

新しい震源指標と鉄道分野での利用方法

山本 俊六* 堀内 茂木**

New Seismic Parameters and Their Application to Railway System

Shunroku YAMAMOTO Shigeki HORIUCHI

Since a seismic magnitude, which is defined from long-period component of seismic waves, has been generally used as one of the most important seismic parameters to scale size of an earthquake, almost all the attenuation relations for strong motion estimation use magnitude as a key seismic parameter. However, when we estimate short-period strong motion indices, such as seismic intensity, short-period responses and other pertinent factors, the magnitude may not be the best seismic parameter physically. Here we propose new seismic parameters, “seismic intensity magnitude” and “frequency-response magnitude”, as directly determined from the target strong motion indices in order to obtain more accurate estimates in real-time systems. Our results show that these parameters are capable of decreasing estimation errors by approximately 10-22% comparing with the conventional method applying JMA magnitude. Further, we present basic plans how to apply these new parameters to a railway system.

キーワード：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，緊急地震速報，鉄道

1. はじめに

一般に地震の大きさを表す震源指標として、マグニチュードが広く利用される。マグニチュードは変位（たとえば気象庁マグニチュード）あるいは変位の時間積分（たとえばモーメントマグニチュード）から定義される震源指標であり、地震動の長周期成分から決定される値である。新幹線の早期地震警報システム¹⁾や、2007年から一般向け運用が開始された気象庁の緊急地震速報システム²⁾などに代表されるリアルタイム地震防災においても、地震の大きさを示す指標としてマグニチュードが使用されている。

一方、地震防災の分野で地震の揺れの強さを表す物理量として、加速度最大値、震度、応答スペクトルなどが使われることが多い。加速度、震度は一般的に地震動のうち1Hz～数Hz程度の短周期成分に支配され³⁾、応答スペクトルの各周期の値は地震動のうち対応する周期付近の成分に支配される。仮に地震動の周波数特性が一定であれば、上記の物理量と長周期成分で定義されるマグニチュードは常に高い相関性を示すことになる。ところが震源域の物性、不均質性、応力場の性質などにより断層の破壊過程は大きく変化し、これにより地震動の周波数特性は地震ごとに有意なばらつきを持つことが知られ

ている。従って揺れの強さを表す様々な物理量とマグニチュードとの相関は常に高くはなく、その結果、マグニチュードからこれらの物理量を推定する際に大きな誤差が生じることがある。しかし、現実には公表される地震の大きさを示す唯一の震源指標はマグニチュードであるため、利用者はマグニチュードに基づき揺れの強さを推定している。

このような背景から、特定の物理量を高精度に推定するための最適な震源指標の開発を目的として、山本他⁴⁾、Yamamoto et al.⁵⁾は、震度推定を目的とした“震度マグニチュード”(MI: seismic intensity magnitude)を、また山本他⁶⁾は、任意の周波数帯域の応答の推定を目的とした“周波数応答マグニチュード”(Mres(f): frequency-response magnitude)を提案した。いずれもリアルタイム地震防災分野での利用を想定し、地震波形のP波部分からこれらの震源指標を即時的に求め、大きな揺れが到達する前に、揺れの強さを高精度に推定することを目指している。ここでは、これらの新しい震源指標の定義(=距離減衰式)を紹介し、物理的観点から既往の揺れの強さの推定手法とここで提案する手法との処理内容の違いを考察する。また、実データを用いて推定誤差の比較や正確な揺れの推定に要する時間の比較を行い、新たな震源指標の有効性を示す。さらに、これらの震源指標が鉄道分野のリアルタイム地震防災に有効活用できる可能性を示す。

* 防災技術研究部（地震防災）

** 独立行政法人防災科学技術研究所（防災システム研究センター）

特集：防災技術

2. 震度マグニチュードと周波数応答マグニチュード

2.1 定義

震源から十分離れた場所におけるS波の加速度最大振幅 Acc は、震源の放射特性を平均化することにより、以下のように表現することができる。

$$Acc = (A_0/r) \exp(-\pi t_s f_s / Q_s) C_s \quad (1)$$

(1)式において、 A_0 、 r 、 t_s 、 f_s 、 Q_s は、それぞれ振幅の絶対値に比例する震源係数、震源距離、S波走時、S波周波数、S波のQ値(内部摩擦による減衰を表す係数)を示す。また C_s は表層での地震動の増幅を表現する観測点補正值である。ここで、震度マグニチュード(MI)を震源係数 A_0 の常用対数値に比例する値として定義する。この時、震度(I)が加速度振幅の常用対数の2倍に比例する値であることを考慮すると、MIは(1)式を利用し以下のように表すことができる。

$$MI = I/2 + \log_{10}(r) + a_s t_s + b_s + c_s \quad (2)$$

$$a_s = \pi / \ln(10) f_s / Q_s \quad (3)$$

$$c_s = -\log_{10}(C_s) \quad (4)$$

(2)式中の係数 b_s は、震度マグニチュードの絶対値を調整する係数である。ここで(2)式が震度マグニチュードの定義式となる。

次に、震度マグニチュードの定義を参考にして、震度(I)の代わりに応答値 $Res(f)$ の推定を目的とした周波数応答マグニチュード($Mres(f)$)の定義を示す。各周波数の応答値が、対応する周波数のS波の振幅に比例すると仮定すれば、(2)式の $I/2$ を $\log_{10}[Res(f)]$ 、各係数を周波数依存の係数と置き換えることにより、 $Mres(f)$ は以下のように定義される。ただし、ここでは幾何減衰に係る項 $[\log_{10}(r)]$ に周波数依存の係数 $g(f)$ を新たに加えた。

$$Mres(f) = \log_{10}[Res(f)] + g(f) \log_{10}(r) + a(f)t + b(f) + c(f) \quad (5)$$

$$a(f) = \pi / \ln(10) f / Q(f) \quad (6)$$

$$c(f) = -\log_{10}[C(f)] \quad (7)$$

ここで、 $Q(f)$ 、 $C(f)$ は、それぞれ周波数依存のQ値、周波数依存の観測点補正值である。また $b(f)$ は、周波数応答マグニチュードの絶対値を調整する周波数依存の係数である。

高感度地震観測網Hi-net⁷⁾により観測されたデータを用いた解析^{4), 6)}の結果、(2)式の各係数として表1に示す値、また $f=0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0$ Hzにおける加速度応答値(減衰定数5%)を対象とした場合の

表1 (2)式の各係数

a_s	b_s
0.0012	2.73

表2 (5)式, (6)式の各係数

f (Hz)	g (f)	Q (f)	b (f)
0.25	1.01	27	3.14
0.5	0.98	68	3.13
1.0	0.96	144	2.95
2.0	0.99	236	2.60
4.0	1.01	349	2.28
8.0	1.05	588	2.06

(5)式, (6)式の各係数として表2に示す値を得た。

以上より観測点補正值の常用対数値である c_s または $c(f)$ が既知であれば、震源距離 r に位置する観測点で震度や応答値が即時に計算された場合、(2)式, (5)式より震度マグニチュードあるいは周波数応答マグニチュードを直接求めることができる。また、一旦これらの指標が求められれば、(2)式, (5)式を変形した次の距離減衰式から、任意の震源距離における震度や応答値を求めることが可能となる。

$$I = 2[MI - \log_{10}(r) - a_s t_s - b_s - c_s] \quad (8)$$

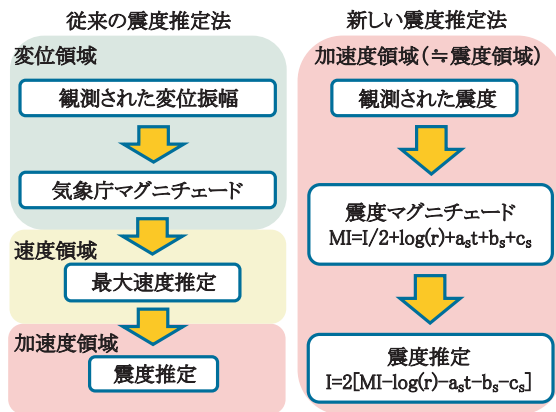
$$\log_{10}[Res(f)] = Mres(f) - g(f) \log_{10}(r) - a(f)t - b(f) - c(f) \quad (9)$$

2.2 新しい震源指標とマグニチュードの比較

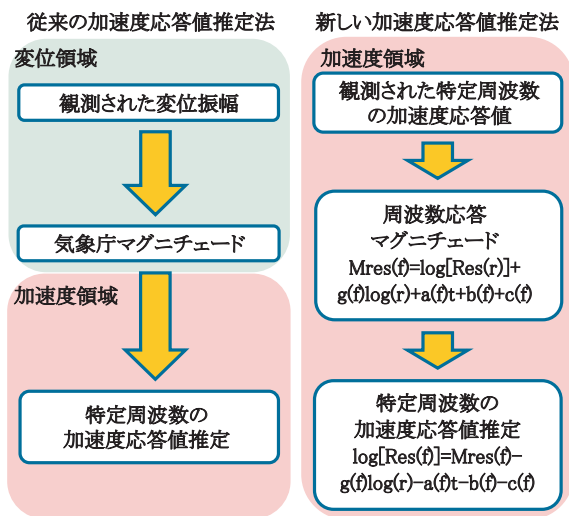
震度マグニチュードあるいは周波数応答マグニチュードを使用した場合の処理の流れを、従来の手法と比較したものをそれぞれ図1(a), (b)に示す。

はじめに図1(a)に示した震度推定の流れについて述べる。気象庁マグニチュードを用いた従来の手法では、まず変位領域で定義された距離減衰式から、気象庁マグニチュードを求める。次に、この気象庁マグニチュードに基づき、速度領域で定義された距離減衰式から最大速度を求め、最後に最大速度と震度の関係式から震度(加速度領域)を求める。これに対して、震度マグニチュードを使用した新しい手法は、加速度領域で定義された距離減衰式から、震度マグニチュードを求め、この震度マグニチュードに基づき、同一の式から直接震度を求める単純な流れとなる。

従来の手法では、対象とする地震が平均的な周波数特性を持つことを前提に、異なる物理領域で定義された複数の経験式を重ねて使用している。この場合、平均と異なる周波数特性を持つ地震では、必然的に推定誤差が大きくなる。これに対して、震度マグニチュードによる手法は、目的とする物理量(この場合は、震度)から震度マグニチュードを直接求め、同じ式を用いて震度マグニチュードから目的の物理量(震度)を求めるため、周波



(a) 震度推定手法の比較



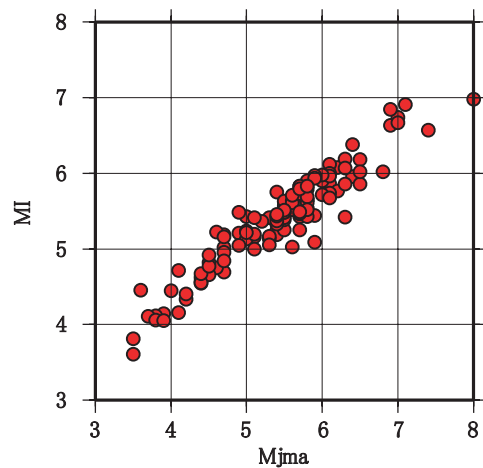
(b) 応答値推定手法の比較

図1 従来の揺れの強さの推定法と新しい震源指標による推定法との比較

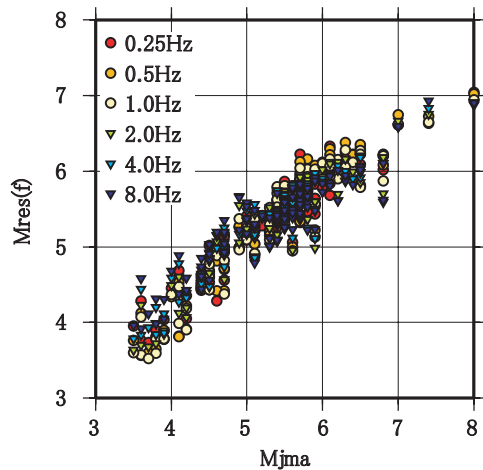
数特性が平均と異なる場合であっても、その変化に対応し、正確な震度推定を行うことができる。

図1 (b) に示した加速度応答値推定の流れについても同様である。従来の手法では、地震ごとの周波数特性の変化に対応できないのに対して、周波数応答マグニチュードを利用した新しい方法は、その変化に柔軟に対応でき、推定精度を向上させる。

図2 (a), (b) に、震度マグニチュードと周波数応答マグニチュードを気象庁マグニチュードと比較したものを示す。図より、気象庁マグニチュードが同じ値を持つ地震であっても、震度マグニチュードや周波数応答マグニチュードがばらつくことが分る。このばらつきの原因は、主に地震ごとの周波数特性の違いによるものである。例えば、震度マグニチュードのばらつきの幅は、平均値に対して最大±0.5程度である。(8)式より、震度は震度マグニチュードの2倍に比例する値となるため、震度マグニチュードレベルで±0.5のばらつきは、震度レベルで±1.0のばらつきとなる。このばらつきレベルは、



(a) 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



(b) 周波数応答マグニチュード(Mres)と気象庁マグニチュード(Mjma)の比較

図2 新しい震源指標と気象庁マグニチュードとの比較

干場他⁸⁾に示された既往の手法による震度推定のばらつきのレベルに概ね対応するものと考える。

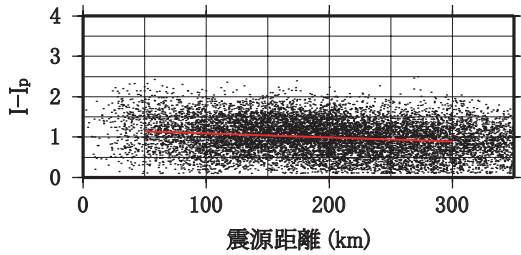
また図2を詳細に見ると、震度マグニチュードおよび周波数応答マグニチュードは、気象庁マグニチュードと線形的な関係を有していないことが分かる。これは震源規模の変化により、平均的な震源スペクトルの形状そのものが変化するためであり、ここで扱う気象庁マグニチュードの範囲(3.5 < Mjma < 8.0)では、気象庁マグニチュードと震度や加速度応答値の関係が1次式で適切に表現できないことを意味する。従って、このような場合、気象庁マグニチュードに基づく1次式で表現される従来の距離減衰式を利用すると、平均的な推定誤差が増大する結果となる。一方、震度マグニチュードや周波数応答マグニチュードは、気象庁マグニチュードとは無関係に、実測された震度や応答値から直接定義される震源指標であるため、これらを利用した際、上記のような問題は発生しない。

特集：防災技術

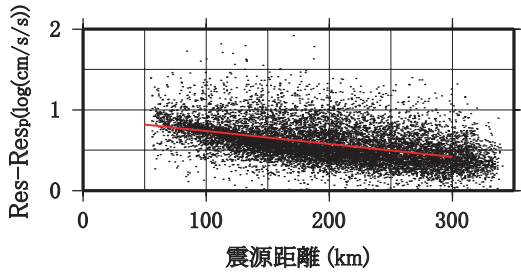
2.3 P波による新しい震源指標の即時計算

2.1節では、P波、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を行った。これらの震源指標をリアルタイム防災システムで利用するためには、S波の到着を待たず、P波部分から指標を計算する必要がある。

図3(a)にP波部分のデータのみを使って計算されたP波リアルタイム震度⁹⁾(I_p)と全相データによる震度(I)の差を示す。また、図3(b)にP波部分のデータから計算された各周波数の応答値(Res_p)と全相データによる応答値(Res)の差を示す。



(a) 震度(I)とP波震度(I_p)の差



(b) 全相データによる周波数応答値(Res)とP波による周波数応答値($Resp$)の差($f=0.5\text{Hz}$ の場合)

図3 全相データによる揺れの強さとP波による揺れの強さの差の震源距離に伴う変化

ここで、 I_p と I の関係、 $Res_p(f)$ と $Res(f)$ の関係は震源距離 r に関する一次関数として、それぞれ以下のような回帰式で表現する。

$$I = I_p + d_s + e_s r + \text{cor}_s \quad (10)$$

$$\log_{10}[Res(f)] = \log_{10}[Res_p(f)] + d(f) + e(f)r + \text{cor}(f) \quad (11)$$

式中、 cor_s は I と I_p に関する観測点補正值、 $\text{cor}(f)$ は $Res(f)$ と $Res_p(f)$ に関する観測点補正值を示し、実測値と回帰式による値を比較することにより求める。ここで用いたデータに基づき、(10)式、(11)式の各係数を求めると表3、表4の値を得る。図3には、求めた回帰式を赤い実線でそれぞれ示した。図より、回帰式に対して各データが大きくばらついているが、これはS波とP波に係る震源の放射特性の違いが強く現れるためと考えられる。実際には複数の観測点データの平均をとることによ

り、上述の影響は大幅に減少する。(10)式を(2)式に、(11)式を(5)式に代入することにより、P波データから震度マグニチュードや周波数応答マグニチュードを求めることができる。

表3 (10)式の各係数

d_s	e_s
1.19	-0.0010

表4 (11)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

このようにして求めたP波震度マグニチュード(M_{Ip})と震度マグニチュードの比較を図4(a)、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4(b)に示す。これらの相関係数は0.990~0.992であり、P波データのみから全相データを用いた場合と等しい震源指標を求められることが示された。

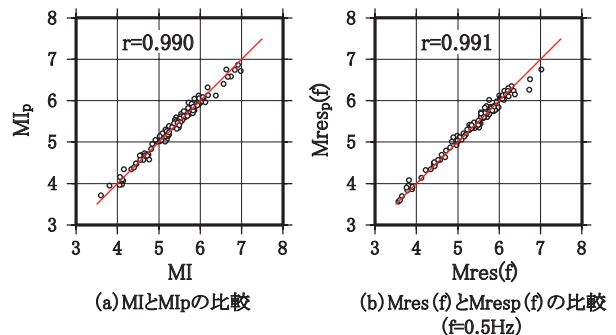


図4 全相データによる震源指標とP波による震源指標の比較

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データを使用して震度マグニチュード、P波震度マグニチュード、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をそれぞれ求め、これから震度と応答値の推定を行った。比較のため気象庁マグニチュードに基づく既往の手法を使用して同様の解析を行った。それぞれの手法による推定誤差(RMS)を比較したものを図5に示す。

図より、マグニチュードを用いた従来の手法と比較し、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分かる。震度マグニチュード、P波震度マグニ

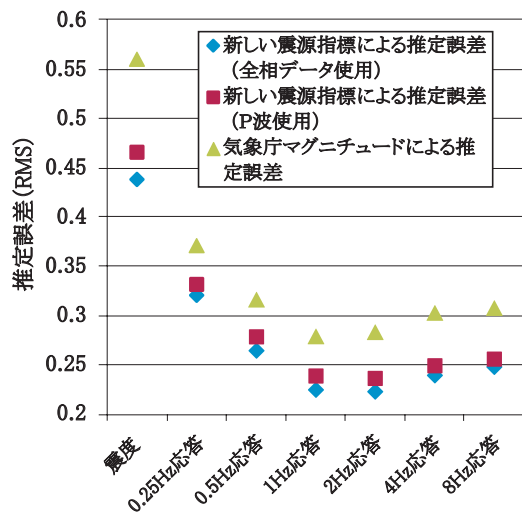


図5 各震源指標による推定誤差の比較
(新しい指標として震度推定には震度マグニチュード、
応答値推定には周波数応答マグニチュードを使用)

チュードによる推定誤差の低減はそれぞれ22%, 17%である。また固有周波数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。

図6に、2003年宮城県沖地震(M=7.1)の場合の、P波震度マグニチュードの成長(断層の破壊開始から全破壊終了までの時間に伴うマグニチュード増加の状況)を気象庁マグニチュード(モーメントマグニチュードから換算したもの)の成長と併せて示す。図より、気象庁マグニチュードが約25秒程度かけ最終値まで成長するのに対して、P波震度マグニチュードは、約5秒程度で最終値に収束する。これは、P波震度マグニチュードがアスペリティ周辺で発生する短周期成分で決定されるため、アスペリティ破壊直後にほぼ最大値を示すのに対して、モーメントマグニチュードが全破壊域からの波動により決定されるため、収束まで時間がかかるためと考える。

このように規模の大きな地震の場合、P波震度マグニチュードはより早い段階で最終値を出力することができる。これはリアルタイム地震防災システムにとって極めて

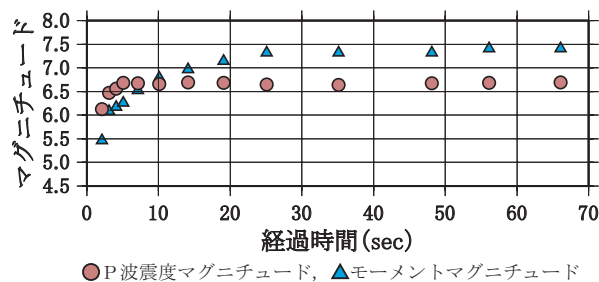


図6 P波震度マグニチュードの成長
(2003年宮城県沖地震)

て有効な性質と言える。

4. 鉄道分野での利用

4.1 観測点以外での揺れの強さのリアルタイム推定

鉄道分野では地震の揺れの強さに係る物理量として、実測データに基づき、最大加速度、最大速度、震度、SI値などが計算され、列車の運転規制、地震後の施設点検などの目的に使用されている。実測値は極めて重い意味を持つ値であるが、鉄道事業者が扱える地震計の数には限界があり、空間的にきめ細かなデータの分析を行うためには、地震計が置かれていない場所における揺れの強さを推定する必要がある。鉄道分野のように広い地域を対象として揺れの分布を推定するためには、単純な空間補間ではなく距離減衰式を使用した補間作業が必要となる。ここで従来のマグニチュードの代わりに新しい震源指標を利用した距離減衰式を用いることにより、精度の高い揺れの推定が可能となる。また、ここでは、震度と加速度応答値を求めるための震源指標を示したが、それ以外の物理量に対しても上記と同様の扱いによる推定精度向上が可能である。

さらに新しい震源指標はP波のみのデータから求めることが可能であり、図7に示したように、地震検知後数秒の段階ではP波に基づいた指標を計算し、早期地震警報システムなどで、また地震検知後数十秒以後の段階では全相データに基づいた指標を計算し、早期運転再開支援システムなどで、これらの指標を利用することが考えられる。特に3章で示したように、大地震の際、震度マグニチュードは従来のマグニチュードに比べて速く成長する性質を持つため、即時性の求められるシステムにとっては重要な指標となり得る。

4.2 周波数情報のリアルタイム利用

鉄道分野に限らず、防災を目的とした地震動の周波数情報の即時的な推定は、これまで行われてこなかった。具体的な対象物を想定した応答を考える際、最大振幅や震度などの単一の指標のみでは精度の高い推定を行うことは困難であるが、周波数情報を用いることにより精度を上げることが可能となる¹⁰⁾。

一方2.2節で述べたように地震動の周波数特性は震源や地盤増幅特性により大きく変化することがあり、従来の気象庁マグニチュードのみから個々の地震の周波数特性を評価することは難しい。この場合、周波数応答マグニチュードを使うことにより、対象とする地震の持つ周波数特性を精度良く扱うことが可能となる。さらに周辺の地盤増幅に関する周波数特性が明らかであれば、これを反映して揺れの強さをより正確に推定することが可能となる。

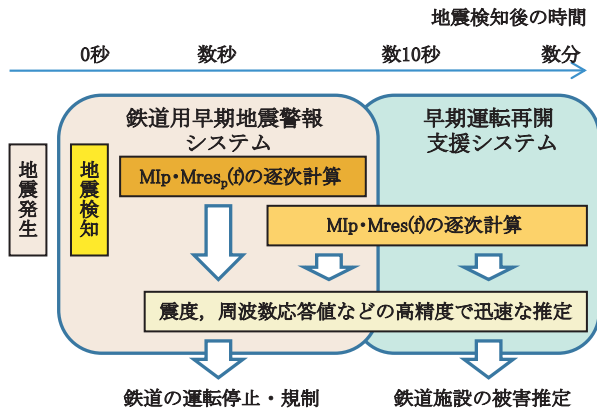


図7 鉄道分野での新しい震源指標の利用

このように周波数応答マグニチュードを利用することにより、様々な固有周期を持つ構造物から成り立つ鉄道施設の個別の被害推定が可能となる。また、たとえば、これまで扱いが困難であった長周期地震動の予測とこれによる応答の推定なども可能となり、多様化する鉄道構造物を対象として、即時システムの応用分野は広がると期待される。

5. 結論

地震による揺れの強さを精度よく推定するための震源指標として提案した、震度マグニチュードと周波数応答マグニチュードの有効性について検討した。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のため、これらを使用することにより、気象庁マグニチュードなどをを用いる従来の手法に比べて揺れの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、即時的な利用も可能である。従来の手法に比べ、P波震度マグニチュードによる推定誤差の低減は17%、また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、周波数0.25Hz～8Hzにおいて10～18%となった。さらに大きな地震の際、P波震度マグニチュードは従来のマグニチュードに比べて速く成長することも示された。以上から新しい震源指標が鉄道分野の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。

謝辞

本論の一部は、文部科学省の高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクトにより防災科学技術研究所で研究開発された成果です。解析には同研究所のHi-netのデータを使用しました。記して感謝いたします。

文献

- 1) 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
- 2) Hoshiba, M., Kamigaichi O., Saito M., Tsukada S., and Hamada N. "Earthquake early warning starts nationwide in Japan," Eos Trans. AGU, Vol.89, p.73, 2008.
- 3) 気象庁: 震度を知る—基礎知識とその活用—, ぎょうせい, 1996
- 4) 山本俊六, 堀内茂木, 中村洋光, 呉 長江: 緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性, 物理探査, Vol.60, pp.407-417, 2007
- 5) Yamamoto, S., Rydelek P., Horiuchi S., Wu C. and Nakamura H. "On the estimation of seismic intensity in earthquake early warning systems," Geophys. Res. Lett., Vol.35, L07302, 2008.
- 6) 山本俊六, 堀内茂木: 緊急地震速報における周波数情報の配信・利用の提案 —周波数応答マグニチュード—, 日本地震工学会論文集, 印刷中
- 7) 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.
- 8) 干場充之, 大竹和生, 岩切一宏, 明田川保, 中村洋光, 山本俊六: どこまで震度は正確に予測できるか? —現在の緊急地震速報の方法における予測震度のばらつきに関する一考察—, 日本地震工学会大会梗概集, 2008
- 9) 功刀 卓, 青井 真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 地震, Vol.60, pp.243-252, 2008
- 10) 室野剛隆, 芦谷公稔: 早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, pp.7-12, 2002