

新幹線における海底地震計を利用した早期地震検知とその効果

鈴木 博人¹・宮腰 寛之²・山本 俊六³・是永 将宏³・鈴木 亘⁴・青井 真⁴

Earthquake Early Warning for Shinkansen Utilizing Ocean Bottom Seismometer and its effect

Hiroto SUZUKI¹, Hiroyuki MIYAKOSHI², Shunroku YAMAMOTO³, Masahiro KORENAGA³, Wataru SUZUKI⁴ and Shin AOI⁴

Abstract

It is important for high-speed trains to early slow down and stop in the event of an earthquake. Shinkansen system is equipped with an earthquake early warning (EEW) system that transmits warnings based on seismometer observations. In recent years, an ocean bottom seismometer (OBS) observation network has been installed offshore in the Pacific Ocean. Subduction-zone earthquakes, such as the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, may be detected earlier if OBS can be utilized for the EEW system. Therefore, we developed a method to utilize OBS for the EEW system, in which we proposed a method of setting an OBS threshold value and a method of preventing false warnings. Furthermore, we evaluated its intended effects. The East Japan Railway Company started utilizing OBS in the Boso offshore area in November 2017, and in the offshore area between Ibaraki and Kushiro in January 2019.

キーワード：早期地震検知, 海底地震計, 新幹線, 距離減衰, 増幅

Key words: earthquake early warning, ocean bottom seismometer, Shinkansen, distance attenuation, amplification

¹ 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター
East Japan Railway Company, Research and Development Center

² 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター
防災研究所 (現在: 東日本旅客鉄道株式会社 千葉支社
千葉土木技術センター)
East Japan Railway Company, Disaster Prevention
Research Laboratory, Research and Development Center
(Current: Chiba Branch Office, Chiba Civil Engineering
Center)

³ 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
Railway Technical Research Institute, Center for Railway
Earthquake Engineering Research

⁴ 国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波火山
ネットワークセンター
National Research Institute for Earth Science and Disaster
Resilience, Network Center for Earthquake, Tsunami and
Volcano

1. はじめに

地震の多い日本の鉄道にとって、地震対策は重要な自然災害対策の一つである。鉄道では地震対策として、耐震設計や耐震補強などのハード対策と、列車運転規制や早期地震検知などのソフト対策を行ってきた。列車運転規制¹⁾は、線路沿線に設置された地震計の観測値に基づいて運転中止や速度規制を実施するものである。早期地震検知²⁾は、線路沿線や線路から離れたより震源に近い地点に設置された地震計で観測される地震情報を利用して、線路に主要動が到達する前に列車を減速・停止させるものである。

高速で走行する新幹線では、地震の発生を早期に検知して、列車を減速・停止させる早期地震検知は極めて重要である。東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本とする）の東北、上越、北陸新幹線には、早期地震検知に用いる地震計として、線路沿線に設置された沿線地震計、沿線から離れた内陸部に設置された内陸地震計、および海岸部に設置された海岸地震計がある³⁾。この中で海岸地震計は、2011年の東北地方太平洋沖地震のような海域で発生する地震をより早く検知するために海岸部に設置された地震計である。一方で、国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、NIEDとする）では、関東から北海道にかけての太平洋沖で発生する地震を広域かつ多点でリアルタイムで観測するために日本海溝海底地震津波観測網（以下、S-netとする）を整備した^{4,5)}。S-netの

海底地震計を新幹線における早期地震検知に利用することができれば、太平洋沖で発生する地震を海岸地震計よりも震源の近くで検知することができ、より早く列車を減速・停止できると期待される。

そこで、S-netの海底地震計を新幹線における早期地震検知に利用するために、海底地震計での地震の検知方法、列車を緊急停止させる警報を出力する制御基準値、警報の誤警報防止、および列車を緊急停止させる区間である制御区間の検討を行った。その上で、早期地震検知に海底地震計を利用した場合の効果を検証した。

2. 早期地震検知システムの概要

新幹線早期地震検知システム³⁾は、図1のように地震発生時に線路沿線や線路から離れた地点における地震計で観測される地震情報に基づいて、線路に主要動が到達する前に列車を減速・停止させるシステムである。このシステムの地震計には、線路沿線に設置された沿線地震計、沿線から離れた内陸部に設置された内陸地震計、および海岸部に設置された海岸地震計がある。沿線地震計は、線路沿線の変電所に設置され、運転中止や速度規制といった地震時の列車運転規制に用いられるとともに、早期地震検知にも利用されている。内陸地震計は2004年の新潟県中越地震のような直下型地震をより早く検知するために内陸部に、海岸地震計は2011年の東北地方太平洋沖地震のような海

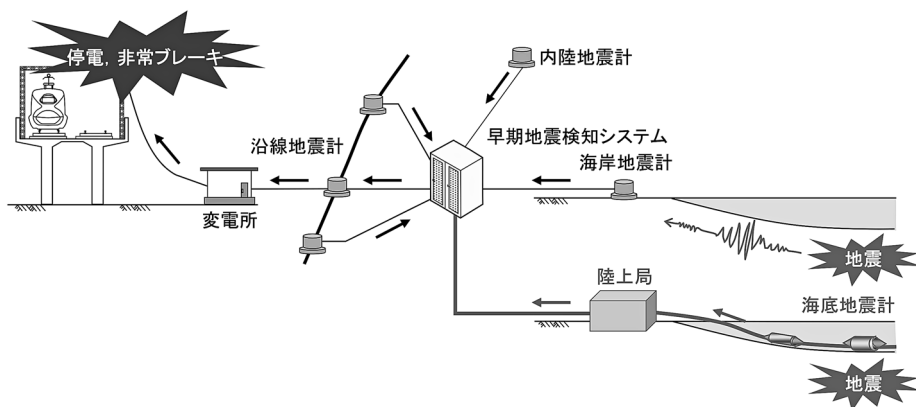


図1 新幹線早期地震検知システムの概要と S-net の海底地震計の接続方法

域で発生する地震をより早く検知するために海岸部に設置された地震計で、早期地震検知に利用されている。なお、JR 東日本の東北、上越、北陸新幹線では、図 2 のように沿線地震計が 85 地点、内陸地震計が 30 地点、海岸地震計が 20 地点に設置されている³⁾。早期地震検知では、これらの地震計で予め定めた基準以上の地震情報が得られると警報が出力されて、変電所からの送電が停止される。送電が停止すると、新幹線車両が停電を検知して緊急ブレーキが動作することで新幹線が緊急停止する。なお、緊急停止後において、沿線地震計の観測値が運転中止基準値を超過した場合は運転中止、その値が運転中止基準値未満かつ速度規制基準値以上の場合は速度規制が実施される。また、沿線地震計の観測値が速度規制基準値未満の場合は、通常運転で運転が再開される。

JR 東日本の地震計では、加速度と SI 値⁶⁾ (Spectral Intensity) が出力される。なお、加速度は鉄道構造物の被害との相関を良くするために、通過帯域 0.05~5 Hz のバンドパスフィルタを適用した加速度⁷⁾ (以下、JR 加速度とする) が出力

される。JR 加速度は早期地震検知システムに利用され、SI 値は列車運転規制に利用される。

早期地震検知には、P 波検知と S 波検知の 2 つの機能がある。P 波検知²⁾では、地震計で観測された P 波初動データからマグニチュードと震央位置 (震央距離と方位) といった地震諸元が推定され、その情報を基に鉄道構造物に被害をおよぼす恐れのある範囲に警報が出力される。警報が出力される範囲は JR 加速度 80 gal 以上の強震動が発生すると推定される範囲に概ね相当し⁸⁾、この範囲に含まれる線路区間に対して変電所からの送電が停止され、新幹線が緊急停止する。この線路区間を制御区間と呼び、P 波検知では制御区間が地震のマグニチュードと震央位置によって変化する。S 波検知²⁾は、地震計で観測された JR 加速度が予め定めた制御基準値を超過したときに警報が出力される。S 波検知による警報範囲は、地震計ごとに定められており、制御区間は固定である。一般的に、P 波検知は、S 波検知よりも警報を早く出力できることが期待される。

3. 日本海溝海底地震津波観測網の概要

NIED では、千葉県から北海道にかけての太平洋沖に地震計と津波計からなる S-net を整備した^{4,5)}。この観測網では、150 地点の地震計と津波計を全長約 5,500 km の光海底ケーブルで結び、リアルタイムの観測が行われている。観測網は、図 2 のように日本海溝の内側に房総沖 (S1)、茨城・福島沖 (S2)、宮城・岩手沖 (S3)、三陸沖北部 (S4)、釧路・青森沖 (S5)、外側に海溝軸外側 (アウターライズ、S6) の 6 つのサブシステムで構成されている。海底地震計のケーブル上での設置間隔は、海溝軸内側では 30 km、外側では 60 km 間隔であり、観測網としては海溝軸直交方向に 30 km 間隔、平行方向に 60 km 間隔のメッシュ状になるべく配置されている。

4. 海底地震計を用いた早期地震検知

S-net の海底地震計は、新幹線における早期地震検知では、2011 年の東北地方太平洋沖地震のようなプレート境界で発生する大地震をより早期に

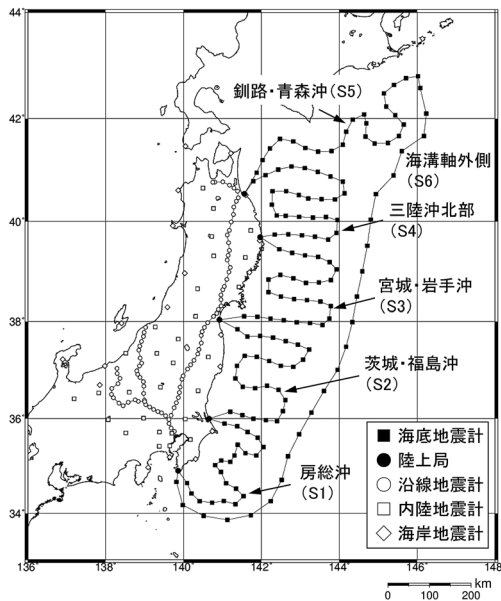


図 2 JR 東日本の沿線地震計、内陸地震計、および海岸地震計と、NIED による海底地震計と陸上局の設置位置

検知することを主目的に利用する。そこで、このような利用を念頭に、海底地震計での地震の検知方法、列車を緊急停止させる警報を出力する制御基準値、警報の誤警報防止、および列車を緊急停止させる区間である制御区間の検討を行った。

4.1 地震の検知方法の選択

海底地震計による早期地震検知に用いる地震の検知方法は、以下に記載する宮腰ら⁹⁾による検討に基づいてS波検知とした。鉄道における早期地震検知の方法には、前述のようにP波検知とS波検知がある。このうち、P波検知は地震波の初動の微弱な震動を利用することから、より早く警報を出力できる一方で、事前に海底地震計が記録するノイズの特性やP波の初動部分の特性を把握する必要がある。したがって、海底地震計のデータを蓄積して、これらの特性について検証を重ねた上でP波検知の実現性を検討することが望ましいとした。一方で、S波検知は強震動を対象にするため、ノイズが警報に影響をおよぼす可能性が比較的低いと考えられる。また、S-netのような密な観測網では、海底地震計の近傍で発生した大地震を検知することが主な目的であるため、P波とS波の走時差は陸上に比べて小さく、陸上の地震計ほどP波検知の優位性は高くない。そのため、海底地震計の観測データが少ない現段階では、海底地震計による地震の検知方法はS波検知が望ましいとした。これから、海底地震計による早期地震検知には、S波検知を用いることにした。なお、海底地震計でのJR加速度は、海底地震計で観測された加速度を漸化式フィルタでリアルタイムでオフセットを除去した上で、通過帯域0.05～5Hzのバンドパスフィルタを適用した3成分を合成することで求めている。

S-netの海底地震計のようなインライン式の海底地震計では、強震動によって地震計の姿勢角が変化する傾動や、強震動によって地震計の筐体が振動するように僅かに回転する揺動が発生する可能性があることが知られている¹⁰⁾。観測される加速度波形に、前者はオフセットとして、後者はノイズとして現れる。前者が発生したときに前述のオ

フセットフィルタが追従しきれていない場合や後者が発生した場合には、海底地震計で観測される地震動のJR加速度は一般的に実際よりも過大になると考えられる。これによって、検知される地震が増加する可能性がある一方で、安全性が損なわれることは少ないと考えられる。そこで、海底地震計の傾動や揺動が海底地震計で観測されるJR加速度に与える影響は考慮しないことにした。

4.2 制御基準値の設定

S-netの海底地震計は、新幹線沿線から離れた海底に設置されている。地震動は伝播距離に応じて減衰することから、震源に近い海底地震計で観測される地震動は線路沿線に比べて大きくなる。また、東北地方の太平洋沖の海底には軟弱な地盤が堆積していることが知られており¹¹⁾、海底地震計で観測される地震動は海底の軟弱地盤により増幅される^{12,13)}。そこで、図3に示すように海底地震計によるS波検知の制御基準値は、伝播による地震動の減衰と海底の軟弱地盤による地震動の増幅を考慮して設定することにし、地震動の減衰を考慮した基準値と海底地盤による地震動の増幅倍率の乗算値とすることにした。前述のように早期地震検知のP波検知では、JR加速度が80gal以上と推定される範囲に警報が出力される。これから、海底地震計によるS波検知の制御基準値は、線路沿線でJR加速度80galに相当する海底地震計の設置位置におけるJR加速度とすることにした。

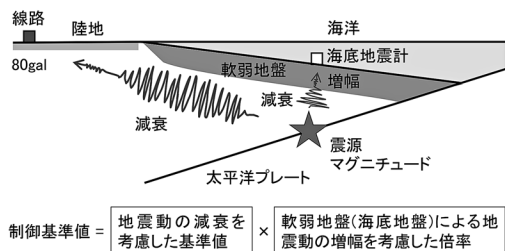


図3 海底地震計によるS波検知の制御基準値の考え方

(1) 地震動の減衰を考慮した基準値

伝播による地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値の設定方法について検討した。この基準値は、図3に示すように、線路沿線のJR加速度が80 gal の場合の震源における地震のマグニチュードを地震動の距離減衰式を用いて推定し、そのときの海底地震計の設置位置におけるJR加速度を推定することで設定した。ここで、新幹線における早期地震検知において、海底地震計で検知すべき地震は、2011年の東北地方太平洋沖地震のようなプレート境界で発生する大地震としたことから、震源は図3および図4に示すように日本海溝から沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートの境界（以下、プレート上面とする）に位置すると仮定する。

地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値は、東北新幹線の線路から10 km 離れるごとに設定することにし、10 km ごときの基準値を一般化した。以下では、10 km ごとに設定した海底地震計の仮想位置における基準値を算出する。ここで、震源はプレート上面に位置すると仮定したことから、震源の深さは陸地に近づくにしたがって深くなる。そこで、初めに新幹線の線路からの距離に応じた震源の深さ、つまりプレート上面の深さをモデル化した。次に、海底地震計の受持ち範囲を定めた上で、線路沿線のJR加速度が80 gal の場合に、海底地震計の設置位置におけるJR加速度を推定した。そして、この推定されたJR加速度

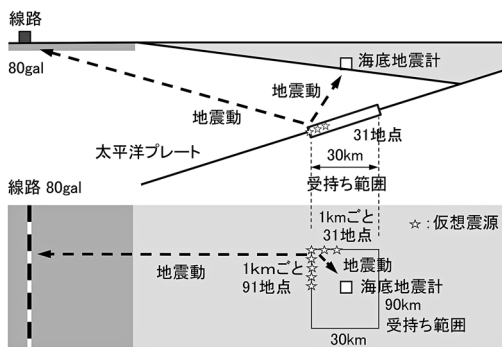


図4 地震動の距離減衰を考慮した海底地震計の制御基準値の設定方法の概要。上段は断面図、下段は平面図

を基に、地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値を設定した。

初めに、太平洋沖における東北新幹線の線路からの距離とプレート上面の深さの関係をモデル化した。海底地震計の位置におけるプレート上面の深さは、この深さに関する研究事例¹⁴⁻¹⁶⁾を基に作成された太平洋プレートの形状の数値データ¹⁷⁾を利用した。図5には、海底地震計から東北新幹線の線路までの最短距離、つまり線路と直交する両者間の距離と海底地震計の位置におけるプレート上面の深さの関係を示す。この図によると、これらの関係は、房総沖サブシステム (S1) 南部、房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4)、および釧路・青森沖サブシステム (S5) の3つに区分される。図中には、最小二乗法により求めたこれらの関係の一次回帰直線を示した。一次回帰直線の傾きから、線路に直交する方向でのプレート上面の傾斜角は、房総沖サブシステム (S1) 南部が約30度、房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4) が約10度、釧路・青森沖サブシステム (S5) が約5度である。

次に、線路沿線のJR加速度が80 gal の場合に、

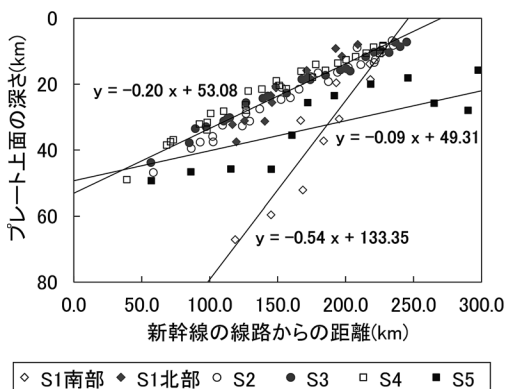


図5 Snetの海底地震計の東北新幹線の線路からの距離とその位置におけるプレート上面の深さとの関係。房総沖サブシステム (S1)、茨城・福島沖サブシステム (S2)、宮城・岩手沖サブシステム (S3)、三陸沖北部サブシステム (S4)、釧路・青森沖サブシステム (S5) の場合。図中の直線は最小二乗法により求めた一次回帰直線。

海底地震計の設置位置における JR 加速度を推定するにあたって、海底地震計の受持ち範囲を設定する。海底地震計の受持ち範囲とは、その範囲内で地震が発生したときに、当該の海底地震計が最も早く警報を出力することを期待する範囲である。したがって、この受持ち範囲は厳密には海底地震計の設置位置を母点としてボロノイ分割された範囲となる。ただし、海底地震計の受持ち範囲をボロノイ分割した範囲とすると、海底地震計ごとに受持ち範囲の大きさが異なることになり、その扱いが煩雑になる。これに加えて、S-net の海底地震計が概ね等間隔で配置されていること、海底地震計の受持ち範囲は海域全体を隙間なく埋める必要がある一方で、範囲が重複することは許容できることから、この範囲は同じ大きさの長方形で統一することにした。なお、この範囲以外で発生した地震であっても、海底地震計の制御基準値を超過した場合には警報が出力される。

海底地震計の受持ち範囲とする長方形をモデル化するにあたって、実際の海底地震計の配置について調べた。海底地震計は、日本海溝の海溝軸内側では海溝軸直交方向に30 km 間隔、平行方向に60 km 間隔のメッシュ状になるべく配置されている^{4,5)}。このように配置された海底地震計に対して、海底地震計の受持ち範囲として、海底地震計とその海底地震計から東北新幹線の線路の最も近い地点を結ぶ直線に直交する長方形を設定した。このような長方形で海域全体を隙間なく埋めるためには、図6に示した房総沖サブシステム(S1)の例のように、海底地震計とその海底地震計から線路の最も近い地点を結ぶ直線と直交方向に海底地震計を中心に90 km、平行方向に30 kmが必要であった。そこで、海底地震計の受持ち範囲は、海底地震計の位置を中心にした平面的に90×30 kmの長方形とすることにした。したがって、地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値の一般化にあたって、海底地震計の受持ち範囲は、図4の下図に示すように、線路と平行方向に90 km、直交方向に30 kmの長方形を設定することにした。

海底地震計の受持ち範囲の断面は、地震動の減

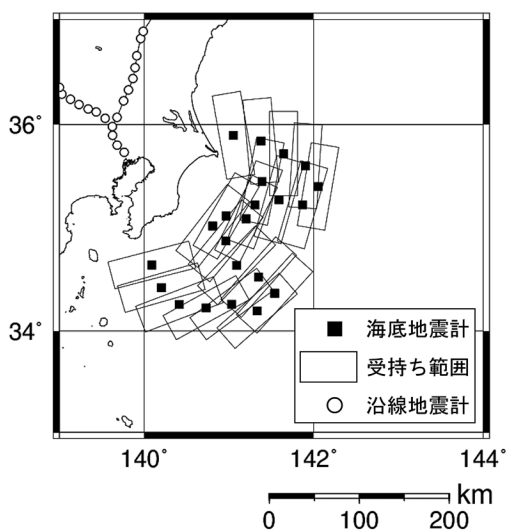


図6 S-netの房総沖サブシステム(S1)における海底地震計の配置(計画時)とその受持ち範囲。

衰を考慮した海底地震計の基準値の一般化にあたって、図4の上図に示すようにプレート上面に平行とした。新幹線の線路から10 km 離れるごとに設定する海底地震計の仮想位置におけるこの深さは、図5に示した新幹線の線路からの距離とプレート上面の深さの関係式から求まる深さとした。また、プレート上面の傾斜角は、前述の3つの区分ごとの値とした。したがって、海底地震計の受持ち範囲は、平面が図4の下図に示すような長方形で、断面が上図に示すようにプレート上面に平行な範囲となる。

海底地震計の受持ち範囲は、東北新幹線の線路から10 km 離れるごとに設定する海底地震計の仮想位置に、海底地震計の位置を中心にした平面的に90×30 kmの長方形をプレート上面に投影した範囲として設定する。そして、この範囲に図4に示すように、水平距離で1 km 刻みで仮想震源を設定する。仮想震源は、海底地震計の仮想位置ごとに、31×91地点の2,821地点を設定する。そして、各々の仮想震源の位置に対して、線路沿線におけるJR加速度が80 galとなる地震のマグニチュードを算出する。この算出にあたっては、式(1)に示す是永ら¹⁸⁾によるJR加速度の最大値

(PGA/JR) に対する距離減衰式を用いた。

$$\log(PGA/JR) = 0.54624M + 0.0058D - 0.00332X + 0.00176 - \log(X + 0.00492 \times 10^{0.5M}) \quad (1)$$

ここで、 M は地震のマグニチュード、 D は震源の深さ (km)、 X は断層最短距離 (km) である。なお、この算出にあたっては、断層の長さと同マグニチュードとの相似則¹⁹⁾による断層面がプレート上面に広がるものとして、断層面から線路までの最短距離を震源距離とした。この算出されたマグニチュードを用いて、海底地震計の仮想位置における JR 加速度を是永ら¹⁸⁾を用いて算出する。そして、海底地震計の仮想位置ごとに、2,821地点の仮想震源の中で、JR 加速度が最小値となる場合を抽出する。

このようにして、線路から 10 km 離れるごとに設定した海底地震計の仮想位置において、海底地震計の受持ち範囲内に設定した仮想震源の中で、線路沿線における JR 加速度を 80 gal としたときに、海底地震計における JR 加速度が最小値となる場合が抽出される。この抽出された値を、線路から 10 km ごとの地点における距離減衰を考慮した海底地震計の基準値とする。図 7 には、房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4) の場合を例に、線路から 10 km ごとの地点における地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値を示す。

なお、海底地震計で観測される地震動は、震央位置が同じ場合に、一般的にプレート上面で発生する地震に比べて、これより上部で発生する地震で大きく、下部で発生する地震で小さくなる。よって、プレート上面より上部で発生する地震は、プレート上面で発生する地震に比べて、海底地震計で検知されやすいと考えられる。一方で、これより下部で発生する地震は検知されにくいと考えられる。ただし、震源が陸地から遠い場合には、震源から海底地震計までの距離に対する震源から新幹線の線路までの距離の比が小さいことから、海底地震計で観測される地震動の差は相対的に小さ

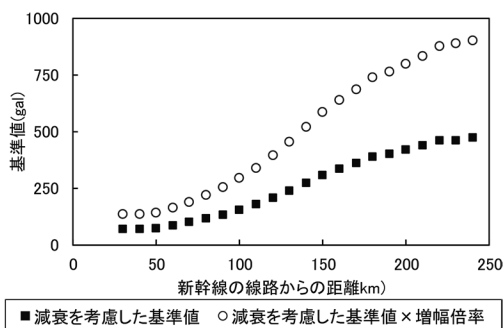


図 7 房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4) の場合の東北新幹線の線路からの距離に応じた地震動の減衰を考慮した基準値と、その基準値に海底の軟弱地盤による増幅倍率 1.9 を乗じた値

くなると考えられる。また、震源が陸地に近い場合には、プレート上面より下部で発生する地震は、震源から海岸地震計までと海底地震計までの距離の差が小さいことから、海岸地震計による P 波検知で警報が出力されることが期待される。よって、震源の位置をプレート上面とすることは、海底地震計で検知すべき地震をプレート境界で発生する大地震としたことに加えて、上記のことから妥当と考えた。

(2) 海底地盤による地震動の増幅効果

海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率について検討した。宮腰ら¹²⁾や林元・干場¹³⁾によると、海底地震計で観測された地震動の S 波の増幅特性は陸域の場合と大きく異なる。宮腰ら¹²⁾は、東京大学地震研究所の釜石沖の海底地震計とその周辺の陸域の参照点における最大加速度を比較して、海底地震計が陸域の参照点に比べて平均的に大きい傾向にあるとした。これには、東北地方の太平洋沖の海底に存在する軟弱地盤¹¹⁾による地震動の増幅の影響が推察される。

海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率を求めるにあたって、陸域で観測された多数の JR 加速度の最大値を用いて作成された是永ら¹⁸⁾による距離減衰式を利用した。増幅倍率は、震源が海底地震計の受持ち範囲にある地震を用いて、海

底地震計で観測された JR 加速度と是永ら¹⁸⁾による距離減衰式で推定される海底地震計の地点における JR 加速度との比から算出した。この算出は、2016年3月から2017年6月に発生したマグニチュード5.0以上の地震を S-net の海底地震計のデータセット²⁰⁾から抽出して行った。その結果、37の地震の46事例が抽出され、その頻度分布を図8に示す。増幅倍率は、対数での幾何平均が0.286、実数では1.9倍となる。ただし、個々の増幅倍率はばらついている。Kodaira et al.¹¹⁾によると、東北地方の太平洋沖の海底に存在する軟弱地盤の厚さは場所によって異なっている。そのため、海底地震計の地点による増幅倍率の差異は軟弱地盤の厚さの違いなどによって生じていることが推察される。

林元・干場¹³⁾は、海底の軟弱地盤による地震動の増幅がマグニチュードの推定に与える影響を軽減するために、地震動の上下動変位振幅を用いたマグニチュードの推定方法を提案している。一方で、海底の軟弱地盤が地震動の加速度に与える影響の除去方法や、これによる加速度の増幅倍率と軟弱地盤の厚さとの関係は解明されていない。また、抽出した37の地震の震源は地域的な偏りが大きく、受持ち範囲内で大きな地震が発生していない海底地震計も多数存在する。そのため、海底地震計による観測データが少ない現状では、これらの解明は今後の課題として、まずは地震動の増幅倍率の平均値である1.9倍を全ての海底地震計で

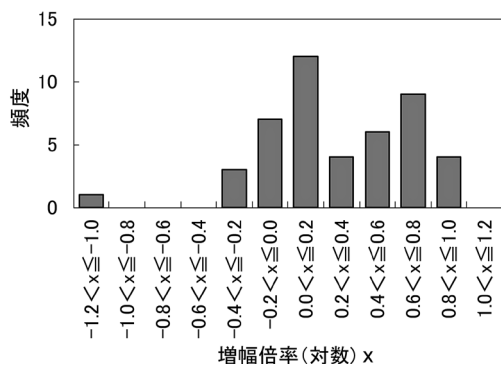


図8 海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率の頻度分布

共通の増幅倍率として用いることにした。

(3) 制御基準値の設定

海底地震計による S 波検知の制御基準値は、前述のように地震動の減衰を考慮した基準値に海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率1.9を乗じたものとした。図7には、房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4) の場合を例に、東北新幹線の線路から10 km ごとの地点における地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値に海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率1.9を乗じた値を示す。海底地震計の S 波検知の制御基準値は、図7に示したような地震動の減衰を考慮した海底地震計の基準値に海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率1.9を乗じた値の一の位を切り捨てた上で、線路から10 km ごとの地点から10 km 以遠までの範囲の値とした。図9には、このようにして設定した房総沖サブシステム (S1) 南部、房総沖サブシステム (S1) 北部から三陸沖北部サブシステム (S4)、および釧路・青森沖サブシステム (S5) の制御基準値を示す。このように制御基準値に差異が生じるのは、新幹線の線路に直交する方向における太平洋プレートの沈み込む角度の違いによって、線路からの距離が同じであってもプレート上面の深さが異なることに主に起因する。なお、プレート上面の傾斜角自体の差異が制御基準値に与える影響は小さかった。

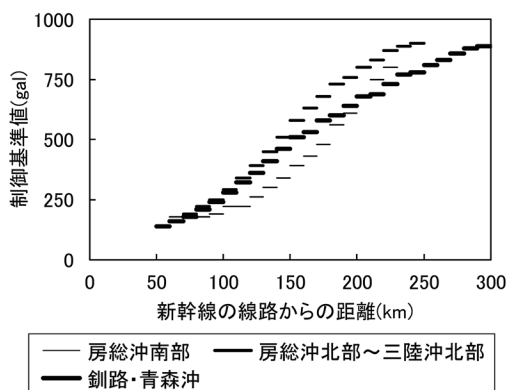


図9 東北新幹線の線路からの距離に応じた海底地震計の S 波検知の制御基準値

4.3 誤警報防止

海底地震計の制御基準値は前節のように設定したが、1地点のみの情報では、この基準値を超過するノイズによって誤警報が出力されるおそれがある。誤警報を防止するために、1地点の海底地震計が前節の制御基準値を超過し、かつもう1地点における観測値が一定の基準値を超過した場合に警報を出力することにした。2017年6月から7月における房総沖サブシステム(S1)の全22地点の海底地震計における電氣的・物理的ノイズを調べた。その結果、JR加速度で3galを超過したイベントは、全て気象庁が発表した地震の発生時刻と対応するもので、海底地震計の電氣的・物理的ノイズに起因してJR加速度が3gal以上になることはなかった。そこで、誤警報防止の基準値をJR加速度で5galに設定することにした。

次に、誤警報防止機能による警報出力の遅延の有無について調べた。2016年3月から2017年6月にS-netの海底地震計で観測されたマグニチュード5.5以上の地震について、海底地震計で制御基準値を超過した時刻と誤警報防止の基準値5galを超過した時刻との時間差を調べた。その結果、表1に示すように、マグニチュード6以上の事例では両者の時間差がほとんどないのに対して、マグニチュード6以下の事例では数秒の差が認められた。この期間に発生した地震の事例数は少ないが、マグニチュードが小さい地震ほど両者の時間差が大きくなる傾向が示唆される。しかし、海底地震計の早期地震検知への利用は大地震対策であることから、誤警報防止の基準値をJR加速度で5galとすることは妥当と考えた。

これから、海底地震計によるS波検知による警報の出力は、ある海底地震計が制御基準値を超過し、かつもう1地点において誤警報防止の基準値としたJR加速度5galを超過した場合とした。

4.4 制御区間

海底地震計により列車を緊急停止させる制御区間は、既存のS波検知と同様に固定とすることにし、既存の海岸地震計の制御区間を活用することにした。遠方の海域で発生した大地震では、強震動が広域に広がるおそれがあることから、海底地震計の制御区間は、当該海底地震計から最も近い海岸地震計の制御区間と、その両隣の海岸地震計の制御区間とした。

したがって、ある海底地震計で地震動が制御基準値を超過し、かつもう1地点において誤警報防止の基準値を超過すると、制御基準値を超過した海底地震計から最も近い海岸地震計の制御区間とその両隣の海岸地震計の制御区間に警報が出力される。これが海底地震計による警報の第1報である。その後、時間の経過とともに、最も近い海岸地震計が異なる海底地震計において、地震動が制御基準値を超過した場合には、警報の第2報としてその海岸地震計と両隣の海岸地震計の制御区間に警報が出力される。その後、最も近い海岸地震計が追加されるごとに、警報の出力が追加される。

なお、JR東日本の新幹線において、S-netの海底地震計を利用した早期地震検知の警報を出力する区間は東北新幹線の全線と上越新幹線の太平洋側の一部区間である。

4.5 海底地震計情報の伝送と警報発令

S-netの海底地震計による観測データは、図1および図2に示すように、海底ケーブルの端部に設置された5つのNIEDの陸上局に集約される。

表1 2016年3月から2017年6月に発生したマグニチュード5.5以上の地震の諸元と、海底地震計で制御基準値を超過した時刻と誤警報防止の基準値5galを超過した時刻との時間差

発生日時	震源位置	震源の深さ (km)	マグニチュード (Mj)	警報との時間差 (秒)	線路沿線での最大JR加速度 (gal)
2016/11/22 5:59	福島県沖	24.5	7.4	+0.17	141.9
2016/11/24 6:23	福島県沖	23.8	6.2	±0.00	33.4
2017/1/5 2:53	福島県沖	26.5	5.6	+4.39	19.8

そして、集約されたデータがJR東日本の新幹線早期地震検知システムのサーバに伝送される。このデータはリアルタイムで伝送することになるが、観測データの全てを伝送するには、大容量の通信回線を整備する必要がある。そこで、NIEDの陸上局において観測されたデータにフィルタ等を施してJR加速度に変換した上で、1秒間の最大値を1秒ごとに伝送することにした⁹⁾。

新幹線早期地震検知システムのサーバでは、伝送されてきた海底地震計のJR加速度が1地点において制御基準値を超過し、かつもう1地点で誤警報防止の基準値を超過した場合に警報が出力される。警報は、図1のように沿線地震計経由で変電所に伝送されて、変電所からの送電が停止される。

5. 海底地震計の効果

JR東日本では、新幹線早期地震検知システムにおいて、S-netの房総沖サブシステム(S1)を2017年11月1日、茨城・福島沖サブシステム(S2)から青森・釧路沖サブシステム(S5)までを2019年1月25日に利用開始した。以下では、新幹線早期地震検知システムによる警報の出力、海岸地震計と海底地震計の観測データ、および海底地震計のアーカイブデータ²⁰⁾を用いて、海底地震計を早期地震検知に利用した場合の効果を検証した。

海底地震計による早期地震検知の効果は、一般的に震源が陸地から遠いほど、震源の深さが浅いほど現れる。鈴木ら²¹⁾によると、2011年の東北地方太平洋沖地震のときに、S-netの海底地震計が設置されていたとすると、S波速度を3.5 m/sと仮定した場合に、海岸地震計に最も早くS波が到達する約27秒前に、震源に最も近い海底地震計にS波が到達すると試算している。また、P波速度を6.5 m/sと仮定すると、同様に海岸地震計にP波が到達する約10秒前に海底地震計にS波が到達したと試算している。このように、海底地震計は太平洋沖の地震を早期に検知することが期待される。

S-netの海底地震計の観測開始以降に、太平洋沖の地震によってJR東日本の新幹線で列車運転

規制が実施されたのは、陸地に近い3つの地震のみである。このような地震では、海底地震計による早期地震検知の効果は一般的に現れにくいと考えられる。しかし、このような地震であっても効果があることが分かった。ここでは、早期地震検知システムに海底地震計を利用する前に発生した2016年11月22日の福島県沖のM7.4の地震、および利用開始後に発生した2021年2月13日の福島県沖のM7.3の地震と2021年3月20日の宮城県沖のM6.9の地震について、地震の検知時刻や警報範囲を調べた。なお、各地震の諸元は気象庁一元化処理震源リストの値を示す。

5.1 2016年11月22日の福島県沖の地震

2016年11月22日5時59分に福島県沖の深さ24.5 kmで発生したM7.4の地震について、新幹線早期地震検知システムによる警報の出力、海岸の観測データ、および海底地震計のアーカイブデータ²⁰⁾を用いて早期地震検知に海底地震計を利用した場合の効果を検証した。この地震の震源は、図10のように陸地に近い。また、震源はプレート上面より上部に位置する。なお、この地震では沿線地震計によって速度規制が発令されたが、新幹線の構造物に被害は発生していない。図10にはこの地震の震源と各地震計の位置、図11には海底地震計と海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列を示す。この地震では、図11に示すように、震源距離が約25 kmの茨城・福島沖サブシステム(S2)の海底地震計S2N13にはS波が、震源距離が約70 kmのいわき海岸地震計にP波が到達する前に到達した。海底地震計S2N13におけるJR加速度が地震発生から約10秒後の5:59:56.35に制御基準値を超過し、その0.17秒後の5:59:56.52に隣の海底地震計S2N12におけるJR加速度が誤警報防止の基準値を超過した。一方、いわき海岸地震計においてP波検知で警報が出力されたのは、地震発生から約22秒後の6:00:09.07である。したがって、この地震では海底地震計が早期地震検知に導入されていれば、海岸地震計に比べて約12秒早く警報を出力できた可能性がある。このように、震源が陸地に近い地震であっても、震源が浅けれ

ば、海岸地震計によるP波検知よりも、海底地震計によるS波検知が早く警報を出力できる場合があることが分かる。

図12には、この地震による東北新幹線における速度規制区間、海岸地震計および海底地震計による地震検知時刻と警報範囲を示した。この地震では海底地震計によるS波検知で、速度規制区間の全てに警報が出力されると考えられる。また、この地震において、海岸地震計では地震検知の第1報から第3報までの警報が出力された。

なお、4.3節で示したように、この地震では海底地震計S2N13において制御基準値を超過した0.17秒後に、隣接する海底地震計S2N12において誤警報防止の基準値5 galを超過している。このため、この地震では誤警報防止機能による警報出力の遅延はわずかである。

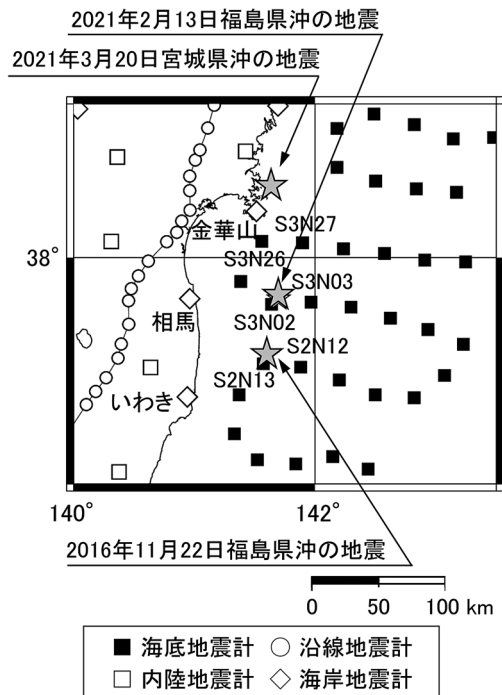


図10 2016年11月22日の福島県沖のM7.4の地震、2021年2月13日の福島県沖のM7.3の地震、および2021年3月20日の宮城県沖のM6.9の地震の震源、海底地震計、海岸地震計、および沿線地震計の位置

5.2 2021年2月13日の福島県沖の地震

2021年2月13日23時07分に福島県沖の深さ55.4 kmで発生したM7.3の地震について、新幹線早期地震検知システムによる警報の出力、海岸地震計と海底地震計の観測データを用いて検証した。この地震の震源は、図10に示すように陸地に近い。また、震源はプレート上面より下部に位置する。この地震では沿線地震計によって運転中止が発令されるとともに、東北新幹線の構造物に被害が発生した。図10にはこの地震の震源と各地震計の位置、図13には海底地震計と海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列を示す。この地震では、震源距離が約86 kmの金華山海岸地震計において地震発生から約15秒後の23:08:06.09にP波検知の第1報、その後23:08:08.09にP波検知の第2報が出力された。さらに、震源から最も近

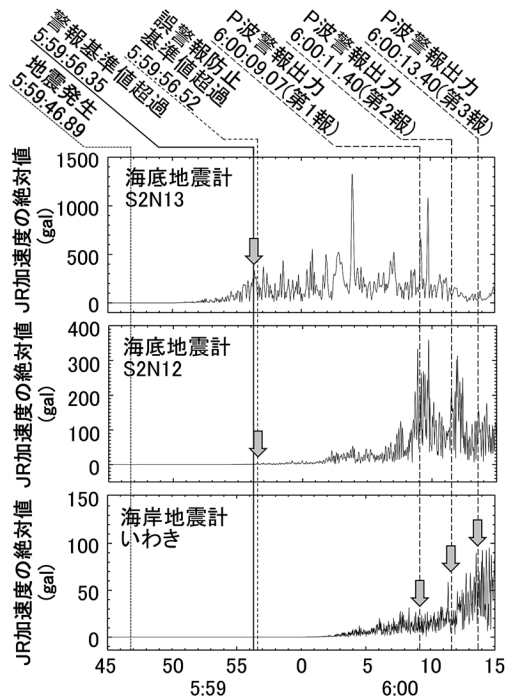


図11 2016年11月22日に福島県沖で発生したM7.4の地震の海底地震計(S2N12, S2N13)といわき海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列と警報出力時刻。図中の矢印は、地震動が当該の基準値を超過した波形。

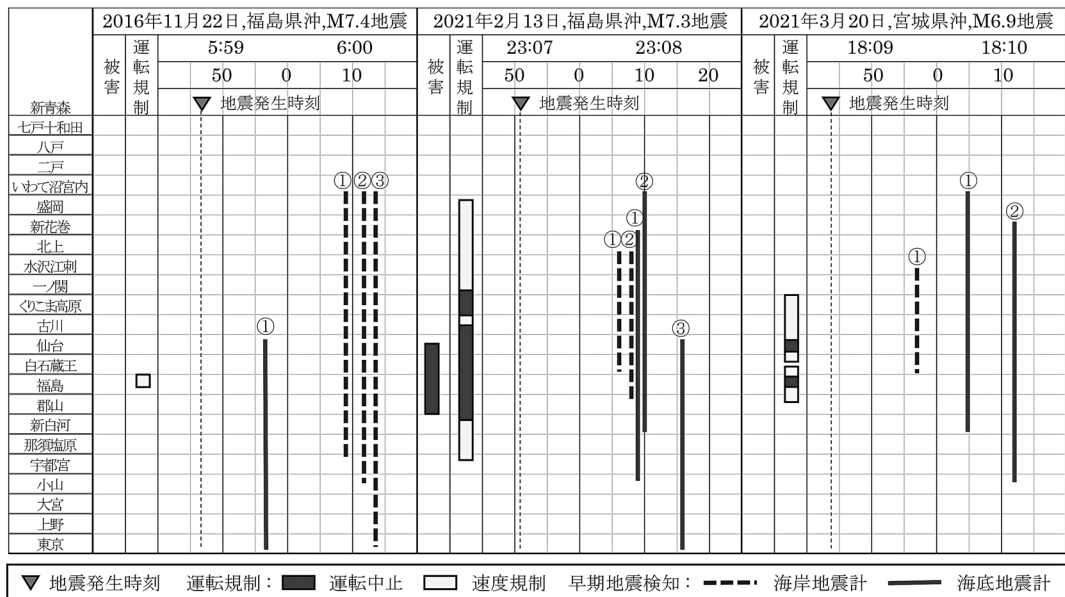


図12 2016年11月22日の福島県沖の M7.4の地震，2021年2月13日の福島県沖の M7.3の地震，および2021年3月20日の宮城県沖の M6.9の地震による東北新幹線の構造物に被害が発生した区間，運転規制区間，海岸地震計および海底地震計による地震検知時刻と警報範囲，海岸地震計および海底地震計による地震検知の①，②，③はそれぞれ早期地震検知の第1，2，3報。

い震源距離が約56 km の茨城・福島沖サブシステム (S2) の海底地震計 S2N02において，地震発生から約18秒後の23:08:09に観測値が制御基準値を超過してS波検知で警報が出力された。震源が陸地に近く深いこの地震では，海岸地震計によるP波検知が海底地震計によるS波検知に比べて早く警報が出力された。

図12には，この地震による東北新幹線の構造物が被害を受けた区間，運転中止区間，速度規制区間，海岸地震計および海底地震計による地震検知時刻と警報範囲を示した。この地震では，金華山海岸地震計によるP波検知の第1報と第2報で構造物に被害が発生した区間および運転中止区間のほとんどに対して警報が出力されているが，一部の区間に対しては警報が出力されていない。これらの全ての区間に警報が出力されたのは海底地震計によるS波検知の第1報で，速度規制区間の全ての区間に警報が出力されたのは海底地震計によるS波検知の第2報である。この地震では最初に早期地震検知の警報が出力されたのは海岸

地震計によるP波検知であるが，P波検知で警報が出力されなかった一部の構造物に被害が発生した区間，および運転中止区間や速度規制区間に対して海底地震計によるS波検知で最初に警報が出力された。このように，この地震では海岸地震計と海底地震計が補完し合って地震の早期検知ができたといえる。

なお，この地震では海底地震計 S2N02において制御基準値を超過する約8秒前に，隣接する海底地震計 S2N03において誤警報防止の基準値 5 gal を超過している。このため，この地震では誤警報防止機能による警報の出力の遅延はなかった。

5.3 2021年3月20日の宮城県沖の地震

2021年3月20日18時09分に宮城県沖の深さ59.5 km で発生した M6.9の地震について，新幹線の早期地震検知システムによる警報の出力，海岸地震計と海底地震計の観測データを用いて検証した。この地震の震源は図10に示すように陸地に近く，金華山海岸地震計が海底地震計よりも震源に

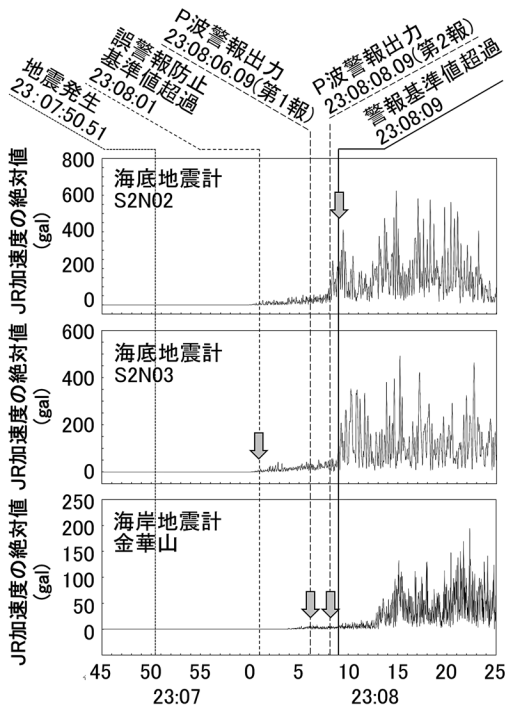


図13 2021年2月13日に福島県沖で発生したM7.3の地震の海底地震計(S2N02, S2N03)と金華山海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列と警報出力時刻. 図中の矢印は, 地震動が当該の基準値を超過した波形.

近い。また、震源はプレート上面より下部に位置する。この地震では沿線地震計によって運転中止と速度規制が発令されたが、新幹線の構造物に被害は発生していない。図10にはこの地震の震源と各地震計の位置、図14には海底地震計と海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列を示す。この地震では、震源からの距離が最も近く、震源距離が約63 kmの金華山海岸地震計において地震発生から約13秒後の18:09:57.16にP波検知で警報が出力された。さらに、海底地震計では震源距離が約73 kmの宮城・岩手沖サブシステム(S3)の海底地震計S2N26において、地震発生から約26秒後の18:10:05に観測値が制御基準値を超過してS波検知で警報が出力された。震源が陸地に近く深いこの地震においても、海岸地震計によるP波検知が海底地震計によるS波検知に比べて早

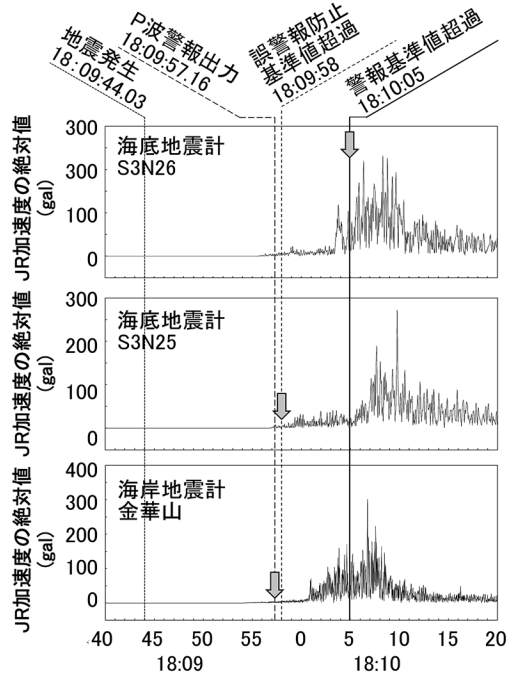


図14 2021年3月20日に宮城県沖で発生したM6.9の地震の海底地震計(S2N25, S2N26)と金華山海岸地震計で観測されたJR加速度の絶対値の時系列と警報出力時刻. 図中の矢印は, 地震動が当該の基準値を超過した波形.

く警報が出力された。

図12には、この地震による東北新幹線における運転中止区間、速度規制区間、海岸地震計および海底地震計による地震検知時刻と警報範囲を示した。この地震では、金華山海岸地震計によるP波検知で運転中止区間と速度規制区間の多くに警報が出力されたが、残りの区間に対して最初に警報が出力されたのは海底地震計によるS波検知の第1報である。この地震においても、最初に早期地震検知による警報が出力されたのは海岸地震計によるP波検知であるが、P波検知で警報が出力されなかった一部の運転中止区間と速度規制区間に対して海底地震計によるS波検知で最初に警報が出力された。このように、海底地震計よりも海岸地震計の方が震源に近いこの地震においても、海岸地震計と海底地震計が補完し合って地震の早期検知ができたといえる。

なお、この地震では海底地震計 S2N26において制御基準値を超過する約7秒前に、隣接する海底地震計 S2N25において誤警報防止の基準値5galを超過している。このため、この地震では誤警報防止機能による警報の出力の遅延はなかった。

5.4 海底地震計の効果のまとめ

海底地震計の早期地震検知の効果は、2011年の東北地方太平洋沖地震のような震源が陸地から遠く浅い地震ほど大きいと一般的に考えられる。2016年11月22日の福島県沖の地震のように、震源が陸地に近くても、震源が浅ければ、海底地震計によるS波検知が海岸地震計によるP波検知より早く警報を出力できる場合があることが分かった。一方で、2021年2月13日の福島県沖の地震と2021年3月20日の宮城県沖の地震のように、震源が陸地に近く深い地震では、海岸地震計によるP波検知が海底地震計によるS波検知より早く警報が出力された。しかし、海岸地震計によるP波検知で警報が出力されなかった一部の構造物に被害が発生した区間や運転規制区間に対して海底地震計によるS波検知で最初に警報が出力された。このように震源が陸地に近く深い地震であっても海底地震計に早期地震検知の効果があることが分かった。これから、海岸地震計と海底地震計が補完し合うことで、海域で発生する地震の早期検知の効果が向上すると考えられる。

6. まとめ

新幹線における早期地震検知にS-netの海底地震計を利用するために、海底地震計での地震の検知方法、列車を緊急停止させる警報を出力する制御基準値、警報の誤警報防止、および列車を緊急停止させる制御区間の検討を行った。海底地震計による地震検知方法には、S波検知を採用した。制御基準値は、伝播による地震動の減衰と海底地盤による地震動の増幅を考慮して設定する方法を開発した。誤警報防止の方法として、ノイズによる誤警報を防止するために、1地点の海底地震計が制御基準値を超過し、かつもう1地点における値が誤警報防止の基準値を超過した場合に警報を

出力する方法とした。また、制御区間は、制御基準値を超過した海底地震計から最も近い海岸地震計の制御区間とその両隣の海岸地震計の制御区間とした。

海底地震計を地震の早期検知に利用した場合の効果を検証した。2016年11月22日の福島県沖の地震のように、震源が陸地に近くても、震源が浅ければ、海底地震計によるS波検知が海岸地震計によるP波検知より早く警報を出力できる場合があることが分かった。一方で、2021年2月13日の福島県沖の地震と2021年3月20日の宮城県沖の地震のように、震源が陸地に近く深い地震では、海岸地震計によるP波検知が海底地震計によるS波検知より早く警報が出力された。しかし、海岸地震計によるP波検知で警報が出力されなかった一部の構造物に被害が発生した区間や運転規制区間に対して海底地震計によるS波検知で最初に警報が出力された。海底地震計の効果は、震源が陸地から遠く浅い地震ほど大きいと一般的に考えられるが、震源が陸地に近くても、海底地震計に早期地震検知の効果があることが分かった。これから、海岸地震計と海底地震計が補完し合うことで、海域で発生する地震の早期検知の効果が向上すると考えられる。このように、S-netの海底地震計は太平洋沖で発生する地震の早期検知に既に効果を発揮しており、新幹線の安全性の向上に貢献しているといえる。

JR東日本では、新幹線早期地震検知システムにS-netの房総沖サブシステム(S1)を2017年11月1日に利用開始した。さらに、茨城・福島沖サブシステム(S2)から青森・釧路沖サブシステム(S5)までを2019年1月25日に利用開始した。今回導入した早期地震検知方法は、限られた海底地震計の観測データに基づいて決定したものである。今後は、海底地震計の観測データを蓄積することで、海底地震計による地震の検知方法や、海底の軟弱地盤による地震動の増幅倍率の精度を高めて、より適切な海底地震計の制御基準値の設定方法の開発を進めていきたいと考えている。さらに、在来線の早期地震検知にも海底地震計を活用する方法の開発を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所と東日本旅客鉄道株式会社の地震計の観測値を利用しました。それぞれの機関において観測とデータの保存・整理に従事された方々に深く感謝申し上げます。また、一部の図の作成には *Generic Mapping Tools*²²⁾ を利用しました。

参考文献

- 1) 堀込順一：JR 東日本における地震対策と運転規制概要，新線路，Vol.60，pp.59-61，2006.
- 2) 岩橋寛臣・岩田直泰・佐藤新二・芦屋公稔：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.
- 3) 水野光一郎・大澤裕之・相沢文也：JR 東日本における地震情報の活用－早期地震検知の取り組み－，JREA（日本鉄道技術協会誌），Vol.61，pp.42277-42280，2018.
- 4) 植平賢司：日本海溝海底地震津波観測網，計測と制御，Vol. 53，No. 6，pp. 477-481，2014.
- 5) Aoi, S., Y. Asano, T. Kunugi, T. Kimura, K. Uehira, N. Takahashi, H. Ueda, K. Shiomi, T. Matsumoto and H. Fujiwara: MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, *Earth Planets Space*, Vol.72, 126, 2020.
- 6) Housner, G. W.: Spectrum intensities of strong-motion earthquakes, *Proc. Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*, pp.20-36, 1952.
- 7) 美藤恭久・中村 豊・富田健司：東海道・山陽新幹線における地震時ダウンタイム短縮化対策，鉄道技術研究報告，Vol. 1294，pp. 1-38，1985.
- 8) 中村洋光・岩田直泰・芦屋公稔：地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係，鉄道総研報告，Vol. 19，No.10，pp. 11-17，2005.
- 9) 宮腰寛之・山本俊六・祇園昭宏・神山真樹・他谷周一・渡辺 篤・功刀 卓：鉄道の早期地震警報への海底地震計情報活用に向けたデータ処理，鉄道総研報告，Vol.29，No.1，pp.35-40，2015.
- 10) 林元直樹・齋藤 潤・足達晋平・森本雅彦・本多誠一郎・小寺祐貴・干場充之・中村武史・功刀 卓：緊急地震速報への海底地震計の振幅情報の活用に向けた取り組み，日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集，SCG65-04，2018.
- 11) Kodaira, S., Y. Nakamura, Y. Yamamoto, K. Obana, G. Fujie, T. No, Y. Kaiho, T. Sato, and S. Miura: Depth-varying structural characters in the rupture zone of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geosphere*, Vol.13, pp.1408-1424, 2017.
- 12) 宮腰寛之・津野靖士・岩田直泰・山本俊六・酒井慎一・篠原雅尚：早期地震警報システムに海底地震計を利用するための基礎検討，日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集，SSS23-P03，2013.
- 13) 林元直樹・干場充之：緊急地震速報における東南海海底地震計活用のための走時補正・マグニチュード補正の検討，*験震時報*，Vol.76，pp.69-81，2013.
- 14) Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima and T. Matsuzawa: Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Science Lett.*, Vol.290, pp.415-426, 2010.
- 15) Nakajima, J., and A. Hasegawa: Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, L16309, 2006.
- 16) Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, B08309, 2009.
- 17) 弘瀬冬樹：プレートの形状の数値データ，<https://www.mri-jma.go.jp/Dep/sei/fhirose/plate/PlateData.html>，2021年4月2日。
- 18) 是永将宏・岩田直泰・山本俊六・野田俊太・下野五月・小野友也：早期地震情報の利用を念頭に置いた距離減衰式の提案，土木学会第66回年次学術講演会，pp.961-962，2011.
- 19) 宇津徳治：地震学，共立出版，286p.，1977.
- 20) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED S-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2019, <https://doi:10.17598/NIED.0007>，2021年4月2日。
- 21) 鈴木博人・宮腰寛之・山本俊六・青井 真・鈴木 亘：東北・上越・北陸新幹線における 早期

- 地震検知システムの変遷と海底地震計の導入,
第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp.176-181, 2019. Trans AGU. 79, 579p, 1998.
- 22) Wessel, P. and W. H. F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS (投稿受理：令和3年4月2日
訂正稿受理：令和3年7月2日)

要 旨

高速鉄道では、地震発生時に速やかに列車を減速・停車させることが重要である。新幹線では、線路沿線や線路から離れたより震源に近い地点に設置された地震計で観測される地震情報を利用して、線路に主要動が到達する前に列車を減速・停止させる早期地震検知システムが構築されている。近年、太平洋沖に海底地震計の観測網が整備された。海底地震計を早期地震検知システムに利用することができれば、東北地方太平洋沖地震などの沈み込み帯で発生する地震をより早く検知できると期待される。そこで、新幹線の早期地震検知システムに海底地震計を利用する方法を開発し、海底地震計のしきい値の設定方法や誤警報の防止方法を提案した。さらに、海底地震計を早期地震検知システムに利用することの効果を検証した。JR東日本では、房総沖のエリアの海底地震計を2017年11月1日に、茨城・福島沖から青森・釧路沖のエリアを2019年1月25日に利用開始した。