

多観測点と単観測点による早期P波警報の比較

○佐藤 勉¹⁾・中村 豊²⁾

- 1) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ, 東京都国立市富士見台3-25-3, tsato@sdr.co.jp
 2) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ/東京工科大学大学院総理工 連携教授, yutaka@sdr.co.jp

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震(以下, 311地震)の地震動は徐々に大きくなり, 広い地域で震度4以上の揺れが異常に長く続いた. 最終的な震度は震度6強が最大であったが, 震動被害は比較的少なかった. こうした中で, 大きな揺れの前に警報する早期警報システムがいくつか稼働していたが, 多くが期待通りには動作しなかった. 特に気象庁が開発した単観測点方式の検知警報システムは, 311地震を危険と認識できず, 警報を発していない. また, 新潟県中越地震後, 気象庁方式を採用した新幹線は大幅に警報が遅れた. 運良く高速列車が被災箇所に入らずに済んだが, 非常に危険な状態にあった. 新潟県中越地震で期待通りの働きをして乗客乗員の安全を確保したコンパクトユレダス(CU)は, すでにJRでは稼働していない. ユレダスやCUの後継機種で単観測点方式のFREQLは, 牡鹿半島近傍に設置されているが, 311地震ではP波警報に成功しマグニチュード以外の震源情報を的確に推定している. しかし, P波検知から警報まで15秒と時間を要した. そこで, FREQLとその地震検知機能を使った独自方式に基づく多観測点方式による早期P波警報との比較を行ない, より速い警報の可能性について検討する.

2. 多観測点による地震諸元の推定方法

2.1 震源時と震源位置の推定

震源時と震源位置(緯度, 経度, 深さ)を, 5個以上の検知点のP波検知時刻だけから最小自乗法により推定する. P波の伝播速度は6km/sとした. 検討には, K-NET及びKiK-netの記録を用いるが, これらの地点にFREQL相当の処理機器があり, そのP波検知時間がリアルタイムに入手できると仮定し, 検知から警報, M の成長などを監視する. 即ち, 最初に地震を検知した地点から5地点までの時点で, 最初の震源推定を行い, 以後, 検知地点が増える毎に震源推定を行って, 前回の結果

震源位置が確定すると期待される. 2004年新潟県中越地震や2010年台湾甲仙地震での震源位置推定では, 最初のP波検知後, それぞれ1.04秒および1.69秒後には震源位置が確定している. なお, 気象庁が採用している多観測点を用いた手法の平均処理時間は5秒で, 311地震では5.4秒(第1報の発信)を要している.

2.2 マグニチュード M の推定

マグニチュード M は, グーテンベルグリヒターのP波全振幅とその周期に基づく M 推定式を基に作成した次式で推定する(高山ほか1981).

$$M=1.59(\log V_p+\log R)+1.53 \quad (1)$$

ここに, V_p は観測点の上下動P波速度振幅(単位, m/s :0.001cm/s)であり, R は震源距離(km)である. また, V_p は, 堅固な地盤での観測値を想定しているが, K-NETなどの強震観測点は必ずしも堅固ではない. そこで, K-NETなどを用いた震度の予測式(齋田ほか2005)に基づいて, 各地点の地震動増幅度 A を表1のように推定し, 上式を次のように修正した.

$$M=1.59(\log V_p+\log R)+1.53-1.59\log A \quad (2)$$

また, 最初の数秒間で推定した破壊開始点を基に震源距離を算定しているが, 破壊の進展とともに, 震源距離も変動する. さらに, 初期微動の後にはS波なども到来するので, 上式は適用できなくなる. 上式の適用限界時間を, 破壊開始点の震源距離の1/4相当距離が破壊されるまでの時間, $R/4C_r$ までとした. なお, 適用時間内に震源距離が変化する量が M の推定に影響するのは, ± 0.2 以下である.

震源が確定した時点から, 上式を用いて各検知点の M の推定を行い, $M-\Delta$ 警報方式で検知点が危険と判定されれば警報を発することとする. この方式では震央を比較的正確に把握できるので, 逐次監視された M を使って, かなりの確に警報地域を特定できる. 最終的には, 各検知点での M 推定値を平均して全体としての M を推定する. 以下, 各地点の推定 M がどのように変化するかを検討する. M の様子を比較するため, 311地震の他, 2008年岩手宮城内陸地震についても検討した.

3. 推定結果と考察

岩手宮城内陸地震については, 最初に関西(IWTH25)で地震を検知してから, 3.46秒後に5地点のデータが揃い, 震源が北緯39.008度, 東経140.845度, 深さ-4.6kmと求めた. その0.55秒後に鳴子(MYGH02)のデータが加わって, 新たな震源が北緯39.027度, 東経140.867度, 深さ-2.1kmと, 前回の

表1 K-NETおよびKiK-net検知点の増幅度

地点	データ 個数	震度増幅 平均	2log A (2)式の 分散定数項
MYG011 牡鹿	9	1.504	0.885 0.33
MYG008 北上	11	0.749	0.602 0.93
MYG002 歌津	14	1.203	0.570 0.57
MYGH03 唐桑(基)	13	0.375	0.589 1.23
MYGH12 志津川(基)	13	0.350	0.629 1.25
MYG010 石巻	12	1.683	0.864 0.19
IWTH25 一関西(基)	10	0.854	0.740 0.85
IWTH26 一関東(基)	11	1.203	0.858 0.57
IWTH10 一関	9	0.805	0.888 0.89
AKT023 檜台	8	0.500	0.706 1.13
ITWH24 金ヶ崎(基)	10	1.133	0.771 0.63
MYGH02 鳴子(基)	6	0.136	0.712 1.42
FKSH03 高郷(基)	12	1.128	0.319 0.63

と比較し所定の範囲内(ここでは5km)に入っていれば推定結果を確定する. 20km程度以下の密度で検知点があれば, 地震検知から4秒以内には

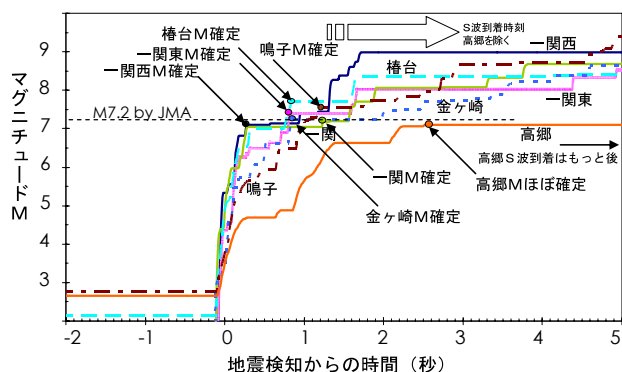


図1 岩手宮城内陸地震での各地の観測マグニチュード M の成長状況

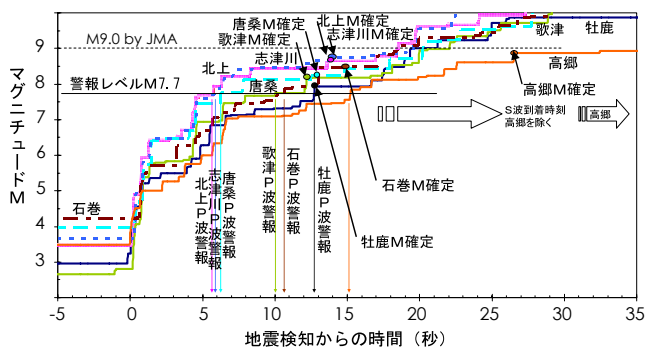


図2 東北地方太平洋沖地震での各地の観測マグニチュード M の成長状況

5km 以内に求められたのでこれで確定である。深さはマイナスになっているが、5km 以内であるので、深さ 0km とした。なお、気象庁震源は、北緯 39.028 度、東経 140.880 度、深さ 8km である。

次に 311 地震では、最初に杜鹿 (MYG011) で検知してから、2.54 秒後に 5 地点のデータが揃い、震源が北緯 36.736 度、東経 146.094 度、深さ 381.6km と求められた。その 1.13 秒後に石巻 (MYG010) のデータが加わり、北緯 38.023 度、東経 143.331 度、深さ 10.8km と求まったが、最初の震源とは大きく異なった。さらに 0.89 秒後に東和 (MYG030) のデータが加わり、北緯 38.003 度、東経 143.356 度、深さ 81.1km と求まっている。震央位置は 5km 以下の差しかない。深さは大きく異なっているが、この地点での深さ 81.1km は信頼性が低いので、2 回目の震源を確定値とした。確定時間は、4.56 秒である。なお、気象庁震源は、北緯 38.103 度、東経 142.860 度、深さ 24km である。

図1と図2は、ふたつの地震について、それぞれ最初に検知した6地点での(2)式による M の成長の様子を示したものである。いずれも参考として、ある程度距離がある高郷 (FKSH03) を加えている。岩手宮城内陸地震の場合、最初の6地点では、適用限界時間は1~2秒しかなく、 M の成長は急激で概ね検知後1秒程度で、7.2程度で確定している。170kmほど離れた高郷を見ると、 M は震央近くの地点よりゆっくりと成長している。3秒程度で成長は止まり、 $M7$ 程度で確定している。

311地震の場合は、適用限界時間は概ね13~15秒程度であるが、成長途中で適用限界時間となり M が確定している。震源距離が300km程度の高郷では、 M の成長

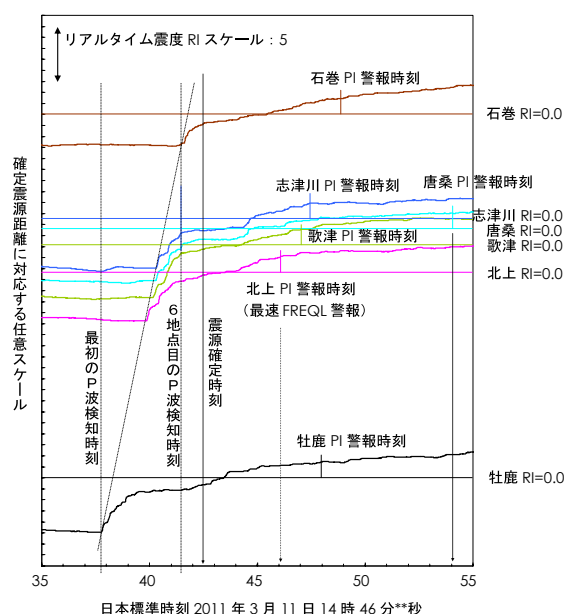


図3 東北地方太平洋沖地震の初期6地点でのP波警報時刻

はさらに緩やかで、適用限界時間を超えたところで成長が止まっている。いずれの地点でも最終的に、検知後15秒~30秒程度で、 M を大きく越えるまでに成長しているか、成長すると見込まれる。各検知点が $M-\Delta$ 図の危険領域に含まれる M は概ね $M7.7$ と考えられるが、警報発信は多くの地点で検知後6秒前後に集中し、15秒くらいまで分布する。つまり、311地震では、多点方式は最短で検知後6秒程度で警報発信できることを示している。このうち唐桑検知点では46分40秒にP波検知し、46秒には警報発信と推測される。単点方式(図3)では、46分54秒に警報発信すると考えられるので、多点方式により8秒程度警報が速くなると期待される。図3は、単点方式による警報時間を、各地点のリアルタイム震度(RI, 中村2003)の時系列変化図上に示したものである。P波警報レベルは、一律に $RI=1.5$ とした。

4. まとめ

ここでは、FREQLのP波検知機能を使った多観測方式の早期P波警報と、単観測点のP波警報の比較を行った。その結果、 M は震源距離が遠い地点ほどゆっくり成長する傾向にあることが推測された。また、やや震央距離が離れたところの地震に対しては、単観測点に基づくP波警報は相対的に迅速だが、多観測点によって警報が早まる地点もあること、正確な震源情報(震源や規模)を早期に把握できることもわかった。正確な震源情報は合理的な震後対応には欠かせないので、今後は情報孤立が生じて、ある程度の精度で震源情報を把握できるようなシステムを構築していきたい。

謝辞：防災科研のK-NETとKik-netのデータを使わせて頂きました。

参考文献：1) 高山昭・江本佑橘・阿部英彦・中村豊：地震動早期検知システムの研究，土木学会誌，66巻，5号，pp. 51-56，1981年5月
2) 斎田淳・中村豊：地震観測点の特性を加味した震度推定式の構築，日本地震工学会2005年次大会，2005年11月
3) 中村豊：合理的な地震動強度指標値の検討-DI値を中心にした地震動指標値間の関係，第27回地震工学研究発表会，2003年
4) 佐藤勉・中村豊：地震被害指標DI値の変動を利用した2004年新潟県中越地震の震源推定，日本地震工学会2005年次大会