

都市における巨大地震と豪雨による複合災害時の感染リスクに関する一考察

首都大学東京	都市環境学部	学生員	○湯浅	信平
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	中川	直子
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	河村	明
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	天口	英雄

1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖において観測史上最大規模の大震災が発生した。被災地では、下水道管がダメージを受けて下水が溢れたり、排水ができなくなったためしばらく仮設トイレを使用するなど、衛生状態の悪い中での生活を余儀なくされた。このような環境下においては、病原微生物への感染リスクが増大していると思われる。震災3日後の3月14日には国立感染症研究所が感染症のリスクアセスメント表を発表した¹⁾ことから、巨大地震発生後の感染症発症に対する危機意識が感じられる。

また、近年首都圏では頻発するゲリラ豪雨や台風被害に加え、首都直下型地震など、巨大地震発生の可能性が高まっている。つまり、巨大地震の発生により都市河川の破堤や下水道管網の壊滅的破壊が生じ、多大な時間を要する復旧時に豪雨・洪水が首都圏を襲う複合災害発生のリスクは非常に高いと考えられる。その場合、下水管からの生下水や仮設トイレ内の汚物が流出し、感染リスクは著しく増大すると予想される。さらに、都市部においては人口密度も高いため、ヒトからヒトへの感染リスクは郊外よりも高くなると考えられる。ひとたび感染症の拡大が始まると、大規模流行につながる恐れもある。

このように、巨大地震の後に豪雨・洪水に見舞われるなどの複合災害を受けると、通常時には衛生状態も良く機能性の高い都市部においても、病原微生物への感染リスクが高まると考えられる。そこで本研究では、従来より確立されている病原微生物のリスク評価手法を、巨大地震と豪雨による複合災害時に適用し、感染リスク評価を試み、その考察を行った。

2. 病原微生物のリスク評価

リスク評価とは、ある危険因子（化学物質や病原微生物）に曝露されたヒトや動物が受ける健康被害の大きさを定量的あるいは定性的に評価することと定義される。リスク評価の手法は、1970年代から1980年代にかけて、全米科学アカデミー（National Academy of Science ; NAS）が中心となって開発された。1983年に米国研究評議会（National Research Council ; NRC）がまとめた報告書では、リスク評価の手順として次の4つを挙げている。1：有害性評価（hazard assessment）、2：用量・反応解析（dose-response analysis）、3：曝露評価（exposure assessment）、4：リスクの記述（risk characterization）。

有害性評価では、リスク評価の対象である病原微生物について、症状、潜伏期間、継続期間などの感染症の特徴を記述する。また、想定される汚染源や、主要な感染経路についての調査を行う。用量・反応解析では、摂取した病原微生物の個数と結果として現れる事象との関係を定量的に示す。そして曝露評価では、あるシナリオでの1回の曝露により摂取する病原微生物数を推定する。最後に、曝露評価で得られた病原微生物の摂取量と、用量・反応解析で作成した用量・反応モデルから、対象病原微生物への曝露により生じる感染リスクを算出し、記述する²⁾。

3. 巨大地震と豪雨による複合災害時の病原微生物感染リスク評価

本研究では、病原微生物のリスク評価手法を、巨大地震と豪雨による複合災害時に適用し、前述の手順に従ってリスク評価を試みた。

1) 対象病原微生物の同定とデータの収集

本研究では、腸管系の病原微生物に着目し、感染症罹患者の糞便中濃度が高く、また比較的必要データのそろっている次の6つの病原微生物を対象とした。すなわちウイルスとしてエンテロウイルス、ロタウイルス、ノロウイルス、そして細菌として赤痢菌、サルモネラ菌、コレラ菌を対象とした。

上記6つの病原微生物について、リスク計算に必要な下水中濃度・罹患者の糞便中濃度を、文献・論文等から調べてまとめたものを表-1および表-2に示す。

キーワード 巨大地震、豪雨、複合災害、感染リスク、都市

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 E-mail : yuasa-shimpei@ed.tmu.ac.jp

2) 用量・反応解析

病原微生物の曝露量をリスクに変換するという、リスク評価の中心的なプロセスである用量・反応解析において、複数のモデルが提案されている。本研究で利用した用量・反応モデルを(1)~(3)に示す。病原微生物のリスク評価モデルは、対象微生物に対して実験結果に最もよくフィットするものが選ばれる³⁾。本研究で対象とする病原微生物に使用する用量・反応モデルとモデルパラメータをまとめたものを表-3に示す。また、それをもとに用量と反応の関係をグラフ化したものを図-1に示す。

$$\bullet \text{ 対数正規モデル} \quad P(D) = \int_0^D \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(\log t - \mu)^2}{\sigma^2}\right] dt \quad (1)$$

$$\bullet \text{ ベータモデル} \quad P(D) = 1 - [1 + (D/\beta)]^{-\alpha} \quad (2)$$

$$\bullet \text{ 指数モデル} \quad P(D) = 1 - \exp(-\gamma D) \quad (3)$$

ここに、 $P(D)$: 1回の曝露で感染する確率、 D : 曝露量(用量)、 $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \sigma$: モデルパラメータ。

図-1より、それぞれの病原微生物の特徴を述べる。まずエンテロウイルスは服用量が少ないときのリスクは比較的高いが、服用量が増えるにつれて、リスクの伸びは小さくなっている。次にコレラ菌とロタウイルスは6つの病原微生物のうちで一貫してリスクが高く、服用量が 10^{-1} 個で既にリスクが0.1程度まで上昇している。ノロウイルスは服用量が少ないうちのリスクはそれほど高くないが、リスクの伸びが大きく、服用量に対してリスクが1に到達するのが6つの病原微生物のうち最も速い。サルモネラ菌と赤痢菌は本研究で扱った病原微生物の中では、比較的服用量に対するリスクが低いことがわかる。

3) 曝露評価

巨大地震と豪雨による複合災害時の病原微生物への曝露量を仮定するため、想定されるシナリオを2つ設定した。シナリオ1: 下水管の損傷により下水が溢れていたところに洪水・内水氾濫に見舞われ、浸水時にそれを誤飲した。シナリオ2: 屋外の仮設トイレを使用していたところに洪水・内水氾濫に見舞われる。トイレ内の汚物が流出し、浸水時にそれを誤飲した。なお、シナリオ2では、仮設トイレ使用者に対象病原微生物の罹患者が1人いると仮定した(罹患者1人の糞便量は150gとした)。

表-1 病原微生物の下水中濃度

病原微生物名	濃度(個/L)	出典
エンテロウイルス	$10^{4.78} \sim 10^{6.16}$	4)
ロタウイルス	$10^3 \sim 10^5$	5)
ノロウイルス	$10^{6.96} \sim 10^{8.22}$	4)
赤痢菌	$10^3 \sim 10^4$	6)
サルモネラ菌	$10^3 \sim 10^4$	6)
コレラ菌	$10^1 \sim 10^3$	6)

表-2 病原微生物の糞便中濃度

病原微生物名	濃度(個/g)	出典
エンテロウイルス	$10^3 \sim 10^7$	7)
ロタウイルス	10^{10}	7)
ノロウイルス	$10^5 \sim 10^9$	8)
赤痢菌	$10^5 \sim 10^9$	7)
サルモネラ菌	$10^4 \sim 10^{11}$	7)
コレラ菌	$10^8 \sim 10^9$	9)

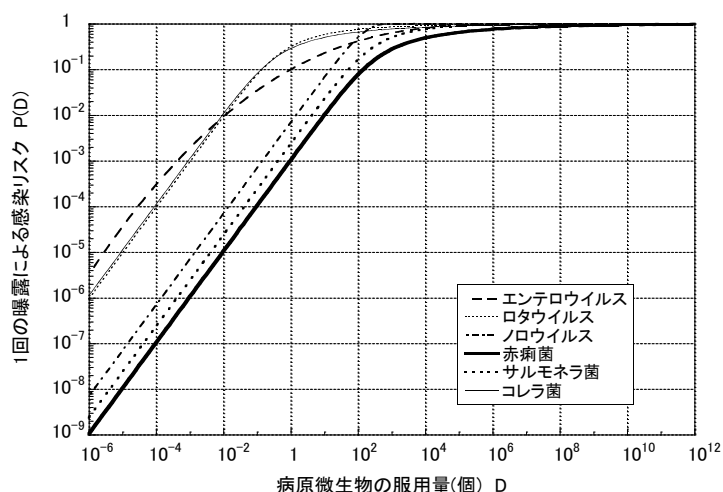


図-1 各病原微生物に対する用量と反応の関係

表-3 本研究での使用モデルとモデルパラメータ

病原微生物名	使用モデル	モデルパラメータ					出典
		α	β	γ	μ	σ	
エンテロウイルス	対数正規モデル				5.523	4.291	10)
ロタウイルス	ベータモデル	0.232	0.247				11)
ノロウイルス	指数モデル			0.0069			12)
赤痢菌	ベータモデル	0.16	155				11)
サルモネラ菌	ベータモデル	0.33	139.9				11)
コレラ菌	ベータモデル	0.164	0.149				13)

シナリオ 1, 2 の感染源は、主にヒトの排泄物である。シナリオ 1 では下水中に、またシナリオ 2 では仮設トイレの汚物内に、様々なウイルス・細菌が含まれている。それらを誤飲することにより、病原微生物に対する感染リスクが生じる。特にシナリオ 2 において、仮設トイレの利用者に感染症の罹患者または保菌者が存在した場合、感染リスクは非常に高くなると考えられる。

本研究ではシナリオ 1, 2 について、表-4、表-5 に示す条件のもとで、感染リスクが最大になると考えられる曝露設定 I と、概ね現実的と考えられる曝露設定 II~IV でのリスク計算を行った。

4. 感染リスク計算結果および考察

シナリオ 1 の感染リスク計算結果を図-2 に示す。図-2 を見ると、感染リスクが最大になると考えられる曝露設定 I ではどの病原微生物も 0.2 を越えるハイリスクとなった。しかし、ウイルスが 0.9~1 程度と非常に高いリスクであるのに対し、細菌は 0.27~0.66 程度と差が生じた。ウイルスと細菌のリスクの差は曝露設定 II~IV ではさらに顕著に現れている。この差は、病原微生物の下水中濃度に因るところが大きいと考えられる。表-1 からわかるように、ウイルスの下水中濃度は細菌に比べ高い値となっている。本研究で対象とした細菌は、近年の日本における感染症発症事例が少なく、それにともない下水中の病原菌濃度も低いのに対し、ノロウイルス・ロタウイルスは日本でも主に冬場に感染が拡大するウイルスであり、またエンテロウイルスは夏かぜの原因となるウイルスであるため、各ウイルスの下水中濃度は細菌よりも高い値となっている。そのため下水の誤飲における感染リスクは、細菌に比べウイルスがより高くなったと考えられる。

下水をそのまま誤飲するようなことは希であると思われるが、曝露設定 II~IV のリスクに注目しても、細菌のリスクは 0.01 以下のものが多いのに対し、ウイルスのリスクは依然として高い値を維持している。このことから、下水の誤飲における病原微生物の感染リスクは、細菌よりウイルスが問題になると考えられる。

次に、シナリオ 2 の感染リスク計算結果を図-3 に示す。なお、ロタウイルスは文献値による糞便中濃度が幅をもたないため曝露設定 II~IV の感染リスクは同じ値とした。図-3 を見ると、感染リスクが最大になると考えられる曝露設定 I は、感染症罹患者の糞便をそのまま誤飲するリスク（糞便中の病原微生物濃度は分布の最大値）を計算しているため、どの病原微生物に対するリスクも 0.9 を超える非常に高い値となった。また、シナリオ 1 と違いシナリオ 2 では、ウイルス・細菌によるリスクの差異は生じず、ウイルス・細菌ともに高い感染リスクとなった。これは図-3 のリスク計算を行うにあたり、仮設トイレ利用者の中に対象病原微生物の罹患者が 1 人いると仮定したためである。そのため、リスクの高低に影響するのは各病原微生物の糞

表-4 シナリオ 1 の条件

曝露設定	洪水による希釈(倍)	誤飲量(mL)	病原微生物の下水中濃度(個/L)
I	なし	100	表-1のデータの最大値
II	100	10	表-1のデータの最大値
III	100	10	表-1のデータの中央値
IV	100	10	表-1のデータの最小値

表-5 シナリオ 2 の条件

曝露設定	洪水による希釈(倍)	誤飲量(mL)	病原微生物の糞便中濃度(個/g)
I	なし	感染症罹患者の糞便1g	表-2のデータの最大値
II	100	10	表-2のデータの最大値
III	100	10	表-2のデータの中央値
IV	100	10	表-2のデータの最小値

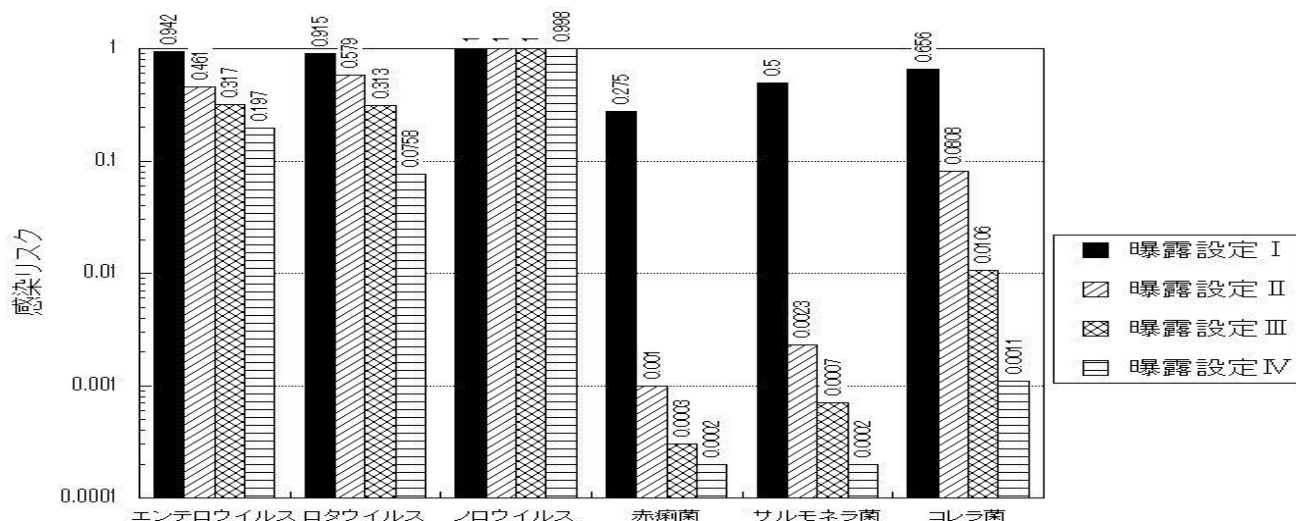


図-2 シナリオ 1 のリスク計算結果

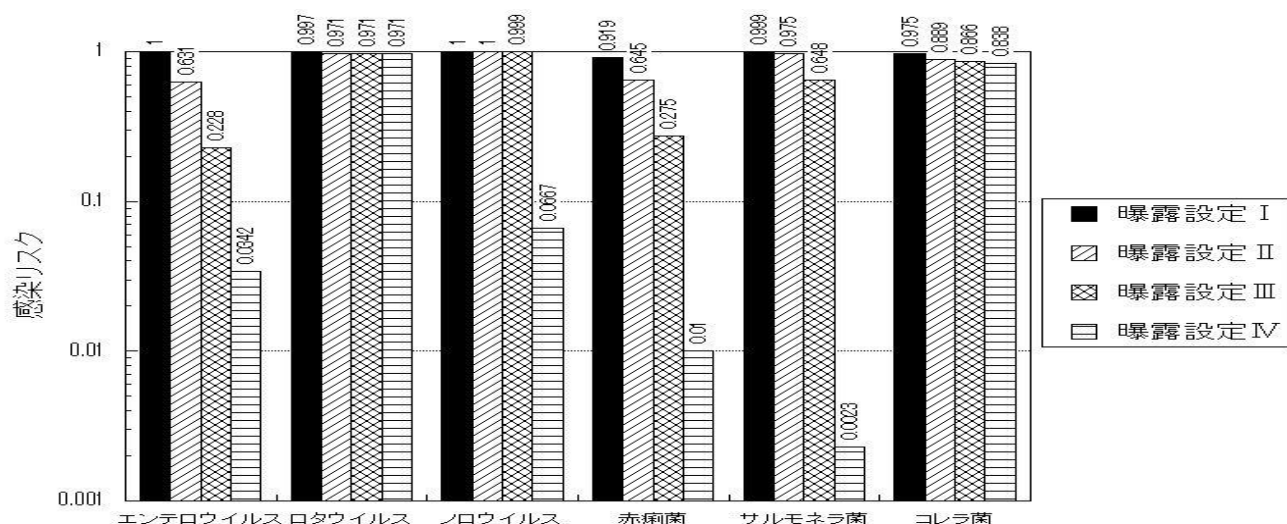


図-3 シナリオ 2 のリスク計算結果

便中濃度と感染力の強さである。よって、糞便中濃度が高い値で分布し、さらに病原微生物自体の感染力が強いロタウイルスとコレラ菌は曝露設定 I ~IV の全てにおいて高いリスクを維持している。これらのことから、トイレ内の病原微生物への曝露による感染リスクは、ウイルス・細菌ともにハイリスクとなり、特に感染症罹患者の糞便中濃度が高く、また病原微生物自体の感染力の高いものが問題になると考えられる。

5. むすび

本研究では、従来より確立されている病原微生物に対する感染リスク評価手法を巨大地震と豪雨による複合災害時に適用し、本研究のシナリオにおける感染リスクを算出することにより、定量的な感染リスク評価を実施した。その結果、巨大地震と豪雨による複合災害時には、通常時には衛生状態も良く機能性の高い都市部においても、病原微生物への感染リスクが高まるという結論を得た。これにより、巨大地震と豪雨による複合災害時には物理的な被害や外傷だけでなく、感染症への注意も必要であることが示唆された。

参考文献

- 1) 国立感染症研究所，感染症情報センター：東日本大震災，3月14日リスクアセスメント表，<http://idsc.nih.go.jp/earthquake2011/RiskAssessment/risukuhyouPDF/20110314hyou.pdf> (参照：2011/09/20)。
- 2) 金子光美：水道の病原微生物対策，丸善株式会社，pp.219-225，2006。
- 3) 金子光美：水質衛生学，技報堂出版，p.438，1996。
- 4) Hiroyuki Katayama, Eiji Haramoto, Kumiko Oguma, Hiromasa Yamashita, Atsushi Tajima, Hideichiro Nakajima and Shinichiro Ohgaki : One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, Water research 42, p.1445, 2008。
- 5) 斎藤博之：下水を利用した環境中の病原ウイルスのモニタリングに関する研究，www.daido-life-welfare.or.jp/research_papers/19/welfare_4.pdf, p.18 (参照：2011/10/15)。
- 6) 金子光美：水質衛生学，技報堂出版，p.230，1996。
- 7) Hass, C. N., Rose, J. B. and Gerba, C. P. : Quantitative microbial risk assessment, p.36, 1999。
- 8) Kazuhiro Ozawa, Tomoichiro Oka, Naokazu Takeda and Grant S. Hansman : Norovirus Infections in Symptomatic and Asymptomatic Food Handlers in Japan, Journal of clinical microbiology Vol. 45, No. 12 pp.3996-4005, 2007。
- 9) 山本耕一郎：コレラ菌 *V. cholerae*, <http://micro.fhw.oka-pu.ac.jp/microbiology/g-negative/cholera.html> (参照：2011/10/15)。
- 10) Cooper, R. C., Olivieri, A. W., Danielson, R. E., Badger, P. G., Spear, R. C. and Selvin, S. : infectious Agent Risk Assessment Water Quality Project, UCB/SEEFRL, Report, 1, No.84-4, 1984。
- 11) Rose, J. B. and Gerba, C. P. : Use of risk assessment for development of microbial standards. Water Science and Technology, 24, No.2, p.29, 1991。
- 12) Yoshifumi Masago, Hiroyuki Katayama, Toru Watanabe, Eiji Haramoto, Atsushi Hashimoto, Tatsuo Omura, Tsuyoshi Hirata and Shinichiro Ohgaki : Quantitative Risk Assessment of Noroviruses in Drinking Water Based on Qualitative Data in Japan, Environ. Sci. Technol., 40, p.7430, 2006。
- 13) Risk assessment of cholerae *Vibrio cholerae* 01 and 0139 in warm-water shrimp in international trade : MICROBIOLOGICAL RISK ASSESSMENT SERIES, Food & Agriculture Org, p.42, 2006。