

京 都 大 学
博 士 学 位 論 文

災 害 時 の 断 水 被 害 軽 減 に 向 け た
水 需 要 マ ネ ジ メ ン ト に 関 す る 研 究

吉 澤 源 太 郎

2 0 1 6 年

論文要旨

地震、津波、水害などの災害は、これまで被災地域に断水被害を誘発させてきた。災害時の水需給バランスを安定化させるための対策としては、大きく需要側の対策と供給側の対策に分けて捉えることができ、これまでわが国をはじめ、国外においてもまた、水道施設の耐震化といった水供給施設整備や災害時応急給水体制の充実などの後者の供給側の対策に傾注してきた。しかしながら、その財源確保の難しさや水道事業従事職員の減少などが近年顕在化してきており、もはや供給側の対策のみに依存するには限界が見え始めている。

そこで本研究では、需要側の対策に着目した。需要側の対策とは、供給側の対策が水道の供給レベルを被災後も速やかに平時のレベルまで回復させようとする施策であったのに対し、水道利用者の需要そのものを水道の供給容量に応じて一時的な低減を図るなどの対策により、社会の断水被害の軽減を図るための対策である。本研究では、こうした需要側のマネジメントを「災害水需要マネジメント」と称し、その体系化とその適用手法の構築に向けたさまざまな分析を試みた。

まず、災害水需要マネジメントの体系化に向けて、水需要マネジメント (Water Demand Management) に関する既存概念を整理するとともに、災害マネジメントサイクルの概念を導入することで、特に災害時に焦点を当てた場合に必要となる概念を整理した。

災害時の水需給逼迫下における被災者と被災企業などの水需要は平時とは異なる。災害時の水需要に関する本研究での捉え方と、水需要を規定している因子として断水受忍限度の存在を明らかにし、災害水需要マネジメントの定義化を図った。

また、災害水需要マネジメントの施策体系について検討を図り、それらは心理的方略 (psychological strategy) と構造的方略 (structural strategy) に大別でき、さらに構造的方略については、技術的方略 (technological strategy) とそれ以外という枠組みで説明できることを示した。

次いで、災害時における水需要構造の把握を行った。被災者の健康および衛生環境の維持、被災企業の営業損失の回避という観点から、それぞれの断水の継続がこれ以上我慢できないとなる範囲の計量化を図り、災害時における水需要の推計を行った。生活用水はもとより、都市活動用水や災害応急対策用水を含めた都市用水全体の推計を試みている。これより、発災直後は突発的な災害応急対策用水の需要が発生し、その後は一時的に平時の需要よりも低く抑えられる (我慢することができる) もの、断水の長期化

に伴いその我慢も限界に達して需要が漸増し、平時の需要水準に急接近するという傾向を明らかにし、その増加速度は水道の応急復旧速度を上回るケースがあるために、大きな水需給ギャップが発生する構造を定量的に明示した。

本論文では、災害水需要マネジメントの主要施策のうち、特に心理的方略と技術的方略に関する具体的な手法構築に焦点を当てた。

心理的方略に焦点を当てた分析では、災害時の水需要は、被災者一人一人の断水受忍限度に大きさに強く依存することに着目し、この断水受忍限度のレベルを引き上げるために、水道事業者による住民へのリスクコミュニケーションを通じて、自発的に断水リスクに対する理解とその対処行動意図の形成と実行を促し、災害発生の際においても水道復旧状況に見合った需要水準を被災者が保持できるようなコミュニケーション手法について検討を行った。その結果、断水リスクの解決に向けた「行動プラン」の作成に役立つような具体的な情報を提供することが災害時の水需要低減に効果的であること、加えて断水リスクの解決や対処行動を具体的に考えた住民ほど、近隣の断水地域の住民を助けようと思う共助の意識も高くなる傾向があるという示唆を得ることができた。

技術的方略に焦点を当てた分析では、災害時において代替水資源の有効活用による需要転換を図ることで、低水質な水への活用を応急的に促す取組について分析した。代替水資源としては、雨水（貯留内水）、地下水（井戸水）、工業用水（余剰水）、下水処理水・再利用水を選定し、なかでも工業用水（余剰水）が災害時有効活用の期待効果が高いことを明らかにした。一方、被災者が水道水を消費することで享受できる各種サービスは、本来どの程度の水質レベルの水で足り得るのかを推計し、工業用水が災害時の水需要の大部分をカバーできるポテンシャルを有することを示した。ケーススタディとして、指定避難所に工業用水を供給可能とする二元給水整備がなされた場合に、災害時の避難所における生活用水確保の期待値がどの程度上昇するのかについてシミュレーションを行い、特に発災後1～3週間の間に高まる生活用水需要の大部分をカバーできる効果があることを明らかにした。その際、工業用水の災害時における供給信頼性には多くの不確実性を伴っているため、工業用水の災害時供給再開予測モデルを構築し、上水道と工業用水道の復旧にかかる人的資源投入配分の検討を可能とした。

最後に、災害水需要マネジメントが断水被害の軽減に果たす役割について、これまでの分析結果の総括を通じた総合考察を行い、災害水需要マネジメントの体系化に向けて残された課題を整理し、本論文の結びとした。

目次

| | |
|---|-----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 わが国における災害時の水需給を巡る課題 | 1 |
| 1.2 世界の水需給を巡る課題 | 3 |
| 1.2.1 恒常的な課題..... | 3 |
| 1.2.2 災害時の様相..... | 4 |
| 1.3 本研究の目的..... | 5 |
| 1.3.1 これまでの災害時の水需給安定化策..... | 5 |
| 1.3.2 供給側の対策の限界と本研究の着眼点..... | 8 |
| 1.4 本論文の構成..... | 8 |
| | |
| 第2章 災害水需要マネジメントの体系化に向けて —本研究の位置づけ | 13 |
| 2.1 水需要マネジメントの体系整理 | 13 |
| 2.1.1 水需要マネジメントの定義..... | 13 |
| 2.1.2 水需要マネジメントを支える諸施策..... | 14 |
| 2.1.3 諸施策の分類化..... | 17 |
| 2.2 災害時における需要の考え方..... | 19 |
| 2.3 災害水需要マネジメントの理論的枠組みの整理..... | 21 |
| 2.3.1 平時と災害時の異なる局面..... | 21 |
| 2.3.2 断水被害の定義..... | 22 |
| 2.3.3 断水受忍限度の定義..... | 23 |
| 2.3.4 災害水需要マネジメントの定義..... | 25 |
| 2.3.5 災害マネジメントサイクルとしての災害水需要マネジメント..... | 27 |
| 2.3.6 災害水需要マネジメントの施策体系..... | 29 |
| 2.4 本論文の検討範囲..... | 29 |
| | |
| 第3章 災害時における断水受忍限度と水需要の推計 | 35 |
| 3.1 本章の論点 | 35 |
| 3.2 災害時の水需要推計の考え方..... | 36 |

| | | |
|------------|------------------------------------|-----------|
| 3.2.1 | 生活用水の需要 | 36 |
| 3.2.2 | 都市活動用水の需要 | 37 |
| 3.2.3 | 災害応急対策用水の需要 | 38 |
| 3.3 | 被災者の断水受忍限度の計量化 | 38 |
| 3.3.1 | 既往研究と本研究の立場 | 38 |
| 3.3.2 | 指標化の方法 | 39 |
| 3.3.3 | 計量化に用いるデータの概要 | 40 |
| 3.3.4 | データの集計結果 | 41 |
| 3.3.5 | 被災環境の基本的な想定 | 42 |
| 3.3.6 | 断水受忍限度指数の定式化 | 43 |
| 3.4 | 被災企業の断水受忍限度の計量化 | 47 |
| 3.4.1 | 指標化の方法 | 47 |
| 3.4.2 | 計量化に用いるデータの概要 | 50 |
| 3.4.3 | 断水受忍限度指数の定式化 | 50 |
| 3.5 | 被災者と被災企業の断水受忍限度の比較考察 | 56 |
| 3.6 | 災害応急対策用水の需要推計 | 57 |
| 3.6.1 | 帰宅困難者用水の需要 | 57 |
| 3.6.2 | 災害医療対応用水の需要 | 58 |
| 3.6.3 | 災害廃棄物等処理用水の需要 | 59 |
| 3.6.4 | 地震火災の消火用水の必要量 | 60 |
| 3.7 | 南海トラフ巨大地震時の都市部における水需要の推計例 | 60 |
| 3.7.1 | 対象地域と被害想定の設定 | 60 |
| 3.7.2 | 水道の復旧想定 | 63 |
| 3.7.3 | 水需要の推計結果 | 65 |
| 3.8 | 災害時における応急給水量の目標設定に関する考察 | 66 |
| 3.8.1 | 現行の応急給水目標の考え方 | 66 |
| 3.8.2 | 災害時の応急給水目標と水需要とのマッチングに関する考察 | 67 |
| 3.9 | 結語 | 68 |
| | | |
| 第4章 | リスクコミュニケーションを通じた災害水需要マネジメント | 73 |
| 4.1 | 本章の論点 | 73 |
| 4.2 | 断水リスクコミュニケーションの定義と役割 | 74 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 4.3 | 断水リスクコミュニケーションの期待仮説 | 76 |
| 4.3.1 | コミュニケーションがリスクの認知・理解・行動に及ぼす影響の仮説 | 76 |
| 4.3.2 | 情報の内容とその提供前後の意識変化の仮説 | 79 |
| 4.4 | 都市生活者への断水リスクコミュニケーション実験 | 80 |
| 4.4.1 | 実験概要 | 80 |
| 4.4.2 | アンケート調査票の設計 | 81 |
| 4.4.3 | 情報提供内容 | 83 |
| 4.4.4 | 断水受忍限度の調査方法 | 86 |
| 4.4.5 | 共助意識の調査方法 | 86 |
| 4.5 | 実験結果 | 86 |
| 4.5.1 | 季節による断水受忍限度の変化 | 87 |
| 4.5.2 | 情報提供内容の違いによる断水受忍限度の変化 | 87 |
| 4.5.3 | 情報提供内容の違いによる共助意識の変化 | 91 |
| 4.6 | 需要低減効果 | 92 |
| 4.7 | クライシス段階に求められるコミュニケーション | 95 |
| 4.8 | 結語 | 96 |

第5章 代替水資源の活用による災害水需要マネジメント 99

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 5.1 | 本章の論点 | 99 |
| 5.2 | 利用可能な代替水資源 | 99 |
| 5.2.1 | 生活用水の使用用途と水質 | 99 |
| 5.2.2 | 代替水資源の水質と使用可能用途 | 100 |
| 5.3 | 水質レベル別の災害時水需要の推計例 | 101 |
| 5.4 | 都市域における代替水資源の災害時有効活用ポテンシャル | 103 |
| 5.4.1 | 多基準分析（線形加法モデル）による定性評価 | 103 |
| 5.4.2 | 代替水資源の地域保有量の推計 | 106 |
| 5.5 | 災害時における工業用水の供給再開予測モデル | 109 |
| 5.5.1 | 工業用水の余剰度と災害時の供給を巡る現状 | 109 |
| 5.5.2 | 東日本大震災における工業用水道の復旧プロセスの分析 | 111 |
| 5.5.3 | 既往研究と本研究の立場 | 120 |
| 5.5.4 | モデル化の範囲 | 122 |
| 5.5.5 | 工業用水道システムのモデル化 | 127 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.5.6 | 災害時復旧曲線の定式化 | 128 |
| 5.5.7 | 復旧シナリオの仮定とシステム各要素の所要復旧日数 | 130 |
| 5.5.8 | 復旧曲線の形状決定要因の可視化 —人的資源投入の山積み図および工業用水道の被害復旧箇所 を示した管路ネットワーク・グラフ図との連関— | 133 |
| 5.5.9 | モデルの精度検証 | 135 |
| 5.5.10 | モデルの限界 | 137 |
| 5.6 | 防災拠点施設に対する工業用水供給を想定したシナリオスタディ | 139 |
| 5.6.1 | 災害時における避難所の水問題 | 139 |
| 5.6.2 | 避難所に工業用水が供給された場合の水道サービスの需要代替性 | 141 |
| 5.6.3 | 対象地区の指定避難所と工業用水道配水管とのネットワーク距離 | 143 |
| 5.6.4 | 対象地区における工業用水道の地震被害シミュレーション | 145 |
| 5.6.5 | 工業用水道の復旧にかかる人的資源投入のシナリオ | 146 |
| 5.6.6 | 対象地区における工業用水の余剰水量 | 148 |
| 5.6.7 | 対象地区における工業用水道の復旧曲線の推計 | 149 |
| 5.6.8 | 対象地区における避難生活用水需要のカバー率の変化 | 151 |
| 5.6.9 | 上水道および工業用水道の復旧人員投入配分の変更による効果 | 155 |
| 5.7 | 結語 | 158 |
| 第6章 | 結論 | 163 |
| 6.1 | 結果の総括 | 163 |
| 6.2 | 今後の課題 —災害水需要マネジメントの体系化に向けて— | 166 |

第 1 章 序論

1.1 わが国における災害時の水需給を巡る課題

地震、津波、洪水などの災害や水源水質異常などの事故は、これまで被災地域に断水被害をもたらしてきた。2011 年 3 月に発生した東日本大震災、同年に発生した平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨や平成 23 年台風第 12 号に伴う災害時には、上下水道施設も甚大な被害を受け、断水日数が長期に及んだ。とりわけ東日本大震災においては、上水道の施設被害が 19 都道府県 264 水道におよび、断水戸数は約 257 万戸、断水日数が最大約 7 ヶ月という甚大な被害が発生した¹⁾。このような大規模災害時における断水被害は、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している。東日本大震災の被災者および被災企業を対象としたアンケート調査（内閣府・他（2011）²⁾、仙台市（2012）³⁾、沖縄県（2012）⁴⁾ および内閣府（2012）⁵⁾）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明らかとなっており、断水が長引くにつれて被災者らの健康と衛生環境が損なわれていったとともに、企業もまた多大な営業損失を抱えていった実状が浮き彫りとなった。

わが国の都市水供給システムの耐震化率は、2015 年 3 月末現在、上水道施設のうち基幹的な管路の耐震適合性のある管路は約 36.0%、浄水場は約 23.4%、配水池は約 49.7%であり⁶⁾、また工業用水道については、2013 年の(一社)日本工業用水協会によるアンケート調査結果よれば、管路全体としては約 31.2%、浄水場は約 20.0%、配水池は約 36.1%であるなど⁷⁾、まだまだ地震に対する備えが十分とはいえない状況である。さらに、わが国の水インフラは、高度経済成長期の水需要の急増に対応するために、その多くが 1950 年代半ばから 1970 年代前半の高度経済成長とともに整備されており、今後急速に老朽化することが懸念されている⁸⁾。

水道水（上水）は、水道法の定義によると、「水道（導管およびその他の工作物により、水を人の飲用に適する水として供給する施設）から入手できる水」であり、言うまでもなく、わが国では、調理、洗濯、風呂、トイレ用水などの生活用水、ひいては飲食店や事務所、ホテル、病院、学校、公園などの施設、公衆トイレなどの都市活動

用水にまで使用されている。そのため災害断水時においては、給水車などによる応急給水だけですべてをまかなうことは困難である。そのため、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、より多く指摘されるようになってきた^{8) 9)}。実際に東日本大震災に発生した福島第一原子力発電所からの放射性物質の大量放出事故の際には、東京都内の一部地区において、摂取制限を行いながら生活用水としての水道水給水を継続する措置が講じられている。このような実態も重なり、厚生労働省（2016）¹⁰⁾は、水質事故発生時や災害等の非常時には、上水道使用者の理解を得ることを前提として、摂取制限による給水継続の措置を選択肢に加えるという考え方を示すこととなった。そして、その直後に発生した2016年熊本地震の際には、熊本市において濁度が高い水道水を応急的に通水する措置が採られるに至っている。このように災害時の水需給ギャップを低減するために、飲用には適さないものの「生活用水として使うことができる水」の需要に少しでも応えるために、現実的な災害時水供給のあり方を模索する動きが活発化してきている。

工業用水の災害時における供給能力の一時低下は、さらに深刻度を増す。工業用水とは、工業用水道事業法による定義では、「工業（物品の加工修理業を含む製造業、電気供給業、ガス供給業及び熱供給業）の用に供する水」とされており、産業がその生産活動を行ううえで不可欠な基礎的生産要素であり、特に製造業においては、生産ラインが稼働するために冷却用水、洗浄用水、その他雑用水として必需品である。災害時における水供給事業者の緊急対応では、被災者の生命維持の観点から飲料用の応急給水の確保が最優先され、復旧活動においても、まず家庭への生活用水供給が優先される。都市活動施設への産業用水については、その後に、復旧、供給再開が行われる。阪神・淡路大震災時においては、工業用水道の長期断水が発生し、神戸の産業に大きな影響を与えたことが報告されている¹¹⁾。また、東日本大震災の被災地における企業・工場・店舗等への雑用水供給についても、その早期化が強く求められていた¹²⁾。一方で、災害復旧活動展開の基礎となる施設、および製造ラインが停止することで被害地域ひいては国家経済に重大な支障を及ぼす施設に工業用水が多量に使用されている場合には、早期復旧されるケースもあり（5.6.5 参照）、災害時における工業用水の供給再開のあり方についても課題が山積している。

なお、上述のような災害断水被害に比べれば深刻度の程度は低いものの、いまだ全国各地において渇水被害も発生しており、取水制限が実施されている。近年、降水量の変動幅の増大などといった気候変動の影響等により、水供給施設の整備が計画された時点に比べてその供給可能量の低下などの不安定要素が顕在化¹³⁾している点も見過

ごすことができない事象である。

1.2 世界の水需給を巡る課題

1.2.1 恒常的な課題

世界の水需給を巡る課題は、近年の世界人口の増加、経済の発展、気候変動等により、わが国よりも切迫度の高い様々な事象が指摘されている。国土交通省 水管理・国土保全局 水資源部は、こうした問題を量的なものとの質的なものに分類して整理し、「日本の水資源の現況」（平成 26 年版までは「日本の水資源」）として毎年公表している。世界の水需給を巡る課題については、このなかの最新の公表資料「平成 27 年版日本の水資源の現況」¹³⁾を引きながら、以下の 3 点に要約できるものとする。

- 国連開発計画（UNDP）の「人間開発報告書 2006（Human Development Report: HDR）」¹⁴⁾の中で、地球上にはすべての人に行き渡らせるのに十分なだけの水量が存在しているものの、国によっては、水の流入量や水資源の分配に大きな差があるという問題点が改めて指摘されている。さらに国連世界水アセスメント計画（WWAP）は、「世界水発展報告書 2014（The United Nations World Water Development Report 2015）」¹⁵⁾のなかで、2013 年現在の人口一人当たりの水資源賦存量から水需給に関する逼迫の程度^{*1}を分析し、いくつかの国で水ストレス下^{*2}、水不足の状態^{*3}に直面していることを明らかにしている。

※1 「水ストレス」と呼ばれる。

※2 農業、工業、エネルギー及び環境に要する水資源量は年間一人当たり 1,700 m³とされ、利用可能な水の量が 1,700 m³を下回る場合は「水ストレス下にある」状態という。

※3 さらに 1,000 m³を下回る場合は「水不足」の状態という。

- 水資源として利用可能な水量は、降水量の変動等により絶えず変化するものであり、地域的には、毎年のように発生する大雨・干ばつ等の異常気象が、水の利用可能量に大きな影響を及ぼす。IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change :

気候変動に関する政府間パネル) 第 5 次評価報告書 (2014 年 11 月) によれば、気候変動は、多くの地域において降水量または雪氷の融解の変化が水文システムを変化させ、質と量の面で水資源に影響を与えること、また、水不足を経験する世界人口、および主要河川の洪水の影響を受ける世界人口の割合は、21 世紀の温暖化水準の上昇に伴って増加することを指摘している。

- 国連が発表した「The Millennium Development Goals Report 2015」¹⁶⁾によれば、安全な飲料水を継続的に利用できる人口の割合は、1990 年には世界全体で 76%、開発途上国で 70%であったものが、2015 年には、世界全体で 91%、開発途上国で 89%まで改善したものの、いまだ約 6 億 6 千万人が継続的に利用できる状況にはないとされている。加えて、基本的な衛生施設を継続して利用できない人口の割合は、1990 年は 54%、2015 年は 68%となっており、約 9 億 5 千万人が改善されていない状況にあるとされている。世界人口の増加、経済発展等により水使用量が大きく増加することに加え、水供給および排水施設の不備などによる水質悪化も懸念されている状況にある。

1.2.2 災害時の様相

自然災害による被害は世界各地で発生している。仙台防災枠組 2015-2030¹⁷⁾のなかでは、とりわけ 2005~2015 年に発生した災害の様相について、以下のように総括 (和訳文より抜粋) されている。

“10 年間の期間に、災害は引き続き甚大な損害をもたらし、その結果、人々、コミュニティ、国家の福祉と安全が総体として影響を受けた、災害の発生によって、70 万人以上が死亡し、140 万人以上が負傷し、約 2,300 万人が住む家を失った。全体としては、15 億人以上の人々がさまざまな形で災害の影響を受けたことになる。経済的損失は合計で 1 兆 3 千億ドル以上となった。さらに、2008 年から 2012 年にかけて、1 億 4,400 万人が災害により住む場所を失った。災害は、その多くが気候変動によって激化し、またより頻繁かつ激しく起こるようになっており、持続可能な開発に向けた進展を著しく阻害する。全ての国において、脆弱性 (Vulnerability) が減少するよりも人と財産の (ハザードへの) 暴露 (exposure) の方が速く増大しており、その結果、新たなリスクが発生したり、短期・中期・長期的な経済・社会・健康・文化・環境への大きな影響を伴った災害損失が、特に地方やコミュニティのレベルで、継続的に増加し

たりしている。繰り返し発生する小規模な災害や、徐々に発生する（slow-onset）災害は、特にコミュニティや世帯、中小企業に影響を及ぼし、全損失の中で高い割合を占めている。”

そして、このような災害時には、水道などの主要インフラもまた重大な被害が発生したことが報告されている¹⁸⁾。

世界都市化予測 2014¹⁹⁾によれば、世界的に、都市部の人口が農村に比べて増加しており、世界人口のうち都市部に居住している人の割合は、1950年には30%であったのが、2014年には54%、そして2050年には66%まで増加すると予測されている。こうした都市化現象は、災害リスクに対する暴露（exposure）の増大をまねく事態といえ、新たに増加した人口が災害に脆弱な地区や状態で生活することを余儀なくされる場合がある。一般に、都市域における水道普及率は農村部よりも高い。しかしながら、災害時においてその供給が断絶するリスクは非常に高くなり、長期的に断水被害が生じた場合には、飲用水をはじめ、洗体、トイレ水洗用の生活用水が不足するため、住民の健康や生活衛生環境の悪化などのリスクは極めて大きくなる。世界各地にみられる災害リスクに対する暴露（exposure）の増大は、災害時の水需給逼迫の増大を誘引にもつながっているといえる。

1.3 本研究の目的

1.3.1 これまでの災害時の水需給バランス安定化策

災害時における水需給バランスを安定化させるための対策は、図-1.1のように需要側の対策と供給側の対策に大別して考えることができる。また、施策別に分類すれば図-1.2のとおり表すことができる。

本研究で着目する「水需要マネジメント」は、需要側の対策として位置づけられ、一方の供給側の対策としては、都市域の唯一ともいえる水供給手段である水道（本論文では、上水道と工業用水道を合わせた水供給インフラを総称して「水道」と呼ぶ。）の災害耐性を高めるための「施設耐震化対策」、および被災した際の迅速な応急復旧体制の構築といった「応急対策」などが挙げられる。

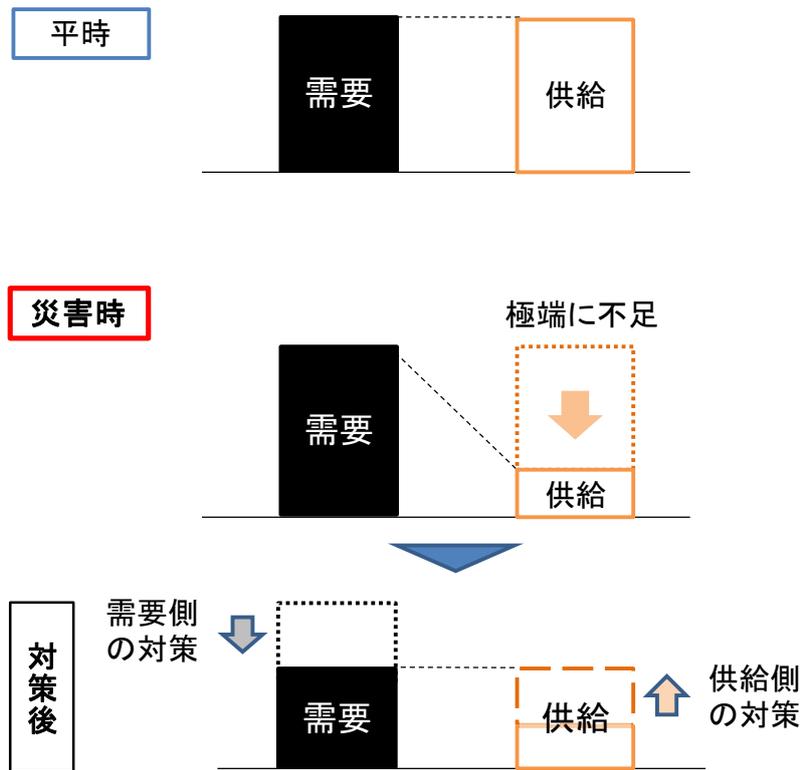


図-1.1 災害時の水需給バランス安定化のための需要側と供給側の対策

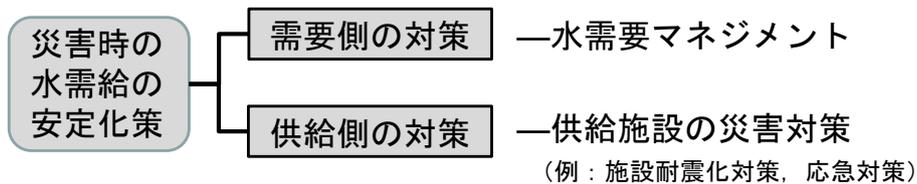


図-1.2 災害時の水需給バランス安定化策の大分類

後者の供給側の対策の詳細については、表-1.1 に示す地震を対する施策例¹⁷⁾をたどりながら整理することができる。図-1.2 における「施設耐震化対策」は表-1.1 の「施設耐震化対策」に当たり、被害発生抑制、および影響の最小化のためのさまざまなハード対策が中心となる。とりわけ、影響の最小化のためハード対策については、地震のみならず、津波、洪水などのさまざまな災害に共通した対策であるといえる。一方、「応急対策」については、復旧の迅速化、および応急給水の充実といったソフト対策が中心となる。

災害時の水需給安定化の取組を概観すると、特にわが国においては、これまで後者

の供給側の対策に重点が置かれてきたと言わざるを得ない。たとえば供給側の対策の中の施設耐震化対策に位置づけられる各種ハード対策については、近年、全国の水道事業者によって、災害時においても断水被害を最小限に抑える水道システムの構築を目指すべく集中的な事業化がなされている。

表-1.1 水道の地震対策

| | | |
|-------------|-------------|--|
| 施設耐震化 対策 | 被害発生 の抑制 | 水源施設等の耐震化 |
| | | 管路施設の耐震化 |
| | | 給水装置の耐震化 |
| | | 管路施工面の耐震化 |
| | 影響の 最小化 | 管路システムの耐震化 (バックアップ施設、ブロックシステムなどの整備) |
| | | 作業障害物の除去 |
| | | バルブの設置と操作 |
| | | 二次災害の防止 (消火用水量の確保など) |
| 応急対策 | 復旧の 迅速化 | 情報の収集と広報 |
| | | 応急復旧の迅速化 |
| | | 作業力の確保と応援の受け入れ体制 |
| | 応急給水 の充実 | 運搬給水 |
| | | 拠点給水 |
| | | 仮設給水 |

(注) 水道の耐震化計画等策定指針 (2008年3月)²⁰⁾を加筆して作成

また、応急対策に関する諸施策については、1995年阪神・淡路大震災以降、わが国において国外では類を見ないほどの研究の蓄積がなされてきた分野である。わが国における研究事例を挙げれば、情報の収集と広報の分野に関する研究については、発災後に目まぐるしく変化する上水道の復旧情報と応急給水の情報など情報システムを介して共有・管理する手法を開発した西澤ら (1997)²¹⁾、山野ら (2005)²²⁾ などの成果が、応急復旧の迅速化に向けた主要研究としては、特に復旧人員の確保が難しい広域災害における水道復旧の迅速化に焦点を当てた築山ら (2008)²³⁾ などの成果が、作業力の確保と応援の受け入れ体制の充実に関しては、事業継続計画の概念を取り入れた

山下ら (2009)²⁴⁾、小松ら (2009)²⁵⁾ などがある。「応急給水の充実」についても同様に、阪神・淡路大震災直後に関西水道事業研究会 (1996)²⁶⁾ の検討をはじめ、細井ら (2003)²⁷⁾、水中ら (2008)²⁸⁾、東日本大震災の教訓も踏まえた応急給水マネジメントシステムのあり方を提案した平山 (2015)²⁹⁾ の研究が主な成果として挙げられる。そして、「復旧の迅速化」と「応急給水の充実」を総合的に捉える試みとしては、例えば細井ら (1999)³⁰⁾ の研究があり、さらには水道事業者の実務レベルで活用するための (社) 日本水道協会の「地震等緊急時対応の手引き」³¹⁾ についても整備されてきている。これらの研究については、実災害時のなかでも応用されている。

1.3.2 供給側の対策の限界と本研究の着眼点

大規模な災害時における水需給バランスの安定化策として、供給側の対策のみに傾注するのは不十分と言わざるを得ない。水道施設の耐震化等に代表される災害耐性の高い施設整備については、その実現までには今後も膨大な投資が見込まれており、財源の確保、ならびに水道事業従事職員および施工業者の不足の問題が顕在化している中で、その目標達成への道程は長く険しいことが指摘されてきている³²⁾。

さらには災害時の応急給水にも限界がある。阪神・淡路大震災以降、被災した水道事業者を応援するための協定などが整備されるとともに、具体的なルールは「地震等緊急時対応の手引き」³¹⁾ の中などで取り決めがなされ、以後約 20 年間に発生した数々の災害時において着実に機能し、高い効果を上げてきた。しかしながら、応急給水車で運搬できる水量は、被災者の需要に比べれば極めて少量に過ぎず、特に東日本大震災のような広域災害時には応急給水車による応急給水だけでは歯が立たない³³⁾。

そこで本研究では、需要側の対策に着目する。供給側の対策が水道の供給レベルを被災後も速やかに平時のレベルまで回復させようとする施策であったのに対し、需要側の対策とは、水道利用者の需要そのものを水道の供給容量に応じて一時的に調整を図るなどの対策により、断水による社会的被害の軽減を図るための対策である。本研究では、そのための各種施策を、災害時の水需給逼迫状態を低減するための需要側のマネジメント、すなわち「災害水需要マネジメント」と総称することとし、その方法論について論述していくこととしたい。

1.4 本論文の構成

本論文では、図-1.3 のように構成される。

| | | |
|-----|-----------------|--|
| | (問題の提起) | 序論 |
| 第1章 | | 〔 災害時の断水被害軽減のための 水需要マネジメントの導入意義 〕 |
| | (問題の明確化, 目的の設定) | |
| 第2章 | | 災害水需要マネジメントの体系化 に向けて — 本研究の位置づけ — |
| | (調査) | |
| 第3章 | | 災害時における断水受忍限度と 水需要の推計 |
| | (手段の設定と分析①) | |
| 第4章 | | リスクコミュニケーションを通じた 災害水需要マネジメント |
| | (手段の設定と分析②) | |
| 第5章 | | 代替水資源の活用による 災害水需要マネジメント |
| | (評価) | 結論 |
| 第6章 | | 〔 結果の総括と災害水需要マネジメントの 体系化に当たって残された課題 〕 |

図-1.3 本論文の構成

第1章では、本研究の背景について述べ、災害時の水需給安定化に関する既存の諸施策と本研究の立ち位置について明確にし、災害時の断水被害軽減のためには、「需要側の対策」の重要性について述べる。

第2章では、災害水需要マネジメントの体系化に向けて、水需要マネジメントに関する既存概念と災害時を想定した場合に必要な概念を明らかにする。災害時の水需給逼迫下における被災者および被災企業などの水需要は平時とは異なった様相を呈する。そのため、災害時の需要に関する本論文の定義と、需要を規定している要因、断水受忍限度の概念を明らかにするとともに、災害マネジメントサイクルの視点を導入することで、災害時というフェイズに射程を拡げた災害水需要マネジメントを定義する。そして、災害水需要マネジメントを構成する諸施策を選定し、その体系化を図る。

第3章では、災害時における水需要の推計を行う。被災者の健康および衛生環境の維持、被災企業の営業損失の回避という観点から、それぞれの「断水受忍限度」の計量化を図り、災害時需要の推計を行う。生活用水はもとより、都市活動用水や災害応急対策用水を含めた都市用水全体の推計を試みる。そして、ケーススタディとして南海トラフ巨大地震時における被災都市の水需給ギャップを定量的に評価する。

第4章では、災害水需要マネジメントの心理的方略に焦点を当てる。情報の提供により住民の行動変容を図る方略である。災害時の水需要は、被災者一人一人の断水受忍限度に大きさに強く依存する。この断水受忍限度のレベルを引き上げるために、水道事業者による住民へのリスクコミュニケーションを通じて、自発的に断水リスクに対する理解とその対処行動意図の形成と実行を促し、災害発生の際においても水道復旧状況に見合った需要水準を被災者が保持できるような災害水需要マネジメント手法を検討する。また、このようなリスクコミュニケーションの成功が、自宅の断水が解消した場合には未解消地域の住民に水を分け与えようとする共助の意識をどの程度を刺激するかについても分析する。

第5章では、災害水需要マネジメントの技術的方略に焦点を当てる。災害時において代替水資源の有効活用を図ることで、低水質な水への需要転換を応急的に促す取組について分析する。なお、代替水資源としては、雨水（貯留内水）、地下水（井戸水）、工業用水（余剰水）、下水処理水・再利用水を選定し、なかでもわが国の都市域のほとんどで入手可能な工業用水（余剰水）が災害時有効活用の期待効果が高いことを確認する。一方で、被災者が水道水を消費することで享受できる各種サービスは、本来どの程度の水質レベルで足り得るのかを推計し、工業用水が生活用水の大部分をカバーできるポテンシャルを有することを示す。ケーススタディとして、指定避難所に工業用水を供給可能とした場合、災害時の避難所生活用水確保の期待値がどの程度上昇するのかについて分析する。その際、工業用水の災害時における供給信頼性には多くの不確実性を伴っているため、工業用水の災害時供給再開予測モデルの構築についても併せて行う。

第6章では、災害水需要マネジメントが断水被害の軽減に果たす役割について、これまでの分析結果の総括を通じた総合考察を行い、災害水需要マネジメントの体系化に向けて残された課題を整理し、本論文の結びとした。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書，2013.3
- 2) 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，2011.9
- 3) 仙台市：東日本大震災における市民アンケート調査，2011.9
- 4) 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，2013.3
- 5) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査，2012.3
- 6) (社)日本水道協会：水道統計「平成26年度」(第95号)，2016.
- 7) (一社)日本工業用水協会：平成25年度工業用水道事業研究大会報告(1)，工業用水 No.622，2014.
- 8) 厚生労働省：新水道ビジョン，2013.3
- 9) 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，2013.8
- 10) 厚生労働省医薬・生活衛生局 生活衛生・食品安全部水道課長（通知），水質異常時における摂取制限を伴う給水継続の考え方について，生食水発 0331 第2号，2016.3.31
- 11) (社)日本工業用水協会：工業用水道施設の耐震性強化及び緊急時対応に関する検討報告書，1996.6
- 12) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査，2012.3
- 13) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：平成27年版日本の水資源，2016.4
- 14) 国連開発計画（UNDP）：人間開発報告書 2006（Human Development Report: HDR）
- 15) 国連世界水アセスメント計画（WWAP）：世界水発展報告書 2014（The United Nations World Water Development Report 2015），2015.
- 16) United Nations, The Millennium Development Goals Report 2015, 2015
- 17) 第3回国連防災世界会議：仙台防災枠組 2015-2030（Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030），2015.3
- 18) 内閣府：平成27年版防災白書
- 19) 国連人口局（UN Population Division）：世界都市化予測 2014（World Urbanization Prospects），2014.7
- 20) 厚生労働省：水道の耐震化計画等策定指針，2008.3
- 21) 西澤常彦・若松享二・萩原良巳：水道事業体における災害復旧のための情報支援シ

- システムに関する考察, 日本リスク研究会論文集, Vol.10, pp.118-123, 1997.
- 22) 山野一弥・江口勝彦・宮崎博明: 水道局災害情報システムの導入, 水道協会雑誌, Vol.74(4), pp.166-172, 2005.
- 23) 築山 勲・佐藤忠信・古田均・森まゆこ: 広域被害における水道管復旧戦略支援システムの開発, 自然災害科学 *J. J SNDS*, 26-4, pp.367-377, 2008.
- 24) 山下涼・石井浩一・谷口靖博・林春男: 事業継続計画策定に向けた業務分析結果を用いた危機対応マニュアルの階層化及び人的資源分析に関する研究—大阪市水道局における検証を通じて—, 地域安全学会論文集, No.11, pp.257-266, 2009.
- 25) 小松瑠実・林春男・尾原正史・鮫島竜一・玉瀬充康・豊島幸司・木村玲欧・鈴木進吾: 最大級の南海トラフ地震による津波を見据えた BIA 及び RA に基づく浄水施設の事業継続戦略構築—大阪市水道局を事例として—, 自然災害科学 *J. J SNDS* 32-2, pp.183-205, 2013.
- 26) 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.
- 27) 細井由彦・増田貴則・雨森智裕: 地震被災後の応急給水における水運搬距離の設定方法に関する研究, 水道協会雑誌, Vol.72, No.4, pp.21~33, 2003.
- 28) 水中進一・平山修久・伊藤禎彦・河田恵昭: 目標による管理に基づく災害時応急給水に関する考察—新潟県中越沖地震における自衛隊による応急給水活動事例による—, 第 59 回全国水道研究発表会, 9-7, 2008.5
- 29) 平山修久: 災害時の安全な水の確保, 保健医療科学, Vol.64, No.2, pp.94-103, 2015
- 30) 細井由彦・城戸由能: 応急給水と復旧過程から見た水道の各種地震対策の評価, 土木学会論文集, No.629/VII-12, pp.67-81, 1999.8
- 31) 社日本水道協会: 地震等緊急時対応の手引き (平成 25 年 3 月改訂), 2013
- 32) 厚生労働省: 新水道ビジョン, 2013.3
- 33) 大西洋二・楯田泰子: 広域災害時の応急給水能力に関する一考察—東日本大震災の事例—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集 Vol.31-b), pp.930-939, 2012

第2章 災害水需要マネジメントの体系化に 向けて—本研究の位置づけ

2.1 水需要マネジメントの体系の整理

2.1.1 水需要マネジメントの定義

「水需要マネジメント」という用語をわが国で耳にすることは極めて少ない。一方、諸外国では一般に“Water Demand Management (WDM)”と称され、多くの国々で知られている用語である。この理由は、諸外国の多くは、慢性的な水資源不足に悩まされている地域、あるいは水インフラが不十分な地域を抱え、さらに近年の人口の増加、経済の発展、気候変動なども重なって、もはや供給側の対策だけでは、日常的な水需給バランス安定化をも保持できないレベルにまで達している。しかしながら、新規の水資源開発には膨大な投資が必要となり、その財源確保は非常に困難である。よって必然的に需要側の対策も必要となり、その対策を形にしたものとして WDM の発想に行きつくからである¹⁾。

以上の WDM 成立の背景を踏まえれば、その定義もおのずと見えてくる。WDM の定義はさまざまなフレーズを使って表現されているが、一般的な定義については、Herbertson & Tate (2001)²⁾、Klas et al. (2004)³⁾ などが南アフリカ地域で展開されている WDM を総括した報告書、あるいは Global Water Partnership (2012)⁴⁾ が地中海沿岸諸国で展開されている WDM を総括した報告書の中での表現をベースに、次のように整理して差し支えないと考える。

“供給のレベルに応じて、(余分な)水の需要を抑えることで、限りある水の供給容量と需要のバランスを安定化させるためのマネジメント”

また、Tonny (2003)⁵⁾ は、WDM にはさまざまな施策があるが、その根幹は“住民や企業の水の消費行動を変容させる (changing the water use behaviour)”という内的な目的達成のためにある点を強調している。

2.1.2 水需要マネジメントを支える諸施策

WDM を支える施策体系については多種多様である。ここでは、国外の主要文献から WDM の諸施策の洗い出しを行う。

David Butler & Fayyaz (2005)³⁾ は、WDM には水道利用者の需要調整を効果的に行うための幅広い施策が含まれると主張し、それらの全体は以下の施策から成るとした。

- 水使用料の徴収 (cost-reflective pricing)
 - ・ 水道料金の価格引き上げなどにより需要抑制を図る。

- 世帯別水道使用量の計量 (universal customer metering)
 - ・ 世界の水道では、わが国のように各戸に水道メータが設置されているケースはほとんどない。水道メータの各戸整備を進められれば、水道事業者は正確な水需要を計測できるとともに、水道利用者もまた自らの水使用量が把握できるため、節水意識の啓発も期待できるようになる。
 - ・ 近年では、各戸に設置するメータをスマートメータにし、水道利用者および事業者双方がリアルタイムで水使用量を把握できるシステム構築の実用化が進みつつある⁴⁾。

- 漏水改善による配水圧の低減 (reticulation leakage detection and repair programs and pressure reduction)
 - ・ 国外の水道事業者が最も頭を悩ませる問題のひとつは漏水率の高さである。2008 年に集計された海外主要都市の漏水率⁶⁾ は、東京都が 3.1% であるのに対し、カイロ (エジプト) 約 20%、イスタンブール (トルコ) 約 25%、ロンドン (イギリス) 約 26%、メキシコシティ約 35% などとなっている。漏水率が高いと水圧も低下するため、さらなる昇圧のために限られた水資源を散財することとなる。

- コミュニケーションを通じた節水啓発 : (a communication strategy, including a community education campaign)
 - ・ 水道利用者の節水意識の啓発に向けたさまざまなコミュニケーション、教育を展開する。本研究では、リスクコミュニケーションと呼ぶこととする。

- 自発的な節水機器設置を促す公的助成の導入 (customer advisory services, the use of incentives for installation and/or retrofitting of water efficient equipment)
- ロスを低減する適正な運転管理 (reduction of water use by the water utility)
- 新築施設に対する水のリサイクル設備導入義務 (regulation of the efficiency of water using appliances, especially in new buildings)
- 給水制限 (water use restrictions, either on a temporary pre permanent basis)
- 多様な水資源 (低水質水 ; 「中水」あるいは「雑用水」などと呼ばれる場合がある) の活用による需要転換 (use of reclaimed water (e.g. waste water/grey water) to reduce the need for fresh water supplies)
 - ・ 中水道とは、飲用に適する上水道と汚水を受け入れる下水の中間に位置して、主に水質に着目した分類である。上水道が、水道法第3条で「導管及びその他の工作物により、水を人の飲用に適する水として供給する施設の総体をいう。」と定義されていることから、中水道は「人の飲用に適さない水を供給する施設の総体」という捉え方が一般的である⁷⁾。なお、中水道を流れる水の原水の種類および用途については特定されていない。
 - ・ WDM として中水利用を考えていくことの重要性については、Emaculate & Saniso (2007)⁸⁾ などによっても指摘されているところである。
 - ・ また David (2006)⁹⁾ は、WDM は大きく5施策で構成されると説明し、そのひとつに「量と質双方の需要の低減」(reducing the quantity or quality of water required to accomplish a specific task) を提案した。

注) 本施策は、一見すると「供給側の対策」に捉えかねないが、水需給逼迫時には‘低水質’な水への需要転換を図るという意味において、「需要側の対策」に位置づけている。この考え方を具体的に図解したものが図-2.1である。一般的に、需要は供給の状態に左右されるものと考えられる。例えば、飲用に適した高水準の水道水を、低廉な価格で、あらゆる用途に使用できる環境が常時整っているとすれば、仮にその水準よりも低いものが提供された場合、住民は、しばし抵抗感を示すものと想像される。よって、現在顕在化してい

る水需要は、こうした高い水質レベルの水を不自由なく消費できる供給水準があるが故の水準となっているといえる。しかしながら、使用用途によっては必ずしも高い水質レベルの水を必要としない場合もあり、本来の水需要は、より低い水準にある可能性を有している。こうした現象の着目し、あらかじめ代替水資源を活用できる環境を整えておくことで、緊急時においては本来の需要に近づけるマネジメントを展開するという考え方が、「需要側の対策」と捉える理由である。

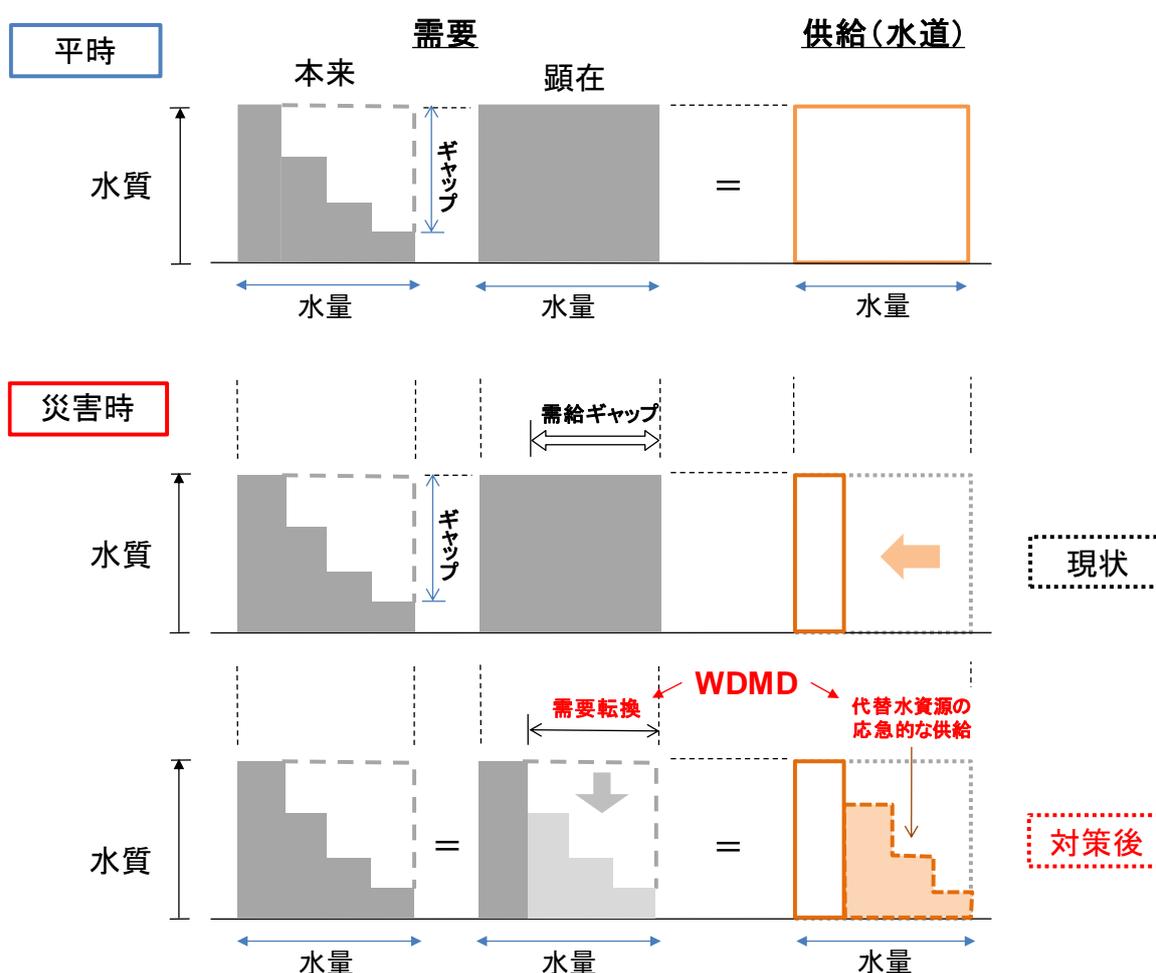


図-2.1 多様な水資源の活用を「需要側の対策」と捉える考え方

さらに、Duane et al. (1997)¹⁰⁾ は、WDM の各種施策を実現するためには、「正確な水需要予測ができる技術を獲得すること」、「供給計画との整合のとりこと」が基本になること、Tonny (2003)⁵⁾、Global Water Partnership (2012)⁴⁾ などは、WDM の各種

施策を実現するためには、その技術を支えるソフトウェアやアプリケーションの理解、水道利用者への教育、水道料金構造の理解なども必要になることを指摘した。

2.1.3 諸施策の分類化

WDM の諸施策を列挙したが、これらの施策がどのような理論的枠組みに基づいた施策なのかを理解することは、本研究の目的である災害版の WDM の体系化を図るうえで非常に重要であると考えられる。

社会基盤整備にかかる分野のなかで、「需要マネジメント」が施策として定着し、かつ体系的に研究が進められてきた分野は、交通分野である。その施策体系は、交通需要マネジメント（TDM : Transportation Demand Management）と称されるものであり、「交通需要の調整によって道路交通混雑の緩和を図る手法」として、TDM という言葉自体が既に常用語になりつつあるほど広く知られるに至っている。TDM の施策は、道路利用者の「時間の変更」、「経路の変更」、「手段の変更」、「自動車の効率的利用」、「発生源の調整」などで構成されることで知られている¹¹⁾が、より大きな方略レベルでの分類としては、藤井（2001）¹²⁾による社会的ジレンマの理論的枠組みの中での分類が代表的である。ここに社会基盤整備を巡る社会的ジレンマは、次のように定義されている。

“個人利益（self interest）の最大化行動（逃避行動：defection）と公共利益（public interest）の最大化行動（協力行動：cooperation）のいずれかを選択しなければならない社会状況”

藤井（2001）¹²⁾は、TDM の導入問題が社会的ジレンマとして定義できる理由として、「全員が自らの行動変化を避けるために TDM 施策の受け入れを拒否する（逃避行動）か、公共利益を優先させて受け入れる（協力行動）かを選択しなければならない状況」、あるいは「全員が自らの行動変化を避けるために TDM の受け入れを拒否した場合（逃避行動）の公共利益の方が、全員が多少の行動変化を許容して受け入れた場合（協力行動）の公共利益に比べて、低くなる状況」だからであるとした。そして社会的ジレンマの対応策は、次の二つの種類に区別されることが多く¹³⁾、TDM の施策群についてもまた、これら二つの方略に位置づけ可能であることを示した。

- 構造的方略 (structural strategy) : 法的規制により逃避行動を禁止する, 逃避行動の個人利益を軽減させる, 協力行動の個人利益を増大させるなどの方略により, 社会的ジレンマを創出している社会構造そのものを変革する.
- 心理的方略 (psychological strategy) : 個人の行動を規定している, 信念 (belief), 態度 (attitude), 責任感 (ascribed responsibility), 信頼 (trust), 道徳心 (moral obligation) などの心理要因に働きかけることで, 社会構造を変革しないままに自発的な協力行動を誘発する.

それでは, WDM の社会への導入問題もまた, ひとつの社会的ジレンマの解消問題として捉えることができるであろうか. 本章の冒頭, WDM は慢性的な水資源不足に対する需要側の対策であることに触れたが, WDM の目標は「全員が自らの水消費行動の変化 (例: 節水) を避けるために WDM の受け入れを拒否した場合 (逃避行動) の公共利益の方が, 全員が多少の水消費行動変化を許容して受け入れた場合 (協力行動) の公共利益に比べて, 低くなる状況」といった社会的ジレンマのひとつの解決策という文脈で捉えることは十分差し支えないものとする. また, 社会的ジレンマの有名な事象に, Hardin (1968)¹⁴⁾ が発表した「共有地の悲劇 (tragedy of commons)」がある. この事象は「限られた資源の下で, すべての人々が十分に利己的かつ合理的なら, 社会全体の持続可能性が失われてしまう」ことを指摘したものであるが, 「限られた資源」を「世界の水資源」に置き換えたとき, 世界の水資源偏在問題は「共有水の悲劇」¹⁵⁾と捉えられることができることも指摘されているところである.

以上を踏まえ, 本研究では, WDM の諸施策を「構造的方略 (structural strategy)」と「心理的方略 (psychological strategy)」に大別して考えることとする.

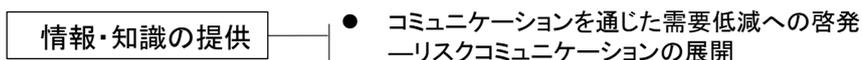
ここで, WDM の諸施策がこれら二つの方略の枠組みだけで十分説明できるかという問題がある. 例えば「多様な水資源の活用による需要転換」といった施策は, そういった水資源を供給できるシステム自体がある程度整備されていなければ実施できないものであるが, 社会的ジレンマの問題のなかでの構造的方略のニュアンスとして, 新たな社会資本の整備のような技術あるいは財の投入を通じた施策までもも想定したものにはなっていないように思われる.

そこで本研究では, このような新しい技術あるいは財の提供を通じた構造的方略を, 特に「技術的方略 (technological strategy)」と称し分類することとした.

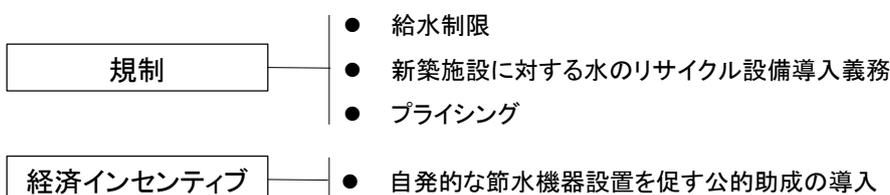
以上の考え方に基づいて WDM の諸施策を分類すれば, 図-2.2 のとおりとなる. 住民の心理構造の変化を目指す「心理的方略 (psychological strategy)」, 住民を取り巻く

社会構造の変化を目指す「構造的方略 (structural strategy)」に大別され、そして構造的方略の中でも、新たな技術や財を投入することで水利用方法の変化を目指す方略については、「技術的方略 (technological strategy)」に分類される。

◆ 心理的方略 (psychological strategy)



◆ 構造的方略 (structural strategy)



技術的方略 (technological strategy)

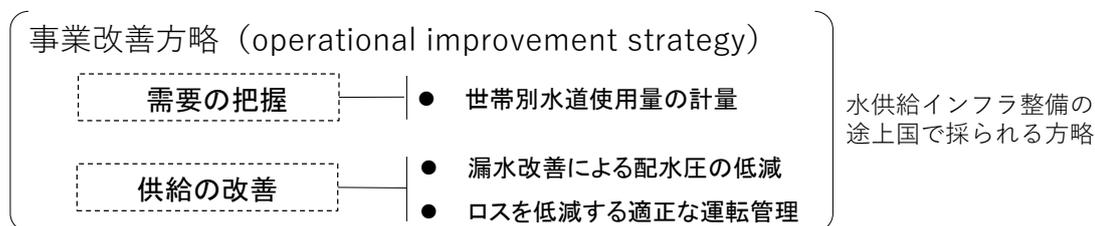
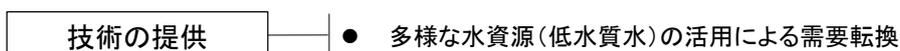


図-2.2 WDM の諸施策の分類化

なお、水供給インフラの整備が途上の地域に限っては、既存の水供給オペレーション自体を改善しようとする施策に取り組まれている。このような構造的方略については、別途、「事業改善方略 (operational improvement strategy)」として区別し、供給側の対策としての色合いが強いため、具体的な手法検討は行わないものとする。

2.2 災害時における需要の考え方

災害時は平時とは異なり、都市への水供給能力が著しく低下するため、水の「消費」

もまた大幅な制限を受けることとなり、その量は、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、本研究は災害時における水の「需要」に着目している。

需要とは、「家計・企業などの経済主体が市場において購入しようとする欲求。購買力に裏づけられたもの。」(デジタル大辞泉) または「家計や企業が自発的意思に基づき、直接消費を目的とし、あるいは生産要素を調達する目的で市場より購入する財やサービスの量のこと。」(世界大百科事典 第2版) などと意味付けられる用語である。よって、本来、災害時に被災者や被災企業の自発的意思に基づく水の消費量は、平時と同水準とまではいかないものの、最低限の被災生活を送ることができるよう実際の消費よりも大きいものであったことが想像される。

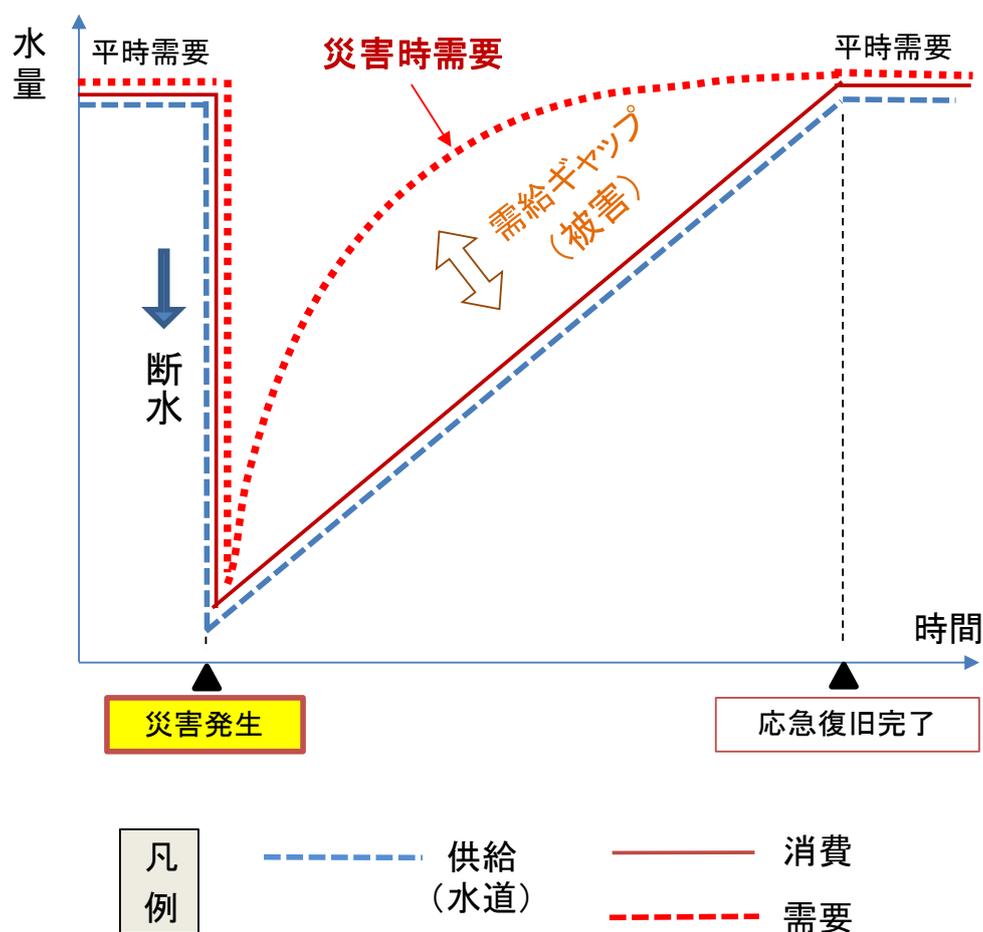


図-2.3 災害時における水需要の考え方

以上を踏まえ、本研究では、災害時の水需要を次のように定義した。

“災害時の水需給逼迫下においても、被災者や被災企業が、直接消費あるいはサービスの生産要素調達の目的で、購入しようとする水の量”

災害時の水の消費と需要の間には、図-2.3 の関係性があると考えられる。発災初期は、「皆水道が使えない状況なのだから我慢しなければならない」という「公共心」（社会一般の利益を図ろうとする精神）などによる動機づけがなされ、平時の需要よりも一旦低くなるものの、断水の長期化に伴いその我慢も限界に達して需要が漸増し、急速に平時の水準に達する様相を示している。ここで、図-2.3 のなかでは、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していない。災害時の需給逼迫下において、消費は、実質的に供給容量と一致することとなるが、需要は、これだけは欲しいと思う量、つまり、

“被災者の健康面や衛生環境面の保持、被災企業の致命的な経営損失の回避という側面から、必要となる水の量”

を表しているため、消費よりも大きくなる関係が示されている。

そして、需要が供給を上回る需要超過状態が発生している場合には、「被害」が発生すると捉えている。

2.3 災害時水需要マネジメントの理論的枠組みの整理

2.3.1 平時と災害時の異なる局面

前節において、WDM の定義は、“供給のレベルに応じて、（余分な）水の需要を抑えることで、限りある水の供給容量と需要のバランスを安定化させるためのマネジメント”と解釈できることを述べた。

この定義については、基本的に災害時においても当てはまるものであるが、加えて、新たな概念の導入が必要であるといえる。

それは大きく二点の着眼点があると考えられ、一点目は、災害の「突発性」であり、二点目は、供給施設の物理的被害に伴う水供給容量の低下度の大きさ、すなわち「断水リスクの顕著化」である。その差異を図示したものが図-2.4 である。

いま、災害時あるいは災害に備えて展開する WDM を、従来の WDM と区別して、Water Demand Management for Disaster Emergency Response and Preparedness (WDMD) と呼ぶこととする。従来の WDM の射程は、多く見積もっても渇水や慢性的な水不足などの突発性の低い災害までしか捕らえていない。地震、水害などの大規模災害時には、必ずと言っていいほど長期的かつ広範囲な断水被害が発生している。よって否応無しに大きな需給ギャップが生じる。このような極端な水供給容量の低下を射程に捉えたのが WDMD である。

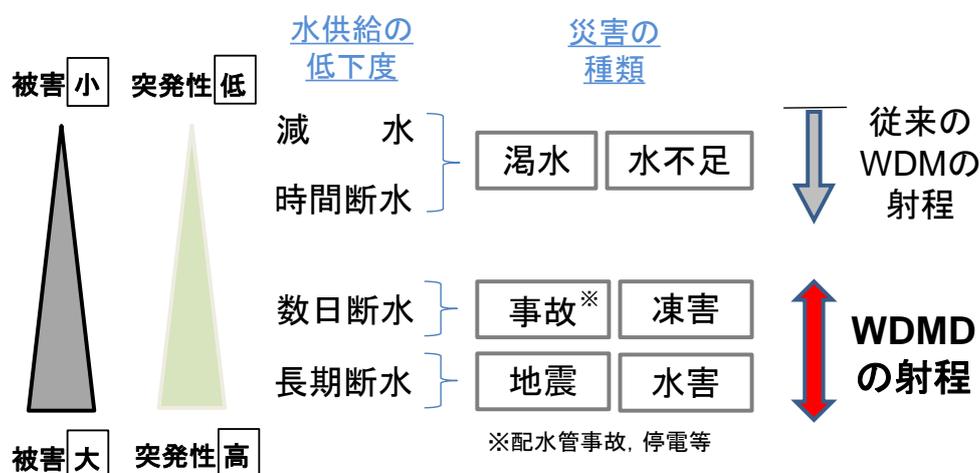


図-2.4 災害の種類と災害水需要マネジメントの射程

2.3.2 断水被害の定義

断水リスクが顕在化することで、どのような被害が発生するのであろうか。個人（需要者）レベルと社会レベルに分けて整理すると表-2.1 のとおり総括できる。

本研究の中で、断水被害とは、例えば配水管路の被害などのような物理的な直接的被害を指すのではなく、社会的な間接的被害に焦点を当てている。よって、本研究の中で、断水被害は「断水に伴い発生する社会的被害」と定義される。表-2.1 に示すとおり、断水被害には個人（需要者）レベルの被害と社会レベルの被害があると捉え、社会レベルの断水被害は、個人（需要者）レベルの被害を蓄積することで発現するという考え方である。WDMD とは、表-2.1 のような災害断水時に顕著になる重大な社会的被害の軽減を目指す体系的な取組であると位置づけている。

表-2.1 断水被害の種類 —断水による社会的被害の分類—

| 断水により停止するサービス | | 個人（需要者）レベル | 社会レベル |
|---------------|------------------------------|------------|--|
| 住民 | 飲料・調理 | 生命危機，健康悪化 | <ul style="list-style-type: none"> ・避難所生活者の増加による被災生活環境の悪化 ・地域衛生環境の悪化 |
| | 洗面・手洗い | 健康悪化 | |
| | 風呂，洗濯 | 健康悪化，清潔欠如 | |
| | トイレ，清掃 | 生活衛生環境の悪化 | |
| 企業 店舗 | 厨房，洗浄，トイレ，空調， 冷却 | 操業停止（経営損失） | <ul style="list-style-type: none"> ・地域経済の悪化 ・被災生活物資の不足 |
| 工場 | 原材料，厨房，洗浄，トイレ， 洗浄，冷却，生産機材 | 生産停止（経営損失） | <ul style="list-style-type: none"> ・地域経済の悪化 ・国産製品の製造停止 |
| 公共 機関 | 洗浄清掃，散水 | — | ・街の清掃，ガレキ撤去，災害廃棄物処理の遅延 |
| | 緊急医療用水 | | ・死者・負傷者の増加 |
| | 消火 | | ・火災被害の拡大 |

2.2.3 断水受忍限度の定義

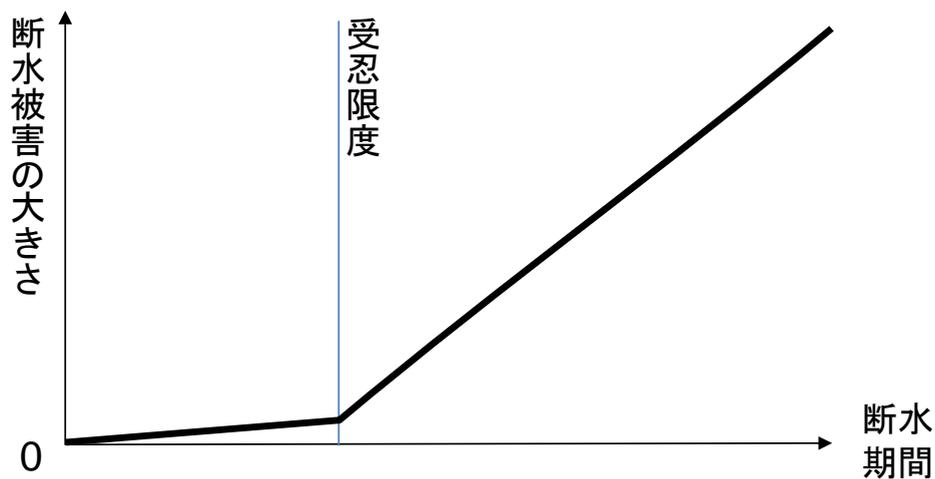


図-2.5 断水被害の大きさと受忍限度の関係

断水が発生すると直ちに被害が発生するかといえば、決してそうとはなり得ない。

ただし断水が長期化すれば、被災者あるいは被災企業において、前節で定義したような断水被害が顕在化することとなる。その概念図を示したものが図-2.5である。

図-2.5において重要な意義を持つ基準が「受忍限度」である。「受忍限度」は「社会生活において一般に受忍するのが相当であると考えられる限度。あらかじめ定められた一律の基準ではなく、被害の性質と程度・地域性・加害行為の態様・環境基準など、諸事情を比較衡量して判断される。」(図解による法律用語辞典(自由国民社))などと定義されるものである。さらに、同辞典のなかで、判例等で見受けられる「平均人を基準とした受忍限度」とは、「平均人標準説」(平均的な通常の理性を備えた人間を行為者に置き換えて、適法行為の期待可能性を判断すべきであるとする説)をベースに設定されるケースがあることを紹介しており、以上の考え方を踏まえると、「受忍限度」とは、「通常の理性を備えた人間が一般に社会生活上迷惑を被っても我慢する範囲」¹⁶⁾と要約され、以上をみてもわかるように、特に一律に定まった基準はないものである。

受忍限度に関する用語説明において、特徴的ないくつかのフレーズは、「あらかじめ定められた一律の基準ではなく」、「諸事情を比較衡量して判断される」、そして「平均人を基準」である。これらのフレーズが意味するところは、たとえば健康被害が起きうる医学的見地からの限界値などが存在していたとして、それが受忍限度になるかといえ、そうとは限らないことを意味している。仮にそうだとすれば、その限界値は極めて大きな数値となりうるであろう。実際の判例のなかでの受忍限度設定の根拠を概観してもイライラ等の精神的苦痛、感覚閾値なども総合的に勘案して設定されている。つまり受忍限度は、その健康被害顕在化の限界値よりも緩和された限度であり、むしろ社会全体がこれ以上は我慢できないと考える個人の主観的な閾値を集めた範囲と捉えることができる。

上述の議論を踏まえ、本研究で提案する用語「断水受忍限度」は、以下のように定義することとした。

“災害断水時に、被災者が生活し、被災企業が営む中で、断水の継続がこれ以上我慢できないとなる平均的な範囲”

さらに議論を進め、断水被害を表-2.1で整理したように、「水の消費で得るサービスの停止」と捉えた場合、「需要」との関係を加味すれば、断水受忍限度は次のようにも言い換えることができる。

“災害時に水需給の逼迫状態が継続する中においても、被災者や被災企業が最低限確保しておこうとする水により得られるサービスの平均的な量”

ここで、図-2.5 からもわかるように、断水受忍限度の閾値は、「断水期間の大きさ」で規定されるとしている。この理由は、災害時の断水現象とそれが解消する現象は、基本的に 0 か 1 の世界、すなわち断水のときは水が自宅の蛇口から入手できないし、断水が解消すれば自宅の蛇口から平時と変わらない水準で水が利用可能となるという世界と考えているからである。稀に、0 と 1 の間の世界、例えば、断水は解消したけれども節水を受忍しなければならないケース、あるいは時間断水を受忍しなければならないケースもあるが、災害時に断水が解消していく過程で、そのようなケースが大規模に発生するのは、水源自体が不足する渇水時と限定的であるため、本研究では考慮しないこととした。

2.3.4 災害水需要マネジメントの定義

WDM は、2.1 において“供給のレベルに応じて、(余分な)水の需要を抑えることで、限りある水の供給容量と需要のバランスを安定化させるためのマネジメント”と定義したが、WDMD はどのように定義できるであろうか。WDMD を説明する上で重要なキーワード、災害時の「需要」と「断水受忍限度」の考え方を示した図-2.3 および図-2.5 を用いながら、その定義を考えていくこととしたい。

まず、図-2.3 を用いて災害水需要マネジメントの定義を説明すれば、図-2.6 となる。図-2.6 に基けば、災害水需要マネジメントは次のように定義できる。

“災害時の水需給逼迫下において、低下した水供給のレベルに応じた需要調整を目指すことで、需給バランスの安定化を目指し、断水被害を軽減させるためのマネジメント”

また、図-2.5 を用いて、断水受忍限度の変化に着目した災害水需要マネジメントの目的を説明すれば、図-2.7 のようになる。そして、同図に基づき災害水需要マネジメントを定義すると、次のように表現できる。

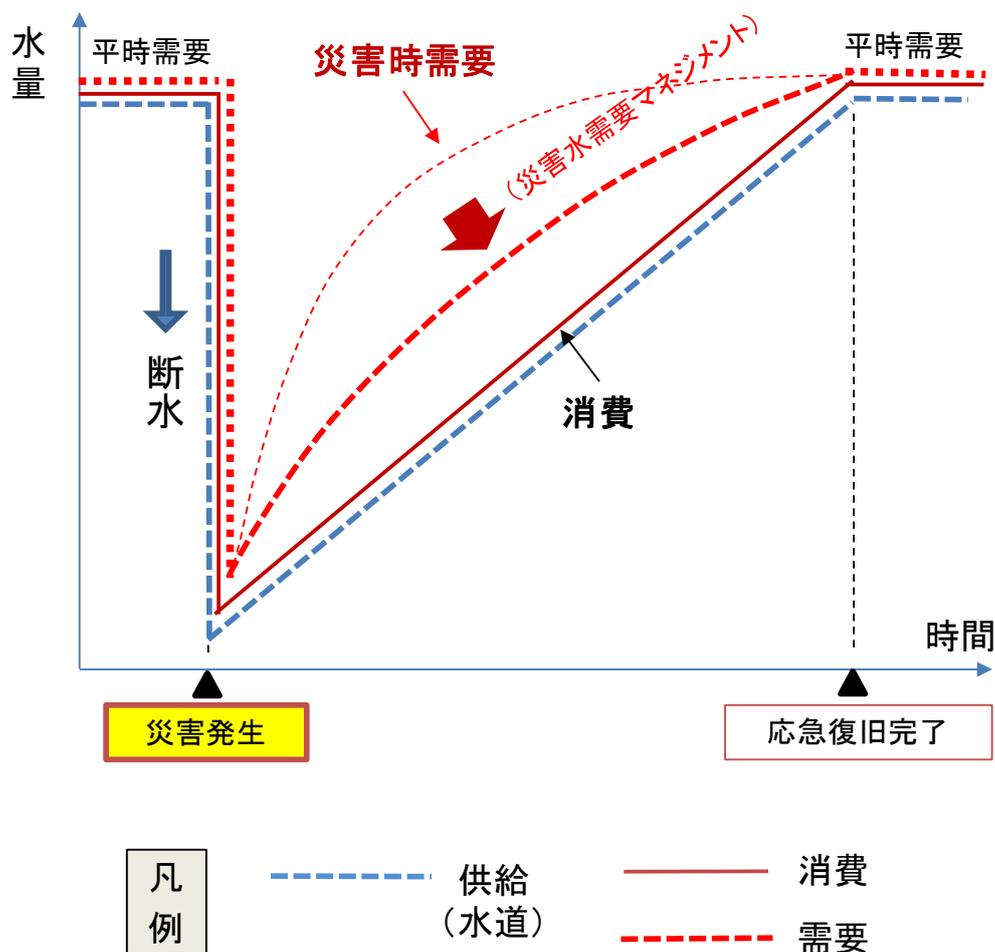


図-2.6 「需要」に着目した災害水需要マネジメントの定義

“被災者や被災企業の断水受忍限度を引き上げることで、断水被害を軽減させるためのマネジメント”

もちろん、需要調整を図ったり、断水受忍限度を引き上げたりするということは、単に被災者や被災企業に、断水の長期化に対して我慢を強いるというだけではない。2.1で紹介したような、WDMにかかる心理的方略、構造的方略を駆使しながら、厳しい被災環境下においても、社会にスマートな水消費の実践を促すということを意図している。その具体的施策については、2.3.6でまとめることとしたい。

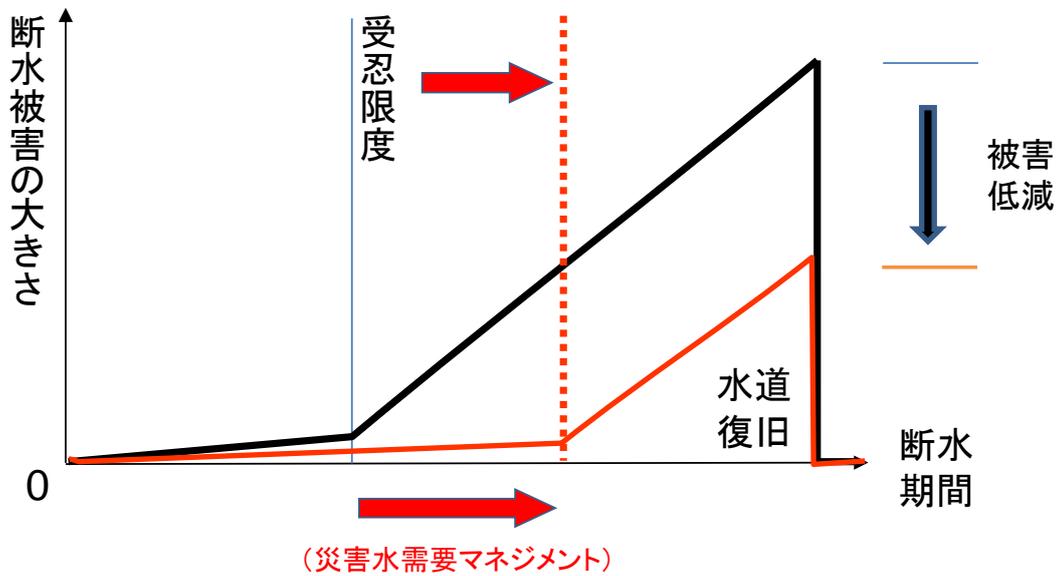


図-2.7 「断水受忍限度」に着目した災害水需要マネジメントの定義

2.3.5 災害マネジメントサイクルとしての災害水需要マネジメント

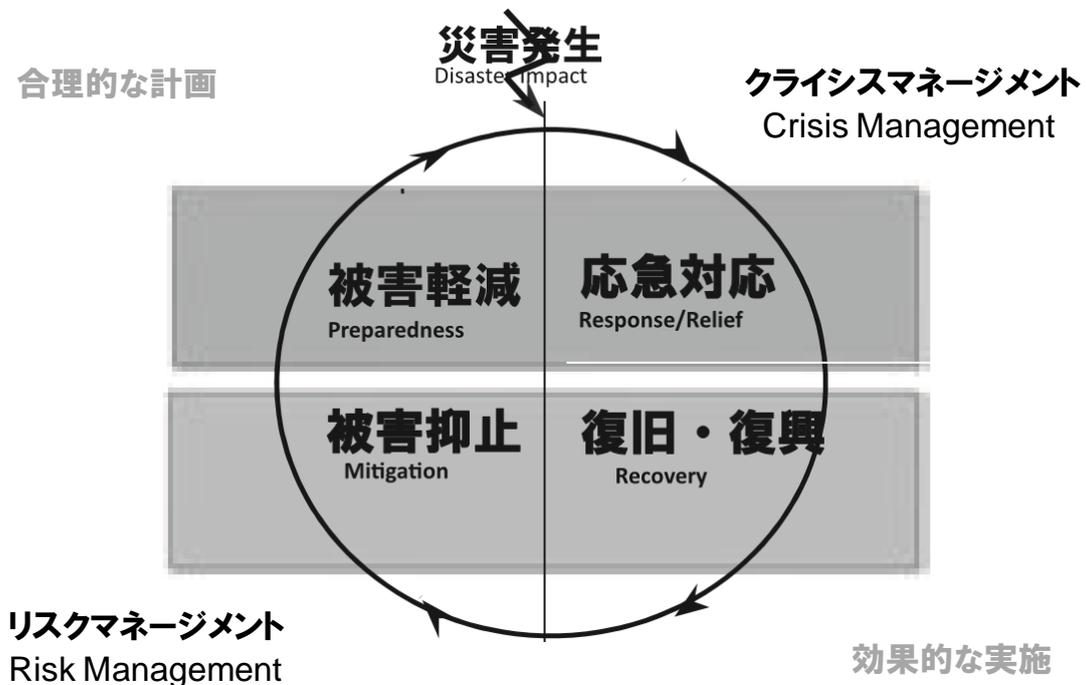


図-2.8 災害マネジメントサイクル¹⁷⁾

図-2.2 に示した WDM の諸施策は、水道利用者に平時より節水を取り組ませようとするための施策が多数を占めていた。一方で、WDMD に求められる諸施策としては、突発的に発生する断水リスクの顕在化に備えるものでなければならない。

災害マネジメントの基本的な考え方として、図-2.8 に示す災害マネジメントサイクル (Disaster Management Cycle) がある。これは、「事前対応である『被害抑止』、『被害軽減』から、災害発生後の『応急対応』、『復旧・復興』という事後対応を経て、さらなる事前対応に繋げていく過程が連続することによって、類似の災害が将来起きた場合に備えて防災体制が強化されていく好循環に繋げていく」という考え方である¹⁷⁾。

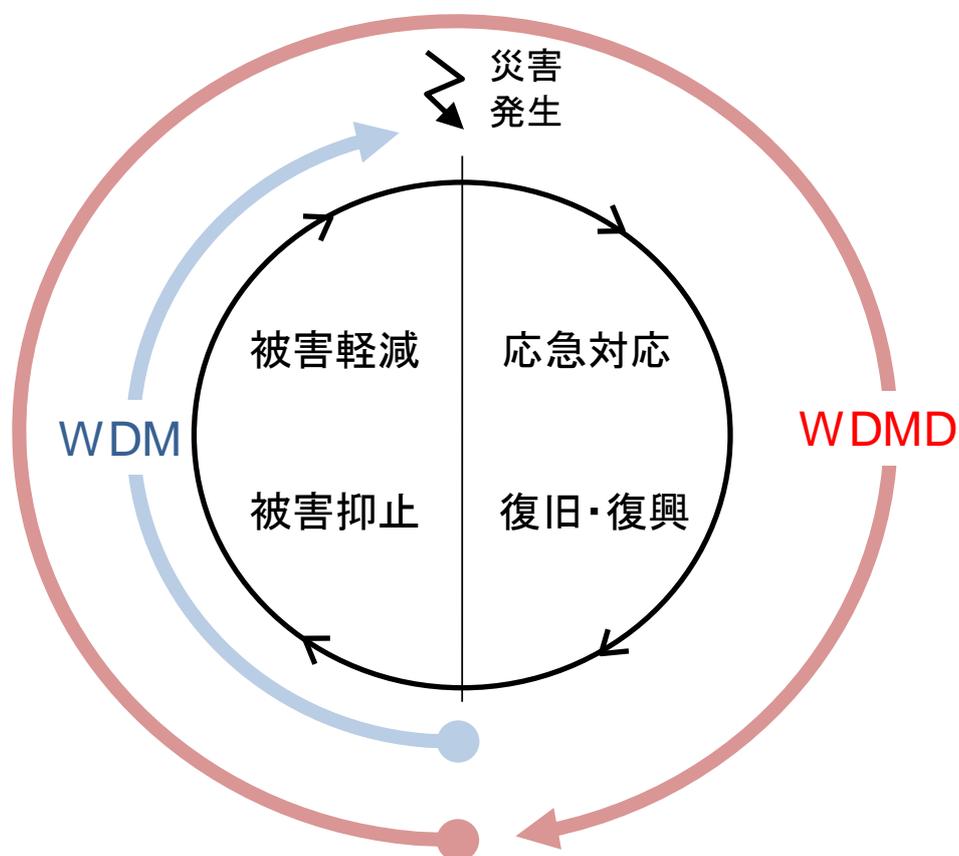


図-2.9 災害マネジメントサイクルとしての災害水需要マネジメント

このサイクルが示す重要な主張のひとつは、災害マネジメントには、平時に展開するリスクマネジメント段階と災害時に展開するクライシスマネジメント段階（「クライシス」の一般的な定義については、4.1 にて詳述）の二つの局面があるという点である。この考え方を当てはめると、WDM は平時のリスクマネジメント段階に展開する

被害抑止，被害軽減的アプローチにほとんどが集約されているといえ，WDMD には，クライシスマネジメント段階についても包含するものでなくてはならない。

以上の趣旨をまとめたものが図-2.9 である。WDMD は，平時には断水被害の抑止・軽減策を講じ，いざ災害が発生した場合のクライシス段階では，迅速な応急対応を図り，その終了後には復旧・復興に向けた措置を講じ，次に備えるという一連のマネジメントサイクルと捉える。

2.3.6 災害水需要マネジメントの施策体系

WDMD の施策体系は，図-2.10 のようにまとめることができた。WDMD 施策として新たに追加した施策は，心理的方略に 2 施策，構造的方略の 1 施策，技術的方略に 1 施策の 4 施策である。いずれも WDM では想定されていない「長期的な断水」あるいは突発的なクライシス段階への対処に必要な施策を追加している。さらに，WDMD が扱う災害時特有の事象として，被災地域の広い範囲で断水が生じたとして，その解消スピードについても地区毎に格差が生じるという点が挙げられる。このような場合には，仮に水道が早期復旧した地域の被災者が，断水地域の被災者に水の分け与えるという行動を発現すれば，被災地域全体の断水被害軽減には非常に効果的であると考えられる。そのため，心理的方略のなかには，「コミュニケーションを通じた共助意識の醸成一水の分け与え行動への変容」という施策についても盛り込むこととした。

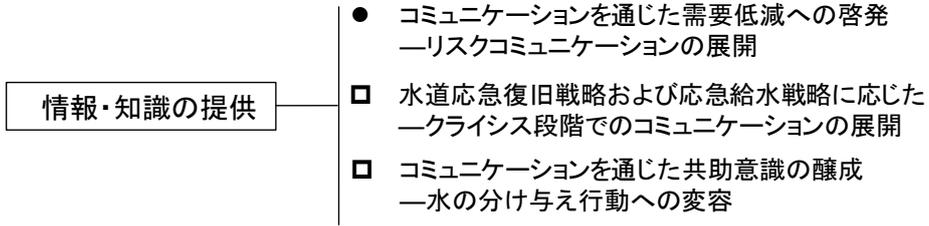
一方，WDM に含まれていたものの WDMD の施策としては含まなかった施策もある。これら施策の共通点は，平時の水不足に対応するための節水，あるいは供給改善を目的としたものであり，とりわけ災害時に起こるような突発性の高い長期間の断水被害への対応には，ほとんど期待される効果は発揮できないと考えられるものであるため，WDMD からは省略することとした。

以上を総括した体系が図-2.10 ということになり，WDMD の施策は WDM の数をやや下回るものの，3 方略それぞれにほぼ満遍なく配置されることとなった。

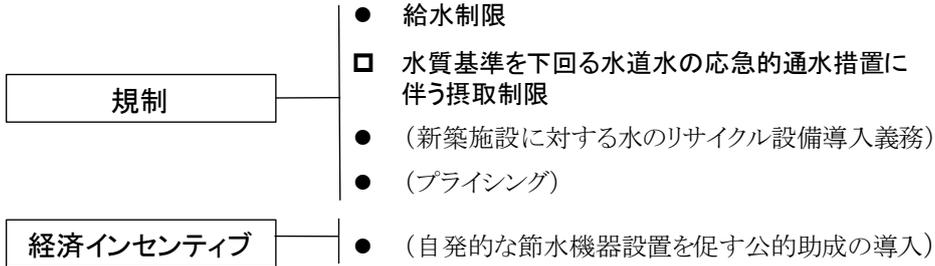
2.4 本論文の検討範囲

WDM に関する先行研究や実務報告の事例は 2.1 でレビューしたとおりであったが，WDMD についてはどうであろうか。

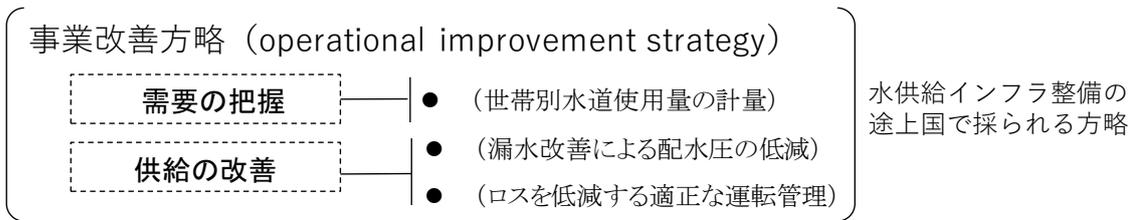
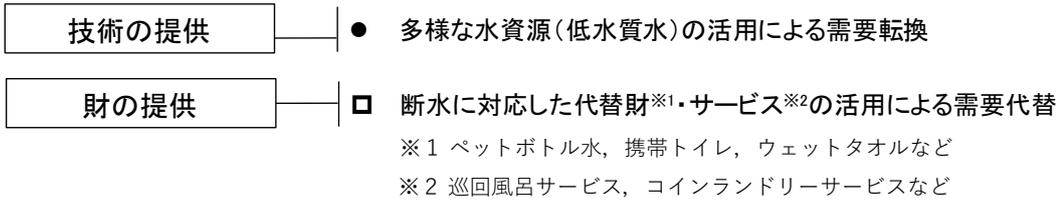
◆ 心理的方略 (psychological strategy)



◆ 構造的方略 (structural strategy)



技術的方略 (technological strategy)



- | | |
|------|--|
| (凡例) | <ul style="list-style-type: none"> ● ----- WDMに含まれる施策 □ ----- WDMに含まれていない施策 (WDMDの追加施策) ● (-----) WDMDに含まない施策 |
|------|--|

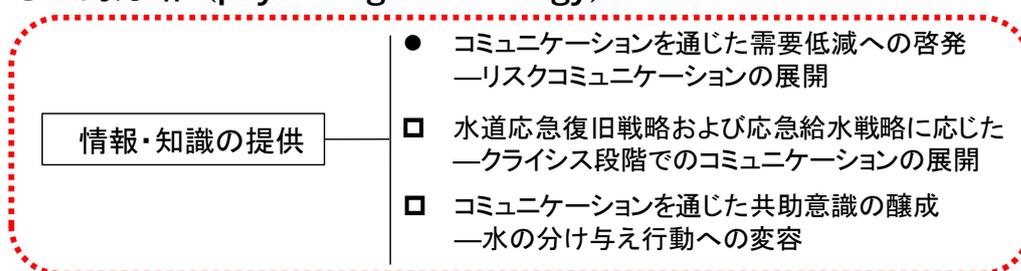
図-2.10 WDMD の施策体系

渇水時の水需要抑制に取り組んだ研究としては、わが国では給水制限と水需要抑制の関係に着目した角ら (1996.)¹⁸⁾、津田ら (2012.)¹⁹⁾ の研究、島嶼地域の水不足問題

と水需要との関係の解明に取り組んだ神谷ら（2006.）²⁰⁾ などの成果が、国外においては、最近では Elena（2014）²¹⁾ の成果がある。しかしながら、地震や水害のような大規模災害時をも想定した WDM に関する研究の蓄積は確認できなかった。

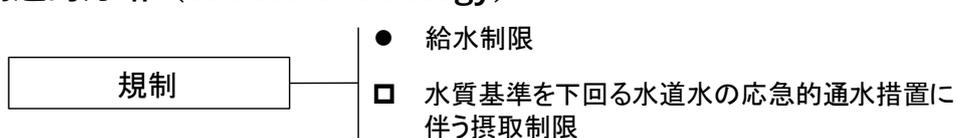
そこで本研究は、国内外の双方において研究の途上である WDMD の体系化と、それを構成する諸施策の手法論の確立を目指していく。なお、図-2.10 の施策の手法論をひとつひとつ構築していくことは、膨大な時間を要する。そのため、本論文のなかでは、図-2.11 のとおり、特に断水被害軽減の効果が高いと推察される心理的方略および技術的方略について、実証分析を通じたマネジメント手法の構築を試みることにする。

◆ 心理的方略（psychological strategy）



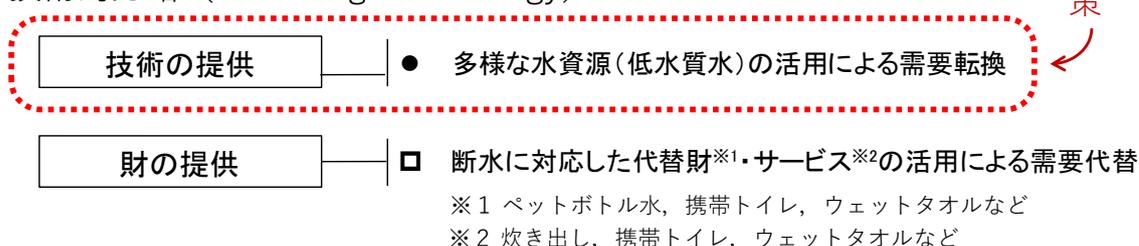
第4章

◆ 構造的方略（structural strategy）



技術的方略（technological strategy）

第5章



（凡例）

- ----- WDMに含まれる施策
- ----- WDMに含まれていない施策（WDMDの追加施策）

本論文で焦点を当てる施策

図-2.10 本研究の検討対象

参考文献

- 1) David Butler and Fayyaz Memon, *Water Demand Management*, IWA *publishing*, 2005.
- 2) P.W. Herbertson and E.L. Tate, *Tools for Water Use and Demand Management in South Africa*, WMO/TD – No. 1095, *Technical Reports in Hydrology and Water Resources*, No. 73, 2001.
- 3) Klas Sandström, Michael Singh and Akkadia consulting, *Assessment of a Sida (SWEDISH International Development Cooperation Agency) financed Water Demand Management project in Southern Africa, 1997–2004 Water Demand Management in Southern Africa*, 2004.
- 4) Global Water Partnership, *Water Demand Management: The Mediterranean Experience*, 2012.
- 5) Tonny Maas, *What the Experts Think: Understanding Urban Water Demand Management in Canada*, POLIS Project on Ecological Governance, 2003.
- 6) 自民党特命委員会：水の安全保障研究会最終報告，2008.7
- 7) 藤原啓助：中水道システムの評価と課題，*環境技術*，Vol.15，No.4，1986.
- 8) Emaculate Madungwe and Saniso Sakuringwa, *Greywater reuse: A strategy for water demand management in Harare?*, *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 32, Issues 15–18, Pages 1231–1236, 2007.
- 9) David B. Brooks, *An Operational Definition of Water Demand Management*, *International Journal of Water Resources Development*, Vol.22, Issue 4, pages 521-528, 2006.
- 10) Duane D. Baumann, John J. Boland, W. Michael Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning*, *McGraw-Hill Professional*, 1997.
- 11) 国土交通省道路局 HP，*道路交通の円滑化／TDM*，http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tdm/TOP_PAGE.html
- 12) 藤井聡：TDM と社会的ジレンマ：交通問題解消における公共心の役割，*土木学会論文集*，No.667/IV-50，pp.41-58，2001.
- 13) Dawes, R. M., *Social dilemmas. Annual Review of Psychology*, 31, pp.169-193, 1980.
- 14) Hardin, G., *The tragedy of the commons*, *Science*, 162, pp.1243-1248, 1968.
- 15) 萩原良巳・坂本麻衣子：*コンフリクトマネジメントー水資源の社会リスク*，勁草出版，2006.

- 16) レファレンス協同データベース：「判例等で見受けられる「平均人を基準とした受忍限度」という言葉はどのような意味か。また、特にマンションの騒音に関する訴訟等で、こうした受忍限度について統一的基準があるかどうか知りたい。」(管理番号 6000013842) , http://crd.ndl.go.jp/reference/detail?page=ref_view&id=1000142282 , 2013.11.24
- 17) 林春男：第2章 防災：社会の防災力と Disaster Management Cycle, 防災と開発～社会の防災力の向上を目指して～, 国際協力事業団・国際協力総合研修所, 2003.3
- 18) 角哲也・柏井条介・安達孝美：渇水における給水制限と水使用量の関係, 土木技術資料, Vol.38, No.10, pp.38-43, 1996.
- 19) 津田守正・西田修三・入江政安：水道の需要抑制による渇水被害軽減効果の定量解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I_1441-I_1446, 2012.
- 20) 神谷大介：沖縄県における水需給の変化と渇水問題に関する研究, 第34回環境システム研究論文発表会講演集, Vol..32, pp.157-164, 2006.
- 21) Elena Maggioni, Water demand management in times of drought: What matters for water conservation, Water Resources Research, 2014.

第3章 災害時における断水受忍限度と水需要の推計

3.1 本章の論点

前章 2.2 において、本研究で着目する災害時の水需要は、「被災者の健康面や衛生環境面の保持、被災企業の致命的な経営損失の回避という側面から、必要となる水の量」であることを述べた。そして、同じく前章 2.3.5 のなかでは、災害水需要マネジメントの定義を明らかにし、「災害時の水需給逼迫下において、低下した水供給のレベルに応じた需要調整を目指すことで、需給バランスの安定化を目指し、断水被害を軽減させるためのマネジメント」ならびに「被災者や被災企業の断水受忍限度を引き上げることで、断水被害を軽減させるためのマネジメント」であることを述べた。

上述において重要なキーワードは、災害時における「需要」と「断水受忍限度」であるが、これらは具体的にどのように定量的に推計できるものであろうか。本章では、この問いに対する答えを導出していくこととしたい。

災害時における水需要の推計に関する調査研究について、その蓄積は極めて少ない。わが国においては、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（1996）¹⁾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3L/日・人、10日目まで20L/日・人、21日目まで100L/日・人、28日目まで被災前給水量の250L/日・人として推計された。その推計値が示されてから約20年経過しているが、未だに見直されてはおらず、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、今日に至っている^{6),7)}。

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。

3.2 災害時の水需要推計の考え方

災害時の水需要は、表-3.1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。

$$QD(t, n_p, n_j) = QD^D(t, n_p) + QD^I(t, n_j) + QD^E(t) \quad (3.1)$$

ここに、 QD^D ：災害時における生活用水の需要、 QD^I ：災害時における都市活動用水の需要、 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。

表-3.1 災害時における水需要の分類

| | |
|----------------------------|--------------------------------|
| (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 |
| 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 |

3.2.1 生活用水の需要

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、災害時の生活用水需要 ($m^3/日$)

は次式により定義した.

$$QD^D(t, n_p) = \sum_k q_k F_k(t) \sum_i n_{pi} \quad (3.2)$$

すなわち, 災害時における生活用水の需要は, 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.

なお, 「需要」ではなく「消費」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, 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られないため, 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, 災害応急復旧期間中, そして上水道供給が復旧してもなお平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⁸⁾もある. 災害応急復旧期間中の各水使用用途の節水については, 各用途をさらに細分化し, その区分での用途別断水受忍限度の調査を行うことで推計可能である. 具体的には, 本論文の 4.4, 4.5 にて用途をさらに細分化した場合の調査結果を示しており, たとえば風呂用水のなかで湯船に使う水は断水受忍限度が高いなどの結果が確認できている. 一方, 平時の節水に関する潜在効果については, 本研究では考慮しないものとする.

3.2.2 都市活動用水の需要

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の需要 ($m^3/日$) は次式により定義した.

$$QD^I(t, n_j) = \sum_j \sum_i q_j F_j(t) n_{ji} \quad (3.3)$$

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.

3.2.3 災害応急対策用水の需要

災害応急対策用水の突発需要は、表-3.1 の考え方にに基づき、次式により定義した。

$$QD^E(t) = QD^u(t) + QD^m(t) + QD^w(t) + QD^e(t) \quad (3.4)$$

ここに、 $QD^u(t)$ ：帰宅困難者用水、 $QD^m(t)$ ：災害医療対应用水、 $QD^w(t)$ ：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、3.6にて詳述する。

3.3 被災者の断水受忍限度の計量化

3.3.1 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、多々納ら（1990）⁹⁾、喜多ら（1999）¹⁰⁾、細井ら（2002）¹¹⁾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（1996）¹⁾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(2005)¹²⁾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(2009)¹³⁾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。

3.3.2 指標化の方法

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)

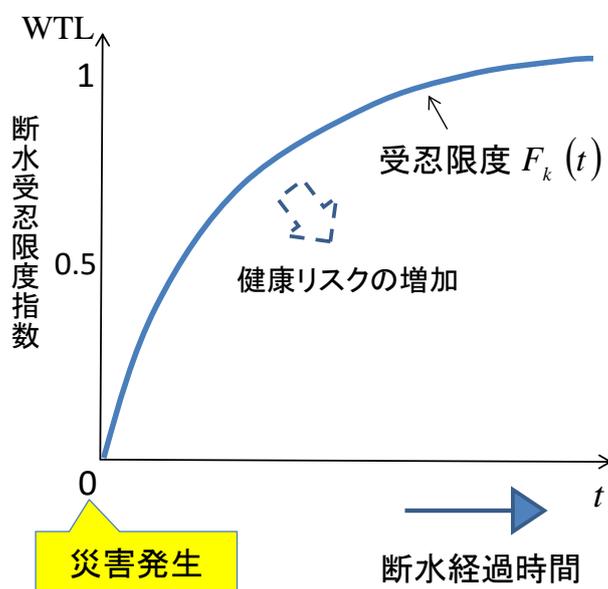


図-3.2 被災者の断水受忍限度指数のイメージ

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。

$$WTL_k = F_k(t) \quad (3.5)$$

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-3.2 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 ($k=0,1...K$) 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。

3.3.3 計量化に用いるデータの概要

断水受忍限度に関する代表的な既往調査^{12),13)}の特徴としては、都心部居住者に限定したものが多い点などが挙げられる。本研究では、以上の課題が改善されている大阪市水道局のインターネットアンケートの結果を用いて、計量化を試みる。

本アンケートは、2008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が特徴である。モニターの属性構成は表-3.2 に示すとおりである。

表-3.2 アンケートモニターの属性構成

| | 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人 | 38人 | 20人 | 22人 | 120人 |
| 30代 | 31人 | 43人 | 29人 | 17人 | 120人 |
| 40代 | 31人 | 48人 | 29人 | 12人 | 120人 |
| 50代 | 31人 | 49人 | 29人 | 11人 | 120人 |
| 60代以上 | 47人 | 57人 | 13人 | 3人 | 120人 |
| 合計 | 180人 | 235人 | 120人 | 65人 | 600人 |

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。

なお、本アンケートでは、災害時に居住地域でどのような断水被害が想定されているか、あるいは平時において一般的にどの程度の量の水が家庭で消費されているかといった基礎情報は、回答者に対して一切提供せずに行っている。そのため、震災や渇水、事故による断水の経験者と未経験者との間のリスク認知バイアスの可能性を考慮して、本章では、断水経験のある回答者のサンプル（265サンプル、全体の占める割合44.2%）を調査データに基づき、以下の分析を進めることとした。

3.3.4 データの集計結果

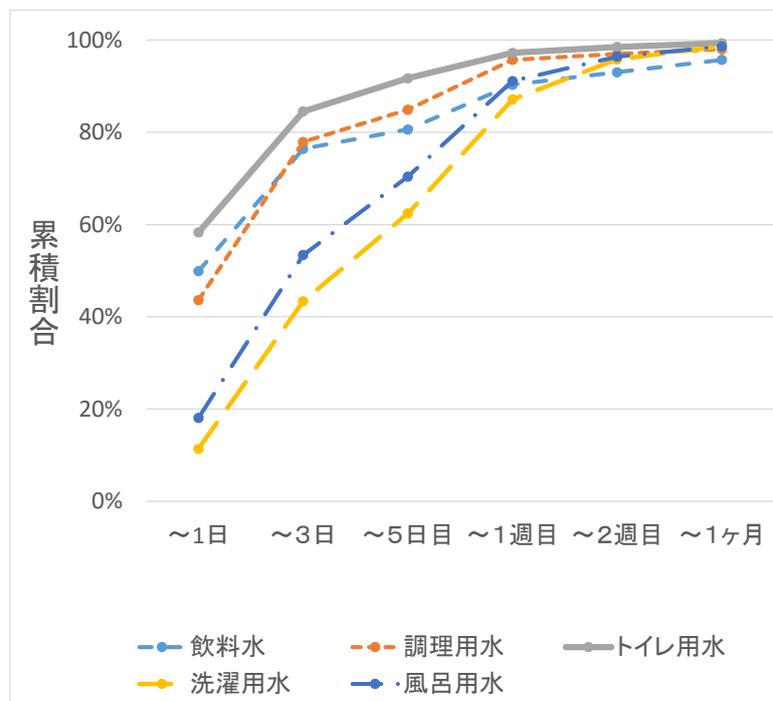


図-3.3 調査データの集計結果

水使用用途別の断水受忍限度の集計結果を図-3.3 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。

3.3.5 被災環境の基本的な想定

図-3.3 より、都市域における住民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の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。

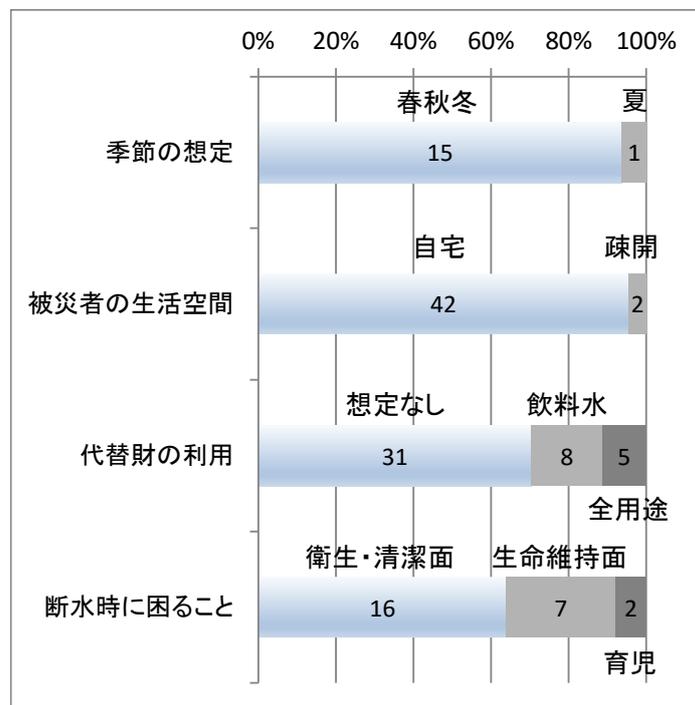


図-3.4 モニターがイメージした被災生活環境

その結果を図-3.4 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

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ならない「春季、秋季または冬季のような極端に暑くない季節」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数を回答したことがわかった。

3.3.6 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-3.3 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、断水継続の長さとは被災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-3.5 の手順¹⁴⁾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)

$$F_k(t) = 1 - \exp(-\alpha t) \quad (3.6)$$

II) ワイブルモデル (weibull model)

$$F_k(t) = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) \quad (3.7)$$

III) 対数正規モデル (lognormal model)

$$F_k(t) = \int_{-\infty}^{\frac{1}{\alpha} \ln \frac{t}{\beta}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi\left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{t}{\beta}\right) \quad (3.8)$$

IV) 対数ロジスティックモデル (log-logistic model)

$$F_k(t) = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha - \beta \ln(t)\}} \quad (3.9)$$

ここに、式(3.6) ~ (3.9) の α , β は、未定係数である。

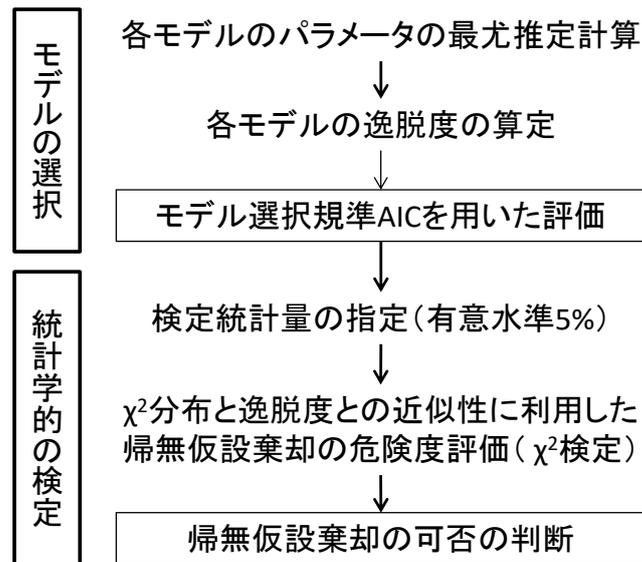


図-3.5 統計学的な検定とモデル選択の手順¹⁴⁾

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。

$$\pi_s = F(t; \theta) \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (3.10)$$

また、実測に基づいた値を次式で表す。

$$\pi_s^0 = a_s / A_s \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (3.11)$$

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(3.10)、(3.11)を用いれば、対数尤度 L は、次式で表すことができる。

$$\ln L = \sum_{s=1}^S a_s \ln \frac{\pi_s}{\pi_s^0} + \sum_{s=1}^S (A_s - a_s) \ln \frac{1 - \pi_s}{1 - \pi_s^0} \quad (3.12)$$

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(3.13)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¹⁵⁾。

$$AIC = Dev + 2N_\theta \quad (3.13)$$

表-3.3 各モデルの逸脱度

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

表-3.4 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 |

式(3.13)において、逸脱度 Dev とは、式 (3.12) より算定した対数尤度の最大値を $\ln L^*$ に-2 を乗じた式(3.14)として定義される規準量である。

$$Dev = -2 \ln L^* \quad (3.14)$$

式(3.13), (3.14)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-3.3 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とがわかった.

$\chi^2_{0.05}(4)=9.488$ 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.

この結果を踏まえ, 被災者の WTL は, III) 対数正規モデル ($k=1\sim3$) 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^{14), 16)}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.

以上より, 関数 $F_k(t)$ には, 表-3.4 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-3.5 を得ることができた.

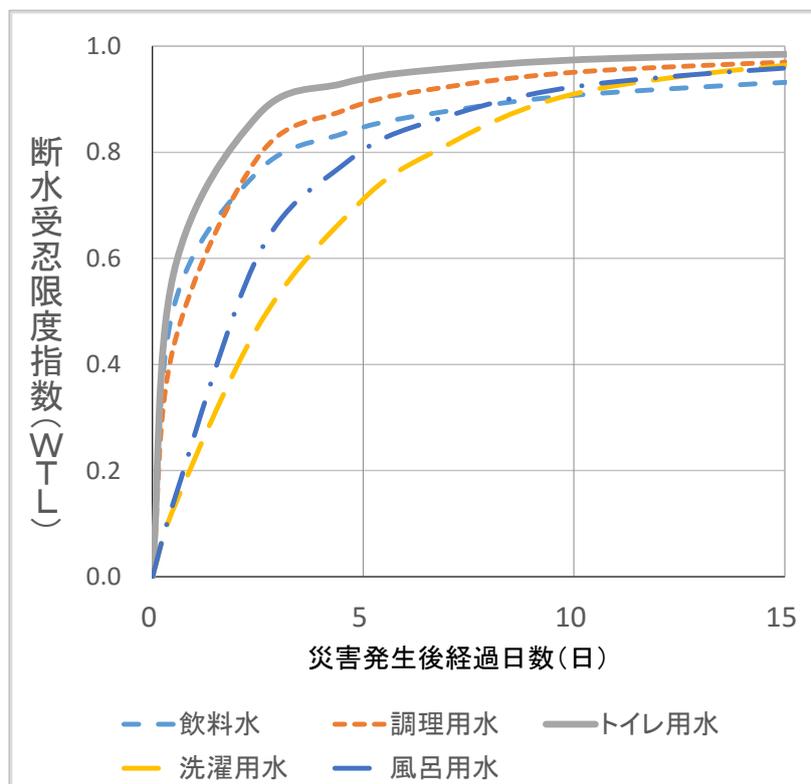


図-3.5 被災者の WTL 曲線

3.4 被災者の断水受忍限度の計量化

3.4.1 指標化の考え方

災害時の事業継続に関する企業等への影響調査⁵⁾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。

$$WTL_j = F_j(t) \quad (3.15)$$

$F_j(t)$ 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きたい。

- 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

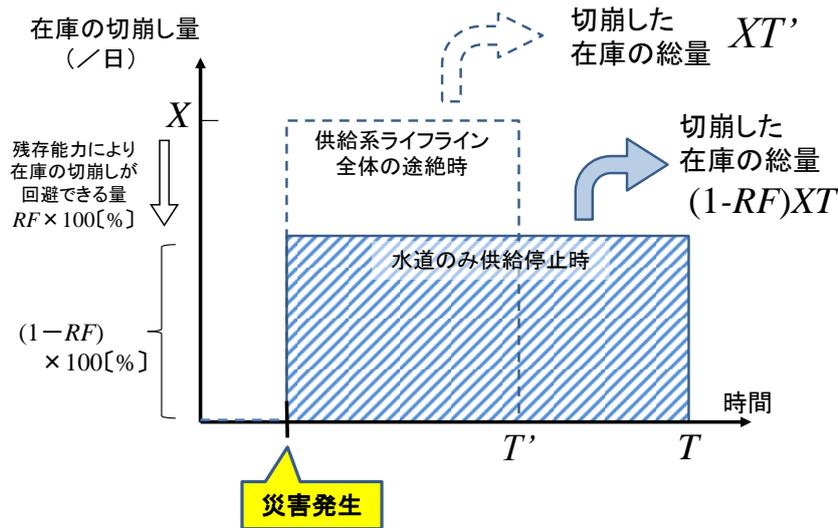


図-3.6 災害時における企業の在庫の切崩し行動

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-3.6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(3.16)の関係が成り立っている。

$$XT' = (1 - RF_j)XT \quad (3.16)$$

式(3.16)を整理することで、式(3.17)を得る。

$$T = \frac{1}{1 - RF_j} T' \quad , 0 \leq RF_j < 1 \quad (3.17)$$

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(3.17)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(3.18)の $F_j(t)$ を G_j と t の関数として導出できた。

$$F_j(t) = \begin{cases} G_j((1 - RF_j)t) & , 0 \leq RF_j < 1 \\ 0 & , RF_j = 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

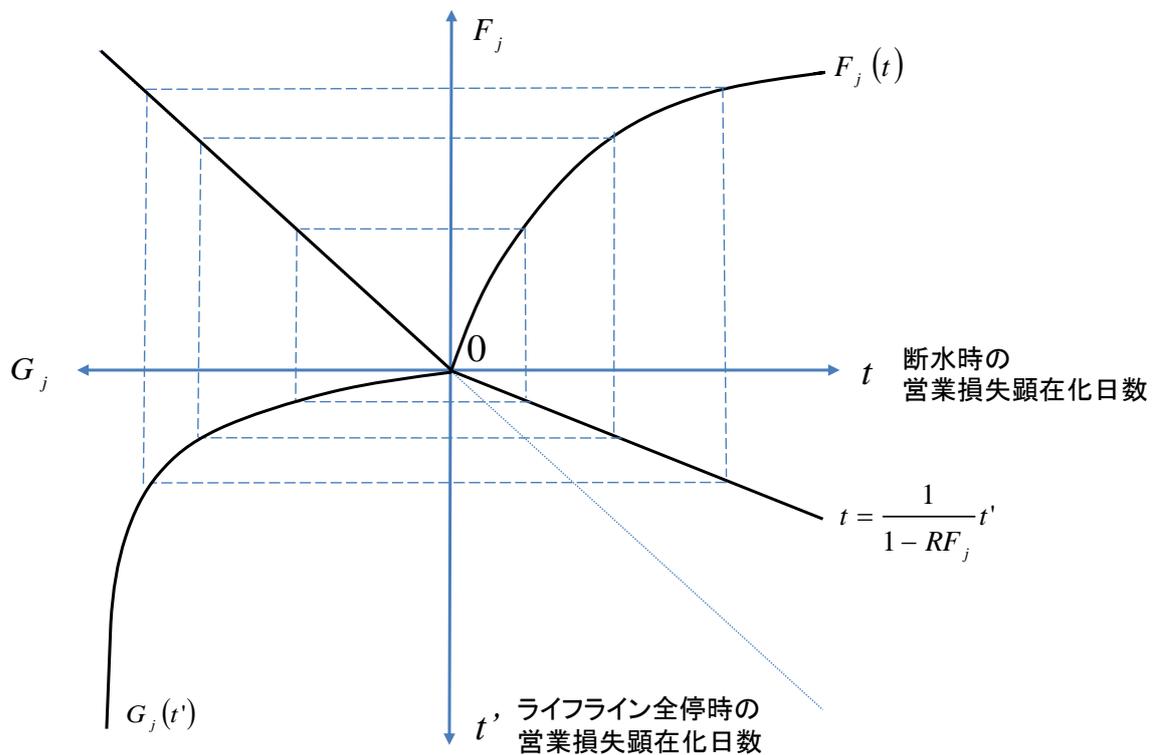


図-3.7 操業全停時あるいは断水時それぞれの営業損失顕在化日数の関係

以上の式(3.17)を用いて式(3.18)を得る関係を図解したものが図-3.7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(3.18)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。

3.4.2 計量化に用いるデータの概要

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（2005）^{18), 19)}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、3.4.1 の考え方に基づいて各産業部門の断水受忍限度 $F_j(t)$ を計量化した。

3.4.3 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。3.3.6 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(3.19)、(3.20)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

$$F_j(t) = G_j((1 - RF_j)t) = 1 - \exp\{-\alpha'(1 - RF_j)t^{\beta'}\} \quad (3.19)$$

VI) 対数正規モデル

$$F_j(t) = G_j((1 - RF_j)t) = \int_{-\infty}^{\frac{1}{\alpha'} \ln \frac{(1 - RF_j)t}{\beta'}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi\left(\frac{1}{\alpha'} \ln \frac{(1 - RF_j)t}{\beta'}\right) \quad (3.20)$$

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²⁰⁾について、両モデルの逸脱度と AIC の推計結果を表-3.5 に示す. なお、大都市域の産業大分類別従業者数²¹⁾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.

表-3.5 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{21)}$ |
|-----|----------|-----|-----|------|--------------|
| 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

表-3.6 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 |

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 パーセンタイル値 (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-3.6 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-3.8 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。

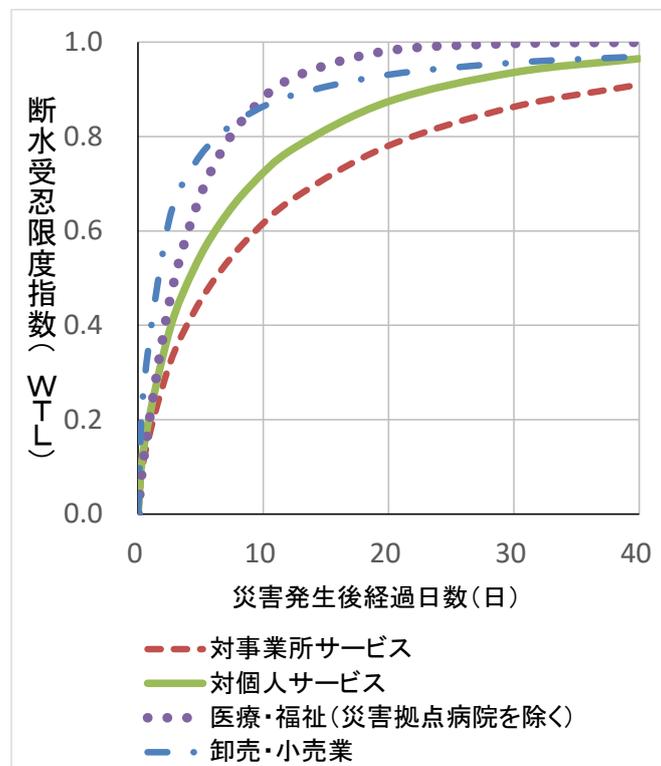


図-3.8 非製造業各部門の WTL 曲線

続いて、水道の取引額が相対的に小さい非製造業各部門²⁰⁾の逸脱度と AIC の推計結果を表-3.7 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-3.8 のモデルが選定された。

表-3.7 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{21)}$ |
|-----|-------|-----|------|------|--------------|
| 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-3.8 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 |

WTL 曲線は、図-3.9 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

では、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。

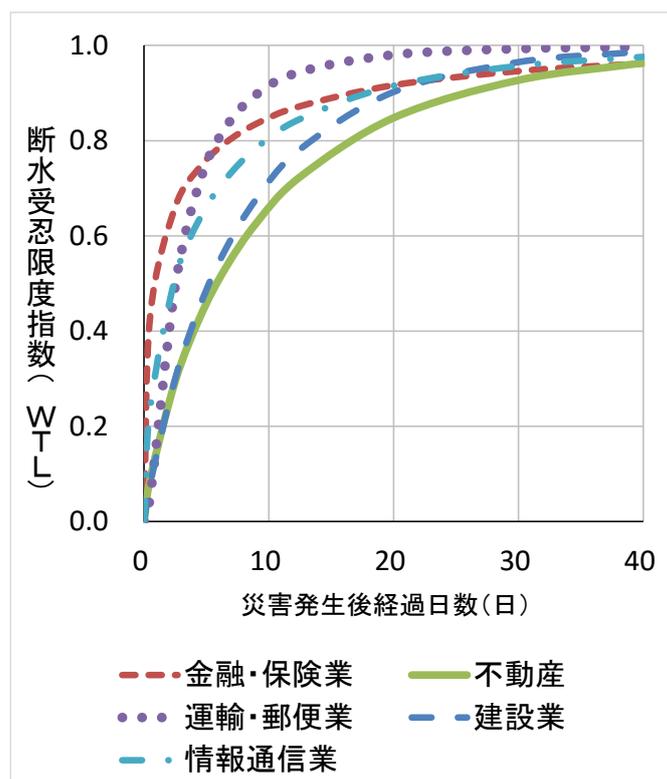


図-3.9 非製造業各部門の WTL 曲線

(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-3.9 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 3-10 のモデルを採用することとした。

表-3.9 各モデルの逸脱度と AIC

| j | 産業部門 | | V | VI | $RF_j^{22)}$ |
|-----|-------|-----|------|------|--------------|
| 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

表-3.10 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 |

以上の分析により導出した WTL 曲線は図-3.10 のとおりである。曲線の立ち上がりが最も急峻な産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。

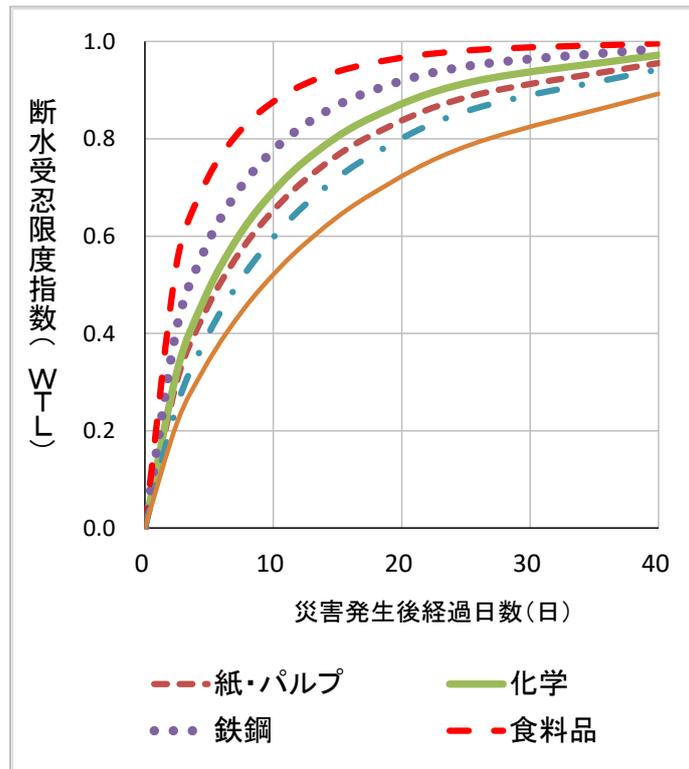


図-3.10 製造業各部門の WTL 曲線

3.5 被災者と被災企業の断水受忍限度の比較考察

以上の分析より計量化された生活用水の各水使用用途，または都市活動用水の各産業部門の 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-3.11，図-3.12 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。

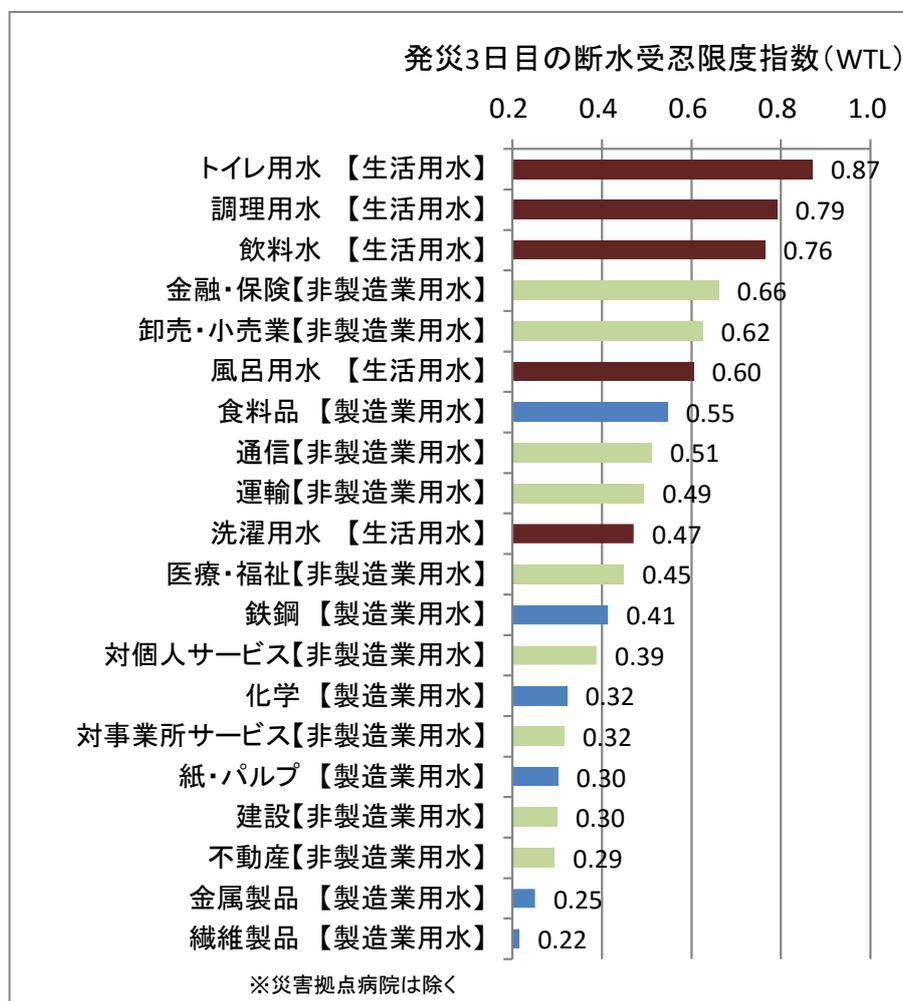


図-3.11 発災3日目の各用途・各部門の WTL

3.6 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(3.4)のとおりであるが、本節では、式(3.4)の中の各項の推定方法を詳述する。

3.6.1 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 $n_{ui}(t)$ とすると、

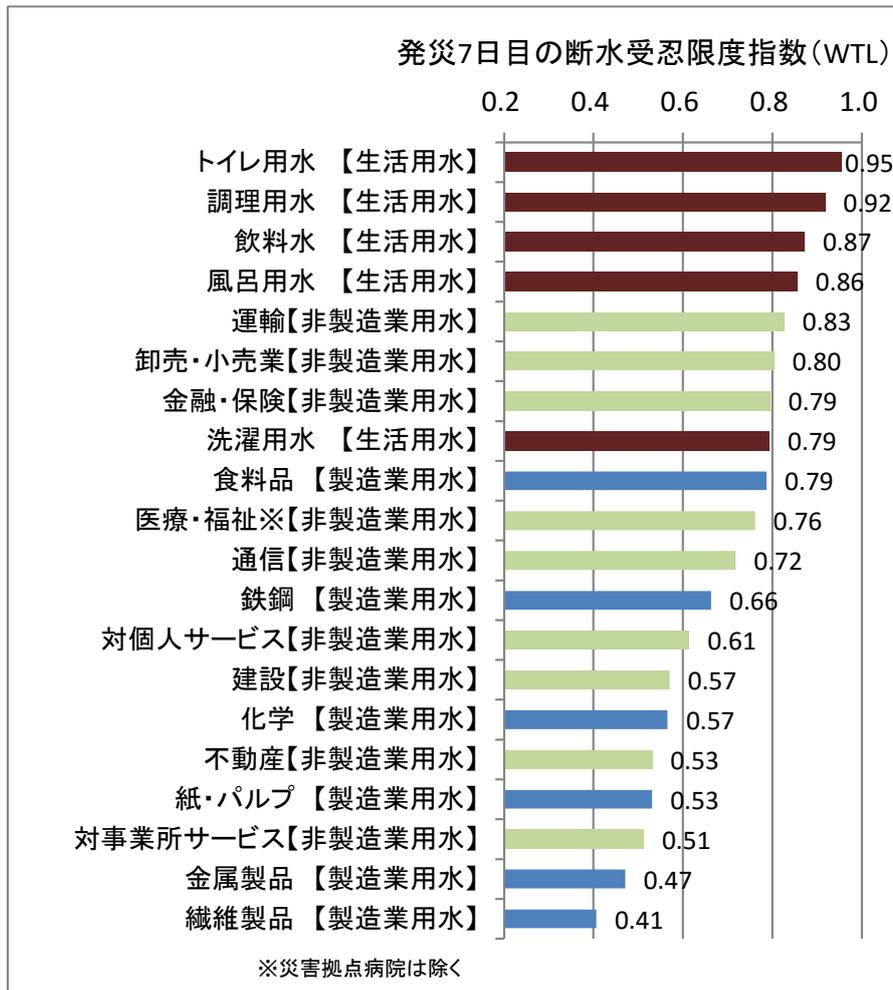


図-3.12 発災7日目の各用途・各部門のWTL

帰宅困難者の水の需要 ($\text{m}^3/\text{日}$) は、式(3.21)で推計することとした。

$$QD^u(n_u, t) = (q_{k:1} + q_{k:3}) \sum_i n_{ui}(t) \quad (3.21)$$

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。

3.6.2 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）、 $n_{hi}(t)$ ：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水の需要（L/日）は、次式で推計できる。

$$QD^m(n_h, t) = q_s F_{j:12}(t) \sum_i n_{hi}(t) \quad (3.22)$$

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。

3.6.3 災害廃棄物等処理水の需要

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²²⁾。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^{23),24)}。

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 1m^2 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 1m^3 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/ m^2 ）、 w'_i ：地域 i の津波堆積物または洪水堆積物発生量（ m^3 ）、 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需要（ m^3 /日）について、式(3.23)で考慮することとした。

$$QD^w(W, W', t) = \sum_i \left(q_w \frac{W_i}{w T_w} + q_{w'} \frac{W'_i}{T_{w'}} \right) t \quad (3.23)$$

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 （ m^3/m^2 ）

を、 q_w の設定値には、排水構造物清掃工における泥土量 1m^3 当たりの必要水量 0.280 (m^3/m^3) で設定した²⁵⁾。また、 T_w の設定は3ヶ月とした²⁴⁾。

3.6.4 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(2007)²⁶⁾は、堀内ら(1999)²⁷⁾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 (m^3) は式(3.24)で表される。

$$QD^e = 6,000 \sum_i d_{fi} \quad (3.24)$$

3.7 南海トラフ巨大地震時の都市部における水需要の推計例

3.7.1 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²⁹⁾。

- ◇ 最大震度・津波浸水・液状化被害：表-3.11
- ◇ 出火件数 $\sum_i d_{fi}$ ：94件
- ◇ 被災者数：図-3.13
- ◇ 災害廃棄物残存量：図-3.14

表-3.11 大阪市域の南海トラフ地震被害想定²⁸⁾

| 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「○」

q_k の値については、大阪市水道局による 2005 年度調査実績値 (図-3.15) を用いた。
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²¹⁾

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（2005年度調査）を基に図-3.16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。

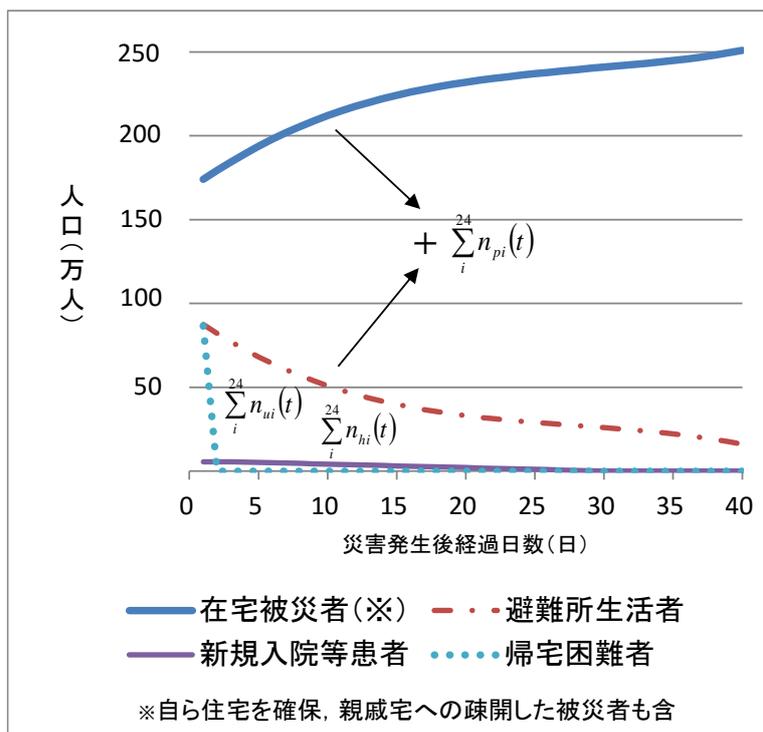


図-3.13 被災者数の時系列想定

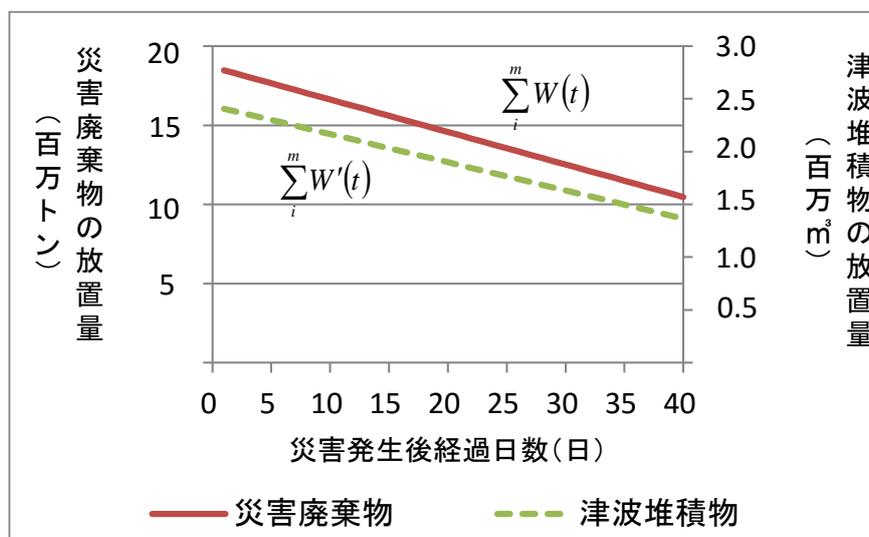


図-3.14 災害廃棄物残存量の時系列想定

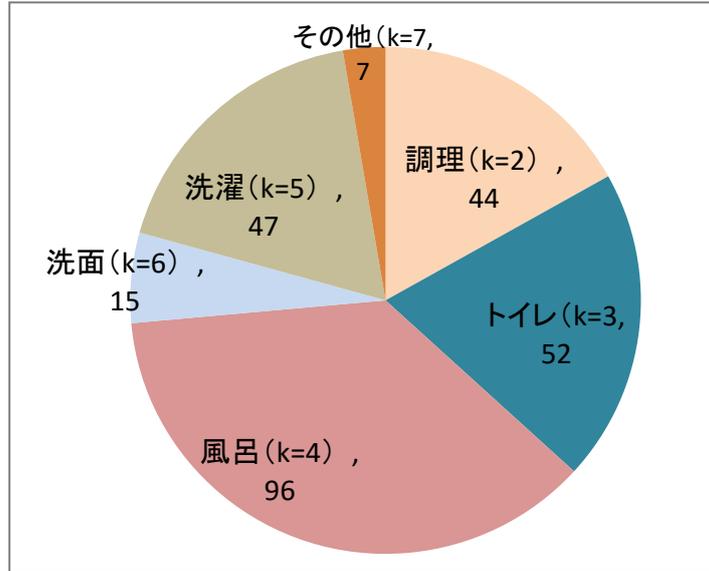


図-3.15 生活用水使用用途別原単位 (L/日・人)

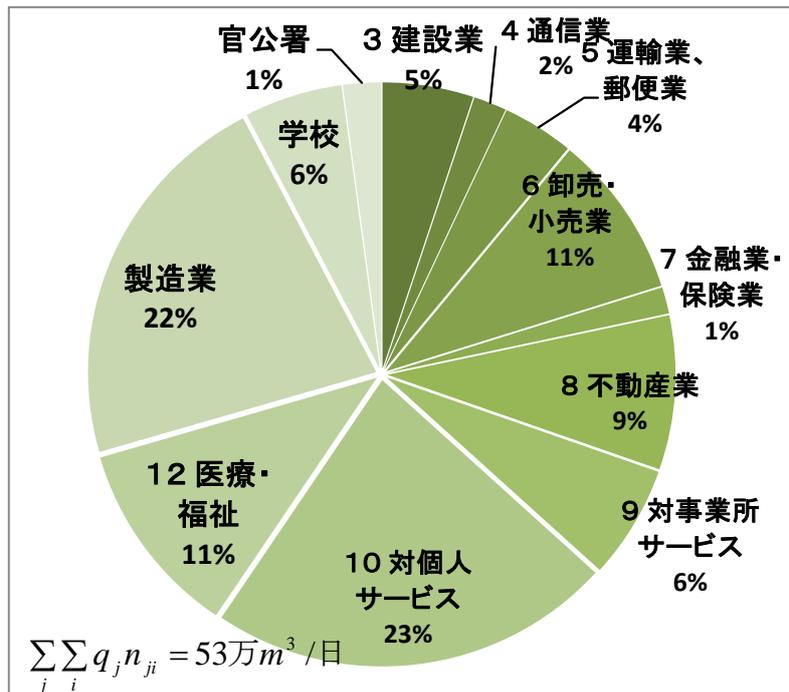


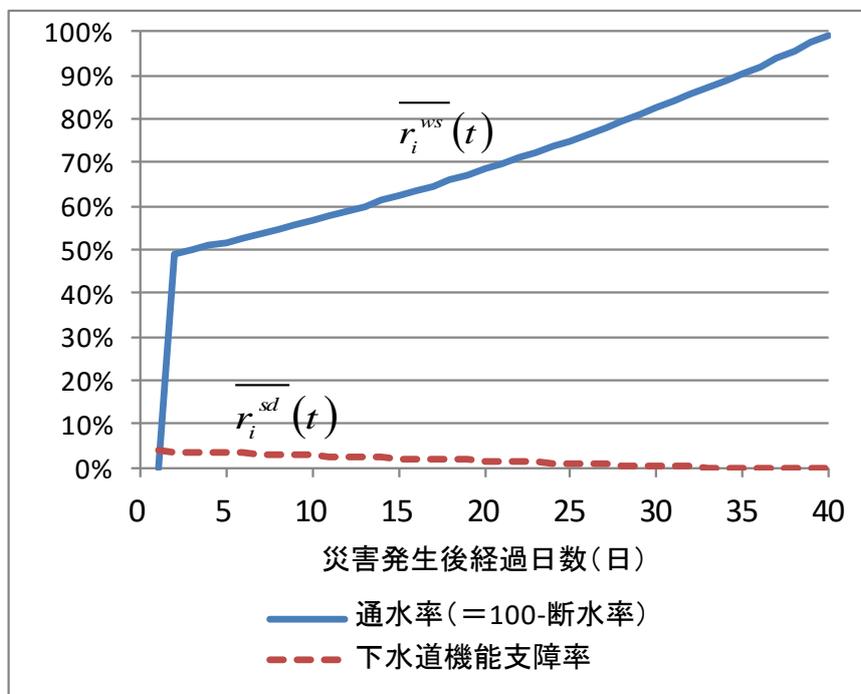
図-3.16 大阪市の産業部門別水量割合の設定値

3.7.2 水道の復旧想定

水道の復旧想定については、既存の予測データ²⁹⁾を所与として分析を進めた。

南海トラフ巨大地震時における大阪市の断水想定は、図-3.17のとおりである²⁹⁾。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。



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³⁰⁾。

図-3.17 大阪市の上下水道被害想定

被災都市における上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 $r_i^{ws}(t)$ (本章では簡単のため工業用水の断水率の推移を上水と同様と扱う。実際的には工業用水の断水低減率の推移は上水よりも大きく遅延するものであり、その具体的な推計方法については、5.5にて詳述する) すると、式(3.25)により推計した。

$$QS(t) = \sum_i^m \left\{ \left(n_{pi} \sum_k q_k + \sum_j q_j n_{ji} \right) \left(1 - \frac{r_i^{ws}(t)}{100} \right) \right\} \quad (3.25)$$

式(3.25)は、地区 i の被災者および被災企業には、対平常時比 $r_i^{ws}(t)$ 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 $r_i^{ws}(t)$ が下水道支障率 $r_i^{sd}(t)$ を上回る場合には、 $r_i^{ws}(t)$ を $r_i^{sd}(t)$ へ置換する。

3.7.3 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需要を推計した。その結果を図-3.18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。

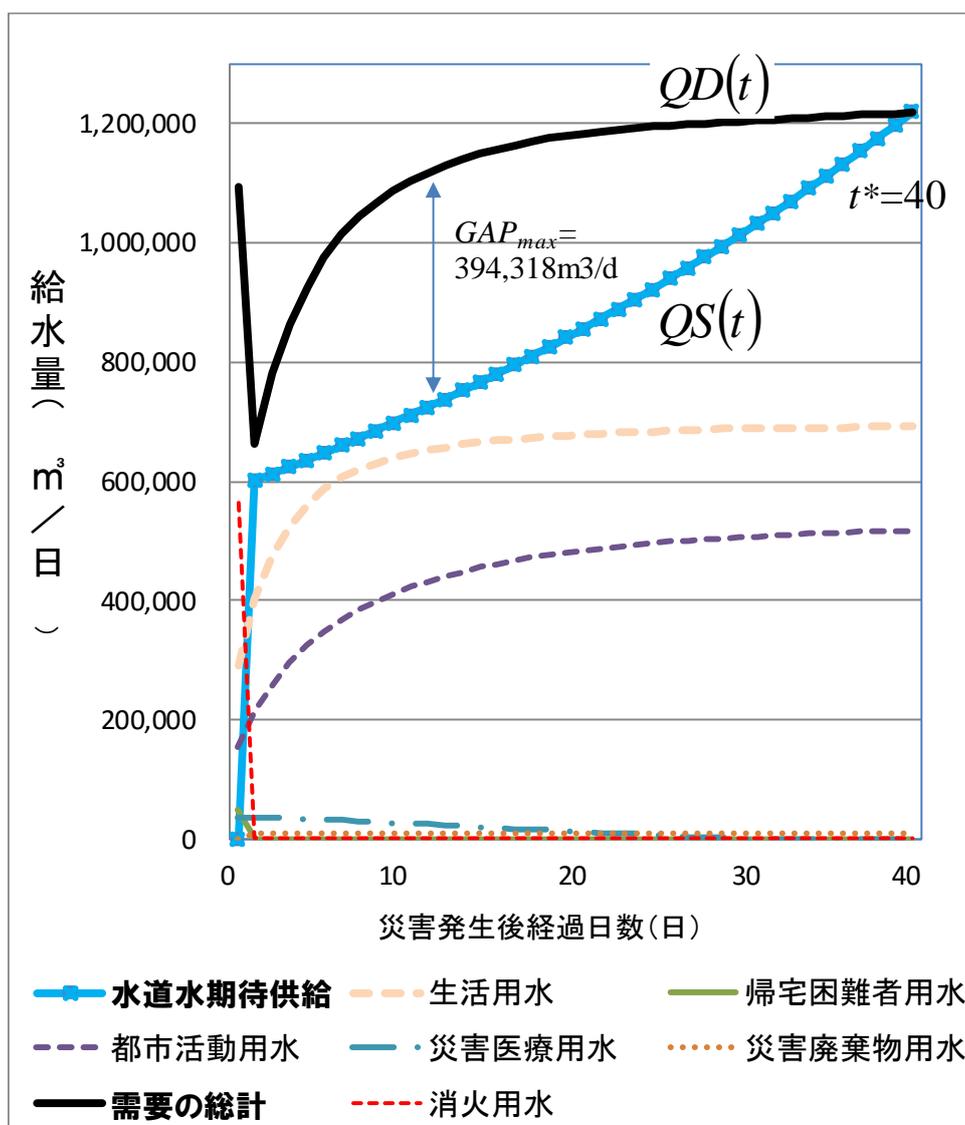


図-3.18 南海トラフ巨大地震時における大阪市域の水需要推計結果（使用用途別）

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、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、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 (= 災害時水需要 - 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、その後に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、 $394,318 \text{ (m}^3/\text{日)}$ 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本研究で定義するような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消火用水の多量需要³¹⁾や需要ニーズが経過日数とともに漸増し続ける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³⁾、すなわち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受忍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考えられる。

3.8 災害時における応急給水量の目標設定に関する考察

3.8.1 現行の応急給水目標の考え方

我が国の多くの水道事業者で採用されている災害時の応急給水目標は、災害が発生して

から3日間は3L/日・人(生命維持のための最低限の飲用水), 10日目まで20L/日・人(水洗トイレ, 洗面用の追加), 21日目まで100L/日・人(風呂・シャワー, 炊事用の追加), そして28日目以降には被災前給水量の250L/日・人(21日目以降200L/人・日と設定している事業者もある)である⁹⁾. これを図示すれば図-3.19のとおりとなり, 概ね時間経過に沿って比例的に増加する目標設定となっている. この設定根拠は, 阪神・淡路大震災時に被災者より電話で寄せられた要望の分析結果がベースとなっており, その結果に, 災害時は被災者各人が節水を心がける(受忍できる)という想定も加味して設定されたものである¹⁾. しかしながら, この目標設定は生活用水のみであり, 都市活動用水やその他応急対策用水の応急給水目標には言及されていないこと, そしてこの目標が設定されて以降, 国民の清潔指向や健康志向はより高まっていると考えられることなどの課題があるといえる.

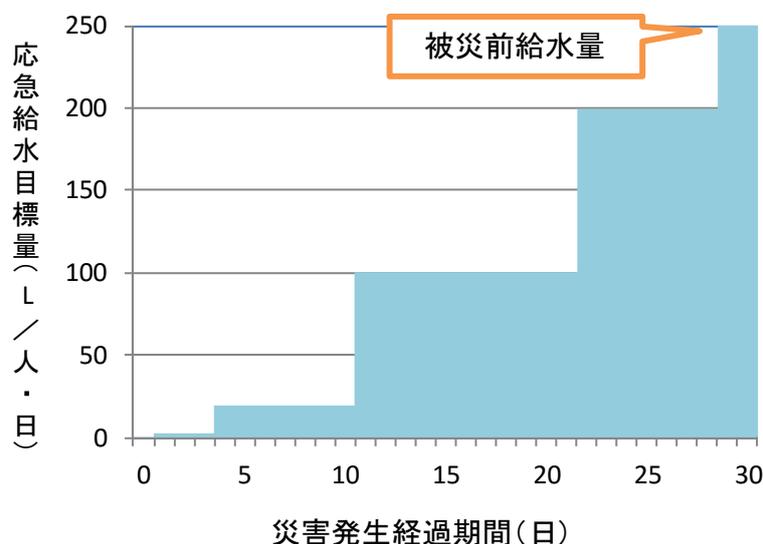


図-3.19 わが国における災害時の応急給水目標

3.8.2 災害時の応急給水目標と水需要とのマッチングに関する考察

災害時における応急給水目標と水需要との関係を図解すれば, 図-3.20のようなイメージとなる. ここで, 都市活動用水の給水目標は無いものとしている. これより都市活動用水はもとより生活用水についても, 応急給水目標と被災者・被災企業の水需要との間には大きなギャップが発生しうることが示唆された.

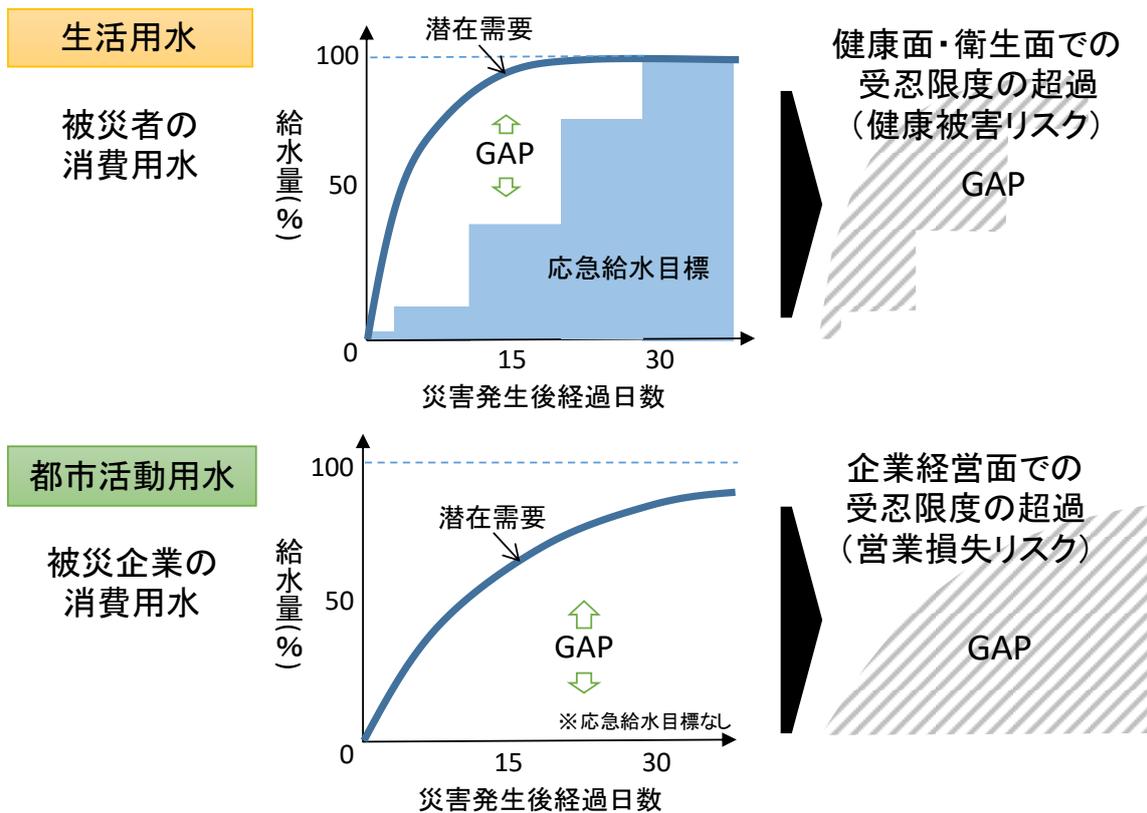


図-3.20 応急給水目標と水需要とのギャップ (イメージ)

3.9 結語

本章では、災害被災都市における水の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用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。

本章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，災害廃棄物等処理水の需要についても包含した，都市用水の災害時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，災害時における水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ましたが，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．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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，2011.9
- 3) 仙台市：東日本大震災における市民アンケート調査，2011.9
- 4) 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，2013.3
- 5) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査，2012.3

- 6) 厚生労働省：水道の耐震化計画等策定指針，2008.3
- 7) (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，2013.
- 8) 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
- 9) 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.43-59，1990.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 平山修久：水利用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.
- 13) 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.
- 14) 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
- 15) 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.
- 16) 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.1-8，2000.3
- 17) Applied Technology Council: Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, ACT-25, Redwood City, California, 1991.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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)，2011.
- 21) 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〕-，2014.2.26
- 22) 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)，

2012.

- 23) 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，2005.6
- 24) (社)廃棄物資源循環学会：津波堆積物処理指針（案），2011.7
- 25) (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
- 26) 高田至郎・楢田泰子・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.
- 27) 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.
- 28) 第 3 回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会，2013.8.8
- 29) 第 5 回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会，2014.1.24
- 30) 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市域はどうなるのか，大阪市災害対策委員会，2014.2.14
- 31) 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.

第4章 リスクコミュニケーションを通じた 災害水需要マネジメント

4.1 本章の論点

本章では、災害水需要マネジメントの心理的方略のひとつである「コミュニケーションを通じた需要低減への啓発—リスクコミュニケーションの展開」、
「水道応急復旧戦略および応急給水戦略に応じた—クライシス段階でのコミュニケーションの展開」、
そして「コミュニケーションを通じた共助意識の醸成—水の分け与え行動への変容」
に向けた方法論について検討する。

ここで、どのようなものをリスクコミュニケーションとして考えるかについては、
研究者によって微妙な違いが見られるが、一般的な定義として、吉川（1999）¹⁾は、
National Research Council（1989）²⁾の定義に基づき、図-4.1のように表現している。

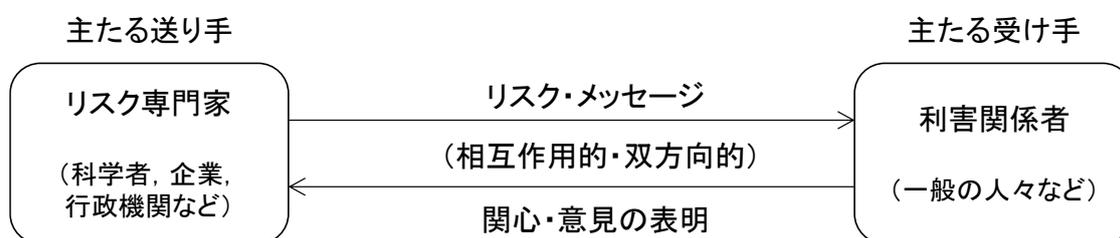


図-4.1 National Research Council が定義するリスクコミュニケーション¹⁾

そして、本定義には、重要なポイントが二点あり、一点目は、「リスクコミュニケーションを送り手と受け手との相互作用過程」と考える点、二点目は、「リスクにされる（ないしは、されされる可能性のある）人々に対しては、十分に情報を提供し、その問題に対する理解を深めてもらうことが重要である」と考える点であることを指摘している¹⁾。

とりわけ災害のリスクコミュニケーションについて、Covelloら（1988）³⁾は、自然災害と科学技術の事故災害と分類して考えていることを提唱した。その理由として、両者の災害は、人々のリスク認知が異なるからであるとしている。具体的には、自然

災害の生起確率については、実際の生起確率よりも低く見積もる一方で、科学技術の事故の生起確率については、実際の生起確率よりも高く見積もる傾向がある。

本研究で取り扱う断水災害は、基本的に前者の自然災害に起因したものである。そのため、人々は断水被害の実際の生起確率よりも低く見積もるリスク認知の特性をよく理解した上で、どのようなコミュニケーションが効果的かを考えることが重要であるといえる。

以上を念頭に、本章では、住民の断水受忍限度のレベルを引き上げるために、リスクコミュニケーションを通じて、断水リスクに対する理解、その対処行動意図の形成とその実行を促す手法について検討する。

なお、災害に関するリスクについては、しばしば「クライシス」と呼ばれ、リスクやハザードとは区別される場合がある。その定義として、大泉（1993）⁴⁾は「社会システムの基本的構造または根本的価値や規範に対する脅威」であって、「システム全体に物的影響を与え、基本理念つまりシステムそのものの抽象的意義やシステムの実在する核心事項を脅かす破壊」としている。つまり予期せぬ社会システムの緊急事態であり、災害時のリスクコミュニケーションはクライシスコミュニケーションと総称する場合があるが、本研究では災害発生時の緊急対応時を「クライシス段階」と位置づけ、そのフェイズにおけるコミュニケーションのみを限定して「クライシスコミュニケーション」と呼び検討を進める。

4.2 断水リスクコミュニケーションの定義と役割

災害時の断水被害軽減に向けて展開するリスクコミュニケーションについては、本研究のなかでは「断水リスクコミュニケーション」と呼ぶこととする。

断水リスクコミュニケーションは、次のように定義するものである。

“災害断水時に被災者が抱えるリスクの正確な情報を住民、行政などのすべての関係者が共有しつつ、相互に意思疎通を図ること”

個人に対してリスクコミュニケーションの成功した状態として、National Research Council（1989）¹⁾は、「いくつかの選択肢の中から、リスクを少なくできるような解を選択し、行動する。そのために有意義な情報が個人に与えられること」であると指

摘している。この捉え方を参考に、「住民（被災者）が自発的に断水生活を乗り切るための方法を選択し、行動する。そのために有意義なコミュニケーションが水道事業者等によってなされること」を断水リスクコミュニケーションの目標として定め、その手法について検討を進めていくこととしたい。

ちなみに、断水リスクコミュニケーションの実施主体には、水道事業者（自治体）を想定している。自治体によるリスクコミュニケーションの重要性については既にさまざまな分野で指摘されているところであり、たとえば環境省が策定したリスクコミュニケーションマニュアル（2002）⁵⁾のなかで、次のようにまとめられている。

自治体はその業務の性質上、以下のような特徴を有している。

- ・その地域の状態に精通しており（情報の分析、提供役）
- ・公共の利益の視点を持ち（公正性の確保）
- ・地域の市民や事業者などとのつながりを持っている（調整役）

このような自治体の特徴を鑑みれば、地域におけるリスクマネジメントを推進するには、自治体がより主体的にリスクコミュニケーションを促進する役割を果たすことの重要性が理解できる。

さらに同マニュアルは、自治体が主体となるリスクコミュニケーションの期待効果について、以下のように述べている。

“リスクをどのように低減すべきかなどについては、市民や事業者、行政などの様々な関係者が、リスクに関する情報を共有しつつ、お互いの立場の相互理解を深めるためのコミュニケーションの場を設定することが重要となる。（場の設定の主体は、もちろん自治体である。）こういったリスクコミュニケーションが促進され、リスクに関する情報が適切に共有できれば、リスクをなるべく回避するように関係者自らの判断で行動することが可能となる。そのため自治体が主体となってリスクコミュニケーションを実施することは、市民や事業者などが断水リスクを自主的、積極的に削減していくのを促す上で有効な手段となる。”

以上は、化学物質に関するリスクを想定してまとめられたものであるが、災害時の断水リスクに対しても十分当てはまる考え方である。

4.3 断水リスクコミュニケーションの期待仮説

4.3.1 コミュニケーションがリスクの認知・理解・行動に及ぼす影響の仮説

リスクコミュニケーションについては、社会心理学などの分野で、その実施目的や手法について研究がなされてきた。なかでもリスクコミュニケーションを効果的に行うプロセスとしては、Rowan (1994) ⁶⁾が提案したモデルがよく知られている。本モデルは、リスクコミュニケーションは、信頼の確立 (Credibility)、リスクに気づかせる (Awareness)、存在するリスクについて理解を深めさせる (Understanding)、リスクへの解決策 (対処行動) の理解を得る (Solutions)、対処行動を引き起こさせる (Enactment) の Step を踏むことを提案した。各 Step の頭文字をとって CAUSE モデルと呼ばれる。そして、各 Step を達成するための手段のひとつとして、コミュニケーションがある。

同様に、社会心理学の分野では、人々を行動変容へと導くコミュニケーションの技法についても研究が進められている。それらの内容について、藤井 (2002) ⁷⁾ は、交通問題を対象とした実証分析を通じて以下のように整理している。

- 情報提供法 | 客観的な情報を提供する方法
- 依頼法 | 行動変容の必要性を説明し、行動変容を依頼 (説得) する方法
- 行動プラン法 | 行動変容した場合の行動プランの立案を要請する方法
- フィードバック法 | 個人の行動情報や集団全体の行動情報を各人にフィードバックする方法
- アドバイス法 | 一人一人に具体的な行動を提案する方法

また、上記の手法のそれぞれに対して、「行動の自覚の誘発」、「行動意図の形成」、「実行意図の形成」が期待できるかについても、次のように整理した。

- ◇ 情報提供法 | 行動の自覚の誘発, 行動意図の形成
- ◇ 依頼法 | 行動の自覚の誘発, 行動意図の形成
- ◇ 行動プラン法 | 実行意図の形成
- ◇ フィードバック法 | 行動の自覚の誘発, 行動意図の形成
- ◇ アドバイス法 | 実行意図の形成

さて、図-4.1 は、CAUSEモデルの考え方を参考にしつつ、断水リスクコミュニケー

シオンが被災者の行動に及ぼす影響の因果関係を考えた仮説である、さらに各Stepの目標を達成するために有効と考えるコミュニケーション技法⁷⁾との一対一関係がわかりやすいように整理した。この関係は、断水被害リスクの「気づき」あるいは「理解」は「行動の自覚の誘発」、断水被害リスクへの「解決策の形成」は「行動意図の形成」、断水被害リスクの「対処に向けた行動意図の形成と実行」は「実行意図の形成」に当たるとして設定したものである。

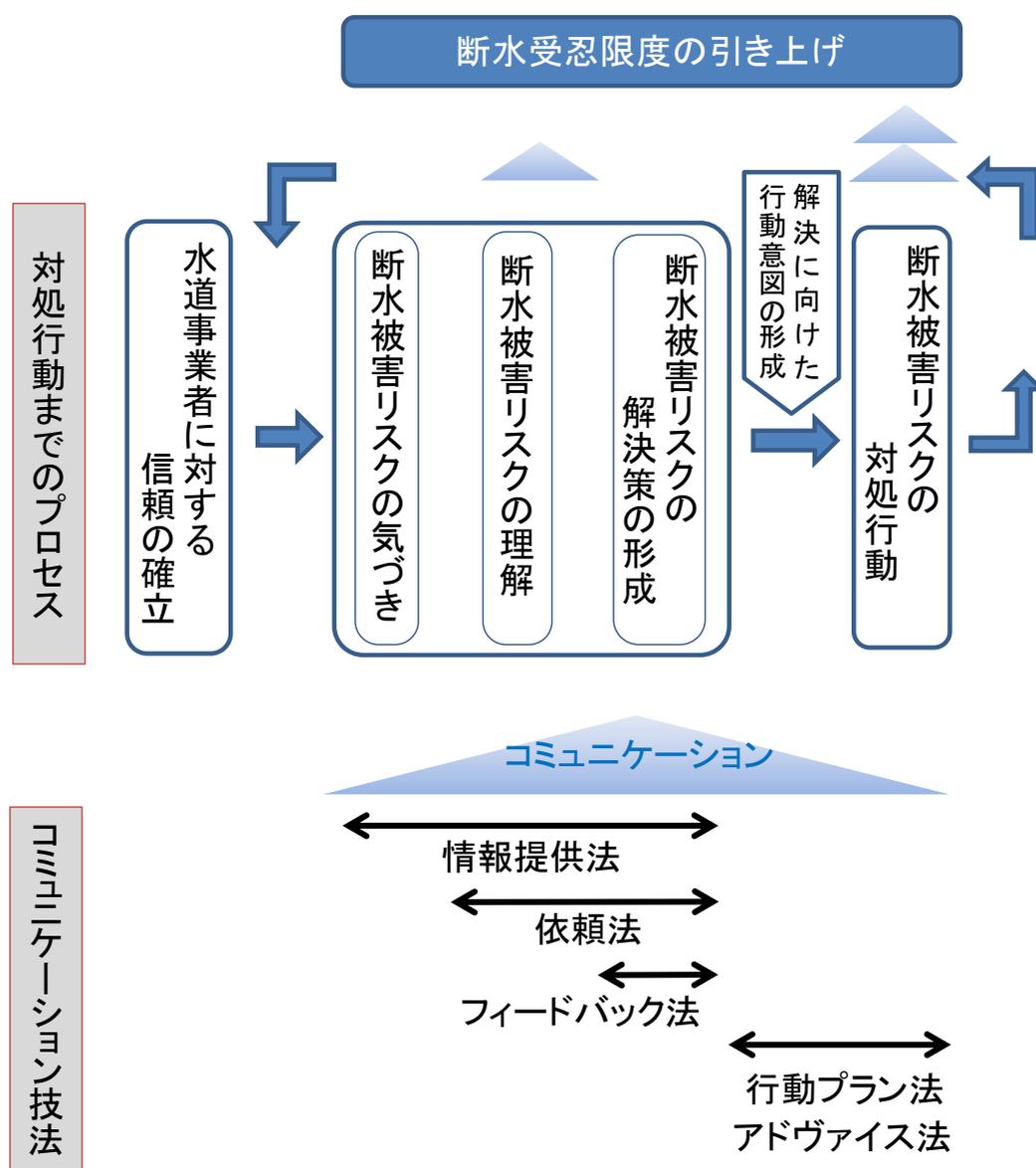


図-4.1 コミュニケーションが断水被害リスクの気づき、理解、対処行動の実行に及ぼす影響の仮説

図-4.1 は、以下の仮説を主張するものとなっている。

“断水被害リスクに対する気づき，理解，解決策の形成といった態度変容が進めば，断水受忍限度は引き上げられる．さらに，解決に向けた行動意図が形成され，実際の行動に移す行動変容まで進むことができれば，断水受忍限度の範囲はより大きく引き上げられる．”

上記の仮説には，態度変容と行動変容には差があり，行動変容を引き起こすに至るには断水受忍限度の大幅な引き上げがなされなければ実現しないという示唆が込められている．つまり，断水リスクの解決策を理解した人々が，そのリスク回避に向けた行動意図の形成と実行に移るかという点と必ずしも容易ではないということである．この点は，いくつかの態度形成と行動変容との相関に着目した研究（例：Raven and Rubin, 1983⁸⁾），行動意図の形成と実行との相関に着目した研究（例：Sheppard et al., 1988⁹⁾）の中でも明らかにされている．特に自然災害に対するリスクコミュニケーションについては，主体間でリスクに関する認識を共有できたとしても，それが「備える」ための行動に結びつかないという問題点も指摘されているところである¹⁰⁾．

行動にまで繋げるためには，まず「災害時に断水生活を強いられても，なんとか凌ぐことができる」という自己効力感（self-efficacy）を高め，まず「行動意図の形成」を図ることが不可欠であると考えられる．ここに自己効力感とは「ある結果を生み出すために必要な行動をどの程度うまく行うことができるか」という予期のことであり，自分の行動に関する可能性の認知である（坂野ら，1986¹¹⁾）．そのため図-4.1には，最終Stepに進む前段で「解決に向けた行動意図の形成」を特出しした．

図-4.1 によれば，断水被害リスクに対する気づき，理解，解決策の形成までの幅広い効果が期待できるコミュニケーション技法は「情報提供法」ということになる．そして人々の行動意図の形成や実行を促すには「行動プラン法」と「アドバイス法」の実施が有効ということになるが，断水リスクコミュニケーションの対象は基本的には不特定多数の住民となるため，一人一人を相手にする「アドバイス法」の適用は膨大な労力を要し現実的ではない．そのため本研究では，「情報提供法」と「行動プラン法」を活用した断水リスクコミュニケーションのパターンを検討する．

4.3.2 情報の内容とその提供前後の意識変化の仮説

表-4.1 情報提供前後の意識変化の仮説

| A. 地域の災害断水リスク | |
|----------------------|--|
| 前 | 災害ハザードに対する地域の被害想定（震度，液状化，浸水深など）については，昨今，多くの自治体でハザードマップなどが整備され，公開されてきているところであるが，その際，どの程度の断水被害が見込まれていて，それがいつ頃を目途に復旧する見込みかという情報までは知らない。 |
| 後 | 断水リスクの気づき が形成される。 |
| B. 断水時に備えた「自助」の取組 | |
| 前 | 自分たちでできるの断水リスクに備えた取組，すなわち断水時の「自助」の実践に関する情報については，多くの住民にはまだまだ定着していない。 |
| 後 | 断水リスクの理解と解決 が形成される。 |
| C. 断水時に自治体が行う「公助」の取組 | |
| 前 | 自助の取組だけでは限界がある。実際には，自治体によって応急給水などの種々の取組が展開されるのが一般的であり，こうした情報の詳細は，多くの住民に知られていない。 |
| 後 | 断水リスクの理解と解決 が形成される。 |
| D. 毎日どの程度の水を使っているか | |
| 前 | そもそも平時において，自分は平均的にどの程度の水量（L）を消費するのかという情報は，ほとんどの住民に知られていない。 |
| 後 | 災害時の節水可能量をイメージしやすくなり， 断水リスクの解決に向けた行動意図 が形成される。 |

被災者が十分に知らないかもしれない災害断水時を乗り切るための有用な情報（被災者の断水受忍限度の範囲拡大に繋がる情報）としては，表-1を仮定した。

表-1においてA～Cは「情報提供法」，Dについては「行動プラン法」の実施を意図した情報である。図-4の仮説に基づけば，これらの情報提供を受けた住民は，情報提供を受けなかった住民に比べて，断水リスクに対する理解および解決に向けた行動意図の水準が高くなること，そして断水受忍限度の範囲拡大に繋がることを期待される。本研究では，この理論的な仮定の妥当性を確認するとともに，情報の違いによっても

断水受忍限度に与える影響は異なるかを計るために、次章に述べるコミュニケーション実験を行った。

4.4 都市生活者への断水リスクコミュニケーション実験

4.4.1 実験概要

断水リスクコミュニケーション実験は、一般市民を対象としたインターネットアンケート調査を介して行った。被験者に南海トラフ巨大地震による断水被害をイメージさせ、断水生活を強いられた場合のいくつかの対処法を情報提供し、その場合の行動意向の質問を通じて、どの程度の断水受忍限度の範囲拡大が期待できるのかについて調査した。

表-4.2 調査対象者の男女割合，年齢構成

| | 総数 | 男 | | 女 | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | サンプル | サンプル | 割合 | サンプル | 割合 |
| 総数 | 600 | 290 | 48% | 310 | 52% |
| 15～29歳 | 172 | 86 | 50% | 86 | 50% |
| 30～59歳 | 246 | 123 | 50% | 123 | 50% |
| 60歳～ | 182 | 81 | 45% | 101 | 55% |

調査の対象は、大阪市民の15歳以上の男女600名とした。2015年12月18日～21日に実施し、男女比，年齢構成は、大阪市の住民比率に準拠し、表-2の構成とした。モニターによって質問の分岐を容易にコントロールできるというインターネットアンケート法の利点を活かし、回答者を3つのグループ（各200名。男女割合，年齢構成に応じて均等割り付け）に分けし、それぞれに異なる提供情報と質問を与えて回答させる形で進めた。

ちなみに、乳幼児を持つ調査対象者や介護を要する方を持つ対象者については、断水受忍限度は著しく小さいものと推察され、このような属性が大部分を占めると、実験結果にも大きな影響を及ぼす。各対象者の世帯構成などを調査した結果は図-4.2の

とおりである。乳幼児を持つ調査対象者が占める割合は4%、介護を要する方をもつ対象者は3%となり、平均的な割合と考えられるため、以後の分析では、属性間の受忍限度の差異には焦点を当てていない。

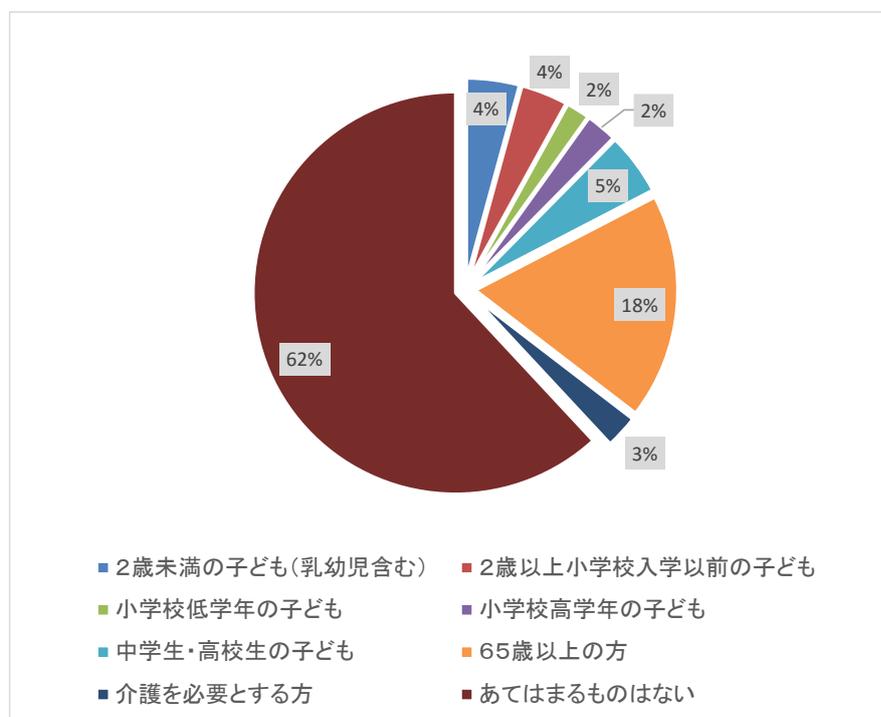


図-4.2 調査対象者の世帯構成

4.4.2 アンケート調査票の設計

調査票は、図-4.3 のとおり、大きく分けて、①個人特性／属性、②断水受忍限度の測定（情報提供前後）、さらに、水道が復旧していない近隣地域の被災者に対して支援しようとする③「共助」意識の潜在性について、以上3点を調査することとした。

今回の断水リスクコミュニケーション実験は、3つのグループに分けて、それぞれに「家庭でできる自助の取組（グループ1）」、「自治体が行う公助の取組（グループ2）」、「公助の取組&平時における水の消費量（グループ3）」の情報を付与している。こういった情報提供コンテンツの選定については、3.3 で適用している大阪市民の断水受忍限度調査のなかで、同時に、「断水リスクを解決するために必要と考えられる優先度の高い情報は何か」についても調査しており、その結果を参考に設定したものである。

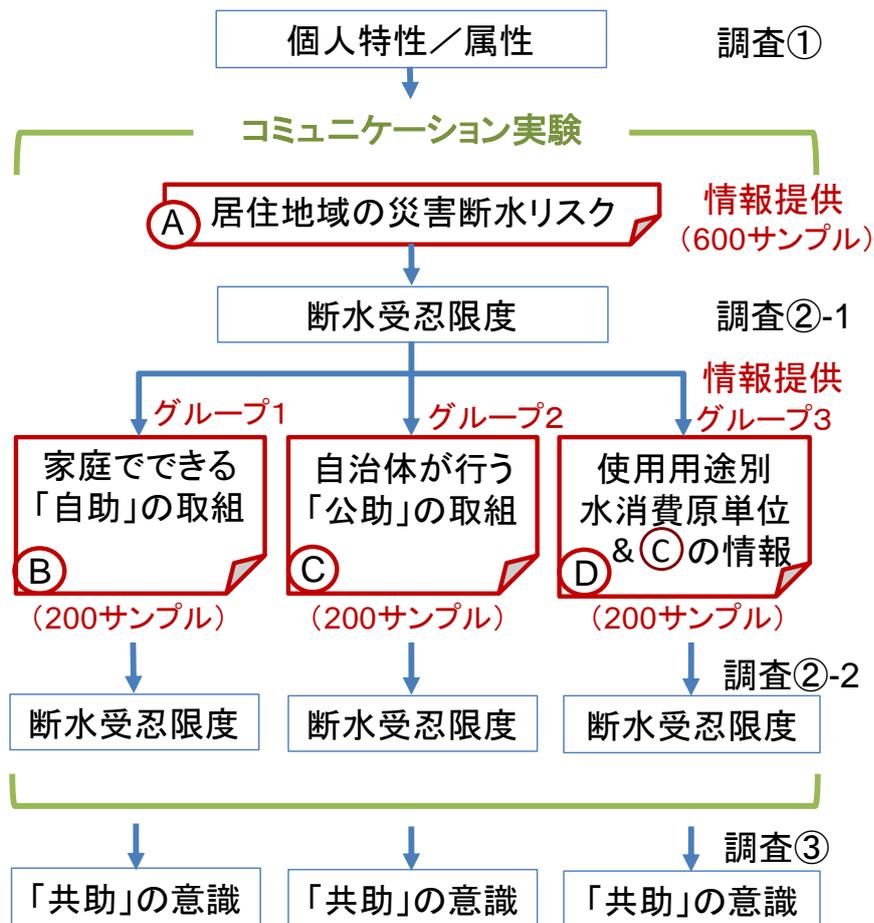


図-4.3 アンケート調査（断水リスクコミュニケーション実験）の構成

ちなみに、回答者には、調査の前段で以下の被災状況をイメージさせている。

自宅できつろいでいたとき、突然、太平洋沖を震源とする震度6強の地震が発生しました。テレビを付けると津波警報が出されていますが、幸いあなたの家は、海や川からかなり離れたところに立地しているので、津波による浸水のおそれはありません。

幸いあなたの自宅には大きな被害はなかったものの、電気、水道、ガスが止まっています。電気とガスは明日には復旧するとのことですが、水道については復旧の目途が立っていないとの報道がなされています。

今回の地震により、周辺の木造家屋などでは倒壊・半壊などの被害が起こっているため、明日より最寄りの小学校と公園が避難所として開設されるとのこと、そ

こを拠点に応急給水車による水の配布や、もともと備蓄されていたボトル水3リットル分の配布がなされる予定となっています。

(原文抜粋. 実際のアンケート調査票には下線無し.)

なお, グループ3の情報のみ, 2つのコンテンツが組み合わさった形となっているが, 図-4.4に示すとおり, これはグループ1と2は, 「情報提供法」によるコミュニケーションを意図したのに対し, グループ3は「行動プラン法」を意図した異なる実験目的を有しているためである。

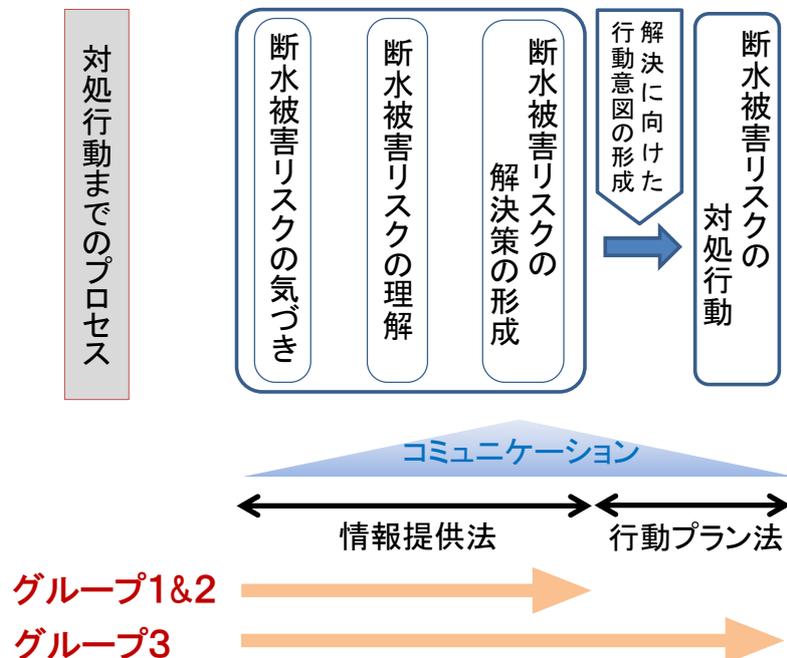


図-4.4 各グループのコミュニケーション実験内容

4.4.3 情報提供内容

図-4.3におけるA～Dの情報提供内容は, 以下のとおりである。

(原文抜粋. 実際のアンケート調査票には下線無し.)

A. 居住地域の災害断水リスク (全員に提供)

..... [“断水リスクの気づき”を与える情報]

近い将来発生が予測されている「南海トラフ地震」の概要をまとめたものです。ご一読ください。

南海トラフ地震とは、過去約100～150年の間隔で繰り返された地震であり、東海・近畿・四国・九州太平洋沖の広い地域に地震や津波被害をもたらし、発生すれば、東日本大震災のような国難ともいえる被害が想定されているものです。

この地震が発生すれば、お住まいの地域では最大震度6強～6弱の揺れと広範囲での津波浸水が予想されています。そのため、水道をはじめとするライフラインにも多くの被害が発生してしまいます。

自治体では、ふだんお使いいただいている水道水を安心・安全にお届けすることに加え、地震などの災害時にも対応できるよう、水道管などを計画的に更新したり、様々な関連施設の耐震補強工事などが推進されているところですが、このような巨大地震に見舞われますと、災害発生1週間後においても約50%の地域が断水しており、つづく3週間後においても約30%が、約1カ月後でも約10～15%の地域が断水状態を強いられることが想定されています。

B. 個人・家庭でできる「自助」の取組（グループ1に提供）

【“断水リスクの理解・解決”を深める情報】

災害などにより水道などのライフラインが止まった場合に備えて、自らの安全は自ら守るという観点から、各ご家庭でも飲料水や非常食などの準備をすることが、国や自治体より、推奨されているところです。

- ✓ ボトルウォーター，非常食
- ✓ 携帯トイレ（大），携帯トイレ（小）
- ✓ 体を拭くためのもの（タオルなど）
- ✓ 洗髪のためのもの（シャンプーナップなど）
- ✓ 使い捨てOKの下着類
- ✓ 洗面のためのもの（ウェットティッシュなど）

C. 自治体が行う「公助」の取組（グループ2に提供）

【“断水リスクの理解・解決”を深める情報】

災害時に水道が復旧するまでの間、自治体によって、次のような取り組みが行われます。

- ✓ 最寄りの避難所では、1人1日3リットル程度の飲料水が非常食の炊き出しなどが提供されます。（ただし、風呂、洗濯、水洗トイレの利用は当面の間できない可能性があります。）
- ✓ 最寄りの避難所では、定期的に給水車が巡回しており、徐々に多くの水が配給可能となっていきます。（例：3日目まで3㍓、10日目まで20㍓、3週間目まで100㍓、1か月後には平時と同水準）
- ✓ お住まいの地域の水道がいつ頃復旧するのかについて、自治体のホームページなどをご覧いただくことが把握できます。
- ✓ 井戸水や貯水タンクの水など緊急的に使いたいけれども、その水質が不安といった場合には、自治体に依頼すれば、水質検査を実施し、水質情報が提供されます。

D. 一人一日水使用用途別原単位（グループ3に提供）

【“断水リスクの対処行動意図の形成”を促す情報】

表-4.3 一人一日当たりの水使用用途別原単位（例）

| | | |
|---------------------------|-----|-------|
| 飲料水 | 3 | L/人・日 |
| 調理用水・食器洗い用水 | 41 | L/人・日 |
| トイレ用水 | | |
| 大便のみ水洗 | 12 | L/人・日 |
| 小便についても毎回水洗 ^{※1} | 40 | L/人・日 |
| 洗濯用水 ^{※2} | 47 | |
| 風呂用水 | | |
| シャワー | 36 | L/人・日 |
| 湯船にも浸かる | 60 | L/人・日 |
| 洗面等用水 | | |
| 洗面・手洗い | 9 | L/人・日 |
| 歯みがき | 6 | L/人・日 |
| その他（散水・掃除など） | 6 | L/人・日 |
| | 260 | L/人・日 |

※1 1日8回を想定、 ※2 洗濯機使用を想定

[注] 大阪市水道局による平成17年度調査などを参考に設定

4.4.4 断水受忍限度の調査方法

市民の断水受忍限度の調査（図-4.3：調査②）は、「どのくらいの日数までなら断水を我慢できると思われますか。夏場の暑い季節とそれ以外の季節（春，秋，冬）の2つのシーンを想像いただき，それぞれの水利用の用途ごとに，我慢できると思われる日数をお知らせください。」という設問を行い，「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週間くらいまで」，「10日くらいまで」，「3週間くらいまで」，「1ヶ月くらいまで」，「1ヶ月以上」を洗濯する方式を採用した。

また，3. においては，水使用用途を「飲料水」，「調理・食器洗い用水」，「トイレ用水」，「洗濯用水」，「風呂用水」，「洗面等用水」に分類し，それぞれの受忍限度を推計してきたが，災害時において被災者は各用途をさらに細分化して捉え，節水できる用途はするといった思考が働くと考えられるため，本研究では，「トイレ水洗」を「大便のみ水洗」と「小便についても毎回水洗」に細分化するとともに，「風呂」についても「シャワー」と「湯船に浸かる」に追加分類して，それぞれの断水受忍限度を調査することとした。

4.4.5 共助意識の調査方法

被災地域における断水の解消速度は，配水ブロック毎に大きく異なるため，狭い範囲で水道復旧完了地区と未復旧地区が混在する格差が発生する。そのため水道が早期復旧した地域の住民が未復旧地域住民を支援することもまた，被災地域全体の断水被害の軽減を考えるうえで重要であるといえる。

こうした共助意識の調査については，「お住まいの地域の水道が被害を受けなかった場合，あるいは周りの地域よりも早く復旧した場合を想像していただきます。大災害が発生した場合には，国や自治体ができることには限界があり，地域のみなさんの支え合いが非常に重要です。いまだ水道が復旧していない近隣地域の被災者の方に対して，支援および協力できることはありますか」という設問を行い，「風呂，トイレ，洗濯，炊事ができる機会の提供」などの項目から選択させる方式を採った。

4.5 実験結果

4.5.1 季節による断水受忍限度の変化

表-4.4 に断水受忍限度の平均日数（以下、「断水受忍日数」と呼ぶ.）の比較結果を示す. いずれの水使用用途においても，夏場の断水受忍日数が春秋冬のときよりも小さいことが確認できた. また，p 値においても全用途において 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，被災者の断水受忍限度は夏場とそれ以外の季節で明確な差があることがわかった.

表-4.4 断水受忍限度の平均日数の比較

| | 夏 | 春秋冬 | p値※ |
|-------------|-----|-----|------|
| 飲料水 | 1.5 | 2.0 | 0.04 |
| 調理用水・食器洗い用水 | 2.3 | 2.8 | 0.02 |
| トイレ用水 | | | |
| 大便のみ水洗 | 1.1 | 1.4 | 0.03 |
| 小便についても毎回水洗 | 1.8 | 2.0 | 0.02 |
| 洗濯用水 | 3.5 | 4.1 | 0.01 |
| 風呂用水 | | | |
| シャワー | 2.2 | 3.4 | 0.01 |
| 湯船にも浸かる | 3.8 | 4.2 | 0.03 |
| 洗面等用水 | 2.1 | 2.3 | 0.02 |

※ 夏と春秋冬の断水受忍日数が等しいとの帰無仮説の下でのt検定結果(片側検定)を示す.

4.5.2 情報提供内容の違いによる断水受忍限度の変化

グループ 1～3 それぞれのコミュニケーション実験前後の断水受忍日数の比較結果を表-4.5 に示す. いずれも夏季の被災をイメージした場合の結果である. すべての水使用用途においてコミュニケーション実験後の断水受忍日数が大きくなり，なかでもグループ 3 の断水受忍日数が最も大きく，次いでグループ 2 が高くなる結果を得た.

ここで，グループ 1 の断水受忍限度の変化が最も小さい結果となったが，一般市民に断水への備えを促すこと，そして避難所に断水生活に備えた備蓄を推進することは，災害断水時を凌ぐための最も基本的な対策と考えられてきたと言っても過言ではない. 本調査では，グループ 1 の回答者に，別途，現在の備蓄状況と，A, B の情報提供を受けた後での備蓄に対する意識の変化を調査しており，図-4.5 のとおりであった.

表-4.5 断水受忍限度の平均日数の比較

| | 実験前 a | 実験後 | | | | | |
|-------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | グループ1 b | p値※ a-b | グループ2 c | p値※ b-c | グループ3 d | p値※ c-d |
| 飲料水 | 1.5 | 2.0 | 0.01 | 2.3 | 0.00 | 3.1 | 0.03 |
| 調理用水・食器洗い用水 | 2.3 | 3.1 | 0.02 | 4.1 | 0.00 | 4.5 | 0.03 |
| トイレ用水 | | | | | | | |
| 大便のみ水洗 | 1.1 | 1.8 | 0.02 | 2.2 | 0.00 | 2.6 | 0.01 |
| 小便についても毎回水洗 | 1.8 | 2.6 | 0.03 | 2.9 | 0.00 | 3.8 | 0.02 |
| 洗濯用水 | 3.5 | 3.9 | 0.02 | 4.3 | 0.00 | 4.6 | 0.00 |
| 風呂用水 | | | | | | | |
| シャワー | 2.2 | 2.7 | 0.03 | 3.3 | 0.02 | 3.7 | 0.02 |
| 湯船にも浸かる | 3.8 | 4.2 | 0.18 | 4.3 | 0.16 | 4.6 | 0.00 |
| 洗面等用水 | 2.1 | 2.6 | 0.01 | 3.2 | 0.00 | 3.5 | 0.04 |

※ コミュニケーション実験前後においても、断水受忍日数は等しいとの帰無仮説の下でのt検定結果(片側検定)を示す。

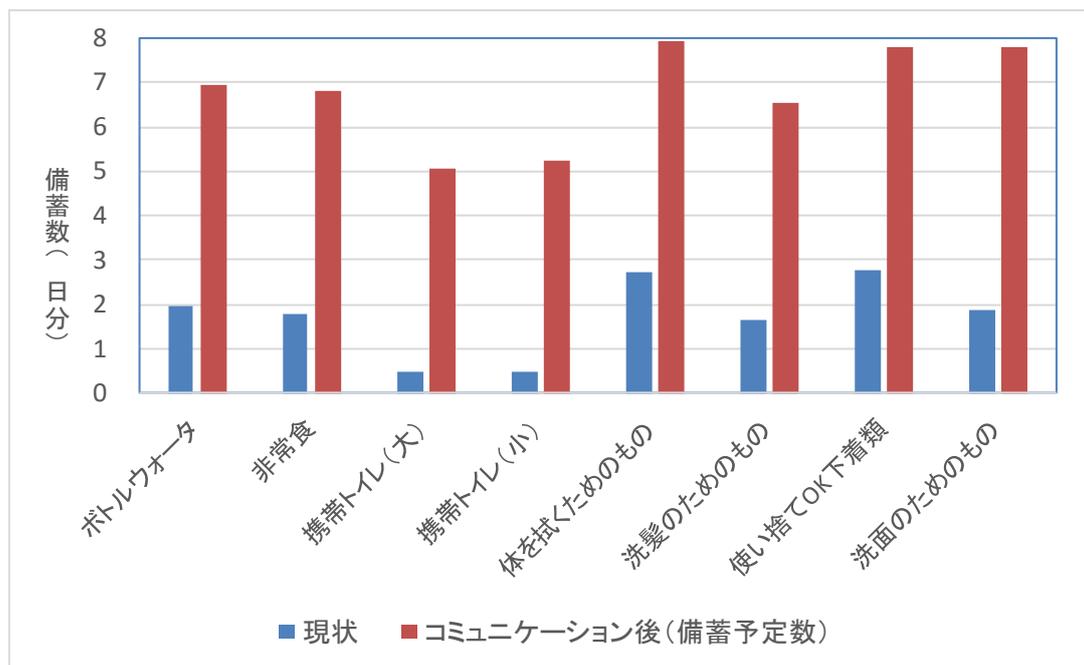


図-4.5 コミュニケーション実験前後の断水に対する備えの意識の変化

各グッズとも軒並み高い変化を示しており、全体を通して1週間程度の備蓄は確保しようという意識の変化が生まれたことがわかる。なお、実際に備蓄への行動にまで至るかどうかについては、本調査では推し量れない部分である。しかしながら、グループ1の断水受忍日数の変化度は1日にも満たず極めて低い。この結果は、水を使わ

なくても済む断水に対応した代替財の使用は、被災者の断水受忍限度を根本的に引き上げる決定打とはならず、水の消費により得ていたサービスを代替するには限界があり、長期の使用は、被災者の健康面・衛生環境面に悪影響をもたらすことが示唆するものと考えられた。

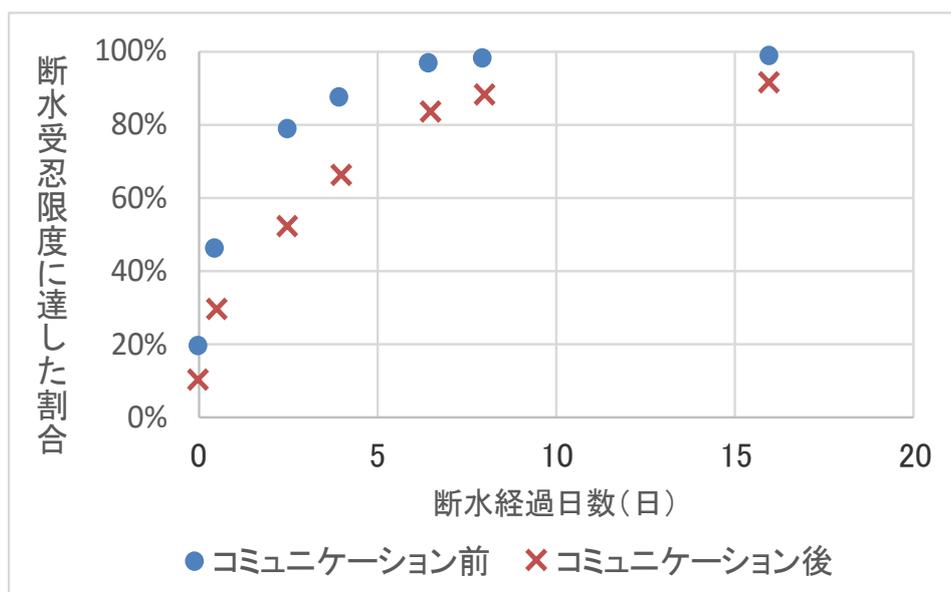


図-4.6 飲料水の受忍限度 (グループ3) : 夏季

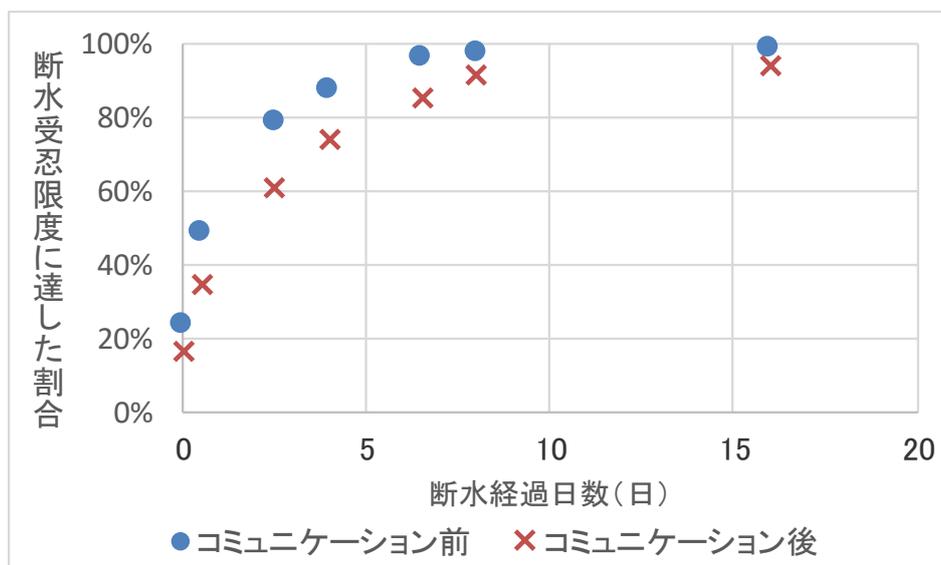


図-4.7 調理・食器洗い用水の受忍限度 (グループ3) : 夏季

続いてグループ3における断水受忍限度に達した回答者割合の累積相対度数分布を、

水使用用途毎にそれぞれ 図-4.6～4.11 に示す。図中には、コミュニケーション実験前後の各階級値における累積度数をプロットしている。いずれの用途においても、すべての階級においてコミュニケーション実験後の方が低くなった。

以上より、断水被害リスクの理解・解決に繋がる具体的な情報提供を受ければ受けるほど、断水受忍限度範囲を拡大するという図-4.1 の仮説が成立することが示された。

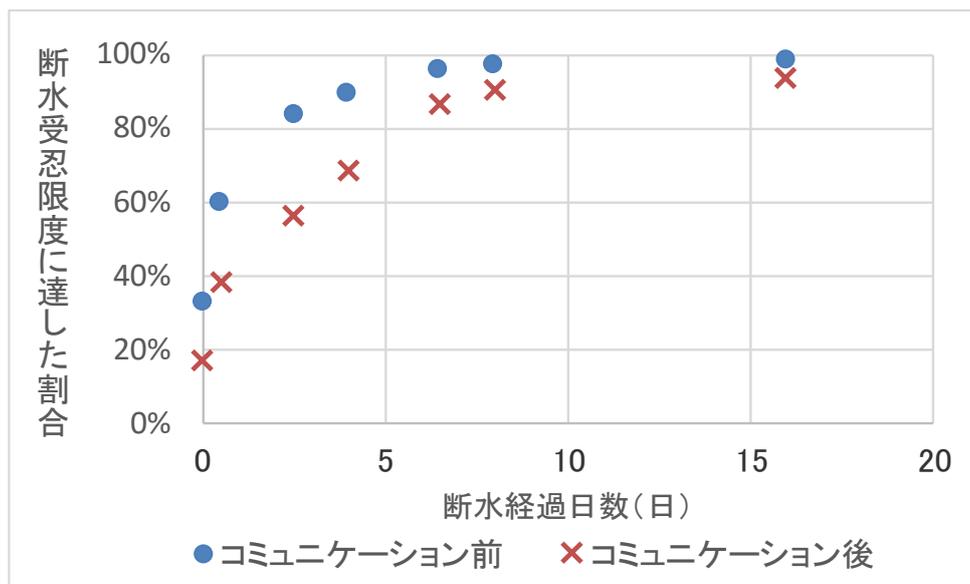


図-4.8 トイレ用水（毎水洗）の受忍限度（グループ3）：夏季

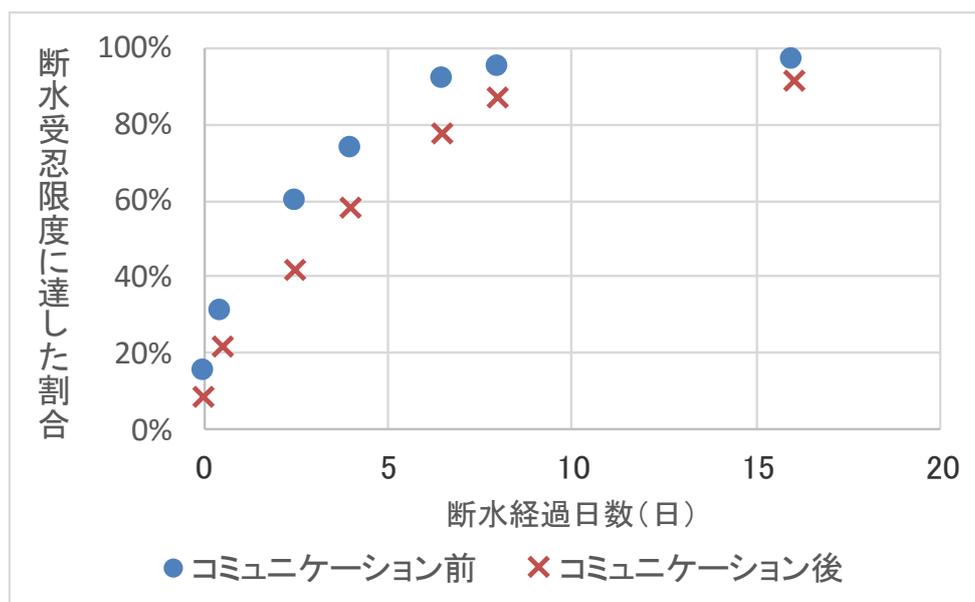


図-4.9 洗濯用水の受忍限度（グループ3）：夏季

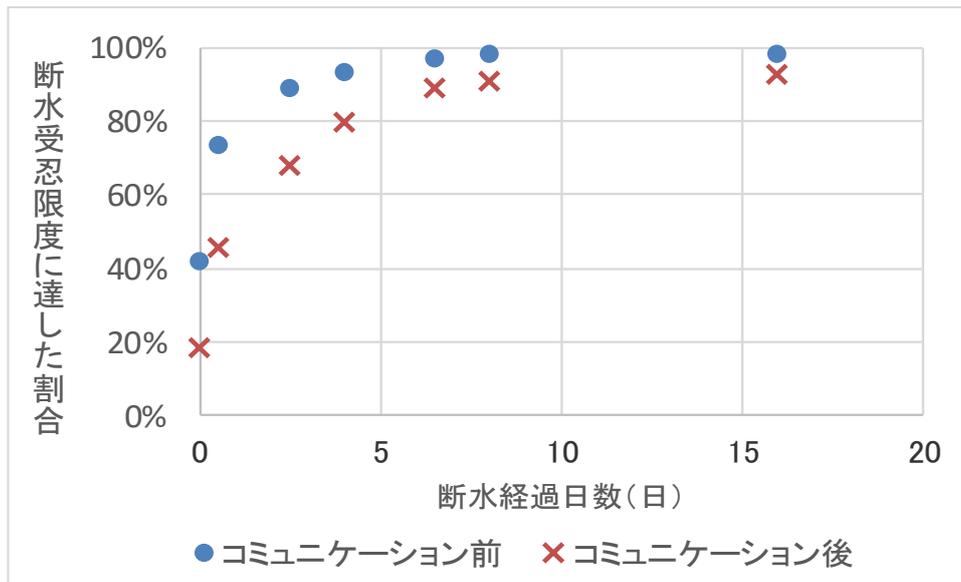


図-4.10 シャワーの受忍限度（グループ3）：夏季

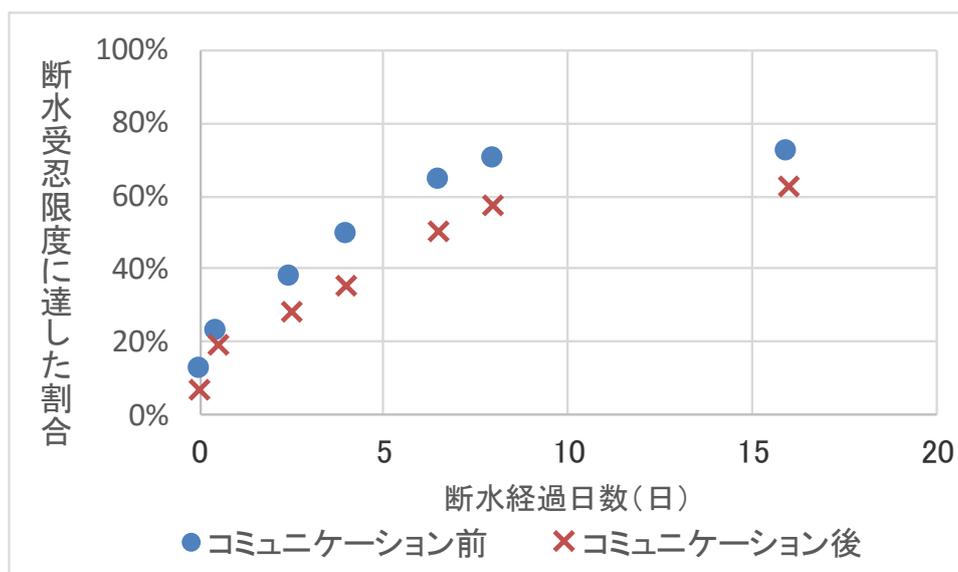


図-4.11 風呂用水（湯船）の受忍限度（グループ3）：夏季

4.5.3 情報提供内容の違いによる共助意識の変化

グループ 1～3 それぞれの回答者の共助意識に関する調査結果を図-4.12 に示す。風呂、トイレ、洗濯および炊事機会の提供意思について、いずれもグループ 3 の回答者が高くなることがわかった。断水リスクの理解と解決に向けた行動意図の形成が進んだ被災者ほど、共助意識も高くなることが示唆された。

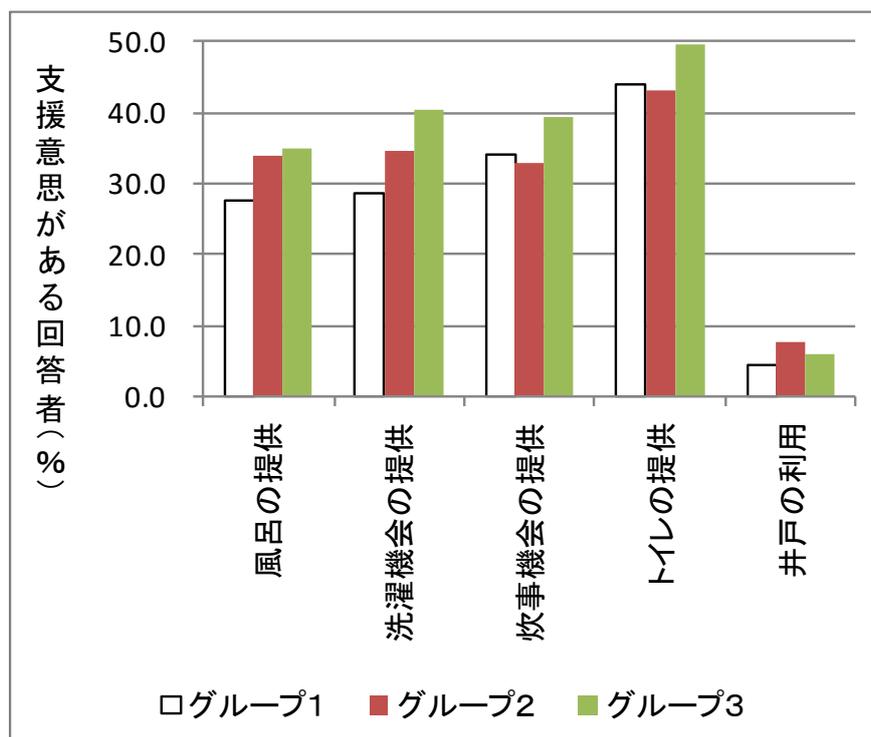


図-4.12 共助意識のグループ間比較

4.6 需要低減効果

断水リスクコミュニケーションの実施による災害時における需要の低減効果を考察するために、今回のコミュニケーション実験を通じた被災者の需要変化を推計した。ここで、水需要の推計は式 (3.2) により行っている。本章では、同式中の q_k の代入値については表-4.4により与え、 $F_k(t)$ については 図-4.6~4.11にて例示した累積相対度数分布とした。

コミュニケーション実験前後における水需要の推計比較結果を図-4.13に示す。同図は最も断水受忍限度の範囲拡大が確認されたグループ3の結果を例示したものである。平時における水需要との差もわかるように、対平常時比で表現した。

コミュニケーション実験を行わなくとも（情報Dの提供をしなくても）、一定の需要低減効果が見込まれるものの、コミュニケーション実験後にはさらなる低減が図られており、発災後1週間の期間のなかにおいて、最大0.19ポイントのさらなる低減が見込まれることがわかった。

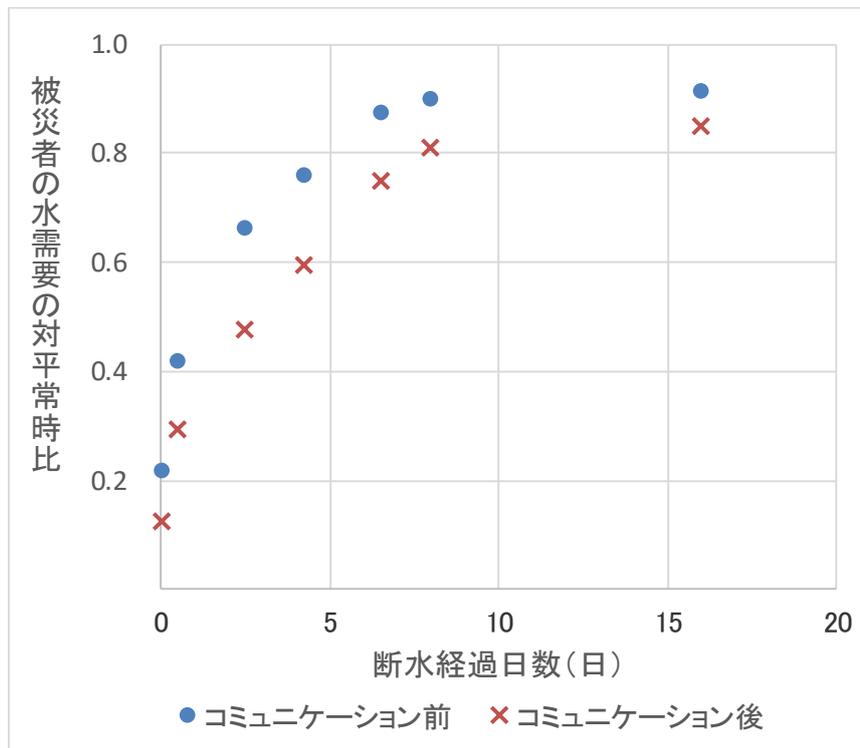
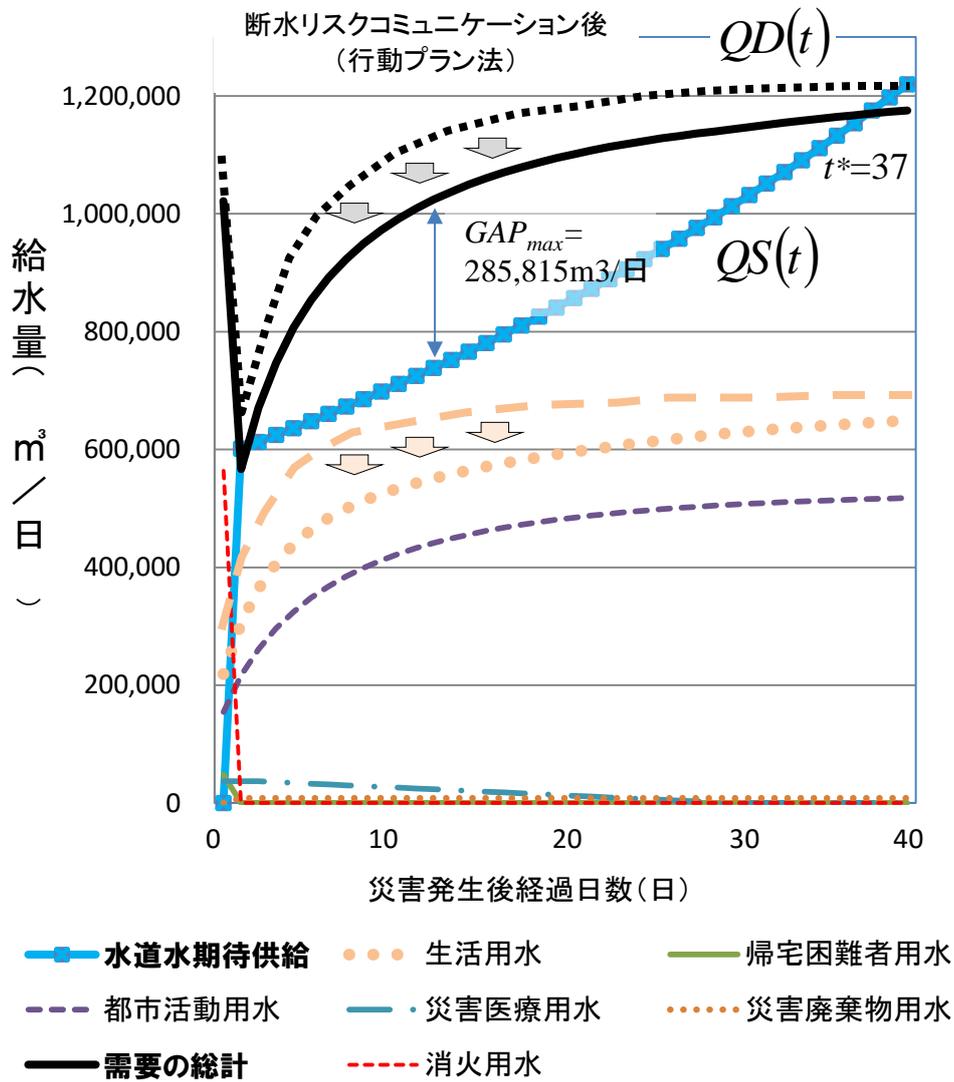


図-4.13 コミュニケーション前後の被災者の水需要変化（グループ3）

また，グループ3に実施したような行動プラン法によるリスクコミュニケーションが大阪市民に展開できたと仮定できた際、生活用水の災害時需要の低減効果を推計した事例を図-4.13に示す．同図は，図-3.18にリスクコミュニケーション後の需要推計結果についても付加したものである．需給ギャップ（＝需要－水道水期待供給量）について着目すると，需給ギャップの解消期間はコミュニケーション後に $t^*=40$ （日）から37（日）に変化するとともに，需給ギャップの最大値は285,815（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）となり，コミュニケーション前の394,318（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）から65,319（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）（27.5%）低減されることがわかり，需給ギャップの低減に大きな効果があることがわかった．

今回のリスクコミュニケーション対象は市民であったが，企業などにも対象を拡げることで，さらなる効果が期待できるものといえる．



注) コミュニケーション後の生活用水需要は、風呂用水を「シャワー」と「湯船」に、トイレ用水を「大便のみ水洗」と「小便も毎回水洗」に細分化し、それぞれの用途別需要を積み上げた推計値である。

図-4.13 南海トラフ巨大地震時における大阪市域の水需要推計結果（使用用途別）
—行動プラン法によるリスクコミュニケーション前後の比較結果—

4.7 クライシス段階に求められるコミュニケーション

災害発生時のクライシス段階におけるコミュニケーションにおいては、素早く、しかも適切なコミュニケーションが求められるなど、非常に難しい対応に迫られる。表-4.6は、災害断水時に水道事業者によって行われる一般的な広報内容をまとめたものであるが、混乱期の中で、新しい情報発信が目まぐるしく求められる様相が見て取れる。

表-4.6 災害断水時の各フェイズにおける水道事業者の広報内容

| | 初動期 | 応急対応期 | 展開期 | | 給水回復期 |
|----------|--------------------------------|--------------------|------------------------------|---------|------------------|
| 広報 | 断水等の発生 現時点の対応状況 | 断水等の発生区域 給水所の情報 | 断水等の発生区域 給水所の情報 復旧の見通し | | 給水所の情報 復旧の見通し |
| 応急 給水 | 応急給水の検討 従事者の確保 資機材の準備・確保 | 対応方針の立案 応急給水の開始 | 活動計画の策定 | 復旧目標の設定 | 応急給水活動の縮小 |
| 応急 復旧 | 応急復旧の検討 施工業者の確保 | 施設の被害状況 漏水調査 | 復旧手順の検討 復旧活動の開始 | 復旧目標の設定 | 復旧による通水 区域の拡大 |

(公財)水道技術研究センター (2015) ¹²⁾ を加筆作成

Mileti and Sorensen (1988) ¹³⁾ は、災害時における効果的な警報の内容として、以下10項目を挙げている。これら各項目のほとんどについては、クライシス段階における基本的なコミュニケーションの留意点としてみても、有用な知見を与えている。

(以下、吉川 (1999) ¹⁾ による訳文の抜粋・一部加筆)

- ① 情報源が信頼できるものであること
- ② 警告メッセージの内容と調子 (tone) が一致していること： たとえば、なにか悪いことが起こりつつあるが、心配することはまったくくない、というようなメッセージは、この点から見て良くないメッセージである。
- ③ 伝えられていることが正確であること： 時間的にふさわしく (timely)、正確、かつ完全なデータを警告メッセージは含んでいなければならない。もし人々が、すべての事実が伝えられていないのではないかと、というように疑うようになれば、警告メッセージの指示に従わなくなるということが起こり得る。
- ④ メッセージが明瞭であること： そのために、簡単な明瞭な言葉遣いをするのが

求められる。

- ⑤ どのようなできごとが起こっているのかということと、人々が何をすべきかについて、確実に伝えること： たとえ曖昧な状況であっても、メッセージは確信をもって伝えられるべきである。
- ⑥ メッセージは十分な (sufficient) 情報を含んでいること： 不十分な情報は、混乱や不安を引き起こす。
- ⑦ 人々が何をすべきかということと、それをするためにどのくらいの時間があるのかについて明確な指示をしていること
- ⑧ メッセージが繰り返されること： これによって、人々は、正しい情報を受ける確率が高くなる。
- ⑨ 災害の場所を明確にすること： どこに災害の影響がおよぶのかを正しく伝えなければ、それを受け取る人々にとっては、その警報が果たして自分に向けられたものなのか、そうでないのかを知ることが難しくなってしまう。
- ⑩ 一つ以上のチャンネルを使って情報を伝えること

以上のように、クライシス段階のコミュニケーションは、平時に展開するリスクコミュニケーションを応用した対応も求められる。そのため、実災害時において水道事業者が行ったコミュニケーションと住民の受忍限度との関係を分析することなどで、断水クライシスコミュニケーションの手法構築を図ることとも重要な課題である。

4.8 結語

本章では、災害水需要マネジメントの一つの施策として「断水リスクコミュニケーション」が重要な役割を担うことを実証的に分析した。

本章で得た主要知見は、以下のとおりであった。

- ✧ 断水リスクコミュニケーションは、被災者の断水受忍限度の範囲拡大に一定の効果をもたらし、被災者の水需要を一時的に低減する効果がある。
- ✧ コミュニケーションのやり方として、断水リスクの解決に向けた「行動プラン」の作成に役立つような具体的な情報を提供することが非常に効果的である。
- ✧ 断水リスクの解決や対処行動を具体的に考えた住民ほど、共助の意識も高くなる傾向がある。

なお、人々の行動変容を促すコミュニケーション技法として、本論文では、情報提供法と行動プラン法の効果を検証したが、その他にも、依頼法、フィードバック法、アドバイス法があり、また、それらを様々な情報媒体を通して実施することで、より大きな効果が期待できるものと考えられる。さらに、情報提供内容を工夫することによっても、さらなる効果が発現するものといえる。

また、今回は、住民のみを対象としたリスクコミュニケーションを扱ってきたが、企業などにも対象を広げることで、更なる効果が期待できるものといえ、今後とも、さまざまなコミュニケーションパターンを組み合わせ、その効果を検証することが肝要である。

参考文献

- 1) 吉川肇子：リスク・コミュニケーション，福村出版，1999.
- 2) National Research Council, Improving risk communication, Washington, DC: National Academy Press, 1989.
- 3) Covello, V. T., Sandman, P. M., and Slovic, P., Risk communication, risk statistics, and risk comparisons: A manual for plant managers. In V. T. Covello, D. B. McCallum, & M. T. Pavlova (Eds.), *Effective risk communication: The role and responsibility of government and nongovernment organizations*. New York: Plenum, 1989.
- 4) 大泉光一：クライシス・マネジメント—危機管理の理論と実践，同文館，1993
- 5) 環境省：自治体のための化学物質に関するリスクコミュニケーションマニュアル，2002年版（2011年3月一部改訂），2002.
- 6) Rowan, K. E, Why rules for risk communication are not enough – A problem-solving approach to risk communication, *Risk Analysis*, 14, pp. 365-374, 1994.
- 7) 藤井聡：行動プラン法による行動変容，土木計画学・講演集，Vol.26 (CD-ROM)，2002.
- 8) Raven, B. H., and Rubin, J. Z., *Social psychology*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons., 1983.
- 9) Sheppard, H. J., Hartwick, J., and Warshaw, P. R., The theory of reasoned action: A meta-analysis of past research with recommendations for modifications and future research,

Journal of Consumer Research, 15, pp.325-343, 1988.

- 10) 松田曜子:低頻度大規模災害に備えることを目的としたリスクコミュニケーション手法に関する研究, 京都大学博士学位論文, 2007.3
- 11) 坂野雄二・東條光彦:一般性セルフ・エフィカシー尺度作成の試み, 行動療法研究, 12(1), pp.73-82, 1986.
- 12) (公財)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 共同研究) 第2研究委員会「災害・危機管理対策」平成24年度~26年度成果報告書, 2015.12
- 13) Mileti, D., and Sorensen, J., “Planning and implementing warning systems.” Mental health care in mass emergencies: Theory and practice, Brunner/Mazel Psychological Stress Series, M. Lystad, ed., New York, 321–345, 1988.

第5章 代替水資源の活用による災害水需要 マネジメント

5.1 本章の論点

大規模な災害時においては、長期的かつ広範囲に亘る断水被害が発生するケースが多く、これまでの応急給水活動等の人海戦術による配給だけでは賄えないほどの水の量的不足が顕在化する。一方で、水道が復旧するまでの非常用水源として、例えば自前の井戸で地下水を汲み上げるなど飲用以外の水利用用途で有効活用した事例が多数報告されている¹⁾²⁾。こうした被災地の実態を鑑みると、災害時における生活用水の水量を可能な限り確保する観点から、水道水以外の水の有効活用と迅速な供給方策について検討することは、非常に重要であるといえる。

もとより都市域には、水道水以外にも、地下水をはじめ、工業用水、降雨、下水再生水といった生活用水として有効利用可能な水資源が潜在する¹⁾。しかしながら、わが国をはじめ世界のほとんどの国においては、こうした多様な水資源を有効活用できる水供給システムは持ち合わせていない。**1.1**、**1.3**でも指摘したとおり、都市域において唯一の安定的な生活用水供給手段である上水道システムは、近年老朽化の進行が顕著になってきているとともに、耐震性も依然として低い水準である。こうした状況を踏まえると、災害時においては現行の上水道システムによる一元的な水供給システムの持続に捉われることなく、地域に潜在する水資源活用についても加味した検討を行うことが重要だと考えられる。

本章では、災害水需要マネジメントの技術的方略に位置づけられる「多様な水資源（低水質水）の活用による需要転換」に着目する。

5.2 利用可能な代替水資源と使用可能用途

5.2.1 生活用水の使用用途と水質

災害時に、水を使用するときの使用用途を大別すると、次のように分類できる³⁾。

- ① 水を直接飲む・・・飲用
- ② 間接的に飲む・・・調理，野菜を洗う，食器をあらう
- ③ 皮膚に触れる，間接的に飲む可能性がある・・・洗面，手洗い，風呂，洗濯
- ④ 水の基本的な性質を有していればよい・・・トイレ水洗，清掃，雑用

これらの用途に適合する水質は，既存の各種水質基準を当てはめると，次のようになる³⁾。

- ①の用途：水道水の水質基準，ミネラルウォーター類の品質表示ガイドライン
- ②・③の用途：公衆浴場水基準，24時間風呂協議会基準，遊泳用プール水質基準
- ④の用途：再利用水の各種基準など

5.2.2 代替水資源の水質と使用可能用途

都市域における上水道以外の代替水資源を列挙すれば，地下水(井戸水)，プール水，雨水貯留槽内の水，蓄熱槽内の水，下水処理水・再利用水，工業用水，河川水・湖沼水，防火水槽内の水などが考えられる。本研究では，特に断水が長期化した場合においても持続的な利用が一定可能であり，かつ都市部において分布の偏りが小さい地下水(井戸水)，雨水(貯留槽内水)，下水処理水・再利用水，工業用水に着目する。

代替水資源の水質と使用可能用途との関係は，表-5.1 のとおり整理されている³⁾。

表-5.1 代替水資源の水質と使用可能用途

| | 地下水 (井戸水) | 雨水 (貯留槽内水) | 工業用水 (余剰水) | 下水処理水 ・再利用水 |
|--------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 飲用 | ○* | | | |
| 調理 | ○* | | | |
| 洗面，手洗い | ○ | | | |
| 風呂 | ○ | | | |
| 洗濯 | ○ | ○ | | |
| トイレ水洗 | ○ | ○ | ○ | ○ |

※ 飲料水の水質基準(2003年5月30日厚生労働省令第101号に掲げる健康項目30)を満足するもの

ここで，災害断水期間中に使用する水の水質レベルは，平時のレベルまで必要なの

かという疑問にぶつかる。(公社) 空気調和・衛生工学会 非常時の水確保と供給システム編集小委員会(2013)³⁾は、「厚生労働省が水道水に要求している飲用水水質基準は、有害物質の‘長期摂取’を前提に規定されたものであるから、災害時という生命維持のために飲む水に対しては安全側の数値である。よって上水道からの水供給が絶たれ、限られた水源しか入手できない場合には、現実性に欠ける」と指摘している。

災害時の飲用水にかかわる水質基準については、現時点では見当たらないが、2016年3月に厚生労働省が示した「水質異常時における摂取制限を伴う給水継続の考え方について」⁴⁾は、その方向性を示す十分な示唆を与えている。本通知のなかでは、特に災害時などの水質異常時においても、次のような基準緩和により、給水継続が可能であることが示されている点が非常に意義深い。

“水質事故等により、浄水中の有害物質の濃度が一時的に基準値を一定程度超過する水質異常が生じた場合においても、長期的な健康影響のもとに基準値が設定されているもの^{*}については、水道事業者及び水道用水供給事業者の判断により、水道利用者に対して水道水の摂取を控えるよう広報しつつ、給水を継続(摂取制限を伴う給水継続)することが可能である。”

※ 一般細菌や大腸菌、シアン、水銀のように基準値超過の継続時に給水停止が求められているもの以外の物質。具体的には同通知の表1に抜粋。

以上の考え方も踏まえれば、基準値超過の継続時に給水停止が求められているもの以外の物質が混入している可能性が極めて低い雨水貯留槽内の水、工業用水については、災害時においては、より幅広い用途に活用可能であるといえる。

5.3 水質レベル別の災害時水需要の推計例

被災都市で使われている主な水の用途を取り上げ、5.2.1の知見をさらに大括りにして水質別に分類したものを表-5.2に示す。飲用に適する水を水質レベル1とし、体に直接接触する水を水質レベル2とし、体に直接接触しない水を水質レベル3とした。

このとき式(3.1)は、各水質レベルの水使用用途の集合をL1~3とすると、次式で表される。

$$QD(t, n_p, n_j | k) = QD^D(t, n_p | k) + QD^I(t, n_j | k) + QD^E(t | k), \quad k = \{L1, L2, L3\} \quad (5.1)$$

表-5.2 水使用用途別の水質区分

| 水質L1 | 水質L2 | 水質L3 |
|-----------|-----------|--------|
| 飲用水 | 風呂用水 | トイレ用水 |
| 調理用水 | 洗濯用水 | 散水用水 |
| 洗面用水 | 生産用水（製造業） | 冷却用水 |
| 生産用水（製造業） | 洗浄用水 | 生産機材用水 |
| 空調用水 | | 清掃用水 |
| 治療用水 | | 消火用水 |

式(5.1)の算定方法に従い、図-3.18の南海トラフ巨大地震時における大阪市域の用途別の水需要推計結果を、水質レベル別に再推計したものを図-5.1に示す。

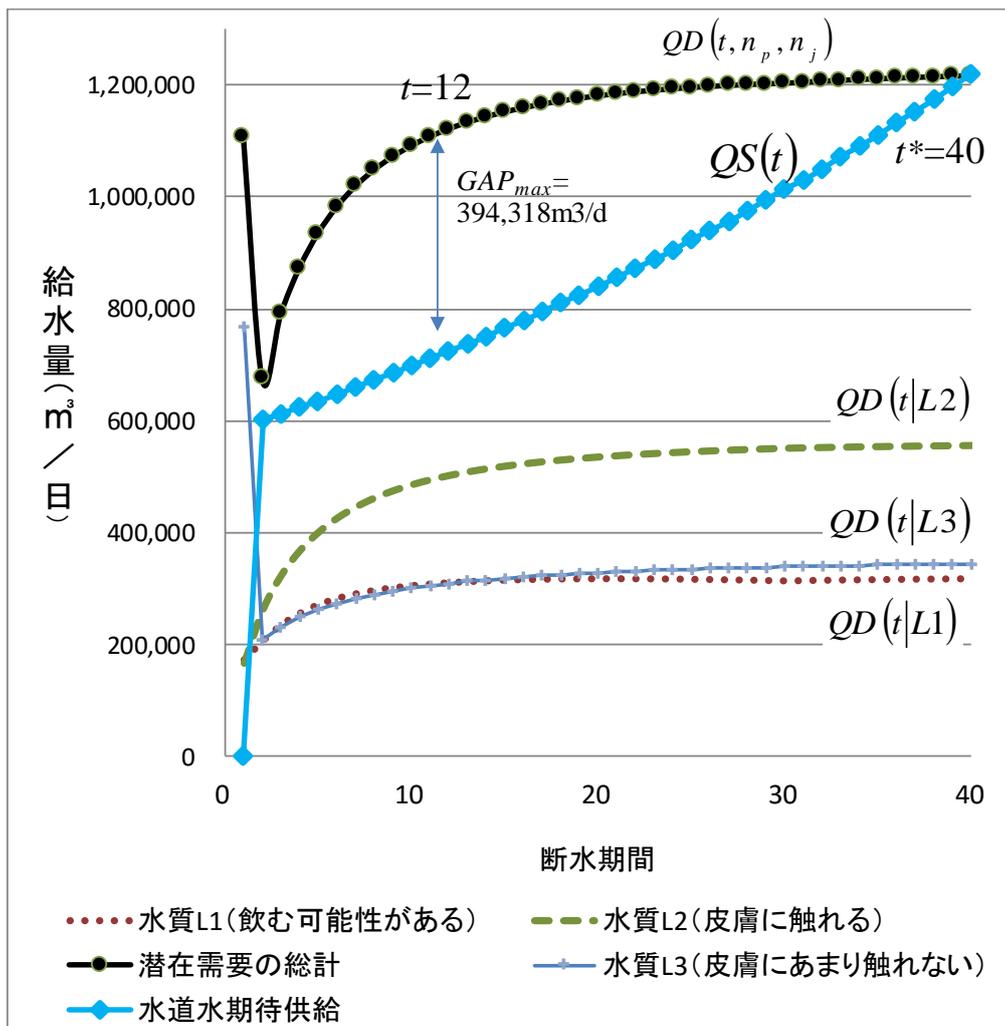
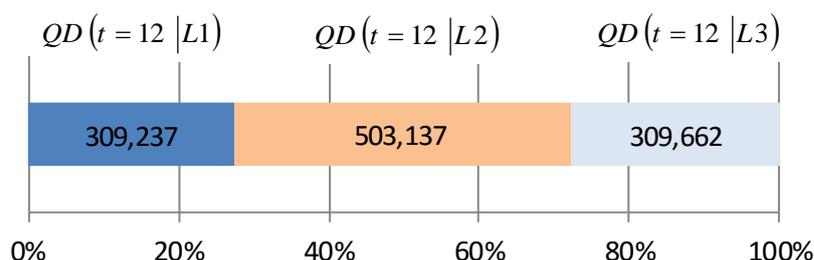


図-5.1 南海トラフ巨大地震時における大阪市域の水需要推計結果（水質レベル別）

どのフェイズにおいても水質レベル2と3の水需要の総計が全体の約70%を占めていることが窺える。一例として需給ギャップが最大となった $t_{max}=12$ 、需給均衡が成り立つ $t_{max}=40$ におけるの水質レベル別の需要内訳を示す。その割合は大きな変化を示さず、飲用までは適さないまでも、身体や生活環境の衛生状態を確保するための水が非常に多く必要とされている現状が確認できた。

t=12



t=40

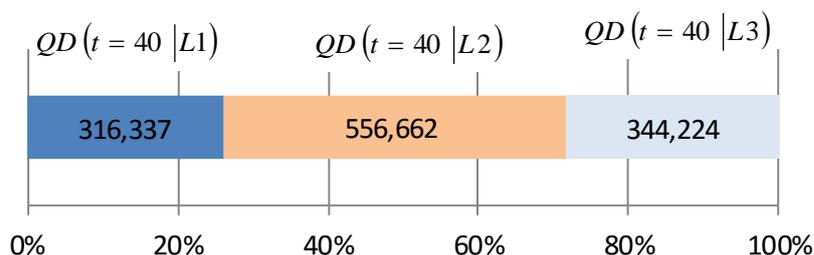


図-5.2 $t_{max}=12$, $t_{max}=40$ の需要内訳 (水質レベル別)

5.4 都市域における代替水資源の災害時有効活用ポテンシャル

5.4.1 多基準分析 (線形加法モデル) による定性評価

水道が成立する三要素は、「水量」(需要を満たす)、「水質」(水質基準に適合)、「水圧」(給水栓からの円滑な供給)であることが知られている。この概念については、基本的には、わが国で都市水供給システムを運営する際に求められる必要条件と捉えることができ、本研究では、この視点に立って、代替水資源の災害有効活用ポテンシャル評価を試みる。

代替水資源が有する供給システムとしての「水量」, 「水質」, 「水圧」を定量的に評価することは, 膨大なデータと計算が必要となり, 非常に煩雑となる. そこで本章では, 多基準分析による評価を行う. 多基準分析とは, 複数の基準で代替案を評価し選択を支援しようとする分析手法の総称である⁵⁾. 多基準分析の種類は多様であるが, イギリスで策定された狭義の多基準分析に焦点をあてた多基準分析マニュアル⁶⁾によると, 一般的には以下の手順を踏むものと紹介されている.

- 1) 評価範囲の特定化
- 2) 評価対象となる代替案を列挙 (定義)
- 3) 目標とクライテリア^{*}を定義 ※「評価項目」のこと
- 4) スコア付け
- 5) クライテリアに対してウェイトを設定
- 6) 総合評価値の算出
- 7) 結果の分析検討
- 8) (必要に応じて) 感度分析を実施

多基準分析による中心的な手法は, 線形加法モデルである. モデルは以下のように表される.

$$S_a = w_1 s_{a1} + w_2 s_{a2} + \dots + w_b s_{ab} = \sum_{b=1}^n w_b s_{ab} \quad (5.2)$$

ここに, S_a は代替案 a の総スコア, s_{ab} は代替案 a の基準 b における選好スコア, w_b は各基準のウェイトである.

本モデルは, 相互効用独立性と加法独立性を仮定しているため, 現実の選好状況を反映しない場合が多く, 記述的モデルとしては問題が多いことが指摘されている⁷⁾が, 非常に直観的にわかりやすい評価手法であるとともに, 代替案の評価を俯瞰するレベルにおいては優れていると考えられるため, 本研究では, 本手法を用いて評価を行う.

いま代替案 a を「地下水 (井戸水)」, 「雨水 (貯留槽内水)」, 「工業用水」, 「下水処理水・再利用水」の災害時緊急活用, 基準 b における選考スコアをそれぞれ図-5.3 のとおり定めた. このスコアは, 平時の上水道において, 「水質」: 5, 「水量」: 5, 「水圧 (輸送)」: 5 となり, レーダーチャートにおいて最も大きな正三角形を描かれることとなる.

平時における代替水資源の都市水供給システムとしての定性評価結果を最も総スコアが高いのは工業用水 (余剰水) となった.

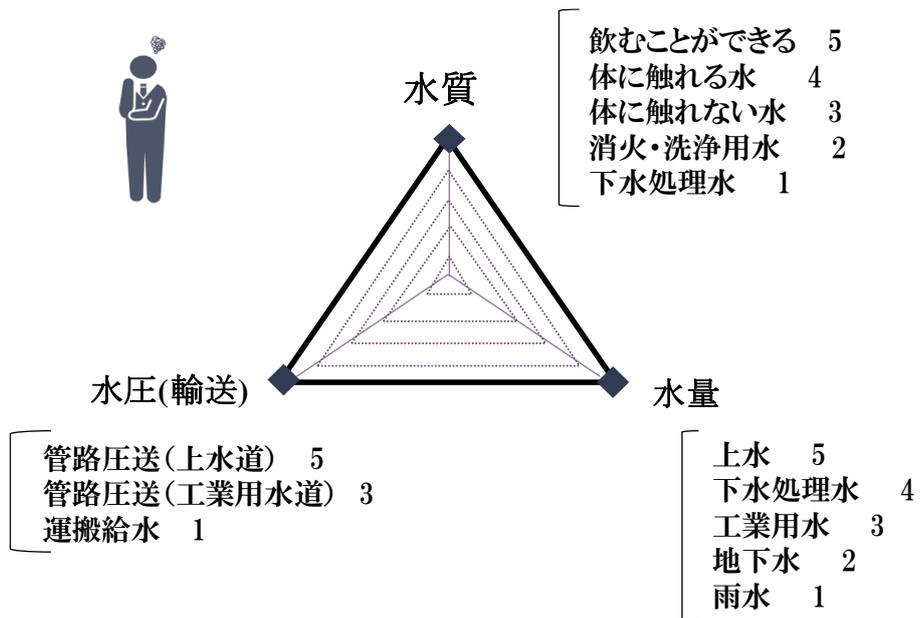


図-5.3 代替案（代替水資源の緊急活用）のスコアリング

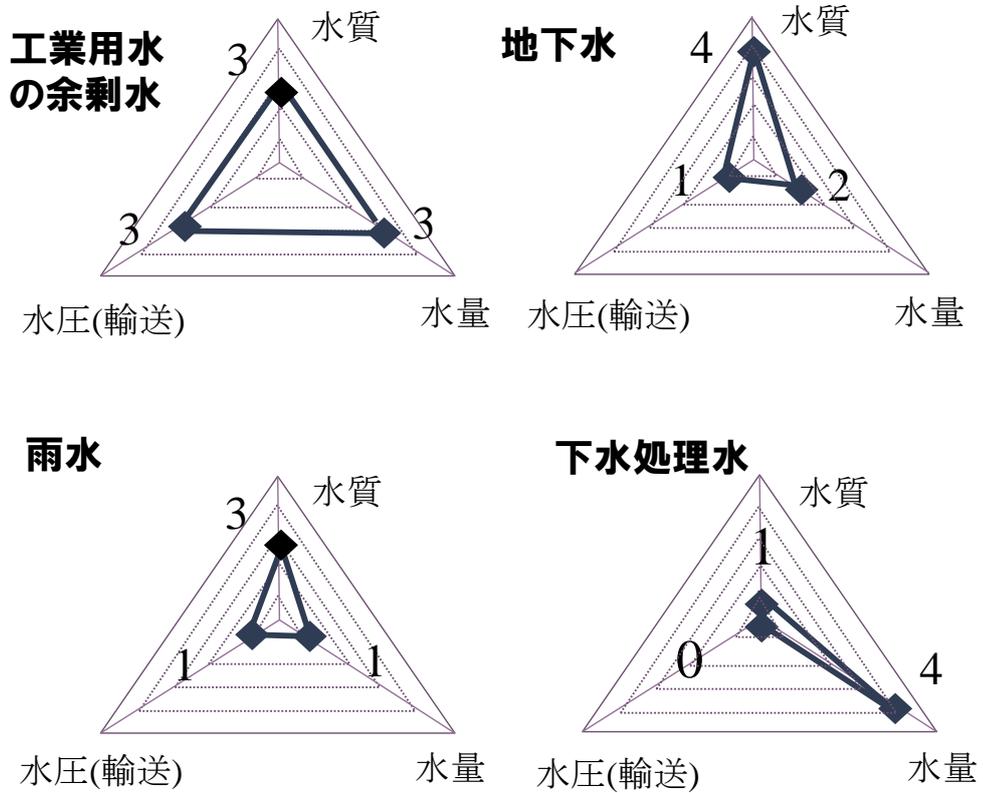


図-5.4 平時における代替水資源の都市水供給システムとしての定性評価

続いて、災害時（例：地震時）の場合の評価結果を図-5.5 に示す。ハザードの規模によって多少の不確定要素はあるものの、工業用水の余剰水が水質、水量のみでも総スコア6にのぼり、最も高いことがわかった。工業用水については、災害時にも地域の生活雑用水または都市活動用水等として有効活用できるものと考えられることから、近年、その必要性の認識と実践が少しずつではあるが浸透しつつある^{8),9)}。

そこで本論文では、災害時の代替水資源として、工業用水の有効活用に焦点を当てることとする。なお、検討に当たっては、工業用水の供給信頼性を的確に予測できることが不可欠となることから、まず5.5にて、工業用水の供給再開予測モデルの構築に取り組む。

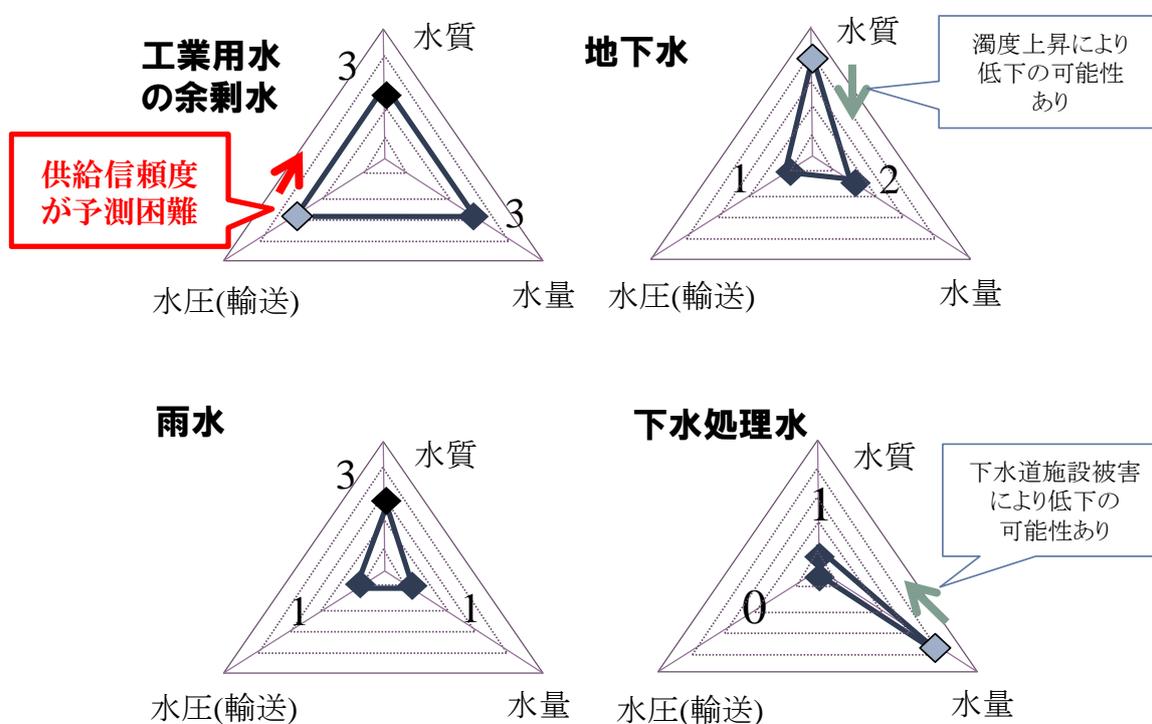


図-5.5 地震時における代替水資源の都市水供給システムとしての定性評価

5.4.2 代替水資源の地域保有量の推計

3.7で災害時の水需要の対象とした大阪市域をケーススタディとして、代替水資源（地下水（井戸水）、雨水（貯留槽内水）、工業用水（余剰水）、下水処理水）の地域保有量を推計した。なお、大阪市域全域を対象とせず工業用水道給水区域内（図-5.6）での推計とした。

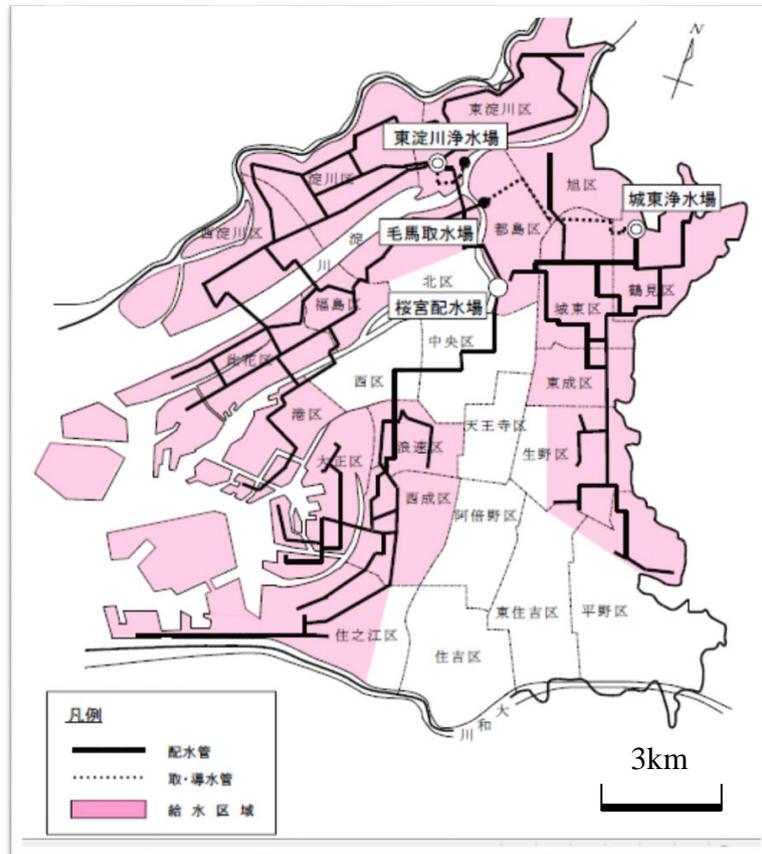


図-5.6 大阪市の工業用水道給水区域¹⁰⁾

| | |
|------|---|
| 地下水 | $Q_G = \Sigma\{(井戸の揚水可能量) \times (地下水汚染のない井戸数)\}$ |
| 雨水 | $Q_R = \text{年間降雨確率} \times \Sigma\{(雨水貯水量) \times (貯留施設数)\}$ |
| 工業用水 | $Q_I = \text{工業用水道の余剰施設能力}$ |

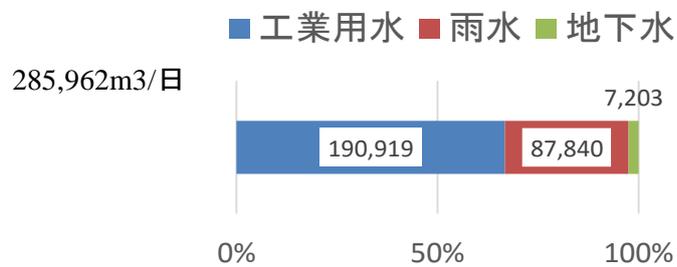


図-5.7 大阪市工業用水道給水区域内における代替水資源の保有量の推計例

推計結果を図-5.7に示す。また、同区域における南海トラフ巨大地震時の水質レベル別の需要推計結果を図-5.8に示す。水需給ギャップ（＝潜在水需要量－期待水供給量）については、発災当日は水供給が0となるため爆発的な消火用水需要を全くカバーできず、その後に再来する需給ギャップの最大期（ $t_{max}=11$ ）には、ギャップ量が294,850（ m^3 ／日）にのぼるものの、本地域においては、特に工業用水の余剰水が非常に多くなるため、代替水資源の総保有量が285,962（ m^3 ／日）となり、水の輸送性に大きな課題はあるものの、水量的にカバーできるレベルであることが確認された。

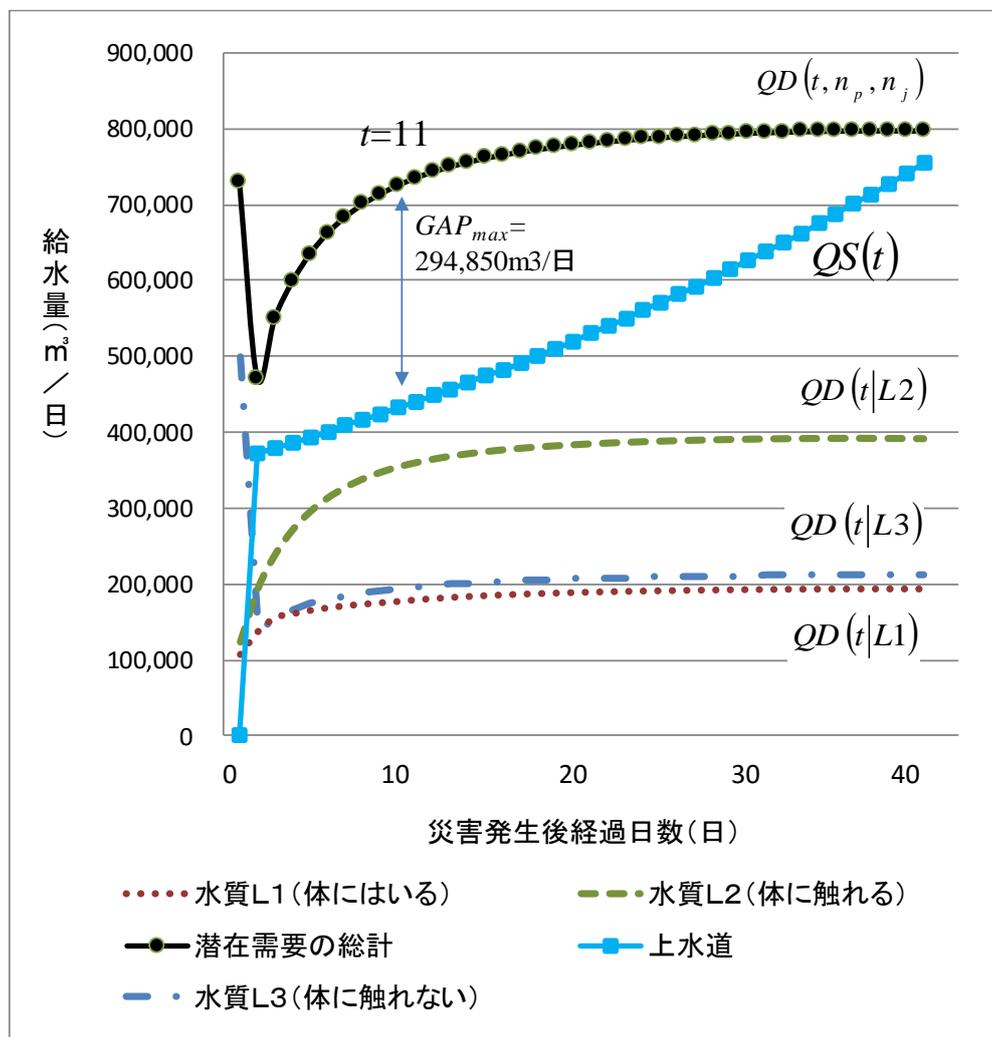


図-5.8 大阪市工業用水道給水区域における
南海トラフ巨大地震時の需要推計結果（水質レベル別）

5.5 災害時における工業用水の供給再開予測モデル

5.5.1 工業用水の余剰度と災害時の供給を巡る現状

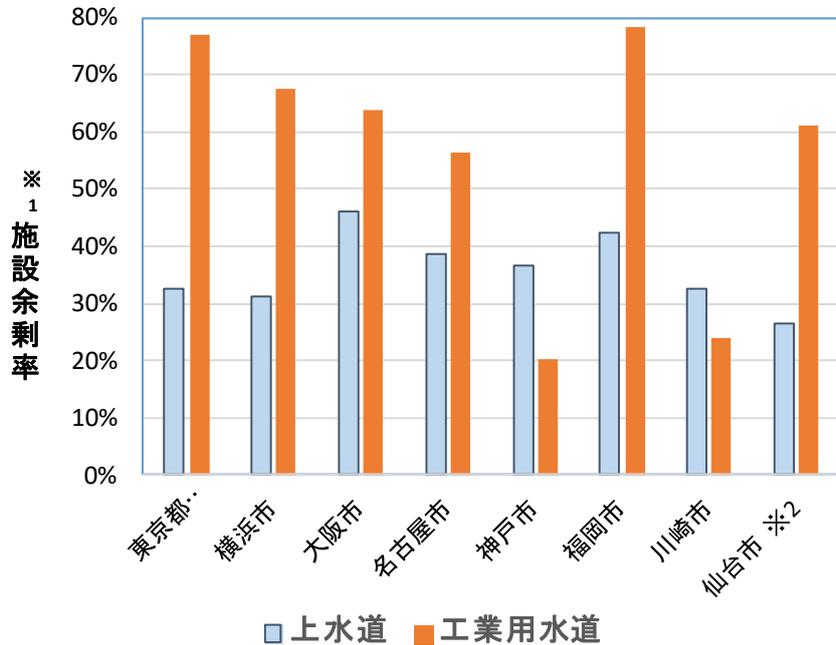
5.4 における代替水資源の災害時有効活用ポテンシャルの評価では、「工業用水の余剰水」が最も有望であるとの結論を得た。しかしながら、工業用水の供給再開の目的が的確に予測できなければ、その有効性を論じることはできない。

災害時における水供給事業者の緊急対応では、人間の生命維持の観点から飲料用の応急給水の確保が最優先され、復旧活動においても、まず家庭への生活用水が優先される。都市活動施設への産業用水については、早期復旧されるケースもあるものの（5.6.5 参照）、基本的には、上水道がある程度供給した後に、供給再開が行われる。震災などにより工業用水道施設に予期せぬ被害を受けると、工場等への給水が停止するだけでなく、延焼火災の誘発、および漏水事故等による二次災害の発生についても指摘されている¹¹⁾。また、1.1 で触れたとおり、工業用水の早期供給が被災地域産業の復興に果たす役割は非常に大きいことがわかっているため、以上の諸課題克服のためにも、工業用水道の早期復旧に向けた検討については、今後、重要な研究事案となるものと考えられる。

工業用水道は、1950年から60年代の日本の高度経済成長期にかけて、政府の設備投資促進策による太平洋沿岸の工業用地造成とともに建設された。工業用水は上水と比べて非常に簡素化された浄水処理工程で造られており、上水が飲用可能水であるのに対して、工業用水は飲用不適水という制約はあるものの、その造水単価は上水と比較して非常に安価であるというメリットがある。そのため企業のコスト削減と大容量受水が可能という利点から、工業用水道は東京都、大阪市、名古屋市、福岡市等の主要な都市域のほとんど（全国151事業体（2015年4月1日現在））で導入されている¹²⁾。

このように工業用水道は経済成長期に一気に建設されたものの、とりわけオイルショック以降、受水企業の工場内部で水のリサイクルが進み、工業用水を大量に使う業種であっても補給水を大量に使用し続けるものではなくなった。加えて工場撤退等も重なり、多くの工業用水道事業で未売水が発生している。この状況を示す事例として、上水道の給水能力が高く工業用水道が普及している主要8都市の工業用水道と上水道の施設余剰率^{13), 14)}を比較した結果を図-5.9に示す。工業化が進展している川崎市、近年施設のダウンサイジングを行った神戸市を除けば、工業用水道の施設余剰率は軒並み高いことが確認でき、工業用水道施設が必ずしも有効に活用されていない現状が映

し出されている。



※1 施設余剰率(%) = 計画一日最大給水量(または契約水量) / 施設能力 × 100

※2 工業用水道は、仙塩工業用水道と仙台圏工業用水道の総計にて試算

図-5.9 上水道と工業用水道の施設余剰率^{13), 14)}

しかしながら、工業用水道の災害時の供給信頼性に着目したとき、上水道との差は歴然としている。その顕著な例として、都市水供給システムの災害時の信頼性や早期復旧に関する研究の多くは上水道を対象に進められており、工業用水道を対象とされていない点が挙げられる。したがって工業用水の災害時有効活用を検討するにおいても、その大前提となる工業用水道の災害時復旧プロセスの予測技術研究が途上であるがために、こうした有効活用の本格議論を足踏みさせる一つの要因にもなっているのが現状である。

工業用水道の災害時の復旧速度が予測できることは、将来的な工業用水の緊急時の他用途転用を検討していく上において、そして言うまでもなく被災企業の営業（稼働）再開時期を明確化させるための極めて重要な基礎情報になり得るものである。そこで本節では、東日本大震災における工業用水道の被害・復旧状況の調査資料をベースに、それらの復旧プロセスを分析し、その結果に基づいた災害時における工業用水道の復旧曲線の推計手法を提案する。ここに復旧曲線とは、災害等によりシステムの機能が

一時的に低下あるいは停止し、その後、同機能が完全に回復するまでの時間経過とプロセスの関係を描いた曲線である。

ここで特筆すべきは、災害時に上水道の復旧にかかる水道事業体職員および修繕業者と、工業用水道の復旧にかかる職員と業者は同一という点である。そのため工業用水道の災害復旧問題は、上水道と工業用水道の復旧にかかる人的資源の配分問題という側面が非常に強く、これまでの実災害時には、大抵の場合、被災者の生活用水確保の観点から上水道の早期復旧に向けた人的資源の優先投入がなされてきた^{15), 16)}。つまり工業用水道の復旧速度は上水道の復旧率に大きく依存するものであるため、その相互関係を把握できるようなモデル構築が望ましい。そのため本研究では、工業用水道の復旧に当たる人的資源が、いつ、どの程度投入されたかの関連が把握可能な災害時復旧予測モデルを提案する。

5.5.2 東日本大震災における工業用水道の復旧プロセスの分析

東日本大震災では、工業用水道は東北地方及び関東地方の工業用水道全 45 事業体 (81 事業) のうち 25 事業体 (44 事業) で被害が発生し、管路、浄水場等施設の破損被害が生じた。ここでは、そのうち断水ユーザーが発生した 19 事業 (図-5.10) を分析対象としている。

被災工業用水道事業の施設諸元およびの主要な被害状況等について、「2011 年東北地方太平洋沖地震に係る工業用水道施設の被災状況調査報告書」¹⁶⁾、における掲載データを基にまとめれば、表-5.3 のとおりとなり、この集計結果の特徴を要約すると以下のとおりとなる。

- 津波による被害は比較的少なく、津波被災地区で管路流出等の被害は発生していなかったものの、沿岸部に位置する水管橋、ポンプ場などの構造物や設備には被害が発生した。
- 発電所や変電所の被災による広域的かつ長期間の停電により、地震による工業用水道施設の直接的な被害が無かった事業においても、非常用電源設備による給水継続ができなかった第一北上中部工業用水道事業、村田町工業用水道、日立市工業用水道、高萩市工業用水道および足利市工業用水道において、2～10 日間の広域停電に起因した給水停止が総じて発生していた。
- 管路の内、特に口径 $\phi 500\text{mm}$ 以上の幹線管路 (水管橋の添加管路を含む) の被害が多く、このような大口径管路には空気弁等の付属設備も多く設置されてい

るため、それらもまた多くの被害を受けたことから、被害数自体は少ない場合でも管路の応急復旧作業は長期化し、結果として、通水の遅延をも招いた実状が推察された。

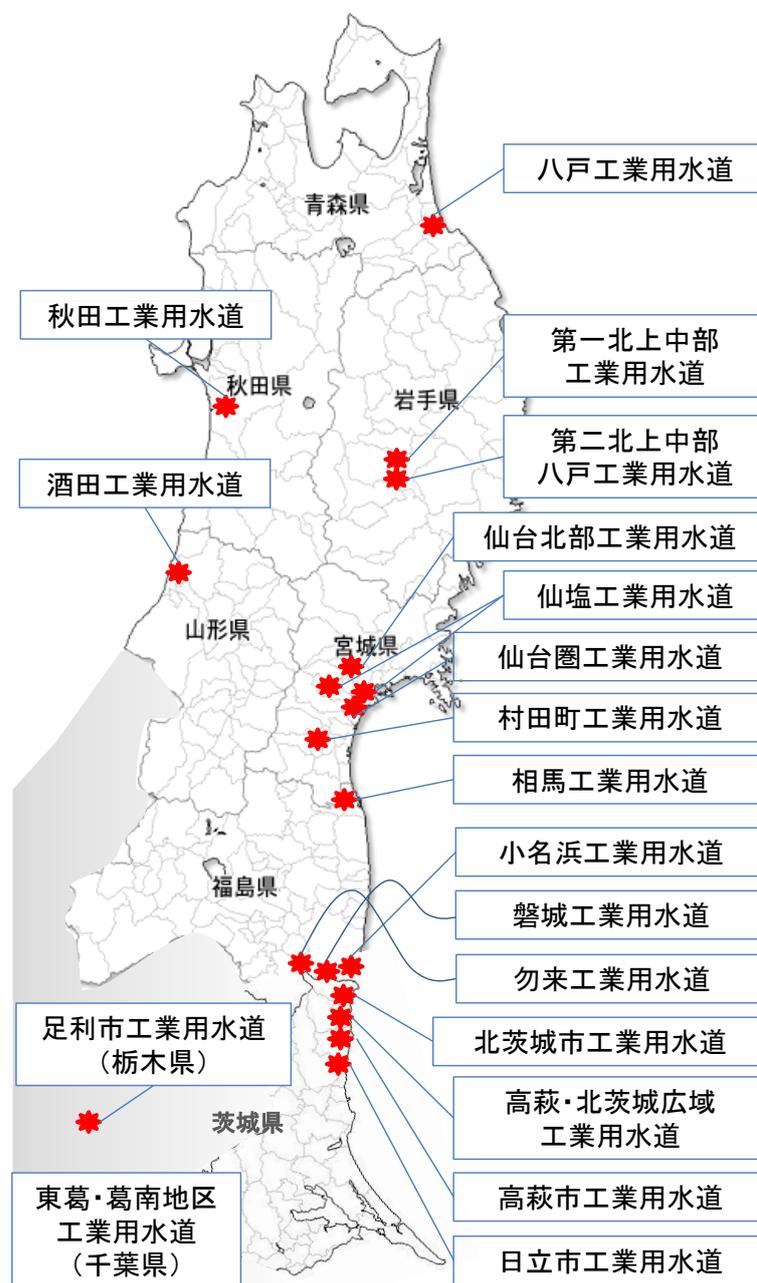


図-5.10 被災工業用水道の位置図

また、表-5.3 を概観すると、事業地域の最大震度と管路被害数および付属設備被害数、あるいは最大震度と浄水場被害数、そして管路ないし浄水場の被害数と 100%通水期間との間などには、いずれも明確な相関は確認できない。この点は、上水道の地震

被害の傾向¹⁸⁾とは異なる点であり、この結果は、災害時における工業用水道システムの被害規模や通水再開期間は、当該施設の耐震化状況や管路の構成および布設地盤条件、ならびに同地域における上水道の復旧作業との調整状況など、さまざまな因子が絡み合っ決定づけられている複合的なものであると捉えることができる。

表-5.3 東日本大震災時に断水が発生した工業用水道の施設諸元と被害・復旧状況¹⁶⁾

| 都道府県 | 事業名 | 施設諸元 | | | 最大震度 | 被害特性 | | | | | | | 復旧特性 | | |
|------|----------|----------------|-------|-------------|------|-----------------|-----------------------|---------------------|--------|------------------------|--------------|------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | 給水能力 (m3/日) | ユーザー数 | 管路延長 (m) | | 停電 | | 管路被害数 ^{※1} | | 付属設備 ^{※2} 被害数 | | 水管橋 被害数 | 浄水場 ^{※3} 被害数 | 100% 通水期間 (日) | 準備 ^{※4} 期間 (日) |
| | | | | | | 停電 期間 (日) | 非常用発電 機稼働期間 (日) | φ500以上 | φ500未満 | 本管 φ500以上 | 本管 φ500未満 | | | | |
| 青森県 | 八戸 | 350,000 | 10 | 21,329 | 5強 | 2.8 | 2.8 | 2 | | | | | | 5 | |
| 秋田県 | 秋田 | 200,000 | 25 | 27,574 | 4 | 1.1 | バッテリー対応 | | | | | | | 3 | |
| 山形県 | 酒田 | 100,000 | 24 | 27,171 | 5弱 | 0.2 | | | | 1 | | 1 | | 6 | 1.0 |
| 岩手県 | 第一北上中部 | 48,360 | 11 | 4,510 | 6弱 | 1.6 | | | | | | | | 12 | 12.0 |
| | 第二北上中部 | 20,000 | 6 | 10,680 | 6弱 | 2.0 | | 1 | 1 | | | | | 4 | |
| 宮城県 | 村田町 | 1,000 | 4 | 3,328 | 6弱 | 10.0 | | | | | | | | 11 | |
| | 仙台北部 | 58,500 | 13 | 46,700 | 6強 | 4.1 | 4.0 | 3 | 2 | 5 | | | | 35 | 2.0 |
| | 仙台圏 | 100,000 | 14 | 32,113 | 6強 | 4.1 | 1.1 | 4 | | 24 | 1 | 1 | | 26 | 1.0 |
| | 仙塩 | 100,000 | 45 | 78,322 | 6強 | 2.8 | 2.8 | 9 | 3 | 63 | 10 | 3 | | 194 | 1.0 |
| 福島県 | 磐城 | 233,000 | 40 | 49,048 | 6弱 | 0.3 | | 32 | 13 | 13 | 1 | 6 | 1 | 58 | 11.0 |
| | 小名浜 | 625,000 | 5 | 4,308 | 6弱 | 0.3 | | 15 | | 2 | | 1 | 2 | 79 | 11.0 |
| | 勿来 | 290,000 | 8 | 5,609 | 6弱 | 0.3 | 0.3 | 5 | | 3 | | 1 | | 47 | 11.0 |
| | 相馬 | 34,700 | 7 | 26,962 | 6弱 | 0 | | 3 | | 6 | | | | 60 | 9.0 |
| 茨城県 | 日立市 | 1,125 | 11 | 3,295 | 6強 | 3.3 | 0.1 | | | | | | | 9 | 5.0 |
| | 高萩市 | 20,000 | 5 | 10,407 | 6強 | 3.1 | | | | | | | | 34 | 15.0 |
| | 北茨城市 | 33,310 | 13 | 14,090 | 6強 | 3.1 | | 2 | | | | | | 16 | |
| | 高萩・北茨城広域 | 15,000 | 12 | 10,774 | 6強 | 2.6 | | 1 | | | | | | 14 | |
| 栃木県 | 足利市 | 36,000 | 11 | 20,273 | 5強 | 0.6 | | | | | | | | 2 | |
| 千葉県 | 東葛・葛南地区 | 160,000 | 109 | 123,080 | 5強 | 0 | | | 8 | | 4 | | | 8 | 1.0 |

※1 水管橋および橋梁に添加している管路の被害も含む。
 ※2 空気弁、仕切弁、排水弁、消火栓の総称。なお、管路付属設備被害の85%は空気弁被害に集中していた。
 ※3 とくに給水機能に大きな影響を及ぼした被害件数を抽出。
 ※4 復旧業者・資材待ち／上水道復旧待ち／原発の状況経過観察 など

被災工業用水道の復旧曲線を図-5.10, 11 に示す。これらの図は、(一社)日本工業用水協会が東日本大震災の被災工業用水道事業者に対して実施した「東北地方太平洋沖地震に係る被災状況調査アンケート調査」(平成23年10月31日回答期限)において得られた「地震発生から断水解消までの断水ユーザー数の推移」に関する調査データ¹⁶⁾をベースに、横軸に地震発生後の日付、縦軸に復旧率(=1-断水ユーザー数/全ユーザー数×100(%))としてグラフ化したものである。

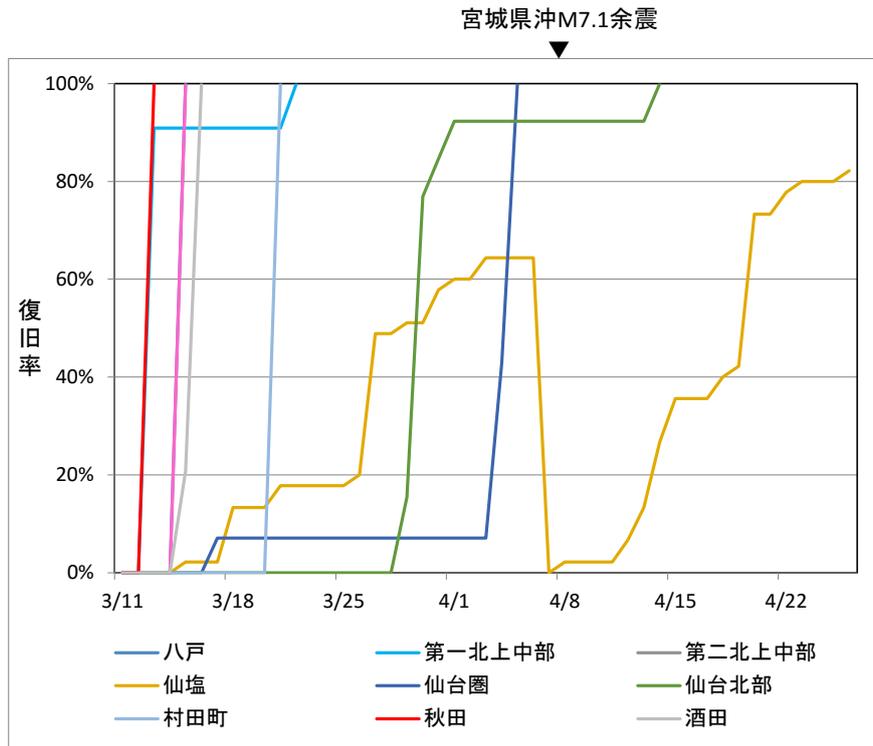


図-5.10 被災工業用水道の復旧曲線（青森・秋田・山形・岩手・宮城）

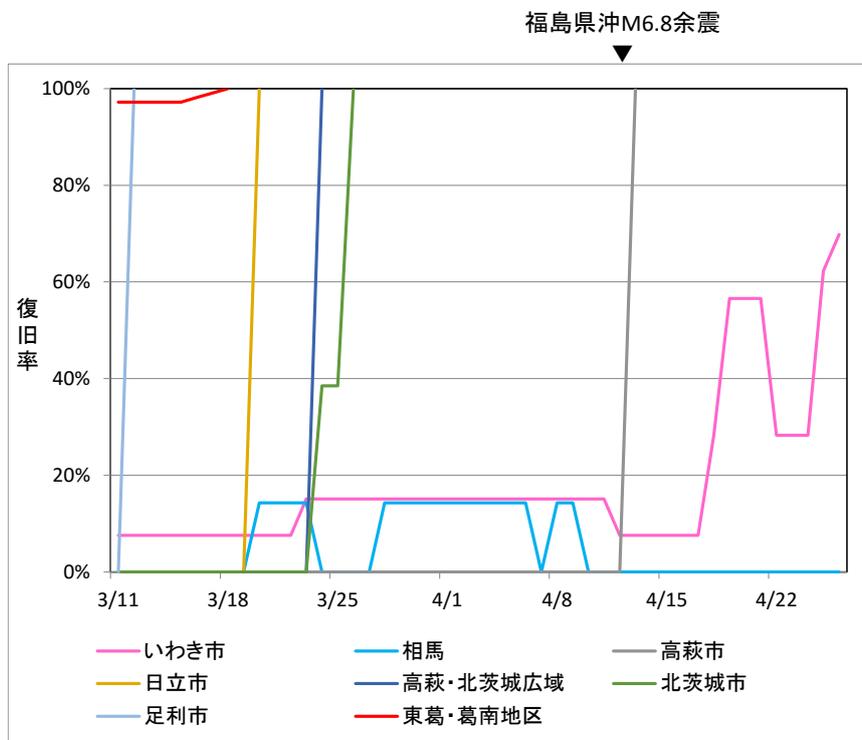


図-5.11 被災工業用水道の復旧曲線（福島・茨城・栃木・千葉）

工業用水道の災害時復旧曲線は、落差の大きい階段状となっている。この傾向は阪神淡路大震災の神戸市工業用水道（図-5.12）でもみられたものであり、滑らかなカーブを描く上水道、電力、ガスといった主要な供給系ライフラインの復旧曲線^{17)・20)}とは異なる傾向である。このような差異が生じる主要因は、工業用水道はユーザー数が極めて少ないこと（表-5.3）、すなわち管路単位延長当たりの給水ユーザー密度が極めて小さいため、一つのユーザーへの断水が解消することに伴う復旧曲線の上昇率（機能回復率）が大きいことが挙げられる。この傾向は被災工業用水道に限ったことではなく、例えば主要8都市における上水道と工業用水道の配水管単位延長当たりのユーザー密度^{13)・14)}を示せば図-5.13のとおりとなるが、その差は少なくとも100倍以上と顕著であることがわかった。

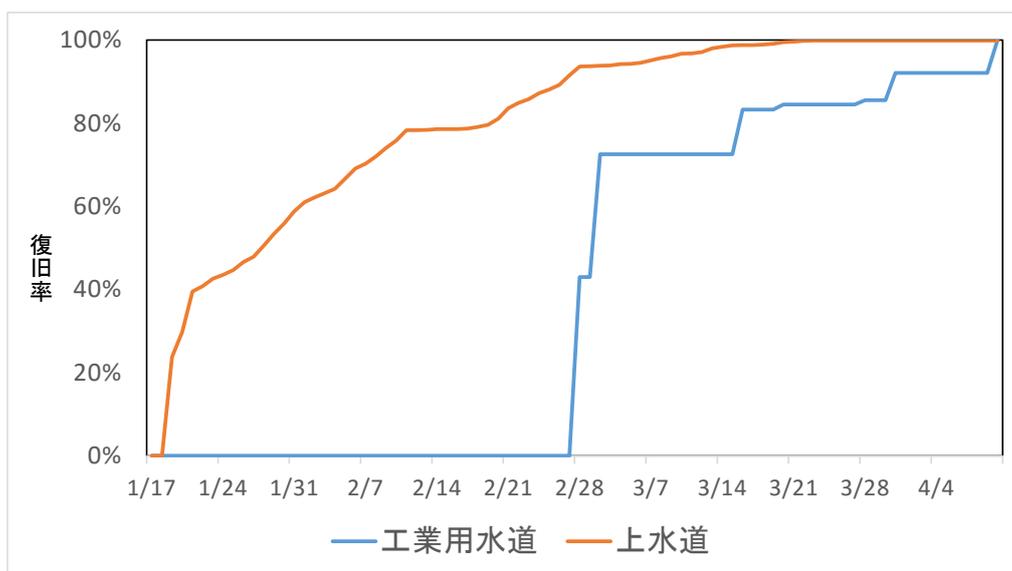
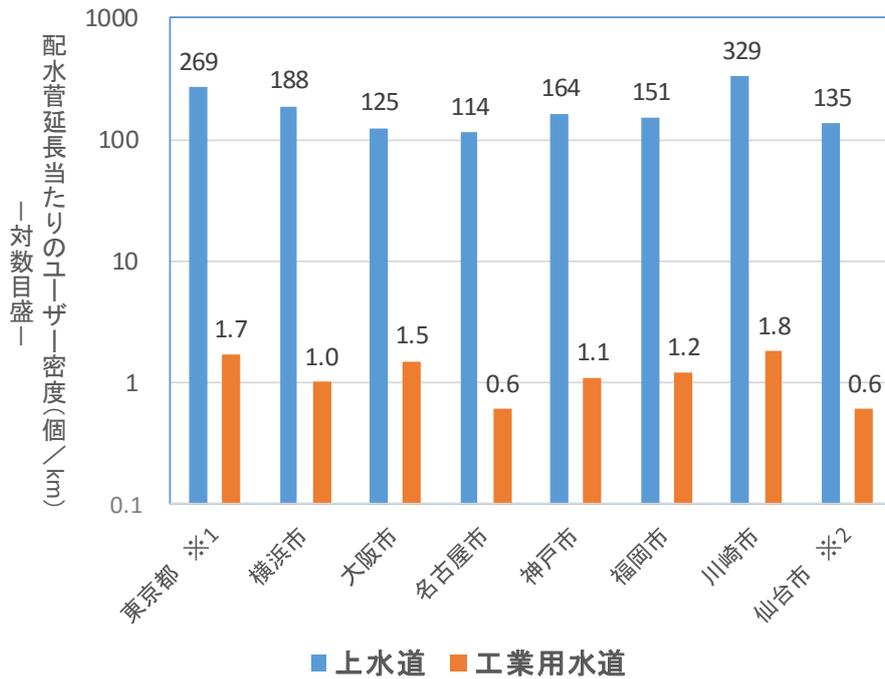


図-5.12 阪神淡路大震災の工業用水道の復旧曲線

続いて、図-5.10, 5.11 のとおり得た被災工業用水道の復旧曲線の特性を把握するために、それらの類型化を行う。復旧曲線の形状を規定する要素としては、初期復旧率、全体的な復旧進捗度、そして初期の復旧速度であると考えられる。また、初期の復旧速度が小さい場合には、システムの修繕規模に起因するものなのか、あるいは別の要因があるのかが重要な関心事となる。本研究では、被災工業用水道の復旧曲線の特性を俯瞰するために、図-5.14 のとおりタイプ A~G の7タイプに類型化して捉えることとした。その結果を図-5.15 に示す。



※1 上水道の密度は、水道事業ガイドライン(業務指標)試算結果(平成25年度)
 ※2 上水道の密度は、水道事業ガイドライン(業務指標)試算結果(平成25年度)
 工業用水道は、仙塩工業用水道と仙台圏工業用水道の総計にて試算

図-5.13 工業用水道と上水道のユーザー線密度の比較 ^{9),10)}

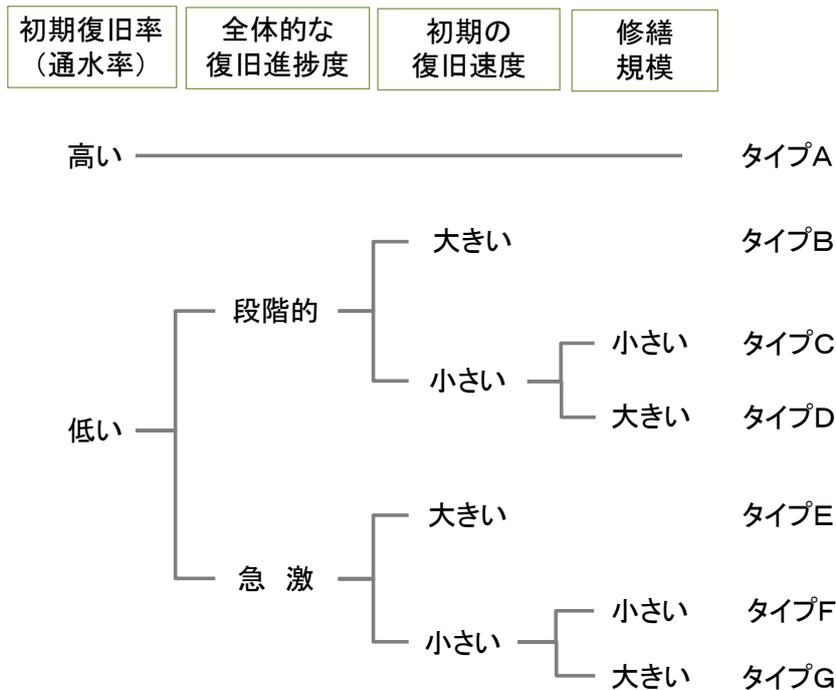


図-5.14 復旧曲線の類型化の考え方

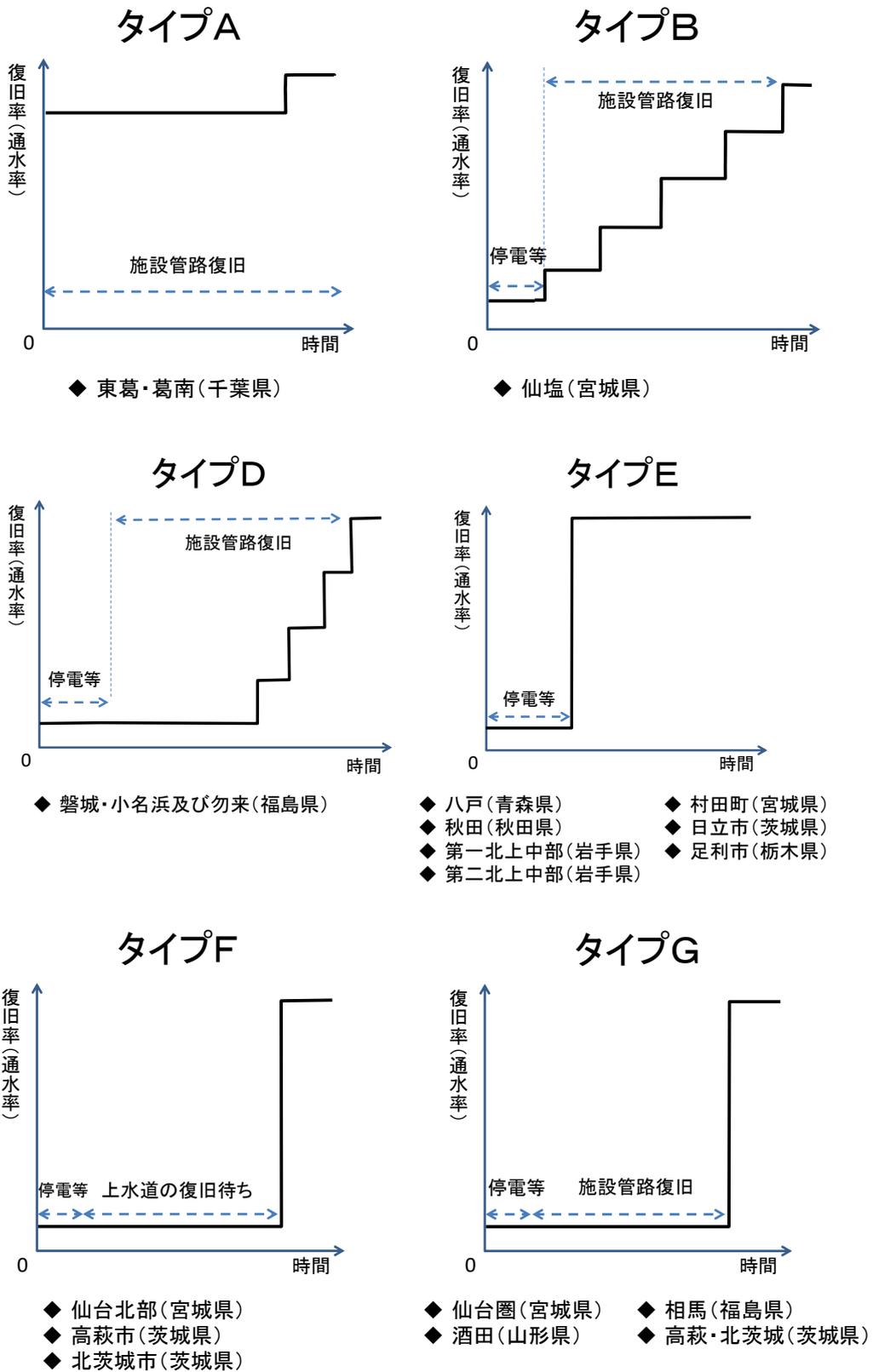


図-5.15 被災工業用水道の復旧曲線の類型化

ほとんどの復旧曲線はタイプ E~G の全体的な復旧進捗度が急激なタイプに分類された。また、初期復旧率（通水率）が低かったタイプ B~G に共通する特性として、発災直後の停電等（原子力発電所の被災による観察期間，津波浸水による電気設備停止も含む）による影響が復旧率の低調をもたらしていることがわかった。一方，上水道のような段階的な復旧進捗を実現され，かつ初期の復旧速度が高いケースについては，タイプ B に分類されたユーザー数と管路被害数が比較的多い仙塩工業用水道の一事業のみであった。なお，タイプ C に該当する復旧曲線についてはなかった。

東日本大震災の被災工業用水道の管路ネットワーク形態は，図-5.16 に従って示せば，単一系統の魚骨形または樹枝形，および複数系統の樹枝形であった¹⁶⁾。

こうした特性をもつ被災工業用水道は，どのような管路復旧プロセスをとってきたかについて調査した。とりわけ復旧が段階的に進んだ（図-5.14，5.15 におけるタイプ B の型を示した）宮城県宮仙塩工業用水道のケースに着目した^{16),21)}。

仙塩工業用水道とは，仙台市，塩釜市および近隣市町（仙塩地区）を対象に，昭和36年に給水を開始した給水能力一日最大 100,000m³/日の工業用水供給施設である。ユーザー数は45である¹³⁾。その結果を図-5.17 に示す。同図は，仙塩工業用水道の給水系統の概略を図化し，その上に，東日本大震災時に実際に行われた管路復旧の順序を付記したものである。表1からもわかるように，震災時には12箇所 of 管路被害が発生していた。これより，上流から下流へと順次復旧を進める方法がとられていることがわかる。具体的には，浄水場からの流入している配水幹線，および最初の配水分岐点から次の分岐地点までの配水幹線2リンクを復旧し通水させた後に，最初の配水分岐点にぶら下がっている給水区域の通水に向け，復旧が進められている。

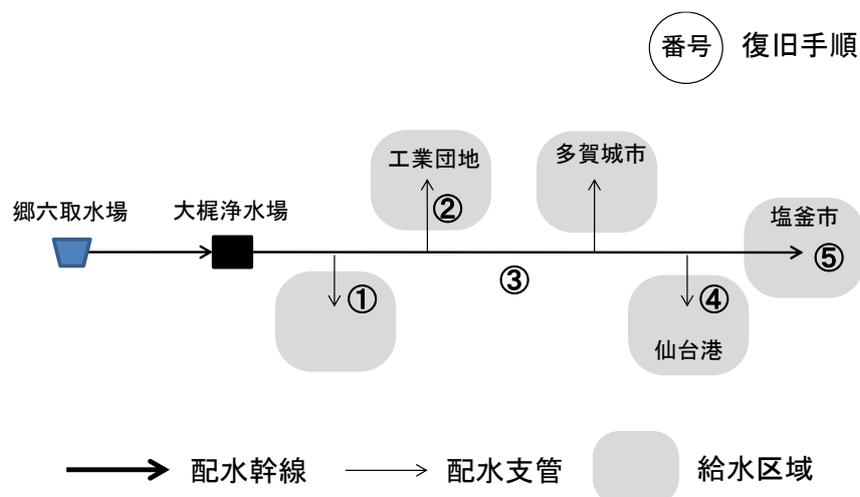


図-5.17 管路復旧手順—仙塩工業用水道を例にとって—

魚骨・樹枝形 (ramification form)

網目形 (grid form)

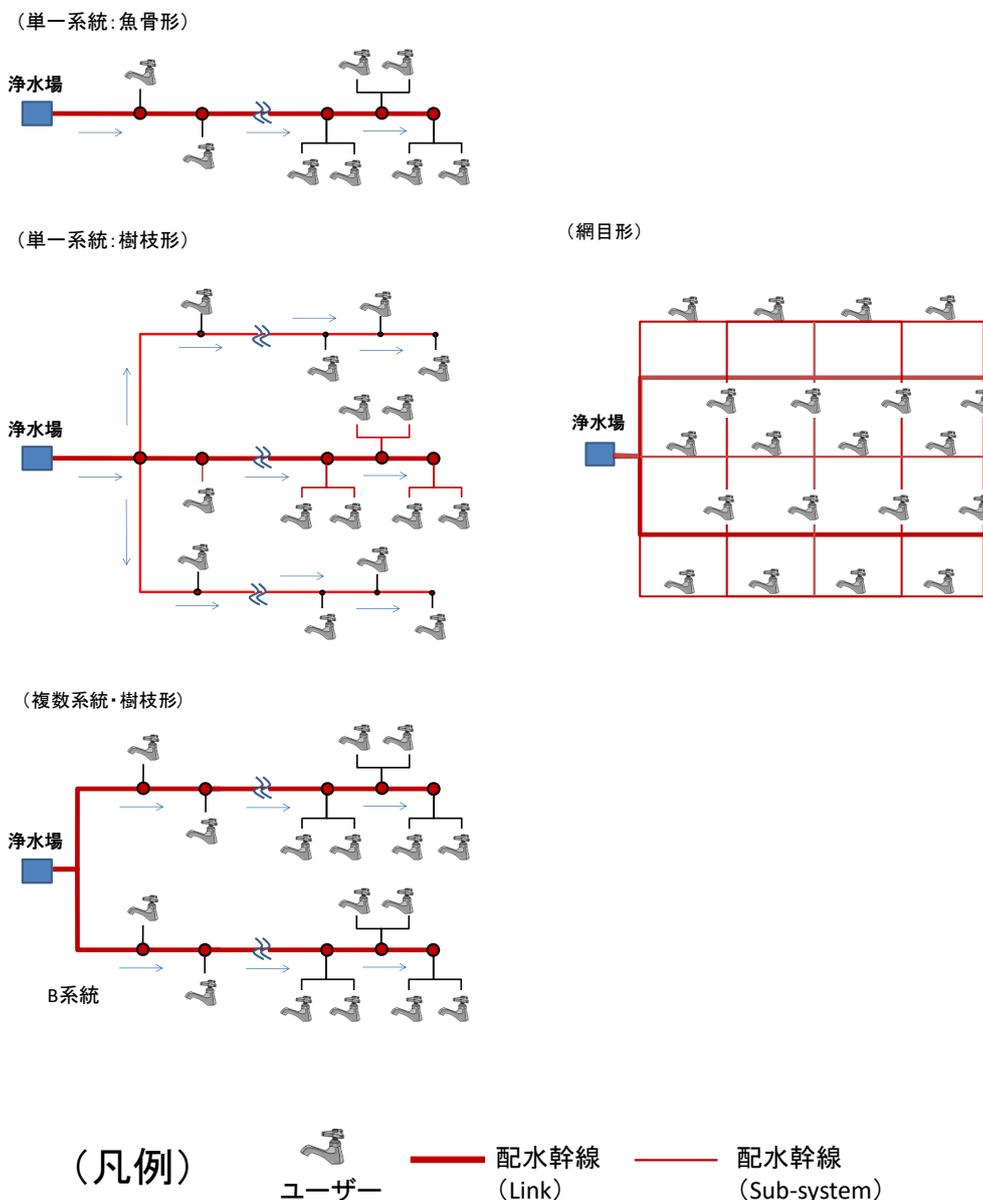


図-5.16 水道システムの主な管路ネットワーク形態

他の被災工業用水道事業についても調査した。管路ネットワークの末端（最下流）に集中して立地している工業用水道の場合は同時復旧が進められているケースもあるが、基本的には浄水場から給水エリアを結ぶ配水幹線を復旧した後に、末端の配水支管の復旧に当たったことが確認できた^{16), 21), 22)}。なお、阪神・淡路大震災時の神戸市工

業用水道においても、基本的には同様の復旧手順が採られていた^{15),23)}。以上を図-5.14, 5.15 の復旧曲線の類型に照らしつつまとめると表-5.4 のとおりとなった。ここで復旧パターンとしては次の2通りに大別している。

1) 順次復旧

単独ないし複数の復旧班は上流の給水ブロックとそこへの供給管路（配水幹線，配水枝管）の単位で復旧を進め，下流に向かって順次移行していく。

2) 同時復旧

各給水ブロックに復旧優先順位をつけず，同時に復旧を進める。

同時復旧の手順が採られたのは，タイプ G の仙台圏工業用水道のみであり，同様のタイプ G に分類された相馬工業用水道についても同時復旧ではなかったことから，工業用水道の復旧手順は，基本的に順次復旧となることが確認できた。

表-5.4 東日本大震災時の工業用水道の復旧手順

| 復旧手順 | 復旧曲線 | 複数個所の管路被害が発生した工業用水道事業 |
|--------------------|-------|-----------------------|
| 順次復旧 ^{注)} | タイプ A | 東葛・葛南地区 |
| | タイプ B | 仙塩 |
| | タイプ D | 盤城・小名浜及び勿来 |
| | タイプ F | 仙台北部，北茨城市， |
| | タイプ G | 相馬 |
| 同時復旧 | タイプ G | 仙台圏 |

注) 各給水ブロックの通水については同時に進められたケースもあるが，ここでは通水順序ではなく，復旧順序をまとめたものである

5.5.3 既往研究と本研究の立場

工業用水道は都市の産業活動を支える重要な供給系ライフラインであるが，上水道，電力，ガスとは対照的に，災害時における機能復旧予測のための復旧曲線の推計に関する研究事例については，著者らの知る限り存在しない。一方，工業用水道が有する水供給のシステムは上水道システムと極めて類似性が高い。そこで本節では，上水道システムを対象とした災害時被害予測に関する既往研究をレビューし，工業用水道シ

システムへの適用を考えた際に最も適切と考えられる手法について考察する。

能島ら（2003）²⁴⁾は、ライフラインの地震時機能の予測法を主として2種類に大別し、それぞれに合った適用条件と有用性等について論じている。一つ目の方法は、「地震動強度、物理的被害要因（埋設管標準被害率、管種、管径、管路延長、地盤条件、液状化など）、機能的被害要因（供給人口、ネットワーク形態、被災率予測式など）および復旧要因（復旧作業効率、投入復旧資機材量など）に関するデータを用いて予測が進められる」という方法であるとしている。そして二つ目の方法は、「被災事例に基づいて震度と機能停止の統計的な関係を求め、そのモデルを用いて予測を行う方法」であるとした。前者の方法を上水道システムに当てはめた検討事例として、近年では、一部の大規模水道事業体で災害対策検討の一環として実務部門で取り組まれた成果がみられるようになってきている^{25),26)}。一方、後者の方法により上水道システムを対象とした近年における関連研究としては、能島ら（2001, 2003）^{24),27)}をはじめ、阪神・淡路大震災の被害データをベースにした高田ら（2003）²⁸⁾および東日本大震災の被害データをベースにした鋤田ら（2012）²⁹⁾の復旧日数予測モデル開発の研究などが相当するものと考えられる。

以上の分類に従って機能復旧予測法を考えたとき、工業用水道については前者の手法に依拠せざるを得ない。なぜなら、5.5.2で指摘したように東日本大震災における被災工業用水道において、震度と通水期間との間には相関が確認できないこと、同震災における被災工業用水道の復旧曲線は落差の大きい単位ステップ関数型としての特性が顕著であるため連続曲線関数への当てはめは困難であるからである。能島ら（2003）²⁴⁾は、前者の手法を適用するためには多くのデータが必要であり、「詳細なデータを利用できるのは、一般的にライフライン事業体や被害想定に関連する一部機関に限定される」という制約がある点を指摘している。一方、後者の手法については、「推定精度に限界はあるものの、必要なデータを十分に得ることができない環境においては、簡便に活用される機会もある」という利点があることにも言及している。

工業用水道については、ユーザーが一部地域の製造業と限定的ということもあり、上水道、電力、ガスといった地域全体の住民の生命支障と健康影響に直結するライフラインのように、まずは速報性の高いマクロ的な被害復旧予測が求められるという局面は少ないと考える。また、近年では、(一社)工業用水協会などにより工業用水道施設に関する種々のデータベース¹³⁾が公開されてきており、復旧日数予測に必要なデータを入手できる環境が少しずつ整いつつもある。

そのため本研究では、詳細なデータを利用する前者の方法により、工業用水道の災

害時における復旧予測モデルの構築を行うこととする。本モデルが活用される局面としては、工業用水道事業者が、災害時において自らの施設の復旧曲線を推計するとき、すなわち自治体により地域への工業用水の通水再開速度を予測するケースを主として想定し、事業者が一般的に保有しているデータの範囲のなかで予測できるモデルの構築を図る。

5.5.4 モデル化の範囲

ライフラインシステムの災害時復旧曲線は、図-5.18 に示す手順で推計される。

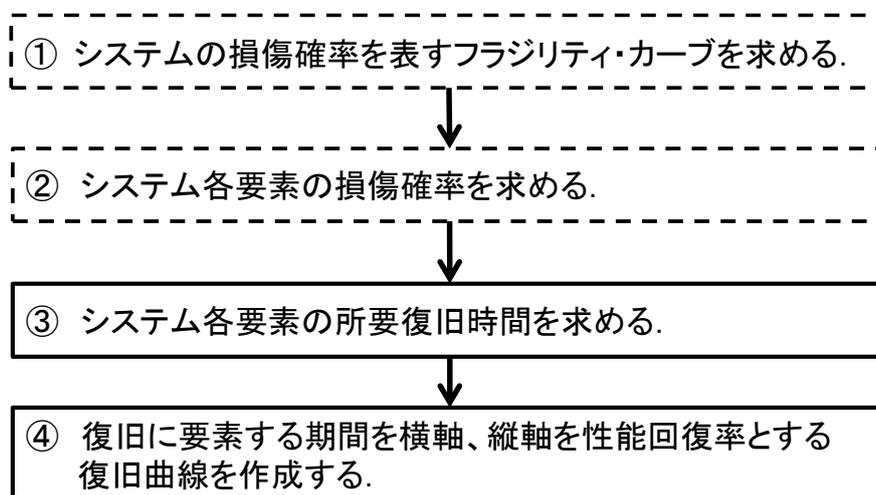


図-5.18 本研究におけるモデル化の範囲

本研究では、災害時における工業用水道システムの損傷確率（①，②）は、各事業者が想定している被害予測結果を所与とした上で、③と④の手法を提案するものである。図-5.18 の最終ゴールは、「復旧曲線の作成」であるが、その形（機能回復速度、100%機能回復期間）を決定する重要なステップは、前段の「③システム各要素の所要復旧時間を求める」ことであり、所要復旧時間の大きさについては、5.5.1 および 5.5.2 でも考察したとおり、一つにはシステム各要素の復旧にかかる人員投入がどの“タイミング”で行われたか（図-5.19 の $h(t)$ ）、もう一つは、どの程度の“量”の人員投入がなされたか（図-5.19 の $\sum h(t)$ ）という二点を特定することと解して差支えないものと考えられる。

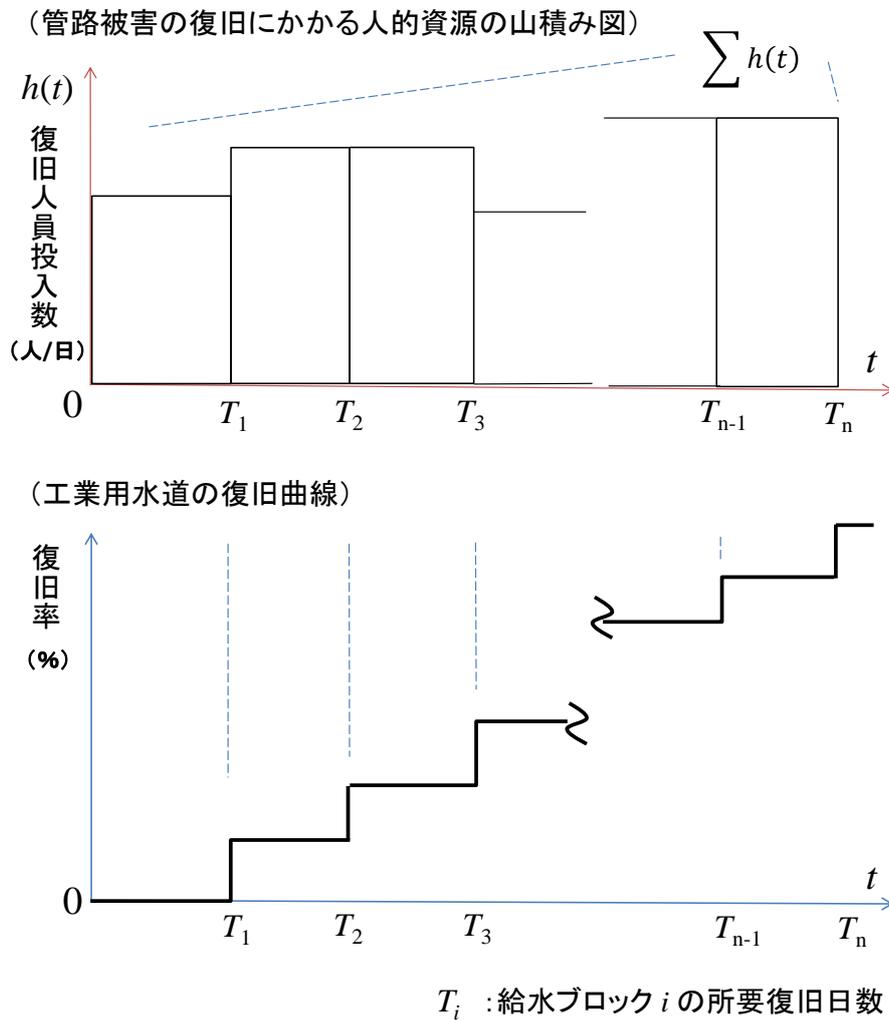


図-5.19 復旧曲線と人的資源投入との関係図

さらに、とりわけ後者の $\sum h(t)$ については、工業用水道システムの被害そのものの大きさ、ひいては工業用水道の施設規模にも影響を及ぼす可能性も考えられる。こうした後者の因果関係を明らかにするために、ここでは、復旧人員投入量を目的変数、工業用水道の被害規模および施設規模を表す各因子を説明変数とした重回帰分析を行い、ステップワイズ法を用いて説明変数の選択する形で、その関係性を分析することとした。

変数選択のプロセス（変数減少法）と絞り込まれた説明変数については、図-5.20 のとおりである。

ステップ1) 6つの説明変数(最大数)を選択

重回帰モデル

被害規模をあらわす変数

$$\Sigma h(t) = \beta_0 + \beta_1 \phi 500 \text{以上管路被害数} + \beta_2 \phi 500 \text{未満管路被害数} \\ + \beta_3 \text{浄水場被害数} + \beta_4 \text{ユーザー数} + \beta_5 \text{給水能力} + \beta_6 \text{管路延長}$$

被害規模をあらわす変数

施設規模をあらわす変数

| | |
|----------------------|-------|
| 自由度調整済R ² | 0.965 |
| 有意F値 | 0.026 |

非常に相関が高い

| | t値 | p値 |
|------------|--------|-------|
| φ 500以上被害数 | 8.944 | 0.012 |
| φ 500未満被害数 | 3.766 | 0.064 |
| 浄水場被害数 | 3.750 | 0.064 |
| ユーザー数 | -0.351 | 0.759 |
| 給水能力 | -1.150 | 0.369 |
| 管路延長 | -2.011 | 0.182 |



多重共線性の疑いがあり(t値が小さく),
有意性が低いと考えられる(p値が高い)
係数「ユーザー数」を除外

ステップ2) 5つの説明変数を選択

重回帰モデル

被害規模をあらわす変数

$$\Sigma h(t) = \beta_0 + \beta_1 \phi 500 \text{以上管路被害数} + \beta_2 \phi 500 \text{未満管路被害数} \\ + \beta_3 \text{浄水場被害数} + \beta_5 \text{給水能力} + \beta_6 \text{管路延長}$$

被害規模をあらわす変数

施設規模をあらわす変数

| | |
|----------------------|-------|
| 自由度調整済R ² | 0.975 |
| 有意F値 | 0.003 |

非常に相関が高い

| | t値 | p値 |
|------------|--------|-------|
| φ 500以上被害数 | 11.457 | 0.001 |
| φ 500未満被害数 | 4.472 | 0.021 |
| 浄水場被害数 | 4.520 | 0.020 |
| 給水能力 | -1.505 | 0.229 |
| 管路延長 | -2.539 | 0.085 |



有意性が低いと考えられる(p値が高い)
係数「給水能力」を除外

図-5.20 (1) ステップワイズ法を用いた重回帰モデルの説明変数選択プロセス(その1)

ステップ3) 4つの説明変数を選択

重回帰モデル

被害規模をあらわす変数

$$\Sigma h(t) = \beta_0 + \beta_1 \phi 500 \text{以上管路被害数} + \beta_2 \phi 500 \text{未満管路被害数} \\ + \beta_3 \text{浄水場被害数} + \beta_6 \text{管路延長}$$

被害規模をあらわす変数 施設規模をあらわす変数

| | |
|----------------------|-------|
| 自由度調整済R ² | 0.967 |
| 有意F値 | 0.001 |

非常に相関が高い

| | t値 | p値 |
|------------|--------|-------|
| φ 500以上被害数 | 9.901 | 0.001 |
| φ 500未満被害数 | 3.821 | 0.019 |
| 浄水場被害数 | 5.350 | 0.006 |
| 管路延長 | -3.493 | 0.025 |



有意性が低いと考えられる(p値が高い)
係数「管路延長」を除外

ステップ4) 3つの説明変数を選択

重回帰モデル

$$\Sigma h(t) = \beta_0 + \beta_1 \phi 500 \text{以上管路被害数} + \beta_2 \phi 500 \text{未満管路被害数} \\ + \beta_3 \text{浄水場被害数}$$

被害規模をあらわす変数

| | |
|----------------------|-------|
| 自由度調整済R ² | 0.894 |
| 有意F値 | 0.002 |

相関が高い

| | t値 | p値 |
|------------|-------|-------|
| φ 500以上被害数 | 2.363 | 0.064 |
| φ 500未満被害数 | 8.348 | 0.000 |
| 浄水場被害数 | 1.415 | 0.216 |



有意性が低いと考えられる(p値が高い)
係数「浄水場被害数」を除外

図-5.20 (2) ステップワイズ法を用いた重回帰モデルの説明変数選択プロセス(その2)

ステップ5) 2つの説明変数を選択

重回帰モデル

$$\sum h(t) = \beta_0 + \beta_1 \phi 500 \text{以上管路被害数} + \beta_2 \phi 500 \text{未満管路被害数}$$

被害規模をあらわす変数

| | |
|----------------------|-------|
| 自由度調整済R ² | 0.515 |
| 有意F値 | 0.048 |

| | t値 | p値 |
|-----------|-------|-------|
| φ500以上被害数 | 3.237 | 0.018 |
| φ500未満被害数 | 1.327 | 0.233 |

↓
相関が低い

↓
ステップ4で決定

図-5.20 (3) ステップワイズ法を用いた重回帰モデルの説明変数選択プロセス(その3)

その結果、工業用水道システムの人的資源投入量 $\sum h(t)$ は、図-5.20 のステップ4で示されたように、浄水場および管路被害数（大口径と小口径に区分）といった災害による施設の被害規模を表す因子により推定できることがわかった。

以上より、モデルによる算定フローは図-5.21 のとおり総括することができる。

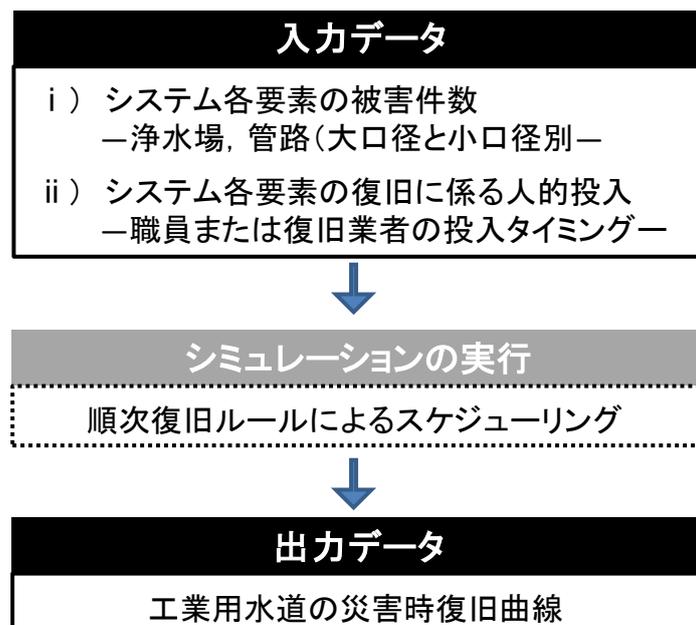


図-5.21 モデルによる算定フロー

5.5.5 工業用水道システムのモデル化

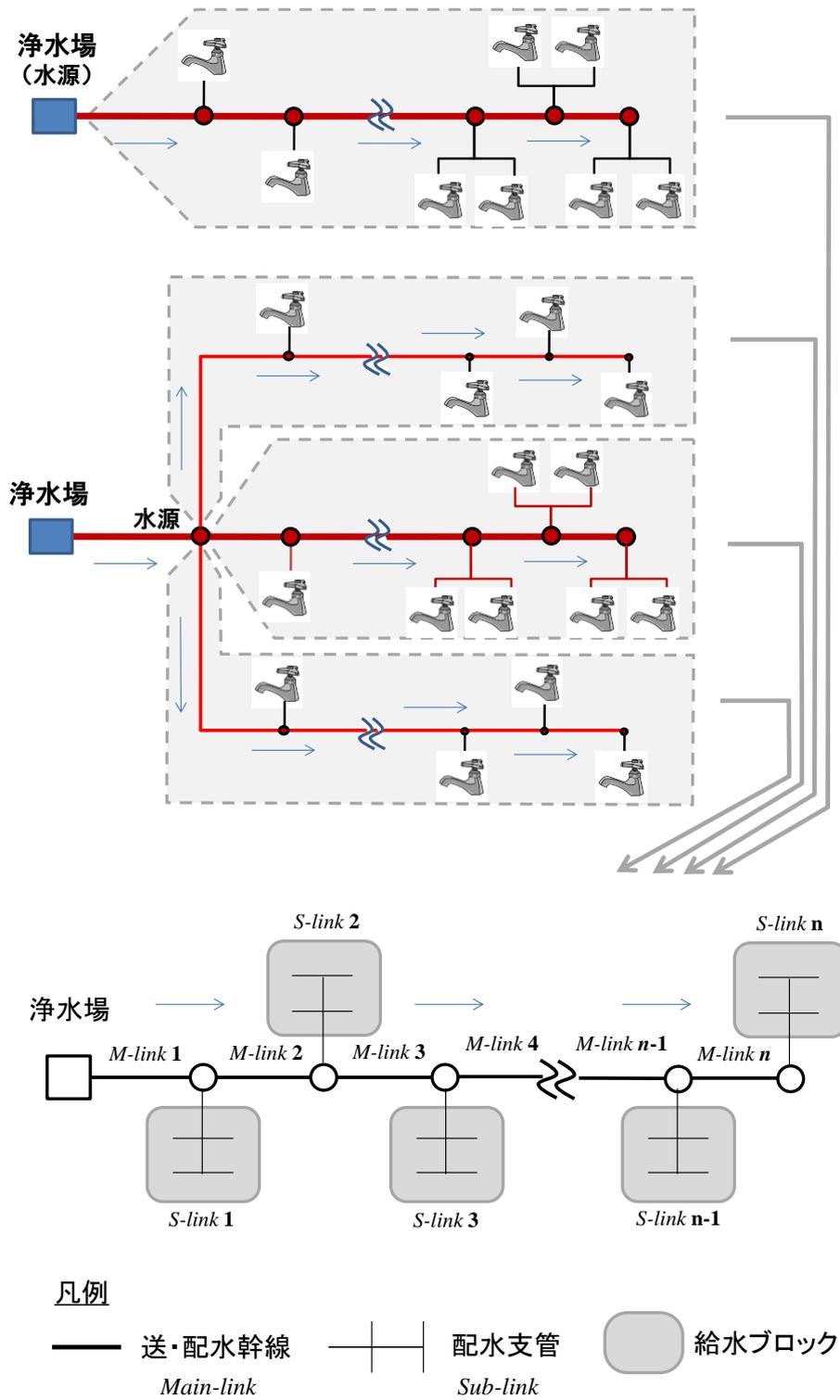


図-5.22 工業用水道の配水系統のモデル化

工業用水道の管路ネットワークは、そのほとんどが樹枝状の形態をとる特性に着目し、工業用水道システムにおける配水系統は、基本的に図-5.22のような1つの水源を有し n 個のメインリンクと、各ノードに連結されたサブリンクから構成される基本配水システムが組み合わさったものであるとした。水道管路ネットワークをノードとリンクから成るグラフとしてモデル化する手法については、わが国だけでも常松 (1974)³⁰⁾、星谷ら (1982, 1983)^{31),32)}、清水ら (2002)³³⁾ などの既に多くの適用実績があるものであり、工業用水道の管路ネットワークについても、その手法を適用したものである。なお、各リンクに流向や位置属性を持たせ、有向ベクトルとしてグラフ理論的に取り扱う場合もあるが、本研究では管種・管径等の物理的属性情報のみを有する無向リンクとして設定している。

メインリンクは配水幹線を、ノード枝分かれした配水支管の連絡地点を表し。ユーザーはサブリンクにぶら下がっていると仮定している。

5.5.6 災害時復旧曲線の定式化

5.5.2に基づき、復旧にプロセスについては、起点の水源に最も近いリンクから順次修繕していくものとする。水源から2つ目のノードまでの連結性が回復されると、そのノードに連結されているサブリンクの復旧作業が開始される。この作業手順が下流へと繰り返されるといふモデルである。図-5.19に基づき説明すると、*M-link 1*と*M-link 2*の配水幹線を復旧させ水を張ることができる状態にした後に、*S-link 1*の配水支管を復旧させ、そこにぶら下がっている給水ブロックを通水させる。そして、次のメインリンク*M-link 3*と*S-link 2*の復旧が開始される。現実には作業能力が有限であるときに実行されるパターンである。上水道の場合は、給水ブロックに防災拠点があるリンクを優先復旧したり、網目状管路ネットワークのフレーム管路を優先復旧したりするなど複雑化するが、工業用水道の場合は基本的にそのような配慮は確認されなかった。

いま、A系統の各メインリンクの復旧に要する所要日数 t_i^m ($i = 1, 2, \dots, n$)、各サブリンクの復旧に要する所要日数 t_i^s 、各サブリンクにぶら下がっている給水エリアの通水に要する所要日数を T_i ($i = 0, 1, \dots, n$)とする。*S-link 1*の給水エリアの通水に要する所要日数 T_1 は、次式とおりととなる。

$$T_1 = t_1^m + t_2^m + t_1^s \quad (5.3)$$

ここで、図-5.15 に示したように、とくに大規模な地震発生直後は、停電および上水道の復旧待ちなどにより、すぐに工業用水道の復旧に取りかかれないケースがある。停電期間を t^e 、上水道の復旧待ちなどの復旧待ち期間を t^w とすると、こういった工業用水道の復旧着手を遅らせる諸要素が継続する期間 T_1 は、次式で表される。

$$T_0 = \max(t^e, t^w) \quad (5.4)$$

T_i ($i = 1, 2, \dots, n$)は次式で表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = T_0 + (t_1^m + t_2^m + t_1^e) \\ T_2 = T_1 + (t_3^m + t_2^e) \\ T_3 = T_2 + (t_4^m + t_3^e) \\ \vdots \\ T_{n-1} = T_{n-2} + (t_n^m + t_{n-1}^e) \\ T_n = T_{n-1} + t_n^e \end{array} \right. \quad (5.5)$$

サブリンク i に従属する受水ユーザー数を u_i とすると、A系統の機能復旧率 $R(t)$ は次式で表される。

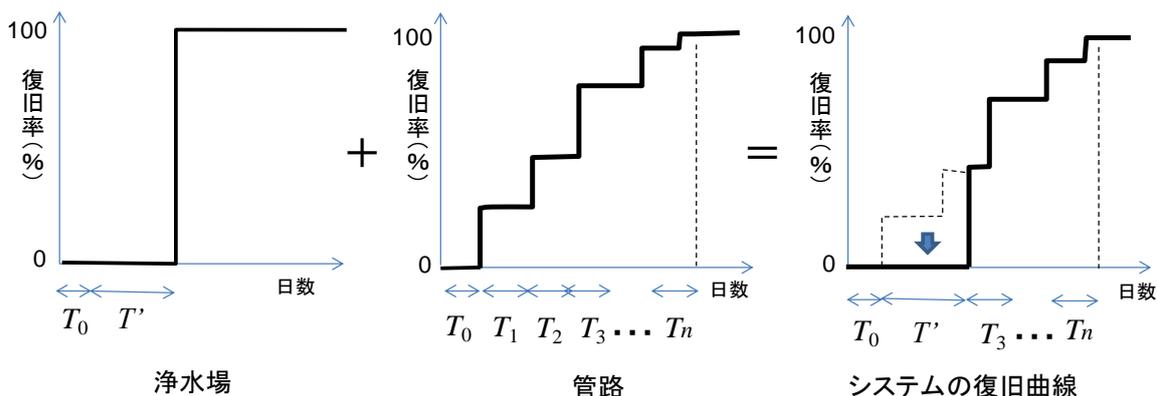
$$R(t) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i U(t - T_i)}{\sum_{i=0}^n u_i} \quad (5.6)$$

$U(\quad)$ は単位ステップ関数であり、次式の性質を有している。

$$\begin{array}{l} U(t - T_i) = 0 \quad (t < T_i) \\ U(t - T_i) = 1 \quad (t \geq T_i) \end{array} \quad (5.7)$$

以上は、管路システムの復旧プロセスにのみに着目した復旧予測モデルであるが、東日本大震災や阪神淡路大震災では、浄水場側の被害も少なからず発生していた^{16), 18)}。

いま浄水場の所要復旧日数を T' とすると、浄水場においても被害が発生した場合の復旧曲線は、図-5.23の概念図のとおり変化する。



注)上の概念図では、浄水場と管路の同時復旧による復旧速度の鈍化は考慮していない

図-5.23 浄水場復旧と管路復旧の同時作業時の復旧曲線

5.5.7 復旧シナリオの仮定とシステム各要素の所要復旧日数

災害断水時において早期復旧が求められる環境下において、工業用水道の応急復旧作業は次の条件で進められるものとする。

- ① 割り当てられた応急復旧作業が終了すると下流部の復旧作業に速やかに移行する。
- ② 各給水ブロックの所要復旧時間は、その作業に割り当てられる復旧人員投入量に比例して短縮される。狭い区域で復旧投入量が過度となると、断通水作業等が輻輳し復旧作業効率が低減することも考えられるが、工業用水道の場合は管路ネットワーク形態が樹枝状であるため断通水区間の切り分けが容易であることから、懸念される復旧作業効率の低下は起こりにくい。

次に、システム各要素の復旧速度に着目したとき、その大きさは、実際的には復旧人員（請負業者も含む）などの作業能力が大きく関与することは言うまでもない。よって t_i^m と t_i^s は、管路の被害件数（箇所）（メインリンク： d_i^m ，サブリンク： d_i^s ）と復旧作業への職員投入数（人／日）（メインリンク： $h_{in,i}^m$ ，サブリンク： $h_{in,i}^s$ ）の関数といえる。加えて投入職員が不足していれば外部復旧応援の人数（人／日）（メインリンク： $h_{ex,i}^m$ ，サブリンク： $h_{ex,i}^s$ ）が加算される。ここに外部復旧応援人数は政策変数である。いま応急復旧作業歩掛を L （人／箇所）とすると、 t_i^m と t_i^s はそれぞれ式(5.8)，(5.9)で表される。

$$t_i^m(d_i, h_i^m) = \frac{Ld_i}{(h_{in,i}^m + h_{ex,i}^m)} \quad (5.8)$$

$$t_i^s(d_i, h_i^s) = \frac{Ld_i}{(h_{in,i}^s + h_{ex,i}^s)} \quad (5.9)$$

よって式(5.6)は、式(5.10)として整理される。

$$R(t, d, h) = \sum_{i=0}^n u_i U(t - T_i(t_i, d_i, h_i)) / \sum_{i=0}^n u_i \quad (5.10)$$

なお、実際の復旧作業は職員のみが直営で対応するのではなく、請負業者とセットになって一つ班を結成し対応に当たる。その標準的な班編成は表-5.5のとおりであり、式(5.8)、(5.9)における説明変数 h には、請負業者数が必要条件として内包された形となっている。

表-5.5 応急復旧作業班の標準的な構成³¹⁾

| | 職員数 ^{注)} h | 業者数 c | 職員あたり 必要業者数 c/h |
|---------------------|--------------------------|---------------|----------------------|
| 1. φ 500以上管路の復旧 | 6.0 (2.0) 人 | 8.0 (12.0) 人 | 1.3 (人/人) |
| 2. φ 300～φ 400管路の復旧 | 2.0 (0.5) 人 | 10.0 (12.0) 人 | 5.0 (人/人) |
| 3. φ 300未満管路の復旧 | 2.0 (0.5) 人 | 6.0人 | 3.0 (人/人) |
| 4.施設の復旧 | 2.0人 | 必要数 | — |

注) バルブ操作・修繕および地元への住民説明は事業体職員による直営を想定すると、水道維持管理指針1998³⁴⁾に示された数値は非常に少ない。したがって、事業体職員を増量して設定する一方で、その分の業者数を減らす(ただし最低6人/班確保)ことで合計要員数は同指針に準ずる形とした。ちなみに、上表の()内は同指針値を示す。

定数 L については、東日本大震災の被害・復旧活動記録¹⁶⁾から、被災工業用水道の管路被害および浄水場被害と応復旧人数の延べ人数(日・人)のデータを抽出し、それらを整理した表-5.6に基づき、応急復旧人数を目的変数、各被害件数を説明変数とした重回帰分析を行って式(5.11)の関係式を導出した。

$$\sum_{i=1}^n (h_i^m + h_i^s) = L^1 d^1 + L^2 d^2 + L^3 d^3 \quad (5.11)$$

ここに、 L^1 ：φ500以上管路および被害箇所周辺の空気弁等附属設備（以下、「管路等」と呼ぶ）の復旧作業歩掛（人／箇所）、 d^1 ：φ500以上管路等の被害件数（件）、 L^2 ：φ500未満管路等の復旧作業歩掛（人／箇所）、 d^2 ：φ500未満管路等の被害件数（箇所） L^3 ：浄水場施設・設備被害の復旧作業歩掛（人／箇所）、 d^3 ：浄水機能に支障を来たした浄水施設・設備の被害件数（箇所）である。

表-5.6 システム各要素の被害件数と復旧人員投入量

| 都道府県 | 事業名 | ※1 通水迄の 投入人数 (人・日) | ※2 管路被害数 | | ※3 浄水場 被害数 | (参考) | |
|------|----------|-----------------------------|-------------|--------|------------------|----------|------------|
| | | | φ500以上 | φ500未満 | | 復電 日数 | 準備※4 期間 |
| 青森県 | 八戸 | 20 | 2 ※5 | | 0 | 2.8 | |
| 秋田県 | 秋田 | 28 | | | 0 | 1.1 | |
| 山形県 | 酒田 | 92 | | | 2 | 0.2 | 1.0 |
| 岩手県 | 第一北上中部 | 26 | | | 0 | 1.6 | 12.0 |
| | 第二北上中部 | 52 | | 1 | 0 | 2.0 | |
| 宮城県 | 村田町 | 30 | | | 0 | 10.0 | |
| | 仙台北部 | 128 | 3 | 2 | 0 | 4.1 | 2.0 |
| | 仙台圏 | 200 | 4 | | 1 | 4.1 | 1.0 |
| | 仙塩 | 438 | 9 | 3 | 0 | 2.8 | 1.0 |
| 福島県 | 磐城 | 不明 | 32 | 13 | 1 | 0.3 | 11.0 |
| | 小名浜 | 不明 | 15 | | 2 | 0.3 | 11.0 |
| | 勿来 | 不明 | 5 | | 0 | 0.3 | 11.0 |
| | 相馬 | 72 | 3 | | 0 | 0.0 | 9.0 |
| 茨城県 | 日立市 | 18 | | | 0 | 3.3 | 5.0 |
| | 高萩市 | 8 | | | 0 | 3.1 | 15.0 |
| | 北茨城市 | 25 | 2 | | 0 | 3.1 | |
| | 高萩・北茨城広域 | 33※6 | 1 | | 0 | 2.6 | |
| 栃木県 | 足利市 | 0 | | | 0 | 0.6 | |
| 千葉県 | 東葛・葛南地区 | 26 | | 8 | 0 | 0.0 | 1.0 |

※1 他事業体からの応援隊員数も含む

カウント方法については、県間で統一的不是な部分がある。

※2 水管橋被害も含む。またφ75mm以下の管路はカウントしていない。

※3 浄水機能の継続に支障をきたした被害件数のみ抽出。

※4 復旧業者・資材待ち／上水道復旧待ち／原発の状況経過観察 など

※5 通水完了後に復旧

※6 3/11～23までは上水道の復旧と並行して、同一職員で対応。

上記期間における投入人員はノーカウント。

重回帰分析による回帰係数の推計結果を表-5.7 に示す。この際、管路もしくは浄水場被害が無かった事業者、あるいは復旧人員投入数が調査報告書^{16),21),22)}から直接把握できなかった事業者などのサンプルは除外した（サンプル数：9）。決定係数は $R^2=0.96$ であり、非常にあてはまりが良い結果を得た。

表-5.7 東日本大震災被災工業用水道の復旧作業歩掛（職員）

| 記号 | 項の説明 | 係数値 |
|-------|---------------------------|------|
| L^1 | φ 500以上管路等の復旧作業歩掛（人・日／箇所） | 42.2 |
| L^2 | φ 500未満管路等の復旧作業歩掛（人・日／箇所） | 5.6 |
| L^3 | 浄水場施設・設備被害の復旧作業歩掛（人・日／箇所） | 43.0 |

5.5.8 復旧曲線の形状決定要因の可視化

—人的資源投入の山積み図 および工業用水道の被害復旧箇所

を示した管路ネットワーク・グラフ図との連関—

被災工業用水道の被害状況とその復旧にかかる人的資源投入量、および復旧曲線の関係は、図-5.24 のとおり可視化することができる。この図は大きく3つの図から構成されており、上から順に被災工業用水道システムのグラフ・モデル図、復旧曲線、および復旧にかかる人的資源の山積み図である。上下の図をインプットデータとし、中央の復旧曲線図がアウトプットとして得られる。ここで、山積み図とは、工事用資源の量的制約のもとでの建設プロジェクトの最小工期スケジューリング問題である PERT/MANPOWBR 問題³⁵⁾で活用される図を参考としたものであり、各作業に必要となる作業数（投入人員数）を合計し、柱状に図示したものである。

これら3つの図はリンクしている。グラフ図中の管路被害箇所を復旧するために、一対一対応で人的資源が投入され、山積み図に上積みされていく。そして上流側の各給水ブロックが通水していくごとに、中央図の復旧曲線のステップが上がり、また山積みは右の列にシフトする。

このような可視化は、工業用水道の復旧に人的資源をいつのタイミングでどの程度投入すべきか、あるいは、災害復旧活動の拠点施設などに工業用水が多量に使用されている場合、上水道の復旧と並行してそこに至る工業用水道の最短経路についても復旧するといった同時検討がなされる際などには、非常に有用であると考えられる。

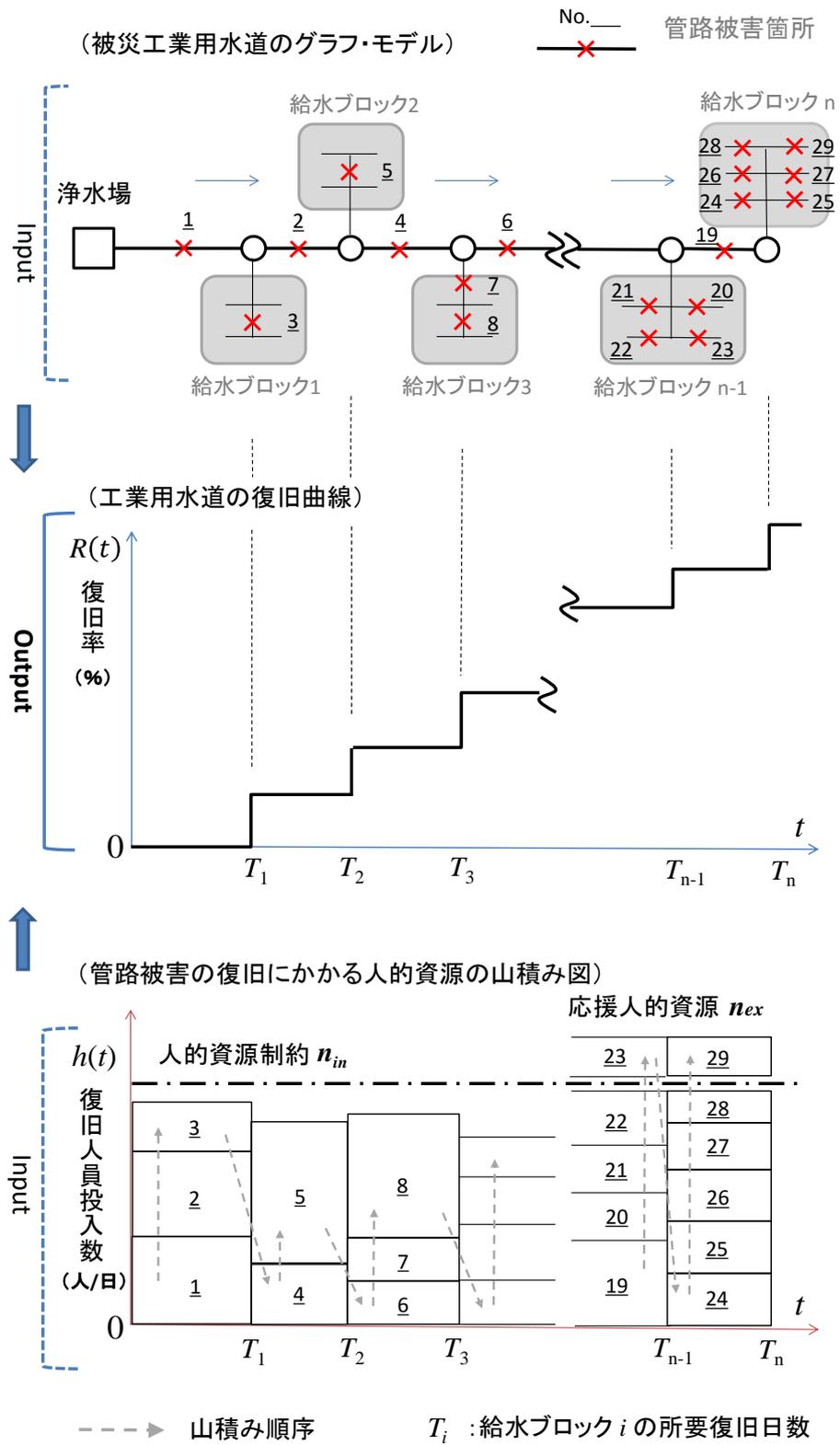


図-5.24 人的資源の山積み図と復旧曲線との関連図

5.5.9 モデルの精度検証

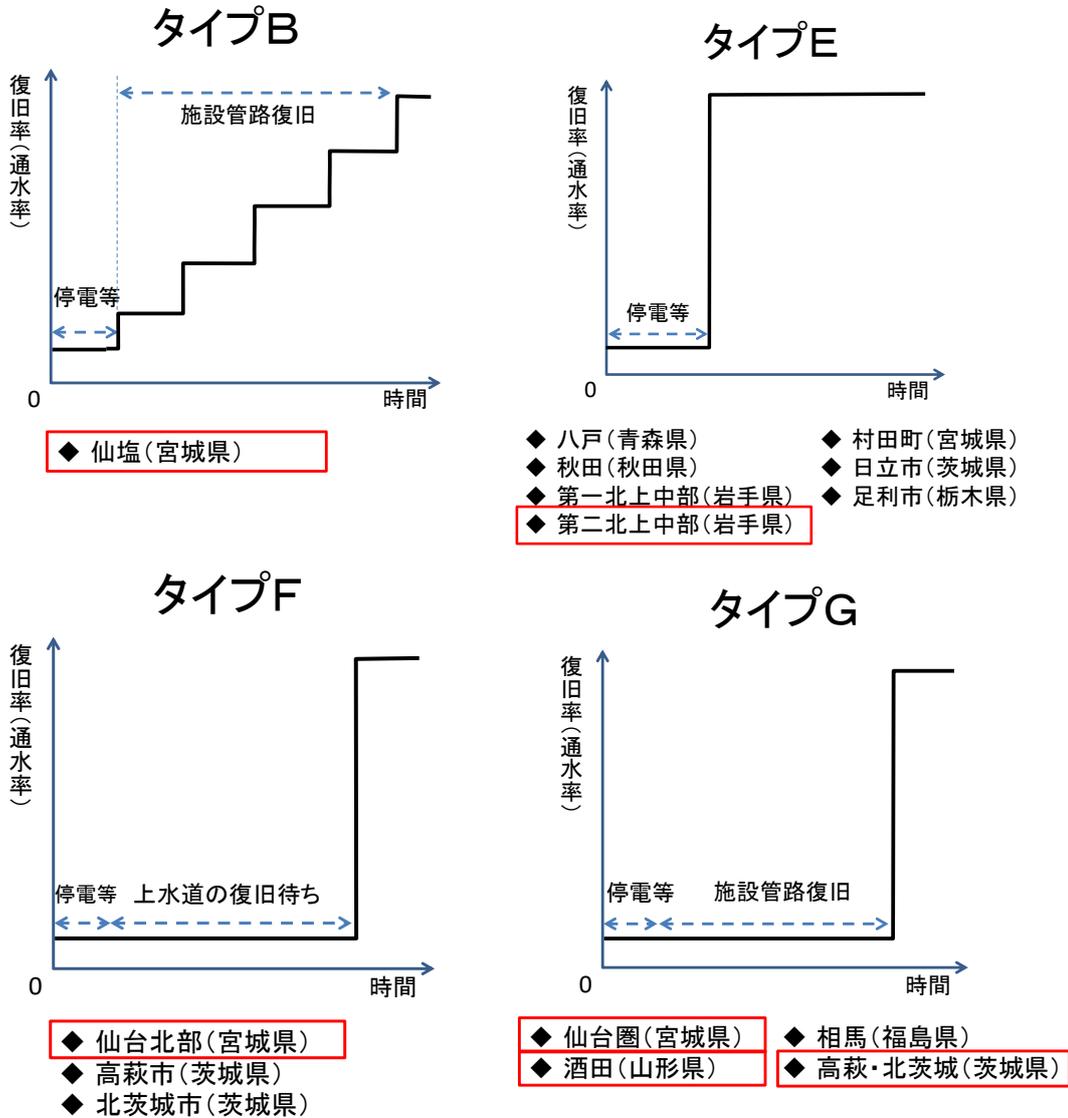


図-5.25 対象施設と復旧特性 (図-5.15 部分再掲)

東日本大震災で被災した第二北上中部工業用水道，仙台圏工業用水道，仙塩工業用水道，仙台北部工業用水道，酒田工業用水道，高萩・北茨城広域工業用水道について，当時の被害事例と投入人量を入力データとして復旧曲線の推計を行っている．これら対象施設は図-5.25 に示す復旧傾向を有していた．なお，相馬工業用水道について復旧に長期を要し暫定給水を繰り返したこと，東葛・葛南地区工業用水道については初期断水率が3%と極めて低かったこと，北茨城市工業用水道については発災後2週目まで

の工業用水道の復旧への関与が定量化しにくかったため、予測の対象としていない。

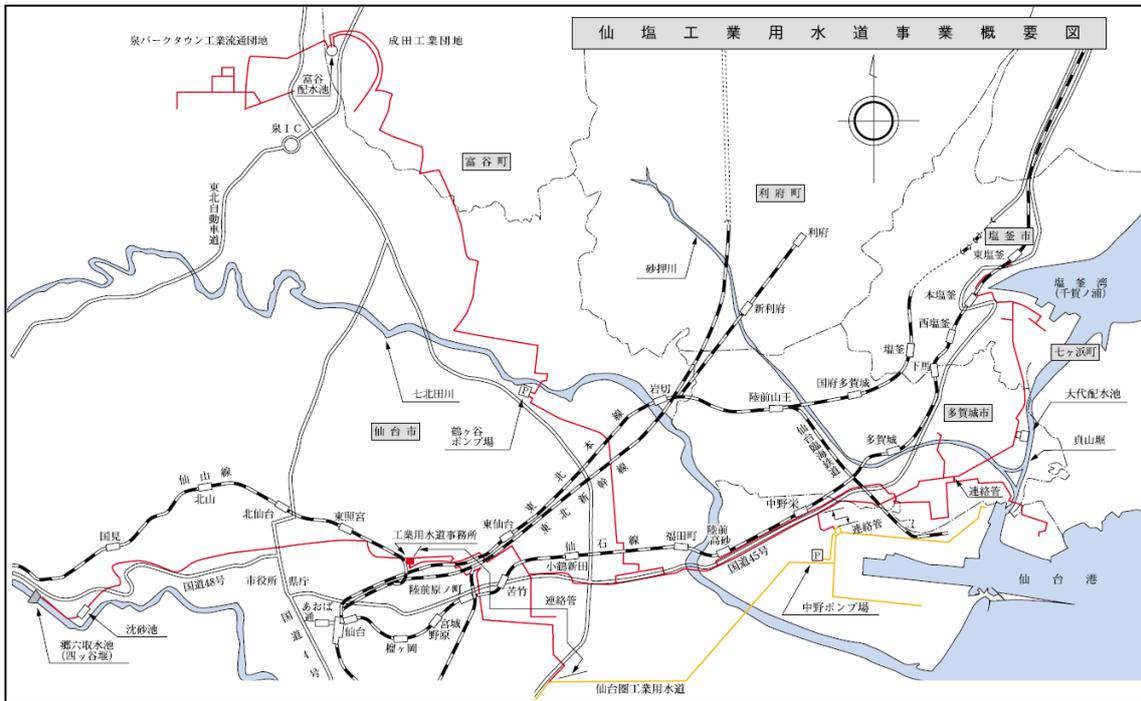
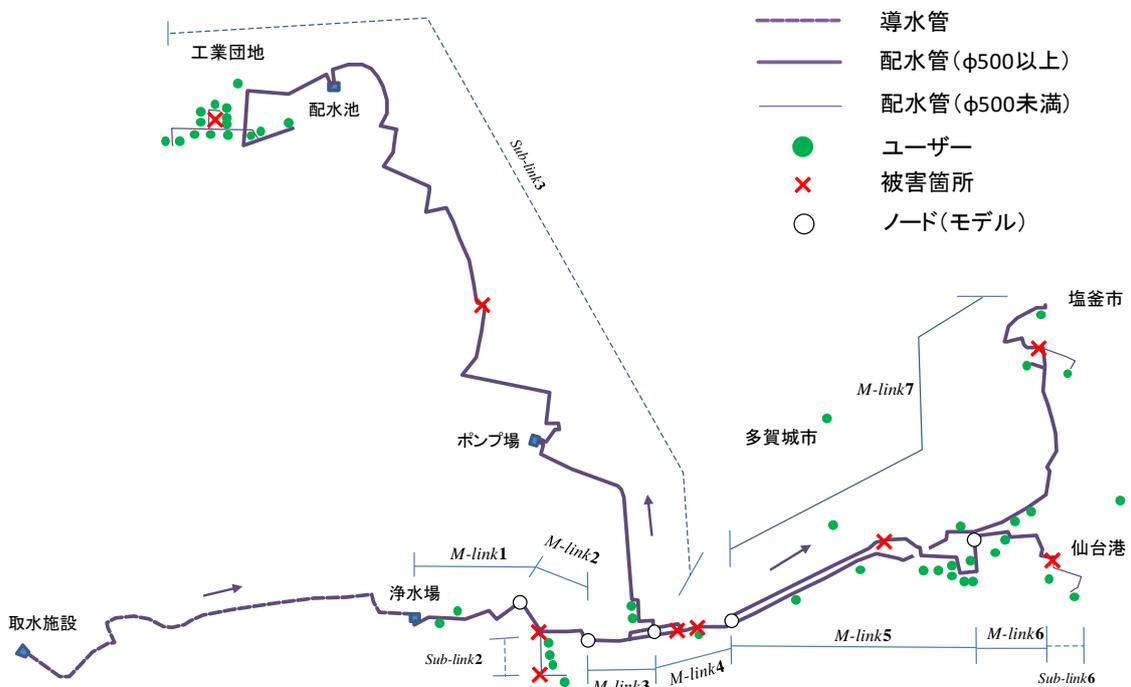


図-5.26 仙塩工業用水道の概要図³⁷⁾



注) VP管, 給水分岐がない末端管路, 他工業用水道との連絡管は省略

図-5.27 仙塩工業用水道のリンク設定および被害箇所

本論文では、5.5.2 で対象とした宮城県仙塩工業用水道のみを検証例を示す。本復旧予測モデルを用いて復旧曲線の推計を試みた。なお、推計期間は発災した3月11日から4月7日宮城県沖M7.1余震の発生直前までとした。なお、その他の被災工業用水道の検証例については、参考文献36)を参照されたい。

モデルの入力変数については、図-5.26をベースに管路ネットワークを複数リンクとノードに分割し、ユーザーと震災時における管路被害箇所（4月7日以降に新たに発生した被害は除く）をプロットした図-5.27を作成することで、各リンクに被害発生数などの変数を表-5.8のとおり設定した。

表-5.8 宮城県仙塩工業用水道の被災状況のモデル化

- 停電期間(日): t^e 2.8
- 復旧待ち期間(日): t^w 1.0
- 浄水場被害数(箇所): d^3_i 0

■ 管路被害数(箇所):

| | Main-Link | | 被害数 | | Sub-Link | | 被害数 | | ユーザー | 通水率 |
|-----|-----------|---|------------|------------|----------|---|------------|------------|------|--------|
| | i | | d^{m1}_i | d^{m2}_i | i | | d^{s1}_i | d^{s2}_i | | |
| I | 1 | | | | i | 1 | | | 2 | 4.3% |
| II | 2 | 1 | | | ii | 2 | | 1 | 4 | 12.8% |
| III | 3 | | | | iii | 3 | 1 | 1 | 18 | 51.1% |
| IV | 4 | 2 | | | iv | 4 | | | 1 | 53.2% |
| V | 5 | 1 | | | v | 5 | | | 8 | 70.2% |
| VI | 6 | | | | vi | 6 | 1 | | 5 | 80.9% |
| VII | 7 | | | | vii | 7 | 1 | | 9 | 100.0% |

復旧予測結果を図-5.28に示す。投入職員数は事業者（宮城県）の職員投入実績数である。実際には各リンクからユーザーへの給水分岐がより細かく設けられているため、その部分での厳密性は省略しているものの、復旧の回復速度は良好に再現できており、工業用水道の給水ブロックレベルでの復旧日数の予測においては精度良く再現できることがわかった。

5.5.10 モデルの限界

本節で構築してきたモデルの特徴をまとめると、次のようになる。

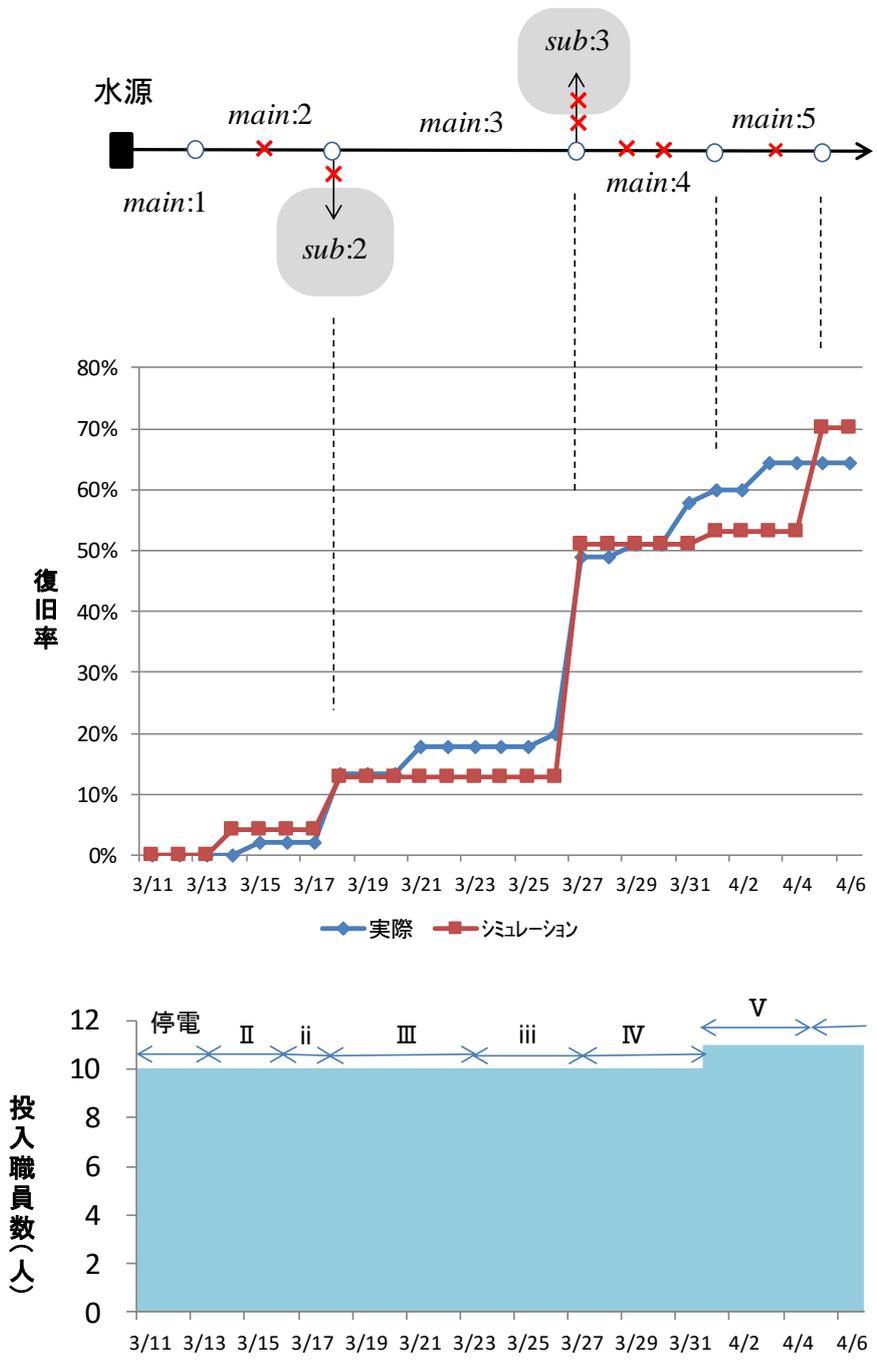


図-5.28 宮城県仙塩工業用水道の推計例

- 東日本大震災における工業用水道の被災特性を調査し、被災工業用水道の施設諸元、施設・管路被害件数、復旧人員投入数および通水期間の関係を総括することができた。これより、当該工業用水道が立地している地域で観測された最大震度と施設被害の大きさとの相関は低かったこと、全管路被害のうち幹線管路の被害

率が非常に高かったという、従来の上水道を対象とした分析で知られる被災特性とは異なる特徴も確認できた。

- 被災工業用水道の復旧プロセスについても調査した。これより、被災工業用水道の復旧曲線は、その給水エリア分布の不均一性と集中性、配水管延長当たりのユーザー密度の低さから単位ステップ型の関数形として捉えることが適当であることを明らかにした。
- 工業用水道の復旧速度を決定付ける要因について分析した。その結果、浄水場や管路の被害件数と復旧にかかる人的資源の投入量の2種に絞られることを明らかにした。この結果を受けて、対象ハザードに対する浄水場・管路の被害発生件数と政策変数である人的資源投入量のみを入力変数とすることで、工業用水道の災害時復旧曲線が描かれるシミュレーションモデルを提案することができた。
- 工業用水道システムを構成する各配水系統についてはシンプルな樹枝状の直列型ネットワークとしてグラフ化できることを指摘し、どの枝（サブリンク）にぶら下がっている実（受水ユーザー）が通水すれば復旧曲線はどの程度立ち上がるのか、その際に投入された人的資源はどの程度になるか（山積み図）が容易に把握できる連関図を提案した。

一方で、今回は東日本大震災で被災した工業用水道の被災復旧特性を踏まえてモデル化を試みたところであるが、他の被災事例にも本モデルを適用しながら、モデルの汎用性を高めていく必要があるといえる。

5.6 防災拠点施設に対する工業用水供給を想定したシナリオスタディ

本節では、防災拠点施設に工業用水道が整備され、上水と工業用水との二元給水が実現していると想定した場合の災害時における避難生活用水需要のカバー率の向上について分析する。なお、防災拠点施設としては指定避難所を選定する。

5.6.1 災害時における避難所の水問題

災害時に避難生活を送るための施設は「指定避難所」と呼ばれ、災害対策基本法のなかでは、災害の危険性があり避難した住民等を災害の危険性がなくなるまでに必要な間滞在させ、または災害により家に戻れなくなった住民等を一時的に滞在させるた

めの施設として市町村長が指定する（法第 49 条の 7）と規定されるものである。

災害被災地域に断水する場合には、避難所もまた断水する。阪神・淡路大震災以降、多くの水道事業者の間で水源から避難所に至るルート of 配水管を優先的に耐震化しようとする取組もなされてきている³⁸⁾が、その効果が実際の地震時に発現したという報告はみられていない。阪神淡路大震災や東日本大震災の際に避難所生活に関するアンケートの結果（図-5.29、図-5.30）からは、水の確保、とりわけ生活用水（トイレ、シャワーなど）の確保に多大な不便を強いられたことが確認できる。

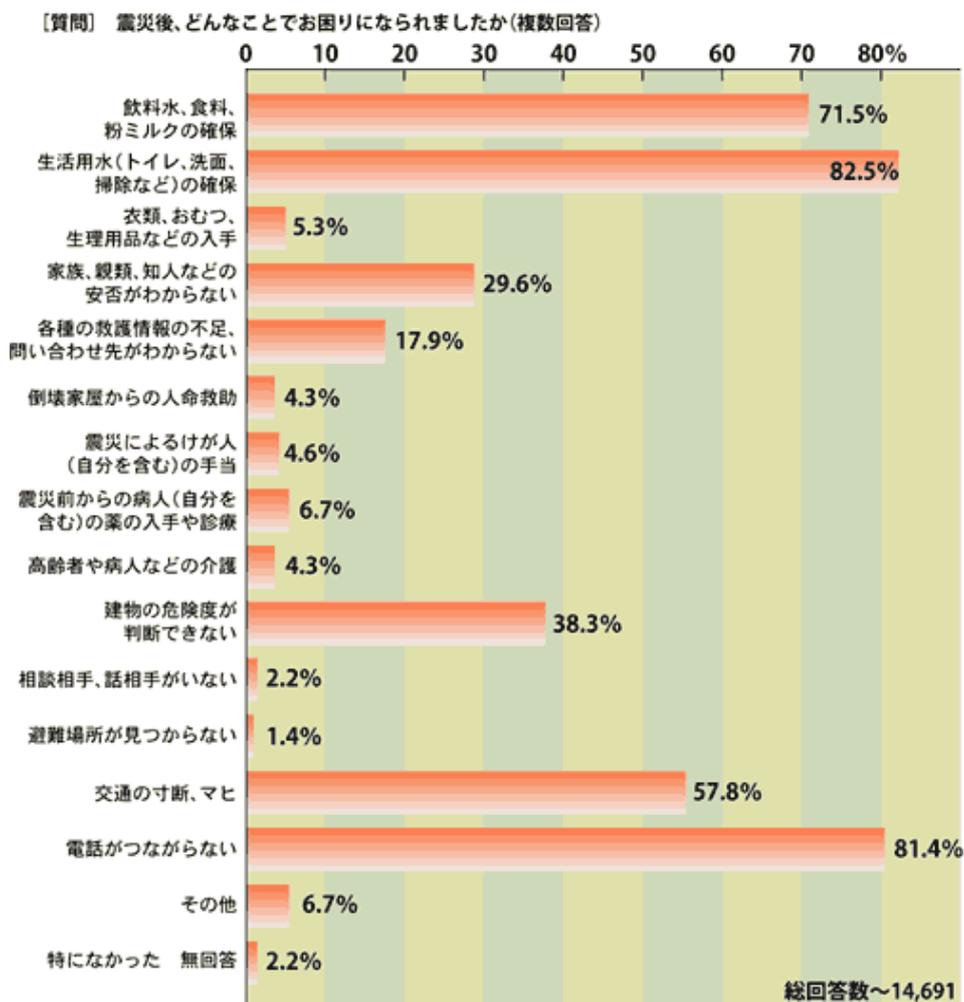


図-5.29 阪神淡路大震災の西宮市民意識調査結果「避難所生活で困ったこと」³⁹⁾

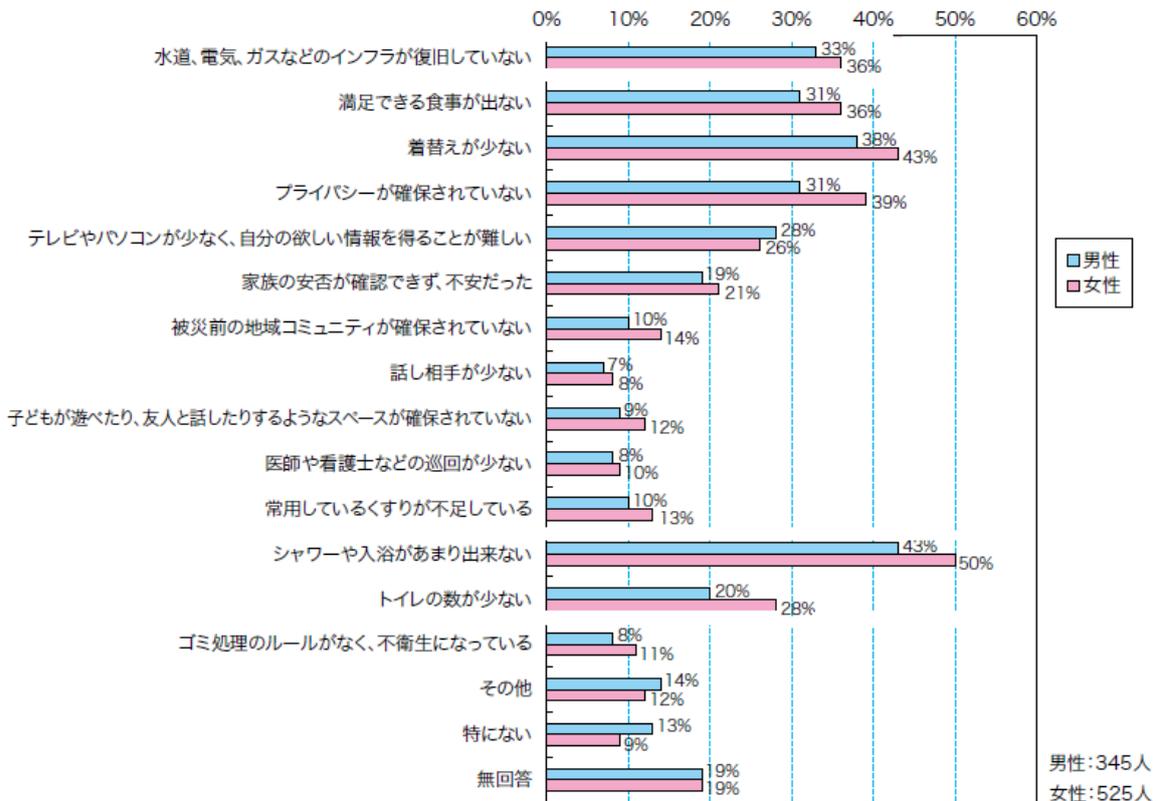


図-5.30 東日本大震災の市民意識調査結果「避難所生活で困ったこと」⁴⁰⁾

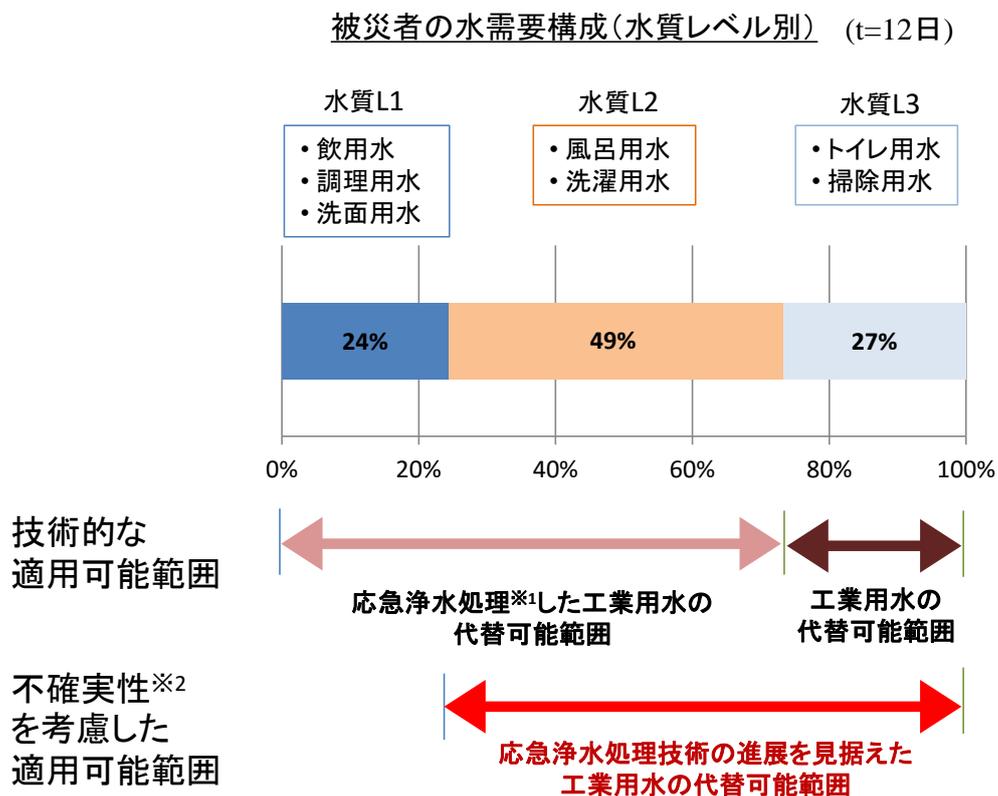
さらに、たとえ避難所に仮設トイレは設置されてはいるものの、水洗化がなされず、それらの衛生対策が劣悪であるため、トイレの利用を控え、健康被害を誘発するケースもよく聞かれる話である。排泄は我慢できない。しかしながら、水洗トイレが使えず、トイレに行かないようにするために水分摂取を控えてしまう傾向があった。その結果、体力低下によりインフルエンザなどの呼吸器系感染症にかかりやすくなったり、脱水症状やエコノミークラス症候群になることもあったことが確認されている⁴¹⁾。

5.6.2 避難所に工業用水が供給された場合の水道サービスの需要代替性

5.3 でも明らかにしているように、災害時における被災者の水需要は、必ずしも水道水のような飲用可能水（水質レベル 1）の水のみで構成されていない。同節で示した、南海トラフ巨大地震時における大阪市域の水需要の推計結果に基づき、被災者の水質面を考慮した水需要をまとめると、図-5.31 のとおり表現することができる。同図は、最大の水需給ギャップが発生する発災後 12 日目（図-5.1）に着目し、水質レベル

別需要構成を表したもので、そのうえに表-5.1 で明らかにした工業用水の水質と使用可能用途との関係を合わせた図である。

図-5.31 より、仮に被災者が工業用水を容易に入手できる環境にあるとき、少なくとも被災者の水需要の27%は代替できる可能性があり（水洗トイレが使用可）、被災生活の衛生環境保持に重要な役割を果たしうる。また、近年、飲用できない原水を臨時に浄水する機能を組み込んだ応急給水手法に関する研究も進みつつある⁴²⁾。この技術は今後導入が進むものと考えられ、これにより工業用水の水質は、応急浄水処理の不確実性（図-5.31 ※2）を考慮しても、少なくともレベル2までは引き上げ可能であり、最大で需要の76%までカバーでき（風呂、洗濯が可）、被災者の健康と清潔感の保持に多大な効果をもたらすことが確認できる。



※1 多様な水源を原水とした、可搬型浄水装置、緊急用浄水器による応急的な浄水処理⁴²⁾

※2 装置で処理を行った結果、溶解性成分の濃度が飲用に適さないレベルまでしか除去できない、あるいは健康に害を及ぼす成分が除去しきれないといった可能性⁴³⁾

図-5.31 災害時における被災者の水需要構成と工業用水の代替可能性

したがって、工業用水を避難所に供給することができれば、たとえ上水道が途絶えようとも、避難所生活者の健康と衛生環境の保持に必要な生活用水の大部分をカバーできることが明らかとなった。

5.6.3 対象地区の指定避難所と工業用水道配水管とのネットワーク距離

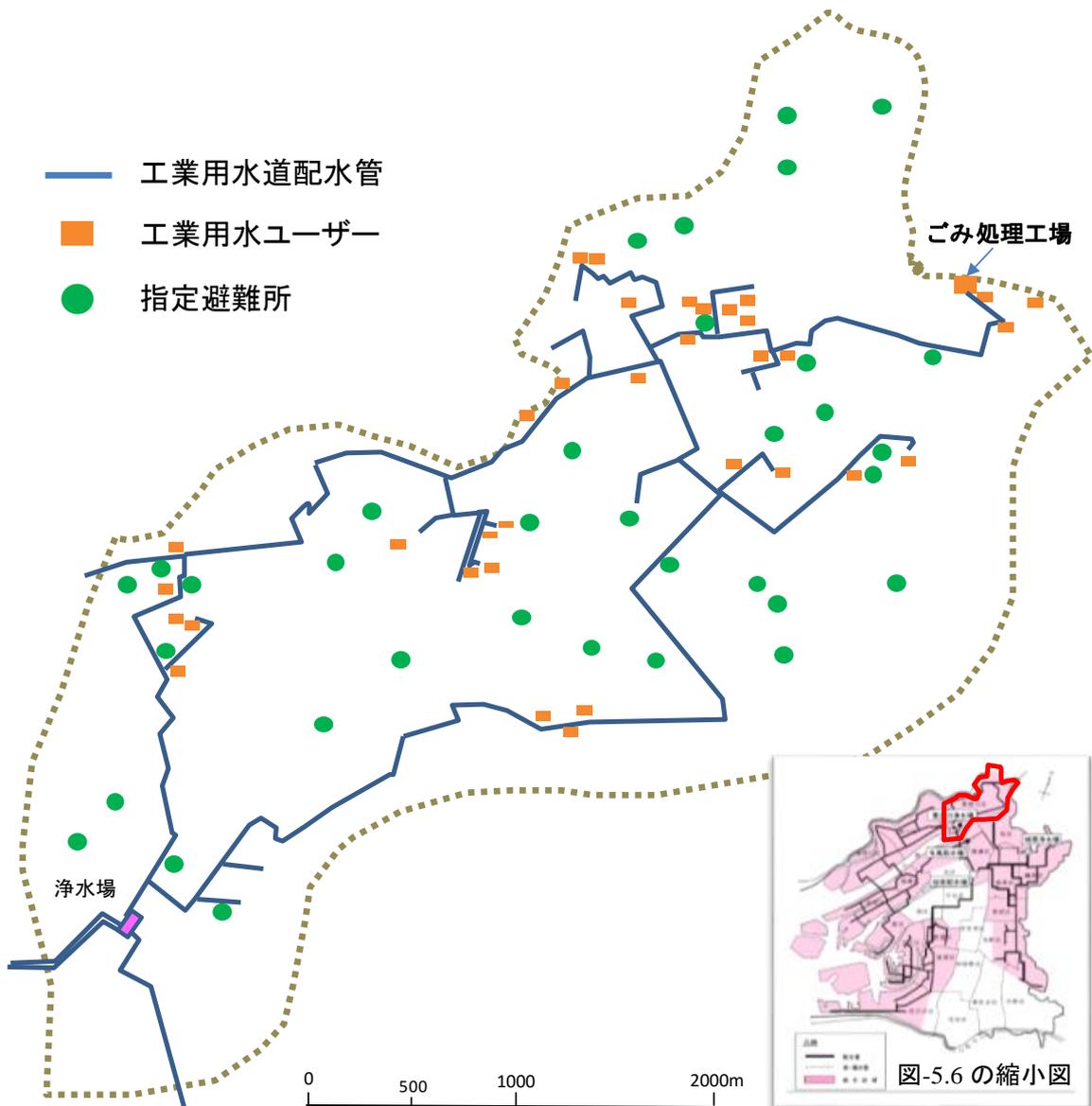


図-5.32 大阪市域における対象行政区の指定避難所と工業用水道の位置図

指定避難所に工業用水を供給できるシステムを構築する上での最大の障壁となるのは、新たな給水管の整備であろう。本論文では、これまで幾度となく実証分析のフィールドとしてきた大阪市のなかで、一つの工業用水道配水系統区域を例に指定避難所と工業用水道配水管との道路ネットワークの距離を概観しながら、新たな給水管布設整備の実現性について考察する。

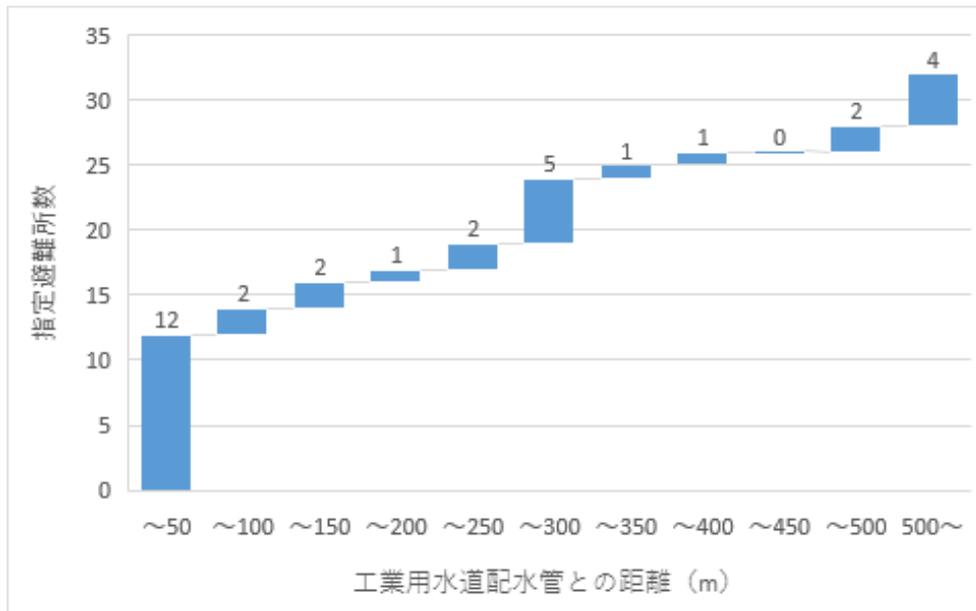


図-5.33(1) 指定避難所と工業用水道配水管とのネットワーク距離

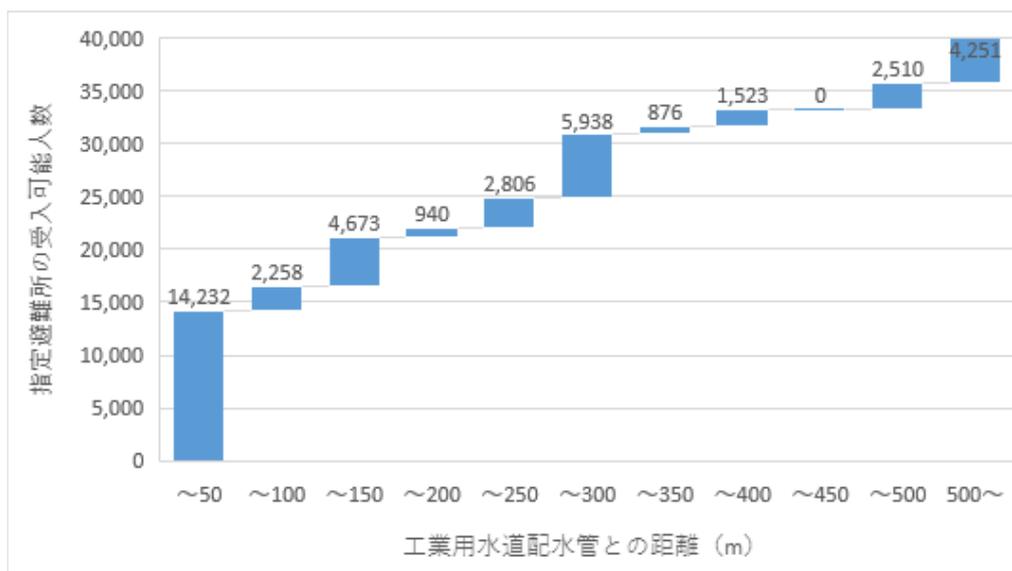


図-5.33(2) 指定避難所と受入可能人数⁴⁴⁾と工業用水道配水管とのネットワーク距離

大阪市の工業用水道給水区域（図-5.6）は広範である。大阪市域 24 行政区中 21 行政区に工業用水道の配水管路が布設されている状況にある。そのなかで「世帯数が最も多い行政区」を抽出し、工業用水道配水管と指定避難所の位置図を示したものを図-5.32 に、配水管と指定避難所とのネットワーク距離の関係をまとめたものを図-5.33(1)に、ネットワーク距離と指定避難所の受入可能人数との関係を図-5.33(2)に、対象地域内の給水人口は約 176,942 人であり、32 の指定避難所があり、その中で 12（38%）の指定避難所は給水管の布設費をほとんど要しない配水管からの距離 50m 以内に立地していることがわかった。この 12 の指定避難所の総受入可能人数は 14,232 人であり、対象地域給水人口の 8%の市民をカバーする規模であることがわかった。

5.6.4 対象地区における工業用水道の地震被害シミュレーション

表-5.8 南海トラフ巨大地震時における大阪市の上水道の配水管被害箇所数

| 総延長 5,224,400m | 配水管被害箇所数 | | (参考)管路耐震化率 | |
|----------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|
| | 市内全域 ⁴⁴⁾ | 対象行政区 ^{※)} | 市内全域 | 対象行政区 |
| 400mm 以上配水管 | 106 | 7 | 41.7% | 32.8% |
| 400mm 未満配水管 | 1,864 | 107 | 23.6% | 20.5% |
| 総計 | 1,970 | 113 | 26.2% | 22.2% |

※) 対象行政区の配水管被害箇所数は、市内全域の被害箇所数を基準に、非耐震管路延長（2015 年度末現在）の割合で按分して推計。

表-5.9 南海トラフ巨大地震時における大阪市工業用水道の配水管被害数の推計

| 総延長 293,170m | 配水管被害箇所数 ^{※)} | | (参考)管路耐震化率 | |
|--------------|------------------------|----------|--------------|-------------|
| | 市内全域 | 対象行政区 | 市内全域 | 対象行政区 |
| 400mm 以上配水管 | 42 | 3 | 17.1% | 3.8% |
| 400mm 未満配水管 | 43 | 4 | 10.8% | 5.9% |
| 総計 | 85 | 7 | 14.3% | 4.5% |

※) 表-5.8 で推定した対象行政区の配水管被害箇所数を基準に、非耐震管路延長（2015 年度末現在）の割合で按分して推計

大阪市の工業用水道に関する各種災害の被害想定については公開されていない。そこで、南海トラフ巨大地震時における上水道の被害想定（表-5.8）をベースに、対象地域の工業用水道被害を表-5.9のとおり設定した。

5.6.5 工業用水道の復旧にかかる人的資源投入のシナリオ

工業用水道の復旧曲線を推計する上で最も重要な要因は、工業用水道の復旧に人的資源がいつのタイミングでどの程度投入可能となるかという点である。5.5.1で述べたとおり、基本的に災害時における水供給事業者の緊急対応では、上水道の復旧が優先される。しかしながら、「災害復旧活動展開の基礎となる施設」、「製造ラインが停止することで、被災地域ひいては国家の経済が重大な支障を来す施設」に工業用水が多量に使用されている場合には、その供給ラインの回復に向けて、上水道の完全復旧よりも優先させて復旧させる場合があることが見受けられる²¹⁾⁻²³⁾。この考え方を図示したものが図-5.34である。同図は、A～E地区を有する被災都市をモデルケースとして、上水道および工業用水道の復旧にかかる人的資源投入配分の基本的な考え方を示したものである。



図-5.34 災害時における上水道および工業用水道の復旧にかかる人的資源投入配分の基本的なシナリオー A～E地区を有する被災都市のモデルケースー

対象地域を概観すると、工業用水のユーザー数は 35 であり、指定避難所数とほぼ同数である。基本的にはユーザーのほとんどは企業の工場であるが、その一つに廃棄物処理工場が存在している。この廃棄物処理工場は大阪市域の 4 行政区の家庭系・事業系ごみの受入および焼却を行う施設であり、大阪市廃棄物処理計画の中核施設である。災害によって排出された廃棄物の処理を迅速に行うことは、被災地域の環境保全及び衛生面の観点から極めて緊急度の高い。また、本論文では、災害事象のケーススタディとして南海トラフ巨大地震を設定しており、広範な広域災害となるため、他自治体への代替処理も極めて難しい。防災拠点となる廃棄物処理場のごみ貯留日数は、一般に 7 日分は確保されていることが求められる⁴⁵⁾。よって災害発生後 7 日経ってもごみ処理場の再開ができない場合には、被災地域に生ごみが仮置されることとなる。

以上を踏まえ、本論文では、対象地域内に立地するごみ処理場に至る工業用水供給ルートについては発災後 7 日以内に復旧させることとし、その他については上水道の完全復旧後に行われるものとして、工業用水道の復旧曲線を推計した。なお、上水道の完全復旧後に行われる工業用水道の復旧作業は、それまで上水道に復旧していた復旧人員数より多く配置されることは考えにくい。大阪市内の上水道が復旧するまでに要する期間は 41 日⁴⁶⁾、全被害数は表-5.8 のとおり、上水道の復旧作業歩掛は表-5.10 のとおり設定できるため、大阪市内の上水道復旧にかかる人員投入は 203.4 (人/日) である。この人員が表-5.9 に示す大阪市内全域の工業用水道復旧に当たると考えれば、対象行政区に当てられる工業用水道復旧人員は、17.6 (人/日) ということになる。

表-5.10 上水道の復旧作業歩掛 (職員)

| 項の説明 | 係数值 |
|----------------------------|------|
| φ 500以上管路等の復旧作業歩掛 (人・日/箇所) | 10.5 |
| φ 500未満管路等の復旧作業歩掛 (人・日/箇所) | 1.5 |

注) 表-5.5の考え方、および関西水道事業研究会 (1996)⁴⁷⁾ の検討結果に基づき設定

表-5.9に基づくと、工業用水道の配水管路被害率は、口径 400mm 以上で 0.19 箇所/km、口径 400mm 未満で 0.55 箇所/km となり、この被害間隔を平均値としたポアソン乱数を発生させ、モンテカルロシミュレーションにより被害箇所を特定し、プロットした結果は、図-5.35 のとおりとなった。併せて、同図にはごみ処理場に至る最短ルートについても明示した。これより、ごみ処理場に至る工業用水供給ルート上に口径 800mm と 600mm の 2 箇所の配水管被害があり、これを優先復旧させるというシナリオを描いた。

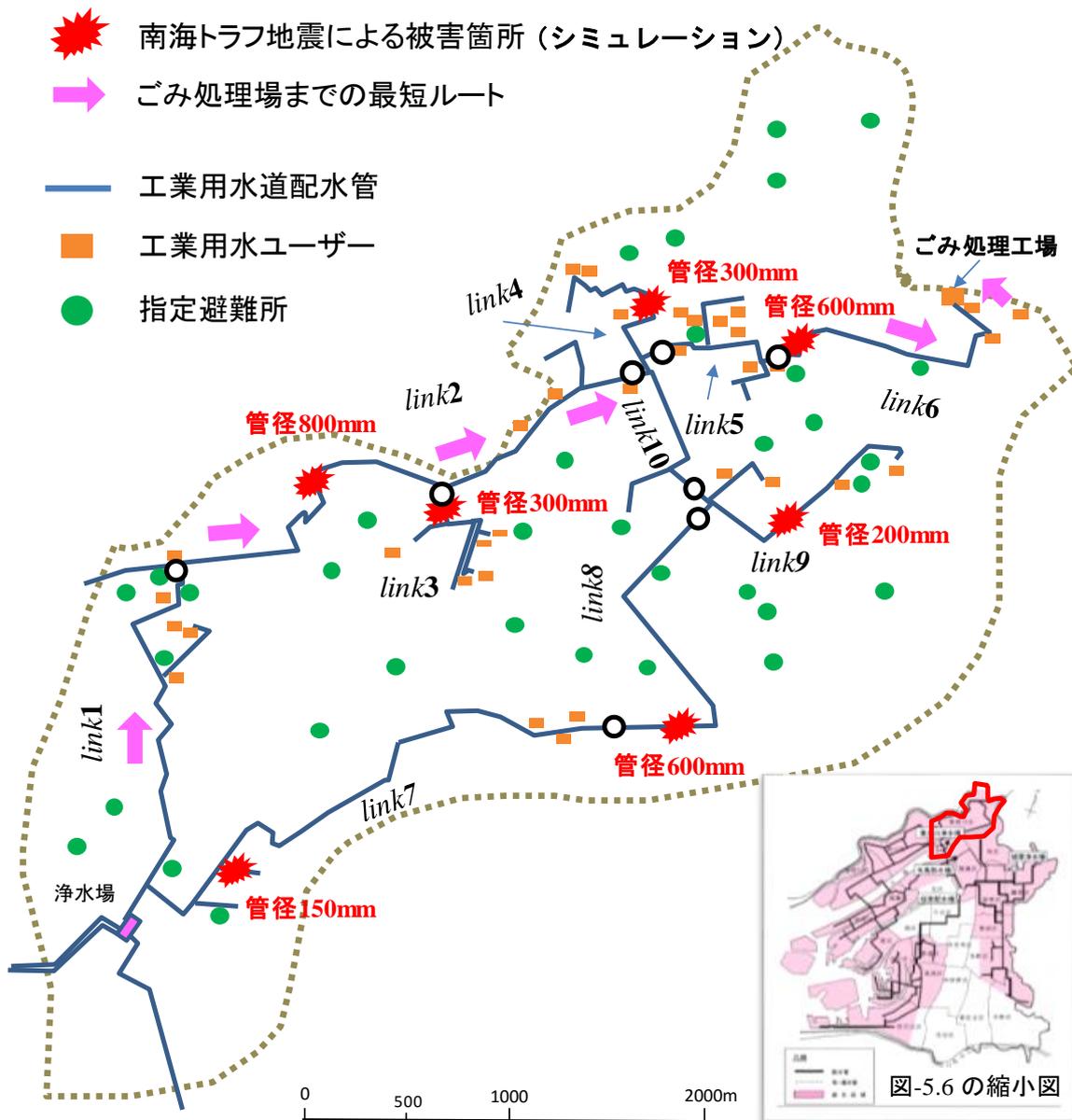


図-5.35 南海トラフ巨大地震時における管路被害箇所とごみ処理場までのルート

5.6.6 対象地区における工業用水の余剰水量

指定避難所の避難者に工業用水の余剰水が供給するとしても、収容者に行き渡る十分な量が確保できるのかという懸念が残る。

対象行政区における工業用水の余剰水量を示せば、図-5.36 のとおりとなった。

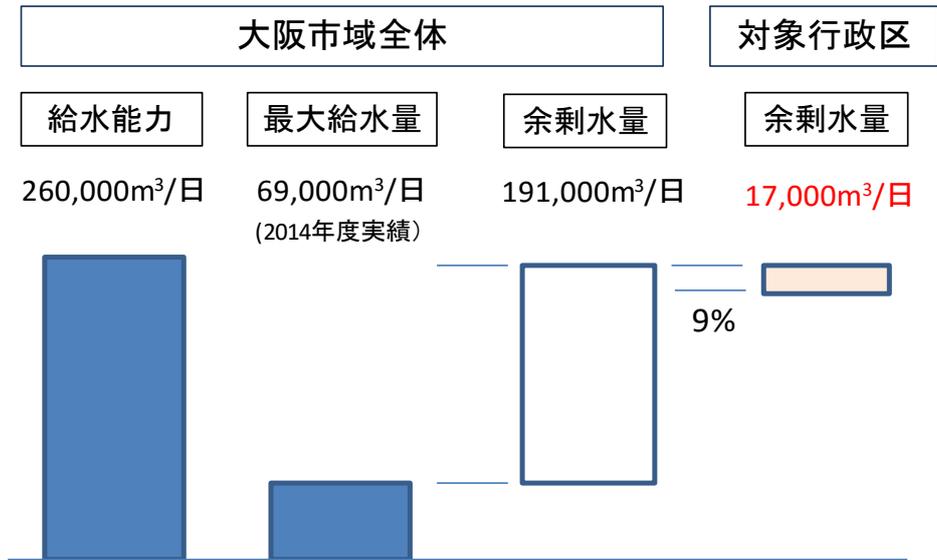


図-5.36 対象行政区における工業用水の余剰水量

対象行政区における指定避難所全体の受入可能人数は 40,007 人であり，仮に避難所生活者が平時と同水準の水需要であったとしても，必要水量は 10,402 m³/日にとどまり，十分カバーできる量となっている。

5.6.7 対象地区における工業用水道の復旧曲線の推計

表-5.11 対象行政区における工業用水道の被害復旧想定モデル化

| | Main-Link | | 被害数 | | Sub-Link | | 被害数 | | 工水ユーザー | 通水率 | 復旧順 | 所要日数 | |
|---|-----------|------------|------------|-----|------------|------------|-------|---|--------|-----|-----|---------|--|
| | i | d^{m1}_i | d^{m2}_i | i | d^{s1}_i | d^{s2}_i | u_i | | | | | | |
| ① | 1 | 0 | 0 | ① | 1 | 0 | 0 | 5 | 14.3% | 1 | 0.0 | | |
| ② | 2 | 1 | 0 | ② | 2 | 0 | 0 | 3 | 22.9% | 2 | 3.5 | | |
| ⑤ | 5 | 0 | 0 | ⑤ | 5 | 0 | 0 | 8 | 45.7% | 3 | 0.0 | | |
| ⑥ | 6 | 1 | 0 | ⑥ | 6 | 0 | 0 | 4 | 57.1% | 4 | 3.5 | ごみ処理場通水 | |
| ⑧ | 8 | 1 | 0 | ⑧ | 8 | 0 | 0 | 0 | 57.1% | 5 | 2.4 | | |
| ⑩ | 10 | 0 | 0 | ⑩ | 10 | 0 | 0 | 0 | 57.1% | 6 | 0.0 | | |
| ③ | 3 | 0 | 1 | ③ | 3 | 0 | 0 | 5 | 71.4% | 7 | 0.3 | | |
| ④ | 4 | 0 | 1 | ④ | 4 | 0 | 0 | 3 | 80.0% | 8 | 0.3 | | |
| ⑨ | 9 | 0 | 1 | ⑨ | 9 | 0 | 0 | 4 | 91.4% | 9 | 0.3 | | |
| ⑦ | 7 | 0 | 0 | ⑦ | 7 | 0 | 1 | 3 | 100.0% | 10 | 0.3 | | |

注) Link No.は，図-5.35 に準ずる。

5.6.5 の考え方をベースにした対象行政区における工業用水道の復旧曲線は、図-5.37（各リンクの被害復旧想定：表-5.11）のとおりとなった。なお、同図中における上水道の復旧曲線については、既存の調査報告⁴⁶⁾を所与とし設定している。

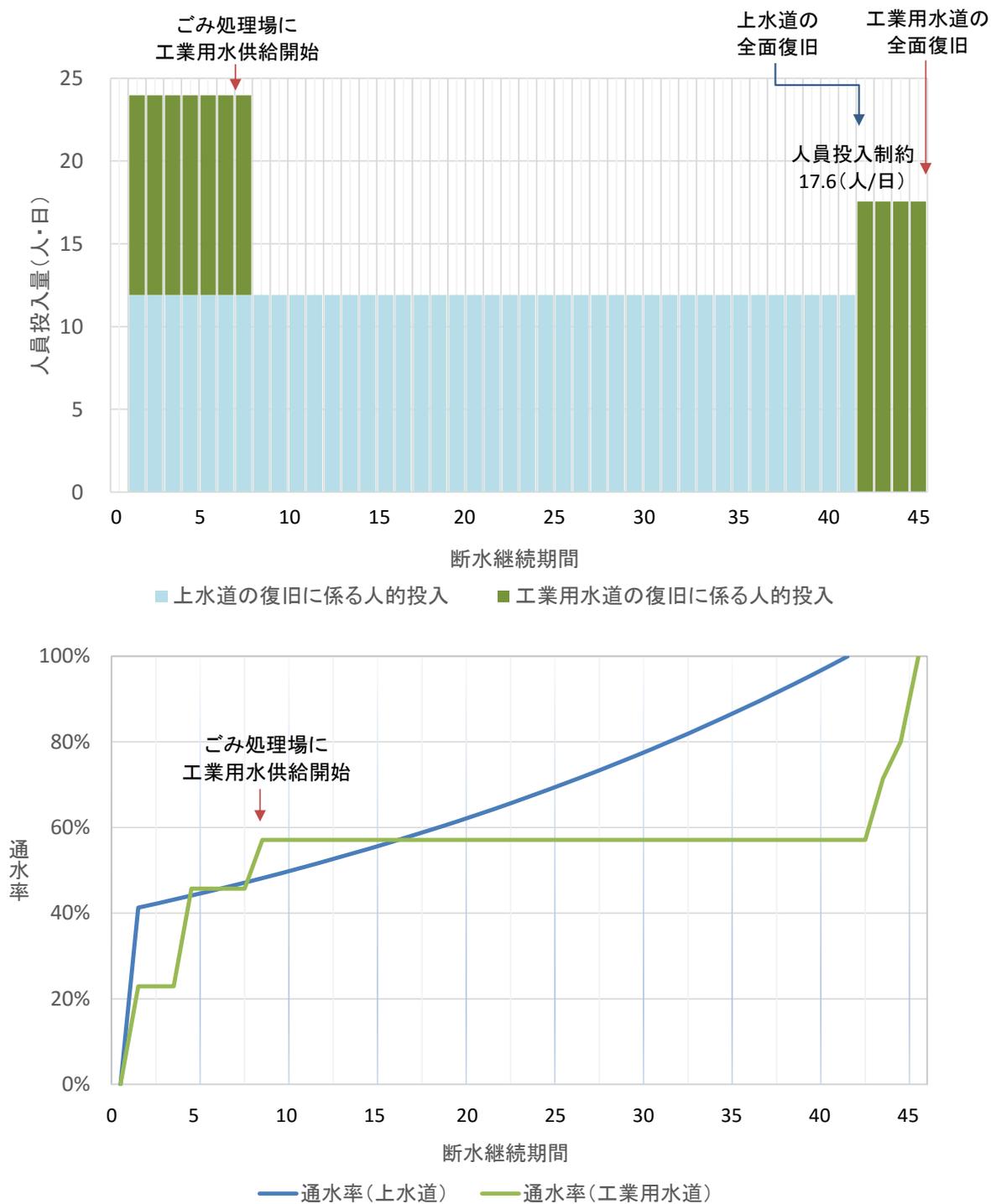


図-5.37 対象行政区における工業用水道の復旧曲線

ごみ処理場までの供給ルートに多くのユーザーがあるため、その復旧を優先させる結果として、発災1週間後には約66%という高い通水率を確保できることがわかった。

5.6.8 対象地区における避難生活用水需要のカバー率の変化

表-5.12 対象行政区における工業用水道の被害復旧想定と各リンクの指定避難所数

| | Main-Link | | | Sub-Link | | | 指定避難所数 | 通水率 | 復旧順 | 所要日数 | | |
|-----|-----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------|-----|--------|------|-----|---------|
| | i | d^{m1}_i | d^{m2}_i | i | d^{s1}_i | d^{s2}_i | | | | | | u_i |
| ① | 1 | 0 | 0 | ① | 1 | 0 | 0 | 6 | 18.8% | 1 | 0.0 | |
| ⑦-1 | 7 | 0 | 0 | | | | | 3 | 28.1% | 2 | 0.0 | |
| ② | 2 | 1 | 0 | ② | 2 | 0 | 0 | 2 | 34.4% | 3 | 3.5 | |
| ⑤ | 5 | 0 | 0 | ⑤ | 5 | 0 | 0 | 3 | 43.8% | 4 | 0.0 | |
| ⑥ | 6 | 1 | 0 | ⑥ | 6 | 0 | 0 | 2 | 50.0% | 5 | 3.5 | ごみ処理場通水 |
| ⑧ | 8 | 1 | 0 | ⑧ | 8 | 0 | 0 | 6 | 68.8% | 6 | 2.4 | |
| ⑩ | 10 | 0 | 0 | ⑩ | 10 | 0 | 0 | 1 | 71.9% | 7 | 0.0 | |
| ③ | 3 | 0 | 1 | ③ | 3 | 0 | 0 | 1 | 75.0% | 8 | 0.3 | |
| ④ | 4 | 0 | 1 | ④ | 4 | 0 | 0 | 3 | 84.4% | 9 | 0.3 | |
| ⑨ | 9 | 0 | 1 | ⑨ | 9 | 0 | 0 | 5 | 100.0% | 10 | 0.3 | |
| | | | | ⑦-2 | 7 | 0 | 1 | | 100.0% | 11 | 0.3 | |

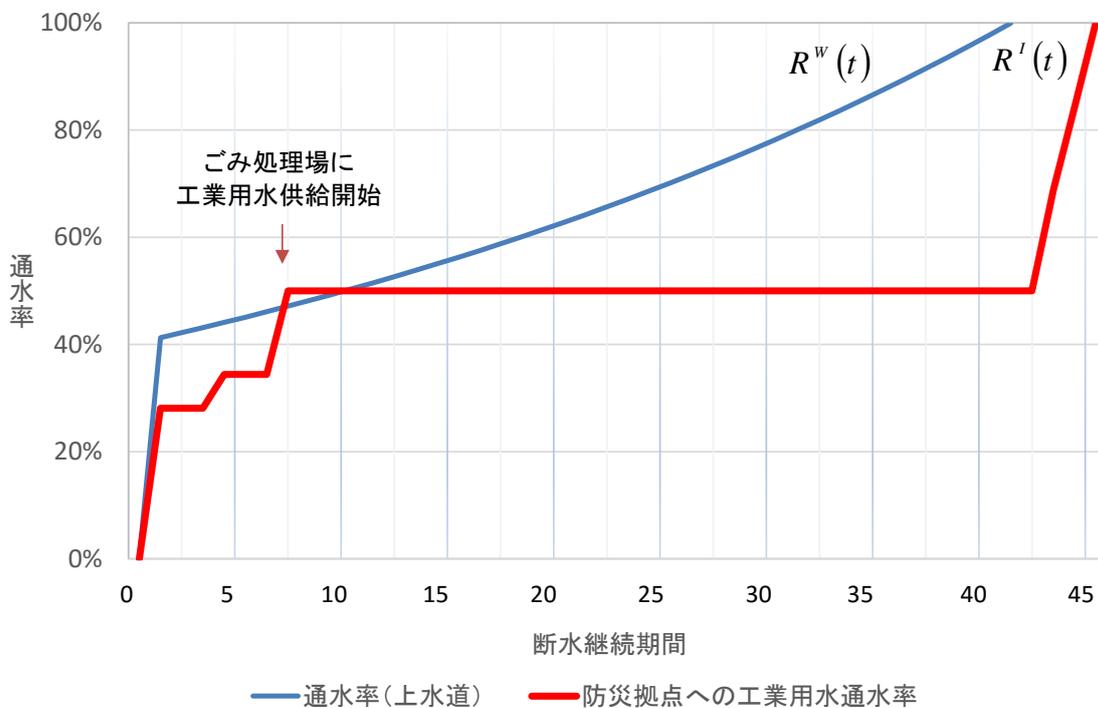


図-5.38 対象行政区の指定避難所における工業用水の通水曲線

続いて、指定避難所へ工業用水道給水管（耐震管路）が整備されていると仮定する。その際、避難所における工業用水の通水曲線（各リンクの被害復旧想定：表-5.12）は図-5.38（各リンクにぶら下がっている指定避難所数：表-5.12）のとおりとなった。ここで同図において、 $R^w(t)$ と $R'(t)$ はそれぞれ指定避難所における上水道および工業用水道の通水率を示している。

上水道と工業用水道の二元給水が実現した指定避難所の災害時における期待通水率は、どのように表現されるであろうか。 $R^w(t)$ と $R'(t)$ は、それぞれ独立した水供給システムの災害時信頼度の回復曲線を表現するものと捉えれば、二元給水システムは並列システム（片方の給水システムが途絶しても、もう一方の給水システムから水が確保できるシステム）となるため、その期待通水率 $R^{ww}(t)$ は、次式で表すことができる。

$$R^{ww}(t) = 1 - (1 - R^w(t))(1 - R'(t)) \quad (5.12)$$

なお、5.6.2で既に分析したとおり、工業用水が指定避難所における全水使用用途の需要をカバーできるかといえ、その様にはならない。しかしながら、南海トラフ地震時における大阪市域のケーススタディと通じて、発災後12日目の需要の73%が工業用水でカバーできるとの結果を得ている。このような需要転換可能率を $r_q(t)$ とし、式(5.1)における記号を用いて表現すれば、その推計は式(5.13)のように導出され、式(5.12)は式(5.14)のとおり表される。

$$r_q(t) = \frac{QD(t|L2) + QD(t|L3)}{QD(t|L1) + QD(t|L2) + QD(t|L3)} \quad (5.13)$$

$$R^{ww}(t) = 1 - (1 - R^w(t))(1 - r_q(t)R'(t)) \quad (5.14)$$

一方、避難所の需要推計についても重要な課題である。避難所生活者と在宅被災者との水需要の差異を推計した調査研究事例は皆無に等しい。そこで本研究では、第3章で推計した被災者の災害時における水需要は、避難所生活者の水需要と大きく差異はないものとして考えた。

よって、災害発生後 t 日目の避難所生活者数を $p_r(t)$ とすると、対象行政区における避難所生活者の生活用水需要（ m^3 /日）は次式で表すことができる。

$$QD^r(t) = q_k p_{ir}(t) F_k(t) \quad (5.15)$$

ここに、 $F_k(t)$ は 3.3 で推計された被災者の断水受忍限度を表す関数と同様である。 q_k は平時における生活用水使用用途の一人一に水使用量原単位である。対象行政区における $p_r(t)$ の想定は図-5.39のとおりである。

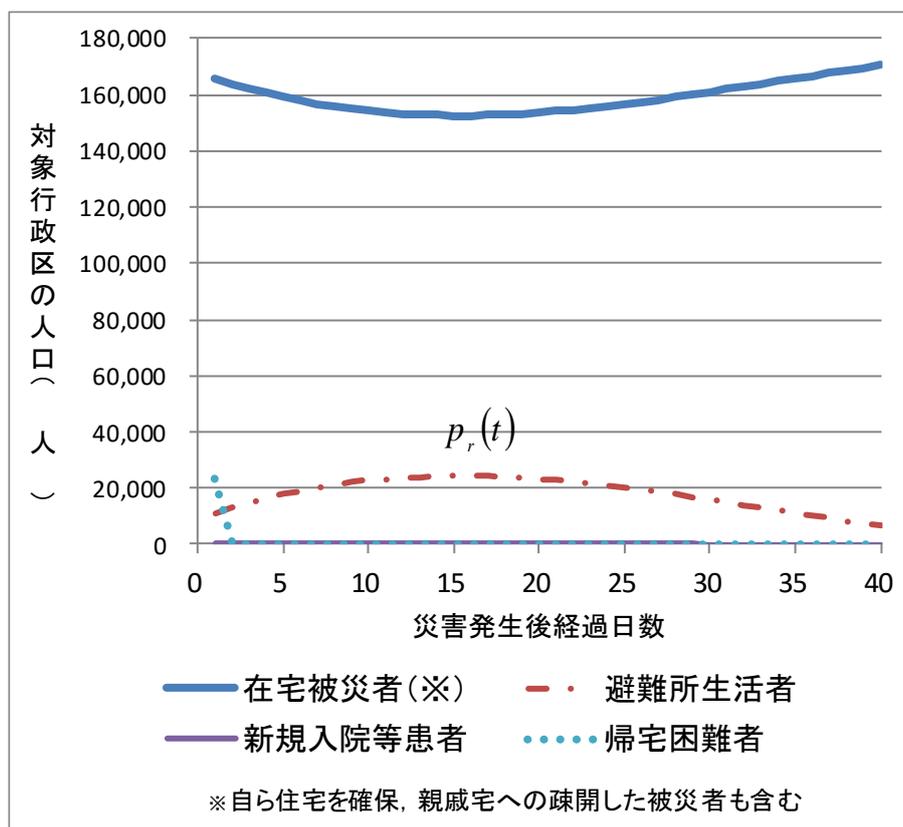


図-5.39 南海トラフ巨大地震時における対象行政区の避難所生活者数の想定
(第5回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会⁴⁶⁾のデータより推計)

対象行政区における水需要推計結果は、図-5.40のとおりとなった。被災者を避難所生活者と在宅被災者に分けて推計している。図-3.18の大阪市域全体の水需要と比べれば、都市活動用水の需要が全体に占める割合が小さいことがわかる。そして、大阪市域全体の結果では発災当日に爆発的な消火用水需要が発生していたが、当該行政区では地震時火災の発生が予測されていない⁴⁶⁾ため、そのような需要も発生しないという結果というのが特徴的であった。

続いて、指定避難所における水需要のカバー率（従前の上水道のみが供給されるケースと、工業用水も供給されるケースの2ケースを記載）に着目した推計結果を図-5.41に示す。

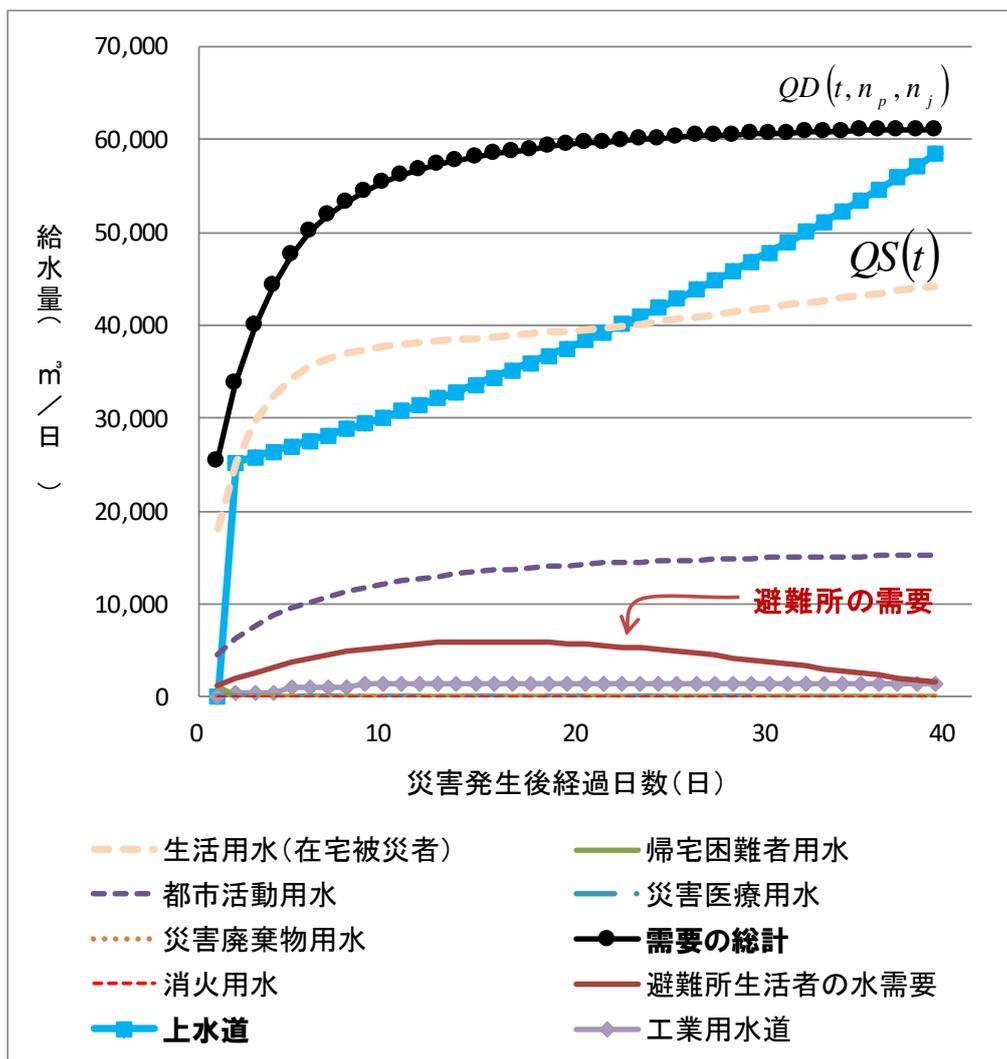


図-5.40 南海トラフ巨大地震時における対象行政区の水需要推計結果（用途別）

避難所における水需要がピークに達するのは発災後 16 日目であり、工業用水についても供給可能とすることにより、そのときの水需要カバー率が 56%から 73%と 17 ポイント高まる結果となった。これより避難所の水不足を完全に解消するまでには至らないものの、その軽減には十分寄与するものであることが確認できた。

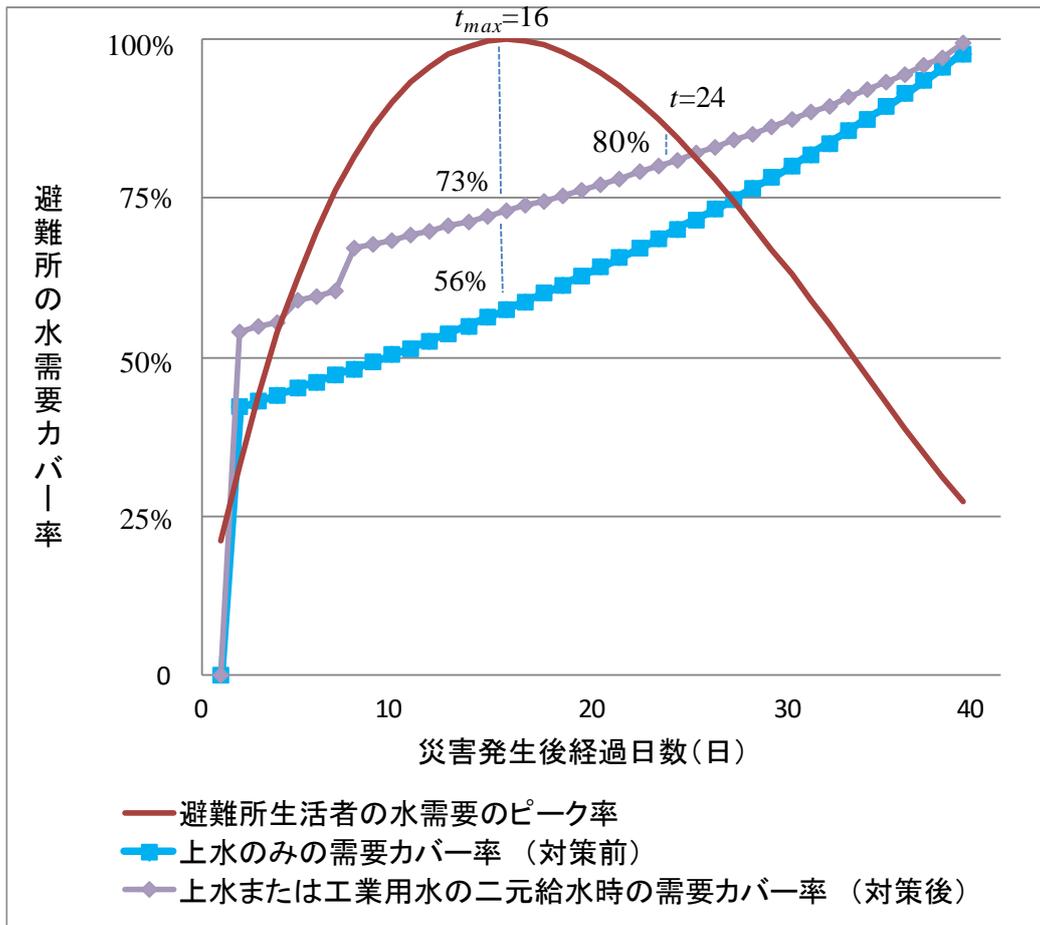


図-5.41 指定避難所における水需要のカバー率 (対象行政区全体平均)
 ～標準的なシナリオに基づく工業用水道の復旧～

5.6.9 上水道および工業用水道の復旧人員投入配分の変更による効果

前節では、標準的な工業用水道の復旧人員投入シナリオの下での分析であったが、工業用水道が指定避難所への給水ルートを持つ存在になれば、上水道との復旧バランス配分にも変化する可能性がある。

本節では、上水道と工業用水道の同時復旧を目指すために、投入人員総数は一定としたなかで、復旧人員投入配分を図-5.42のとおりに変更した場合の避難所における水不足の軽減効果を分析した。その結果、上水道の復旧速度はやや減速するものの、工業用水道の復旧速度が大幅に向上することで、図-5.43に示すとおり、特に避難所の水需要がピークを迎えた16日目以降は、図-5.41で示した結果を上回る水準（17日目より80%以上の需要カバー率）でそれをカバーする効果が期待できることがわかった。

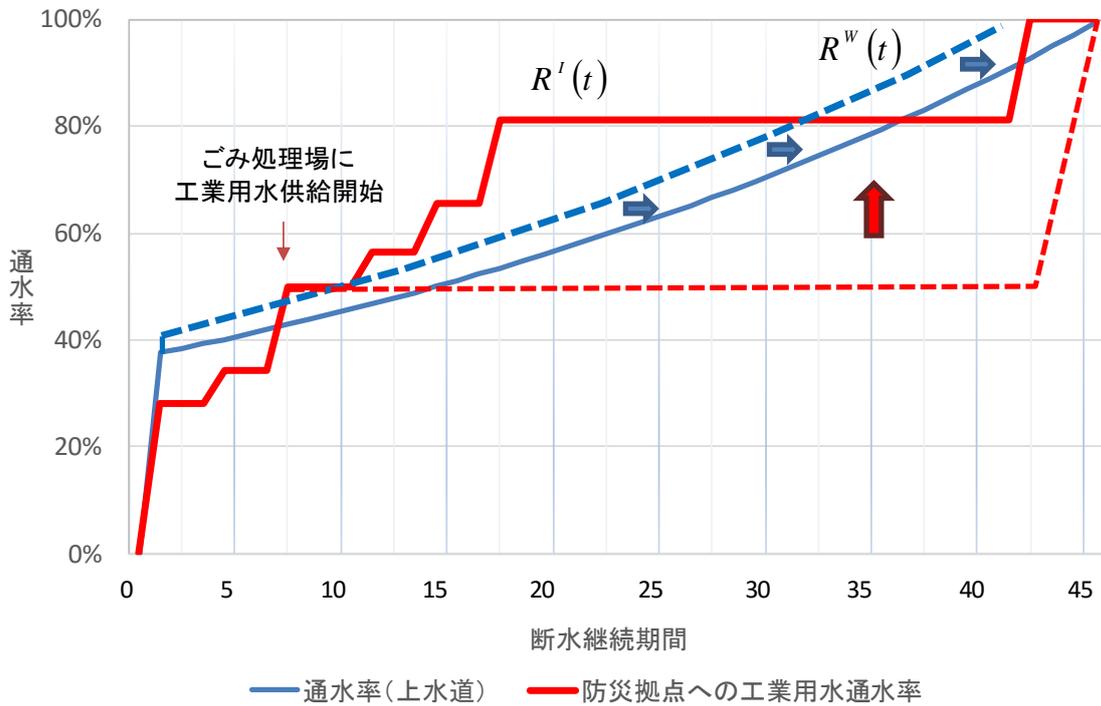
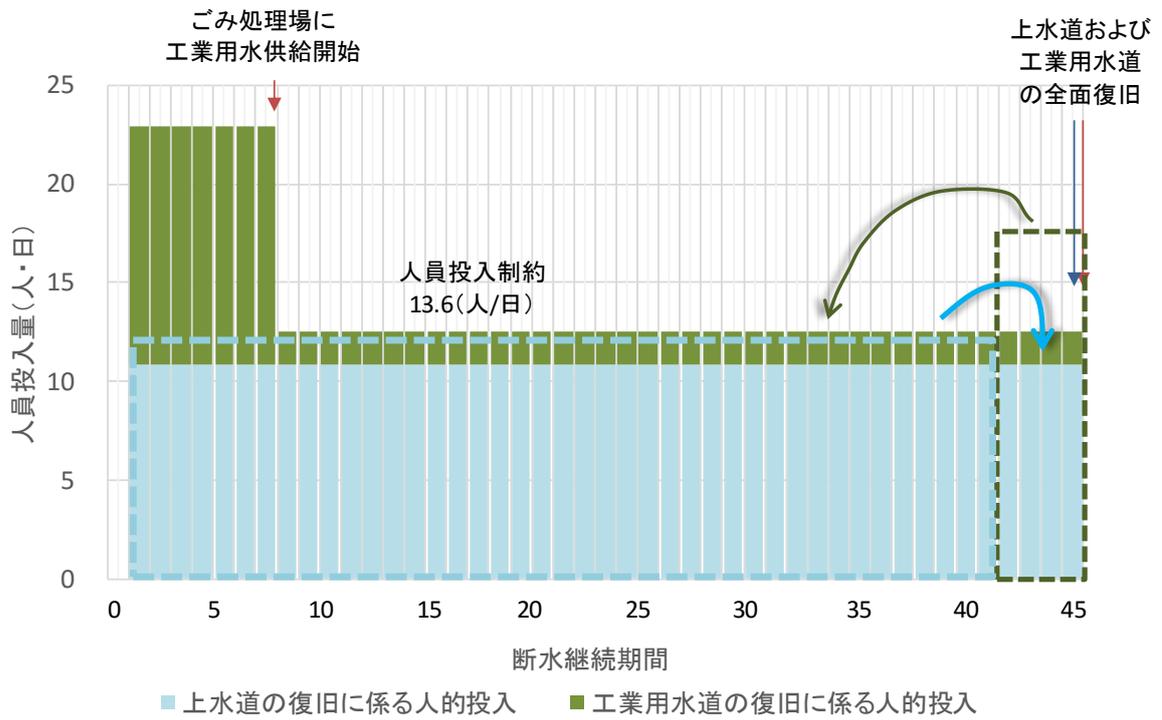


図-5.42 対象行政区における工業用水道の復旧曲線
～上水道と工業用水道の同時復旧を目指す復旧人員配分に変更後～

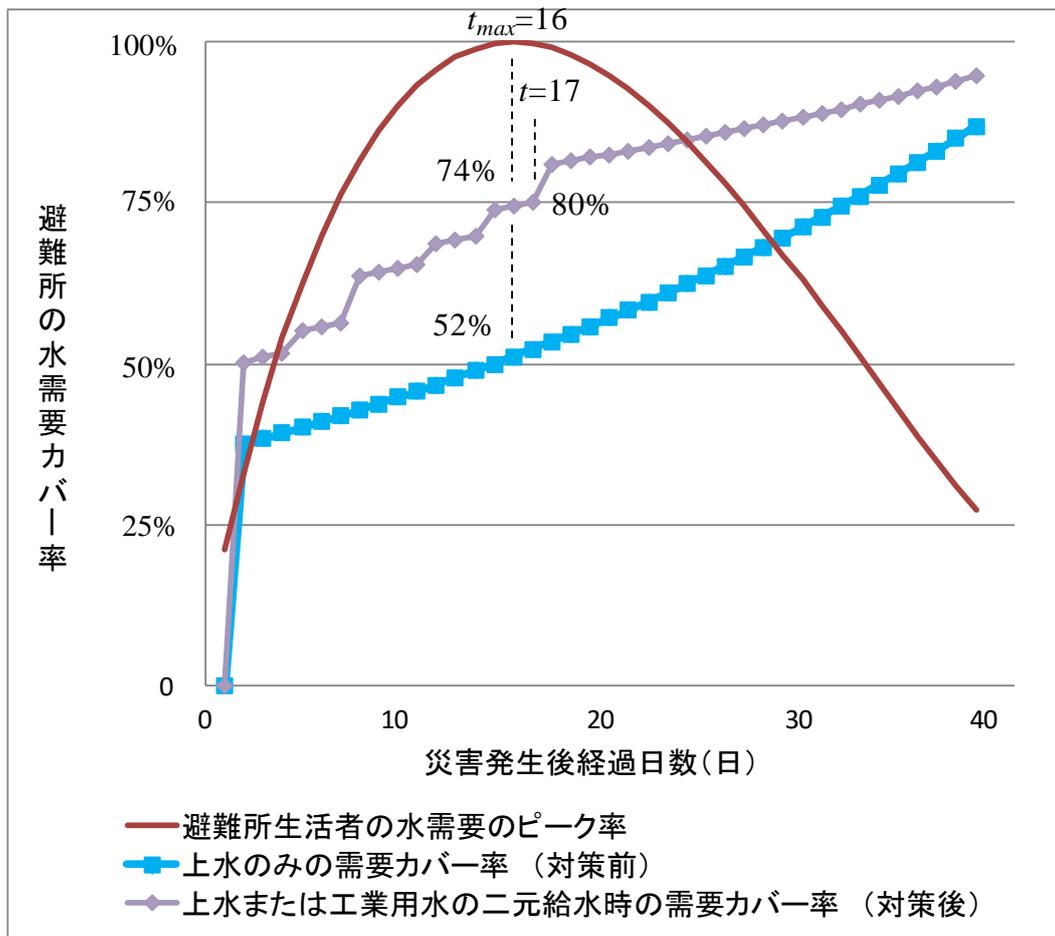


図-5.43 指定避難所における水需要のカバー率 (対象行政区全体平均)
 ～上水道と工業用水道の同時復旧を目指す復旧人員配分に変更後～

今回の分析結果は、対象地域をマクロ的に捉えたものであるが、実際の水道の復旧プロセスは、細かい街区レベルで大きなコントラストが発生してくる。そのため、地域全体の通水率が高いものの、ある地区では避難所に至る上水道ルートが大幅に遅延するといった状態があり得るため、そういった街区に立地する避難所に工業用水の供給だけでも早期確保されていれば、避難所生活者の衛生環境の保持などに大きな役割を果たすものと考えられる。

5.7 結語

本章では、災害水需要マネジメントのひとつの施策である代替水資源の有効活用を図ることで、低水質な水への需要転換を応急的に促す取組について分析した。

災害時の水需要を、体内に入る、体に触れる、体に触れないという3つの水質レベル別に推計するとともに、上水道水をはじめ雨水（貯留内水）、地下水（井戸水）、工業用水（余剰水）、下水処理水・再利用水についても同様の水質レベルへの当てはめを行い、災害時の需給マッチングを評価した。また、それらの代替水資源を水質、水質、水圧（輸送）の3要素から分析し、災害時有効活用のポテンシャル評価を行うことで、工業用水（余剰水）が有望であることを明らかにした。

また、大阪市工業用水道給水区域におけるひとつ行政区を対象とした分析を通じて、既設の工業用水道配管と指定避難所とのネットワーク距離を計測した結果、全体の38%の避難所が給水管の布設費をほとんど要しない位置に存在していること、そして、それらの指定避難所に工業用水道給水管を整備し工業用水の供給を可能とした場合には、避難所の期待水確保量は上昇し、上水道が途絶した避難所においても工業用水については確保可能という局面が十分想定できることが示唆され、避難所生活者の衛生環境の保持などに有用であることを示した。

なお、本研究で扱った代替水資源について、災害時に迅速かつ効率的に入手できるインフラ環境は整っているかといえば、多くの地域、とりわけ都市域では不十分な状態である。本研究のケーススタディで示した指定避難所に工業用水を入手する場合においても、多かれ少なかれ新たな給水管の布設整備を要することとなる。多くの地域において不十分な状態である。よって、それらの追加投資を含めた費用対効果などを行い、総合的な災害有効活用ポテンシャルの評価を加えることが望まれる。

参考文献

- 1) 谷口真人・中島誠：シンポジウム「震災時の非常用水源としての地下水利用の在り方」、地下水学会誌第55巻第1号 pp.37-64, 2013.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：平成24年版日本の水資源
- 3) （公社）空気調和・衛生工学会：新版 災害時の水利用 飲める水・使える水、丸善

- 出版, 2013
- 4) 厚生労働省医薬・生活衛生局 生活衛生・食品安全部水道課長（通知），水質異常時における摂取制限を伴う給水継続の考え方について，生食水発 0331 第 2 号，2016.3.31
 - 5) 堀江典子・萩原清子：多基準分析の今日的意義と課題，総合都市研究，No.82，2003
 - 6) Department for Transport, Local Government and the Regions (DTLR), Multi Criteria Analysis: A Manual, 2001
 - 7) 田村垣之・中村豊・藤田眞一：効用分析の数理と応用，コロナ社，1997
 - 8) (一社)日本工業用水協会：災害時における工業用水の有効活用に係る取り組み報告書，2014 年 3 月
 - 9) 経済産業省産業施設課：今後の施策展開について（準公共財としての工業用水道による社会貢献について），産業構造審議会地域経済産業分科会，第 5 回工業用水道政策小委員会資料，2015 年 5 月 13 日
 - 10) 大阪市水道局：大阪市の水道技術 2012
 - 11) 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社（経済産業省業務委託）：平成 22 年度 工業用水道事業調査（地震被害想定調査事業）報告書，平成 23 年 3 月
 - 12) 経済産業省：工業用水，http://www.meti.go.jp/policy/local_economy/kougyouyousui/
 - 13) (一社)日本工業用水協会 WEB サイト：全国の施設の概要，http://www.jiwa-web.jp/database/gaiyo_index.html
 - 14) (社)日本水道協会：水道統計（平成 25 年度）施設・業務編，第 96-1 号，2013
 - 15) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録，平成 8 年 2 月
 - 16) (社)日本工業用水協会：2011 年東北地方太平洋沖地震に係る工業用水道施設の被災状況調査報告書，平成 24 年 3 月
 - 17) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，ライフライン施設の被害と復旧，1997
 - 18) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書，平成 25 年 3 月
 - 19) 経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会電気設備地震対策ワーキンググループ（第 2 回） - 配付資料，平成 23 年 11 月
 - 20) 経済産業省総合資源エネルギー調査会都市熱エネルギー部会ガス安全小委員会災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書，平成 24 年 3 月

- 21) 宮城県企業局:東日本大震災からの復旧・復興に向けた宮城県企業局の対応と取組, 平成 27 年 3 月
- 22) 福島県企業局: 県営工業用水道 東日本大震災記録誌 (概要版), 平成 27 年 2 月
- 23) 武市淳・楢田泰子:地震時工業用水供給停止による受水企業への波及, 地域安全学会論文集 No.11, p.267-274, 2009.11
- 24) 能島暢呂・杉戸真太・鈴木康夫・石川裕・奥村俊彦:震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル, 土木学会論文集 No.724, I -62, 225-238, 2003.
- 25) Osaka City Waterworks Bureau: 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.
- 26) Kobe Municipal Waterworks Bureau: 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.
- 27) 能島暢呂・杉戸真太・石川裕・奥村俊彦・澤田彩:地震時における供給系ライフラインの復旧予測モデルの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 平成 13 年 10 月
- 28) 高田志郎, 原山絵巳子, 今西立彦:兵庫県南部地震における水およびガス供給被災復旧の時空間分析, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol.7, pp.213-235, 2003.3
- 29) 楢田泰子・岡本祐:東北地方太平洋沖地震における断水長期化要因の解明, 地域安全学会論文集 No.17, 2012.7
- 30) 常松芳昭:管路水輸送システムのグラフ理論的解析, 土木学会論文報告集, Vol. No. 229, p.21-30, 1974
- 31) 星谷勝・小池精一・宮崎正敏:上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測, 土木学会論文報告集, No.322, pp.25-35, 1982.
- 32) 星谷勝・宮崎正敏:上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測, 土木学会論文報告集, No.331, pp.45-54, 1983.
- 33) 清水康生・萩原良巳・西村和司:グラフ理論による大都市域水循環圏ネットワークの構造安定性の評価, 環境システム研究論文集, Vol. 30, p.265-270, 2002.
- 34) 日本水道協会:水道維持管理指針, p.909, 1998.
- 35) 関根智明:PERT-CPM, 日科技連, 1975.
- 36) 吉澤源太郎・畑山満則・多々納裕一:人的資源投入を考慮した工業用水道の災害時

- における復旧予測モデル, 自然災害科学 JJSNDS, 2017
- 37) 宮城県 WEB サイト, 仙塩工業用水道事業について, <http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/suido-kanri/senen-kougyouyou-suidou1.html>
- 38) 厚生労働省: 水道の耐震化計画等策定指針, 2008.3
- 39) 阪神淡路大震災の記録 別巻「資料編」, ぎょうせい, 1996
- 国土交通省近畿地方整備局 WEB サイト, 阪神・淡路大震災の経験に学ぶ 震災時における社会基盤利用のあり方について, <http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/daishinsai/index.html>
- 40) 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
- 41) 日本トイレ研究所: 東日本大震災 3.11 のトイレ現場の声から学ぶ一, 2013.3
- 42) (公財)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 共同研究) 第 2 研究委員会「災害・危機管理対策」平成 24 年度～26 年度成果報告書, 2015.12
- 43) (社)日本水道協会: 震災等の非常時における水質試験方法 (上水試験方法一別冊), 2012 年 3 月
- 44) 大阪市地域防災計画, 2014
- 45) 公益財団法人廃棄物・3R 研究財団: 平成 25 年度地域の防災拠点となる廃棄物処理施設におけるエネルギー供給方策検討委託業務, 平成 25 年度環境省委託業務報告書, 2014.3
- 46) 第 5 回大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会, 2014.1.24
- 47) 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, 1996

第6章 結論

6.1 結果の総括

災害時の水需給逼迫下における断水被害を軽減させるための対策は、大きく需要側の対策と供給側の対策に分けて考えることができ、わが国をはじめ諸外国の多くもまた、水道施設の耐震化や水源開発といった後者の供給側の対策に傾注してきたところである。しかしながら、近年、財源確保の難しさなどが顕在化し、その対策にも限界がある。

本研究では、需要側の対策に着目した。需要側の対策とは“災害時の水需給が逼迫している状況下において、著しく低下した水供給のレベルに応じた需要調整を目指すことで、需給バランスの安定化を目指し、断水被害を軽減させるためのマネジメント”である。本研究では、こうした需要側の対策を「災害水需要マネジメント」と称し、その体系化とその適用手法の構築に向けた検討を行い、以下の知見を得ることができた。

第2章では、災害水需要マネジメントの体系化に向けて、水需要マネジメント（Water Demand Management: WDM）に関する既存概念の整理し、災害時を想定した場合に必要な次の概念を明らかにした。

- 従来のWDMの射程にはない、自然災害特有の突発性と一過性、供給施設の物理的被害を伴う断水被害の顕在化を考慮した。
- 災害水需要マネジメントのひとつの効果測定指標として、断水受忍限度（災害断水時に被災者が生活し被災企業が営業するなかで、断水の継続が我慢できないようになる平均的な範囲）を提案した。
- 災害時における被災者や被災企業の水需要は、断水受忍限度に依存する。そして、断水が長期に及ぶと、社会の断水受忍限度を超過するため、断水被害として顕在化する。災害水需要マネジメントとは、この断水受忍限度の引き上げを目指すことで、断水被害を軽減させるためのマネジメントであるという概念を整理した。

また、災害水需要マネジメントの施策体系としては、心理的方略（psychological strategy）と構造的方略（structural strategy）に大別でき、さらに構造的方略については、技術的方略（technological strategy）とそれ以外という枠組みで説明できることを示した。

- 心理的方略（psychological strategy）：

コミュニケーションを通じた需要低減への啓発—リスクコミュニケーションの展開，水道応急復旧戦略および応急給水戦略に応じた一クライシス段階でのコミュニケーションの展開，コミュニケーションを通じた共助意識の醸成—水の分け与え行動への変容

- 構造的方略（structural strategy）：
給水制限，水質基準を下回る水道水の応急的通水措置に伴う摂取制限
- 技術的方略（technological strategy）：
多様な水資源（低水質水）の活用による需要転換，断水に対応した代替財・サービスの活用による需要代替

第3章では，災害水需要マネジメントの構築において重要な指標である，災害時の「需要」と「断水受忍限度」の推計を行い，次の知見を得た．

- 被災者の健康および衛生環境の保持，ならびに被災企業の営業損失の回避という観点から，それぞれの断水受忍限度と水需要に関する定量的推計手法を構築した．
- 断水受忍限度の推計に当たっては，被災者の断水受忍限度が最も小さいのは飲用水よりもトイレ用水であることを明らかにするとともに，被災企業の断水受忍限度については，製造業では食料品業，鉄鋼業の受忍限度が小さく，非製造業では卸売・小売業，医療・福祉の受忍限度が小さいことを明らかにした．そして，総じて被災者の断水受忍限度は企業よりも小さいものの，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受忍限度は，災害時に早期復旧が望まれる産業でもあり，被災者と同レベルの受忍限度水準に達することを示した．
- 水使用用途別（生活用水），産業部門別（都市活動用水）に需要の推計を行い，発災初期は平時の需要水準よりも一旦低くなるものの，断水の長期化に伴い需要が漸増し平時の水準に達する様相を定量的に明らかにした．
- 需要の推計に当たっては，生活用水のみならず，都市活動用水，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，災害医療対应用水，災害廃棄物等処理用水の需要についても包含した総合的な都市用水の災害時需要の推計モデルを提案しており，この点は，既往研究ではフォローされていない特筆すべき成果である．

そして，以上の推計手法を用いることで，災害被災地で発生する水需給ギャップの

定量化が可能とするとともに、以下、災害水需要マネジメントの効果を定量的に評価する枠組みを構築した。

本論文では、災害水需要マネジメントの主要施策のうち、とりわけ心理的方略と技術的方略の手法について検討している。

第4章では、心理的方略に焦点を当て、リスクコミュニケーションを通じた需要マネジメント手法の方法論について検討を行った。具体的には、災害時の水需要は断水受忍限度に依存することに着目し、水道事業者による断水リスクコミュニケーションを通じて、自発的に断水リスクに対する理解とその対処行動意図の形成と実行を促し、この断水受忍限度の水準の引き上げを目指すコミュニケーション手法について検討を行い、次の知見を得た。

- 社会心理学的アプローチと行動変容型コミュニケーション技法をベースに、断水リスクコミュニケーションが被災者の断水受忍限度の範囲拡大に寄与する理論的仮説を提案し、大阪市民を対象とした実証分析から、その妥当性を示した。
- 具体的な断水リスクコミュニケーション手法としては、自身が被る断水リスクの定量的な認知とその解決に向けた「行動プラン」の作成に役立つような情報を提供することが、断水受忍限度の範囲拡大に非常に効果的であることを示した。
- さらに、自身が被る断水リスクの解決や対処行動を具体的に考えた住民、すなわち断水リスクコミュニケーションを通じて断水受忍限度の範囲拡大が図られた住民ほど、水道未復旧地域を助けようという共助意識も高くなることを示し、断水被害軽減策としての新しい対策として、「共助」が有望である点を示唆した。

以上の手法を用いることで、実証分析を通じて、被災者の生活用水需要を大幅に低減できることを明らかにした。

第5章では、技術的方略に焦点を当て、災害時において代替水資源の有効活用による需要転換を図ることで、低水質な水への需要転換を応急的に促す取組に関する検討を行い、以下の知見を得ることができた。

- 代替水資源としては、雨水（貯留内水）、地下水（井戸水）、工業用水（余剰水）、下水処理水・再利用水を選定し、多基準分析（線形加法モデル）を用いた「水量」、「水質」、「水圧」の3要素の定性評価を行い、工業用水（余剰水）が災害時有効活用の期待効果が高いことを明らかにした。
- なお、工業用水の災害時における供給信頼性には多くの不確実性を伴い、それ

を予測する手立ては存在しない。そこで、工業用水道の災害時復旧問題は上水道と工業用水道の復旧にかかる人的資源の配分問題であることを考慮した、工業用水の災害時供給再開予測モデルを構築し、被災地域における工業用水の通水率の明示、並びに上水道と工業用水道の復旧にかかる人的資源投入配分の検討を可能とした。

- 一方、被災者が水道水を消費することで享受できる各種サービスは本来どの程度の水質レベルの水で足り得るのか、すなわち低水質水の需要代替性を推計し、工業用水は生活用水の大部分をカバーできるポテンシャルを有することについて、実証分析を通じて明らかにした。
- ケーススタディとして、指定避難所に工業用水を供給可能とした場合、避難所生活者の生活用水需要をどの程度カバーできるかについて分析し、特に水不足が顕在化する発災後1～3週間目において、その水不足の低減に大きな効果をもたらすとともに、水不足が生じる期間そのものも低減できることを明示した。

以上の手法を用いることで、実証分析を通じて、避難所の水不足問題の解決に大きな効果を果たし、特に避難所生活者の衛生環境の保持に寄与するという示唆を得ることができた。

6.2 今後の課題 —災害水需要マネジメントの体系化に向けて—

以上、本研究で得られた成果をまとめたところであるが、本論文の冒頭にある研究目的に謳った“災害水需要マネジメントの体系化”を果たす上においては、まだまだ残された課題が多いと考える。

- 災害水需要マネジメントの方策には、心理的方略、構造的方略、および技術的方略があることを示したが、本研究のなかでは、構造的方略の具体的手法論について触れることができなかった。給水制限や摂取制限などで構成される構造的方略は、その実施タイミングや制限レベルの設定、その際のコミュニケーションのあり方など検討すべき事項は多く、ひとつの重要な研究事案であるといえる。
- 心理的方略として、断水リスクコミュニケーションの概念とその適用手法の一つの形を示すに至ったが、人々の行動変容を促すコミュニケーション技法として、本論文では、情報提供法と行動プラン法の効果を検証したが、その他にも、依頼

法、フィードバック法、アドバイス法があり、また、それらを様々な情報媒体を通して実施することで、より大きな効果が期待できるものと考えられる。一方、今回は、住民のみを対象としたリスクコミュニケーションを扱ってきたが、企業にも対象を拡げることも重要である。とりわけ都市域における水需要に占める都市活動用水の割合は高い。以上、さまざまな対象に各種のコミュニケーションパターンを組合わせて実施することの効果を検証することは重要な課題である。

- また、災害断水発生時のクライシス段階におけるコミュニケーション手法についても、平時に展開するリスクコミュニケーションを応用した対応も求められるため、実災害時において水道事業者が行ったコミュニケーションと住民の受忍限度との関係を分析し、“断水クライシスコミュニケーション”としてひとつの手法構築を目指すことも必要であると考えられる。
- 技術的方略として、代替水資源（特に工業用水）の活用を図ることで、低水質水への需要転換を応急的に促すモデルケースを示すことができたが、そもそもそれらの水資源が災害時に迅速かつ効率的に入手できるインフラ環境は整っているかといえば、多くの地域において不十分な状態である。よって、それらの追加投資を含めた費用対効果などを行い、総合的な災害有効活用ポテンシャルの評価を加えることが望まれるところである。

以上の課題を順次克服し、災害時の断水被害軽減に大きな役割を果たす新しい方法論として、「災害水需要マネジメント」の構築が成就することとなれば、著者にとって望外の喜びである。

謝辞

本論文は、著者が2013年4月に京都大学大学院情報学研究科社会情報専攻 博士後期課程生として多々納研究室（防災社会システム研究分野）に所属してから、3年余りの年月を経て、ここにひとつの形としてまとめるに至ったものです。この間、多くの方々に出会い、才知に秀でた国内外の研究者の方々と議論させていただく機会を賜り、ご指導、ご鞭撻をいただき、そして支えられてまいりました。

最後に、その一部ではありますが、ここに感謝の意を申し上げます。

畑山満則教授（京都大学防災研究所）には、多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。私が博士後期課程への進学を意識し始めた頃から相談に乗っていただくとともに、研究姿勢と内容に関する指導はもちろんのこと、研究がなかなか軌道に乗らないとき、社会人ドクターとしての研究時間の制約に悩んだとき、そして論文投稿時にトラブルがあったときなども、いつも温かくサポートいただきました。だからこそいま、大望を果たすことができたと言っても過言ではありません。心より御礼申し上げます。

多々納裕一教授（京都大学防災研究所）には、終始研究遂行に欠かせない基礎知識を親身にご指導いただきました。研究の方向性とその進め方、分析アプローチの方法、論文のまとめ方など、さらには実務と研究での見方の違いに至るまで、3年余りの間、私の知識レベルに合わせて、わかりやすく、多くの専門知識をご教授いただきました。自身の学術的視野を大きく広げることにつながったとともに、これからの技術者人生においても大きな糧となったものと確信しております。ここに深く感謝いたします。

矢守克也教授（京都大学防災研究所）には、3年余りの間、私の研究アドバイザーをご担当いただき、多くの貴重なコメントと、ときに激励の言葉をいただきました。先生の御専門であるリスクコミュニケーション、心理学（防災人間科学）の視点からご指摘くださることで、新たな研究の課題や方向性、アプローチの仕方について気づかせていただきました。

伊藤禎彦教授（京都大学大学院工学研究科）には、3年余りの間、私の研究アドバイザーをご担当いただき、水道業界の潮流と水道研究分野の昨今の動向を踏まえた数々の貴重なコメントをいただきました。先生に研究の進捗状況をご報告させていただいた後には、必ずと言っていいほど研究遂行に有益な資料や図書を授けていただき、たいへん勉強になり、それらの資料からも多くの知見を学ばせていただきました。

梶谷義雄主任研究員（電力中央研究所）には、本論文第3章で用いた過年調査デー

タの提供ならびにその見方をご指導いただくとともに、第4章のコミュニケーション実験のためのアンケート調査票設計時には的確なアドバイスをいただきました。

いま振り返れば、私の博士後期課程進学を強く後押しいただいたのは、萩原良巳名誉教授（京都大学）でした。進学を決意したときには、お力添えをいただくとともに、入学以降も、事ある毎に私を気にかけてくださいました。また、先生が現役時代に執筆した著書や論文からも多くの知識を得、さらにはそれらの研究資料の数々を私に譲渡いただくなど、博士論文の作成を志すチャンスを与えていただきました。

また、学部、修士課程時代の指導教官である吉川和広名誉教授（京都大学）からも、進学を決意したとき、激励と喜びの言葉をいただきました。その際、「君ならやれる」とおっしゃっていただけたことが、その後の大きな自信へと繋がりました。

本研究では、大阪市域をフィールドとした実証的分析を数多く実施していますが、その分析に用いたデータの提供に携わっていただいた大阪市水道局の関係者一同、社会人ドクターとしての研究の進め方など要所要所での的確なアドバイスをいただいた、同じく大阪市水道局の京都大学博士号学位取得者の先輩方、田中尚博士（計画課長）、石本知子博士（水質試験所研究主幹）、そして私の研究活動にご理解と激励をいただいた職場の皆様方に深く感謝いたします。本研究で得られた知見は、大阪市水道事業の発展にも寄与する有用なものと確信しており、今後、実務の場面にも反映させることで、同事業を取り巻く諸課題の解決に尽力する所存です。

そして、多々納研究室、畑山研究室（旧林春男研究室）の皆様、京都大学防災研究所総合防災グループの皆様にはこれまで大変お世話になりました。素晴らしい先生方、先輩、後輩、留学生、秘書の方々に囲まれ、多くの刺激を受け、有意義な研究生活を送ることができました。皆様と過ごした時間は私にとって大切な財産です。

最後に、本論文をまとめることができたのは、家族の支えがあつてのものであることを申し添えておきたいと思います。その他、数えきれない方々の直接、間接の多くの支援がありました。ここに記して、心より、皆様に御礼申し上げる次第です。

2016年8月

吉澤 源太郎