

# ユレダスが捉えた 2001 年芸予地震の断層運動

中村 豊

正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ(SDR, 〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

ユレダスは震源諸元(地震規模、震央方位、震源距離)をリアルタイム計測する機能を持っている。2001年3月24日に安芸灘で発生した芸予地震は山陽新幹線防護のためのユレダスシステムによって観測された。ユレダスは100km~200km程度の距離で30km程度の広がり断層を捉えている。断層の破壊運動を波動放射源の移動と捉え、これをユレダスによってリアルタイム監視できないか検討した。この結果、波動放射源が北から南にかつ深いところから浅いところに向かって移動している様子が観察された。これは芸予地震の地中の強震動分布とも整合するものでリアルタイム断層運動監視により、強震動の偏りを考慮した迅速で的確な警報や震後対応に役立つ直後情報の発信が可能になるものと期待される。

**Key Words :** UrEDAS, PI, DI, Early Warning, The 2001 Geiyo Earthquake, Rupture Process

## 1. はじめに

2001年3月24日15時28分頃、安芸灘を震源とするM6.7の地震が発生し、気象庁により2001年芸予地震と命名された。

山陽新幹線の対震列車防護システムに組み込まれたユレダス群はこの芸予地震を取り囲むような位置に配置されている。ユレダスは、地震の発生位置を、震央方位、初動入射角ならびに推定震源距離から推定する。これらの諸量はリアルタイムで監視される。そこで、ユレダスのリアルタイム震源推定機能を使って、震源断層の進展状況が把握できるかどうか、今回の芸予地震を例として検討する。断層の進展状況がリアルタイムで把握できれば、断層伸展方向に被害が集中することが多いのでより的確な早期警報・震後対応が可能となるものと期待される。

## 2. 芸予地震の諸元

気象庁と防災科学技術研究所(防災科研)による震源推定結果を表-1に示す。

表-1 震源諸元ほか

	発生時15時	北緯(度)	東経(度)	深さ(km)	
気象庁震源	28分頃	34.1	132.7	50	
防災科研震源	27分54.943秒	34.123	132.698	45.6	
1. 破壊開始	27分55.29秒	34.091	132.637	41.7	記録 再測
破壊開始	27分56.20秒	34.096	132.62	35.2	
2. 大震開始	27分56.97秒	34.106	132.657	32.8	
3. 断層終了	28分04.71秒	33.975	132.688	16.8	

最近では大きな地震の断層破壊過程は地震後直ちに解析され発表されるようになってきている。芸予地震に対してもいくつかのモデルが示されている。これらは文献<sup>1)</sup>にまとめられているので参照されたい。

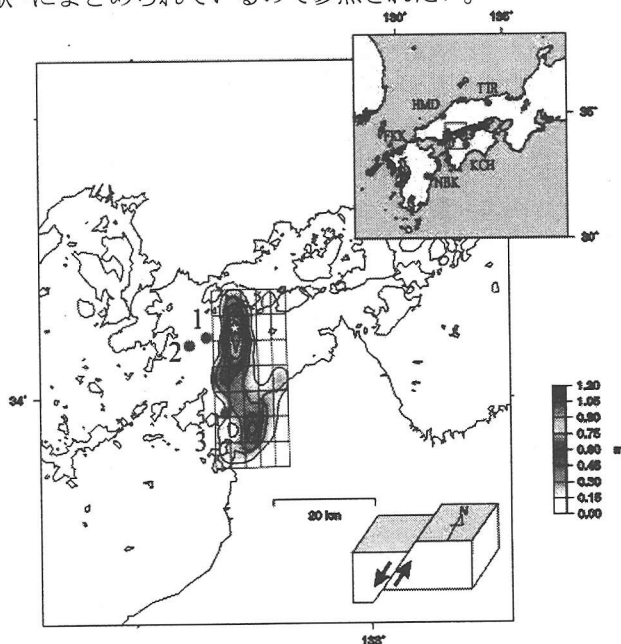


図-1 断層破壊過程とユレダス位置他  
(文献<sup>2)</sup>にユレダスやイベント1~3を加筆)

図-1に断層破壊過程解析の一例を示す。この図には、以下で検討するユレダス検知点の位置やユレダスのP波検知時刻から推定した震源位置などを加筆した。

## 3. 地震の検知

山陽新幹線には対震列車防護のため、沿線約 20km 毎に警報地震計が 23 基設置され、大阪-博多間を網羅するようにユレダスが設置されている。図-1 に示す 5 箇所(鳥取 TTR、高知 KCH、浜田 HMD、福岡 FKK および延岡 NBK)のほか、東海道新幹線用ユレダス 14 基のうち西側 3 基が山陽新幹線の対震列車防護にも利用されているがここでの検討には使用しない。

警報地震計は、水平面内の合成加速度が 40Gal を越えると警報を出すもので、沿線近傍の直下地震に対応する。ユレダスは、地震の P 波初動の震動情報を使って地震の位置・規模をリアルタイム推定し、必要と考えられる地域にいち早く警報を出すシステムで、新幹線沿線から離れた位置に発生した大地震を対象とする。

### (1) 地震検知時刻

図-2 は今回の地震が山陽新幹線の対震列車防護システムによりどのように捉えられたかを示したものである。震央が沿線近傍であることから、今回の地震は沿線警報地震計の受け持ちと考えられ、想定どおり沿線警報地震計がいち早く警報を出している。沿線警報地震計の 40Gal 警報は S 波が到着した後に地震動が大きくなり始めるところで警報を出すものと考えられるが、大きな地震動を記録した地点では S 波到着より早く 40Gal 警報が出されている。これに対して、より迅速な警報発令を目指して SDR で開発された PI 警報(文献<sup>4)</sup>参照)のシミュレーション結果は、震央近傍においてさえ、従来の沿線警報よりもさらに 2~3 秒早くなることを示している。

### (2) ユレダスによる地震処理シミュレーション

現地で記録されたユレダスの記録波形を用いてユレダス処理のリアルタイムシミュレーションを行い、震央方位やみかけの入射角度などの推定結果を時刻歴変

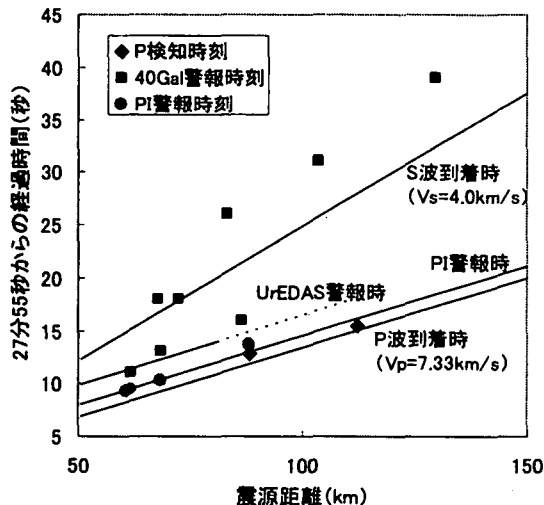


図-2 芸予地震の検知状況

動として算出した。これらの処理は現地のユレダスではリアルタイムで実施しているものである。

高知および浜田検知点での 3 方向振幅自乗和、上下動振幅と水平動振幅の比  $V/H$  および震央方位の時刻歴変動を図-3 に示す。 $V/H$  は波動の識別に使用している。 $V/H > 1$  は概ね P 波に相当し、S 波到来とともに急激に  $V/H < 1$  となることは文献<sup>5)</sup>で指摘した。また、大きな  $V/H$  値は深い地震または近い地震に対応する。図-3 の  $V/H$  の変動をみると、S 波到来前の矢印 3 の部分までが主要な P 波部分と推測される。この部分の始めの部分(矢印 1)は破壊開始点に相当すると考えられ、終わりの部分は断層運動の終端部(矢印 3)と考えられる。それぞれに対応する位相時刻を表-2 に示す。

破壊開始点の時刻は地震検知時刻としてユレダスにより 1 秒単位で検知・記録されている。ここでは、時刻コード波形を利用してこの検知時刻を 1/100 秒単位で再測した結果も示した。山陽ユレダス 5 地点で記録

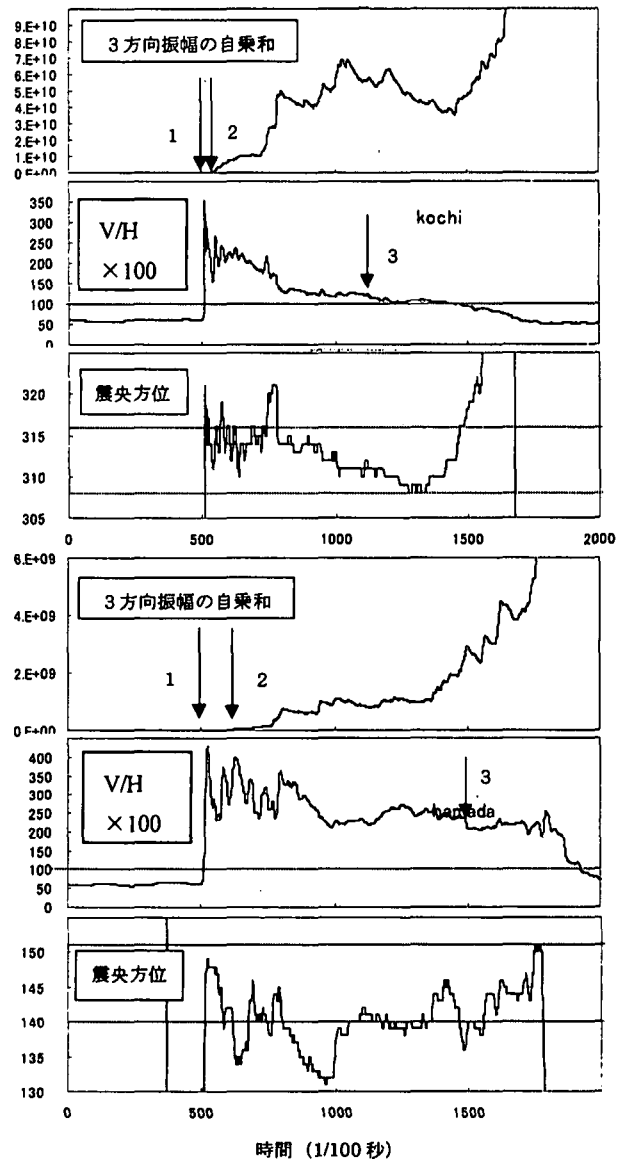


図-3 ユレダス処理例(高知、浜田)

表-2 各ユレダスの推定結果と読取結果

	震源距離*	震央方位*	推定方位	検知時刻(秒)		大振幅開始	断層終端
				記録	再測		
鳥取UR	222	222	231	31	31.85	32.2	40.9
高知UR	88	308	316	12	12.74	13.0	18.7
浜田UR	113	151	140	15	15.41	16.2	25.4
福岡UR	250	75	76	33	33.65	34.7	42.0
延岡UR	200	34	31	27	27.61	28.9	35.0

\* 気象庁震源に対して算定

された P 波到着時刻 (秒単位記録と 1/100 秒単位再測) を用いて震源位置を推定した結果が表 1 中の欄 1 である。ただし、P 波伝播速度を全地点で 7.33km/s と仮定した。これは気象庁震源から高知検知点までの震源距離 88km を防災科研の発生時刻に基づく P 波伝播時間 12 秒で除して得たものである。

記録と再測データを用いた推定震央位置はほとんど一致している。防災科研のものと比較しても数 km の誤差で一致している。仮定したモデルが簡単なため、この程度の誤差はやむを得ないが、上記の結果はユレダスの地震検知時間の信頼性が高いことを示している。

図-3には NS、EW および UD の 3 方向震動振幅を各時刻ステップで自乗加算した量の時間変動も示している。これを見ると、ユレダスが検知した地震動は極めて微小で、検知後やや遅れて比較的大きな震動が始まっている。このやや大きな震動が始まった時刻(矢印 2)を読み取り、対応する発生位置と時間を算定した。表-1 欄 2 に結果を示す。これは最初の点から北西(252 度の方向)に約 4km の位置にあり、発生時刻は最初の発生から約 0.8 秒後である。つまり、芸予地震は微細な破壊が始まってからほぼ 1 秒後に本格的な波動エネルギーを放射する破壊が始まったと推定される。

ユレダス検知時刻を基準にして、V/H の変動図で断層終端に相当すると考えられる時刻を 5 地点で読み取り、事象発生位置と時間を算定した。表-1 欄 3 に結果を示す。大きな震動が始まってから約 8 秒間で概ね南南東 (155 度の方向) かつ上方に向かって約 23km 進んで止まったことになる。断層破壊速度は 3km/s 弱と概ね妥当な値が推定される。

多くの観測点で断層が伸展している間の波形に相互に対応するものがあれば、上記のようにして破壊の進展状況を追跡できるものと考えられる。しかし、少なくとも今回の各地の波形について対応関係を細かく把握するのは困難である。次節では、ユレダスの機能を使って、断層からの波動エネルギーの放射状況をモニタする可能性について検討する。

#### 4. ユレダスによる断層モニタ

##### (1) ユレダスによる断層破壊運動の観察の考え方

ユレダスは単一観測点の情報だけで震源の位置などを推定する。これらの量は地震動のサンプリング時間間隔毎にリアルタイム算定される。前節では波動種別を識別するための V/H の変動を利用して断層の始終端の位置と時刻を試算した。ここでは V/H をみかけの入射角  $\phi$  に変換した上で、震央方位  $\theta$  の変動と併せて検討する。すなわち、各ユレダス観測点からみた断層面上の波動放射点の動きを  $\theta - \phi$  平面に投影させて観察することを試みる。また、時々刻々の震動振幅と卓越周期を用いて見掛けの震源距離  $r$  の時刻歴変動を試算したが、 $\theta - \phi$  平面と合わせて  $\theta - r$  平面も同時に表示することで三次元的な挙動把握を試みる。

遠くのユレダスによる断層の観察は断層と観測点の間に横たわるさまざまな不均一性によって影響を受けると考えられるので、比較的近距离にある高知と浜田について検討する。

##### (2) 震央方位、入射角および震源距離の変動

図-4は高知および浜田検知点からみた芸予地震断層上の波動放射源を  $\theta - \phi$  平面および  $\theta - r$  平面に投影したものである。大振幅発現時から断層運動終了ま

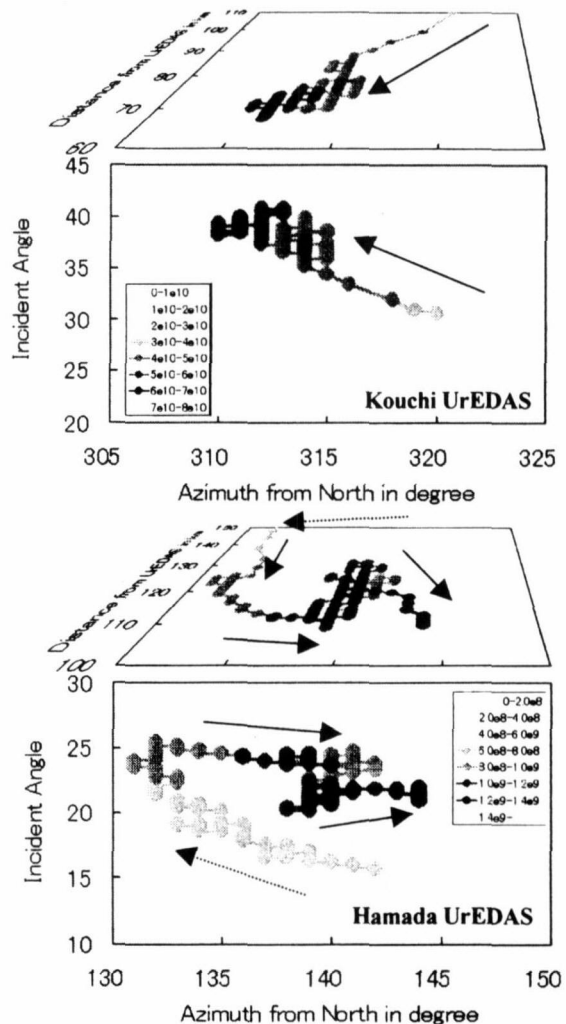


図-4 ユレダスによる断層からの波動放射源の運動

で見ている。3方向の振幅自乗和の指数平滑値、すなわち放射エネルギーの大きさに関係した量の大きさでマークの濃さを変化させて表示している。濃いものほど大きな振幅に対応する。また、放射源の移動に伴って放射震動は大きくなる傾向がある。したがって、高知・浜田検知点とも、 $\theta-\phi$ 平面上での動きは、波動放射源が北から南へ移動していることを示している。みかけの入射角 $\phi$ の $0^\circ\sim 45^\circ$ は震源深さの深い～浅いに対応するが、高知からみた波動放射源は浅い方に進行していく様子が明瞭であるのに対し、浜田からは浅くなる傾向はそれほど明瞭ではない。

高知は断層の下盤側にあり断層を下側からみていることになるが、放射源はやや左方にそれているものが高知側に向かって一様に近づいてくるように見える。これに対し、浜田からみた放射源は一旦遠ざかっている。つまり、放射源の動きから、高知側では放射エネルギーが累加され、浜田では分散されると推測される。

高知および浜田の震源距離はそれぞれ 88km および 113km と大きな違いはないが、記録された最大加速度

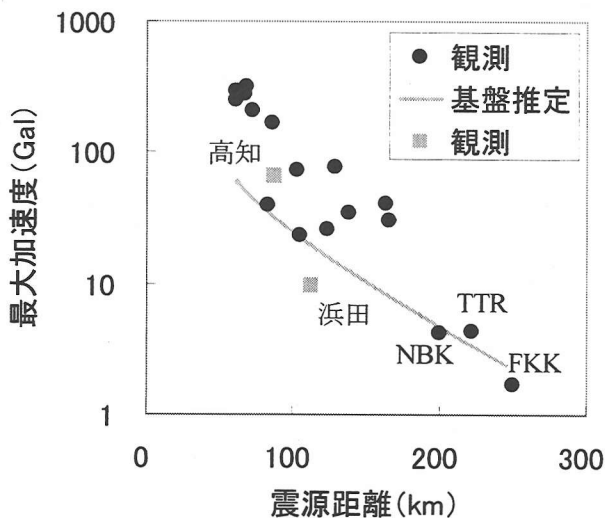


図-5 最大加速度分布

はそれぞれ65Galおよび9.6Galと大きく異なっている。

図-5に震央距離に対する加速度減衰曲線を示す。図中の曲線は、中村ら(1984)<sup>4)</sup>の基盤加速度推定式による推定値である。ユレダスはほぼ基盤での観測と考えると良い。ユレダスでの観測値は高知と浜田を除くと概ね推定曲線に一致している。浜田は推定値の約1/2、高知は推定値の約2倍となっており、上述の観察結果と矛盾しない。また、図-6に示す KIK-net による地中地震動の分布図<sup>3)</sup>をみても波動放射源の向かう高縄半島を中心に大きくなっており、ユレダスによる観察結果が妥当であることを示している。

## 5. おわりに

ここでは、芸予地震の断層運動をユレダスのリアルタイム震源推定機能を用いて観察することを試みた。その結果、ほぼ南北に伸びた断層の北端付近のやや深いところで破壊が始まり、一旦やや東方に移動した後、波動放射源は徐々に浅くなりながら南に向かって移動しつつ放出エネルギーを増大させていることが推測された。波動放射源が北から南に、また深いところから浅いところに向かって伸展したということは、その方向の地震動が大きく反対側が小さくなることを意味しており、地震動観測結果の偏りと一致している。ユレダスの観察は原理的にリアルタイムで行えるので、地震動分布の偏りなどをいち早く検知してよりの確な警報や迅速な震後対応を実現することが期待される。

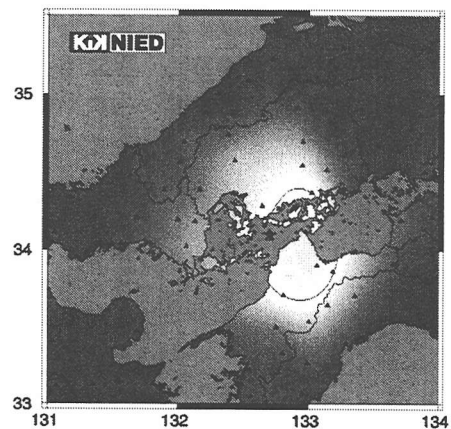


図-6 芸予地震の地中地震動分布<sup>3)</sup>

謝辞：山陽ユレダスなどのデータの使用をご快諾いただいた西日本旅客鉄道株式会社の中田昌典主幹をはじめとする関係の方々に深甚の謝意を表します。また、データの解析や整理を手伝っていただいた(株)SDRの佐藤勉研究員、中山沢子女史に感謝します。

## 参考文献

- 1) 飛鳥建設株式会社技術研究所：2001年3月24日芸予地震被害調査報告、2001年5月
- 2) Yagi, Y. and Kikuchi, M.: Rupture Process of The Geiyu Earthquake of March 24, 2001 (Mw6.7), <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/Aki-nada/>
- 3) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 (KIK-net)、<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 4) 中村：新しい地震動モニタのための地震動被害指標 DI 値と P 波警報指標 PI 値の提案、第 25 回地震工学研究発表会講演概要集、1999年7月
- 5) 中村：総合地震防災の研究、土木学会論文集 No.531/I-34、1996年1月
- 6) 中村・新谷：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、土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集 I、1994年6月
- 7) 中村・富田：最大地震動加速度の推定式、第 39 回年次学術講演会講演概要集 I、1984年10月