

3.5.4 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20年度業務目的

第二年度の本年度は、システム間の被害波及と復旧過程を「ミクロスケール」および「マクロスケール」でとらえるモデルについて検討する。まず、平常時・緊急対応時・復旧過程の各段階におけるライフラインの相互依存性を分類する。「物理的被害波及」については、埋設施設の近接性に起因することから地理的・空間制約を強く受ける点を考慮して、空間的に重なり合うライフライン施設の同時被害発生（近接位置における被害発生）に関する確率論的モデルを構築し、首都直下地震を対象とした評価を行うことにより、システム間の相互連関を考慮した復旧過程のための基礎データを得る。また「機能的被害波及」については、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機構を反映した被害波及構造のモデル化を行う。これらのモデルを用いて、ライフライン系のシステム間被害波及と復旧過程を両スケールでとらえ、ネットワークの細部構造に立ち入ることなく解析できるモデルを構築する。

(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20年度の成果

(a) 業務の要約

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するモデルの検討を行った。まず「物理的被害波及」について、近接ライフラインの同時被害発生の確率論的モデルを構築した。同時被害発生率には各システムの被害発生率の相乗効果が現れ、同時被害の面的分布はコントラストが強くなることを明らかにした。上下水道を対象としたケーススタディにより、復旧調整等が必要となる箇所数やその分布、下水道の排水不能による上水道の復旧・通水制限といった事態についておおよその把握が可能であることを示した。また管路の脆弱性の低減により同時被害をかなり回避できるという結果を得た。「機能的被害波及」については、被害波及とその防御機構を反映したプロトタイプを用いて、単独事故および地震災害による同時被害のケースを想定したケ

ースタディを行った。その結果に基づいて、供給停止地域の時空間的分布を、バックアップの効果とその限界等の影響要因と関連付けて検討できることを示した。

(b) 業務の成果

1) ライフライン相互連関の分類に基づく被害波及モデルのモデル化の方針

ライフライン地震災害は、各システム単独の問題としても重大ではあるが、重層的に重なり合った総合体としてライフラインを見た場合、付随して新たに考慮すべき問題が生じる。ライフライン施設の多くが道路の地下埋設施設や沿道施設として設置されていることや、ライフライン機能そのものが相互依存的関係にあることから発生するのが、総称して地震時ライフライン相互連関といわれる問題である。

本研究ではライフラインの相互連関を、地震発生後の時間スケールにおいて、「物理的被害波及」「機能的被害波及」「復旧支障」の順でとらえることとしている。いずれの側面においても、巨大災害になるほど相互影響の度合いは大きくなる。これは、

- ・物理的被害が膨大になりシステム間の物理的影響波及の機会が増すこと、
- ・ライフライン機能停止が長期化して機能的被害波及が顕在化すること、
- ・復旧必要量の絶対量が増えるため、復旧作業の錯綜などの復旧支障が随所で発生すること、

等によって悪循環に陥るためである。将来発生が予想される地震において、どのようなライフライン相互連関の問題が発生するのか、予見することは重要である。これまで、過去の事例分析や専門家の意見収集に基づいて相互連関の影響波及を記述するモデルが提案された例はいくつかある¹⁾⁻²⁾。しかしながら、定量的・総合的な予測を試みた例はきわめて少ない。一言でライフライン相互連関といってもその様相は多面的であり、定量的モデルを構築するには、対象とする問題のスケールに応じたアプローチが必要である。

物理的被害波及や復旧現場での復旧支障は、近接地域内での局所的な事象である。つまり、物理的な距離が近接していることによって生じる問題であるから、空間制約が強い。従って、そのモデル化と定量的解析を行うには「ミクロスケール」での検討が必要であり、同時多発被害発生の可能性とその分布について把握することが先決となる。復旧段階においては、被害現場レベルでは戦術的な影響回避措置が必要となるほか、災害対策本部レベルでは戦略的な復旧調整や広域連携措置が必要となる。

こうした観点から本年度ではまず、物理的被害波及や復旧支障に関するモデル構築を目指した基礎的検討として、近接して設置されたライフライン施設の同時被害発生という問題に焦点を絞り、確率論的考察を行った。複数ライフラインの被害が近接地点で発生する要因としては、複数ライフライン上のランダム被害が重複して生じる「偶発的同時被害」と、複数ライフラインが地震時に一体となって挙動して被災（橋梁添架管の落橋、大規模液状化、盛土の大規模崩壊などによる埋設管損傷）することに起因する「共通モード被害」に大別して考えることができる。本研究では、このうち前者の「偶発的同時被害」を考察対象とする。

一方、機能的被害波及は、有形・無形に存在する機能的・組織的な依存体系の破壊によって生じるものであるから、空間制約はほとんど受けないと考えてよい。つまり「繋がり」

が存在する限り、被害波及は遠方まで瞬時に到達することもある。この種の問題を扱うには、各システムのネットワーク構造やネットワーク上での被害パターンを考慮した「マクロスケール」での検討によって、被害波及と復旧過程をとらえるモデルが必要である。

このため本研究では、昨年度までに検討を進めた機能的被害波及のモデルを用いて、「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、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に関するケーススタディを行う。

2) ライフライン施設の同時被害発生に関する確率論的考察

a) 2システムの被害発生率がそれぞれ一様な場合の同時被害発生率

対象地域内にある2つのライフラインシステム（システム1、システム2）について考える。これらのシステムは面的な広がりを持つが、単純化のため図1に示すように一次元に伸長した線上構造物としてモデル化する。被害は各システムの全長にわたって一様・独立・ランダムに発生するものと仮定し、被害発生率（単位長さあたりの被害箇所数、以下では被害率と省略することもある）をそれぞれ v_1 、 v_2 で表す。また両システムは十分に近接して敷設されており、被害位置はシステムに沿った共通の一次元座標で表せるものとする。この前提条件では、システム間での被害発生は互いに独立となり、微小距離の近傍 l 以内で両システムの同時被害が発生する単位長さあたりの割合（同時被害発生率）は、確率論的考察より、 v_1v_2l と求められる。つまり、2つのシステムの同時被害発生率は、各システムの被害発生率と同時被害発生を規定する範囲（微小距離の近傍 l ）の積であることから、2システムの相乗効果が顕在化することがわかる。

以上より、長さ L における両システムの同時被害発生数 k は、 v_1v_2lL をパラメータとするポアソン分布に従い、その期待値は v_1v_2lL 、標準偏差は $(v_1v_2lL)^{0.5}$ となる。

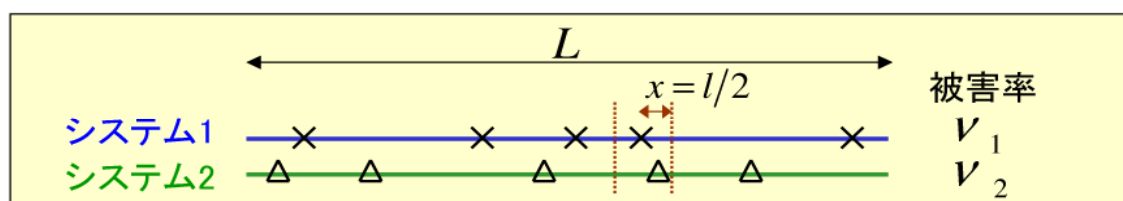


図1 2つのライフライン施設の微小距離の近傍における同時被害発生モデル化

上記では、同時被害発生を規定するための範囲を「微小距離の近傍 l 以内」とした。しかしこれはあくまでも同時被害発生率を導出するための近似措置である。実際の被災現場では、ある程度の離間距離があったとしても、物理的被害波及や復旧支障といったライフライン相互連関が生じる。そこで図2に示すように、全長 L が長さ l の N 個のセグメントに分割されたシステムを考える。被害発生は一様・独立・ランダムであることから、各セグメントにおける両システムの同時被害発生確率は、

$$p_s = (1 - \exp[-v_1l])(1 - \exp[-v_2l])$$

で求められる。各セグメントにおける2つのシステムの同時被害発生確率は、各システムの被害発生確率の積であり、微小距離の近傍を仮定した上記とは形式的には異なるものの、2システムの相乗効果が顕在化するという点では共通している。

全長 L を構成する N 個のセグメントについて考えると、各セグメントにおいて「同時被害が発生する／しない」の事象の列は、発生確率が p_S で試行回数 N 回のベルヌーイ試行列を構成する。従って全長 $L = Nl$ のうち同時被害が発生しているセグメント数 N_S は p_S をパラメータとする二項分布に従い、その期待値は Np_S 、標準偏差は $\{N(1-p_S)p_S\}^{0.5}$ となる。

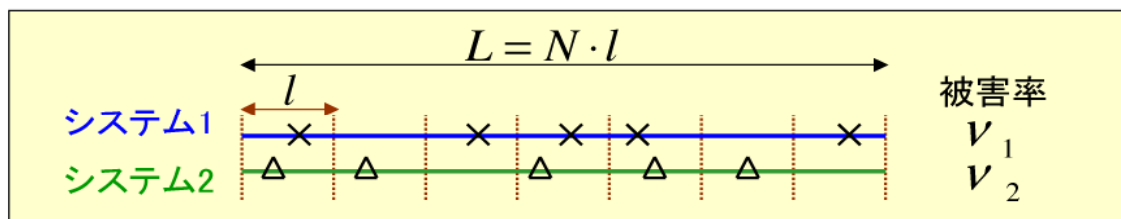


図2 2つのライフライン施設の共通セグメント内における同時被害発生モデル化

b) 2システムの被害発生率がそれぞれ空間的に変動する場合の同時被害発生率

上記 a) では、2つのライフラインシステムの被害発生率を全長にわたって一様と仮定し、それぞれ v_1 、 v_2 で表した。しかしながら、ライフライン・ネットワークは広域に広がっているため、地震動強度、地盤条件、施設の脆弱性などの空間的分布に従って被害発生率は変動する。いま、地震動強度（震度、最大加速度、最大速度など）、地盤条件（表層地盤種別、液状化危険度など）、施設の脆弱性（管種・管径など）が、位置 x の関数としてそれぞれ $I(x)$ 、 $S(x)$ 、 $V(x)$ で表されるものとする。一般的に用いられる埋設管被害予測式の形式を踏襲すると、被害発生率は、基準となる管種・管径に対する標準被害率関数 $R(\cdot)$ を用いて、

$$v_1(x) = R_1(I(x)) S(x) V_1(x)$$

$$v_2(x) = R_2(I(x)) S(x) V_2(x)$$

と書くことができる。添字1、2は、それぞれシステム1、システム2に関する項であることを示す。ここで、両システムの埋設位置が近接していることを前提としているので、局所的には、地震動強度 $I(x)$ および地盤条件 $S(x)$ は両システムで共通要因と見なすことができる。一方、標準被害率 $R(\cdot)$ およびシステムの脆弱性 $V(x)$ については各システム固有の変動要因であり、被害発生率の相違を特徴付けるものとする。

以上の考察から、図3に示すように、被害発生率 v_1 と v_2 は空間的に変動するのみならず、上記の共通要因に起因する空間的相関を有する。つまり、揺れの大きい場所あるいは地盤条件の悪い場所では、システム1、システム2ともに被害発生率が高くなるので、広域的な広がりの中においては、両者の被害発生率の間に、空間的な正の相関性があることは明らかである。しかしこのような状況においても、被害発生という事象の独立性を仮定することができる。以下ではその考え方を示す。

図3に示した被害発生率 $v_1(x)$ および $v_2(x)$ の空間的変動において、それぞれが区分的に

一様と見なせる範囲においては、各区分における被害発生の一様性・独立性・ランダム性を仮定することができる（なお、ここでいう「区分」は、被害発生率の変動に応じて適宜定められるものであり、前述の「セグメント」とは無関係であることに注意されたい）。ここで、2つのシステムにおける共通要因とした $I(x)$ 、 $S(x)$ は、あくまで個別の被害発生率を定量的に規定する要因である。このこと自体は、確率統計的な独立性（システム1の被害発生という条件がシステム2の被害発生確率を変化させず、同様に、システム2の被害発生という条件がシステム1の被害発生確率を変化させない）を否定するものではない。つまり、被害発生率 $v_1(x)$ と $v_2(x)$ に共変関係があったとしても、被害発生という事象の独立性の仮定が損なわれることはない。

以上の考察に基づいて、図4に示すように、被害発生率 $v_1(x)$ と $v_2(x)$ およびセグメント長 l の積として、空間的に変動する同時被害発生率 $v_1(x)v_2(x)l$ を考えれば、被害発生率の相関性についてはこの同時被害発生率というパラメータに織り込み済みであり、そこに非定常ポアソン過程を導入すれば、前述の評価方法を区分的に適用することができる。既に述べたとおり、同時被害発生には2システムの被害発生率の相乗効果が現れるため、冒頭に述べたように、大規模災害で特に深刻な事態となる。また、同時被害が発生しやすい場所とそうでない場所のコントラストがより一層明確になり、同時被害が集中する可能性が高くなる。

なお、セグメント化されたシステムを対象とする場合には、上記と同様の考察により、各セグメントにおける同時被害発生確率は、次式で求められる。

$$p_s = \{1 - \exp[-v_1(x)l]\} \{1 - \exp[-v_2(x)l]\}$$

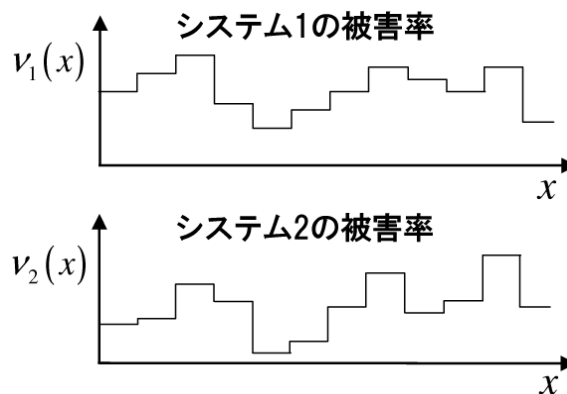


図3 2つのライフライン施設の被害発生率の空間的変動

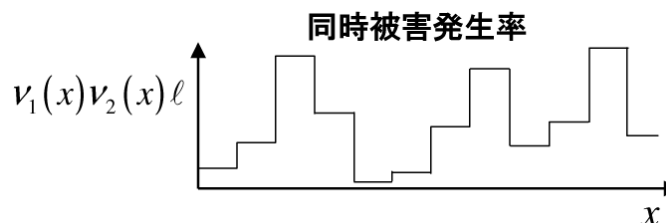


図4 同時被害発生率の空間的変動

c) 千葉県における上下水道管路網の同時被害発生に関するケーススタディ

i) 上下水道管路網の被害想定概要

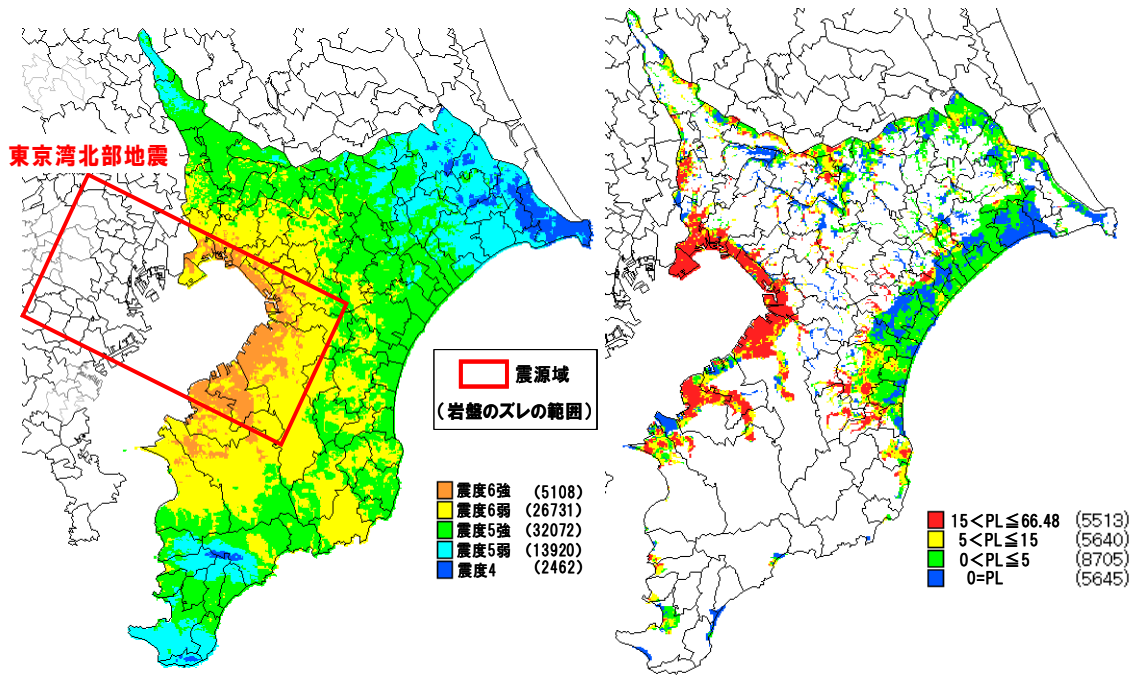
ライフライン施設の地震時同時被害発生に関する確率論的モデルの適用例として、いわゆる「動脈－静脈系」として水供給処理機能を担う上水道システムと下水道システムを対象としたケーススタディを示す。この目的を達成するため、千葉県より、千葉県地震被害想定³⁾において整備された上下水道の施設分布データ（管路延長など）と想定被害データ（被害率、被害箇所数など）の提供を受けた。

千葉県における被害想定（平成19年度）では、56市町村（36市17町3村；千葉市の6行政区を含めて61市区町村）よりなる千葉県全域（面積約5,157km²）を対象として、250mメッシュ単位（メッシュ総数80,315）の評価がなされている。ここでは東京湾北部地震（マグニチュード7.3程度）に関する想定被害データを用いることとした。その震度分布と液状化危険度分布を図5に示す。また、上水道の配水管延長（総延長約23,600km）と、下水道の管路延長（約14,400km）の分布を図6に示す。普及率は上水道で約93%、下水道で約64%である。

東京湾北部地震における千葉県全域での上水道配水管被害率の分布を図7(a)に示す。被害率の最大値は4.94(箇所/km)である。上水道配水管被害箇所数の分布を図7(b)に示す。被害率が高くかつ布設延長が長い東京湾臨海部地域に集中している。ただし埋立地では被害率は高いものの布設延長が短いため、被害箇所数はやや少なくなっている。被害箇所の総数は約8,135箇所、メッシュにおける被害箇所数の最大は約60(箇所/メッシュ)と推定されている。

下水道管の被害には、管本体や継手部の損傷だけでなく、ある程度の管路延長にわたる管路のたるみや蛇行がある。このため下水道管の被害を表す指標としては、被害箇所数ではなく被害延長距離(km)が用いられることが多く、被害率(%)は、被害延長距離を管路延長距離(km)で除した割合を表す。千葉県では、国土交通省「大規模地震による下水道被害想定検討委員会」³⁾において示された下水道管の被害予測手法が採用されている。東京湾北部地震における千葉県全域での下水道管被害率(%)の分布を図8(a)に示す。東京湾臨海部などで被害率が高く、最大0.16%となっている。被害延長(km)の分布を図8(b)に示す。下水道管の総被害延長は428.8kmとなった。

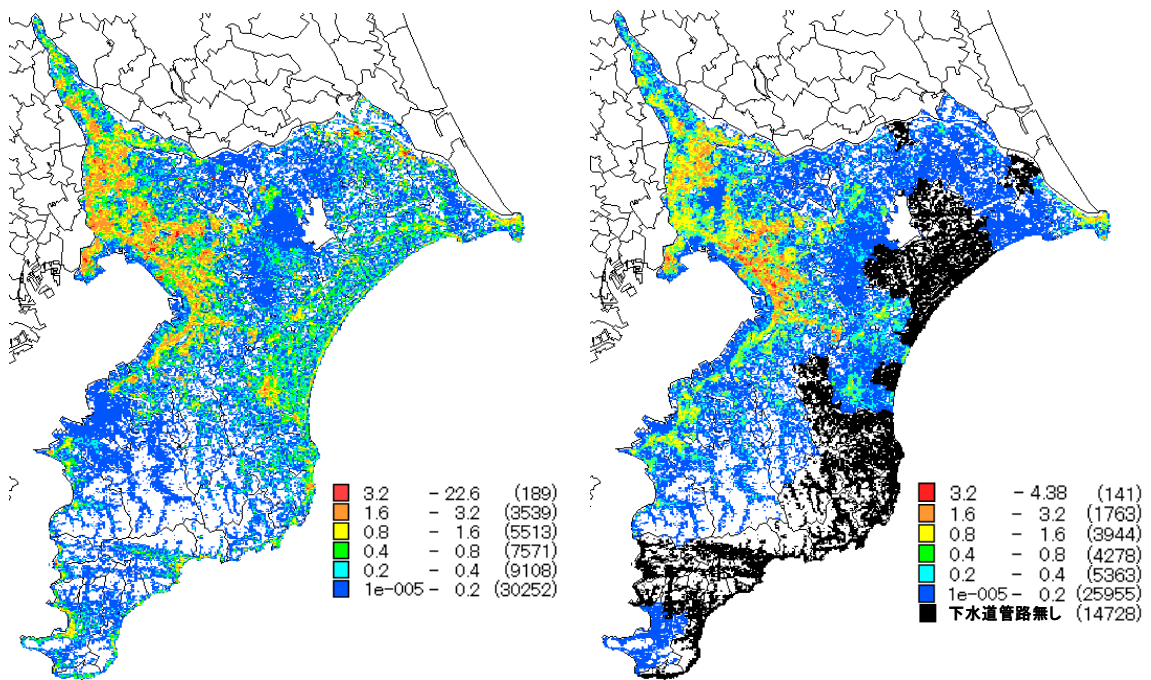
このように上下水道では被害の定義が異なるが、本研究では同時被害予測モデルを適用するため、被害率および被害箇所数の換算を行った。その手続きを以下に示す。「大規模地震による下水道被害想定検討委員会」⁴⁾では、兵庫県南部地震の下水道被害について、スパン数で報告されている市町村単位の被害集計結果を、「1スパン＝被害延長平均25m」として被害延長に換算した上で、平成7年度下水道統計の管路敷設延長で除することで下水道被害率(%)を試算している。本研究では、この手順を逆に適用して、スパン長（1スパンと見なす被害延長）を $L_s=25m$ として、メッシュごとの下水道被害延長を「被害スパン数」に換算するとともに、これをメッシュごとの管路敷設延長で除することによって、「被害率(被害スパン数/km)」を求めることとした。被害率(スパン/km)および被害スパン数の分布を図9(a)と図9(b)に示す。



(a) 震度分布

(b) 液状化危険度分布

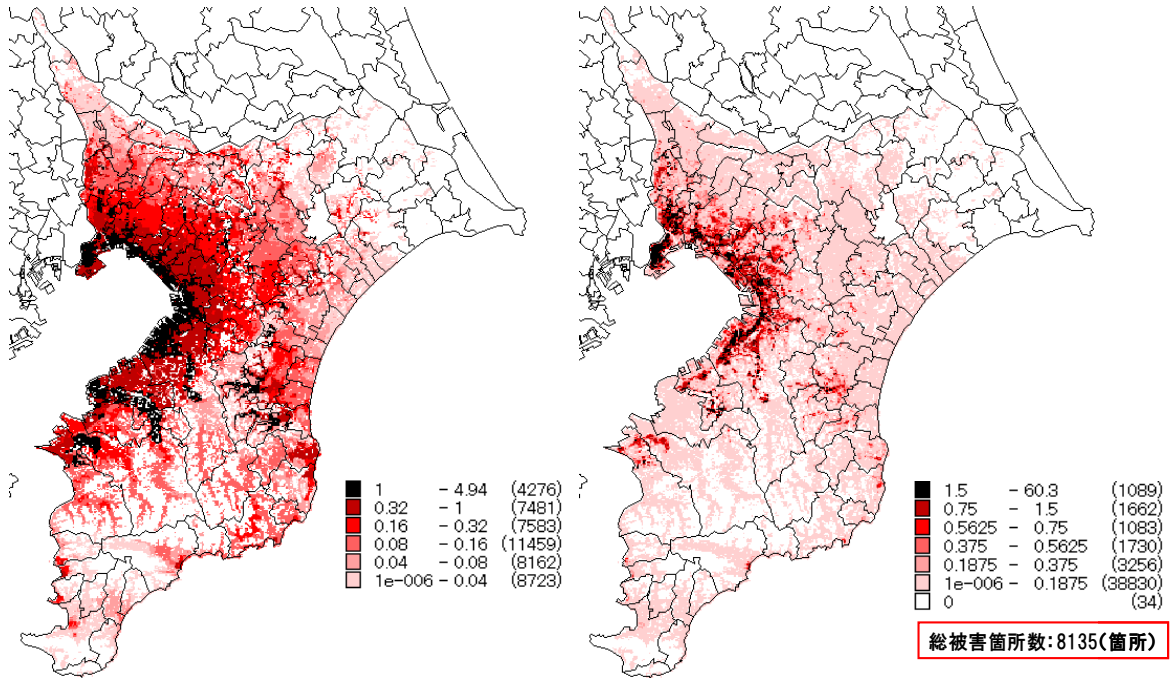
図5 東京都北部地震による千葉県内の震度と液状化危険度の推定分布



(a) 上水道配水管

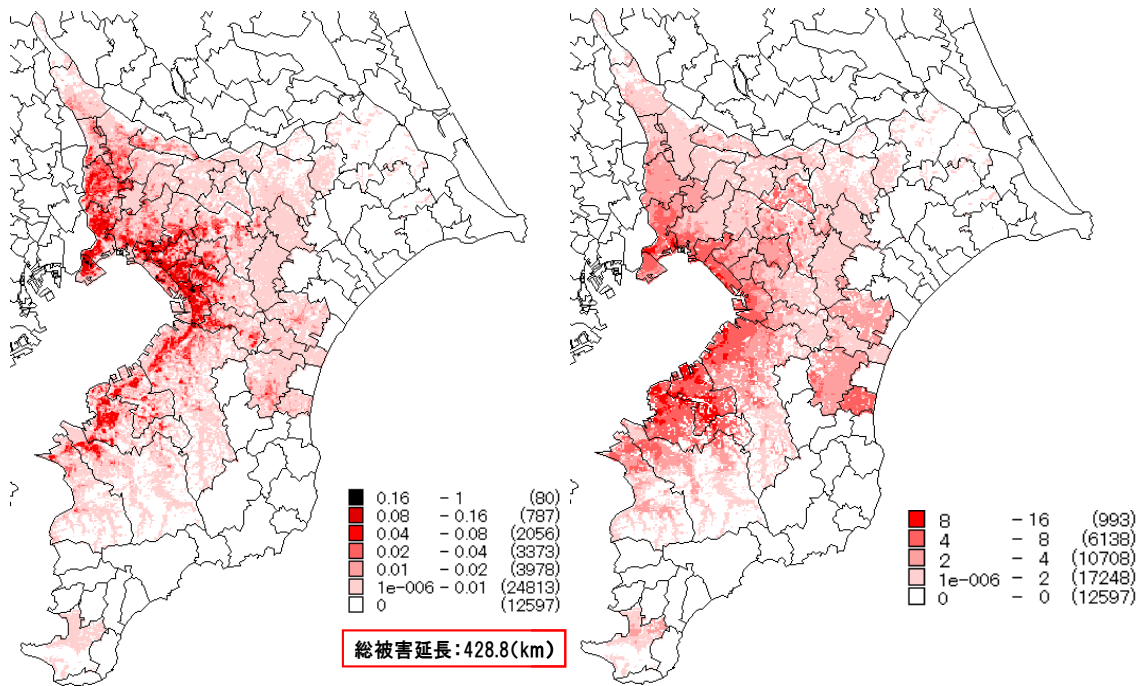
(b) 下水道管

図6 千葉県における上下水道管路の敷設延長距離の分布 (km)



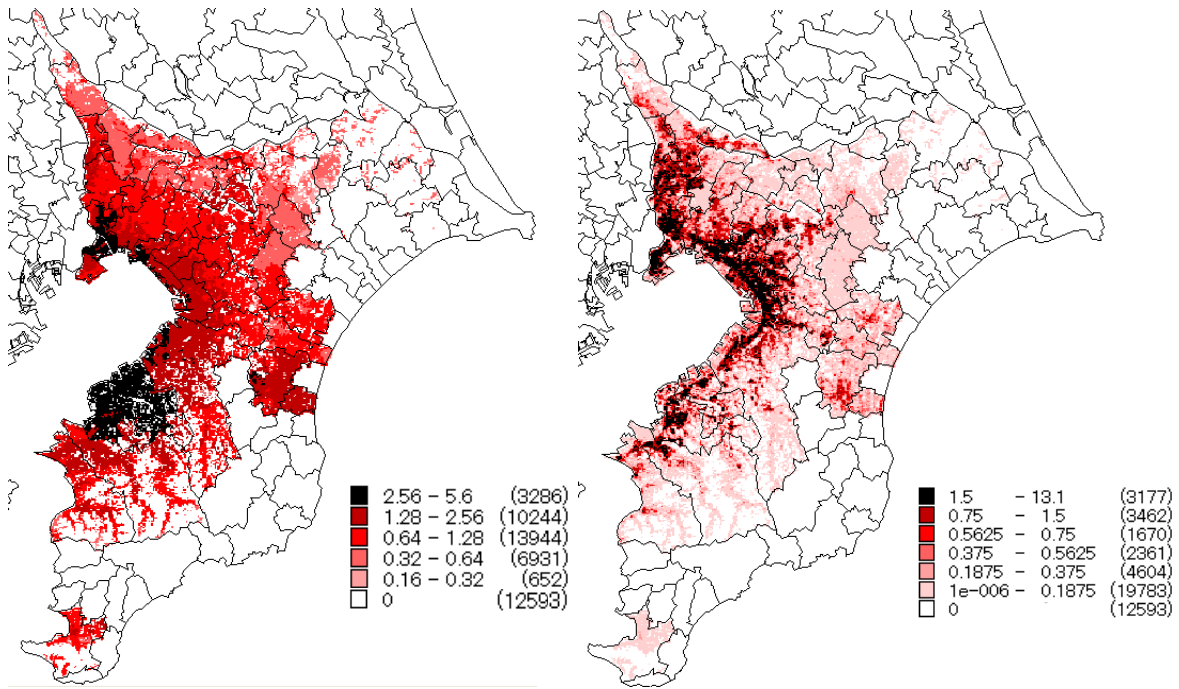
(a) 被害率の分布 (箇所/km) (b) 被害箇所数の分布 (箇所)

図7 東京都北部地震による上水道配水管の想定被害



(a) 被害率の分布 (%) (b) 被害延長の分布 (km)

図8 東京都北部地震による下水道管の想定被害



(a) 被害率 (被害スパン数/km)

(b) 被害スパン数 (スパン)

図9 下水道管の被害率および被害スパン数の分布 (スパン長 25m)

ii) 上水道配水管と下水道管の同時被害発生数の評価

東京湾北部地震における千葉県での上下水道の同時被害発生数について評価する。同時被害発生数の検討対象は、上下水道ともに管路が敷設されている計41,444メッシュである。なお、敷設延長距離 L については、同一メッシュにおいても上水道と下水道で異なるため、ここではメッシュごとに敷設延長距離の短い方の値を用いることとした。

セグメント長 l の設定に関しては、ライフライン事業者（上水道、ガス）の訪問調査を実施して、専門的見地から意見を伺った。その結果、埋設施設の復旧作業における重機の作業錯綜や、ガス管への差水等が問題になるような事態に関しては「ごく近傍での同時被害」としてセグメント長 l を短くとる必要があることがわかった。一方、地域の水循環系としての上下水道の一体化した機能が損なわれるような事態に関しては「一定の範囲内での同時被害」としてセグメント長 l をある程度長くとる必要があることがわかった。

本研究では、セグメント長 l を10m、25m、50m、100m、250m、500m、1000mの7通りに変化させ、また下水道の被害率に関わるスパン長（1スパンと見なす被害延長） L_S を5m、10m、25m、50m、100m、250mの6通りに変化させ、計 $7 \times 6 = 42$ 通りの組み合わせで検討を行った。

まず「ごく近傍での同時被害」の評価例として、セグメント長を $l=25m$ とした場合の同時被害発生数 N_S の分布を図10(a)に示す。相対的に同時被害発生数の多いメッシュは、東京湾臨海部の一部に見られるものの、各メッシュにおける同時被害発生数の絶対値はかなり小さい。1メッシュあたりの同時被害発生数の最大値は0.54セグメントと低い値であり、千葉県全体での同時被害発生数の総数は約280セグメントという結果となった。

次に、「一定の範囲内での同時被害」の評価例として、セグメント長を $l=100m$ 、250m、1000mとした同時被害発生数 N_S の分布を図10(b)～(d)に示す。同時被害発生数の多いメッ

シユは、 $l=25\text{m}$ のケースと比較すると、東京湾臨海部を中心にかなりの広がりを見せている。1メッシュあたりの同時被害発生数の最大値は、上記の順に1.73セグメント、2.85セグメント、2.95セグメントとなった。また千葉県全体での同時被害発生数の総数は、上記の順に983セグメント、1926セグメント、3059セグメントという結果となった。

図11は全パターンにおける千葉県全体での上下水道の同時被害発生数を図示したものである。同じセグメント長であっても、スパン長 L_S を短くすると、被害スパン数が増え、見かけ上の下水道の被害率が高まるため、同時被害発生数も増加する。図11より、スパン長 $L_S=25\text{m}$ までは、セグメント長を長く取るほど、同時被害発生数は高くなるが、 $L_S=10\text{m}$ においては、 $l=500\text{m}$ 、 $L_S=5\text{m}$ においては、 $l=300\text{m}$ ほどで、同時被害発生数が最大となっている。両システムの被害率が非常に高い場合、ある程度のセグメント長において、全てのセグメントで同時被害となる。この場合、さらにセグメント長を長く取ると、セグメントの数が減少するため、同時被害発生数もそれに伴い減少する。

以上のように得られた上下水道の同時被害発生数の数値そのものには、パラメータの設定による任意性がある。また分布図は全体的に小さな値が広がった形となっているため、発生位置の特定はできない。とはいえ、「ごく近傍での同時被害」の検討結果からは、所与の条件下で相互に復旧調整等が必要となる事態となるおおよその箇所数やその分布を把握することができる。また、下水道被害が生じて排水が不能となり、下水道の流下機能が回復するまでは、上水道の復旧・通水が制限されるような事態についても、おおよその検討が可能となろう。

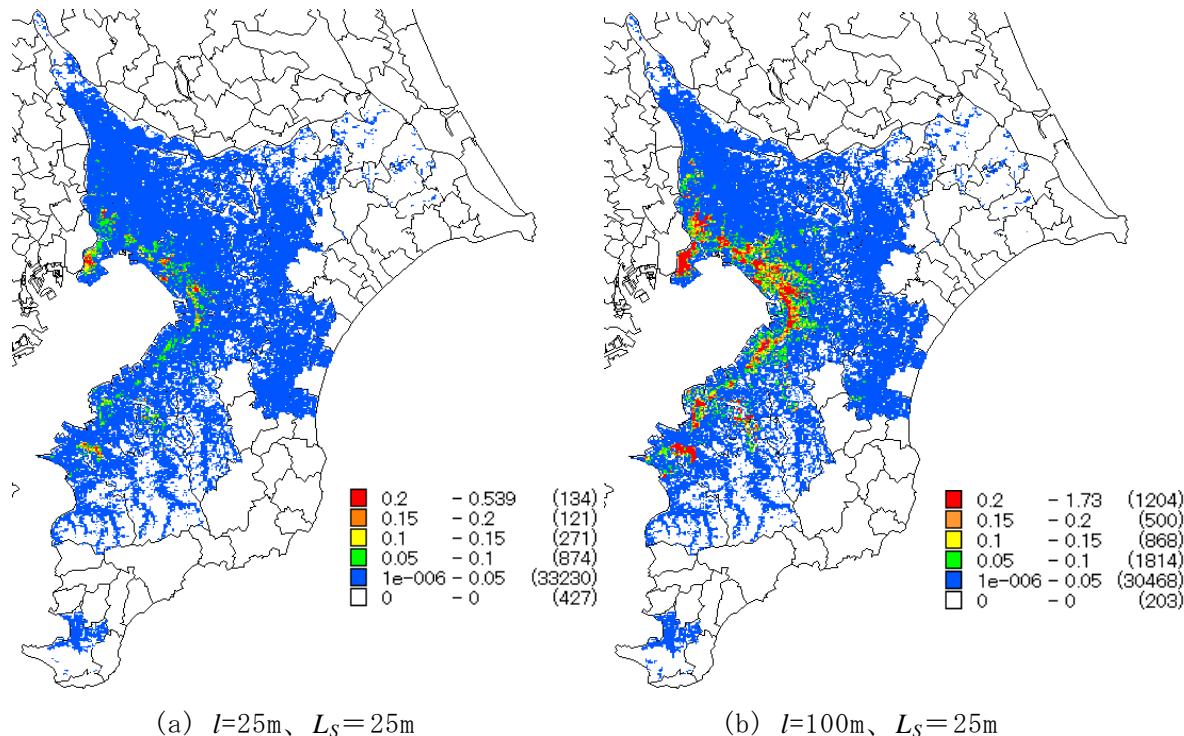
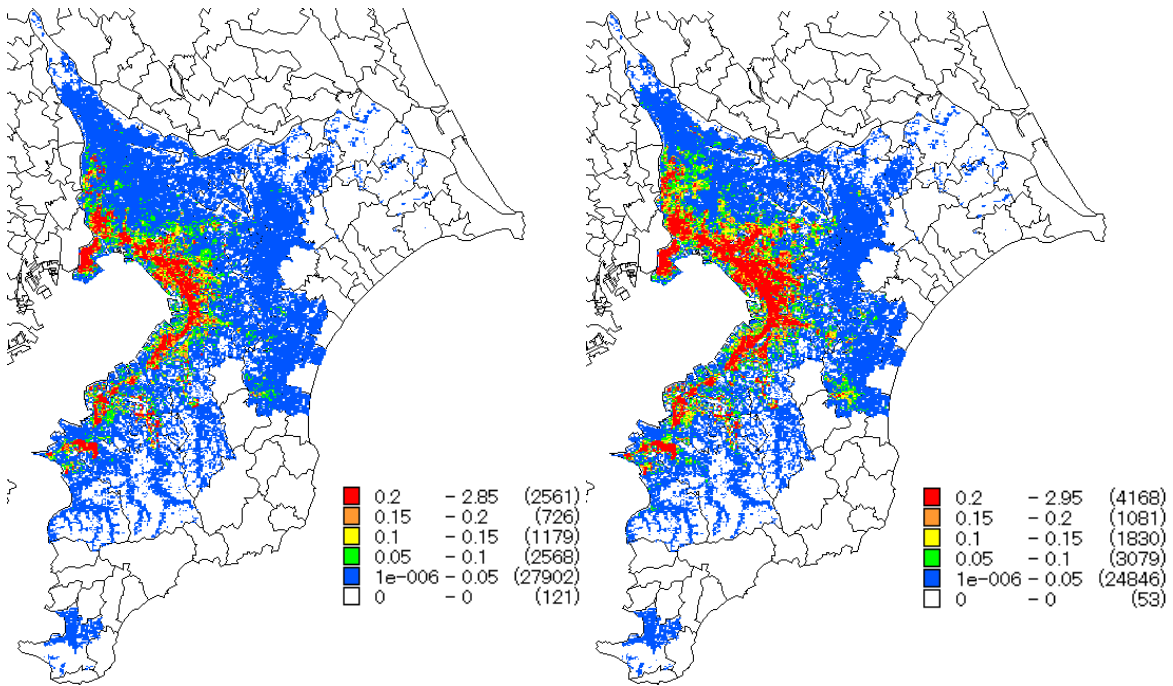


図10 上下水道管の同時被害発生数の分布（続く）



(c) $l=250\text{m}$ 、 $L_S=25\text{m}$ (d) $l=1000\text{m}$ 、 $L_S=25\text{m}$

図 10 上下水道管の同時被害発生数の分布 (続き)

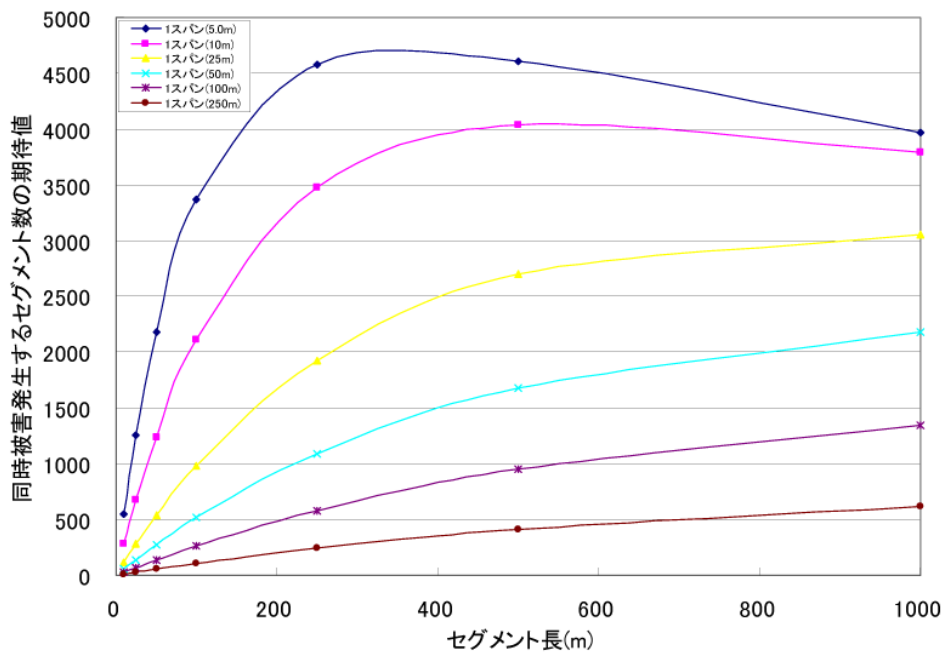


図 11 セグメント長 l とスパン長 L_S の設定による同時被害発生総数の比較

d) 東京都におけるライフラインの同時被害発生に関するケーススタディ

比較のため、東京都の想定地震における同時被害について検討を行う。上水道システムを対象として、同一のネットワークがもう一つ敷設されている状況を設定する。昨年度の検討により、東京都の上水道システムにおいては物理的被害軽減対策が進められた状況であり、全国平均と比較して管路の脆弱性が極めて低い。対策促進によって同時被害がどれほど軽減されるのかを確認することを狙いとしたものである。

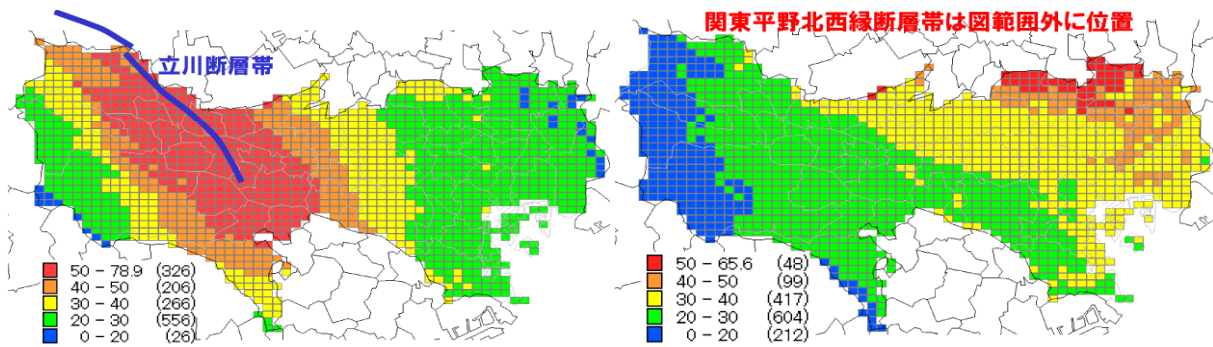
本研究では「上水道ネットワークの広域復旧シミュレータ（簡易版）」⁵⁾を用いた。このシミュレータは、地震動（計測震度、速度、加速度など）、管路情報（配水管の管種・管径係数、管路延長など）、地盤情報（地盤種、地形、地質など）といったデータを基に、選択した地震における対象地域の上水道配水管の被害箇所数を3次メッシュ単位で算出するものである。立川断層帯地震（マグニチュード7.4程度）と関東平野北西縁断層帯地震（マグニチュード8.0）の予想地表面最大速度の分布を図12に示す。これは「地震ハザードステーション(J-SHIS)⁶⁾」に基づく距離減衰式の中央値相当の予測値である。

東京都水道局（東京23区と武蔵野市・昭島市・羽村市・奥多摩町・檜原村の3市1町1村を除く25市町に給水）に加えて、武蔵野市・昭島市・羽村市の計4事業体（以下、東京都全体と表記）を対象とした。図13に、東京都全体における上水道配水管の管路延長の分布を示す。管路延長の値は、事業体ごとの管路総延長を、平成12年度国勢調査のメッシュ人口（昼間+夜間の合計値）の比率で按分した推定値である。東京都全体での上水道配水管被害率の分布を図14に示す。被害率の分布は地震動分布にほぼ対応しているが、臨海部や羽村市・武蔵野市では、周辺メッシュより被害率が高くなっているのは、管種・管径係数の違いによるものと考えられる。被害率の最大値は、立川断層帯地震で0.68(箇所/km)、関東平野北西縁断層帯地震では1.29(箇所/km)となった。東京都全体での上水道配水管被害箇所数の分布を図15に示す。メッシュあたりの最大被害箇所数は立川断層帯地震で約15箇所、関東平野北西縁断層帯地震で約21箇所となった。また東京都全体での総被害箇所数は、立川断層帯地震で約1,658箇所、関東平野北西縁断層帯地震で約1,927箇所となった。

前述のように、同一の上水道システムが2つ敷設されているという仮定のもとで、同時被害発生数を評価する。両システムの被害率は等しく($v=v_1=v_2$)、延長距離 L も等しいと置く。セグメント長 l については、「ごく近傍での同時被害」の評価例として、セグメント長を $l=25\text{m}$ とした場合と、「一定の範囲内での同時被害」の評価例として、 $l=250\text{m}$ とした場合について、同時被害発生数 N_s の分布を示す。

図16に立川断層帯地震による同時被害発生数の分布を示す。(a) $l=25\text{m}$ では、メッシュあたりの最大同時被害発生数が約0.15箇所、全域での総数はわずか約6箇所である。(b) $l=250\text{m}$ でも、メッシュあたりの最大同時被害発生数が約1.4箇所、全域での総数は約57箇所である。図17に関東平野北西縁断層帯地震による同時被害発生数の分布を示す。(a) $l=25\text{m}$ では、メッシュあたりの最大同時被害発生数が約0.58箇所、全域での総数はわずか約9箇所である。(b) $l=250\text{m}$ でも、メッシュあたりの最大同時被害発生数が約4.5箇所、全域での総数は約81箇所である。

地震動分布評価などの前提条件が異なるため単純な比較はできないが、千葉県の場合に比べると東京都での同時被害発生数は明らかに小さい値である。複数のシステムの物理的被害軽減対策が進められ、管路の脆弱性が極めて低く抑えられた場合には、それらの相乗効果によって同時被害をほとんど回避できることを示唆している。



(a) 立川断層帯地震

(b) 関東平野北西縁断層帯地震

図 1.2 想定地震における東京都での地表面最大速度 (cm/sec) の分布

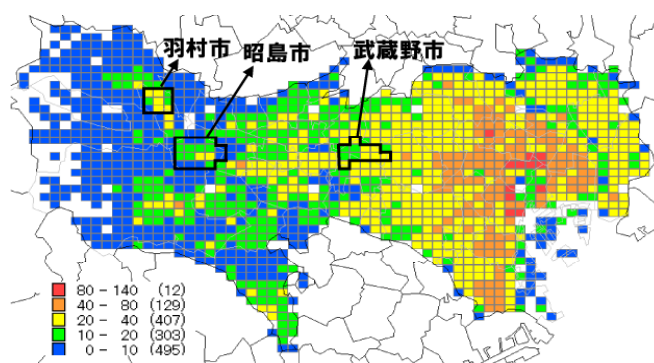
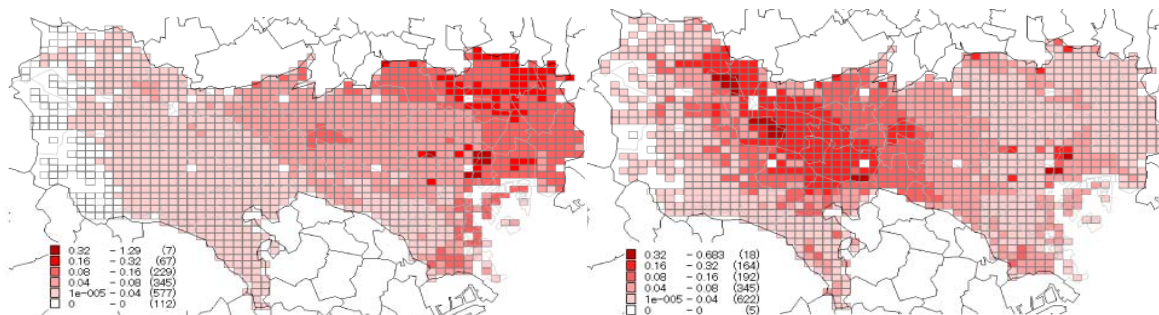


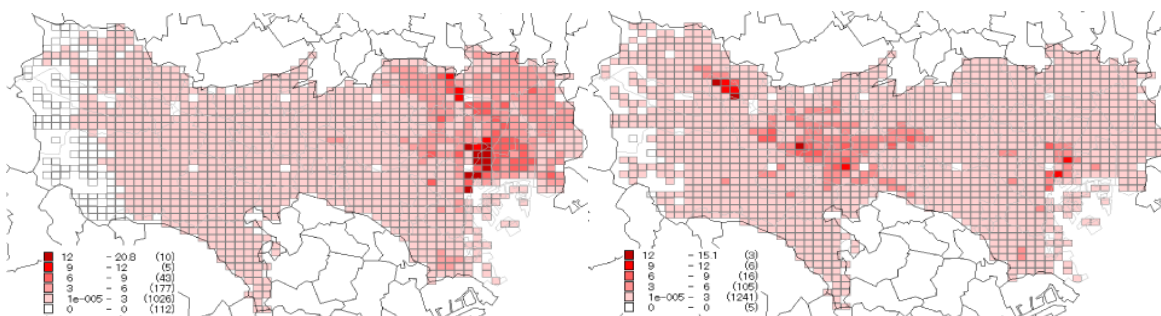
図 1.3 東京都における上水道配水管布設延長距離(km)の分布



(a) 立川断層帯地震

(b) 関東平野北西縁断層帯地震

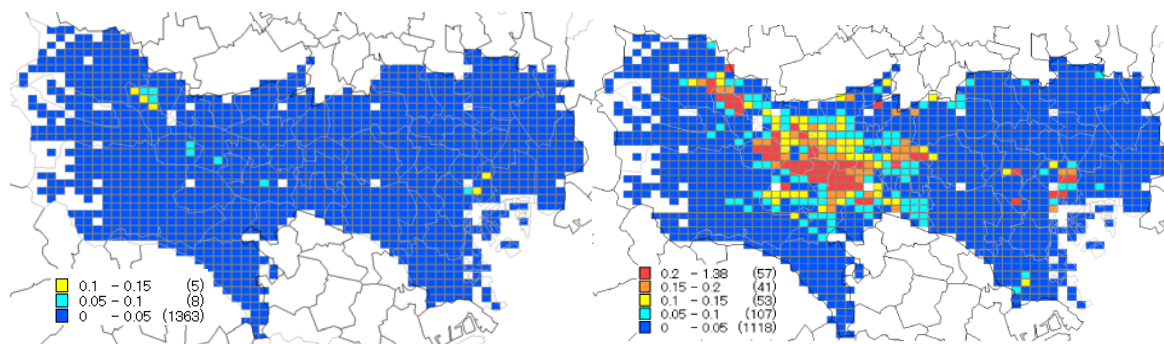
図 1.4 想定地震における上水道配水管の被害率 (箇所/km) の分布



(a) 立川断層帯地震

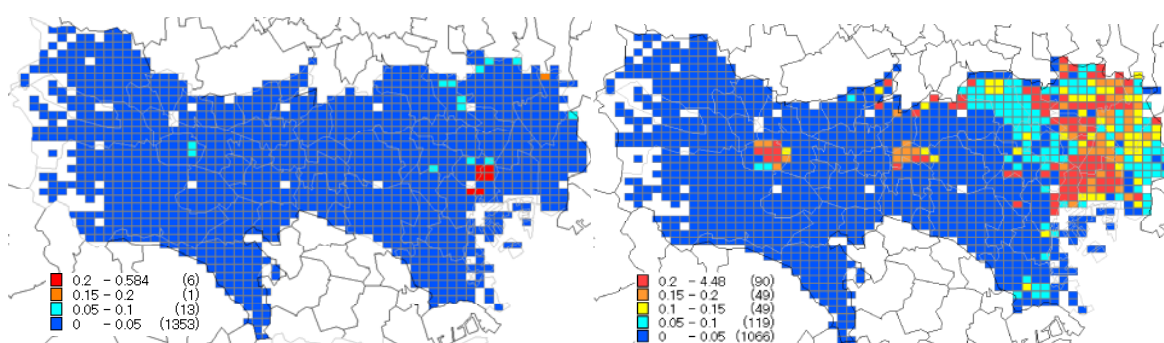
(b) 関東平野北西縁断層帯地震

図 1.5 想定地震における上水道配水管の被害箇所数の分布



(a)セグメント長： $l=25\text{m}$ (b)セグメント長： $l=250\text{m}$

図 1 6 立川断層帯地震による同時被害発生数



(a)セグメント長： $l=25\text{m}$ (b)セグメント長： $l=250\text{m}$

図 1 7 関東平野北西縁断層帯地震による同時被害発生数

3) 機能的被害波及の解析モデル構築のための検討

機能的被害波及の解析モデル構築のため、昨年度は、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、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た。本年度は、このプロトタイプを基にして、東京都のライフライン事業者（仮想的な2システム）を対象として、予備的なシミュレーションによる数値実験を行う。

本研究では、図18に示す概念にしたがって、次の通りに状況を付与した。システム2はネットワーク構造を持ち、ネットワーク上のリンク機能喪失あるいはノード機能喪失によって供給ノードからの連結性が失われるとノード機能を喪失する。その結果、当該ノードの下位に位置する供給エリアで供給停止が発生する。ただし、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。また、システム2は、その基幹施設においてシステム1の機能に依存しており、システム1の機能が当該ノードで失われると被害が波及する。ただしノードがバックアップ機能を備えていれば、システム2への影響波及は阻止される。その寿命が尽きてもなおシステム1の機能が回復しない場合、影響波及が生じる。

具体的には図 1 9 に示すように、システム 2 の 12 の基幹施設は、システム 1 の基幹施設から供給される機能に依存し、図に小さな円で示す供給拠点を通じて、それぞれの供給エリアに機能を供給している（システム 1、2 とも、ネットワーク構造については図示を省略し、エリア表示に留めている）。システム 2 におけるシステム内の余裕時間は 0～3 日の範囲で与え、システム 1 に対するバックアップ寿命は一律に 2 日間とした。

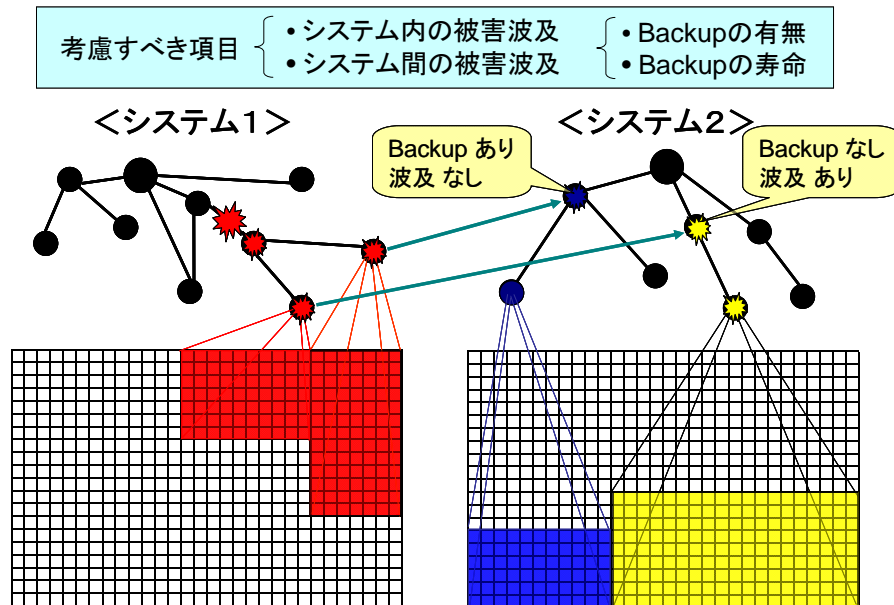


図 1 8 相互連関を考慮した機能的被害波及モデル

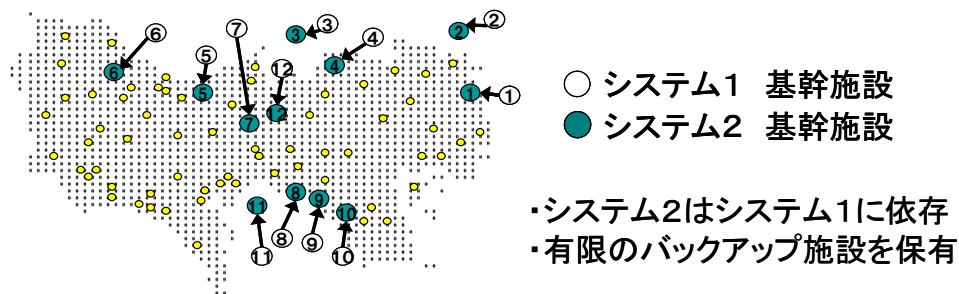


図 1 9 システム 2 が機能的にシステム 1 に依存するモデル
(小さな円はシステム 2 の供給拠点を表す)

被害波及について定量的な検討を行うために考慮すべき被害パターンとしては、(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）などが考えられる。これを念頭に本年度においては、被災規模の組み合わせで表 1 に示す 4 ケースを設定した。それぞれの停止期間については、計測震度に基づいて復旧期間を予測するモデル⁷⁾を参考にして与えた。各ケースにおけるシステム 2 の供給停止地域の変化を行った結果を図 2 0 に示す。赤色がシステム 2 の供給停止区域、青色が供給区域である。

ケース 1 はシステム 1 の単独事故で、被害が軽微で 1 日で回復すること（小被害）を想

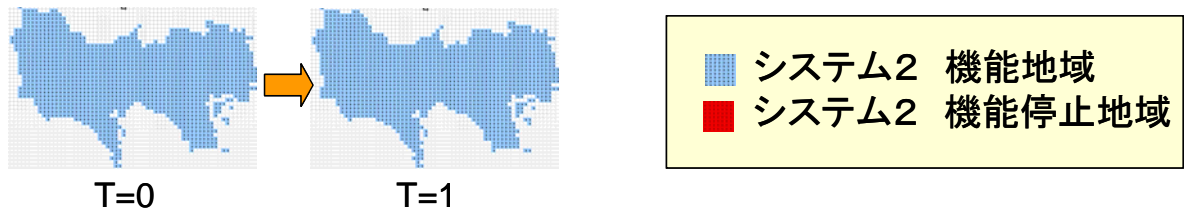
定したものである。システム2のシステム1に対するバックアップ機能が有効に働き、システム1が早期に回復したため、システム2への影響波及は発生していない。ケース2は、ケース1と同じくシステム1の単独事故であるが、被害が大きく完全復旧までに最長7日を要すること（大被害）を想定したものである。3日目でバックアップの寿命が尽きたため、システム2への影響が一挙に発生している。その後は、基本的にはシステム1の機能回復とともにシステム2の供給停止地域が解消してゆくが、一部で供給停止地域が広がっている。これは、システム2において影響波及が顕在化するまでの余裕時間が存在するために供給可能であった部分において、その時間を超過したために供給停止に転じたことを表している。

ケース3は、地震災害によりシステム1とシステム2ともに被災することを想定したものである。システム2は完全復旧までに最長17日間を要し（大被害）、システム1についてはケース1と同じ1日間（小被害）とした。図からは判断しづらいが、システム1が1日で完全復旧するため、システム2への影響はケース1と同様に全くなく、供給停止地域はすべてシステム2自体の被災によるものである。システム1の完全復旧以降（8日目以降）については、図示していないが、システム2の復旧作業進捗に伴って徐々に機能停止地域が解消してゆく。ケース4は、ケース3の変則パターンで、システム1の機能停止を7日間（大被害）としたものである。3日目に機能停止地域が拡大している点では、ケース1～2と共通している。システム1の完全復旧以降は図示していないが、ケース3と同等の結果となる。

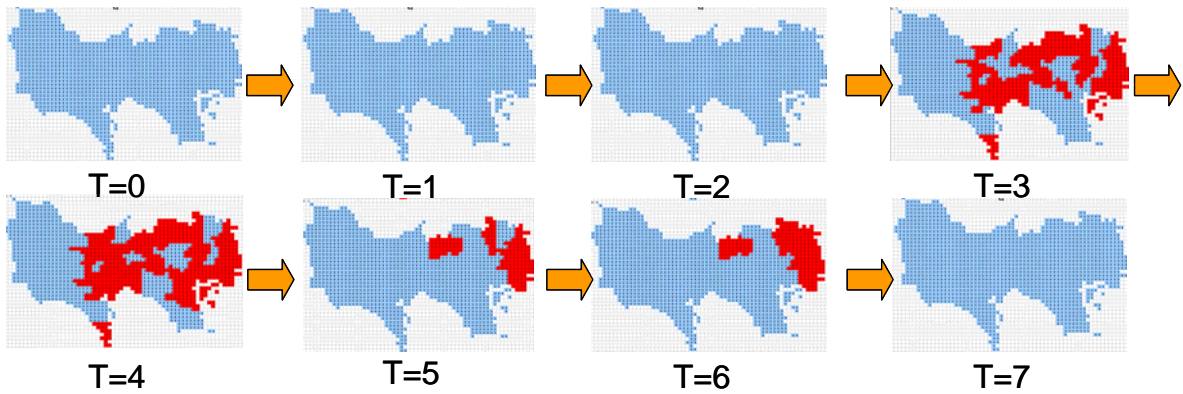
以上の簡単なシミュレーションにより、供給停止地域の時空間的分布には、各要因の複合的な効果が現れていることが示された。

表1 ケーススタディのケース分類

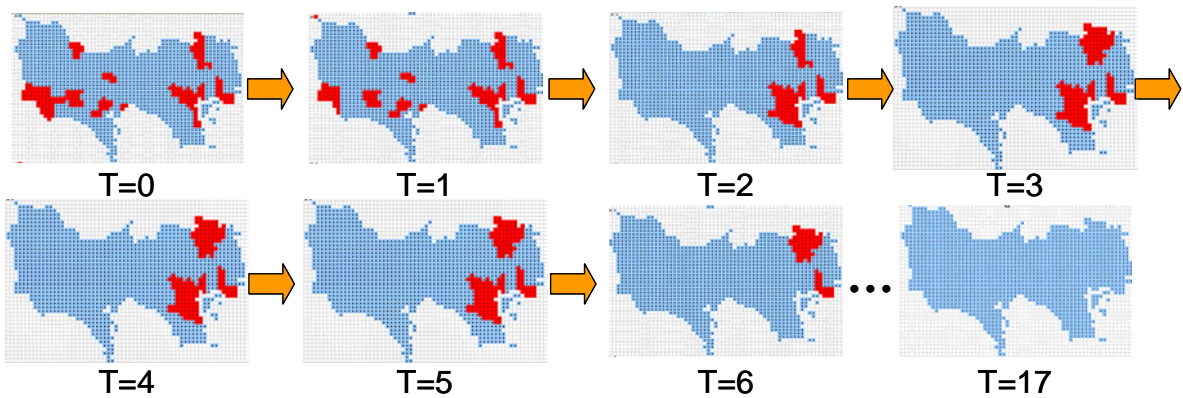
	ケース	システム1 機能停止	システム2 機能停止
単独事故 (システム1被災)	1	1日 (小被害)	0日 (無被害)
	2	7日 (大被害)	0日 (無被害)
地震災害 (システム1、2被災)	3	1日 (小被害)	17日 (大被害)
	4	7日 (大被害)	17日 (大被害)



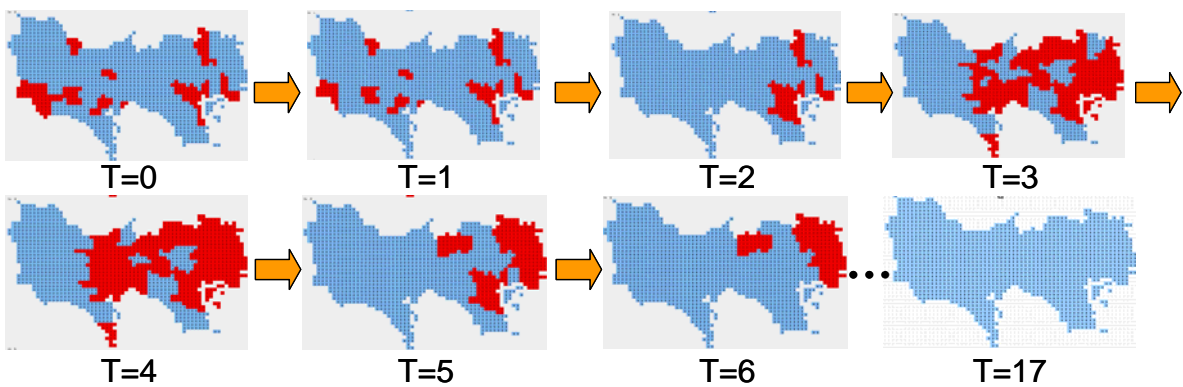
(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4

図 2 0 各ケースにおけるシステム 2 の供給停止地域の変化の比較

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は、システム間の被害波及と復旧過程を「ミクロスケール」および「マクロスケール」でとらえるモデルを構築した。まず「物理的被害波及」については、近接して設置されたライフライン施設の同時被害発生（近接位置における被害発生）という問題に焦点を絞り、その可能性とその分布について把握するため、確率論的モデルを構築した。まず、物理的被害の同時発生を規定するパラメータとして同定したのは、「システム全体の長さ L 」と、「同時被害発生を規定する範囲（微小距離の近傍 l 、もしくは、全長を分割するセグメント個数 N ）」、および「被害発生率（単位長さあたりの被害箇所数） v 」である。被害発生率について、位置 x に依存する変動を考慮して $v(x)$ とした場合には、「地震動強度 $I(x)$ 」、「地盤条件 $S(x)$ 」、「システムの脆弱性 $V(x)$ 」をパラメータとした。2つのシステムを対象とした場合、それらの同時被害発生率は、各システムの被害発生率と同時被害発生を規定する範囲の積であり、2システムの相乗効果が顕在化することが明らかにされた。このため大規模災害で特に深刻な事態となることと、同時被害が発生しやすい場所とそうでない場所のコントラストがより一層明確になり、同時被害が集中する可能性が高くなることが明らかにされた。

その適用例として、千葉県地震被害想定の上下水道の施設分布データと想定被害データを用いて、東京湾北部地震における上下水道の同時被害発生数について、「ごく近傍での同時被害」および「一定の範囲内での同時被害」の評価を行った。得られた数値そのものにはパラメータの設定による任意性があるが、こうしたモデルによって、所与の条件下で相互に復旧調整等が必要となる箇所数やその分布、さらには、下水道の排水不能による上水道の復旧・通水制限といった事態について、おおよその把握が可能となった。比較のため、東京都の想定地震における同時被害について検討を行った。管路の脆弱性が極めて低意図評価される上水道システムを対象として、同一のネットワークがもう一つ敷設されている状況での同時被害発生数を評価した。複数のシステムの物理的被害軽減対策が進められ、管路の脆弱性が極めて低く抑えられた場合には、それらの相乗効果によって同時被害をほとんど回避できることを示唆する結果が得られた。

本年度に扱った範囲は、複数ライフライン上のランダム被害が重複して生じる「偶発的同時被害」である。複数ライフラインが地震時に一体となって挙動して被災することに起因する「共通モード被害」については、今後の課題である。

「機能的被害波及」については、システム内およびシステム間の機能的被害波及の直接的要因となる「ネットワークのトポロジー構造」と、影響顕在化までの余裕時間を規定する「システム内の余裕時間」および「バックアップの寿命」をパラメータとして同定した。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機構を反映した被害波及構造のモデルを用いて、東京都のライフライン事業者（仮想的な2システム）を対象としてシミュレーションによる数値実験を行った。首都圏大規模停電のような単独事故に起因するケースでは、小被害であればバックアップ機能が有効に働き影響波及が回避される一方、大被害になるとバックアップの限界から影響波及が一挙に広がることが示された。地震災害により両システム被災するケースでも、依存される側のシステムの被害が小さければ供給停止地域はすべて自システムの被災地域に限定されるが、機能停止が長引くとやはり機能停止地域が拡大することが示された。以上のように、2システムを対象としたシミュレーション

により、供給停止地域の時空間的分布には、各要因の複合的な効果が現れていることが示された。

現在、2システムにおける相互依存性を考慮したモデルとなっているが、より汎用性を高めるため、3システムへの拡張を行うことが今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課防災科学技術推進室，独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー、国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室：重要インフラ間の被害波及軽減のための調査報告書、2007.3.
- 2) 後藤洋三・鈴木猛康・末富岩雄・小路泰広・鶴田舞・片岡正次郎・鈴木光：重要インフラ間の被害波及軽減のための調査、土木学会地震工学論文集、2007.8、pp.1344-1354。
- 3) 千葉県総務部消防地震防災課：千葉県の地震被害想定調査結果について、
http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/a_bousai/jishin/higaisouteikekka.html#1
- 4) 国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道企画課：「管路施設の被害予測手法について」、第1回 大規模地震による下水道被害想定検討委員会資料、2005.12.
- 5) 山本欣弥・永田茂・景山耕平：上水道システムの広域復旧戦略シミュレータ(簡易版)の開発、第58回全国水道研究発表会、2007.5.
- 6) (独) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション (J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station) ホームページ、<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 7) 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、2003.1、pp.225-238.

(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	国際・国内の別
復旧支障の原因となるライフラインの近接被害発生に関する確率論的考察 (口頭発表)	袴田健太・能島暢呂	土木学会中部支部平成20年度研究発表会、名城大学	2009年3月	国際
Seismic Vulnerability Index for Lifeline Facilities (口頭発表)	Nojima, N.	第14回世界地震工学会議、北京、中国	2008年9月	国際
Prompt Estimation of Strong Ground Motion Near Focal Region Based on Fault Inversion from	Kuse, M., Sugito, M. and Nojima, N.	第14回世界地震工学会議、北京、中国	2008年9月	国際

Acceleration Records (口頭発表)				
2006年首都圏大規模停電の影響波及に関する考察(口頭発表)	能島暢呂	地域安全学会梗概集、No.22	2008年5月	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	国際・国内の別
ライフライン施設の地震時同時被害発生に関する確率論的モデル	能島暢呂・袴田健太	東濃地震科学研究所報告、No.24、11p. (印刷中)	2009年3月	国内
脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価～上水道配水管網への適用～	能島暢呂	地域安全学会論文集、No.10、pp.137-146.	2008年11月	国内

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	国際・国内の別
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21年度業務計画案

第3年度にあたる平成21年度においては、第1～2年度におけるミクروسケール・マクروسケールの検討を踏まえ、システム間の被害波及と復旧過程を概略的に捉えた解析モデルのプロトタイプを用いて、異種ライフラインの近距離圏内での被害発生(物理的相互連関)から、システム相互の被害波及(機能的相互連関)、復旧過程におけるシステム間の復旧支障(復旧時相互連関)に関する試行的なシミュレーションを行う。

具体的には、本年度に明らかにされた課題を踏まえて、首都圏におけるライフライン施設の敷設状況をメッシュ化したデータに、首都直下地震の予測震度分布を重ね合わせ、個別のシステム被害をメッシュごとに評価するとともに、同時被害発生に関する確率予測モデルを適用して、物理的被害波及ならびに復旧支障の双方の原因となる近接被害発生を評価する。また、ネットワーク間の相互依存性とともバックアップ設備等の防御対策の効果を考慮した解析モデルを用いて、システム間被害波及のシミュレーションを行う。以上により、ライフライン同時被害発生の状況下におけるライフライン系の相互連関を定量的に分析することを目標とする。