

稍深発地震のためのオンサイト地震警報基準の検討

Examination of Onsite Early Warning Criteria for Intermediate-depth Earthquake

関西大学 社会安全学部

山 村 紀 香¹⁾

Faculty of Societal Safety Sciences,
Kansai University

Norika YAMAMURA

関西大学 社会安全学部

林 能 成

Faculty of Societal Safety Sciences,
Kansai University

Yoshinari HAYASHI

SUMMARY

An Earthquake Early Warning System is one of the modern technological methods for mitigating earthquake damage. However, an Earthquake Early Warning System has a problem that the warning cannot be issued onsite before the S-wave arrivals in the area close to the epicenter. To overcome this problem, onsite information is used supplementary. The Onsite Early Warning System has been developed in Taiwan and California where a lot of shallow crustal earthquakes occur. We verified the feasibility in Japan where remarkable intermediate-depth earthquakes occur. Intermediate-depth earthquakes, in general, show the maximum vertical displacement in the first 3 seconds bigger than crustal earthquakes. We devise new criteria for identifying the type of the earthquakes based on the maximum vertical acceleration in the first 3 seconds.

Key words

Onsite Early Warning, Earthquake Early Warning, Intermediate-depth earthquake, Crustal earthquake, Pd-method

1. はじめに

地震による被害を減らす方法の一つとして、地震早期警報（Earthquake Early Warning,

EEW）という技術がある。この技術は、電磁波を利用した情報伝播速度よりも地震波の伝搬速度が遅いことを利用したもので、震源に近い場所で地震波を検知することによって地震波より

1) 現所属：京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

先回りして情報を伝達するものである。さらに、振幅の大きいS波の伝搬速度は、地震波の中でもっとも高速なP波の伝搬速度の半分程度である。そのため、先に伝わるP波を検知した段階において、地震の危険度を判定できれば、より迅速に警報を出すことが可能である。

この技術は日本では緊急地震速報という名称で実用化されており、気象庁によって開発と運用がすすめられている。緊急地震速報は日本全国に展開された気象庁および防災科学技術研究所が運用する全国約800点の地震観測網を用いており、これら複数観測点の観測記録を同時に処理することによって震源の位置と地震の規模(マグニチュード)を約5秒程度以内の時間で推定する。そして、被害が発生する可能性のある地震であるかどうかを判定し、強い揺れが予測される地域に対してテレビやラジオ、スマートフォンなどを介して情報を伝え、各自の防災行動につなげることを目的とする。

しかし、緊急地震速報には重大な弱点が存在する。それは、緊急地震速報は複数観測点の情報を統合して処理するために時間がかかってしまい、震源に近い場所では緊急地震速報が出される前にS波が到達してしまう場合があることである。

そこで、この弱点を補うような形での利用が提案されているのが、オンサイト地震警報である[Nakamura (1988, 1989)]。オンサイト地震警報とは、警報の利用者が独自に設置した観測点で演算される警報で、P波を検知した段階でその地点のS波の大きさを推定して、その地点における独自の警報を即座に出すものである。エレベータや鉄道、工場のラインなどを緊急停止させるためのシステムとして使われることが多い。

オンサイト地震警報は、1ないし極めて少数の観測点における観測記録を用いた演算となる

ため、警報の精度が緊急地震速報に比べると低くなる。しかし、警報が出るまでの時間が震央に近い場所では緊急地震速報よりも短いため、緊急地震速報と併用することによって、予測の精度向上と早期化が期待されている[鷹野(2010)]。

オンサイト地震警報の実用化アルゴリズムとしてもっとも知られているのがPd法[Wu and Kanamori (2005b)]である。この手法は、台湾やカリフォルニアなどでの使用を考えて開発された方法である。これらの地域では、震源の浅い地殻内地震(震源の深さ60km以下)は多く発生するが、沈み込んだスラブ内で発生する稍深発地震(震源の深さ60~300km)はほとんど発生しない。しかし、日本では、2001年の芸予地震($M_{JMA}6.7$)をはじめとして、2008年の岩手県沿岸北部の地震($M_{JMA}6.8$)や2009年の駿河湾の地震($M_{JMA}6.5$)といった被害を発生するような大きな規模の稍深発地震がしばしば発生している。そのため、本研究では、日本でオンサイト地震警報を使用するにあたって、Pd法がそのまま適用できるかどうかを詳細に検証し、新しい警報基準の検討を行った。

2. オンサイト地震警報に関する先行研究

2.1 オンサイト指標

オンサイト指標とは、各観測点で得られた地震波形をリアルタイムに処理することによって求められる地震動の指標値である。オンサイト指標には、初期微動から主要動の大きさを推定するものや、地震波全体からその地震のおおよその被害を推定するものなど、複数の種類が存在する[たとえば鳥海(2009)]。

本研究では、オンサイト地震警報基準の検討を行うため、初期微動から主要動の大きさを推定するP波検知のオンサイト指標を対象として解析を行った。P波検知のためのオンサイト指

標には、Pd法で用いられているPd値 [Wu and Kanamori (2005b)] と τ_c 値 [Wu and Kanamori (2005a)] が存在する。本章では、それらの演算方法や特徴について述べる。

2.1.1 Pd 値

Pd 値とは、P 波検知後 3 秒間における変位上下動成分の最大絶対値である (図1)。強震動観測には加速度計が用いられる場合が多いため、加速度波形を 2 階積分することによって、変位波形への変換を行う。積分演算によって長周期のノイズが増幅されてしまうため、本研究では、0.075Hz、4 次のローカットバターフースフィルターを用いて演算した。

Pd 値は、一般に地震の揺れによる構造物の被害と相関が強いといわれている PGV を推定するために用いられる指標である。PGV とは地震動全体における速度の最大絶対値である (図1)。Pd 値と PGV の関係は、回帰式

$$\log(\text{PGV}) = 0.920 \log(\text{Pd}) + 1.642 \quad (1)$$

で示され、Pd=0.2 cm は、およそ PGV=10 cm/s に対応している [Wu and Kanamori (2008)]。

2.1.2 τ_c 値

τ_c 値とは、P 波検知後 3 秒間における上下動成分の速度 $\dot{u}(t)$ と変位 $u(t)$ から演算される地震動の卓越周期を示すパラメータで、以下のようにして演算される。

$$\tau_0 = 3 \quad (2)$$

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (3)$$

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (4)$$

なお、Pd 値を求める際と同様に、加速度波形を積分することによって速度波形に、さらに積分することによって変位波形への変換を行う。本研究では、0.075Hz、4 次のローカットバターフースフィルターを用いて長周期成分のノイズの影響を除去した。そのようにして得られた速度および変位波形を τ_0 秒間 (先行研究に従い、本

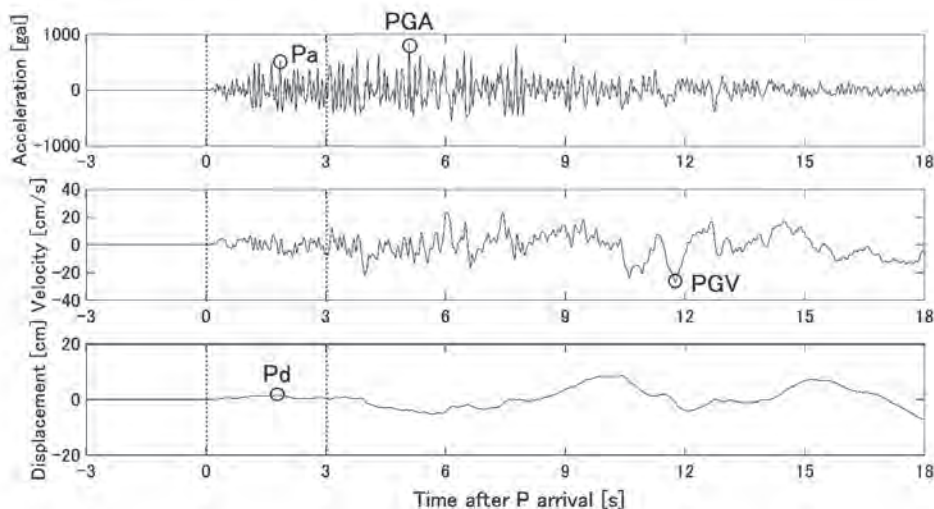


図1 オンサイト指標の概念図。2004年新潟県中越地震 (M_{JMA} 6.8) の K-NET 観測点 NIG019 (小千谷) の上下動成分の波形で、上から加速度波形、速度波形、変位波形。Pa 値は P 波検知後 3 秒間における加速度上下動成分の最大絶対値、Pd 値は P 波検知後 3 秒間における変位上下動成分の最大絶対値、PGA は地震動全体における加速度の最大絶対値、PGV は地震動全体における速度の最大絶対値。

研究では3秒間)時間積分して(3)式に代入し,さらに(4)式に演算結果を代入することによって τ_c 値を求めた.

τ_c 値は,地震の規模を表すモーメントマグニチュード M_w を推定するために使われる指標である. M_w の大きな地震は,震源の破壊継続時間が長く,地震波の初動周期が長くなるため, τ_c 値が大きくなる傾向にある. M_w と τ_c 値の関係は,回帰式

$$\log(\tau_c) = 0.296M_w - 1.716 \quad (5)$$

で示され, $M_w 6$ は,およそ $\tau_c = 1$ sに対応している[Wu and Kanamori (2008)].

地震の規模を表すマグニチュードにはいくつかの種類があり,日本では気象庁マグニチュード M_{JMA} が広く使われている. M_{JMA} は地震動の最大振幅から求める古典的な手法のマグニチュードであるため演算の簡便さや即時性に優れているが,マグニチュード8を超える巨大地震では値が頭打ちしてしまい,それ以上大きくならないという欠点がある.一方で,モーメントマグニチュード M_w は超巨大地震でも振り切れないという大きな利点があるが,演算にやや複雑な手順が必要であり,また過去の地震では測定されていないものが多数ある.つまり,記録の連続性という観点では,気象庁マグニチュードが優れているといえる.本研究で対象とする地震のマグニチュードは,6.3~7.3程度であるため, M_{JMA} と M_w の乖離は小さい.そこで,解析対象とするマグニチュードの選定基準には,カタログ値が整備されている気象庁マグニチュード M_{JMA} を採用した.

2.2 Zollo et al. (2010) による警報基準

Zollo et al. (2010)は,日本や台湾,イタリアにおける震源の深さ50km以内の地殻内地震の観測波形を解析することによって,2.1で示

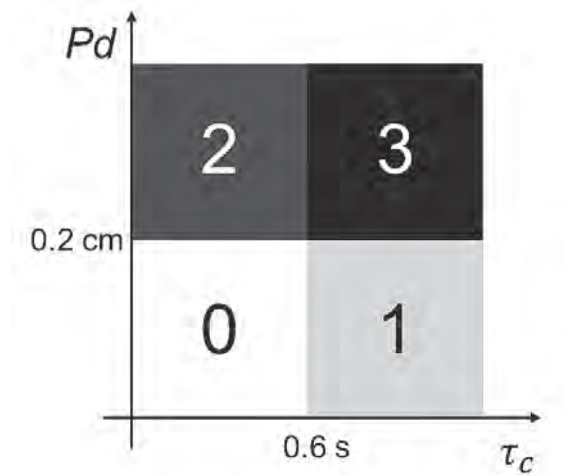


図2 Zollo et al. (2010) によるオンサイト地震警報基準.

したPd値と τ_c 値を組み合わせた0~3の4段階のオンサイト地震警報基準を提案している(図2).

最上位の警報レベル3($\tau_c \geq 0.6$ sかつPd ≥ 0.2 cm)に達した観測点は,規模の大きい地震が近くで発生している可能性が高く,ただちに警報が出されるべき観測点である.このような場所では,複数点観測による早期地震警報が間に合わないことが多いため,オンサイト地震警報の重要性が高い.また,警報レベル2($\tau_c < 0.6$ sかつPd ≥ 0.2 cm)は規模のあまり大きくない地震が近くで,レベル1($\tau_c \geq 0.6$ sかつPd < 0.2 cm)は規模の大きな地震が遠くで発生している可能性があることを示す.レベル0($\tau_c < 0.6$ sかつPd < 0.2 cm)は地震の規模が小さく,震源も遠い地震で,警報の対象とはならないと判断される.

3. 手法

3.1 データセット

本研究では,Zollo et al. (2010)による警報基準が稍深発地震にも適用可能かどうかを検証するため,1999年から2016年の間に日本で発

生した M_{JMA} 6.3~7.3 程度の稍深発地震 6 個と地殻内地震 7 個の合計 13 地震を対象として解析を行った（表 1）。対象とした各地震において、震央距離 50km 以内の観測点における地震波形記録を用いた。震央距離の条件を設けた理由は、震央距離が長くなるとオンサイト地震警報の情報価値が低下するからである。地震波形記録は、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測点における 3 成分加速度波形を使用し、合計 381 地点 1,143 成分のデータをもとに解析を行った。

3.2 波形の処理方法

本研究のデータセットにおけるオンサイト指標を求めるにあたって、以下の手順に従って波形の処理を行った。

- 1) 防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net からダウンロードした上下動成分の加速度波形から、P 波到達時刻を目視によって決定した。そして、その時刻より前後の各 3 秒間である、合計 6 秒間の波形を切り出した。K-NET, KiK-net の波形では P 波到達時刻

の読み取りはなされておらず、強震動波形における P 波到達時刻の自動読み取りは目視に比べて精度が高くないため、目視による P 波到達時刻の読み取りを行った。

- 2) P 波到達時刻前 3 秒間の平均値を使い、オフセットを取り、0.075Hz, 4 次のローカットバタワースフィルターをかけて、これを加速度波形とした。
- 3) 加速度波形を積分し、P 波到達時刻前 3 秒間の平均値を使い、オフセットを取り、0.075Hz, 4 次のローカットバタワースフィルターをかけて、これを速度波形とした。
- 4) 速度波形を積分し、P 波到達時刻前 3 秒間の平均値を使い、オフセットを取り、これを変位波形とした。
- 5) これらの波形から、先述の方法を用いて、オンサイト指標である Pd 値と τ_c 値を演算した。

4. 結果と考察

本研究のデータセットから演算された τ_c 値と

表 1 本研究のデータセット。(上) 稍深発地震, (下) 地殻内地震.

稍深発地震名	発生年月日	M_{JMA}	震源の深さ	観測点数
釧路支庁中南部の地震	1999/05/13	6.3	104km	10
芸予地震	2001/03/24	6.7	51km	22
岩手県内陸南部の地震	2001/12/02	6.3	122km	33
宮城県沖の地震	2003/05/26	7.1	71km	20
岩手県沿岸北部の地震	2008/07/24	6.8	108km	32
駿河湾の地震	2009/08/11	6.5	23km	35
地殻内地震名	発生年月日	M_{JMA}	震源の深さ	観測点数
鳥取県西部地震	2000/10/06	7.3	11km	36
新潟県中越地震	2004/10/23	6.8	13km	28
長野県北部の地震	2014/11/22	6.7	5km	36
熊本地震の前震①	2016/04/14	6.5	11km	35
熊本地震の前震②	2016/04/15	6.4	7km	35
熊本地震の本震	2016/04/16	7.3	12km	32
鳥取県中部の地震	2016/10/21	6.6	10km	27

Pd 値の結果を図3に示す。本研究では、警報が出されるべきであると判断した基準を $PGA \geq 80 \text{ gal}$ とした。PGA とは地震動全体における加速度の最大絶対値である (図1)。この加速度の値は、気象庁 (1968) において震度5に相当する強い揺れである。

図3から、稍深発地震、地殻内地震ともに τ_c 値はおおむね0.6秒以上に求まったことが読み取れる。これは、本研究で対象とした地震が $M_{JMA} 6.3$ 以上の比較的大きな地震であることから、Zollo et al. (2010) の警報基準で大きな地震を表す $\tau_c \geq 0.6 \text{ s}$ と調和的な結果が確認されたことを表す。

一方、Pd 値は地殻内地震では3cm程度の大きな値が得られたが、稍深発地震では地殻内地震ほど大きくならないことが分かった。これは、地殻内地震に比べて稍深発地震は震源が深いため、同じ震央距離であっても震源距離が長くなることで距離減衰の影響を受け、Pd 値が小さくなる傾向にあるからである。稍深発地震のPd

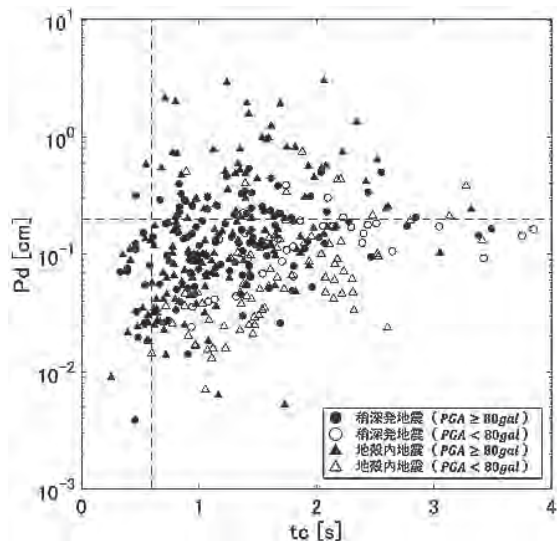


図3 本研究データセットによる τ_c 値と Pd 値。丸印が稍深発地震で、三角印が地殻内地震の観測点。警報が出されるべき基準である $PGA \geq 80 \text{ gal}$ の観測点は塗り潰してある。なお、点線は現行基準の $\tau_c = 0.6 \text{ s}$, $Pd = 0.2 \text{ cm}$ 。

値が小さくなると、Zollo et al. (2010) の警報基準に沿って警報を出す際、警報レベルの閾値に届かない場合が発生する。

また、Zollo et al. (2010) の警報基準における本研究のデータセットの的中、空振り、見逃しの観測点の割合を図4に示した。警報が出されるべきであると判断した基準は $PGA \geq 80 \text{ gal}$ である。的中とは、警報が出されるべき時に警報が出た場合、あるいは警報が出なくてよい時に警報が出なかった場合を指す。また、空振りとは警報が出なくてよい時に出てしまった場合、見逃しとは警報が出されるべき時に出なかった場合を指す。

図4において、的中率だけで見ると稍深発地震は71%、地殻内地震は61%となっており、稍深発地震の方が良好な判定結果になっている。しかし、空振りは稍深発地震21%、地殻内地震34%で、地殻内地震の空振り率が高く全体の1/3にも達していることがわかる。一方、見逃しは稍深発地震8%、地殻内地震5%となり、稍深発地震では見逃しが多くなる傾向にあった。

実際に、稍深発地震において被害を生ずるような地震動が観測されているにもかかわらず、警報レベル3が出なかった観測点の加速度波形の例を図5に示す。これは2001年芸予地震 ($M_{JMA} 6.7$) のK-NET観測点HRS019 (呉) の加速度波形で、震央距離は19kmと近く、計測震度は5.3と大きな地震動を観測した。この観

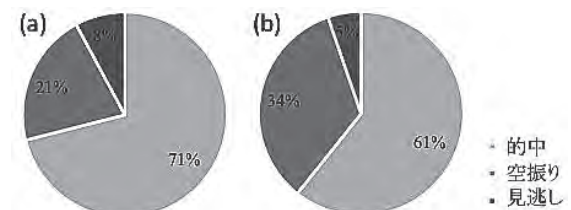


図4 Zollo et al. (2010) の警報基準における本研究のデータセットの的中、空振り、見逃しの観測点の割合。(a) 稍深発地震、(b) 地殻内地震。

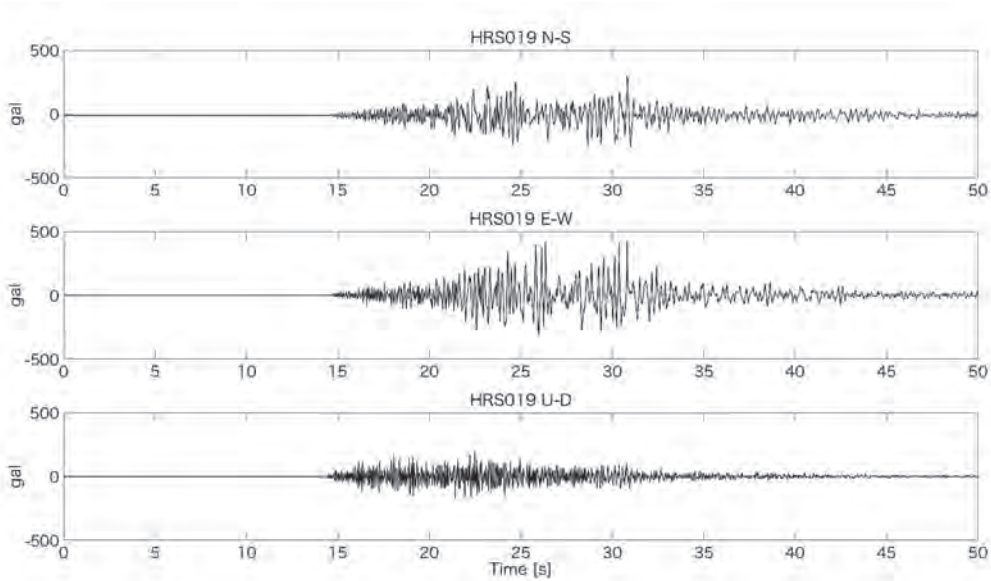


図5 稍深発地震における見逃しの観測点の例. 2001年芸予地震 ($M_{JMA}6.7$) のK-NET観測点HRS019 (呉)の加速度波形. (上から, 南北成分, 東西成分, 上下成分).

測点は, 警報レベル3が出るべき地震動を観測しているのだが, Pd値が小さくなってしまったため, Zollo et al. (2010)の警報基準では警報レベル1となった. しかも, この地点は震央距離が近いので, オンサイト地震警報が有効な場所である. このような見逃しを減らすためには, 新しい警報基準を検討する必要がある.

そこで, オンサイト地震警報の精度向上のために, Zollo et al. (2010)の警報基準のみで警報レベルを判断するのではなく, 新しい警報基準と併用することを次章で検討する.

5. 稍深発地震に対応した新しい警報基準の検討

5.1 Pa値による足切り

まず, 地殻内地震に多くみられた空振りを減らすために, Pa値による足切りを検討する. Pa値とは, P波検知後3秒間における加速度上下動成分の最大絶対値である(図1). 加速度は短周期の地震動成分の影響が大きいため, 震源が

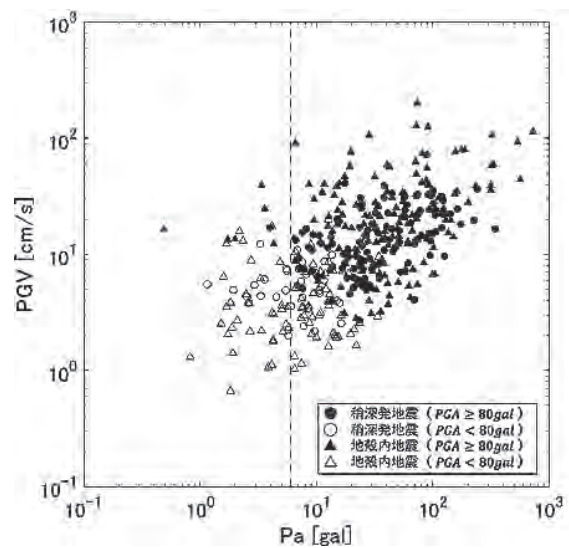


図6 Pa値による足切りの検討. 点線は, $Pa=6$ gal.

観測点に近いときに大きくなる傾向にある.

図6に, Pa値とPGVの関係を示す. この図から, 稍深発地震, 地殻内地震ともに, $Pa \geq 6$ galの範囲に $PGA \geq 80$ galの観測点の多くが分布していることが読み取れる. ゆえに, $Pa < 6$

galの観測点を足切りすることによって、空振りを減らすことが可能である。

5.2 水平動と上下動の変位比 Pd_H / Pd_V による地震の分類

次に、稍深発地震で多くみられた見逃しを減らすために、警報を出す前に稍深発地震と地殻内地震に分類することを考える。そして、稍深発地震に分類された場合、稍深発地震で小さくなりやすい傾向にあった Pd 値の基準を下げて警報が出やすい状態にすることを検討する。地震の分類をするために、 Pd_H / Pd_V を導入する。このパラメータは、P波検知後3秒間における変位水平動成分の最大絶対値 Pd_H を、同じくP波検知後3秒間における変位上下動成分の最大絶対値 Pd_V で割ったものである。図7のように、稍深発地震は地殻内地震より震源が深いため、P波において水平動成分より上下動成分が卓越する傾向にある。この現象を利用して、このパラメータを導入することによって、初期微動の段階で稍深発地震と地殻内地震をおおよそ分類することが可能である。

図8に Pd 値と Pd_H / Pd_V の関係を示す。 $Pd_H / Pd_V = 1$ で境界線を引くと、 $Pd_H / Pd_V \leq 1$ の範囲が稍深発地震、 $Pd_H / Pd_V > 1$ の範囲が地殻内地震である可能性が高くなることが分かった。稍深発地震は93.4%、地殻内地震は68.1%の割

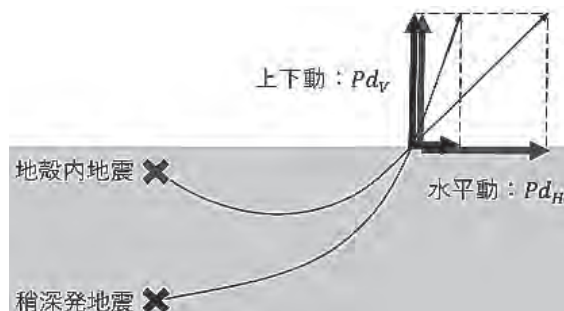


図7 稍深発地震、地殻内地震における水平動 Pd_H と上下動 Pd_V の変位比の概念図。

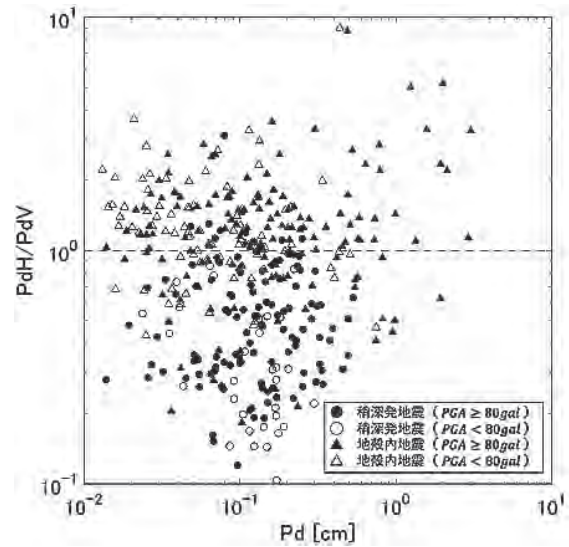


図8 Pd_H / Pd_V による地震の分類の検討。点線は、 $Pd_H / Pd_V = 1$ 。

合で、各地震を正確に分類することができた。 $Pd_H / Pd_V \leq 1$ に入った観測点は稍深発地震である可能性が高いため、前述したように見逃しの観測点が含まれている可能性も高い。そこで、 $Pd_H / Pd_V \leq 1$ の範囲に入った観測点において、警報レベル3が出される Pd 値の基準を0.2cmから0.05cmまで引き下げると、地殻内地震の空振りを大きく増やすことなく、稍深発地震の見逃しを減らすことが可能となる。

5.3 新しい警報基準を設けた場合の改善率

前述したように、オンサイト地震警報を出すにあたって、Zollo et al. (2010) の警報基準だけでは空振りの観測点や稍深発地震における見逃しの観測点が多くなることが分かった。そこで、本章で検討した2つの新しい警報基準 (Pd 値による足切り、 Pd_H / Pd_V による地震の分類) を Zollo et al. (2010) の警報基準と併用することを試みた。Zollo et al. (2010) の警報基準に加えて、新しい基準をそれぞれ1つずつ設けた場合と、2つの新しい基準を併用した場合における改善率を表2に示す。

表2 新しい警報基準を設けた場合の改善率.

	A Zollo et al. (2010) の警報基準のみ	B A + Pa 値による足切り	C A + Pd _H / Pd _V による 地震の分類	D A + Pa 値による足切り + A + Pd _H / Pd _V による地震の分類
的中	64.6%	74.8%	66.1%	76.4%
空振り	29.1%	17.3%	30.7%	18.9%
見逃し	6.3%	7.9%	3.2%	4.7%

まず、本研究による改善策を適用する前である A : Zollo et al. (2010) の警報基準だけで判断した場合、的中は 64.6% であるが、空振りが 29.1%、見逃しが 6.3% となり、改善の余地のある結果になった。

次に、B : A の場合 + Pa 値による足切りの警報基準を設けた場合、的中は 74.8% と A と比べて 10.2% も増加した。これは、警報が出なくてもよい観測点を事前に足切りすることにより、的中率が増えたためである。そして、Pa 値による足切りの警報基準は空振りを減らすことができるため、空振りは 17.3% となり、A と比べて 11.8% も減少した。一方、見逃しは 7.9% と A と比べて 1.6% 増加した。つまり、B の場合、見逃しが若干増えることを代償にして、空振りを減らすことができた。

また、C : A の場合 + Pd_H / Pd_V による地震の分類の警報基準を設けた場合、的中は 66.1% と A と比べて 1.5% 増加した。そして、Pd_H / Pd_V による地震の分類の警報基準は見逃しを減らすことができるため、見逃しは 3.2% となり、A と比べて 3.1% 減少した。一方、空振りは 30.7% と A と比べて 1.6% 増加した。つまり、C の場合、空振りは多少増えるものの、見逃しを減らすことに成功した。

最後に、D : A + Pa 値による足切り + Pd_H / Pd_V による地震の分類の警報基準を併用した場合について説明する。的中は 76.4% とすべての場合において一番高い中率となった。そして、

空振りは 18.9% と A と比べて 10.2% 減らすことに成功し、見逃しは 4.7% と A と比べて 1.6% 減らすことができた。つまり、D の場合、Zollo et al. (2010) の警報基準のみで判断するよりも、空振り、見逃しともに減らすことができ、さらに的中も増やすことに成功した。

以上より、A のみの場合に比べて、B は空振りの観測点を減らすことが、C は見逃しの観測点を減らすことができた。そして、Pa 値による足切り + Pd_H / Pd_V による地震の分類の警報基準を併用した D の場合においては、空振り、見逃しともに減らすことができ、そのうえの中率も上げることに成功した。この結果、D の手法を適用することで、オンサイト地震警報の精度が向上することが示された。

しかし、近くで大きな地震が起きていることを P 波検知後 3 秒間では予測できなかった観測点も存在する。その理由としては、長周期成分のノイズの影響で、Pd 値や τ_c 値を適切に演算できなかった可能性が考えられる。このような波形が記録された観測点では、最終的に強い揺れであったとしても、Pd 値が高くなりにくい傾向がみられた。特に、岩手県周辺で発生した稍深発地震においては、すべての観測点の波形の立ち上がりが緩やかであったことが注目される。これは沈み込むスラブなど広域的な地下構造の影響を受けている可能性が高く、地域性を考慮した特別な判定基準を今後は検討する必要がある。

6. まとめ

日本では緊急地震速報が実用化され、防災面において重要な役割を果たしている。しかし、緊急地震速報には、震源に近い場所では情報が出される前にS波が到達してしまう場合があるという重大な弱点が存在する。そこで、本研究では、この弱点と相補的な役割を果たすオンサイト地震警報について、日本で使用するにあたってそのまま適用できるかどうか検証を行った。その結果、オンサイト地震警報で一般的に使われているPd法において、Zollo et al. (2010)のオンサイト警報基準を使用した場合、空振りの観測点や稍深発地震における見逃しの観測点が多くなることが問題点として浮かびあがった。そこで、それらの問題点を解決するために、Zollo et al. (2010)の警報基準だけで判断するのではなく、新たな警報基準を前処理として設けることを検討した。その結果、Zollo et al. (2010)の警報基準に加えて、Pa値による足切りとPd_H/Pd_Vによる地震の分類の警報基準を併用した場合においては、Zollo et al. (2010)の警報基準だけの場合と比べて、空振り、見逃しともに減らすことができ、的中率を上げることに成功した。

しかし、規模の大きな稍深発地震は規模の大きな地殻内地震に比べて発生回数が少ない。そのため、波形データが十分に多くはなくデータセットに地域性などの偏りがある。今後、稍深発地震の観測記録が蓄積されれば、さらに定量的に研究を発展させていくことが可能となる。

また、本研究では、オンサイト指標をP波検知後3秒間のデータからすべて演算した。しかし、実際の運用を考える場合においては、緊急地震速報が出されるまでの間、オンサイト指標を繰り返し演算し、警報レベルを更新し続けることが求められる。

謝辞

匿名の査読者2名および担当編集者の高橋智幸氏からの貴重なコメントにより本稿は改善されました。また、本研究では防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの加速度波形データを利用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 気象庁 (1968). 地震観測法指針・参考編 245pp.
- [2] Nakamura, Y. (1988). *On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)*. in Proceedings 9th World Conf. Earthquake Eng., 7, 673-678.
- [3] Nakamura, Y. (1989). *Earthquake alarm system for Japan railways*. Jpn. Railway Eng. 109, 1-7.
- [4] 鷹野澄 (2010). 緊急地震速報とオンサイト地震警報システムの現状と課題 東京大学地震研究所研究集会「揺れる直前の地震動予測：さらなる迅速化と精度の向上」.
- [5] 鳥海哲史 (2009). 複数のオンサイト指標による統合的な早期地震警報 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 修士論文.
- [6] Wu, Y. M., and Kanamori, H. (2005a). *Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system*. Bull. Seismol. Soc. Am., 95, 347-353.
- [7] Wu, Y. M., and Kanamori, H. (2005b). *Rapid assessment of damaging potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves*. Bull. Seismol. Soc. Am., 95, 1181-1185.
- [8] Wu, Y. M., and Kanamori, H. (2008). *Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals*. Sensors, 8, 1-9.
- [9] Zollo, A., Amoroso, O., Lancieri, M., Wu, Y. M., and Kanamori, H. (2010). *A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks*. Geophys. J. Int., 183, 963-974.

(原稿受付日：2017年12月6日)

(掲載決定日：2018年2月5日)