

# 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の遮断特性評価

山崎文雄<sup>1)</sup>，矢野嘉久<sup>1)</sup>，丸山喜久<sup>1)</sup>，山内亜希子<sup>2)</sup>，菜花健一<sup>2)</sup>

1) 千葉大学 都市環境システム学科，yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp, ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

2) 東京ガス(株) 防災・供給部，akko@tokyo-gas.co.jp, k-nabana@tokyo-gas.co.jp

## 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，従来からの防災システム(図1)に加えて，2001年から SUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake)と呼ばれる新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仕組みを構築した．また各需要家には，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，マイコンメーターが多数感震遮断し，東京ガスには問い合わせの電話が殺到した．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する．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する．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う．これらの検討結果を踏まえて，マイコンメーターの地震時遮断率推定式を構築する．

## 2. STATION24 のデータ分析

### 2.1 STATION24 のデータ概要

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．この地震は，ライフライン，鉄道，エレベータなど，様々な都市インフラに機能停止などの影響を及ぼした．東京ガスの供給エリア内でも，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，自動的にガス供給を遮断した．図2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<sup>2)</sup>．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，遠隔で取得可能である．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件の計約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，ST24の全データでは75%以上が木造である．このシステムは有料サービスであり，加入者は一戸建て住宅に住む割合が高く，そのため，建物構造としては木造が多い．

### 2.2 地区ガバナからの距離の検討

地震動の大きさは，地盤条件によって異なるため，地区ガバナに配備された新 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3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)の頻度分布を示す．全体的な傾向として，SI 値，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以内と500m以内では，全体的な傾向に大きな差はなかったため，データの全体数のより多い500m以内を今回の使用データ範囲とした．

次に，建物の地震応答特性が遮断状況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 値と PGA の分布の傾向をみた．全体的な分布では，SI 値，PGA のいずれも傾向に大きな変化が見られなかった．しかし，

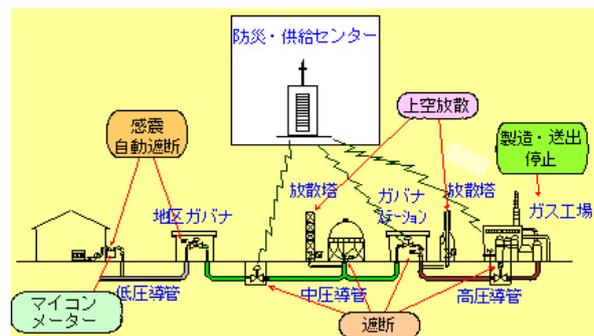
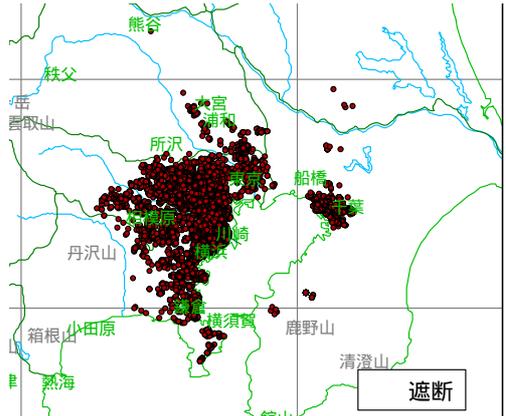


図1 東京ガスの防災システム<sup>1)</sup>

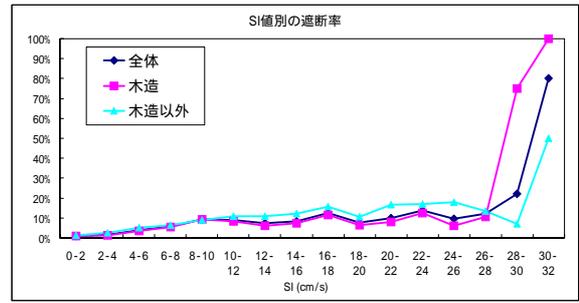


(a)震度分布

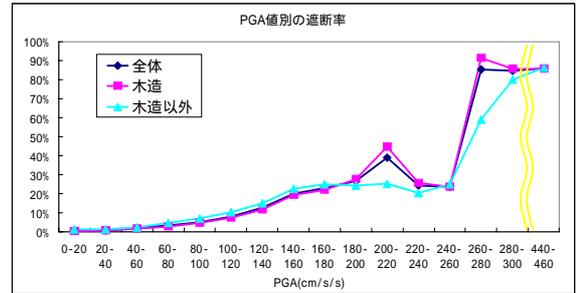


(b)マイコンメーターの遮断分布

図2 2005年千葉県北西部地震の震度分布とマイコンメーターの遮断分布



(a)SI 値



(b)PGA 値

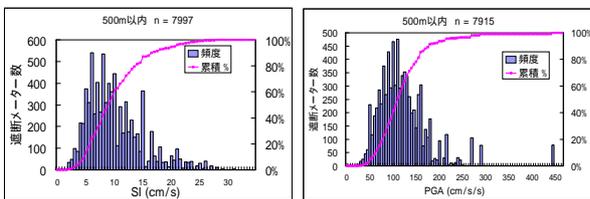
図4 建物構造別の地震動強さと遮断率の関係

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考えられ、詳細な遮断数推定に関しては、地域の建物構造比率に応じた建物地震応答の影響を考慮する必要があると思われる。

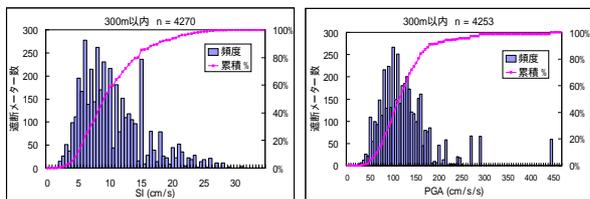
2.3 地震動強さと遮断率の関係

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 値と PGA に関する遮断率を算出した(図4)。SI 値の遮断率では、28cm/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い。28cm/s 以上になると木造建物のみについては、遮断率は大きく上昇し、木造建物以外では、遮断率は大きく上昇したが、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 10cm/s 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 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<sup>3)</sup>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。

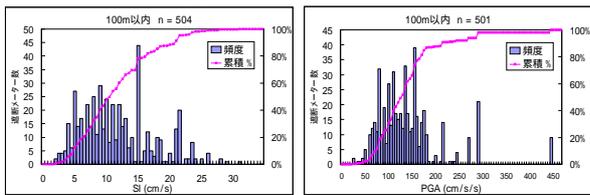
次に、地区ガバナごとの SI 値と PGA についての遮断率を図5に示す。各地区ガバナでデータ数の違いはあるが、SI 値の分布では 27cm/s あたりまで 0%もしくは数%の遮断率の地区ガバナが多く存在している。PGA 値の分布では、180gal を超えると低い遮断率の地区ガバナはわずかになり、高い遮断率のもの割合が多くなる。



(a) 範囲 500m 以内

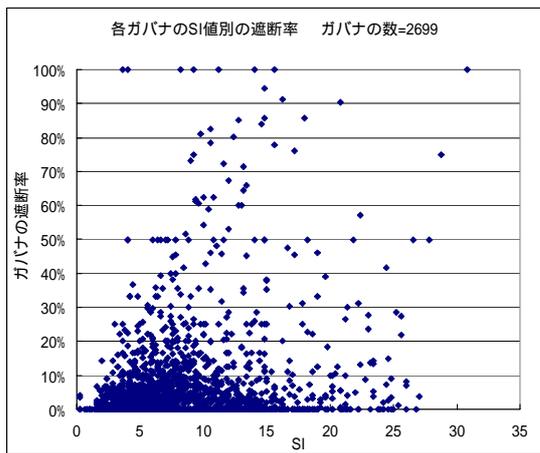


(b) 範囲 300m 以内

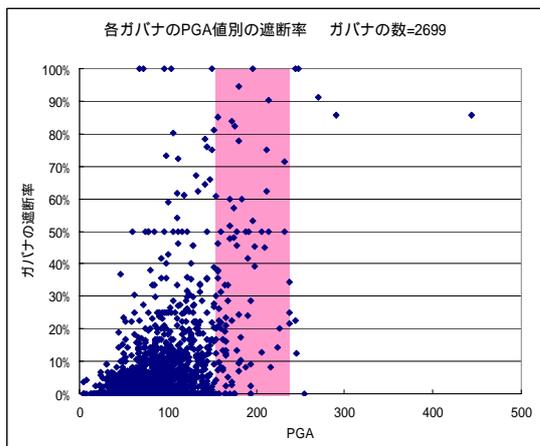


(c) 範囲 100m 以内

図3 データ利用範囲別のマイコン遮断分布  
SI 値(左)・PGA(右)



(a)SI 値



(b)PGA 値

図 5 地区ガバナごとの地震動強さと遮断率の関係

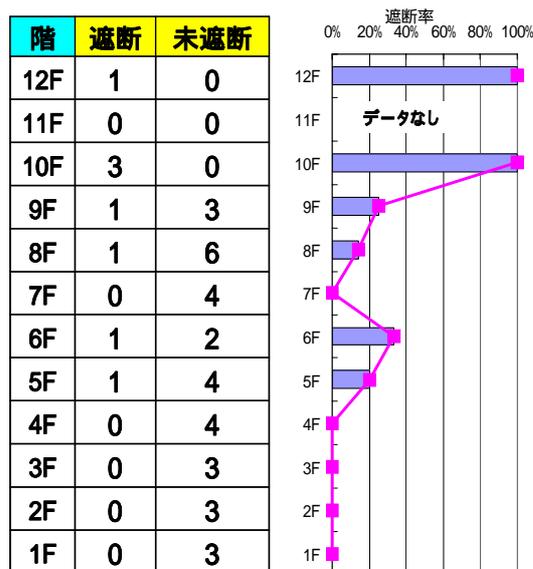


図 6 同一建物内のマイコンメーター遮断状況 (千葉市中央区 H マンション)

## 2.4 建物応答の遮断特性に与える影響

全体的な遮断率の分布では、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評価するために、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 6 に示す。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、この例のように、上層階は明らかに遮断しやすくなっている様子が観察される。また、周辺の木造建物は、遮断してないものが多い。このことから、建物の地震応答が影響して、低層階や周辺の木造建物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. 感震器の振動台実験

### 3.1 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がわかった。そこで、この影響を検討するために、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。感震器は、地震動を含めメーターに加わる全ての振動を感知する。図 7 に示すように、振動により感震器内の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、その信号の回数と継続時間により地震波だけを区別する。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 (図 8)。振動台実験では 10 個の感震器を設置し、全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記録した。図 9 に実験で用いた振動台と実験の様子を示す。製造時の感震器サンプルの正弦波加振実験によると、遮断加速度の平均に 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、記録する感震器として選んだ。

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<sup>4),5)</sup>。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。減衰については、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<sup>6)</sup>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千葉市都町 2 丁目記録 (Y 成分)、

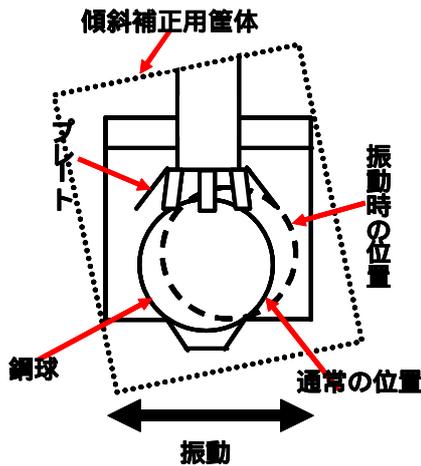


図7 マイコンメーター内の感震器の構造

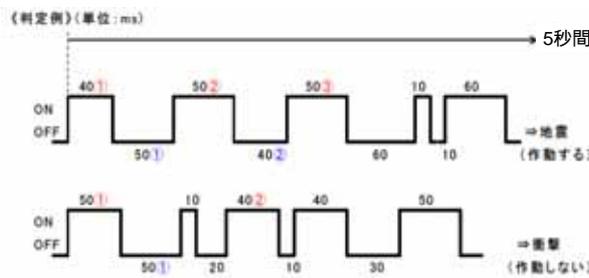


図8 感震器の判定例



図9 実験で用いた振動台と感震器サンプル

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100galにスケーリングしたものの3波とした。東千葉1丁目記録は, 建物応答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Hマンションに最も近い地震観測点で得られたものである。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。

### 3.2 実験結果

表1に振動台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, 180-200gal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

表1 振動台実験結果

建物	階	実験番号	最大加速度	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

複数回が遮断したケースは10回行った。また, 全ての実験で, 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。建物の応答加速度が180gal以下の実験ケースに関しては, 全ての感震器で遮断せず, 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, 遮断加速度値にばらつきがあることが原因と思われる。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出るのが実験でも確認された。

## 4. 遮断率推定式の構築

### 4.1 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 データ分析結果を踏まえ、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みのデータを用いた。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日と10月16日の2つの茨城県南部地震を用いた。また、千葉県北西部地震の場合、SI値と遮断率の関係はかなりばらついているため、マイコンメーターの遮断率推定に用いる指標としては、PGAのみを用いることにした。実際のマイコンメーターの感震器も、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。一つ目は、PGA値に対する遮断率を対数正規分布と仮定し、縦軸に遮断率の逆関数、横軸に  $\ln(\text{PGA})$  をとった確率紙を作成し回帰直線を引いた。この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分布を算出し、遮断率推定式を求める。

二つ目は、ロジットモデル<sup>7)</sup>に当てはめ遮断率推定式を構築する。まず、0から1の値をとる  $p$  (遮断率) に対し、式(1)で表される線形モデルに仮定する。式(1)の回帰で求めた係数を用いて、式(2)で遮断率を推定する。

$$\text{logit}(p) = \log_e \left( \frac{p}{1-p} \right) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

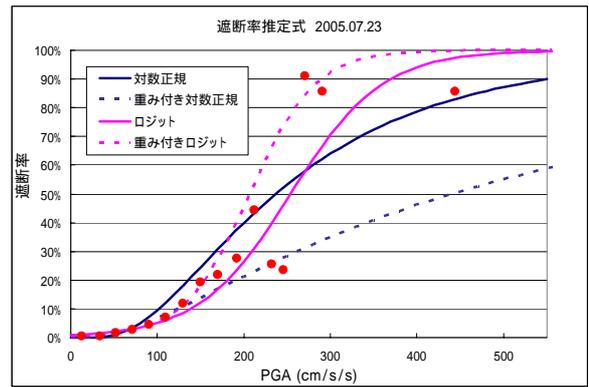
$$p = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 x)]} \quad (2)$$

また、対数正規分布、ロジットモデルの両方について、データ数を考慮した重み付き最小二乗法により、遮断率推定式を求めることも検討した。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。

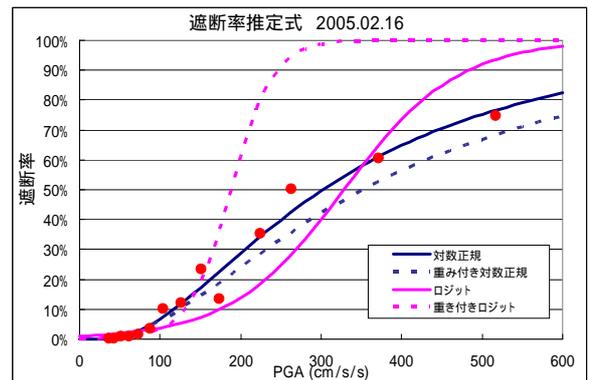
#### 4.2 推定精度の評価

2005年7月23日の千葉県北西部地震と、2005年2月16日と10月16日の2つの茨城県南部地震の計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10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、これらは比較的よく近似しており、地震ごとのばらつきは、今回のデータの範囲では小さいといえる。

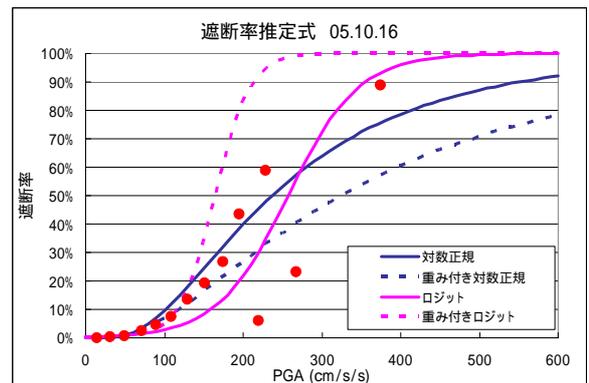
次に、対数正規分布と重み付きロジットモデルの2つに関して、3つの地震のデータを全て用いて、遮断率推定式を求めた(図11)。この推定式から求めた遮断数推定結果(図12)では、150 - 250gal



(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10 回帰分析結果の比較

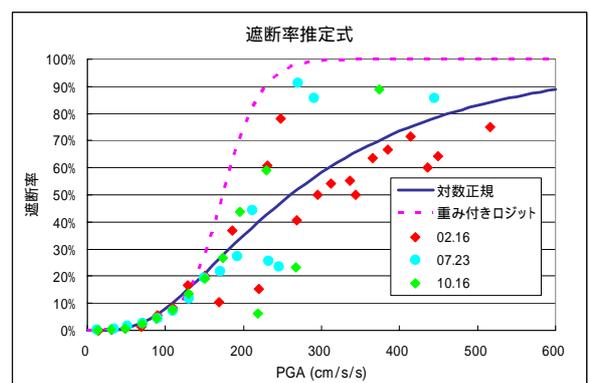


図11 3つの地震データで求めた遮断率推定式

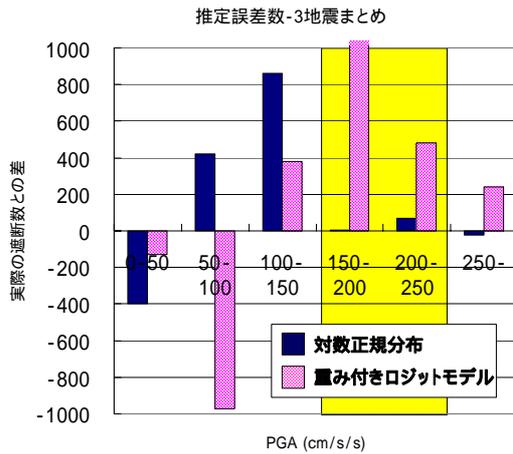


図 12 3つの地震データにおける実際の遮断数と推定遮断数の差

の区間で、重み付きロジットモデルでは、大きく誤差が生じたのに対し、対数正規分布では精度よく推定できている。このことから、今回のデータに関しては、対数正規分布として求めた遮断率推定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。幾つかのモデルで遮断率推定式を求めた結果、対数正規分布を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遮断率モデルの構築も行う必要がある。

#### 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. 738/1-64, pp.283-296, 2003.
- 2) 東京ガス HP: <http://www.tokyo-gas.co.jp/>
- 3) F. Yamazaki, Y. Maruyama, A. Yamauchi, K. Nabana, H. Nakane, Seismic shutoff characteristics of intelligent gas meters for individual customers in Japan, *Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Bangkok, Thailand, Vol.3, pp.261-266, 2006.
- 4) 井上超, 神田順, 非線形多質点構造物の地震危険度評価: 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) 日本建築学会, 地震荷重 - 地震動の予測と建築物の応答, 丸善, 1992.
- 6) 柴田明德, 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981.
- 7) 東京学統計学教室, 自然科学の統計学, 東京大学出版, 1992.