

東京ガスにおけるリアルタイム地震防災システム

清水 善久¹

¹ 正会員 工修 東京ガス株式会社 防災・供給センター(〒105-8527 東京都港区海岸一丁目5-20)

東京ガスでは、リアルタイム地震防災システムを「地震時に都市ガスに起因する二次災害を発生させないための措置又は手段と位置づけ、これまで低圧供給施設については「感震自動遮断システム」や「リアルタイム導管網被害推定システム-SIGNAL-」を、また中圧供給施設についてはリアルタイム圧力・流量データ等の「遠隔監視・制御システム」を構築してきた。阪神大震災以降は緊急措置レベルをより向上させるため、それに加えて1998年1月より約3,100km²の供給エリアにおいて約3,700個の新SIセンサーと地区ガバナ遠隔監視システムを用いた世界一超高密度な新リアルタイム防災システム(SUPREME)の整備を開始した。

Keywords: *New SI sensor, Real-time, Earthquake monitoring, Damage estimation, Liquefaction Judgement, SIGNAL, SUPREME*

1. はじめに

阪神大震災以降、多くの機関でリアルタイム地震防災システムの設置が計画又は実施されている。但し、リアルタイム地震防災システムの内容や目的は各機関毎に異なるものであり、それぞれの比較を表面的に行うことは本質的ではない。本稿においては、東京ガスにおけるリアルタイム地震防災システム-SIGNALとSUPREMEを紹介すると共にその目的や構築後の運用方法を示し今後の都市ガスにおけるリアルタイム地震防災システムのあり方を示していきたい。

2. 東京ガスの地震防災戦略

東京を中心とした首都圏は、政治・文化・経済などの機能が高度に集中した世界有数の過密都市であり、たとえ大地震に見舞われた場合においても安全を確保することは、ガス供給事業者にとっての社会的使命である。従って、大地震に対する備えはきわめて重要な課題であり、これまで、供給施設に関するハードウェアとしての問題と、緊急対応や復旧の効率化等にかかわるソフトウェアの両面について諸々の対応策を講じてきている。

さて、1995年1月17日阪神・淡路島地区においてマグニチュード7.2の直下型地震が発生し、神戸市を中心

に未曾有の大被害をもたらした。都市ガスにおいても、表1に示すように主として低圧ガス供給施設に被害が発生し、地震災害の脅威を再認識するとともに地震時の低圧供給施設に対する緊急措置システムの重要性が確認された。¹⁾

表1 阪神大震災におけるガス施設の被害

項目	内容
1. 導管の被害	中圧導管 106件 漏洩 低圧導管 26,459件 漏洩
2. 供給停止件数	約86万件
3. 復旧日数	85日間

さらに、この阪神大震災において、大きくクローズアップされた課題は、地震発災直後の被害情報収集が重要にもかかわらず極めて困難であることであった。この課題を克服する対策の一つとして「リアルタイム地震時被害推定システムの整備」が幾つかの機関で計画または実施されている。東京ガスではSIGNAL-地震時導管網警報システム²⁾の開発を1986年から開始し、阪神大震災の半年前、1994年6月に実用化している。さらに今後の防災レベルのより一層の向上を図るため、約3,700基の地震計(新SIセンサー)を用いた世界一超高密度な新リアルタイム地震動計測防災システム

-SUPREME(Super-dense Realtime Monitoring of Earthquakes)- の構築を開始した。

3. 東京ガスの供給施設の概要と防災対策

東京ガスの供給区域は、図1に示すように1都4県を中心に、3,100 km²の広がりをもつ、約860万件の需要家を擁している。供給方式は図2の如く、高圧、中圧A・Bおよび低圧の4段階の圧力で構成されている。工場から送出されたガスは、ガバナーステーション(高圧から中圧へガスを減圧する施設)を介して、中圧ラインに供給される。

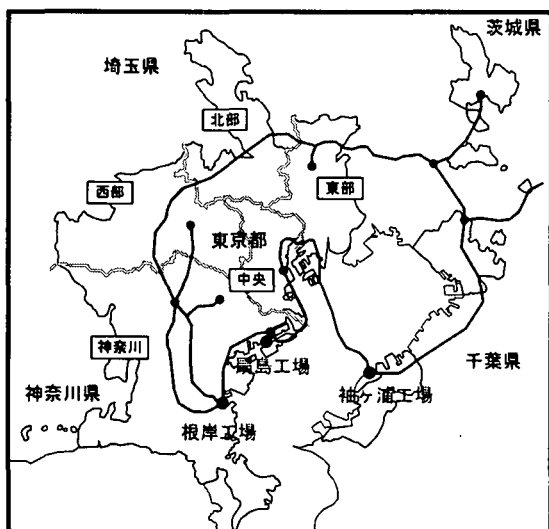


図1 東京ガス(株)の供給エリア(広域支社を除く)

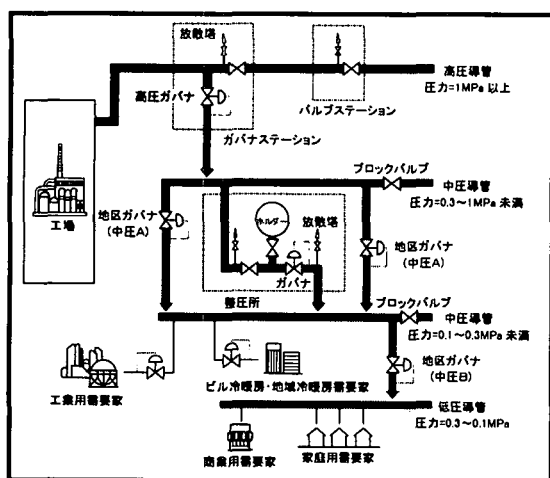


図2 東京ガス供給システムの概要

発電等大規模工業用需要家や、ビル冷暖房、地域冷暖房需要家などへは、中圧で直接供給するが一般の家庭用や商業用の需要家には、各地域に約3,700基ほど点在する地区ガバナーステーションで低圧まで減圧し供給している。

東京湾をはさんだ東の袖ヶ浦、西の根岸・扇島、三つの主要工場を結ぶ延長約500 kmの高圧幹線ループライ

ン、供給区域にネットワーク化された中圧A(延長約2,000 km)中圧B(延長約3,500 km)ラインさらに低圧ネットワーク約40,000 km総計46,000 kmに及ぶガス導管網によるガスの供給は、総合的にコントロールするTGCS(Total Gas Control System)で管理されている。

東京ガスでは、これら中圧以上の供給施設については高い耐震性を保つよう耐震設計・施工・補強および適切なメンテナンスを実行している。更に万が一の場合に備えて無線で遠隔コントロールできる緊急遮断システムを持っている。(図3参照)

つまり中圧以上の供給施設の地震対策は、「大地震が発生した場合も構造物が損傷せず機能を保持し、安全を確保する。」ことを基本とし、万が一の事態においては24時間常時遠隔監視で得られる圧力・流量情報や通報等によって、防災・供給センター指令室にて判断を行い供給停止を実施する。

さて、ガス施設の被害は地震の規模・程度によって異なるが中圧以上の施設に比べて、低圧供給施設は一般的に耐震性が低いため被害の起こる確率が高い。特にお客様に供給する配管は阪神大震災において全被害の8割にあたる約2万件の被害が発生している。そこで低圧供給施設の地震対策は「大地震の際には自動的に供給停止を実施する」ことを基本としている。

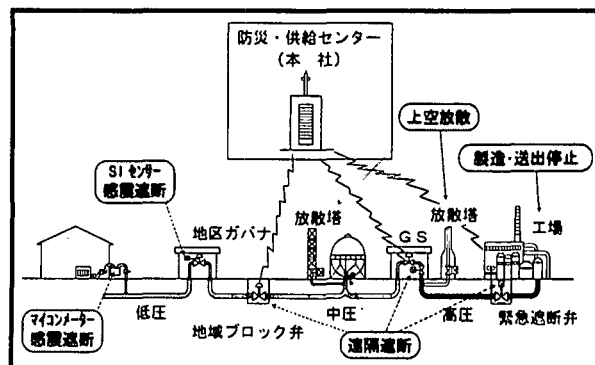


図3 大地震時の緊急遮断システム

4. 東京ガスのリアルタイム地震防災システム

地震によって、ガス施設に被害が生じた場合には、二次災害防止のために、ガスの供給を早急に停止する必要があります。これを達成することが東京ガスのリアルタイム地震防災システムの基本目標である。つまり、都市ガス設備でリアルタイムに緊急措置を実行するという事は、リアルタイムに情報を得て判断し供給停止をする事である。情報は地震動であったり圧力・流量または被害推定情報である。判断は自動または人間が実施し、供給停止は自動、遠隔、手動のいずれかで行うこととなる。

4. 1 低圧導管網のリアルタイム防災システム

4. 1. 1 感震自動遮断システム

東京ガスでは、低圧導管についてはマイコンメータ及びSI自動遮断システムの二種の感震器によりあるレベル以上の地震動を感知した場合に即座にガス供給の自動遮断を行うシステムを作りあげてきた。(図3参照)

マイコンメータは震度5強、又は加速度200ガル程度の地震動を感知した場合、自動遮断する機能を持ち、これによりメータ下流側のお客様へのガス供給は停止される。既に東京ガスは全てのお客様に対してマイコンメータの取付を完了している。

更に、中圧から低圧にガスの圧力を降下させる地区ガバナという施設がある。ここにSIセンサーという高精度に地震動の強さを感知できる地震センサーを取付けており、導管や構造物に被害が生じるような地震動(SI値30~40カイン)を感知すると、自動的にガスの供給を遮断するようになっている。(図3、図4、図5)

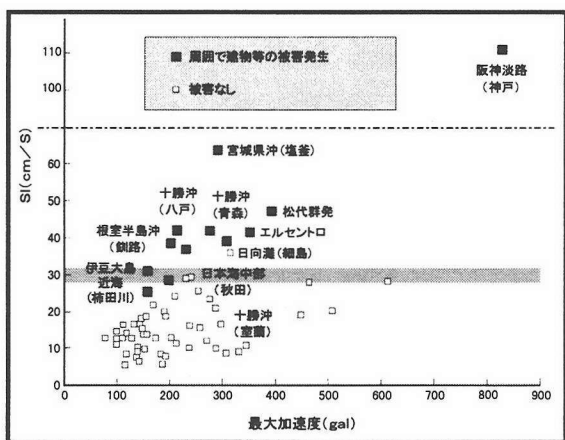


図4 SI値と加速度と建物被害の相関

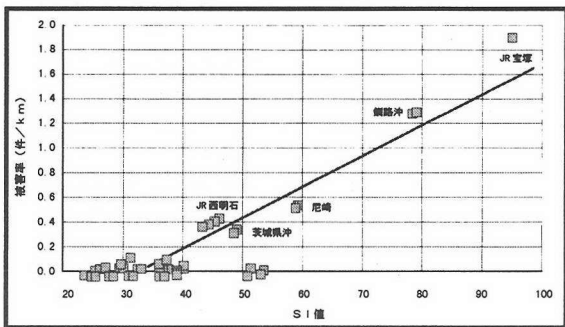


図5 SI値とネジ接合鋼管被害率の相関

4. 1. 2 SIGNAL -地震時導管網警報システム-

地震発災時に漏洩対応、保安確保などの初動措置を計画し実行するためには、被害情報が必要であるが、地震直後の電話回線の輻輳(ふくそう)などにより、ガス漏れなどの被害情報の入手に困難を極めたのが阪神・淡

路大震災の現実であった。当社では地震発生と同時に、どこの地域にどれだけの被害が生じているかを迅速かつ高精度で推定できるシステムが不可欠と考え、1988年より“SIGNAL-地震時導管網警報システム-”を開発し1994年6月より運用している。

このシステムは、供給区域内の332ヶ所のSIセンサーや5ヶ所の地下地震計・20ヶ所の液化化センサーなどから指令センターへ地震時にも信頼性の高い自営無線網で伝送される“リアルタイム地震動モニタリング情報”とGISを利用して予めデータベース化された供給区域内の地盤や導管情報などの“蓄積情報”を統合して地域ごとの被害を精度よく推定するものである。図6にSIGNALの概要を示す。

SIGNALのデータベースの地盤、需要家、導管の基本データは当社のGISマッピングシステムのものを利用し、東西250m、南北175mのメッシュを単位としてデータベース化している(総計80,000メッシュ)。地震動の大きさは地盤に大きく影響されることから各SIセンサーの観測値(計332個)は、センサー近傍の同種の地盤の地震動を代表させるものとし、そのため供給区域全域の地盤ゾーニングを行い、各SIセンサーの分担地域(メッシュ)を定めている。

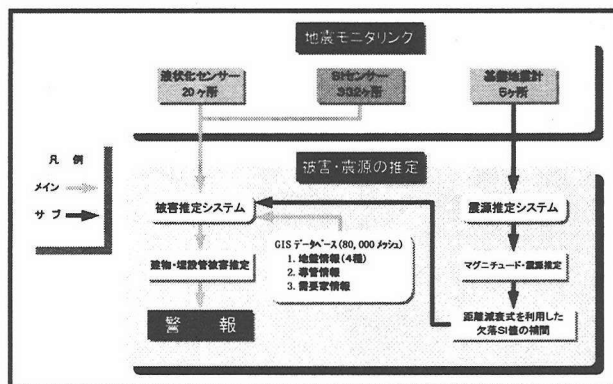


図6 SIGNALの概要

さて、地震直後に送信されてくる332局のSI値は分割された供給区域ブロック毎の供給停止を決定する基準値となる。例えば、あるブロックでSI値が60カイン以上となった場合は二次災害を防止するため、そのブロックの低圧供給は停止することとしている。低圧供給施設には感震自動遮断装置が具備されているがブロック内の完全な供給停止の確認のため人員を現場に派遣していく。

またSIGNALは、地震発生後約10分で被害推定計算を完了するので、地震直後の緊急措置において、供給停止基準に達しない地区の低圧ガス供給の停止又は継続の判断を短時間に行うことが可能である。また被害推定データを用いて復旧基本計画を復旧支援システム上で地震後短時間で策定することが可能となり、他社へ

の応援依頼、また資機材の確保等が早期に実行でき、結果的に早期復旧を実現できることとなる。

4.2 高・中圧導管網のリアルタイム防災システム

中圧導管は、耐震性に優れた材質や接合方法を用いているため、地震によって、損傷をうけることはきわめて稀である。しかし、大地震による万一の場合に備えて、迅速に遠隔監視、遠隔操作で緊急措置が行われるよう防災システムを構築してきた。供給区域の中圧導管網を15の大ブロックに分割できるよう遮断バルブが取り付けられている。

4.2.1 無線通信による遠隔監視・操作

工場、整圧所、ガバナーステーション等重要な供給拠点と本社、防災・供給センターの間はループ化された専用の固定無線が設置してある。(図7参照)これは多重無線回線であるため、大量の複数の情報を同時に伝達することができる。地震情報収集や各供給拠点の圧力、流量等の状態監視やガバナ、バルブ等の制御もこの無線によって実行される。

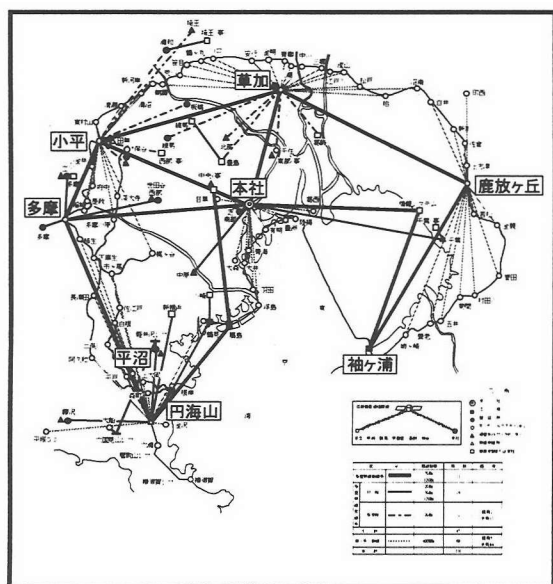


図7 東京ガスの専用無線網

4.2.2 遠隔漏洩検知システム

高・中圧導管網には、圧力・流量・圧力波センサーを用いたリアルタイム漏洩検知システムを具備している。地震が発生し万一高中圧導管に被害がある場合は、被害箇所近傍の供給地点で圧力波の発生、圧力低下、流量増大が起こることからそれらの情報を無線通信で収集し分析することにより漏洩検知が可能であり、既に東京ガスでは、これらのシステムを運用している。漏洩が検知されれば、遠隔操作により近傍区間、地域のガス供給を停止することになる。

5. 阪神大震災以降の東京ガスのリアルタイム地震防災システムの取り組み

阪神大震災以前より東京ガスは地震防災を他に先駆けて充実させてきた。しかしながら阪神大震災は我々の想定地震被害レベルを大きく上回った。そこで阪神大震災以降は100万件程度の供給停止件数となる直下型大地震を想定し、対策をより充実させることとした。ここでは、東京ガスの新しいリアルタイム地震防災システムへの取り組みを紹介する。

なお、阪神大震災以降取り組んだ主な課題は以下の通りである。

- (1)より迅速な低圧供給施設緊急措置実施のため低圧供給停止の感震自動遮断を正確に実施し、全ての地点での遮断状況を遠隔で監視し、必要に応じて遠隔で遮断を行う。
- (2)地震時に効率的に情報を送信できる装置の開発を行う。
- (3)低圧被害推定精度を向上させる。
- (4)圧力検知点を増加させることで中圧の異常状態検知レベルを向上させる。
- (5)地震波形データを蓄積することで揺れ易さ等の分析を行う。

5.1 新SIセンサーの開発

マイクロマシニング技術により超小型加速度ピックアップ(住友精密工業(株)製)の採用が可能となり、また高性能小型CPU、RAM等が安価に入手できるようになったことから、これまでの1/3~1/2以下の低価格で高機能・高精度を実現させた新SIセンサー(写真1、図8参照)を(株)山武と共同開発した。その主な機能を以下に示す。

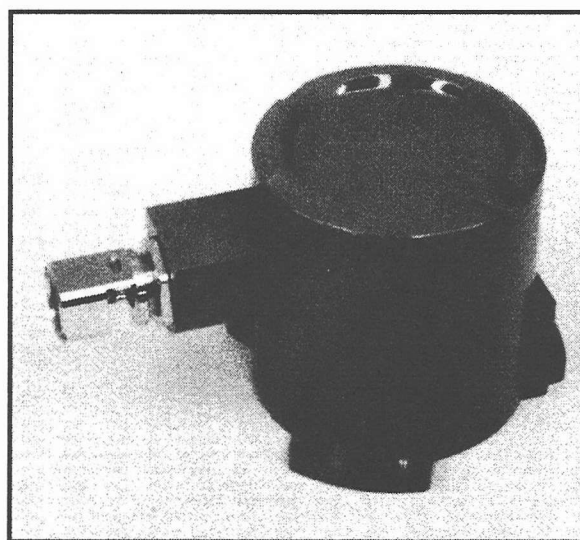


写真1 新SIセンサー

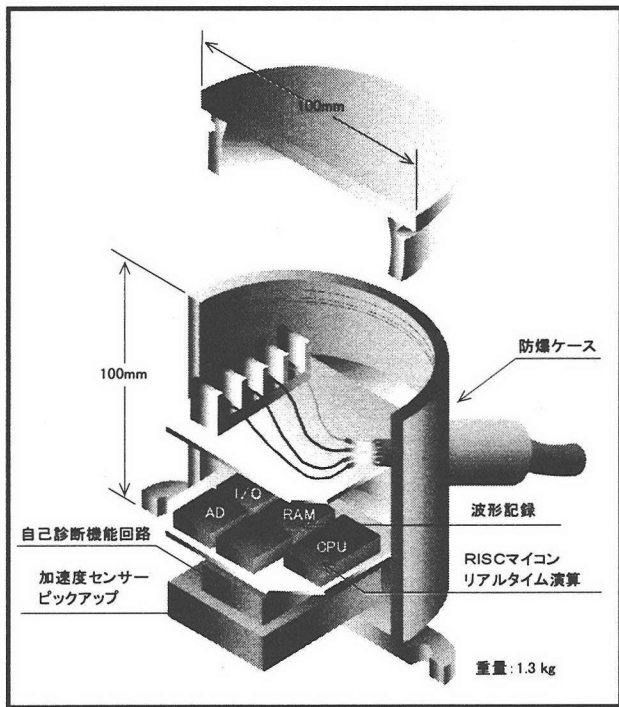


図8 新SIセンサー構造図

5.1.1 制御・計測機能

新SIセンサーは、都市ガスの圧力調整器(地区ガバナ)に地震発災時に感震遮断させる目的で設置されている。その制御遮断用に無電圧リレー接点出力、計測用にSI値・加速度のアナログ出力、液状化警報出力を持つ。ここでSI値とは、地震時の構造物被害と関連の高い値である。主要な構造物の固有周期が0.1~2.5秒の間にあるものと考えて、その間の1質点減衰系の速度応答スペクトルの平均を求めた値がSI値となる。

なお、加速度計測範囲は阪神大震災クラスにも対応可能なように±2,000galとし、さらに地震計として充分使用できるように分解能を1/8galとしている。

また温度補正を内部温度センサーで行うことにより計測精度を±5%以内とし、かつ設定変更(SI値/加速度、任意設定可)が可能な警報出力をもっている。

5.1.2 波形保存機能

各種防災対策・研究に生かせるように新SIセンサーは波形保存機能を持つ。データは、SI値の大きい波形(XYZ3軸)から6地震分、年月日時間等のヘッダー情報とともに内部メモリに保存される。記録されるデータのサンプリングタイムは1/100秒毎、波形記録時間は、SI最大値を中心として±25秒、計50秒間/地震波である。

図9に実際に保存された1998年1月14日茨城県南部の地震の加速度波形(港区港南で観測)を示す。

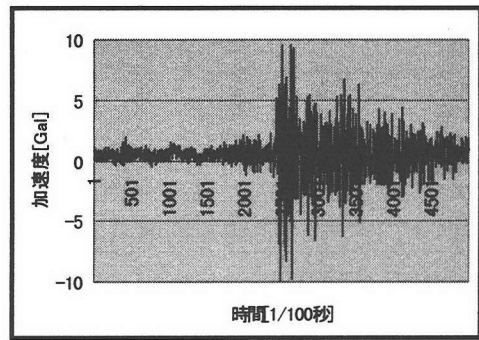


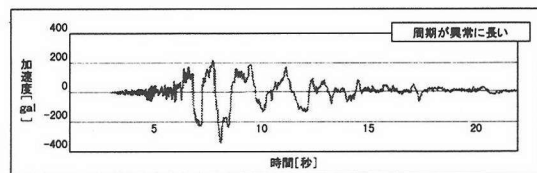
図9 1998.1.14 地震データ(港区港南)

5.1.3 液状化判定

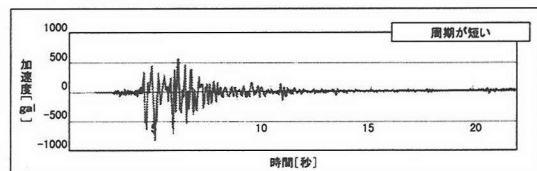
地盤の液状化は、被害を推定する上で非常に重要なデータとなるが、従来は大規模なボーリング工事が必要であった。新SIセンサーは加速度波形の変化から液状化を判定するため非常に簡便に液状化を把握することができる。図10に示すように阪神・淡路大震災におけるポートアイランドと神戸海洋気象台の波形を比べると、明らかに液状化したポートアイランドの地震波形の周期が長くなっていることがわかる。

新SIセンサーではこの液状化時の地震波形の変化を加速度 A_{max} 、SI値、推定変位 $D(2SI^2/A_{max})^3$ 、推定周期(T)を用いて、以下の4条件を満たしたときに液状化が発生したと判定している。なお、ここで推定周期(T)とは、新SIセンサーで計測される加速度地震波形がゼロ線を横切る時間間隔(ゼロクロス周期)としている。

- (I) $A_{max} > 100gal$
- (II) SI値 $> 20kine$
- (III) $D > 10cm$
- (IV) $T > 2sec$



ポートアイランドで観測(激しい液状化あり)



神戸海洋気象台で観測(液状化なし)

図10 阪神大震災における地震波形

図11に過去70地震の波形を分析し液状化判定を実施した結果を示す。70地震の波形のうち明らかに液状化の発生した事例は、日本海中部地震(八郎潟)、阪神大震災(尼崎、神戸港、ポートアイランド(0m)、東神戸大

橋)、Superstition Hill(Wildlife)⁴⁾、新潟地震(川岸町)であるが、今回開発した測定法を用いれば、十勝沖地震(八戸)を除き、ほぼ100%の液状化の判定がリアルタイムで可能である。この世界初の技術により液状化検知が非常に安価に実現できる。

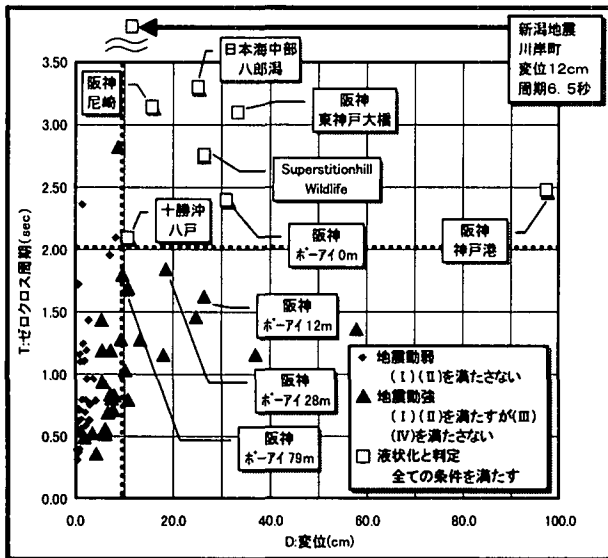


図11 液状化判定結果

ある地区ガバナに新SIセンサーと防災DCX(地区ガバナ遠隔監視装置)を設置することにより、0.9km²に1つの超高密度でSI値、PGA(地表面最大加速度)、圧力、ガバナ遮断、液状化警報の遠隔監視が可能となる。SUPREMEの主な活用方法は以下のとおりである。

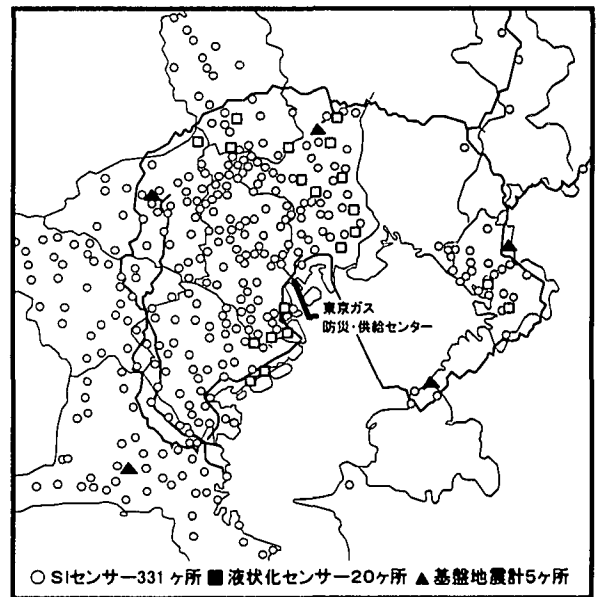


図12 現状のSIGNAL・SIセンサー配置図

5.2 防災DCX

東京ガスでは、地区ガバナの状態監視を常時遠隔で実施するため防災DCXを全3,700ヶ所に設置を実施中である。DCXの設置の主目的は、平常時の地区ガバナのトラブルシューティングまた圧力監視および分析に使用されることである。そのため、通信手段はコストを重視して選択する必要があり、全ての地区ガバナには、NTT等の一般加入回線を利用している。これらの回線は地震時の輻輳が考えられるため通信困難となることが考えられる。そのため、地震時には地区ガバナでの情報を優先付けしてまとめて一度に効率的に送信するようソフトを開発し防災DCXに組み込んでいる。例えば、阪神大震災クラスの大地震の場合は、輻輳率が50倍であっても被害が発生した地区の地区ガバナの80%の箇所の遮断情報、中圧低下警報、液状化警報等の優先情報を30分以内に収集する事が可能となる。

5.3 SUPREME - 新防災システム - の概要

東京ガス株式会社では既に332局の地震計を用いた“SIGNAL”(図12参照)を運用しているが、阪神大震災を教訓として、それに加えて1998年1月より供給区域、約3,100km²に対して約3,700基の地震計(新SIセンサー)を設置しモニタリングする世界一超高密度な“SUPREME”の構築を開始した。図13に新SIセンサー全数設置後のセンサー配置図を示す。また図14にSUPREMEの構成図を示す。都市ガスの圧力調整器で

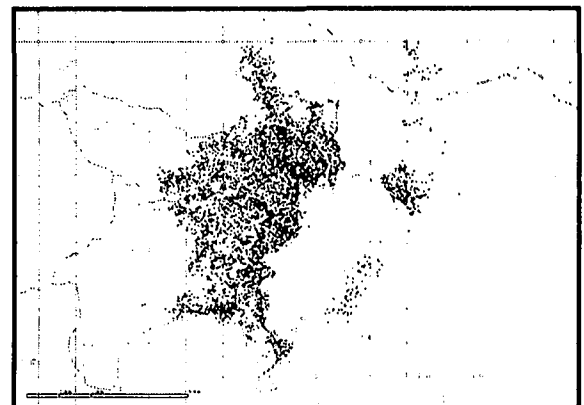


図13 SUPREME・新SIセンサー配置図

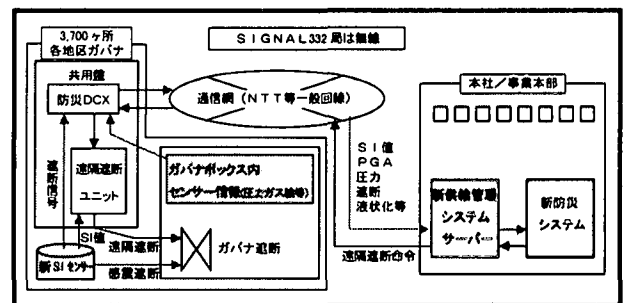


図14 新リアルタイム防災システム(SUPREME)の構成

①超高密度に計測されるSI値と供給区域内のガス導管、地盤データ、地形データを取り込んだGISを組み合わせることによる高精度被害推定の実施を行う。

- ②毎年蓄積される中小地震の地震波形データとGISデータを分析することにより、約3,700地点それぞれの揺れやすさを求め、ゾーニングへの反映や緊急措置実行の最適化を行う。
- ③リアルタイム液化化検知が、きめ細かく実行されることから、高精度被害推定・的確な緊急措置実行が実現可能となる。
- ④全ての地区ガバナの遠隔遮断状況を地震発災直後に遠隔で把握することが可能となり、また必要に応じて遠隔遮断を実施することで飛躍的に低压導管網に対する緊急措置レベルの向上が図れる。
- ⑤圧力検知点が3,700点に増えることから、中圧導管の異常状態検知レベルを大幅に向上させることが可能となる。

今後、SUPREMEで得られる超高密度なリアルタイム地震情報(SI値・加速度)についてはリアルタイム配信サービスを開始する予定であり、また中小地震波形については、CD-ROM等に保存し年1回程度の頻度でデータ公開していく予定である。

6. (実例)台湾大地震における台北市地震動計測

6.1 概要

1999年9月21日1時47分(現地時間)台湾南投縣集集近辺(台北の南南西約160km)で $M_w=7.6$ の地震が発生した。この地震により震央から160km離れた台北でも震度4を記録した。台北市では約80km²のエリアで台湾最大の都市ガス事業者である大台北区ガスが約33万戸の需要家に都市ガスを供給しているが、地震時の二次災害防止を目的として整圧器の感震遮断のために設置していた新SIセンサー16基で地震動の記録が得られた。ここではこの高密度地震動モニタリングシステムにより得られた本震と余震記録について紹介する。なお今回の地震による大台北区ガスの被害は支管2件のみと軽微であり、ガスの供給停止は実施していない。また大台北区ガスでは整圧器の感震遮断設定値を40kineとして運用しており、後述するように新SIセンサーで測定された最大SI値は27kineであったため、ガスの供給は継続することができた。

6.2 観測結果

今回の地震の本震では、図15に示すとおり16ヶ所でSI値・加速度が計測されている。台北市は、震源より約160km北に位置しているため距離減衰の影響は殆ど無いと考えられるが、分布図から明らかなようにSI値・加速度ともかなりのバラツキが見られる。最大値は社子でSI

値27.4kine、加速度139.6Gal、最小値は圓山でSI値8.3kine、加速度38.0galが記録されている。最大・最小比はSI値で3.3倍、加速度では3.7倍となっている。

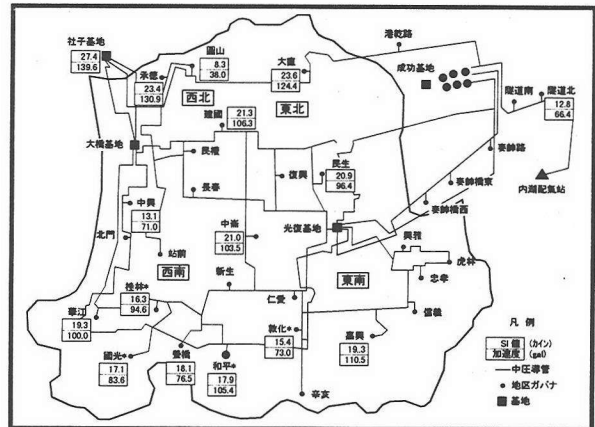


図15 観測された地震動分布

社子、圓山の加速度応答と付近のボーリング柱状図を図16及び図17に示す。地盤の差異がその地盤の揺れ易さと強い相関があるように見える。これらについては今後より多くの地盤柱状図、PS検層データを入手し地盤と揺れ易さの分析を実施する予定である。

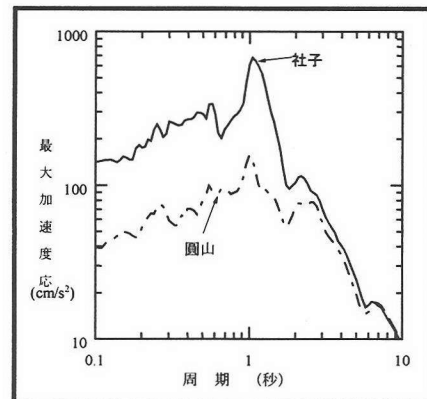


図16 社子と圓山の加速度応答スペクトル

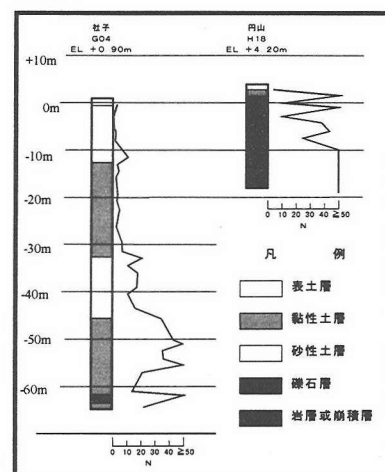


図17 社子と圓山のボーリング柱状図

6.3 本震と余震の関係

SI センサー設置地点の揺れ易さの本震と余震の相関を見るために、図18に最も加速度データの多い99年11月2日の地震を基準にしてSI値の小さい地点順にソートしてSI値(各地震の全観測地点の平均値で規格化)をプロットし、図19では本震(観測値の平均に対する比)に対する余震(観測値の平均に対する比)のSI値をプロットした。どの地震でも右上がりの傾向が概ね認められ、各地点の相対的な揺れ易さの関係は地震の種類によらず、概ね一定であることが明らかになったため、中小地震の揺れ易さから大地震の揺れ易さを推定できることが分かった。また11月2日の地震で大きなSI値が観測された台北盆地南東部の忠孝・虎林・信義では1~2Hzで非常に特徴的なピークがあることが明らかになっている。

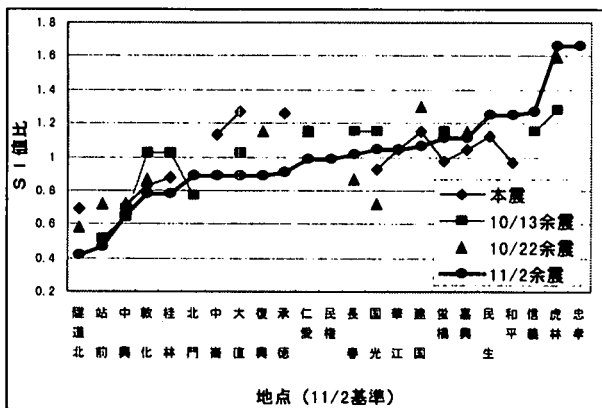


図18 台北市における本震と余震の地点毎の揺れ易さの関係

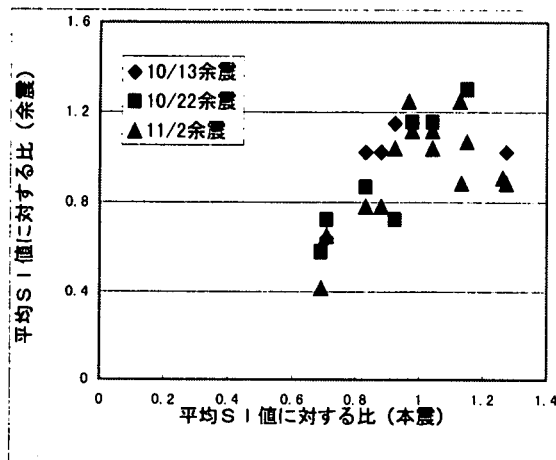


図19 台北市における本震と余震のSI値の関係

7. まとめ

当社は大都市におけるガス事業の基本が「安全の確保」にあるとの認識のもとに、地震対策を真剣に追求し、

さまざまな対応策を講じてきた。これによって、少なくとも地震時にライフラインの中であって都市ガスだけが甚大な被害を受け、孤立する事態を招くことはないものと確信している。しかしながら、これだけ巨大化し、過密した首都圏における大地震を想定した時、どのような事態が招来するのか予測すら困難である。地震対策には万全ということはある得ない。一方、地震をめぐる知見や技術も日々新たな進展を見せている。特に阪神大震災以降、多岐の分野にわたって研究が進み多くの提案、提言がなされ、実際に地震対策、施策、プロジェクトが幾つかの機関で計画・実行されている。その注目されている分野の一つに「リアルタイム地震防災」があげられる。我々はリアルタイム地震防災を「地震時にガスによる二次災害が起きないようにするための措置又は方法、手段」として位置づけ以下のようなシステムを構築してきた。

- (1) 低圧供給施設についてはマイコンメーターやSIセンサーによる地区ガバナ遮断システムなどの感震自動遮断システムによって地震発災後即座に供給停止を実施する。
 - (2) SIGNALによる低圧導管被害推定によって、低圧供給網の供給停止、供給継続の可否支援を実施する。
 - (3) 高・中圧施設については圧力・流量等の遠隔監視により異常を検知し必要により遠隔制御を実施する。
- さらに現在、阪神大震災での教訓を基に地震発災後の被害把握能力、緊急対応能力を高めるために3,700ヶの新SIセンサー、防災DCXを組み合わせた新防災システム(SUPREME)を展開中であり、一歩でも我々の地震対策をベストのものに近づけていく所存である。

- 1) ガス地震対策検討会: ガス地震対策検討会報告書、1997
- 2) 清水善久: 早期地震時被害推定システム—SIGNAL—、計測と制御、Vol.36, pp.41-44, 1997
- 3) I. Towhata, I., Park, J.K., Orense, R.P and Kano, H.: Use of Spectrum Intensity for Immediate Detection of Subsoil Liquefaction, Soils and Foundations, Vol.36, No.2, pp.29-44, 1996
- 4) Matasovic, J. and Vucetic, M.: Analysis of Seismic Records Obtained on November 24, 1987 at the Wildlife Liquefaction Array, Reserch Report U.C.L.A., 1993.