

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

清水 善久¹・石田 栄介²・磯山 龍二²・山崎 文雄³・小金丸 健一⁴・中山 涉⁴

¹正会員 工博 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1-5-20)

²正会員 工博 日本技術開発株式会社 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

³正会員 工博 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴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1-5-20)

東京ガスの新防災システム「SUPREME」は、供給エリア内約3,700箇所の新SIセンサーにより地震動モニタリングを行うとともに迅速な緊急対応を行うためのシステムである。SUPREMEは1998年より開発が行われ、2001年7月より実稼働を開始した。本システムでは地震発生時に地区ガバナを遠隔遮断することにより迅速に供給停止を実施することで、これまでに比して大幅なリスクの軽減を可能とした。また、防災GISを開発し、供給エリア内の約6万本のボーリングデータ、微地形分類データ等を利用して表層地盤の地震動増幅度分布や液化化危険度分布等の広域かつ細密な分析・整備を行うとともに、低圧ガス導管の面的被害推定について諸検討を行った。

Key Words : SUPREME, GIS, seismic ground motion, real-time damage estimation, liquefaction, supply shut-off, city gas

1. はじめに

都市ガスは、快適な都市生活のために重要なエネルギー源であるが、可燃性であるが故に地震等により施設に損傷が発生した場合は火災・爆発等の二次災害の危険性も併せ持っている。例えば1994年ノースリッジ地震の際の火災の原因の1つに漏洩した都市ガスがあげられている¹⁾。また、1995年兵庫県南部地震においても神戸市で発生した火災175件のうちの8件は都市ガスまたはガス器具等が原因であると報告されている²⁾。

兵庫県南部地震は、神戸市を中心とする阪神地域を直撃した直下型地震であり、それによる被害は、死者6,432名、全半壊家屋約25万棟、焼失家屋約7,500棟、水道断水123万戸、停電260万戸等と過去に例を見ない都市型大災害(阪神・淡路大震災)をもたらした。都市ガス業界においても、表-1に示すように過去最大の被害が発生し約86万件の供給停止を余儀なくされた³⁾。災害が大きくなればなるほど緊急措置の重要性が高まるが、阪神・淡路大震災においては緊急措置の迅速・的確な実行において種々

の問題点が存在した。そこで緊急措置を充実するための情報収集または実行手段の重要性が指摘され、リアルタイム地震防災システムが注目を集めるようになった。

実際に阪神・淡路大震災以降「リアルタイム地震被害推定システム」の整備が幾つかの機関で計画または実施されている。我々はその重要性を早期に認識し、地震時導管網警報システム(SIGNAL)⁴⁾の開発を1986年から開始し、阪神・淡路大震災の半年前、1994年6月に都市ガス業者としては世界で初めて実用化している。さらに阪神・淡路大震災の経験を活かし今後の都市ガスの防災レベルのより一層の向上を図るため、マルチ機能を搭載した小型地震計(新SIセンサー)⁵⁾を開発し、それを約3,700基配備

表-1 阪神・淡路大震災におけるガス施設の被害³⁾

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. 供給停止に要した時間	15時間
4. 復旧日数	85日間

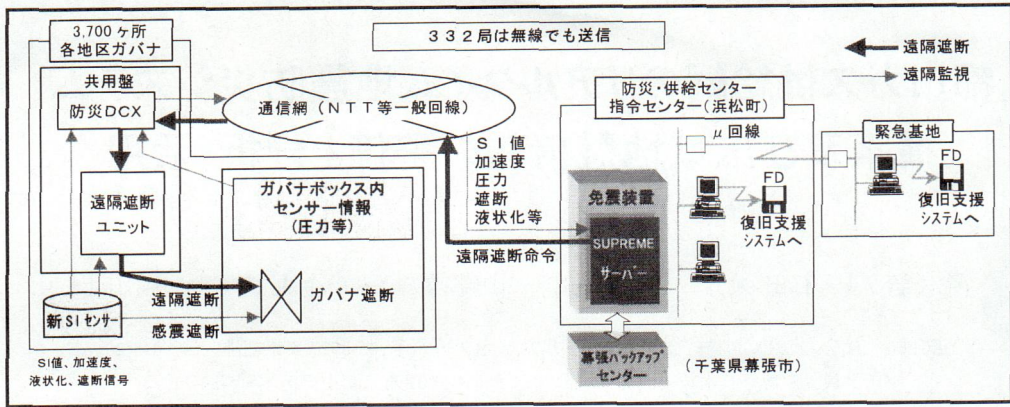


図-1 超高密度リアルタイム防災システム (SUPERME) の構成

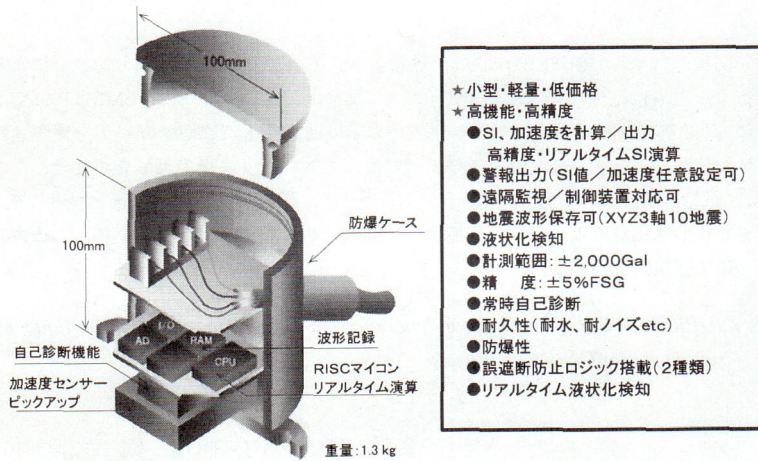


図-2 新SIセンサー内部構成概要及び主な機能

した世界一高密度な新リアルタイム地震防災システム「SUPERME」(Super-dense Realtime Monitoring of Earthquakes)の構築を行うこととした。

本論文では、2~3章で新SIセンサー等を利用した都市ガスの迅速遮断システムについて、4~7章で詳細なGISデータベースをもとにした、超高密度な被害推定システムの構築について述べる。

3,700地点(0.9km²に1個)でのSI値、最大加速度、圧力、ガバナ遮断、液状化警報状況等の観測および指令センターからの遠隔監視・制御が可能となる。

なお、ここで用いるSI値とは、式(1)に示す地表面観測波形の20%減衰速度応答スペクトルの周期0.1~2.5秒の平均値⁶⁾で、最大加速度よりも被害と相関が高い指標と言われる。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T) dT \quad (1)$$

2. SUPERMEの概要

SUPERMEの構成を図-1に示す。現在、東京ガスでは、新SIセンサー(図-2)、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(ガスの圧力を2.5kPa程度の低圧に制御する機器)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3,100km²の供給区域の約

ここで、SIはSI値(cm/s)、Tは周期(s)、Sv(T)は20%減衰速度応答スペクトル(cm/s)を示す。

また、新SIセンサーとは従来のSIセンサー⁶⁾を改良したもので、個々のガバナ単位での感震遮断(SI値がある閾値を超えると自動的に低圧への供給を停止する)の目的を持つとともに、観測記録に基づく液状化の検知を行う機能⁷⁾等も備えている。内

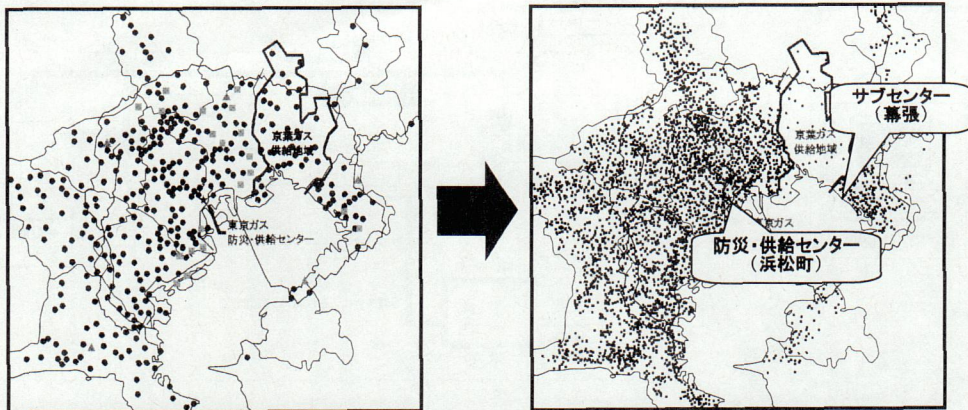


図-3 SIGNAL (332ヶ所) とSUPREME (3,700ヶ所) のSIセンサー配置

表-2 SUPREME観測データ (2002年3月現在)

データ	自営無線	一般公衆回線
SI値・加速度	332 (地区ガバナ300ヶ所 +その他32ヶ所)	1,800: 新SI設置数 (2007年に約3,700ヶ所)
液状化警報	20 (液状化センサー設置箇所) 300 (地区ガバナ300ヶ所)	1,800: 新SI設置数 (2007年に約3,700ヶ所)
地区ガバナ情報 (圧力, 流量, 遮断状況等)	300 (地区ガバナ地点)	3,700 (全地区ガバナ)

部にSI値を計算する機能を有しており、センサーのサンプリング間隔である0.01秒毎に随時計算、時間ウィンドウは10~20秒(可変)としている。式(1)の計算周期 T は試行錯誤の結果、周期1秒未満は短めの0.3秒刻み、1秒以上は長めの0.5秒刻みとし、7ポイント(0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5秒)に決定した。各々、水平8方向(22.5度刻み)の最大値を $S_v(T)$ として計算している。

SUPREMEは、これまでのリアルタイム地震防災システムSIGNALを包含して拡張したシステムで、観測密度を大幅に向上させている(図-3参照)。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⁸⁾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た。その結果、個々の地区ガバナと指令

センターの一般回線は災害時優先指定回線の認定を受け、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⁹⁾。SUPREMEにおける新SIセンサーの設置は2002年3月までに1,800基となっており、最終的に3,700基の設置が完了するのは2007年の予定である。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開始している。表-2にSUPREMEで観測するデータ一覧を示す。

3. SUPREMEによる地震時地区ガバナ遠隔遮断

(1) 背景

都市ガスの低圧供給網は阪神・淡路大震災で大きな被害を受けたが³⁾、首都圏でも大地震が発生した際は同様の事態が起こると考えている。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、これまで東京ガスで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ごとに行われ、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

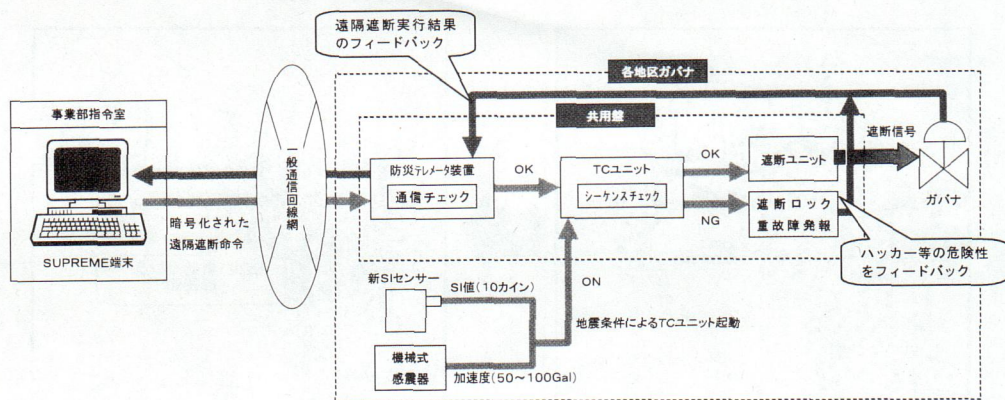


図-4 SUPREMEにおける地区ガバナ遠隔遮断安全性確保の仕組み

ない。しかし地盤条件の違いなどにより地震動は面的に大きく変わるため、供給停止条件（阪神大震災における供給停止地区と継続地区とで観測されたSI値をもとに、即時供給停止条件として「60kineを観測した場合に即時供給停止判断を行う」ことが設定された³⁾）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るが、大地震になればなるほど人員参集が困難となり供給停止に時間がかかることになる。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な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困難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・ハッカー等に対する）の確保が課題となっていた。

(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年以上にわたる日本の都市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

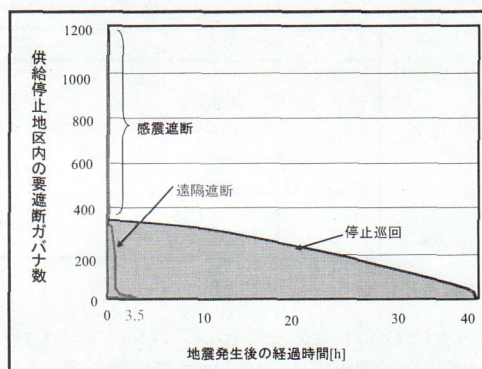


図-5 供給停止に要する時間の比較

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充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時にSUPREME端末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-4に示す。

(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少でき、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首都圏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、どの程度二次災害危険度が低下できるかを検証した。

二次災害危険度を「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」と定義し、図-5におけるグラフの曲線の下側の面積が危険度に比例す

表-3 首都圏における緊急供給停止
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+停止巡回)	39時間	1.0
遠隔遮断 (遠隔監視含む)	1時間	0.03

ると仮定した。図-5に示す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時間以内にはほぼ全ての地区ガバナの閉止が完了する（通信の断線した箇所等を除く）ため表-3に示すように危険度は3%に削減され、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式会社の実績をもとに想定した³⁾。

4. 防災GISの開発

(1) SUPREMEと防災GISの位置付け

SUPREMEの目的は、感震遮断や遠隔遮断に留まらない。各種の情報をリアルタイムで収集、処理し、人間の迅速な判断を支援することも大きな目的の一つである。このためには、膨大な情報を人間に理解しやすい形で表示あるいは選択して表示する必要がある。また、各種の推定には事前に蓄積されたデータ、およびリアルタイムに収集されたデータ等、膨大な空間情報を効率よく処理する必要がある。このため、SUPREMEの情報処理部分は必然的に地理情報システム（GIS）上で行うこととなる。また、数年にわたるSUPREMEの開発は、表層地盤における地震動増幅特性や液状化の判定等の多くの研究開発と並行して進められたため、研究開発の支援ツールとしてもGISは必要である。研究開発フェーズでは、各種解析手法に対して、基礎検討から実用化段階まで様々なレベルがある。従って、入力データや解析パラメータの頻繁な更新に対して、再計算、再描画の要求に迅速に答えられるような小回りの効くGISが必要である。

これに対し、本稼動用のSUPREMEは、地震発生

待機型の常時システムであり、極低頻度である地震に対して観測の失敗は許されない。このため、システムの更新に対しては、嚴重なデータチェックとシステム検証が行われ、研究用に気軽に転用できるようなシステムとはいえない。そこで、研究開発フェーズの様々な場面で活用するためのGIS（ここでは、便宜上「防災GIS」と呼ぶ）を別途開発した。

図-6に示すように、SUPREMEは観測網及びLANに接続されたホストマシン上の常時稼動システムであり、SUPREME自体にも「メイン」（本稼動用）と「サブ」（開発用）がある。「メイン」は、東京ガス本社に設置され、地震時以外にも、通常業務のモニタリングシステムとして常時稼動している。一方、「サブ」は、様々なデータ検証、システム検証、バックアップ用途のため、「メイン」と全く同一のシステム構成となっており、東京ガス幕張ビル（千葉県幕張市）に設置されている。システムの更新を行う場合は、「サブ」で嚴重なシステム検査を経て「メイン」へインストールされる。

これに対し、防災GISは、スタンドアロンで稼動し研究・開発目的で利用される。データの可視化に主眼が置かれており、CD-ROMベースや低スペックパソコン上でも軽快に稼動するポータブルなGISである。データ互換により、SUPREMEで得られた観測記録等を利用したり、SUPREMEに必要な各種データや推定手法を防災GIS上で研究・開発・加工するといったデータ交換を行う。また、本稼動用SUPREMEにおける表示システム部分の検討用プロトタイプとしての役割も担っている。

(2) 防災GISを活用したデータの整備と活用

防災GISの構造を図-7に示す。その中核をなすのはデータベース部分である。供給施設の情報としては3,700個所の地区ガバナはもちろん、中圧管についてはベクターデータとして、低圧管については50m単位のメッシュに集約し、管種、管径ごとの延長が入っている。また、基本情報として道路・建物情報、50mメッシュ標高等も整備されている。各種推定を行う上で地盤情報は1つの大きな重要要因となるが、防災GISでは特徴的な2種類の地盤情報を有する。1つは微地形分類情報であり、独自に作成した「東京ガス地質分類図」である。これは国土交通省国土地理院が作成している1/25,000土地条件図と同等のものであるが、供給エリア（本店地区）全域のデジタルデータ（ポリゴン）が整備されている（図-12）。もう1つの特徴的な地盤情報として、供給エリア内の約6万本のボーリングデータが収納されている（図-8）。ボーリングデータは、東京ガス

が作成している都市総合情報システム「TUMSY」からのデータに加え、関係自治体から本システムでの使用の許可を受けたものである。このデータにより、これまで考えられなかったボーリング1本単位でのマイクロゾーニングが可能となった。

SUPREMEの観測密度はきわめて高いが、それでも0.9km²に1個所の割合である。センサーのない地域については、観測されたデータを補間し精度を高める必要がある。そこで、防災GIS上に整備された地形・地盤データを活用し、迅速かつ詳細にセンサー間を補間する手法を開発し、そのための事前データの整備を行った。SUPREMEでは、地震動(SI値)、液状化、流動化、ガス導管被害(中圧および低圧)の推定を、50m×50mのメッシュ140万個に対して、観測情報収集後10分程度で行うことが可能である。

以下、5～6章では、微地形分類情報及びボーリングデータを活用した地盤増幅度分布や液状化危険度分布の整備と、これらを活用したリアルタイム地震動分布推定及びリアルタイム液状化層厚分布推定の説明を行う。また、7章では、これらにガス導管網情報を重ね合わせたリアルタイムガス導管被害推定手法について説明を行う。

5. 地盤増幅度分布の整備と活用

(1) 地盤増幅度分布の整備

SUPREMEの推定では、約6万本のボーリングデータと補間手法により、推定の精度を大幅に向上することを目的とした。ここでは、まず地表面地震動の面的推定の方法を示す¹⁰⁾。

観測値に基づく地表面地震動推定の流れを図-9に示す。SI値の面的推定においては観測地点および任意の地点のSI値増幅度が必要となる。SI値増幅度とは、表層地盤の地震動増幅特性によりSI値がどれだけ増幅されるかという指標である。SUPREMEでは、最近の各種の強震観測結果を整理し、図-10に示す表層地盤20mの平均S波速度(AVS20)とSI値増幅度との関係¹¹⁾(式(2))を用いることとした。AVS20は、ボーリングデータを用いて、道路橋示方書におけるN値からS波速度の推定式¹²⁾(式(3))により各層のS波速度を求め、深さ20mまでの走時平均¹¹⁾

(式(4))を計算している。任意の地点の増幅度は、近傍5地点のボーリングで計算したAVS20を参照して、距離を重みとした重み付平均(式(5))により補間している。以上の計算式を以下にまとめる。

$$\log_{10} \xi_i = -0.785 \log_{10}(AVS_{i,20}) + 2.18 \quad (2)$$

$$\begin{cases} VS_{i,j} = 100N_{i,j}^{1/3} & (\text{粘性土}, 1 \leq N_{i,j} \leq 25) \\ VS_{i,j} = 80N_{i,j}^{1/3} & (\text{砂質土}, 1 \leq N_{i,j} \leq 50) \end{cases} \quad (3)$$

$$AVS_{i,20} = \frac{\sum_j H_{i,j}}{\sum_j \left(\frac{H_{i,j}}{VS_{i,j}} \right)} \quad (4)$$

$$y = \frac{\sum_i \left(\frac{1}{r_i^2} y_i \right)}{\sum_i \left(\frac{1}{r_i^2} \right)} \quad (5)$$

ただし、 $y = \log_{10} \xi$, $y_i = \log_{10} \xi_i$

ここで、 ξ は計算地点におけるSI値増幅度、 ξ_i は参照ボーリング*i*地点におけるSI値増幅度、 $AVS_{i,20}$ は*i*地点における深さ20mまでの平均S波速度(m/s)、 $VS_{i,j}$ は*i*地点*j*層のS波速度(m/s)、 $N_{i,j}$ は*i*地点*j*層のN値、 $H_{i,j}$ は*i*地点*j*層の厚さ(m)、 y , y_i は ξ , ξ_i の対数値、 r_i は計算地点から参照ボーリング*i*地点までの距離(m)である。 Σ_i は地点*i*に関する、 Σ_j は層*j*に関する合計を示している。式(3)はボーリングデータの各層毎の計算、式(4)及び式(2)は、各ボーリング地点毎の計算である。なお、式(3)～式(4)において、各N値に対応する層厚は、図-11のような分担層厚の考え方に従っている¹³⁾。すなわち、N値調査深さ2点間で土質が変わる場合は土質境界で分け、2点間で土質が変わらない場合は中点で分けて、各々のN値の分担範囲としている。式(5)は各50mメッシュ中心点毎の計算となる。補間法にはKriging¹⁴⁾等の高度な手法もあるが、ここでは、データが高密度であることから、単純な補間法を採用している。

供給エリア全体のSI値増幅度分布を図-13に示す。図-13では、50m四方のメッシュごとにSI値増幅度を計算している。図-13によれば、東京東部低地や多摩川河口域で3～4倍近いSI値増幅度になっている。逆に、西側の台地や丘陵地では、1～2倍程度のSI値増幅度になっていることが分かる。

(2) リアルタイム地震動分布推定

地震が発生し指令センターに観測値が集まると(大規模な地震の場合でも20分程度)、図-9の流れに従い、観測地点のSI値はその地点のSI値増幅度で除され工学的な基盤上のSI値に変換される。この基盤SI値を平面的に補間し、図-13のSI値増幅度を用いて地表の面的なSI値の分布を推定する。補間方法

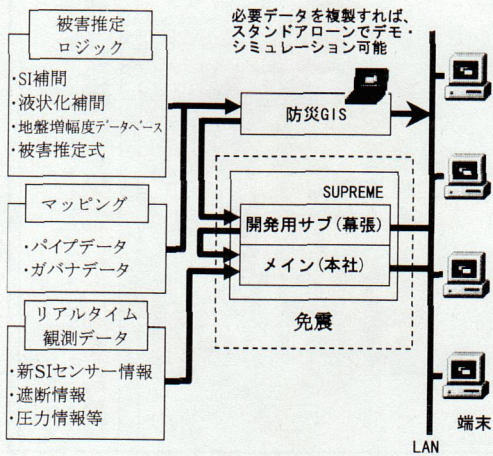


図-6 SUPREMEと防災GISの位置づけと開発データの流れ

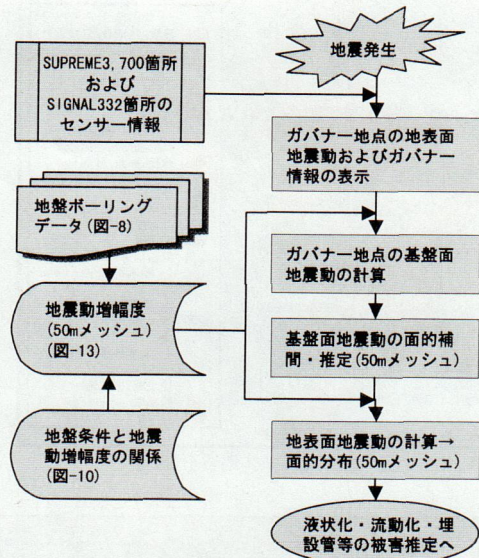


図-9 観測値に基づく地表面地震動推定の流れ

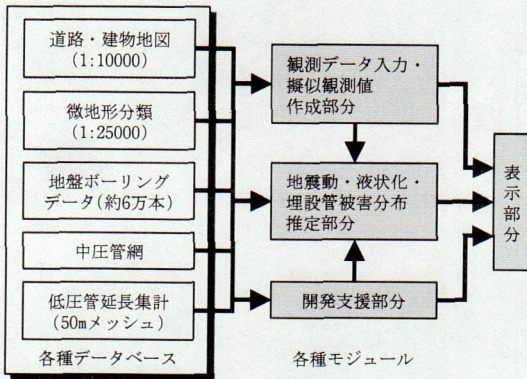


図-7 防災GISの構造

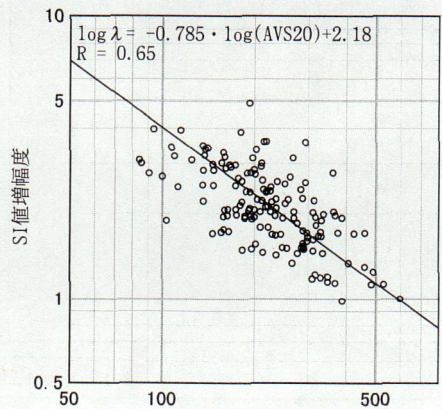


図-10 観測SI値増幅度と平均S波速度の関係¹¹⁾

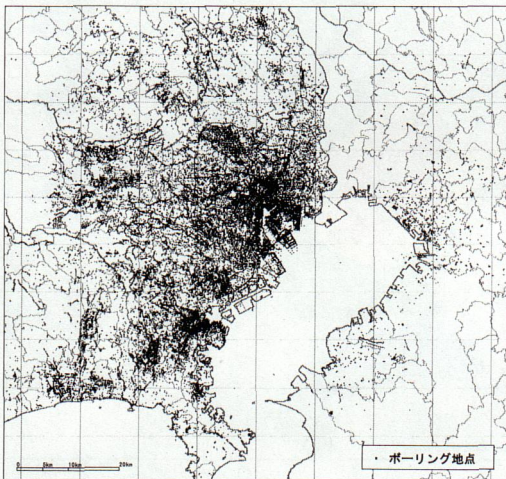
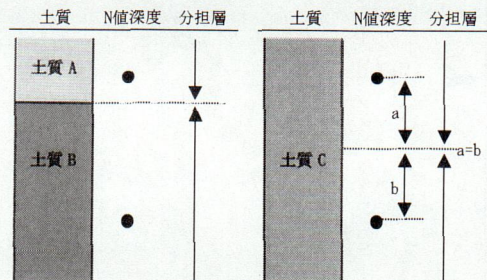


図-8 防災GISボーリングデータベース



(1) 上下のN値間で土質が変わる場合 (2) 上下のN値間で土質が同じ場合

図-11 分担層厚の考え方¹³⁾

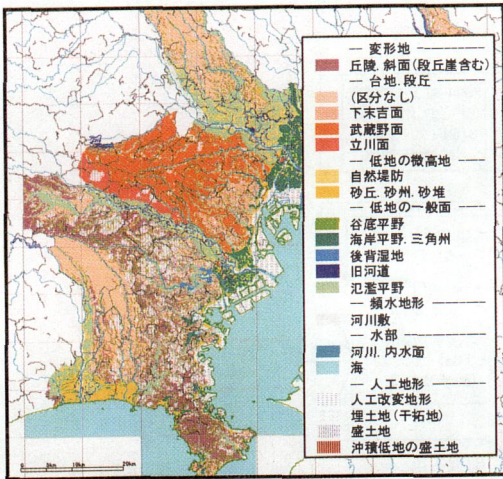


図-12 東京ガス地質分類図

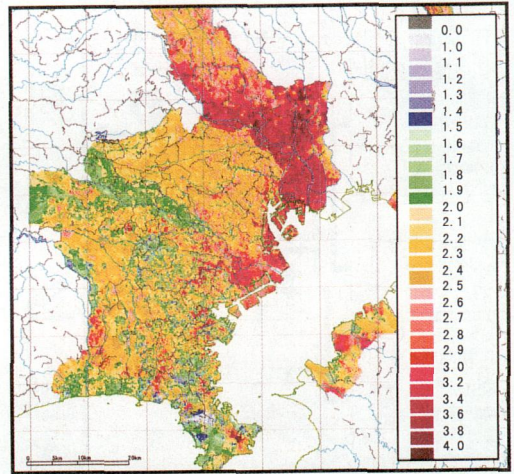


図-13 50mメッシュ単位でのSI値増幅度分布

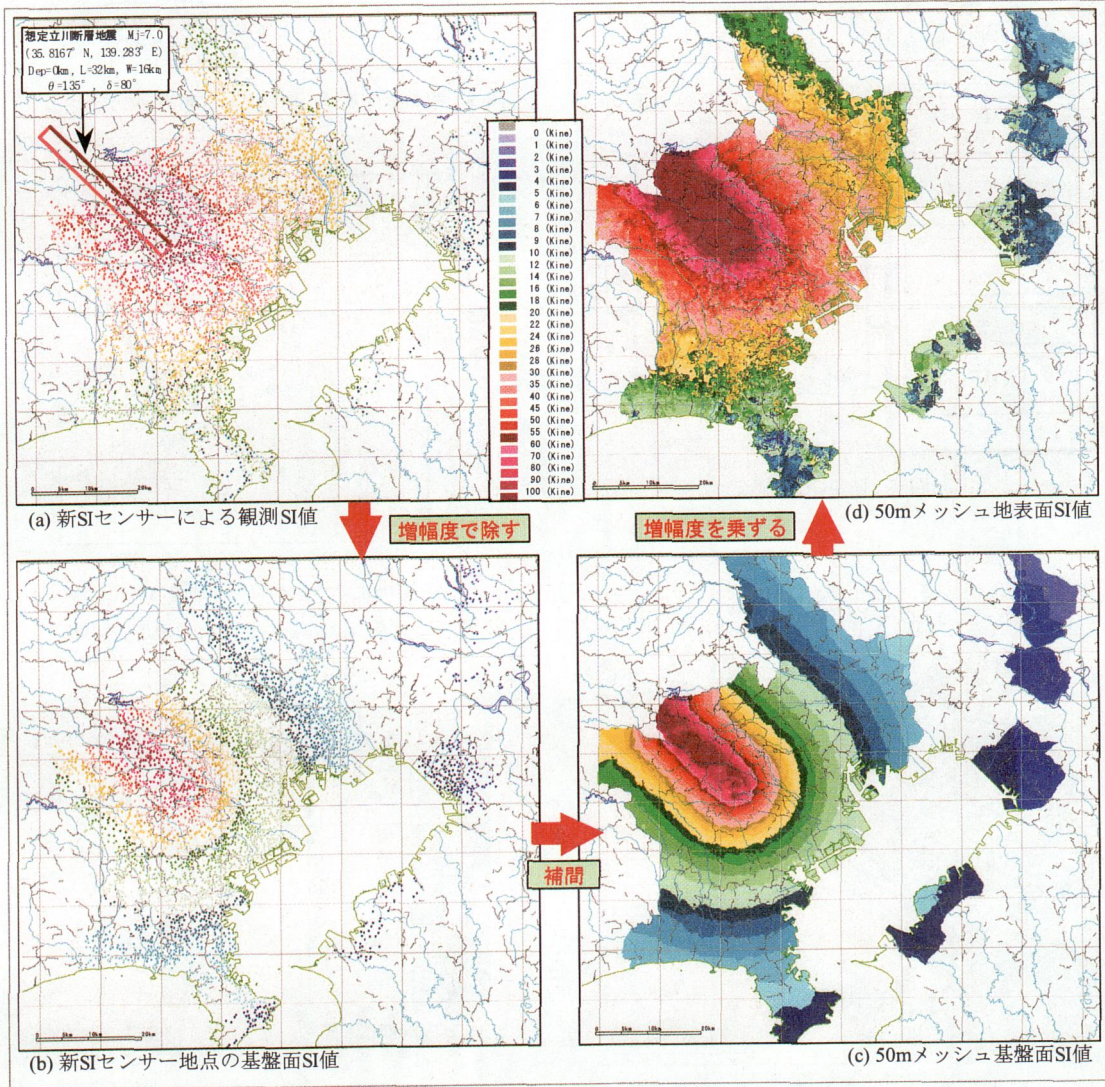


図-14 想定立川断層地震に対する地表面地震動分布推定結果

はSI値増幅度の補間の時と同じ式(5)を用い、 y 及び y_i の値を基盤SI値として計算している。

図-14にリアルタイムSI値分布推定例を示す。この例は、想定立川断層地震について、各センサー地点のSI値を被害想定シミュレーションシステムによって計算しておき、その値を擬似的に観測SI値として地震動分布推定を行った場合のシミュレーション結果である。観測SI値自体がシミュレーションから作成した擬似値であるため、基盤SI値の補間結果は距離減衰式を連想させる分布となっている。地表面SI値分布は、距離減衰式とSI値増幅度を反映して震源近傍と東京東部低地や多摩川流域等で大きな地震動となっている。観測SI値が収集された状態からスタートして、50m×50mメッシュ140万点の推定計算に要する所要時間は5分程度であり、観測情報収集時間（大規模地震の場合20分程度）と合わせても、初動体制支援や供給停止判断支援に十分有用なリアルタイム性を有しているといえる。

現在、観測地点のSI値増幅度は近傍ボーリング地点のSI値増幅度から補間により推定しているが、将来、中小地震の観測データが蓄積されてくれば、その地点の中小地震の観測データに基づいてSI値増幅度を決定していく方法を考えている。防災GISは、例えばこのSI値増幅度計算手法の変更に対しても、すぐに対応可能であり、様々な検討においても活用されている。

6. 液状化危険度分布の整備と活用

(1) 液状化層限界厚分布の整備

ガス導管網被害推定において液状化程度の要因を考慮するため、地震時の液状化層厚分布の推定手法を開発した¹⁵⁾。

観測地点で最大加速度とSI値が得られていれば、Towhataら¹⁶⁾の方法を用いて下式によりその地点の液状化層厚の推定が可能である。

$$H = \frac{\pi}{2\gamma_{liq}} U \quad (6)$$

$$U = \lambda \frac{SI^2}{A_{max}} \quad (7)$$

ここで、 H は推定液状化層厚 (cm)、 γ_{liq} は地盤のせん断ひずみである。 U は液状化時の地表面地盤変位推定値 (cm)で、式(7)を用いて推定する。 SI 、 A_{max} は新SIセンサーによる観測SI値 (cm/s)、観測

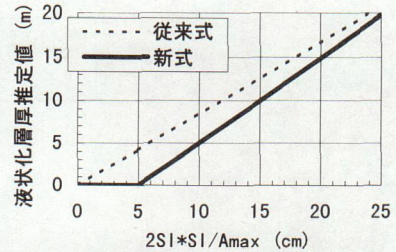


図-15 液状化推定法の新旧比較

最大加速度 (cm/s²) である。 λ は係数であり、地表付近では $\lambda=2.0$ とされている。

式(6)では変位と液状化層厚を比例関係としているが、この関係式に従った場合、変位が生じると必ず液状化層があることになり、実用上問題がある。現実的には、ある程度のひずみ、変位までは弾性範囲内で液状化しなくても生じると考えられるので、弾性範囲内の限界値として、弾性ひずみ0.01、弾性変位5cmを仮定し、式(6)を以下のように変更して利用することとした¹⁵⁾。

$$H = \frac{\pi}{2\sqrt{\gamma_{liq}^2 - 0.01^2}} (U - 5) \quad (8)$$

液状化層厚推定法の新旧比較を図-15に示す。本論では、 γ_{liq} として0.01875を用いている。

Towhataら¹⁶⁾の方法では、液状化層厚の推定値が検討対象層の合計厚さより大きくなる場合があり、この場合は、過剰と思われる厚さ分を除外することとしている。ここでは、この液状化検討対象層の合計厚さを「液状化層限界厚」と呼ぶこととする。新SIセンサー地点そのものの地盤調査は行っていないが、供給エリア内の約6万本の高密度なボーリングデータが利用可能であり、これらのデータを活用して、空間補間により液状化層限界厚分布の整備を行った。

まず、液状化強度式について検討したが、従来よく用いられる道路橋示方書の液状化強度式¹⁷⁾を用いて、設計水平震度を一律0.4とした場合の東京東部低地の P_L 値分布を図-16に示す。 P_L 値分布は、液状化危険度を表す指標であり、高圧ガス導管液状化耐震設計指針¹⁸⁾等では、 P_L 値5以上が液状化の危険性ありの地域とされている。しかし、図-16では、東京東部低地のほとんどの領域が $P_L \geq 5$ となっており、図-17に示す1923年の関東地震の液状化履歴¹⁹⁾と比較すると、過剰評価であると思われる。

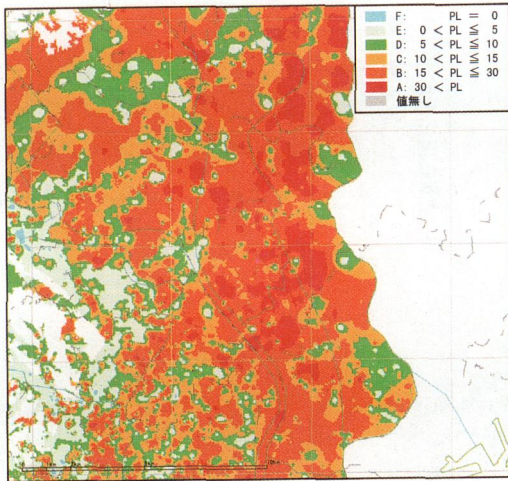


図-16 道路橋示方書の液状化強度式を用いた P_L 値分布 (設計水平震度一律0.4, 地震動Type1)

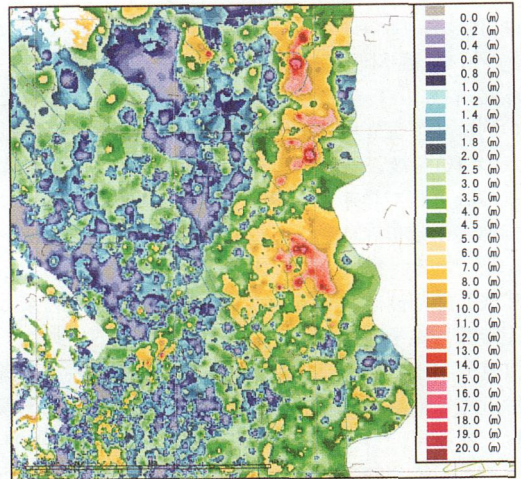


図-19 改良液状化強度式を用いた液状化層厚分布 (設計水平震度一律0.4, 地震動Type1)

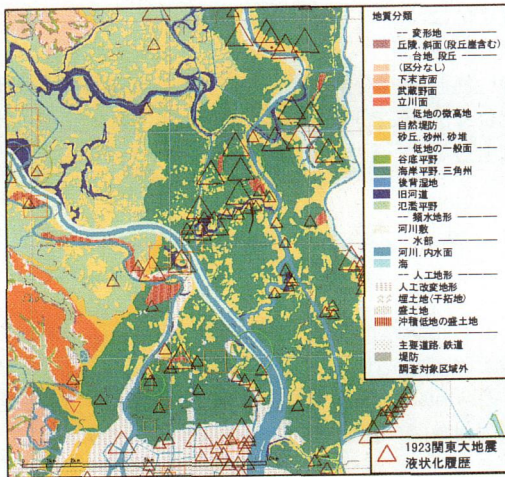


図-17 1923年関東大地震の液状化履歴¹⁹⁾

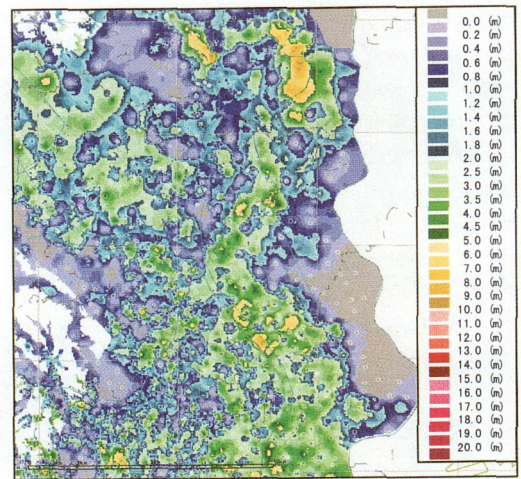


図-20 液状化層厚分布推定シミュレーション例 (想定立川断層地震)

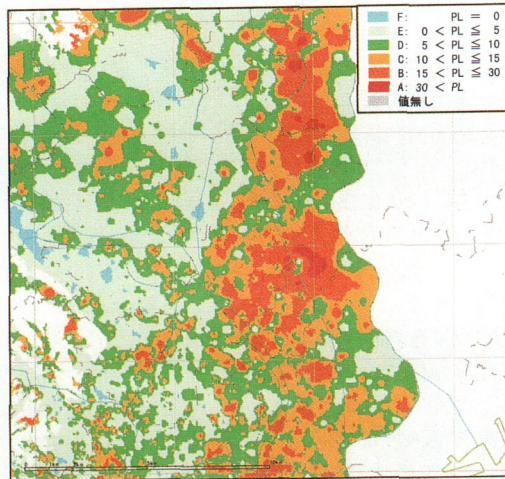


図-18 改良液状化強度式を用いた P_L 値分布 (設計水平震度一律0.4, 地震動Type1)

表-4 液状化層厚の空間補間方法

①	個々の推定地点で液状化対象層厚による足切りをした後、補間する。
②	補間した後、個々の補間地点で液状化対象層厚による足切りを行う。
③	個々の推定地点で液状化対象層厚による足切りをした後、液状化層限界厚に対する液状化層厚の比率を補間する。
④	③と手順を入れ替え、足切前液状化層厚の液状化層限界厚に対する比率を補間した上で、液状化層限界厚による足切りを行う。
⑤	変位 U の増幅度を整備しておき、増幅度を考慮した変位 U ($= \lambda SI^2/A_{max}$)

これに対し、東京東部低地の沖積砂質土盤についてN値と細粒分含有率の関係に関する研究、及び、これら成果の実用化に向けた液状化強度式の改良についての検討が行われている²⁰⁾。改良された液状化強度式を用いると、図-17の液状化履歴位置と不整合なく $P_L \geq 5$ の領域を絞り込むことができている(図-18)。

この液状化強度式を用いて、ボーリング地点について設計水平震度一律0.4を与えた場合の液状化層厚を求め、面的補間を行った結果を図-19に示す。SUPREMEでは、図-19をリアルタイム液状化層厚推定における「液状化層限界厚」とすることとした。すなわち、式(8)で計算した観測地点の推定液状化層厚が、図-19におけるその地点の液状化層限界厚より厚く推定された場合、液状化層限界厚の値を推定液状化層厚とする。

(2) リアルタイム液状化層厚分布推定

任意地点におけるガス導管網被害推定を可能とするには、これらの各観測地点の推定液状化層厚を用いて補間を行う必要がある。補間方法には、表-4に示すように様々な方法が考えられるが、SUPREMEでは、液状化層厚率(液状化層限界厚に対する推定液状化層厚の比)の線形補間(表-4では③の手法)を採用している。

図-14の想定地震に対する液状化層厚推定シミュレーション結果を図-20に示す。これは、想定立川断層地震について、各センサー地点のSI値及び最大加速度を被害想定シミュレーションシステムによって計算しておき、その値を擬似的に観測地点に与え、式(7)~(8)により各観測地点の推定液状化層厚を求め、表-4③の補間手法により液状化層限界厚分布を活用して液状化層厚分布推定を行った結果である。液状化層限界厚の大きい中川流域等で液状化層厚が大きくなる結果となった。

7. ガス導管のリアルタイム被害推定

低圧管の被害推定については、阪神・淡路大震災のガス管被害データを中心に、地震動分布、液状化分布、微地形分布、管種とガス管被害との要因分析を行い、被害推定式を作成している²¹⁾。SUPREMEでは、この被害推定式を活用し、図-21のような流れで低圧管被害推定を行う。この低圧管被害推定では、地表面SI値、液状化層厚、微地形分類、管種といったデータが必要だが、SUPREMEではこれら全てについて50mメッシュで整備し、50mメッシュ単

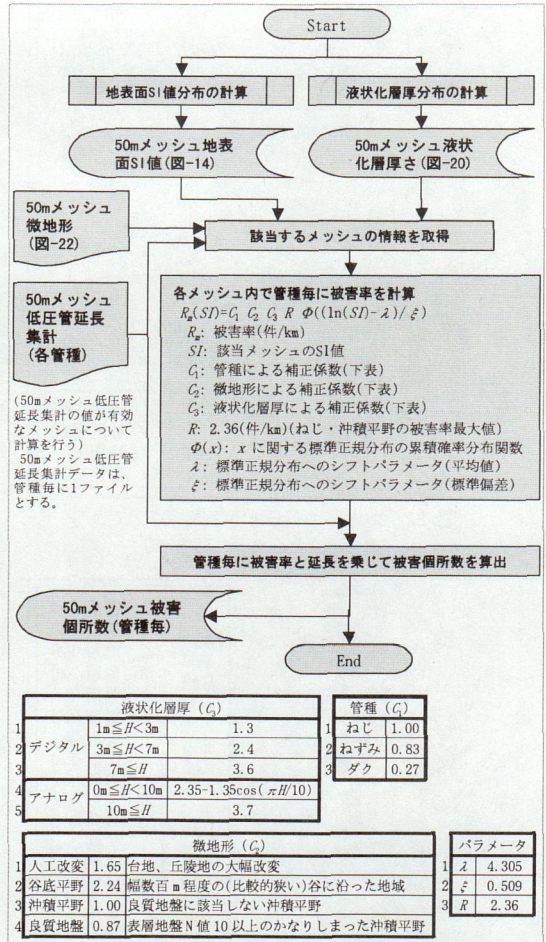


図-21 低圧管被害推定の流れ

表-5 「東京ガス地質分類図」と低圧管被害推定用微地形区分との対応

低圧管用区分	微地形区分		
	台地	良質地盤	人工改変
低地	沖積平野	自然堤防	河川敷
		砂丘・砂州・砂堆	河川・内水面
		海岸平野・三角州	主要道路・鉄道
		後背湿地	堤防
		旧河道	埋土地(干拓地)
	氾濫平野	沖積低地の盛土地	
	谷底平野	盛土地	
対象外	海	調査対象区域外	

位で演算を行う。例えば、想定立川断層地震に対しては、地表面SI値分布は図-14(d)が、液状化層厚分布は図-20がそれぞれ相当する。

微地形分類に関しては、図-21の「微地形による補正係数(G_2)」を決定する必要があるが、図-12の「東京ガス地質分類図」を基に、表-5のような対

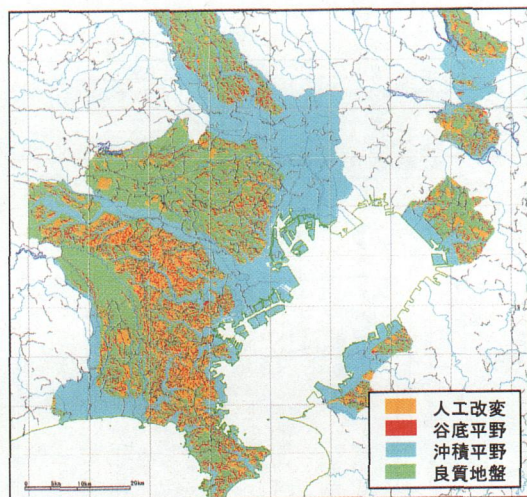


図-22 微地形の低圧被害推定用区分

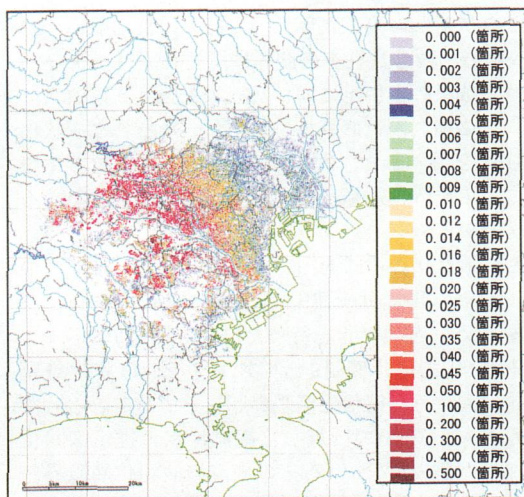


図-24 50mメッシュ推定被害箇所数 (全管種)
(想定立川断層地震)

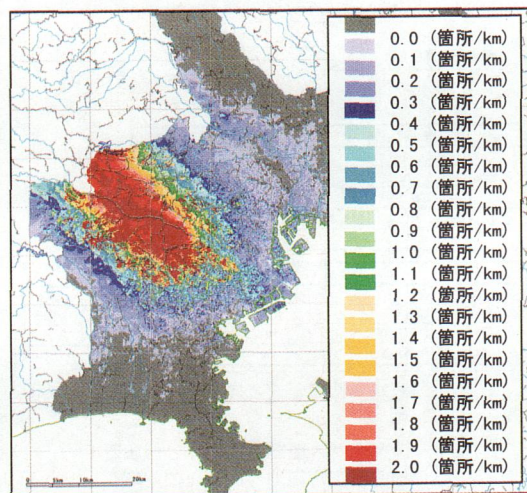


図-23 標準管種 ($C_1=1.0$) の被害率分布 (箇所/km)
(想定立川断層地震)

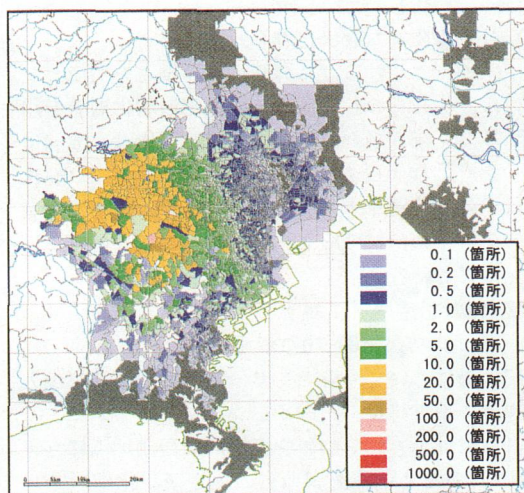


図-25 推定被害箇所数Mブロック集計 (全管種)
(想定立川断層地震)

応で低圧被害推定用の区分を行った。この低圧管被害推定用の微地形区分を図-22に示す。なお、もとの「東京ガス地質分類図」では、「盛土地」について、丘陵地の谷を埋めたような盛土と、沖積低地の大規模な盛土を区別していないが、図-21の被害推定における「谷底平野」の定義では、前者は含まれるが後者は含まれない。そこで、図-12ではこれらを分けて微地形データの再整理を行っている。

管種については、供給エリア内の全導管について、計算単位である50mメッシュ毎に各圧力・各管種の延長集計データを整備した。図-23は図-14の想定立川断層地震に対する標準管種 ($C_1=1.0$) の推定低圧管被害率 (件/km) の分布である。これは、各50mメッシュのSI値から計算される標準被害率 (件

/km) に該当メッシュの液状化層厚 (図-20) から与えられる補正係数 (C_3) と微地形区分 (図-22) から与えられる補正係数 (C_2) を乗じた結果である。この分布に各管種の補正係数 (C_1) と50mメッシュ延長集計 (km) を乗じるにより、管種毎の50mメッシュ被害箇所数 (件) の分布が作成できる。図-24は、このようにして求めた各管種の推定被害箇所数分布 (件) を合計した全管種の50mメッシュ被害箇所数分布 (件) を表示している。

また、東京ガスでは、効果的な緊急供給停止及び迅速な復旧を行うため、供給エリア内のガス導管網に対して、Kブロック (大)、Lブロック (中)、Mブロック (小) といった複数段階のブロック手段を持っている。SUPREMEでは、50mメッシュと各

ブロックの対応テーブルも整備しており、50mメッシュ単位で計算した延長集計や推定被害箇所数は、各ブロック単位に再集計可能である。一例として、ブロック最小単位であるMブロック単位での再集計結果を図-25に示す。

8. まとめ

本論では、都市ガス供給網に対するリアルタイム地震防災システムSUPREMEに関して、概要を報告した。システム構成と遠隔遮断実施によるリスク削減効果の検証や、データ整備・分析・活用システムの構築から、被害推定手法の確立、プロトタイプシステムの実装に至るまでを含括的に紹介した。SUPREMEの地区ガバナ遠隔遮断技術は、地震時に都市ガスによる二次災害の防止を目的として、既に北陸ガス株式会社や台湾の大台北区ガス公司等にも導入され、今後はその導入分析はより広がっていくと思われる。また、被害推定については、本論では低圧管被害推定までにとどめたが、中圧導管のリアルタイム被害推定や耐震対策検討のためのシステム整備も着々と進めている。また、本論で示した各種推定手法等を活用して地震被害リスク分析を行い、費用対効果に基づく耐震化対策も進行している。この他にも、さらなる精度向上のための諸検討をSUPREME稼動後も引き続き行っている。

SUPREMEは稼動開始から既に10以上の地震で起動しており、中小地震のデータを観測しているが、まだ十分とはいえない。今後、SUPREMEによる中小地震の観測データがさらに蓄積されてくれば、観測データに基づく地盤増幅度の検討等も可能になる。高密度、高品質の観測データは、地盤分析等を行う上で貴重なデータとなることが期待される。また、これらの観測データを防災機関や民間企業などに対しても準リアルタイムで配信することも計画している。これらを活用した様々なリアルタイム防災システムが展開し、地震災害軽減に役立てば幸いである。

謝辞: (財)地震予知総合研究振興会の関連委員会を通じて、地震動分布推定に関しては、佐藤工業株式会社・末富岩雄氏に、液状化分布推定に関しては、東京電機大学・安田進教授、東京大学・東畑郁生教授、東洋大学・鈴木崇伸助教授、基礎地盤コンサルタンツ株式会社・森本巖氏、亀井祐聡氏に貴重な意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) O'Rourke, T.D. and Palmer, M.C.: The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: Performance of Gas Transmission Pipelines, *NCEER Report*, 94-0011, 1994.
- 2) 日本消防協会: 阪神・淡路大震災誌, 1996.
- 3) ガス地震対策検討会: ガス地震対策検討会報告書, 1996.
- 4) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田 茂, 吉川洋一, 大谷泰昭: 大規模都市ガス導管網の地震時警報システムの開発, 土木学会論文集, No.525/1-33, pp.331-340, 1995.
- 5) 小金丸健一, 清水善久, 梁田 貴, 古川洋之, 田久保光: 新SIセンサーの開発, 土木学会第53回年次学術講演会, 1-B, pp.852-853, 1998.
- 6) 佐藤暢彦, 片山恒雄, 大保直人, 川崎勝幸: 新しい制御用地震センサーの開発と試作, 第18回地震工学研究発表会, pp.105-108, 1985.
- 7) 鈴木崇信, 清水善久, 中山 涉: 液状化地盤における強震記録の特徴について, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1223-1228, 1998.
- 8) Shimizu, Y., Yasuda, S., Morimoto, I. and Orense, R.: Development of Sensor for Monitoring Seismic Liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.1, pp.35-52, 2002.
- 9) 清水善久, 小金丸健一, 中山 涉, 山崎文雄: 超高密度地震防災システム(SUPREME)の開発, 第26回地震工学研究発表会, pp.1285-1288, 2001.
- 10) 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 清水善久, 中山 涉: 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, 第26回地震工学研究発表会, pp.421-424, 2001.
- 11) 田村 勇, 山崎文雄: K-NET地震記録を用いた平均S波速度による地盤増幅度の推定, 第55回土木学会年次学術講演会, 1-B357, 2000.
- 12) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.43-48, 1996.
- 13) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室: 地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究, 土研資料 第1729号, pp.38-39, 1981.
- 14) 野田 茂, 星谷 勝: 条件付確率場の補間法に関する一提案, 鳥取大学工学部研究報告, 28, pp.175-197, 1997.
- 15) 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, 第26回地震工学研究発表会, pp.409-412, 2001.
- 16) Towhata, I., et al.: Effects of Subsurface Liquefaction on Earthquake Ground Motion at Surface, *Proc. 14th International Conference on Soil Mechanics and*

Foundation Engineering, Vol.1, pp.739-742, 1997.

- 17) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.91-95, 1996.
- 18) (社)日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針, p.41, 2001.
- 19) 若松加寿江: 日本の地盤液状化履歴図, 東海大学出版会, 1991.
- 20) 亀井祐聡, 森本 巖, 安田 進, 清水善久, 小金丸健一, 石田栄介: 首都圏の低地部における液状化推定, 第26回地震工学研究発表会, pp.581-584, 2001.
- 21) 細川直之, 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, 第26回地震工学研究発表会, pp.1333-1336, 2001.

(2002. 8. 12 受付)

DEVELOPMENT OF REAL-TIME EARTHQUAKE DISASTER MITIGATION SYSTEM FOR CITY GAS NETWORK AND UTILIZATION OF REGIONAL GEOLOGICAL INFORMATION

Yoshihisa SHIMIZU, Eisuke ISHIDA, Ryoji ISOYAMA, Fumio YAMAZAKI,
Kenichi KOGANEMARU and Wataru NAKAYAMA

The new real-time disaster mitigation system for a city gas network has been developed by Tokyo Gas Co. for the purpose of realization of dense real-time seismic motion monitoring, quick gas supply shut-off, prompt emergency response and efficient restoration work since 1998. In 2001, Tokyo Gas successfully started operation of SUPREME, which employs 3,700 new SI sensors and remote control devices. The SUPREME can observe the status of 3,700 district regulators and shut them off remotely, if necessary. The remote shut-off using SUPREME can realize quick gas supply shut-off and effectively reduce gas leakage risk during earthquakes. The SUPREME can also conduct damage estimation for gas pipe with enhanced use of GIS.