

断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式

NEW ATTENUATION RELATIONSHIPS FOR PEAK GROUND ACCELERATION AND VELOCITY CONSIDERING EFFECTS OF FAULT TYPE AND SITE CONDITION

司 宏 俊*, 翠川 三郎**

Hongjun SI and Saburoh MIDORIKAWA

New attenuation relationships for peak ground acceleration on soil ground and for peak ground velocity on stiff ground are developed based on the database of strong motion recordings from 21 Japan earthquakes. In the database, the near-source recordings are included, and the earthquakes are classified into three groups according to the fault type. The new attenuation relationships show that an intra-plate earthquake generates stronger acceleration and velocity than inter-plate and crustal events. The results also show that the earthquake with deeper focal depth generates stronger ground motion.

Key words: Attenuation relationship, Peak ground motion, Fault type, Focal depth, Fault distance, Equivalent hypocentral distance

距離減衰式, 地震動最大振幅, 断層タイプ, 震源深さ, 断層最短距離, 等価震源距離

1. はじめに

将来発生するであろう大地震による地震動の強さをあらかじめ予測することは地震工学上重要な課題の一つである。地震動強さの距離減衰式は地震動強さを経験的に予測する手法として従来よりしばしば用いられており、数多くの距離減衰式が提案されている。これらの距離減衰式の問題点としては、まず、既往のデータの統計解析に基づくため、データの少ない震源近傍での信頼性が指摘できる。特に、日本では、海洋で震源を持つ地震が多いことから、震源近傍での地震記録がほとんど得られておらず、震源域での地震動の距離減衰特性は十分に調べられていない。

また、距離減衰式では、地震動の強さを支配する要因が単純にモデル化され、震源特性を地震規模で、伝播特性を震源からの距離で、地盤特性を地盤種別などで表現される場合が多い。そのため、個々の地震の個性などを表現することが困難である。そこで、震源特性として、地震規模のみならず断層タイプや震源深さの影響も考慮すべきことが指摘されている¹⁾²⁾。伝播特性については、近距離で震源からの距離をどのように定義すべきかが問題とされている³⁾⁴⁾。地盤特性についても、地盤種別では十分に考慮できないことが指摘されている⁵⁾。

これらの問題点を踏まえて、本研究では、震源特性、伝播特性、

地盤特性の影響をより正確に評価して、震源域にも適用できる最大加速度、最大速度の距離減衰式を提案することを目的とした。

そのため、近年発生した大地震による強震記録を含めた強震動データベースを構築した。このデータベースは、①震源近傍の強震記録が含まれていること、②地震のマグニチュードが5.8から8.3まで幅広く分布していること、③地震の断層タイプがさまざまであり、震源深さも6km~120kmまでの広範囲に分布していることが主な特徴である。震源距離としては、従来よく用いられてきた断層最短距離に加え、最近提案されている等価震源距離⁶⁾も用いることにした。震源特性をより適切に評価するため、回帰モデルに、震源深さ及び断層タイプの項目を追加し、その影響を評価することにした。また、地盤特性の影響を定量的に評価して、最大加速度については地盤上、最大速度については表層地盤の影響を取り除いた硬質地盤上のものに対してそれぞれ距離減衰式を求めることにした。

2. 地震動データベース

Table 1に本研究で用いた地震のリストを示す。1968年から1997年までに日本で発生した21地震から得られた強震記録を用いた。これらの地震について、地震の規模を示すマグニチュードは、モーメントマグニチュード $[M_w]$ とし、その値はハーバード大学のCMT解ない

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻 大学院生・修士(工学)
(現職構造計画研究所)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Table 1. The list of the earthquakes in the database

NO.	Earthquake	Date	M_w	Depth	Number of recordings		Fault Type	Weight	Reference
					Peak acceleration	Peak velocity			
1	Off Tokachi	1968.05.16	8.2	15	10	10	Inter-plate	C	1, 2
2	Off Nemuro Pen.	1973.06.17	7.8	25	6	4	Inter-plate	C	1, 2
3	Near Izu Oshima	1978.01.14	6.6	7	8	12	Crustal	C	1, 3
4	Off Miyagi Pref.	1978.06.12	7.6	37	13	10	Inter-plate	C	1
5	East off Izu Pen.	1980.06.29	6.5	7	19	16	Crustal	B	1, 3
6	Off Urakawa	1982.03.21	6.9	25	19	9	Crustal	C	1, 2
7	Nihonkai-Chubu	1983.05.26	7.8	6	21	17	Inter-plate	C	1
8	Off Hyuganada	1984.08.07	6.9	30	9	8	Intra-plate	C	4,5,6,7
9	Central Iwate Pref.	1987.01.09	6.6	73	10	5	Intra-plate	C	4,8,9
10	Northern Hidaka Mt.	1987.01.14	6.8	120	16	9	Intra-plate	C	4,9,10
11	East off Chiba Pref.	1987.12.17	6.7	30	173	47	Crustal	A	1,3,11
12	Off Kushiro	1993.01.15	7.6	105	51	21	Intra-plate	B	4,11
13	Off Noto Pen.	1993.02.07	6.3	15	21	5	Crustal	C	4,13,14,15,16,17
14	Southwest off Hokkaido	1993.07.12	7.7	10	52	18	Inter-plate	B	4,12,18
15	East off Hokkaido	1994.10.04	8.3	35	41	17	Intra-plate	B	4,18,19,20
16	Far off Sanriku	1994.12.28	7.7	35	83	30	Inter-plate	B	4,22,23,24
17	Hyogo-ken Nanbu	1995.01.17	6.9	10	85	47	Crustal	A	4,25
18	Off Hyuganada	1996.10.19	6.7	25	106	67	Inter-plate	A	4,26
19	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.03.26	6.1	6	121	68	Crustal	A	4,27,28
20	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.05.13	6.0	7	121	64	Crustal	A	4,27,29
21	Northern Yamaguchi Pref.	1997.06.25	5.8	10	152	59	Crustal	A	4,27,30

し各地震に関連する研究論文などの公表されているものを用いた。なお、 M_w の公表されていない地震については、地震モーメントを用いてHanks and Kanamori (1979) ⁷⁾による地震モーメントとモーメントマグニチュードの関係式によって求めた。地震の震源深さ、断層タイプ及び断層の位置などは、佐藤(1989) ⁸⁾などの文献を参考にして定めた。参考にした文献を付録に示す。

Fig.1に本研究で用いた地震の震源深さ分布図を示す。ここで、震源深さは断層面の平均的な深さと定義している。震源深さはほとんど40 km以内に分布しているが、70 kmや100 km程度の地震も含まれている。Fig.2に断層タイプの頻度分布図を示す。本研究では、地殻内地震、プレート間地震及びプレート内地震の3つの断層タイプに分類した。ここで、プレート内地震とはもぐり込みプレート内で発生する地震を意味する。

本研究では距離の定義として断層最短距離と等価震源距離 ⁹⁾の2種類を用いた。断層最短距離は定義が簡単で、利用にも便利であることから、既往の研究でもよく用いられている。一方の等価震源距離は物理的意味が明確で、点震源距離減衰モデルを断層近傍まで適用できるという利点があるが、これを定義するためには断層面でのすべり量の分布が必要とされる。なお、本研究では等価震源距離を求めるとき、すべり量は断層面にわたって一様に分布すると仮定した。

各種観測機関によって観測された強震記録を収集した。そのうち、最大加速度は21地震の1137記録、最大速度は21地震の543記録を整理した。これらは地盤上ないし低層建物の1階にある観測点から得られたものである。時刻歴波形が利用できる場合(905記録)には、各観測機関の地震計はさまざまであるため、地震計の特性補正を行った。地震計の特性補正を施した後、ノイズを除去するため、Fig.3に示すバンドパスフィルターをかけた。Fig.3に示すフィルターの各コーナー周波数はフーリエスペクトルで確認されるノイズの状況に応じて3種類のもの(① $F_1=0.15$ Hz, $F_2=0.08$ Hz; ② $F_1=0.20$ Hz, $F_2=0.10$ Hz;

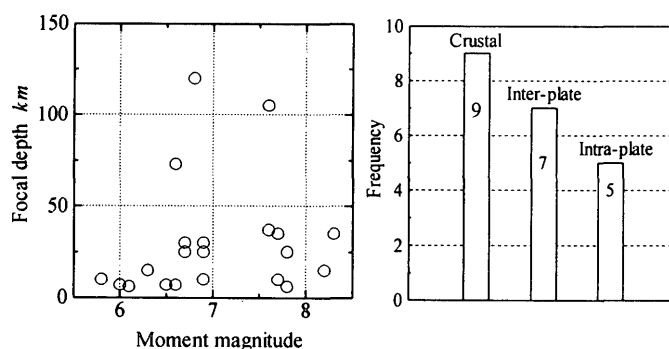


Fig.1. Focal depth vs. M_w

Fig.2. Histogram of the earthquakes

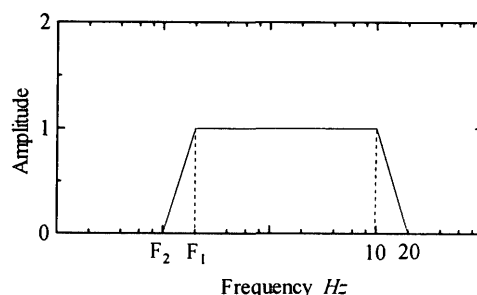


Fig.3. Band-pass filter used for instrument correction

③ $F_1=0.33$ Hz, $F_2=0.15$ Hz)を用いた。得られた強震記録のうち、速度記録については微分して加速度記録を求め、加速度記録については積分して速度記録を求めた。一方、時刻歴波形が利用できない場合には、各観測機関(例えば、港湾技術研究所、土木研究所など)から公表されている最大加速度値や最大速度値を用いた。この際、地震計の特性補正の処理が行われているもの(232記録)のみを用いた。また、兵庫県南部地震でのポートアイランドの記録などのように地盤の液状化の影響が著しく現れた記録は解析に用いていない。

解析には、こうした処理を行った強震記録より、マグニチュードが7以上の地震では震源距離300 km以内、マグニチュード6.6以上7以下の地震では震源距離200 km以内、マグニチュード6.3以上6.5以下の地震では震源距離150 km以内、マグニチュード6.2以下の地震では震源距離100 km以内のデータを使用し、結局、最大加速度については856記録、最大速度については394記録を用いた。なお、最大振幅値は水平2成分のうち大きい方の値を用いた。Fig.4に、用いた地震記録の距離と M_w の分布を断層最短距離について示す。図から、震源近傍の地震記録も多数含まれていることが分かる。

地震動に含まれている地盤特性の影響を検討するため、各観測点の地盤データの収集を行った。そのうち、全観測点(560地点)については、公表されている資料や論文、および観測機関から提供された資料を参考にして岩盤、地盤に地盤分類を行った。なお、岩盤、地盤の分類基準はJoyner and Boore(1981)⁹⁾によった。より詳細な地盤情報のわかっている観測点に対しては、地盤のS波速度検層結果及びボーリングデータを用いて、地表から30 mまでの平均S波速度[AVS_{30}]を推定した。平均S波速度の計算は各層の伝達時間の和で全層厚を除いて求めた。

ただし、地盤データの調査深度が30 m未満の場合(例えば、K-NETの地盤データのほとんど)は、①最も深い層が岩盤の場合は、岩盤のS波速度を岩種などを考慮して推定し、これが30 mまで続くとして地盤の平均S波速度を計算し、②最も深い層が岩盤でない場合は、地盤データのある最下層までの深さと最下層でのS波速度がTable 2で示すような条件を満足する場合には、最下層のS波速度が深さ30 m続くとして平均S波速度を計算した。この条件を満足しないものは除外して、結局296地点で地盤の平均S波速度を求めた。なお多数の地盤モデルを仮定して数値実験を行い、Table 2で示すような条件を満足すれば、推定される AVS_{30} の誤差は25%以内に収まることを確認している。

3. 回帰モデル

断層最短距離の場合は(1)式で、等価震源距離の場合は(2)式で示す回帰モデルを用いた。

$$\log A = b - \log(X + c) - kX \quad (1)$$

$$\log A = b - \log X_{eq} - kX_{eq} \quad (2)$$

ただし、 A は地震動の最大振幅値、 X は断層最短距離[km]、 X_{eq} は等価震源距離[km]を示す。

(1)(2)式の右辺第1項の回帰係数 b は距離減衰曲線の絶対値を支配する項で、右辺第2項は幾何減衰を表す項である。右辺第3項は粘性減衰を表す項であり、この係数 k の値は、既往の研究では、最大加速度で0.003前後⁹⁾⁻¹¹⁾、最大速度で0.002前後⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾を取る場合が多い。また、地震記録のインバージョン等により得られた日本各地での伝播経路での Q_s 値¹³⁾²¹⁾から係数 k を概算すると、最大加速度で0.002~0.005程度、最大速度で0.002~0.003程度の範囲にある。

理想的には地域ごとに適切な k の値を設定することが望ましいが、回帰分析から各地での k の値を求めるには、データの数が不十分であ

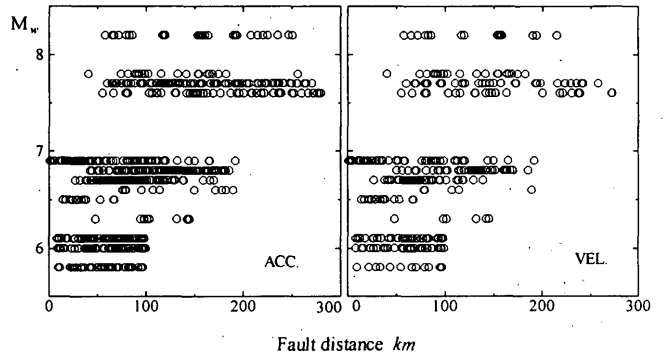


Fig.4. Fault distance vs. moment magnitude

Table 2. Criterion for estimating the average S-wave velocity

Depth of the known layer (m)	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5
S-wave velocity of the deepest layer (cm/s)	500	400	350	250	200	100

る。また、上述の k の変動による最大振幅の変化は近距離(例えば、100 km程度以内)では大きなものとはならない。本研究では近距離での地震動強さの予測を主眼にしており、後述のように遠距離の記録は重みを下げて解析していることから、本研究では係数 k の値を最大加速度に対して0.003、最大速度に対して0.002と与えた。

断層最短距離の場合は、(1)式で示すように、回帰モデルに係数 c を導入して、距離が小さいところで地震動の振幅値が飽和するようになった。 c は(3)式で示される。 c_1 、 c_2 は回帰係数である。

$$c = c_1 10^{c_2 M_w} \quad (3)$$

4. 地盤特性の評価

4.1 最大加速度に対する地盤の影響

最大加速度に対する地盤特性の影響については、最近の研究では岩盤に対する地盤の増幅率が平均で1.4倍程度であることが指摘されている¹⁰⁾²²⁾。本研究は、これらの結果に従って、最大加速度距離減衰式を求めるときに、岩盤上の最大加速度観測値を1.4倍大きくして、地盤上の最大加速度値に変換した。本研究で用いる最大加速度の大部分は地盤上の観測点で得られたものであるため、この変換値と地盤上で観測された最大加速度を用いて地盤上での最大加速度の距離減衰式を求めることにした。なお、本データセットにより岩盤上に対する地盤上の最大加速度の比を検討したところ、ほぼ1.4倍の値をとることを確認している。

4.2 最大速度に対する地盤の影響

Midorikawa *et al.* (1994)¹⁰⁾は千葉県東方沖地震の際に得られた多数の地震記録を用いて地震動に対する地盤特性の影響を検討し、その結果、最大速度に対する地盤の影響を評価する方法として、地盤増幅率 R と地盤の30mまでの平均S波速度[AVS_{30}]との関係式(4)を提案している。

$$\log R = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \quad (4)$$

本研究では、観測された最大速度値[V_{max}]を(4)(5)式で硬質地盤上の

最大速度値[V_{cor}]に変換する。ここでいう硬質地盤は(5)式で示す増幅率が1となるような地盤で、平均S波速度で600m/sのものである。このように地盤の影響を補正した硬質地盤上の最大速度について距離減衰式を求める。

$$V_{cor} = V_{org} / R \tag{5}$$

5. 最大加速度・最大速度の距離減衰式の作成

5.1 解析方法

最大振幅の距離減衰式を求めるため、(1)(3)式または(2)式で示す回帰モデルを用いて2段階に分けて回帰分析を行う。第1段階では、回帰モデルを各地震に適用し、係数 b の値を求める。その際、近距離での地震動データがより強く反映されるよう、データには、震源距離が25 km以下の場合には8, 25 km~50 kmまでは4, 50 km~100 kmまでは2, 100 km以上は1で重みをつけて解析した。

断層最短距離の場合、(1)式の係数 c は近距離のデータがないと決まらないので、すべての地震については求められない。そこで、まず近距離で強震記録の得られている地震について、係数 c を求めてから、回帰モデルに代入して各地震のデータに適用して係数 b を求める。第2段階では、地震規模、断層タイプ、震源深さを考慮して係数 b について回帰分析を行い、精度の良い回帰式を求める。

5.2 拘束条件を与えない場合

a) 断層最短距離の場合

最大加速度については、震源近傍でデータが得られている3つの地震について(1)式に示す係数 c の値を求めた。Fig.5には各地震から求めた係数 c とモーメントマグニチュードとの関係を示す。図中、近距離のデータが十分にあり、信頼性の高い値を○印、また、1985年チリ地震の記録から得られた c 値²³⁾を△印で示している。これらの値から(3)式で示すモデルより回帰分析を行い、図中の実線と(6)式で示す係数 c とマグニチュード[M_w]との関係が得られた。

$$c = 0.0055 \cdot 10^{0.50M_w} \tag{6}$$

図中、福島・田中(1992)²⁴⁾、Nozu *et al.*(1997)²⁵⁾の結果もプロットしているが、本研究の結果とは調和的である。

最大速度については震源近傍でデータが得られている4つの地震について(1)式に示す係数 c の値を求め、その結果をFig.6に示す。図中、近距離のデータが十分にあり、信頼性の高い値を○印、近距離でのデータがやや十分ではなく、信頼性がやや劣る値を△で示す。前述のチリ地震から得られたデータ²³⁾も△印で示す。これらのデータを用いて、最大加速度の場合と同様な方法で回帰分析し、図中の実線と(7)式に示す係数 c とマグニチュード[M_w]との関係が得られた。

$$c = 0.0028 \cdot 10^{0.50M_w} \tag{7}$$

図中、Nozu *et al.*(1997)²⁵⁾の結果もプロットしているが、本研究の結果と大きな相違は見られない。

(1)式と(6)または(7)式を用いて各地震の最大加速度および最大速度データにフィットすることによって係数 b が求められる。Fig.7に、

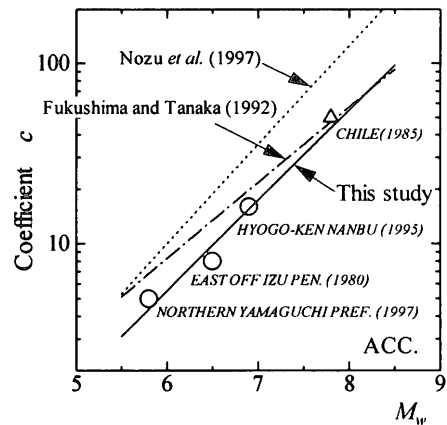


Fig.5. Coefficient c for peak ground acceleration

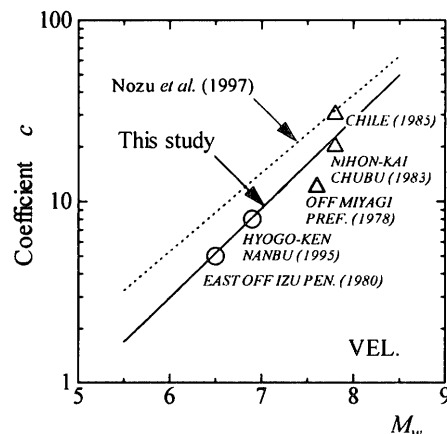


Fig.6. Coefficient c for peak ground velocity

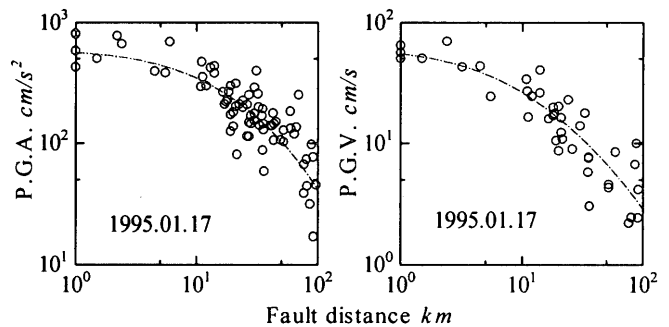


Fig.7. Examples of fitting the data with the regression model

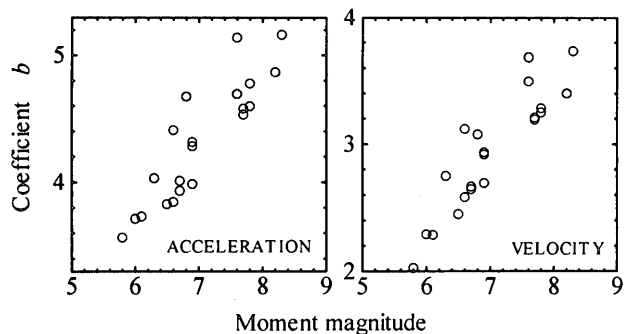


Fig.8. Coefficient b vs. moment magnitude

近距離で強震記録の得られた兵庫県南部地震の最大加速度[P.G.A.], 最大速度[P.G.V.]に対して回帰モデルであてはめたときの状況を示す。Fig.8には, 求めた各地震の**b**値とマグニチュードとの関係を示す。Fig.8より, **b**値とマグニチュードの間に強い相関があることが分かる。 M_w と係数**b**との関係は線形ではなく非線形になるとの指摘もなされている²⁶⁾が, 今回の結果には非線形性は明瞭にはみられない。

ただし, マグニチュードが同一でも, **b**値のばらつきが大きいことから, 地震動の強さには, マグニチュード以外の震源要素にも影響されていることが推測できる。既往の研究²⁷⁾で, 地震動に影響する要因として震源深さ, 断層タイプなどが挙げられていることから, 係数**b**を求めるため, これらの要素を取り入れた(8)式で示す回帰モデルを用いた。

$$b = aM_w + hD + \sum d_i S_i + e + \varepsilon \quad (8)$$

式中, *D*は震源深さ, *S_i*は断層タイプ, *e*は定数項, ε は標準偏差を示す。*a*, *h*, *d_i*は回帰係数を表す。ただし, 地震タイプの項*S_i*はダミー変数で, 地殻内地震, プレート間地震及びプレート内地震の3つのカテゴリで与えた。また, 強震記録が多く得られている地震のデータがより強く反映されるよう, Table 1のweightの項でAの地震は3, Bの地震は2, Cの地震は1で重みをつけて解析した。

重相関解析より得られた(8)式の各係数の値を最大加速度, 最大速度についてそれぞれTable 4で示す。ただし, これらの結果は, 後述のように回帰分析の際にトレードオフが発生することから, 再検討する必要があるものと考えられる。

b) 等価震源距離の場合

等価震源距離の場合, (2)式を用いて各地震の最大加速度および最大速度のデータに当てはめ, 回帰モデルの係数**b**を求めた。得られた係数**b**については, 断層最短距離の場合と同様に(8)式で示す回帰モデルを用いて重相関解析を行った。求めた(8)式の各係数の値を最大加速度, 最大速度についてそれぞれTable 5で示す。ただし, この結

Table 4. The results of the regression analysis without constraint (Using fault distance)

<i>a</i>	<i>h</i>	<i>d</i>			<i>e</i>
		Crustal	Inter-plate	Intra-plate	
Peak ground acceleration					
0.53	0.0044	0.00	-0.04	0.17	0.38
Peak ground velocity					
0.55	0.0037	0.00	0.01	0.16	-1.10

Table 5. The results of the regression analysis without constraint (Using Equivalent hypocentral distance)

<i>a</i>	<i>h</i>	<i>d</i>			<i>e</i>
		Crustal	Inter-plate	Intra-plate	
Peak ground acceleration					
0.58	0.0039	0.00	0.01	0.18	0.12
Peak ground velocity					
0.60	0.0032	0.00	0.03	0.13	-1.39

果についてもトレードオフの問題があり, 以後, 再検討する。

5.3 拘束条件を与える場合

本研究のデータベースでは, 回帰モデルの説明変数であるパラメータの間にある程度の相関関係がみられる。例えば, 規模の大きい地震で震源が深い傾向がみられる。このことより, 回帰分析をするとき, 係数*a*と*h*との間でトレードオフが発生しやすく, 回帰係数が適切に決まっていなかったことが予想される。例えば, Table 5の等価震源距離の場合には, Table 4の断層最短距離の場合に比べて, M_w の係数*a*は大きく, 深さの係数*h*は小さくなっている。これはトレードオフの影響によるものと考えられる。

距離が十分に離れていれば距離の定義によらず両者の結果は一致すべきであるので, 例えば, M_w の係数*a*が両者の場合で一致することが望ましい。そこで, M_w の係数*a*が距離の定義によらず一致することを拘束条件として与えた。また, 近年の研究では, 震源近傍での最大加速度は M_w によらずほぼ一定との指摘が多い¹¹⁾²⁷⁾²⁸⁾ことから, 断層近傍でのマグニチュード依存性が小さいことも拘束条件として与えた。

すなわち, 最大加速度の場合には, 断層最短距離が0のときに M_w によらず最大加速度が一定となるよう, 係数*a*の値を0.50に固定した。最大速度の場合には, 係数*a*の値を小刻みに変化させながら与えて, 他の係数と標準偏差を求め, 同一の*a*に対して得られる断層最短距離の場合の標準偏差と等価震源距離の場合の標準偏差との和が最小となる時の係数*a*を採用した。Table 6, 7に解析結果を示す。これらの係数より得られる新しい距離減衰式と用いたデータとの対数標準偏

Table 6. The results of the regression analysis with constraint (Using fault distance)

<i>a</i>	<i>h</i>	<i>d</i>			<i>e</i>
		Crustal	Inter-plate	Intra-plate	
Peak ground acceleration					
0.50	0.0043	0.00	0.01	0.22	0.61
Peak ground velocity					
0.58	0.0038	0.00	-0.02	0.12	-1.29

Table 7. The results of the regression analysis with constraint (Using Equivalent hypocentral distance)

<i>a</i>	<i>h</i>	<i>d</i>			<i>e</i>
		Crustal	Inter-plate	Intra-plate	
Peak ground acceleration					
0.50	0.0036	0.00	0.09	0.28	0.60
Peak ground velocity					
0.58	0.0031	0.00	0.06	0.16	-1.25

Table 8. The standard error of the attenuation relations shown in Tables 6 and 7

Standard error	Equivalent hypocentral distance		Fault distance	
	P.G.A.	P.G.V.	P.G.A.	P.G.V.
All data	0.28	0.23	0.27	0.23
$D \leq 100\text{km}$	0.24	0.22	0.25	0.23

D = distance

差をTable 8に示す。既往の研究⁴⁾²⁹⁾では標準偏差が0.3より大きいものが多いが、本研究では距離が100 km以内では0.25以下であり、データセットによく当てはまっていることが分かる。

5.4 本提案式から得られる距離減衰曲線

Fig.9に断層タイプをプレート間地震、震源深さを5 kmに固定し、マグニチュードのみを変動させたときの最大加速度、最大速度の距離減衰曲線を示す。距離の定義は断層最短距離をとっている。図中、最大加速度において、震源近傍ではわずかなマグニチュード依存性が示されているのに対し、最大速度では、より強いマグニチュード依存性がみられる。これは既往の研究結果と調和的である。

Fig.10に M_w を7、地震タイプをプレート内地震に固定して、震源深さのみを変化させたときの最大加速度、最大速度の距離減衰曲線をそれぞれ示す。図から、震源深さが100 kmの地震は、深さ30 kmの地震より、最大加速度では約2倍、最大速度では約1.8倍大きいことが分かる。

Fig.11に M_w を7、震源深さを20 kmに固定して、断層タイプのみを変化させたときの最大加速度、最大速度の距離減衰曲線をそれぞれ示す。図から、最大加速度の場合、プレート内地震が地殻内地震やプレート間地震より約1.7倍大きく、最大速度の場合、その倍率は約1.4倍となる。

なお、等価震源距離を用いた場合の結果は断層最短距離を用いた場合と同様の結果を与えるが、断層端部や傾斜断層の直上ではやや異なる結果を与える。

5.5 既往の研究結果との比較

Fig.12に本研究で得られた最大加速度距離減衰式と既往の研究結

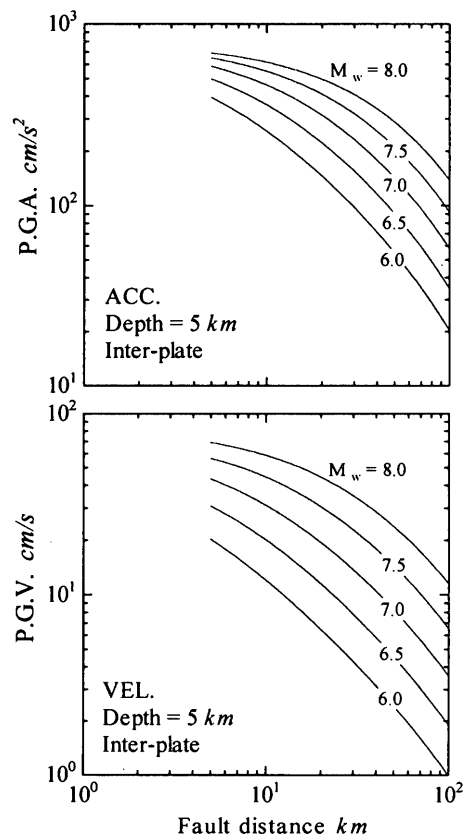


Fig.9. Predicted attenuation curves

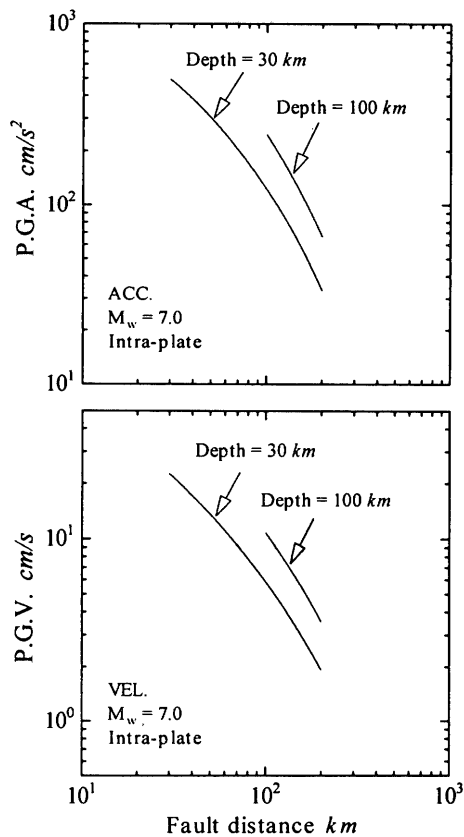


Fig.10. The effects of focal depth on peak ground motion

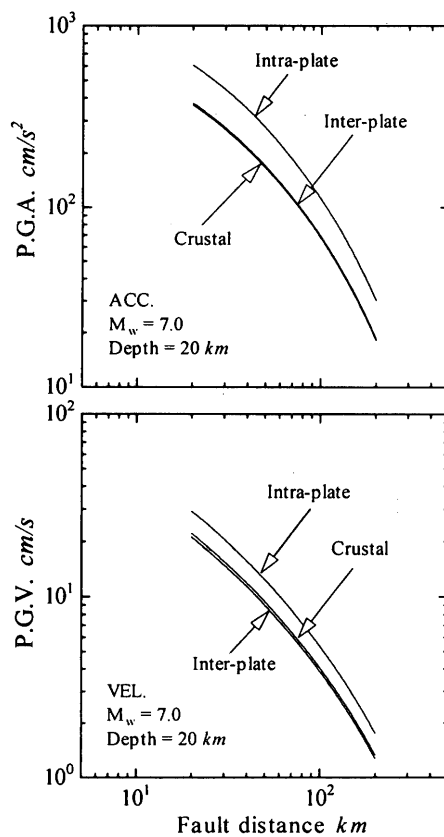


Fig.11. The effects of fault type on peak ground motion

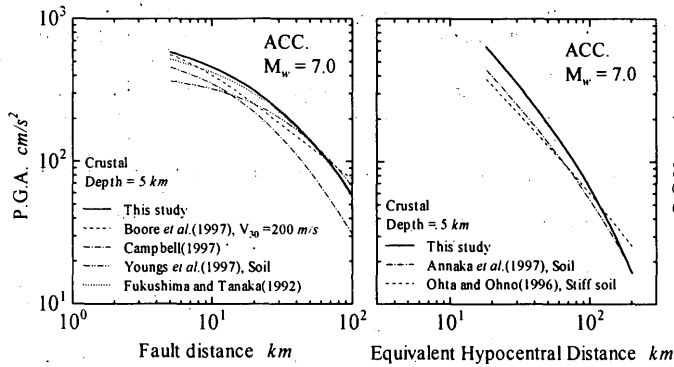


Fig.12. Comparison of the attenuation relations for peak ground acceleration

果²⁾¹¹⁾¹²⁾²⁸⁾³⁰⁾³¹⁾との比較を断層最短距離と等価震源距離の場合について示す。本提案式で M_w 7, 震源深さ5 km, 地殻内地震の場合とそれと等価な場合のものを比較している。図から, 断層最短距離と等価震源距離の場合とも, 既往の研究結果と調和的であることが分かる。Fig.13に最大速度の場合を示す¹²⁾²⁸⁾³²⁾³³⁾。断層最短距離の場合, 各距離減衰式間でばらつきがみられるが, 本提案式は中間的な値となっている。等価震源距離の場合は, 3つの距離減衰式の結果はほぼ同程度である。

地震動距離減衰式における震源深さの影響の評価は, 文献 2) 12) 34) 35)で行われている。これらの研究結果から, (8)式中の係数 h の値は最大加速度の場合で0.003~0.007, 最大速度の場合で0.002~0.003である。本研究の結果は, これら既往の研究結果と同程度である。震源深さが地震動強さに影響を与えるメカニズムについては, 最近の研究では応力降下による議論が多く見受けられる。McGarr *et al.* (1981)³⁶⁾は震源近傍での最大加速度や最大速度が応力降下との関係が線形的であることを示し, また実際の地震で応力降下が震源深さに依存することが示されている³⁷⁾³⁸⁾ことから, 地震動強さが震源深さとともに増加することが理解できる。

一方, 断層タイプによる地震動強さへの影響は, プレート内の地震がプレート間の地震より地震動の強さが大きい²⁾という結果が報告されている。本研究の結果は, これらの結果とは調和的である。断層タイプによる地震動強さの違いの原因は複雑なものと思われるが, 応力降下が一つの要因として考えられる。既往の研究より, プレート内地震の応力降下がプレート間地震のそれより一般的に高い³⁹⁾⁴⁰⁾ことが指摘されており, 本研究の結果を説明している。

6. 結論

本研究では, 比較的多数の近距離での強震記録を含む日本で観測された地震動のデータベースに基づき, 地震動強さの距離減衰特性に対する地震規模, 断層タイプ, 地盤特性の影響を検討し, 断層最短距離, 等価震源距離を用いて最大加速度, 最大速度についてそれぞれ距離減衰式を求めた。ただし, 最大加速度は地盤上の距離減衰式を, 最大速度は表層地盤の影響を取り除いた硬質地盤上の距離減衰式を求めた。断層タイプ, 震源深さなどの影響も検討し評価した。その結果, 地殻内地震やプレート間地震による地震動の最大振幅がほぼ同程度であること, プレート内地震による地震動はより強いこと, 震源が深いほど地震動の最大振幅が大きいことを示した。

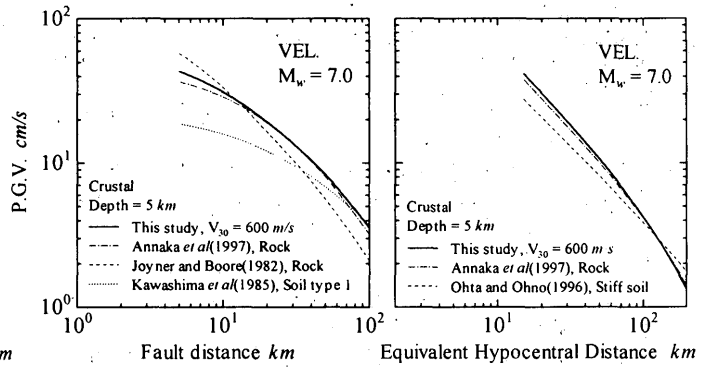


Fig.13. Comparison of the attenuation relations for peak ground velocity

謝辞

本研究で用いた強震記録は運輸省港湾技術研究所, NTT, 大阪ガス, 大林組, 科学技術庁防災科学技術研究所, 鹿島建設, 神奈川県, 神奈川大学, 関西地震観測研究協議会, 関西電力, 気象庁, 京都大学防災研究所, 熊谷組, K-NET, 建設省建築研究所, 建設省土木研究所, 佐藤工業, 清水建設, 自治省消防研究所, 竹中工務店, 鉄道技術総合研究所, 電源開発, 電力中央研究所, 東京工業大学, 東京大学地震研究所, 同生産技術研究所, 東京電力, 東京都土木研究所, 同港湾局, 同下水道局, 東急建設, 飛鳥建設, 西松建設, 間組, 八戸工業大学, 弘前大学, フジタ, 北海道大学, 北海道電力, 松村組, 三井建設, 三菱地所, 早稲田大学の各機関(五十音順)により観測されたものである。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) McGarr, A. : Scaling of Ground Motion Parameters, State of Stress, and Focal Depth, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.6969-6979, 1984.
- 2) Youngs, R.R., S.J. Chiou, W.J. Silva, and J.R. Humphrey. : Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, Vol.68, pp. 58-73, 1997.
- 3) Joyner, W.B. and D.M. Boore : Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion, *Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics II -Recent Advances in Ground Motion Evaluation-*, pp.43-102, 1988.
- 4) Campbell, K.W. : Strong Motion Attenuation Relations : A Ten-Year Perspective, *Earthquake Spectra*, Vol.1, pp.759-804, 1985.
- 5) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一 : 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, *日本建築学会構造系論文報告集*, 第442号, pp.71-78, 1992.
- 6) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura, and M. Takemura : Revision of Attenuation Formula Considering the Effect of Fault Size to Evaluate Strong Motion Spectra in Near Field, *Tectonophysics*, Vol.218, pp.69-81, 1993.
- 7) Hanks, T.C. and H. Kanamori : A Moment Magnitude Scale, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, 2348-2350, 1979.
- 8) 佐藤良輔 : 日本地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版社, 1989.
- 9) Joyner, W.B. and D.M. Boore : Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp.2011-2038, 1981.
- 10) Midorikawa, S., M. Matsuoka and K. Sakugawa : Site Effects on Strong-Motion Records during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, *The 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.3, pp. 85-90, 1994.
- 11) Fukushima, Y. and T. Tanaka : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.80, pp.757-783, 1990.
- 12) 安中正・山崎文雄・片平冬樹 : 気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演概要, pp.161-164, 1997.
- 13) Akamatsu, J. : Attenuation Property of Seismic Waves and Source Characteristics of Small Earthquake, *Bull. Disas. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.30, pp.53-80, 1980.
- 14) 佐藤春夫 : 関東・東海地域におけるコーダ Q^1 の地域性, 地震, 第2輯,

- 第39巻, pp.241-249, 1986.
- 15) 岩田知孝・入倉孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第2輯, 第39巻, pp.579-593, 1986.
 - 16) 長橋純男: 関東地方周辺域における地震動短周期成分の距離減衰特性, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp.283-288, 1990.
 - 17) 田居優・岩崎好規・吉川宗治・入倉孝次郎・永野徹・尾崎昌彦: 岩盤内で観測された加速度波形を用いた震源, 伝播, サイト特性のインバージョンと震源パラメータの評価, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp.163-168, 1990.
 - 18) 田居優・岩崎好規・入倉孝次郎・尾崎昌彦: 近畿地方の地震記録による震源, 伝播, サイト特性の分離, 第22回地震工学研究発表会講演概要, pp.303-306, 1993.
 - 19) 山本みどり・岩田知孝・入倉孝次郎: 釧路気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性の評価, 地震, 第2輯, 第48巻, pp.341-351, 1995.
 - 20) 山中浩明・中丸明子・栗田勝美・瀬尾和大: 表層の地盤条件を拘束条件にしたS波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.193-202, 1998.
 - 21) 古和田明・田居優・岩崎好規・入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動及び上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第514号, pp.97-104, 1998.
 - 22) Campbell, K.W.: An Empirical Analysis of Peak Horizontal Acceleration for the Loma Prieta, California, Earthquake of 18 October 1989, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 81, pp.1938-1858, 1991.
 - 23) 翠川三郎: 1985年チリ地震及び1983年日本海中部地震の地震動最大加速度・最大速度振幅の距離減衰, 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.37-44, 1991.
 - 24) 福島美光・田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会1992年秋季大会講演予稿集, p.116, 1992.
 - 25) Nozu, A., T. Uwabe, Y. Sato, K. Ichii, and S. Iai: Attenuation Relations for Peak Ground Motions on Base Layer in Japan, Proceedings of Earthquake Criteria Workshop -Recent Developments in Seismic Hazard and Risk Assessments for Port, Harbor, and Offshore Structures-, pp.118-135, 1997.
 - 26) 福島美光・翠川三郎: 硬質岩盤における観測記録に基づく項を考慮した地震動応答スペクトルの予測式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第447号, pp.39-49, 1993.
 - 27) Campbell, K.W.: Near-source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, pp.2039-2070, 1981.
 - 28) 太田外気晴・大野晋: 強震記録による震源域を含む地震動の平均特性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第479号, pp.31-40, 1996.
 - 29) 田中貞二・福島美光: 地震動強さの距離減衰, 第15回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.7-16, 1987.
 - 30) Boore, D.M., W.B. Joyner, and T.E. Fumal: Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, Seism. Res. Lett., Vol.68, pp.128-153, 1997.
 - 31) Campbell, K.W.: Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, Seism. Res. Lett., Vol. 68, pp.154-179, 1997.
 - 32) Joyner, W. B. and D. M. Boore: Prediction of Earthquake Response Spectra, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept., No.82-977, 1982.
 - 33) 川島一彦・相沢興・高橋和之: 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, No.166, 1985.
 - 34) Molas, G.L. and F. Yamazaki: Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep Focus Events, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.295-319, 1995.
 - 35) 安中正・山谷敦・桃林治彦・野沢是幸: 関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.129-132, 1987.
 - 36) McGarr, A., R.W.E. Green, and S.M. Spottiswoode: Strong Ground Motion of Mine Tremors, Some Implications for Near-Source Ground Motion Parameters, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, pp.295-319, 1981.
 - 37) 三雲健: 地震を発生させる応力の大きさと断層の破壊, 月刊地球, Vol.2, pp.560-568, 1992.
 - 38) 加藤研一・武村雅之・八代和彦: 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.123-138, 1998.
 - 39) Kanamori, H., D.L., Anderson: Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, pp.1073-1095, 1975.
 - 40) Scholz, C.H.: Scaling Laws for Large Earthquakes: Consequences for Physical Model, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.72, pp.1-14, 1982.
- 付録: 断層タイプ・震源パラメータを決定する際参考にした文献 (Table 1参照)
- 1) 佐藤良輔: 日本地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版社, 1989.
 - 2) 日本建築学会: 1982年浦河沖地震, 1983年日本海中部地震災害調査報告, pp.5-8, 1983.
 - 3) 岡田義光: 首都圏直下に発生する地震のタイプ分け, 地震学会1992年春季大会講演予稿集, p.69, 1992.
 - 4) Harvard CMT Catalog: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.
 - 5) 気象庁: 地震月報, 1984年8月号, pp.4-8.
 - 6) 気象庁: 地震月報, 1987年12月号, p.271.
 - 7) 菊地正幸: 私信, 1998.
 - 8) 海野徳仁・中山徹・松澤暢・山本明・長谷川昭・高木章雄・植木貞人・河野俊夫・仁田交市: 1987年1月9日岩手県中部に発生した稍深発地震 (M6.6) について, 地震学会1987年春季大会講演予稿集, p.8, 1987.
 - 9) 気象庁: 地震月報, 1990年12月号, pp.253-254.
 - 10) 鈴木貞臣: 1987年1月14日日高山脈直下のやや深発地震 (M6.9) について, 地震学会1987年春季大会講演予稿集, p.5, 1987.
 - 11) 岡田義光・笠原敬司: 1987年12月千葉県東方沖地震, 地震学会1988年春季大会講演予稿集, p.63, 1988.
 - 12) 日本建築学会: 1993年1月15日釧路沖地震, 1993年7月12日北海道南西沖地震災害調査報告, 1995.
 - 13) 佐々木嘉三: 渥美・能登測線の地下構造についての再検討, 地震学会1978年春季大会講演予稿集, p.171, 1978.
 - 14) 阿部邦昭・岡田正実: 能登半島沖地震の津波波源モデル, 地震学会1993年秋季大会講演予稿集, p.171, 1993.
 - 15) 和田博夫・伊藤潔・渡辺邦彦: 1993年2月7日能登半島沖地震前後の地震活動, 地震学会1993年秋季大会講演予稿集, p.159, 1993.
 - 16) 佃為成・和田博夫・酒井要・伊藤潔: 能登半島沖地震 (1993年2月7日, M6.6) の余震分布, 地震学会1993年秋季大会講演予稿集, p.160, 1993.
 - 17) 爆破地震動研究グループ: 日本海海中爆破による日本列島の地殻構造, 地震学会1977年春季大会講演予稿集, p.12, 1977.
 - 18) 笠原稔・勝俣啓一・柳昌義・三羽真人: 1994年北海道東方沖地震の余震分布, 月刊地球, Vol.17, pp.301-307, 1995.
 - 19) 菊地正幸・金森博雄: 広帯域地震記録による1994年北海道東方沖地震の震源メカニズム, 月刊地球, Vol.17, pp.322-329, 1995.
 - 20) 長都夫・中西一郎・今西和俊・佐藤魂夫: 1994年北海道東方沖地震 (MJMA=8.1) のCMT解: 広帯域強震計データを用いたインバージョン, 地震, 第2輯, 第48巻, pp.353-364, 1995.
 - 21) 橋本徹夫: 1994年三陸はるか沖地震の強震波形成解析(2), 地震学会1995年秋季大会講演予稿集, B51, 1995.
 - 22) 小沢慎三郎・橋本学・多田堯・鷲谷威: 1993年北海道南西沖地震に伴う地殻変動の再検討と断層モデル, 地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集, p.150, 1994.
 - 23) 松澤暢・海野徳仁・堀内茂木・長谷川昭・平沢朋朗: 微小地震観測網による1994年三陸はるか沖地震の余震活動, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, p.36, 1995.
 - 24) 海野徳仁・松澤暢・長谷川昭: 変換波から推定した1994年三陸はるか沖地震の余震の深さ分布, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, p.36, 1995.
 - 25) Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiba: Minute Locating of Faulting beneath Kobe and the Waveform Inversion of the Source Process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, Using Strong Ground Motion Records, J. Phys. Earth, Vol.44, pp.473-487, 1996.
 - 26) 菊地正幸・山中佳子: 97年3月26日鹿児島県薩摩地方の地震の震源過程, 地震学会1997年秋季大会講演予稿集, P81, 1997.
 - 27) 全国地震データ流通システム震源情報: <http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/>.
 - 28) 菊地正幸・山中佳子: EIC地震学ノート, No.18, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/index.html, 1997.
 - 29) 菊地正幸・山中佳子: EIC地震学ノート, No.22, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/index.html, 1997.
 - 30) 菊地正幸・山中佳子: EIC地震学ノート, No.24, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/index.html, 1997.

(1998年10月9日原稿受理, 1999年3月26日採用決定)