

地震時の漏洩通報に基づくガス導管の被害予測結果の更新に向けた検討

河村 祥彰¹・丸山 喜久²・水上 清二³・田村 健³

¹学生会員 千葉大学大学院融合理工学府 博士前期課程 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: afd1977@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学教授 大学院工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

³非会員 東京ガス株式会社 防災・供給部 (〒105-8527 港区海岸1-5-20)

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京ガス(株)の供給エリアで耐震性の劣る一部の低圧ガス導管に被害が発生した。防災システムSUPREMEは、収集された地震動情報を用いて低圧ガス導管の被害予測を行っている。SUPREMEは地震による二次災害の防止に大きく貢献しているが、被害予測の精度が良くないと、初期対応が遅れが生じ、混乱を助長してしまうことも懸念される。そこで本研究では、地震発生直後に東京ガス(株)に寄せられる漏洩通報情報に基づき、ガス導管の被害予測結果を更新する手法を構築した。さらに、更新結果に関する精度評価を行い、更新後の被害予測結果の推定精度の向上に向けた検討を行った。

Key Words : The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, SUPREME, Gas leak reported by customer, Update of damage estimation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、水道管やガス導管などの地中埋設管に多くの被害が発生した。東京ガス(株)の供給エリアでは、高圧ガス導管・中圧ガス導管には被害が発生しなかったが、耐震性の低い一部の低圧ガス導管に被害が発生した。低圧ガス導管における被害数¹⁾を表-1にまとめる。なお、都市ガスの設備区分は図-1に示す通りである。

東京ガス(株)では、地震発生後に迅速かつ的確に情報収集を行い、漏洩ガスの引火等の二次災害を防止することを目的として、リアルタイム地震防災システムSUPREME²⁾を導入している。都市ガスを中圧から低圧へ圧力調整を行う設備である地区ガバナ³⁾は、東京ガス(株)の供給区域内に約4,000箇所存在し、その全てにSIセンサーが設置されている。SIセンサー観測した地震動指標値はSUPREMEに転送され、過去の地震での知見を基に、ガス導管の被害を予測する機能を有している。2011年東北地方太平洋沖地震においてもSUPREMEは稼働し、ガス導管の被害予測を行った。このような防災システムは、地震発生直後の災害対応体制を確立するのに有用であるものの、万が一、被害予測の精度が良くない場合は、災

表-1 東北地方太平洋沖地震における東京ガス供給エリアの低圧ガス導管の被害数¹⁾

道路下	本支管	145箇所
	供給管	131箇所
民地	灯外内管	929箇所

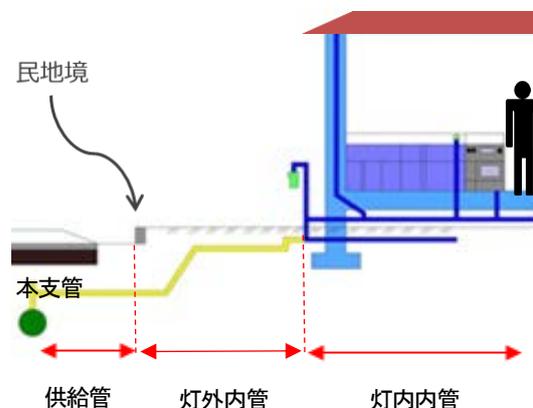


図-1 都市ガス供給の主な設備区分

害対応に遅れが生じ、混乱を助長してしまうことも懸念される。

そこで、本研究では、地震発生直後に東京ガス（株）に寄せられる電話によるガス漏洩の通報情報に基づき、被害予測結果を更新する手法の構築することを目的とする。これによって、地震時のガス導管の被害予測精度の更なる向上を目指す。

2. 本研究で用いるデータ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に電話で東京ガスに寄せられたガス漏洩の通報履歴データ、低圧導管の被害データおよび敷設状況、SUPREMEによって推定された50mメッシュ単位のSI値分布、供給エリア内のメーター開栓数（需要家数）、東京ガスの供給エリアを101個に分割した供給ブロック（Lブロック）のポリゴンデータを用いた。Lブロックは、東西・南北それぞれ5~10 km程度の大きさであり、ブロック内の需要家数は平均10万軒である。Lブロック間では、臨時工事以外はガス管が接続されておらず、隣接ブロックの影響を受けないようになっているため⁹⁾、地震による被害が大きい地域だけを分離してガス供給を停止することができる⁷⁾。Lブロックごとの平均SI値は、概ね15~30 cm/s程度である（図-2）。また東京ガスが定めている地形区分³⁾（50 mメッシュ単位）を使用する。本支管ネジ継手の延長が存在するメッシュのみを表示すると図-3のようになる。

ガス漏洩の通報履歴データは、東北地方太平洋沖地震発生直後から7日間（2011年3月11日14時46分から2011年3月18日14時46分まで）に東京ガスに電話で寄せられたものである。ブロック番号、住所、作業区分、設備区分名、管材質名、口径や故障原因名など20項目が取りまとめられている。

3. 通報履歴に基づく被害予測の更新

(1) 既往の研究

能島ら⁸⁾は地震動情報と実被害情報の統合処理による被害推定の逐次更新手法を提案し、これに基づき緊急対応を支援する数理モデルを構築している。ここでは、全要素 M_T の構造物群において、被害が独立、一様、ランダムに発生すると仮定する。被害の程度が有無（○か×）の二段階で区別され、被害発生数 n が被害確率 p の二項分布に従うものと仮定する。さらに、地震直後にリアルタイムで得られる地震動強さと被害推定式に基づいて被

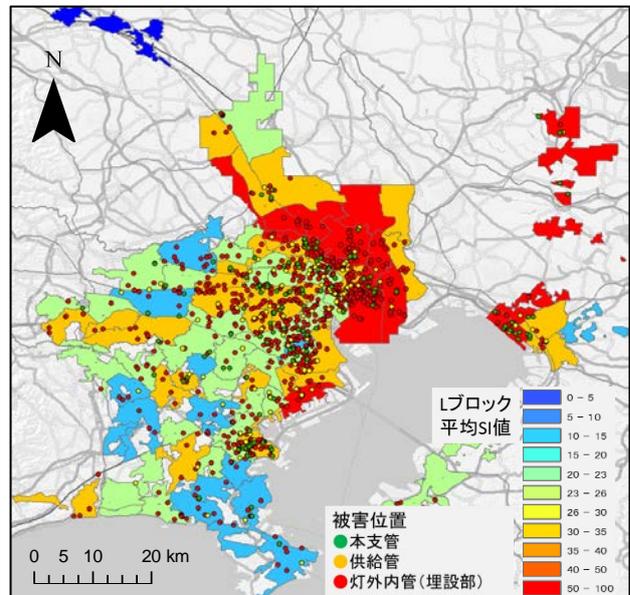


図-2 Lブロックごとの平均SI値とガス導管の被害位置

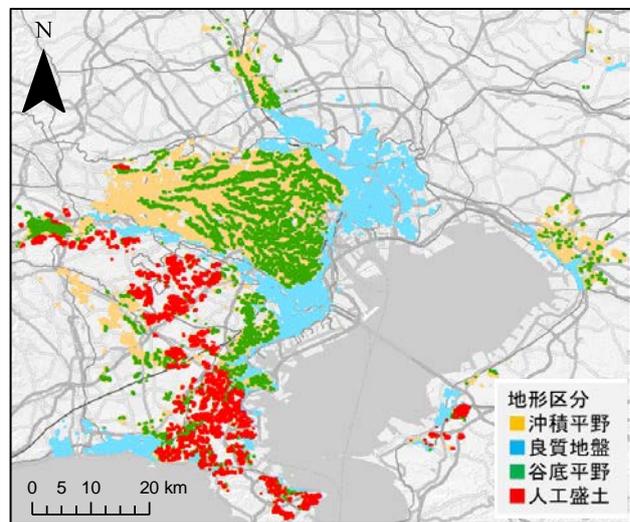


図-3 本支管延長が存在するメッシュの地形区分

害確率 p の即時推定が行われ、その平均値 μ_p 、標準偏差 σ_p が与えられているとする。

いま、 M_0 個の調査をしたところ、 n_0 個の被害が明らかになったものとする。被害確率 p の逐次更新された事後平均値 μ_p' 、標準偏差 σ_p' は次式となる⁸⁾。

$$\mu_p' = \frac{n_0 + n_0' + 1}{M_0 + M_0' + 2} \quad (1)$$

$$\sigma_p' = \sqrt{\frac{(M_0 + M_0' - n_0 - n_0' + 1)(n_0 + n_0' + 1)}{(M_0 + M_0' + 2)^2 (M_0 + M_0' + 3)}} \quad (2)$$

ここで、被害確率 p の共役事前分布としてベータ分布を適応し、確率分布の二次までのモーメントを適合させるモーメント法⁹⁾を用いると、 M_0' および n_0' は次式となる。

$$M_0' = \frac{\mu_p(1-\mu_p)}{\sigma_p^2} - 3 \quad (3)$$

$$n_0' = \mu_p \left[\frac{\mu_p(1-\mu_p)}{\sigma_p^2} - 1 \right] - 1 \quad (4)$$

M_0' と n_0' (いずれも一般に非整数)は「仮設事前標本」¹⁰⁾と呼ばれ、被害推定式によって算出された推定値の不確かさを定量的に評価するパラメーターである。被害確率の事前分布は、 M_0' 個あたり n_0' 個の被害が確認されたことと等価であると解釈される。

また、猪股ら¹¹⁾は、本支管ネジ継手の被害予測式の高精度化に向けた検討を行った結果、ネジ接合鋼管の継手と管体の被害形態の違いを考慮し、それぞれ独立した式を作成して重ね合わせる構成にした(式(5))。継手被害については、新たにグルーピングした3種類の地形分類(標準地形グループ・谷底平野・盛土造成地)に対して λ 、 ξ を設定した(式(6))。管体被害については、SI値に応じて緩やかに増加する被害率を再現するため、べき関数を用いて被害予測式を作成した(式(7))。猪股ら¹¹⁾が提案する被害予測手法の適用方法を表-2に示す。

$$R(SI) = \phi_{jg}(SI) + \phi_p(SI) \quad (5)$$

$$\phi_{jg}(SI) = R_0 \int_0^{SI} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right) dx \quad (6)$$

$$\phi_p(SI) = c(SI - A)^b \quad (7)$$

ここで、 $R(SI)$ は管種別被害率(箇所/km)、 $\phi_{jg}(SI)$ は継手の被害予測式(箇所/km)、 $\phi_p(SI)$ は管体の被害予測式(箇所/km)でありべき関数で表現される。 R_0 はねじ接合鋼管の被害率最大値(件/km)、 λ は標準正規分布のパラメーター(平均値)、 ξ は標準正規分布のパラメーター(標準偏差)である。被害率はSI値とともに増加し、SI値が大きくなると R_0 に漸近する。式(6)のパラメーターを表-3に示す。

また、式(7)の A 、 b 、 c は、それぞれ10、1.33、 4.44×10^4 となっている¹¹⁾。

向後ら¹²⁾は、ネジ継手を有する供給管、灯外内管(埋設部)の被害予測式を構築した。SUPREMEが搭載している本支管ネジ継手の被害予測式¹⁾(式(8))を変形し、 λ を式(9)のように管路延長 w を重みとした誤差の2乗和 ε を最小化するように定めた($\lambda = 3.73$)¹³⁾¹⁴⁾。

$$P = C\Phi((\ln SI - \lambda)/\xi) \quad (8)$$

表-2 継手の被害予測手法の適用方法¹¹⁾

	①標準地形グループ (沖積, 良質, 人工)	②盛土造 成地	③谷底 平野
継手	$\phi_{jg}(SI)$	$\phi_{jf}(SI)$	$\phi_{jv}(SI)$
管体	$\phi_p(SI)$		

表-3 継手の被害予測式の各パラメーター¹¹⁾

	被害率最大値 R_0 (箇所/km)	平均値 λ	標準偏差 ξ
$\phi_{jg}(SI)$	2.61	4.30	0.37
$\phi_{jf}(SI)$	5.27	4.62	0.40
$\phi_{jv}(SI)$	5.13	4.37	0.50

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (9)$$

(2) ガス導管の被害予測結果の更新への適応

前節で示した既往研究の手法をガス導管の被害予測結果の更新に適用する。一般に、埋設管の被害率は導管1kmあたりの被害数として定義されている³⁾¹⁵⁾。しかし、需要家からの漏洩通報履歴の活用を考えた場合、ガス導管の延長を基準とした被害率のままでは扱うことが難しい。

そこで全てのガス導管の被害は、最も近傍の需要家によって検知されるものと仮定することで、地震動強さと被害予測式に基づく即時予測の被害確率の平均値 μ_p を以下のように定義した。

$$\mu_p = N / M_T \quad (10)$$

ここで、 M_T はLブロックごとの開栓数(需要家数)、 N は地震直後の即時予測における被害数をLブロック単位で集計したものである。即時予測のLブロックごとの本支管の被害数は、式(5)~(7)で示した猪股ら¹¹⁾の式を用い、SI値と本支管のネジ継手管路延長に基づき50mメッシュごとに演算を行い、その値をLブロックごとに集計した。供給管と灯外内管の即時予測における被害数は、向後ら¹²⁾の式(8)を用いて、SI値と本支管ネジ継手管路延長に基づき、Lブロックごとに算出を行った。灯内内管の被害予測式は存在しないが、本研究では供給管と灯外内管の予測被害数の和と同数と仮定した。このように算出された、本支管、供給管、灯外内管、灯内内管の予測被害数の合計を、式(10)の N とした。

式(1)と(2)の n_0 を、Lブロックごとの漏洩通報件数とし、調査済み棟数 M_0 を適切に仮定すれば、式(1)~(4)によって被害予測結果を更新することができる。更新後に算出

された事後被害確率の平均値 μ_p' にLブロックごとの開栓数（需要家数） M_l を乗じると、ブロックごとに更新された予測被害数を算出できる。また、標準偏差 σ_p' を用いると誤差範囲も評価できる。

4. 被害予測結果の更新

本研究では、7日分の漏洩通報履歴データに基づき、ガス導管の被害予測結果を1日単位で更新する。漏洩通報データは、全通報数のうち、実際のガス導管の被害に関係する（本支管・供給管・灯外内管・灯内内管・メーター）の通報データを用いた。7日間かけて全ての需要家が一様に調査されたものと仮定し、1日あたりの調査済み棟数 M_0 を $M_0/7$ とする。また、即時予測の被害率の変動係数を0.6と仮定した。

本研究では、24時間後（1日後）、48時間後（2日後）、72時間後（3日後）における結果に注目して予測被害数の精度評価を行った。精度評価指標には、平均2乗誤差RMSE (Root Mean Squared Error)を用いた。また、実際の被害数と更新された予測被害数を比較し、被害確率の平均値の標準偏差内（ $\mu_p' \pm \sigma_p'$ ）に含まれるか否かをブロックごとに評価した。

漏洩通報履歴に基いた被害予測の更新結果の地図表示を図-4、各時間における予測被害数と実被害数の比較を図-5、更新された被害予測数の評価結果を表-4に示す。日数が経過し漏洩通報が増えるにつれて、RMSEの値は小さくなり、被害確率の平均値の標準偏差内に含まれるブロック数も増加している。この結果は多くのブロックの被害予測結果が実被害数に近づいていることを示しており、被害予測結果が通報履歴に基づき更新されていることが分かる。一方、神奈川県南部のいくつかのブロックのように、予測被害数が実被害数よりも小さくなっており、被害確率の平均値の標準偏差外となったケースも見られた。

被害確率の平均値の標準偏差外となった原因を調べるため、被害確率の平均値の標準偏差内のブロックと標準偏差外のブロックが混在する実被害数が40～80件の全18ブロックの72時間後の結果に注目した（図-6）。即時予測における被害数が小さすぎるとき、更新後の予測被害数が被害確率の平均値の標準偏差外になっている。即時推定時の初期予測被害数が、更新後の予測精度に大きく影響を与えていることが分かった。

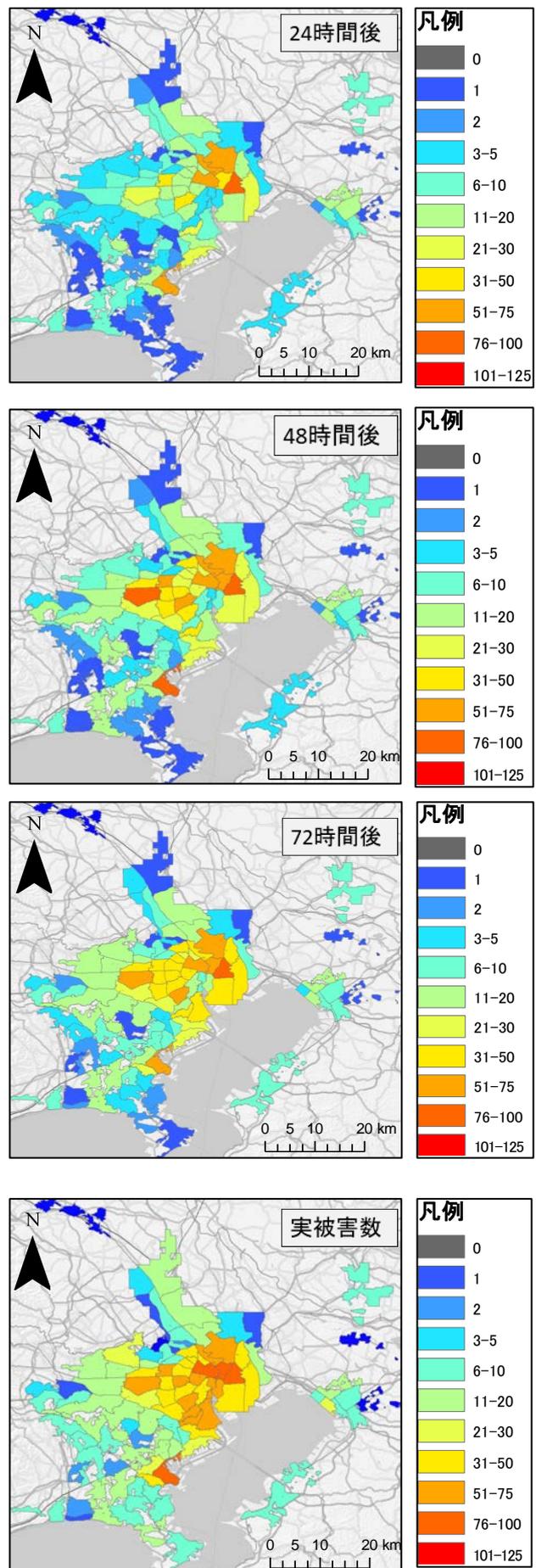


図-4 被害予測の更新結果と実被害数

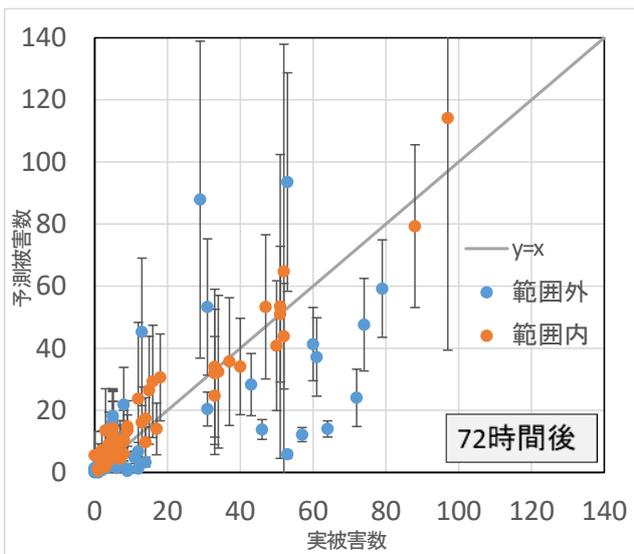
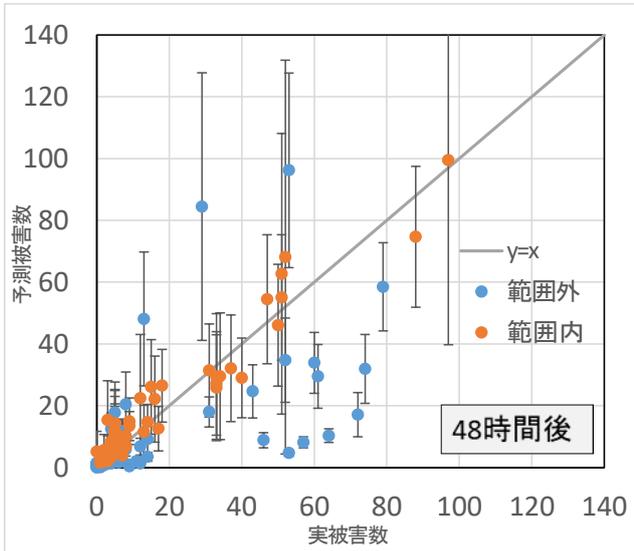
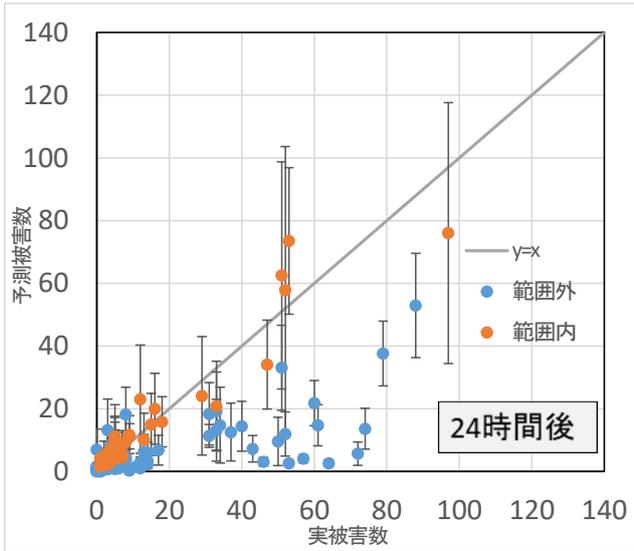


図-5 更新された予測被害数と実被害数の比較

表-4 更新された被害予測数の評価結果

	RMSE	被害確率の平均値の標準偏差内ブロック数 (全 101 ブロック)
24時間後(1日後)	18.93	43ブロック
48時間後(2日後)	15.98	55ブロック
72時間後(3日後)	14.85	57ブロック
168時間後 (7日後)	11.80	68ブロック

表-5 精度評価のための混合行列

		実被害のデータ	
		$\mu_p' \pm \sigma_p'$ の範囲内	$\mu_p' \pm \sigma_p'$ の範囲外
初期予測被害数に基づく分析結果	初期予測被害数 \geq 閾値	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	初期予測被害数 $<$ 閾値	FN (False Negative)	TN (True Negative)

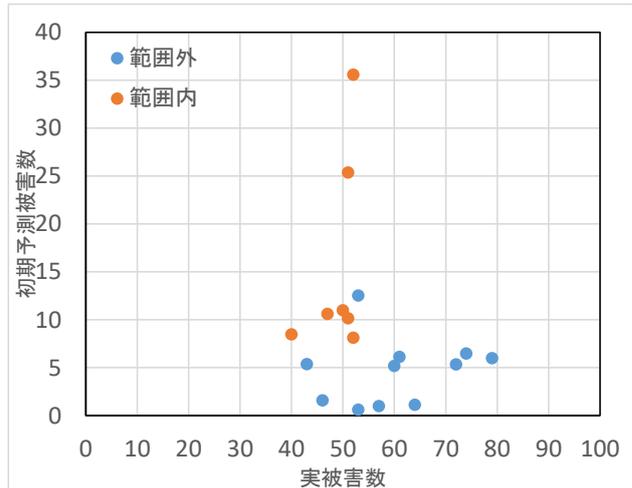


図-6 実被害数が40~80件の範囲内ブロックの評価

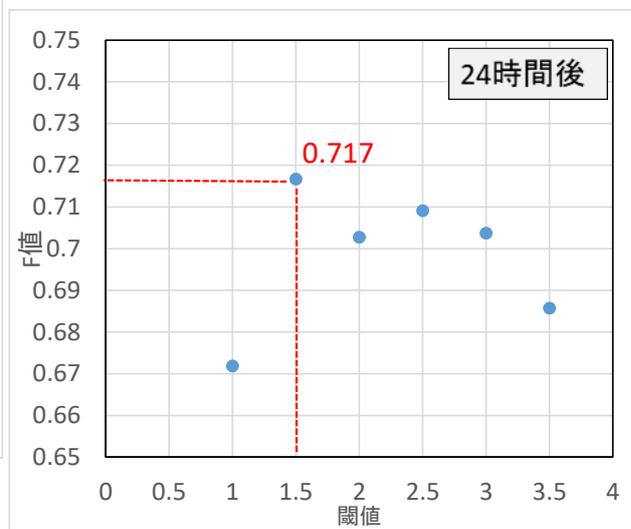


図-7 即時予測被害数の閾値とF値の関係

この結果を踏まえ、即時予測の予測被害数が何件以上であれば、実被害数が更新された被害確率の標準偏差内となるか調べた。即時予測被害数の閾値を変化させ、実被害数が更新された被害確率の標準偏差内か否かを判定し、2クラス分類の精度指標¹⁶⁾を用いて結果を評価した。各精度指標は式(11)~(14)であり、式中のTP, FP, FN, TNは表-5のように定義される。

$$\text{正答率(Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (11)$$

$$\text{適合率(Precision)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (12)$$

$$\text{再現率(Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

$$\text{F値(F-measure)} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (14)$$

本研究では、再現率と適合率を両方考慮することが出来る。F値が最大になるときの閾値を基準に精度の評価を行った。

即時予測被害数の閾値を0.5刻みで変化させ、式(11)~(14)の精度指標を計算した。24時間後においては、閾値が1.5の時に、F値が71.7%で最大となった。つまり、即時推定時の予測被害数が1.5件以上のブロックであれば、実被害数が被害確率の標準偏差内に含まれる可能性が高いことが分かった。(図-7, 表-6)。

次に、即時予測被害数が1.5以上のブロックのみの更新結果の評価を表-7に示す。表-4と比較すると、RMSEの値は小さく、さらに被害確率の平均値の標準偏差内に含まれるブロック数の割合も増加していることが分かる。しかし、即時予測被害数が1.5より小さいブロックの実際の被害数を合計すると、200箇所を超え、無視できない数である。これらのブロックの被害予測数を更新するのが今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際に東京ガスに電話で寄せられた漏洩通報履歴データの分析を行い、漏洩通報履歴に基づき被害予測結果を更新する手法の構築を試みた。予測被害数はLブロックごとに算出した。地震からの日数が経過し漏洩通報件数が増えるにつれて、更新された予測被害数が実際の被害数に近づくことが確認できた。

本研究の結果を精査すると、即時予測被害数が1.5件より小さいとき、実被害数が被害確率の標準偏差外となることが多かった。即時予測被害数が1.5より小さいブロックの実際の被害数の合計は、全被害数の約10%を占

表-6 即時予測被害数の閾値を1.5とした場合の評価結果 (24時間後)

		正解のデータ	
		$\mu_p' \pm \sigma_p'$ の範囲内	$\mu_p' \pm \sigma_p'$ の範囲外
分析結果	初期予測被害数 ≥ 1.5	40	35
	初期予測被害数 < 1.5	1	25

再現率：53.3%，適合率：97.6%，F値：71.7%

表-7 即時予測被害数1.5以上のブロックにおける更新された被害予測数の評価結果

	RMSE	被害確率の平均値の標準偏差内ブロック数 (全77ブロック)
24時間後(1日後)	18.58	43ブロック
48時間後(2日後)	15.19	54ブロック
72時間後(3日後)	14.01	55ブロック
168時間後(7日後)	10.35	64ブロック

める無視できない量であるため、これらのブロックの被害予測結果を適切に更新することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 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, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.2, pp.37-44, 2013.
- 2) 清水善久, 小金丸健一, 中山渉, 山崎文雄: 超高密度地震防災システム(SUPREME)の開発, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.26, pp.1285-1288, 2001.
- 3) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.283-296, 2003.
- 4) 東京ガス: 超高密度リアルタイム地震防災システム「SUPREME」, https://www.tokyo-gas.co.jp/techno/menu/2/11_index_detail.html (2020年8月15日閲覧)
- 5) 東京ガス: ガバナに関して, <https://blog2.tokyo-gas.co.jp/letter/2016/03/20160323.html> (2020年8月15日閲覧)
- 6) 東京ガス: 東京ガスの地震防災対策, 2008.
- 7) 坂口央一, 萬來雄一: 都市ガス事業における事業継続について, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.59-72, 2009.
- 8) 能島暢呂, 杉戸真太, 金澤伸治: 地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.187-200, 2003.
- 9) 養谷千風彦: すぐ役に立つ統計分布, 東京図書, 1998.
- 10) 渡部洋: ベイズ統計入門, 東京大学出版, 1985.

- 11) 猪股涉, 丸山喜久: 超高密度な地震観測記録に基づく低圧ガス導管予測システムの高度化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) (印刷中)
- 12) 向後陽平, 丸山喜久, 猪俣涉: 東北地方太平洋沖地震における都市ガス導管の被害分析, 土木工学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp.140-145, 2016.
- 13) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟中越地震の被害データに基づく高速道路盛土と被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol.64, No. 2, pp.208-316, 2008.
- 14) 神足史人: Excel で操る! ここまでできる科学技術書, 丸善, 2009.
- 15) 高田至郎, 藤原正弘, 宮島昌克, 鈴木康博, 依田幹雄, 戸島敏雄: 直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究, 水道協会雑誌, Vol. 70, No. 3, pp. 21-37, 2001.
- 16) 平井有三: はじめてのパターン認識, 森北出版, 2012.

UPDATE OF DAMAGE ESTIMATION OF GAS PIPELINES USING LEAKAGE REPORTS FROM CUSTOMERS

Yoshiaki KAWAMURA, Yoshihisa MARUYAMA, Seiji MIZUKAMI and Ken TAMURA

This study tries to construct a method to update the result of damage estimation of the gas pipelines based on the leakage reports from customers after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. A real-time earthquake monitoring system SUPREME, operated by Tokyo Gas Co., Ltd., can estimate the number of damage incidents to gas pipelines using observed SI (Spectrum intensity) values. The damage ratios are updated using the reports of gas leakage, and they are compared with those of actual damage.