

大規模都市ガス導管網の地震時警報 システムの開発

山崎文雄¹・片山恒雄²・野田 茂³・吉川洋一⁴・大谷泰昭⁵

¹正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 Ph.D 東京大学教授 生産技術研究所(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科(〒680 鳥取市湖山-町4-101)

⁴東京ガス(株) 防災・供給センター(〒105 東京都港区海岸1-5-20)

⁵(株)富士総合研究所(〒108 東京都港区海岸3-2-12)

大規模都市ガス供給網の地震時の二次災害防止のためには、甚大な被害が予想される場合、中圧導管網のブロック化と供給停止が必要となる。この緊急措置を迅速に行うため、東京首都圏において、地震動モニタリングシステムの展開と、それからの地震動情報に基づく警報システムの開発を行った。331地点でのSI値と最大加速度、5地点での加速度波形、さらに液化化の予想される20地点での水位上昇量を観測し、無線でデータ収集するシステムは、世界でも例のない大規模で高密度なものである。これらの情報をリアルタイムに処理するため、地理情報システム上に、地盤条件、埋設管、需要家建物等のデータベースを構築し、被害推定、震源推定、スペクトル評価、意志決定の4つの機能を持つシステムを開発した。

Key Words: city gas network, earthquake monitoring, service shut-off, realtime damage estimation, geographic information system

1. はじめに

都市ガスは市民生活や産業にとって重要なエネルギー源であるが、1994年ノースリッジ地震の際の火災事例^{1),2)}でも明らかのように、地震による二次災害の危険性を秘めている。したがって、東京首都圏のように密集度が高く地震活動度も高い地域では、その地震防災対策は極めて重要な課題といえる。

わが国においても、過去から最近の地震により、都市ガス施設はしばしば甚大な被害を被ってきており、その大部分がガス導管などの供給施設において発生している³⁾。1978年宮城県沖地震⁴⁾、1983年日本海中部地震⁵⁾、1987年千葉県東方沖地震⁶⁾、1993年釧路沖地震⁷⁾、1993年北海道南西沖地震⁸⁾、さらに1995年阪神・淡路大震災⁹⁾において、ガス導管の被害が発生し、結果としてガスの供給停止が行われている。このうち、宮城県沖地震がきっかけとなって、予防対策、緊急対策、復旧対策の3つからなる「地震防災対策ガイドライン⁹⁾」が日本ガス協会により作られた。この中で、緊急対策としては、ブロック化による緊急措置と情報収集システ

ムの確立が提唱されている。緊急措置のための適切な情報は、事業者の規模によって異なり、近年、中・大規模の事業者に対しては、地震動強さの遠隔監視の重要性が指摘されている^{9),10)}。

このような背景から、今日、わが国の大規模都市ガス事業者は、緊急対策としていろいろなレベルで供給を停止する仕組みを構築している(図-1)。

需要家数約800万件と最大手の東京ガスを例にとると、末端の需要家レベルでは、感震器を内蔵したマイコンメータによって、震度5程度以上の揺れに対し、ガス供給を自動停止することになっている。また需要家に直接ガスを送る低圧導管網は、需要家3万~10万件を単位として常時、低圧ブロックを形成し、地区ガバナに取り付けられたSIセンサー¹¹⁾がSI=30 cm/sを感知すると、供給を自動遮断する仕組みになっている。この自動遮断用のSIセンサーは、各低圧ブロックに約30箇所、全供給区域で約3,000箇所が設置されている。

さらに、ガバナステーションやガスホルダーと地区ガバナを結ぶ中圧導管網については、数十万件の需要家を含む大きな地域(中圧ブロック)で、ブロック化と供

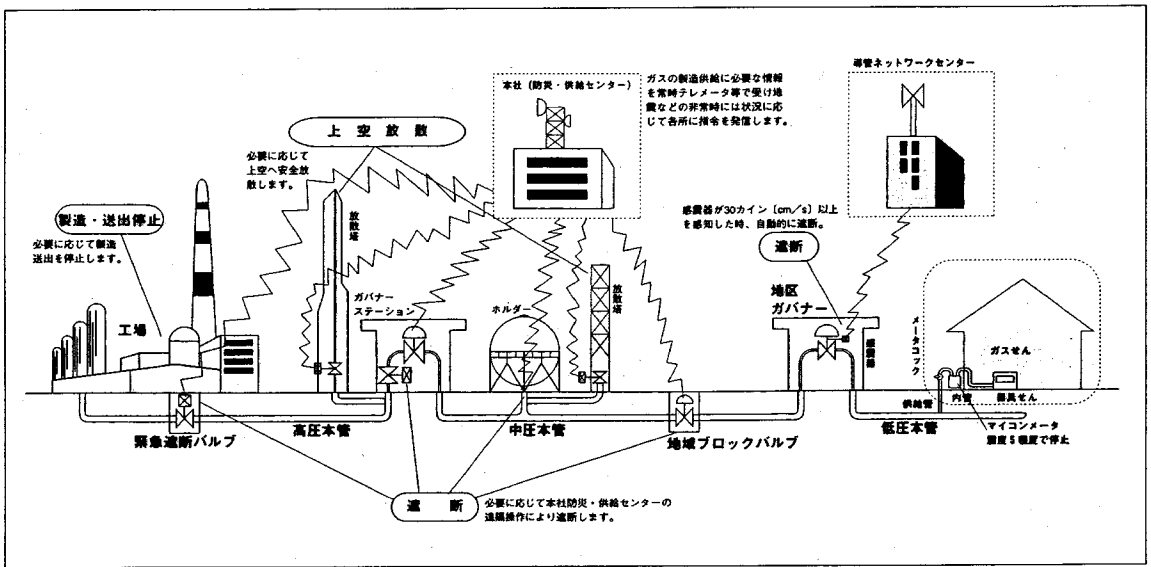


図-1 都市ガス供給システムと緊急措置¹²⁾

給停止が行えるようになっている。この中圧ブロックの供給停止は、現在のところ、中圧導管網の被害確認情報に基づいて判断し、本社の防災・供給センターからの遠隔操作で行うことになっている。しかし供給区域が広いために、被害確認に時間を要する恐れがあり、地震動モニタリング結果のみから中圧ブロックの地震被害を推定し、警報を発するようなシステムの開発が急務となっている。

本報告では、現在東京ガスで一部運用が開始されているSIGNAL (Seismic Information Gathering and Network Alert system)と名付けられたシステムの概要を紹介し、想定地震によるケーススタディ結果を示す。

ここで、最近脚光を浴びているリアルタイム地震(工)学¹³⁾や早期警報システムにおけるSIGNALの位置付けについて一言触れておこう。これらのシステムの先駆となったJRのUrEDAS¹⁴⁾は、地震動のうち最初に到達するP波を検知して、S波到達前に列車を安全に停止させようというものであり、超短時間での震源推定を目的としている。またこの結果を受けて、被害予測・復旧支援を行うHERAS¹⁵⁾というシステムも開発されている。一方、SIGNALは、震源推定と被害推定の両方を統合したシステムになっており、地震動と地理情報システム(GIS)上のデータから、埋設管や需要家建物の被害を推定して、地震発生後10分程度で警報発令することを目指している。

米国においても、ノースリッジ地震において、CUBE¹⁶⁾ (the Caltech-USGS Broadcast of Earthquakes)という震源推定のシステムが注目を集めた。CUBEは、南カリフォルニアの200余りの地震観測点からの地震動をテレ

メーター、電話回線、無線などで集め、即時に震源位置とマグニチュードの計算を行い、震源情報をライフライン事業者や州緊急対策本部などのCUBEの契約者にポケットベルで連絡する。ノースリッジ地震の際、CUBEは必ずしも予定どおりには動作しなかったが、手段としての有効性は評価された。

またカリフォルニア州政府では、地震直後に構造物やライフラインの被害、それに人的被害などを迅速に推定することを目的とした、EPEDAT¹⁶⁾ (the Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool)というGISに基づいたシステムの開発を始めている。これは、CUBEで推定された震源位置とマグニチュードから、まず破壊の生じた断層面を特定し、地震動強さの分布を予測、さらに、建物、ガス、水道、高速道路などの包括的な被害推定を行う。州政府がこのようなシステムを持つ利点は、被害地域や被害程度を特定し、救助や緊急支援、それに復旧活動の立案に用いるほか、予想被害額を集計し、連邦政府に求める緊急援助額の根拠とする点が挙げられる。

このように、早期警報システムといっても各々のシステムで対象や目的が異なっているが、日本ではライフライン事業者が独自のシステムを開発し、米国では協同利用のシステムが作られている点が大きく異なるといえよう。

2. 地震動モニタリング・システム

中圧導管網の地震時警報システムSIGNALは、大規模な地震動モニタリングに基づいている。図-2は東京

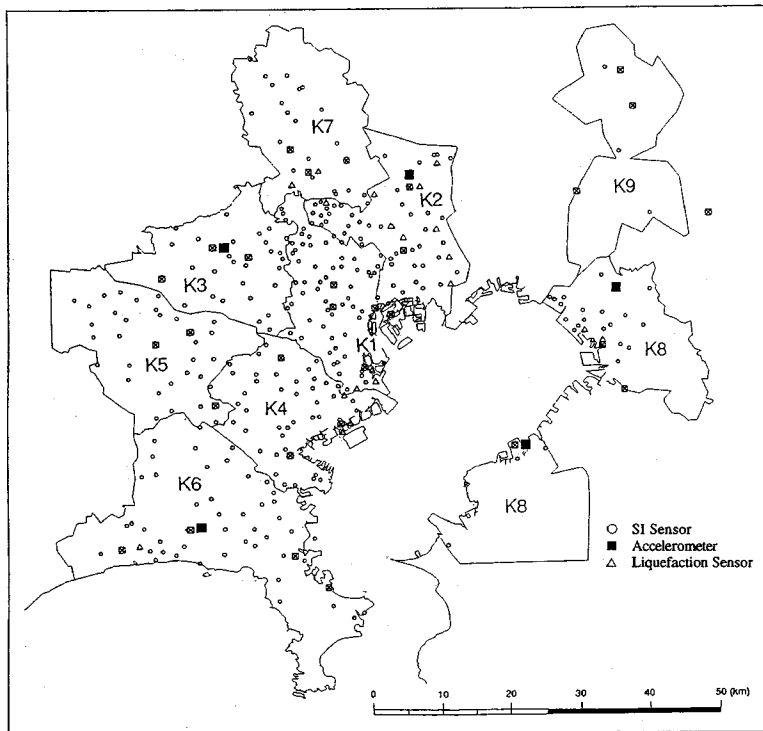


図-2 都市ガス供給網の中圧ブロックとモニタリング用地震センサー

ガスの供給区域の中圧ブロック分割であり、現在9のブロックが設けられている。

地震動モニタリングの中核をなすものは、全地域で331箇所（各低圧ブロックに3箇所）の観測点を有するSIセンサー・ネットワークである。この地震動モニタリング用SIセンサーは、整圧所や地区ガバナに設置されており、地震が発生すると地震動のSI値と最大加速度を観測し、本社の防災・供給センターへ無線によりこれらの値をリアルタイムで送信する。このうち31箇所における最大加速度値は、従来からNHKにも提供されており、関東地方で地震があった場合には、地震速報としてテレビ放送されている。

また、地震の震源やマグニチュードを独自に迅速に推定することを主たる目的として、供給エリア外周部の5箇所（神奈川県藤沢市、東京都小平市、埼玉県草加市、千葉県四街道市、千葉県袖ヶ浦市）の東京ガス施設内に、地表および地中の地震計を設置している。地中地震計は深さ20~40mの比較的固い地盤に埋設され、3方向成分の加速度を観測し、無線で本社に波形を送信する。

さらに、液状化の危険性の高い地区には、新たに開発した液状化センサー¹⁷⁾を20箇所設置し、地震時のセンサー内の水位上昇量を本社に無線連絡し、液状化発生の有無を知らせる仕組みとなっている。

これらの地震動リアルタイム・モニタリングシステムは、計器の設置と無線システムの構築が終了し、1994年6月より本格稼働を始めた。

3. SIGNALの構成

現在構築を進めている地震時警報システムSIGNALの全体構成を図-3に示す。全体システムは、被害推定システム、震源推定システム、スペクトル評価システム、意志決定システムの4つのサブシステムから成っている。また事前に対象地域の地盤ゾーニングを行い、埋設管や需要家建物などの基本データを準備しておく。以下にそれぞれについて概要を述べる。

(1) 地盤ゾーニングと基本データ

地震動強さが、地盤条件に大きく左右されることはよく知られている。SIGNALでは、地震センサーの配置が非常に密であるので、観測点間における地震動強さは補間などを行わず、各SIセンサーの観測値は、センサー近傍の同種の地盤での地震動強さを代表すると考えることにする。したがって、事前に対象区域全域の地盤ゾーニングを行い、各SIセンサーの分担区域を定めておく必要がある。

地盤分類は、地形により台地と沖積低地（谷底低地

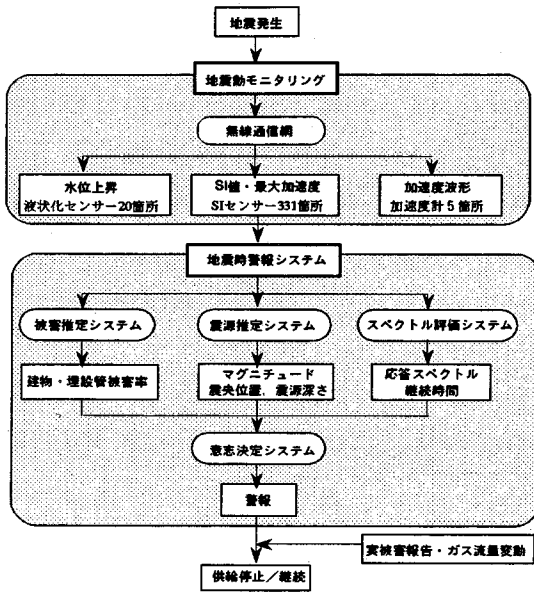


図-3 SIGNALのシステム構成とフロー

を含む)の2つに分類したあと、沖積低地についてはさらに固有周期により3つに区分し、計4通りの地盤分類とする。沖積低地の固有周期 T_c (s)による分類は、従来の4種類¹⁸⁾の2-4種に対応する $T_c < 0.2$, $0.2 \leq T_c < 0.6$, $T_c \geq 0.6$ で区分した。固有周期は、地層断面と地層ごとの代表的S波速度から求めたが、現在、常時微動観測¹⁹⁾による確認も行っている。またボーリング柱状図に基づき、観測SI値と液状化層厚の関係²⁰⁾を地図として準備している。各SIセンサー分担区域における被害推定の基本データとして、埋設管については中圧導管と低圧導管の延長、管種、管径などを、また需要家建物については契約数を準備している。

(2) 被害推定システム

SIGNALの中核をなすもので、無線で得られるSI値と最大加速度を用いて、各中圧ブロックの被害程度を推定する。中圧ブロックの供給停止は、中圧導管網の被害を前提としているが、過去の地震による被害事例が少ないため、統計的な被害予測式の精度はあまり期待できない。そこで、中圧管の被害予測とともに、需要家建物や低圧導管の被害予測も行い、これらの被害状況も参考とすることにした。これまでの事例⁷⁾で、中圧管被害のあった場所では、低圧管や木造家屋の被害も見られている。

建物の被害要因としては、震動被害と液状化などの地盤被害が主として考えられる。ここでは液状化の影響は、震動被害を増加させることで評価できるという

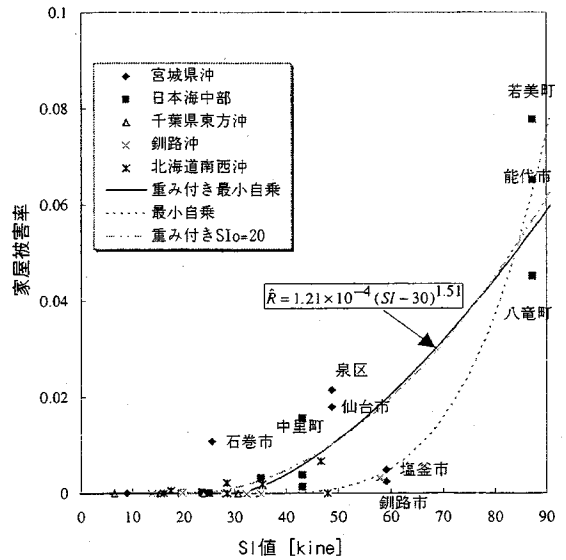


図-4 SI値と家屋被害率の関係

考えに立ち、その増加率を液状化層厚の関数として与える。これは、液状化がまったく生じない時に増加率が1.0となり、液状化が10mの厚さで発生した時に増加率が10.0となる連続的な三角関数であり、液状化層厚が10m以上になる場合は、被害増加率を10倍で頭打ちさせている。

埋設管被害における液状化の影響についても、建物と同様に被害率を増加させる考え方を現在では用いているが、データが揃えば、液状化地盤と非液状化地盤で別の被害推定式を構築することも可能となる。

また、宅地造成地や急傾斜地などでは、地すべりや地割れなどの地盤変状の起こりやすいことが知られている²¹⁾。このため、該当するようなSIセンサー分担区域を事前の地盤ゾーニングで指定できれば、建物および埋設管の被害率の割り増しを行いたい。

システムでは、まず観測SI値と最大加速度を入力として、各SIセンサー分担区域ごとに埋設管および需要家建物の被害率を推定する。この被害推定の方法として、ファジィ推論²²⁾に基づくものを既に提案したが、システムの実用化に向け簡便な手法を今回採用する。図-4は、実地震のデータに基づいて今回新たに構築したSI値と建物被害率の関係²³⁾である。

同様に図-5は、実地震のデータに基づいて構築した、SI値と低圧導管(ネジ鋼管)の標準被害率の関係²⁴⁾である。埋設管の被害率は、この標準被害率に管種と管径の補正係数²⁵⁾を乗じて算定する。しかし、この経験的方法では、管種によらず被害が発生し始めるSI値を一定としているなどの問題点もあり、西尾²⁶⁾による管の変位吸収能力と地盤変位の不均一性の関係に基づく方

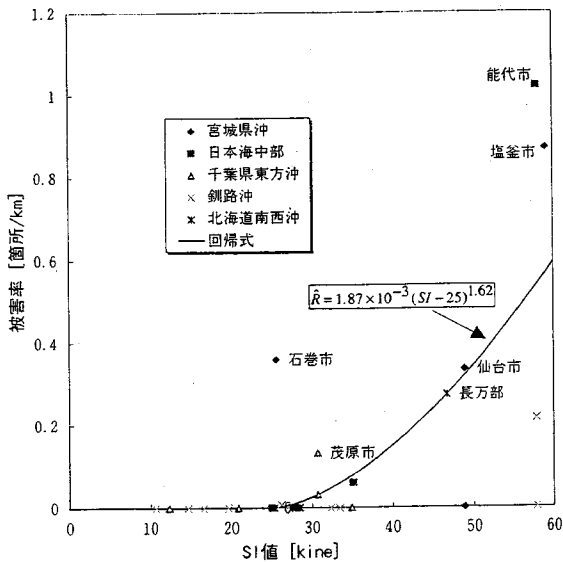


図-5 SI値と低圧ガス導管被害率の関係

法についても検討を進めている。

各SIセンサー分担区域で推定された建物および埋設管被害率より、建物被害棟数と埋設管被害箇所数を計算し、これらを低圧ブロックおよび中圧ブロック単位で集計して被害数量を求める。また、低圧および中圧ブロック単位での平均被害率も逆算により求める。

(3) 震源推定システム

本システムのように高密度な地震動モニタリングを行った場合、各供給区域内の地震動強さは観測値で代表できよう。したがって被害推定の目的からは、震源位置やマグニチュードを推定する必要はさほど高くない。しかし、震源位置やマグニチュードを知るとは、供給停止の意志決定を行う上で極めて重要と考えられる。

震源推定²⁷⁾は、無線で送られてくる5地点の加速度波形(地表および基盤)を用いてリアルタイムで行う。図-6は震源推定システムのフローチャートを示したものである。このシステムは次の5つのステップよりなる。すなわち、1) 逐次型同定手法による観測記録の初動時刻(P波とS波)の決定、2) 半無限地盤構造における震源情報の概略推定、3) 多層地盤構造における理論走時と震源位置に関する偏微分係数の算定、4) 2)の結果を初期値とし非負の深さを考慮した重み付き最小自乗法による震源位置と発震時刻の決定、および、5) 気象庁の算定式に準じたマグニチュードの推定である。

P波とS波の到着時刻およびSP時間の決定においては、オンライン処理のため、カルマンフィルターを用いている。さらに、本システムでは、地盤構造の違い

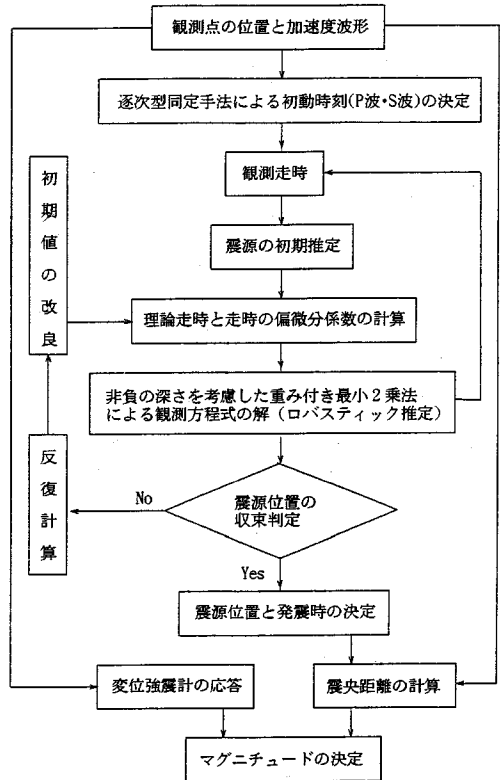


図-6 震源推定計算のフロー

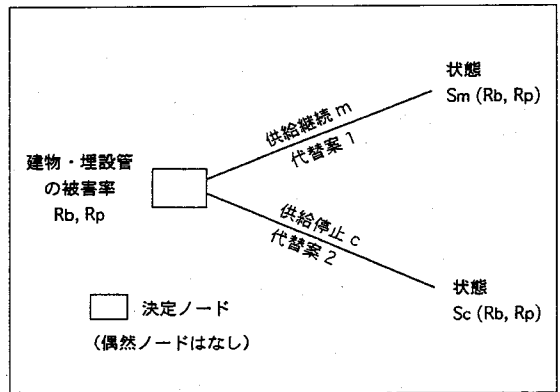


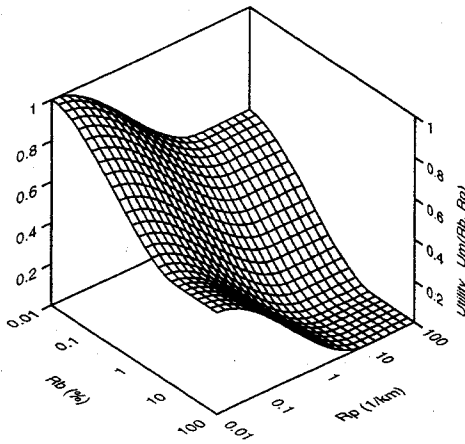
図-7 2変数の意志決定ツリー^{22),28)}

が反映されるように、理論走時とそれの震源位置に関する微分を計算した上で、自動処理・震源決定を実施している。これらの点は既往の手法に見られない本アルゴリズムの特徴である。

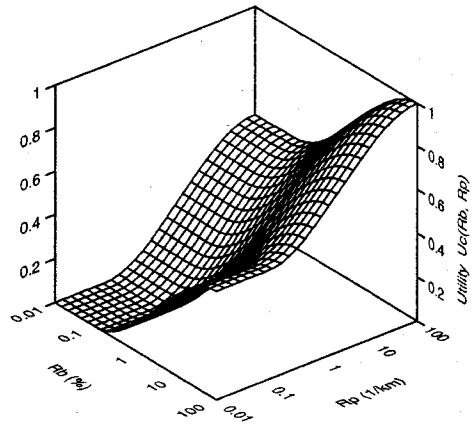
また、この震源推定結果を用いて、マグニチュードと震源距離による概略的な被害推定²⁹⁾を行う。

(4) スペクトル評価システム

スペクトル評価システムでは、5地点からの加速度波



代替案1： 供給継続



代替案2： 供給停止

図-8 2変数問題における効用関数の例²²⁾

形を用いて、加速度応答スペクトルを計算する。また主要動の継続時間も計算する。これらの結果より、各地点における地震動の卓越周期などが分かり、被害を受ける可能性のある構造物の周期帯域をある程度特定できる。また過去の被害地震の加速度応答スペクトルや継続時間と比較することにより、地震動のおおよその破壊力をイメージできる。しかし波形を得られるのが5地点のみであるので、地点間のスペクトルの違いやその間の地域の評価は難しい。したがって、このサブシステムの計算結果は、意志決定において参考程度の位置づけとすることを考えている。

(5) 意志決定システム

被害推定システムでは、各中庄ブロックの建物被害率 R_b と埋設管被害率 R_p が求められ、供給停止の一次判定は、これらの2つの次元の異なる量を考慮して行う。決定解析は、供給継続と供給停止の2つの代替案のある決定ツリーで表される(図-7)。意志決定の方法は、2次元の効用関数を仮定して(図-8)、建物被害率と埋設管被害率に対応する期待効用の大きさを、供給停止の場合と供給継続の場合で比較し、「供給停止」、「様子を見る」、「供給継続」の3段階の判断を下す。効用関数を決めるのは容易ではないが、現在のガス事業者の判断基準などを参考にしたいと考えている。

この一次判定結果に、震源推定結果とスペクトル評価結果を加味して二次判定を行い、SIGNALからの警報発令の有無を判断する。なお実際の供給停止は、このほかに実被害や火災の報告、さらにガスの圧力および

流量情報などを考慮して、最終的に供給責任者により判断される。

4. システム開発と観測記録

ワークステーション上で、SIGNALの開発を行っており、現在までに被害推定システムと震源推定システムの開発を終えた。

地盤ゾーニング・データベースは、250m×175mメッシュを単位とした地理情報システム(GIS)上で構築した。例として、都心の隣接する2つの中庄ブロック(K1, K2)の地盤分類をSIセンサー位置とともに図-9に示す。SIセンサーの分担地域は、各メッシュと地盤分類が等しく最短距離にあるセンサーがその地点の地震動を代表するという考え方で決定した。図-10は各メッシュ単位での埋設管延長を示している。

モニタリングシステムの拡張を始めてからこれまでに、数個の地震が観測されている。ともに東京と横浜で震度4を記録した、1993年5月21日茨城県南西部地震(マグニチュードM5.4, 震源深さH=60km)では147地点、同10月12日東海道はるか沖地震(M7.1, H=390km)では205地点、東京震度3の1994年5月27日東京都東部地震(M4.0, H=42km)では315地点で記録が得られた。観測されたSI値は、いずれの地震も最大4cm/s程度で、被害は当然ながら生じていない。しかしこのような記録の蓄積により、揺れやすい地域の特定や、地盤ゾーニングの評価が可能となろう。

SIGNALの震源推定システムについては、すでに得ら

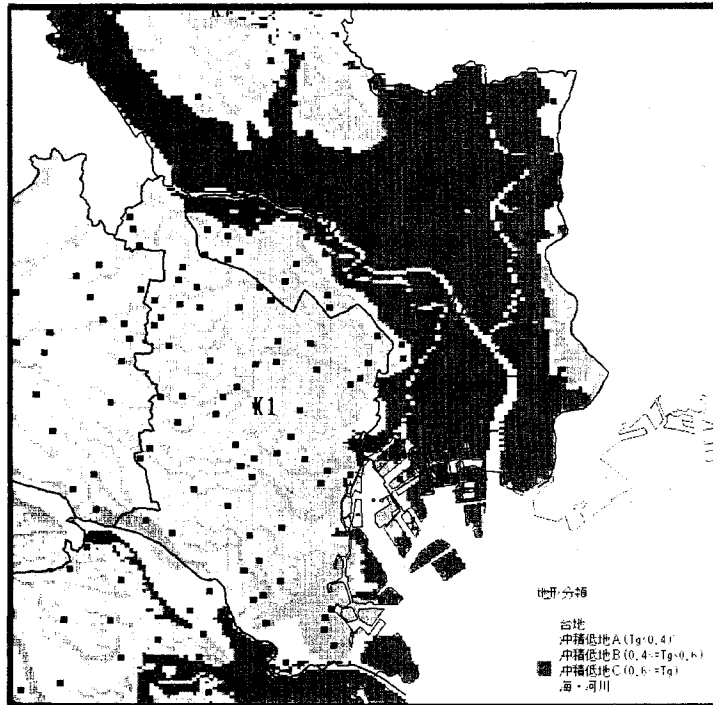


図-9 地形分類とSIセンサー設置地点

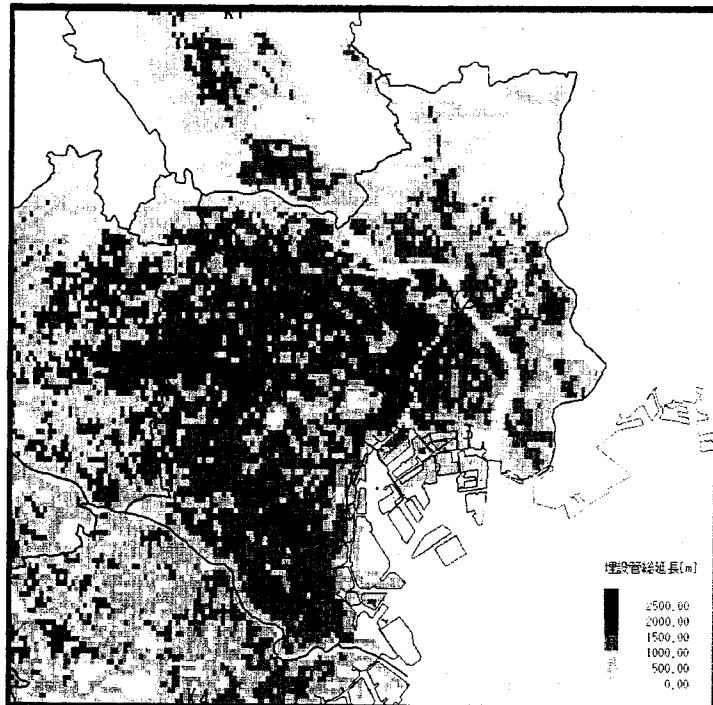
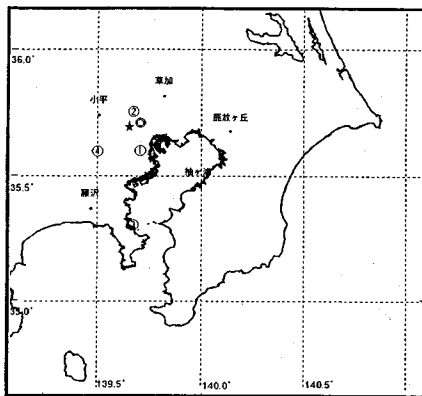


図-10 各メッシュにおける埋設管延長



	緯度/経度	気象庁(再計算)とのずれ	深度 (km)	マグニチュード
○気象庁(再計算)	35° 42' 139° 42'		42	4.0
①気象庁(遠緯)	35° 36' 139° 42'	11km	30	4.1
②他機関A	35° 45' 36" 139° 39' 36"	8km	29.4	4.9
③他機関B	35° 18' 25" 139° 40' 48"	44km	31.4	4.1
④他機関C	35° 36' 139° 30'	21km	24	3.9
★SIGNAL	35° 41' 30" 139° 38' 54"	6km	43.6	3.93

図-11 SIGNALによる震源推定結果の例

れた幾つかの地震で検証が行われている。図-11は、1994年5月27日東京都東部地震について、SIGNALの推定結果と、気象庁および他の3機関による震源推定結果とを比較したものである。この例では、SIGNALの結果は、震央位置、深度、マグニチュードのいずれもが、他機関のものより、気象庁の再計算値に近かった。この例は、震源が供給区域内であり、SIGNALの震源推定にとって最も理想的ではある。しかし、他の地震にも適用した結果、震源が供給区域外であっても、かなり正確に震源情報が推定できることを確認している。

5. 事例解析

被害推定の事例解析は、東京都の地震被害想定³⁰⁾でも用いられた1855年安政江戸地震を対象として行った。この地震は荒川河口付近を震源とする典型的な直下型地震で、ここではマグニチュード7.0、震源深さ20kmと仮定した。

地震動強度は、Molas and Yamazaki³¹⁾の距離減衰式により、地盤種別ごとに地表面での最大加速度と最大速度を推定し、これに対数正規乱数による距離減衰式のばらつきを考慮した。SI値は最大速度より推定した²³⁾。このようにして決めた各SIセンサー分担地域のSI値を震

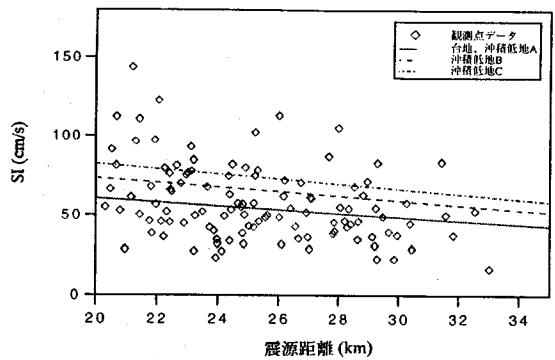


図-12 想定地震におけるSI値と震源距離の関係

源距離に対して図-12に示す。この想定地震は、震源が対象とした中圧ブロック内にあるため、近傍ではSI値が最大100cm/sを越すような大きな地震動が予測されている。

最近の地震記録と地震被害事例より構築した被害推定関数²⁴⁾を用いて、上で想定したSI値に対する各メッシュの埋設管被害率を推定し、全供給区域について図-13に示す。この被害率は、中圧導管および低圧導管を合わせたもので、液状化による被害率の割増しも考慮されている。この被害想定では、震源近傍で大きな被害が予測され、中圧ブロック全体の埋設管被害予測結果は、K1ブロックで中圧管被害4件、低圧管被害1,542件、K2ブロックで同じく11件と2,165件であった。また需要家建物の被害は、K1ブロックで被害率1.4%、被害件数36,786件、K2ブロックで同じく5.3%、81,584件であった。K2ブロックでの被害が大きいのは、この地域で液状化が大規模に生じると予想されることの影響が大きい。

これらの結果は、対象区域、構造物の定義、それに想定地震や被害推定法などに違いがあるので、東京都や国土庁などの被害想定結果と単純な比較はできないが、オーダー的にはそれらに近いものとなっている。しかしこのような数字は、計算式やさまざまな係数による影響が大きく、今後、広範な事例解析と慎重な吟味が必要といえよう。

6. まとめ

地震による大規模都市ガス供給システムの二次災害防止のためには、甚大な被害が予想される場合、中圧導管網のブロック化と供給停止が必要となる。東京首都圏においてこの緊急措置判断を迅速に行うため、地震動モニタリングシステムの展開と、それからの地震動情報に基づく警報システムの開発を進めている。モニタリングシステムは、331地点における地震動のSI値

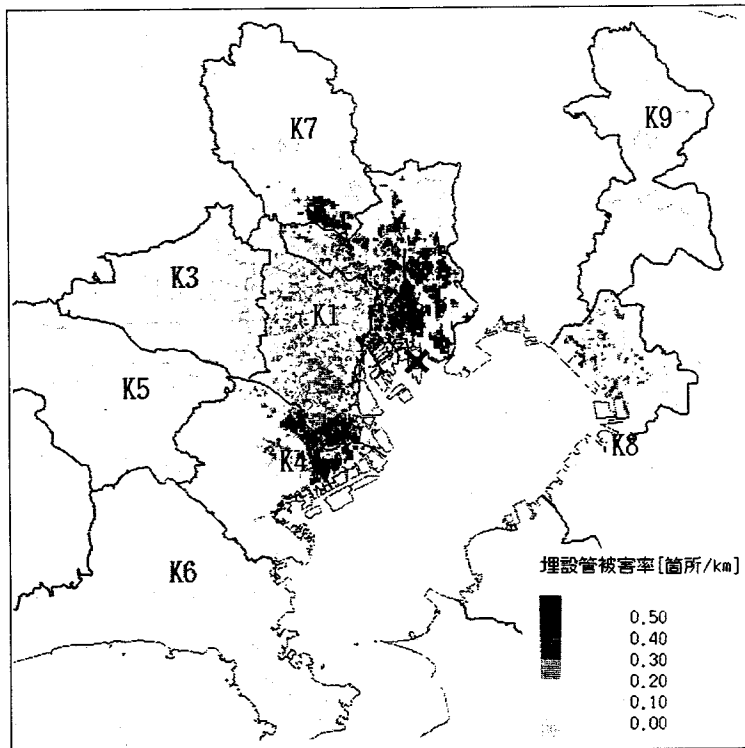


図-13 想定地震による各メッシュの埋設管被害率

と最大加速度、5地点における加速度波形、さらに液状化の予想される20地点での水位上昇量を観測し、無線でデータ収集するもので、世界でも例のない大規模で高密度なものである。これらの情報をリアルタイムに処理し、供給地域の地震被害を推定するため、地理情報システム上に、地盤条件、埋設管、需要家建物などのデータベースを構築し、被害推定、震源推定、スペクトル評価、意志決定の4つのサブシステムから成る地震時警報システムの開発を行っている。本文では、このシステムの基本的考え方を示すとともに、開発したシステムを用いた解析例を紹介した。今後、いろいろなケーススタディを行って、本システムの実証性を高めていきたいと考えている。

なお、この報告を書き上げた時点で、阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）が発生した。この地震による被害は、当然SIGNALの被害推定式にも反映されることになろう。しかし、今こそSIGNALのようなシステムの重要性が理解されるであろうし、都市防災全体にも貢献できることが大きいと考え、後日、多少変更があることをあえて承知で投稿することにした。

謝辞：SIGNALの開発に当っては、(財)地震予知総合研究振興会の中に作られた研究委員会を中心として、多くの方々の協力と意見を頂いている。とくに、現在の

研究会メンバーである磯山龍二(日本技術開発)、鈴木崇伸(東洋大学)、童華南(東京大学生産技術研究所)、小川好(東京都土木研究所)、根岸七洋・狩野浩之(東京ガス)、赤坂望(富士総合研究所)の各氏、および前研究会メンバーであった安田進(東京電機大学)、東畑郁生(東京大学)、永田茂(鹿島建設)、森本巖(基礎地盤コンサルタンツ)の各氏には厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大町達夫代表：1994年ロスアンゼルス地震と都市機能障害の調査研究、文部省科学研究費突発災害研究成果、1994。
- 2) 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.
- 3) 山崎文雄：地震と産業被害、日本損害保険協会、1994。
- 4) 日本瓦斯協会：宮城県地震と都市ガス、1979。
- 5) 日本ガス協会：日本海中部地震と都市ガス、1984。
- 6) 日本ガス協会関東中央部会：千葉県東方沖地震と都市ガス、1988。
- 7) 日本ガス協会：釧路沖地震、北海道南西沖地震と都市ガス、1994。
- 8) 神戸大学土木系教室：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報)、1995。

- 9) 日本ガス協会：地震防災対策ガイドライン，1981.
- 10) 日本ガス協会：地震時の緊急措置判断のための情報に関する研究報告書，1991.
- 11) 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，1985.
- 12) 東京ガス防災・供給センター：総合管理システムパンフレット，1994.
- 13) 野田茂，目黒公郎：リアルタイム地震工学を目指して，第22回地盤振動シンポジウム，pp.95-112，1994.
- 14) 中村豊，上野真：地震早期検知警報システムUrEDASの開発，第7回日本地震工学シンポジウム，pp.2095-2100，1986.
- 15) 中村豊：リアルタイム地震防災システム：「ユレダス」「ヘラス」，第22回地盤振動シンポジウム，pp.73-84，1994.
- 16) Eguchi, R., Goltz, J.D., Seligson, H., and Heaton, T.H.: Real-time Earthquake Hazard Assessment in California: the Early Post-earthquake Damage Assessment Tool and the Caltech-USGS Broadcast of Earthquakes, *The 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Vol. II, 1994.
- 17) 安田進，吉川洋一，森本巖：1992年2月2日の地震による液化化センサーの記録，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，III，1992.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1980.
- 19) 布施光啓，山崎文雄，佐々木裕明：常時微動による地盤振動特性の推定，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.11，pp.667-672，1994.
- 20) 安田進，吉川洋一，牛島和子，石川利明：SI値を用いた液化化予測手法，第28回土質工学研究発表会，1993.
- 21) 損害保険料率算定会：人工地盤における地震被害予測に関する研究，地震保険調査研究33，1993.
- 22) Cret, L., Yamazaki, F., Nagara, S., and Katayama, T., Earthquake Damage Estimation and Decision Analysis for Emergency Shut-off City Gas Networks Using Fuzzy Set Theory, *Structural Safety*, Vol.12, pp.1-19, 1993.
- 23) 被害事例に基づく地震動強さと建物被害率の関係，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 2, pp.2299-2304，1994.
- 24) 高橋正洋，鈴木崇伸，磯山龍二，吉川洋一：埋設管被害と地震動強度の関係について，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2，pp.2083-2088，1994.
- 25) 三菱総合研究所：東京における地震被害想定に関する調査研究 供給処理施設分科会報告書，1988.
- 26) Nishio, N.: Seismic damage ratio prediction for buried pipelines considering nonuniform ground displacement, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, No.450/I-20, pp.63-74, 1992.
- 27) Noda, S. and Kano, H.: Hypocenter estimation system for earthquake countermeasures, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 15, No.1, pp.53-90, 1993.
- 28) Ang, A. H.-S. and Tang, W. H.: Probabilistic Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons, 1984.
- 29) 野田茂，磯山龍二，山崎文雄，吉川洋一：震源情報を用いた地震被害の概略的推定法，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2，pp.2233-2238，1994.
- 30) 東京都防災会議：東京における地震被害の想定に関する調査研究，1990.
- 31) Molas, G. L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 5, 1995.

(1995.1.27受付)

DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE CITY-GAS NETWORK ALERT SYSTEM BASED ON MONITORED EARTHQUAKE GROUND MOTION

Fumio YAMAZAKI, Tsuneo KATAYAMA, Shigeru NODA, Yoichi YOSHIKAWA
and Yasuaki OTANI

A seismic information gathering and network alert (SIGNAL) system for a large-scale city gas network has been developed based on extensive earthquake monitoring and geographic information system (GIS). The monitoring system consists of 331 SI-sensors, 5 accelerometers and 20 liquefaction sensors. Once an earthquake occurs, monitored values by these sensors are sent to the network control center by radio. The emergency operation system is activated as soon as these monitored values are received. Then damage estimation to customers' buildings and pipelines, estimation of the magnitude and hypocenter, evaluation of the response spectrum, and decision analysis whether to shut-off or maintain the supply based on the estimated results are conducted. SIGNAL has started operation recently. This paper introduces SIGNAL and case studies using it.