

都市中小河川流域を対象とした地震降雨複合災害時における 病原感染リスクに関する基礎的考察

首都大学東京	都市環境科学研究科	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

近年、首都直下型地震など巨大地震発生の可能性が上昇している。過去の経験から、巨大地震の発生後には感染症が拡大する傾向にあることが知られている¹⁾。2011年3月11日に東北地方太平洋沖で発生した東日本大震災においても、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て注意を喚起したが²⁾、被災地ではインフルエンザ、ノロウイルス感染症、破傷風、レジオネラ症などの散発的な流行が確認された¹⁾。その原因の一つとして、被災地での衛生状態の悪化が挙げられる。東日本大震災では下水道管渠の破損や破断が生じ、下水が溢水するなどの被害も報告されており^{3,4)}、被災地広域において衛生環境の悪化が問題視された。上下水道のような公衆衛生システムの損壊が、感染症拡大の一因となることは想像に難くない。

また仮に、震災後に降雨が発生し、地震降雨複合災害となった場合、通常時には処理可能な雨量強度の降雨であっても、下水道管渠が破断した状態では雨水を処理しきれずに内水氾濫が生じる可能性が高くなると考えられる上に、東京都のように合流式下水道を採用している地域では、雨水のみならず処理前の生下水が雨水と共に氾濫し、病原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、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、巨大地震と降雨による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、病原感染リスクが高まると考えられる。

そこで本研究では、東京都内の代表的な中小河川である神田川の上流域を対象として、まず、下水道管システムおよび個別の地表面地物を表現可能な高度な地物データ GIS を活用し、降雨の流出経路を物理的に忠実に表現できる都市型洪水氾濫解析モデルである TSR (Tokyo Storm Runoff) モデル^{5,6,7)}の検証を行った。この TSR モデルを用いることで、下水道管渠の破断を考慮した、精緻な氾濫解析が可能となる。次に、本 TSR モデルを適用し、地震降雨複合災害時における流出氾濫解析を行い、下水道管渠の破断の有無による病原感染リスクの増減を空間的分布として表現し、定量的な評価を試み、その考察を行った。

2. 対象流域の概要

本研究で対象とする神田川は、三鷹市の井の頭池にその源を発し、途中善福寺川と妙正寺川を合流して隅田川に流入する東京都内の代表的な都市河川である。本研究では、井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域(流域面積 11.5 km²、流路延長 9 km)を対象流域として設定した。図-1 は神田川上流域の概要図である。流域内の人口は 160 万人を超えており、合流式下水道による下水道整備は普及率 100%に達している⁸⁾。

3. TSR モデルの検証

TSR モデルは、本研究の対象流域である神田川上流域において、流量による検証を実施しており⁷⁾、図-2 にその一例を示す。図-2 は、2007年8月28日に発生した降雨(総雨量 35mm、60分最大 34mm)による、佃橋および方南橋における観測流量と TSR モデルによる計算流量の比較であり、両地点における双方の流量曲線がほぼ一致していることから、神田川上流域における TSR モデルによる流出解析の妥当性が確認できる。また、他の降雨でも同様に観測流量と TSR モデルによる計算流量の比較検証を行っている。さらに、神田川流域の一部である江古田川流域において洪水氾濫解析の検証を行い、こちらでも TSR モデルの妥当性が確認されている^{5,6)}。

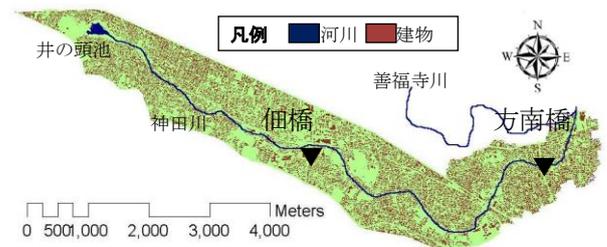


図-1 神田川上流域の概要

キーワード 巨大地震、降雨、複合災害、水系感染リスク、TSR モデル

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

4. TSR モデルを用いた地震降雨複合災害時の流出氾濫解析

(1) 下水道管渠被害箇所の設定

巨大地震発生時には、東日本大震災と同様に下水道管渠の被害が発生すると予想される。神田川上流域における地震発生時の下水道管渠被害箇所について個々に行った調査事例は存在しないため、本研究では神田川上流域における液状化分布を特定し、その領域内の下水道管渠が被害を受けるものと仮定した。

東京都防災会議による液状化危険度は 250m メッシュ単位でリスク評価が行われており、神田川上流域においては液状化危険度の高い箇所が数メッシュあるほか、液状化危険度自体は低いものの、特に重要な構造物に対してより詳細な調査が必要と判定されたメッシュが河川沿いの低地部に多数存在する⁹⁾。そこで、液状化リスクがある範囲を把握するため、国土地理院発行の土地条件図^{10),11)}により、地形分類が河川および盛土地に相当する部分を抽出した。図-3 は、土地利用要素を用いて抽出した地域を赤色、それ以外を緑色として示した流域マップである。本研究では、赤色で示した領域に存在する下水道管渠を、地震による被害箇所として設定した。

(2) 対象降雨

対象降雨として、アメダス確率降雨量計算プログラム¹²⁾を基に中央集中型(3時間)の仮想降雨を、降雨1および降雨2の2パターン設定した。雨量特性として、降雨1では総雨量は58mm、60分最大雨量は30mm、降雨2では総雨量は96mm、60分最大雨量は50mmとした。

(3) シナリオ設定

本研究では、地震被害(下水道管渠被害)がある場合とない場合の双方での流出解析を実施し、その比較検討を行う。地震被害がない状態で降雨1が発生した場合を CaseA、地震被害により下水道管渠が被害を受けた状態で降雨1が発生した場合を CaseB、地震被害がない状態で降雨2が発生した場合を CaseC、地震被害により下水道管渠が被害を受けた状態で降雨2が発生した場合を CaseD として設定した。

(4) 流出解析結果および考察

CaseA から CaseD における、TSR モデルによる流出氾濫解析により求めた最大浸水深を示す流域マップを図-4 に示す。図-4(a)と図-4(b)を比較すると、図-4(a)ではほとんど見られなかった浸水が、図-4(b)では広範囲に確認できる。同様に図-4(c)と図-4(d)を比較すると、図-4(d)の方が浸水範囲がやや増加し、最大浸水深も図-4(c)に比べ高くなっている地域が多いことが分かる。これにより、下水道管渠に被害を受けると内水氾濫を生じる範囲が拡大し、多くの地域で浸水深も高くなる傾向があるという結果が得られた。

5. 病原微生物のリスク評価¹³⁾

本研究では、この最大浸水深をもとに病原感染リスクの算出を行った。

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

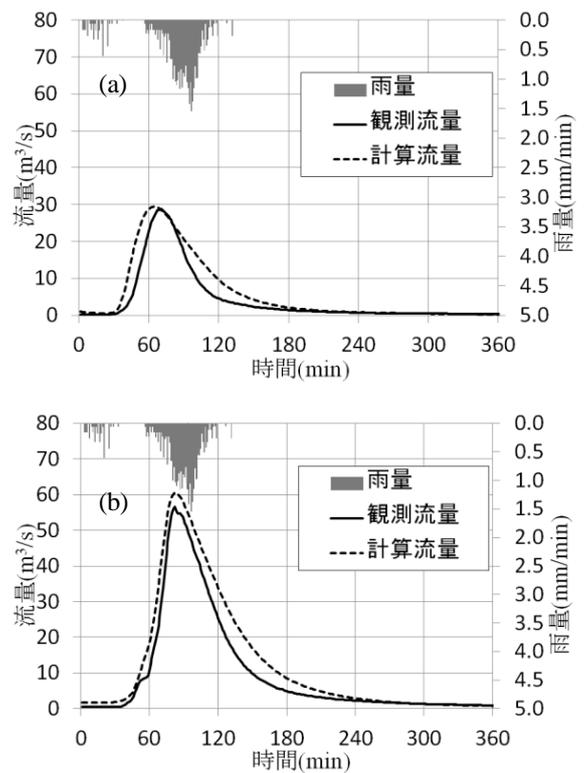


図-2 TSR モデルによる計算流量(a)佃橋, (b)方南橋

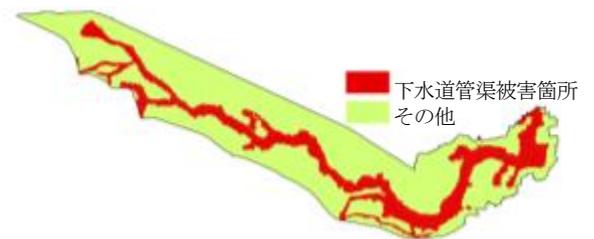


図-3 設定した下水道管渠被害箇所

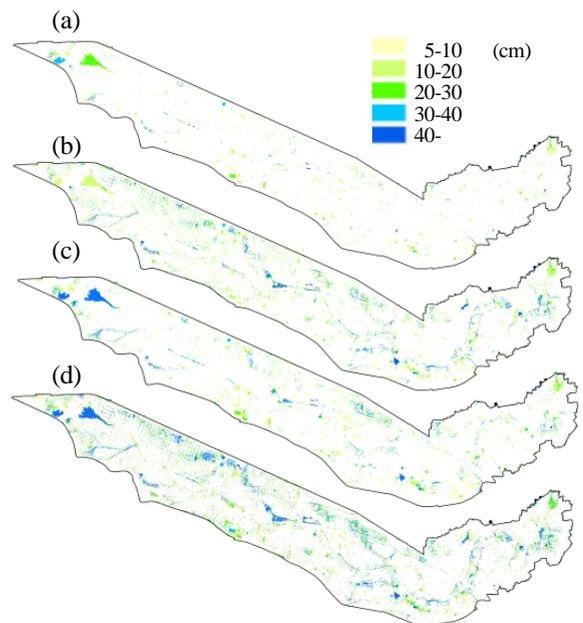


図-4 最大浸水深
上より(a)CaseA, (b)CaseB, (c)CaseC, (d)CaseD.

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、1983 年に米国研究評議会 (National Research Council ; NRC) が報告書にまとめている。本研究ではこのリスク評価手法を、CaseA から CaseD の内水氾濫発生時に適用し、以下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

本研究では腸管系の病原微生物に着目し、日本での感染症発生事例の非常に多いノロウイルスおよび、日本での感染事例は少ないが、感染力が強くハイチなどで地震後に感染拡大が確認されているコレラ菌の 2 つを対象病原微生物として設定した。

(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おり、対象微生物に対して実験結果に最もよくフィットするリスク評価モデルが選ばれる¹⁴⁾。本研究においてノロウイルスおよびコレラ菌のリスク評価に使用した用量・反応モデルを式(1)および式(2)に示し、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-5 に示す。

・ベータモデル (コレラ菌) $P(D) = 1 - [1 + (D/\beta)]^{-\alpha}$ (1)
 ・指数モデル (ノロウイルス) $P(D) = 1 - \exp(-\gamma D)$ (2)

ここに、 $P(D)$: 1 回の曝露による感染リスク、 D : 曝露量 (個)、 $\alpha(=0.164)^{15)$, $\beta(=0.149)^{15)$, $\gamma(=0.0069)^{16)$: モデルパラメータ。

(3) 曝露評価

前述の洪水流出解析により、CaseA から CaseD の内水氾濫時には図-4 に示すような最大浸水深が得られている。氾濫水は雨水および下水の混合物であると考えられ、それを誤って摂取した場合、下水に含まれる病原微生物により、病原感染リスクが生じる。浸水深と摂取量の関係であるが、浸水深が高くなれば摂取量も増えると考えられるが、不確定要素が多いため、本研究では式(3)に従うと仮定した。

$y = 0.25x$ ($0 \leq x \leq 2000$)
 $y = 500$ ($2000 \leq x$) (3)

ここに、 y : 摂取量(mL)、 x : 浸水深(mm)。

また、式(3)をグラフ化したものを図-6 に示す。

次に氾濫水中の病原微生物濃度であるが、文献値による下水中の病原微生物濃度が^{17),18)}、雨水により 100 倍に希釈された値と仮定した。表-1 に病原微生物の下水中濃度、希釈率および氾濫水中濃度を示す。なお、ノロウイルスの下水中濃度は季節による変動が大きいため、本研究では下水中濃度が高くなる 1 月の値を使用した。

これらの仮定の下で、流域内の各地物要素において、最大浸水深に対する病原感染リスクを算出した。

6. 感染リスク算出結果および考察

CaseA から CaseD までのノロウイルスおよびコレラ菌の感染リスクをそれぞれ算出し、地震による下水道管渠の被害の有無によ

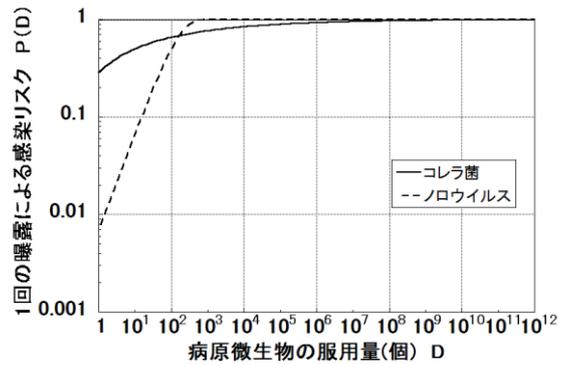


図-5 ノロウイルス・コレラ菌の用量と反応の関係

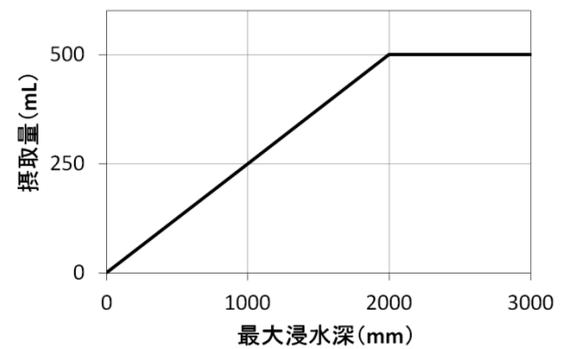


図-6 最大浸水深と摂取量の関係

表-1 病原微生物の濃度と希釈率

	下水中濃度 (個/L)	雨水による希釈(倍)	氾濫水中濃度 (個/L)
ノロウイルス	$10^{6.2}$	100	$10^{4.2}$
コレラ菌	10^2		1

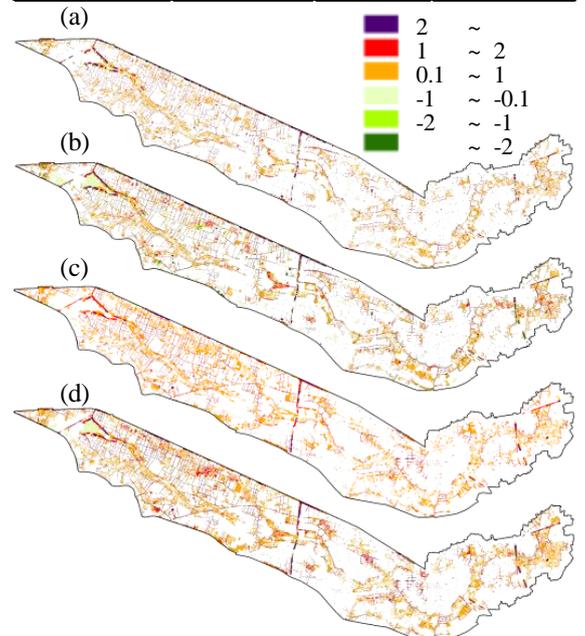


図-7 下水道管渠被害の有無による log(感染リスク)の差

上より

- (a)ノロウイルス (雨量強度 30mm/hr),
- (b)コレラ菌 (雨量強度 30mm/hr),
- (c)ノロウイルス (雨量強度 50mm/hr),
- (d)コレラ菌 (雨量強度 50mm/hr)。

る病原感染リスクの増減を把握するために、対数をとった感染リスクの差を図-7に示す。図-7を見ると、ノロウイルス・コレラ菌ともに広範囲でオレンジ色が目立ち、次いで赤色や紫色も点在していることから、地震による下水道管渠の被害が存在する場合には、流域広域において概ね病原感染リスクが上昇することが分かった。また、多少ではあるが緑色系統も確認できるため、地震による下水道管渠の被害が存在することにより、病原感染リスクが減少する地域もあることが分かった。本研究では、最大浸水深から病原感染リスクを求めているため、緑色系統で示されている地域は、下水管渠の被害を受けた場合の最大浸水深が被害を受けない場合の最大浸水深より低い地域であると考えられる。次に、流域の中央付近で上下に紫色や赤色が密集する地域があるが、ここには環状八号線上である。下水道管渠の被害が存在しないときにはほとんど浸水が見られない箇所であるが、下水道管渠に被害が発生すると氾濫水が溜まりやすいため、感染リスクの差が大きくなったと考えられる。なお、対象降雨や病原微生物の種類の違いによる大きな差異は認められなかった。

図-8は感染リスクの差と流域面積の関係を示したグラフである。なお、感染リスクの差が±0.1の範囲は、ほぼリスクの変化がない地域であると考えられるため、面積加算の対象から除外した。図-8からも、地震による下水道管渠の被害が存在することで、病原感染リスクが1オーダー程度上昇する地域が多いということが確認できる。

7. むすび

本研究では、神田川上流域を対象として、通常時および地震降雨複合災害時における流出解析を行うと共に、ノロウイルスおよびコレラ菌の定量的な感染リスク評価を実施した。その結果、地震降雨複合災害時には、通常時に比べ内水氾濫を起こす地域が多く、最大浸水深も高くなる傾向があり、それに伴い病原微生物との接触の機会が増加し、病原感染リスクも上昇するという結論を得た。これにより、通常時には衛生状態も良く機能性の高い都市部でも、地震降雨複合災害時には、病原感染リスクが高まることが示された。

参考文献

- 1) 国立感染症研究所 感染症情報センター：東日本大震災における感染症の発生および対策について、<http://idsc.nih.gov/jp/iasr/32/32s/mp32s1.html> (参照：2012/11/17)。
- 2) 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.gov/jp/earthquake2011/RiskAssessment/risukuhyouPDF/20110314hyou.pdf> (参照：2011/09/20)。
- 3) 国土交通省 下水道部：東日本大震災における下水道管、下水処理施設の被害および復旧状況について、<http://www.env.go.jp/recycle/jokaso/data/kentoukai/pdf/20110606-s02-01.pdf> (参照：2012/11/15)。
- 4) 土研リサイクルチーム：東日本大震災 下水道施設に係わる土研 TEC-FORCE 概要報告、<http://www.pwri.go.jp/team/recycling/miyagi.pdf> (参照：2012/11/15)。
- 5) 天口英雄，河村明，高崎忠勝：地物データ GIS を用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案，土木学会論文集 B，Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007。
- 6) 天口英雄，河村明，高崎忠勝，中川直子：個別の地物情報を考慮した密集市街地における Tokyo Storm Runoff Model の提案，水工学論文集，第55巻，pp.S517-S522, 2011。
- 7) 神戸大学自然科学系先端融合研究環 都市安全研究センター：第13回緊急時の用水路確保に対する研究会 報告書，pp.259-289, 2011。
- 8) 高崎忠勝，河村明，天口英雄，荒木千博：都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案 土木学会論文集 B, Vol.65, No.3, pp.221, 2009。
- 9) 東京都：首都直下型地震等による東京都の被害想定，東京都防災会議，2012。
- 10) 国土地理院：土地条件図 東京西部，2011。
- 11) 国土地理院：土地条件図 吉祥寺，2011。
- 12) 独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 水文チーム：アメダス確率降雨計算プログラム、<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm> (参照：2012/11/21)。
- 13) 金子光美：水道の病原微生物対策，丸善株式会社，pp.219-225, 2006。
- 14) 金子光美：水質衛生学，技報堂出版，p.438, 1996。
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会：下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会 報告書 参考資料編，p14, 2010。
- 18) 金子光美：水質衛生学，技報堂出版，p.230, 1996。

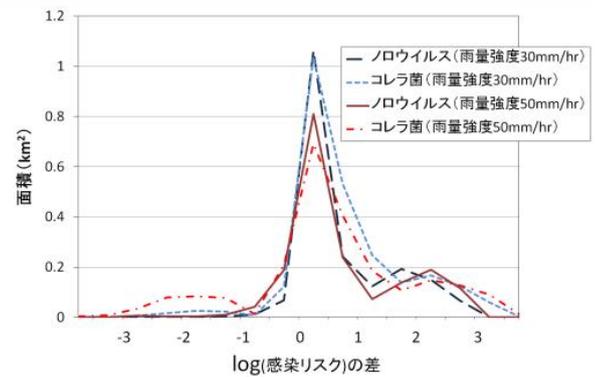


図-8 感染リスクの差と面積の関係