

海底地盤で観測された地震動の P 波に対する海水の影響に関する検討

公益財団法人鉄道総合技術研究所

○森脇美沙, 津野靖士, 是永将宏

1. はじめに

近年海底地震観測網の整備が進んでいるが、鉄道では早期地震警報に海底地震計情報をまだ十分に活用できていない。B-Δ法 (Odaka et al., 2003) や C-Δ法 (岩田ほか, 2016) などの既存の警報手法は陸上地表地震計で有効性が確認されたものであり、設置環境が異なる海底地震計への適用性は未検討であった。B-Δ法や C-Δ法を S-net の地震データに適用してみたところ、P 波振幅を過小評価したことで係数 B, C も過小評価となり、震央距離を過大推定する傾向が見られた (図 1)。その要因として P 波が一部海水中へ透過していることが考えられる (図 2)。そこで、本研究では陸上地中観測点に対する海底観測点の地震動のスペクトル比を用いて P 波に対する海水の影響について検討する。

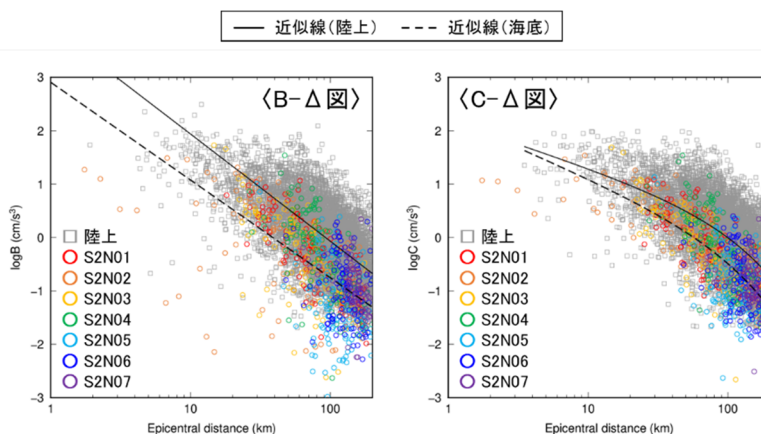


図 1 B-Δ 図 (左) および C-Δ 図 (右)

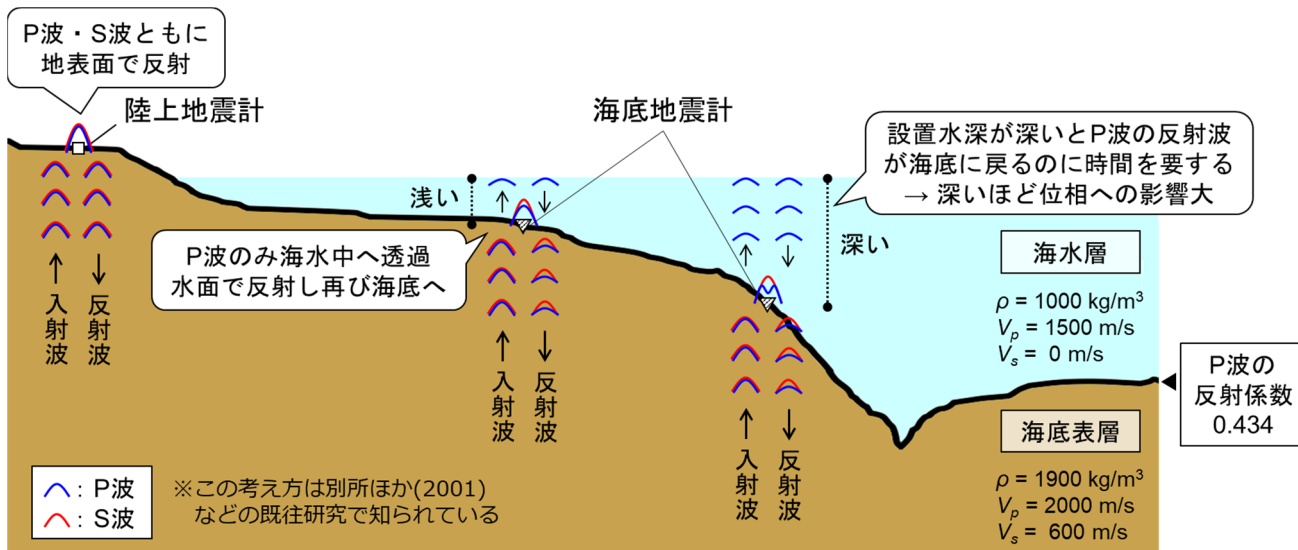


図 2 陸上および海底地盤における地震波伝播の模式図

2. 使用データおよびスペクトル比の算出方法

2016 年 8 月から 2022 年 5 月までに発生した地震のうち、S-net の茨城・福島沖観測網の S2N01～S2N07 および KiK-net の MYGH10 の全 8 観測点において地震記録が得られている計 169 地震 (M_j 4.5～7.4) のデータを使用した。陸上地中観測点に対する海底観測点の P 波および S 波のスペクトル比は、UD 成分の P 波開始および NS・EW 成分の S 波開始からそれぞれ 10.24 秒を抽出して FFT することで P 波および S 波のスペクトルを算出した後、S2N01～S2N07 のスペクトルをそれぞれ MYGH10 のスペクトルで除すことで求めた。なお、S 波のスペクトルは NS 成分と EW 成分のスペクトルを対数平均したものである。

3. 海底で観測される地震動に対する海水の影響の検討

3.1 海底／陸上地中スペクトル比

S2N01～S2N07 観測点について、2 章の手順で算出した各観測点における個々の P 波および S 波の海底／陸上地中スペクトル比の対数平均を算出し比較した（図 3）ところ、P 波のスペクトル比の方が S 波のスペクトル比よりもバラツキが大きいことがわかった。定性的にはある 2 観測点間の距離に対し P 波は S 波の波長よりも長いから S 波のスペクトル比の方がバラツキが大きくなると考えられるが、実際には P 波の方がバラツキが大きいという結果が得られた。この要因として海水の影響が挙げられる。P 波は固体中に加え液体中も伝播するのに対し S 波は固体中を伝播するが液体中は伝播しない性質を持つ。よって既存の警報手法を海底地震計データに適用するには、海底での地震観測に際して P 波が海中へ透過し再び海面での反射波が海底に向かって戻ってくる現象を考慮する必要があることが示唆される。

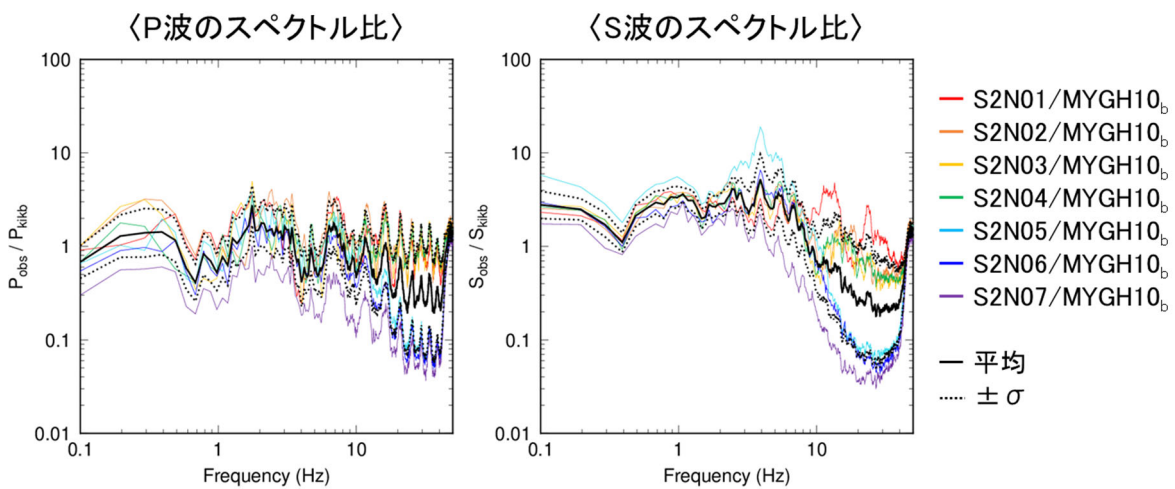


図 3 P 波および S 波の海底／陸上地中スペクトル比

3.2 理論と観測の海底／陸上地中スペクトル比の比較

海水層がある場合とない場合について、それぞれ鉛直入射を仮定した重複反射理論に基づいて海底／陸上地中スペクトル比を理論的に求め、3.1 節で算出した観測のものと比較した。地盤条件は J-SHIS の深部地盤情報を使用した（図 4）。入力層は全観測点共通の $V_p = 4000$ m/s, $V_s = 2100$ m/s の層とし、出力層は各観測点の設置位置とした。各観測点について $(E_{out} + F_{out})/E_{in}$ を計算し（E は入射波、F は反射波、

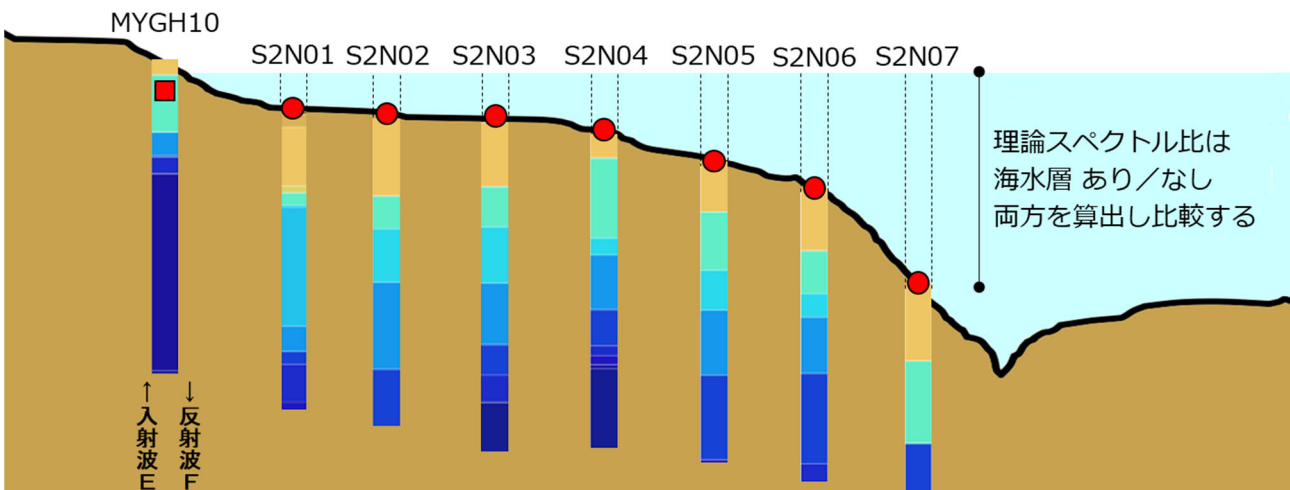


図 4 理論の海底／陸上地中スペクトル比の算出に用いた地盤情報の模式図

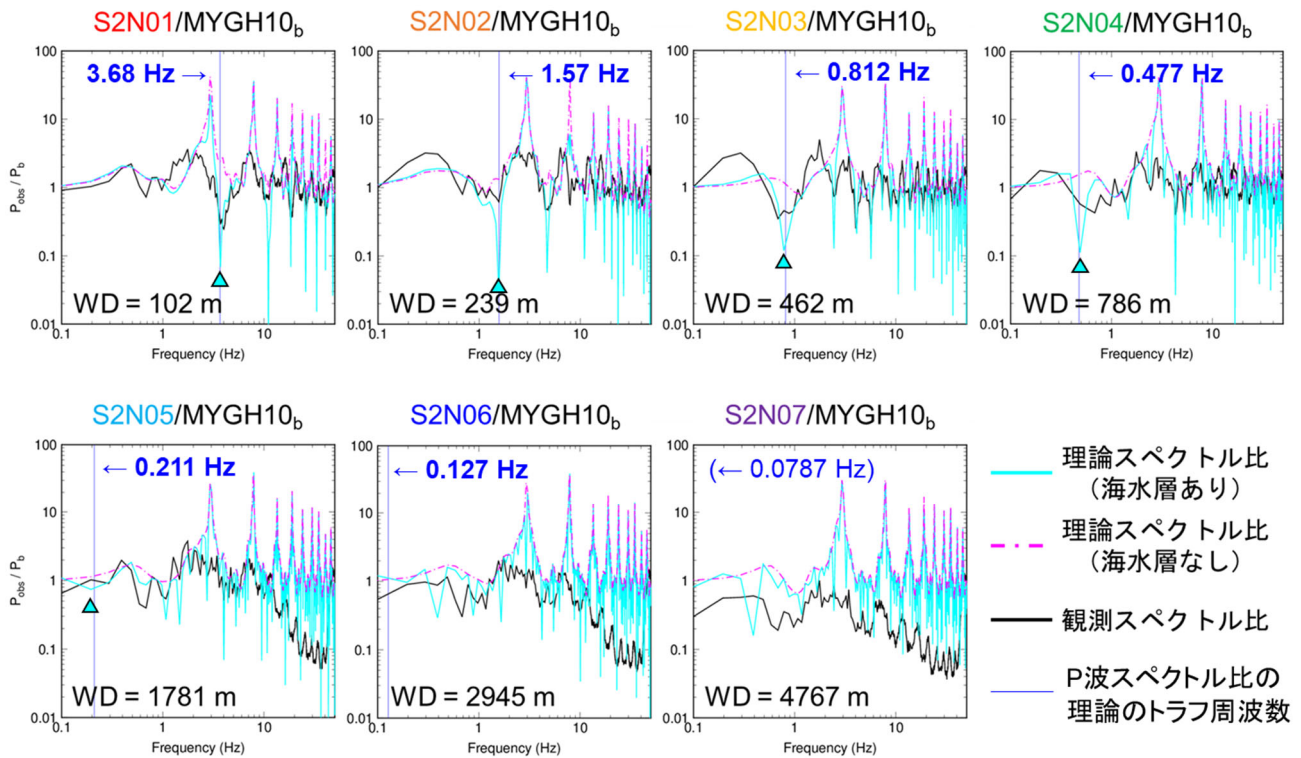


図5 P波の理論と観測の海底／陸上地中スペクトル比の比較

添え字の out は出力層，in は入力層をそれぞれ示す)，海底と陸上地中で比をとることで理論の海底／陸上地中スペクトル比を算出した（図5）．その結果，P波のスペクトル比において，海水層を考慮すると観測のスペクトル比に見られるトラフが理論でも再現できているのに対し，海水層を考慮しない場合は再現できていないことが見て取れる．このトラフ部分では海水層を考慮するか否かでスペクトル比が数倍～10倍程度異なり，海水層の影響は大きいと言える．一方S波は海水中を伝播しないため，海水層の有無によって理論スペクトル比は当然ながら変化しなかった．

P波の海底／陸上地中スペクトル比に現れるトラフについて，海水層厚に対し4分の1波長則を考えると，例えばS2N01（設置水深102m）の卓越周波数は3.68Hzと計算されるが，改めて図5で示したP波のスペクトル比を確認すると観測・理論ともに3.68Hz付近にトラフが現れていることが見て取れる．さらに高周波数帯域にもいくつかトラフが見受けられるが，これらは高次モードにそれぞれ順番に対応していることも確認できた．S2N01～S2N07の各観測点のトラフが出現する周波数を比較すると，設置水深が深いほどトラフが出現する周波数が観測・理論ともに長周期側へシフトしていることがわかる．

4. まとめ

本研究を通して，海底面でP波が海水中に透過しており，その影響は海底地震計の設置水深によって異なることが明らかになった．また，既存の警報手法を海底地震計に適用するには海水層による影響を補正する必要がある，すなわち海底地震計の水深に応じた補正を施せば既存手法が適用できる可能性があると言える．

5. 参考文献

- Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K. and Nozaka, D: A new method of quickly estimation epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 93, No.1, pp.526-532, 2003.

- ・ 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.
- ・ 別所正利, 前田久明, 増田光一, 高村浩彰: 海震に伴う海底地盤の振動特性に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, Vol.189, pp.87-92, 2001.
- ・ 防災科学技術研究所: K-NET, KiK-net, <https://doi.org/10.17598/nied.0004>, 2019.
- ・ 防災科学技術研究所: S-net, <https://doi.org/10.17598/nied.0007>, 2019.
- ・ 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <https://doi.org/10.17598/nied.0010>, 2019

6. 謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所の S-net および KiK-net の地震データ, J-SHIS の深部地盤データを使用させていただきました。