

地震時のガス漏洩通報に基づく導管被害予測の更新に向けた検討

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

19WM1330 河村 祥彰
 Kawamura Yoshiaki

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

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 the 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 ratios.

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、高圧および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SUPREME^{2),3)}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は、東京ガスの供給区域内に約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センサーが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に寄せられるガス漏洩の津法情報に基づき、被害予測結果を更新する手法を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. 分析対象データ

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、低圧ガス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5~10km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、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⁴⁾。Lブロックごとの平均SI値は、概ね15~30cm/s程度である。また東京ガスが定めている地形区分³⁾(50mメッシュ単位)を使用する。

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。

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

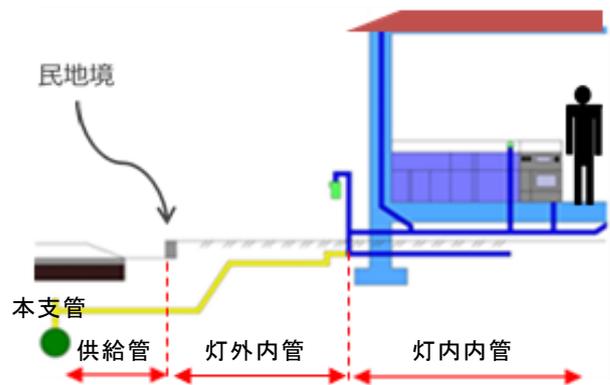


図-1 都市ガス供給の主な設備区分

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⁵⁾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⁵⁾。

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

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

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⁶⁾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」⁷⁾と呼ばれ、被害推定式によって算出された推定値の不確実性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・丸山⁸⁾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))。文献⁸⁾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⁸⁾。

向後⁹⁾は、ネジ継手を有する供給管、灯外内管(埋設部)

表-2 継手の被害予測手法の適用方法⁸⁾

	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⁸⁾

	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

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(6))を変形し、 λ を管路延長を重みとした誤差の2乗和を最小化するように定めた($\lambda = 3.73$)¹⁰⁾。

(2) ガス導管の被害予測結果の更新への適用

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⁾。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、地震動の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。

$$\mu_p = N / M_T \quad (8)$$

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・丸山⁸⁾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⁹⁾の被害予測式を用い、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(8)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_T 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、低圧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、全通報数のうちガス導管の被害に係る(本支管・供給管・灯外内管・灯内内管・メーター)通報データを用いた。7日間かけて全ての需要家が一樣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）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-2、各時間における予測被害数と実被害数の比較を図-3、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21ブロックの72時間後の結果に注目した。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。

この結果を踏まえ、即時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

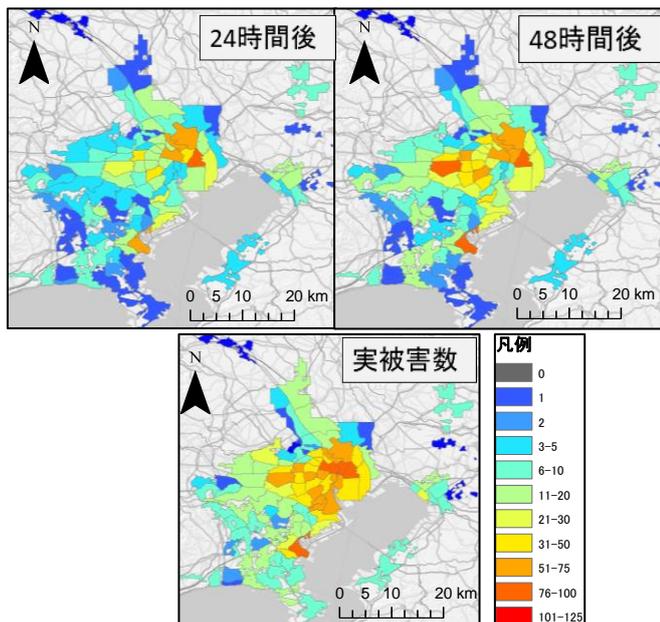


図-2 被害予測の更新結果と実被害数

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)	19.10	42 ブロック
48 時間後(2 日後)	13.01	66 ブロック
168 時間後 (7 日後)	8.98	78 ブロック

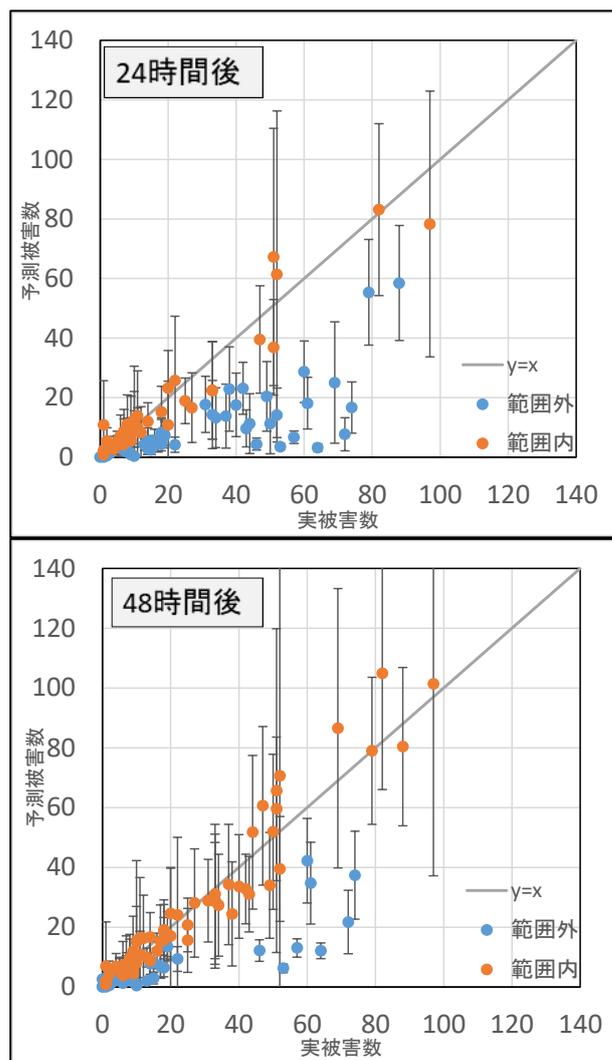


図-3 更新された予測被害数と実被害数の比較

ることとした。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を用いて結果を評価した。各精度指標は式(9)～(12)であり、式中の TP, FP, FN, TN は表-5のように定義される。

$$\text{正答率(Accuracy)} = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \quad (9)$$

$$\text{適合率(Precision)} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (10)$$

$$\text{再現率(Recall)} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (11)$$

$$\text{F 値(F - measure)} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (12)$$

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(9)～(12)の精度指標を計算した。その結果、24 時間後においては、閾値が 2.0 のときに F 値が 84.7% で最大となった。つまり、即時推定時の予測被害数が 2.0 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（表-5）。

表-5 即時予測被害数の閾値を 2.0 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 ≥ 2.0	61	21
	初期予測被害数 < 2.0	1	18

再現率：74.4%，適合率：98.4%，F 値：84.7%

表-6 新たに作成した被害関数の適用結果 (24 時間後)

本支管の実被害数	ブロック数	予測精度が改善したブロック数
0	14 ブロック	12 ブロック
1	4 ブロック	1 ブロック
3	1 ブロック	0 ブロック

本支管以外の実被害数	ブロック数	予測精度が改善したブロック数
0	2 ブロック	1 ブロック
1	3 ブロック	2 ブロック
2	5 ブロック	2 ブロック
5	1 ブロック	1 ブロック
7	1 ブロック	1 ブロック
9	3 ブロック	3 ブロック
13	1 ブロック	0 ブロック
53	1 ブロック	0 ブロック
56	1 ブロック	0 ブロック
61	1 ブロック	1 ブロック

しかし、即時予測被害数が 2.0 件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った。したがって、これらのブロックの被害予測数の更新に向けた検討を行う。

まず、本支管と本支管以外（供給管・灯外内管・灯内内管）のそれぞれについて、即時予測被害数が 2.0 件以上のブロックの更新後の被害率を求めた。次に、猪股・丸山の被害予測式⁸⁾（式(6)）に基づき、 λ を誤差の 2 乗和を最小化するように定め、新たに被害関数を作成した（図-4）。最後に新たに作成した被害関数を即時予測被害数が 2.0 件より小さい全 19 ブロックに適用した。その結果、24 時間後では、本支管は 19 ブロック中 13 ブロック、本支管以外（供給管・灯外内管・灯内内管）は 19 ブロック中 11 ブロックにおいて、予測被害数が実被害数に近づき、予測精度の改善が見られた（表-6）。

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 2.0 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

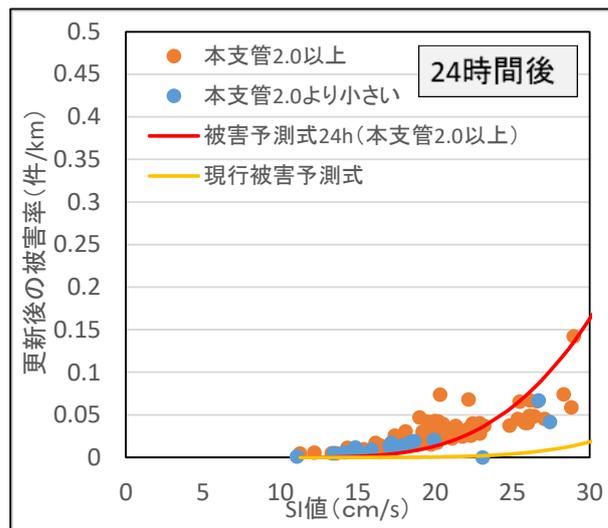


図-4 初期被害予測数が 2.0 件以上のブロックを用いて作成した本支管の被害関数

とが多かった。そこで、本支管と本支管以外（供給管・灯外内管・灯内内管）のそれぞれについて、即時予測被害数が 2.0 件以上の各ブロックの更新後の被害率を求め、新たに被害関数を作成した。この被害関数を即時予測被害数が 2.0 件より小さいブロックに適用した結果、予測精度の改善が見られた。主に改善が見られたブロックは実被害数が小さかったブロックであった。今後は、本研究の手法で精度が向上しなかったブロックの被害予測結果を適切に更新することが課題である。

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) 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.
- 5) 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.
- 6) 蓑谷千風彦: すぐ役に立つ統計分布, 東京図書, 1998.
- 7) 渡部洋: ベイズ統計入門, 東京大学出版, 1985.
- 8) 猪股渉, 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), Vol. 76, No. 3, pp. 424-441, 2020.
- 9) 向後陽平, 丸山喜久, 猪俣渉: 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. 140-145, 2016.
- 10) 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.