

流域内二都市間における水系感染症の 流行伝播モデルの開発

渡部 徹¹・大村達夫²

¹正会員 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

近年、世界各国で感染症の流行を引き起こし問題視されている原虫やウイルス等の病原微生物は、感染者の体内で増殖し糞便とともに高濃度で下水へ排出される。そのため、ある都市で発生した感染症の流行はその都市内にとどまらず、様々な水利用システムを介して他の都市へ伝播する危険性を伴う。また、増大し続ける水需要に呼応して水利用の効率化が進みつつある流域の現状は、この流行伝播の危険性を増加させる可能性があるため、衛生学的観点からの流域管理が切望されている。本論文では、流域管理の目的から流域内二都市間における水系感染症の流行伝播モデルを開発し、浄水・下水処理による病原微生物除去効率、河川流量と微生物濃度等の因子が二都市間での感染症流行の伝播に与える影響を明らかにした。

Key Words: watershed management, outbreak propagation, waterborne infectious diseases, relative sensitivity, Monte Carlo simulation

1. はじめに

今世紀初頭まで我が国では、頻繁に発生する飲料水を介したコレラやチフス、赤痢といった感染症の蔓延に苦しめられてきた。しかし戦後、国策として上・下水道の普及や塩素消毒の徹底を推し進めた結果、我が国の衛生状態は飛躍的に改善され、1950年代以降これらの水系感染症の発生事例は劇的に減少したり、水道ではほぼ100%の普及率(下水道の普及率は約60%)を達成した現在においては、これら病原細菌による飲料水を介した感染症の発生事例は皆無に等しい。ところが近年、病原細菌による水系感染に代わり、クリプトスポリジウムに代表される原虫や腸管系ウイルスによる水系感染がしばしば報告されるようになり、人間の健康を脅かす新たなリスクとして関心を集めている。

水系感染が懸念されている原虫やウイルスは、主として人間の腸管に感染する。その後、感染者の体内で莫大な数に増殖し糞便とともに下水に流入するため、感染症流行時の下水は通常より非常に高濃度の病原微生物によって汚染されている。原虫や一部のウイルスは、病原細菌に比べ塩素消毒に対する耐性が強いことが知られており、塩素消毒を採用している下水処理施設では、原虫やウイルスにより高濃度

に汚染された下水を適切な濃度レベルまで処理することは難しく、感染症流行時に病原微生物が混入した処理水が環境中に放流される危険性は否定できない。したがって、病原微生物による水系感染症のリスクを議論する場合には、感染症流行地域だけを対象とした議論ではもはや不十分であり、その地域から放流される下水処理水を受容する水域が様々な用途で利用されることにより、他の地域において再び感染症流行が発生してしまう危険性、すなわち感染症流行の伝播に関しても十分配慮する必要がある。実際に昨年3月、フィンランドでは、ノーウォーク様ウイルスによる集団感染が70kmも離れた二つの都市間で伝播した事例が報告されている²⁾。この事例のように、流行伝播の危険性は我々のごく身近まで迫っているのである。

一方で近年、流域の水資源管理という立場では、逼迫した水供給問題の解決のために、下水処理水等の再利用をはじめとする水利用の効率化が盛んに議論されているが、この水利用の効率化は履歴のある水に人間が接する機会を増加させ、結果として水系感染症の流行伝播の危険性を増長させることにもつながりかねない。そのため、流域の水需要に呼応した量的な水資源管理と同様に、水系感染症のリスクという概念にもとづいた衛生学的観点からの流域管理も

また緊要な課題と認識すべきである。

本論文では、衛生学的観点からの流域管理に役立つような、流域二都市間での水系感染症の流行伝播モデルを開発することを目的とする。このモデルには流域の水利用の特長を表す因子として、浄水および下水処理による微生物除去効率、河川の流量と微生物濃度等を取り入れ、さらに都市の人口や年齢構成分布といった都市に関する因子も考慮することによって、非常に汎用性に富むモデルの開発を行った。その汎用性ゆえに、このモデルを利用した隣接二都市間における流行伝播の予測結果は、実際の流域に見られるような多数の都市間での流行伝播予測に拡張させることが可能となる。また本論文では、モデル流域におけるポリオウイルス1型による感染症流行の都市間伝播をモンテカルロシミュレーションの結果から予測し、流行伝播モデルに取り入れた様々な因子が流行伝播に及ぼす影響についても調べた。

2. 流行伝播モデル

(1)病原微生物に対する人間の感受性を考慮した用量-反応モデル

用量-反応モデルとは、ある病原微生物の摂取量とその人間の感染確率との関数であり、病原微生物による感染リスクを議論する場合には最も重要な因子となる。用量-反応モデルの関数形として、これまで多くの数学モデルが提案されており、実際に病原微生物ごとにそれらのモデルを適用した例も数多く報告されている。モデルの適用は、ボランティアに対する暴露実験から得られた感染データをもとにしたパラメータフィッティングにより行われる。通常、ボランティアには健康な人間が選ばれるため、この感染データによって構築された用量-反応モデルでは、病原微生物に対する抵抗力が比較的弱いと考えられる乳幼児や高齢者の感染確率を過小評価してしまう危険性がある。そこで著者らは、年齢による病原微生物に対する感受性の違いを表現できる、相対感染確率というパラメータを開発し、次式で用量-反応モデルに導入することを提案した³⁾。

$$P^*(D, A_k) = RP(A_k) \times P(D) \quad (1)$$

ここで、D: 病原微生物の摂取量または暴露量[個]

A_k : 年齢階級 ($k=1, 2, \dots, 11$)

$RP(A_k)$: 相対感染確率

$P(D)$: 従来の用量-反応モデルで算出される感染確率

$P^*(D, A_k)$: 年齢による感受性の違いを考慮し

て算出される感染確率

本論文で開発される流行伝播モデルにおいても、式(1)で表される人間の感受性を考慮した用量-反応モデルを採用した。

(2)流行伝播モデルの構成

図-1に、流行伝播モデルの概念図を示す。ここでは、流域内に位置する二つの都市間において水系感染症の流行が水利用を介して伝播する過程をモデル化している。具体的には、上流側に位置する都市1において感染症の流行が発生したと仮定し、感染者の糞便に含まれる病原微生物が下水処理水とともに河川水中に放流され、下流側の都市2の水道水源を汚染するというケースを想定している。実際の流域では、より多くの都市がより複雑な水利用システムを構築しているため、そのモデル化は非常に困難である。しかし、その流域内都市群の複雑な関係が、微視的には隣接した二都市間の関係によって構成されていることを考えると、このモデルにより予測された二都市間の流行伝播は、流域全体における巨視的な流行伝播の予測に拡張することができる。

流域の水環境中での病原微生物の挙動に関しては、都市1の下水処理施設および都市2の浄水施設における病原微生物の除去、河川における病原微生物の不活化をこのモデルでは考慮しており、それぞれの除去効率または不活化効率をパラメータに設定した。また、都市1の下水処理放流水が河川水により希釈される効果も無視できないため、河川の流量と微生物濃度も考慮した。この河川の微生物濃度というパラメータには、都市1よりも上流に病原微生物排出源となりうる都市や畜産施設等が立地している場合の影響も反映させることができる。都市に関するパラメータとしては、それぞれ人口と感染者数を設定したが、著者ら³⁾により集団の年齢構成分布が水系感染症の流行を議論する上で重要であることが明らかとされていることより、都市2の年齢構成分布もパラメータとして採用した。

(3)流行伝播モデルにおける仮定

表-1に流行伝播モデルにおける種々の仮定を示す。このうち1日あたりの水道水摂取量 $2[L/日]$ は、化学物質や重金属によるリスク評価の際に米国環境保護庁(EPA)が推奨している値であり、この仮定をもとに算出された感染リスクはこれまで数多くの論文の中で報告されている^{4), 5)}。我が国においてもこれに倣って水道水基準が設定されている。一方、1993年に設立されたWHOの飲料水水質ガイドラインでは、大人の飲料水摂取量は $2[L/日]$ であるのに対し、

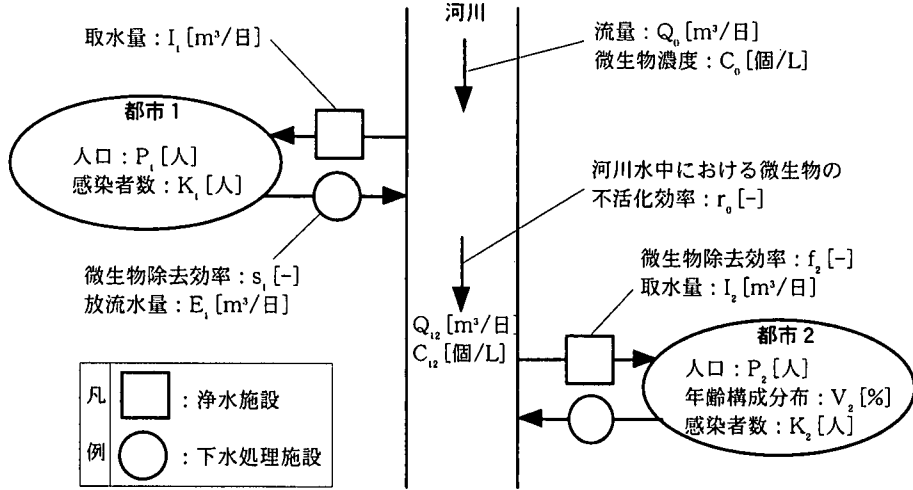


図-1 流行伝播モデルの概念図

表-1 流行伝播モデルにおける種々の仮定

項目	数値	単位
水道水に関する項目		
・ 1人1日当たり水道水摂取量 ^{a, 9)}	2	L/日/人
・ 1人1日当たり家庭用水使用量 ⁹⁾	210	L/日/人
・ 全給水量のうち家庭用水として使用される割合 ⁹⁾	70	%
病原微生物に関する項目		
・ 感染者の糞便のポリオウイルス1型の濃度 ⁷⁾	10 ⁶	個/g(湿重)
・ 下水中のポリオウイルス1型の生存率 ⁷⁾	10	%
その他の項目		
・ 感染者の糞便の重量 ⁷⁾	100	g(湿重)

子供や幼児についてはそれぞれ1, 0.75[L/日]とやや減少させた値を採用している。このガイドラインと比較すると、EPAや我が国のように飲料水摂取量を一律に2[L/日]と定めた場合に算出されるリスクは、やや高く見積もられていることになる。

家庭用水の使用量および浄水施設からの全給水量に占める家庭用水の割合は、給水地域の生活スタイルや産業構造などによって影響を受けると考えられるが、ここでは我が国における一般的な値を採用した⁶⁾。また病原微生物に関する仮定は、流行伝播予測の対象とする病原微生物の種類に合わせて変更する必要がある。本論文での対象微生物はポリオウイルス1型であるが、ポリオウイルス1型に限定したこの種の情報は現段階で非常に不足しているため、ここでは、ポリオウイルス1型を含む腸管系ウイルスのうち、これまで比較的良好に調査がなされているエンテロウイルス属に関する文献値を引用した⁷⁾。

その他の仮定としては、都市1における取水量と放流量は等しいとする(すなわち $I_1 = E_1$)。したがって、河川流量の変化もないものとする($Q_0 = Q_{12}$)。また、水道水中の病原微生物の濃度分布は一様ではなく、ポアソン分布に従うこととする⁸⁾。ただし、濃度分布の平均値が大きい場合(具体的には、平均値が100個/L以上の場合)には、ポアソン分布が平均値が大きくなるにつれて正規分布に近づくという性質により、病原微生物の濃度分布としては正規分布を採用した。

(4) 流行伝播シミュレーションの方法

図-2に、流行伝播モデルを用いたシミュレーションの方法を示す。図中の病原微生物濃度とは、濃度分布の平均値を意味している。このフローに従って、水道水の微生物濃度の平均値 $C_{2,drk}$ [個/L]は、以下の数式によって計算される。

$$C_{1,in} = \frac{K_1 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 0.10}{E_1} = \frac{K_1 \cdot 10^7}{P_1 \cdot 210 / 0.70} = \frac{K_1}{3P_1} \cdot 10^5 \quad (2)$$

$$C_{1,out} = 10^{-5} \cdot C_{1,in} \quad (3)$$

$$C_{12} = \frac{C_0 \cdot (Q_0 - I_1) + C_{1,out} \cdot E_1}{Q_0} = C_0 + \frac{(C_{1,out} - C_0) \cdot I_1}{Q_0} = C_0 + \frac{(C_{1,out} - C_0) \cdot 300 \cdot P_1}{Q_0} \quad (4)$$

$$C_{2,in} = r_0 \cdot C_{12} \quad (5)$$

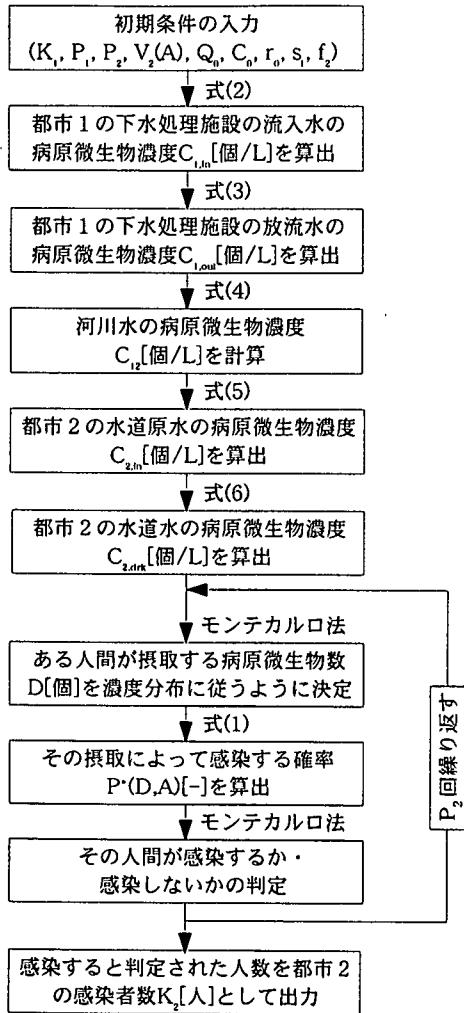


図-2 流行伝播シミュレーションの流れ

$$C_{2,drk} = f_2 \cdot C_{2,in} \quad (6)$$

ただし、 $C_{1,in}$: 都市1の下水処理施設の流入水の病原微生物濃度の平均値[個/L]

$C_{1,out}$: 都市1の下水処理施設の放流水の病原微生物濃度の平均値[個/L]

$C_{2,in}$: 都市2の水道原水の病原微生物濃度の平均値[個/L]

水道水の摂取量が2[L/日]であり、水道水中の微生物濃度がポアソン分布に従うと仮定したことより、都市2の住民が摂取する水道水の微生物数は、 $2C_{2,drk}$ [個/日]を平均値としたポアソン分布(あるいは正規分布)に従うようにばらつくことになる。この病原微生物の摂取量(用量)の個人間のばらつきを表現するために、流行伝播モデルではモンテカルロ法を用いる。病原微生物の用量が決定されると、その個人の年齢から式(1)により感染確率が算出される。そして、

この感染確率にもとづき、再びモンテカルロ法を用いて感染するかどうかの判定を行う。これを都市2の住民全員について繰り返し、感染すると判定された人数を出力する。各条件についてそれぞれ20回の試行が行われ、算出された値の平均値に関する95%信頼区間の上限値を、都市2における感染者数の予測値として採用した。

(5)流行伝播係数

上記の方法でシミュレーションを行った結果から、次式で定められる流行伝播係数(OPC; Outbreak Propagation Coefficient)を算出する。

$$OPC_{12} = \frac{K_2/P_2}{K_1/P_1} \quad (7)$$

この流行伝播係数は、2つの都市における感染リスクの比として定義され、流域内での流行伝播を評価するために非常に役に立つ指標である。流行伝播係数が1となる場合は特に重要で、すべての二都市間における流行伝播係数が1より小さく抑えられている流域では、下流側の都市ほど感染リスクは減少するために、上流の都市で発生した感染症の流行は、流域内の他の都市に伝播するにつれて次第に勢力を弱めていくことが予想される。一方、流域内に流行伝播係数が1を超えるような二都市が存在する場合には、この都市間で感染リスクが増大するため、ある都市で発生した感染症の流行が、勢力を拡大しながら流域内の他都市へと伝播していく危険性がある。したがって、流域全体を視野に入れて感染症の流行をコントロールするためには、流域内二都市間での流行伝播係数を1未満に抑えることは非常に重要である。

流行伝播係数は、病原微生物の特長(用量-反応関係、浄水処理および下水処理における除去効率、河川での不活化効率)と流域の特徴(河川流量と微生物濃度、都市の人口と年齢構成分布)によって大いに影響を受けるため、本研究ではこのうち、浄水および下水処理における除去効率、河川流量と微生物濃度という各因子の影響を、以後の流行伝播シミュレーションより明らかにした。

3. 結果および考察

(1)流行伝播モデルの適用例

a) 対象微生物に関する条件

ポリオウイルス1型に関する用量-反応モデルとしては、免疫学的な効果が考慮されている点などにより、次式で示されるベータモデルを採用した⁹⁾。

$$P(D) = 1 - \left(1 + \frac{D}{1000}\right)^{-15} \quad (8)$$

この用量-反応モデルを式(1)に導入して、感染確率を算出する。

また、河川水中における病原微生物、特に病原ウイルスの挙動は未だ不明な点が多く、本研究では都市1と都市2の間で、河川の自浄作用におけるウイルスの不活化は起こらないものとする。

b) 対象流域に関する条件

流行伝播モデルを適用した感染症流行の伝播の解析例として、以下のような流域を考える。

- ・都市1および都市2の人口はともに1万人とする。
- ・都市2の年齢構成分布は1995年の東京都のものを参考にする。

- ・ポリオウイルス1型は一度感染すると免疫が生産続くため、感染履歴のある人間は再び感染することがない¹⁰⁾、ここでは都市2の住民はすべて感染履歴がなく、感染する可能性がある人間として扱う。

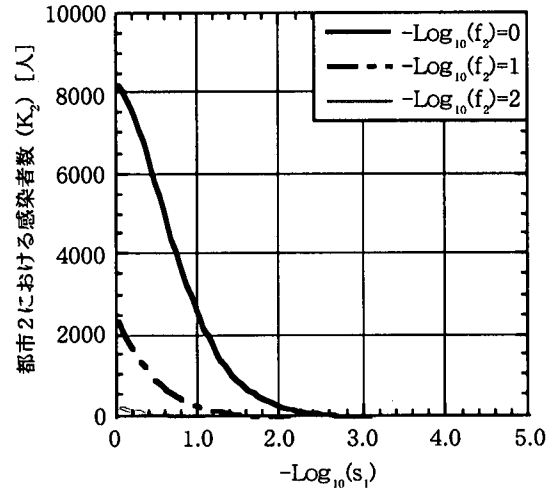
- ・都市1において、人口の1%にあたる100人が感染する流行が発生したケースを想定する。すなわち、都市1における感染リスクは1万人のうち感染者が100人であるから、0.01[日]と算出される。

(2) 処理施設における微生物除去による流行伝播の防止効果

図-3は河川流量が $Q_0 = 1.0 \times 10^4$ [m³/日]で、河川中のポリオウイルス1型の濃度が $C_0 = 0$ [個/L]の場合における、都市2で発生するであろう感染者数の予測結果を示している。この図の横軸は上流の都市1における下水処理による除去効率を示しており、予測された都市2の感染者数は都市2における浄水処理の除去効率をパラメータとして描かれている。この図では、除去効率は絶対値で表現されており、例えば、横軸の $-\text{Log}_{10}(s_1) = 2.0$ とは、都市1における下水処理によってウイルス濃度が $10^{-2.0}$ 倍に減少することを意味している。図-3(a)は予測結果の全体図を表しているが、この図には浄水処理による除去効率が比較的高い場合 ($-\text{Log}_{10}(f_2) > 2$) の結果を示すことができないため、図-3(b)に感染者数が0~200人となるような領域を拡大して予測結果を図示した。

ここでは都市2の人口を1万人と定めたため、予測された感染者数をこの人口で除すことにより感染リスクを算出することができる。例えば感染者数が500人の場合の感染リスクは0.05[日]である。一般的に、飲料水に由来する腸管感染症のリスクは、1年間に1万人に1人以下(すなわち、 10^{-4} /年)に抑えることが望ましいとされており、実際この許容感染

(a) 全体図 (ただし浄水処理による除去効率が高い場合の予測結果は除いている)



(b) 感染者数が0~200人となる領域の拡大図

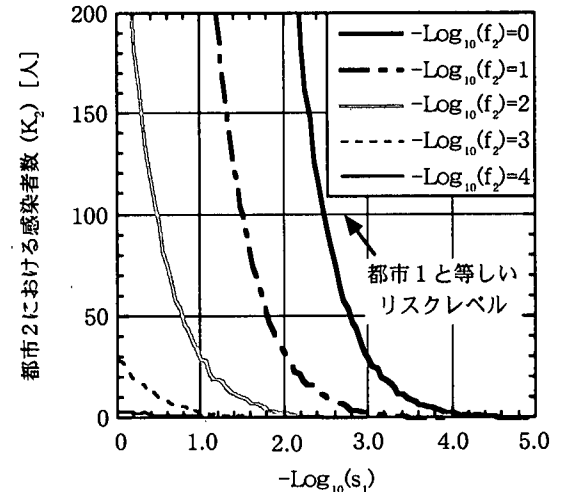


図-3 都市1の下水処理におけるポリオウイルス除去効率に対する都市2における感染者数の予測結果。ただし河川流量は $Q_0 = 1.0 \times 10^4$ [m³/日]、河川のウイルス濃度は $C_0 = 0$ [個/L]である。

リスクをもとに飲料水基準が設定されている例も多い。本論文で対象としているのは突発的な流行であり、その感染リスクは1日当たりで算出されているため、単純に比較はできないものの、都市1における下水処理が不十分であった場合には、都市2での浄水施設で非常に高い除去効率が達成されなければ、 10^{-1} という年間許容リスクをわずか1日間の流行だけで超過してしまう可能性があることをこの結果は示している。例えば $-\text{Log}_{10}(s_1) = 0 \sim 1$ の場合においては、感染リスクを 10^{-1} 以下に抑えるためには、都市

表-2 実規模の浄水処理施設における腸管系ウイルスの除去効率

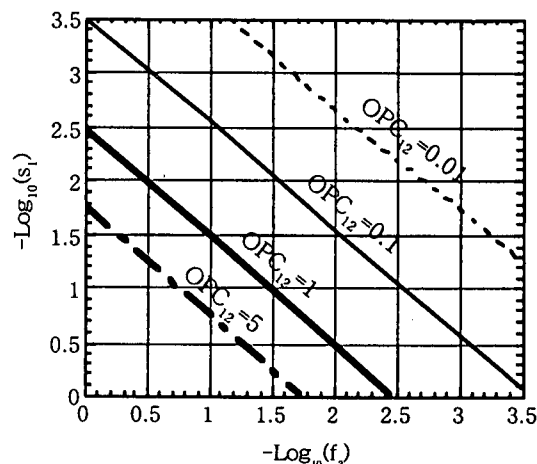
処理プロセス	除去効率	出典
凝集・沈殿	$10^{-1.3}$	11
	$10^{-3.2}$	
	$10^{-0.6}$	
凝集・沈殿・急速ろ過	$10^{-1.1}$	12
	$10^{-1.4}$	

2の浄水施設では 10^{-4} もの高い除去効率が必要とされる。これに対し、実規模の浄水処理施設で観測された腸管系ウイルス除去効率を表-2に示したが、通常処理によって 10^{-1} の除去効率を達成することは非常に困難であり、流行伝播を防止するためには浄水処理だけでなく下水処理による除去が不可欠であることが分かる。

流行伝播の防止のために必要とされる浄水および下水処理のレベルを知るためには、得られた予測結果を図-4に示すように流行伝播係数(OPC)を用いて図示すると非常に便利である。ここでは、浄水処理によるポリオウイルス1型の除去効率($-\text{Log}_{10}(f_2)$)を0.5きざみに設定して試行を行った結果を図示しているため、特に $C_0=1$ [個/L]の場合は直線が折れ曲がって見えるが、本来このきざみをより細かく設定すればこの図はなめらかな曲線で描かれることになる。この図-4の中で $\text{OPC}=1$ を表す線は特に重要な意味を有しており、流行伝播による流域の感染リスクの増大を防止するためには、都市2の下水処理および都市2の浄水処理では $\text{OPC}<1$ となるような除去効率を達成する必要がある。例えば、図-4(a)を参考にすると、もし浄水処理による除去効率が表-2の中で最小の $-\text{Log}_{10}(f_2)=0.6$ である場合、下水処理においては $-\text{Log}_{10}(s_1)>1.9$ を満たす除去効率が、この二都市間での感染リスクの減少のために要求されることが分かる。

また比較のために、河川のウイルス濃度が1[個/L]の場合における流行伝播の評価図を図-4(b)に示した。 $C=0$ [個/L]の場合には、流行伝播係数の各値を示す線はいずれもほぼ傾きを-1とする直線であったのに対して、1[個/L]の場合には下に凸の曲線を描いている。すなわち、 $C=0$ [個/L]の場合には浄水処理と下水処理は同程度に流行伝播の防止に寄与するのに対して、 $C=1$ [個/L]になると、特に下水処理による除去効率が高い領域においては、下水処理より浄水処理の方により敏感に流行伝播は影響を受けるようになる。この河川のウイルス濃度が流行伝播に及ぼす影響については、次節にて論ずることとする。

(a) $C_0=0$ [個/L]の場合



(b) $C_0=1$ [個/L]の場合

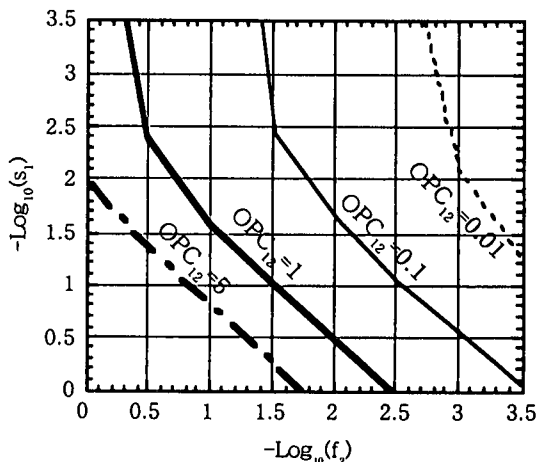


図-4 浄水および下水処理によるポリオウイルス除去効率が流行伝播に及ぼす影響。ただし河川流量は $Q_0=1 \times 10^4$ [$\text{m}^3/\text{日}$]である。

(3)河川のウイルス濃度による影響

河川からの腸管系ウイルスの検出例は各地より報告されており、その濃度はおおよそ 10^{-2} から 10^0 [個/L]程度とみなすことができる^{14)~15)}。腸管系ウイルスはヒトの腸管においてのみ増殖可能であるため、これらの報告事例は、本研究で想定したような下水処理水による水域の病原微生物汚染が日常的に少なからず発生している証拠とみなすことができる。そこで、バックグラウンドとしての河川のウイルス濃度を0.01, 0.1, 1, 10 [個/L]と変化させ、そのときの流行伝播係数が1となるような浄水および下水処理による除去効率の組み合わせを調べた。その結果を図-5に示すが、前述の通り、特に下水処理による除去効率が高い領域において、河川のウイルス濃度による影響が顕著に表れている。この影響は以下のよ

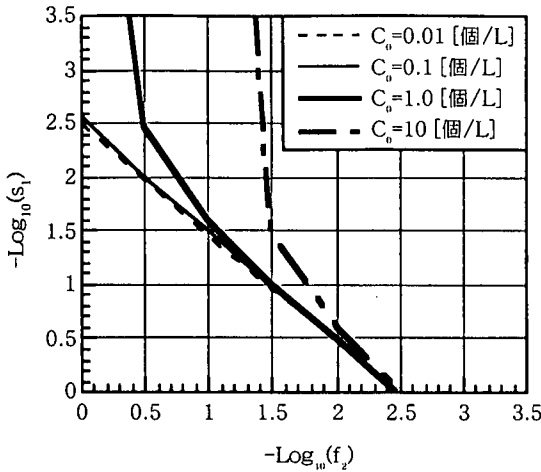


図-5 河川のウイルス濃度が流行伝播に及ぼす影響. 図中の各線は, 流行伝播係数が1となるような浄水, 下水処理におけるポリオウイルス除去効率の組み合わせを示している. ただし, 河川流量は $Q_0=1 \times 10^4$ [m³/日]である.

うに考察される.

図-5より, 都市1の下水処理による微生物除去効率が $-\text{Log}_{10}(s_1)=0$ の場合, 河川のウイルス濃度に関わらず $\text{OPC}=1$ を満足させるためには, 都市2において除去効率が $-\text{Log}_{10}(f_2)>2.5$ となる浄水処理が必要とされる. このとき, 放流水のウイルス濃度は式(2)と式(3)より $C_{1,\text{out}}=3.3 \times 10^2$ [個/L]と算出される. この濃度は, 設定された河川のウイルス濃度 $0.01 \sim 10$ [個/L]より少なくとも10倍大きいので, 放流量と合流前の河川流量の比 $E_1: (Q_0-I_1) = 3:7$ (∵ 仮定より, $I_1=E_1=3 \times 10^3$ [m³/日]である)を考慮しても, 合流後の河川のウイルス濃度は放流水の濃度に依存しているとみなすことができる. したがって, 河川のウイルス濃度に関わらず, 都市2で必要とされる浄水処理のレベルは一定となるのである. また図-5において, $C_0=0.01$ および 0.1 [個/L]の場合の軌跡は, 浄水および下水処理による除去効率の合計がほぼ $10^{-2.5}$ を満たす直線となっており, これは図-3(a)に示した $C_0=0$ [個/L]の条件下での直線と一致する. つまり, 本論文で想定したケースでの流行伝播は, 0.1 [個/L]程度よりも低い河川ウイルス濃度には全く影響を受けないことが分かる. 一方, $C_0=1.0$ または 10 [個/L]の場合には, 除去効率の合計はもはや $10^{-2.5}$ では十分でなく, 特に $C_0=10$ [個/L]の場合には都市1での下水処理のレベルに関わらずに, 都市2では $-\text{Log}_{10}(f_2)=1.5$ 程度の浄水処理が要求される. これは, 下水処理による除去効率が十分に高い場合には, 放流水よりも河川のウイルス濃度が卓越することによる. すな

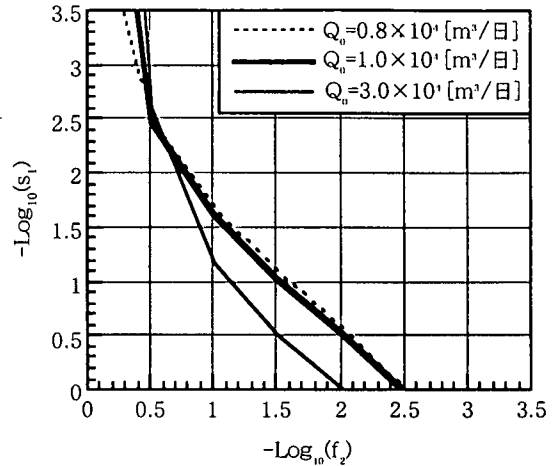


図-6 河川流量が流行伝播に及ぼす影響. 図中の各線は 流行伝播係数が1となるような浄水, 下水処理におけるポリオウイルス除去効率の組み合わせを示している. ただし, 河川のウイルス濃度は $C_0=1$ [個/L]である.

わち, この場合に都市2の浄水処理に必要とされている $-\text{Log}_{10}(f_2)>1.5$ を満たすウイルス除去は, 放流水に由来するものではなく河川由来のウイルスのために必要な除去と言える.

(4)河川流量による影響

これまでの試行では, 河川流量を $Q_0=1.0 \times 10^4$ [m³/日]と設定してきたが, このとき1万人の人口を抱える都市1での取水量は $I_1=3.0 \times 10^3$ [m³/日]であることより, 実に河川流量の30%を水道水源として取水していることになる. この仮定は大流量を誇るミシシッピ川や長江においては不適當であるが, 我が国のように小河川の流域に人口が密集しているようなケースでは珍しい数値ではない.

図-6に, 河川流量が 0.8×10^4 , 1.0×10^4 , 3.0×10^4 [m³/日]の場合における, 流行伝播係数が1を満たすような除去効率の組み合わせを示す. このとき, 河川流量に対する都市1での取水量の割合はそれぞれ37, 30, 10%となる. 河川に占める放流水の割合が高くなるほど, 河川水は放流水の水質の影響を強く受けるようになるため, 放流水にはより高い水質レベルが要求される. このことは, 図-6からも明らかであり, 都市1での下水処理によるウイルス除去効率が $-\text{Log}_{10}(s_1)<2.5$ の場合には, 河川流量が減少するにつれて(すなわち, 放流水の割合が高くなるにつれて), 都市2での浄水処理で必要とされる除去効率は高くなる. これに対し, 下水処理によりウイルスが $10^{-2.5}$ よりも高い効率で除去された場合には, 河川

流量が少ないほど、浄水処理で必要とされる除去効率は低くなる。これは、下水処理の高いウイルス除去効率により放流水のウイルス濃度が河川の濃度よりも低いレベルまで抑えることができたためであり、このとき河川のウイルス濃度は放流水によって希釈されることになる。

4. 結論

本論文では、河川流域内で隣接する二都市間で構成される家庭→下水→河川→上水(飲料水)→家庭という水利用の流れに着目し、この経路を介して水系感染症が都市から都市へと伝播する危険性を評価するための流行伝播モデルの開発を行った。このモデルには、流域を特徴づける因子として、二つの都市の人口と年齢構成分布、河川の流量と病原微生物濃度がそれぞれ考慮されており、浄水および下水処理による微生物除去効率を設定した場合に、二都市間における感染者数(あるいは感染リスク)の増減を予測することが可能となった。

また、ここで開発された流行伝播モデルを用いた流行伝播の予測結果をもとにして、流域内二都市間での水系感染症の流行伝播の判定基準として流域管理に役立つ流行伝播係数(OPC)の提案を行った。特に $OPC=1$ は、二都市間における感染リスクの増減の傾向を決定する境界値という意味で重要である。

さらに、河川流量と微生物濃度をパラメータとして変化させて流行伝播シミュレーションを行った結果より、流行伝播防止のために必要とされる浄水および下水処理による微生物除去効率の組み合わせは、これらの因子により強く影響を受けることが明らかとなった。このことは、対象とする流域によって流行伝播の様子が大きく異なることを意味しており、衛生学的な観点からの流域管理のためには、今後、ここで開発されたモデルを利用したより詳細な伝播予測が必要であることを示唆している。

謝辞：本研究は財団法人科学技術振興事業団戦略的基礎研究事業から一部助成を受けたことを報告いたします。

参考文献

1) 田口勝久, 田口真: 公衆衛生における下水道の重要性, 下水道協会誌, Vol. 32, No. 387, pp. 4-7, 1995.

- 2) M. Kukkula, L. Maunula, E. Silvennoinen and C.-H. von Bonsdorff: Outbreak of viral gastroenteritis due to drinking water contaminated by norwalk-like viruses, *J. Infectious Disease*, Vol. 180(December), pp. 1771-1776, 1999.
- 3) 渡部徹, 福士謙介, 大村達夫: 病原微生物に汚染された水道水摂取による感染症集団発生モデルの開発, 土木学会論文集, No. 650/VII-5, pp. 25-32, 2000.
- 4) Regli, S., Rose, J. B., Haas, C. N. and Gerba, C. P.: Modeling the risk from Giardia and viruses in drinking water, *J. AWWA*, Vol. 83, No. 11, pp. 76-84, 1991.
- 5) Gerba, C. P., Rose, J. B., Haas, C. N. and Crabtree, K. D.: Waterborne Rotavirus: A risk assessment, *Wat. Res.*, Vol. 30, No. 12, pp. 2929-2940, 1996.
- 6) 茂庭竹生: 上下水道工学, コロナ社, 1985.
- 7) Cooper, R. C., Olivieri, A. W., Danielson, R. E., Badger, P. G., Spear, R. C. and Selvon, S.: Assessment of risk associated with water-related infectious agents, Infectious agent risk assessment water quality project, Vol. 1, *UCB/SEEHRL Report*, No. 84-4, 1984.
- 8) Haas, C. N. and Rose, J. B.: Distribution of Cryptosporidium oocysts in a water supply, *Wat. Res.*, Vol. 30, No. 12, pp. 2251-2254, 1996.
- 9) Haas, C. N.: Estimation of risk due to low doses of micro-organisms: A comparison of alternative methodologies, *American J. Epidemiol.*, Vol. 118, No. 4, pp. 573-582, 1983.
- 10) 飯田広夫: 感染症, 理工学社, 1981.
- 11) Payment, P. and Franco, E.: 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.
- 12) Havelaar, A. H., Olphen, M. V. and Schijven, J. F.: 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.
- 13) Payment, P.: Elimination of coliphages, clostridium perfringens and human enteric viruses during drinking water treatment: Results of large volume sampling, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 24, No. 2, pp. 213-215, 1991.
- 14) Johl, M., Kerkmann, M.-L., Kramer, U. and Walter, R.: Virological investigation of the river Elbe, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 24, No. 2, pp. 205-208, 1995.
- 15) Havelaar, A. H., Olphen, M. V. and Dorst, Y. C.: F-specific RNA bacteriophages are adequate model organisms for enteric viruses in fresh water, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 59, No. 9, pp. 2956-2962, 1993.

(2000. 5. 11 受付)

DEVELOPMENT OF PROPAGATION MODEL ON OUTBREAK OF WATERBORNE INFECTIOUS DISEASES BETWEEN TWO CITIES IN THE WATERSHED

Toru WATANABE and Tatsuo OMURA

When an intestinal infectious disease is outbroken in a city, the water environment receiving the effluent from the wastewater treatment plant in the city will be polluted by the pathogen without the appropriate treatment. In such cases, there is possibility that the outbreak of waterborne infectious disease occurs in other cities using the water environment as the source of drinking water. In this paper, the propagation model on outbreak of waterborne infectious diseases between two cities in the watershed was developed taking some factors (pathogen removal efficiencies by water and wastewater treatments, the river flow rate, the pathogen concentration in the river, and so on) into account. The outbreak propagation coefficient (OPC) was very available for the watershed management from the viewpoint of public health.