

III-3 相互に関連したライフラインの復旧最適化に関する研究

山崎文雄(千葉大学)

1. 研究の目的

首都圏には重要インフラや社会機能が一極集中し、首都直下地震時の連鎖的被害波及と都市機能マヒが大きな懸念材料となっている。その被害軽減を図るには、ライフライン相互連関および社会機能の相互依存性に起因する被害波及構造を解明し、都市機能の防護戦略と早期復旧戦略を確立することが必要である。本研究テーマでは、被害波及と復旧過程を記述・解析するモデルを構築して都市機能の防護戦略を策定し、安全で迅速な機能過程の実現と地域防災力の向上を図ることを目的とする。具体的には、「広域連携」、「復旧調整」、「自律分散」という相互補完的な対策軸における被害軽減戦略を提案し、社会的インパクトを最小化することを目的としている。

本研究は、以下のテーマについて 5 機関が分担し、実施した。

- ① ライフライン施設被害の相関性と復旧過程の実態解明 千葉大学 山崎文雄、丸山喜久
- ② ライフライン被害波及モデルと解析法の開発 岐阜大学 能島暢呂、久世益充
- ③ 交通インフラ網等の復旧を基点とした広域連携による復旧効率化に関する検討 筑波大学 庄司 学
- ④ 自律分散型拠点構築による地域防災力向上 横浜国立大学 佐土原 聡、吉田 聡、稲垣景子、古屋貴司、岡西 靖
- ⑤ ライフラインの復旧最適化による企業の事業継続性向上に関する検討 鹿島技術研究所 永田 茂

研究の全体構成と個別テーマ間の関係を図 1 に示す。研究全体は、「実態把握」、「モデル化と対策」、「シミュレーション」に示す。

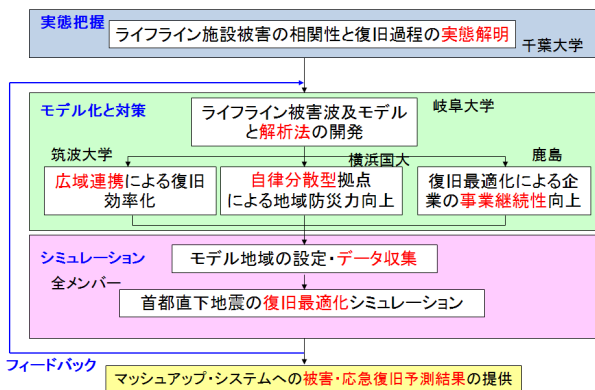


図 1 相互に関連したライフラインの復旧最適化に関する研究の構成とフロー

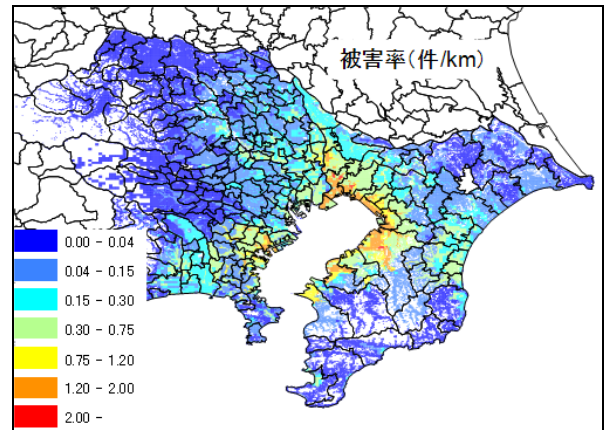


図 2 東京湾北部地震における上水道管の被害率

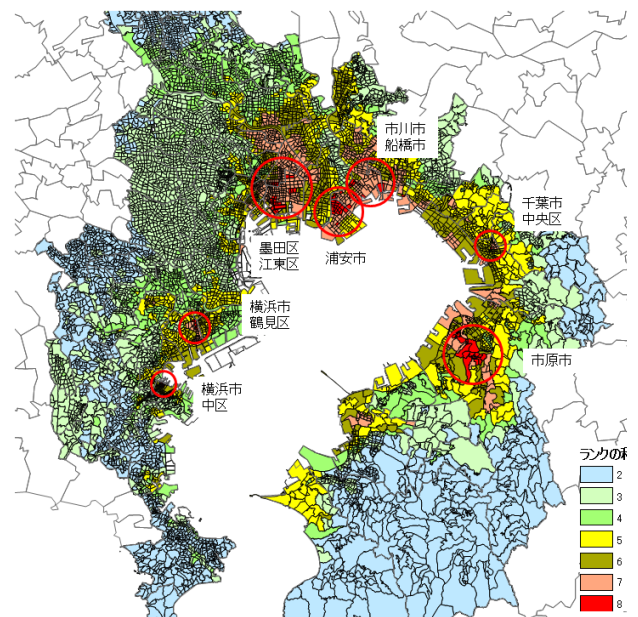


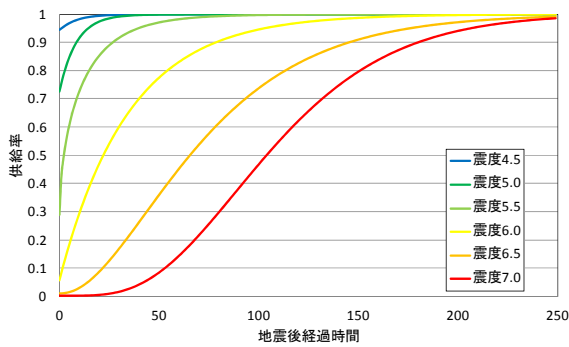
図 3 木造建物全壊率と上水道被害率の相対評価

「シミュレーション」の 3 つの大項目からなり、本年度の研究事業は、いずれのテーマも「シミュレーション」に分類される。

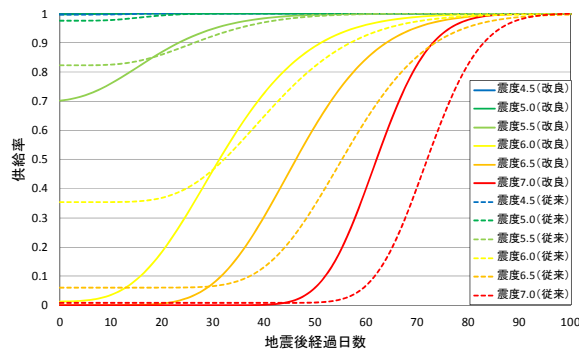
2. 研究成果の概要

2.1 ライフライン施設被害の相関性と復旧過程の実態解明

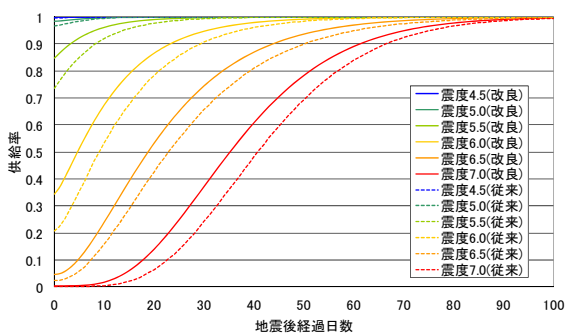
この研究では、近年の上水道管(配水管)の地震被害データと観測された地震波形を用いて、配水管の被害関数を提案した。さらに、この被害関数を用いて、東京湾北部地震が発生した場合の上水道管の被害予測を、1 都 3 県について一括に統一された手法で予測し



(a) 電力



(b) 都市ガス



(c) 上水道

図4 所与の計測震度に対する供給率曲線の予測

た。なお、この際には、1都3県の地震被害想定に用いられている都市基盤データ(250mメッシュ)を使用した。

1都3県について広域かつ一括で被害想定を行うと、都県境を超えて相対的に被害量を比較することができ、広域連携や復旧調整の戦略を立てるのに有益と考えられる。図2に、東京湾北部地震の際の1都3県で予測される上水道管の被害率を示す。震度6弱以上の揺れが予測されている東京湾側の地域で被害件数が多く推定されており、震度6強が予測されている東京都東部低地よりも千葉県などの東京湾側地域が大きくなっている。水道統計を用いた都道府県別の上水道管管種延長の分析結果によると、千葉県は地震に弱い石綿

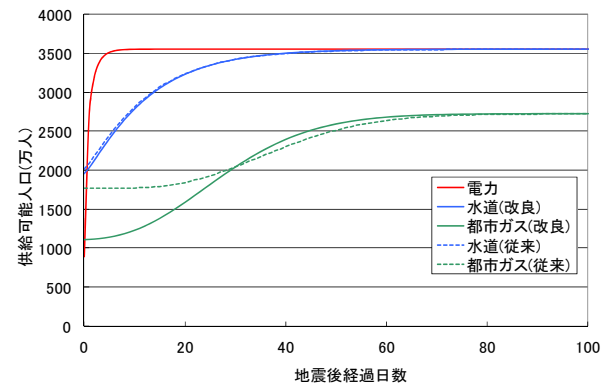


図5 東京湾北部地震で推定されるライフラインの供給可能人口

セメント管(ACP)の残存距離が全国一であり、比較的地震に強いダクタイル鋳鉄管(DIP)の敷設割合が小さい。また東京都では、配水管にはDIPが主として使用されていることが明らかとなっている。このような敷設されている管種の割合の違いが主として影響して、強い揺れが予測されている東京都よりも千葉県の方が水道管被害率が高く予測されていると考えられる。

図3に、木造建物の全壊率と上水道管の被害率とともに相対的に高かった地域を示す。ここで、木造建物のデータは1都3県の地震被害想定に用いられている都市基盤データ(250mメッシュ)であり、1都3県を統一された被害関数で、一括に被害予測を行った。木造建物と上水道管の被害程度がともに高いと想定される地域は、神奈川県横浜市中区、鶴見区、東京都墨田区、江東区、千葉県浦安市、市川市、船橋市、千葉市中央区、市原市などの一部の町丁目であり、東京湾沿いの一部地域で地震被害が複合的に作用するものと予測された。これらの地域では、倒壊した住宅による道路閉塞が発生し、ライフラインの復旧に支障が生じる可能性があるため、東京湾北部地震が発生した際には相対的に迅速な緊急対応が望まれる地域であると考えられる。

2.2 ライフライン被害波及モデルと解析法の開発

この研究では、兵庫県南部地震における被災事例に基づき構築されたライフライン被害・復旧過程の分析モデルを地域固有のライフライン脆弱性を考慮できるように改善し、さらに、ハード面での対策効果を反映できるように改良した。また、この結果を用いて、東京湾北部地震を対象とした復旧シミュレーションを行った。

ライフライン被害・復旧過程の分析モデルの改良については、ライフライン施設の脆弱性やライフライン事業者の地震防災対策の効果を検討できるようにした。電力供給システムについては、特筆すべき事項はなかったため変更なしとした。都市ガス供給システムについ

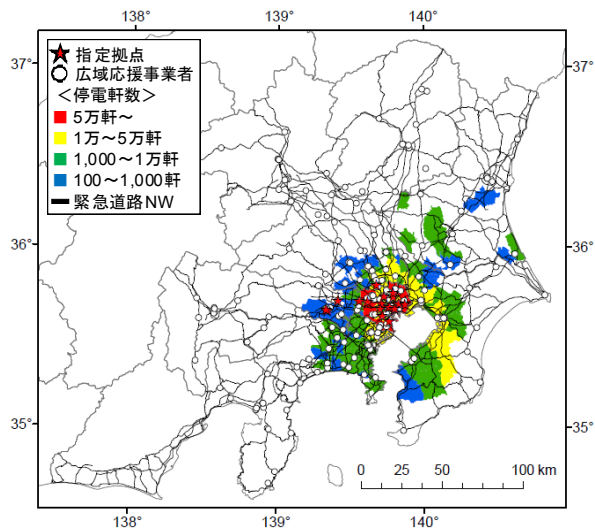


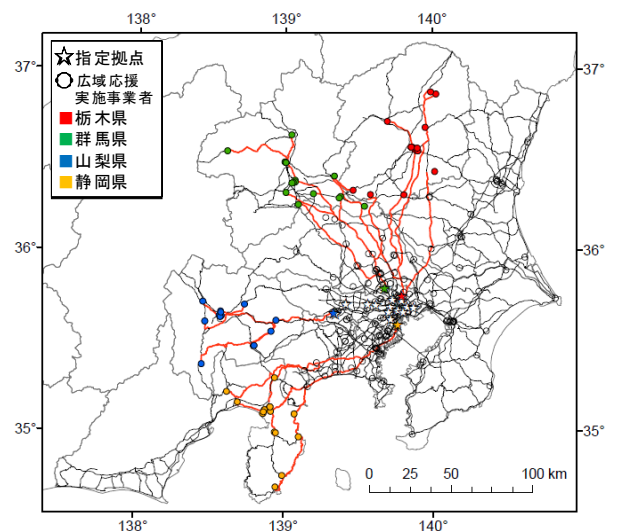
図6 指定拠点及び広域応援事業者の分布（電力）と停電件数

では、自動供給遮断装置が作動する SI 値に基づく機能的フラジリティ関数を採用するとともに、初動体制確立の面での改善を反映して復旧曲線の立ち上がりを早期化してモデルを改良した。上水道システムについては、兵庫県南部地震の被災地域における水道事業者の配水管の脆弱性と予測対象地域の脆弱性との違いを考慮して、脆弱性指数に基づく改良を行う方法を示した。図4に、電力、ガス、上水道（東京都）の供給率曲線を示す。東京湾北部地震における震度暴露人口を考慮し、図4を適用して1都3県の供給可能人口を推定した。結果を図5に示した。

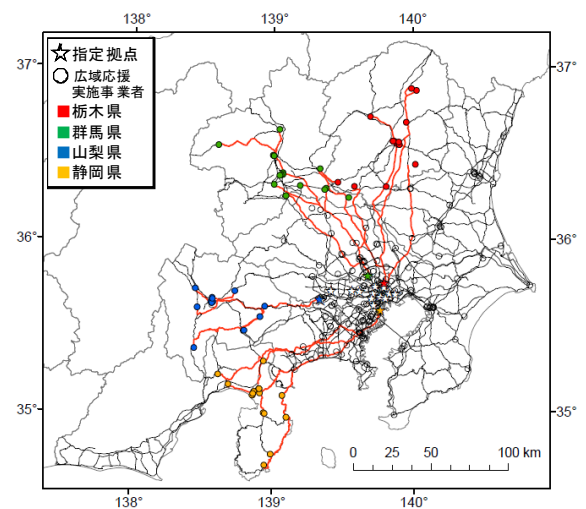
2.3 交通インフラ網等の復旧を基点とした広域連携による復旧効率化に関する検討

この研究は、道路交通インフラ網の中でも広域連携に直結し、インターシティ間の道路交通を担う一般国道クラスの道路網を対象に絞り、緊急交通路並びに緊急輸送路としての機能支障が電力、ガス、上水、下水、通信等の各種ライフラインの復旧遅延に与える影響を明らかにした。さらに、その具体的な影響の低減を目指した広域連携・復旧効率化案を検討した。

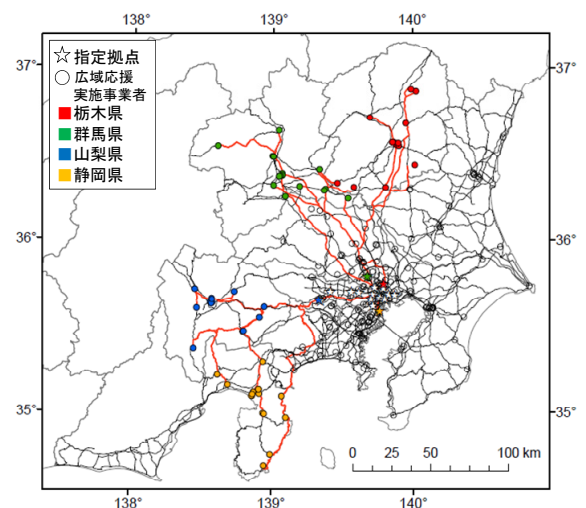
シナリオ地震として、東京湾北部地震を想定する。緊急道路ネットワークの発災後の機能を評価する際には、物理的被害に伴う道路機能の低下及び渋滞等に伴う通行支障（交通支障と定義）を考慮する必要がある。ここでは、物理的被害に伴う道路機能の低下を測る指標として震度に暴露された道路延長距離（震度暴露距離 d_{SI} ）及び液状化危険度に曝された道路延長距離（PL値暴露距離 d_{PL} ）を、道路渋滞の可能性を測る指標として混雑度重み付距離 d_c を、そして所要時間を測る目安として混雑時平均所要時間 t_c をそれぞれ用いる。



(a) Case1

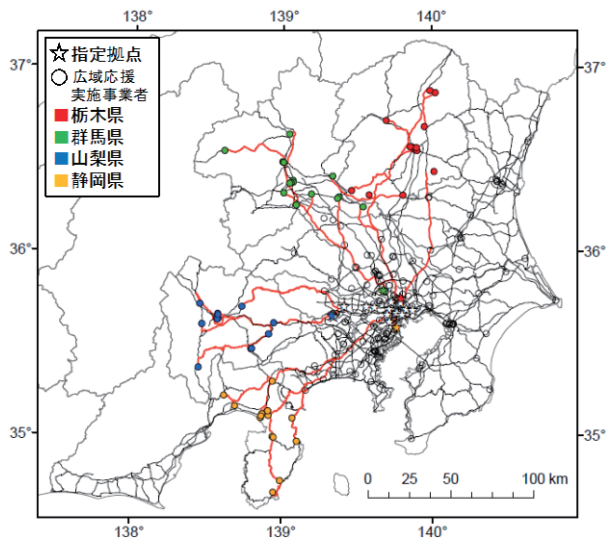


(b) Case2

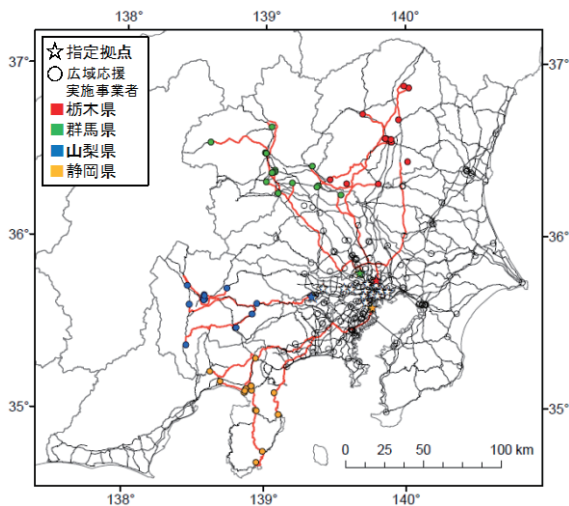


(c) Case3

図7 各ケースにおいて選択された経路（電力）



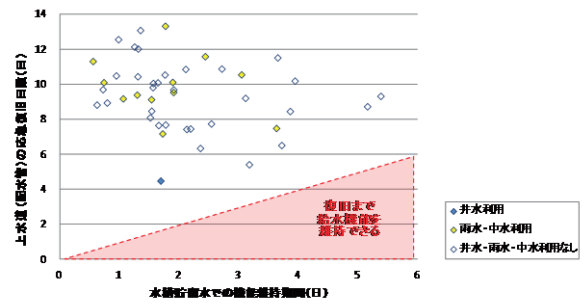
(d) Case4



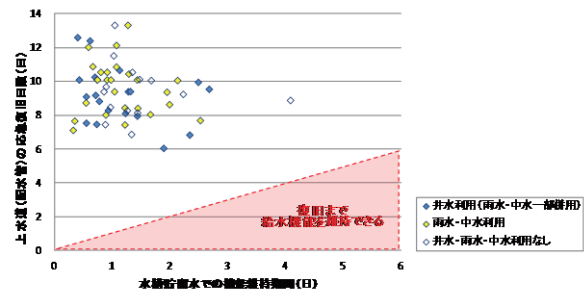
(e) Case5

図 7 各ケースにおいて選択された経路（電力）

広域応援実施拠点から指定拠点までの経路を選択する際には、実距離に加え、上記の 4 つの指標を各リンクの移動コストとし、広域応援実施拠点から指定拠点までの移動コストの総和が最小となる最短経路を探索する。実距離を移動コストとしたケース (Case1) では移動距離の総和が最小となる経路が選択される。次に震度曝露距離を移動コストとしたケース (Case2) 及び PL 値曝露距離を移動コストとしたケース (Case3) ではそれぞれ地震動又は液状化による物理的被害の可能性が最も低い経路が選択される。これらは震後の移動経路として想定しており、地震ハザードの高い地域を迂回するような経路となる。さらに混雑時重み付距離を移動コストとしたケース (Case4) 及び混雑時平均所要時間を移動コストとしたケース (Case5) では、混雑の可能性が比較的低い経路及び所要時間が最短となる経路がそ



(a) 庁舎

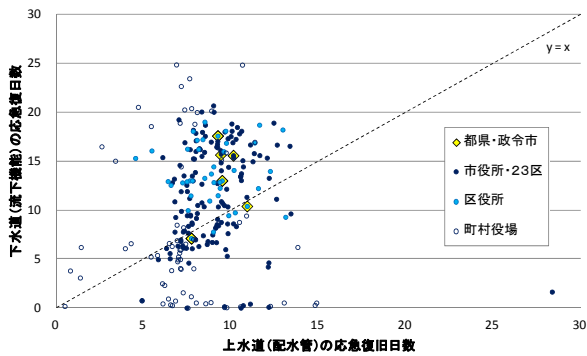


(b) 病院

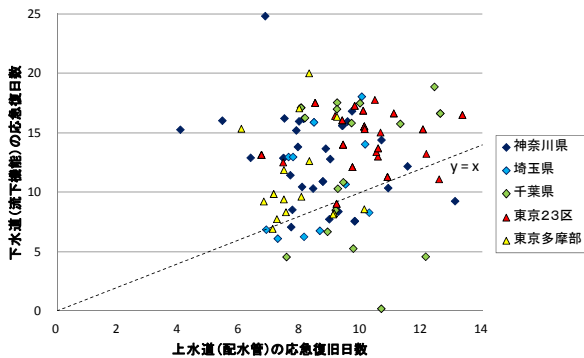
図 8 水槽貯留水での機能維持期間と上水道（配水管）応急復旧日数

れぞれ選択される。

電力の応急復旧活動の場合について考えると、東京電力の施設の中で、東京都地域防災計画において緊急輸送ネットワークの指定拠点として選定されている施設は、本・支店、資材置場等の計 18 箇所ある。また、東京電力の防災業務計画に従って、東京湾北部地震の際に広域応援が実施可能な施設は 66 箇所であった (図 6)。図 7 に、各ケースで推定される最短経路を示す。Case1 及び Case2 では応援先となる指定拠点によって、東京都外において選択される緊急道路ネットワークの経路が複数存在するが、Case3 から Case5 にかけては指定拠点の所在地に関わらず、とくに東京都内で選択されるルートが共通していることが分かる。これは、広域応援実施事業者が位置する各地域において、液状化の危険性が比較的高い経路や交通量の多い経路が存在することを示している。また、復旧人員の指定拠点への参集に要する時間が最も早い地域は移動距離の短い山梨方面であり、2.5 時間～4.5 時間となる。次に参集の早い地域は栃木方面で 2.5 時間～5.0 時間であった。反対に参集までに時間がかかる地域は静岡方面であり、4.5 時間～6.5 時間となった。さらに、経路ごとの特徴を見ると、震度曝露及び混雑度の程度に関しては静岡方面が、液状化の観点からは静岡方面及び栃木方面がやや危険であると言える。また混雑度の面からは群馬方面及び栃木方面が非効率であった。



(a) 庁舎所在地



(b) 災害拠点病院所在地

図9 上下水道の復旧日数

2.4 自律分散型拠点構築による地域防災力向上

この研究は、地方公共団体の災害対策本部が設置される庁舎と災害拠点病院を重要拠点と位置付け、自律可能性の実態把握を行った。1都3県(東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県)に立地する当該施設(都県庁舎、政令市庁舎、東京23区および政令市の区役所庁舎、災害拠点病院)に対し、平成19年度より建物設備やエネルギー・水消費量等に関するアンケート調査を継続してきた。さらに、この結果とライフライン施設被害と被害波及モデル、広域連携による復旧効率化の検討結果に基づく拠点の自律の必要性和あわせて分析した。

東京湾北部地震の際の庁舎と病院の上水用水槽貯留水での給水機能維持期間と、各所在地の上水道(配水管)の応急復旧日数との関係を図8に示す。給水機能維持期間は、各施設の受水槽と中間・高置水槽の容量を、当該施設の年間水消費量で除して算出した。上水道(配水管)の応急復旧日数は、ライフライン施設被害(2.1)と被害波及モデル(2.2)、広域連携による復旧効率化の検討(2.5)に基づく市町村単位の平均値である。全ての庁舎と病院で、水槽貯留水のみでは需要量を復旧まで賄うことができない結果となった。病院の方が、機能維持期間が短い、井水・雨水・中水

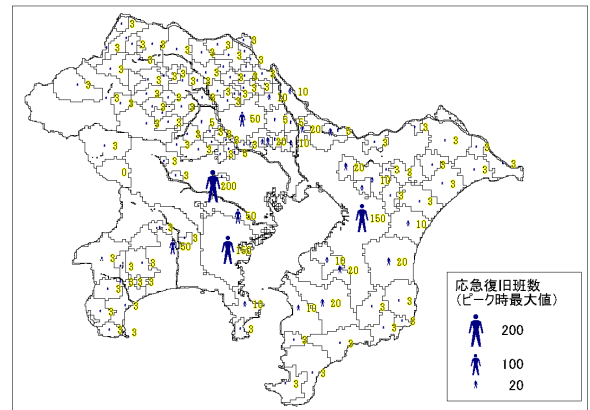


図10 配水管の復旧予測に用いた配水地区とピーク時の復旧班数

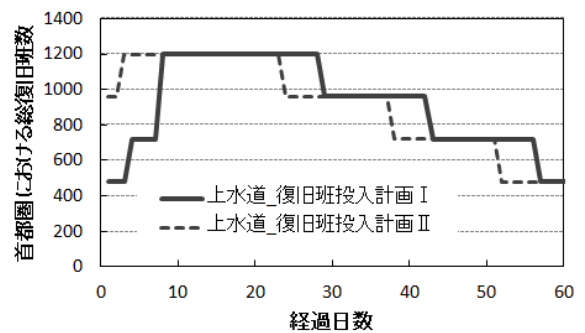


図11 首都圏全域の総復旧班数の経時的推移

利用は多い。井水を利用している場合、ポンプ用電源を確保できれば、給水機能を維持できる可能性が高く、雨水や中水を利用している施設では、貯留水を生活用水として利用できる。ただし、井水・雨水・中水利用がなく、水槽容量が1日分の需要量に満たない病院もあり、給水機能の維持に支障が生じる可能性がある。

1都3県の地方公共団体庁舎(島しょ部を除く)と災害拠点病院の所在地における上水道(配水管)の応急復旧日数と下水道(流下機能)の応急復旧日数を、図9に示す。庁舎では上下水道復旧に最大約1ヵ月間を要し、病院では上水復旧に最大2週間、下水道復旧に約1ヵ月を要する。都県別にみると、東京都区部は、上下水道とも応急復旧日数が長く、下水道の応急復旧がより長い。また、庁舎の約6割(都県・政令市の7割、東京23区と政令市区役所の9割)、災害拠点病院の約8割が、上水道より下水道の応急復旧に日数を要するため、上水道からの給水支障だけでなく、下水道への排水支障も各施設で考慮する必要がある。

以上の結果をふまえて、配水管復旧まで上水用受水槽と中間・高置水槽の貯留水で給水機能を維持できるケースと、維持できないケースに分類し、主な対応を整理した。庁舎・病院の現状は、機能維持できないケースに分類される結果となった。貯留水や地下水利用等で

表1 断水人口の評価結果（中央防災会議の結果との比較）

	都道府県	1日目		4日目		応急復旧日数 (最大値)(日)
		支障数(人)	支障率	支障数(人)	支障率	
本検討 結果 (計画Ⅱ)	埼玉県	6,614,802	94.9%	3,452,414	49.5%	23
	千葉県	5,823,068	96.9%	3,660,987	60.9%	19
	東京都	12,213,464	98.3%	9,347,616	75.2%	24
	神奈川県	8,594,966	98.5%	5,404,478	61.9%	24
	4県合計	33,246,300	98.4%	21,865,495	64.1%	
	都道府県	1日目		4日目		応急復旧日数 (日)
		支障数(人)	支障率	支障数(人)	支障率	
中央 防災会議	埼玉県	1,800,000	26.9%	550,000	8.1%	30
	千葉県	2,400,000	41.4%	720,000	12.4%	(目標値)
	東京都	3,900,000	33.3%	780,000	6.7%	(目標値)
	神奈川県	3,100,000	37.3%	920,000	11.2%	(目標値)
	4県合計	11,200,000	34.4%	2,970,000	9.2%	

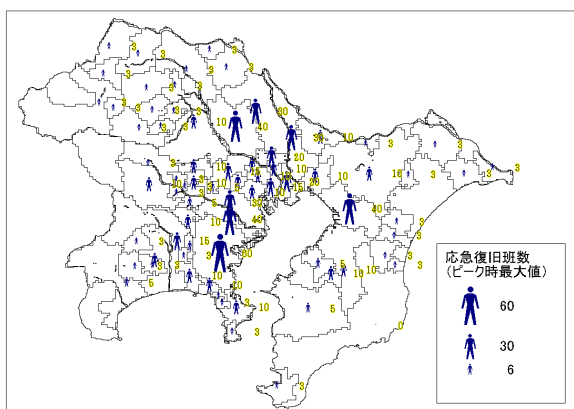


図12 汚水管の復旧予測で用いた下水処理区とピーク時の復旧班数

給水機能を維持できる場合においても、下水道復旧までは上水道の利用制限を受けると考えられるため、節水等の配慮が求められる。

2.5 ライフラインの復旧最適化による企業の事業継続性向上に関する検討

この研究では、関連のサブテーマ担当者による被害予測手法、相互関連評価手法を考慮しつつ、上下水道の応急復旧過程の簡易評価モデルを用いて複数の応急復旧戦略に関する上下水道の復旧過程解析を実施した。

東京湾北部地震による埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県の上下水道施設の応急復旧日数の予測解析を行った。応急復旧日数の予測方法としては、配水拠点を中心としてメッシュでモデル化された配水本支管の被害箇所数や給水人口等を考慮して面的に復旧過程を予測する方法を用いた。応急復旧に従事する1都3県の総復旧班数は、中央防災会議首都直下地震対策専門調査会（以下、専門調査会と呼ぶ）の報告を参考に1,200班（1班10人と仮定して12,000人）とし、給水区域の被害箇所数に応じて比例配分した。配水本管及び支管の復旧速度は、それぞれ0.5箇所/(班日)、

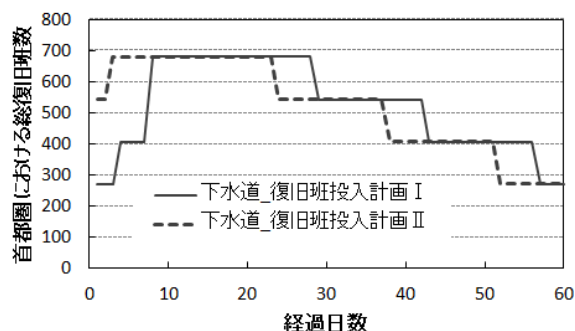


図13 首都圏全域の総復旧班数の経時的推移

表2 下水道の機能支障人口の評価結果（専門調査会の結果との比較）

	都道府県	1日目		4日目		応急復旧日数 (最大値)(日)
		支障数(人)	支障率	支障数(人)	支障率	
本検討 結果 (計画Ⅱ)	埼玉県	4,889,166	70.34%	4,338,098	62.4%	18
	千葉県	4,807,846	86.14%	4,358,594	78.1%	18
	東京都	12,002,473	97.26%	10,376,715	84.1%	20
	神奈川県	8,307,595	96.74%	6,875,888	80.1%	17
	4県合計	30,007,080	89.68%	25,949,296	77.6%	
	都道府県	1日目		4日目		応急復旧日数 (日)
		支障数(人)	支障率	支障数(人)	支障率	
中央 防災会議	埼玉県	64,000	0.95%	47,000	0.70%	30
	千葉県	110,000	1.86%	77,000	1.30%	(目標値)
	東京都	130,000	1.07%	97,000	0.80%	(目標値)
	神奈川県	130,000	1.54%	93,000	1.10%	(目標値)
	4県合計	434,000	1.31%	314,000	0.95%	

1.0箇所/(班日)とし、また、配水池などの給水拠点の近傍の被害の多いメッシュから順次復旧作業を進める戦略を用いた。応急復旧日数を検討する際に使用した配水地区と各配水地区に投入したピーク時復旧班数を図10に示し、1都3県の総復旧班数の経時的な推移を図11に示す。ピーク時1,200班の復旧班は各配水地区の被害箇所数に比例して配分するとともに、発災から8日目または3日目にピーク時班数となる2種類の応急復旧班の投入計画ⅠとⅡを使用した。

2種類の復旧班投入計画のもとで250mメッシュごとに応急復旧日数を評価し、これを市区町村ごとの平均応急復旧日数に整理した結果を図12に示す。専門調査会では、発災後1、2、4日目の断水人口を示しており、4日目に支障率10%以下に低下することから配水機能停止地域は限定的と想定していると考えられる。一方、本検討結果では、埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県で広く被害が発生しており、復旧が早いと考えられる復旧班投入計画Ⅱの1日目と4日目について応急復旧が完了していない250mメッシュの夜間人口を集計して断水人口と支障率を求めたところ、1日目で専門調査会の約3倍の98%、4日目で7倍の64%が断水する結果となった(表1)。

同様の方法で、下水道施設(汚水管)の応急復旧予測を行った。なお、応急復旧予測の際の前提条件となる汚水管の被害予測式としては、近年の地震における下水道管の被害分析に基づいて提案した予測式を用

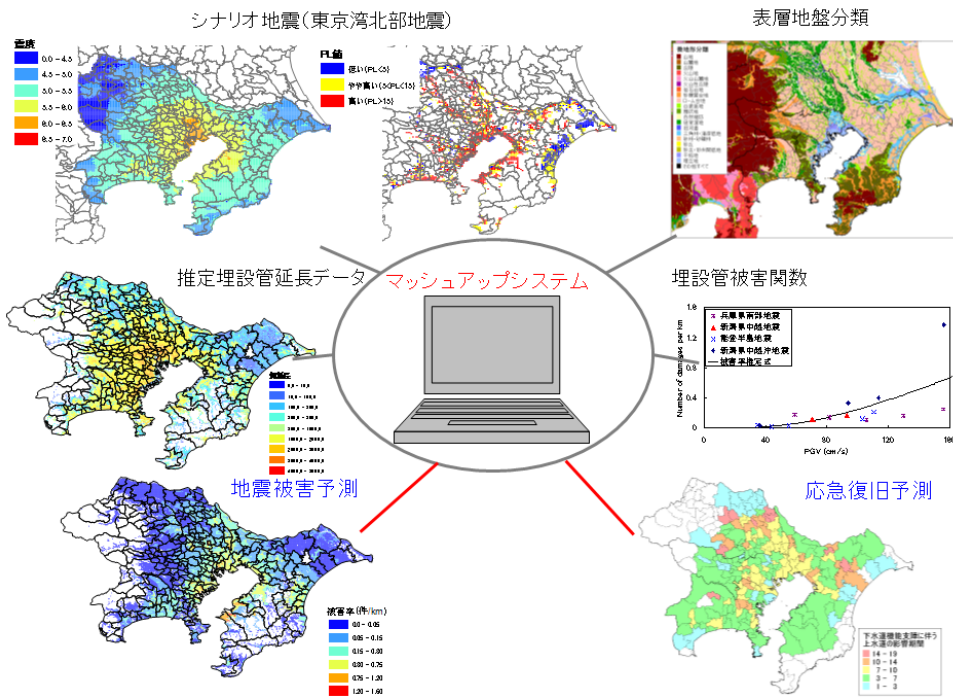


図 14 ライフライン被害・応急復旧予測結果ダウンロードシステムの概要

いた。応急復旧に従事する復旧班数としては、専門調査会の報告に情報がないため上水道の半分約 680 班(1 班 5 人と仮定し 3,400 人)をピーク時の班数とし、被害延長に応じて各処理区に配分した。また、汚水管の復旧速度は近年の被害地震時の応急復旧活動の実態を踏まえて、口径 600 mm 以上、600 mm 未満の復旧速度をそれぞれ 150m/(班日)、300m/(班日)とした。汚水管の復旧作業は処理場に近く被害延長の大きなメッシュから順次実施する戦略を採用した。また、処理場の応急復旧日数の予測方法としては、近年の被害地震における復旧過程データをもとに作成した予測式を使用し、処理場の復旧人員については十分な人数が配置されるものとした。

図 12 に、応急復旧日数を検討する際に使用した下水処理区と各処理区の被害延長に比例して配分したピーク時復旧班数を示す。また、図 13 には検討で使用した首都圏全域における総復旧班数の 2 種類の経時的な復旧班投入計画 I と II を示す。

本検討の応急復旧班投入計画 II の発災後 1 日目、4 日目の結果を表 2 に示した。この表には、比較のため専門調査会による発災後 1、2、4 日目の機能支障人口を示した。本検討の応急復旧完了日数は専門調査会の結果より約 10 日早くなっているが、4 日目の段階では専門調査会の機能支障率約 1% に対して 77% と高い支障率となった。専門調査会の復旧日数の評価方法

に関して不明点が多く単純に比較することはできないが、専門調査会の評価では発災直後から膨大な復旧資源を投入することを前提としていることが考えられる。

3. アウトカム

以上のような一連の研究によって、1 都 3 県における東京湾北部地震の際の上水道管、下水道管の被害予測および相互関連を考慮した応急復旧予測、自律分散型拠点の機能支障等を評価することが可能となった。本研究の成果をダウンロードできるシステムを、京都大学防災研究所で運営・管理しているマッシュアップシステムの一つのコンテンツとして構築する。本システムの概要図を図 14 として示す。このシステムは、中小自治体によるライフライン施設の地震被害想定の一助になり企業の事業継続計画策定に利用できる。また公共施設等の自律分散拠点の整備効果が明らかになるなどが国民の「安全・安心」の実現にも寄与するものと期待できる。

さらに、広域連携・復旧効率化の観点からみて、首都圏の社会・経済機能に与えるマイナスのインパクトを最小化・最適化する広域連携復旧方策のガイドライン案、地方自治体や医療機関等を対象とした「自律分散拠点」の計画や手法をとりまとめた提案書などを作成した。