

# リアルタイム地震防災のための地震動モニタリング

山崎文雄

正会員 工博 東京大学 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

兵庫県南部地震以後、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。本文では、このようなリアルタイム地震防災の動きのなかで、地震動モニタリングに焦点を当て、現行のさまざまなシステムの紹介し、問題点や今後の展望などについて述べる。また、米国、メキシコ、台湾など海外における地震計ネットワークと早期警報システムについても紹介する。

**Key Words :** real-time monitoring system, seismometer network, GIS, early warning system

## 1. はじめに

近年、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<sup>1)5)</sup>。日本では、1995年1月17日の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・救援活動が後手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、兵庫県南部地震の1年前の同日に発生したノースリッジ地震において、CUBE<sup>4)</sup>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、古くより提唱されていたが、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<sup>3)</sup>であり、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。

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、1994年より実稼働している、東京ガスのSIGNAL<sup>6)</sup>、川崎市の震災対策支援システム、東京消防庁の地震被害予測システムなどがある。また、ほぼ同時期に米国でも、CUBEで推定された震源情報を用いて、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

EPEDAT<sup>7)</sup>というシステムの開発が進められていた。

ここで、リアルタイム地震防災システムという言葉は、普通、ユレダスやCUBEのような地震情報システムと、SIGNALやEPEDATのような早期被害推定システムを指す場合が多い(図-1)。前者は、地震計ネットワークと地震情報伝達が重要な要素であり、後者は地震動分布の即時推定と地盤・構造物等のデータベース構築が必要である。

兵庫県南部地震以後、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の大きな課題となっており、その1つの柱として、地震計ネットワークの増設と早期被害推定システムの導入がある。本文では、このなかで地震動モニタリングの現状を紹介し今後の課題を述べる。なお、本シンポジウムにおいて他に解説のあるシステムについては、ここでは詳しくは言及しない。

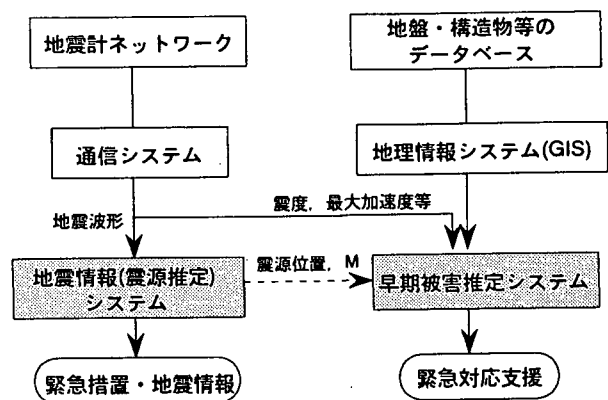


図-1 リアルタイム地震防災システム

## 2. 地震動モニタリングの要件

リアルタイム地震防災システムにおいて、地震動モニタリングは必須の条件である。地震動モニタリングに関しては、地震計ネットワークと通信システムが重要な構成要素である。

まず地震計ネットワークについては、地震計の数と配置、観測項目（波形）と成分、地震計で計測する地震動指標、などが基本となる項目である。

地震計の数と配置は、「震災の帯」やローカルに揺れ易い地域を見逃さないために、対象地域になるべく数多く、均等に配置されるのが望ましい。しかしながら、当然予算上の制約もあるし、地盤や構造物に関する情報の密度とも関係するので、どれくらいが適切かは一概には言えない。地震計の密度によって、地震動の空間分布推定をどうするかが決定する。もし地震計配置が都道府県に1カ所程度なら、距離減衰式などによる推定が必要であるし、もし非常に密なら、観測値で周辺地盤の地震動を代表させれば良い。実際は、この中間程度の密度の場合が多いので、距離減衰式をトレンド成分とするKriging法<sup>8)</sup>などによる空間補間が望ましい場合が多いと考えられる。また、事前に、ボーリングデータや常時微動観測などに基づく地盤ゾーニングを行い、地震動分布の推定のために必要な観測地点を抽出することが重要である。

観測する地震動は、被害推定の観点からは（積分により速度も得られるので）加速度波形が望ましく、水平2成分と鉛直成分の計3成分の計測および記録が望ましい。制御用地震計や震度計などで、波形が保存されないものもあるが、貴重なデータを捨てていることは残念である。

計測する（または即時に計算する）地震動指標としては、最大加速度、最大速度、SI値、計測震度などが主なものである。これらは、リアルタイム地震防災システムにおける利用法を考慮して、適当なものを選択すべきである。地震動指標と構造物被害の関係は、古くからの研究課題である。基本的には、構造物の固有周期が短周期から長周期に移るに従って、被害と相関の高い指標は、最大加速度、最大速度（SI値）、最大変位へと移っていく傾向にある<sup>9)</sup>。この観点からは、応答スペクトルは構造物周期を考慮した量であるので望ましく、観測地点で波形からこれをオンライン計算することも現在では可能である。なお、絶対変位の計測は難しいので、最近は

GPSを用いて永久変位や長周期構造物の振動変位を計測しようという試みも見られる。

次に通信システムについて考えてみよう。通信手段としては、無線、専用回線、公衆回線、通信衛星回線などがある。もちろん、これらはデータ量、通信速度、費用、信頼性などを勘案して選択すできであり、重要度によってはバックアップ回線の準備も必要である。送信する情報としては、震源推定のためには数カ所の波形が必要となる。しかし、地震動分布や構造物被害の推定のためには、波形までは必要としないことが多く、最大加速度、最大速度、SI値、計測震度などの指標値を地震発生直後に収集し、情報量の多い波形は、その後に収集するようなシステムが現実的であろう。また、防災センターに送信するのみならず、放送型ポケットベルなどを用いて、防災担当者などに地震情報を速報する動きは、CUBEに刺激されたこともあり、最近、我が国でも見られる。

## 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、兵庫県南部地震では「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を紹介する。

### (1) 気象庁の強震観測ネットワーク<sup>10)</sup>

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た。さらに、兵庫県南部地震をきっかけとして、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-2)。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。兵庫県南部地震の直後、神戸海洋気象台からの通信が一時跡絶えた経験を生か

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、気象業務支援センターを通して、高速デジタル回線による地震情報など気象データの配信サービスも行っている。したがって、これを利用すれば、現在、誰でも早期被害推定のための震源や震度情報を得ることができる。

気象庁では、この震度データに基づいて、全国1kmメッシュ単位での震度分布をリアルタイムで推定するシステムを国土庁と協力して開発した。

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、「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の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。

## (2) 科学技術庁の全国強震ネットワーク K-NET<sup>11)</sup>

科学技術庁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-3)、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、自動ダイヤ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。

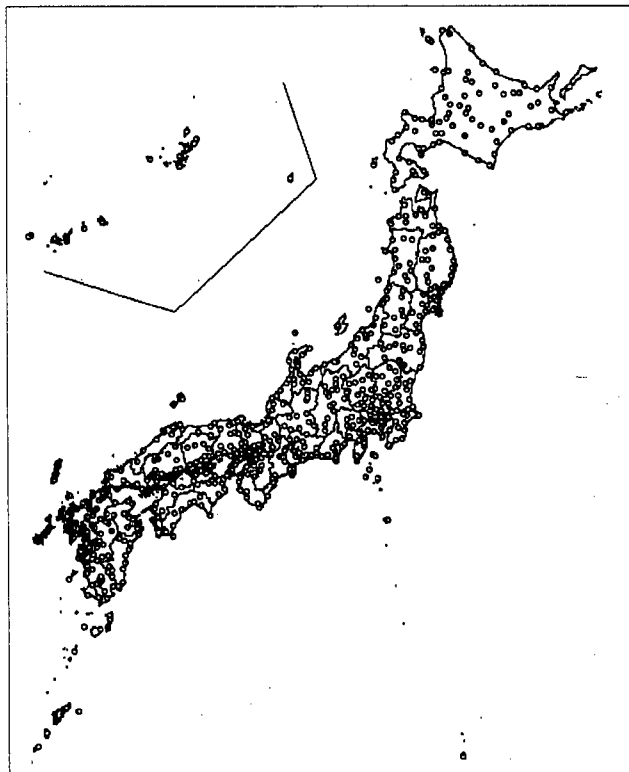


図-2 気象庁の全国574箇所の震度観測地点

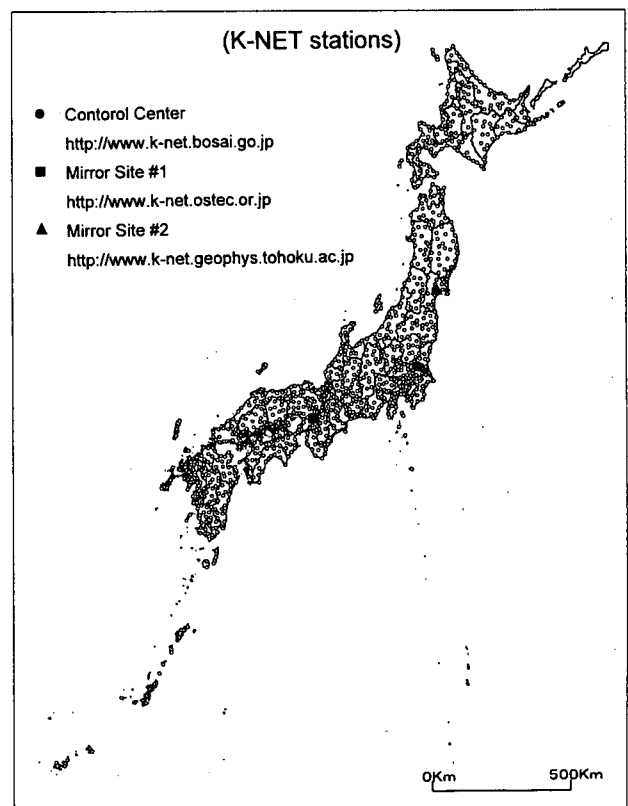


図-3 K-NETの1,000箇所の地震計設置点<sup>11)</sup>

### (3) 消防庁の震度情報ネットワーク

自治省消防庁も兵庫県南部地震を契機に、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<sup>10)</sup>」構築の補助事業を行っている(図-4)。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た。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。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。

### (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。

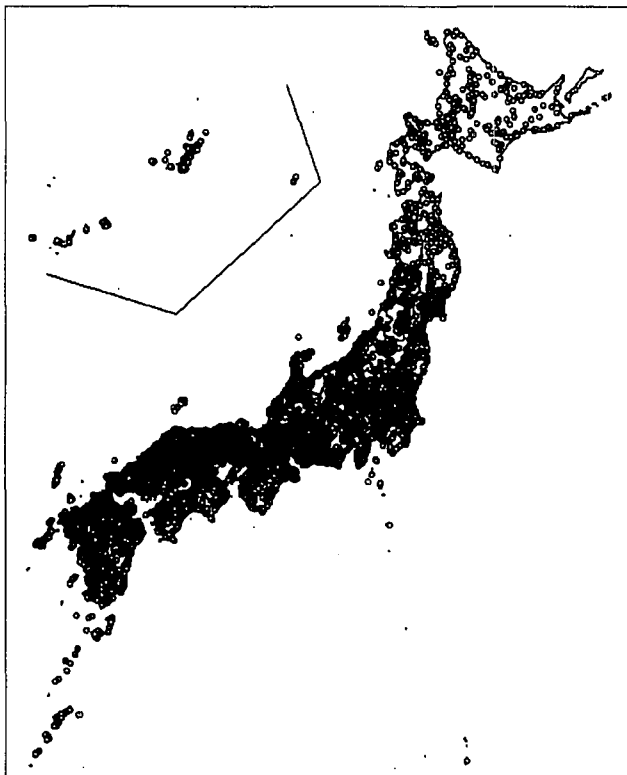


図-4 消防庁による震度情報ネットワーク(全国3,255市町村)+気象庁の震度観測地点

横浜市は、市内に150観測点と3箇所センターからなる高密度強震計ネットワーク(図-5)の構築を行った<sup>12)</sup>。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、計測震度などの情報を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。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。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READY<sup>13)</sup>の構築も進められ、98年4月より稼働している。

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<sup>14)</sup>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(図-6)、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他の防災機関の持つ地震情報と相互交換することも計画している。

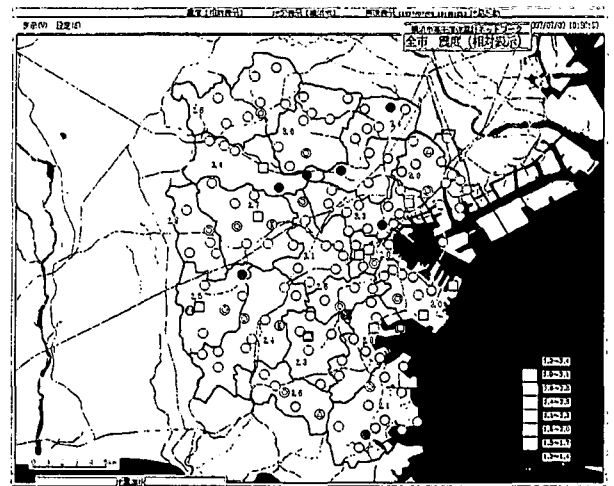


図-5 横浜市の高密度強震計ネットワーク

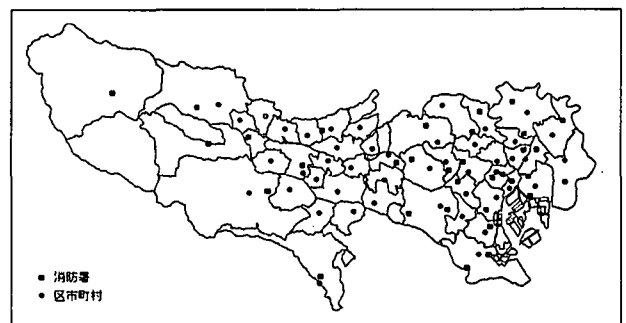


図-6 東京都と東京消防庁の地震計ネットワーク

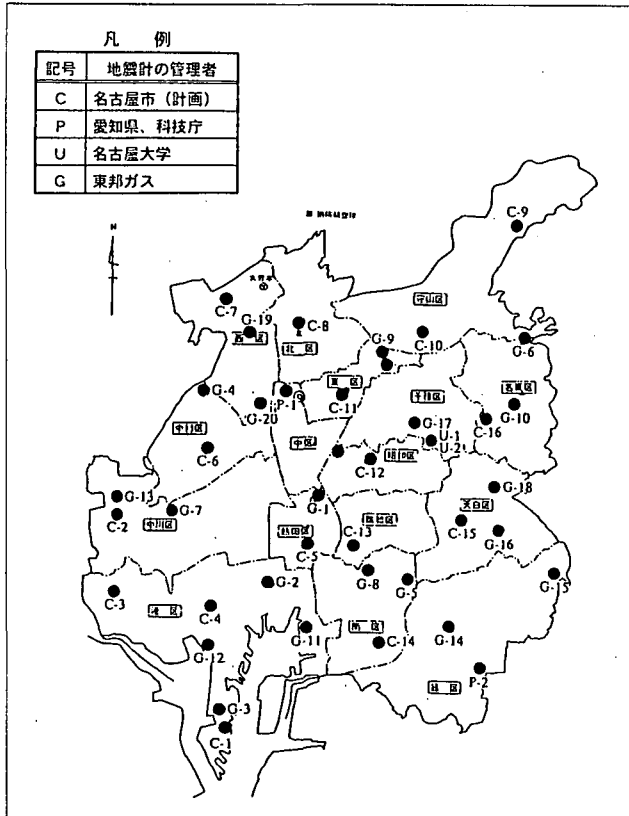


図-7 名古屋市の地震被害予測システムで用いる地震計ネットワーク

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(図-7)、これを利用した「地震被害予測システム」を開発し99年1月より稼働した。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。

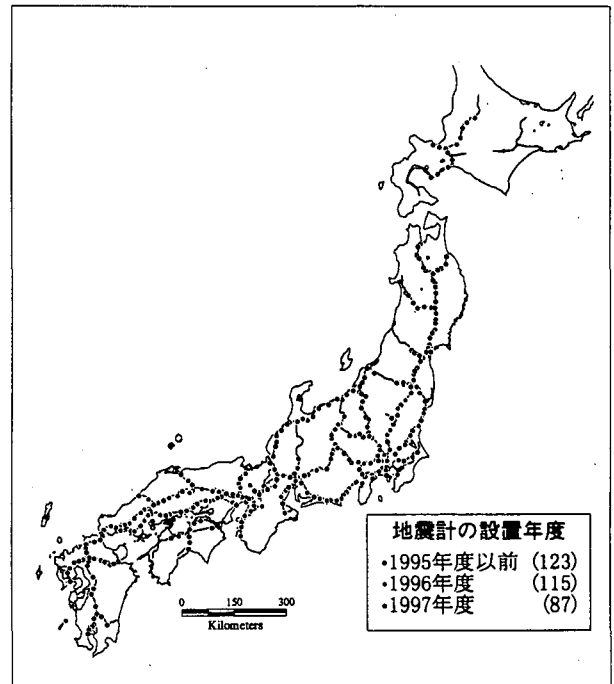


図-8 日本道路公団の高速道路網と制御用地震計<sup>8)</sup>

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<sup>15)</sup>。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)」の開発が行われている。

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。兵庫県南部地震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した(図-8)。新設地震計は、最大加速度に加えて、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。この拡充された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<sup>8)</sup>。

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<sup>16)</sup>。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。

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. 海外における地震計ネットワークと地震情報システム

##### (1) 米国のリアルタイム地震動モニタリング

米国では、ロスアンジェ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、CUBE<sup>5),17)</sup>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<sup>5)</sup>。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た。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予定で、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、REDI<sup>18)</sup>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-9)、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

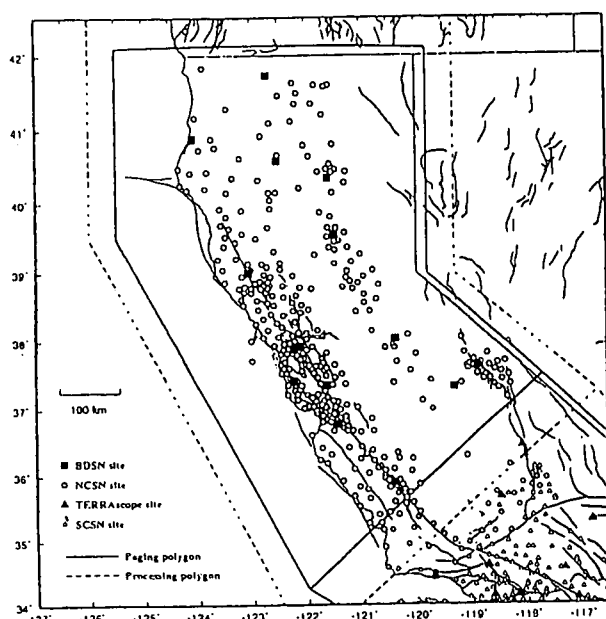


図-9 REDIシステムの地震観測点<sup>18)</sup>

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) メキシコ市の早期地震警報システム<sup>19)</sup>

メキシコ市では、1985年メキシコ地震による建物倒壊による惨事を再び繰り返さないため、CIRESという機関により、1991年8月より地震警報システム(SAS)が試験的に稼働している。この警報システムは、メキシコ市から約320km離れた太平洋岸のGuerrero地域で発生が予測されるマグニチュード6以上の地震に対して、地震発生後、同市に直前警報を行うことにより、人的被害や混乱を軽減しようというものである。太平洋岸に沿って約25km間隔で12基の3成分加速度計が配備され(図-10)、地震発生が感知されるとその情報は、アカプルコを經由してメキシコ市まで、二重の無線回線で通報される。この間の距離により、地震波到達までに約60秒間の余裕がメキシコ市では生じる。警報受信機は、市内の小学校、ラジオ放送局、民間事業所や官庁、大学、公共サービス機関、集合住宅などに置かれ、警報が流されるとともに、ラジオ放送を通して一般市民にも警報が伝えられる。まだ実験段階とはいえ、このように一般市民をも対象とした、地震波到達前の警報システムの試みは、世界でも画期的といえよう。

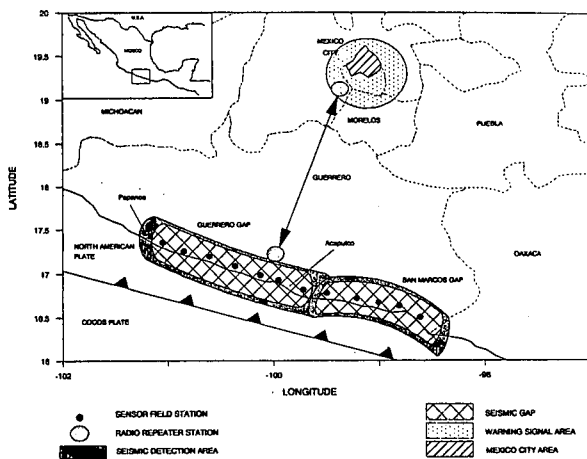


図-10 メキシコ市への地震警報システムの地震計配置<sup>19)</sup>

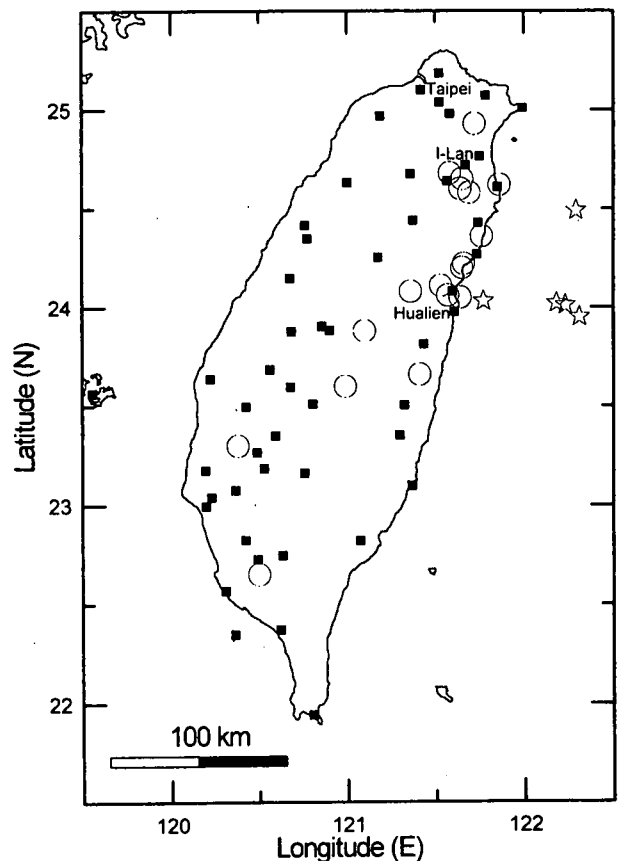


図-11 台湾のリアルタイム地震動モニタリング<sup>20)</sup>

### (3) 台湾の早期地震警報システム<sup>20)</sup>

台湾中央気象台では、早期地震警報を目的として、52箇所の観測点からなるリアルタイム地震動モニタリング(図-11)および警報システムを1997年より稼働開始している。TERIRSと名付けられたこのシステムは、地震発生直後に震源位置とマグニチュードを震源近くの観測波形から決定し、速報しようというものである。現在までのところ、発震から約30秒で震源とマグニチュードが決定できるようになったが、首都台北市に地震波到達前の警報ができるよう、さらに研究開発を続けている。

## 5. 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のコ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、日本では兵庫県南部地震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、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ステムの導入が進められている。また、メキシコや台湾などでも、地震計ネットワークが配備され、早期地震警報システムが作られ稼働している。

しかしこれらに関して残された課題も多い。日本の地震計ネットワークは、いろいろな機関が独自に保有しているため、それらか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、兵庫県南部地震以降、急激に地震計の台数が増加したが、それらの維持管理や更新が、今後、大きな課題となってこよう。

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と、精度や情報収集法などが異なってこよう。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。また、地震（震度）情報や被害推定のみならず、早期に被害確認を行う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, 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) 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.
- 5) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577, pp. 1-15, 1997.
- 6) 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.
- 7) 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 Conf. on Earthq. Eng.*, Vol. II, pp. 55-63, 1994.
- 8) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第10回地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3491-3496, 1998.
- 9) 安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄: 地震動の強さ指標による構造物損傷の評価, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 715-720, 1990.
- 10) 気象庁編: 平成9年版 今日気象業務, 1997.
- 11) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No. 4, pp. 309-332, 1998.
- 12) 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.
- 13) 鳥居盛男, 阿部進, 新保康裕, 岸本健二: 横浜市の実リアルタイム地震防災システム, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 3451-3456, 1998.
- 14) 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.
- 15) 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, pp. 193-196, 1997.
- 16) 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, pp. 1281-1284, 1997.
- 17) Kanamori, H., Hauksson, E., and Heaton, K.: TERRAScope and CUBE Project at Caltech, *EOS*, Vol. 72, No. 50, 1991.
- 18) 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.
- 19) Espinosa-Aranda, J.A. et al.: Mexico City Seismic Alert System, *Seismological Research Letters*, Vol. 66, No. 6, 42-52, 1995.
- 20) Wu, Y.-M., Shin, T.-C., and Tsai, Y.-B.: Quick and Reliable determination of magnitude for Seismic Early Warning, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 5, pp. 1254-1259, 1998.