

S波/P波の振幅比を利用したP波規定値超過検出手法

津野 靖士* 宮腰 寛之**

Detection Method for Exceeding Threshold of P-Wave, Using an Amplitude Ratio of S-Wave to P-Wave

Seiji TSUNO Hiroyuki MIYAKOSHI

An earthquake warning by observing the threshold value of earthquake motion is generally applied to an amplitude of S-wave, which is dominated in seismic waves. To issue the earthquake warning earlier, we investigated the applicability of earthquake warning by the threshold of P-wave in seismic data, using an amplitude ratio of S-wave to P-wave. Prediction by P-waves using the amplitude ratio of S-wave to P-wave at seismic stations reproduces S-waves well. Finally, we concluded that this method can potentially issue the earthquake warning earlier than the previous method by Ts-p.

キーワード：P波規定値超過検出手法，S波/P波の振幅比，Ts-p時間，鉄道地震検知点

1. はじめに

鉄道沿線や海岸線，内陸には警報用の地震計が10km～数10km間隔で配置されており，揺れを捉えると即時的に列車運行の可否が判断され，ある規定値を超過したあるいは超過すると予測された場合は，走行列車の減速・停止が速やかに行われる^{1) 2)}。鉄道用の地震警報としては，規定値超過による地震警報¹⁾とP波による早期地震警報²⁾が，走行列車の安全性確保のために実用化されている。本論文は，前者の規定値超過による地震警報に着目し，新たな手法の考案と検証を行ったものである。

現行の規定値超過による地震警報は，主としてS波の主要動部分で警報（通称：S波規定値超過警報）を出力していることから，走行列車を停止するための余裕時間を十分に確保することができない場合がある。そのため，P波を利用した警報手法^{例えは3) 4)}が幾つか提案されているが，P波とS波の関係が不明確あるいは広域のP波とS波の経験式や統計式^{3) 4)}を利用した手法であり，観測点直下のサイト特性を考慮したものではないため，警報精度に限界がある。そこで，本研究では，観測点直下のサイト特性を直接的に反映することにより，S波の予測精度を向上させた新しい手法を考案した。さらに，鉄道地震検知点で取得された地震データによる検証を通じて，本手法の有効性を実証的に検討した。

2. データ

2.1 観測点と地震の概要

本研究では，2016年9月～2017年6月に展開した

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

臨時連続地震観測データを使用した。地震観測地点は，地盤環境が異なる軟弱地盤上に位置する観測点Aと岩盤上に位置する観測点Bである。観測には，加速度計（ミツトヨ：JEP-6A3）とデータロガー（白山工業：LS-8800）を使用し，100Hzサンプリング，16倍の増幅率で地震データを収録した。図1に，観測した地震の震央と観測点の位置を示す。2016年11月22日に福島県沖でマグニチュード (M_j) 7.4の地震が発生したこともあり，取得データの大半は福島県沖の地震が占める。一方で，観測した地震は6～59kmの深さと3.8～7.4のマグニチュードの範囲にあり，多様な地震データが取得されていることが分かる（観測点A：18地震，観測点B：47地震）。なお，観測した全データの最大加速度（PGA）値は，観測点Aで 8cm/s^2 ，観測点Bで 24cm/s^2 である。

2.2 観測点の地盤情報

軟弱な地盤上に位置する観測点Aでは，J-SHIS⁵⁾より地下30m平均S波速度（AVs30）が150m/s程度であり，硬質な岩盤上に位置する観測点Bでは650m/s程度である。観測点AとBにおける2017年1月10日0時（環境振動が静穏な時間帯）の微動加速度波形を図2に示す。観測点AとBの加速度振幅はそれぞれ約 0.025cm/s^2 ，約 0.005cm/s^2 であり，観測点AとBの地盤環境が大きく異なることが分かる。図3には，その静穏な時間の微動加速度データを用いて算出したH/V（水平/上下）スペクトル比を示している。観測点Aでは，2Hz以下の周波数帯にH/Vスペクトル比のピークが見られており，厚い堆積層の影響を受けていることが分かる。一方で，検知点Bでは，4～6Hzの周波数帯にピークが見られ，ごく表層部分に数m程度の堆積層が存在することが分かる。

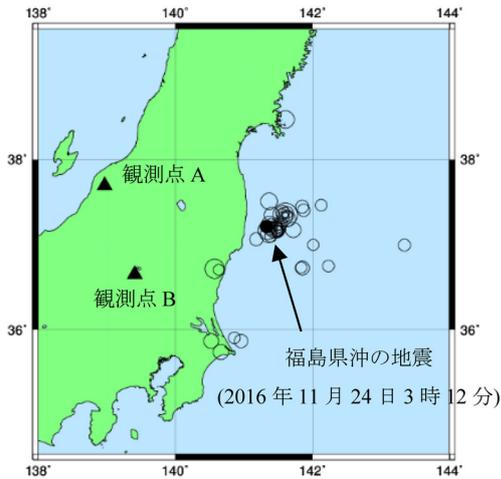


図1 観測した地震の震央(○)と観測点(▲)の位置

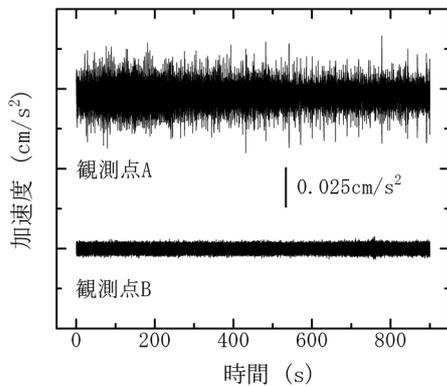


図2 観測点AとBの微動加速度波形

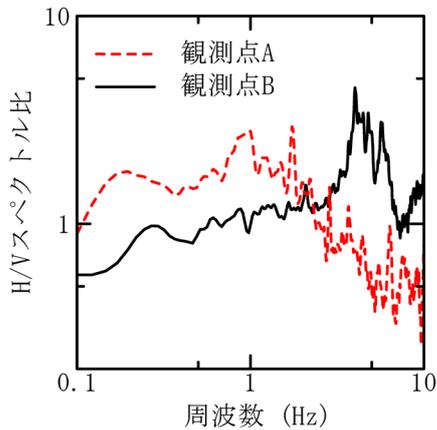


図3 観測点AとBの微動H/Vスペクトル比

3. P波規定値超過検出手法

3.1 手法の概要

P波規定値超過検出手法の概念図を図4に示す。本手法は、図4に示すように、検知点で観測されたP波からS波を直接的に予測するため、条件によっては従来のS波規定値超過検出手法で警報出力していた時刻に対して大幅に警報時間を短縮することができる可能性がある。

3.2 S波/P波振幅比の定式化

震源を点震源、震源に作用する力をダブル・カップルとすると、遠方における基盤でのP波とS波のフーリエスペクトル $O(\omega)$ は、遠方場のスペクトル振幅⁶⁾と点震源からの実体波の減衰⁷⁾の式を用いて、それぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$O_b^P(\omega) = \frac{R_{\theta\theta}^P}{4\pi\rho V_p^3} \frac{1}{r} \Omega(\omega) \cdot \exp\left(-\frac{\omega}{2Q_p} \frac{r}{V_p'}\right) \quad (1)$$

$$O_b^S(\omega) = \frac{R_{\theta\theta}^S}{4\pi\rho V_s^3} \frac{1}{r} \Omega(\omega) \cdot \exp\left(-\frac{\omega}{2Q_s} \frac{r}{V_s'}\right) \quad (2)$$

ここで、 ω は角周波数、 ρ と V は地震発生域周辺の密度と弾性波速度、 r は震源距離、 $\Omega(\omega)$ は震源スペクトル、 $R_{\theta\theta}$ はラディエーション係数、 Q は地殻内における内部減衰、 V' は地殻内の平均的な実体波の伝播速度を表す。添字PとSはP波とS波、添字bは基盤を表す。

式(1)と式(2)の対数比では、基盤P波に対する基盤S波の関係が式(3)、式(4)で表される。

$$\log O_b^S(\omega) = \log O_b^P(\omega) + a_1(\omega) \quad (3)$$

$$a_1(\omega) = \log \frac{V_p^3}{V_s^3} + \log \frac{R_{\theta\theta}^S}{R_{\theta\theta}^P} + \log e^{\frac{r\omega}{2} \left(-\frac{1}{Q_s V_s'} + \frac{1}{Q_p V_p'} \right)} \quad (4)$$

$a_1(\omega)$ は地震発生域周辺の V_p/V_s 、P波に対するS波のラディエーション係数比、そしてP波とS波の伝播経路における地震波の減衰、つまり、震源と伝播経路の影響を含む。

次に、基盤P波と地表P波、基盤S波と地表S波の関係を基盤から地表までのP波速度構造とS波速度構造による伝達関数 $G^P(\omega)$ と $G^S(\omega)$ を用いて式(5)、式(6)で表す。

$$O_s^P(\omega) = O_b^P(\omega) \cdot G^P(\omega) \quad (5)$$

$$O_s^S(\omega) = O_b^S(\omega) \cdot G^S(\omega) \quad (6)$$

ここで、添字sは地表を表す。

式(5)と式(6)の対数を取ると式(7)～(10)が得られる。

$$\log O_s^P(\omega) = \log O_b^P(\omega) + a_2(\omega) \quad (7)$$

$$\log O_s^S(\omega) = \log O_b^S(\omega) + a_3(\omega) \quad (8)$$

$$a_2(\omega) = \log G^P(\omega) \quad (9)$$

$$a_3(\omega) = \log G^S(\omega) \quad (10)$$

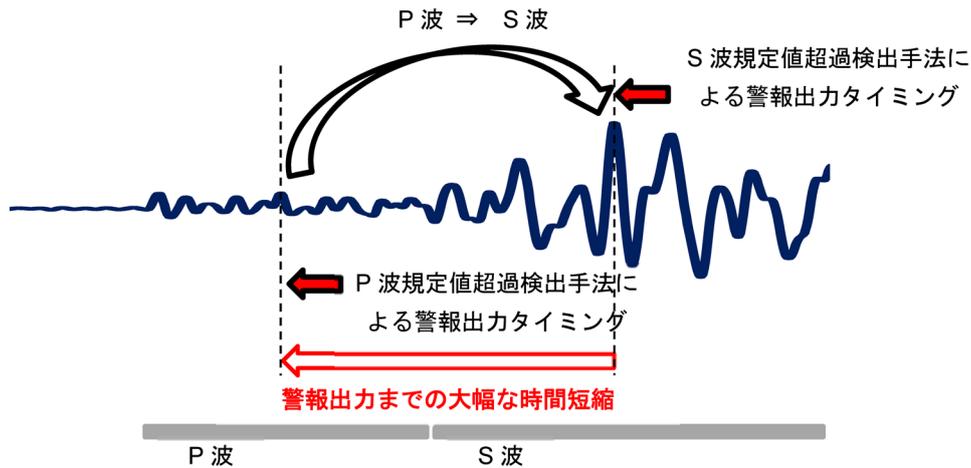


図4 P波規定値超過検出手法の概念図

$a_2(\omega)$ と $a_3(\omega)$ は観測点直下の P 波速度構造と S 波速度構造によるサイト増幅の影響を含む。

最終的に、地表 P 波と地表 S 波の関係は式 (3) と式 (7)、式 (8) から、

$$\log O_s^s(\omega) = \log O_s^p(\omega) + b(\omega) \quad (11)$$

$$b(\omega) = a_1(\omega) - a_2(\omega) + a_3(\omega) \quad (12)$$

と表され、 $b(\omega)$ は震源・伝播経路・P 波と S 波のサイト増幅の影響を含む。

宮腰・津野 (2015)⁸⁾ は、基盤 P 波と地表 S 波の関係を理論および観測データ、経験式から検討し、S 波/P 波の振幅比 (スペクトル比および最大加速度比、最大速度比) に対する震源・伝播経路の影響は小さいことを明らかにした。そのため、式 (12) の $a_2(\omega)$ が付加された本検討においても同様に、震源・伝播経路 $a_1(\omega)$ の影響が小さいことは明らかであり、その結果として、本手法では表層の P 波と S 波のサイト増幅を考慮することが重要であることが分かる。

3.3 観測された S 波/P 波の振幅比

図 1 に示した地震の加速度データを利用して、観測点 A と B における S 波/P 波のスペクトル比を算出した (図 5)。算出手順を以下に示す。

- ① 各地震データに対して、P 波と S 波の立ち上がりを目視により、読み取った。
- ② P 波と S 波の初動から 10.24 秒のデータ区間を利用し、観測点 A では 18 個の地震データ、観測点 B では 47 個の地震データに対してフーリエ・スペクトル (スムージング処理なし) を算出した。その際、S 波部分への P 波の混入を避けるため、Ts-p 時間 (P 波到達時刻と S 波到達時刻の時間差) が十分に確

保出来ていることを確認した。

- ③ S 波のフーリエ・スペクトルを P 波のそれで除することで、S 波/P 波のスペクトル比を算出した。
- ④ 観測点 A と B ごとに、全地震データに対する S 波/P 波のスペクトル比を平均し、それを最終的な S 波/P 波のスペクトル比とした。

P 波は上下動 (UD 成分)、S 波は水平動 (NS 成分と EW 成分) とし、スペクトル比は NS 成分と EW 成分の相加平均より算出した。最大加速度 (PGA) の振幅比を算出する際は、上記スペクトル比を算出した区間のデータを利用し、同様の処理を最大加速度値に対して行った。

図 5 に示した最終的な S 波/P 波のスペクトル比は、観測点 A では 2Hz 以下の周波数帯で増幅が見られ、観測点 B では 4 ~ 6Hz の周波数帯で増幅が見られている。図 6 に、観測点 A と B における S 波/P 波の最大加速度 (PGA) 振幅比を示すが、観測点 B の方が 4 ~ 6Hz の高周波数帯域の影響を大きく受けている (図 5) ため、観測点 A よりも観測点 B の方が S 波/P 波の最大加速度 (PGA) 振幅比の値が大きい。

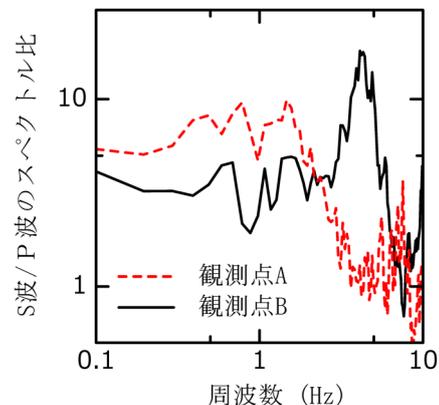


図5 観測点 A と B における S 波/P 波のスペクトル比

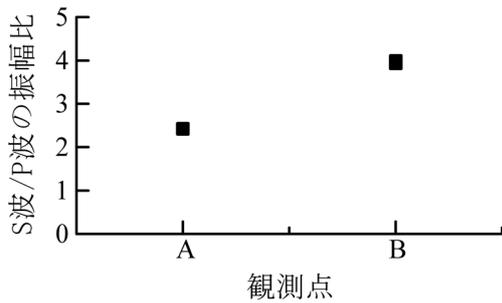


図6 観測点AとBにおけるS波/P波のPGA振幅比

4. 手法の予測精度と余裕時間

4.1 予測精度

観測されたP波初動から10.24秒のデータ区間のフーリエ・スペクトルに、算出したS波/P波のスペクトル比(図5)を掛け合わせることで、P波スペクトルからS波スペクトルを予測した。観測点AとBにおける2016年11月24日3時12分に福島県沖で発生したMj4.8の中規模地震の予測結果を図7に示す。本手法では、UD成分のP波スペクトルからS波スペクトルを予測するため、1成分の結果のみが得られるが、本予測結果は観測されたS波スペクトルと良く整合し、本手法の予測精度の高さが示されている。ただし、0.5Hz以下の低周波帯域では、0.5Hz以上の高周波帯域よりも予測結果と観測の整合性が低いことから、警報として利用する際は適用可能な周波数帯を考慮するべきである。

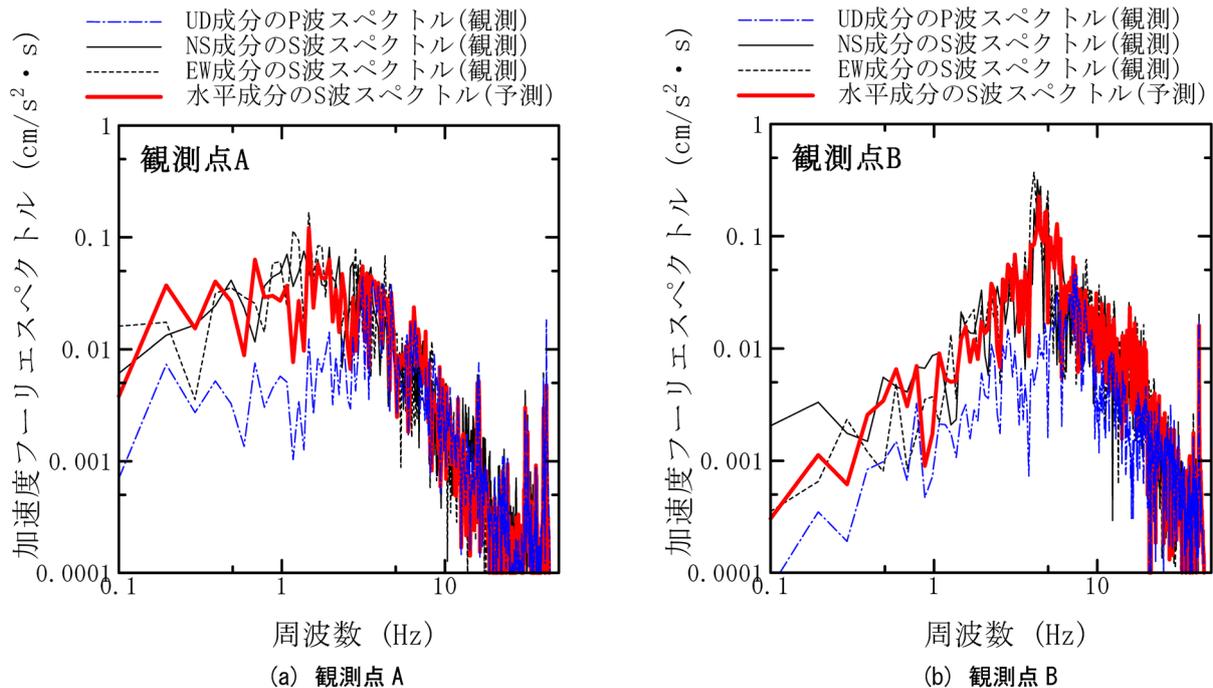


図7 観測点AとBに対するS波スペクトルの予測結果
(2016年11月24日3時12分に福島県沖で発生したMj4.8の中規模地震)

図8に、全地震データ(A:18個, B:47個)に対する本手法を用いたS波の最大加速度(PGA)の予測結果を示す。最大加速度(PGA)値が 24cm/s^2 以下である大半の本予測結果は、予測値/観測値の±対数標準偏差 σ (A:0.18, B:0.19)に収まっており、今回扱った加速度の範囲では単一指標である最大加速度(PGA)値を利用する場合においても、本手法が有効であることが示された。

4.2 余裕時間

従来の規定値超過検出手法¹⁾は、P波とS波の区別をしないため、振幅が大きくなるS波主要動部の振幅値で地震警報システムが出力されることが通常である。一方で、P波規定値超過検出手法は、P波初動から数秒間のデータ区間を利用して警報を出力するため、原理的にはTs-p時間分、従来の手法よりも警報出力の余裕時間を増加することが期待できる(図9)。

観測点AとBで観測された地震データから算出したP波最大値とS波最大値の出現時間差を図10に示す。図10の点線は、地殻中に伝播する地震波のP波速度を 7km/s ・S波速度を 4km/s とした場合の理論Ts-p時間である。本地震観測で収録されたデータは、福島県沖で発生した地震が大半であったため、観測点Aでは約20秒以上、観測点Bでは10秒以上のP波最大値とS波最大値の出現時刻差がある。つまり、観測点Aと観測点BにP波規定値超過検出手法を適用した場合は、福島県沖で発生した地震に対して、従来手法よりもそれぞれ約20秒以上、10秒以上の余裕時間が生じることが分かる。

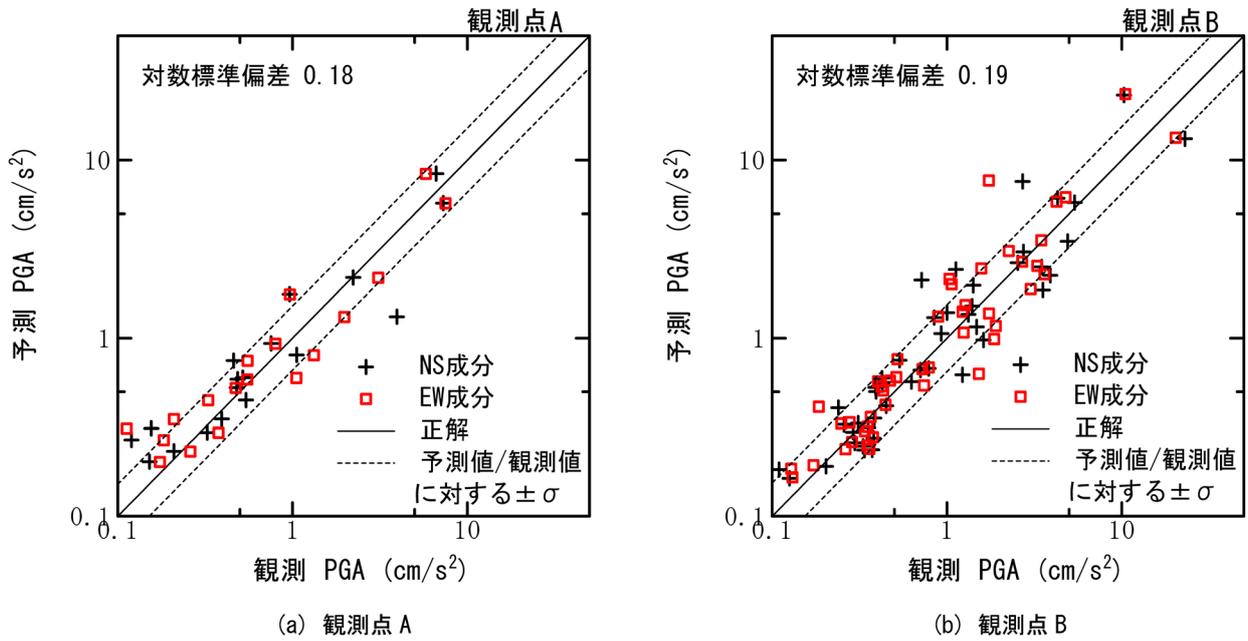


図8 観測点 A と B に対する S 波最大加速度 (PGA) の予測結果
(全地震データ数 - A : 18 個, B : 47 個)

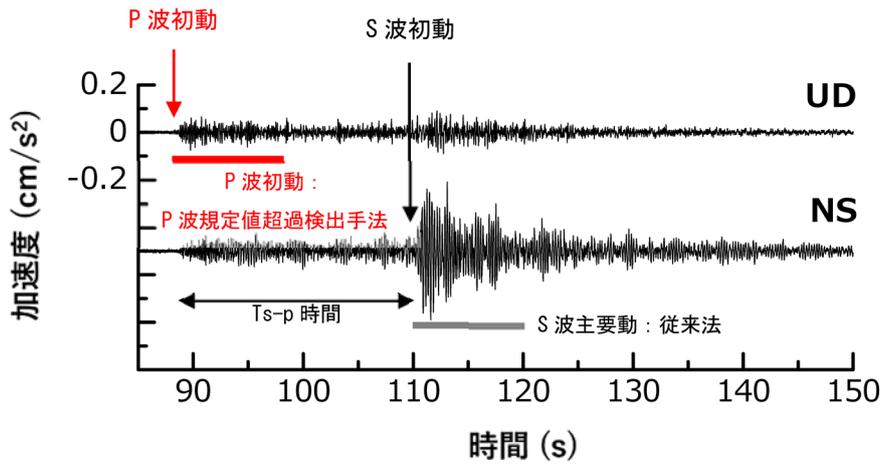


図9 観測点 B の UD 成分と NS 成分の例
(2016 年 11 月 24 日 3 時 12 分に福島県沖で発生した M_j 4.8 の中規模地震)

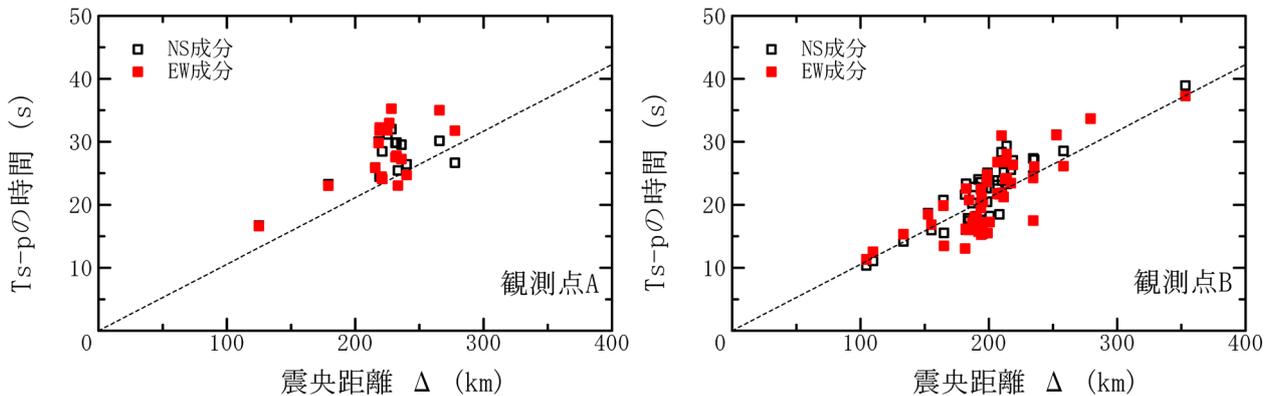


図10 観測点 A と B の震央距離 (Δ) に対する P 波と S 波の到達時刻差 (T_{s-p})

また、P波最大値とS波最大値の出現時刻差は理論 Ts-p 時間と概ね対応しており、本手法では、従来手法よりも Ts-p 時間程度分の警報時間を短縮することができることを確認した。

本観測では、現行の列車停止に向けた警報出力の規定値(40ガルや80ガル)を超過したデータが得られなかったため、実データを利用した提案手法の従来手法に対する利得を算出することはできなかったが、今後に向けて、公開データを利用した強震時の余裕時間の算出に対する具体的な検討が必要である。

5. データ数に関する検討

提案したP波規定値超過検出手法では、各観測点で観測されたP波データからS波振幅を予測するため、S波/P波の振幅比の安定性を確保あるいは確認することが重要となる。ここでは、観測データ数とS波/P波スペクトル比の安定性の関係を検討する。

観測点Bでは、本観測期間で47個の地震データが収録されており、使用したデータ数を変化させた場合のS波/P波のスペクトル比を図11に示す。データ数の増加とともに、スペクトル比は安定し、本検討では20個程度のデータ数があれば、安定したスペクトル比を取得できると言えそうである。ただし、データ数が少ない(例えば、図11中のデータ数10場合であろうとも、データ数47から算出したスペクトル比の標準偏差の範囲に収まっていることが分かる。また、新規地点などの理由から地震データがない場合は、スペクトル比形状の類似性の観点から微動H/Vスペクトル比(図3)を代用できる可能性もある。

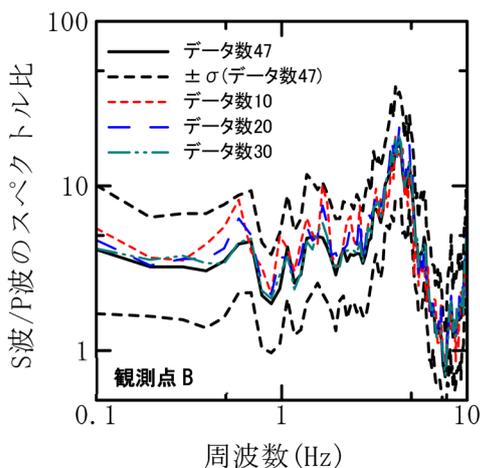


図11 データ数に対するS波/P波のスペクトル比

6. まとめ

本研究では、観測されたP波の振幅とS波/P波の振

幅比を利用することで、従来のS波の規定値に対する地震警報(S波規定値超過検出手法)よりも、Ts-p時間程度分早く警報を出力できる手法を新たに提案した。S波/P波の振幅比は観測点直下のP波とS波の速度構造の寄与が大きいことを理論から導出し、地震観測点で取得した実測データより、S波/P波の振幅比を抽出できることを示した。実観測データであるP波の最大加速度を利用することにより、対数標準偏差0.2程度のばらつきでS波の最大加速度を即時的に予測できることを示した。また、P波のフーリエ・スペクトルを利用して直接的に予測したS波のフーリエ・スペクトルは観測のそれと良く整合しており、周波数領域においても本手法が有効であることが示された。本手法では、地震観測点ごとにS波/P波の振幅比をチューニングする必要があるが、20個程度の実測データを利用することで、安定的にS波/P波の振幅比を抽出できることが分かった。

謝辞

地震観測の現地調査では、東日本旅客鉄道株式会社の菅原 瑞朗氏をはじめ関係者にご協力をいただいた。

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) 中村豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集I，531，pp.1-33，1996
- 3) 上田竹寛，倉橋奨，正木和明，入倉孝次郎：P波最大加速度を用いた新たな震度予測手法の提案，愛知工業大学研究報告，44，pp.131-138，2009
- 4) 糸井達哉，内山泰生，高木政美，末田隆敏，長島一郎：緊急地震速報と現地地震計の初期微動情報を併用した地震防災システムの開発と性能評価，日本建築学会技術報告集，16，pp.827-832，2010
- 5) 藤原広行，河合伸一，青井真，森川信之，先名重樹，工藤暢章，大井昌弘，はお憲生，早川譲，遠山信彦，松山尚典，岩本鋼司，鈴木晴彦，劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，No.337，2009
- 6) 理論地震動研究会：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994
- 7) 木下繁夫：地震観測に基づく観測点特性と径路減衰特性の評価，地震2，46，pp.161-170，1993
- 8) 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ーオンサイト早期地震警報への利用を目的としてー，地震2，68，pp.91-105，2015