

東北地方太平洋沖地震における断水長期化要因の解明

Finding out Factors of Prolonged Water Supply Outage
during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

鍼田 泰子¹, 岡本 祐¹

Yasuko KUWATA¹ and Tasuku OKAMOTO¹

¹ 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
Department of Civil Engineering, Kobe University

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake caused water supply outage of 2.2 million households in 187 cities and towns. This earthquake provoked several aspects on earthquake-following natural and social events to the water supply system; the destructive tsunami damage, the water supply outage due to damage to the large transmission pipeline, the long-term electric power outage, the serious liquefaction damage, and the evacuation due to radioactivity leak of the nuclear power plant. The multi-factors made the water supply restoration be delayed even though the seismic ground motion was moderate. This study attempts to clarify these factors based on the water pipeline damage and restoration period.

Keywords: water supply outage, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, factor analysis, restoration period, regional water supply, wide-area earthquake disaster

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、広域災害、津波災害、原子力災害が複合して発生し、被災地は甚大な被害を受けた。上水道システム一つを取り上げても、広域水道の送水停止による受水事業体の断水長期化や、津波による浸水・洗掘被害ならびに水源の塩水化、放射能漏洩による浄水場の水質管理など、各局面で災害対応における新たな課題が浮き彫りになった。本地震による断水自治体は187市町村、断水戸数は225万人にも上る¹⁾。また、この断水戸数は1995年兵庫県南部地震の約2倍にあたり、戦後最大の水道システムの地震災害といえる。

本地震は広域に被害を引き起こした地震であったが、観測された最大加速度や震度に比べて住家の倒壊率は低く、一般的な振動による構造物被害は少なかった。上水道の施設・管路被害も津波や液状化による特殊な被害を除けば、揺れによる構造物被害はこれまでに経験したものと同程度かそれより小さいものであった。しかし、被災市町村の断水は長期にわたり、地震から1週間を経過しても124市町村で120万戸、2週間後で89市町村で60万戸が復旧していない状態であった。図-1は県別の断水戸数の解消過程を示したものであるが、断水戸数が1週間で半減している県もあれば、長期に断水が継続している県もある。断水長期化には複数の事象が関わっており、市町村でもそれぞれ要因が異なると考えられる。

地震後に断水自治体へのヒヤリング調査に基づいた報告書から、長期断水化の要因の一つに広域水道の被害が

挙げられていた²⁾が、要因が他にもあるために根本的な要因は明確になっていない。本研究では、広域水道の被害を含めて、東北地方太平洋沖地震における被災自治体の断水長期化の要因を明らかにし、その影響を定量的に評価することを試みる。まず、広域水道の送水再開やその他の要因で復旧が遅れた地域の自治体を対象に地震被害状況や災害対応などの調査を進め、断水長期化の要因を市町村間で比較して定性的に整理する。さらに、配水管路の被害程度に基づいた経験的な通水日数と比較して断水が長期化した要因とその影響程度を定量的に分析する。

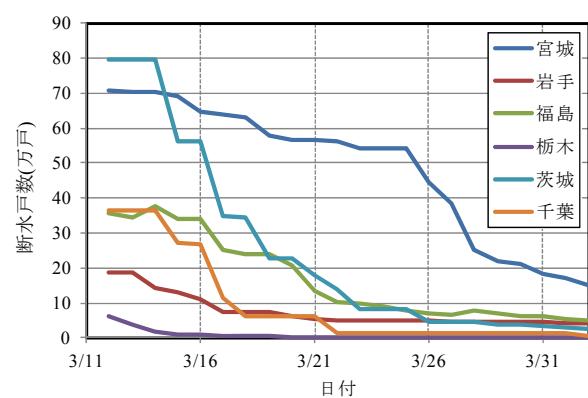


図-1 地震後からの被災県別断水戸数（文献1に基づく）

2. 断水長期化要因と市町村の断水解消の特徴

(1) 断水長期化要因の抽出

前述したように、本地震における断水戸数は225万人にも上る。図-2には厚生労働省¹⁾の公表資料に基づき、各市町村の通水日数を示している。津波で市街地が壊滅的な被害を受けた沿岸部の市町村だけでなく、内陸の市町村でも通水日数が2週間以上経過している市町村が多いことが明らかである。本研究では断水長期化の要因とその影響を明らかにするため、ヒアリング等の調査から考えられる要因を挙げ、観測できる数値からその要因を検証する。ヒアリング調査は4県19市町の自治体に対して、2011年3月後半から4月上旬の地震後1ヶ月程度と、同年10、11月の地震後半年程度の二度に分けて行ったものである。ヒアリングや統計資料に基づき、市町村の被害状況と災害時の対応を表-1にまとめて示す。これらの調査結果から本研究で検討すべき断水長期化要因に以下のa)からe)の5つを挙げる。これらの要因を挙げた根拠を以下に示す。

a) 広域災害による復旧資源の不足と応援の遅れ

187もの市町村が断水に陥り、被害調査から応急復旧、応急給水などの多くの人的復旧資源、資機材が東北へ迅速に調達される必要があったが、大西・鍬田の応急給水応援に関する分析³⁾によると、安定した300台規模の給水車が被災地に派遣されるようになった3月15日まで被災情報の収集ならびに応援隊の調整に4日間の時間を要していた。また、3月14日に日本水道協会の災害応援方針は、被災地の「応急給水に専念する」ことに変更され、他都市の水道事業体による災害復旧応援はほとんど行われていなかった⁴⁾。つまり、被害箇所の復旧は、被災自治体が地元の管工事組合などの業者と連携して行われ、外部の水道事業者の人的資源は兵庫県南部地震の時に比べて少なかった。さらに、被災地は中山間地域の自治体が多いため、水道技術職員も数人から数十人のところが多く、復旧に関わる人的資源が不足していた。

また、地震後の復旧活動には、管路などの資機材の調達が必要となるが、被災地に入る道路網の機能回復や復

旧に必要な燃料調達に時間を要した。これらの復旧に関わる人的・物的資源の調達が遅れたことが断水長期化の要因の一つとして挙げられる。

b) 停電の長期化による復旧対応の遅れ

断水長期化の要因の一つとして、停電の影響が大きい。北関東から東北地方の太平洋側にかけて地震後少なくとも2、3日は通電しなかった。自治体で自家発電装置を備えていても、1日以上の停電に対応できる自治体は少ない。地震当日から自家発電装置によって浄水処理を再開できた自治体は、応急給水分を貯える小規模な浄水処理施設をもつ自治体だけであり、その水量で全供給域の通常時の水需要に対応できるものではなかった。また、防災上重要な施設には複数の配電系統が整備されているが、広域災害において複数の電力系統が全て供給停止に陥った自治体もある。

さらに水道施設内の稼働状況、配水状況は遠隔監視されているが、停電すれば被害把握業務そのものが難しくなる。宮城県北西部の自治体の多くは1週間近く停電したため、実質的な復旧活動は地震後2週目に入つてからになっている。本地震で明らかになったことは、停電期間には許容できる期間があり、自家発電装置などのバックアップの容量を超えると水道システムの早期復旧が困難になることである。長期停電になると各施設や機器だけでなく、組織全体にも波及し、災害対応のシナリオ自体を変えなければならない。現在ある災害対応のシナリオに長期停電のシナリオを追加し、災害対応マニュアルを拡充する必要がある。

c) 広域水道の送水停止による水源不足

本地震では、県や企業団が管理する広域水道事業の内、地震から1週間以上送水停止をした広域水道が10箇所にも及んだ。図-3は10箇所の広域水道の供給範囲と送水停止期間を示している。宮城、茨城県の大部分と福島県の一部が広域水道送水停止の影響範囲に含まれている。表-1に示す宮城県北西部や茨城県南部の自治体もそれに該当する。

広域水道は、本地震の被災地に限らず全国的に整備されている。早くから市街地とともに水道が整備された歴史的な都市や、市街地が分散して物理的に広域水道で供

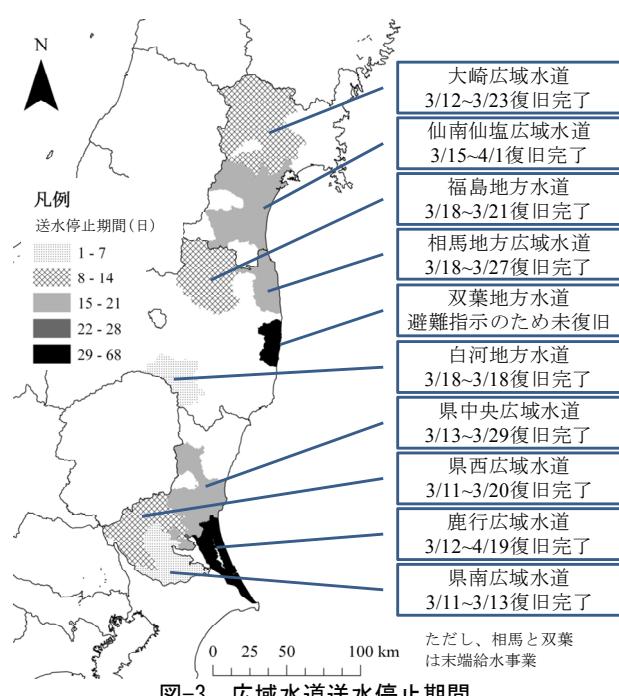
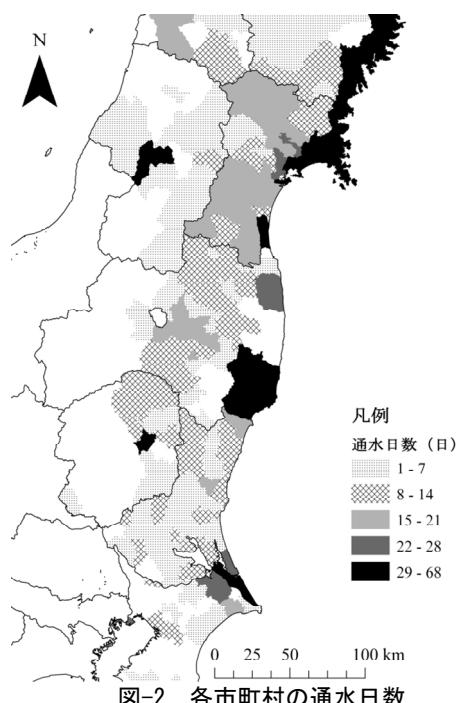


表-1 調査対象水道事業体の被害状況とその対応^{1), 2), 5), 6), 7), 8)}

県名	市町村名	通水日数	震度	広域水道		施設停電		液状化		避難市町	津波		初期の被害と対応事例	
				影響度	復旧日数 T_f (日)	広域水道割合 r	影響度	復旧日数 T_e (日)	影響度		影響度	流失戸数(戸)(全世帯比)		
宮城	仙台市	18	6-	◎	11	0.30	○	3	○	1	×	○	1700 (0.8%)	市の30%の自己水源ならびにその浄水施設に機能停止に至る被害が無かったために、停電解消後に復旧が開始される。配水ブロック間がループ化されていたため、広域水道停止による影響範囲は軽微である。宅地崩壊地域を除き管路被害は軽微であった。津波被害があるが沿岸部の一部あった。
	利府町	23	6-	◎	17	0.83	○	2	×	0	×	△	0	広域水道が送水再開するまで、被害を受けなかつた井戸水源(1箇所/4箇所)で応急給水対応と一部の通水をする。津波の床上・床下浸水被害は約30世帯。管路被害のほとんどは本震による。
	塩竈市	28	6+	◎	20	0.20	○	7	×	0	×	△	0	水道庁舎が津波で床下浸水したため、高台の浄水場で災害対応する。広域水道ならびに仙台からの送水管に被害があつたが、浄水場内の貯水槽で応急給水を対応する。沿岸部と島嶼部は津波の浸水・流出被害あり。
	松島町	33	6-	◎	5	0.76	×	0	×	0	×	△	0	4/7の余震による管路被害は全体の1/3。市内の停電は1週間程度あったが、自家発電を備えており、地震当日から浄水処理できましたが、燃料不足する。2つの広域水道の復旧は大崎で5日。仙南・仙塩で20日。沿岸部で津波の床上・床下浸水被害あり。
	大崎市	21	6+	○	1	0.95	○	7	○	3	×	○	432 (0.3%)	4/7の余震による管路被害は全体の1/3。古川地域の広域水道再開により管路復旧進む。市内広域のため、市内で水融通できず。古川地域では液状化地域もあり。
	栗原市	27	7	◎	12	0.08	○	7	×	0	×	○	432 (0.3%)	緊急遮断弁と発電機のある浄水場で地震当日から浄水処理を再開する。ただし、被害調査・復旧は通電後の2週目以降に開始される。
	美里町	24	6-	◎	11	0.52	○	7	×	0	×	○	432 (0.3%)	本震と4/7の余震の管路被害はほぼ同数。広域水道が送水開始するまで、自己水源の浄水場から広域水道供給域へ配水。
	大郷町	22	6-	○	5	0.75	◎	10	×	0	×	○	432 (0.3%)	停電は10日以上かかったが、自己水源の井戸からの取水・浄水処理は発電機で実施した。管路被害のほとんどは本震による。
	登米市	14	6-	○	5	1.00	○	5	×	0	×	○	432 (0.3%)	通電するまでは発電機で浄水処理する。ただし、発電の燃料不足あり。南三陸への応急給水も実施。
福島	いわき市	31	5+	○	1	0.95	○	6	○	3	×	○	432 (0.3%)	本震では施設機能に停電の影響はなし。4/11の地震では停電被害あり。4/11本震の管路被害は全体の1/3。放射能対応から3日以降庁舎内待機が続く。
	郡山市	23	6-	○	6	0.85	○	6	×	0	×	○	432 (0.3%)	市域の1/3で断水。停電により浄水場が機能停止。東部の団地で管路被害が集中する。4/11の地震では2,3件の管路被害。
茨城	日立市	11	6-	○	6	0.15	○	5	×	0	×	△	0	導水管で被害あり。地震後2日は停電で被害確認できず。高台へのポンプアップできず。沿岸部(久慈川)は一部床上・床下浸水の被害あり。
	ひたちなか市	17	6-	○	6	0.15	○	5	×	0	×	△	0	市の70%の水源の浄水場で施設被害があり、約10日間の機能停止。広域水道が先に復旧。ブロック化されておらず、復旧時に支障あり。那珂港で浸水被害あり。
	那珂市	17	6-	○	6	0.50	○	3	○	3	×	○	432 (0.3%)	浄水場で施設被害あり。複数の水道が統合されたこともあり、復旧時の水融通で支障あり。
	鹿嶋市	34	6-	○	2	0.85	○	5	○	14	×	△	0	本震で市内の1/3(大野・鹿嶋浜)で停電。県水が2日で送水再開されるも十分量なし。旧鹿嶋地区での管路被害大。
	潮来市	44	6-	○	3	0.33	○	4	○	23	×	×	0	旧牛堀町は鹿嶋県水から受水。管路被害軽微で3/21通水。旧潮来町は自己水源の施設で、自家発電があったが燃料確保が困難。日の出など液状化甚大地域あり。
	神栖市	50	5+	◎	15	1.00	○	4	○	16	×	△	0	二つの広域水道の浄水場から2送水ルートあり。1ルートの鰐川浄水場の液状化被害ともう1ルートの鹿行浄水場からの送水管被害により受水完全停止。送水管ルート切替により配水池には3/26送水再開。液状化甚大地域あり。一部津波の浸水被害あり。
千葉	旭市	39	5-	○	2	1.00	○	2	○	5	×	○	336 (1.5%)	浄水機器の損傷で企業団からの送水が2日間停止。配水池・管路への充水に時間要する。液状化により宅地の被害あり。飯岡地区で津波の被害あり。
	香取市	38	5+	○	6	0.85	○	0	○	11	×	×	0	施設に被害がでるが、機能停止せず。根川沿岸部(市役所周辺・新島)で甚大な液状化被害のため仮設地上配管。

注:

- 通水日数は3月11日の本震からの全戸通水までの日数。4/7の余震やいわきでの地震で再び断水している場合はそれまでの日数。
- 震度は3月11日の地震による庁舎での震度階級。
- 広域水道の影響度は、県や企業団から受水し、地震7日後までの送水再開では○、それ以降であれば◎で記載。複数の受水地点がある場合、 T_f は市町の受水地点の中で最初に復旧した地点の復旧日数を用いた。広域水道割合は、水道統計に基づく計画水量ベースで換算したもの。
- 停電の影響度は、浄水・送配水施設での機能維持のための電力停電状態。地震7日後までの通電では○、それ以降であれば◎で記載。 T_e はNojima⁵⁾による報告書、ヒアリング及び各市町村のHPより設定した。
- 液状化の影響度は、丁目単位で仮設配管が必要なほど液状化した地域があれば◎、一部の地域の液状化であれば○、影響がなければ×で記載。 T_l は液状化が発生した市町村を対象に、断水解消過程において断水率が30%に達した時点から断水率が10%に到達するまでの日数を液状化による遅延日数とした。
- 津波の影響度は、復旧ではなく復興対象となる津波浸水地域の程度。配水地域の浸水が1m程度の床上・床下浸水で通水再開が可能な場合は△、津波の流出戸数がある場合は○で記載。

給できない中山間地域では独自の水道システムが構築されているが、それ以外の地域では戦後の人口増加とともに水需要が見込まれるため、安定した水資源を求めて都道府県や企業団が水源開発を行い、市町村に送水する広域水道を構築・拡張してきた。とくに、小規模自治体では水道事業経営の合理化のために、全国的に水道の広域化は進んでいる。しかし、これら広域水道の多くは冗長性が低いシステムになっている。

また、これまでに広域水道の送水停止の影響について十分検討されてきたとはいえない。例えば、1995年の兵庫県南部地震では、神戸・芦屋などの阪神地域の4市への送水供給をしている阪神水道企業団は地震後送水を一時停止したが、地震当日中に再開し、4市への送水供給には大きな支障とならなかった。地震後には広域水道の送水停止対策が指摘され、神戸市では震災復興事業として既存送水管とは別ルートで大容量送水管が建設された。その後の国内地震では、中山間地域における地震災害が多く、兵庫県南部地震と同様に広域水道に被害があつたものの長期断水には至らず、市町村の自己水源による送配水システムの被害に留まっていた。そのため、自治体の地震被害想定では、広域水道からの受水が継続することを前提に配水管路の被害・復旧を中心検討されている。

広域水道の送水再開が遅れた原因の一つには、まず停電がある。北関東から東北一帯では地震後3日から1週間程度停電し、広域水道では大容量の水を送水できない状況に陥った。送水停止後に空になった配水池や大口径管に充水・送水するには日オーダーの復旧期間を要する。二つ目の原因是、大口径管の破断・漏水である。前述したように広域水道の多くは冗長性が低いため、一カ所の管路復旧期間中、下流の自治体へは完全送水停止となる。また、大口径管路の復旧は作業だけでなく、特殊な管路の調達も地震直後には困難である。

例えば、宮城県南部の仙南・仙塩広域水道では15カ所の被害の内、14カ所が管路の被害である。図-4は仙南・仙塩広域水道の高区幹線と低区幹線の2系統からなる送水システムの概略図を示し、幹線区間の復旧日と受水市町の日供給水量に対する受水量と自己水源の配水量の比を示す。

している⁶⁾。低区幹線では3月15日から送水再開をしているが、高区幹線では低区幹線との分岐直後にφ2400の可とう継手が2カ所離脱し、その復旧に11日を要し、末端の松島市・塩釜市には3月31日まで送水再開できなかった。自治体の多くが半分以上を広域水道からの受水に頼っていることから、自己水源だけで配水管の復旧・配水再開ができず、長期断水に陥った。また、茨城県の鹿行広域水道では、鶴川浄水場内で甚大な液状化が発生し、場内配管が複数離脱した。そのために、施設が機能せず、約1ヶ月間の送水停止に陥った。

d) 広域液状化による復旧活動の遅れ

東京湾沿岸や利根川流域の沿岸部の宅地では液状化によって管路網が甚大な被害を受けている。例えば、利根川流域では茨城県潮来市日の出、神栖市掘割・深芝、千葉県旭市後草・蛇園、香取市佐原・新島が挙げられる。これらの液状化地域は、局所的な範囲ではなく、水道管路延長の1~2割に相当する。小字単位で液状化をしている場合、水道管路だけでなく宅地や道路も液状化をしているため、他部局との復旧調整が必要となる。また、道路の不陸具合によって被害場所の特定・復旧よりも地上に仮設配管を設置して本管または直接メータに接続すれば早期の仮設復旧が可能となる。しかし、液状化の程度から被害状況を推定するのが困難な状況下で、通常の災害復旧のように被害場所を特定して本復旧するのか、地上仮設配管をするのかの意思決定が求められていた。さらに、仮設配管設置のための資材調達も困難を極めた。

e) 施設・住家の津波被害による復旧の遅れ

水道管路・施設の多くは地中にあるが、河川横断部の水管橋や橋桁の添架管は地上にあるため、津波の河川週上のときに被災する。また、宮城・岩手県では水道事務所や水源施設も浸水した。表-1には含まれないが、津波の浸水により、水源が塩水化し、浄水処理に支障を来していた自治体もあった。

津波の浸水が1m以下の床下・床上浸水で、住宅が押し流されていなければ、地中の管路被害はほとんどなく、被災地の水道機能はほぼ維持されていた。一方、住宅が流出する被害に遭うと、住宅とともに給水管が流出するために流出地域一帯で復旧する必要が出てくる。しかし、

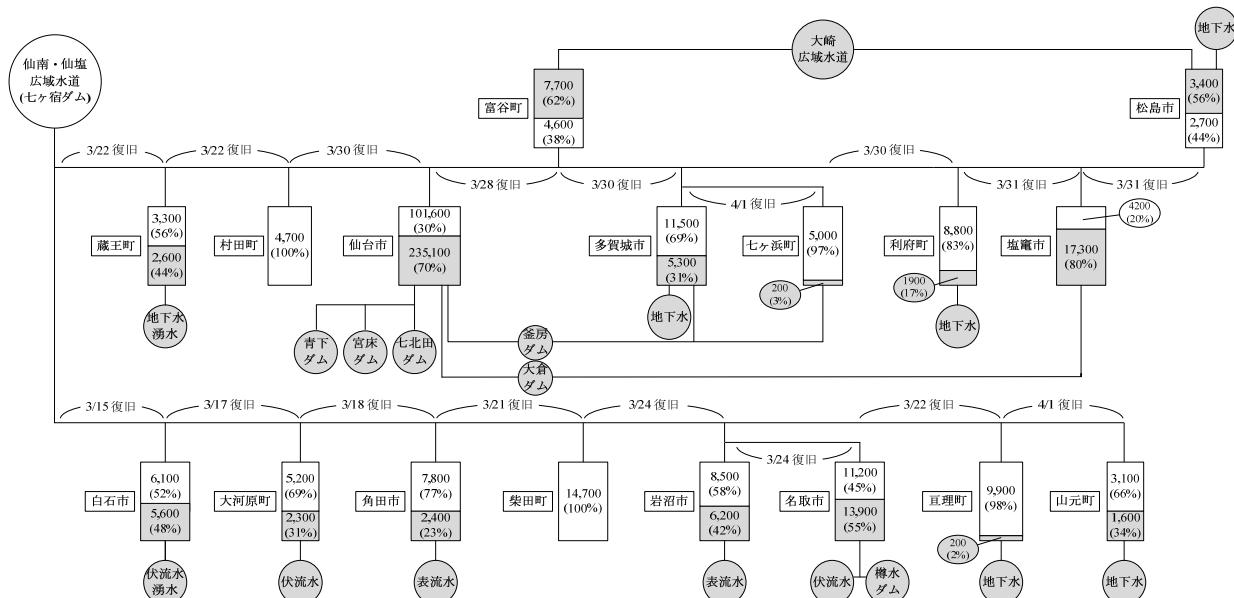


図-4 宮城県企業局仙南・仙塩広域水道の受水市町における県水と自己水源比
(□の上段の数字は受水量($m^3/日$)、下段の(%)の数字は総配水量に占める比率) (参考文献6)に基づく)

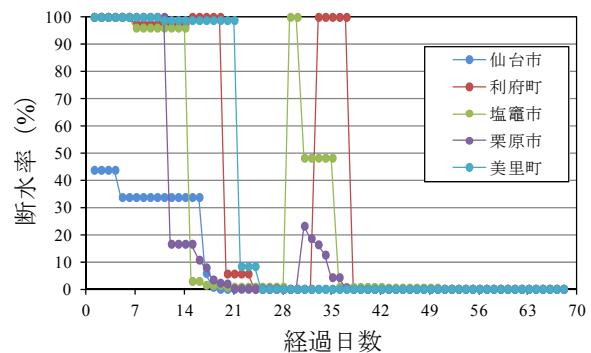
津波流出地域では水道の原形復旧よりも住宅地の復興を先行して進められることになり、上述した他の要因とは異なる復旧・復興過程を踏むことになる。

(2) 各市町における断水解消過程の特徴

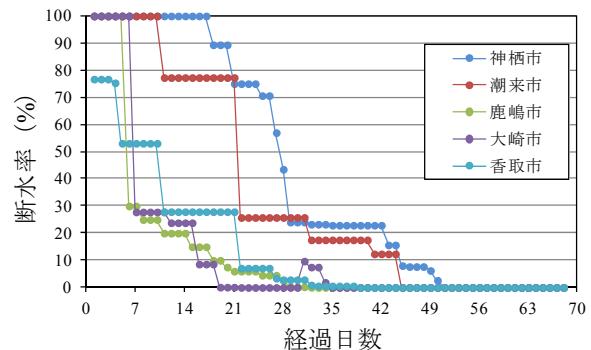
著者らがヒアリング調査を行った4県19市町の自治体を対象に、上述した要因に関する県や市町の公表資料、厚生労働省の公表資料¹⁾に基づく断水解消過程から影響すると考えられる日数を抽出し、表-1に合わせて示す。管路被害程度に関わるものとして、地震動の大きさを示す震度を示している。いずれの自治体も震度5弱から7の地域に含まれる。次に広域水道を受水している場合は、県の報告に基づき、地震発生から受水点での送水再開日までの日数を広域水道の復旧日数として示している。一自治体に複数の受水点がある場合は、最初の受水点の送水再開日を採用した。この復旧日数に基づいて、広域水道の影響度を定性的に表-1に分類した。停電の要因については、取水・浄水処理のための施設の停電と、管路被害調査・復旧作業に関わる市域の停電が考えられるが、本研究は前者についてのみ考慮することとし、自家発電装置で浄水処理できた自治体については、停電日数を0とした。それ以外の自治体では、Nojima⁵⁾の停電状況のとりまとめを参考にした。停電の影響度もこの復旧日数で分類した。液状化については、液状化が発生した市町村を対象に、断水復旧過程において断水率が30%に達した時点から断水率が10%に到達するまでの日数を液状化による遅延日数とした。液状化の影響度はこの遅延日数で分類した。津波については、床上・床下浸水した地域と流出戸数がある市町を対象に影響度を評価したが、本研究で対象とした自治体の津波流出地域の割合は旭市の1.5%が最大であり、本研究の後述で扱う通水率90%達成日数（断水率が10%以下に達するまでの日数）に影響を与えないものである。したがって、本研究では施設・住家の津波被害による復旧の遅れを考慮しないこととする。

これらの影響度の分類に基づき、各要因で影響度の大きい市町の断水解消過程を比較する。図-5は、広域水道または液状化の影響度が甚大であった市町と、各要因の影響度がそれほど甚大でない市町からそれぞれ5市町選択し、それらの断水解消過程を示している。

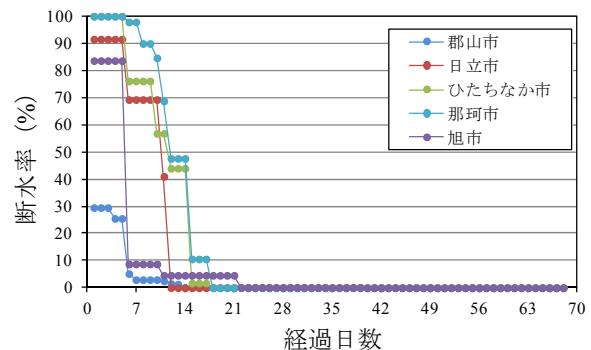
広域水道供給停止の影響が大きい市町では、図-5(a)に示すように地震後しばらく高い断水率の状態が続き、広域水道の受水再開後、断水率が急激に下降している。これは広域水道の復旧が水道の復旧のボトルネックとなっていたためと考えられる。地震から30日前後の断水率の上昇も、4月7日の余震による広域水道や単独送水管の被害によるものである。一方、液状化の影響が大きい市町では広域水道供給停止の影響が大きい市町のように断水率が急激に下降することはなく、図-5(b)に示すように徐々に断水率が下降し、断水率が30%以下に至ったところで復旧速度が著しく低下する傾向がみられる。これは液状化のために配水管復旧ならびに仮設配管の調達が遅れたためと考えられる。顕著な断水長期化の要因がない市町では、図-5(c)に示すように、地震直後の停電の影響で断水するが、復旧とともに徐々に断水率が下降し、断水率が残り10%になると復旧速度がやや遅くなつて、全戸通水する過程をとる。つまり、断水長期化の要因の違いによって、各市町の断水解消過程は特徴づけられることが分かる。



(a) 広域水道供給停止の要因が大きい市町



(b) 液状化の要因が大きい市町



(c) 顕著な要因がない市町

注)

- 1)本図は厚生労働省から発表された「平成23年（2011年）東日本大震災の被害状況及び対応について」¹⁾に基づいて作成されたものである。
- 2)断水率の母数は自治体の全給水戸数とする。地震直後に戸数が公表されていない市町については後の断水戸数から判断して全戸断水とした。
- 3)全戸断水と定性的に表記されたものについては、断水率100%，一部断水と表記されたものは、その日付より後の日付で公表された断水戸数の最大のものを用いた。

図-5 影響の大きい要因別断水解消過程

3. 断水長期化の要因分析

(1) 通水日数予測モデルの概念

水道の災害復旧は、まず浄水・配水施設とともに上位の導水管や送水管を充水・確認・修理・通水させ、順次下位の配水管や給水管の漏水箇所を幹線またはブロックごとに修理する。さらに水道の系構造と復旧方法を考えると、通水日数と断水率との関係は図-6の概念図で表せる。施設は系構造においては水源機能を表し、水生成機能が確保できるか否かで断水率は決定され、図-6(a)のように復旧に伴い急激に減少する。一方、管路は上位の幹

線またはブロックごとに修理する。すなわち、水道の系の段階的な復旧によって徐々に断水が解消する。実際の事象では(a), (b)の2つの事象が発生し、施設が復旧した後に管路の復旧が開始されるので、断水率は図-6(c)のように減少する。

ここで、上述した断水長期化要因を考慮した場合、(a)の復旧資源不足による管路復旧の遅れは、管路の復旧速度を鈍化させることになるため、図-7(a)に示すようになる。広域水道とは複数の自治体に水道水の製造・送水を行なう施設であるため、各受水自治体の水道では、自己水源の浄水施設と同じ機能を果たす。また、本研究で扱う施設の停電も同様である。つまり、送水停止・再開や停電・通電はその下位の系の断水率が100%か0%になることと同じであり、それらの要因による影響は図-7(b)に示すように100%断水率の復旧期間がシフトする方向に動く。さらに、液状化による復旧の遅延は、図-5(b)に見られたように液状化対象地域の復旧速度が急激に鈍化することで表される(図-7(c)参照)。本研究では、これらの断水解消過程の特徴を加味して、地震動による管路被害に基づく経験的な通水日数と、停電、広域水道、液状化要因による復旧日数を用いて新たな通水日数の予測モデルを構築する。

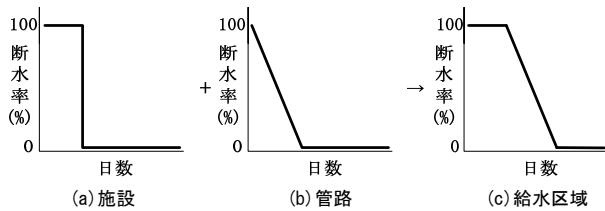


図-6 断水解消過程概念図

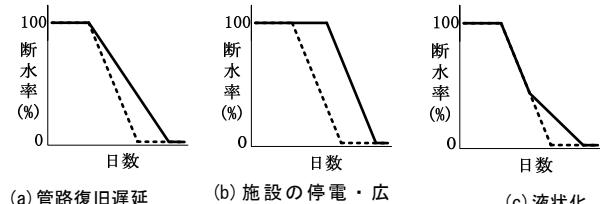


図-7 断水長期化要因が断水解消過程に与える影響の概念図

(2) 既往の通水率90%達成日数予測式

高田ら⁹⁾は、兵庫県南部地震における配水管被害率(以下、RR)及び、顧客密度(配水管1kmあたりの給水戸数以下、d)が水道の通水率90%達成日数と相關があることを示し、配水管被害率及び顧客密度を説明変数とした重回帰分析によって下式に示す水道管路の通水日数予測式を提案している。

$$T_{p90} = 0.38d^{0.86}RR^{0.59} \quad [1]$$

ここで、 T_{p90} ：通水率90%達成日数(日)、d：配水管1kmあたりの給水戸数(戸/km)、RR：配水管被害率(件/km)

ここで、通水率(100% - 断水率)は、全給水戸数を母数とした時の通水戸数の比率と定義される。また、通水率が90%程度に達すると残りの断水解消過程では被災市町村の個々の被害状況によって復旧速度が異なることから、通水率100%ではなく復旧速度がほぼ一定である通水率

90%が採用されている。

ここで、兵庫県南部地震における上水道の被害は主に配水管・給水管であったことが報告されている¹⁰⁾。広域水道の送水停止は前述したとおり地震当日中に再開し、神戸・芦屋などの阪神地域の4市への送水供給には大きな支障とならなかった。停電による被害は、地震直後、浄水場、ポンプ場を併せ37カ所が停電に陥ったが、そのうちの95%である35カ所が概ね12時間で復電し、停電が長引いた北野ポンプ場と高取ポンプ場も幹線の施設ではなかったため、停電が送水供給に与えた影響は軽微であった¹⁰⁾。さらに、物理的な被害によって上ヶ原浄水場では一時稼働停止となったものの、その他の浄水場では稼働停止はなかった。その他の送水施設、貯水池、配水池において漏水などの軽微な被害はあったものの、送水供給に支障を及ぼすものではなかった。また、液状化による被害は沿岸部を中心に発生したが、神戸市における液状化面積率は表-2に示すようにいずれの配水区でも10%を超えていたため¹¹⁾、液状化が送水供給に与えた影響はごく僅かであった。これらのことから式[1]における通水率90%達成日数は給水管・配水管の復旧日数と同義であると捉えられ、本研究では原著の通水率90%達成日数を呼称変更し、通水率90%までの管路復旧日数 T_{p90} として扱う。

表-2 兵庫県南部地震における神戸市の液状化面積率¹¹⁾

配水区	液状化面積 (km ²)	配水区面積 (km ²)	液状化率 (%)
東部営業所	2.6	86.7	3.0
中部センター	3.3	60.1	5.5
北センター	0.0	240.9	0.0
西部センター	0.3	45.8	0.7
垂水センター	0.0	166.0	0.0

兵庫県南部地震の記録に基づいて提案された予測式を用いて本地震の通水日数を分析した。まず、通水率90%までの管路復旧日数 T_{p90} を推定するため、配水管被害率RRは各市町からのヒヤリング調査で得た数値を配水管被害件数から求めた。平成23年11月時点で災害査定を受けていない市町も多く、最終的な被害件数は前後する可能性はある。配水管路延長はヒヤリング又は平成19年度の水道統計¹²⁾に記載されている配水管路延長の数値である。それぞれの値を表-3に示す。

配水管被害率に着目すれば、0.04件/kmから0.67件/kmに分布している。宮城県北部の強震域や液状化が甚大であった市町では0.3件/kmを超え、新潟県中越地震の小千谷や長岡、能登半島地震の輪島とほぼ同程度であり、液状化被害の大きかった新潟県中越沖地震の柏崎の0.65件/kmとも肩をならべる程度である。しかし、全ての市町が同程度の被害であるわけではなく、被害件数が少なかった市町も多い。また、図-8は表-3の市町における通水率90%までの管路復旧日数の推定値 T_{p90} と本地震における実際の通水率90%達成日数(以下、 T_{obs})を比較したものである。

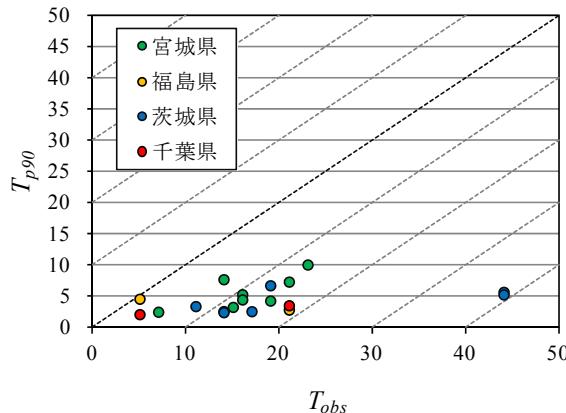
T_{obs} と比べて T_{p90} は全ての市町において小さい値となっている。本地震では、多くの市町に復旧の資機材や復旧要員が行き届かなかったために遅れたとも考えられるが、通水率90%までの管路復旧日数の倍以上も通水に時間を要しており、単に管路被害率だけでは評価できないことが自明である。

表-3 配水管1kmあたりの給水戸数及び被害率¹²⁾

県	市町村	配水管被害件数(件)	給水戸数(千戸)	配水管延長(km)	配水管被害率RR(件/km)	通水率90%までの管路復旧日数の推定値 T_{p90} (日)
宮城県	仙台市	437	457	4500	0.10	5
	利府町	45	11	230	0.20	4
	塩竈市	65	26	290	0.23	8
	松島町	45 ^{**}	6	82 ^{**}	0.55	10
	大崎市	128	45	960	0.13	3
	栗原市	196	23	610	0.32	4
	美里町	137	8	210	0.67	7
	大郷町	56	3	150	0.36	2
	登米市	400 ^{***}	29	1400	0.29	2
福島県	いわき市	154	125	2100	0.07	3
	郡山市	210	125	1700	0.12	4
茨城県	日立市	45	83	880	0.05	3
	ひたちなか市	28	63	780	0.04	2
	那珂市	42	19	440	0.10	2
	鹿嶋市	217	10.8 ^{***}	310 ^{***}	0.70	7
	潮来市	80 ^{***}	7.8 ^{***}	200 ^{***}	0.40	5
	神栖市	214	27	590	0.36	6
千葉県	旭市	39	22	540	0.07	2
	香取市	80	26	540	0.15	3

注)※松島町は管径75mm以上の被害件数と配水管延長を用いて被害率を計算した。
 ***登米市、潮来市では具体的な被害件数が調査当時判明していなかったため、被害件数については現在判明している概数を用いた。

****潮来市では旧潮来町(一部日の出地区を除く)、鹿嶋市では旧鹿嶋町のみの給水戸数、配水管被害件数及び配水管延長を用いて計算を行った。

図-8 通水率90%までの管路復旧日数の推定値 T_{p90} と本地震における通水率90%達成日数 T_{obs} の比較

(3) 通水日数予測式の拡張

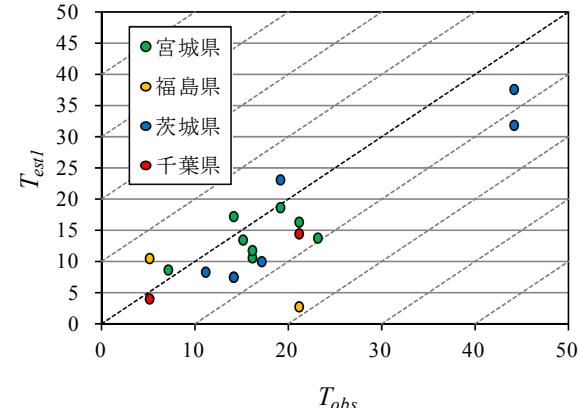
通水日数の予測モデルの拡張にあたり図-6(a)にあたる施設の復旧に代わり、自治体の自己水源における電力復旧日数(以下、 T_e)、広域水道の復旧日数(以下、 T_t)と、液状化による配水管路復旧の遅延日数(以下、 T_l)を本地震の断水長期化の要因として加算する。広域水道が占める水供給の割合を r とした時、停電、広域水道、液状化を踏まえた通水日数の予測式は式[2]に示すモデルに拡張できる。また、予測式から求められる予測通水日数を T_{est1} とした。

$$T_{est1} = T_{p90} + (1-r)T_e + rT_t + T_l \quad [2]$$

ここで、 T_{p90} : 90%管路復旧日数、 T_e : 自治体の自己水源における電力復旧日数、 T_t : 広域水道の復旧日数、 T_l : 液状化による配水管路復旧の遅延日数

管路復旧日数以外の各復旧日数は表-1に前掲した数値を用いる。前述した津波による断水長期化要因は、分析

対象市町村の津波流出戸数が10%以下であることから、通水率90%達成日数に影響していないと考えられる。また、図-9は予測通水日数 T_{est1} と通水率90%達成日数 T_{obs} との関係を示す。図-8では通水率90%達成日数が予測通水日数の2倍以上大きかったが、広域水道及び液状化の復旧日数を考慮すると、通水率90%達成日数と予測通水日数はほぼ比例的な関係になる。

図-9 予測通水日数 T_{est1} と通水率90%達成日数 T_{obs} の関係
($R^2=0.70$)

さらに、通水率90%達成日数を目的変数、式[2]の各項を説明変数とし、式[3]に示す重回帰モデルによって、予測通水日数 T_{est2} のあてはまりを分析した。

$$T_{est2} = k_1 T_{p90} + k_2 (1-r)T_e + k_3 rT_t + k_4 T_l \quad [3]$$

ただし、 k_i は偏回帰係数

表-4に各項の相関行列を示す。最も高い相関係数でも T_l と $(1-r)T_e$ の-0.36であり、各項間に強い相関は見られず互いに独立していると言える。

表-4 式[3]の相関行列

項	T_{p90}	$(1-r)T_e$	rT_t	T_l	
T_{p90}	1.00				Sym.
$(1-r)T_e$	-0.02	1.00			
rT_t	0.29	-0.35	1.00		
T_l	0.13	-0.36	0.14	1.00	

回帰分析の結果、決定係数は $R^2=0.92$ であり、非常にあてはまりが良いといえる。それぞれの項の回帰係数を表-5に示す。第1項の管路被害復旧日数 T_{p90} 以外の項の回帰係数は概ね1.0に近い値であり、本研究で導入した各要因の復旧日数や広域水道の比率はそれぞれ独立しており、復旧日数の加算方式によって再現できることを示している。また、図-8の通水率90%達成日数で合わなかったものが予測通水日数 T_{est1} や T_{est2} で実際の通水日数をほぼ再現できるということは、広域水道の送水停止や液状化が断水長期化の支配的な要因であったことを示している。

一方、断水長期化の要因として広域災害による管路復旧資源の不足、遅れを挙げていたが、表-5の回帰分析の第1項の回帰係数が1.75と2に近い値が算出され、これらの影響が定量的に示されたと考えられる。つまり、通

水率 90%までの管路復旧日数の予測式は本地震の通水日数を過小に評価しており、外部からの復旧資源が充実していた過去の地震と比べ、本地震は復旧活動そのものに支障を来していたといえる。

表-5 回帰分析の偏回帰係数

項	項の説明	回帰係数	説明変数	係数の値
1	復旧活動の遅延	k_1	T_{p90}	1.75
2	施設停電	k_2	$(1-r)T_e$	0.86
3	広域水道供給停止	k_3	rT_f	0.81
4	液状化	k_4	T_l	1.17

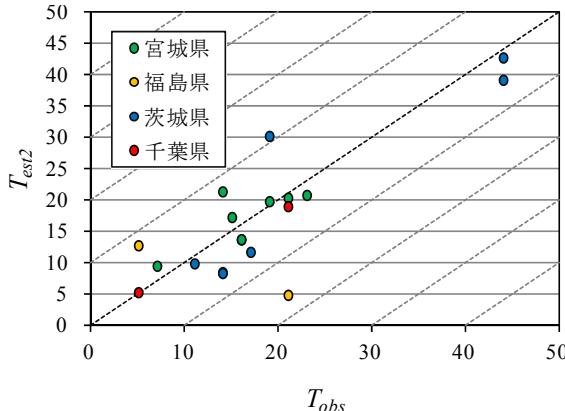


図-10 予測通水日数 T_{est2} と通水率90%達成日数 T_{obs} の関係 ($R^2=0.92$)

4. 断水長期化要因が与えた影響の定量化

本研究では式[3]の回帰分析によって得られた予測通水日数 T_{est2} を用い、それぞれの断水長期化の要因が通水日数、断水戸数に与えた影響を定量的に評価する。表-6は分析対象市町の各項の予測通水日数を示している。

表-6 予測通水日数 T_{est2} における各要因の配分日数

県	市町村	予測通水日数 T_{est2} における各要因の配分日数						
		$k_1 T_{p90}$	$k_2 (1-r)T_e$	$k_3 rT_f$	$k_4 T_l$	T_{est2}	$k_3 rT_f$ 比率(%)	$k_4 T_l$ 比率(%)
宮城県	仙台市	9.1	1.7	2.8	0.0	13.6	21	0
	利府町	7.3	0.3	12.1	0.0	19.7	62	0
	塩竈市	13.3	4.5	3.4	0.0	21.3	16	0
	松島町	17.4	0.0	3.3	0.0	20.7	16	0
	大崎市	5.5	0.3	0.8	10.6	17.2	5	62
	栗原市	7.6	5.2	0.8	0.0	13.6	6	0
	美里町	12.6	2.7	4.9	0.0	20.3	24	0
	大郷町	4.2	2.0	3.2	0.0	9.4	34	0
福島県	登米市	4.4	4.0	0.0	0.0	8.4	0	0
	いわき市	4.8	0.0	0.0	0.0	4.8	0	0
	郡山市	7.8	4.9	0.0	0.0	12.7	0	0
	日立市	5.7	4.0	0.0	0.0	9.8	0	0
茨城県	ひたちなか市	4.0	3.4	0.8	0.0	8.3	9	0
	那珂市	4.3	1.2	2.6	3.5	11.6	22	30
	鹿嶋市	11.6	0.6	1.5	16.4	30.1	5	55
	潮来市	9.0	2.2	0.9	27.0	39.1	2	69
	神栖市	9.8	0.0	12.9	20.0	42.6	30	47
千葉県	旭市	3.5	0.0	1.7	0.0	5.2	33	0
	香取市	6.0	0.0	0.0	12.9	18.9	0	68

図-11に予測通水日数 T_{est2} とそれに示す各項の割合を示している。図に取り上げている市町は、図-5で定性的に広域水道と液状化が断水長期化の要因として影響が大きいとして示した市町である。図-11(a)の広域水道に関する項の割合は、広域水道からの受水割合が高い利府町が62%と最も高かった。栗原市では送水停止期間が長かったが受水割合が低く、停電期間が長かったために、広域水道の

影響が強く現れなかった。また図-11(b)の液状化に関する項の割合は、液状化被害によって復旧が遅れた潮来市が69%と最も高かった。管路被害による復旧日数が約2倍になっていることを勘案すると、液状化による要因は震による既往の管路被害の復旧日数の6~8倍近く長期化したことを示す。

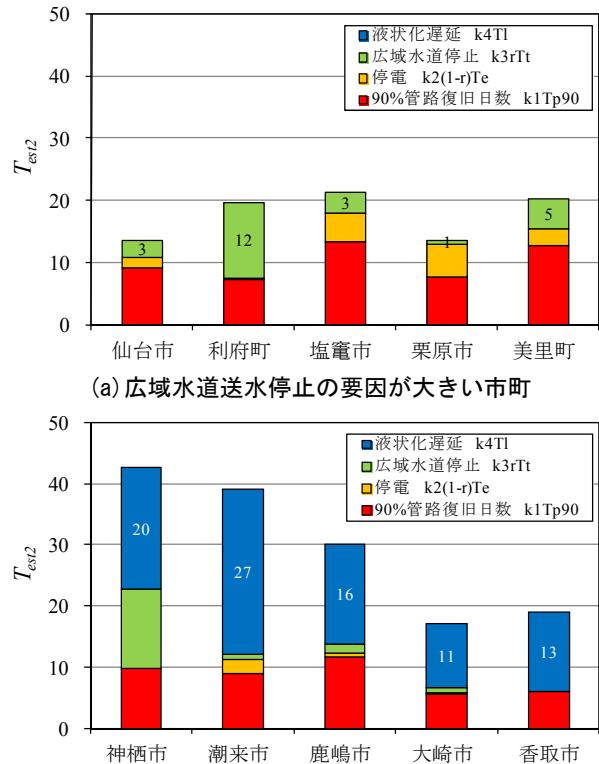
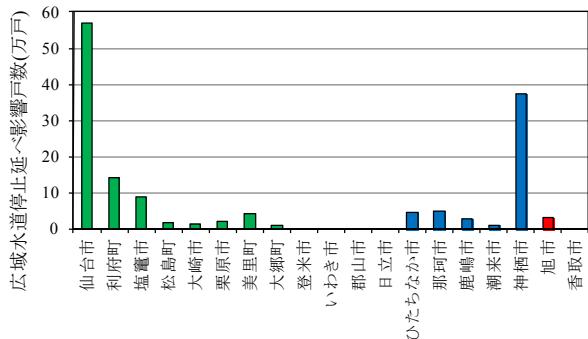


図-11 予測通水日数における断水長期化要因の割合

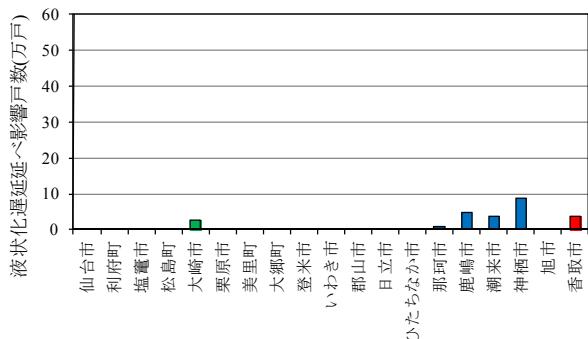
図-7の示すように断水解消過程において、広域水道による断水の影響は、広域水道の復旧日数に全戸数を乗じることで、断水の影響に晒された延べ断水影響戸数として扱うことができる。また、液状化による断水日数の遅延は、仮に断水影響世帯を全戸数の30%と仮定したときに、液状化による遅延日数に全戸数の30%を乗じたものの半分(図-7(c))の遅延による三角形の面積に全戸数を乗じたものに相当し、液状化による延べ断水影響戸数として扱える。本地震における各市町の延べ影響戸数を図-12に示す。広域水道停止の延べ影響戸数は本研究で対象とした自治体全体で143万戸、給水戸数の多い仙台市が延べ影響戸数57万戸、広域水道の復旧日数が大きかった神栖市が37万戸と受水市町の中でも影響が大きい。単純計算ではあるが、断水期間に断水世帯に一人3リットルを4m³給水車で給水するとすれば、仙台市の広域水道による延べ影響戸数だけで1,050台分に相当する。また、液状化による断水長期化による延べ影響戸数は今回対象とした自治体全体で25万戸あり、広範囲に液状化が発生した神栖市が9万戸と市町の中でも影響が大きい。また、広域水道の復旧日数 T_f や液状化の復旧日数 T_l が大きかった市町が必ずしも延べ影響戸数が高いわけではない。これら以外にも断水戸数や r など複数の値が、延べ影響を評価する上で重要となる。

本研究で取り上げた東北地方太平洋沖地震の断水長期化要因をまとめると、広域災害によってもたらされた広域での水道システムや他ライフルインのつながりや被災

地が増加することによる復旧資源や応援体制の遅れと、海溝型地震によってもたらされた広域液状化に二分される。これらは、これまで経験的な通水日数を倍増させるだけでなく、さらに各要因が加算方式で影響していくことが明らかになった。



(a) 広域水道送水停止による断水長期化の影響



(b) 管路網の液状化による断水長期化の影響
図-12 断水長期化要因による延べ影響戸数

5. 結論

本研究では東北地方太平洋沖地震における自治体の断水長期化の要因とその影響を定量的に評価することを試みた。本研究は以下のようにまとめられる。

- 広域水道被害、液状化被害などの断水長期化要因の影響度が大きい市町の水道の断水解消過程を比較した結果、断水長期化の要因の違いによって、各市町の断水解消過程は特徴づけられることが分かった。
- 本地震の通水日数は既往の通水日数に加え、広域水道復旧日数、広域水道が占める水供給の割合、電力復旧日数及び液状化による遅延日数を組み合わせることで説明できることが明らかになった。
- 広域災害であるがゆえに管路復旧にも倍の日数を要していることが明らかになった。
- 既往の通水日数予測式を拡張させた予測式を用い

ると、検討した市町の中の最大の要因は通水日数の62%が広域水道に起因するものであり、また通水日数の69%が液状化に起因するものであることが明らかになった。

- 断水延べ影響戸数という指標を用いて市町における広域水道停止と液状化の影響を評価したところ、広域水道停止による断水長期化の影響は供給戸数の多い宮城県仙台市と送水停止期間が長い茨城県神栖市において大きく、液状化による断水長期化の影響も液状化による被害が甚大であった神栖市において大きかったことが定量的に明らかになった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の水道事業体の皆様には、ヒヤリング調査ならびに資料提供に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 厚生労働省: 平成 23 年 (2011 年) 東日本大震災の被害状況及び対応について, (<http://www.mhlw.go.jp/jishin/joukyoutaiou.html>), 2011
- 2) 土木学会地震工学委員会: 水道施設の被害、土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, pp. 10-1-10-61, 2011.5.20
- 3) 大西洋二、鍬田泰子: 広域災害時における応急給水能力に関する一考察—東日本大震災の事例—, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演構文集, 2011
- 4) 厚生労働省健康局水道課: 東日本大震災に係る水道関係の最近の動きについて, (<http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001hhf7.html>), 2011.6
- 5) Nobuoto Nojima: Lifeline Restoration Overview, Briefing report for ASCE/TCLEE at JSCE, 2011.6.13
- 6) 宮城県: 仙南地域の概要、宮城県大河原地方振興事務所ホームページより, (<http://www.pref.miyagi.jp/>), 2011.11.4
- 7) 気象庁: 震度データベース、気象庁ホームページより, (<http://www.jma.go.jp/>), 2012.1.4
- 8) 旭市: 災害関連情報、旭市ホームページより, (<http://www.city.asahi.lg.jp/>)
- 9) 高田至郎、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
- 10) 神戸市水道局: 阪神・淡路大震災水道復旧の記録, 1996.2
- 11) 若松加寿江: 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会, 2011.3
- 12) 日本水道協会: 平成 19 年度水道統計施設編, 2008

(原稿受付 2012.1.6)

(登載決定 2012.5.26)