

被災者と被災企業の断水受忍限度を考慮した災害時の潜在水需要の推計

吉澤 源太郎¹・畑山 満則²・多々納 裕一²

Estimation of Potential Water Demand in a Disaster Satisfied with the Water Suspension Tolerable Limits of Households and Firms

Gentarō YOSHIKAWA¹, Michinori HATAYAMA² and Hirokazu TATANO²

Abstract

In the Great East Japan Earthquake, many people were difficult to keep their health and business continuity of many firms was also severely damaged due to long-term and extensive water suspension. It has been often discussed that make effective usage of a variety of water resources as well as the tap water in a large-scale disaster. For this purpose, it is important to accurately estimate the potential demand for potable water and water for miscellaneous use in the disaster stricken area. Based on this background, the present study formulates a quantitative evaluation model of water suspension tolerable limits of households and firms. The study further estimates potential demand of water for domestic use and industrial use, plus water demand for disaster emergency measures such as commuters unable to get home, extinguishing fires, medical care and waste cleaning during disaster. Through the application of the method to Osaka City in Huge Nankai Quake, demand-supply gap was estimated in this area.

キーワード：断水受忍限度，潜在水需要，生活用水，都市活動用水，災害対策用水

Key words: water suspension tolerable limit, potential water demand, domestic water, industrial water, water for disaster emergency measures

¹ 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

² 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本論文に対する討論は平成27年11月末日まで受け付ける。

1. はじめに

地震、豪雨などの自然災害は、これまで被災都市に断水被害をもたらしてきた。東日本大震災においては、被災都市における水道システムの管路および構造物、並びに下水道システムが甚大な被害を受けたため、長期的かつ広範囲に亘る断水被害が発生した。

大規模災害時における都市水供給システムの被害は、その復旧に多大な費用を要するだけでなく、住民生活や地域経済にも大きな影響を及ぼす。2011年に発生した東日本大震災の被災者や被災企業を対象にしたアンケート調査¹⁻⁴⁾からは、避難所や自宅で生活する被災者が最も困難を感じたのは断水によるトイレ・風呂・洗濯用水等の生活用水不足であったこと、さらに、被災企業における重要業務停止の主要因のひとつは断水であったことなどが確認され、長期に及ぶ水利用の制限が受忍限度を大きく超え、被災者の健康⁵⁾が損なわれるとともに、被災企業は多大な営業損失を抱えた実状が窺える。

災害時における水の確保目標として、これまで、被災者の生命と健康保持の観点から飲用水の確保に重点が置かれてきた。しかしながら、東日本大震災では、飲用水を渴望する声は少なく、むしろ、トイレ、風呂、洗濯用水といった雑用水の不足が非常に顕著であったことが明らかとなっている^{2,3)}。このことから、大規模災害時に被災者が最低限必要としている水の用途、量と質、時期について、その受忍の限度は変容してきているものと考えられ、災害時の水需要ポテンシャルは、必ずしも従前の応急給水目標と合致しなくなっているものと推察される。また、被災都市の活動を支える水は、常住者および避難所生活者の家庭用水だけではなく、都市活動用水や工業用水といった企業・工場・店舗等の営業・事業継続に必要な水についても、評価される必要がある。

東日本大震災を契機に、水道水以外の水を災害時に有効利用することの重要性が、より多く指摘されているようになってきている^{6,7)}。このことから、災害時における水需要の推定においては、被災者と被災企業の断水受忍限度を考慮しつつ、

飲用水と雑用水双方の潜在需要量を的確に把握することが重要であり、地域の多様な水源を飲用以外の用途へ効果的に利活用できるかということなど、水需給ギャップの解消方策の検討にも資するものでなくてはならない。

以上の災害時の水需要推定にかかる既往研究の課題を踏まえ、本研究では、被災者の健康状態の保持と被災企業の営業損失の回避という観点から、既往の調査データをベースに、両者の断水に対する受忍限度を定量的に評価するための指標を定式化する。そして、その受忍限度の範囲において被災者および被災企業が欲する最低限の水需要量を、本来被災都市において生じていたとされる潜在的な水需要と捉え、その推計手法について提案する。

また、提案手法の適用例として、南海トラフ巨大地震時に甚大な水インフラ被害が予想され、かつ火災被害等に伴い水の量的不足が懸念されている都市を抽出し、当該都市の被災時における水の潜在需要量の推計結果を提示するとともに、需給ギャップとその解消に向けた考察を行う。

2. 本研究の基本的な考え方

2.1 潜在需要の定義と推計の意義

災害時は平常時とは異なり、都市への水供給能力が著しく低下するため、水需要もまた大幅な制限を受ける。こうした実需量を顕在化需要と呼ぶこととすれば、その量は、被災者や被災企業が被害を免れた水道や応急給水車、井戸等より確保できた水量の総計で推計される。一方、本来、大規模災害時の被災都市において生じていた水需要は、顕在化需要よりも大きい。このことは1995年の阪神淡路大震災の事例⁸⁾や東日本大震災の事例¹⁻⁴⁾からも明らかであり、被災者や被災企業の多くは満足な水を確保できず、我慢を強いられていた。

本研究では、「災害時等に伴う大規模断水時において、対象地域の住民と企業が各々の受忍限度を超過させないために、本来生じていたと想定される水需要」を潜在水需要と定義する。潜在需要は、顕在需要と常時需要との間に図1の関係性を

有するものである。なお、図1では、地震時消火用水といった発災初期における多量の突発需要については考慮されていない。顕在化需要は、水の物理的な確保可能量を表す。それに対し、潜在需要は、被災者が健康面・衛生面で、企業においては経営面で受忍可能量を推定する点が特徴である。

これまで、本研究で定義したような災害時における潜在水需要の推計に関する主な調査研究は、阪神淡路大震災当時の被災者の要望の分析に基づいた関西水道事業研究会⁸⁾の成果が唯一と言っても過言ではなく、地震発生から3日間は生命維持のための最低限の水量 3 L/日・人、10日目まで 20 L/日・人、21日目まで 100 L/日・人、28日目まで被災前給水量の 250 L/日・人として推計され、この数値に基づき、我が国における多くの水道事業者の地震時応急給水目標に適用されるに至っている^{9,10)}。しかしながら、東日本大震災の事例からも被災者は、より多く生活雑用水の利用についても欲していること、また、この水量設定には、都市活動用水をはじめ災害時の応急対策に必要な水の確保量は含まれていないことなど、近年の大規模災害時における実状を振り返れば、その設定は過小に評価されているものと考えられ、以上の課題を克服した形での推計手法を構築することは重要であるといえる。

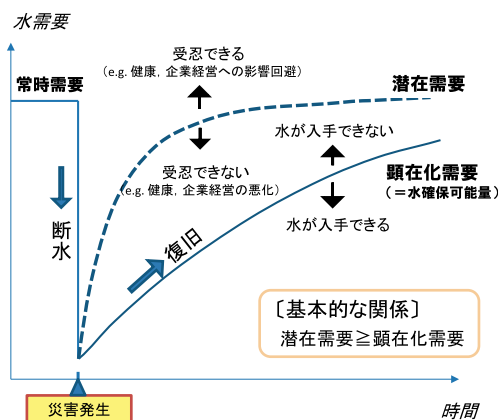


図1 潜在水需要の考え方

2.2 潜在水需要の推計方法の概要

災害時の水需要は、表1のように分類した。

災害発生後 t 日目の災害被災地域における水の潜在需要 QD は、次式により推計する。

$$QD(t, n_p, n_j) = QD^D(t, n_p) + QD^I(t, n_j) + QD^E(t) \quad (1)$$

ここに、 QD^D ：生活用水の潜在需要、 QD^I ：都市活動用水の潜在需要、 QD^E ：災害応急対策用水の需要、 n_p ：断水影響人口（発災初期に断水被害を受けた地区内の全給水人口）、 n_j ：産業部門 j ($i = 1, 2, \dots, J$) の断水影響事業所数（発災初期に断水被害を受けた地区内の事業所数の総計）である。

なお、災害時における給水人口は、断水の長期化等に伴い、居住地区を離れ新しい住宅を確保する者、親戚宅等へ疎開する者もいるが、本研究では、これらの被災者も含めて評価を進める。ただし、対象地区内で新規入院患者が発生した場合には、災害医療対策用水の推計との二重計算を防ぐため、この人数分を除くこととする。

(1) 生活用水の潜在需要の考え方

平常時における生活用水使用用途 k の 1 人 1 日水使用量原単位を q_k 、評価対象地域を一定量の地区に細分化したときの基本単位を i とすると、生活用水の災害時潜在需要 ($m^3/日$) は次式により定義した。

表1 災害時における水需要の分類

| 使用用途 | |
|--------------|---------------------------------------|
| (1) 生活用水 | |
| | 飲料・調理, 洗面, 風呂 トイレ, 洗濯, 散水 |
| (2) 都市活動用水 | |
| 製造業 | 原材料, 厨房, 洗浄, トイレ 洗浄, 冷却, 生産機材 (工水) |
| 非製造業 | 厨房, 洗浄, 空調, トイレ, 冷却 |
| (3) 災害応急対策用水 | |
| 帰宅困難者用水 | 飲料水, トイレ |
| 災害医療対応用水 | 治療, トイレ |
| 災害廃棄物等処理用水 | 洗浄清掃, 散水 |
| 消火用水 (地震火災) | 消火 |

$$QD^D(t, n_p) = \sum_k q_k F_k(t) \sum_i n_{pi} \quad (2)$$

すなわち、災害時における生活用水の潜在需要は、被災者の健康を損なわないための最低限必要な水の量を表し、平常時の水使用量原単位に断水受忍限度指数 $F_k(t)$ (0 から 1 の値をとる被災者の断水受忍限度の程度を表す関数) と断水影響人口を乗じることで推計することとした。潜在需要ではなく顕在化需要であれば、式(2)では考慮されていない他のライフラインの復旧状況などの外的要因にも影響を受けるものと考えられる。しかしながら、潜在需要は、基本的に被災者の衛生環境や健康状態からくる内的な影響のみしか受けなないため、式(2)に断水受忍限度指数 $F_k(t)$ が乗じられているところである。

ここで、被災者の中には、震災直後はもとより水道水の供給が復旧してもなお、平常時の使用水量より少ない水量で我慢しようとする節水行動をとるケース¹¹⁾もあるが、本研究では、その潜在効果までは考慮しない。

(2) 都市活動用水の潜在需要の考え方

平常時における産業部門 j の事業所当たり 1 日水使用量原単位を q_j とすると、都市活動用水の災害時潜在需要 ($\text{m}^3/\text{日}$) は次式により定義した。

$$QD^I(t, n_j) = \sum_j \sum_i q_j F_j(t) n_{ji} \quad (3)$$

基本的な式の形は式(2)と同様であり、被災企業の経営を悪化させないために最低限必要な水の量とし、平常時の水使用量原単位に断水受忍限度指数 $F_j(t)$ (0 から 1 の値をとる被災企業の断水受忍限度の程度を表す関数) と断水影響事業所数を乗じることで推計することとした。

なお、 $F_j(t)$ は、断水時における企業の営業損失顕在化の程度を表したもので、例えば一部断水時における企業の受忍限度や事業継続度については、推定範囲としていない。

(3) 災害応急対策用水の需要の考え方

災害応急対策用水の突発需要は、表1の考え方に基づき、次式により定義した。

$$QD^E(t) = QD^u(t) + QD^m(t) + QD^w(t) + QD^e(t) \quad (4)$$

ここに、 $QD^u(t)$ ：帰宅困難者用水、 $QD^m(t)$ ：災害医療対応用水、 $QD^w(t)$ ：災害廃棄物等処理用水、 $QD^e(t)$ ：消火用水(地震火災)の需要量である。各需要の具体的な推計方法については、5.にて詳述する。

2.3 被災者の断水受忍限度の考え方

(1) 既往研究と本研究の立場

断水に対する受忍範囲の計量化には、2つのアプローチが考えられる。1つは家計の水取得機会の消失に伴う効用の減少分を定量的に評価する方法である。もう1つは、アンケート調査等により断水被害の大きさに対する受忍限度の感覚量を測定し、評価を行う方法である。

前者の方法としては、多々納¹²⁾、喜多ら¹³⁾、細井ら¹⁴⁾によってモデル化が試みられてきた。基本的な考え方としては、一般に家計は、水、時間、市場財という生産要素を効率的に組み合わせて家庭内サービスを生産すると同時に、時間制約、所得制約といった利用可能な資源の制約のもとで、費用を最小化、効用を最大化するという観点から水消費行動モデルを構築し、断水時における効用の変化を表現するものである。この方法は、家計の断水受忍限度を決定づける経済的な背景が特定できるという大きな利点があるが、大規模災害の長期断水時に被災者が抱える心理的ストレスや衛生面での不快感などを包括的に反映することが難しい。

一方、後者の方法は、断水受忍限度を決定づける複合要因からなる身体的・感覚的な影響についても評価できる点で優れている。断水受忍限度の感覚量に関する既往の調査について、その端緒となる事例としては、関西水道事業研究会⁸⁾(1996)による分析が挙げられる。阪神淡路大震災被災者より寄せられた電話内容から水道施設復旧に伴う市民意識の変化を分析し、1週目の市民の受忍意識は、飲料水を確保できず不安という声が多く、生命維持用水や緊急用水が欲しいという要望が挙がり、2週目になると、飲料水の次に生活用水が

欲しいという要望が多くなり、以後、4週目に至ると、一刻も早く復旧してほしい、我慢の限界に達するという結果を得ている。平山ら¹⁵⁾は、水利用形態からみたライフライン需要者の震災リスクに対する認知イメージの構成要素を明らかにするため、大阪市および神戸市の住民を対象にアンケート調査を行い、水使用用途別の我慢の限界が最も高いのはトイレであり、74.8%以上の回答者が我慢の限度として1日以内であったことなどを明らかにしている。谷口ら¹⁶⁾も同様の手法で、大阪市、金沢市、神戸市に断水受忍限度等のアンケートを行い、トイレ用水の受忍限度が高い点など、同様の傾向を確認している。

いずれ調査研究においても、断水継続期間に対し受忍限度の大きさを測定する手法がとられており、本研究でも同様の考え方で採用する。

(2) 指標化の方法

災害発生後 t 日が経過した時の被災都市における在宅被災者の断水受忍限度は、次式のように定義した。

$$WTL_k = F_k(t) \tag{5}$$

WTL (Index of Water Suspension Tolerable Limit) は断水受忍限度の程度を表す指数であり、0 から 1 の値をとる基準化された指標である。 $F_k(t)$ は、図2のような災害発生後 t 日が経過した際、生活用水使用用途 k ($k = 0, 1 \dots K$) の断水が受忍限度に達したとする被災人口の累積相対度数を表す関数として表される。

2.4 被災企業の断水受忍限度の考え方

災害時の事業継続に関する企業等への影響調査⁴⁾が示すとおり、事業継続に最も大きな影響を与える要因のひとつには断水被害を挙げられている。企業・工場・店舗等における事業継続の主たる目的は営利であることを鑑みれば、被災企業の断水受忍限度は、事業あるいは営業の中断に伴う経済的な損失の大きさに依存するものといえる。このことから、本研究では、企業における断水受忍限度の大きさは、断水が発生した場合の事業の

0: がまんでできる

1: がまんでできない (通常レベルの水利用を渴望)

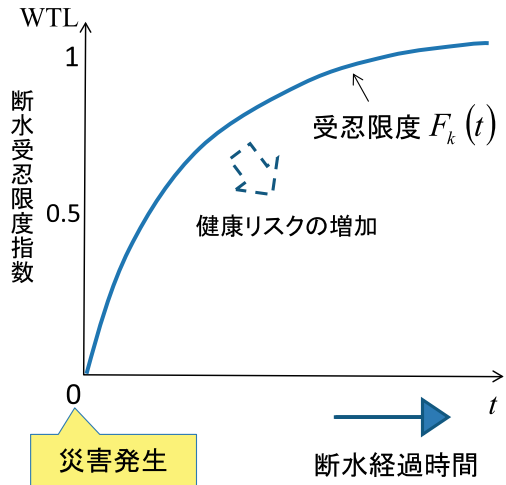


図2 被災者の断水受忍限度指数のイメージ

中断に伴う営業損失の顕在化までの期間の長さで評価することとした。

災害発生後 t 日が経過した際の企業の断水受忍限度、すなわち、水道、電力、ガス (以下、「供給系ライフライン」と呼ぶ。) のうち水道のみ供給が途絶した場合において、営業損失を顕在化させずに操業を続けることができる限界については、次式により定義した。

$$WTL_j = F_j(t) \tag{6}$$

$F_j(t)$ は、断水が t 日間継続したとき営業損失を被る事業所数 (j : 産業部門) の累積相対度数関数を表す関数である。この $F_j(t)$ については、企業へのアンケート調査より直接測定することが難しい。災害時における企業の操業停止は、供給系ライフライン全体の途絶等といった複合要因が重なって至るケースがほとんどであるためである。そのため、 $F_j(t)$ を推定は、以下の方法で行う。

まず、供給系ライフライン全体が途絶した場合の t 日間継続したとき営業損失を被る事業所数の累積相対度数関数を $G_j(t)$ とし、企業への調査により推定する。次に、断水時においても残存する生産能力の対平常時比率を RF_j (Resiliency

Factor) と定める。通常、Resiliency Factor は複数のライフラインの途絶に対する生産能力の対平常時比を表す指標¹⁷⁾であるが、本論文では水道インフラの供給途絶に限定した場合の途絶指数を表す指標として用いている。

これら $G_j(t)$ と RF_j を用いて、 $F_j(t)$ を推定する。

ここで、 T ：断水時に営業損失が顕在化するまでの日数と T' ：ライフライン全停時に営業損失が顕在化するまでの日数との関係について、 RF_j を用いて明らかにしておくたい。

いま企業の災害時における在庫の切崩し行動に着目する。災害時において企業は、営業損失を出さないために在庫を切り崩して出荷を続ける。そして、在庫が底を尽きると、営業損失の顕在化が始まる。ただし、ライフライン被害が断水のみの場合には、企業の生産能力低下は $RF_j \times 100\%$ までと限定的であり、在庫の切崩し量は低減するものとする。この関係を示したのが図3である。それぞれのケースで在庫を切崩した総量は同等である。よって、 T と T' の間には、式(7)の関係が成り立っている。

$$XT' = (1 - RF_j)XT \quad (7)$$

式(7)を整理することで、式(8)を得る。

$$T = \frac{1}{1 - RF_j} T' \quad , 0 \leq RF_j < 1 \quad (8)$$

- X ：全供給系ライフライン途絶時の在庫の切崩し量(=常時の出荷量)
- T' ：全供給系ライフライン途絶時の在庫枯渇日数(=常時の在庫保有日数)
 ➡ 操業全停時に営業損失が顕在化するまでの日数
- T ：生産能力が $RF \times 100\%$ の低下に止まるときの在庫枯渇日数
 ➡ 断水時に営業損失が顕在化するまでの日数

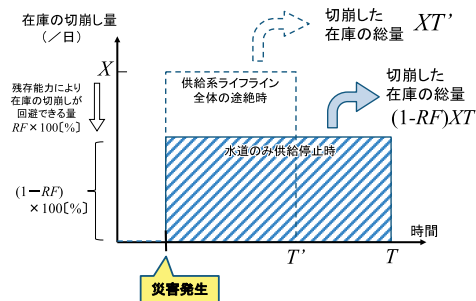


図3 災害時における企業の在庫の切崩し行動

これより、 $F_j(t) = G_j(t)$ のとき、すなわち全供給系ライフライン途絶時の営業損失の大きさと断水が発生した時のその大きさが等しいときには、式(8)の T 、 T' をそれぞれ t 、 t' に置き換え、同式を代入することで、式(9)の $F_j(t)$ を G_j と t の関数として導出できた。

$$F_j(t) = \begin{cases} G_j((1 - RF_j)t) & , 0 \leq RF_j < 1 \\ 0 & , RF_j = 1 \end{cases} \quad (9)$$

以上の式(8)を用いて式(9)を得る関係を図解したものが図4である。第1象限および第3象限に、断水時およびライフライン全停時のそれぞれでの企業の営業損失顕在化の度合いを表す F_j と G_j の関数が描かれている。第4象限には、ライフライン完全停止期間 t' と断水期間 t の関係を示している。第2象限に描かれている直線は45度線である。第3象限で描かれた関数 $G_j(t)$ を所与とした場合に、第2象限における $F_j = G_j$ の関係と第4象限で描かれた式(9)の関係を満たす関数として、関数 $F_j(t)$ が第1象限上に求められる。

3. 被災者の断水受忍限度の計量化

3.1 データソース

(1) モニターの属性構成

断水受忍限度に関する代表的な既往調査^{15, 16)}の特徴としては、都心部居住者に限定したものが多く、また震災や渇水、事故による断水の経験者と未経験者の間にはリスク認知バイアス¹⁸⁾が生じる可能性が十分想定されるが、その点を検証する

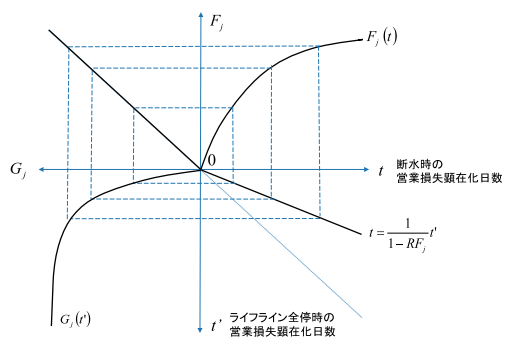


図4 操業全停時または断水時それぞれの営業損失顕在化日数の関係

には、断水経験者のサンプル数が十分ではない点が挙げられる。

本研究では、以上の課題が改善されている大阪府水道局のインターネットアンケートの結果を用い、検討を行う。

モニターの属性構成を表2に示す。本アンケートは、平成20年3月8日～11日に大阪市内の常住者と、市外からの通勤・通学者も含めた関西2府4県のモニターを対象に行われたものであり、サンプル数の割り付けは、性・年代・行政区別の大阪市の昼夜間市民人口比を基に行われているなど、幅広い属性が網羅されている点の特徴である。

(2) 調査方法

被災者の断水受忍限度は、都市生活者のモニターに各水使用用途に対応した断水受忍期間を調査することで分析することができる。具体的な調査方法としては、各属性に対して「震災による断水が発生した場合、飲料水、調理用水・食事用水、トイレ用水、洗濯用水、風呂用水、それぞれの水利用をどの程度の日数までなら断水を我慢できるか。また、その日数を選んだ理由は何か。」という設問を行い、断水日数が「全く我慢できない」、「1日程度」、「2～3日程度まで」、「4～5日程度まで」、「1週間程度まで」、「2週間程度まで」、「1ヶ月程度まで」、「1ヶ月以上」を評価する方式を採用している。

なお、近年の災害時における応援物資ロジスティクスの発達を踏まえ、大規模な災害時であっても、応急給水や備蓄水によって飲料水は容易に

表2 アンケートモニターの属性構成

単位：(人)

| | 都心居住者 (大阪市居住者) | | 郊外居住者 (通勤・通学者) | | 計 |
|--------|-------------------|-----|-------------------|----|-----|
| | 男性 | 女性 | 男性 | 女性 | |
| 15～20代 | 40 | 38 | 20 | 22 | 120 |
| 30代 | 31 | 43 | 29 | 17 | 120 |
| 40代 | 31 | 48 | 29 | 12 | 120 |
| 50代 | 31 | 49 | 29 | 11 | 120 |
| 60代以上 | 47 | 57 | 13 | 3 | 120 |
| 合計 | 180 | 235 | 120 | 65 | 600 |

入手可能な場合が多いことから、断水期間においても1人1日あたり3Lの飲料水までなら確保できる前提で回答を求めている。

3.2 断水リスクの認知バイアスの考慮

本アンケートでは、断水の経験のある人の割合が44.2% (265サンプル) を占めていた。

断水経験の有無による断水受忍限度に達する平均日数と、3日以内に断水受忍限度に達する回答数の累積割合を表3に示す。

これより、断水経験の方が、発災3日目の短期では受忍範囲はやや大きいものの、長期的にみれば受忍範囲は小さく、未経験者は長期断水に伴う生活支障の程度を若干ではあるが過小評価する傾向にあることが示唆された。

この傾向が偶然的な誤差の範囲内かを検証するため、断水経験の有無による2つのグループ間に対し、t検定を行った。その結果、各使用用途の平均日数に対するp値(両側検定)は0.009、3日以内での受忍限度回答割合では0.056となり、概ね0.05以下であることから有意水準5%で有意差があると判断できた。したがって、断水経験の有無による受忍限度の差はあることがわかった。

したがって、このバイアスを解消するため、断水経験者の断水受忍限度の調査データに基づき、以下の分析を進めることとした。

3.3 水使用用途別の集計結果

水使用用途別の断水受忍限度の集計結果を図5に示す。受忍限度が最も小さいのはトイレ用水であり、3日までが84.5%に上っている。続いて、調理用水と飲料水の受忍限度が小さい。一方、洗

表3 断水経験の有無による違い

| k | 使用用途 | 平均日数(日) | | 3日以内限度 | |
|---|-------|---------|------|--------|-------|
| | | 経験なし | 経験あり | 経験なし | 経験あり |
| 1 | 飲料水 | 5.5 | 4.9 | 76.1% | 76.6% |
| 2 | 調理用水 | 3.7 | 3.3 | 78.5% | 77.4% |
| 3 | トイレ用水 | 2.4 | 2.2 | 85.4% | 83.4% |
| 4 | 風呂用水 | 5.0 | 4.6 | 44.2% | 42.3% |
| 5 | 洗濯用水 | 5.6 | 5.4 | 54.6% | 52.1% |

濯用水、風呂用水についてはしばらく我慢できるという意識がみられた。

3.4 モニターがイメージした被災者像

図5より、都市生活者の断水継続期間に対する各用途の受忍限度の大きさが明らかになったところであるが、この集計結果は、どのような被災環境に直面した生活者の受忍限度を代表しているかについても明らかにしておく必要がある。

そこで、断水経験の有るモニター265人の内、44人のモニターより、具体的な回答理由（自由記入）が得られているため、その記述内容よりキーワードを抽出し、類似項目にグルーピングすることで、モニターは、どのような被災生活の環境をイメージして受忍限界日数を回答していたのかについて炙り出した。

その結果を図6に示す。なお、本調査は「震災による断水を経験されたことがない方もそのような状況を想定してください」という補足を付して得た回答であるとともに、44名中34%の回答者が阪神淡路大震災の経験を基に回答していたため、モニターがイメージした災害ハザードは地震であり、その規模は大きいといえる。

これよりモニターの多くは在宅被災を想定し、水の消費量がそれほど多くならない夏以外の季節において、断水に対応した代替財の利用をせず、特に衛生・清潔面の観点から受忍できる限界の日

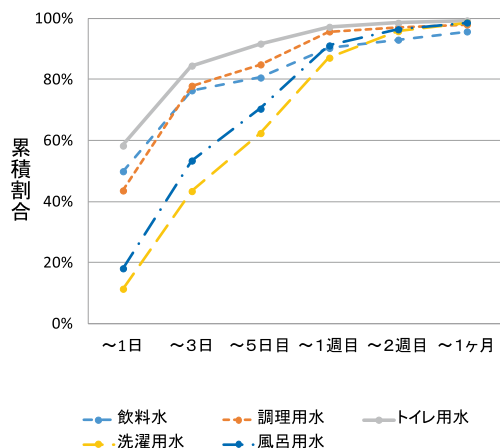


図5 アンケートの集計結果

数を回答したことがわかった。したがって、図5の断水受忍限度の測定結果は、具体的に「在宅被災者が、代替財を利用せずに、衛生・清潔面で、断水を我慢できる限界の期間」と捉えることができた。

3.5 被災者の断水受忍限度指数の定式化

被災者のWTL値を規定する関数 $F_k(t)$ の同定は、図5のデータを用いて行った。分析アプローチとしては、同図の離散データを連続化するため、累積分布関数モデルへの当てはめを行った。具体的には、断水継続の長さと同定者の受忍限度の関係性は、ある時点から時刻 t までにかかる個体へのストレスと生残の関係に類似するものと仮定し、ハザード関数との当てはめを行う。ハザード関数としては、以下の4つの累積分布関数モデルを選定し、それぞれについて、図7の手順¹⁹⁾により、観測データの予測が最も優れているモデルを評価した。

I) 指数モデル (exponential model)

$$F_k(t) = 1 - \exp(-\alpha t) \tag{10}$$

II) ワイブルモデル (weibull model)

$$F_k(t) = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) \tag{11}$$

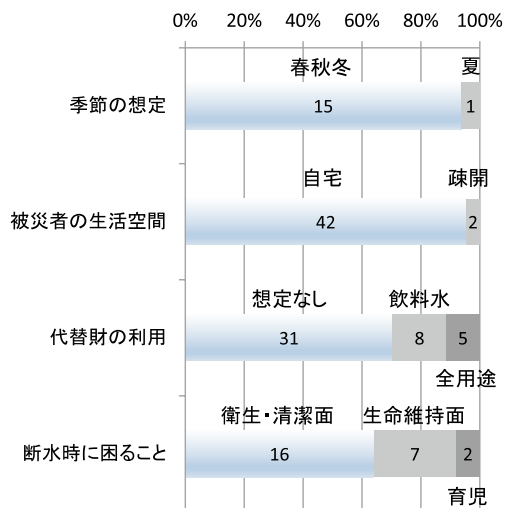


図6 モニターがイメージした被災生活環境

Ⅲ) 対数正規モデル (lognormal model)

$$F_k(t) = \int_{-\infty}^{\frac{1}{\alpha} \ln \frac{t}{\beta}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (12)$$

$$= \Phi\left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{t}{\beta}\right)$$

Ⅳ) 対数ロジスティックモデル (log-logistic model)

$$F_k(t) = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha - \beta \ln(t)\}} \quad (13)$$

ここに、式 (10) ~ (13) の α, β は、未定係数である。

いま、 α, β のパラメータセットを θ 、断水経過期間のステージを s とし、それぞれのモデルにおける推計値を次式で表す。

$$\pi_s = F(t; \theta) \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (14)$$

また、実測に基づいた値を次式で表す。

$$\pi_s^0 = a_s / A_s \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (15)$$

ここで a_s は各ステージにおいて断水を受忍できない示した回答者の数、 A_s は各ステージにおける回答者全体の数である。

式 (14), (15) を用いれば、対数尤度 L は、次式で表すことができる。

$$\ln L = \sum_{s=1}^S a_s \ln \frac{\pi_s}{\pi_s^0} + \sum_{s=1}^S (A_s - a_s) \ln \frac{1 - \pi_s}{1 - \pi_s^0} \quad (16)$$

上式は、未知パラメータセット θ の関数であり、 θ の当てはまりの良さを表す指標として知られる。パラメータセットの最尤度の推定値は、この対数尤度を最大化する θ の値を見つけて出すことで得た。

次に、予測の良いモデルの選択規準として AIC (Akaike's information criterion) を用い、モデル I ~ IV を評価した。AIC は式 (17) で定義される規準であり、 Dev : モデルの逸脱度と、 N_θ : モデルのパラメータ数を用いて算定される²⁰⁾。

$$AIC = Dev + 2N_\theta \quad (17)$$

上式において、逸脱度 Dev とは、式 (17) より算定した対数尤度の最大値を $\ln L^*$ に -2 を乗じた式 (18) として定義される規準量である。

$$Dev = -2 \ln L^* \quad (18)$$

式 (17), (18) に基づき、モデル I ~ IV の逸脱度と AIC を推計した。その結果を表 4 に示す。指数モデルと対数ロジスティックモデルの適合性は低いことがわかった。また、飲料水、調理用水、トイレ用水のような断水受忍限度の範囲が相対的に狭い用途に対しては対数正規モデルが最も良好な適合を示すこと、風呂用水、洗濯用水については、ワイブルモデルとの適合が最も良好であるこ

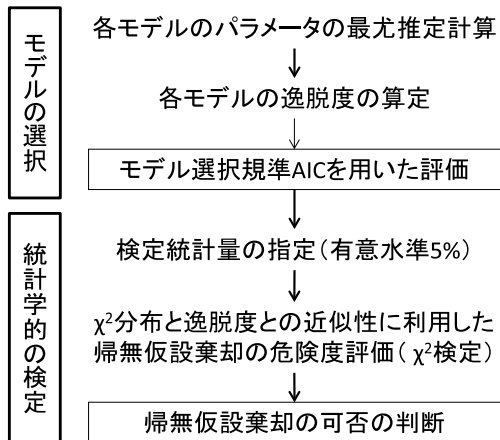


図7 統計学的な検定とモデル選択の手順¹⁹⁾

表4 各モデルの逸脱度

| k | 使用用途 | I | II | III | IV | |
|---|-------|-----|-------|------|------|-------|
| 1 | 飲料用水 | Dev | 525.9 | 13.0 | 6.1 | 41.3 |
| | | AIC | 527.9 | 17.0 | 10.1 | 45.3 |
| 2 | 調理用水 | Dev | 268.6 | 14.7 | 7.0 | 27.6 |
| | | AIC | 270.6 | 18.7 | 11.0 | 31.6 |
| 3 | トイレ用水 | Dev | 223.9 | 4.5 | 3.6 | 123.5 |
| | | AIC | 225.9 | 8.5 | 7.6 | 127.5 |
| 4 | 風呂用水 | Dev | 17.1 | 5.0 | 16.1 | 22.0 |
| | | AIC | 19.1 | 9.0 | 20.1 | 26.0 |
| 5 | 洗濯用水 | Dev | 8.7 | 6.6 | 21.9 | 26.1 |
| | | AIC | 10.7 | 10.6 | 25.9 | 30.1 |

I) 指数モデル, II) ワイブルモデル, III) 対数正規モデル, IV) 対数ロジスティックモデル

とがわかった。

この結果を踏まえ、被災者の WTL は、Ⅲ) 対数正規モデル ($k = 1 \sim 3$) とⅡ) ワイブルモデル ($k = 4, 5$) という仮説を立て、先に求めた逸脱度の値は $S - N_{\theta}$ (S : 階級数, N_{θ} : モデルのパラメータ数) の自由度を持つ χ^2 分布に近似する性質^{19, 21)} を利用し、各モデルの逸脱度と χ^2 分布の上位 5 パーセンタイル値 (自由度: $6 - 2 = 4$) と比較を行った。

$\chi^2_{0.05}(4) = 9.488$ であり、いずれの逸脱度も当該数値より小さいことから、フィッティング許容度に関する帰無仮説は棄却されないと判定された。

以上より、関数 $F_k(t)$ には、表 5 のモデルを採用することとした。そして、選定された WTL 曲線を図示すれば、図 8 を得ることができた。

表 5 採用モデルと最適化パラメータ

| k | 使用用途 | 選択モデル | α | β |
|---|-------|-----------|----------|---------|
| 1 | 飲料水 | lognormal | 2.30 | 0.48 |
| 2 | 調理用水 | lognormal | 1.65 | 0.66 |
| 3 | トイレ用水 | lognormal | 1.70 | 0.37 |
| 4 | 風呂用水 | weibull | 0.80 | 3.11 |
| 5 | 洗濯用水 | weibull | 0.93 | 4.02 |

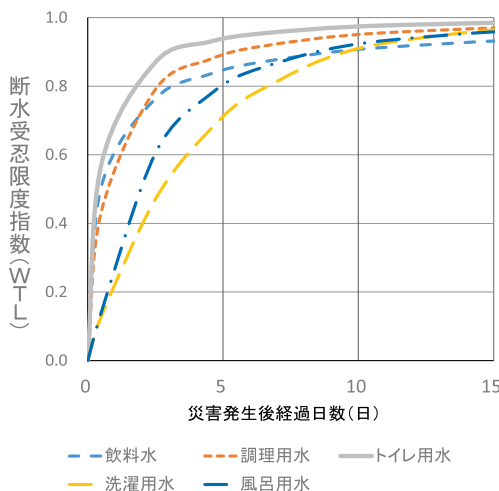


図 8 被災者の WTL 曲線

4. 被災企業の断水受忍限度の計量化

4.1 データソース

災害時のライフライン途絶状況下における企業等の生産量の低下状況に関する調査としては、我が国において、梶谷ら^{22, 23)}の成果が代表的である。東海・東南海地震の発生によって甚大な被害が予想されている愛知県、静岡県における全産業部門の事業者アンケート調査を実施し、水、電力、ガスの途絶と操業影響度の関係に関する調査を行っている。

具体的な調査方法としては、各産業部門の事業者に対して、ある一定期間以上生産停止が災害等により突然発生した場合を想定させ、「生産活動は何%程度行えるのか」、そして、1日、2~3日、5日、1週間、10日、2週間、2週間以上(製造業の場合は20日、1ヶ月)の7ステージ(製造業の場合は8ステージ)が経過した際に「計画されていた生産計画(受注分)をキャンセルし、その分の損害が発生するのは、生産停止がどれくらいの期間に亘って継続しそうな場合か」という設問を行い評価している。

本研究では、この調査データ(サンプル数: 製造業725, 非製造業355)をベースに、 $G_j(t)$ の推定を行い、産業部門 j については日本標準産業大・中分類一覧(平成19年11月改訂版)の大分類 A~T に従い分類して、2.4の考え方に基いて各産業部門の断水受忍限度 $F_j(t)$ を計量化した。

4.2 被災企業の断水受忍限度指数の定式化

被災企業の WTL 値を規定する関数 $F_j(t)$ の同定するために、累積分布関数モデルへの当てはめを行う。3.5において適合が良好だったワイブルモデルと対数正規モデルに対し、式(19)、(20)で定式化されたモデルへの当てはめを行った。

V) ワイブルモデル

$$F_j(t) = G_j \left((1 - RF_j) t \right) = 1 - \exp \left\{ -\alpha \left(1 - RF_j \right) t^{\beta} \right\} \quad (19)$$

VI) 対数正規モデル

$$\begin{aligned}
 F_j(t) &= G_j\left(\left(1-RF_j\right)t\right) \\
 &= \int_{-\infty}^{\frac{1}{\alpha'} \ln \frac{(1-RF_j)t}{\beta'}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (20) \\
 &= \Phi\left(\frac{1}{\alpha'} \ln \frac{(1-RF_j)t}{\beta'}\right)
 \end{aligned}$$

α' , β' は未定係数である。

(1) 非製造業の推定式

まず、非製造業のなかで水道の取引額が相対的に大きい産業部門²⁴⁾について、両モデルの逸脱度と AIC の推計結果を表 6 に示す。なお、大都市域の産業大分類別従業者数²⁵⁾のなかで、構成比が非常に小さい農林水産業、鉱業については、推定の対象から除外している。また、官公署、エネルギー業、学校等の公共サービス ($j=11$)、医療・福祉 ($j=12$) における災害拠点病院 ($j=12'$ とおく) については、被災時においても不断の事業継続が求められる業種であるため、断水期間の大きさにかかわらず WTL 値は 1 ($F_{j=12}(t) = 1$) とし、今回の評価対象外である。

この結果を踏まえ、卸売・小売業は対数正規モデル ($j=6$)、対事業所サービス、対個人サービス、医療・福祉はワイブルモデル ($k=9,10,12$) という仮説を立て、各モデルの逸脱度と χ^2 分布の上位 5 パーセント値 (自由度: $7-2=5$) と比較を行った。 $\chi^2_{0.05}(5) = 11.070$ であり、いずれの逸脱度も当該数値より小さいことから、フィッ

表 6 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{(23)}$ |
|-----|----------|-----|-----|------|---------------|
| 6 | 卸売・小売 | Dev | 3.2 | 3.3 | 0.5833 |
| | | AIC | 7.2 | 7.3 | |
| 9 | 対事業所サービス | Dev | 3.0 | 5.6 | 0.7375 |
| | | AIC | 7.0 | 9.6 | |
| 10 | 対個人サービス | Dev | 4.3 | 6.6 | 0.5385 |
| | | AIC | 8.3 | 10.6 | |
| 12 | 医療・福祉 | Dev | 1.5 | 4.8 | 0.5259 |
| | | AIC | 5.5 | 8.8 | |

V) ワイブルモデル, VI) 対数正規モデル

ティングの許容度に関する帰無仮説は棄却されないと判定された。よって表 7 のモデルを採用することとした。そして、選定された WTL 曲線を図示すれば、図 9 を得ることができた。

発災初期段階における曲線の立ち上がり最も急峻な産業部門は、対数正規モデルとの適合性が良好であった卸売・小売業であり、3日までが受忍限度に達する事業所数が80%に上ることがわかった。

続いて、水道の取引額が相対的に小さい非製造業各部門²⁴⁾の逸脱度と AIC の推計結果を表 8 に示す。

(1)と同様、ワイブルモデル(建設業、情報通信業、金融・保険業、不動産業)と対数正規モデル(運輸・郵便業)の適合が最も良好であること

表 7 各モデルの最適化パラメータ

| j | 産業部門 | 選択モデル | α' | β' |
|-----|----------|-----------|-----------|----------|
| 6 | 卸売・小売 | lognormal | 0.50 | 1.15 |
| 9 | 対事業所サービス | weibull | 0.67 | 2.81 |
| 10 | 対個人サービス | weibull | 0.69 | 1.84 |
| 12 | 医療・福祉 | weibull | 0.92 | 2.08 |

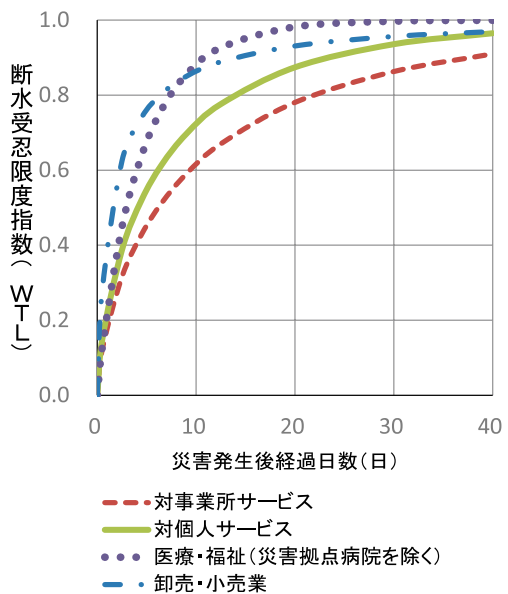


図 9 非製造業各部門の WTL 曲線 (その 1)

がわかった。

この結果を踏まえ、運輸・郵便業は対数正規モデル ($j = 5$)、建設業、情報通信業、金融・保険業、不動産業はワイブルモデル ($k = 3, 4, 7, 8$) という仮説を立て、各モデルの逸脱度と $\chi^2_{0.05}(5) = 11.070$ との比較を行った。いずれの逸脱度も当該数値より小さいことから、フィッティングの許容度に関する帰無仮説は棄却されないと判定され、表9のモデルが選定された。

WTL 曲線は、図10のとおりであり、受忍範囲が最も小さい業種は対数正規モデルとの適合が良好であった運輸・郵便業であり、発災後10日目までにほとんどの被災企業が受忍できなくなることがわかった。また、金融・保険業については、発災初期の WTL 曲線の立ち上がりは急峻となることが明らかとなった。

以上、非製造業各部門における WTL を推定できたところであるが、災害時においては、人工透析患者を扱う医療機関など、各産業部門のなかで不断の事業継続を求められる企業がある。それらの企業の WTL 値は発災直後より 1 ($F_j(t) = 1$)

と考えられるが、それら企業の水需要の産業部門全体に占める割合は一般に少ないため、以後の分析では特に区別せずに取り扱う。

(2) 製造業の主要業種の推定式

主要な製造業各部門の逸脱度と AIC の推計結果を表10に示す。

なお、製造業で扱う水は、一般家庭や非製造業とは異なり、水道水(上水)のみならず工業用水

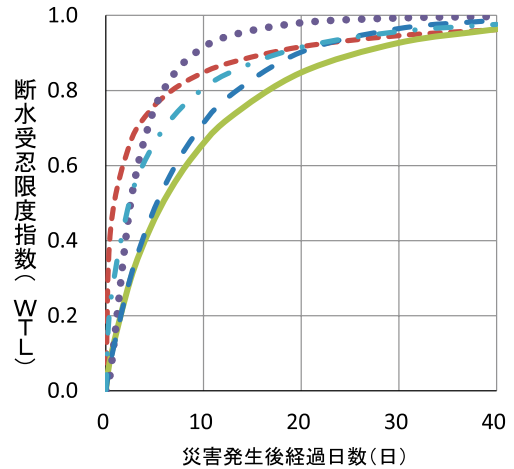


図10 非製造業各部門の WTL 曲線 (その2)

表8 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{(2)}$ |
|---|-------|-----|------|------|--------------|
| 3 | 建設 | Dev | 4.3 | 7.0 | 0.6250 |
| | | AIC | 8.3 | 11.0 | |
| 4 | 情報通信 | Dev | 6.3 | 8.2 | 0.7222 |
| | | AIC | 10.3 | 12.2 | |
| 5 | 運輸・郵便 | Dev | 2.6 | 2.6 | 0.7647 |
| | | AIC | 6.6 | 6.6 | |
| 7 | 金融・保険 | Dev | 7.8 | 9.0 | 0.6875 |
| | | AIC | 11.8 | 13.0 | |
| 8 | 不動産 | Dev | 3.2 | 4.2 | 0.5385 |
| | | AIC | 7.2 | 7.2 | |

V) ワイブルモデル, VI) 対数正規モデル

表9 各モデルの最適化パラメータ

| j | 産業部門 | 選択モデル | α' | β' |
|---|-------|-----------|-----------|----------|
| 3 | 建設 | weibull | 0.90 | 2.94 |
| 4 | 情報通信 | weibull | 0.60 | 1.22 |
| 5 | 運輸・郵便 | lognormal | 0.81 | 0.89 |
| 7 | 金融・保険 | weibull | 0.40 | 0.64 |
| 8 | 不動産 | weibull | 0.81 | 4.23 |

表10 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{(2)}$ |
|----|-------|-----|------|------|--------------|
| 13 | 食料品 | Dev | 5.6 | 5.1 | 0.4333 |
| | | AIC | 9.6 | 9.1 | |
| 14 | 紙・パルプ | Dev | 3.3 | 7.1 | 0.5938 |
| | | AIC | 7.3 | 11.1 | |
| 15 | 化学 | Dev | 9.9 | 8.4 | 0.3571 |
| | | AIC | 13.9 | 12.4 | |
| 16 | 鉄鋼 | Dev | 2.2 | 2.1 | 0.5000 |
| | | AIC | 6.2 | 6.1 | |
| 17 | 金属製品 | Dev | 6.4 | 13.6 | 0.6519 |
| | | AIC | 10.4 | 17.6 | |
| 18 | 繊維製品 | Dev | 3.2 | 4.1 | 0.7241 |
| | | AIC | 7.2 | 8.1 | |

V) ワイブルモデル, VI) 対数正規モデル

も多く活用する。以下で推定される製造業の断水受忍限度指数は、水道水の断水だけでなく工業用水の断水も合わせて評価したものである。

分析の結果、食料品、化学、鉄鋼業については対数正規モデルに、紙・パルプ、金属製品業についてはワイブルモデルとの適合が最も良好であることがわかった。この結果に基づき、それぞれ対数正規モデル ($j = 13, 15, 16$) とワイブルモデル ($k = 14, 17, 18$) という仮説を立て、各モデルの逸脱度と $\chi^2_{0.05}(6) = 12.592$ との比較を行い、非製造業各部門と同様、フィッティングの許容度に関する帰無仮説は棄却されないと判定された。よって、表11のモデルを採用することとした。

以上の分析により導出した WTL 曲線は図11のとおりである。曲線の立ち上がり最も急峻な産

表11 各モデルの最適化パラメータ

| j | 産業部門 | 選択モデル | α' | β' |
|-----|-------|-----------|-----------|----------|
| 13 | 食料品 | lognormal | 1.30 | 1.14 |
| 14 | 紙・パルプ | weibull | 0.78 | 3.78 |
| 15 | 化学 | lognormal | 1.31 | 2.97 |
| 16 | 鉄鋼 | lognormal | 1.31 | 1.62 |
| 17 | 金属製品 | weibull | 0.83 | 3.91 |
| 18 | 繊維製品 | weibull | 0.81 | 4.07 |

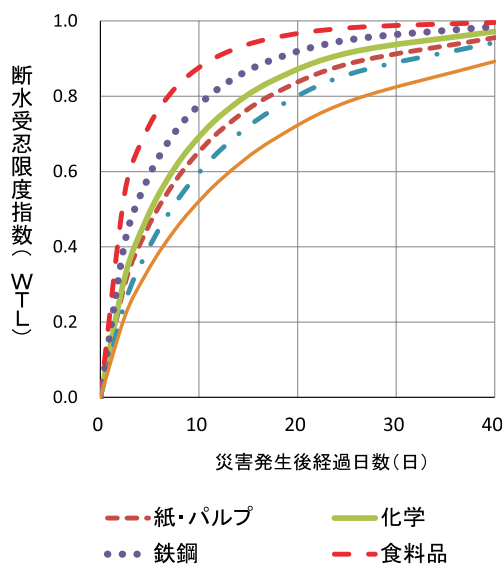


図11 製造業各部門の WTL 曲線

業部門は対数正規モデルと適合がよかった食料品業であり、続いて鉄鋼業であることがわかった。

4.3 被災者の断水受忍限度との比較考察

最後に本項では、以上の分析より計量化された各水使用用途、または各産業部門の WTL について、それらの相対的な関係を把握するため、災害発生初期から応急復旧期の節目の3日目、7日目(1週間)において、各用途・各部門における WTL 値がどの程度に達するかを分析した。その結果を図12、図13に示す。

これより、総じて生活用水の WTL 値は都市活動用水よりも高いことがわかった。都市活動用水のなかでも飲用水を多く使用する卸売・小売業や食料品製造業といった部門の WTL は、生活用水と同レベルの高さに達することも明らかとなった。また、3日目と7日目を比較したとき、生活用水は3日目の段階で WTL 値が0.8近くまで達する用途が多いのに対し、都市活動用水はそれほど高い数値にはならないこと、一方、7日目になると、3割程度の産業部門が0.8近くに達してくることとなり、断水長期化による企業経営の悪化は、発災1週間という早い段階で既に顕著になってくることが示唆された。さらに、製造業のなかでも鉄鋼業や化学工業といった多量の工業用水を使用する産業部門についても、それらの WTL 値は高いことが明らかとなった。

5. 災害応急対策用水の需要推計

災害時の水需要は、生活用水や都市活動用水のみならず、災害応急対策用水という新たな突発的需要が発生する。その算出方法は式(4)のとおりであるが、本章では、式(4)の中の各項の推定方法について検討した。

5.1 帰宅困難者用水の需要

災害発生後 t 日目に地区 i で発生した対象地域外への帰宅困難者数を $n_{wi}(t)$ とすると、帰宅困難者の水の潜在需要 ($m^3/日$) は、式(21)で推計することとした。

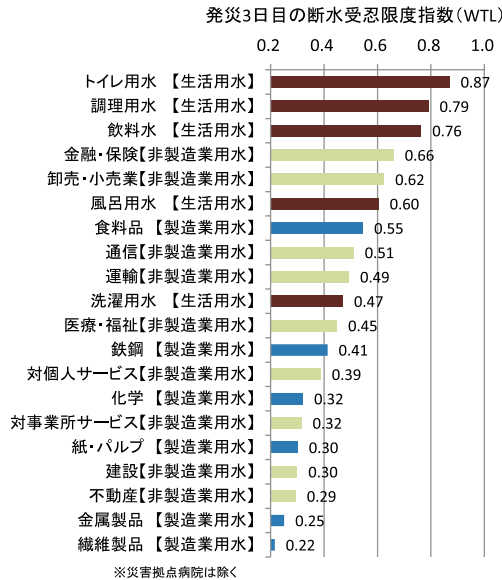


図12 発災3日目の各用途・各部門のWTL

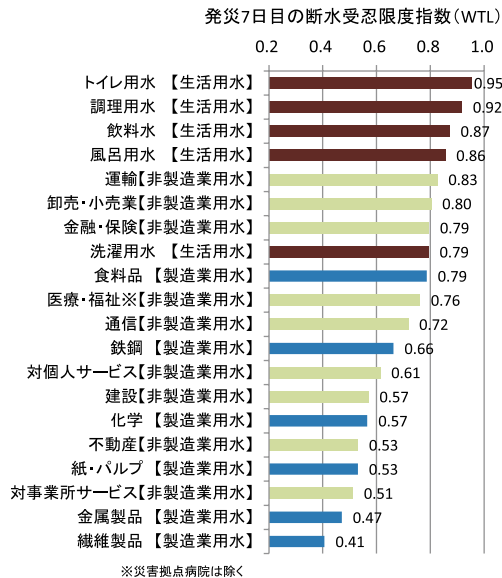


図13 発災7日目の各用途・各部門のWTL

$$QD^u(n_w, t) = (q_{k:1} + q_{k:3}) \sum_i n_{ui}(t) \quad (21)$$

帰宅困難者の水使用用途は、必要最小限の飲料水とトイレ用水 ($k = 1, 3$) のみとした。

5.2 災害医療対応用水の需要

災害時の医療需要は、新規の入院需要（重傷者 + 医療機関で結果的に亡くなる患者）と外来需要（軽傷者）、転院需要（被災した医療機関からの転院患者）に大別される。この内、外来需要に対する水使用量は少なく、また転院需要は平常時在院需要の代替である。そのため、災害医療対応用水の推計値として、新規入院等患者用水のみに着目すればよいことになる。

いま、 q_s ：平常時における病床当たりの平均水使用量原単位 (L/日・床)、 $n_{ni}(t)$ ：新規入院等患者数、とすると、被災都市における災害医療対応用水の災害時潜在需要 (L/日) は、次式で推計できる。

$$QD^m(n_n, t) = q_s F_{j:12}(t) \sum_i n_{ni}(t) \quad (22)$$

ここに、災害拠点病院の断水受忍限度指数 $WTL_{j=12} = 1$ である。 q_s の設定値としては、大阪市の一般病床当たり使用水量実績662 (L/日・床) を設定した。

5.3 災害廃棄物等処理用水の潜在需要

大規模な災害時には、大量の廃棄物が発生する。長期に亘り放置しておけば、強風による飛散、ハエなどの害虫の発生、余震による建物の倒壊などの二次災害、道路へ倒壊した災害廃棄物による通行障害など、様々な障害が発生することから、迅速な処理が求められる²⁶⁾。特に、津波堆積物や洪水堆積物のような有機物や泥状物を含む堆積物については、病原菌の増殖、腐敗の進行、臭気の発生、乾燥による粉塵の発生など、周辺地域の人の健康や生活環境保全上の支障となるおそれがあることから、早急の撤去しなければならない^{27, 28)}。

災害廃棄物の撤去時には、一定量の散水用水、洗浄・清掃用水が利用される。しかしながら、これらの使用実績の調査研究データについては未整備な状況であり、これまで、災害時の水需要として、ほとんど考慮されていない。

そこで本研究では、 q_w ：災害廃棄物発生放置地区延床面積 1 m²当たりの散水等による使用水量原単位、 q_w ：津波堆積物または洪水堆積物 1 m³当

たりの洗浄・清掃等による使用水量原単位, W_i : 地域 i の廃棄物発生量 (トン), \bar{w} : 延床面積当たりの災害廃棄物平均発生量 (トン/㎡), W'_i : 地域 i の津波堆積物または洪水堆積物発生量 (㎥), T_w : 廃棄物処理目標期間とし, 災害廃棄物等の処理時における水の潜在需要 (㎥³/日) について, 式 (23) で考慮することとした。

$$QD^w(W, W', t) = \sum_i \left(q_w \frac{W_i}{wT_w} + q_{w'} \frac{W'_i}{T_{w'}} \right) t \quad (23)$$

なお, q_w の設定値としては, 土木工事における防塵処理工の散水量 0.001 (㎥³/㎡) を, $q_{w'}$ の設定値には, 排水構造物清掃工における泥土量 1 ㎥³ 当たりの必要水量 0.280 (㎥³/㎥³) で設定した²⁹⁾。また, T_w の設定は 3 ヶ月とした²⁸⁾。

5.4 地震火災の消火用水の必要量

大規模災害時に発生する火災は, 類焼火災となる場合が多く, 常時に通常発生する単体火災に比べて 1 件当たりの必要消火水量が急激に増加する。高田ら³⁰⁾ は, 堀内ら³¹⁾ の消火水量算定手法に基づき, 地震時必要消火水量の近似式を提案しており, 本研究では, 同式を活用した。

いま, 地震時の出火件数を d_{fi} とすると, 消火用水の災害時必要量 (㎥³) は式 (24) で表される。

$$QD^e = 6,000 \sum_i d_{fi} \quad (24)$$

6. 南海トラフ巨大地震時の推計事例

6.1 対象地域と被害想定の設定

本研究で構築した推計モデルを, 南海トラフ巨大地震時に甚大な水インフラ被害が予想され, かつ火災被害等に伴い水の量的不足が懸念される大阪市に適用した。

被害想定は以下のとおりである³³⁾。

- ・最大震度・津波浸水・液状化被害: 表12
- ・出火件数 $\sum_i d_{fi}$: 94件
- ・被災者数: 図14
- ・災害廃棄物残存量: 図15

ここで, q_k の値については, 大阪市水道局によ

る平成17年度調査(図16)を参考に設定した。また, 大阪市は, 我が国において東京都に次ぐ経済基盤活動の付加価値額が高い地域²⁴⁾ であるため, 都市活動用水の需要は非常に高い。そのため, こうした大都市域の水需要推計においては, q_j の把握についても重要である。これについても, 大阪市水道局の推計データ(平成17年度調査)を参考に図17のとおり産業部門別 ($j=1, \dots, 12$) に再分類し, モデルの入力値とした。

6.2 水道水の期待供給量の設定

地震被害に伴う被災都市の断水予測に関する研究^{例えは34, 35)}, 復旧速度に関する研究³⁶⁻³⁸⁾ については, これまで非常に多くの蓄積がある。本稿では, 災害時水供給の推定方法について, その高度化を研究対象とするものではないため, 既存の調査報告³³⁾ を所与として分析を進める。

表12 大阪市域の南海トラフ地震被害想定³²⁾

| i | 行政区 | 最大震度 | 津波浸水 | 液状化被害大 | 火災 |
|-----|------|------|------|--------|----|
| 1 | 北区 | 6弱 | ○ | | |
| 2 | 都島区 | 6弱 | ○ | | |
| 3 | 福島区 | 6弱 | ○ | | |
| 4 | 此花区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 中央区 | 6弱 | | | |
| 6 | 西区 | 6弱 | ○ | | |
| 7 | 港区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 8 | 大正区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 9 | 天王寺区 | 6弱 | | | |
| 10 | 浪速区 | 6弱 | ○ | ○ | |
| 11 | 西淀川区 | 6弱 | ○ | ○ | |
| 12 | 淀川区 | 6弱 | ○ | | |
| 13 | 東淀川区 | 6弱 | | | |
| 14 | 東成区 | 6弱 | | | |
| 15 | 生野区 | 6弱 | | | |
| 16 | 旭区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 17 | 城東区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 18 | 鶴見区 | 6弱 | ○ | | |
| 19 | 阿倍野区 | 6弱 | | | |
| 20 | 住之江区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 21 | 住吉区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |
| 22 | 東住吉区 | 6弱 | | | |
| 23 | 平野区 | 6弱 | | | |
| 24 | 西成区 | 6弱 | ○ | ○ | ○ |

※液状化被害大: 建物被害が顕著な行政区のみ「○」

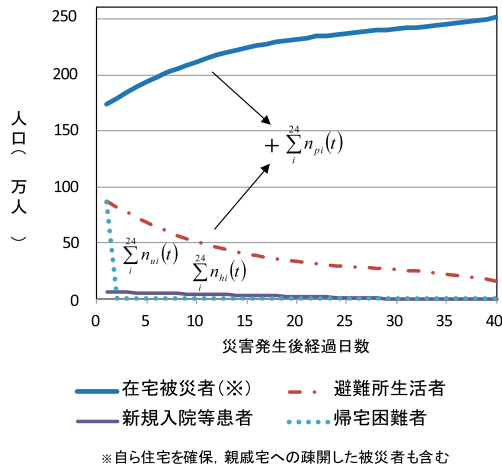
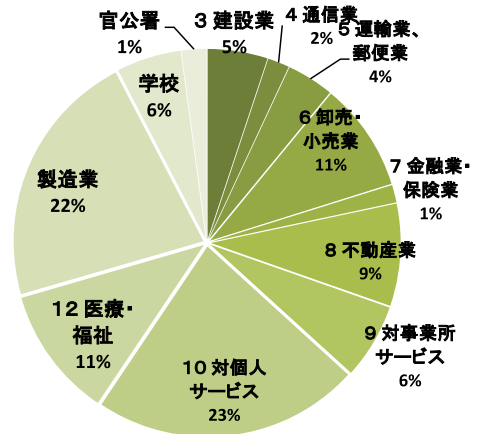


図14 被災者数の時系列想定



$$\sum_j \sum_i q_j n_{ji} = 53 \text{万} m^3 / \text{日}$$

図17 大阪市の産業部門別水量割合の設定値

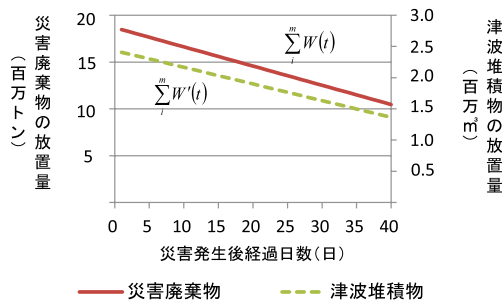
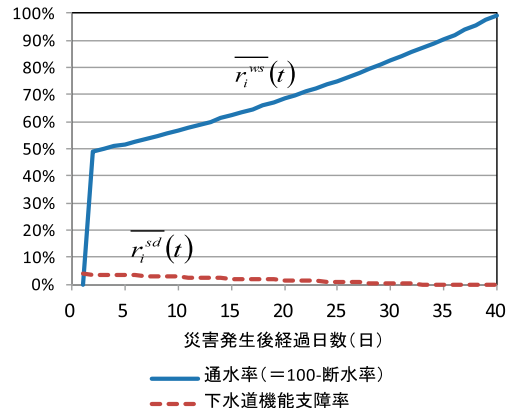


図15 災害廃棄物残存量の時系列想定



注) 津波氾濫が起これば、市内道路は泥土とガレキに覆われ、同時に、地盤の液状化が起これば、路面の凹凸が激しくなることから、実際の水道の復旧作業については、上図の想定よりも遅れることも予測される³⁹⁾。

図18 大阪市の上下水道被害想定

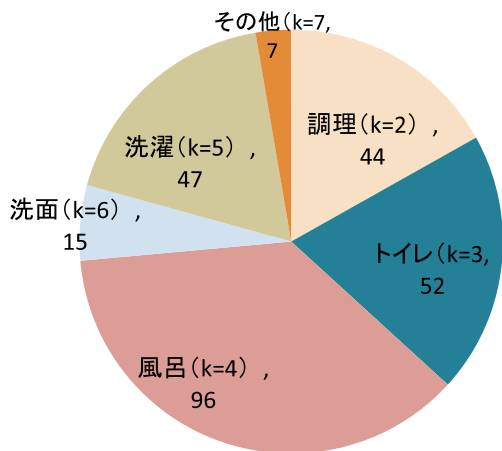


図16 生活用水使用用途別原単位 (L/日・人)

南海トラフ巨大地震時における大阪市の断水想定は、図18のとおりである³³⁾。発災1日目は、河川の津波遡上による取水障害および津波浸水の影響により、市内全域が断水し、発災2日目頃からは管路被害による断水が継続し、発災後1ヶ月経過してもなお、完全復旧には至らないといった特徴がある。

被災都市における水道水および工業用水の期待

供給可能量 $QS(t)$ については、断水率を $r_i^{us}(t)$ とすると、式 (24) により推計した。

$$QS(t) = \sum_i^m \left\{ \left[n_{pi} \sum_k q_k + \sum_j q_j n_{ji} \right] \left(1 - \frac{r_i^{us}(t)}{100} \right) \right\} \quad (25)$$

式 (25) は、地区 i の被災者および被災企業には、対平常時比 $r_i^{us}(t)$ の水量しかシェアできないという水供給状況を表すものである。なお、東日本大震災被災地の一部地域でみられたような、断水率 $r_i^{us}(t)$ が下水道支障率 $r_i^{sd}(t)$ を上回る場合には、 $r_i^{us}(t)$ を $r_i^{sd}(t)$ へ置換する。

6.3 潜在水需要の推計結果

南海トラフ巨大地震時における大阪市域の水の潜在需要を推計した。その結果を図19に示す。同図で、水道水期待供給は上水および工業用水の合算値であり、それぞれ94.3%、5.7%の割合である。

発災初日には、地震火災の発生により、消火用水が爆発的に必要となるとともに、帰宅困難者用水、災害医療対応用水の潜在需要がピークになることが確認できる。そして、発災後20日目を迎えれば、潜在需要がほぼ横ばいに推移するようになり、仮に避難所への水関連物資の備蓄や被災者への節水啓発等を講じない場合には、この段階で平常時と同程度の需要レベルにまで潜在需要が高まることが把握できた。また、大阪市のような経済中枢都市では、都市活動用水の割合が非常に大きく、潜在需要の時系列も生活用水とほぼ同程度のペースで増大することがわかった。

さらに、需給ギャップ (= 潜在水需要量 - 水道水期待供給量) についても着目した。発災当日は水供給が0となり、爆発的な消火用水需要を全くカバーできず、その後再来する需給ギャップが最大となる時点は $t_{max} = 12$ であり、その規模は、394,318 (m³/日) にのぼることがわかった。そして需給ギャップの解消時期 t^* は、水道システムが応急復旧完了期である $t^* = 40$ と算定された。

大阪市をはじめ全国的に実災害時に潜在水需要が推計された事例はないため、実現象との比較検証はできないが、以上の推計結果からは、まず阪神淡路大震災の際に指摘された発災当日の膨大な

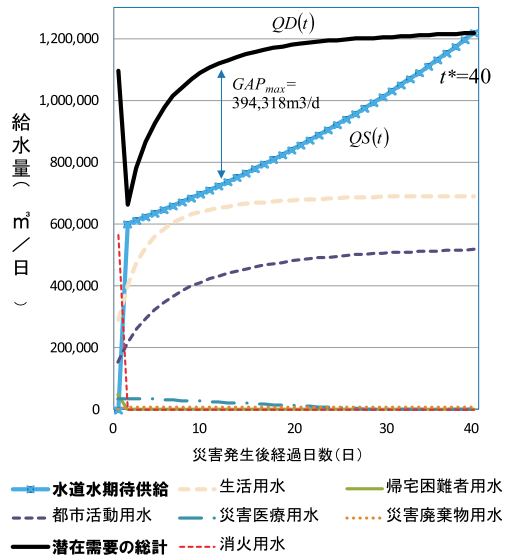


図19 推計結果 (ベースシナリオ)

消火用水の多量需要⁴⁰⁾や需要ニーズが経過日数とともに漸増し続ける⁸⁾傾向が見てとれること、また、本推計例の断水被害想定(初期断水率50%)と東日本大震災時における仙台市の断水被害は類似する部分が多いが、その当時の被災市民が最も我慢を強いたことは生活用水が不足したこと²⁾、すなわち潜在需要と実際の水供給との間に大きなギャップが発生していたことが考えられ、その傾向が同様に表れていることなど、実災害時に現出した特徴が反映されているといえる。

本研究で構築した推計モデルを用いることで、被災者と企業の断水被受限度に基づく需給ギャップの大きさ(応急給水必要量)とその継続期間、解消時期についても定量的に明らかにすることができた。大規模災害時における被災地全体の水確保策をマクロ的に検討するレベルにおいて、非常に有用な結果が得られたものとする。

6.4 需給ギャップ低減のケーススタディ

前節のケーススタディより南海トラフ巨大地震時の大阪市内においては、被災者・被災企業の水利用の要求量と実際の水供給可能量との間には大きなギャップが発生する可能性が高いことがわ

かった。しかしながら、実災害時においては、こうした需給ギャップの早期解消に向けて行政等の対応が迅速に機能するかというと、必ずしも期待できない場合が多い。そのため、既往の災害時では、被災者は健康リスクを抱え、被災企業は大きな営業損失を抱える形で、顕在化需要と実供給とがキャッチアップしていったと考えることができる。

災害時における需給ギャップの解消方策としては、水供給インフラの防災整備を推進することで災害時の水供給能力を高める方策と、被災者および被災企業とのリスクコミュニケーションを通じて、より水の利用を我慢してもらうこと、あるいは水が使えなくても水関連製品の利用等で代替してもらうことなど、潜在需要そのものを低減させる方策の2つに大別される。

本稿では、後者の方策による効果に着目する。具体的なシナリオとしては、対象地域内の全産業部門の操業を想定してきたところを災害応急対策上の重要施設に限定したケースを想定した。

ここで、災害応急対策上の重要施設とは、対象自治体の地域防災計画⁴¹⁾で位置づけられている施設とし、官公署・エネルギー業・学校等の公共サービス、災害拠点病院、情報通信、運輸・郵便業、金融・保険業、医療福祉業、そして応急復旧する上で不可欠な建設業が該当する(表13)。

その結果を図20に示す。

発災初日の水需給逼迫の高さは依然として変わらないものの、都市活動用水の潜在需要が大幅に低下し、被災都市全体の需要も大きく低減できることが確認できた。また、需給ギャップが最大となる時点は $t_{max} = 9$ とやや早まり、126,247 (m³/日) にとどまることがわかった。

需給ギャップの解消時期は $t^* = 21$ とベースシナリオより約半分の期間にまで短縮されている。ただし、発災後21日目までは、災害上の重要施設に位置付けられていない大部分の事業所は操業を休止している状況にあるため、図21のとおり

$\sum_{j \in C} \sum_i n_{ji} F_j(t)$ に相当する企業数、具体的には発災後3週目で大阪市の約75%に及ぶ150,768の

表13 災害応急対策上の重要施設と事業所数

| | j | 産業部門 | 重要施設 ⁴¹⁾ 集合C | 大阪市 ⁴²⁾ 事業所数 |
|------|-----|----------|-----------------------------|----------------------------|
| 非製造業 | 1 | 農林・水産業 | | —※3 |
| | 2 | 鉱業 | | —※3 |
| | 3 | 建設 | ○ | 11,193 |
| | 4 | 情報通信 | ○ | 4,070 |
| | 5 | 運輸・郵便 | ○ | 5,064 |
| | 6 | 卸売・小売 | | 56,884 |
| | 7 | 金融・保険 | ○ | 3,281 |
| | 8 | 不動産 | | 19,089 |
| | 9 | 対事業所サービス | | 14,021 |
| | 10 | 対個人サービス | | 55,640 |
| | 11 | 公共サービス※1 | ○ | 665 |
| | 12 | 医療・福祉※2 | ○ | 10,819 |
| 製造業 | 13 | 食料品 | | 1,050 |
| | 14 | 紙・パルプ | | 3,982 |
| | 15 | 化学 | | 682 |
| | 16 | 鉄鋼 | | 488 |
| | 17 | 金属製品 | | 3,867 |
| | 18 | その他 | | 12,558 |
| 総計 | | | | 203,383 |

※1 公共サービス：エネルギー業、学校、官公署等
 ※2 災害拠点病院は除く
 ※3 事業所数が極めて少ないため評価対象外とした

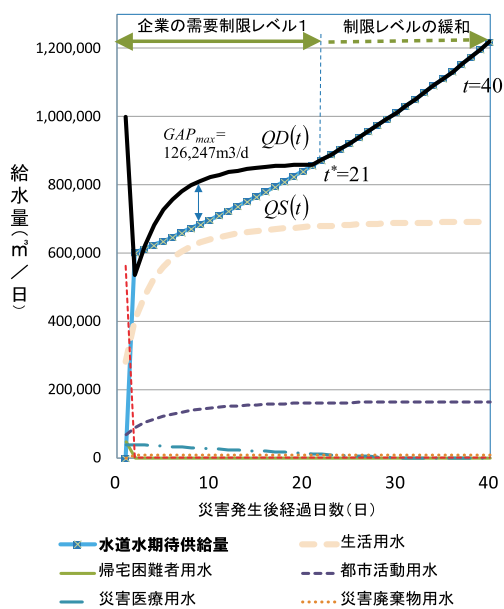


図20 需要推計結果(企業の需要制限レベル1)

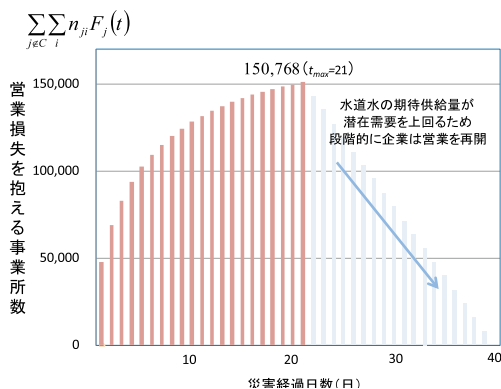


図21 営業損失を抱える事業所数の推移
(注) 22日目以降は営業が再開できた事業所からノーカウント

事業者が営業損失を被ることとなることが推定された。

7. おわりに

本研究では、被災都市における水の潜在需要量をマクロ的に推計する手法を検討し、南海トラフ巨大地震の被災シナリオへの適用を試みた。被災者の健康保持と被災企業の営業損失の回避という観点から、断水に対する受忍限度と潜在需要との関係は、これまで十分な研究が行われていなかった。特に、東日本大震災の経験から、災害時において優先的に確保すべき水は必ずしも飲用水だけではなく、被災者の生活雑用水や都市活動水の早期確保についても重要であることが再認識され、それらの水使用用途を包括した都市用水全体の災害時需要に関する推計方法の検討が一つの重要な課題であると考えられた。

ここで得られた成果と知見は、次のようにまとめられる。

- 災害時の断水継続期間と被災者・被災企業の断水受忍限度の関係について、対数正規モデル、またはワイブルモデルにより計量化できた。
- 被災者の断水受忍範囲が最も小さいのはトイレ用水であり、続いて飲料水・調理用水であった。被災企業については、製造業では食料品業、鉄鋼業の断水受忍範囲が小さく、非製造業では卸売・小売業、医療・福祉、運輸・郵便業、金融・

保険業であった。

- 生活用水の断水受忍限度は、総じて都市活動用水よりも小さい。飲用水を多く使用する卸売・小売業や食料品製造業といった部門の断水受忍限度は、生活用水と同レベルの高さに達することがわかった。
- 災害時において突発的に必要となる地震火災の消火用水、帰宅困難者用水、災害医療対応用水、災害廃棄物等処理用水の需要についても包含した、都市用水の災害時潜在需要の推計モデルを構築できた。
- 南海トラフ巨大地震時を想定した大阪市への本モデルの適用を通して、被災都市の水需給ギャップの定量化が可能であることがわかった。

このように、災害時水利用の潜在需要の推計手法について一定の知見が得られたと考えられるが、今後も検討すべき様々な課題があると考えられる。まず、提案した推計モデルの地域適用性を高め、不確実性を低減させるために、断水受忍限度計量化と用途別・産業別の水需要原単位のデータの蓄積が不可欠である。また、今回は水需要の原単位データが整備されていた大阪市を推計事例の対象としたが、今後、被災都市にも適用し、モデルの妥当性をより精査することも重要である。

なお、本研究では対象にしなかったが、断水受忍レベルの引き上げに応じて被る経済的損失の計量も重要な課題である。需給ギャップの解消するためには、断水に対応した代替財の確保や応急給水車による拠点・運搬給水を行うなどのソフト的な方法から、都市水供給システムのインフラ整備を強化していくハード的な方法など、選択肢は多数存在する。それらのベストプラクティスを探索する上において、それらの分析は必要になる。

謝辞

本研究の実施に当たり、ライフライン途絶と企業の操業影響度に関する既往研究について御助言いただいた梶谷義雄氏((財)電力中央研究所)、大阪市域の水需要予測調査データを御提供いただいた大阪市水道局の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府・消防庁・気象庁：津波避難等に関する調査結果，中央防災会議の専門調査会報告，平成23年9月
- 2) 仙台市：東日本大震災における市民アンケート調査，平成23年9月
- 3) 沖縄県：雨水等の有効利用による災害時生活用水確保促進事業・事業実施報告書，平成25年3月
- 4) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査，平成24年3月
- 5) World Health Organization: Constitution in basic documents, Geneva, World Health Organization, 1948.
- 6) 厚生労働省：新水道ビジョン，平成25年3月
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：平成24年版日本の水資源，平成24年8月
- 8) 関西水道事業研究会：市民の視点に立った水道地震被害予測及び震災時用連絡管整備に関する一考察，pp.6-16, 1996.
- 9) 厚生労働省：水道の耐震化計画等策定指針，平成20年3月
- 10) (財)水道技術研究センター：しなやかな浄水システムの構築に関する研究(J-Step)，第2研究委員会「災害・危機管理対策」，平成24年度研究成果
- 11) 岡山朋子：東日本大震災後の仙台市民の下水処理に関する情報取得と節水行動に関する考察，建築設備と配管工事，2014.1
- 12) 多々納裕一・岡田憲夫・小林潔司：給水制限が水消費行動に与える影響に関する研究，水資源研究センター研究報告，1990年第10号，pp.43-59.
- 13) 喜多秀行・谷本圭志・花井俊文：災害時のサービス水準を考慮した水供給方策に関する考察，京都大学防災研究所年報，第42号，B-2，pp.69-79, 1999.
- 14) 細井由彦・小池敦司・増田貴則・飯田奈穂：水道における費用対効果分析に関する考察，環境システム研究論文集，pp.379-390, Vol.30, 2002.
- 15) 平山修久：水利形態からみた震災リスクの認知構造に関する一考察，日本リスク研究学会第18回研究発表会講演論文集，pp.193-198, 2005.
- 16) 谷口靖博・宮島昌克・源田裕希：リスクコミュニケーションを用いた水道の震災対策事業に関する住民意識調査—大阪市におけるケーススタディー，第30回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009.
- 17) Applied Technology Council: Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, ACT-25, Redwood City, California, 1991.
- 18) 日本リスク研究学会：リスク学辞典，阪急コミュニケーションズ，2006.
- 19) 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門—一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC(確率と情報の科学)，岩波書店，2012.5
- 20) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎：情報量統計学，共立出版，1983.
- 21) 庄野宏：情報量規準とステップワイズ検定の比較と水産資源解析への応用，遠洋水研報第37号，pp.1-8, 平成12年3月
- 22) 梶谷義雄・多々納裕一・山野紀彦・朱牟田善治：製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計，自然災害科学，J. JSNDS 23-4, pp.553-564, 2005.
- 23) 梶谷義雄・多々納裕一・山野紀彦・朱牟田善治：非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計，自然災害科学，J. JSNDS 23-3, pp.247-255, 2005.
- 24) 経済産業省：平成23年簡易延長産業連関表(平成17年基準)取引額表(時価評価)
- 25) 総務省：統計トピックス-No.75-経済センサスでみる12大都市の産業特性と主要産業-平成24年経済センサス-活動調査の分析事例②[地域分析]-，平成26年2月26日
- 26) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針(平成24年度案)
- 27) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：水害廃棄物対策指針，平成17年6月
- 28) (社)廃棄物資源循環学会：津波堆積物処理指針(案)，平成23年7月5日
- 29) (一財)建設物価調査会：平成25年度国土交通省土木工事標準積算基準書
- 30) 高田至郎・欽田泰子・勤息義弘：消防専用水道システムの導入手法構築と適用事例，日本地震工学会論文集，第7巻，第3号，2007.
- 31) 堀内三郎・保野健治郎・室崎益輝：新版建築防火，朝倉書店，pp.179-235, 1999.
- 32) 第3回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会，平成25年8月8日
- 33) 第5回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会，平成26年1月24日

- 34) (財)水道技術研究センター：地震による水道管路被害予測の手引き，平成23年3月
- 35) (財)水道技術研究センター：地震による管路被害予測の確立に向けた研究，平成25年3月
- 36) Y. Sagara, K. Eguchi and R. Yamashita: Simulation of the restoration process based on estimation of seismic damage to distribution pipes, 第6回日米台水道施設地震対策ワークショップ，2009.
- 37) T. Tanaka, Y. Matsuda, K. Sakaki and N. Hirayama: Improvement of Restoration Process in Water Supply Utilities After Disasters Using Reliability Analysis Approach, 第8回日米台水道施設地震対策ワークショップ，2013.
- 38) T. Onishi: BCP Resource Calculation Method by the City of Nagoya – Pipeline Damage Investigation, Emergency Repair, and Emergency Water Supply, 第8回日米台水道施設地震対策ワークショップ，2013.
- 39) 河田恵昭 (大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会長)：南海トラフ巨大地震が起これば大阪地域はどうなるのか，大阪市災害対策委員会，平成26年2月14日
- 40) 関西水道事業研究会：消火用水確保の観点から見た都市の安全性と水道のあり方に関する一考察 (水道と消火用水分科会報告書)，1997.
- 41) 大阪市地域防災計画<震災対策編>，平成24年7月
- 42) 大阪市：大阪市統計書，V-2事業所の概況，2014年5月27日
- (投稿受理：平成26年7月15日
訂正稿受理：平成26年11月25日)

要 旨

東日本大震災では，長期的かつ広範囲に亘る断水被害の発生により，生活用水の不足が顕著となり，被災者の健康リスクが著しく増加した。また，企業の事業継続に必要な水も大幅に不足することとなり，大きな営業損失を招いた。東日本大震災を契機に，水道水以外の水資源を災害時に有効利用することの重要性がより多く指摘されているようになってきている。

本研究では，以上を踏まえて，災害時における被災者と被災企業の断水受忍限度を計量化し，断水期間中に被災者と被災企業が本来欲していた飲用系および雑用系の水の量（潜在水需要）の推計手法を提案する。生活用水と都市活動用水の潜在需要をはじめ，消火用水，帰宅困難者用水，災害医療対応用水および災害廃棄物等処理用水それぞれの突発需要を推計する。そして，南海トラフ巨大地震時における大阪市の潜在水需要の推計例を示す。