

地震計の場所選定によって 震央位置をより精度高く予測する



岩田 直泰
Naoyasu Iwata
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室長



丹羽 健友
Katsutomo Niwa
ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社
東京事業部 東京技術部
主査



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
株式会社ANET
代表取締役

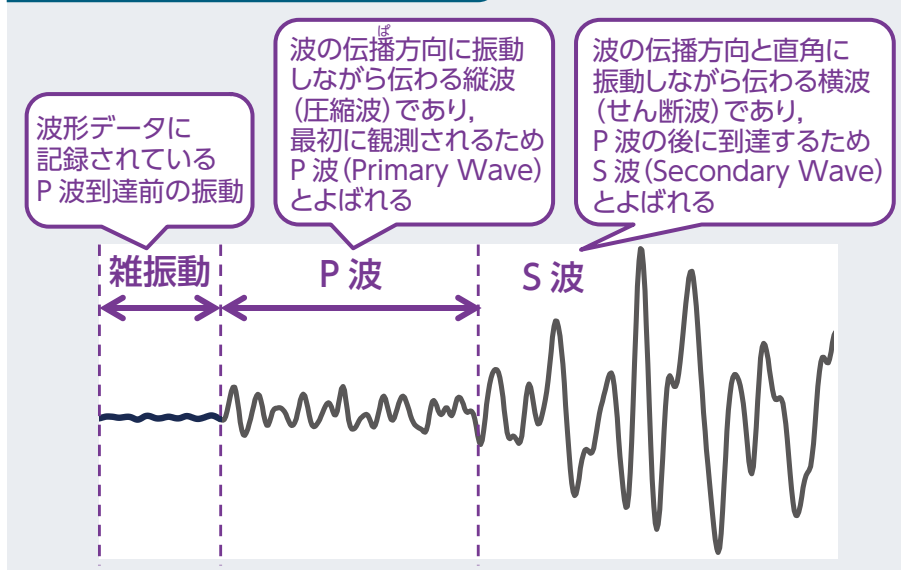
はじめに

新幹線などでは、安全が懸念される地震が生じた場合に、できる限り早く列車を停止させるための早期地震警報システム¹⁾が導入されています。このシステムで用いられる早期警報用地震計は、[図1](#)に示す、地震動の中でも伝わる速度が速いP波に着目しています。P波の到達を検知した後の数秒の情報を用いて地震の位置と規模を推定²⁾し、必要とする範囲に対して列車停止の警報を出力します。すなわち、目に見えない地中を伝わる強い揺れが鉄道沿線へ到達する前に、それを予測し、列車を素早く停止させるシステムと言えます。早期警報用地震計によ

るP波警報の出力の流れを[図2](#)に示します。

日本では現在も[新幹線の延伸工事](#)³⁾が進められており、それにともない早期警報用地震計が設置される地震検知点も増えています。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、これまでの経験に基づきできる限り地盤が固く静穏な地点を選定しています。しかし、例えば地盤の固さなどの地点特性が[震央位置推定](#)⁴⁾に与える影響は明らかにされていません。その関係がわかれば、推定精度が高まる地点を効果的に選定できます。ここでは、地震検知点の地点特性と早期地震警報において重要な推定項目である

図1 雑振動および地震動のP波とS波



新幹線の延伸工事

新幹線鉄道による全国的な鉄道網の整備を図ることを目的とした全国新幹線鉄道整備法に基づき、現在も北海道新幹線などの延伸工事が進められています。

震央位置推定

地中で発生した地震の地表の地点を震央とよびます。早期警報用地震計では、地震が発生した場所として震央位置を推定します。

震央位置の推定誤差の関係を分析し、地震検知点の位置選定の考え方を提案するとともに、その効果について述べます³⁾。

なお、早期警報用地震計は、**図3**のとおり震央距離と震央方位を推定して震央位置を求めており、ここではそれらの推定誤差を個別に取り上げます。

地震検知点の地点特性を表す情報の定義

本記事では、地震検知点の地点特性を示す情報として**図4**に示す表層地盤特性、深部地盤特性、静穏性を取り上げます。まず、表層地盤特性については、この特性を表す指標として地表から深さ30mまでのS波が伝わる速度の平均値 (AVS30) を用います。この値が小さいと地盤の浅い部分が軟らかいと考



図2 早期警報用地震計によるP波警報出力の流れ

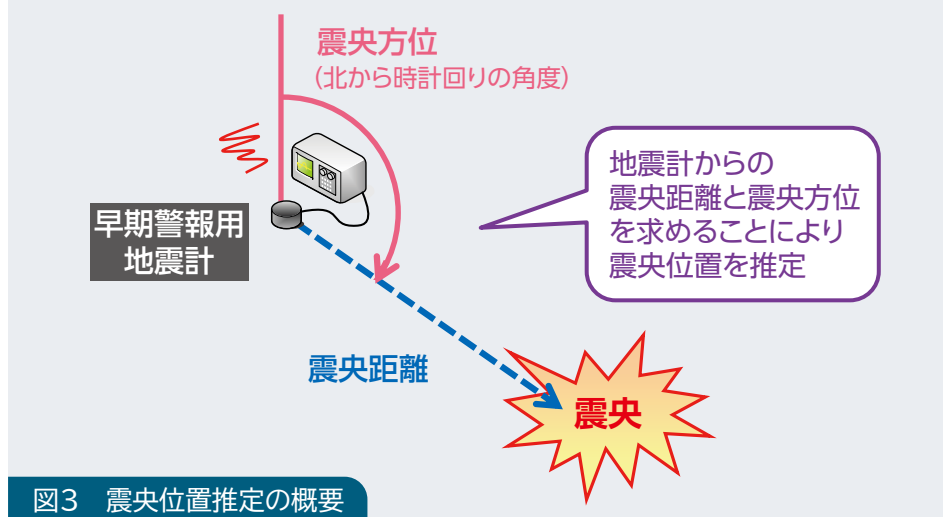
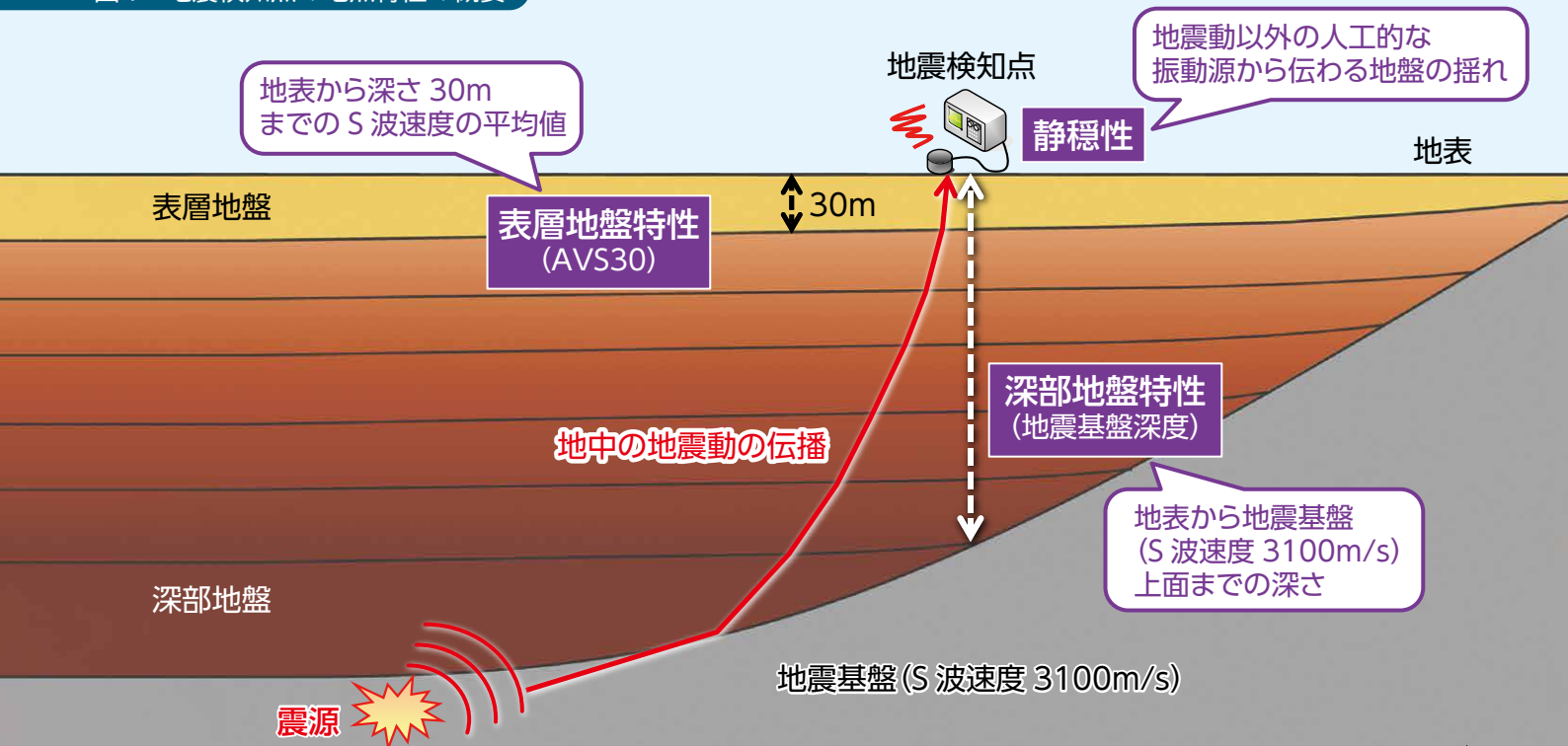


図3 震央位置推定の概要

図4 地震検知点の地点特性の概要



ることができます。次に、深部地盤特性については、国立研究開発法人防災科学技術研究所（防災科研）の地震ハザードステーション J-SHIS⁴⁾で公開されている情報から抽出した地震基盤深度（地中の非常に固い層までの深さ）を使用します。この値が大きいと地盤の深い部分まで軟らかいと判断することができます。そして、地震検知点の静穏性を評価する指標については、[図1](#)に示す地震波形記録のP波到達前の雑振動部分を用います。雑振動とは地震動以外の人工的な振動源から伝わる地盤の揺れを意味します。なお、対象とする地震検知点は、防災科研の強震観測網K-NET観測点⁵⁾です。

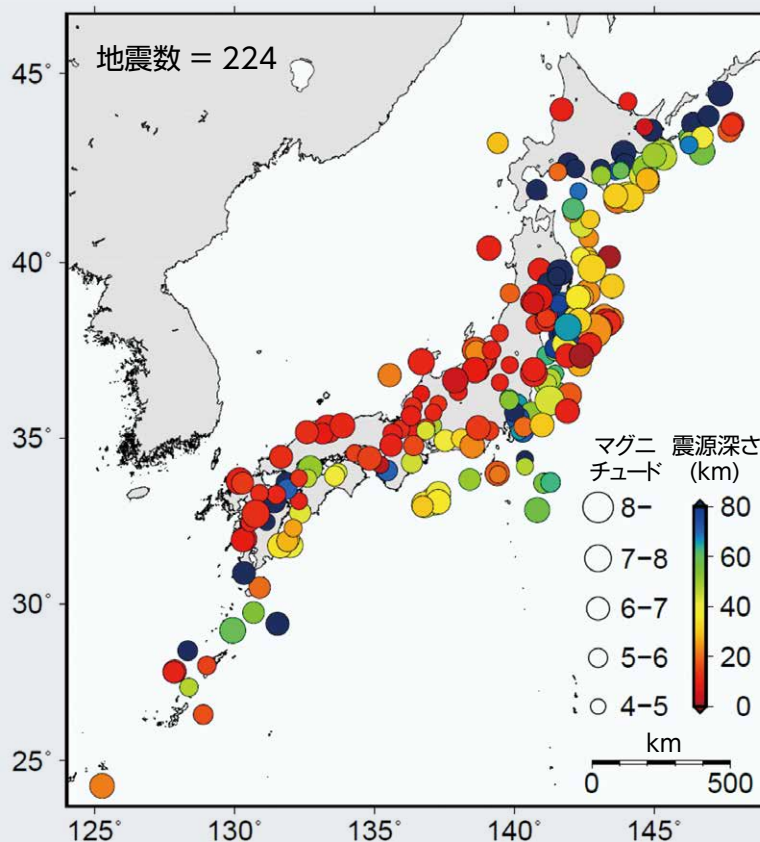


図5 対象地震の震央分布

地震検知点の地点特性と震央位置推定誤差の関係

地震検知点の地点特性と震央位置推定誤差の統計的な関係を分析するための地震動として、防災科研のK-NET観測点⁵⁾で記録された224地震を用いました。用いた地震の震央位置分布を[図5](#)に示します。ここでは、これらの地震で記録された11,193波形について検討しました。どの地点特性が影響するのかを定量的に把握できれば、地震検知点の地点選定にその情報を活かすことができます。

震央距離推定誤差

地震検知点の地点特性として定義したAVS30、地震基盤深度、静穏性と震央距離推定誤差の関係について述べます。ここで震央距離推定誤差とは推定値と正解値の対数の差であり、正解値は気象庁発表の情報から求めています。まずAVS30と震央距離推定誤差の関係について[図6](#)に示します。この図では、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◆印で示しています。データ数が多い区間における平均値の分布を見ると、震央距離推定誤差はAVS30によらず一定であり、表層地盤特性は震央距離推定精度に影響しないと考えられます。

このほかに深部地盤特性や静穏性との関係を確認しました。その結果、それらによらず震央距離推定誤差は[図6](#)と同様に一定となりました。よって、震央距離の推定誤差に対する地点特性の影響は小さいと考えられます。

震央方位推定誤差

続いて、地震検知点の地点特性と震央方位推定誤差の関係について示します。ここで、震央方位推定誤差は推定値と正解値の差としています。[図7](#)のAVS30との関係を見ると、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ます。加えて、[図7](#)によるとAVS30が大きい(500m/s以上)

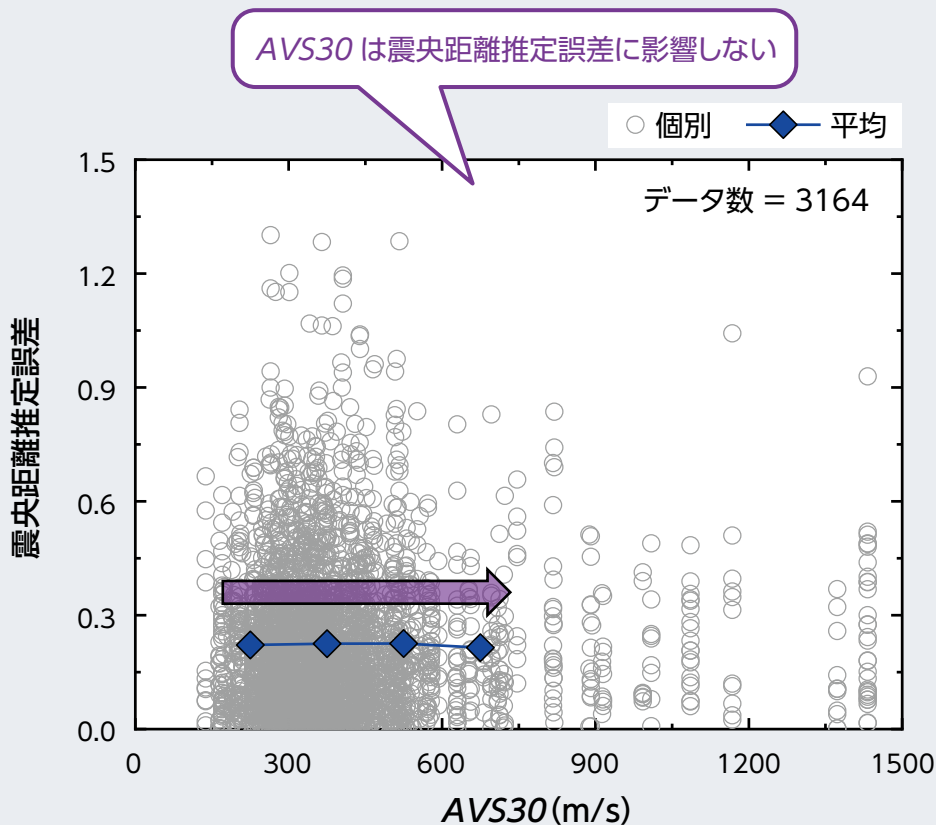


図6 AVS30と震央距離推定誤差の関係

検知点ほど、推定誤差が約180度の正反対の誤差となる結果が大幅に少なくなることが確認できます。震央方位推定が表層地盤特性の影響を受けるのは、[図4](#)に示す地中を伝播する地震波の屈折^ばの程度が表層地盤により変化するためと考えられます。すなわち、AVS30が小さく表層地盤が軟らかい地点では、伝播するP波は特に大きく屈折し、地震検知点のほぼ真下から地表に伝わることとなります。震央方位の推定は水平方向の揺れ程度から求めますが、表層地盤が軟らかい地点でのP波は水平方向の揺れの程度が小さくなり、推定精度が低下すると考えられます。

このほかに深部地盤特性や静穏性との関係も確認しました。その結果、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、そして静穏であるほど推定誤差が小さくなる傾向が確認されました。ただし、地震基盤深度や静穏性からは推定誤差が約180度となるケースを分離するのは難しいこともわかりました。

地震検知点の位置選定方法の提案

多くのデータを用いた分析結果から、地震検知点の位置選定に対して震央位置の推定精度を高めるために、まず表層地盤が固く、次に静穏な地点を選定することを提案します。表層地盤特性を優先して位置選定を行うのは、[図7](#)の赤破線の枠で示すとおり、AVS30が500m/s以上の場合、震央方位の推定誤差が約180度となるケースを排除でき、震央方位の予測精度を改善できるためです。そのうえで可能な限り静穏な位置を選定することが、震央位置をより精度高く推定することにつながると言えます。これまでも経験に基づき、定性的に地盤が固く静穏な地点を選定していましたが、本記事の検討に

地震波の屈折

一般的に、地盤は深いほど固く、浅いほど軟らかい層構造となっています。地中深くの震源から発生した地震波は、地表へ向かって伝わる際、[図4](#)のとおりより軟らかい地表の向きへ曲がる性質があります。

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ある
AVS30が大きい(500m/s以上)場合、誤差が約180度となるケースが低減する

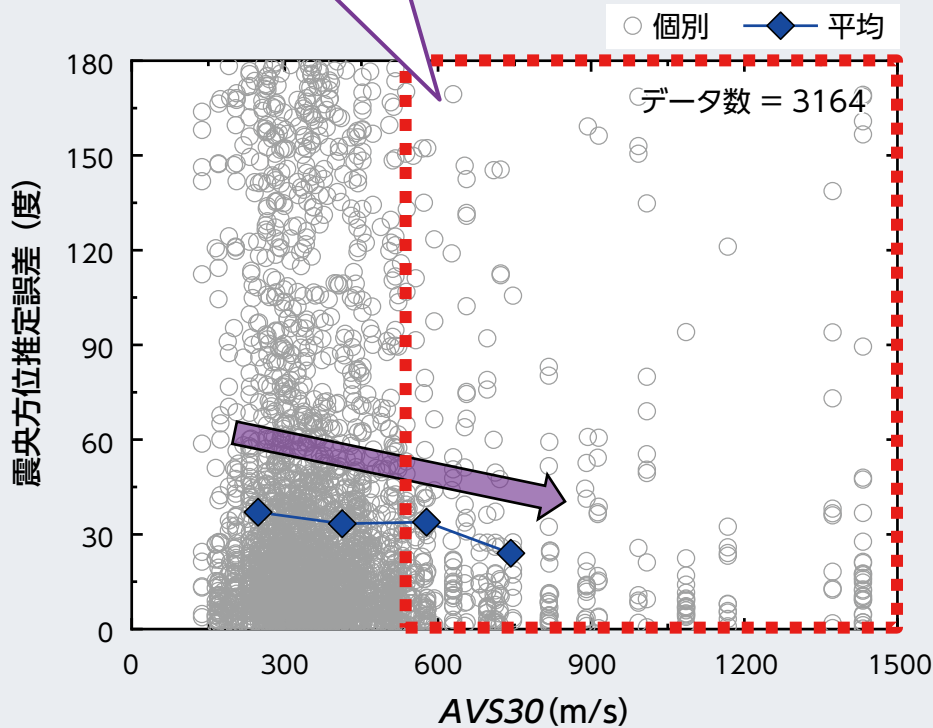


図7 AVS30と震央方位推定誤差の関係

より、その優先順位や定量的な基準が明らかとなりました。

地震検知点の位置選定効果の事例検討

最後に、提案手法の効果を確認します。ここでは、近接しているものの地点特性が異なる検知点のデータを用いて比較を行います。検知点は、それぞれ20～30km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⁵⁾を選定しました。図8に3箇所の位置とそれぞれの地点特性を記します。検討に使用する地震は、3つの観測点で共通して記録された10地震です。

提案手法によると、3地点が地震検知点の候補地となった場合にはAVS30が大きく静穏なA観測点を選定されます。その適正を確かめるために、3地点のK-NET観測点による震央位置の推定結果の一例を図8の(a)と(b)に示します。図によると検討に使用した地点のうち、A観測点の推定結果が実際の震央位置に最も近いこと

が確認できます。

ほかの8地震についてもおおむね同様の結果であり、3地点から地震検知点を選ぶ場合、提案手法に基づきA観測点の選定が適切であることが確かめられました。

おわりに

早期警報用地震計は微弱なP波を利用するため、設置箇所の地点特性が震央位置の推定精度に影響を与えると予想されます。しかし、この影響の程度は明らかになっていませんでした。ここでは、地震検知点の地点特性(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を分析しました。その結果、震央方位への影響が明らかとなり、予測精度向上の観点から、まず表層地盤が固く(AVS30が500m/s以上が望ましい)、そのうえで静穏な地点を選定することが適切であることを示しました。

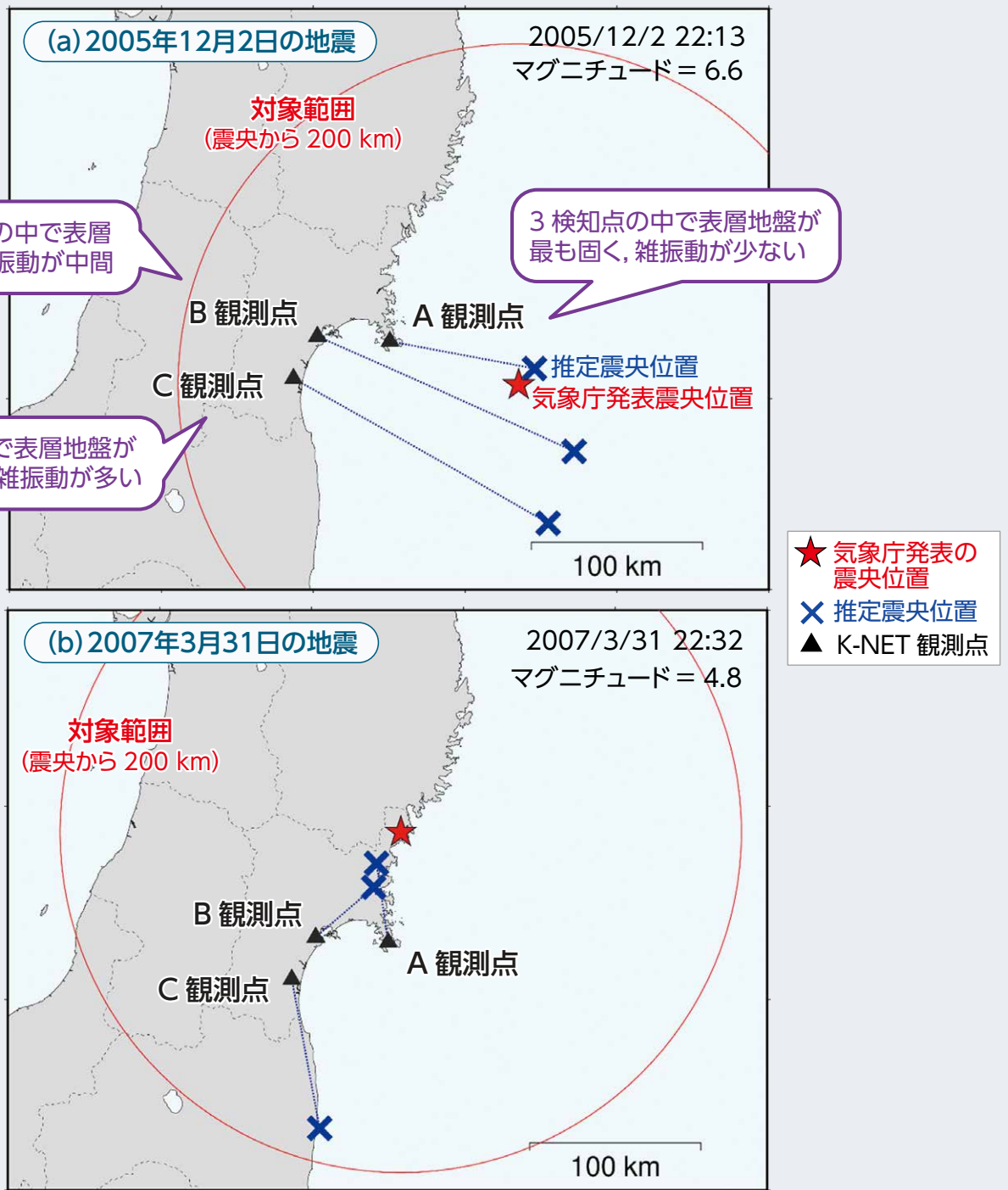


図8 震央地推定結果の例

新幹線延伸にともない地震検知点を新たに設置する場合などでは、上記の提案基準により選定された位置に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地震警報の出力が期待できます。今後も、震央位置推定手法の改良や最適な地震検知点の選定などを通じて、早期地震警報の性能を高める取り組みを進めます。 **RRR**

文献

- 1) 岩橋寛臣, 岩田直泰, 芦谷公稔, 佐藤新二: 早期地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.23-28, 2004
- 2) 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏, 野田俊太: 早期地震警報のための地震諸元推定とノイズ識別の機能向上, 鉄道総研報告, Vol.29, No.3, pp.5-10, 2015
- 3) 岩田直泰, 丹羽健友, 山本俊六: 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, 鉄道総研報告, Vol.35, No.5, pp.5-10, 2021
- 4) 防災科学技術研究所: J-SHIS, <https://doi.org/10.17598/nied.0010>, 2019
- 5) 防災科学技術研究所: NIED K-NET, KiK-net, <https://doi.org/10.17598/nied.0004>, 2019