

## バイオトイレにおける病原微生物二次感染リスクの間接暴露評価

### Indirect exposure assessment on secondary infection of pathogenic microorganisms in biological toilet

中川直子・大瀧雅寛

Naoko NAKAGAWA and Masahiro OTAKI

(お茶の水女子大学・人間文化研究科・ライフサイエンス専攻)

#### 1. はじめに

水を使わず資源回収が可能なバイオトイレが注目され始め、山岳地域や放流規制の厳しい地域で使われている。下水道設備を必要とせず、ポータブルであることから介護用トイレとしても利用されている。しかし、水洗トイレと異なり、排泄物を生活環境内にとどめておくため、病原微生物の二次感染について留意する必要がある。そこで本研究ではバイオトイレの衛生学的安全性を調べるため、二次感染リスク評価を行ってきた。今回はその中で病原微生物の間接暴露評価について述べる。

#### 2. 間接暴露評価のシナリオ設定

バイオトイレを使用する際に病原微生物に暴露する場合を直接暴露ケース（直接担体に接触し、誤ってその中に含まれる病原微生物を摂取する等）と間接暴露ケース（病原微生物が入ったまま庭にまかれた残渣物が地中を通過して井戸水などに入り、それを飲むことで病原微生物を摂取する等）に分けて考えた。直接暴露ケースのリスク評価に関しては以前に述べている<sup>(1)</sup>。評価方法の手順は直接暴露ケースの評価方法と同様だが、今回問題となる病原微生物はTable1-1に示すような4種類の腸管系細菌、ウイルスをとりあげた。また間接

暴露ケースのリスク評価をするにあたり、地下涵養ケースをとりあげ、シナリオを次のように設定した。

#### 地下涵養ケースシナリオ

郊外の一軒家でバイオトイレを使用しており、庭の隅には井戸がある。病原微生物の入った残渣物が庭にまかれ、残渣物の中の病原微生物は地中を通過して地下水層に達し、井戸水の中に混入する。この一軒家ではこの井戸水を消毒せずに飲んでいると仮定した (Fig 1-1)

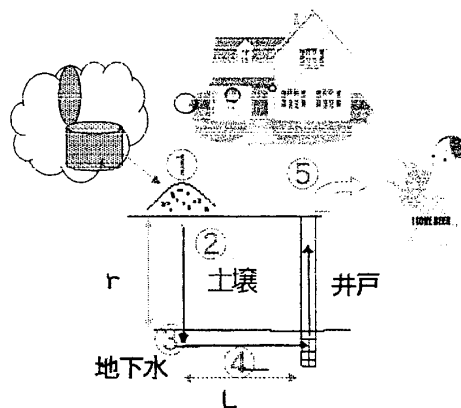


Fig1-1 Scenario for indirect exposure assessment

#### 3. モンテカルロシミュレーションによる、年間感染リスク計算

間接暴露の場合の年間感染リスク計算にはモンテカルロ法を使用した。モンテカルロ法とは数式モデルの解析解を得る事が困

難な場合に、乱数を発生させ現象のモデルを適用させて現象の様子をシミュレーションして調べようとするものである。

#### 4. 地下涵養ケースにおける病原微生物の中間過程の考察

残渣物中の病原微生物が庭にまかれて摂取されるまでの病原微生物の中間過程としてFig1-1に示すような①～⑤の過程を考慮した。初期微生物濃度（庭にまかれた残渣物中の病原微生物濃度）を $C_0$ 、 $i$ 番目の過程から出てくる微生物濃度を $C_i$ とすると、以下の式が得られる。

$$C_1 = f(C_0, y_1(1), y_2(1), \dots)$$

$$C_2 = f(C_1, y_1(2), y_2(2), \dots)$$

・

$$C_6 = f(C_5, y_1(5), y_2(5), \dots)$$

（それぞれの過程における関数 $f$ はそれぞれ異なっている）。

以下に各過程の計算について順に説明する。

##### ① 病原微生物初期値 $C_0$ の設定

シミュレーションに用いた病原微生物初期値  $C_0$  に関してはバイオトイレの残渣物に残っている病原微生物の量としTable1-1中に示される1グラムの糞便中の病原微生物濃度を参考にし、平均値と標準偏差を設定した対数正規分布とした。そして1回の糞便量を150g、バイオトイレの担体を40kgとし、保菌者からバイオトイレに排出された150gの糞便は分解されて中の病原微生物は40kgの担体といっしょに庭にまかれると考え、微生物初期値は

$$C_0 = (\text{各病原微生物の対数正規分布}) \\ \times 150 / (40 \times 1000)$$

とした。バイオトイレ中の熱処理によって

Table1-1 Characteristics of pathogenic microorganisms

病原微生物の種類	症状	1グラムの糞便中の濃度
腸管系細菌		
サルモネラ菌	サルモネラ症、胃腸炎	$10^7 - 10^{11}$
赤痢菌	細菌性赤痢、胃腸炎	$10^7 - 10^9$
腸管系ウイルス		
エンテロウイルス	麻痺、無菌性髄膜炎など	$10^2 - 10^{3.5}$
ロタウイルス	胃腸炎、小児下痢	$10^{10}$

菌数が減ることを考慮にいれ、バイオトイレ内での病原微生物除去率を入力できるようにした（つまり対数正規分布の平均値を可変にした）。

##### ② 飽和層での土壌への吸着

庭にまかれた残渣物が不飽和層を通過する際に中の病原微生物が土壌に吸着されることを考慮に入れ、不飽和層を通過したあとの菌数を次式で表した。

$$C_1 = C_0 \times 10^{-0.007 \times 10/3r}$$

（ $r$ :不飽和層の長さ）

ここで0.007という数字はカルフォルニアでの浄化槽におけるウイルスのろ過テスト（土壌浸透）より得た値である<sup>(3)</sup>。単位が1フィートあたりになっていたことからこれを1メートルあたりに換算するため10/3を乗じた。また $r$ の値に関しては、東京近郊の地下水面の高さを調べ、ここでは $r = 60$ を入力した<sup>(4)</sup>。

##### ③ 地下水層流入時の希釈

微生物が土壌中から地下水に入るとき、微生物濃度は薄められる。この時

$$C_1[\text{g}] \rightarrow C_2 = C_1/b[\text{ml}] \\ = C_1/10^3b[\text{l}]$$

ここで $b$ :希釈定数

となるとして $C_2$ の値を計算した。ここで希釈定数 $b$ の値は最小値1、モード10、最大値20の三角分布に従うとした<sup>(5)</sup>。

##### ④ 地下水中で不活化

飽和地下水での病原微生物の不活化を考慮にいれ、

$C3 = \epsilon C2$   
 としてC3を計算した。 $\epsilon$ は不活化率で  
 $\epsilon = 10^{-k10t}$   
 ここで  $t$  : 地下水中での経過時間  
 $k10$  : 不活化係数の常用対数値  
 で表される。

$t$ の値を考慮するにあたり、地下流速を0.3(m/day)、Fig1-1に示すように井戸までの地下水の距離をL mとして  $t = L / 0.3(\text{day})$ とした (Lは可変にした)。また、不活化係数の常用対数値  $k10$  はパラメータ  $\mu = -2.07$ 、 $\sigma = 0.754$  の対数正規分布に従うとした<sup>(5)</sup>。

④ 井戸水摂取量

井戸水摂取量に関しては2000年に本研究室でアンケート調査を行ったことがある。そこでそのデータ結果の解析を行なった結果、一人一日あたりの井戸水摂取量は平均0.232(L/day)の対数正規分布( $\mu = -1.95$ 、 $\sigma = 1.21$ )に従うとなったのでこれを用いた。そのデータ解析の詳細について以下に述べる。

④-1 井戸水飲料量のデータ解析

病原微生物の水系感染リスクが最も高い飲用水として、加熱処理をしていない、いわゆる生水を想定して、2000年にアンケートによる飲用水量調査を日本全国を対象に行った。859人を対象にしたものである。その中で井戸水の摂取量の生データを解析して、リスク評価にとりいれた。

④-2 データの解析方法

まず、井戸水摂取量のデータを度数分布表にした。0(mL)摂取が859人中823人いたのでこれは井戸を全く使用していないとして解析対象から除き、残り36件のデータを解析対象とした。

つぎに、36件分のデータをヒストグラムにまとめた (Fig4-1)。生データは1週間分の飲料量となっていたので7で割って1日あたりの飲料量に換算した。一日あたりの飲料量の算術平均値232.2 (mL)、最大値2207.1 (mL)、最小値7.1 (mL)だった。

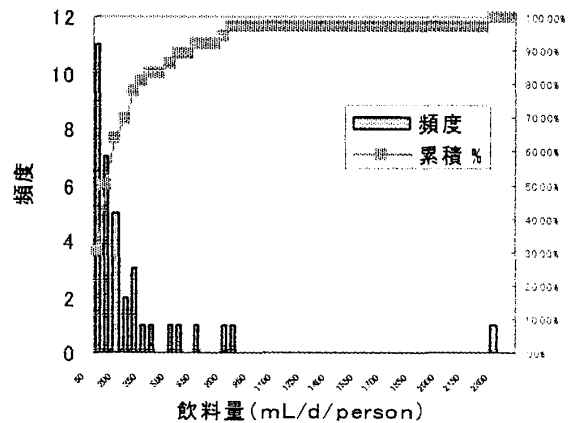


Fig4-1 Histogram and cumulative frequency of average daily water intake from wells

④-3 最尤法による井戸水飲料量分布形の推定

最尤法 (maximum likelihood method) とは尤度関数  $L(\theta)$  を最大にするパラメータ  $\theta$  を推定値や推量値とするものである。

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$$

この関数を最大にする値が最尤推定関数となる。また、 $-2 \ln L(\theta)$  を  $\chi^2$  乗分布にあてはめて検定することができる。

まず井戸水飲料量分布がどのような確率分布になっているのかを推定した。通常、飲料分布は対数正規分布に従うといわれているが、正規分布、ポアソン分布についても検討した。各確率分布の関数を下記に示す。

対数正規分布

$$f(x) = 1 / \sqrt{2 \pi \sigma} \exp\{-(\ln x - \mu)^2 / 2 \sigma^2\}$$

正規分布

$$f(x) = 1/\sqrt{2\pi\sigma^2} \exp\{-(x-\mu)^2/2\sigma^2\}$$

ポアソン分布

$$f(x) = e^{-\lambda} \lambda^x / x!$$

#### ④-4 最適パラメータの決定

計算しやすいように  $L(\mu, \sigma)$  の対数  
をとり、

$$\begin{aligned} \ln L(\mu, \sigma) &= \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; \mu, \sigma) \\ &= \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \mu, \sigma) \end{aligned}$$

を考える。  $\ln L(\theta)$  が最大になるため  
には  $\ln L(\theta)$  を  $\mu, \sigma$  についてそれぞ  
れ偏微分したものが 0 となればよいと考  
えた。例えば対数正規分布の場合、

$$\partial \ln L(\theta) / \partial \mu = 0$$

を満たすような  $\mu$  を計算すると

$$\mu = 1/n \sum \ln(x_i) \quad \dots \textcircled{1}$$

$\sigma$  についても同様にして

$$\sigma^2 = 1/n \sum (\ln(x_i) - \mu)^2 \quad \dots \textcircled{2}$$

となる。他の正規分布やポアソン分布の最  
適パラメータも同様に偏微分することによ  
って算出した。

#### ④-5 各確率分布と調査データ

①と②の式にデータ値を入れるにあたり、  
こんどはデータの刻み幅を 10(mL) 分割で  
36 件のデータを度数分布表にした。そして  
それぞれのデータ値を①と②式にいれると、  
対数正規分布の場合、パラメータの値は

$$\mu = 4.69(\text{mL 単位, L 単位では } -1.95)$$

$$\sigma = 1.21$$

となった。正規分布、ポアソン分布に関し  
ても同様にして最適パラメータ値を入力し  
た。

このようにして求めた各確率分布と調査  
データを Fig4-2 に表す。図より一見して対  
数正規分布が最も調査データに合っている  
ことがわかる。

#### ④-6 対数正規分布の調査データに対する 適合度検定

対数正規分布の調査データに対する適合  
度検定を行うため、累積確率をもとに、対  
数正規分布の調査データに対する尤度比検  
定を行った。

帰無仮説  $H_0$  :

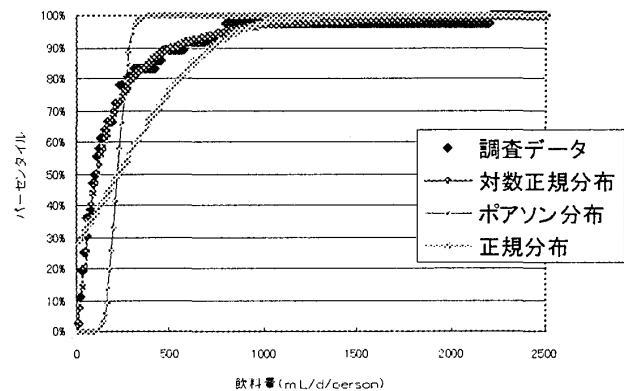


Fig4-2 Survey data of well water intake  
and each probability distributions

井戸水飲料量を表す分布として、対数正  
規分布は適当である。

調査データの尤度関数  $L_a$  と対数正規分  
布の尤度関数  $L_b$  を計算することにより、  
 $\chi^2$  検定に使う  $-2 \ln(L_b/L_a)$  を計算  
すると、

$$\begin{aligned} &-2 \ln(L_b/L_a) \\ &= -2 (\ln L_b - \ln L_a) \\ &= -2 \times (-31.7 - (-31.2)) \\ &= 1.0 \end{aligned}$$

これを自由度 2 (パラメータの差) の  $\chi^2$   
分布にあてはめ、有意水準 0.05 で検定する  
と、

$$\chi^2_{0.05}(2-0) = 5.99$$

$$\chi^2_{0.01}(2-0) = 9.21$$

であり、有意水準 0.01 でも 0.05 でも帰無  
仮説  $H_0$  は棄却されない。よってこの対数正

規分布は井戸水飲料量を表す分布として適当であるといえる。なお、これらの解析はMicrosoft社のExcelを用いて行った。

5. 年間感染リスクの計算

上記①から⑤までの過程を考慮にいれ、モンテカルロシミュレーションを行った。地下水中から井戸に入る病原微生物数を計算した後、これを一日あたりの井戸水摂取量とかけあわせることで、一日あたりの病原微生物摂取量を算出した。上記4種類の病原微生物の容量反応モデルとそのパラメータは直接暴露の時と同じである<sup>(1)</sup>。4種類の病原微生物の一日あたりの病原微生物摂取量をそれぞれの病原微生物の容量反応モデルに入れることにより一日あたりの病原微生物感染リスクを算出した。試行回数はそれぞれ1000回とした。例えばFig5-1はバイオトイレの除去率を5log(除去率

$n \log$ とは $n = \log_{10}$ (残存濃度/投入濃度)を示す)、Fig1-1に示すように残渣物がまかれた場所から井戸までの距離L=5(m)の時の一日あたりの病原微生物感染リスクの1000回中の頻度分布である。この場合、感染リスクPの平均値は $2.7 \times 10^{-2}$ となった。このPをもとに、バイオトイレに病原微生物は7日間排出されると仮定して

年間感染リスク =  $1 - (1 - P)^7$   
 但し P : 一日あたりの病原微生物感染リスクの平均値P

とした。サルモネラ菌に関してバイオトイレ内での除去率を1~11log、Lを5,10,15,20(m)とふってそれぞれの場合の感染リスクを計算した結果をFig5-2に示す。バイオトイレ内での除去率が大きくなるにつれ、感染リスクは低くなっていることがわかる。また、距離Lが大きくなるにつれ、

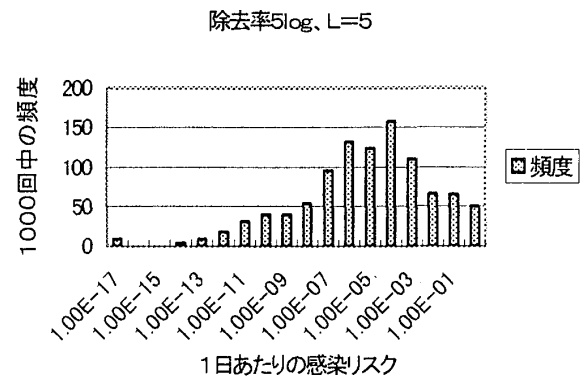


Fig5-1 Daily risk of infection by pathogenic microorganisms

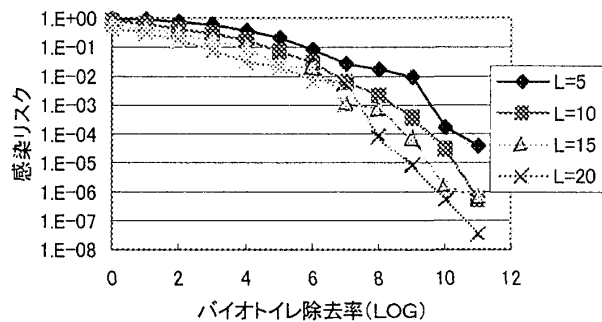


Fig5-2 Annual risk of infection with salmonella spp.

リスクは低くなっている。また、水系の感染リスクを考える場合、通常、年間リスク $10^{-4}$ が安全レベルといわれているが、グラフよりこれを達成するためには例えばバイオトイレ内の除去率8log、L=20(m)程度なければならないことが言える。このことはバイオトイレの設計や残渣物を廃棄する場所の目安をリスクの見地からたてられることを表している。

また、他の3種類の病原微生物に関して同様に年間リスクを計算した結果をFig5-3に示す。サルモネラ菌、赤痢菌、ロタウイルスは容量反応モデルがベータ関数で表されるのでバイオトイレ内での除去率やLに

関しても似たような傾向を示すが、中でもロタウイルスは感染力が高い（保菌者からの1g中の糞便濃度も高く容量に対するリスクも高い）ので、Lの影響をあまり受けないといえる。一方エンテロウイルスは容量反応モデルが対数正規分布なのでY軸を対数軸にすると一次関数になっている。他の3種類の病原微生物と比べるとバイオトイレの除去率が0でも井戸が近くても感染リスクは高くはないが、除去率を上げて井戸までの距離を離しても感染リスクは低減されない病原微生物であるといえる。

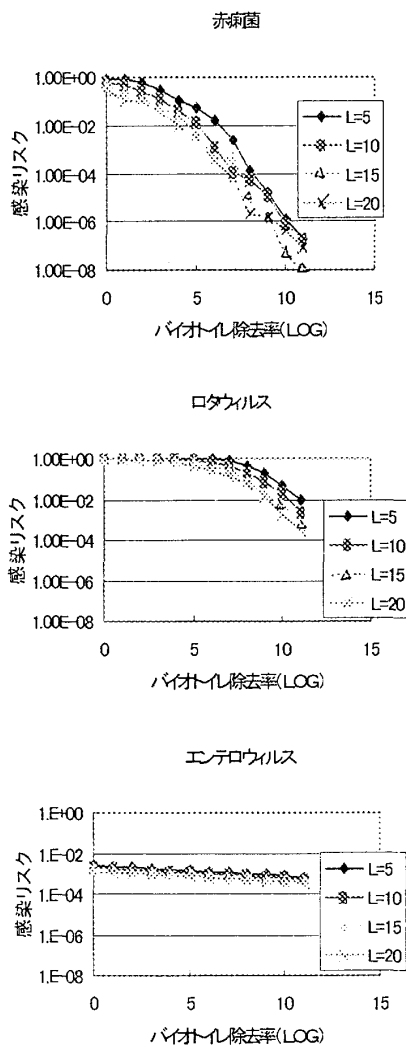


Fig5-3 Annual risk of infection with other pathogenic microorganisms

またバイオトイレの除去率を上げた時の病原微生物の残存性に着目すると、細菌よりもウイルスの方が残存性が高いといえる。直接暴露の際にも同じ傾向が見られた。つまり、バイオトイレの病原微生物感染リスクに関しては細菌よりもウイルスの方が問題になると考えられる。

6. おわりに

今回は病原微生物の2次感染リスク評価の中の間接暴露評価について述べた。地下涵養ケースのシナリオをたて、モンテカルロシミュレーションにより病原微生物感染リスクを評価した。その結果、以前に行なった直接暴露評価と考え合わせても細菌よりもウイルスが問題であるという知見が得られた。

参考文献

- (1) 中川直子、大瀧雅寛：生活工学研究, vol.3, No.2, 2001, pp242-245
- (2) Haas C.N., Rose J.B and Gerba C.P.: Quantitative Microbial Risk Assessment, John Wiley & Sons, Inc. 1999
- (3) Asano T., Leong L.Y.C., Tennant A. and Sakaji R.H.: Evaluation of the California waste water reclamation criteria using enteric virus monitoring data. Water Science and Technology, vol.26, No.7-8, pp. 1513. 1992
- (4) 新井 正他 共著「都市の水文環境」 pp. 125
- (5) Haas C.N., Jin Anotai, Richard S.Engelbrecht: Monte Carlo assessment of microbial risk associated with landfilling of fecal material, Water Environment Research, vol.68, No.7, pp.1123-1131. 1996