

首都圏の都市ガス導管網の地震時脆弱性評価

Evaluation of seismic vulnerability of gas distribution pipeline in Tokyo metropolitan area

15TM0322 向後 陽平  
 Yohei Kogo

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake caused severe damage to various lifeline systems, such as electric power supply, water supply, sewage, city gas supply, and telecommunication systems. This study investigates the damage ratios of gas distribution pipelines in Tokyo Metropolitan area. The damage dataset of gas distribution pipelines compiled by Tokyo Gas Co., Ltd. was employed to obtain the damage ratios with respect to the type of joint for gas pipe. Assuming the Poisson process for modelling pipe failures, the seismic vulnerability of gas pipelines is evaluated for the pipes. The effects of topographic features are also considered for the evaluation of seismic vulnerability of gas pipelines. This study also estimates the locations of damage incidents of the mains with screwed joints based on the SEM (Structural Equation Modeling) and the SVM (Support Vector Classification).

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、水道、ガスなどの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、耐震性の劣る低圧ガス導管に被害が発生したが、防災システムSUPREME<sup>1)</sup>が確実に稼働し安全を確保した。低圧ガス導管における被害数<sup>2)</sup>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。SUPREMEによって、供給エリア内に設置されている約4000箇所のSIセンサーなどから、この地震に関する多くのデータを得ることができた。

既往研究<sup>2)</sup>では、東北地方太平洋沖地震の際に被害の大半を占めたネジ継手の本支管被害率について、SUPREMEに搭載されている被害推定式の精度検証が行われた。本支管のネジ継手に関してはSUPREMEの被害推定式の精度が高いことが確認できた。

そこで本研究では、本支管の被害を継手ごとに整理し、被害予測式の地形補正係数を導出し、被害予測の高度化を図る。さらに被害位置の推定することを目的とした。

2. 分析対象データ

本研究では、東京ガス(株)がとりまとめた東北地方太平洋沖地震の際のガス管の被害データ、50mメッシュごとの管路延長データ、SUPREMEによって推定された50mメッシュのSI値分布、PL値分布を用いた。地形区分は、東京ガス(株)が定めている地形区分<sup>1)</sup>(50mメッシュ)を使用した。

ガス管の被害は、被害位置、設備区分(本支管、供給管、灯外内管など)、管種、接合方法が取りまとめられている。また、管種、接合方法ごとにガス導管の延長が50mメッシュ単位でまとめられている。

3. 本支管の地形区分ごとの被害分析

(1) 地形補正係数に関する検討

本章では、被害予測の高度化を目指し、非液状化地域の本支管のうち耐震性の低いネジ継手、機械式継手として初期に採用されていたLM継手の被害を地形区分ごとに分析する。メッシュごとの被害数をポアソン過程を仮定して推定し、東北地方太平洋沖地震の際の実測値と比較を行う。この成果は、ガス導管の被害予測式に導入されている補正係数の再検討や継手別のガス導管の耐震性能評価に貢献できる。なお、本章では、地震動による被害を厳密に評価す

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導管の被害数<sup>2)</sup>

	埋設部					地上部	合計	
	接合部	管体						
本支管	72	亀裂	折損	水溜まり	接合部隙間	経年劣化	-	145
		10	3	4	1			
供給管	23	108					-	131
灯外内管	137	372					420	929

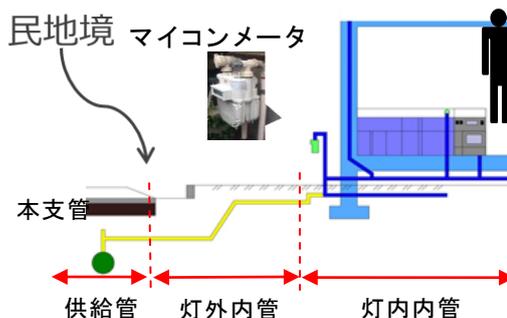


図-1 都市ガス供給の設備区分

ることを目的としている。そこで、ガス導管の被害のうち管体の経年劣化が主因と考えられる被害は除外した（表-1参照）。

ガス導管の被害の発生が、ポアソン過程に従うものと仮定する<sup>3), 4)</sup>。このとき、メッシュごとの被害数は、以下のように書ける。

$$p(X=x_k) = (N_{ck})^{x_k} \cdot \exp(-N_{ck}) / x_k! \quad (x_k = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ここで、 $k$ はメッシュコード、 $p(X=x_k)$ はメッシュ内の被害数が $x_k$ である確率を表す。 $N_{ck}$ はメッシュごとの平均被害数であり、以下のように仮定した。

$$N_{ck} = 2.36\Phi(\ln SI_k - 4.298) / 0.387 \times C' \times l_k \quad (2)$$

すなわち、ネジ継手の本支管の被害関数を基準とした被害率に、メッシュごとの管路延長 $l_k$ を乗じている。さらに、地形区分ごとの補正係数（地形補正係数）として $C'$ を導入している。 $SI_k$ はメッシュごとのSI値を表す。補正係数 $C'$ の値を適宜変化させ、式(1)、(2)に従う平均被害数をメッシュごとの被害数とみなした。この結果と東北地方太平洋沖地震の際のガス導管の被害数を比較し、地形補正係数に関する検討を行う。

独立な確率変数 $X$ 、 $Y$ がそれぞれ平均値 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ のポアソン分布 $p(\lambda_1)$ 、 $p(\lambda_2)$ に従っているとき、確率変数の和 $X+Y$ はポアソン分布 $p(\lambda_1+\lambda_2)$ に従う（ポアソン分布の再生性）<sup>5)</sup>。式(1)、(2)のようにメッシュごとのガス導管の被害の発生がポアソン過程に従うとき、ある地形区分の被害総数は、ある地形補正係数 $C'$ の下で式(3)のように算出される $\mu^*$ を平均値とするポアソン分布に従う。

$$\mu^* = \sum_{k=1} N_{ck} \quad (3)$$

また、このときの標準偏差 $\sigma$ は $\mu^*$ の平方根で与えられる。

図-2に、地形補正係数 $C'$ と地形区分ごとの推定被害数の平均値 $\mu^*$ および $\mu^* \pm \sigma$ の関係を示す。さらに、図中では東北地方太平洋沖地震の際の実際の被害数を併せて示している。たとえば、ネジ継手の本支管では、人工改変地で地震動が主因と考えられる接合部および管体の亀裂、折損の被害が5件発生している。この被害数は、地形補正係数 $C'$ を0.83~2.0とすると、 $\mu^* \pm \sigma$ の範囲で再現できる。

図-2のように推定された、ネジ継手およびLM継手の本支管の地形区分に応じた補正係数の範囲を表-2に示す。平均的には、ネジ継手の補正係数は沖積平野、良質地盤、人工改変地の順に大きくなるが、顕著な違いはない。一方、谷底平野の補正係数はほかの3つの地形区分と比べて大きく、例えば沖積平野に対して約5~6倍の補正係数を示している。地盤の不整形性の影響によって、地震動が増幅されたり、ひずみが不整形境界面で大きくなる<sup>6), 7)</sup>ため、とくに谷底平野で埋設管に被害が生じやすかったものと考えられる。LM継手はネジ継手と比べ、どの地形区分においても補正係数が小さいことが分かる。具体的には、沖積平野のLM継手の補正係数はネジ継手のものの約0.4倍程度である。

## (2) 被害推定結果と実被害の比較

前項で得た補正係数を用いて、地形区分ごとに被害予測を行った。表-2に示した実被害数とポアソン分布の平均値 $\mu^*$ が一致するときの地形補正係数を各地形区分の補正係数と仮定し、メッシュごとに被害数を推定した。具体的には、式(3)に従うポアソン乱数を各メッシュ1回だけ発生させた。ネジ継手の本支管について推定された被害数は、人工改変

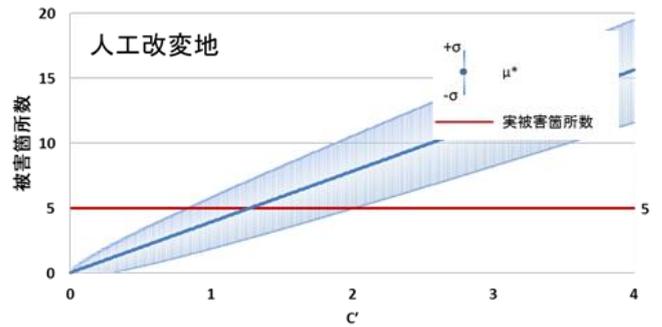


図-2 非液状化地域における本支管ネジ継手（人工改変地）の補正係数の評価

表-2 地形区分ごとの補正係数（本支管ネジ継手およびLM継手）

	下限	被害数=μ*	上限
ネジ継手 良質地盤	0.60	0.93	1.45
LM継手 良質地盤	0.10	0.25	0.65
ネジ継手 沖積平野	0.60	0.85	1.21
LM継手 沖積平野	0.20	0.30	0.47
ネジ継手 谷底平野	3.76	4.75	6.01
LM継手 谷底平野	1.23	1.92	2.99
ネジ継手 人工改変地	0.83	1.29	2.0
LM継手 人工改変地	0.13	0.33	0.85

地で6件、谷底平野で17件、沖積平野で6件、良質地盤で5件の合計34件となった。実被害数は人工改変地で5件、谷底平野で18件、沖積平野で8件、良質地盤で5件の合計36件であった。またLM継手に関しては、人工改変地で0件、谷底平野で5件、沖積平野で3件、良質地盤で0件の合計8件が推定された。実被害は人工改変地で1件、谷底平野で5件、沖積平野で3件、良質地盤で1件の合計10件であった。被害が発生していると推定されたメッシュの位置が実被害と厳密に一致したメッシュはなかった。補正係数を調整することによって被害総数の推定精度を高めることはできたが、被害位置を的中させることには至らなかった。

## 4. 被害位置の推定

### (1) ガス導管の被害発生確率の導出

本研究では、共分散構造分析（SEM）<sup>8)</sup>を用いて被害位置の推定を行った。SEMとは複数の構成概念間の関係を検討できる手法であり、SI値、管路延長、地形区分、被害発生確率を素因（観測変数）とおいた。

被害発生確率はベイジアンモデルおよび、ファジーセットモデルの二つの計算手法<sup>9)</sup>により求めた。ベイジアンモデルは式(4)、ファジーセットモデルは式(5)に帰着する。

$$S_q = \frac{P(c_{1j}) \dots P(c_{mj})}{P(c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj})} \cdot P\{T_q\} \cdot \frac{P(T_q|c_{1j})}{P(T_q)} \dots \frac{P(T_q|c_{mj})}{P(T_q)} \quad (4)$$

$$S_q = \mu_s\{q|c_{1j}, \dots, c_{ij}\} = 1 - \prod_{i=1}^m \{1 - \frac{N_{ij}}{N_i}\} \quad (5)$$

ここで、 $N_{ij}$ は*i*番目の素因におけるカテゴリ*j*のメッシュ数、 $A$ は全メッシュ数、 $N_X$ はメッシュ*q*における*i*~*m*番目の素因に対する全カテゴリにおいて等しい属性のメッシュ数、 $N_0$ はガス導管被害のメッシュ数、 $N_i$ は*i*番目の素因におけるカテゴリ*j*の領域に属するガス導管被害のメッシュ数である。

(2) 基本パス図の作成

SEMの実行にあたり、基本となるパス図を作成する。本研究ではパス図の作成にグラフィカルモデリング(GM)<sup>10)</sup>を用いた。グラフィカルモデリングとは、変数を頂点にとったグラフに対応した統計モデルを推論する作業のことである。すなわち本研究では、前項で述べた四つの素因を頂点としたモデルを作成した。モデリング作業の結果、管路延長と地形区分間の線を切断したモデルを基本パス図とした。また、本研究では既往研究<sup>11)</sup>を参考に、基本パス図に潜在変数を導入したモデルも作成した。

(3) 的中率の算出

前項で作成したモデルからの中率を算出し、本研究で採用する計算手法およびモデルを決定した。ガス導管の被害発生的中率は、横軸にパス図をもとに算出した被害発生確率、縦軸にその度数および累積頻度を示す。さらに負極側からガス導管の被害発生地点の累積頻度曲線を、正極側からガス導管の非被害発生地点の累積頻度曲線を描く(図-3)。つまり、被害発生地点をAグループ、非発生地点をBグループとすると、

$$F_A(X) = 1 - \int_{-\infty}^X f_A(x) dx \quad (\int_{-\infty}^{+\infty} f_A(x) dx = 1) \quad (6)$$

$$F_B(X) = \int_{-\infty}^X f_B(x) dx \quad (\int_{-\infty}^{+\infty} f_B(x) dx = 1) \quad (7)$$

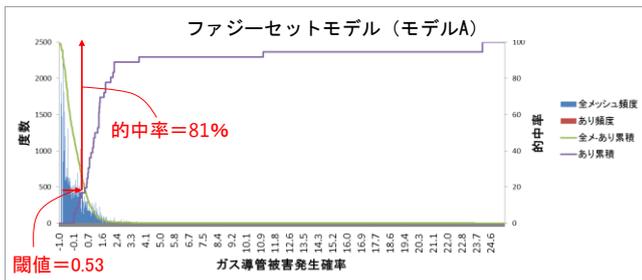
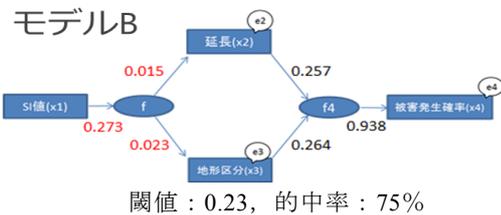
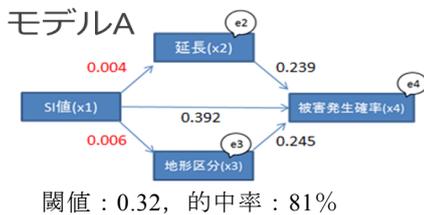


図-3 的中率を求める際のグラフ

● ベイジアンモデル



● ファジーセットモデル

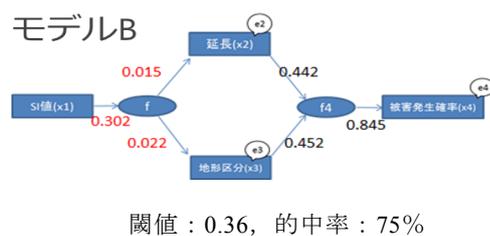
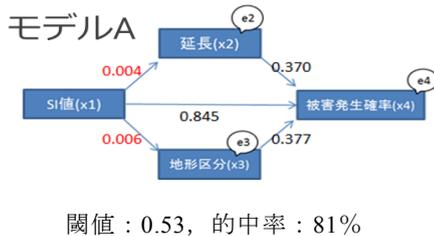


図-4 パス係数および的中率

となり、 $F_A(X), F_B(X)$ の交点が判別の閾値となる。

的中率を算出した結果を図-4に示す。モデルAとモデルBの的中率は計算手法によらず同じ値となった。また、モデルAとモデルBでは、モデルAの方が良い的中率となったため、SEMではファジーセットモデルのモデルAを採用することとした。

(4) サポートベクターマシンによる2クラス分類

共分散構造分析と別の被害位置推定的手法として、本研究ではサポートベクターマシン(SVM)を用いた。SVMとは、教師あり学習を用いたパターン認識手法の一つである。基本的には二つのクラスを識別するための識別器を構成するための学習法とされている。

分析を実行するにあたり、式(8)、式(9)を満たすハイパーパラメータC,  $\gamma$ を求める必要がある<sup>12)</sup>。

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i \in [m]} \xi_i \quad (8)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (9)$$

ここで、 $w$ は実数ベクトル、 $b$ はスカラー、 $\xi$ は非負の変数、 $K()$ はカーネル関数である。

ハイパーパラメータを求めるために、被害発生メッシュに重み付け<sup>13)</sup>、全データの30%を学習データ、 $\gamma$ を $10^{-5} \sim 10^5$ の範囲で5ケース、Cを $10^{-2} \sim 10^2$ の範囲で11ケースの合計55通りの組み合わせについてパラメータの検討を行った。分析結果の一部を表-3に示す。表-3で網掛けされたパラメータの組み合わせは学習データの2クラスを完全に的中させたものである。これらの分析は好ましいように考えられるが、学習データに特化された判定が行われている可能性が高く、汎用性が考慮されない。そこで、本研究では学習データとテストデータ(全データから学習データ

表-3 ハイパーパラメータの検討

人工実データ k-fold cross cost	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	$10^2$
0.01	1.00	1.00	0.47	0.81	0.86	0.96	0.99	1.00
0.1	1.00	0.30	0.85	0.85	0.94	0.97	0.99	1.00
1	0.25	0.86	0.84	0.89	0.96	0.99	1.00	1.00
10	0.86	0.84	0.86	0.94	0.98	0.99	1.00	1.00
100	0.84	0.86	0.90	0.95	0.99	1.00	1.00	1.00

を除いたデータ)の的中率のバランスを考慮して、パラメータを選択した。その結果、人工改変地では $\gamma=1.0$ ,  $C=1.0$ , 谷底平野では $\gamma=10$ ,  $C=0.1$ , 沖積平野では $\gamma=10$ ,  $C=1.0$ , 良質地盤では $\gamma=10$ ,  $C=0.1$ とすることとした。

### (5) ガス導管の被害発生地点評価図

SEM で採用したパス図の結果と SVM の分析の結果を用いて、東北地方太平洋沖地震の際のガス導管の被害位置と比較し、被害発生地点の評価図を作成した。結果を図-5に示す。

SEM の評価図から、被害ありと推定されたメッシュが実際の被害よりも過剰に抽出されており、安全側に評価されていることが分かった。一方、SVM の評価図からは、被害ありのメッシュに重みをつけたものの、被害発生地点の見落としが多いことが分かった。

## 5. まとめ

本研究では東北地方太平洋沖地震において被害が多かったネジ継手の本支管に関して被害分析を行った。被害予測の高度化を目的とし、本支管の被害を継手ごとに整理し、被害予測式の地形補正係数に関する評価を行った。補正係数は沖積平野, 良質地盤, 人工改変地の順に大きくなるが、顕著な違いはなかった。一方、谷底平野の補正係数は他の3つの地形区分と比べて大きいことが分かった。

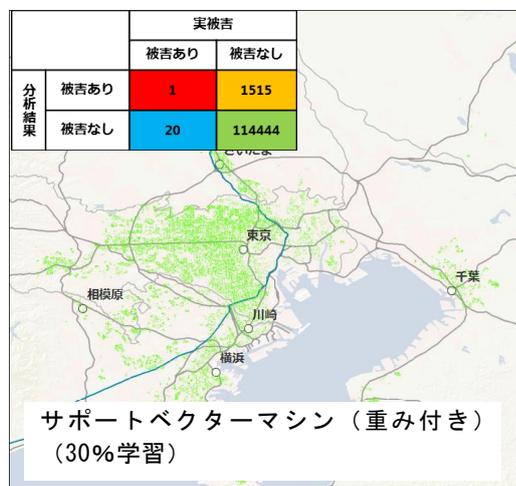
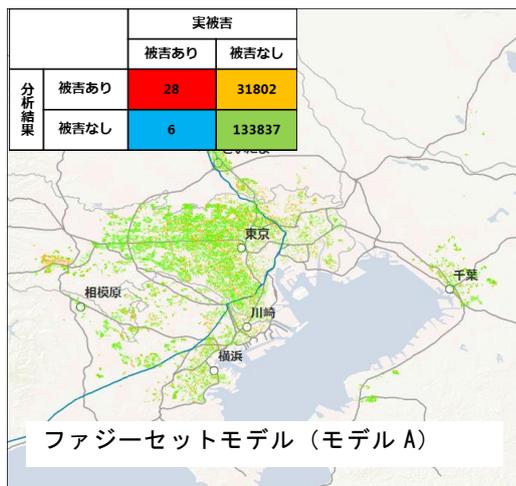


図-5 被害発生地点評価図

本研究では、被害位置の推定を行った。被害位置の推定には共分散構造分析とサポートベクターマシン (SVM) による分析を用いて推定した。共分散構造分析では、SI 値、管路延長、地形区分を変数 (素因) とし、埋設管の被害にどのように影響を及ぼすのかを検討した。グラフィカルモデリングを用いて作成した基本パス図をもとに共分散構造分析を行った結果、SI 値が被害発生に及ぼす影響が強いことが分かった。SVM では30%学習を行い、2クラス分類を行った。学習データは被害なしが多いため、本研究では被害ありのデータに重み付けを行い、ハイパーパラメータを設定した。共分散構造分析と SVM の分析の結果を実際の被害位置と比較し、的中率を算出した。SVM では共分散構造分析よりも高い的中率を得ることができたが、実際の被害地点の見逃しが確認された。今後はさらに素因を増やしたモデルの検討を行うとともに、SVM の適切なハイパーパラメータの設定を目標とする。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Federal Emergency Management Agency: Hazus-MH 2.1 Technical Manual, 2015.
- 4) 永田茂, 丸山喜久, 庄司学: 既往の上水道配水管の地震被害予測式の予測精度に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I\_50-I\_61, 2015.
- 5) 浅見泰司: 都市工学の数理: 基礎編, 日本評論社, 2015.
- 6) 清野純史, 井上佳樹, 清水謙司: 地震時における埋設管に及ぼす不整形地盤の影響について, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp. 214-221, 2009.
- 7) Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., Sakanoue, T. and Hamanaka, R.: Three-dimensional nonlinear seismic ground response analysis of local site effects for estimating seismic behavior of buried pipelines, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, DOI: 10.1115/1.4026208, 2014.
- 8) 豊田秀樹: 共分散構造分析[R編], 東京図書, 2014
- 9) 大林成行, 小島尚人, Chang-Jo F.Chung: 斜面安定性評価モデルの精度比較とその実用化への提案, 土木学会論文集, No.630/VI-44, pp.77-89,1999.
- 10) 小島隆矢, 山本将史: Excel で学ぶ共分散構造分析とグラフィカルモデリング, オーム社, 2003
- 11) 小島尚人, 大林成行, 青木太: 共分散構造分析を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.79-93,2002.
- 12) 竹内一郎, 鳥山昌幸: サポートベクトルマシン (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 講談社, 2015
- 13) 六本木で働くデータサイエンティストのブログ: 不均衡データを SVM でクラス分類するにはどうすれば良いか, <http://tjo.hatenablog.com/entry/2014/10/09/224106>