

[研究展望]

リアルタイム地震防災システムの
現状と展望

山崎文雄

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

阪神・淡路大震災後、地震防災対策の見直し、国や自治体それにライフライン事業者などにとって大きな課題となっている。その1つの大きな柱として、地震計ネットワークの大幅な増設と早期被害推定システムの導入がある。本文では、このようなリアルタイム地震防災の動きについて、日本と米国における実際のモニタリングシステムや被害推定システムに焦点を当て、これまでの発展の経緯、現行のさまざまなシステムの紹介、問題点と今後の展望などについて論ずる。

Key Words : earthquake disaster mitigation, early damage estimation, seismometer network, GIS, real-time monitoring system

1. はじめに

最近、リアルタイム地震防災システムが、日本や米国で注目を集めている¹⁾⁵⁾。日本では、阪神・淡路大震災(兵庫県南部地震)の発生初期に被害情報がなかなか集まらず、様々な救助・救援活動が後に回ったという反省が、このようなシステムの重要性を広く認識させるきっかけとなった。また米国では、阪神・淡路大震災の1年前の同日に発生したノースリッジ地震において、CUBE⁹⁾という早期に震源情報を知らせるシステムが注目された。

リアルタイム地震防災システムの基本的考えは、地震動を遠隔監視(モニタリング)し、その情報に基づいて、被害防止もしくは軽減のための対応を迅速に開始する点にある。このようなアイデア自体は、かなり古くより提唱されていたが⁶⁾、実際にシステムとして構築され、実用化したのはごく最近である。その先駆となったのがJRのユレダス³⁾⁶⁾と呼ばれる震源推定システムであり、地震動のうち最初に到達する縦波を検知して、大きな横揺れが到着する前に、列車を安全に停止させようというものである。ユレダスに関する要素技術や応用事例に関しては、既に総合的な解説³⁾が行われている。

また数年前より、地震直後にライフライン・建物・火災などの被害を推定し、緊急対応や初動体制の確立に利用しようとするシステムが提案・実用化されつつある。その代表的なものとして、94年より実稼働を始めた東京ガスのSIGNAL⁷⁾⁸⁾がある。このシステムは、高密度に配備した地震計ネットワークから無線で集めた情報と、地理情報システム(GIS)に蓄えた埋設管・需要家建物・地盤などのデータに基づいて、都市ガス供給網の地震被害を推定し、ガスの供給停止に関する警報を出すものである。

自治体等の防災機関においても、地震発生直後に被害推定を行うシステムが導入されつつあった。その代表的なものに、川崎市の「震災対策支援システム⁹⁾」と東京消防庁の「地震被害予測システム¹⁰⁾」がある。また、ほぼ同時期に米国においても、CUBEで推定された震源情報を用いて、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推定するEPEDAT¹¹⁾というシステムの開発が進められていた。これらの動向については後に詳しく紹介する。

ここでリアルタイム地震防災(ないしは地震学)という言葉は、とくに「リアルタイム」の部分がやはり言葉になる反面、時間経過との関連の中でどこ

までをリアルタイムと呼ぶのかという議論も度々交される^{1),2),12)}。一方、準リアルタイムないしは早期被害推定と呼ぶべきシステムも、一般にリアルタイムと呼ばれることが多い。本文でも、この点については余りこだわらずに、リアルタイムという言葉を使っている。

阪神・淡路大震災後、地震防災対策の見直しは、国や自治体それにライフライン事業者などにとって、大きな課題となっている。その1つの大きな柱として、地震計ネットワークの大幅な増設と早期被害推定システムの導入がある。また、リアルタイム地震防災に焦点を当てたシンポジウム¹³⁾⁻¹⁵⁾が開催されたり、研究プロジェクト^{16),17)}も幾つか開始している。これらのリアルタイム地震防災の動きは、現在進行中のものが大半であるが、本文ではそれらの現況(1997年8月時点)を紹介するとともに、今後の展望について論ずる。なおここでは、リアルタイム地震防災の実務面での利用に注目しており、その背景となる考え方や技術に関しては、他の論説等¹⁾⁻³⁾を参照されたい。

2. 日本における先駆的な地震情報システム

(1) JRの地震防災システム：ユレダスとヘラス³⁾

鉄道に関する地震防災システムの動向については、文献³⁾で既に詳しく紹介されているので、ここでは簡単に概要を述べるに留める。鉄道は、地震が発生した場合、列車を緊急停止させるなど、最も迅速な対応を要求される。しかし、高速で走っている列車はすぐには停止できないことから、1) 大きな揺れが来る前の初期の小さな揺れを検知すること、2) 線路に揺れが到着する前に震源の近くで検知すること、の2つが警報を早めるための手段として考えられる。このようなアイデアを取り入れた世界最初の早期検知システムが、JRのユレダス(UrEDAS)である。ユレダスは、単一地点で観測されたP波(縦揺れ)初動部より、地震のマグニチュード、震央位置、震源深さをほぼリアルタイムに推定し、S波(横揺れ)が到着する前に、新幹線などの列車を減速・停止しようというものである。

図-1は、現在稼働しているユレダスのネットワークである。83年にパソコンを用いたプロトタイプが完成、84年からは宮古その他で試験観測が実施され、その後運輸省の助成を受けて、5観測地点からなる

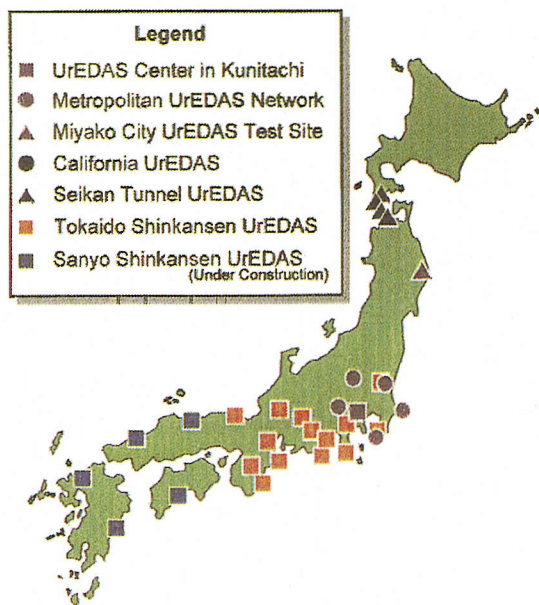


図-1 稼働中のユレダス・ネットワーク
(出典：JR総研ホームページ)

首都圏のユレダス・ネットワークが89年から90年にかけて構築された。また、88年には青函トンネルの地震防災システムの一部として、ユレダスの震源推定機能が使われ始め、92年からは14観測地点からなるシステムが東海道新幹線に導入され稼働中である。また、カリフォルニア工科大学に研究用システムが設置され、CUBEシステムなどとの比較検討が行われている。さらに、阪神・淡路大震災の後、山陽新幹線においても、現在ユレダス・ネットワークの構築が進んでいる。このように、鉄道の地震対策として、ユレダスは今後ますます広く使われるようになるものと思われる。

またJRは、ユレダスによる地震検知情報に基づいて、鉄道施設の被害状況を5分以内に推定するヘラス(HERAS)と呼ばれる災害予測・復旧支援のシステムも用意している。ヘラスは、膨大な地盤や構造物の震動特性データを内部に保有し、過去の地震被害データベースとユレダスの情報に基づいて鉄道施設の被害推定を行う。またこれにより、将来発生が予想される地震による被害予測も可能で、耐震強化策の策定にも役立つことが期待されている。ヘラスは現在、災害発生予測手法に改良を加えた新バージョン¹⁸⁾も開発されている。



図-2 SIGNALのモニタリング用地震センサー

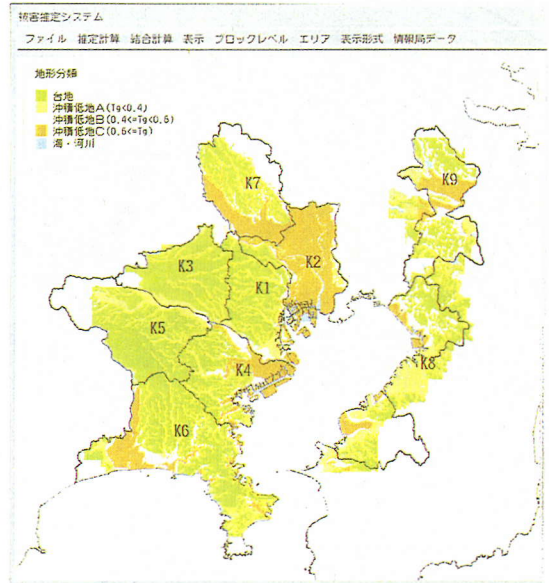


図-3 SIGNALのGISによる地形分類

(2) 東京ガスの地震時導管網警報システムSIGNAL⁷⁾

わが国の大規模都市ガス供給システムでは、過去の地震災害の経験も生かして、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。東京ガスを例にとると、需要家レベルでは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。また低圧導管網は、需要家3万~10万件を単位として常時ブロックを形成し、地区ガバナに取り付けられたSIセンサーが一定の揺れの強さ(SI値=30または40cm/s)を感知すると供給を自動遮断する。さらに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で、ブロック化と供給停止が行える。この中圧ブロックの供給停止は、従来、中圧導管網の被害確認情報に基づき判断し、本社からの遠隔操作で行うことになっていた。しかし、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から中圧ブロックの地震被害を推定し、緊急措置判断を支援するようなシステムの開発が急務となり、SIGNALという早期警報システムが開発された。

SIGNALの地震動モニタリングの中核をなすものは、全地域で331箇所の観測点を有するSIセンサーネットワークである(図-2)。このSIセンサーは、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へ無線送信する。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、供給エリアの外周部に5箇所、地表および地

中の地震計を設置している。さらに、液状化の危険性の高い地区には液状化センサーを20箇所程度設置し、水位上昇量によって液状化発生の有無を無線で知らせる。埋設管や需要家建物の被害推定を効率的に行うには、地盤や構造物などのデータを事前に地理情報システム(GIS)の上に準備しておく必要があり、縦175m×横250mを単位メッシュとした数値地図を構築した。全エリアを地形と固有周期により計4通りに地盤分類(図-3)するとともに、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を数値地図として準備した。また、被害推定のための基本データとして、埋設管については中圧・低圧導管の延長、管種、管径を、また建物については契約戸数を準備した。このようなGISデータに基づいて、地震動情報が無線で送られてくれば、被害推定と震源推定を自動的に行い、被害程度により警報が発令され、この結果にさらに実被害報告やガス流量変動などの情報を加えて供給停止の判断を行う。SIGNALは、94年6月より運用が開始され、96年9月よりインターネットによる地震データ公開も始め⁸⁾、その後もシステムの実証性を高めるための研究を継続している。

他の大手都市ガス会社でも、阪神・淡路大震災と前後して、地震計ネットワークの配備と早期地震被害推定システムの導入が進められている¹⁹⁾。

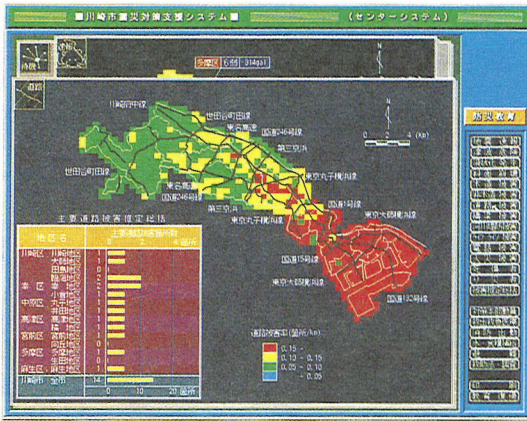


図-4 川崎市の「震災対策支援システム」の出力例
(道路被害予測)

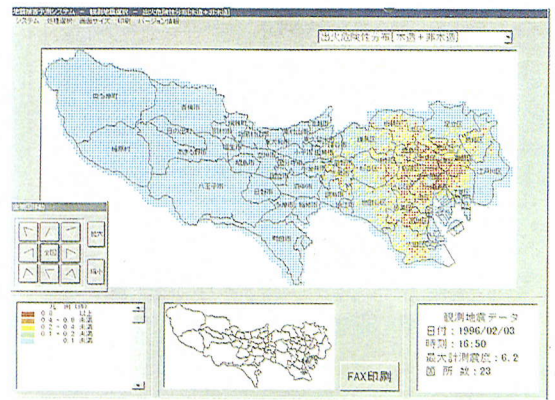


図-5 東京消防庁の「地震被害予測システム」による被害予測結果の出力例(出火危険性分布)

(3) 川崎市と東京消防庁の早期被害推定システム

市レベルの被害推定・震後対応のシステムとしては、川崎市が開発した「震災対策支援システム⁹⁾」が先駆的なものである。このシステムの目的は、地震発生時における初動対応の効率化を図ることにある。市域の被害情報を入手するには時間がかかると予想されることから、この「情報の空白期」における初動体制を確立するための支援情報として、このシステムの役割が期待されている。また平常時には、そのシミュレーション機能を生かして、防災訓練や防災教育にも活用できる。システム構成は、入力評価、被害想定、対策支援、防災教育の4つのモジュールから成っている。またシステムは、自然環境、社会環境、防災資源についてのデータベースを基本的に500mメッシュ単位で蓄えている。

地震発生時には、各区に置かれた端末点システムからの揺れの情報から地震緒元を推定し、地盤条件などを考慮して、市内全域の震度分布を予測する。次に、この震度分布に基づいて、津波危険、液状化危険、斜面崩壊、木造・非木造建物被害、道路被害(図-4)、橋梁被害、河川堤防被害、ライフライン被害、火災被害、人的被害などの項目について予測する。これらの被害予測結果に基づいて、災害対策本部設置、職員動員、救出・救急医療活動、消防活動、給水・食料供給活動、避難活動、調査活動などの災害応急対応指針が表示される。このシステムは、94年4月より実際に稼働しているが、その後、市内の各区に地震計の設置が完了し、更なる発展を目指し

たシステム開発を現在もやっている。

東京消防庁は、発災直後の消防対応に有用な情報を得ることを目的として「地震被害予測システム」を94年に開発した¹⁰⁾。予測する項目は、500mメッシュ単位での震度、液状化危険、出火危険(図-5)、延焼危険、人的被害、交通状況など、火災や救急・救命に関する地域分布である。このシステムは、基本的に、東京都や東京消防庁が行っている地震被害想定手法をコンピュータ・パッケージとしたもので、地震条件を入力することにより、迅速に被害予測を行う。

このシステムでは当初、気象庁が発表するマグニチュードと震源位置から、距離減衰式を用いて地震動の地域分布を推定していた。しかし東京消防庁では、都内の各消防署に計測震度計の設置を進めており、既に22箇所の計測震度と最大加速度もコンピュータ上に表示され、この観測データの補間により地震動分布を推定することも可能となっている²⁰⁾。計測震度計は、2000年度までに計80台に増設される予定となっている。また、被害予測項目として、建物被害や地盤災害を加えてより総合化するとともに、他の被害推定手法についても、最新の知見を取り入れて改めていく計画である。基図についても、町丁目単位や250mメッシュの採用も現在検討中である。

このほかの自治体では、埼玉県、小田原市などが、同様の簡易な地震被害予測システムを阪神・淡路大震災以前から既に導入している。

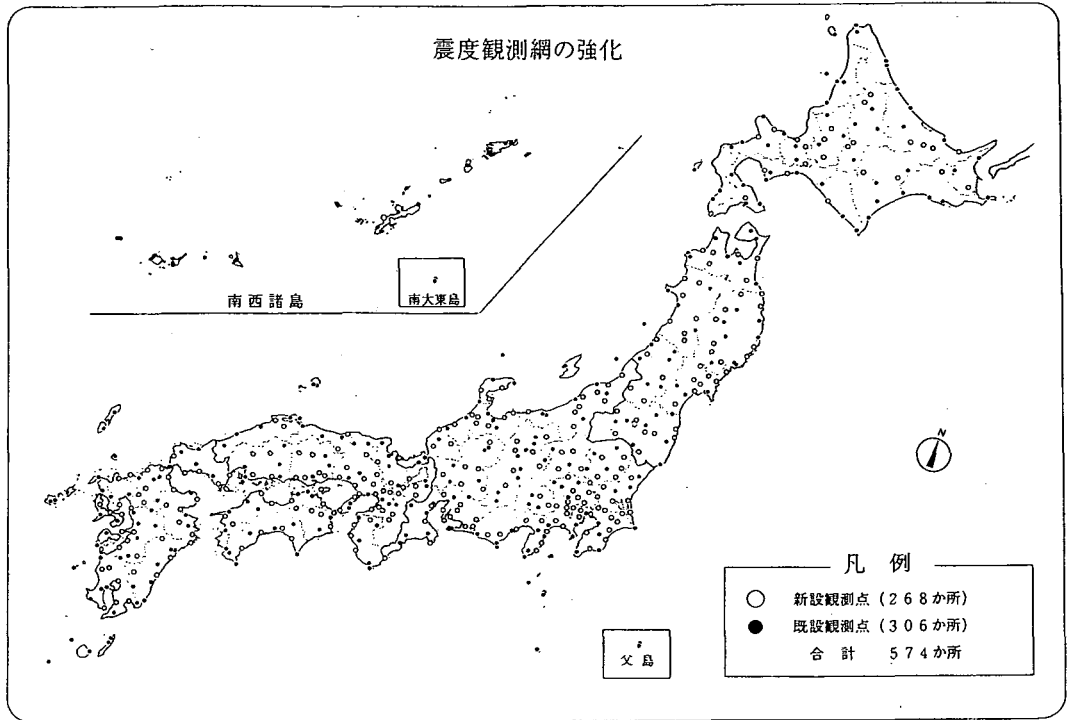


図-6 気象庁の全国574箇所の震度観測点²¹⁾

3. 最近の日本の地震計ネットワーク

日本には以前より、世界で最も多くの強震計が設置されていた。しかし、阪神・淡路大震災では「震災の帯」と呼ばれる震度7と判定された地域にほとんど地震計がなかったことなどの反省から、より多くの強震計を配備しようという動きが活発である。ここでは、そのような動きの代表的なものについて紹介する。

(1) 気象庁の強震観測ネットワーク²¹⁾

気象庁は、近年、強震観測網を急激に拡大してきている。気象庁は数年前に震度の計測化を導入するに際し、87型強震計と呼ばれる加速度地震計の配備を1988年頃より開始した。当初この観測点は、全国の気象管署など76箇所であったが、1993年の北海道南西沖地震などをきっかけとして、主として津波警報を迅速化するために、観測点を268箇所に増やす計画を進めていた。さらに、阪神・淡路大震災をきっかけとして、計測震度の見直しを行うとともに、被害の甚大な地域を見逃さないためにはより高密度

な観測が必要ということで、95年度中に計測震度観測点を574箇所にまで拡大した(図-6)。このうち、150箇所の津波地震観測点からは、速度および加速度の波形もリアルタイムに収集可能で、地震発生から3分程度で津波予報を出すことができる。阪神・淡路大震災の直後、神戸海洋気象台からの通信が一時途絶えた経験を生かして、通信手段もNTT回線を2ルート化するとともに、気象官署と都市部では衛星回線も利用できるようにした。また、国土庁と協力して、全国1kmメッシュ単位での震度の面的分布推定に関して検討を進めている。

さらに、気象庁は、地震波の主要動が到達する前に、各地の地震動に関する予測情報の伝達のための「地震警報システム」の設計に関する研究開発を計画している。交通機関やプラントへ情報伝達することにより、適切な制御が可能となり、地震災害の軽減に貢献できよう。このようなユレダス的な即時情報提供について、技術的可能性および情報内容や利用形態について、調査研究が行われている。このように気象庁は、地震・津波に関する情報を収集・提供する機関として、その機能向上に努めている。

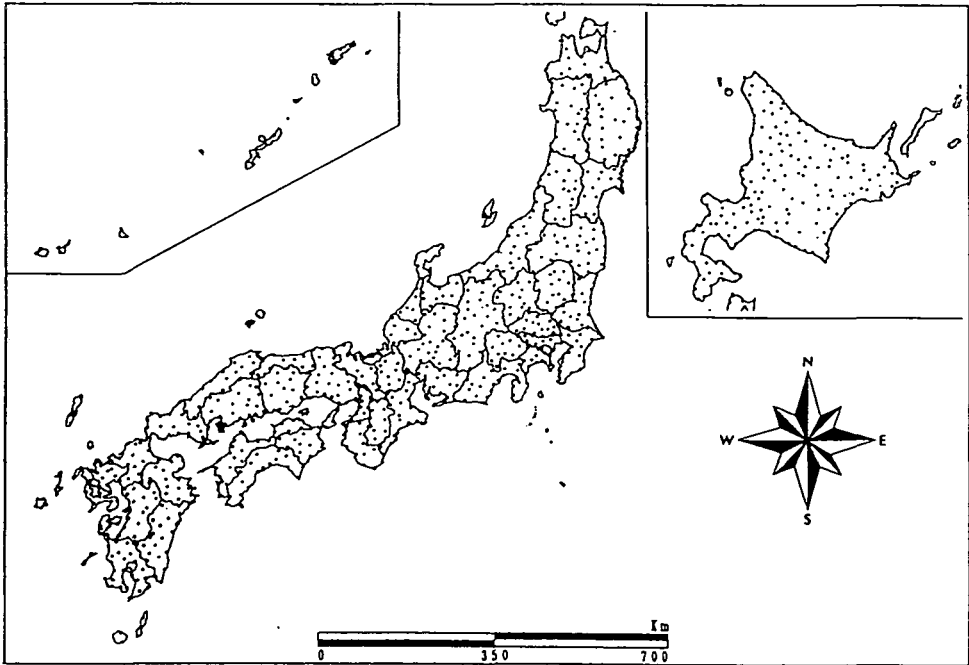


図-7 科学技術庁の強震ネットワーク(K-NET)の地震計設置点(1,000箇所)

(2) 科学技術庁の全国強震ネットワーク K-NET²²⁾²³⁾

科学技術庁の防災科学技術研究所は、主として研究のための強震記録の収集・公開を目的として、1,000箇所の観測点からなる全国強震ネットワーク(強震ネット、K-NET)の構築を行い、1996年6月より運用を開始した。観測点は全国をほぼ25kmメッシュでカバーするように配置され(図-7)、2Gまで測定可能な3成分の加速度型強震計が自由地盤上に置かれている。観測地点では、ボーリングや弾性波速度等の地盤調査も行われている。各観測点は、モデムを通して筑波の強震観測センターとNTT回線で結ばれており、震度3以上の地震が発生すると、気象庁が衛星から発信する震源速報に基づいて、自動ダイアルアップにより記録の回収が行われる。記録収集装置に回収された強震記録は、編集後、最大加速度分布図とともに数時間でインターネット上に公開される。また、各観測点はその位置する地方自治体とも別の通信回線で結ばれ、消防庁の震度計ネットワークに組み込まれて、震度モニターとして利用されている。K-NET地震記録のリアルタイム的な利用は、現在この震度計ネットワークに限られている。

K-NETのホームページには、中規模の地震が発生すると1日に1,000を越えるアクセスが殺到すること

もある。このため、K-NETは急増するインターネット利用者への対応とシステムの信頼性向上を目的として、97年4月にミラーサーバーを仙台と大阪に開設するとともに、仙台のセンターにはバックアップ機能も持たせた。K-NETは運用を開始してまだ1年余りであるが、強震波形を短時間で公開するという画期的なシステムにより、日本のみならず世界の研究者より非常に高い評価を得ている。このようなデータの質と公開性より、K-NETは、我が国が世界に誇り得る地震計ネットワークといえよう。

(3) 消防庁の震度情報ネットワーク

自治省消防庁も阪神・淡路大震災を契機に、全国すべての市町村と東京23区の計3,255自治体に最低1台の計測震度計を整備するという「都道府県震度ネットワーク²¹⁾」構築の補助事業を行っている(図-8)。この事業により、気象庁の震度計またはK-NETの強震計の設置していない約3,000の自治体に震度計が設置される。震度4以上の地震が発生した場合、各市町村からの震度情報は、都道府県を經由して、概ね15分程度でNTTのデジタル回線(ISDN)により消防庁に集められる。消防庁はこれを24時間体制で監視して、広域的な被害情報の把握や初動体制の確立

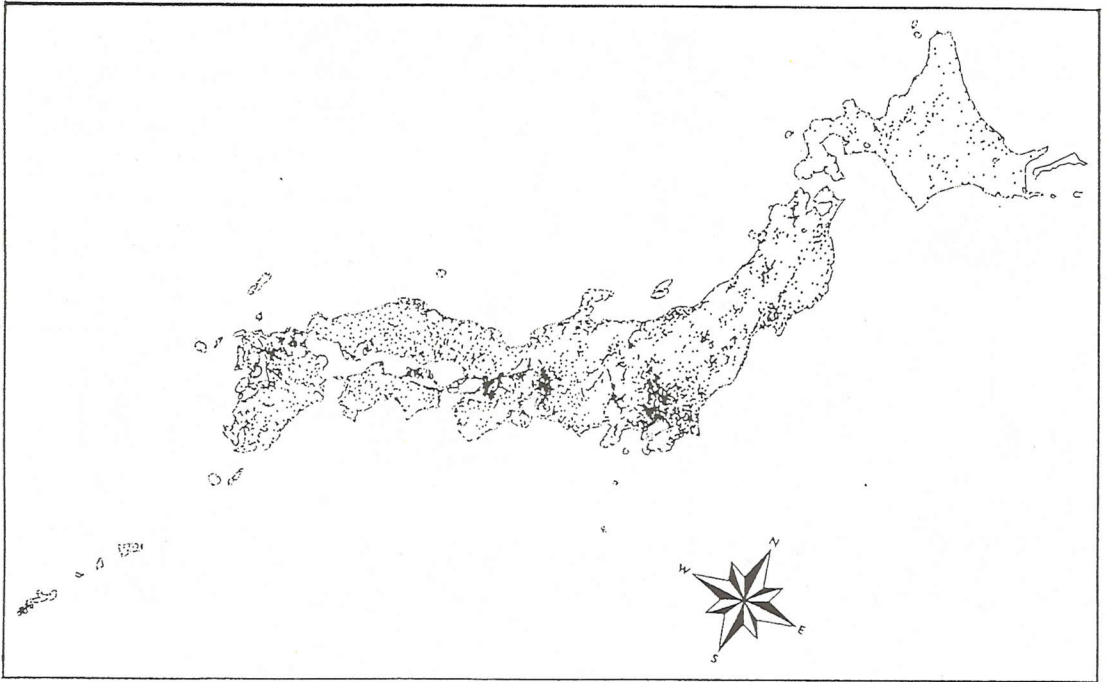


図-8 消防庁による震度情報ネットワーク（全国3,255市町村）

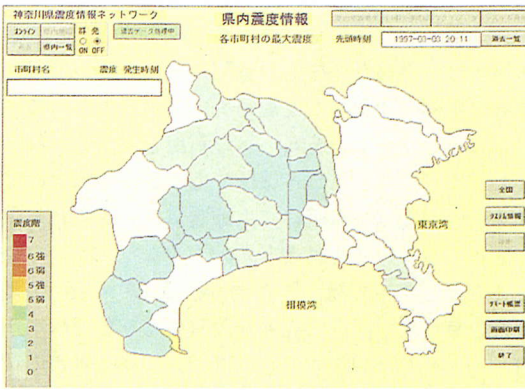


図-9 神奈川県震度情報ネットワーク（36市町村）

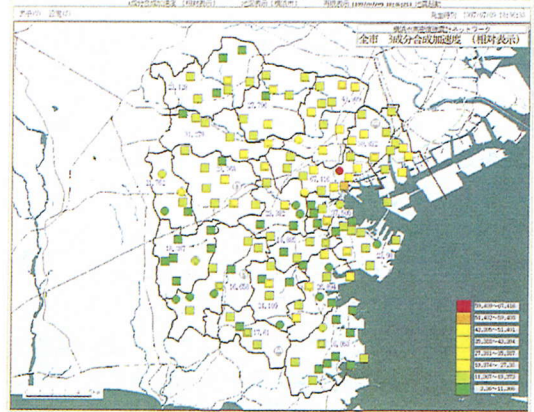


図-10 横浜市高密度強震計ネットワーク

に利用する。また各都道府県の災害担当部署では、これを災害対策の初動情報として用いるため、それぞれ震度情報ネットワークのデータ収集・監視・管理などを行うシステムの構築を進めている。

神奈川県では、県内16箇所に地震計を配備し遠隔監視を行うシステムを独自に94年に構築していたが、97年よりこの震度情報ネットワークへ切り替えを行った(図-9)。

また、消防庁と気象庁の間では、震度計の規格を

気象庁のものに統一するとともに、専用回線による地震情報の交換も行われる予定である。

(4) 自治体の地震計ネットワーク

上記以外にも多数の地震計ネットワーク構想が、幾つかの省庁、自治体、ライフライン事業者などにおいて進められている。それらの全ての動向を把握するのは現状では困難であるので、ここでは筆者の知り得た範囲で紹介する。

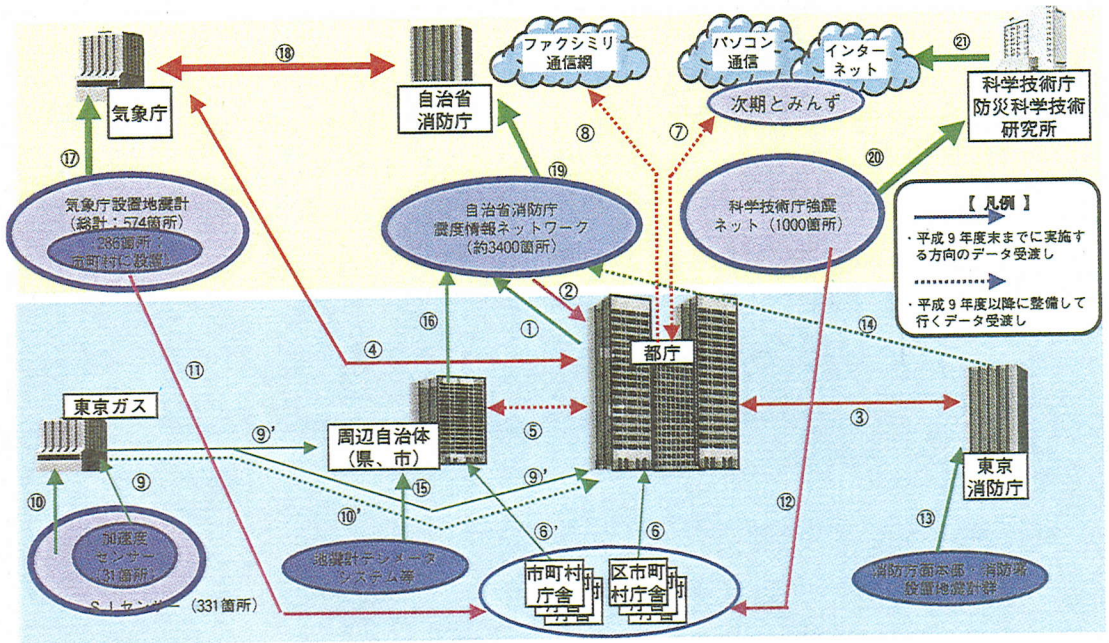


図-11 東京都の地震計ネットワークと他の地震計ネットワークとの接続案²⁶⁾

横浜市は、市内に150観測点と3箇所のセンターからなる高密度強震計ネットワーク(図-10)の構築を行った^{24),25)}。これらの地震計は市内をほぼ2km間隔でカバーし、地震発生後3分以内に、最大加速度などの情報をNTTのISDN専用回線で収集し、初動対応の判断のための材料とするとともに、関係機関へ計測データを素早く伝達する。このうち、95年度には18台の地震計を設置し、災害対策室に中央センターを開設した。残りの地震計の設置と2箇所のセンター開設を97年3月に終え、高密度強震計ネットワークが完成した。現在、このネットワークからの地震動情報を用いた早期被害推定システムの構築を行っている。

東京都総務局災害対策部も東京消防庁と分担で、95年度より3年度計画で、都内に約100台の地震計を配備し、震度情報をリアルタイムに収集する地震計ネットワーク²⁶⁾の構築を行っている。地震計は市区町村庁舎や消防署などに設置され、防災無線、NTT回線、消防多重無線、消防電話などを通じて、震度などの情報が東京都防災センターと東京消防庁に集められる。また、これらの地震情報を、国や周辺自治体、東京ガスなど他の防災機関の持つ地震情報と相互に交換することも計画している(図-11)。

自治体としては、このほかに名古屋市や京都市な

ども独自の地震計を設置して、早期地震対応に利用しようと計画を進めている。名古屋市では、市が16台の地震計を設置して、愛知県(科学技術庁)、名古屋大学、東邦ガスなどの機関のものと合わせて、計40台余りの地震計で地震動を監視するとともに、「地震被害予測システム」への利用を考えている。このプロジェクトは、各機関で地震計の仕様が異なるという問題点を克服して、地震情報を共有化しようという点で評価されよう。

また、京都市では、消防局が設置した4箇所の地震計と京都大学防災研究所が設置した10箇所の地震計を合わせた計14箇所の地震計で、97年より市内の地震動(最大加速度)を監視している。この地震情報に加えて、市の外周の山上に3箇所設置する高所監視カメラからの映像も利用する、GISベースの「震災対策支援システム」を現在構築中である。

(5) 道路管理者関係の地震計ネットワーク

このほか、建設省や日本道路公団などの道路管理者、さらに電力会社やガス会社などのライフライン事業者も、独自の地震計ネットワークを配備する計画を進めている。

建設省では、関東地方建設局管内の1都8県を対象に、国道などの管理施設に沿って20~40km間隔で

配置した約100箇所の地震計をマイクロ回線でネットワーク化する事業を1995年度より進めている²⁷⁾。このネットワークで収集される最大加速度とSI値に基づいて、橋梁等の構造物位置での地震動強度を推定し、概ね15分以内に主要な道路施設等の被害を概略推定する「リアルタイム震害予測システム(SATURN)」の開発が現在行われている。

北海道開発局では、釧路沖地震、北海道南西沖地震、北海道東方沖地震などの教訓に基づいて、被害把握と情報連絡網の保持を主眼とする、地震情報伝達システム(WISE)の開発を進めている²⁸⁾。橋梁や河川堤体、ダム管理事務所等に設置している既設強震計や、新たに開発・設置した速度型デジタル強震計をオンラインで結び、地震発生とともに、最大加速度、最大速度、SI値、震度などの地震情報を管理事務所等の通信運用端末に送信する。地震情報は、さらに建設部や開発土木研究所に送信され、強震情報の表示や道路構造物や河川堤体等の被害推定に利用される。1996年度末の時点で、地震計121箇所と通信端末101箇所が設置されており、実際の運用開始を目指して研究開発が進められている。

日本道路公団では、従来、高速道路約40km区間ごとに最大加速度を測定する地震計を設置し、その観測結果を交通管理や点検に利用してきた。阪神・淡路大震災をきっかけとした地震防災強化対策の一環として、きめ細かな交通管理と震後点検の効率化を目指して、沿線約20kmピッチでの地震計の整備を進めている。既設の123箇所の地震計に加えて、96年度に101箇所、97年度に87箇所の地震計を新設する計画である。新設の地震計は、最大加速度に加えて、最大速度、SI値、計測震度がオンラインで収集されるとともに、ICカードに加速度波形も記憶される。この拡充される地震計ネットワークからの情報を交通規制に連動させるため、適切な地震動強度指標の評価と地震動レベルに関する研究が進められている²⁹⁾。

このように、最近、道路関係でも新しい地震計ネットワーク構築の動きが活発である。しかし、このような動きが道路管理者ごとに別個に進められているので、今後、これらのネットワーク間の情報交換や相互利用が課題になるとと思われる。

4. 最近の日本の早期被害推定システム

(1) 国土庁の防災情報システム

阪神・淡路大震災後、国レベルでも幾つかの早期被害推定システム開発の動きが見られる。国土庁は95年度より、GISに基づく汎用の地震防災システム(DIS)の開発を行っている^{30),31)}。このシステムは、地震発災後の「応急対策」「復旧・復興」と発災に先立つ「事前の備え」の3段階に着目して、それぞれの段階に対応したサブシステムを整備し、これらを活用して迅速かつ的確な意思決定をトータルに支援することを目的としている。DISは、各サブシステムを運用するためのデータベースを持ちこれを管理する防災情報管理システムと、実際の分析を行うサブシステムから成る。事後対策の関連システムとしては、政府の初動対応を支援する「地震被害早期評価システム」、輸送対策、救助・医療、避難、ボランティア、ライフライン等の応急対策を支援する「応急対策サポートシステム」、および復旧・復興に関する様々のレベルの計画策定と計画の進行状況を管理する「復旧・復興対策サポートシステム」がある。また、事前対策関連のシステムとして、想定地震に対する被害を推計し事前防災対策に役立てる「地震被害想定システム」および、防災施設の整備候補地の選定等を支援する「地震防災施設等整備計画サポートシステム」を考えている。

このシステムの一部の「地震被害早期評価システム(EES)」は、日本全国を1kmメッシュで覆って地盤と建物のデータを準備し、既往の経験式に従って、各メッシュ単位で震度分布、建物・人的被害、および沿岸における津波高と浸水域を予測するものである。このシステムの地震情報としては、気象庁が95年度末までに全国で574台設置した計測震度計からのものを利用し、震度-速度の変換式と地盤による速度増幅率を用いて、基盤速度コンター法により工学的基盤における速度分布を求め、これに増幅率を乗じて、地表における速度および換算震度分布を推定する。図-12は、兵庫県南部地震による震度分布を気象庁の観測震度から、このシステムにより推定したものである。このシステムは、96年4月より実際に国土庁で稼働しており、発災後約30分で地震被害の規模を自動的に集計し、国の応急対応の迅速化に役立つことが期待されている。このほか、デジタル地図データ(1/25,000ラスタ地形図、1/2,500ベク

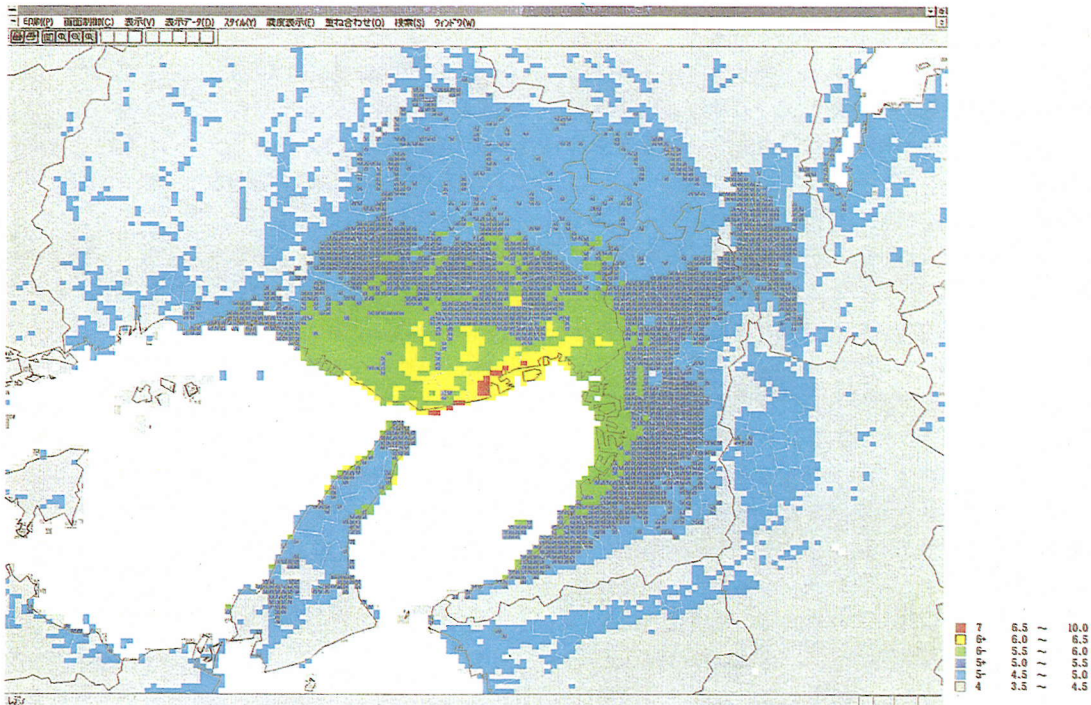


図-12 国土庁の地震被害早期評価システム(EES)で推定した兵庫県南部地震の震度分布

ター詳細地図)の整備やその他のサブシステムの開発も順次進められている。

DISの今後の課題としては、関係省庁や自治体の防災情報システムとのネットワーク化と情報共有化の推進、国レベルでの防災関連データ整備などが挙げられる。

また国土庁は、南関東地域の直下地震を対象として、市町村が被害想定を行うためのGISに基づくツールの開発も行っている。このシステムは、もとは市町村向けに簡易被害想定実施マニュアルを作成する予定でスタートしたものであったが、CD-ROMなどの電子メディアやインターネットで公表することも考慮して開発が進められた。GISデータの整備自体は、市町村の仕事と位置付けられているが、鎌倉市を例としてプロトタイプが作られた。このシステムの目的は、被害想定や訓練、それに緊急時の対応などへの利用を考えているため、街区・幹線道路・重要施設なども表示できるマイクロなGISが取り入れられている。

「震被害想定システム」を開発し、全国の自治体や消防機関へ提供を行っている。このシステムは、自治体などが任意に設定した地震諸元や発生時間に対して、瞬時に被害想定を行えるようにしたもので、全国約39万の1km×1kmメッシュごとに、国土数値情報(海岸線、標高、地形分類・表層地質等、河川の流路位置、行政界)および国勢調査地域メッシュデータ(人口、世帯数、住宅の建て方別住宅に住む一般世帯)の一部が収められている。これらの地理情報と震源条件に基づいて、最大速度(図-13)、家屋被害数、出火発生数、死者発生数をメッシュごとに計算する。地震動や被害推定には、いずれも簡易な経験式が用いられている。このシステムは、CD-ROMにデータと計算・表示プログラムが収められており、防災関係者が誰でも簡単に使えるという利点がある。しかし、被害集計が市町村単位ではなく指定した四角形の領域であること、計算式等をユーザー指定できないことなどの難点もある。

(3) 自治体の防災情報システム

阪神・淡路大震災後、全国多数の自治体が、防災情報システムの一環として、早期地震被害推定シ

(2) 消防庁の簡易型地震被害想定システム³²⁾

自治省消防庁消防研究所は、1996年に「簡易型地

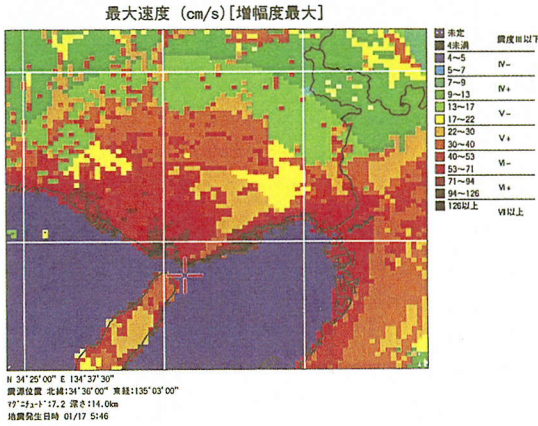


図-13 消防庁の簡易型地震被害想定システムによる最大速度分布の出力例(兵庫県南部地震)

テムを導入する計画を進めている。

兵庫県は、通商産業省の「災害時統合行政支援システム開発モデル事業」として、「フェニックス防災システム」と名付けた災害対応総合情報ネットワークシステムを最近構築した³³⁾。このシステムは、災害時の迅速で的確な緊急対応に役立てるとともに、平常時から住民との情報交換や市町との連携にも活用しようというものである。システムは、震度情報ネットワークシステム(91市町)、観測情報集配信システム、被害予測システム、地図情報システム、災害情報システム、画像情報システム、防災コミュニケーション支援システム、バックアップセンタの各サブシステムから成り、デジタル専用線やISDNで県内の防災機関と結ばれている。このうち被害予測システムについては、現在開発中である。

大阪府も、最近、情報連絡体制の整備や初動体制の確立などの防災対策の強化のために、総合的な防災情報システムを開発している³⁴⁾。O-DISと名付けられたこのシステムは、気象等観測情報収集・予測、被害映像収集、被害情報収集、被害等情報提供、意思決定支援、災害情報管理のサブシステムから成る。震度などの気象観測情報や被害映像を迅速に収集・処理し、地図情報等との統合を行い、的確で迅速な応急対策活動を支援することを目指している。

横浜市は、高密度強震計ネットワークと連動するリアルタイム地震被害推定システムを開発中である。このシステムでは、市内全域を50m×50mという細かいメッシュで分割し、地盤や構造物の地域特性を詳細に評価しようとしており、96年度には鶴見地区

を例にプロトタイプを構築した。被害推定の精度が一般にあまり高くないという認識から、このシステムでは、推定項目を震動分布、液状化、木造建物被害にとりあえず限定して、98年度までに全市を対象としたシステムとして完成することを目指している。横浜市はまた、この地震被害推定情報や地震計情報も一部として取込んだ、総合的な「横浜市防災情報システム」を96年より運用している。このシステムでは、気象関係の観測情報、注意報・警報情報、実被害情報などを柱として、18区役所や関係局を結んで、災害対策支援を行うことを目指している。

このほか、前述したように、京都市、名古屋市などが、独自の地震計ネットワークと連動した早期地震被害推定システムと、それを含む防災情報システムの開発を行っている。同様の動きは、他の政令指定都市や県でも進められているものと思われる。

5. 米国におけるリアルタイム地震防災の現況

(1) 地震計ネットワークと地震情報システム

米国では、ロスアンゼルス近郊を襲ったノースリッジ地震において、カリフォルニア工科大学(Cal Tech)と米国地質調査所(USGS)が共同開発した、CUBE³⁵⁾という早期震源推定システムが注目を集めた。CUBEは、南カリフォルニアの約250の地震観測点からの地震動をテレメーター、電話回線、無線などでカリフォルニア工科大学地震研究所にある本部に集め、即時に震源位置とマグニチュードの計算を行う。この震源情報(地震発生時間、震央位置、震源深さ、マグニチュード)は、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、放送型のポケットベル(pager)により2~3分で配信される。このポケットベルをパソコンなどに接続すると、震央が地図上に表示される。ノースリッジ地震の本震の際、CUBEは必ずしも予定通りには動作しなかったが、余震の情報は適切に知らせその有効性が認識された。日本でもCUBEは非常に有名になったが、やや過大評価されている点も見受けられる。日本では気象庁が、地震発生後すぐにテレビ・ラジオなどを通じて、震源位置やマグニチュードのみならず各地の震度まで知らせる。このような仕組みのない米国におけるCUBEの働きは、日本では気象庁が業務として行っているものに近いともいえる。

現在、CUBEは初期の実験的システムとしての目

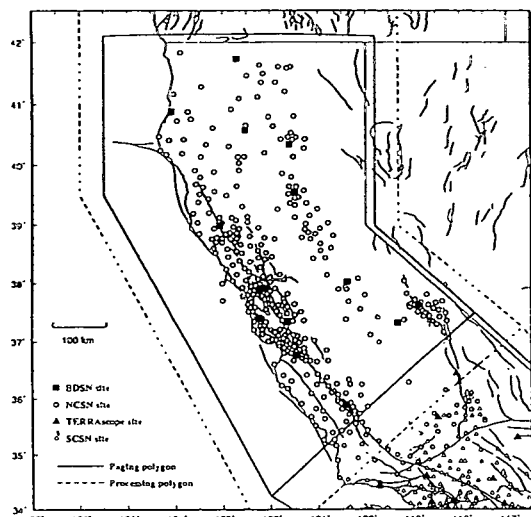


図-14 REDIシステムの地震観測点³⁰⁾

的を果たし、意義が認められるようになったため、新たなシステムへの発展を計画している⁹⁾。このシステムでは、カリフォルニア工科大学とUSGSに加えて、カリフォルニア州が加わった、Tri-Netという地震観測網を基礎とすることになっている。この計画では、約250箇所全部の地震計をデジタル強震計とし、テレメーターに伝送容量の大きいフレームリレーを用いて波形を常時連続的にモニタリングするなど、技術革新を数多く取入れることになっている。この新しいシステムの一部は既に実験的に稼働している。

一方、サンフランシスコを中心とするカリフォルニア州中北部では、REDI³⁰⁾という早期震源推定システムの開発が、カリフォルニア大学バークレー校を中心として、カリフォルニア工科大学とUSGSの協力により進められている。REDIにおいては、USGSが80年代に配備した（高倍率の短周期鉛直地震計350台と強震計20台から成る）北カリフォルニア地震計ネットワーク(NCSN)と、バークレー校が近年設置した（13地点における3成分広帯域地震計と加速度強震計、および5地点における地中加速度強震計から成る）バークレーデジタル地震計ネットワーク(BDSN)からの情報を用いて(図-14)、地震発生直後に震源位置とマグニチュードを推定するほか、断層破壊特性と地震動地域分布の推定、および早期被害推定システムの開発も目的としている。

このように、米国では日本では気象庁が行ってい

るような震源決定の業務を、各地の大学や研究機関が独自に行っており、USGSが全米の震源決定を統括している訳ではない。しかし、CUBE以降、同様のプロジェクトが幾つか持ち上がったこともきっかけとなり、USGSと30の地域地震観測機関が集まって、CNSS (Council of the National Seismic System)という全国地震機構が作られた。CNSSは各機関が決定した震源情報を、インターネットなどを用いて迅速に交換する連合体を目指している。

このように米国では、国土の広さと国状の違いにより、強震観測の全国ネットワーク化は進んでいないが、南カリフォルニアのCUBE以来、地域ごとにリアルタイム地震情報システムが作られつつある。

(2) 早期地震被害推定システム

カリフォルニア州政府の緊急対策局(OES)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て、南カリフォルニアを対象にEPEDAT¹¹⁾という被害推定システムの開発を進め、96年より稼働を開始した。これは、CUBEで推定された震源位置とマグニチュードから、破壊の生じた断層面を特定し、地震動の強さの分布を推定する。この際、事前に地盤特性などを数値地図データとして準備しておき、表層地盤による地震動の増幅なども考慮する。また、建物、ガス、水道、高速道路などのデータもGIS上に準備しておき(図-15)、即座に被害量の推定を行う。EPEDATの特色は、包括的な被害推定を地震発生後数分から数時間で済ませようという点にある。

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、被害額までの推計を迅速に行い、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。ノースリッジ地震の際も、地震翌日には大まかな被害推計総額が、州政府の委託を受けたEQE社によって発表されている。また地震直後から、壊れた建物などの実被害データが次々とGISに入力・表示され、米国では既にGISが都市防災の重要な実務ツールとなっているとの印象を受けた。鉄道や都市ガスの早期警報システムでは先鞭をつけた日本ではあるが、このようなトータルな被害推定システムは、現在各機関で計画されているが、川崎市の震災対策支援システム以外は未だ実用化していない。広域応援等の緊急対応を考えると、地方や

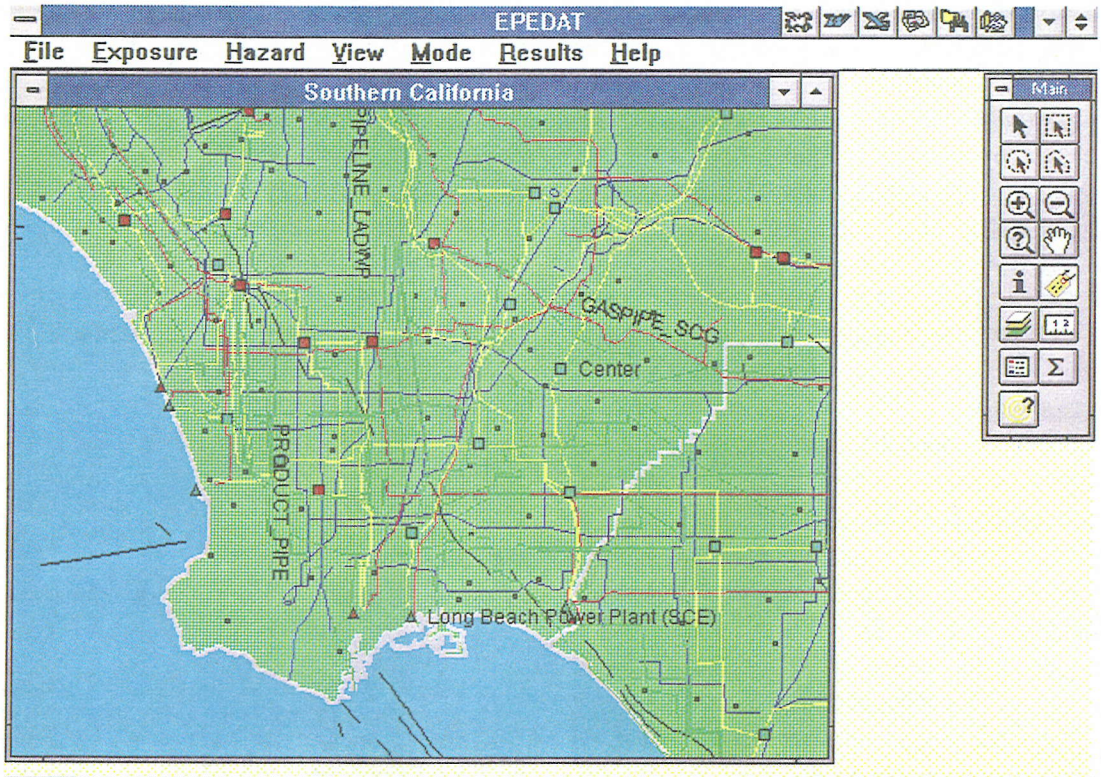


図-15 ロスアンジェルス主要ライフラインと重要施設を表わすEPEDATの画面

国のレベルにおける、このような包括的な早期被害推定システムの開発が早急の課題といえよう。

また、米国では連邦危機管理庁(FEMA)が、全米各地を対象とした地震被害推定システム(HAZUS)の開発を行っている³⁷⁾。1992年に開始したこのプロジェクトは、1)地震被害推定手法の評価³⁸⁾、2)暫定的な地震被害推定手法の開発、3)ワークショップ開催と学会発表、4)試験的研究、5)最終的な手法の提示、の5項目から成っている。NIBS(国立建築研究所)が元請となり、RMS社が手法の開発と検証を、Dames & Moore社がオレゴン州ポートランド市を対象とした試験研究を、EQE社がマサチューセッツ州ボストン市を対象とした試験研究を分担した。HAZUSは基本的な開発を終え、その公開のために、全米各州の防災担当者を集めて訓練セミナーを行っている。しかし、被害推定手法は提示されているものの、GISデータの整備はユーザーサイドの仕事であるため、実際に防災・危機管理業務に使われるのは先のことになると思われる。

6. まとめと今後の課題

リアルタイム地震防災システムを実用化したのは、日本が世界で最初であろう。早期地震検知システムは、地震発生と同時にそれを検知して緊急対応を取るためのもので、横揺れが到達する前に列車を停止させようというJRのユレダスがパイオニアといえよう。また、早期地震被害推定システムは、地震発生直後の情報空白期に初動対応を早めるための情報を与えるもので、東京ガスや川崎市が最初に実用化した。米国においても、時期をほぼ同じくして、地震情報を知らせるCUBEや被害推定を行うEPEDATなどのシステムが開発されている。

米国においてはノースリッジ地震が、また日本では阪神・淡路大震災が大きな契機となって、このような早期の地震防災システムの役割が広く理解されるようになった。とくに、地震防災対策の見直しが、国や自治体それにライフライン事業者などの大きな課題となっている日本では、その1つの柱として、地震計ネットワークの大幅な増設と早期被害推定シ

システムの導入が進められている。

しかしこれらは、決して万能ではなく残された課題も多い。まず地震計ネットワークについては、いろいろな機関が独自にネットワークを作っているため、それらの情報を広く共有化する仕組の構築が急務である。これらの地震計は時刻歴波形を観測するか、計測震度、SI値、最大加速度などの強度指標のみを観測するかなど、機能的に異なっており、データを共有化の際の障害となっている。また、我が国では阪神・淡路大震災後、急激に地震計の台数が増加したが、今後はそれらの維持管理や更新が大きな課題となつてこよう。

地震情報（震源推定）システムについては、どの程度の早さで情報が必要かを明確にする必要があり、鉄道や高速道路、危険物施設など、地震波到着以前に対応をとれば有効なものと、地震波到着後、数分で震源情報が分かればいいもので、精度や情報収集法などが異なつてこよう。また、推定した震源情報をどのようにユーザーや一般に伝達するかもいろいろ異なる。推定する震源情報も、マグニチュードと（点）震源位置のみというのが現状であるが、近地地震について地震動分布を精度よく推定するには、断層面の広がりや破壊の進展方向まで早期に推定する必要がある。

早期被害推定システムについては、まずデータベースの整備が重要な課題で、例えば精度よい建物被害を予測するには、詳細な建物構造や建築年のデータが必要となってくる。また、被害推定結果は被害推定式の精度に依存するので、最新のデータと解析法を用いた被害推定式の構築が大きな課題である。さらに、地震被害想定調査の延長として広く用いられてきた500m四方や1km四方メッシュを用いた地図表現は、地域特性を詳細に表現するには不向きであり、町丁目やより細かいメッシュによる表現などの採用が今後必要となろう。先駆的な被害推定システムにおいても、これらの課題に対処するために、システムの見直しを行おうという動きが見られる。

システムとしては、地震前、地震直後、復旧・復興期と一貫して使えるものが有効であり³⁹⁾、被害推定結果は確認情報が得られた段階で更新できるようにすべきである。このような観点からは、より高度なGISの利用が必要となろう。被害情報の収集手段としては、高所カメラやヘリコプターからの映像、携帯情報端末⁴⁰⁾ やインターネットの利用⁴¹⁾、さらに

最近は高精度衛星画像やGPSの利用なども実用化が近づいており、これらを取入れた総合的な防災情報システムへと発展するのが、今後の方向性と思われる。また、これまでは物理的な被害予測に重点が置かれてきたが、今後は、時々刻々の状況に応じて、交通量、流量、供給圧力などの機能低下と回復過程を評価できるような、機能損失予測ならびに復旧支援システムを開発していく時期にきていると考えられる。さらに、それぞれの防災機関同士で、お互いの地震（震度）情報や被害推定および確認被害情報などを共有化することが極めて重要である。リアルタイム地震防災システムが真に社会に役に立つかどうかは、このような今後の取組みにかかっているといえよう。

参考文献

- 1) 野田茂, 目黒公郎: リアルタイム地震工学を目指して, 第22回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp. 95-112, 1994.
- 2) 土岐憲三: 大都市における地震災害のリアルタイム制御 - リアルタイム地震防災をめざして -, 自然災害と地域社会の防災, 第9回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編, クバプロ, pp. 90-100, 1995.
- 3) 中村豊: 研究展望: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No.531, pp. 331-340, 1996.
- 4) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と動向, 建築防災, (財)日本建築防災協会, No. 222, pp.8-14, 1996.
- 5) 金森博雄: 地震学の現状と防災への応用, 科学, Vol. 66, No.9, pp. 605-616, 1996.
- 6) 中村豊, 上野真: 地震早期検知警報システムUrEDASの開発, 第7回日本地震地震工学シンポジウム, pp. 2095-2100, 1986.
- 7) 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, pp. 331-340, 1995.
- 8) 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.
- 9) 持田忠男: 川崎市の震災対策支援システム, 火災, Vol. 44, No. 6, pp. 44-49, 1994.
- 10) 大津康祐: 東京消防庁の地震被害予測システム, リアルタイム地震防災 - 現状とその可能性 - プログラム & 予稿集, 科学技術庁防災科学技術研究所・横浜市主催, pp. 13-16, 1997.
- 11) 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, pp. 55-63, 1994.

- 12) 太田裕：強震動の面的・即時的情報の地震防災における役割と期待，第22回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp. 63-72, 1994.
- 13) 日本建築学会地盤震動小委員会主催：第22回地盤震動シンポジウム 地盤震動研究の新たな展開-面的・即時的評価への取組み，1994.
- 14) 文部省科学研究費補助金重点領域研究「都市直下地震」総括班：第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1996.
- 15) 科学技術庁防災科学技術研究所・横浜市主催：リアルタイム地震防災-現状とその可能性-プログラム&予稿集，1997.
- 16) Katayama, T.: INCEDE-NCEER Joint Research Project on Post-Earthquake Reconstruction, INCEDE Newsletter, Vol. 4, No. 3, pp. 1-2, 1995.
- 17) 山崎文雄：「社会基盤システムの実時間制御技術」研究計画，第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.31-38, 1996.
- 18) 富田健司，山下彰彦，中村豊：“HERAS(ヘラス)”の災害発生予測手法，第24回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp. 1165-1168, 1997.
- 19) 高田至郎：ライフラインと危機管理技法，計測と制御，Vol. 36, pp. 3-7, 1997.
- 20) 東京消防庁警防部警防課：阪神・淡路大震災以降における東京消防庁の震災消防活動対策について，近代消防，Vol. 35, No. 3, pp. 44-50, 1997.
- 21) 気象庁編：平成9年版 今日気象業務，1997.
- 22) 大谷圭一：全国強震ネットワークの構築，地震工学振興会ニュース，震災予防協会，No. 147, pp. 27-29, 1996.
- 23) 木下繁夫：K-NET -a year after-，地震工学振興会ニュース，震災予防協会，No. 155, pp. 39-45, 1997.
- 24) 菊地正幸：大都市における高密度強震計ネットワーク，科学，Vol. 66, No.12, pp. 841-844, 1996.
- 25) 阿部進，岸本健二，斎藤慎太郎：地震計ネットワークと連動した地理情報(GIS)を利用した地震対策，高圧ガス，Vol. 34, No. 6, pp. 32-41, 1997.
- 26) 東京都災害情報システム検討会：東京都災害情報システム検討会平成7年度報告書，1996.
- 27) 濱田禎，杉田秀樹，金子正洋：地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp. 193-196, 1997.
- 28) 小林将，中井健司，島田武，佐藤昌志：北海道開発局の地震情報伝達システムの被害推定に関する現状と課題，第24回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp. 1281-1284, 1997.
- 29) 大西淳一，山崎文雄，田山聡，福田直三：高速道路における地震被害と地震動強さの関係，第24回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp. 1289-1292, 1997.
- 30) 国土庁編：平成8年版 防災白書，1996.
- 31) 国土庁防災局震災対策課：地震防災情報システム(DIS)の整備について，人と国土，Vol. 22, No. 3, pp. 47-49, 1996.
- 32) 自治省消防庁消防研究所：簡易型地震被害想定システムユーザズガイド，1996.
- 33) 兵庫県知事公室消防防災課：パンフレット「フェニックス防災システム-兵庫県災害対応総合情報ネットワークシステム-」，1996.
- 34) 大阪府消防防災安全課：パンフレット「大阪府防災情報システム」，1997.
- 35) Kanamori, H., Hauksson, E., and Heaton, K.: TERRAScope and CUBE Project at Caltech, EOS, Vol. 72, No. 50, 1991.
- 36) Lind, S. G., Neuhauser, D. S., Dreger, D. S., Pasyanos, M. E., Uhrhammer, R. A., Romanowicz, B.: Real-time Seismology at UC Berkley: The Rapid Earthquake Data Integration Project, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 4, pp. 936-945, 1996.
- 37) Schneider, P. and Drury, C.: Earthquake Loss Estimation Methodology Study, National Institute of Building Sciences, 1996.
- 38) Federal Emergency Management Agency: Assessment of the State-of-the-Art Earthquake Loss Estimation Methodologies, FEMA-249, 1994.
- 39) 亀田弘行：防災情報システムのあり方，都市震災と防災システム，第10回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編，クバプロ，pp. 77-88, 1996.
- 40) 碓井照子，橋本潤治：電子地図とGPS搭載の携帯型パソコンGISの開発-地域現場からの災害情報取得システムの応用モデル-，地理情報システム学会論文集，No. 5, pp. 39-42, 1996.
- 41) 石田栄介，福和伸夫：オブジェクト指向による都市地震防災情報統合GISの構築，第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.233-236, 1996.

(1997.8.25受付)

REVIEW ON THE DEVELOPMENTS OF EARTHQUAKE MONITORING AND EARLY DAMAGE ASSESSMENT SYSTEMS IN JAPAN

Fumio YAMAZAKI

This paper highlights recent developments of earthquake monitoring systems and early damage assessment systems in Japan. UrEDAS of the Japan Railway group and SIGNAL of Tokyo Gas Company are the pioneers of such systems. A few other early damage assessment systems were also developed by local governments. After the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, installation of seismometer networks and development of early damage assessment systems boomed. Although some networks and systems are still under construction, this paper provides an overview of recent vintage and future directions of real-time earthquake hazard assessment are discussed. Recent developments in the United States were also reviewed.