

早期地震警報用アルゴリズムの総合評価

是永 将宏* 山本 俊六* 野田 俊太*

Overall Performance Evaluation of Earthquake Early Warning Algorithm

Masahiro KORENAGA Shunroku YAMAMOTO Shunta NODA

In order to verify the effects of the new earthquake early warning algorithm developed by RTRI, we conducted an overall performance evaluation on the accuracy and promptness of the alarm output during earthquakes. We compared the result of the new earthquake early warning algorithm and that of the current algorithm with respect to the correct answer rate of the area that alarm outputs cover and the ratio of the unnecessary alarms. We also compared the result of the current algorithm and that of the new algorithm on the alarm output timing for each seismic event. As a result, we showed that the accuracy and quickness of the alarm output are improved.

キーワード：早期地震警報用アルゴリズム，早期地震防災システム，警報出力判定，総合性能評価

1. はじめに

日本の鉄道では、地震発生時に列車の安全を確保するために、鉄道構造物や走行列車への影響を判断して『警報』を出力し、列車の停止、減速を行うことが原則である^{1) 2) 3)}。特に新幹線のような高速鉄道においては、上記を速やかに行うために、地震発生後、即時に地震波の到達を検知し、自動的に警報出力の判断を行う早期地震防災システムが導入されている^{1) 4)}。新幹線の早期地震防災システムでは、規定値超過による警報に加えて、単独地震計のP波初動部のデータから地震諸元情報（震央距離、震央方位、マグニチュード）を推定して警報の判断を行う、早期地震警報用アルゴリズムが用いられている^{例えは5)}。早期地震警報用アルゴリズムでは、伝播速度の速いP波の情報を用いることで迅速な地震諸元推定や警報出力判断を行うことが可能である。さらに、推定した地震諸元情報から、その地震による鉄道への被害発生範囲を推定することで、必要な範囲に警報を出力することが可能であるという利点がある。一方で、P波到達後数秒間で推定を行うために、地震諸元情報や警報の出力範囲に一定の誤差が生じる可能性があることから、早期地震警報用アルゴリズムでは、その即時性ととも推定精度の向上が求められる。

鉄道総研では、地震時の鉄道の安全性と安定性の向上を目指して、新たな早期地震警報用アルゴリズムの開発を行っており^{6) 7) 8)}、現在、この改良したアルゴリズムを搭載した早期警報用地震計および早期地震防災システムの導入が進んでいる。本報告では、早期地震警報用アルゴリズムにおける地震諸元推定手法の改良点や警報出

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

力の判定手法の概略を紹介するとともに、早期地震警報用アルゴリズムによる警報出力範囲の精度や警報出力時間に関するシステムとしての総合的な評価を行うことで得られる、新たな早期地震防災システムの導入効果について述べる。

2. 早期地震警報用アルゴリズム

ここでは、早期地震警報用アルゴリズムの地震諸元推定手法について、現行の早期地震防災システムで用いられているアルゴリズム（現行アルゴリズム）と、新たに開発したアルゴリズム（新アルゴリズム）との違いを中心に概説する。

2.1 震央距離推定手法

早期地震警報用アルゴリズムにおける震央距離推定手法では、P波初動部分の振幅増加率と震央距離との統計的な関係から震央距離を推定する。現行アルゴリズムにおける震央距離推定手法（B-Δ法）^{5) 9)}では、P波到達から2秒間のデータに対して式(1)に示す関数をフィッティングさせることで振幅増加率を示す係数Bを求め、統計的に震央距離Δの推定を行っている。

$$y(t) = Bt \exp(-At) \quad (1)$$

ここで $y(t)$ は地震波の振幅エンベロップ、 t は時間、 A 、 B は関数フィッティングにより得られる係数である。

これに対し、新アルゴリズムの震央距離推定手法では、フィッティングさせる関数を式(2)のように単純化すると同時に使用するデータ長を0.5秒とし、求めた係

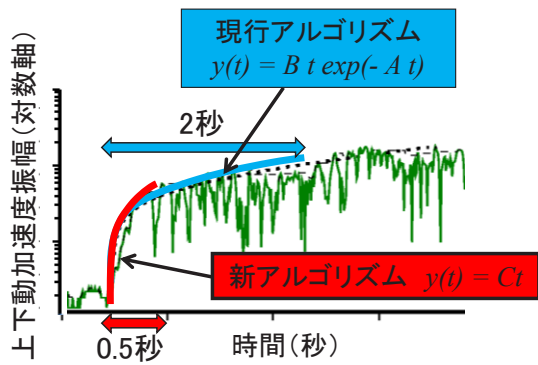


図1 震央距離推定手法における、現行アルゴリズム（青線）と新アルゴリズム（赤線）のフィッティング関数

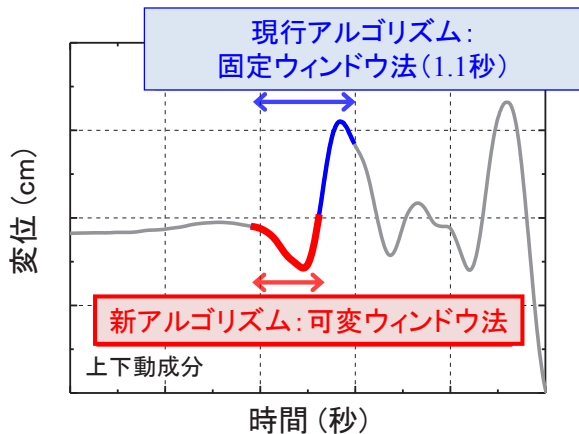


図2 震央方位推定手法における現行アルゴリズム（青線）と新アルゴリズム（赤線）のデータ長の違い

数 C から震央距離 Δ を推定する手法¹⁰⁾を提案している (C- Δ 法)。

$$y(t) = Ct \quad (2)$$

C- Δ 法では、より短いデータ長のP波初動振幅の立ち上がり特性に着目することで、震央距離に依存したP波初動の特性を効果的に利用した震央距離推定を行うことが可能である。図1に、現行アルゴリズムと新アルゴリズムにおけるデータ長とフィッティング関数の違いを示す。

2.2 震央方位推定手法

震央方位は、観測された加速度波形を二回積分することにより得られた変位波形に対して、主成分分析法を適用することにより算出を行っている。主成分分析法により粒子軌跡の長軸方向（第1主成分）を求め、長軸方

向が下方（地中側）となる向きを地震波の到来方向（震央方位）としている。現行アルゴリズムでは、P波到達から1.1秒の固定長のデータを用いて震央方位の算出を行っている。一方、新アルゴリズムでは、変位波形の半波長分のデータを使用して算出を行うこととしている。データ長が地震記録ごとに異なることから、この手法を可変ウィンドウ法と呼ぶ（図2）¹¹⁾。過去のデータによる検証では、平均のデータ長は0.58秒で、現行の約半分の推定時間となることが示されている。

2.3 マグニチュード推定手法

マグニチュード (M) は、2.1節で求めた推定震央距離と、観測最大振幅値との関係式によって推定を行う。現行アルゴリズムでは、加速度を二回積分して得られた変位振幅値を用いてマグニチュードを決定する^{8) 12)}。新アルゴリズムでは、変位振幅値によるマグニチュード（変位マグニチュード）に加え、加速度振幅の大きさからもマグニチュードを決定し（加速度マグニチュード）、両者のうち大きい方の値を最終的なマグニチュードとして採用している^{6) 7)}。地震波形において、統計的に振幅の最大値の出現は変位よりも加速度の方が早い傾向が示されており¹³⁾、加速度マグニチュードを用いることでマグニチュード決定が早期に行えることが期待される。新アルゴリズムで用いる震央距離と最大振幅値との関係式を式(3)に示す。式(3)では、現行アルゴリズムで用いる式に、不均質な地殻内を地震波が伝播することによって生じる影響（内部減衰および散乱減衰）に対応する項（右辺第四項：粘性減衰項）を加えている。係数の値は異なるものの、変位マグニチュード、加速度マグニチュードの両方で式(3)と同じ型の式を使用する。

$$M = Pm1 \cdot \log_{10} A + Pm2 \cdot \log_{10} \Delta + Pm3 + Pm4 \cdot \Delta \quad (3)$$

ここで、 A は振幅の最大値、 Δ は震央距離 (km)、 $Pm1$ 、 $Pm2$ 、 $Pm3$ 、 $Pm4$ は係数である。

また、マグニチュードはP波初動数秒間のデータだけではなく、逐次更新される観測波形の最大振幅値を用いて繰り返し算出を行い、求められたマグニチュードの最大値をトレースしている。これは、 $M6$ を超えるような規模の大きな地震では、震源断層の破壊開始から完了までの継続時間が数秒から数十秒を超えるため、P波の極初動部のみ情報から最終的なマグニチュードを推定することが難しいためである。新アルゴリズムではこのマグニチュードの追加推定について、現行アルゴリズムよりもP波中の推定間隔を短く、かつ推定回数を増やすよう改良を行い、安全性の向上を図っている。

3. 早期地震警報用アルゴリズムの警報出力判定

早期地震警報用アルゴリズムでは、推定地震諸元情報を求めた後に、その情報を用いて警報を出力する範囲を決定し、必要な範囲に適切に警報を出力する必要がある。ここでは、主に新幹線の早期地震防災システムで用いられている警報範囲の決定手法と、警報出力・列車運行の制御手法について述べる。

3.1 M-Δ 法による警報出力範囲の決定

早期地震警報用アルゴリズムにおける警報出力範囲決定の方法は、その利用特性上、簡易かつ即時性に優れることが求められる。新幹線の早期地震防災システムで広く用いられている警報出力範囲の決定手法として、過去の地震災害における鉄道被害事例の、マグニチュード (M) と被災箇所の最大震央距離 (Δ_{lim}) との関係を用いる手法 (M-Δ 法) がある。マグニチュードが大きいほど、被害が発生する範囲も大きくなる傾向があり (図3)、その関係式は式 (4) で表される¹⁴⁾。

$$\log_{10} \Delta_{lim} = 0.51M - 1.5 \quad (4)$$

Δ_{lim} は被災発生 の最遠点の震央距離を示し、式 (4) の関係式を被災発生限界線と呼ぶ。

新幹線の早期地震防災システムでは、後述するように、この M-Δ 法の被災発生限界線を利用した固定制御手法や可変制御手法と呼ばれる手法により、警報の出力と列車運行の制御を行っている。

3.2 早期地震警報用アルゴリズムによる固定制御

地震諸元推定を行った地震計、およびその地震計の受け持つ範囲に地震被害が発生すると判断された場合に警報出力を行う手法である。地震諸元推定を行った地震計自身が M-Δ 法による被災発生限界線の範囲内に含まれた場合に警報を出力し、その地震計が受け持つ固定範囲の列車運行を制御する。新幹線の早期地震防災システムでは、例えば地震計が設置されている変電所等に制御信号を送信することにより、き電が遮断されて走行中の新幹線の非常ブレーキが自動的に動作し、減速・停止が行われる。これは早期警報用地震計の基本的な機能であり、仮に他の地震計やサーバとの通信が遮断された場合においても当該地震計単独で警報出力を行うことができる重要な制御方法である。

3.3 早期地震警報用アルゴリズムによる可変制御

推定されたマグニチュードの大きさに応じて警報出力と列車の運行制御を行う範囲を可変とする制御方法である。推定震央位置を中心とした被災発生限界線範囲内全

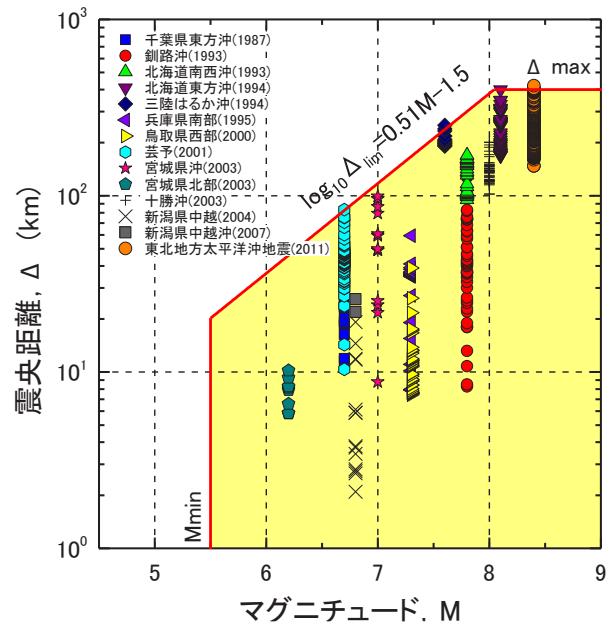


図3 地震イベント毎の鉄道地震被災箇所の震央距離とマグニチュードの関係図 (M-Δ 図)

体に警報を出力し、列車運行を制御する。新幹線の早期地震警報システムでは、推定地震諸元情報を、サーバ等を介して他の地震計に対して送信し、情報を受け取った各地震計が被災発生限界線範囲に含まれるか否かを判断することで警報出力の有無を決定する。地震の規模、被害範囲に応じた適切な警報出力が行われること、また、震源に近い地震計の推定情報により判断を行うことで、より早期に、より広い範囲に警報出力を行うことが可能であるというメリットがある。

4. 早期地震警報用アルゴリズムの総合性能評価

早期地震警報用アルゴリズムの性能評価として、2.1節から2.3節に示した震央距離、震央方位、マグニチュードの各地震計推定手法については、正解値と推定値との比較による精度検証が行われており、それぞれの手法の推定精度は現行アルゴリズムと比較して同等以上となることが示されている⁸⁾。一方で、早期地震警報用アルゴリズムを搭載した早期地震防災システムの導入効果の検証を行うためには、各地震計推定手法と3章で示した警報出力判定手法とを組み合わせたシステムとしての総合的な性能評価を行う必要がある。そこで、実地震データを用いた早期地震警報用アルゴリズムの総合性能評価を行い、現行アルゴリズムと新アルゴリズムとで結果の比較を行った。総合性能評価では、警報出力の性能検証として、警報出力範囲の正解率・空振り率の確認と、警報出力タイミングの評価を行った。

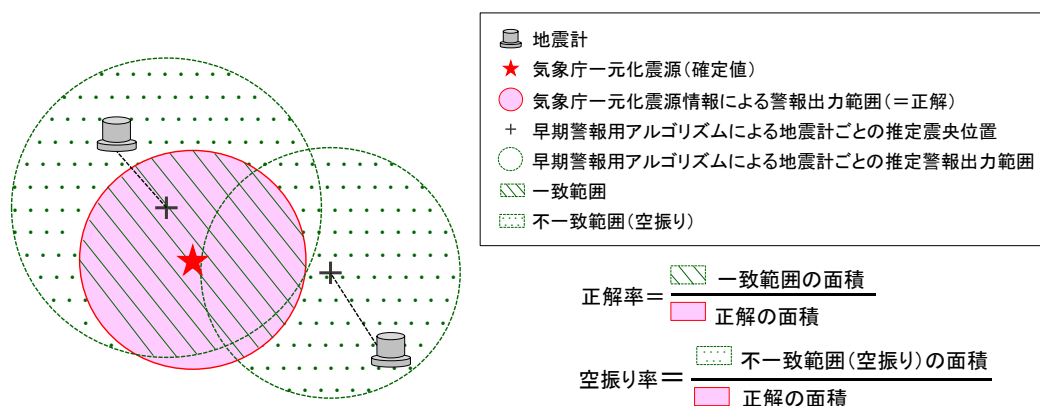


図4 警報出力範囲の正解率と空振り率の概念図

表1 警報出力範囲の正解率と空振り率

| | 現行アルゴリズム | 新アルゴリズム |
|------|----------|---------|
| 正解率 | 0.87 | 0.93 |
| 空振り率 | 1.42 | 0.19 |

4.1 警報の正解率、空振り率

地震イベント毎に早期地震警報用アルゴリズムによる推定警報出力範囲の正解率、空振り率を求め、現行アルゴリズムと新アルゴリズムとの結果の比較を行った。

警報出力範囲の正解率、空振り率の概念図を図4に示す。警報出力範囲はM-Δ法により決定し、被害発生限界線範囲内全体に警報を出力する可変制御を行うこととした。ここでは、早期地震警報用アルゴリズムによる推定警報出力範囲と、正解の警報出力範囲とを比較し、双方が一致している範囲(図中の緑色斜線部)の面積を正解の警報出力範囲面積(赤色部)で除したものを正解率、双方が不一致でかつ正解の範囲外に出ている範囲の面積(警報の空振り範囲; 緑色点部)を正解の面積で除したものを空振り率とした。正解の警報出力範囲は、気象庁一元化震源の震央位置、マグニチュードの情報により求めた。また、一つの地震イベントに対して複数の地震計が推定、警報出力を行った場合は、各地震計の推定警報範囲を足し合わせた総面積をその地震イベントにおける推定警報出力範囲とした。地震時の鉄道の安全性向上のためには、正解率が1に近づくことが望ましい。一方、鉄道の安定輸送の観点からは、空振り率がより小さな値となることが望まれる。

解析に用いたデータは、新アルゴリズムの開発で使用した国立研究開発法人防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net実地震データ、1996年から2011年に記録されたM4.5以上の195地震である。ここでは、K-NET、KiK-net観測網の地震計を仮想的に鉄道の早期地震防災システム地震計とみなして解析を行った。

表1に、求められた警報出力範囲の正解率と空振り率を示す。正解率の算出には、過去に鉄道の地震被害が発生したマグニチュードM5.5以上かつ気象庁一元化震源情報による正解の警報出力範囲内に地震計が含まれる地震(62地震)を使用し、地震ごとの正解率の平均値を求めている。また、空振り率の算出には、全195地震を使用している。空振り率については、地震イベントごとの値が正規分布に従わないことから、その中央値を全体の空振り率としている。表1より、正解率は現行アルゴリズム、新アルゴリズムともに9割近い値となるが、新アルゴリズムを用いることによりさらに約6%精度が向上することが明らかになった。また、空振り率は現行アルゴリズムと比較して約87%と大幅に減少することが明らかとなった。上記より、新アルゴリズムは現行アルゴリズムを使用する場合と比較して、より適正な範囲に警報が出力され、地震時の安全性、安定性が向上するものと見込まれる。

4.2 警報出力タイミング

警報出力の早期性向上の評価のため、地震イベントごとに警報出力タイミングを確認し、現行アルゴリズムと新アルゴリズムとの結果の比較を行った。対象となる地震計の個別の推定、警報判定による動作を確認するために、警報出力タイミングは固定制御による警報のタ

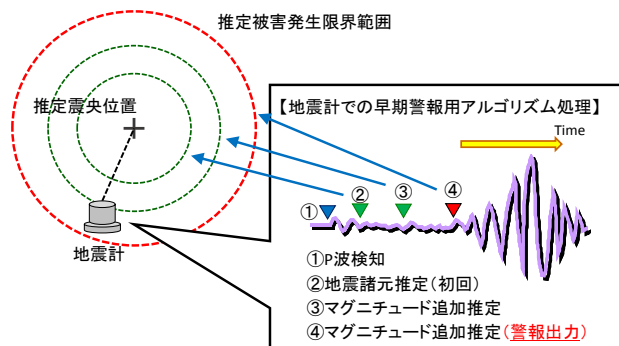


図5 警報出力タイミングの概念図

イミング（早期地震警報アルゴリズムにより推定した被害発生限界範囲に推定を行った地震計が含まれるタイミング）とした（図5）。ここでは、2003年以降に発生した主な被害地震で記録されたデータのうち、震央距離が50km以内でかつJR警報用加速度¹⁴⁾が40gal以上を記録した地震計のデータ（6地震）を対象として検証を行った。使用した地震の一覧を表2に示す。

図6～11に、各地震による警報の検証結果を示す。横軸は地震発生からの経過時間、縦軸は警報出力した地震計の割合を示している。

図6～11で警報出力した地震計の割合が1に到達しないものがある。これは30秒以降に警報出力した地震計や、固定制御による警報の条件を満たさなかった地震計があるためであるが、その多くが震央から離れた場所の地震計であることから、システム全体としての動作に問題はないと考える。

図6～11より、全ての地震において、各地震の最初の警報は新アルゴリズムの方が早く出力されることが明らかになった。その出力タイミングの差は最大で約4秒

表2 警報出カタイミングの検証で使用した地震イベント

| 発震時刻 | 震央緯度(度) | 震央経度(度) | 震源深さ(km) | マグニチュード | 地震名称 | データ数 |
|------------------|---------|---------|----------|---------|-----------|------|
| 2004/10/23 17:56 | 37.292 | 138.867 | 13.1 | 6.8 | 新潟県中越地震 | 12 |
| 2005/03/20 10:53 | 33.739 | 130.176 | 9.2 | 7.0 | 福岡県西方沖地震 | 10 |
| 2007/03/25 09:41 | 37.221 | 136.686 | 10.7 | 6.9 | 能登半島沖地震 | 7 |
| 2007/07/16 10:13 | 37.557 | 138.609 | 16.8 | 6.8 | 新潟県中越沖地震 | 12 |
| 2008/06/14 08:43 | 39.03 | 140.881 | 7.8 | 7.2 | 岩手・宮城内陸地震 | 11 |
| 2016/04/16 01:25 | 32.755 | 130.763 | 12.4 | 7.3 | 熊本地震 | 18 |

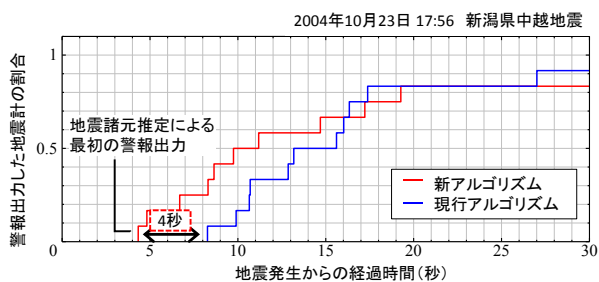


図6 2004年新潟県中越地震での警報出カタイミング

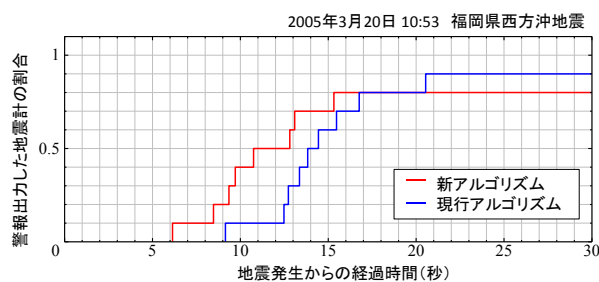


図7 2005年福岡県西方沖地震での警報出カタイミング

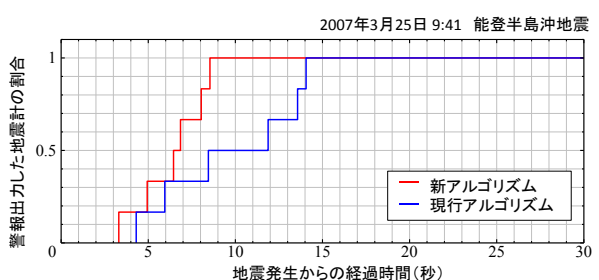


図8 2007年能登半島沖地震での警報出カタイミング

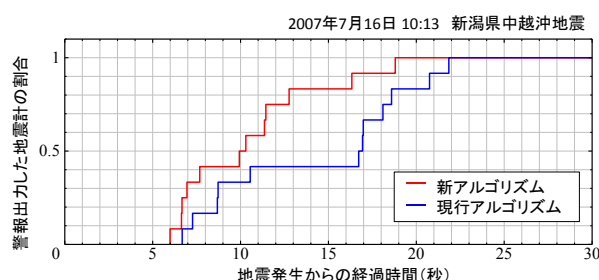


図9 2007年新潟県中越沖地震での警報出カタイミング

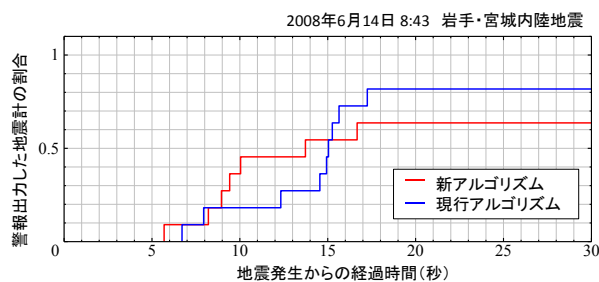


図10 2008年岩手・宮城内陸地震での警報出カタイミング

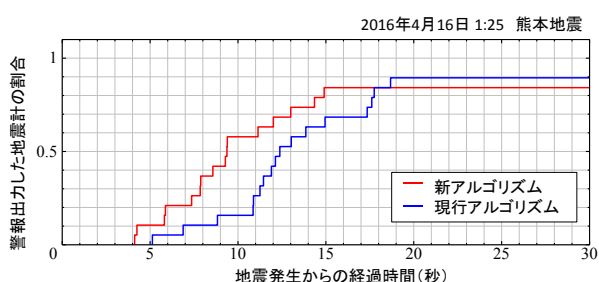


図11 2016年熊本地震での警報出カタイミング

特集：地震対策技術

(図6, 新潟県中越地震)であった。また, 最初の警報タイミング以降についても, ほぼすべての地震計で現行アルゴリズムよりも新アルゴリズムの方が早く警報出力される結果となり, 新アルゴリズム導入により警報出力の早期性が向上することが示された。

5. まとめ

本報告では, 早期地震警報用アルゴリズムにおける地震諸元推定手法の改良点や警報出力の判定手法の概略を述べた後, 鉄道総研が開発した新しい早期地震警報用アルゴリズムの導入効果の検証として, 警報出力範囲の精度や警報出力時間に関する総合的な評価を行い, 現行アルゴリズムによる結果と比較した。早期地震警報アルゴリズムによる警報出力範囲の正解率, 空振り率の比較を行った結果, 正解率は現行アルゴリズムと比較して約6%向上し, 空振り率は約87%減少することを確認した。また, 地震イベントごとの警報出力タイミングは, 現行アルゴリズムと比較して直近観測点で最大4秒程度早くなることが明らかになった。以上の結果から, 新しい早期地震警報用アルゴリズムの導入により, 警報出力の精度が向上するとともに警報出力の早期性が向上することが示された。

謝 辞

本報告の解析には, 国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) および基盤地震観測網 (KiK-net) の地震記録波形を使用しました。ここに記して感謝いたします。

文 献

1) 中村豊: 研究展望 総合地震防災システムの研究, 4 土木学会論文集, No.531/I34, pp.1-33, 1996
 2) 芦谷公俊, 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, 第60巻, 第5号, pp.387-397, 2007
 3) Yamamoto, S., Tomori, M., "Earthquake early warning sys-

tem for railways and its performance," *Journal of JSCE*, Vol.1, pp.322-328, 2015.
 4) 岩橋寛臣, 岩田直泰, 佐藤信二, 芦谷公俊: 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
 5) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔: P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震2, Vol. 56, pp. 351-361, 2004
 6) 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
 7) 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
 8) 岩田直泰, 山本俊六: 高度化されたアルゴリズムを搭載した早期警報用地震計の開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.5, pp.11-16, 2016
 9) 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," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 1, pp. 526-532, 2003.
 10) 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
 11) Noda, S., Yamamoto, S., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M., and Ashiya, K., "Improvement of back-azimuth estimation in real-time by using single station record," *Earth Planets Space*, Vol.64, pp.305-308, 2012.
 12) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔: 早期地震検知における新しい地震諸元推定方法, 鉄道総研報告, Vol. 16, No. 8, pp. 1-6, 2002
 13) 干場充之, 岩切一宏, 大竹和生: 最大動の出現時間について -緊急地震速報におけるより迅速な M 推定を目指して-, 日本地球惑星科学連合大会, Y230-004, 2009
 14) 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