

## 早期地震検知・警報のための新しい震源指標

防災技術研究部 地震防災

主任研究員 山本俊六

### 1. はじめに

現在、新幹線の早期地震警報システムや緊急地震速報では、地震の規模を表現する指標として、地震動の変位から定義された気象庁マグニチュード<sup>1)</sup>を利用している。一般に地震動の変位成分は、地震動の長周期成分の性質を強く反映するため、気象庁マグニチュードは揺れの長周期成分を評価するために適した震源指標と言える。

一方、地震防災の分野では、地震の揺れの強さを表す物理量として、加速度、震度、加速度応答スペクトルなどを使うことが多い。加速度、震度は通常、地震動のうち数分の1秒～1秒付近の短周期成分の影響を強く受け、また加速度応答スペクトルは地震動のうち対応する周期の成分の影響を受ける。このような特定周期の物理量をすべて、気象庁マグニチュードから精度良く推定するには限界がある。ただし、一般的に用いられる唯一の震源指標は気象庁マグニチュードであるため、通常は気象庁マグニチュードに基づき加速度、震度、加速度応答スペクトルなどを推定している。

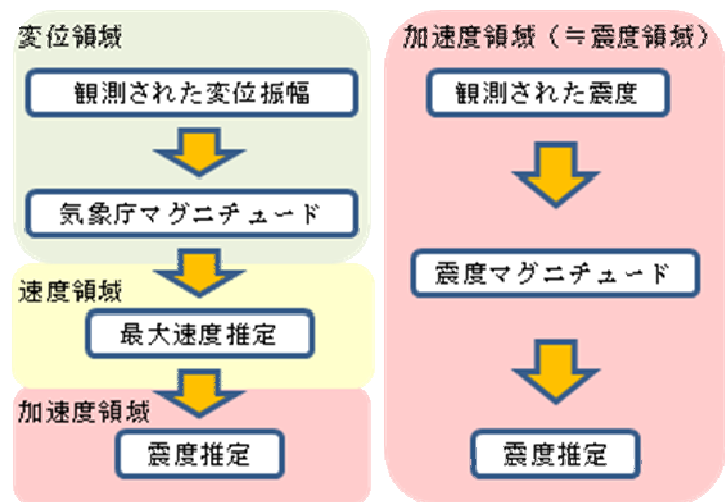
このような状況を背景に、ここでは特定の物理量を高精度に推定するために特化した新しい震源指標を提案したので、これを紹介しその有効性を示す。

### 2. 新しい震源指標の導入

#### 2.1 震度マグニチュードと周波数応答マグニチュードの概念

地震の揺れに関する特定の物理量を精度良く推定するためには、対象とする物理量から直接求められた震源指標を使用することが望ましい。たとえば現在、震度を推定する場合、図1(a)に示すように、変位により定義された気象庁マグニチュードを用いて速度を推定し、さらに速度から震度(≒加速度)を推定する手順をとっている。この手法では、異なる物理量を関連付けるために複数の経験式が用いられており、結果的に各経験式の持つ誤差が積み重なることとなり、単一の経験式を使う場合に比べ誤差が大きくなることが予想される。

一方、震源指標が震度から定義されていれば、単一の経験式を用いてこの震源指標から直接震度を推定することができる(図1(b))。このため、各経験式の予測精度の検討は要するものの、



(a) 従来(従来の)震度推定法 (b) 新しい震度推定法

図1 震度推定の流れ

推定誤差が前者に比べ相対的に減少することが予想される。

同一の概念は、加速度応答スペクトルの推定にも適用できる。従来の手法では変位から定義された気象庁マグニチュードを用いて加速度応答スペクトルを計算した。この時、観測された加速度応答値から直接定義された震源指標を用いれば、加速度応答値をより高い精度で計算できることが予想される。(図2参照)。

## 2.2 震度マグニチュードを用いた距離減衰式

前節の概念に基づき、ここでは、震度と震源距離をパラメータとする新しい震源指標、すなわち震度マグニチュードを用いた距離減衰式を定義する。震源から十分離れた距離において、マグニチュード (M)、変位振幅 (D)、震源距離(r)の関係は(1)式のように表すことができる。

$$M = \log_{10}(D) + \log_{10}(r) + at + b \quad (1)$$

この時、tは震源から観測点までの波動伝播時間(走時)を示す。またa、bは係数である。ここで、震度(I)と加速度振幅(A)の関係が  $I=2 \cdot \log_{10}(A)+0.94$  と定義されることを考慮すると、震度マグニチュード(MI)の距離減衰式は、(1)式で表される関係を参考に次式となる。

$$MI = I/2 + \log_{10}(r) + at + b \quad (2)$$

(2)式は震度マグニチュードの定義式とも言え、この式を用いることにより、震度マグニチュードを震源距離と震度から直接求めることができる。また同一の式を変形することにより、震度を震度マグニチュードと震源距離から直接計算することができる。

次に防災科学技術研究所のHi-net<sup>2)</sup>で観測された127地震、11242データを用いて、(2)式の係数a、bを最小自乗法により求めた。その結果、 $a=0.012$ 、 $b=2.73$ を得た。

上記の127地震に関して気象庁マグニチュードと震度マグニチュードを比較したものを図3に示す。図より、気象庁マグニチュードが同じ値を持つ地震

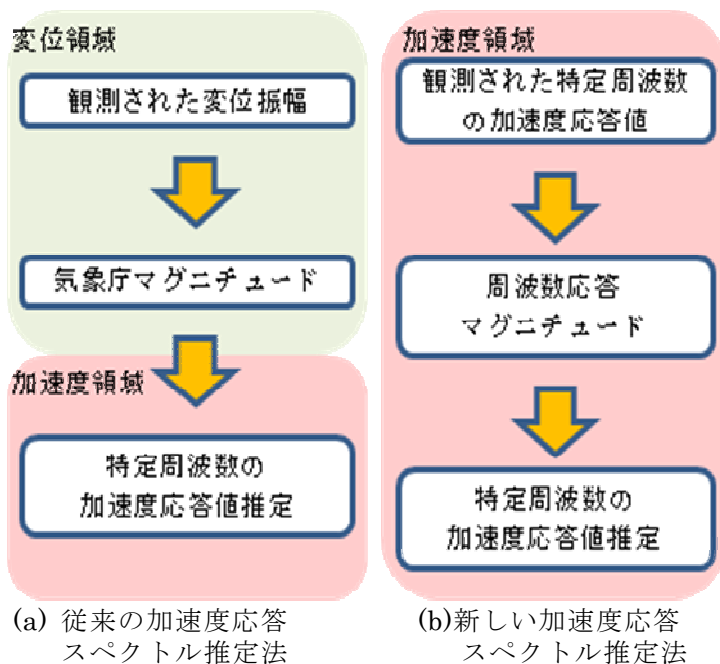


図2 加速度応答スペクトル推定の流れ

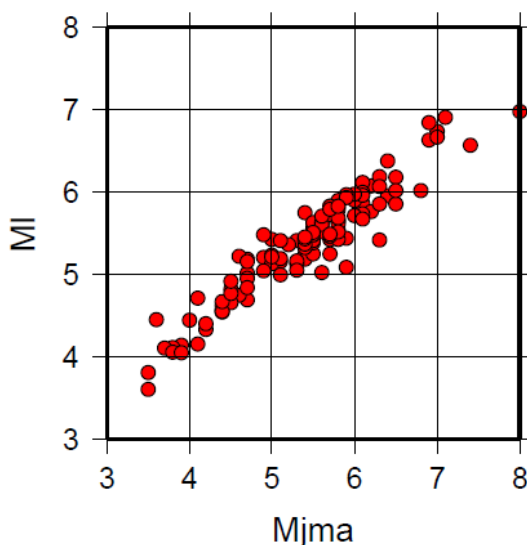


図3 震度マグニチュード(MI)と気象庁マグニチュード(Mjma)の比較

であっても、震度マグニチュードの値が±0.5程度の範囲でばらつくことがわかる。このばらつきは、各地震の周波数特性の差異によるものと考えられ、これが気象庁マグニチュードを利用して震度推定を行う際の、推定誤差の主な要因となっている。

### 2.3 周波数応答マグニチュードを用いた距離減衰式

前節と同様に、加速度応答スペクトルと震源距離をパラメータとする新しい震源指標、すなわち周波数応答マグニチュードを用いた距離減衰式を求める。加速度応答値を  $Res(f)$ 、周波数応答マグニチュードを  $M_{res}(f)$  と表現した場合、周波数応答マグニチュードを用いた距離減衰式は、(1)式の  $D$  を  $Res(f)$  と置き換え、さらに右辺第2項目に係数を追加することにより、次式となる。

$$M_{res}(f) = \log_{10}[Res(f)] + g(f)\log_{10}(r) + a(f)t + b(f) \quad (3)$$

ここで  $g(f)$ 、 $a(f)$ 、 $b(f)$  は周波数特性を持つ係数であり、Hi-net データを用いた最小自乗法解析の結果、それぞれ表1のように求められた。

上記解析に用いた地震に関して各周波数に対応する周波数応答マグニチュードを計算し、その結果を気象庁マグニチュードと比較したものを図4に示す。図3同様、気象庁マグニチュードが同じ値を示す地震であっても、周波数応答マグニチュードの値が±0.5程度の範囲でばらつく。前節の場合と同様に、このばらつきは、地震の周波数特性の差異によるものと考えられる。

### 2.4 P波による新しい震源指標の計算

2.2 および 2.3 では、P波とS波などを含む全相データを用いて震度マグニチュードや周波数応答マグニチュードの定義と計算を行った。これらの震源指標を早期地震警報で利用するためには、P波部分から指標を計算する必要がある。そのための準備として、全相データによる震度(I)とP波による震度( $I_p$ )、および全相データ加速度応答スペクトル( $Res(f)$ )と、P波による加速度応答スペクトル( $Res_p(f)$ )との関係を求めることとした。ここでは(4)式および(5)式のように、両者の関係を震源距離に関する一次式で表す。

$$I - I_p = d + er \quad (4)$$

$$\log_{10}[Res(f)] - \log_{10}[Res_p(f)] = d(f) + e(f)r \quad (5)$$

(4)式の  $d$ 、 $e$ 、(5)式の  $d(f)$ 、 $e(f)$  は係数であり、Hi-net のデ

表1 (3)式の各係数

f(Hz)	g(f)	a(f)	b(f)
0.25	1.01	0.013	3.14
0.5	0.98	0.010	3.13
1.0	0.96	0.0094	2.95
2.0	0.99	0.011	2.60
4.0	1.01	0.016	2.28
8.0	1.05	0.019	2.06

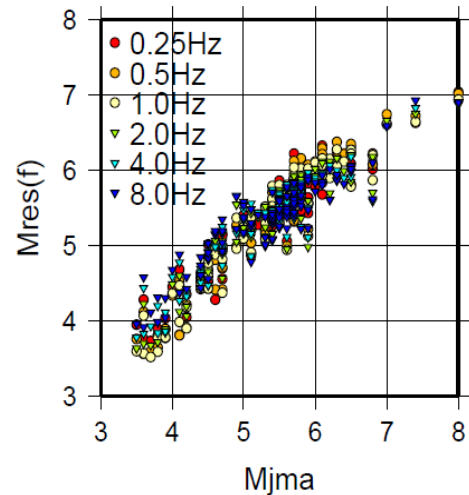


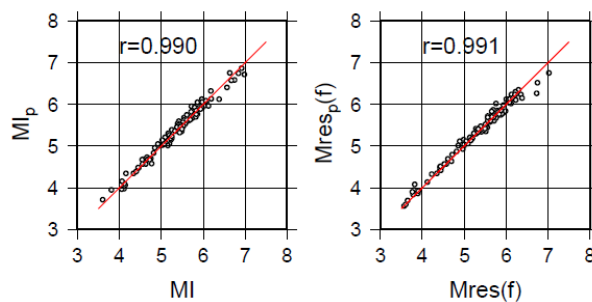
図4 周波数応答マグニチュード ( $M_{res}(f)$ ) と気象庁マグニチュード ( $M_{jma}$ ) の比較

表2 (5)式の各係数

f(Hz)	d(f)	e(f)
0.25	0.917	-0.0019
0.5	0.900	-0.0016
1.0	0.890	-0.0015
2.0	0.804	-0.0014
4.0	0.750	-0.0014
8.0	0.650	-0.0011

ータを用いた解析の結果、 $d=1.19$ 、 $e=-0.0010$ 、  
また  $d(f)$ 、 $e(f)$  に関しては表 2 のように求められた。

(2)式、(4)式を用いて計算された P 波震度マグニチュード ( $MI_p$ ) と震度マグニチュードの比較を図 5 (a)、(3)式、(5)式を用いて計算された P 波周波数応答マグニチュード ( $M_{res_p}(f)$ ) と周波数応答マグニチュードの比較の例を図 5 (b)に示す。これらの相関係数は  $0.990\sim 0.991$  と非常に高い。以上より、P 波データを用いても全相データを用いた場合とほぼ等しい震源指標を求められることがわかった。



(a) MI と  $MI_p$  の比較 (b)  $M_{res}$  と  $M_{res_p}$  の比較  
( $f=5\text{Hz}$ )

図 5 全相データによる震源指標と P 波による震源指標の比較

### 3. 新しい震源指標の有効性

新しい震源指標の有効性を検証するため、Hi-net のデータを用いて、震度マグニチュードと気象庁マグニチュードを用いた震度推定誤差の比較、および周波数応答マグニチュードと気象庁マグニチュードを用いた周波数応答推定誤差の比較を行った。その結果を図 6 に示す。

図より、気象庁マグニチュードを用いた従来の手法と比較して、新しい震源指標（震度マグニチュード・周波数応答マグニチュード）を用いた場合、推定誤差が大幅に減少することがわかる。震度マグニチュード、P 波震度マグニチュードによる推定誤差の低減はそれぞれ 22%、17%である。また周波数 0.25~8.0Hz において、周波数応答マグニチュード、P 波周波数応答マグニチュードによる推定誤差の低減は、それぞれ 14~22%、10~18%である。これより新しい震源指標の有効性が示された。

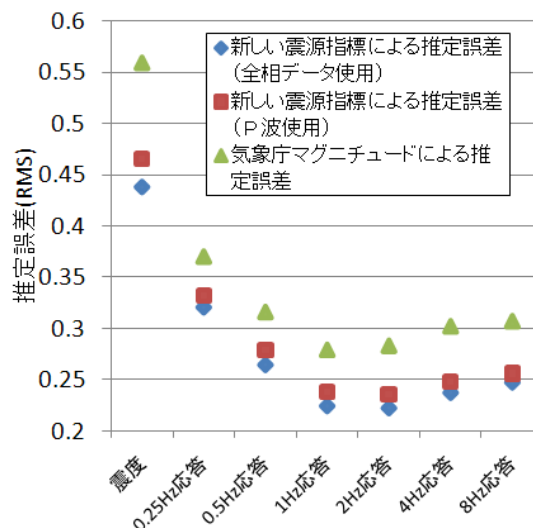


図 6 各震源指標による推定誤差の比較

### 4. まとめ

地震による揺れの強さを精度よく推定するための新しい震源指標として震度マグニチュードと周波数応答マグニチュードを提案し、その有効性について述べた。これらの震源指標は、目的とする揺れの物理量と直接関連付けられる指標であるため、これらを使用することにより、従来の手法に比べて推定誤差が大幅に減少する。また P 波からこれらの震源指標を計算できるため、即時的なシステムでの利用も可能である。以上より新しい震源指標は地震防災システムにとって有効な指標になると期待される。

### 【参考文献】

- 1) 気象庁：震度を知る—基礎知識とその活用—，ぎょうせい，1996
- 2) Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H. and Yamamoto A. “Recent progress of seismic observation networks in Japan —Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net—,” Earth Planets Space, Vol.56, pp.15-28, 2004.