

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
(課題番号：13838002)

平成13～14年度科学研究費補助金
基盤研究(C)(2)
研究成果報告書
平成15年3月

研究代表者 大村 達夫
(東北大学大学院工学研究科・教授)

はしがき

本研究成果は、平成13年度～14年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)によるものである。

近年、世界的な異常気象を反映して、集中豪雨や長期に渡る少雨など、不均衡な降雨による被害が度々報告されている。その不均衡を調整し、安定した水資源を確保する役割を担っているのがダムであるが、自然保護を訴える世論はますます強まり、新規なダム建設は非常に難しい状況を迎えている。そのような中、限られた水資源を有効に利用するために、下水処理水再利用をはじめとする流域内の水循環利用の必要性が高まっている。

しかしながら、水環境（特に下水）の中には多くの病原微生物が存在していることが知られており、浄水・下水処理における病原微生物の不活化が不十分な場合には、水循環利用を介して流域内に感染症が蔓延する危険性は避けられない。したがって、流域の水循環利用システム導入にあたっては、事前に、水資源量の増加による社会的な利益とともに、感染リスク増大による不利益も正確に評価することが重要であり、その結果にもとづいて、感染リスクを最小化したシステムが構築されなければならない。

本研究で得られた成果が、今後、流域の感染リスクを最小化した水循環利用システム構築に向けた研究の一助となることを願っている。

平成15年（2003年）3月

研究代表者 東北大学大学院工学研究科教授
大村 達夫

研究組織

研究代表者：大村達夫（東北大学大学院工学研究科・教授）

研究分担者：渡部 徹（東北大学大学院工学研究科・助手）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成13年度	2,200	0	2,200
平成14年度	1,300	0	1,300
総計	3,500	0	3,500

研究発表

(1)学会誌等（査読付き論文）

- ・T. Watanabe, K. Hashimoto, Y. Abe and T. Omura: Risk Evaluation of Pathogens in Wastewater Reclamation as a Drinking Water Source. 76th Annual Water Environmental Federation (WEF) Conference and Exposition (Los Angeles, USA, October 2003), accepted for oral presentation
- ・橋本剛志, 渡部徹, 大村達夫: 病原微生物感染リスクにもとづく濁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～, 環境工学研究論文集, Vol. 39, 123-134, 2002

(2)口頭発表

- ・T. Watanabe, K. Hashimoto, Y. Abe, K. Fukushi and T. Omura: Risk Evaluation for Viral Infectious Diseases through Drinking Water with the Secondary Infection. 2nd IWA Asia-Pacific Regional Conference (Bangkok, Thailand, October 2003), accepted for poster presentation
- ・橋本剛志, 渡部徹, 大村達夫: 阿武隈川中流域における下水処理水再利用による濁水リスク低減と病原微生物感染リスクの評価, 平成13年度土木学会東北支部技術研究発表会（福島県郡山市, 2002年3月）
- ・橋本剛志, 渡部徹, 大村達夫: 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, 土木学会第57回年次学術講演会（札幌市, 2002年9月）
- ・渡部徹, 橋本剛志, 阿部欽章, 大村達夫: 水中病原微生物の検出精度を考慮した感染リスク評価, 第37回日本水環境学会年会（熊本市, 2003年3月）
- ・渡部徹, 阿部欽章, 大村達夫: 河川における病原ウイルスの不活化と輸送に関する研究, 平成14年度土木学会東北支部技術研究発表会（宮城県多賀城市, 2003年3月）
- ・阿部欽章, 渡部徹, 藤倉雅浩, 大村達夫: 河川における病原ウイルスの挙動評価のための基礎的実験, 土木学会第58回年次学術講演会（徳島市, 2003年9月）

研究成果 目次

1. 研究の背景および目的	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	5
2. 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	6
2. 1 はじめに	6
2. 2 河川流量の再現と渇水被害の評価	6
2. 3 下水処理水再利用シミュレーション	13
2. 4 下水処理水再利用シミュレーションの結果および考察	19
2. 6 まとめ	22
3. 河川における病原ウイルスの不活化の評価	24
3. 1 はじめに	24
3. 2 河川水中における病原ウイルスの濁質への吸着	24
3. 3 河川水中における遊離状態の病原ウイルスの不活化	27
3. 4 まとめ	28
4. おわりに	29
5. 本研究の成果に関する発表論文	30

1. 研究の背景および目的

1. 1 研究の背景

(1) 渇水の発生状況

「渇水」とは、水の供給が一時的に需要を下回る状態を意味している。同じような言葉で「水不足」という言葉があるが、この場合は水が恒常的に足りない状況を意味するのが一般的である¹⁾。

我が国では、小規模のものを含めると昭和30年以降渇水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。表1.1はこれまでの我が国における著名な渇水を示したものであるが、特に深刻な影響を与えた渇水として、昭和39年の東京（東京オリンピック渇水）、昭和48年の高松（高松砂漠）、昭和53年の福岡（福岡渇水）、昭和56年の沖縄、昭和59年の中部圏・近畿圏、昭和62年の首都圏、平成6年の全国的な渇水（列島渇水）などがあげられる。

こうした渇水の原因は主に気象条件によるものだが、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。水需要が増加している背景には、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り、このような社会の急激な変化は、需要を満たすだけの水の確保を困難にしている。

こうした水需要の増加や渇水の頻発に対し、現在では主に水の相互融通と新たな水資源開発の2点が検討されている²⁾。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、一方で少雨は多雨に比較して空間的拡がりが大きく、隣接する水系間の導水・融通は容易ではないとの研究報告もある¹⁾。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がかかることも忘れてはならない。水資源開発についてはダム開発が検討されているが、上流域への負担、適地の不足、自然保護の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。このように上流地域での水源確保に多くを望めない状況の中、代替水資源の必要性は急速に高まっている。

(2) 都市内での下水処理水再利用の現状

河川水やダムでの貯留水に替わる水資源として現在考えられているものには、地下水、海水、下水処理水などがある。その中で、近年では下水処理水の再利用に大きな注目が集まっている。下水処理水再利用の利点は、都市下水の発生量は渇水の影響をほとんど受けず安定した水量が確保できること、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となり輸送コストを低く抑えられることである。さらに下水処理技術も向上しているため、下水道普及率の高い大都市を中心として導入され始めている（表1.2参照）。

1996年（平成8）度版の下水道統計によれば、我が国で下水処理場で再利用された処理水の総量は最大約48万m³/日であり、これは全高度処理水量約3,108万m³/日の1.5%に相当する水量である。また、下水処理場外に再利用水を供給した下水処理場の総

表 1.1 我が国における著名な渇水¹⁾

年	地域		給水制限		備考
	都市名	主要河川	期間	日数	
昭和39	東京都	多摩川	7.10～10.1	84 日間	東京五輪渇水
昭和42	北九州市	遠賀川	6.19～10.26	130 "	
	筑紫野市	筑紫川	9.5～9.26	22 "	
昭和48	長崎市		9.5～12.5	72 "	長崎渇水
	松江市	斐伊川	6.20～11.1	135 "	
	大竹市	小瀬川	7.27～9.13	49 "	
	高松市		7.13～9.8	58 "	高松渇水
昭和52	那覇市他		11.21～翌9.24	239 "	
	淀川沿川都市		8.26～翌1.6	134 "	
昭和53	那覇市他		4.27～翌4.7	176 "	
	淀川沿川都市	淀川	9.1～翌2.8	161 "	
	北九州市	遠賀川	6.8～12.11	173 "	
昭和56	福岡市	筑紫川	5.20～翌3.24	287 "	福岡渇水
昭和59	那覇市他		7.10～翌6.6	326 "	
	蒲郡市他 (豊川用水地域)	豊川	10.12～翌3.13	154 "	
	東海市他 (愛知用水地域)	木曾川	8.13～翌3.12	213 "	
昭和61	淀川沿川都市	淀川	10.8～翌3.12	156 "	
	蒲郡市他 (豊川用水地域)	豊川	8.28～翌1.26	152 "	
	東海市他 (愛知用水地域)	木曾川	9.3～翌1.26	146 "	
昭和62	淀川沿川都市	淀川	10.17～翌2.10	117 "	
	東京都他	利根川・荒川	6.16～8.25	71 "	首都圏渇水
	蒲郡市他 (豊川用水地域)	豊川	8.24～翌5.23	274 "	
平成元	東海市他 (愛知用水地域)	木曾川	9.12～翌3.17	188 "	
	那覇市他		2.17～4.26	59 "	
平成2	東京都他	利根川・荒川	7.23～8.9	18 "	
	奈良県	木津川	9.1～9.16	16 "	
平成3	高松市他	吉野川	8.2～8.24	23 "	
	那覇市他		6.10～7.27 9.6～9.24 (除く9/12, 17, 18)	64 "	
平成5	石垣島		7.19～翌3.3	219 "	
	高松市	吉野川	7.11～9.30	67 "	
平成6	松山市	重信川	9.26～11.25	123 "	列島渇水
	福岡市	筑後川	8.4～翌5.31	295 "	
平成7	佐世保市		8.1～翌3.18	213 "	
	高知市	鏡川	12.13～翌3.18	97 "	
平成8	東京都他	利根川・荒川	8.16～9.26	42 "	
	神奈川県	相模川・酒匂川	2.26～4.24 7.5～7.22	77 "	

(注) 1. 国土庁調べ
2. 平成8年までの主な渇水についての記述

表 1.2 下水処理水の再利用事例³⁾

再利用用途	再利用個所	供給水量 (m ³ /日)
水洗用水等の雑用水	千葉県幕張新都心	2372*
	神戸市六甲アイランド	995*
	福岡市	3900*
河川環境維持用水	大阪市今川・駒川・細江川	8480
	名古屋市荒子川	7900
	札幌市安春川	35200
修景・親水用水	大阪市大阪城外堀	5000
	長岡京市勝竜寺城址内堀	2500
	豊中市新豊島川	5920
	宮崎市宮崎せせらぎ水路	2880
	黒部市アクアパーク	1500
	名古屋市ストリートギャラリー	200
灌漑用水	熊本市中部浄化センター	32000
	足利市水処理センター	20000
流・融雪用水	旭川市融雪槽	72960
工業用水	名古屋市工業用水道	8888

*：日最大供給量（実績）

数は162で、全下水処理場（1,221）の13%であり、再利用を行っている処理場全体の日平均下水水量に対する日最大再利用量の割合は3.9%であった³⁾。

図1.1は再利用水の主要な用途別水量の全再利用水量に対する割合を示したグラフである。公園や庭園などにある堀、池水路に修景・親水用水として供給された量が45%で最も多く、次に希釈、冷却洗浄などのために事業場に供給された工業用水としての利用量が24%、農業用水14%、流・融雪用水11%となっている³⁾。現在のところ、これら我が

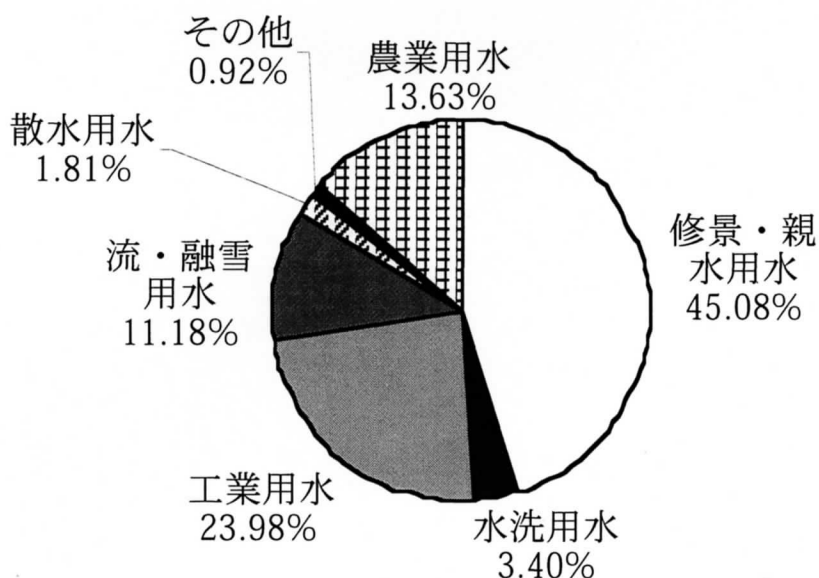


図 1.1 再利用水の主要な用途別水量の全再利用水量に対する割合³⁾

国での下水処理水再利用は、直接人間の体内に入らない非飲料用に限られており、再生水の水質基準も非飲料用水についてのみ定められている（表 1.3 参照）。

渇水が大きな問題となっているアメリカ合衆国カリフォルニア州では、極限の水の使い方として、都市下水を超高度に処理して飲料用として利用することが議論されている³⁾。またナミビアの首都ウインドホークには、おそらく世界で唯一の、下水から飲料水を直接再生するプラントがあり、多段処理システムによる水処理技術の研究がなされてきた。そこでの研究の結果、ウイルスについては12logの除去が可能であるなど、下水から微生物学的に安全な飲料水を直接再生する技術が有用であることが示されている⁴⁾。

(3)流域内の水循環利用の問題点

下水中には多くの病原微生物が存在している。したがって、下水処理水の再利用には感染症発生の危険性、すなわち感染リスクが伴うことを考慮しなければならない。確かに下水処理技術は向上しているものの、病原微生物などは微量でも健康被害を及ぼすことが知られており³⁾、検出限界以下の濃度でも安全と判断することはできない。このことは現行の水道水についても問題となっており、現在までのところ飲料水中の病原微生物について明確な閾値が定められていない。また、下水処理水再利用の中でも特に飲料水としての利用には水利用者の心理的抵抗が大きいのも事実である。もしも実際に飲料水として利用することになれば、このような感染リスクや心理的抵抗以上の社会的利

表 1.3 再利用水の水質基準²⁾

用途 項目	国土交通省				経済産業省	厚生労働省
	修景用水	親水用水	水洗便所用水	散水用水	個別・地区・広域循環の雑用水	水洗便所用水
大腸菌群数 (個/ml)	10以下	0.5以下	10以下	0.5以下	10以下	10以下
残留塩素 (mg/l)			保持されていること	0.4以下		
BOD (mg/l)	10以下	3以下	20以下	20以下		
pH	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	6.5~8.6	5.8~8.6
COD (mg/l)					20以下	
色度 (度)	40以下	10以下	外観が不快でないこと	外観が不快でないこと		
濁度 (度)	10以下	5以下	外観が不快でないこと	外観が不快でないこと		
蒸発残留物 (mg/l)					800以下	
外観					不快でないこと	不快でないこと
臭気	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
備考	人間が触れること(身体の一部的な接触)を前提としない。	人間が触れること(身体の一部的な接触)を前提としない。			他に陰イオン界面活性剤基準値が設定されている。 (1.0mg/l) 対象としている用途は(水洗便所・散水用水・冷却用水・清掃洗浄水・洗車水・修景用水)の6用途である。	

益が得られることを利用者に提示しなければならないが、それらを正当に比較するための評価手法が必要となる。

(4)都市間での水の高度利用の現状とその問題点

渇水の頻発に対応して十分な量の水資源を得るための方法として、都市内での下水処理水再利用の他に、流域の都市間での水の高度利用がある。すなわち、安定した河川流量を確保するために、流域の上流に位置する都市で下水処理水を河川へ放流し、その河川を下流の都市が再び水源として利用するという水利用形態である。この都市間での水の高度利用は、東京周辺や京都・大阪、福岡など、人口が密集し水需要が多いにも関わらず、水資源に乏しい流域において多く見られる。また、この高度利用により河川流量が安定することから、河川生態系保全の効果も期待され、今後、他の流域でも実施されていく可能性が高い。

このケースは、河川を介して上流の都市の下水処理水を下流の都市において再利用している状況と見ることもでき、前述の都市内での下水処理水再利用と同様、病原微生物の感染リスクが重大な問題となる。

1. 2 研究の目的

今後、都市内での下水処理水再利用や都市間での水の高度利用といった水循環利用は、さらに多くの流域で実施されていくものと予想される。しかしながら、下水中には多くの病原微生物が存在しており、下水処理が不十分な場合には水系感染症が流行する可能性も否定できない。これは必ずしも飲料用として再利用する場合に限られるものではなく、再利用水の多様な使用形態・使用目的に応じたそれぞれの安全性が十分に検討されなければならない。それだけでなく、流域の水循環利用システム導入のためには、事前に社会全体での利益・不利益を総合的に評価し、そのシステムの最適な構造を見出していく必要がある。本研究では、このような水循環利用システム導入の評価およびシステム最適化手法の構築のための第一段階として、以下に示す2つの研究目的のもとで研究を実施した。

- 1) 水循環利用システムのモデルケースとして、阿武隈川中流域に位置する福島市を対象に下水処理水再利用システムを仮想的に構築し、社会的利益としての渇水低減効果、不利益としての病原微生物感染リスクをそれぞれ評価し、その結果を比較すること。
- 2) 将来の流域内の水循環利用システムにおける感染リスクを予見的に評価するために必要となる、河川水中での病原微生物（特に病原ウイルス）の挙動を明らかにすること。

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.

2. 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

2. 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¹⁾）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²⁾。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¹⁾。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³⁾、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。

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^{4,5)}、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⁶⁾、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。ここでは、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目的として研究を行った。

2. 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文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⁷⁾。

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¹⁾により、1日ごとの流量を再現することで年間を通じ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。

(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5400km² (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)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2.1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27.68m³/sであり、これは表2.1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。

表 2.1 流量レベルの設定

流量レベル	流量 (m ³ /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

(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日ごとの流量データ20年分⁸⁾(1980～1999年, n=7290)である。

(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

(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}

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

③コンピュータにより一様乱数 $\xi_1 (0 < \xi_1 < 1)$ 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 ξ_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_n は式 (4) を用いて計算する。

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

これは q_n 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。

(6) 再現データの妥当性の検討

a) 流量変動に関する比較

図2.1および図2.2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。

b) 各流量レベルの発生日数に関する比較

図2.3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、 χ^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、渴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、渴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。

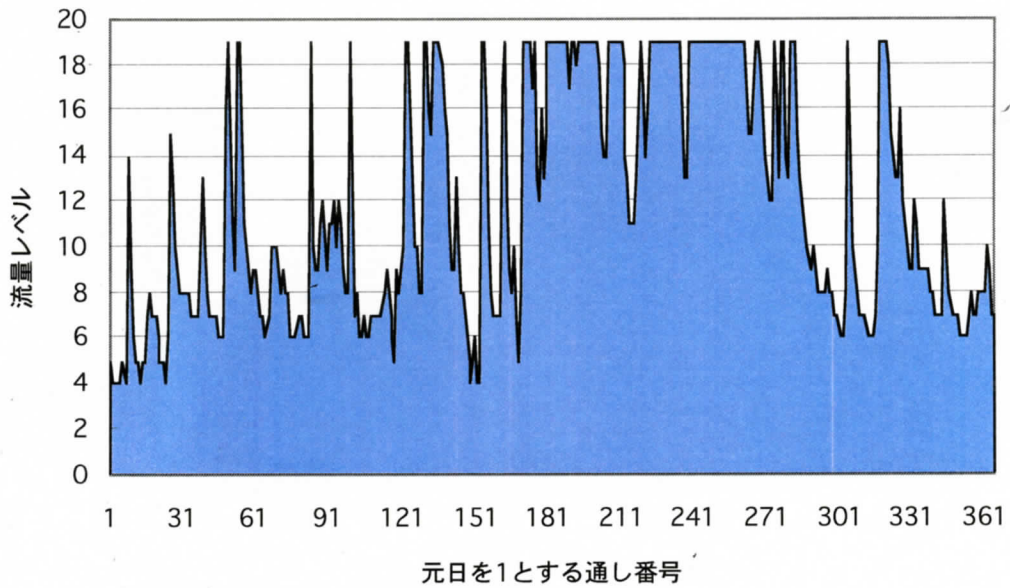


図 2.1 実測データの流量変動

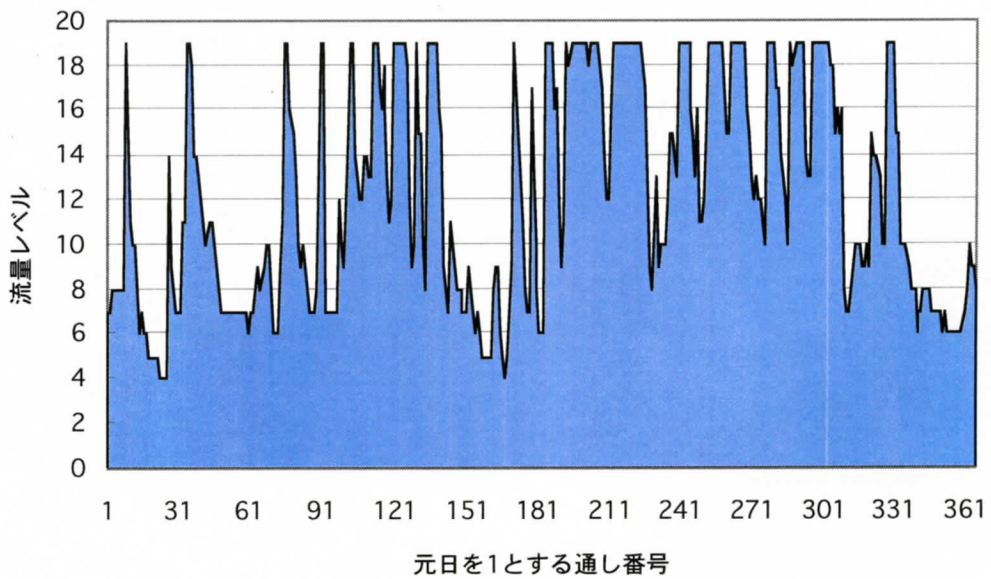


図 2.2 再現データの流量変動

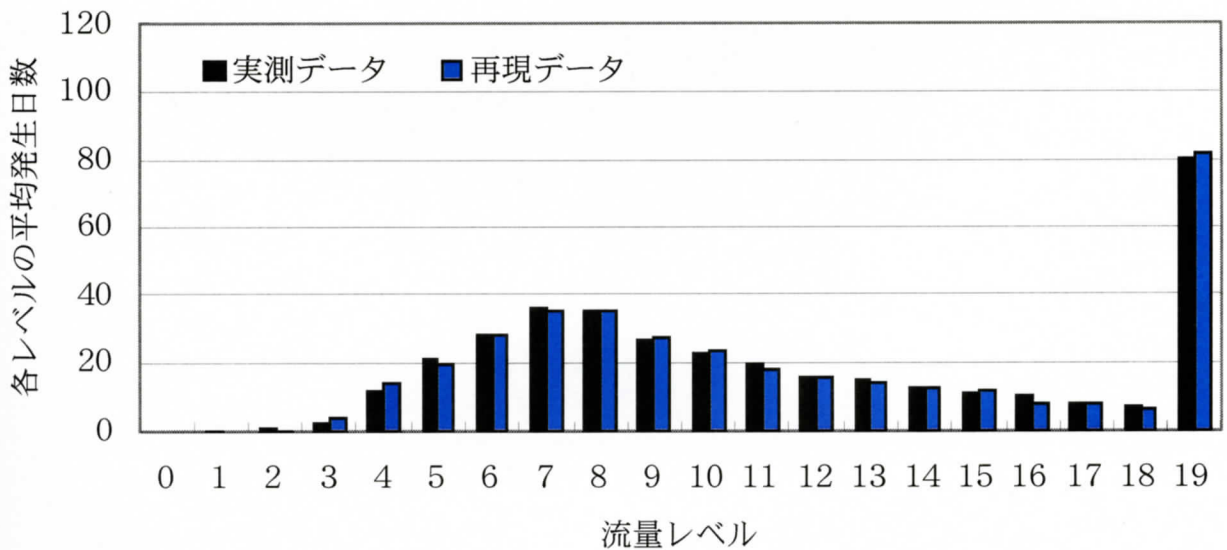


図 2.3 各流量レベルの平均発生日数

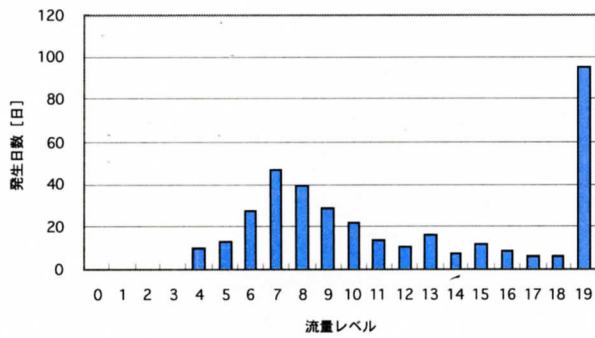


図 2.4 各流量レベルの発生日数
(1993年)

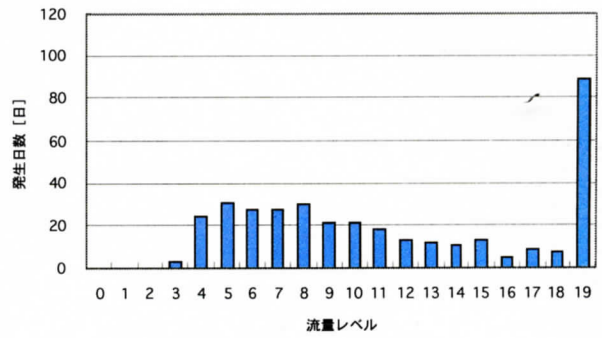


図 2.5 各流量レベルの発生日数
(1985年)

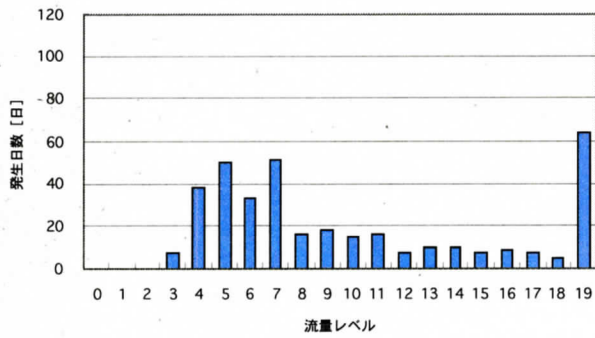


図 2.6 各流量レベルの発生日数
(1992年)

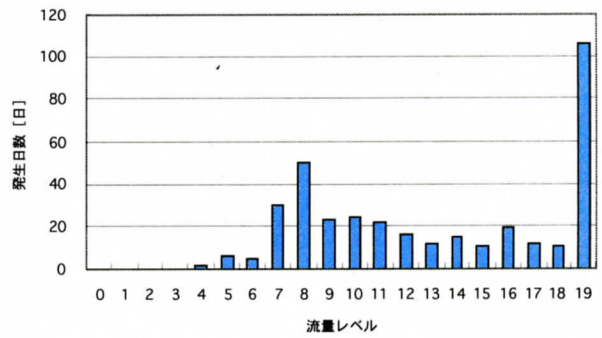


図 2.7 各流量レベルの発生日数
(1983年)

- ・パターン1 (図 2.4) : 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 2.5) : 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 2.6) : 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 2.7) : 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 2.8~2.11 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 2.4~2.7 に示した実測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 2.2 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 2.3 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が増加しパターン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。

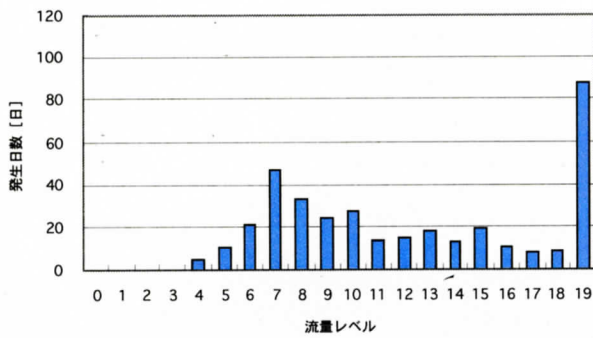


図 2.8 各流量レベルの発生日数 (試行 1)

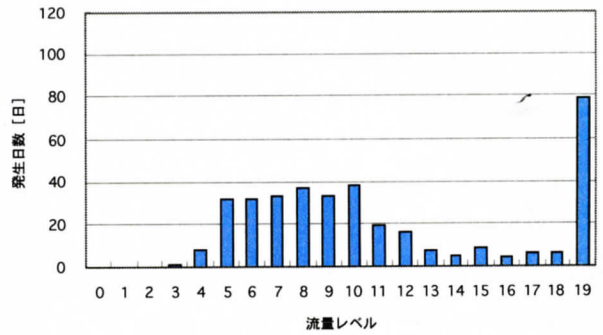


図 2.9 各流量レベルの発生日数 (試行 2)

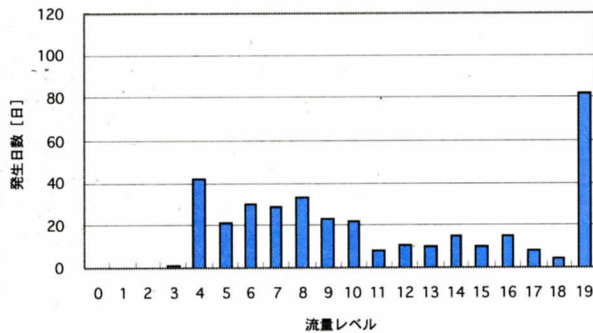


図 2.10 各流量レベルの発生日数 (試行 3)

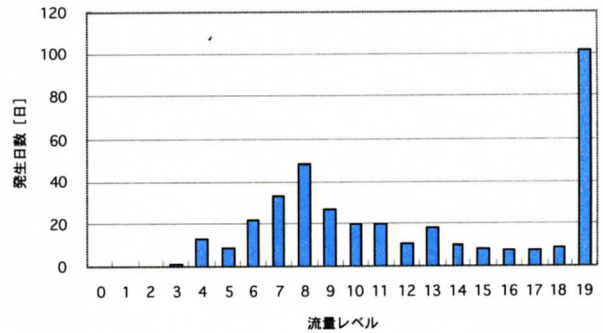


図 2.11 各流量レベルの発生日数 (試行 4)

表 2.2 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%

c) 濁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、流量が濁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。各レベルごとの内訳は表2.3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。

表 2.3 渴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%

2. 3 下水処理水再利用シミュレーション

(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2.12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1.25m³/sとなる。

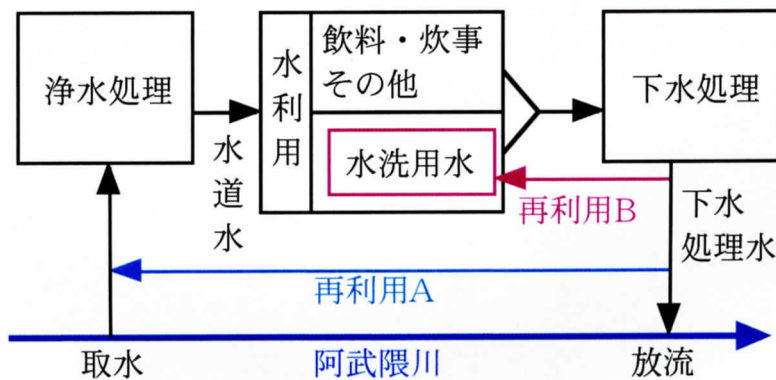


図 2.12 水利用システムのモデル

(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2.13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以下の日は渴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2.12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

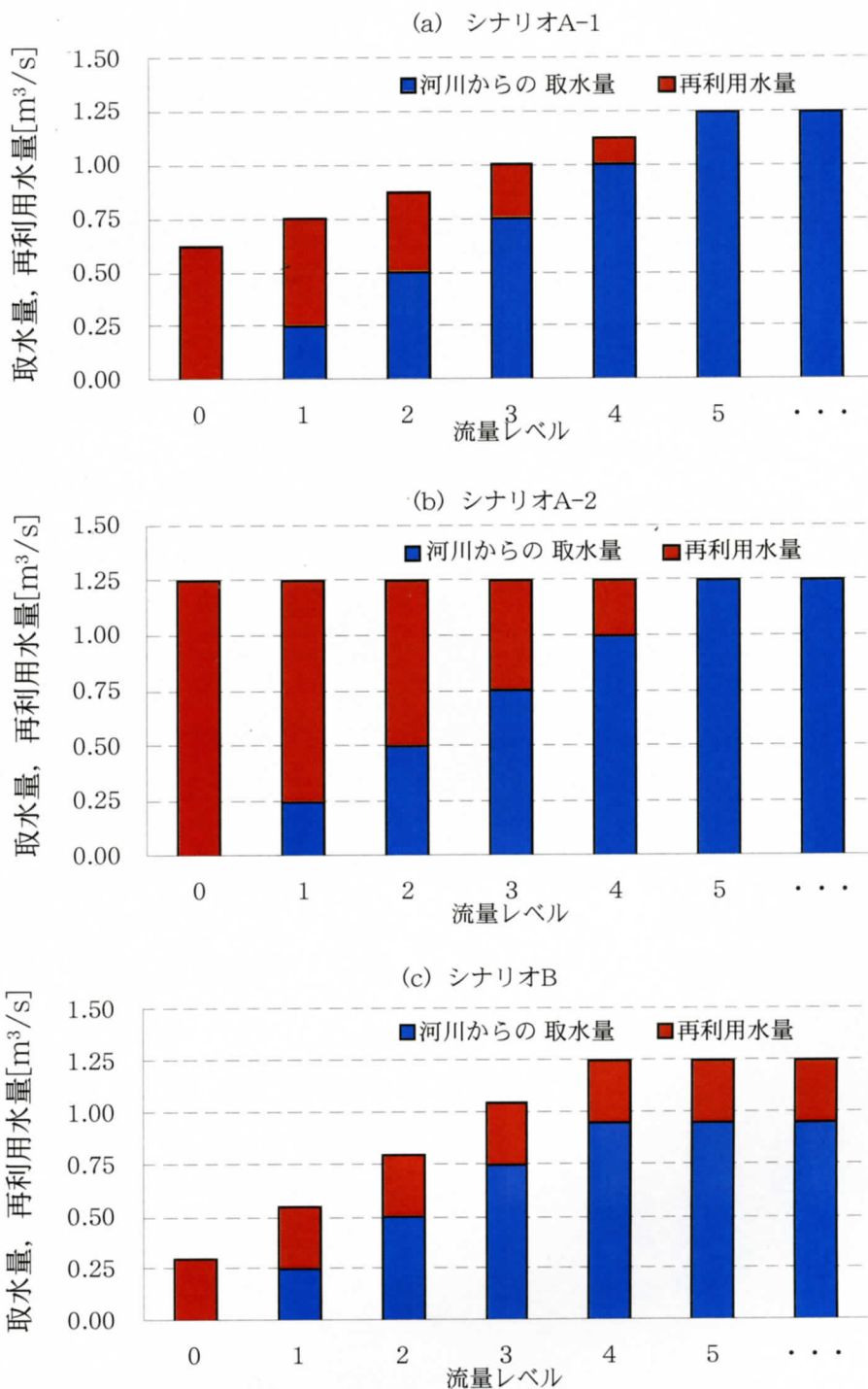


図 2.13 各流量レベルに応じた河川からの取水量と再利用水量

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⁹⁾。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 2.12 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) 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¹⁰⁾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。

(4) 感染リスクの算出

a) 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¹¹⁾。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에서도似た挙動を示す可能性が高いからである。

b) 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¹¹⁾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¹¹⁾。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]、 α 、 β : パラメータ（本論文ではRoseら¹²⁾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¹¹⁾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。

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

c) 感染リスク算出における仮定

・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⁹⁾。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⁹⁾。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。

・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¹³⁾。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¹³⁾。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、1.3¹⁴⁾、enterovirus に対しては 1.4¹⁵⁾ 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を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¹¹⁾ 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¹⁶⁾ 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¹³⁾。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¹³⁾) であった rotavirus SAll の不活化率と同じであると仮定している。

・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⁹⁾。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¹³⁾、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¹⁷⁾。

・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 2.14 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2.4, 2.5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。

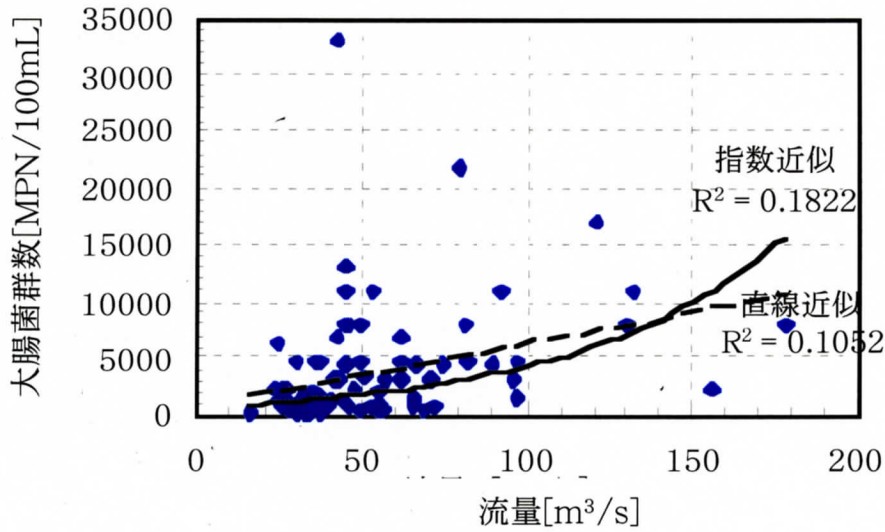


図 2.14 流量と大腸菌群数の関係（取水点付近）

表 2.4 大腸菌群数レベルの設定

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

表 2.5 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

・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 2.15 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。
- 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。

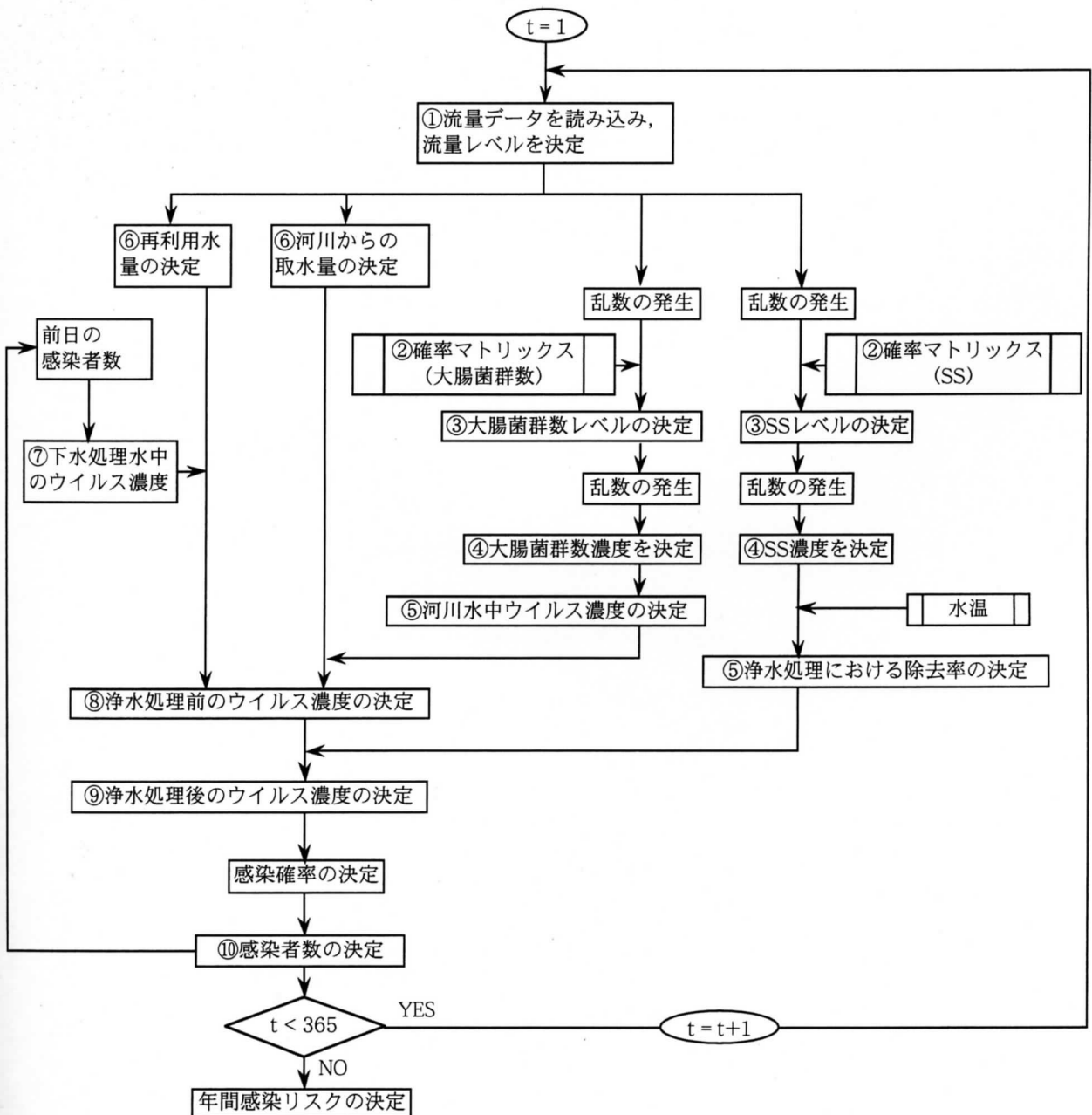


図 2.15 シミュレーションの流れ

- 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日分繰り返して、式(7)により年間感染リスクが算出される。

3. 4 下水処理水再利用シミュレーションの結果および考察

(1)年間感染リスクの算出結果と考察

図2.16および図2.17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

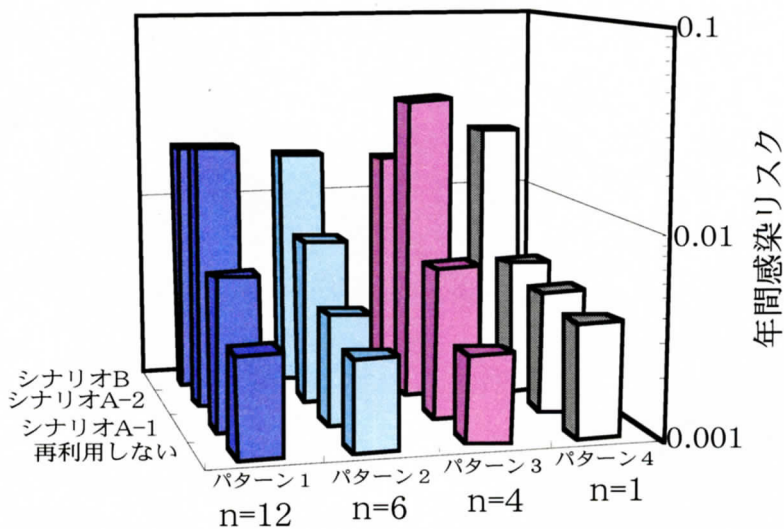


図 2.16 二次処理水を再利用した場合の年間感染リスク

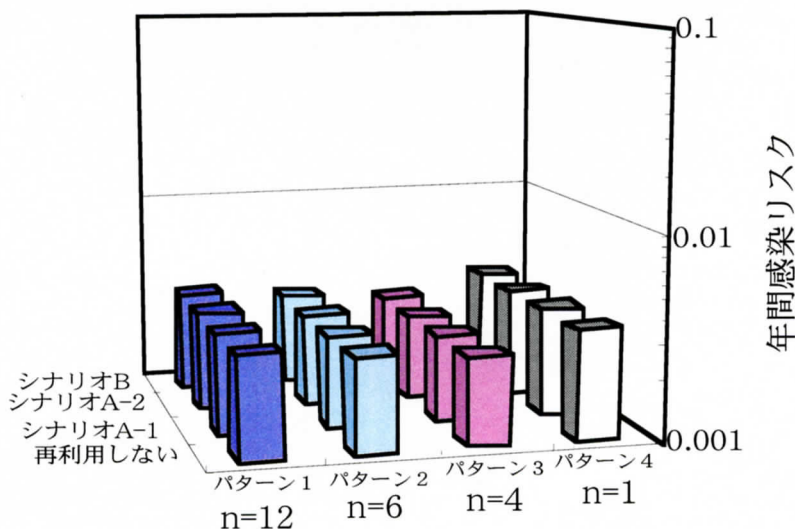


図 2.17 消毒処理水を再利用した場合の年間感染リスク

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2.16）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、特に喝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では喝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0.001m³/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2.17）、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、喝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/m³以下とされている¹³⁾。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/m³程度¹⁸⁾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。

(2) 喝水低減効果の算出結果と考察

20回の試行について喝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喝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の喝水低減効果は、その年の喝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%の喝水低減効果が得られることになる。シナリオBでは最大喝水低減効果に対して約80%の喝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以上の喝水低減効果が得られた。

(3) 年間感染リスクと喝水低減効果の関係

図2.18および図2.19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

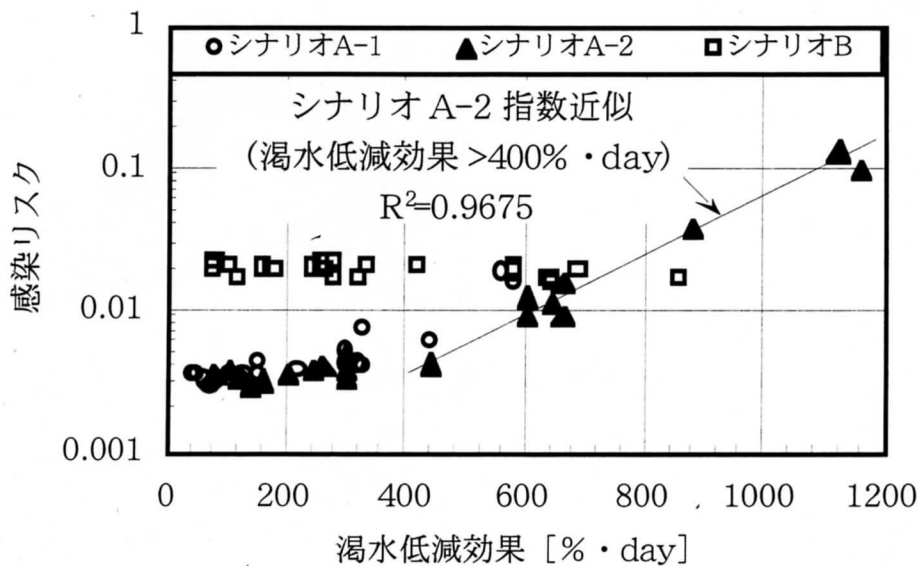


図 2.18 二次処理水を再利用した場合の喝水低減効果と年間感染リスクの関係

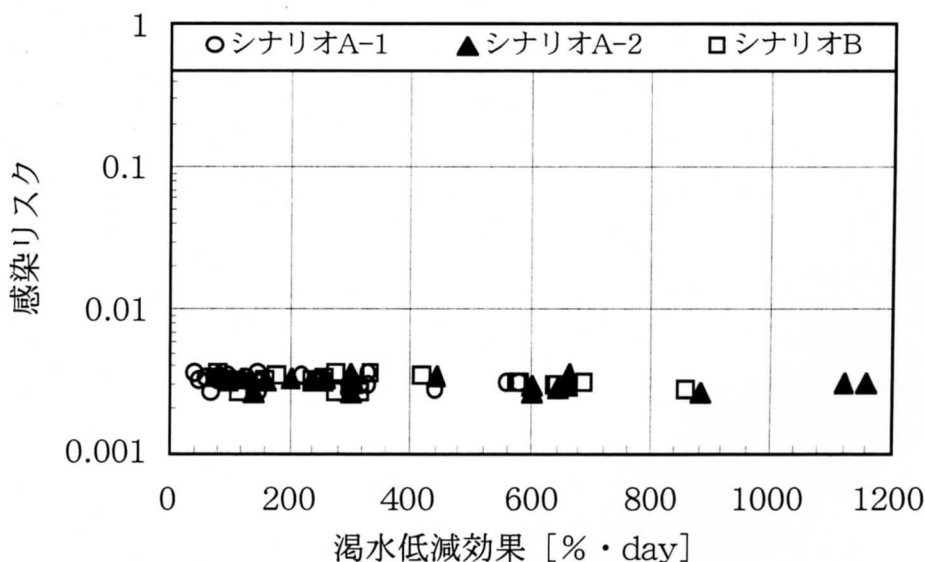


図 2.19 消毒処理水を再利用した場合の喝水低減効果と年間感染リスクの関係

クと喝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 においては喝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 において喝水低減効果が 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 : 喝水低減効果 [%・day], y : 感染リスク) という式で表される。このとき、喝水低減効果が 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 2.19)、喝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 2.18 のように喝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 2.19 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

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。

2. 5 まとめ

この研究では、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。

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, pp2956-2962, 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.

3. 河川水中における病原ウイルスの挙動に関する研究

3. 1 はじめに

水系感染が懸念されているウイルスは、主に人間の腸管に感染し、大量に増殖して糞便とともに下水中に流入する。その後、一定の処理がなされてから河川等に放流されるが、放流水からもウイルスが検出されていることから¹⁾、生残したウイルスが河川に流入している可能性は否定できず、河川の水利用を介して流域内にウイルス感染症が伝播する危険性がある。このリスクを正確に評価するためには、河川におけるウイルスの消長や挙動を明らかにする必要がある。

水中では、ウイルスは完全に分散しているというよりも、大なり小なり集塊化していると見てよい²⁾。ウイルスが集塊化したり濁質に付着、埋棲すると、周囲のストレスから保護され不活化時間が長くなることが知られている。また、濁質への付着は河川水中でのウイルスの輸送にも影響を与えることから、濁質はウイルスの挙動に関する重要な因子といえる。そこで、ここでは、河川におけるウイルスの挙動解明の第一歩として、遊離状態にあるウイルスの不活化と、ウイルスの濁質への吸着について明らかにすることを目的とした。

なお、以下に示す全ての実験操作は、病原ウイルスを取り扱う際の安全性に配慮して、東北大学大学院工学研究科土木工学専攻に設置されているP2レベルバイオハザード実験設備内の安全キャビネットを利用して行われた。

3. 2 河川水中における病原ウイルスの濁質への吸着

(1)材料

a) 供試ウイルス液

実験用のウイルスとして弱毒ポリオウイルス1型(Lsc,2 ab株)を用いた。ウイルスの培養は、BGM細胞で増殖させることにより行い、3回凍結融解させた後、遠心分離した上清を10mLシリンジと0.2 μ mメンブレンフィルターでろ過したものを供試ウイルス液(濃度はおおよそ 10^6 PFU/mL)とした。

b) 希釈液

プラーク法によりウイルス量を測定する場合、サンプルをそのまま細胞に接種すると浸透圧による細胞溶解が起こる。そのため、サンプルはウイルス量測定前に希釈液(MEM①(日水製薬, 05900)溶液500mL(粉末状のMEM①4.7gを蒸留水500mLに溶解させ、オートクレーブで121°C, 15分間高压滅菌したもの)に牛胎児血清(MITSUBISHI KASEI)5mL、7.5%重炭酸ナトリウム溶液(GIBCO BRL)7.5mL、200mM L-グルタミン溶液(GIBCO BRL)5mL、抗生物質-抗真菌剤(GIBCO BRL)5mLを添加したもの)で適当な濃度に希釈した。

(2)ウイルスの濁質への吸着実験

河川水サンプルは仙台市内の河川から採取した。サンプル(SS:18.6mg/L)は、濁質濃

度を上昇させるためロータリーエバポレーターで真空濃縮(25℃, 約7時間, 1000mLを185mLに濃縮, 計算上のSS: 100.5 mg/L)した。また, 河川水サンプルおよび濃縮後のサンプルをそれぞれ0.22 μmフィルターでろ過し, 濁質が存在しないサンプルも用意した。以上の4サンプルをそれぞれ遠心管に9mLずつ注入した。供試ウイルス液を精製水で1000倍に希釈した。これを遠心管に1mLずつ接種し, ローターで30, 60, 120分と時間を変えて攪拌した(13 rpm)。攪拌後には, シリンジを用いてサンプリングを行い, 細胞へ毒性を示す物質を除くために0.22 μm フィルターでろ過した後, 希釈液で適当な濃度に希釈して, -20℃で冷凍保存した。後日, BGM細胞を用いたプラーク法によりウイルス量を定量した。

(3)濁質への吸着実験の結果と考察

吸着実験の結果(SS:100.5mg/L)を図3.1に示す。濁質があるサンプルのウイルス量が少ないのは, 濁質に吸着したウイルスが, フィルターした際に濁質と共に除去されるためである。攪拌時間による吸着量の差は認められない。このため, ウイルスは河川水に注入された直後に濁質に吸着したものと考えられる。また, その吸着は13rpm程度の緩い攪拌では剥離しなかった。各時間ごとに算出したウイルスの濁質への吸着率を表3.1に

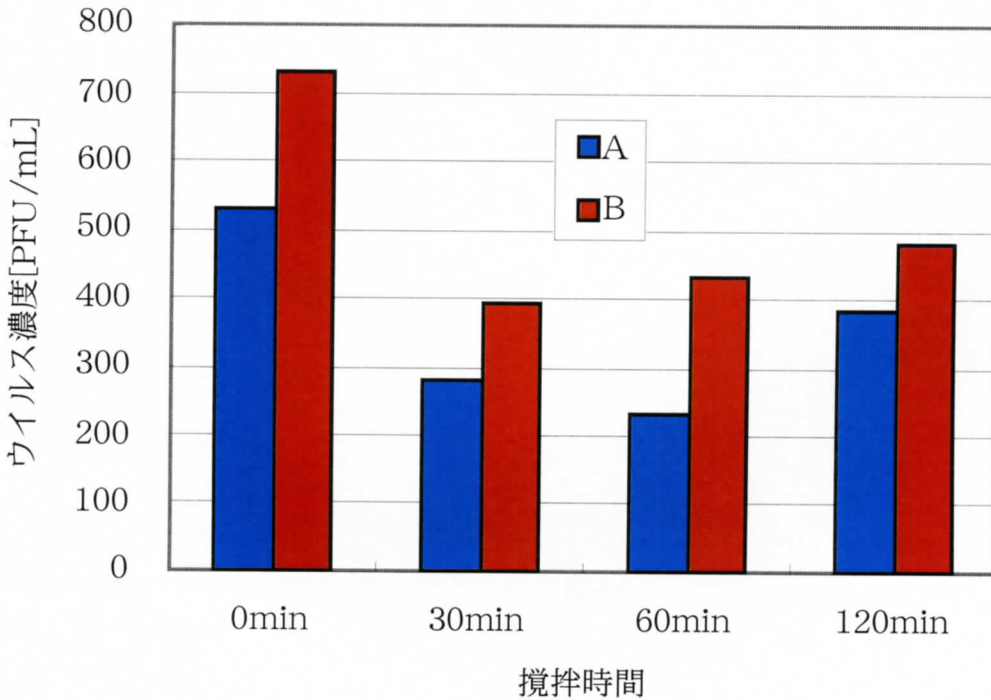


図3.1 河川水中 (SS:100.5 mg/L) でのウイルス吸着実験の結果
(A: 河川水, B: 0.22 μm フィルターでろ過した河川水)

表3.1 河川水中 (SS:100.5 mg/L) でのウイルスの濁質への吸着率

攪拌時間(min)	0	30	60	120	平均
吸着量(PFU/mL)	200	108	200	100	152
吸着率(%)	27	28	46	21	30.5

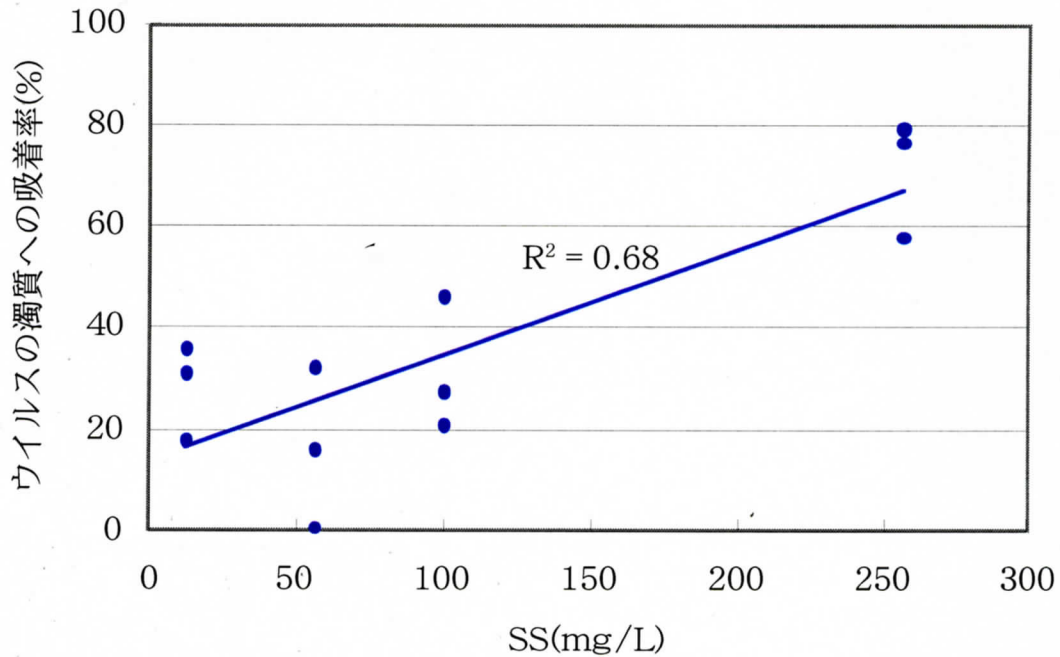


図 3.2 濁質濃度 (SS) とウイルスの濁質への吸着率の関係

示す。60min だけは高い値を示しているが、全体の 30% 程度のウイルスが濁質に吸着した。図 3.2 には、濁質濃度 (SS) が異なる他の河川水サンプルを用いて、同様のウイルス吸着実験を行った結果をまとめた。この図より、SS とウイルスの濁質への吸着率には弱いながらも比例関係が見られた。

3. 3 河川水中における遊離状態の病原ウイルスの不活化

(1) 材料

供試ウイルス液，希釈液ともに 3. 2 に示したものと同様である。

(2) 精製水中でのウイルスの不活化実験

ビーカーに精製水 500mL と攪拌子を入れ，オートクレーブで 121℃，15 分間滅菌した。その後室温になるまで放置し，供試ウイルス液 0.5mL を入れてウイルス溶液を作製した。ウイルスの集塊化を防ぐためにマグネティックスターラーで攪拌(373 rpm)した。実験は 25℃ で行った。ウイルスの感染価が測定できなくなるまで(25PFU/mL 程度) 継続してサンプリングを続けた。サンプリングにはシリンジを用い，細胞へ毒性を示す物質を除くために 0.22 μm フィルターでろ過した後，希釈液で希釈し，-20℃ で冷凍保存した。後日，BGM 細胞を用いたプラーク法によりウイルス量を定量した。

(3) 濁質を除去した河川水中でのウイルスの不活化実験

0.22 μm フィルターでろ過して濁質を除去した河川水 99mL，攪拌子，供試ウイルス液 1mL をビーカーに入れ，スターラーで攪拌した。以降の操作は(2)と同様である。

(4)不活化実験の結果および考察

ポリオウイルス1の精製水中での不活化実験の結果を図3.3に示す。ウイルスの感染価がおおよそ10分の1になるのに、約33日を要した。このことから、ポリオウイルス1は不活化されるまでには非常に長い期間を要し、水中では感染力を有したままで安定して生存することが分かる。したがって、例えばポリオウイルス1が河川に放流された場合、実際の河川では多くのストレス（物理力、紫外線、温度等）を受けることを考慮しても、下流までほとんど不活化せずに流下する可能性が高い。

微生物の減衰は一般に、 $N=N_0e^{-kt}$ （または対数表記で $\log N=-0.43kt+\log N_0$ ）で表される。ここで、 N はウイルス濃度(PFU/mL)、 k は不活化速度定数(1/日)、 N_0 は初期ウイルス濃度である。初期ウイルス濃度と比較してウイルスが減少し始めた約18日以降をこのモデルに適合させた結果($R^2=0.91$)、不活化速度定数は0.16となり(95%信頼区間として、 $0.13 < k < 0.20$)、18日目以降は約14日でウイルス濃度が1/10になることが分かった。

次に濁質を除去した河川水中での不活化実験の結果を図3.4に示す。ウイルス濃度は実験開始初期から急激に減少し、約2日で1/10になり、それ以降徐々に不活化した。この初期の急激な減少は、精製水中での不活化には見られなかった。この原因は定かではないが、河川水は精製水と異なり、微量ながら塩素や金属イオン等を含含有しており、これらが不活化を促進させた要因の1つであると考えられる。

精製水の結果と同様に、約2日目以降をモデルに適合させた結果($R^2=0.80$)、不活化速度定数は0.10となり(95%信頼区間として、 $0.06 < k < 0.14$)、2日目以降は約23日でウイルス濃度が1/10になることが分かった。

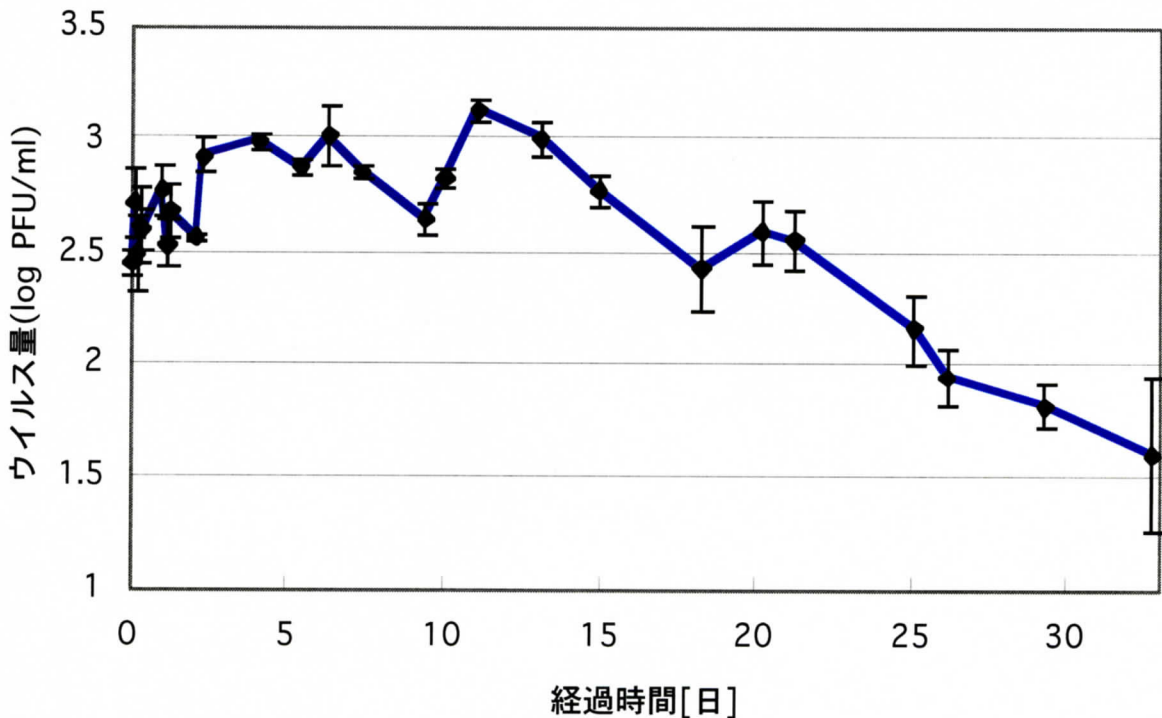


図3.3 精製水中におけるポリオウイルス1型の不活化

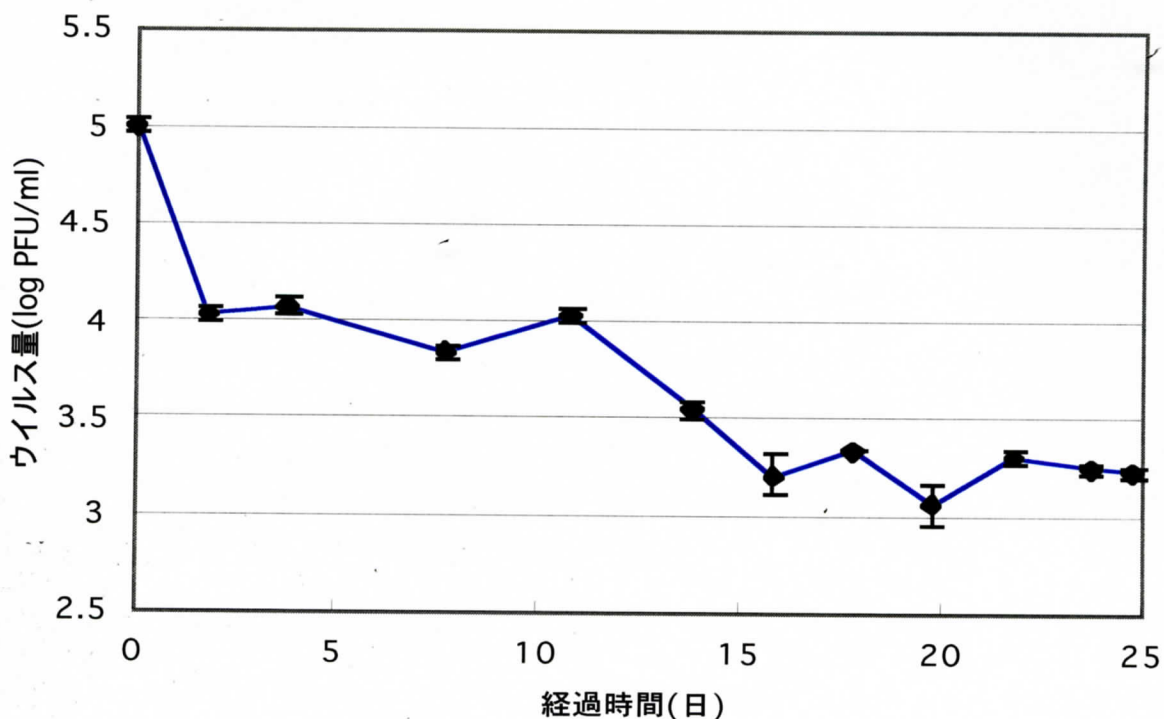


図 3.4 河川水中（濁質なし）におけるポリオウイルス 1 型の不活化

3. 4 まとめ

河川水中での病原ウイルスの挙動を正確に評価するために、①河川水中でのウイルスの濁質への吸着、②遊離状態のウイルスの不活化のそれぞれ現象に関して、ポリオウイルス 1 型をモデルウイルスとして室内実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ・河川水中のウイルスの濁質への吸着率は、濁質濃度（SS を指標とした）に比例して増加した。

- ・遊離状態のウイルスは、初期に急速に不活化し（約 2 日間で濃度が 1/10 になる）、その後の不活化は緩やかであった。このように、河川水中のウイルスが二段階の不活化を示すことは新たな知見であった。

参考文献

- 1) 矢野一好：水環境学会誌，Vol.26，No.1，2003.
- 2) 金子光美：水の消毒，（財）日本環境整備教育センター，1997.

4. おわりに

異常気象にともなう渇水の頻発に加え、自然環境保護や生態系保全の観点から新たな水資源開発が難しくなった現在、都市内での下水処理水再利用や都市間での水の高度利用といった流域内の水循環利用システムに寄せられる期待は大きい。しかしながら、水環境中（特に下水中）には多くの病原微生物が存在していることから、浄水・下水処理が不十分な場合には、水循環利用を介して流域内に感染症が蔓延する危険性は否定できない。したがって、流域の水循環利用システム導入のためには、事前に社会全体での利益・不利益を総合的に評価し、そのシステムの最適な構造を見出していく必要がある。本研究は、流域内の水循環利用システム導入の評価、および感染リスク最小化を目指したシステム最適化手法の構築のための第一段階として実施された。以下に本研究の成果をまとめる。

1) 阿武隈川中流域に位置する福島市を対象として、下水処理水再利用システムを仮想的に構築し、社会的利益としての渇水低減効果、不利益としての病原微生物感染リスクをそれぞれ評価した。具体的には、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、その再現データをもとに下水処理水再利用シミュレーションを行った。その結果から、将来の下水処理水再利用システムにおける poliovirus1 による感染リスク、ならびに渇水低減効果を算出した。この手法により、下水処理水の処理程度や再利用用途に応じて、感染リスクと渇水低減効果を同時に評価することが可能となった。

本研究で対象とした福島市の下水処理水再利用システムは、流域内の水循環利用システムの一例であり、ここで提案した水量・水質の両側面からのシステム評価手法は、他の流域の水循環利用システムにも適用することができる。

2) 河川水中での病原微生物（特に病原ウイルス）の挙動を明らかにするため、①河川水中でのウイルスの濁質への吸着、②遊離状態のウイルスの不活化のそれぞれ現象に関して、ポリオウイルス1型をモデルウイルスとして室内実験を行った。その結果、以下に示す新しい知見が得られた。

- ・河川水中のウイルスの濁質への吸着率が濁質濃度（SSを指標とした）に比例して増加する。

- ・遊離状態のウイルスは、初期に急速に不活化し（約2日間で濃度が1/10になる）、その後の不活化は緩やかである。

これらの知見は、将来の流域内の水循環利用システムにおける感染リスクを予見的に評価するために必要不可欠な情報となる。

5. 本研究成果に関する発表論文

本研究の成果に関して、研究期間中に発表された論文（発表予定のものを除く）を以下に列挙し、次ページから各論文の写しを添付した。

査読付き論文

- ・橋本剛志，渡部徹，大村達夫：病原微生物感染リスクにもとづく濁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～，環境工学研究論文集，Vol. 39, 123-134, 2002

その他の発表論文

- ・橋本剛志，渡部徹，大村達夫：阿武隈川中流域における下水処理水再利用による濁水リスク低減と病原微生物感染リスクの評価，平成13年度土木学会東北支部技術研究発表会（福島県郡山市，2002年3月）
- ・橋本剛志，渡部徹，大村達夫：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，土木学会第57回年次学術講演会（札幌市，2002年9月）
- ・渡部徹，橋本剛志，阿部欽章，大村達夫：水中病原微生物の検出精度を考慮した感染リスク評価，第37回日本水環境学会年会（熊本市，2003年3月）
- ・渡部徹，阿部欽章，大村達夫：河川における病原ウイルスの不活化と輸送に関する研究，平成14年度土木学会東北支部技術研究発表会（宮城県多賀城市，2003年3月）

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。