

## P波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案

## The new method for seismic intensity estimation by using the P-wave's maximum acceleration

上田竹寛†, 倉橋奨††, 正木和明†††, 入倉孝次郎††

Takenori UEDA, Susumu KURHASHI, Kazuaki MASAKI, Kojiro IRIKURA

**Abstract:** The Japan Meteorological Agency has started to provide the Early Earthquake Warning (EEW) since October 2007. EEW is expected to reduce earthquake damages by informing people about estimated seismic intensity before arriving strong motions. However, EEW has some problems, such as low accuracy and/or strong motions arriving before EEW information near the near-source area. In this study, we propose new method to estimate seismic intensity more accurately and rapidly by using P-wave Magnitude ( $M_p$ ) which is defined by maximum P-wave acceleration of vertical component, although JMA magnitude is defined by maximum S-wave displacement. Attenuation formula of P-wave maximum acceleration derived from seismic records and estimation relationship between seismic intensity and P-wave maximum acceleration were also proposed in this study. By using these empirical equations seismic intensity in a target site can be estimated P-wave information. The method is also able to apply as onsite alarm system. It is showed that the new method proposed in this study has well accuracy and is useful technique for real time earthquake emergency information.

## 1. 序論

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。緊急地震速報が平成19年10月より一般に提供され、被害の軽減が期待されている。しかし、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・東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<sup>1)</sup>。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に示したのは、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図である。震源に最も近い円が情報提供と主要動到

達と同時に地点を示している。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,2008<sup>2)</sup>)。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。

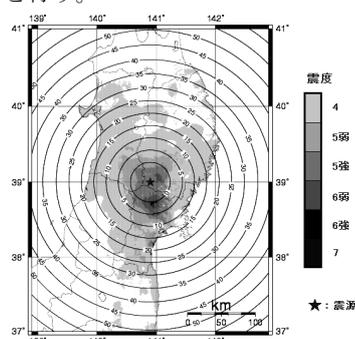


図1 岩手・宮城内陸地震における緊急地震速報の第1報提供から主要動到達までの時間及び推計震度分布図(気象庁HPより)

† 愛知工業大学大学院 工学研究科 建築システム  
工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 地域防災研究センター (豊田市)

††† 愛知工業大学 工学部 都市環境学科 (豊田市)

2. 新たな震度予測手法の提案

新たな震度予測手法の提案にあたり、緊急地震速報の震度予測手法およびオンサイト警報の震度予測手法について検討を行う。図 2 に本研究の流れを示す。

2・1 緊急地震速報の震度予測手法

図 3 に加速度波形から震度を予測する緊急地震速報の震度予測手法<sup>3)</sup>を示した。気象庁マグニチュードを求めるまでの処理は震源情報を推定するための処理である。それ以降は任意地点の震度を予測するための処理である。緊急地震速報の手法では、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)<sup>4)</sup>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ることで震度の推定が行われており、最適であるとは限らない。これらの点を改善すれば、より早く、精度良い震度予測が可能と考えられる。

2・2 オンサイト警報の震度予測手法

オンサイト警報は最も簡単な警報システムと言える。この警報システムは、地震波の検知から警報を出す判断までを警報を発する地点の観測情報のみで行うものであり、欠点としては第 1 章でも取り上げたが、地点ごとに計測機器が必要となることが挙げられる。しかし、緊急地震速報では間に合わない、震源近傍においても情報提供ができる可能性がある。最も簡単なオンサイト警報のシステムとして、観測された地震動のレベルが、あらかじめ設定した閾値を超えた場合に警報を出すものが考えられる。

2・3 本研究の震度予測手法

2・1 節では緊急地震速報による震度予測手法の問題点を挙げた。また、2・2 節ではオンサイト警報の震度予測手法を簡単なシステムモデルにより説明した。

提案する震度予測手法は、P 波加速度を用いて震度を予測するものであるが、震度マグニチュードを用いた震度の予測手法を参考とした。この手法の優れている点として、震度マグニチュードの定義式と距離減衰式が同一であるため、一つの式で震度マグニチュードの推定と任意地点の震度推定を可能としていることにある。また、いくつかの式を介して震度を予測するのではなく、直接、

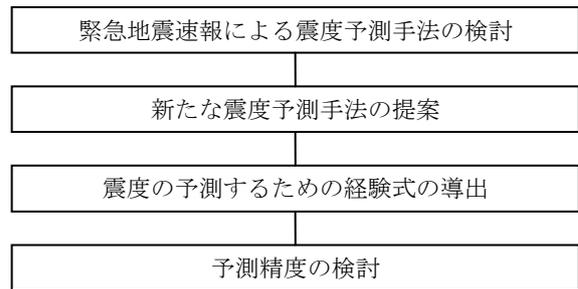


図 2 本研究の流れ

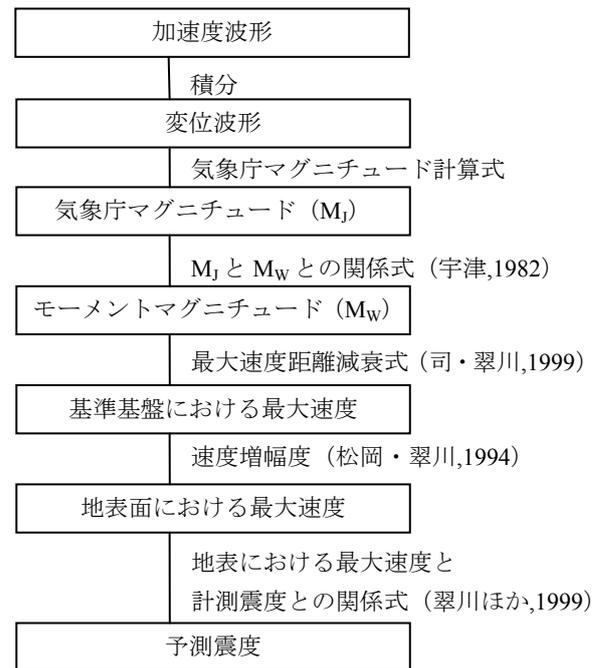


図 3 緊急地震速報における加速度波形から震度推定までの流れ

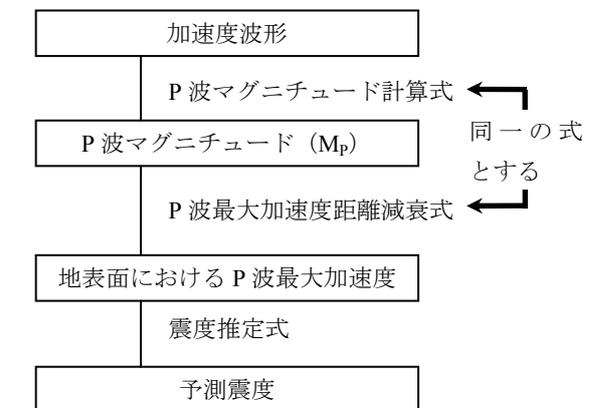


図 4 提案手法における加速度波形から震度推定までの流れ

震度の距離減衰式を用いることで、誤差の積み重ねの問題が改善されている。

## P 波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案

本研究はP波を用いたオンサイト警報システムとしても適用可能なP波最大加速度と震度の経験式、およびP波マグニチュードを用いた地表面におけるP波最大加速度の距離減衰式を定義し、震度マグニチュードによる震度予測とは異なるアプローチによって、即時性と予測精度の向上を試みる。図4に提案する予測手法について示す。この手法は、まず、実測のP波最大加速度からP波マグニチュード ( $M_p$ ) を算出し、 $M_p$  を用いて任意地点のP波最大加速度を予測する。そして、予測したP波最大加速度から最終的に震度を予測する。

### 3. P波マグニチュードを用いた震度予測式の定義

第2章では提案する震度予測手法について示した。本章は、提案手法による震度の予測に必要な関係式を導出する。

#### 3.1 震度予測式の定義に用いたデータ

本研究では内陸型地震を対象として、図5に示した地震及び観測地点の記録を用いた。地点及び波形の選定では以下の2つの条件に該当する、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ている。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。

##### (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。対象とする地点の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。

##### (2) 波形記録の選定

(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関連の良い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。

ただし、図6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

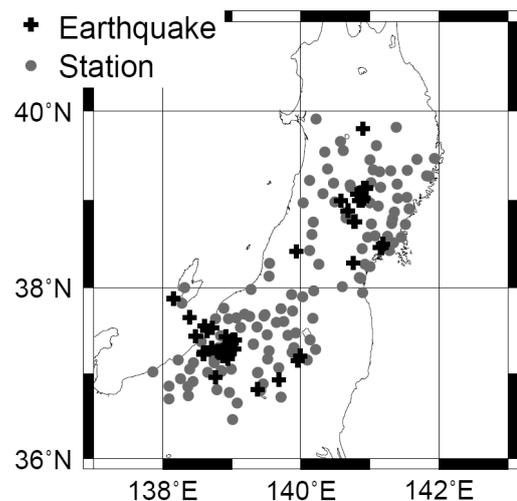


図5 関係式の導出に用いた地震及び地点

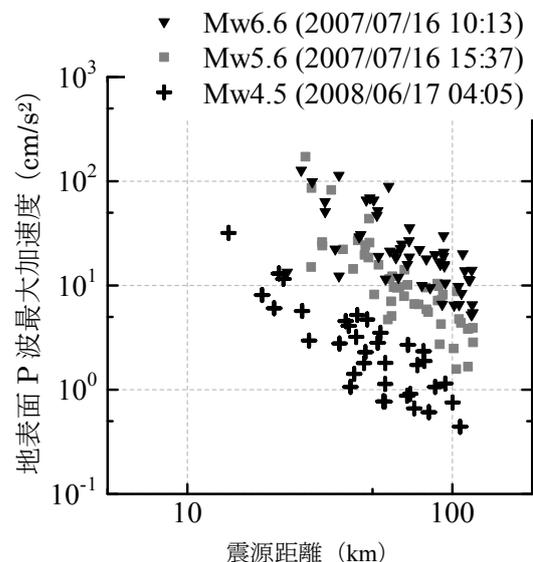


図6 震源距離と地表面P波最大加速度

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した。

P波マグニチュードはP波最大加速度から決められるが、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。P波マグニチュードとモーメントマグニチュードの関係を図7に示す。また、気象庁マグニチュードとの関係を図8に示す。気象庁マグニチュードとモーメントマグニチュードは相関があるといわれており、P波マグニチュードと気象庁マグニチュードも相関があることが図からも分かる。P

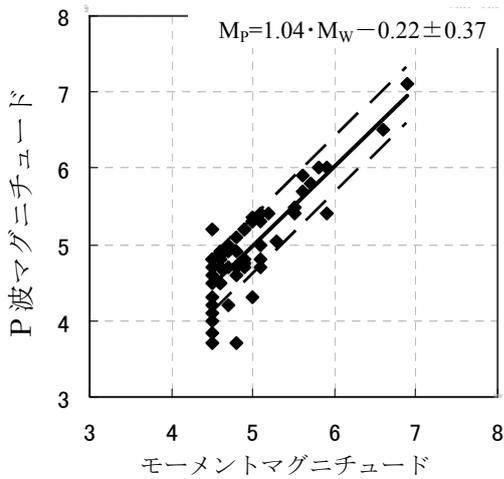


図7 モーメントマグニチュードとP波マグニチュード

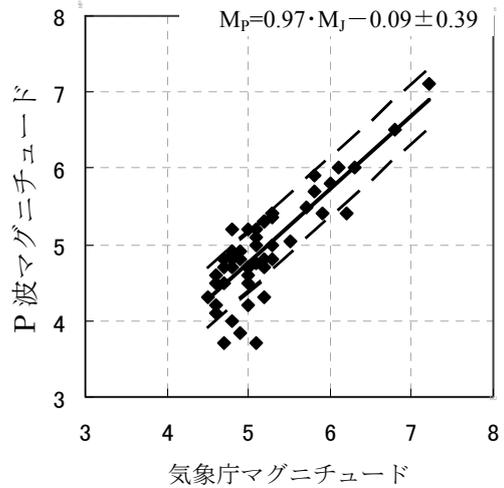


図8 気象庁マグニチュードとP波マグニチュード

波マグニチュードの計算式は第2章でも述べたが、地表面におけるP波の最大加速度の距離減衰式と同一の式とするため、3・3節で示す。

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。

$$\log P_{\max} = a \cdot M_p - \log r - b \cdot r + c \quad (1)$$

- P<sub>max</sub> : P波の最大加速度 (上下動成分) (gal)
- M<sub>p</sub> : P波マグニチュード
- r : 震源最短距離(km)
- a, b, c : 回帰係数

回帰式はS波に関するものを参考にして<sup>5)</sup>、式(1)とした。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。

$$\log (P_{\max} \cdot r) = -b \cdot r + dummy \quad (2)$$

係数の決定は2ステップ法(Joyner and Boore,1981<sup>6)</sup>)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。

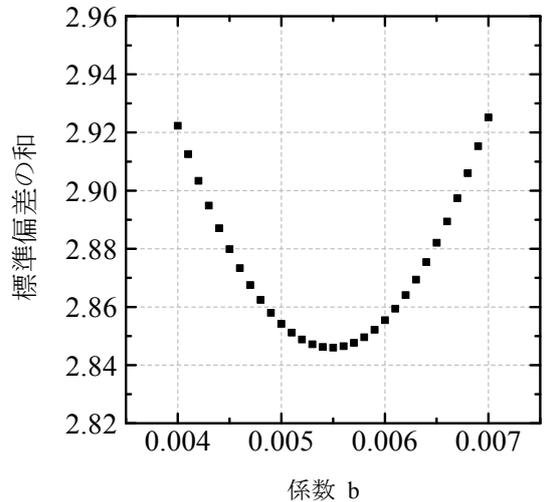


図9 係数 b と標準偏差の和

はじめに、式(1)を式(2)のように変形し、直線の傾きから係数 b を決定する。このとき、データセットを M<sub>p</sub> ごとに分けて、M<sub>p</sub> が異なっても共通の係数 b となるように決定する。図9において M<sub>p</sub> ごとの標準偏差を足し合わせたものが最小となる値が係数 b であり、0.0055 となった。

$$\log (P_{\max} \cdot r) + b \cdot r = a \cdot M_p + c \quad (3)$$

その後、決定した係数 b を用いて、式(3)の傾きより係数 a、切片より係数 c を決定する。このとき、地点ごとにデータセットを分けて、共通の係数 a となるように決定した。係数 a と標準偏差の和の変動を図10に示した。最小となる値が係数 a であり、a=0.600 となった。また、係数 c は地点ごとの値を平均して、c=0.338 となった。

## P波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案

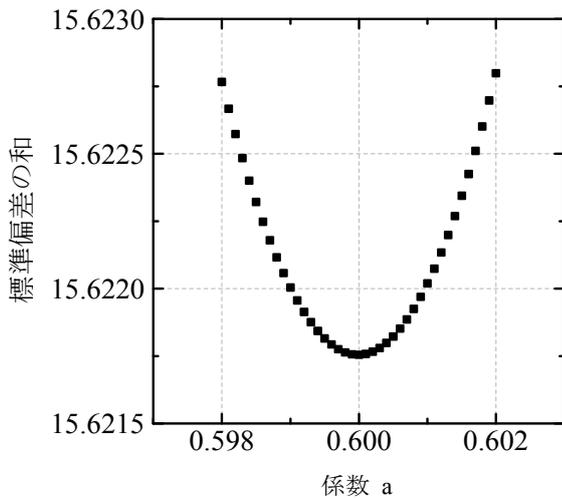


図10 係数 a と標準偏差の和

以上より、地表面における P 波最大加速度の距離減衰式 (4) を得た。

$$\log P_{\max} = 0.600 \cdot M_p - \log r - 0.0055 \cdot r + 0.338 \quad (4)$$

また、式 (4) を変形した式 (5) によって、P 波マグニチュードを算出される。

$$M_p = 1.667 \cdot (\log P_{\max} - \log r - 0.0055 \cdot r + 0.338) \quad (5)$$

## 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、震度を予想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。

まず、図 11 に地表面における S 波最大加速度と震度の関係を示す。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、図 12 に地表面における P 波と S 波の最大加速度の関係を示す。相関係数は 0.89 と高く、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。

そこで、図 13 に地表面における P 波最大加速度と震度の関係を示す。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。このことは、緊急地震速報のように S 波の到達を待たずして、震度を予測しなければならないリアルタイム地震情報において、非常に重要で注目すべきことである。

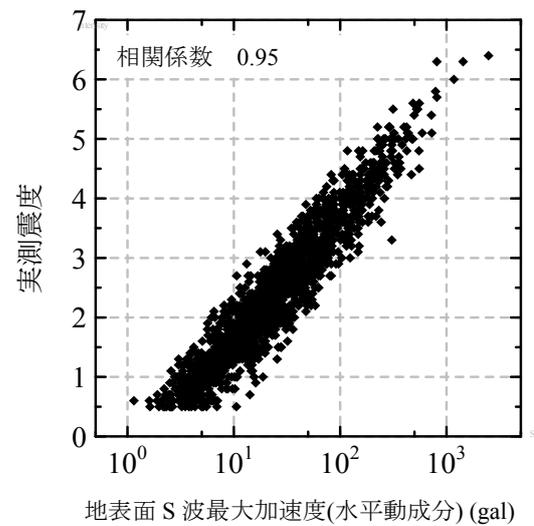


図11 地表面 S 波最大加速度と実測震度

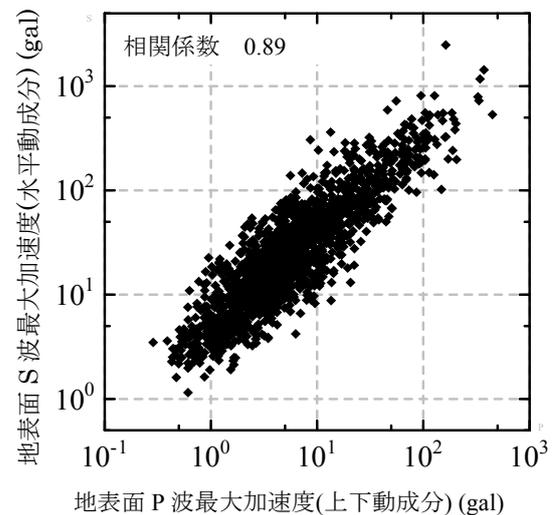


図12 地表面における P 波と S 波の最大加速度

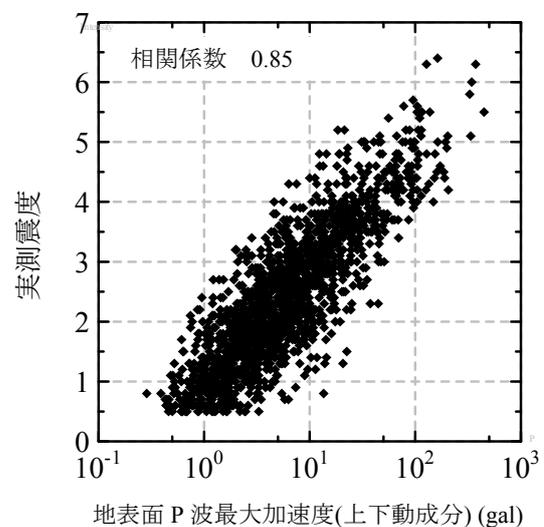


図13 地表面 P 波最大加速度と実測震度

本研究により、3・3 節において導いた式 (5) を用いて P 波マグニチュードの算出し、式 (4) を用いて P 波最大加速度の推定を行い、以下に導く P 波最大加速度から震度との関係式を用いて震度を予測することが可能になる。また、求めた式を、オンサイト警報のシステムに組み込むことも可能であり、応用的研究としても意義がある。

回帰式は S 波についての式を参考にし、式 (6) とした。

$$I = n \cdot \log P_{\max} + m \tag{6}$$

- I : 震度
- Pmax : P 波地表面最大加速度、上下動成分 (gal)
- n, m : 回帰係数

解析には平均回帰直線 (宇津,1984<sup>7)</sup>) 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。

図 14 に地表面における P 波最大加速度と震度の関係を示す。独立変数を P 波最大加速度とした場合と震度を独立変数とした場合の回帰直線、および平均回帰直線を示す。得られた平均回帰直線は式 (7) となる。

$$I = 2.18 \cdot \log P_{\max} + 0.77 \tag{7}$$

#### 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 14 に示した。導出した式は、サイト特性の平均値である。したがって、地点ごとにサイト特性を評価する必要がある。まず、P 波の実測最大加速度から Mp を計算するが、このとき観測地点のサイト特性を入れる必要がある。次に震度予測地点の P 波最大加速度を予測する際には、対象地点のサイト特性の補正が必要である。予測された P 波最大加速度を用いて震度を予測する際には、震度に関するサイト特性の補正をする必要がある。

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、フィルターについて検討した。最終的に震度を得ることが目的であるため、震度フィルターをかけたものについて検討した。また、サイト特性については平均値を用いた場合と地点ごとのサイト特性で補正した場合について検討した。その結果を図 16 に示す。サイト特性の平均値を用いた場合が a) および b) であり、地点ごとのサイ

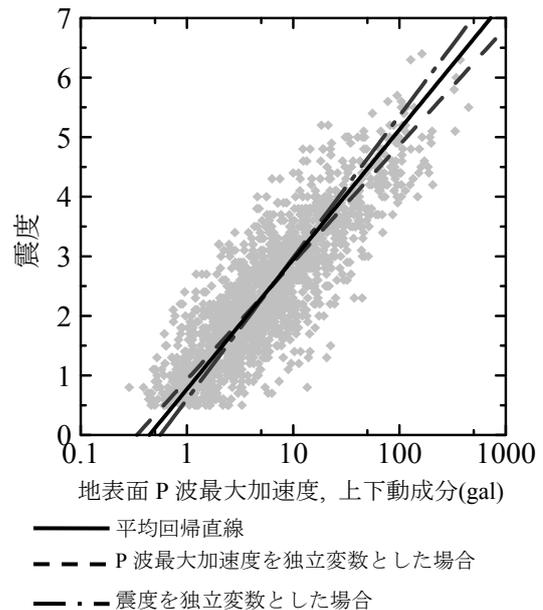


図 14 最小二乗法で求めた回帰直線と平均回帰直線

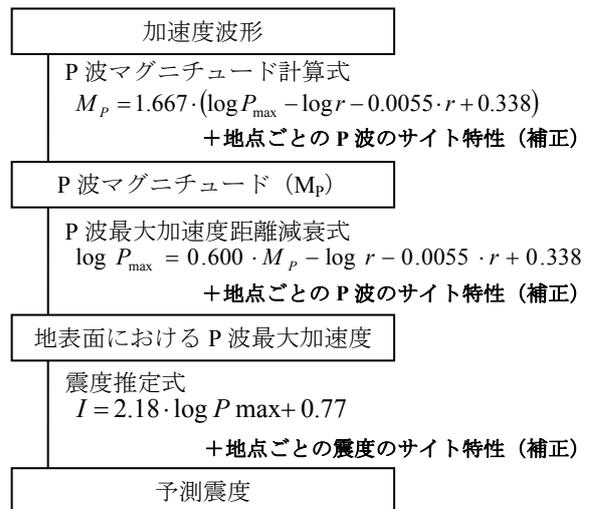


図 15 提案する震度予測手法と用いる関係式

ト特性を与えた場合が c) および d) である。また、a) および c) がフィルターをかけない場合、b) および d) が震度フィルターをかけた場合である。

サイト特性を補正した場合には明らかに標準偏差が小さい。したがって、地震動計測機器の設置地点においては、採取できた地震記録の蓄積をはかり、サイト特性(補正值)を評価すれば、予測精度の向上できる。一方、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。

## P波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案

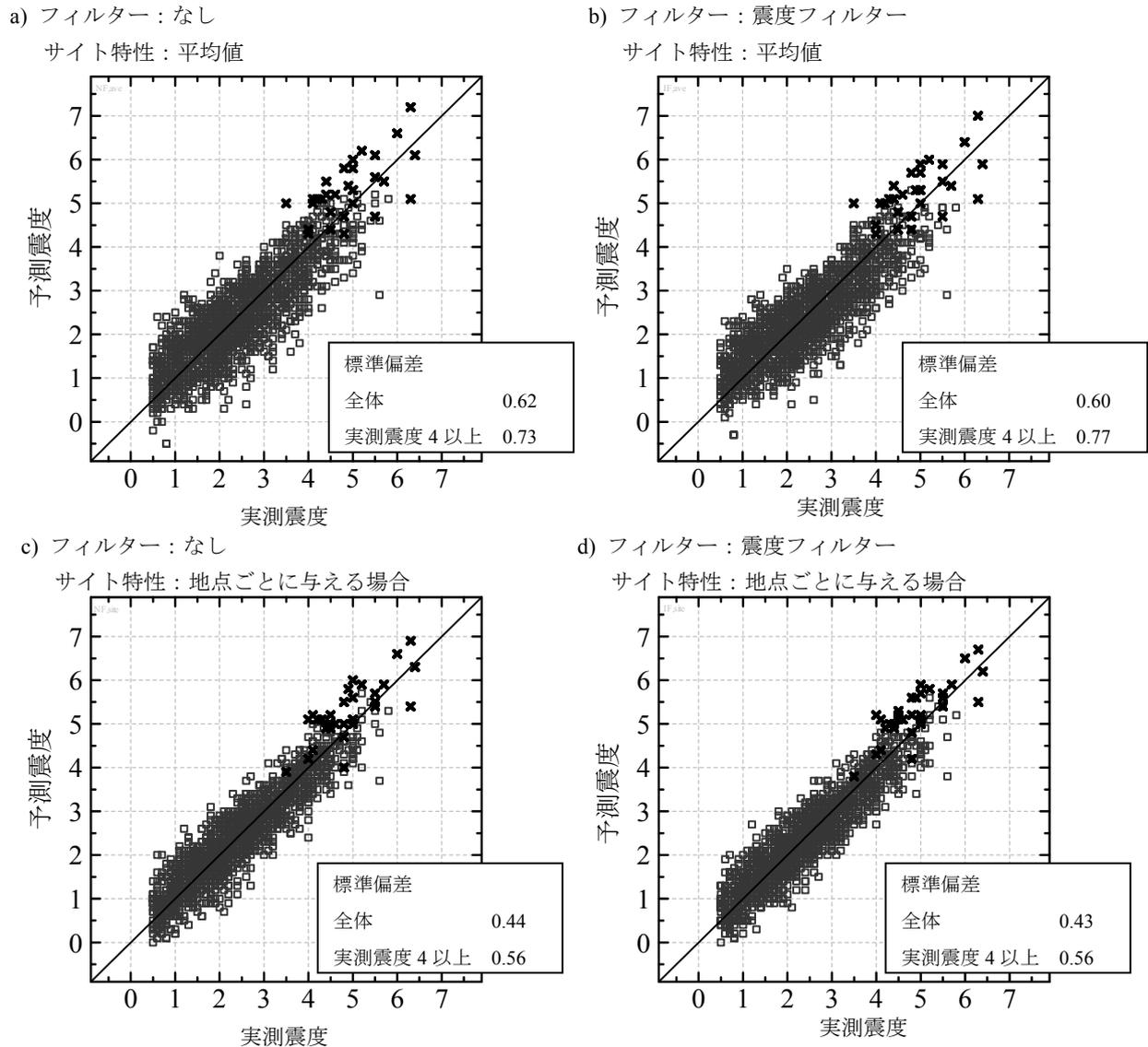


図16 実測震度と提案手法による予測震度

(×印はMw6以上で震源距離50km未満の記録、□印はその他)

図16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。これらの記録は直線より上方に分布しており、過大に予測されていることを示している。これについては、今後改善しなければならない。

図17は緊急地震速報の方式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、地点ごとのサイト特性を与えた場合は、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)<sup>8)</sup>によって表層地

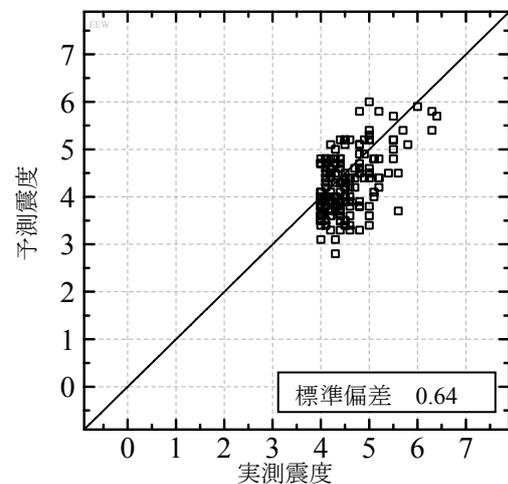


図17 実測震度と緊急地震速報の手法による予測震度

盤特性を評価した違いはある。平均サイト特性を場合は、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。

今回の検討は、地震動計測機器が設置された地点を対象としたものである。機器が設置されていない一般的な任意地点の予測では、平均サイト特性を用いることになるが、今後、任意地点のサイト特性を適切に評価できるようになれば、地点ごとに与えた場合に近づく。よって、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

本研究は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。次に、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。最後に、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。以上のことにより、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。

予測精度の検討では、サイト特性を地点ごとに与えた場合、より精度の高い震度推定ができることを示した。また、今回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。

今回の震度予測手法の提案および検討では、地震計が設置された地点に関するものであった。地震計が設置されていない任意の地点での予測をする場合、サイト特性をどのように与えるか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、巨大地震における震源域近傍での予測に対して課題が残った。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」<sup>9)</sup>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ス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

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)