

# P波規定値超過判定手法による早期地震警報の 即時性と正確性の検証

森脇 美沙\* 津野 靖士\*\* 是永 将宏\*

Immediacy and Accuracy of Earthquake Early Warning Method Based on P-wave Threshold Exceedance  
Applied to the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake

Misa MORIWAKI Seiji TSUNO Masahiro KORENAGA

The immediacy and accuracy of the earthquake early warning method based on P-wave threshold exceedance was verified by applying it to data from the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake. The result confirmed that it is possible to issue an earthquake warning in less than one second in the vicinity of the earthquake source fault region by directly predicting the S-wave by multiplying the pre-calculated amplitude ratios of the S-wave to the P-wave by the P-wave observed in real time. Furthermore, the logarithmic standard deviation of the peak ground acceleration (PGA) of the observed S-wave from the PGA of the predicted S-wave was as small as 0.284, indicating that this method can predict S-wave amplitudes with high accuracy.

キーワード：P波規定値超過判定手法，早期地震警報，S波/P波振幅比，2004年新潟県中越地震

## 1. はじめに

鉄道のソフト面からの地震防災対策として、地震発生直後の迅速かつ適切な早期地震警報により走行中の列車を減速・停止させることは非常に重要である。鉄道沿線やその周辺の海岸部および内陸部には数km～数10km間隔で地震計が設置されており、揺れの大きさがある規定値を超過した場合に警報を出力する手法<sup>1)</sup>や、P波初動を使用して地震諸元推定を行い被害が予測される範囲に警報を出力する手法<sup>2)</sup>が現在運用されている。前者の手法（通称：S波警報）は主に主要動であるS波部分で警報を出力しており、警報発令から沿線に主要動が到達するまでの余裕時間がほとんど確保できないことが多い。後者の手法（通称：P波警報）は地震諸元を推定するのにP波開始から1秒以上のデータを要する。したがって地震検知から警報出力までに少なくとも1秒以上かかり、沿線近傍で発生する内陸地震に対しては警報出力が遅れる場合もある。

そこで近年、P波に対してS波/P波の比を掛け合わせることで観測点直下のサイト特性を直接反映させ、精度良くS波を予測できる新たな警報手法が開発されてきた<sup>3)4)</sup>。この「P波規定値超過判定手法」はこれまでに、福島県沖で発生した中規模地震<sup>4)</sup>や巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震<sup>5)</sup>、内陸地震である2016年熊本地震<sup>6)</sup>を対象に、警報の即時性やS波の予測精度

について実証されてきた。一方、今後本手法を鉄道の早期地震警報に導入するためには、即時性やS波予測精度に加えて、警報出力判断の正確性について現行の警報手法と比較検証する必要がある。

本研究では2004年新潟県中越地震の、鉄道沿線での記録を含む本震データに適用することで、鉄道沿線近傍で発生する内陸地震に対する本手法による警報の即時性および警報出力判断の正確性について検証する。

## 2. データ

本研究では、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-net<sup>7)</sup>、東日本旅客鉄道株式会社の地震検知点で記録された地震データを使用した。図1に観測点位置を示す。解析には2004年新潟県中越地震の本震データと、2006年2月～2014年9月に発生した気象庁マグニチュード( $M_j$ )4.0～5.9である87の中小規模地震のデータを使用した。図1に2004年新潟県中越地震本震の震央位置と震源断層の地表投影面<sup>8)</sup>をあわせて示す。また、図2に87地震の震源位置とマグニチュードを示す。

## 3. P波規定値超過判定手法

### 3.1 手法の概要

図3にP波規定値超過判定手法の概念図を示す。本手法は、P波に対して事前に過去の地震データを用いて算出したS波/P波振幅比を乗ずることでS波を直接予測するものであり、従来の主にS波部分で警報出力さ

\* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

\*\* 元 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

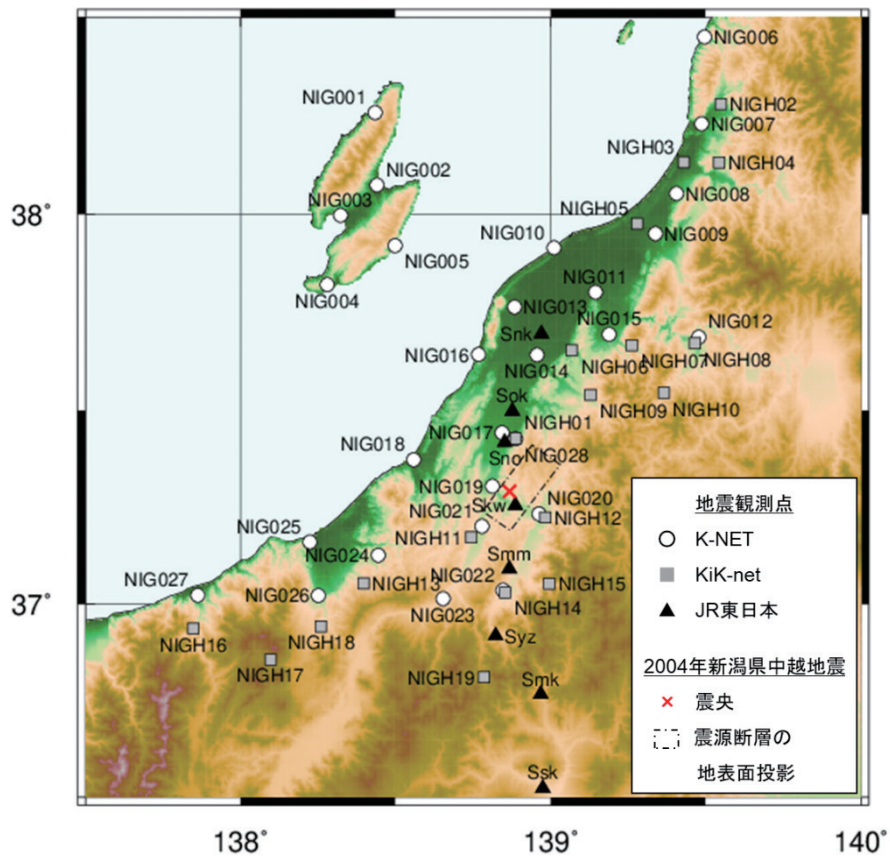


図1 使用した地震データの観測点位置

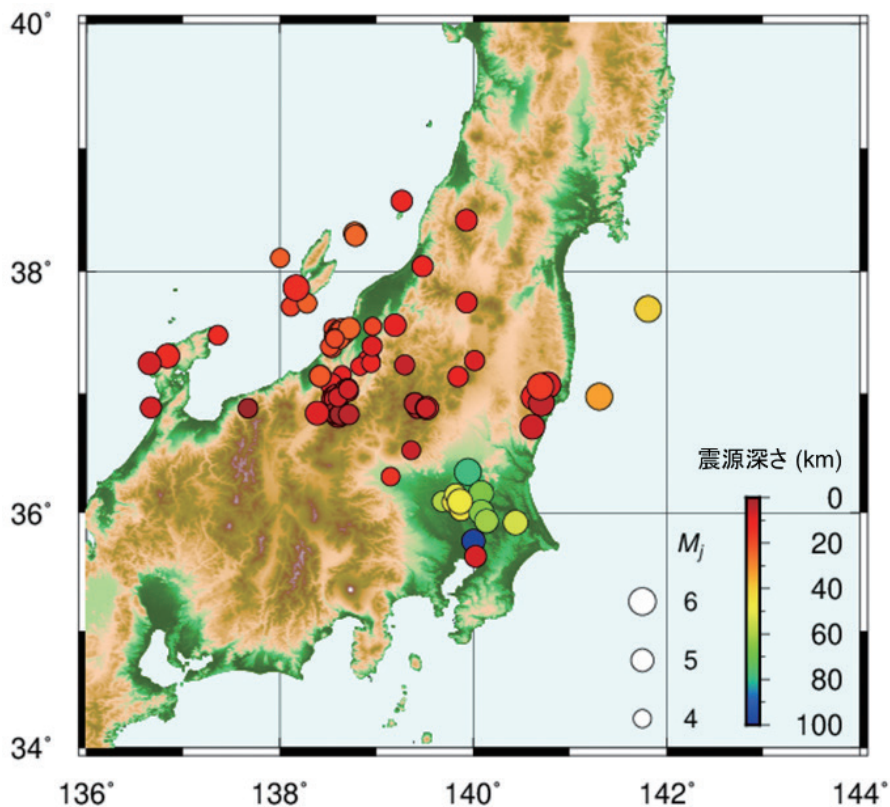


図2 使用した地震データの震源位置とマグニチュード

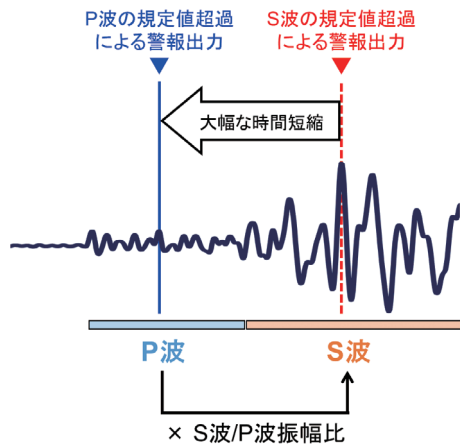


図3 P波規定値超過判定手法の概念図

れる手法よりも大幅に速く警報を出力できる可能性がある。本手法は既往の研究により次のように定式化されている<sup>4)</sup>。

$$\log O_s^S(\omega) = \log O_s^P(\omega) + b(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $O_s^S$  は地表の S 波フーリエスペクトル、 $O_s^P$  は地表の P 波フーリエスペクトルである。また、 $b(\omega)$  には震源、伝播経路、P 波および S 波のサイト増幅特性の影響が含まれているが、S 波/P 波のフーリエスペクトル比に対しては震源と伝播経路の影響は十分小さいことが知られている<sup>3)</sup>。この式(1)を時間領域で展開することで、リアルタイムで観測された P 波振幅に対し S 波/P 波振幅比を乗じて S 波振幅を予測することが可能となる。なお、S 波/P 波振幅比は各観測点のサイト増幅特性をよく反映しており、これを用いることで観測点ごとの地盤情報を考慮した高精度な S 波予測が可能となる。

### 3.2 S 波/P 波振幅比

観測点ごとに固有の S 波/P 波振幅比は、あらかじめ過去の地震データを使用して求めておく必要がある。本研究では、図1に示した各観測点の S 波/P 波振幅比を、図2に示した 87 地震の加速度記録から算出した。S 波/P 波振幅比の算出手順を以下に示す。

- (1) P 波および S 波の開始時刻を読み取る。  
上下成分の P 波開始時刻から、さらに南北成分および東西成分の S 波開始時刻から、それぞれ 10.24 秒のデータ区間を抽出する。もし P 波開始時刻から S 波開始時刻までが 10.24 秒に満たない場合はデータ区間長を P 波開始時刻から S 波開始時刻の直前までとし、P 波部分に S 波が混入しないようにする。
- (2) 上下成分から抽出したデータを用いて P 波の PGA (地表面最大加速度) を求める。また、南北成分

および東西成分から抽出したデータを用いてそれぞれ PGA を算出し、それらの相乗平均をとることで S 波の PGA を求める。

- (3) S 波の PGA を P 波の PGA で除することで S 波/P 波の振幅比を算出する。
- (4) すべての地震データについてそれぞれ手順 (1) ~ (4) にしたがって S 波/P 波振幅比を求め、それらに対数平均したものを最終的にその観測点の S 波/P 波振幅比とする。

図4に平均および個々の S 波/P 波振幅比を観測点ごとに示す。また、図5に平均の S 波/P 波振幅比を地図上で示す。図4および図5から、S 波と P 波の振幅比は観測点によって 2 倍~10 倍と大きく異なることが見て取れる。このことは、観測点ごとのサイト増幅を把握することの重要性を示している。

図6に、2004 年新潟県中越地震の震源近傍に位置する K-NET 小千谷観測点 (NIG019) を例として、図2に示した 87 地震で得られた地表の観測 P 波と地表の観測 S 波との関係を示す。なお、図4 (a) で示したように、K-NET 小千谷観測点の S 波/P 波振幅比の平均は 3.86、標準偏差  $\sigma$  は 0.315 である。図6より、地表の観測 P 波と地表の観測 S 波は、式(1)で示したように線形関係にあることがわかる。

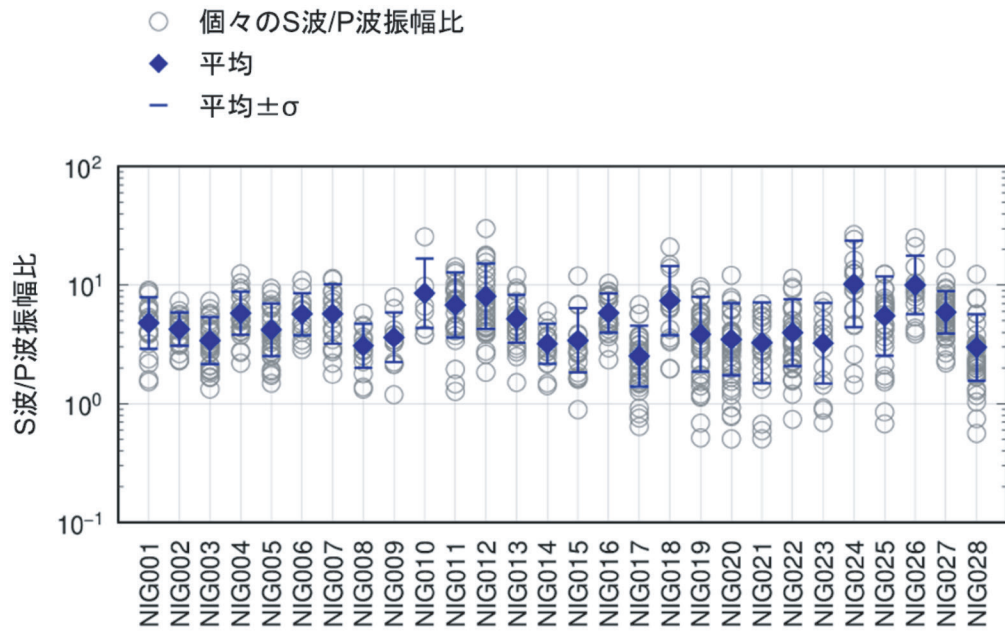
## 4. 2004 年新潟県中越地震への適用

### 4.1 警報の即時性の検証

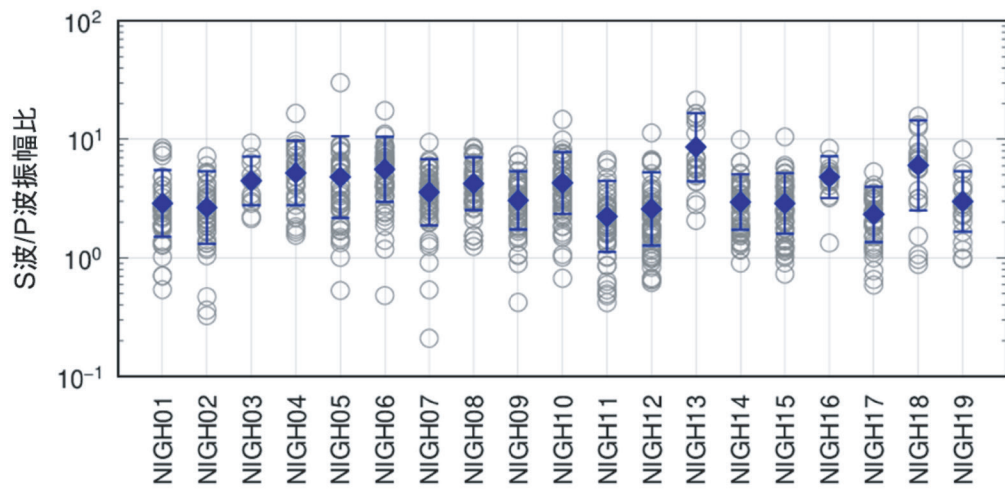
P 波規定値超過判定手法を 2004 年新潟県中越地震の本震データに適用し、警報の即時性について確認した。図7に、K-NET 小千谷観測点を例として、観測された P 波に 3.2 節で算出した振幅比をリアルタイムで乗じて S 波を予測するという本手法の処理過程を示す。P 波が検出された直後に、観測された P 波の最大加速度 (PGA) に S 波/P 波振幅比 (K-NET 小千谷観測点では 3.86) をリアルタイムで乗じて S 波の PGA を予測している。ここで警報基準値を  $80\text{cm/s}^2$  とすると、P 波検出から 0.09 秒後に予測の S 波 PGA が  $80\text{cm/s}^2$  を超過したため、警報が出力された。このことは、現在の S 波警報や P 波警報よりも非常に速く警報を出力することができるという、本手法による警報出力の即時性の高さを示している。

### 4.2 警報出力判断の正確性の検証

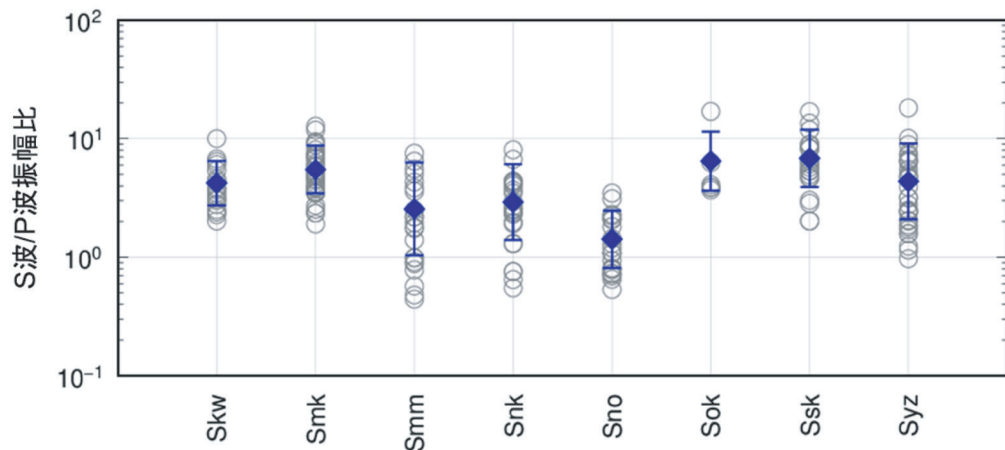
図1に示した地震観測点について、それぞれ P 波規定値超過判定手法を 2004 年新潟県中越地震の本震データに適用し S 波予測を行った。図8に、観測 S 波 PGA と予測 S 波 PGA との比較結果を示す。予測 S 波に対する観測 S 波の残差の対数標準偏差は 0.284 と、精度よく



(a) K-NET



(b) KiK-net



(c) JR 東日本

図4 各観測点の平均および個々のS波/P波振幅比

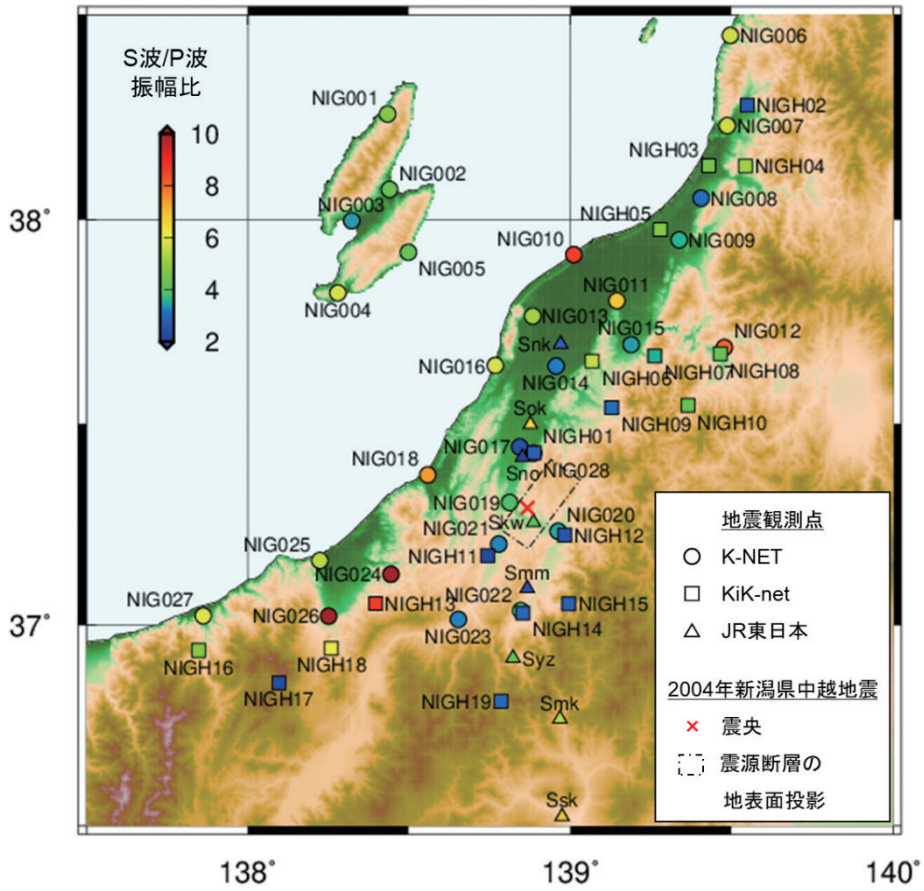


図5 各観測点の平均のS波/P波振幅比

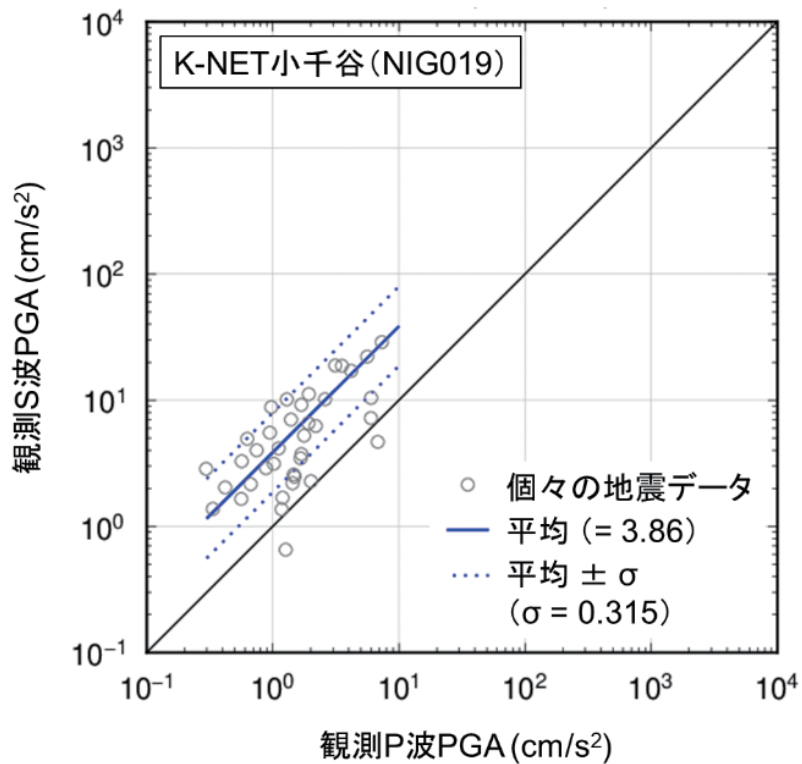


図6 観測P波と観測S波の関係 (K-NET小千谷)

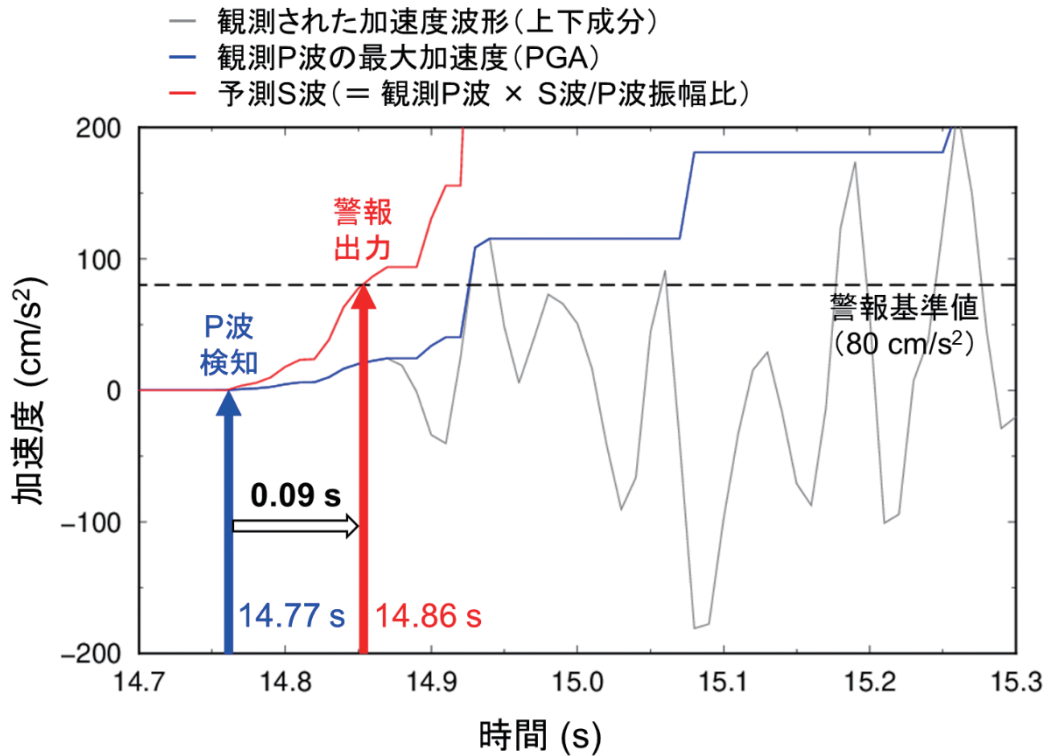


図7 2004年新潟県中越地震への適用 (K-NET 小千谷)

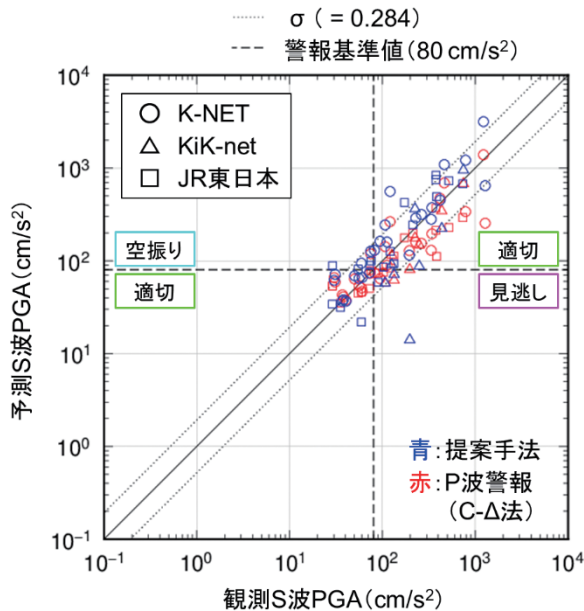


図8 観測 S 波と予測 S 波の関係

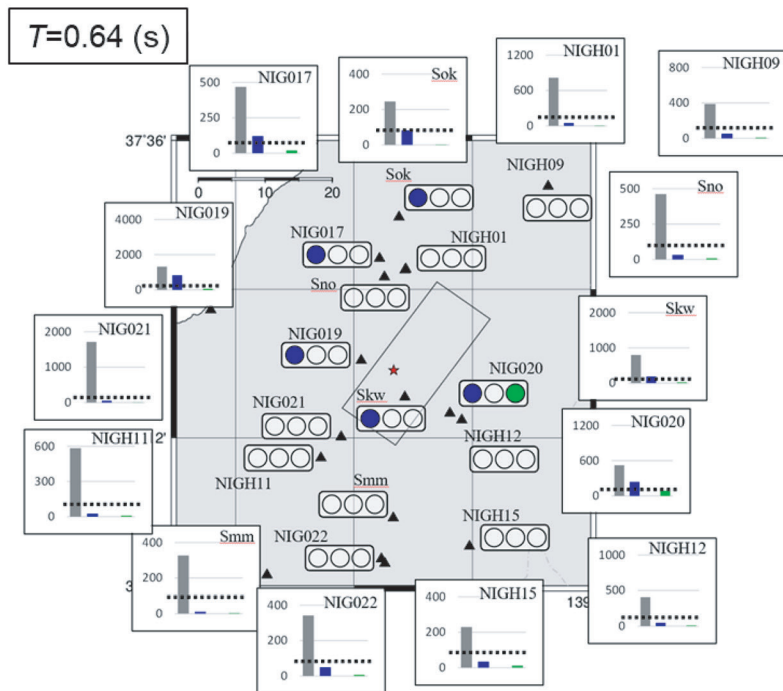
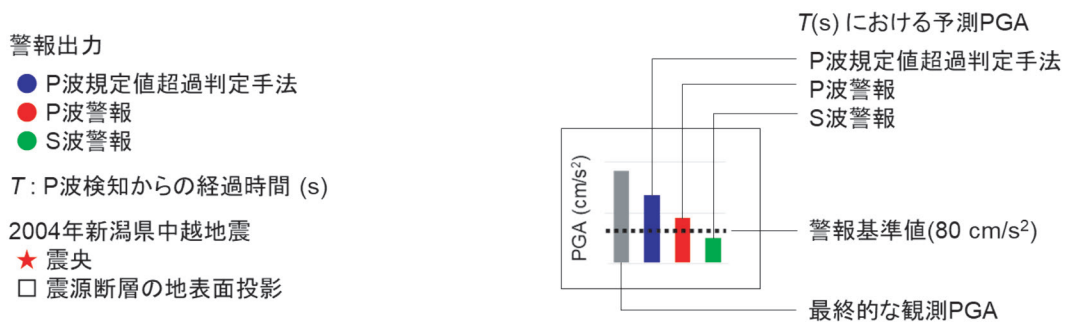
表 1 2004年新潟県中越地震に対する警報出力判断結果

警報手法	適切	空振り	見逃し
P 波規定値超過判定手法	42	6	4
P 波警報 (C-Δ 法)	45	1	6

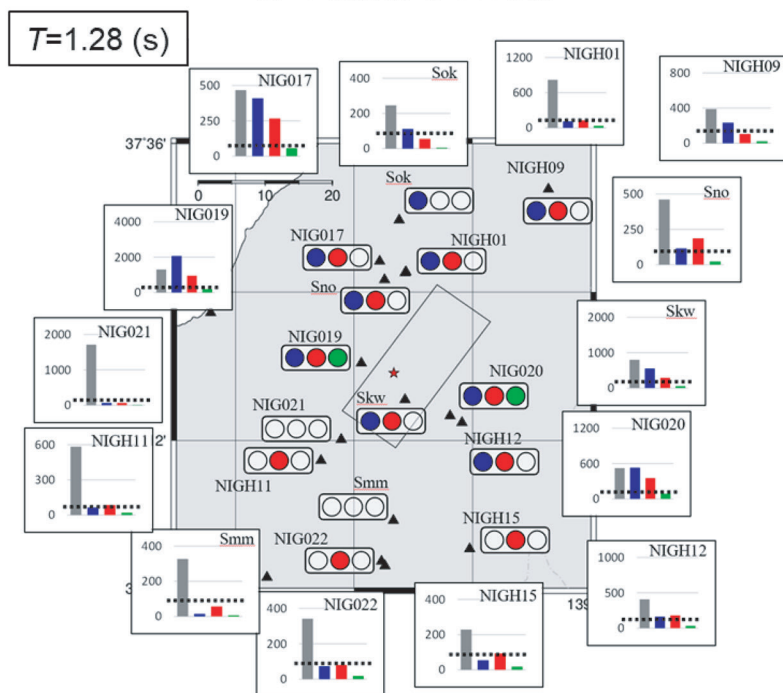
S 波を予測できていることが分かる。また、警報出力判断の正確性について、既存の C-Δ法<sup>9)</sup>を用いた地震諸元推定による P 波警報との比較検証を行った。図 8 および表 1 に示すように、本研究で使用した 52 の地震観測点のうち、P 波規定値超過判定手法を適用した場合に適切に警報出力判断できたのは 42 点、空振り（過大評価）となったのは 6 点、見逃し（過小評価）となったのは 4 点であった。一方、C-Δ法による P 波警報に対して同様に適用した場合の結果は、適切に警報出力判断できたのは 45 点、空振りは 1 点、見逃しは 6 点であった。以上より、本手法による警報出力判断の精度は C-Δ法による P 波警報と同程度の高さを有しているといえる。

## 5. 既存の警報手法との併用

2004 年新潟県中越地震の本震データを対象として、P 波規定値超過判定手法と、既存手法である S 波警報および P 波警報の、地震検知から警報出力までの時間を比較した。図 9 にその結果を示す。各観測点の傍に示す丸印がそれぞれ青、赤、緑色に点灯している場合、その時点で、P 波規定値超過判定手法、P 波警報、S 波警報の各手法による予測もしくは観測の PGA が警報基準値として設定した 80cm/s<sup>2</sup> を超過し、警報がそれぞれ出力されていることを表現している。図 9 (a) の検知時刻から 0.64 秒後の時点では、主に震源断層近傍では P 波規定値超過判定手法による警報が出力されている。一方、



(a) P波検知から0.64秒後



(b) P波検知から1.28秒後

図9 P波規定値超過判定手法およびP波警報、S波警報による警報出力状況の比較(2004年新潟県中越地震本震)

図9 (b) の検知時刻から1.28秒後の時点では、主に震源断層近傍ではP波規定値超過判定手法およびP波警報により警報が出力されているが、震源断層の遠方ではP波警報のみで警報が出力されている。このことから、P波規定値超過判定手法は震源断層近傍で最も速く警報が出力でき、また既存の警報手法と併用することで広域的に安定して警報出力できることが確認できた。

## 6. まとめ

本研究では、2004年新潟県中越地震の本震データにP波規定値超過判定手法を適用することで、鉄道沿線近傍で発生する内陸地震に対する警報の迅速性および警報出力判断の正確性について検証を行った。その結果、観測されたP波に対して事前に算出したS波/P波振幅比をリアルタイムで乗じることで、震源断層周辺で既存の警報手法よりも非常に速く、最短1秒以内に警報を出力できることが確認された。また、観測S波PGAと、観測点ごとのサイト増幅特性を反映できる本手法で予測されたS波PGAの対数標準偏差は0.284であり、既存のC-Δ法によるP波警報と同程度の精度で警報出力判断ができることが明らかになった。さらに、本手法と既存の警報手法を併用することで、広域的に安定した警報出力が可能であることが示された。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社より地震データをご提供いただきました。また、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの地震データ<sup>7)</sup>を使用させていただきました。2004年新潟県中越地震本震および87の中小規模地震の震源位置およびマグニチュードは、気象庁が公開している地震月報(カタログ編)の震源データ<sup>10)</sup>によるものです。一部の図の作成にはGMT5<sup>11)</sup>を使用させていただきました。

## 文献

- 1) 中村豊：国鉄における地震警報システム，鉄道技術，42，pp.371-376，1985
- 2) Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., "A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Record," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, No.1, pp.526-532, doi: 10.1785/0120020008, 2003.
- 3) 宮腰寛之，津野靖士：地震基盤P波と地表S波の関係に及ぼす震源・伝播経路・サイト増幅特性の影響評価－オンサイト早期地震警報への利用を目的として－，地震第2輯，Vol.68，pp.91-105，2015
- 4) 津野靖士，宮腰寛之：S波/P波の振幅比を利用したP波規定値の地震警報に関する検討，日本地震工学会論文集，Vol.19，No.6，2019
- 5) Tsuno, S., "Applicability of On-Site P-wave Earthquake Early Warning to Seismic Data Observed During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan," Frontiers in Earth Science, 9: 681199, doi: 10.3389/feart.2021.681199, 2021.
- 6) 津野靖士，是永将宏，森脇美沙，丹羽健友：震源近くの列車をより早く止める，RRR，Vol.80，No.1，pp.32-37，2023
- 7) 防災科学技術研究所：NIED K-NET, KiK-net, doi: 10.17598/nied.0004, 2019
- 8) Hikima, K., Koketsu, K., "Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system," Geophysical Research Letters, 32: L18303, doi: 10.1029/2005GL023588, 2005.
- 9) 岩田直泰，山本俊六，野田俊太，是永将宏：早期地震警報に向けた地震諸元推定とノイズ識別のアルゴリズム開発，土木学会論文集A1，Vol.72，No.1，pp.133-147，2016
- 10) 気象庁：震源データ，地震月報(カタログ編)，<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/hypo.html> (参照日：2021年10月4日)
- 11) P. Wessel, W. Smith, R. Scharro, J. Luis, F. Wobbe, "Generic Mapping Tools: Improved Version Released," EOS Transactions American Geophysical Union, Vol.94, Issue 45, pp.409-410, doi: 10.1002/2013EO450001, 2013.