

早期震央位置推定の精度を向上する 地震計位置の選定方法

岩田 直泰* 丹羽 健友** 山本 俊六***

Method of Selecting Seismometer Installation Sites for Accurate Epicentral Location Estimation of Earthquake Early Warning

Naoyasu IWATA Katsutomo NIWA Shunroku YAMAMOTO

Earthquake disaster prevention systems using early warning seismometers have been introduced to ensure safety during an earthquake for the high-speed railways in Japan. The early warning seismometer estimates the epicentral location and the magnitude just after detecting the arrival of P-wave when an earthquake occurs. Since the seismometers utilize weak initial P-wave information to estimate seismic parameters, it is supposed that the seismometer installation site may affect the estimation accuracy, but this effect is not clear. In this study, we evaluate the relationship between the characteristics of seismic observation sites and the estimation error of epicentral locations. Then we suggest a method of selecting the seismometer installation sites to improve the estimation accuracy of the epicentral location by the seismometers and we confirm its effect.

キーワード：早期警報用地震計，地震検知点，AVS30，地震基盤深度，ノイズレベル，震央位置，推定誤差

1. はじめに

新幹線などでは、地震時に鉄道施設や列車の走行安全性が懸念される状況において、可能な限り早く列車を停止させる早期地震警報システムが稼動している^{1) 2)}。このシステムは主要動のS波と比較して伝播速度が速いP波に着目し、単独検知点のP波初動数秒の情報から地震の震央位置とマグニチュードを推定し^{3) 4)}、その情報に基づき必要とする範囲に対して列車停止の警報を出力する機能を有している⁵⁾。このうち単独検知点による地震諸元推定の精度や即時性を向上させるアルゴリズムについては近年改良が行われ⁴⁾、2018年より新幹線向けの早期警報用地震計に順次導入されている。

我が国では全国新幹線鉄道整備法に基づき現在も新幹線の延伸工事が進められており、それに伴い地震検知点も増設されている状況にある。特に、より早くP波を検知する目的で線路から離れた位置に設置される地震検知点に対しては、可能な限り地盤条件が良好で静穏な環境を選定している。しかし、地震検知点サイト特性が震央位置推定に与える影響は定量的に明らかにされておらず、地震時における警報出力の信頼性を高めて安全性を向上させるためには、それらの関係を明らかにし推定精度の向上が期待できる地震検知点を戦略的に選定することが重要となる。本研究では、精度の高い早期震央位置

推定を可能とする地震計位置の選定に向けて、地震検知点サイト特性と震央位置推定誤差の統計的な関係を分析する。この結果を受けて、地震検知点の位置選定方法を提案すると共に選定効果について検討する。

なお、早期警報用地震計に実装されている早期地震諸元推定アルゴリズムは、震央距離と震央方位を個別に推定することにより最終的に震央位置を求める。従って、本研究では、地震検知点サイト特性との関係として、早期地震諸元推定アルゴリズムにより算出される震央距離および震央方位を分析対象とする。

2. サイト特性を示す情報の定義

本章では、地震検知点サイト特性を示す情報として本研究で扱う表層地盤特性、深部地盤特性、静穏性に関する指標の定義について述べる。なお、本研究は地震検知点サイト特性の整理にあたり、国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）の強震観測網K-NET観測点⁶⁾を検討の対象としている。K-NET観測点は移設されることがあるが、その移設の時期などの情報は公開されている⁶⁾。ここではK-NET観測点の移設の履歴を考慮した上で分析を行った。

2.1 地震検知点の表層地盤特性と深部地盤特性の情報

本研究では地震検知点の表層地盤特性を表す指標として、地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS30)を使用する。ただし、K-NET観測点の地盤データの調査深度は、ほとんどが30m未満であるため、こ

* 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 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社)
*** 鉄道地震工学研究センター

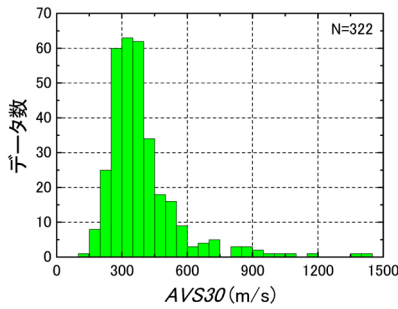


図1 対象点のAVS30のヒストグラム

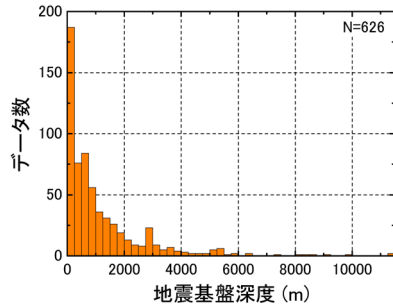


図2 対象点の地震基盤深度のヒストグラム

ここではそのようなデータについてもAVS30を計算できる司・翠川の方法⁷⁾を用いる。これにより、AVS30を算出できたK-NET観測点は全体の3割程度の322点であり、それらの地点のAVS30のヒストグラムを図1に示す。図より、AVS30は250～400 m/sの地点が多いことが分かる。

また、地震検知点の深部地盤特性を表す指標として、地震ハザードステーションJ-SHIS⁸⁾で公開されている深部地盤モデルから抽出した地震基盤深度を使用する。J-SHISでは、全国の基準地域メッシュ(約1kmメッシュ)に対応する地震基盤から工学的基盤に至る深部地盤各層の密度、P波速度、S波速度等が公開されている。本研究では、K-NET観測点を含むメッシュにおけるS波速度3100m/sの上面深度を地震基盤深度として用いることとした。対象K-NET観測点の地震基盤深度ヒストグラムを図2に示す。図より、地震基盤深度が1000mより浅い地点が多いことが分かる。

2.2 地震検知点の静穏性の情報

早期地震諸元推定アルゴリズムは、P波初動数秒の情報を用いて震央位置を推定する。P波到達時の振動を正しく捉えるためには、静穏な環境であることが望ましく、これまでは基本的に常時の雑振動ができる限り小さい地点を選定して早期警報用地震計を設置してきた。しかし、地震検知点の静穏性が震央位置の推定精度にどの程度影響を与えるのか検討された事例はない。本研究では、地震波形ごとの記録開始からP波到達前までの振幅データの二乗平均平方根(RMS)を用いる。早期地震諸元推定アルゴリズムにおける震央距離推定では加速度

データ、震央方位推定では変位データを用いており、加速度ノイズ RMS_{Acc} (cm/s^2)と変位ノイズ RMS_{Dis} (cm)を式(1)および式(2)により算出する。

$$RMS_{Acc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Acc_{i-1})^2 / n} \quad (1)$$

$$RMS_{Dis} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Dis_{i-1})^2 / n} \quad (2)$$

ここで、 Acc は上下動加速度データ(cm/s^2)、 Dis は上下動変位データ(cm)、 n は波形データの記録開始からP波手動検出までのサンプル数を表す。なお、上下動変位データは漸化式により上下動加速度データから算出する。

3. サイト特性と震央位置推定誤差の関係

3.1 検討に用いた地震動データセット

地震検知点サイト特性と震央位置推定誤差の統計的關係を分析するための地震動データセットとして、1996年7月から2018年6月に防災科研のK-NET観測点⁶⁾で記録されたマグニチュード4.5～9、震源深さ146km以浅の地震(N=224)を用いた。本研究で扱う地震の震央位置分布を図3に示す。これらの地震について、K-NET観測点からの震央距離が200km以内となる地震動データ(N=11193)を抽出した。早期警報用地震計による震央位置推定ではP波初動数秒の情報を用いるため、波形にはP波到達前後のデータが含まれている必要がある。このため、P波の到達時刻を目視により読み取り、P波初動が記録された波形のみを検討対象とした。P波の到達時刻の読み取り結果は、P波伝播の時間と距離の關係である走時図により確認を行っている。

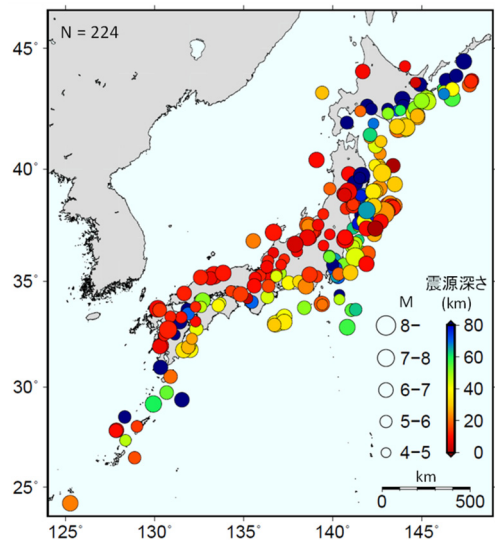
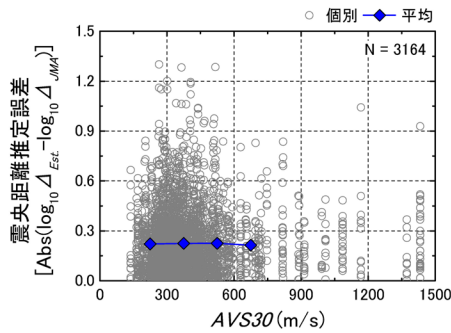


図3 対象地震の震央位置

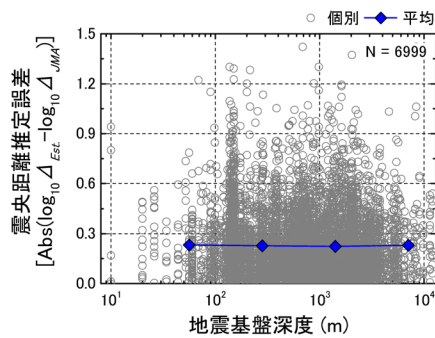
3.2 サイト特性と震央距離推定誤差の関係

本節では、地震検知点サイト特性として定義した $AVS30$ 、地震基盤深度、ノイズレベルと震央距離推定誤差の関係を分析する。3.1 節で述べた地震動データセットに対する分析結果を図 4(a) から (c) に示す。これらの図において個別の解析結果を灰色の○印、それぞれ一定区間ごとのデータの平均を◆印と実線で示している。震央距離推定誤差は推定値 (Δ_{Est}) と正解値 (Δ_{JMA}) の対数差の絶対値 ($=\text{Abs}(\log_{10}\Delta_{Est}-\log_{10}\Delta_{JMA})$) としており、推定値は早期警報用地震計に実装されている早期地震諸元推定アルゴリズムにより算出し、正解値は地震検知点から気象庁発表の震央までの距離としている。

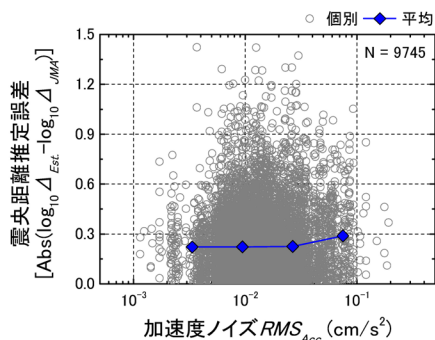
まず、表層地盤特性との関係として $AVS30$ に着目する。図 4(a) の平均値の分布より、 $AVS30$ と震央距離推定誤差に関係性は確認されず、表層地盤は震央距離推定精度に影響しないと考えられる。



(a) $AVS30$



(b) 地震基盤深度



(c) 加速度ノイズ RMS_{Acc}

図4 サイト特性と震央距離推定誤差の関係

次に、深部地盤特性との関係として地震基盤深度を取り上げる。図 4(b) の平均値の分布より、地震基盤深度と震央距離推定誤差にも明確な関係性は見られず、地震基盤深度は震央距離推定精度に影響しないと考えられる。

最後に、地震点の静穏性との関係として式 (1) により算出した加速度ノイズ RMS_{Acc} について整理する。図 4(c) に示す平均値の分布より、震央距離推定誤差は特にノイズレベルが大きな地点においてわずかに大きくなる傾向が見られる。一般的に加速度ノイズ RMS_{Acc} が大きな地点において P 波到達を検知するためには、P 波初動の振幅が雑振動よりも十分に大きい必要がある。これより、ノイズレベルの大きな地点は P 波初動振幅の増加率が大きいケースが選別的に多くなる傾向となる。現行の震央距離推定手法では P 波初動振幅の増加率が大きい場合には震央距離を小さく推定する結果となることから⁴⁾、加速度ノイズ RMS_{Acc} の大きな地点で推定誤差がやや大きくなると推察される。ただし、図 4(c) によるとノイズレベルが震央距離推定誤差に与える影響は顕著ではない。

本節の分析により、震央距離推定誤差と $AVS30$ や地震基盤深度、加速度ノイズ RMS_{Acc} の関係性は小さいことが確認された。

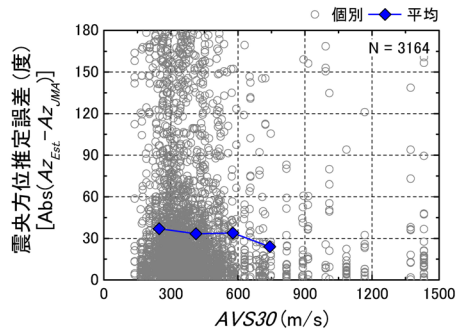
3.3 サイト特性と震央方位推定誤差の関係

次に、地震検知点サイト特性として定義した $AVS30$ 、地震基盤深度、ノイズレベルと震央方位推定誤差の関係を分析する。図 5(a) から (c) に、3.1 節に示した地震動データセットに対する分析結果を示す。これらの図において凡例は図 4 と同一である。震央方位推定誤差は推定値 (Az_{Est}) と正解値 (Az_{JMA}) の差の絶対値 ($=\text{Abs}(Az_{Est}-Az_{JMA})$) としており、推定値は早期警報用地震計に実装されている早期地震諸元推定アルゴリズムにより算出し、正解値は地震検知点から気象庁発表の震央までの北から時計回りの角度としている。

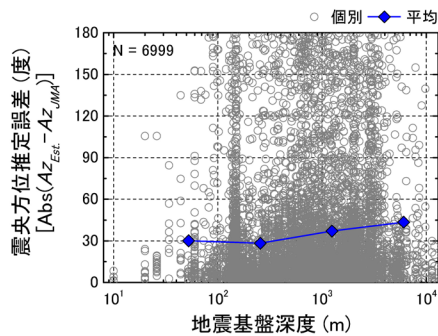
まず、表層地盤特性との関係として $AVS30$ に着目する。図 5(a) の平均値の分布より、 $AVS30$ が大きくなるにつれて震央方位推定誤差は小さくなる傾向が見られる。一般に比較的軟らかい表層地盤では、基盤との層境界における屈折により、地震計に対して鉛直下方入射となりやすい傾向となるが、固い表層地盤ではその傾向が弱まる。 $AVS30$ が比較的大きい地盤では、地表への P 波初動入射角度が大きくなり変位の水平成分が明瞭な軌跡を描くことにより⁴⁾、震央方位推定精度が向上すると考えられる。また、図 5(a) より $AVS30$ が小さい検知点ほど、推定誤差が約 180 度となるデータが多くなることが見られ、推定方位が反転する結果が多く含まれる。これは、軟弱な表層付近の重複反射の影響により上下動の極性の反転した振幅が卓越し、方位が反転するケースが増加するためと推察される。

次に、深部地盤特性との関係として地震基盤深度を取り上げる。図 5(b) の平均値の分布より、地震基盤深度が浅い検知点ほど震央方位推定誤差が小さくなる傾向が見られる。本研究で扱う地震基盤深度と $AVS30$ の統計的な関係を別途整理したところ、地震基盤深度が小さいほど $AVS30$ が大きくなる傾向が認められ、推定精度の傾向が両指標の相関性と整合していることを確認している。すなわち、地震基盤深度が深い地点は表層地盤が柔らかい場合が多く、屈折の影響により地震計に対して P 波初動が鉛直下方入射しやすくなり、震央方位推定誤差が大きくなるためと考えられる。

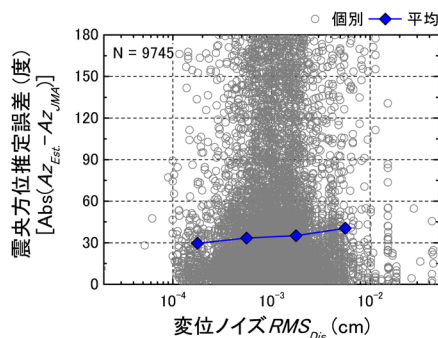
最後に、地震検知点の静穏性との関係として式 (2) により算出した変位ノイズ RMS_{Dis} について整理する。図 5(c) の平均値の分布より、変位ノイズ RMS_{Dis} と震央方位推定誤差の関係は、やや左下がりの傾向を示し、ノイズレベルが小さいほど推定誤差が小さくなる傾向が見られる。



(a) $AVS30$



(b) 地震基盤深度



(c) 変位ノイズ RMS_{Dis}

図 5 サイト特性と震央方位推定誤差の関係

これは、地震動のシグナルの大きさにも左右されるが、ノイズレベルが小さいほど P 波到達後の S/N 比が大きくなることから、特に P 波到達直後において漸化式により算出する変位波形が安定し、変位データに基づく震央方位の推定精度が高まるためと考えられる。以上より、地震検知点サイト特性との関係として、震央方位推定精度は表層地盤特性、深部地盤特性および静穏性の影響をそれぞれ受けることが確認された。

3.4 地震検知点の位置選定方法の提案

3.2 節および 3.3 節の地震検知点サイト特性と震央位置推定誤差の統計的分析から、地震検知点サイト特性と震央距離推定誤差は関係性が小さいことが確認された。よって、地震検知点の位置選定を行う際、震央距離推定精度の観点においてそのサイト特性を考慮する必要性は低いと考える。一方、震央方位推定精度は地震検知点サイト特性の影響を受けることが明らかとなった。ここで、先述の通り $AVS30$ と地震基盤深度は相関性を有するが、 $AVS30$ を用いることにより図 5(a) の通り推定誤差が約 180 度となるケースをより効果的に排除できるため、震央方位推定精度に着目して地震検知点の位置選定を行う際は、表層地盤特性を優先するのが適切と考える。

これより、震央位置の推定精度を高めるためには、特に震央方位推定精度に着目し、表層地盤が固く ($AVS30$ が大きい)、静穏な (ノイズレベルが小さい) 地点を選定することが適切と考える。特に、震央方位推定に関して、 $AVS30$ が小さい場合に推定方位が反転しやすい傾向が顕著となっており、その反転は震央距離推定誤差に比べて不適切な警報の出力につながる可能性が高いため、早期地震警報の観点からは $AVS30$ が大きい地点を優先することが望ましい。この際、 $AVS30$ が 500 m/s 以上では反転のケースが顕著に低減することが期待される。

4. 地震検知点の位置選定効果の事例検討

本章では、3.4 節で提案した地震検知点の位置選定効果を確認するために、比較的近接しているものの $AVS30$ 、地震基盤深度、ノイズレベルが異なる検知点のデータを用い震央位置推定誤差の比較を行う。検討に使用する検知点として、それぞれ 20 ~ 30 km 程度離れた位置関係にある宮城県内の 3 箇所の K-NET 観測点 (MYG011, MYG012, MYG015) ⁶⁾ を選定した。各 K-NET 観測点の $AVS30$ 、地震基盤深度、加速度ノイズ RMS_{Acc} の中央値を表 1 に示す。

検討に使用する地震は、1998 年から 2010 年の期間に 3 箇所の K-NET 観測点で共通して記録された気象庁マグニチュード 4.5 以上の地震 (N=10) である。対象地震の震央位置と K-NET 観測点を図 6 に示す。なお、

表1 対象 K-NET 観測点のサイト特性

K-NET観測点	$AVS30$ (m/s)	地震基盤 深度 (m)	RMS_{Acc} の 中央値 (cm/s ²)
MYG011(牡鹿)	1432	137	0.0017
MYG012(塩竈)	452	667	0.0099
MYG015(岩沼)	230	851	0.0212

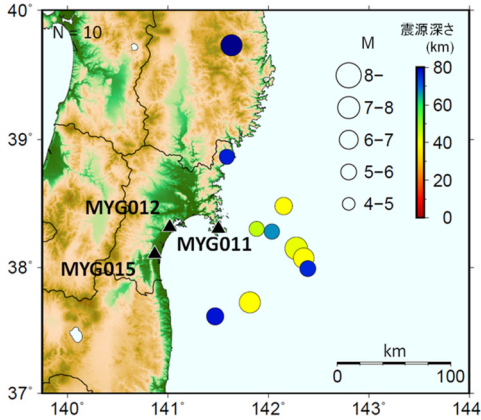


図6 対象 K-NET 観測点と対象地震の震央位置

MYG011 と MYG012 は移設履歴があるが、ここではそれを考慮し、K-NET 観測点が当該箇所を設置されていた期間に合わせて評価対象地震を選定している。

表1の3地点が地震検知点の候補地となった場合には、3.4節の提案によると $AVS30$ が大きくノイズレベルの小さな MYG011 が選定される。ここでは、当該の3地点を対象として地震検知点の位置選定効果の事例検討を行う。

まず、3章で分析した $AVS30$ 、地震基盤深度、ノイズレベルと震央位置推定誤差の関係を確認する目的から、3章と同様の整理を3箇所の K-NET 観測点に対して行った。図7の(a)に $AVS30$ と震央距離推定誤差、(b)に $AVS30$ と震央方位推定誤差の分析結果を示す。図中には、各地震の推定誤差を○印、各 K-NET 観測点の平均を◆印で表しており、推定誤差の定義は4章と同一である。

図7(a)より震央距離推定誤差の平均値の分布は、図4(a)と同様に $AVS30$ と明確な関係性は確認できない。地震基盤深度および加速度ノイズ RMS_{Acc} についても、震央距離推定精度に大きく影響しないことを別途確認している。

次に震央方位推定誤差を整理する。図7(b)の平均値の分布より、図5(a)と同様に $AVS30$ が大きい検知点ほど推定誤差が小さい傾向が見られる。また、MYG015における個別地震の推定誤差においては、135度程度の誤差となるデータもあり、反転に近い推定方位の結果が含まれている。これは図5(a)から得られた傾向と整合している。なお、地震基盤深度については図5(b)と同様に地震基盤深度が小さい検知点ほど推定誤差が小さくなる傾向が見られることを別途確認している。変位ノイズ RMS_{Dis} は震央方位推定誤差の平均値と明確な関係

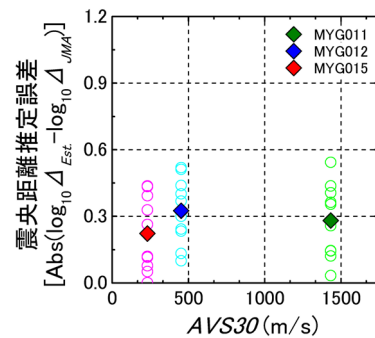
は確認できなかったが、対象地震の数が少なく3箇所の K-NET 観測点における変位ノイズ RMS_{Dis} の分布が小さいことから、誤差変動の傾向が見えにくいことによると考える。

以上の検討より、対象とした3箇所の K-NET 観測点に対する、特に震央方位推定誤差に着目した分析結果は、3章で示した統計的な関係と整合することが確認できた。

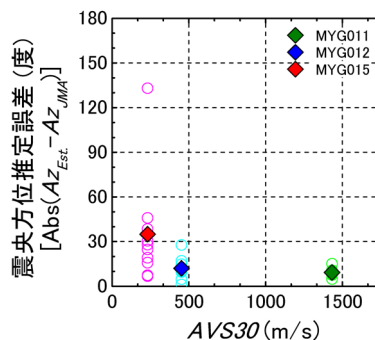
次に、図8(a)と(b)に対象地震に対する3箇所の K-NET 観測点による推定震央位置の例を示す。図によると検討に使用した地点のうち、震央位置推定においては、MYG011の推定結果が最も良好であることが確認できる。表1より、MYG011は $AVS30$ が大きく、ノイズレベルが最も小さい K-NET 観測点である。一方、 $AVS30$ が小さい MYG015 は図8(b)で見られるように推定震央位置が反転するケースが確認される。

以上から、表1の3地点から地震計検知点を選ぶ場合、震央位置推定の精度という観点では、まず $AVS30$ が大きく、その上で常時のノイズレベルが小さい MYG011 を選定することが適切であることが示された。

本章の事例検討から、3.4節の提案に基づく地震検知点の選定方法の適用性が確認された。新幹線延伸に伴い早期地震諸元推定の機能を有する地震検知点を増設する場合などは、ここで提案する選定方法の適用により、特に震央方位推定誤差を小さく抑えることが期待され、早期警報用地震計による震央位置推定の信頼性が向上すると考える。

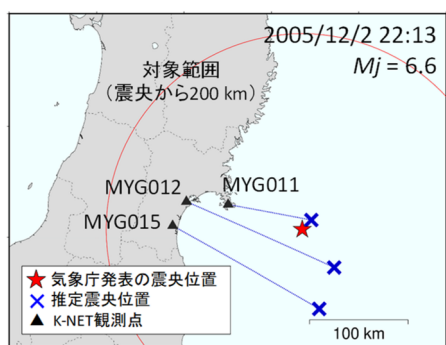


(a) 震央距離

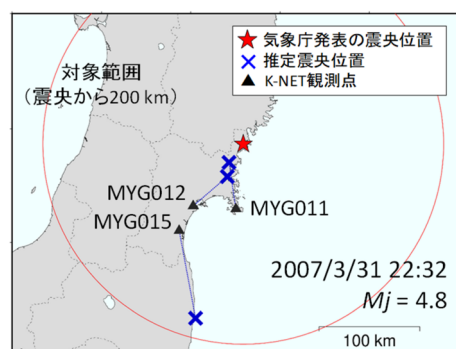


(b) 震央方位

図7 $AVS30$ と推定誤差の関係



(a) 2005/12/2 の地震 (気象庁マグニチュード 6.6)



(b) 2007/3/31 の地震 (気象庁マグニチュード 4.8)

図8 震央位置推定結果の例

5. まとめ

早期警報用地震計は微弱な P 波を利用するため、その設置環境が震央位置の推定精度に影響を与えると予想されるが、この影響の程度は明らかとなっていなかった。本研究は、地震検知点サイト特性（表層地盤特性、深部地盤特性、静穏性）と震央位置（震央距離、震央方位）推定誤差の統計的関係の分析により、早期警報用地震計による震央位置推定の精度向上を目指した地震検知点の位置選定方法を提案すると共に、検知点の位置選定効果の事例検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 震央距離推定誤差に関して、*AVS30*、地震基盤深度、ノイズレベルとの関係を分析した結果、地震検知点サイト特性と震央距離推定誤差の関係性は小さいことが確認された。
- (2) 震央方位推定誤差に関して、*AVS30*、地震基盤深度、ノイズレベルとの関係を分析した結果、*AVS30* およびノイズレベルとの関係性が大きいことが分り、地震検知点の *AVS30* が大きく、ノイズレベルが小さいほど推定誤差は小さくなる傾向を確認した。特に、*AVS30* が小さい場合は震央方位が反転しやすく、目安として *AVS30* が 500 m/s 以上の箇所では反転のケースは少なくなる。
- (3) (1) および (2) より、早期警報用地震計の位置を選

定する際は、特に震央方位の精度向上の観点から、まず *AVS30* が大きく、その上でノイズレベルの小さい地点を選定することが適切である。

- (4) 近傍の 3 箇所の検知点について実地震による検証を行い、地震検知点の位置選定効果の事例を検討した。その結果、(3) の提案が適切であることを示した。

新幹線延伸に伴い地震検知点を増設する場合などには、上記の基準により選定された位置に早期警報用地震計を設置することにより、正確な推定震央位置に基づく信頼性の高い早期地震警報が出力され、地震時の安全性を高めることができると考える。

謝 辞

本研究において、防災科研の強震観測網 (K-NET)⁶⁾ および J-SHIS⁸⁾ の情報を使用しました。一部の図の作成には、Generic Mapping Tools (GMT)⁹⁾ を使用しました。記してお礼申し上げます。

文 献

- 1) 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，pp. 1-33，1996
- 2) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，Vol. 60，No 5，pp. 387-397，2007
- 3) Odaka, T. Ashiya, K. Tsukada, S. Sato, S. Ohtake, K. and Nozaka, D.: A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 526-532, 2003.
- 4) 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 (構造・地震工学)，Vol. 72，No. 1，pp. 133-147，2016
- 5) Yamamoto, S. and Tomori, M.: Earthquake early warning system for railways and its performance, Journal of JSCE, Vol. 1, pp. 322-328, 2013.
- 6) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED K-NET, KiK-net, <https://doi.org/10.17598/nied.0004>, 2019.
- 7) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No. 523，pp. 63-70，1999
- 8) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: J-SHIS, <https://doi.org/10.1758/nied.0010>, 2019.
- 9) Wessel, P. Smith, W. H. F. Scharroo, R. Luis, J. F. and Wobbe, F.: Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, Vol. 94, pp. 409-410, 2013.