

震源近くの列車をより早く止める



津野 靖士
Seiji Tsuno
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
主任研究員



是永 将宏
Masahiro Korenaga
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
主任研究員



森脇 美沙
Misa Moriwaki
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
研究員



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

はじめに

鉄道では、**P波とS波**が観測点に到達する時刻の差を利用して、揺れの大きなS波が到来する前に、列車を停止させるシステムを導入しています。現在の早期地震警報手法（以後、P波警報とよびます）は、P波から地震規模を推定して被害が想定される範囲に警報を出力します。このP波警報¹⁾は、1秒以上の地震データを利用するため、警報出力まで地震検知後少なくとも1秒以上の時間が必要となります。したがっ

て、P波とS波の到達する時刻差が小さい震源近くにおいては、P波の到達後1秒以内にS波が到達する場合もあり、P波警報が間に合わないといった課題があります（図1）。例えば、時速約300km/hで走行する新幹線は1秒の間に約80m進みます。仮に警報が0.5秒早く出力されれば、単純計算で約40m手前において列車を停止させることができ、走行列車の地震時安全性をより高めることができます。そのため、震源近くの列車をより早く止めることを目的に、

🔊 P波とS波

P波

波の伝搬方向に振動しながら伝わる縦波であり、物理的には粗密波・圧縮波になります。地震時に最初に観測されるためP波 (Primary Wave) とよばれます。

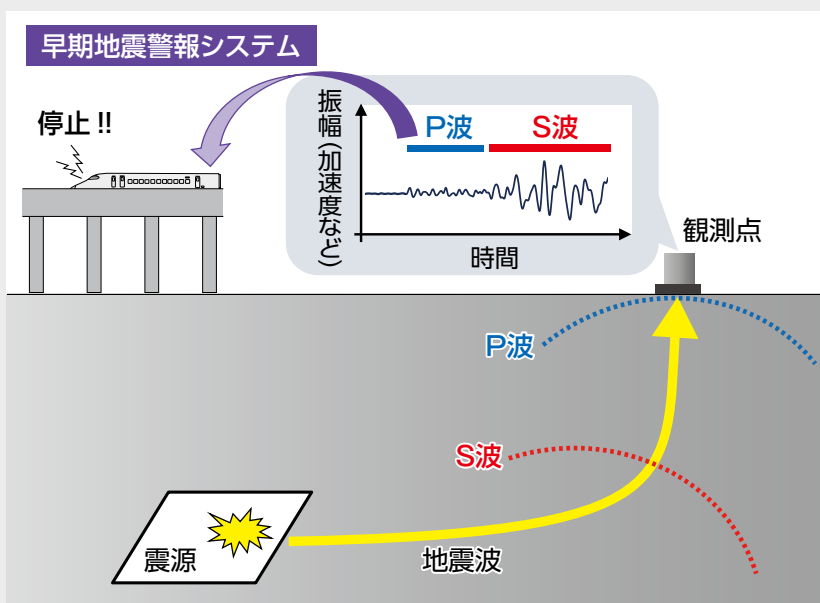
S波

波の伝搬方向と直角に振動しながら伝わる横波であり、物理的にはせん断波になります。地震時にP波の後に到達するためS波 (Secondary Wave) とよばれます。被害を発生させる地震波は、おもに後から伝わるS波であり、地震被害を軽減するためにはS波を適切に評価することが重要です。

早期地震警報システム

図に示すように、地震が発生すると、震源から放射された地震波が地面を伝わり、基本的にはP波が最初に観測点に到達し、S波がその次に到達します。

鉄道の早期地震警報システムでは、先に到達したP波を検知・分析して、揺れの大きなS波が到来する前に警報を出力するP波警報と、揺れの大きさが規定値を超過した場合に直ちに警報を出力するS波警報によって列車を停止させます。



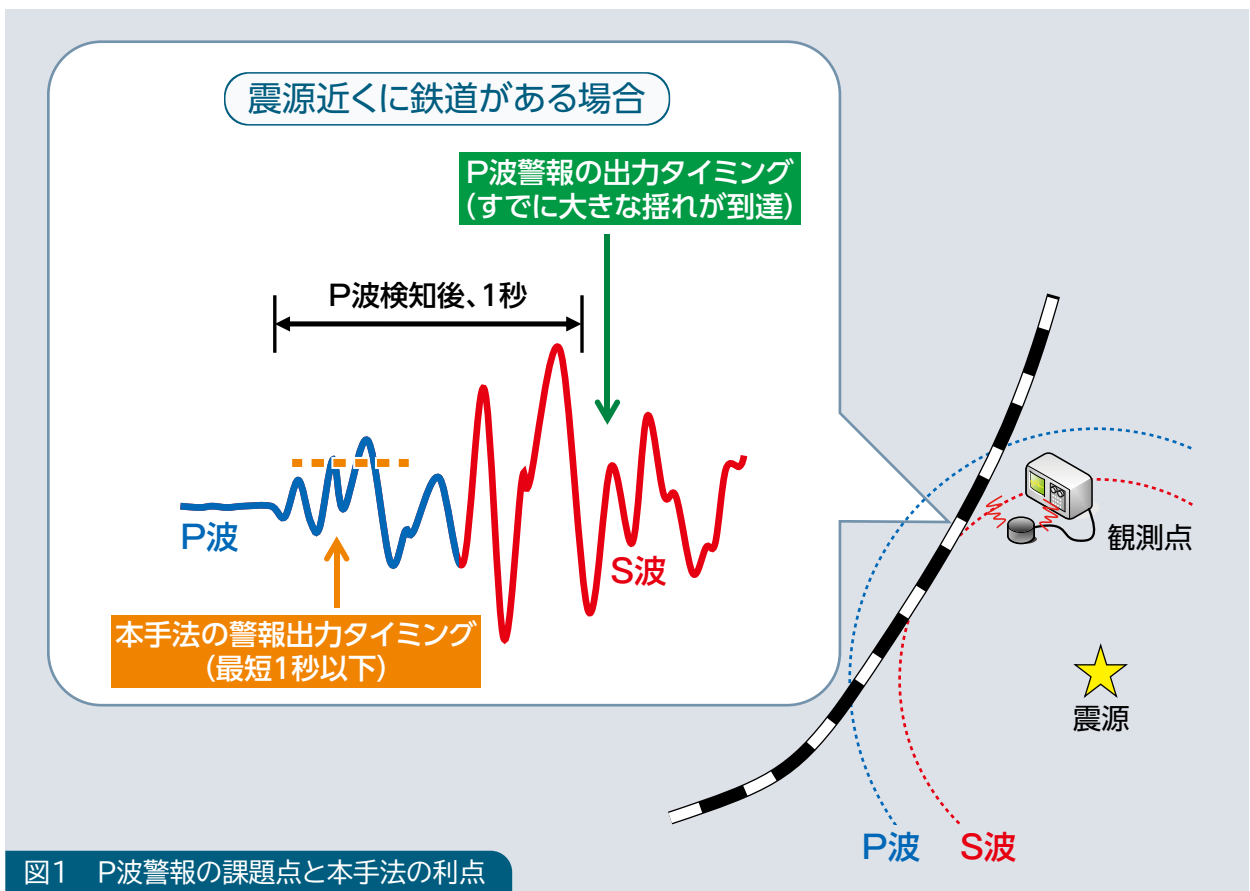


図1 P波警報の課題点と本手法の利点

現行の最短警報出力時間である1秒よりも早い警報出力が可能である手法の開発が必要とされています。

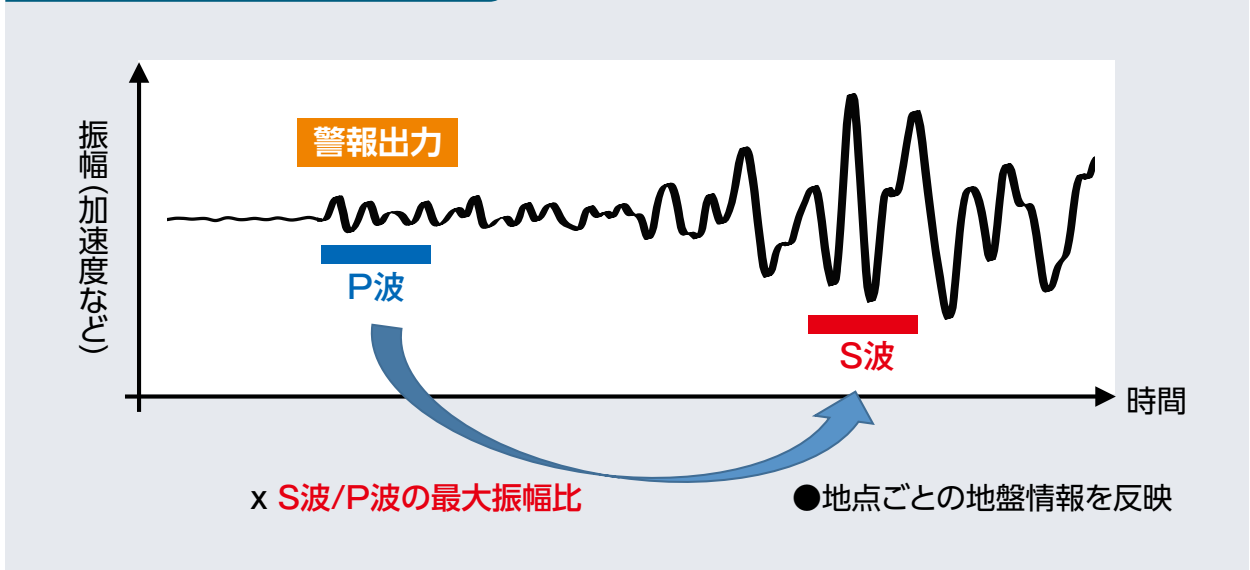
近年、鉄道総研では、P波とS波の強さの関係をを利用してP波から直接的にS波を予測し、データ長の制約を受けないといった特徴を有するP波規定値超過検出手法を開発しています²⁾。このP波規定値超過検出手法では、上記の課題

点を克服する地震検知後最短1秒以下においても警報出力できる可能性があります(図1)、その警報手法について解説させていただきます。

P波規定値超過検出手法

P波規定値超過検出手法の概念図を図2に示します。本手法の特徴は、地点ごとに固有であるP波とS波の揺れの大きさの関係(S波/P波の

図2 P波規定値超過検出手法の概念図



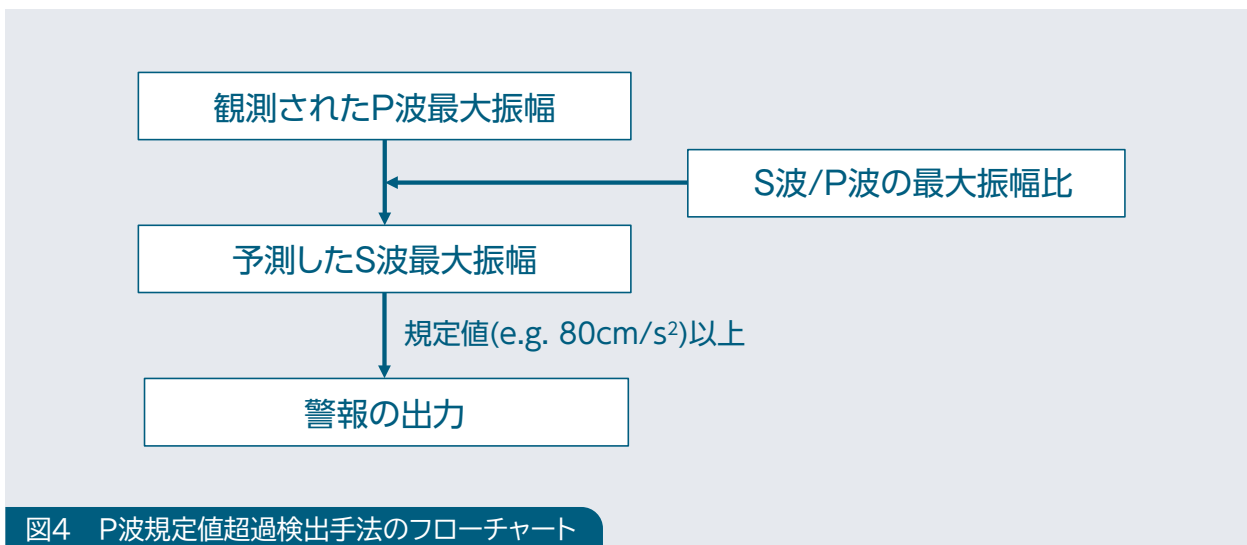


図4 P波規定値超過検出手法のフローチャート

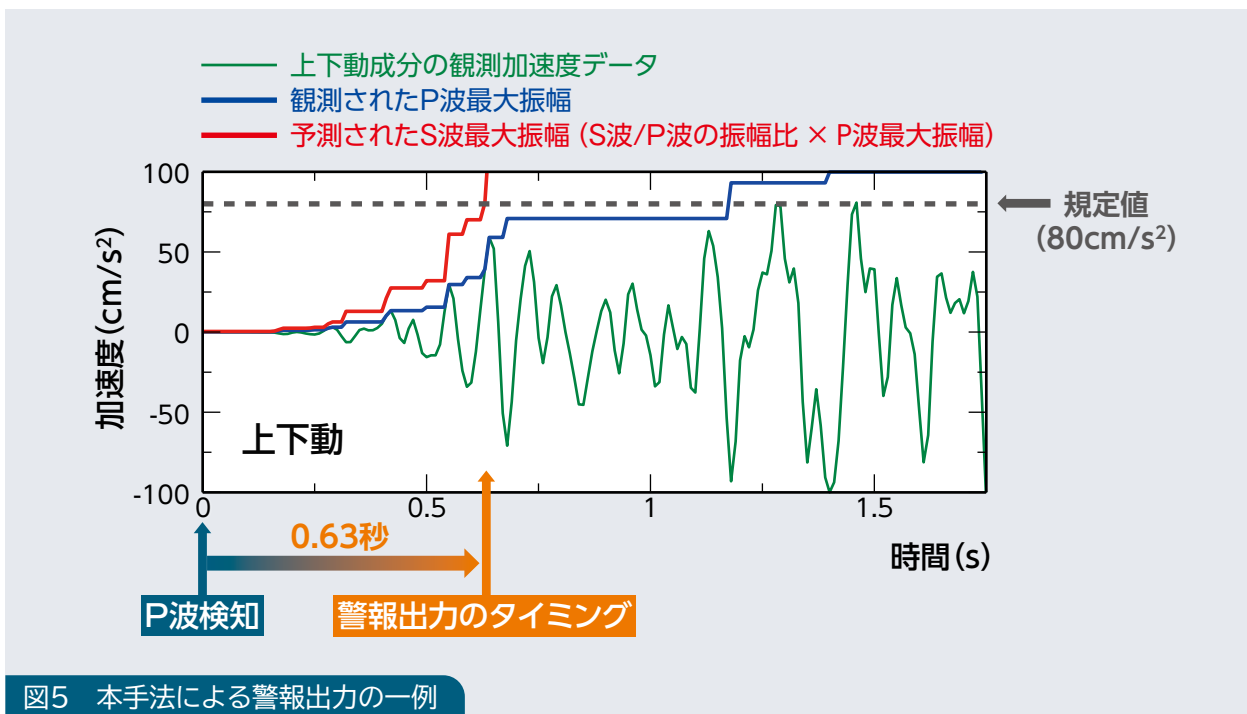
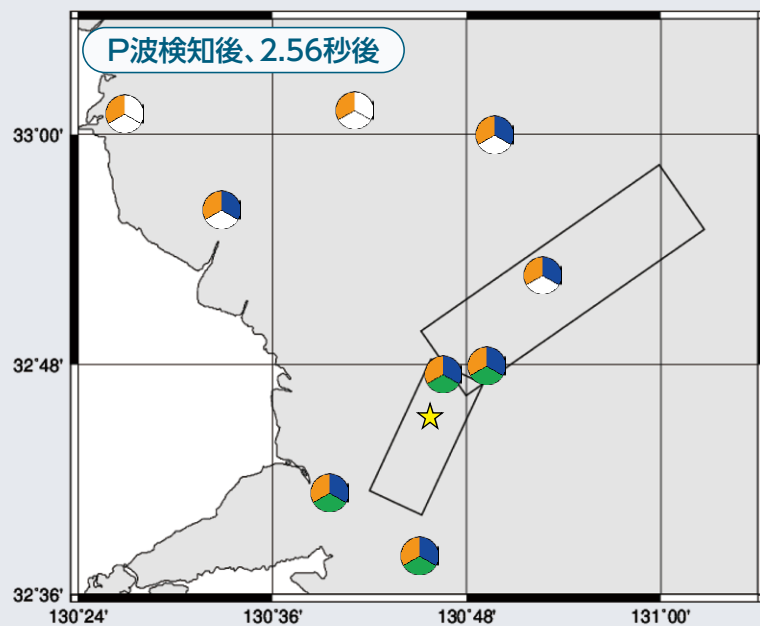
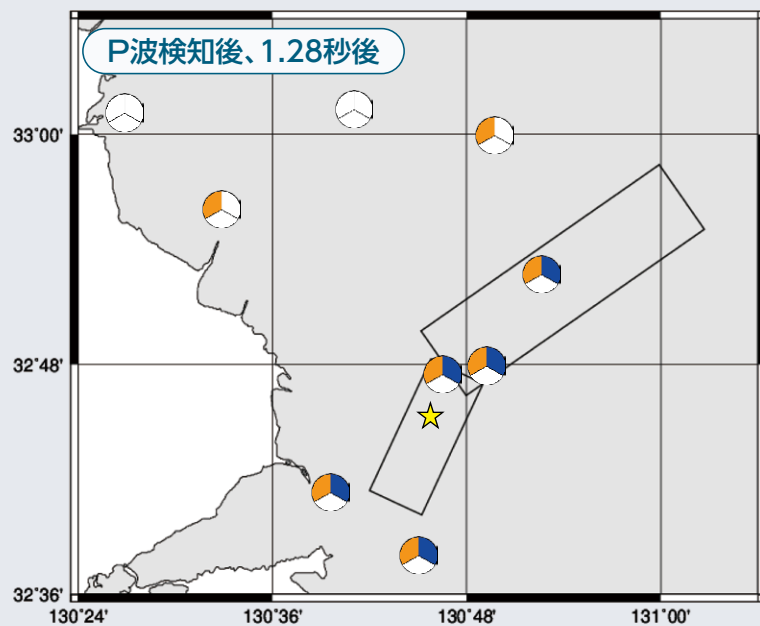
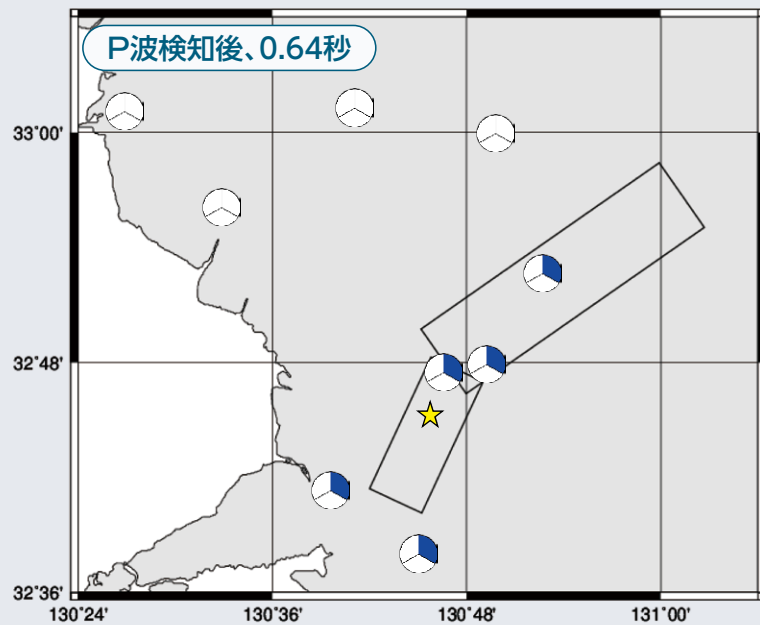


図5 本手法による警報出力の一例

警報出力に至る実例

2016年熊本地震の震源近くで収録された加速度データを利用し、P波規定値超過検出手法の警報出力に至る実例を紹介します。本手法のフローチャートを図4に示します。本手法では、観測されたP波最大振幅に、地点ごとの地盤情報を反映したS波/P波の最大振幅比を掛け合わせることで、S波最大振幅を予測します。この予測したS波最大振幅が設定した規定値を超えた場合、地震警報が出力されることになります。

図5には、KiK-net益城町 (KMMH16) で観測された2016年熊本地震のP波初動の加速度波形を示しています。益城町は、2016年熊本地震の震源近くに位置しており、重力加速度のおおよそ半分である最大加速度500cm/s²を超える強い揺れが観測された地域です。図5に示す本手法による警報出力例では、規定値を80cm/s²に設定しています。この場合、予測されたS波最大加速度振幅が80cm/s²を超えたP波検知から0.63秒のタイミングで警報が出力



されることとなります。本手法によりP波検知後の1秒以下である0.63秒後に地震警報が出力されています。この実例から、震源近くの地点において、本手法が高い即時性を有していることがわかります。

直下型地震への適用

本手法の直下型地震への適用性について示します。2016年熊本地震の本震データを用いて、本手法の即時性についてP波警報およびS波警報と比較しました。図6は、2016年熊本地震を例にP波を検知してから0.64秒、1.28秒、2.56秒後の本手法およびP波警報手法、S波警報手法による警報出力状況を示しています。

P波検知後0.64秒後においては、3つの手法のうち、本手法のみが震源近くにおいて地震警報を出力していることがわかります。その後、P波検知後1.28秒においては、本手法とP波警報が警報を出力し、震源からやや遠方の地震観測点ではP波警報のみが警報を出力していることがわかります。さらに、P波検知後2.56秒においては、震源近くにおいてすべての警報手法が警報を出力し、震源からさらに遠方の地震観測点ではP波警報のみが警報を出力していることがわかります。つまり、この2016年熊本地震の例においては、震源断層内では本手法がもっとも早く警報を出力し、P波警報やS波警報

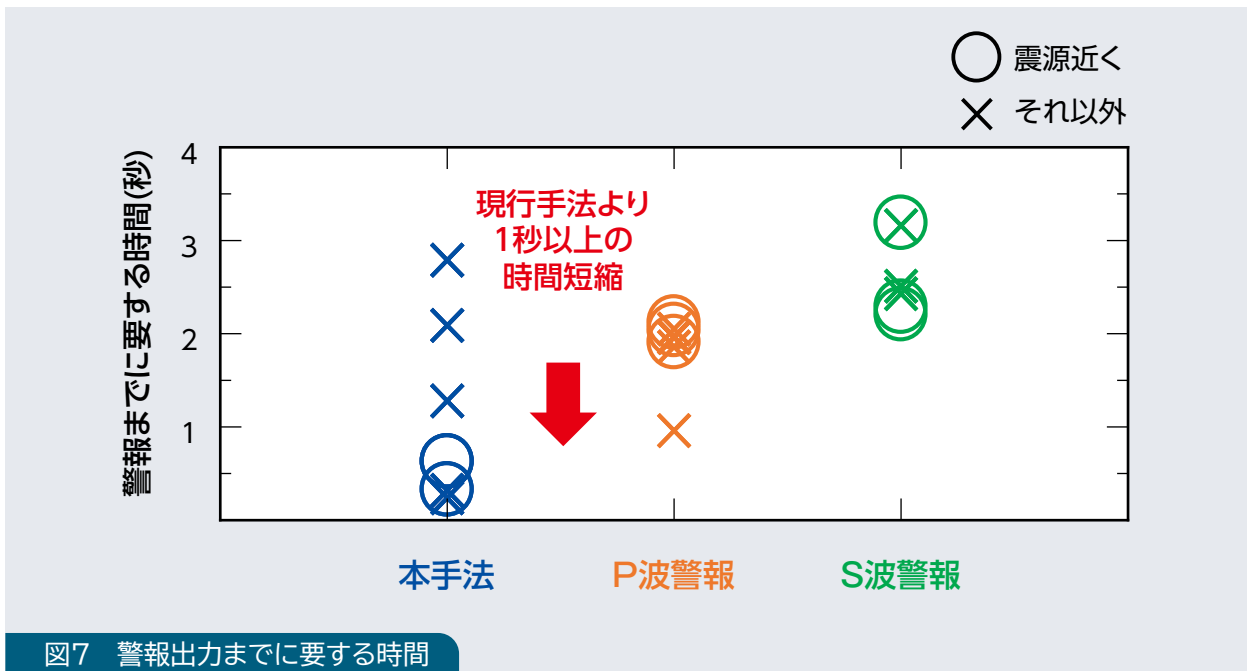


図7 警報出力までに要する時間

報の他警報手法と併用することで、対象とした地域に補完的に警報を出力しています。図7は、震源近くの観測点において各警報手法による警報出力までに要する時間を示していますが、本手法はP波検知後1秒以内で警報を出力することができます。2016年熊本地震に適用した事例において、現行手法であるP波警報およびS波警報よりも1秒以上の時間短縮を可能としています。

まとめ

震源近くに対して地震警報の即時性能を向上させることを目的に、P波検知後最短1秒以下で警報出力できるP波規定値超過検出手法を開発しました。本手法の特徴として、地点ごとに固有であるP波とS波の揺れの大きさの関係(S

波/P波の振幅比) を利用していることがあげられます。地点ごとの地盤情報を反映したS波/P波の振幅比は観測点により数倍以上の変動があることから、地点ごとにその特性を把握することが重要です。内陸直下型地震である2016年熊本地震の実データに本手法を適用し、震源近くに対して現行手法であるP波警報およびS波警報よりも1秒以上の時間短縮に成功していることを示しました。本手法を鉄道の早期地震警報システムへ導入することで、震源近くの列車をより早く止めることができると考えています。

RRR

文献

- 1) 山本俊六, 野田俊太, 是永将宏: P波初動部の立ち上がり特性に着目した震央距離推定手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, pp.5-10, 2012
- 2) 津野靖士, 宮腰寛之: S波/P波の振幅比を利用したP波規定値超過検出手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.5, pp.11-16, 2021
- 3) 防災科学技術研究所: 防災科研 K-NET, KiK-net, DOI: <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>, 2019