

### 3.5.2 ライフライン施設被害の相関性と復旧過程の実態解明

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

ライフラインの被災による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は、都市機能の防護戦略の策定、安全で迅速な機能回復過程の実現、地域防災力の向上を図るために重要である。このためには「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が必要である。

本研究では、ライフライン被害波及構造モデル、自立分散型拠点の配置モデル、広域連携・復旧調整モデルを構築し、これらをベストミックスした復旧戦略を示す。

##### (b) 平成22年度業務目的

平成21年度までの研究成果を踏まえて、中央防災会議が想定している東京湾北部地震などが起こった際の地中埋設管被害や道路被害を1都3県（東京、神奈川、千葉、埼玉）でマクロにかつ統一された手法で算定し、迅速な復旧に必要と見込まれる部隊数を評価する。また道路被害が影響する復旧活動の遅延時間を評価し、適切な広域連携のあり方を考えるための基礎資料を作成する。1都3県のライフライン、地震動の多数のメッシュデータを一括処理する目的で、ワークステーションを増強する。さらに、首都圏ライフライン事業者との打ち合わせ、研究成果発表、復旧シミュレーションのデモンストレーションに利用する目的で、高性能なグラフィックカードを搭載しているパソコンを導入する。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
千葉大学大学院工学研究科	教授	山崎文雄	
千葉大学大学院工学研究科	准教授	丸山喜久	

#### (2) 平成22年度の成果

##### (a) 業務の要約

- ・東京湾北部地震の際の上水道管の被害予測を、ワークステーションを用いて1都3県（東京、神奈川、埼玉、千葉）について統一された手法で実施し、部隊数を評価した。
- ・道路被害に関しては道路の機能支障に着目し、ワークステーションを用いて木造建物の被害率を1都3県について統一された手法で予測することで考慮した。
- ・上水道管被害率と木造建物被害率の相関性を、震度6弱以上が予想されている東京湾沿岸地域について分析し、復旧遅延が生じると考えられる地域を都県境を超えて指摘した。

##### (b) 業務の成果

###### 1) 1都3県の地震被害想定基盤データの整理

本研究では、東京、神奈川、埼玉、千葉の1都3県の地震被害想定で使用された空間基

盤データを用いて、東京湾北部地震を想定した広域被害予測を行う。具体的には、木造建物と上水道管の被害率を標準的な統一された手法で予測し、都県境を超えて被害量の相対評価をする。さらに、地震によって同位置に様々な被害が発生する状況を評価するため、木造建物と上水道管被害率を町丁目ごとに集計する。町丁目ごとの被害率を平均値と標準偏差をもとにランク分けし、2種類の地震被害の相関性を分析する。

首都圏では、プレート境界の潜り込みによって蓄積された歪みのエネルギーの一部が、相模トラフ沿いの規模の大きな地震に先立ってマグニチュード7程度の地震として放出される可能性が高いと指摘されている<sup>1)</sup>。そこで、中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会は、フィリピン海プレートと北米プレートとの境界の地震のうち都心部が影響を受ける場合の応急対策立案のための対象断層として東京湾北部の2断層面を設定した<sup>2)</sup>。東京湾北部地震はある程度切迫性が高い地震とされ、さらに都心部の揺れが強く、強い揺れの分布が広域的に広がっているため、首都直下地震の代表的なシナリオ地震として、各都県の地震被害想定で用いられている。

図1に、東京湾北部地震(M7.3)の計測震度とPL値の分布を示す。内閣府では、1kmメッシュ単位の計測震度とPL値を公開している<sup>3)</sup>。主に東京都江戸川区、墨田区、江東区で震度6強の揺れが予測され、東京湾沿いに広く震度6弱の揺れが想定されている。また、東京湾側の地域や河川沿いの地域などでは液状化の危険性も高いものと予測されている。

図2に、木造建物総数の分布を示す。各都県が地震被害想定で用いた木造建物に関するデータは、250mメッシュごとに建物数が示されていることは共通するが、建築年代区分等が都県ごとに異なっている場合もあった。本研究では、1都3県の木造建物について標準的な統一された手法で被害予測<sup>4)</sup>を行うため、各都県のデータ構造をそろえる必要がある。そこで、建築年代の区分を1960年以前、1961年～1980年、1981年以降の3区分とすることにした。千葉県の木造建物数データの建物区分は、1950年、1970年、1980年を区切りとして作成されているため、住宅・土地統計調査<sup>5)</sup>から得られる建物構造種別ごとの建築年代数の比率を乗じて、年代区分が上記の3区分となるように建物棟数を換算した。

上水道管路(配水管)延長データに関しても、木造建物データと同様に各都県でデータ区分が異なっていた。統一された手法で一括に被害予測を行うためには、データ区分を統一することが必要なため、管種6区分(铸铁管:CIP、ダクタイル铸铁管:DIP、ポリエチレン管:PEP、塩化ビニル管:VP、鋼管:SP、石綿セメント管:ACP)、管径4区分( $\phi 75\text{mm}$ 以下、 $\phi 100\sim 150\text{mm}$ 、 $\phi 200\sim 450\text{mm}$ 、 $\phi 500\text{mm}$ 以上)に分類した。埼玉県のデータについては、管径ごとの管路延長が含まれていなかったため、平成18年度水道統計<sup>6)</sup>に記載されている事業主体ごとの管径別配水管路延長を利用して比例配分した。各都県の上水道管データは、基本的には事業主体や行政界ごとに集計される統計量を建物棟数や人口データなどを用いて比例配分して作成しているように見受けられた。また、上水道管の被害予測を行う際には、地形区分を考慮する必要があるため地震ハザードステーション(J-SHIS)にて公開されている若松らが構築した微地形分類<sup>7)</sup>を1都3県について整備した。図3に1都3県の上水道管路延長と微地形区分を250mメッシュ単位で示す。

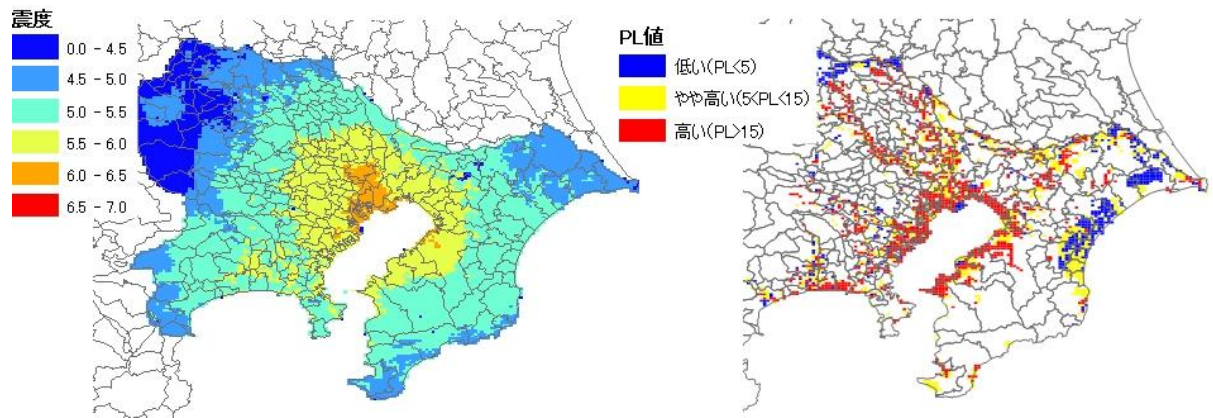


図1 東京湾北部地震の計測震度と PL 値の分布 (1km メッシュ)

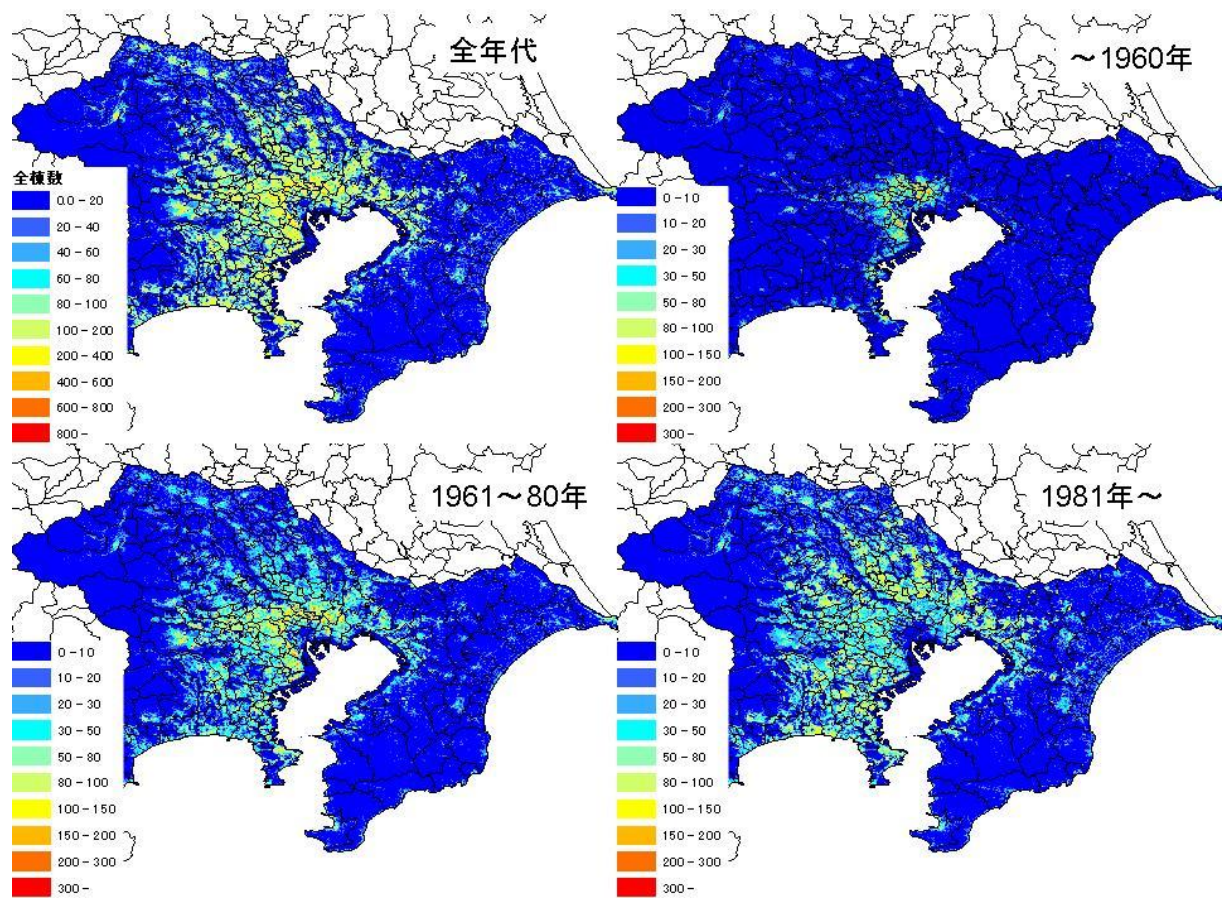


図2 1都3県における建築年代別の木造建物数 (250m メッシュ)

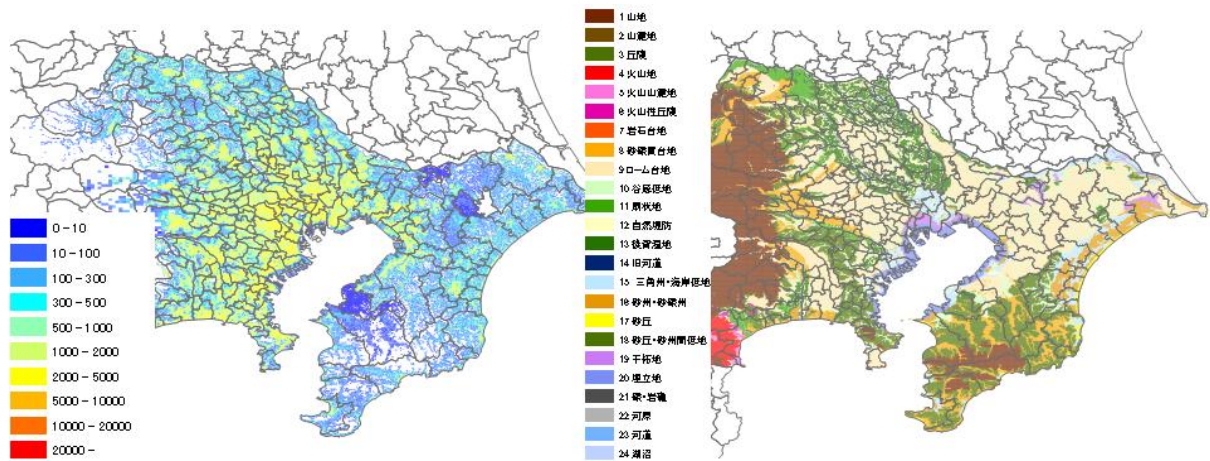


図3 1都3県における上水道管路延長(m)とJ-SHISで公開されている微地形区分(250mメッシュ)

## 2) 東京湾北部地震時の木造建物と上水道管の広域被害予測

地震被害想定で見積もられる木造建物被害は、揺れ(地震動強さ)、液状化、急傾斜地崩壊、火災などに起因するものに大別されるが、本研究では揺れによる木造建物被害のみを検討対象とした。標準的な建物被害予測手法として、内閣府<sup>4)</sup>が建築年代別の木造建物全壊率を推定する方法として示している山口・山崎<sup>8)</sup>をもとにした被害関数を使用する。木造建物の被害率は式(1)のように表されるものと仮定する。

$$P(I) = \Phi\left(\frac{I - \lambda}{\zeta}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\Phi(x)$ は標準正規分布の確率分布関数を表し、 $I$ は計測震度、 $\lambda$ は計測震度の平均値、 $\zeta$ は標準偏差である。内閣府<sup>4)</sup>は、 $\lambda$ と $\zeta$ を表1のように定めている。図4に本研究で使用した木造建物の被害関数を示す。

図5に本研究で予測された東京湾北部地震による木造建物全壊率と全壊棟数の分布を示す。全壊棟数については、震度6強以上の揺れが予測されており、さらに1960年以前に建てられた木造建物の多い東京都東部を中心に被害数の大きいメッシュが分布し、神奈川県川崎市、横浜市、千葉県市川市、浦安市、船橋市、千葉市でも比較的多くの全壊建物が生じると予測される。

次に、上水道管の被害予測を行う。磯山ら<sup>9)</sup>は水道管路の被害率 $R_m$ (件/km)の推定式を以下のように提案している。

$$R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v) \quad (2)$$

ここで、 $C_p$ は管種係数、 $C_d$ は管径係数、 $C_g$ は地形・地盤係数、 $C_l$ は液状化係数、 $v$ は地動最大速度(PGV)である。

$R(v)$ は、標準被害率曲線と呼ばれ、標準的な管路(CIP、 $\phi 100-150\text{mm}$ )が一般的な条件で埋設されている場合(沖積地盤に浅く埋設)の被害率と地動最大速度の関係式である。本研究では、神奈川県の地震被害想定調査<sup>10)</sup>と同様に、丸山・山崎が近年の被害地震における水道管被害データを取り入れて構築した標準被害率曲線<sup>11)</sup>を使用する(式(3))。

$$R(v) = C\Phi\left(\frac{\ln v - \lambda}{\zeta}\right) \quad (3)$$

ここで、 $C$ 、 $\lambda$ 、 $\zeta$ は非線形回帰で得られた定数である。被害率予測式の概形は図 6 のようである。

神奈川県、千葉県がとりまとめた地震被害想定調査結果<sup>10)</sup>、<sup>12)</sup>を参考に管種係数と管径係数は表 2 のように定めた。管種係数は、CIP および VP の標準被害率曲線を基準としたものである。本研究では、DIP に関しては管種係数を乗じるのではなく、式(3)で表される DIP の標準被害率曲線を直接用いることとする。また、耐震管には被害が生じないものと仮定する。地形・地盤係数は、図 3 に示した 24 種類の微地形分類をもとに千葉県の地震被害想定調査結果<sup>11)</sup>と同じ値とした。液状化係数は、沖積平地に分類されるメッシュについてのみ、千葉県の地震被害想定調査結果<sup>12)</sup>と同様に設定した。

図 7 に東京湾北部地震における上水道管の被害率（件/km）と被害件数の予測結果を示す。なお、東京湾北部地震の予測されている計測震度は、Karim and Yamazaki の関係式<sup>13)</sup>で PGV に換算し、式(3)に代入した。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。能島によ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<sup>14)</sup>によると、千葉県は地震に弱い ACP の残存距離が全国一であり、比較的地震に強い 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 7 に示した 1 都 3 県の上水道管の被害総数は、約 23,000 件と推計される。中央防災会議による上水道復旧に関する算定<sup>2)</sup>に従って、復旧に必要な人数を推定する。復旧目標日数を 30 日、地震発生 4 日後までは断水範囲縮小作業を行い、その後に修理作業を行うものと仮定すれば、一日あたり約 32,000 人（約 1,800 班）もの人員が必要となる。一方、各都県の確保可能な人員は、東京都が約 2,300 人、ほか 3 県は約 2,000 人とされている<sup>2)</sup>ので、広域応援の必要性が再認識される。

表 1 木造建物被害関数のパラメータ

建築年代	全壊率	
	$\lambda$	$\zeta$
～1960	6.25	0.27
1961～1980	6.40	0.32
1981～	6.95	0.44

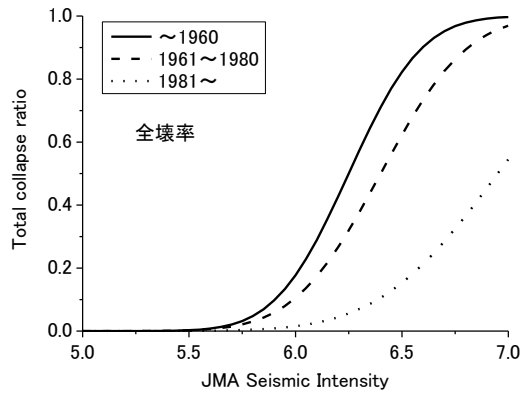


図4 木造建物の被害関数

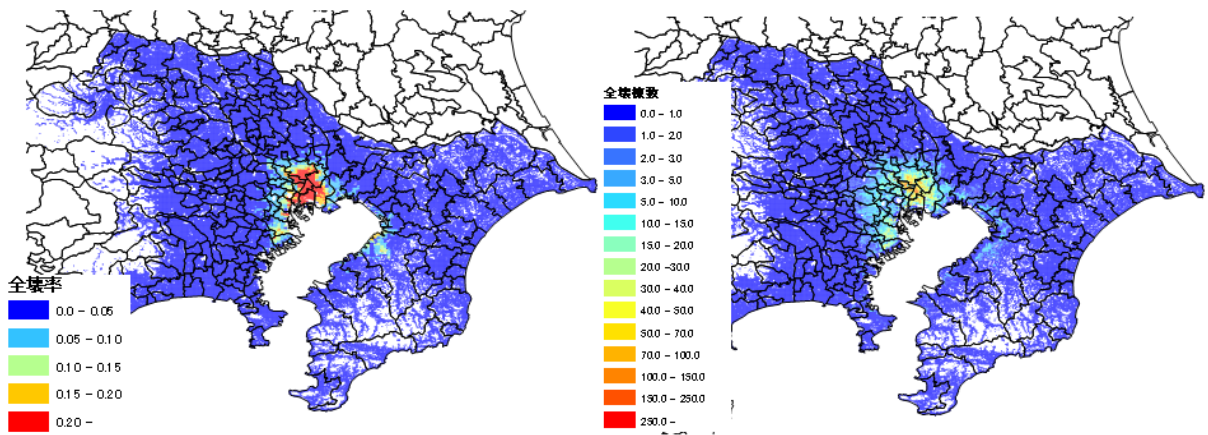


図5 東京湾北部地震における木造建物全壊率と全壊棟数の分布

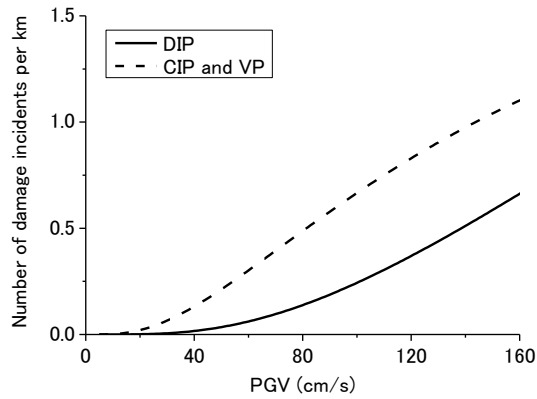


図6 上水道管の標準被害率曲線

表 2 本研究で用いた管種係数と管径係数

管種	管種係数 ( $C_p$ )	管径	管径係数 ( $C_d$ )
ACP (石綿セメント管)	1.2	~ $\phi$ 75 mm	1.6
CIP (鋳鉄管)	1.0	$\phi$ 100~150 mm	1.0
VP (塩化ビニル管)	1.0	$\phi$ 200~450 mm	0.8
SP (鋼管)	2.0	$\phi$ 500 mm~	0.5
PEP (ポリエチレン管)	0.1		

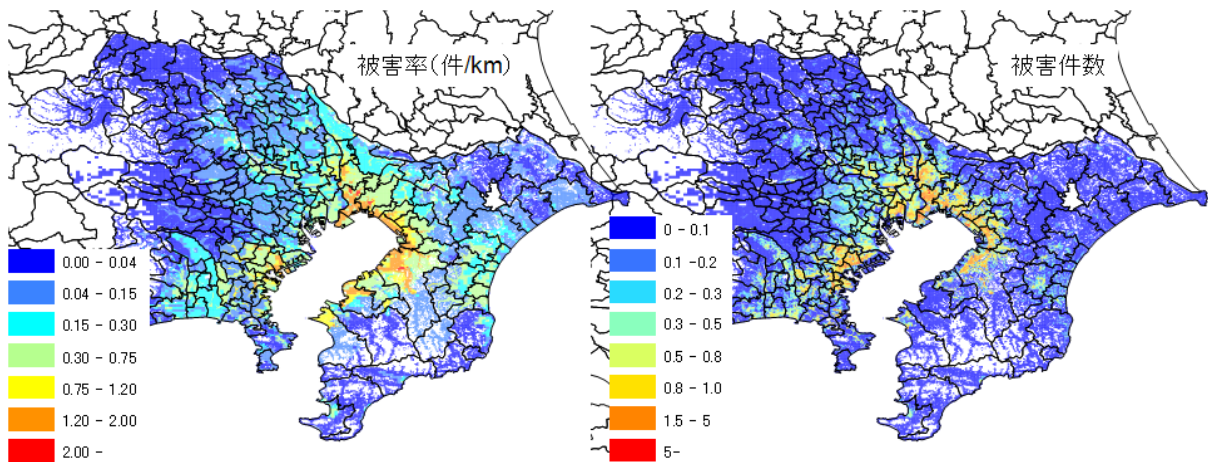


図 7 東京湾北部地震における上水道管の被害率と被害件数

### 3) 木造建物被害と上水道管被害の相関性

本研究で予測された木造建物と上水道管の被害率は 250m メッシュ単位であるが、主に震度 6 弱以上の揺れが予想される東京湾沿いの地域に関して、町丁目単位でその結果を集計した。ここでは、町丁目ポリゴンと 250m メッシュの空間的な位置関係をもとに両者を結合した。木造建物に被害が甚大で、さらに上水道管の被害率も高い町丁目については、倒壊建物による道路閉塞などの影響で、地中埋設管の復旧が遅れることが懸念される。また、建物被害の程度は小さいものの、上水道管被害の程度が大きい地域は、長期間断水が続き日常生活に支障をきたす期間が長期化することが予想される。本研究では、この復旧遅延が生じる可能性を評価することを目的に、町丁目単位で木造建物と上水道管被害の相関性を分析する。

本研究では木造建物の被害程度を表す物理量として、図 5 に示した全壊率を用いることとする。上水道管については、図 7 に示した被害件数を管路延長で除した被害率 (件/km) を用いる。木造建物や上水道管の被害率を予測するには、被害関数を用いるのが一般的である。提案されている被害関数は多岐にわたっており、どの被害関数を採用するかによって予測される結果は異なる。さらに、上水道管の被害率については、補正係数の値をどのように設定するかも最終的な結果に影響する。そこで、木造建物と上水道管の被害率を評価するにあたり、ここでは絶対量で評価は行わず、推定された被害率の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  をもとに 5 段階にランク分けし、相対的な評価をすることとした。ランクの閾値は  $\mu - 0.5\sigma$ ,  $\mu + 0.5\sigma$ ,  $\mu + 1.5\sigma$ ,  $\mu + 2.5\sigma$  とし、被害率の小さい方から順に 1~5 ランクとした (図

8)。図 9 に、町丁目ごとの木造建物全壊率と上水道管被害率を 5 段階のランク別に表示する。木造建物全壊率に関しては、震度 6 強の揺れが予測されている東京都東部を中心にランク 5 の地域が存在する。上水道管被害率に関しては、想定震度の大きい東京都東部よりも千葉県や神奈川県の一部にランク 5 の地域が見られる。これは、前述の通り上水道管の管種の割合の違いが影響しているものと考えられる。

本研究で推定された町丁目別の木造建物被災率と上水道管被害率の関係を図 10 に示す。両者の散布図によると、木造建物全壊率はランク 1 または 2 であるが上水道管被害率はランク 4 または 5 である町丁目（図 10 の赤枠）、上水道管被害率はランク 1 または 2 であるが木造建物被災率はランク 4 または 5 である町丁目（図 10 の青枠）が存在する。図 11 に、これらの地域を GIS で表示する。前者の地域に関しては、東京湾北部地震の際に被害を生じない住宅が多いものの、水道が長期にわたり断水する可能性が高いものと考えられる。一方、後者の地域については、水道管の推定被害率は低いため、地震被害の同位置性を考えない単純な復旧期間の見積もりでは、断水期間は短く予測される可能性があるが、実際は木造建物被害が多大な地域であるため、道路閉塞などの影響により復旧作業が想定よりも長期化することが懸念される地域と思われる。

木造建物と上水道管の被害ランクの和を図 12 に示す。両者のランクの和が大きい地域は、木造建物と上水道管の被害がともに大きな地域になるものと考えられ、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。被害ランクの和が 8 を示した地域は、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。

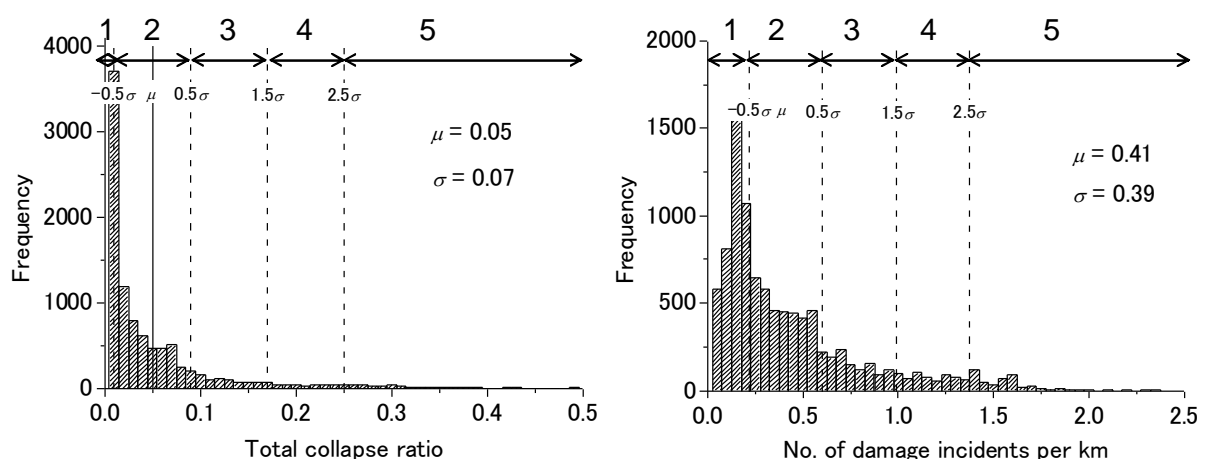


図 8 町丁目別の木造建物全壊率（左）と上水道管被害率（右）のヒストグラム



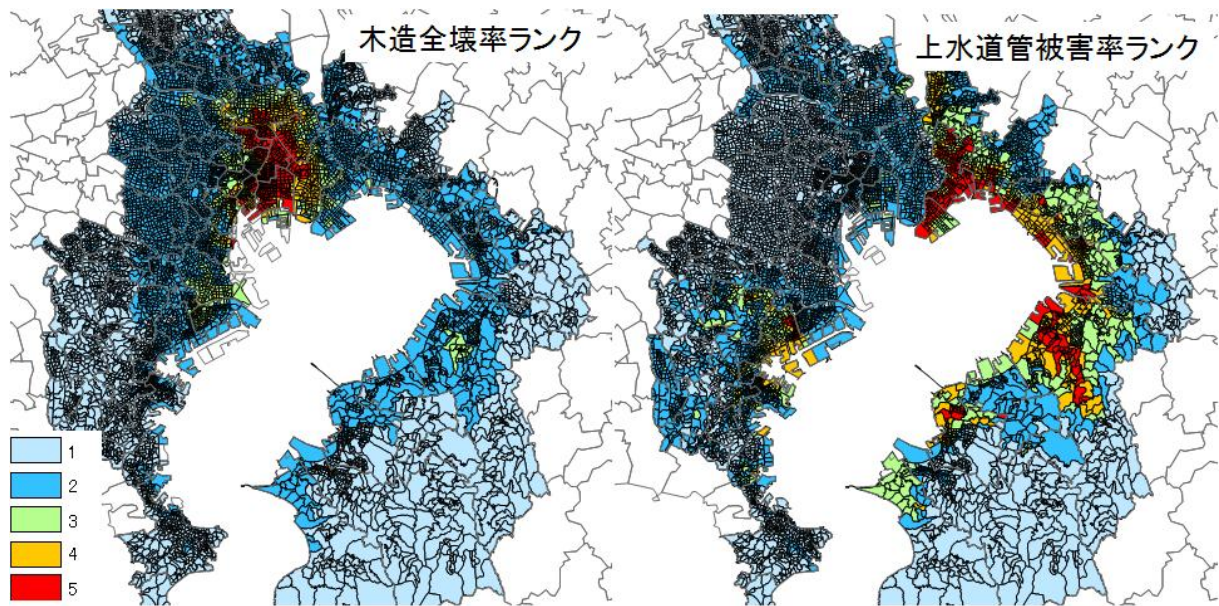


図9 町丁目別の木造建物全壊率と上水道管被害率のランク別表示

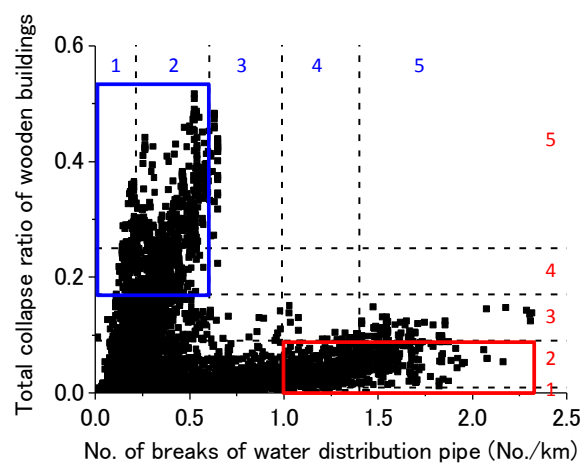
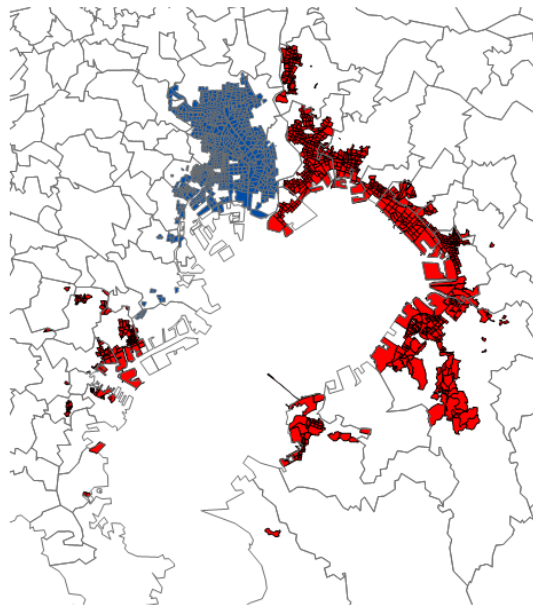


図10 町丁目別の木造建物全壊率と上水道管被害率の関係



- 上水道被害ランク1-2, 木造建物被害ランク4-5
- 上水道被害ランク4-5, 木造建物被害ランク1-2

図 11 上水道被害ランク 1～2 かつ木造建物被害ランク 4～5 の町丁目と上水道被害ランク 4～5 かつ木造建物被害ランク 1～2 の町丁目

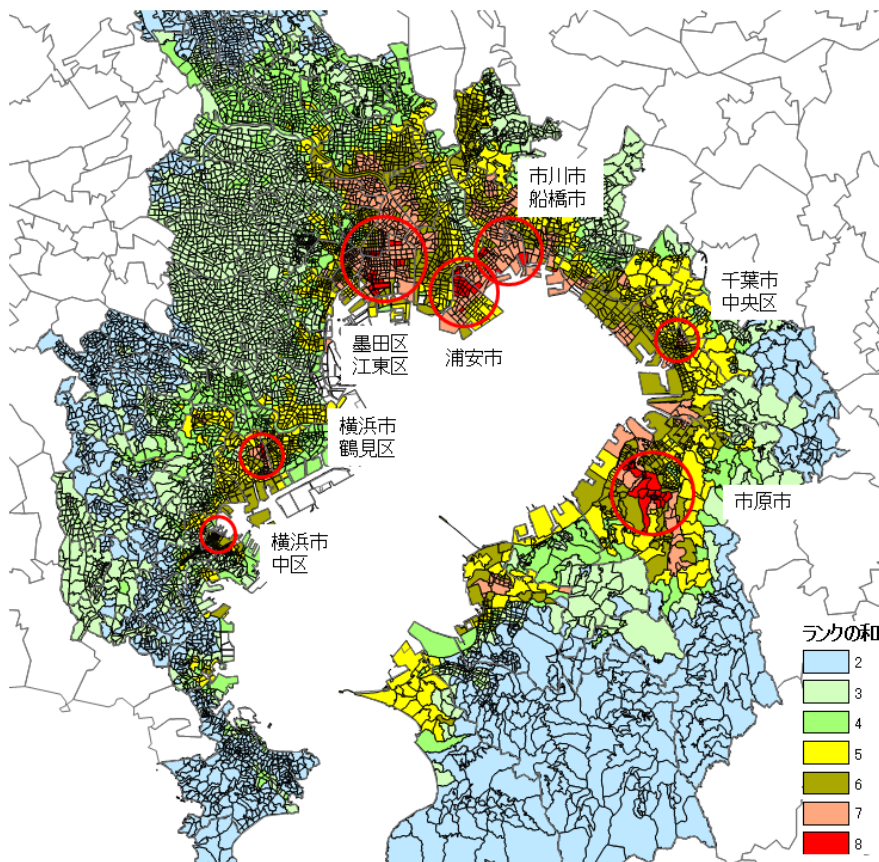


図 12 木造建物全壊率と上水道被害率のランク和

### (c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、東京、神奈川、埼玉、千葉の1都3県について、東京湾北部地震後の木造建物と上水道管の被害予測を統一された手法で行った。使用したデータは各都県の地震被害想定で用いられた基盤データであるが、それぞれの都県が個別に被害予測を行っていたため、データ構造が一致しなかった。そこで、データ区分などを統一し、さらに使用する被害関数も統一することで、県境を超えて被害量を相対的に評価できるようになった。木造建物被害については、震度6強以上の揺れが予測されている地域などで全壊棟数が多く予測されることが分かった。上水道管の被害率に関しては、揺れが大きい東京都よりも千葉県の方が大きな被害率を示していた。これには、東京都と千葉県で敷設されている上水道管の管種ごとの割合が異なることが影響していると考えられる。

両者の被害率を平均値と標準偏差を用いてランク分けし、木造建物と上水道管被害の相関性について検討を行った。木造建物の被害程度が小さいものの上水道管被害の程度が高い地域が、千葉県の広い範囲と神奈川県の一部に存在した。この地域では、東京湾北部地震後も住宅に住み続けることができる可能性は高いが、長期にわたり断水するため日常生活に支障が生じるものと考えられる。また東京都東部は上水道管被害の程度は小さいが、木造住宅の被害が甚大な地域である。通常地震被害想定で行われるように、被害の同位置性を考えずに単に水道管の被害率から復旧期間を見積もった場合よりも、実際には道路閉塞等の影響で復旧活動が遅延することが懸念される。

木造建物と上水道管の被害ランクの和をとったところ、東京湾側のいくつかの地域で木造建物被災率と上水道管被害率がともに相対的に大きなところがあることが明らかとなった。これらの地域では、とくに迅速な緊急対応がとられることが望まれる。

本研究では、通常地震被害想定のように様々な地震被害を個別に評価するのではなく、地震被害の同位置性に着目して木造建物と上水道管被害が複合して影響を与えそうな地域を評価した。ガス管と水道管について同様な検討を行うことで、差し水が発生しやすい地域を予め把握することができる。また、幅員データを有する詳細な道路データを用いることで、家屋倒壊による道路閉塞について予測することができ、復旧支障のより定量的な評価につながるものと考えられる。

### (d) 引用文献

- 1) 内閣府：平成22年度防災白書，<http://www.bousai.go.jp/hakusho/h22/index.htm>，2010.
- 2) 中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会：首都直下地震対策専門調査会報告，2005.
- 3) 内閣府：<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/datakoukai/index.html>
- 4) 内閣府：地震防災マップ作成技術資料，2005.
- 5) 総務省：<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/index.htm>
- 6) (社)日本水道協会：平成18年度水道統計，2008.
- 7) 若松加寿江，松岡昌志，久保純子，長谷川浩一，杉浦正美：日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.213-232，2004.
- 8) 山口直也，山崎文雄：詳細な建物情報を含む被災度調査結果に基づく西宮市の地震動分布の再推定，土木学会論文集，No. 640/I-50，pp.203-214，2000.

- 9) 磯山龍二, 石田栄介, 湯根清二, 白水暢: 水道管路の地震被害予測に関する研究, 水道協会雑誌, 第 761 号, pp.25-40, 1998.
- 10) 神奈川県: 神奈川県地震被害想定調査報告書, 2009.
- 11) 丸山喜久, 山崎文雄: 近年の地震被害データを加味したマクロな配水管被害予測式の改良, 土木学会地震工学論文集, Vol. 30, pp. 565-574, 2009.
- 12) 千葉県: 千葉県地震被害想定調査報告書, 2008.
- 13) Karim, K. R. and Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1191-1212, 2002.
- 14) 能島暢呂: 脆弱性指標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～, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 137-146, 2008.

(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（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
Construction of fragility curve for water distribution pipes based on damage datasets from recent earthquakes in Japan（口頭発表）	Yoshihisa Maruyama, Fumio Yamazaki	Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada	2010年7月	国際
Detection of Slope Failures due to the Iwate-Miyagi, Japan Earthquake using Satellite Images（口頭発表）	Fumio Yamazaki, Takahiro Ishide	The 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Macedonia	2010年9月	国際
2007年新潟県中越沖地震における水道管被害率と地震動強さの関係（口頭発表）	君島康太, 丸山喜久, 山崎文雄	土木学会第65回年次学術講演会（北海道大学）	2010年9月	国内
首都直下地震における上水道管と木造建物の広域被害予測（口頭発表）	丸山喜久, 山崎文雄	第2回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集（土木学会, 東京）	2010年12月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
Damage assessment of buried pipes due to the 2007 Niigata Chuetsu-oki earthquake in Japan	Yoshihisa Maruyama, Kota Kimishima, Fumio Yamazaki	Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 5, No. 1, pp. 57-70	2011年1月	国際

マスコミ等における報道・掲載

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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

**(3) 平成23年度業務計画案**

平成20年度から各都県に依頼して収集してきた1都3県の上水道管路延長データ（250mメッシュ）と中央防災会議が予測した東京湾北部地震の地震動強さ分布を用いて推定した広域上水道管被害予測結果を京都大学防災研究所が構築するマッシュアップシステムへ実装する。

1都3県の広域被害予測を行うために、整備してきた上水道管路延長データをもとにサブプロ1が予測する首都直下地震動情報を用いて、広域水道管被害予測を統一的な手法により行い、都県境界をまたいで地震に脆弱な地域を指摘し、さらに復旧の際の広域連携のあり方などを検討する際の基礎資料となるデータをまとめる。また、予測された結果を京都大学防災研究所が構築するマッシュアップシステムへ実装する。