

# 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

宮腰 寛之\*      山本 俊六\*      祇園 昭宏\*\*  
 神山 真樹\*\*\*      他谷 周一#      渡辺 篤##  
    切刀 卓###

## Data Processing for the Application of Ocean-bottomed Seismographs to the Earthquake Early Warning in the Railway Field

Hiroyuki MIYAKOSHI      Shunroku YAMAMOTO      Akihiro GION  
 Masaki KAMIYAMA      Shuichi TAYA      Atsushi WATANABE  
 Takashi KUNUGI

In order to issue warnings for earthquakes whose epicenters are located in ocean areas more rapidly than present earthquake early warning (EEW) systems, it is effective to utilize ocean-bottomed seismographs (OBSs). So as to stably transmit OBS data to railway operators from land terminal stations by limited bandwidth, we defined the UDP telegram format which contains seismic indices of OBSs in a certain area and the quality control flags for data losses and noises. This information calculated in real-time at land terminal stations may improve both the rapidness and reliability of EEW in the railway field.

キーワード：早期地震警報，海底地震計，陸上局，S波警報，通信，ノイズ

### 1. はじめに

鉄道分野では、地震発生時に列車の運転を制御するために地震警報が古くから利用されている。新幹線の開業当初は、沿線に配置された地震計がある規定値以上の地震動を観測したタイミングで地震計周辺の決められた範囲（固定制御範囲）に警報を出力していた<sup>1)</sup>。1982年には東北新幹線の開業に合わせて、海域で発生する地震をより早く観測するために、海岸線に配置された地震計（海岸地震計）が規定値以上の地震動を観測すると、対応する固定制御範囲に警報を出力する手法が導入された<sup>1)</sup>。ここまで述べた警報用アルゴリズム（以下、警報手法）は、地震の主要動であるS波の情報に基づいていることから「S波警報」と呼ばれている。その後、S波より先に到着するP波の初動部分の情報から震源の位置とマグニチュードを推定し、過去の地震における鉄道構造物の

被害とマグニチュード、震央距離の関係（M-Δ図<sup>2)</sup>）に基づき、地震規模に応じて警報を出力する範囲を変化（可変制御範囲）させる「P波警報」が開発された。「P波警報」は1992年にユレダス<sup>2)</sup>として実用化され、その後、2004年以降、P波の初動部分の数秒における振幅のエンベロープ形状との統計的な関係に基づいて震央距離を推定するB-Δ法<sup>3)</sup>を組み込んだ地震防災システムが実用化<sup>4) 5)</sup>された。近年では、気象庁の「緊急地震速報」によって推定された震源の位置とマグニチュードの情報を受信し、M-Δ図に基づいて可変制御範囲に警報を出力する方法も併せて用いられている<sup>6)</sup>。

現在、「P波警報」「S波警報」「緊急地震速報」を組み込んだ早期地震防災システムが新幹線を運行する鉄道事業者を中心に運用されており、地震発生時には概ね適切に動作している。一方、東北地方太平洋沖地震を受け、海域で発生する大地震に対してより早い警報に対するニーズが高まっている。しかし、陸上の地震計の情報のみに基づいた警報手法では限界があることは自明である。海域で発生する巨大地震に対しては、震源の近くに設置された地震計、すなわち海底地震計の情報を活用することで、警報から主要動到達までの余裕時間を大きく増加させることが期待できる<sup>7)</sup>。

\* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室  
 \*\* 事業推進室 地震防災システム  
 \*\*\* 東日本旅客鉄道株式会社  
 # 東海旅客鉄道株式会社  
 ## 三菱スペース・ソフトウェア株式会社  
 ### 独立行政法人防災科学技術研究所

特集：防災技術

図1に日本周辺の海底地震計網を示す。近年、(独)防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網 S-net<sup>7) 8)</sup> や、(独)海洋研究開発機構の DONET<sup>9)</sup> のように、密な海底地震計網が整備されつつあり、それぞれ日本海溝、南海トラフなどの巨大地震の想定震源域に設置されている。これら海底地震計の情報を活用することは、巨大地震の早期検知に極めて効果的であると考えられる。本稿では、鉄道の早期地震警報への活用に向けて検討を進めている S-net を中心として、

- (1) 海底地震計情報を活用した警報手法
- (2) 海底地震計情報の配信手法
- (3) 海底地震計情報の現地処理方法

について述べる。

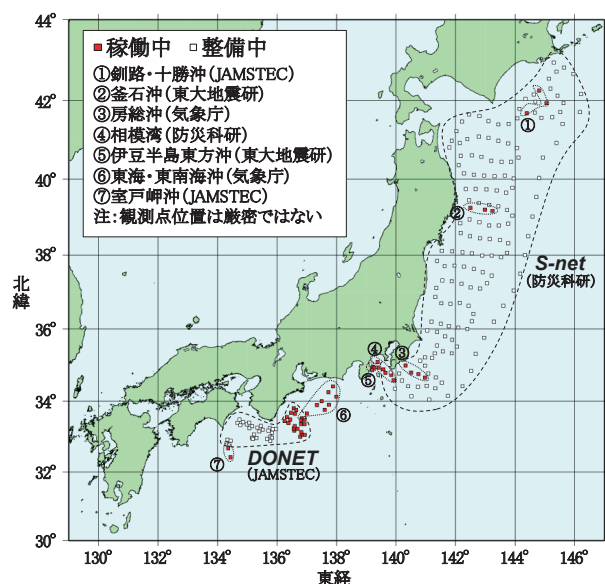


図1 日本周辺の海底地震計網

## 2. 海底地震計情報を活用した警報手法

### 2.1 S-net の概要<sup>7) 8)</sup>

図2に S-net における情報の流れを示す。S-net の観測データは海底ケーブルを通じて常時リアルタイムで陸上局に伝送される。このとき、一つの陸上局には接続する二つの海域からそれぞれ約 25 箇所分の海底観測点(以下、ノード)の情報がまとめられて送られる。陸上局で受信した情報は必要な処理(以下、現地処理)が行われたうえで、通信回線を通じて関係機関に伝送される。

S-net の各ノードには地震計や津波計など多数の観測機器が搭載されている。このうち、地震計としてサーボ型加速度計の正(計測範囲±5G)と副(計測範囲±2G)、水晶振動式加速度計、そして速度計が格納されている<sup>8)</sup>。本研究ではサーボ型加速度計の正副の利用を想定する。

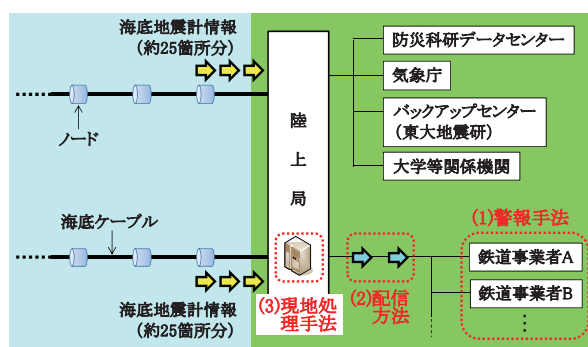


図2 S-net における情報の流れ

### 2.2 警報手法の選択

海底地震計情報を早期に活用することを目的として、現行の鉄道の早期地震防災システムの手法を参考とした警報手法を検討する。先述のとおり、現行の警報手法には S 波警報と P 波警報がある。このうち、より早く警報を出力できる P 波警報は地震波の初動の微弱な振動を利用するため、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、海底地震計の観測開始後にノイズデータを蓄積し、検証を重ねたうえで P 波警報の実現性を検討することが望ましい。

一方、S 波警報は強震動を対象とするため、ノイズが警報に影響を及ぼす可能性は比較的小さいと考える。また、S-net や DONET のような密な観測網を活用する場合、海底地震計の近傍で発生した巨大地震を検知することが主な目的となるため、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 波警報の優位性は高くない。そこで、ここでは、現段階での海底地震計情報を活用した警報手法として、S 波警報を先行して採用することとした。

### 2.3 警報のための地震動指標

陸上における S 波警報では、5Hz 以上の高周波数成分を遮断する鉄道独自のフィルタ<sup>10)</sup>(以下、JR フィルタ)や計測震度の近似フィルタ<sup>11) 12)</sup>を表す漸化式に加速度波形の各時間ステップの値を代入して求めたリアルタイム演算値が地震動指標として用いられている。前者は JR 警報用加速度、後者は警報用リアルタイム震度と呼ばれる。海底地震計で S 波警報を行うに当たっては、海底地震計で観測される地震動特性を確認し、ノイズの影響や地震毎の地震動特性の違いの影響が抑えられるような周波数帯域を明らかにしたうえで、警報に使用する地震動指標を検討することが望ましい。しかし、このような検討はデータの蓄積に合わせて実施することとし、現段階では、JR 警報用加速度と警報用リアルタイム震度を海底地震計情報による S 波警報の地震動指標として

用いることとした。

陸上での観測データから地震動指標を計算する場合、地震波形の水平2成分（南北，東西），あるいは上下成分が用いられることがある。陸上では観測小屋内のコンクリート製の台座に地震計センサが固定されているが、海底ではノードが海底ケーブルと共に敷設されている状態であるため、強震動等の外的要因により地震計センサの姿勢が変化する可能性がある。数百  $\text{cm/s}^2$  程度の加速度であれば、姿勢の変化は無視できるほど小さいという報告もあるが<sup>13)</sup>、より大きい地震動が作用した場合のノードの挙動は明らかでない。地震計センサの姿勢が変化すると、重力加速度の各成分の値が変化して地震波形の基線がずれ、地震動の南北，東西，上下成分の大きさを誤って評価することとなる。基線のずれは時間経過とともに補正されるので、3成分を合成した値により計算した地震動指標であれば、ノードの姿勢が変化した直後を除いてこの影響を受けないと考えられる。そこで、海底地震計においても3成分を合成した値から計算した地震動指標を利用することとした。

一方で、将来的により早く警報を出力するうえでP波振幅が有効な指標となる可能性がある<sup>14) 15)</sup>。このとき、上下成分を取り扱うことが効果的と考える。また、P波上下動の規定値は、S波よりも小さな値に設定することができるため、ノードの姿勢の変化による影響を小さくできるという利点を有する。そのため、ここでは上下成分から計算した地震動指標も利用できるように定めた。なお、姿勢の変化による地震記録の南北，東西，上下成分からのずれは、重力加速度の各成分を手動により再設定することで補正可能であるため、補正のタイミングについて送信側とあらかじめ打合せをしておくことが望ましいと考える。

### 3. 海底地震計情報の配信手法

2章で決定したS波警報を行うためには、地震動指標（JR警報用加速度と警報用リアルタイム震度）のフィルタ演算が必要であり、この処理を鉄道事業者側で行う場合、陸上局から地震波形を0.01秒間隔でリアルタイムに伝送される必要がある。しかし、約50箇所分の地震波形を受信するために十分な容量を有した通信回線を整備するには多大なコストを要する。そこで、ここでは、伝送する情報量を低減するために、現地処理として陸上局で地震動指標の計算を行った後に各鉄道事業者に伝送することとし、その際の通信プロトコルと電文フォーマットについて検討を行った。

#### 3.1 通信プロトコルの検討

通信プロトコルについてTCP（Transmission Control Protocol）とUDP（User Datagram Protocol）の比較を行った。TCPは送信側と受信側でコネクションを確立したうえで、電文の送受信状況を相互に確認しながら情報を送るため、確実に電文の送受信を行うことができるというメリットがある。TCPは個々の地震計と電文をやり取りする従来の早期地震防災システムの通信方法において採用されている<sup>16)</sup>。しかし、通信異常時に電文が届かないと再送を繰り返すため、通信回数が増えて回線への負荷が大きくなり、回線容量が十分でない場合に遅延が発生する可能性がある。

一方、UDPは電文の送受信状況の相互確認を行わないため伝送の信頼性はTCPに比べて低いものの、通信異常時にプロトコルレベルで再送を行わないことから、回線の負荷はTCPに比べて小さいことが知られている。以上の特性を考慮し、ここでは、海底地震計情報の伝送を安定して行うことを優先的に考え、通信プロトコルとしてUDPを採用することとした。また、地震発生の有無にかかわらず一定間隔で伝送することとした。これにより、回線の負荷を一定とすることができる。したがって、電文のサイズと伝送間隔を適切に設定すれば、64kbps程度の低速回線でも安定的な伝送が期待できる。同時に、定期的なライフチェックも可能である。図3に策定した配信方法の概念図を示す。

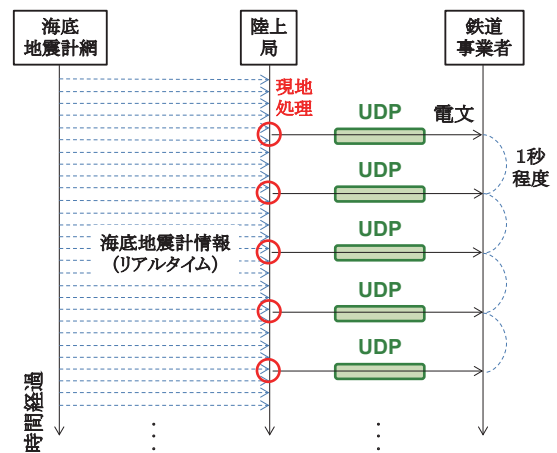


図3 海底地震計情報の配信手法

#### 3.2 電文フォーマットの検討

地震発生や警報出力を地震動指標から判断する基準（しきい値の設定等）は各鉄道事業者によって異なるため、各鉄道事業者がそれらを判断可能となるような情報を電文に盛り込む必要がある。一方で、電文を安定的に伝送するためには、電文内の情報は必要なものだけとし、サイズを抑制することが望ましい。従来の早期地震防災システムが個々の地震計とやり取りする電文のサイズは

特集：防災技術

80byteである<sup>16)</sup>。ここでは、UDPによって電文を一定間隔で伝送するという今回の通信形式を踏まえ、電文内の情報の集約および内容の精査を行った。そして、陸上局に接続するノード約50箇所における地震動指標の一定時間内の最大値をまとめた電文（以下、鉄道向け電文）を策定した。

鉄道向け電文のフォーマットを図4に示す。鉄道向け電文は時刻等の情報を有する「ヘッダ領域」、各ノードの地震動指標やデータの異常有無の情報を有する「データ領域」、および電文の誤り検出を目的とした「検定キー」からなる。データ領域には、JR警報用加速度と警報用リアルタイム震度は3成分合成値によるものと上下成分によるものがそれぞれ記載される。また、伝送異常により、規定値超過情報を含んだ電文が欠損するケースを想定して、JR警報用加速度については過去10秒間のピークホールド値を設けた。警報用リアルタイム震度については、過去60秒間の波形を用いて、計測震度演算の定義<sup>17)</sup>に従って継続時間の合計が0.3秒となる振幅値を求める処理（以下、継続時間判定処理）を行うことにより、最大値が約60秒間維持される特徴を有するので<sup>11)</sup>、継続時間判定処理を適用して求めた震度をピークホールドの代わりに用いることとした。なお、P波警報への活用を想定して、電文内に予備領域を設けている。結果として、電文のサイズは1kbyte程度となり、64kbps程度の低速回線でも1秒程度の間隔で安定的に伝送できると考えている。

今後は、海底地震計網と陸上局の整備完了に合わせて、陸上局と鉄道事業者の間の接続試験を実施する予定である。接続試験では電文の遅延や欠損、回線の負荷状況など通信の安定性に係わる項目を確認し、その結果を踏まえて電文の伝送間隔の最適化を検討していく。

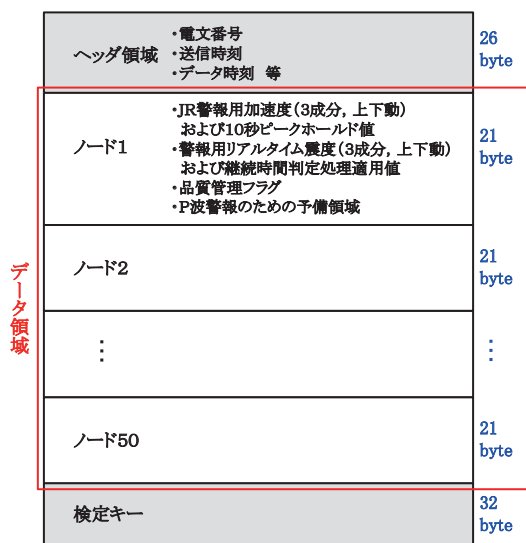


図4 鉄道向け電文のフォーマット

## 4. 海底地震計情報の現地処理手法

### 4.1 現地処理手法の全体フロー

陸上局の現地処理において各ノードのJR警報用加速度や警報用リアルタイム震度をまとめた鉄道向け電文を生成し、それを受信した鉄道事業者が警報出力の有無を判断する。このとき、海底地震計のノイズに関する知見が十分蓄積されていない現状においても、海底地震計やシステムの不具合等に起因するノイズによって誤警報を出力することは極力避けなければならない。そのためには、一定間隔で受信するデータから故障や不具合の発生を判断可能とする必要がある。そこで、陸上局の現地処理において指標値計算に加えて海底地震計情報の品質をチェックし、欠測やノイズの判定を行うこととした。この結果は、図4に示す電文のデータ領域内にある「品質管理フラグ」に反映される。

海底地震計情報の現地処理における欠測・ノイズ判定から地震動指標計算に至る全体フローを図5に、品質管理フラグの定義を表1に示す。はじめに「パケット確認処理」において、各ノードからリアルタイムで送られる海底地震計情報のパケットを集約し、パケットの受信/未受信の判定を行う。その後、データの物理値化と南北、東西、上下成分への座標変換を経て、「欠測判定」において長時間にわたって有効データを受信できない欠測状態を判定する。欠測判定の後、海底地震計情報に故障や異常によるノイズが含まれていないかを判定する「ノイズ判定」を行う。最後に、一定時間における各地震動指標の最大値を計算し、電文を作成する。

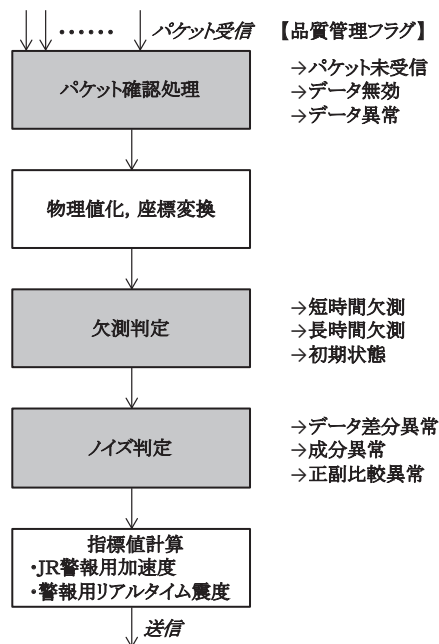


図5 現地処理の全体フロー

表1 品質管理フラグの定義

バイト	ビット	種別	内容
#1	0x01	【正】短時間欠測	N サンプル未満の欠測 (直近の有効データによって補間)
	0x02	【正】長時間欠測	N サンプル以上の欠測を含む
	0x04	【正】初期状態	欠測から復帰後、オフセットレベルの計算を行っている
	0x08	【正】パケット未受信	当該ノードから海底地震計情報パケットが受信できない
	0x10	【正】データ無効	CAL 信号など送信側で指定したデータの無効
	0x20	【正】データ異常	同じ値が M 個以上連続している
	0x40	【正】データ差分異常	サンプル間の値の差が異常に大きい
	0x80	【正】H/V 異常	成分同士の最大加速度比が異常に大きい (小さい)
#2	0x01	【正】正副比較異常	正と副の最大加速度の比が異常に大きい (小さい)
	0x02	【副】短時間欠測	【正】と同じ
	0x04	【副】長時間欠測	【正】と同じ
	0x08	【副】初期状態	【正】と同じ
	0x10	【副】パケット未受信	【正】と同じ
	0x20	【副】データ無効	【正】と同じ
	0x40	【副】データ異常	【正】と同じ
	0x80	± 5G 加速度計故障	± 5G の加速度計が故障している
#3	0x01	± 2G 加速度計故障	± 2G の加速度計が故障している
	0x02	正の加速度計変更	± 2G の加速度計が正として取り扱われている
	0x04	予備領域	
	0x08	予備領域	
	0x10	予備領域	
	0x20	予備領域	
	0x40	予備領域	
	0x80	予備領域	

【】はサーボ型加速度計の正副を表す

4.2 欠測・ノイズ判定の詳細

欠測判定の概念を図6に示す。時系列データが欠測すると、オフセットレベルや地震動指標演算フィルタの漸化式が計算不能となる。そこで、0.5秒程度にも満たないごく短時間の欠測については、図6(a)のように欠測箇所を直近のデータを用いて補間し、計算の連続性を維持するようにした。長時間の欠測については図6(b)のように一度計算を中断して地震動指標には未定義値を代入することとした。そして、欠測から復帰した際にオフセットレベルの計算を行い、漸化式フィルタの計算結果の安定を図るための数秒程度の「初期状態」を定義した。

次に、代表的なノイズ判定の概念を図7に示す。図7(a)に示すように、S波警報において誤警報を出力するリスクの高いノイズとして電気的なパルス状のノイズが考えられる。そこで、前後サンプルの加速度値の差分を監視し、差分が極端に大きい場合には異常を検出することとした。具体的には、s サンプル目の加速度値を A(s) とすると、各サンプルにおいて、

$$\Delta A = A(s) - A(s-1) \tag{1}$$

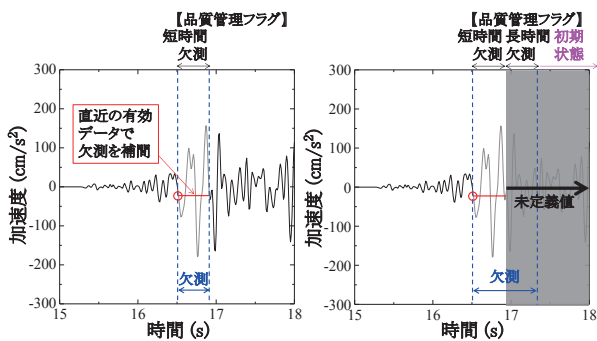


図6 欠測判定

を計算し、加速度の差分  $\Delta A$  が設定値を超過した時に「データ差分異常」の品質管理フラグを立てることとした。また、図7(b)に示すように、1成分のみ加速度計のセンサが故障し、観測値が得られなくなるケースが考えられる。この場合、各成分の値の違いを監視することで、違いが大きい場合に異常を検出することとした。具体的には、同データ時刻内の各成分間の最大加速度比

$$R_1 = \frac{A_{nsmax}}{A_{ewmax}}, \quad R_2 = \frac{A_{nsmax}}{A_{udmax}}, \quad R_3 = \frac{A_{ewmax}}{A_{udmax}} \tag{2}$$

を計算し、 $R_1, R_2, R_3$  のいずれかが設定値を超えたあるいは下回った場合には「成分異常」の品質管理フラグを立てることとした。さらに図7(c)に示すように、サーボ型加速度計に正と副が存在する点を活かして、正と副のデータを比較することで加速度計の異常を検出することとした。具体的には、正 (main) と副 (sub) の同データ時刻内の最大加速度比

$$R_{4_i} = \frac{A_{main-max_i}}{A_{sub-max_i}}, \quad i = NS, EW, UD \tag{3}$$

を計算し、 $R_{4_i}$  が設定値を超える場合には「正副比較異常」の品質管理フラグを立てることとした。今後、海底地震計データの受信状況を確認したうえで、ノイズ判定の設定値を調整していく予定である。

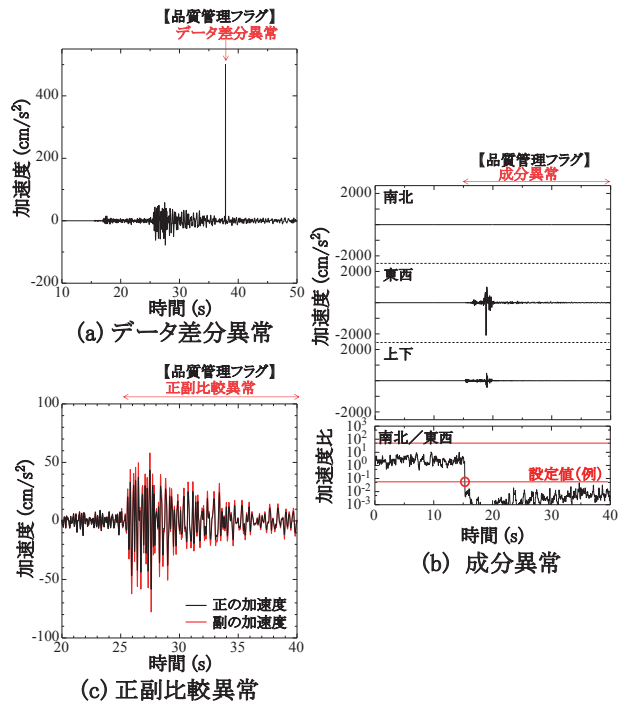


図7 ノイズ判定

特集：防災技術

5. まとめ

本研究では、現在整備が進んでいる海底地震計網の情報を鉄道の早期地震警報に活用することを目的として、警報手法、情報配信方法、陸上局における現地処理方法について検討を行った。はじめに、海底地震計情報の利用法としてまずはS波警報を用いることを提案した。次に、UDPプロトコルによって一定間隔で電文を送る通信方法を提案し、複数の海底地震計におけるJR警報用加速度や警報用リアルタイム震度をまとめた鉄道向け電文のフォーマットを定めた。さらに、陸上局における現地処理において海底地震計情報の品質をチェックしてフラグを立て、一定間隔で受信するデータから欠測やノイズの発生を判断可能とする方法を提案した。

今後は、実データを蓄積しつつ、電文の伝送間隔、警報や欠測・ノイズの判定を行うための設定値を調整していく予定である。また、並行して、海水や海底の未固結堆積層が海底地震計で観測される地震動特性に及ぼす影響を明らかにしていくことも重要と考える。そして、海底地震計の密な配置間隔を活かした警報手法など新たな手法の開発を行うことも計画している。

謝辞

海底地震計情報のデータ処理に関する検討に当たっては、白山工業株式会社の安達繁樹様、鏡弘道様にご助言、ご協力を賜りました。記して感謝致します。

文献

- 1) 中村豊：国鉄における地震警報システム，鉄道技術，Vol.42，pp.371-376，1985
- 2) 中村豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531，pp.1-33，1996
- 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 Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 1, pp. 526-532, 2003.
- 4) 芦谷公稔，東田進也，他谷周一，小高俊一，佐藤新二，大竹和生，中村洋光：ナウキャスト地震情報を活用した早期地震警報システム，鉄道総研報告，Vol.17，No.8，pp.1-6，2003
- 5) 岩橋寛臣，岩田直泰，佐藤新二，芦谷公稔：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
- 6) 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.6，No.5，pp.387-397，2007
- 7) 金沢敏彦：日本海溝海底地震津波観測網について，地震ジャーナル，Vol.55，No.6，pp.28-33，2013
- 8) 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
- 9) 川口勝義，荒木英一郎，金田義行：DONET—海底におけるリアルタイム長期連続モニタリング手法の確立—，海洋理工学会誌，Vol.17，No.2，pp.125-135，2011
- 10) 中村洋光，岩田直泰，芦谷公稔：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.11-16，2005
- 11) 切刀卓，青井真，中村洋光，森川信之，藤原広行：震度のリアルタイム演算法，地震第2輯，Vol.60，pp.243-252，2008
- 12) 切刀卓，青井真，中村洋光，鈴木亘，森川信之，藤原広行：震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良，地震第2輯，Vol.65，pp.223-230，2013
- 13) 平田賢治，川口勝義：ケーブル式海底地震計の姿勢と強震動，JAMSTEC 深海研究，Vol.21，pp.83-89，2002
- 14) 他谷周一，中嶋繁，下野五月：単独観測点での早期震度予測手法，日本地震学会秋季大会講演予稿集，pp.310，2008
- 15) 是永将宏：直下型地震に対してより早く列車の運転を規制する，RRR2010.10，pp.6-10，2010
- 16) 佐藤新二：地震防災システムにおける新たな情報通信方法の提案，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.43-48，2007
- 17) 気象庁：震度を知る—基礎知識とその活用—，ぎょうせい，1996