

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

吉澤 源太郎¹・畑山 満則²・多々納 裕一²

Simulation Model of Disaster Recovery Process of Industrial Waterworks in Consideration of Human Resources Input

Gentaro YOSHIZAWA¹, Michinori HATAYAMA² and Hirokazu TATANO²

Abstract

This paper addressed the method of recovery process simulation of industrial waterworks in a disaster. The industrial water supply system is a system independent from a drinking water supply system and its customer is mostly contracted industrial businesses. The industrial water is an essential element to continue the urban industrial activities. However, in most cases, the disaster recovery of the industrial water supply system is deferred because a higher priority is assigned to the recovery of the tap water supply system among the urban water supply systems. It is important to consider an early recovery of industrial waterworks from the viewpoint of advancing of the industrial rehabilitation in an affected area. Based on this background, the present study analyzed the characteristics of the damages and recovery process of industrial waterworks during the 2011 Great East Japan Earthquake, and based on these results, attempted to construct the simulation model of disaster recovery processes of industrial waterworks in consideration of human resources input. The model was mainly formed in combination with a workload analysis sheet and a multiple regression model of the human resource input amount when damage factors due to a disaster were adopted as an explanatory variable.

キーワード：工業用水道，災害復旧曲線，人的資源，山積み図，重回帰モデル

Key words: industrial waterworks, disaster recovery process, human resource, workload analysis sheet, multiple regression model

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

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

本論文に対する討議は平成 29 年 8 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

工業用水は、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る。とくに製造業においては、生産ラインが稼動するために冷却用水、洗浄用水、その他雑用水として、工業用水は必需品である。しかしながら、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・健康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、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¹⁾。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た²⁾。

震災等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³⁾。そのため、こうした事態にも迅速に対処できるよう工業用水道の災害対策はより注目すべき事案である。

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⁴⁾。

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^{5,6)}を比較した結果を図1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。こうした工業用水の余剰水は、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もある^{7,8)}。

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ということもあり、こうした有効活用の本格議論を足踏みさせる要因ともなっているのが実状である。

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

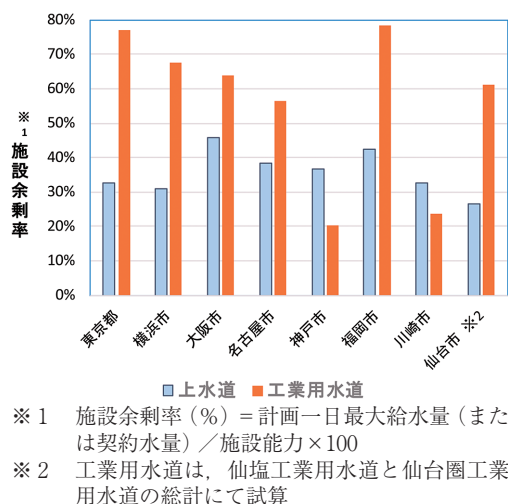


図1 上水道と工業用水道の施設余剰率^{5,6)}

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。そこで本研究では、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者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^{9,10)}。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。そこで本研究では、このような課題の解決にあたり、人的資源制約下の作業工程調整問題に用いられる PERT/MANPOWER の概念を導入するとともに、施設被害因子を説明変数とした人的資源投入必要量の重回帰モデルを内包することで、工業用水道の復旧に当たる人的資源が、いつ、どの程度投入すべきかなどを把握可能とする災害時復旧予測モデルを提案する。

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

2.1 被災工業用水道の施設概要と被害状況

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。本研究では、その内、断水が発生した19事業（図2）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」¹⁰⁾、における掲載データを基にまとめれば、表1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、日上市工業用水道、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

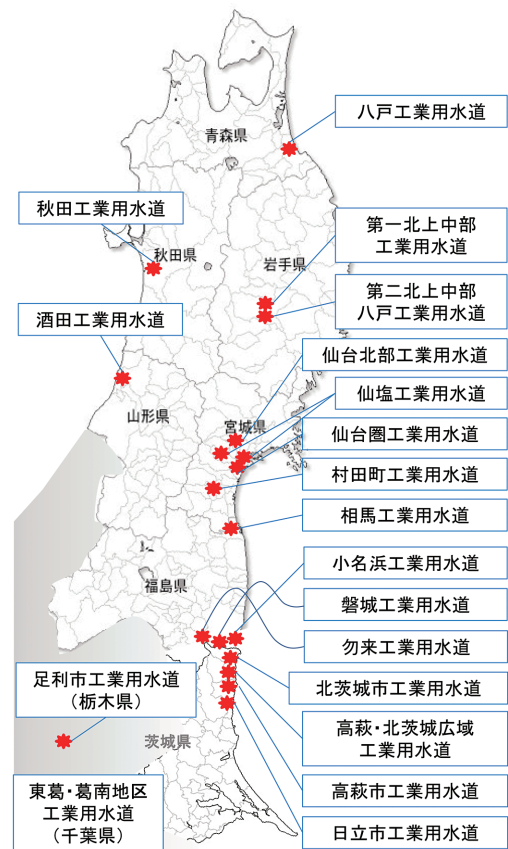


図2 被災工業用水道の位置図

表1 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¹⁰⁾

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 (m ³ /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	0	0	0	0	0	0	5	
秋田県	秋田	200,000	25	27,574	4	1.1	パナテリコ								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	
福島県	仙塩	100,000	45	78,322	6強	2.8	2.8	9	3	63	10	3		194	1.0	
	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	
茨城県	相馬	34,700	7	26,962	6弱	0		3		6				60	9.0	
	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		
栃木県	高萩・北茨城広域	15,000	12	10,774	6強	2.6			1					14		
	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

に起因した給水停止が総じて発生していた。

●管路のうち、とくに口径φ500 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。

また、表1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¹¹⁾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て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。

2.2 復旧曲線の類型化

被災工業用水道の復旧曲線を図3、4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¹⁰⁾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。

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)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¹¹⁻¹⁴⁾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

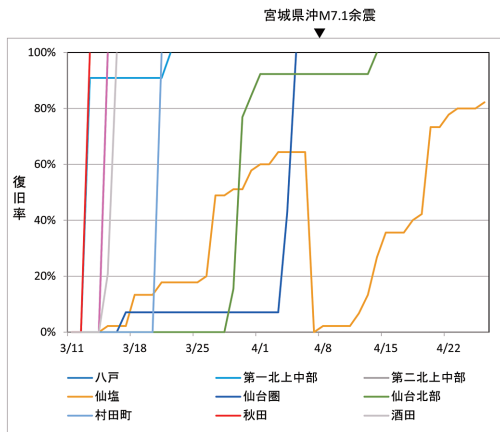


図3 被災工業用水道の復旧曲線(青森・秋田・山形・岩手・宮城)「東北地方太平洋沖地震に係る被災状況にかかるアンケート調査結果」((一社)日本工業用水協会)¹⁰⁾を元に筆者作成

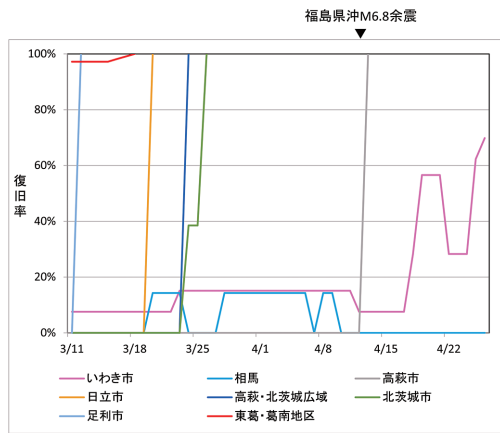


図4 被災工業用水道の復旧曲線(福島・茨城・栃木・千葉)「東北地方太平洋沖地震に係る被災状況にかかるアンケート調査結果」((一社)日本工業用水協会)¹⁰⁾を元に筆者作成

て少ないこと(表1), 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

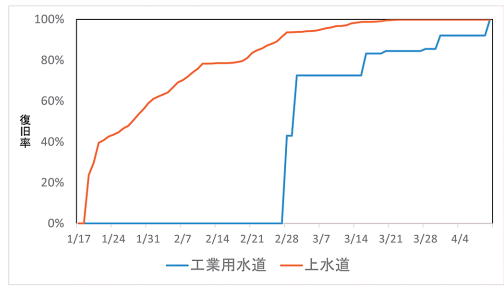
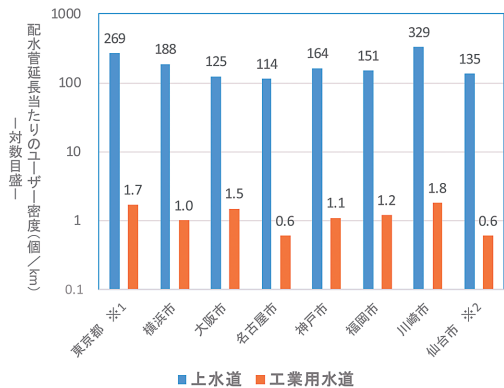


図5 阪神・淡路大震災の工業用水道の復旧曲線⁹⁾



- ※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6 工業用水道と上水道のユーザー線密度の比較^{5,6)}

度^{5,6)}を示せば図6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。

続いて, 図3, 4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,

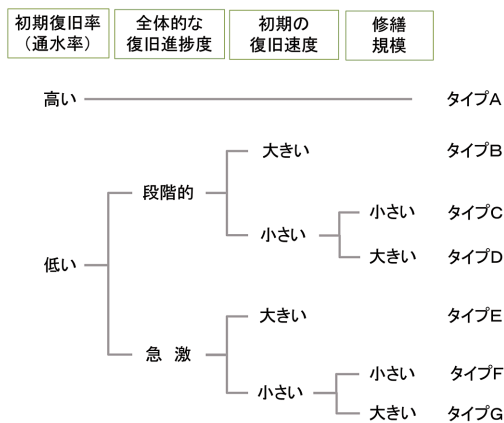


図7 復旧曲線の類型化の考え方

図7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8に示す。

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。

以上の特徴を踏まえ、工業用水道の災害時復旧曲線のモデル化を次章で試みることにしたい。

2.3 管路ネットワークの復旧手順

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9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¹⁰⁾。

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7, 8におけるタイプBの型を示した)宮城県営仙塩工業用水道のケースに着目した^{10, 15)}。

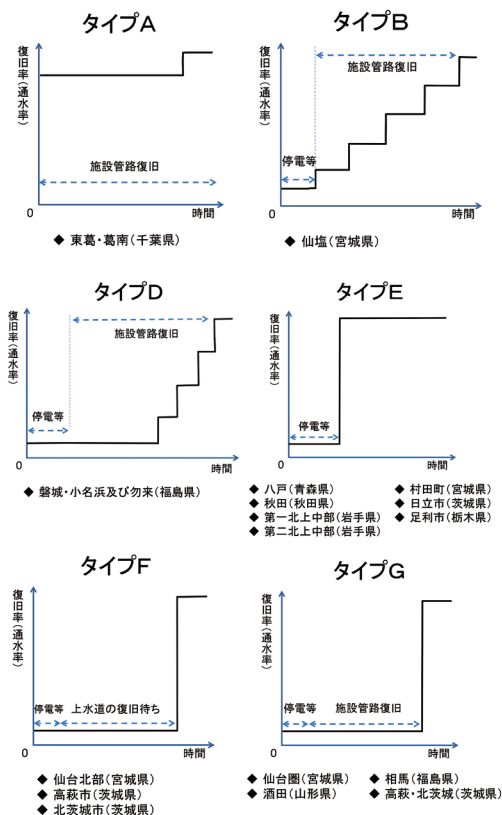


図8 被災工業用水道の復旧曲線の類型化

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100,000 m³/日の工業用水供給施設である。ユーザー数は45である⁵⁾。その結果を図10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箇所の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。

他の被災工業用水道事業についても調査した。

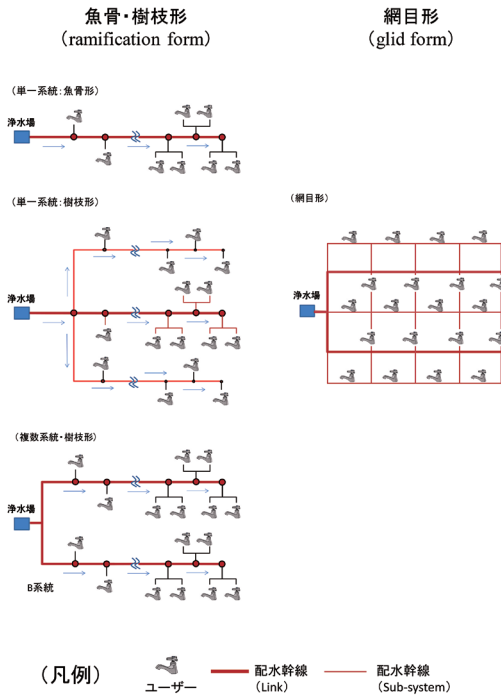


図9 水道システムの主な管路ネットワーク形態

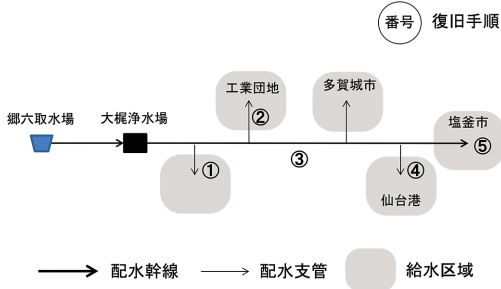


図10 管路復旧手順－仙塩工業用水道を例にとって－

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、末端の配水支管の復旧に当たったことが確認できた^{10, 15, 16}。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^{9, 17}。以上を図7、8の復旧曲線

表2 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	複数箇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

の類型に照らしつつまとめると表2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。

3. 工業用水道の災害時復旧モデルの考え方

3.1 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、工業用水道システムへの適用を考えた際に最も適当と考えられる手法につい

て考察する。

能島ら¹⁸⁾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」¹⁸⁾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」¹⁸⁾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者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^{19, 20)}。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^{18, 21)}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²²⁾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²³⁾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、2.1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、2.2で指摘したように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¹⁸⁾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者や被害想定に関連する一部機関に限定される」¹⁸⁾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」¹⁸⁾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⁵⁾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。

3.2 本研究におけるモデル化の範囲

ライフラインシステムの災害時復旧曲線は、図11に示す手順で推計される。

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11における最終ゴールは、「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、1.および2.1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12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12の $\Sigma h(t)$)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。

さらに、とりわけ後者の $\Sigma h(t)$ 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

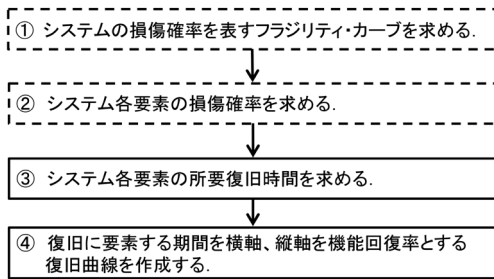


図11 本研究におけるモデル化の範囲

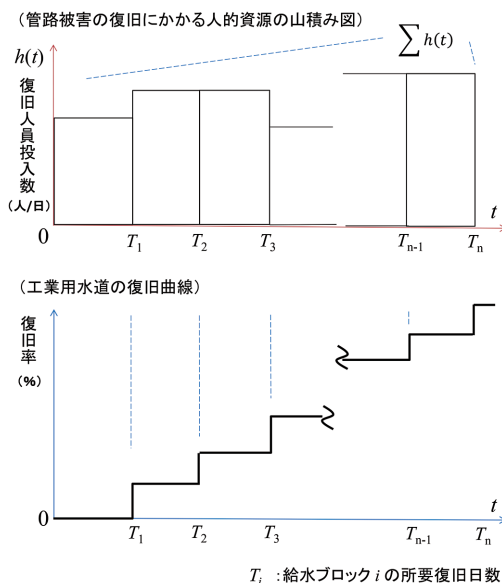


図12 復旧曲線と人的資源投入との関係図

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13のとおりである。

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13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14のとおり総括することができる。

3.3 工業用水道システムのモデル化

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15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²⁴⁾、星谷ら^{25,26)}、清水ら²⁷⁾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。

3.4 工業用水道の災害時復旧曲線の定式化

2.3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うモデルである。図15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

ステップ1) 6つの説明変数(最大数)を選択

重回帰モデル

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

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R ²	0.965
有意F値	0.026

非常に相関が高い

	t値	p値
φ500以上被害数	8.944	0.012
φ500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3) 4つの説明変数を選択

重回帰モデル

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

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R ²	0.967
有意F値	0.001

非常に相関が高い

	t値	p値
φ500以上被害数	9.901	0.001
φ500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2) 5つの説明変数を選択

重回帰モデル

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

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R ²	0.975
有意F値	0.003

非常に相関が高い

	t値	p値
φ500以上被害数	11.457	0.001
φ500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

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R ²	0.894
有意F値	0.002

相関が高い

	t値	p値
φ500以上被害数	2.363	0.064
φ500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

ステップ5) 2つの説明変数を選択

重回帰モデル

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

被害規模をあらわす変数

自由度調整R ²	0.515
有意F値	0.048

相関が低い

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

ステップ4)で決定

図13 変数選択プロセス

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 $t_m^i (i=1,2,\dots,n)$ 、各サブリンクの復旧に要する所要日数 t_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、次式とおりとなる。

$$T_1 = t_1^m + t_2^m + t_1^s \tag{1}$$

ここで、図8に示したように、とくに大規模な

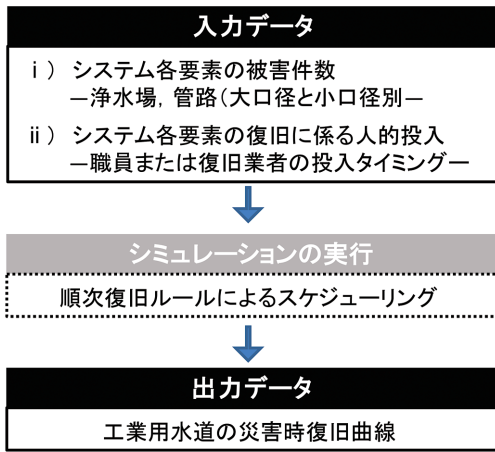


図14 モデルによる算定フロー

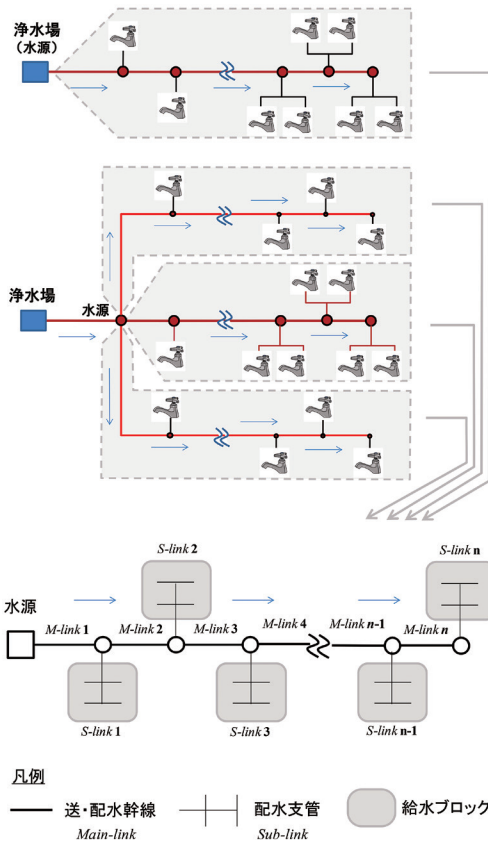


図15 工業用水道の配水系統のモデル化

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^w 、上水道の復旧待ちなどの復旧待ち期間を t^s 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。

$$T_0 = \max(t^s, t^w) \tag{2}$$

T_i ($i=1, 2, \dots, n$) は次式で表される。

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + (t_1^m + t_2^m + t_1^s) \\ T_2 = T_1 + (t_3^m + t_2^s) \\ T_3 = T_2 + (t_4^m + t_3^s) \\ \vdots \\ T_{n-1} = T_{n-2} + (t_n^m + t_{n-1}^s) \\ T_n = T_{n-1} + t_n^s \end{cases} \tag{3}$$

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。

$$R(t) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i U(t - T_i)}{\sum_{i=0}^n u_i} \tag{4}$$

$U(\quad)$ は単位ステップ関数であり、次の性質を有している。

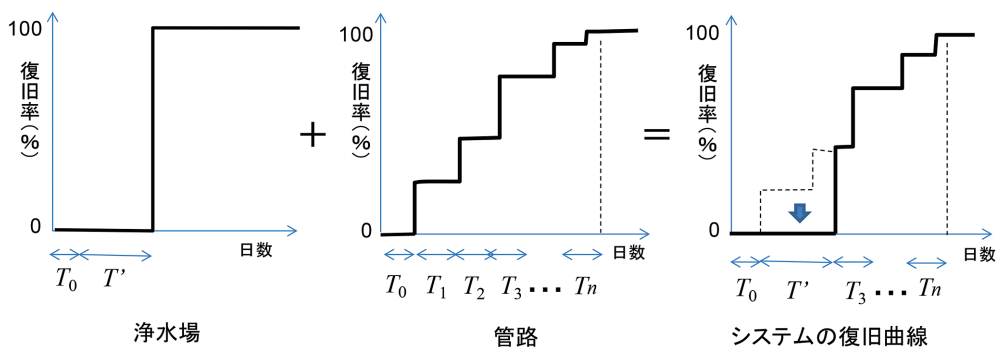
$$\begin{cases} U(t - T_i) = 0 & (t < T_i) \\ U(t - T_i) = 1 & (t \geq T_i) \end{cases} \tag{5}$$

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^{10,11)}。

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16の概念図のとおり変化する。

3.5 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。



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16 浄水場復旧と管路復旧の同時作業時の復旧曲線

- 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 (6)、(7) で表される。

$$t_i^m(d_i, h_i^m) = \frac{Ld_i}{(h_{in,i}^m + h_{ex,i}^m)} \tag{6}$$

表3 応急復旧作業班の構成事例²⁸⁾

	職員数 h	業者数 c	職員あたり 必要業者数 c/h
1. $\phi 500$ 以上 管路の復旧	2.0人	12.0人	6.0 (人／人)
2. $\phi 300 \sim \phi 400$ 管路の復旧	0.5人	12.0人	24.0 (人／人)
3. $\phi 300$ 未満 管路の復旧	0.5人	6.0人	12.0 (人／人)
4. 施設の復旧	2.0人	必要数	—

注) バルブ操作や住民への工事 PR を事業者職員で行う場合は、職員数の割合が高くなる。職員と業者との人数配分は、作業分担によって変更される。

$$t_i^s(d_i, h_i^s) = \frac{Ld_i}{(h_{in,i}^s + h_{ex,i}^s)} \tag{7}$$

よって式 (4) は、式 (8) として整理される。

$$R(t, d, h) = \sum_{i=0}^n u_i U(t - T_i(t_i, d_i, h_i)) / \sum_{i=0}^n u_i \tag{8}$$

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。その班編成の一例は表3のとおりであり、式 (6)、(7) 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。

定数 L については、東日本大震災の被害・復旧活動記録¹⁰⁾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4に基づ

表 4 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)	管路被害数 ※2		※3 浄水場被害数	(参考)	
			φ500以上	φ500未満		停電期間(日)	※4 準備期間(日)
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 他事業者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。

表 1 および「東日本大震災の復旧活動記録」((一社)日本工業用水協会)¹⁰⁾を元に筆者作成

表 5 回帰係数の推計結果

記号	項の説明	係数値
L^1	φ500以上管路等の 復旧作業歩掛(人・日/箇所)	42.2
L^2	φ500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

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(9)の関係式を導出した。

$$\sum_{i=1}^n (h_i^m + h_i^s) = L^1 d^1 + L^2 d^2 + L^3 d^3 \quad (9)$$

ここに、 L^1 : φ500以上管路および被害箇所周辺の空気弁等付属設備(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。

重回帰分析による回帰係数の推計結果を表5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^{10,15,16)}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。

3.6 復旧曲線の形状決定要因の可視化
 ー人的資源投入の山積み図および工業用水道の被害復旧ポジションを示した管路ネットワーク・グラフ図との連関ー
 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17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。

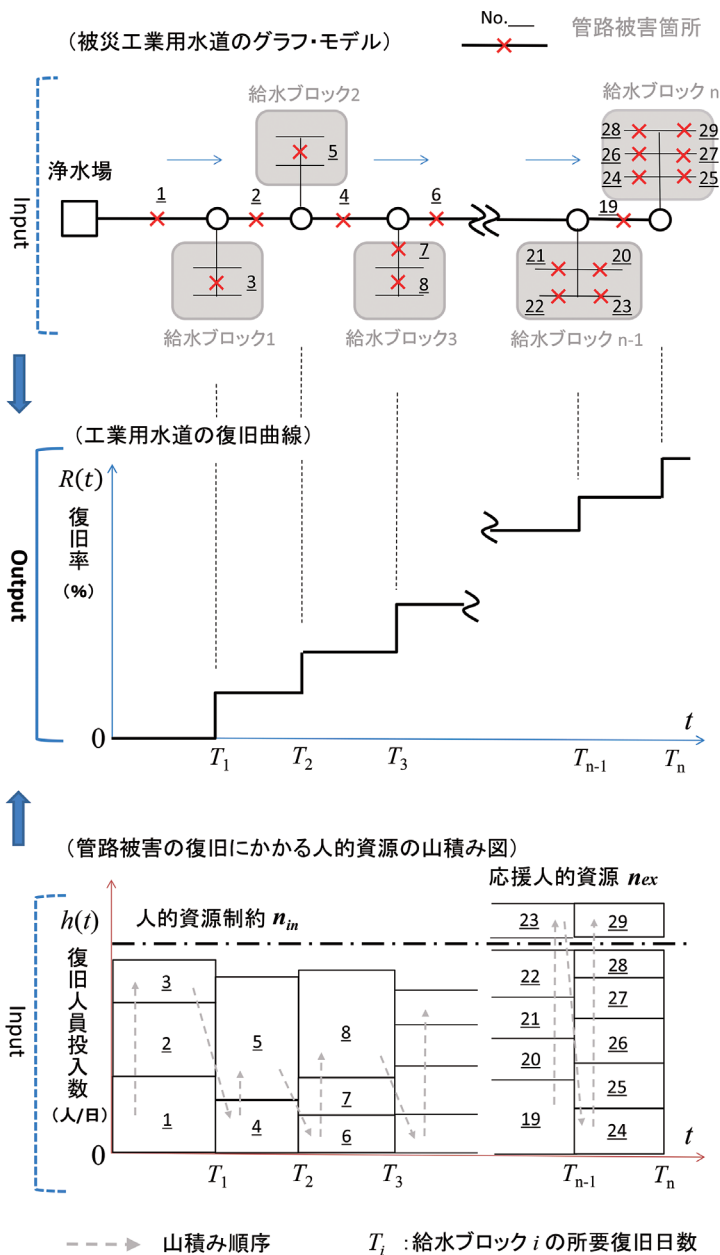


図17 人的資源の山積み図と復旧曲線との連関図

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、工事前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²⁹⁾で活用される図を参考としたものであり、各作業に必要な作業数(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には、非常に有用であると考ええる。

4. モデルの適用例

4.1 対象施設

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員を入力データとして復旧曲線の推計を行う。これら対象施設は図18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から、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。

4.2 宮城県仙塩工業用水道の推計例

まず、2.3で対象とした東日本大震災時における宮城県仙塩工業用水道について、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。

モデルの入力変数については、図19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20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6のとおり設定した。

復旧予測結果を図21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。

4.3 その他の被災工業用水道の推計例

(1) 岩手県第二北上中部工業用水道

第二北上中部工業用水道は、岩手県の内陸工業地帯の一つである北上市を中心とした北上中部地区の工業団地のうち、岩手県中部(金ヶ崎)工業団地および北上南部工業団地へ工業用水を供給するため計画されたものである。現在、給水能力

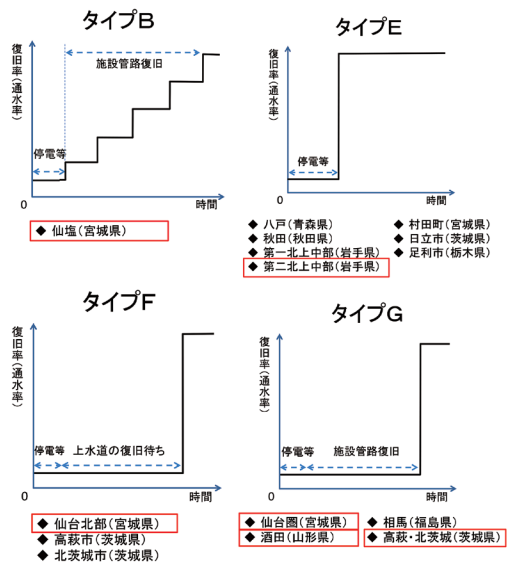


図18 対象施設と復旧特性(図8部分再掲)

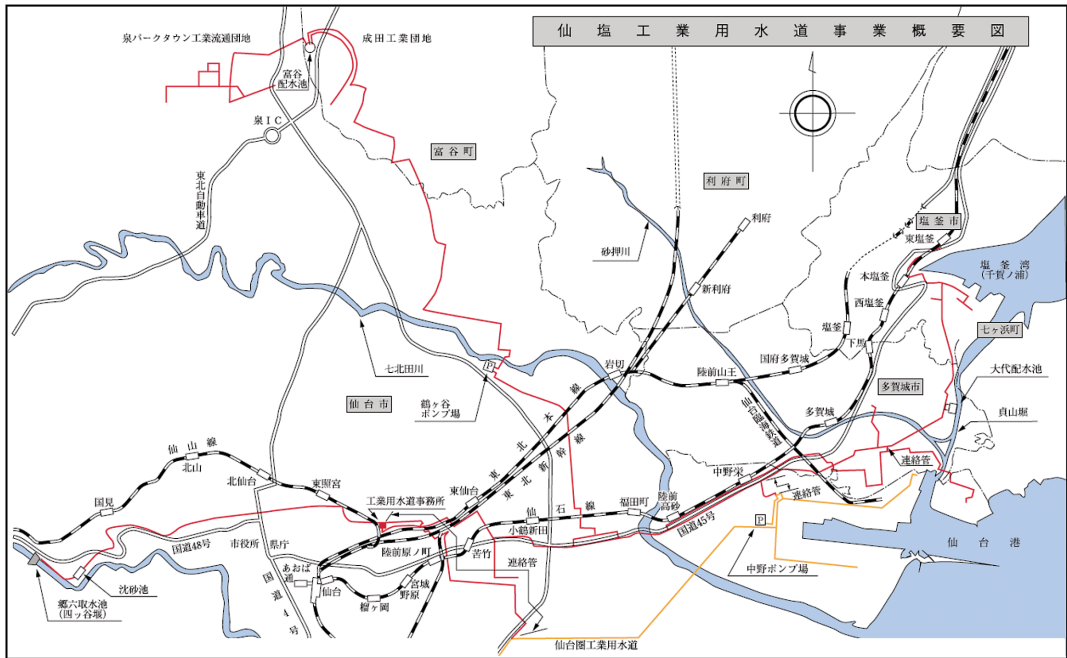
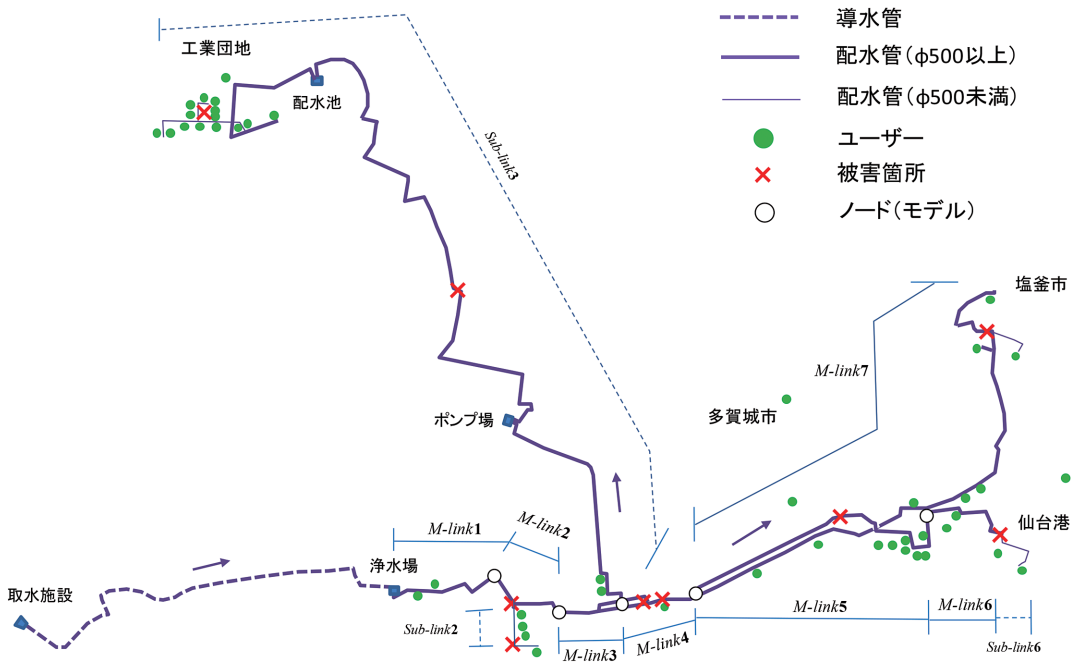


図19 仙塩工業用水道の概要図³⁰⁾



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20 仙塩工業用水道のリンク設定および被害箇所

20,000 m³/ 日を有している⁵⁾。

実被害結果に基づき設定したモデルの入力変数と予測結果は図22のとおりであり、予測結果と実際の復旧タイミングは一致した。

表6 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	i	被害数		Sub-Link	i	被害数		ユーザー数	通水率
		d^{m1}_i	d^{m2}_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%

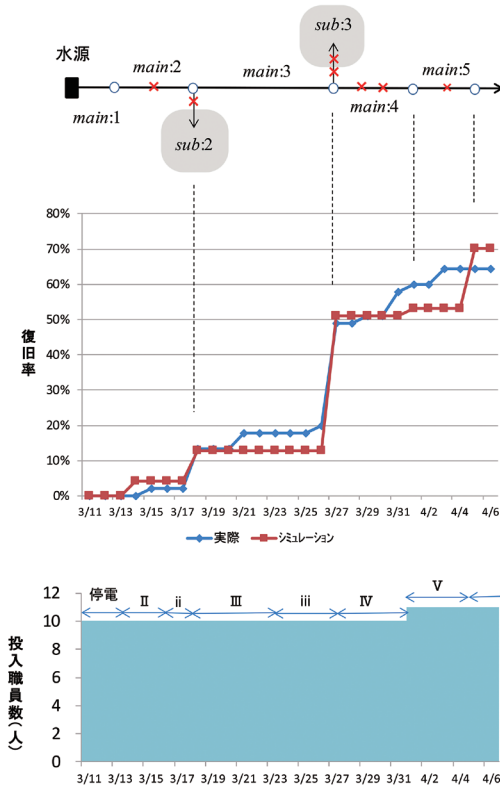


図21 宮城県仙塩工業用水道の推計例

(2) 宮城県仙台圏工業用水道

仙台圏工業用水道は、仙台港背後地に立地する企業に給水能力100,000 m³/ 日の工業用水を供給するため建設されたものである⁵⁾。

モデルの入力変数と予測結果は図23のとおりであり、とくに4月4日の復旧完了時期をほぼ正確に予測できた。

(3) 宮城県仙台北部工業用水道

仙台北部工業用水道は、宮城県内陸部の仙台北部中核工業団地並びに古川市、志田群三本木町および加美郡加美町における立地企業に対し一日最大58,500 m³/ 日の工業用水を供給するために建設されたものである。ユーザー数は13であり、そのほとんどは管路ネットワーク末端に位置する給水ブロックに集中配置されている^{5,15)}。

本推計では、実際の通水再開時期3/29~3/31の短期間に集中していることを踏まえ、管路復旧がすべて完了するまでユーザーへの給水は開始されないという想定で行った。なお、ユーザー側の

- 停電期間 (日) : t^e 2.0 (3/13PM復電)
- 復旧待ち期間 (日) : t^w 0.0
- 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		ユーザー数
i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	u_i
-			-		1	6

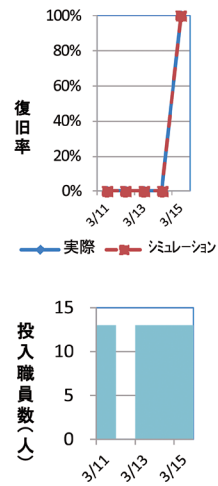


図22 岩手県第二北上中部工業用水道の復旧予測

■ 停電期間(日): t^e 4.1
 ■ 復旧待ち期間(日): t^w 1
 ■ 浄水場被害数(箇所): d^3_i 1

■ 管路被害数(箇所):

Main-Link		被害数			Sub-Link		被害数			ユーザー数	
i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	u_i		
-	4		-						14		

■ 停電期間(日): 4.1
 ■ 復旧待ち期間(日): t^w 2
 ■ 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			ユーザー数	
i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	u_i		
-	3		-						13		

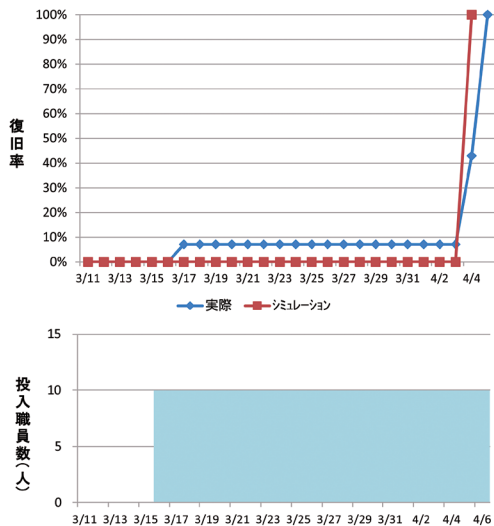


図23 宮城県仙台圏工業用水道の復旧予測

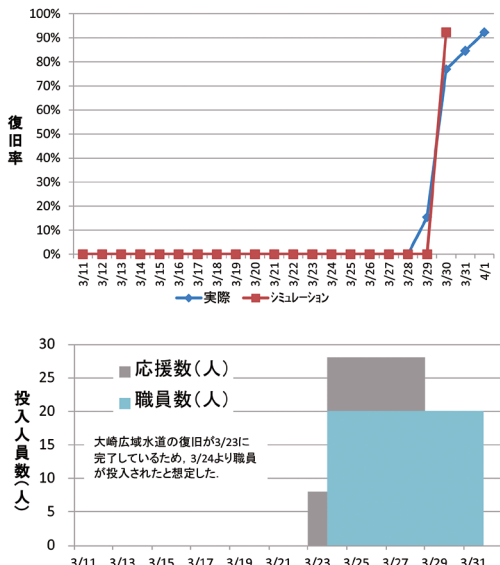


図24 宮城県仙台北部工業用水道の復旧予測

都合により通水を遅らせていた事象が確認されている。その影響を反映して通水率は92.3%にとどまる。

モデルの入力変数と予測結果は図24のとおりである。90%復旧完了期間で実際と予測結果を比較したとき、予測結果が約2日早くなるという結果が得られた。これは3/23～28の投入人員数の想定において、上水道の復旧が完了した翌日より工業用水道の復旧に必要な人員が投入されたという想定を付加したためであると考えられる。

(4) 山形県酒田工業用水道

酒田工業用水道事業の給水区域は、山形県の日本海側に位置する酒田市の大浜・北港地区と川南地区である⁵⁾。

モデルの入力変数と予測結果は図25のとおりである。当該工業用水道の被害の特徴は、大きな管路被害がない一方で浄水場被害が顕著であった点である。復旧人員の投入が速やかになされている

ため通水期間は6日と早いですが、予測結果は1日遅れとなった。浄水場被害の種類は多様であり、単位被害当たりの復旧歩掛については、引き続き精度向上を図る必要がある。

(5) 茨城県高萩・北茨城広域工業用水道

高萩・北茨城広域工業用水道事業は、茨城県と地域振興整備公団(現・中小企業基盤整備機構)が高萩市と北茨城市の工業化を進める上で必要不可欠である工業用水の安定的供給を図るために実施されたものであり、給水能力は15,000 m³/日である。

モデルの入力変数と予測結果は図26のとおりであり、主要な管路被害としては幹線管路1箇所のみであったものの、投入人員が少ないため復旧期間がやや長引いた結果が精度良く再現することできている。

■ 停電期間(日): t^e 0.2
 ■ 復旧待ち期間(日): t^w 1
 ■ 浄水場被害数(箇所): d^3_i 2

■ 管路被害数(箇所):

Main-Link	被害数		Sub-Link	被害数		ユーザー数
i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	u_i
-			-			24

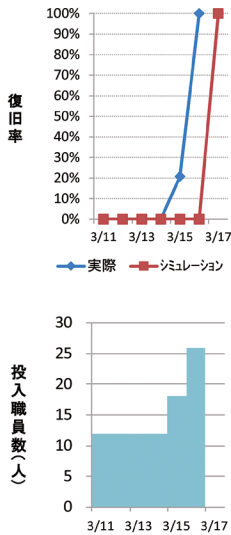


図25 山形県酒田工業用水道の復旧予測

■ 停電期間(日): 2.6
 ■ 復旧待ち期間(日): t^w 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		ユーザー数
i	d^1_i	d^2_i	i	d^1_i	d^2_i	u_i
-	1		-			12

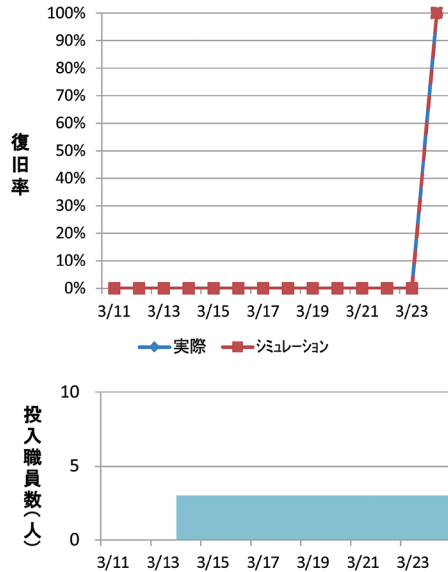


図26 茨城県高萩・北茨城広域工業用水道の復旧予測

4.4 モデルの再現性に関する考察

東日本大震災の被災工業用水道を対象に復旧曲線の推計を進めてきたところであるが、一般に上水道と工業用水道の復旧にかかる事業者職員あるいは請負業者は区別されない。そのため、どの時点から上水道から工業用水道の復旧作業に移行したかなどの明確にされていないケースも多いが、今回は既存報告書および事業者へのヒアリングから可能な限り区分けを行い、モデルの入力データとして推計を進めたところである。

復旧曲線の実事象の再現性を確認するポイントは大きく二点であり、復旧完了期間と曲線勾配の一致性である。前者については今回対象とした6ケースにおいて実事象との良好な再現性が確認された。予測結果が実事象より常に早い完了期間を示すなどの偏りもみられなかった。後者については、被災工業用水道が比較的小規模であったため、6ケース中5ケースについては復旧が一気に進捗

したケースであったところであるが、その対象範囲において良好な再現性を確認できたといえる。

5. おわりに

災害時における都市水供給システムの復旧予測に着目した研究は、これまで上水道を対象に進められてきた。しかしながら、都市活動施設へ産業用水を供給する工業用水道の早期復旧についてもまた被災地の産業活動を再開させる上で不可欠となる。また東日本大震災以降、工業用水の生活雑用水としての緊急時有効活用についても注目が高まっており、その検討の基礎となる工業用水道システムの災害復旧プロセスの予測手法が蓄積されていない状況にあった。とりわけ災害時における工業用水道の復旧は上水道よりも遅い。この主要因は、上水道の早期復旧が優先されるためであることから、人的資源投入量と関連付けた工業用水

道の災害時復旧予測モデルの検討が一つの重要な課題であると考えられた。

本研究で得られた成果と知見は、次のようにまとめられる。

- 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、あるいは震度と通水期間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が確認できた。
- 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。

このように、工業用水道の災害時復旧予測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、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。また、本論文では対象にしなかったが、復旧投入人員の増減による工業用水道システムの復旧期間の感度分析についても重要な課題である。大規模災害時における被災都市の産業復興において、工業用水道の早期復旧は必要不可欠である。上水道と工業用水道の復旧人員の効果的配分を検証する上において、それらの分析は有用な示唆を与えうると考えられる。

謝辞

宮城県企業局をはじめ東日本大震災で被災された工業用水道事業者の関係各位には、所管する工業用水道事業の管路図面および震災時の詳細被災情報などの多くの情報提供いただき、本研究の遂行に当たり多大な御助力を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) (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。
- 2) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査、平成24年3月
- 3) 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、pp.73-102, pp.128-156, 平成23年3月
- 4) 経済産業省：工業用水、http://www.meti.go.jp/policy/local_economy/kougyouyousui/
- 5) (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
- 6) (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
- 7) (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、平成26年3月
- 8) 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、平

- 成26年5月13日
- 9) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, pp.56-59, 平成8年2月
 - 10) (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
 - 11) 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, pp.2.1-2.120, 平成25年3月
 - 12) 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9ライフライン施設の被害と復旧, 第2章水道, 第5章電力施設, 第6章都市ガス施設, 1997.
 - 13) 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報告書-参考資料集-, pp.12-15, 平成24年3月
 - 14) 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, pp.3-18, 平成24年3月
 - 15) 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, pp.1-62, 平成27年3月
 - 16) 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
 - 17) 武市 淳・鍛田泰子：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, pp.267-274, 2009.
 - 18) 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, pp.225-238, 2003.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 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, 2001.
 - 22) 高田志郎・原山絵巴子・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.
 - 23) 鍛田泰子・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, pp.83-91, 2012.7
 - 24) 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, pp.21-30, 1974.
 - 25) 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.
 - 26) 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.
 - 27) 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, pp.265-270, 2002.
 - 28) 日本水道協会：水道維持管理指針, 909 p., 1998.
 - 29) 庄子幹雄：PERT/MANPOWERの応用例, 電子計算機活用セミナー・テキスト CPT-16, 日本科学技術連盟, 1969.
 - 30) 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>

(投稿受理：平成28年1月10日
訂正稿受理：平成29年1月10日)

要 旨

工業用水は、企業が生産活動を行ううえで不可欠な基礎的要素のひとつである。しかしながら、災害時における水道事業者の緊急対応では、上水道の復旧が最優先され工業用水道の復旧はその後に行われる。そのため、工業用水道の災害時復旧予測に関する研究の蓄積は極めて乏しい。災害時における工業用水道の復旧速度の明確化は、被災地域における産業の復旧・再開時期の明確化に繋がる重要な基礎情報となる。

そこで本研究では、東日本大震災における工業用水道の被害・復旧状況の分析結果を踏まえた、災害時における工業用水道の復旧予測モデルを提案する。工業用水道の復旧問題は、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認識の下、PERT/MANPOWER の概念を導入し、施設被害因子を説明変数とした人的資源投入必要量の重回帰モデルを内包することで、工業用水道の主要施設の被害件数と復旧に当たる人的資源の投入時期の2変数の入力により復旧速度を予測可能とするモデルを提案する。