

3.3.4 ライフライン被害波及モデルと解析法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

本研究テーマでは、ライフラインの相互連関を考慮して、被害波及と復旧過程を記述・解析するモデルを構築することを目的とするものである。時間スケールで「物理的被害波及」「機能的被害波及」「復旧支障」の順で相互連関をとらえ、各事象の特性に適応したスケール（マクロ、ミクロ、ネットワーク構造）で、ライフライン被害波及モデルとその解析法を構築する。これにより相互連関を考慮した定性的～準定量的～定量的な被害・復旧シミュレーションが可能となり、最適な被害軽減戦略を策定するという最終目標の達成につながる成果を得る。

(b) 平成19年度業務目的

本年度は、首都圏におけるライフラインおよび社会機能の相互依存性の実態解明を行い、次年度以降のモデルおよび解析法構築のための基礎資料を得ることを目標とする。まず、ライフラインの平常時における相互依存性に関しては、既往の文献・資料調査および事業者へのヒアリング調査を行ってその実態を明らかにする。また、緊急対応時および復旧過程における相互依存性に関しては、既往地震や事故の被災事例に基づいた実態調査を行う。具体的には、2006年8月の首都圏大停電をはじめ、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震などの地震災害事例を取りあげて被害波及の事例分析を実施し、被害連関マトリクスとして整理する。以上の成果に、数値実験による予備的検討をあわせて、ライフライン系のシステム間の被害波及と復旧過程をマクロ（広域的）～ミクロ（局所的）スケールでとらえるための設計フレーム（枠組み）とパラメータ同定に関する基礎情報を得る。これにより、次年度以降、定性的～準定量的～定量的な解析を行うモデルを構築するための準備を整える。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人岐阜大学工学部	教授	能島暢呂	
国立大学法人岐阜大学 流域圏科学研究センター	助教	久世益充	

(2) 平成19年度の成果

(a) 業務の要約

本年度は、まず2006年首都圏大規模停電を対象として、被害波及の事例分析を行った。新聞報道やヒアリング調査に基づいて被害の全体像と時系列的展開をまとめ、バックアップ施設などの停電影響波及に関わった要因を明らかにした。この分析を元に、機能的被害波及のモデルの骨格を「システム内の機能的被害波及」「影響顕在化までの余裕時間」「システム間での機能的被害波及」「バックアップ施設」と規定してプロトタイプを作成し、その適用例を示した。また、復旧過程における相互連関を検討するためには、ライフライン被害の絶対量とその地域分布の把握が重要となる。本年度は上水道システムを対象として管路施設の脆弱性指

数を定義し、「水道統計」に基づいて全国の現状と経年変化について比較・考察した。これにより、物理的・機能的被害波及の軽減策や復旧最適化など、首都圏の地震防災戦略を総合的に検討するための基礎資料を得ることができた。

(b) 業務の成果

1) 2006年首都圏大規模停電の影響波及に関する考察

a) 2006年首都圏大規模停電の原因

2006年8月14日(月曜)の午前7時38分頃、旧江戸川を横断する江東線78～79号鉄塔間の27万5千ボルト送電線に、しゅんせつ作業船のクレーンブームが接触する事故が発生した。これにより、1号線(河口側)の中相3本の送電線と下相4本の送電線と2号線(上流側)の下相2本の送電線が損傷した。2系統が同時損傷する多重事故となった影響で、葛南変電所・世田谷変電所・荏田変電所と江東変電所・城南変電所の一部で機能が停止した。停電による供給力低下にもかかわらず、朝の電力需要は伸び続けたため、供給力の水準を上げる試みがなされたものの、需要増加に追従できず過負荷状態となった。このため7時58分に品川火力発電所において施設が自動停止した。

首都圏への主要高圧送電線の損傷と品川火力発電所の停止により、東京都の区部の広い範囲と、神奈川県横浜市北部と川崎市西部、千葉県市川市および浦安市の一部をあわせて約139万1000軒で停電し、マスコミ等では「首都圏大規模停電」と称された。停電エリアを図1に示す。停電軒数の内訳は、東京都心部で97.4万軒、横浜市北部・川崎市西部で22万軒、市川市・浦安市で19.7万軒、特別高圧の施設で414軒、配電用変電所で75箇所となっており、東京都心部での停電世帯数が総計の7割以上を占めている。



図1 停電エリア (提供：東京電力株式会社)

その後、通常東側からの送電を西側からの送電に切り替えるなどの対応により、同日 8 時 37 分に全系統に送電され、全停電軒数の 98.9%が 1 時間程度で復旧した。送電復旧の推移を図 2 に示す。配電機器不具合による停電（1.5 万軒）は最終的に 12 時 20 分に解消した。つまり、停電自体は概ね 1 時間程度で復旧したが、完全に復旧したのは約 4 時間 40 分後ということになる。なお、変電所レベルでの復旧は、荏田変電所、世田谷変電所、葛南変電所、城南変電所、江東変電所の順であった。

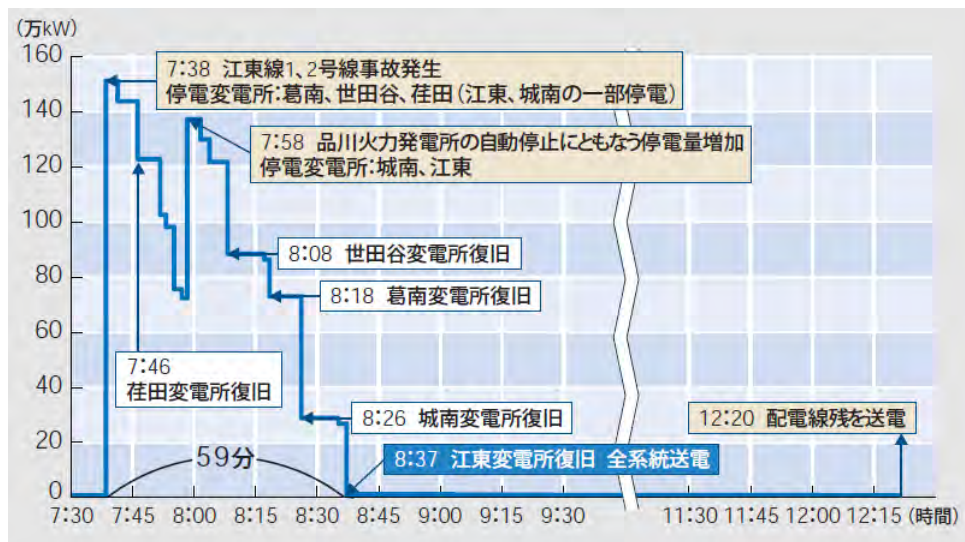


図 2 送電復旧の推移 (提供：東京電力株式会社)

b) 停電の影響波及に関する情報収集と分析

停電の影響は多くの社会インフラに波及する結果となった。その状況をまとめるため、まず、朝日新聞、毎日新聞、読売新聞の三紙^{1)~3)}の関連記事より、被害概要を整理した。さらに詳細な情報を得ることを目的として、東京電力株式会社、東日本電信電話株式会社、東京都水道局、東京急行電鉄株式会社、警視庁、東京地下鉄株式会社を対象として聞き取り調査を実施し、下記の 3 項目について調査した。

- ・首都圏大規模停電時の状況および被害と影響
- ・バックアップシステム等の配備状況
- ・停電等の事故・災害対策と首都直下地震等の震災対策と被害想定

以上に基づいて、次の 3 つの観点から分析を行った。

- ・停電の影響範囲についての分析
- ・停電の影響波及の時系列的分析
- ・停電対策の効果に関する分析

まず、新聞報道と聞き取り調査で得られた情報をまとめて、首都圏大規模停電の全体像をまとめた概要図を図 3 に示す。首都圏大規模停電という事象を中心に置き、その周りに社会インフラを並べ、それらの分枝先に、各社会インフラで発生した影響・被害を記述している。

交通関係では、鉄道 9 事業者 18 路線が運行停止して約 35 万人に影響が及んだほか、都内を中心に信号機がマヒして、交通支障が発生した。通信関係では、携帯電話の基地局約

300箇所では障害が発生して通信に支障がでた。金融関係では、約1000台のATMで一時停止等の影響がでたほか、日本経済新聞社グループのQUICK社のシステムに午後になって障害が発生し、東京証券取引所の株価動向を示す日経平均株価などの6種類の指数の算出・配信ができなくなった。また、エレベーターの閉じ込め事故も多発し、救助要請が出されるなど、市民生活にも大きな影響を及ぼした。

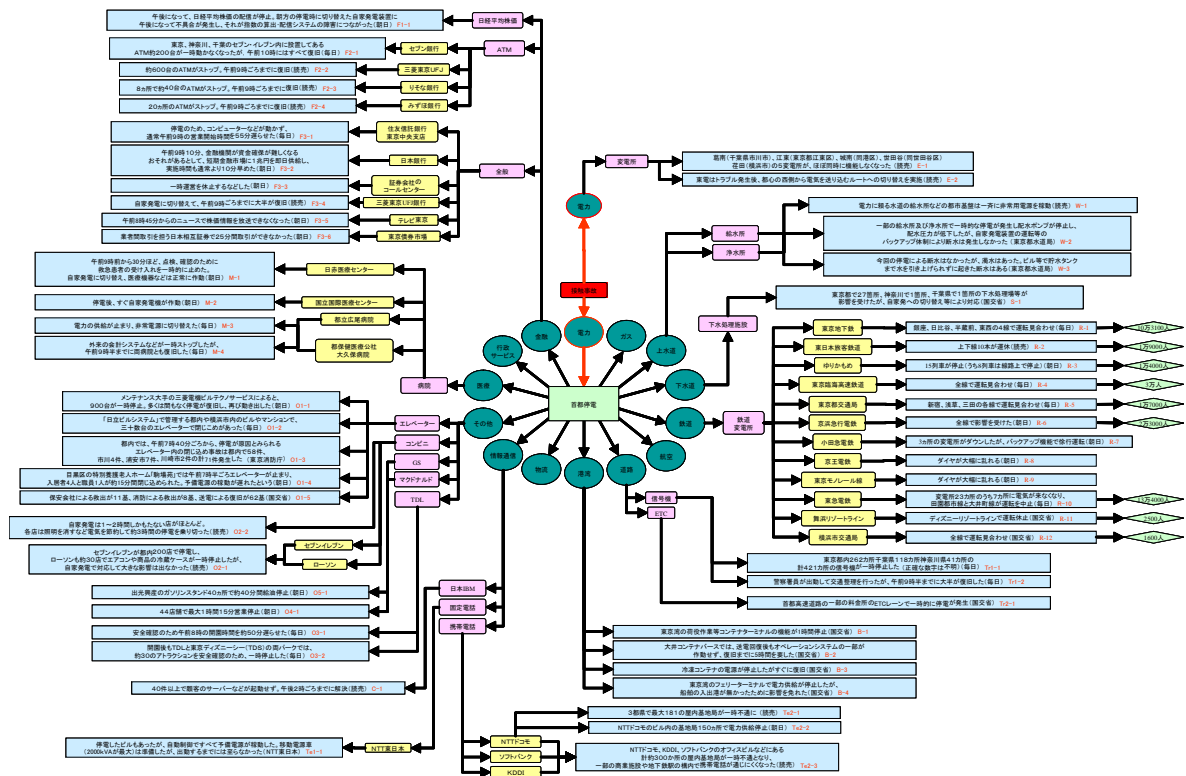
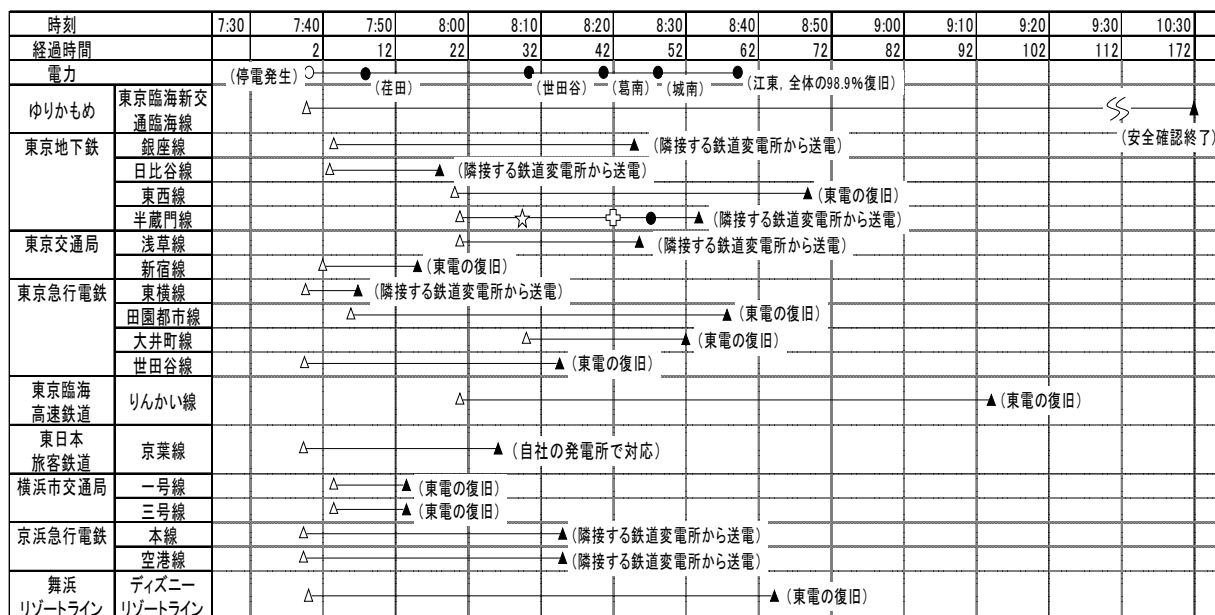


図3 首都圏大規模停電が社会インフラに与えた影響の全体像

c) 停電の影響波及の時系列的分析

首都圏における市民生活や社会経済活動の鉄道機能への依存度はきわめて高いため、首都圏大規模停電において影響波及が最も顕著に現れたのは、鉄道の運行停止であった。図4に、鉄道各社の各路線の運行休止時刻と運行再開時刻を比較した。鉄道9事業者18路線中の13路線は、接触事故による停電の影響を受けたが、残る5路線については、その後発生した品川火力発電所の機能停止による影響を受けたことがわかる。

運転再開については、2回線受電や連絡送電線等の自社のバックアップシステムにより早期に運転再開ができた路線が6路線あった。一方、2系統の送電線の同時損傷により複数の鉄道変電所が同時に機能停止したことから、東京電力からの送電再開まで運行再開ができなかった路線も多く見られた。



○: 東電停電時刻 ●: 東電復旧時刻 △: 運転休止時刻 ▲: 運転再開時刻 ☆: 系統変更時刻 ◻: 隣接変電所からの電力供給開始時刻 ()内は運転再開要因

図 4 鉄道各社の運行状況の比較 (国土交通省⁴⁾等に基づいて作成)

次に、東京都水道局の施設の状況を表 1 にまとめた。停電により配水ポンプが停止して配水圧力が低下したものの、受電の予備線への切り替えや自家発電設備の運転、給水系統の多重化および他の給水所等からのバックアップ体制により、断水は発生しなかった⁵⁾。需要家への影響としては、一部地域 (世田谷区松原 1、5、6 丁目付近) において濁水が 40 件あったため、応急給水車 2 台を派遣して対応にあたったほか、マンション等のポンプ停止による断水 143 件と濁水 51 件が報告されている⁵⁾。このように、首都圏の水供給機能に及ぼした影響はごく軽微なものにとどまったといえる。

表 1 東京都水道局の施設の状況⁵⁾

	施設	停電発生時刻	停電時間	復電時刻	備考
1	和田堀給水所	7:38	30分	8:08	
2	八雲給水所	7:38	1分	7:39	予備線に切り替えてポンプ運転
3	有明給水所	7:38	59分	8:37	停電直後から自家発電でポンプ運転
4	葛西給水所	7:38	14分	7:52	予備線に切り替えてポンプ運転
5	西瑞江給水所	7:38	9分	7:47	
6	江東給水所	7:58	2分	8:00	予備線に切り替えてポンプ運転
7	砧下浄水所	7:39	31分	8:10	

また、警視庁により得られた交通信号機に関する状況を図 5 にまとめた。停電時には、都内の信号機の少なくとも 440 基が滅灯状態となり、警察官による交通整理が行われた。都内の信号機の総数は 1 万 5000 基で、うち 7500 基はコンピューターによる制御がされている。そのうち 750 基にはバックアップシステムが配備されているが、これは全体の 20 分の 1 に過ぎない。今回の停電では 100 基が起動し、有効に作動した。なお、大地震時には緊急車両の通行を優先させるため、信号機を特殊な制御パターンに切り替え、環状 7 号線内への車両進入は禁止される。

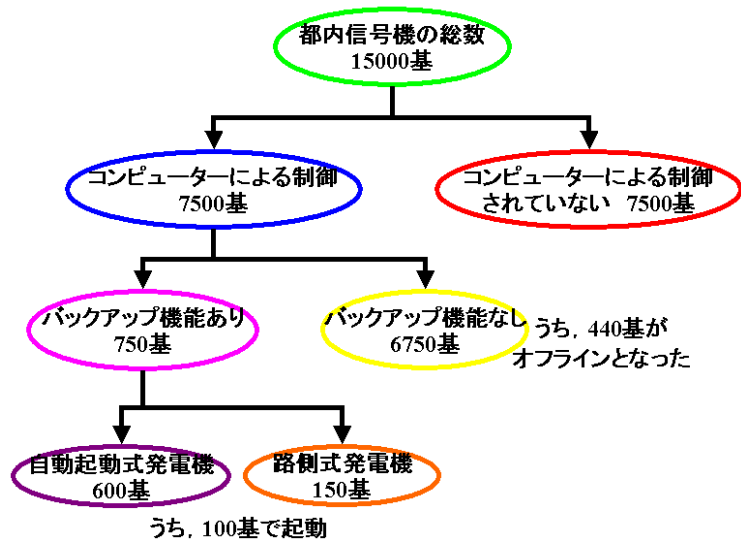


図 5 都内信号機の現状と首都圏大規模停電時の状況

d) 停電対策の効果に関する分析

停電の影響波及の発生要因および阻止要因を、バックアップ施設と関連付けて図 6 に示すように 9 段階に分類した。事例として最も多いのは、予備電源、自家発電装置ともに配備されておらず、影響波及が発生したケースである。次いで多いのは、自家発電装置が配備されており、有効に作動したために影響波及を免れたケースである。停電の継続時間が比較的短かったため、停電の影響が顕在化しなかったケースも多いと考えられる。

首都圏大規模停電では、停電が短時間であったが、長期化した場合には予備電源装置の容量を超過するため、影響波及がさらに広範囲に及ぶと考えられる。また、自家発電装置の燃料補充などの対応も必要となり、それは道路機能に依存するため、連鎖的な影響がさらに広がる懸念される。

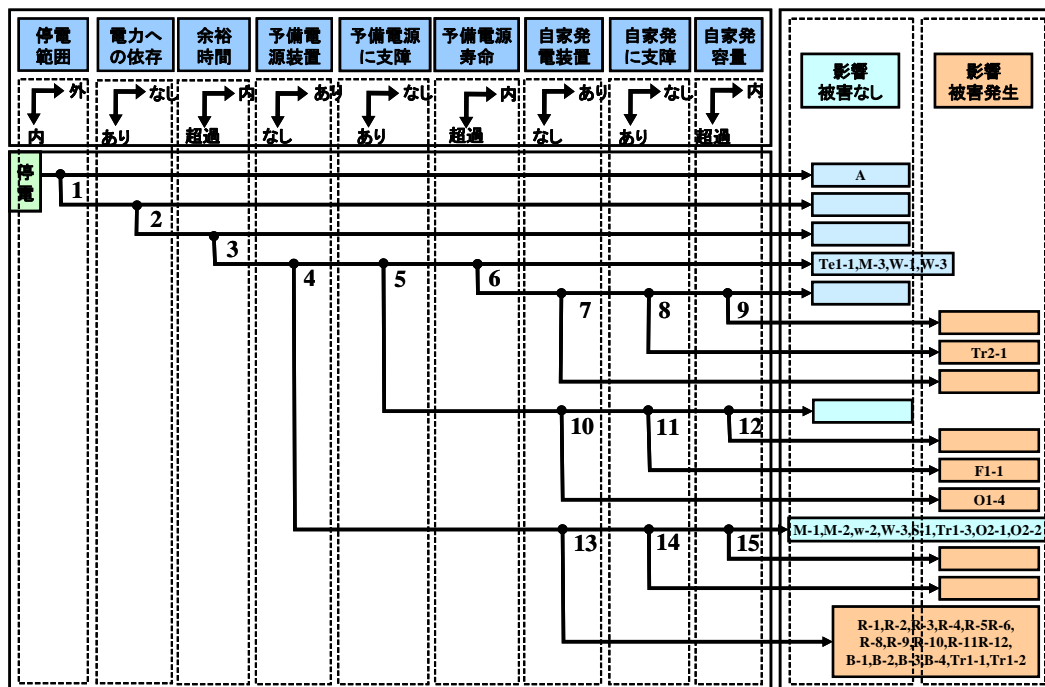


図 6 停電被害波及に関する樹木図 (記号は図 3 に対応、判明した事象のみ記載)

e) ライフラインの相互連関を考慮した地震防災対策の必要性

首都圏大規模停電の原因事象は、クレーン船と送電線の接触事故という単発の事象であり、停電の継続時間もおおむね約1時間であった。また、お盆休みの間であったため、都市機能への影響は最小限で済んだともいえる。それでもなお、停電の影響は広範囲に及び、現代社会の脆弱性を浮き彫りした。

2 系統の送電線の同時損傷は想定外とされており、いわば盲点を突かれた形となっている。ところが地震時には、桁違いに膨大な数の被害が広域に同時多発し、しかも複数のライフラインが同時に被災する。その場合には、各システムの機能途絶が単に長期化するだけでなく、影響の相互波及による事態の悪化を免れることはできないと考えられ、ライフラインの相互連関を考慮した地震防災対策を検討することの重要性は高くなる。この事例は、現実の被害波及事例として貴重な教訓を残すものであり、そのシミュレーションを行う上での重要な参考資料となる。

2) 機能的被害波及の解析モデル構築のための検討

a) 機能的被害波及とその対策の概念整理

2006年首都圏大規模停電の調査と分析結果を踏まえて、機能的被害波及のモデル化のための基本概念を整理して、解析モデル構築の準備を行う。図6で見たように機能的な被害波及構造は様々な経路を含むが、主な要因は以下の4点にまとめられよう。

- i. システム内の機能的被害波及：ネットワークの連結性が失われることによって発生するものである。物理的被害のないところまで容易に波及しうる一方、ネットワークの冗長性によって機能的被害が回避されることもある。
- ii. 影響顕在化までの余裕時間：ネットワークのノードやリンクに貯蔵機能がある場合には、その容量の範囲内で供給を継続することができるため、影響波及が顕在化するまでの余裕時間が存在する。
- iii. システム間の機能的被害波及：複数のシステムのネットワークを相互に連結するリンクが存在して、機能的に依存している場合には、(i)と同様に機能的被害波及が発生しうる。
- iv. バックアップ施設：システム間での機能的被害波及の場合、ネットワークの冗長性に代わる対策は、バックアップ施設による代替機能である。依存している機能が失われても、(ii)と同様に、バックアップ寿命の範囲内であればその機能を代替できる。

図7は単一のライフラインシステムに関する上記(i)(ii)の概念図である。ここでは、対象システムを、上位の基幹ネットワークとそこから供給を受ける下位の供給エリア(青色)の2層構造で考える。ネットワークのノードまたはリンクに被害が発生すると、対応する供給エリアで供給が停止する(赤色)。ノードBに余裕時間がある場合にはその範囲内で供給が確保される。

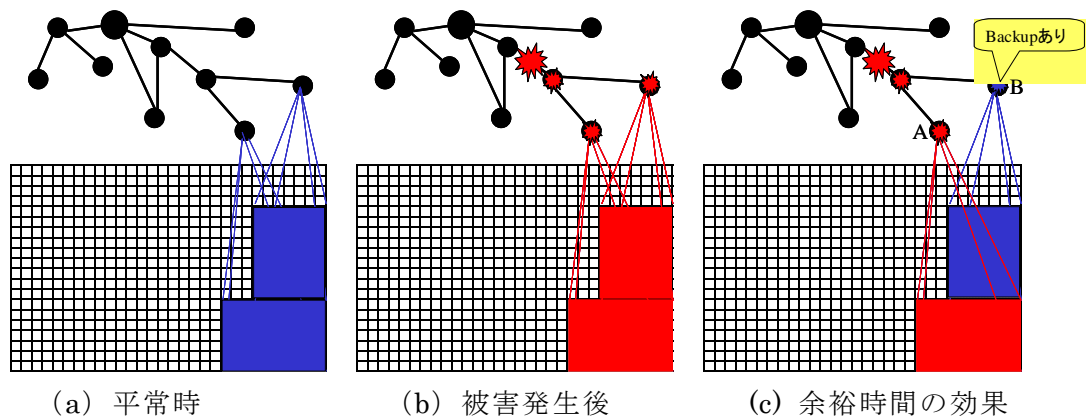


図7 機能的被害波及の基本的考え方

図8は、2つのライフラインシステムに関する上記(3)(4)の概念図である。システム2のノードBがシステム1のノードAに依存している場合、ノードAが機能を失うとノードBが機能を失い、さらにノードCに波及して、その供給エリアで供給停止となる(黄色)。しかしノードBにバックアップ施設があれば、システム2への影響波及は阻止される(青色)。なお、バックアップ施設は、その稼動によって機能が回復できる場合のみ稼動する。例えば、システム2に被害が生じてノードB自体が機能を失っている場合は、バックアップの効果が発揮されないため、稼動せずにその容量が温存される。

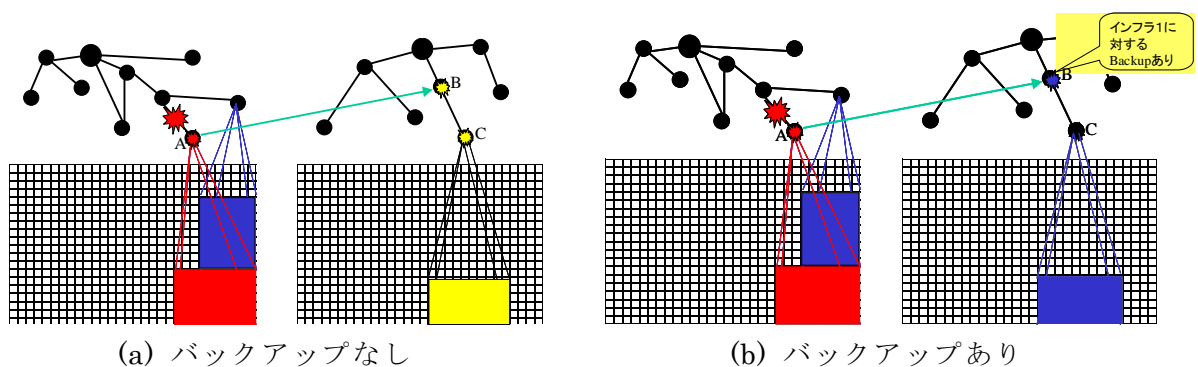


図8 システム間影響波及の考え方

b) 機能的被害波及モデルのプロトタイプによる適用例

システム1とシステム2からなる簡単な分析モデルにより機能的被害波及モデルのプロトタイプを作成した。図9に示すように、10×10メッシュの供給エリアが2システムからの供給を受けている。システム1は10ノード・9リンク、システム2は6ノード・5リンクである。メッシュ中の数字は、メッシュが供給を受けるノード番号である。またシステム間のリンクが示すように、2システム間には相互依存関係が存在し、システム1のノード③とノード⑤においては、システム2に対するバックアップが4日分(被災当日を含めて)存在する。被害はシステム1の②→④のリンク(3日後復旧)とシステム2の①→④のリンク(5日後復旧)に与えた。このような条件の下、相互関連とバックアップの有無による、3つのケースでシミュレーションを行った。

- Case 1 : 相互関連なし (相互関連による被害波及を考慮しない)
- Case 2 : 相互関連あり (相互関連による被害波及を考慮する)、バックアップなし
- Case 3 : 相互関連あり、システム 1 にシステム 2 に対するバックアップあり

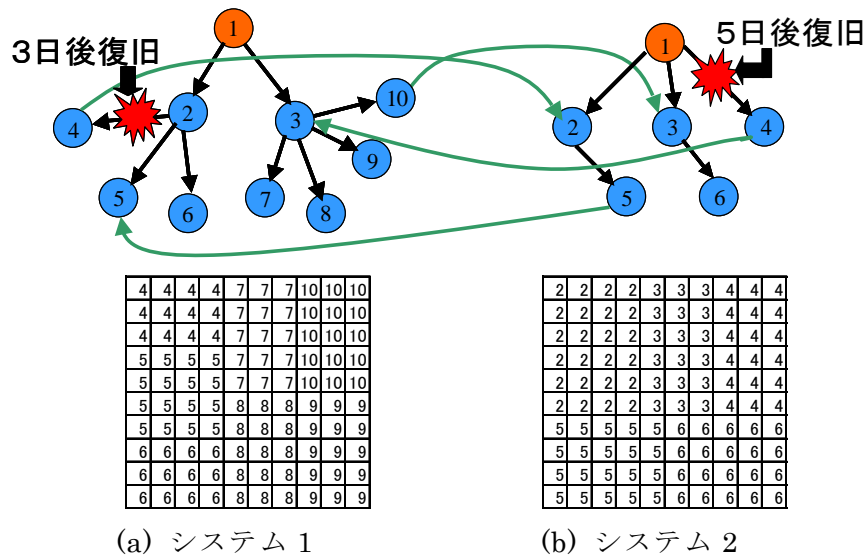


図 9 相互に依存する 2 つのシステムモデル

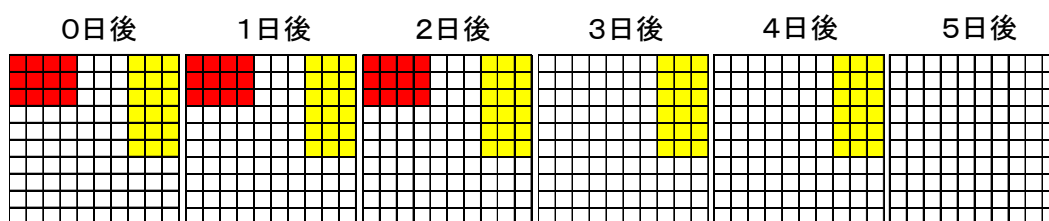
結果を図 10 に示す。赤色はシステム 1 の供給停止区域、黄色はシステム 2 の供給停止区域、灰色は両方の供給停止区域を表している。

Case 1 (図 10(a)) では相互関連を考慮しないため被害が波及せず、連結性を失ったシステム 1-④とシステム 2-④だけに被害が現れている。その後、3 日後にシステム 1 が復旧し、5 日後にはシステム 2 が復旧して、この地域内で完全復旧となっている。

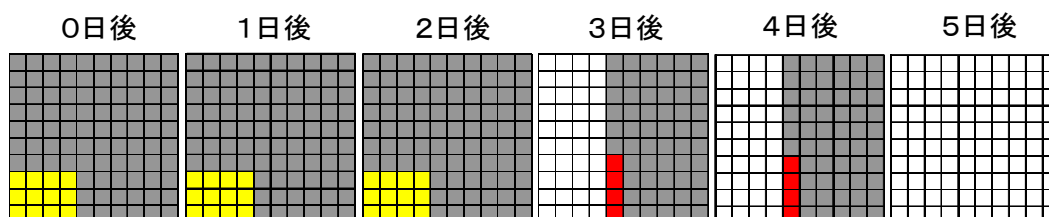
Case 2 (図 10(b)) では相互関連により被害が波及し、供給停止区域は、システム 1 で供給エリア⑥を除く全エリアに、システム 2 では全エリアに拡大している。3 日後にシステム 1-④が復旧すると、やや意外ではあるが、システム 2 のみ復旧する区域も現れる。5 日後にシステム 2-④が復旧すると完全復旧となる。

Case 3 (図 10(c)) では、バックアップ施設の機能の効果により、被災直後の供給停止地域は Case 2 と比べてかなり狭められている。しかし、バックアップの寿命は 4 日分 (図中の 3 日後まで) であったため、4 日後にはシステム 1-③で影響が顕在化して、供給停止区域が再度広がったため、Case 2 と同じ結果になっている。

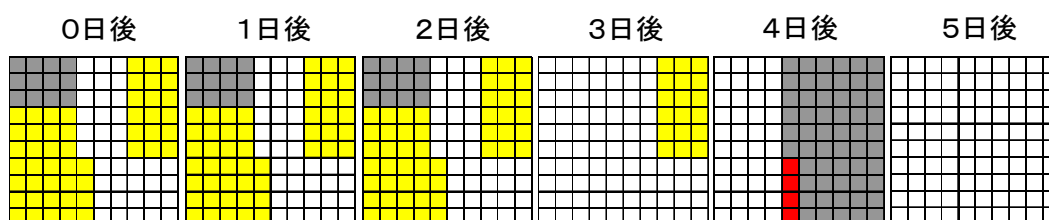
以上の簡単なシミュレーションモデルを用いた適用例により、各要因の複合的な効果が、供給停止地域の時空間的分布に現れることがわかった。



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

図 10 供給停止地域の比較

(赤：システム 1 のみ停止、黄：システム 2 のみ停止、灰：両システムとも停止)

3) 脆弱性指数を用いた上水道管路の地震時脆弱性評価

a) はじめに

水道施設の耐震化は、兵庫県南部地震を契機に重点的に進められてきた。しかし管路施設は膨大な施設よりなることから、耐震化はまだ低い達成水準にとどまっており、地域格差が大きいのが現状である。例えば、平成 17 年度末、浄水場の耐震化率は 12.4%、配水池で 20.1%、基幹管路で 10.8%であり、決して高いといえる状況ではない⁶⁾。

首都直下地震におけるライフライン機能の地震時信頼性を効率的に向上するためには、被害の絶対量とその地域分布を把握しておくことが重要である。本研究ではその基礎資料として、「水道統計（施設・業務編）⁷⁾」の統計資料に基づく簡便な評価指標を定義し、全国の現状と経年変化の状況について比較・考察した。

b) ライフラインの埋設管路の一般的な被害予測手法

地方自治体で広く採用されているライフライン被害予測手法において、埋設管路の被害

箇所数を予測する場合、管路布設延長距離に被害率（被害箇所数／布設延長距離）を乗じる方法がとられている⁸⁾。

$$N = L \cdot R_{fm}(x) \quad (1)$$

ここに、 $R_{fm}(x)$ 被害率（箇所/km）

N ：被害箇所数、 L ：管路布設延長(km)、 x ：地震動強度指標

被害率 $R_{fm}(x)$ については、まず地震動強度 x の関数として規定される標準被害率 $R_f(x)$ を設定し、管種・管径・地盤条件に応じて定められた補正係数を乗じて求められる⁸⁾。

$$R_{fm}(x) = C_d \cdot C_p \cdot C_g \cdot R_f(x) \quad (2)$$

ここに、 $R_f(x)$ ：標準被害率（箇所/km）、

C_d ：管径係数、 C_p 管種係数、 C_g ：地盤・液状化係数

地震動強度指標 x としては、最大加速度、最大速度、SI 値などが用いられている。

この被害予測手法は、ほとんどの地方自治体に共通するものである。ただし、標準被害率の関数、各種係数を定める際の地盤分類、管径区分、管種区分、および係数の値などの詳細については、既往研究や既往地震の被害分析に基づいて、各自治体が独自に定めている場合が多い。

高田ら⁹⁾は、兵庫県南部地震による水道管路被害データに基づいて、直下型地震特性を考慮した管路及び属具（空気弁、制水弁、消火栓など）の被害予測手法を提案した。管路の被害分析の結果得られた管径係数および管種係数を表 1 に示す⁹⁾。管径については $\phi 100 \sim 150\text{mm}$ を、管種については铸铁管を基準としてそれぞれの補正係数を 1.0 としている（注：文献⁹⁾では、「管径」を「口径」と称しているが、ここでは「管径」で統一する）。なお一部の管径・管種区分では、布設延長距離が短いため、分析結果の信頼性が低く、文献⁹⁾では参考値として扱われている（*を付けて表示）。また文献⁹⁾では、 $\phi 600$ を超える管径区分の記載がないため、表 2 では、他の評価事例を参考にして補完している（#を付けて表示）。

一般に、管径が大きいくほど補正係数は小さくなり、 $\phi 1100\text{mm}$ 以上で 0.20 と最も小さく、 $\phi 75\text{mm}$ 以下で 1.60 と最も大きな値をとる。また管種係数は、耐震継手を有するダクタイル铸铁管 DIP（S、SII）の 0.00 が最も低く、ねじ継手鋼管 SGP の 4.00 が最も高い値である。

表 2 水道埋設管の管径係数 C_{d_i} と管種係数 C_{p_j}

管径 (mm)	管径係数	管種	管種係数
～φ75	1.6	CIP 铸铁管	1.0
φ100～150	1.0	DIP ダクタイル铸铁管	0.3
φ200～250	0.9	DIP 同(耐震継手)	0.0
φ300～450	0.7	SP 溶接鋼管	0.3*
φ500～600	0.5*	SGP ねじ継手鋼管	4.0*
φ700～1000	0.4#	VP 硬質塩化ビニル管	1.0
φ1100～	0.2#	ACP 石綿セメント管	2.5*

c) 脆弱性指数の評価方法 (詳細評価)

図 11 に示すように、統計的な地震被害予測手法では、被害量を、施設量、脆弱性、ハザードの三要素により予測するものであり、ライフラインの埋設管路では次のような対応関係になろう。

- ・施設量 : 管路布設延長 L
- ・ハザード : 地震動強度指標 x 、地盤・液状化係数 C_g
- ・脆弱性 : 管径係数 C_{d_i} 、管種係数 C_{p_j}

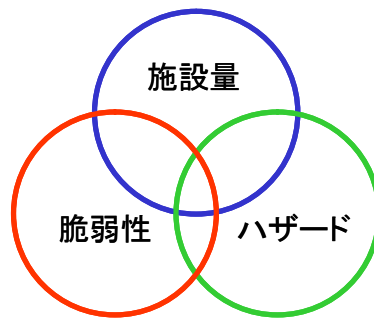


図 11 地震被害の三要素

式(2)の「被害率」は、「ハザード」と「脆弱性」との組み合わせ効果を表現し、式(1)としての「被害量」は、さらに「施設量」との組み合わせ効果を表現すると解釈できる。

鈴木ら¹⁰⁾は、「脆弱性」の要素に関して、「脆弱性指数 V 」という指標を提案した。これは、式(3)に示されるように、管径係数と管種係数との積を、管径・管種別の布設延長距離で重み付けして平均して求められ、値が大きいほど脆弱性が高く、被害を受けやすいことを示す。

$$V = \frac{\sum_i \sum_j C_{d_i} C_{p_j} L_{ij}}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \quad (3)$$

ここに、 C_{d_i} : 管径区分 i の補正係数、 C_{p_j} : 管種区分 j の補正係数
 L_{ij} : 管径・管種別の布設延長距離

脆弱性指数 V のとりうる最小値は、ダクタイル鋳鉄管 DIP (S、SII) が 100% の場合 (管径は任意) で 0 である。最大値は、 $\phi 75\text{mm}$ 以下のねじ継手鋼管 SGP が 100% の場合で 6.4 となる。

脆弱性指数を式(3)の定義どおりに求めるには、管径・管種別の布設延長距離すなわちクロス集計表が必要である。しかし、多数の水道事業者を対象として比較考察を行う場合には、このクロス集計表の入手は困難である。一方、管径別および管種別に集計されたデータであれば比較的容易に入手可能である。そこで本研究課題では、式(3)に基づく評価を「詳細評価」と位置づけ、管径別および管種別の集計データに基づく「簡易評価」を提案する。

d) 脆弱性指数の評価方法 (簡易評価)

本研究では、管種別脆弱性指数 V_p と管径別脆弱性指数 V_d を別々に求め、それらの積によって算出される脆弱性指数 V_{pd} をもって近似評価とする。

$$V_{pd} = V_d \cdot V_p \approx V \quad (4)$$

$$V_d = \frac{\sum_i \left(C_{d_i} \sum_j L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}}, \quad V_p = \frac{\sum_j \left(C_{p_j} \sum_i L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \quad (5)$$

ここに、 $\sum_j L_{ij}$: 管径別布設延長距離、 $\sum_i L_{ij}$: 管種別布設延長距離

式(4)は、次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} V_{pd} &= \frac{\sum_i \left(C_{d_i} \sum_j L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \cdot \frac{\sum_j \left(C_{p_j} \sum_i L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}} = \sum_i \beta_{d_i} C_{d_i} \cdot \sum_j \beta_{p_j} C_{p_j} = \sum_i \sum_j C_{d_i} C_{p_j} \cdot \beta_{d_i} \beta_{p_j} \\ &= \sum_i \sum_j C_{d_i} C_{p_j} \frac{\sum_j L_{ij}}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \frac{\sum_i L_{ij}}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \approx \sum_i \sum_j C_{d_i} C_{p_j} \frac{L_{ij}}{\sum_i \sum_j L_{ij}} = V \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 β_{d_i} : 管径別布設延長割合、 β_{p_j} : 管種別布設延長割合

式(6)の近似等号の両辺を比較するとわかるように、これは、管種別布設割合と管径別布設割合を比例配分することによって、管種・管径別布設延長距離を近似したことに相当して

いる。

このような近似評価の妥当性を検証するため、管種・管径別の布設延長距離（クロス集計値）が得られているデータを用いて、詳細評価と簡易評価を行って比較した。個別調査により管種・管径別のクロス集計値を収集したのは、下記の 29 事業者である。

- ・兵庫県芦屋市（1995 年）、伊丹市・川西市・尼崎市・宝塚市（2002 年）
- ・新潟県長岡市（2004 年）
- ・愛媛県松山市・今治市・宇和島市ほか 20 市町村（2002 年）

簡易評価による V_{pd} と詳細評価による V との比較を図 12 に示す。詳細評価の方が平均的に 3%程度大きな結果を与えているが、両者の相関は極めて高く、ほぼ 1 : 1 対応となっている。これより、簡易評価でもかなり正確な脆弱性指数を算出することが可能であるといえる。

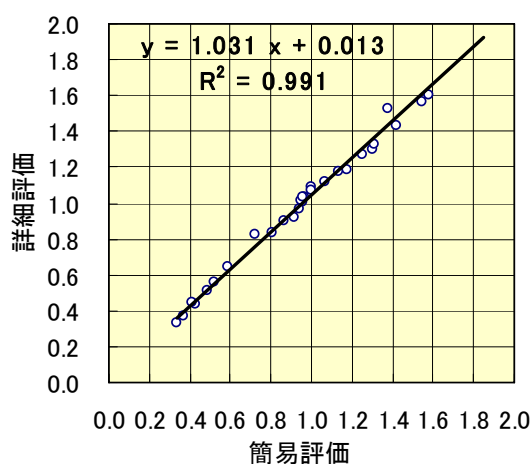


図 12 簡易評価と詳細評価の比較

e) 水道統計（平成 17 年度）の記載内容について

上記により脆弱性指数の簡易評価の妥当性が明らかになった。そこで、平成 17 年度水道統計⁷⁾に記載された全国 1602 の上水道事業者を対象に、脆弱性指数の簡易評価を行う。

まず、平成 17 年度水道統計における管種区分については、铸铁管、ダクタイル铸铁管（耐震型継手を有する／上記以外）、鋼管、鋼管（溶接継手を有する／上記以外）、石綿セメント管、硬質塩化ビニル管、コンクリート管、鉛管、ポリエチレン管、ポリエチレン管（高密度、熱融着継手を有する／上記以外）、ステンレス管、その他、の 15 区分となっているが、鋼管およびポリエチレン管については継手内訳が重複するので、実質的には 13 区分である。

ここで、鋼管については 3 区分あるが、溶接継手とそれ以外の鋼管の延長を足し合わせても鋼管の延長に必ずしも等しくならない。同様にポリエチレン管も 3 区分あるが、高密度・熱融着継手とそれ以外の延長を足し合わせてもポリエチレン管の延長に必ずしも等しくならない。この理由として、各上水事業者が継手の種類を明確に区分していない場合や、不明である場合が多いためと考えられる。そこで本研究では、鋼管の延長と溶接継手を有する鋼管の延長の差をすべてねじ継手鋼管と扱った。またポリエチレン管の延長と高密度・熱融着継手を有するポリエチレン管の延長の差をとって、高密度・熱融着継手でない

ポリエチレン管とした。以上によりデータを再編して布設延長距離を求めた。

なお、脆弱性指数の評価にあたっては、表 1 に管種係数が設定されていない管種（コンクリート管、鉛管、ポリエチレン管、ステンレス管、その他、の 5 区分）については、布設延長距離が短く、全体の評価には大きく影響を及ぼさないと判断されることから、評価の対象外とした。

次に、平成 17 年度水道統計の管径区分について述べる。導水管（取水施設から浄水場まで水を導く管）および送水管（浄水場から配水池まで水を送る管）については、300mm 未満から 2000mm 以上の 6 区分、配水本管（直接給水装置を分岐しないもの）および配水支管（直接給水装置を分岐するもの）については、50mm 未満から 2000mm 以上の 25 区分となっている。本研究では、管径係数の区分にあわせてデータを再編して布設延長距離を求めた。

f) 水道統計（平成 17 年度）に基づく脆弱性指数の評価

ここでは、配水管（配水本管+配水支管）を対象とした脆弱性指数の評価を示す。

まず、配水管延長と V_d （管径別）との関係を図 13 に示す。 V_d 値は 0.8~1.6 の間に収まり、全体的にレンジが狭い。配水管の管径がほぼ ϕ 450mm 以下が多いためと考えられる。また、配水管延長が長いほど V_d 値がやや小さくなる傾向がある。すなわち、事業体が大きいほど大口径管の比率が大きくなるためと考えられる。

配水管延長と V_p （管種別）との関係を図 14 に示す。配水本管と配水支管を合わせた V_p 値は、一部の例外を除くと 0.3~1.5 程度であり、 V_d （管径別）よりもレンジが広く、事業体ごとの管種の違いが明確である。ばらつきは大きいものの、配水支管延長が長くなると、 V_p 値が小さくなる傾向が見受けられる。

V_d （管径別）と V_p （管種別）の比較を図 15 に示す。既に指摘したように、 V_p 値は V_d 値と比較してレンジが広い。被害箇所数に及ぼす影響としては、管径より管種の方が大きいと考えられる。また、 V_p 値と V_d 値には、かなり弱い正の相関がある。

V_{pm} （配水本管）と V_{ps} （配水支管）の比較を図 16 に示す。 $V_{ps} > V_{pm}$ である事業体が多い。階層的に配水本管の下位に位置する配水支管の方が配水本管より脆弱な傾向にある。

配水管延長と V_{pd} ($=V_p \cdot V_d$) との関係を図 17 に示す。 V_p 値と V_d 値を掛け合わせるため、個別の評価値よりもレンジがやや広がっている。 V_{pd} 値の全国平均値は 0.8 となった。事業体によるばらつきは非常に大きい、大規模な事業体ほど V_{pd} 値が小さくなる傾向が見受けられる。

配水管延長と V_{pd} ($=V_p \cdot V_d$) との関係を図 18 に示す。大規模な事業体ほど V_{pd} 値が小さく脆弱性は低い傾向にあるが、埼玉県から千葉県にかけては脆弱性の高い事業体もある。

配水管延長（本管+支管）の分布（東海~関東地方）を図 19 に示す。配水管の布設延長距離を事業体規模とみなすと、東京都および神奈川県は非常に大きな事業体が広いエリアをカバーしている一方で、埼玉県から千葉県にかけては中小事業者が多いといえる。

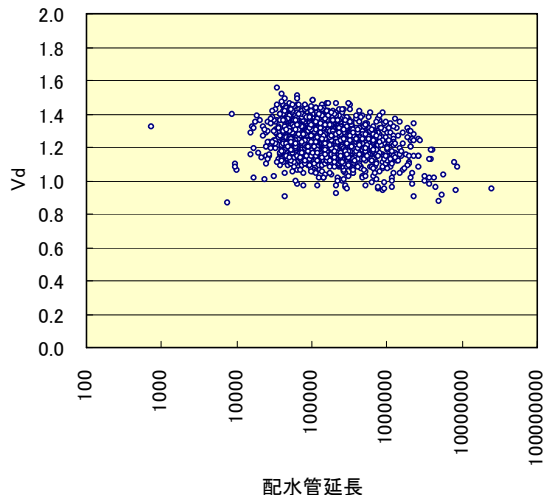


図 13 配水管延長(m)と V_d との関係

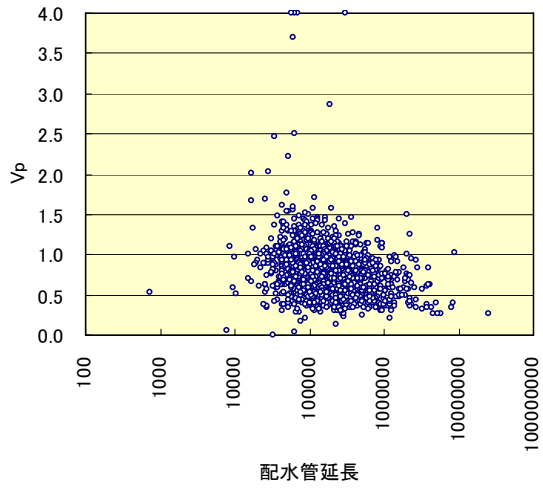


図 14 配水管延長(m)と V_p との関係

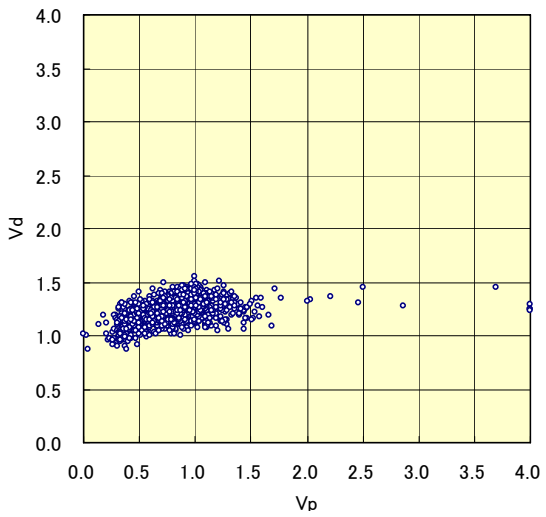


図 15 V_d と V_p の比較

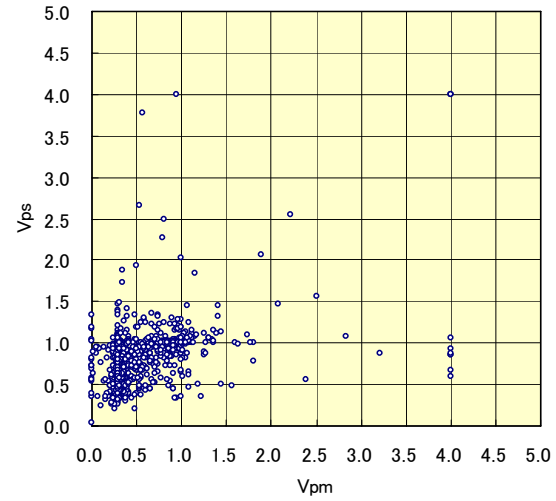


図 16 V_{pm} (配水本管) と V_{ps} (配水支管) の比較

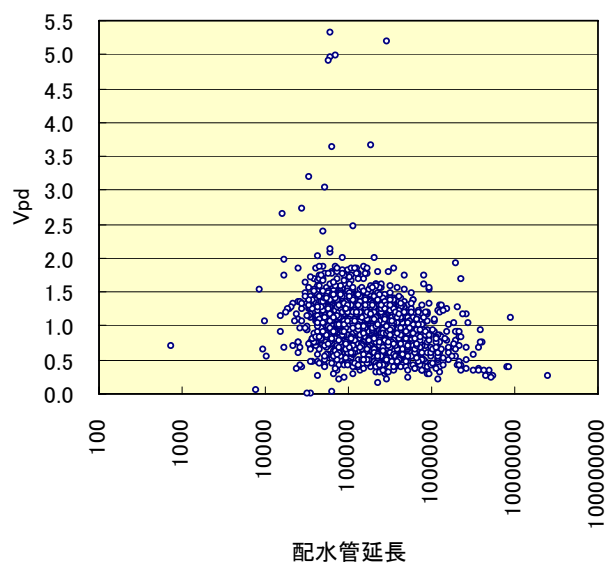


図 17 配水管延長(m)と V_{pd} ($=V_p \cdot V_d$) との関係

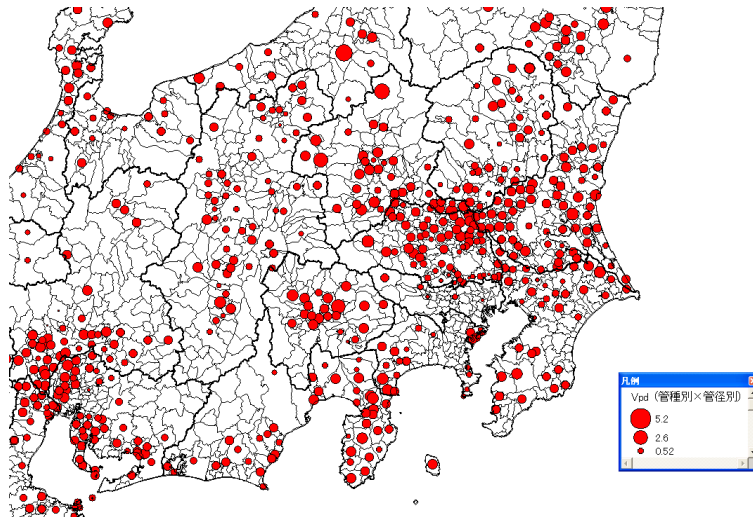


図 18 V_{pd} 値 ($=V_p \cdot V_d$) の分布(東海～関東地方)

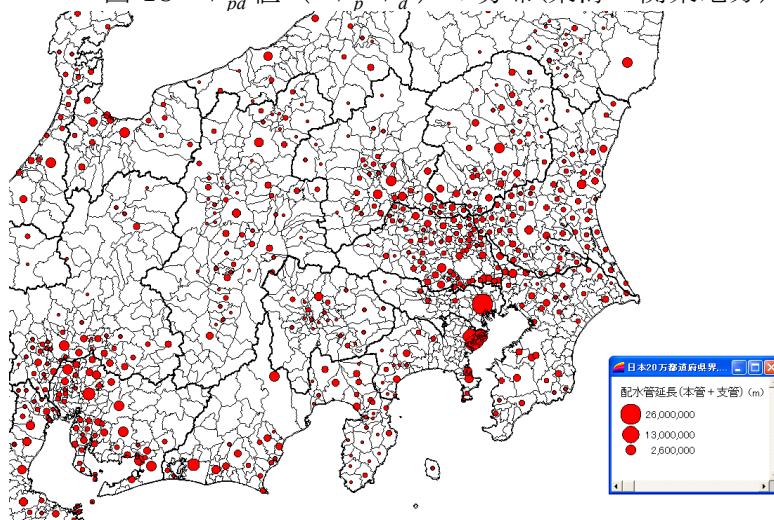


図 19 配水管延長（本管+支管）の分布(東海～関東地方)

g) 水道統計（平成 17 年度）に基づく耐震化率の評価

水道統計による管路の「耐震化率」とは、耐震管路延長距離の総延長距離に対する割合で定義される。耐震管路とは次の管種のことをさす。

- ・ ダクタイル鋳鉄管（耐震型継手を有する管：S 型、SII 型、NS 型、US 型、UF 型、KF 型、PII 型などの抜け出し防止継手）
- ・ 鋼管（溶接継手）
- ・ ポリエチレン管（高密度・熱融着継手）

ここでは、配水管（本管+支管）の耐震化率について考察する。まず、図 20 は、配水管延長と配水管耐震化率との関係を示している。耐震化率の最大値は 1.0 であるが、その値は 0.0～0.1 の範囲に集中しており、事業体規模との間に明確な傾向は見られない。図 21 に V_p 値（管種別）と配水管耐震化率の関係を示す。両者には、弱い負相関が見受けられるが、ばらつきは非常に大きく、ほぼ無相関といってよい ($R^2=0.05$)。図 22 は、東海～関東地方における配水管耐震化率の分布を示す。地域的分布の面で、特徴的な傾向は見られない。

管路の継手の種類については、前述のように、各上水事業者が明確に区分していない場合や、そもそも不明である場合がある。耐震化率という指標は、継手の種類が正確に把握されていない限り、正しく評価できない。

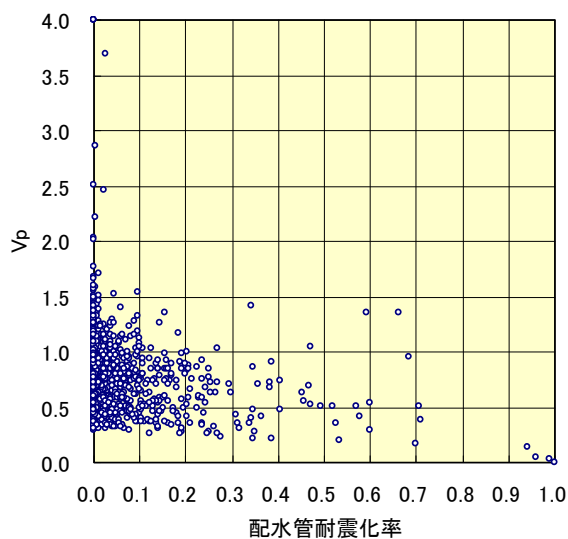
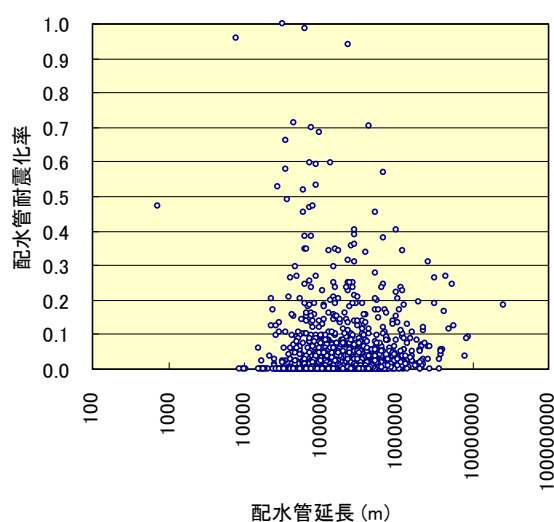


図 20 配水管延長(m)と配水管耐震化率との関係 図 21 配水管耐震化率と V_p (管種別) の比較

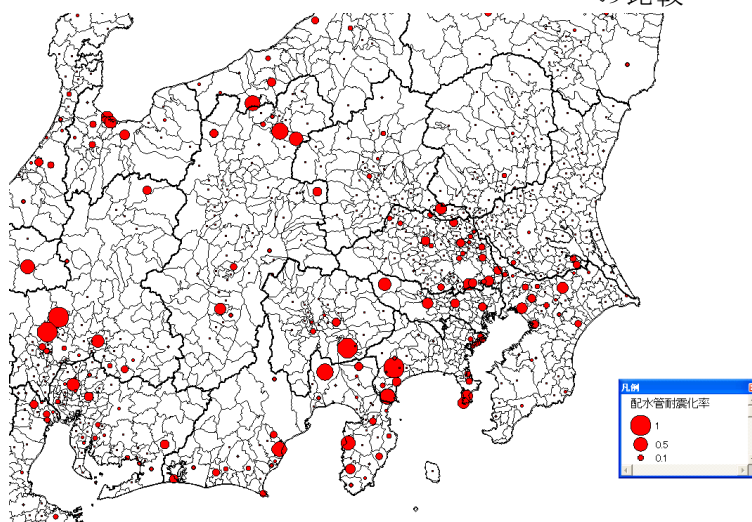


図 22 配水管耐震化率の分布(東海～関東地方)

h) 水道統計（平成 6～17 年度）に基づく脆弱性指数と耐震化率の経年推移

過去の「水道統計」を遡って調査し、全国の V_{pd} 値および耐震化率の経年推移を明らかにする。「水道統計」では、最近のものほど詳細な調査項目が設定されている。平成 2～17 年度以降における主要な相違点は次のとおりである。

- i. 平成 2～5 年度においては、布設延長距離について、導水管・送水管・配水本管・配水支管の区別がなされていない。平成 6 年度以降は区別されている。
- ii. 平成 2～5 年度においては、ダクタイル鋳鉄管の耐震継手と非耐震継手の区別がなされていない。平成 6 年度以降は区別されている。
- iii. 平成 2～16 年度においては、鋼管とポリエチレン管について、耐震継手と非耐震継手の区別がなされていない。平成 17 年度では区別されている。

以上のことを鑑みて、本研究では調査対象を平成 6～17 年度とし、上記(iii)に関して次の 2 ケースを設定して検討することとした。

Case A： 鋼管とポリエチレン管の耐震化率を平成 17 年度と同等の値とする。(脆弱性最小)

Case B： 鋼管とポリエチレン管の耐震化率をゼロとする。(脆弱性最大)

平成 17 年度に近い最近の年代では Case A に近いと考えられるが、古い年代では必ずしも Case B に近いとはいえない。

まず、配水支管の管種・継手種別布設延長距離の経年変化を図 23 に示す。ダクトイル 鋳鉄管（非耐震継手）は 19.9 万 km から 27.5 万 km に増加している。ダクトイル 鋳鉄管（耐震継手）は 9.3 千 km から 26.6 万 km に増加しており、伸び率は高いものの、布設割合は依然としてわずかである。石綿セメント管は 4.9 万 km から 1.3 万 km まで減少した。一方、安価な硬質塩化ビニル管は、14.9 万 km から 18.6 万 km と増加傾向にある。

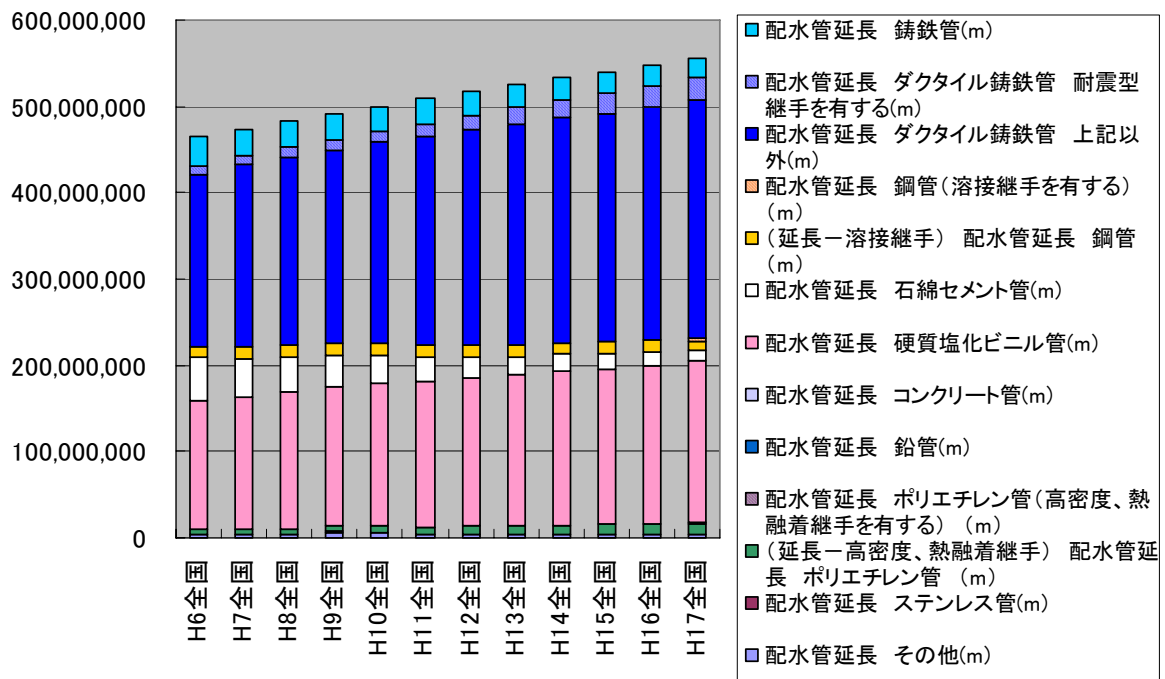


図 23 配水支管の布設延長距離の経年変化（管種・継手種別、Case B）

管路の脆弱性を徐々に低減できていることは、この統計からも定性的に読み取ることができるが、この傾向を定量的に明らかにするため、脆弱性指数および耐震化率の経年変化を比較する。

図 24 は、簡易評価による配水管（本管＋支管）の脆弱性指数 V_{pd} と耐震化率を、Case A および B について示したものである。まず脆弱性指数 V_{pd} 値を見ると、ほぼ一定のペースで値が減少していることがわかる。期間中の低減率をまとめると次のようになる。

- Case A では、平成 6～17 年度の 11 年間で 1.041 から 0.795 に減少（76.3%）
- 平成 7～17 年度の 10 年間で 1.004 から 0.795 に減少（79.1%）
- Case B では、平成 6～17 年度の 11 年間で 1.084 から 0.795 に減少（73.3%）
- 平成 7～17 年度の 10 年間で 1.045 から 0.795 に減少（76.0%）

i) 水道統計に基づく経年管の残存状況

水道統計では、「石綿セメント管、鉛管、および布設後 20 年以上経過した硬質塩化ビニル管、铸铁管、コンクリート管、鋼管およびその他管」を経年管としており、導・送・配水（本・支）管の布設延長距離がまとめられている。ここでは、配水管（配水本管+配水支管）のデータを用いて、経年管の現状についてまとめる。

図 25 の折線は、配水管の経年管の布設延長距離が、総布設延長距離に占める割合を示している。平成 17 年度においては約 22.1 万 km が経年管であり、年々増加傾向にあることがわかる。平成 17 年度で全体の 39%を占めているが、この割合も増加傾向にある。同図の棒グラフは、経年管の布設延長距離の管種別内訳を示す。先に見たように石綿セメント管は減少しつつあるが、ダクティル铸铁管や硬質塩化ビニル管の増加が全体的な増加傾向の主要因であることがわかる。

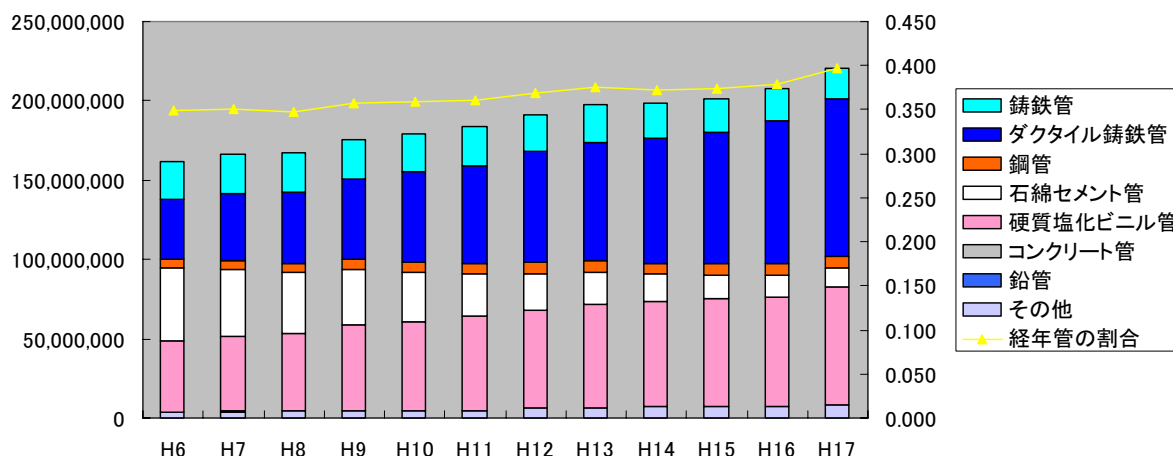


図 25 経年管が全体に占める割合と布設延長距離の管種別内訳（配水管）

図 26 の折線は、平成 17 年度統計に基づいて、経年管の布設延長距離が、総布設延長距離に占める割合を都道府県別に示したものである。経年管が占める割合は、島根県、高知県、大阪府、宮城県、広島県が上位を占める。一方で、経年管の延長距離では、愛知県、東京都、北海道、神奈川、大阪府が上位を占める。同図の棒グラフは、経年管の布設延長距離の管種内訳を都道府県別に示したものである。首都圏の一都三県に注目すると、それぞれ特徴的な傾向を示している。東京都ではほとんどがダクティル铸铁管である。千葉県は石綿セメント管の残存距離が長く、全国一となっており、硬質塩化ビニル管も多い。埼玉県も千葉県に次いで石綿セメント管の残存距離が長い。神奈川県では、鋼管やその他管が占める割合が、他都道府県と比較すると高いことがわかる。

以上のことから、各地域の経年管の残存状況を踏まえて、計画的に布設替えを行うことによって、脆弱性指数を低減し、ひいては被災時の被害箇所数を確実に減少させることが重要であるといえる。

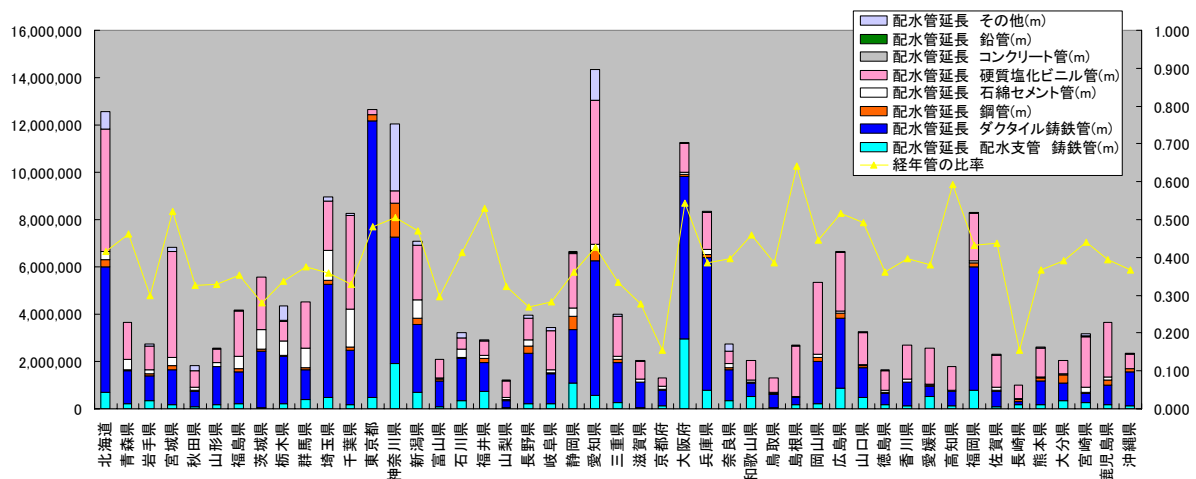


図 26 経年管が全体に占める割合と布設延長の管種内訳
(平成 17 年度、都道府県別、配水管)

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は、首都圏におけるライフラインおよび社会機能の相互依存性の実態解明を行い、次年度以降の「被害関連マトリクス」モデルおよび解析法構築のための基礎資料を得ることを目標として、単一システムからの他システムへの被害波及について検討した。まず、平常時～緊急対応時における相互依存性の検討のため、2006 年首都圏大規模停電を対象として被害波及の事例分析を行い、被害の全体像と時系列的展開をまとめた。さらに、鉄道、水道、交通信号機の事例を中心に、バックアップ施設などの停電影響波及に関わった要因を明らかにした。

以上の分析結果と、新潟県中越地震や新潟県中越沖地震の被災状況に関する知見とあわせて、機能的被害波及のモデルの骨格をなす要因を、「システム内の機能的被害波及」「影響顕在化までの余裕時間」「システム間での機能的被害波及」「バックアップ施設」と規定してプロトタイプを作成し、解析モデルの設計フレームとパラメータ同定のための基礎資料を得た。簡単なシミュレーションモデルによる適用例を通じて、各要因の複合的な効果が、供給停止地域の時空間的分布に現れることを示した。

また、復旧過程における相互関連を検討するため、被害の絶対量とその地域分布を把握することを目的に、上水道システムを対象として管路施設の脆弱性指数を定義して、「水道統計」に基づいて全国の現状と経年変化について考察した。過去 10 年間で配水管の脆弱性指数は全国平均で約 20%低減されたこと、配水管耐震化率は向上しつつあるが 6%程度にとどまること、首都圏における経年管残存状況の特徴（東京都：ダクタイル鋳鉄管、千葉県：石綿セメント管と硬質塩化ビニル管、埼玉県：石綿セメント管、神奈川県：鋼管やその他管）が明らかになった。

以上により、ライフライン相互関連をマクロ（広域的）～ミクロ（局所的）スケールでとらえる設計フレームと解析モデル構築のための基礎資料が得られ、物理的被害波及の軽減、機能的被害波及の軽減、復旧最適化（広域連携や復旧調整）など、首都圏の地震防災戦略

を総合的に検討するための準備を進めることができた。

次年度は、機能的被害波及については、本年度のプロトタイプをもとにしてモデル構築を進める方針である。また機能的被害波及とは異なった特性を持つ物理的被害波及については、新たに検討を進める必要がある。本年度は、都市ガス供給システムの脆弱性評価について資料が十分に得られなかったため、管路網に関する資料収集と脆弱性評価が今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) 朝日新聞，2006年8月14～15日。
- 2) 毎日新聞，2006年8月14～20日。
- 3) 読売新聞，2006年8月15日。
- 4) 国土交通省：大規模停電に関する国土交通省の対策，2006.9.
- 5) 東京都水道局：停電による水道施設への影響等について（最終版），2006.8.
- 6) 厚生労働省健康局水道課：災害対策の充実，水道ビジョンフォローアップ検討会第6回検討会資料，2007.12.
- 7) 社）日本水道協会：平成2～17年度水道統計（施設・業務編）第73-1号～第88-1号，1992～2007.
- 8) 損害保険料率算定会：地震被害想定資料集，pp3.102-3.123，1998.9.
- 9) 高田至郎・藤原正弘・宮島昌克・鈴木康博・依田幹雄・戸島敏雄：直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究，水道協会雑誌，第70巻，第3号（第798号），pp.21-37，2001.3.
- 10) 鈴木康夫・佐藤寛泰・能島暢呂・杉戸真太：埋設管路網の脆弱性を考慮した地震時ライフライン機能の簡易評価モデル，第58回土木学会年次学術講演会，I-349，2003.9.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
Modeling Impact of Lifeline Disruption on the Industrial Sector in Earthquake Disaster (口頭発表)	Nojima, N.	Ninth Canadian Conf. on Earthq. Eng., Ottawa, Ontario, Canada	June 2007	国外
脆弱性指数を用いた上水道管路の地震時脆弱性評価（口頭発表）	安藤騰志	土木学会中部支部平成19年度研究発表会，金沢大学	2008年3月7日	国内
脆弱性評価のためのガス導管敷設状況に関する考察（口頭発表）	能島暢呂	土木学会中部支部平成19年度研究発表会，金沢大学	2008年3月7日	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
なし				

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果	対応者氏名	報道・掲載機関	発表時期	国内・外の別
なし				

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成20年度業務計画案

第二年度の平成20年度においては、ライフライン系のシステム間の被害波及と復旧過程をマクロスケールで概略的にとらえ、定性的～準定量的な解析を行うモデルの設計フレームについてさらに検討を進め、モデル構築を行う。本研究課題では「物理的被害波及」、「機能的被害波及」、「復旧支障」の時間スケールの枠組みに従って相互連関をとらえることから、それぞれ段階における相互連関の特性にあわせて検討を進める計画である。

まず「物理的被害波及」については、このタイプの被害波及が近接する施設相互で発生する事象であることから、地理的・空間制約を強く受ける点を考慮することが重要となる。そこで、各ライフラインシステムの空間的配置を、互いに重なり合うシステムレイヤーで表現することとし、各レイヤーはメッシュの集合体として記述する。システム内の物理的被害は空間的に隣接するメッシュ相互で波及し、異種システム間における物理的被害は空間的に重なり合うメッシュ相互で波及すると仮定して検討を進める。

「機能的被害波及」のモデルについては、地理的・空間的制約を強く受ける物理的被害波及とは異なり、機能的連結性の喪失に起因することから、有形・無形のネットワーク制約を受ける点と、被害波及防御機能を考慮することが重要となる。そこで、第一年度の成果に基づいて、「システム内の機能的被害波及」、「影響顕在化までの余裕時間」、「システム間での機能的被害波及」、「バックアップ施設」と規定したプロトタイプを基本として、モ

デル要件をより詳細に検討して発展させる。これにより、システム内および異種システム間における被害波及を防御するシステム内の余裕時間やバックアップ施設の効果を反映した被害波及構造のモデル化を行う。

「復旧支障」については、まずライフラインの物理的被害の絶対量を知ることが不可欠となる。中央防災会議や東京都などの関連自治体（八都県市）による被害想定や、第一年度の「脆弱性指数」を応用した検討結果、永田・山本により開発された簡易版ライフライン被害・復旧予測システム等を用いることによって、対象地域内で発生する被害量の概数とその地域分布を求める。その結果によって、各ライフラインの面的な復旧需要量を把握することができ、復旧最適化（自律分散化、広域連携、復旧調整）の検討材料とすることができる。またそれと同時に、「物理的被害波及」および「機能的被害波及」の入力条件として活用可能な情報が得られる。

さらに、関連自治体（八都県市）とライフライン事業者（上水道、ガス、電力など）の訪問調査を実施して、ある程度対象地域を絞った上で、データが入手可能な範囲でモデルの特定化を行い、モデルパラメータを同定する。その上で、予備的なシミュレーションによる数値実験を通じて、諸条件の相違による感度分析を行う。被害パターンおよび被災規模としては、(1)単発（首都圏大規模停電のような単独事故に起因する事象）、(2)局所的同時多発（小規模な直下型地震に起因する事象）、(3)散発的同時多発（遠距離の海溝型地震に起因する事象）、(4)破局的同時多発（大規模な直下型地震に起因する事象）、の4種類を念頭に置いた想定を行う。

以上により、第三年度以降、首都直下地震による同時多発被害発生状況下で、システム間の相互関連を考慮した復旧過程のシミュレーションを行い、物理的被害波及の軽減、機能的被害波及の軽減、復旧最適化（自律分散化、広域連携、復旧調整）など、首都圏の地震防災戦略を総合的に検討するためのシミュレーションの初期条件設定を目標とする。