

機能的フラジリティ関数による都市ガスの地震時供給停止人口の推計

Estimation of Population Affected by City Gas Supply Disruption Using Seismic Functional Fragility Function

能島 暢呂¹, 加藤 宏紀¹

Nobuoto NOJIMA¹ and Hiroki KATO¹

¹ 岐阜大学工学部 社会基盤工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

For the purpose of estimation of population affected by city gas supply disruption in an earthquake disaster, vulnerability factor of low-pressure gas pipelines is defined on the basis of non-earthquake resistant ratio. A functional fragility function in terms of shaking intensity is defined as a logit model with 50% exceedance level at SI=65kine considering the vulnerability factor and standard gas shutoff criteria. A grid cell dataset on population served by city gas supply is also developed based on penetration ratio inside/outside of DID. Observed and estimated population of disruption are compared for three major earthquake disasters during 2004-2011. Precision of estimation is approximately within a factor of two except for some extreme cases.

Keywords: city gas supply, emergency shutoff criteria, SI, disruption of service, functional fragility function, served population distribution, earthquake disaster

1. はじめに

都市ガスは、市民生活や社会経済・生産活動を支えるクリーンなエネルギーとして現代社会で重要な役割を果たしている。しかし、地震時に都市ガス供給が停止すると、電気や水道と比べて供給再開までに長期間を要する傾向にある。将来の地震による都市ガス供給停止を的確に予測することは、停止に伴う影響評価や、被害防止・軽減方策の検討、復旧計画の策定^{補注(1)}などに欠かせないことである。

都市ガス供給システムでは、ガス漏洩に伴う二次災害防止のため、地震観測値に応じてガス供給停止を行う措置がとられる。1995年兵庫県南部地震の後、ガス地震対策検討委員会¹⁾の検討結果に基づいて、従来の「緊急供給停止判断」に加えて、SI値が60kine以上の場合または送出量や圧力の大変動により供給継続が困難な場合に即時に供給停止措置をとる「即時供給停止判断」が導入された。これを基本として各都市ガス事業者により保安規程が改訂された。

「新潟県中越地震ガス地震対策調査検討会報告書²⁾」では「即時供給停止判断・緊急供給停止判断」という用語が「第1次・第2次緊急停止判断」に変更され、供給停止単位として「単位ブロック（面積50km²、5万戸程度）」とそれらを一括供給停止する「統合ブロック（面積200km²、20万戸程度）」が定義された³⁾。また60kineを少し上回る場合でも、被害が軽微であることが確認された場合には、第2次緊急停止判断（情報収集の状況に

応じて供給停止）へ移行する特例措置が設けられた³⁾。

「新潟県中越地震における都市ガス事業・施設に関する検討会報告書⁴⁾」では「供給停止判断基準値の妥当性を検証するための有効なデータが少なかったことから第1次緊急停止判断値の60kineは引き続き暫定値とし、今後もデータを蓄積しながら妥当性の検証を行うことが必要」とされており、特段の変更はなされていない。

東日本大震災においては、仙台市ガス局の供給区域内の低圧本支管の被害分析に基づいて、ねじ接合の継手部の被害は60kine程度から生じ始め、80kineから急激に増加する傾向が認められ、第1次緊急停止判断基準の60kineの妥当性が確認された⁵⁾。一方、低圧本支管の耐震化率の高いブロックでは被害率は低かったことから、SI値が60kineを上回るブロックにおいて、ガス導管等の被害が軽微であることが「予見」できる場合にも特例措置が適用されることが検討されている⁵⁾、^{補注(2)}。

南海トラフ巨大地震の被害想定においては、安全措置としての供給停止の影響は、各供給ブロック内のSI値の60kine超過率から判定されている⁶⁾。しかし複数のSI値に基づく場合や、上記特例措置の適用など、供給停止判断に関して弾力的運用がなされていることや、低いSI値でも第2次緊急供給停止措置がとられる可能性があること、耐震化率が高いブロックでは供給停止判断基準がさらに緩和される可能性があること等^{補注(2)}を考慮すると、被害想定において基準値60kineにより決定論的に供給停止予測することについては、再検討する必要性があると考えられる。

能島ら⁷⁾は、1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づいて、計測震度を説明変数として供給系ライフライン（電気・水道・都市ガス）の機能停止確率と復旧過程を予測する地震時機能の二段階評価モデルを提案した。モデルの前段を「機能的脆弱性関数」と称しており、機能停止の有無を計測震度に対する二項反応と捉え、機能停止確率をロジットモデルで表現している。

本研究は供給系ライフラインのうち都市ガスに焦点を絞り、供給停止判断に関する上記動向を踏まえて機能的脆弱性関数を再構築し、供給停止人口を推計する方法を提案するものである。その妥当性を検証するため、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）における都道府県単位でのガス停止人口の実測値と推定値を比較する。

以下、2.では低圧本支管の脆弱性指数 V_G を定義し、これに基づいて供給停止判断基準を設定して都市ガス供給停止の機能的脆弱性を構築する。3.では都市ガス普及率に基づいて都市ガス供給人口のメッシュデータを整備する。4.では対象地震における供給設備被害とガス供給停止状況をまとめる。5.では各地震による震度曝露人口を推計し、機能的脆弱性関数を適用して得られる供給停止人口の推定値を実測値と比較し、モデル検証を行う。6.では本研究のまとめを行う。

2. 都市ガス供給停止の機能的脆弱性関数

(1) ガス低圧本支管の脆弱性指数

「ガス事業年報⁸⁾」等に基づいて、全国の一般ガス事業者のガス導管の敷設状況を整理しておく。平成22年度末現在の一般ガス事業者数は211事業者である（私営

181、公営30）。ガス導管の管種別敷設延長距離の経年推移を図1に示す。敷設延長距離は年平均3,200km程度増加しており、約24.6万kmに達している。管種は「铸铁管」「鋼管」「その他」の3種類に分類されている。

「その他」の増加傾向が特に著しいのは、可とう性に優れたポリエチレン(PE)管の導入が推進されているためである。圧力・管径・管種別の敷設延長距離を図2に示す。圧力別の敷設延長の構成比は高圧0.9%、中圧A5.7%、中圧B7.4%、低圧86.0%である。このように大半を占める低圧本支管の耐震化率は次式で定義されている⁹⁾。

$$\text{低圧本支管の耐震化率} = (\text{低圧本支管のうちポリエチレン(PE)管・溶接鋼管等「中低圧ガス導管耐震設計指針」を満足する導管の延長}) / (\text{低圧本支管の総延長}) \quad [1]$$

図3は、日本ガス協会が実施したアンケート調査の結果⁹⁾をもとに、PE管延長、PE管比率、耐震管延長、耐震化率の経年推移（2003年以前の耐震管延長と耐震化率はデータ欠損のため2004年以降のトレンドを外挿）を示したものである。またPE管以外の耐震管延長と非耐震管延長を推計して合わせて示している。これに基づいて低圧本支管の脆弱性指数 V_G を

$$V_G = \text{低圧本支管の非耐震化率} = 1 - \text{耐震化率} \quad [2]$$

により定義し、その経年推移を求めた結果を図4に示す。兵庫県南部地震の被災時の1995年時点で $V_G=0.361$ であったと推定されるが、2011年時点では $V_G=0.198$ と約55%に低減されている。一方、日本ガス協会は「Gas

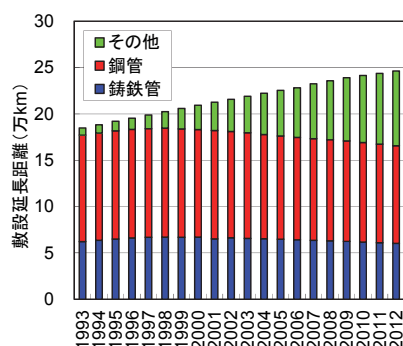


図1 ガス導管の管種別敷設延長距離⁸⁾

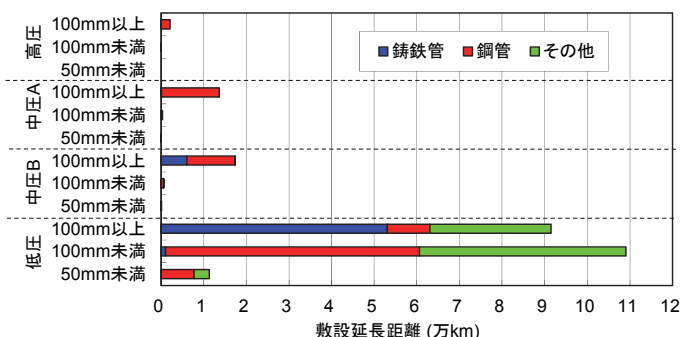


図2 圧力・管径・管種別の敷設延長距離(平成22年度末)⁸⁾

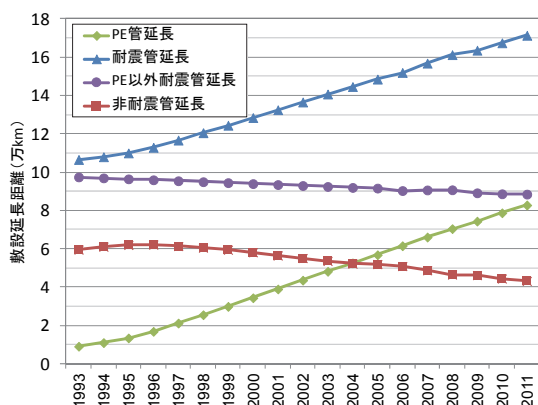


図3 低圧本支管の耐震管の敷設延長距離の推移(文献⁹⁾に基づき作成)

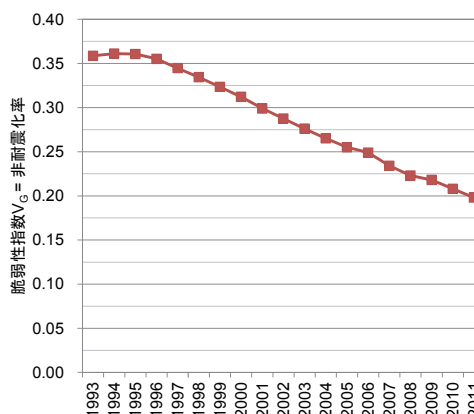


図4 低圧本支管の脆弱性指数 V_G の推移

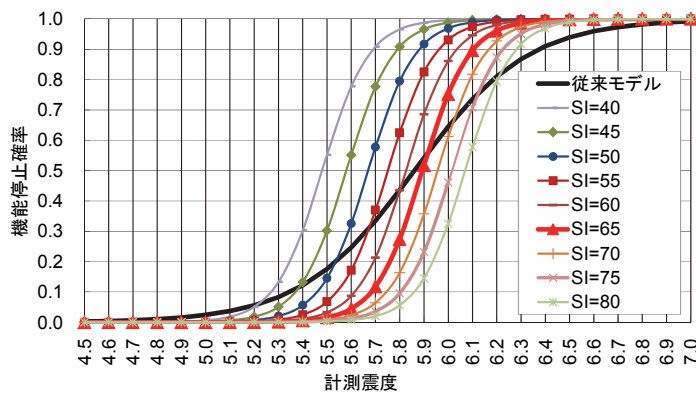


図5 供給停止判断基準 SI 値と機能的フラジリティ関数 ($\sigma_I=0.174$)

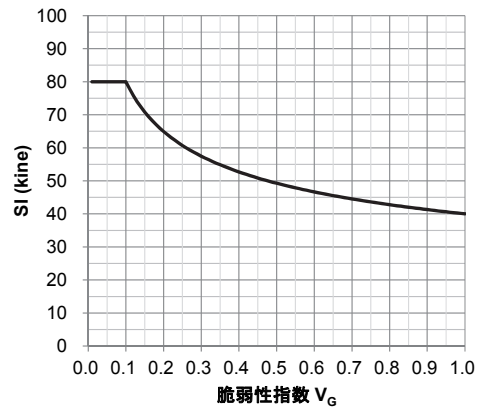


図6 供給停止判断基準 SI 値と低圧本支管の脆弱性指数 V_G

Vision 2030」¹⁰⁾の中で、アクションプランの1つに「低圧導管の耐震性向上」を挙げ、「2030年時点でポリエチレン管率60%、耐震化率90%」との目標を掲げており、将来的には $V_G=0.1$ まで低減されることが期待される。

(2) 供給停止判断基準値の設定

1. で述べた二段階評価モデルに関する既往研究^{7), 11)}¹²⁾では一貫して、計測震度 I に対する機能停止確率 $p(I)$ を表す機能的フラジリティ関数をロジットモデルで表現している (b_0, b_1 はパラメータで、平均値 $\mu = -b_0 / b_1$ 、標準偏差 $\sigma = \pi / \sqrt{3} b_1$ の関係にある)。

$$p(I) = \frac{\exp[b_0 + b_1 \cdot I]}{1 + \exp[b_0 + b_1 \cdot I]} \quad [3]$$

阪神・淡路大震災の被災事例に基づく初期のモデル⁷⁾では、都市ガス停止の有無を二項反応と捉え、統計処理に基づいて経験的に平均5.86、標準偏差0.42と定めていた(図5太線および表1参照)。首都圏を対象としたモデル改良¹¹⁾においては、東京ガスにおける供給停止判断の目安(SI値40~50kine)¹³⁾の中央値45kineを採用し、SI値から計測震度 I への変換式¹⁴⁾

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

により変換して得られる計測震度5.58を50%停止確率とした。都市ガス供給網のブロックの細分化が進められたため、揺れに基づく供給停止判断の範囲は面積的に限定化され、結果として機能的フラジリティ関数のばらつきは低減されることが考えられる。そのばらつきはブロック内の地震計設置台数・設置条件と「多数決システム」に代表される停止判断ルールに依存するため別途検証中である。本研究では変換式[4]のばらつきは最小限考慮することから、便宜的に標準偏差0.174を採用することとした。

供給停止判断基準に関しては、関係者へのヒアリングによると、新興住宅地など耐震化率が90%以上と高い場所で80kineとしているケースや、逆に耐震化率が低い場所や木造家屋密集地帯など条件が悪い場所では安全側を見て40~50kineとしているケースがあり、状況に応じた設定がなされている。

本研究では、ここまで述べた経緯を総合的に考慮して、低圧本支管の耐震化の効果を取り入れるために、供

給停止判断基準としてのSI値を脆弱性指数 V_G の関数として、次式で定めることとした。

$$SI = \begin{cases} 40V_G^{-0.301}; & 0.1 \leq V_G \leq 1 \\ 80 & ; 0 < V_G \leq 0.1 \end{cases} \quad [5]$$

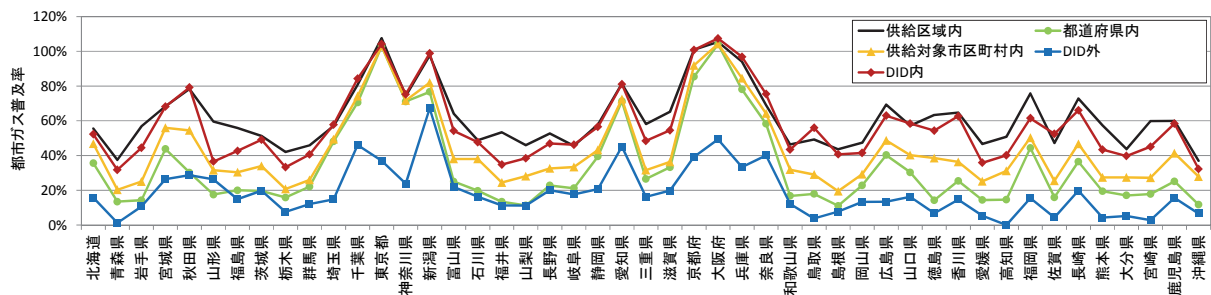
これは $V_G=0.1$ 以下(耐震化率90%以上)でSI=80kine、 $V_G=1$ (耐震化率0%)でSI=40kineとし、工学的判断により両対数での線形補間したものである(図6)。1995年時点で54kine、2011年時点で65kineとなり、第1次緊急停止判断の基準値60kineよりも高くなる。しかしPE管の普及が進みつつある現状を考慮すると、SI値が60kineを超えても第2次緊急停止判断に移行するケースも多く、式[5]は有効と考えられる。

ただし事業者別の V_G は不明であるため、本研究では全国平均としての供給停止判断基準65kine(計測震度5.89)を採用し、文献^{11), 12)}と同様に標準偏差を0.174とした。詳細な予測を行うには、事業者間の V_G のばらつきや、さらには事業者内での空間分布を把握する必要がある。表1に改良モデルのモデルパラメータを示す。従来モデル⁷⁾とSI=40~80kine(計測震度5.48~6.07)としたガス停止の機能的フラジリティ関数を図5に示す。

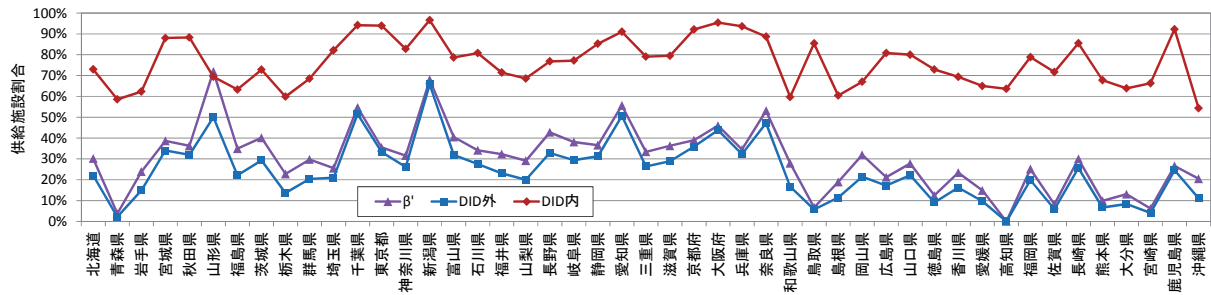
なお、5. の2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震への適用については、図4より2004年および2007年時点でそれぞれ $V_G=0.265, 0.234$ と求められるため、供給停止判断基準値としては、式[5]より得られるSI=60kine(計測震度5.82)およびSI=62kine(計測震度5.85)を採用する。これらは当時の標準的な保安規程にほぼ整合する値である。東日本大震災についてはSI=65kine(計測震度5.89)とする。表1に従来モデル⁷⁾と対比させて、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震に適用する改良モデルの各パラメータをまとめて示す。

表1 機能的フラジリティ関数のパラメータ

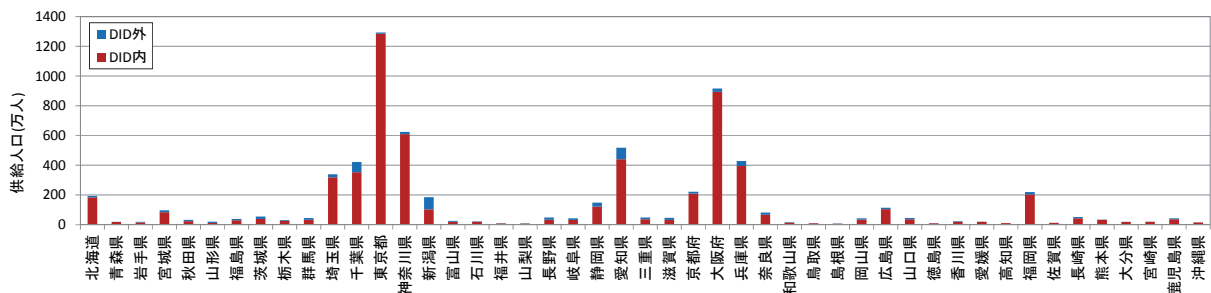
	従来 ⁷⁾	改良 (2004)	改良 (2007)	改良 (2011)
b_0	-25.08	-60.72	-61.01	-61.45
b_1	4.28	10.42		
50%相当値	5.86	5.82	5.85	5.89
標準偏差	0.42	0.17		



(a) 様々な都市ガス普及率の比較（都道府県内，供給区域内，供給対象市区町村内およびそのDID内外別）



(b) 地価公示データに基づくDID内外別の都市ガス供給施設割合およびその比率 β' （DID外/DID内）



(c) DID内外別の都市ガス供給人口

図7 DID内外別の普及率に基づく都道府県別の都市ガス供給人口の推計

3. 都市ガス供給人口分布のメッシュデータ化

都市ガスの供給停止人口を推定するには，基礎データとして都市ガス供給人口分布が必要となる．ここでは都市ガス普及率に基づく推定方法を示す．

(1) 都市ガス普及率に関する統計

「ガス事業年報⁸⁾」には，事業者別に供給区域内ガス普及率が記載されている．しかし一般に入手可能な供給区域地図¹⁵⁾は概略図のため精度が十分でなく，供給区域を全国レベルで正確に特定することは困難である．本研究ではガス事業統計および国勢調査を用いて推定する．

平成22年度国勢調査¹⁶⁾による総世帯数は約5,195万世帯であり，総務省資料¹⁷⁾によると，都市ガス供給区域内にある世帯数は3,620万世帯である．需要家メーター取付数は約2,890万¹⁷⁾であることから，全国の都市ガス普及率は55.6%と推定され，供給区域内普及率では79.8%¹⁷⁾に達している．都道府県別集計をそれぞれ図7(a)の黄緑線と黒線で示す．従来の研究^{11), 12)}では，このような都道府県内での全体での普及率を用いられているが，空間解像度の向上が課題となっている．

そこでまず全国1,901市区町村から都市ガス供給が行われている825市区町村（以下，供給対象市区町村）を

抽出した（図8）．供給対象市区町村内における世帯数は約4,412万世帯であり，この中での全国普及率は65.5%と推定され，その都道府県別集計を図7(a)の黄線で示す．しかし供給区域地図¹⁵⁾と人口集中地区¹⁸⁾（以下DID^{補注(3)}）を比較すると，ガス事業は明らかにDIDに集中し，供給対象市区町村内においても需要家は偏在していると考えられる（図9）．そこで，供給対象市区町村内の普及率（図7(a)の黄線）をさらにDID内外の普及率に分解して精度向上を図る．

(2) DID内外の普及率の推定方法

DIDの内外での普及率の違いを考慮するため，地価公示点データ¹⁸⁾に記載されているガス供給施設の有無のデータ（25,983箇所）を用いる．ガス供給施設の有無と供給対象市区町村およびDIDとの重ねあわせの例を図10に示す．供給対象外市区町村内のデータ22,377箇所（全体の86.1%）を対象として，DID内およびDID外においてガス供給施設がある割合を都道府県単位で求めた結果を図7(b)の赤・青線で示す（全国平均値：DID内84.9%，DID外29.8%）．DID内外における比を β' （=DID外のガス供給施設存在割合/DID内ガス供給施設存在割合）として求めた（図7(b)の紫線，全国平均値：29.8/84.9=0.351）．

次に，図7(a)の黄線の供給対象市区町村内普及率（=R

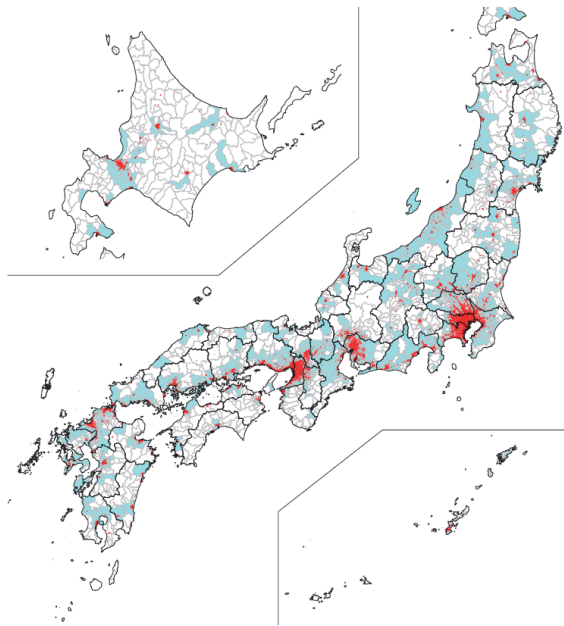


図8 都市ガス供給対象市区町村(■)とDID(■)

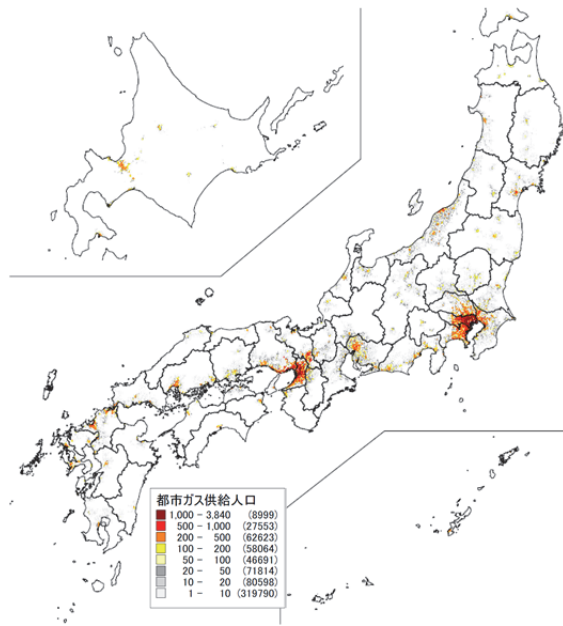
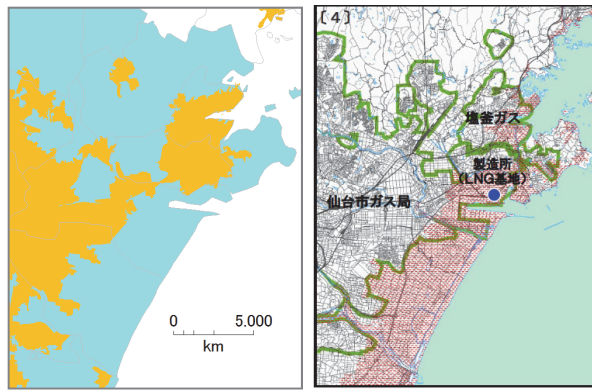


図11 都市ガス供給人口のメッシュデータ



(a) 供給対象市区町村(■)とDID(■) (b) 供給対象区域⁵⁾
図9 DIDと都市ガス供給区域との比較

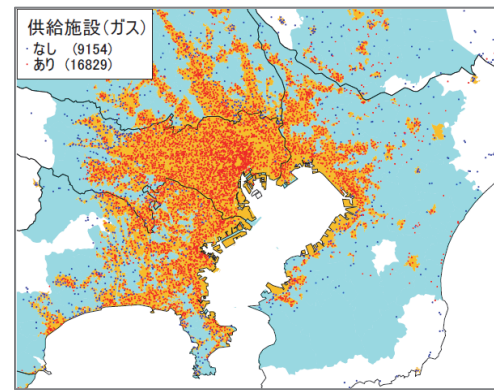


図10 都市ガス供給施設の有無と供給対象市区町村(■)およびDID(■)との関係(首都圏)

とおく)との整合性を確保するため、DID内外における普及率の比を β ($= \text{DID外普及率 } r_0 / \text{DID内普及率 } r_1$)と定義し、上記データを用いて $\beta = \beta^*$ と仮定して、供給対象市区町村の普及率 R を分解する。供給対象市区町村の全人口を N 、DID内人口を n_1 、DID外人口を n_0 で表すと、前提条件より次式が成り立つ。

$$N = n_1 + n_0 \quad [6]$$

$$N \cdot R = n_1 \cdot r_1 + n_0 \cdot r_0 \quad [7]$$

$$r_0 = \beta \cdot r_1 \quad [8]$$

式[6]～[8]から式[9]が導出される。

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{N}{n_1 + n_0 \cdot \beta} R = \frac{n_1 + n_0}{n_1 + n_0 \cdot \beta} R \\ r_0 &= \frac{N\beta}{n_1 + n_0 \cdot \beta} R = \frac{(n_1 + n_0)\beta}{n_1 + n_0 \cdot \beta} R \end{aligned} \quad [9]$$

(3) DID内外普及率に基づく供給人口のメッシュデータ

式[9]を用いて、供給対象市区町村におけるDID内外の都市ガス普及率を都道府県別に算定した結果を図7(a)に示す(全国平均値：DID内78.0%，DID外27.4%)。普及率が高かった三大都市圏であり変化しないが、地方ではDID内で上昇、DID外で下落する傾向が強い。DID外での普及率が比較的高いのは、天然ガスを産出する新潟県・千葉県や、三大都市圏周辺である。図7(c)は、都市ガス供給人口をDID内外別に求めたものであり、DIDへの集中傾向が明確に読み取れる(全国平均DID内：DID外=90.9%：9.1%)。

以上に基づいて、都市ガス供給人口のメッシュデータを作成する。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分の1地域メッシュ(約250m四方)に変換したものをを用いる。これに供給対象市区町村におけるDID内外別の都道府県別普及率を掛け合わせて図11のように結果を得た。5.の供給停止人口推計ではこれを用いる。

4. 対象地震における供給設備被害とガス供給停止状況

供給停止人口推計の対象とする 2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）における供給設備被害と SI 値観測およびガス供給停止状況について表 2 と表 3 にまとめた。

(1) 2004 年新潟県中越地震²⁾

供給設備の被害箇所は少なく、中圧導管で 1 箇所（供給停止地区内被害率 0.02 件/km）、低圧本支管で 126 箇所（同 0.14 件/km）、供給管・内管で 2,478 箇所（需要家件数比 4.36%）であった。長岡市の一部（D ブロック）および小千谷市・越路町・見附市・堀之内町・川口町の全域で、あわせて 56,800 戸で供給停止した。

(2) 2007 年新潟県中越沖地震⁴⁾

供給設備の被害箇所については、高圧導管（小口径管）で 2 箇所（供給停止地区内被害率は 0.02 件/km）、中圧導管で 26 箇所（同 0.20 件/km）、低圧本支管で 166 箇所（同 0.25 件/km）、供給管・内管で 3,086 箇所（需要家件数比不明）であった。中越と比較すると、高圧・中圧でかなり多く、低圧本支管、供給管・内管でやや多くなっている。柏崎市では 3 箇所の供給所でいずれも 90kine を超える SI 値を観測して全域供給停止（32,139 戸）となり、上越市と長岡市の一部をあわせて 32,340 戸で供給停止した。

(3) 東日本大震災（2011 年東北地方太平洋沖地震）^{5),19)}

供給設備の被害は、中圧導管で 22 箇所（被害率 0.0018 件/km）、うち津波によるもの 2 箇所、低圧本支管で 774 箇所（同 0.008 件/km）、うち液状化によるもの 103 箇所、津波によるもの 1 箇所、供給管・内管で 7,132 箇所（需要家件数比 0.05%）、うち液状化によるもの 95 箇所（津波によるものは不明）であった。PE 管に関しては初めて 2 件の被害（分岐部の融着不良 1 件、鋼管と鋼管を接合する PE 製水取器の短延長の袖管部 1 件）が報告されているが、全体的にはわずかに留まり、耐震性の高さが確認された。供給停止戸数は全域で 458,564 戸に上るが、その要因は

ガス事業者によって様々である。青森県（停止戸数 1,236 戸）では卸元から八戸ガスへの送出停止、岩手県（停止戸数 7,000 戸）では釜石ガスでの製造設備の津波浸水による供給停止である。

宮城県（停止戸数 384,617 戸）で最大の被害は仙台市ガス局で生じた。地震計の値に基づく第 1 次緊急停止は 11 ブロック中 3 ブロック（停止戸数：約 7 万戸²⁰⁾、停止人口 18.2 万人に相当）であったが、その後、ガスを製造する港工場の津波被災により送出停止し、供給区域全域（3 市 3 町 1 村、358,781 戸）での供給停止に至った。塩釜ガスでは仙台市からの送出停止、石巻ガスでは津波による送出停止が主要因である。気仙沼市ガス水道部では製造所の送出圧力・流量の変動により第 1 次緊急停止措置がとられた。

福島県（停止戸数 18,655 戸）では、常磐共同ガスで製造所の送出圧力・流量の変動により第 1 次緊急停止、福島ガス・東北ガス・常磐都市ガスで現場巡回・点検による第 2 次緊急停止措置がとられた。

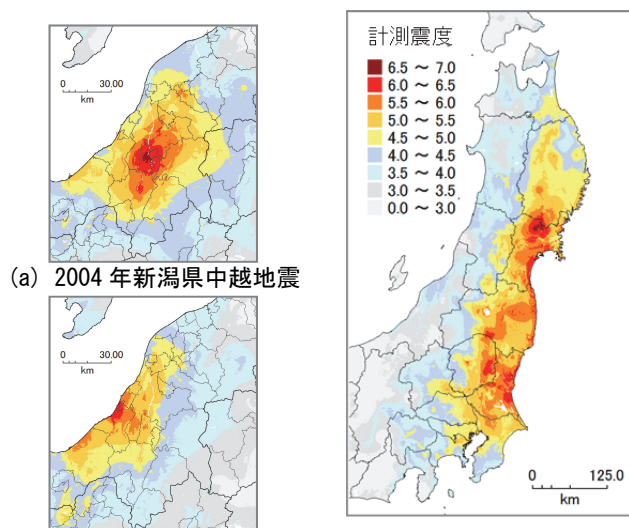
茨城県（停止戸数 37,597 戸）では、東京ガス（日立支社）で SI 値 70kine による第 1 次緊急停止措置に伴い、全戸供給停止（30,008 戸）となった。この他、東京ガス（常総支社）で第 1 次緊急停止措置および東部ガス（水戸地区・土浦地区）で第 2 次緊急停止措置がとられた。

千葉県（停止戸数 8,889 戸）では、京葉ガスにおける浦安市の液状化被害による第 2 次緊急停止 8,631 戸が大多数を占めたほか、九十九里町ガス課で津波に伴う橋梁添架管損傷による供給停止があった。また神奈川県、埼玉県でもそれぞれ 420 戸、150 戸の供給停止となった。

5. 供給停止人口の推定値と実測値の比較検証

(1) 震度曝露人口

各地震の推定震度分布（東日本大震災においては 3 月 11 日 14:46 の本震と 15:15 の最大余震による最大値マップ）を（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)」²¹⁾を用いて作成した（図 12）。これらと図 11 の都市ガス供給メッシュ人口を重ね合わせて算出した震度曝露人口²²⁾を図 13 に示す。



(b) 2007 年新潟県中越沖地震 (c) 2011 年東北地方太平洋沖地震
図 12 対象地震の推定震度分布 (QuiQuake²¹⁾に基づいて作成)

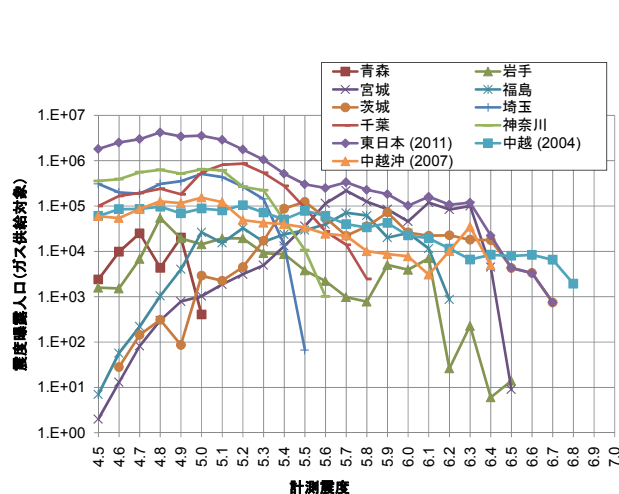


図 13 都市ガス供給人口分布を用いた
震度曝露人口（震度 0.1 刻み）

表2 各地震における都市ガス供給設備被害と供給停止戸数（文献^{2), 4), 5)}に基づいて作成）

	2004年新潟県中越地震		2007年新潟県中越沖地震		東日本大震災（2011年東北地方太平洋沖地震）	
	被害箇所数	被害率*	被害箇所数	被害率*	被害箇所数	被害率**
高圧導管	0	0 件/km	2	0.02 件/km	0	0 件/km
中圧導管	1	0.02 件/km	26	0.20 件/km	22	0.0018 件/km
低圧本支管	126	0.14 件/km	166	0.25 件/km	774	0.008 件/km
供給管・内管	2,478	4.36%	3,086	(不明)	7,132	0.05%
供給停止戸数	56,800		32,340		458,564	
注 **供給停止地区内の導管延長および需要家数を分母とする						
**供給区域内で震度5弱以上を記録した一般ガス事業者の導管延長および需要家数を分母とする						

表3 各事業者におけるSI値観測および都市ガス供給停止状況
(a) 2004年新潟県中越地震（文献²⁾に基づいて作成）

都道府県	ガス事業者	観測点名称	SI [kine]	供給停止 戸数	供給停止地区	備考
新潟県	北陸ガス(株)	悠久町ガバナ	87	23,200	Dブロック	長岡市Dブロック
	小千谷市ガス水道局		80	12,200	全域	
	越路町企業課	第15整圧所計器室	77	4,000	全域	
	見附市ガス水道局	中央供給所	70	13,300	全域	余震でSI値79kine観測
	堀之内町企業課		51.8	2,400	全域	
	川口町建設企業課		—	1,700	全域	

(b) 2007年新潟県中越沖地震（文献⁴⁾に基づいて作成）

都道府県	ガス事業者	観測点名称	SI [kine]	供給停止 戸数	供給停止地区	備考
新潟県	柏崎市ガス水道局	鏡町供給所	99	27,056	柏崎ブロック全域	PGA, SI測定範囲超過
		藤井供給所	99			SI測定範囲超過
		加納供給所	—			
		中通供給所	—	479		
		刈羽供給所	93	1,967	刈羽・西山ブロック	PGA測定範囲超過
		西山供給所	—	1,971	全域	
	上越市ガス水道局	柿崎区	73	81	一部	7/18復旧
	長岡市水道局	三島供給所	50	120	一部	7/16復旧

(c) 東日本大震災（2011年東北地方太平洋沖地震）（文献^{5), 19)}に基づいて作成）

都道府県	ガス事業者	SI [kine]	緊急停止 判断	供給停止 戸数	供給停止地区 (いずれも一部)	供給停止に至った要因
青森県	八戸ガス	22	—	1,236	八戸市	卸元（JX日鉱日石エネルギー八戸LNG基地）の送出停止に伴い、一部エリアで供給停止
岩手県	釜石ガス	26	第2次	7,000	釜石市	津波による製造設備の浸水
宮城県	仙台市ガス局	147	第1次	358,781	仙台市，多賀城市，名取市，宮城郡利府町，黒川郡富谷町，大和町，大衡村	地震計の値に基づく供給停止（3ブロック），その後，津波による製造所の送出停止（全ブロック）
	石巻ガス	62	—	14,771	石巻市	保安規程に基づく巡回・点検中に津波により送出停止
	塩釜ガス	41	—	9,665	塩釜市，多賀城市，宮城郡七ヶ浜町，利府町	卸元（仙台市）の送出停止
	気仙沼市ガス水道部	15	第1次	1,400	気仙沼市	製造所の送出圧力・流量の変動
福島県	常磐共同ガス	24	第1次	14,572	いわき市	製造所の送出圧力・流量の変動
	常磐都市ガス	—	第2次	649	いわき市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断，計器損傷のためSI値欠測
	福島ガス	35	第2次	2,920	福島市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
	東北ガス	42	第2次	514	白河市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
茨城県	東京ガス（日立支社）	70	第1次	30,008	日立地区供給エリア	地震計の値に基づく
	東京ガス（常総支社）	53	第1次	548	牛久町，龍ヶ崎市若柴	感震遮断機能
	東部ガス（土浦地区）	47	第2次	6,834	土浦市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
	東部ガス（水戸地区）	32	第2次	207	水戸市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
千葉県	京葉ガス	44	第2次	8,631	浦安市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断（広範囲な液状化による導管被害により供給停止）
	九十九里町ガス課	29	第2次	258	山武郡九十九里町	津波による橋梁添架管の損傷
埼玉県	東彩ガス	37	第2次	150	春日部市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
神奈川県	秦野ガス	22	第2次	380	秦野市	漏洩通報を受け現場の巡回・点検した結果の判断
	東京ガス（横浜）	51	第1次	40	横浜市西区平沼町	感震遮断機能

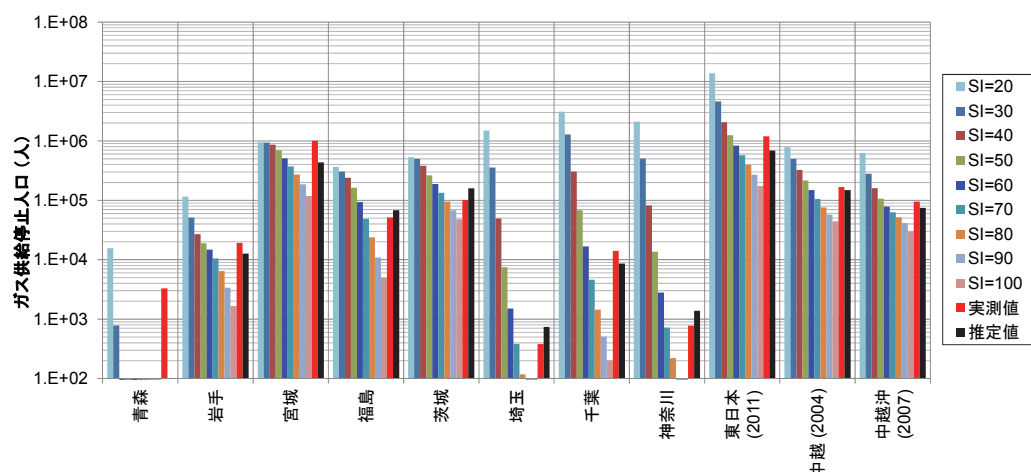


図 14 供給停止判断基準 SI 値を変化させた場合の供給停止人口の比較および実測値と推定値との関係

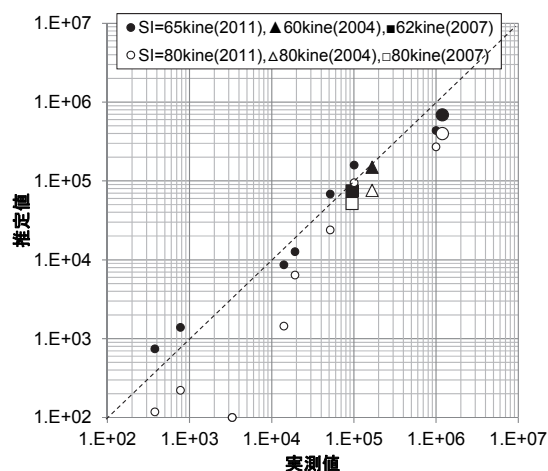


図 15 供給停止人口の実測値と推定値との比較

(▲：中越地震，■：中越沖地震，●：東日本大震災，
●：東日本大震災の県別，各白抜き：SI=80kine 相当値)

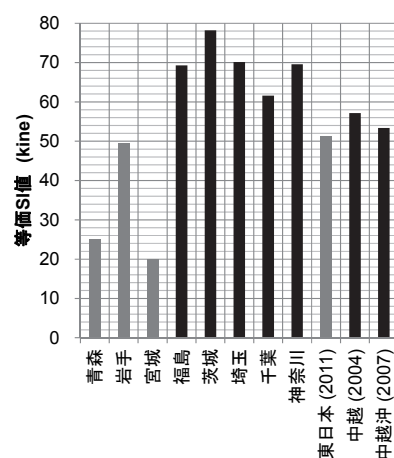


図 16 供給停止人口の実測値と推定値とが整合する供給停止判断基準 SI 値（グレーは参考値）

これに機能的フラジリティ関数（基準 SI 値は、中越：60kine，中越沖：62kine，東日本：65kine）を適用して得られたガス供給停止人口の推定結果と実測値とを比較する。停止戸数の実測値は停止世帯数とほぼ同等と考え、中越および中越沖については新潟県の 1 世帯当たり平均人員 2.93 人（2005 年国勢調査）¹⁶⁾ を用い、東日本については、都道府県別の 1 世帯当たり平均人員（2010 年国勢調査）¹⁶⁾ を用いて供給停止人口に換算した。さらに、供給停止基準 SI 値が供給停止人口に及ぼす影響について考察するため、20～100kine（計測震度 4.89～6.26）の範囲で、10kine 刻みで変化させた感度分析を行った。

(2) 供給停止人口の実測値と推定値との比較

図14は、供給停止人口の実測値および推定値（赤および黒で表示），ならびに、供給停止判断基準としての様々なSI値による供給停止人口をあわせて比較したものである。東日本については県別と合計を示すが、中越および中越沖については「県別集計（新潟県）＝合計」である。図15には実測値と推定値とを散布図で比較した。まず全体的な傾向について考察する。

a) 2004年新潟県中越地震

推定値／実測値の比率（以下、推定／実測比）は90%とわずかに過小評価となった。4. で述べたように供給

設備被害は比較的少なく、特に見附市（供給停止戸数13,300戸）でのSI値は周辺の震度分布より高い傾向にあり、実際に、低压本支管の被害は6箇所（被害率0.024件/km）に留まった。見附市で供給が継続されていれば供給停止戸数は43,500戸、推定／実測比は117%と逆にわずかに過大評価となる。観測値がブロック内の揺れの傾向を反映することは、適切な供給停止判断の要件である。この地震による教訓から供給停止判断に特例措置が設けられたのは前述のとおりである。

b) 2007年新潟県中越沖地震

推定／実測比は78%であり、やや過小評価となった。表3にあるように、ブロック供給遮断が適用されると、1ブロックあたり数千～数万戸単位で供給停止となる。予測モデルによる供給停止人口の推定値が連続的であるのに対して、実測値はブロック単位で離散的に出現する傾向にあり、数値的な整合性そのものに限界がある。実際、柏崎市では柏崎ブロックの2ブロックのみで供給停止戸数が約2.7万戸（全体の83%）に達している。

c) 東日本大震災（2011年東北地方太平洋沖地震）

推定／実測比を県別にみると、青森0%、岩手66%、宮城43%、千葉61%の4県では過小評価側となっている。4. でみたように供給停止の主要因は、青森県では卸元のガス送出停止、岩手県と宮城県では津波被害、千葉県では

液化状被害である。逆に過大評価側となったのは、福島132%、茨城157%、埼玉195%、神奈川178%の4県である。これらの県での供給停止の主要因は地震動と考えられるが、埼玉・神奈川の停止戸数は極めて少なく、この精度が限界と考えられる。

全域での推定／実測比が58%と過小評価となったのは、実測値に津波被害や卸元からの送出停止が多数含まれるためである。これらの影響を除いて全域での停止戸数を試算したところ約13.5万戸（停止人口36.1万人）となり、推定／実測比は191%と過大評価になった。この試算において「津波に隠された第2次緊急停止」がある可能性を考慮すると、実際の推定／実測比は58%と191%の中間にあるとみるのが適切であろう。

以上、3つの対象地震の考察から、細部については推定値と実測値との整合は良いとはいえないが、予測モデルによる県別および全域での推定精度は、一部例外を除けば倍半分程度といえる。

(3) 停止基準に関する感度分析

図14の感度分析結果によると、基準SI値に対する供給停止人口の変動具合は様々である。首都圏周辺ではSI値を下げるると供給停止人口が極端に増加するのに対して、宮城・福島・茨城では飽和効果がある。また、仮想的に、低圧本支管の耐震化率目標値の90%が達成されて $V_G=0.1$ となり、式[5]より、これに相当する基準値80kineで供給停止したと仮定すれば、供給停止人口は、中越、中越沖、東日本の順に7.6万人、5.2万人、40万人となり、実測値のそれぞれ46%、54%、33%に抑えられることがわかる。

図16は、感度分析に基づいて初期停止人口の実測値を満足する等価SI値を逆算したものである。中越と中越沖に関しては、等価SI値はそれぞれ57kine（計測震度5.8程度）および53kine（同5.7程度）と低い値となった。このことは、供給停止ブロック内に、相対的に地震動強度が低い地域が含まれていた可能性を示唆している。中越では見附市・堀之内町・長岡市、中越沖では柏崎市がこれに相当すると考えられる。

東日本に関しては、各県で様相が異なっている。青森・岩手・宮城および東日本合計では、等価SI値は20～50kine程度（計測震度5.0～5.7程度）となったが、地震動以外の要因が大きく作用しているため、参考値とすべきであろう。それ以外における等価SI値は、供給停止戸数の多い福島・茨城で69～78kine（計測震度5.9～6.0）、供給停止戸数の少ない埼玉・千葉・神奈川で61～70kine（計測震度5.8～6.0）となった。これらは本研究での設定値である65kineに比較的良く整合しているといえよう。

6. おわりに

本研究では、都市ガス供給に関する機能的脆弱性関数を構築して、3地震を対象として供給停止人口を推計し、予測モデルの妥当性を検証した。得られた成果を以下に列挙する。

- 1) 低圧本支管の耐震化率に基づいて、脆弱性指数 V_G （＝非耐震化率）を定義し、1995年から2011年の16年間で $V_G=0.361$ から 0.198 へと約55%に低減されたことを明らかにした。
- 2) 供給停止判断基準 SI 値を脆弱性指数の関数としてモデル化し、 $V_G=0.198$ に相当する 65kine を用いて、50%停止確率相当震度 5.89、標準偏差 0.174 の機能的

脆弱性関数を構築した。

- 3) 都市ガスの供給対象市区町村内における DID 内外の普及率を都道府県別に推定し、地域メッシュ統計のメッシュ人口と併せて、都市ガス供給メッシュ人口データを作成した。
- 4) 2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、東日本大震災（2011 年東北地方太平洋沖地震）の推定震度分布をもとに、都市ガス供給対象となっている震度曝露人口を推計した。これに機能的脆弱性関数（基準 SI 値は上記地震順に 60, 62, 65kine）を適用してガス供給停止人口を推計した。
- 5) 推定／実測比は上記地震順に 90%, 78%, 58%といずれもやや過小評価となった。その要因としては、観測 SI 値がブロック全体の傾向を適切に反映しないケース、ブロック単位での供給停止人口が数千～数万人単位で離散的であることによる整合性の限界、ガス製造設備の津波被害や卸元の送出停止により供給停止が拡大したこと、などが挙げられる。
- 6) 都道府県別評価では、上記要因の影響が極端に表れる場合があり、過大評価・過小評価の幅が広がるが、予測モデルの推定精度は、一部例外を除けば倍半分程度であることが確認された。
- 7) 供給停止基準 SI 値を 20～100kine の範囲で変化させた感度分析を行い、供給停止人口に整合する等価 SI 値を比較した。地震動を主要因とした範囲内で、65kine はほぼ妥当であることが確認された。耐震化率90%に相当する基準 SI 値 80kine では、対象3地震で実測値の33～54%に抑えられることが分かった。

仙台市における低圧本支管の被災状況⁵⁾からも明らかのように、ブロック間の耐震化率の違いは被害出現傾向に大きく影響する。きめ細かく適切な供給停止判断を行うためには、耐震化率の分布状況を考慮することが必要である。本研究では、SI=60, 62, 65kine の機能的脆弱性関数を対象地震ごとに一律に適用したが、事業者別、さらには、事業者内での経年管²³⁾の敷設状況や SI センサー数²⁴⁾やその密度・敷設状況などの状況を踏まえて、ブロック別で個別に定めることが望ましい。都市ガス供給人口に関しても同様であり、詳細な普及率や供給区域データを用いて高精度化する余地がある。また供給停止判断基準のみならず、ガス導管網の実際の運用形態^{補注(4)}も供給停止人口を大きく左右するため、重要な要因として考慮する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたって、文部科学省「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト（2012～2016 年度）」③都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究（代表：林春男 京都大学防災研究所教授）の補助を得た。東京ガス(株)および東邦ガス(株)の関係各位には種々のご協力をいただいた。また名古屋大学減災連携研究センター 北野哲司教授には、本研究に関して有益なご助言をいただいた。記して謝意を表する。

補注

- (1) 地震発生時の情報収集および復旧活動立ち上げの迅速化・的確化を支援することを目的としたシステムとしては、「ガス防災支援システム (G-React)」が知られている。これは2004年新潟県中越地震の復旧活動の初動期において防災活

動に必要な地図情報（被害・復旧状況、通行可能な道路情報、復旧計画など）の集約・共有が困難であったこと²⁾を教訓として構築されたものであり、平成20年から運用されている²⁵⁾。東日本大震災においては多数の被災事業者や応援事業者がG-Reactを活用し、復旧活動に向けて被災情報の共有が図られたと評価されている⁵⁾。

- (2) 関連部分を文献⁵⁾より抜粋する。『今回の震災では、複数の事業者が上記の基準（第1次緊急停止判断から第2次緊急停止判断への移行の特例措置）を適用し、SI値が60kineを上回ったものの直ちに被害が軽微であることを確認したため、第2次緊急停止判断へと移行し、結果としてガス供給を停止することなく供給継続がなされた。新設される本支管の多くはPE管であることに加えて、経年管の取替えによりPE管等の耐震性の高い管の比率が益々高まっていくことを鑑みると、今後、耐震化率の極めて高いブロックが増えていくものと考えられる。（中略）耐震化率の高いブロックにおいて、SI値が60kineを上回る場合、道路、建築物等の被害の確認を行うことがなくとも、第2次緊急停止措置に移行できるよう、「60kineを上回るSI値を記録したブロックにおいて、ガス導管等の被害が軽微となることが予見できる場合」を特例措置の適用条件として追加することが合理的であると考えられる。』
- (3) 人口集中地区（Densely Inhabited District：DID）の定義は「市区町村の区域内で人口密度4,000人/km²以上の基本単位区が互いに隣接しており、かつ人口が5,000人以上となる地区」である。
- (4) 一例として、文献²⁶⁾によると東京ガスでは、SIセンサーと連動した遮断装置（SI値40～60kineで遮断）により、約4,000基の地区ガバナのうち14基で低圧ガスの送出を停止した。その内11基については隣接地区ガバナからのバックアップにより供給継続したが、それ以外の3基では供給停止した。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁監修 ガス地震対策検討委員会：ガス地震対策検討会報告書、1996.3.
- 2) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会：新潟県中越地震ガス地震対策調査検討会報告書・参考資料、2005.7.
- 3) (社) 日本ガス協会：地震防災対策ガイドライン、2007.3.
- 4) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会：新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会報告書・参考資料集、2008.5.
- 5) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会 災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書、2012.3.
- 6) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定項目及び手法の概要 ～ライフライン被害、交通施設被害、被害額など～、2013.3.
- 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，pp.225-238，2003.1.
- 8) 資源エネルギー庁ガス市場整備課：ガス事業年報，平成 12，17，22 年度，2002，2007，2010.

- 9) 経済産業省：資料 No.33 災害対策 設備対策・耐震化率の一層の向上，一般ガス事業者における低圧本支管の耐震化・ポリエチレン化への取組み状況，http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/gas_anzen/pdf/001_04_02_03.pdf（2013.9.10 閲覧）
- 10) (社) 日本ガス協会：Gas Vision 2030，<http://www.gas.or.jp/gasvision2030.pdf>（2013.9.10 閲覧）
- 11) 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，pp.153-162，2011.11.
- 12) 能島暢呂，加藤宏紀：供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの検証 ー東日本大震災の被災事例に基づくー，地域安全学会論文集 No.18，pp.229-239，2012.11.
- 13) 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，(社)土木学会地震工学委員会，相互連関を考慮したライフライン減災対策に関する研究小委員会，pp.54-59，2009.12.
- 14) 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.570-550，1996.11.
- 15) ガスエネルギー新聞：2012 年 都市ガス事業マップ，2012.
- 16) 総務省統計局：平成 17，22 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/2005/>，<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/>（2012.5.15 閲覧）
- 17) 総務省統計局：第 62 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 22 年度），<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/10.htm>（2012.5.15 閲覧）
- 18) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報ダウンロードサービス，人口集中地区（平成 22 年度），地価公示（平成 25 年度），<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>（2013.8.27 閲覧）
- 19) (社) 日本ガス協会：「東北地方太平洋沖地震による都市ガス供給の停止状況について」2011.3.11～4.25（第 2～51 報）
- 20) 仙台市ガス局：東日本大震災 復旧の記録，2012.1.
- 21) (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>（2011.8.23 閲覧）
- 22) 能島暢呂，久世益充，杉戸真太，鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み，自然災害科学，Vol.23，No.3，pp.363-380，2004.
- 23) 経済産業省ガス安全室：平成 23 年度導管改修（経年管対策）実施状況について，2012.12. http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/gas_anzen/pdf/001_05_01.pdf（2013.9.10 閲覧）
- 24) ガスエネルギー新聞：CITY GAS '13，日本の都市ガス事業者，2012.
- 25) (株) ティージー情報ネットワーク：平成 23 年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査（都市ガス安全情報広報事業（防災支援情報の整備））事業報告書，2012.3.
- 26) 猪股渉，乗藤雄基，石田栄介，塚本博之，山崎文雄：東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度地震観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証，日本地震工学学会論文集，第 13 巻，第 2 号(特集号)，pp.37-44，2013.

(原稿受付 2014.1.13)

(登載決定 2014.5.31)