

3.5.3 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

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23年度業務目的

- ・兵庫県南部地震の被災事例に基づいて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する。その上で東京湾北部地震を対象として被害と復旧のシミュレーションを実施し、ライフライン被害波及モデルの高精度化を図る。
- ・さらに、ライフライン機能低下が市民生活および社会経済活動に対して及ぼす影響を表す機能充足度を用いて社会機能の低下と復旧の時系列的展開をシナリオ化し、社会的インパクトを最小化するための都市機能防護戦略を、学会発表を通じて提案する。

(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23年度の成果

(a) 業務の要約

- ①兵庫県南部地震の被災事例に基づいて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。その上で東京湾北部地震を対象として被害と復旧のシミュレーションを実施し、ライフライン被害波及モデルの高精度化を図った。
- ②さらに、ライフライン機能低下が市民生活および社会経済活動に対して及ぼす影響を表す機能充足度を用いて社会機能の低下と復旧の時系列的展開をシナリオ化し、社会的インパクトを最小化するための都市機能防護戦略を、学会発表を通じて提案した。

(b) 業務の成果

1) 供給系ライフライン機能の被害予測モデルの改良（業務の要約①）

a) 1都3県の上水道システムを対象としたモデルの改良

本研究ではまず、兵庫県南部地震の被災事例に基づいて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、ハード面での対策効果を反映できるように改良する。

1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づいて、能島ら¹⁾は震度 I をパラメータとして当該地点における供給系ライフラインの地震時機能を二段階で評価するモデルを提案した。第一段階は、機能的フラジリティ曲線として、ライフライン機能の停止確率 $p(I)$ をモデル化したものである。第二段階は、震度 I で機能停止という条件下での停止期間 t の非超過確率 $F(t|I)$ としてモデル化したものである。これらを組み合わせ、震度 I 、地震後経過期間 t の供給率曲線 $P(I, t)$ が得られる。

$$P(I, t) = \{1 - p(I)\} + p(I) \cdot F(t|I) \quad (1)$$

第1項は地震直後に低下した供給率、第2項はその後の回復率に相当する。

昨年度は、兵庫県南部地震の被災事例に基づくこのモデル（従来モデルと呼ぶ）を、ライフライン施設の脆弱性²⁾やライフライン事業者の地震防災対策の効果を考慮できるように改良した予測モデルを提案した³⁾（改良モデルと呼ぶ）。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ては、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。東京都水道局管内を対象としてモデルを改良し、東京都特別区を対象とした事例を扱ったが、首都圏全体（1都3県）のシステム特性を考慮して同様の手法を展開し、広域評価を行うため拡張することを課題として残していた。そこで本年度は引き続いて、昨年度と同様の改良方法を1都3県に適用して、都県別のモデル改良を行う。

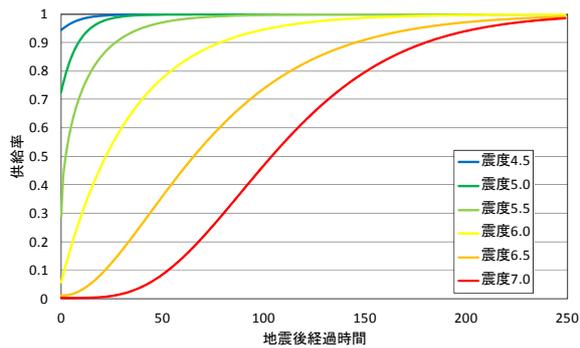
配水管の被害の受けやすさを表わす脆弱性指数 $\hat{\alpha}$ （管径別脆弱性指数 α_d と管種脆弱性指数 α_p の積として簡易的に算定）を表1に示す。また、従来モデル構築の基礎データとした兵庫県南部地震の被災地域における水道事業者の脆弱性指数は $\alpha^*=0.446$ との比率 $\gamma = \hat{\alpha}/\alpha^*$ および、モデル改良に用いる等価震度算出のための震度増分値も示した。

以上により得られた1都3県の上水道システムの供給率曲線の改良モデルを図1に示す。参考までに、電気（従来モデル）と、都市ガス（昨年度の改良モデル）も示した。

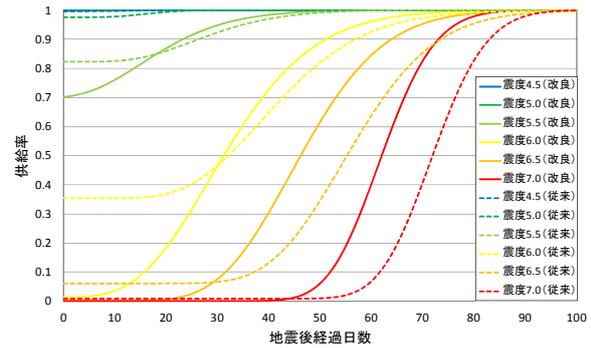
従来の予測方法は、ネットワーク構成要素の構造物被害予測に始まり、その結果を前提に機能被害を経験的に予測し、さらに復旧人員・効率に基づいて復旧予測を行うものであった。こうした積み上げ方式に対して、提案手法では、あくまでも少ないデータから簡便に概略予測を行うことを重視したものである。地震動予測に詳細法（地震動シミュレーション）と簡便法（距離減衰式）があり、前者の妥当性チェックのために後者がベンチマーク的に用いられているように、マクロな視野からの概略予測は有用と考えられる。

表 1 脆弱性指数を用いた上水道システムのモデル改良のためのパラメータ

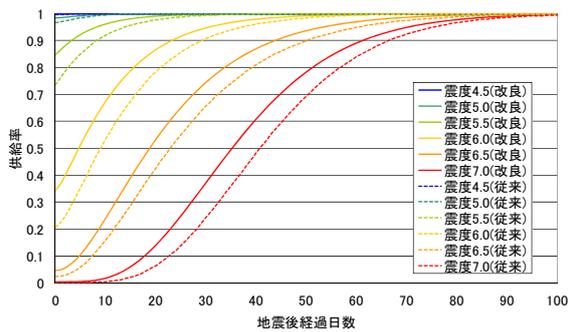
対象地域	管種別脆弱性指数 α_p	管径別脆弱性指数 α_d	脆弱性指数 $\alpha = \alpha_p * \alpha_d$	阪神地域の $\alpha^* = 0.446$ に 対する比率	等価震度に 対する震度 増分値
埼玉県	0.622	1.115	0.693	1.554	0.12
千葉県	0.678	1.210	0.820	1.839	0.17
東京都	0.275	0.960	0.264	0.593	-0.15
神奈川県	0.675	1.022	0.690	1.546	0.12
1都3県全体	0.554	1.076	0.597	1.337	0.08



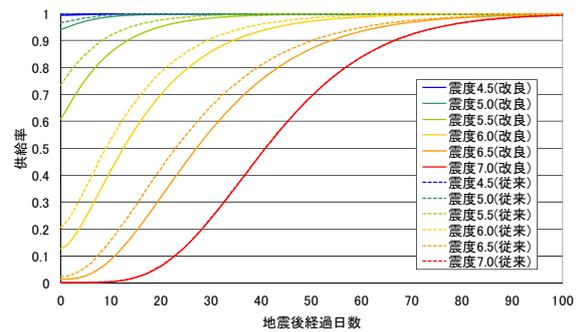
(a) 電力 (従来モデル)



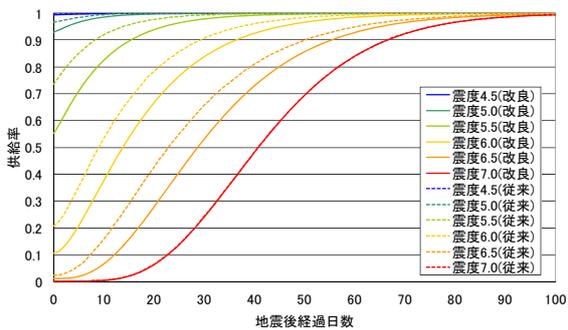
(b) 都市ガス (改良モデル)



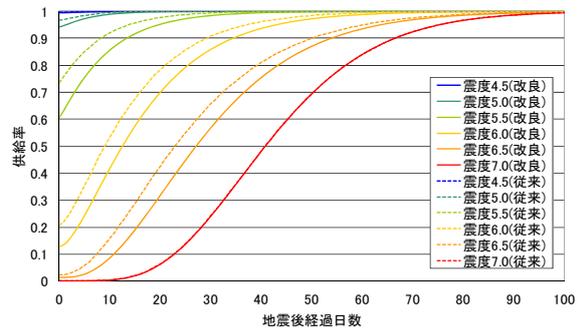
(c) 上水道 (改良モデル: 東京都)



(d) 上水道 (改良モデル: 神奈川県)



(e) 上水道 (改良モデル: 千葉県)



(f) 上水道 (改良モデル: 埼玉県)

図 1 所与の計測震度に対する供給率曲線の予測

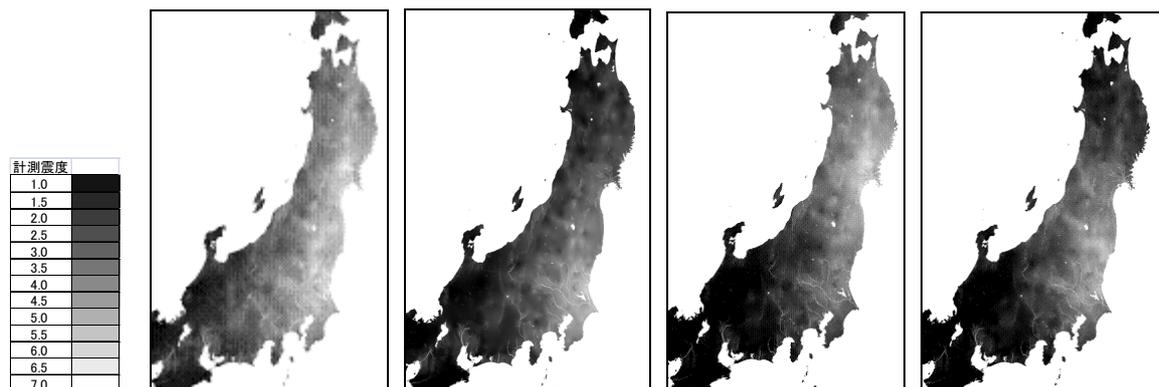
b) ライフライン被害・復旧予測モデルの東日本大震災における検証

本研究で改良して適用しているライフライン被害・復旧予測モデルの妥当性については、これまで実際の大規模地震災害で検証することがなかった。首都圏直下地震に適用するにあたって、本年度は、東日本大震災をもたらした一連の地震のうち、表 2 に示す本震と 3 つの主要地震（余震および誘発地震）を対象として検証を行う。

表 2 予測モデル検証の対象とした東日本大震災の地震群

地震名	発生日時	マグニチュード
東北地方太平洋沖地震（本震）	2011年3月11日14:46	Mw=9.0
茨城県沖の地震（余震1）	2011年3月11日15:15	M=7.7
宮城県沖の地震（余震2）	2011年4月7日23:32	M=7.1
福島県浜通りの地震（誘発地震）	2011年4月11日17:16	M=7.0

震度分布については、(独)産業技術総合研究所の「地震動マップ即時推定システム (QuiQuake)」⁴⁾を用いた。このシステムは、(独)防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET, KiK-net) で観測された地震記録を用いて、地盤のゆれやすさを考慮して空間補間計算を行い、広域かつ詳細な地震動マップを推定・図示するものである。これまでに、1996年6月以降の15年間に記録された約6,400個の地震に関する地震動マップ（計測震度、最大地動加速度PGA、最大地動速度PGV）が作成されてアーカイブ化されており、任意の地震動マップをダウンロード可能となっている。データは4分の1地域メッシュ（約250m四方）で、フォーマットは「2次元ラスタ型1バイト符号なし整数」である。計測震度INTについては $INT=0.025692*DN+0.474308$ の関係式でピクセル値DN(0~255)に対応付けられ、256階調のGeoTIFFファイルとして提供されている。図2に各地震の推定震度分布を示す。

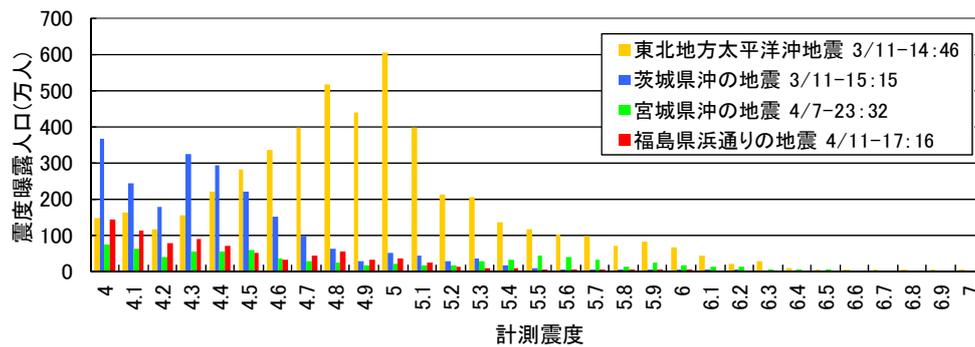


(a)東北地方太平洋沖地震 (b)茨城県沖の地震 (c)宮城県沖の地震 (d)福島県浜通りの地震
 (本震：Mw=9.0) (余震1：M=7.7) (余震2：M=7.1) (誘発地震：M=7.0)

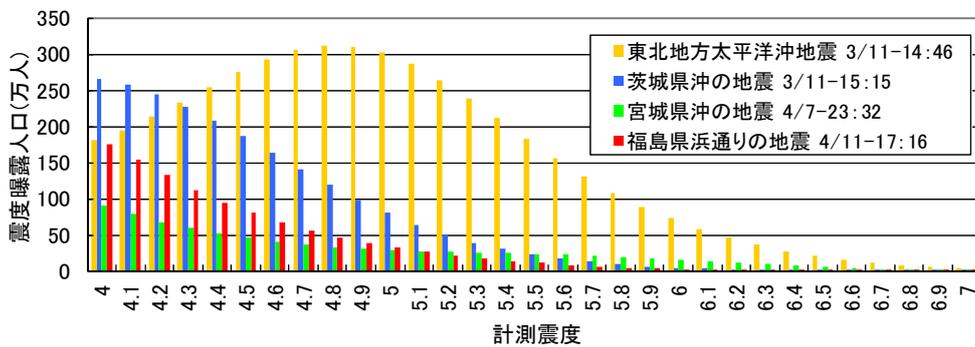
図 2 東日本大震災に関連する主要4地震の推定震度分布 (GeoTIFF データ)

平成 17 年国勢調査による地域メッシュ統計の 2 分の 1 地域メッシュ（約 500m 四方）の夜間人口データを 4 等分して簡易的に 4 分の 1 地域メッシュに変換し、震度曝露人口⁵⁾を推定した結果を図 3 に示す。「単純集計」は推定震度をそのまま用いた集計結果である。「移

動平均」は推定震度のばらつきを考慮したものである。QuiQuake で用いられている補間手法は、距離減衰式による推定結果をトレンド成分とする simple kriging であり、2005 年福岡県西方沖地震を対象とした最大速度の補間推定誤差は対数標準偏差で $\sigma=0.232$ と評価されている⁶⁾。評価計測震度への変換式 $INT=2.68+1.72 \cdot \log_{10} PGV$ の係数 1.72 と変換誤差 $\sigma=0.21$ を考慮すると、計測震度の推定誤差は $\sigma=0.45$ と評価される。また 2004 年新潟県中越地震を対象とした震度の補間推定では $\sigma=0.45$ と評価され、合わせて 9 地震では $\sigma=0.50$ と評価されており⁷⁾、ここでの値にきわめて近い。これより、正規分布密度関数 ($\mu=0$ 、 $\sigma=0.45$) の平滑化ウィンドウを施した結果が「移動平均」である。以下では双方を用いて比較検討を行う。



(a) 単純集計：震度推定のばらつきを考慮しない場合 ($\sigma=0.0$)



(b) 移動平均：震度推定のばらつきを考慮した場合 ($\sigma=0.45$)

図3 2011年東北地方太平洋沖地震の震度曝露人口

ライフライン被害・復旧予測モデルに関しては、電力供給システムについては、従来モデルを適用する。都市ガス供給システムについては、従来モデルと改良モデルを適用する。また上水道システムについては、表3に示すように、4県平均の脆弱性指数を用いてモデルを改良し、従来モデルと改良モデルを適用する。

ここでは、供給支障人口（被災地域全体で供給を受けられない人口）の解消過程 $H(t)$ を推定し、実測値と比較・検証する。次式のように $H(t)$ は、式(1)の供給率曲線 $P(I)$ を1から引いて、震度曝露人口 $PEX(I)$ およびライフライン機能の普及率 r を乗じて、全ての震度に対して集計することにより得られる。

$$H(t) = \sum_I r \cdot PEX(I) \{1 - P(I, t)\} = \sum_I r \cdot PEX(I) \cdot p(I) \{1 - F(t|I)\} \quad (2)$$

ライフライン普及率に関しては、電力および上水道については $r=100\%$ とする。都市ガスについては、表 4 に示すように、宮城・岩手・福島・茨城の 4 県の平成 22 年度国勢調査⁸⁾による世帯数（約 319 万世帯）と平成 20 年度「ガス事業生産動態統計調査」による需要家メーター取付数（82.6 万件）⁹⁾との比率から、これらの地域の都市ガス普及率の平均値 $r=25.9\%$ を採用する。

表 3 脆弱性指数を用いた上水道システムのモデル改良のためのパラメータ

対象地域	管種別脆弱性指数 α_p	管径別脆弱性指数 α_d	脆弱性指数 $\alpha = \alpha_p * \alpha_d$	阪神地域の $\alpha^*=0.446$ に対する比率	等価震度に対する震度増分値
岩手県	0.692	1.183	0.818	1.835	0.17
宮城県	0.731	1.157	0.846	1.897	0.18
福島県	0.786	1.125	0.885	1.984	0.19
茨城県	0.788	1.241	0.978	2.193	0.22
4県全体	0.758	1.186	0.899	2.016	0.20

表 4 都市ガスの普及率

対象地域	世帯数 (千世帯)	供給区域内世帯数(千世帯)	需要家メーター取付数(千件)	供給区域内普及率(%)	都市ガス普及率(%)
岩手県	483	122	71	58.4	14.7
宮城県	900	562	398	70.9	44.2
福島県	719	243	146	60.0	20.3
茨城県	1087	387	211	54.6	19.4
4県全体	3189	1314	826	62.9	25.9

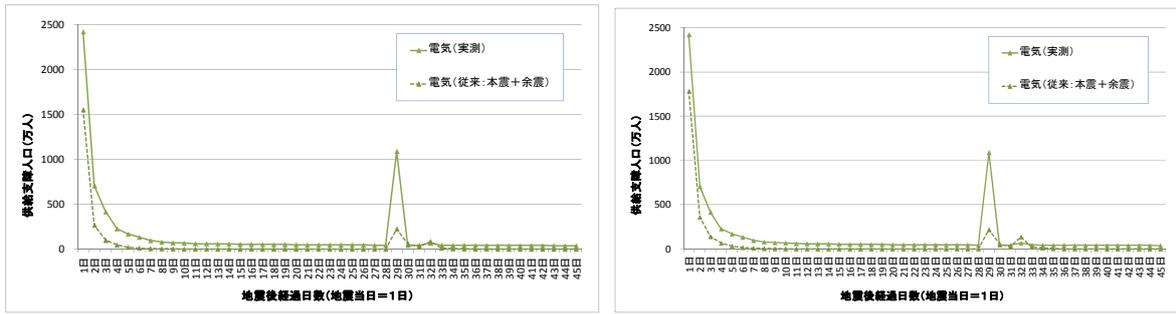
図 3 に示した 4 地震による震度曝露人口を個別に適用して、供給支障人口の解消過程 $H(t)$ を別々に求め、時系列的に総和して得られた推定結果を、実測値と比較したものを図 4~6 に示す。実測値については停止件数（世帯数）で得られているので、平成 22 年度国勢調査⁸⁾による 4 県の 1 世帯当たり平均人員（=2.72 人）を用いて人口換算して比較した。

図 4 は停電人口の解消過程である。形状に関しては予測値と実測値はほぼ整合しているが、全体的に実測値の方が長期間を要している。地震直後においては電源喪失、中長期的には津波被災地域における被害把握および復旧作業の難航が原因と考えられる。また余震では系統制御の問題が停電拡大要因と見られている。図 5 は断水人口の解消過程を示す。 $\sigma=0.45$ / 改良モデルを除いて、両者がほぼ整合する結果が得られたが、予測値は全般的に余震の影響をやや過大評価する傾向にある。図 6 はガス停止人口の解消過程を示す。初期被害については、 $\sigma=0.45$ / 従来モデルおよび $\sigma=0.0$ / 改良モデルで整合が良いが、復旧過程全体をみると後者の整合が良い。

東日本大震災では、沿岸部での甚大な津波被害、電力や都市ガスにおける供給源喪失、上水道における広域水道の被災など、多様な被災要因が関係したことは明らかであるが、被災地全体のライフライン機能のマクロ評価という面では、震度曝露人口に基づく評価でおおむね妥当な結果が得られたといえる。市町村別の評価では各地の個別被災要因の特徴が現れるため、整合が悪くなる可能性が高い。しかし予測値は考え得る復旧曲線の確率モデル全体の平均的な姿を提示するものであり、実測値はその 1 サンプルと位置付けられる。

以上の結果を総合的に踏まえて、東京湾北部地震を対象としたシミュレーションにおいては、震度のばらつきを考慮しない「単純集計 ($\sigma=0.0$)」の震度曝露人口を用い、電力に

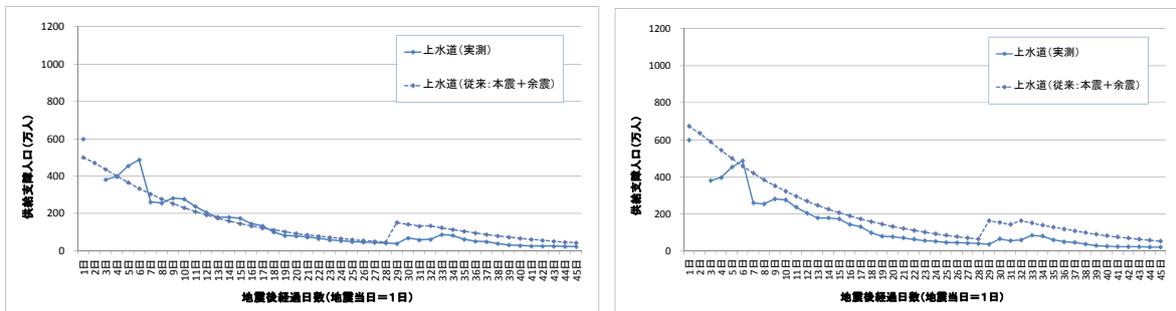
については従来モデル、都市ガスと上水道については改良モデルを適用することとした。



(a) $\sigma=0.0$ / 従来モデル

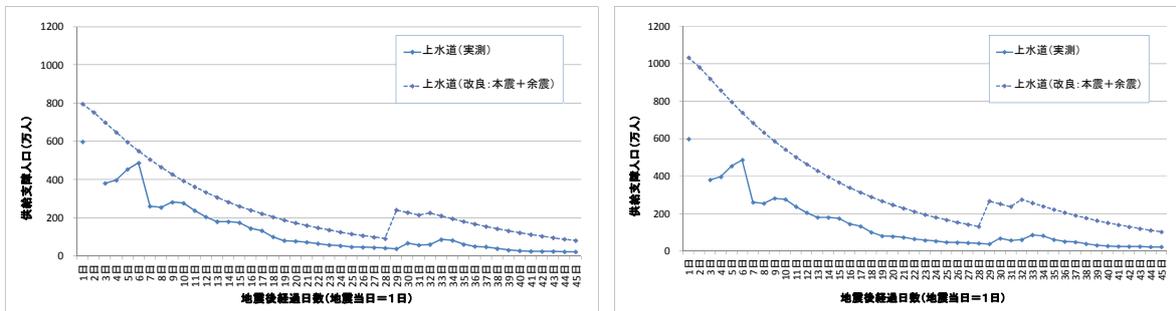
(b) $\sigma=0.45$ / 従来モデル

図4 停電人口の解消過程の予測モデルによる推定値と実測値の比較



(a) $\sigma=0.0$ / 従来モデル

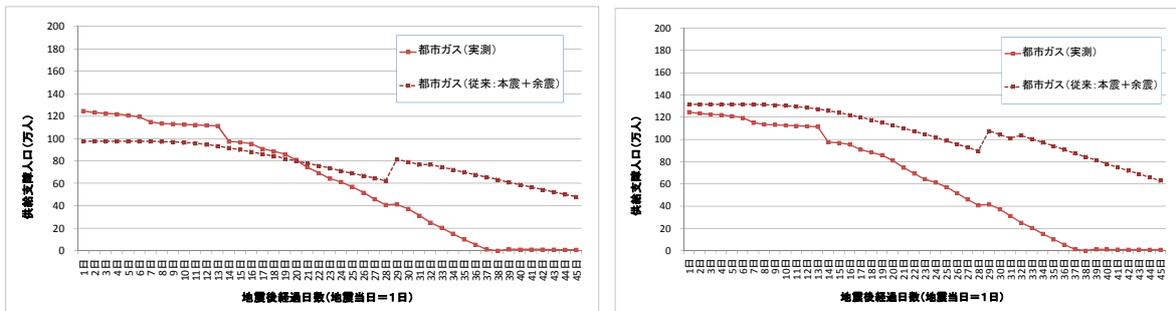
(b) $\sigma=0.45$ / 従来モデル



(c) $\sigma=0.0$ / 改良モデル

(d) $\sigma=0.45$ / 改良モデル

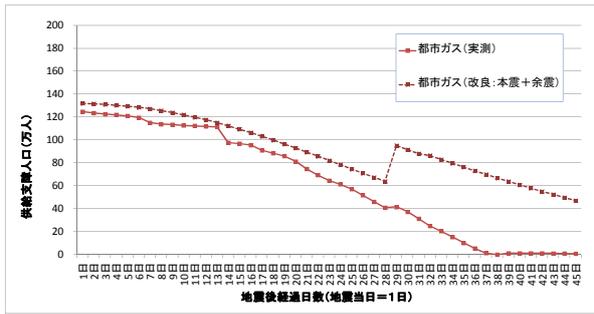
図5 断水人口の解消過程の予測モデルによる推定値と実測値の比較



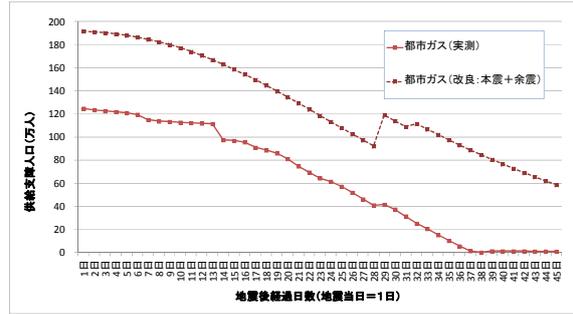
(a) $\sigma=0.0$ / 従来モデル

(b) $\sigma=0.45$ / 従来モデル

図6 ガス停止人口の解消過程の予測モデルによる推定値と実測値の比較 (続く)



(c) $\sigma=0.0$ / 改良モデル



(d) $\sigma=0.45$ / 改良モデル

図6 ガス停止人口の解消過程の予測モデルによる推定値と実測値の比較 (続き)

2) 東京湾北部地震を対象としたライフライン被害・復旧のシミュレーション (業務の要約②)

a) 1都3県におけるライフラインの供給可能人口

ライフライン機能低下が市民生活に及ぼす影響評価の一環として、供給可能人口を推計する。供給可能人口 $M(t)$ は、式(1)の供給率曲線 $P(I)$ 、震度曝露人口 $PEX(I)$ およびライフライン機能の普及率 r から次式により推定される³⁾。

$$M(t) = \sum_I r \cdot PEX(I) \cdot P(I, t) \quad (3)$$

図7に東京湾北部地震による震度曝露人口を推定した結果を都県別に示す。これはばらつきを考慮せず「単純集計 ($\sigma=0.0$)」としたものであるが、前述の検討結果を踏まえて、以下では平滑化しないこの震度曝露人口を適用する。ライフライン普及率に関しては、電力および上水道については $r=100\%$ 、都市ガスについては表5より推定した都県別の普及率を採用した。図8(a)~(d)は、図1と図7を式(3)に適用して推定された供給可能人口である。これにより、被災規模と復旧過程を概略的に把握することができる。

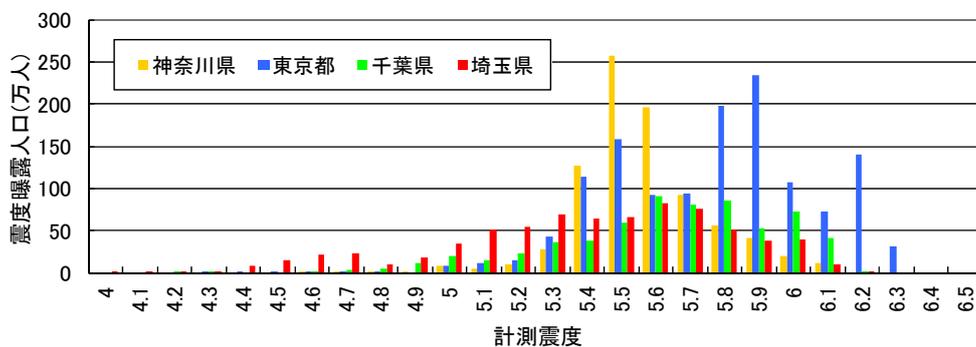
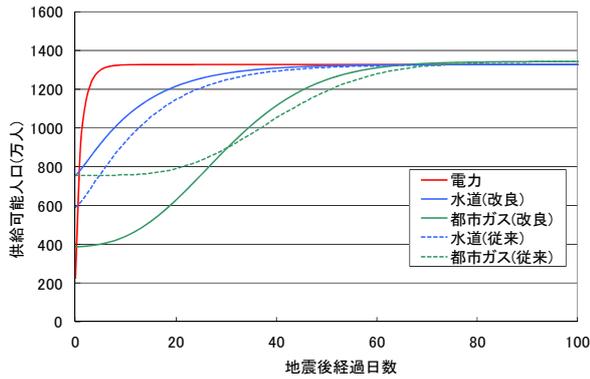


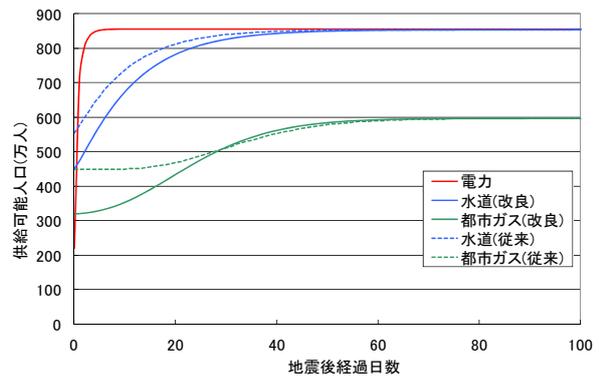
図7 東京湾北部地震で推定される1都3県の震度曝露人口 (単純集計: $\sigma=0.0$)

表 5 都市ガスの普及率の推定結果

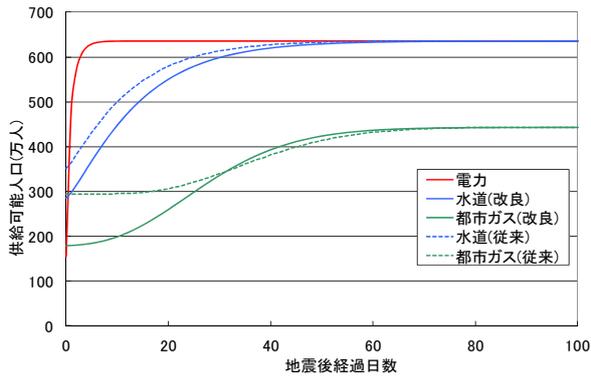
対象地域	世帯数	世帯数 (千世帯)	供給区域内世 帯数(千世帯)	需要家メーター 取付数(千件)	供給区域内 普及率(%)	都市ガス普 及率(%)
埼玉県	2837542	2838	2302	1320	57.3	46.5
千葉県	2512441	2512	2139	1750	81.8	69.7
東京都	6382049	6382	6000	6457	107.6	101.2
神奈川県	3830111	3830	3597	2674	74.3	69.8
1都3県全体	15562143	15562	14038	12201	86.9	78.4



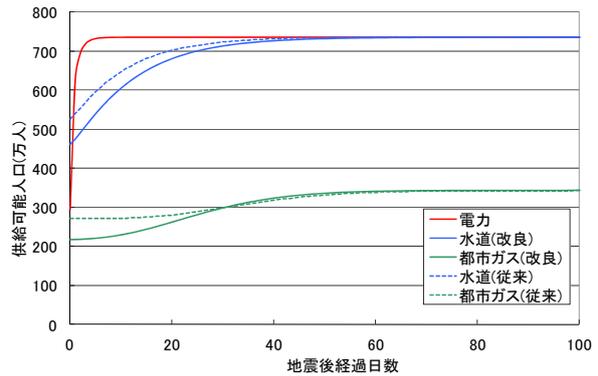
(a) 東京都



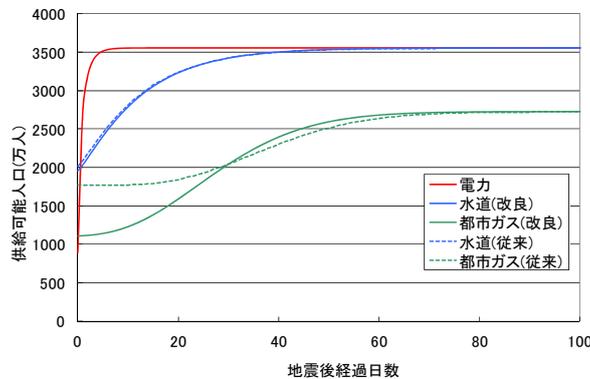
(b) 神奈川県



(c) 千葉県



(d) 埼玉県



(e) 1都3県全体

図 8 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

b) ライフライン停止・復旧による地震時機能充足度と広域的影響の評価の枠組み³⁾

供給系ライフラインの $2^3=8$ 通りの停止パターンを $(\delta_E, \delta_W, \delta_G)$ で表す。ただし δ は供給可能(1)・供給不可能(0)を表す二値変数で、Eは電力、Wは水道、Gは都市ガスを表わす。震度 I 、時間 t における停止パターン $(\delta_E, \delta_W, \delta_G)$ の生起確率の時間関数 $Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t)$ は、式(1)の $P(I, t)$ を用いて次式により求められる。

$$Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t) = \prod_{k=E, W, G} P_k(I, t)^{\delta_k} \cdot \{1 - P_k(I, t)\}^{1 - \delta_k} \quad (4)$$

供給系ライフラインの停止パターン別の活動項目 i の機能充足度(活動水準を0~1の値で基準化した指標、0は全く活動できない水準、1は通常的水準)の時間関数 $R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t)$ は、次式で定義される。

$$R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t) = \prod_{k=E, W, G} A_k(t)^{1 - \delta_k} \quad \text{ただし} \quad A_k(t) = 1 - (1 - R_k) \cdot B_k(t) \quad (5)$$

$A_k(t)$: 供給系ライフラインの途絶に対する機能充足度の時間関数

$B(t)$: バックアップの持続時間に関する累積分布関数

R_k : バックアップが無い場合の各ライフラインの単独停止時の機能充足度

以上より、活動項目 i の地震時機能充足度 $\bar{R}_i(I, t)$ を次式で評価する。

$$\bar{R}_i(I, t) = \sum_{\forall(\delta_E, \delta_W, \delta_G)} R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t) \cdot Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t) \quad (6)$$

ライフライン途絶の広域的影響を評価するために、地震発生後の活動項目 i の活動水準を0~1の値で基準化した「広域機能充足度」 $S_i(t)$ として評価する。

$$S_i(t) = \frac{\sum_I PEX_i(I) \cdot \bar{R}_i(I, t)}{\sum_I PEX_i(I)} \quad (7)$$

ただし、 $PEX_i(I)$: 活動項目 i に従事する人の震度 I の曝露人口

産業の活動水準を対象とする場合で、経済的影響を推計するには、地震後経過日数 t における製造品出荷額を次式で推定する。

$$EC_i(t) = S_i(t) \cdot PR_i \quad (8)$$

ただし、 PR_i : 業種 i の製造品日平均出荷額

c) 重要拠点施設のBCPに関する適用例

重要拠点施設のBCPを検討するにあたっては、地震時のライフライン機能の使用可能性は非常に重要な基礎情報である。ここではその一助として、災害拠点病院の機能充足度の時系列的展開をシナリオ化して、ライフライン・ユーザー側としての病院および供給側としてのライフライン事業者の対策効果を検討した例を示す。

Inagaki and Sadohara¹⁰⁾は、1都3県の県庁・市役所・区役所・災害拠点病院を対象として、ライフライン途絶の影響と対策に関するアンケート調査を実施した。それによると、停電、

断水、暖房・給湯・冷熱供給停止（ここでは都市ガス停止と解釈）により業務に支障をきたすと回答した病院の割合は、それぞれおよそ 57%、74%、42%であった。この結果のうち停電と断水に関しては、各病院におけるバックアップ設備保有状況や備蓄状況、2 回線受電などの防災対策を踏まえての回答と考えられるが、対策不足が認識されていることを示唆している。本研究では、上記アンケート調査で回答が得られた病院の中から、東京・神奈川・千葉・埼玉でそれぞれ 2 病院を抽出して、計 8 病院を対象としたケーススタディを行う。図 9 に対象とした 8 病院の位置を示す(都県のイニシャルと番号で、T1, T2, K1, K2, C1, C2, S1, S2 と表す)。ただしパラメータ設定については、アンケート個票は用いずに全体の回答傾向を踏まえたものとする。

まず、バックアップ設備がないという前提でのライフライン停止時の機能充足度については、停電もしくは断水が発生した場合には、完全に病院機能が喪失されると判断してそれぞれ 0 と定めた。都市ガス停止については、上記の結果を参照して 0.42 と定めた。すなわち式(5)において $R_E=R_W=0$ 、 $R_G=0.42$ である。図 10(a)にライフライン停止パターン別機能充足度を図示する。

バックアップについては、自家発電容量の契約電力に対する割合は 67%（平均発電容量 1,800kW）であり、うち常用発電機を設置している病院に限るとその割合は 78%（平均発電容量 2,300kW）となっている¹⁰⁾。災害時には不要不急のニーズ（エレベータや照明等）は節電され、重要ニーズのみに自家発電設備が使用されるものと解釈して、機能充足度が 100%になるものと解釈した。また、自家発電設備で維持できる期間は平均 74 時間との結果が得られている¹⁰⁾。水道については、延床面積あたりの水槽容量は $8.32\text{L}/\text{m}^2$ (320kL) であり、1 日当たり平均使用量 $7.59\text{L}/\text{m}^2$ との比より、断水時に給水機能を維持できる期間は平均 27 時間との結果が得られている¹⁰⁾。都市ガスについては前述のようにバックアップなしとした。以上に基づいて本研究では、停電、断水、都市ガス停止に対するバックアップの持続時間に関する累積分布関数 $B(t)$ の平均値をそれぞれ 3 日、1 日、0 日、すなわち $(E,W,G)=(3,1,0)$ とした。変動係数については昨年と同様に 30% とした。ライフライン停止パターン別機能充足度の時間関数を図 10(b) に示す。

次に、式(6)に基づいて得られた地震時機能充足度の時間関数を比較する。バックアップがない場合は図 11(a) に示すように、機能充足度は地震直後にいったん 0 まで低下する。その後の回復は、曝される震度レベルやシステム脆弱性に依じて開きがある。バックアップ $(E,W,G)=(3,1,0)$ がある場合について図 11(b) に示す（現状の平均的傾向に相当）。地震直後の機能充足度低下はかなり緩和できるが、その最小値は K2 の 0.05 から T1 の 0.9 まで大きな差が認められる。その後の回復過程は図 11(a) とほぼ同じである。さらに対策効果を比較するため、上水道に関するバックアップを増強して $(E,W,G)=(3,10,0)$ としたケースを図 11(c) に示す。機能充足度の低下は、K2 を除いてほぼ 0.4 程度まで緩和されている。また、災害拠点病院はライフラインの優先復旧の対象とされ、東日本大震災でもその事例報告¹¹⁾ がある。そこで、予測モデルにおいて上水道と都市ガスの平均復旧時間を 0.5 倍として適用した結果を図 11(d) に示す。機能充足度の低下が一段と緩和されていることがわかる。以上、都市機能防護戦略としてのユーザー側のバックアップおよび供給側の優先復旧の効果を定量的に示した。

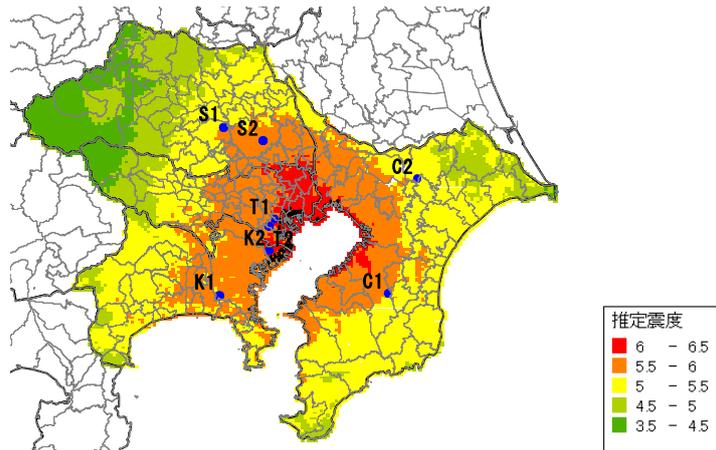
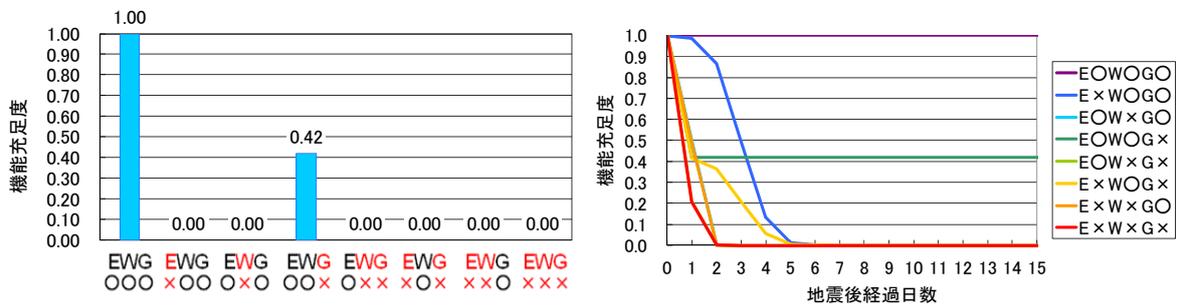


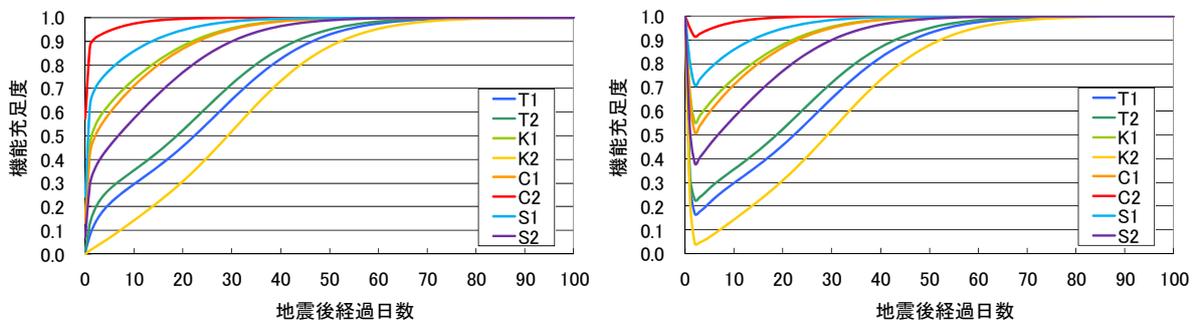
図9 対象とした8病院の位置（背景地図は東京湾北部地震による震度分布）



(a) 機能充足度

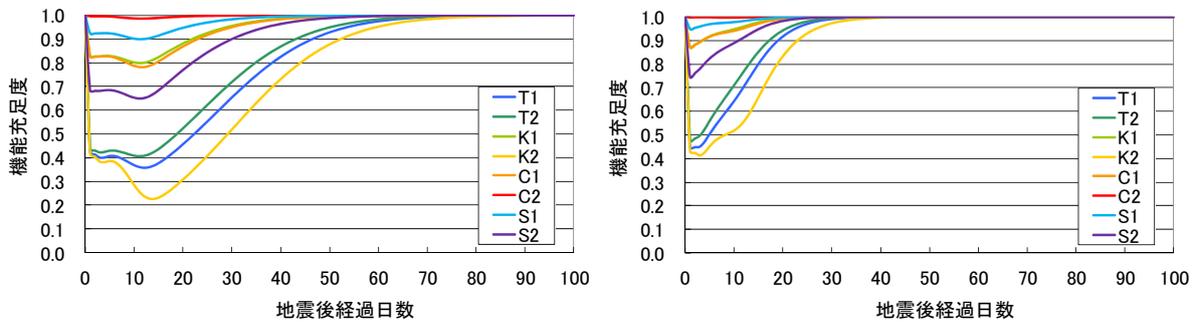
(b) 機能充足度の時間関数 (E,W,G)=(3,1,0)

図10 首都圏8病院におけるライフライン停止パターン別機能充足度



(a) バックアップなし

(b) バックアップあり(E,W,G)=(3,1,0)



(c) バックアップ増強(E,W,G)=(3,10,0)

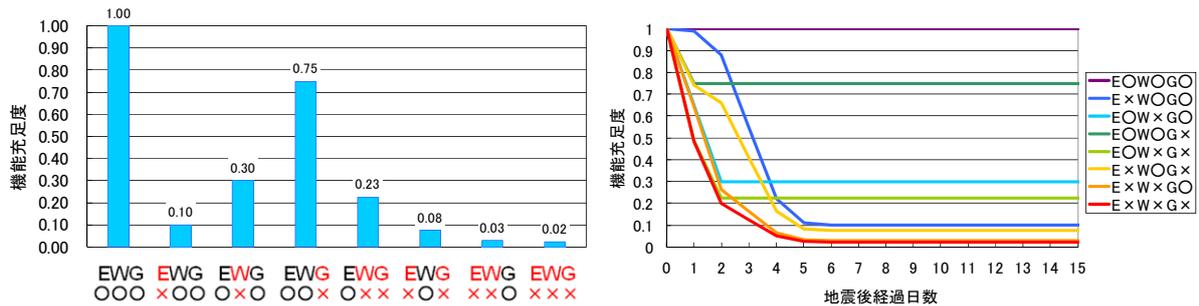
(d) バックアップ増強+優先復旧

図11 首都圏の8病院における地震時機能充足度の時間関数

d) 製造業に関する適用例

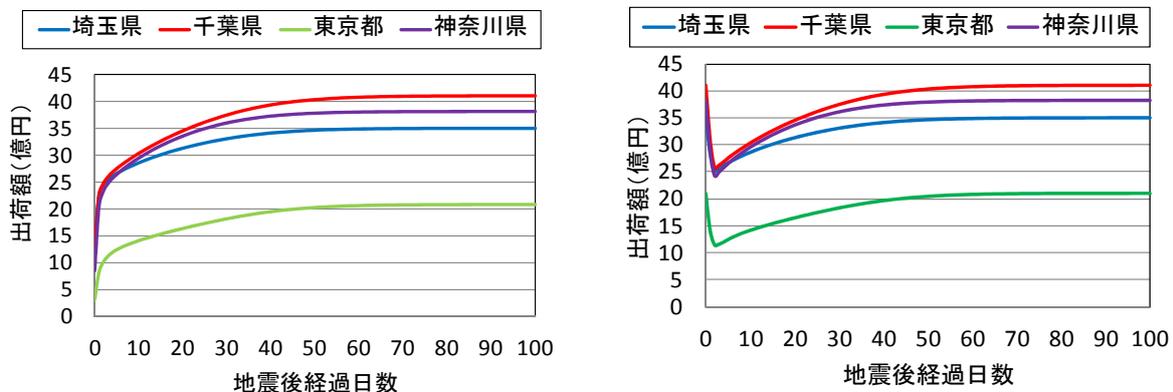
昨年度は、ライフライン機能停止の影響評価の事例として、東京都特別区の食料品製造業を対象とした検討結果を示した。本年度は1都3県に評価を拡張した結果をまとめて示す。従業者数分布、出荷額分布などの使用データや、従業者震度曝露人口の結果などについては文献³⁾を参照されたい。式(5)の R (バックアップが無い場合の各ライフラインの単独停止時の機能充足度) については、 $R_E=0.1$ 、 $R_W=0.2$ 、 $R_G=0.75$ である。バックアップ条件としては、前述の病院の事例を参考に実現可能性を考慮して、バックアップ持続時間の累積分布関数 $B(t)$ の平均値を $(E,W,G)=(3,1,0)$ および $(3,10,0)$ と2ケース設定し、変動係数はすべて30%とした。図12(a) (b)に停止パターン別機能充足度とその時間関数を示す。

式(6)の地震時機能時充足度に基づいて、式(7)の広域機能充足度の推移を求め、式(8)より求めた地震後出荷額の推移を図 13(a)~(c)に示す。平常時の日平均出荷額は、千葉、神奈川、埼玉、東京の順に多額で、それぞれ 41 億円、38 億円、35 億円、21 億円である。図 13(d)は、被害額の累積値を比較したものである。千葉、神奈川、東京、埼玉と順位が入れ替わるが、それぞれバックアップの効果を確認される。実際の評価にあたっては、供給系ライフラインの依存度と地震時停止期間を考慮したバックアップ体制構築が重要である。



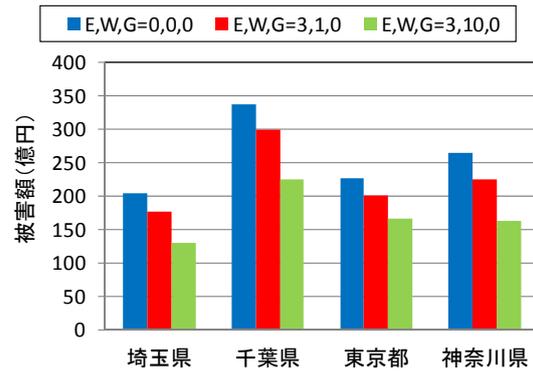
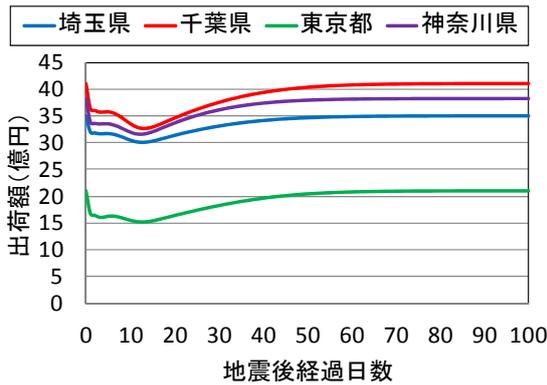
(a)機能充足度 (b) 機能充足度の時間関数 $(E,W,G)=(3,1,0)$

図 12 食料品製造業のライフライン停止パターン別機能充足度



(a) バックアップなし (b) バックアップあり $(E,W,G)=(3,1,0)$

図 13 食料品製造業における出荷額の推移と累積被害額 (単位: 億円) (続く)



(c) バックアップ増強(E,W,G)=(3,10,0)

(d) 累積被害額

図 13 食料品製造業における出荷額の推移と累積被害額（単位：億円）（続き）

e) 市民の生活支障に関する適用例

最後に、市民生活への影響評価の例として、下記の 3 種類の生活項目に関する例を示す。

- ・ Case 1 ($R_E=0.2$ 、 $R_W=0.1$ 、 $R_G=0.6$ ：炊事のイメージ)
- ・ Case 2 ($R_E=0.8$ 、 $R_W=0$ 、 $R_G=0.2$ ：入浴のイメージ)
- ・ Case 3 ($R_E=0.9$ 、 $R_W=0.1$ 、 $R_G=1$ ：用便のイメージ)

ライフライン被災時に一般家庭においては、生活項目ごとに代替行動をとること、備蓄量（懐中電灯、飲料水、卓上コンロ）と復旧見込みを勘案しながら乗り切ること、避難所で生活することなどの選択肢があり、ライフライン機能に対する直接的なバックアップ保有という考えはなじまない。そこで、地震発生後の 3 日間を自助努力で乗り切るべき期間と定め、提案手法でそれを表現するため、バックアップ持続時間の累積分布関数 $B(t)$ の平均値を $(E,W,G)=(3,3,3)$ 、変動係数 30% と設定した。

図 14 に生活支障（機能充足度の低下度合い）の累積値を示す。Case2 は水道・都市ガスへの依存度が高いため、この中で最も累積困窮度が大きく、影響緩和効果が小さい。Case1 は Case2 より電力依存度は高いものの都市ガス依存度がやや低いため、累積困窮度はやや低くなっている。Case3 では水道依存度のみが高いため、累積困窮度は最も低い。3 日間自活の影響緩和効果は、それぞれに認められるものの、困窮が生じることには変わりはない。

前述のように、災害拠点となる病院ではライフライン事業者による「優先復旧」が有力な対策となるが、全需要家対象の復旧では、供給エリア内でトレードオフが生じ、「優先復旧」は望めない。自活期間を長期化すれば影響はそれだけ緩和されるが、ライフライン復旧期間が自助努力の限界を超えるようであれば、やはり公助的手段として、ライフライン事業者側の初期被害軽減、早期復旧、応急供給などで補完することが不可欠であろう。

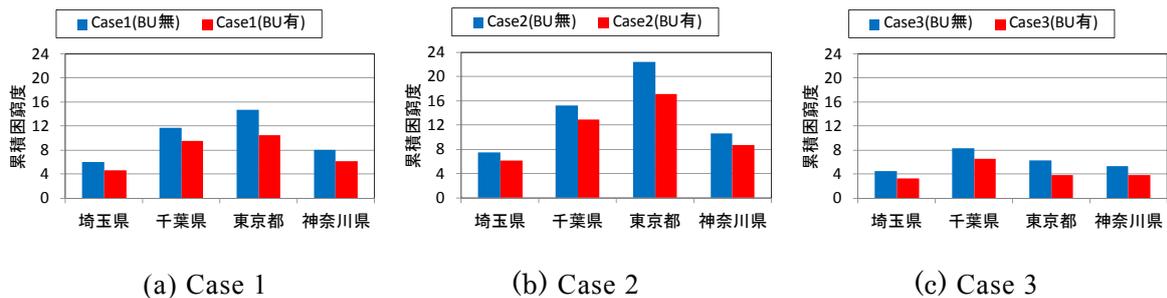


図 14 生活支障（機能充足度の低下度合い）の累積値（単位：日）

(c) 結論ならびに今後の課題

昨年度に引き続き、兵庫県南部地震の被災事例に基づいて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、ハード面での対策効果を反映できるように改良した。東日本大震災を対象としてモデルの妥当性を検証し、地震時ライフライン機能のマクロ評価として、おおむね妥当な結果が得られることを確認した。東京湾北部地震を対象としたシミュレーションにおいては、この検証結果を総合的に踏まえて、震度のばらつきを考慮しない震度曝露人口を用い、電力については従来モデル、都市ガスと上水道については改良モデルを適用することとした。

まず、1都3県別の震度曝露人口をモデルに適用して、ライフラインの供給可能人口を算出し、被災規模と復旧過程を概略的に把握した。次に、重要拠点施設としての災害拠点病院の地震時機能を対象としたケーススタディを行った。既往研究に基づいてモデルパラメータを定め、バックアップの有無とその増強パターンに加えて優先復旧が行われる場合の機能充足度をシナリオ化し、病院（ユーザー側）とライフライン事業者（供給側）の対策効果を定量的に示した。製造業（ユーザー側）を対象としたケーススタディとしては、1都3県の食料品製造業への影響評価の適用例を示した。広域機能充足度および地震後出荷額の推移を求め、バックアップの効果を定量化して、供給系ライフラインへの依存度と地震時停止期間を考慮したバックアップ体制構築が重要であることを指摘した。最後に、市民生活（ユーザー側）に関するケーススタディを行った。優先復旧の対象とはならないため、自助として3日間の自活期間を設定して生活支障を定量化し、ライフライン依存度の相違が及ぼす影響について考察した。自活による影響緩和効果は認められるものの、自助努力の限界を超える部分については、ライフライン事業者の公助的手段（初期被害軽減、早期復旧、応急供給など）による補完が不可欠であることを指摘した。

以上、多様なユーザー特性を考慮して、ライフライン機能低下が市民生活および社会経済活動に対して及ぼす影響を表す機能充足度を用いて社会機能の低下と復旧の時系列的展開をシナリオ化し、社会的インパクトを最小化するための都市機能防護戦略について検討し、学会発表を通じて提案することによって、本年度の業務目的を達成した。

これまでの成果から、ライフライン被害・復旧過程の分析モデルの適用性と有効性が示された。地震特性および対象地域のライフライン特性を、個別的要因として組み込んで高精度化することは今後の課題である。また、様々な社会機能の地震後の時系列的展開をシナリオ化するための手段として、地震時機能充足度評価のモデルが有効であることも示さ

れた。今後、高精度化に向けて、ライフライン依存度やバックアップ保有状況などのユーザー特性に関する調査と、東日本大震災関連のデータを活用した詳細な検証が必要である。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 能島暢呂：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～、地域安全学会論文集 No.10、2008.11、pp.137-146.
- 3) 能島暢呂：事業者と利用者の対策効果を考慮した供給系ライフラインの地震時機能停止の影響評価モデル、地域安全学会論文集 No.15、2011.11、pp.153-162.
- 4) (独)産業技術総合研究所：地震動マップ即時推定システム HP、
<http://qq.ghz.geogrid.org/QuickMap/about.html>
- 5) 能島暢呂・松岡昌志・小山真紀・原章裕：地震動マップ即時推定システム(QuiQuake)を用いた震度曝露人口の推定、第30回日本自然災害学会学術講演会講演概要集 2011.11、pp.187-188.
- 6) 松岡昌志・若松加寿江：九州の地形・地盤分類 250m メッシュマップを利用した 2005 年福岡県西方沖地震の地震動分布推定、日本地震工学会・大会－2007 梗概集、2007.11、pp.104-105.
- 7) 松岡昌志・若松加寿江・橋本光史：地形・地盤分類 250m メッシュマップに基づく液状化危険度の判定、日本地震工学会論文集、第 11 巻、第 2 号、2011、pp.20-39.
- 8) 総務省：平成 22 年国勢調査、人口等基本集計結果、主要統計表、第 1 表、
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>、2011.
- 9) 総務省統計局刊行、総務省統計研修所編集：第 60 回日本統計年鑑、第 10 章 エネルギー・水、10-9 都道府県別都市ガス事業ガス販売量及び普及率(平成 20 年度)、
<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/10.htm>、2011.
- 10) Inagaki, K. and Sadohara, S: Improvement of Local Ability under Lifeline Disruptions by Construction of Distributed Self-Sustaining Zone, -Based on Research of Disaster Base Hospitals in Tokyo Capital Area-, Journal of Disaster Research (in printing).
- 11) 能島暢呂：東日本大震災における供給系・通信系ライフラインの復旧概況、地域安全学会梗概集、No.28、pp.97-100、2011.5.

(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
バックアップ効果を考慮した地震時ライフライン機能停止の影響評	能島暢呂・岡田大知	第 66 回土木学会年次学術講演会	2011.9	国内

価（口頭）				
東日本大震災における供給系・通信系ライフラインの復旧概況（口頭）	能島暢呂	地域安全学会第28回研究発表会（春季）	2011.5	国内
東日本大震災における供給系ライフラインの被害と復旧（口頭）	能島暢呂	第3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	2011.12	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
事業者と利用者の対策効果を考慮した供給系ライフラインの地震時機能停止の影響評価モデル	能島暢呂	地域安全学会論文集 No.15	2011.11	国内
東日本大震災のライフライン復旧にみる災害対応オペレーション	能島暢呂	オペレーションズ・リサーチ	2011.12	国内

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