

直下地震にも遠地巨大地震にも対応できる早期地震警報システムについて

(株) システムアンドデータリサーチ代表
東京工業大学総理工人間環境システム専攻連携教授
中村 豊

1. はじめに

地震防災の基本は耐震強化にあることはいうまでもない。しかし、予想される地震動に対して十分な強さをもった住宅や施設であっても、その機能はさまざまな状況下で発揮されるものであるため、思わぬ災害に発展してしまうことも考えられる。こうした不測の事態に対応するための情報システムとして、早期地震警報システム「ユレダス (UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System、“揺れ出す”）」が開発されてから、四半世紀が経過した。はじめは青函海底トンネルの地震情報システムの一部として運用が開始され、次いで東海道新幹線の走行安全性を少しでも高めるシステムとして 1992 年から本格的な運用が始まった。その後、阪神淡路大震災などを経験して、こうした防災情報システムの問題点を実際に経験しながら改良を進めてきた。

その結果、「フレックル (FREQL: Fast Response Equipment against Quake Load、“振れッ来る”）」が開発された。ユレダスは当初、P 波を検知してから警報発信まで 3 秒間を要したが、フレックルでは、現在、最短 0.1 秒にまで、警報処理時間を短縮することに成功している。この程度の警報処理時間であれば、直下で発生した地震に対しても、概ね 1 秒以上大きな揺れに先行して警報できると期待される。非常にわずかな時間であるが、高速走行する列車や高層エレベータなど極限状態で機能している施設では大きな意味を持つ可能性がある。もちろん、十分な耐震性が無ければ、機能が損なわれる以前に崩壊の危険がある。また、地震によって崩壊した建物から生存者を救出する際にも、大きな余震をいち早く警報して二次災害を防止することが考えられる。

ここでは、早期地震警報システムの歴史を簡単にふりかえるとともに、地震防災情報のあり方についても考えてみたい。

2. ユレダスの誕生

そもそも、早期地震警報による災害低減の考え方は、19 世紀に飛躍的に発展した科学の進歩に寄与するところが大きい。科学の教えるところによれば、地震とは、地殻の破壊であり、それに伴って生じた震動が周囲に伝播していく現象である。地震予知ができれば、地震防災上、様々なメリットが期待されるが、破壊現象は確率現象であり、防災に利用できるほど確定的な予知は不可能である。そこで、予知に代わって、地震が発生したことを

いち早く知り、地震波の伝播より早く警報を伝えることで、大きな地震動に対処しようという現実的な方策が考え出された。

最初の提案はサンフランシスコを対象になされたもので、1868年11月3日付の新聞、サンフランシスコ・デイリーイブニング・ブリティン紙に、サンフランシスコの医師クーパー博士による早期地震警報システムのアイデアが載せられている。日本の磁石を使った地震予知器が失敗したので、新たな方策を考えたとしているのは興味深い。しかし、この構想が実現されることはなかった。

ほぼ百年が経過した1972年頃、クーパー構想とは無関係に、ある大学の研究室での雑談の中から、東京を対象にした早期地震警報のアイデアが生まれた。伯野先生らによる10秒前検知システムの構想である（伯野他1972）。これを契機に日本では、気象庁や防災科研、国鉄などをはじめ、官民を挙げて、多くの研究が推進された。こうして世界最初の実用システムとして1985年頃に生まれたのが、旧国鉄のユレダスである。ユレダスは完全自動リアルタイム処理システムで、地動をデジタル情報として取り込む時間刻み（1/100秒）毎に必要な解析処理を繰り返し行っており、迅速であることはもちろんであるが、データを貯め込む必要が無く、地震の有無にかかわらず処理量に大きな変化がないという特長を持っている。このため、地震を検知しても、解析処理量が急激に増加して、システムが停止したり不安定になったりすることはない。

さまざまな実用化試験や改良を経て、M6以上の地震に対応するため警報処理時間を3秒に設定した上で、1992年3月から東海道新幹線で本格的な運用が始まった。

3. 阪神大震災とコンパクトユレダスの誕生

1995年1月17日早朝、阪神・淡路地域は突然大きな地震動に見舞われた。M7.3の兵庫県南部地震で、阪神淡路大震災と呼ばれる大きな災害を引き起こした。前年に発生し、ロサンゼルス近郊に大きな被害をもたらしたノースリッジ地震と同様、都市直下で発生した地震である。東海道新幹線にとって、ユレダスの近くで発生した地震ではなく、沿線警報地震計が主として対応する地震であった。しかし、いくつかのユレダスは、大阪地区が被災する危険があるとして警報を発している。その警報は、ユレダスが震源から離れていたため新幹線沿線に設置している警報地震計の警報と同時刻くらいに発信されたと思われるが、地震直後の停電による通信システム障害のため必要なところには届かなかった。こうした事態に備えて設置された筈の無停電電源装置のバッテリーが機能しなかったのである。通信ネットワークを介して警報を送信するシステムの注意しなければならない弱点である。

神戸市内のコンビニエンスストアでの記録映像をみて、P波を検知してから、3秒経過してからでないと警報できないユレダスでは、直下の地震には間に合わないことを痛感した。そこで、少なくとも1秒で警報できるシステムの開発を目指した。この結果、1998年に実用化されたのが、コンパクトユレダスである。

ユレダスが、P波検知後、地震の諸元（震央位置、深さ、マグニチュードなど）を推定し、

特定された危険地域に含まれる変電所に向けて P 波検知後 3 秒で警報を発信するのに対して、コンパクトユレダスは、検知した地震動の危険性を判断して P 波検知後 1 秒で警報を発信する。コンパクトユレダスは、1998 年から東北新幹線、上越新幹線、長野行き新幹線で実際に運用され、2003 年 5 月 26 日の三陸南地震 (M7.1、深さ 71km)、2004 年 10 月 23 日の新潟県中越地震 (M6.8、深さ 13km)、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震 (M7.2、深さ 28km) で、確実に P 波を検知して、いち早く警報を発信している。

三陸南地震では、高架橋の柱の上下端が損壊する被害を受けているが、この箇所には大きく揺れ出す 14 秒～16 秒前に P 波警報されている (中村 2008)。地震が発生した時間帯においては、被災した高架橋付近を走行中の列車はなく、強震動に見舞われた地域にあった列車も駅に停車中か、駅近くで加減速中であり、大きな地震動の中を高速走行する列車は無かった。

新潟県中越地震では、初めて営業中の新幹線が地震で脱線するという事態になったが、コンパクトユレダスがいち早く P 波警報を発したため (大きく揺れ出す 2 秒～3 秒前)、大事に到らず、乗客乗員は全員無事であった (中村 2006)。この地震では、震央付近の新幹線高架橋が激しく損壊し、新幹線トンネルの内壁が剥落した。

宮城県沖の地震では、気象庁の緊急地震速報が試験運用中で成功裏に動作したとされている。しかし、その警報は、遠距離地震対応として警報発信までの時間を特別に 3 秒に長くした海岸線検知点のコンパクトユレダスの警報発信よりも、さらに 4 秒以上遅れている。この地震では、長周期地震動に共振した架線とパンタグラフが衝突して架線が切れたため、構造物などに被害がなかったにもかかわらず、運行再開まで多くの時間がかかってしまっている。新幹線などの場合、地震警報の後はパンタグラフを下げて、架線の共振が収まるまで待つ必要があるかも知れない (中村 2006)。

その後、今日まで国内では新幹線が被災するような地震は発生していない。なお、2007 年の能登半島地震の少し前辺りから、新幹線のユレダスやコンパクトユレダスは気象庁方式の早期地震警報システムに置き換わっている。警報時間を早めるためとの理由であったが、実際の地震に対する動作状況を新聞報道などから検証した結果、むしろ遅くなっていることが危惧される (中村 2008)。

4. 気象庁の地震早期警報システム

2000 年頃から、気象庁と鉄道総研が協力して新たな地震早期警報システムの開発を始めた。初動部分で地震諸元を推定し、これに基づいて被災地域を特定し警報するという、ユレダスの考え方が踏襲されている。しかし、ユレダスのリアルタイム処理方式とは異なり、蓄積された数秒間のデータを使って警報に必要な解析を間歇的に行う処理方式をとっている。気象庁システムは正確にはリアルタイムシステムではなく、必然的に解析処理に時間を要する。このシステムでは、震源が近いかどうか (つまり震央距離) を地震動波形の立ち上がりで判断し、振幅と併せてマグニチュードを推定している。ユレダスでは、初動周

期からマグニチュードを推定し、振幅と併せて震源距離を推定している。しかし、波形の立ち上がり方で大まかに震源の近さを判断するところは、コンパクトユレダスにおけるひとつの警報条件：DI 値<震度と密接に関係>がある一定時間 t の間に規定値を超えるかどうか (Nakamura 1998, 2003)、ときわめて類似している。気象庁方式のシステムは、現在、緊急地震速報の中核システムとして使われているが、解析処理に時間を要し（平均 5.4 秒、気象庁調べ）、震央から 30km～50km の範囲では、大きな揺れに先行する警報は出せない。数十年に一度あるかどうかの M8 クラスの巨大地震の際には役立つのだろうと考えられている。

5. 究極の早期地震警報システム「フレックル」の開発と普及

新潟県中越地震では、崖崩れで埋もれた乗用車の中から幼児が 92 時間ぶりに救出された。この時活躍したのは東京消防庁のハイパーレスキュー隊である。強い余震が頻発する中で救出劇は困難を極めた。崖の上に大勢の監視要員を配置して、余震で崖に少しでも異常が生じれば、救出作業に従事している隊員に通報して、すぐさま安全を確保するという体制をとっていたとのことである。この救出劇の後、ハイパーレスキュー部隊を統括する部署から、ちょうど開発が終了していたフレックルについて問い合わせがあった。

フレックルは、ユレダス（震源諸元推定機能）とコンパクトユレダス（地震動危険判定）の機能を併せ持ち、しかも警報処理時間を、それぞれ 1 秒と最速 0.2 秒にまで早めたものである。形状も、それまでのシステムが大きなラックに收容されていたものを、一辺 12cm の立方体の大きさの中に、センサーを含めた処理装置などの本体機構をほぼ収めることに成功していた。このため、容易に持ち運びが可能という点が、警報の速さとともに注目されたのである。すぐさま東京消防庁に実物を持参して、動作状況を実演してみせた。重機を使っただけの救出作業もあるということで、機器をお貸しして、重機による誤動作が無いこともチェックしていただいた。また、地震動を正確に再現できる 3 次元振動台を使った動作試験にも立ち会った。いくつかの強震動で実際に所定通り動作するかどうか確認するのである。この試験では、最初はこうした装置に懐疑的であった試験担当者が、次第にこれは使えるとして、次々にいろんな地震動を使って動作を確認していたのが印象的だった。

こうして、フレックルは、世界最初のポータブル P 波地震警報器として、全国の消防・警察などに普及して活躍中である。鉄道分野でも東京メトロや小田急などで使われている。試験的ではあるが、原子力発電所や半導体工場などでも使われている。工事現場や工場などで、大きな地震のおそれの中での危険を伴う作業を支援したり、不良品の発生を抑止したりする機器として、今後、数多くの分野で活躍することを期待している。

なお、ユレダスやフレックルの警報処理時間の変遷を図 1 にまとめて示す。参考として気象庁方式のものも示している。また、図 2 にはユレダスをはじめ開発した地震早期検知システムの写真を示す。

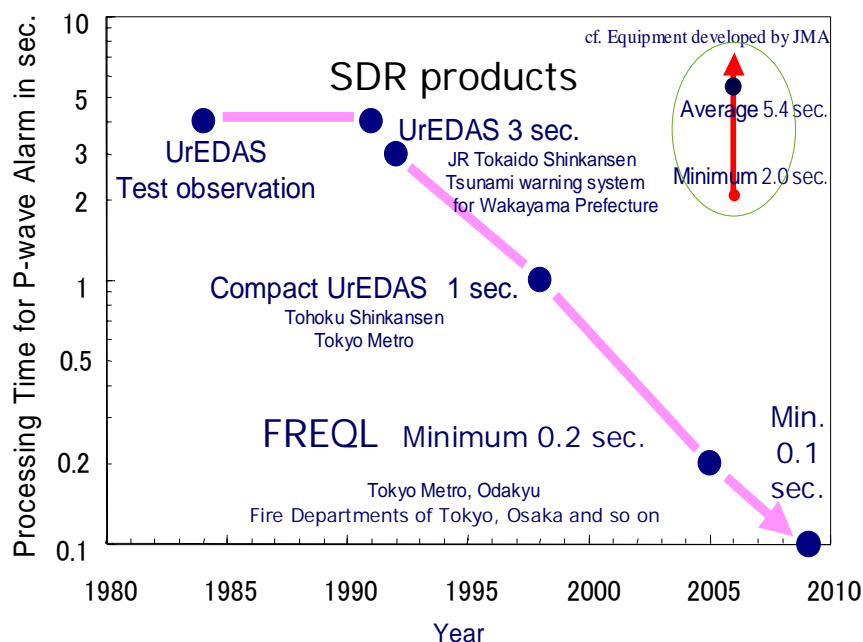


図1 地震早期警報システムの警報処理時間の変遷



図2 早期地震警報システム:ユレダス~コンパクトユレダス~フレックル

6. 実際の地震記録を用いたフレックル警報シミュレーション

実際の地震の例として、台湾・甲仙地震（現地時間 2010 年 3 月 4 日午前 8 時 18 分 52.14 秒発生、M6.4、深さ 22.64km、台湾気象局による）とチリ地震（現地時間 2010 年 2 月 27 日午前 3 時 34 分頃発生、Mw8.8、深さ 47km）をとりあげる。

事例 1: 台湾・甲仙地震

台湾の南東部山岳地帯で発生した地震では、北西部に広がる平野部分において大きな地震動が観測され被害が発生している。また、300km/h で高速走行していた台湾新幹線列車の先頭車両で 1 本の車軸が脱線した。

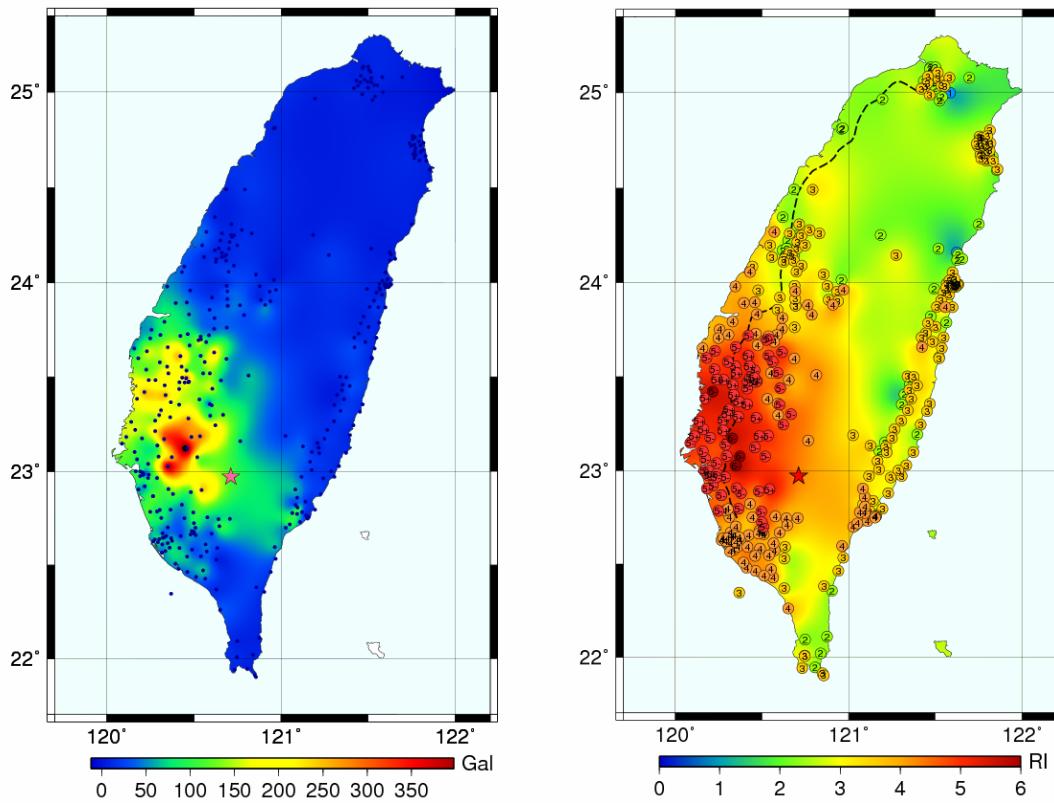


図3 台湾・甲仙地震の最大加速度(5HzPGA)とRI震度

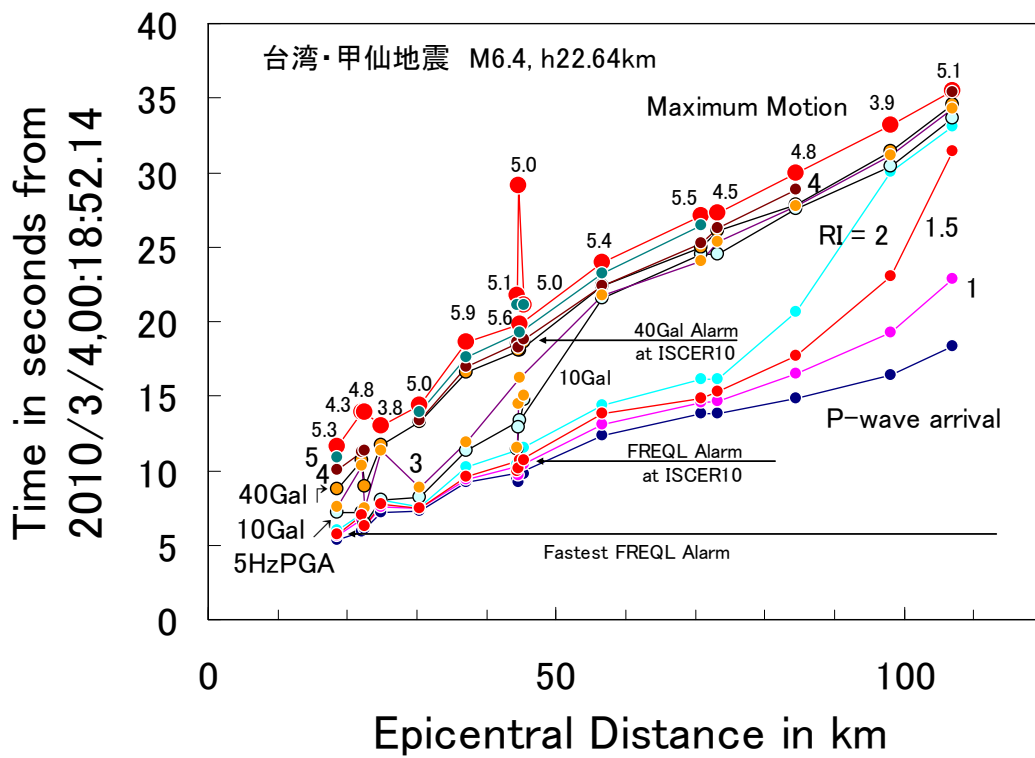


図4 台湾・甲仙地震の警報シミュレーション

図3は、台湾全土の5HzPGAの分布およびリアルタイム震度（最大値、気象庁の計測震度とほぼ同じ値）の分布を示したものである。M6.4の地震としては、震源からかなり離れたところまで大きな加速度や震度となっており、堆積地盤の共振作用が顕著に現れたものと推測される。

この地震の強震記録（台湾気象局提供）を利用してフレックル警報をシミュレートした結果を図4に示す。これにはリアルタイム震度⁵⁾の時間的推移も示した。脱線した新幹線列車は午前8時19分10秒に40Gal警報により制動が開始されている。フレックル警報であれば、それより約8秒早い19分02秒前後に警報が発信されたと考えられる。この警報発信時間は地震検知後0.8秒と推測され、大きな揺れに7秒以上先行している。また、フレックル警報では、震央付近においても大きな揺れに3秒以上先行していることがわかる。

事例2:チリ地震

チリ大学から公開されている強震波形を使ったシミュレーション結果を図5に示す。これをみると、震源から数百km離れても震度5以上の地震動が数十秒継続している。Mw8.8の地震の巨大さを改めて思い知らされる。フレックル警報は震源近くではP波到達直後に出される。震源から遠くではそれなりに遅くなるが、震源の近くで7秒以上、震源から離れた地点では数十秒、震度4以上の大きな揺れに先行すると期待される。災害時には機能しない可能性がある通信を必要としない身近のフレックルでも十分な猶予時間が得られるのである。

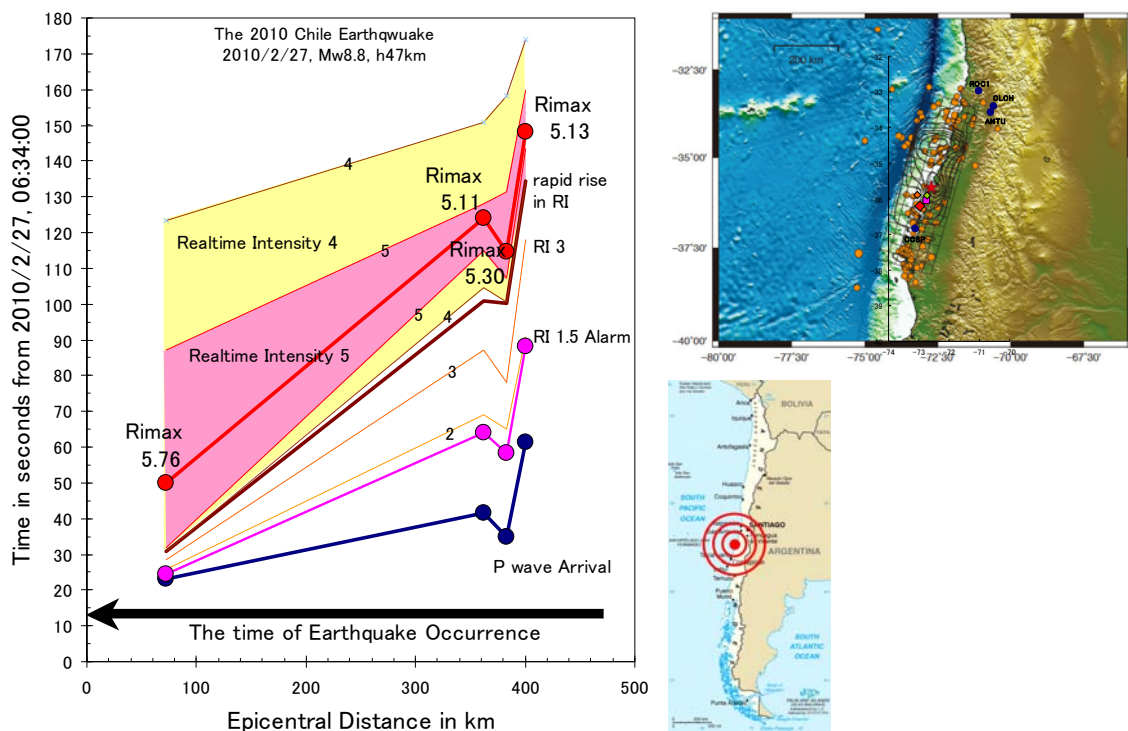


図5 チリ地震(Mw8.8)に対するシミュレーション結果

7. 震央と被害範囲の関係

陸域の地震では、通常、被害範囲の中に震央があり、被害範囲は概ね震央を中心とした地震規模により規定される一定の円内に含まれる（図6参照）。この被害円は概ねM5.5以上で現れ、その時の半径は概ね5km、M6.0では12km、M7.0では50km、M8.0では250km、と見積もられる（M- Δ 図による被害推定）。ユレダスの早期警報（FREQLのユレダス機能も）は、このM- Δ 図に基づいている。もちろん、地震の断層は拡がりを持っており、破壊開始点に過ぎない震央を中心にして被害範囲を考えるのは、断層が大きい場合には適切ではない。このような考え方ができるのは、せいぜいM7程度までであろう。

いずれにせよ、外部からの緊急の救援が必要となる地域は、M7クラス程度では震央地域に限られるのではなかろうか。これより遠いところでの被害は、軽微であるか、特殊で個別的なものであり、地域の人たちで対応可能と考えられる。つまり、M7程度では、二次災害を軽減するには正確な震央をいち早く通報することが重要となる。

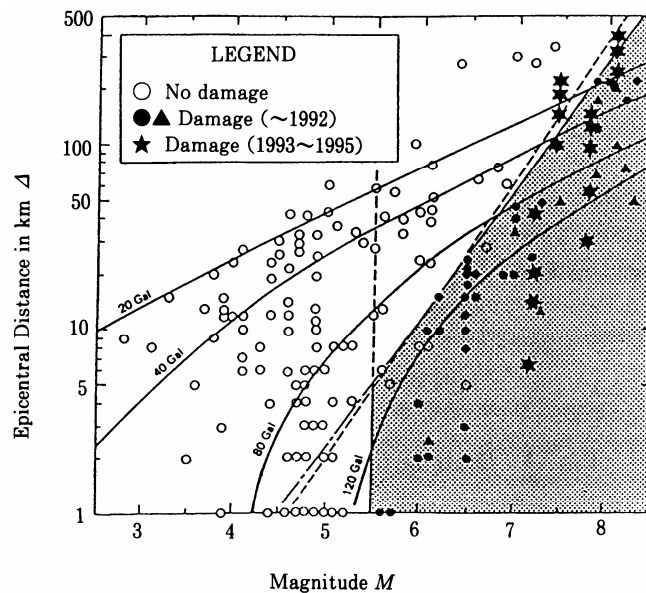


図6 M- Δ 図上の鉄道構造物被害

余震の発生状況も重要である。余震の揺れ情報も重要だが、それ以上に余震の震源分布がより重要な情報となる。本震後24時間の余震の震源分布は断層破壊領域にほぼ等しいとされるが、余震発生は指数関数的に減少することを考えれば、本震後数時間でも被害域の拡がり判断するのに極めて有効だと思われる。

断層が大きな拡がりを持つような場合には、その破壊開始点である震央だけでは、的確に被害域を特定できないことが考えられる。その場合でも、余震域の拡がり判れば、それを被害域とみなして緊急対応することが可能である。もちろん、稠密な震度情報も有効な情報であるが、震災時には通信が途絶して情報が来ない場合も考えられる。この場合でも、震源情報は、周りの地震観測によって確実に把握できるという特質を備えている。

8. 家屋の倒壊と避難

2007年の能登半島沖地震により崩壊した家屋から脱出した人の体験談によると、地震に気付く直ぐさま机の下（安全ゾーン）に潜り込んで難を避けることができた。しかし、家屋倒壊に伴って舞い上がった粉塵で視界が真っ白になり、出口が判らなくなった。余震に備えて、すぐに脱出しなければならないと焦ったが、幸いに地震前に外に出ていた人の声で出口の方向が判り、無事に脱出できた、とのことだった。

崩壊すれば、少なくともその直後、粉塵で視界が無くなることは、考えれば当たり前であるが、意外な盲点かもしれない。粉塵で避難方向を見失わない工夫が必要だろう。

能登半島沖地震の事例は、いち早く地震の発生を知り、すばやく対応することで、被害が軽減できることを示している。もちろん、あらかじめ、それぞれの場所で“安全ゾーン”がどこかを、的確な思考シミュレーションなどを行って認識しておくことが重要となる。

なによりも、まず身の安全を確保することが重要である。大きな揺れの中では思うように動くことができない。できるだけ危険なものから遠ざかるように行動するのが賢明である。火を消す、ガスの元栓を止める、電気のブレーカーを落とす等、地震時にしなければいけないことを、地震警報器などを利用して自動的にできるように対策することが、今後重要となろう。

9. 地震後の初動対応と防災情報

2008年の岩手・宮城内陸地震では、これまでの経験が活かされ、防災機関や報道機関の初動対応が迅速であった。ただ、残念なことに、災害発生地域を特定するのに手間取り、午前8時43分という比較的早い時間に発生した地震でありながら、また、初動対応も速かったにもかかわらず、日が暮れるまでに被害の全容をつかみきることはできなかった。

NHKや民放各社によって派遣されたヘリコプターは被災現場を求めて飛び回ったが、どのヘリコプターも同じような場所を撮影している。一社が崖崩れを見つけると、そこに多くのヘリコプターが集結して旋回し、報道している。報道映像に他社のヘリコプターが映り込む始末である。これでは多くのヘリコプターを飛ばす意味はない。さすがに防災ヘリコプターは、探査地域を逐次指示されながら被害把握に努めたようであるが、それでも的確に被災地域が絞り込めていないことによるもたつきがあったのは否めない。

今後は、防災ヘリコプターはもちろん、報道ヘリコプターも活用して被災地を迅速に特定することを考える必要があるのではないだろうか。その際、大きく被災している可能性があるのは、通常、震央を中心にしたある範囲内であり、この範囲は地震規模（マグニチュード）によって規定される。M7程度であれば、通常30km程度以内である。そこで、被害の可能性がある範囲を、震央を中心にして探索することになる。山岳地帯では大きな河川に沿って下流から上流を探索すれば、また、都市内では幹線道路に沿って探索すれば、被害状況を把握できるのではないか。このとき、川筋や幹線道路ごとに、各報道機関が分担して探索し、情報を共有すれば被害の全容が迅速に把握できると期待される。具体的な

分担方法についてはあらかじめ協議しておく必要があるだろう。

探索地域を策定するにあたって非常に重要になるのが震源情報であり、震度情報である。正確なマグニチュードとともに、本震や余震の震央位置、震源深さを少なくとも 1km 単位以下の精度で詳細に把握できれば、被災地を迅速かつ的確に推測できると期待される。正確で詳細な震源情報が地震後遅くとも数分後に配信されれば、これに基づいて防災ヘリコプターや報道ヘリコプターが協力して被災地を特定し、優先順位に従って救援活動を迅速に開始できるようになると期待される。もちろん、これに加えて震度情報が利用できることさらに的確な絞り込みが可能になる。

遅くとも 1 時間以内に機械力を備えた救助部隊が特定された被災地域に向かって移動し始めることができないだろうか。気象庁ほか正確な震源情報を発信できる能力を持った機関・大学などが、遅滞なく正確で詳細な震源情報（本震のみならず、余震の発生状況も含めて）を迅速に発信することが重要となる。言うまでもないが、これらの情報は、大きな誤差を伴う予測情報ではなく、正確な観測に基づく事実情報でなければならない。気象業務法の見直しも含めた法整備が必須で、新たな体制づくりが必要になるだろう。

10. おわりに

ここでは、直下地震や遠地巨大地震にも対応できる早期地震警報システムについて概説するとともに、迅速な初動体制のための地震情報、防災情報のありかた、マスコミや地域社会の対応について検討した。最近、地震被害の報道映像に既視感（この光景は見たことがある）を感じることもある。同じような被害状況、救援状況で、なんら改善されているようにはみえないのが悲しい。少なくとも、我が国では、地震災害から生き延びることを目指すのではなく、安全で快適な生活を地震があっても継続維持させることに目標を置くべきだと思う。その一方で、震央付近の強大な地震動に見舞われた地域では、不測の事態が生じている可能性が高く、外部から機械化救援部隊が迅速に駆けつける体制を早急に確立していく必要がある。マスコミをも巻き込んだ新たな防災体制の枠組づくりが望まれる。

謝辞:台湾中央気象局と台湾高速鉄道からは甲仙地震の貴重な強震記録の提供を受けました。中央気象局の郭鎧紋博士、高速鉄道の王建淇技師ほかの皆様に謝意を表します。

参考資料

- 1) 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 年
- 2) Saita, J. and Nakamura, Y.: UrDAS: The Early Warning System for Mitigation of Disasters Caused by Earthquake and Tsunamis, Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction edited by J. Zschau and A. N. Küppers, 453-460, 2003, related conference held at 7-11 September 1998 in Potsdam, Germany.
- 3) Nakamura, Y.: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction edited by J. Zschau and A. N. Küppers, 693-699, 2003, related conference held at 7-11 September 1998 in Potsdam, Germany.
- 4) 中村 豊：「新潟県中越地震の早期検知と脱線」、「地震動早期検知システム」、「自律防災」、地震ジャーナル第 41 号、2006 年 6 月
- 5) 中村 豊：地震動指標間および被害との関係、日本地震工学論文集、第 7 巻第 2 号、235-248、2007 年
- 6) 中村 豊：地震防災システムの動向、鉄道と電気技術、第 19 巻第 9 号、2008 年 9 月号
- 7) Nakamura, Y., Saita, J. and Satoh, T.: On an earthquake early warning system (EEW) and its applications, Soil and Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, doi:10.1016/j.soildyn.2010.04.012