

バイオトイレにおける病原微生物感染リスク評価の適用 Application of microbial risk assessment on the biological toilet

中川直子・大瀧雅寛

Naoko NAKAGAWA and Masahiro OTAKI

(お茶の水女子大学大学院 人間文化研究科ライフサイエンス専攻)

1. はじめに

近年、介護用トイレに微生物分解型トイレ（バイオトイレ）（図1-2）が出現した。このトイレは水を使わず多孔性物質を人工土壌として微生物による好気性分解によりその場で尿尿を水と炭酸ガスに変える（図1-2）。下水道設備を必要としないためベッドのそばにおいて使用することもでき、トイレ使用者だけでなく介護する人や看護婦さんの負担も大幅に軽減できるという利点がある。¹⁾ また、窒素、リンなど湖沼、河川の富栄養化の原因物質も排出せず、処理後の残さ物も堆肥化が可能で環境的負荷が少ないという利点もある。²⁾

ところがこのバイオトイレは果たして衛生的に安全といえるのだろうか？水洗トイレはもとはといえば人から病原微生物を排除するために普及したものである。バイオトイレにおいては、尿尿を長時間にわたり滞留させるため、逆に病原体の発生源にもなりかねないと考えられる。バイオトイレを使用した場合、病原菌に感染するリスクがどのくらいあるのかという、病原微生物感染リスクアセスメントを行うことが必要と思われる。

ここではバイオトイレを使用した場合の病原微生物の感染リスク、感染ルートなどについて考察したことについて述べる。

2. 病原微生物の感染リスクアセスメントについて

飲料水や大気中等に含まれる化学物質や病原微生物の濃度が人の健康にどの程度の影響を与えるかを定量的に評価する手法のことをリスクアセスメントという。人の健康に関わる環境物質のリスクアセスメントにおけるリスクとは、人の健康にある悪影響が起こる確率として定義される。手順を以下に述べる。

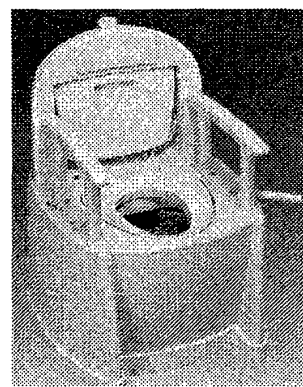


図1-1 バイオトイレ

1) リスクの原因が何であるかを明確化する。

2) リスクの原因物に人が暴露された場合に人体が受ける影響を定量的に記述する（用量・反応の評価）

3) あるシナリオでどの程度のリスク原因物の暴露を受けるのかを考える。

4) 用量をもとに用量・反応のモデルを用いてリスクの大きさを定量し、記述する。

このようなリスクアセスメントはある暴露によりどの程度のリスクが生じるかという予測的な方法に利用されるばかりでなく、逆算的に許容される汚染のレベルを決定するためにも使われる。

3. バイオトイレの感染リスクについて

上記の 1)-4) に従ってバイオトイレの病原微生物に関するリスクについて考察してみる。

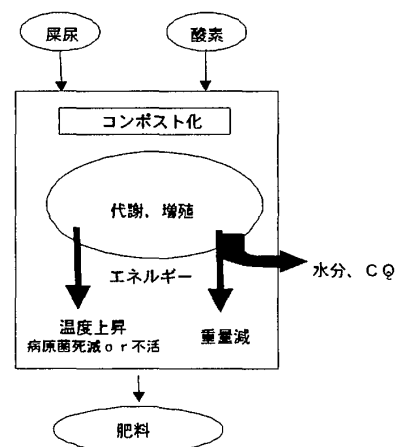


図1-2 バイオトイレの尿尿処理プロセス

1) バイオトイレに関して一番考慮しなければならないのは尿尿に由来する腸管系の細菌、原虫やウイルスであろう。

表 3-1 は尿尿中の代表的な病原微生物の種類、感染した場合の症状、感染した時に便に排出される微生物濃度についてまとめたものである。^{3), 4)}

2) 人間が暴露された病原微生物量とその人が感染、あるいは発病するリスクがどの程度であるかを微生物の暴露量、つまり用量から決定するモデルが複数提案されている。主な用量・反応モデルとして、指数モデル、ベータポアソンモデルなどがある。⁵⁾

それぞれのモデルの特徴は以下の通りである。

i) 指数モデル

シングルヒットモデルとも呼ばれている。安全性を高め設定しているモデルである。ある病原微生物がヒトに感染を引き起こす割合が不変である場合、一回の暴露による感染確率は指数モデルで与えられる。

$$P(D) = 1 - \exp(-\gamma D)$$

P: 一回の暴露で感染する確率、

D: 暴露量、つまり用量、

γ : パラメータ

パラメータ γ は病原微生物がヒトに感染する割合で、大きくなるほど感染能力が高いことを示している。

ii) ベータ分布感染確率モデル

指数モデルでは人体に取り込まれた個々の病原微生物が人に感染する能力 γ はとりこまれた量によらず一定であると仮定しているが、そのかわりに侵入した病原微生物数によって感染能力が異なると仮定したモデルである。次のように感染確率が推定できる。

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

P: 1 回の暴露で感染する確率

D: 暴露量、つまり用量

α 、 β : パラメータ

この分布は α が大きくなると指数モデルに近づく。

この他に、対数正規モデル、ロジスティックモデル、線形モデルなどがある。

これらのモデルの選択とパラメータの決

表 3-1 尿尿中の病原微生物

病原微生物の種類	症状	1 グラムの糞便中の濃度
原虫		
クリプトスポリジウム	下痢, 胃腸炎	10^6 - 10^7
サイクロスポラ	下痢	10^6 - 10^8
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	10^3 - 10^{10} ^a
ロタウイルス	胃腸炎, 小児下痢	10^{10} ^b
アデノウイルス	胃腸炎, 結腸炎	10^{12} ^b
腸管系細菌		
サルモネラ菌	サルモネラ症, 胃腸炎	10^4 - 10^{11}
赤痢菌	細菌性赤痢, 胃腸炎	10^6 - 10^9
回虫	回虫症, 消化・栄養摂取障害	10^4 - 10^5

a Cell culture assays

b Electron microscope observations of viral particle

定は疫学的あるいはボランティアなヒトに対する実験データをもとに暴露された全員の人数に対するその時に実際に感染した人の比率のデータが最も適合するように決定される。

これらのモデルをもとに代表的な腸管系微生物用量と反応の関係をグラフ化したものを図 3-1 に示す。ここでの計算には表 3-2 に示すように Haas ら, Rose ら, Regli らによって決められたパラメータの値を用いた。

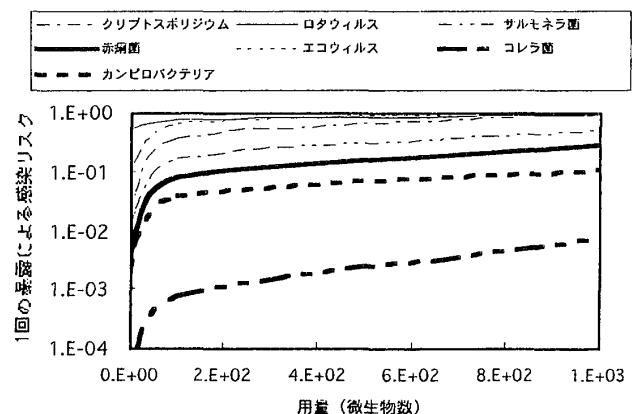


図 3-1 病原微生物の用量・反応モデル

表 3-2 モデルのパラメータ

病原微生物の種類	モデル型	モデルのパラメータ		
		α	β	γ
クリプトスポリジウム	指数関数			0.00467
ロタウイルス	ベータ関数	0.232	0.247	
サルモネラ菌	ベータ関数	0.33	139.9	
赤痢菌	ベータ関数	0.16	155	
エコウイルス	ベータ関数	1.3	75	
コレラ菌	ベータ関数	0.097	13020	
カンピロバクテリア	ベータ関数	0.039	55	

3) バイオトイレを使用している場合、ヒトが病原微生物に暴露するのはどのような場合があるのだろうか？

i) 処理槽内に直接手でふれるなどして手

→口の経路で体内にとりこまれる直接感染。

ii) バイオトイレ内で熱処理された後に残る残さ物の中に病原微生物が残っているならば、バイオトイレ(熱処理)→土壌→地下水→河川→浄水処理→生水摂取(暴露)という経路で病原微生物は人間の体内にとりこまれる可能性がある。

iii) 腸管系微生物の中にはエアロゾルによる感染も存在するといわれている。それならばバイオトイレのふたを開けたままにしておくだけで感染することもあるかもしれない。

これらの中で一番感染リスクが高いと思われるのは i) の場合である。そこでここでは i) の直接感染についてのみ考察してみる。

処理槽内に直接手でふれるというケースはどのような場合におこるのだろうか？

介護する人などがバイオトイレのそうじやメンテナンス時、3世代でいっしょに住んでいる家庭などで乳幼児や幼児が誤って手を触れる時など、いろいろなケースが考えられるだろう。いずれにしろ、そこで排出した保菌者 A から暴露者 B への2次感染がおきるわけである。

ここでは保菌者 A がバイオトイレを使用した後に表 3-1 にもあるように腸管系病原微生物のひとつであるサルモネラ菌を排出し、そのあとでバイオトイレを掃除する B がサルモネラ菌を暴露するというシナリオのもとにバイオトイレの感染リスクを考えてみることにする。

4) 実際に感染リスクの計算をしてみる。
本来ならばバイオトイレ内でのサルモネラ菌の経時変化は実際にバイオトイレに菌を投入して調べてみるのがいいのだが、ここでは文献検索してコンポスト内でのサルモネラ菌の経時変化のデータを用いた。⁶⁾ バイオトイレとコンポストでは基質(微生物にとって栄養となる物質)が異なるが温度に対する感受性は似たような傾向を示すと思われる。また表 3-1 より、サルモネラ菌に感染した場合の保菌者の排出量は 10^4 — 10^{11} となっているのでこの文献値をそのまま適

用できると考えた。各温度でのサルモネラ菌の経時変化を図 3-2 に示す。微生物の増殖・死滅は理論的には一次反応的に起こるとして

$$\ln(x/x_0) = \mu t \quad \cdots \textcircled{1}$$

x : 微生物濃度

x_0 : 初期微生物濃度

μ : 病原微生物増殖・死滅速度

t : 時間

と表されるので直線近似して μ の値を求めると、

$$\mu(T=20-30^\circ\text{C}) = -0.29$$

$$\mu(T=45-50^\circ\text{C}) = -0.56$$

$$\mu(T=60^\circ\text{C}) = -6.0$$

となった。つまり、保菌者 A がサルモネラ菌を排出した後、バイオトイレ処理槽内の温度によって中のサルモネラ菌数は図 3-2 のような経時変化をしていると仮定する。

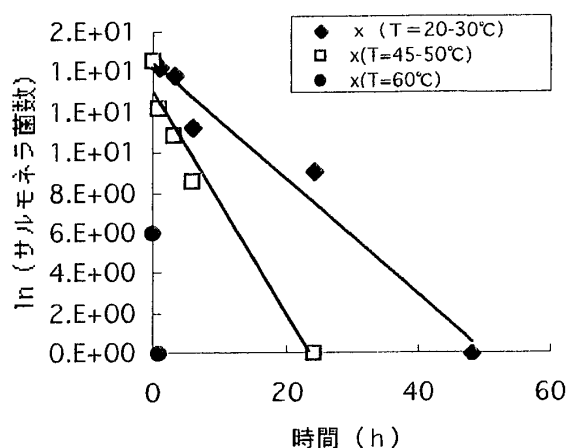


図 3-2 サルモネラ菌の経時変化

一方、B が掃除をしたときにサルモネラ菌を暴露する量はどのくらいの菌数であろうか？これも実際に何人かに行ってもらい、掃除のときにどのくらいの量が手につくかなど、データをとるべきであるが、ここでは B が掃除をしたときの暴露量としてそのときにバイオトイレ内に存在する菌数の $1/10^2$ 、 $1/10^3$ 、 $1/10^4$ 、 $1/10^5$ 、 $1/10^6$ の 5 通りを考え暴露量のレンジを広くとった。つまり

$$\text{暴露量 } D = x/10^2, x/10^3, x/10^4, x/10^5, x/10^6 \quad \cdots \textcircled{2}$$

図 3-1 の中でサルモネラ菌に着目すると、

サルモネラ菌はベータ関数

$$P(D)=1-[1+(D/139.9)]^{-0.33} \quad \dots \textcircled{3}$$

P: 1 回の暴露で感染する確率

D: 暴露量、つまり用量

で表されたので

①、②、③より、バイオトイレに関してサルモネラ菌保菌者 A が排出した後に非保菌者 B が t 時間後に処理槽内に手をふれるなどしてサルモネラ菌に暴露した時の B の受ける二次感染リスクは例えば $D=x/100$ の時

$$P(t)=1-[1+(x_0 \times \exp(\mu t)/13990)]^{-0.33}$$

ここで

x_0 : 保菌者 A が排出したサルモネラ菌数
(ここでは文献値より 2×10^6 としている)

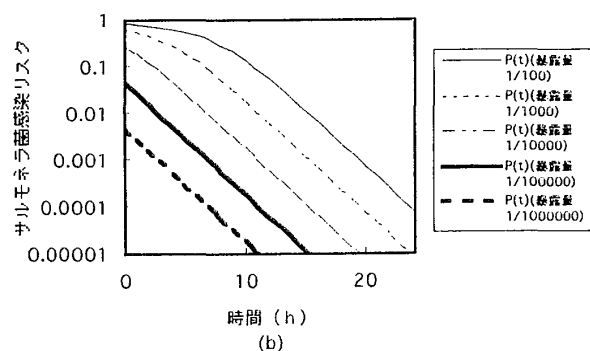
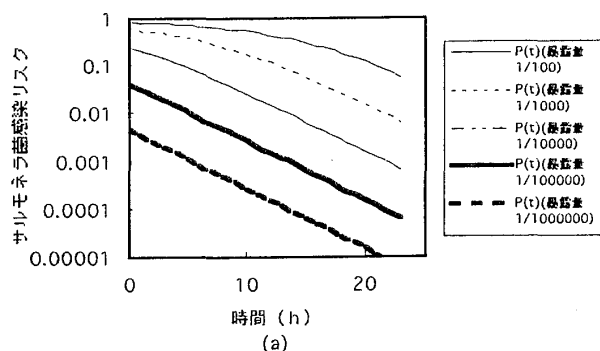
μ : 病原微生物死滅速度

図 3-2 より μ ($T=20-30^\circ\text{C}$) $= -0.29$

μ ($T=45-50^\circ\text{C}$) $= -0.56$

t: 時間

で表される。このようにしてそれぞれ 5 通りの暴露量について B がうける感染確率を $T=20-30^\circ\text{C}$ 、 $T=45-50^\circ\text{C}$ の場合で μ を変えて計算し、図 3-3 に示した。



また、この式は表 3-2 における α 、 β の値を変えることによって他の病原微生物にも適用でき、例えばクリプトスポリジウムなどベータ関数以外の関数に従う病原微生物にも適用できると思われる。

4. おわりに

バイオトイレを使用した場合の病原微生物の感染リスク、感染ルートなどについて考察し、シナリオを設定してバイオトイレにおける病原微生物感染リスクを定量的に表した。

近年、畜産物の増産により、大腸菌 O-157、サルモネラ菌による食中毒、クリプトスポリジウム原虫による水道水源汚染、地下水の硝酸性窒素の増加など、家畜糞尿が原因とされる環境問題が増加している。それに対処するべく家畜糞尿の処理、利用に注目が集まり、家畜糞尿のコンポスト化の技術開発が進められている。⁷⁾ バイオトイレの病原微生物リスク評価はこうした水を用いない家畜糞尿の処理方法にも応用可能であると思われる。

今後の予定としては実際にバイオトイレに指標となる細菌やウィルスを導入し、バイオトイレ内での病原微生物の経時変化を調べる必要があると考えている。

参考文献

- 1) 石崎勝義、中川直子、大瀧雅寛、小林将也、正木晴彦、原田真一、「介護者にやさしいポータブルトイレ」福祉の町づくり研究会全国大会投稿中
- 2) 石崎勝義、正木晴彦、戸田清、上幸雄、中川直子、糸永貴範「資源循環型トイレットの可能性」土木学会環境システム研究論文集 (2000)
- 3) CHARLES N. HAAS, JOAN B. ROSE, CHARLES P. GERBA 「Quantitative Microbial Risk Assessment」
- 4) 本林秀文「有機物の農地還元による人への健康影響」都市と廃棄物 Vol. 29, No. 4, pp40-46 (1999)
- 5) 金子光美「水質衛生工学」技報堂出版
- 6) 「生物系廃棄物資源化・リサイクル技術」エヌ・ディー・エス
- 7) 崎元道男「家畜ふん尿のコンポスト化」エネルギー・資源 Vol. 22, No. 3, pp206-211 (2001)