

地震動早期検知警報システム「ユレダス」 の現状と今後の展望

中村 豊¹

¹株式会社 システムアンドデータリサーチ
(〒186-0003 東京都国立市富士見台3-35-3)

E-mail: yutaka@sdr.co.jp

「ユレダス」は実際に稼働している世界で唯一のリアルタイム地震動早期検知警報システムで、主に新幹線や地下鉄など鉄道関係で使われているが、鉄道分野に限定されたものではない。そのリアルタイム震源諸元推定機能を使い津波警報システムの構築を進めている自治体もある。ユレダスは地震波形を貯め込まない逐次処理が特徴で、処理量は地震時も平時とほとんど変わらず地震時にシステムダウンすることはない。ネットワーク化も不要で自然災害やサイバーテロに強い自律分散型システムである。2003年5月26日の三陸南地震は新幹線構造物が被災するほど大きく、しかも新幹線の営業時間帯に発生した。海岸線コンパクトユレダスは期待どおり大きく揺れる前に早期警報を出すなど、その有効性をはじめて実証した。

Key Words : Instrumental Seismic Intensity, Damage Index, Destructive Intensity, Realtime Intensity, Modified Mercalli Intensity, Peak Ground Acceleration, Quake Monitor, AcCo

1. はじめに

「ユレダス」は実際に稼働している世界で唯一のリアルタイムP波警報システムである。ユレダスの特徴は地震波形を貯め込まない逐次処理にある。地震時も平時とほとんど変わらない処理量のため、予想外の負荷で機能停止するようなことはない。

2003年5月26日夕刻の宮城県沖（Mj7.1）の地震ではコンパクトユレダスが期待どおりに働いた。新幹線構造物が被災するほどの大きな地震で、早期検知システムの有効性が実証されたのははじめてである。

ここでは、実際の稼働事例を中心にP波早期検知システム「ユレダス」の現状を概説し、断層の多い地域などでの試験観測結果などを報告する。また、次代のリアルタイム情報機器についても考察する。

2. ユレダスの機能と現状^{1),2)}

「ユレダス」には現在、ユレダスとコンパクトユレダス（以下、Cユレダスと称す）の2種類がある。

ユレダスの機能は、P波初動で地震の規模と発生位置をおおまかに特定して、被害が生じる恐れのある地域に警報を出すというものであり、Cユレダスの機能は、地震動が破壊的なものに成長するかどうかをP波の部分で判断して警報を出すというものである。ユレダスおよびCユレダスの守備範囲は、そ

れぞれを中心とする半径約200kmおよび約20kmであり、それぞれ地震発生および地震動の監視を行う。

ユレダスは、1985年にその原型が完成して以後、試験観測が継続して行われ、東海道新幹線で機能を限定した試験運用が1990年に御前崎検知点で始まった。「のぞみ」の営業開始（1992年3月）とともに全8個所のユレダス検知点が正式に稼働し始めたが、それまでにさまざまな改良が加えられている。この第一世代ユレダスは1998年に第二世代ユレダスに置き換わって今日に至っている。

山陽新幹線は1995年の兵庫県南部地震の影響でユレダス設置計画が促進され、東海道新幹線の西側3検知点の情報を使って直ちに試験運用が開始された。1996年11月からは新たに整備された5個所のユレダスを合わせて本格運用が開始されている。

東北・上越新幹線の沿線および海岸線の警報地震計（計45基）は、1997年春までに、Cユレダスに更新された。当時工事中の長野新幹線の沿線にはCユレダスが新設され、日本海側の海岸線にも海底地震に備えてCユレダスが新設された（計11基）。CユレダスはP波警報機能のほかS波警報機能も有しており、調整が不要なS波警報機能は設置時から使われている。その後、地震観測データの蓄積を待ってP波検知機能が調整され、1998年10月からP波警報機能の運用が始まった。この時からCユレダスは、P波警報とS波警報の2段階警報機能を保持し、迅速で確実な警報が実現されている。

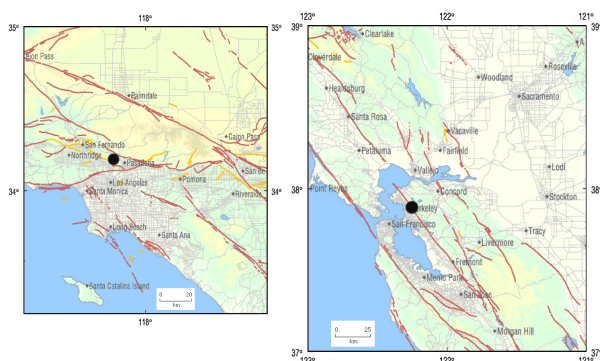


図1 PASユレダスとBKSユレダスと断層

営団地下鉄には6基のCユレダスが設置され、S波警報機能だけの期間を経て、2001年4月からP波警報機能と合わせて運用されている。

和歌山県はユレダスを串本に設置し、その震源推定機能を使って津波警報システムを構築中である。

SDRは次代のリアルタイム情報機器のあり方を探るため、ユレダスによる試験観測を行っている。

環太平洋の津波地震に対するユレダス警報の可能性、断層帯でのユレダスの推定精度の向上策などを探るため、カリフォルニア大学やカリフォルニア工科大学の地震研究所と共同して、バークレー (BKS) とパサデナ (PAS) にユレダスを設置した。

また、一般大衆への警報の可能性/有効性、その方法などを探るため、メキシコ地震計登録設置機関 CIRES（アカプルコ周辺の巨大地震を監視してメキシコシティに警報する役割を担っている）と共同してメキシコシティにユレダスを設置した。

3. 試験観測ユレダスの動作状況

(1) BKSユレダスとPASユレダス

PASユレダスは2000年7月から、BKSユレダスは2001年2月から、それぞれ観測が始まった。これらのユレダスの地震検知情報は、リアルタイムで関係者にメール送信されている。なお、旧PASユレダスによる観測は1993年9月～1999年8月である。

図1に示すように、BKSはヘイワード断層のほぼ直上であるのに対して、PASは断層に取り囲まれている。悪条件下での両地点の観測である。断層の影響か、BKSの方がPASより震源諸元の推定精度は良くないが、地震検知性能はともに良好である。

ここではPASの結果だけを示す。以下の検討では、自動メール通報されたすべての結果を使用した。

図2aは最新の内部パラメータによる推定結果とUSGSの結果を比較したものである。これによると、遠地地震（概ねM6以上）を除くと、規模の誤差は概ね ± 1 以内である。また、一次震源距離も1000km以上の遠地地震を除けば、概ね倍半分で推定できている。震央方位については特定の方位でかなり悪くなり、断層の影響が強く現れているものと思われる。それでも遠地地震については概ね正しい。これは断層の影響が地表付近に留まることを示唆しており、

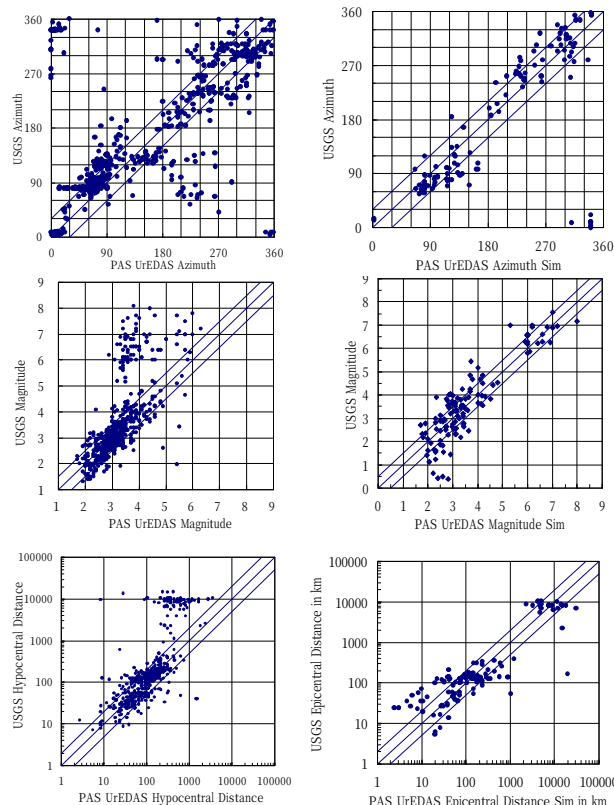


図 2a PAS 現地処理結果 図 2b PAS 精度向上試験

ほぼ鉛直下方から来る遠地の地震動の到来方向は正しく評価できるものと期待される。

PASユレタスやBKSユレタスでは、それぞれの協力機関の厚意で、検知地震波形の一部がインターネットを通じて直ちに参照できるようになっている。最近1年程度の期間中に参照できた波形すべてを用いた精度向上シミュレーションの一例を図2bに示す。基本的な手法は従来どおり¹⁾ 初動周期でMを推定し、これと初動振幅から距離を推定するものであるが、P波処理時間を3秒から1秒に縮めている。これによれば、震央方位、震源距離、地震規模は、Mの大小、遠近にかかわらず、かなり改善されている。特に初動1秒間のデータを使ったM推定が改善されたということは、大地震は始めから大地震になることを知っていることを示す結果とも解釈でき興味深い。今後さらにデータを蓄積して分析を進めたい。

(2) MEXユレダス

現在のMEXユレダスはCIRESが運営する強震観測点CS78が置かれた中学校にある。MEXユレダスの検知情報はCIRES本部のユレダスセンターに無線中継されCIRES側システムに取り込まれ、直ちにCIRESから関係者にネット配信される。ここでの観測は2001年12月から始まり、同時にネット配信も始まった。なお、2000年2月から2001年11月までは別の場所で試験観測していた。

図 3 は観測結果のうち振幅が 1mm 以上のものを図化したものであるが、これによれば、P 波段階では震源距離はやや遠めに推定され、マグニチュー

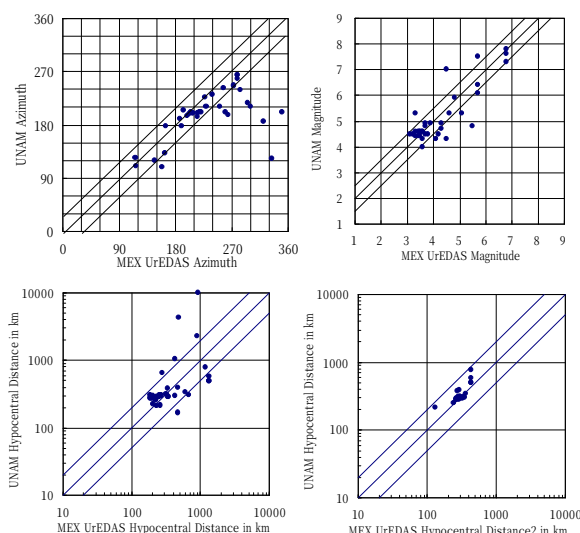


図3 MEX ユレダスの現地処理結果

ドは1ほど過小評価されることがわかる。震央方位やS波段階での震源距離については概ね妥当である。

4. ユレダスが動作した最近の地震

(1) 2003年メキシコ・コリマ地震

2003年1月のコリマ地震はユレダスが設置されたメキシコシティから約400km西で発生した。この地震により震央付近は大きな被害を受けている。

22日11時19分頃に東京・国立(SDR)で、MEXユレダス情報を受信した。その内容は以下のとおり。

- 地震検知時間：22日02時07分51秒(UTC)。
- 一次推定諸元(CIRES受信時間07分56秒, UTC)：地震規模M6.8, 震央方位280度, 震源距離232km, 深さ134km(この時点の推定震央はメキシコシティとコリマ市のほぼ中間)
- 二次推定諸元(CIRES受信時間08分53秒, UTC)：震源距離442km, 深さ255km(Mと方位は一次推定のまま)(この時点の震央はコリマ市北東約60km)

ユレダス情報によれば、最初の地震波動が到達したと同時に数百km西方でM6.8(経験則によればM7.8程度)の地震が発生したことが推測され、約1分後に大きな地震動が到来した時点で、震源はコリマ市近傍であることが判明している。

図4はMEXユレダスが記録した地震波形である。上からUD, NSおよびEW, 振幅の単位はmkine(0.001cm/s)である。51秒と105秒付近の縦線はそれぞれユレダスによるP波とS波の検知時刻を示す。

記録波形によると、最初の波動は比較的小さく、4秒程度経過した後、大きなP波動が到来している。震源距離が400km程度あり、警報から大きく揺れ出すまでの初期微動継続時間は1分程度あった。

ユレダスは最初のP波を検知して3秒後に最初の推定諸元をCIRESのセンタに送信し、S波検知後直ちに二次情報を送信している。CIRES側のシステムはこれらの情報を3秒程度の遅れで受信している。

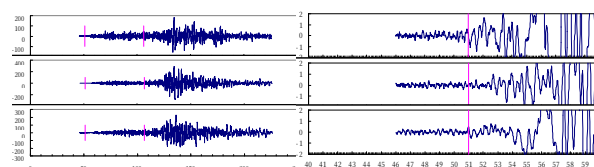


図4 MEX ユレダスが捉えたコリマ地震

日本でコリマ地震のユレダス情報を受信したのは発生後約12分後であり、インターネットを使った情報伝達としては遅い。しかし、日本に地震波動が到達するのに20分近くかかることを考えれば、これでも日本では地震波動が到達する前に情報を得たことになる。日本でのユレダス観測結果と併せれば、かなり正確な震源情報とすることができ、的確な津波警報も可能になるものと期待される。

(2) 2003年宮城県沖の地震

この地震は、5月26日18時24分33秒頃(Hi-net)、やや深いところ(約70km)で発生している。震源直上の陸前高田Cユレダスがいち早く地震を検知して早期P波警報を出している。KIK-NETの陸前高田地点によれば、P波検知が44秒であるからP波警報は47秒に出たと推測される。この警報により、沿線にP波が到達する前に、盛岡―仙台間のき電が止まったものと推測される。この地震では当該区間内の新幹線構造物が被災している。

この地震は、新幹線の営業時間帯に沿線近傍で発生した2例目の被害地震(最初は2001年芸予地震)で、ユレダスが警報対象とする初めての地震である。

地震時、100Gal以上の大きな地震動であった仙台―八戸間には8列車が存在していたが、幸いにも、高速走行中の新幹線列車は、やまびこ59号と、はやて26号だけで、ほかは駅構内で停車中か低速走行中であった。図5に地震発生時間、警報時間、被害箇所などを、時刻表から読み取った列車位置などとともに示す。地震の発生が10分程前後すると、被災高架橋上を高速走行中に地震に遭遇した可能性が高い。

北上駅を出発したばかりのやまびこ59号は早期P波警報で直ちに停車している。停車位置は北上駅を出て約3km、被災高架橋の10kmほど手前であった⁴⁾。

はやて26号は、いわて沼宮内駅を通過して一路盛岡に向かって全速力で南下中であつたと考えられる。付近の地震動は、概ね300Gal程度(JR警報特性の5Hz最大加速度)であつたと推測される。堅固な地盤上かトンネル内を走行していたと考えられるが、芸予地震の事例を参考にすると、はやて26号の乗客・乗員は地震動を感じなかった可能性が高い。警報は盛岡以南より10秒程度遅れ、地震に気づかず大きな地震動の中を高速走行したものと推測される。

このように走行列車の上で地震動に気づくことは困難であり、車外からの地震警報が必須なのである。

なお、芸予地震時には多くの走行中の列車が、宮城県沖の地震時にははやて26号と同じ300Gal程度の地震動に遭遇している。この時の調査結果³⁾によれば、高速でトンネル内などを高速走行中の「のぞみ」や「ひかり」では乗客・乗員ともにほとんど地震を感じ

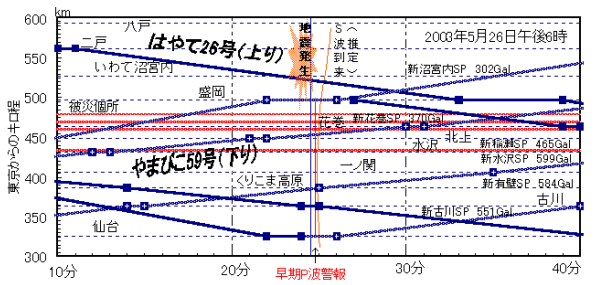


図5 2003年宮城県沖の地震時の列車位置ほか

じていない。しかし、駅に到着間近で低速走行中の「こだま」は脱線したのではないかとさせる程の震動で乗客は恐怖を感じている。「こだま」の乗客は、屋根瓦の落下や揺れる電線・電柱など車外の景色を見てはじめて地震と認識した。

芸予地震では震源に近かった沿線地震計がいち早く警報を出し、震源から離れたところに位置していたユレダスは警報を発していない。

北上駅発車直後のやまびこ59号や駅に停車中の列車は芸予地震時以上に大きく震動したと考えられるが詳細は不明である。駅に停車中の新幹線列車も含めて大きな震動に見舞われた地域の列車の乗客・乗員がどのような地震動を感じたのか興味深い。

5. 今後のリアルタイム地震防災

強烈な災害時には情報システムは間違いなく機能不全に陥る。システムは巨大であればあるほど、災害に弱いと考えた方が無難である。

非常時には臨機応変に活動することが重要であり、そのためには、合理的で積極的な防災意識がまず要求される。防災機器としては、大災害時でも確実に動作する信頼性の高いタフなシステムが望まれる。巨大な防災システムの構築より、的確な優先順位にしたがって組織的に対応できる体制の構築がより重要になるのである。今こそ「防災システムからシステム防災へ」の転換が必要なのではなかろうか。

早期に地震の発生を知らせ、避難行動をトリガーするための機器であれば、精度を多少犠牲にしても、

タフで廉価で信頼性の高い防災に特化したシステムを構築すべきと考える。こうした機器を数多く設置することで、地震時の不測の事態に迅速に対応できるものと期待される。今後、巨大な情報システムの情報だけに頼らず、自身の感覚や各個人が準備できるように、シンプルで廉価な警報装置の研究開発が進められ、既存の巨大情報システムとの連携で災害軽減をめざすようになるものと考えられる。

6. おわりに

世界で最初に開発され実用されている唯一のシステム「ユレダス」の現状について概説した。ユレダスを鉄道分野以外に利用してもらうためには、これまで以上にタフで信頼性の高いシンプルな廉価システムへ変貌させる必要があると考えている。

警報地震計や計測震度計も高価でだれもが使えるものとなっていない。加速度や震度の概念はもっと周知徹底されるべきである。温度や湿度のように、地震動も定量的に表示し、各自の感覚と照らし合わせて、的確な地震動感覚が醸成できれば、合理的で迅速な防災行動がとれるようになるものと期待される。

謝辞：BKSユレダス、PASユレダスおよびMEXユレダスはそれぞれ、カルフォルニア大学パークレー地震研究所、カルフォルニア工科大学地震研究所およびメキシコ地震計登録設置機関CIRESのご協力とご支援のもとで運営されています。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊：総合地震防災の研究，土木学会論文報告集 No.531/I-34，pp.1-33，1996年1月。
- 2) 中村 豊：世界最初の実用P波警報システム「ユレダス」の現状と将来，土木学会第2回リアルタイム地震シンポジウム概要集，pp.107-112，2000年5月。
- 3) 中国新聞特報2001：新幹線「安全神話」は本物？（5月1日）。脱線対策決め手なく（5月2日），2001年5月。
- 4) 宮城県沖の地震・アルジェリア地震被害調査報告会：日本地震工学会・土木学会・建築学会・地盤工学会・地震学会，2003年8月21日

(2003. 10. 20 受付)

TODAY AND TOMORROW OF THE REAL-TIME EARTHQUAKE INFORMATION EQUIPMENT

Yutaka NAKAMURA

UrEDAS, Urgent Earthquake Detection and Alarm System, can realize the real-time early earthquake detection and alarm system in the world. There is a local government that has realized a tsunami warning system using real-time estimated earthquake parameters as magnitude and location, distributed by UrEDAS. On 26 May 2003, the earthquake of Miyagiken-Oki was occurred. It was so large that the maximum acceleration of about 600 Gal was observed along the Shinkansen line and 22 columns of the rigid frame viaducts (RC) were severely cracked. This earthquake occurred on the business hours of the Shinkansen. As expected, coastline "Compact UrEDAS" along the Shinkansen took out the early P wave alarm before the destructive earthquake motion and the validity of this system was proved for the first time.