

# 研究展望

## REVIEW

# 研究展望：総合地震防災システムの研究

中村 豊

正会員 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 ユレダス開発推進部  
(〒185 国分寺市光町 2-8-38)

構造物および地盤の耐力を把握し、発生した外力をモニターするために、警報システム「ユレダス」と復旧支援システム「ヘラス」を開発した。「ユレダス」はP波初動を検知して、マグニチュード、震央位置および深さを推定し、必要地域に4秒以内に警報を出す地震警報システムである。「ヘラス」はユレダス情報をもとにP波検知後数分で被害を予測し、迅速・的確な地震後対応を支援する。ヘラスに関連して、「被災しやすさ指数」K値群を提案した。K値群は、地盤や構造物の健全度計測のために開発された「ピック」を用いて常時微動を測定することにより、簡便に精度良く算定できる。地震前の微動測定データに基づくK値群と実際の地震被害とを比較して、K値群が被災しやすさを的確に表現していることを確認した。

**Key Words :** alarm system, real-time seismology, UrEDAS, microtremor, QT Spectrum, spectral ratio, HERAS, vulnerability index, hazards estimation

## 1. はじめに

地震災害を少しでも軽減するため、鉄道ではさまざまな地震対策が研究され実施されてきている。鉄道システムを対象とする地震対策は、一般の社会システムと同様、地震動に対して十分に丈夫な構造物・施設を構築することから始まる。しかし、鉄道の場合、これだけでは十分ではない。なぜなら、鉄道システムは、構造物や地盤の上に作られた軌道の上を多数の旅客や貨物を載せた列車が高速で走行することで機能を発揮するシステムであり、絶対的に安定なシステムとはいえないからである。つまり、鉄道システムの地震動に対する安全性は構造物そのものの耐震性を前提とした列車の走行性に関わるところが大きい。さらに、地震後の鉄道輸送システムの早急な回復は社会的な要請であり、地震後の復旧を迅速にするための施策も欠かすことはできない。このように、鉄道システムの地震防災には、ハード的な対策とともに、それを補完し機能喪失を最少にするようなソフト的な対策が不可欠なのである。

鉄道システムなど一般の地震対策は、地震前・地震時・地震後の3段階に分けて考えることができる<sup>1)</sup>。

最初は地震が発生する前の地震に備えた対策で、耐震的な構造物・施設の建設、既設の構造物・施設の弱点箇所の補強、ソフト的な対応策の検討や訓練などである。この対策は鉄道に限らず一般に行われている。

次に、地震発生時の対策がある。これは鉄道の地震対策を特徴づけるものであるが、類似の対策は原子力発電

所の運転制御、ビルのエレベータ管理、都市ガスの供給管理などでも実施されている。走行している列車は停止している列車より安定しているともいわれるが、高速列車は大きな運動エネルギーを持っており、脱線転覆した場合には相当大きなダメージを受けることは想像に難くない。一方、停止している状態で脱線転覆してもそのダメージはそれほど大きくない。つまり、列車はできるだけ停止している方が全体としての安全性は大きいはずである。十分な制動時間が確保できず停止できない場合でもできるだけ減速された状態にして安全性を高めることが重要となる。

地震の発生が予知できるのであれば、その時間に列車を安全な場所に停車させ、地震後、安全性を点検してから運行を再開すればよい。しかし、確率現象である地震の発生を列車運行を制御できるほどの確度と精度で予知することは、少なくとも現在では不可能であるし、近い将来可能になる見通しもない。そこで、次善の策として地震の発生をいち早く検知して対応するための警報地震計が設備され、地震時には列車の運行をいち早く停止することとしている。これは、すでに発生した地震についての警報・情報であり、地震予知にくらべて獲得できる余裕時間（直前対策に使える時間）は少ないが地震予知のようなあいまいさはない。実用的な地震予知ができない現状においては、これは最善の地震警報である。

鉄道における地震警報の目的は次のようにまとめられる。

- ① 大きな地震動の中を走り続ける危険を避ける。

② 被災した箇所へ高速で突入する危険を避ける。

新潟地震や釧路沖地震の後の調査によれば、走行中の列車の運転士が地震の発生を知ることは、大きな地震動であっても容易ではないようである。しかし、地震警報により運転士に地震発生が伝えられれば、①や②の危険回避が確実にできる。

最後は、地震発生後の対策で、被災箇所や被災程度などを調べ、迅速な復旧を実現する諸施策を打ち出していくことになる。被災箇所や被害程度を予備知識なしで調査するのでは膨大な時間を要することになるが、あらかじめ構造物など施設の耐震性を把握し、襲来した地震動の特徴を計測して、発生したであろう被害をおおよそ予測して対応すれば、調査も迅速になり、思わぬ見落としを防ぐことも可能となる。復旧資材の調達も迅速に行える。もちろん、被害予測結果が実状に合わない場合もあるが、こうした場合にも、現地調査班からの情報を迅速に取り入れることによって、推定結果を逐次修正していき、震災の全体像を正確なものにしていくことができる。このために被害程度を迅速に定量化する調査手法の開発も必要になる。

地震対策は、結局、外力としての地震動特性とそれを受ける構造物や施設などの地震動に対する抵抗力の双方を的確に把握することが基本となる。外力や抵抗力を把握するためには、地震動の計測や計測データの収集・伝達、構造物や地盤の地震動に対する抵抗性能の調査、調査データの蓄積と有効利用などが必要である。これには現在の計算機技術・通信技術などの情報処理技術の積極的な応用が欠かせない。近年の通信技術・計算機技術の発展に伴い、さまざまな情報をほぼリアルタイムで処理し表示・通報するシステムが次第に普及し始め、防災の分野にも急速に浸透しつつある。

鉄道の分野では、20年近く前からソフト的な地震防災対策の一環として、警報システムに情報処理技術を導入する研究が積極的に続けられて来た。つまり個々の警報地震計がそれぞれ単独に機能するのではなく、全体として機能させ、地震の全体像を把握しようとするのである。この頃、理学の分野でも微小地震の自動観測に情報処理技術を導入し始めていたが、鉄道の場合は、単なる自動システムを構築するのではなく、リアルタイム性を重視した警報システムを指向していた。つまり、リアルタイム地震防災の概念がすでに生み出されていたのである。

こうした考えは、警報地震計「NEWS（ニュース）」および「NEWS改」、世界ではじめて実用化に成功した早期地震警報システム「UrEDAS（ユレダス）」、災害予測・復旧支援システム「HERAS（ヘラス）」、地盤や構造物の地震動特性・健全度調査システム「PIC（ピック）」の開発、地盤や構造物の特性調査手法の提案や、

被災しやすさ指数  $K$  値群の提案につながっている。ここでは、ユレダス、ヘラスなどに集約される総合地震防災システムの前史を含めて、これらのシステムの基になった要素技術とその応用事例についての総合的な解説を試みる。

## 2. 防災の考え方

鉄道における地震対策の基本は構造物の強化にある。列車を支える構造物が脆弱では、いつ崩壊するかかわからず不安で危険である。新しくつくる構造物は十分丈夫なものにし、すでに存在する構造物の場合には、脆弱な部分を抽出して強化することが重要になる。しかし、丈夫につくられた構造物や強化された構造物も、時が経つにたがって次第に弱くなる。地震災害は、地震力がこうした構造物（斜面などの自然のものも含む）のもつ抵抗力（耐力）を上回った場合に発生する。弱点箇所を自然の力であればかかれたものが災害となり、人間が弱点箇所を発見すれば有効な事前対策を施すことができ災害を未然に防止することが可能となる。

あらかじめ耐力を把握し、不意にきた地震力を適切に見積もることができれば、どこにどの程度の被害が発生するか予測することができる。予測された被害に適切に対処することによって、少なくとも二次災害を防止することができる。また、周辺地域で起こりうる地震の規模や位置を想定すれば、その地震に対して弱点となるところを明らかにでき、事前に対処することも可能となる。いくつかの地震を想定して事前に地震被害を評価することの重要性がここにある。すべての弱点箇所を地震発生前に強化することは、理想ではあるけれども、耐力が経年劣化することなどを考慮すれば現実にはほぼ不可能であろう。

このように考えると、つぎの2点が地震防災上不可欠であることがわかる。

- ① 既存構造物の現有耐力を的確に評価すること。
- ② 外力を常時監視して、不測の事態の発生をできるだけ抑制するバックアップ対策を用意すること。

特に②は地震発生時の対策であり、リアルタイム性が重要となる。①も耐力の変化をリアルタイムに把握することができれば理想的である。少なくとも、適当な時間間隔で現有耐力を調査して、その変化の程度を把握しておく必要がある。

以下、3章では地震外力の常時監視について考察し、耐力の調査法や、これを用いた被害予測手法などは4章で考察する。

### 3. 地震外力の常時監視

#### (1) 警報地震計

地震力を把握する方法として、地震動の最大値を利用するものがある。一般的には最大加速度が用いられるが、気象庁震度階もよく利用される。速度や変位については、大きな速度や変位を計測できるセンサーが無かったこともあって、大地震時には振り切れることが多く、地震力を把握する手段としてはあまり利用されて来なかった。最近は大震動も測定可能な速度・変位センサーが作られ、速度や変位も地震力の監視に利用されるようになってきている。しかし、最大値はいずれにせよ、瞬間的な値であり、被害と密接に結びつかないことが多い。そこで、最大値ではなく、0.1秒～2.5秒の周期範囲の速度応答スペクトル(減衰20%)を平均したスペクトル強度SI値<sup>2)</sup>を利用しているところもある<sup>3)</sup>。また、地震動ではなく、歪計<sup>4)</sup>や液状化センサー<sup>5)</sup>を用いて構造物や地盤の変状そのものを直接的に監視する方法もある。

強震動波形を記録するSMAC型強震計が開発され、観測に使われ始めたのは昭和28年(1953年)のことである。国鉄では、これにやや遅れて昭和30年代から防災を目的とした簡易警報地震計が在来線の沿線に設置され始めている。

昭和39年10月に開業した東海道新幹線にも、簡易警報地震計が設置されていたが、翌年4月に大井川河口付近に発生した地震(M6.1)を契機に、より信頼性の高い警報地震計を用いた自動列車停止システムへと発展した。このとき、システムの動作状況を確認する目的で警報地震計のほかには地震波形を記録するSMAC-B2型強震計が併設されている。

警報地震計は最大加速度が設定値を越えると警報を出す。最終的な最大加速度の大きさを知ることはできなかった。そこで、運転再開のための情報を得るため、設定値の異なる警報地震計をもう一台設置して、地震動の大きさを段階的に把握できるようにした。東北新幹線の開業時には、警報地震計も進歩して数段階の警報加速度が設定でき、地震後には最大加速度が表示・印字され波形記録が残るようになった<sup>6)</sup>。同様機能の警報地震計が在来線やほかの新幹線にも導入され、総計約400台にまで達している。在来線には概ね40km～50km毎に、新幹線にはほぼ20km間隔で設置されている。これらの警報地震計の感度特性は、0.1Hz～5Hzに設定され、高い振動数の振動には反応しにくいようになっている。なお、波形記録の特性は10Hzまで拡げている。

こうした警報地震計は地表面に設置され、地震計が震度4に相当する水平加速度(概ね40Gal(:cm/s<sup>2</sup>)に設定)を検知すると警報が発せられる。この起動レベルを小さくすると、より早く地震動を検知できるが、列車

振動、道路振動や工場振動など社会活動に起因する雑振動にも反応し、いわゆる誤動作が多くなる。また、地震計の近くで発生した小さな地震に対して無用の警報を発してしまうことは現在でも少なくない。つまり、これまでの警報地震計には次のふたつの問題点がある。

① 警報発令が遅く、余裕時間が少ない。

② 無被害の小地震に対して警報が出ることがある。

これらの問題は、地震動があらかじめ定められた基準値を超えると警報を出すという、基本的な考え方に起因している。JRでは、地震動の大きさとして加速度を採用しているが、速度であってもSI値や計測震度などほかの計測量であっても事情は大して変わらない。

地震被害は、地震動の大きさだけではなく、地震動の継続時間や振動周期の大きさにも関係している。これらの影響の大きさは構造物の種別・劣化度によって異なるため、地震動の観測結果から被害発生の有無を判断するには、まだまだ多くのデータや経験が必要である。また、こうした方法では地震動が来た後でしか判断できず、迅速な警報には適していない。

#### (2) 地震の早期検知

早期検知を実現する方法として、次のふたつの方法が考えられる。

① 地震をP波初動で検知し警報する。(P波警報)

② 地震を震源域で検知し警報する。(前線警報)

これらを簡単に説明する。

##### a) P波警報

図-1は地震動を模式的に示したものである。これまでの警報地震計は事実上、地震の主要動で検知(S波警報)していたが、これをP波初動で検知(P波警報)するにすれば、前節の問題点①が改善される。しかし、P波警報は、地震動があるレベルを越えると警報するというこれまでのやり方では実現できない。レベルを下げると、検知は早くなるが誤動作回数も飛躍的に増え、前節の問題点②が顕著になるからである。

新しい警報方式を検討するため、これまでの鉄道被害事例を、横軸に地震規模(M:マグニチュード)、縦軸に震央距離( $\Delta$ )をとったM- $\Delta$ 図上にプロットしてみた<sup>6)</sup>。結果を図-2に示す。これによると、被害らしい被害はM>5.5で生じ、被害域は震央を中心にしたある範囲に限られている。例えば、M6では半径12km程度、M7では半径60km程度、M8では半径300km程度といった具合である。

図-2には、堅い地盤で観測される地震動の最大加速度の概略値も示している。警報地震計はふつう地表面に置かれる。やわらかい表層地盤で地震動が増幅されることを考えると、これまでの警報は図-2の20Gal等値線より下の地域に対して出されていると考えて差し支え

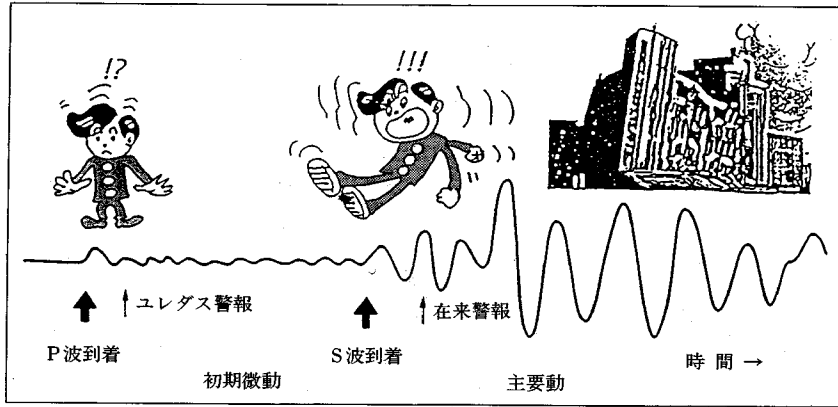


図-1 地震動の模式図

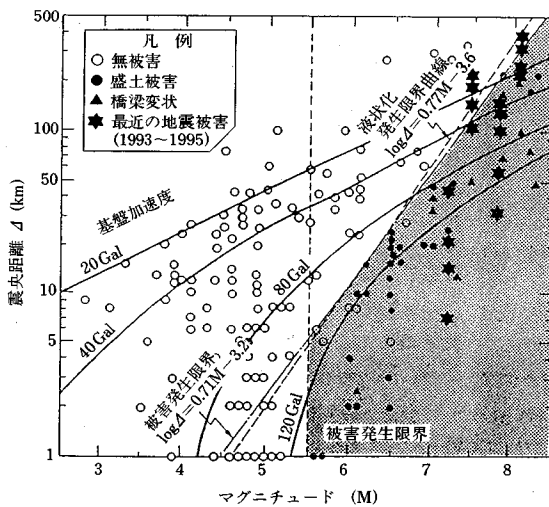


図-2 地震被害とマグニチュードM、震央距離Δの関係(M-Δ図)

ない。つまり、この図をみても、これまでの警報には、小さな地震で敏感すぎる（空振り警報）という問題があることがわかる。さらに、大きな地震では震央から離れたところには警報を出さない（見逃しの）可能性があることもわかる。

これに対して、P波の初動部分で地震のマグニチュードや震央位置・深さを即時的に推定できれば、M-Δ図に基づいて警報すべき地域を明らかにすることができるので、合理的かつ迅速に警報を発令することができるものと期待される。

**b) 前線警報**

大きな地震動をいち早く検知し、光と同じ速さ（30万 km/s）の電気通信と地震動の伝播速度（8 km/s 程度）の差を利用して、地震動が当該地域に到達する前に対策をとるアイデアが発表されたのは1868年、明治維新の年のことである。この年の11月3日付けのSan

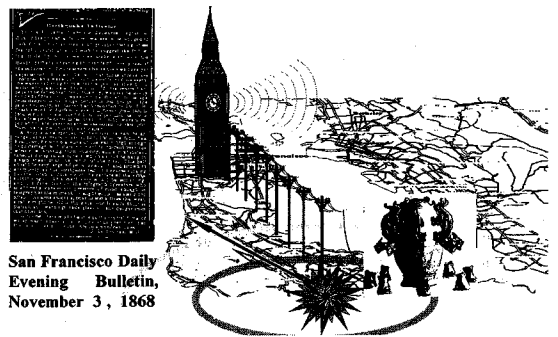


図-3 揺れより早く地震の発生を知る方法 (J. D. Cooper 博士の構想)

Francisco Daily Evening Bulletin 誌に、サンフランシスコの医師 J. D. Cooper 博士は、日本の磁石による地震予知（磁石に鉄片を吸い付けておくと、地震の前に磁力が失われ、鉄片が落下するので地震が予知できるというもの）がうまくいかないことに鑑み、予知に代わるものとして、つぎのような地震の早期検知とこれに基づいた地震警報の構想を発表している。

「…地震波動は、水面に石を投げ入れたときのように、震源から周囲に拡がっていく。そこで、次のような地震警報装置を提案する。すなわち、サンフランシスコから10~100マイル離れた震源の近くに感震器を設置し、大きな地震動を検知するとすぐにそのことを電信でサンフランシスコに伝える。そして、大きな地震動がやってくる前に、市の中央に建てられた高い塔に吊るされた大きな釣鐘を乱打させれば、多くの人命を救うことができるだろう。もちろん、この警鐘が地震警報であることは知られていなければならないし、地震感知から通報・警鐘までを自動化する必要もある。…」(図-3参照)

ここには、早期警報システムの自動化の必要性、誤動作の問題、システムについての民衆への周知徹底の必要性などがすでに述べられている。しかし、当時の技術は

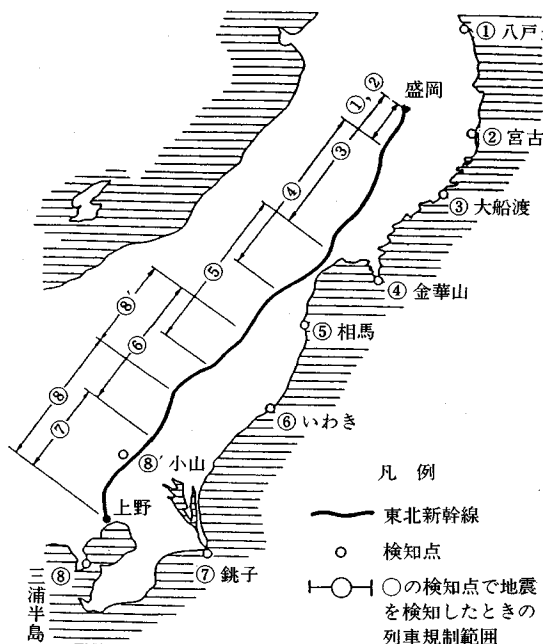


図-4 東北新幹線の地震警報システム

これを実現させるには至らなかった。

これからほぼ100年が経過した1972年には、東京大学(当時)の伯野元彦らにより「10秒前大地震警報システム」構想が発表された<sup>7)</sup>。これは東京を対象としたものであるが、サンフランシスコを対象にしたJ. D. Cooper博士の構想と基本的に変わらない。当時の国鉄は、地震時の不測の事態に対応するための新しい設備として、この構想に強い関心を示し、東北新幹線に設備することを念頭に置いての研究・開発が始まった<sup>8)</sup>。

### (3) 東北新幹線の海岸線検知システム

東北新幹線の場合、東北地方の太平洋岸から平均的に70 km程度内陸を走っている。そして、この地域では地震は概ね太平洋海底下で発生する。したがって、太平洋の沿岸ないし海底にいくつかの警報地震計を置けば、いち早く地震を検知することができ、警報を出すことができる。しかし、海岸線に置かれた警報地震計が地震を検知した時、ここから離れたところを走行する東北新幹線のどこに警報を出せばよいのだろうか？ 検知した地震による被害地域を直ちに特定して、その周辺を走行する列車群に対して警報するのが理想的である。しかし、当時は「検知した地震による被害地域を直ちに特定すること」は不可能であったため、以下のような現実的な対応策が採られた<sup>9)</sup>。

すなわち、ある検知点が動作した場合、動作した検知点の近くで発生した既往地震の内、もっとも影響の大き

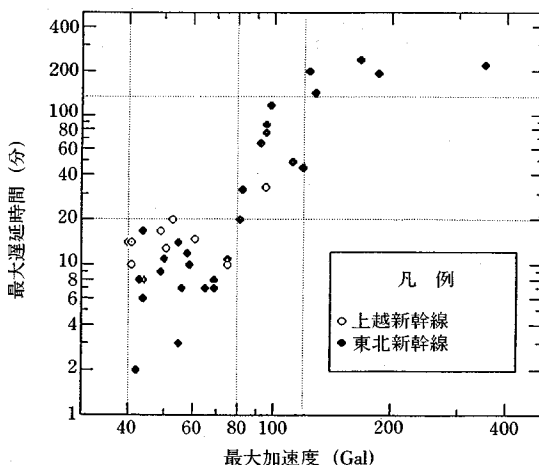


図-5 最大加速度と列車遅延時分(東北新幹線)

いものが再び発生したとみなして、この地震の想定被害範囲を警報範囲とする(図-4参照)。

どの程度の地震動で警報を発令すべきかという問題については、P波警報がまだ実用段階になかったので、とりあえず従前のS波警報が採用され、警報レベル(水平合成加速度40 Gal)が設定されている。

これが、現在、東北新幹線で運用されている海岸線検知システムである。図-4に示すように、8箇所の地震検知点が八戸から三浦海岸までの海岸付近に50 km~80 kmの間隔で設置されている。図-4にはそれぞれの検知点が動作したときの規制区間なども示した。

海岸線検知システムを含む東北新幹線の地震警報システムの動作回数は月平均1回以上になると予想され、ほぼ予想どおりの実績となっている。しかも、その多くは海岸線近くの小地震で新幹線にはなんらの影響を与えないと推測される不要警報である。そこで、沿線での地震動の大きさが震度5以上に対応する80 Gal以上でなければ、新幹線にとっては不要な警報であったと判断して直ちに運転を再開し、混乱をできるだけ少なくするよう配慮した。

図-5は東北新幹線(上越新幹線を含む)の最大加速度と列車遅延時分の関係を示したものである。沿線で80 Gal以下であれば5分~20分で回復するなど、120 Gal以下の場合の東北新幹線の回復の早さは上述の運転再開方法によるところが大きい。当初の東北新幹線のように運転本数がそれほど多くなければ、このような対処で、多少の不要警報も列車運行にはほとんど影響しないようにできたのである。

表-1に運転再開手順の変遷の一例として東海道新幹線のものを示した。これは、地震後の運行を安全を保ちながら迅速に正常化して、旅客への影響を最小限にしよ

表一 東海道新幹線の運転再開手順の変遷

	加速度		40ガル	40~80	80~120	120ガル
	気象庁 震度階		未 満	ガル未満	ガル未満	以 上
開業時	II 以下		運 転 再 開			
	III		30 km/h 駅 収 容			
	IV 以上		地 上 巡 回			
昭和 41年	III 以下		70 km/h 運 転 再 開			
	IV	運 転	30 km/h 運 転 再 開			
	V 以上		地 上 巡 回			
昭和 45年	-	運 転	30 km/h 駅 収 容	地 上 巡 回		
昭和 58年	III 以下		70 km/h 運 再 開	地 上 巡 回		
	IV 以上	運 転	30 km/h 駅 収 容			
昭和 60年	III 以下		70 km/h 運 再 開	30 km/h 運 再 開	地 上 巡 回	
	IV	運 転	30 km/h 運 再 開	部 分 地 上 巡 回	地 上 巡 回	
	V 以上			地 上 巡 回	地 上 巡 回	

平成4年からはユレダスによるM-J図法に移行して上記の再開マニュアルは廃止されている

うとする努力の現れである。1985年（昭和60年）6月に改正された東海道新幹線の運転再開手順がそれ以前のものと比較してどの程度効果があったかを、最大加速度と列車遅延時分の関係でみると、図-6のようになる。改正は最大加速度が120 Gal未満の場合を対象にしたものであるが、3時間を越すこともあった回復時間が改正後は1時間以下に減少し、80~120 Galでは東北新幹線と同程度（図-5参照）にまで回復時間が早まっている。しかし、120 Galを超える地震になると、被害が無くても運転再開まで2~3時間以上が必要となる。なお、現在の東海道新幹線にはP波警報を実現したユレダスが導入され、大きな最大加速度で沿線警報地震計が警報を出しても、被害が出ないような地震であれば直ちに運転再開され、旅客への影響が最小限度に抑えられている。

東北新幹線や東海道新幹線など新幹線で使われている警報システムは、沿線警報地震計によって計測された最大加速度値を直ちに中央のCTCにおかれたCRT画面に表示する機能を持っており、リアルタイム地震防災情報システムの先駆的な存在として重要である。

なお、海岸線検知システムが線路から離れた大地震に対応する一方、沿線の警報地震計は主に直下地震に対応

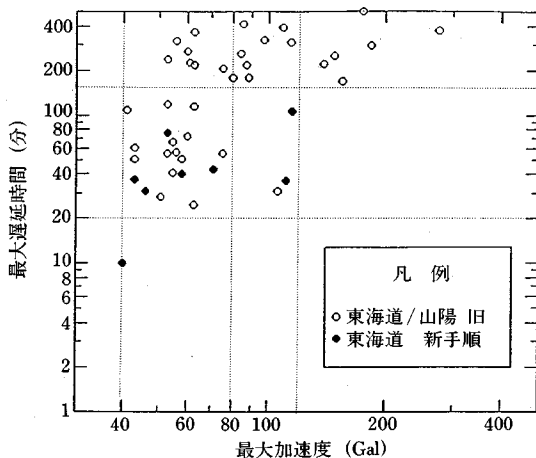


図-6 最大加速度と列車遅延時分（東海道新幹線）

し、双方が補完する役割を果たしている。この考え方はユレダス導入の際にも取り入れられている。

#### (4) ユレダスの開発と実用化

ユレダス (UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System, 早期地震検知警報システム) は、リアルタイム地震防災の考え方をいち早く実現した世界で唯一の実用システムである。ユレダスの基本機能はP波部分の情報に基づく迅速な警報である。これは、ただ単に大きい地震動を検知して警報を発するというのではなく、地震の規模や発生位置を推測した上で被災の可能性のある地域に対して警報を発する。1983年にはパソコンを用いて基本機能を実現したプロトタイプシステムが完成<sup>10)</sup>し、1984年からは宮古そのほかで試験観測が実施されている。そして運輸省の助成を受けて首都圏を対象にしたユレダスネットワーク (5基のユレダスで構成) が1988年~1989年にかけて構築された<sup>11)</sup>。また、1988年3月からは青函トンネルの地震防災システム<sup>4)</sup> (補遺1) の一部として4基のユレダスの震源推定機能が使われ始め<sup>4)</sup>、1990年9月には東海道新幹線のために設置された御前崎ユレダスの限定使用が開始された。1992年3月からは東海道新幹線でユレダスのP波警報機能をはじめすべての機能が実際に使用されている。なお、首都圏ユレダスの情報は約50のテストユーザーにリアルタイムで配信されている。

ユレダスの先進的な考え方は、最近になってリアルタイム地震学<sup>12)</sup>として脚光を浴びている。これは、迅速かつ合理的に地震災害に対応し二次災害を軽減防止するためには、単純に地震動の大きさだけで警報を出す装置では不十分であり、地震の諸元をすぐさま把握して被害予測までを迅速に行なうユレダスのようなシステムが必要

だとの認識が広まっていることを示している。アメリカ合衆国のカリフォルニア州では、ユレダスに触発されたカリフォルニア工科大学 (Caltech) の地震研究所所長金森博雄教授らが中心になって1991年に開始したキューブ (CUBE: Caltech and USGS Broadcast of Earthquakes) プロジェクトが多くの地震工学研究者や防災関係者に支持され、国家的事業に成長しつつある(補遺2)。

ところで、ユレダスは「地震の加害性を判断するために地震の諸元を推定する」。したがって、その推定はP波検知後できるだけ速やかになされねばならない。時間がかかりすぎて、諸元を推定した頃には地震は終了していたというのでは実用にならない。むしろ、大きな主要動が到来する前に警報が出せるくらいの迅速さが要求される。したがって、多くの観測点での観測データを中央処理システムに伝送して処理させる通常の方法(気象庁、防災科学技術研究所や大学など)では、地震後の対策のための情報としては役立つが警報には全く無力である。もちろん、地震終了後ある程度の時間をおいて襲来する津波に対しては、この従来の方法でも有効となる。しかし、それほどの時間的余裕がない津波が発生し、多くの人命を奪ったことは記憶に新しい。警報はまず迅速であること、次に的確であることが望まれるのである。多点システムの複雑さ・ネットワークの脆弱性なども考慮して、ユレダスでは警報に単一観測点の情報しか用いないこととした。

単一観測点の地動データをリアルタイムモニターすることにより、地震の検知・震央方位の推定・地震規模の推定・震央距離の推定・震源深さなどの第一次推定をP波検知後3秒以内に行っている。これに基づいて、ユレダスに内蔵された多数の警報対象地点のうちどこが危険地域に入っているかを判定して、関係地点に対してP波検知後4秒以内に警報が届くように、警報を発令する。これが、東海道新幹線で1992年3月より稼働しているユレダスの警報機能である。震央位置とユレダス検知点の位置関係によっては、地震動(P波)が到着する前に警報を受け取ることもありうる。

以上のユレダスの基本的な考え方はつぎのようにまとめられる。

- ① 地震動の初動(P波)で地震を検知する。
- ② マグニチュードなどの地震諸元を直ちに推定する。
- ③ 必要地域が大きく「揺れ出す」前に警報を出す。
- ④ 以上を検知点毎に独立して行う(分散処理)。

ユレダスは2段階のプロセス・機能を持ったリアルタイム地震警報・情報システムである。すなわち、P波到来直後に最初の第一次警報/情報を発信し、続いてS波到来直後に第二次情報を発信する。検知点から半径約

250 km の円内の地震であれば、すべての警報情報処理はほぼ30秒以内に終了する。

複数のユレダスが使われる場合でも、個々のユレダスは独立に地震諸元を推定してそれぞれの判断により必要な警報を発令する。そして、各ユレダスが推定した地震諸元情報はユレダスセンターに集約され、より精度の高い地震諸元に統合される。この統合情報は、ヘラス(災害予測・復旧支援システム;後述)に送られ、地震後の合理的な対処のために利用される。

中央集中型の警報システムでは中央装置が破壊されてしまうとシステム全体の機能も破壊されてしまう。しかし、ユレダスは完全な自律分散型システムであり、たとえ破壊的な地震動に襲われてもシステム機能が一斉にダウンすることはない。主要動の到来と共にユレダスが破壊されても、既に警報は発令されており、当該地震の震源情報は必要な箇所に伝達されているからである。さらに、在来の警報地震計にくらべて余裕時間は増大し、地震の全体像に基づく警報のため誤りが少ないという利点もある。

## (5) ユレダスの動作原理と検証

ユレダスは単一観測点のP波初動部分の情報だけで、地震の規模、震央の方向、震央距離、震源の深さをほぼリアルタイムに推定するが、その原理はつぎのとおりである。

### a) 地震規模

地震の規模は地震断層の大きさに比例する。地震断層が大きければ破壊に要する時間や断層生成に要する時間が長くなる。したがって、ここから発生する地震波動の周期も長くなる。このため、初動周期から地震規模M(マグニチュード)を推定することができるものと期待される。リアルタイムに初動周期を検出する方法としてゼロクロス法があるが、周期の短い振動の存在によって誤差が大きくなるという欠点がある。ここでは、微積分波形の平滑化振幅を使って、周期変動をリアルタイムで検出する方法を新しく開発し採用している。

初動周期のリアルタイム算出方法<sup>13)</sup>について述べる。これは地動の卓越振動数の変動を連続的に捉える方法で、地震波初動直後の卓越周期を初動周期として捉える。地動を単振動と仮定すれば、その振動数は次のように求められる。

$$F_i = (A_i/V_i)^{0.5}/(2\pi) \quad (1)$$

$$A_i = \alpha A_{i-1} + a_i^2$$

$$V_i = \alpha V_{i-1} + v_i^2$$

ここに、 $a_i$ 、 $v_i$ はそれぞれ現時刻( $i$ ステップ)の地動の加速度振幅、速度振幅である。また、 $\alpha$ は指数平滑係数で、0と1の間の値をとる。1に近いほど平均する



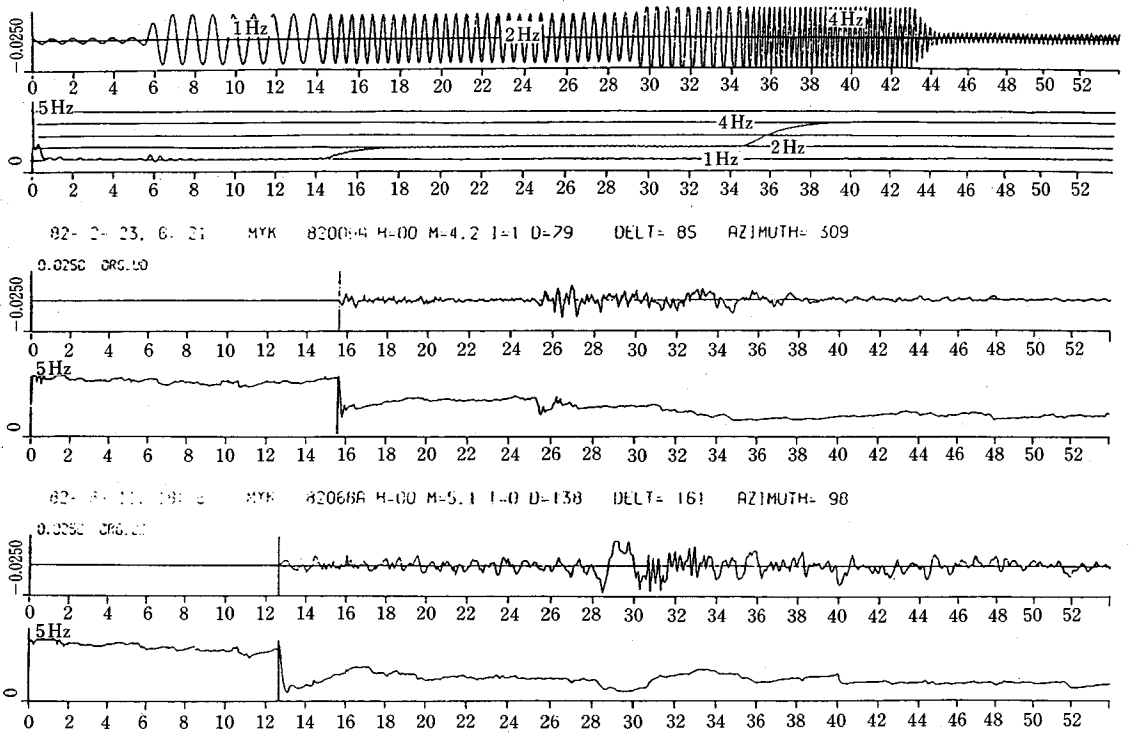


図-7 卓越振動数のリアルタイム読み取り法

時間区間が長く、0は全く平均操作をしないことに相当する。このとき、加速度波形および速度波形の自乗平滑振幅値はそれぞれ  $A_i(1-\alpha)$  および  $V_i(1-\alpha)$  と表せる。したがって、これらを次のようにおくことができる。

$$A_i(1-\alpha) = \int A d\omega = \int \omega V d\omega \quad (2)$$

$$V_i(1-\alpha) = \int V d\omega \quad (3)$$

ここに、 $A$ 、 $V$ はそれぞれ加速度、速度のパワースペクトルを表す。式(2)、(3)を式(1)に代入すると、

$$F_i = (A_i/V_i)^{0.5} / (2\pi) \\ = (\int \omega V d\omega / \int V d\omega)^{0.5} / (2\pi) \quad (4)$$

となる。つまり、 $F_i$ は速度波形のパワースペクトル図の重心点として定義されている。したがって、単一の鋭いピークで卓越する振動数は正確に推定できるが、高周波ノイズが多く含まれる場合には、推定される振動数は高めにシフトするものと考えられる。規模  $M$  の大きな地震では、 $M$  に対応する低い振動数が卓越し、それより高い振動数の震動は相対的に急速に減少して  $SN$  比が大きくなるため、この方法は的確な値を与えるものと期待される。

図-7は、種々の波形に対して上式によって計算され

る卓越振動数の変化を見たもので、処理対象波形と計算された卓越振動数の時間的変化を一組として示した。一番上の波形は、振動数を変えずに振幅を急に大きくした後、振幅を変えずに振動数を倍増し、さらに振幅を漸増した後振動数を倍増してから徐々に振幅を小さくしたものである。二番目、三番目は実地震波形である。これから、式(1)によって振幅や振動数が変化しても卓越振動数をうまく読み取れることがわかる。また、実地震波形に対する処理を見ると、振幅が急激に大きくなる場合の振動数の変化に対する応答は極めて速い。

図-8は提案法によって検出した初動周期  $T$  とマグニチュード  $M$  の関係を示したものである。これによると、 $M = a \log T + \beta$  の形に置くことができることがわかる。そのばらつきは小さくないが、多くのデータが  $M$  でみて  $\pm 0.5$  以内に入っている。なお、深さによって  $M$  と  $T$  の関係が若干異なるが、深さに関連したパラメータ  $V/H$  (後述) を説明変数に加えることで精度向上を図ることができる。

人工的な振動ノイズは比較的高い振動数が卓越し、これに相当する地震の規模はかなり小さい。したがって、この連続的な卓越振動数の計測によって地震規模を的確に推定できるのみならず、警報を要する地震と人工的な振動ノイズを容易に識別することができ、危険地震の検

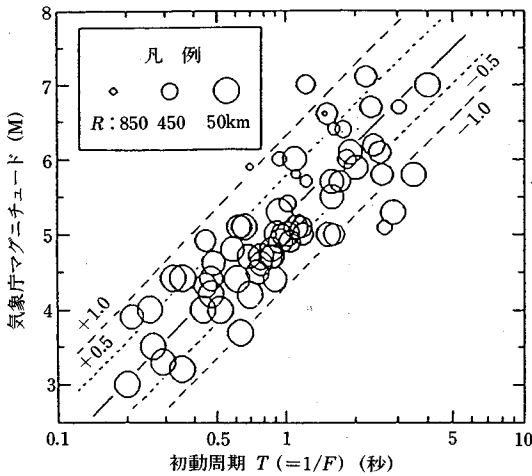


図-8 初動周期とマグニチュードの関係

知がより確実に行えるものと期待される。

初動周期を利用した M の推定原理は気象庁の地震津波早期警報網における P 波を用いた地震規模の推定にも利用されている<sup>14)</sup>。

### b) 震央方位

P 波は粗密波であり、波動伝播方向（震央方向）と振動方向が一致している。したがって、P 波初動の水平 2 方向の振幅値（符号を考慮）から震央方向を知ることができる。しかし、直接的に振幅比を算定しても、振幅が小さく符号が不明瞭であれば、方位推定に大きな誤差が生じやすい。そこで、P 波初動の波形は 3 方向成分とも相似であることを利用して震央方位をリアルタイムに推定する方法<sup>15)</sup>を述べる。

まず、水平 2 方向の各成分振幅 ( $Xns(i)$ ,  $Xew(i)$ ) と上下成分振幅 ( $Xud(i)$ ) との時間差 0 の相互相関を以下のように連続的に算定する。ただし、 $\alpha$  は指数平滑係数である。

$$Rudns(i) = Xud(i) \times Xns(i) + Rudns(i-1) \times \alpha \quad (5)$$

$$Rudew(i) = Xud(i) \times Xew(i) + Rudew(i-1) \times \alpha \quad (6)$$

次のようにして波動の到来方向すなわち震央方向  $\theta(i)$  が時系列的に算定される。

$$\theta(i) = \tan^{-1}(Rudew(i)/Rudns(i)) \quad (7)$$

ただし、各相互相関の符号の組み合わせにより、 $\theta(i)$  の存在する象限が表-2 のように与えられる。

図-9 には 3 方向波形とともに震央方位の時間的変動を示した。これによると、P 波到来と同時に方位は急激にシフトしてしばらく安定し、S 波が到来するとまた急激に変化する。P 波到来後、 $\theta(i)$  の値が安定するところを読み、それが震央方位になる。この時、必ずしも破壊開始点に対応する震央方位を読む必要はなく、大きな波動エネルギーが放出された時刻直後の震央方位を読

表-2 相互相関の符号と  $\theta(i)$  の象限の関係

		N			
		Rud. ew	Rud. ns	象 限	
W	II	-	-	I	
	I	+	-	II	
E	III	+	+	III	
	IV	-	+	IV	
		S			

80年3月29日の地震：M=4.2 (4.6),

$\Delta/h=55/70$  (58/79),  $\theta=355$  (355)<sup>°</sup> 気象庁(東北大学)による。

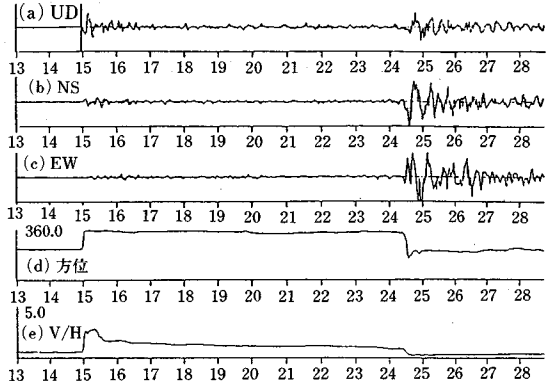


図-9 地震動波形と震央方位および V/H の時間変動の例 (宮古)

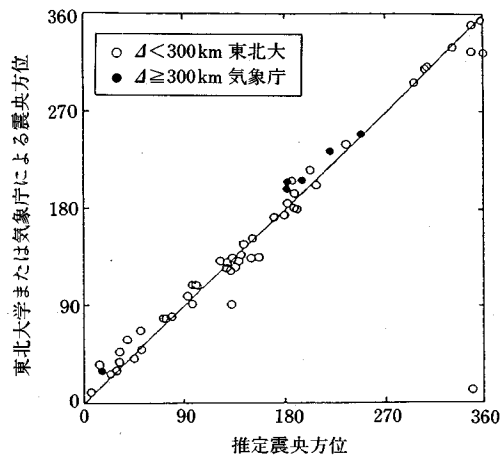


図-10 ユレダス推定震央方位と気象庁および東北大学の推定震央方位との関係 (宮古)

むことによって、その地震で主体的にエネルギーを放出した部分を震央として捉えることが即時的に可能となる。

図-10 は宮古一点の観測データを用いて上記の方法で推定した震央方位と気象庁および東北大学による震央方位を比較したものである。概ね  $\pm 20^{\circ}$  の精度で震央方位が推定できていることがわかる。

### c) 地震波動種別の識別<sup>15)</sup>

地震の検知は、例えば常時の地動ノイズレベルを大き

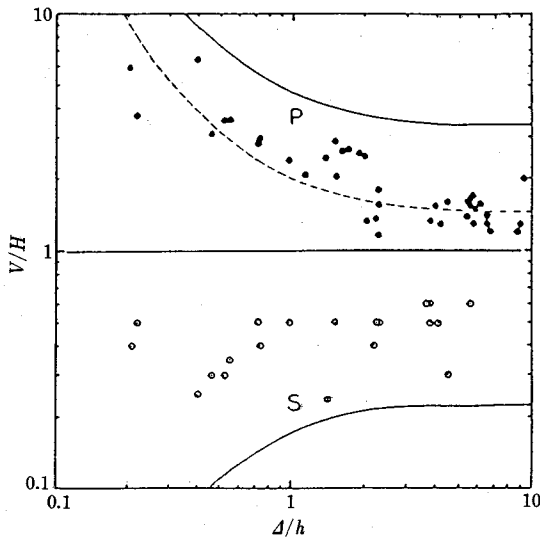


図-11  $\Delta/h$ と $V/H$ の関係

く超える地動を検出することで行えるが、前項までの推定処理は検出した波動がP波であることを前提としている。また、S波の到来を精度良く検知できれば、初期微動継続時間（PS時間）に基づいて震源距離を精度良く推定できることになる。地震を雑振動と区別して検知するためにも波動種別の識別は必要である。地震波の伝播速度は、一般に地表面付近が最もおそく、深くなればなるほど速くなる。このため、地震波動の伝播経路は下に凸の形状となり、地震波動はほぼ鉛直下方から地表面に入射する。したがって、P波であれば上下動が卓越し、S波であれば水平動が卓越する。このことから、P波とS波は容易に識別できる。これがPS識別の原理である。しかし、次式で定義される波形振幅（瞬時値）の比は、波動到来とほとんど無関係に短い周期で大きく変動し、移動平均をとっていてもPSの識別には有効でなかった。

$$R(i) = Xud(i) / (Xns(i)^2 + Xew(i)^2)^{0.5} \quad (8)$$

ここで、 $Xud(i)$ 、 $Xns(i)$  および  $Xew(i)$  はそれぞれ上下方向、南北方向および東西方向の波形振幅である。 $i$  は現在の時刻ステップ、 $\alpha$  は指数平滑係数である。

これは式(8)で計算される比が種々の原因で波形に生じるノイズの影響を受けやすく、しかもこれによる変動が必ずしも正しい値を中心としたものでないことに起因する。

そこで、上下動および水平動の自乗振幅を次のように指数平滑した後、両者の振幅比を算定することとした。

$$V(i) = Xud(i)^2 + V(i-1) \times \alpha \quad (9)$$

$$H(i) = Xns(i)^2 + Xew(i)^2 + H(i-1) \times \alpha \quad (10)$$

表-3 仮定した地殻の速度構造

層厚 km	P波速度 km/s	S波速度 km/s
0.2	2.0	0.82
5.5	6.0	3.41
10.3	6.6	3.75
$\infty$	8.0	4.35

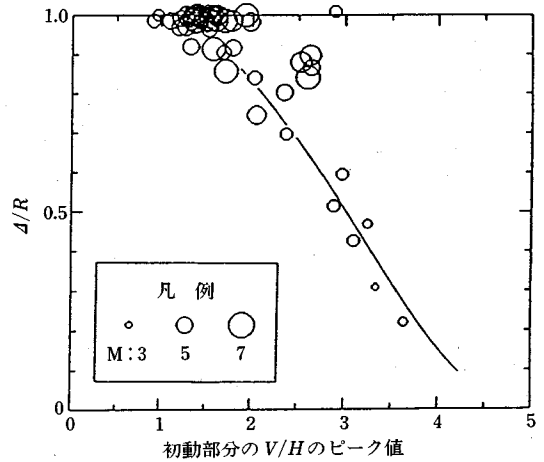


図-12  $V/H$ と $\Delta/R$ の関係

$$[V/H](i) = (V(i)/H(i))^{0.5} \quad (11)$$

図-9は3方向成分波形と $[V/H]$ （以下 $V/H$ と表記）の時間変動の関係を例示したものである。これによると、P波到来とともに $V/H$ は増大し、S波到来とともに減少する。いくつかの地点でP波とS波の両方が観測された波形に対する処理結果によれば、地震波形が十分な精度で取り込まれれば、 $V/H$ はほぼ確実にP波到来とともに増大し、S波到来とともに減少する。

表-3の速度構造に対して、P波とS波のそれぞれに対して、観測点に最も速く到達する波動の見かけの入射角度を震央距離 $\Delta$ と震源深さ $h$ をパラメータにして計算し、これから $V/H$ を求めた。図-11は、計算結果を観測値とともに示したものである。これによると、P波に対する $V/H$ の理論値は $\Delta/h$ の減少とともに増大し、S波に対する $V/H$ の理論値は $\Delta/h$ の減少とともに減少する。観測値もこれと同じ傾向を示しており、一般的な性質と考えられる。

P波に対応する $V/H$ の理論値や観測値は、S波に対応するものから大きく隔たっており、観測値はPSに対応する理論値の間に挟まれている。これは観測値が平均された値であるためであり、理論値は観測値の上下限値を与えているものと考えられる。

このように $V/H$ の観測値はPSの識別に用いられるばかりでなく、震源深さに関する情報も含んでいるため、

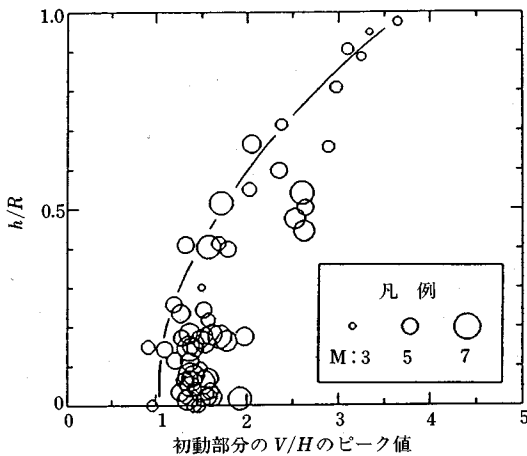


図-13 V/Hとh/Rの関係

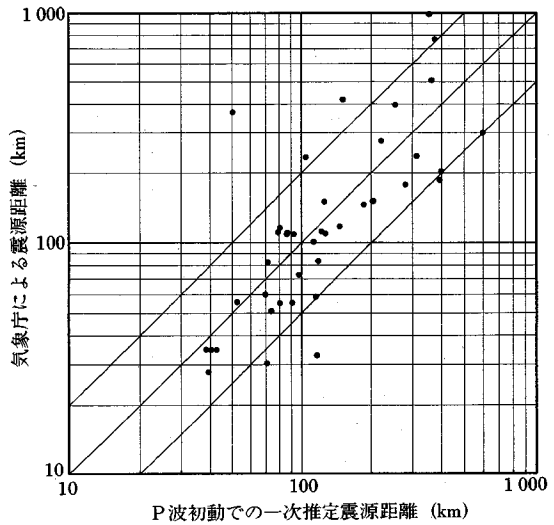


図-14 第一次震源距離推定と気象庁データの比較

震源位置の推定に際しても重要なパラメータとして有効に利用できる。

#### d) 震央距離と震源の深さの推定<sup>13)</sup>

地震波の地表面に対する入射角度を用いて、入射角が大きければ震源は深く、小さければ浅いと判断することができる。遠くの地震でもその震波線は深いところを潜ってくるため、入射角は大きくほぼ真下からの入射となり、深い地震と区別がつかない。しかし、深さが迅速に必要なのは近い地震の場合であり、遠い地震の場合には、震動被害には深さの影響は少なく、津波被害に対してはやや時間的余裕があるので、S波到来後の判断でも十分である。検知した地震をとりあえず近くの地震とみなして深さを推定しても地震警報上は問題が少ない。

図-12および図-13は、前節の方法で平滑化した振幅の比(V/H)を、震源距離Rに対する震央距離Δや震源深さhの比と対比して示したものである。これによると、平滑化振幅比(V/H)と震源距離Rから震央距離と震源の深さをおおまかに推定できることがわかる。

#### e) 震源距離の推定

P波初動の部分で震源距離を正確に推定するのは難しい。しかし、S波の到達時点がわかれば、いわゆる初期微動継続時間からかなり正確に震源距離を把握することができる。つまりリアルタイムで波動種別を識別できれば、S波到達直後に比較的正確な震源距離を知ることができるのである。ここでは、多少精度は悪いがP波初動部分の情報だけで、震源距離を推定する方法<sup>16)</sup>を述べる。

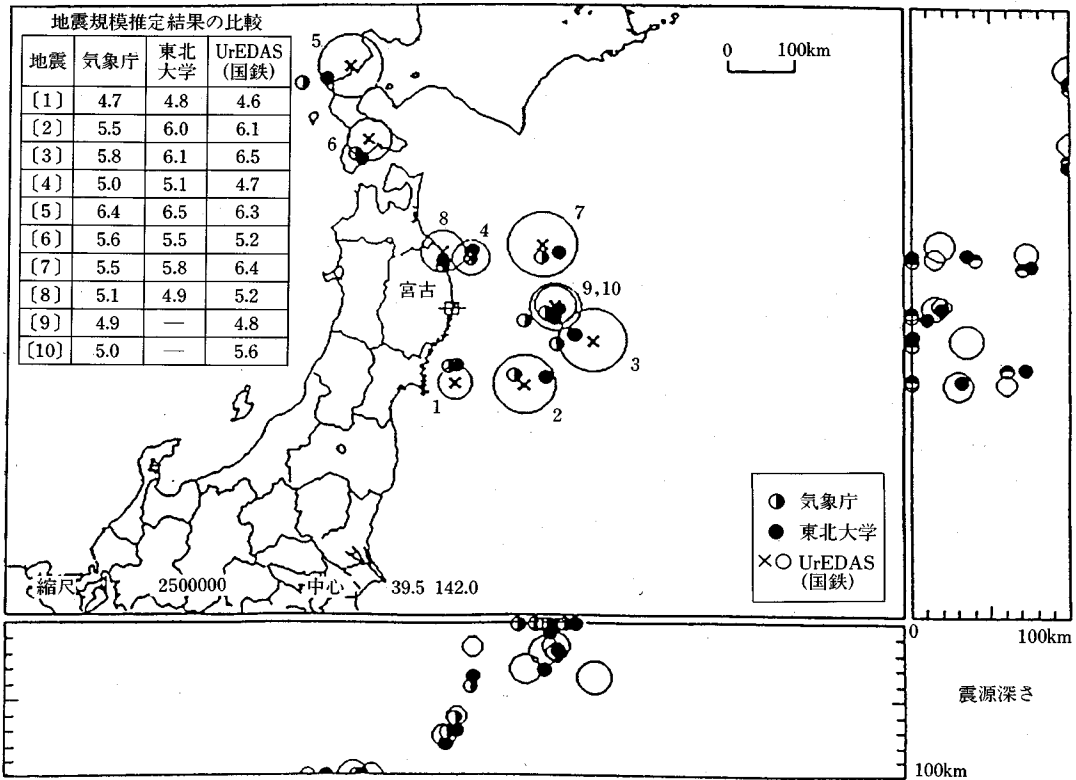
地震の規模は一般には、観測点から震源までの距離および観測点での地動振幅から各観測点毎に算定され、多

くの観測点で推定された地震規模を平均して、当該地震の規模を推定する。しかし、a)項の方法によれば、P波到来直後に地震規模を推定することができる。したがって、初動の最大値がわかれば、震源距離が概算できることになる。この方法の精度はあまりよくないが、観測データを集積すれば、図-14に示す程度の精度(概ね倍半分)で推測できるようになる。

#### f) 総合検証例

図-15は東北地方の地震について、宮古一点の3方向成分地震波形をユレダスに入力して、リアルタイム推定した震源諸元(S波到来後の確定推定結果：二次推定)を、気象庁や東北大学が数十点の観測データを時間をかけて処理して推定した震源諸元と比較したものである。これによれば、ユレダスの推定精度は、少なくともS波到来の段階では気象庁や東北大学の推定結果と比べて遜色ない程度になっていることがわかる。P波初動部分による一次推定結果の精度はこれよりは劣るので、P波警報は誤差を見込んで出すことになる。しかし、すぐ後に続くS波が到着した段階で、送出した警報の是非を判断することができる。

表-4はいくつかの遠地大地震について記録された波形をユレダスに入力して、リアルタイム処理させた結果を示したものである<sup>17)</sup>。これによると、ユレダスの内部パラメータを適当に選べば、単一観測点の地動データを使って、遠地巨大地震をもそれなりに検知し、マグニチュードや震央の大まかな位置を推定できることがわかる。この結果は、ユレダスを使って遠地巨大地震の津波や震動が感じられないような津波地震に対する警報が実現できることを示唆している。



図—15 ユレダスの震源推定結果と気象庁および東北大学の推定結果の比較

表—4 遠地大地震のユレダス処理結果と他機関の推定結果の比較

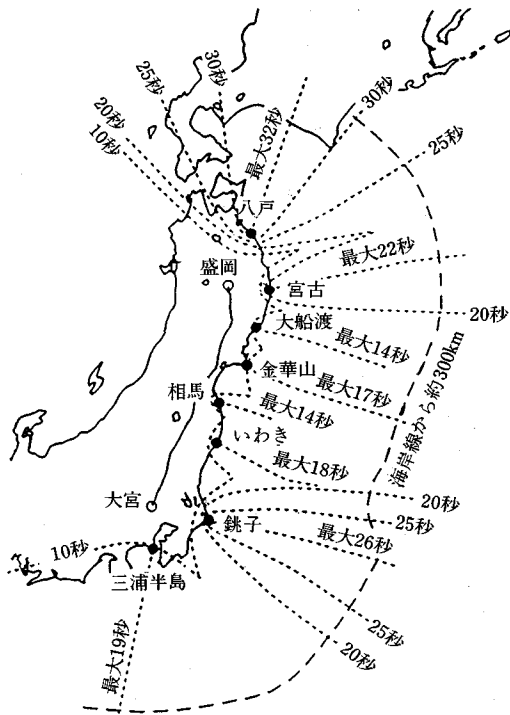
Origine Time : GMT	Lat. Long.	M ( $T_1$ : s)	$\theta$ degree	$\Delta$ : km ( $t_{ps}$ : s)	estimated by
7 May '86 22 : 53 Aleutian Is	51.42° N 174.82° W	7.6	50	4 004	USGS
		7.6 (5.4)	51	4 100 (359)	UrEDAS
11 May '86 01 : 25 East China Sea	26.40° N 125.55° E	6.6	236	1 717	USGS
		6.4 (2.2)	248	2 000 (174)	UrEDAS
26 May '86 18 : 50 Fiji Is.-1	19.60° N 178.80° E	6.8	139	7 416	USGS
		6.2 (2.0)	154	7 100 (501)	UrEDAS
26 May '86 19 : 16 Fiji Is.-2	19.60° N 178.80° E	7.2	139	7 418	USGS
		6.7 (2.7)	143	7 100 (496)	UrEDAS
14 Aug '86 19 : 46 Molucca Sea	2.10° N 126.50° E	7.3	203	3 953	USGS
		6.8 (3.0)	220	— (718)	UrEDAS

M : Magnitude,  $T_1$  : Period of initial motion (velocity).  
 $\theta$  : Epicentral azimuth,  $\Delta$  : Epicentral distance.  
 $t_{ps}$  : PS time

### (6) 余裕時間と防災効果

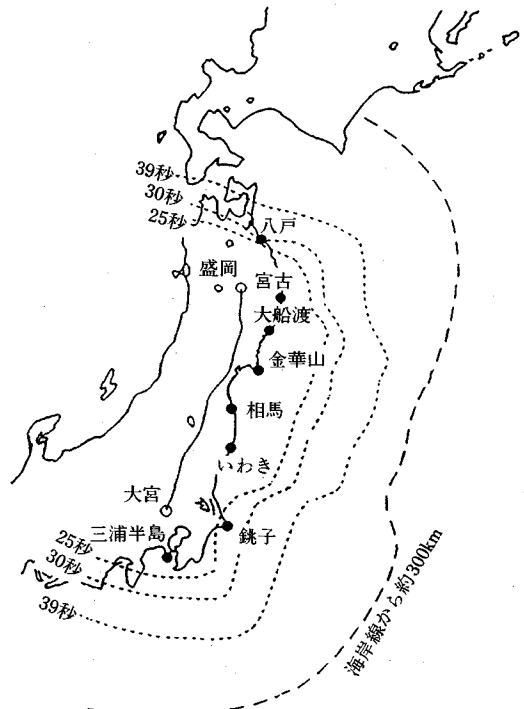
ユレダスにより獲得できる余裕時間は、検知点における初期微動継続時間に検知点から警報受信箇所までの主要動の伝播時間を加えたものから警報受信までの処理時間（現在3~4秒、1秒化を検討中）を差し引いたものとなる。初期微動継続時間(秒)はおおむね震源距離(km)を8で除した程度の値となる。また、主要動の伝播速度は4 km/s程度である。したがって、余裕時間は検知点が警報対象域から離れるほど、かつまた、震源に近いほど長くなる。震源から離れた警報対象域に検知点が置かれた場合でも、少なくとも初期微動継続時間程度の余裕時間は確保できる。

ここでは、東北新幹線は海岸線から約70 km内陸を走り、大地震は海岸線から100 km程度沖合いで発生すると簡略化して考える。海岸線検知システムで獲得できる余裕時間は、検知点と沿線各点のS波の到達時間差であり、平均17秒程度である。海岸線検知点がユレダスに置き変わったとすれば、獲得できる余裕時間は海岸線検知システムよりおよそ9秒多い約26秒となる。特に十勝沖地震の場合には、海岸線検知システムによる余裕時間がせいぜい20秒であるのに対して、ユレダスによ



S波で検知した場合

条件：S波速度 4km/s  
S波から最大動まで4秒  
処理時間 0秒



P波で検知した場合

条件：大森係数 9km/s  
S波速度 4km/s  
S波から最大動まで4秒  
処理時間 2秒

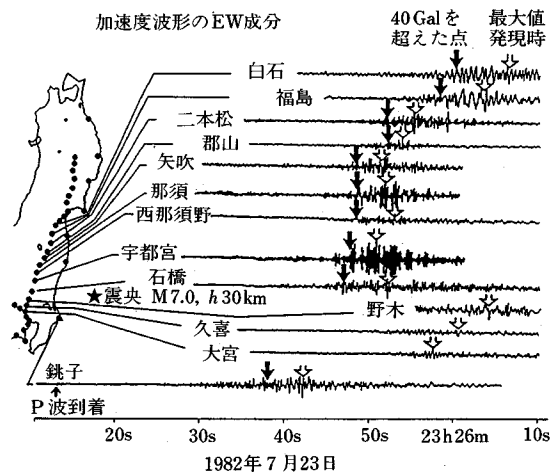
図—16 ユレダスと海岸線検知システムの余裕時間比較

れば40秒以上の余裕時間を稼ぐことができるものと期待される。

海岸線検知システムとユレダスで確保できる余裕時間を図—16に比較して示す。海岸線検知システムでは25秒程度の余裕時間が期待できるのは限られたところで発生した地震であるが、ユレダスのP波検知ではかなり広い領域で発生した地震に対して25秒以上の余裕時間を見込むことができる。

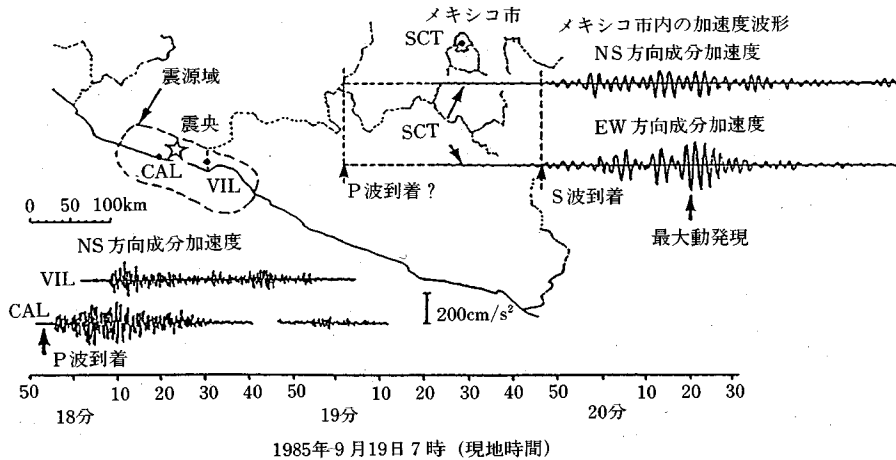
なお、東北新幹線沿線にユレダスが設置された場合の余裕時間は、ほぼ初期微動継続時間に相当する17秒程度と見積られる。すなわち、沿線ユレダスによって現在の海岸線検知システムと同程度の余裕時間を獲得できることになる。

図—17に東北新幹線の地震警報システムに捉えられた各地の地震波形を示す。地震波動が伝播する様子がわかる。各種のシステム（海岸線検知システム、海岸線ユレダス、沿線ユレダスなど）による余裕時間が、この地震の場合どのくらいになるかをこの図から読みとることができる。

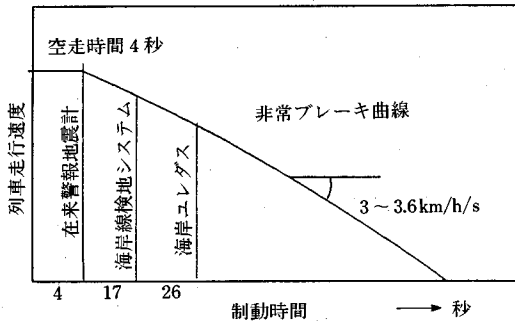


図—17 東北新幹線の地震警報システムによる地震観測波形例（地震動の伝搬）

次に、獲得される余裕時間により、列車の走行安全性がどの程度向上するかについて簡単に検討する。以下の説明の理解に資するため、図—18に簡略化した非常制



図一19 1985年ミチョアカン地震の地震動伝播状況



図一18 簡略化された非常制動曲線

動曲線を示す。

鉄道の非常制動は毎時3.6 km/h程度が限度で、平均3 km/h程度である。したがって、海岸線検知システム（平均余裕時間17秒）およびユレダス（平均余裕時間26秒）によって、列車の走行速度は、それぞれ約50 km/hおよび約80 km/hだけ減速される。

走行安全性が運動エネルギーに比例すると考えれば、走行安全性は走行速度の自乗に比例することになる。したがって、240~270 km/hで走行している列車の安全性は、海岸線検知システムでは1.5倍程度に向上し、ユレダスでは2倍以上にまで向上するものと見込まれる。また、240~270 km/hで走行する列車が非常停止するまでに大きく揺れる中を走り続ける距離は、沿線のみでの在来警報システムで3 km程度、海岸線検知システムで2 km程度、ユレダスで1.5 km程度と順次短くなる。

こうした減速効果によって脱線・転覆や被災箇所突入の危険性が大幅に低下するものと期待される。

さらに、従来の警報装置や海岸線検知システムでは地震の影響を的確に把握できないため、地震後の対応に時間を要するが、ユレダスの場合、検知した地震の全体像

が把握されており、地震後の運転再開をより合理的に迅速に行うことができるという効果もある。

1985年のメキシコ（ミチョアカン）地震を例にとれば、太平洋沿岸にユレダスがあれば、図一19に示すように警報から地震動（P波）がメキシコシティに到達するまでに1分、メキシコシティでの地震動が大きくなり被害が発生するようになるまでにさらに1分、の時間的余裕が生み出せる。したがって、メキシコシティにしかユレダスがない場合でも1分の余裕時間が確保される。人は1分で100 m以上移動できるので、事前に地震時の望ましい避難行動や対策（高層ビルの各階などに耐震シェルターを設けるなど）が周知徹底されていれば、ユレダスにより獲得される余裕時間で人的被害が大幅に軽減できるものと推測される。

また、ユレダスは地震P波検知後3秒でマグニチュードなどの地震諸元を把握できるため、津波の有無と襲来地域をP波検知後4秒程度で判断することができる。したがって、ユレダスを市町村などで普及している防災無線などと直結すれば迅速な避難行動を喚起することができ、津波襲来までにはかなりの余裕時間を確保することができる。これは気象庁が整備を進めている早期地震津波警報網からの津波警報・地震情報（地震後3分程度を目標）を補完するものとなる。

以上のように、数秒以内の迅速な警報と1分程度での的確な地震情報をもたらすユレダスは、鉄道・道路などの輸送・交通機関の地震時安全対策、高層ビルの制震システムの起動、高層ビルのエレベータ制御、化学プラントや原子力発電所などの地震時対策、港湾関係者・沿岸住民のための津波警報システムなど、広く一般の地震防災に役立つものと期待される。

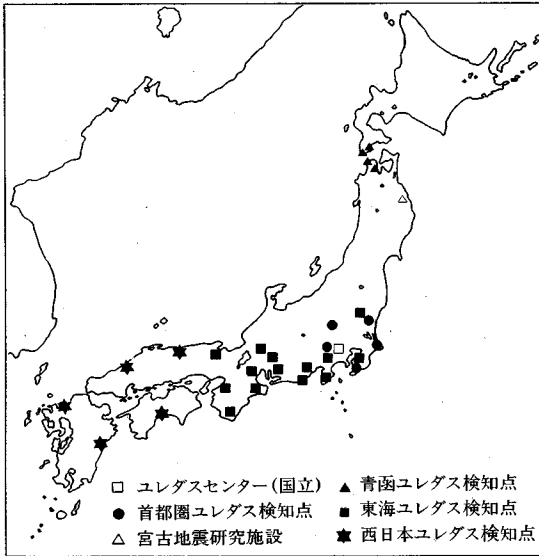


図-20 日本国内のユレダス分布

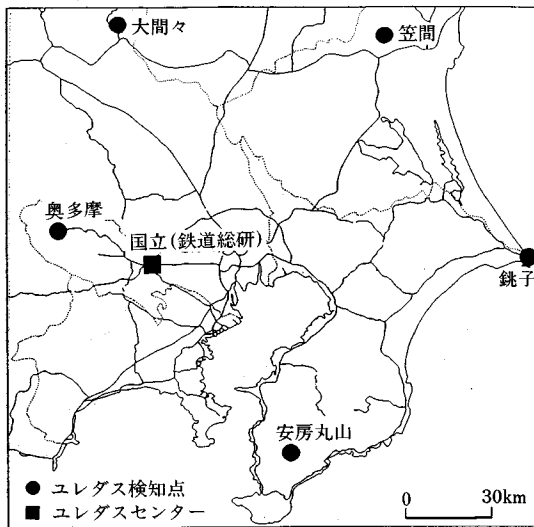


図-21 首都圏ユレダス

(7) ユレダスの現状と将来

1995年現在、日本には3つのユレダスネットワークが稼働している。そのほかユレダス発祥の地宮古市や鉄道総研の国立の研究所、カリフォルニア工科大学などに単独のユレダスが研究用に設置されている。図-20にこれらのユレダスの分布を示す。

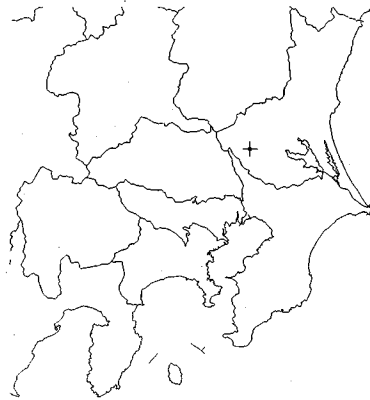
a) 首都圏ユレダス

これは運輸省の助成研究の一環として首都圏を対象に構築されたものである。図-21に示すように5基のユレダスからなり、1989年春に完成している。統合されたユレダス情報のうち、 $M \geq 3.5$ で首都圏近傍(概ね東

編〇〇 防災担当者 〇〇様

93-01-06 08:14 042573-3001\*01  
1/6 08:14 FROM:RTRI/SDAC PAGE:01/01

地震発生 1993年 1月 6日 8時10分38秒  
北緯: 36.1' 東経: 139.9' マグニチュード: 4.0 深さ: 59km  
発生地域: 茨城県南西部 [関東]



\*\*\* ユレダス地震情報 \*\*\*

この情報は部外へは絶対に出さないようにお願いします。  
なお、この地震に関する公式の情報は気象庁より発表されます。

< ただ今FAX配信テストを実施しています >

ユレダス地震最新情報 Ver. 3.01

(C)RTRI

図-22 首都圏ユレダスファックス配信例

京駅を中心に半径200km程度以内)の地震情報については図-22に示すような形で、約50のユーザーに対してテスト的にFAX送信(一般公衆回線使用)されている。なお、この情報配信に要する時間はP波検知後4~5分であり、専用回線と放送型ポケットベルを使用したアメリカのキューブ(補遺2)よりやや遅い。現在のユレダス地震情報のFAX配信速度は、地震後の対応を判断する情報(地震情報)としては十分な早さではないかと考えている。しかし、業種によってはより早い地震情報や警報にも使える迅速な情報(P波情報)が必要になるものと思われる。そこで、P波情報については4~5秒で、地震情報についてはFAXを用いても2~3分で、伝達されるよう検討を進めている。地震後については、気象庁の情報も併せて利用できる。

b) 東海道新幹線ユレダス

これは、沿線25箇所を設置された在来型の警報地震計とともに東海道新幹線(JR東海)の地震警報システムを構成している。東海道新幹線ユレダスは、14基のユレダス、25箇所の警報受信端末「ストップ」(STOP: Stop Trigger Operation Processor, 変電所にあり、ここに設置されている在来型警報地震計からの警報も併せて隣接する変電設備にき電停止信号を送出する)、CTCセンターおよびこれらを結びつける地震情報中継





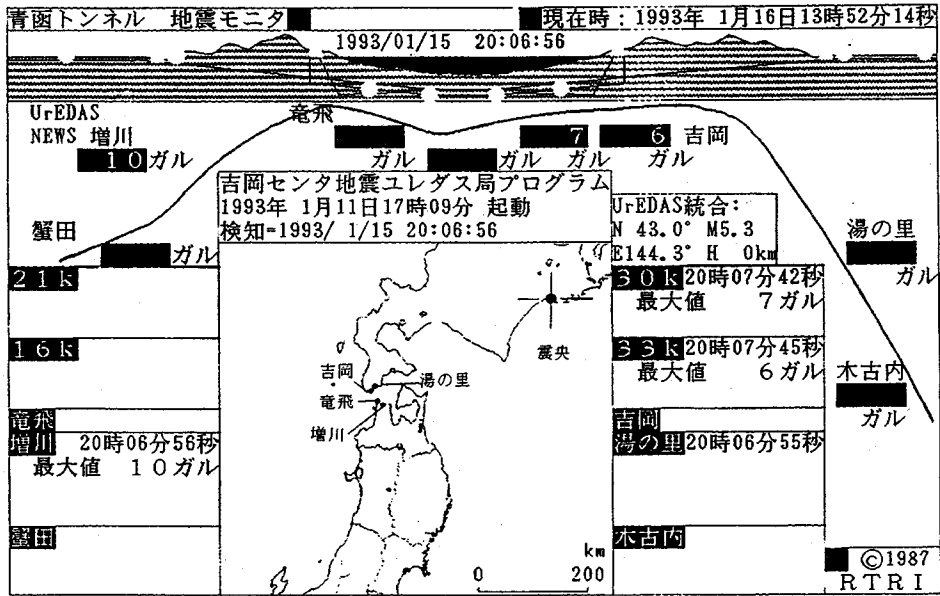


図-24 青函トンネルユレダスの動作例 (1993年釧路沖地震)

を発生している。御在所ユレダス以外のユレダスは当該地震が東海道新幹線には大きな影響を与えないと判断して警報を発生していない。しかし、沿線警報地震計からの警報は、もっとも近いユレダスが警報を出した場合とほとんど同時か、またはやや先行して出されており、沿線の警報地震計は期待通りの働きをした。ただし、運転再開の指示書は、地震直後に発生した大阪地区の停電により情報が途絶し出力されなかった。無停電電源装置のバッテリーが機能しなかったのが原因であるが、防災システムを維持管理する上での貴重な教訓として受け止めている。また、沿線警報地震計の警報動作を早める方策として、警報対象を隣接変電所までに限定してP波警報処理時間を1秒に短縮し、さらに在来の警報機能をも兼ね備えた沿線設置用のユレダス(コンパクトユレダス)を開発している。

c) 青函ユレダス

青函トンネルの地震防災システム(JR北海道)には、4基のユレダスからなるネットワークが含まれている<sup>4)</sup>。地震後の合理的な対応を判断するため、規模や震央位置の統合情報がCTCのCRTにはぼりリアルタイムで表示される。図-24に1993年釧路沖地震の際の表示例を示す。

また、このシステムでは、地震動がモニターできるのみでなく、被害状況をも的確にリアルタイムモニターできる(補遺1参照)。

d) そのほかのユレダス

研究用ユレダスが(財)鉄道総合技術研究所(以下、

鉄道総研と略称)の国立研究所(1987年からユレダスによる地震観測開始)および宮古市(1984年からユレダスによる地震観測開始)に設置されている。

さらに、地震断層の存在がユレダスの推定精度に与える影響や断層運動の動きをユレダスが捉えられるかどうか等を検討するため、カリフォルニア工科大学(カルテック: Caltech)の地震研究所と協力して、クレスゲ地震観測所(米国加州パサディナ)にユレダスを設置し、1993年9月から観測を開始した<sup>18)</sup>。このパサディナ・ユレダスは1994年1月のノースリッジ地震およびその余震群の自動モニターに成功している<sup>19)</sup>。図-25はパサディナ・ユレダスの位置およびノースリッジ地震のモニター例である。本震発生後最初の24時間で700個あまりの地震を検知して、うち約450個についてはその規模と震源を自動的に推定している。さらに、その後の余震発生状況についても的確にモニターし続けている。本震に対する動作状況を調査したところ、図-26に示すように、断層破壊の伝播と整合する震央方位の変動が記録されていた。

パサディナ・ユレダスにより検知された地震群はカルテックの地震研究所の一室にあるユレダス情報表示装置に地震発生後直ちに表示されている。ノースリッジ地震の余震の場合、二次情報でも10秒前後で表示される。なお、ユレダスの情報はキューブ(補遺2)にも送られ、迅速な地震情報として参考にされている。

現在、国内25基、海外(米国カリフォルニア州)1基のユレダスが活躍中である。

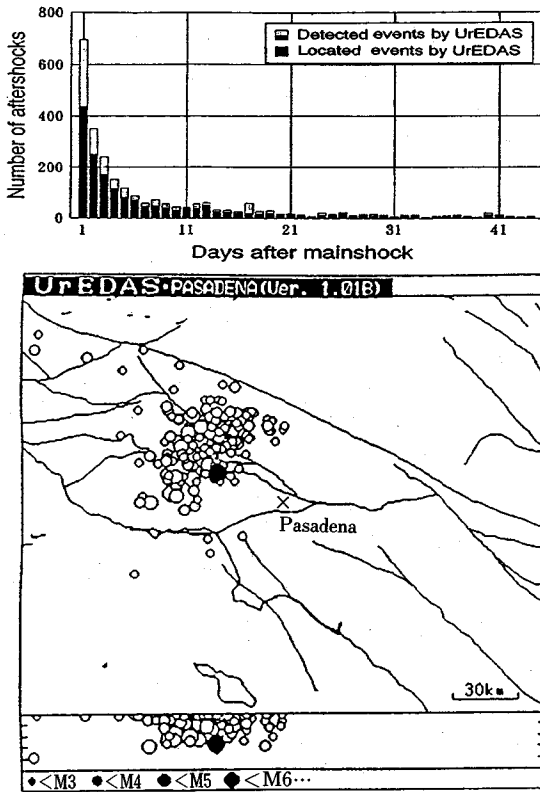


図-25 パサディナ・ユレダスの動作例

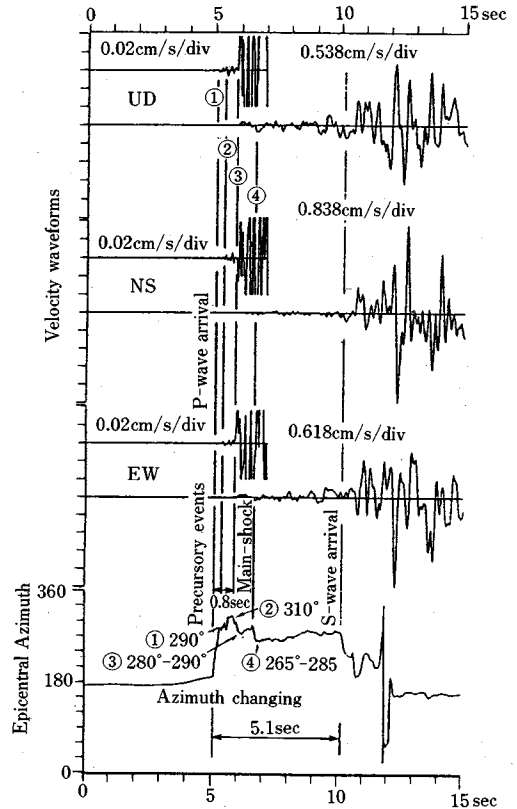


図-26 パサディナ・ユレダスによるノースリッジ地震の断層破壊

#### e) ユレダス 2100 計画

20 km 間隔でユレダスを全国に展開すれば、ほぼどこでも被害地震の主要動が到達する 5 秒以上前に警報を受け取ることができ、多くの産業分野・都市施設・市民生活などの防災強度が高められる。この時ユレダスの総数は 2100 基程度になるが、日本全土を覆う防災情報ネットワークとして機能させることが可能になる。このネットワークは地震に限らずあらゆる自然災害に対応できるものと期待される。これがユレダス 2100 ネットワーク構想<sup>20)</sup>である。まだ、構想の 1% 強が実現しているに過ぎないが、多くの方々のご協力・ご支援を得て大きく成長させたいと考えている。

#### 4. 耐力の調査 (被害推定)

地盤や構造物の耐力 (抵抗力) を想定される地震力を上回るようにすることは地震防災の基本である。しかし、建設当初十分な抵抗力があっても、経年劣化により想定地震力を下回ることが考えられる。寒冷地や、降雨の多い地域では、季節により地盤の抵抗力が変動すると考えられる。つまり、「現在の」抵抗力を的確に把握しておくことが防災対策の基本となる。経年劣化や地震により

抵抗力が低下し、想定される地震に対して十分な抵抗力を発揮できないものについては強化し、新しく建設されるものは十分な耐震性を保持するように設計・施工する。

事前に強化した構造物や地盤、新設構造物などが所定の抵抗力を具備しているかを調査することも重要である。こうした初期の力学的特性が把握されていれば、メンテナンスも合理的に実施することができるし、被災程度を定量的に把握することが可能になる。

地震被害箇所は、地震によってあぶり出された弱点箇所である。あらかじめどこが弱点箇所かを調査しておけば、被害を受ける前に強化することができるし、運行に支障がない弱点箇所ならば、地震被害発生時のモニタリングポイントとしても利用できる。また、あらかじめ線路沿線地盤や構造物の地震動特性がわかっているならば、当該地震による地震動分布を的確に推定把握することができる。

地震被害発生には、地震動の大きさ、周期および継続時間が関係する。これらのパラメータには地震そのものが関係しているのはもちろんであるが、被害地点の表層

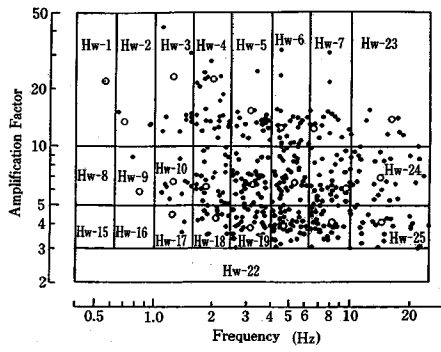


図-27 固有振動数と増幅倍率に基づく地盤分類

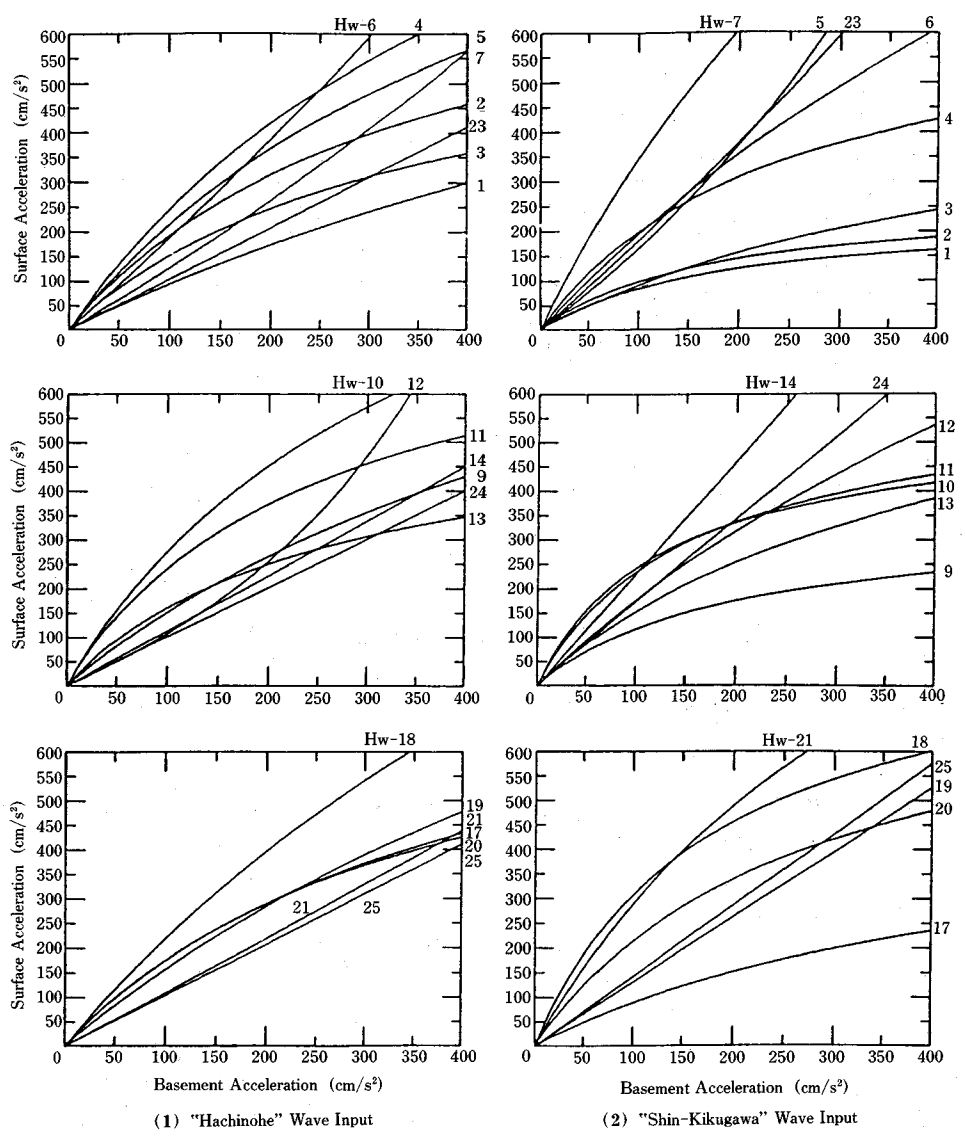


図-28 代表地盤の地震応答曲線例

地盤や構造物の地震動応答特性がかなり大きく影響する。したがって、弱点箇所は表層地盤や構造物の地震動特性を調べることによってあぶり出すことができる。

### (1) マイクロゾーニング

前節の考えで沿線地盤や構造物の特性を細かく調査分類して、地域ごとに区分していくいわゆるマイクロゾーニングを実施した<sup>21)</sup>。大規模地震対策強化地域に含まれる東海道新幹線の区間を手始めに、建設時のボーリング調査データを収集・分析して、最終的に表層地盤を25種類の代表地盤にモデル化している。周波数と増幅倍率で分類した地盤分類を図-27に示す。各代表地盤について、波形振幅を相似的に伸長・圧縮して最大加速度150 Gal および 300 Gal に調整した2種類の地震波形(大地震と中小地震に対応する)に対する応答を算定し、基盤(入力)最大加速度に対する応答最大加速度の関係(応答曲線)を求めた。図-28にいくつかの例を示す。沿線に沿った地盤種別に対して、基盤加速度値をマグニチュードMおよび震央距離・深さなどをパラメータにして推定すれば、その地盤の応答曲線を用いて地表面での最大加速度が推定できることになる。推定された地表面最大加速度とさまざまな構造物の被災程度を既往の被害地震について比較して、累積被害曲線を求めた。その結果の一例を図-29に示す。

### (2) ヘラスの構築

「ヘラス」(Hazards Estimation and Restoration Aid System: 災害予測・復旧支援システム)は、後述する常時微動を用いた地盤や構造物の振動特性調査結果(マイクロゾーニング結果)をベースに、ユレダスの情報を受けて発生した地震に対する被害状況を迅速にかつ詳細に推定するシステムである。災害発生状況を詳細に推定することによって迅速で合理的な復旧を支援する。地震発生後数分程度で推定結果を画像表示したり、数値を数表化して出力することを目指している。ヘラスは施設の合理的なメンテナンスをも支援できるように設計されるべきで、日常からその機能を使いこなせるように訓練できる必要がある。つまり、震災時にはじめて使うのではなく、日常のメンテナンスに用いてその操作に習熟し、災害時にはこれを駆使して、状況把握・対策策定などを合理的に迅速に行えるようにシステム設計されなければならない。

### (3) 第一世代ヘラス

地震被害予測・復旧支援システム「ヘラス」の最初のプロトタイプシステムは、上述の考え方で被害予測を行うものである。最大基盤加速度  $a$  を、つぎの中村・富田(1984)式<sup>22)</sup>で推定し、これに表層地盤の増幅特性を

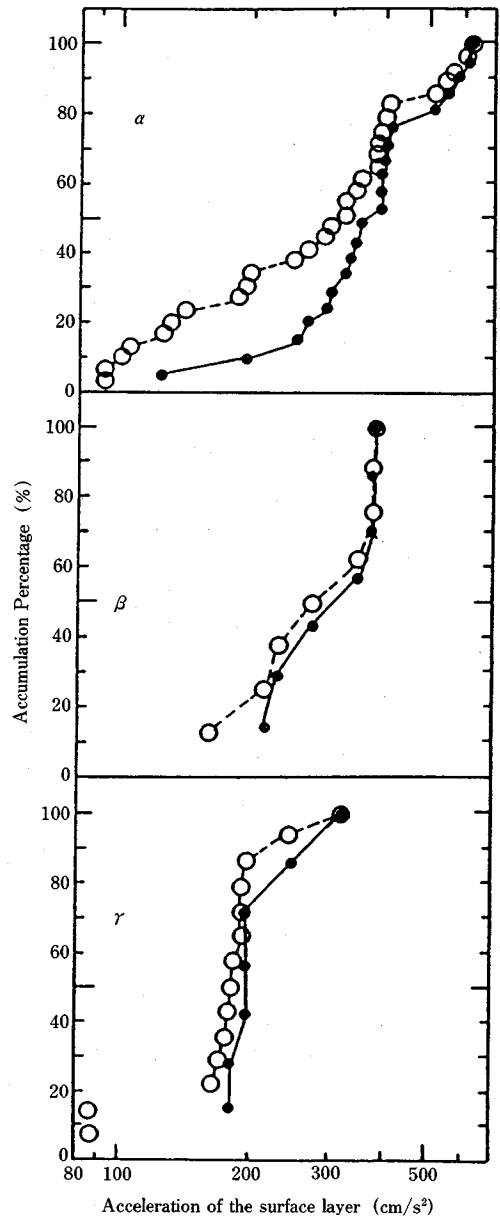


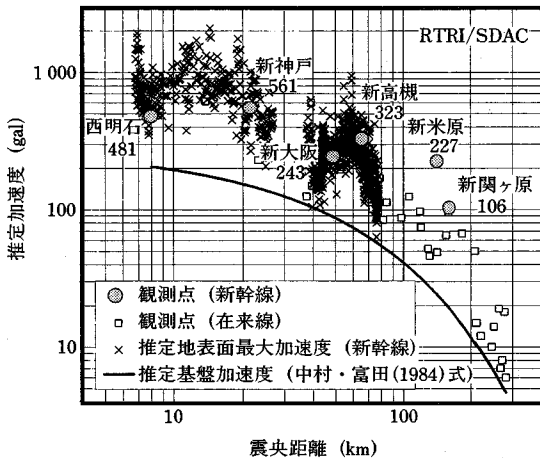
図-29 地表面最大加速度に対する累積被害曲線

考慮して沿線の地表面加速度を推定する。

$$\log a = 0.168M - 0.5 \times \log(\Delta + h) - 0.0551 \\ \times 10^{-0.156M} \times \Delta + 1.86$$

ここで、 $M$ 、 $\Delta$  および  $h$  はそれぞれ、マグニチュード、震央距離 (km) および震源深さ (km) である。

また、地震後、沿線で計測された最大加速度を入力すれば、沿線の推定最大加速度が補正されるようになっている。ただし、沿線地盤の地震動特性は、後述する常時微動を用いて詳細に把握したもの(防災管理基図、後述)



図一30 1995年兵庫南部地震の新幹線沿線最大加速度の推定値と観測値

をデータベースとして保有している。ヘラスでは、類似のシステムと異なりボーリング調査結果に基づく推定地盤特性は採用していない。

図一30は1995年1月17日の兵庫県南部地震の時の山陽新幹線沿線の地表面最大加速度を気象庁による震源データを基に推定したものである。沿線地表面加速度は、中村・富田(1984)式による基盤加速度に常時微動で推定された表層地盤の増幅倍率を乗じて推定した。沿線変電所での計測最大加速度も表示しているが、推定値は概ね観測値と整合していることがわかる<sup>23)</sup>。

また、使用している累積被害曲線は図一29などを基本にしているが、これはマグニチュードMが比較的大きい場合のものである。Mが小さい場合、加速度が大きくても破壊力はそれほど大きくないという経験に基づき、Mが小さくなるほど推定最大加速度に小さな係数を乗じた実効加速度を算定する。実効加速度に対して図一29などのグラフを適用し、被害程度を推定する。実効加速度係数を合理的に決定するのに十分なデータがないので、とりあえず表一5のように設定しているが、被害データが蓄積された段階で見直す必要がある。

被害予測結果は、次の3段階に分けて表示される<sup>24)</sup>。すなわち、本格的な復旧が必要な被害(α)、応急工事で復旧できる程度の被害(β)、軽微な被害(γ)および無被害(δ)である。種々の構造物のうち、盛土と高架橋に対するそれぞれの被害段階に対する具体的な被害程度を表一6に例示する。α、βおよびγに無被害δの割合を加えると100%になる。

この被害推定は地盤特性については比較的详细に考慮されているが、構造物については種別毎に平均的な特性しか考慮されていないことに注意する必要がある。したがって、現在のヘラスを用いた被害予測は、α、β、γな

表一5 最大加速度から実効加速度への変換係数

M	加速度補正倍率
5.0~6.1	0.1
6.2, 6.3	0.2
$6.4+0.1 \times i$	$0.2+0.1 \times i$
7.0, 7.1	0.9
7.2~8.0	1.0
8.1~8.8	1.1

注：iは0から5までの整数

表一6 各種構造物の被害程度分類

路盤(盛土、橋台裏)の被害程度の評価基準

被害程度	評価基準
α	沈下量50cm以上、流失(大)、すべり破壊(大)崩壊
β	沈下量20cm以上、流出(小)、すべり破壊(小)
γ	沈下量20cm未満、路盤亀裂
δ	微小被害(記載のみを含む)

高架橋(ラーメン)の被害程度の評価基準

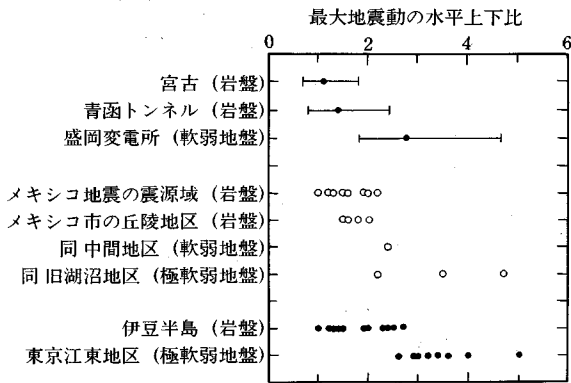
被害程度	評価基準
α	倒壊、転倒、柱の座屈
β	傾斜、桁の破損欠落、亀裂(大)、柱、梁の剝離剝落(大)
γ	亀裂(小)、柱、梁の剝離剝落(小)
δ	微小被害(記載のみを含む)

どで表示された被災予想箇所について、該当構造物の振動特性を防災管理基図で確認して被害発生予測を補正しなければならない。

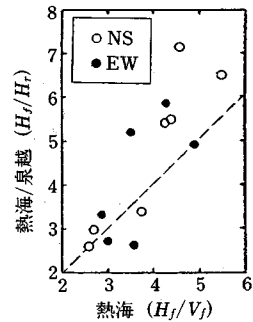
現在では、次節で述べるような地盤と構造物の詳細な地震動特性を考慮した精度の高い合理的な被害予測手法が開発され、新しいヘラスの構築が進んでいる。

#### (4) 地盤および構造物の地震動特性の推定

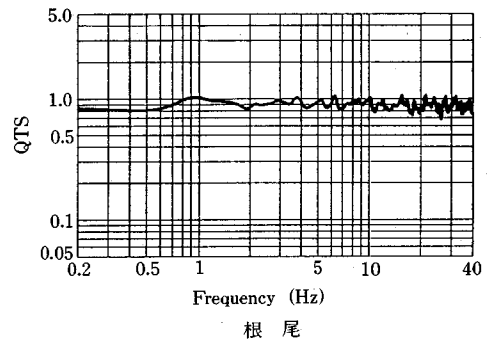
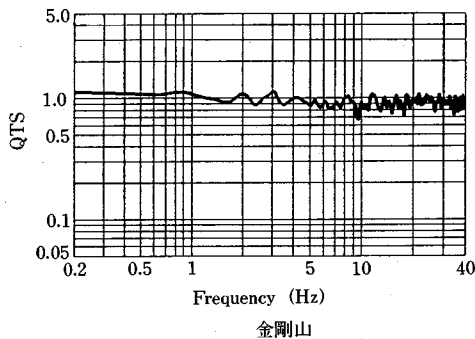
地震被害に影響を与える表層地盤の地震動特性をボーリング調査結果から推定するのではなく、実際の地震動特性を稠密に把握できれば理想的である。被害推定の精度も飛躍的に向上するものと期待される。この目的のためには、簡単にしかも精度良く地盤の特性を抽出できる方法を開発する必要がある。比較的簡単に計測できる常時微動を使って、表層地盤の地震動特性を推定する試みは古くからある。しかし、最近まで、微動の震源や微動を構成する波動種別の不確実性などが災いして、数多く測定されてはいるけれども参考データとして取り扱われることが多かった。常時微動の有効性が今なお論文のタイトルとして掲げられる<sup>24)</sup>ほど、その実用性には疑問符がつきまわっていたのである。



図—31 最大加速度の水平／上下比と表層地盤の関係



図—32 最大加速度の増幅度と最大加速度の水平／上下比との関係



図—33 岩盤地帯のQTS例

こうした状況を背景に、強震観測データからヒントを得て地動の水平動と上下動の関係に着目し<sup>25)</sup>、表層地盤の地震動特性を簡便に推定する新しい手法を開発した<sup>26)</sup>。これは、地盤の地震動特性を水平動と上下動のスペクトル比で近似するものである。ここでは、このスペクトル比をQT (Quasi-Transfer: 疑似伝達) スペクトルまたはQTSと呼ぶ。

図—31に示すように、地震動の各方向の最大加速度は、岩盤地帯では水平動と上下動とで大きな相違はないが、軟弱地盤では水平動の方がかなり大きい。また、図—32に示すように、堆積地盤表面での観測値とその基盤につながる岩盤での観測値の比率(堆積地盤の増幅特性を示す)は水平最大加速度と上下最大加速度の比率とよい相関を示す。

一般に地動の源には、風雨、波浪、火山、地震などの自然的な要因によるものと、交通(道路、鉄道)、工場、工事など人間生活に起因するものがある。こうしたさまざまな要因で生じる振動が混合したものが常時微動で、一般にはその発生源は特定できない。特に方向性のない堅固な地盤では、こうした振動(常時微動)が特定方向に大きくなる理由はない。つまり、統計的にはあらゆる方向に均一に振動していると考えられる。

図—33は、岩盤地帯における常時微動の測定結果からQTスペクトルを算定した例である。これによると、堅固な地盤においては水平動のスペクトル $H_b$ と上下動のスペクトル $V_b$ がかなり広い振動数範囲でほぼ等しい( $H_b \approx V_b$ )ことがわかる。

このような微動が、表層地盤の増幅作用や盆地地形の縁辺部などで生じた表面波の影響を受けることになる。図—34に堆積地盤の典型的な地形構造を示す。各場所の地動または地動スペクトルを図に示す記号で表す。地中基盤での地動( $H_b$ ,  $V_b$ )は、堆積層の影響を受けているが堆積層が軟弱であるほど影響は小さく、概ね近傍露出岩盤での地動( $H_r$ ,  $V_r$ )と同一とみなせる。ここでは直下地中基盤の地動を基準地動とみなして、表層堆積地盤の増幅特性 $A$ を考える。表面波の影響を添字 $s$ で表現すると、堆積地盤表面の地動スペクトル $H_f$ ,  $V_f$ は次のように表される。

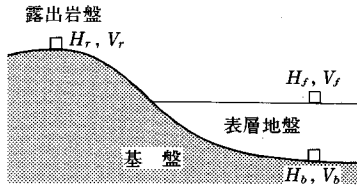
$$H_f = A_h \times V_b + H_s \quad (12)$$

$$V_f = A_v \times V_b + V_s \quad (13)$$

したがって、

$$T_h = H_f / H_b = A_h + H_s / H_b \quad (14)$$

$$T_v = V_f / V_b = A_v + V_s / V_b \quad (15)$$



$H_f, H_b, H_r$ : 水平方向の地動または地動スペクトル  
 $V_f, V_b, V_r$ : 上下方向の地動または地動スペクトル

図-34 堆積地盤の地盤構造

ここで、 $A_h$  および  $A_v$  は堆積層による水平動および上下動の増幅特性を示す。水平動はせん断波 (S波) の重複反射で増幅され、上下動は疎密波 (P波) の重複反射で増幅される。一般に堆積表層ではポアソン比が 0.45 を上回っており<sup>27)</sup>、P波はS波より3倍以上速い。また、軟弱地盤ではS波の伝播速度が 100 m/s を下回ることもあるが、含まれる水の影響でP波は 1000 m/s を越える。このため、堆積層で水平動が増幅される振動数付近では事実上上下動の増幅はほとんどないと期待される。したがって、この付近の振動数では、 $V_f \approx V_b$  となるはずで、 $V_f$  が  $V_b$  より大きくなるのは表面波の影響を表していると考えられる。そこで、 $V_f/V_b (=T_v)$  で表面波の影響度を見積もり、水平動の増幅特性を式 (16) で補正することを提案している<sup>26)</sup>。すなわち、補正増幅特性  $T_h^*$  は次のようになる。

$$T_h^* = (H_f/H_b)/T_v \quad (16)$$

$$= H_f/V_f / (H_b/V_b)$$

$$= QTS / (H_b/V_b)$$

ここに、 $QTS = H_f/V_f$  である。 $H_b/V_b \approx 1$  であるから

$$T_h^* \approx QTS$$

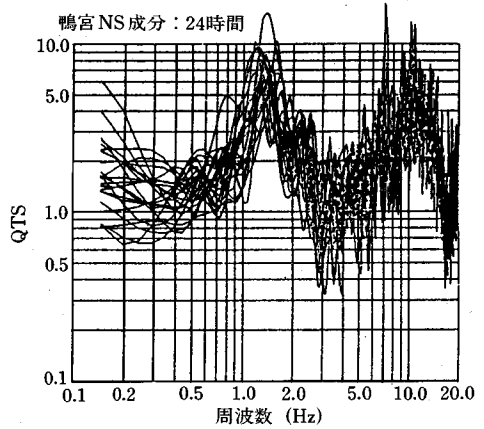
$$= (A_h \times H_b + H_s) / (A_v \times V_b + V_s)$$

$$= A_h (H_b/V_b) / (A_v + (V_s/V_b))$$

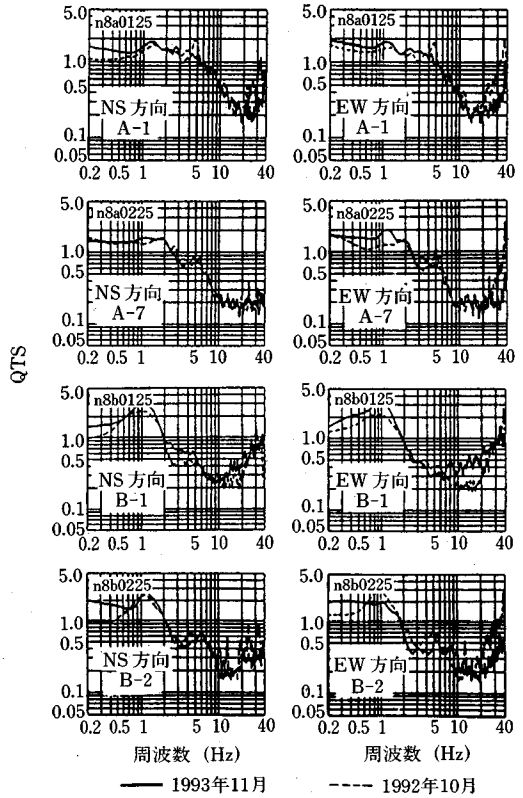
$$+ (H_s/V_s) / (1 + A_v/(V_s/V_b)) \quad (17)$$

$$\approx A_h / (A_v + \beta) + (H_s/V_s) / (1 + A_v/\beta) \quad (18)$$

ここに、 $\beta$  は、 $\beta = V_s/V_b$  であり、Rayleigh 波の影響度を表す。Rayleigh 波の影響がない場合 ( $\beta=0$ )、 $QTS \approx A_h/A_v$  となる。Rayleigh 波の影響が大きい場合には、 $QTS \approx H_s/V_s$  となる。水平動の最低次の固有振動数  $F$  においては、 $A_v \approx 1$  であり、 $A_h$  はもちろんのこと、 $H_s/V_s$  もピークを示す<sup>28)</sup>。このため、QTS は振動数  $F$  で安定したピークを示すことになる (図-35 参照)。また、Rayleigh 波の影響が大きい場合でも、水平動の一次固有振動数  $F$  付近においては、 $V_s$  は小さい (このため  $H_s/V_s$  がピークを示す) ので、基盤における微動  $V_s$  が相対的に十分大きければ、 $QTS \approx A_h$  となるものと期待される。



(a) 短期安定性



(b) 長期安定性

図-35 QTS の安定性

$F$  より高く、上下動の一次固有振動数より低い振動数領域では、Rayleigh 波の影響を直接的に受ける。つまり、影響が大きくなるとともに、QTS は  $A_h$  より小さくなる。また、上下動の固有振動数周辺 ( $>3F$ ) でも QTS は  $A_h$  より小さくなる。

したがって、QTS は、Rayleigh 波の影響の大小にかかわらず、表層地盤の SH 波の重複反射による一次固有



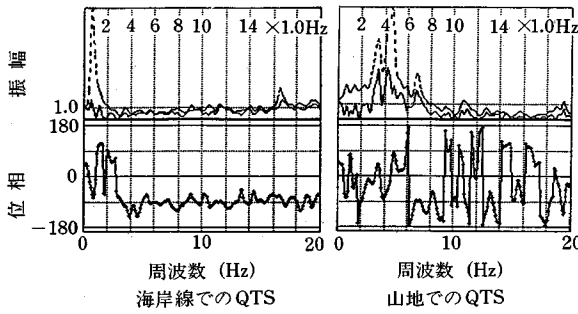


図-36 QTSの位相差スペクトルの例

振動数とその増幅倍率を的確に表現できることがわかる。さらに、Rayleigh波の影響がかなり大きい場合には、比較的広い振動数領域で、 $QTS < 1$ 、となり、Rayleigh波の影響が小さい場合には、上下動の影響で $F$ の3倍以上の振動数で局部的に、 $QTS < 1$ 、となることが予想される。こうした性質を利用して、QTSの形状からRayleigh波の影響の大きさを見積もることができると思われる。

また、Rayleigh波が微動の主体的な成分だとすれば、微動のQTSの位相差スペクトルが主体的な振動数帯域で $\pm 90^\circ$ となる<sup>29)</sup>。これからも主体的な波動を確認することができる。ちなみに、一般の測点ではQTSの位相差スペクトルはランダムであるが、サンフランシスコのマリーナ地区のように非常に軟弱な埋め立て地盤では位相差スペクトルからもRayleigh波が卓越していることが確認される(図-36参照)。

微動を構成する波動種別は、実体波が主体である場合、Rayleighが主体である場合、それぞれが同じように含まれる場合など、場所や気象条件、震動源の状況によって変化するものと考えられる。このような微動に対して、QTSを算定すれば、表層地盤のSH波の重複反射による一次固有振動数とその増幅倍率を的確に推定することができるのである。

なお、近傍露出岩盤での微動を基準にして、表層地盤特性 $Thr$ は次のように表せる。

$$Thr = A_h + H_s/H_r \quad (19)$$

これによると、 $Thr$ は概ね $A_h$ より大きい。これに対して、地表面微動のQTSは概ね $A_h$ より小さい。したがって、 $Thr$ による推定増幅度はQTSによるものより大きくなる。また、 $Thr$ には表面波の影響を受けたみかけの増幅ピークが含まれるので、表層地盤本来の固有振動ピークを見失う可能性がある。これを避けるには表面波の影響を取り除く処理が必要で、補正処理に上述の処理を採用すれば、結局、地表面微動のQTSを算定することになる。

次に、地表面微動のQTSから推定される卓越振動数

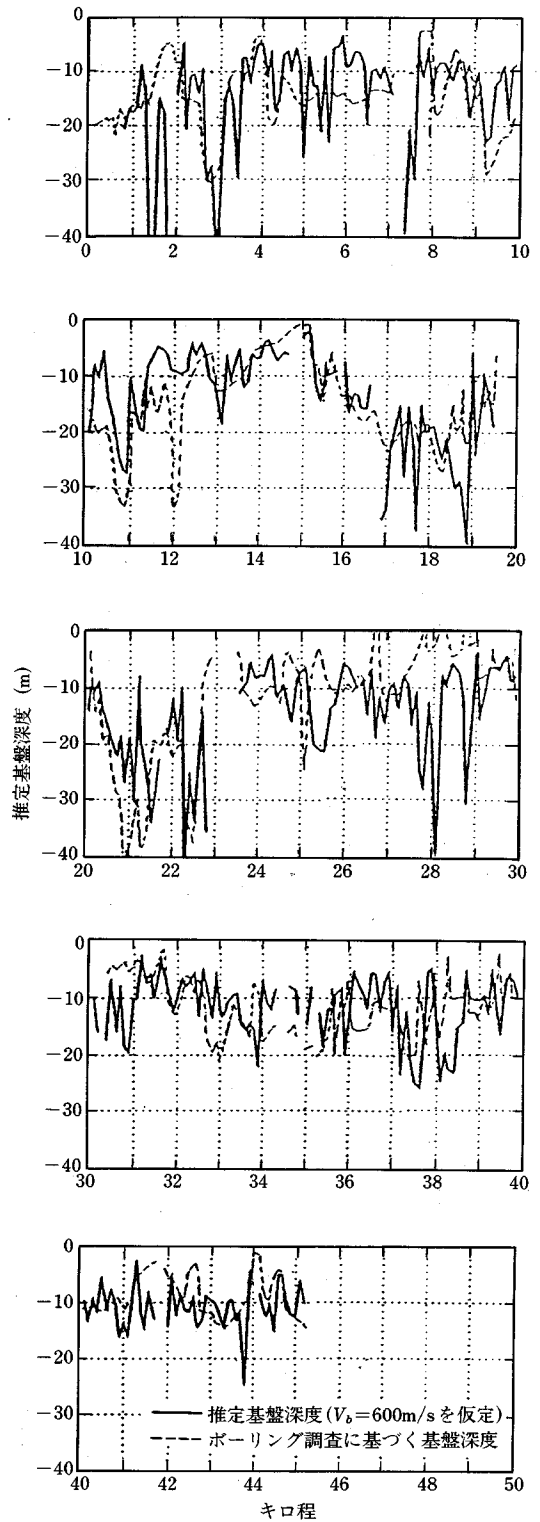
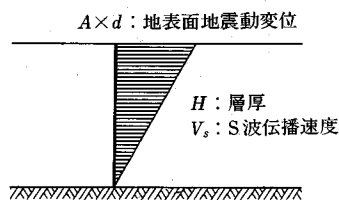


図-37 東海道新幹線の地質縦断とQTSによる層厚推定の比較



表一七 地盤歪と変状の関係

ヒズミの大きさ	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
現象	波動, 振動		き裂, 不等沈下		スベリ, 締固め, 液状化	
力学的特性	弾性		弾塑性		破壊	
定数	せん断定数, ポワソン比, 減衰定数				内部摩擦角 粘着力	



図一三九 地盤のせん断変形図

a) 地盤

地盤の場合には、表層地盤のせん断歪  $\gamma$  に着目する。表一七は石原によってまとめられた地盤災害と  $\gamma$  の大きさの関係<sup>32)</sup>を示したものである。これによると、 $\gamma = 1000 \times 10^{-6}$  から地盤が非線形化しはじめ、 $\gamma > 10000 \times 10^{-6}$  では大きな変状や崩壊が生じるようになる。

表層地盤のせん断変形を図一三九に示したように簡略化し、表層地盤の平均的なせん断歪  $\gamma$  を次式で見積もることとする<sup>33)</sup>。すなわち、

$$\gamma = Ad/H \quad (22)$$

ここで、 $A$  は増幅倍率、 $H$  は表層厚さ、 $d$  は基盤での地震動変位を表す。

基盤および表層地盤でのS波伝播速度を  $v_b$  および  $v_f$  とすると、式(20 a)により、表層地盤の固有振動数  $F$  は次のように表される。

$$F = v_b / (4AH) \quad (23)$$

また、基盤加速度  $a$  は次のように表される。

$$a = (2\pi F)^2 d$$

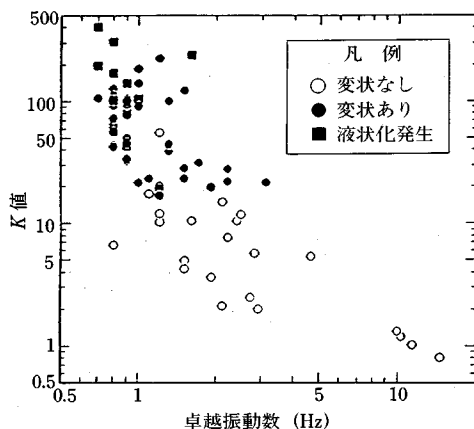
したがって、 $\gamma$  を次のように  $F$  と  $A$  および  $v_b$  で表すことができる。

$$\begin{aligned} \gamma &= (A_a / (2\pi F)^2) (4AF / v_b) \\ &= (A^2 / F) (a / (\pi^2 v_b)) \end{aligned} \quad (24 a)$$

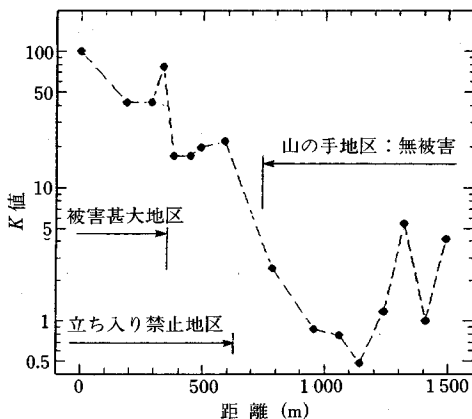
$$= \alpha Ka \quad (24 b)$$

ここに、 $\alpha = 1 / (\pi^2 v_b)$ 、 $K = A^2 / F$ 、である。 $\alpha$  は広い範囲でほぼ一定の値にあるものと期待される。また、 $K$  値は地点固有の値である。したがって、 $K$  値は当該地盤のひずみやすさを表す指数であり、弱点箇所の抽出に有効と期待される。 $v_b = 600 \text{ m/s}$  と置けるから、 $\alpha = 1.69 \times 10^{-6} \text{ (s/cm)}$  となり、有効歪を推定最大歪の60%程度と考えれば、 $K$  値と基盤最大加速度(単位: Gal)とを掛け合わせることで有効歪が推定できることになる。

図一四〇は1989年のロマプリア地震の時のサンフランシスコ湾岸地域での常時微動測定の結果<sup>34)</sup>から各地の  $K$  値を算定して示したものである。特にマリナー地区については海岸から山への測線に沿って示している。これによると、大きく地盤が変状したところの  $K$  値は20



(a) サンフランシスコ市周辺での常時微動測定



(b) SFマリナー地区での常時微動測定

図一四〇 サンフランシスコ湾岸地域の  $K$  値

以上と大きく、被害がなかったところはこれよりかなり小さな値となっている。付近の最大加速度の観測値を併せて考慮すると、概ね  $1000 \times 10^{-6}$  を境にして液状化したところと液状化しなかったところが分かれることがわかった。

図一四一は1993年の釧路沖地震の時の釧路市内の常時微動測定結果<sup>35)</sup>を示したものであるが、同様に被害の大

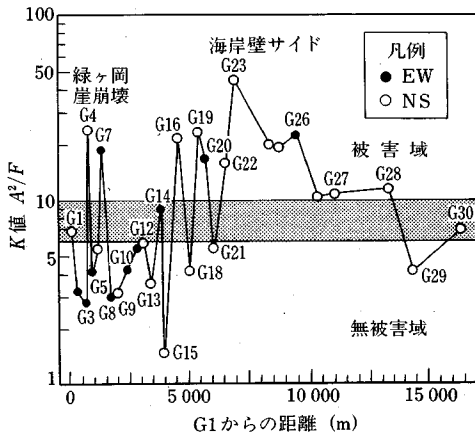


図-41 釧路市内の常時微動測定結果

きいところと  $K$  値の大きいところはほぼ一致していた。この場合も、 $1000 \times 10^{-6}$  の地盤歪が被害の有無の境界になっていた。

$K$  値と被害の関係が変わったものとして留置線に停車中の列車の転倒と  $K$  値の関係を図-42 に例示する。これは、1995年兵庫県南部地震により鷹取駅構内に留置された電車が転覆したり、しなったりした現象を究明するため当該地盤の常時微動を詳細に測定した結果<sup>35)</sup> である。転覆程度のひどいところと  $K$  値の大きいところがほぼ一致するなど興味深い。

b) 盛土

かつて盛土は、鉄道沿線の80%を占めるほど一般的な鉄道構造物であった。現在も鉄道構造物を構成する重要な構造物に変わりはない。したがって、盛土の地震動特性を把握することは地震防災上重要である。表層地盤と異なり、盛土の上と下の地盤面で常時微動を同時に測定することによって、比較的簡単に盛土本体の振動特性とともに、その基礎地盤の振動特性を併せて把握することができる。

盛土は局部的に地層が増えたものとみなせるから、その被災しやすさ指数は表層地盤と同様に定義できる(詳しくは文献36)参照)。このとき被災しやすさ指数は盛土本体と基礎地盤に分けて算定することができ、発生歪はそれぞれに対応するものを算出することができる。したがって、被害が基礎地盤の変状に起因して発生するのか、盛土本体の崩壊で生じるのかを識別できるものと期待される。また、盛土上だけの微動測定結果から、盛土と表層地盤を合わせた構造物として被災しやすさ指数を算定することもできる。

釧網線茅沼一五十石間の盛土は1993年釧路沖で被災した盛土が補修された後、再び1994年北海道東方沖地震により被災した。この盛土については1993年の夏、

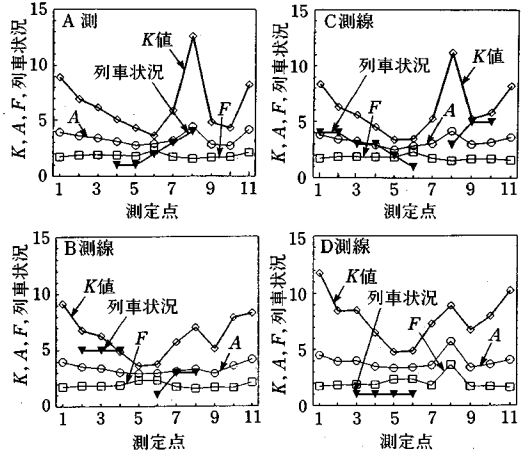
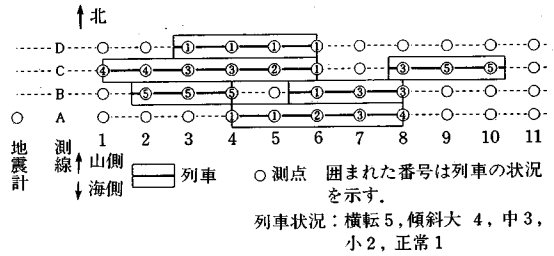


図-42 列車転覆地点の常時微動特性(鷹取駅構内)

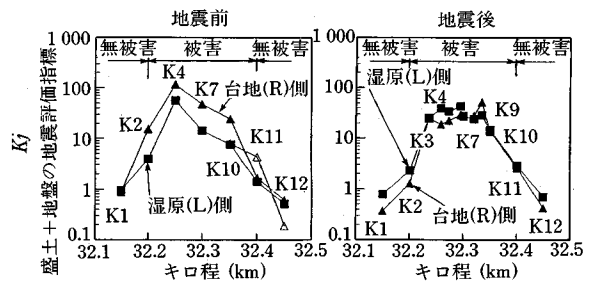
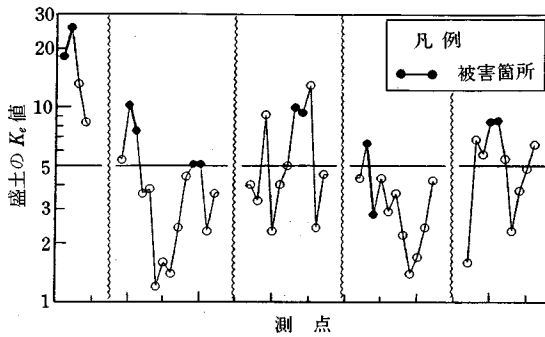


図-43 1994年北海道東北沖地震の盛土被害と  $K$  値の関係

震災補修後に常時微動を測定した<sup>37)</sup>。したがって、地震の前に常時微動測定がなされたことになる。地震前の測定結果と被害状況を比較したものを図-43に示す。これによると、 $K_j$  値(盛土本体と基礎地盤を合わせた  $K$  値)の大きいところは被害が発生しているところと対応している。また、盛土左右の  $K_j$  値の大きさには差異があったが、北海道東方沖地震による被害は  $K_j$  値の大き



図—44 盛土の降雨による被害と  $K$  値の関係

い側で大きく、 $K_j$  値は被災しやすさを的確に表していることがわかる。

図—44 は、ある線区の盛土について微動を 100 m 間隔で測定し、盛土本体の  $K_e$  値（盛土本体の  $K$  値）の変化を見たものである<sup>36)</sup>。黒丸で示した区間は降雨災害を受けたことのある区間であり、概ね  $K_e > 5$  の区間に相当している。つまり盛土の  $K_e$  値も被災しやすさに関連している。

盛土の特性として  $K_e$  値や  $K_j$  値のほか、平均的なせん断波速度なども常時微動を基に計測でき有効に利用できることは文献 36) に示すとおりである。

### c) 高架橋・橋脚

高架橋は鉄道構造物としてかなり一般的になってきた。高架橋の地震被害は古くからあるが、最近では 1968 年十勝沖地震による東北本線姉沼高架橋、1978 年の 2 回の宮城県沖地震による工事中の東北新幹線の高架橋や在来線の高架橋、1987 年千葉県東方沖地震による京浜急行水深高架橋、1993 年北海道南西沖地震による津軽海峡線高架橋などがある。これらの被害は曲げにより柱の上下端のコンクリートが剥落し、鉄筋が露出したものである。また、新幹線高架橋の中層梁には大きなクラックが入った。水深高架橋や海峡線高架橋では被害高架橋の近傍に強震計が設置されていたため、水平最大加速度が地表面で 200 Gal ~ 300 Gal 程度であったことがわかっている。1995 年兵庫県南部地震では地表面で 500 Gal 以上の大きな加速度（これまでに受けた地震動加速度の 2 倍程度）により高架橋をはじめ致命的に崩壊してしまった。本来起きるはずのないせん断破壊が曲げ破壊に先行して急激に破壊されてしまった高架橋や、大きな曲げ破壊が徐々に致命的な崩壊に至った高架橋などがあったものと考えられている。

コンクリート構造物は曲げ破壊が先行するように設計されているから、ここでは曲げによって柱の上下端に発生する縁歪に着目して被災しやすさ指数  $K_s$  値を定義した<sup>36)</sup>。その基本的な考え方は、 $K_s$  値に基盤層での最大

地震動加速度  $a$  を掛け合わせて柱上下端の縁歪  $\epsilon$  が算定できるようにするものである。 $a$  に表層地盤と構造物による増幅度を掛け合わせたものを高架橋の上部構造に作用させて高架橋本体のたわみ量を算定し、たわみ量と構造特性および寸法から柱上下端の縁歪  $\epsilon$  を算定する。この過程で  $K_s$  値が定義されるが、これは 2 層式の高架橋にも適用できるよう拡張されている<sup>38)</sup>。拡張された  $K_s$  値 ( $i$  層目) を示すと次のようになる。

$$K_s = (7500/\pi^2) \times (A_{sg}/F^2) \times (b h_i / (h_i^3 + h_j^3)) \quad (25)$$

ここに、 $A_{sg}$  は表層地盤と高架橋を合わせた増幅倍率、 $F$  は高架橋本体の固有振動数 (Hz) であり、 $b$  は柱の振動方向の幅 (m)、 $h_i$  は  $i$  層の柱の高さ (m) を表す。また、 $7500/\pi^2$  は、構造寸法を m 単位で計測し地震動加速度を Gal (=cm/s<sup>2</sup>) 単位で測定した場合に、計算結果が 10<sup>-6</sup> 単位の値となるように調整した係数である。

この式をみると、2 層式の場合、柱が高い層の方が  $K_s$  値が大きい、つまり、被災しやすいということがわかる。これは兵庫県南部地震で被災した 2 層式高架橋は柱の高い方が損傷程度の大きいものが多かった事実と符合する。

図—45 は、1995 年兵庫県南部地震が発生する前に 100 m 間隔で測定していた新幹線の沿線地盤・構造物の常時微動データを用いて  $K_s$  値を算定し、被害と比較したものである<sup>38)</sup>である。この際、被害は常時微動を測定した高架橋のものとした。その結果、崩壊した高架橋は、①  $K_s > 50$  でかつ②変動する  $K_s$  値のピークに対応するものであることがわかり、地震前に測定した  $K_s$  値は実際に発生した被害とよく対応していることがわかる。このように、 $K_s$  値を使って事前に的確な被害予測を行うことができる。

図—46 は、1993 年北海道南西沖地震で被災した津軽海峡線高架橋での地震後の常時微動測定結果<sup>39)</sup>の一例を示したものである。これをみると、被災程度に応じて  $K_s$  値が大きくなっており、どの高架橋ブロックから被災したかを定量的に把握し得ている。つまり、 $K_s$  値により地震後の被災程度が迅速に定量的に把握できることを示している。

高架橋については、 $K_s$  値のほか、水平たわみ量  $\delta$ 、みかけのヤング率  $E$  なども常時微動計測結果から算定でき、被災程度を把握するパラメータとして利用できる。詳しくは文献 36) を参照されたい。

基礎地盤にしっかり固定された背の高い橋脚は高架橋と同様に扱える。しかし、他の橋脚についてはロッキング振動の影響を考慮しなくてはならない。橋脚については、打撃したり加振したりすることなく、橋脚の左右天端での常時微動測定に基づいて、健全度を判定するとともに洗掘の状況を把握したり、橋脚と基礎地盤の地震動

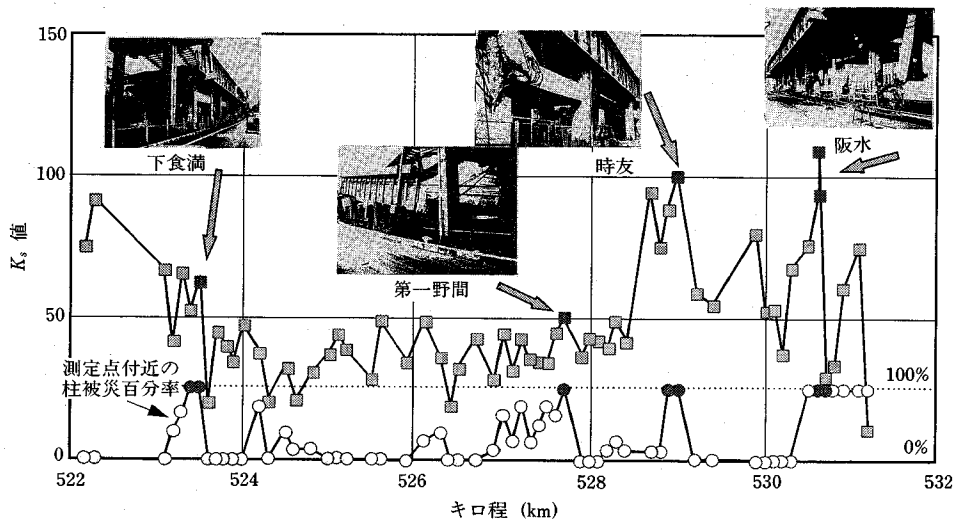


図-45 高架橋の  $K_s$  値と被害（山陽新幹線）

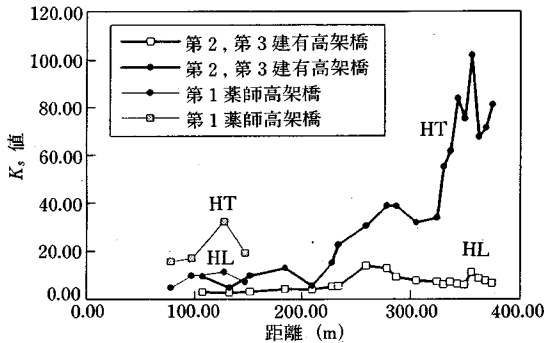


図-46 高架橋の  $K_s$  値と被害（津軽海峽線）

特性を把握したりすることができる。詳しくは文献 40) を参照されたい。

#### (6) ピック (PIC: Portable Intelligent Collector)

常時微動測定の簡便さを十分に生かし切るためにポータブルな測定器ピックを開発した。異なるセンサーで検出された振動のフーリエスペクトルの比をとることが多いため、ピックのセンサー群は広い振動数範囲で振動特性がほぼ一致するように調整している。また、現地測定が主体になるのでバッテリーを電源とし、内蔵バッテリーで8時間連続使用できる機能を持たせている。また、常時微動にはある程度の定常性が要求されるが、自動車の走行などで過渡的なパルス波形など好ましくない波形が記録されることも少なくない。そこで、測定中の波形をリアルタイム表示して、異常のないことを確認しながら計測できるように工夫している。最初のピックは1986年に完成した<sup>41)</sup>。以来3回の開発試作を繰り返し、完成度の高い高精度計測器となっている。図-47に主

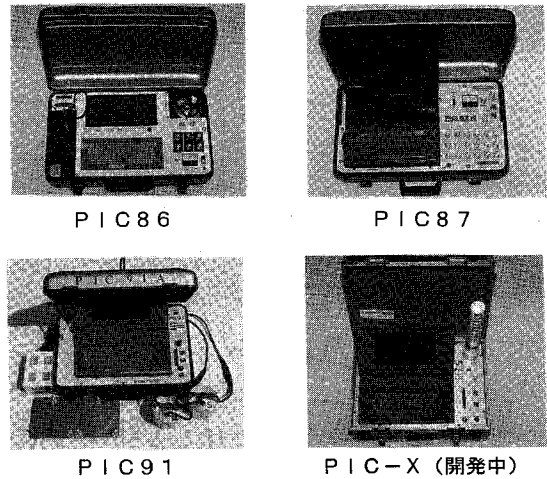


図-47 主要PICとセンサー

なピックの本体写真を示し、表-8に各ピックの主な仕様を示す。

提案しているデータ処理法の関係上センサー間の振動特性が一致していることが重要である。このため、微動測定の前に必ず確認試験を行ない、不用意な計測データによって、常時微動利用技術の普及と健全な発展を阻害しないように注意を払っている。

#### (7) 次世代ヘラスの構築

前節までに説明したように、表層地盤や盛土・高架橋などの構造物に対して定義された被災しやすさ指数  $K$  値群は、地震被害を的確に推定するのに役立つ。こうした  $K$  値群による被害予測手法を取り入れて次世代のヘラスを構築中である。ヘラスを地震以外の自然災害にも

表一8 主なビックの仕様

	PIC 86	PIC 87	PIC 91
本体寸法	550 mm(W)×350 mm(D)×200 mm(H)	560 mm(W)×330 mm(D)×195 mm(H)	465 mm(W)×365 mm(D)×170 mm(H)
本体重量	約14 kg	約14 kg	約11 kg
A/D 変換	12 bit	12 bit	16 bit (AGC 付き), ダイナミックレンジ 24 bit 相当
サンプリング	N/60 秒間隔, N=1 以上の整数 データ個数 4 096 個/ch まで	N/100 秒間隔, N=1 以上の整数 データ個数 8 192 個/ch まで	N/100 秒間隔, N=1 以上の整数 データ個数 8 192 個/ch まで
記録媒体	3.5 インチフロッピディディスク (750 KB) 4 096 個/ch で 29 ファイル記録可能	3.5 インチフロッピディディスク (1.2 MB) 4 096 個×6 ch で 24 ファイル記録可能	3.5 インチフロッピディディスク (1.2 MB) 4 096 個×6 ch で 12 ファイル記録可能
処理装置	インテル 8086, 5 MHz	μPD 70216, 8 MHz	インテル 486 SX, 33 MHz
波形表示	640×200 ドット CRT 上に 3 成分同時表示	640×400 ドット CRT 上に 6 成分同時表示	640×400 ドット CRT 上に 6 成分同時表示
増幅度	10~106 dB (4 dB 間隔で設定 可能)	0~120 dB (5 dB ステップ), 設定ゲイン自動認識	0~60 dB (20 dB ステップ), セミオートゲイン
バッテリー作動時間	約1時間	約8時間	約8時間

対応できる総合防災システムの中核と位置づけ、必要とされる要素技術の開発と最新情報通信技術の導入を進めているところである。これらについての詳細は、機会をあらためて報告することとしたい。

## 5. おわりに

以上、鉄道総合技術研究所で実施されている地震防災に関わる技術開発の一端を紹介した。災害時には外界から孤立することが多く、各個人の自律的な判断・行動が重要となる。自律的な判断には、多くの情報・知識を必要とするが、これらは普段から涵養しておく必要がある。災害時には限られた情報で、さまざまな決断を強いられることになるので、平時から個々の情報の持つ意味などを吟味しておきたいものである。災害時には防災システムも孤立することを考えておかなければならない。このため、ユレダスは、ネットワークで構成することを前提とせず、また、人間との協調性をあえて排除して単独で自律的に動作するシステムとしている。もちろん、ユレダスはネットワークとしての機能も併せて持っているため、最終的には多くのユレダスを統合して精度を高めた情報をヘラスに送り、迅速・的確な復旧を支援する。また、ヘラスは人間の判断を支援するものであるから、的確な情報を収集したり、加工したりできなくてはならない。人間とのインターフェースが重要となり、その操作には平時から習熟しておく必要がある。こうした観点から、ヘラスには保守情報システムとしての性格を積極的に付与していかなければならないと考えている。

こうしたシステムも故障したり、情報が途絶したりする。したがって、システムを利用する職員には、システムからの提案を鵜呑みにせず他のさまざまな情報を用いてチェックしながら利用する自律的な行動が要求される。自律的な行動は、防災に携わる人々に要求される共通の資質である。

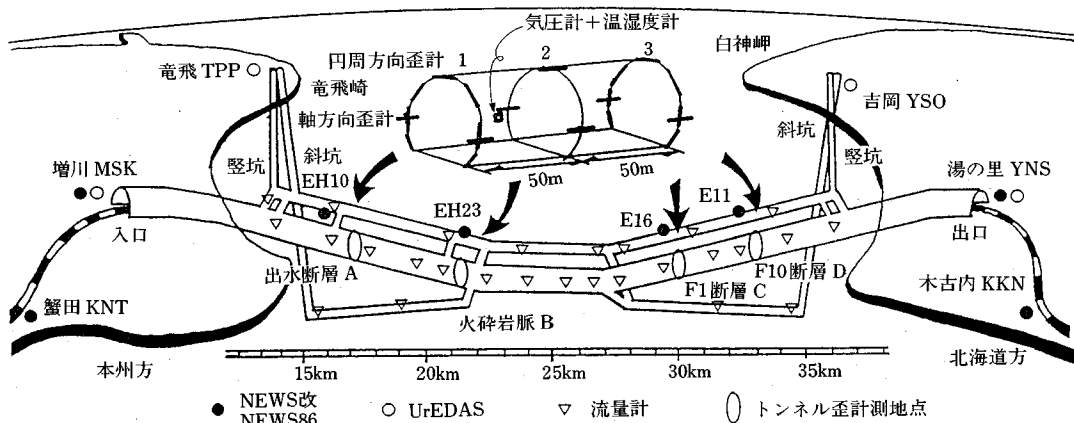
ユレダス・ヘラスなどの防災情報システムを、自律的な行動を支援するシステムとして発展させ普及させることができれば、これに過ぎる喜びはない。

**謝辞：**金森博雄教授をはじめとするカリフォルニア工科大学地震研究所の方々や米国地質調査所（パサディナ）のご協力に感謝します。われわれの防災情報システムについてご理解を賜り、協力にご支援いただいているJR各社の方々に深甚の謝意を表します。また、財団法人鉄道総合技術研究所の富田健司主任技師、齋田 淳技師、佐藤新二技師、井上英司技師および上半文昭技師の諸氏、ならびにユレダス・ヘラスの開発や常時微動の測定・解析に協力していただいている宮村根三顧問（元東大教授）をはじめとする（株）システムアンドデータリサーチの方々に感謝します。

### 補遺1：青函トンネル地震防災システムについて

付図一1に青函トンネル地震防災システムの概要図を示す。本システムは地震警報機能のほか、大地震でトンネルが被災した場合、被災状況をリモート検知する機能を有している。

海底トンネルが地震被害を受けると、被災箇所から漏

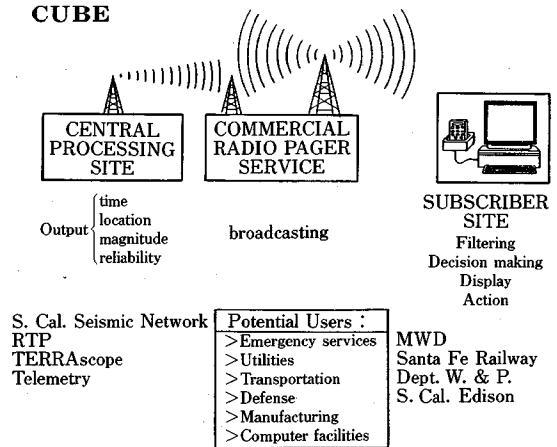


付図-1 青函トンネル地震防災システム

水が始まる。トンネル内は出入り口からの雨水の流入や、トンネル壁面からの湧水が常時存在する。トンネル内の雨水や湧水の水の流れを監視できる位置に流量計を置いて監視すれば、地震被災箇所からの新たな漏水の量と位置を知ることができる。ただし、被災箇所から流量計を設置した場所まで水が流れるのに要する時間だけのタイムラグが生じる。トンネル内の流水の速度は勾配によっても異なるが、1~2 m/s であり、流量計の設置間隔は概ね 4 km 程度であるため、タイムラグは最長で 1 時間程度と見積られる。すなわち、どんなに遅くとも地震後 1 時間経てば、トンネルが重大な損傷を受けたかどうか判明する。また、より少ないタイムラグで地震被害をモニターできるものとして、トンネルの変形状況を捉える壁面歪計を設置している。トンネルの海底部分を五分する形で 4ヶ所に合計 84 成分の歪計が設置され、断面変形やトンネル軸方向の伸縮を監視している。原則として 1 分間隔で計測されたデータは、センターに伝送され、湧水量・流水量、壁面歪の大きさおよびこれから算定される断面変形状況などがセンター管理画面に表示される。地震発生時には流量計測を除いて 1/100 秒間隔でデータが取得され地震動も記録される。

本システムによって 1993 年の北海道南西沖地震の際の流量変動や歪変動が記録<sup>42)</sup>されている。これによると、トンネルの湧水量は全体的に増大したが、局所的に増えたところはなかった。湧水量の増加は地震を誘発した地殻の圧力によりトンネル周辺の土圧が高まったことによると推測される。また、壁面歪の動的変動は最大  $500 \times 10^{-6}$  程度、静的壁面歪は  $200 \times 10^{-6}$  程度にまで達したが、トンネル本体にはなんらの異常も認められなかった。地震時のこうした情報はトンネル本体の異常の有無を把握するのに大いに役立っている。

CUBE



付図-2 キューブシステム

補遺 2: キューブ (CUBE: Caltech and USGS Broadcast of Earthquakes) について

Caltech は 1930 年代から南カリフォルニア一帯の地震活動を観測してきた。現在では、南カリフォルニアに約 250 地点の地震観測点を展開し、これらの情報をパサディナにある Caltech の地震研究所に集めて、地震の発生状況を自動的に監視している。キューブはこの自動的に決定された震源情報を関係機関に自動的に配信するシステムであるが、ユレグスのように早期警報を出せることまでには達していない。地震研究所で自動決定された高精度の地震情報は、ポケベル会社に専用回線で送られ、ここから放送型のポケットベルによって地震情報が配信される (付図-2)。受信用ポケットベルにはワークステーションまたはパソコンが接続されており、送られてきた地震情報は約 2 週間分地図上に震央分布図として表示される。キューブは会員制で運営されている。1995 年 11 月現在、キューブ会員は 20 機関にのぼっている。



現在のキューブ情報は、地震発生時間・震央位置・深さ・規模であり、情報配信に要する時間は2~3分とのことである。これは首都圏におけるユレダス地震情報のFAX配信とほぼ同じ内容である。

1994年1月のノースリッジ地震の際、多くの観測点から一度に地震波形情報が送信されてきたため、自動処理システムの処理能力を超えてしまい、1時間程度システムダウンしてしまった。しかし、システムダウンする前に本震直前の前震の情報を送信しており、情報を受信した機関は規模については小さすぎるが地震の位置は間違いのないものと判断して、この地震に対応し始めた。システムが復旧すると同時に、余震情報が送られて、ノースリッジ地震の全体像の把握に役立っている。キューブ情報の受信機関は、キューブ情報が防災上非常に有効であったことを表明している。

なお、マスコミ向けにメディアキューブ(Media CUBE)が開発され、すでに運用されている。これは、 $M < 5$ の地震の情報は2~3分で自動配信し、これ以上大きな地震についてはCaltechの地震研究者によってチェックされるが遅くとも15分後には配信されるというものである。

#### 参考文献

- 1) 美藤恭久：国鉄における地震対策の考え方，鉄道技術，Vol.42, No.10, pp.371-376, 1985年10月。
- 2) Housner, G.W.: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of WCEE, Oakland, California, 1956.
- 3) 山崎文雄，片山恒雄，吉川洋一，大谷泰昭：地震動モニタリングに基づく都市ガス導管網警報システム SIGNALの開発，pp.2113-2118, 第9回日本地震工学シンポジウム，1994年12月
- 4) 北川修三，中村 豊：青函トンネルの地震防災システムについて，第19回地震工学研究発表会講演概要集，pp.505-508, 1987年7月。
- 5) 中村 豊，斉藤明夫：東北新幹線の耐震列車防護システム，地震学会講演予稿集(秋季) No.2, p.244, 1982年10月。
- 6) 美藤恭久，中村 豊，富田健司：東海道・山陽新幹線のための地震時ダウンタイム短縮化対策，鉄道技術研究報告，Vol.1294, pp.1-38, 1985年3月。
- 7) 伯野元彦，高橋 博：10秒前大地震警報システム，自然，9月号，1972。
- 8) Fujiwara, T.: New Automatic Train Stopping System during Earthquake, 6 WCEE, 1977.
- 9) 高山 昭，江本佑橋，阿部英彦，中村 豊：地震動早期検知システムの研究—新幹線の安全のために—，土木学会誌，Vol.66, No.5, pp.51-56, 1981年5月。
- 10) 中村 豊，斉藤明夫，橋本民雄：パソコンを利用した地震諸元のリアルタイム推定装置，地震学会講演予稿集(秋季)，No.2, pp.138-139, 1983年9月。
- 11) 中村 豊：首都圏を対象にした総合防災システムの構想，第19回地震工学研究発表会講演概要集，pp.509-512, 1987年7月。
- 12) Kanamori, H., E.Hauksson and T.Heaton: TERRAScope and CUBE project at Caltech. EOS 72, p.564, 1991.
- 13) 中村 豊：地震(津波)警報のための地震早期検知を行う—1点検知システムの考え方とパソコンによる実例—，第18回地震工学研究発表会講演概要集，pp.505-508, 1985年7月。
- 14) 気象庁地震津波監視課：津波予報発表が大幅に短縮されます，pp.17-34, 29回強震観測事業推進連絡会資料，1994。
- 15) 中村 豊，斉藤明夫：地震波動種別の識別と単一観測点のデータに基づく震央方位の推定，第17回地震工学研究発表会講演概要集，pp.95-98, 1983年7月。
- 16) Nakamura Yutaka: Development of Earthquake Early-Warning System for the Shinkansen, SOME RECENT EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH AND PRACTICE IN JAPAN, pp.224-238, The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering.
- 17) 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, 1986.12.
- 18) Nakamura, Y., Araya, T. and Kanamori, H.: Comparison of UrEDAS and CUBE, SSA94, April 1994.
- 19) Nakamura, Y. and Araya, T.: Real-time monitoring of the Northridge Earthquake sequence by UrEDAS, SSA94, April 1994.
- 中村 豊，新谷恒章：ユレダスによるノースリッジ地震群のリアルタイムモニター，第49回土木学会年次学術講演概要集第I部門，pp.1492-1493, 1994年9月。
- 20) 鉄道総合技術研究所ユレダス推進部：防災特集えびるおぐ—ユレダス2100点ネットワーク構想—，RRR, No.9, pp.10-19, 1992年9月。
- 21) 阿部英彦，涌井 一，中村 豊：大規模地震に対する鉄道沿線の地震動予測—東海道新幹線沿線のサイズミック・マイクロゾーニング—，鉄道技術研究所報告，Vol.1216, No.531, pp.1-85, 1982.9.
- Yutaka Nakamura and Hidehiko Abe: Estimation of Seismic Motion and Damages of Structures for New Bullet Trains, 3th South Pacific Regional Conference on Earthquake Engineering, pp.1-19, May.1983.
- 22) 中村 豊，富田健司：最大地震動加速度の推定式，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，I-393, pp.785-786, 1984年9月。
- 23) 中村 豊，日高和利，齋田 淳，佐藤新二：1995年兵庫県南部地震による最大加速度の分布及び被害について，JR地震情報 No.23 b, 1995年2月8日。
- 24) Lermo, Javier and Francisco J. ChavezGarcia: Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.84, No.5, pp.1350-1364, October 1994.
- 25) 中村 豊，斉藤明夫：強震記録に基づいた表層地盤の加速度増幅特性と最大加速度の推定，第17回地震工学研究発表会講演概要集，pp.25-28, 1983年7月。
- 26) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988

- 年4月.
- 27) 土質工学会編：土質調査法，p.121，1982年12月。
- 28) 時松幸次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集，第439号，pp.81-87，1992年9月。
- 29) 神山 真：地震時における地盤内の応力，ひずみの評価，土木学会論文報告集，第250号，pp.9-23，1976年6月。
- 30) 中村 豊，滝沢太郎：常時微動による表層厚厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定，鉄道総研報告，Vol.4，No.9，pp.29-35，1990年9月。
- 31) 例えば，  
Lermo, Javier and Francisco J. Chavez-Garcia : Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.83, No.6, pp.1574-1594, 1993.  
Corinne Lachet and Pierre-Yves Bard : Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *Journal of Physics of the Earth Vol.42 No.5*, pp.377-397, 1994.  
若松邦夫，安井 謙：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価や可能性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第471号，pp.61-70，1995年5月。  
Edward H. Field and Klaus Jacob : A Comparison and Test of Various Site-Response Estimation Techniques, Including Three That Are Not Reference-Site Dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, No.4, pp.1127-1143, August 1995.
- 32) 石原研而：土質動力学の基礎，p.2，鹿島出版会，1978年1月。
- 33) 中村 豊，滝沢太郎，富田健司，齋田 淳，西永雅行：常時微動による地盤変状予測の試み，鉄道総研報告 第7巻10号，pp.63-72，1993年10月。
- 34) 中村 豊，大町達夫，年縄 巧：ロマブリータ地震調査報告 §1.3 常時微動により推定した地盤振動特性と地震被害の関係，土木学会論文報告集 第424号，Ⅲ-14，pp.37-51，1990年12月。
- 35) 中村 豊：兵庫県南部地震による留置列車の脱線・転覆と周辺地盤の常時微動特性の関係，第50回土木学会年次講演集，I-470，pp.940-941，1995年9月。
- 36) 中村 豊，日高和利，佐藤新二，西永雅行：ラーメン高架橋および盛土の地震被害判定指標の提案，鉄道総研報告，Vol.8，No.5，pp.25-28，1994年5月。
- 37) 西永雅行，中村 豊：常時微動による盛土の地震被害分析，第23回地震工学研究発表会講演概要集，pp.593-596，1995年7月。
- 38) 佐藤新二，中村 豊，西永雅行：兵庫県南部地震による鉄道高架橋の被害分析，第23回地震工学研究発表会講演概要集，pp.265-268，1995年7月。
- 39) 中村 豊，佐藤新二，富田健司：北海道南西沖地震による海峡線高架橋の被害，鉄道総研報告 第8巻第5号，pp.13-18，1994年5月。
- 40) 小林俊夫，中村 豊，田母神宗幸：洗掘に伴う橋脚の振動特性の変化—常時微動と衝撃試験の比較—，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-107，pp.362-363，1993年9月。  
中村 豊，田母神宗幸，佐藤新二，立花三裕：常時微動を用いた新しい橋脚健全度評価法の提案，鉄道総研報告，Vol.8，No.5，pp.47-52，1994年5月。  
立花三裕，中村 豊：常時微動を用いた橋脚健全度について，第23回地震工学研究発表会講演概要集，pp.643-646，1995年7月。
- 41) 中村 豊，小島 昇，新谷恒章：携行型振動計測器 PIC の開発，第42回土木学会年次講演集 I-452，pp.938-939，1987年9月。
- 42) 中村 豊，富田健司，山口文敏，齋田 淳，佐藤新二：青函トンネル地震防災システムに捉えられた地震時のトンネル挙動，鉄道総研報告 第8巻第5号，pp.19-24，1994年5月。

(1995.11.22 受付)

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INTELLIGENT EARTHQUAKE DISASTER PREVENTION SYSTEMS UrEDAS AND HERAS

Yutaka NAKAMURA

UrEDAS, Urgent Earthquake Detection and Alarm System, is an integrated real-time earthquake warning system using a single station with three-component seismometer. Detecting the initial P-wave of an earthquake, UrEDAS judges the destructive potential of the impending earthquake on the basis of the relation between magnitude and epicentral distance of earthquake, and issues a necessary warning within four seconds after the P-wave arrival for a certain area which may sustain damage. UrEDAS is the fastest earthquake alarm system in the world, practically in use since 1988. At the arrival of S wave, it improves the estimates and updates the warning. When several UrEDAS units are used, the data from each unit are synthesized to produce more definitive information.

HERAS, Hazards Estimation and Restoration Aid System, estimates the degree of damage caused by an earthquake based on the synthesized information from UrEDAS units within a few minutes using the relation between earthquake strong motion and damage for the prompt correct countermeasures just after the earthquake. The prototype system of HERAS completed in 1992.

As a method to estimate the degree of damage, usefulness of vulnerability indexes  $K$  values are proposed in 1992-1995.  $K$  values can be derived accurately from microtremors measured easily and quickly by using PIC, Portable Intelligent Collector, developed in our laboratory in 1986.