

### 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22年度業務目的

ライフラインの被害波及と復旧過程の分析モデルを用いて、ライフライン同時被害発生状況下における相互連関の影響を定量的に分析する。東京湾北部地震を対象として、首都圏のライフライン敷設状況と予測震度分布を重ね合わせ、複数ライフライン機能の初期被害および復旧過程の時系列的展開をシナリオ化する。これに基づいて、ライフラインに複合的に依存する社会経済活動への影響を評価するとともに、バックアップ等の対策効果に関するシミュレーションを行う。

##### (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22年度の成果

##### (a) 業務の要約

- ① ライフラインの被害波及と復旧過程の分析モデルを首都圏に適用してライフライン同時被害発生状況下における相互連関の影響を定量的に分析するため、各システムの地域特性や緊急対応策を考慮して改良を行った。事業者側の要因としては、上水道システムについては配水管の脆弱性の違いを反映し、都市ガス供給システムについてはSI値に基づく緊急供給遮断と復旧初動体制の改善を反映したモデルとした。
- ② ユーザー側の要因としては、バックアップ体制を考慮して、ライフライン停止状況下における各種社会機能の「機能充足度」を時間関数に拡張した。
- ③ 東京湾北部地震を対象として、首都圏のライフライン敷設状況と予測震度分布を重ね合わせて改良モデルを適用し、複数ライフライン機能の初期被害および復旧過程の時系列的展開をシナリオ化した。
- ④ 供給系ライフラインに複合的に依存する製造業の広域機能充足度を評価し、バックア

ップの影響緩和効果に関するシミュレーションを行い、ライフライン同時被害発生  
の状況下における相互連関の影響を定量的に分析した。

## (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①③）

1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づいて能島らは、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<sup>1)</sup>。  
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  
化したものであり、第二段階は復旧曲線として、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  $F(t|I)$  を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<sup>2)</sup>。

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

昨年度は、内閣府による東京湾北部地震の被害想定で示された供給系ライフラインの復  
旧曲線に整合するように、初期被害および機能停止期間を表すパラメータを調整してモデ  
ルを改良した。本年度は、現在の首都圏のライフラインの施設や地震対策の状況を反映し  
て、改めてモデルを改良する。

### a) 電力システム

地震後の停電は、比較的低震度でも広域で発生する。基幹施設の被害が軽微で発電・送  
電に問題がなければ、数時間単位で系統復旧による復電が進むと考えられる。一方、末端  
の配電線は架空設備であり、建物倒壊による支持物の折損、配電線や通信ケーブルの破断、  
あるいは火災による焼損などにより被害を受けた場合は、応急ケーブルが架設されるまで  
は停電が続く。この点では1995年兵庫県南部地震から大きな変化はないと考えられる。こ  
のため、電力供給システムについては兵庫県南部地震被災事例に基づくモデル（以下、従  
来モデルと呼ぶ）を首都圏にも適用することとした。

### b) 上水道システム

一般に地中埋設管の被害予測では、地震の揺れの強さにより定められる標準被害率に、  
管種（継手のタイプを含む）、管径、地盤条件、液状化に関する補正係数を乗じて被害率が  
求められ、さらに管路延長を乗じて被害箇所数が求められる。本プロジェクト初年度の平  
成19年度には、水道事業者の埋設管の相対的な被害の受けやすさを「脆弱性指数」で表す  
ことを提案した<sup>3)</sup>。本年度はこれを用いて、首都圏における配水管の被害の受けやすさを  
考慮して従来モデルを改良する。

地中埋設管の脆弱性指数  $\alpha$  は、管径係数  $\alpha_d$  と管種係数  $\alpha_p$  を管種・管径別の敷設延長距離  
 $L$  で加重平均することにより求められる。震災時の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  $\alpha^* = 0.446$  である。これと評価対象  
地域の脆弱性指数  $\hat{\alpha}$  との比率  $\gamma = \hat{\alpha} / \alpha^*$  をモデル改良に用いる<sup>4)</sup>。

地中埋設管の標準被害率  $R_f$  の地震動強度指標  $X$  には最大加速度や最大速度が用いられ、  
 $R_f = c(X - g)^d$  と表される（ $c, d, g$  は係数）。震度  $I_0$  と  $X$  との関係は一般に  $I_0 = a \log_{10} X + b$

( $a, b$  は係数) と表されるので、標準被害率  $R_f$  は震度の関数として表される。ここで上述の脆弱性指数は、被害率 (および被害箇所数) に比例的に作用するパラメータである。従って図 1 に示すように、脆弱性指数の比率  $\gamma = \hat{\alpha}/\alpha^*$  で表される脆弱性指数の違いは、標準被害率曲線を介して、従来モデルにおいて適用される震度の差分と一対一で対応づけることができる。そこで「脆弱性の違いを考慮して従来モデルに当てはめる上での震度」として等価震度  $I_{eq}$  を定義すると、等価震度  $I_{eq}$  は震度  $I_0$  から次式により評価できる。

$$I_{eq} = \begin{cases} I_0 & ; I_0 > a \log_{10} g + b \\ a \log_{10} \left\{ \gamma^{1/d} \cdot 10^{\left(\frac{I_0-b}{a}\right)} + g \left(1 - \gamma^{1/d}\right) \right\} + b & ; I_0 \leq a \log_{10} g + b \end{cases} \quad (2)$$

ここで、兵庫県南部地震の管路被害の分析に基づいて最大加速度を指標として求められた標準被害率の予測式<sup>5)</sup>  $R_f = 4.11 \times 10^{-9} \times A_{\max}^{2.92}$  ( $A_{\max} \leq 800\text{gal}$ ) と最大加速度から震度への変換式<sup>6)</sup>  $I_0 = 1.89 \cdot \log_{10} A_{\max} + 0.59$ を用いると、等価震度  $I_{eq}$  は次式で求められる。

$$I_{eq} = I_0 + 0.647 \cdot \log_{10} \frac{\hat{\alpha}}{\alpha^*} \quad (3)$$

これより、対象地域の脆弱性指数  $\hat{\alpha}$  を算出し、等価震度  $I_{eq}$  を従来モデルに当てはめれば、水道埋設管の脆弱性を考慮した被害・復旧予測が可能となる。

図 2(a) に東京湾北部地震の推定震度分布を示し、首都圏の各水道事業者の脆弱性指数  $\hat{\alpha}$  と阪神地域との脆弱性指数の比率  $\gamma$  に基づいて式(3)より算出した等価震度  $I_{eq}$  の分布を図 2(b) に、それらの差を図 2(c) に示す。東京都、千葉市、さいたま市、川崎市などの大都市部では脆弱性指数が比較的低く、等価震度  $I_{eq}$  も推定震度  $I_0$  よりも低い値となる。逆に、横浜市や千葉県沿岸部の市町村などの都心部から離れた地域でも、脆弱性指数が比較的高く、等価震度  $I_{eq}$  も推定震度  $I_0$  よりも高い値となる。

東京都水道局の供給エリアにおける等価震度  $I_{eq}$  を用いて作成した供給率曲線を図 3 に示す。従来モデルを破線、改良モデルを実線で示している。東京都の地中埋設管における脆弱性指数は 0.248 と被災時の阪神地域の脆弱性指数より小さいため、等価震度  $I_{eq}$  は本来の推定震度よりマイナス 0.17 となる。そのため改良モデルの方が従来モデルよりも、地震発生直後における供給率が高くなっており、復旧所要時間も早まっていることがわかる。

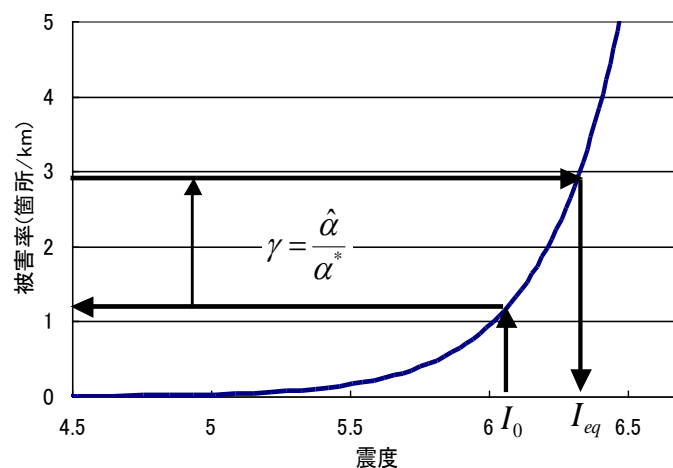


図 1 補正係数による等価震度算出の概念図

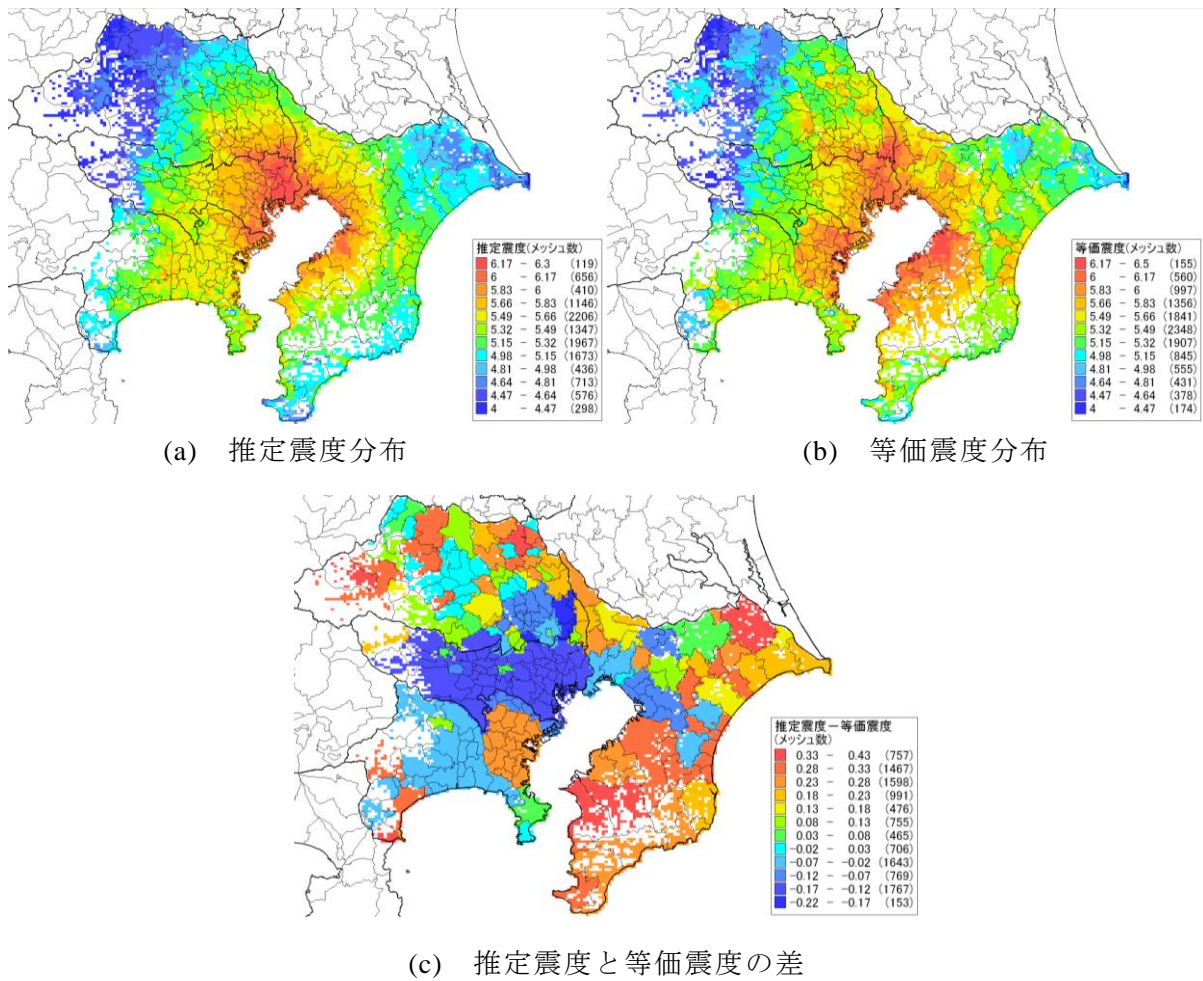


図2 東京湾北部地震推定震度分布図と等価震度変換後の推定震度分布

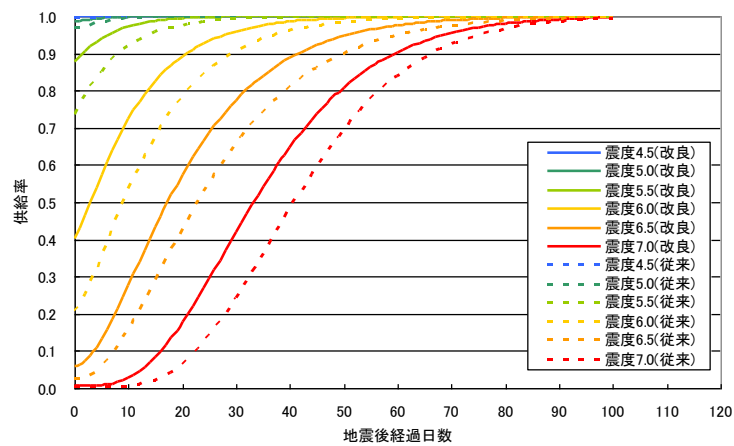


図3 東京都水道局供給エリアにおける水道の供給率曲線

### c) 都市ガス供給システム

ガス供給システムでは、ガス漏洩や爆発・火災などの二次災害防止のため、供給区域内に設置されたSIセンサーの観測値に応じてガス供給停止を行う措置をとっている。従って、

揺れの予測に基づく地震直後のガス供給停止予測は妥当と考えられる。しかし、従来モデル<sup>1)</sup>ではライフライン機能停止の有無を二項反応と捉え、震度  $I$  をパラメータとした停止確率  $p(I)$  をロジットモデルでモデル化し、経験的に平均 5.86、標準偏差 0.42 と定めていた。本研究では予測震度を SI 値に変換し、ガス停止判断基準に準じてガス停止確率を定める。

ガス地震対策検討委員会<sup>7)</sup>では、既往地震におけるガス導管の被災事例の分析結果に基づいて、観測された SI 値が 60 kine 以上になるか、ガス送出量に大変動があった場合には、即時にガス供給を停止（即時供給停止判断）、30～60 kine の場合は、ガス導管や建物、道路などの被害状況に応じてガス供給を停止（緊急供給停止判断）としている。SI 値から計測震度への変換式<sup>6)</sup>

$$I = 2.34 + 1.96 \cdot \log_{10}(SI) \quad (\sigma = 0.174) \quad (4)$$

より SI 値 30～60 kine 相当の計測震度を求めると 5.24～5.83 となる。一方、東京ガスでは SI 値 40～50 kine を観測した場合に地区ガバナの遮断装置が作動しガス供給を停止する<sup>8)</sup>。式(4)によるとこれは計測震度 5.48～5.67 に相当し、0.2 程度の幅がある。一方、震度に対する機能停止確率のばらつきについては、従来モデルでは標準偏差 0.42 としている。供給停止判断が行われる場合のばらつきの要因としては、ブロック内の複数の観測 SI 値を組み合わせることで総合的判断が行われることや、変換式(4)の予測誤差が考えられるが、いずれにせよ従来モデルの標準偏差 0.424 より小さくなると考えられる。本研究では変換式(4)のばらつきを考慮することとし、標準偏差 0.174 を採用することとした。

50%停止確率相当の計測震度を 5.24～5.83 とした機能的フラジリティ関数と、従来モデルを図 4 に示す。本研究では、東京ガスで自動供給遮断装置が作動する SI 値 40～50 kine の中央値 45 kine に相当する計測震度 5.58 を 50%停止確率とした機能的フラジリティ関数を採用する。このため震度 6 弱以上になると、従来モデルよりも急激に停止確率が高くなっている。

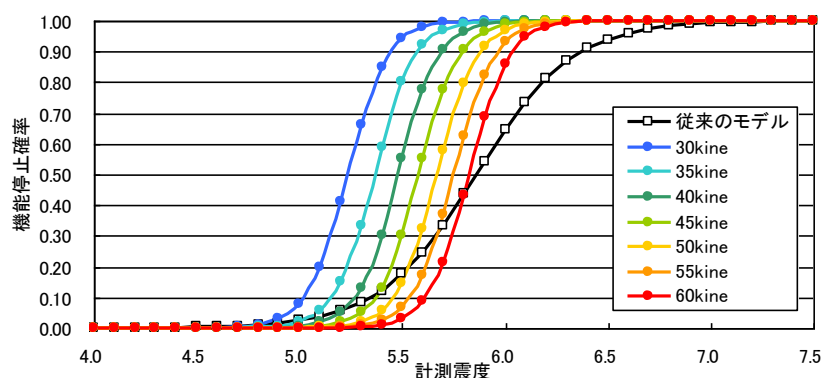


図 4 SI 値に基づく改良を行った機能的フラジリティ関数

初動体制確立の面でも大幅に改善されているため、復旧曲線の立ち上がりを早期化する方向で従来モデルを改良する。兵庫県南部地震では、供給ブロック遮断および復旧セクターの形成など初動体制の確立に時間を要し、大阪ガス供給エリアにおける復旧開始は地震発生 6 日後であった。従来モデルではこれを反映して、地震後数日間は復旧が全く進まな

い期間が存在する。しかし現在では復旧ブロック・復旧セクターの事前整備が進み、緊急対応体制も改善されており、復旧はかなり早期化されると考えられる。改良モデルにおいては、地震発生後 10 日間の復旧未着手の期間を解消できることを仮定して、従来モデルにおける地震後 11 日目を 1 日目と換算することで補正を行うこととした。図 5 に供給率曲線を示す。改良モデル（実線）では計測震度に対する停止確率の勾配が急であるため、地震直後の供給率は計測震度 5.5～6.0 で急激に落ち込んでいる。しかし復旧所要日数を 10 日間早期化しているため、供給率の回復はやや早まっている。

東京湾北部地震を対象として、東京都水道局の供給エリアで算定された供給可能人口を図 6 に示す。地震発生直後の供給可能人口は、改良モデル（実線）では従来モデル（破線）に比べて水道では増加している。都市ガスでは逆に減少しているが復旧はやや早い。

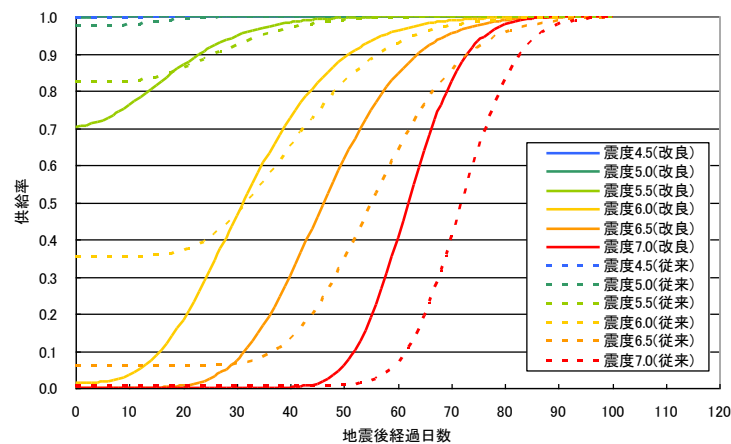


図 5 都市ガスの供給率曲線

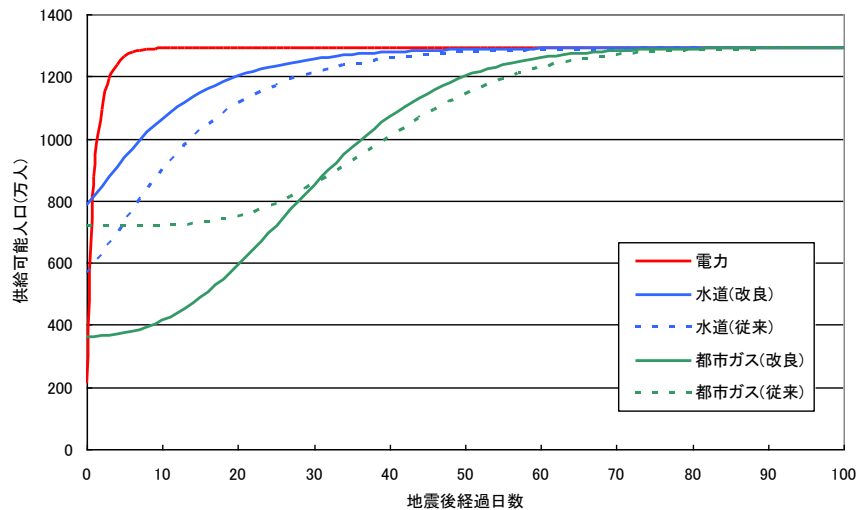


図 6 東京都水道局供給エリアにおけるライフライン供給可能人口

## 2) バックアップを考慮した地震時機能充足度の時間関数（業務の要約②③）

### a) ライフライン停止パターン別機能充足度

地震時のライフライン供給停止が各種産業に与える影響を推計するため、米国のATC-25ではライフライン重要度係数(Lifeline Importance Factor)が導入されている<sup>9)</sup>。Chang et al.<sup>10)</sup>は1からライフライン重要度係数を引いた値をRF(Resiliency Factor)として定義しており、白谷・能島<sup>11)</sup>はこれを「機能充足度」として用いている。「機能充足度」とは、ライフライン停止により低下した各業種の生産活動水準を0~1の値で基準化したものであり、0は全く活動できない水準、1は通常的水準を示す。

供給系ライフラインの停止パターンは $2^3=8$ 通り存在しているので、各パターンの業種*i*の機能充足度を $R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G)$ で表す<sup>11)</sup>。ただし $\delta$ は供給可能(1)・供給不可能(0)を表す二値変数であり、Eは電力、Wは水道、Gは都市ガスを表す。例えば $R(1,0,0)$ は電力のみ停止している場合、 $R(1,1,0)$ は電力と水道が停止している場合の機能充足度を表す。ここで、3種の供給系ライフラインのうち1つのみ供給停止している場合には、ATC-25の重要度係数を1から引いた値を機能充足度とする。2つ以上供給停止している場合には、それぞれの供給系ライフラインが単独で停止している場合の機能充足度の値を掛け合わせて評価することとする。図7(a)に食料品製造業の停止パターン別機能充足度の例を示す。

#### b) バックアップを考慮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

供給系ライフラインのユーザーは、ある程度の時間であれば、バックアップ機能等によりライフライン停止を許容することができ、機能充足度は徐々に低下するものと考えられる。ここでは、こうした影響緩和効果を考慮し、機能充足度を時間関数に拡張する。バックアップの有無やその持続時間等については各企業個別の要因であり、対象地域内の備えの程度の多様性(ばらつき)について、アンケート調査などを通じて実態把握することが望ましい。しかし網羅的な把握は困難であるため、本研究では、対象地域内のバックアップの持続時間に関する確率分布を用いた評価の枠組みを提示する。

バックアップの持続時間に関する非超過確率、すなわち累積分布関数を $B(t)$ で表す。これを用いて、供給系ライフライン停止パターン別機能充足度を導入し、各業種の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 $A_k(t)$ を次式のように定義する。

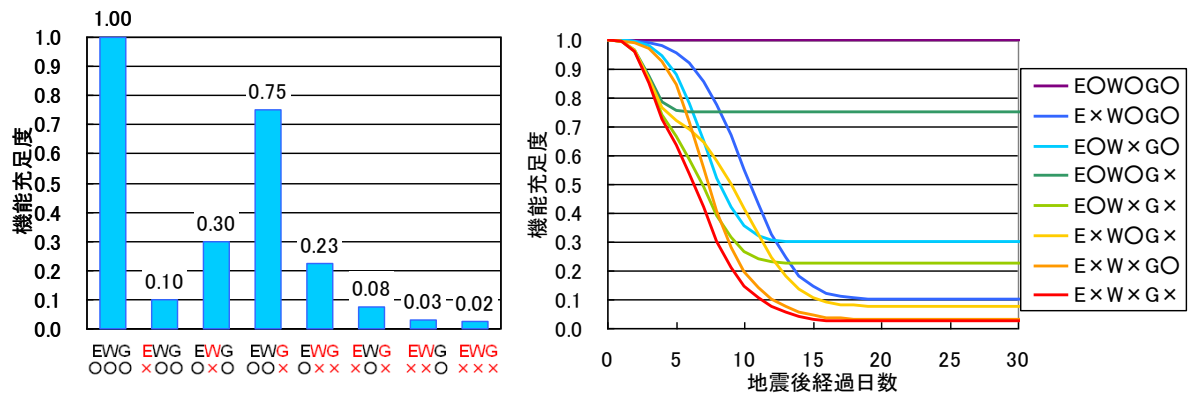
$$A_k(t) = 1 - (1 - R_k) \cdot B_k(t) \quad (5)$$

ここで、 $R_k$ は各ライフラインの単独停止時の機能充足度(バックアップが無い場合)、 $k$ は電力(E)、水道(W)、都市ガス(G)を表す添字である。これを用いて、各業種における供給系ライフライン停止パターン別機能充足度の時間関数 $R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t)$ を次式で定義する。

$$R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t) = \prod_{k=E,W,G} A_k(t)^{1-\delta_k} \quad (6)$$

これは、停止している供給系ライフラインに関する $A_k(t)$ を、各時間断面で掛け合わせたものであり、バックアップを考慮せず時間関数としていない機能充足度と同様の扱いである。例として、食料品製造業における停止パターン別機能充足度の時間関数を図7(b)に示す。効果を目視しやすくするため、バックアップの持続時間の累積分布関数 $B(t)$ を正規分布とし、その平均値を電力30日、水道20日、都市ガス10日(以下、これを(E,W,G)=(30,20,10)と表す)、変動係数0.3とした。地震直後の値は1で、時間の経過とともに図7(a)に示した

停止パターン別機能充足度の値に収束する。



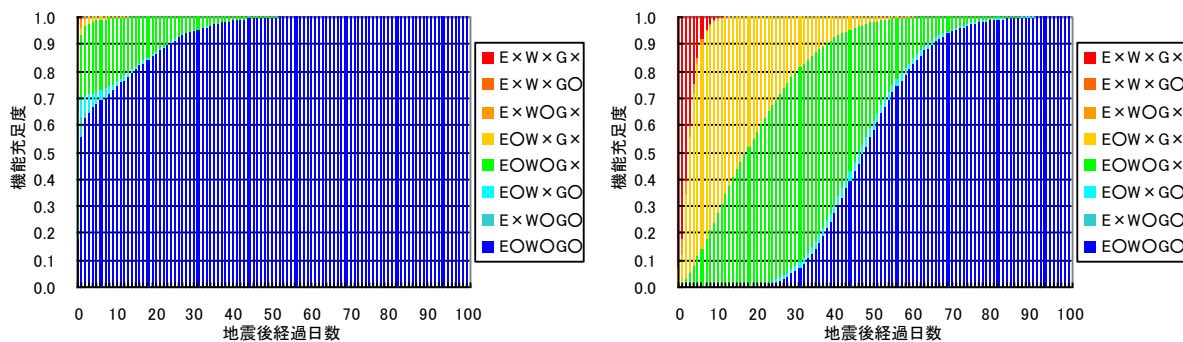
(a)機能充足度 (b)機能充足度の時間関数  
図7 食料品製造業のライフライン停止パターン別機能充足度

### c) ライフライン停止パターンの生起確率分布の時間的推移

2<sup>3</sup>通りの停止パターンの時系列変化を、供給系ライフライン機能被害予測モデルを利用してモデル化する。式(1)で表される供給率 $P_k(I,t)$ を供給可能である確率として扱えば、各ライフラインの復旧可能性を独立と仮定すれば、震度 $I$ の場合の停止パターン $(\delta_E, \delta_W, \delta_G)$ の生起確率 $Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t)$ は次式により求められる<sup>11)</sup>。

$$Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t) = \prod_{k=E,W,G} P_k(I, t)^{\delta_k} \cdot \{1 - P_k(I, t)\}^{1-\delta_k} \quad (7)$$

震度 $I$ 、時間 $t$ の条件下において、停止パターンに応じて掛け合わせたものである。例として、図8に、計測震度5.5と6.5における供給系ライフライン停止パターン生起確率の時間推移を示す。このモデルによって、ライフラインの停止パターンの初期確率分布が震度 $I$ により規定され、経過時間 $t$ とともに確率分布が変化していく様子が定量的に示される。



(a)計測震度 5.5 (b)計測震度 6.5  
図8 供給系ライフラインの停止パターン生起確率分布の時間的推移

### d) ライフライン停止パターン別機能充足度の時間関数を考慮した地震時機能充足度

ライフライン停止パターン別の機能充足度の時間関数 $R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t)$ を、震度 $I$ における停止パターン生起確率の時系列 $Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t)$ で加重平均することにより、業種 $i$ の地震時機能充足度 $\bar{R}_i(I, t)$ を次式で評価する。



$$\bar{R}_i(I,t) = \sum_{k=E,W,G} R_i(\delta_E, \delta_W, \delta_G; t) \cdot Q(\delta_E, \delta_W, \delta_G; I, t) \quad (8)$$

地震時機能充足度の時間的推移の例として、食料品製造業を対象とした結果を図9に示す。まず図9(a)はバックアップを保有していない場合の地震時機能充足度である。地震発生直後からの機能充足度の急速な回復は電力復旧の効果であり、それ以降は水道、都市ガスの復旧による効果である。累積困窮度（ $1 - \bar{R}_i(I,t)$ の積分値）は、震度4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0に対して、それぞれ0.1, 0.3, 2.8, 13.1, 24.1, 36.1となり、また機能充足度の最小値は、同順に0.95, 0.75, 0.30, 0.07, 0.03, 0.02となった。

次に図9(b)は、バックアップの持続時間に関する累積分布関数を図7と同じ設定とした場合の地震時機能充足度である。計測震度が高いほど機能充足度の低下が大きいことは同じであるが、バックアップの効果により、地震直後の機能充足度の低下が緩和されていることがわかる。累積困窮度は計測震度4.5～7.0の順にそれぞれ0, 0, 1.0, 7.1, 16.9, 28.0となり、また機能充足度の最小値は、計測震度4.5～7.0の順に1.0, 1.0, 0.95, 0.76, 0.62, 0.45となった。このようにバックアップ保有によってライフライン停止の影響が緩和されている。

図10は、計測震度6.5における食料品製造業の機能充足度について、バックアップ持続時間の平均値を(E,W,G)=(30,20,10)、(30,10,20)、(20,30,10)、(20,10,30)、(10,30,20)、(10,20,30)と変化させた機能充足度の比較である。ここに示したケースは、あくまでも仮想的なものである。実際にはバックアップ保有量やコストに関する制約を考慮したうえで、最適なバックアップ戦略を検討する必要がある。

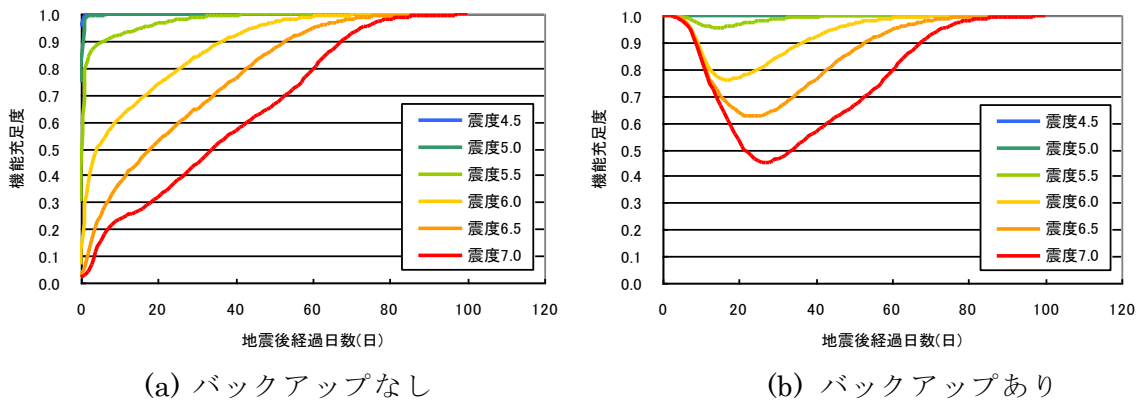


図9 食料品製造業における地震時機能充足度（計測震度4.5～7.0）

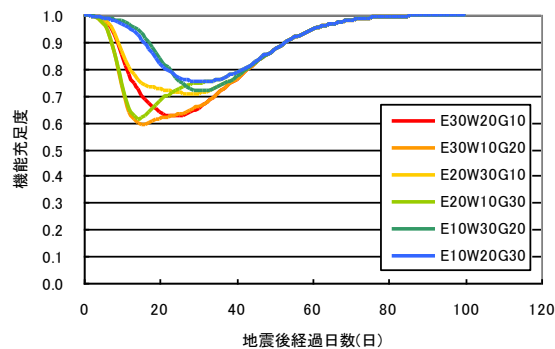
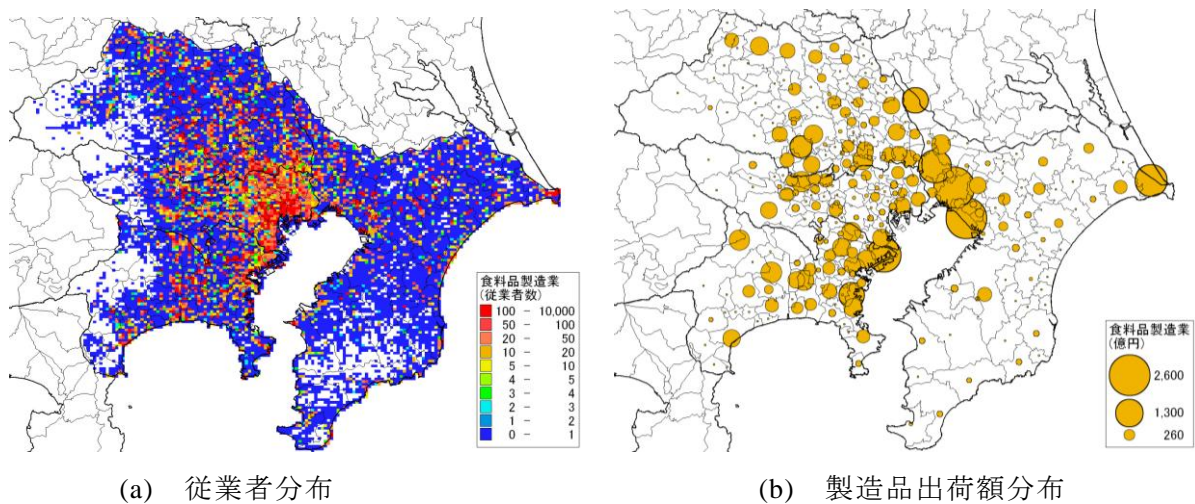


図10 食料品製造業における地震時機能充足度（バックアップあり、計測震度6.5）

### 3) 首都圏の製造業を対象とした地震時影響評価（業務の要約③④）

改良したライフライン機能被害予測モデルを用いて、首都圏の製造業を対象としてライフライン機能停止の影響評価を行い、バックアップによる被害軽減効果について検討する。

製造業に関するデータとしては、平成 18 年度事業所・企業統計調査<sup>12)</sup>による基準地域メッシュ（日本測地系）の従業者数データと、平成 20 年度工業統計調査<sup>13)</sup>による製造品出荷額（市区町村編）データを用いる。図 11 に 1 都 3 県（東京都、千葉県、埼玉県、神奈川県）における食料品製造業の従業者数の分布と製造品出荷額の分布を示す。従業者分布と東京湾北部地震推定震度分布を重ねあわせ、製造業を対象とした震度曝露人口を算出した。図 12 に食料品製造業の震度曝露人口  $PEX(I)$  を都県別に示す。従業者数が東京都に特に多く、震度 6 強以上（計測震度 6.0 以上）に多数の従業者が曝されると予想される。



(a) 従業者分布 (b) 製造品出荷額分布

図 11 従業者と製造品出荷額の地域分布（食料品製造業）

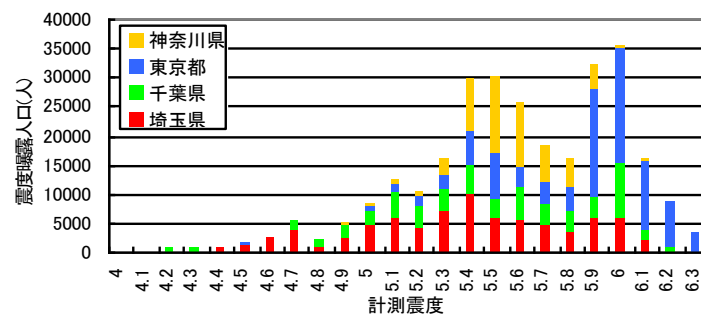


図 12 従業者の都県別震度曝露人口（食料品製造業）

地域全体におけるライフライン途絶の影響を評価するために、広域的な震度と産業の分布を考慮して、地震発生後における生産活動の活動水準を「広域機能充足度」<sup>11)</sup>として評価する。業種  $i$  における震度  $I$  の機能充足度  $\overline{R}_i(I, t)$  を、図 12 に示した当該業種  $i$  の従業者

の震度  $I$  の曝露人口  $PEX_i(I)$  で加重平均することによって、次式により地震時の広域機能充足度  $S_i(t)$  を 0~1 の値で基準化して評価する<sup>11)</sup>。

$$S_i(t) = \frac{\sum_I PEX_i(I) \cdot \bar{R}_i(I, t)}{\sum_I PEX_i(I)} \quad (9)$$

さらに経済的影響を推計するため、業種  $i$  の製造品日平均出荷額を  $PR_i$  として、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<sup>11)</sup>。

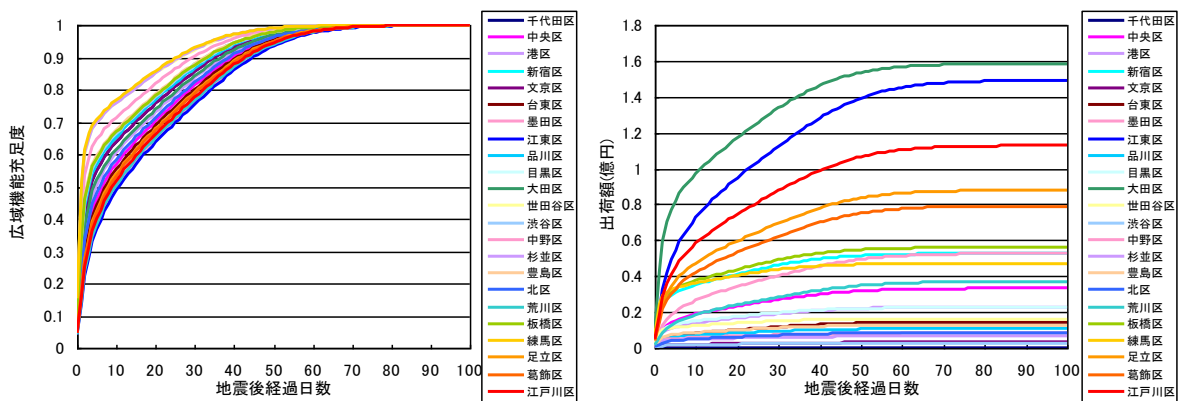
$$EC_i(t) = S_i(t) \cdot PR_i = \frac{\sum_I PEX_i(I) \cdot \bar{R}_i(I, t)}{\sum_I PEX_i(I)} \cdot PR_i \quad (10)$$

東京都特別区の食料品製造業を対象として、バックアップがない場合を想定した広域機能充足度の推移を図 13(a)に、地震後出荷額の推移を図 13(b)に示す。また図 14 は、被害額と通常時の出荷額に換算した日数を比較したものである。墨田区、江東区、荒川区、足立区、葛飾区、江戸川区などで比較的被害が大きく、世田谷区、杉並区、練馬区などで被害が小さいと予想される。

次に、バックアップ保有による被害軽減効果について検討するため、各ライフラインバックアップ保有に関する条件を図 7 および図 9 と同じく  $(E, W, G) = (30, 20, 10)$  とした結果を図 15 に示す。バックアップのない図 13 と比べると地震発生直後の機能充足度の低下が緩和されている。

バックアップ保有に関する条件を図 10 と同じく  $(E, W, G) = (30, 20, 10)$ 、 $(30, 10, 20)$ 、 $(20, 30, 10)$ 、 $(20, 10, 30)$ 、 $(10, 30, 20)$ 、 $(10, 20, 30)$  と変化させた場合を比較する。図 16 は、被害額の通常時換算日数について、バックアップを考慮しない場合と考慮した場合との差を示したものである。各機能の復旧の早さとの関係で、バックアップの保有量が都市ガス、水道、電力の順に長いほど被害軽減効果が高くなっている。

今回の推計では、電力、水道、都市ガスのバックアップを仮想的な値で評価したが、各企業において供給系ライフラインの依存度と、地震時における予想停止期間の兼ね合いを考慮して、適切なバックアップ規模を検討することが重要であると考えられる。



(a) 広域機能充足度

(b) 出荷額

図 13 食料品製造業における広域機能充足度および出荷額の推移 (バックアップなし)

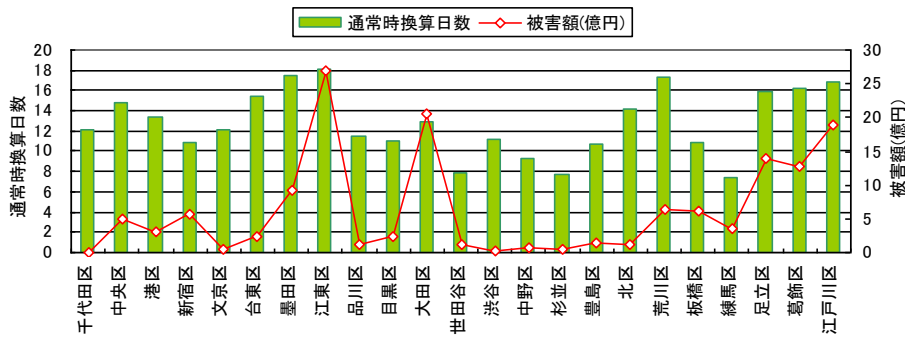
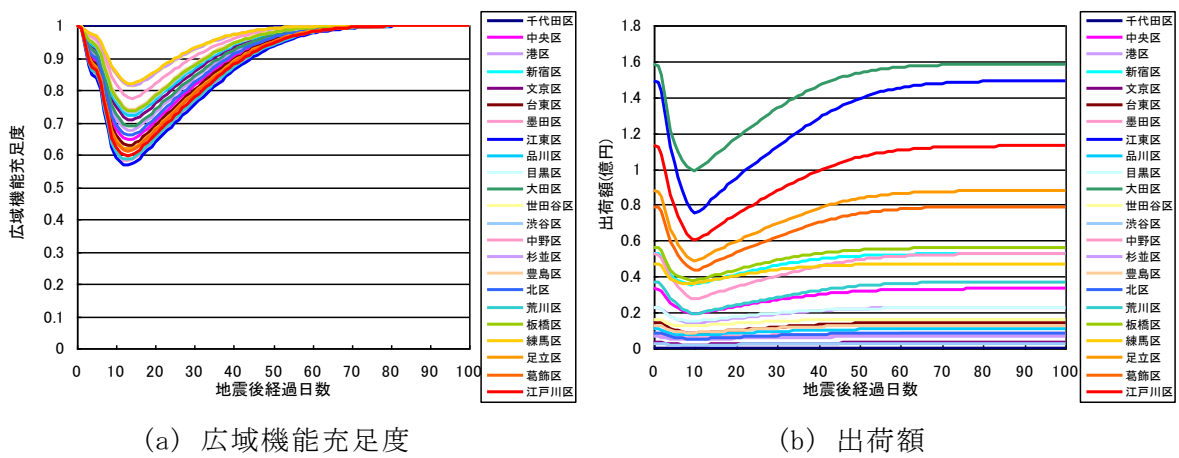


図 14 食料品製造業における被害額と通常時換算日数（バックアップなし）



(a) 広域機能充足度

(b) 出荷額

図 15 食料品製造業における広域機能充足度および出荷額の推移（バックアップあり）

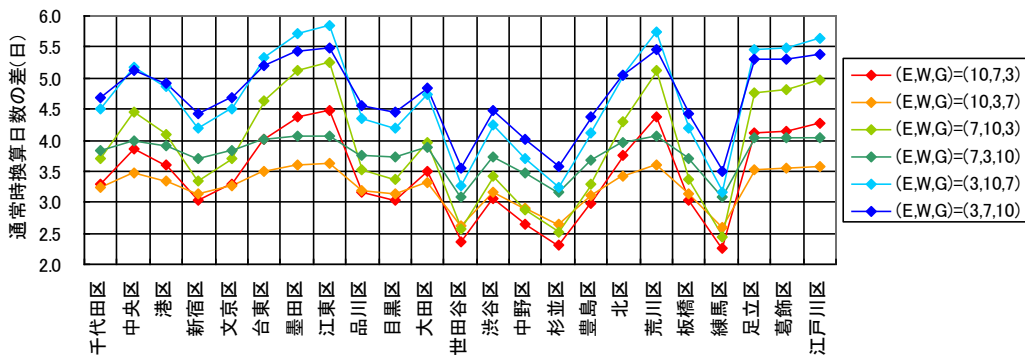


図 16 食料品製造業におけるバックアップ保有パターン別に見た影響緩和効果（通常時換算日数の差で表示）

### (c) 結論ならびに今後の課題

兵庫県南部地震の被災事例に基づくライフライン地震時機能予測モデルをもとに、昨年度は内閣府による東京湾北部地震のライフライン復旧予測と整合するようにモデルを改良した。しかし首都圏の各システム特性を直接的に反映したものではなく、また、様々なラ

ライフライン相互連関の効果が希薄になっている可能性が指摘され、課題を残していた。

そこで本年度は、各システムの地域特性や緊急対応策を考慮して改めて改良を行うこととした。まず事業者側の要因として、上水道システムについては、震災時の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配水管の脆弱性と、首都圏の脆弱性の違いを考慮して、脆弱性指数に基づく改良を行った。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ー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。なお電力供給システムについては変更なしとした。ユーザー側の要因としては、バックアップ保有による影響緩和効果を考慮するため、バックアップの持続時間に関する確率分布を導入し、ライフライン停止状況下における各業種の「機能充足度」を時間関数に拡張した。

次に、改良したライフライン機能被害予測モデルを東京湾北部地震の被害予測に適用し、首都圏の製造業を対象としてライフライン機能停止の影響評価を行った。まず複数ライフライン機能の初期被害および復旧過程の時系列的展開をシナリオ化した。さらに、事業所・企業統計調査による従業者数分布と東京湾北部地震の推定震度分布を重ねあわせ、東京都特別区の製造業を対象とした震度曝露人口を算出し、供給系ライフラインに複合的に依存する製造業の広域機能充足度を評価した。また、工業統計調査による製造品出荷額データを用いて出荷額の地震後推移を評価した。さらに、バックアップを保有しない場合と保有する場合について比較を行い、バックアップの影響緩和効果を確認した。

本年度は東京都特別区を対象としたが、今後の課題としては、首都圏全体のシステム特性を考慮して同様の手法を展開し、広域評価を行う必要がある。また、バックアップ保有に関するパラメータについては、供給系ライフラインへの依存度と地震時の予想停止期間の兼ね合いを考慮して適切に設定する必要がある。これに関しては、東日本大震災の被害事例が参考になると考えられる。

#### (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・杉戸真太・鈴木康夫・佐藤寛泰：被災事例に基づく供給系ライフラインの地震時機能停止と復旧過程の予測 — 想定東海・東南海地震を対象として —、地域安全学会梗概集、No.13、2003.11、pp.101-104.
- 3) 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.
- 4) 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、2003.9、I-349.
- 5) (財)水道技術研究センター：地震による水道被害の予測及び探査に関する技術開発研究報告書(厚生科学研究費補助による共同研究)第 1 巻、pp.1-23、2000.3.
- 6) 童華南・山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係、生産研究、

Vol.48、No.11、pp.31-34、1996.11.

- 7) 資源エネルギー庁監修：ガス地震対策検討委員会報告書 ガス地震対策検討会報告書、1996.3.
- 8) 猪股渉・山本貞明：都市ガス事業における事業継続と地震防災対策、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論文集、pp.54-59、2009.12.
- 9) Applied Technology Council：Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States、ATC-25, Redwood City, California, 1991.
- 10) S.E.Chang, H.A.seligson and R.T Eguchi：Estimation of the Economic Impact of Multiple Lifeline Disruption: Memphis Light, Gas and Water Division Case Study, Technical Report NCEER-96-0011, August 16, 1996.
- 11) 白谷啓行・能島暢呂・杉戸真太・佐藤慶昇：供給系ライフラインの地震時機能停止が製造業に与える影響の評価モデル、第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集、2006.11、paper No.283、pp.1238-1241 (on CD-ROM).
- 12) (財) 統計情報開発センターホームページ：平成 18 年度事業所・企業統計調査の提供、<http://www.sinfonica.or.jp/datalist/index.html>
- 13) (独) 統計センターホームページ：工業統計調査 平成 20 年確報、[http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?\\_toGL08020103\\_&listID=000001063747&requestSender=dsearch](http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000001063747&requestSender=dsearch)

(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
Probabilistic Assessment of Coincidence of Earthquake Damage to Collocated Lifelines	Nojima, N.	Proc. of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthq. Eng., Tronto, Canada	July 2010	国際

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
なし				

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 18 年 8 月 14 日に発生した首都圏大停電では 1 時間程度の停電であったが、平成 18 年にはその影響を調査し、停電が長期化した場合にはライフライン相互連関が顕在化する可能性があったことを指摘した。今回の東日本大震災では 3 時間程度の輪番停電という形で、東京電力管内で計画停電が連日実施され、首都圏の市民生活と社会経済活動にも大きな混乱と影響を及ぼすとともに、ライフライン相互連関の問題が顕在化した。首都圏直下地震への対策にも大きな教訓を残すものである。そこで平成 23 年度には、東日本大震災におけるライフライン被害と復旧のオペレーションのあり方が、ライフライン・システム間に及ぼした影響を調査する計画である。

また、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引き続いて改善し、地域固有のライフライン脆弱性、ハード面での対策効果、バックアップ体制を反映できるようにして、予測の高精度化を図る。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する。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する。

本年度は東京都特別区を対象としたが、平成 23 年度は、首都圏全体のシステム特性を考慮し、その他の地域についても同様の手法を展開し、広域評価を行う。また本年度は、電力、水道、都市ガスのバックアップ保有に関するパラメータを仮想的な値として与えたが、上述の東日本大震災の検討結果を踏まえたうえで、各企業における供給系ライフラインの依存度と、地震時における予想停止期間の兼ね合いを考慮して、適切なバックアップ規模のあり方を検討する。以上の検討を通じて、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提案する。