

第3章 緊急地震速報ならびに企業防災力向上に向けた研究開発

1 緊急地震速報の高度化・高度利用に向けた研究開発

1. P波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案

上田竹寛・倉橋奨・正木和明・入倉孝次郎

1. はじめに

地震の検知直後、主要動の到達前に地震の規模、位置、発生時刻などを即時に計算し、配信するシステムはリアルタイム地震情報システムと呼ばれ、その一つに緊急地震速報がある。被害の軽減が期待されているが、内陸型地震の場合に、震源に近い地点では主要動が到達したあとで情報が配信される問題や、東海・南海地震のような巨大地震の場合に予測震度を過小評価してしまう可能性など、速報性や予測精度に課題を抱えている。震度の予測精度向上に関する研究には、山本ほか(2007)は震度マグニチュードを提案し、震度を直接的に求められる震度の距離減衰式を提案している¹⁾。しかし、情報提供までの時間に対しては根本的な解決には至っていない。図1は、岩手・宮城内陸地震における緊急地震速報の第1報提供から主要動到達までの時間及び推計震度分布である。震源に最も近い円が情報提供と主要動到達が同時の地点を示している。震源近傍において、情報の提供が間に合っていないことが分かる。そのような地域に対しては、地震動計測機器を予測対象地点に設置し、警報を発するオンサイト警報が有効であると言われている(中村,2008²⁾)。しかし、オンサイト警報のシステムでは、計器が設置されていない任意地点の予測はできない欠点がある。本研究は、オンサイト警報の概念を取り入れた、任意地点における予測が可能な新たな予測手法の提案を試みる。また、予測に必要な関係式を提案し、最終的に予測精度の検討を行う。

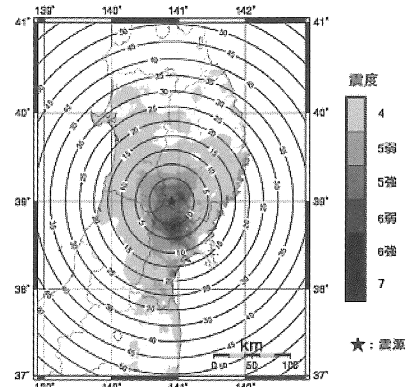


図1 岩手・宮城内陸地震における緊急地震速報の第1報提供から主要動到達までの時間及び推計震度分布図(気象庁HPより)

2. 新たな震度予測手法の提案

緊急地震速報の震度予測手法³⁾は、変位波形からマグニチュードを求めている。しかし、干場ほか(2009)⁴⁾によれば、P波の最大値の出現時刻は加速度が最も早く、速度、変位の順に出現する。そのため、加速度からマグニチュードを予測できれば、より早期に予測が可能であると考えられる。また、P波の情報をS波に関する既往の経験式と組み合わせて震度の推定が行われており、最適であるとは限らない。そこで、より早く、精度良い震度予測を目的とした新たな手法を提案する(図2)。本提案では、手法による予測が可能かを確認するため、関係式の定義および予測精度の検討を行った。

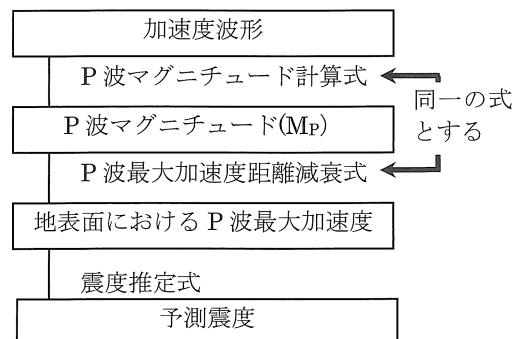


図2 提案手法による加速度波形からの震度推定までの流れ

3. P波マグニチュードを用いた震度予測式の定義

3.1 用いたデータ

内陸型地震を対象として、地点及び波形の選定条件に該当する 1570 データ (124 地点、55 地震) を用いて、震度予測式の導出と精度の検討を行った。震源距離 120km 以遠の記録には、モホロビッチ不連続面からの屈折波による影響が考えられるので、120km 以内の記録を対象とした。また、同一の地震で 5 記録以上あり、同一地点で 5 記録以上あることを条件とした。

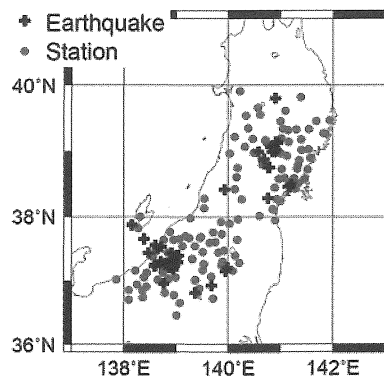


図3 関係式の導出および精度検討に用いた地震及び地点

条件1：対象地点の選定

震度 5 以上の地震が計測された地震において、震度 4 以上が計測された地点を対象とする。選定に用いた地震は平成 16 年新潟県中越地震、及び平成 20 年岩手・宮城内陸地震の本震および余震を用いた。

条件2：波形記録の選定

条件 1 で選定された地点において、内陸型地震の震度 1 以上の記録であること。また、モーメントマグニチュードが 4.5 以上であり、P 波および S 波の読み取りが可能であること。

3.2 P波マグニチュードの定義

本研究では気象庁マグニチュードに代わり、モーメントマグニチュードと相関の良い P 波マグニチュードを定義し、震源のパラメータとして用いた。P 波マグニチュードは P 波最大加速度 (上下動成分) から決める指標であり、マグニチュードの値が 6.0 でモーメントマグニチュードと一致するように定義した。モーメントマグニチュードと関係を持たせた理由として、モーメントマグニチュードは地震モーメントから定義されるので、物理的な意味が明確な指標であることが挙げられる。ところで、図 4 の震源距離と地表面における P 波最大加速度 (上下動成分) の関係から、モーメントマグニチュード 6 以上、震源距離 50km 未満のデータはばらつきが大きいことが分かる。これらのデータを用いた場合、マグニチュードを過小評価する可能性があるため、P 波マグニチュード (P 波最大加速度距離減衰式) の導出に用いる記録から除外することにした。

モーメントマグニチュードと P 波マグニチュードの関係を図 5 に、気象庁マグニチュードと P 波マグニチュードの関係を図 6 に示す。定義式は地表面における P 波最大加速度 (上下動) の距離減衰式と同一の式とするため、次節に示す。

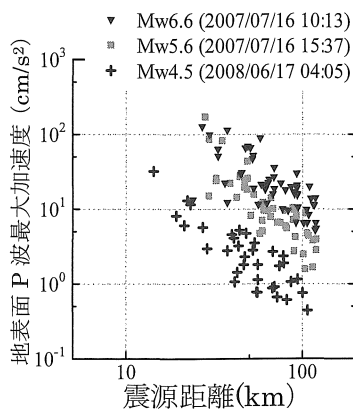


図4 震源距離と地表面 P 波最大加速度

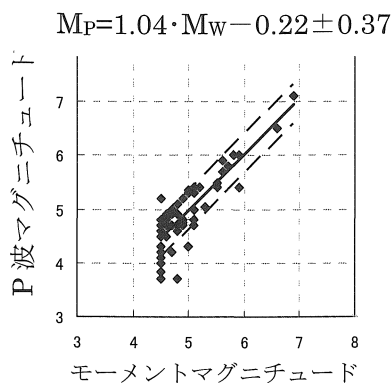


図5 モーメントマグニチュードと P 波マグニチュード

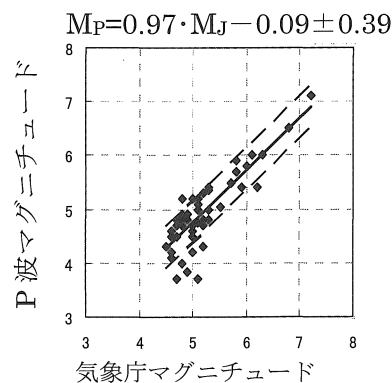


図6 気象庁マグニチュードと P 波マグニチュード

3.3 地表面におけるP波最大加速度の予測

地表面におけるP波最大加速度の予測には、P波マグニチュードを用いたP波最大加速度の距離減衰式を用いる。距離減衰に関する既往研究の多くは、S波に関するものであり、P波に関する研究は十分にされていない。そこで、リアルタイム地震情報の利用を目的とした、地表記録におけるP波最大加速度の距離減衰式を本研究において導くことにする。回帰式はS波に関するものを参考⁵⁾にして、係数の決定は2ステップ法(Joyner and Boore,1981⁶⁾)を用いた。これは、回帰係数間のトレードオフ問題を回避するため、2段階で近似を行う方法である。その結果、式(1)を得た。右辺の第2項が幾何減衰を表し、第3項が粘性減衰を表す。また、第4項は地点ごとの増幅(サイト係数)である。式(1)のサイト係数は地点ごとの値の平均を示している。

$$\log P_{\max} = 0.600 \cdot M_P - \log r - 0.0055 \cdot r - 0.338 \quad (1)$$

P_{\max} : P波の最大加速度(上下動成分)(gal)

M_P : P波マグニチュード

r : 震源最短距離(km)

a, b, c : 回帰係数

また、式(1)を変形した式(2)によって、P波マグニチュードは算出される。

$$M_P = 1.667 \cdot (\log P_{\max} + \log r + 0.0055 \cdot r + 0.338) \quad (2)$$

3.4 P波最大加速度と震度の関係式

既往研究(例えば、翠川ほか,1999)によれば、S波最大速度と震度の関係は高い相関があるとされている。しかし、リアルタイム地震情報はS波の到達を待たず、震度を予測する必要があるため、P波から震度を予測する必要がある。そこで、地表面P波最大加速度と震度の関係式を提案する。

図7の左にS波最大加速度と震度の関係、中にP波とS波最大加速度の関係、そして、右にP波最大加速度と震度の関係を示す。P波最大加速度およびS波最大加速度は地表面におけるものである。

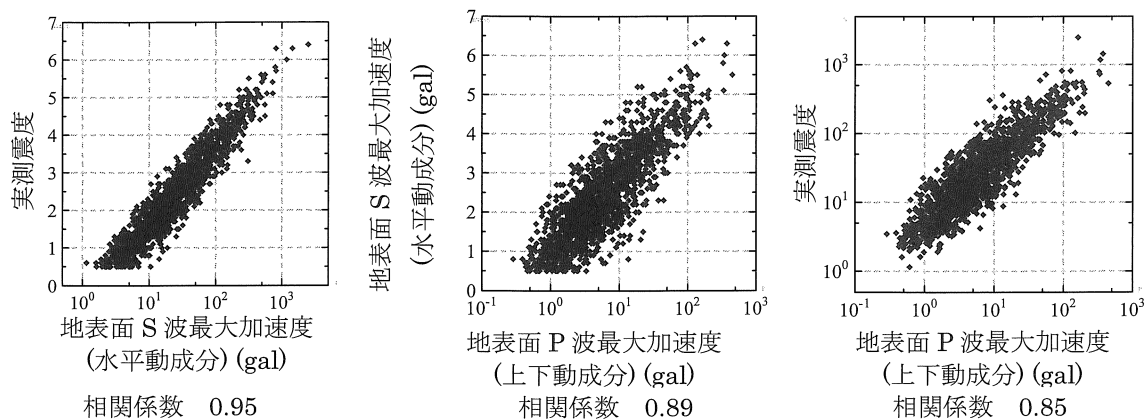


図7 地表面におけるP波とS波の最大加速度、および震度の関係

左のS波最大加速度と震度では、相関係数は0.95と高い。このことは既往研究とも一致している。次に、中のP波とS波の最大加速度の関係の相関係数は0.89と高い。よって、P波最大加速度から震度を推定することが可能であることを示している。右のP波最大加速度と震度の関係を確認すると、相関係数は0.85と高く、P波最大加速度から震度を予測することが可能であると判断できる。

回帰式はS波についての式を参考にした。解析には平均回帰直線(宇津,1984⁷⁾)を用いた。これは独立変数と従属変数を入れ替えて最小二乗法により2つの回帰式を求め、その幾何平均を平均回帰直線とする方法である。得られた平均回帰直線は式(3)となった。

$$I = 2.18 \cdot \log P_{\max} + 0.77 \quad (3)$$

I : 震度

P_{\max} : P波地表面最大加速度、上下動成分 (gal)

4. 本提案手法の検討

本提案手法の流れと導出した関係式を図8に示した。ここまで示したサイト特性は平均値であり、地点ごとにサイト特性を評価する必要がある。

提案手法の精度検討では、サイト特性を補正したもので行った。また、実測波形には高振動数成分が含まれる可能性があるため、震度フィルターをかけたものについて検討した。その結果を図9に示す。

図から震度フィルターによる予測精度の改善はほとんど見られなかった。よって、フィルターを用いなくても十分に予測が可能であると言える。ただし、図中の×印は大きな地震(モーメントマグニチュード6以上)であり、かつ震源近傍(震源距離50km以内)の記録である。これらの記録は過大に予測されている。この点については、今後改善しなければならない。

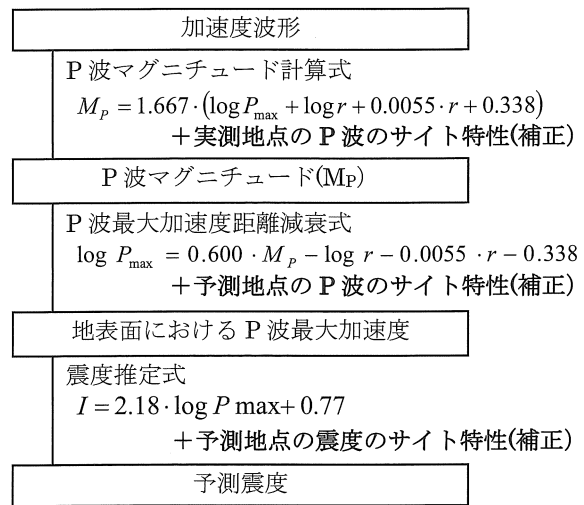
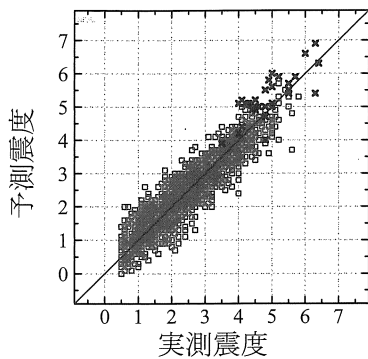


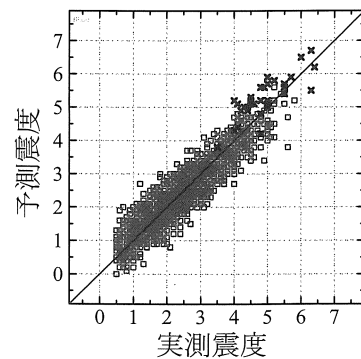
図8 提案する震度予測手法と用いる関係式

フィルター：なし

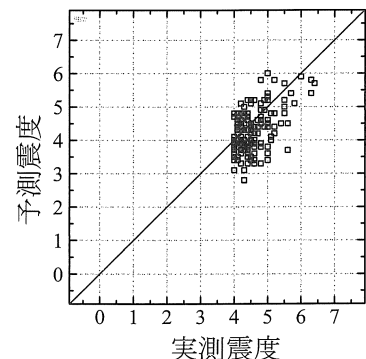


標準偏差(フィルターなし)
 全体 0.44
 実測震度4以上 0.56

フィルター：震度フィルター



標準偏差(震度フィルター)
 全体 0.43
 実測震度4以上 0.56



標準偏差 0.64

図9 提案手法による予測震度と実測震度(×印はMw6以上で震源距離50km未満の記録、□印はその他)

図10は緊急地震速報の手法による予測震度と実測震度の比較である。緊急地震速報は予測震度4以上が有効であるため、実測震度4以上の標準偏差で比較すると、提案手法の精度の方がよいと言える。ただし、本手法の場合は実測記録から求めた対象地点のサイト特性を用いているのに対し、緊急地震速報の場合のサイト特性は

500m メッシュの地形分類から、松岡・翠川 (1994)⁸⁾ によって表層地盤特性を評価した違いはある。平均サイト特性を場合、十分に地点のサイト特性を評価していないため、精度が低くなっている。

今回の検討から、提案した方式は適切にサイト特性を与えれば、有効な震度予測方式であると言える。

5. 結論

モーメントマグニチュードと相関のよい P 波マグニチュードを提案した。P 波マグニチュードは P 波最大加速度から決まる指標である。また、これを用いて震度予測値の地表面における P 波最大加速度を推定する経験式を示した。そして、地表面の P 波最大加速度から震度を求める経験式についても示した。以上により、P 波マグニチュードを用いて、震度を予測する手法を提案し、その有効性を示した。

今回の予測精度の検討では、現在の緊急地震速報よりも震度の予測精度が良いことが分かったが、より多くの地震、地点に対し、検証していくことは必要である。また、地震計が設置されていない任意地点のサイト特性の与え方や巨大地震における震源域近傍での予測に対しては今後の課題として残っている。P 波マグニチュードを用いて、どのような手順を踏めば震度の予測が可能になるかを示せたが、これらの課題を早期に解決し、実用化に向けて更なる改良が必要である。

謝辞

本研究は、独立行政法人防災科学技術研究所の運用する強震観測網 (K-NET および KIK-net) の記録、及び F-net による地震のメカニズム情報を用いています。また、地形分類からの表層地盤特性は「全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用」⁹⁾ を利用しました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本俊六, 堀内茂木, 中村洋光, 呉長江: 緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性, 物理探査, Vol.60, No.5, pp407-417, 2007
- 2) 中村豊: 地震防災システムの動向, 鉄道と電気技術, Vol.19, No.9, 2008
- 3) 気象庁地震火山部: 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, 2007
- 4) 干場充之, 石切一宏, 大竹和生: 最大動の出現時間について — 緊急地震速報のより迅速な M 推定を目指して —, 「巨大地震に対応した高精度リアルタイム地震動情報の伝達システムの構築」会議資料, 2009
- 5) Y.Fukushima and T.Tanaka, “A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan”, Bulletin of the Seismological Society of America, 1990, Vol.80, No.4, pp 757-783, 1990
- 6) W.B.Joyner and D.M.Boore, “Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake”, Bull. Seism. Soc. Am. , Vol.71, No.6, pp.2011-2038, Dec. 1981.
- 7) 宇津徳治: 震度 - 震央距離 - マグニチュードの関係 その 1. 東日本太平洋岸沖合を除く日本の浅発地震, 地震研究所彙報, Vol.59, pp.219-233, 1984
- 8) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイズミックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム資料集, 23-34, 1994
- 9) 久保智弘, 久田嘉章, 柴山明寛, 大井昌弘, 石田瑞穂, 藤原広行, 中山圭子: 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用, 地震 2, 56, 21-37, 2003