

振動台実験と実地震データに基づく マイコンメーター遮断特性の評価

矢野嘉久¹・丸山喜久²・山崎文雄²・山内亜希子³・菜花健一³

¹正会員 東京ガス(株) 南部導管NC設計・道調G (〒106-0047 東京都港区南麻布2-5-19)

E-mail:y_yano@tokyo-gas.co.jp

²正会員 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp, yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

³正会員 東京ガス(株) 防災・供給部 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail:akko@tokyo-gas.co.jp, k-nabana@tokyo-gas.co.jp

東京ガス(株)では2001年からSUPREMEと呼ばれる新防災システムを導入し、大きな地震動が観測されると地区ガバナ単位でガス供給を自動遮断および遠隔遮断する。さらに、各需要家に配備されているマイコンメーターは、地震動を感知するとガスの供給を自動遮断する仕組みを有している。しかし、マイコンメーターの地震時遮断特性に関してはまだ不明瞭な部分が残っている。本研究では、マイコンメーターの地震時遮断特性を評価するための振動台実験を行うとともに、実地震時におけるマイコンメーターの遮断データを収集し分析を行った。さらに、地震動強さとマイコンメーター遮断率の関係を評価し、対数正規分布を用いた遮断率推定曲線を構築した。

Key Words : intelligent gas meter, seismic shutoff characteristics, shaking table test, actual shutoff data

1. はじめに

今日において、ガス事業は電気事業や水道事業などと並び、市民生活において重要なライフラインである。これまで過去から近年にかけた数々の地震により、都市ガス設備は甚大な被害を被ってきた。1995年兵庫県南部地震では、最大時約86万戸というこれまでに例を見ない大規模な供給停止を始めとする様々な被害を被った¹⁾。これを教訓として、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²⁾。

その一例として東京ガス(株)では、従来の防災システムを拡張して、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³⁾。また、各需要家には、マイコンメーターが設置されている⁴⁾。マイコンメーターとは、ガスメーターにマイコン制御器を組み込んだ

ガス遮断装置付きガスメーターで、ガスの使用量を計量するだけでなく、内蔵しているIC回路で24時間ガスの使用状態を監視する機能がついており、電気のブレーカーに相当する安全機能をもっている。ガス器具の消し忘れやガス漏れ、ガスの異常使用などの疑いがあるときには、マイコンメーターが感知してガス供給を自動的に遮断する。さらに、マイコンメーター内には地震波を感知する感震器が内蔵されており、ある程度の大きさの地震時にガス供給が自動遮断する仕組みをもっている⁵⁾。しかし、マイコンメーターの地震時遮断特性に関しては、1998年の感震器開発当初に地震波6波による検証を行った以降、主に正弦波加振による製造メーカーの製品検査が行われているだけで、実地震下での遮断特性にはまだ不明瞭な部分が残っている。

近年首都圏で発生している茨城県南部を震源とする地震や、2005年7月23日に発生した千葉県北西部地震⁶⁾では、マイコンメーターが多数感震遮断した。SUPREMEでは、地震後の初動対応の目安のために観測された地震記録を用いてマイコンメーターの遮断数を推定しているが、推定遮断数と実際に感震遮

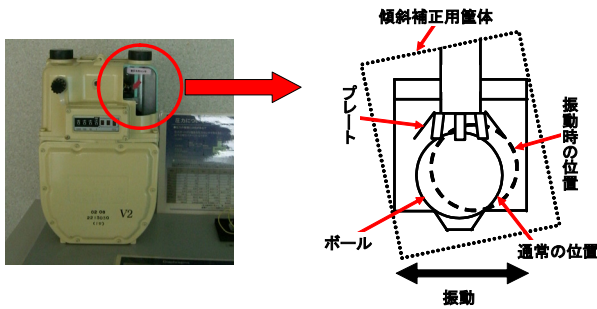


図-1 マイコンメーターの構造

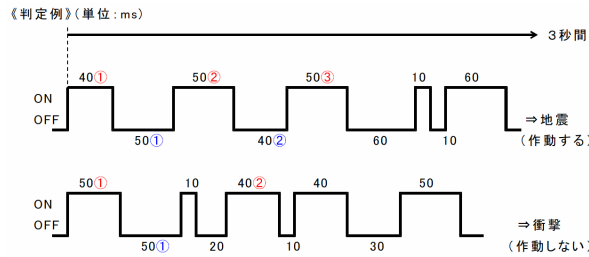


図-2 マイコンメーターによる地震判定例⁵⁾

断したメーターの数は乖離しており、その後の緊急対応に支障をきたしかねない。

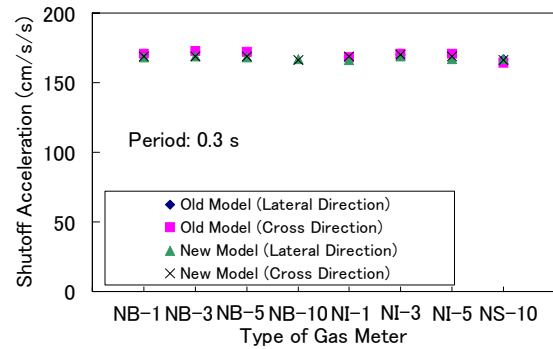
そこで本研究では、マイコンメーターの地震時遮断特性の把握を目的として、正弦波や実地震記録を用いた振動台実験を行った。また、千葉県北西部地震時などの約20万件のマイコンメーターの遮断履歴データを用いて、地震動強さとマイコンメーター遮断率の関係を評価した。

2. 振動台実験によるマイコンメーターの地震時遮断特性の把握

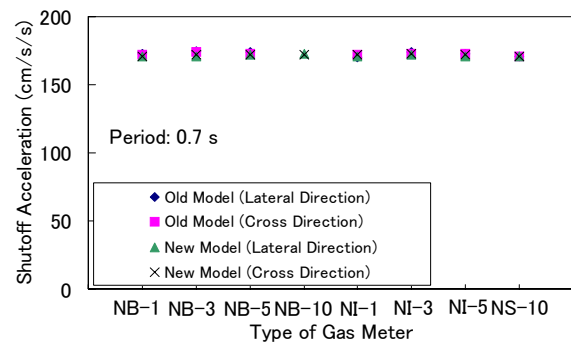
(1) 製造メーカーの製品試験

マイコンメーター内には、地震波を感知する感震器が内蔵されている(図-1)。鋼球がプレートにふれると電流が流れる仕組みになっている。マイコンメーターは、ファジー推論により感震器から発生した電流をもとに地震による振動かその他の衝撃かを判定する⁵⁾。判定基準は、マイコン基盤の製造メーカーによって異なるが、例えば3秒以内に40ms以上のOFF時間を挟む40ms以上のON信号が3回以上発生している場合に地震と判定する(図-2)。その他の判定基準には、5秒以内に30ms以上のOFF時間を挟む30ms以上のON信号が3回以上発生している場合がある。

マイコンメーターは、 $150\sim250\text{cm/s}^2$ の加速度が感知された場合に、遮断するように設計されている。



(a) 周期 0.3 秒



(b) 周期 0.7 秒

図-3 マイコンメーター製品試験による遮断加速度 (正弦波の周期 0.3 秒, 0.7 秒)

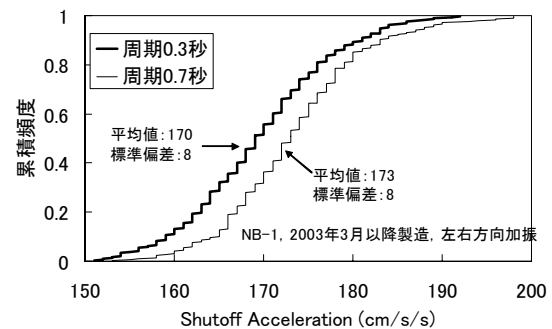


図-4 正弦波加振時のマイコンメーター遮断加速度の累積頻度分布 (NB-1 型)

マイコンメーターの製造メーカーは、製品検査を実施しており、周期0.3秒と0.7秒の正弦波でマイコンメーターを加振している。振幅を漸増させて加振しており、遮断加速度が $150\sim250\text{cm/s}^2$ の範囲であることを試験している。本研究では、マイコンメーター製造メーカーが行った2003年2月製造時までのマイコンメーター(設計遮断加速度： $150\text{ cm/s}^2\sim200\text{ cm/s}^2$)、2003年3月以降に製造されたマイコンメーター(設計遮断加速度： $150\text{ cm/s}^2\sim250\text{ cm/s}^2$)に関する製品検査結果について分析した。

図-3にマイコンメーターの型式と遮断加速度の関

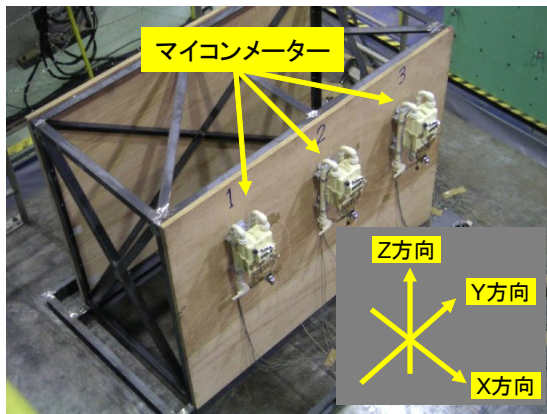


図-5 振動台実験におけるマイコンメーター取り付け状況

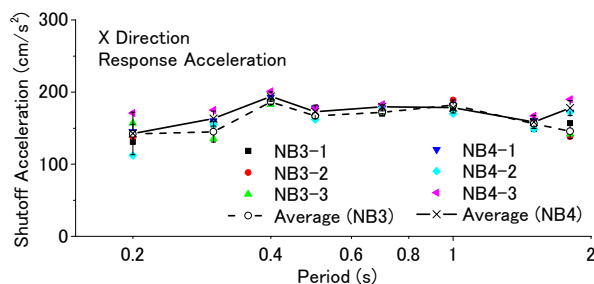


図-6 正弦波周期とマイコンメーター遮断加速度の関係 (1方向加振)

係を示す。なお、マイコンメーターの型式の違いは、躯体の大きさ、重量とガスの使用可能最大流量の違いを表しており、図-1に示した感震器の構造が異なっているのではない。これによると、遮断加速度は、マイコンメーターの型式、製造時期や加振方向にあまり関係なくほぼ一定値であることが分かる。また、周期0.3秒の正弦波でも周期0.7秒の正弦波でも、その遮断加速度はほぼ同じ値を示している。なお、遮断加速度は平均値を示しており、各型式のサンプル数はおよそ200～700である。図-4は、2003年3月以降に製造されたNB-1型マイコンメーターの遮断加速度の累積頻度分布である。遮断加速度は約 $150\text{cm/s}^2 \sim 200\text{cm/s}^2$ に分布している。また、周期0.3秒の正弦波のもとでの遮断加速度がやや小さいように思われるが大きな差は見られない。

(2) 様々な周期の正弦波によるマイコンメーター加振実験

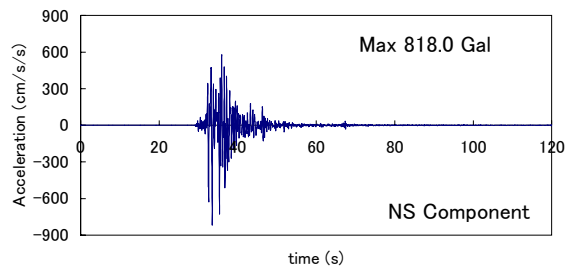
前項で述べたように、マイコンメーター製造メーカーによる製品検査では、周期 0.3 秒と 0.7 秒の正弦波が用いられている。地震時の遮断特性をより詳細に把握するためには、その他の周期の正弦波加振を行い、遮断加速度を明らかにする必要がある。そ

こで、実環境に近い状況で取り付けられたマイコンメーターを対象に、東京ガス（株）パイプライン技術センターが保有する振動台による加振実験を実施した。対象としたマイコンメーターは、NB-3 型 3 台、NB-4 型 3 台の計 6 台とし、すべて 2003 年 3 月以降に製造されたメーターである。

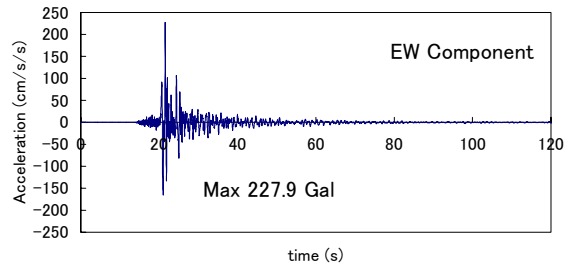
実験では、鋼材で作成した枠に厚さ 30 mm の合板パネルを取り付け、これを架台とし振動台に固定した。この架台の合板パネルを建物の外壁と見なし、マイコンメーターを取り付けた（図-5）。取り付け高さはマイコンメーター頂上が地上から約 1400 mm の位置である。マイコンメーターの前後を X 方向、左右を Y 方向、上下を Z 方向とした。加振に用いた正弦波の周期は 0.1～1.8 秒とし、加速度振幅が 250cm/s^2 に達するまで 1 周期ごとに 5cm/s^2 ずつ加速度を漸増させた。

マイコンメーターの遮断判定は遮断時の電気信号を利用し行った。マイコンメーターは感震遮断時に 1.0～3.0 V の電圧が 60 ms のパルス信号で発生することから、この信号を記録することにより遮断判定を行った。これによって、マイコンメーターが遮断した時刻を正確に把握することができる。

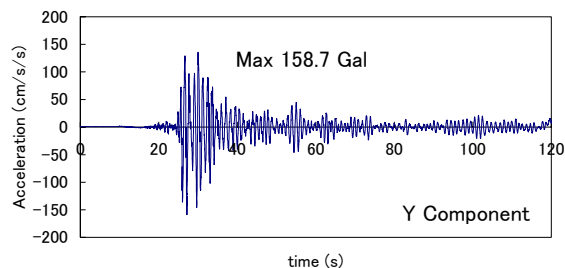
マイコンメーターの遮断加速度と正弦波の周期の関係を図-6 に示す。ここで、加振方向は X 方向としている。加振実験に用いたマイコンメーターには、加速度計を取り付けており、正弦波加振の際の遮断加速度はこれらの加速度計で記録された値を用いて評価した。なお、正弦波の周期が 0.1 秒のときは 6 台のマイコンメーターのうち 1 台（NB3-2）のみが感震遮断した（遮断時の応答加速度は 171cm/s^2 ）。図-6 に示している結果は、6 台全てのマイコンメーターが感震遮断した周期 0.2 秒～1.8 秒のときのものである。これによると、周期 0.4 秒の正弦波下で、マイコンメーターの遮断加速度がやや大きい、概ね周期 0.2～1.8 秒加振時の遮断加速度には正弦波の周期の影響はあまり大きくない。また、NB-3 型と NB-4 型の遮断加速度の差は一部の周期を除いて小さい。加振方向を Y 方向にしたり、正弦波の位相差を 0deg, 45deg, 90deg に設定した 2 方向加振実験を行ったが、今回の実験では X 方向加振時の遮断加速度と比べて大きな差は見られなかった。このことから、正弦波加振では、マイコンメーターの遮断加速度に与える影響は周期 0.2～1.8 秒の間では小さく、また型式による遮断加速度の違いもあまりないものと考えられる。



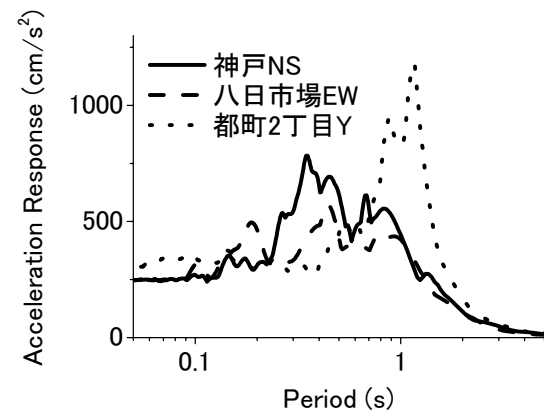
(a) 神戸海洋気象台記録 (NS 成分)



(b) K-NET 八日市場記録 (EW 成分)



(c) 東京ガス都町 2 丁目記録 (Y 成分)



(d) 加速度応答スペクトル (5%減衰)

図-7 振動台実験で用いた加速度記録

(3) 実地震波を用いたマイコンメーター加振実験

次に、実際に観測された水平 2 成分の加速度波形をスケールしたものを入力地震動とし、マイコンメーターの遮断特性を調査した。実験に用いた実地震動は、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録⁷⁾、2005 年 4 月 11 日に発生した千葉県北東部を震源とする地震の K-NET 八日市場記録⁸⁾、千葉県北西部地震の東京ガスによって観測された都町 2 丁目記録である⁹⁾。図-7 に、これら地震記録の加速度波形と

表-1 振動台実験でのマイコンメーター遮断数

地震記録	目標 PGA [cm/s ²]	測定 PGA [cm/s ²]	測定 PGV [cm/s]	周期 [s]	遮断個数	
					NB3	NB4
神戸	130	170	16.7	0.62	0	0
	150	190	19.2	0.63	3	0
	170	215	21.3	0.62	3	0
	190	242	23.6	0.61	-	3
都町	170	165	27.1	1.03	0	0
	190	194	30.0	0.97	3	2
	210	211	36.1	1.07	-	3
八日市場	170	178	16.7	0.59	0	0
	190	202	19.3	0.60	1	0
	210	220	21.4	0.61	3	1
	230	242	22.9	0.59	-	1
	250	262	25.2	0.60	-	3

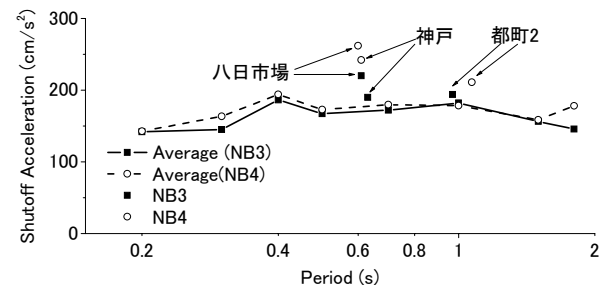


図-8 正弦波加振時と実地震動入力時のマイコンメーターの遮断加速度の比較

2 方向合成最大加速度を 250cm/s^2 としたときの加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示す。

表-1 に、振動台実験結果をまとめる。振動台の特性上、目標とした最大加速度と実際に再現した最大加速度が正確には一致しないため、それらの値を表-1 にあわせて示す。とくに神戸海洋気象台記録を入力地震動に用いると、目標最大加速度よりも大きな最大加速度が振動台上で測定されている。実地震波を入力とした際のメーター遮断加速度は、入力に対する遮断状況を整理するという観点から、震動台によって再現された最大加速度を用いて評価することとする。

表-1 によると、NB-3 型の方が NB-4 型と比べて小さな地震動で感震遮断していることが分かる。また、3 台すべてのメーターが遮断せずに、1 台または 2 台のみが感震遮断している場合もいくつか見られ、図-4 などからも明らかのように個体差があることが示唆される。

実地震波を用いた加振試験における遮断加速度と周期の関係を、正弦波加振試験の結果とあわせて図-8 に示す。図中の遮断加速度は、3 台すべてのマ

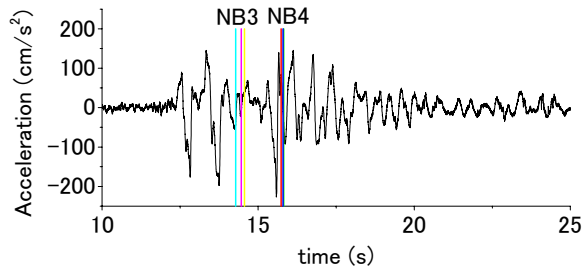


図-9 神戸波加振時のマイコンメーター感震遮断のタイミング

マイコンメーターが感震遮断したときの値を示している。また、実地震波の周期 T は以下の式で推定した。

$$T = 2\pi \frac{PGV}{PGA} \quad (1)$$

ここで、PGA は地震動の最大加速度 (cm/s^2)、PGV は最大速度 (cm/s) である。いずれも振動台によって再現されたものの 2 方向合成値で、0.2～20Hz を有効な周波数範囲としている。これによると、式(1)から推定される周期が約 1.0 秒の都町波下では遮断加速度が正弦波加振時とほぼ同程度であるが、八日市場波を入力地震動としたときと、神戸波下での NB-4 型の遮断加速度は正弦波加振のときと比べて大きくなっている。

図-9 に、神戸波を入力地震動に用いたときの各マイコンメーターの感震遮断のタイミングを示す。NB-3 型マイコンメーターは最大振幅が発現される前に感震遮断している。一方、NB-4 型は最大振幅後に感震遮断しており、両者のタイミングが異なっていることが分かる。(1)で述べたように、感震遮断の判定基準は、基盤製造メーカーによって 2 種類に分類される。実地震波加振時には、判定基準の違いが影響し感震遮断のタイミングに違いが生じ、NB-3 と NB-4 の遮断加速度値に差が生じたのではないかと想像される。地震判定基準が実地震下での遮断加速度に与える影響を詳細に検討するには、感震器の数値モデルを構築し解析的な検討を行ったり、オシロスコープなどを用いて電流を詳細に観察した状態で加振実験を行うなどの検討が必要である。

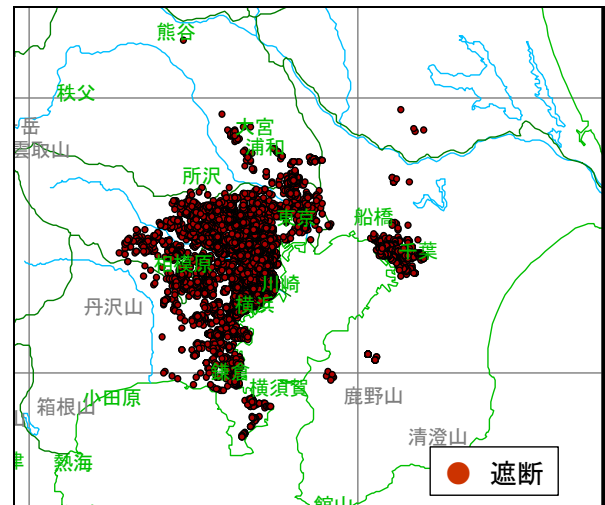
3. 千葉県北西部地震時のマイコンメーター感震遮断履歴データの分析

(1) 感震遮断履歴データ

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



(a)震度分布

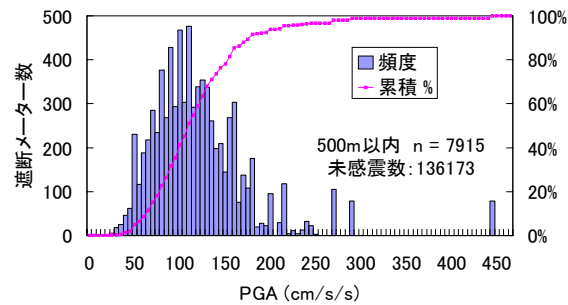


(b)マイコンメーターの遮断分布

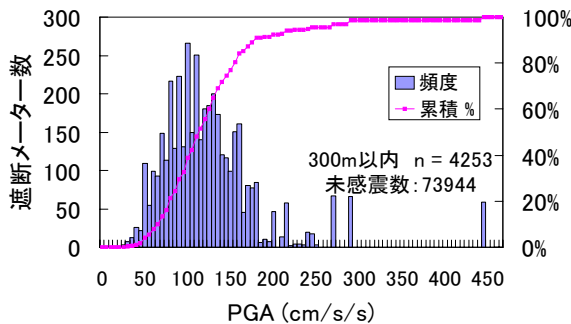
図-10 2005 年千葉県北西部地震の震度分布とマイコンメーターの遮断分布

のうちのひとつが STATION24 (ST24) システム¹⁰⁾である。このシステムは、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 時間体制で監視するものである。このシステムに加入している需要家に設置されているマイコンメーターの遮断履歴情報を、遠隔で取得可能することができる。本研究では、約 20 万件の遮断履歴情報を収集した。

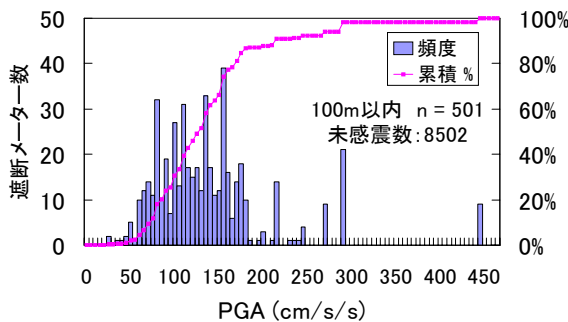
2005 年 7 月 23 日に発生した千葉県北西部地震では、ライフライン、鉄道、エレベータなど、様々な都市インフラに機能停止などの影響を及ぼした^{11), 12)}。東京ガスの供給エリア内でも、多くの需要家のマイコンメーターが地震を感知して、自動的にガス供給を遮断した。図-10 に SUPREME が観測した震度分布と、この地震で感震遮断したマイコンメーターの分布を示す。ST24 システムの加入状況によっては、千葉県の南西部のように震度が大きいのに感震遮断データがない地域も見られるが、広範囲にわたって



(a) 500m 以内



(b) 300m 以内



(c) 100m 以内

図-11 ガバナ最短距離ごとの感震遮断メーター数の累積頻度分布（千葉県北西部地震）

データを収集することができた。取得した感震遮断履歴データは約20万件であり、千葉県北西部地震では10,175件の遮断データが得られた。なお、感震遮断しなかったマイコンメーター数は187,814である。

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。ST24システムの加入者は戸建て住宅の需要家の割合が高く、構造種別に関しては今回収集した全データのうち75%以上を木造住宅が占めている。

(2) 地震動強さと感震遮断率の関係

地震動の大きさは、地盤条件によって異なる^{13), 14)}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。そこで、

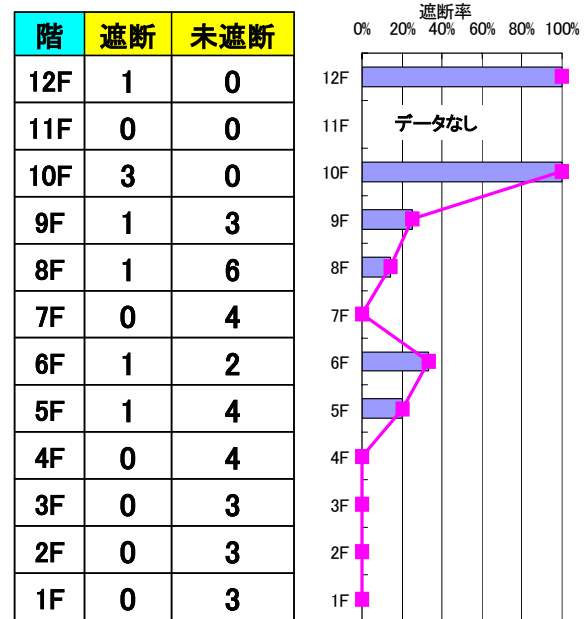


図-12 千葉県北西部地震における同一建物内のマイコンメーター遮断状況（千葉市中央区 H マンション）

千葉県北西部地震における遮断履歴情報をもとに、地区ガバナまでの最短距離が100m, 300m, 500m以内の遮断メーター数の最大加速度(PGA)に対する頻度分布を作成した（図-11）。ガバナ最短距離を100m以内とすると感震遮断したマイコンメーターのデータ数が少ないため、分布の傾向が最短距離300m以内, 500m以内の場合と比べてやや異なる。しかし、マイコンメーターの遮断加速度のばらつきは、ガバナからの最短距離を100m以内としても有意には小さくなっていないように思われる。これは、最大加速度の空間的な広がりにはさらに局所的な地盤条件の違いに影響されているためと想像される。しかし、統計的な検討を行うにはある程度多数の感震遮断データを用いる必要があるので、本研究ではガバナ最短距離が300m以内と500m以内で分布の全体的な傾向に大きな差がないことから、データ数の多いガバナ最短距離500m以内の遮断履歴情報を検討に用いるデータとした。

次に、建物の地震応答特性がマイコンメーターの感震遮断にどのような影響を与えるかを調べるために、マンションなどの高層建物を対象に同一建物内での遮断状況を調べた。千葉県北西部地震における千葉市中央区のHマンションでの階数とマイコンメーター遮断率の関係を図-12に示す。前述の通り、ST24システムに加入している需要家の多くは戸建て住宅の割合が高いので、遮断履歴情報の数が充分ではないが、上層階の方が遮断率が大きくなってい

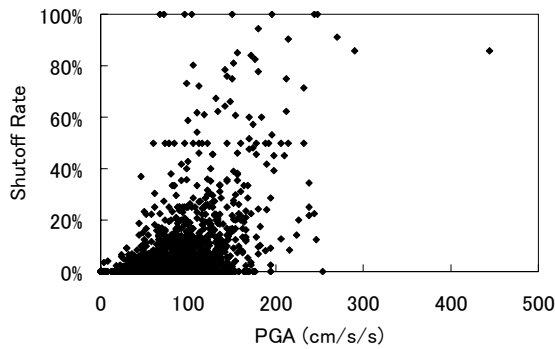


図-13 千葉県北西部地震における PGA とマイコンメーター遮断率の関係 (木造建物)

の様子が見られる。このマンション周辺の木造建物の遮断状況を調べると、11戸のマイコンメーターが未感震であり感震遮断したマイコンメーターはなかった。このことから、建物の地震応答特性が影響して、主に高層階のマイコンメーターが感震遮断したものと考えられる。しかし、本研究で分析に用いている遮断履歴情報は低層建物と想像される木造建物の割合が大きく、マンションなどの高層建物の地震応答特性がマイコンメーターの遮断状況に与える影響に関しては、加震実験を行うなどの更なる検討を要する。

以上の検討をふまえて、ガバナ最短距離が500m以内である木造建物の千葉県北西部地震時の感震遮断情報について、ガバナで観測されたPGAと感震遮断率の関係を示す(図-13)。なお、図中のガバナ数は2699である。ガバナごとに遮断率のばらつきはあるが、PGAが大きくなるにつれて感震遮断率も大きくなる傾向が見られる。また、PGAが180cm/s²程度以上になると、遮断率が0の地点は一部を除き存在しない。

同程度のPGAが観測されたガバナ周辺でも、マイコンメーターの感震遮断率は異なっている。例えば、東京都足立区の西保木間4丁目では217.0cm/s²のPGAを観測しており、3戸の木造住宅のマイコンメーターすべてが感震遮断した。一方、246.0cm/s²のPGAを観測した神奈川県相模原市麻溝台では、8戸すべてのマイコンメーターが感震遮断しなかった。図-14に、これら2観測点での加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。マイコンメーターが感震遮断しなかった麻溝台は、周期0.1秒にピークが見られる短周期成分が卓越した地震動であったことが分かる。西保木間4丁目は、周期0.4~0.5秒に応答スペクトルのピークが見られる。前章の加震実験で周期0.1秒の正弦波で加振したときに6個のメータのうち1個だけが感震遮断したことを踏まえると、周期

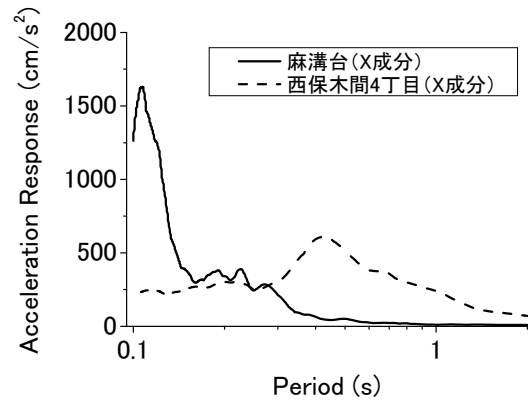


図-14 麻溝台と西保木間4丁目における千葉県北西部地震の加速度応答スペクトル(5%減衰)

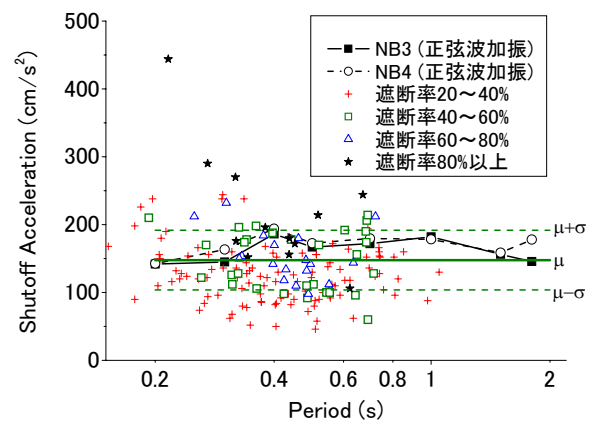


図-15 マイコンメーター感震遮断率ごとのガバナでの最大加速度と正弦波加振実験結果の比較

約0.1秒の短周期成分の卓越した地震動下では、マイコンメーターはその構造および動作原理から感震遮断しにくいものと考えられる。

千葉県北西部地震時のガバナ(ただし、ST24システムで取得されたデータ数が3以上のガバナに限る)の最大加速度をメータ感震遮断率ごとに示し、正弦波加振時の遮断加速度と比較する(図-15)。図中では、遮断率40%以上60%未満のガバナのPGAの平均値と標準偏差も併せて示している。ここで、各ガバナで観測されたSI値を式(2)¹⁵⁾でPGVに換算し、式(1)を用いて各ガバナの地震動の周期を算定した。

$$SI = 1.18PGV \quad (2)$$

図-15によると、遮断率が大きくなるにつれてガバナで記録された最大加速度が大きくなる傾向が見られるが、200cm/s²程度の最大加速度を示しているも遮断率が20~40%の地点も一部存在している。実環境下では、地震計設置位置と周辺の地盤条件の違いなどから地震動は空間的なばらつきを有している。空間的なばらつきは、平均値を中心とした対称な分布形でありガバナで観測されたPGAがその平均値で

あると仮定する．このような仮定に基づけば，正弦波加振実験によって得られたマイコンメーター遮断加速度は実環境下の遮断率50%に対応することとなる．マイコンメーターの遮断率が40~60%を示したガバナのPGAの平均値は約150cm/s²であり，正弦波加振実験の遮断加速度に近い値を示している．以上の検討を踏まえると，実環境下ではPGAの空間的なばらつきがマイコンメーターの遮断状況に影響を与えるものの実験によって得られた遮断加速度と関連づけた説明が可能であるので，地震計で観測されたPGAはマイコンメーターの遮断状況を予測するのに利用できるものと考えられる．

4. マイコンメーターの感震遮断数の推定

東京ガスが導入しているリアルタイム地震防災システムSUPREMEでは，地震後の初動対応の目安のために観測された地震記録を用いて，SI値が4.0cm/sを超えるとマイコンメーターが感震遮断するものと仮定して遮断数を推定しているが，推定遮断数と実際に感震遮断したメーターの数はやや乖離している．そこで，実地震時のマイコンメーター遮断履歴情報を用いて遮断率推定曲線を求める．ここでは，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（有効な感震遮断メーター数：1596）と10月16日（有効な感震遮断メーター数：1651）に発生した茨城県南部を震源とする地震時の遮断履歴情報を検討に用いた．また，データ数の豊富な木造住宅の感震遮断データを対象としており，建物地震応答が遮断特性に与える影響は今後検討予定である．

遮断率推定曲線には以下の2通りの関数形を仮定した．まず，式(3)で表される対数正規分布を用いた．

$$P = \Phi((\ln PGA - \lambda)/\zeta) \quad (3)$$

ここで， $\Phi(x)$ は標準正規分布の確率分布関数である． λ は対数平均， ζ は対数標準偏差を表し，確率紙上の近似直線により値を定めた¹⁶⁾．次に，式(4)で表されるロジスティック分布を仮定した．

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 PGA)]} \quad (4)$$

ここで， β_0 と β_1 はロジット ($\ln\{1/(1-P)\}$) に線型モデルを仮定することで定めた¹⁷⁾．

また，以上の2通りの関数形について，それぞれ

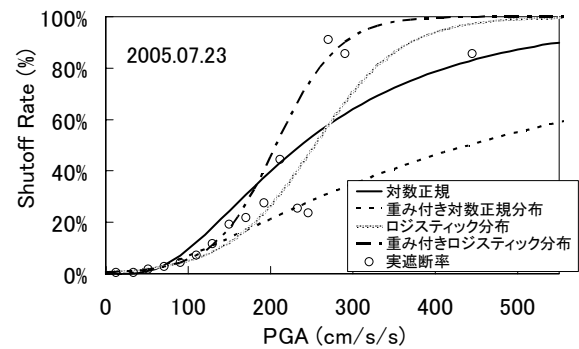
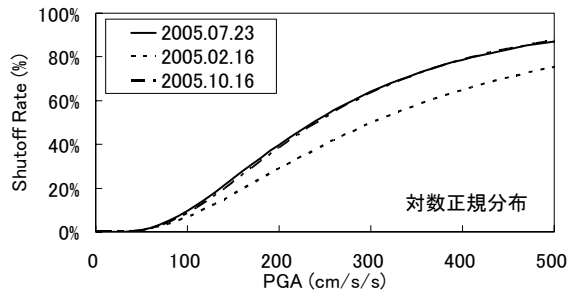


図-16 千葉県北西部地震におけるマイコンメーター感震遮断率推定曲線

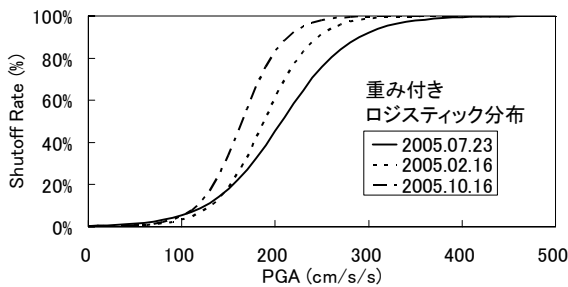
の2つのパラメータをデータ数による重み付き最小二乗法で定めた．

3地震ごとに得られるマイコンメーターの感震遮断率をもとに前述の4通りの回帰分析によって遮断率推定曲線を構築した．その結果を地震間で比較することで，仮定した関数形の妥当性を検証した．構築された遮断率推定曲線に地震間で大きな違いが見られなければ，仮定した関数形はある程度妥当なものと考えられる．例として図-16に，千葉県北西部地震時の感震遮断率とPGAの関係をもとに，構築された遮断率推定曲線を示す．対数正規分布のパラメータ λ ， ζ を定める際には，図-13に示した各ガバナのPGAと遮断率の関係をPGAが対数軸で等間隔となるように区分化し確率紙上にプロットした．ロジスティック分布に関しては，20cm/s²刻みでPGAに対する感震遮断率を計算し，回帰分析を行った．仮定した関数形や回帰方法によって，とくにPGAが200cm/s²以上の範囲で推定遮断率の値が異なっているが，対数正規分布と重み付きロジスティック分布によって得られた遮断率推定曲線の当てはまりが良いように思われる．図-17に，対数正規分布と重み付き回帰分析によるロジスティック分布で構築された遮断率推定曲線を3地震間で比較する．対数正規分布を仮定した場合，千葉県北西部地震と2005年2月16日に発生した茨城県南部を震源とする地震に関しては違いがほとんど見られない．重み付き回帰分析で構築されたロジスティック分布による遮断率推定曲線は，対数正規分布と比べると地震間でやや違いが大きい．

3地震のデータをすべてまとめて回帰分析を行い，遮断率推定曲線を構築した（図-18）．ここでは，データ数が豊富な千葉県北西部地震時に遮断率推定曲線として実データと当てはまりが良好であった対数正規分布と重み付きロジスティック分布を用いて遮断率推定曲線を構築した．得られたパラメータ値を表-2に示す．重み付き回帰分析によってパラメー



(a) 対数正規分布



(b) 重み付きロジスティック分布

図-17 地震間のマイコンメーター感震遮断率推定曲線の比較

タを決定したロジスティック分布は、データ数の多いPGAが150cm/s²以下の範囲の当てはまりが良いが、PGAが大きくなるにつれて実際の遮断率よりも過大な推定結果を与える。一方、関数形に対数正規分布を仮定した場合、230cm/s²~300cm/s²の範囲で一部推定遮断率が過小に評価されているが、概ね実データに良好な当てはまりを示している。

本研究で構築した遮断率推定曲線によると、PGAが約290cm/s²のとき遮断率が50%と推定される。周期0.2秒~1.8秒の正弦波加振時の平均遮断加速度が概ね150~180cm/s²であることと比べると差異が生じている。この理由には、地震計が設置されているガバナと周辺のサイト特性の違いが影響していることや周期0.1秒程度の短周期の振動下でマイコンメーターが感震遮断しにくいことなどが挙げられる。

以上の検討をふまえて、対数正規分布を仮定して構築された遮断率推定曲線を用いて、千葉県北西部地震と2つの茨城県南部を震源とする地震時における木造住宅のマイコンメーター感震遮断数を推定し、実測値と比較した。推定値と実測値の比をとる(図-19)と、PGAが50cm/s²以下の範囲と2005年2月16日の地震時の170cm/s²、220cm/s²付近と2005年10月16日の220cm/s²で推定誤差がやや大きい、概ね良好な推定結果が得られている。

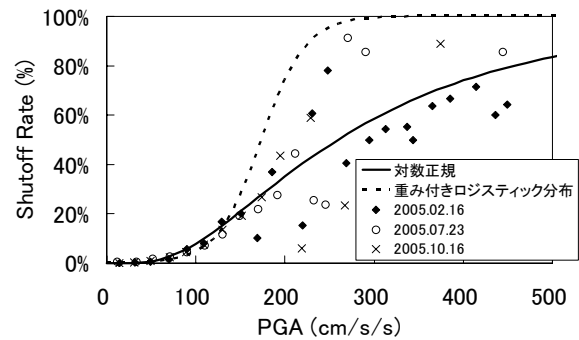


図-18 3 地震時のマイコンメーター感震遮断データをもとにした遮断率推定曲線

表-2 遮断率推定曲線のパラメータ

対数正規分布		重み付きロジスティック分布	
λ	ξ	β_0	β_1
5.56	0.674	-7.08	0.041

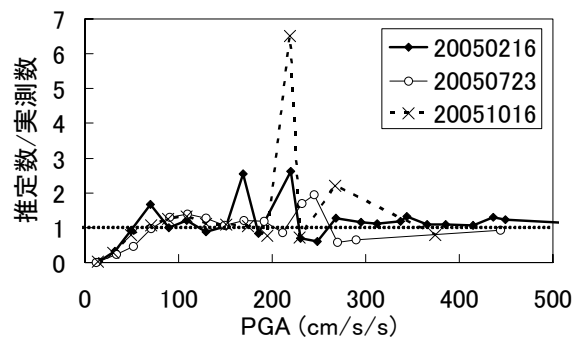


図-19 マイコンメーターの推定感震遮断数と実際の遮断数の比

5. 結論

本研究では、マイコンメーターの地震時遮断特性の把握を目的として、正弦波や実地震記録を用いた振動台実験を行った。また、千葉県北西部地震などの約20万件のマイコンメーターの遮断履歴データを用いて、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。

様々な周期の正弦波下でマイコンメーターの遮断加速度を測定すると、周期0.1秒の正弦波加振では、6個のメーターのうち1個だけが171cm/s²で感震遮断した。その他の周期の正弦波加振では、6個全てのマイコンメーターが感震遮断し、概ね周期0.2~1.8秒加振時の遮断加速度には正弦波の周期の影響はあま

り大きくなかった。また、マイコンメーターの型式による遮断加速度値の違いは小さいものと考えられる。実地震波下での遮断特性を振動台実験によって評価すると、NB-4型の感震遮断加速度がNB-3型と比べて大きくなるときが見られた。このような場合には、NB-3型とNB-4型で感震遮断のタイミングが異なっており、マイコン基盤の地震判定基準の違いが影響しているものと考えられる。

千葉県北西部地震と2つの茨城県南部を震源とする地震時のマイコンメーター遮断履歴データを用いて、マイコンメーター感震遮断率推定曲線を構築した。関数形には対数正規分布とロジスティック分布を、回帰方法に単純回帰とデータ数による重み付き回帰を採用し、遮断率の推定精度を検討した。今回使用したデータはPGAが 150cm/s^2 以下のデータ数が多いため、重み付き回帰分析から構築された遮断率推定曲線はPGAが大きくなるにつれて推定誤差が大きくなる傾向が見られた。このため、単純回帰からパラメータ値を決定した対数正規分布の精度が良好であり、実際のマイコンメーター感震遮断数を推定するのに最も適していた。

今後、ある程度の規模の地震が発生した際にマイコンメーターの遮断履歴情報を継続的に収集、分析していくことで、重み付き回帰分析によって構築される遮断率推定曲線の精度も向上していくものと思われる。また、今回分析に用いた遮断履歴情報は一戸建て住宅の需要家が主であり、高層住宅などの建物地震応答特性がマイコンメーターの遮断状況に与える影響を検討するには充分な数のデータが得られなかった。建物応答を評価に取り入れるには、加震実験を行ったり、非木造住宅に住む需要家のデータベース化を進めるなどの更なる検討を要するものと思われる。

参考文献

- 岡田恒男, 土岐憲三編: 地震防災のはなし, 朝倉書店, 2006.
- 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No. 577/I-41, pp. 1-16, 1997.
- Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Ioyama, R., Ishida, E., Suetoni, I., Koganemaru, K., and Nakayama, W.: Development of real-time control system for urban gas supply network, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*: ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 東京ガス: <http://home.tokyo-gas.co.jp/userguide/anzen/meter/reset/index.html>
- 高圧ガス保安協会: http://www.khg.or.jp/activities/research_development/lpg_lab/dl/saigai.pdf
- 東京大学地震研究所強震動グループ: <http://taro.eiu.tokyo.ac.jp/saigai/chiba/index.html>
- 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部: 1995 年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996.
- 防災科学技術研究所強震ネットワーク: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/20050411072200/>
- 山内亜希子, 菜花健一, 細川直之: 千葉県北西部地震における高密度地震防災システム SUPREME の活用, 日本地震工学会・大会-2005 梗概集, pp. 30-31, 2005.
- 東京ガス: <http://home.tokyo-gas.co.jp/my24/sv7.html>
- 高浜勉, 翠川三郎, 大堀道広: 鉄道事業者の地震時対応の調査に基づいた地震発生後の鉄道輸送能力低下に関する検討, 地域安全学会論文集, No. 8, pp. 253-258, 2006.
- 内閣府編: 平成 18 年度版防災白書, 株式会社セルコ, 2006.
- 翠川三郎, 阿部進: 横浜市における細密震度分布の即時評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp. 3467-3432, 1998.
- 丸山喜久, 山崎文雄: 近年の地震観測記録に基づく東京都地盤分類ごとの増幅特性の評価, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1258-1261, 2006.
- 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 2, pp. 2299-2304, 1994.
- Ang, A. H-S. and Tang, W.H. (伊藤學, 亀田弘之 (訳)): 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 1997.
- 東京大学教養学部統計学教室編: 自然科学の統計学, 東京大学出版会, 1992.

(2007. 5. 24 受付)

SEISMIC SHUTOFF CHARACTERISTICS OF INTELLIGENT GAS METERS BASED ON SHAKING TABLE TESTS AND ACTUAL EARTHQUAKE DATA

Yoshihisa YANO, Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI,
Akiko YAMAUCHI and Kenichi NABANA

Intelligent gas meters that stop gas supply during an earthquake are deployed for individual customers in the area where Tokyo Gas Co., Ltd. provides the service. However, there still remains unclear points in the seismic shutoff characteristics of gas meters. In this study, to reveal the shutoff characteristics under seismic motion, shaking table tests were conducted. In addition that, the relationship between the earthquake motion and gas meters' shutoff rate was investigated using about 200,000 monitored archive data that shows the shutoff situations under actual seismic motions.