナリオはAsano他⁹⁾に従い、再利用水が100%を占める河川で放流直下流で水浴によるリクリエーション利用が行われ、年間40日間水浴が行われるものである。もし、1回の水浴ごとに誤って100mlが飲まれると想定し、環境での病原性微生物の減衰が期待されないと仮定する。感染モデルとして低濃度の感染リスクが最も高いロタウイルスをRose and Gerba¹⁰⁾の用いたベータモデル ($\alpha = 0.232, \beta = 0.247$)を基に算定する。年間感染許容リスクとしては、USEPAがSurface Water Treatment Ruleに基づく飲料水の年間許容感染リスク 10^{-4} とする場合¹²⁾、USEPAが水浴場で実態調査を行った結果から実際に起こっていると考えられるオーダー²⁰⁾である 10^{-2} 、また最近、実態的に水道の安全性で妥当であると考えられ始めた 10^{-3} のレベル⁴⁾の3段階を想定する。それぞれの条件での信頼性は次のように算定できる。図-1は異なる4つ処理施設の未消毒2次処理水をさらに様々な対数除去率で制御可能とした場合の、年間許容感染リスク 10^{-4} を満足する時間確率、つまり信頼性である。図-1から分かることは同じ2次処理水でも特性が大きく異なり、米国の水道水並の年間許容リスクレベルを、例えば90%とか95%といった高い信頼性で確保するためには、その後の再利用処理施設で4~7-logといった高い除去率が必要であること、また再利用での処理レベルの低下が起こった場合は、処理水によっては再利用水の信頼性が大きく低下する場合があることである。ここでは示していないが、年間許容リスクを1オーダーずつ上げると、それぞれのカーブは左に1-logずつ移動するので、実際にリクリエーションでの水浴で生じているリスクレベルと同等な安全性を確保するのに必要な処理レベルは2~5 log レベルで良く、カリフォルニア州の非制限的利用で要求される再利用施設¹⁷⁾では満足されることとなる。高い信頼性、例えばUSEPAで浄水過程での必要な濁質制御を95%の時間で定義していること¹²⁾から、95%の信頼性を確保するのに必要な再利用施設での除去率は表-1のように与えられる。

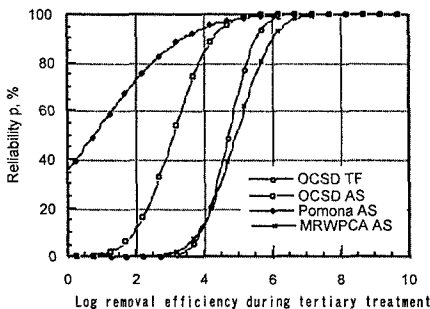


図-1 カリフォルニア州の4つの下水処理場のデータに基づく再利用施設での除去率 R のレベルの向上と再利用水の信頼性 p の変化

4. 参考文献

- 1) Asano T. et al. (1990) *Wat. Sci. Tech.* 26, pp1513.
- 2) Cabelli, V. J. et al. (1979) *American Journal of Public Health*, 69, pp. 690-696.
- 3) Cabelli, V. J. et al. (1982) *American Journal of Epidemiology*, 115, pp.

表-1 10^{-2} ~ 10^{-4} までの年間許容感染リスクを95%の信頼性で満足するために必要な再利用施設の除去率

2次処理施設の種類	95%の信頼性を満足するために必要な再利用施設での対数除去率 (log-removal efficiency)		
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
年間許容感染リスク			
OCSD 散水濾床	3.8	4.8	5.8
OCSD 活性汚泥法	2.6	3.6	4.6
Pomona 活性汚泥法	2.2	3.2	5.1
MRWPCA 活性汚泥法	4.4	5.4	6.4

606-616.

- 4) Haas, C. (1996) *J. of AWWA*, 88, 12, 8.
- 5) Niku, S. et al. (1982) *J. of WPCF*, 54, pp. 129-234.
- 6) Rose J.B. & C. P. Gerba (1991) *Wat. Sci. Tech.* 24, 2, pp. 29-34.
- 7) State of California (1978) Administrative Code, Title 22, Division 4, Environmental Health, Chapter 3, *Wastewater Reclamation Criteria*, Department of Health Services, pp. 1557-1610.
- 8) Tanaka, H. et al. (1993) *Proceedings of 66th Annual Conference & Exposition, Anaheim, CA*, AC 93-034-001.
- 9) 田中他(1994)土木研究所資料第3294号, pp75-80.
- 10) 田中(1996)金子編水質衛生学, 技報堂.
- 11) 田中他(1997)水環境学会誌 20, 3, pp.129-133.
- 12) USEPA(1989) *Federal Register*, 54:27486, June 29, 1989.