

警報用計測震度及び警報用予測震度の検討

東海旅客鉄道㈱ 他谷 周一、中嶋 繁

1. はじめに

地震の最中にリアルタイムに地震警報を出す場合、ある地震動指標で揺れの大きさを計り、基準値（例えば震度5弱相当）を超えたら警報を出す仕組みが考えられる。このときの地震動指標には、分かりやすいもの（すなわち普遍性が高いもの）が求められる。様々にある地震動の強さを表す指標の中でも、最も普遍性が高いものは気象庁震度階級、すなわちその元となっている計測震度と考えてよいであろう。

本稿は、計測震度を指標とした地震警報を実現することを目的に、地震中に計測震度相当値を算出する方法を検討した過程を述べたものである。また、この新しい仕組みを発展させ、大きく揺れる前にその観測点での最終的な計測震度の予測値を算出する方法も検討したので併せて報告する。

2. 地震中の計測震度相当値の算出における課題

計測震度の算出方法は平成8年気象庁公示第4号に定められているが、この公示では地震終了後に計測震度を算出することとなっている。公示上の方法を改良し、地震中に計測震度相当値を算出するには1つの大きな課題をクリアしなければならない。公示上の方法では、地震波形全体を周波数領域に Fourier 変換し、所定のフィルタ処理を施した後、Fourier 逆変換により時間領域に地震波形を戻す演算が含まれている。上記フィルタ処理を漸化式にて処理¹⁾できれば、上記3つの過程を全て時間領域で処理する事ができるのだが、中間にあるフィルタの特性が複雑であり（図1）、簡単に漸化式で表現する事ができない。

3. フィルタ処理の時間領域での処理方法の検討

2. で述べた課題をクリアするため、1Hzの位相を補償するように条件を設定し、帯域の狭いバンドパスフィルタを重ね合わせ、気象庁定義のフィルタに近い特性をもつ漸化式フィルタ（式1）を作成した。フィルタ後加速度値 $y[n]$ は、地震動を常時観測したときの地震波形の時系列データの加速度振幅値 $x[n]$ 、以前のサンプリングタイミングでの加速度振幅値 $x[n-1]$ 、 $x[n-2]$ 、以前のサンプリングタイミングでのフィルタ後加速度値 $y[n-1]$ 、 $y[n-2]$ をもとに、式1により計算できる。

$$y[n] = b_1x[n] + b_2x[n-1] + b_3x[n-2] - a_2y[n-1] - a_3y[n-2] \quad (\text{式1})$$

式1で表されるフィルタの特性を図1に示す。

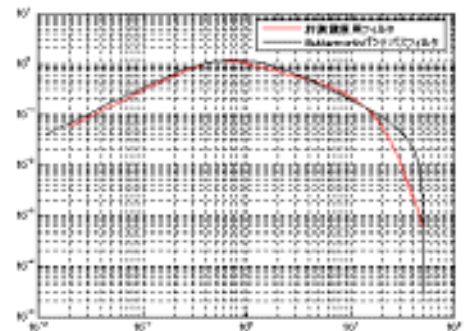


図1 フィルタ特性の比較

4. 警報用計測震度算出方法

ある時刻まで求めた3成分のフィルタ後加速度値 $y[n]$ のベクトル合成値 $v[n]$ は、気象庁公示の計算方法における $v[n]$ と同様と考えれば、 $v[n]$ をもとに計測震度 I を求める手順は、公示の順に準拠する事ができる。すなわち、 $v[n]$ を降順に並べ替え、最大値から30番目（100Hz サンプリングの場合）のとなる $v[n]$ を a_{max} とし、次式により計測震度 I を求めることができる。

$$I = 2\log a_{max} + 0.94 \quad (\text{式2})$$

以下では、公示どおりの方法で計算した計測震度 I_{jma} と区別するため、今回提案する方法により求めた計測震度を「警報用計測震度」と呼ぶことにする。

過去の地震(5403地震波形, マグニチュード6.0以上)について、

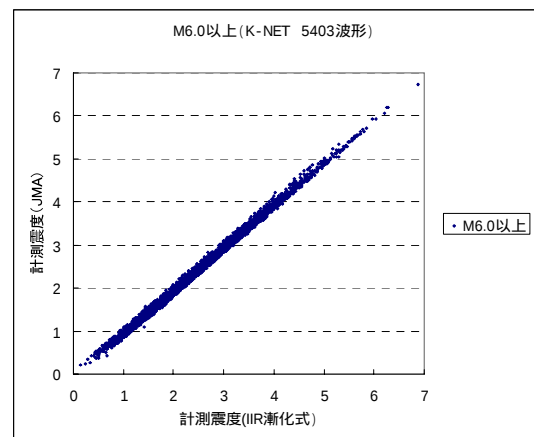


図2 警報用計測震度と計測震度の差の比較

キーワード：地震、早期警報、計測震度、予測震度

連絡先：東海旅客鉄道㈱ 新幹線鉄道事業本部 施設部管理課 TEL:03-5218-6269 FAX:03-3286-5183

この方法で計算した警報用計測震度 I と計測震度 I_{jma} とを比較した結果を示す(図2)。両者の差の平均値は0.083、標準偏差は0.058である。計測震度の実効桁数は小数点第2位であるから、警報用計測震度は必要十分な精度で計測震度を再現している。

5. 計測震度の予測値を算出する方法の検討

地震動の最初の部分はP波であり、P波では水平動より上下動が卓越する事は良く知られている。このことから、地震動の最初の部分から最終的な震度を予測するには、上下動に着目するのが良いと考えた。そこで、上下動の最大値から最終的な計測震度を予測するための相関式を作成することとした。

3成分の加速度値について、警報用計測震度フィルタ処理し、そのうちの上下動加速度の最大値(以下 Afu)を説明変数(x)とし、3成分合成値に0.3秒ルールを適用した後の最大値 a_{max} を y として、累乗近似による回帰係数を求め(図3)、この回帰係数と式2をもとに式3を作成した。式3は、 $Afu[n]$ の最大値から震度相当値を算出する式であるが、 $Afu[n]$ を任意の時刻に拡張することで、計測震度の予測値 Iap (以下「警報用予測震度」と呼ぶ)を算出する式となる。

$$Iap = 2.0 \alpha \log(Afu[n]) + 2.0 \beta + 0.94 \quad (\text{式3})$$

4. と同様の方法で、 Iap と I_{jma} とを比較した結果を示す(図4)。両者の差の平均値は-0.039、標準偏差は0.333であり、概ね震度階1段階分程度の誤差となる。

6. 警報用予測震度による地震警報の早期性の検証

地震警報の早期性を論じるとき、注意しなければならない点がある。警報を早めるには、どのような指標であっても、閾値さえ下げればよいが、その一方、被害が発生せず、結果として不要となる警報(以下空振り警報)を増やすことになる。したがって、警報の早期性の面で地震警報の判断指標間の優劣を考えるとときには、空振り警報の発生頻度が同程度となる閾値を設定し、その閾値で警報が必要となる地震に対する警報の早期性を検討すべきである。そこで、鉄道の沿線地震計による地震警報の指標として長年使用されてきた5Hz加速度40galでの空振り警報頻度と同レベルになるよう、警報用予測震度による地震警報の閾値を設定した。

図5は、警報用予測震度による地震警報の早さを示した図であり、グラフ上の左上に張り出すような形になるほど、早いタイミングで警報が出る事を示している。参考として、既存技術である5Hz加速度、リアルタイムSI値²⁾、PI値³⁾(※文献3をもとに独自に推察した方法で算出)についても警報用予測震度と同様の解析を行った。この図から警報用予測震度は既存技術と比較しても警報を早く出すことができる指標であることが判る。

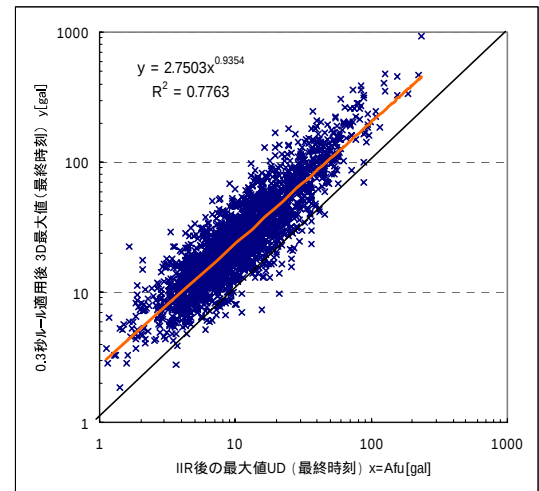


図3 Afu と a_{max} の相関

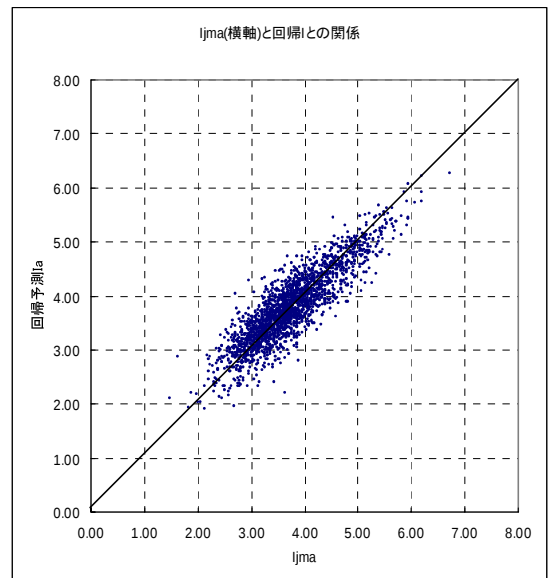


図4 予測震度と計測震度の差の比較

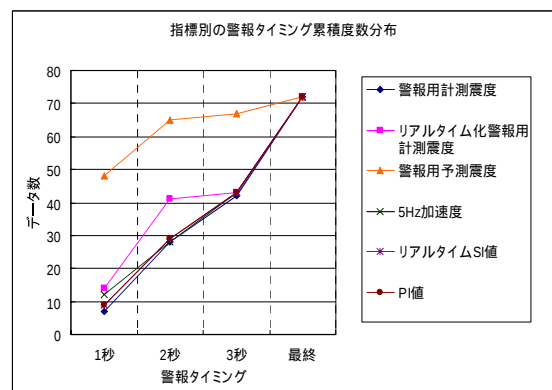


図5 指標別の警報タイミング比較

¹ 「漸化式デジタル・フィルターの自動設計」(齊藤 物理探鉱, 1978.08)

² 「インテリジェント地震センサの開発」(古川ほか Savemation Review, 1999)

³ 「合理的な地震動強度指標値の検討」(中村 土木学会地震工学論文集, 2003)