

## 地震豪雨複合災害時における都市避難所の感染リスクに関する一考察

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<sup>1)</sup>。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、上下水道のような公衆衛生システムの損壊により、被災地広域において衛生環境の悪化が問題視され、感染症への注意が喚起された。また仮に、震災後に豪雨が発生し、地震豪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、雨水・下水道管路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り、氾濫水の水位も上昇しやすいと考えられる。その場合、避難所の屋外に設置された仮設トイレからは氾濫水により尿尿が漏出しやすいと考えられ、病原感染リスクは著しく増大すると予想される。

洪水氾濫と水系感染症の関係を明らかにしようとする研究はこれまでも行われている<sup>2), 3), 4)</sup>が、それらはアジアの発展途上国を対象に行われたものであり、東京都のように複雑な雨水・下水道管路網が構築されている都市域での複合災害時の感染リスク評価は見受けられない。著者らは都市流域における洪水流出および浸水過程の解析モデルとして、下水道管路システムはもちろんのこと道路および河道に加え、街区内に存在する建物、駐車場、緑地などのあらゆる地物から構成される都市流域の構造を忠実に表現可能な高度な地物データ GIS を用いた洪水流出モデルとして、TSR(Tokyo Storm Runoff)モデル<sup>5), 6), 7)</sup>を提案している。

そこで本研究では、まず、この TSR モデルを用いて、神田川の上流域を対象とし、東京都の雨水・下水道管路の設計降雨である 60 分あたり最大 50 mm の降雨に対し、雨水・下水道管路の破断を考慮した、流出氾濫解析を行った。そして、浸水深と仮設トイレからの尿尿漏出率の関係および浸水深と摂取水量の関係を飽和曲線で仮定し、神田川上流域の避難所におけるノロウイルスおよびコレラ菌の病原感染リスクの算出を試み、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 km<sup>2</sup>, 流路延長 9 km)を対象流域として設定した。図-1 に神田川上流域の概要図を示す。

## 3. TSR モデルを用いた地震豪雨複合災害時の流出氾濫解析

(1) 雨水・下水道管路破断箇所の設定<sup>8)</sup>

巨大地震発生時には、東日本大震災と同様に雨水・下水道管路の破断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管路破断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、その領域内の雨水・下水道管路が破断するものと仮定した。図-2 は、土地利用要素を用いて液状化の発生が予想される地域を赤色、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雨水・下水道管路が全て破断するものと仮定(雨水・下水道管路はないものと仮定)してシミュレーションを行った。なお、本研究では、地震被害(雨水・下水道管路の破断)が有る場合と無い場合の双方での流出解析を実施し、その比較検討を行った。

## (2) 対象降雨

本研究では、東京都の雨水・下水道管路の設計降雨である 60

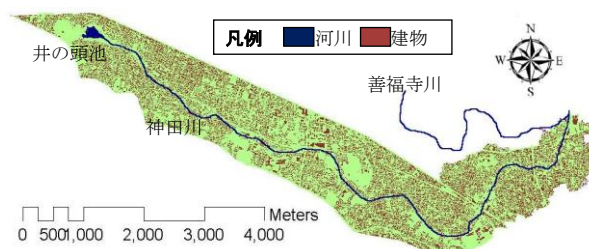


図-1 神田川上流域の概要

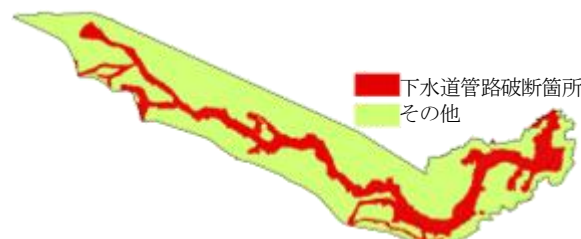


図-2 設定した雨水・下水道管路の破断箇所

キーワード 巨大地震, 豪雨, 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

分あたり最大時間降雨 50 mm の降雨を対象とした。この降雨は、降雨継続時間 3 時間の中央集中型降雨で、総雨量は 96 mm である。なお、本研究で対象とした仮想降雨はアメダス確率降雨量計算プログラム<sup>9)</sup>を基に作成した。

(3) 流出解析結果

前述した TSR モデルを用いて雨水・下水道管路の破断有、破断無の双方について流出氾濫解析を行った。流出氾濫解析により求めた流域上の各地物要素ごとの最大浸水深を図-3 に示す。破断有のマップでは破断無のマップに比べ広範囲で浸水が発生し、また、浸水深も上昇する傾向にあることが確認できる。これにより、雨水・下水道管路に破断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。

4. 病原微生物のリスク評価

本研究では、前述した最大浸水深をもとに病原感染リスクの算出を行った。病原微生物のリスク評価手法は、1970 年代から 1980 年代にかけて、全米科学アカデミーが中心となって開発され、1983 年に米国研究評議会が報告書にまとめている<sup>10)</sup>。本研究ではこのリスク評価手法を、雨水・下水道管路の破断が有る場合と無い場合の双方の内水氾濫発生時に適用し、以下の手順に従って病原感染リスクの評価を試みた。

(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<sup>11)</sup>

病原微生物の曝露量をリスクに変換する用量・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<sup>12)</sup>。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-4 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)

ここで、 $P(D)$ :1 回の曝露による感染リスク、 $D$ :曝露量(個)、 $\alpha(=0.164)^{13}$ 、 $\beta(=0.149)^{13}$ 、 $\gamma(=0.0069)^{14}$ :モデルパラメータ。

(3) 曝露評価

本研究の対象流域である神田川上流域は、三鷹市、武蔵野市、杉並区および渋谷区の 4 区市にまたがっており、巨大地震発生時など、緊急時に避難生活をおくる避難所が 17 カ所設定されている<sup>15), 16), 17), 18)</sup>。本研究ではこれらの避難所を西側から順に R (Refuge) 1, R2, R3...R17 として設定し、その位置関係を図-5 に示す。震災発生時、これらの避難所の屋外には仮設トイレが多数設置されると予想される。本研究では、地震豪雨複合災害時に避難所敷地内の氾濫水により、仮設トイレから尿尿が漏出すると仮定し、その氾濫水および尿尿の混合物を誤って摂取した場合の病原感染リスクを算出する。

図-6 に病原感染リスクを算出するまでのフローチャートを示す。まず、ノロウイルスおよびコレラ菌の日本の年間感染者数<sup>19), 20)</sup>や感染者の糞便中病原微生物濃度<sup>21), 22)</sup>、避難所の想定避難人口<sup>23)</sup>などをもとに、避難所の仮設トイレ内に存在するノロウイルスおよびコレラ菌の総量を推定した。

次に尿尿漏出量であるが、東日本大震災の例から、避難所に設置される仮設トイレは和式が多い<sup>24)</sup>と推測され、氾濫水の浸水深が尿尿を溜め置く便槽の高さを超えると、尿尿の漏

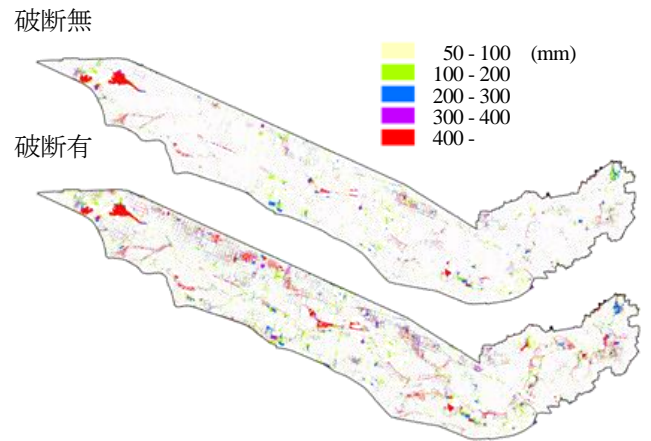


図-3 最大浸水深

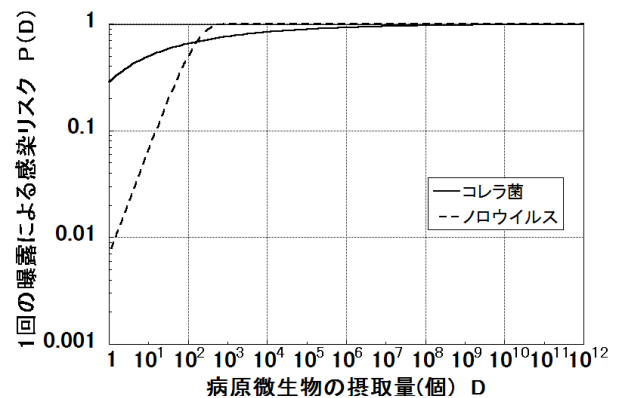


図-4 ノロウイルスおよびコレラ菌の摂取量と反応の関係

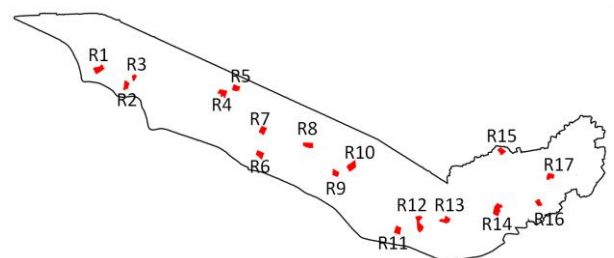


図-5 神田川上流域の避難所

出が始まると考えられる。そこで、一般的な仮設トイレの便槽の高さである 350mm 以上の浸水深となった場合に尿尿の漏出が開始するものと考え、避難所の浸水深と尿尿漏出率の関係としては以下の式(3)に示す飽和曲線で表されると仮定した。

$$y = A \operatorname{Tanh}((x-350)/b) \quad (3)$$

ここで、 $y$ : 漏出率(%),  $x$ : 浸水深(mm),  $A, b$ : パラメータ。パラメータ  $A$  は漏出率の飽和値であり、100 % (全ての尿尿が漏出する) とした。また、パラメータ  $b$  は飽和曲線の傾きに関係するが、本研究では(350,0),(1000,75)を通る飽和曲線となるように  $b$  を設定( $b = 668$ )した。以上のようにパラメータを設定し、式(3)をグラフ化したものを図-7に示す。

さらに、避難所敷地内の浸水深と敷地面積から敷地内に存在する氾濫水の総量を算出し、仮設トイレから漏出した尿尿と氾濫水の総量が完全混合するものと仮定して、氾濫水中の病原微生物濃度を算出した。

誤って摂取する氾濫水の量であるが、不確定要素は多いものの浸水深が高くなれば摂取量も増えると考えられる。しかし、水深と摂取水量の関係を示す研究やデータは確認できないため、本研究では浸水深と氾濫水の摂取量の関係としては以下の式(4)に示す飽和曲線で表されると仮定した。

$$z = C \operatorname{Tanh}(x/d) \quad (4)$$

ここで、 $z$ : 摂取量(mL),  $C, d$ : パラメータ。パラメータ  $C$  は摂取量の飽和値であるが、溺水時の摂取水量を把握したデータも確認できなかったため、一回あたりの飲量を考慮して 200 mL と仮定した。また、パラメータ  $d$  は飽和曲線の傾きに関係するが、本研究では(0,0),(1000,150)を通る飽和曲線となるように  $d$  を設定( $d = 1028$ )した。以上のようにパラメータを設定し、式(4)をグラフ化したものを図-8に示す。

以上の仮定の下で、流域内避難所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が、前述のように、本研究では浸水深が 350 mm 以上となった場合に尿尿が漏出し、病原感染リスクが生じると仮定したため、流域内の避難所 17 カ所のうち該当する避難所は、雨水・下水道管路の破断無の場合には R12 および R14 の 2 カ所となり、破断有の場合には前述の 2 カ所 (R12,R14) に R5 および R17 を加えた 4 カ所となった。本研究ではこれらの該当する避難所において病原感染リスクの算出を行った。

## 5. 病原感染リスクの算出結果および考察

雨水・下水道管路の破断有および破断無の双方で病原感染リスクが生じる避難所である R14 の病原感染リスク算出結果を図-9に示す。まず、ノロウイルスの感染リスクから見ると、破断有の場合 (図-9 a)), ほぼ全域で感染リスクが 0.1 を超える非常に高い値となっている。破断無 (図-9 b)) の場合、感染リスクは幾分低下するが、こちらも高い値となっている。次に、コレラ菌の感染リスク (図-9 c),d)) は、ノロウイルスと比較すると全体的にやや低い値となっているが、破断有、破断無の場合ともに感染リスクが 0.1 を超える地域が多く見られる。コレラはノロウイルス感染症に比べ、日本での感染症発症事例が少なく、仮設トイレ内に存在する病原微生物数も少ないため、ノロウイルスよりも低い感染リスクになったと考えられる。しかし、ノロウイルス、コレラ菌の病原感染リスクともに、1 回の降雨イベントですでに米国環境保護局が提唱する微生物許容感染リスクである  $10^{-4}$ /年を大きく上回っている。なお、R12 の病原感染リスクについてもほぼ同様の傾向が得られた。また、雨水・下水道管路の破断無の場合には R12 および R14 のみ病原感染リスクが生じるが、破断有の場合にはさらに R5 および R17 においても病原感染リスクが生じることから、地震により雨水・下水道管路の破断が生じた場合、より多くの避難所で病原感染リスクへの警戒が必要となることが示された。

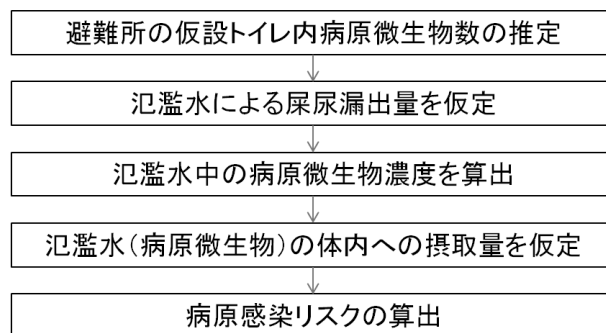


図-6 病原感染リスク算出までのフローチャート

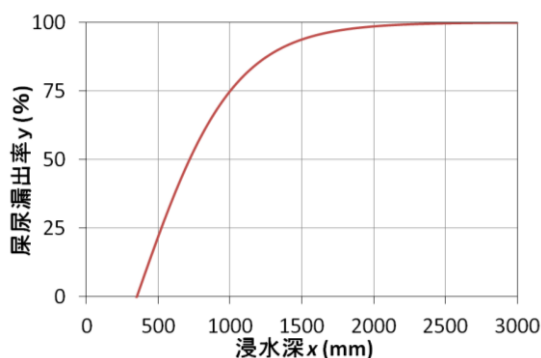


図-7 浸水深と尿尿漏出率の関係

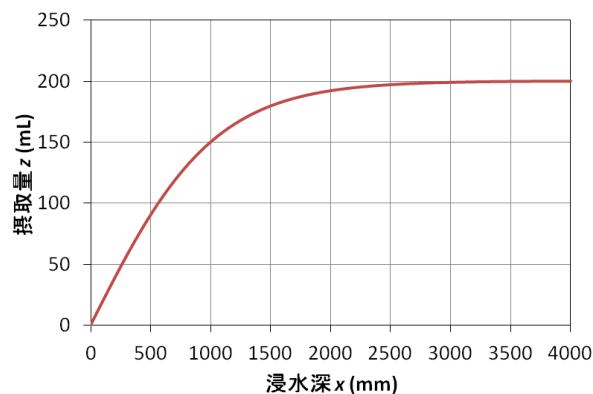


図-8 浸水深と摂取量の関係

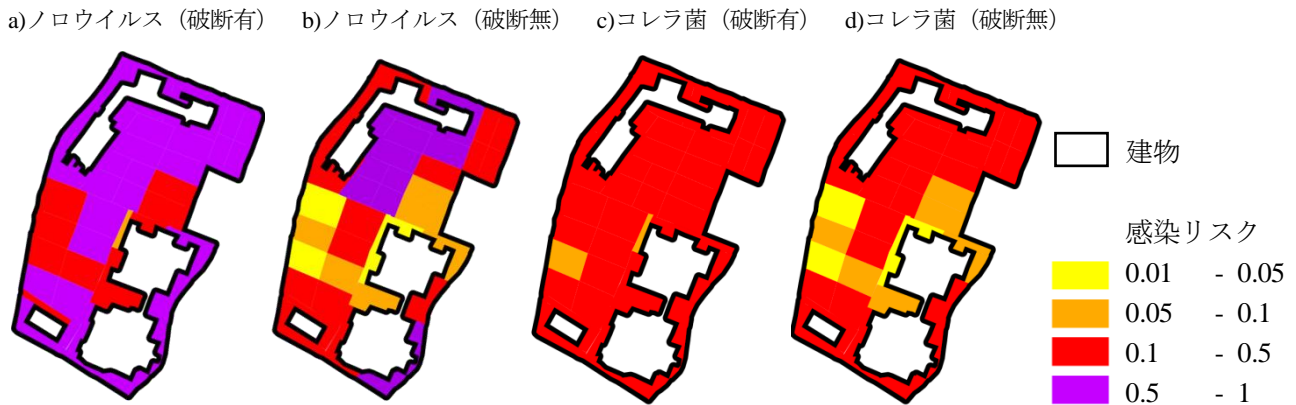


図-9 ノロウイルスおよびコレラ菌の病原感染リスク

## 6. むすび

本研究では、神田川上流域を対象として、通常時および地震豪雨複合災害時における流出氾濫解析を行い、浸水深よりノロウイルスおよびコレラ菌の定量的な病原感染リスク評価を実施した。その結果、地震豪雨複合災害時には、通常時に比べ浸水深が上昇する避難所が多く、それに伴い仮設トイレからの尿尿漏出により、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、地震豪雨複合災害時には、病原感染リスクが高まることが定量的に示された。

## 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/iasr/32/32s/mp32s1.html>.
- 2) So Kazama, Toshiki Aizawa, Toru Watanabe, Priyantha Ranjan, Luminda Gunawardhana and Ayako Amano : A quantitative risk assessment of waterborne infectious disease in the inundation area of a tropical monsoon region, Sustainability Science, Vol.7, No.1, pp.45-54, 2012.
- 3) 天野文子, 佐久間太佑, 風間聡：水理氾濫モデルと現地患者数を用いた水系感染症リスクの時空間分布, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S643-S648, 2011.
- 4) 佐久間太佑, 風間聡：水理氾濫モデルと現地患者数を用いた水系感染症リスクの定量化, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.457-462, 2010.
- 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) Amaguchi H, Kawamura A, Olsson J and Takasaki T : Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation, Journal of Hydrology, No.420-421, pp.205-215, 2012.
- 8) 天口英雄・河村明・中川直子：震災時の雨水・下水道管路被害を想定した浸水リスク評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp. I\_1609-I\_1614, 2013.
- 9) 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>.
- 10) 金子光美：水道の病原微生物対策, 丸善株式会社, pp.219-225, 2006.
- 11) 湯浅信平, 中川直子, 河村明, 天口英雄：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, 第 40 回土木学会関東支部研究発表会講演集, CD-ROM 版(V I I -23),2013.
- 12) 金子光美：水質衛生学, 技報堂出版, p.438, 1996.
- 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.
- 14) 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.
- 15) 三鷹市：三鷹市防災マップ, [http://www.city.mitaka.tokyo.jp/c\\_service/003/003310.html](http://www.city.mitaka.tokyo.jp/c_service/003/003310.html)
- 16) 武蔵野市：防災情報マップ及び浸水予想区域図について, [http://www.city.musashino.lg.jp/anzen\\_anshin/bosai/003786.html](http://www.city.musashino.lg.jp/anzen_anshin/bosai/003786.html)
- 17) 杉並区：杉並区防災マップ, <http://www2.city.suginami.tokyo.jp/library/library.asp?genre=679A>
- 18) 渋谷区：一時集合場所・避難場所一欄, <http://www.city.shibuya.tokyo.jp/anzen/bosai/hinan/basyo.html>
- 19) 厚生労働省：ノロウイルスに関する Q&A, <http://www.mhlw.go.jp/topics/syokuchu/kanren/yobou/040204-1.html>
- 20) 国立感染症研究所 感染症情報センター：コレラ, <http://idsc.nih.gov/disease/cholera/IDWR1107.html>
- 21) 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.
- 22) 山本耕一郎：コレラ菌 V. cholerae, <http://micro.fhw.oka-pu.ac.jp/microbiology/g-negative/cholera.html>.
- 23) 武蔵野市：避難所の区割り設置 (案), [http://www.city.musashino.lg.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/011/183/0719-4.pdf](http://www.city.musashino.lg.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/011/183/0719-4.pdf)
- 24) NPO 法人：日本トイレ研究所 理事 上好雄：災害時のトイレ確保と問題解決に向けた下水道への提案,  
<http://www.21water.jp/G120711-2.pdf>