

P波初動を用いた震度予測方法の開発と緊急地震速報への応用

Seismic intensity estimation using P-wave and its Application to Real-time Earthquake Information

林龍男† 倉橋奨†† 正木和明††† 入倉孝次郎††††

Tatsuo HAYASHI, Susumu KURAHASHI, Kazuaki MASAKI, Kojiro IRIKURA

Abstract: The Japanese Meteorological Agency has started examination delivery of real time earthquake information since February 2005. Real time earthquake information gives the information of earthquake event before strong motion arriving. It is hoped that we can reduce the damage due to earthquake greatly by this. However, real time earthquake information has plural big problems. Precision of seismic intensity in particular is the first problem. Estimated seismic intensity by method that the Japanese Meteorological Agency recommends tends to become bigger than observed seismic intensity. It is thought that the reason is to calculate it from many experience equations in seismic intensity estimation. In addition, it is thought that experience equations used for estimation have regional characteristics to national average. Therefore, in this study, we suggest a method to estimate seismic intensity different from the method Japanese Meteorological Agency recommended. The new method estimate seismic intensity from initial part of P wave. In addition, we suggest seismic intensity estimation to the other site where P wave does not arrive at. The method calculates magnitude, epicentral distance with B- Δ method (Tukada et al 2004). We demand an attenuation relationship from calculated results. We perform seismic intensity predictions from a found expression to the other site. Initial up-and-down motion of P wave has a good relation with seismic intensity. The method developed in this study will be very useful for emergency system by using the Real-time earthquake information.

1.序論

1.1 背景

阪神大震災の死亡原因は、漏電やガス漏れ、圧死がほとんどである。

事前に、巨大な揺れが来ることを察知しガスコンロや電気製品のスイッチを制御したり、安全な場所に避難したりすることができたなら、これらの被害を大きく軽減することが可能である。

そこで、気象庁は平成16年2月25日緊急地震速報の試験配信を開始し、平成17年8月16日に発生した宮城沖地震では地震到達前に情報が配信していることが知られている。そこ

で平成18年8月1日から、情報利用の目的等が一定の条件を満たした機関へのより本格的な先行配信を開始した。

本大学の地震防災コンソシアムはその機関の一つとして発信情報を受けている。それに伴い、三河平野の強震観測ネットワーク(Ai-net)による観測が開始され、現在、地域企業の防災力の向上に向け、観測された地震を用い、実用化に向けトレーニングを積み、データと経験の蓄積を行っている。



図1 Ai-net地震計設置点¹⁾

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻
†† 愛知工業大学大学院 生産・建設工学専攻
††† 愛知工業大学 工学部 都市環境学科(豊田市)
†††† 愛知工業大学地域防災研究センター客員教授
(豊田市)

一方、緊急地震速報には多くの問題がある。中でも現段階の状態では震度推定精度が不十分であるため、予想より小さな揺れであった場合や逆に予想以上の揺れが発生してしまった場合は、人的被害、企業の経済的被害の両面から致命的な被害が発生する可能性が十分に考えられる。

1.2 研究目的

本研究では、緊急地震速報の精度を上げ、迅速かつ正確な震度予測をするために、現在使用されている震度推定方法とは別の新たな推定震度算出方法を確立し、震度推定精度を上げることが目的とする。

2. 緊急地震速報

2.1 緊急地震速報とは

緊急地震速報とは、気象庁の地震観測網から得られた地震発生情報を即座に伝達し、住民の生命を守る(危機の軽減)ことや社会経済に与える損害を軽減するための情報である。

地震が発生すると始めにP波と呼ばれる初期微動が到達する。その後P波に比べ振幅が数倍大きいS波と呼ばれる主要動が到達する。一般に地震の被害はS波によって引き起こされる。S波の速度は 3~4km/s でP波のおよそ半分ぐらい遅く、この時間差を利用して、S波が到達する前に地震の情報を伝えることで、身の安全確保などの防災対策を取ることが可能となるものである。



図2 緊急地震速報の仕組み²⁾

図2に緊急地震速報の仕組みを表した図を示す。

- 1) 地震が発生し、地震波が放射された後、震源に近い数ヶ所の観測点でP波が観測する。
- 2) そのP波を用いて、震源位置とマグニチュードを予測算出する。

- 3) その情報からS波の到達時間、震度、マグニチュードを配信する。

しかし緊急地震速報は地震発生から主要動到達までの短い時間に提供・活用する情報であることから、様々な適用限界がある。震源に近い場所ほど情報の提供から主要動が到達するまでの時間が短くなることから、特に内陸の直下型地震などでは、情報の提供が主要動の到達に間に合わないことがある。また、緊急地震速報は迅速性を優先しているため、震源、マグニチュード、主要動到達予測時刻および予測震度の推定精度が十分でない場合や、誤報(落雷等、地震以外の原因で発信される緊急地震速報)が発信されることがあるなど様々な問題点を抱えている。

2.2 現在の予測震度算出方法

現在気象庁が提案している予測震度算出方法のフローチャートを図3に示す。この方法の推定震度と観測震度の比較を図4に示す。要約するとこの方法は地震の規模から対象地点と震央距離による減衰効果と対象地点のそれぞれの揺れやすさを考慮することで震度を計算するものである。

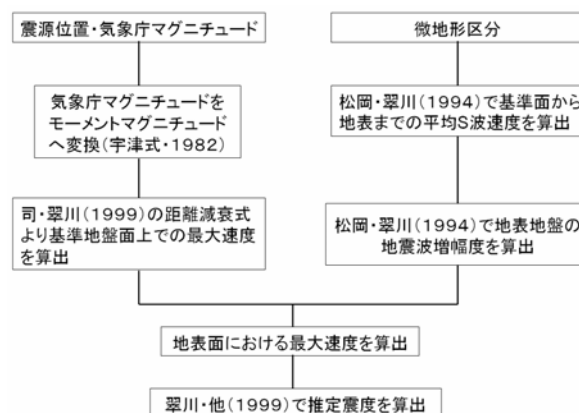


図3 予測震度の算出方法のフローチャート

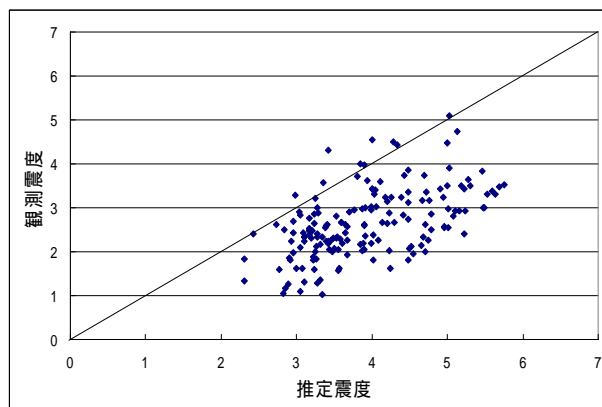


図4 推定震度と観測震度の比較

この方法では、実際に観測したものより大きくなる傾向がある。

実際図4を見ると推定震度は観測震度に比べて震度1~2程度大きく推定されている。

これは、震度の算出までに複数の経験式から算出していることから誤差が生じてしまう可能性が考えられる。

3.研究方法

3.1 解析方法

先に示したとおり、気象庁の震度推定方法では多くの計算により誤差が大きいと考えられる。そこで本研究ではP波の初動から直接震度を推定する方法を提案する。

解析は以下の手順で行った。

P波数秒間の上下動の地震波形の最大加速度と震度の関係を導きだす。

他地点への適用するためには以下の操作を行う。

B-法を適用し、マグニチュードおよび震央距離を推定する。

震央距離とP波初動の最大加速度相当値の関係を導きだす。

P波初動の加速度相当値から震度を導き出す。

なお本研究にて解析に用いた地震波は防災科学技術研究所の地震観測網、K-net、kik-netの観測点で得られたものである。ただし地域特性による影響が考えられるため、愛知県内の観測点で観測されたデータのみを使用した。また今回は被害が起こる大きな地震を対象とするため、マグニチュード5(M5)以上のものを対象とした。

3.2 B-法

P波初動からマグニチュードと震央距離を推定する方法としてB-法を適用した。B-法(東田・他 2004)⁵⁾とは、P波初動部上下動成分の振幅の包絡線形状を用いてマグニチュードと震央距離を推定する方法である。

解析手順は以下の通りある。

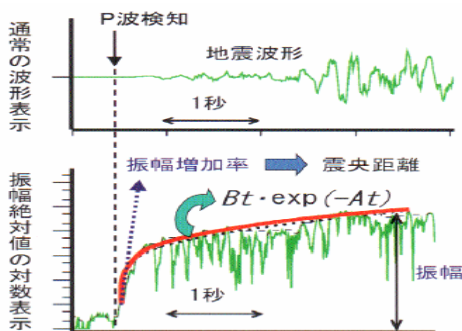


図5 B-法概略図⁸⁾

P波上下動の加速度波形を絶対値化させる

に(式1)で最小二乗法を用いて係数A、Bを求める。

$$y(t) = Bt \cdot \exp(-At) \quad (t \geq 0) \quad \dots (式1)$$

ここでtは観測点にP波が到達した以後の時間を原点とする。

より求めた係数Bを(式2)に代入して震央距離を求める。

$$\log B = -3.54 \log \Delta + 6.11 \quad \dots (式2)^{5)}$$

Δ : 震央距離(km)

B: 求めた係数B

P波初動3秒間の最大加速度を(式3)に代入してマグニチュードを求める。

$$M = 0.929 \log A_{\max} - 0.62 \log B + 0.188$$

$\dots (式3)^{5)}$

A_{\max} : P波初動3秒間の最大加速度(gal)

M: マグニチュード

以上のように震央距離、マグニチュードを算出させる。

P波初動の振幅増幅率が大きいほど、すなわち初動が急激に立ち上がるほど、震央距離が近く、振幅増幅率が小さいほど、震央距離が遠い地震であるという特徴がある。

なお、式2、式3は全国で観測された地震を対象として回帰分析より求められた関係式である。

4.研究結果

4.1 震度の推定

一般に震度は水平動成分と関係性がある。しかしP波と震度との関係はよく分かっていない。

そこで上下動のP波最大加速度と震度に関係性について検討を行った。結果を図6に示す。

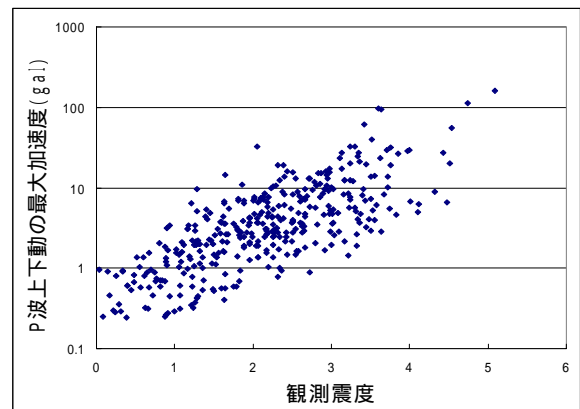


図6 上下動のP波最大加速度と震度

その結果、上下動のP波最大加速度と震度に比例関係がみられることがわかった。

しかし、P波の最大加速度はP波の初動の数秒間で必ずしも得られるものではない(図7を参照)。

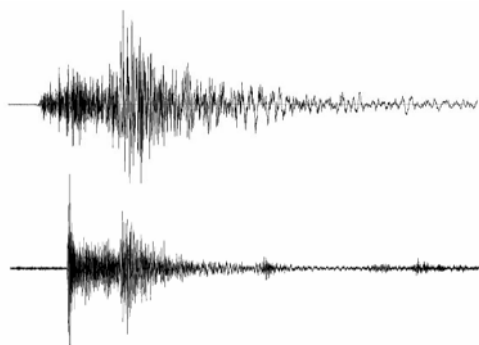


図7 P波の最大加速度の違いの比較

そこで緊急地震速報では迅速性を重視するため、P波検知後何秒で震度との関係性が現れるか検討を行った。

計算間隔は1秒間隔でP波検知後10秒まで行った。結果を以下に示す。

そこで緊急地震速報に使用するには、P波初動何秒で関係性が現れるか検討を行った。計算間隔は、1秒間隔で10秒間とした。結果を図8に示す。

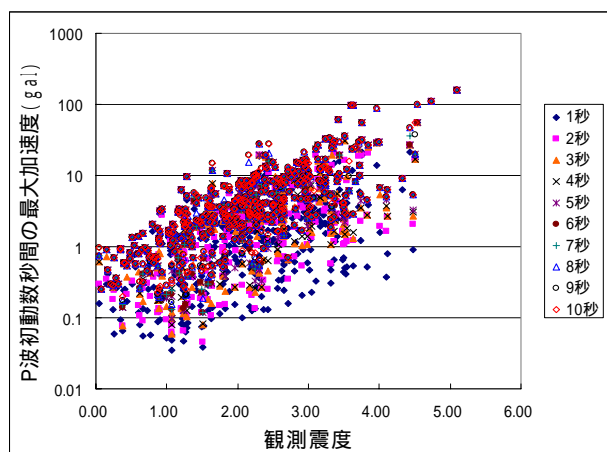


図8 P波検知後数秒間の最大加速度と震度の関係

検討を行った結果、P波初動3秒間以降の最大加速度でバラツキがあまり変化見られなくなった。

しかしバラツキは大きい。地域特性も考慮しているため、バラツキは地震によるものと考えられる。そこで本研究では地震の違いとして、震央距離と震源深さに依存していると考え、震央距離別と震源深さ別に比較を行った。図9にP波初動3秒間の最大加速度と震度の関係を震央距離 50kmごとに分類を行ったものを示す。

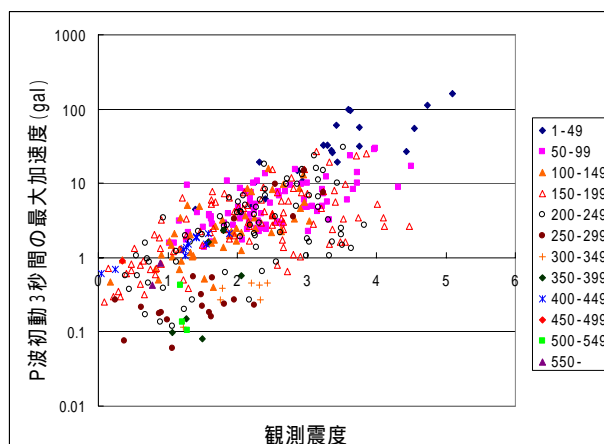


図9 震央距離別の関係

分類した結果、震央距離 200 ~ 250km 辺りからデータのバラツキが見られることが分かる。しかし震央距離が 200 ~ 250km 以上のデータでもバラツキが見られないデータが存在する。次に震源深さ 10kmごとに分類を行った。結果を図10に示す。

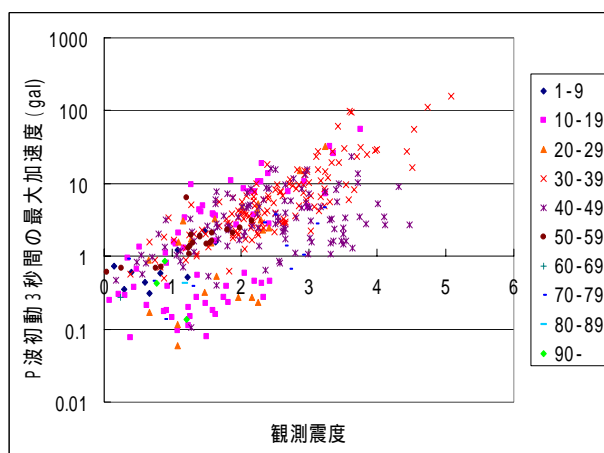


図10 震源深さ別の関係

分類した結果、震源深さ 10 ~ 30km のデータをみるとバラツキがみられることが分かる。図9, 10 の関係から震央距離が遠く、震源深さが浅い地震がデータのバラツキの原因であると考えられる。

震央距離が遠く、震源深さが浅い地震は地震波がほぼ水平に伝播してくると考えられ、上下動成分は小さくなると考えられる。

このことからバラツキを少なくするために、震央距離が遠く、震源の浅い地震は今回の震度の推定式を算出する解析データからは除外することにした。

P波初動3秒間の最大加速度と震度の関係から推定式を求めた。推定式を以下に示す。

$$I = 1.541 \cdot \log P_{3\max} + 1.258 \quad (P_{3\max} > 0)$$

…(式4)

$P_{3\max}$: P波初動3秒間の最大加速度 (gal)

I : 推定震度

図11に推定震度と実際の震度の差を示す。

実際の震度 ± 0.3 の範囲で本研究にて算出した推定式で全データの約 50%、 ± 0.5 の範囲では全データの約 70%が含まれる結果となった。推定結果から実際の震度より少し大きめに推定される傾向がある結果になった。

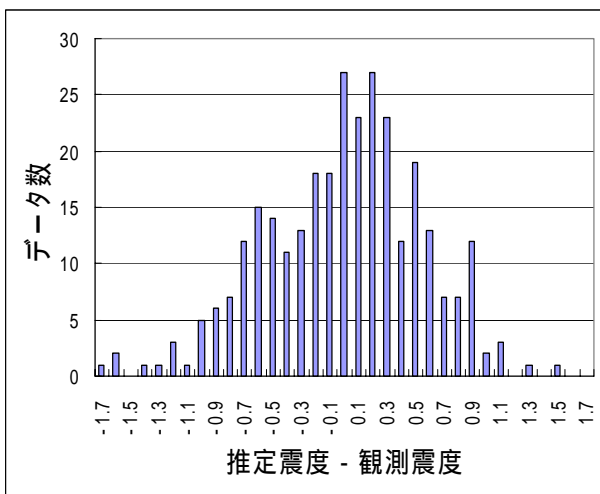


図11 推定震度と観測震度の差

図12に従来の方法と本研究の方法の比較を示す。

図12より、従来の方法に比べて本研究の推定方法の方が精度良く推定できることがわかる。

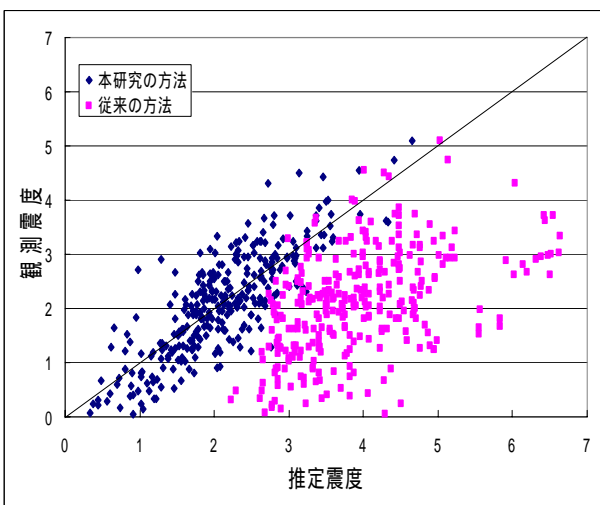


図12 従来の方法と本研究の方法の震度比較

4.2 B- 法にて震央距離およびマグニチュードの推定

本研究で用いる地震をB-法を適用し、震央距離とマグニチュードを推定した。

図13に実際の震央距離と推定した震央距離の比較の結果を示す。推定された震央距離は実際の震央距離より大きく求まる傾向がある。これについては4.3で検討を行う。

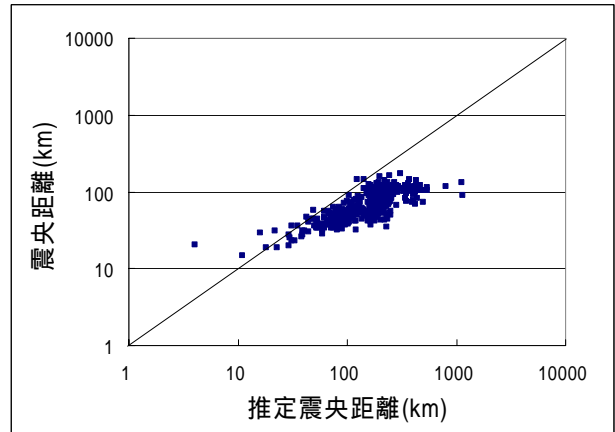


図13 推定と実際の震央距離の比較

図14に推定されたマグニチュードと実際のマグニチュードを比較した結果を示す。

推定マグニチュードは実際のマグニチュードとは大きく違いが生じている。これについては4.4で検討を行う。

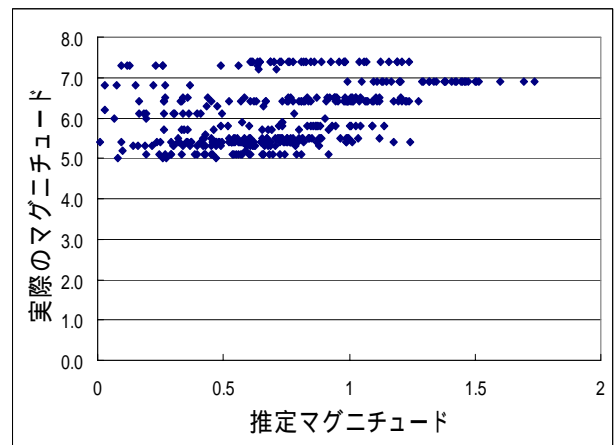


図14 推定と実際のマグニチュードの比較

4.3 震央距離推定の改善方法の検討

(2)式で震央距離を算出した場合推定と実測では大きな誤差を生じてしまうため、推定に用いるデータの再検討を行った。

現在B-法は3秒間のデータを使用しているが、地震の規模の違いにより断層の破壊過程が変わると考えられる。よって

P波初動を用いる時間によりパラメータBの違いが出る可能性が考えられる。そこで算出使用時間の変更を検討し、時間間隔を1秒間隔で10秒まで変更した。図 15 に結果を示す。

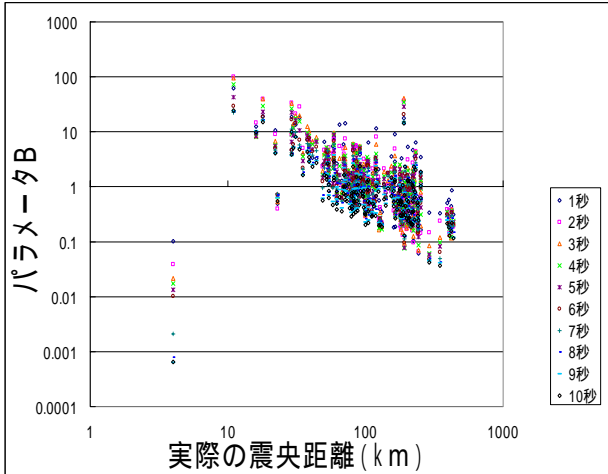


図 15 1秒間隔のパラメータBと震央距離の関係

解析を行った結果、解析使用時間1秒では大きくバラツキが確認されたが3秒以降のバラツキはあまり変化が見られなかった。よってB - 法によるP波初動部の解析時間は妥当である。

パラメータBと震央距離の関係は解析使用時間が問題ではないことがわかった。そこで次に地域的な特性について検討した。本研究で用いている地震は愛知県内で得られたもので、このデータのみを使用して関係式を導いた。関係式を以下に示す。

$$\log B = -2.86 \log \Delta + 5.91 \quad \dots (式5)$$

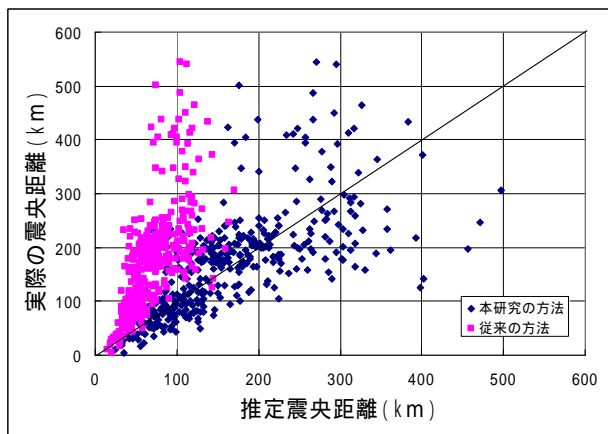


図 16 震央距離の比較

地域特性を考慮した式を用いて計算した推定震央距離と実際の震央距離の比較した結果を図 16 示す。

結果、地域特性を考慮することで誤差が小さくなった。

4.4 マグニチュード推定の改善方法

図 14 に示した通り現在のB - 法のパラメータBとP波初動3秒間の最大加速度を用いる推定式では全くことなった結果になるため、地域性を考慮した推定式を検討した。推定した式を以下に示す。

$$M = 0.940 \log A_{\max} - 1.20 \log B + 5.331 \dots (式6)$$

図 17 に推定マグニチュードと実際マグニチュードの差を示す。

実際のマグニチュードの±0.5の範囲で全データの約70%が含まれた。

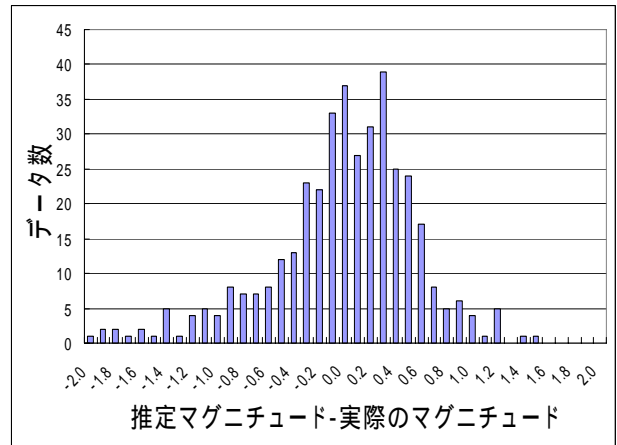


図 17 マグニチュードの差

図 18 に従来の方と本研究の方の比較を示す。図より、地域特性を考慮する必要があることがわかる。

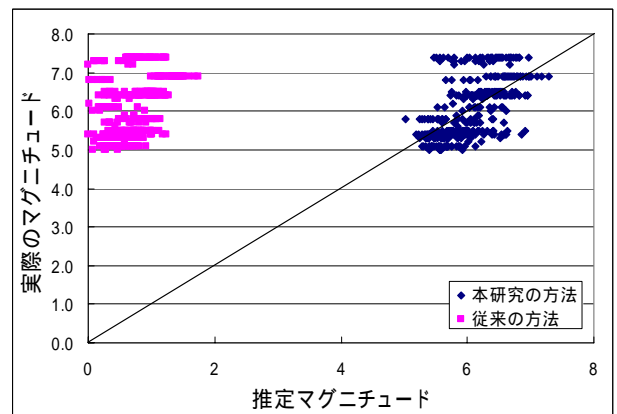


図 18 従来の方と本研究の方の比較

4.5 他地点への震度予測

他地点での震度を推定する方法を検討するため、P波初動3秒間の最大加速度と震央距離の関係を調べた。

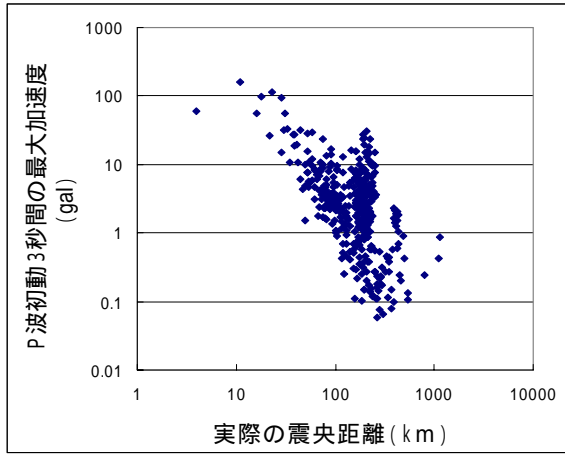


図 19 P 波初動3秒間の最大加速度と震央距離の関係

図 19 にP波検知後3秒間の最大加速度と震央距離の関係を示す。結果、負の相関関係にあることが分かった。この関係からP波検知後3秒間相当の最大加速度の推定式を算出した。

なお、推定式算出の際に4-1章同様に震央距離が遠く、震源深さが浅い地震については解析から除外した。推定式を以下に示す。

$$\log P_{3\max} = 1.42M - 2.561 \log \Delta - 2.334 \quad \dots(\text{式 } 7)$$

$P_{3\max}$: P波初動3秒間相当値の最大加速度 (gal)

Δ : 震央距離 (km)

M : マグニチュード

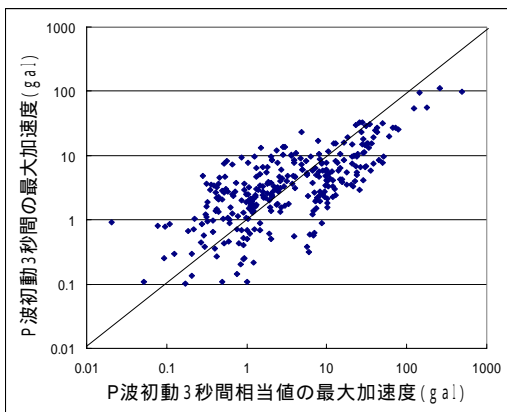


図 20 P 波初動3秒間相当値の最大加速度と実測のP波初動3秒間の最大加速度の比較

図 20 を見るとP波初動3秒間相当値の最大加速度と実測のP波初動3秒間の最大加速度は概ね一致した結果が得られた。

他地点での震度予測するために得られたP波初動3秒間相当値の最大加速度を使用し、(式4)に代入した。結果を図 21 に示す。

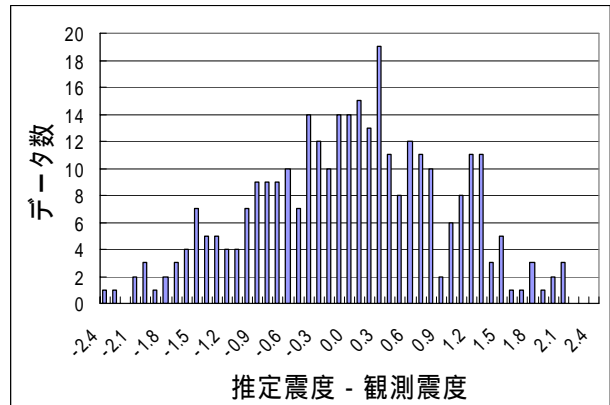


図 21 他地点予測震度の差

実際の震度 ± 0.5 の範囲では全データの約40%が含まれる結果となった。

従来の方とを比較を図 22 に示す。

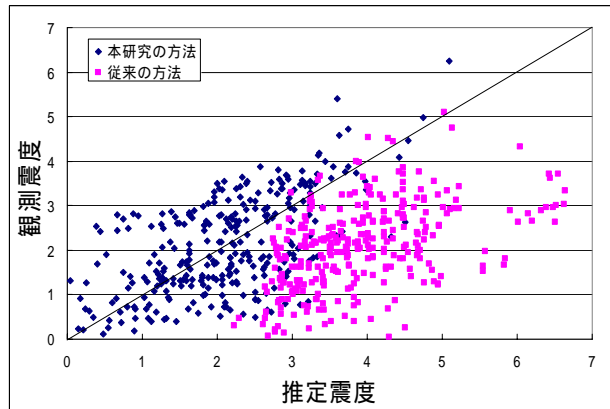


図 22 従来の方法と本研究の方法の震度比較

図 22 より、従来の方法に比べて本研究の推定方法の方が精度良く推定できることがわかる。しかしバラツキが大きく出ているためより精度を上げるために検討が必要だと考えられる。

5. 結論

1. 本研究ではP波初動から直接震度を推定する方法を提案した。その結果従来のものはRMSが2.05であったが、本研究ではRMSが0.55となり誤差が小さくなった。

2. B - 法により震央距離とマグニチュードを推定する場合には地域特性を考慮することにより誤差を小さくできる。少なくともこの地域では地域特性を考慮すべきである。
3. P波初動の用いる時間は地震に関わらず3秒でよいことがわかった。ただし、本研究のデータでは震央距離が遠く、震源深さが浅い地震では関係性がなかった。
4. 最大加速度と震央距離とマグニチュードの関係から他地点の震度を予測する方法を提案した。このことにより地震計のない地点でも震度を予測することが可能となる。しかしその精度は RMS が 0.94 と従来の方法より精度は良いが実用化するためにはさらに検討する必要がある。

謝辞

本論文の作成にあたって、ご指導とご助言を頂いた愛知工業大学工学部土木工学科 正木和明教授に心よりお礼を申し上げます。

愛知工業大学地域防災センター客員教授 入倉孝次郎先生には研究のご助言、ご指導をしていただき心よりお礼申し上げます。

愛知工業大学大学院生の倉橋奨さんにはご指導、ご助言、本論文をまとめるプログラムの作成にご協力を頂き、心よりお礼申し上げます。

なお本論文には、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-net) および基盤強震観測網 (kik-net) のデータを使用させていただきました。これにより本研究を進めることができたことに感謝しております。

参考文献

- 1) 村瀬浩也, 正木和明: 緊急地震速報による震度予測の精度に関する研究, 愛知工業大学修士論文, 2005.
- 2) 地域防災研究センター: <http://dprec.aitech.ac.jp/aisite>
- 3) 特定非営利活動法人 リアルタイム地震情報利用協議会: <http://www.real-time.jp/index.html>
- 4) 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
- 5) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔: P波インベローブ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震第2輯, 56(4), pp.351-361, 2004.
- 6) 芦谷公稔, 小高俊一, 東田進也, 横田崇, 加藤考志, 上垣内修: ナウキャスト地震情報とその早期地震警報への活用, 物理探査, 55, pp.485-494, 2002.
- 7) Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka: A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., 93, pp.526-532, 2003.
- 8) 芦谷公稔: 地震時に列車運行を制御する, 第16回鉄道総研講演会要旨集, pp.37-45, 2003
- 9) 中村豊: 研究展望: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集 No.531/I-34, pp1-33, 1996
- 10) 北川源四郎: 時系列解析入門, p.113, 岩波書店, 東京, 2005
- 11) 防災科学技術研究所: 強震観測網 K-NET, <http://www.k-net.bousai.go.jp/>
- 12) 防災科学技術研究所: 基盤強震観測網 KiK-net, <http://www.kik.bousai.go.jp/kik/>

(受理 平成19年3月19日)