

都市ガス供給網における超高密度地震防災システム—SUPREME—

清水 善久

東京ガス㈱では、一層の都市ガスの緊急措置レベルの向上を図るため、約3,100 km²の供給エリアにおいて約3,700基の新SIセンサーと地区ガバナ遠隔監視・制御システムを配備した世界一超高密度なリアルタイム防災システム(SUPREME)の稼働を開始した。SUPREMEでは、地震発生時に地区ガバナを自動感震遮断および遠隔遮断することで迅速に供給停止を実現し、また、地震発生後ほぼリアルタイムに地震動・液状化等のデータ収集を行い、高精度に被害推定を行うことにより二次災害発生の危険度を大幅に低減させるものである。

キーワード：SUPREME，地震防災，都市ガス，リアルタイム被害推定，二次災害防止，新SIセンサー

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以降、多くの機関で高密度地震動モニタリングシステムの構築やリアルタイム被害推定システムの整備が実施されている。東京ガスでも今後の防災レベルのより一層の向上を図るため、供給区域、約3,100 km²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

一超高密度な地震防災システム(Super-dense Realtime Monitoring of Earthquakes: SUPREME)の構築を開始した。図1に新SIセンサー全数設置後のセンサー配置図を示す。

このシステムは、地震時に迅速に情報収集するために新たに開発された防災テレメータ装置(防災DCX)を利用して地震発生に際してほぼリアルタイムに新SIセンサーで測定される地震動強さ(SI値、加速度)

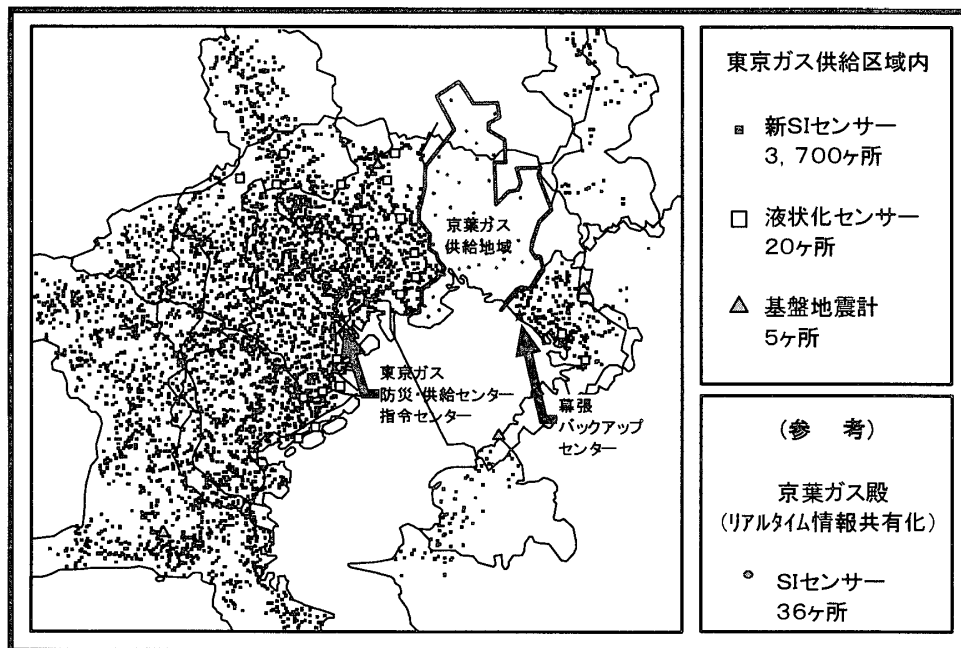


図1 SUPREME/地震センサー配置図

しみず よしひさ
東京ガス㈱ 防災・供給センター
〒105-8527 港区海岸 1-5-20

や液化化発生に関するデータを収集し、それらをあらかじめ防災 GIS 上に 50 m×50 m の大きさの 140 万個のメッシュに対して整備された地盤増幅特性や液化化層厚推定情報、導管情報等のデータベースと組み合わせて高精度に地震動空間補間、液化化空間補間を行い被害推定を実施する。また、低圧導管網からの漏洩ガスによる二次災害を防止するための新 SI センサーによる地区ガバナ感震遮断状況を監視し、必要な場合は遠隔で遮断する等の制御を実施することで災害の軽減をねらい、防災レベルを大幅に向上させるものである。本稿では 2001 年 7 月に稼働を開始したこのシステムの中核となる新 SI センサー及び SUPREME の迅速情報収集・遠隔遮断技術を中心に詳しく述べることにする。

2. 新 SI センサーの開発

2.1 新 SI センサー開発の背景

阪神・淡路大震災を契機として、地震時に破損した低圧導管から漏洩した都市ガスが原因となる二次災害の発生を防止するために、ガス地震対策検討会[1]において、SI 値[2]を用いた即時ならびに緊急供給停止の判断や供給停止の方法が提案された（表 1 参照）。

東京ガスでは、図 2 に示すように既に阪神・淡路大震災以前より即時もしくは緊急供給停止に対応できる低圧ブロックを 101 ヶ整備してきた。図 2 に示すよう

に各ブロックの面積は 30～40 km² であり、その中にガスの圧力を中圧（0.1～1.0 MPa）から低圧（約 2.5 kPa）に制御する地区ガバナが 30～50 個配置されている。

大地震時に被害が生じる可能性の高い低圧導管網の供給停止は、この地区ガバナ全てを遮断することで各ブロック毎に実現する。そこで、地震発生時に被害が甚大となる地域への供給停止を容易にするため、各地区ガバナには事前に設定した SI 値以上の地震動が検知された場合に供給を遮断する「感震自動遮断装置」が取り付けられている。

また各低圧ブロック内には SI 値を計測する 3 ヶの地震計（L ブロック情報局）が設置され、地震発生直後にそのセンサーが計測した SI 値が無線で指令センターに送信される。つまり、指令センターはこの SI 値を用いて低圧ブロック毎に供給停止判断を行うことになる。このように SI 値は即時・緊急供給停止地域（ブロック）を決める指標またはガバナの供給停止を実行させるために使われることになり、供給停止は経営的課題でもあるから、地震計を含む地震監視システムの信頼性、SI 値計算の高精度化がこれまで以上に望まれることとなった。

さて、東京ガスでは 1986 年より約 3,700 基の地区ガバナに遮断用 SI センサーと自動感震遮断装置を設置してきた。しかし、従来の遮断用センサーは電磁ノ

表 1 都市ガスの供給停止判断と実行（ガス地震対策検討会報告書[1]より）

	即時供給停止	緊急供給停止
1. 供給停止判断	①地震計のSI値が60カイン以上の場合又は②工場及び供給所ホルダー送出量の大変動や、主要ガバナ等、圧力の大変動により供給継続が困難な場合	①地震計のSI値が30カイン以上60カイン未満程度で状況に応じる。
2. ブロック形成の方法	・二次災害防止を再重要視し、より安全側に立った供給停止が行えるブロック ・大きさ:200km ² 程度	・二次災害防止を基本に、供給停止地域の極小化を考慮したブロック ・大きさ:50km ² 程度
3. 供給停止方法	複数のブロックを有する場合、ブロック毎に遠隔遮断、又は感震自動遮断による即時遮断システムを整備する。	・手動停止を含めた遮断システムを整備する。 ・大規模事業者においては、遠隔遮断又は感震自動遮断による遮断システムの整備を検討する。

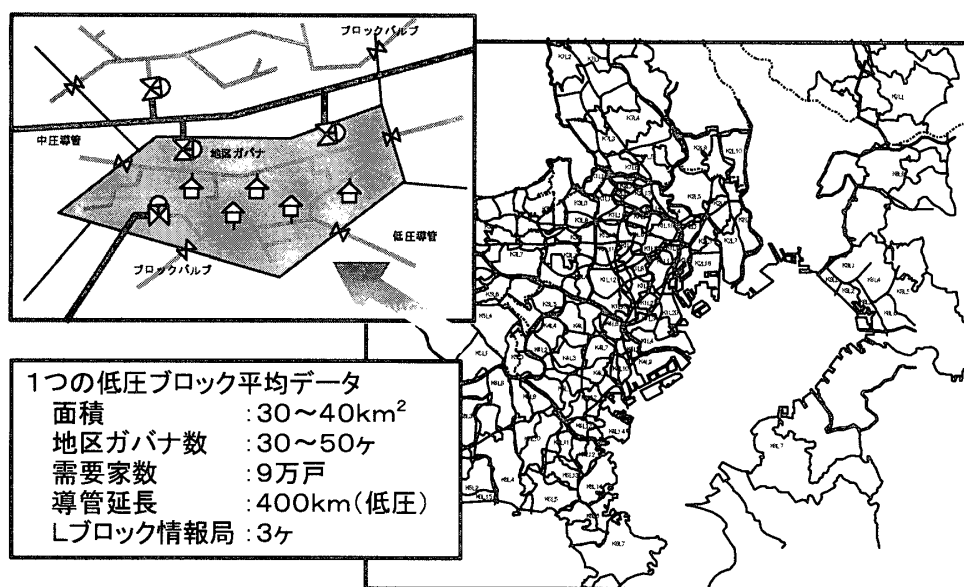


図2 東京ガスにおける低圧導管ブロック概念図 (計 101 ブロック)

イズ等による誤遮断を防止するために、振り子の揺れ幅設定によって遮断を行う機械式センサーで ON/OFF のみを出力する型式となっており大幅な誤差を含むものである。また L ブロック情報局に用いている計測用の SI センサーは高価であったにもかかわらず、当時の CPU 能力が限定されていたため簡易的な計算アルゴリズムしか導入しておらず精度に問題があった。さらに、計測用 SI センサーは電磁ノイズによる誤計測の問題から遮断等の制御用では使われていない。そこで、上述した SI 値計算の高精度化、適切な遮断の実行を行うため、また従来のセンサーが設置して 10 年以上経過し更新時期になっていること、近年のマイクロマシニング技術等の進歩により安価で高性能な新しいセンサーを作れる環境が揃ったこと、さらに阪神・淡路大震災以降のリアルタイム地震防災レベルの向上を図る必要があったことも背景として、耐環境性が優れていてガバナ遮断、地震動計測も可能な高性能地震計、新 SI センサーの開発を行うこととなった。

2.2 新 SI センサーの概要とコンセプト

新 SI センサーは、単機能・高価格な既存センサーの欠点を克服するため、SI 値演算、加速度波形記録保存、感震遮断信号出力、液状化検知等の多機能を一つのセンサーに集約すべく設計を行った。新 SI センサーの内部構成概要と主な機能を図 3 に示す。加速度センサーには 3 軸シリコンマイクロマシニング容量型加速度センサー [3] を採用している。シリコン加速度センサーは、サーボ型加速度センサーには分解能等の項目では性能的に及ばないものの、体感地震の計測制

御用としては十分な性能を持ち、超小型軽量の特長を有している。地震センサー内部の加速度計測部においては、加速度センサーと温度センサーの出力を同時に取得し、キャラクターゼーション演算を行うことで温度特性の向上を図っている。加速度計測範囲はノースリッジ地震や阪神・淡路大震災にも十分対応可能なように $\pm 2,000$ Gal とし、計測精度は $\pm 5\%$ 以内を確保している。また、新 SI センサーは温度補正された加速度データを 1 波あたり 3 軸、10 ms サンプリング、分解能 1/8 Gal、SI 最大値を中心に 120 秒の記録として SI 値の大きな順に 10 地震分を内部 SRAM (記憶装置) 上に記録保存することが可能である。その他、地区ガバナの制御のため無電圧リレー設定出力を持つ。さらに制御するにあたっての SI 値/加速度/液状化警報の設定を自由に行うことができる。また、従来の計測型地震計では、センサー部と演算部が別ユニットとして構成されるのが通常であったが、今回開発の地震センサーにおいては SI 値演算アルゴリズムの最適化の結果、全演算を地震センサー内で行うことが可能となった。したがって、防爆ケース内に小型シリコン加速度センサーを搭載するとともに制御用出力を含む全ての機能を集約し、小型、低価格化を実現するとともに耐電磁ノイズ性を向上させた。また、新 SI センサーは加速度波形の変化からリアルタイムに液状化を判定するアルゴリズム [4] を搭載しており、従来の土木工事を必要とする液状化検知方法と比べて、安価にかつ簡便に液状化発生を把握することを可能としている。新 SI センサーの主な機能について図 3 に付記する。

3. SUPREME の構成

SUPREME の構成を図 4 に示す。現在、東京ガスでは、従来の地区ガバナ SI 遮断センサーの更新の機会を利用して新 SI センサー、地区ガバナ遠隔監視用防災テレメータ装置（以下防災 DCX と略す）を約 3,700 個の地区ガバナに設置中であり、これらの機器と指令センターを通信で結ぶことにより、約 3,100 km² の供給区域の約 3,700 点（0.9 km² に 1 個）での SI 値、PGA、圧力、ガバナ遮断、液状化警報状況等の観測及び指令センターからの遠隔監視・制御が可能となる。

SUPREME はこれまでのリアルタイム地震防災シ

ステム SIGNAL[5]を包含して拡張したシステムである。例えば 3,700 個ある地区ガバナ等の地震時の情報のうち、新 SI センサーで測定される SI 値・加速度については 332 局は自営無線と一般回線、その他の約 3,400 局は NTT 等の一般回線のみを使用して送信される仕組みになっている。また、液状化警報については、20 ヶ所の液状化センサー[6]と 300 局の新 SI センサーからの警報は自営無線と一般回線、その他約 3,400 局は一般回線で送られる。地震時の通信の信頼性を考慮すれば、全ての情報を自営無線で送信することが望ましいが、コスト面で実現性が乏しい。そこで無線と一般回線を併用することとし、一般回線では必要な情報の 8 割を 20 分以内に収集することを目指し

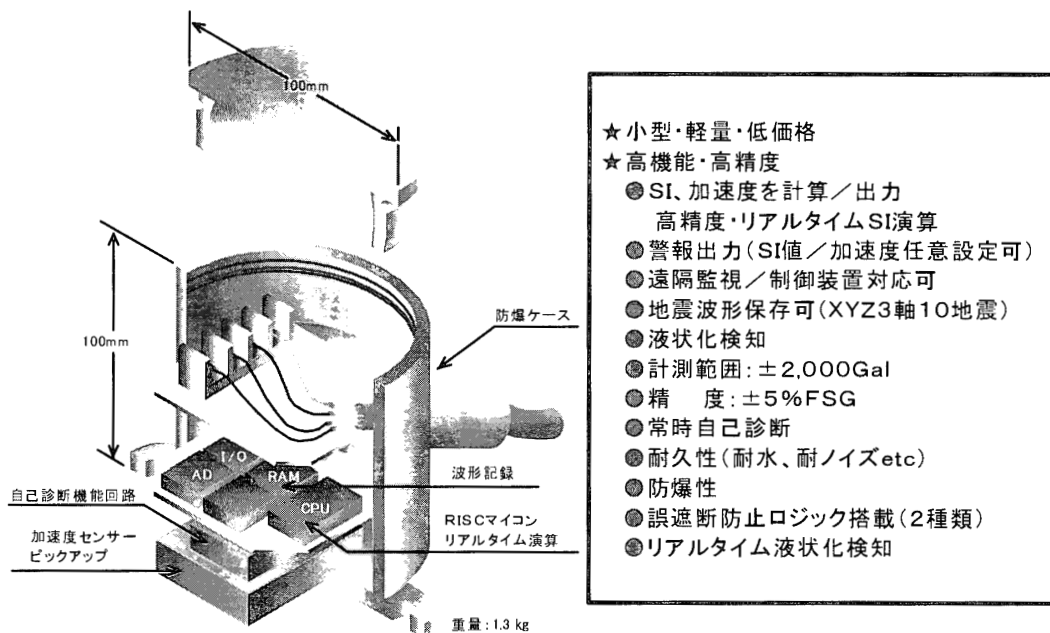


図 3 新 SI センサー内部構成概要及び主な機能

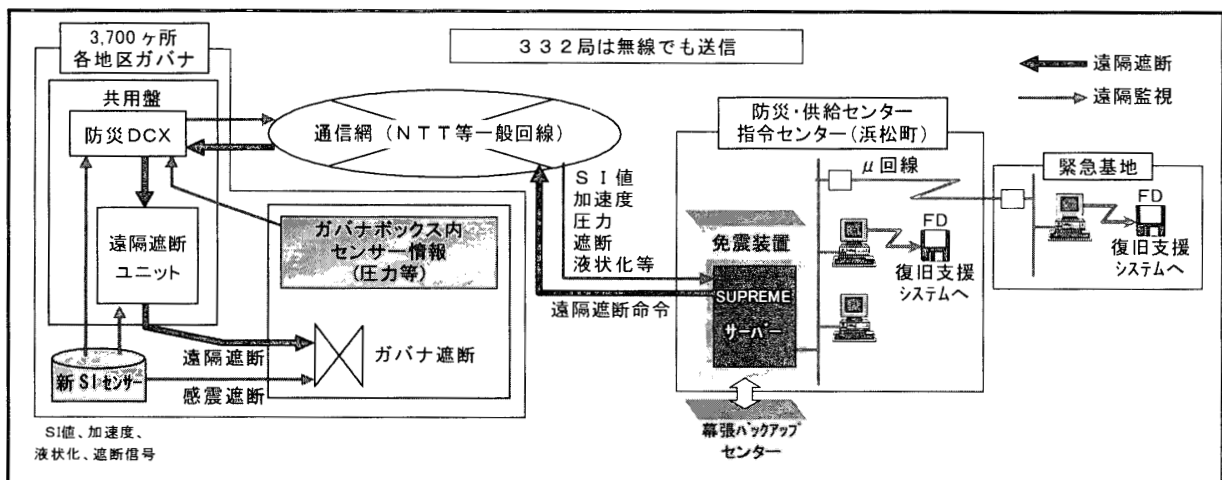


図 4 超高密度リアルタイム防災システム (SUPREME) の構成

た。まず NTT 等との折衝の結果、個々の地区ガバナと指令センターの一般回線は災害優先指定回線とし、地震時の通信の輻輳に対処している。また、より迅速に情報送信を行うために防災 DCX を開発して 3,700 地点全ての地区ガバナに設置している。SUPREME における新 SI センサーは 2003 年 3 月までに 2,300 基設置されており、最終的に 3,700 基の設置が完了するのは 2006 年度の予定である。ホストシステムは 2001 年 7 月に完成し、これまでにない超高密度リアルタイム地震防災システムが稼働を開始している。

4. SUPREME による地震時迅速情報収集

東京ガスでは、遠隔監視装置 (DCX 200) [7] を、通常時の圧力管理業務を目的として 1994 年より全地区ガバナへの設置を行ってきた。地区ガバナのうち設置の困難な個所を除けば 2000 年度中に 3,700 ヶ所全数に設置され、全地区ガバナの圧力センサー等のガバナ情報や保安管理情報の把握が可能となってきた。

この遠隔監視装置からの情報を地震時にも用いることが SUPREME の構築の重要なポイントである。地震時だけで使うシステムは非効率的であるばかりか、通常時操作を行わないために地震時に的確に操作される確率は低くなる。通常時も使用されていれば、メンテナンスも行き届いているばかりか操作も習熟されていて、地震時に不安を残さない。しかし、現在の DCX 200 を地震時に用いるには、“大地震時に多発する警報収集に時間がかかる”といった課題があり、これを解決するべく、「通常時の警報収集機能に支障をきたさない」という条件で地震時迅速情報収集機能を強化しソフトウェアを改良した「防災 DCX」を開発した。新機能の開発の結果、例えば阪神・淡路大震災規模の地震規模かつ電話の輻輳条件で、20 分以内に必要地震情報の 8 割を収集することが可能となった。3,700 基の地区ガバナのバッテリー仕様は 1 時間であり、この防災 DCX の設置により、地区ガバナの監視・遠隔遮断、高精度被害推定を SUPREME で実現することが可能となった。防災 DCX は 1999 年度に開発を完了し、2001 年 3 月までに地区ガバナ全数に設置を完了している。

5. SUPREME による地震時地区ガバナ遠隔遮断技術

5.1 背景

都市ガスの低圧供給網が阪神・淡路大震災で大きな

被害を受けたが[1]、東京首都圏エリアでも大地震が発生した際は同様の事象が起これると考えている。都市ガス漏洩による二次災害防止のためには、即時にガス供給を停止しなければならない。このため、これまで我々は地区ガバナに感震自動遮断装置を取り付けてきた。しかし、現実的には地震時の低圧供給網の供給停止は低圧ブロック毎に行われ、そのブロックの全ての地区ガバナを閉止しなければ実現できない。しかし地盤条件の違いなどにより地震動は大きく変わるため、供給停止条件を満たしたブロック内の全ての地区ガバナが感震遮断をするとは限らない。また、新 SI センサーの機器故障があれば、そのガバナは当然感震遮断しない。そのため地震後供給停止を行うブロックについてはガバナの停止巡回を行う必要があり、供給停止には時間・人手がかかる。また中圧導管網は高い耐震性を保持しており、地震時に被害の多い低圧導管を健全中圧導管網から迅速に切り離すことは中圧の供給継続及び復旧時の時間の短縮のために非常に重要である。SUPREME により地区ガバナを遠隔遮断することができればこの課題を克服できるが、無線を用いることはコスト面で不可能でありまた一般回線を用いる遠隔遮断に対しては信頼性 (機器故障・ハッカー等) の確保が課題となっていた。

5.2 対策

今回、一般回線を用いて遠隔遮断を行う際に誤遮断に対する信頼性を向上させるため“遠隔遮断ユニット (以下 TC ユニット)”を開発し、SUPREME から遠隔で一般回線を用いてガバナを遮断できるようにした。また、地震時以外に地区ガバナを遠隔遮断するニーズが 100 年以上にわたるガス供給の歴史の中でも全くないため、TC ユニットによる遠隔遮断は、地震時のみ実行可能な機能とし、新 SI センサーと機械式感震器の双方のデータから TC ユニットで地震の有無を判断することとした。また誤操作や機器故障・ハッカーの侵入による誤遮断を防止するため、防災 DCX で通信チェック及び TC ユニットで遮断命令の正誤判断を行い十分な信頼性を確保することとした。遠隔遮断の実施結果は即ホストにフィードバックされる。この一般回線を用いた安全・安価かつ確実な地区ガバナ遠隔遮断の仕組みを図 5 に示す。

5.3 遠隔遮断の効果

地区ガバナ遠隔遮断を行うことにより人員を地区ガバナに巡回させることなく供給停止を極めて短時間で実施できるため、被害箇所からのガス漏洩を大幅に減

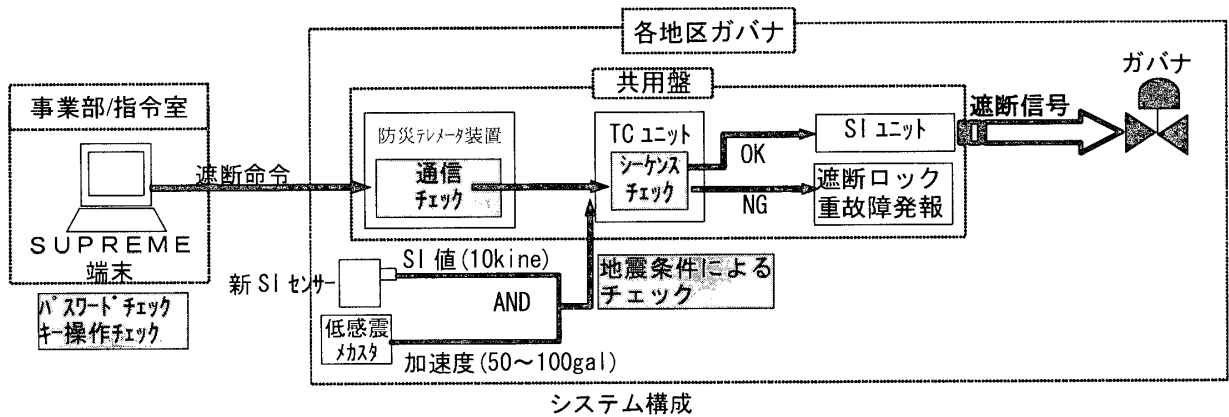


図5 SUPREMEにおける地区ガバナ遠隔遮断安全性確保の仕組み

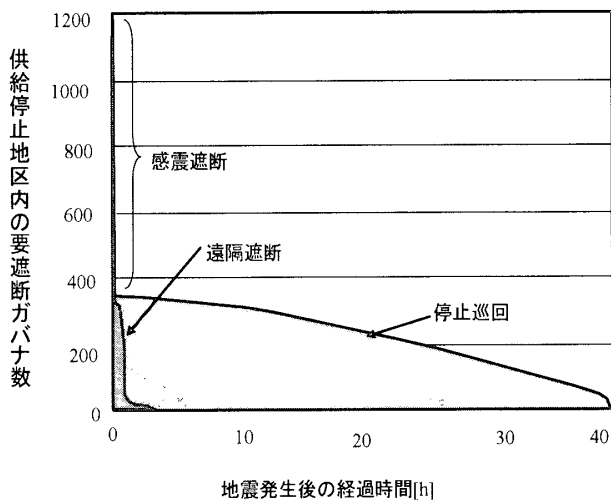


図6 供給停止に要する時間の比較

少で二次災害の発生を最小限に抑えることが可能となる。ここでは阪神・淡路大震災のデータに基づいて東京地区でシミュレーションを実施し、遠隔遮断技術を導入することで、どの程度危険度が低下できるかを検証した。

危険度を「供給停止すべき地域（SI値が高く供給停止基準に適した地域）における開ガバナ数と地震発生後の経過時間の積」と定義する。図6に示されたシミュレーションでは供給停止すべき地域に1,200基の地区ガバナが存在し、現状の感震自動遮断システムではそのうち850基が感震自動遮断するが350基が遮断しないままの状況として残ることになる。これを参集した人員で地区ガバナの停止巡回を実施すれば約39時間かかる。これが遠隔遮断を用いれば1時間以内に通信の断線した箇所等を除いてほぼ全ての地区ガバナの閉止が完了するため表2に示すように危険度は97%削減され、大幅な地震防災レベルの向上が図れることがわかる。なお、ここでは激震地区の一般回線の

表2 危険度シミュレーション結果

	供給停止完了時間	危険度比
現状 (感震遮断のみ)	39時間	1.0
遠隔遮断 (遠隔監視含む)	1時間	0.03

断線率を阪神・淡路大震災を参考として5%としている。また、動員状況や巡回歩掛かりについては、阪神・淡路大震災時の大阪ガス(株)の実績を基に想定した[1]。

6. SUPREMEで実現されるその他の機能

6.1 高精度低圧供給網漏洩推定機能

SUPREMEでは、ほぼリアルタイムに最大3,700点からの地震動(SI値, PGA)及び液状化情報が収集される。これをSUPREMEに即した地理情報システムに蓄積されたデータと組み合わせることで地震動面的分布推定[8]、液状化層厚面的推定[9]、低圧供給網の被害推定[10]を高精度に実施する。低圧供給網の被害推定結果は、地震直後の被害全体像の把握及び低圧ブロックの供給停止又は継続の判断に利用される。蓄積データベースのうち、供給施設情報として3,700基の地区ガバナ及び中圧供給網は線情報として、低圧供給網については50m単位のメッシュに集約して管種・口径毎の延長を整備している。また、地盤情報として微地形情報や供給エリア内に約60,000本のボー

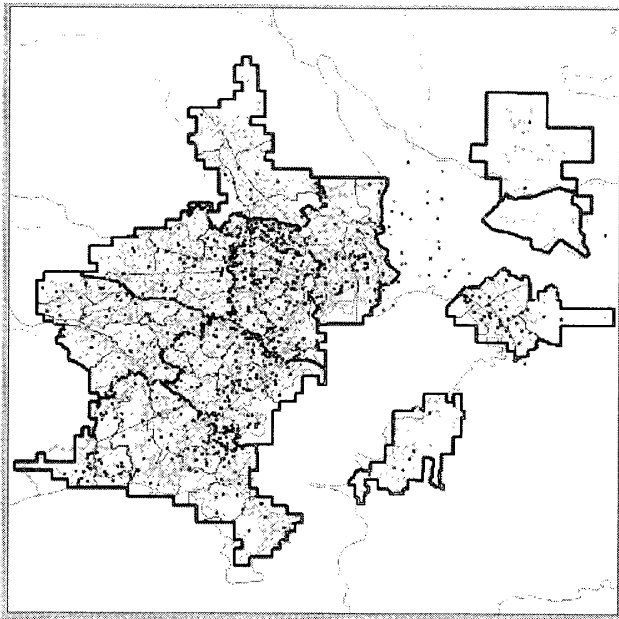


図7 SUPREME 実稼働状況 (01.07.20 地震 SI 値分布)

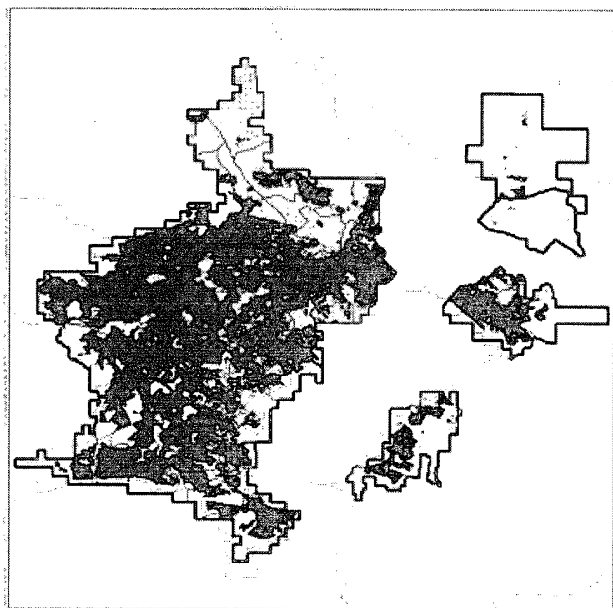


図8 SUPREME 実稼働状況 (01.07.20 地震 50 m メッシュ単位補間後 SI 値)

リングデータを収納している。図7に、2001年7月20日に発生した小規模地震でSUPREMEが捉えた超高密度SI値分布を、図8にそれを50mメッシュに補間した分布図を例示する。

6.2 超高密度加速度波形データによる事前防災

SUPREMEはリアルタイム緊急措置だけでなく、事前地震防災にも利用が可能である。中小地震時に最大3,700点の新SIセンサーに蓄積される加速度波形データは、これまでにない超高密度データベースとな

り、地盤増幅度の研究、地震動空間補間技術やゾーニング技術の検討に大きく寄与することになる。

7. まとめ

阪神・淡路大震災を教訓として都市ガス供給網、特に低圧供給網に対する緊急措置レベルの大幅な向上を目的として超高密度防災システム SUPREME の構築を開始した。SUPREME は約 3,100 km² のエリアに約 3,700 基の地震計 (新 SI センサー) を設置し、双方向通信でモニタリング・コントロールする世界一超高密度リアルタイム地震防災システムである。SUPREME は、2001 年 7 月に一部稼働を開始した。これにより、都市ガス供給網の大地震時の防災レベルを大きく向上させると確信している。

参考文献

- [1] ガス地震対策検討会：ガス地震対策検討会報告書，1996.
- [2] Housner, G. W.: "Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault", Proc. 3rd WCEE, Vol. III, pp. 94-115, 1965.
- [3] Torabayashi, O., Takahashi, A., Tokue, R.: "3-axis Accelerometer", Trans. IEE of JAPAN, Vol. 116-E, No. 7, pp. 272-275, 1996.
- [4] 鈴木崇伸, 清水善久, 小金丸健一, 中山渉：ゼロクロス周期を用いた液状化判定法の検知精度, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 1413-1416, 2001.
- [5] 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.
- [6] 清水善久, 安田進, 森本巖：液状化センサー, センサー技術, Vol. 11, No. 11, pp. 42-46, 1991.
- [7] 榎山武パンフレット：簡易テレメータ装置 DCX 200, 2001.
- [8] 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 清水善久, 中山渉：防災 GIS を用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面的分布推定に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 421-424, 2001.
- [9] 磯山龍二, 石田栄介, 安田進, 東畑郁生, 清水善久, 小金丸健一：超高密度地震計ネットワークを用いたリアルタイム液状化空間分布推定方法, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 409-412, 2001.
- [10] 細川直行, 渡辺孝仁, 清水善久, 小金丸健一, 小川安雄, 北野哲司, 磯山龍二：地盤条件を考慮した低圧ガスねじ継手鋼管の被害率予測式の検討, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 1333-1336, 2001.