

緊急地震速報の発表状況 2011年東北地方太平洋沖地震とその余震について Earthquake Early Warning of JMA - The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks -

菊田 晴之¹, 平野 和幸¹, 山田 安之^{1*}, 若山 晶彦¹, 松井 正人¹, 干場 充之², 林元 直樹², 青木 重樹²

KIKUTA Haruyuki¹, HIRANO Kazuyuki¹, YAMADA, Yasuyuki^{1*}, WAKAYAMA Akihiko¹, MATSUI Masato¹, HOSHIBA, Mitsuyuki², HAYASHIMOTO, Naoki², AOKI, Shigeki²

¹ 気象庁地震火山部, ² 気象庁気象研究所

¹Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency (JMA), ²Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency (JMA)

気象庁が緊急地震速報の高度利用者向け提供を2006年8月に開始し、2012年8月には6年となる。その間、2007年10月より、テレビ・ラジオ等を通じた一般向け緊急地震速報の提供を開始し、さらに、2007年12月には、気象業務法の改正により、緊急地震速報を地震動の「予報」及び「警報」として位置づけた。このうち、「警報」は震度5弱以上を予測した時に発表している。ただし、本稿では2007年10月から提供している緊急地震速報について「予報」及び「警報」相当の情報として取り扱う。

2011年3月11日に三陸沖で発生した巨大地震(2011年東北地方太平洋沖地震、Mw9.0、最大震度7)に対して、気象庁は緊急地震速報(警報)を発表した。この警報は、東北地方が大きな揺れに襲われるよりも前に発表されている。その後の活発な地震活動を受けて、気象庁は2011年12月31日までに96回の警報を発表している。この期間に予報を発表した地震は、本震を含めて3751回であった(キャンセル報も含む)。ちなみに、2007年10月から本震発生までの3年5ヶ月間に発表した警報は17回、予報は1928回であった。

本震発生後、精度の低い緊急地震速報が発表されることが多くなった。2011年に発表された97回の警報のうち、いわゆる誤報とされるもの(警報を発表した対象地域において震度3以上が観測されなかったもの)は27回であった。その原因の一つを以下に記す。

本震発生後、その余震活動と、誘発地震と見られる地震活動とが広い範囲で活発化し、複数の地震がほぼ同時に発生する頻度が増加した。これにより、中枢システムにおける緊急地震速報の処理が複数の地震を同一の地震として判定してしまい、震源の推定や予測震度の計算の誤差が増大した。

本発表では、緊急地震速報の発表状況を整理し、評価を行なう。また、気象庁が行ってきた技術改良と課題、今後の計画について報告する。

キーワード: 緊急地震速報, 警報事例, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: Earthquake Early Warning, Warning event, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

リアルタイムモニタリングを用いた地震動の予測 リアルタイム地震動予測を目指して

Prediction of ground motion using real time monitoring -for real time ground motion prediction -

干場 充之^{1*}

HOSHIBA, Mitsuyuki^{1*}

¹ 気象研究所

¹Meteorological Research Institute

緊急地震速報等の Earthquake Early Warning では、大きく揺れ始める前に人々に知らせることで被害の軽減を目指すものである。現在の気象庁の緊急地震速報では、震源位置とマグニチュード(M)を迅速に推定し、それから、距離減衰式と地盤増幅度から震度の予測を行っている。2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方に対しては期待通りのタイミングで警報を発しているものの、関東地方については、予測震度を過小評価し警報を出していない(Hoshiba et al. 2011, EPS)。この大地震の震源域の広がり十分にに対応できなかったからである。また、本震後数週間は、震度予測を過大評価し過大な警報を出したことが続いた。これは、離れた場所で同時に余震が発生したため、システムが混乱し、震源位置とMを適切に決められなかった場合が多い。

上記の課題に対処するため、前線検知の考え方を拡張し、震源とMを介しない予測の方法が提案されている(干場, 2011, 地震学会)。この方法では、波形が広がっていく様子をモニターし、近い未来を予測する場合には予測点の近傍の観測点の、遠い未来を予測するには遠い観測点の波形を用いることになる。Kirchhoff Fresnel 積分を応用するもので、距離減衰(に相当するファクター)が求められる。この場合、波動の空間分布、波の振幅と伝播方向の実時間把握、および観測点から予測点までのグリーン関数の事前評価が重要である。

実際の予測に適用する場合には、さらに地盤増幅度の補正を考慮する必要がある。現在の気象庁の緊急地震速報では、この地盤増幅度には“震度の増幅度”というスカラー量で近似されているが、周波数別の増幅度を考慮すると、予測精度が高まることが期待できる。岩切・干場(2011, JpGU)の震度予測の試算によると、RMS換算でおよそ2割程度の精度向上が見込まれるとしている。地盤増幅度の位相情報の取り扱いに課題があるものの、もし、この周波数別の増幅度の補正が実時間で行うことができれば、上記の震源とMを介しない予測の方法の考察と合わせて、地震動波形そのものの合成が可能となり、リアルタイムでの地震動予測に結びつけることができる。

シナリオ地震を対象とした地震動予測では、アスペリティの位置や滑り量分布などの震源での情報を仮定し、それをもとに予測を行う。一方、リアルタイムでの地震動予測では、既に発生した地震の波形を伝播途中で把握し、その波形をもとに予測を行うことになる。リアルタイム地震動予測の Earthquake Early Warning への応用が期待できる。

キーワード: 緊急地震速報, リアルタイム, 前線検知, 地盤増幅度, 地震動予測

Keywords: Earthquake Early Warning, Real time, Monitoring, Ground motion prediction

巨大地震の震源域リアルタイム推定システムの開発 四川地震 Real-time fault area location of a massive scale earthquake-Wenchuan Earthquake-

譚 軍輝^{1*}, 堀内 茂木¹, 厚井 裕司¹
TAN, Junhui^{1*}, HORIUCHI, Shigeki¹, Yuji Koi¹

¹ 岩手大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Iwate University

1. はじめに 巨大地震発生時には、いわゆるマグニチュードの飽和の問題で、気象庁マグニチュードは、Mw に比べ小さくなり、巨大地震の正確な津波予測が困難になっている。また、緊急地震速報は、点震源モデルを仮定していることから、緊急地震速報による予測震度は、観測震度に比べ小さくなる。堀内・他(2011)は、1秒毎のリアルタイム震度データを用いて、巨大地震の震源域をリアルタイムで推定する手法を開発し、この開発で、これらの課題の解決が可能であることを示した。

中国では、2008年に、M7.9の四川地震が発生した。この地震は、断層の長さが280kmの巨大地震で、死者行方不明約8万人の、極めて甚大な被害が発生した。断層長が長かったことから、断層運動を開始した近傍を除く、大部分の地域に被害を及ぼす揺れが到着したのは、断層運動開始の数10秒後であった。震源域の拡大をリアルタイムで推定し、それを伝達するシステムが開発されれば、多くの人々の避難が可能になり、被害の軽減が期待できると思われる。本報告では、堀内・他(2011)の方法を四川地震に適用した。また改良を行い、中国に適したリアルタイム震源域推定手法の開発を行った。

2. 震源域拡大のリアルタイム推定 司・翠川(1999)、松崎他(2006)は、震度が断層最短距離からの距離で表されるとして、経験式を求めている。距離減衰式による予測震度、Sは、

$$S = S(M, D, H, C) \quad (1)$$

と表される。ここに、M, D, H, Cはマグニチュード、断層最短距離、深さ、および、地盤増幅率である。(1)式のSを、1秒毎に観測される実測震度であるとする、断層最短距離の時間関数は、

$$D(t) = D(S(t), M, H, C) \quad (2)$$

と表される。本報告でも、堀内・他(2011)と同様に、距離減衰式から推定される震度が、観測震度に比べ大きい場合に、(2)式による断層最短距離を求め、それを、震央と観測点とを結ぶ線分上に投影することにより、断層面拡大の時間分布を求めた。

3. 結果 距離減衰式として、司・翠川(1999)を用いる場合は、断層の走行は、余震分布や波形のインバージョンの結果(例えば、Kouketsu, 2008)とほぼ一致するが、断層の長さは、約2倍になった。原因は、震源域の北東端から200km-500km北東に位置する観測点での震度が、日本での距離減衰式で計算されるそれに比べ大きいからである。そこで、距離減衰式を、中国大陸のそれに合うよう変更し、再計算を行った。得られた震源域は、余震分布等のデータから推定された結果と良く一致する結果が得られた。

本手法は、計算が単純で、ほぼ正確に、断層運動の拡大をリアルタイムで推定することが可能であることから、地震災害軽減に貢献できると期待される。

キーワード: 巨大地震, 震源域, リアルタイム推定, 断層, 震度, 距離減衰式

Keywords: Massive earthquake, Fault area, Real-time estimation, Fault, Seismic intensity, Empirical attenuation relation

同時多発地震に対する緊急地震速報

Classification of Simultaneous Multiple Earthquakes for the Earthquake Early Warning System

山田 真澄^{1*}, Liu Annie², Mori James¹

YAMADA, Masumi^{1*}, LIU, Annie², MORI, James¹

¹ 京都大学, ² Caltech

¹ Kyoto University, ² Caltech

The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) caused significant damage over a large area of northeastern Honshu. An earthquake early warning was issued to the public in the Tohoku region about 8 seconds after the first P-arrival, which is 31 seconds after the origin time. There was no blind zone, and warnings were received at all locations before S-wave arrivals, since the earthquake was fairly far offshore.

Over 70 early warnings for strong shaking were also broadcast during larger aftershocks. In general, the system worked well for these smaller events, but there were significant errors caused by event mislocations. Immediately following the earthquake, the waveforms of some large aftershocks were contaminated by long-period surface waves from the mainshock, which made it difficult to identify P-wave arrivals. Also, correctly distinguishing and locating later aftershocks was sometimes difficult, when multiple events occurred within a short period of time.

In this presentation, we propose a new approach to classify simultaneous multiple earthquakes in the current JMA system framework. We introduce a Particle Filter approach, also known as sequential Monte Carlo method, to estimate the most probable event parameter values, which include location, magnitude, and origin time. This approach provides a probabilistic solution to the problem of classifying multiple events. We formulate the likelihood function using the attenuation relationship in the current JMA system, and test the aftershock data of 2011 Tohoku earthquake. The results show that this approach can correctly classify multiple events occurred around the same time in several case studies.

Keywords: Earthquake Early Warning

W-phase を用いた津波警報のための GRiD MT モニタリングシステム GRiD MT with W-phase monitoring system for tsunami early warnin

鶴岡 弘^{1*}, Luis Rivera²

TSURUOKA, Hiroshi^{1*}, Luis Rivera²

¹ 東京大学地震研究所, ² ストラスブール大学

¹ERI, Univ. Tokyo, ²Universite de Strasbourg

The GRiD MT system (Tsuruoka et al., PEPI, 2009) is the real-time monitoring analysis system that continuously monitors long-period seismic wave field at a period of 20-50s recorded by broad-band seismometers. This analysis system automatically and simultaneously determines the origin time, location and moment tensor of seismic events within 3 min of their occurrence without earthquake information such as QED etc. This system has been in operation since April 2003 at the Earthquake Research Institute.

For tsunami early warning purposes, we have implemented a W-phase source inversion algorithm (Kanamori and Rivera, GJI, 2008) into the GRiD MT system (we call this system GRiD MT with W-phase monitoring system) using SeedLink software developed by GEOFON and later adopted by IRIS. W-phase is a very long-period (typically 200-1000s) phase starting after the P-wave arrival, and is suitable for fast source parameter determination for large ($M_w \geq 7$) earthquakes. When broad-band seismograms are available at distances (≤ 30 deg), we can detect seismic events and determine satisfactory mechanism solutions within 15 min after the earthquake occurrence.

We compared GRiD MT with W-phase monitoring results with W-phase source inversion results for events ($M_w \geq 7$) occurred from 2005 to 2011 in the World. From the results, (1) this system detects earthquakes and determines the source parameters with a high level of precision and complete automation within 15 min of the earthquake occurrence. (2) The origin time and locations are similar to those of PDE catalogue or GCMT catalogue. (3) The focal mechanism and moment magnitude obtained by two systems are very similar. The preliminary results suggest that this system provides rapid and reliable source parameters useful for tsunami warning purposes.

キーワード: リアルタイム, 地震解析, システム, W-phase, 津波

Keywords: realtime, earthquake analysis system, W-phase, Tsunami

高精度即時震源パラメータ解析システム (AQUA) における MT・CMT 解析の改良 Improvement of MT/CMT analyses in the AQUA (Accurate and Quick Analysis System for Source Parameters) system

木村 尚紀^{1*}, 浅野 陽一¹, 松本 拓己¹

KIMURA, Hisanori^{1*}, ASANO, Youichi¹, MATSUMOTO, Takumi¹

¹(独) 防災科学技術研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

大地震発生時、迅速に震源位置、規模を推定し、その情報を伝達することができれば、地震防災上非常に有効である。防災科学技術研究所 (以下、防災科研) では、比較的大きな地震を対象に震源、マグニチュード、メカニズム解について即時的に推定するシステムを開発し、AQUA システム (Accurate and Quick Analysis System for Source Parameters) と名付け、試験的公開を行ってきた (松村ほか, 2006)。AQUA システムでは、初期震源が求まった後にモーメントテンソル (MT)・セントロイドモーメントテンソル (CMT) 解析を行うことで、震源深さ・メカニズム解・規模等の震源パラメータを迅速かつ正確に決定することができる。しかし、2011 年東北地方太平洋沖地震およびその余震を解析する中で、いくつかの問題点が浮かび上がってきた。そこで、これらの問題点に対応するための改良を行った。

2011 年東北地方太平洋沖地震発生時、AQUA システムではこの地震の MT・CMT 解を適切に決定することができなかった。これは、これまで防災科研 広帯域地震観測網 (F-net) の観測点に設置された広帯域地震計による波形記録のみを解析に用いていたため、広い範囲の観測点で波形が飽和し、正確なデータが得られなかったことによる。また、初期震源として防災科研 Hi-net による波形データの解析により決定された震源を用いるが、破壊過程の初期の段階では規模が過小評価される。AQUA における MT・CMT 解析では、初期震源の規模に応じて最適な観測点範囲、波形の周波数帯・時間長を設定し、Ito et al. (2006) の手法を元に、グリッドサーチによりセントロイド位置・深さ・時刻等の震源パラメータを探索する。このため、初期震源が過小評価されると適切な解析が行えない可能性がある。一方、東北地方太平洋沖地震後、アウトライズ付近でも多数の余震が発生しているが、このような地震については初期震源の深さ誤差が大きいため適切に処理されない場合があった。

これらの問題に対処するため、まず、F-net 速度型強震計を処理に組み込んだ。地震の規模が M7 以上となる場合には、F-net 速度型強震計で得られたデータについて、地震計の特性を補正し、1 回積分することで得られる変位波形を解析に用いた。これにより、M7 以上の地震についても、これまでより震央距離の近い観測点が利用可能となった。このため、これまで M7 以上では震央距離 400km 以上の観測点を用いていたが、M7~9 の地震については震央距離 200km 以上とし、M9 以上の観測点については 400km 以上とした。また、初期震源の規模が過小評価された場合でも、後続の大振幅の波形により規模が大きく求められることから、段階的に規模の大きな地震として解析を行うこととした。同様の処理はこれまででも実装されていたが、解析を繰り返す回数をこれまでの 1 から 10 に増やした。さらに、M9 級の地震に対応できるように、M8 以上の地震について新たな解析パラメータの設定を追加し、セントロイド時刻の探索範囲を広げるなどのパラメータチューニングを行い、M8 以上の地震については 0.005-0.02 Hz の周波数帯を用いることとした。一方、アウトライズ付近の余震を解析するため、観測網から遠く離れた地震についてセントロイド深さの探索範囲を広げた。

東北地方太平洋沖地震を再解析した結果、初期震源が M5 級の場合でも、段階的に処理を行い Mw8.6 の規模を推定できた。比較のため、M7 級以上の地震についても Hi-net による震源を初期震源として再解析した。得られた結果を GlobalCMT (Global CMT Web Page) と比較すると、メカニズム解・深さ・規模ともほぼ一致し、規模については本震を除いてほぼ Mw で 0.1 以内で一致した。しかし、本震については、例えば GlobalCMT の Mw9.1 と比較してやや差が大きい。これは、東北地方太平洋沖地震のような巨大地震に対しては解析に用いる周期帯が十分でないことによる可能性がある。そこで、さらに長周期の波形を用いた解析を検討した。破壊開始 500 秒前からの 1000 秒間のデータを用い、0.0025-0.01 Hz の周波数帯で解析を行ったところ、Mw8.9 の結果が得られた。これは、GlobalCMT (Mw9.1) および他の解析結果 (e.g., Mw9.0: Ozawa et al., 2011; Suzuki et al., 2011) と良い一致を示している。今後は、解析時間の短縮をさらに検討する必要がある。

キーワード: セントロイドモーメントテンソル, 即時震源決定, 2011 年東北地方太平洋沖地震, アウトライズ地震

Keywords: Centroid moment tensor, Earthquake Early Warning, the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku earthquake, outer rise earthquake