

リアルタイム震度算出のための時系列解析

石垣祐三*

Time series analysis for real time seismic intensity

Yuzo ISHIGAKI

(Received April 20, 2005 : Accepted December 19, 2005)

ABSTRACT

Seismic intensity on the JMA intensity scale is calculated from an acceleration record of one minute duration. We obtained now a regression expression for real time seismic intensity, using acceleration and filtered velocity, as $I = 1.0528 + 1.4578 \log A + 0.45521 \log V + 1.6089 \log \theta$,

where I = seismic intensity; A = acceleration; V = velocity; θ = frequency-dependant correction used for seismic intensity. Using this formula, real time seismic intensity can be obtained for every 0.1s interval.

1. はじめに

震度の算出は、加速度データに高速フーリエ変換・フィルター処理・フーリエ逆変換を行い、3成分合成値の継続時間の合計が 0.3 秒となる振幅に基づいている(平成 8 年気象庁告示第 4 号)。同告示では、算出に用いる時間幅は「地震動が継続している時間」とあるが、気象庁の震度計における運用では 60 秒間を対象とし、それ以上地震動が続く場合は、さらに次の 60 秒間処理を行っている。つまり、現状の震度の算出には、最低 1 分間必要である。また、60 秒間に 2 つの地震が含まれている場合には、2 つの地震動を併せて計算するため、まれにそれぞれの地震動より高位の震度階級になる場合がある。

本調査は、リアルタイムに近い時間で、かつ連続的に現在算出されている震度と同等の値を得ることができないか検討したものである。リアルタイムに近いタイミングで震度算出が可能になれば、例えばシステムにおける即時的なデータのバックアップなどのトリガーに利用するなど、震度の利用価値が高まる可能性があると考えられる。

具体的な検討項目は、観測されている加速度と加速度から漸化式により求められる速度、それらから求められるパラメータ等を説明変数とし、これらの組み合

わせから、直接震度が求められるか、である。これらの回帰的方法とは別に、現行の震度算出式をより短い時間幅に適用することも考えられるが、現行の方式で震度の算出するためには、ある程度時間幅を要する。1 分間の時間幅による震度とほぼ同じ(計測震度 0.1 以内)の震度を算出するためには、経験上、約 5 秒間のデータが必要である。このスパン以上では、60 秒間を対象とした通常処理にほぼ近い震度値が得られる(図 1)が、これより時間幅を短くすることは難しい。

本調査では、1996 年以降観測を行ってきた 95 型震度計データ(気象庁, 2005)を主に用いて、震度、加速度、速度等の関係を取りまとめるとともに、リアルタイム処理の導入に必要な解析をいくつか行った。

2. 方法

震度と各物理量の関係を明らかにするため、まず 1 地震動における震度と各物理量の最大値の回帰的な関係を見る。このため、3 節~4-1 節までは、一連の地震動における震度を I 、最大加速度(3 成分合成値、以下同じ)を A 、最大速度を V 、最大変位を D 、各時刻における加速度と速度の積の最大を P と記す。

この結果をもとに、4-1 節で得られた回帰式の性質、算出時間幅、周期帯等、回帰式の適用範囲を検討した

*地震火山部地震津波監視課 Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismological and Volcanological Department

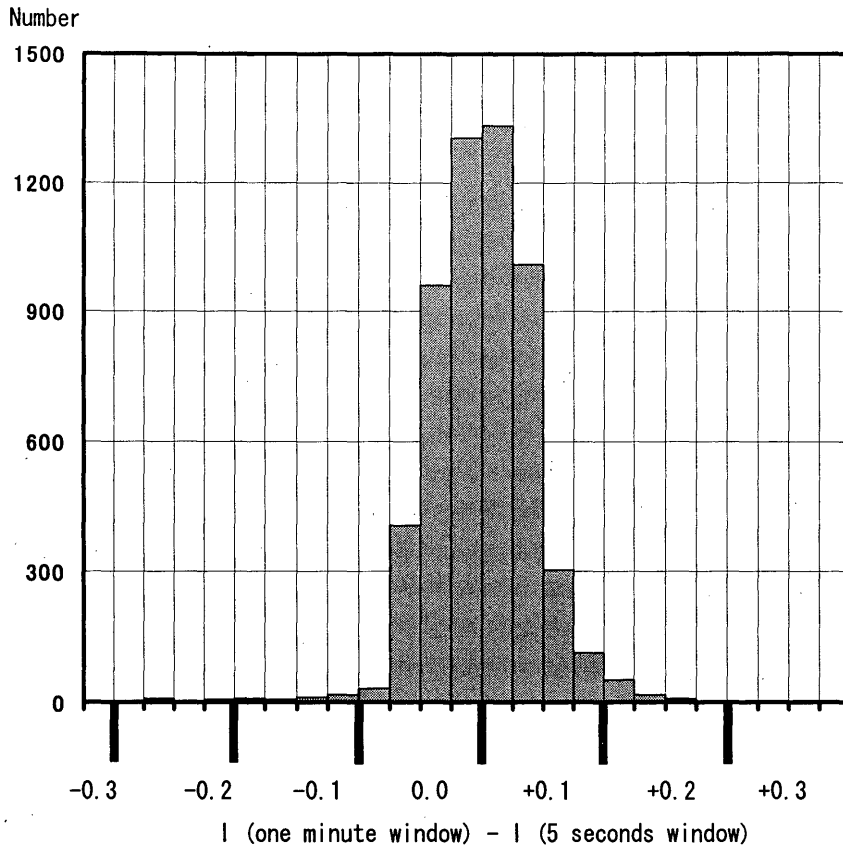


Figure.1 Histogram of seismic intensity difference of time window

The figure shows the seismic intensity differences between calculated with one minute window and 5 second one, using 5,614 data. The most of data concentrates within ± 0.1 .

後、4-2 節でリアルタイム震度算出を試みる。この際、連続的な処理に適応するため、4-2 節では、先の震度及び各物理量の定義を「一連の地震動における最大」から「ある微小な時間幅における最大」に広げる。

データは、1996 年 10 月-2005 年 7 月の気象庁 95 型震度計波形（一部多機能型地震計）と 2004 年新潟県中越地震における新潟県、及び 2005 年福岡県西方沖の地震における福岡県等地方公共団体の震度計波形を用いる。95 型震度計データは、収集基準が年によって異なり、震度 1～2 に相当する波形が相対的に少ない。今回の調査では、現地交換したメモリーカードからデータを補充した。

震度は、通常の 1 分間処理ではなく、1 秒ずつずらして 5 秒間のスパンで求めた震度の最大を求め、これと $\log A$, $\log V$, $\log P$ の関係を見る。なお、 \log は常用対数である（以下同じ）。速度の算出は、ある時刻の加速度、速度を $a(t)$, $v(t)$ とし、次の周期 30 秒以上をカットする漸化式¹⁾

$$v(t) = c1 \{ a(t) - a(t-\Delta t) - a(t-2\Delta t) + a(t-3\Delta t) \} \\ + c2 v(t-\Delta t) + c3 v(t-2\Delta t) + c4 v(t-3\Delta t)$$

$c1=0.004989538985$, $c2=-2.995811212285$,
 $c3=2.991631192755$, $c4=-0.995819971303$

を用いる（斉藤，1978）。ここで、 Δt はサンプリング間隔で、0.01 秒である。

また、震度の算出には地震動の周波数が密接に関連していることから、上記告示における 3 つのフィルター（周期の効果を表すフィルター、ハイカットフィルター、ローカットフィルター）の積（以下、スペクトル振幅補正係数と記す）の常用対数を説明変数として加え、各種の回帰式やその適用範囲、実際に時系列上でリアルタイム震度算出がどの程度可能か等を見る。

なお、スペクトル振幅補正係数は周波数の関数²⁾であり（気象庁，1996）、地震動の周波数 (f) の値は、最大加速度と最大速度から $f=A/(2\pi V)$ によって求める。

一方、今回の調査の主目的（震度のリアルタイム算出）とは外れるが、変位と震度の関係も調査項目とし

て加える。変位と震度との関係は、加速度、速度それぞれと震度とのそれに比較して薄いと考えられる。しかし、明治時代から平成初期までの間、気象庁の強震観測は変位型地震計を主に用いているため、変位と震度の関係を確認しておくことは、重要な手がかりになりうると考えたためである。変位の算出は、52型機械式強震計の特性を再現する漸化式（気象庁、2005）を用いた。

- *1 気象庁強震観測報告（例えば、気象庁、2005）の速度は、周期5秒以上をカットする漸化式を用いている。ここでは、やや長周期の波形を含めて各種の関係を解析するため、特に問題のない限りこの式を用いた。
- *2 関数の形は、図4（後述）右側に示してある。

3. 結果

3-1 加速度、速度等と震度の全般的な関係

図2はI-A、I-V、I-P、I-Dの関係を示したものであり、回帰式と 2σ の信頼曲線を併せて示している。

データは、最大加速度時刻、最大速度時刻、最大加速度速度積時刻、最大震度時刻がそれぞれ5秒以内に得られた場合採用し、計測震度3.5以上を対象とした（1,032データ）。いったんそれぞれの回帰式を得た後、回帰式で3.5以上にならない加速度等をしきい値として、それ以上のデータに絞り、再度回帰式を求めた。これは、データ数の多い下位データの取り方を、回帰式から一定の距離に保つためである。このためデータ数は、A:985、V:977、P:982、D:1008となった。また、A、V、P、Dに共通するデータ数は908である。

図2によれば、正相関という傾向は合っているものの、I-A、I-Dはばらついているのに対し、I-V、I-Pは相対的にまとまっている。また、I-V、I-Pの関係をみると低位の震度でVやPが大きくても、震度がそれに見合って大きくなっていない点が多々見られる。これらは、逆（震度が大きくVやPが小さい）の現象が見られないことから、震度算出に効く周期帯から外れるためだと考えられる。

またI-Dの関係は、I-Aに比べてもかなりばらついている。ただし、I-V、I-Pの関係と同様に、震度が大きくDが小さい現象はない。これも周期帯の影響と考えられるが、ある変位が与えられたときにその変位における震度の下限はわからないものの、その上限については言及が可能となる。

次に各種の回帰式を比較する。データは共通な908データを用いたので、AIC（Akaike,1974）により適合の良し悪しを判断できる。比較した回帰式は以下の通りである。

$$I = a + b \log A \quad (1)$$

$$I = a + b \log A + c \log \theta \quad (2)$$

$$I = a + b \log V \quad (3)$$

$$I = a + b \log V + c \log \theta \quad (4)$$

$$I = a + b \log P \quad (5)$$

$$I = a + b \log P + c \log \theta \quad (6)$$

$$I = a + b \log A + c \log V \quad (7)$$

$$I = a + b \log A + c \log V + d \log \theta \quad (8)$$

また、これらの式に併せ、

$$I = a + b \log V + c \log \theta' \quad (4')$$

$$I = a + b \log D \quad (9)$$

$$I = a + b \log D + c \log \theta' \quad (10)$$

についても調査した。ここで、 $a \sim d$ は定数、 θ はスペクトル振幅補正係数であり、具体的な値は $0 < \theta < 1.17$ である。 θ' は、3つのフィルター（平成8年気象庁告示第4号）のうち、「周期の効果を表すフィルター」 $(1/f)^{1/2}$ を $(1/f)^{-1/2}$ に替えたものである（ f は周波数）。震度演算において、周期の効果を表すフィルター $(1/f)^{1/2}$ は、加速度を加速度速度積の次元にする効果がある。一方、 $(1/f)^{-1/2}$ は速度を加速度速度積の次元にする効果を考慮したものである。

それぞれの回帰式について、最小自乗法により求めた結果は表1の通りである。既往の回帰式として、翠川他（1999）の式がある（いずれも震度4以上を対象とした回帰式である。本稿が取り上げた式との関連で、式番号を振ってある）。

$$I = 0.55 + 1.90 \log A \quad \sigma:0.30 \quad (1)$$

$$I = 2.68 + 1.72 \log V \quad \sigma:0.21 \quad (3')$$

$$I = 1.65 + 1.00 \log P \quad \sigma:0.18 \quad (5')$$

これらとは、係数、標準偏差とも、ほぼ同じ結果が得られた。この結果から、主に2つのことが言える。

ひとつは、(1)(3)(5)(9)式（逐次、震度値が得られる式）を比較すると、(5)式の適合がよいことである。さらに(7)式の適合がよい。ただし、AとVは一般的に同時刻に得られないため、この式による逐次震度値は求めにくい。(7)式は次のように書き換えられる。

$$I = a + \log(A^b \cdot V^c) \quad (7')$$

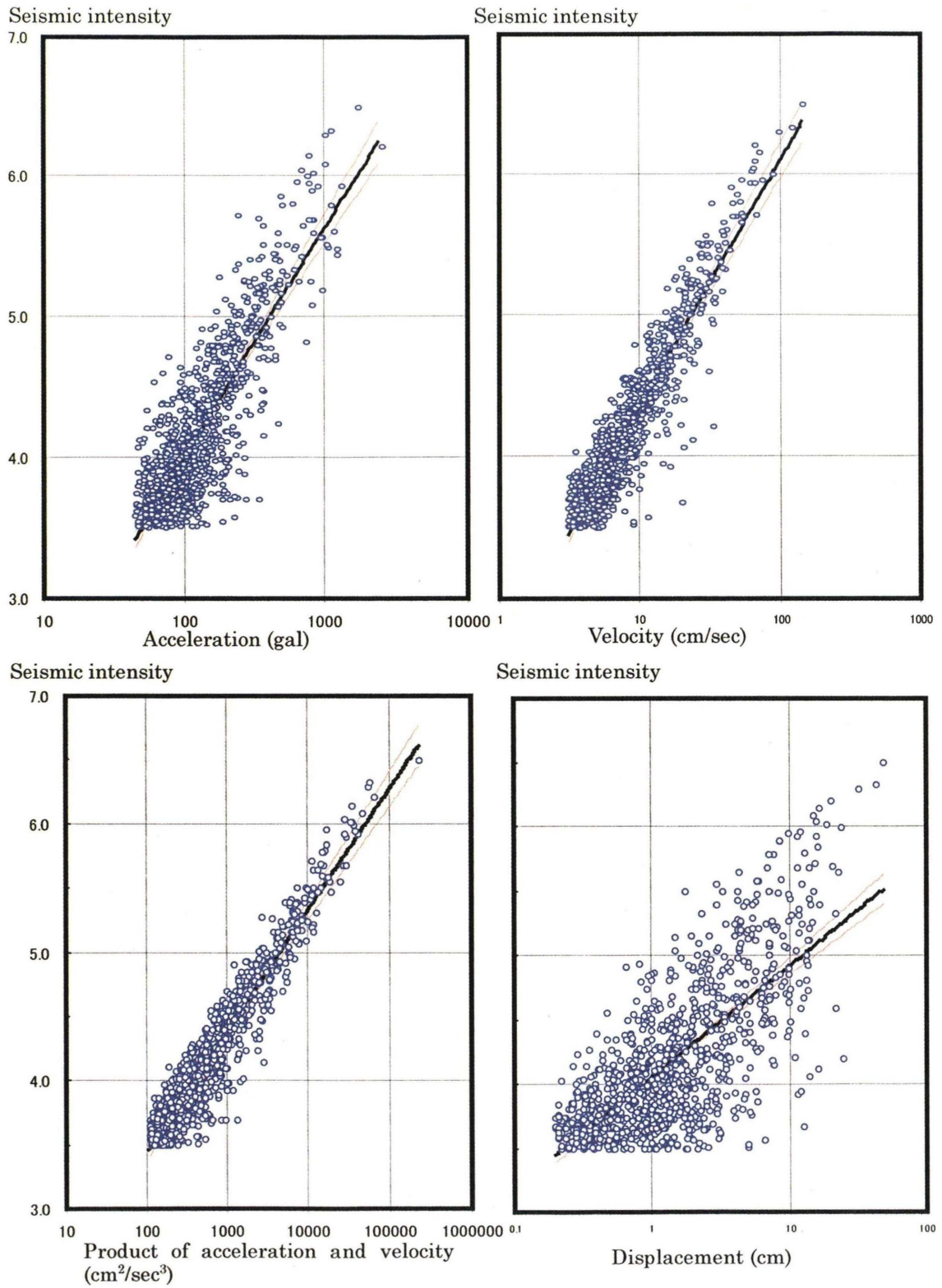


Figure.2 Relationships of seismic intensity with acceleration, velocity, maximum product of acceleration and velocity, and displacement

Table.1 Regression of seismic intensity from peak acceleration (A), peak velocity (V), and peak of product between acceleration and velocity (P), peak displacement (D) and frequency correction coefficient (θ, θ')

Equation	Regression	σ	AIC	AIC-AIC _{min}
1	$I = 0.78820 + 1.6121 \log A$	0.311	462.25	1240.29
2	$I = 0.68300 + 1.9132 \log A + 2.4207 \log \theta$	0.158	-767.20	10.84
3	$I = 2.6039 + 1.7522 \log V$	0.198	-361.06	416.98
4	$I = 2.2699 + 1.8830 \log V - 0.96156 \log \theta$	0.167	-659.34	118.70
5	$I = 1.5104 + 0.95562 \log P$	0.179	-541.95	236.09
6	$I = 1.6646 + 0.94982 \log P + 0.62108 \log \theta$	0.164	-703.08	74.97
7	$I = 1.7585 + 0.58412 \log A + 1.3202 \log V$	0.162	-732.82	45.23
8	$I = 1.0528 + 1.4578 \log A + 0.45521 \log V + 1.6089 \log \theta$	0.157	-777.97	0.08
4'	$I = 2.2122 + 1.9136 \log V - 1.2977 \log \theta'$	0.157	-778.05	0.00
9	$I = 4.1044 + 0.86073 \log D$	0.386	853.73	1631.78
10	$I = 3.6952 + 1.0862 \log D + 2.0237 \log \theta'$	0.347	662.87	1440.92

σ : standard deviation AIC: An Information Criterion (Akaike,1974)

翠川他 (1999) では、類似した式として以下の式がある。

$$I = a + \log(A \cdot V)^b \quad (7'')$$

(7)は(7'')における A と V, それぞれに別の指数項を適用するものである。適合の良さは、(9)<(1)<(3)<(5)<(7), つまり、変位より加速度, さらに速度, 同時刻の加速度, 速度の積, 最大加速度・最大速度の積の順となり, 翠川他 (1999) と同様の結果が得られた。

もう一つは、スペクトル振幅補正係数 (θ) を入れた場合 ((2)(4)(6)(8)式), (8)式が最小の AIC を与えることである。(2)(4)(6)(8)式は、(1)(3)(5)(7)式に $c \log \theta$ (c は定数項) をそれぞれ加えたものであり, 周期を補正する意味がある。適合の良さは、(4)<(6)<(2)<(8)であり, それぞれの AIC に着目すると, (1)式と(2)式の差が大きく, 加速度に対しては, 特に効果が大きいことを示す。速度, 加速度・速度の積に関しては, それよりも効果が小さい。ただし, もう一方のスペクトル振幅補正係数 (θ') を(4)式に入れた(4')式は, (8)式とほぼ同じ AIC が得られた。次節では, この結果を基に実際の時系列への適用を検討する。

4. 結果の適用

1) 回帰式の誤差要因及び適用範囲

各地震動の回帰から得られた結果を、連続的な地震動へ適用範囲を拡張するための検討を行う。まず、(1)~(8)及び(4')式のどの式を用いるべきか、という問題

については適用する状況によって異なるものと考えられる。すなわち, 100Hz サンプリングの加速度データに対し, 100Hz サンプリングの震度データが必要な場合は, 加速度と速度から得られる周期情報に誤差が大きくなること, (7)式では最大加速度時刻と最大速度時刻が一般には同時刻ではないことから, (1), (3), (5)式のうちで一番 AIC 及び σ の小さい(5)式が適当であろう。5秒以上のデータを対象に震度を求めるのであれば, 通常の震度算出処理でほぼ問題ない。なお, (9), (10)式は, 本調査の主目的から外れること, また σ が大きいことから, 本節では取り扱わない。

今回の調査で扱った地震動データ約 6165 データでは, 最大速度時刻と最大加速度時刻の差は, その差 0.1秒以内に入るものは 42%, 1秒以内に入るものは 83% である (もともと, その差が 5秒以内という制約がついている)。ここではまず, 最大加速度と最大速度の関係を見て, 上記の回帰式の適用範囲について検討をつける。

図 3 は, 川瀬(1998)を参考に作成した最大加速度-最大速度の分布図である。図には, (8)式による等震度線を書き加えるとともに, プロットした点は, 震度 0.5 から +1.0 ごとに色を変えてある。図の右下が短周期卓越, 左上ほど長周期卓越の地震動を表す。参考のため地震動が 1 Hz 及び 10 Hz に相当するところに補助線を書き加えてある。

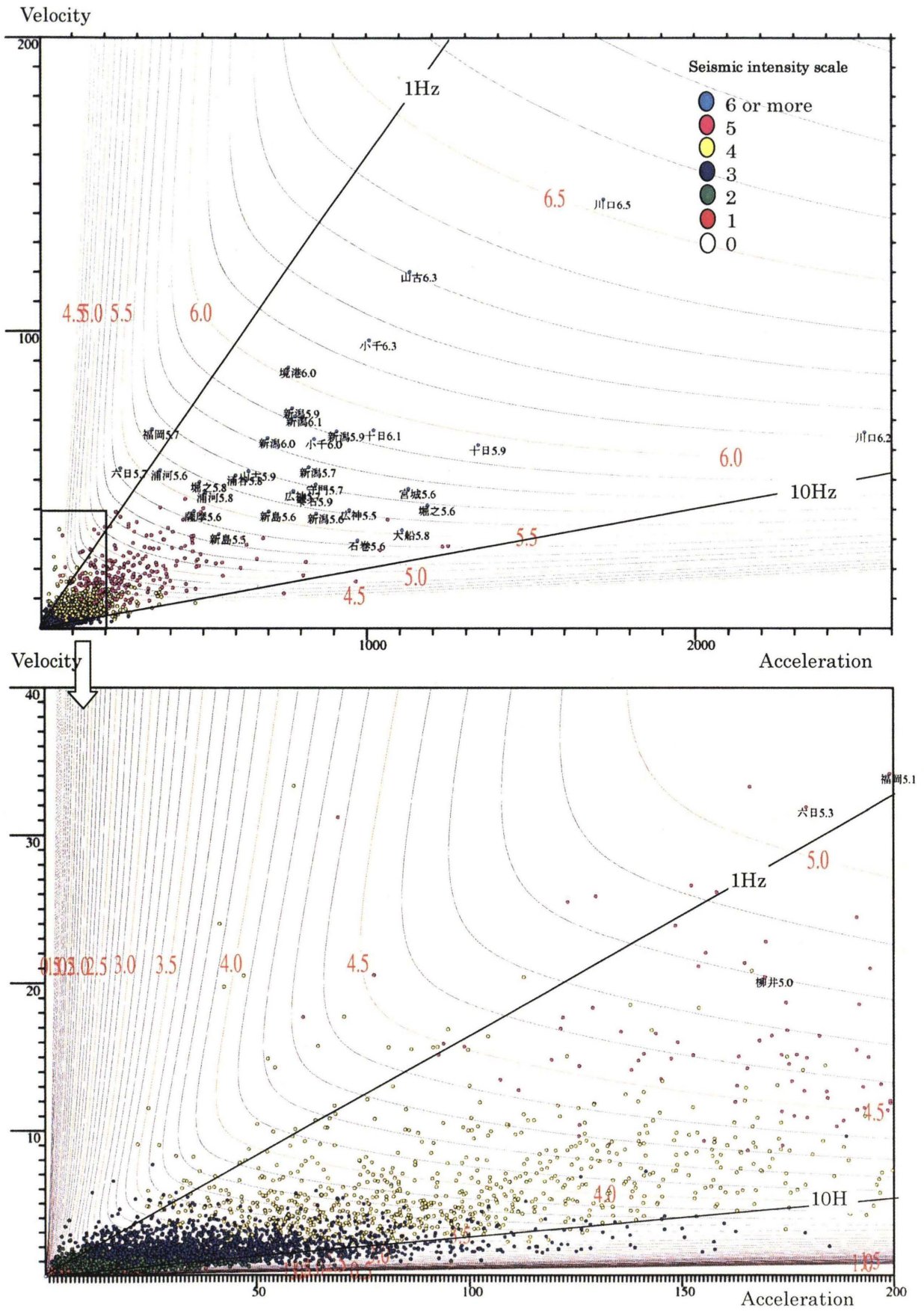


Figure.3 Relation of acceleration and velocity
Contours of seismic intensity are given by Eq. (8)

この図から大きく2つのことがわかる。ひとつは、回帰式と震度はほぼ一致する傾向があるものの、等震度線近くで見ると、震度の逆転している観測点があること、もう一つは、ほとんどの地震動は、補助線内(1~10Hz)に入ることであり、まれにこの補助線より長周期、短周期の地震動があることである。

回帰式と実際の震度が合っていないデータは、図3において偏在していないように見える。回帰式(8)は、加速度、速度、スペクトル振幅補正係数を説明変数として用いているが、ばらつきの原因にはこの他の要素があると考えられる。震度処理においてその要因となる可能性が高いのは、スペクトル振幅補正係数をかけた後の加速度値の継続時間の合計が0.3秒を超える振幅値を採用する処理である。

この処理による効果が、それぞれの地震動でどの程度ばらつくのか、また、この効果と関連が深い要素は何かを検討するために、以下のような単純なモデルからのずれ(比)を調べた。すなわち、0.3秒に比べ十分に長く連続した単純な正弦波の地震動を考える。その正弦波の周波数に相当するスペクトル振幅補正係数をかけた最大加速度を g_0 とすると、震度はそのまま

$$I = 2 \cdot \log(g_0) + 0.94 \quad (11)$$

と書ける。しかし、現実の波形は、時間の経過に伴う減衰や単純な正弦波では表現しにくい形であり、震度の算出に採用される加速度(g)は、これより小さい値を採る。波形の形がどれだけ効率的に震度値に採用される加速度を与えたかというパラメータを ϕ とすると、実際に観測された震度 I 、フィルター処理済み最大加速度 g_0 をもとに、

$$\phi = g/g_0 = 10^{(I-0.94)/2} / g_0 \quad (12)$$

で定義でき、 ϕ は0~1の間の値をとる。 I 、 g_0 は5秒幅の震度処理から算出できる。 ϕ を縦軸に、横軸に震度、周波数(この周波数はAとVから換算した)をそれぞれとり、表示したものが図4である。

まず、震度と ϕ をみると、 ϕ は全く震度に依存していないことが分かる。また、周波数と ϕ をみると、かなりばらついているが、おおざっぱに低周波側の利得が大きく、高周波側のそれが小さい傾向がある。図4右には、スペクトル振幅補正係数(右目盛)を併せて示してある。このカーブは、ほとんどの地震動がその範疇にある1~10Hzでは単調減少関数であり、利得 ϕ の分布とよく似ている。

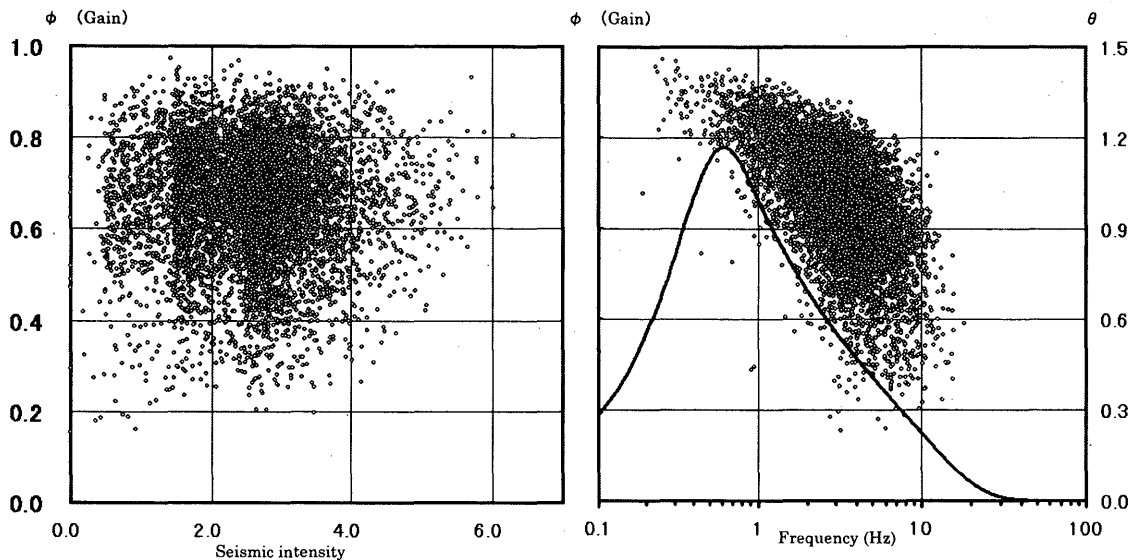


Figure 4 Relation of Gain parameter and seismic intensity and frequency.

ϕ (Gain parameter) is defined in eq.(12)

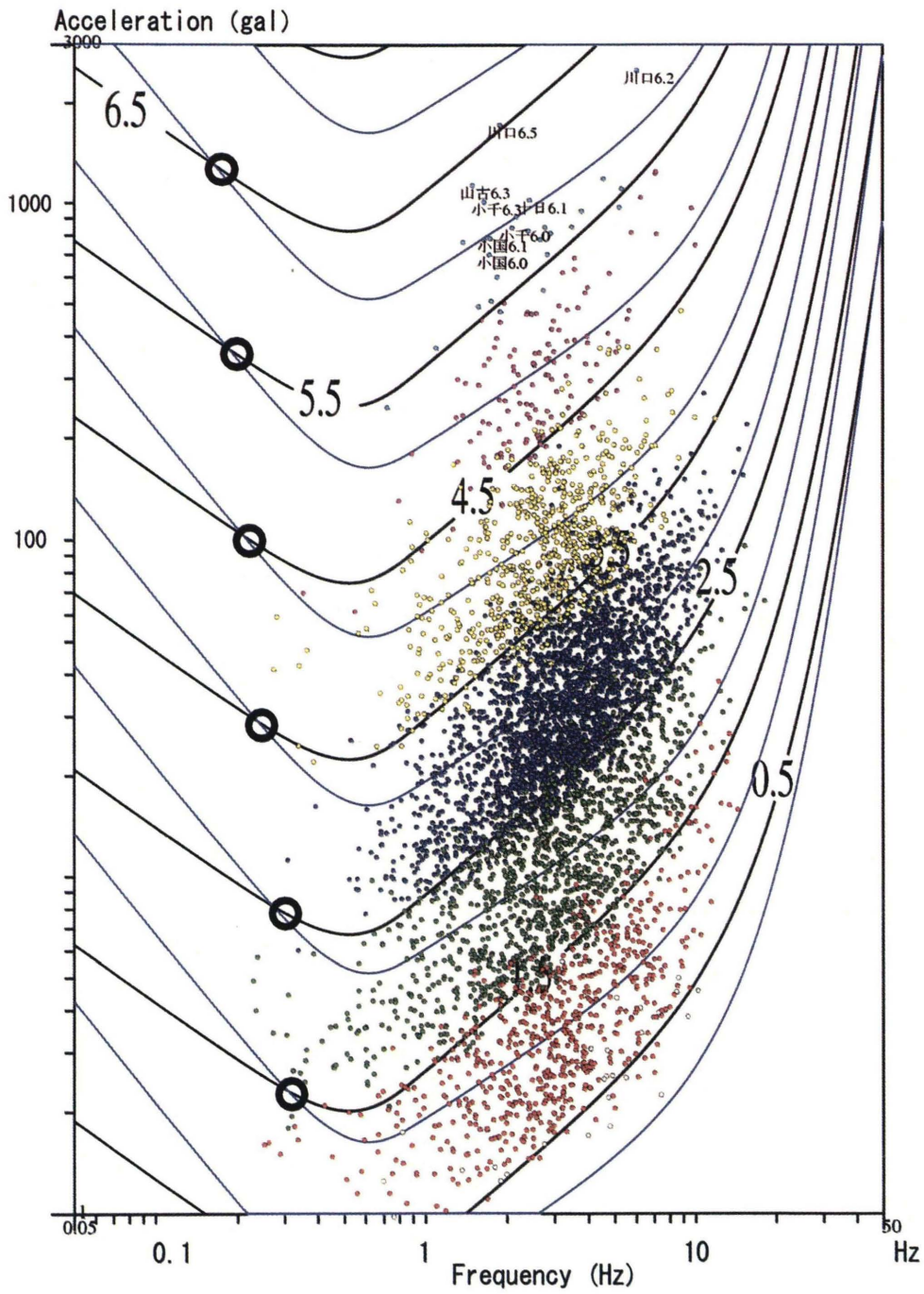


Figure 5 Relation of seismic intensity and frequency.
 Contours of seismic intensity are given by Eq. (8) Relation of seismic intensity and frequency, under condition gain parameter $\phi=1$, also plotted. The left side intersection of 2 contours (O) is outside of the regression range.

図5は図3と同じ回帰式(8)を用い、縦軸を加速度、横軸を周波数に換算したものである。改めて、震度・回帰式・周波数ごとのばらつきを見ると、1 Hz付近で大きく回帰式を外れるものはないのに対し、5 Hz付近をみると実際の震度と回帰式の出入りが激しい。これは、図4右側と同じ傾向である。図4右のばらつきが大きいことは、周波数推定の誤差(AとVによる近似)も要因としてあるが、このばらつきが、回帰式と実際との誤差の主要因と考えられる。

図5に(12)式で定義される ϕ を1としたときの加速度-周波数の関係を震度0.5から0.5ずつ増やして描画した。 $\phi=1$ の曲線は、該当する震度・周波数における必要最低限の加速度である。この曲線と同震度値の回帰式等値線は、回帰式が正しいとすれば常に $\phi=1$ の曲線より上である。しかし、実際には交差する点が0.2~0.3Hz(周期3秒~5秒)にあり(図5)、この点より低周波(長周期)側の回帰式は適用範囲を外れていると言える。

2) リアルタイム震度の算出

最大速度時刻と最大加速度時刻の差、及び実際の地震動の範囲から考えると、周波数補正項を含む回帰式を用い震度を算出する時間幅は、安全をみると1秒間程度と考えられる。その間隔の切れ目で最大速度時刻と最大加速度時刻が分かれる場合もあるので、機械の自動制御などの目的に用いる場合は、時間窓をずらしながら計算することも必要と考えられる。

ここでは、0.1秒後には震度を算出するという課題と「強震動の継続時間(例えば計測震度5.0を超えている時間)を0.1秒単位で把握する」という課題を設定した。1秒スパンより条件の厳しい0.1秒スパン(シフトは0.01秒)で、周期補正項を用いる式が震度の過大あるいは過小評価をすることがないか確認する目的もある。以下、時系列に様々な回帰式を適用し、その有用性を検討した。

図6(1)は2004年新潟県中越地震における川口(震度7への適用)、(2)は同最大余震における川口(短周期地震波への適用)、(3)は新潟県中越地震における六日町(周期約1.5秒、やや長周期地震波への適用)、(4)は2004年紀伊半島沖地震・本震における京丹後市(ノイズ混入データへの適用)である。図には波形の時系列も併せて示している。回帰式は(5)(周期情報を用いない式)と(2)(4)(8)(周期情報を用いる式)式を用い

た。震度は5秒スパンのデータを0.01秒ごとに求めている。

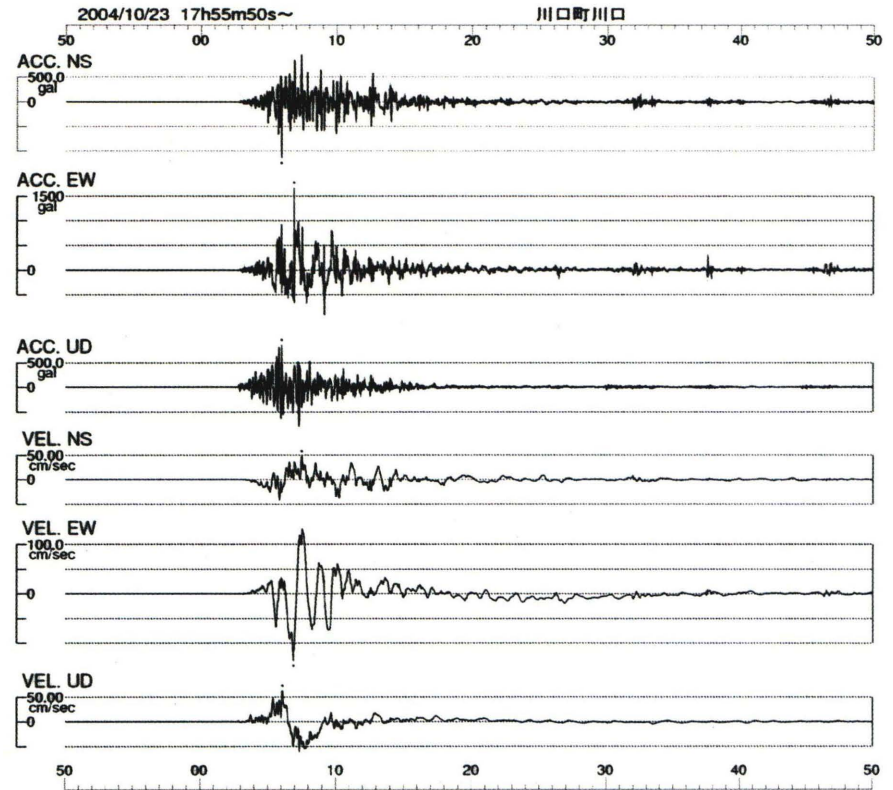
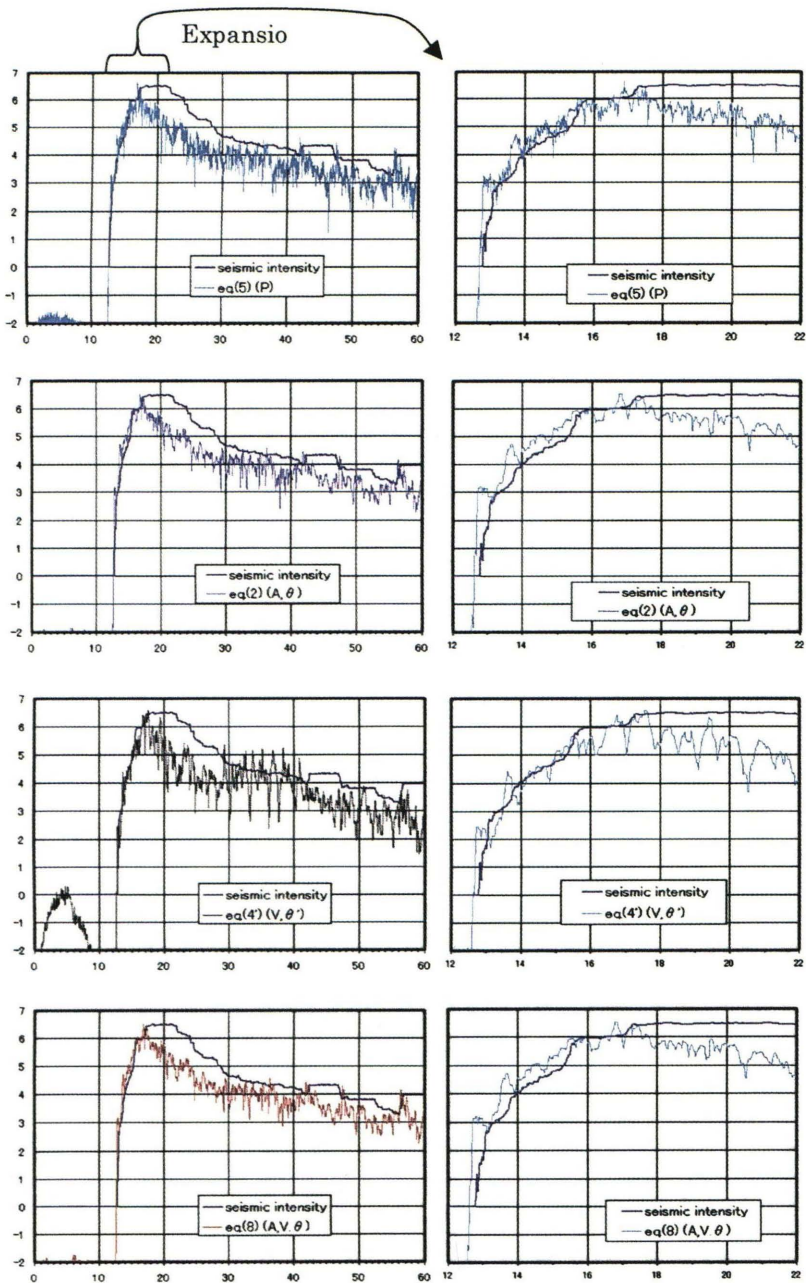
図6(1)は、どの回帰式も震度のピークは6.5前後と良好な結果が得られている。強震動の継続時間を把握する目的では、5秒スパンの震度はデータの重複が多いため使用しにくい。他の3つの回帰式は「計測震度5.0を超えている時間が5.7秒前後」と読み取れる。データの暴れ方をみると、(4)は全般的に震度の上下振幅が大きい。(5)式は(2)、(8)式に比べるとやや変動が大きい。

図6(2)は、(5)式の適合が相対的によい。(4)式は実際の震度ピークとの差が0.6以上あり、短周期への適用に難がある。

図6(3)は、(4)式だけが震度ピークに達しているが、大きく見積もりすぎている。その他の式は、震度ピーク値に届いていない。長周期の地震波へは、0.1秒スパン、あるいは逐次計算の式の適用はやや難があると考えられる。

図6(4)は、5秒スパンの震度がまったくノイズの影響を受けていない。他の式はノイズの影響がすべて出ているが、特に速度式(4)は漸化式の影響が顕著であり、ノイズ期間が尾を引いている。

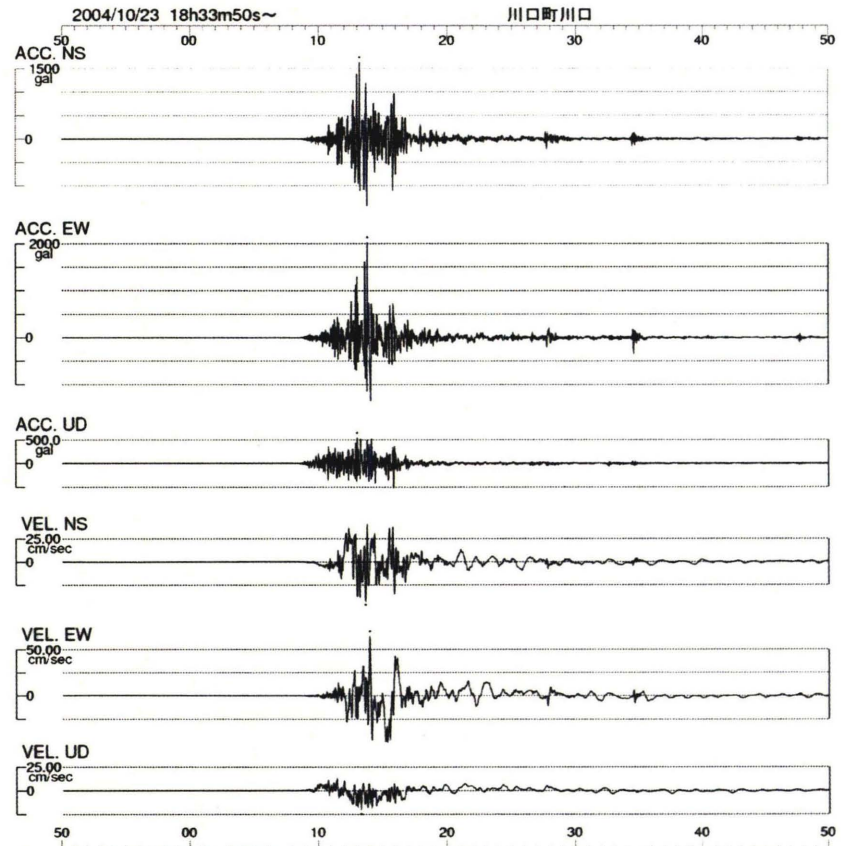
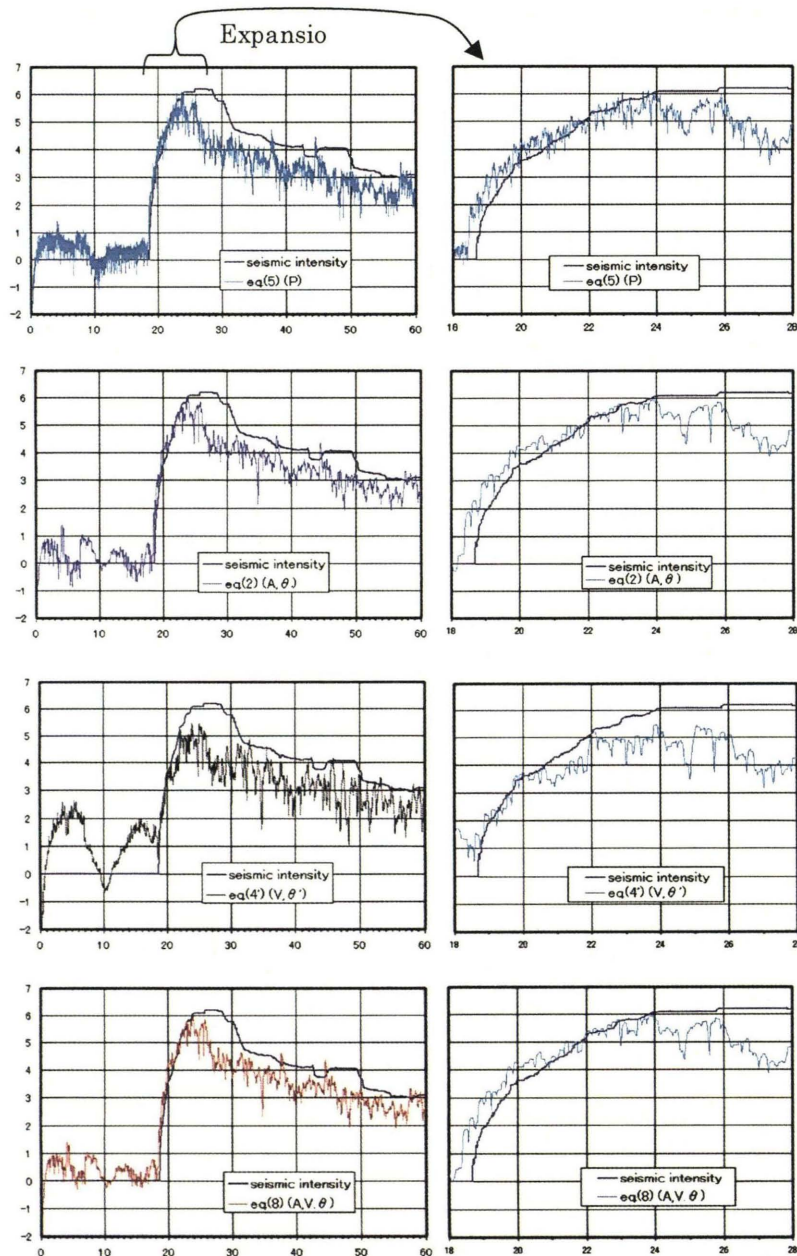
これらから言えることは、通常の使用ではどの回帰式もほぼ問題ないが、短周期・長周期データへの適用範囲の広さから、全般的に(8)式がよい結果を与える。しかし、これら回帰式の適用は、ノイズに関して別途考慮しなければならないことも分かった。



(1) Kawaguchi of the Mid Chuetsu Earthquake in 2004

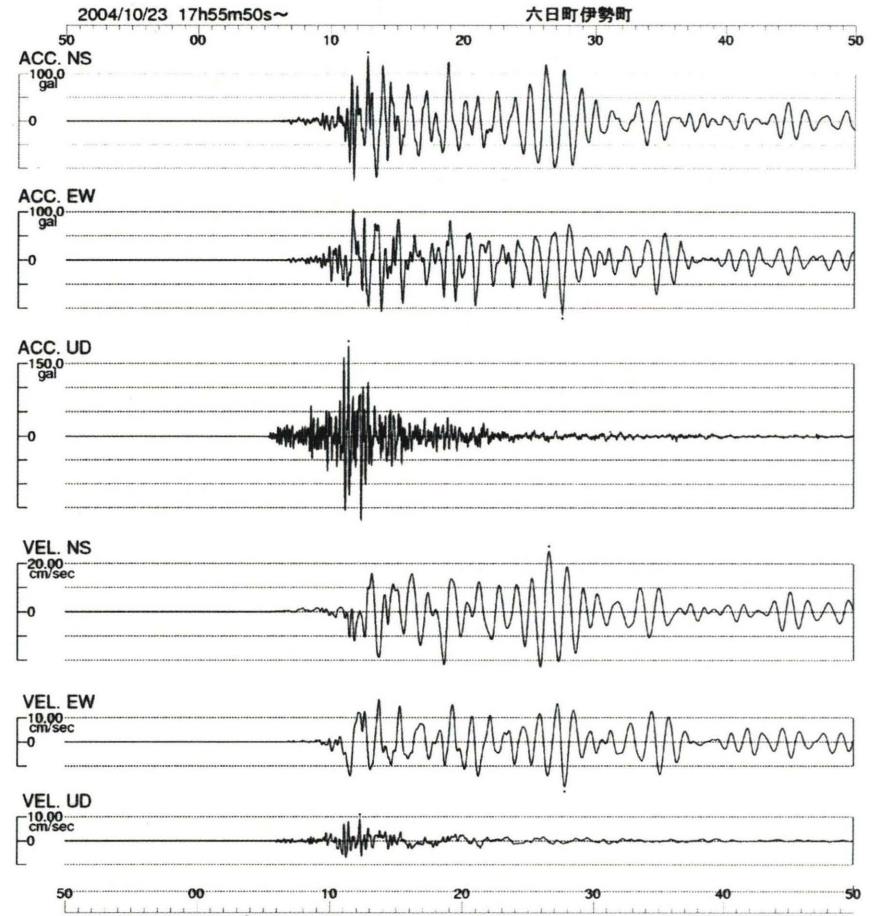
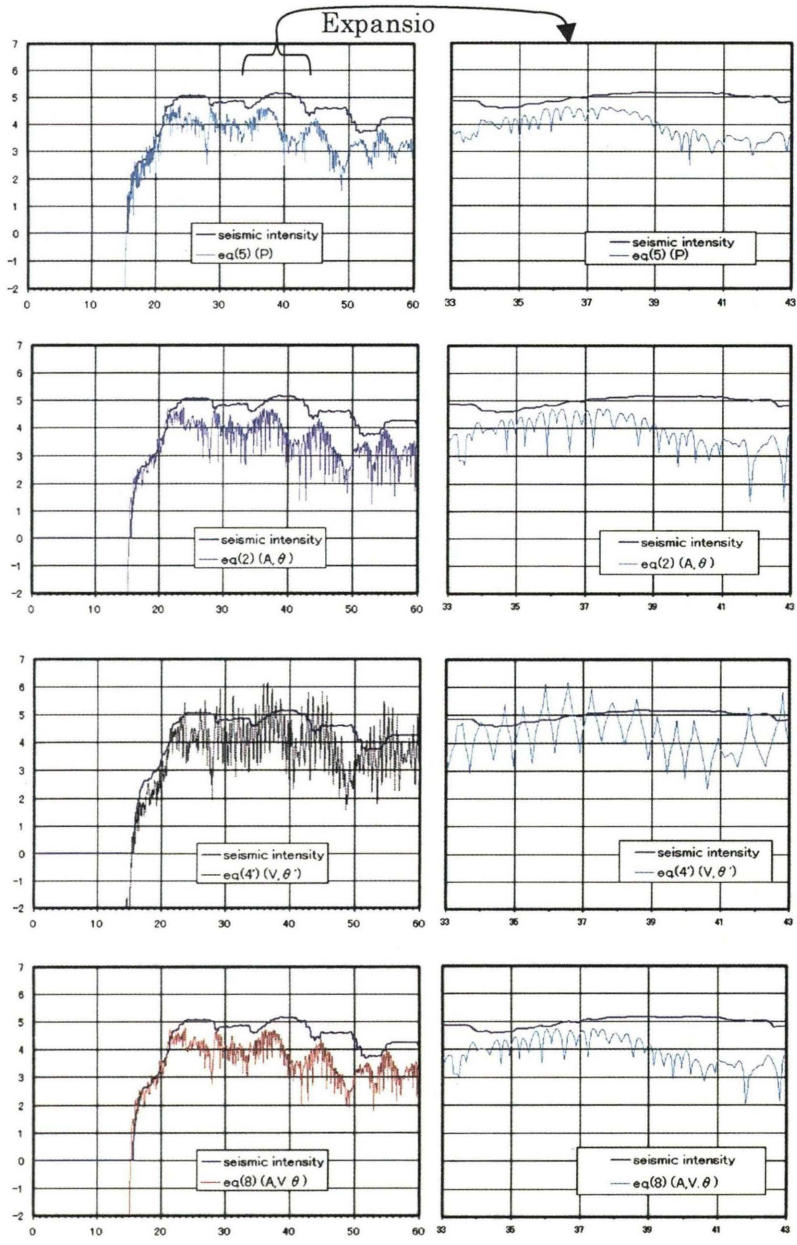
Figure.6 Time series of real time or 0.1s interval seismic intensity

Seismic intensities are calculated from the regression (5), (2), (4'), and (8), respectively. Seismic intensity calculated with 5s time window is also plotted in deep blue.



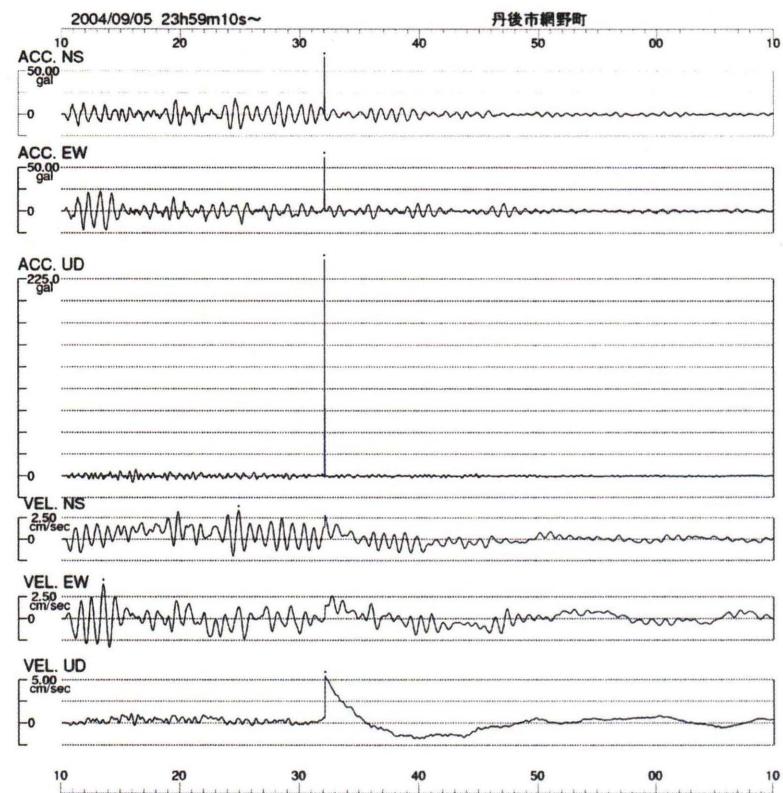
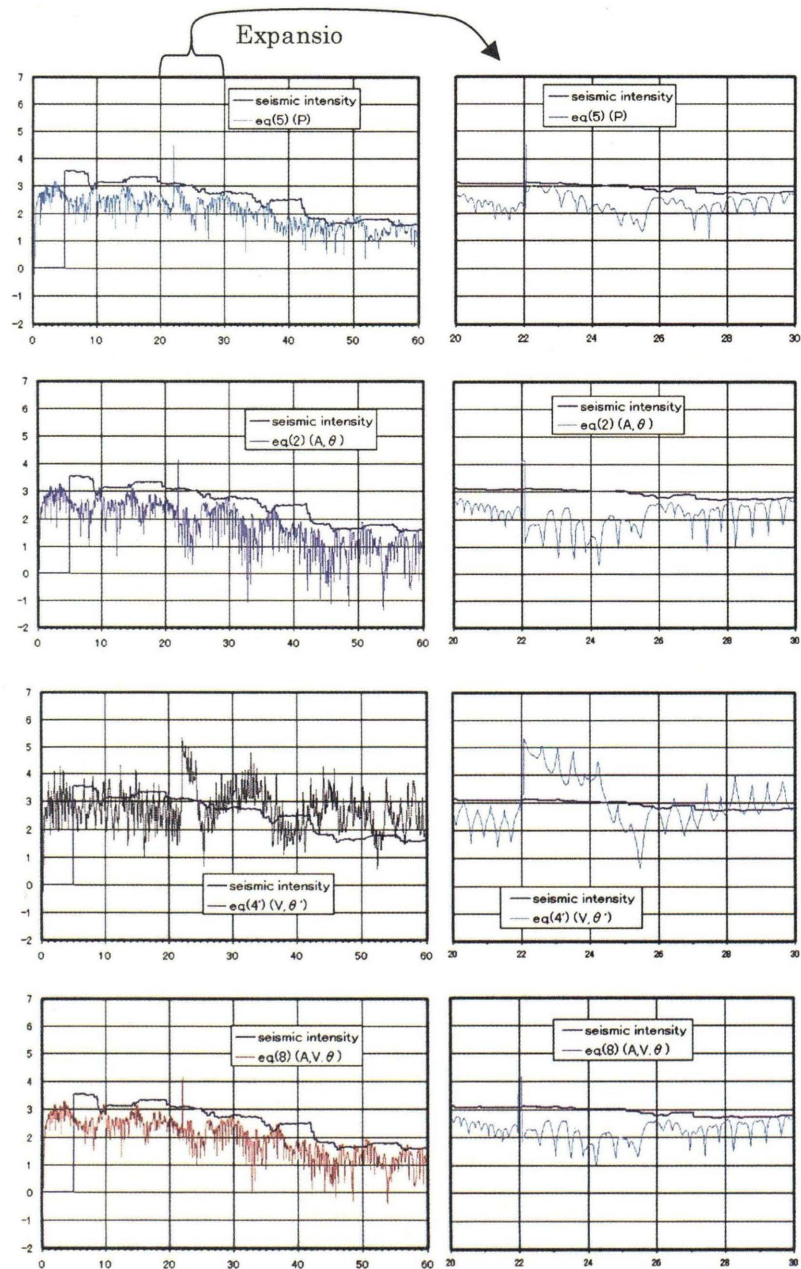
(2) Kawaguchi, aftershock of the Mid Chuetsu Earthquake in 2004

Figure.6 Time series of real time or 0.1s interval seismic intensity
(Continued)



(3) Muia-machi of the Mid Chuetsu Earthquake in 2004

Figure.6 Time series of real time or 0.1s interval seismic intensity
(Continued)



(4) Kyo-tango for an earthquake off the Tokai area on Sep. 5, 2004

Figure.6 Time series of real time or 0.1s interval seismic intensity
(Continued)

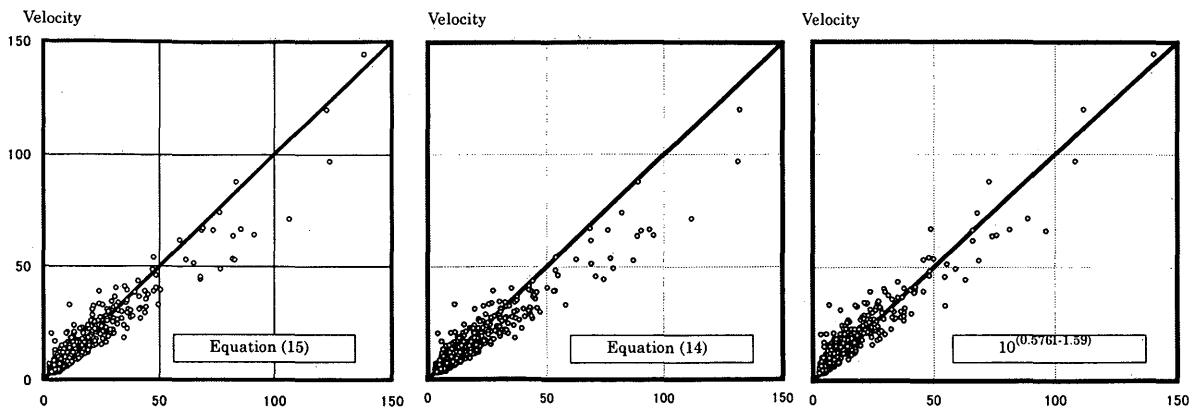


Figure.7 Comparison of data fitting of equations (3), (14) and (15)

3) 速度推定

2005 年現在、地震時に震度計から電報形式で得られる情報には、計測震度、最大加速度（合成、各成分）などが含まれている（石垣・福満，2002）が、速度の情報は含まれていない。一方、気象庁では、推計震度で用いる地表での最大速度を、計測震度から算出している（(3)式の型）。(3)式よりも周期情報を用いた式の誤差が全般に小さいので、(2)式、(4)式、あるいは(8)式を用いることで、最大速度を推定することができる。具体的な方法は、以下の通りである。

まず、(2)式を用いて、 $\log \theta$ を求める。

$$\log \theta = \{I - (0.6830 + 1.9132 \log A)\} / 2.4207 \quad (13)$$

$\log \theta$ 及び(4)式を用いて、

$$\text{vel} = 10\{I - 2.2699 + 0.6156 \log \theta\} / 1.8830 \quad (14)$$

あるいは、 $\log(\theta)$ 及び(8)式を用いて、

$$\text{vel} = 10\{I - 1.0528 - 1.4578 \log A - 1.6089 \log \theta\} / 0.45521 \quad (15)$$

によって、最大速度が得られる。結果を図 7 に示した。

横軸は各々の回帰式による推定速度、縦軸は実際の速度である。推定速度双方ともオリジナルの回帰式とほぼ同様の結果が得られた。25cm/sec 未満での現状の回帰式は、低く見積もり気味であることも分かる。しかし、(14)、(15)式はそれより大きい速度では、実際の速度よりやや大きく見積もる傾向があることも、同時に見て取れる。(14)、(15)式の適用によって、速度の推定が一概に改善したとは言いが、比較材料としてこれらの式は使用できると考えられる。

5. まとめ

- ・即時的な震度を算出するため、各種の回帰式を調査した。その結果、以下の回帰式が最小の AIC を与えることが分かった。

$$I = 1.0528 + 1.4578 \log A + 0.45521 \log V + 1.6089 \log \theta$$

- ・得られた回帰式を用いて、リアルタイムに近いタイミングで震度が得られることを示した。

謝辞

本稿は、勝間田明雄気象研究所室長、関田康雄地震情報管理官に査読して頂いた。勝間田室長には、査読のみならず、波形処理に関する示唆も多く頂いた。また、藤本一雄博士、翠川三郎教授らとは、本稿と同時期に作成されていた類似テーマに関する論文を執筆段階で交換し、頂いたご意見は本稿の改善に役立った。また、地震波形は気象庁の他、新潟県、福岡県、京都府等のデータも使用した。過去に気象庁データ収集・整理に当たられた方も含め、これらの方々記して謝意を表します。

文献

- 石垣祐三・福満修一郎 (2002) : 最大加速度発現時刻を用いた計測震度データの特性調査について - 気象庁震度データベースの活用 -, 験震時報, 65, 45-65.
- 加藤輝之 (2004) : PostScript コードを生成する描画ツール "PLOTIPS" マニュアル, 気象研究所技術報告, 44, 97pp.8

2.31

- 川瀬博 (1998) : 断層近傍強震動の地下構造による増幅

- プロセスと構造物破壊能, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, 29-34.
- 気象庁告示 4 号(1996).
- 気象庁(1996): 震度を知る, ぎょうせい, 238pp.
- 気象庁(2005): 強震観測報告 2003 年(CD-ROM).
- 気象庁(2005): 強震波形データ (95 型) (CD-ROM).
- 斉藤正徳 (1978): 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探鉱, **31**, 240-263.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2005): 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, **7**.
- 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄(1999): 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, **51-56**.
- Akaike, H (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Autom. Control, **AC-19**, 716-723.