

実地震データと振動台実験結果に基づくマイコンメーター遮断特性評価

Seismic Shutoff Characteristics of Intelligent Gas Meters Based on Actual Earthquake Data and Shaking Table Tests

05UM3209 矢野 嘉久
Yoshihisa Yano

指導教員 山崎 文雄

SYNOPSIS

To prevent secondary disasters due to strong earthquakes, Tokyo Gas Co., Ltd. developed an earthquake monitoring and rapid damage assessment system called SUPREME after the 1995 Kobe earthquake. SUPREME has a subsystem to estimate the number of gas meters' shutoff because of an earthquake. In this study, to improve the accuracy of estimation, the relationship between the earthquake motion and gas meters' shutoff rate was investigated using about 200,000 monitored customers' data due to three actual earthquakes, including the 2005 North-western Chiba Prefecture earthquake. In addition, a series of shaking table tests were conducted for seismic sensors in gas meters to investigate the effects of seismic responses of buildings. A shutoff rate estimation model of gas meters was then constructed based on these examinations.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、都市インフラの様々な分野で、地震発生時の被害軽減に向けた新しい取り組みが行われるようになってきた。その一例として、東京ガス(株)では2001年からSUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake)と呼ばれる防災システムを導入し、高密度に配備された地震計(新SIセンサー)により観測された地震記録をもとに、地区ガバナ単位でガス供給を自動的に停止する^{1),2)}。また、各需要家には、ある大きさの地震動で感震遮断するマイコンメーターが設置されており、その遮断数を推定する機能もSUPREMEは有している。しかし、マイコンメーターの遮断特性に関してはまだ不明瞭な部分があり、現在の遮断数の推定精度は高いとはいえない。

2005年7月23日に発生した千葉県北西部地震では、東京ガス供給エリア内のマイコンメーターが多数遮断した。本研究では、千葉県北西部地震の際に得られた約20万件の遮断・未遮断データを用いて、地震動強さとマイコンメーター遮断率の関係を評価した。また、他の地震の際の遮断特性を千葉県北西部地震の結果と比較した。さらに、建物応答の影響を調べるため、マイコンメーターに内蔵されている感震器の振動台実験を行った。これらの検討結果をふまえて、マイコンメーター遮断率推定式を構築した。

2. STATION24 データ分析

(1) ST24 データ概要

2005年7月23日16時35分頃、千葉県北西部を震源とする地震が発生した。この地震では、ライフライン・鉄道など様々な都市インフラに被害や機能停止などの影響を及ぼした。東京ガス供給エリア内でも各家庭のマイコンメーターは震度5強相当でガスを自動遮断するため、かなりの件数でマイコンメーターが動作し、自動的にガス遮断した。

図-1に震度分布とマイコンメーターの遮断分布を示す。しかし、ガス導管の被害はなく、各家庭で直ちに復帰操作が可能であった。

東京ガスでは防災対策の一環として、SUPREMEの導入に加えて、様々なサービスを行っている。そのうちのひとつがSTATION24 (ST24) システムであり、各家庭に設置してあるマイコンメーターを電話回線で東京ガスと結び、24時間体制で監視している¹⁾。このシステムによって、各戸に設置されているマイコンメーターの遮断履歴情報が遠隔で取得できるようになっている。今回の地震でST24システムによって得られたデータとして、遮断10,175件、未遮断187,814件の約20万件が入手できた。このデータには住所や建物構造などの情報も含まれている。建物構造は全データでは75%以上が木造建物である。このシステムは有料サービスであり、加入世帯は一戸建ての需要家の割合が大きい。そのため、加入世帯の建物構造は木造建物が多い。

(2) ガバナ距離の検討

地震動の大きさは、地形・地盤条件によって異なるため、新SIセンサーによる観測値の有効範囲を検討する必要がある。図-2に一番近いガバナの範囲が100m, 300m, 500m以内の遮断メーターのSI値と最大加速度(PGA)値別の頻度分布を示す。全体的な傾向としてSI・PGAの両方で100mと300m・500mの傾向に多少の違いがあることがわかった。これは、100m以内の場合データ数が少なく、分布の傾向がやや異なる。300mと500mでは全体的な傾向に大きな差はなかったので、データの全体数のより多い500m以内を今回の有効データの範囲とした。

次に建物の地震応答特性が遮断傾向にどのような影響があるかを調べるために、建物応答の影響が少ないと思われる木造建物とそれ以外の建物に分けて範囲500m以内のSI・PGA値別の分布の傾向をみた。全体的な分布ではSI・PGAのどちらとも傾向に大きな変化が見られなかった。し

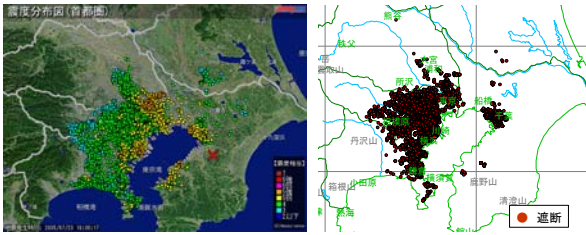


図-1 千葉県北西部地震の震度分布 (左) と遮断分布 (右)

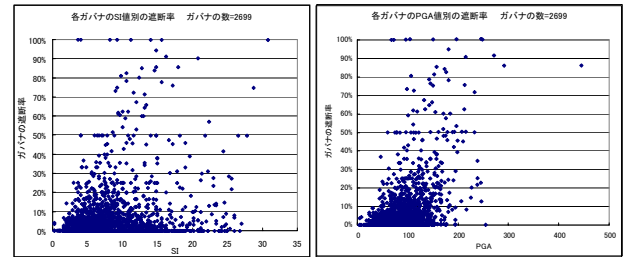
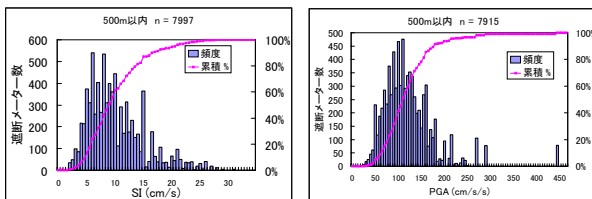
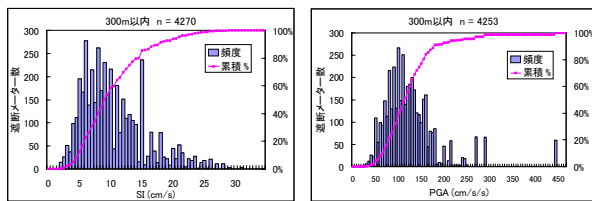


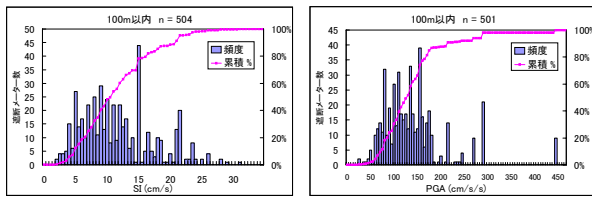
図-3 ガバナごとの観測 SI (左)・PGA (右) と遮断率の関係



(a) 範囲 500m 以内



(b) 範囲 300m 以内



(c) 範囲 100m 以内

図-2 データ利用範囲別の遮断分布 SI (左)・PGA (右)

しかし、ST24 データには木造建物の割合が大きいことが少なからず影響していると思われるので、遮断数推定に関しては建物の地震応答の影響を考慮する必要があると思われる。

(3) 地震動強さと遮断率の関係

全データ・木造建物のみ・木造建物以外のそれぞれの建物について SI・PGA 値別の遮断率を算出した。SI 値の遮断率では、28kine(cm/s)までは遮断率の大きな上昇はなく、全体的に遮断率は低かった。28kine 以上になると木造建物のみで遮断率は大きく上昇し、木造建物以外では 30kine 以上で大きく遮断率が上昇したが、28kine 以上になるとデータ数が大幅に減少するので、遮断率の信頼性は高いとはいえない。また、わずかであるが木造建物以外のほうが、木造建物のみと比べて 10kine 以上の遮断率が全体的に高かった。これは建物の地震応答の影響が原因の一つと考えられる。PGA 値の遮断率は木造・木造以外の両方で 120~140gal(cm/s²)あたりから遮断率が上昇し始め、260gal 以上から急上昇する。過去に行った振動台実験³⁾では、6 台のマイコンメーターの遮断 PGA 値の平均の分布が 140~190gal であった。

次に、ガバナごとの SI・PGA 値別の遮断率を図-3 に示す。

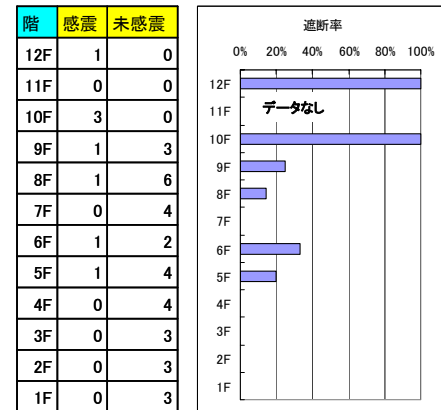


図-4 同一建物内の遮断状況 (ハイラーク千葉、千葉市中央区)

各ガバナでデータ数の違いはあるが、SI 値の分布では 27kine あたりまで 0%もしくは数%の遮断率のガバナが多く存在している。PGA 値の分布では 180gal を超えると低い遮断率のガバナはわずかになり、高い遮断率のガバナの割合が多くなった。

(4) 建物応答の遮断特性に与える影響

全体的な分布では、建物構造の違いによる地震応答の影響は明確には確認できなかった。そこで、実際にどれほどマイコンメーターの遮断に影響しているかを検討するために、マンションなど同一建物内の遮断状況を調べた。建物の各階の遮断状況の一例を図-4 に示す。これによると何階から遮断しやすくなるかは建物によって多少の違いはあるが、上層階は明らかに遮断しやすくなっているのがわかる。また、周辺の木造建物は遮断していない建物が多い。このことから、建物の地震応答が影響して、地震時に周辺の木造建物や高層建物の低層階はほとんど遮断しなくても、高層階だけ多く遮断してしまうという状況も十分考えられる。

3. 感震器振動台実験

(1) 実験概要

これまでの検討によって建物の地震応答特性がマイコンメーターの遮断に影響することはわかった。そこで、マイコンメーターの遮断値に建物地震応答が与える影響を検討するために、マイコンメーター内に設置されている感震器の振動台実験を行った。感震器は地震波を含め、ガス設備に加わるすべての振動を感知するようになっており、感震器内のボール(鋼球)がプレートに触れ、電流が流れる仕組みになっている。更に、その信号から地震波だけを区別

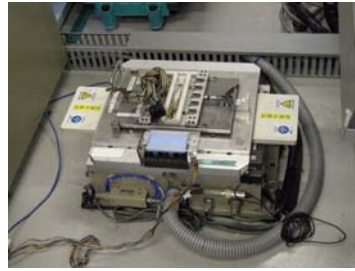
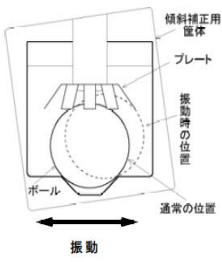


図-5 感震器内の構造図（左）と振動台（右）

表-1 感震器振動台実験結果

建物	階	実験番号	gal	遮断数
S-18 都町	16F	1	157	0/30
	17F	2	185	65/100
S-18 東千葉	3F	3	133	0/30
	4F	4	118	0/10
	17F	5	146	0/10
	18F	6	226	0/30
S-18 神戸	3F	7	126	0/10
	6F	8	131	0/10
	7F	9	130	0/10
	8F	10	123	0/10
	18F	11	185	0/30
RC-8 東千葉	3F	12	130	0/10
	4F	13	150	0/10
	5F	14	201	0/30
	6F	15	249	30/30
7F	16	271	30/30	
RC-8 神戸	3F	17	144	0/10
	4F	18	156	0/10
	5F	19	184	6/100
	6F	20	231	30/30
	7F	21	280	10/10
RC-8 都町	2F	22	140	0/30
	3F	23	219	30/30
RC-3 都町	2F	24	149	0/10
	3F	25	161	0/30
RC-3 東千葉	2F	26	142	0/10
	3F	27	221	30/30
RC-3 神戸	2F	28	204	65/100

できる。今回使用した感震器は信号が発生してから5秒以内に30ms以上のOFF時間を挟む30ms以上のONが3回以上発生している場合、メーターに作用した外乱を地震とみなすものである。実験では10個の感震器を設置し、すべての感震器の遮断判定を行うとともに、3つの感震器のパルス波形をオシロスコープで記録した。感震器サンプルの正弦波加震実験結果によると、遮断加速度の平均が10gal程度のばらつきがあるので、その遮断加速度の平均が大、中、小のものを各1つずつ選んだ。図-5に感震器内の構造図と振動台を示す。

入力地震動には、低層マンションの例としてRC造3層建物モデル、中層マンションの例としてRC造8層建物モデル、高層マンションの例としてS造18層建物モデルの応答加速度を用いた^{4),5)}。構造物は線形多質点モデルとし、加振条件は基礎固定で1階の床に地表面地震動を入力することとした。減衰は1次モードの減衰定数をRC造は0.03、S造は0.02と仮定し、高次モードの減衰定数は剛性比例型減衰を用いた。構築した多質点モデルの非減衰固有値解析^{6),7)}を行った。

構築した多質点モデルに入力する地表面地震動は、2005年7月23日に発生した千葉県北西部地震での東京ガス都町2丁目記録(Y成分)、東千葉1丁目記録(X成分)、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録(NS成分)を最大加速度100cm/s²にスケールリングしたものの3波とした。東千葉1丁目記録は、ST24のデータから建物の影響によって上層階のマイコンメーターの遮断率が大きかったハイラーク千葉に最も近い地震観測点で得られた記録なので使用することとした。これら3波の地震動を建物モデルに入力し、地震応答解析を行った。

(2) 実験結果

表-1に実験での遮断結果を示す。各実験ケースで、明らかに遮断しないと思われるケースは1回、180gal~200gal程度で1つも遮断しなかったケースと10個中全てが遮断したケースは3回、10個中複数が遮断したケースは10回行った。また、すべての波形で入力波と再現波はほとんど一致しており、振動台の地震波の再現性は高いといえる。

傾向としては建物の応答加速度が180gal以下のケースに関しては、すべてのケースで遮断せず、180gal以上から遮断し始め、200galを越えるとほとんどが遮断した。また、とくに180~190galの間では遮断の割合が0%~60%と大きくばらついた。これは、感震器ごとに多少の遮断gal値にばらつきがあることが原因の一つと思われる。全体的な結果としては、同一建物内において建物応答により階層による遮断にばらつきがでることがこの実験でも確認された。

4. 遮断率推定式の構築

(1) 重みなし回帰分析

マイコンメーター遮断数推定に向け、これまでのST24データ分析結果をふまえ、地震動強さと遮断率の関係から遮断率推定式を求める。データは建物応答の影響が少ないと思われる木造建物のみを用いた。ここでは、ST24データからマイコンメーターの遮断数の多かった千葉県北西部地震と2005年2月16日茨城県南部地震と2005年10月06日茨城県南部地震を用いた。また、千葉県北西部地震場合、SI値と遮断率の関係はかなりばらついているため、遮断数推定に用いる指標としてSI値と比べ当てはまりが良いと思われるPGA値を用いる。実際のマイコンメーターも、PGA値で遮断されるように設計されている。

いくつかの方法により推定式を求める。一つめはPGA値に対する遮断率が対数正規分布だと仮定し、縦軸に遮断率の逆関数、横軸にln(PGA)をとった確率紙を作成し、回帰直線を引いた⁸⁾。そして、回帰直線の逆関数の傾きと切片が対数の平均と標準偏差となるので、それらの値で対数正規累積分布を算出し遮断率推定式を求める。

二つめとしてロジットモデルに当てはめ遮断率推定式を構築する。ロジット(logit)とは、0から1の値をとるp(遮断率)に対し式(1)で表される値のことで⁹⁾、これを線形モデルに仮定する。式(2)で求めた値を式(3)に代入し、遮断率推定式を求める。

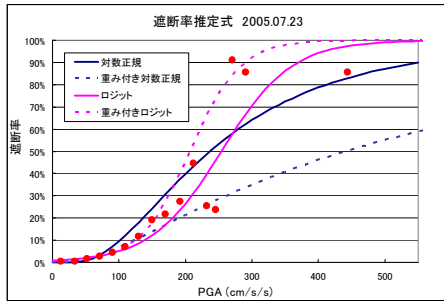
$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (1)$$

$$\log\frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2)$$

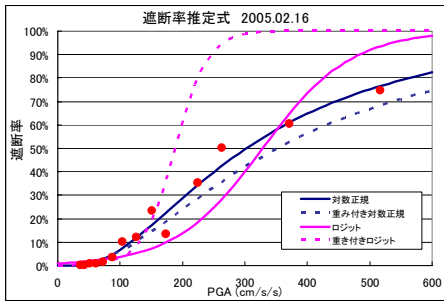
$$p = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}} \quad (3)$$

(2) 重み付き回帰分析

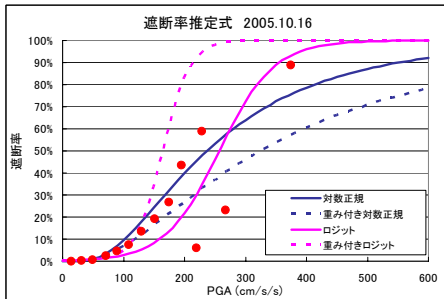
データ数 m_i を考慮した式(4)に示す重み付き最小二乗法により回帰直線を引き、遮断率推定式を求める。対数正規分布、ロジットモデル両方でこの重み付き回帰分析を行った。対数正規分布ではデータ数を考慮した回帰直線を引く



(a) 2005年7月23日千葉県北西部地震



(b) 2005年2月16日茨城県南部地震



(c) 2005年10月06日茨城県南部地震

図-6 回帰分析結果の比較

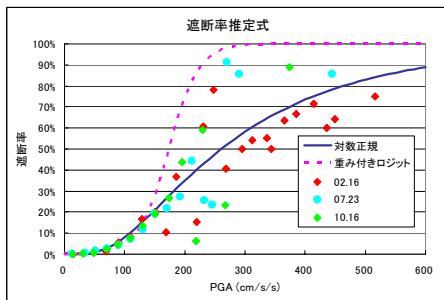


図-7 3つの地震データで求めた遮断率推定式

表-2 遮断数推定誤差 (3地震による回帰式)

PGA	実際の遮断数	対数正規	重み付きロジット
0-50gal	699	-365	-130
50-100gal	2797	555	-970
100-150gal	2769	911	379
150-200gal	1373	7	1038
200-250gal	302	67	479
250-gal	515	-26	242
全体	8455	1151	977

ことで式の傾きが緩やかになったが、逆にロジットモデルでは式の傾きは急になった。

$$L = \sum_{i=1}^n m_i \{y_i - (bx_i + a)\}^2 \quad (4)$$

(3) 推定精度の評価

千葉県北西部地震と2005年2月16日茨城県南部地震、2005年10月06日茨城県南部地震の3つの地震において、対数正規・重み付き対数正規分布・ロジット・重み付きロジットの4つの方法で求めた遮断率推定式を図-6に示す。マイコンメーターは150~250galで遮断するように設計されているので、その区間の推定精度にとくに注目すると、対数正規分布と重み付きロジットによって求めた推定式の精度がよかった。また、3つの地震で求めた推定式を比較すると、式の形状は似ていた。このことから地震ごとのばらつきは少ないと思われる。

次に、対数正規分布と重み付きロジットのどちらが遮断率推定式に適しているかを定めるため、3つの地震をまとめたデータを用いて遮断率推定式を求めたものを図-7に、実際の遮断数と推定数の誤差を表-2に示す。この推定結果では150gal~250galの間の遮断数推定で重み付きロジットでは大きく誤差が生じたのに対し、対数正規では精度よく推定できた。このことから、遮断率推定式として対数正規分布として求めた式が適していると思われる。

5. まとめ

本研究では、千葉県北西部地震を含む3地震の際に得られた都市ガスのマイコンメーターの遮断・未遮断データを用いて、地震動強さとマイコンメーター遮断率の関係を評価し、予測精度の高い遮断率推定式を構築した。

遮断・未遮断データの分析結果をもとにいくつかの方法で遮断率推定式を求めた結果、対数正規分布と仮定して求めた遮断率推定式によって精度よく推定することができた。

また、マイコンメーターの振動台実験等より建物の地震応答の影響が大きいことが分かったので、今後それらを考慮した分析も行う必要がある。

参考文献

- 1) 東京ガスHP: <http://www.tokyo-gas.co.jp/>
- 2) 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震情報の整備と分析・活用: 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉, 土木学会論文集, No. 738I-64, pp.283-296, 2003.
- 3) Seismic shutoff characteristics of intelligent gas meters for individual customers in Japan: F. Yamazaki, Y. Maruyama, A. Yamauchi, K. Nabana, H. Nakane, Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Bangkok, Thailand, Volume 3 - Wind and Earthquake Engineering, pp. 261-266, 2006.
- 4) 非線形多質点構造物の地震危険度評価: 井上超, 神田順, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 1, pp.501-506, 1998.
- 5) 地震荷重-地震種別の予測と建築物の応答: 日本建築学会, 丸善, 1992.
- 6) 最新耐震構造論: 柴田明徳, 森北出版, 1981.
- 7) Numerical Recipes in Fortran 77: Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, and Flannery B.P, Cambridge University Press, 2003.
- 8) 確率的手法による構造安全性の解析: 柴田明徳, 森北出版, 2005.
- 9) 統計学入門: 東京学統計学教室, 東京大学出版, 1991.