

港湾技術資料

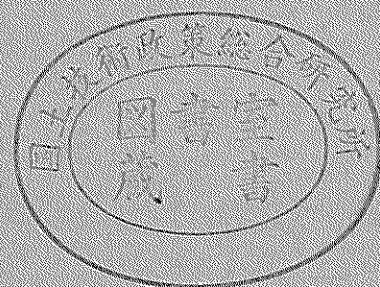
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 724 Mar. 1992

地震最大加速度の距離減衰

井 合 進
倉 田 栄 一
向 井 健

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 既往の研究	4
2.1 距離減衰式において考慮すべき項目	4
2.2 既往の距離減衰式	6
3. 加速度記録のデータベース	15
3.1 港湾地域強震観測網の概要	15
3.2 加速度記録のデータベースの特徴	15
4. 従来重回帰分析の問題点	47
4.1 既往の研究	47
4.2 最小2乗法による回帰式の検討	47
4.3 データベースの分布の特徴との関係	48
4.4 港湾地域強震観測データベースでの検討	49
4.5 一括回帰と二段階回帰の比較	50
5. 距離減衰の地域特性	64
5.1 個別の地震毎に求まる距離減衰の勾配	64
5.2 距離減衰の勾配の地域特性	65
6. 距離減衰式の提案	80
6.1 水平動の距離減衰式の提案	80
6.2 上下動の距離減衰式の提案	82
6.3 既往の距離減衰式との比較	82
7. 結 論	134
参 考 文 献	134
記号表一覧	138
付 録 A 既往の研究および本研究で得られた各距離減衰式の最大加速度と震源距離の 関係と最大加速度とマグニチュードの関係	139
付 録 B 同一のマグニチュードごとの観測記録とそれから得られる距離減衰式	162
付 録 C 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式（水平動）	194
付 録 D 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式（上下動）	215

An Attenuation Relation for Strong Earthquake Motions in Japan

Susumu IAI *
Eiichi KURATA **
Ken MUKAI ***

Synopsis

The authors and their colleagues have observed strong earthquake motions in Japanese port areas for 27 years. Number of records reaches about four thousands. Using these and other data, many engineers studied strong motion attenuation relations but most of the studies were based on the conventional multiple regression analysis. Because of an inevitable internal correlation within the maximum acceleration data, the conventional analysis results in a smaller attenuation factor.

In the present study, two step regression analysis is conducted for solving this problem. The results are obtained as

$$\log a = 0.552M - 1.965 \log(\Delta + 30) + 2.103$$

$$\log a = 0.559M - 2.057 \log X + 2.187$$

$$\log a = 0.490M - \log X - 0.00173X + 0.634$$

for horizontal maximum acceleration a in Gals to be given by M = magnitude by Japan Meteorological Agency, Δ = epicentral distance and X = hypocentral distance specified both in Kilometers. The relations are basically consistent with the results give by Joyner and Boore (1981) and Fukushima and Tanaka (1989).

Key Words: Attenuation, Earthquake, Maximum Acceleration, Regression Analysis, Strong Earthquake Motion

* Chief, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division

** Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

*** Visiting Researcher, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division (on leave of Penta Ocean Construction Co. Ltd.)

地震最大加速度の距離減衰

井合 進*
倉田栄一**
向井 健***

要 旨

港湾地域強震観測が開始されてから27年経ち、観測記録も約4000本となった。これを機会に、地震最大加速度の距離減衰について検討を加えた。既往の研究では重回帰分析の手法をそのままあてはめたものが多いが、地震記録のデータベースには内部的な相関関係があるため、この手法を用いた従来の研究では、距離減衰係数として過小な値が求められるという不備がある。

本研究では二段階回帰法を用いてこの問題を解消することとした。この結果、水平最大加速度 a (Gal)、気象庁マグニチュード M 、震央距離 Δ (km)、震源距離 X (km) の回帰式として以下の式を得た。

$$\log a = 0.552M - 1.965 \log (\Delta + 30) + 2.103$$

$$\log a = 0.559M - 2.057 \log X + 2.187$$

$$\log a = 0.490M - \log X - 0.00173 X + 0.634$$

これらの結果は、二段階回帰手法を用いた日米における最近の研究成果と整合性のある結果となっている。

キーワード：距離減衰，地震，最大加速度，回帰分析，強震記録

1. はじめに

地震動の工学的特性を表す指標には種々のものがあるが、これらのうちで最大加速度は最も基本的なパラメータの一つである。そのため、これまでに数多くの研究者によって最大加速度の予測式が研究されている。その研究のほとんどは、強震観測記録に基づいた距離減衰式の検討を目的としたものであり、ある程度の数量の強震観測記録が蓄積された段階で、適当な統計解析手法を用いることにより研究の主目的は達成できるものである。

初期の代表的な研究としては、金井¹⁾による日立鉾山の岩盤での地震観測記録に基づいた研究がある。その後、種々の機関による強震観測記録の蓄積にともない、種々の研究成果が数多く出されている。このような研究はわが国だけでなく、わが国と同様に地震の多発地帯に位置する北米の研究者によっても実施され、数多くの研究成果が発表されている²⁾。

港湾技術研究所においても、土田・上部³⁾の基盤における地震動特性に関する研究、土田ら⁴⁾による応答スペ

クトルの研究など、地震動のスペクトル特性に関する研究が行われる一方、野田ら⁵⁾による震度と地盤加速度に関する研究、上部⁶⁾による釜石湾口防波堤の設計用入力地震動に関する研究などにおいて最大加速度の距離減衰に関する研究成果が発表されている。

このように最大加速度に関する距離減衰式の検討は、これまでに数多くの研究者が取り組んできた非常に古い研究課題の一つである。それに関わらず、近年においても最大加速度の距離減衰式に関する研究が多くの研究機関で行われているのも一つの事実である。その理由としては、これらの研究が基本的に強震観測記録に基づいた経験的な手法に基づいたものであり、近年急速に整備されている強震観測網から新しい観測記録が追加されること自体により新しい研究成果が得られる可能性があることが挙げられる。さらに、研究において用いる統計解析手法についても、従来の標準的な重回帰分析手法の単純なあてはめにより発生する問題点が明らかにされるようになり、これらの問題点を解消するための新しい手法や全く別の解析手法を用いることにより距離減衰式の精

* 構造部地盤震動研究室長

** 構造部主任研究官（強震観測担当）

*** 研修生（五洋建設（株））

度の改善を図ろうとする新しい動向があることなどが指摘できよう。いずれにしても、本研究課題は不確実性の非常に高い自然現象を非常に単純化した回帰式で表そうとする試みであり、地震学、土質力学、統計学、その他の関連分野での研究の進展に伴って、今後さらに改善される余地が残されている研究課題である。

本研究では、港湾地域強震観測において1964年から1990年までの27年間に得られている強震観測記録を用いて、新たに最大加速度の距離減衰式を検討しようとするものである。強震観測記録としては、すでに4000記録程度の観測記録が蓄積されており、最大加速度が100Galを超える記録も数多く含まれている。本研究課題について新たな検討を実施するための機は熟したものと判断される。

なお、本研究を実施中、その途中結果の一部を土木学会年次学術講演会にて発表する機会を得た¹⁰⁾。

2. 既往の研究

2-1 距離減衰式において考慮すべき項目

距離減衰式を検討する際に考慮すべき主要な項目として以下のものがある。

- 1) 目的変数と説明変数
- 2) データベース
- 3) 距離減衰式のモデルまたは関数形
- 4) 統計的解析手法

以下においては、既往の研究成果において上記の各項目をどう取り扱ってきたかを Campbell¹¹⁾ や田中・福島¹²⁾ の研究成果を参照しながら概観する。

(1) 目的変数と説明変数

目的変数とは予測すべき地震動強度であり、本研究で取り上げている最大加速度のような最大地動や応答スペクトルなどである。本研究では最大加速度を取り上げているが、構造物の設計上重要なパラメータであるため、既往の研究でも最も多く取り上げられている。従って、以下においても、最大加速度を中心に述べることにする。水平動の場合には、2方向の観測が一般的であり、この場合には最大加速度の定義としては、水平2方向の最大値の平均値を用いる場合や、いずれかの大きい方を用いる等が一般的である。そのほか、スパイク状に表れる最大値については無視するなどの方法を用いた研究も見られる。

説明変数は距離減衰式を求める上で非常に重要な項目である。すなわち、説明変数としては、信頼できるものであること、工学的な利用に当って予測可能なものであることが必要である。距離減衰式の精度を上げるために

むやみに説明変数を増やすことは、工学的に利用する立場からは未知なるパラメータが増えるため逆に予測値の誤差を増すことになる。このような事情から、既往の距離減衰式は、以下の3つを説明変数とするものが多い。

- 1) 地震規模
- 2) 伝播経路
- 3) 予測地点の表層地盤特性

地震規模については、マグニチュードが通常用いられている。ただし、地震のマグニチュードもその決め方にはいろいろの方法があり、日本の場合には気象庁マグニチュードが用いられることが多いが、アメリカの場合にはローカルマグニチュードや表面波マグニチュードが用いられることが多い。マグニチュードには、その値が飽和する現象（地震の規模がある程度以上大きくなると、マグニチュードが地震の規模を正しく表さなくなる現象）がある。これをさけるために地震規模を表すものとして地震モーメントやそれに関わる量としてモーメントマグニチュードが用いられる場合もあるが、これらのパラメータは必ずしも全地震についてその値が求められてはならず、前述のような説明変数が備えるべき条件を必ずしも満たしてはいない。

伝播経路に関しては、地震波の伝播過程での幾何学的減衰と非弾性的内部減衰を考慮するパラメータが必要であるが、実際にはこれに関連する説明変数として距離が用いられる。距離減衰式においては上記の減衰を表すパラメータ、例えばQ値等は直接には考慮されず、距離項にかかる係数として評価している。距離を表すパラメータとして日本では震央距離や震源距離が用いられることが多いが、アメリカでは断層面からの最短距離（以下においては断層距離と呼ぶ）を用いたものも多い。このことは、アメリカにおいては震源近傍での観測記録が比較的多く得られており、かつ震源が浅い地震が多いのに対し、日本では震源近傍での地震観測記録が少なく、かつ震源が深い地震が多いためと考えられる。すなわち、震源近傍に近づくにつれて震央距離や震源距離は距離のパラメータとして不適当となるため、用いるデータベースによっては断層距離のようなパラメータが必要となるものである。

対象地点の地盤条件は、例えば土田¹³⁾による地盤種別に対応するものであり、表層に存在する堆積層が地震動の増幅特性に及ぼす影響を評価するものである。

(2) データベース

データベースの選定にあたっては、以下の諸点が予測式の精度にとって重要である。すなわち、

- ① テクトニックの環境が等しい地域、すなわち震源

メカニズム、減衰特性が等しいとみなすことができる地域を選ぶこと

- ② 地震計の計器特性が異なること
- ③ データ処理過程が同一であること
- ④ 各パラメータの定義が同一のものであること

である。例えば、震源などの点では、日本の大地震の多くがプレートの沈み込みによる逆断層型であるのに対し、米国のそれは横ずれ断層であり、日米間には明瞭な違いが存在するので、日米の記録を同一のデータベースとして無条件に用いることには、無理がある。また、すでに(1)において述べたように、日米のデータベースには距離と地震規模の定義に違いがある。

地震計の計器特性が異なる条件を満たすためには、異った計器間で特性が等しくなるように計器補正を施せばよい。例えば、わが国で多く用いられているSMAC-B型の強震計の場合には、周波数特性が低下が顕著な領域があるために補正が必要である。

(3) 距離減衰式の型

既往の距離減衰式の標準的な関数形としては、

$$Y = b_1 f_1(M) f_2(R) f_3(M, R) f_4(p) \varepsilon \quad (2-1)$$

と与えられる。ここに、 Y は予測すべき地震動パラメータ、 $f_1(M)$ は地震の規模に関わる項、 $f_2(R)$ は距離に関わる項、 $f_3(M, R)$ は地震規模と距離の複合項、 $f_4(p)$ は地点特性に関わる項であり、 ε はその他の不確定要素を表すものである。距離減衰式が既往の強震記録の回帰式であるために、これらの予測式を外挿する場合(例えば、震源近傍のデータを含まないデータベースから推定した距離減衰式を震源近傍にも適用する場合)には、これらの各項は物理的な意味が明確なものであることが必要である。逆に、データベースの範囲にのみ着目して距離減衰式を用いる限りにおいては、関数形の物理的意味合いについては必ずしもこだわる必要はない。以下、各項ごとに簡単に既往の研究成果を概観する。

地震規模に関わる $f_1(M)$ は、ほとんどの距離減衰式で、

$$f_1(M) = e^{b_1 M} \quad (2-2)$$

なる関係式を用いている。そもそもマグニチュードは、観測された地震動の最大振幅の自然対数に比例する形で定義されているものであり、その逆関係に相当する式(2-2)で示される項が距離減衰式に含まれることは必然的である。

距離に関する項 $f_2(R)$ については、比較的古い研究では距離のパラメータとして震央距離が用いられたものが多く、その関数形も上式と同様の次式を用いたものが多い。

$$f_2(R) = e^{b_2 R} \quad (2-3)$$

距離減衰に関わる項として物理的な意味がより明確な式として、

$$f_2(R) = e^{b_3 R} (R + b_4)^{-b_5} \quad (2-4)$$

を用いたものも多い。この式では、指数項が地震伝播経路の非弾性的減衰を、残りの項は幾何学的減衰を示しており、 $b_4=1.0$ 、 $b_5=0.0$ とした場合には点震源を仮定した場合の実体波の減衰を表している。(2-4)式はこのような地震学の基礎的知見に基づいた距離減衰項として用いられている。この場合には距離のパラメータとして、震央距離のかわりに震源距離や断層距離(断層面からの最短距離)を用いることが多い。ただし、(2-4)式は断層から比較的離れた地点(遠方)においてのみ成り立つものであり、断層面を点震源とする仮定が成り立たない断層近傍においては、理論的には、適用できないと考えられる。

第3項の $f_3(M, R)$ は通常1.0としたものが多い。この項は、震源近傍での最大加速度が地震規模によらずある一定値に収束することを表すために導入されることが多く、式の形も(2-4)式の b_5 を地震のマグニチュード M の関数とした以下の式、

$$f_3(M, R) = (X + b_6 \cdot e^{b_7 R})^{-b_8} \quad (2-5)$$

が用いられたものが多い。この式を導入することにより、震源近傍において(2-2)式のマグニチュードにかかる係数が相殺されることにより、その依存度を下げるものである。

$f_4(p)$ および ε について、わが国ではこれらを陽な形で式に取り込んだものは少なく、米国でも少ない。

(4) 解析方法

(2-1)式のような形で表される距離減衰式に含まれる未定パラメータは、適当な統計解析手法を用いて決定しなければならないが、最小2乗法に基づいた重回帰分析を行うのが一般的である。実際の計算にあたっては、(2-1)式の両辺の対数をとって線形化した式を用いることが多い。

ただし、用いるデータベースが均一に分布したデータベースとなっていない場合、例えば、地震のマグニチュードと距離(震源距離等)の間に統計的な相関がある場

合や、数個の地震や数カ所の観測地点のデータが大半を占めている場合などでは、上述のような重回帰分析を用いると、求まる係数値に偏りが生じる可能性が指摘されている。現実には我々が手にすることができるデータベースには上記の問題点が避けられないのが現状である。そのため、これらよりもたらされる問題点を除くために、重み付き回帰分析手法や2段階回帰手法など用いられるようになってきている。これらのことは、データベースの特性に関する検討の重要性を示すとともに、解析手法も用いるデータベースにより適切に選択すべきものであること示している。

2-2 既往の距離減衰式

前節では地震動強度の予測式である距離減衰式を決定する際に重要となる項目を示し、その内容を概観した。本節では、まず、現在迄に提案されている既往の距離減衰式のうち最大加速度について、代表的な研究成果を一覧表として示し、これらの既往の研究では前項のような各項目をどう取り扱っているかを示す。次に、一覧表として示した既往の研究成果を上記各項目毎に分類し、既往の距離減衰式の特徴について行った若干の検討結果を含めて、その特徴を示す。なお、本節では前節の内容と若干重複する部分があるが、既往の距離減衰式についてのレビューの観点からの新たなまとめとして割り切り、重複する部分はそのままとした。

表-2-1には、日本の研究者によって提案されている水平最大加速度の距離減衰式の代表的な例を、表-2-2には、主にアメリカの研究者により提案されている水平最大加速度の距離減衰式の代表的な例を示す。これらの表では、前項で示した4つの項目に対する考え方を中心に取りまとめを行っている。なお、これらの距離減衰式を図の形で表示したものを付録Aにまとめている。

以下には、これらの表における4つの項目についてやや詳しく説明している。また、既往の距離減衰式としては、表-2-1および表-2-2に示したものを対象とするものとし、各距離減衰式の引用の際には表中に示した文献番号を用いることとする。

(1) 目的変数の定義

ここで考えているのは最大加速度であるが、すでに前項で述べたように最大加速度の定義にはいくつかのものが考えられる。既往の研究成果で水平動の最大加速度の定義として用いられているものを示すと、

- 1) 水平方向2成分の最大値の平均値をとる場合
- 2) 水平方向2成分の最大値の大きい方をとる場合
- 3) 水平2方向の合成値の最大加速度をとる場合
- 4) その他

などがある。上下動の最大加速度の場合には、水平動のような2方向の観測記録の選択の問題点はないが、水平動と異なり最大値がいわゆる初動部に表れる場合があり、この場合にはその最大値はいわゆるスパイク状の波形となることが多く、研究者によってはその部分を除いているものも見られる。

これらの最大加速度の定義の違いは、系統的な違いとなつて表れるものであり、それらの値のあいだの関係式をあらかじめ求めておけば大きな問題ではない。既往の距離減衰式を見る場合には、これらの距離減衰式が最大値としてどのような定義を用いているかに注意する必要があるのは当然であるが、距離減衰式で用いるものと異った定義に基づいた最大加速度が必要な場合には、上述の関係式を用いて補正することにより必要な定義に基づいた値を得ることができる。

(2) 説明変数

説明変数として地震規模のパラメータは、マグニチュードがほとんどの場合用いられている。ただし、米国の場合には、ローカルマグニチュードもしくは表面波マグニチュードが用いられることが多く、日本の場合にはほとんどが気象庁マグニチュードを用いている。地震規模を表すこれらのパラメータには、相関関係があることが調べられており、これらの関係を用いることにより適当なマグニチュードに補正することができる。

これらのマグニチュードには地震規模が大きくなると“飽和現象”という問題があり、それを避けるため別のパラメータ、例えば、地震モーメントやモーメントマグニチュードを用いたものもある。距離減衰式の工学的な利用の面からは、これらのパラメータは、設計上用いることが希であるため、不便である。

(3) データベース

データベースの違いとしては、地震環境、すなわち、テクトニックの環境が異なる地域で得られた記録による違いに起因するものである。具体的には米国のデータベースとわが国のデータベースの違いに起因するものが典型的である。

表-2-1にまとめてあるものが基本的にはわが国の強震観測網で得られているデータベースに基づいているものであり、表-2-2の諸外国の成果についてはほとんどが北アメリカでの強震観測網により得られたものである。このようなデータベースの違いによる距離減衰式の違いについて調べるためには、その他の要因の影響を除くべきであるが、現実的には困難な面がある。また、既往の研究成果のなかには日本の記録に米国の記録を加えて、震源近傍の記録を補ったものも見受けられる。

(4) 関数形

前項において、標準的な関数形として(2-1)式を示したが、これに対応する具体的な関数形は表-2-1および表-2-2に示される通りである。これらは、さらに以下の5つの代表的な距離減衰式に区分される。

$$\log Y = b_1 \cdot M + b_2 \cdot \log(R + b_3) + b_4 \quad (2-6)$$

$$\log Y = b_1 \cdot M + b_2 \cdot \log(R) + b_4 \quad (2-7)$$

$$\log Y = b_1 \cdot M - b_2 \cdot \log(R) - b_3 \cdot R + b_4 \quad (2-8)$$

$$\log Y = b_1 \cdot M - b_2 (\log(R) + b_3 \cdot 10^{b_7 \cdot M}) - b_3 \cdot R + b_4 \quad (2-9)$$

上記以外にも特定の研究者のみが用いているような関数形もあり、その中には非線形の回帰式となっているものも多い。図-2-1は、それぞれの距離減衰式の代表的な関数形の特徴をつかむために描いたもので、それぞれの代表的な式として(2-6)式については川島らの式¹⁹⁾を、(2-7)式については福島²⁰⁾の式を、(2-9)式については福島・田中の式²¹⁾を用いて比較したものである。それぞれの具体的な式の形は、それぞれ表-2-1中の13, 16, 19番で示される欄に示されている。なお、(2-8)式については震源近傍を除いて(2-9)式とはほぼ同じ傾向を示すのでここでの比較では除いている。これらの式の内(2-9)式を除けば震源近傍への適用には問題があるが、同図では各距離減衰式の特徴を比較するために、震源近傍まで外挿した値を示している。特に、やや自明ではあろうが、(2-7)式では、震源近傍での最大加速度の推定値が極端に大きくなる。

(5) 統計解析手法

統計解析手法として従来の研究でもっともしばしば見かけられるものは、すでに述べたように、一括回帰による標準的な重回帰分析である。しかし、この手法のもつ問題点が明らかにされつつある近年では、2段階回帰手法を用いた研究が多く見られるようになってきている。2段階回帰手法が用いられている Joyner and Boore²²⁾(表-2-2中8番)や安中ら²³⁾(表-2-1中18番)はいずれも、距離減衰式の距離に関わる項の回帰とマグニチュードにかかわる項の回帰を分離することをねらっている。この手法はデータベースの地震の規模と距離の間に相関がある場合に、その影響を除くために有効な手法でもあり、福島ら²⁴⁾がこの目的で2段階回帰手法を用いている。図-2-2はこのような2段階回帰による方法

と従来より実施されてきた一括回帰による方法により得られた距離減衰式の比較を行ったものである。一括回帰による重回帰分析を用いたものについては、2段階回帰との比較をするために代表的なものとして川島ら¹⁹⁾(表-2-1中13番)のものを示した。

図-2-2は距離の減衰にかかわる影響を示したものであり、一括回帰による方法と2段階回帰による方法との間には、距離減衰の勾配に明瞭な違いが見られ、一括回帰による方法では距離減衰の勾配が小さくなっていることがわかる。

表-2-1 水平最大加速度距離減衰式 (日本の研究)

番号	提案者	距離減衰式 $\log Y$ (Gal.) =	最大加速度の定義	データベース			統計解析方法
				Mの範囲	距離の範囲(km)	地盤	
1	金井 ¹¹⁾ (1966)	$0.61M - (1.66 + 3.6/X) \log X + (0.167 - 1.83/X) - \log T$	1成分	4.3~5.9	X: 45~197	岩盤 Vp=5.5km/s	計器補正なし 一括復帰
2	岡本 ⁹⁾ (1971)	$2.806 + (-0.1036M^2 + 1.7244M - 7.604)(\Delta + 40)/100$	不明	4.3~7.9	Δ: 43~540	Vp=3.5km/s	計器補正なし 一括復帰
3	片山 ⁹⁾ (1974)	$0.464M - 1.291 \log \Delta + 0.982$ $0.411M - 1.637 \log(X+30) + 2.308$	2成分の平均	5.1~7.8	Δ: 不明	不明	計器補正なし 一括復帰
4	大崎ら ¹¹⁾ (1977)	$0.472M - (1.97 - 1.8/X) \log X + (2.2 - 11.1/X)$	不明	不明	X: 不明	硬質地盤	計器補正なし 一括復帰
5	佐伯ら ¹²⁾ (1977)	$0.299M - 0.788 \log \Delta + 1.28$	不明	5.0~7.9	Δ: 7~677	各種地盤	計器補正なし 個別因子使用 (地盤)
6	田村ら ¹³⁾ (1979)	$3.0 + (-0.043M^2 + 0.89M - 4.93) \cdot (\Delta + 50)/100$	1成分	4.0~	Δ: ~280	岩盤 Vs=1.7km/s	計器補正なし 一括復帰
7	上部 ⁶⁾ (1980)	$0.234M - 1.478 \log X + 3.159$	2成分の大きい方	4.0~7.4	X: 50~400	岩盤	計器補正なし 一括復帰
8	渡部ら ¹⁴⁾ (1981)	$0.440M - 1.381 \log X + 1.04$	不明	4.0~7.5	X: 5~600	岩盤	計器補正なし 一括復帰
9	後藤 ¹⁵⁾ (1982)	$0.178M - 0.666 \log(\Delta + 30) + 2.305$	2成分の大きい方	5.0~8.0	Δ: 25~400	洪積層	計器補正あり 一括復帰
10	横田ら ¹⁶⁾ (1982)	$0.323M - 0.979 \log X + 0.72$	不明	4.0~7.9	X: 40~700	Vs=0.5km/s	計器補正なし 一括復帰

凡 Y: 最大加速度 (Gal.) T: 基礎地震動の卓越周期 (sec) M: マグニチュード
 Δ: 震央距離 (km) X: 震源距離 (km) r: 断面面からの最短距離 (km)

番号	提案者	距離減衰式 $\log Y (\text{Gal.}) =$	最大加速度の定義	データベース			統計解析方法	
				Mの範囲	距離の範囲(km)	地盤		データ補正
11	篠ら ¹⁷⁾ (1982)	$0.373M-0.866 \log \Delta + 0.836$ (1種) $0.351M-0.793 \log \Delta + 0.829$ (2種) $0.318M-0.829 \log \Delta + 1.170$ (3種) $0.420M-0.922 \log \Delta + 0.648$ (4種)	不明	5.0~7.9	Δ : 7~866	各種地盤	計器補正なし	一括回帰
12	中村ら ¹⁸⁾ (1984)	$0.353M-0.837 \log \Delta + 0.905$ (1種) 層別因子使用 $0.353M-0.837 \log \Delta + 0.908$ (2種) $0.353M-0.837 \log \Delta + 0.963$ (3種) $0.373M-0.866 \log \Delta + 0.905$ (4種)	不明	4.8~7.0	Δ : 不明	各種地盤	計器補正なし	一括回帰
13	川島ら ¹⁹⁾ (1985)	$0.221M-1.251 \log(\Delta+30) + 3.031$ (I種) $0.308M-1.201 \log(\Delta+30) + 2.357$ (II種) $0.282M-1.208 \log(\Delta+30) + 2.605$ (III種)	2成分合成の最大値	5.0~7.9	Δ : 5~500	各種地盤	計器補正あり	層別因子使用 (地盤)
14	星谷 ²⁰⁾ (1985)	$0.121M-0.405 \log(\Delta+30) + 1.928$ (I種) $0.220M-0.564 \log(\Delta+30) + 1.681$ (II種) $0.194M-0.423 \log(\Delta+30) + 1.507$ (III種)	不明	不明	Δ : 不明	各種地盤	計器補正なし	一括回帰
15	佐藤 ²¹⁾ (1986)	$0.387M-1.823 \log(\Delta+30) + 2.22$	不明	不明	Δ : 不明	岩盤地盤	計器補正なし	一括回帰
16	福島 ⁷⁾ (1987)	$0.42M-1.78 \log X + 2.46$	不明	4.0~7.5	X: 不明	各種地盤	計器補正なし	層別因子使用 (地震)
17	大田 ²³⁾ (1987)	$\log(0.637M-1.381 \log X + di)$ di: 深度による差を示す層別因子	不明	5.4~7.9	X: 64~400	洪積層	計器補正なし	層別因子使用 (深度)
18	安中 ²⁴⁾ (1987)	$0.627M+0.00671H-2.212 \log(X+0.35 \cdot e^{0.65M}) + 1.711$	2成分の平均	3.9~7.5	x: 1.5~500	各種地盤	計器補正なし 観測点補正	2段階回帰
19	福島・田中 ²⁵⁾ (1990)	$0.41M - \log(r+0.032 \cdot 10^{0.41M}) - 0.0034r + 1.30$	不明	3.5~7.9	r: 15~700	各種地盤	計器補正なし	層別因子使用

凡 Y: 最大加速度 (Gal.) M: マグニチュード
 Δ : 震央距離 (km) X: 震源距離 (km) r: 断面からの最短距離 (km) H: 震源深さ (km)
 I種: 道路橋示方書 (1種地盤)、2種: 同示方書 (2種地盤)、3種: 同示方書 (3種地盤)、4種: 同示方書 (4種地盤)
 II種: 道路橋示方書 (1種地盤)、III種: 同示方書 (2種地盤+3種地盤)、IV種: 同示方書 (4種地盤)

表 2-2 水平最大加速度距離減衰式 (外国の研究)

符号	提案者	距離減衰式 $\log Y$ (Gal.) =	最大 加速度の 定義	距離の範囲		地盤		データ補正	統計解析方法
				Mの範囲	Δ : 距離の範囲				
1	Trifunac ²⁶⁾ (1976)	$2.789M-0.186(M^2-(M-7.5)^2)$ $-(0.060S)+f(\Delta)-4.359$ $2.789M-0.186M^2-0.060S+f(\Delta)-4.359$ ($M \geq 7.5$) $M-0.060S+f(\Delta)-0.053$ ($7.5 \leq M < 4.8$) $f(\Delta) = \Delta/50$ ($\Delta \leq 75$ km) $1.125 + \Delta/200$ ($75 \text{km} < \Delta \leq 350$ km) S: 0 沖積層, 1 軟岩, 2 基盤	不明	3.0~7.7	Δ : 20~200	各種地盤	不明	一括帰帰	
2	McGuire ²⁷⁾ (1977)	$0.278M-1.300 \log(\Delta+25)+2.674$	不明	4.5~7.8	Δ : 10~200	硬質地盤	不明	一括帰帰	
3	Donovan ²⁸⁾ (1978)	$(0.020+0.193 \log r)M-2.11 \log r$ $-(+2.515+0.488 \log r) \cdot \log(r+25)+6.333$	不明	5.0~7.9	r: 7~677	各種地盤	不明	一括帰帰	
4	Cornell ²⁹⁾ (1978)	$0.373M-1.801 \log(X+25)+2.927$	不明	4.0~7.7	X: ~280	岩盤 $V_s=1.7$ km/s	不明	一括帰帰	
5	Espinosa ³⁰⁾ (1980)	$M-(0.11+0.507 \log r) \log r-2.96$	不明	4.0~7.5	r: 5~800	岩盤	不明	一括帰帰	
6	McGuire ³¹⁾ (1980)	$0.387M-1.171 \log X-1.514-0.0888s$ s: 0 岩盤, 1 地盤	不明	4.0~7.5	X: 5~600	岩盤	不明	一括帰帰	
7	Egnchi ³⁵⁾ (1980)	$0.37M-1.441 \log \Delta+1.830$	不明	4.0~7.9	Δ : 40~700	各種地盤	不明	一括帰帰	
8	Joyner & ³²⁾ Boore (1981)	$0.249M-0.51 \log(r^2+7.3^2)$ $-0.00255(r^2+7.3^2)^{0.5}+1.971$	不明	5.0~7.7	r: 1~400	拱形層	不明	一括帰帰	
9	Campbell ³³⁾ (1981)	$0.377M-1.091 \log(r+0.0606 \cdot 2.014^M)+1.193$	不明	5.0~7.7	r: ~80	$V_s=0.5$ km/s	不明	一括帰帰	
10	Bolt ³⁴⁾ (1982)	$0.0531 \log((r+23)^2+1)-0.029(r+23)+3.070$ ($5.0 \leq M \leq 5.9$) $0.0421 \log((r+25)^2+1)-0.019(r+25)+3.070$ ($6.0 \leq M \leq 6.9$) $0.1001 \log((r+15)^2+1)-0.0095(r+15)+2.371$ ($7.0 \leq M \leq 7.9$)	不明	5.0~7.7	r: ~370	各種地盤	不明	一括帰帰	
11	Abrahamson ³⁶⁾ (1983)	$0.177M-0.9821 \log(r+e^{0.284M})-0.62$ $+0.132F-0.0008Er$ F, Er: ダミー変数	不明	5.0~7.8	r: 1~400	各種地盤	不明	2段階帰帰	

凡 Y: 最大加速度 (Gal.) M: マグニチュード
例 Δ : 震央距離 (km) X: 震源距離 (km) r: 断層面からの最短距離 (km)

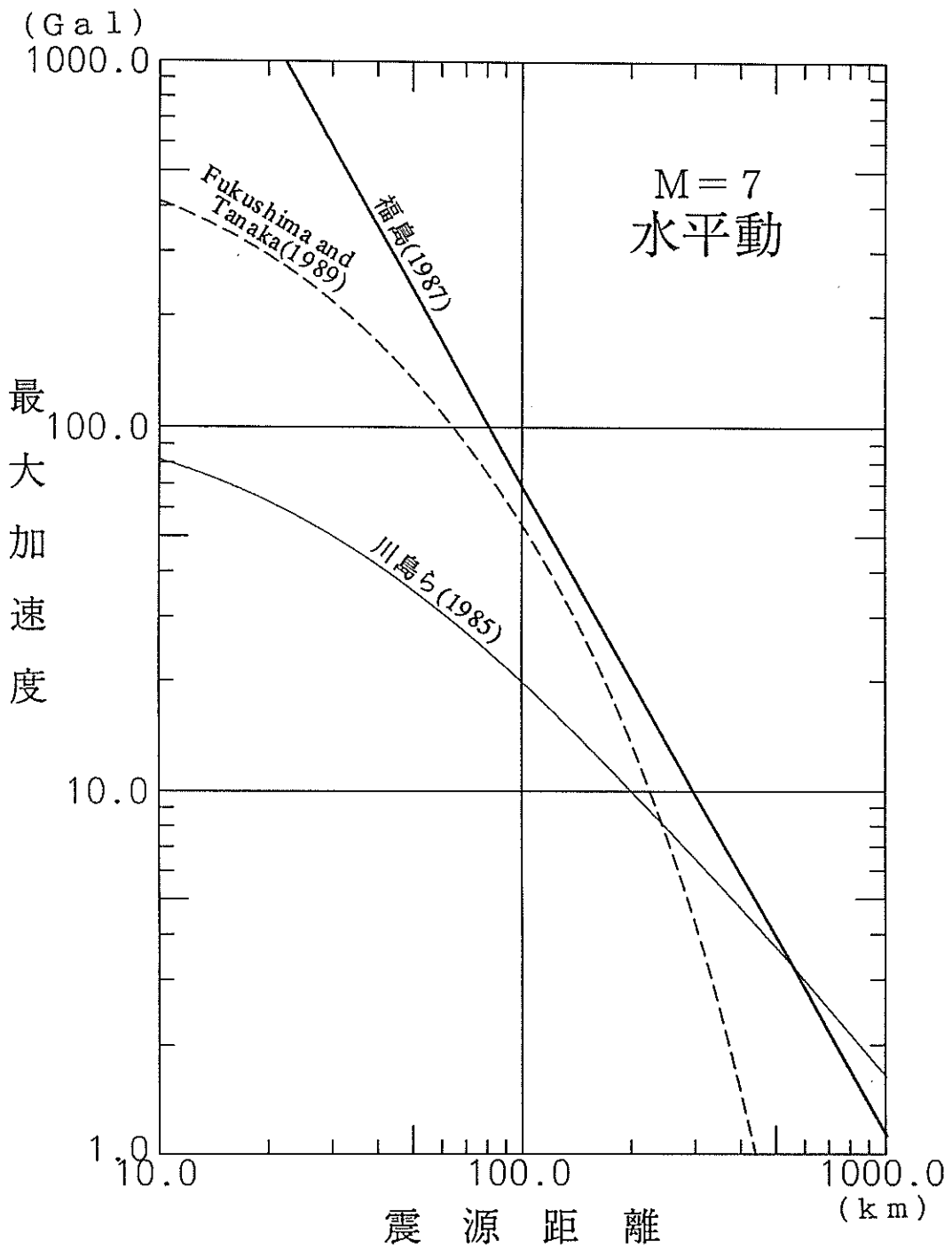


図-2-1(a) 関数形の違いによる距離減衰式の比較

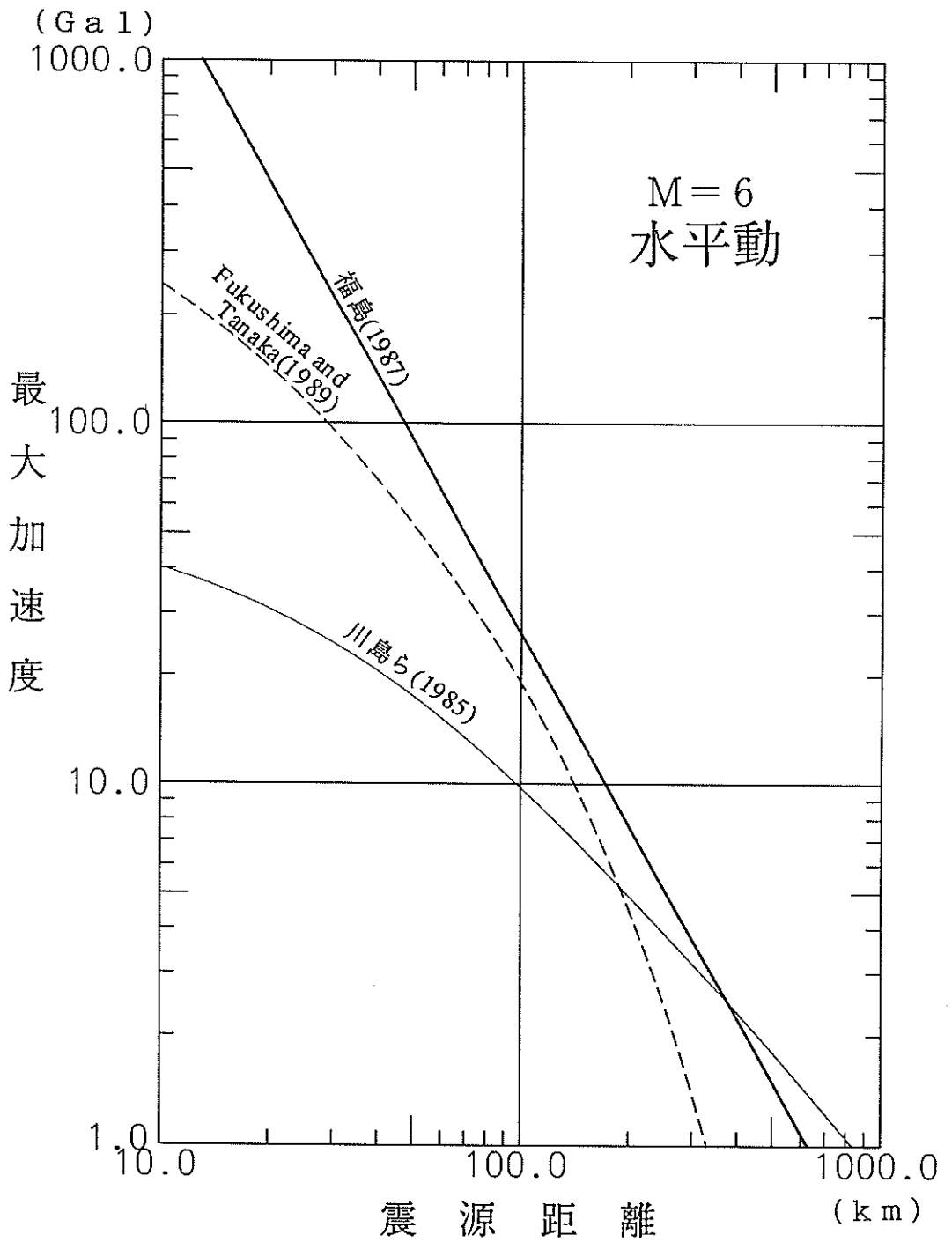


図-2-1(b) 関数形の違いによる距離減衰式の比較

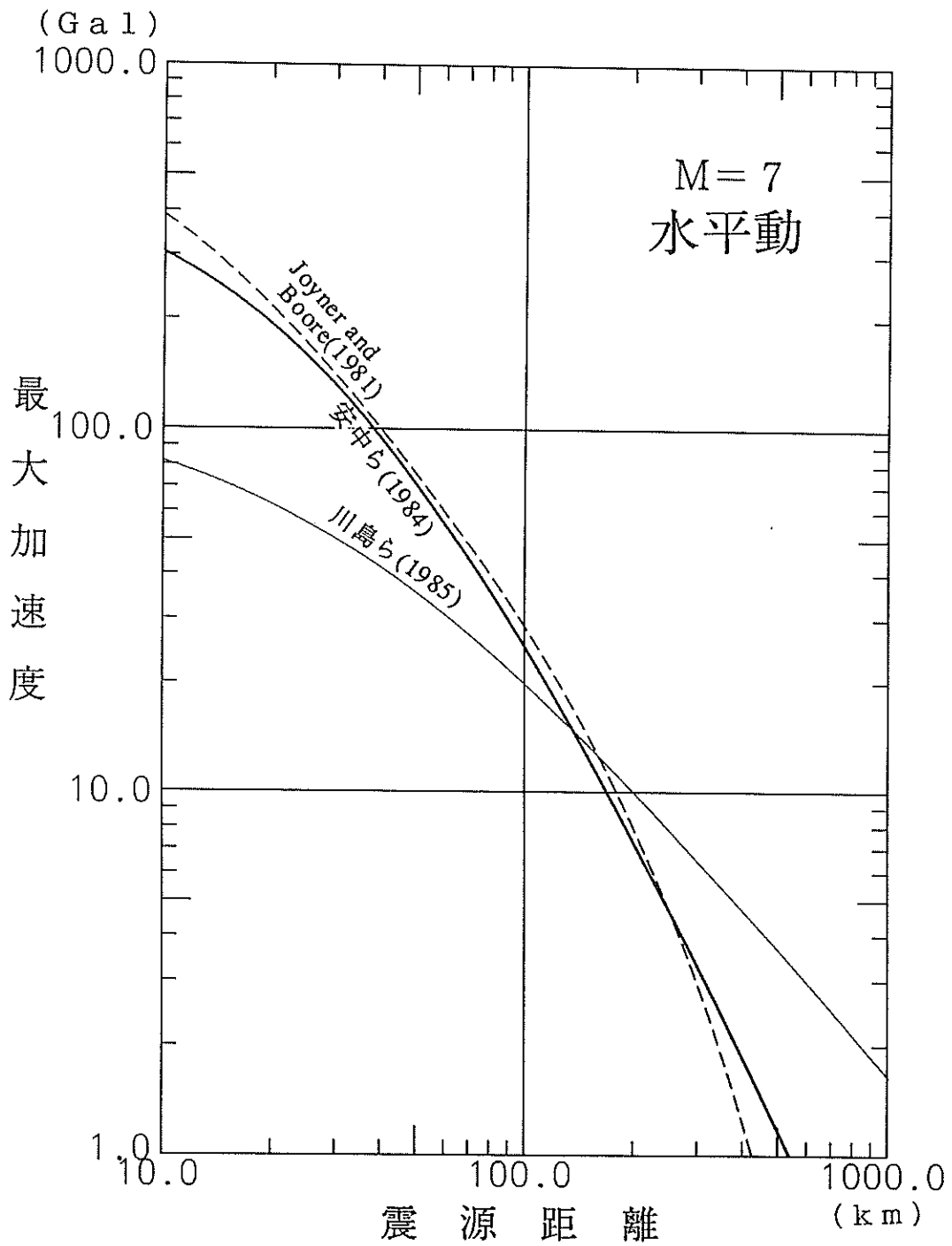


図-2-2(a) 統計解析手法の違いによる距離減衰式の比較

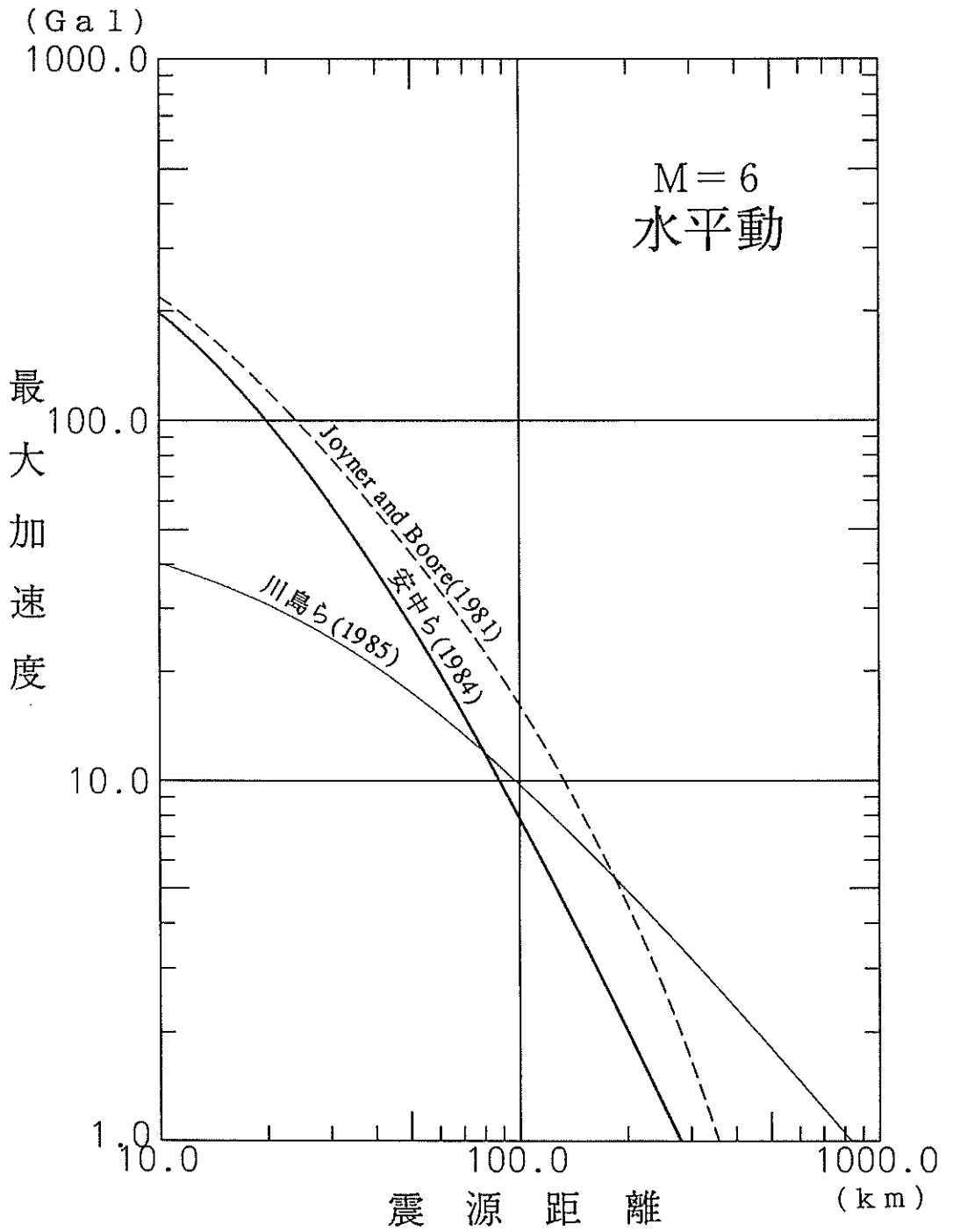


図-2-2(b) 統計解析手法の違いによる距離減衰式の比較

3. 加速度記録のデータベース

本研究では、加速度の距離減衰式を求めることを主たる研究目的としている。そのための加速度記録のデータベースとしては、港湾地域強震観測網により得られているデータベースを用いるものとした。既往の強震記録に基づいた距離減衰式の作成には、より多くの強震観測記録の活用が望ましいが、記録の取られている地盤状況や地震計の設置状況、さらには、各地震計の計器特性等の問題もあり、今回の研究では他機関により実施されている強震観測網の観測記録は取り入れていない。本章では、まず港湾地域強震観測網の概要を紹介し、得られている観測記録の特徴を示す。

3.1 港湾地域強震観測網の概要

運輸省港湾建設局等の港湾関連諸機関では、1963年に京浜港（横浜）をはじめとする6港湾地域において、SMAC-B2型の強震計を設置し強震観測を始めて以来、1989年12月現在、図-3-1に示す全国の主要港湾地域55ヶ所で強震観測を実施している。表-3-1は、強震観測地点名と観測を開始した時期、さらに、設置された強震計の種類と設置状況をまとめたものである。これによれば、82台の強震計のうち、61台が地盤上に設置されており、15台は構造物上に、残りの6台が地中に設置されている。運輸省港湾技術研究所では、主に強震計設置に当たって技術的検討や記録のデジタル化および解析を担当し、その成果を港湾地域強震観測年報等の定期刊行物などの形でとりまとめてきた。^{38)~73)}本研究で用いたのは、このうち地盤上に設置された強震計の観測記録である。強震計の種類は、その多くがアナログ記録方式のSMAC-B2型の強震計とERS-B, C, D型の強震計であるが、近年ではデジタル記録方式のERS-F型の強震計が設置されるようになってきている。

本研究に使用した地盤上の観測点は、その表層地盤の地盤特性により、表-3-2に示すA, B, C地盤の3種類の地盤分類が可能である。¹⁾各観測点は標準的と考えられるB地盤に分類されるものが47ヶ所と最も多く、続いてA地盤の24ヶ所であり、C地盤での観測は9ヶ所にすぎない。地盤上で観測される記録は、各観測地点固有の表層地盤の地盤特性に応じて増幅作用を受けたものとなっている。本研究のような、最大加速度の距離減衰式に関する研究のためには、各観測地点の表層地盤の特性についての影響を考慮に入れた検討が望ましいが、本研究では研究の第一段階として、表層地盤の影響を無視して検討を行うこととした。すなわち、加速度記録のデータベースとしては、地盤種別による分類はしないものと

し、各観測点の表層地盤の影響は、各観測地点固有の偏差として評価するものとの立場から検討している。

地震計については、その記録方式の違いだけでなく、計器特性の異なる地震計が用いられている点で注意を要する。とくに、SMAC-B2型強震計とERS型強震計では、その周波数応答特性がかなり異なり、後者の地震計がかなり広い範囲で周波数応答特性が一樣であるのに対し、前者は5Hz以上での感度の低下が顕著である。運輸省港湾技術研究所では1978年以降に記録された記録については、水平方向のいずれかの成分が20Galを越えたものについてのみ、このような計器特性の補正を行っており、それより小さい加速度の記録については未補正の記録のみが保存されている。本研究のような距離減衰の検討には、データの大小の幅が大きいために望ましいので、比較的加速度の大きいデータのみでなく加速度が小さなデータを用いることの意義も大きい。従って、周波数応答特性の異なる強震計の記録をそのまま同一のデータベースとして取り扱うのは本意ではないが、本研究では、計器補正を施していない観測記録をそのまま用いたデータベースにより検討を実施した。

水平方向の最大加速度の値としては、水平2方向の最大加速度のうち大きい方を採用した。その他の最大加速度の定義、すなわち、水平2方向の最大加速度の平均値を用いる場合などとの場合の違いについては適切な相関関係を用いればよいと考える。上下動の最大加速度については、観測記録の最大値をそのまま用いることとした。

3.2 加速度記録のデータベースの特徴

本節では、回帰分析を実施するに先だって、港湾地域強震観測の加速度記録のデータベースの特徴を検討する。

(1) マグニチュードと震源距離の関係

本研究では、水平動については118の地震で得られた合計914個の加速度記録を、上下動については100の地震で得られた合計772個の加速度記録をデータベースとして用いている。表-3-3にこれらの地震を一覧表として示しているが、いずれの地震も水平動もしくは上下動の観測結果が少なくとも5ヶ所の観測地点で得られているものだけを選んでいく。このようにして選び出したデータベースの、水平動についてのマグニチュードと震源距離の関係は、図-3-2に示す通りであり、上下動については図-3-3に示す通りである。これらの関係については、距離減衰式に関する既往の研究にも見られるように、近距離の大地震の記録がないという特徴を有する。このことは、同図で上限の包絡線に対応している。港湾地域強震観測データベースによれば、マグニチュードが7を越えると震源距離は100kmを越えるものがほとんど

である。また、震源距離が50km未満のデータはマグニチュードによらず非常に少ない。これらの事実には、わが国におけるマグニチュードが7を越える地震の発生が、陸地から比較的離れた海溝沿いの地域に集中していることも反映されているものと考えられる。

図-3-2および3のもう一つの特徴として、マグニチュードの下限の包絡線を図中の直線のように引くことができる点を指摘することができる。図中に示した下限包絡線は、最大加速度の観測値の下限値に対応したものであり、この直線上では最大加速度は下限値（この場合約2Gal）となっている。

このような2つの理由により、マグニチュードと震源距離の間には強い正の相関がみられる。ちなみに、水平動の検討に用いたデータベースの場合、この両者の関係の相関係数 ρ と線形回帰式は、以下のように求められる。

$$M = 1.758 \cdot \log X + 2.434$$

$$(\rho = 0.644) \quad (3-1)$$

マグニチュードと震源距離（その他の定義でも同じ）の間に上式で示されるような強い相関がある場合には、2章で触れた距離減衰式における回帰係数が独立とは成らなくなる。例えば、距離減衰式として、最も標準的なものの1つと考えられる次式を用いると、

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log X + c \quad (3-2)$$

港湾地域強震観測のデータベースからは、距離減衰式の回帰係数 a, b 等の間に、次式のような関係が発生する。

$$a = 0.236 \cdot b - 0.096 \quad (3-2)$$

このことが直接、回帰係数の値の低下に影響することを説明するものではないが、従来行われてきた標準的な重回帰分析を強震観測データに無条件に当てはめる場合に発生する問題点の一つを示すものと言える。

(2) 最大加速度と震源距離の関係

次に、データベース内に内在する最大加速度と震源距離の関係を検討する。まず、水平動についての検討を行い、その後上下動の検討を行うこととする。

図-3-4は、水平動の全データについて、両者の関係を最大加速度を縦軸に、震源距離を横軸にして両対数グラフに示したものである。これらの図から読み取れる特徴として、

- ① 震源距離は50km付近より小さい値は非常に少ない。

- ② 約2Galを境として、それより小さいデータは非常に少ない。

が挙げられる。ただし、マグニチュードの違いの影響が同図では読み取りにくい。そこで、図-3-5~8に、マグニチュードの4つの範囲に対しそれぞれの範囲のデータだけで、最大加速度と震源距離の関係をプロットした。これらの図には、上述の2つの特徴が明瞭に表れている。また、マグニチュードが6以上の図によれば、上述の2つの特徴に加えて、最大加速度の最大値および最小値の包絡線を図のように引くことができる。この包絡線の傾きは、距離減衰式の距離減衰項の傾きを表しており、データ数が多くなれば、真の距離減衰の勾配を表すものと考えられるが、データ数の多い図-3-5, 6を見ると、最大値の包絡線の勾配は約1.8程度の値をとっている。これらの図から、最大加速度と震源距離の関係を模式的に示せば、図-3-9に示す分布となる。

以上は、水平動についての検討結果であるが、上下動についてもほぼ同様の結果が得られる。図-3-10は最大加速度と震源距離の関係を全データについて示したものであり、図-3-11~14は、マグニチュードにより分類して両者の関係を示したものである。これらの図からは、水平動とほぼ同じ結論が導き出され、最大加速度と震源距離の関係は図-3-9のような模式図で特徴づけられる。

(3) 最大加速度とマグニチュードの関係

ここでも、まず、水平動についての最大加速度とマグニチュードの関係を調べる。そのあと、上下動の関係について調べる。

図-3-15は最大加速度を縦軸に、マグニチュードを横軸にして両者の関係を調べたもので、震源距離によって図中の記号を変えている。前項と同様に震源距離の4つの分類ごとに図-3-16~19に両者の関係を示した。震源距離の幅を比較的広くとっているため、震源距離の影響を完全に除いて検討はできないが、マグニチュードと最大加速度の間には、線形の関係が見られる。

これらの図から、最大加速度の下限値が存在することが、ここでもデータベースの分布を特徴づける要因となっている。また、図-3-16~19の間の最大加速度の最大値および最小値の包絡線を図のように引くことができる。この包絡線の傾きは、距離減衰式のマグニチュードの回帰係数を表しており、データ数が多くなれば、真の値の近似値を表すものと考えられるが、図からは、最大値の包絡線の勾配は0.55程度の値をとっていることがわかる。

これらのデータの分布を模式化して示せば図-3-20のようになる。これは、図-3-9の勾配を正負に交換

したものに相当する。図-3-16~19の中には震源距離にかなりの幅があるものの、これを無視し震源距離とマグニチュードの線形回帰式を計算すると、各図に太実線で示した回帰式が得られる。この傾きは、図中に示す上限値の包絡線の勾配に比べ小さい値となっている。

上下動について、同様の図を示したものが、図-3-21~25である。いずれも、水平動の特徴をほぼ再現したものとなっている。

表-3-1 強震観測地点の観測概要と観測開始日時

番号	港名	観測点名	強震計の種類	設置状況	観測開始時期	備考
1	花咲	花咲-M	ERS-C	地表面	1975.12.	
2	釧路	釧路事-S	SMAC-B2	地表面	1964.7.	
3	十勝	十勝-M	ERS-C	地表面	1974.12.	
4	浦河	浦河-S	SMAC-B2	地表面	1984.	
5	苫小牧	苫小牧-S	SMAC-B2	地表面	1970.3.	
6	室蘭	室蘭-S	SMAC-B2	地表面	1964.7.	
7	小樽	小樽-S	SMAC-B2	地表面	1967.11.	
8	函館	函館-M 函館-FB 函館-F 函館-FR	ERS-C ERS-F ERS-F ERS-F	地表面 地中 地表面 構造物上	1974.12. 1986. 1986. 1986.	
9	青森	青森-S	SMAC-B2	地表面	1967.12.	
10	八戸	八戸事-S	SMAC-B2	地表面	1965.9.	
11	宮古	宮古-S	SMAC-B2	地表面	1966.2.	
12	釜石	釜石-M 釜石-MB	ERS-C ERS-D	地表面 地中	1980.3. 1980.3.	
13	大船渡	大船渡-S 大船渡防地-S 大船渡防-S 大船渡マツドM	SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面 構造物上 構造物上	1965.1. 1968.10. 1966.12. 1681.	1968.10.終了
14	塩釜	塩釜-S 塩釜工場-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1964.12. 1968.6.	1968.3.終了
15	仙台	仙台-M 仙台-MB	ERS-C ERS-D	地表面 地中	1979.12. 1979.12.	
16	相馬	相馬-S	SMAC-B2	地表面	1984.	
17	小名浜	小名浜-S 小名浜事-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1966.1. 1979.9.	1979.9.終了
18	常陸那珂	常陸那珂-F	ERS-F	地表面	1986.	
19	鹿島	鹿島-S 鹿島事-S 鹿島造函-S	SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面 地表面	1976.9. 1972.1. 1976.3.	1971.11.終了 1976.3.終了
20	千葉	千葉-S	SMAC-B2	地表面	1968.7.	

	港名	観測点名	強震計の種類	設置状況	観測開始時期	備考
21	東京	品川-S 品川-M 品川-MB	SMAC-B2 ERS-D ERS-D	地表面 地中 地中	1966.12. 1966.12. 1984.	
22	川崎	川崎第5地-M 川崎第5構-M 川崎-FB 川崎-F 川崎-FR	ERS-B ERS-B ERS-F ERS-F ERS-F	地表面 地表面 地中 地表面 構造物上	1964.3. 1964.3. 1987. 1987. 1987.	
23	横浜	京浜事-S 山下変-S 山下変-M 山下第6-S 山下第7-M 山下-FB 山下-F 山下-FR	SMAC-B2 SMAC-B2 ERS- SMAC-B2 ERS- ERS-F ERS-F ERS-F	地表面 地表面 地表面 地表面 地表面 地中 地表面 構造物上	1963.1. 1963.1. 1975.4. 1963.1. 1964.3. 1987. 1987. 1987.	
24	横須賀	港研-S 港研-M	SMAC-B2 ERS-C	地表面 地表面	1963.3. 1964.3	
25	田子の浦	田子の浦-S	SMAC-B2	地表面	1968.3.	
26	下田	下田-F	ERS-F	地表面	1966.3	
27	清水	清水工場-S 奥津-S 清水石炭-S 清水三保-S 清水石炭-M	SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面 地表面 地表面 地表面	1963.3 1966.3 1964.3 1974.9 1964.3	1974.9.終了
28	御前崎	御前崎-M	ERS-C	地表面	1978.9.	
29	衣浦	衣浦-S 衣浦事-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1968.3. 1976.3.	1976.3.終了
30	名古屋	名古屋造函-S 名古屋稲永-S 稲永棧橋-M 稲永矢板-M	SMAC-B2 SMAC-B2 ERS-B ERS-B	地表面 構造物 構造物 構造物	1963.3. 1965.3. 1967.3. 1967.3.	
31	四日市	四日市事-S 四日市千歳-S 四日市石炭-M 四日市第2-M	SMAC-B2 SMAC-B2 ERS-B ERS-B	地中 地中 構造物 構造物	1964.7. 1969.3. 1966.3. 1966.3.	1969.3.終了
32	和歌山	和歌山事-S 和歌山-S 和歌山住金-S 和歌山岸壁-S	SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面 地表面 地表面	1965.3. 1975.2. 1964.7. 1972.3.	1975.2.終了 1968.6.終了
33	大阪	大阪事-S 大阪中央-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 構造物	1965.1. 1965.1.	

	港名	観測点名	強震計の種類	設置状況	観測開始時期	観測終了時期
34	尼崎	尼崎-S	SMAC-B2	地表面	1972.3.	
35	神戸	神戸事-S 神戸第6-S 神戸第8-S 神戸摩耶-M 摩耶第1-M 摩耶第2-M	SMAC-B2 SMAC-B2 SMAC-B2 ERS-C ERS-B ERS-B	地表面 構造物 構造物 地表面 構造物 構造物	1963.8. 1963.3. 1963.3. 1975.3. 1966.3. 1966.3.	
36	小松島	小松島-S	SMAC-B2	地表面	1968.2.	
37	高知	高知-S 高知事-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1964.1. 1978.3.	1978.3.終了
38	松山	松山-S	SMAC-B2	地表面	1972.3.	
39	広島	広島事-S	SMAC-B2	地表面	1965.1.	
40	大分	大分-S	SMAC-B2	地表面	1972.3.	
41	細島	細島-S	SMAC-B2	地表面	1965.1.	
42	宮崎	宮崎-M	ERS-C	地表面	1975.8.	
43	志布志	志布志-S	SMAC-B2	地表面	1981.	
44	鹿児島	鹿児島-S	SMAC-B2	地表面	1962.10.	
45	水俣	水俣-M	ERS-C	地表面	1978.11.	
46	境港	境港-S 境港事-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1966.2. 1976.3.	1976.3.
47	敦賀	敦賀-S	SMAC-B2	地表面	1965.3.	
48	金沢	金沢-S	SMAC-B2	地表面	1969.3.	
49	富山	富山-S	SMAC-B2	地表面	1965.3.	
50	新潟	新潟-S 新潟事-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1965.12. 1975.8.	1975.8.終了
51	酒田	酒田-S	SMAC-B2	地表面	1965.12.	
52	秋田	秋田-S	SMAC-B2	地表面	1965.3.	
53	那覇	那覇-S 那覇造函-S	SMAC-B2 SMAC-B2	地表面 地表面	1973.5. 1976.12.	1976.12.終了
54	平良	平良-S	SMAC-B2	地表面	1973.3.	
55	石垣	石垣-S	SMAC-B2	地表面	1973.3.	

表-3-2 地盤種別 (土田らによる⁹⁾)

地盤種別	内 容
A 地盤	岩盤および非常に締まったN値約50以上の礫層、砂層から成る地盤。
B 地盤	中程度に締まった砂層およびシルト質、粘土質地盤。 A地盤、C地盤のいずれにも属さない中間的地盤。
C 地盤	ゆるづめでN値約5以下の砂層から成る地盤。

A地盤	花咲、釧路、十勝、浦河、小樽、函館、宮古、釜石、大船渡、仙台、常陸那珂、相馬、鹿島、横須賀、御前崎、水俣、秋田	17港
B地盤	苫小牧、室蘭、八戸、塩釜、小名浜、千葉、東京、川崎、横浜、田子の浦、下田、清水、衣浦、名古屋、四日市、大阪、尼崎、神戸、高知、松山、大分、広島、細島、宮崎、志布志、敦賀、金沢、富山、酒田、那覇、平良、石垣	47港
C地盤	青森、和歌山、小松島、鹿児島、境港、新潟	9港

表-3-3 検討に使用した地震

番号	発震月日	震 央			深度(m)	マグニチュード M	データ個数	
		地 名	北緯(度分)	東経(度分)			水平	上下
1	1965.4.20	静岡県付近	34° 53'	138° 18'	20	6.1	7	7
2	1965.10.26	根室	43° 44'	145° 31'	160	7.1	6	6
3	1968.4.1	日向灘	32° 17'	132° 32'	30	7.5	7	7
4	1968.5.16	十勝沖	40° 44'	143° 35'	0	7.9	13	13
5	1968.5.16	十勝沖余震	41° 25'	142° 25'	40	7.5	7	7
6	1968.6.12	岩手県沖	41° 25'	142° 25'	0	7.2	8	8
7	1968.7.1	埼玉県中部	35° 59'	139° 26'	50	6.1	7	8
8	1968.7.5	宮城県沖	38° 26'	142° 13'	50	6.4	7	7
9	1969.4.9	栃木県中部	36° 47'	139° 46'	100	5.6	5	5
10	1969.9.9	岐阜県中部	35° 47'	137° 4'	0	6.6	7	6
11	1970.1.21	北海道	42° 23'	143° 8'	50	6.7	5	5
12	1971.1.5	愛知県沖	34° 26'	137° 10'	40	6.1	8	9
13	1971.7.23	山梨県東部	35° 33'	138° 58'	10	5.3	5	6
14	1971.8.2	襟裳岬沖	41° 14'	143° 42'	60	7.0	6	5
15	1972.3.20	青森県東方沖	40° 51'	142° 0'	80	6.4	6	6
16	1972.12.4	八丈島東方沖	33° 12'	141° 5'	50	7.2	8	7
17	1973.3.27	東京湾	35° 31'	139° 56'	60	4.9	7	5
18	1973.6.17	根室半島沖	42° 58'	145° 57'	40	7.4	6	6
19	1973.9.30	銚子付近	35° 39'	140° 40'	50	5.9	5	—
20	1973.11.19	宮城県沖	38° 53'	142° 9'	50	6.4	6	6
21	1973.12.22	千葉県南部	35° 13'	140° 17'	70	5.0	5	—
22	1974.2.22	紀伊半島沖	33° 8'	137° 7'	400	6.9	6	—
23	1974.3.3	千葉県東方沖	35° 24'	140° 53'	60	6.1	5	—
24	1974.5.9	紀伊半島沖	34° 34'	138° 48'	10	6.9	10	8
25	1974.7.8	茨城県沖	36° 25'	141° 12'	40	6.3	6	5
26	1974.8.4	茨城県南西部	36° 1'	139° 53'	50	5.8	8	6
27	1974.9.27	八丈島東方沖	33° 43'	141° 31'	60	6.4	8	6
28	1974.11.9	苫小牧沖	42° 29'	141° 47'	130	6.5	5	5
29	1974.11.30	本州南方沖	30° 36'	138° 46'	40	6.1	6	—
30	1975.2.8	千葉県北部	35° 49'	140° 7'	60	5.4	7	5

番号	発震月日	震 央			深度(m)	マグニチュード M	データ個数	
		地名	北緯(度分)	東経(度分)			水平	上下
31	1976.6.16	山梨県東部	35° 30'	139° 0'	20	5.5	7	6
32	1976.12.29	群馬県北部	36° 38'	139° 10'	130	5.8	5	—
33	1977.6.4	東京湾北部	35° 31'	140° 3'	60	4.6	5	—
34	1977.6.22	千葉県東方沖	35° 27'	140° 32'	40	5.0	5	—
35	1977.10.5	茨城県南西部	38° 8'	139° 52'	60	5.4	6	6
36	1977.1.14	大島付近	34° 46'	139° 15'	0	7.0	12	10
37	1978.1.15	伊豆半島中部	34° 50'	138° 53'	20	5.8	5	6
38	1978.2.20	宮城県沖	38° 45'	142° 12'	50	6.7	16	15
39	1978.3.20	茨城県南西部	36° 5'	139° 53'	60	5.5	6	9
*	1978.5.16	青森県東部	40° 56'	141° 27'	10	5.8	—	5
40	1978.5.23	種子島近海	30° 59'	130° 22'	160	6.7	5	5
41	1978.6.12	宮城県沖	38° 9'	142° 10'	40	7.4	27	25
42	1978.10.7	長野県南西部	35° 47'	137° 30'	0	5.3	5	5
43	1978.12.3	大島近海	34° 53'	139° 8'	0	5.4	7	5
44	1978.12.6	国後島近海	44° 44'	146° 58'	100	7.7	9	9
45	1979.7.11	茨城県沖	36° 36'	140° 31'	40	5.9	6	—
46	1979.10.28	千葉県東方沖	36° 36'	140° 31'	40	5.9	7	5
47	1980.3.12	関東南方沖	34° 57'	140° 31'	80	5.6	6	5
48	1980.5.8	関東南方沖	34° 31'	140° 27'	60	5.7	8	6
49	1980.6.29	伊豆半島東方沖	34° 55'	139° 14'	10	6.7	13	12
50	1980.9.24	関東南部	35° 58'	139° 48'	80	5.4	7	6
51	1980.11.27	東北東海岸	40° 26'	141° 30'	90	5.9	5	5
52	1981.1.19	東北中部東方沖	40° 26'	141° 30'	90	5.9	7	7
53	1981.1.23	北海道南海岸	42° 25'	142° 12'	130	7.1	13	12
54	1981.12.2	東北北部東方沖	35° 17'	137° 35'	50	5.0	8	8
55	1982.3.7	関東東海岸	36° 28'	140° 39'	60	5.5	5	—
56	1982.3.21	浦河沖	42° 4'	142° 36'	40	7.1	9	8
57	1982.6.1	東北地方東方沖	38° 41'	142° 20'	40	6.2	7	7
58	1982.7.23	茨城県沖	36° 11'	141° 57'	30	7.0	13	12
59	1982.8.12	関東南方沖	34° 53'	139° 34'	30	5.7	5	—

番号	発震月日	震 央			深度(m)	マグニチュード M	データ個数	
		地 名	北緯(度分)	東経(度分)			水平	上下
60	1983. 2. 27	関東南部	35° 56'	140° 9'	72	6.0	8	8
61	1983. 3. 16	中部地方南海岸	34° 47'	137° 36'	40	5.7	8	8
62	1983. 5. 26	日本海中部	40° 21'	139° 4'	14	7.7	9	8
63	1983. 6. 21	日本海中部	41° 15'	139° 0'	6	7.1	7	7
64	1983. 7. 2	東北地方東海岸	36° 54'	141° 11'	54	5.8	9	8
65	1983. 8. 8	関東・中部境	35° 31'	139° 1'	22	6.0	11	10
66	1983. 8. 26	瀬戸内海	33° 33'	131° 36'	116	6.8	9	9
67	1983. 10. 31	中国地方北海岸	35° 24'	133° 55'	15	6.2	6	5
68	1984. 1. 1	紀伊半島沖	33° 37'	136° 50'	388	7.3	7	6
69	1984. 3. 6	鳥島近海	29° 20'	139° 12'	452	7.9	11	10
70	1984. 5. 30	近畿北部	34° 57'	134° 35'	17	5.6	5	—
71	1984. 8. 7	九州南東沖	32° 22'	132° 9'	33	7.1	10	10
72	1984. 9. 14	長野県西部	35° 49'	137° 33'	2	6.8	16	14
73	1984. 9. 15	長野県西部	35° 47'	137° 28'	6	6.2	12	10
74	1984. 9. 19	関東南東沖	34° 3'	141° 33'	13	6.6	9	8
75	1984. 12. 17	東京湾	35° 35'	140° 3'	78	4.9	6	5
76	1985. 1. 6	和歌山県	34° 10'	135° 33'	70	5.9	9	8
77	1985. 1. 6	和歌山県	34° 9'	135° 33'	69	5.5	8	7
78	1985. 1. 27	宮崎県北部	32° 36'	131° 17'	118	6.0	6	6
79	1985. 3. 29	秋田県北部	40° 17'	140° 35'	164	6.5	9	9
80	1985. 5. 13	愛媛県南西部	32° 59'	132° 35'	39	6.0	5	5
81	1985. 7. 29	福島県東部	37° 42'	141° 53'	52	6.4	5	—
82	1985. 8. 12	福島県沖	37° 42'	141° 53'	52	6.4	8	7
83	1985. 10. 4	茨城県南部	35° 52'	140° 9'	64	6.1	8	7
84	1986. 3. 2	宮城県沖	38° 28'	142° 18'	33	6.0	6	5
85	1986. 6. 24	房総南東部	34° 49'	140° 43'	73	6.5	13	12
86	1986. 7. 10	茨城県北部	36° 13'	140° 36'	81	4.8	5	—
87	1986. 9. 20	茨城県北部	36° 28'	140° 39'	56.2	5.0	5	—
88	1986. 10. 14	福島県沖	37° 3'	141° 13'	53	5.7	7	6
89	1986. 11. 15	茨城県東方沖	36° 23'	140° 55'	43	5.1	5	—

番号	発震月日	震 央			深度(m)	マグニチュード M	データ個数	
		地 名	北緯(度分)	東経(度分)			水平	上下
90	1986.11.29	茨城県東方沖	36° 23'	141° 10'	42	5.8	5	—
91	1986.12.1	金華山	38° 52'	142° 8'	51	6.0	6	—
92	1987.1.9	岩手県北部	39° 50'	141° 46'	72	6.6	15	14
93	1987.1.14	日高山地	42° 32'	142° 55'	119	7.0	13	13
94	1987.2.6	福島県沖	36° 56'	141° 56'	30	6.4	5	5
95	1987.2.6	福島県沖	36° 57'	141° 53'	35	6.7	12	13
96	1987.3.18	日向灘	31° 58'	132° 3'	48	6.6	6	7
97	1987.4.7	福島県沖	37° 18'	141° 52'	44	6.6	14	14
98	1987.4.10	茨城県南西部	36° 7'	139° 52'	61	4.9	6	6
99	1987.4.17	千葉県北部	35° 44'	140° 8'	77	5.1	5	5
100	1987.4.23	福島県沖	37° 5'	141° 37'	47	6.5	13	13
101	1987.5.12	金華山	38° 51'	142° 8'	50	5.7	7	7
102	1987.6.30	茨城県南西部	36° 11'	140° 5'	57	4.9	5	5
103	1987.7.16	東海地方沖	33° 6'	138° 17'	325	6.3	5	5
104	1987.9.24	茨城県沖	36° 37'	141° 19'	41	5.8	9	7
105	1987.10.4	福島県沖	37° 17'	141° 44'	42	5.8	7	7
106	1987.12.17	千葉県東方沖	35° 22'	140° 29'	58	6.7	14	14
107	1988.3.18	東京都	35° 39'	139° 38'	96	6.0	11	11
108	1988.5.7	十勝南東沖	42° 29'	143° 51'	93	6.4	6	6
109	1988.8.12	房総半島南部	35° 5'	139° 52'	69	5.3	8	8
110	1988.9.5	山梨県東部	35° 29'	138° 59'	30	5.6	5	5
111	1989.1.25	浦河南方沖	42° 7'	142° 47'	49	5.8	5	5
112	1989.2.19	三重県北部	34° 36'	136° 28'	45	5.3	6	6
113	1989.2.19	茨城県南西部	36° 1'	139° 54'	55	5.6	9	9
114	1989.3.6	銚子付近	35° 41'	140° 42'	56	6.0	7	7
115	1989.3.11	茨城県南部	35° 54'	140° 33'	45	4.9	5	5
116	1989.6.17	鳥島近海	31° 53'	138° 20'	385	6.8	7	7
117	1989.10.14	伊豆大島近海	34° 49'	139° 30'	21	5.7	6	6
118	1989.11.2	三陸海岸沖	39° 51'	143° 3'	0	7.1	9	9

注. データ個数の欄で — はデータ個数が5未満であることを示す。



図-3-1 港湾地域の強震観測地点

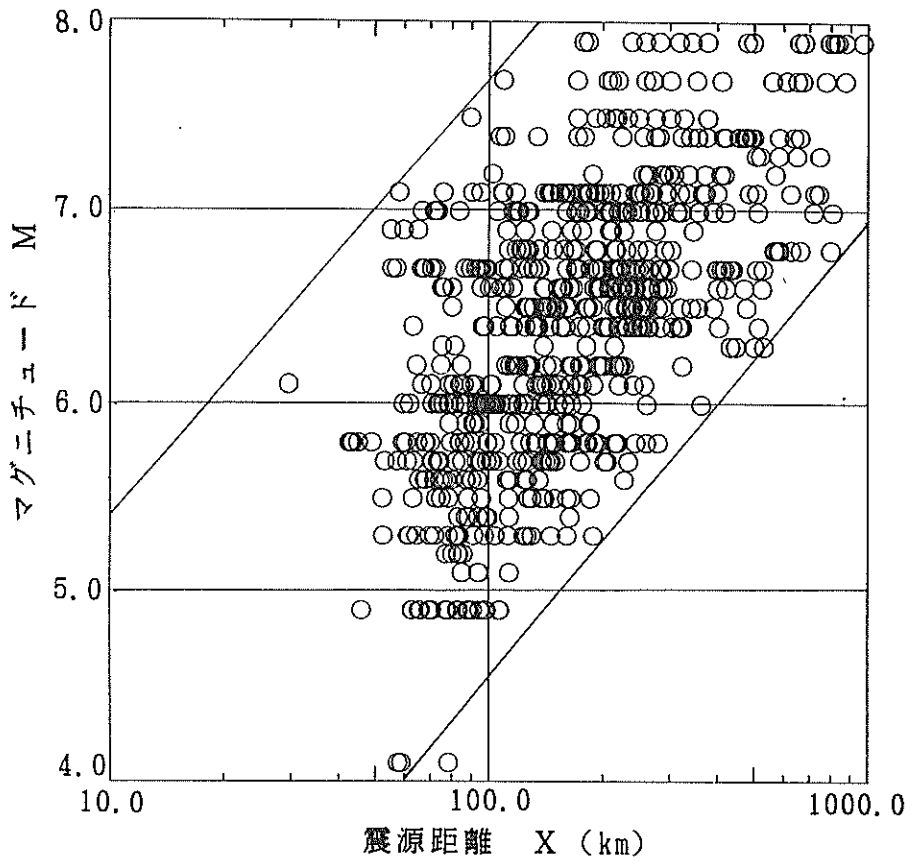


図-3-2 水平動の加速度データベースのマグニチュードと震源距離の関係

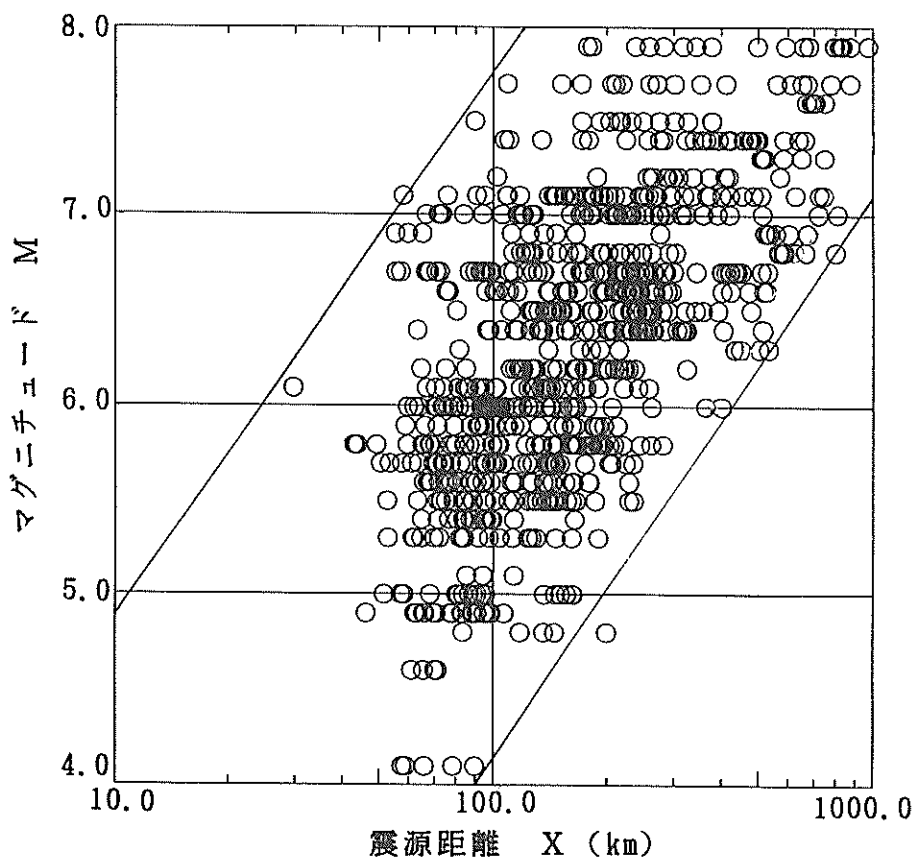


図-3-3 上下動の加速度データベースのマグニチュードと震源距離の関係

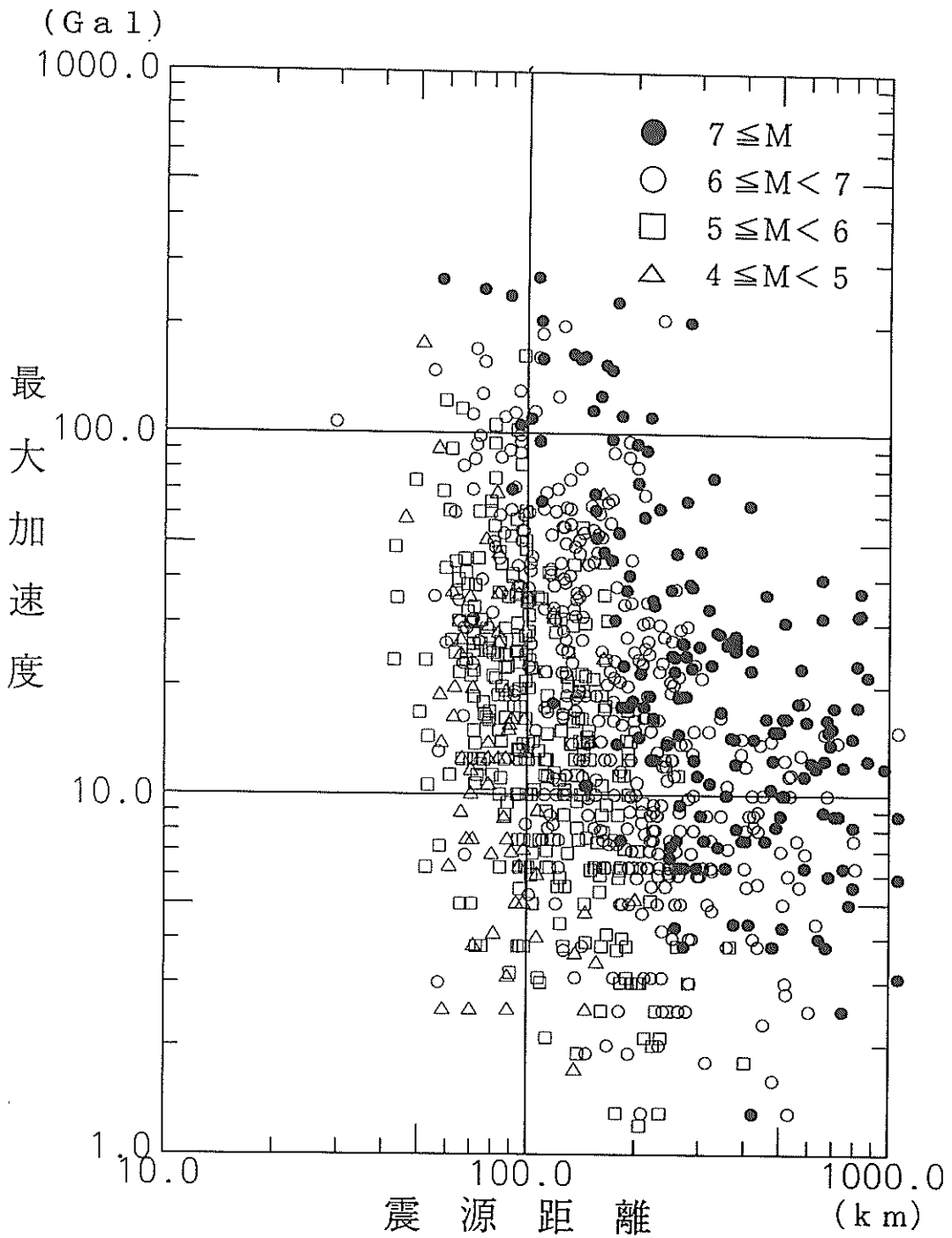


図-3-4 水平動の最大加速度と震源距離の関係

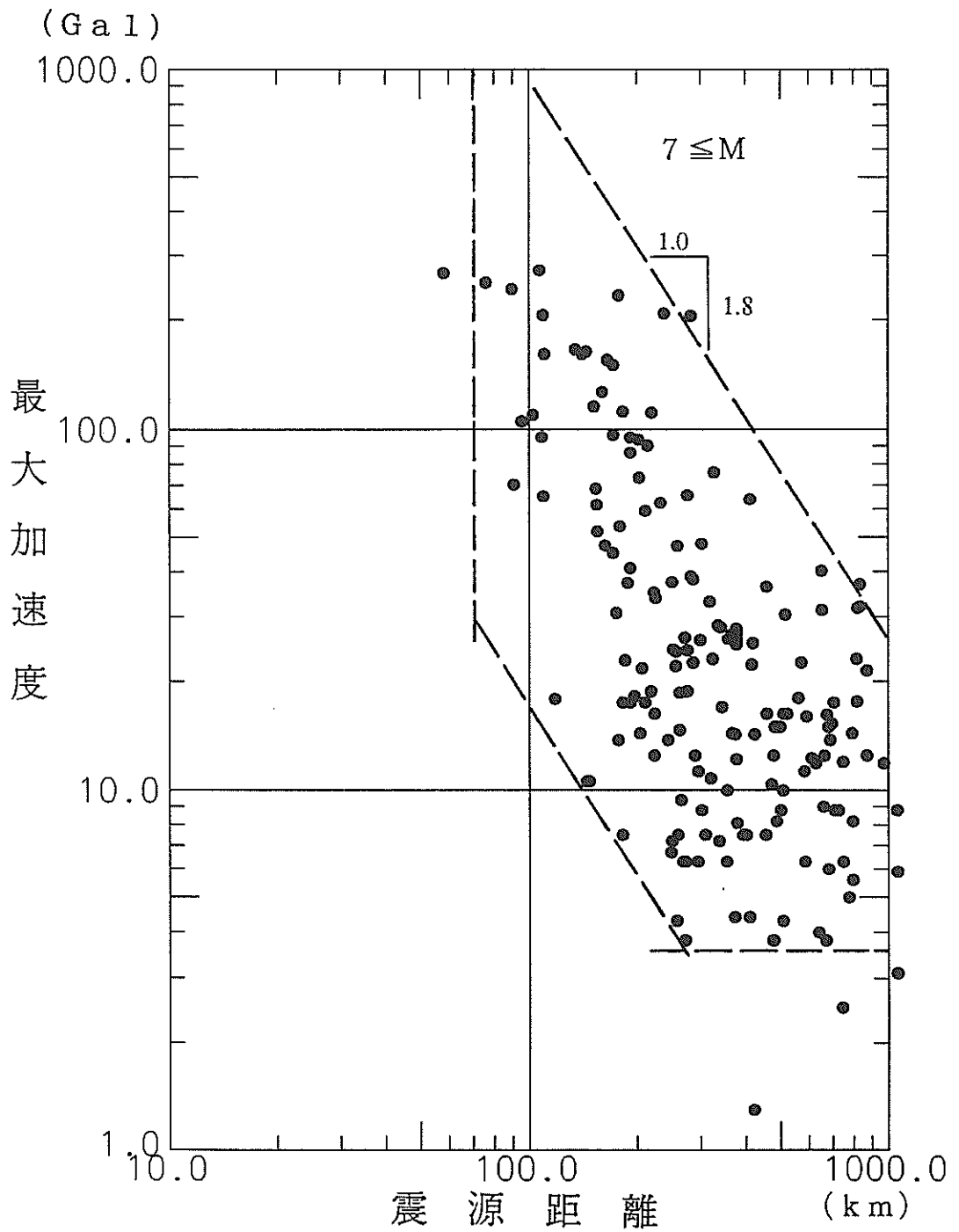


図-3-5 水平動の最大加速度と震源距離の関係 ($M \geq 7$)

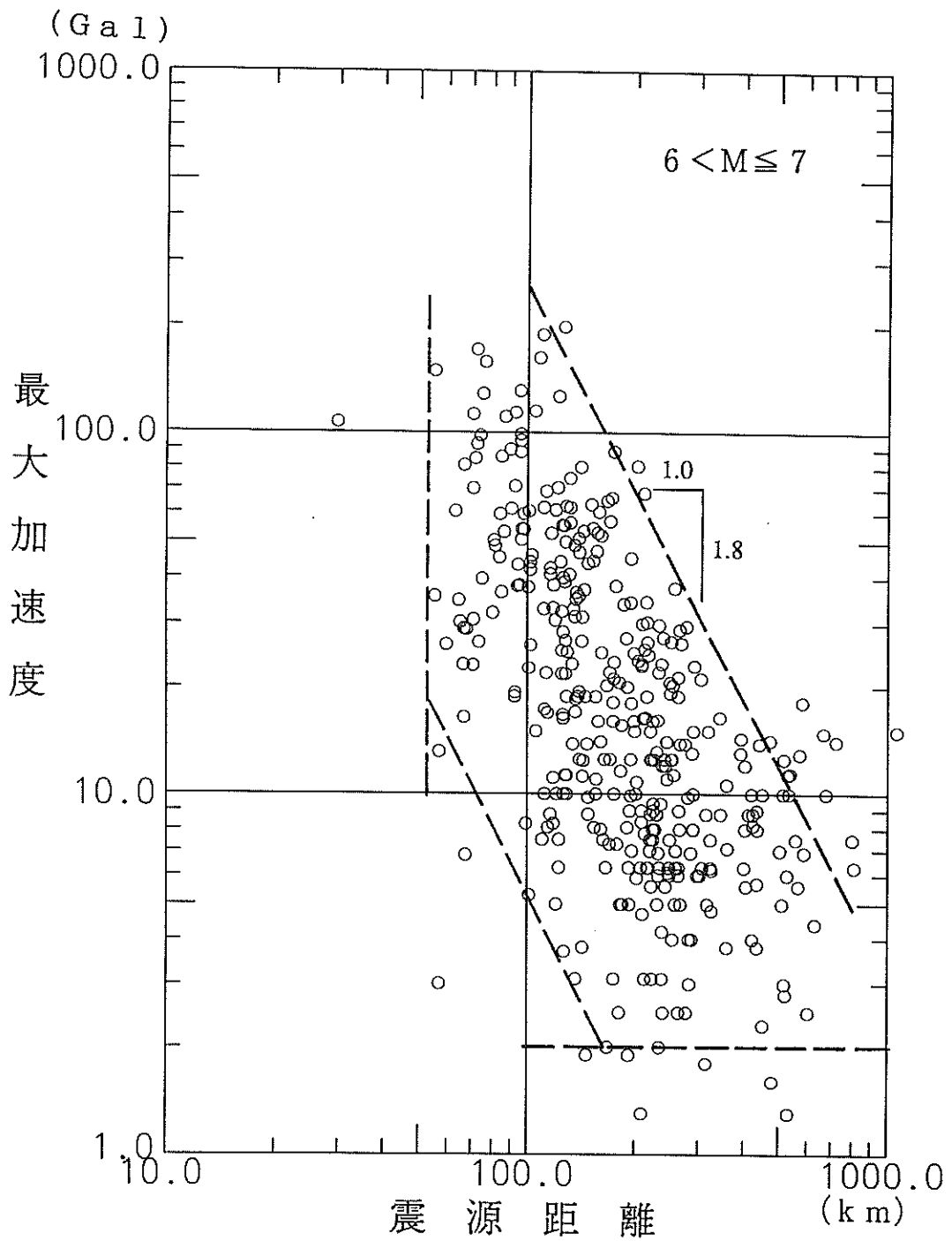


図-3-6 水平動の最大加速度と震源距離の関係 ($7 > M \geq 6$)

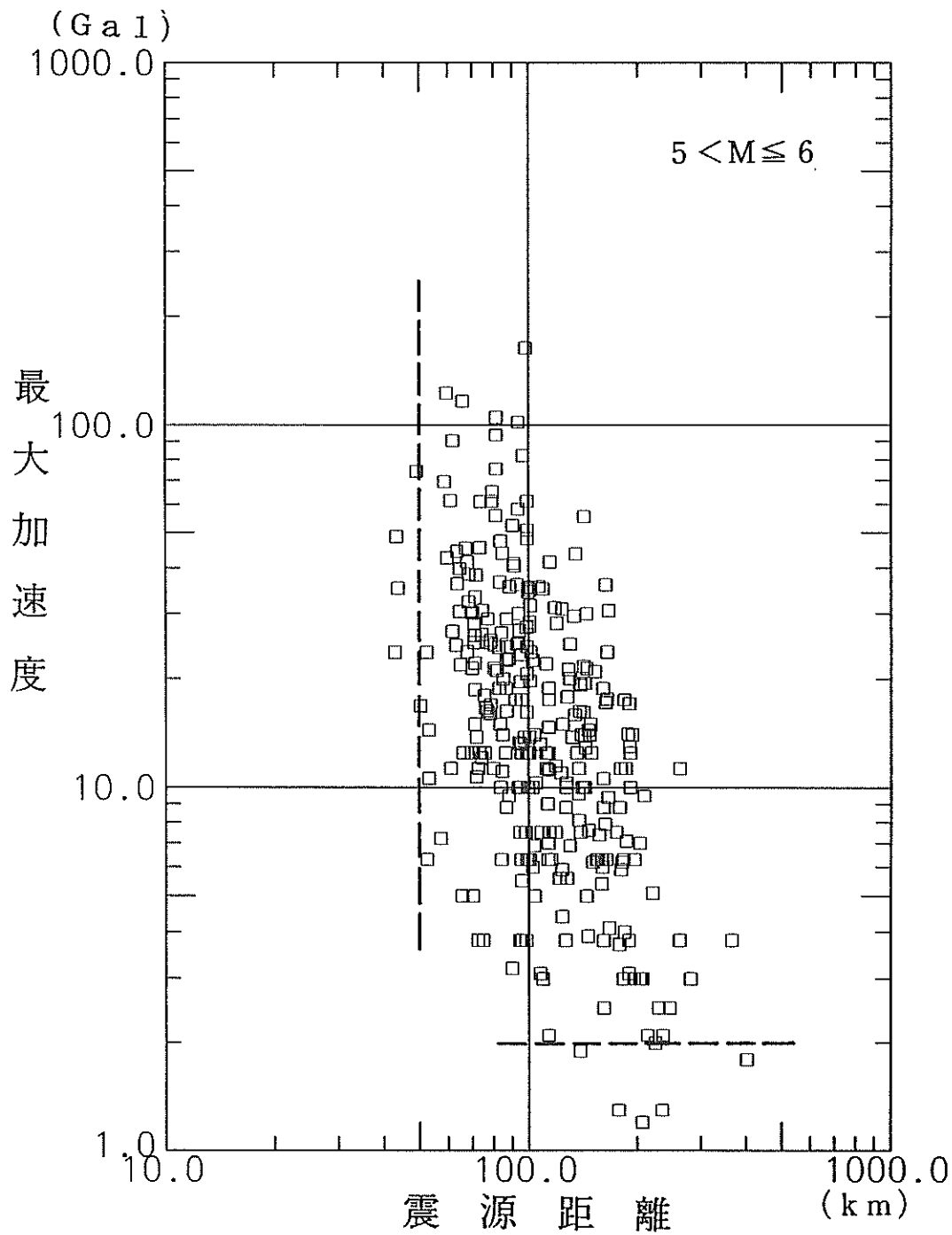


図-3-7 水平動の最大加速度と震源距離の関係 ($6 > M \geq 5$)

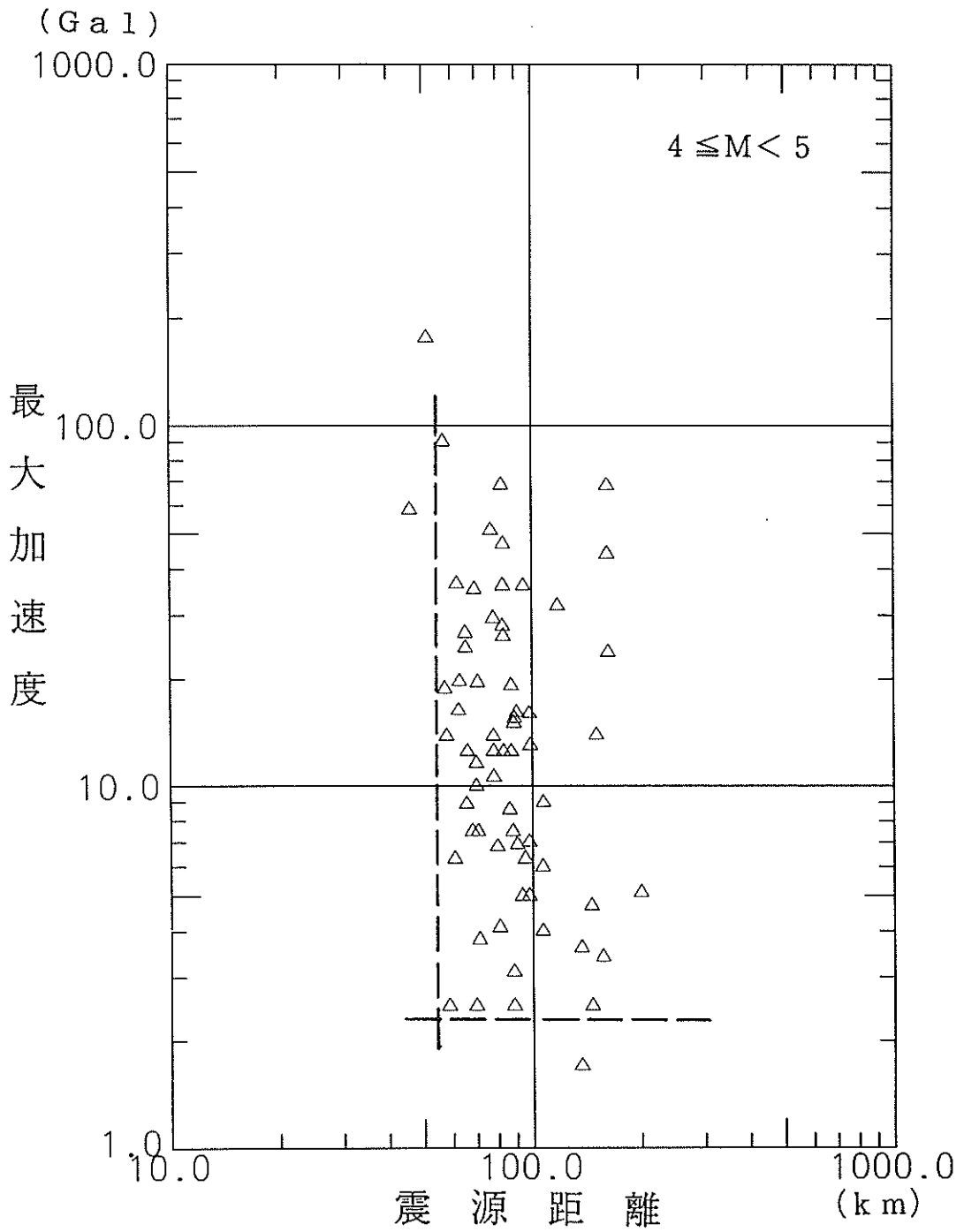


図-3-8 水平動の最大加速度と震源距離の関係 ($5 > M$)

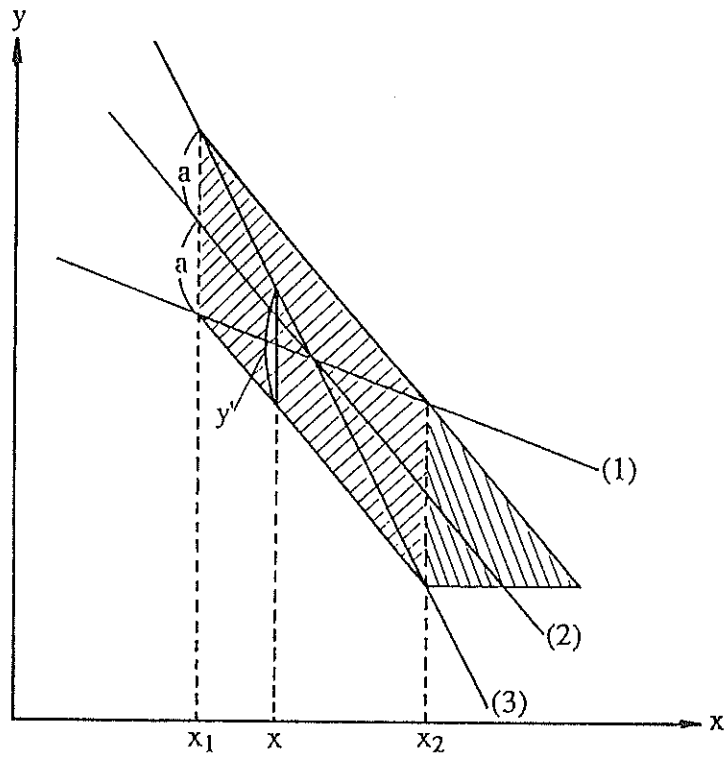


図-3-9 水平動の最大加速度と震源距離の関係の模式図

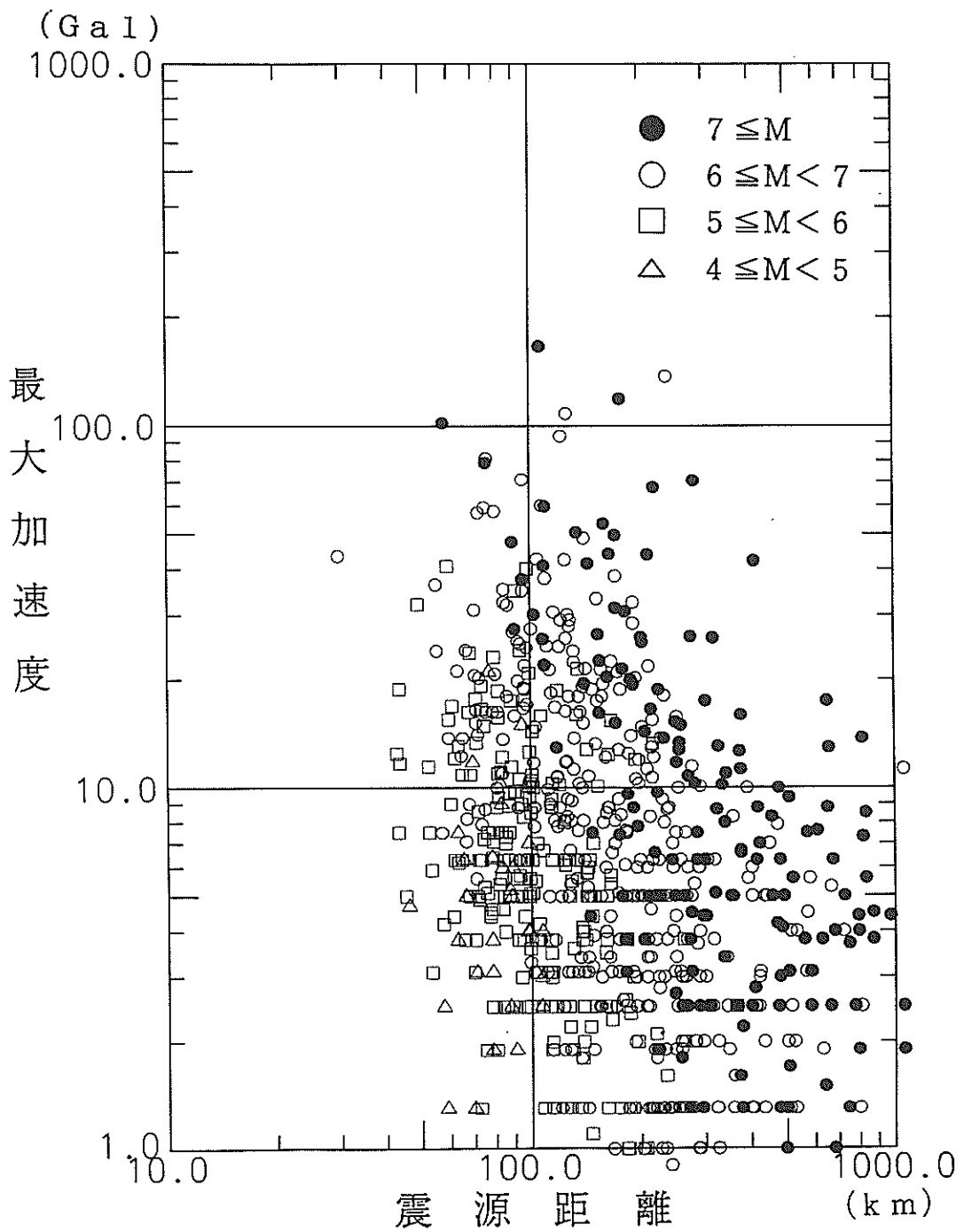


図-3-10 上下動の最大加速度と震源距離の関係

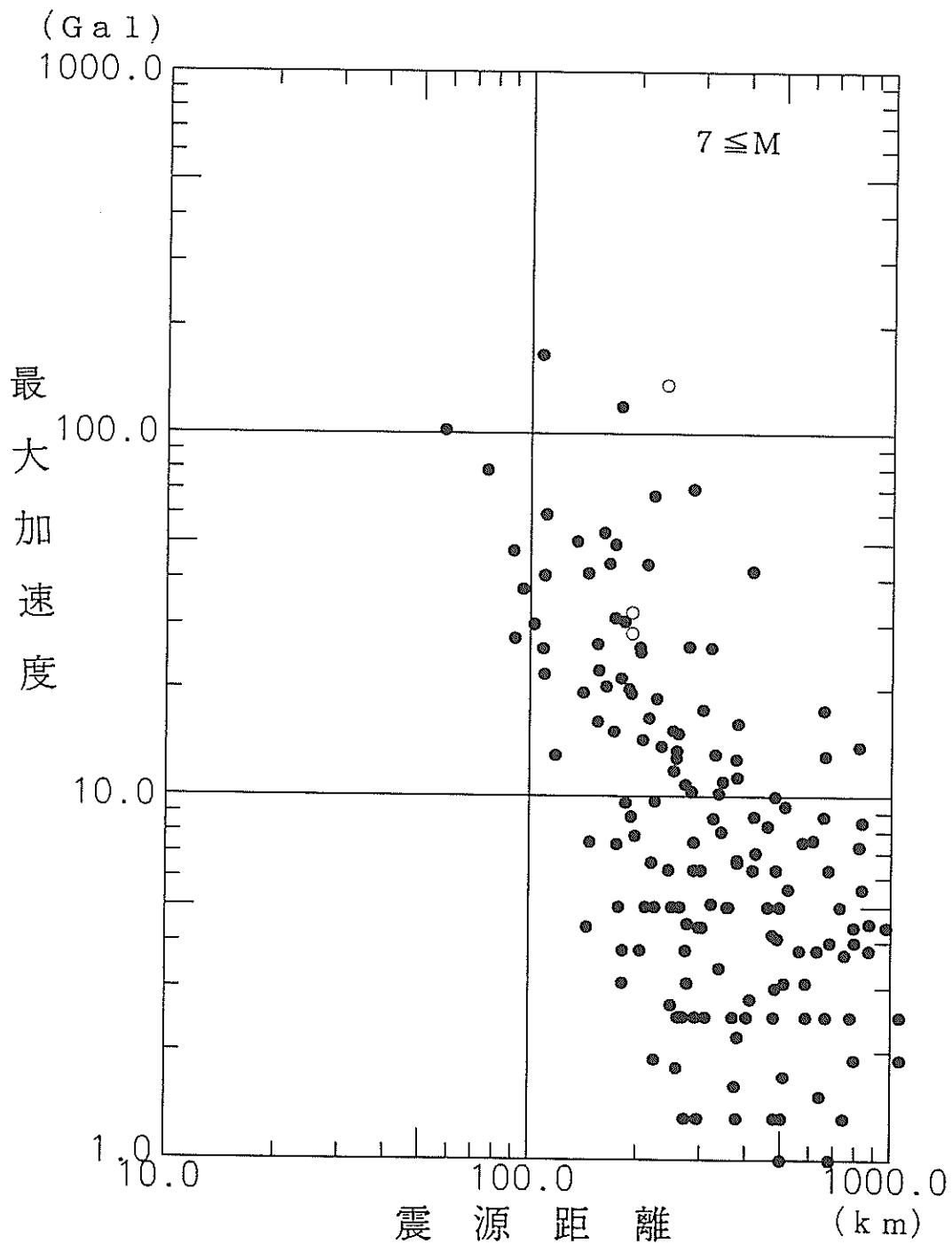


図-3-11 上下動の最大加速度と震源距離の関係 (M ≥ 7)

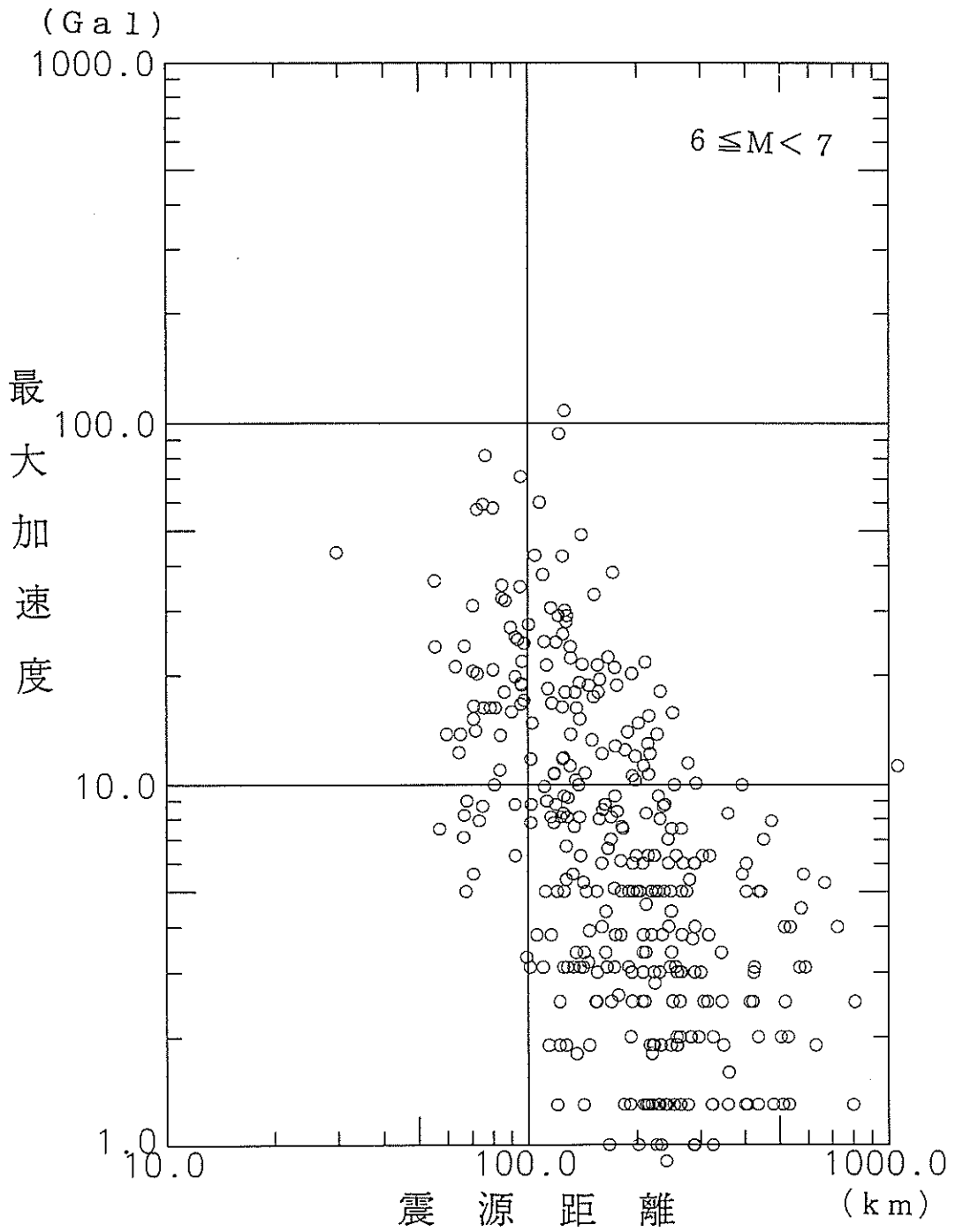


図-3-12 上下動の最大加速度と震源距離の関係 ($7 > M \geq 6$)

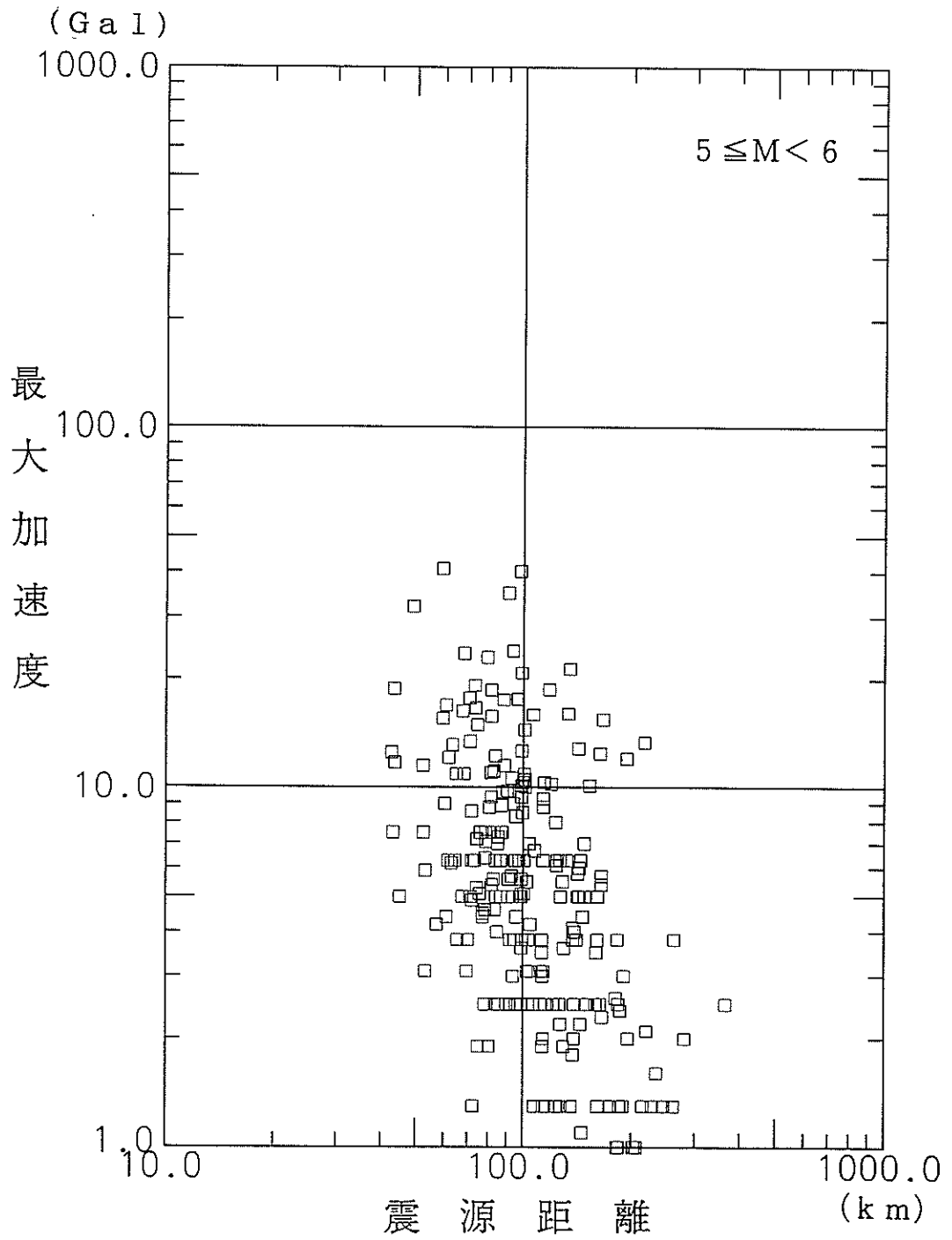


図-3-13 上下動の最大加速度と震源距離の関係 ($6 > M \geq 5$)

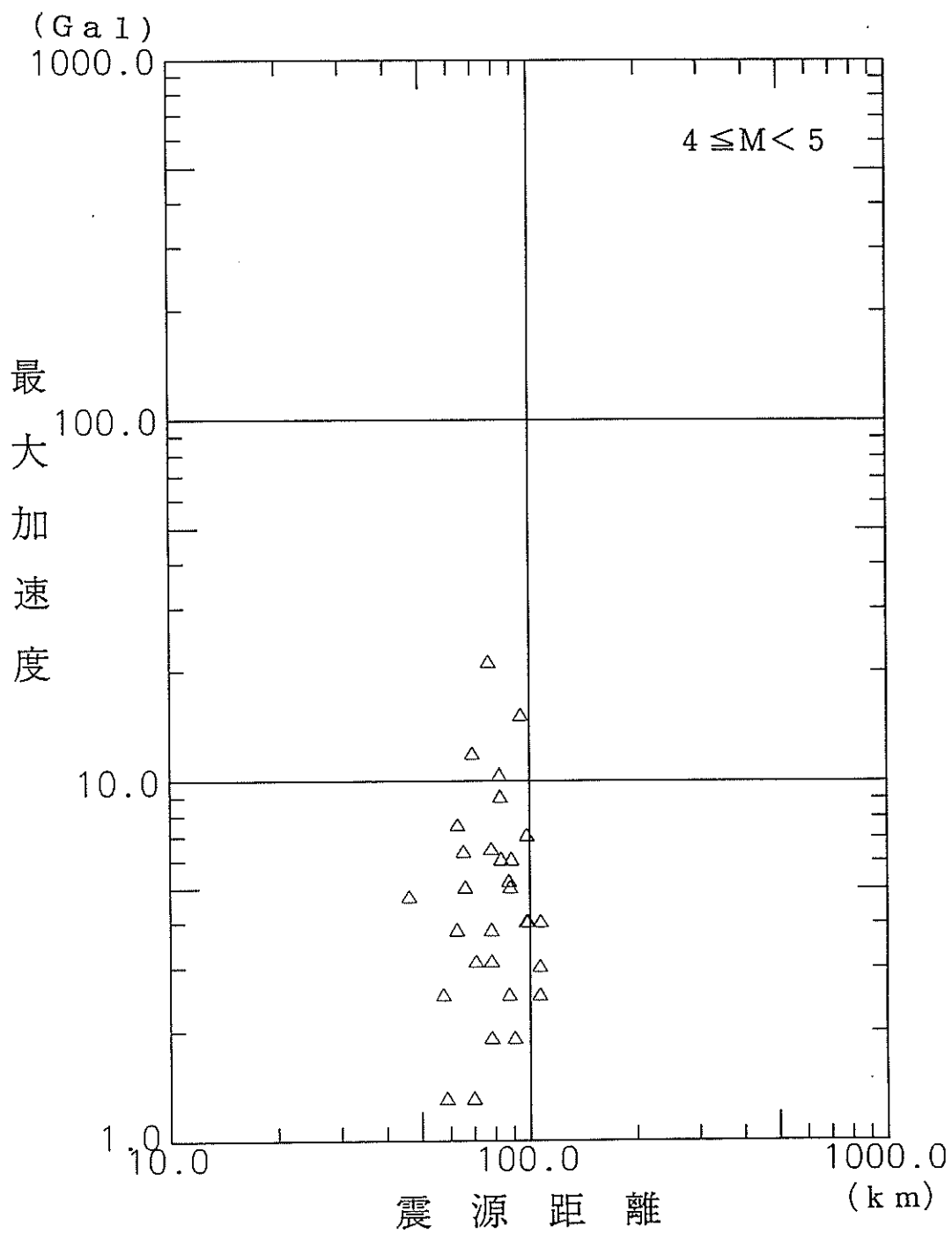


図-3-14 上下動の最大加速度と震源距離の関係 ($5 > M$)

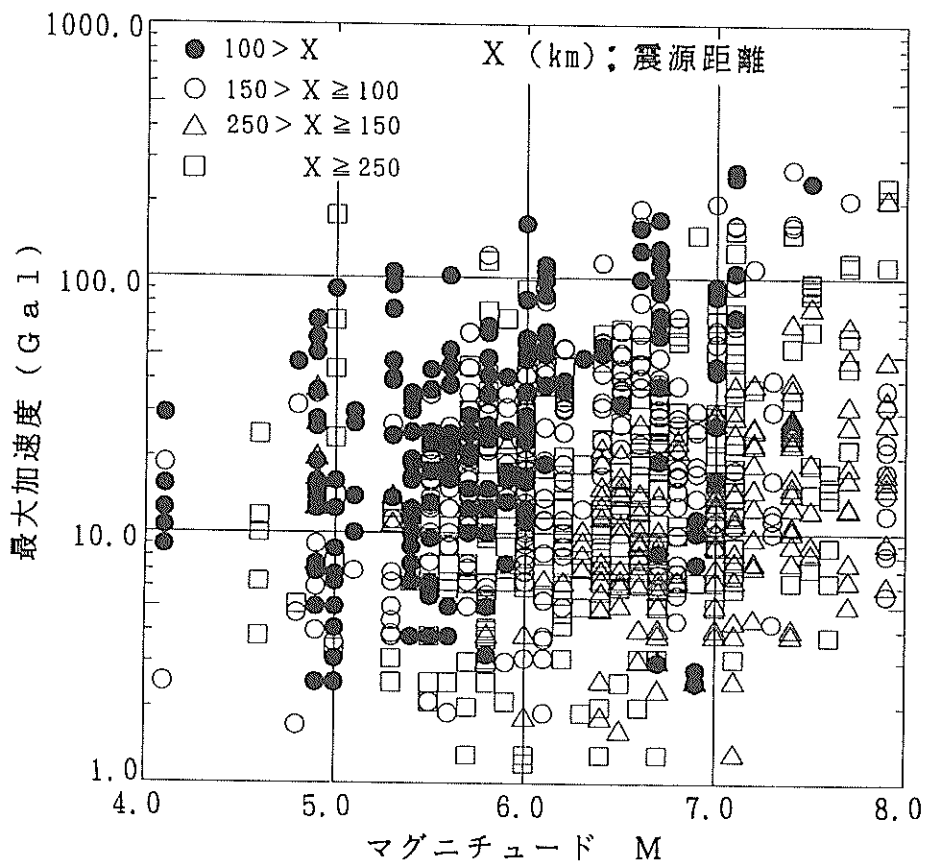


図-3-15 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係

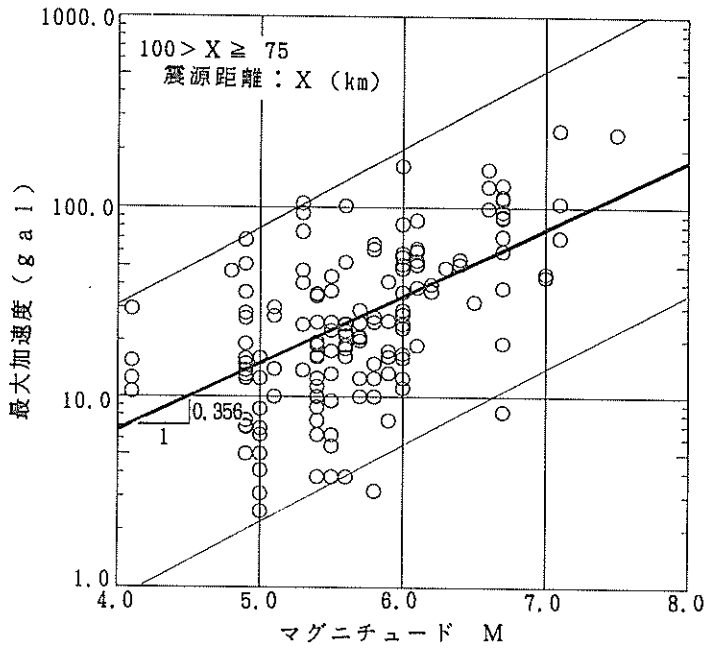


図-3-16 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係
($100 > X \geq 75$)

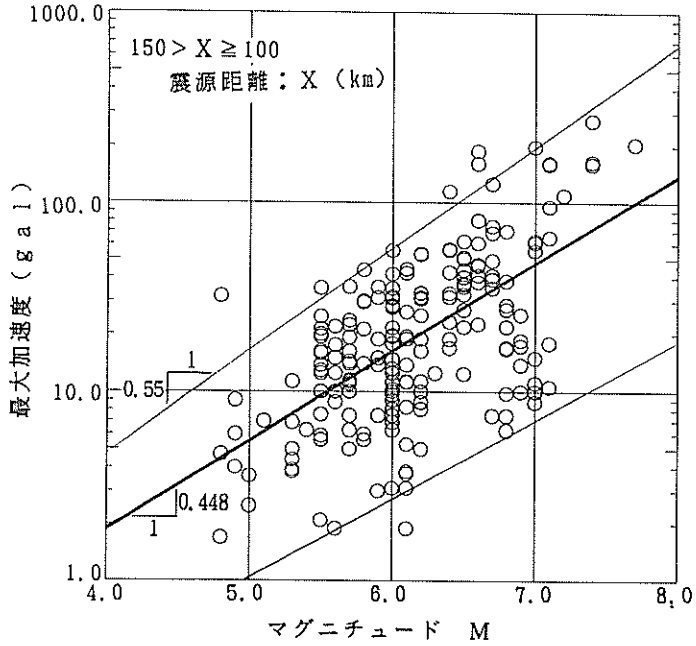


図-3-17 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係
($150 > X \geq 100$)

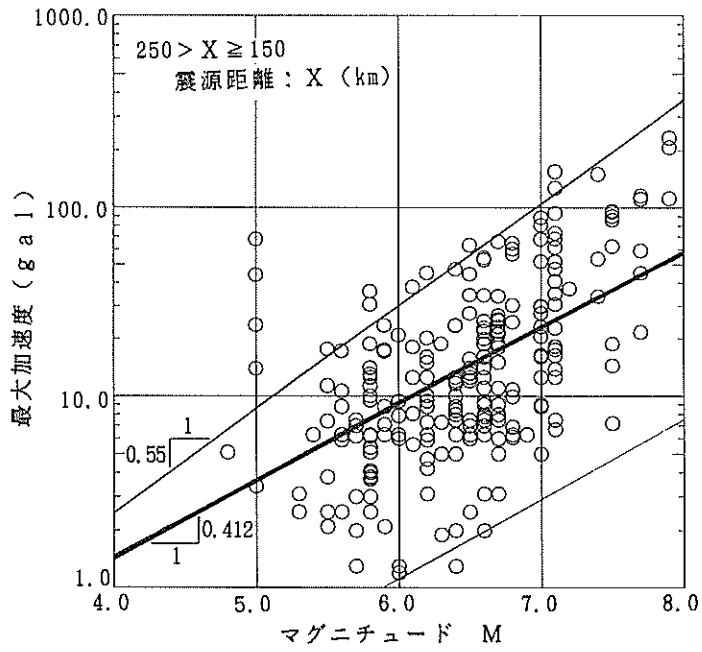


図-3-18 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係
($250 > X \geq 150$)

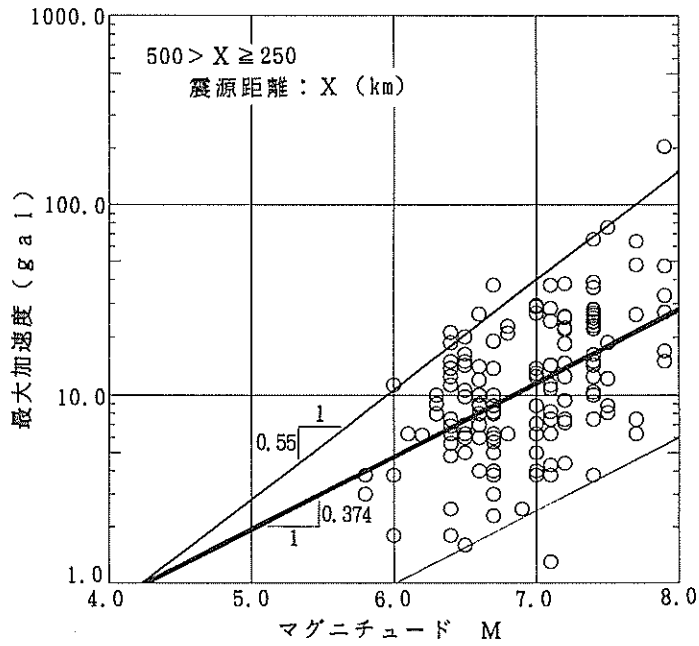


図-3-19 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係
($500 > X \geq 250$)

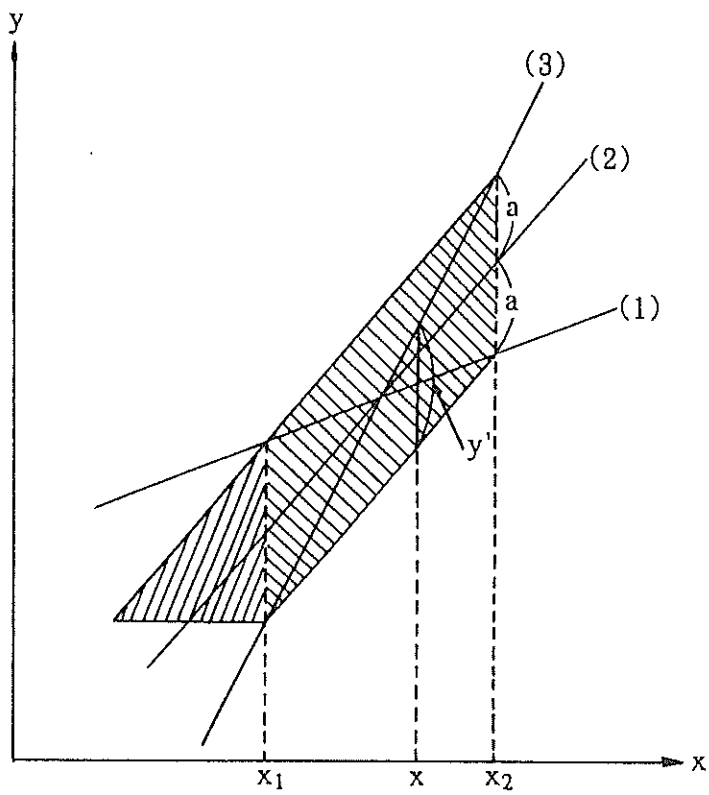


図-3-20 水平動の最大加速度とマグニチュードの関係の模式図

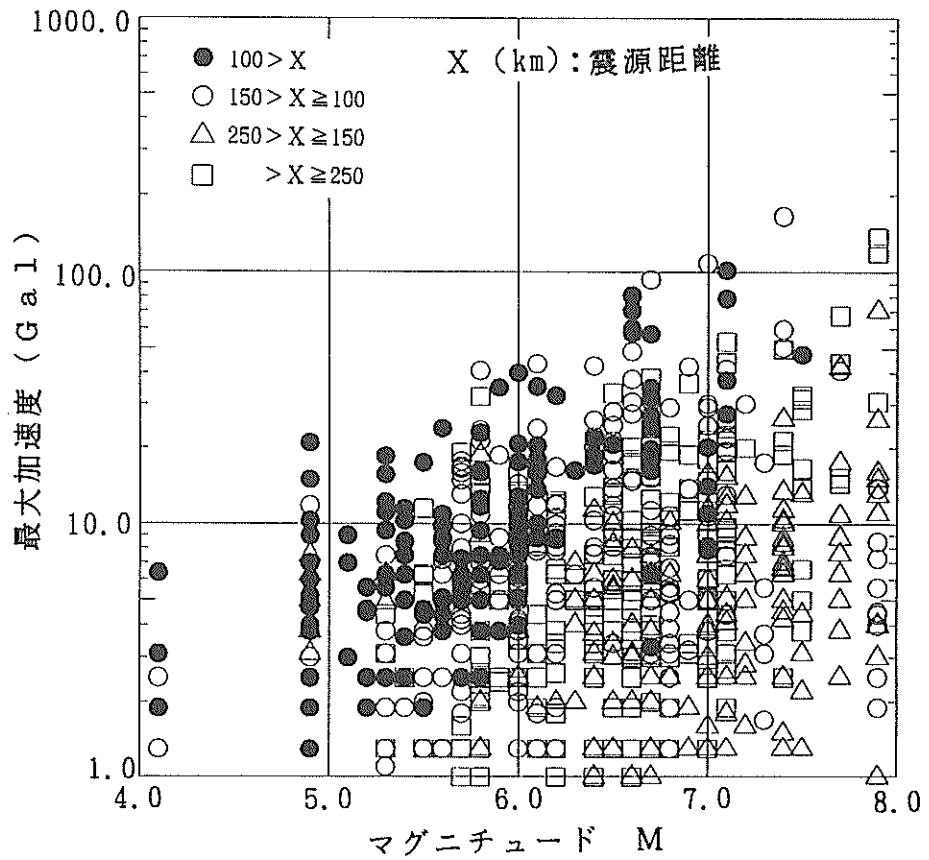


図-3-21 上下動の最大加速度とマグニチュードの関係

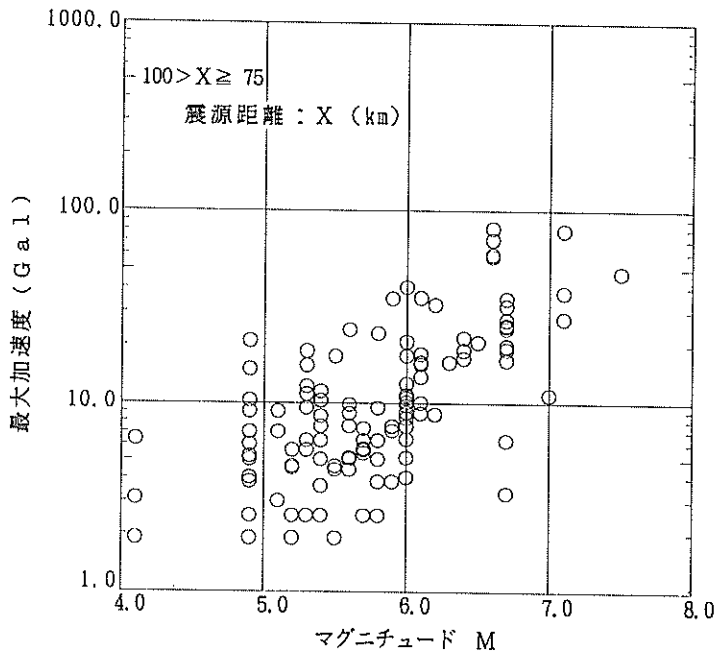


図-3-22 上下動の最大加速度とマグニチュードの関係
($100 > X \geq 75$)

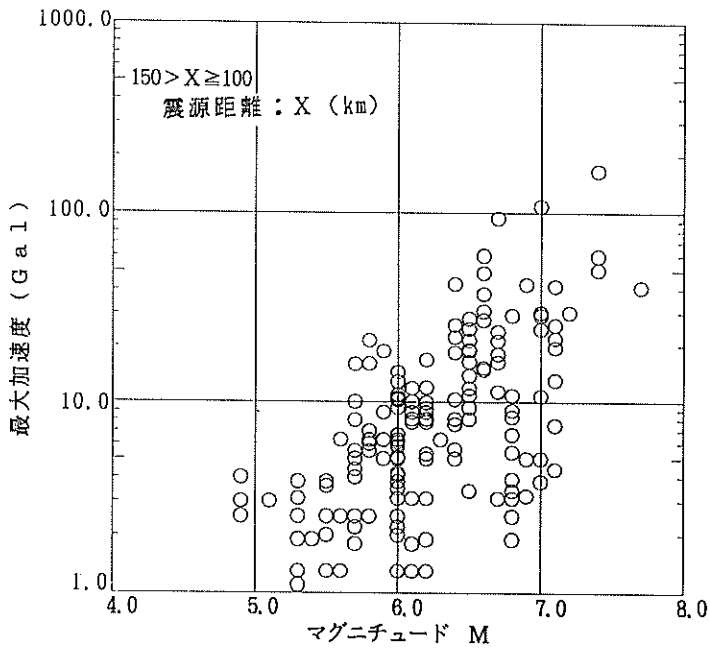


図-3-23 上下動の最大加速度とマグニチュードの関係
($150 > X \geq 100$)

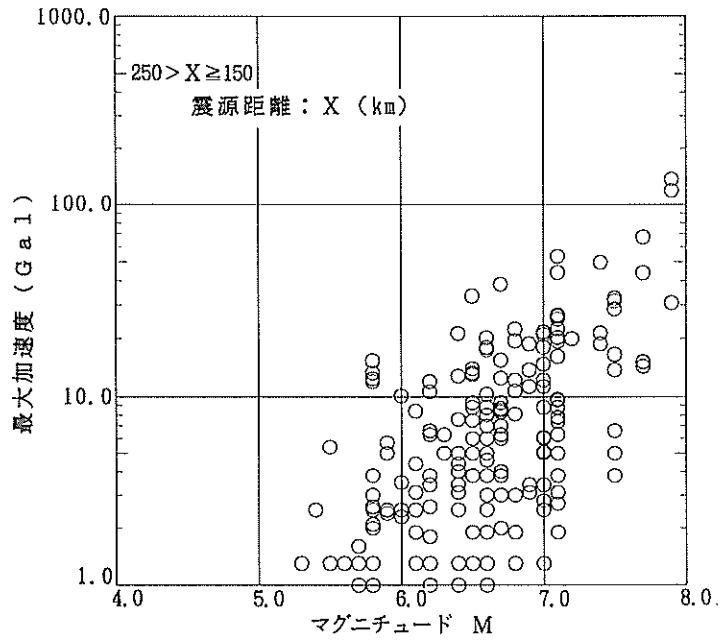


図-3-24 上下動の最大加速度とマグニチュードの関係
($250 > X \geq 150$)

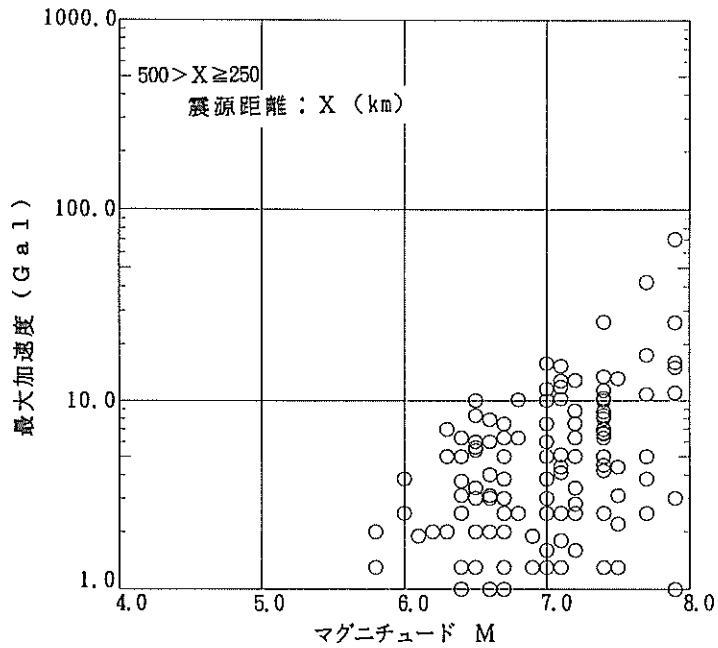


図-3-25 上下動の最大加速度とマグニチュードの関係
($500 > X \geq 250$)

4. 従来の重回帰分析の問題点

4.1 既往の研究

通常の一括回帰による重回帰分析を行うと距離減衰の勾配が小さくなる原因についての考察をしている文献としては、福島らの一連の文献^{22), 37), 25)}が挙げられる。福島らはこの論文で、Campbell²⁾が述べているように、マグニチュードと距離の間に強い相関がある場合、マグニチュードの係数と距離の係数の間は独立ではなく互いに影響しあうことを具体的に示している。さらに、マグニチュードと距離の回帰係数の値が小さくなる可能性を、乱数によるシミュレーションで発生させたデータの組の具体的な計算例を示している。その概要を以下に紹介する。

既往の研究成果から代表的な距離減衰式として、

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log X + c \quad (4-1)$$

を用いると、最小2乗法に基づいた重回帰分析手法を用いると、マグニチュードと距離の回帰係数 a , b は、以下の2次元連立一次方程式の解として求まる。

$$\begin{aligned} & a \cdot \Sigma (M_i - \bar{M}) \cdot 2 \\ & - b \cdot \Sigma (M_i - \bar{M}) \cdot (\log X_i - \log \bar{X}) \\ & = \Sigma (M_i - \bar{M}) \cdot (\log Y_i - \log \bar{Y}) \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} & a \cdot \Sigma (M_i - \bar{M}) \cdot (\log X_i - \log \bar{X}) \\ & - b \cdot \Sigma (\log X_i - \log \bar{X}) \cdot 2 \\ & = \Sigma (\log X_i - \log \bar{X}) \cdot (\log Y_i - \log \bar{Y}) \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここで、添え字 i はデータの組を、上付きのバーは平均を示している。ここで、各変数の標準偏差と重相関係数を用いると、(2)式は、

$$\begin{aligned} b = & (a \sigma_M - \sigma_{\log Y} \rho_{M, \log Y}) \\ & / (\sigma_{\log X} \rho_{M, \log X}) \end{aligned} \quad (4-4)$$

ここに、 $\sigma_M, \sigma_{\log Y}, \sigma_{\log X}$ はそれぞれの変数の分散を、 $\rho_{M, \log Y}, \rho_{M, \log X}$ は添え字の変数同士の重相関係数をそれぞれ表している。(4-4)式から明らかなように、マグニチュードと震源距離の間の重相関係数が正の場合には、回帰係数 a の値が小さくなることにより、 b の値も小さくなるのがわかる。このことから、仮に距離減衰の勾配が小さめの値をとらない場合でも、マグニチュー

ドの回帰係数が小さめの値をとれば、距離減衰の勾配は小さくなる。図-4-1は、距離にかかる回帰係数の値が小さくなる例を示したものであり、図-4-2は、マグニチュードにかかる回帰係数が小さくなる例を示したものである。図-4-1および2は、シミュレートしたデータの組の計算例であるが、実際のデータベースを用いた解析でもこの現象が確認できるとしている。

この議論で注意を要する点は、回帰係数 a が小さく成れば回帰係数 b も小さくなることを説明しているにすぎない点であり、一括回帰による回帰係数 a がなぜ小さくなるかについては、十分な説明がなされていないのである。

そこで以下に、あらためて、距離の係数が小さく評価され易い原因についての検討を行う。検討手順は以下の通りである。

- (1) ある特定の傾向を有するデータの組み合わせ (X , Y) に対して最小2乗法による回帰分析を行った場合の若干の検討を行う。
- (2) 3章に示した、港湾地域強震観測記録のデータ間(最大加速度と震源距離, 最大加速度とマグニチュード, マグニチュードと震源距離など)の関係の特徴が、最小2乗法に基づく回帰分析に及ぼす影響を、簡単なシミュレーションにより検討する。
- (3) 実際の港湾地域強震観測のデータベースを用いて、距離減衰式に与えるデータ間の関係の影響の検証を行い、その影響を回避する方法として2段階回帰を用いた場合と、データベースを修正する方法の2通りの方法を用いた結果を示す。

4.2 最小2乗法による回帰式の検討

図-4-3に示した斜線部の平行四辺形の範囲に、データの組み合わせ (X , Y) が均等に(一様に)分布していると仮定する。強震観測データに置き換えると、マグニチュードが同じデータベースで距離減衰の勾配は等しいものの観測記録はある距離の範囲でしか得られていない場合に対応し、しかも同じマグニチュードでも最大加速度のレベルが異なる(その理由としては、マグニチュードそのものに存在する誤差や震源過程の違い等を想定できる)場合と考えればよい。もちろん、その他の条件も想定可能であるが、ここでは強震観測データへの置き換えについては固執しない。図-4-3のデータの組み合わせに対して線形回帰計算を行うと、回帰式となる可能性は図中に示した(1), (2), (3)の3つの直線がある。これらの各式にたいする残差平方和を計算すると、図-4-3の下に示した結果となり、図中の(2)式が最小の残差平方和をとる回帰式として求まる。すなわち、図-4-

3のような平行四辺形（あくまで、 x の幅が規定される四辺形であること）の場合には、強震観測データに置き換えた場合に、距離減衰の勾配は、正しい値（減衰傾度）が正しいとした場合）が回帰により得られる。

4.3 データベースの分布の特徴との関係

3章での港湾地域強震観測データベースの検討から、個々のデータ間には以下のような特徴があることが明らかにされた。すなわち、最大加速度と震源距離の間には、

- ① 震源距離は50km 付近より小さい値は非常に少ない。
- ② 約2Galを境として、それより小さいデータは非常に少ない。

という特徴があり、図-4-4（図-3-9の再掲）のような分布の特徴が示される。前項の図-4-3と図-4-4との違いは、強震観測データベースの面から述べると最大加速度に下限があることに対応している。図-4-3の場合には、データが均等に分布していることという仮定のもとではあるが、回帰分析からは、同図中の(2)式が求まるが、図-4-4のように、下側の三角形の部分加わることにより回帰式の傾きは図中の(1)式と(2)式の間になることがわかる。最大値の包絡線の傾きが真の距離減衰の勾配に近いとすると、回帰式の距離減衰の勾配は、小さい値を与えやすいことになる。

最大加速度とマグニチュードの関係の場合にも、最大加速度の下限値が存在するために、データの分布は図-4-4の勾配を正負に変換したものである図-4-5（図-3-15の再掲）のような形になることが3章の検討で明らかとなっている。前項と同じ原理で、これらのデータベースから回帰式を求める場合には、図中の(2)式（最大値の包絡線に近い傾き）と(1)式の間傾きとなる。真の値に近いと考えられる最大値の包絡線の傾きと比べると、小さい傾きを与える。

マグニチュードと震源距離の関係についても、すでに3章の検討で明らかなように、両者の間には強い正の相関があり、両者の関係の相関係数と線形回帰式が求められている。ただし、これらのことが直接、回帰係数の値の低下に影響することを説明するものではない。

これまでに示した港湾地域強震観測のデータベースのデータ間の分布の特徴が最小2乗法を用いる解析に与える影響は、データベースの各データ間の特徴が図-4-4と図-4-5のように表されることに要約できる。図-4-3との違いは、いずれの場合も最大加速度の下限値が存在する点である。以下において人工的に作成したデータベースを用いて、このことについて具体的な計算例を確認する。

現実のデータベースは、図中に示した斜線部のような領域に、なんらかの原因でデータはばらつくものであり、その原因としては、

- 1) マグニチュードの値そのものにばらつきがあること。
- 2) 距離減衰そのものに種々の原因でばらつきがあること。

などがある。ただし、これらの誤差は偏差として表れる誤差ではなく、真なる値を中心にばらつくと考えてよい。そこで、データベースをシミュレートする場合もこれらのばらつきを考えて作成した。

まず、真の距離減衰式として以下の2つの式、すなわち、

$$\log Y = 0.544 \cdot \underline{M} - 1.898 \cdot \log X + 1.940 \quad (4-5)$$

$$\log Y = 0.513 \cdot \underline{M} - 1.8 \cdot \log (\Delta + 30) + 1.945 \quad (4-6)$$

の2式を用い、上記の2つの原因を想定して上式のアンダーラインで示した各係数にばらつきを考え、データベースはこれらの式上に均等に分布していると仮定する。ただし、シミュレートしたデータベースには、図-4-3と図-4-4のような分布上の特徴を持たせるものである。このように作成したデータベースを用いて回帰分析を行い、距離に関わる回帰係数の真の値（ばらつきを持って与えた係数の平均値）と計算結果の比較をする。

マグニチュードは7に固定し、震源距離に関する仮定として50km以内の観測記録はないものとする（図-4-4の x_i に対応する）。最大加速度の最小値はここでは10Galを仮定した。ただし、図-4-3に対応する条件（理想的な場合には、正しい距離減衰の勾配が求まる場合に対応するもの）として、震源距離が500kmを越える観測記録はなく、最大加速度の下限値は存在しない場合を考えるものとする。上記1)のばらつきの原因は、マグニチュードの値は7であっても真の値はばらつきがあることであり、以下のような値を仮定する。

$$M = 7.6 = (7 + 0.6)$$

$$M = 7.3 = (7 + 0.3)$$

$$M = 7.0 = (7.0)$$

$$M = 6.7 = (7 - 0.3)$$

$$M = 6.4 = (7 - 0.6)$$

上記2)のばらつきの原因は、マグニチュードは真の値が与えられている場合に、距離減衰の勾配が、各地震により異なることを表しており、以下のような値を想定する。

- $b = 2.498$
- $b = 2.198$
- $b = 1.898$
- $b = 1.598$
- $b = 1.298$

このような真の値がばらついていることを、図-4-4の斜線部のようなデータのばらつきの原因とする。

検討は表-4-1に示す8ケースについて行った。データベースは、(4-5)と(4-6)式の距離減衰式を各係数を上記の各数値で修正した式上に均等に分布しているものとしている。このようにして、8つのケースについてデータベースを作成し、最小2乗法による回帰分析を行い、回帰式の距離減衰の勾配の値がどのように変化するかを調べた。

図-4-6~13にはシミュレートしたデータの分布と、回帰分析により得られる回帰式を示したものである。図中の細い実線で示した5つの距離減衰式上(破線の部分はデータの範囲外と仮定)にデータが均等にばらついていると仮定しており、求まる回帰式は太い実線で示している。回帰式の計算結果は表-4-2にまとめて示している。図-4-3に対応するケース2, 4, 6, 8では、回帰式の距離減衰の勾配は平均値を再現している。一方、図-4-4に対応するケース1, 3, 5, 7では、回帰式の距離減衰の勾配はいずれもデータベースの平均値を下回る値を与えている。以上の結果から、マグニチュードの誤差や距離減衰の勾配そのものにばらつきが存在することよりも、最大加速度の下限値が存在すること距離減衰の勾配を小さくする大きな原因の一つと言える。

統計的に見ると、 x 軸上である分布を持っている母集団の一部を取り出して検討することを、現在の距離減衰式に関する研究では行わざるを得ない。 x 軸上のある部分を取り出す際に、取り出した範囲で均等にデータを抽出することができればよいが、図-4-4の場合のように震源距離が大きい部分(図-4-3からの追加分)での Y 軸上の分布を均等に取出していない(Y 軸上である限界値以下のデータを強制的に取り除いている)。その結果、母集団の特性を誤って予測する結果となっている。この観点から、4.1で示した福島らのシミュレーションデータセットを見ると、横軸上でのサンプルの抽出に偏りがあり、その結果推定値に誤差が生じているものと考えればよい。ただし、ここでの議論は彼らのシミュレートしたデータベースに問題があるというより、現実の強震観測データベースの多くが、最大加速度の下限値の問題から、そのような状態にあることを認識すべきであることを示している。

図-4-5の場合にも、全く同じことが起こっており、横軸であるマグニチュード軸上でのサンプリングに偏りがある部分が存在し、そのために、最小二乗法により得られる回帰式には偏りが生じる。

4.4 港湾地域強震観測のデータベースでの検討

以上の議論により、距離減衰の勾配の過小評価の最も大きな原因は、データベースの分布にあるらしいことがかなりの程度明らかにされた。そこで本節では、この議論の妥当性を実際の強震観測データベースを用いて確認する。

港湾地域強震観測のデータベースの最大加速度と震源距離の間の関係は3章に示しているように、データベースの分布に問題点がある。まず、このデータベースを用いて、一括回帰による重回帰分析を行い、距離減衰式を求める。距離減衰式の形として以下の3つの式を用いる。

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log (\Delta + 30) + c \quad (4-7)$$

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log X + c \quad (4-8)$$

$$\log Y = a \cdot M - \log X - b \cdot X + c \quad (4-9)$$

ここに、 Y :最大加速度 (Gal), M :気象庁マグニチュード, Δ :震央距離 (km), X :震源距離 (km), である。一括回帰の結果、各回帰係数および相関係数は、表-4-3に示す結果のうち一括回帰の結果の欄に示されるように求められた。

さて、回帰分析手法による違いが、さきに述べたようなデータベースの問題とすると、その解決方法として、Campbell²⁾が述べているように、データベースの不都合な部分を削除する方法がある。この場合、距離減衰式の勾配の過小評価がデータベースに起因するものであれば、この方法で解は改善されなければならない理屈となる。逆に言えば、除去したデータが確かに距離減衰の勾配の低下の原因でないと、解は改善されない訳である。

今、次の4通りのデータベースを作成する。

ケース1 …… データを削除しない場合。

ケース2 …… 震源距離が500km以上のデータを全て削除する。

ケース3 ……

$M > 7$ 震源距離が500km以上のデータを削除

$7 > M > 6$ 震源距離が350km以上のデータを削除

- 6 > M > 5 震源距離が200km以上のデータを削除
 5 > M 震源距離が100km以上のデータを削除

ケース4 …… M < 6のデータを削除した場合

このような条件で、一括回帰による重回帰分析を実施した。その結果は、表-4-4に示す通りである。これらの距離減衰式を、先に表-4-3に示した上から2段目の2行目に示す2段階回帰により求められた次式

$$\log Y = 0.544M - 1.898 \log X + 1.940 \quad (4-10)$$

と比較すると理解されるように、ケース1からケース4にデータの削除の割合が増加するにしたがって、結果は改善する傾向にある。

これより判断するに、データベースの分布の特徴が距離減衰の勾配の過小評価の一因となっていることは間違いないといえる。

4.5 一括回帰と二段階回帰との比較

既往の研究の章において述べたように、Joyner and Boore²³⁾や安中ら²⁴⁾が用いている2段階回帰による回帰分析を行うと、距離に関わる回帰とマグニチュードに関わる回帰を分離した検討が可能である。この方法によれば、距離の項の係数とマグニチュードの項の係数の依存関係についての問題点は解消できる。

彼らの用いた二段階回帰手法では、例えば(4-8)式を距離減衰式として用いる場合に、まず第一段階の回帰式として次式を用いて重回帰分析を行い、距離減衰に関わる回帰係数 b と、各地震ごとに求める回帰係数 α_i を求める。

$$\log Y = \sum \delta_{ij} \cdot \alpha_i - b \cdot \log X \quad (4-11)$$

ここに、添え字 i は地震の番号に対応しており、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。この手法は一段階の回帰では個別の地震毎に1なるダミーの変数を導入し、各地震毎に得られている観測記録（この場合には最大加速度の観測記録）の平均レベルを α_i として求めるものである。マグニチュードに関わる係数は、一段階で求める各地震毎の回帰係数である α_i とマグニチュードを用いて、次式で表される第2段階の回帰計算を行うことにより求める。

$$\alpha_i = a \cdot M_i + c \quad (4-12)$$

このような2段階回帰手法を用いて、同じデータベースから回帰式を求めた結果を表-4-3に示してある。先に示した一括回帰による値と比べると、距離減衰の勾配が大きくなっている。図-4-14は水平動についての、両解析手法による計算結果の比較を観測値とともに示したものである。図-4-15は同じく上下動について示したものである。

この方法では、距離減衰の勾配 b は、個別の地震ごとに回帰式を計算し求めた距離減衰の勾配の平均値とほぼ同じと考えてよい。震源距離と最大加速度の関係からは、一括回帰による方法の場合には同一のマグニチュードの記録は同じデータの組と考えられるが、上記の二段階回帰による方法の場合には同一のマグニチュードの場合にも地震ごとに別のデータの組となる。このことは、本章のこれまでの検討の中で調べてきた図-4-4や図-4-5などのデータの組のばらつき幅に、一括回帰による方法と二段階回帰による方法との間に違いがでることとなって表れる。すなわち、一括回帰の場合にはばらつき幅が大きく、二段階回帰の場合にはばらつき幅は小さい。すでに前節で、同一のマグニチュードのデータであっても、記録にはばらつきが存在する原因を2つ、すなわち、マグニチュードの推定誤差と距離減衰の地域性があることを示したが、一括回帰の場合には対象となる地震の数が多いことからばらつきは大きくなる傾向にあると言える。二段階回帰の場合には距離減衰の地域性やマグニチュードの推定誤差は、個別の地震ごとに回帰する手法と同じ手法であるので、前節までで示したような距離減衰の勾配の推定誤差はもたらされない。ただし、今回用いているデータは、地盤種別を無視した地表でのデータを計器特性の補正をしないで用いており、これによるばらつきが存在することが考えられる。このような地盤種別や計器特性に対する補正に関するばらつきは一括回帰の場合も同じであり、前述の2つの原因と合わせてばらつきが大きくなっていると考えられる。

以上の検討から明かにされたように、個別の地震毎に回帰式を計算することにより、データベースに含まれるマグニチュードと震源距離の相関が断ち切られるために、妥当な回帰結果が得られる。しからば、個別の地震毎に回帰式を計算する代わりに、マグニチュード毎に回帰式を計算しても同様の結果が得られるのではないかの疑問も発生するであろう。この点に関する参考資料を付録Bに示す。この参考資料からは、マグニチュード毎の回帰では、データ相互の相関の影響を断ち切るためには必ずしも十分ではないとの結論が得られる。

表-4-1 検討ケース

ケース	データを発生させた距離減衰式	データのバラツキの要因	データの範囲
1	(4-7)式を 基に修正した式	(1) 距離減衰の傾きの誤差	図-4-4
2			図-4-3
3		(2) Mの推定の誤差	図-4-4
4			図-4-3
5	(4-8)式を 基に修正した式	(3) 距離減衰の傾きの誤差	図-4-4
6			図-4-3
7		(4) Mの推定の誤差	図-4-4
8			図-4-3

(1) 式

- (1) $\log Y = 0.544 M - 2.498 \cdot \log X + 2.959$
- (2) $\log Y = 0.544 M - 2.198 \cdot \log X + 2.450$
- (3) $\log Y = 0.544 M - 1.898 \cdot \log X + 1.940$
- (4) $\log Y = 0.544 M - 1.598 \cdot \log X + 1.430$
- (5) $\log Y = 0.544 M - 1.298 \cdot \log X + 0.921$

(2) 式

- (1) $\log Y = 0.544 (M-0.6) - 1.898 \cdot \log X + 1.940$
- (2) $\log Y = 0.544 (M-0.3) - 1.898 \cdot \log X + 1.940$
- (3) $\log Y = 0.544 M - 1.898 \cdot \log X + 1.940$
- (4) $\log Y = 0.544 (M+0.3) - 1.898 \cdot \log X + 1.940$
- (5) $\log Y = 0.544 (M+0.6) - 1.898 \cdot \log X + 1.940$

(3) 式

- (1) $\log Y = 0.513 M - 2.400 \cdot \log(\Delta+30) + 2.831$
- (2) $\log Y = 0.513 M - 2.100 \cdot \log(\Delta+30) + 2.388$
- (3) $\log Y = 0.513 M - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$
- (4) $\log Y = 0.513 M - 1.500 \cdot \log(\Delta+30) + 1.502$
- (5) $\log Y = 0.513 M - 1.200 \cdot \log(\Delta+30) + 1.059$

(4) 式

- (1) $\log Y = 0.513 (M-0.6) - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$
- (2) $\log Y = 0.513 (M-0.3) - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$
- (3) $\log Y = 0.513 M - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$
- (4) $\log Y = 0.513 (M+0.3) - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$
- (5) $\log Y = 0.513 (M+0.6) - 1.800 \cdot \log(\Delta+30) + 1.945$

表-4-2 回帰式の計算結果

ケース	距離減衰式	重相関係数(R)
1	$\log Y = 4.276 - 1.292 \cdot \log X$	0.866
2	$\log Y = 5.531 - 1.898 \cdot \log X$	0.847
3	$\log Y = 4.623 - 1.470 \cdot \log X$	0.838
4	$\log Y = 5.536 - 1.898 \cdot \log X$	0.913
5	$\log Y = 2.960 - 0.662 \cdot \log(\Delta+30)$	0.623
6	$\log Y = 5.535 - 1.800 \cdot \log(\Delta+30)$	0.687
7	$\log Y = 4.374 - 1.291 \cdot \log(\Delta+30)$	0.788
8	$\log Y = 5.536 - 1.800 \cdot \log(\Delta+30)$	0.953

表-4-3 港湾地域強震観測の加速度データベースから求まる距離減衰式
(一段階回帰と二段階回帰による方法)

(水平方向)

式	距離減衰式	相関係数 (ρ)	標準偏差 (σ)	回帰方法
4-7	$\log Y = 0.410M - 1.332 \log(\Delta + 30) + 1.595$ $\log Y = 0.513M - 1.800 \log(\Delta + 30) + 1.945$	(0.65) 0.88(0.73)	0.34 0.35	1段階回帰 2段階回帰
4-8	$\log Y = 0.372M - 1.164 \log X + 1.420$ $\log Y = 0.544M - 1.898 \log X + 1.940$	(0.60) 0.84(0.74)	0.36 0.39	1段階回帰 2段階回帰
4-9	$\log Y = 0.340M - \log X - 0.000053X + 1.271$ $\log Y = 0.483M - \log X - 0.00123X + 0.608$	(0.59) 0.82(0.71)	0.36 0.39	1段階回帰 2段階回帰

注) カッコ内は1段階目の重回帰分析に対する重相関係数

(上下方向)

式	距離減衰式	相関係数 (ρ)	標準偏差 (σ)	回帰方法
4-7	$\log Y = 0.432M - 1.320 \log(\Delta + 30) + 0.978$ $\log Y = 0.520M - 1.742 \log(\Delta + 30) + 1.278$	(0.66) 0.90(0.73)	0.33 0.34	1段階回帰 2段階回帰
4-8	$\log Y = 0.402M - 1.174 \log X + 0.805$ $\log Y = 0.552M - 1.839 \log X + 1.238$	(0.62) 0.85(0.75)	0.35 0.38	1段階回帰 2段階回帰
4-9	$\log Y = 0.368M - \log X - 0.000069X + 0.649$ $\log Y = 0.489M - \log X - 0.00113X + 0.095$	(0.61) 0.84(0.72)	0.35 0.38	1段階回帰 2段階回帰

注) カッコ内は1段階目の重回帰分析に対する重相関係数

表-4-4 港湾地域強震観測の加速度データベースの修正により
 求まる距離減衰式

ケース	距離減衰式	相関係数
1	$\log Y = 0.372M - 1.164\log X + 1.420$	0.60
2	$\log Y = 0.382M - 1.329\log X + 1.706$	0.61
3	$\log Y = 0.503M - 1.430\log X + 1.104$	0.62
4	$\log Y = 0.532M - 1.682\log X + 1.705$	0.69

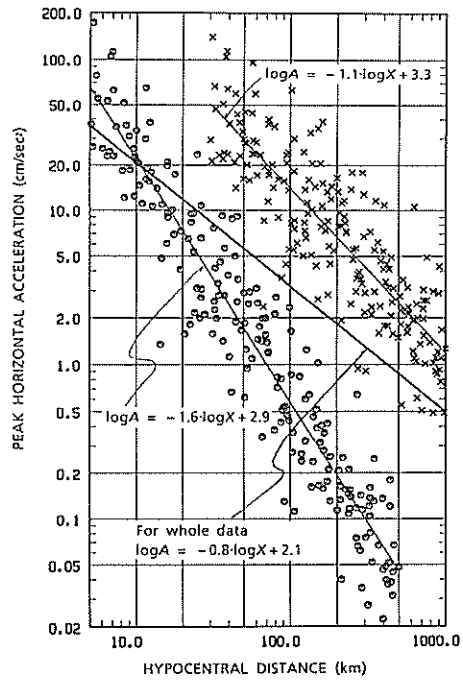


図-4-1 シミュレートしたデータの組に対し距離の
回帰係数が小さくなる例

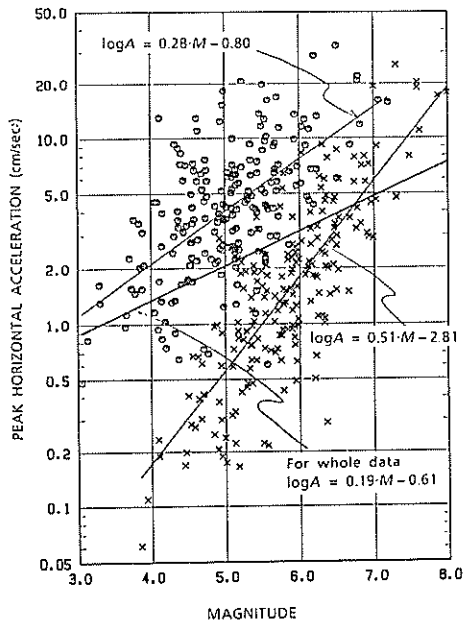
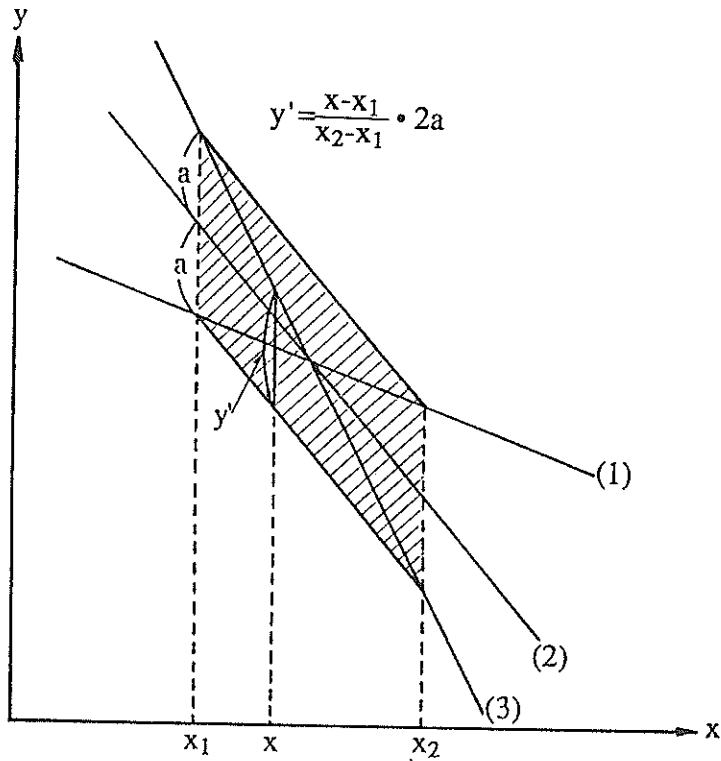


図-4-2 シミュレートしたデータの組に対し
Mの回帰係数が小さくなる例



(1), (3) 式の残差平方和 $\Sigma(s)^2$ は、

$$\Sigma(s)^2 = 2 \int_{x_1}^{x_2} \left(\int_0^{y'} y^2 dy \right) dx = \frac{4}{3} a^3 (x_2 - x_1)$$

(2) 式の残差平方和 $\Sigma(s)^2$ は、

$$\Sigma(s)^2 = \frac{2}{3} a^3 (x_2 - x_1)$$

図-4-3 最小2乗法の検討に用いたデータの組の分布の例

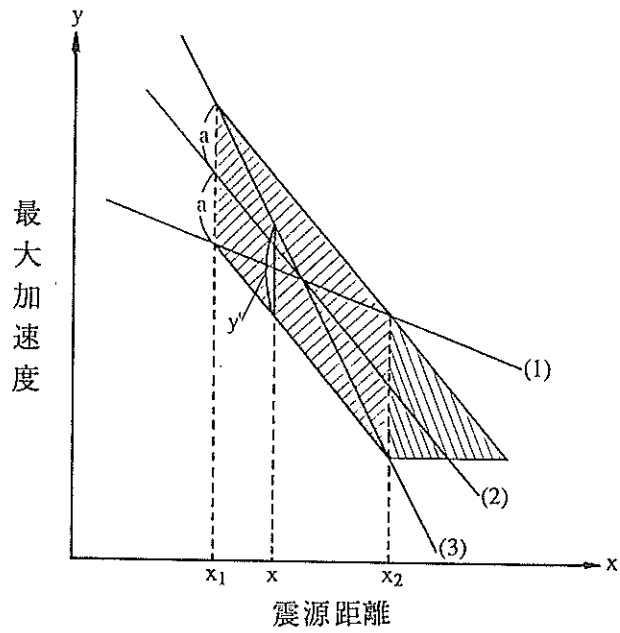


図-4-4 最大加速度と震源距離の関係の特徴

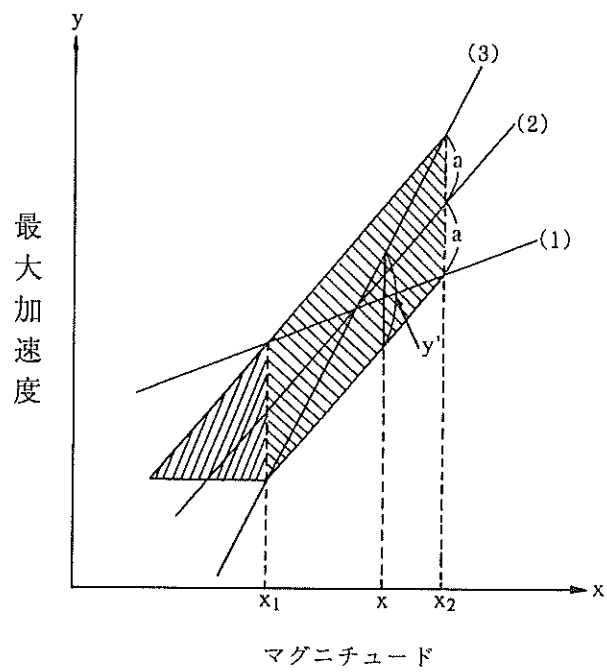


図-4-5 最大加速度とマグニチュードの関係の特徴

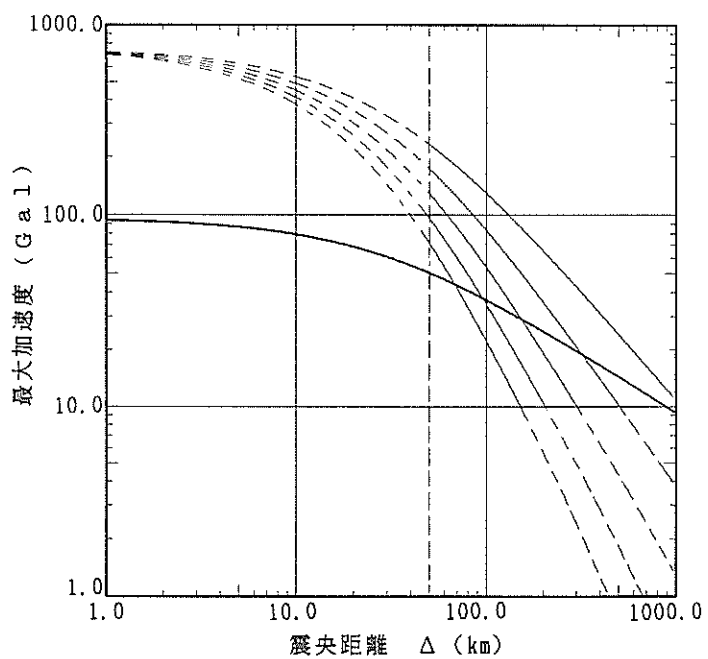


図-4-6 シミュレートしたデータの分布と回帰式(ケース1)

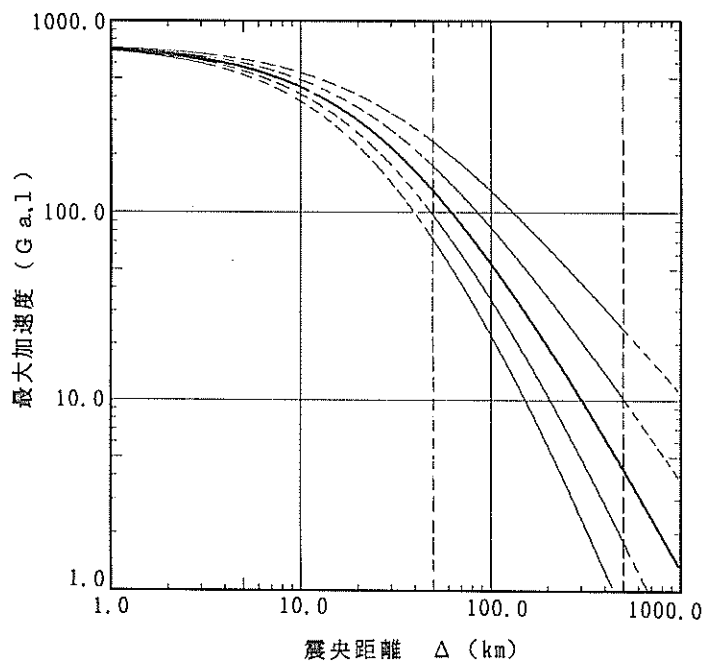


図-4-7 シミュレートしたデータの分布と回帰式(ケース2)

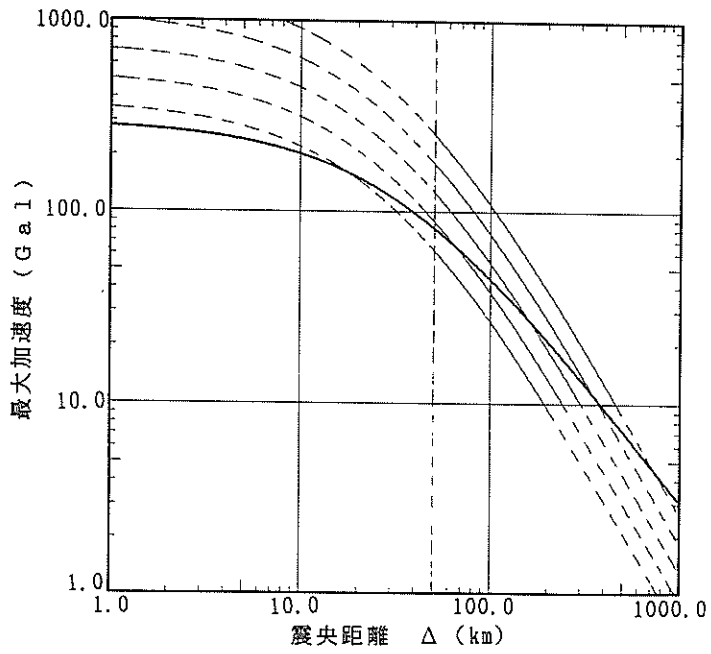


図-4-8 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース3)

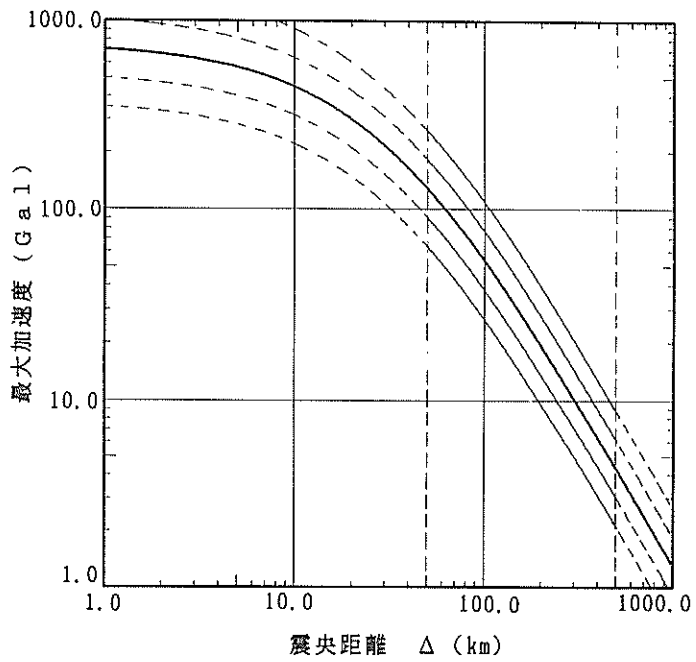


図-4-9 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース4)

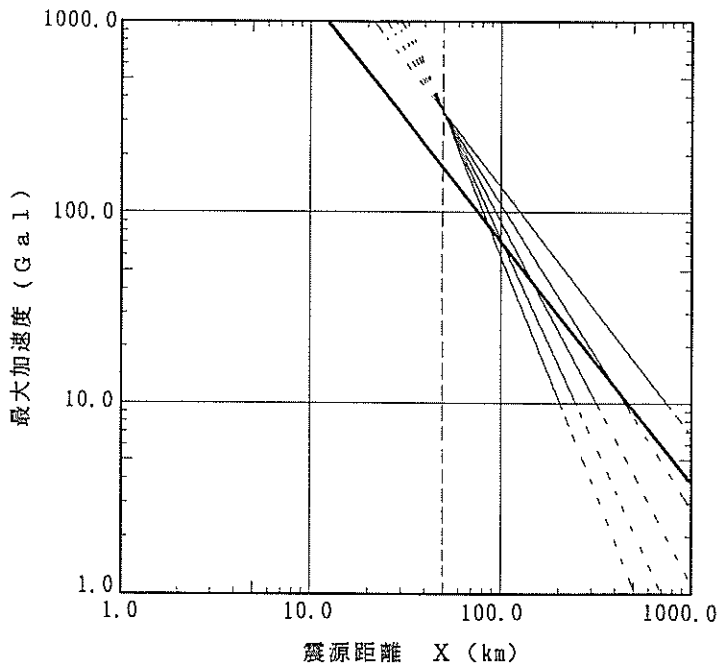


図-4-10 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース5)

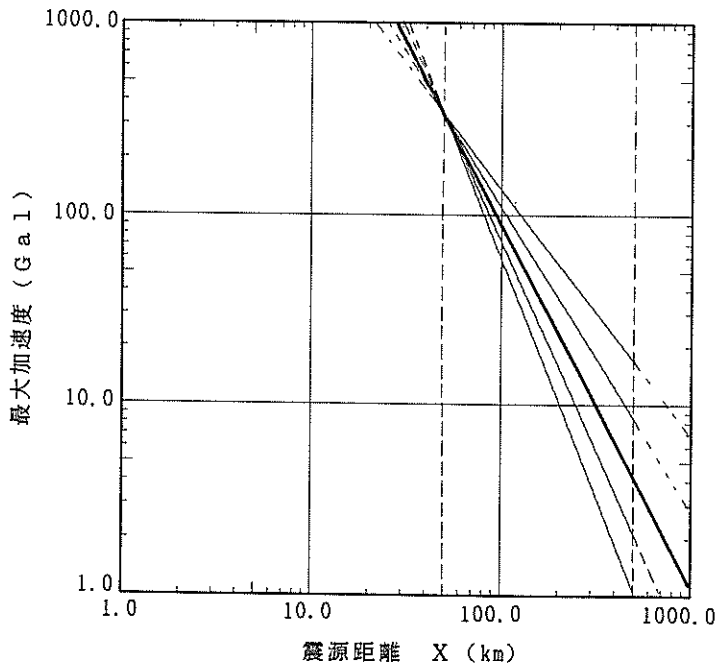


図-4-11 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース6)

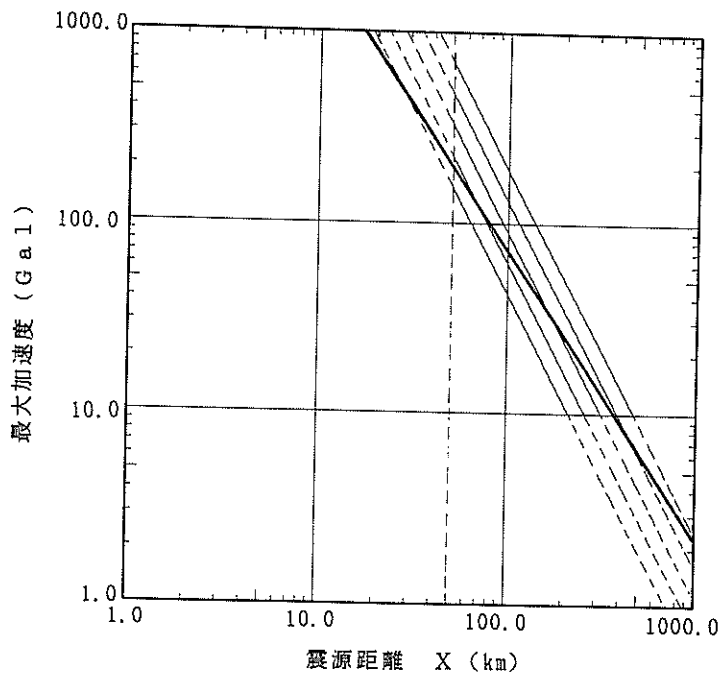


図-4-12 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース7)

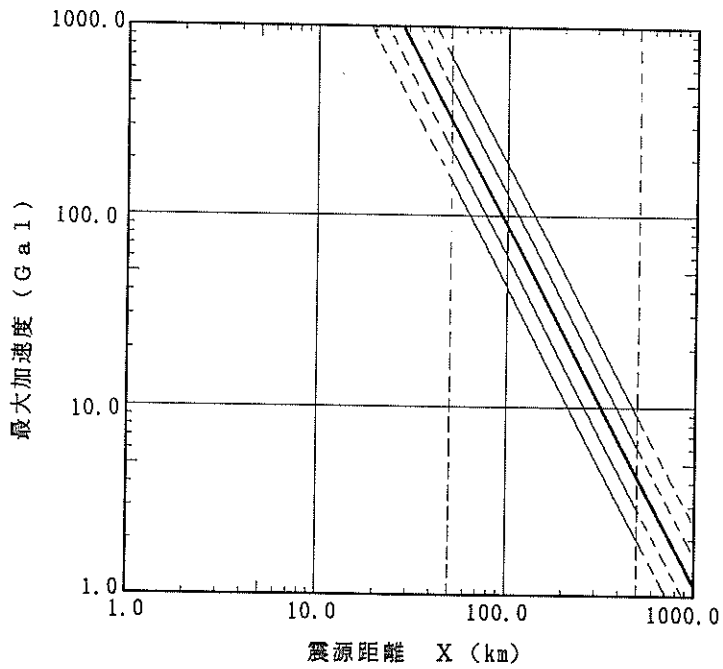


図-4-13 シミュレートしたデータの分布と回帰式 (ケース8)

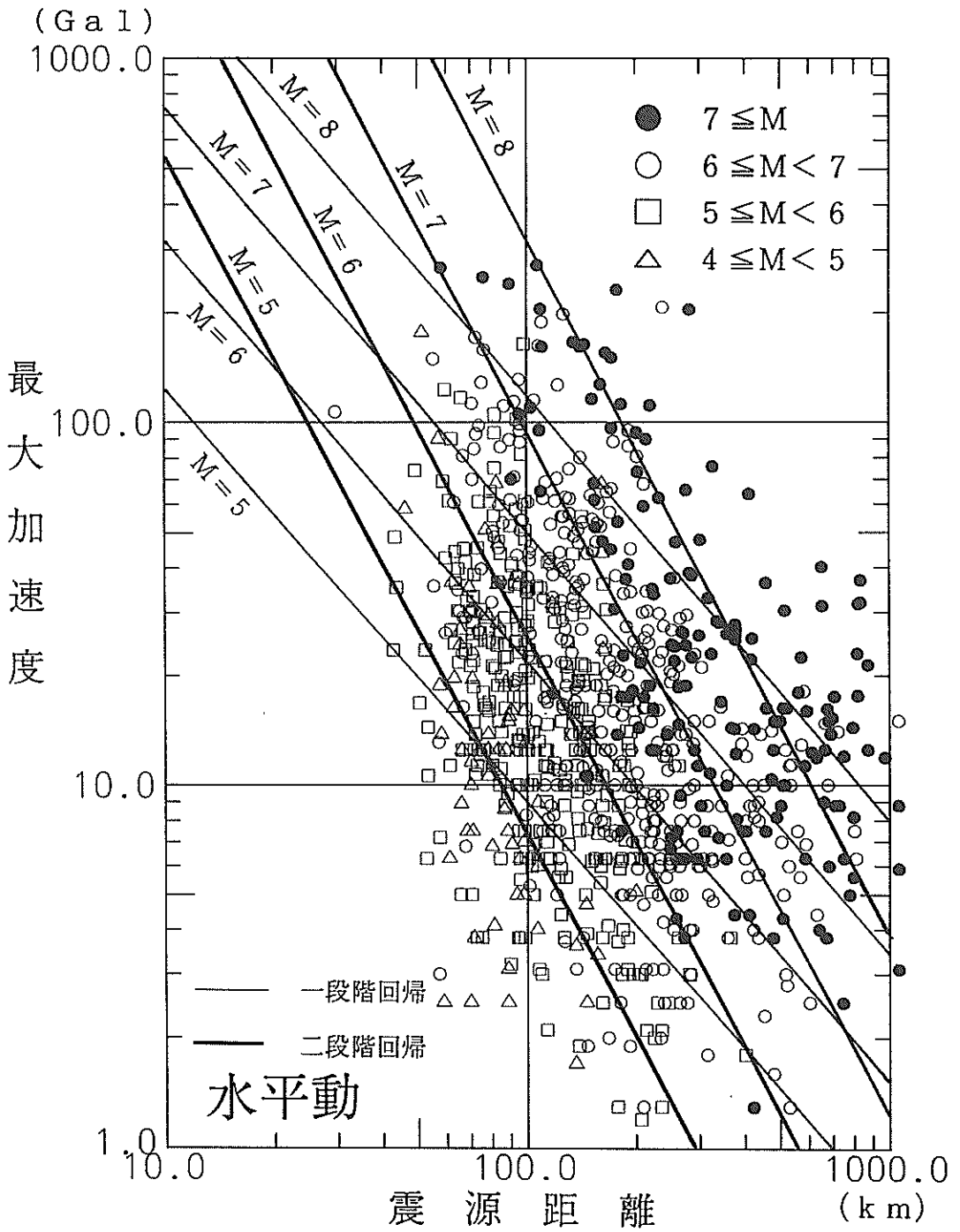


図-4-14 観測記録と距離減衰式の比較 (水平動)

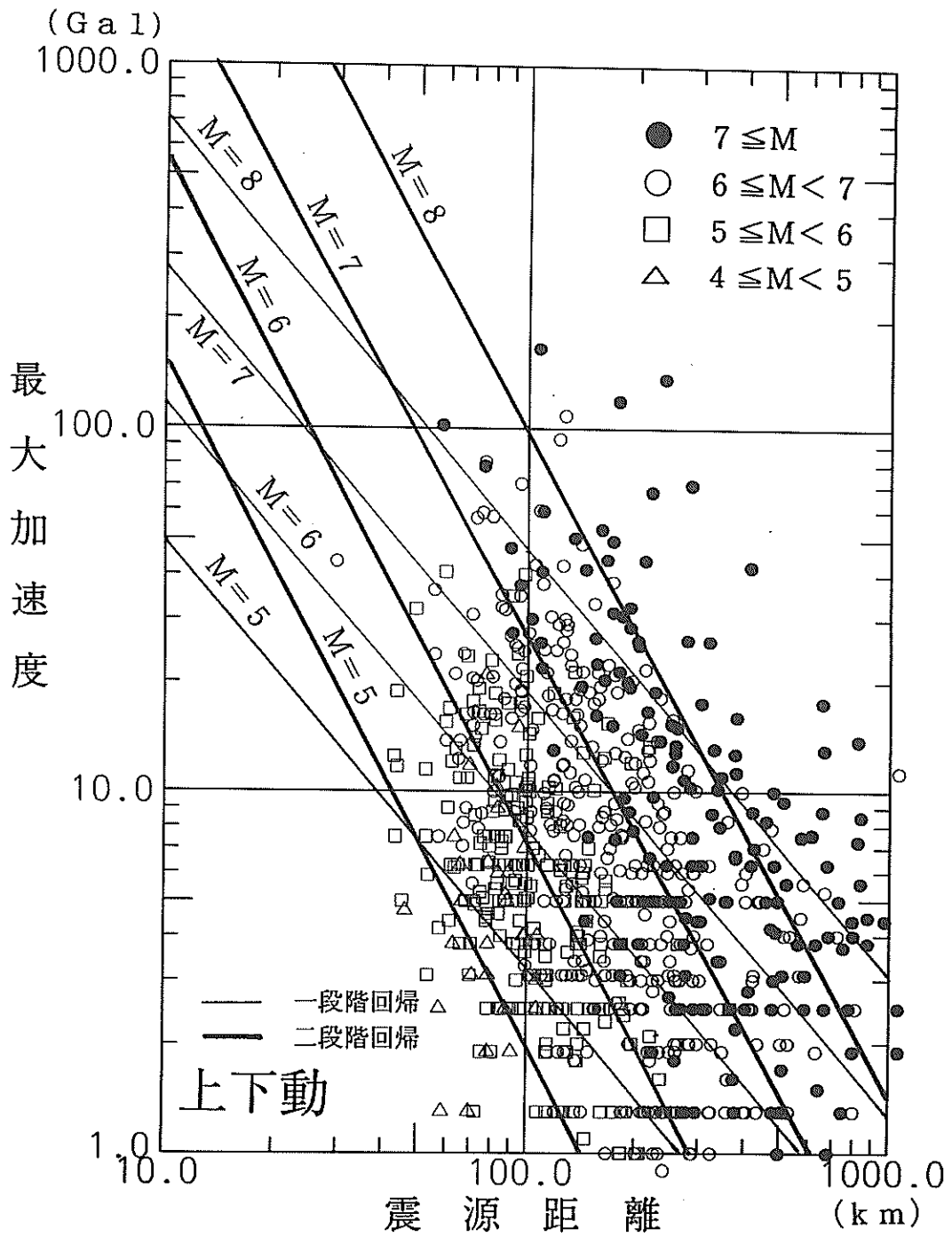


図-4-15 観測記録と距離減衰式の比較 (上下動)

5. 距離減衰の地域特性

前章では、一括回帰による方法では、距離にかかる回帰係数の評価にデータベースの持つ特徴などにより、正しい距離減衰の値が得られず、そのため、距離の回帰係数の検討と、マグニチュードの回帰係数の検討を分離することができる二段階回帰手法を用いて、水平動と上下動についての距離減衰式を求めた。ここで、二段階回帰手法を用いたのは、主として距離の回帰係数、すなわち、距離減衰の勾配の評価を個別の地震毎の値を反映する手法として選んだものである。しかし、統計解析手法として二段階回帰手法を用いると、個別の地震毎に回帰される距離減衰の勾配の値のばらつきは陽な形で評価できない。そのため、例えば、距離減衰に見られる地域特性の評価などは難しい。そこで、本章では、個別の地震ごとに震源距離と最大加速度の関係を最小2乗法により回帰し、個別の地震ごとの距離減衰の勾配についての検討を行い、その地域特性について調べる。

5.1 個別の地震毎の距離減衰の勾配

個別の地震毎に震源距離 ($\log X$) と最大加速度 ($\log Y$) の線形回帰式を計算した。回帰式は、

$$\log Y = -b \cdot \log X + c \quad (5-1)$$

である。上式の係数 b が、距離減衰の勾配である。ここでは、まず、水平動についての検討結果を示す。

計算を行ったのは、すでに表-3-1に示した各地震である。その結果を表-5-1に示す。同表中に示す N_0 は表-3-1の地震番号に対応し、 A 、 B 、 R はそれぞれ式(5-1)の係数 c 、 b 、および相関係数を示している。また、これらの結果を図で表示したものを付録Cにまとめた。

これらの結果を分析するため、マグニチュードと距離減衰の勾配 b の関係を図-5-1に、相関係数と距離減衰の勾配 b の関係を図-5-2に示す。なお、距離減衰の勾配の平均値としては1.878が得られている。図-5-1によれば、距離減衰の勾配の値には物理的に意味のない負の値((5-1)式で距離減衰の勾配にマイナス符号を付けているため負の値となっている)が得られるなど、全体にばらつきは大きい。特に、そのばらつきはマグニチュードが6以下の小さい領域で大きい。これを、図-5-2の相関係数との関係で見ると、相関係数が0.5を越える領域では、距離減衰の傾きが負の値をとるものは1ケースのみであり、ほとんどのデータが1.0を越える範囲でばらついている。負の距離減衰の勾配が得られたケースは、1ケースを除いて全て相関係数が0.5を下

回る地震である。

そこで、相関係数が0.5以上の地震についてのみ、マグニチュードと距離減衰の勾配の関係を示したのが、図-5-3である。また、参考として、相関係数が0.7以上の地震のみを示したものを、図-5-4に示している。この図からわかるように相関係数の高い地震だけを集めると、距離減衰の勾配のばらつきは小さくなる。また、距離減衰の勾配はマグニチュードには依存していないようである。これらのデータを基に、距離減衰の勾配の平均値を求めてみると、相関係数が0.5を越えるものを集めた場合に2.335、相関係数が0.7を越えるものを集めた場合に2.388が得られた。これらの平均値は、先に述べた全地震を用いた場合(1.878)に比べ、負の距離減衰の傾きの計算結果が含まれない分だけ大きな値をとる。

3章において示した港湾地域強震観測のデータベースは、個別の地震について強震観測地点の5ヶ所以上での観測記録が得られていることだけを条件としてまとめたものであり、距離減衰式の作成の観点から条件を設定して抽出したものではない。上記の結果によれば、相関係数の値が0.5に満たない地震の場合には、距離減衰の勾配が負の値を示すものもあり、データベースとして採用するには、少なからぬ問題があると考えられる。そこで、ここではまず、相関係数の値が0.5を下回る地震の特徴について簡単に調べる。

図-5-5は、相関係数が0.5を下回るものの震源位置を調べたものである。相関係数が0.5を下回る地震の多くが、関東地方を震源とするものであることがわかる。また、図中に大きな丸で示したものは、いずれも震源の深さが200kmを越える比較的深い位置に震源を持つ地震である。このように、相関係数が0.5を下回るケースが関東に震源を持つ地震に偏っていること、また、震源の深さが非常に深いものなどの、地域特性を強く反映したもの、あるいは震源特性を強く反映したものとなっている。そのため、広く一般的な日本を対象とした距離減衰式を作成する場合には、これらのデータについては除いた方がよいと考えられる。さらに、このような事実は、距離減衰式の作成にあたって、距離減衰特性の地域特性を考慮する必要性や、震源深さの影響を考慮する必要性を示すものと考えられる。

ここまでの検討は水平動についての計算結果に基づいたものであるが、上下動の計算結果についても、図-5-6~10および表-5-2(また、これらの結果を図で表示したものは付録D)に示す通りであり、水平動と全く同じ傾向にある。すなわち、

① 相関係数が0.5を下回る地震の場合には距離減衰

の勾配の値には負の値をとるものがあるなど、ばらつきが多きい。

- ② 相関係数が0.5を超えるものについては距離減衰の傾きはおおむね1.0を超えており、マグニチュードに対する依存性は見られない。
- ③ 相関係数が0.5を下回る地震の多くは、関東地方に震源を持つ地震と、震源の深さが200kmを超える深い地震であり、地域特性と震源特性を反映している。
- ④ 距離減衰の勾配の平均値を求めてみると、全地震を用いた時が1.706、相関係数が0.5を超える場合については2.110という値が得られ、相関の高いデータのみを集めた場合の方が大きな値を示している。

このように、上下動の場合も水平動とほぼ同じ傾向を示す結果が得られており、距離減衰の勾配の平均値もほぼ同程度の値が得られている。

以下の節においては、個別の地震毎に得られる距離減衰の勾配から、距離減衰の地域特性について検討した結果について示す。

5.2 距離減衰の勾配の地域特性

前節で示したように、個別の地震ごとの距離減衰の勾配を調べると、関東地方を震源とする地震の場合には相関係数が小さい。このことは、距離減衰の地域特性を考慮する必要性を示すものとも考えられる。そこで、相関係数が0.5以上の地震についてのみ、地震の震源位置を図-5-11に示すような、(1)東日本太平洋側、(2)東日本日本海側、(3)関東地方、(4)東海地方以西の4つに分類し、それぞれの地域ごとにマグニチュードと距離減衰の勾配を比較した。その結果は水平動については図-5-12~15に、上下動については図-5-16~19に示した。各図ともに、黒丸が当該地域に震源を持つ地震の観測記録から得られる値を示したものであり、白丸はその他の地域のもを示している。表-5-3および表-5-4は、水平動と上下動のそれぞれについて、4つに区分した各地域ごとの距離減衰の勾配の平均値をまとめて示したものである。同表には、参考として図としては示していない全ての地震を用いた場合の平均値と相関係数が0.7以上の場合の平均値を、地域区分しないものと合わせて示している。日本全域を4つに分類したため、地域分類が非常に大きく、細かい議論には問題があると考えられるが、各地域区分の特徴として、以下の各項目を挙げることができる。

- ① 東日本の太平洋側では、マグニチュードが7を超える大きな地震の発生も多く、距離減衰の勾配もば

らつきが少ない。距離減衰の勾配は、全体の平均値にほぼ近い値を示す。

- ② 東日本の日本海側では、地震の発生は希であるが、1983年の日本海中部地震の本震および最大余震の記録によれば、距離減衰の勾配は大きな値を示している。
- ③ 関東地方に震源を持つ地震はいずれもマグニチュードが7以下であり、距離減衰の傾きのばらつきが4つの地域分類のなかでも非常に大きい。
- ④ 東海地方以西に震源を持つ地震の記録はばらつきの少ない結果を示しているが、距離減衰の勾配の平均値でみると最も小さい値を与える。

以上のように、非常におおまかな分類ではあるが、日本を4つの地域に分類し、距離減衰の勾配についての地域の特徴を調べた。その結果、各地域ごとに距離減衰には特徴的な違いがみられることが示された。これらの結果は、距離減衰の評価に当たって、地域特性の考慮の重要性を示すものと考えられる。

なお、関東地方を震源にもつ地震の場合には、全体的に個別地震ごとに得られる距離減衰の勾配のばらつきが非常に大きく、相関係数の非常に小さいものや、距離減衰の勾配が負になる場合があるなど、他の地域とは際違った違いがみられる。

表一5-1 個別の地震毎に回帰した距離減衰式(水平動)

NO.	A	B	R	NUM. OF DATA	NO.	A	B	R	NUM. OF DATA
1	4.2035427	1.4805251	-0.8353215	7	62	8.9754372	3.2377787	-0.9068425	9
2	5.8487654	1.7177887	-0.9807182	6	63	11.5175028	4.4150887	-0.8383503	7
3	5.5448942	1.6620970	-0.7088787	6	64	6.6845913	2.5059614	-0.8904741	7
4	7.4230795	2.2901782	-0.8880922	13	65	1.8419952	1.8419952	-0.7576124	11
5	10.4892958	3.8925939	-0.8074068	66	66	6.1430844	2.0084752	-0.786124	9
6	7.0190515	2.4353809	-0.9723467	8	67	1.2990543	1.2990543	-0.6450860	6
7	4.6478901	1.5987158	-0.5393297	7	68	-2.3860942	1.5817640	-0.5435982	9
8	5.0993584	1.8333720	-0.6624502	7	69	5.1031117	1.5217690	-0.1868161	7
9	5.8533357	1.8464902	-0.7821358	7	70	9.8425170	1.5267965	-0.1988161	11
10	4.3528925	1.5668882	-0.7850140	5	71	6.4825140	2.8579921	-0.8094434	5
11	4.2526973	1.2584745	-0.7834939	5	72	4.3889360	1.8095789	-0.8652679	10
12	4.7080755	2.5982735	-0.7808329	8	73	4.8246756	1.5038319	-0.6796354	16
13	4.3920279	1.7843497	-0.8995451	5	74	-0.3511595	1.7766314	-0.6704856	12
14	4.8835273	1.4369955	-0.8319645	6	75	12.9354839	6.0542812	-0.2933719	9
15	4.7935102	1.4943886	-0.8144559	5	76	0.8019660	6.0390625	-0.3653035	6
16	0.6279966	-0.2685927	-0.1511987	6	77	1.9244709	-0.2007713	-0.1730977	9
17	11.3174047	5.5360680	-0.5962573	6	78	1.1982861	0.3733940	-0.2482314	8
18	5.8339949	1.7145233	-0.9889308	6	79	0.6485355	1.8281317	-0.5506003	9
19	6.4606161	2.7286911	-0.8498112	6	80	4.1755381	0.0311496	-0.0311496	6
20	6.0598040	2.765722	-0.7922762	5	81	7.0811825	1.4546175	-0.3592766	5
21	10.7071638	4.9967974	-0.5852979	6	82	5.5611887	2.8256731	-0.9296665	5
22	0.1970449	-0.3637924	-0.0520440	6	83	5.6807203	1.9864159	-0.8518233	8
23	7.6122293	3.1273516	-0.7507214	5	84	4.2927418	2.0685930	-0.8834515	8
24	5.0345516	1.8517519	-0.8701153	10	85	4.5764456	1.5036244	-0.8235743	8
25	5.7484150	2.1722536	-0.6764348	8	86	7.4890194	3.0843588	-0.7713210	13
26	0.7367238	-0.2431791	-0.0764042	8	87	6.9857495	3.0843588	-0.7713210	13
27	4.8689841	-0.1848844	-0.1482965	8	88	7.2443313	2.9419050	-0.9114528	5
28	4.6689841	-0.5690537	-0.5364139	8	89	4.7313089	1.4654836	-0.9446710	7
29	-1.6330510	-0.9294545	-0.0589887	6	90	8.44222593	3.5159197	-0.7569836	5
30	7.7385688	3.9279844	-0.9310984	7	91	6.1534328	2.4577398	-0.9995366	5
31	7.9930744	1.6028576	-0.6567621	6	92	5.7660685	1.9356443	-0.8818241	5
32	7.7376575	2.9737902	-0.1413780	7	93	5.1912270	1.9356443	-0.8818241	6
33	7.7514009	1.5235113	-0.1288678	5	94	11.5855207	1.5637856	-0.7547756	15
34	7.7654552	3.7532824	-0.9929244	5	95	6.1343098	4.7250242	-0.8904138	13
35	3.3584857	1.1466837	-0.6363286	6	96	6.5443888	2.4258690	-0.8131248	14
36	3.9798412	1.2941084	-0.6686996	6	97	6.7610083	2.5717899	-0.6323232	6
37	5.1230764	2.2001982	-0.8639094	12	98	13.6757727	6.5367071	-0.8567775	14
38	6.3779678	2.1745935	-0.8918451	5	99	7.2821827	3.0800276	-0.5195072	6
39	3.4956846	-0.8987786	-0.2927251	16	100	5.5673046	3.0800276	-0.5195072	5
40	3.4956846	0.8987786	-0.7024453	6	101	4.9378128	1.9216213	-0.7917495	17
41	6.6476130	2.1135118	-0.8808336	5	102	12.1082888	5.5523720	-0.9426489	13
42	8.4823112	3.6930027	-0.8424448	27	103	4.9194176	1.5230720	-0.9469946	5
43	-2.9889698	1.822786	-0.4709127	5	104	4.4229822	-0.0078855	0.0651444	5
44	6.3518744	1.8320365	-0.687474	9	105	9.0183791	1.5230720	-0.7924242	8
45	3.5079269	1.1688356	-0.5584398	5	106	7.9975973	3.0688900	-0.8531485	5
46	3.1116676	2.0089383	-0.1560316	7	107	8.5417433	3.5024185	-0.9690478	14
47	5.7507019	3.2008593	-0.5476556	6	108	6.2893761	2.2028561	-0.5694628	11
48	0.3460342	-0.320389	-0.0671660	8	109	-11.1313834	-6.8608109	-0.9465468	6
49	3.6635742	1.3271656	-0.4474830	13	110	-3.3543573	2.4635801	-0.6150899	8
50	14.1056025	6.4590502	-0.6351505	11	111	4.3446215	1.6402102	-0.2394606	5
51	6.9015827	2.6774302	-0.9656150	5	112	3.2244132	1.1971083	-0.9150931	5
52	2.0317185	0.4464602	-0.3975359	7	113	5.8559027	2.2639256	-0.7785500	6
53	7.5845861	2.5196047	-0.9643582	13	114	5.6875915	3.007631	-0.728058	9
54	3.6844311	1.9526901	-0.7165523	8	115	6.7390175	3.0570450	-0.7069848	6
55	8.3051653	2.9895353	-0.9211395	13	116	2.1359844	0.4245614	-0.9187783	5
56	8.3833094	3.1219320	-0.9127068	5	117	-3.9467497	-2.8814471	-0.1977850	6
57	5.3468419	1.9391003	-0.8884273	9	118	5.2871971	1.7754173	-0.6645409	7
58	6.3125172	2.1785345	-0.8729720	7					
59	3.7076769	1.3045616	-0.4838521	5					
60	9.0338001	3.7972193	-0.8189859	8					
61	3.9449072	1.3747921	-0.6755768	8					

表一 5-2 個別の地震毎に回帰した距離減衰式(上下動)

NO.	A	B	R	NUM. OF DATA	NO.	A	B	R	NUM. OF DATA	NO.	A	B	R	NUM. OF DATA	
1	3.9851646	1.6040049	-0.8896675	7	51	10.7945004	4.2915869	-0.8687766	7	51	10.7945004	4.2915869	-0.8687766	7	
2	5.0952854	1.5759344	-0.9714152	6	52	5.8137789	2.2984629	-0.8689252	7	52	5.8137789	2.2984629	-0.8689252	7	
3	5.7976112	2.0717869	-0.7578222	6	53	4.3628998	1.8441010	-0.8952244	10	53	4.3628998	1.8441010	-0.8952244	10	
4	8.0638399	2.7157402	-0.7950990	13	54	5.1442089	1.7791071	-0.7411867	9	54	5.1442089	1.7791071	-0.7411867	9	
5	9.7357824	3.6776972	-0.9104443	7	55	4.0823539	1.6154470	-0.9219933	5	55	4.0823539	1.6154470	-0.9219933	5	
6	9.9366414	2.1564960	-0.8598061	8	56	-5.1742368	-2.0878229	0.4167587	6	56	-5.1742368	-2.0878229	0.4167587	6	
7	3.9705896	1.5407352	-0.8870134	8	57	5.9724398	1.8015337	-0.3035836	10	57	5.9724398	1.8015337	-0.3035836	10	
8	5.2867126	2.0447512	-0.8725306	7	58	5.9555655	2.2986679	-0.9278874	14	58	5.9555655	2.2986679	-0.9278874	14	
9	8.1382160	3.0880718	-0.7927449	5	59	4.5296679	1.8344393	-0.6896344	14	59	4.5296679	1.8344393	-0.6896344	14	
10	8.9434996	3.7430992	-0.8710206	5	60	6.1940851	2.6907673	-0.5498405	10	60	6.1940851	2.6907673	-0.5498405	10	
11	3.3539333	1.0457239	-0.7294714	9	61	-1.6595971	-0.9021046	0.4411087	8	61	-1.6595971	-0.9021046	0.4411087	8	
12	6.4955033	2.7366371	-0.8055114	5	62	3.8673143	1.6522312	-0.1698975	5	62	3.8673143	1.6522312	-0.1698975	5	
13	3.4607589	1.4982395	-0.9092748	6	63	1.8994904	0.5768723	-0.4380577	7	63	1.8994904	0.5768723	-0.4380577	7	
14	4.0134381	1.8663392	-0.7514935	5	64	3.8126612	1.5350075	-0.6490664	8	64	3.8126612	1.5350075	-0.6490664	8	
15	5.0789299	1.8489114	-0.6746717	6	65	2.5800619	0.8900459	-0.3612151	7	65	2.5800619	0.8900459	-0.3612151	7	
16	-0.7036040	-0.3833834	0.3886877	5	66	2.2366533	0.6724086	-0.1794175	9	66	2.2366533	0.6724086	-0.1794175	9	
17	8.2637043	4.1691170	-0.5675354	5	67	4.6682139	1.9415789	-0.5510505	5	67	4.6682139	1.9415789	-0.5510505	5	
18	5.5799313	1.8402300	-0.9783433	6	68	6.81847584	2.7862866	-0.8876228	7	68	6.81847584	2.7862866	-0.8876228	7	
19	4.9568672	1.9124975	-0.8099145	6	69	5.5095482	2.2627068	-0.9710133	7	69	5.5095482	2.2627068	-0.9710133	7	
20	4.3529682	1.6892548	-0.7644449	8	70	1.3056030	0.2312689	-0.0879685	5	70	1.3056030	0.2312689	-0.0879685	5	
21	3.3400478	1.1378155	-0.9368742	5	71	3.7676640	1.2652092	-0.7439486	12	71	3.7676640	1.2652092	-0.7439486	12	
22	1.4469709	0.3262464	-0.1799608	6	72	4.6704817	1.8699460	-0.8704927	6	72	4.6704817	1.8699460	-0.8704927	6	
23	-2.6762371	-1.2058815	0.7836782	5	73	5.7164459	2.0625734	-0.8815776	14	73	5.7164459	2.0625734	-0.8815776	14	
24	6.0595617	2.2878714	-0.6467233	6	74	4.6039314	1.4745903	-0.8103384	13	74	4.6039314	1.4745903	-0.8103384	13	
25	3.7347984	1.6993799	-0.6961736	6	75	8.5898864	3.5517387	-0.7808971	15	75	8.5898864	3.5517387	-0.7808971	15	
26	3.4599533	1.4122019	-0.7592723	6	76	3.5670109	2.0616837	-0.7668788	13	76	3.5670109	2.0616837	-0.7668788	13	
27	3.5880642	1.3787155	-0.7913426	10	77	8.0183659	3.2953930	-0.9275481	6	77	8.0183659	3.2953930	-0.9275481	6	
28	3.1036339	1.3216572	-0.8289104	6	78	6.3676062	2.4320526	-0.7555071	15	78	6.3676062	2.4320526	-0.7555071	15	
29	3.5020208	1.9961882	-0.9194511	15	79	8.7034407	3.9980192	-0.4922877	6	79	8.7034407	3.9980192	-0.4922877	6	
30	2.6772747	0.9274346	-0.6054081	5	80	6.9030341	3.1109314	-0.5762392	5	80	6.9030341	3.1109314	-0.5762392	5	
31	4.0923462	1.3888720	-0.8026039	5	81	5.5011454	2.0371656	-0.8268769	13	81	5.5011454	2.0371656	-0.8268769	13	
32	6.4731236	2.2039228	-0.8683886	5	82	5.7120075	2.4189625	-0.9635933	5	82	5.7120075	2.4189625	-0.9635933	5	
33	3.2851353	4.2949791	-0.9159921	5	83	9.4656226	4.166079	-0.8782248	5	83	9.4656226	4.166079	-0.8782248	5	
34	6.8476665	-2.0102825	-0.5518348	9	84	3.2737093	1.4234476	-0.1695734	5	84	3.2737093	1.4234476	-0.1695734	5	
35	9.3016710	2.1573744	-0.8767668	9	85	6.3935167	2.5398064	-0.7233870	7	85	6.3935167	2.5398064	-0.7233870	7	
36	-9.4650135	-4.6250000	0.4603427	5	86	6.3055393	2.5350018	-0.9515249	14	86	6.3055393	2.5350018	-0.9515249	14	
37	1.6227883	-0.9914330	0.1009399	5	87	3.6161642	1.6153269	-0.1367053	6	87	3.6161642	1.6153269	-0.1367053	6	
38	-7.5485670	-3.5359646	0.3007084	6	88	5.2337418	2.1070795	-0.4210748	11	88	5.2337418	2.1070795	-0.4210748	11	
39	5.7077055	2.3866873	-0.8735077	6	89	4.7418541	1.7576887	-0.8246599	6	89	4.7418541	1.7576887	-0.8246599	6	
40	13.3262234	6.2886686	-0.7744672	5	90	-2.6479568	-1.9003687	0.3073706	8	90	-2.6479568	-1.9003687	0.3073706	8	
41	8.9118853	3.7499504	-0.9714524	7	91	3.9781651	1.4504395	-0.6982710	10	91	3.9781651	1.4504395	-0.6982710	10	
42	2.9707747	1.0543127	-0.7079367	7	92	2.5340977	1.0773335	-0.8907554	9	92	2.5340977	1.0773335	-0.8907554	9	
43	5.9032583	1.9948711	-0.9024999	12	93	4.1271095	1.6611023	-0.7516672	6	93	4.1271095	1.6611023	-0.7516672	6	
44	0.0045508	2.3346968	-0.6858290	8	94	7.1628361	3.2652798	-0.8272420	7	94	7.1628361	3.2652798	-0.8272420	7	
45	7.3284869	2.8573227	-0.8315737	7	95	2.3842192	1.0053291	-0.3697407	5	95	2.3842192	1.0053291	-0.3697407	5	
46	5.1198826	2.0207672	-0.7063399	8	96	8.4059743	2.8281250	-0.641955	7	96	8.4059743	2.8281250	-0.641955	7	
47	6.5860376	2.4779711	-0.8338898	7	97	3.230731	1.2757687	-0.6298082	6	97	3.230731	1.2757687	-0.6298082	6	
48	2.7537050	0.9121697	-0.4085087	8	98	-3.5544987	2.0515840	-0.8157235	9	98	-3.5544987	2.0515840	-0.8157235	9	
49	5.1876593	2.2657452	-0.7967625	8	99					99					
50	6.0509939	2.1397457	-0.7281471	8											

表-5-3 個別の地震毎に回帰して求まる距離減衰の勾配の
各地域毎の平均値（水平動）

地域区分	すべてのデータ使用	R>0.5 のデータ使用	R>0.7 のデータ使用
全体	1.878 (118)	2.335 (92)	2.388 (69)
東日本日本海側	3.829 (2)	3.829 (2)	3.829 (2)
東日本太平洋側	2.055 (42)	2.198 (40)	2.268 (35)
関東地方	1.902 (46)	2.717 (30)	2.787 (18)
東海以西	1.268 (24)	1.921 (17)	1.985 (12)

注 R：相関係数 ()内の数字はデータ個数

表-5-4 個別の地震毎に回帰して求まる距離減衰の勾配の
各地域毎の平均値（上下動）

地域区分	すべてのデータ使用	R>0.5 のデータ使用	R>0.7 のデータ使用
全体	1.706 (100)	2.110 (80)	2.241 (64)
東日本日本海側	3.218 (2)	3.218 (2)	3.218 (2)
東日本太平洋側	1.884 (38)	2.112 (36)	2.209 (31)
関東地方	1.200 (35)	1.966 (22)	2.237 (16)
東海以西	1.584 (21)	1.933 (17)	2.239 (12)

注 R：相関係数 ()内の数字はデータ個数

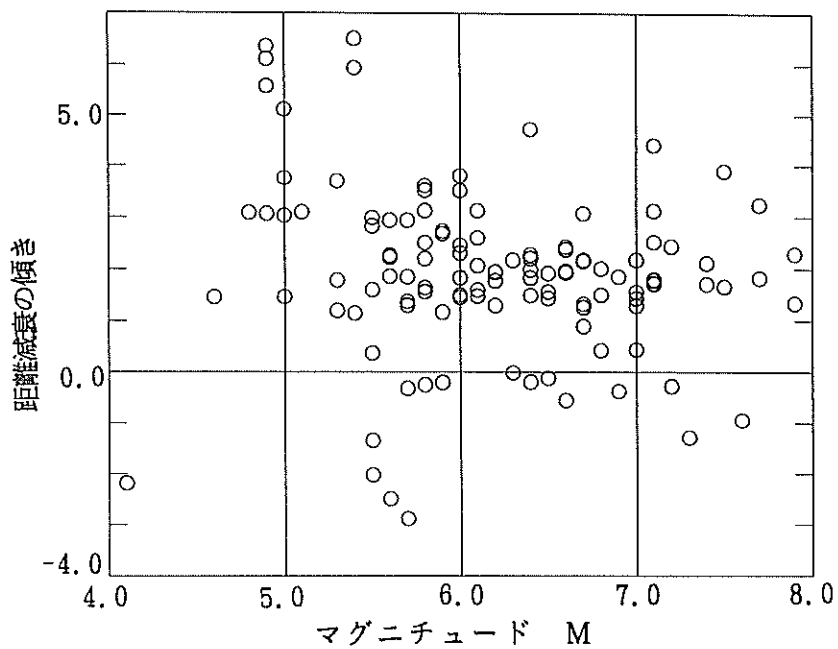


図-5-1 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(全地震, 水平動)

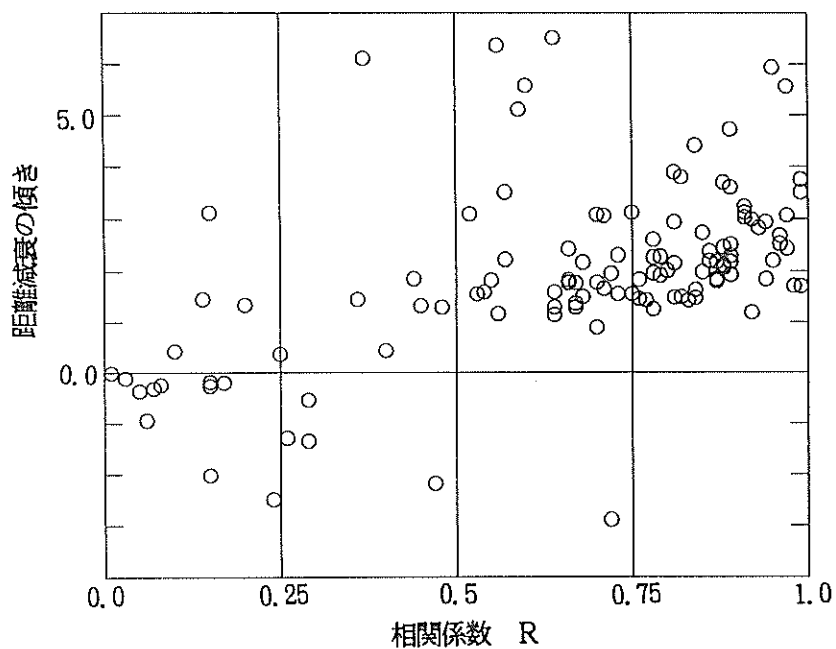


図-5-2 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配と相関係数の関係
(全地震, 水平動)

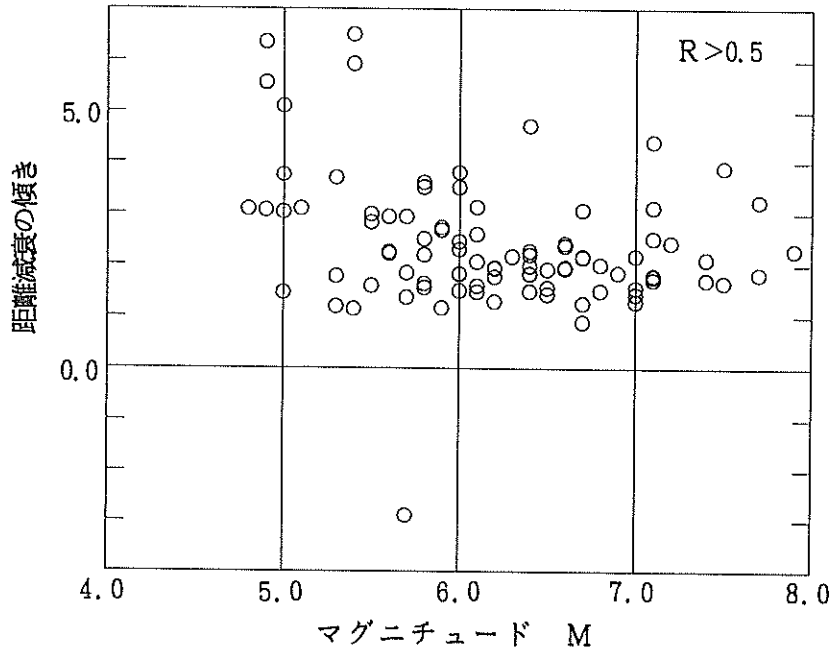


図-5-3 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 水平動)

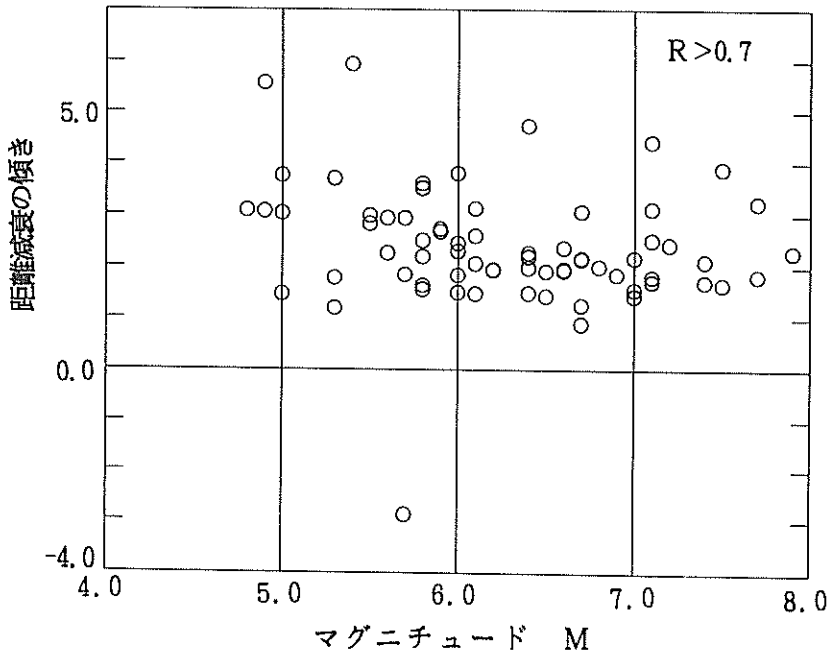


図-5-4 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配と相関係数の関係
(相関係数が0.7以上の地震, 水平動)

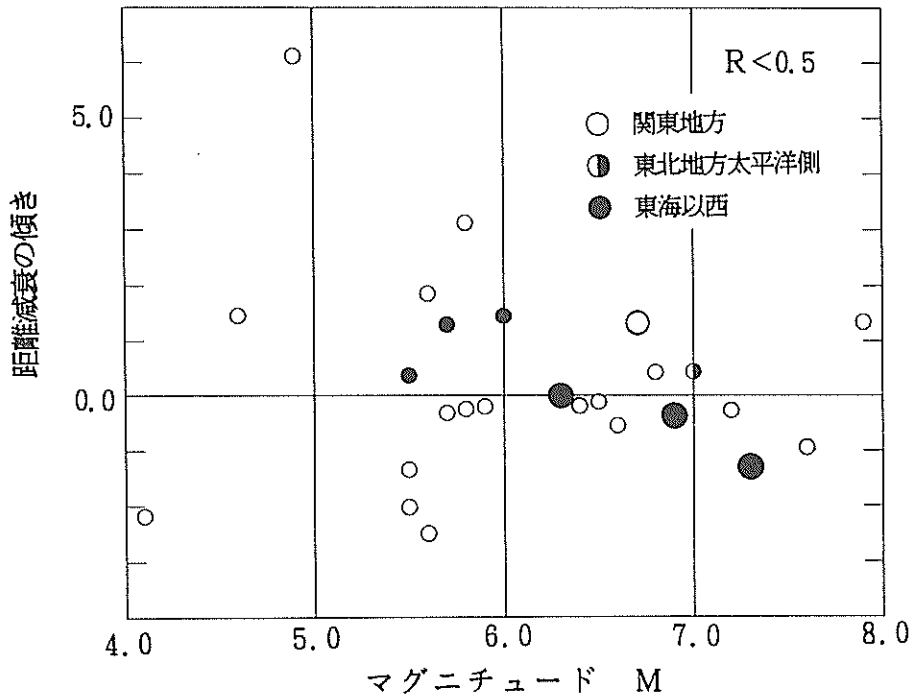


図-5-5 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係と震源位置（相関係数が0.5以下の地震，水平動）

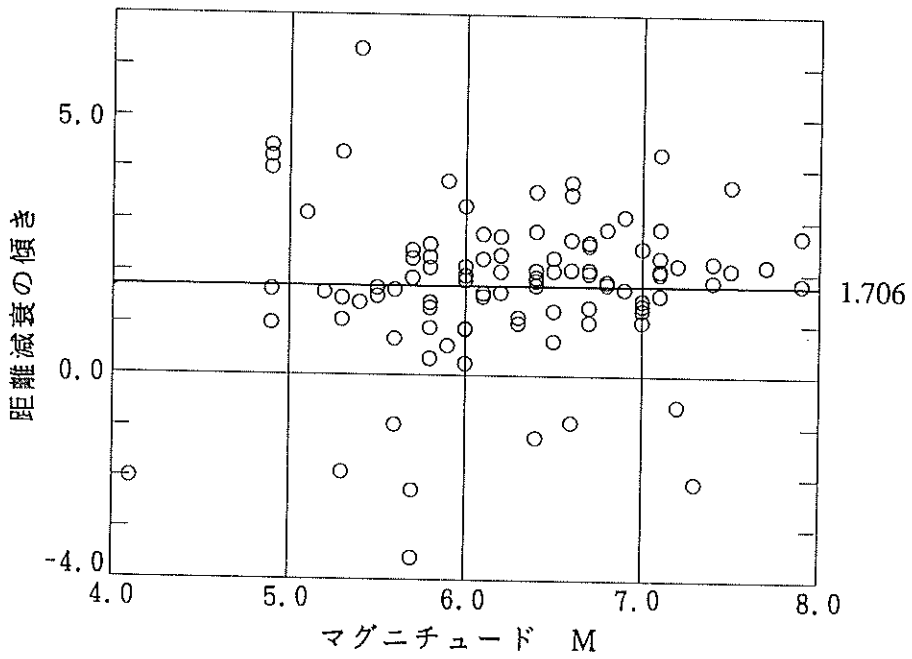


図-5-6 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(全地震, 上下動)

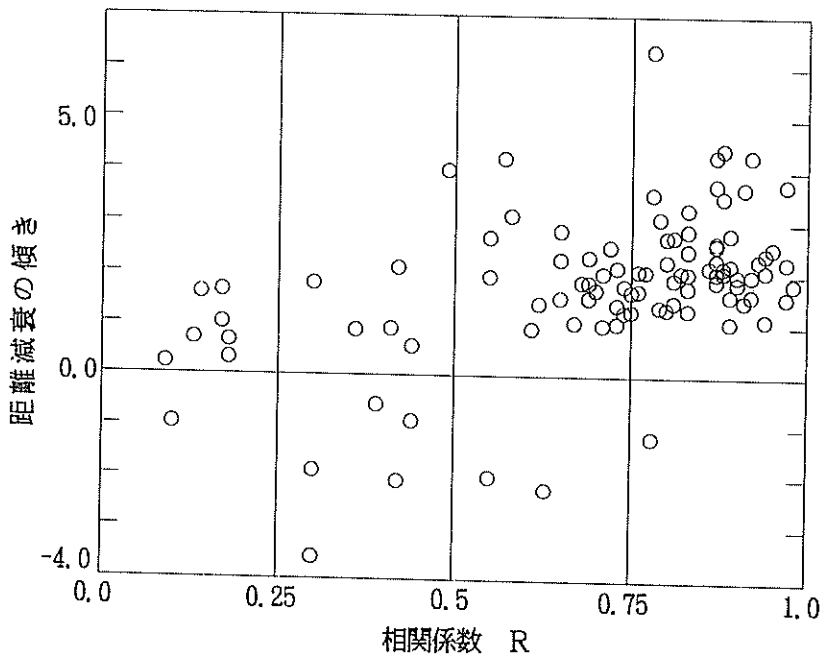


図-5-7 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配と相関係数の関係
(全地震, 上下動)

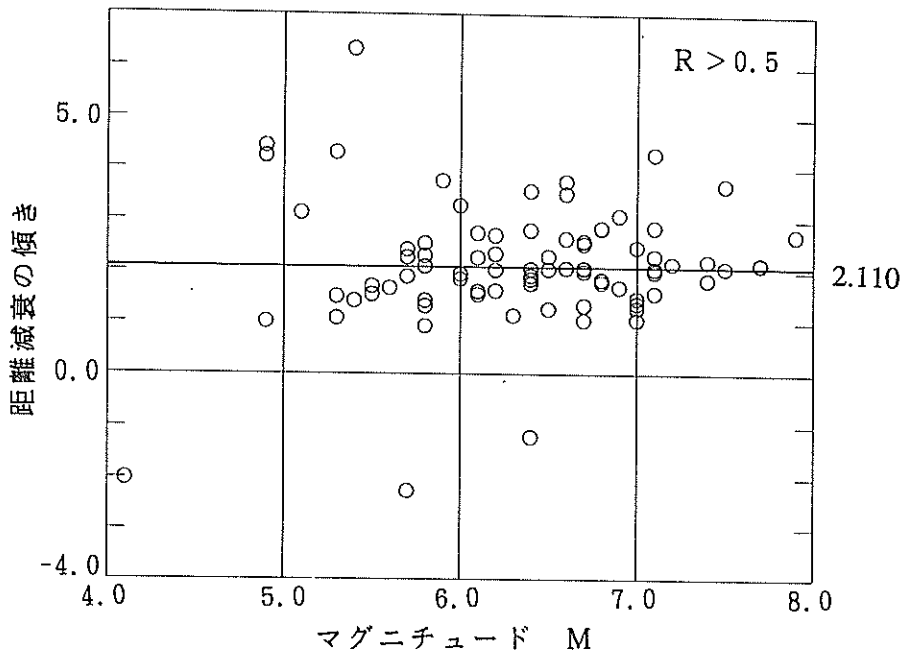


図-5-8 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 上下動)

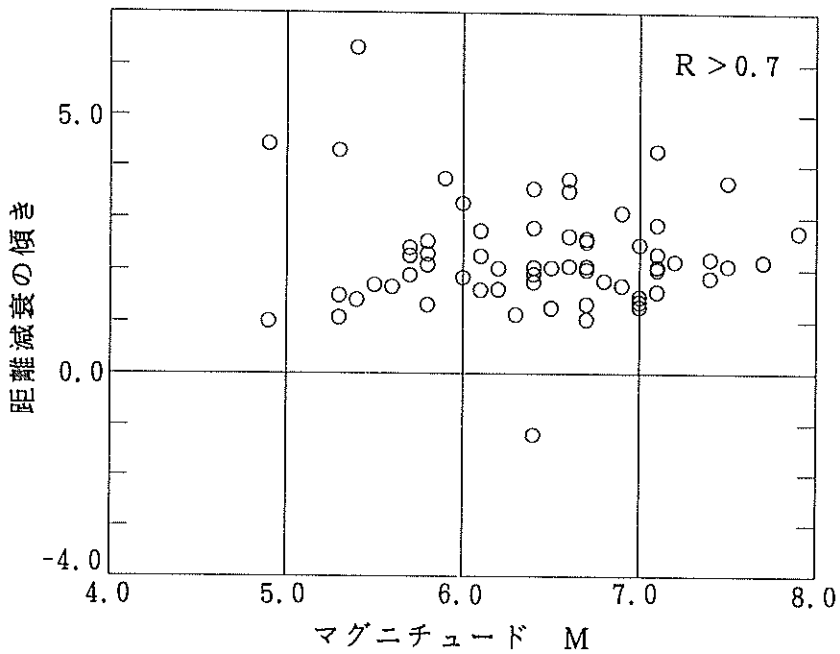


図-5-9 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配と相関係数の関係
(相関係数が0.7以上の地震, 上下動)

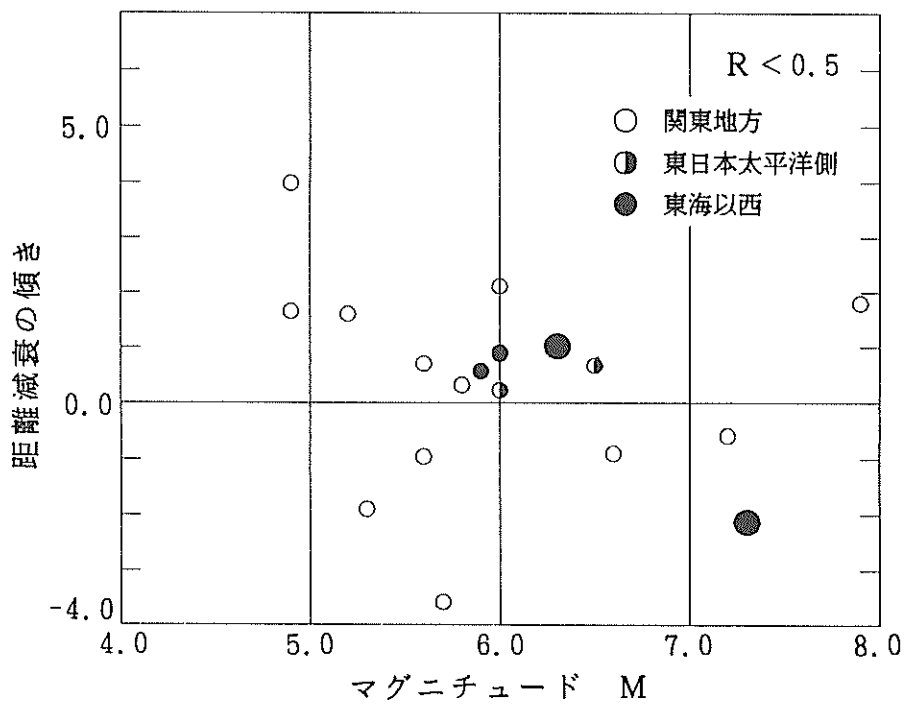


図-5-10 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以下の地震, 上下動)



図-5-11 地震の震源位置の区分

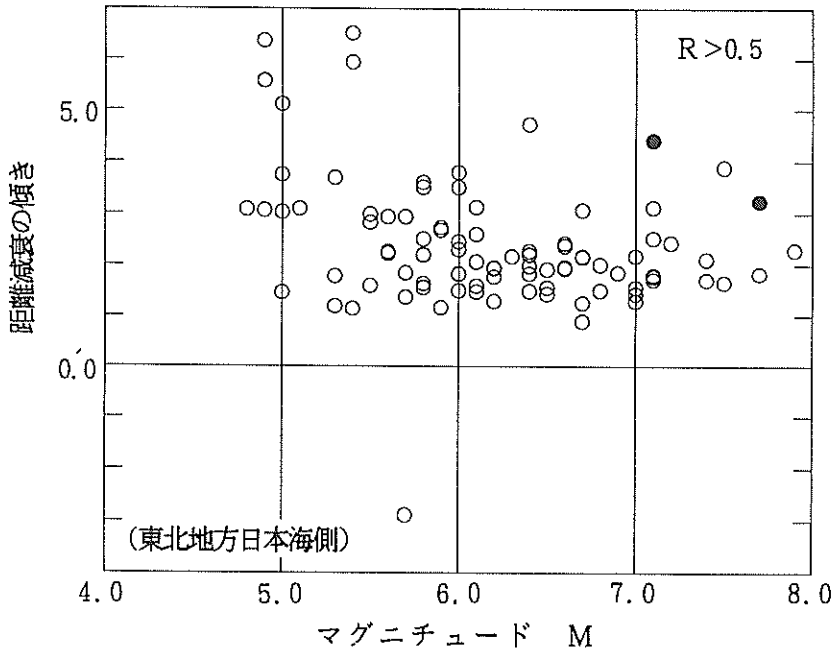


図-5-12 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 水平動, 東日本日本海側)

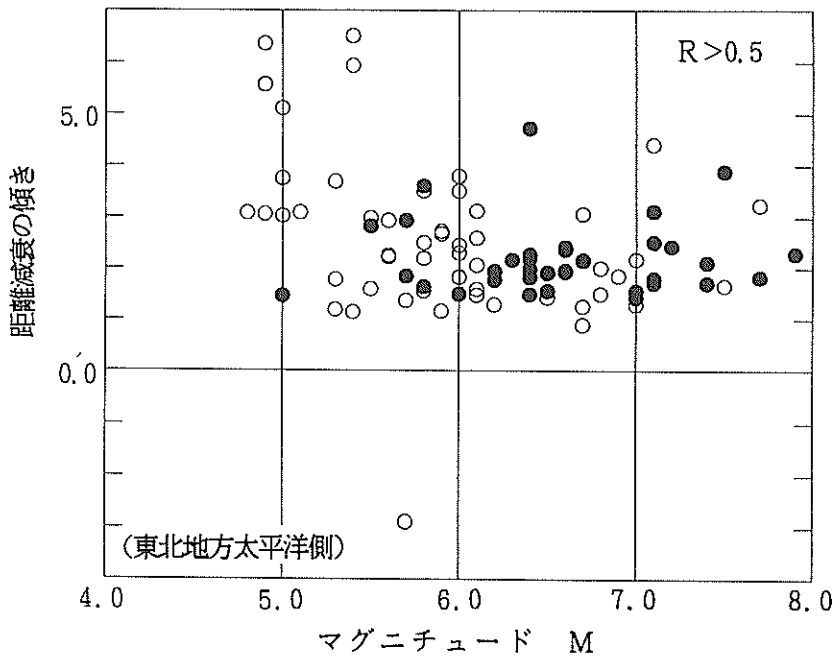


図-5-13 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 水平動, 東日本太平洋側)

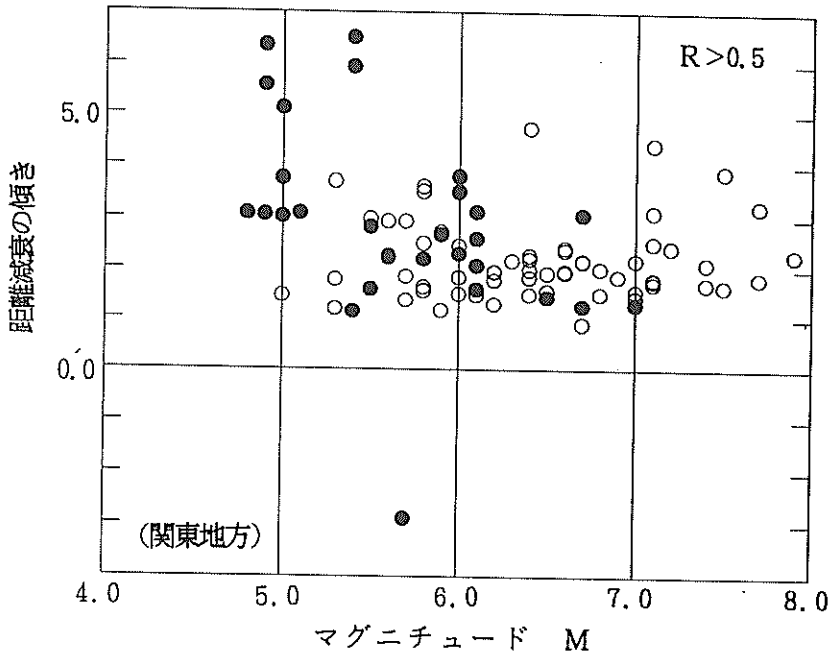


図-5-14 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 水平動, 関東地方)

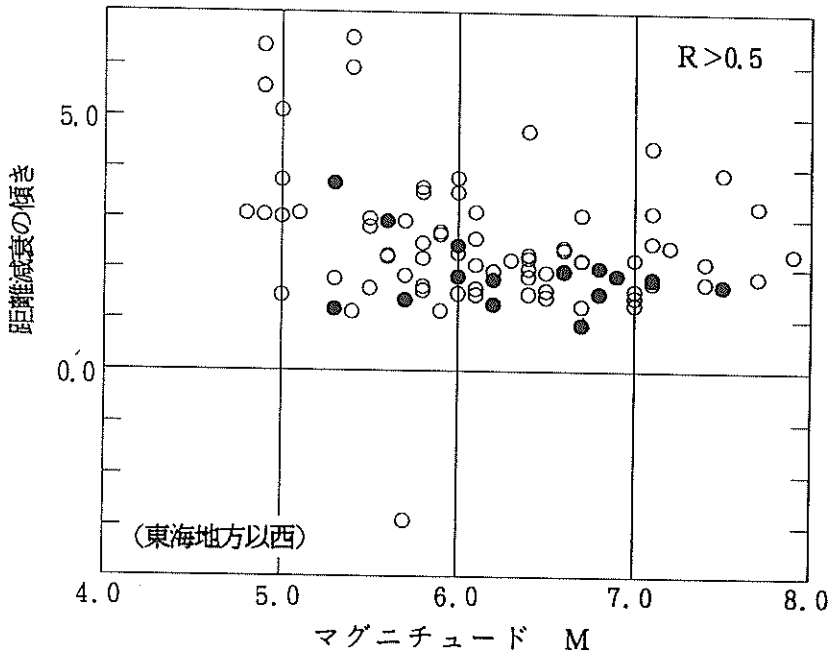


図-5-15 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 水平動, 東海以西)

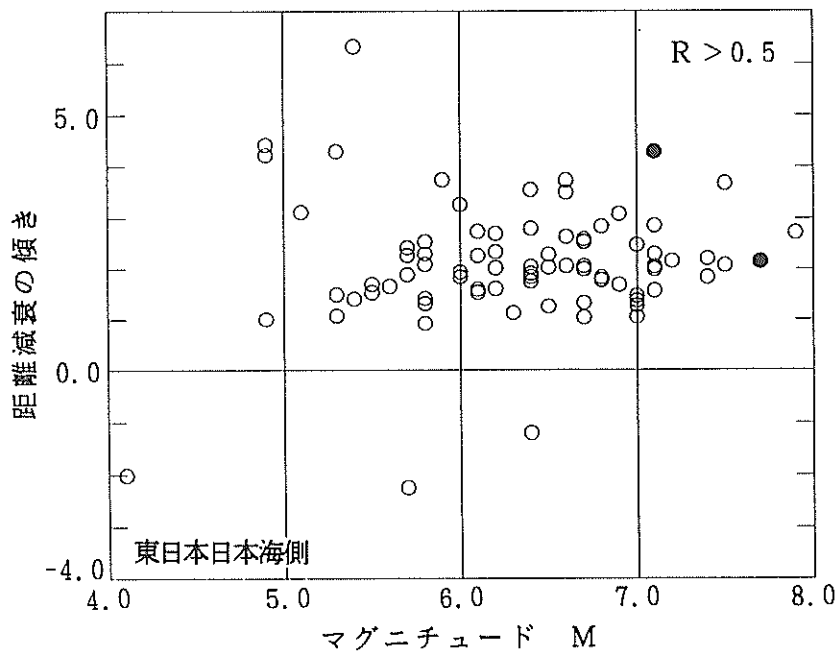


図-5-16 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 上下動, 東日本日本海側)

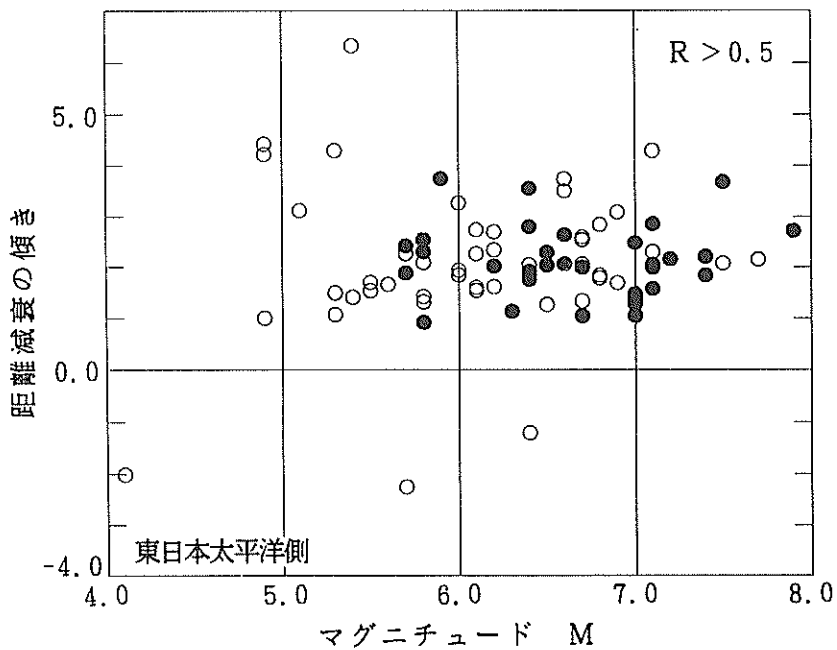


図-5-17 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 上下動, 東日本太平洋側)

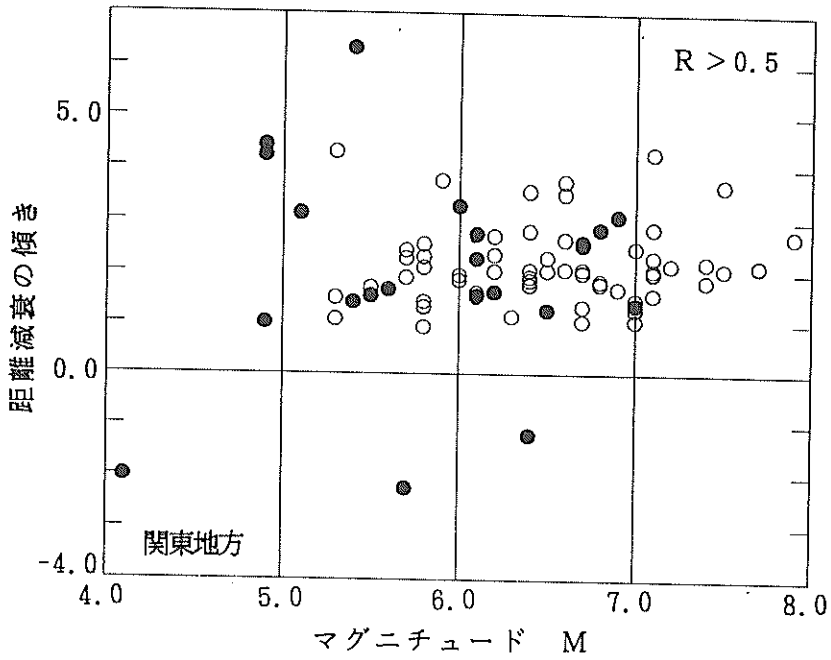


図-5-18 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 上下動, 関東地方)

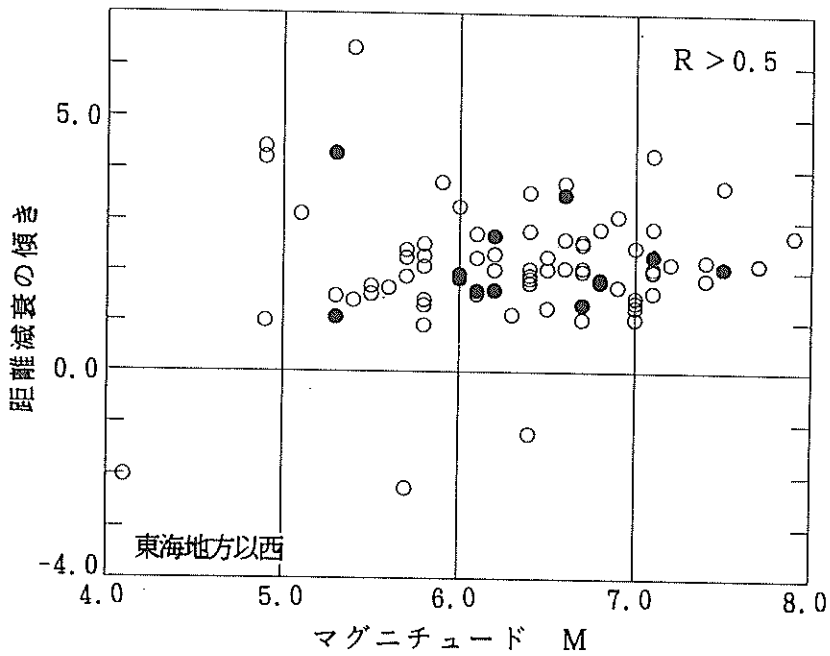


図-5-19 個別の地震ごとに求まる距離減衰の勾配とマグニチュードの関係
(相関係数が0.5以上の地震, 上下動, 東日本太平洋側)

6. 距離減衰式の提案

5章においては、個々の地震毎の距離減衰についてやや詳細に検討を実施し、本研究で回帰分析に用いるデータベースのもつ特徴について詳細な検討を行うとともに、距離減衰の地域性についての検討を行い、研究上この点に関する検討が重要であるとの見通しを得た。しかし、現在得られている強震観測記録のデータベースとの関連で考え直すと、各地域ごとに必ずしも十分なデータ数が得られているものとは言えず、現時点で本格的に地域性を考慮した距離減衰式を検討することは時機尚早であり過度の細分化をもたらすものと判断される。そこで、本章においては、現時点で実施することが妥当と考えられるわが国全体の平均的な距離減衰式の検討を行うこととする。

さきに見たように、4章では、強震観測データベースが、最大加速度と震源距離や最大加速度とマグニチュードなどの各データ間の特徴から、従来多用されている一括回帰型の重回帰分析手法では距離減衰式の各回帰係数を小さめに評価することを示した。これらの影響は、4.5で示したような二段階回帰手法を用いることにより、距離減衰式の各回帰係数をより適切に評価することができる。すでに4.5において港湾地域強震観測のデータベースに二段階回帰手法を用いて表-4-4に示される距離減衰式を求めている。ただし、4.5で用いた強震観測記録のデータベースは、3章に示したように、ひとつの地震で5ヶ所以上の観測点において記録が得られているものを条件として選んでいる。そのため、5章において示したように、個々の地震で得られた記録だけで線形回帰式を求めると距離減衰の勾配に負の値を示す場合、すなわち、震源距離が大きくなるにつれて最大加速度が大きくなる結果を示す場合があり、データとして選択するにはふさわしくないと考えられるものも含まれている。5章においてすでに若干の検討をしたように、距離減衰の勾配が負になる原因として、震源深さが200kmを超える深発地震を選んでいることや震源距離にほとんど差のない観測記録が選ばれている場合などである。このようなデータベースとしてふさわしくない結果となるものは、個別の地震ごとに線形回帰式を求めた場合に、相関係数がいずれも0.5を下回ることがわかっている。

本章では、個別の地震ごとに線形回帰式を求めた場合に相関係数が0.5を下回るものは除外したデータベースを用い、統計解析手法としては4.5に示した二段階回帰手法を用いて水平動と上下動の距離減衰式を求める。なお、以下の各節などの標題にも見られるとおり、論文

の構成上「提案」という形で求めた距離減衰式を提示することとするが、これはあくまで本研究の範囲内でのとりまとめとしての研究提案であって、ここで得られた結果をただちに実務に用いるためには、震源近傍における最大加速度の検討など、さらに検討すべき種々の研究課題が残されていることは明かである。以下に示す結果の利用に当たっては、この点に留意すべきと考えている。

6.1 水平動の距離減衰式の提案

個別の地震ごとに線形回帰式を求めた場合に相関係数が0.5を下回るものは26地震である。これらの26地震で得られた観測記録をデータベースから削除し、結局水平動の距離減衰式を求めるとあたって用いた地震は合計92地震の726組の観測記録が含まれたデータベースである。

距離減衰式の計算にあたっては、4.5と同様に以下の3つの代表的な距離減衰式の関数形を用いた。

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log (\Delta + 30) + c \quad (6-1)$$

$$\log Y = a \cdot M - b \cdot \log X + c \quad (6-2)$$

$$\log Y = a \cdot M - \log X - b \cdot X + c \quad (6-3)$$

ここに、各変数の定義は、4.4に示したとおりである。また、統計解析手法は4.5に示した二段階回帰手法である。距離減衰式の計算結果は表-6-1に示す通りである。なお、同表には参考として一括回帰型の重回帰分析による手法を用いて得られる結果も示している。

ここで得られている距離減衰の勾配の値は、4.5において示した相関係数が0.5を下回るものも含めたデータベースから得られる結果(表-4-3および表-4-4)よりも大きな値を示している。個別の地震ごとに回帰式を計算する場合に負の勾配を示しものが、相関係数が0.5を下回る場合を除くことでデータベースから削除された結果、距離減衰の勾配の値は大きく評価されることになっているものと考えられる。

一括回帰手法と二段階回帰手法の比較の観点からは、ここで得られた結果は4章での検討で示したような一般的な傾向を示しており、以下のような結果が得られている。

- ① 一括回帰により得られる距離減衰の勾配 b の値は、二段階回帰手法により得られる値に比べ小さい。
- ② マグニチュードにかかる係数 a は、距離減衰の勾配 b の値に応じて二段階回帰手法により得られる値が一括回帰により得られる値より大きい。
- ③ 標準偏差を比べると、一括回帰による方法の場合がいずれの場合も小さい値を示す。

距離減衰の勾配に関する議論はすでに何度もふれてい

るように、一括回帰による方法では、データベースの分布の特徴に起因する問題点により、真なる値より小さめの結果がしやすい。また、マグニチュードにかかる係数 a については、一括回帰型の重回帰分析手法による限り、福島ら²²⁾が示しているように距離減衰の勾配 b と正の相関を示し、一方の値が小さく評価されると共に小さく評価される結果となる。このことが一括回帰手法と二段階回帰手法との比較からも示されている。適合度の判定に用いる標準偏差をみた場合には、一括回帰による方法の方が小さい値を示しているが、このこと自体は、重回帰分析の手法の意味（すなわち、標準偏差を最小とする解を求めること）から自明なことである。問題は、一括回帰の重回帰分析手法が偏りがあるデータの集合に対しても偏りを含めて適合してしまうために発生するものと言える。

図-6-1および図-6-2は表-6-1に示した6つの距離減衰式をマグニチュードが7と6の場合について比較して示したものである。一括回帰と二段階回帰の手法の違いにより距離減衰の勾配の違いが明瞭に見てとれる。

用いる回帰式の関数形の違いによる最大加速度の予測値は、震源近傍に近付くにつれてその違いが顕著になる。特に、工学上重要となる加速度が100Gal以上の範囲における相違が著しい。3つの式の中では(6-1)式が、距離の項に d (ここでは30を用いている)なる距離補正項を導入して、震央近傍での最大加速度が大きくなるの防いでいる。しかし、これはあくまでも震央に対するものであって、震源ないし断面における最大加速度を考慮したものではない。したがって、やや便法の意味合いが強い一つの経験式にすぎないといえよう。工学上特に重要となる震源近傍への距離減衰式の適用を図るためには、2.1(3)に示したように、距離減衰式の関数形にさらに工夫が必要とされるものと考えられる。この点に関しては、本研究に引き続いて検討を加えることとしたい。

以下においては、このように研究途上であるとの立場を明確にするために、これらの3つの式のうちでは最も単純な直線関係を表す式(6-2)を代表として議論を進めることとしたい。

図-6-3は、観測記録と得られた距離減衰式の代表として式(6-2)の関係を比較したものである。図-6-4~7は観測記録のマグニチュードの幅をそれぞれ8~7, 7~6, 6~5, 5~4に限定して距離減衰式との比較を行ったものである。距離減衰式は比較のために一括回帰手法の場合の結果も示している。図-6-4~7で観測記録は図中に示した2本の距離減衰式の間

分布することが期待されるわけであるが、観測値のばらつきは大きい。二段階回帰を用いる場合には、距離減衰式の回りの観測値のばらつきは、震源距離の軸に対して見た場合比較的均等にばらついているのに対し、一括回帰を用いた場合には震源距離の軸に対しばらつきに偏りがある(震源距離が短い場合に大きめのばらつきを示し、震源距離が長い場合には小さめのばらつきを示す)。また、マグニチュードの値が6以下の小さい場合(図-6-6と7)には、観測値は得られた距離減衰式の値に比べ大きめの値を示す傾向にあり、その傾向はマグニチュードが5以下の場合(図-6-7)に最も顕著である。

図-6-8~12は震源距離を50km~100km, 100km~200km, 200km~300km, 300km~500km, 500km~1000kmに分類して、最大加速度とマグニチュードの関係について観測値と得られた距離減衰式とを比較したものである。震源距離が大きい500km~1000kmの場合にのみ計算値の方が観測値よりも大きい傾向を示しているが、震源距離が500km以下の場合には、計算値と観測値とは良い一致を示している。

得られた距離減衰式を用いて震源距離と地震のマグニチュードを用いると最大加速度の予測値が得られる。この計算される最大加速度の予測値と実際の観測値の比を計算することにより、距離減衰式の予測精度を調べることができる。図-6-13~15は、土田ら¹⁾の地盤分類に基づいて各観測地点をA地盤、B地盤およびC地盤の3つにわけ、それぞれの地盤種別ごとに予測値と観測値の比をまとめて示したものである。これらの図では横軸に地震のマグニチュードをとっている。距離減衰式の作成にあたっては地盤種別の分類は行っていない。そのため、得られた距離減衰式は各種地盤の表層地盤の平均的な増幅の効果を反映したものとなっていると考えられる。これらの結果によれば、地盤種別の違いによる距離減衰式の予測精度には明瞭な傾向の違いは認められない結果となっている。また、マグニチュードによる依存性も明瞭には認められないが、すでに図-6-6および図-6-7でも示したようにマグニチュードが6以下の場合には予測値は観測値をかなり下回る値を示している。図-6-16~18は同じ結果について横軸に震源距離をとったものである。ここでも明瞭な傾向は認められないが、震源距離が500kmを超える範囲ではいずれの地盤種別においても観測値が予測値を上回る結果が得られている。これは観測値の方が約2Galを下限值としていることによるものであり、震源距離が500kmを超える場合に予測値は2Galを下回る値を示すことから当然の結果といえる。

6.2 上下動の距離減衰式の提案

個別の地震ごとに線形回帰式を求めた場合に相関係数が0.5を下回るものは20地震であり、結局上下動の距離減衰式を求めるにあたって用いた地震は合計80の地震で記録された720の記録である。

距離減衰式の計算にあたっては、ここでも前節に示した(6-1)～(6-3)式の3つの代表的な距離減衰式の関数形を用いた。

距離減衰式の計算結果は表-6-2に示す通りである。なお、同表には参考として、一括回帰型の重回帰分析による手法を用いて得られる結果も示している。ここで得られた結果は前節に示した水平動の距離減衰式の計算結果と同じ傾向を示している。すなわち、

- ① 一括回帰により得られる距離減衰の勾配 b の値は、二段階回帰手法により得られる値に比べ小さい。
- ② 個別の地震ごとに線形回帰計算を行った場合に相関係数が0.5を下回る地震を除いた場合に、距離減衰の勾配 b はさらに大きくなる傾向にある。
- ③ マグニチュードにかかる係数 a は、距離減衰の勾配 b の値に応じて二段階回帰手法により得られる値が一括回帰により得られる値より大きい。
- ④ 残差の標準偏差を比べると、一括回帰による方法の場合がいずれの場合も小さい値を示す。

の結果が得られている。

ここでも前節の水平動の場合と同じ図により比較を行った。図-6-19, 20は表-6-2に示した6つの距離減衰式を、マグニチュードが7と6の場合について比較して示したものである。図-6-21は、観測記録と得られた距離減衰式を比較したものであり、距離減衰式としては(6-2)式を示している。図-6-22～25は観測記録のマグニチュードの幅をそれぞれ8～7, 7～6, 6～5, 5～4に限定して距離減衰式との比較を行ったものである。図-6-26～30は震源距離を50km～100km, 100km～200km, 200km～300km, 300km～500km, 500km～1000kmに分類して、最大加速度とマグニチュードの関係について観測値と計算値とを比較したものである。図-6-31～33は、土田ら⁹⁾の地盤分類に基づいて各観測地点をA地盤, B地盤およびC地盤の3つにわけ、それぞれの地盤種別ごとに予測値と観測値の比をまとめて示したものである。図-6-34～36は同じ結果について横軸に震源距離をとったものである。

これらの結果は水平動の場合とほぼ同じ結果となっており、以下の各項目のような結果が得らる。

- ① 一括回帰と二段階回帰の手法の違いにより距離減衰の勾配の違いは明瞭に見てとれるが、データベー

スの範囲(50km～500km)では、いずれの式を用いても大きな違いは見られない。

- ② 用いる回帰式の関数形の違いによる最大加速度の予測値の違いは、データベースの範囲においては明確ではないが、震源近傍に近付くにつれてその違いが顕著になる。
- ③ 二段階回帰を用いる場合には、距離減衰式の回りの観測値のばらつきは、震源距離の軸に対して見た場合比較的均等にばらついているのに対し、一括回帰を用いた場合には震源距離の軸に対しばらつきに偏りがある(震源距離が短い場合に大きめのばらつきを示し、震源距離が長い場合には小さめのばらつきを示す)。
- ④ また、マグニチュードの値が6以下の小さい場合には、観測値は得られた距離減衰式の値に比べ大きめの値を示す傾向にある。
- ⑤ 地盤種別の違いによる距離減衰式の予測精度には明瞭な傾向の違いは認められなく、マグニチュードによる依存性も明瞭には認められない。
- ⑥ 震源距離が500kmを超える範囲ではいずれの地盤種別においても観測値が予測値を上回る結果が得られている。

6.3 既往の距離減衰式との比較

ここでは、6.1および6.2の各節で求めた水平動と上下動の距離減衰式と既往の研究成果との比較を行う。

2.2で示したように水平動の最大加速度の距離減衰式については国の内外を問わず非常に多くの研究成果が発表されている。しかし、既往の研究成果の代表として、これらの中から2, 3の研究成果を選び出すことはかなり困難である。データベースの違いや用いた距離減衰式の関数形の違い、さらには統計解析手法の違いなど、ある一定の指標による評価規準を設定することが難しいからである。

本研究では、一括回帰型の重回帰分析手法では得られる結果に偏りが見られることを示し、統計解析手法として二段階回帰手法を採用している。そこで、このような統計解析手法の違いの影響が明確になるように、また、同様の二段階回帰手法を用いている他の研究結果との比較ができることを念頭において、既往の研究成果との比較を行った。一括回帰による方法の例として川島ら¹⁹⁾、渡部・藤堂¹⁰⁾およびCampbell³²⁾の3つの式を、また二段階回帰手法として福島²⁸⁾、Joyner and Boore³²⁾、安中ら²⁴⁾およびFukushima and Tanaka²⁵⁾の4つの式を選び、本研究で得られた距離減衰式との比較を行った。まず、研究成果の最も豊富な水平動の距離減衰式の比較

から行う。

図-6-37および38は一括回帰手法により得られた結果と本研究の結果を比較したものであり、マグニチュードを7および6とした場合の震源距離と最大加速度の関係を比較したものである。なお、既往の研究成果のうち川島らの式は震央距離をパラメータとしており、Campbellの式では断層からの最短距離が用いられているため、ここではこれらのパラメータをすべて震源距離に置き換えて比較図を示しており、絶対的な大きさを含めた厳密な比較ができるものとはなっていない。比較の結果は、すでに何度も述べているように回帰手法の違いが明瞭に表れており、本研究の距離減衰式は距離の勾配が大きくなっている。

図-6-39および40は本研究と同様の二段階回帰手法を用いた研究成果との比較を行ったものであり、同じくマグニチュードを7と6とした2つの場合についての比較を行っている。なお、安中らの式では震源距離の代わりに震央距離と震源深さが用いられており、Joyner and Booreは断層面からの最短距離を用いている。また、最大加速度の定義や地盤種別の違いやデータ補正の有無等の違いもあり、その絶対的な大きさを含めた厳密な比較はここでもできない。距離減衰の勾配については本研究での成果はデータの多く分布する範囲(震源距離が100km~500km程度)では、これら最近の研究成果とほぼ同じ結果となっている。したがって、大まかには、二段階回帰手法を用いた研究では、整合性のある結果が得られるものと考えられる。

図-6-41~43は震源距離を100km, 50km, 10kmとした場合の最大加速度とマグニチュードの関係について、二段階回帰手法を用いている4つの距離減衰式と比較したものである。本研究での提案式としては(6-2)式のみを示している。震源距離が10kmと震源に非常に近いところでは、福島(1987)と本研究の式は震源近傍に対する特別な配慮をしていないために、他の3つの式に比べると非常に大きな値を示している。震源距離が50kmを超える領域(図-6-42と6-43)では、各関係相互の相違はかなり縮まってくる。その中では、本研究の関係は比較的大きい加速度を与えるものとなっている。また、各関係の中では本研究の式がマグニチュードに対する傾きが最も大きい。

つぎに上下動の距離減衰式についての、既往の研究成果との比較を行う。上下動の距離減衰式については、水平動に比べると既往の研究成果は非常に少ない。

表-6-4は代表的な既往の研究成果を示したものである。最も新しい研究成果である Abrahamson and

Litehiser³⁹⁾を除くといずれの研究成果も、一括回帰の重回帰分析手法を用いたものである。そこで、一括回帰手法の既往の研究成果の例として川島ら¹⁹⁾の式を、二段階回帰手法の例として Abrahamson and Litehiserの式を用いることとし、本研究で得られた式との比較を行うものとした。

図-6-44, 45はマグニチュードが7と6の場合についての最大加速度と震源距離の関係を示したものである。距離のパラメータは3つの式では共通ではないので絶対値の比較は意味が無い。距離減衰の勾配に着目すると、本研究と同様の手法を用いている Abrahamson and Litehiserの式とはほぼ同じような距離減衰の勾配が得られており、上下動についても一括回帰により得られた結果は過小であることが見て取れる。

図-6-46は震源距離を10kmと50kmとした場合の最大加速度とマグニチュードの関係を示したものである。本研究での提案式は他の2式に比べるとマグニチュードに対する傾きが大きい傾向にある。このことは、図-6-44と図-6-45を比較した場合にマグニチュードが7の場合には各距離減衰式の最大加速度の予測値がほぼ等しいのに対し、マグニチュードが6の場合に本研究での提案式の最大加速度が小さめに評価されていることと対応している。当然のことながら、マグニチュードが大きくなると逆に本研究での距離減衰式から得られる最大加速度は大きめの値を与えることになる。

以上の比較を通じて、一つの興味深い事実を指摘することができる。従来、わが国と米国とにおいては震源などの条件が異なるために距離減衰式も著しく異なるのではないかと、この見解が示されることがあったが、本研究の結果はこの様な見解に対して否定的と言える。同様の結論は、Fukushima・Tanaka²⁵⁾によっても導かれている。

最後に、既往の研究のうち、岩盤における最大加速度について研究した野田ら⁵⁾、上部⁶⁾および田村ら¹³⁾との比較を図-6-47において試みた。距離の定義は各研究によって異なるが、同図に示すとおり、これらの結果は図-6-39に示す結果と同様、本研究の結果と比較的整合するものとなっていることが見て取れる。野田ら⁵⁾による研究では、一括回帰による重回帰分析手法を用いず工学的判断を加えながら回帰曲線を求めており、この工学的判断が二段階回帰による結果に近いものを与えることとなったものと思われる。上部による研究⁶⁾では、一括回帰による重回帰分析を行っており、詳しく見ると本研究によるものと比較してやや距離減衰係数が小さいが、概ね本研究の結果と整合するものとなっている。その原因

には、上部による研究において、対象とする地震の発生位置をある一定の地域に限定したことが大きく関係しているものと考えられる。また、田村ら¹⁰⁾による研究では、単純な一括回帰による重回帰分析手法は用いられていないようであり、このことが結果の整合性に大きく関係しているものと考えられる。

表-6-1 相関係数が0.5以上のデータを用いた場合の距離減衰式（水平動）

式	距離減衰式	相関係数 (ρ)	標準偏差 (σ)	回帰方法
6-1	$\log Y = 0.472M - 1.590 \log(\Delta + 30) + 1.778$ $\log Y = 0.552M - 1.965 \log(\Delta + 30) + 2.103$	(0.65) 0.88(0.73)	0.11 0.34	1段階回帰 2段階回帰
6-2	$\log Y = 0.441M - 1.490 \log X + 1.694$ $\log Y = 0.559M - 2.057 \log X + 2.187$	(0.60) 0.84(0.74)	0.12 0.37	1段階回帰 2段階回帰
6-3	$\log Y = 0.405M - \log X - 0.00070X + 0.978$ $\log Y = 0.490M - \log X - 0.00173X + 0.634$	(0.59) 0.82(0.71)	0.12 0.37	1段階回帰 2段階回帰

注) カッコ内は1段階目の重回帰分析に対する重相関係数

表-6-2 相関係数が0.5以上のデータを用いた場合の距離減衰式（上下動）

式	距離減衰式	相関係数 (ρ)	標準偏差 (σ)	回帰方法
6-1	$\log Y = 0.448M - 1.433 \log(\Delta + 30) + 1.137$ $\log Y = 0.542M - 1.866 \log(\Delta + 30) + 1.505$	(0.68) 0.88(0.77)	0.11 0.35	1段階回帰 2段階回帰
6-2	$\log Y = 0.419M - 1.259 \log X + 0.871$ $\log Y = 0.568M - 1.915 \log X + 1.367$	(0.64) 0.83(0.78)	0.12 0.38	1段階回帰 2段階回帰
6-3	$\log Y = 0.385M - \log X - 0.00022X + 0.567$ $\log Y = 0.485M - \log X - 0.00129X + 0.136$	(0.59) 0.82(0.73)	0.13 0.38	1段階回帰 2段階回帰

注) カッコ内は1段階目の重回帰分析に対する重相関係数

表-6-3 上下最大加速度距離減衰式

番号	提案者	距離減衰式 $\log Y \text{ (Gal.)} =$	データベース				統計解析方法
			Mの範囲	距離の範囲	地盤	データ補正	
1	大崎ら ¹¹⁾ (1980)	$0.485M - 1.85 \log(\Delta) + 1.378$	4.3~5.9	X: 35~197	硬質地盤	計器補正	一括回歸
2	川島 ¹⁹⁾ (1985)	$0.281M - 1.277 \log(\Delta + 30) + 2.164$ (1) $0.273M - 1.078 \log(\Delta + 30) + 1.865$ (2) $0.419M - 1.240 \log(\Delta + 30) + 1.123$ (3)	4.3~7.9	X: 43~540	各種地盤	計器補正あり	一括回歸
3	Trifunac ²⁶⁾ (1977)	$2.789M - 0.186(M^2 - (M - 7.5)^2) - (0.060S) + f(\Delta) - 4.69$ $2.789M - 0.186M^2 - 0.060S + f(\Delta) - 4.69$ (M ≥ 7.5) M - 0.060S + f(Δ) - 0.384 (7.5 \leq M ≤ 4.8) f(Δ): $\Delta/50$ ($\Delta \leq 75$ km) 1.125 + $\Delta/200$ (75km $\leq \Delta \leq 350$ km) S: 0 沖積層, 1 軟岩, 2 基盤	3.0~7.7	Δ : 20~200	各種地盤	不明	一括回歸
4	Abrahamson ³⁶⁾ (1989)	$-1.15 + 0.245 M - 1.096 \log(r + e^{0.256M}) + 0.096F - 0.001Er$ F, Er: ダミー変数	5.0~7.8	X: 1~400	各種地盤	不明	2段階回歸

凡例 Y: 最大加速度(Gal.) M: マグニチュード
 Δ : 震央距離(km) X: 震源距離(km) r: 断面からの最短距離(km)

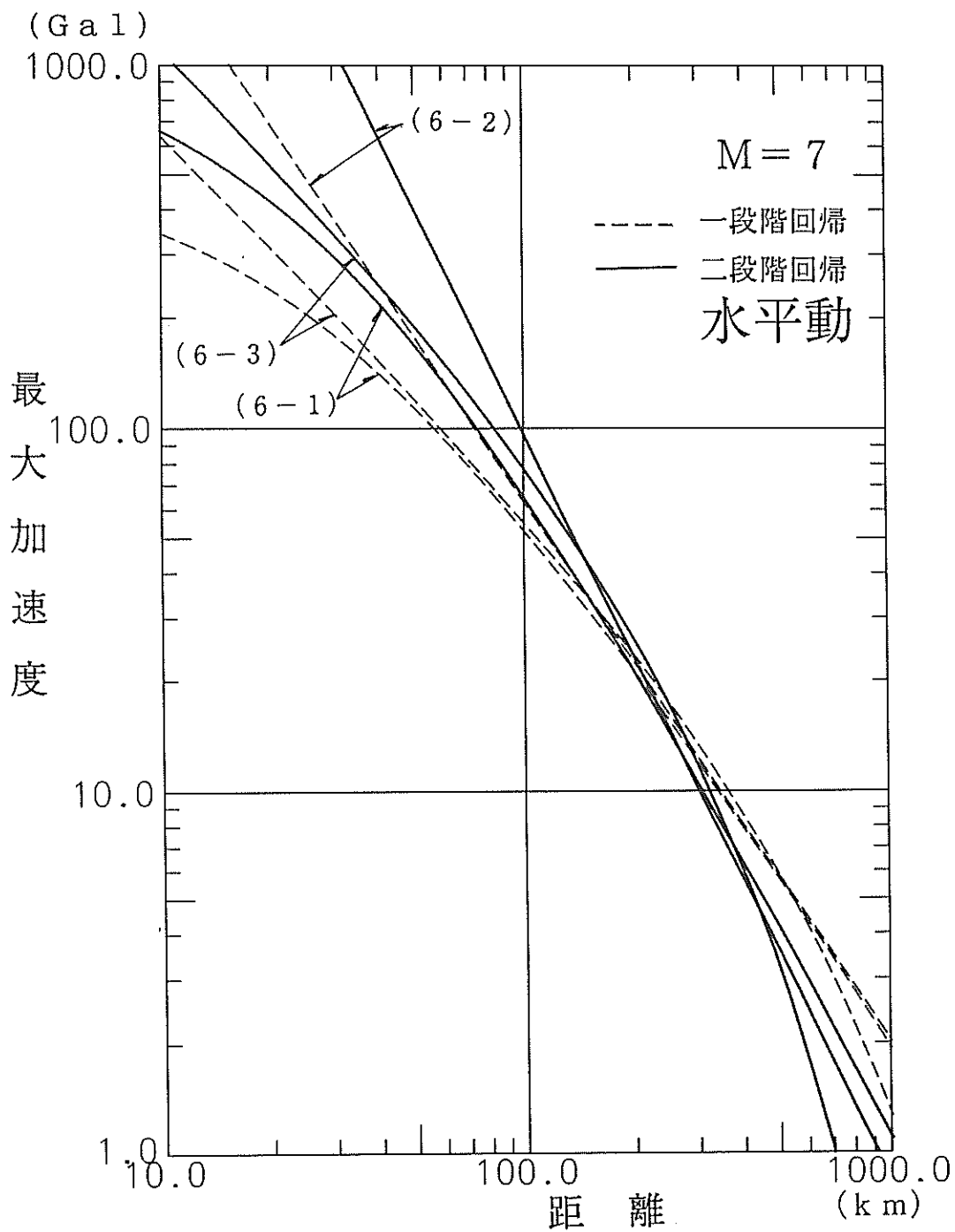


図-6-1 回帰式の形の違いによる距離減衰式の比較 (M=7)

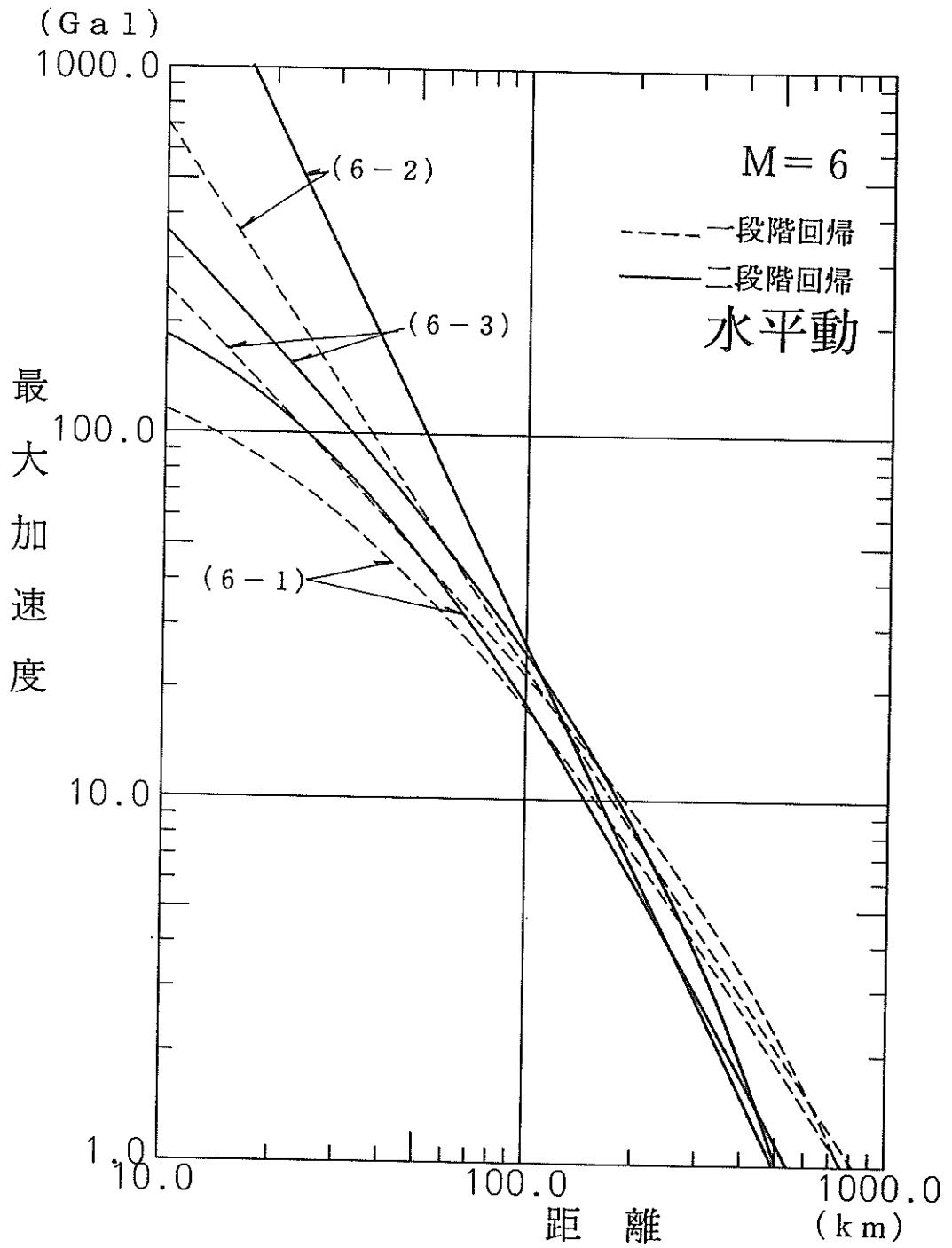


図-6-2 回帰式の形の違いによる距離減衰式の比較 (M=6)

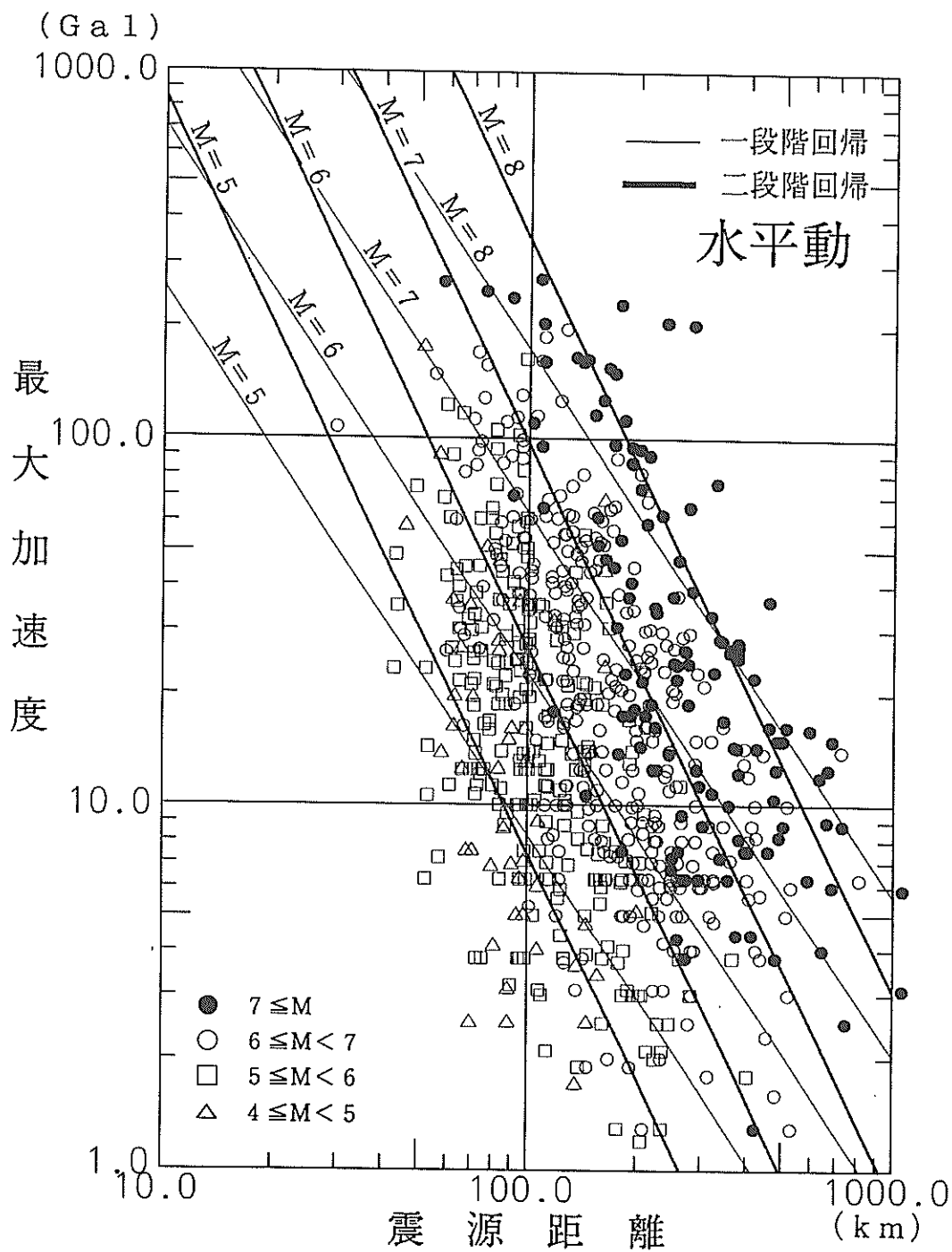


図-6-3 観測記録と距離減衰式の比較

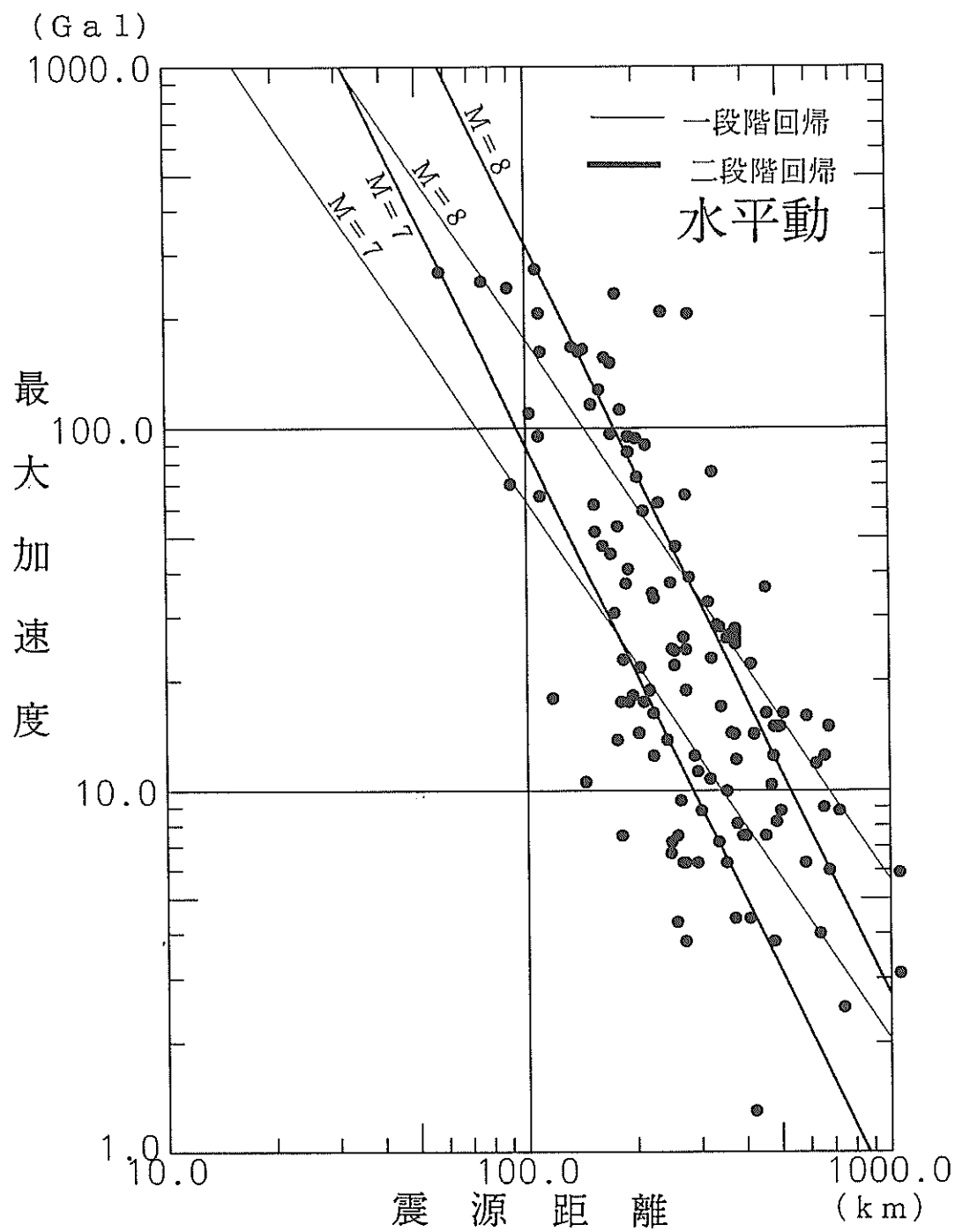


図-6-4 観測記録と距離減衰式の比較 ($M \geq 7$)

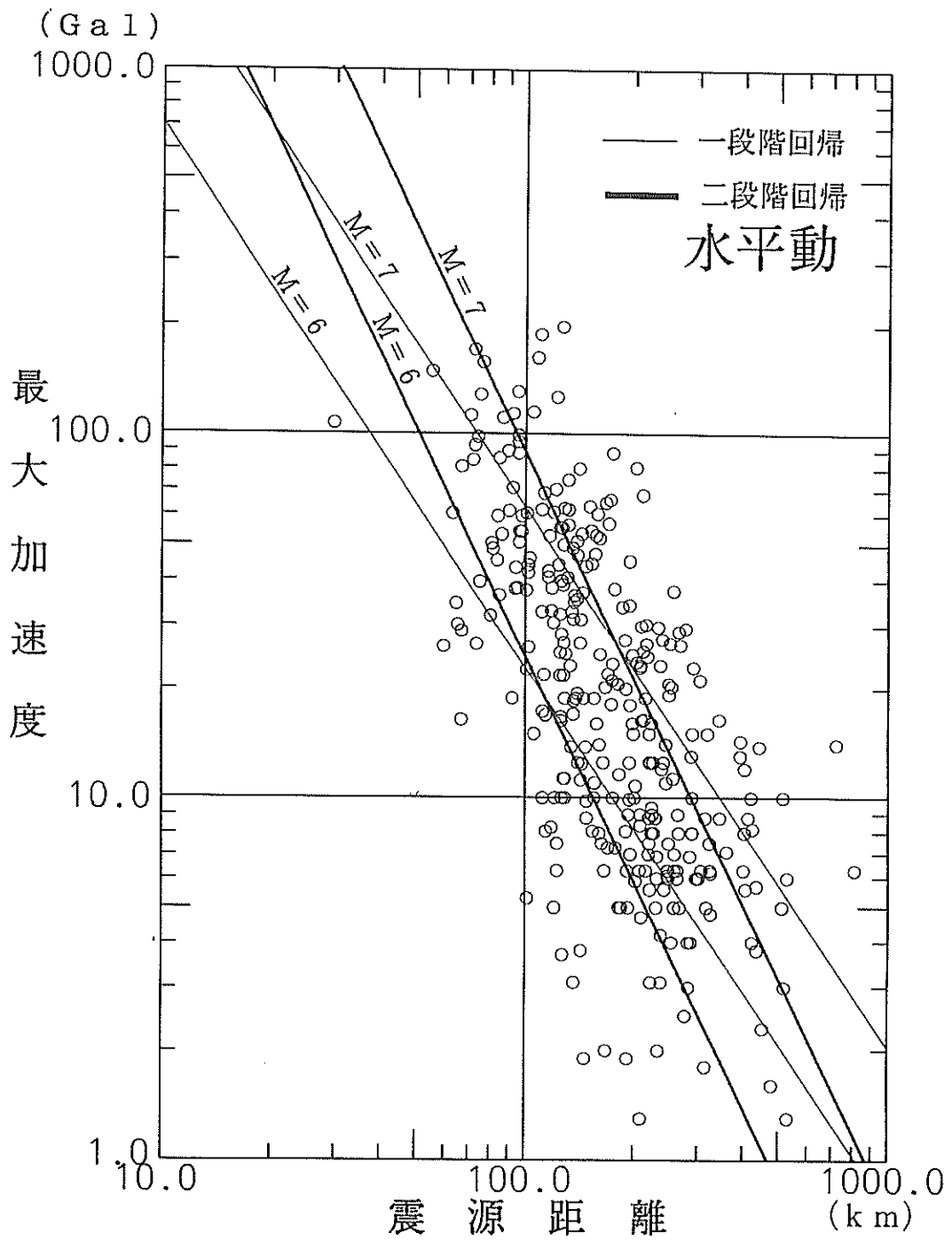


図-6-5 観測記録と距離減衰式の比較 ($7 > M \geq 6$)

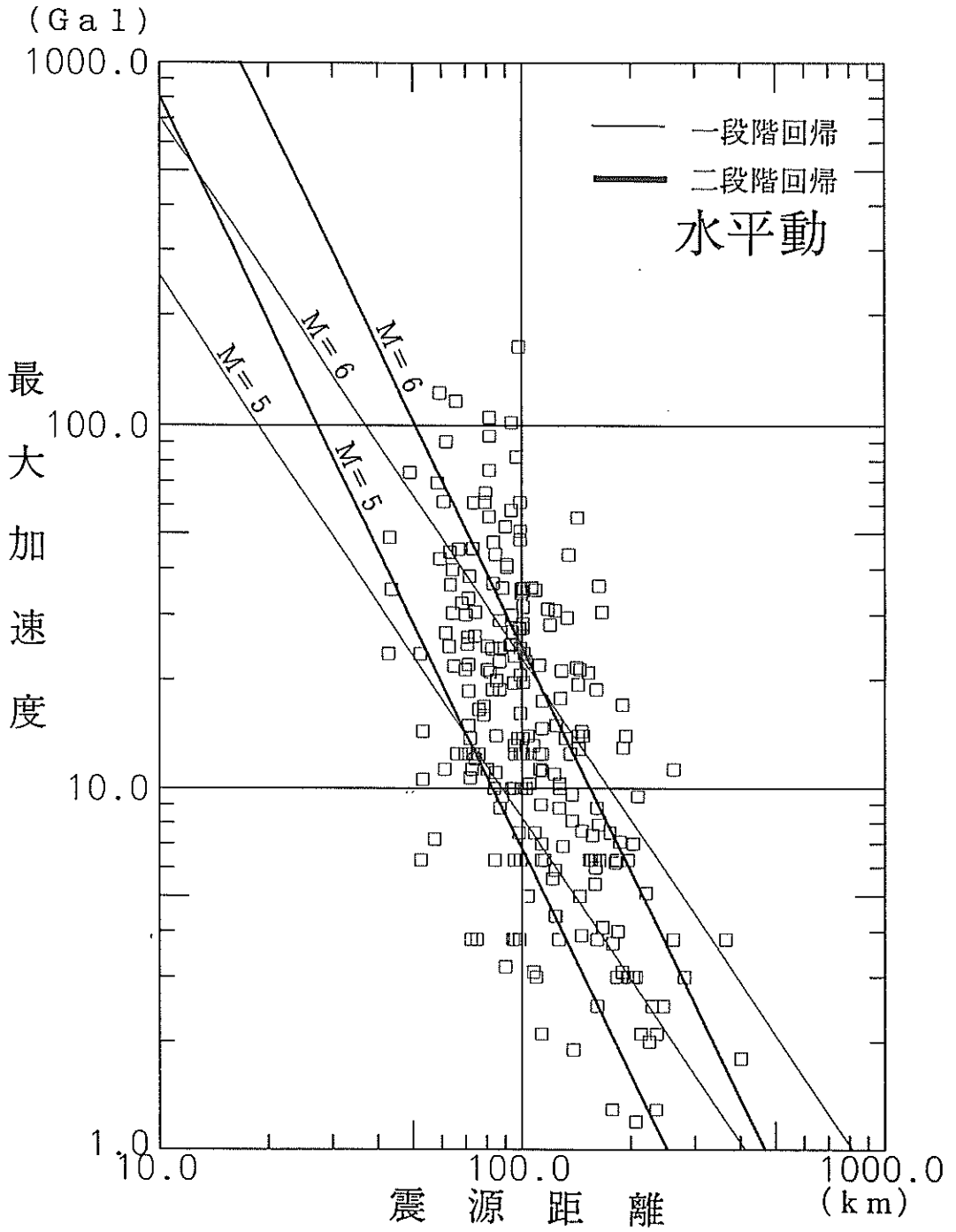


図-6-6 観測記録と距離減衰式の比較 ($6 > M \geq 5$)

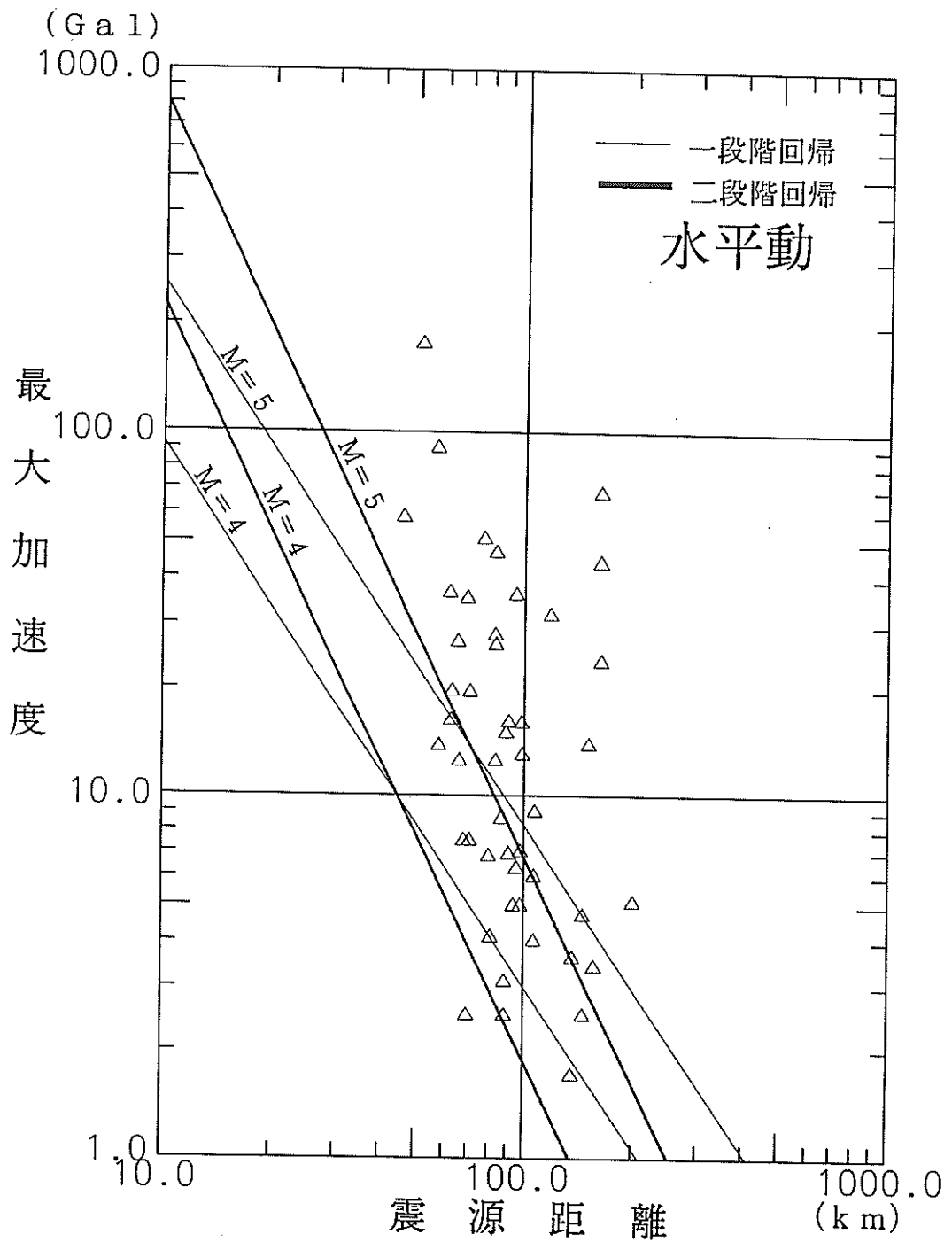


図-6-7 観測記録と距離減衰式の比較 ($5 > M \geq 4$)

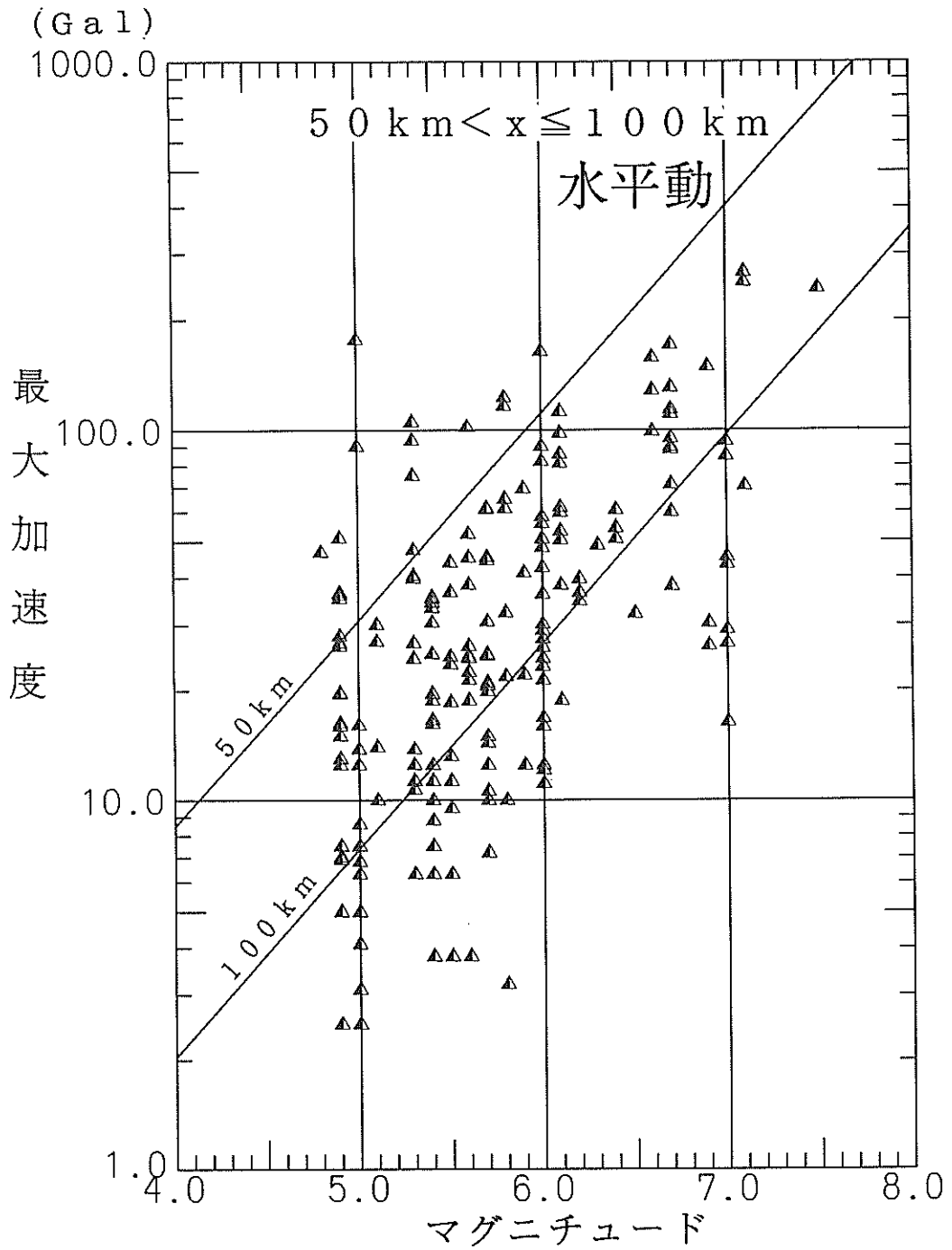


図-6-8 観測記録と距離減衰式の比較 (50 < X ≤ 100)

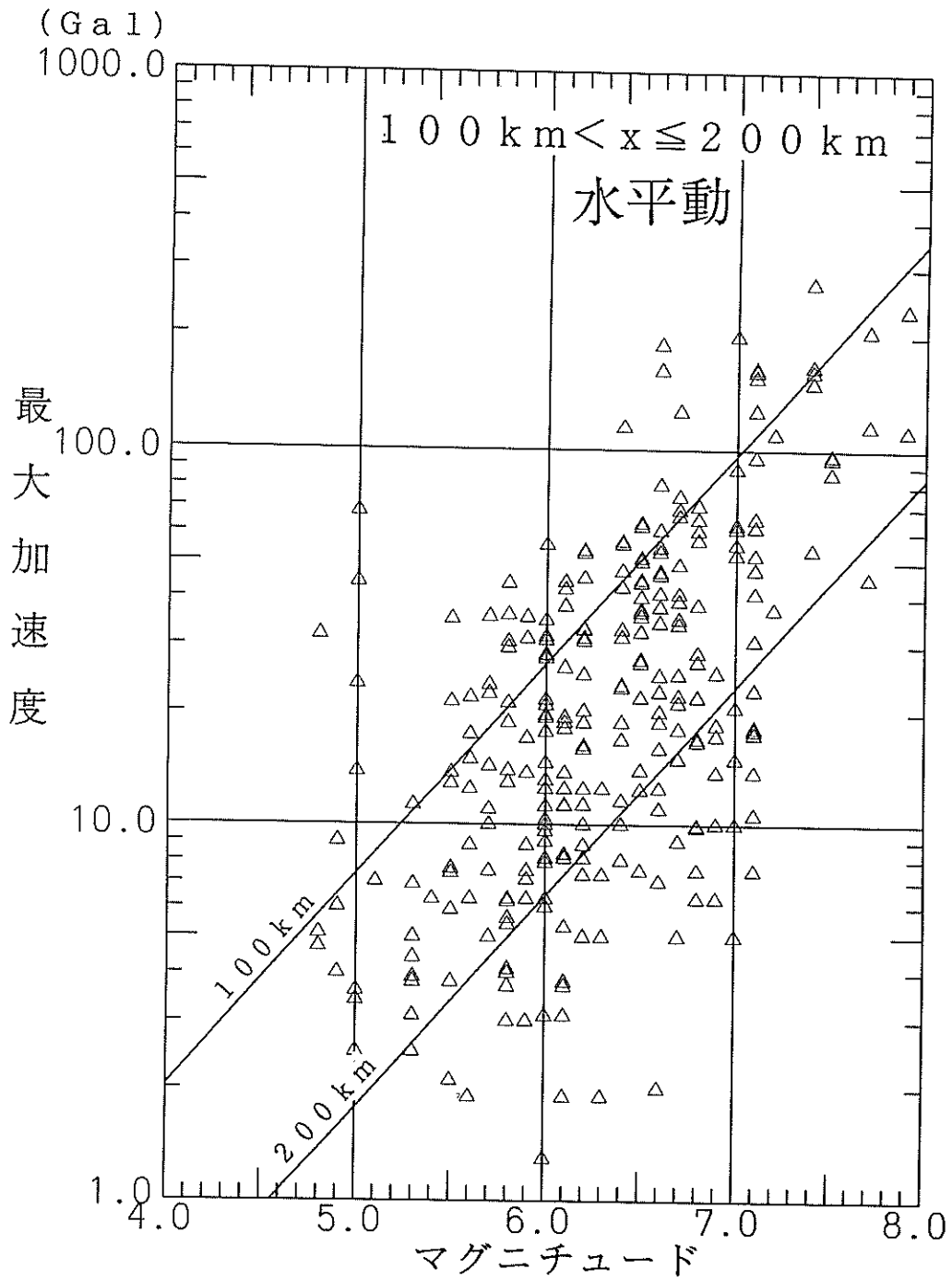


図-6-9 観測記録と距離減衰式の比較 (100 < X ≤ 200)

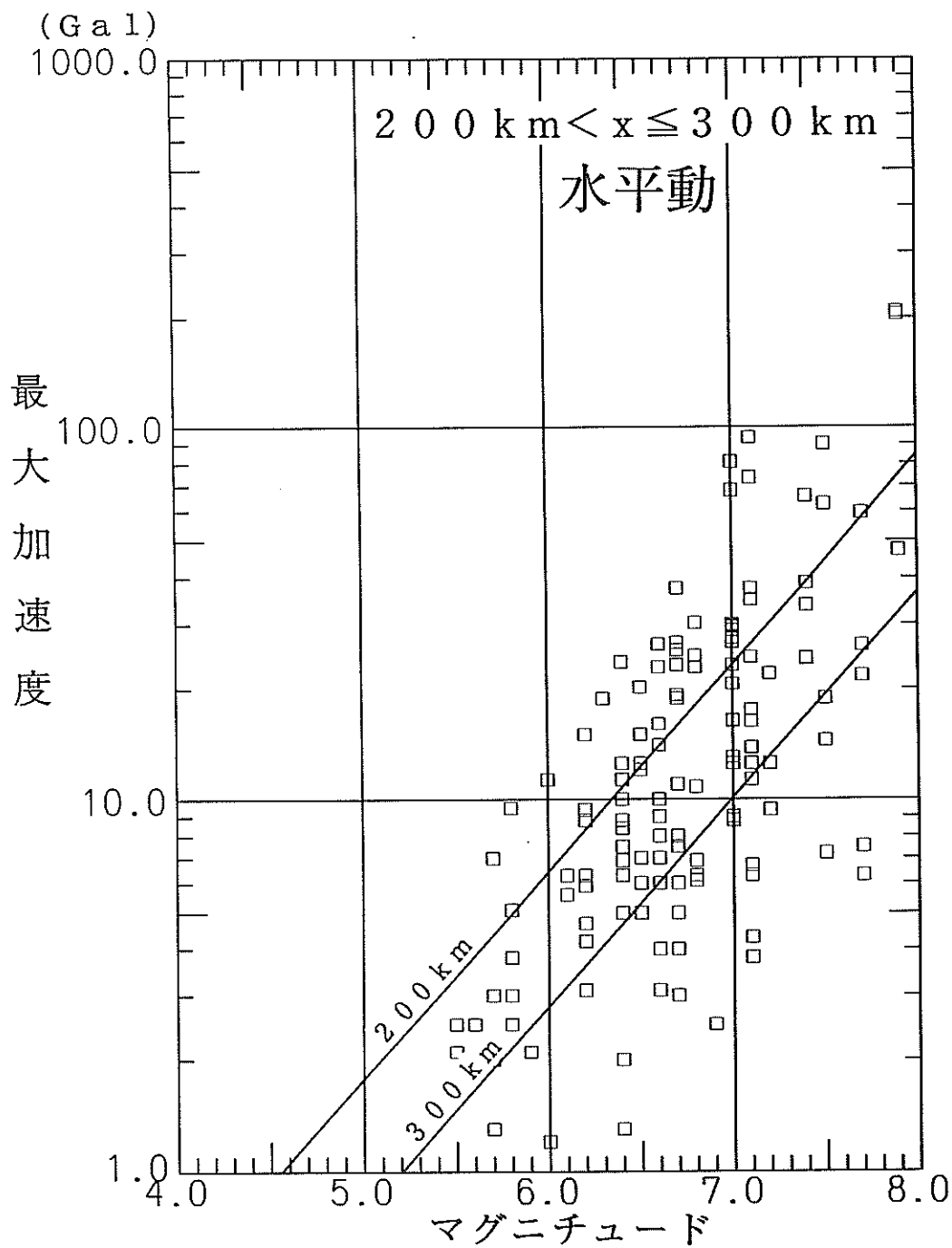


図-6-10 観測記録と距離減衰式の比較 (200 < X ≤ 300)

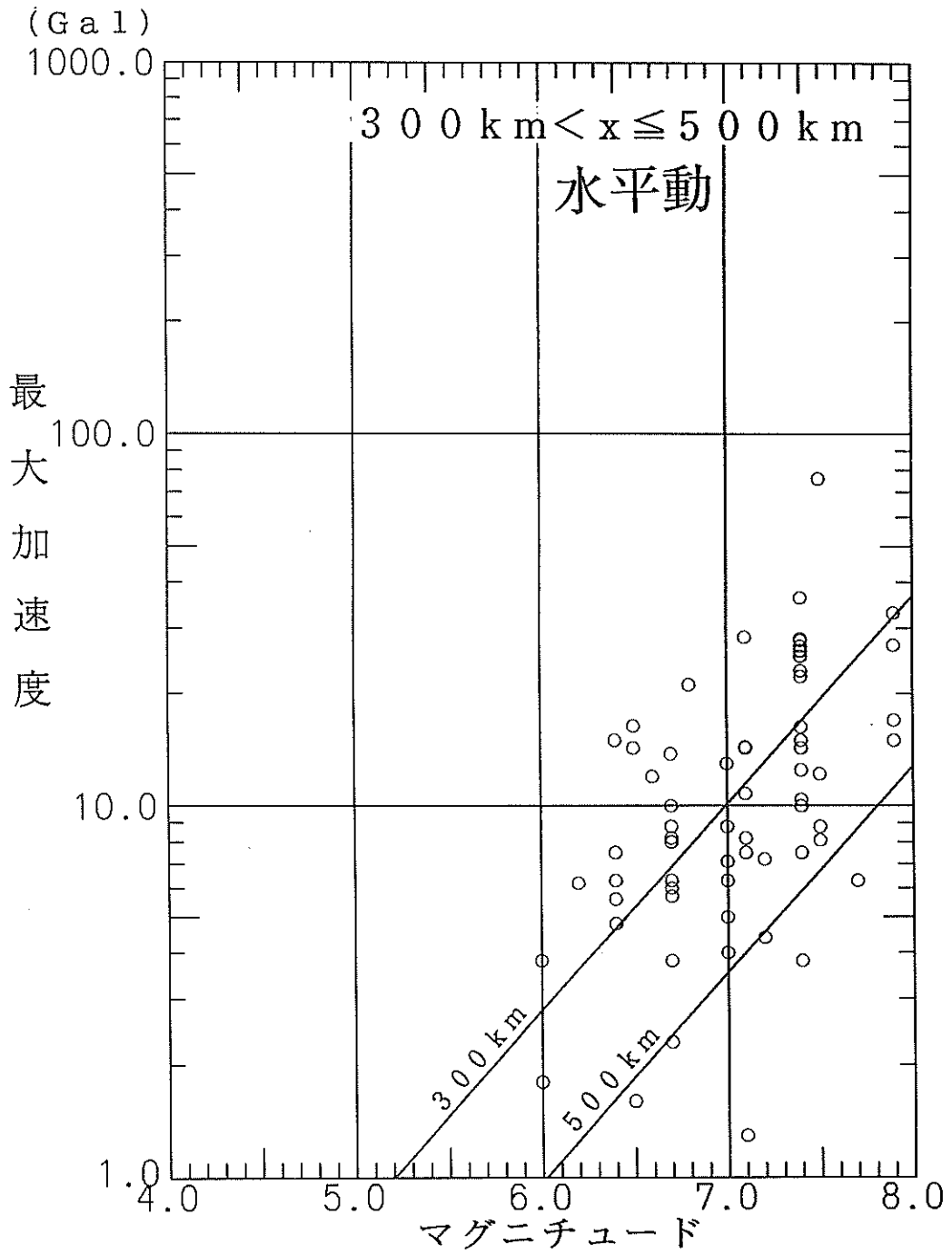


図-6-11 観測記録と距離減衰式の比較 (300 < X ≤ 500)

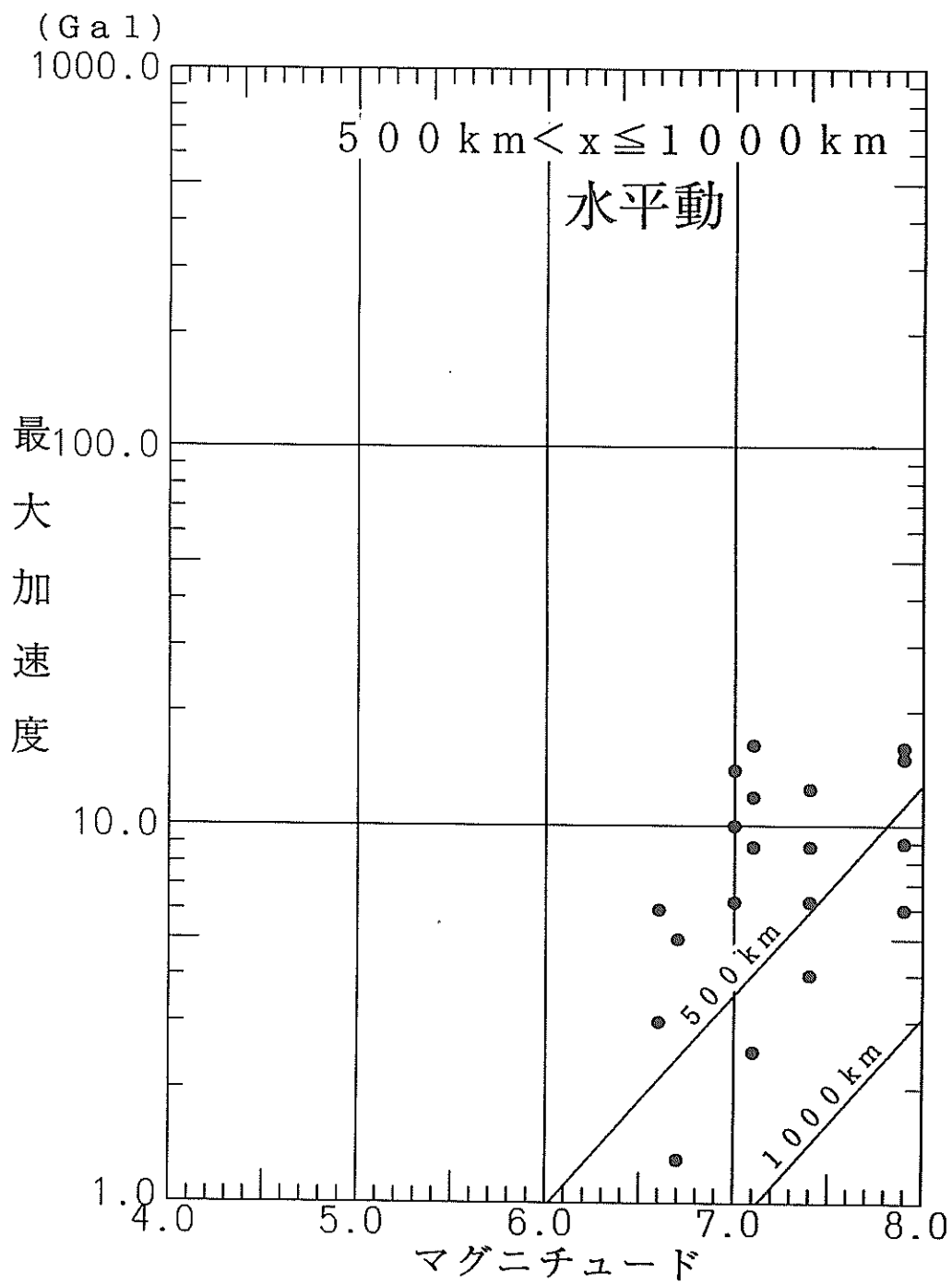


図-6-12 観測記録と距離減衰式の比較 (500 < X ≤ 1000)

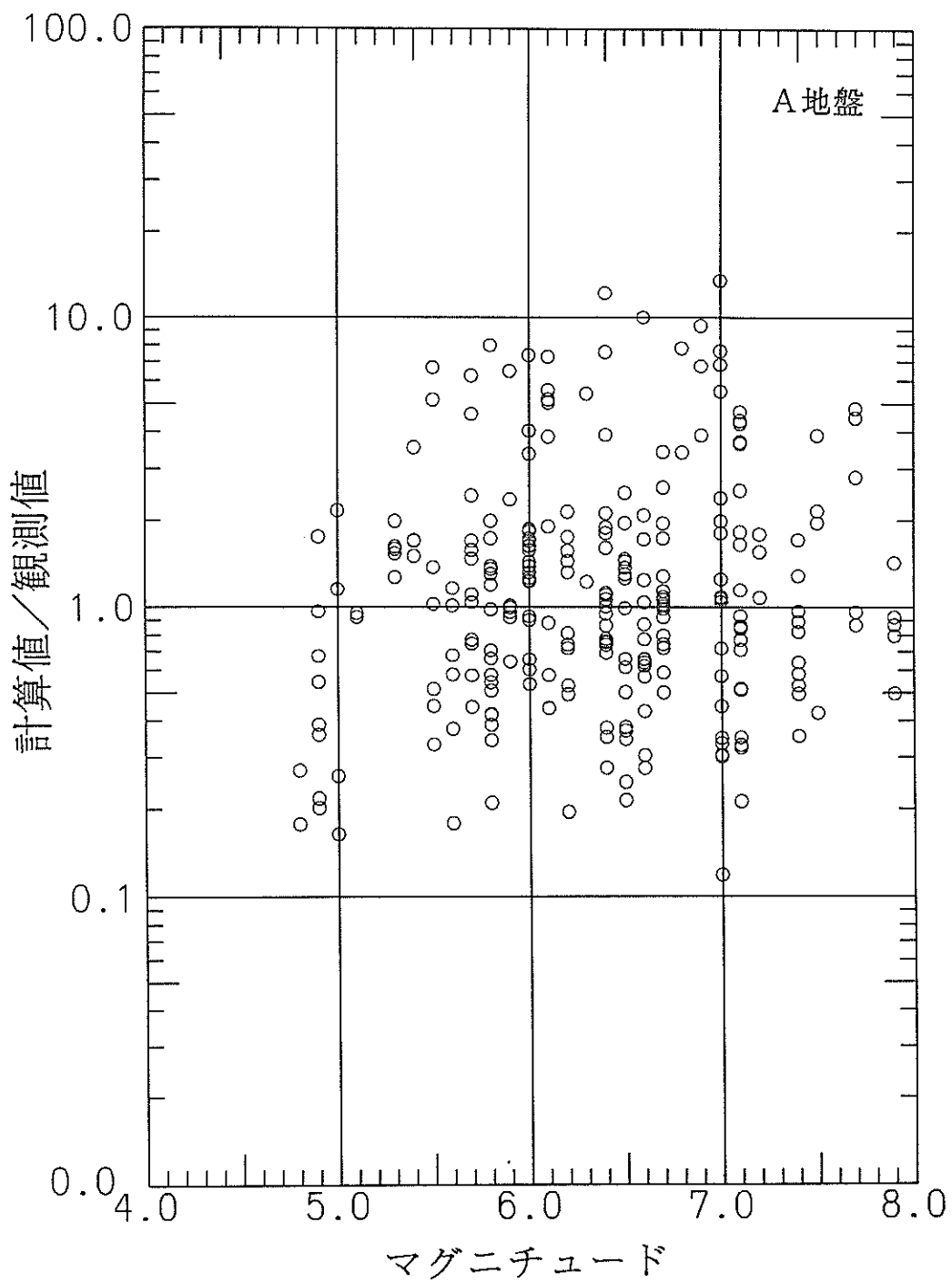


図-6-13 観測値と距離減衰式による予測値の比 (A地盤, 水平動)

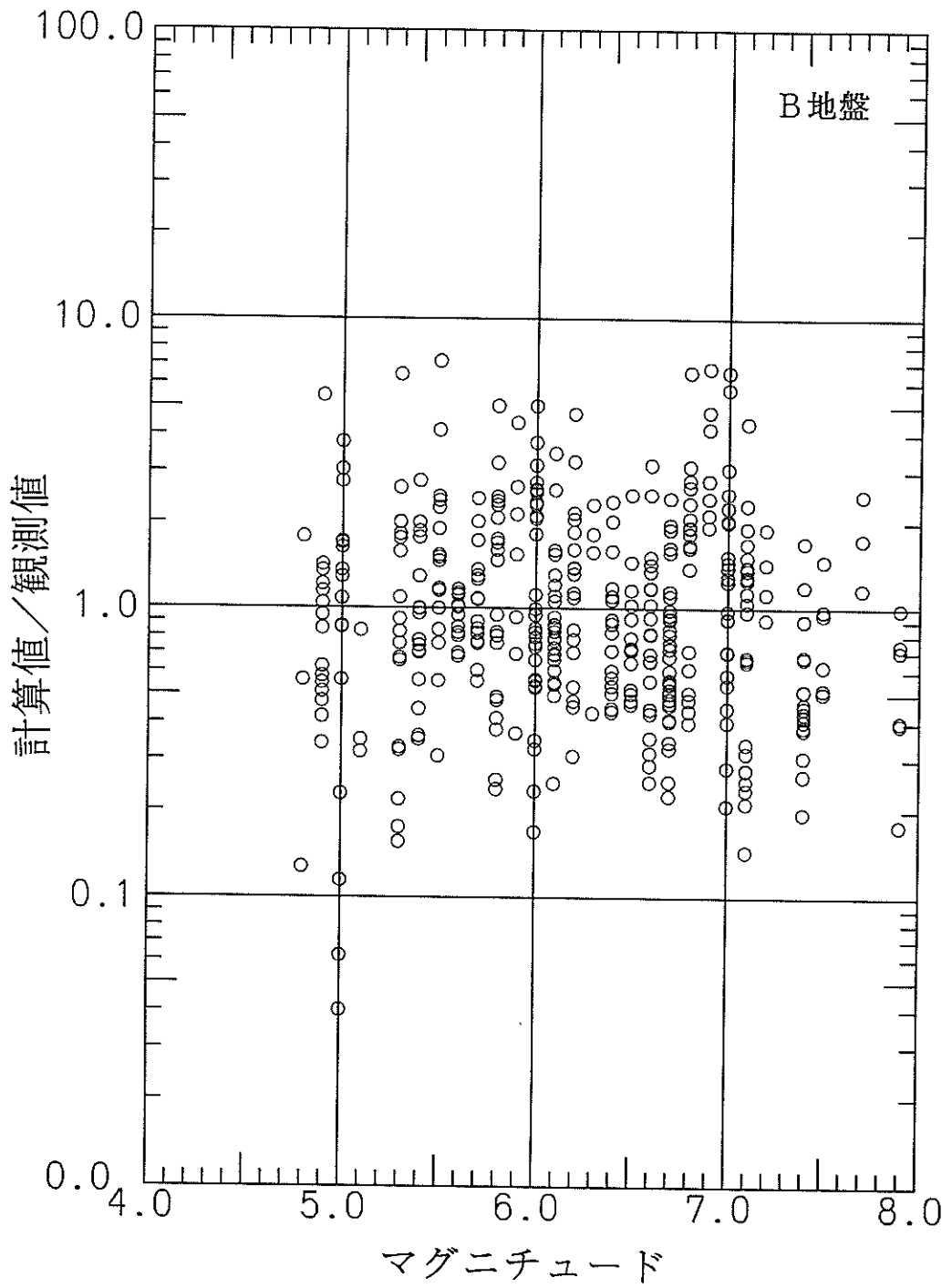


図-6-14 観測値と距離減衰式による予測値の比 (B地盤, 水平動)

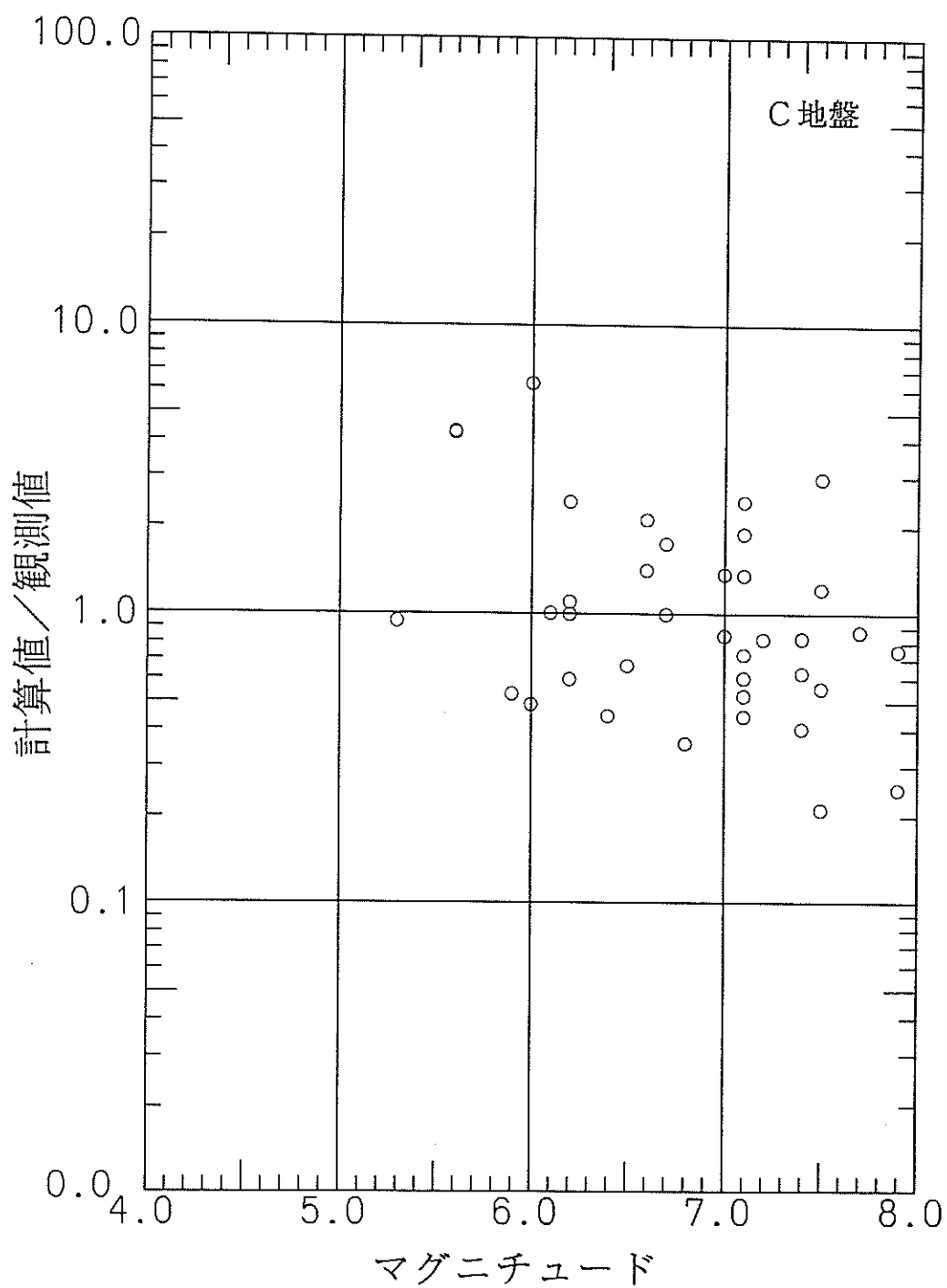


図-6-15 観測値と距離減衰式による予測値の比 (C地盤, 水平動)

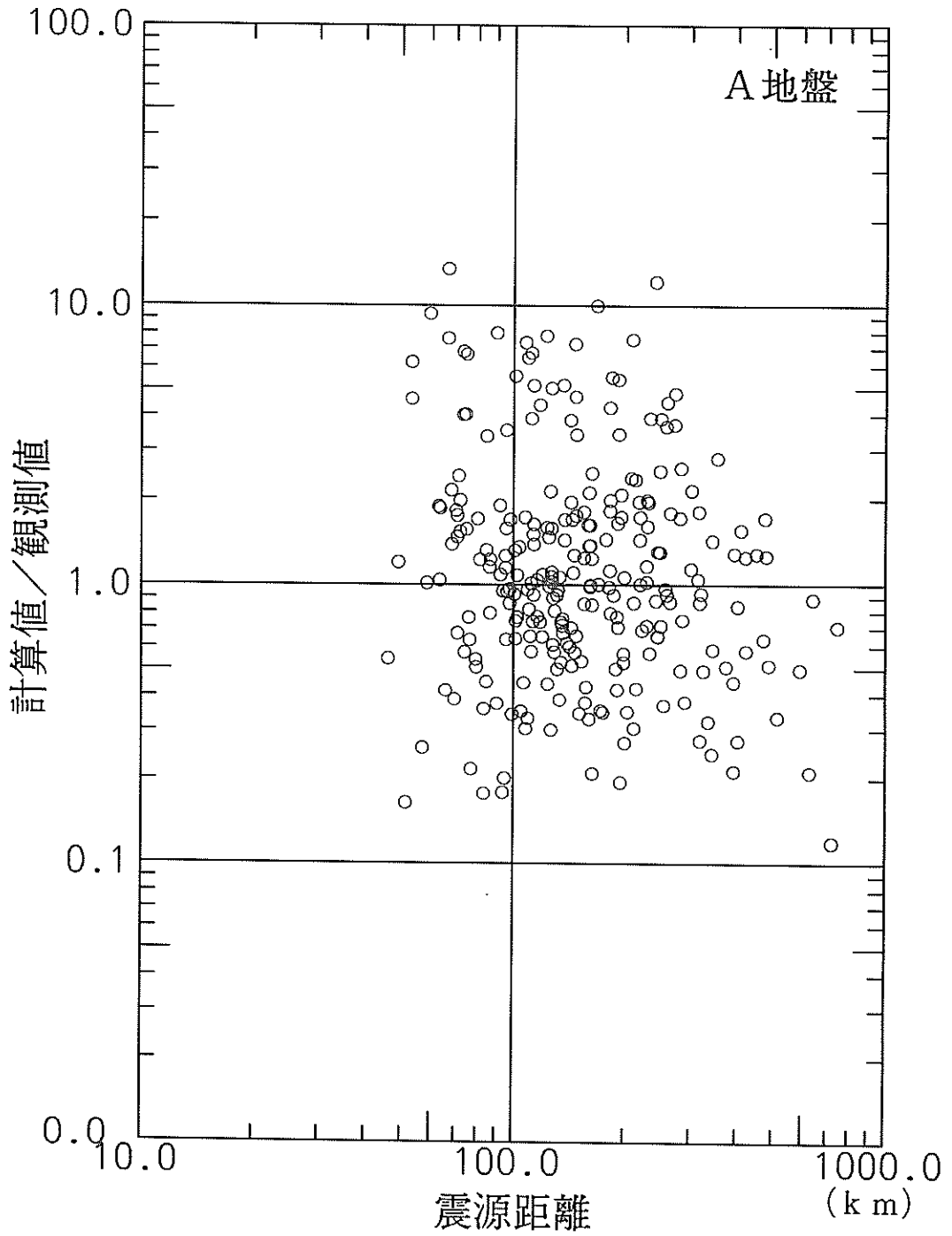


図-6-16 観測値と距離減衰式による予測値の比 (A地盤, 水平動)

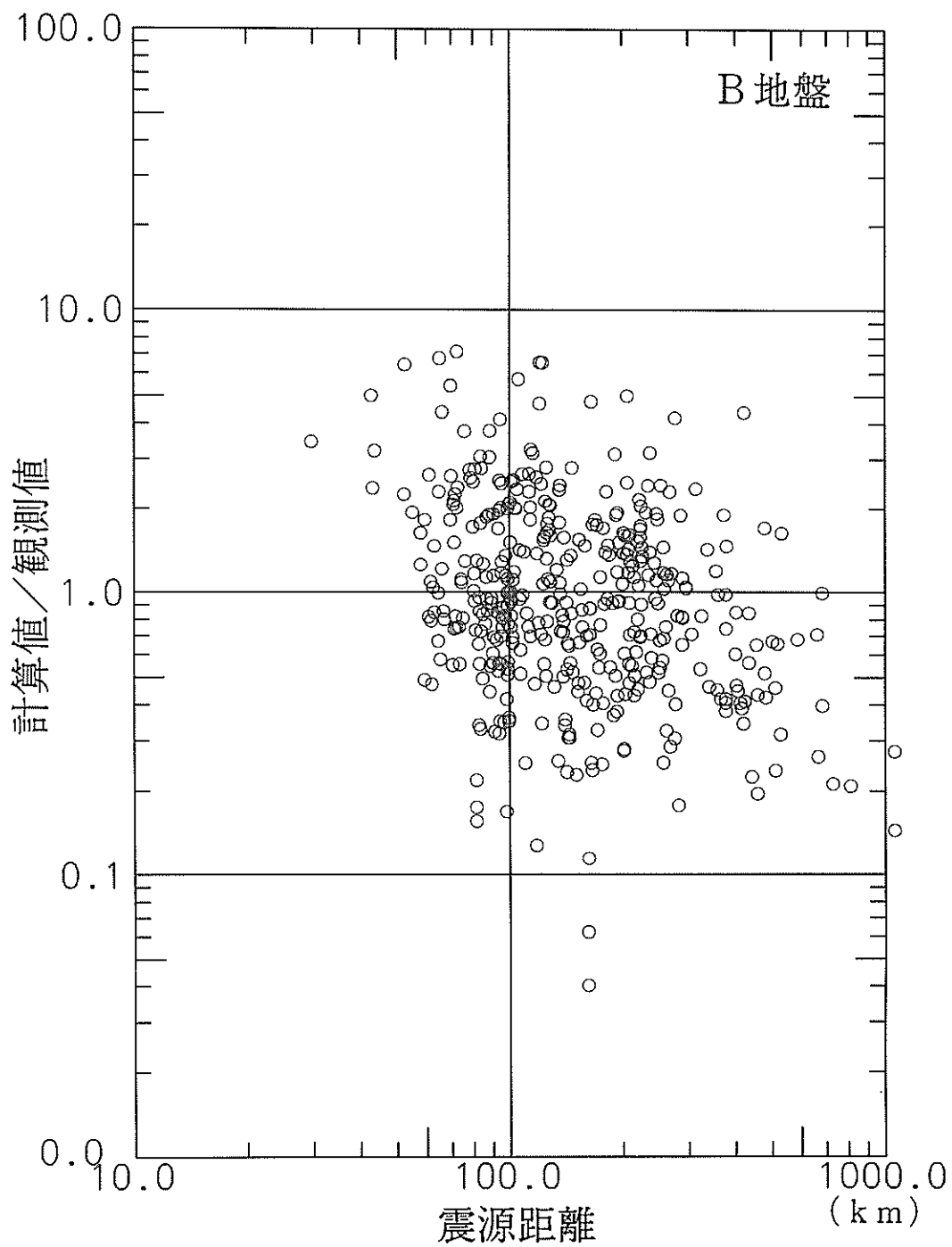


図-6-17 観測値と距離減衰式による予測値の比 (B地盤, 水平動)

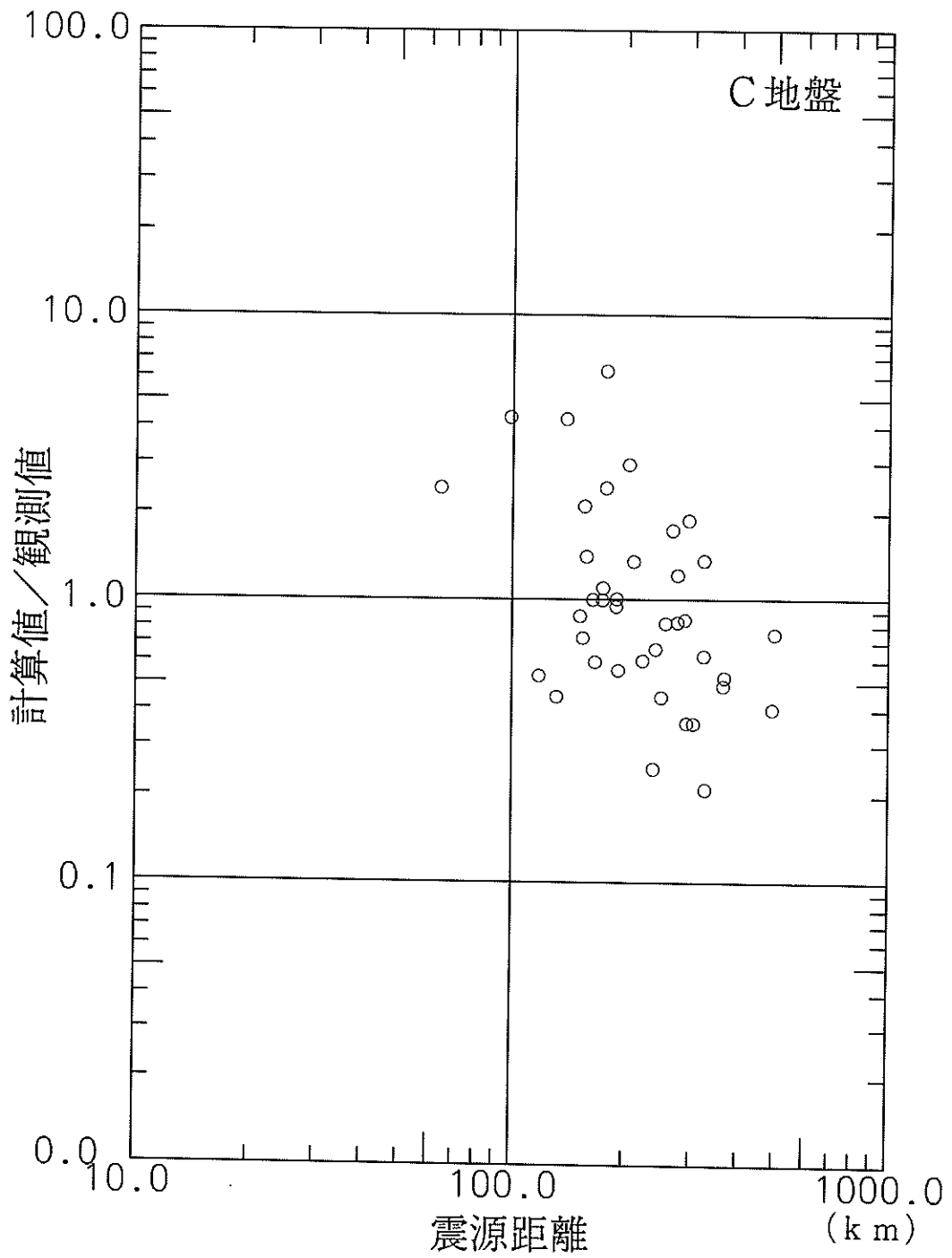


図-6-18 観測値と距離減衰式による予測値の比 (C地盤, 水平動)

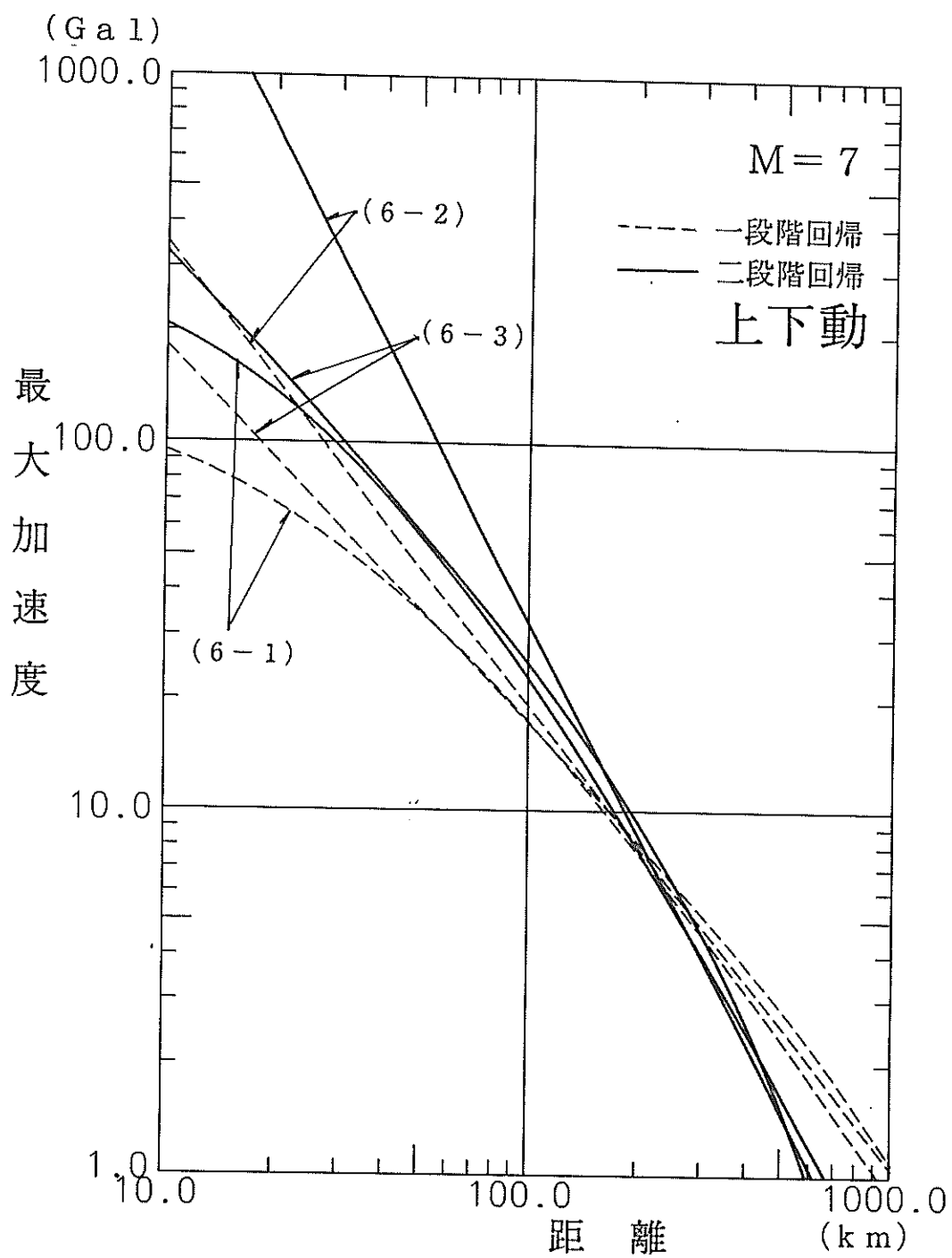


図-6-19 回帰式の形の違いによる距離減衰式の比較 (M=7)

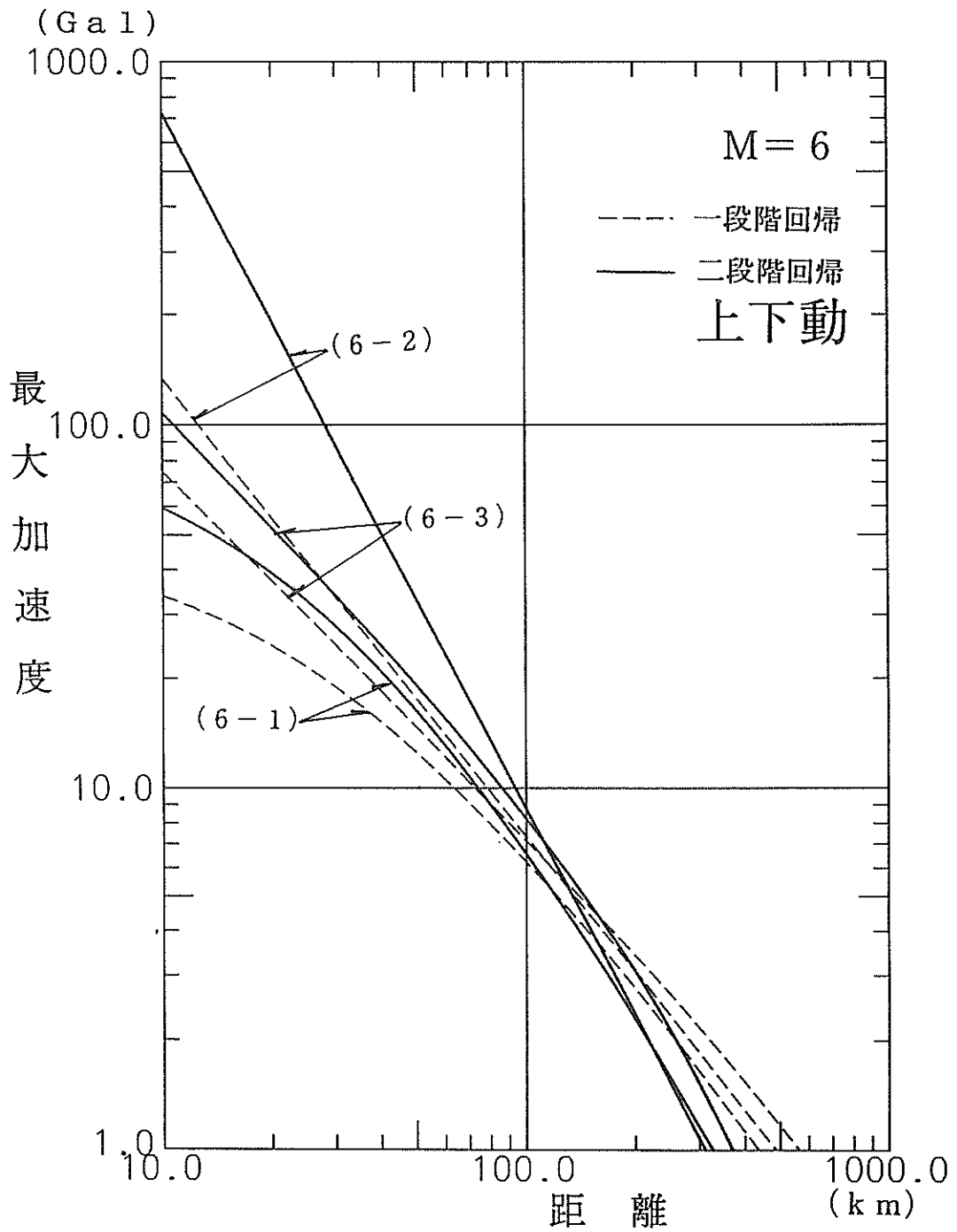


図-6-20 回帰式の形の違いによる距離減衰式の比較 (M=6)

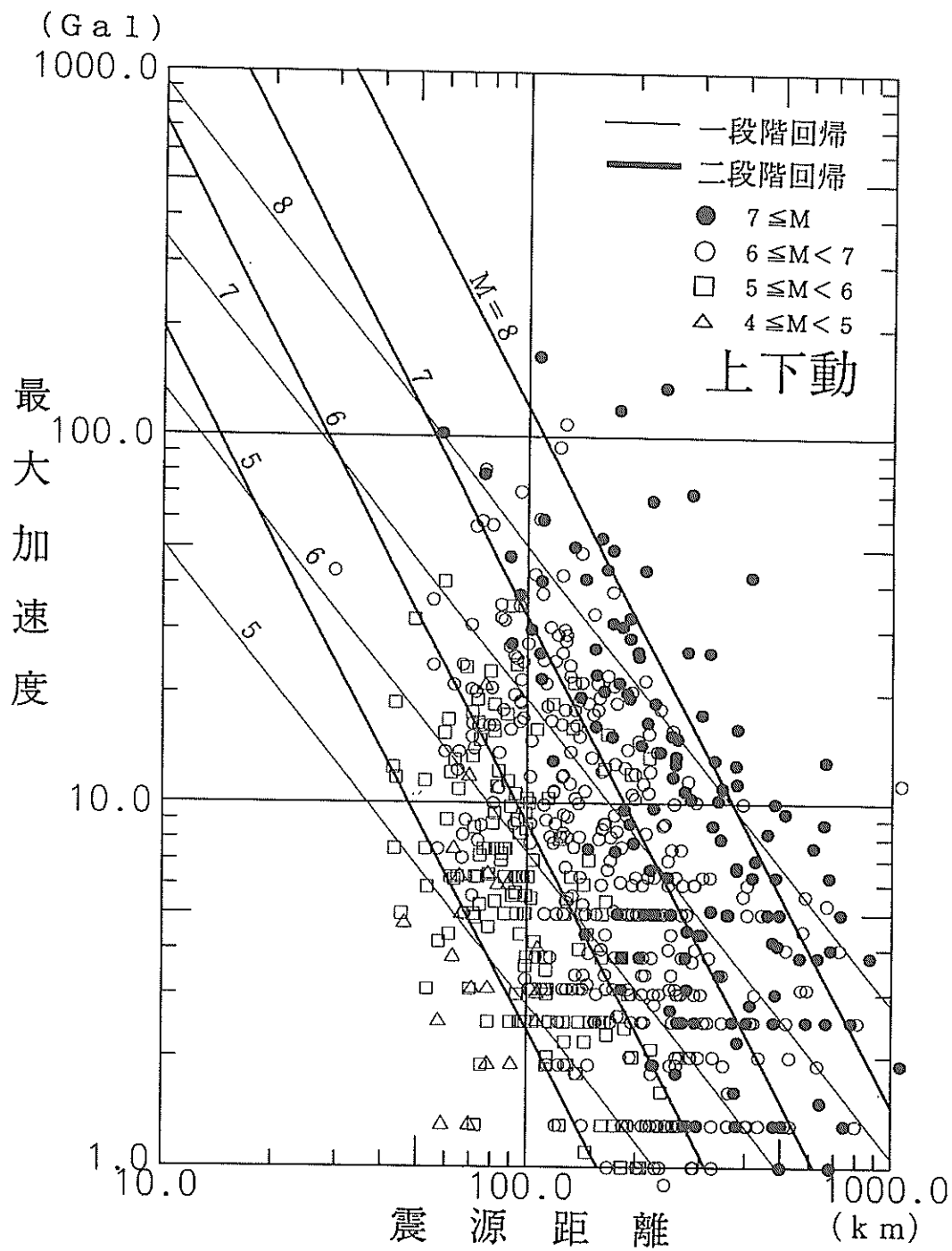


図-6-21 観測記録と距離減衰式の比較

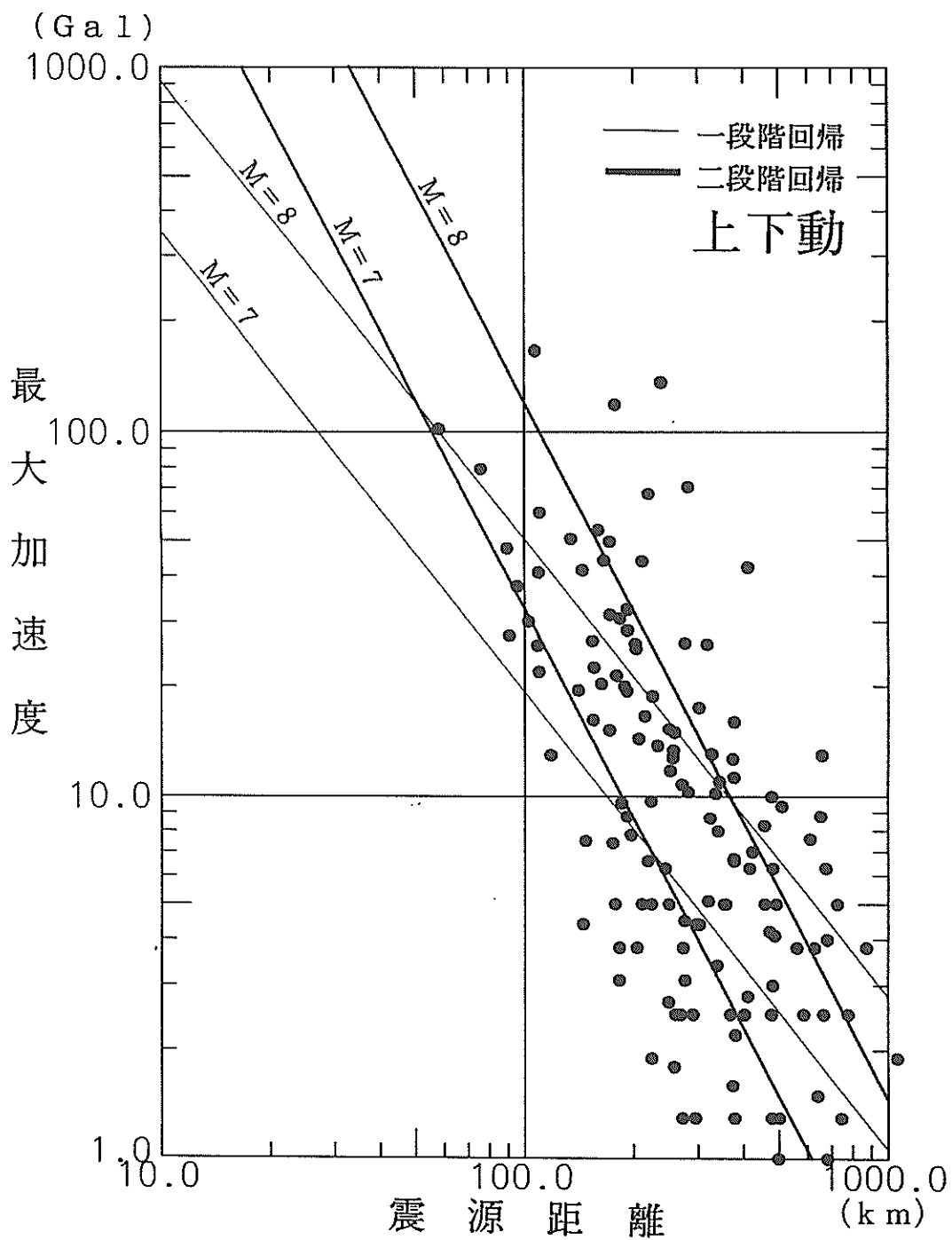


図-6-22 観測記録と距離減衰式の比較 ($M \geq 7$)

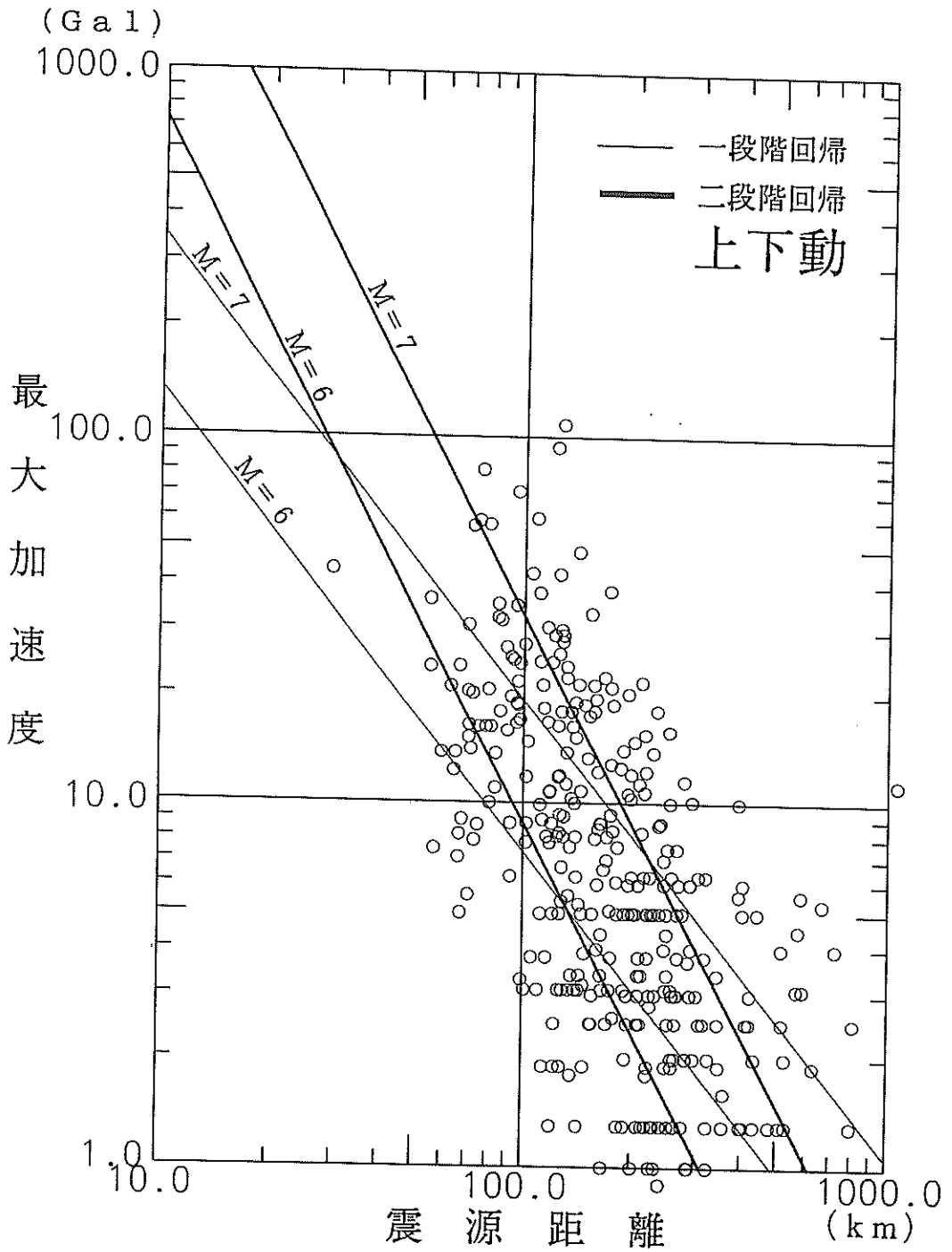


図-6-23 観測記録と距離減衰式の比較 ($7 > M \geq 6$)

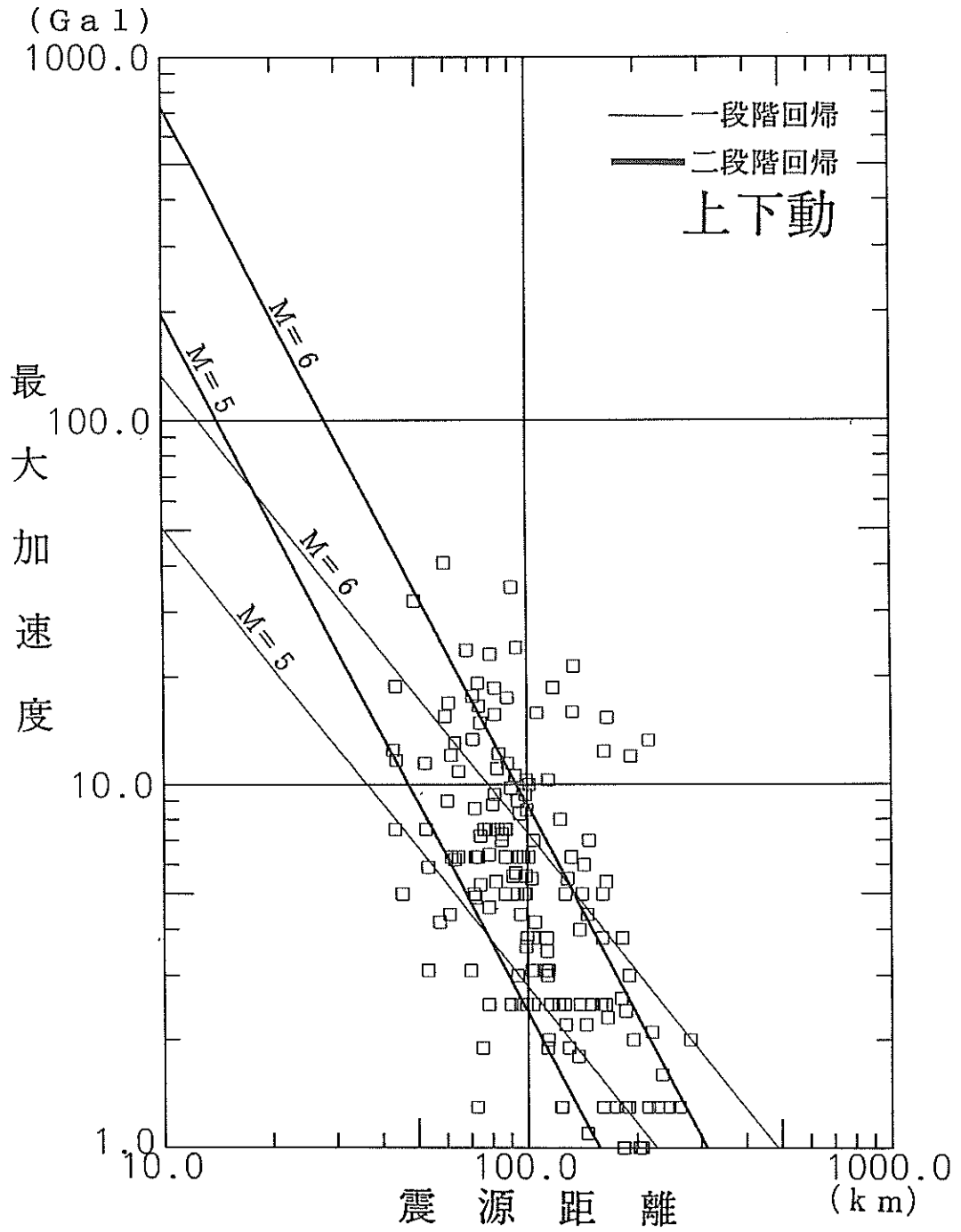


図-6-24 観測記録と距離減衰式の比較 ($6 > M \geq 5$)

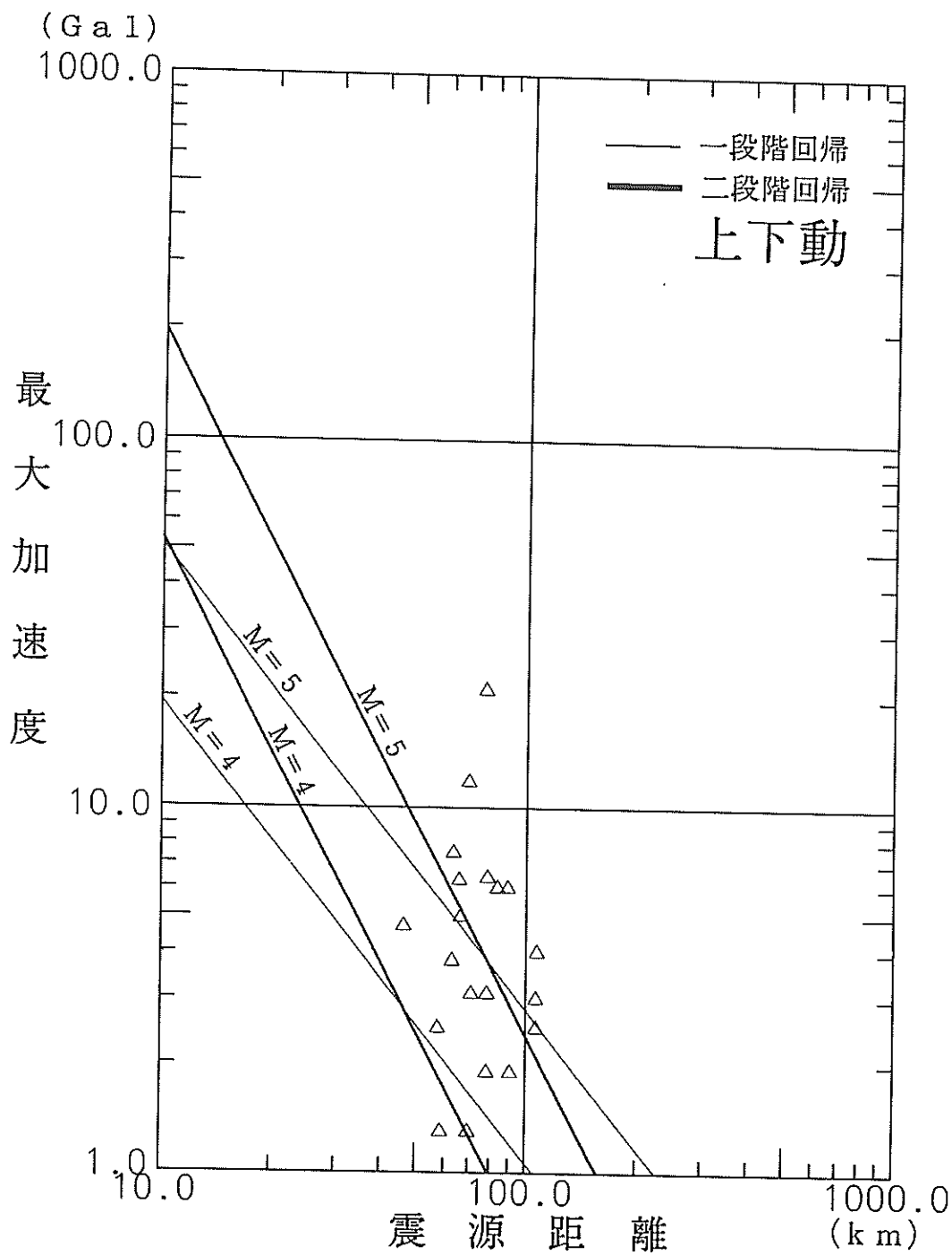


図-6-25 観測記録と距離減衰式の比較 ($5 > M \geq 4$)

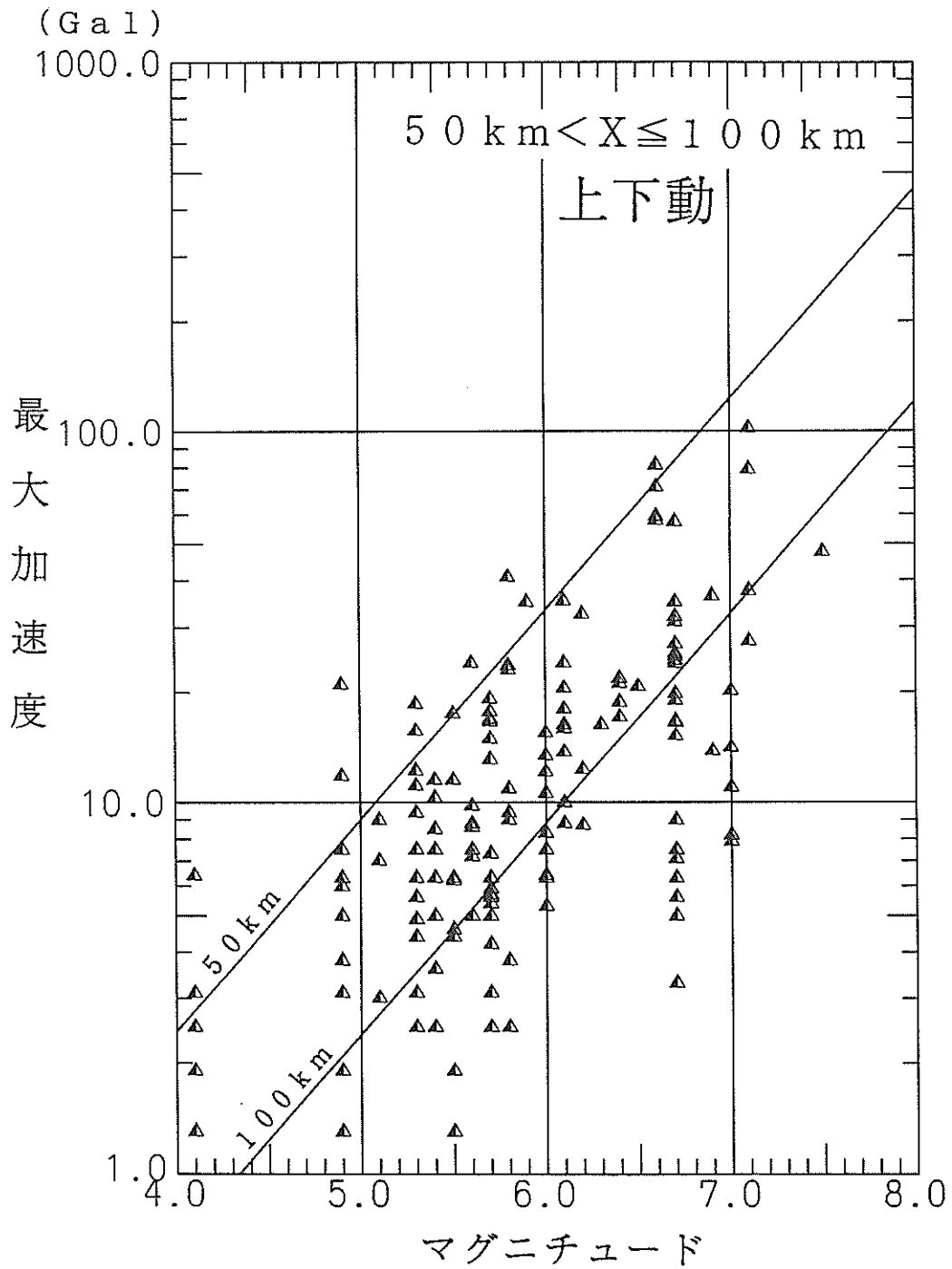


図-6-26 観測記録と距離減衰式の比較 (50 < X ≤ 100)

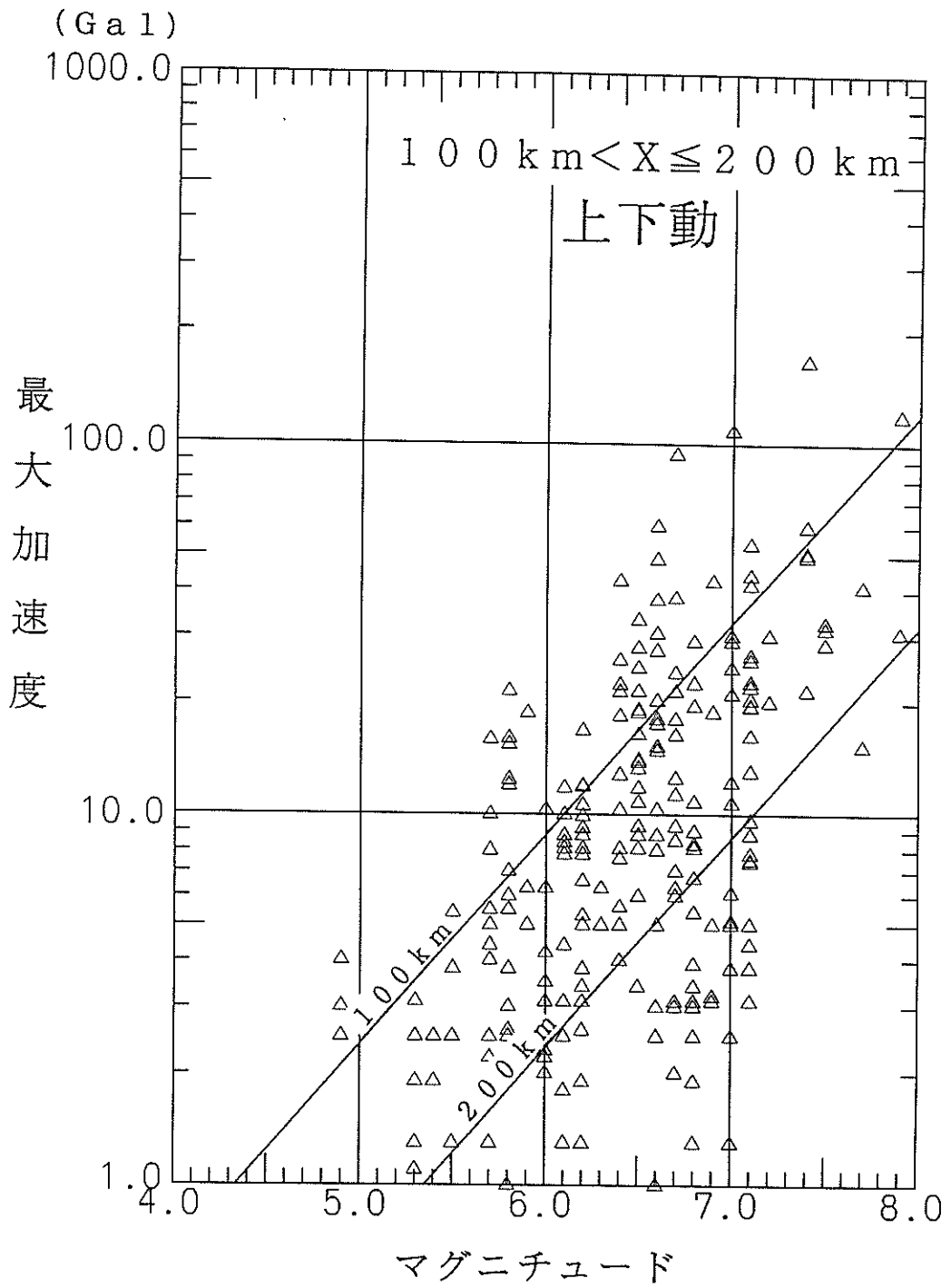


図-6-27 観測記録と距離減衰式の比較 (100 < X ≤ 200)

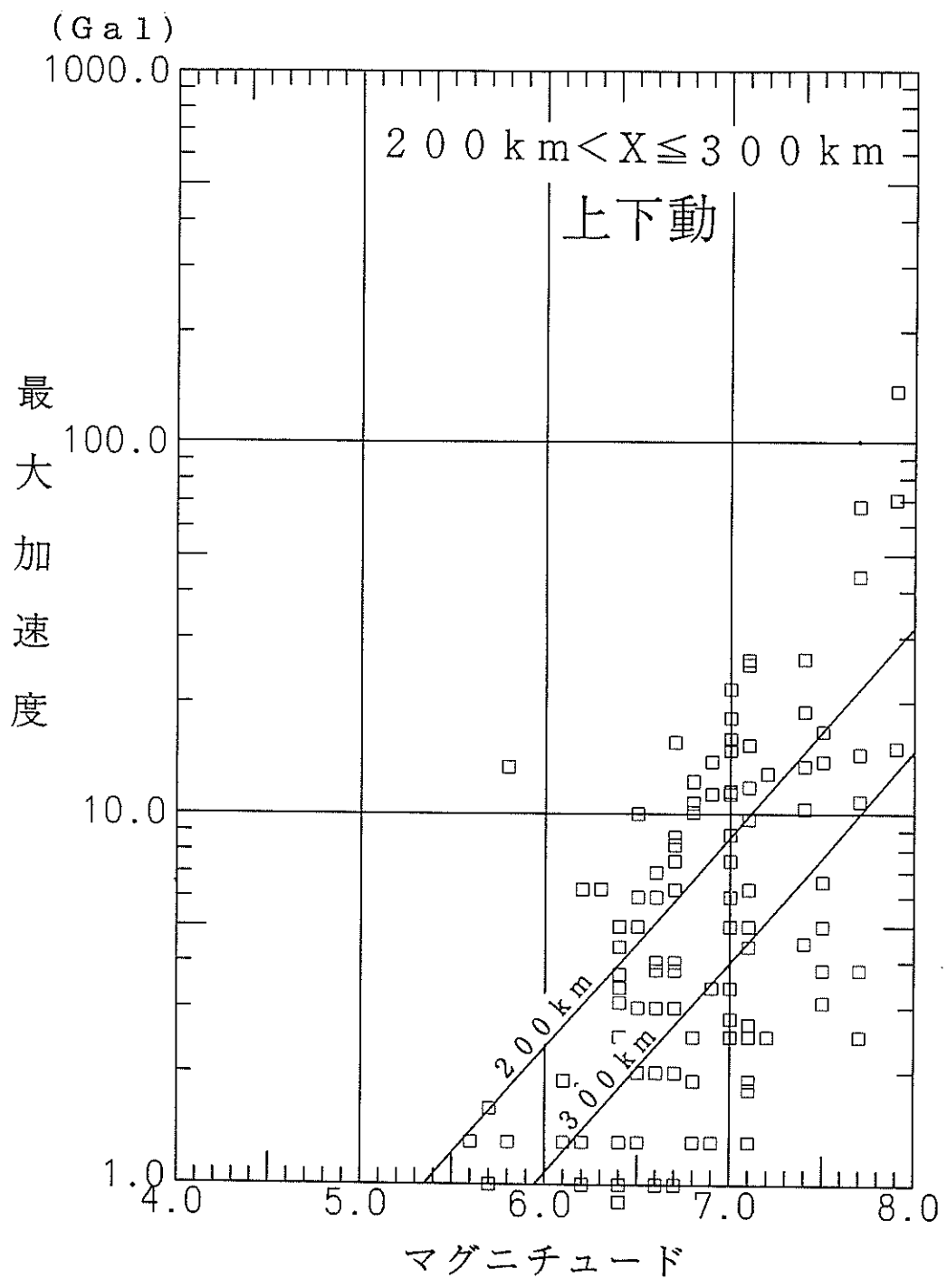


図-6-28 観測記録と距離減衰式の比較 (200 < X ≤ 300)

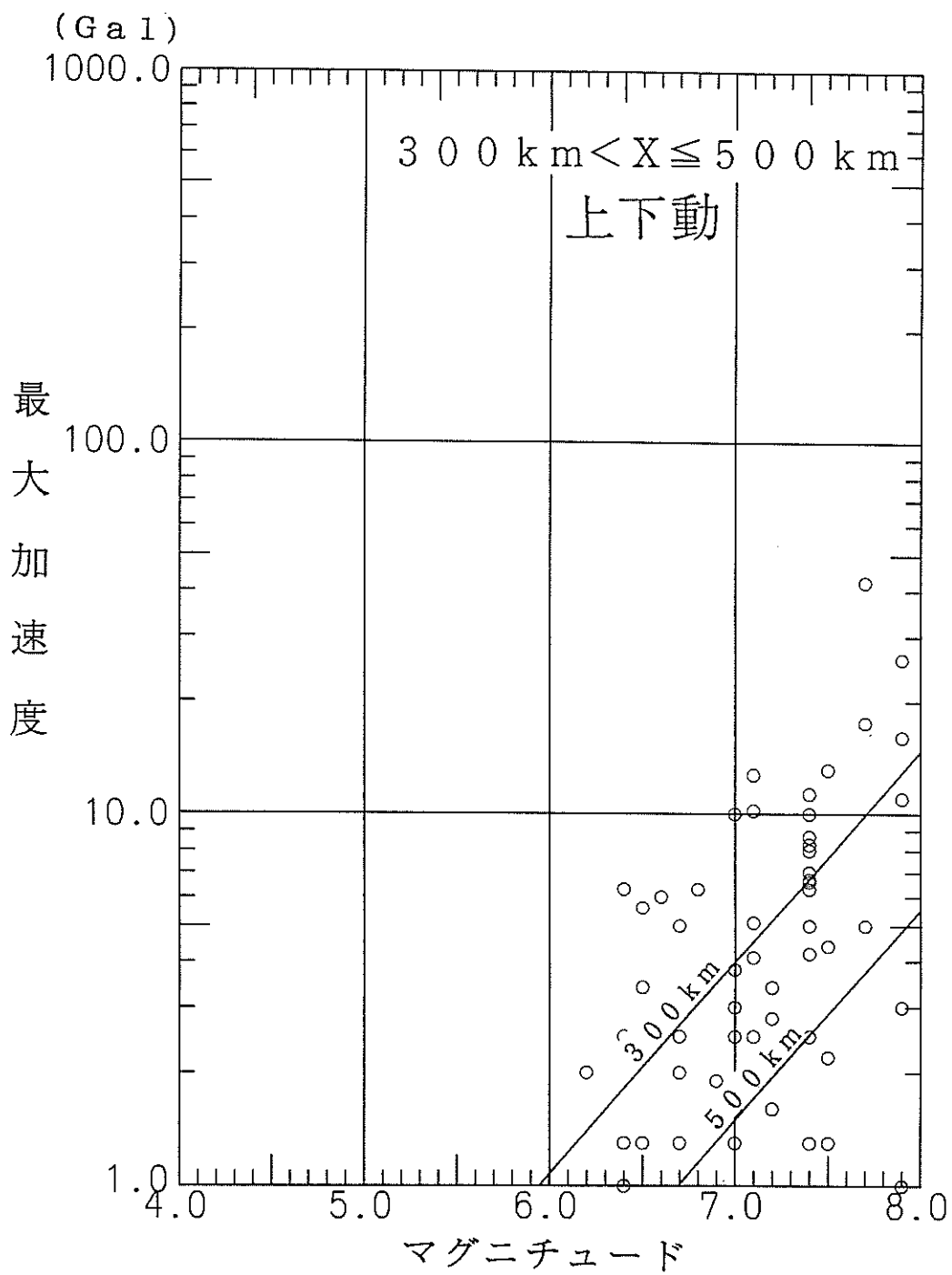


図-6-29 観測記録と距離減衰式の比較 (300 < X ≤ 500)

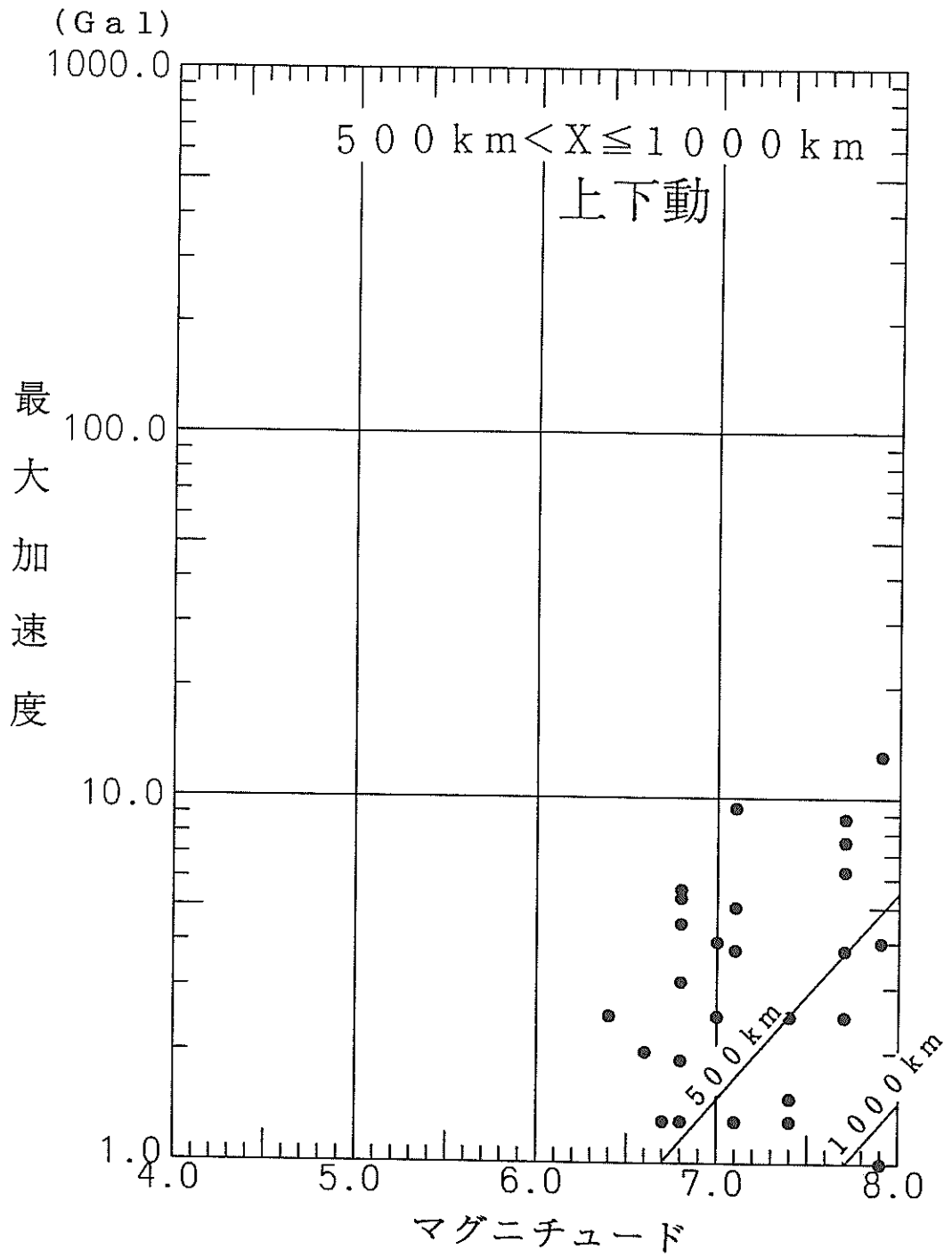


図-6-30 観測記録と距離減衰式の比較 (500 < X ≤ 1000)

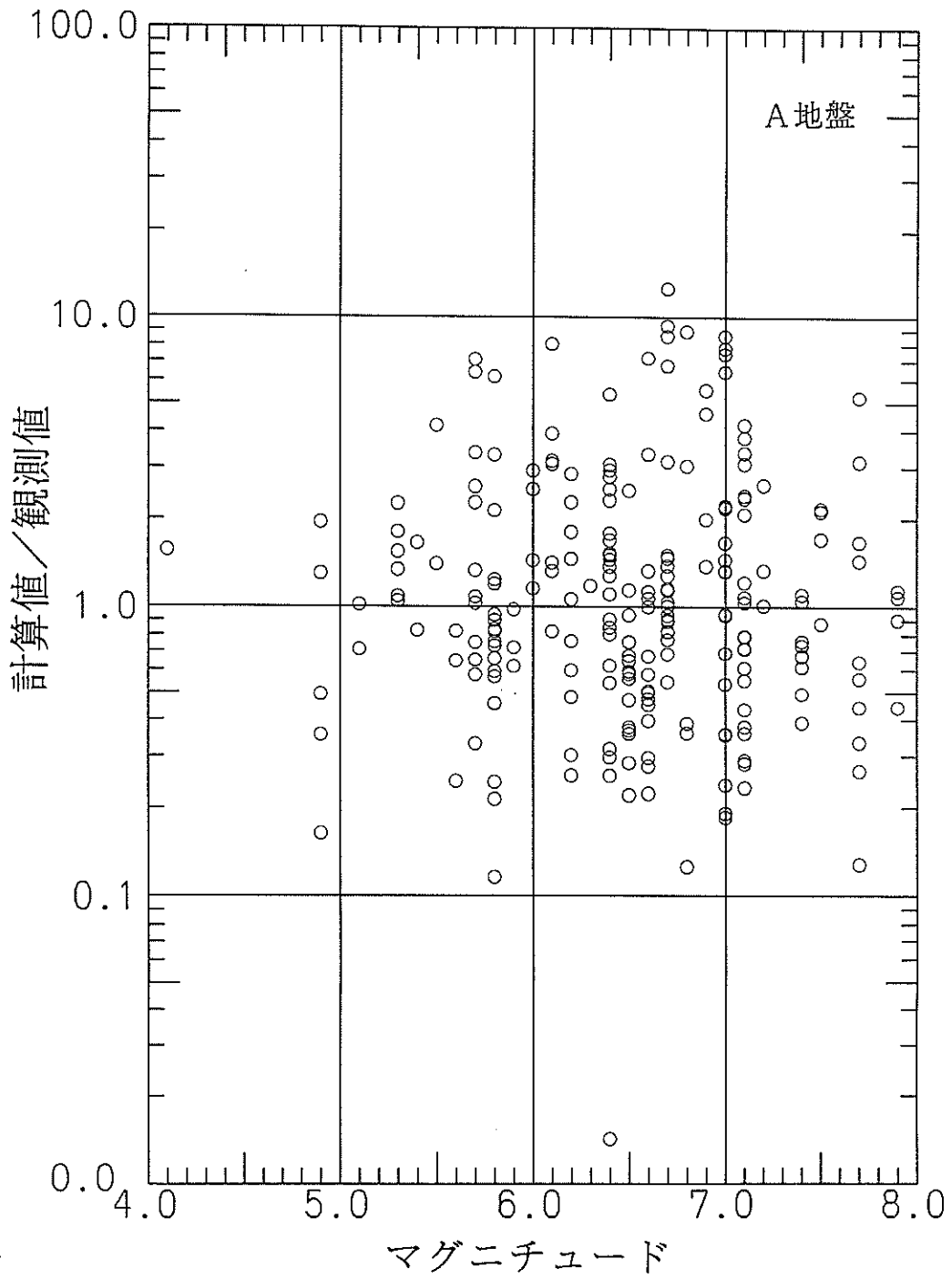


図-6-31 観測値と距離減衰式による予測値の比 (A地盤, 上下動)

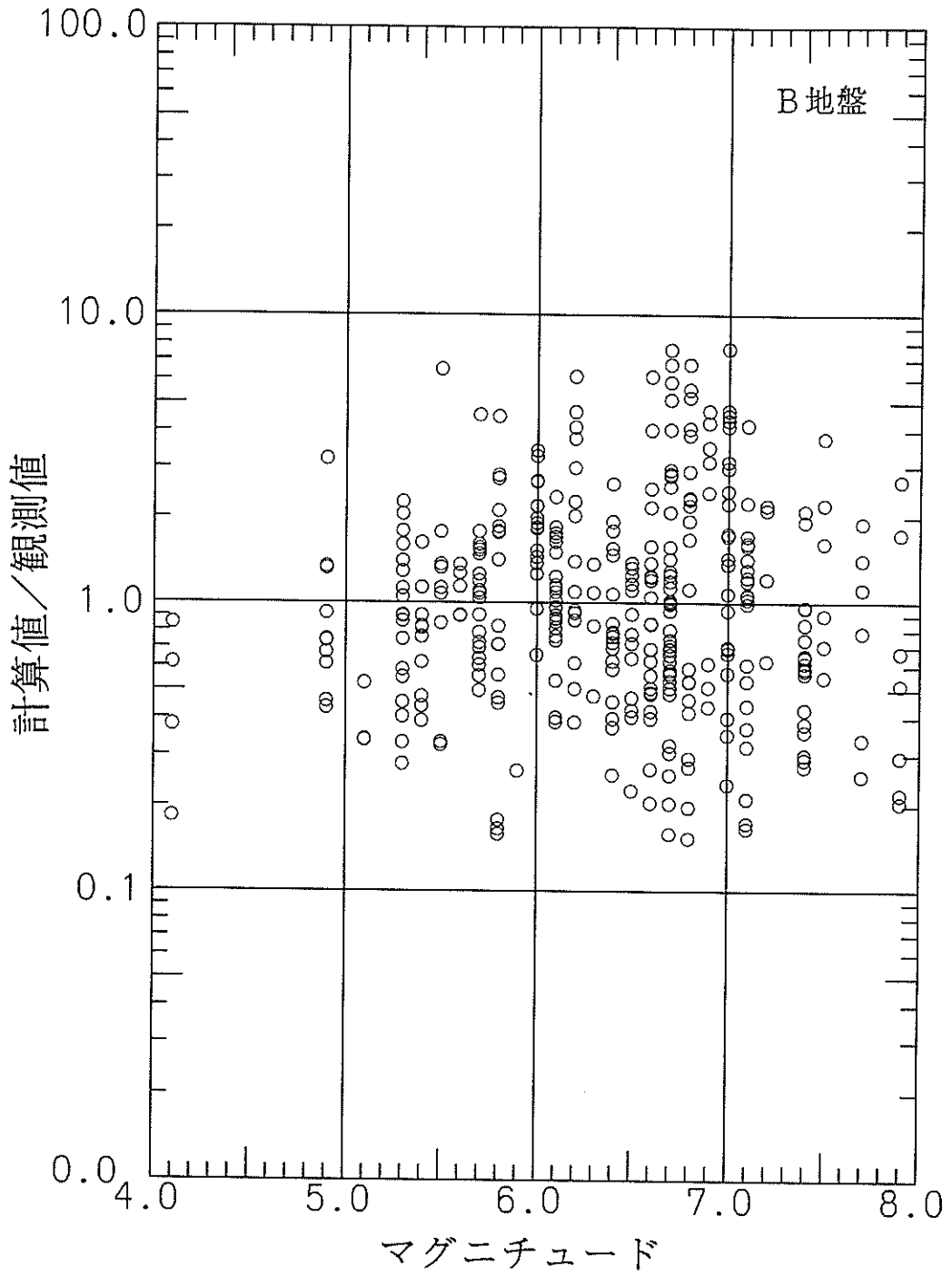


図-6-32 観測値と距離減衰式による予測値の比 (B地盤, 上下動)

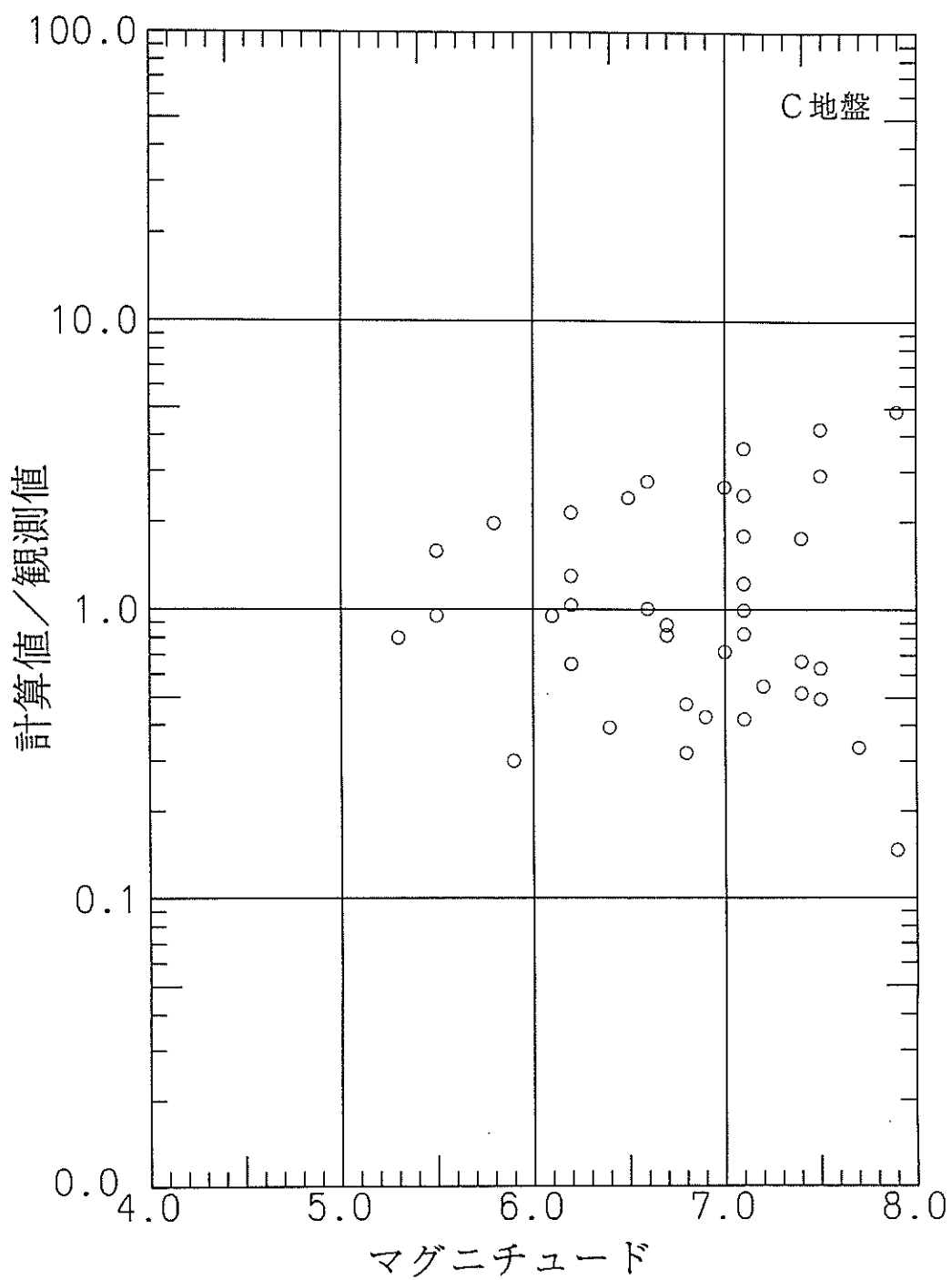


図-6-33 観測値と距離減衰式による予測値の比 (C地盤, 上下動)

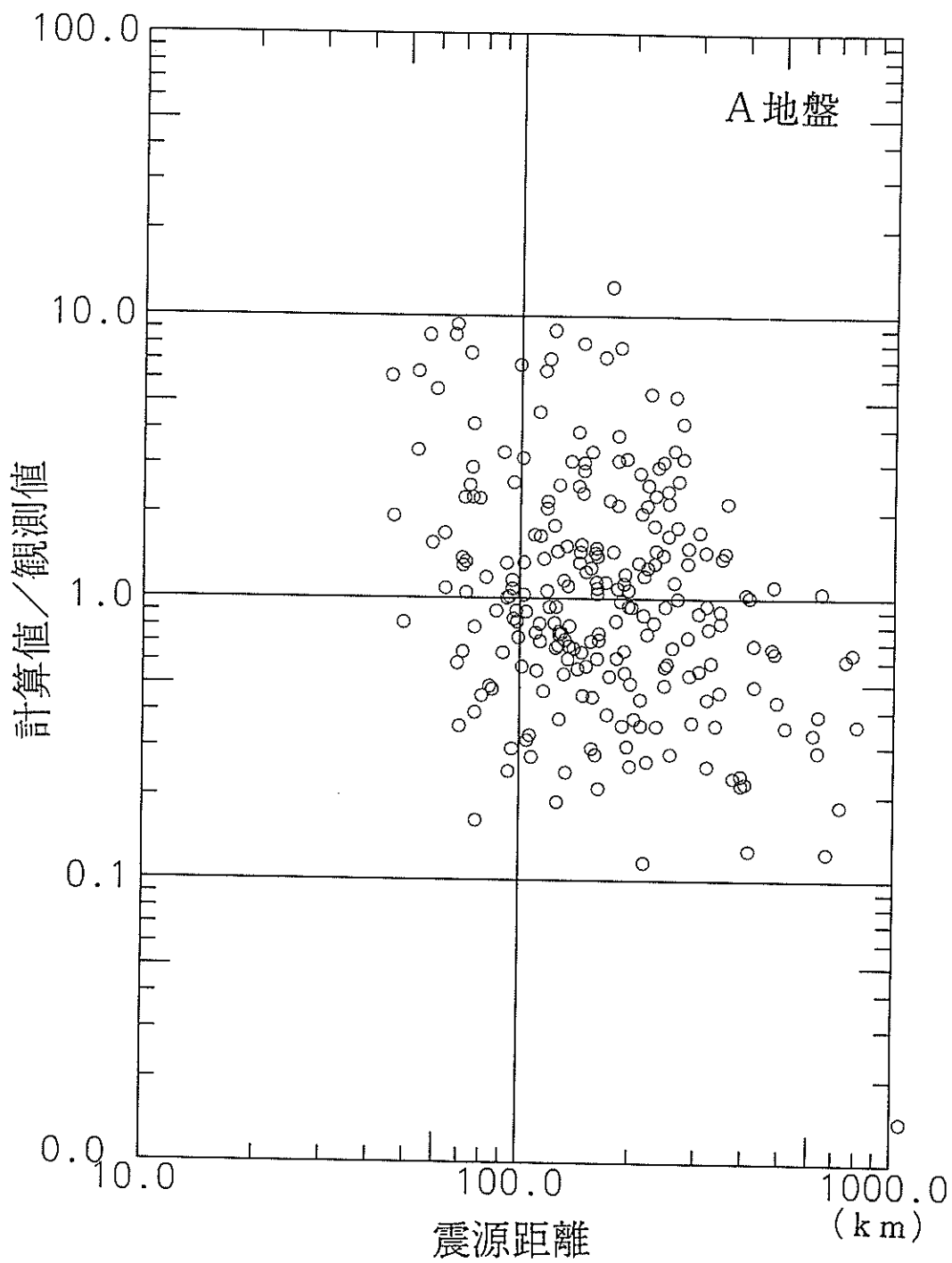


図-6-34 観測値と距離減衰式による予測値の比 (A地盤, 上下動)

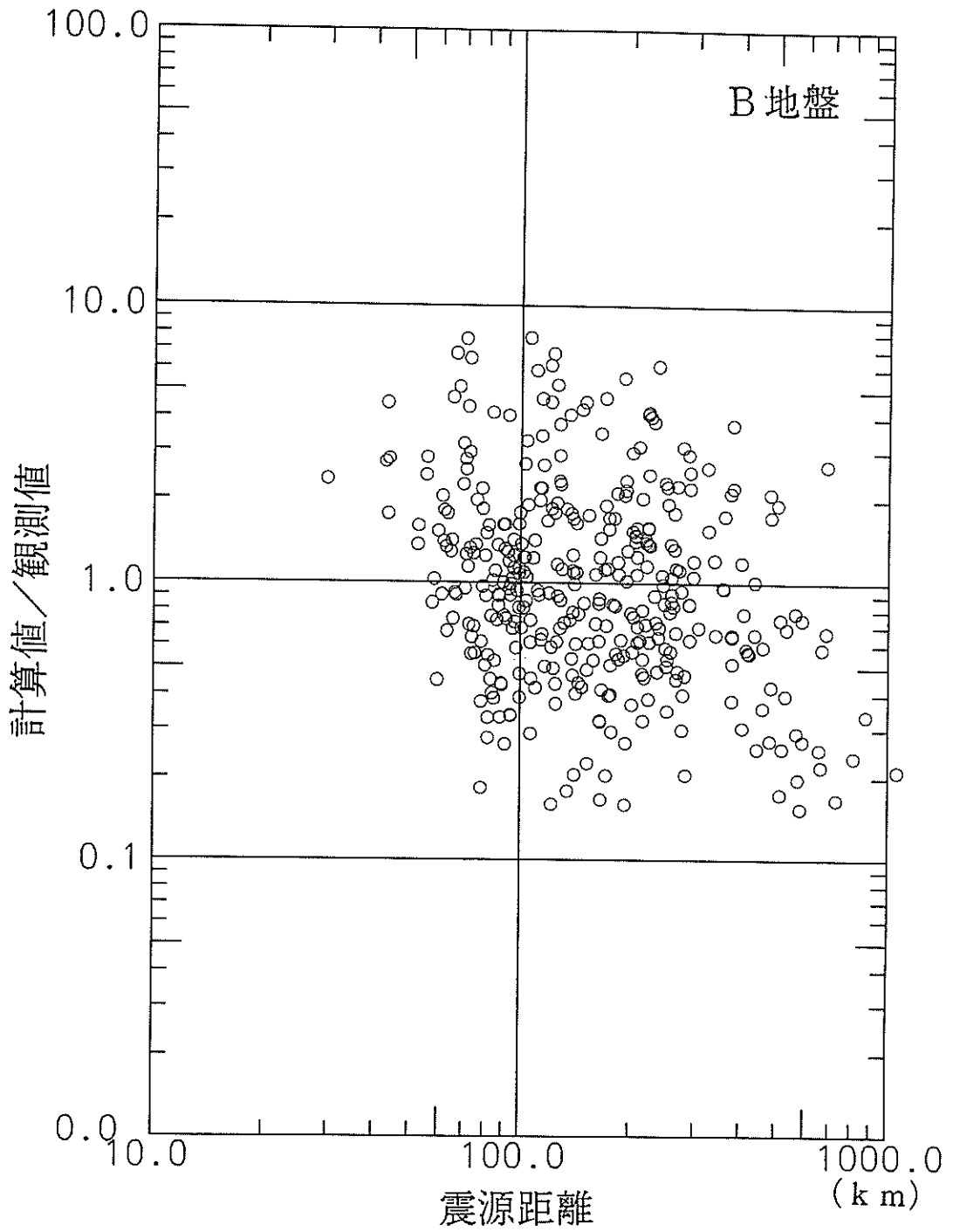


図-6-35 観測値と距離減衰式による予測値の比 (B地盤, 上下動)

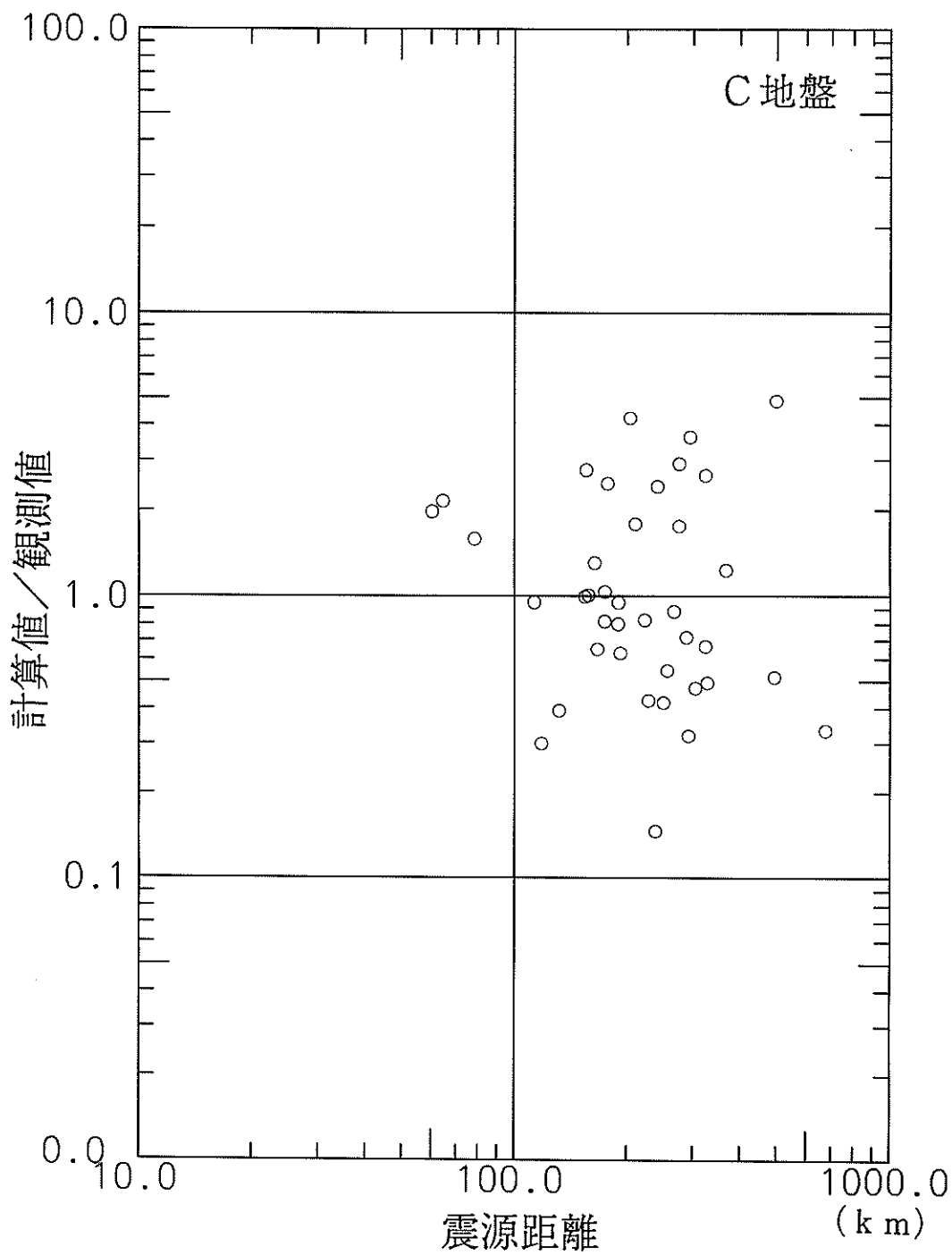


図-6-36 観測値と距離減衰式による予測値の比 (C地盤, 上下動)

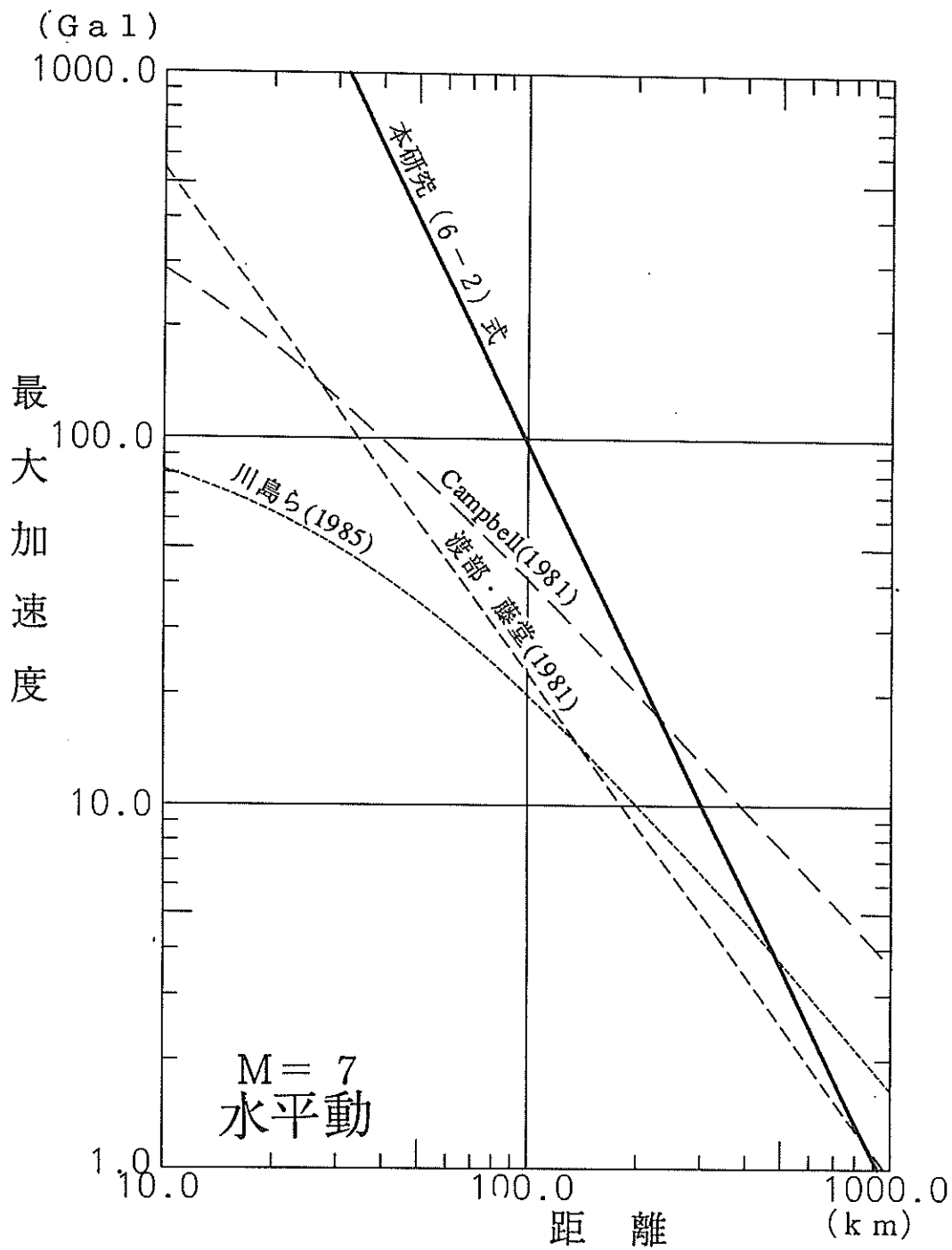


図-6-37 一段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式との距離と最大加速度の関係の比較 (M = 7)

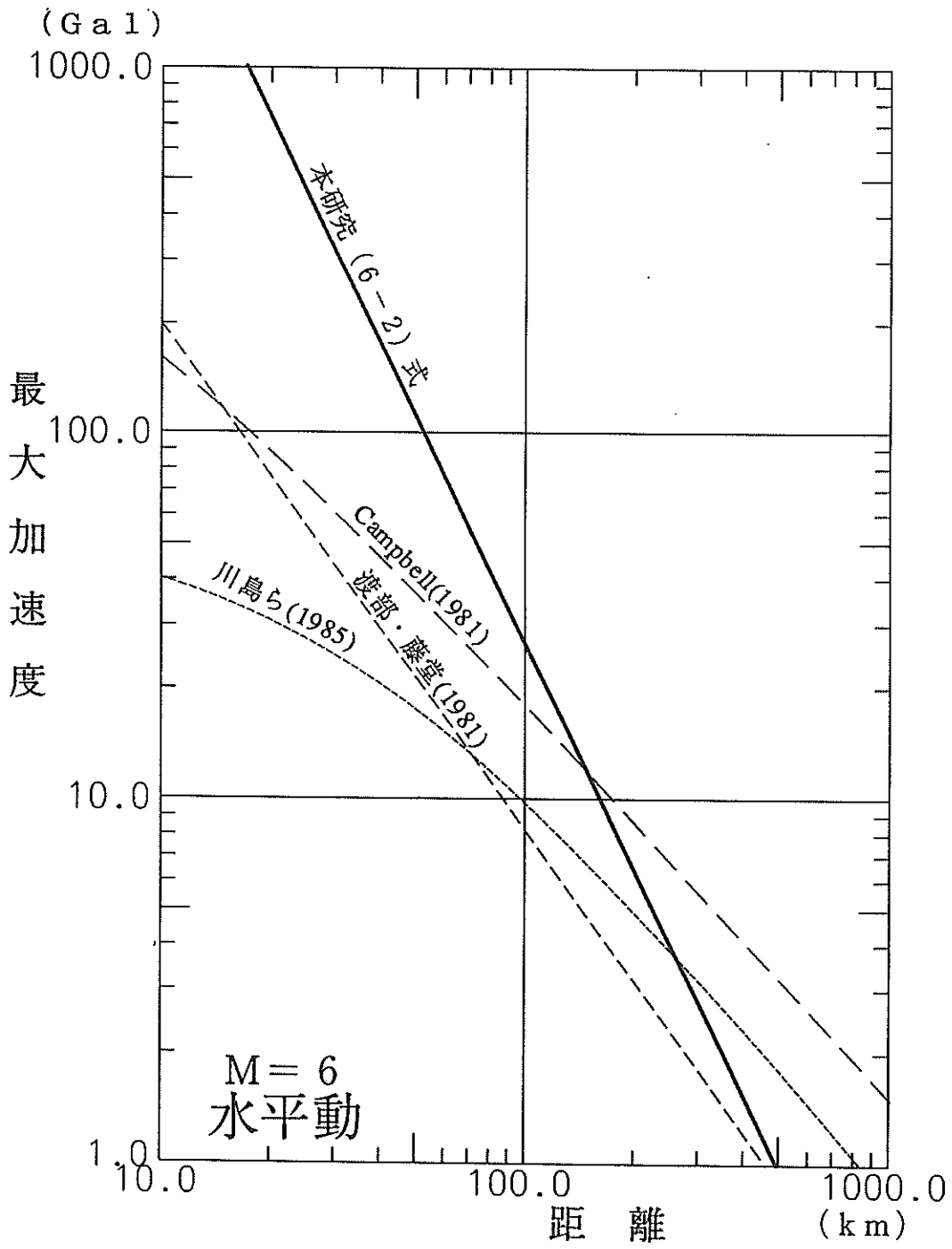


図-6-38 一段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=6)

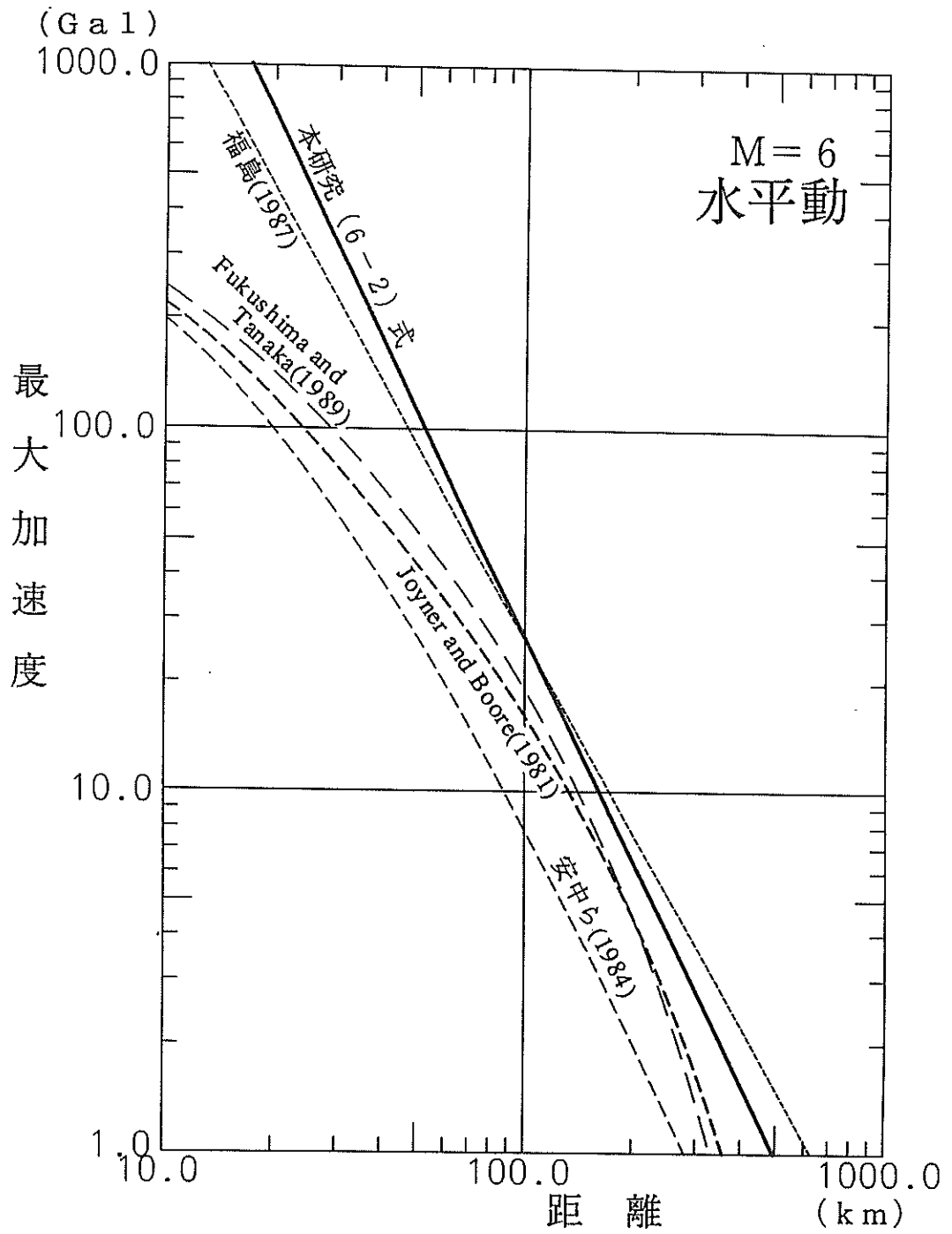


図-6-39 二段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=7)

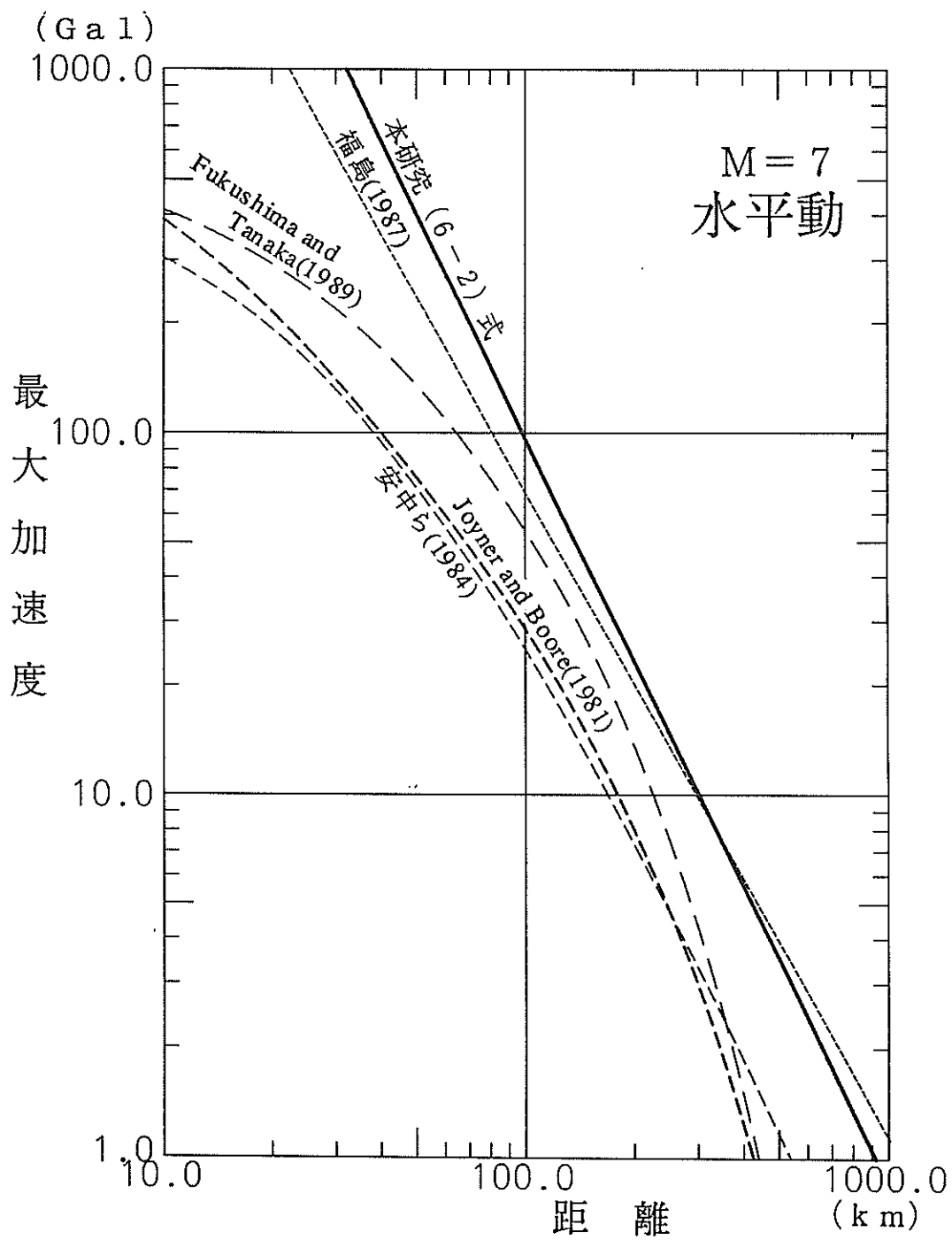


図-6-40 二段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=6)

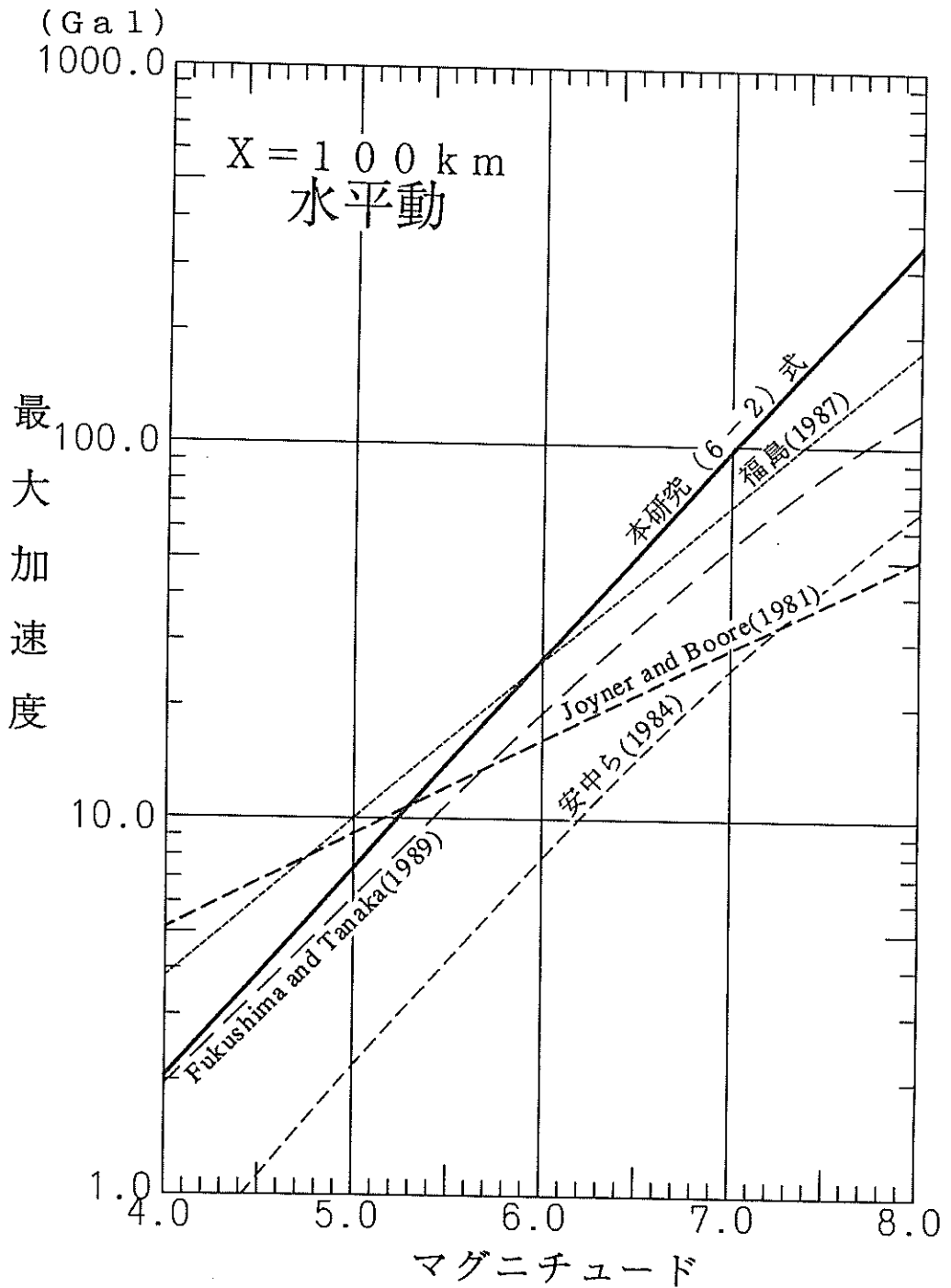


図-6-41 二段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式とのマグニチュードと最大加速度の関係の比較 (X=100km)

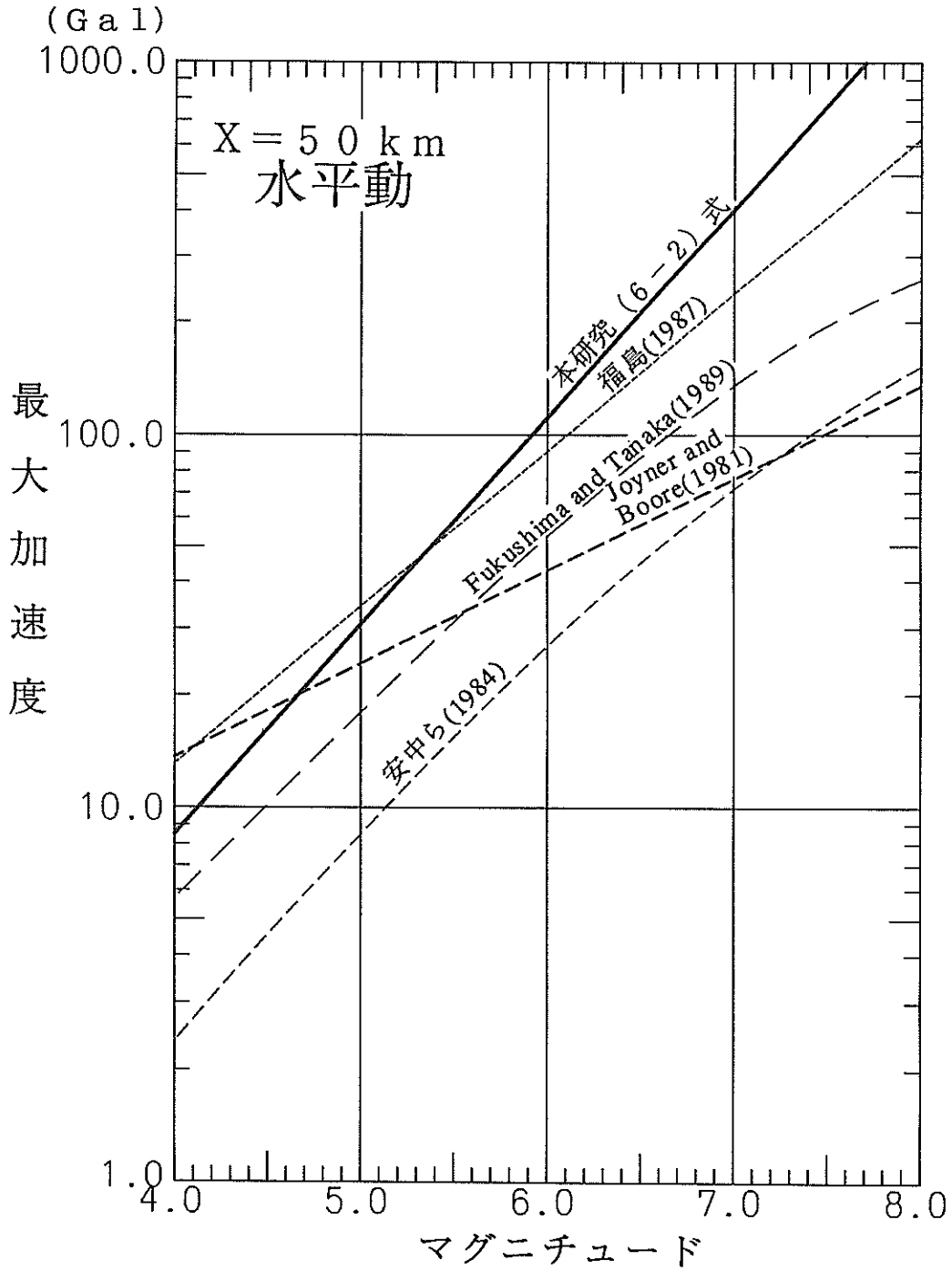


図-6-42 二段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式とのマグニチュードと最大加速度の関係の比較 (X=50km)

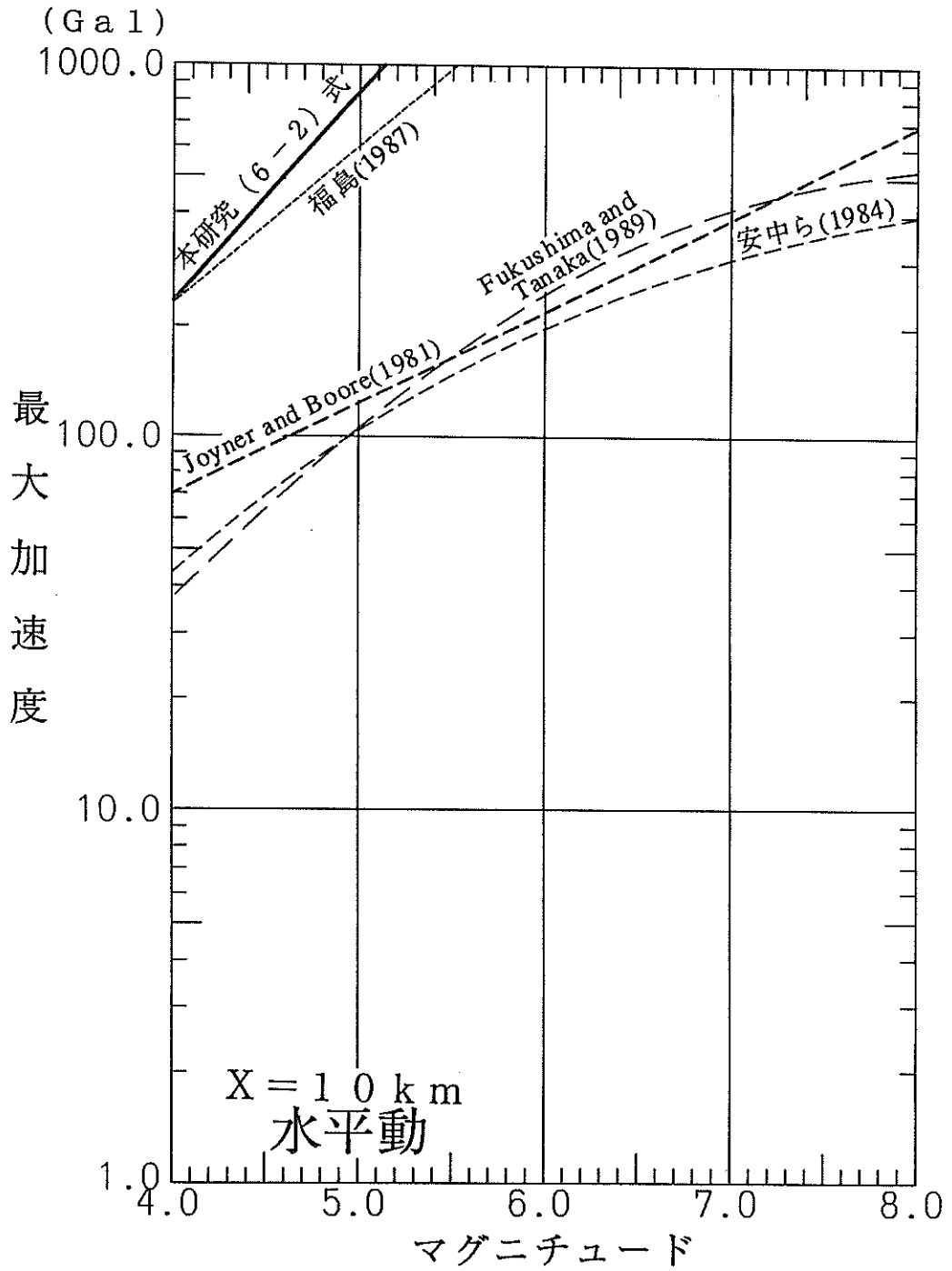


図-6-43 二段階回帰手法を用いた既往の距離減衰式と本研究での提案式とのマグニチュードと最大加速度の関係の比較 ($X=10\text{km}$)

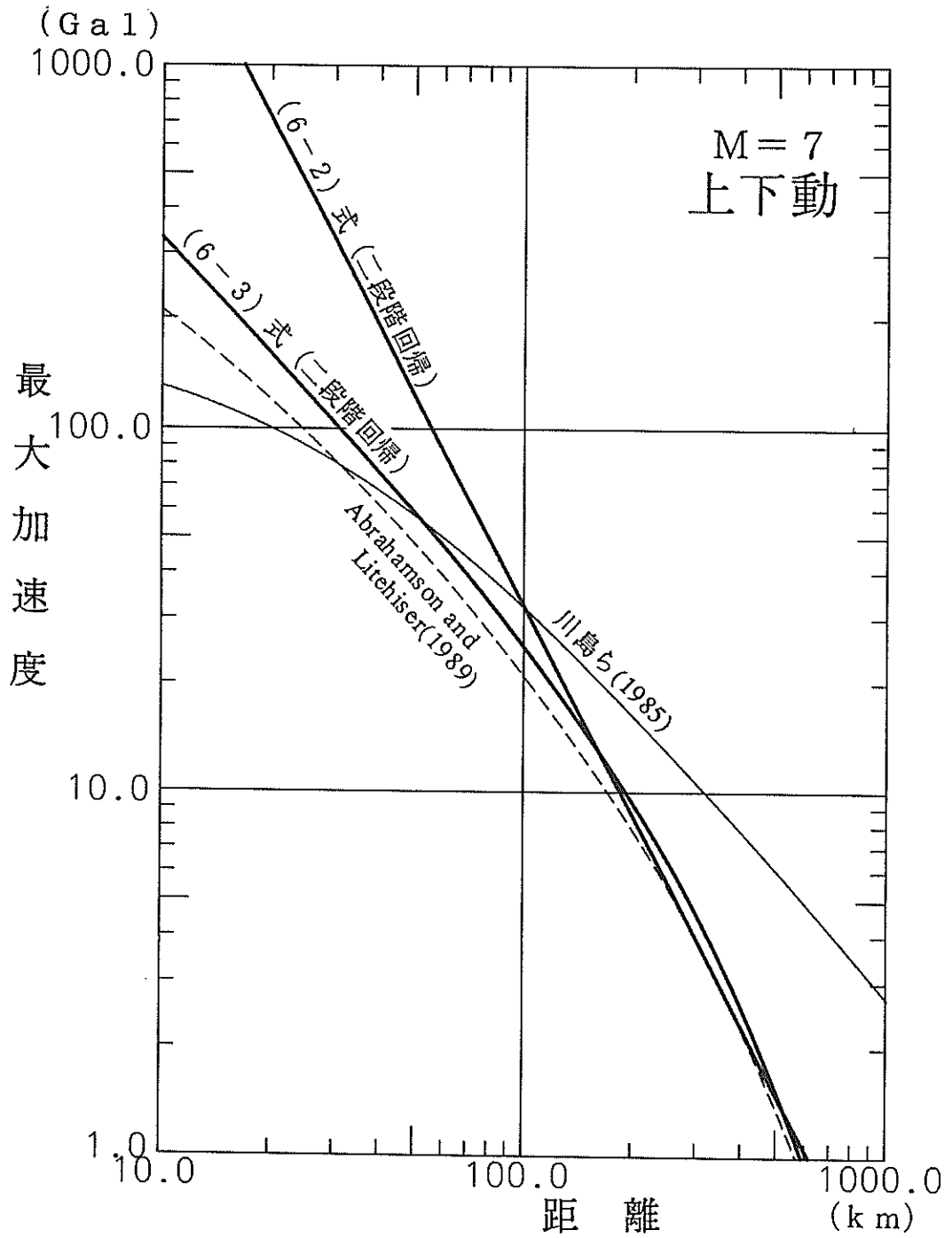


図-6-44 既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=7)

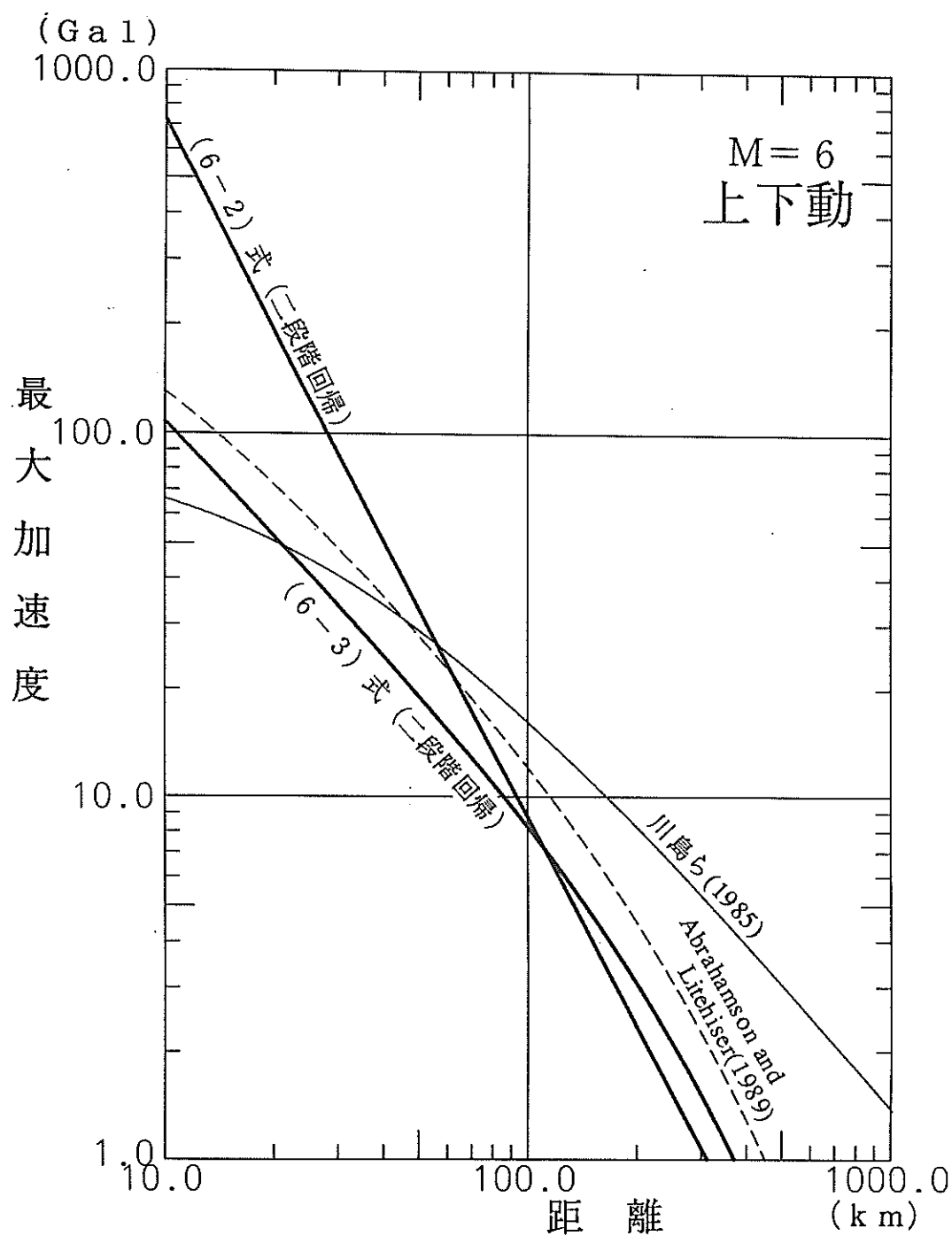


図-6-45 既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=6)

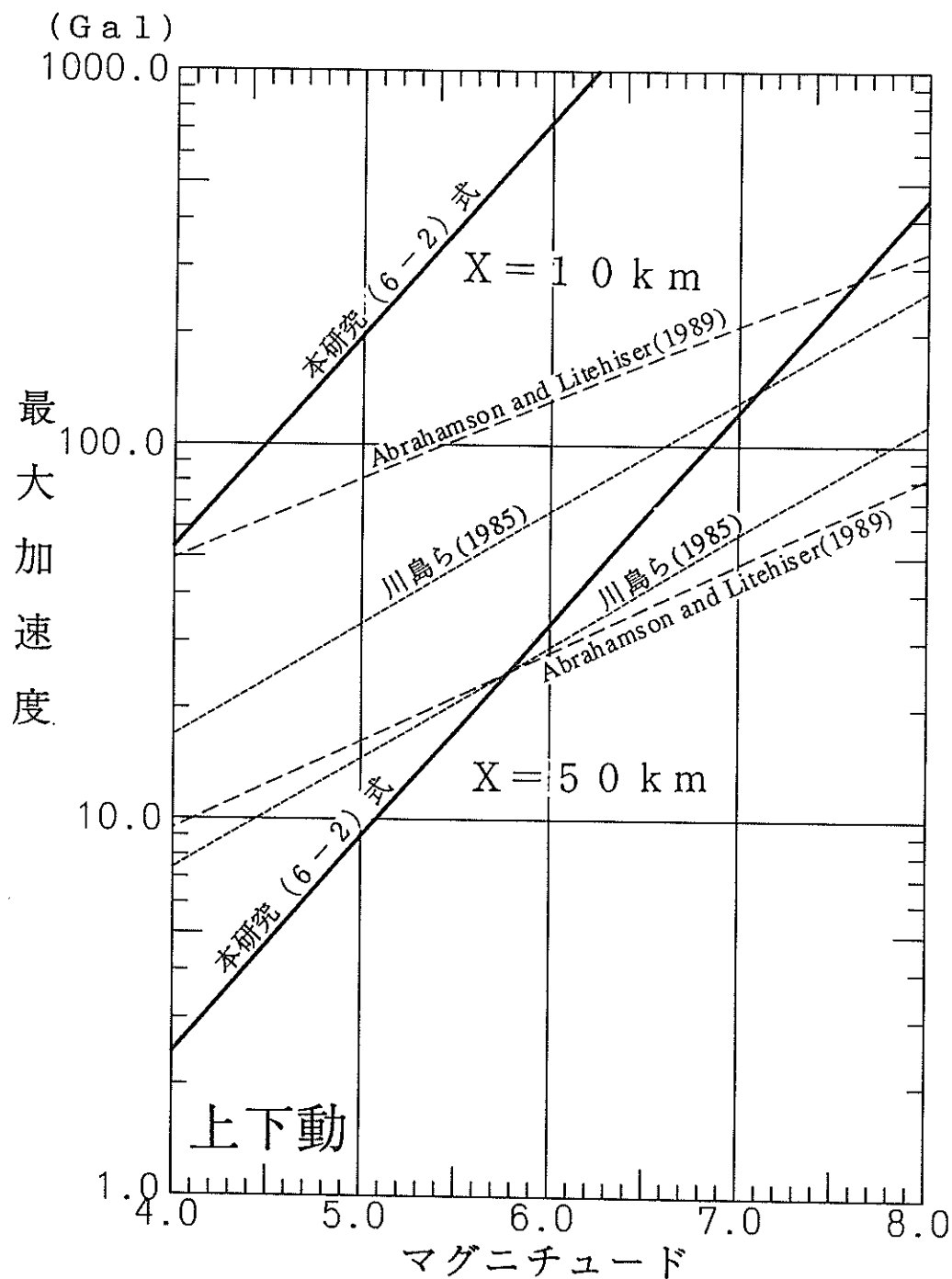


図-6-46 既往の距離減衰式と本研究での提案式との震源距離と最大加速度の関係の比較 (M=7)

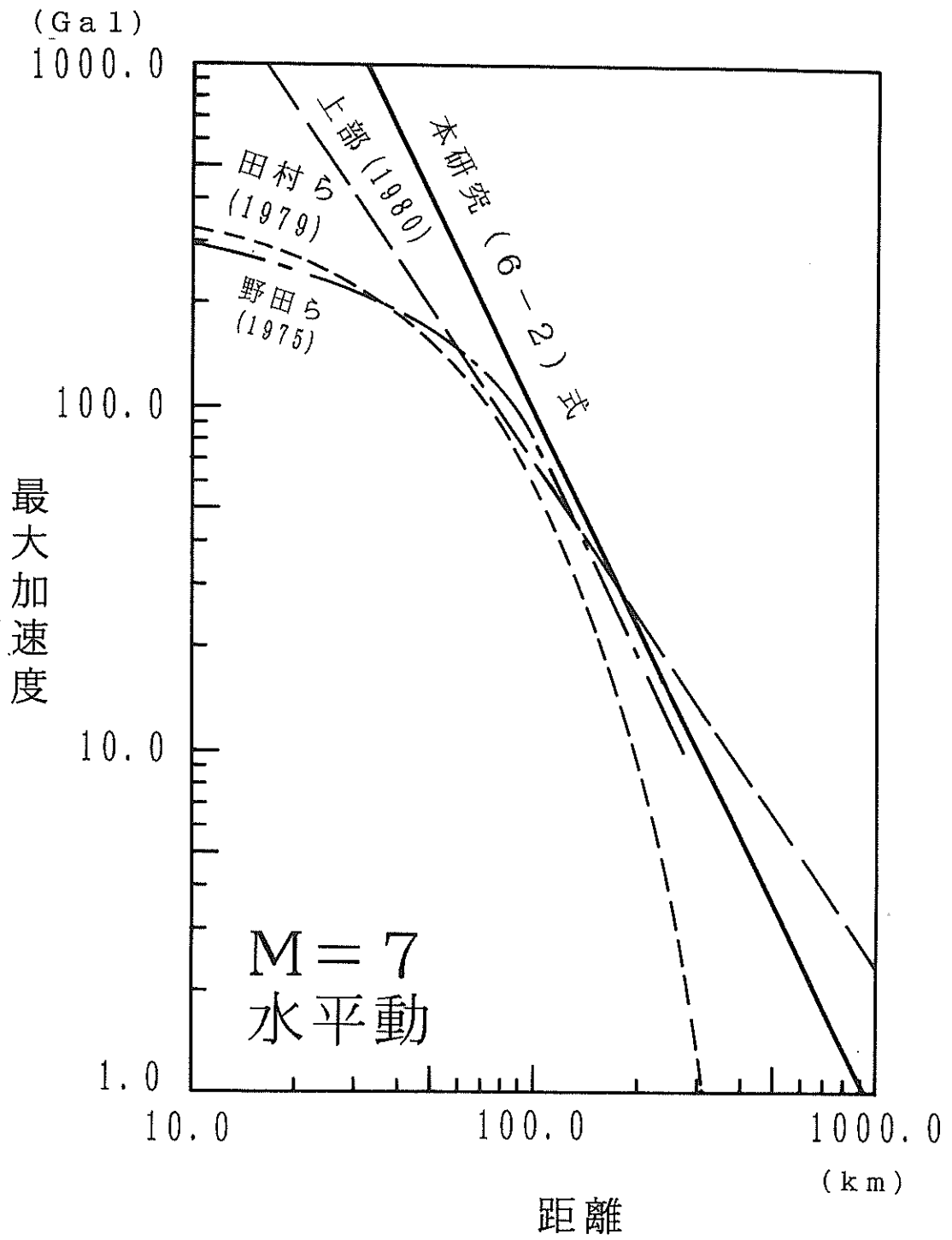


図-6-47 既往の距離減衰式と本研究での提案式との比較 (M=7)

7. 結 論

港湾地域強震観測網により得られた強震記録に基づいて標準的な地盤地表面の最大加速度の距離減衰に関する検討を行った。本研究を通して明かとなった事項をまとめると以下ようになる。

- 1) 統計解析手法として従来より用いられてきた一括回帰による標準的な重回帰分析を行った場合と二段階の回帰分析を行った場合とにおいて得られる距離減衰の勾配を比べると、従来の一括回帰により与えられる値は二段階回帰手法により得られる値に比べ過小となる。ここに、二段階の回帰分析とは、まず個別の地震ごとの回帰式を求め、次に得られた距離減衰の勾配の平均値を求めることに相当する。
- 2) 強震観測記録のデータベースには、これに集録する記録の最大加速度の下限値が存在するという特異性がある。これはデータ相互の内部的な相関を発生させる原因となる。
- 3) 強震観測記録のデータベースにこのような内部的相関関係があることが、従来の一括回帰による重回帰分析により求められる距離減衰式の勾配が過小評価される大きな原因と考えられる。
- 4) 個別の地震毎に回帰式を求める場合には、地震の条件が固定されるため、データ相互の内部的な相関が断ち切れ、その結果一括回帰の場合に発生する問題点が解消されるものと考えられる。
- 5) 個別の地震毎に得られる距離減衰式の勾配のばらつきは大きい。試みに地震発生位置により4つの地域区分を設け、個別の地震毎に求められる距離減衰の勾配の地域特性を調べたところ、各地域毎に距離減衰の勾配に違いが見られ、距離減衰の地域特性の考慮の必要性を示唆する結果も得られた。
- 6) わが国の全国にわたる平均的な距離減衰を検討することは、実務上からも意義のあるところであり、個別の地震毎の回帰での相関係数が0.5を下回るものを除いたデータベースを用い、二段階回帰手法により水平動と上下動の距離減衰式を求め、最大加速度 a (Gal), 気象庁マグニチュード M , 震央距離 Δ (km) の回帰式として以下の結果を得た。

○水平最大加速度の距離減衰式

$$\log a = 0.552M - 1.965 \log (\Delta + 30) + 2.103$$

$$\log a = 0.559M - 2.057 \log X + 2.187$$

$$\log a = 0.490M - \log X - 0.00173 X + 0.634$$

○上下最大加速度の距離減衰式

$$\log a = 0.542M - 1.866 \log (\Delta + 30) + 1.505$$

$$\log a = 0.568M - 1.915 \log X + 1.367$$

$\log a = 0.485M - \log X - 0.00129 X + 0.136$
ただし、これらの回帰式を実務などにおいて用いようとする場合には、さらに、震源近傍(概ね100km以下)についての研究が必要であることに留意すべきである。

- 7) これらの結果は、二段階回帰手法を用いた最近提案されている距離減衰式と比較した場合、距離減衰の勾配がほぼ同じ程度の値となっている。特に、震源などの条件がわが国とは異なるとされる米国での結果とも整合性のある結果が得られていることは興味深い。ただし、最大加速度のマグニチュードへの依存度は、本研究で得られた値が最も大きなものとなっている。(1991年9月30日受付)

謝 辞

本研究は港湾地域強震観測の成果によるものであります。同観測には次の諸機関が関係しています。

運輸省港湾局, 港湾技術研究所, 各港湾建設局

北海道開発局港湾部, 沖縄開発庁沖縄総合事務局

東京都港湾局, 大阪市港湾局, 静岡県, 宮崎県港湾課

関係諸機関の観測事業に対する理解と協力に謝意を表

します。また、強震計の維持点検は上記諸機関に所属する担当者が多忙な業務の中で行っていますが、これら担当者諸氏の努力に対し敬意を表します。本来ならば氏名を記して謝意を表すべきところですが、多人数のため略させて頂きました。

本研究の取りまとめにあたり、著者らの一人の関係者として田村保氏(五洋建設(株))より討議・助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 金井 清: 地震動の振動特性に関する実験式, 第2回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.1-4, 1966
- 2) Campbell, K. W.; Strong Motion Attenuation Relations: A Ten-Year Perspective, *Earthquake Spectra*, Vol.1, No.4, August, pp.759-804, 1985
- 3) 土田 肇, 上部達生: 地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性, 港湾技術研究所報告, Vol.11, No.4, pp.191-270, 1972
- 4) 土田 肇, 倉田栄一, 石坂徳三, 林 聡: 各種地盤における平均応答スペクトル, 港湾技術研究所報告, Vol.12, No.4, pp.171-200, 1973
- 5) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.4,

- pp.67-112, 1975
- 6) 上部達生：東北地方太平洋沿岸地域の基盤における地震動—釜石港湾口防波堤の設計用入力地震動—, 港湾技研資料, No.412, pp. 1-12, 1982
 - 7) 田中貞二, 福島美光：地震動強さと距離減衰, 第15回地盤振動シンポジウム, 日本建築学会, pp. 7-16, 1987
 - 8) 岡本瞬二：耐震工学, p.108-112, オーム社, 1971
 - 9) 片山恒雄：強震記録による地震動最大加速度の統計的解析, 第13回日本地震工学研究発表会, pp.45-48, 1979
 - 10) 井合 進・倉田栄一・向井 健：最大加速度の距離減衰(その1), 同(その2), 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp.1310-1312, 1991
 - 11) 大崎順彦・渡部丹：地震動の最大値について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.525-526, 1977
 - 12) 佐伯光昭・片山恒雄・岩崎敏男：わが国の地盤上で得られた加速度記録の特性, 土木学会第32回年次学術講演会, pp.304-305, 1977
 - 13) 田村重四郎・岡本瞬三・加藤勝行：岩盤地帯の地震動の最大加速度について, 第15回地震工学研究発表会講演概要, pp.181-184, 1979
 - 14) 渡部丹・篠堂正喜：設計用模擬地震動に関する研究, その1, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.41-51, 1981
 - 15) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：地震動の最大地動予測におけるN値を用いた地盤条件の評価法について, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.217-224, 1982
 - 16) 横田治彦・塩谷清人・渡辺弘之：観測に基づく東京の入力地震動特性の検討, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.217-224, 1982
 - 17) 篠泉・大角恒雄・片山恒雄：強震データの統計解析における問題点, 土木学会第37回年次学術講演会梗概集, pp.659-660, 1982
 - 18) 中村 豊・富田健司：最大地震動加速度の推定式, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, pp.785-786, 1984
 - 19) 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, 第166号, 1985
 - 20) 星谷 勝, 丸山 収：適応型重回帰分析法に基づく地震動距離減衰式算定法, 第18回地震工学研究発表会, pp.21-24, 1985
 - 21) Sato, T., J. Kiyono and T. Matsuoka : Attenuation of peak ground motion taking in to account the fault extent, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.541-546, 1986
 - 22) 福島義光, 田中貞二：最大加速度の平均的距離減衰に関する一考察, 地震学会講演予稿集, p.125, 1987, No. 2
 - 23) 稗圃成人・太田外気晴・内山正次・福岡篤信：第四紀層で観測された地震動の最大振幅について, 地震学会講演予稿集, p.268, 1987
 - 24) 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, pp.129-132, 1987
 - 25) 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 No. 4, pp.757-583, 1990
 - 26) Trifunac, M. D. : Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion-Dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions, *Bull. seism. Soc. Am.*, Vol.66, pp.189-219, 1976
 - 27) Mc Guire, R. K. : Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response, *J. Geotech. Engrng. Struct. Dyn.*, Vol. 5, pp.211-234, 1977
 - 28) Donovan, N. C. and A. E. Bornstein : Uncertainties in seismic risk procedures, *J. Geotech. Engrng. Division, ASCE*, Vol.104, pp.869-887, 1978
 - 29) Cornell, C. A. , H. Banon and A. F. Shakal : Seismic motion and response prediction alternatives, *J. Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 4, pp.295-315, 1979
 - 30) Espinosa, A. F. : Attenuation of strong horizontal ground accelerations in the western United States and their relation to ML, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.70, pp.593-616, 1980
 - 31) McGuire, R. K. and T. C. Hanks : RMS accelerations and spectral amplitudes of strong motion during the San Fernando, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.70, pp.1907-1920, 1980
 - 32) Joyner, W. B. and D. M. Boore : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp.2011-2038, 1981
 - 33) Campbell, K. W. : Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, pp.2039-2070, 1981
 - 34) Bolt, B. A. and N. A. Abrahamson : New attenuation relation for peak and expected accelerations of strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.72, pp.2307-2321, 1982

- 35) Eguchi, R. T. : An alternative approach to modeling earthquake ground motion attenuation in the Western United States, *7th WCEE*, Istanbul, Turkey, pp.113-120, 1980
- 36) Abrahamson, N. A. and J. J. Litehisher : Attenuation of vertical peak acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.79, No. 3, pp.549-580, 1989
- 37) Fukushima, Y., T. Tanaka and S. Kataoka ; A new attenuation relationship for peak ground accelerations derived from strong-motion acceleration, *9th WCEE*, pp.343-348, 1988
- 38) Hajime Tsuchida, Teiichiro Yamada, Eiichi Kurata and Datsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1963 and 1964), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.55, September 1968, 86p.
- 39) Hajime Tsuchida, Teiichiro Yamada, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1965 and 1966), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.62, December 1968, 145p.
- 40) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1967), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.64, March 1969, 182p.
- 41) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1968), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.98, March 1970, 342p.
- 42) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1969), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.100, June 1970, 86p.
- 43) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1970), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.116, March 1971, 171p.
- 44) Eiichi Kurata, Tokuzo Ishizaka and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1971), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.136, March 1972, 195p.
- 45) Eiichi Kurata, Tokuzo Ishizaka and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1972), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.160, March 1973, 206p.
- 46) Eiichi Kurata, Tokuzo Ishizaka and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1973), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.181, March 1974, 152p.
- 47) Eiichi Kurata, Tokuzo Ishizaka and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1974), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.202, March 1975, 124p.
- 48) Eiichi Kurata, Susumu Iai and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1975), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.236, March 1976, 64p.
- 49) Eiichi Kurata, Susumu Iai and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports, Supplementary (1963 through 1975, Vertical component), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.250, December 1976, 290p.
- 50) Eiichi Kurata, Susumu Iai and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1976 and 1977), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.287, March 1978, 194p.
- 51) Eiichi Kurata, Susumu Iai, Yoshiko Yokoyama and Hajime Tsuchida : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1978 and 1979), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.338, June 1980.
- 52) Eiichi Kurata, Susumu Iai, Yoshiko and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1980), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.374, June 1981.
- 53) Eiichi Kurata and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1981), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.426, June 1982, 191p.
- 54) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1982), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.446, June 1983, 183p.

- 55) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1983), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.487, June 1984, 411p.
- 56) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1984), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.519, June 1985, 154p.
- 57) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1985), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.547, June 1986, 355p.
- 58) Eiichi Kurata, Susumu Iai and Setsuo Noda : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1986), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.588, June 1987, 370p.
- 59) Eiichi Kurata and Susumu Iai : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1987), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.618, June 1988, 688p.
- 60) Eiichi Kurata and Susumu Iai : Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1988), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.649, June 1989, 313p.
- 61) Hajime Tsuchida, Eiichi Kurata and Katsuko Sudo : Strong-Motion Earthquake Records on the 1968 Tokachi-Oki Earthquake and Its Aftershocks, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.80, June 1969, 476p.
- 62) Eiichi Kurata, Susumu Iai and Hajime Tsuchida : Strong-Motion Earthquake Records on the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.317, March 1979, 383p.
- 63) Eiichi Kurata, Susumu Iai, Yoshiko Yokoyama and Hajime Tsuchida : Strong-Motion Earthquake Records on the 1978 Miyagi-Ken-Oki Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.319, June 1979, 419p.
- 64) Eiichi Kurata and Setsuo Noda : Strong-Motion Earthquake Records on the 1982 Ura-kawa-Oki Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No. 442, Mar 1983, 144p.
- 65) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Strong-Motion Earthquake Records on the 1983 Nipponkai-Chubu Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.458, Sept 1983, 327
- 66) Eiichi Kurata, Tetsuo Fukuhara and Setsuo Noda : Strong-Motion Earthquake Records on the 7 August 1984 Hyuganada Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.503, Dec 1984, 113p.
- 67) Eiichi Kurata, Setsuo Noda and Toyoshi Higuchi : Strong-Motion Earthquake Records on the 17 December 1987 Chiba-ken-Toho-Oki Earthquake in Port Areas, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No. 619, June 1988, 299p.
- 68) Hajime Tsuchida, Teiichiro Yamada and Eiichi Kurata : Site Characteristics of Strong-Motion Earthquake Stations in Ports and Harbour in Japan (Part 1), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.34, November 1967, 306p.
- 69) Eiichi Kurata, Hajime Tsuchida and Katsuko Sudo : Site Characteristics of Strong-Motion Earthquake Stations in Ports and Harbours in Japan (Part 2), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.107, December 1970, 87p.
- 70) Eiichi Kurata and Tokuzo Ishizaka : Site Characteristics of Strong-Motion Earthquake Stations in Ports and Harbours in Japan (Part 3), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.156, March 1973, 54p.
- 71) Yoshiko Yokoyama and Eiichi Kurata : Site Characteristics of Strong-Motion Earthquake Station in Ports and Harbours in Japan (Part 4), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.298, June 1978, 110p.
- 72) Yoshiko Yokoyama and Eiichi Kurata : Site Characteristics of Strong-Motion Earthquake Stations in Ports and Harbours in Japan (Part 5), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.351, September 1980, 72p.
- 73) 井合 進・倉田栄一・土田 肇・強震記録のデジタル化と補正, 港湾技研資料 No.286, 1978, 56p.
- 74) Susumu Iai and Eiichi Kurata : Integration of Strong-Motion Accelerograms, Proceedings of the 5th Japan Earthquake Engineering Symp-

記号表一覧

- a : 距離減衰式中でマグニチュードにかかる係数
 b : 距離減衰式中で距離にかかる係数
 $b_1 \sim b_7$: 距離減衰式中の係数
 c : 距離減衰式中の定数
 f_1 : 距離減衰式中で地震の規模に関わる項
 f_2 : 距離減衰式中で距離に関わる項
 f_3 : 距離減衰式中で地震規模と距離の複合項
 f_4 : 距離減衰式中で地点特性に関わる項
 M : マグニチュード
 M_i : i 番目のマグニチュード
 R : 距離
 $\rho_{M, \log X}$: M と $\log X$ との間の重相関係数

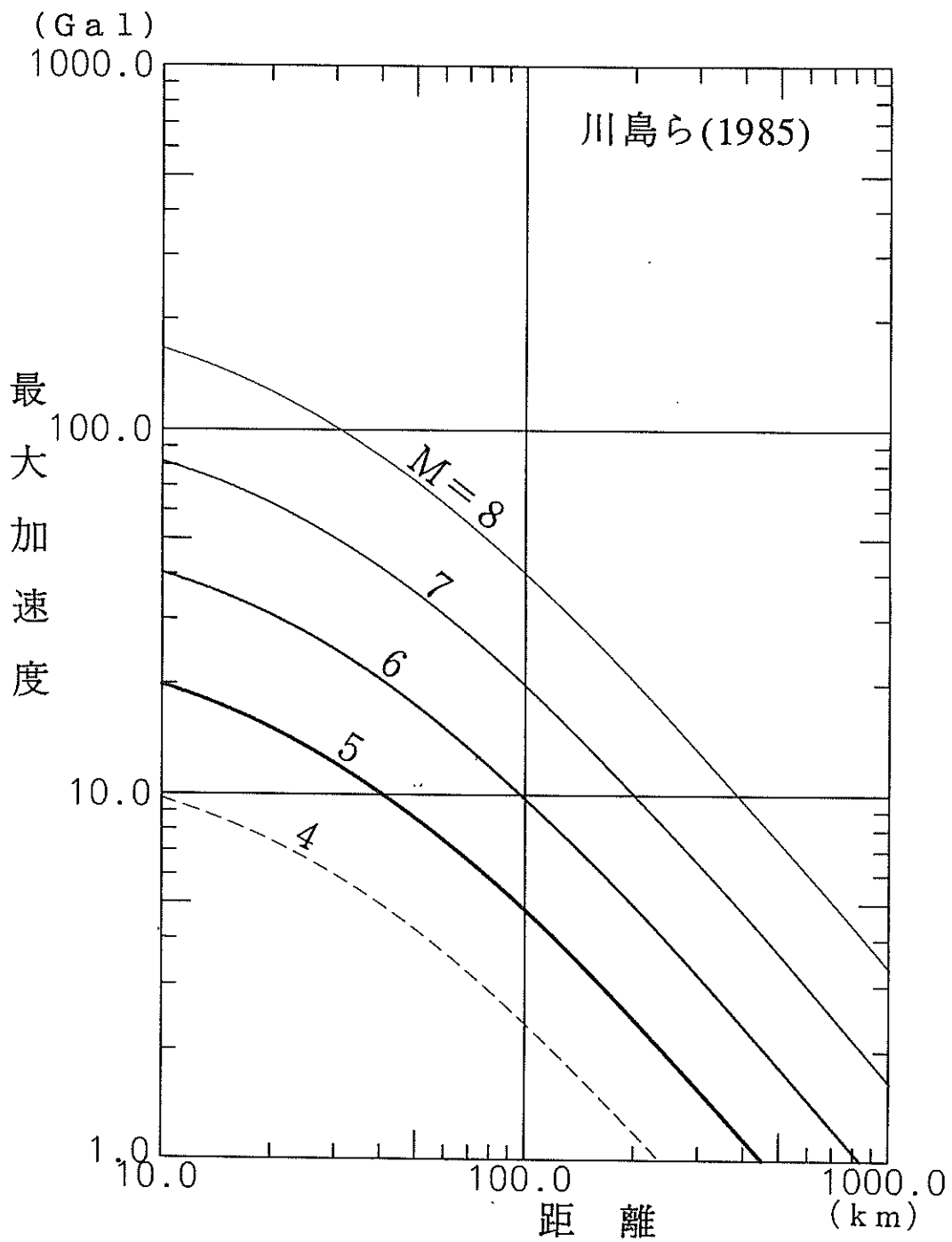
$\rho_{M, \log Y}$: M と $\log Y$ との間の重相関係数

- X : 震源距離
 X_i : i 番目の距離
 Y : 最大加速度
 Y_i : i 番目の最大加速度
 α_i : 2 段階回帰手法において, 1 段階回帰の結果地震ごとに求まる回帰係数
 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ
 Δ : 震央距離
 σ_M : M の分散
 $\sigma_{\log Y}$: $\log Y$ の分散
 $\sigma_{\log X}$: $\log X$ の分散

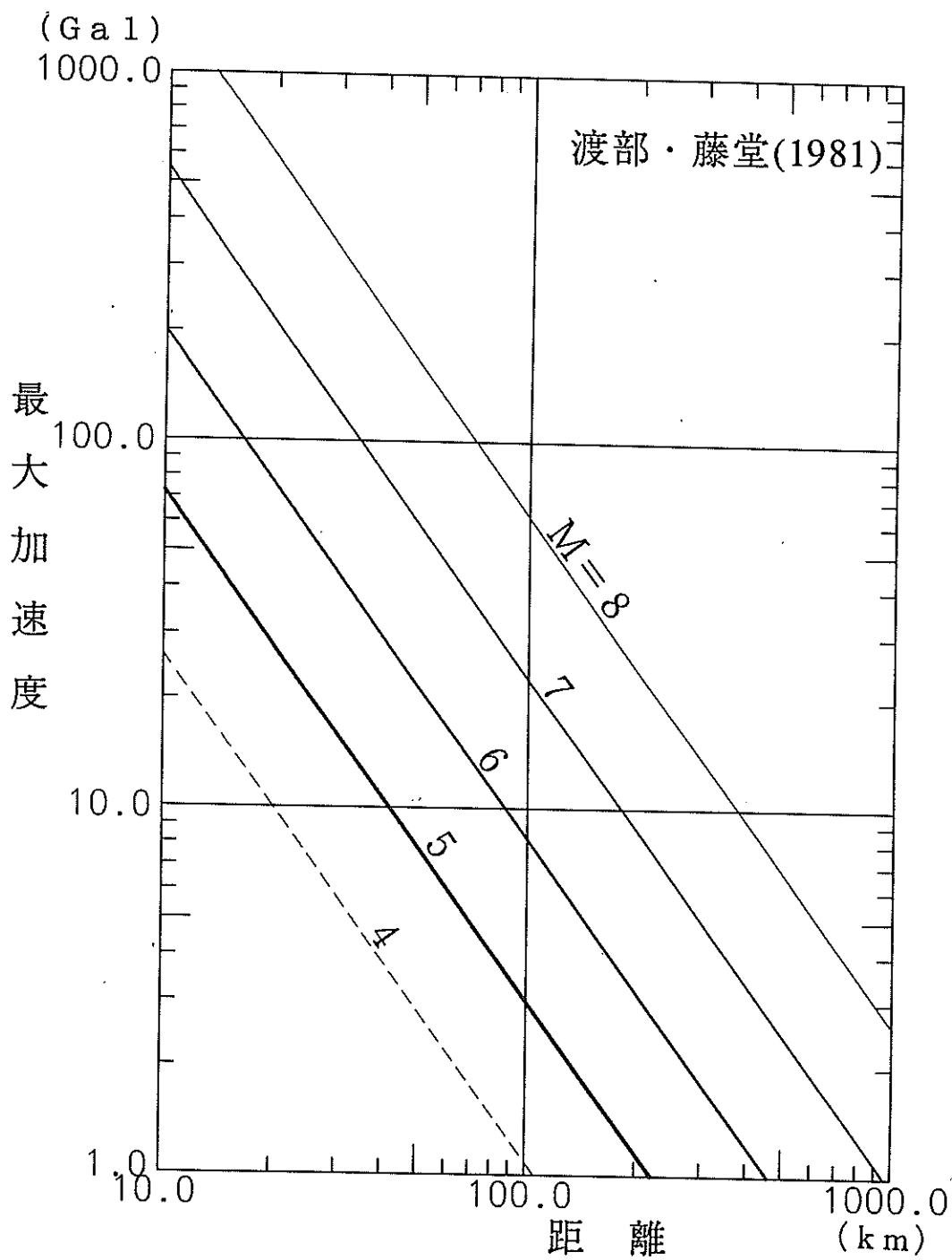
付録-A 既往の研究および本研究による各距離減衰式の最大加速度と震源距離の関係と最大加速度とマグニチュードの関係

本付録では、既往の研究および本研究による各距離減衰式で表される関係を図示する。それぞれの式について、最大加速度と震源距離の関係および最大加速度とマグニチュードの関係の両者を示す。

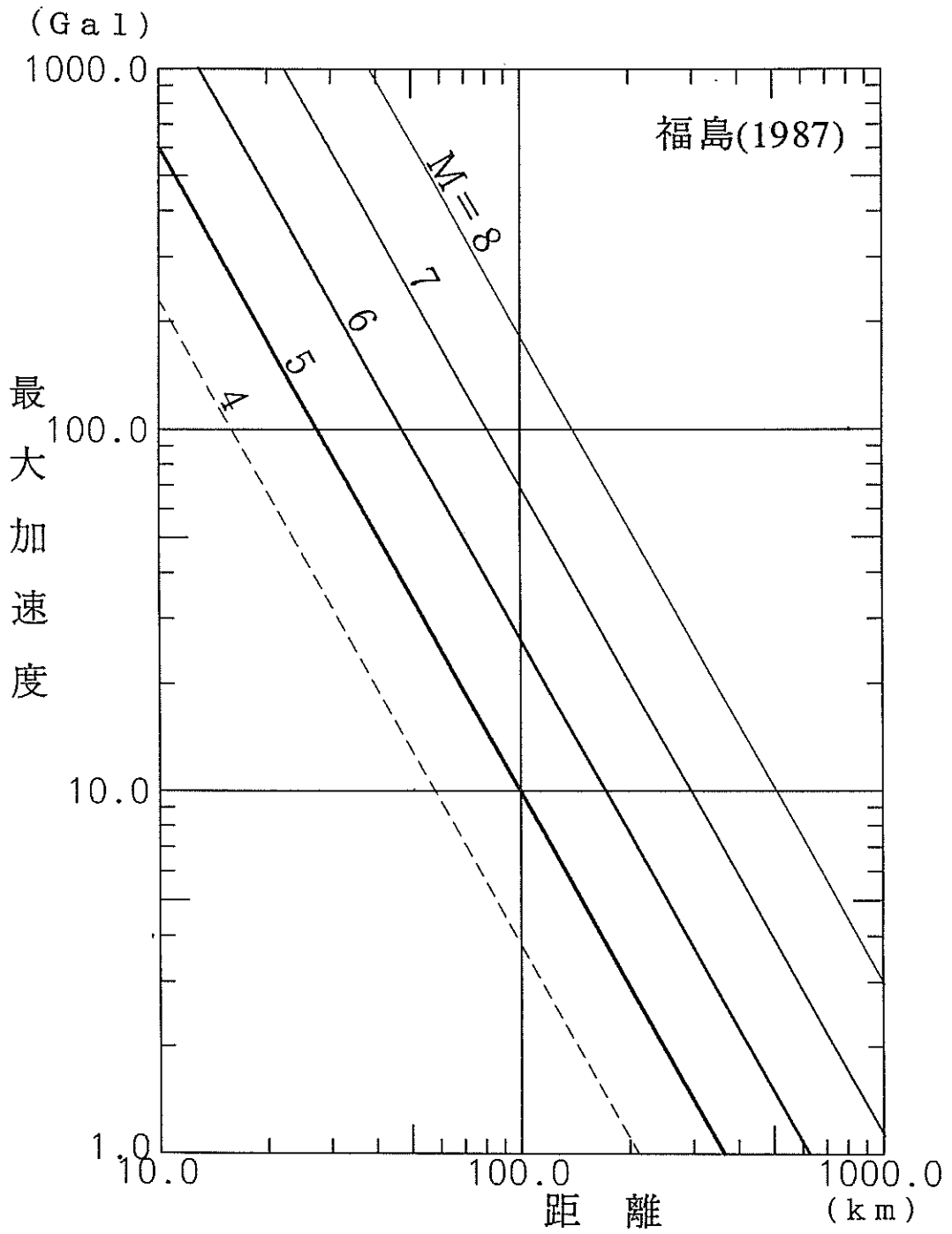
以下の各図において示す関係では、距離の定義が震源距離、震央距離、断層面からの距離、などと異なっており、個々の距離減衰式における定義については、表-2-1および2-2を参照されたい。



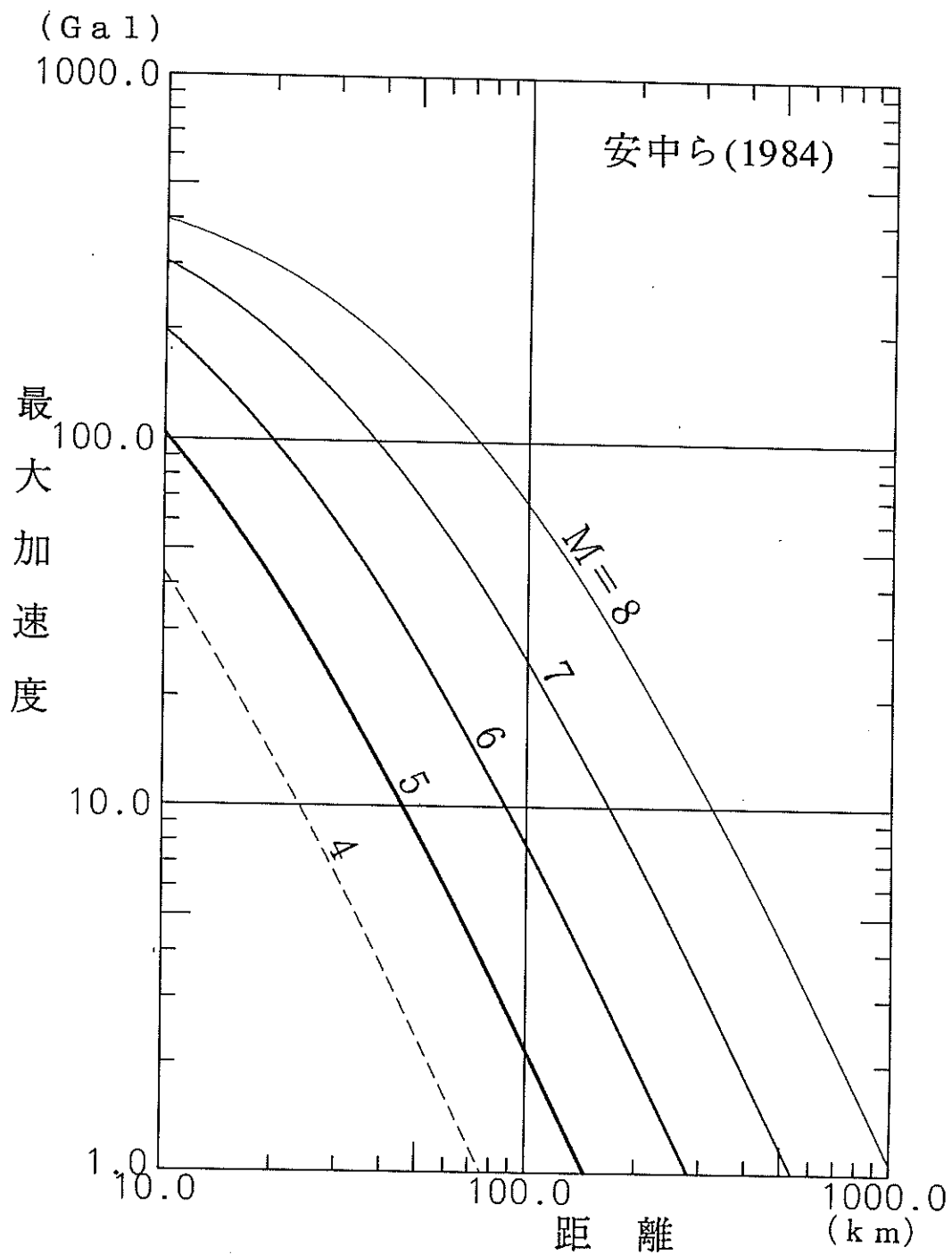
付図-A-1 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



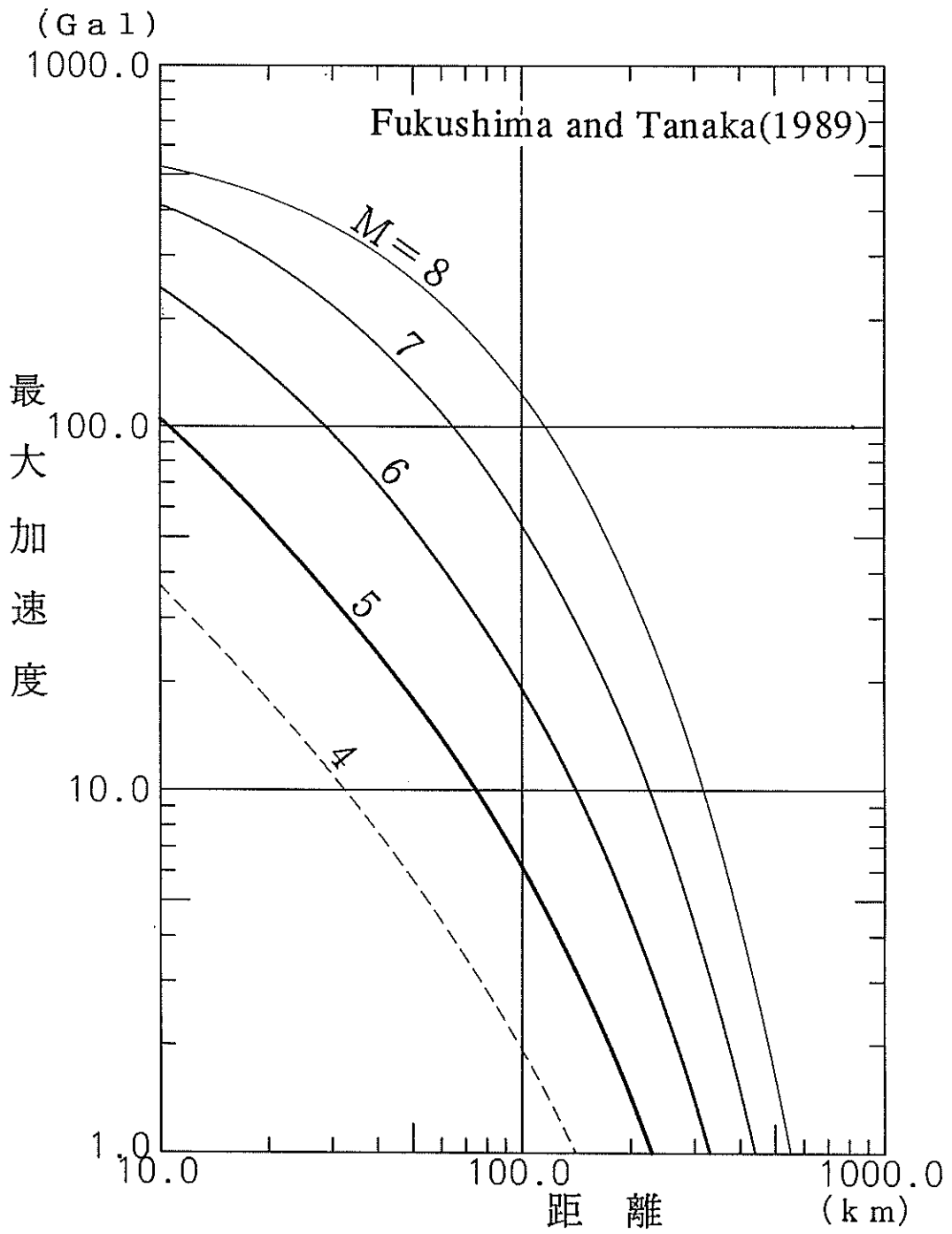
付図-A-2 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係(水平動)



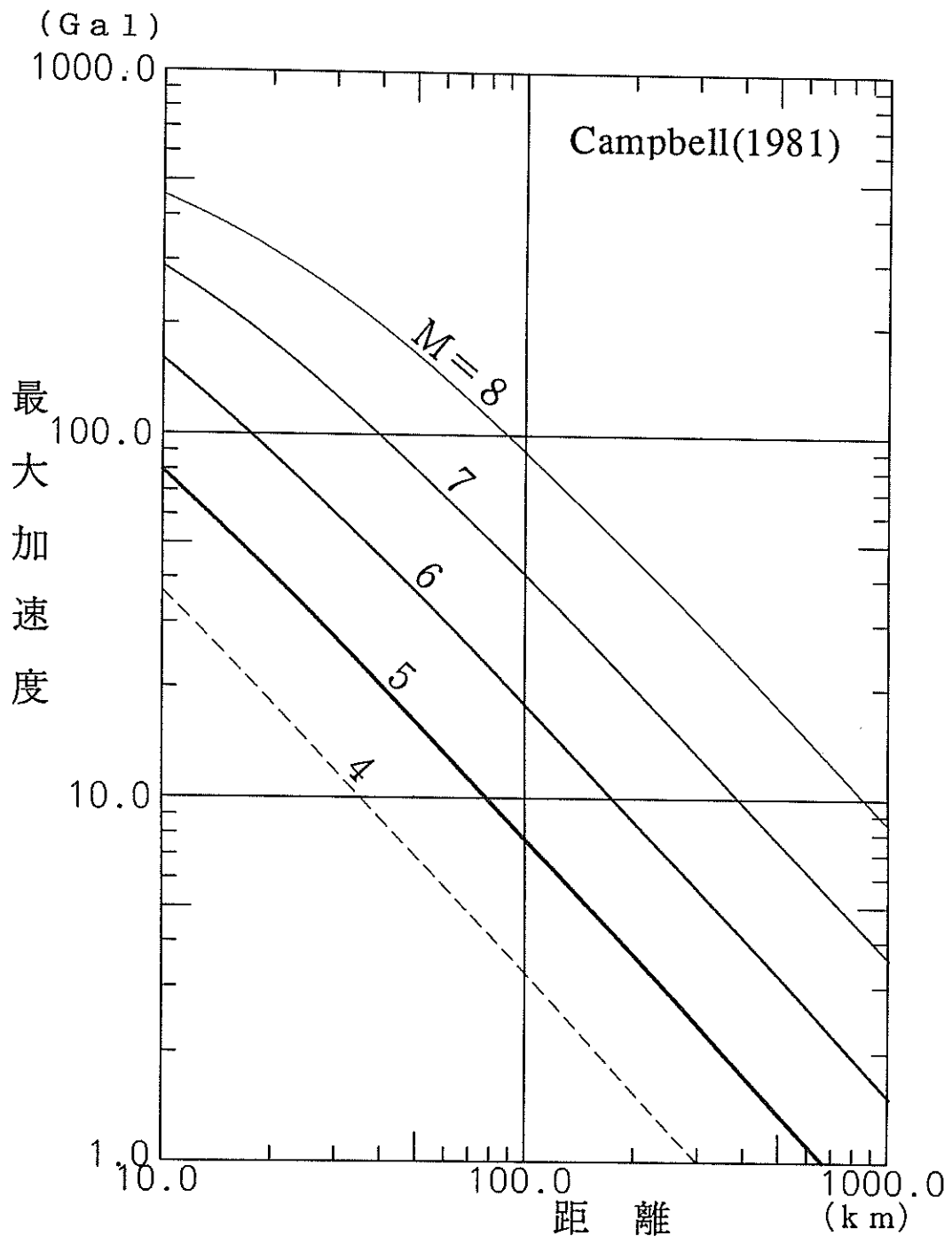
付図-A-3 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



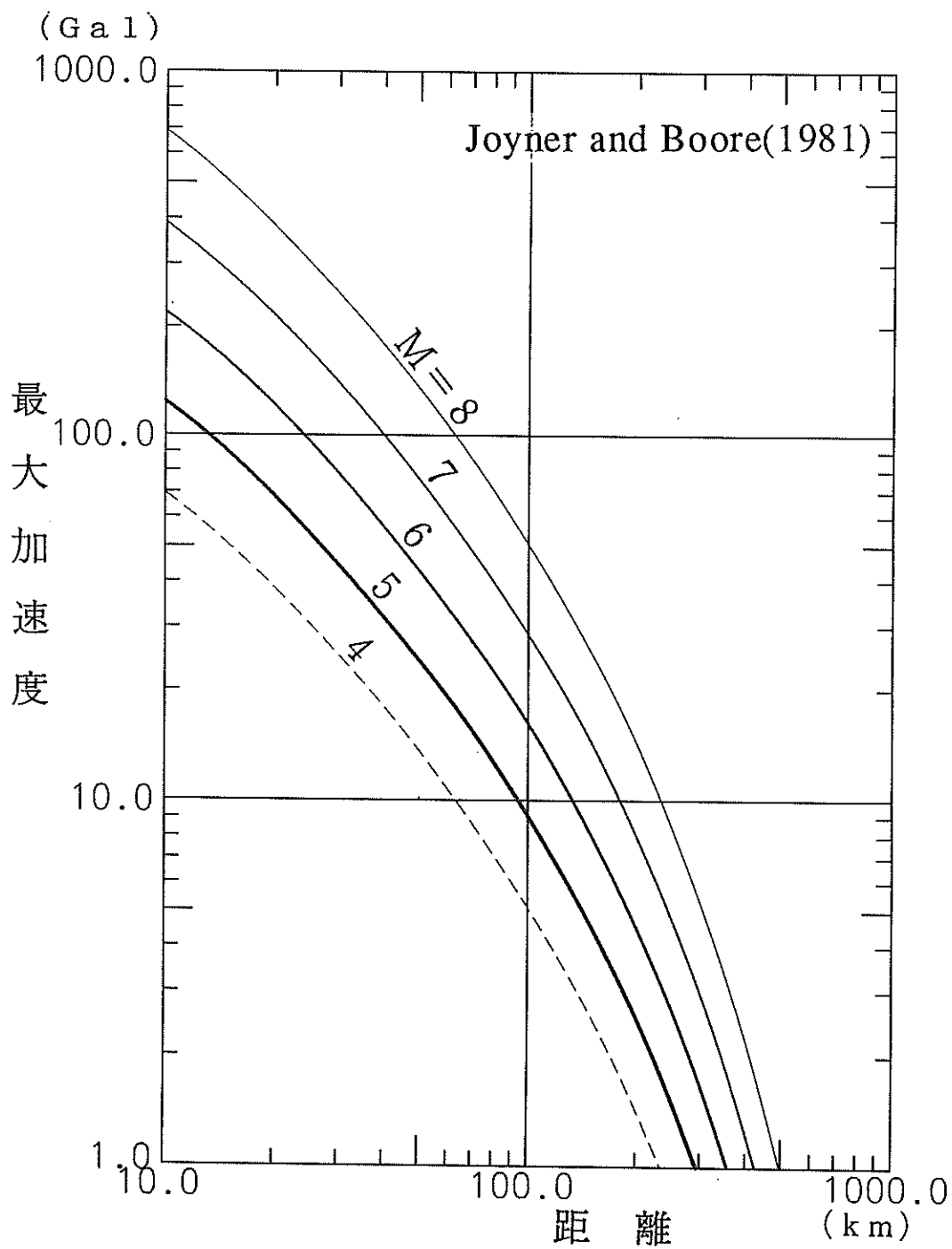
付図-A-4 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



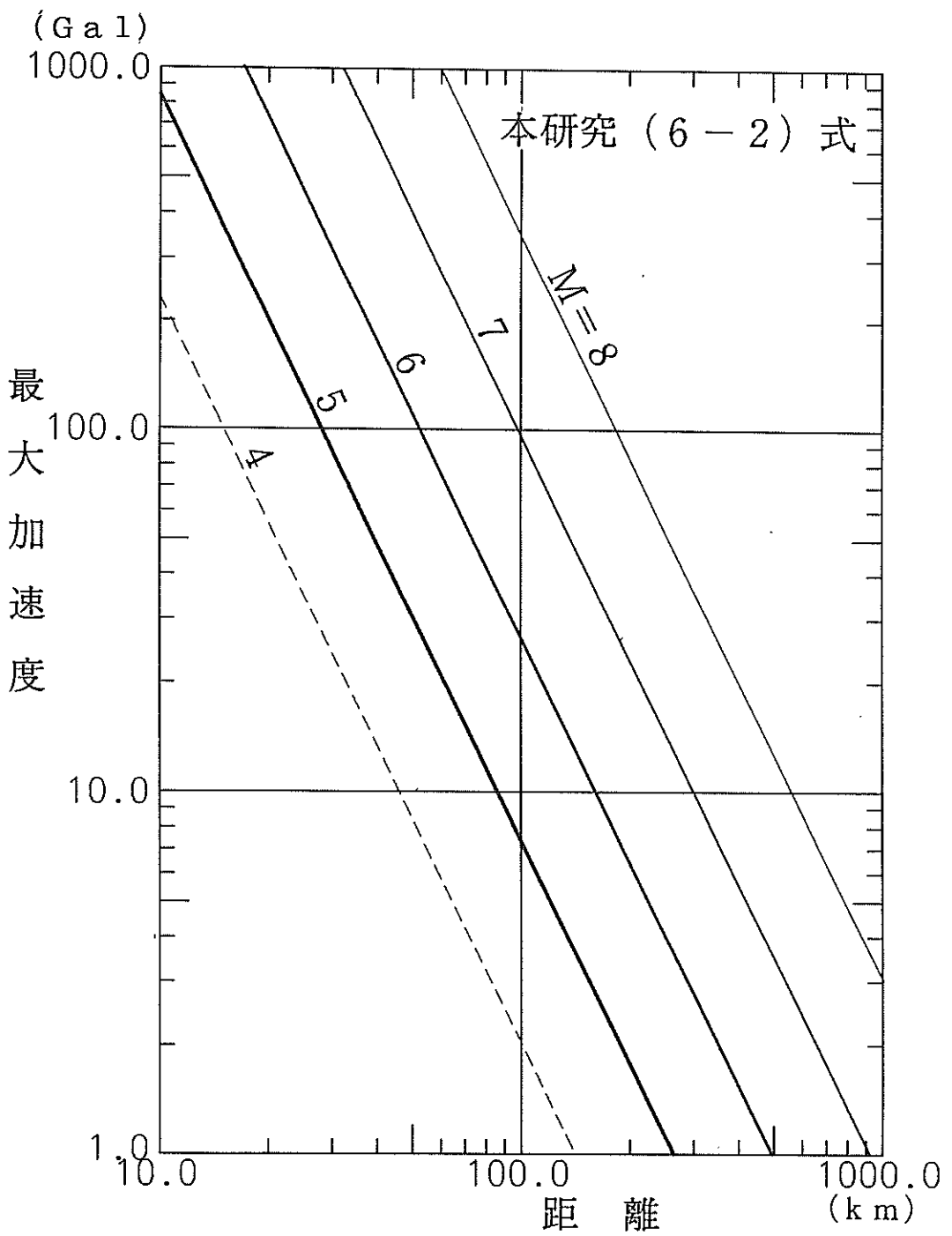
付図-A-5 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



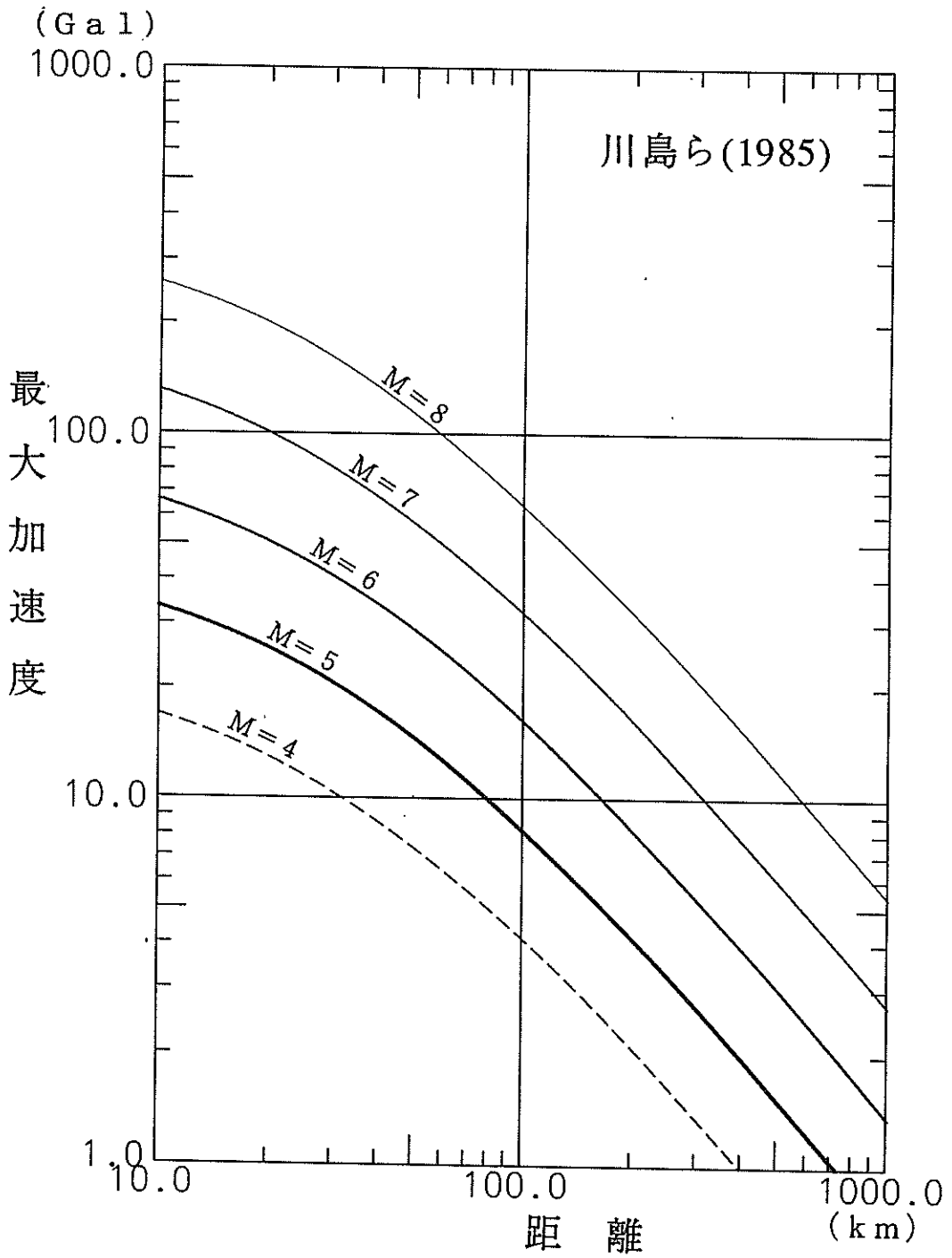
付図-A-6 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



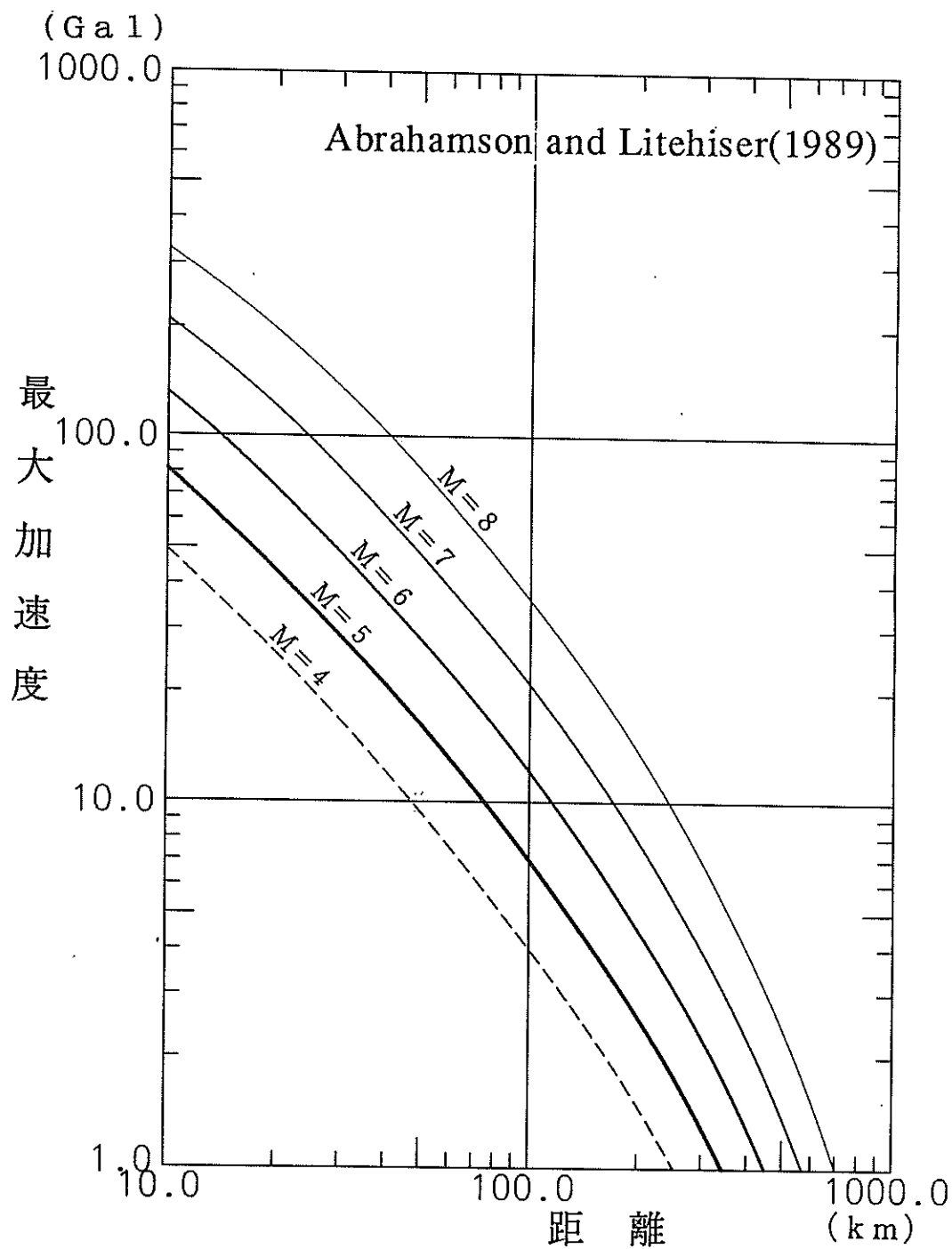
付図-A-7 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係(水平動)



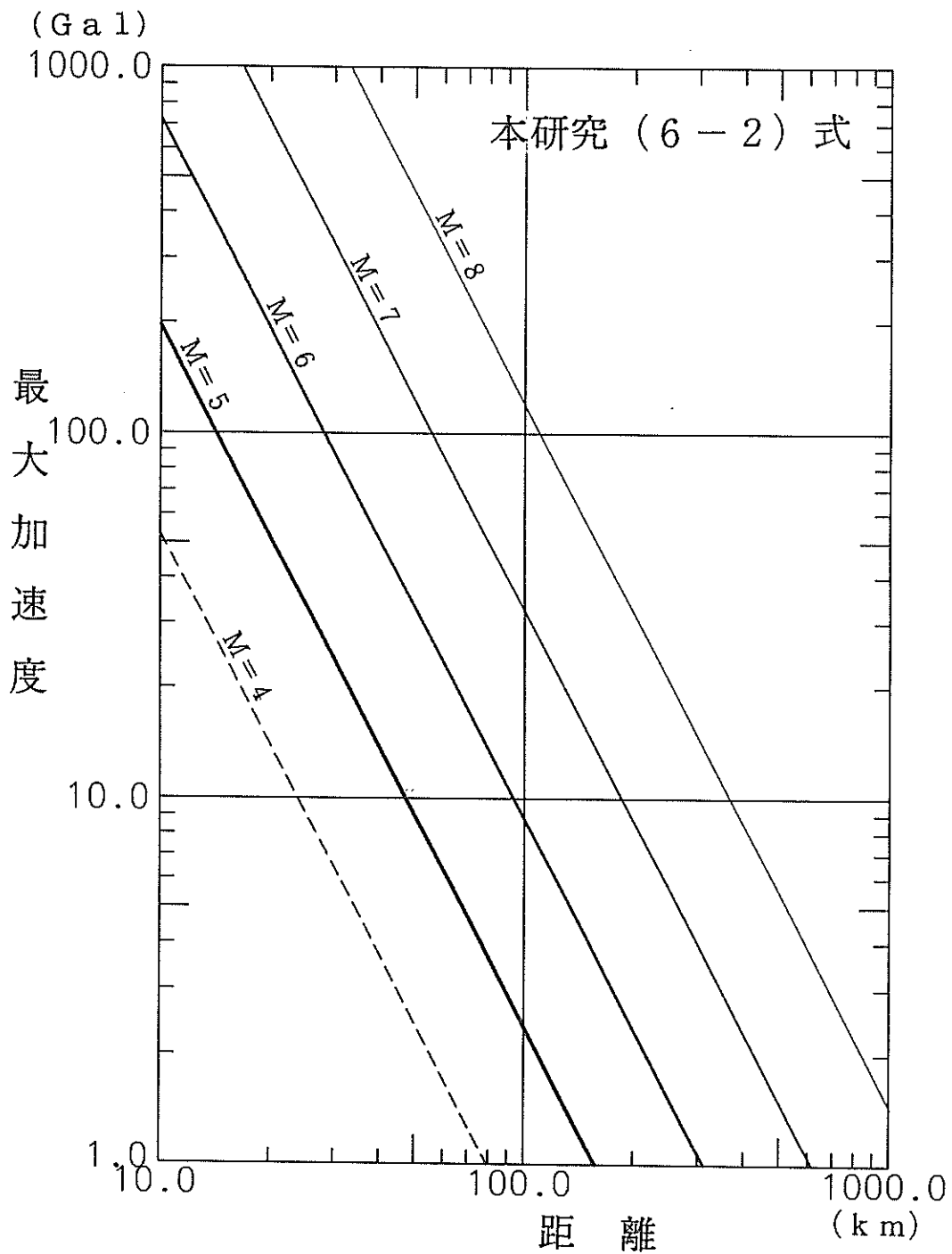
付図-A-8 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



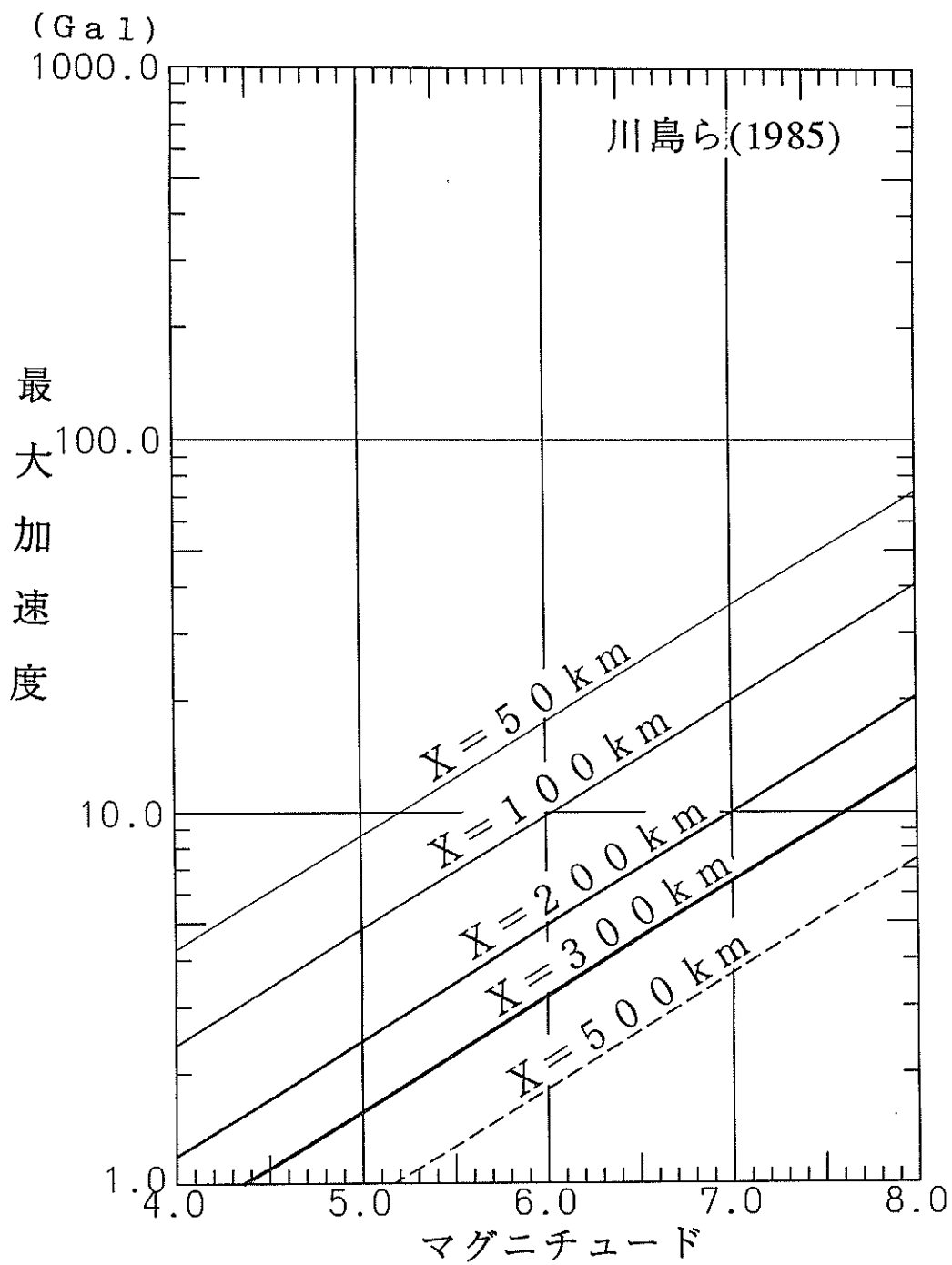
付図-A-9 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



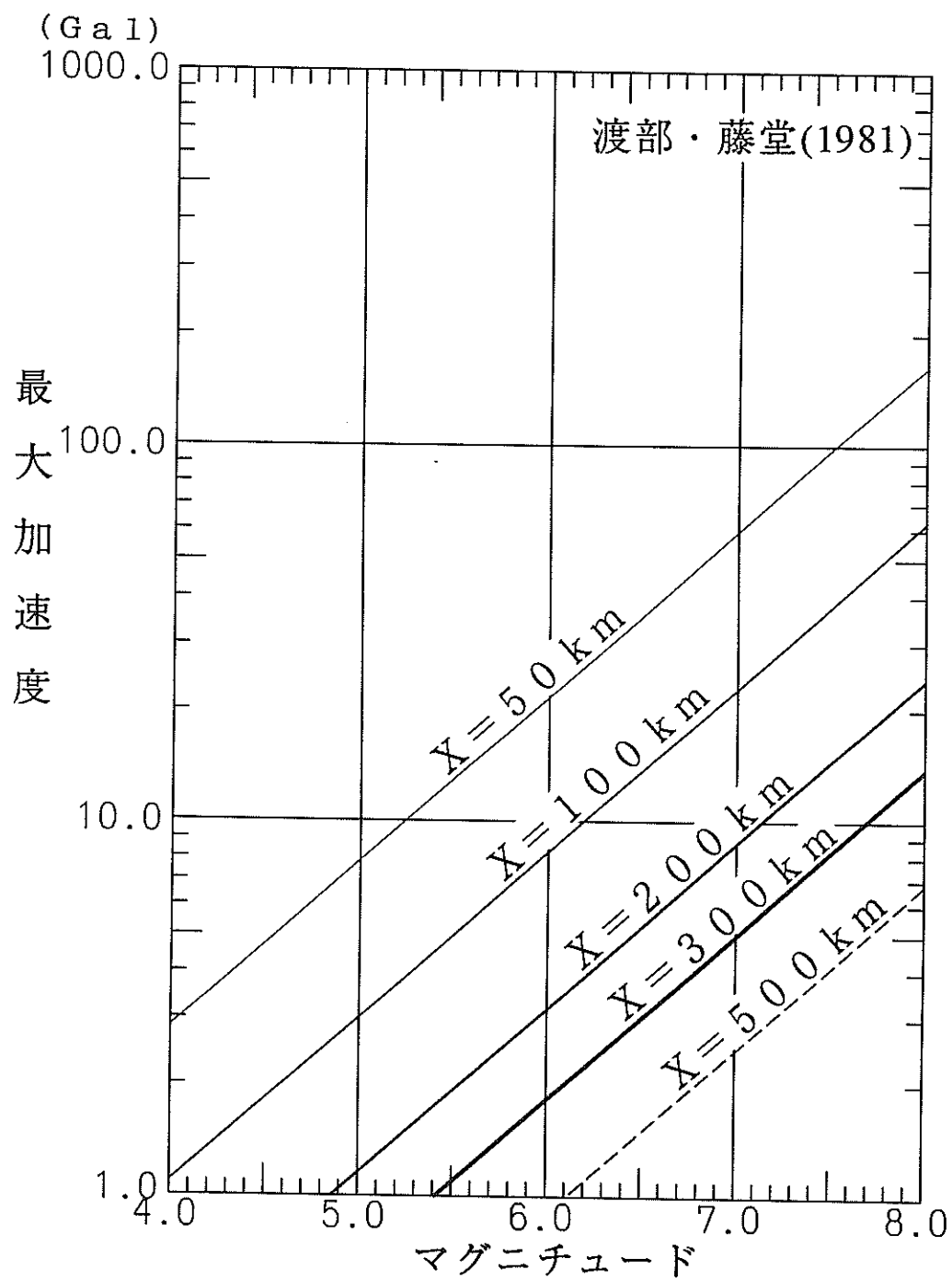
付図-A-10 既往の距離減衰式の最大加速度と距離の関係 (水平動)



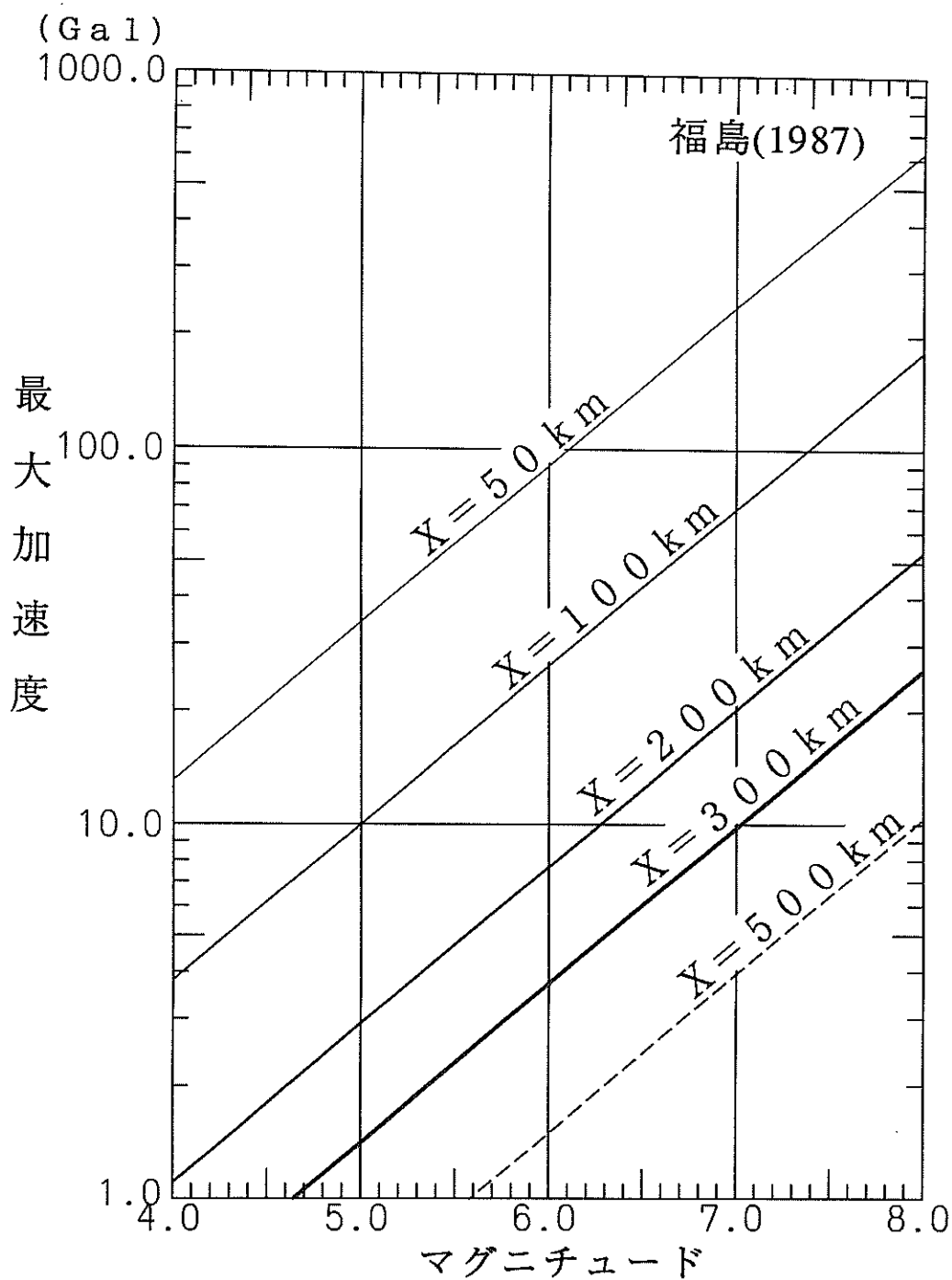
付図-A-11 本研究で得られた距離減衰式 ((6-2) 式) の最大加速度と距離の関係



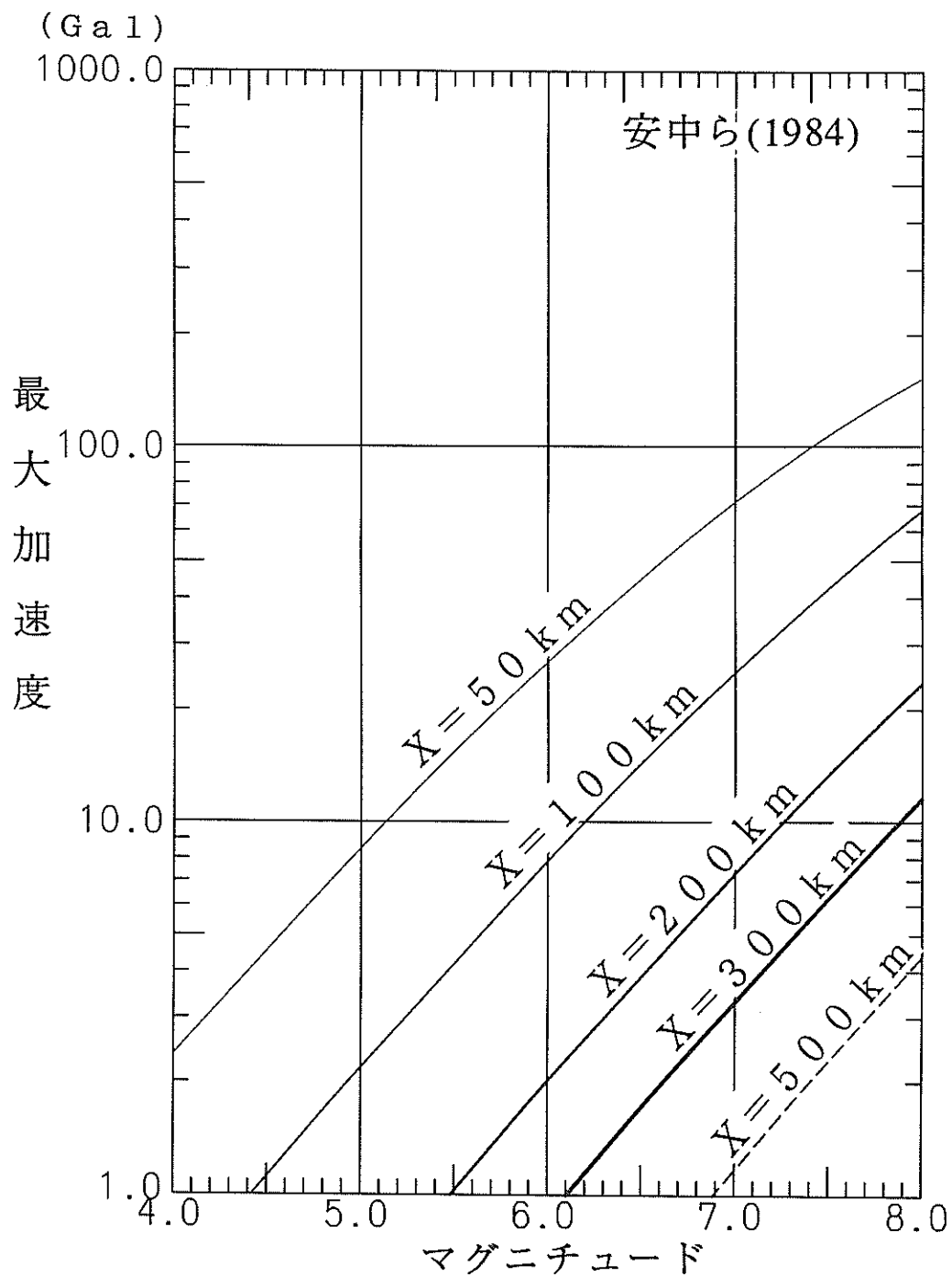
付図-A-12 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



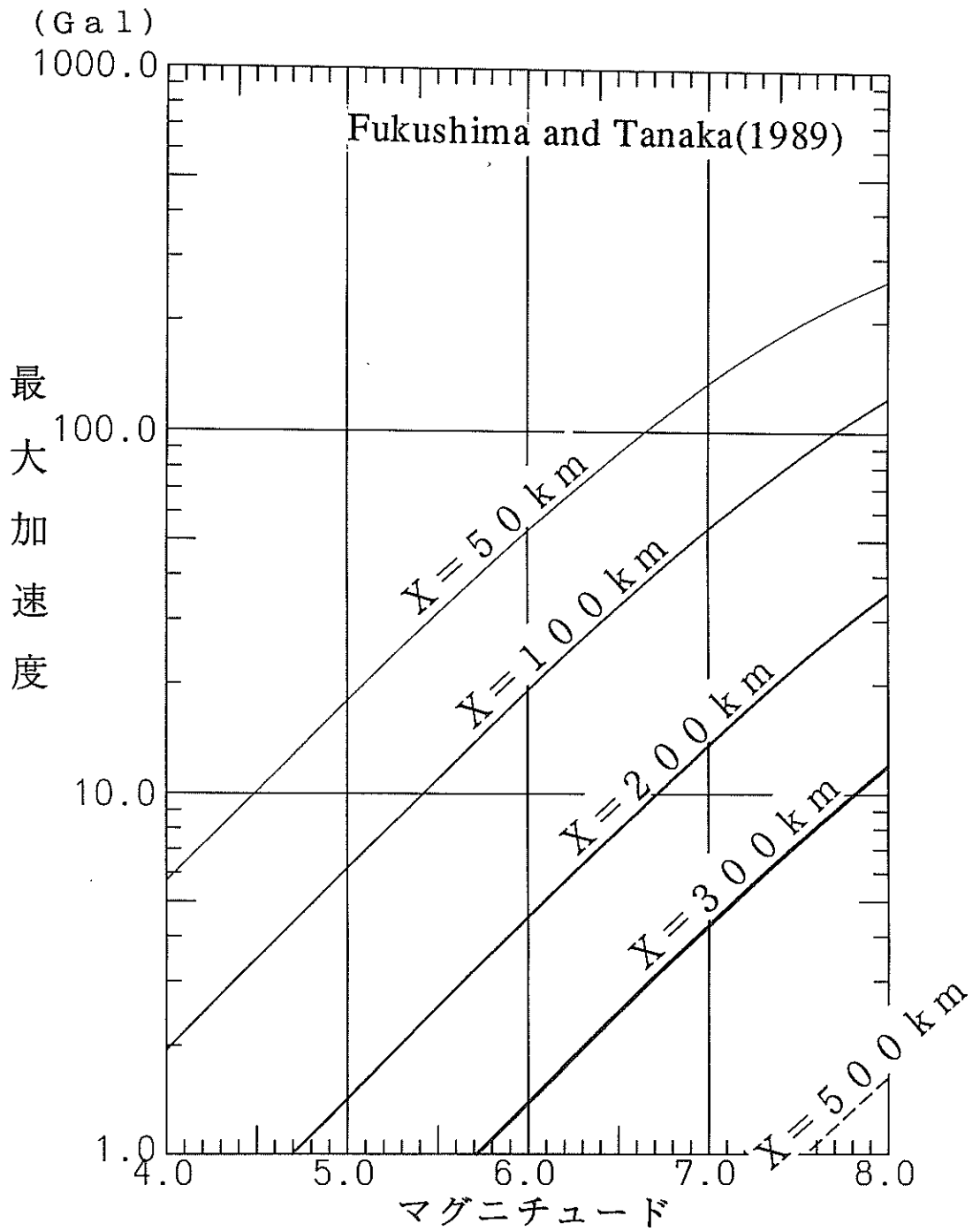
付図-A-13 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



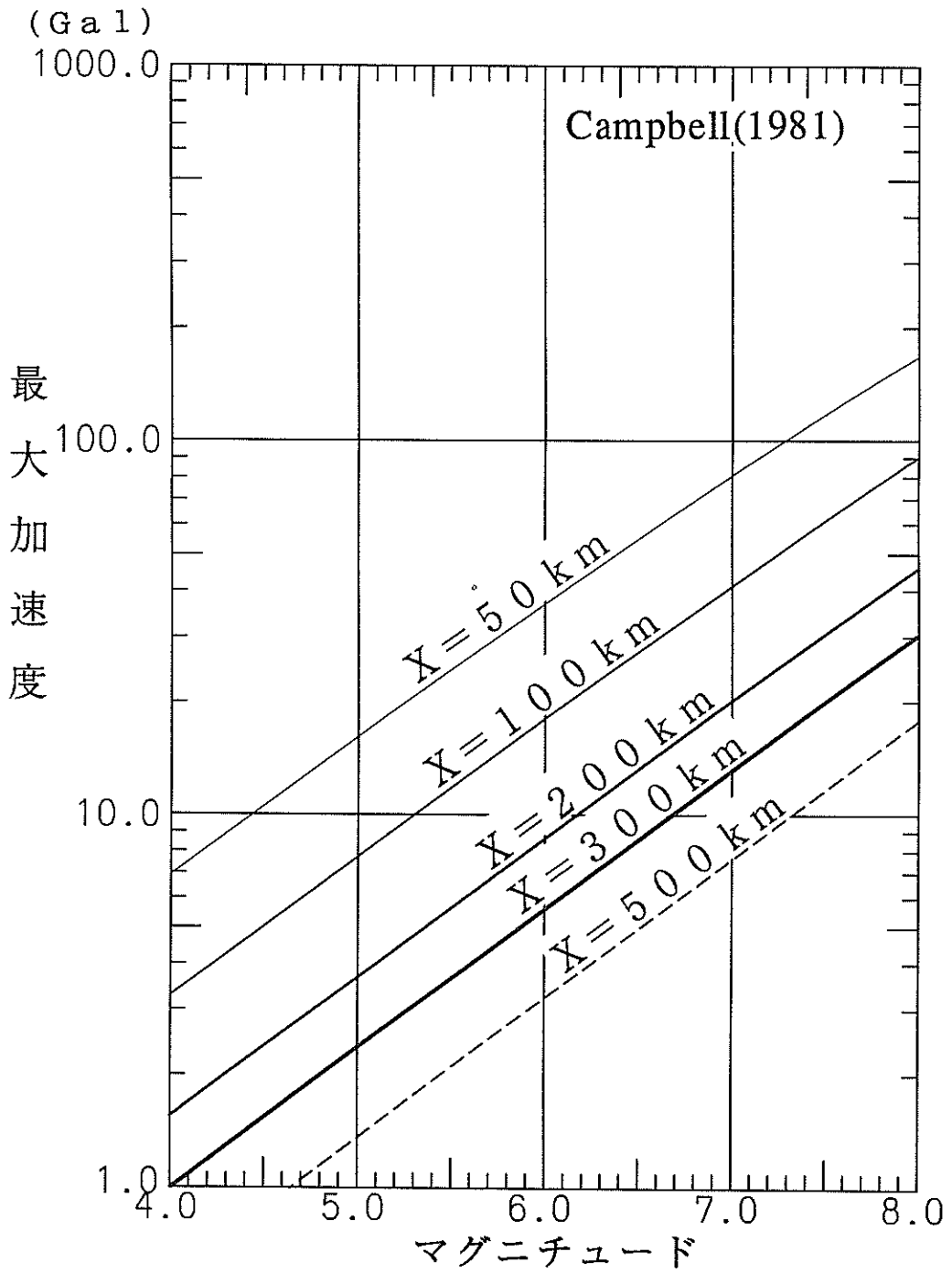
付図-A-14 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



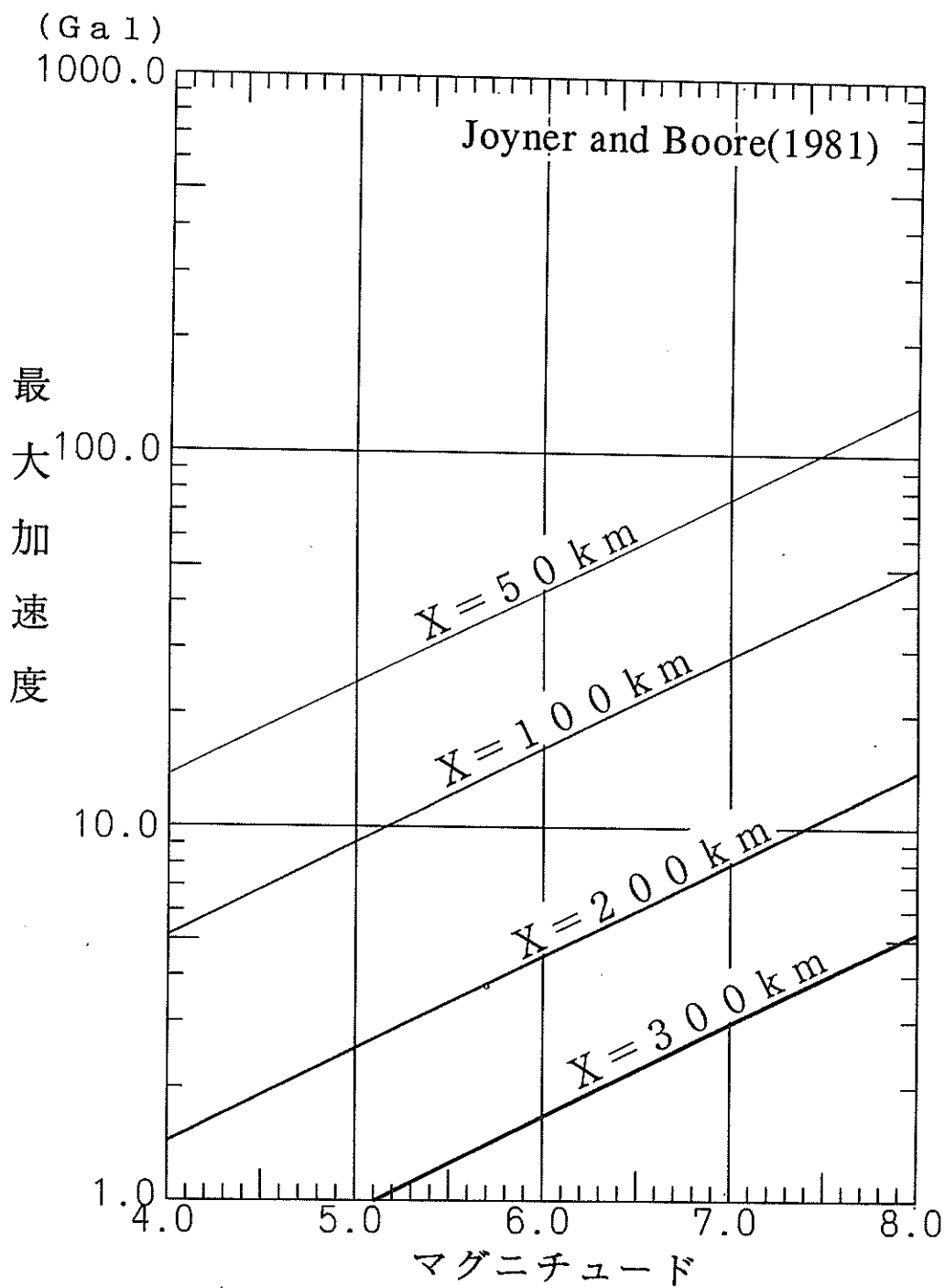
付図-A-15 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



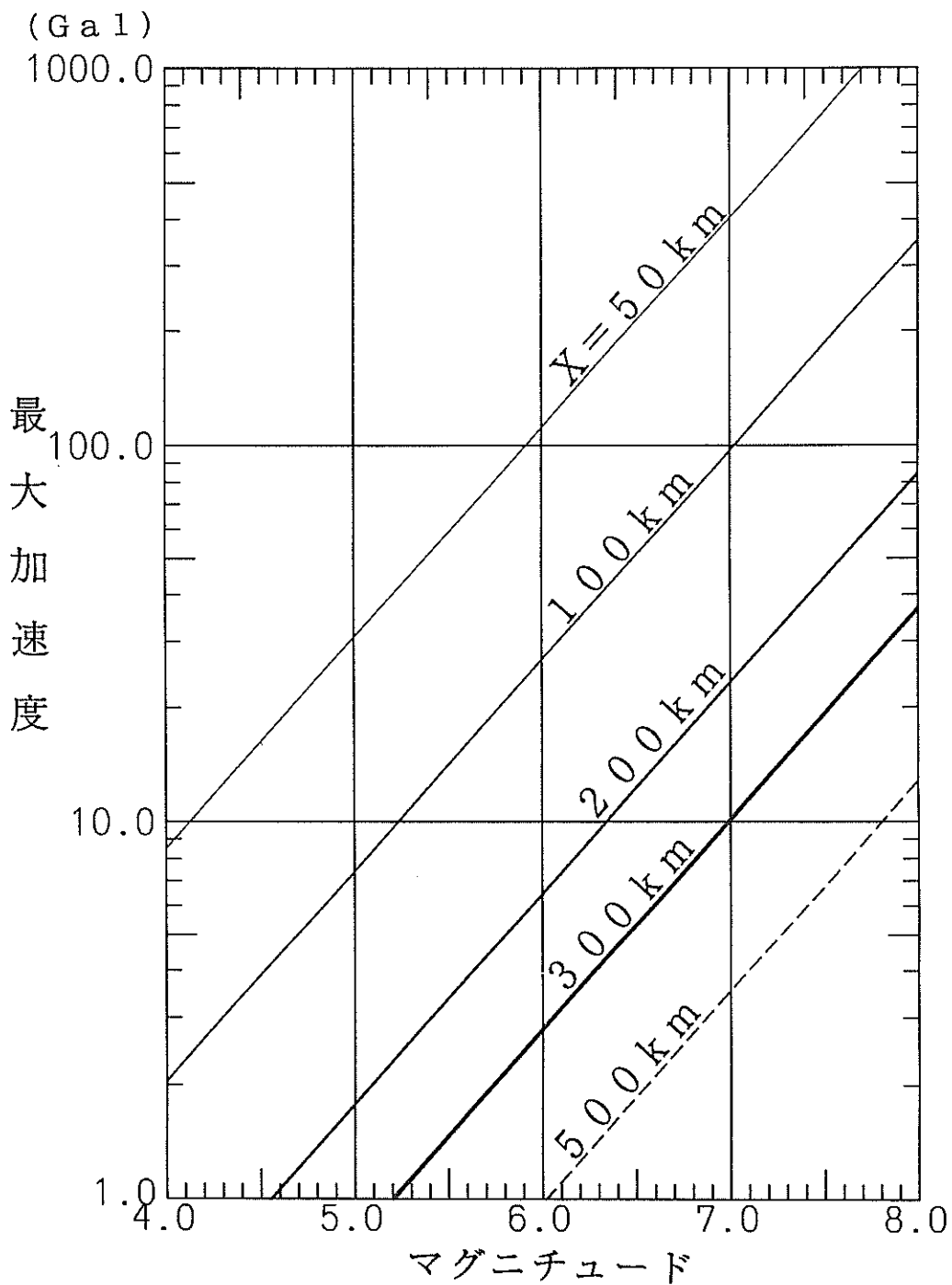
付図-A-16 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係（水平動）



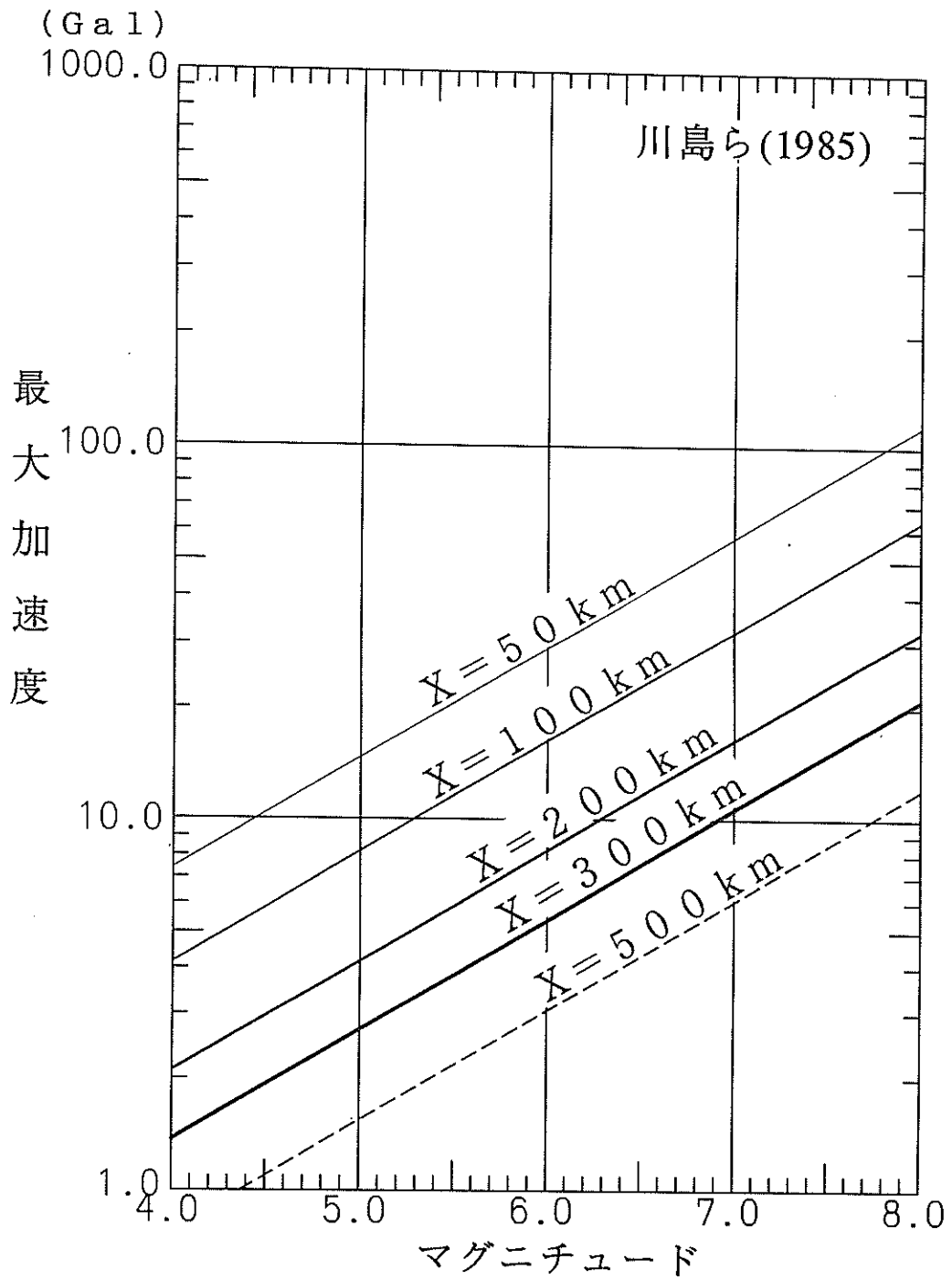
付図-A-17 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



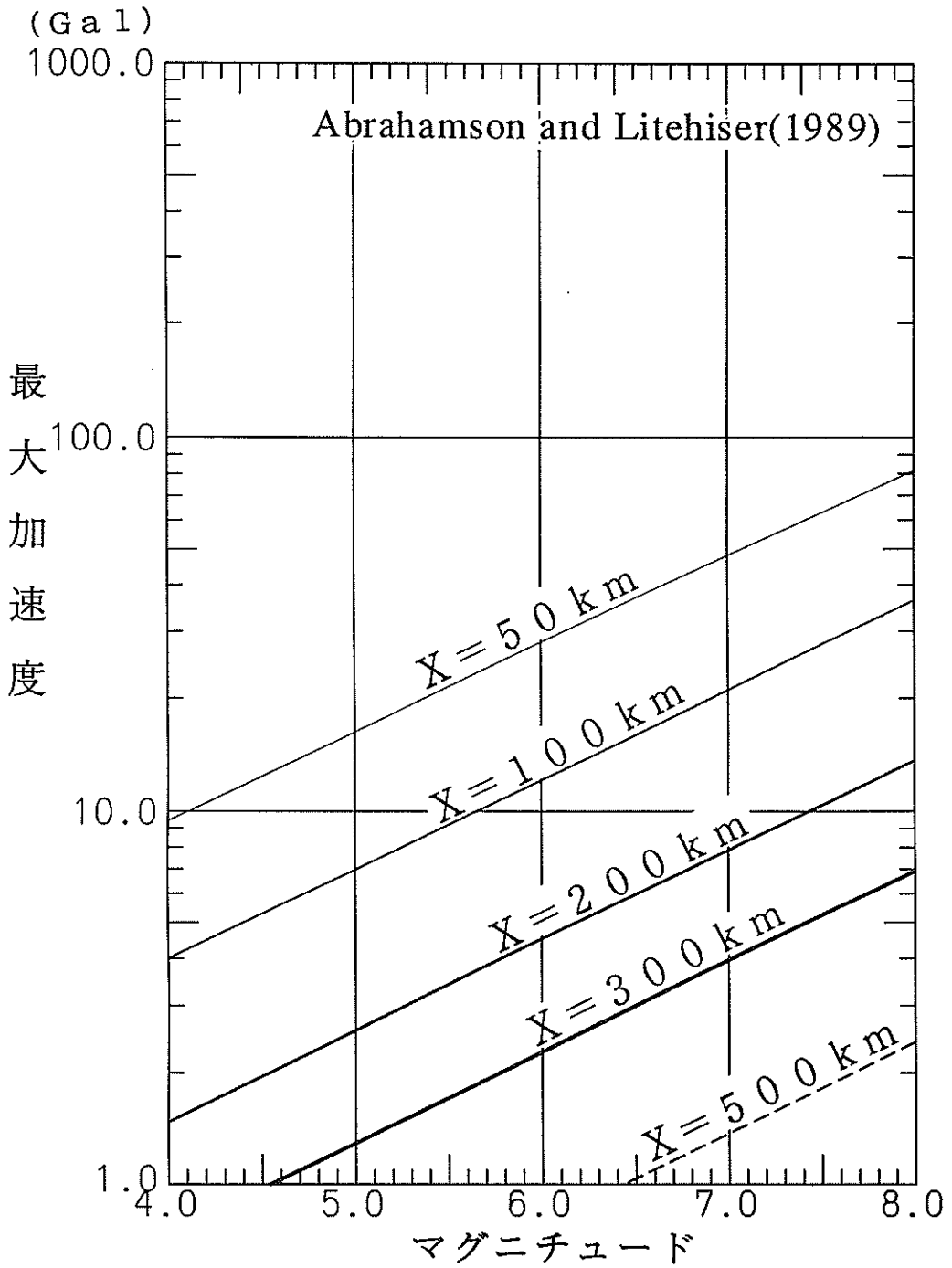
付図-A-18 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



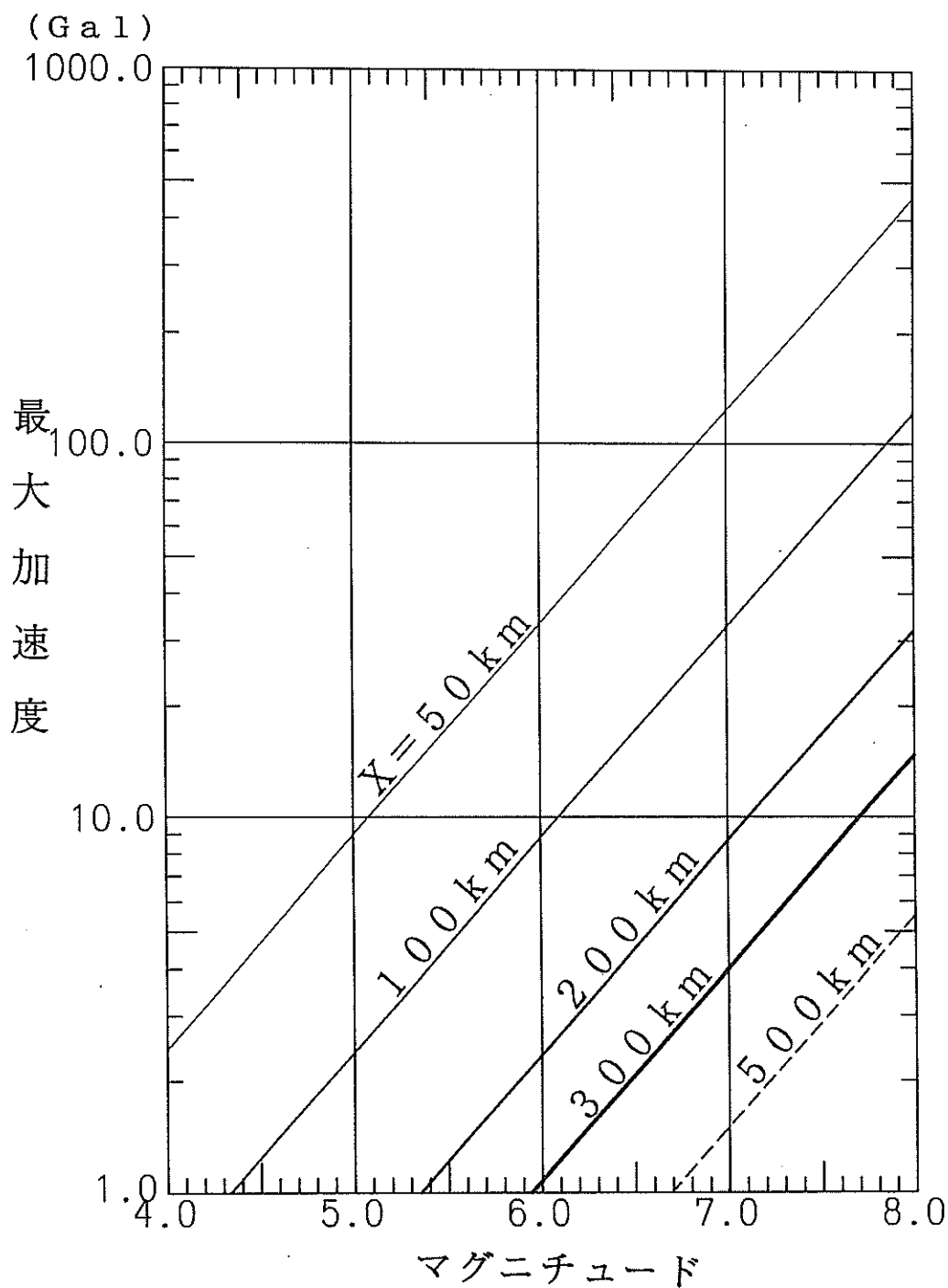
付図-A-19 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係 (水平動)



付図-A-20 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係(水平動)



付図-A-21 既往の距離減衰式の最大加速度とマグニチュードの関係（水平動）



付図-A-22 本研究で得られた距離減衰式 ((6-2) 式) の最大加速度とマグニチュードの関係 (上下動)

付録-B 同一のマグニチュードごとの観測記録とそれから得られる距離減衰式

本付録では、同一のマグニチュードごとの観測記録とそれから得られる距離減衰式を示す。

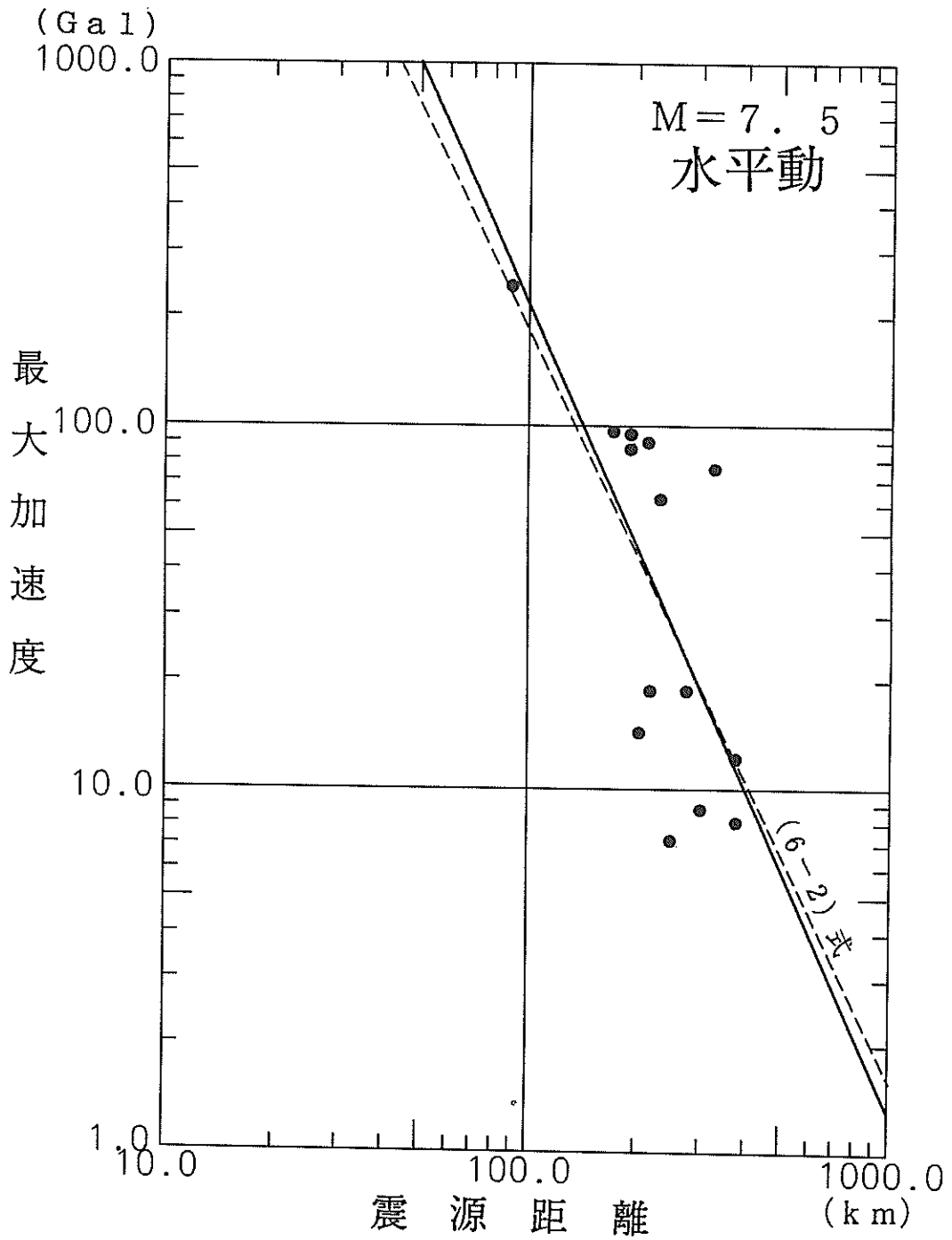
以下に示す各図において、実線がマグニチュードごとの式(6-2)による回帰の結果を、また、破線が2段階回帰での式(6-2)による回帰の結果を示すものである。また、表中には、マグニチュードごとの式(6-2)による回帰での勾配 α および相関係数をまとめている。

水平動

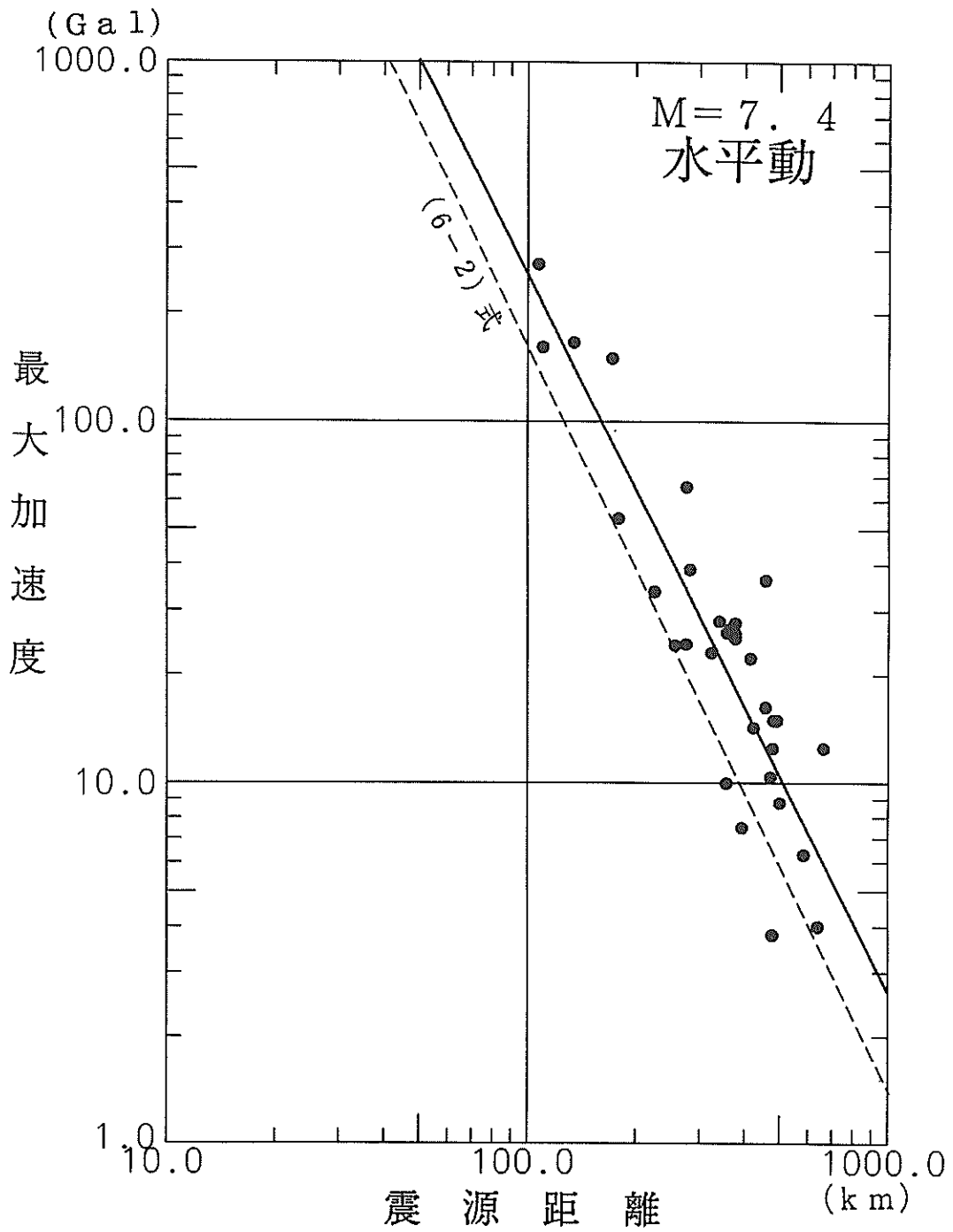
M	距離減衰勾配	相関係数
7.5	2.217	-0.708
7.4	1.985	-0.878
7.3	-1.282	0.261
7.2	1.372	-0.606
7.1	1.481	-0.743
7.0	0.840	-0.531
6.9	0.835	-0.720
6.8	0.575	-0.437
6.7	1.101	-0.605
6.6	1.722	-0.729
6.5	1.636	-0.678
6.4	1.238	-0.559
6.3	0.410	-0.322
6.2	1.367	-0.603
6.1	1.913	-0.708

上下動

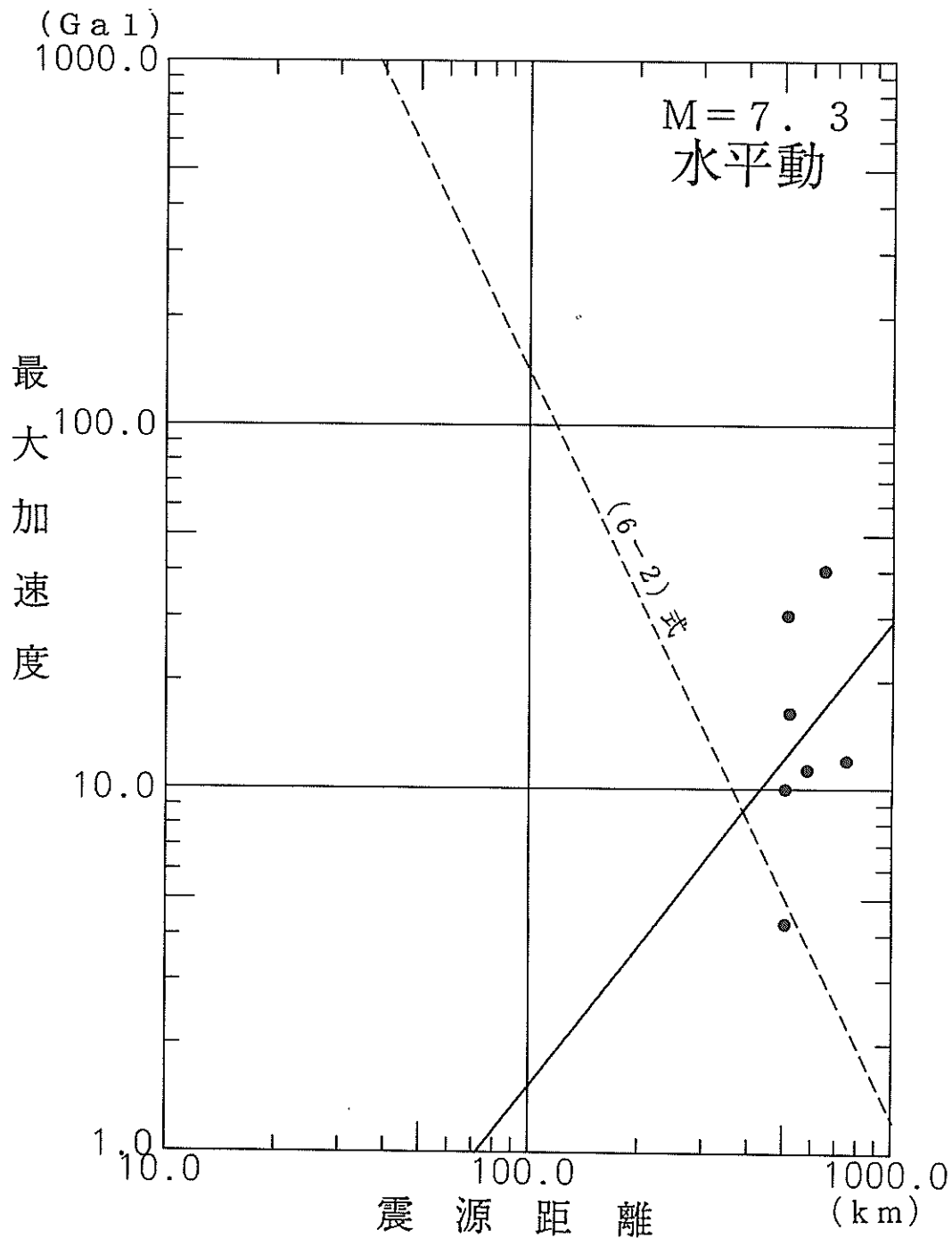
M	距離減衰勾配	相関係数
7.5	2.373	-0.781
7.4	2.116	-0.899
7.3	-2.088	0.417
7.2	1.251	-0.580
7.1	1.268	-0.694
7.0	0.780	-0.467
6.9	1.166	-0.617
6.8	0.449	-0.334
6.7	1.176	-0.670
6.6	1.993	-0.712
6.5	1.611	-0.689
6.4	1.312	-0.582
6.3	0.775	-0.819
6.2	1.513	-0.557
6.1	1.913	-0.799



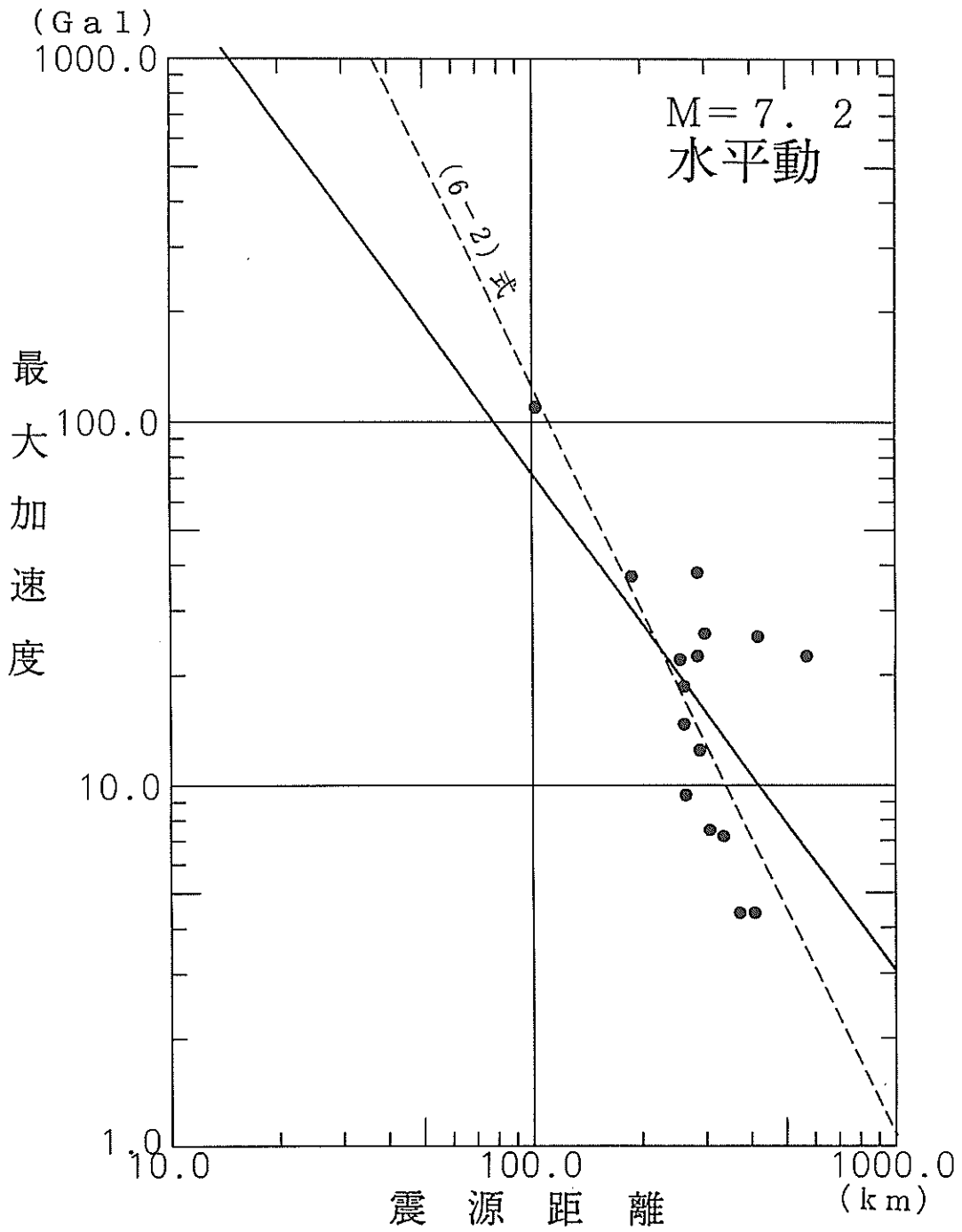
付図-B-1 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



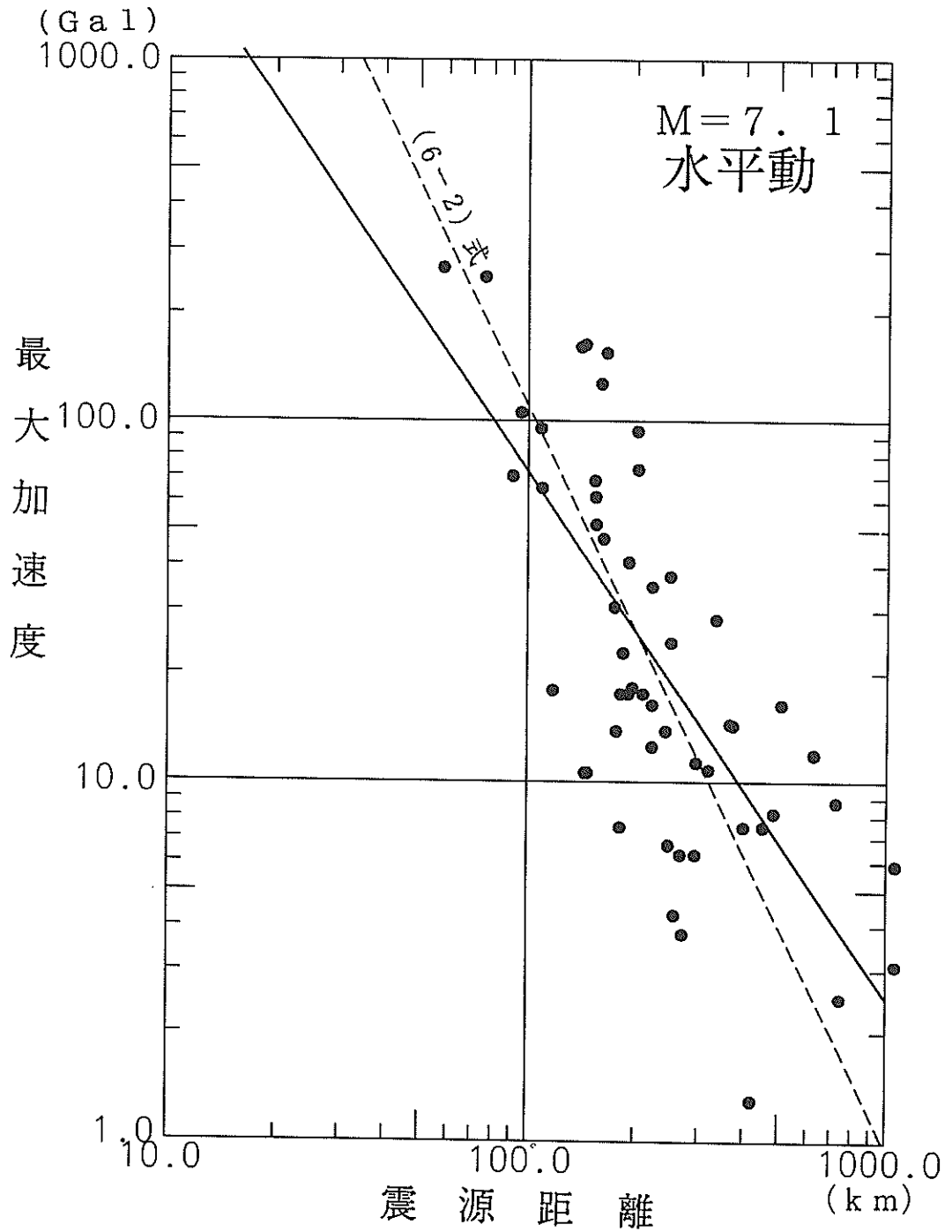
付図-B-2 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



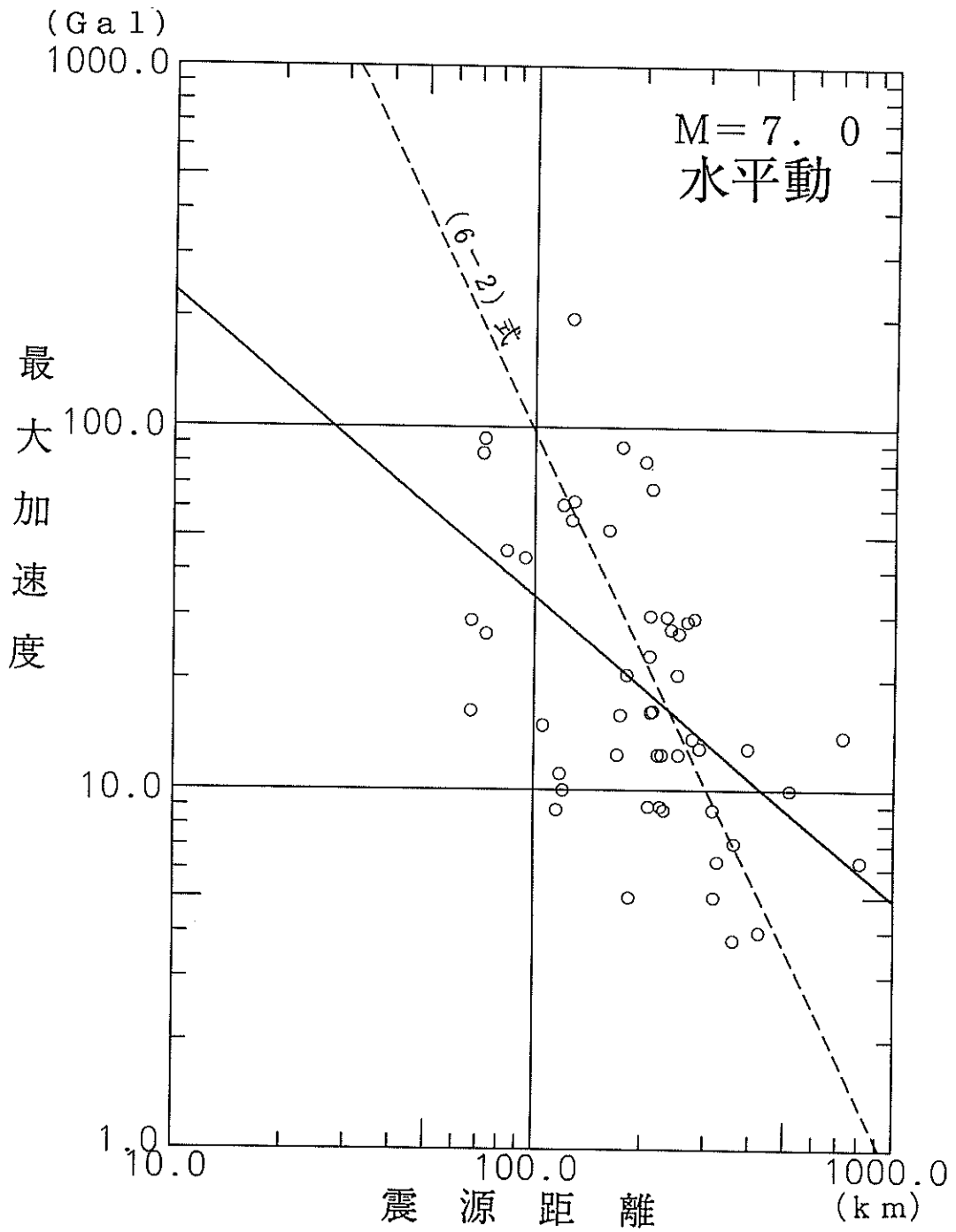
付図-B-3 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



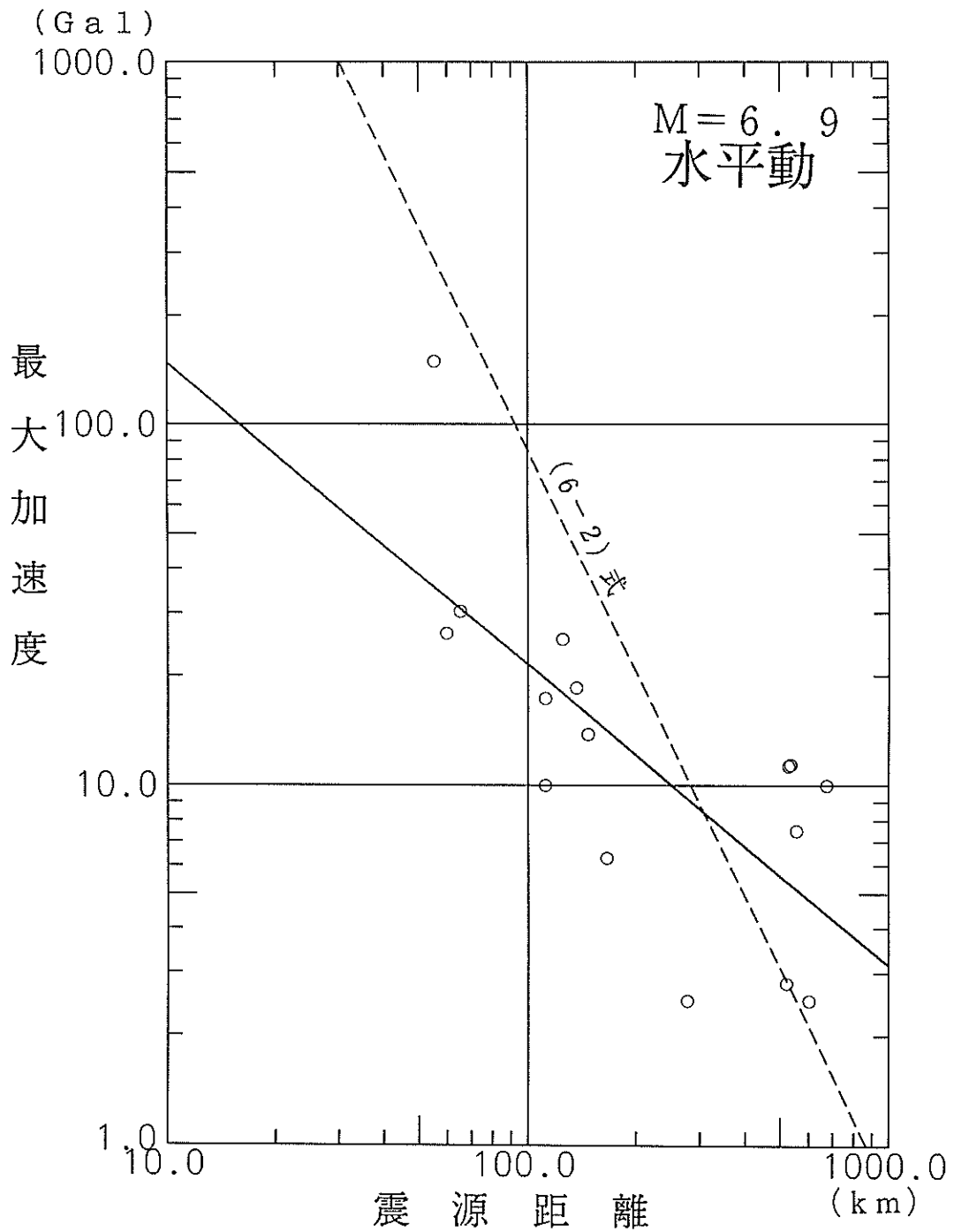
付図-B-4 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



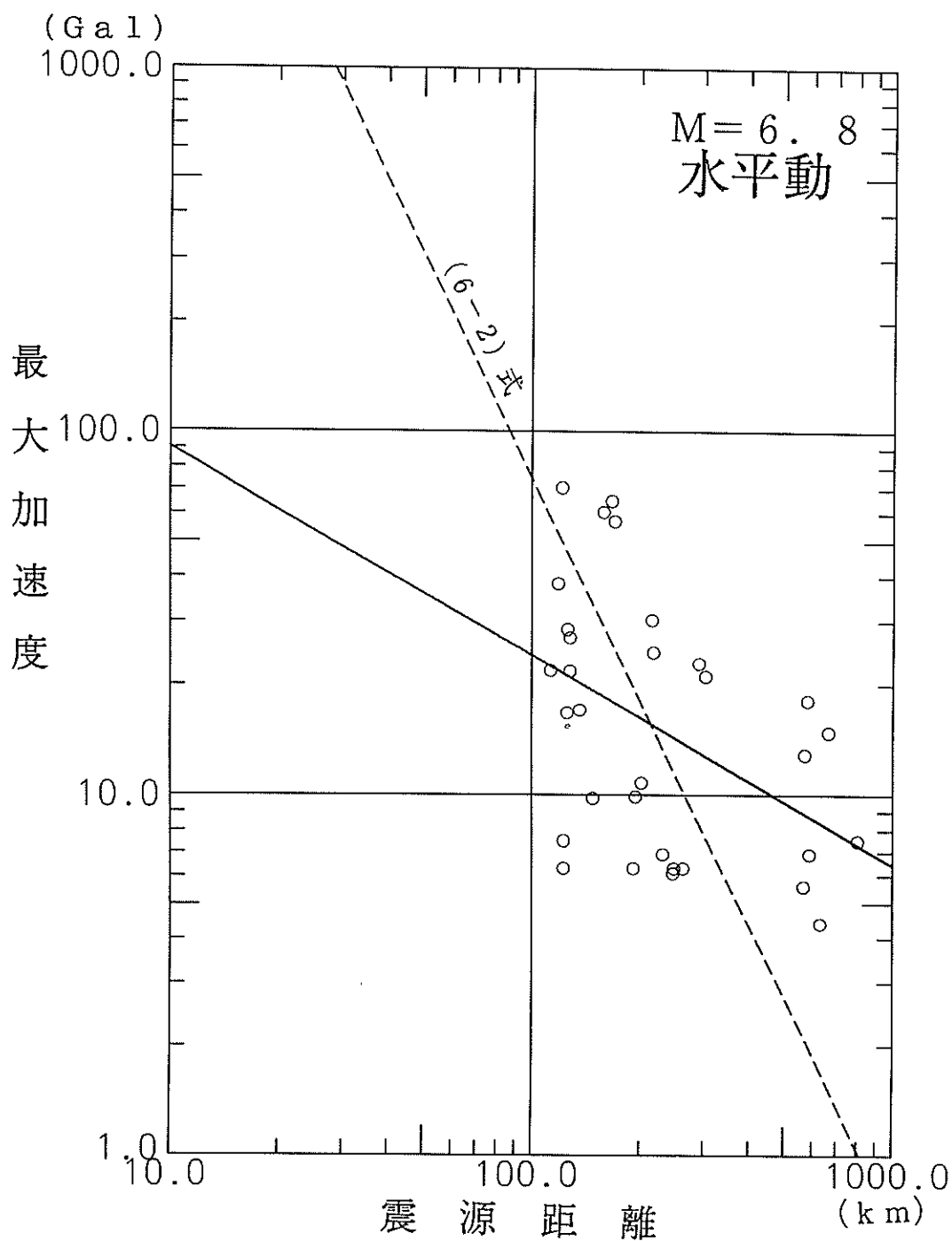
付図-B-5 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



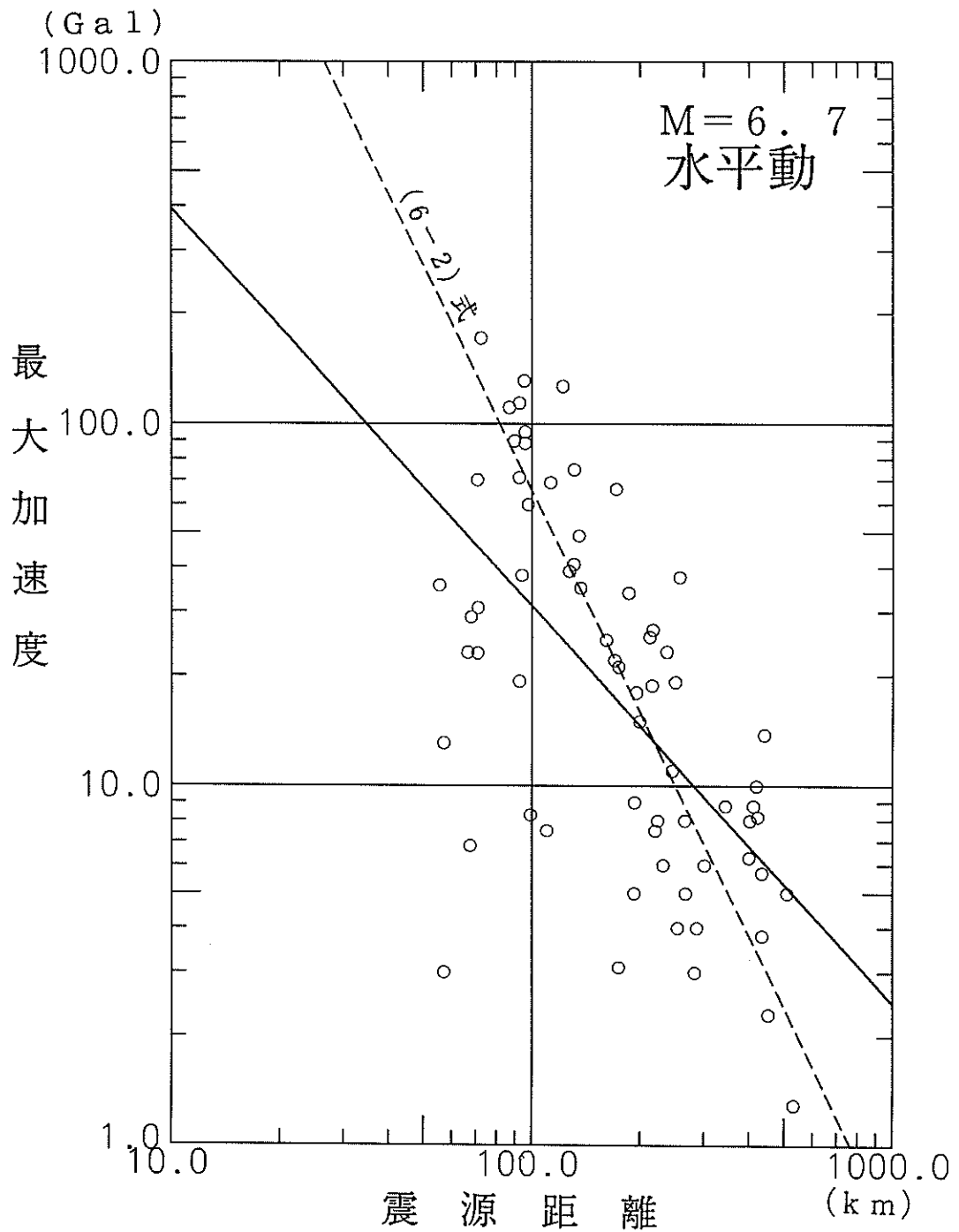
付図-B-6 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



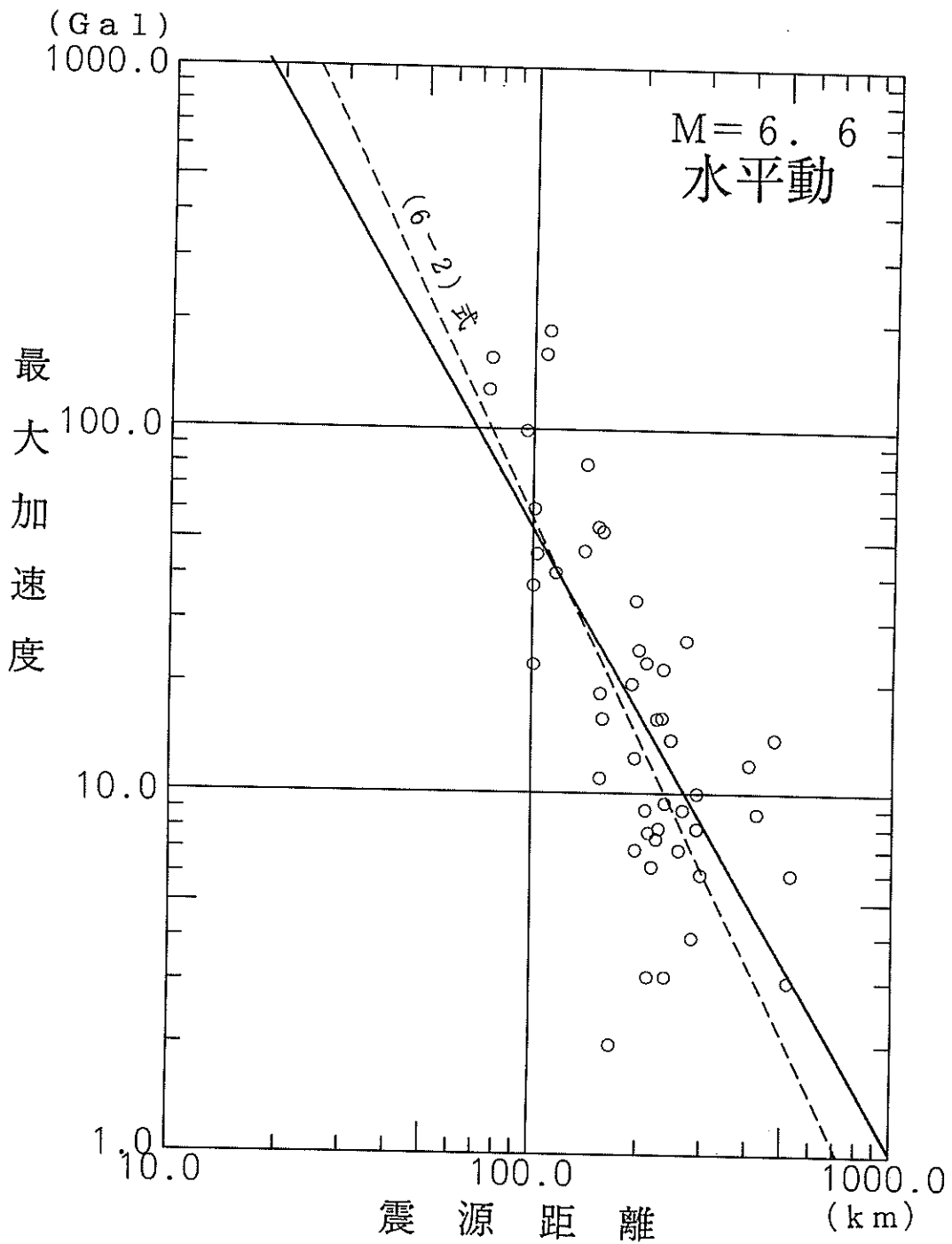
付図-B-7 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
本研究(6-2)式との比較



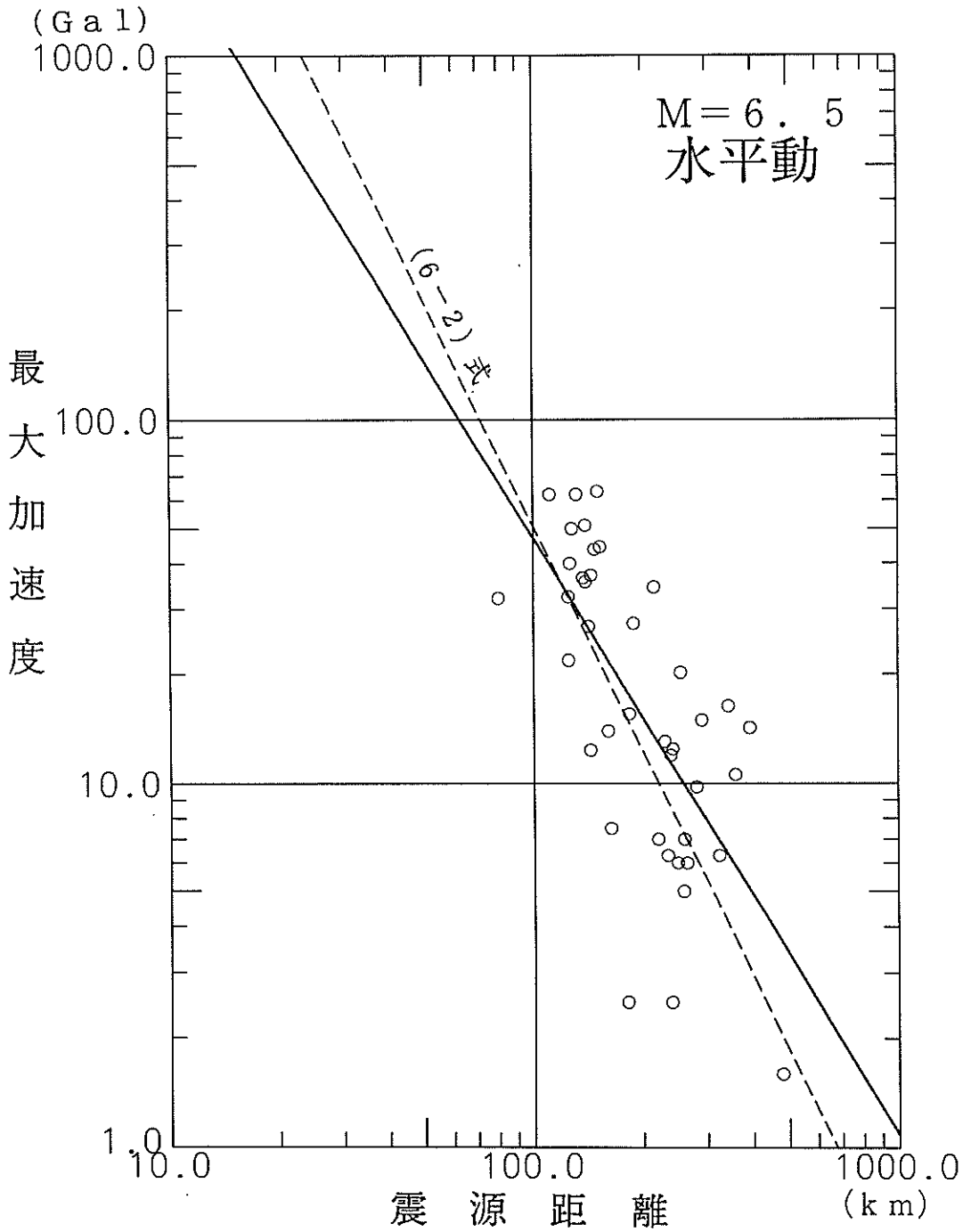
付図-B-8 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



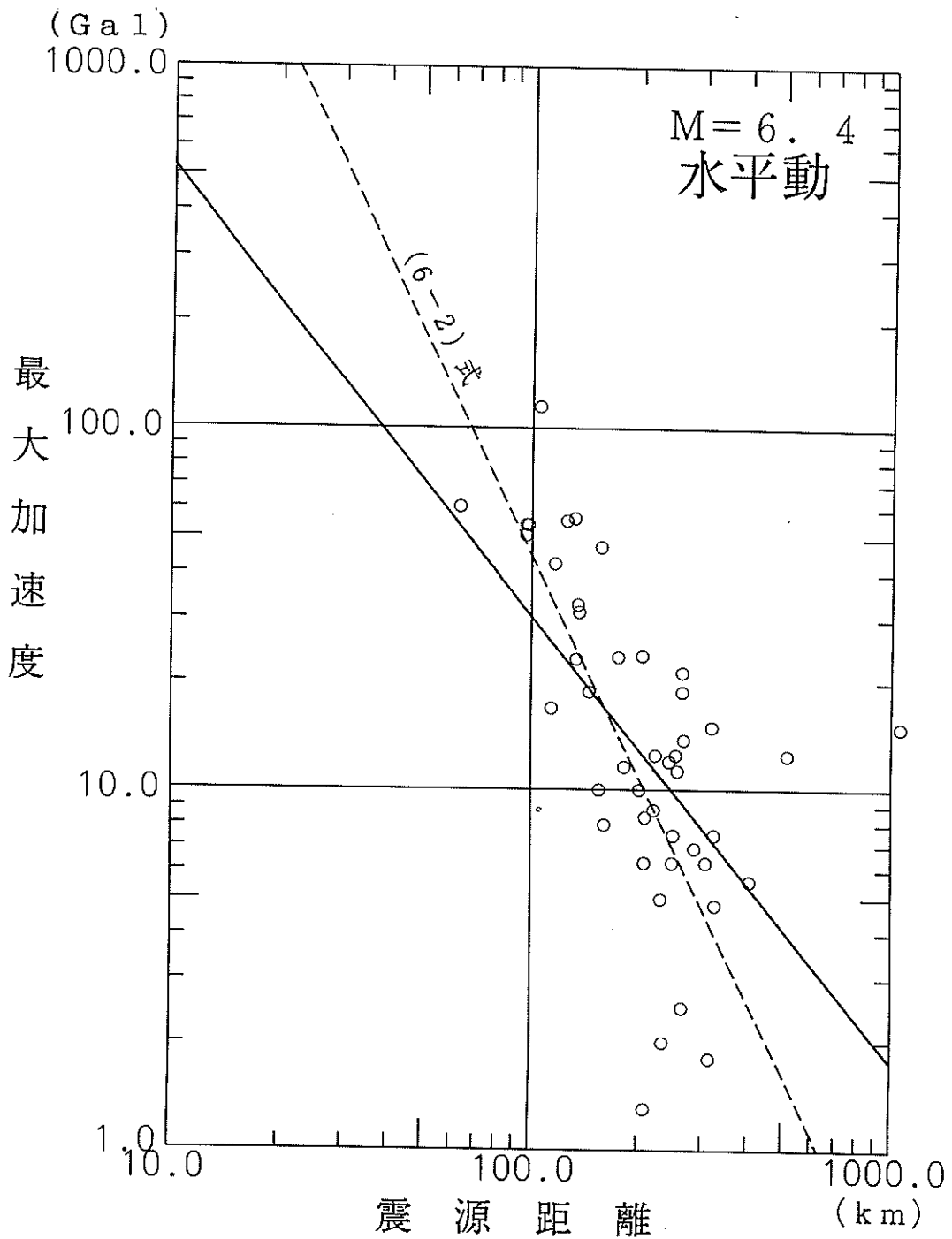
付図-B-9 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



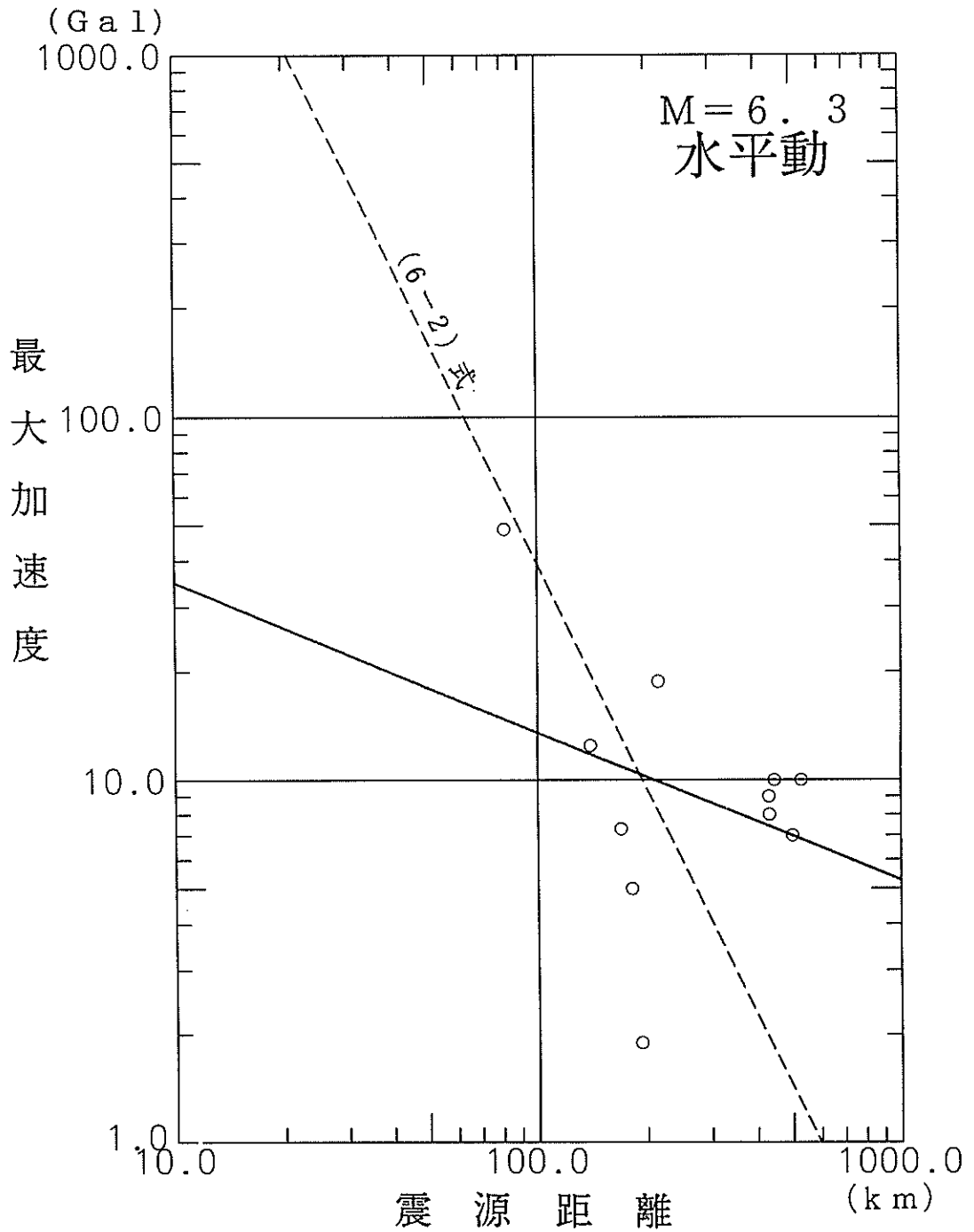
付図-B-10 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



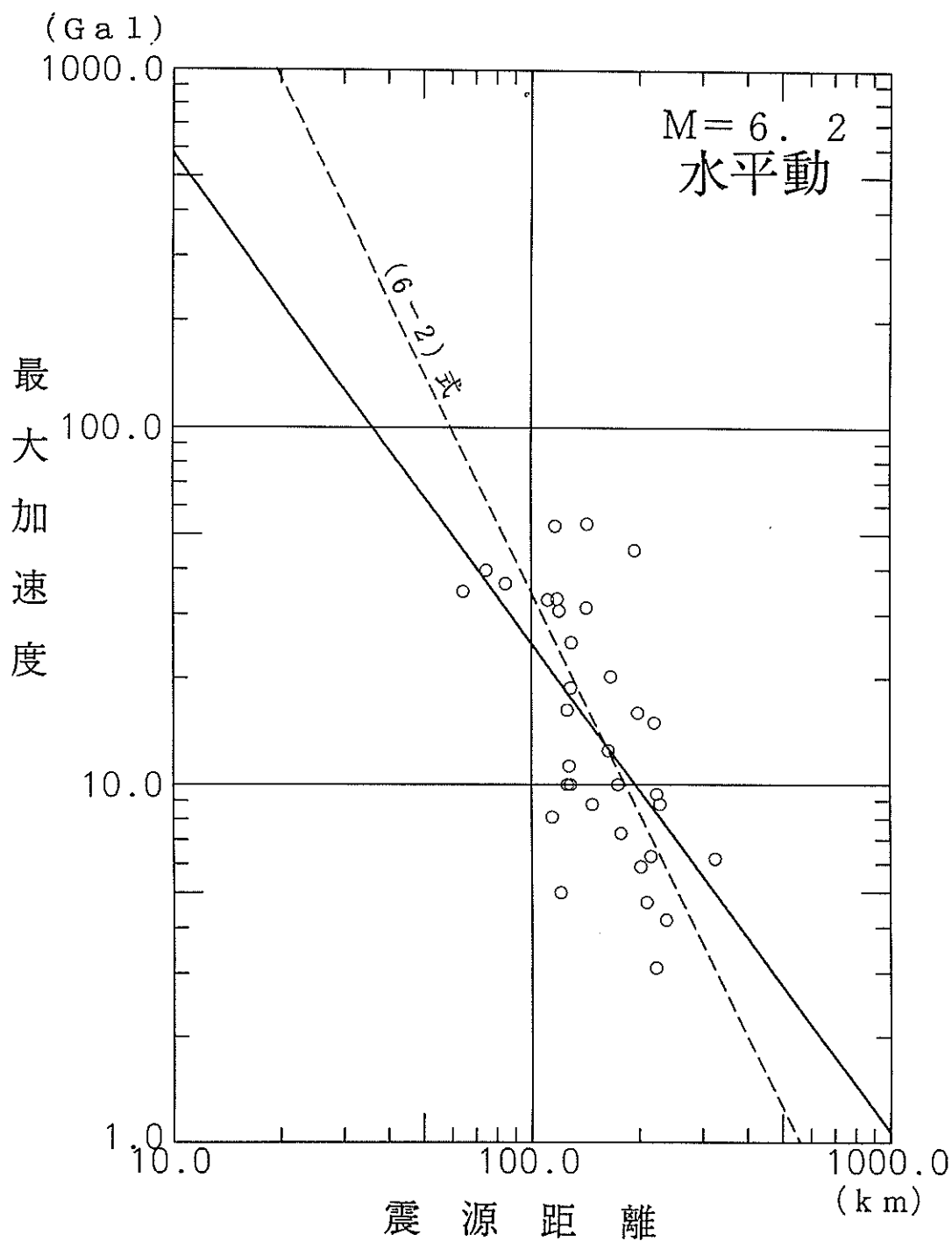
付図-B-11 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



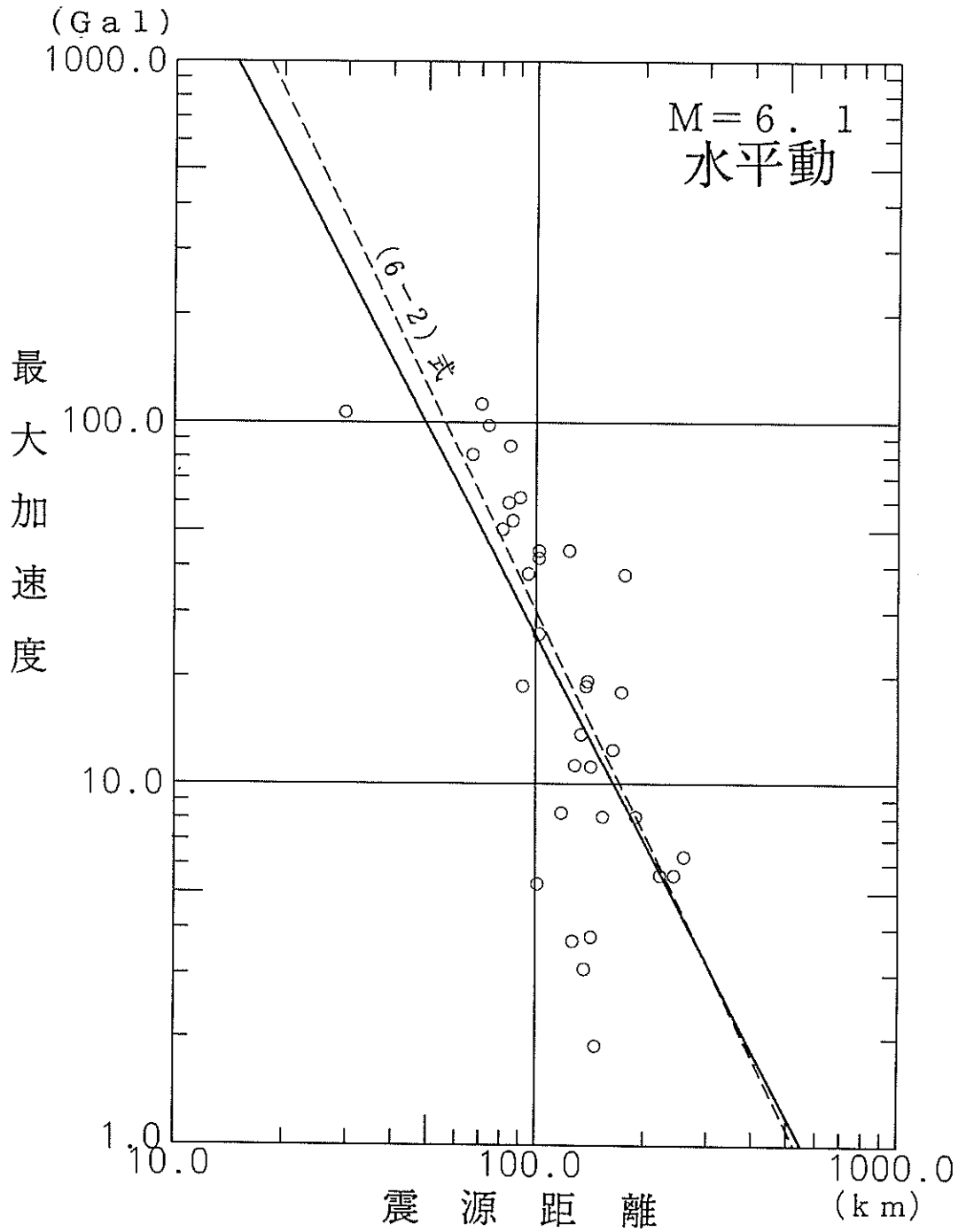
付図-B-12 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



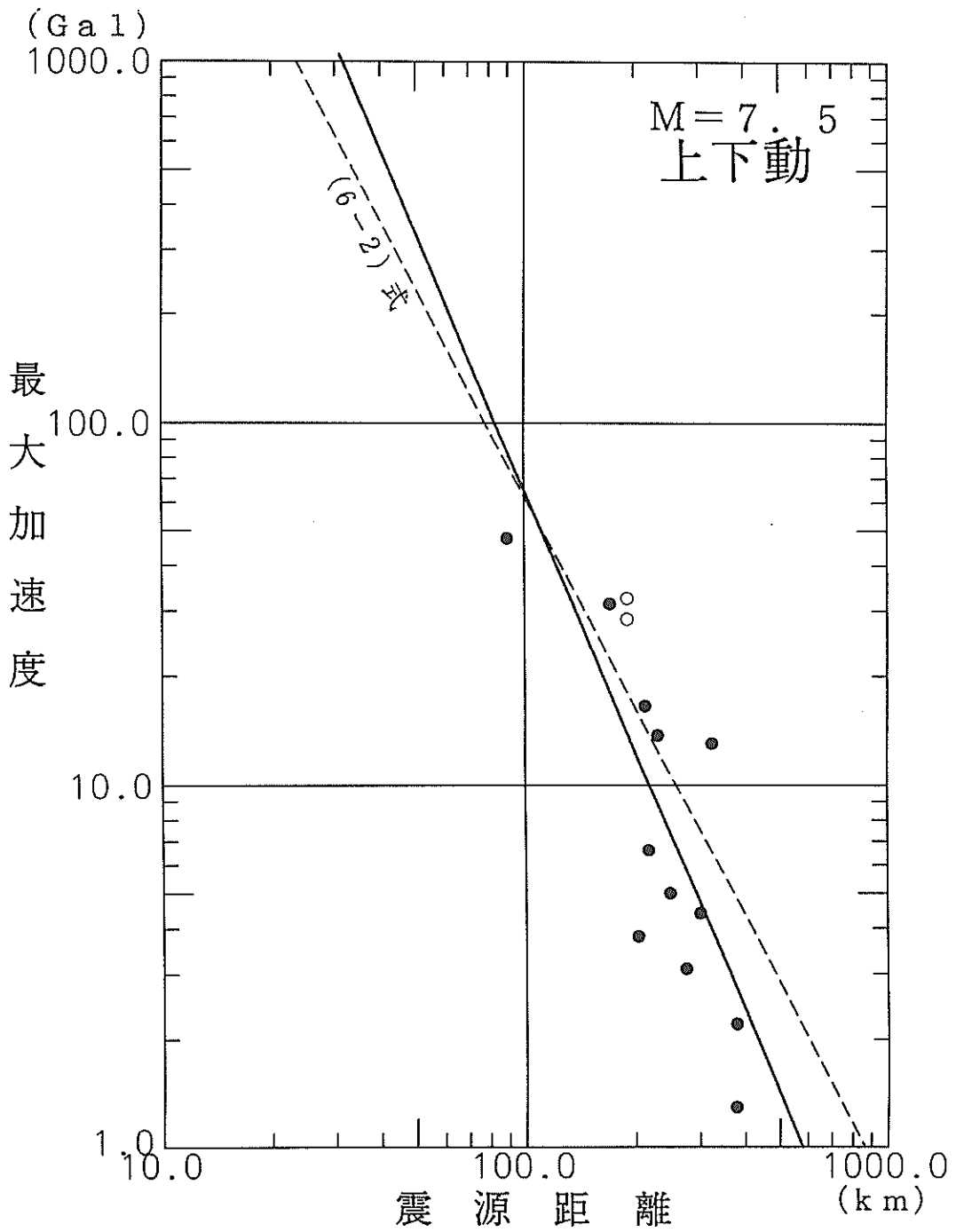
付図-B-13 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



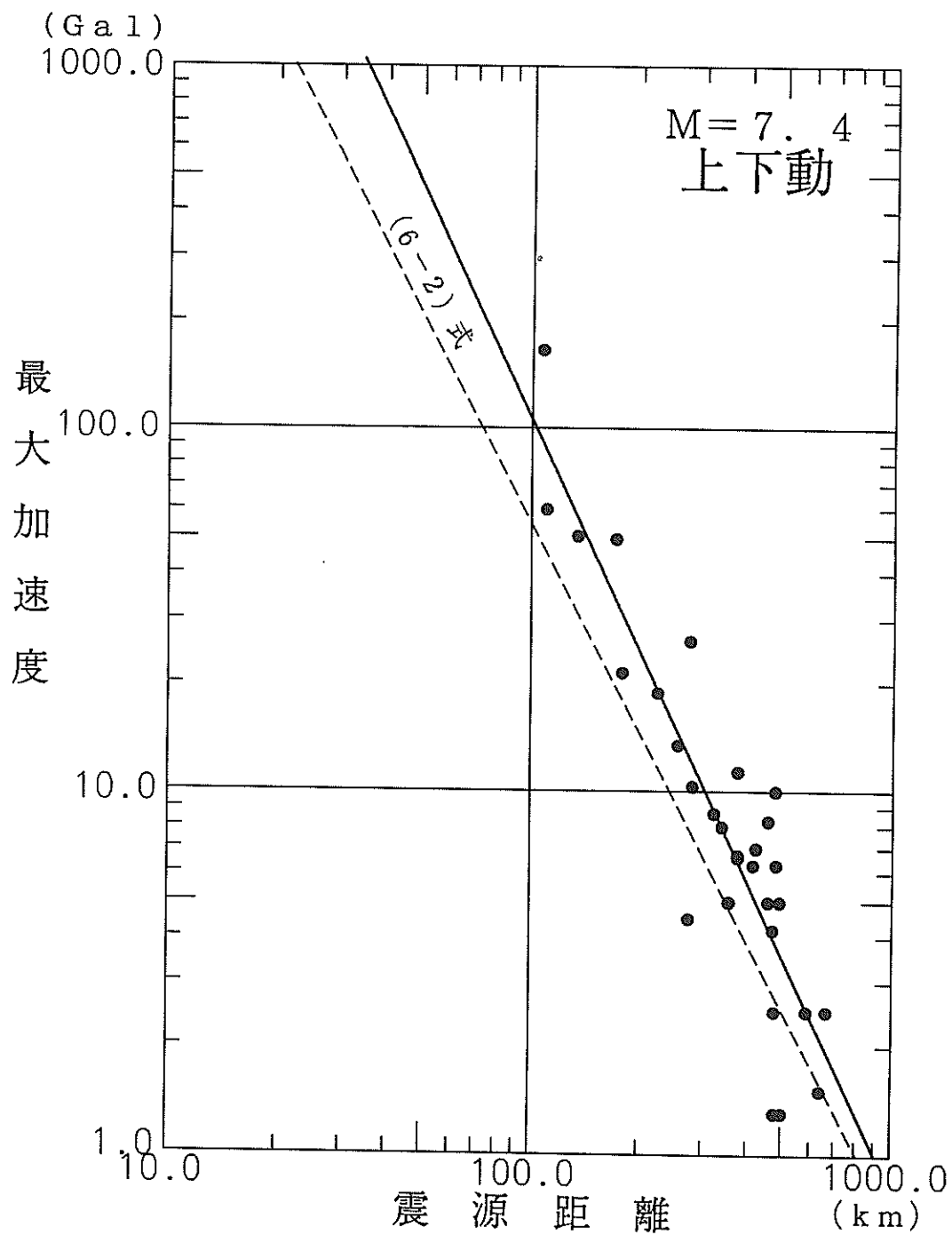
付図-B-14 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



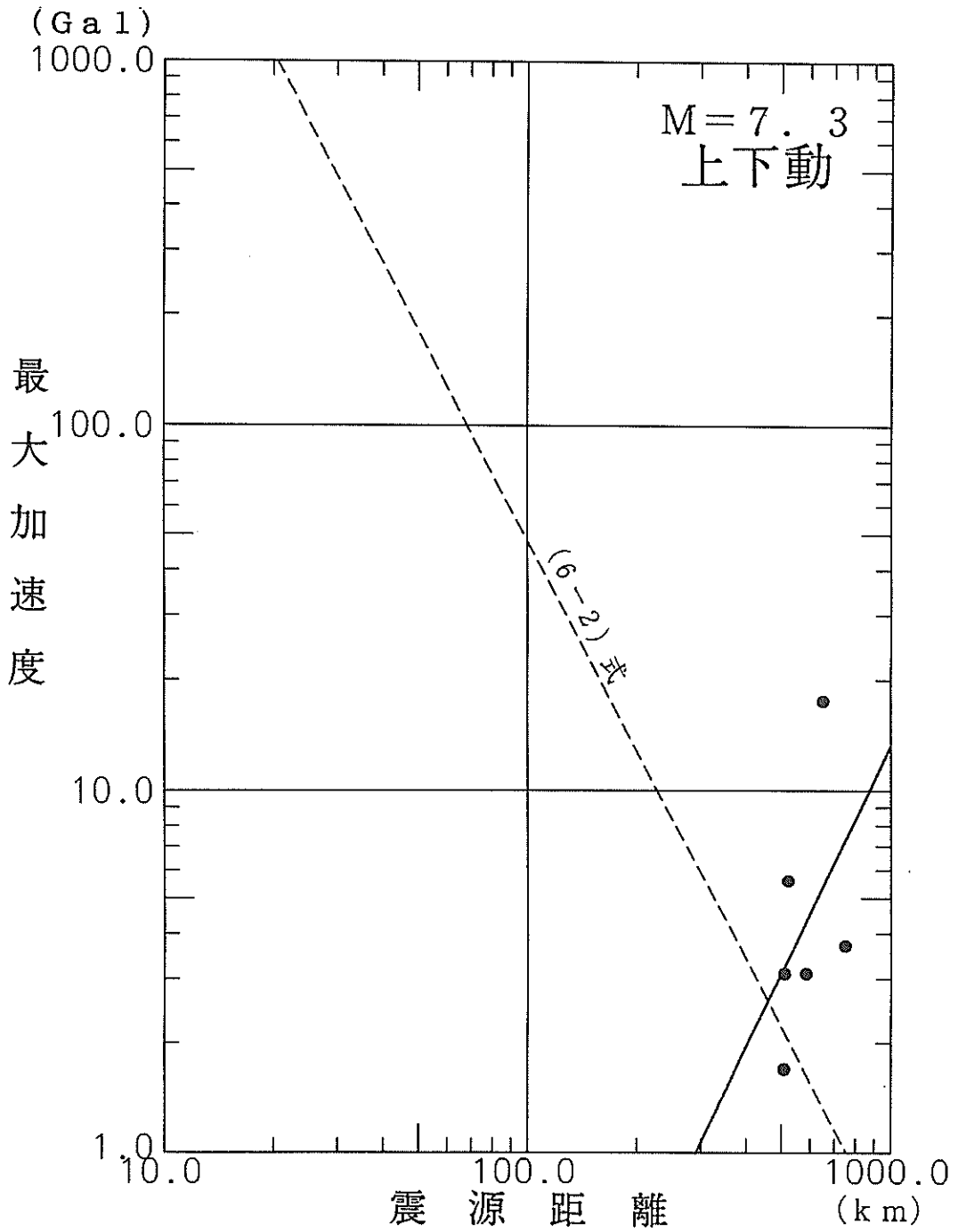
付図-B-15 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



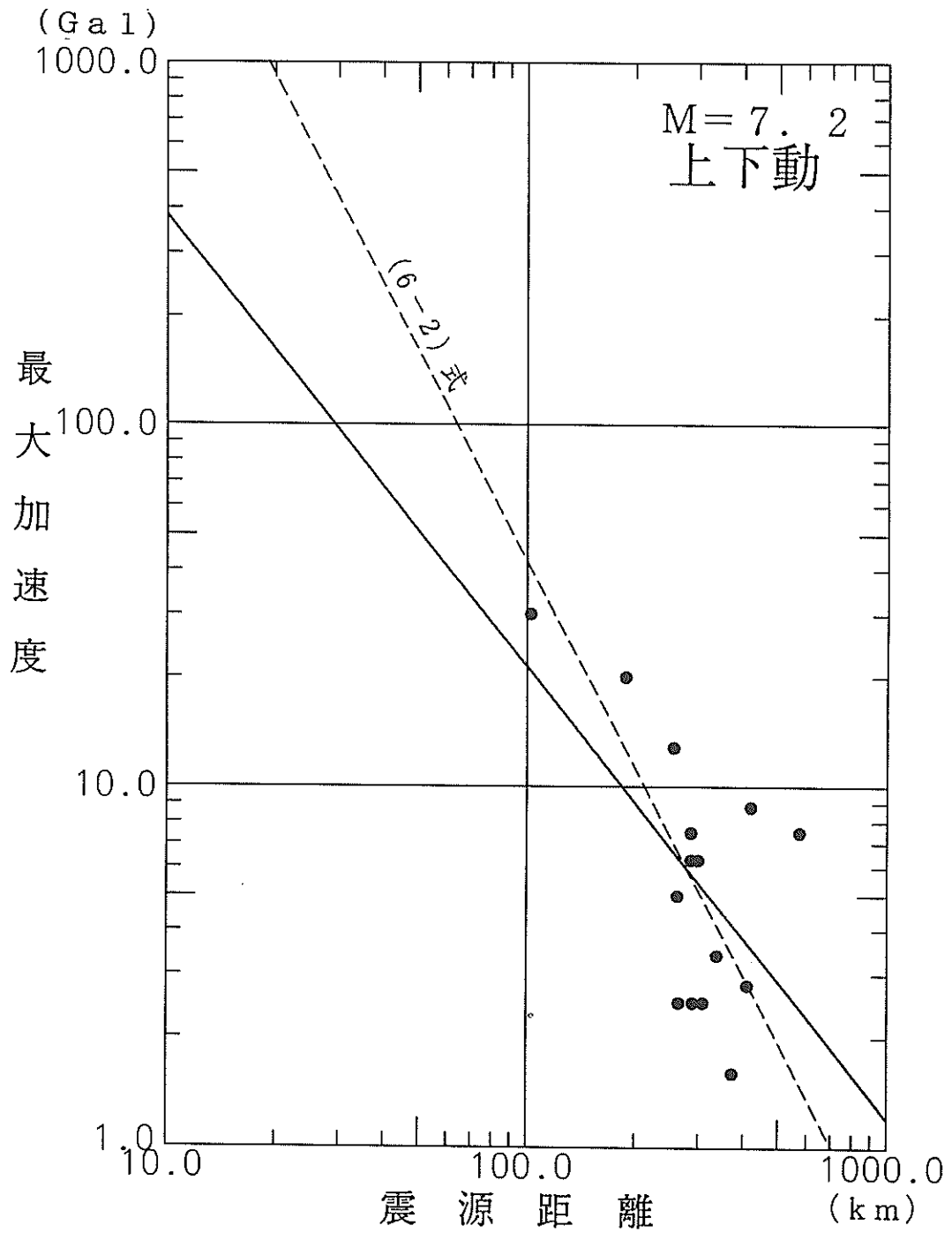
付図-B-16 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



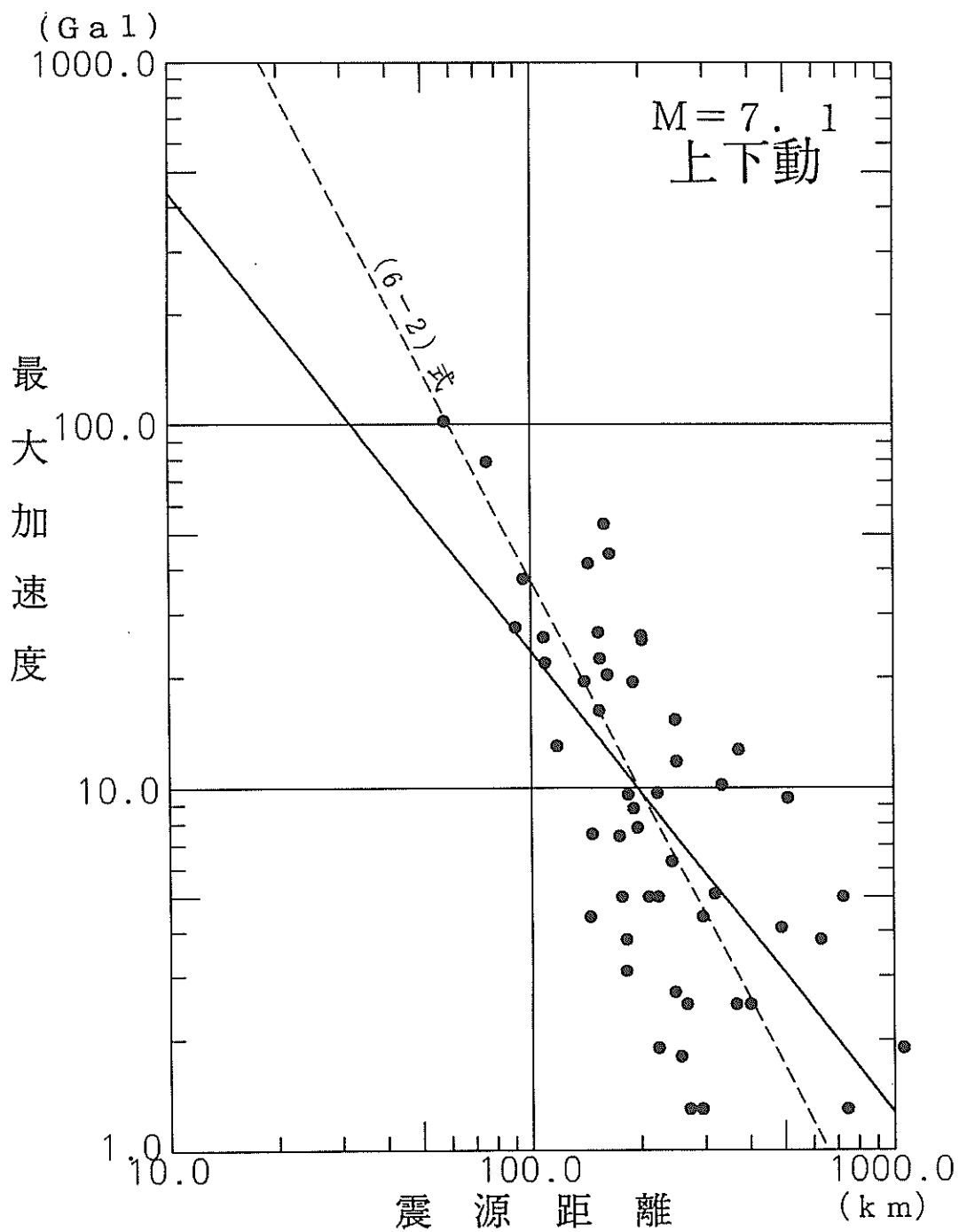
付図-B-17 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



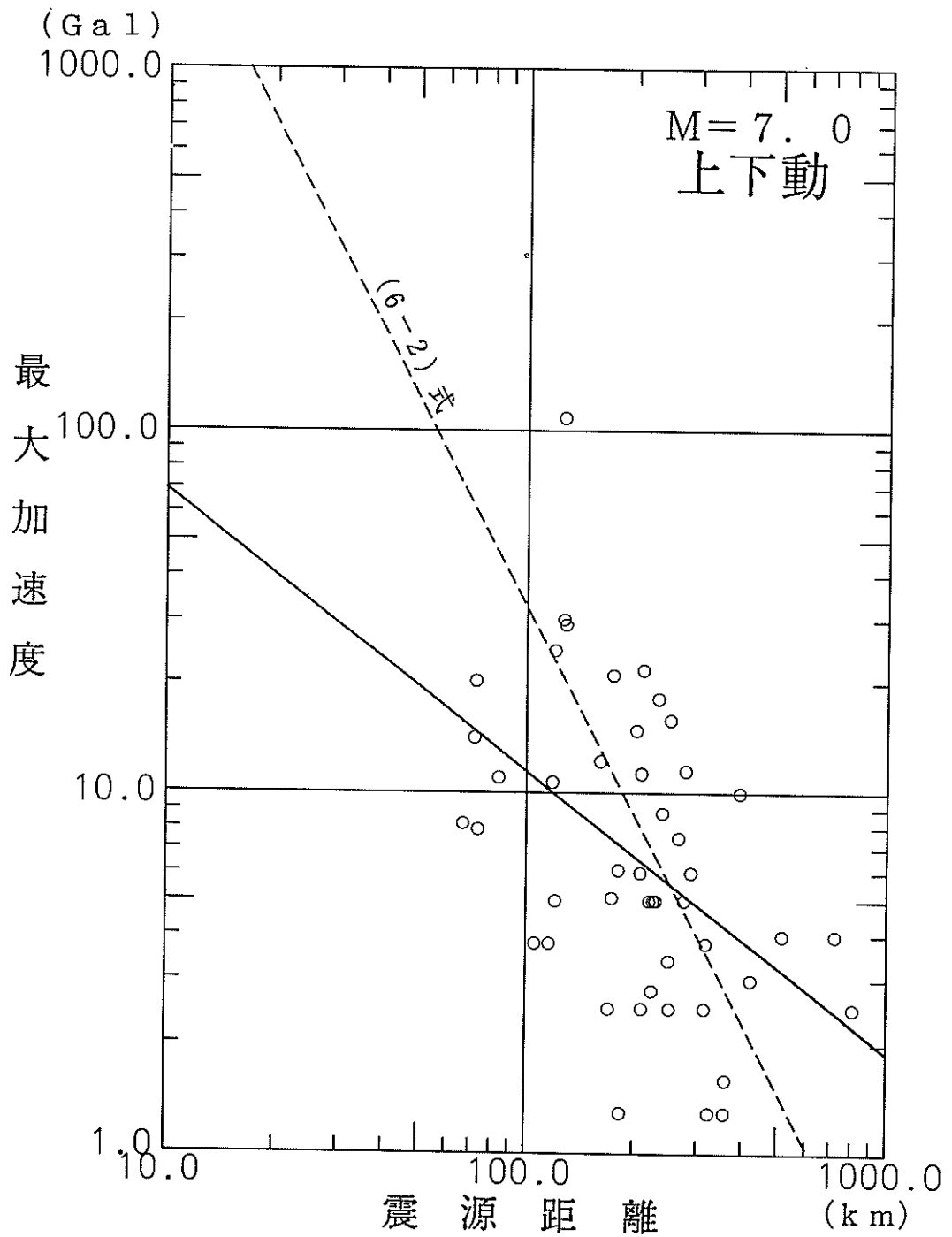
付図-B-18 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



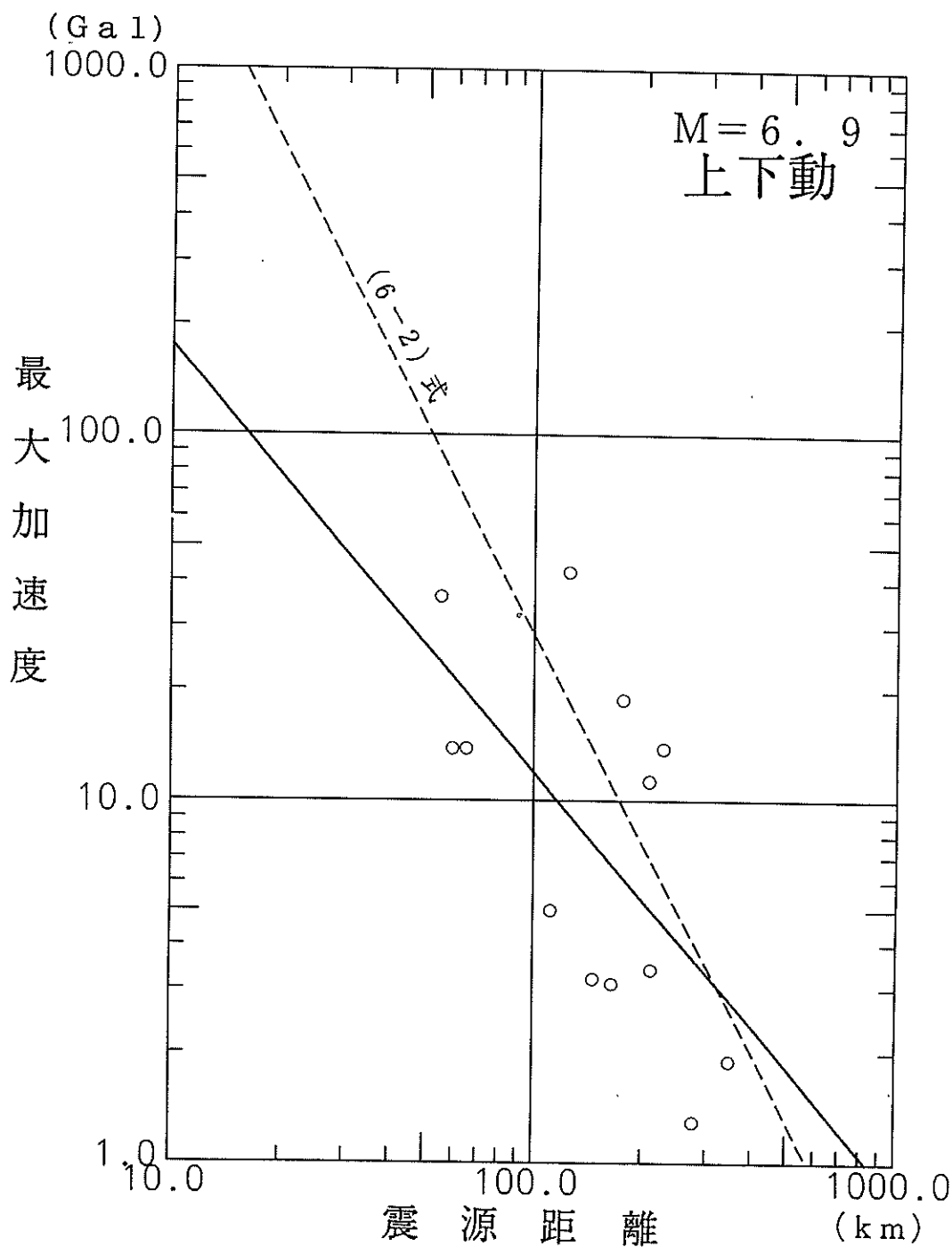
付図-B-19 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



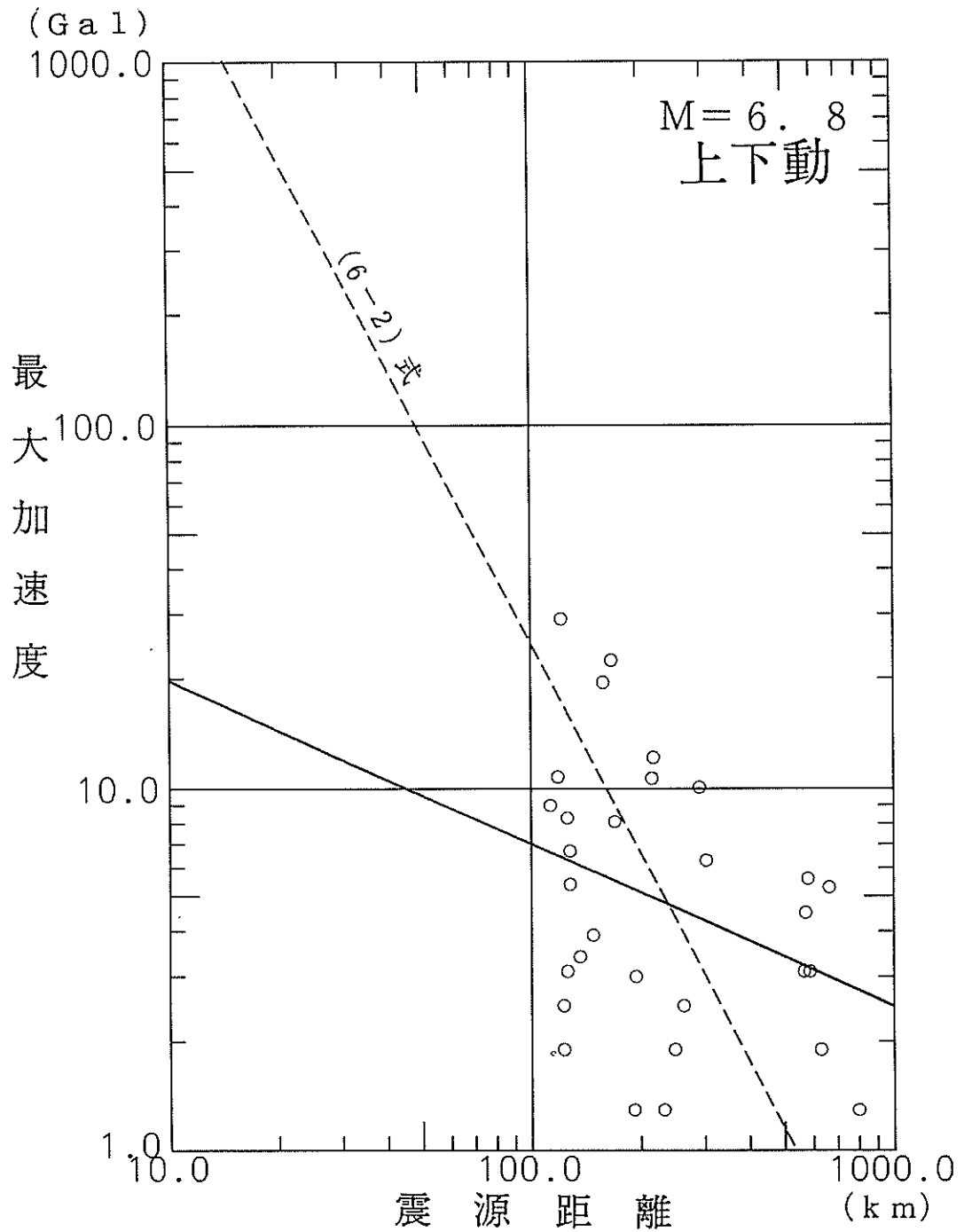
付図-B-20 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



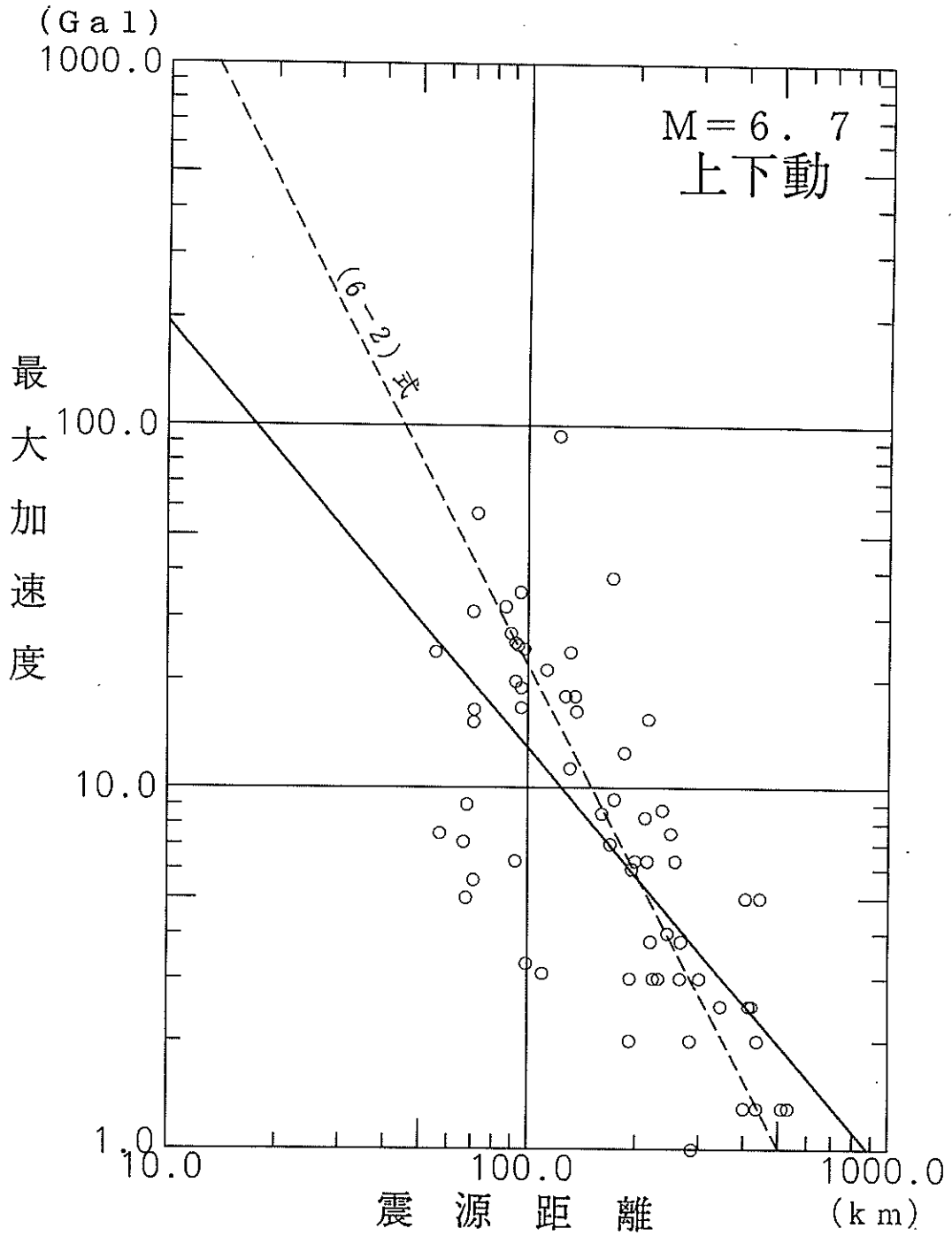
付図-B-21 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



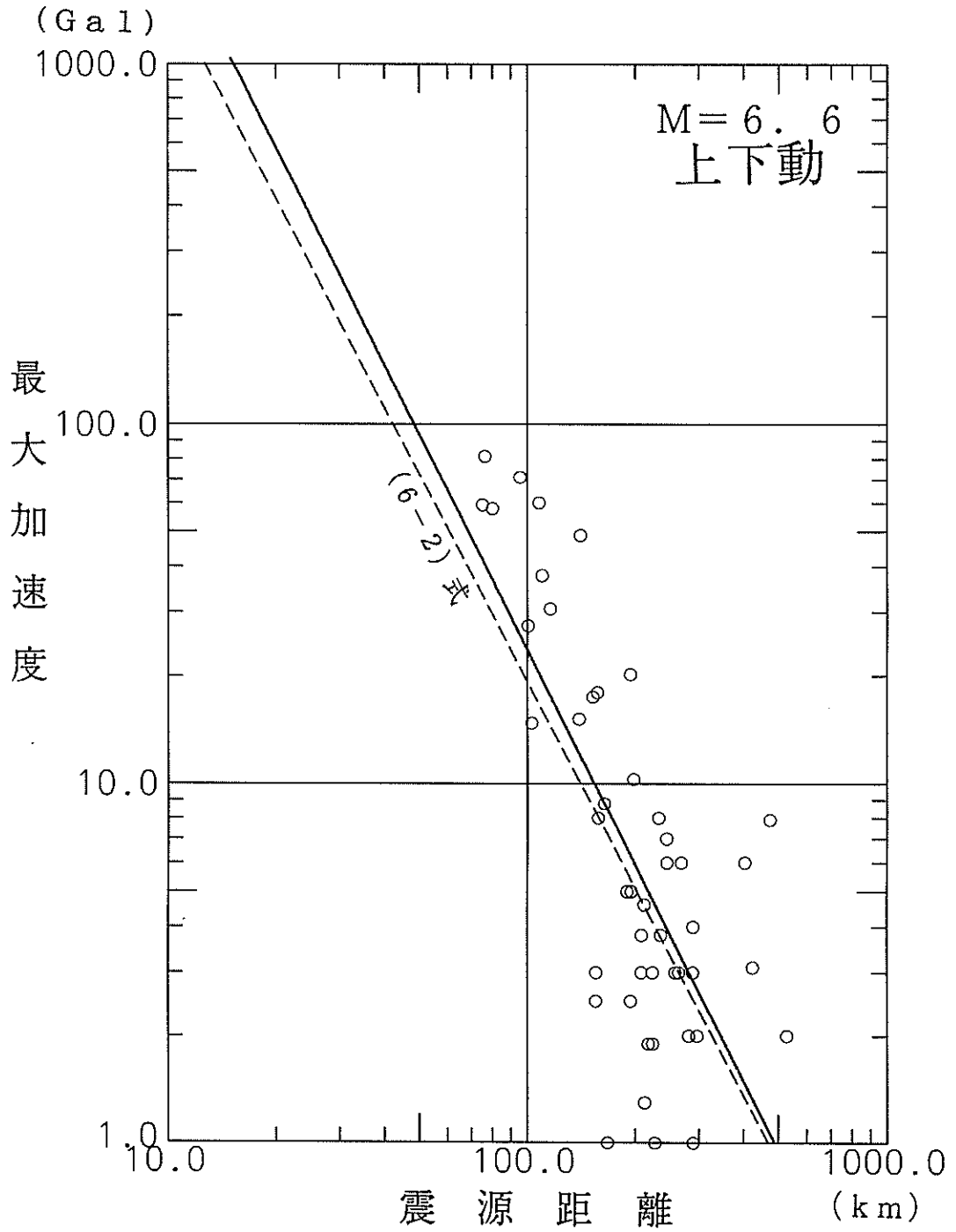
付図-B-22 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



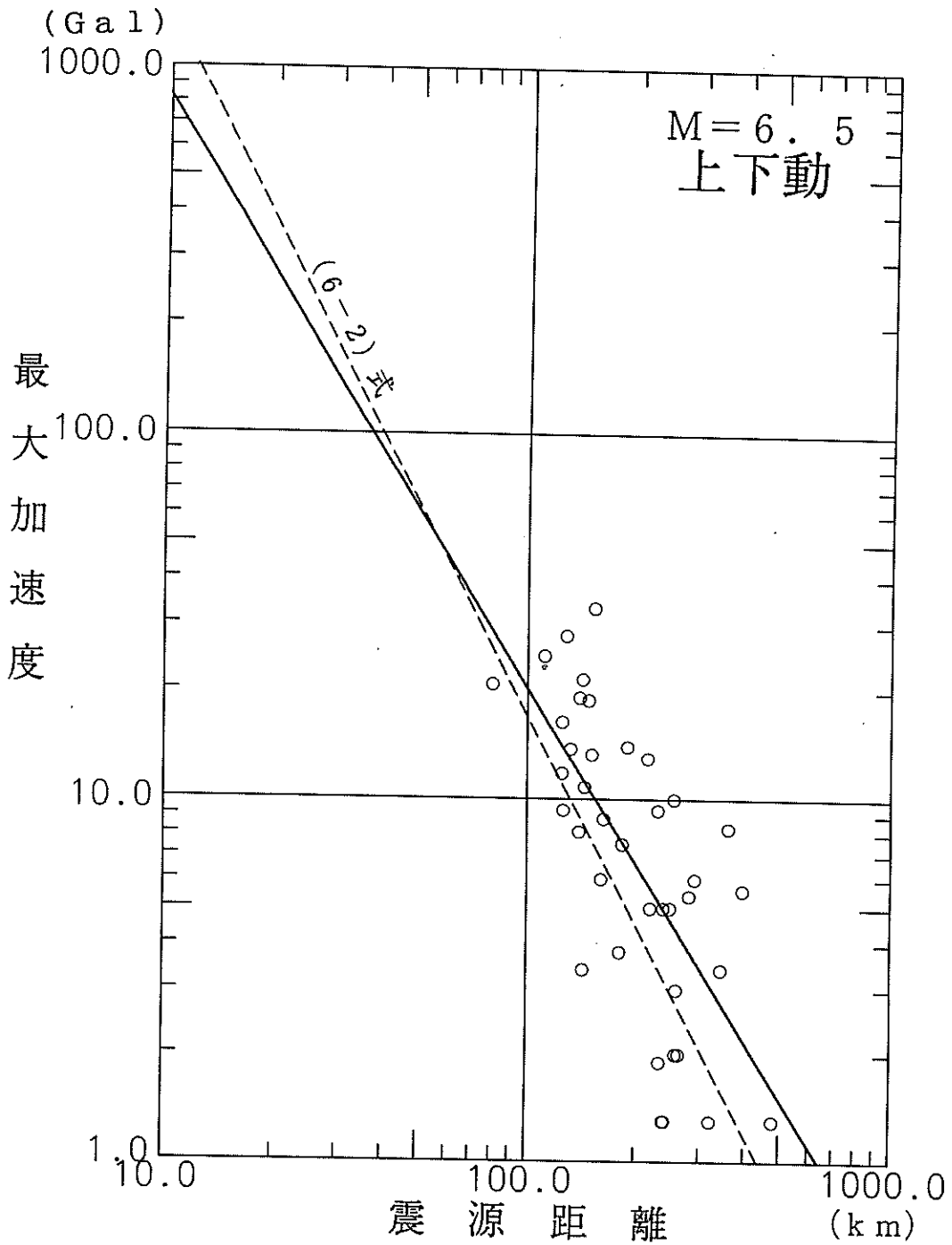
付図-B-23 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



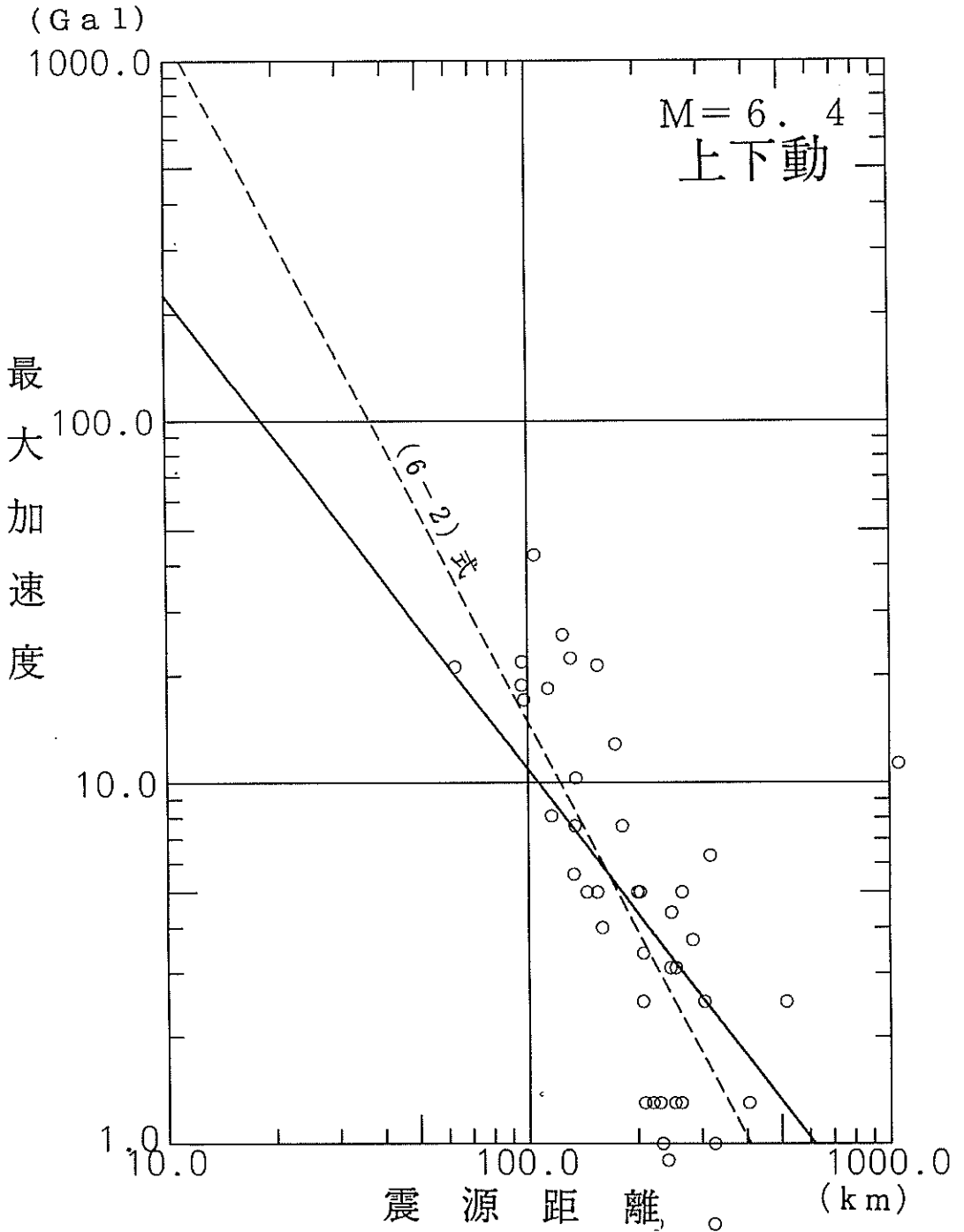
付図-B-24 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
本研究(6-2)式との比較



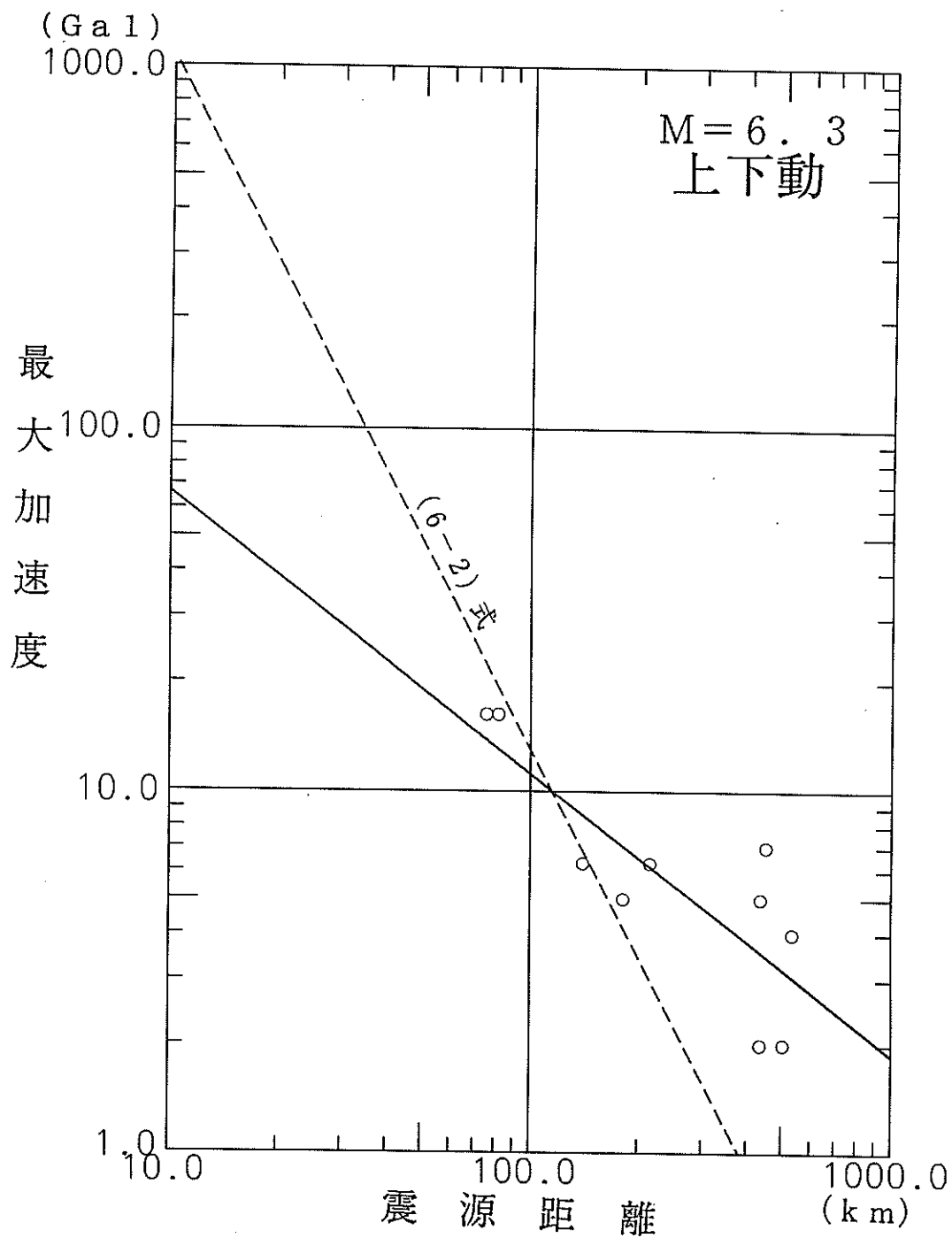
付図-B-25 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



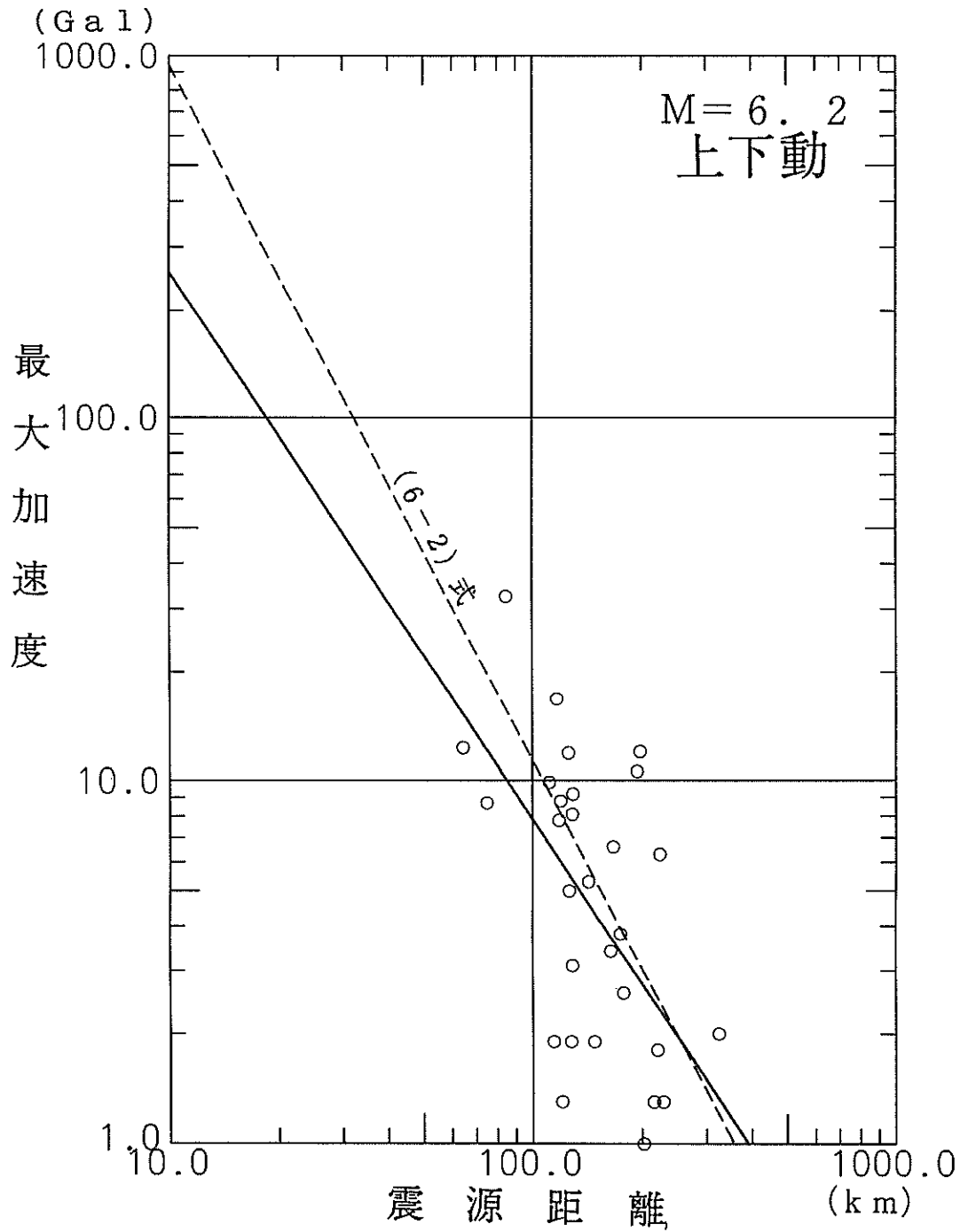
付図-B-26 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



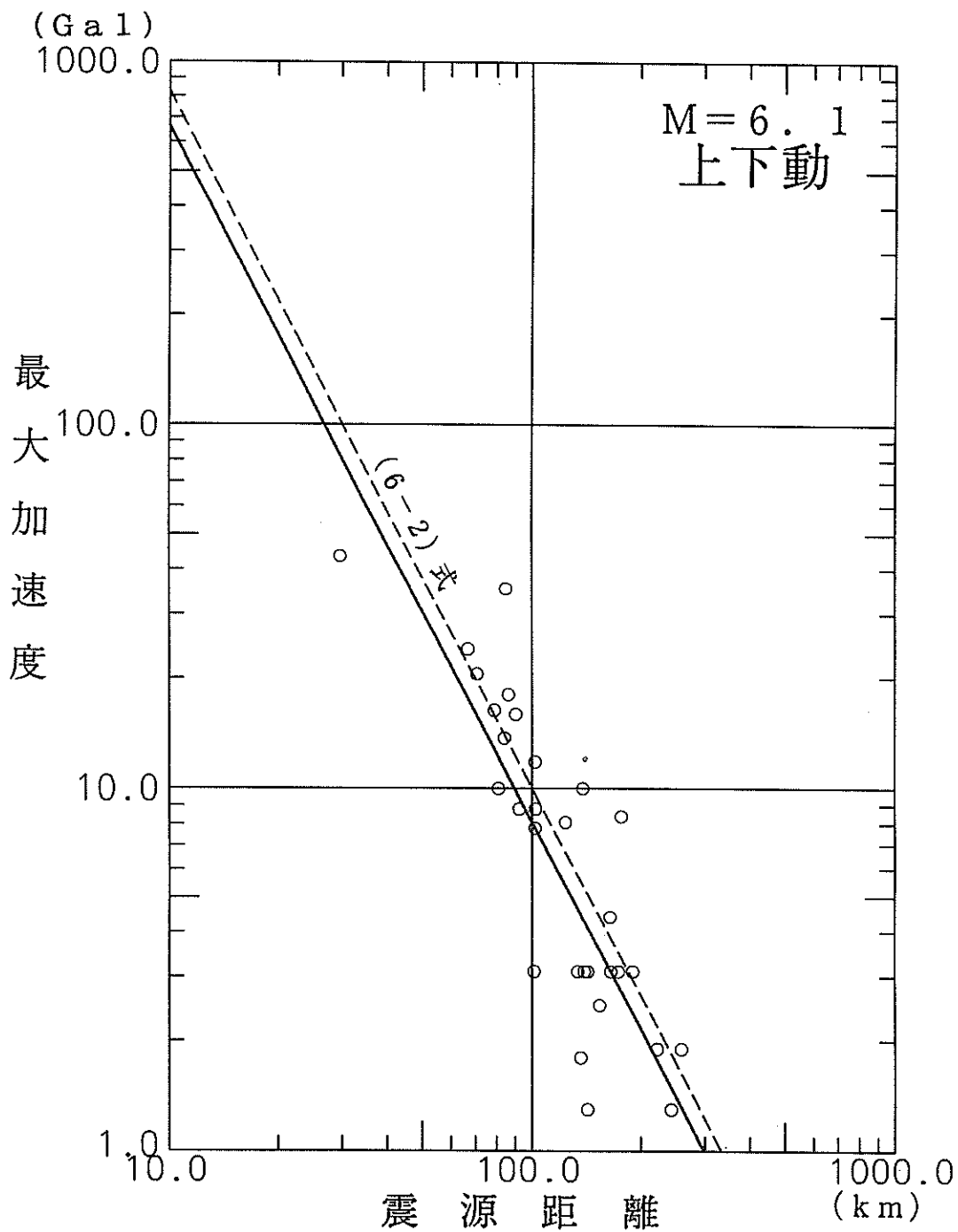
付図-B-27 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較



付図-B-28 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
 本研究(6-2)式との比較



付図-B-29 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と
本研究(6-2)式との比較

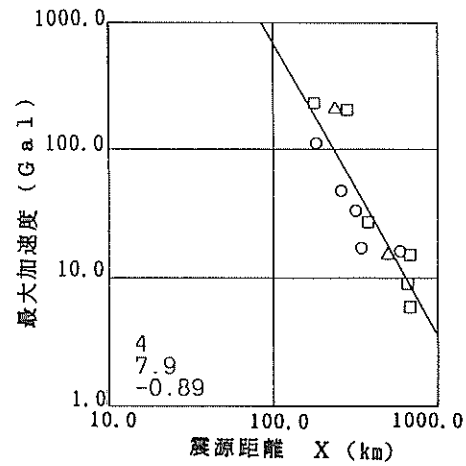
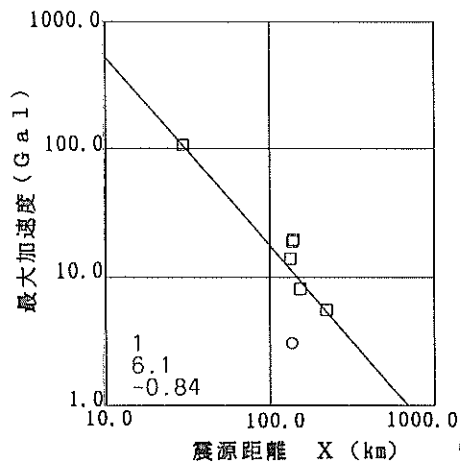
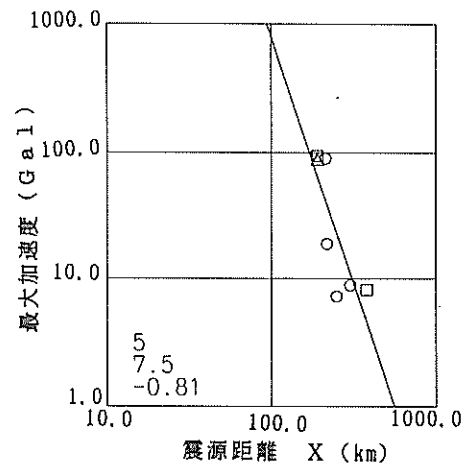
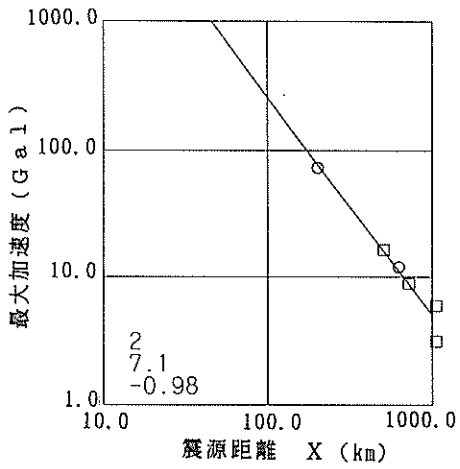
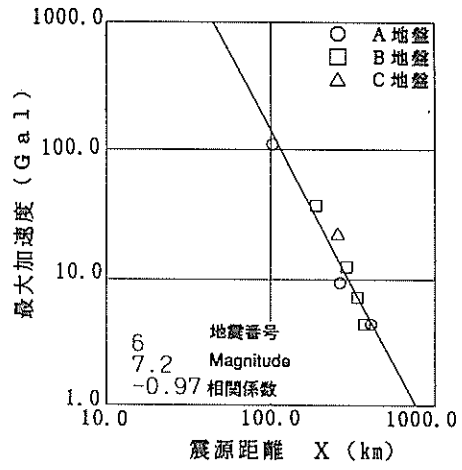
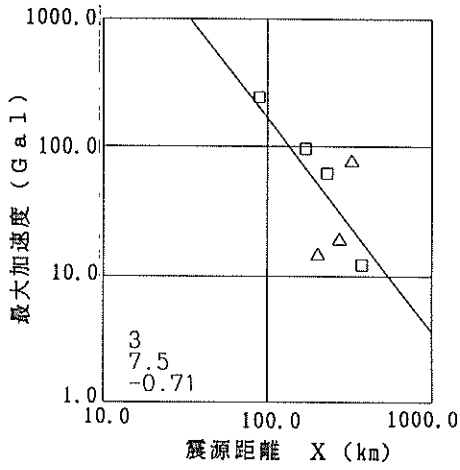


付図-B-30 マグニチュードが同じ地震の観測記録とそれを用いて得られる回帰式と本研究(6-2)式との比較

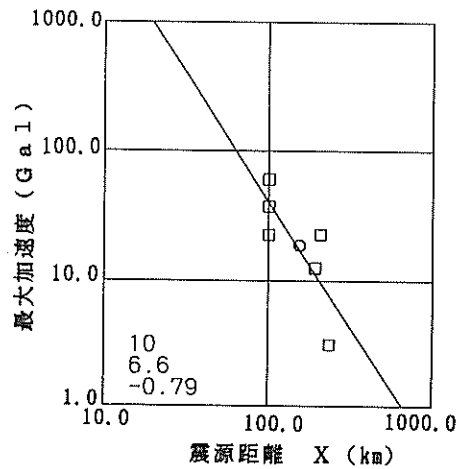
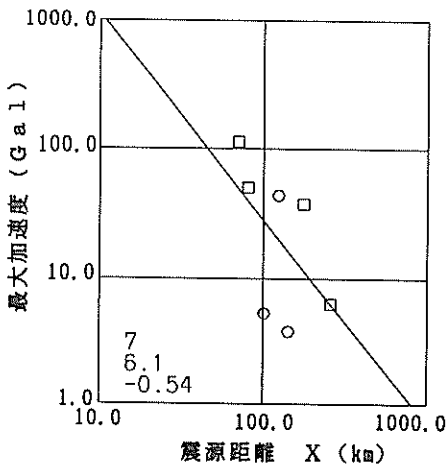
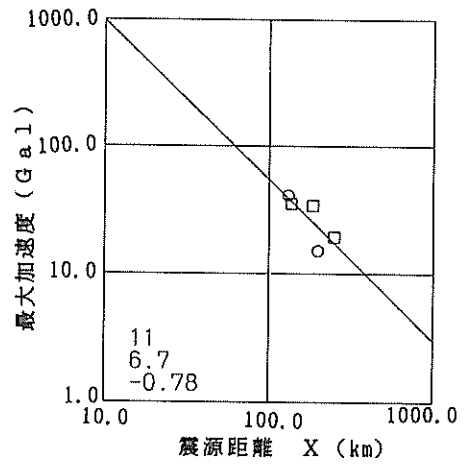
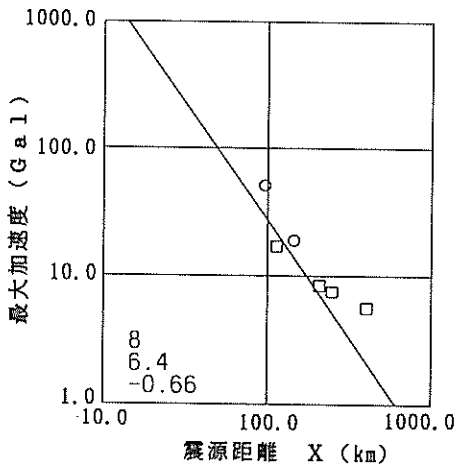
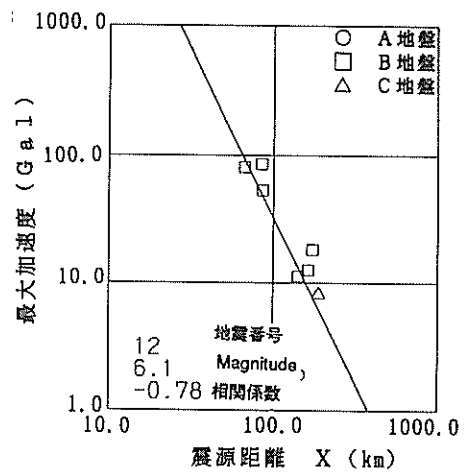
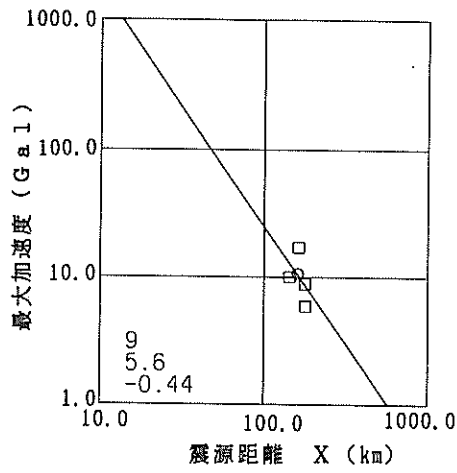
付録－C 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式（水平動）

本付録では、個別の地震ごとの水平動の観測記録と式（6－2）による線形回帰式を示す。

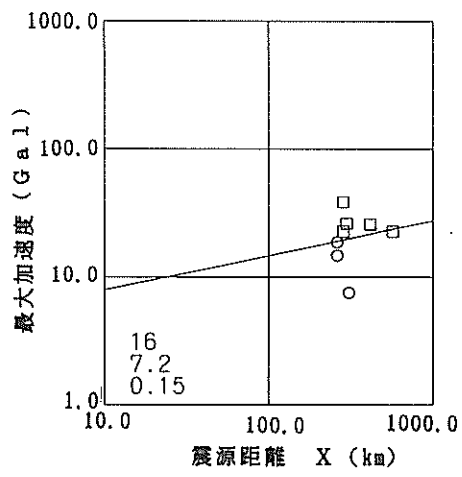
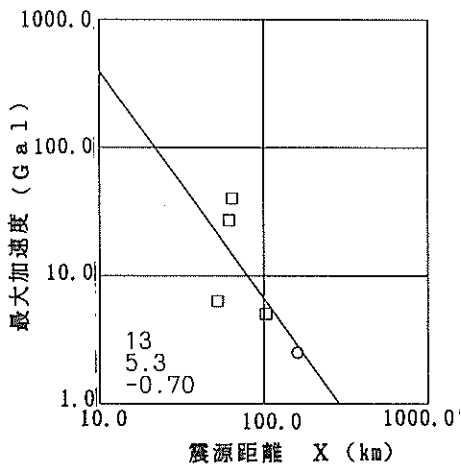
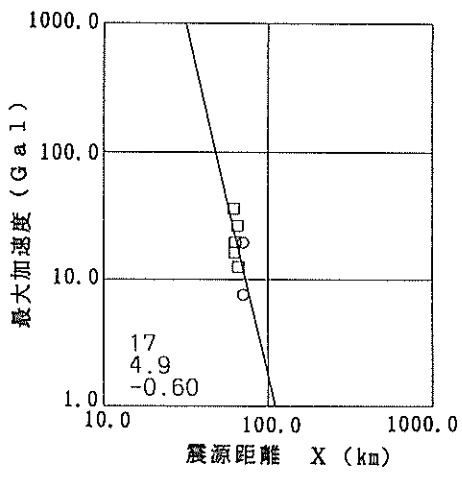
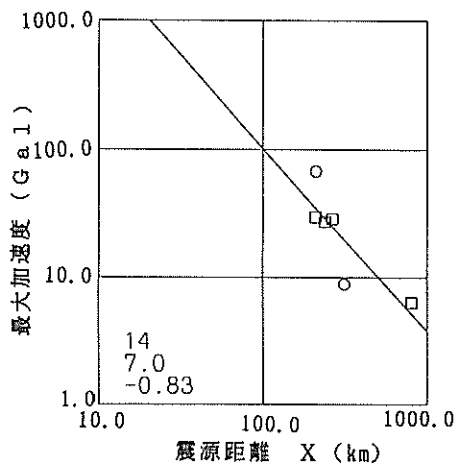
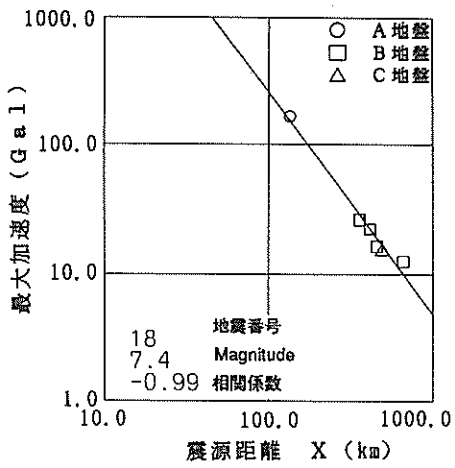
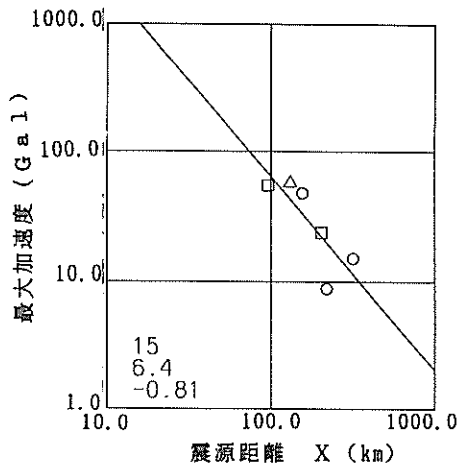
以下に示す各図において、「A～C地盤」は、表－4－2に示す地盤種を示す。また、左下に示す数字は、上から順に、表－3－3における地震番号、地震のマグニチュード、および距離減衰の傾き（式（5－1）における（ $-b$ ）の値）を示す。



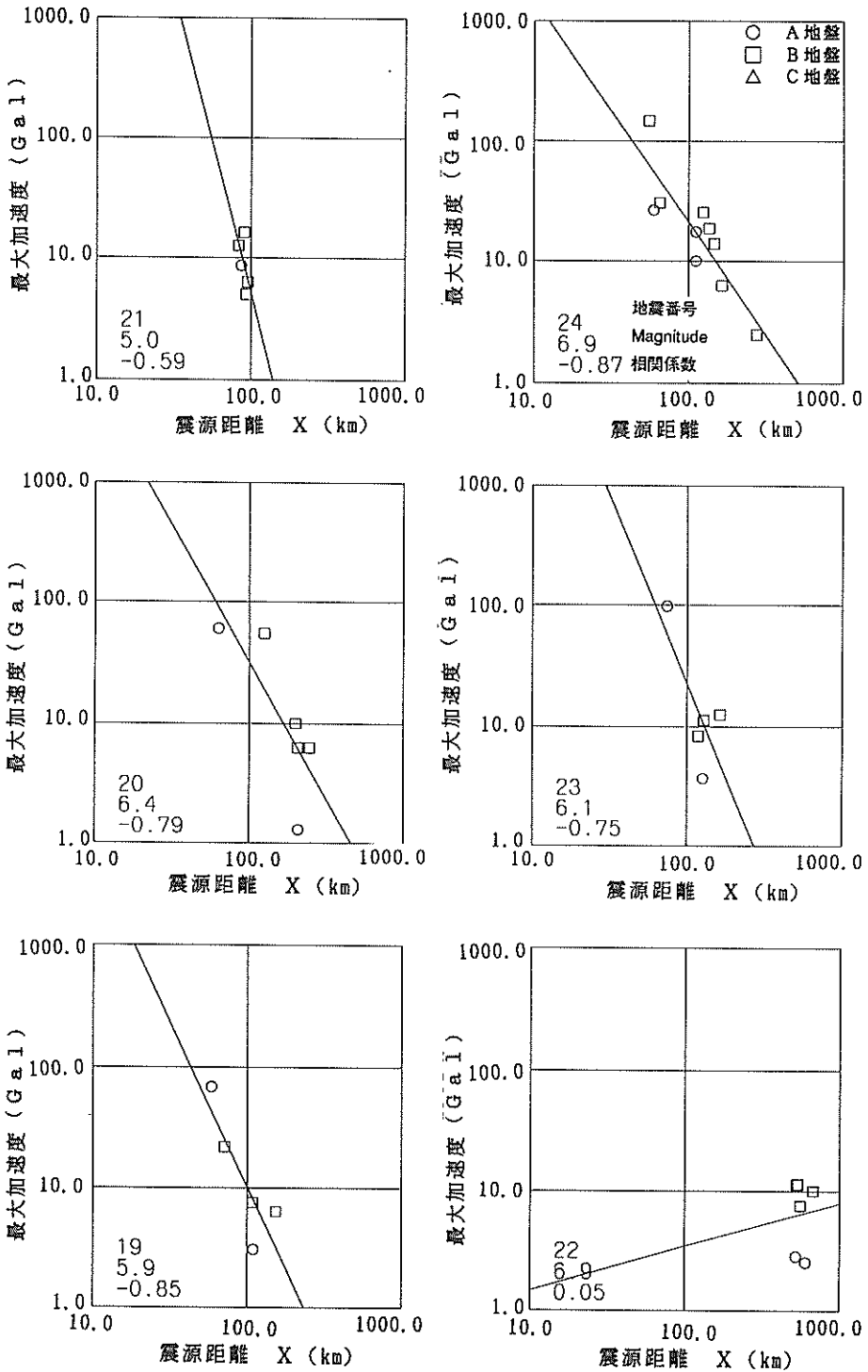
付図-C-1 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



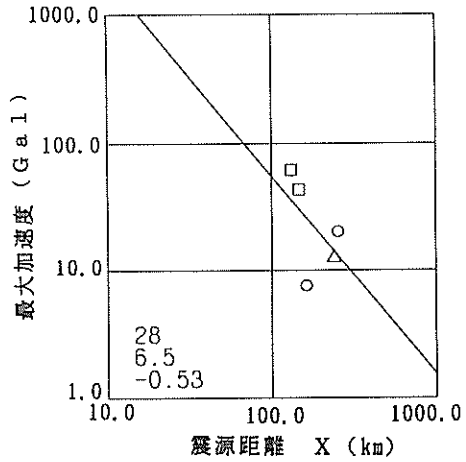
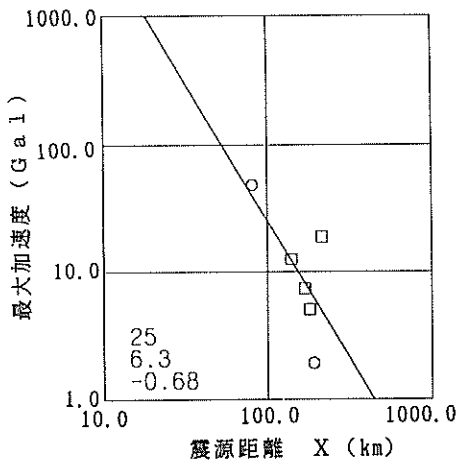
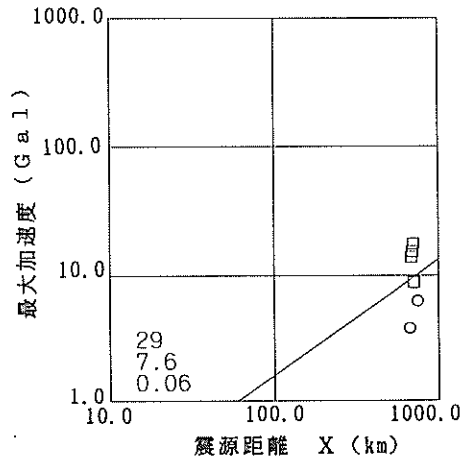
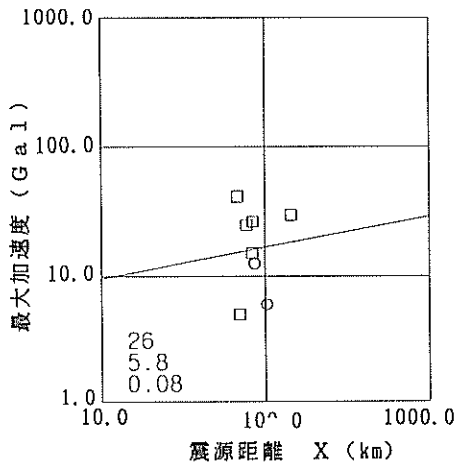
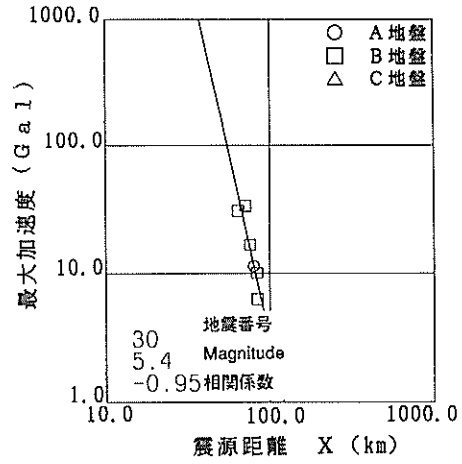
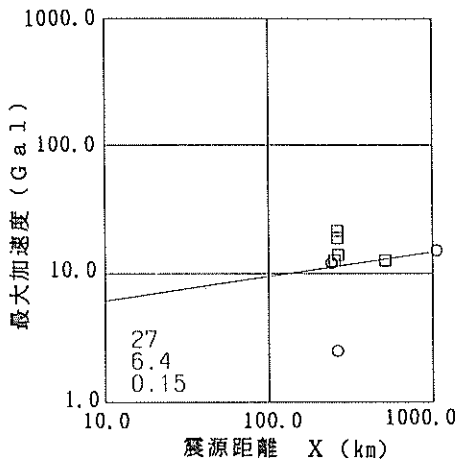
付図-C-2 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(水平動)



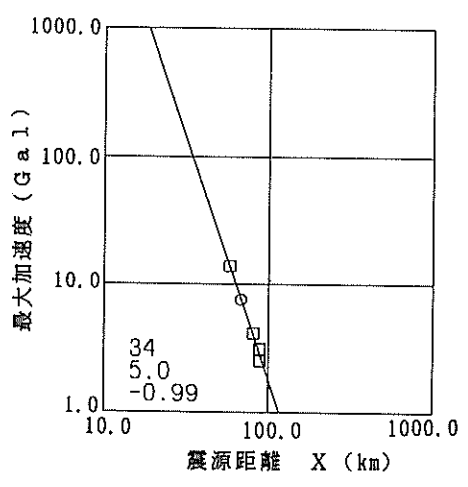
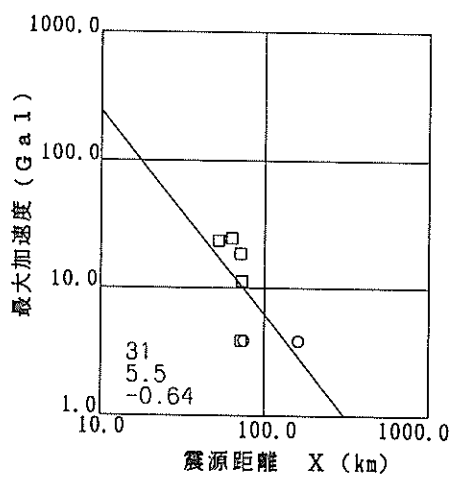
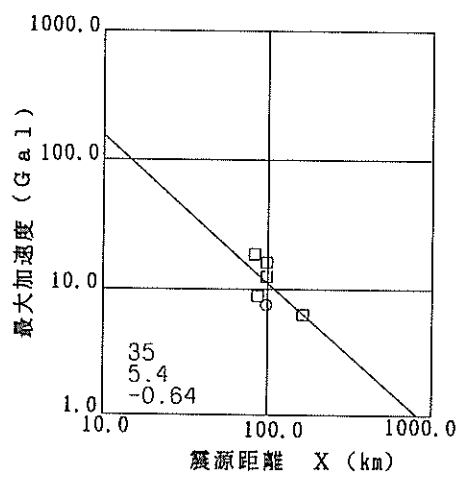
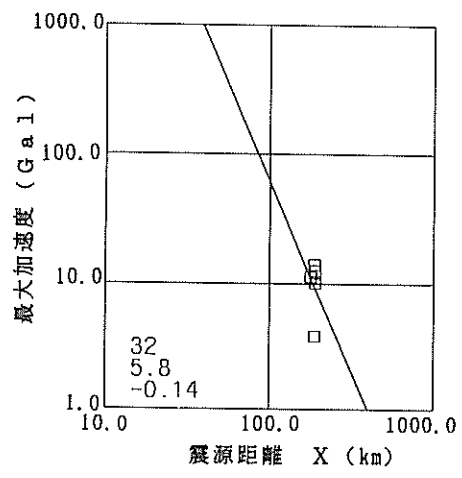
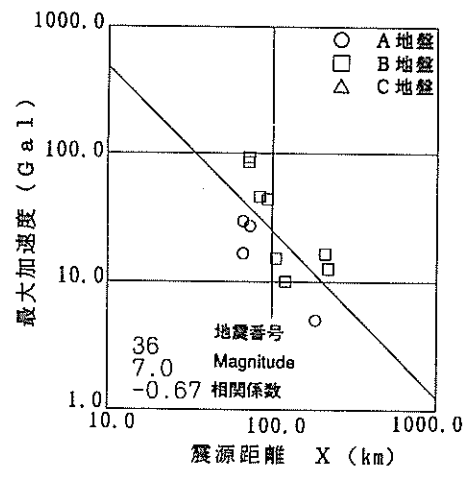
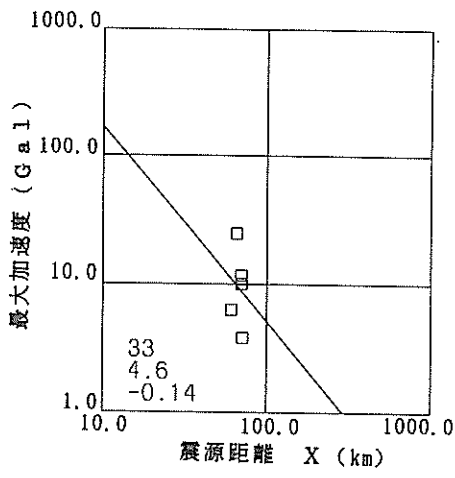
付図-C-3 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



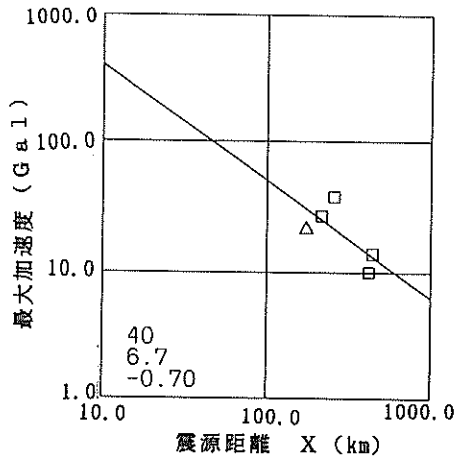
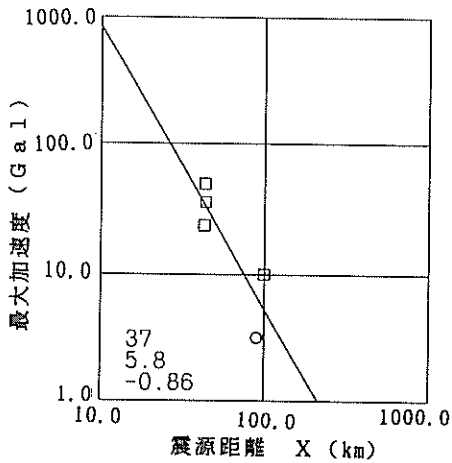
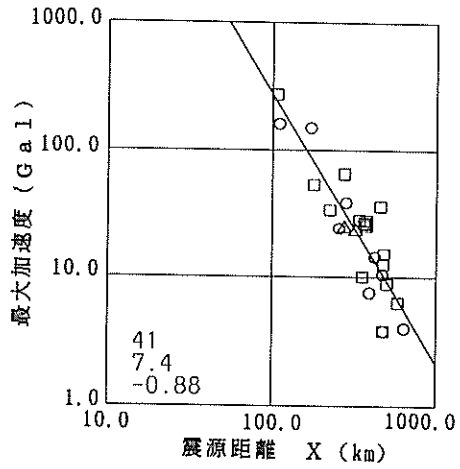
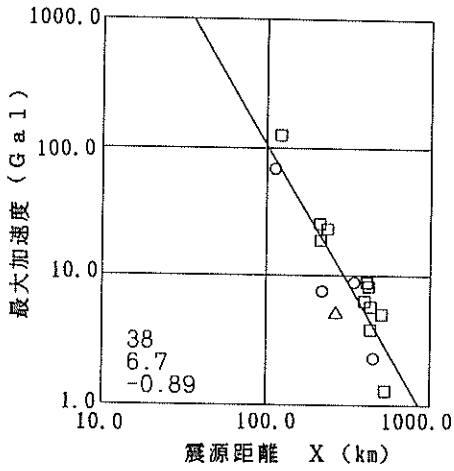
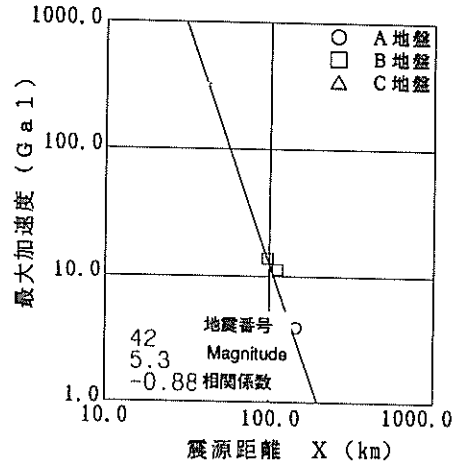
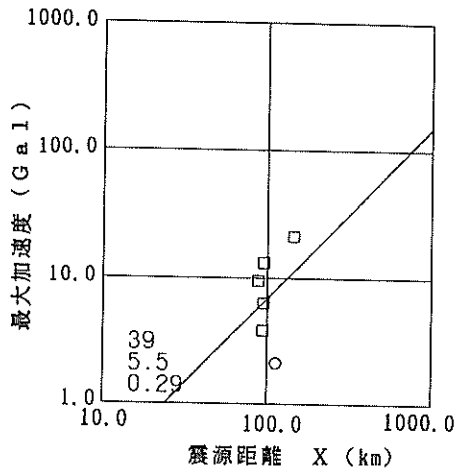
付図-C-4 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



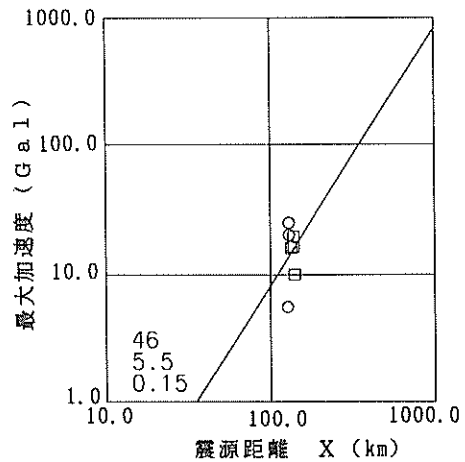
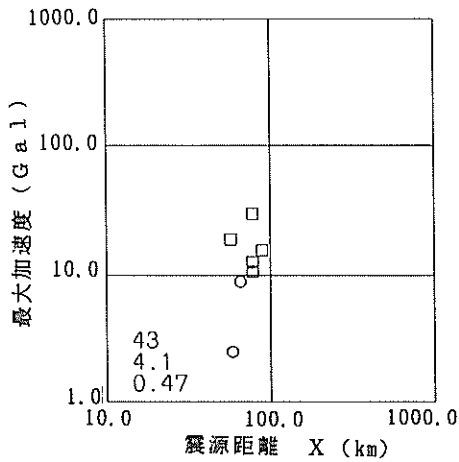
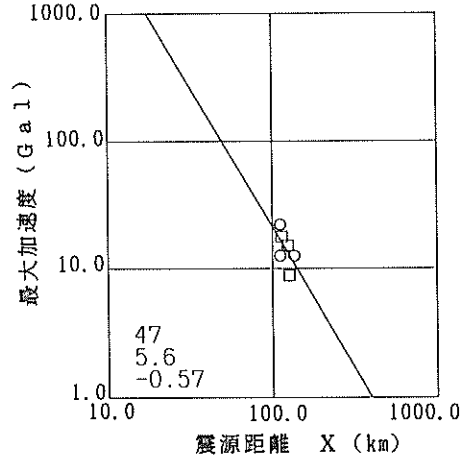
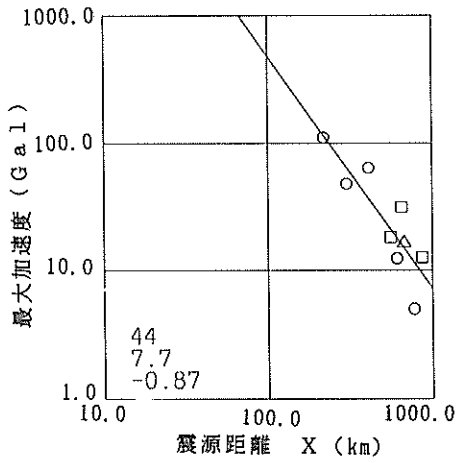
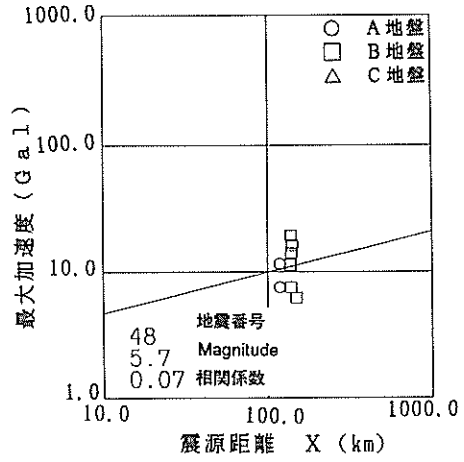
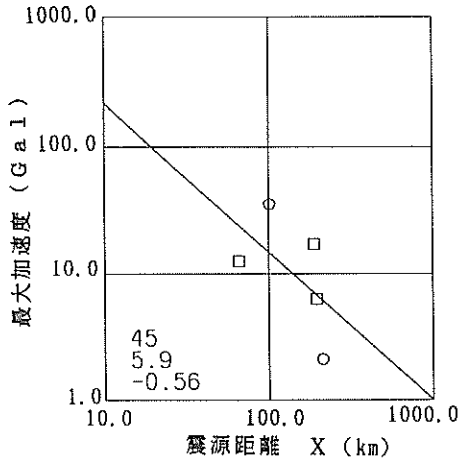
付図-C-5 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



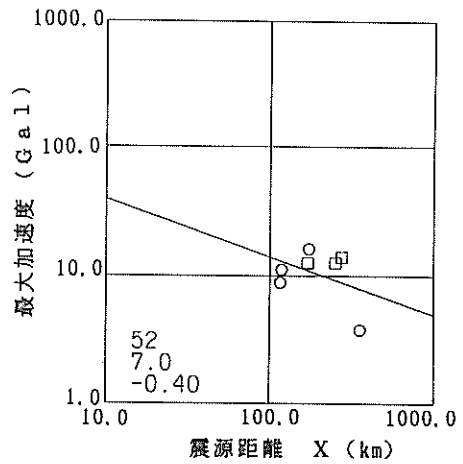
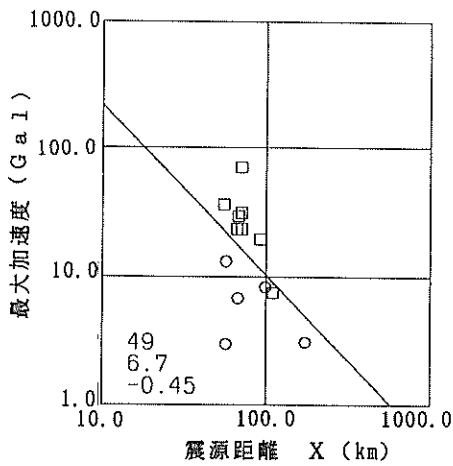
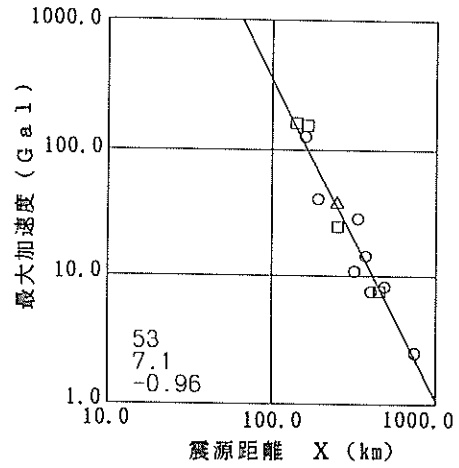
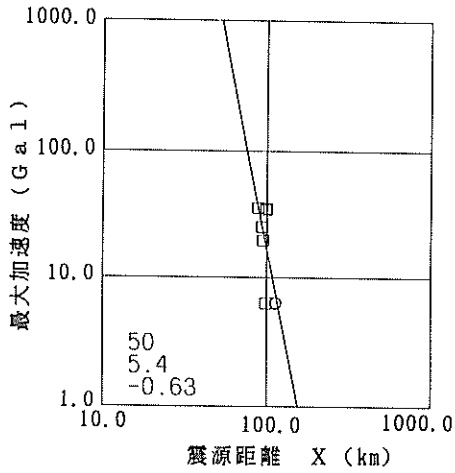
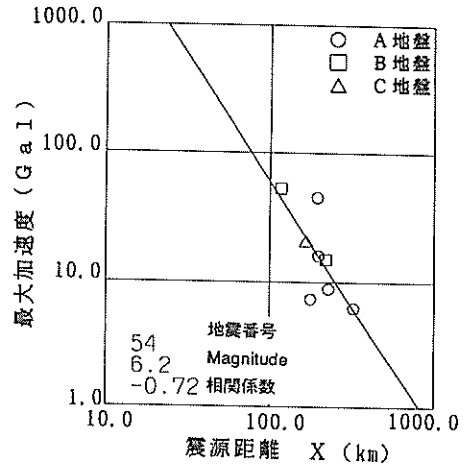
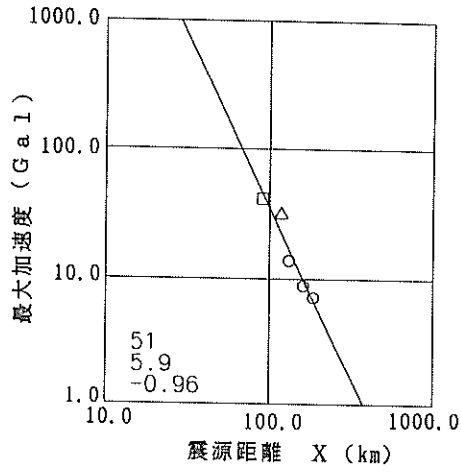
付図-C-6 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



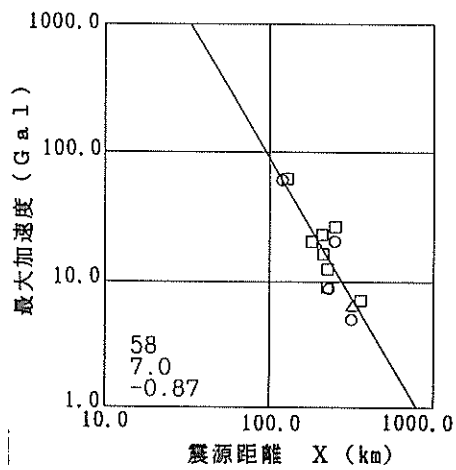
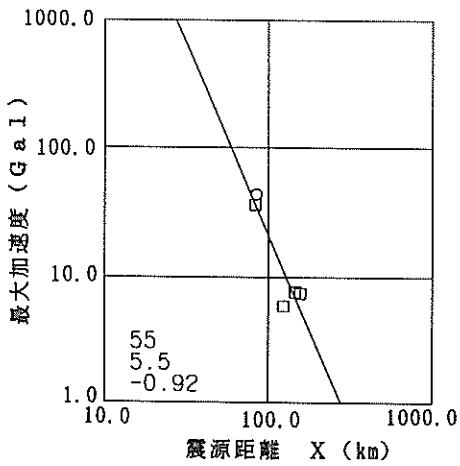
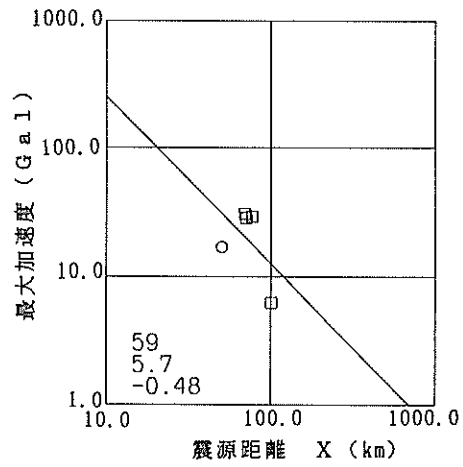
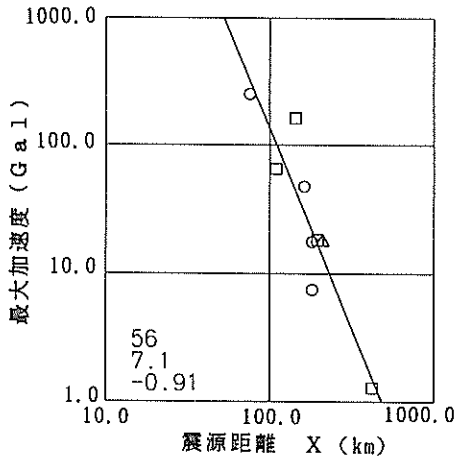
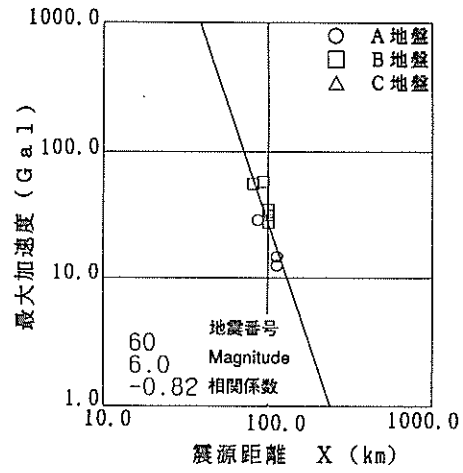
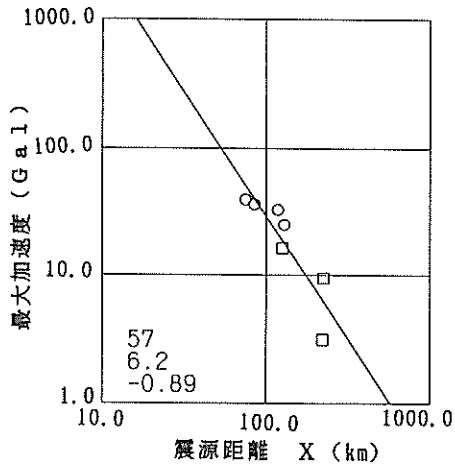
付図-C-7 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



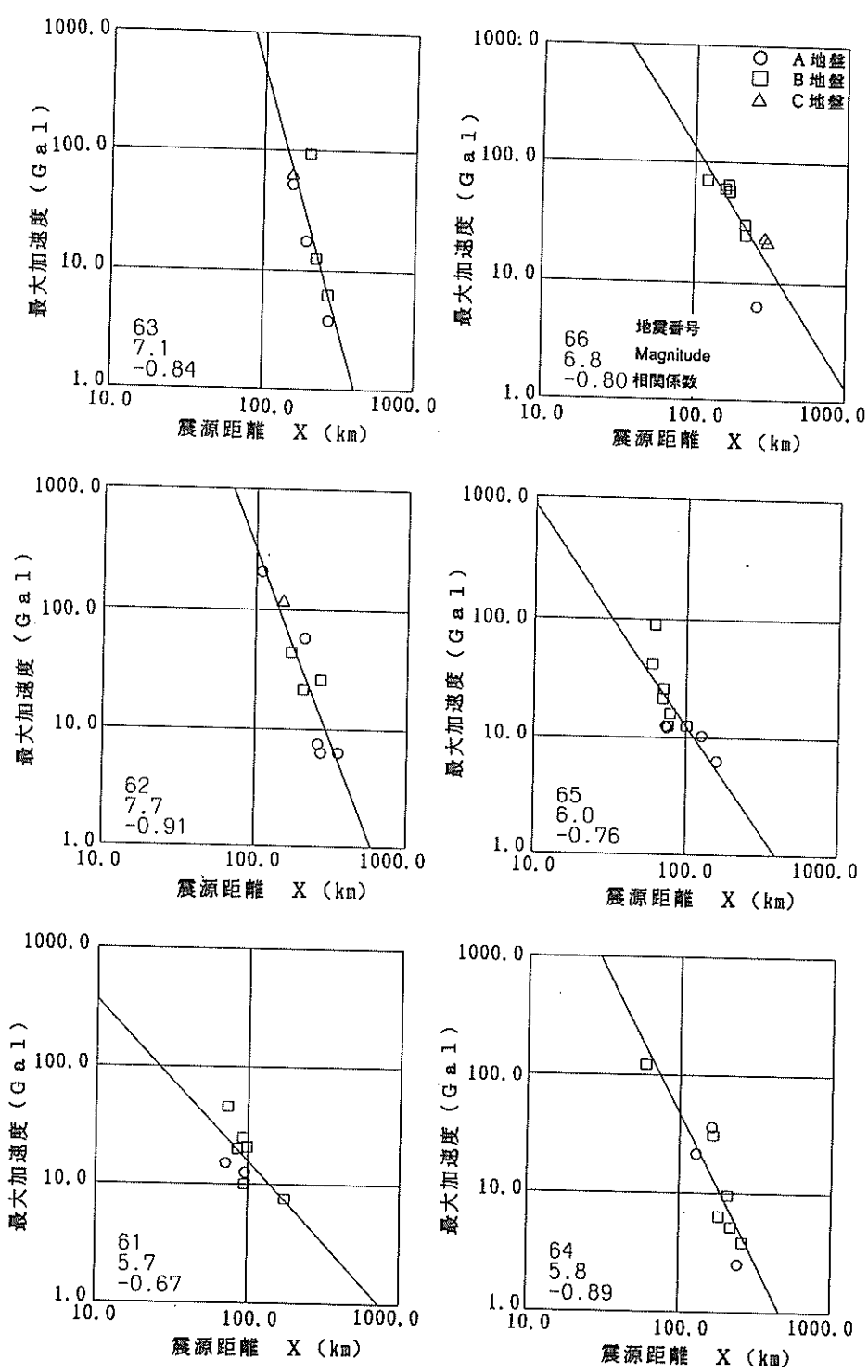
付図-C-8 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(水平動)



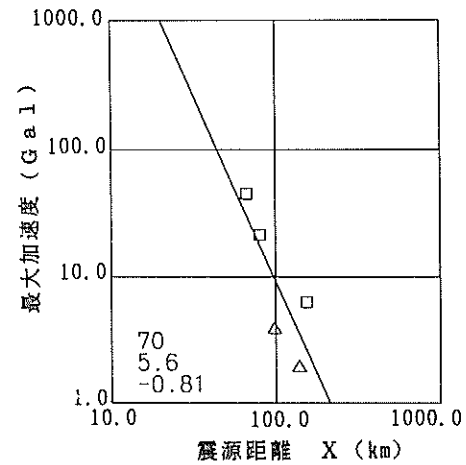
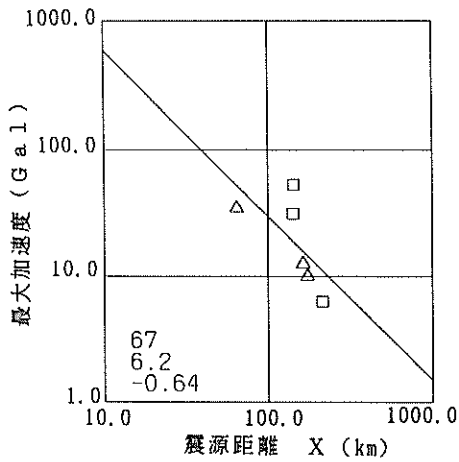
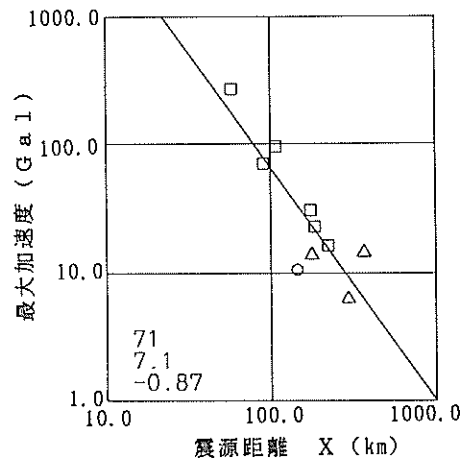
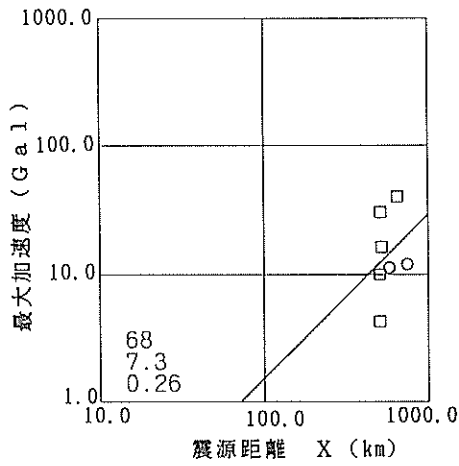
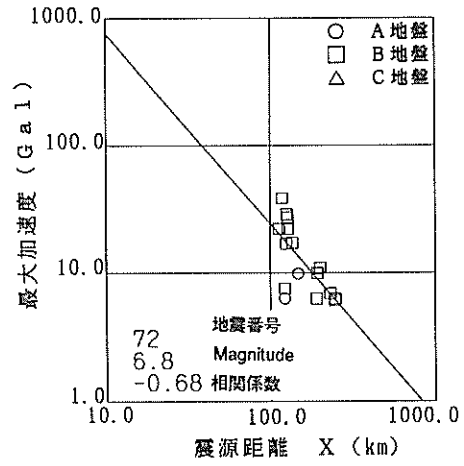
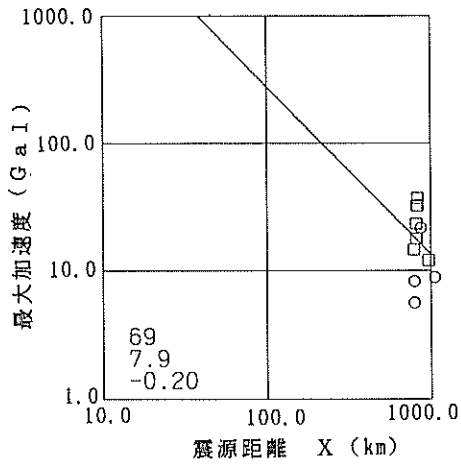
付図-C-9 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



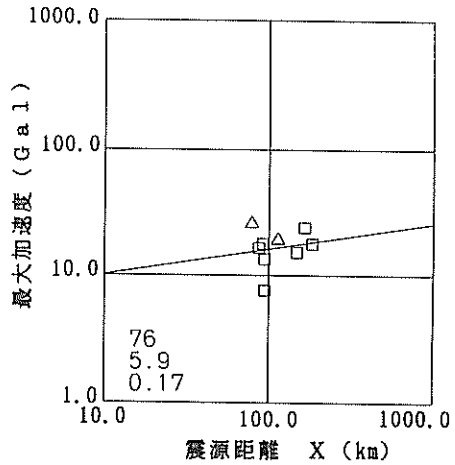
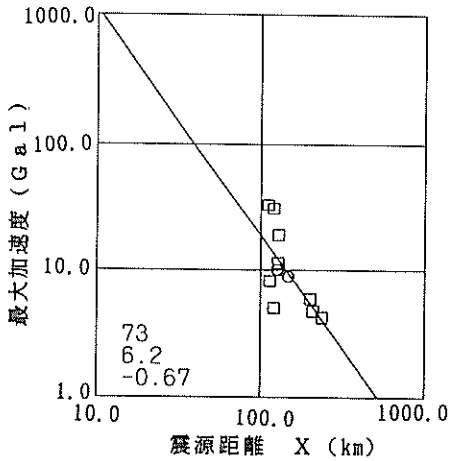
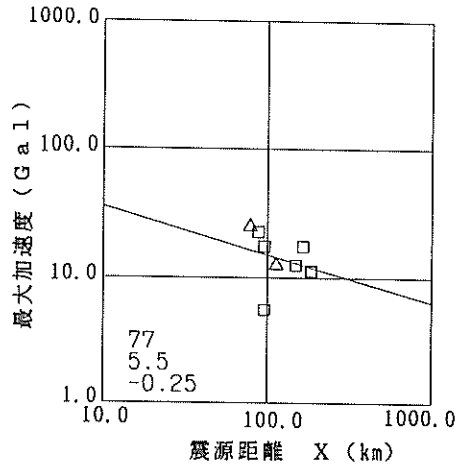
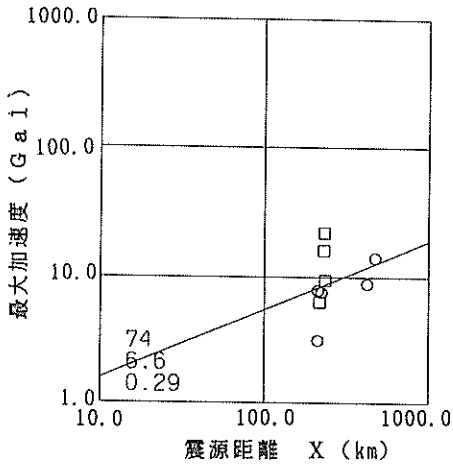
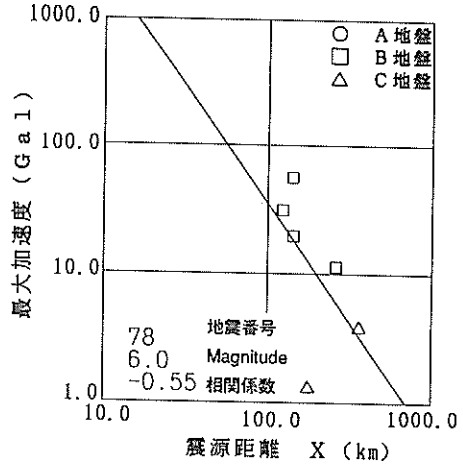
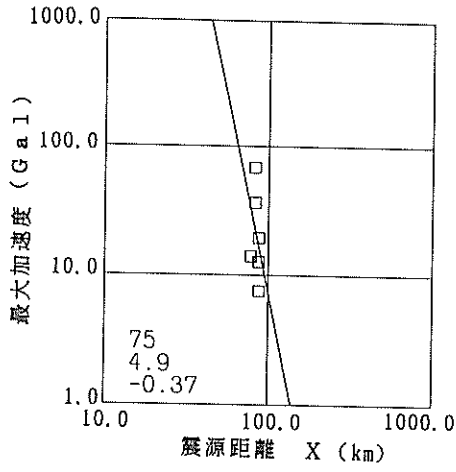
付図-C-10 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



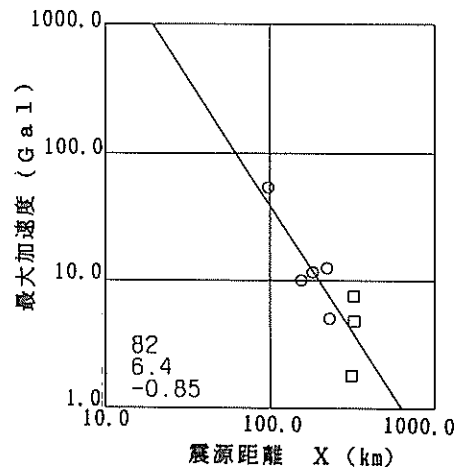
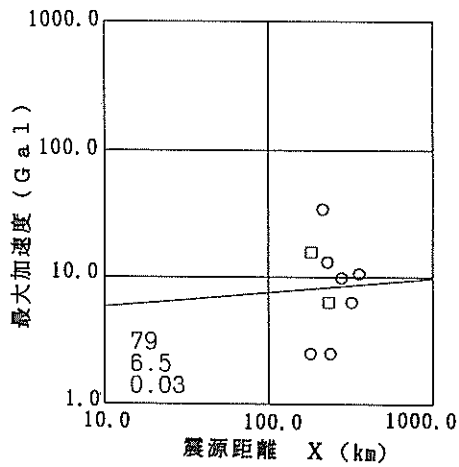
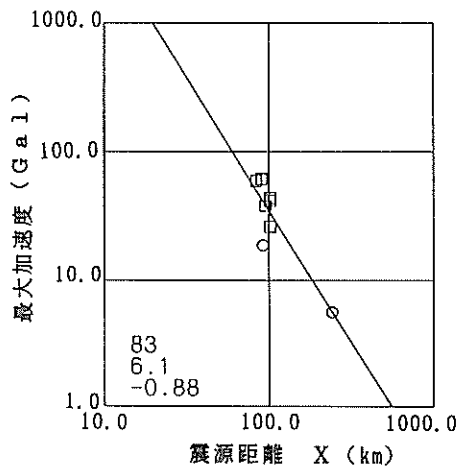
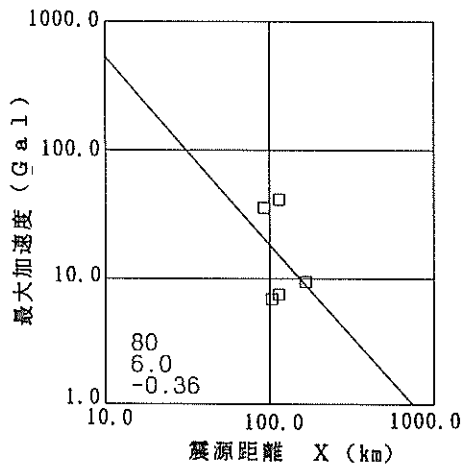
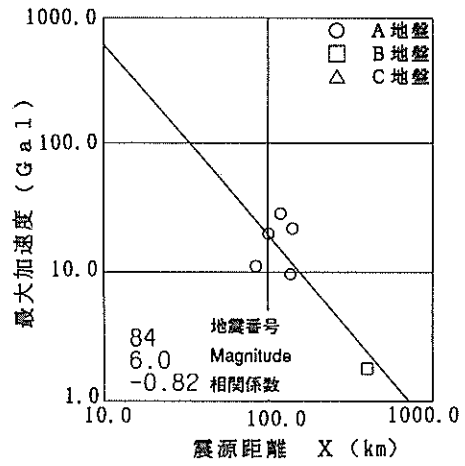
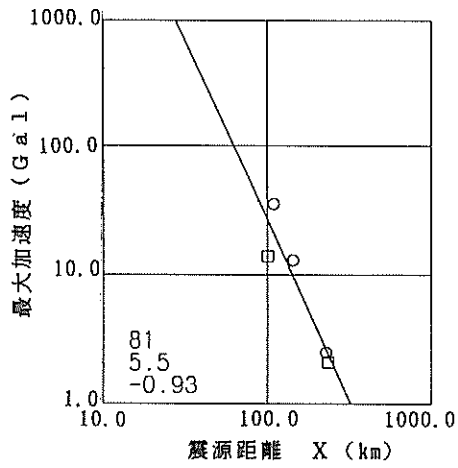
付図-C-11 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



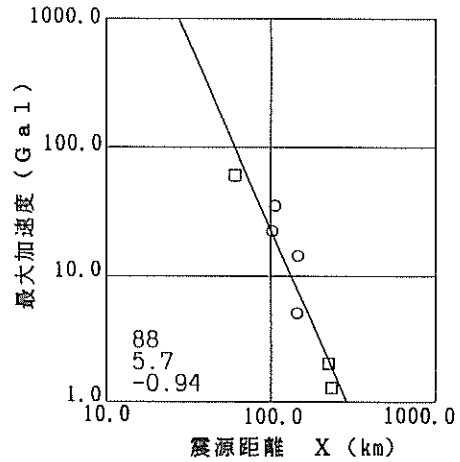
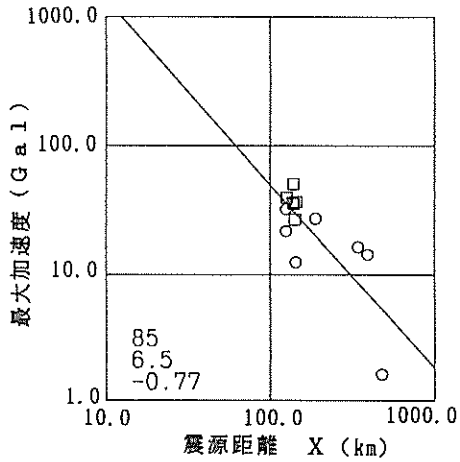
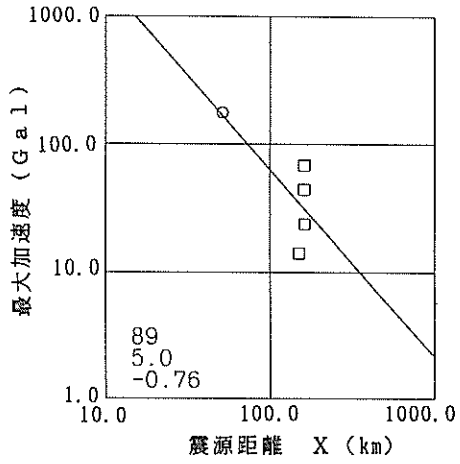
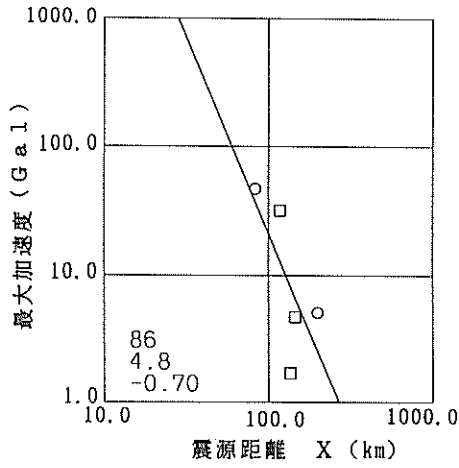
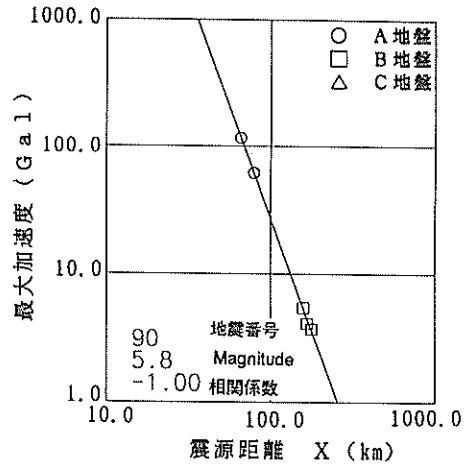
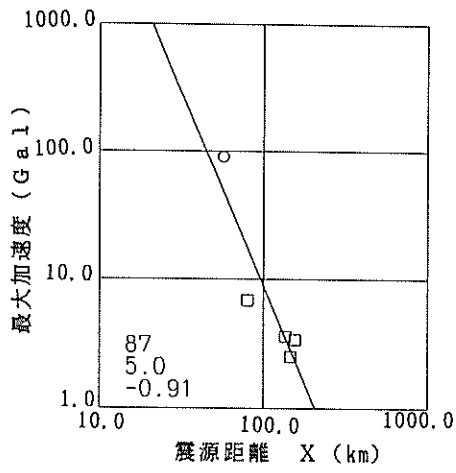
付図-C-12 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



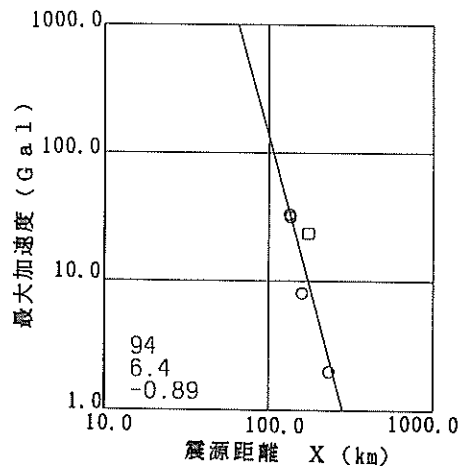
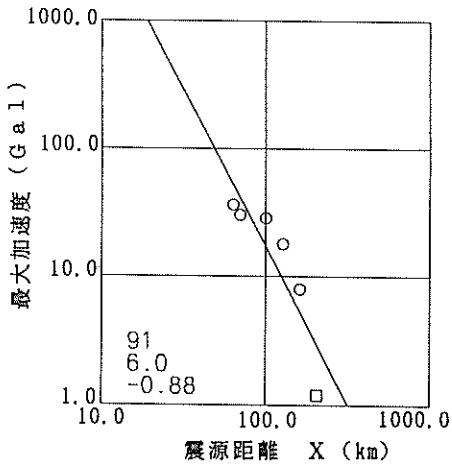
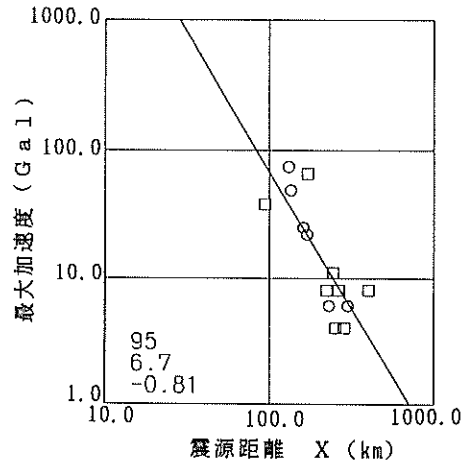
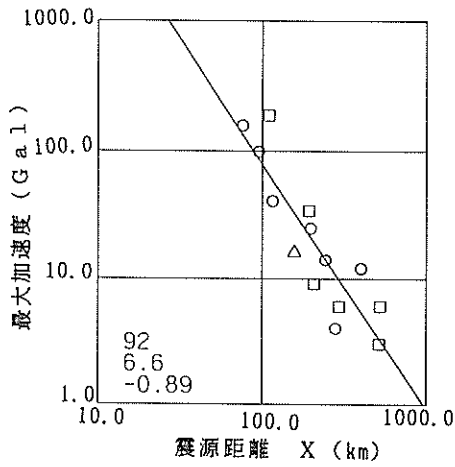
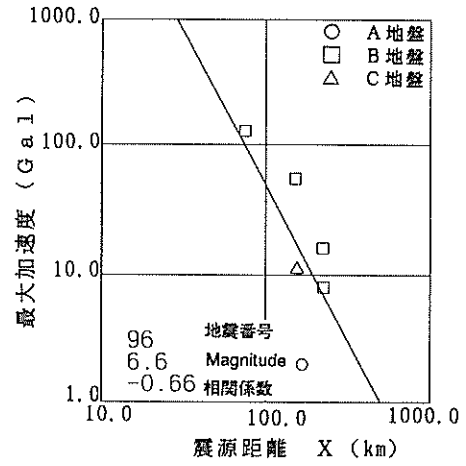
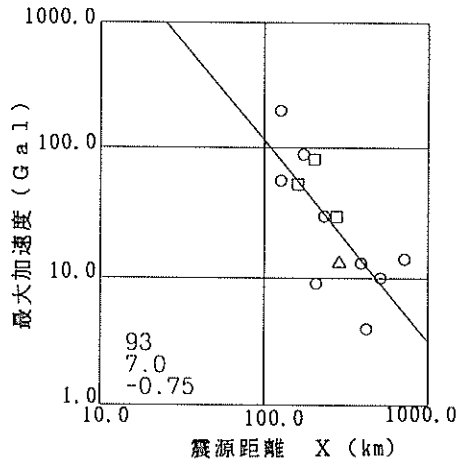
付図-C-13 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(水平動)



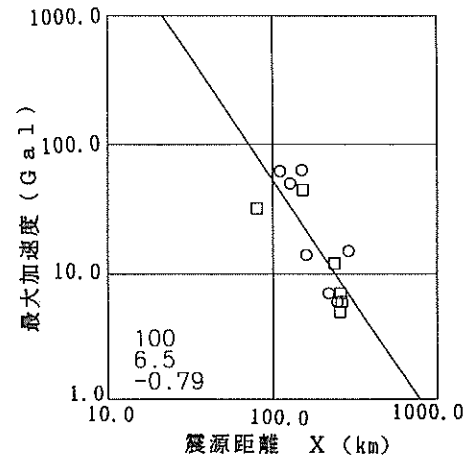
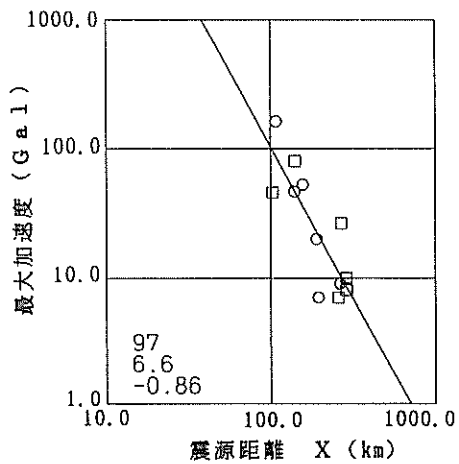
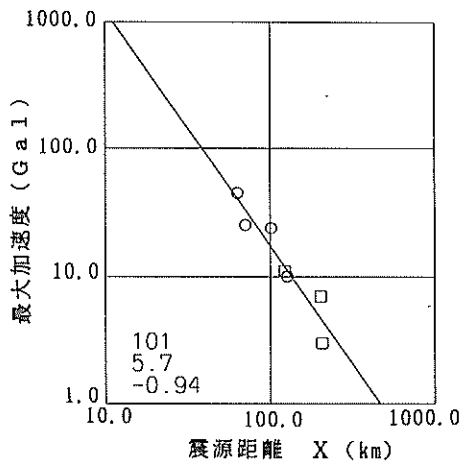
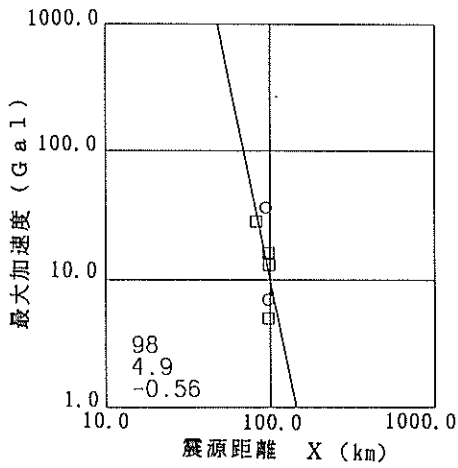
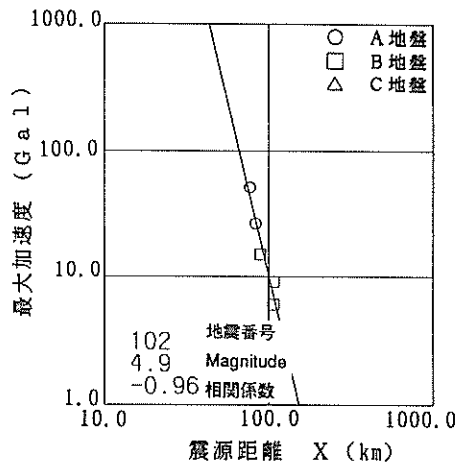
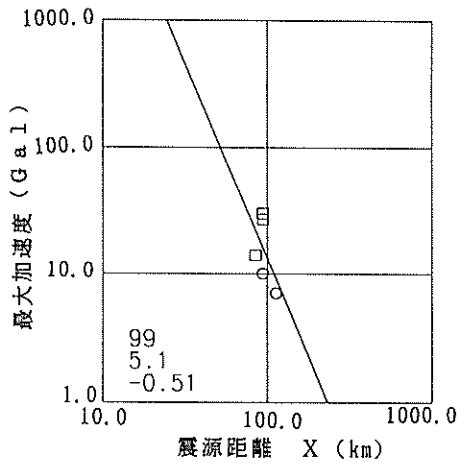
付図-C-14 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



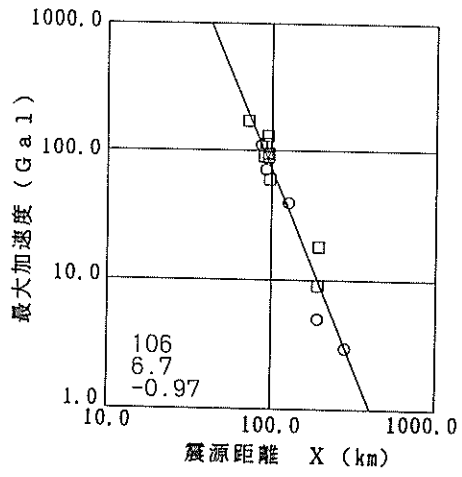
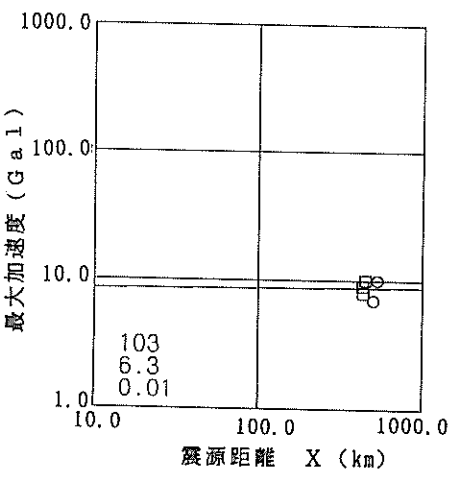
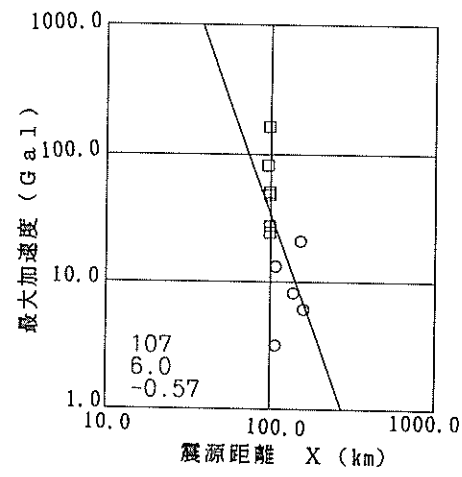
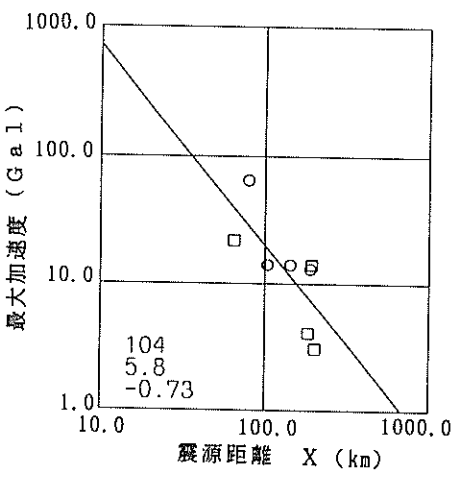
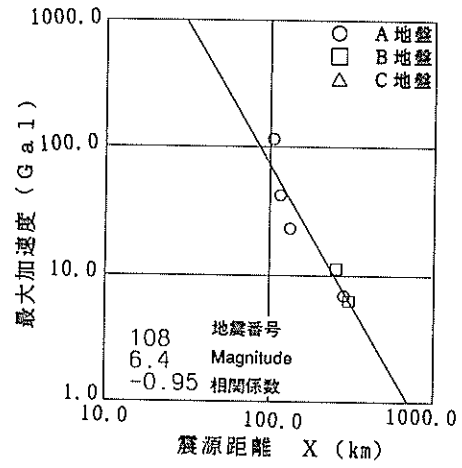
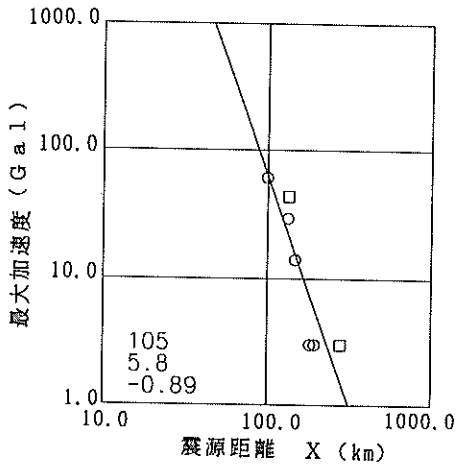
付図-C-15 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



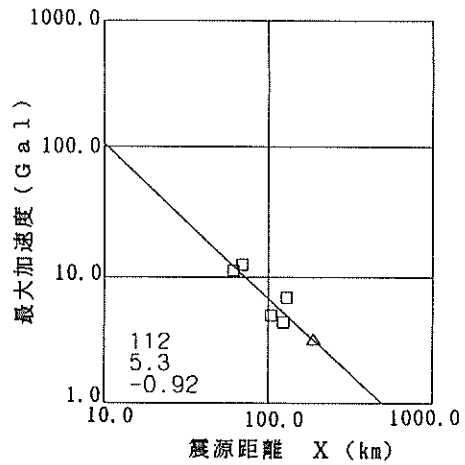
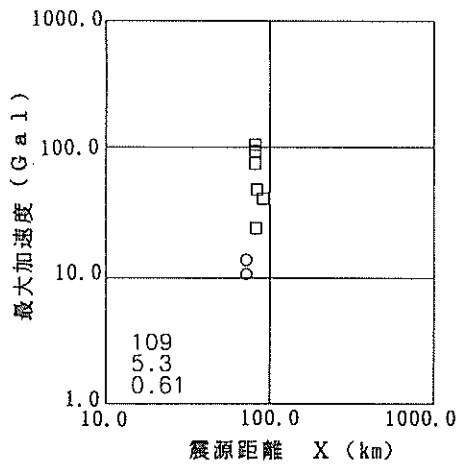
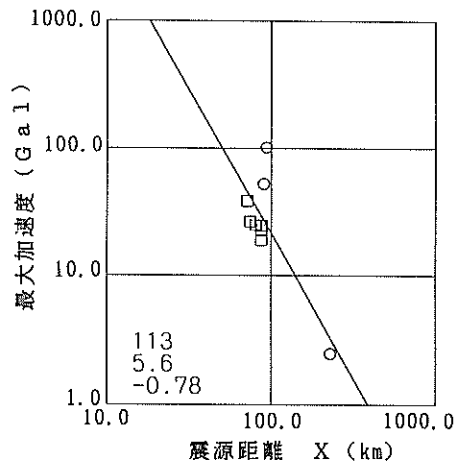
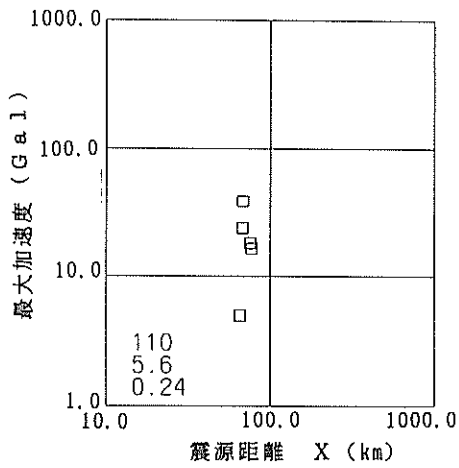
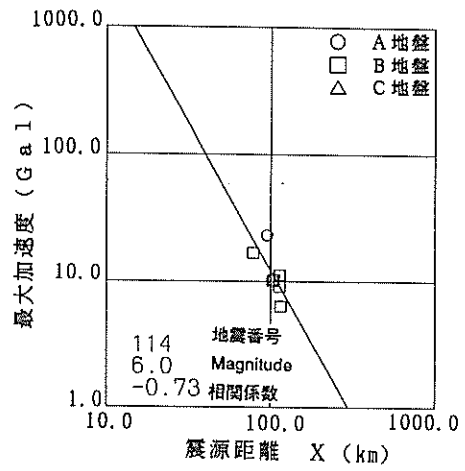
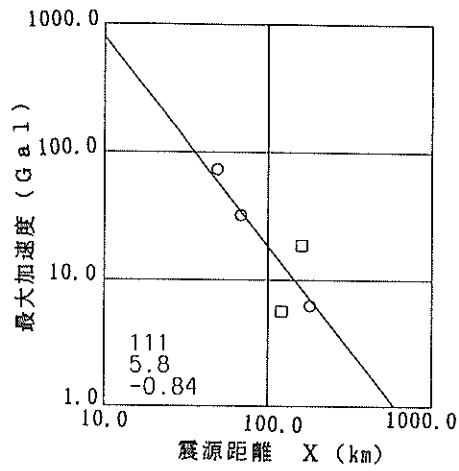
付図-C-16 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



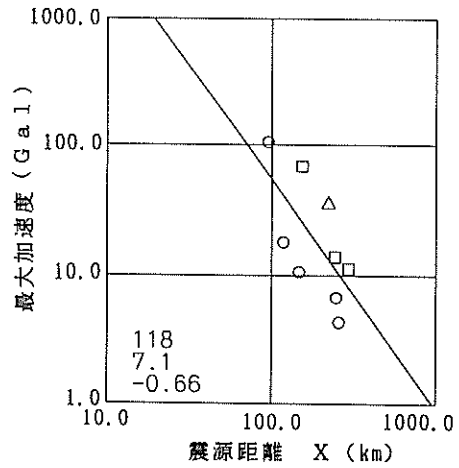
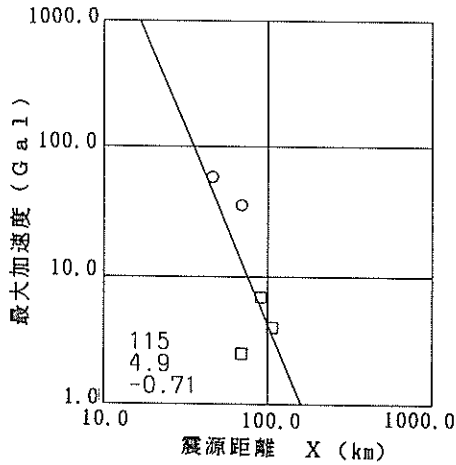
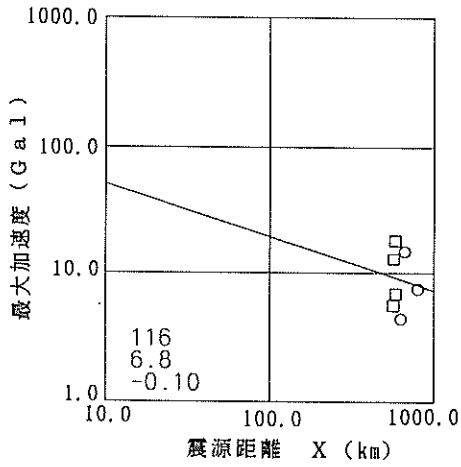
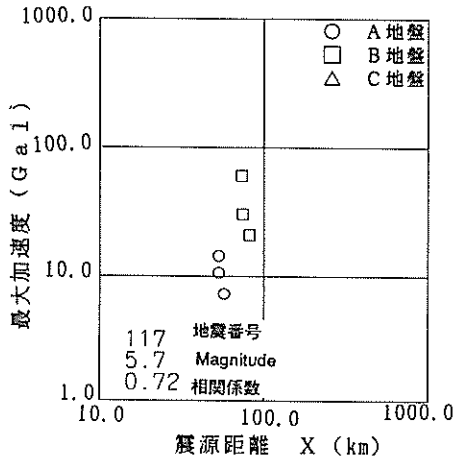
付図-C-17 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(水平動)



付図-C-18 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)



付図-C-19 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)

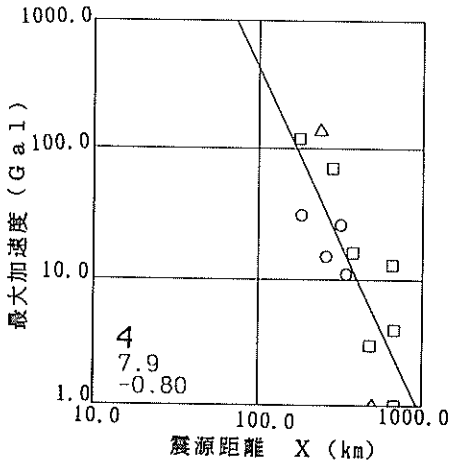
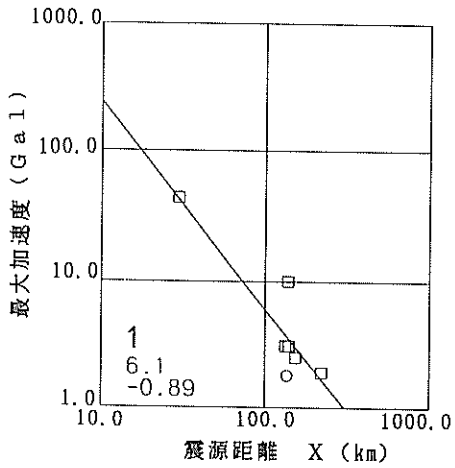
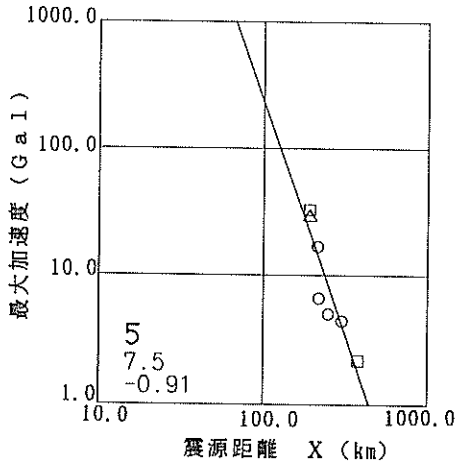
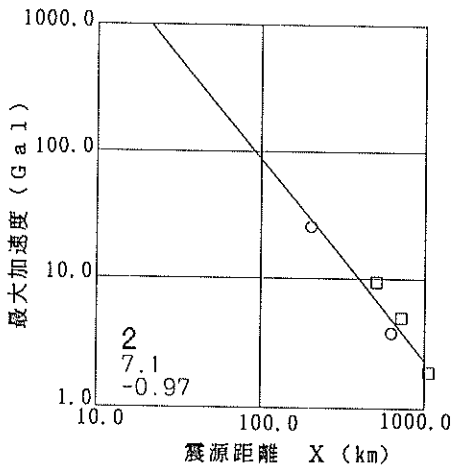
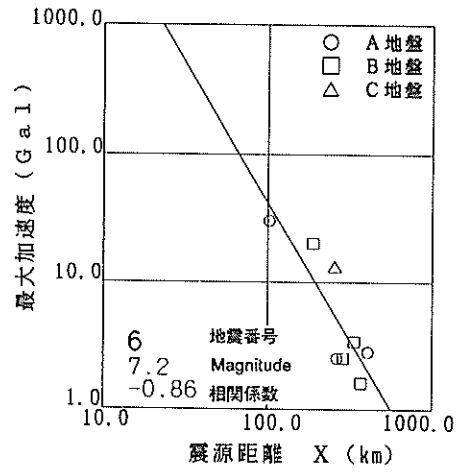
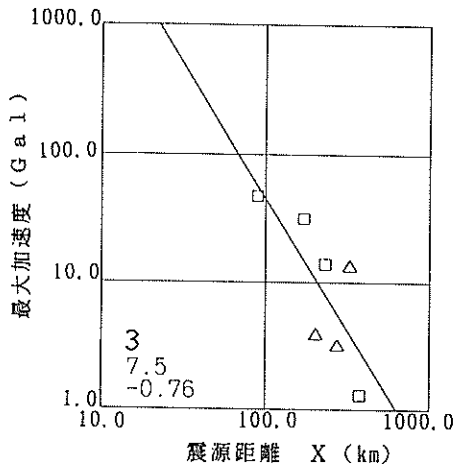


付図-C-20 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (水平動)

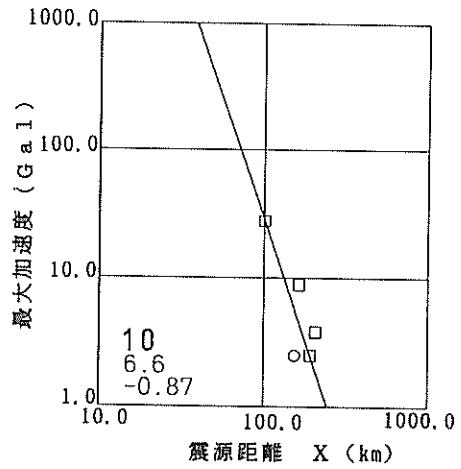
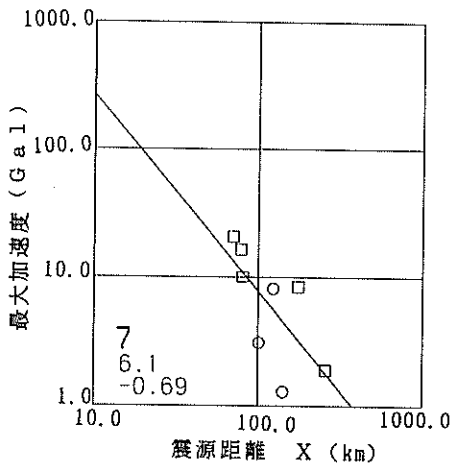
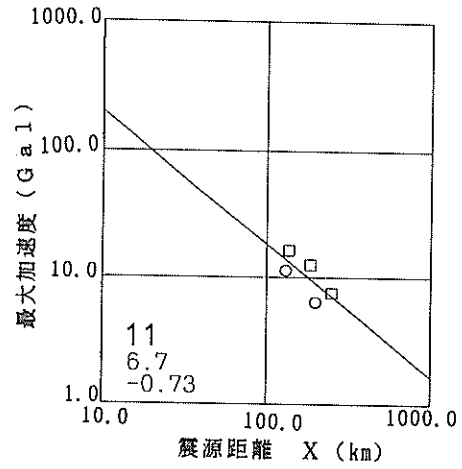
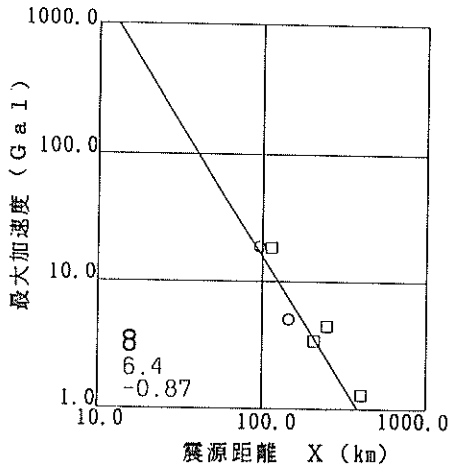
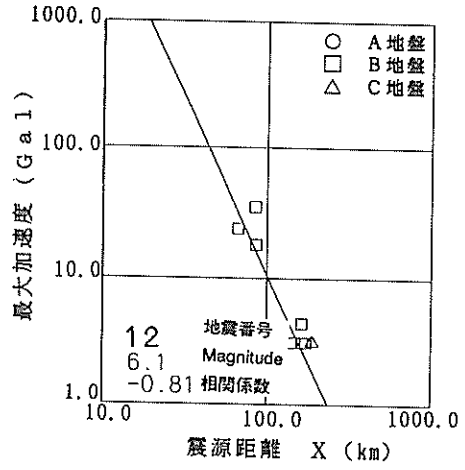
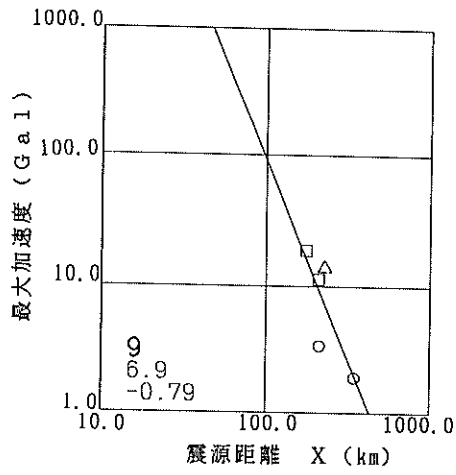
付録－D 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式（上下動）

本付録では、個別の地震ごとの上下動の観測記録と式（6－2）による線形回帰式を示す。

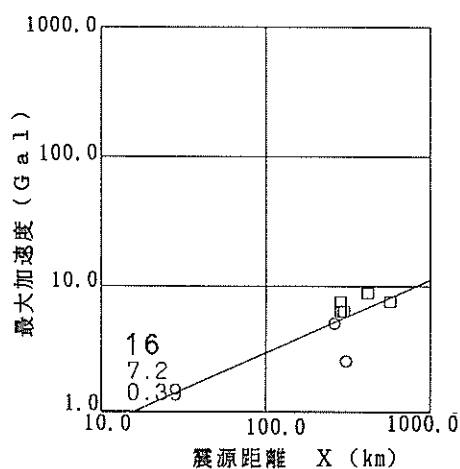
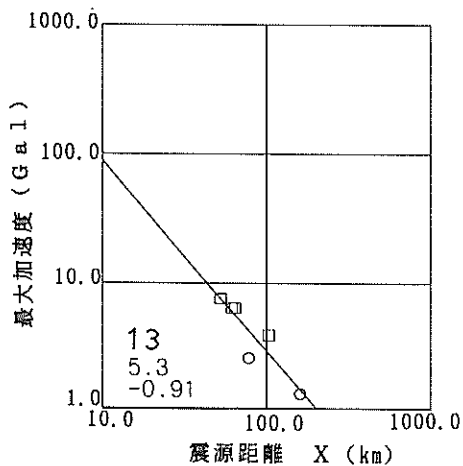
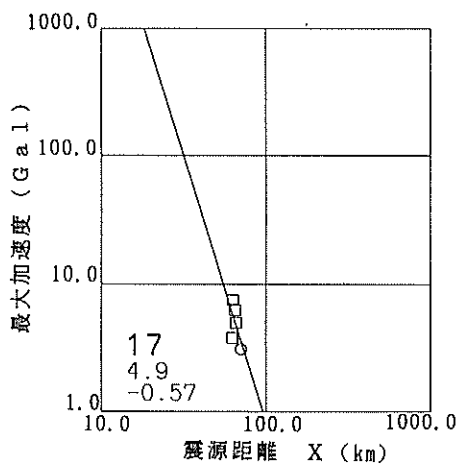
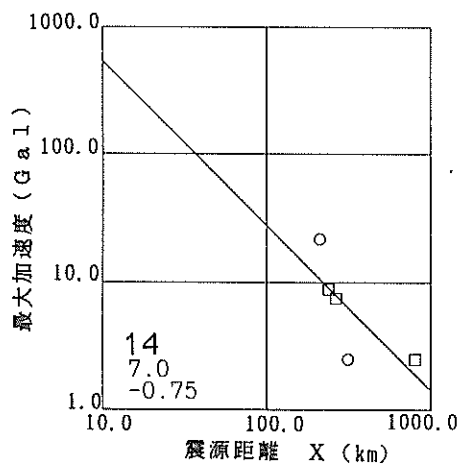
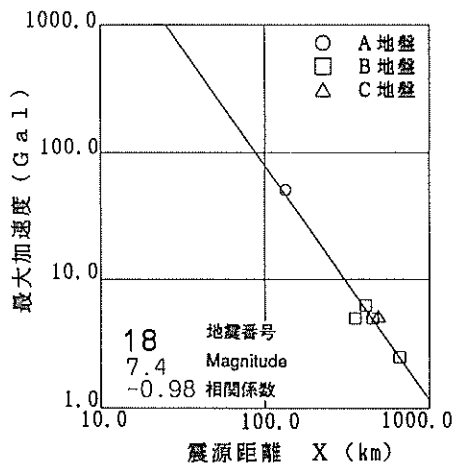
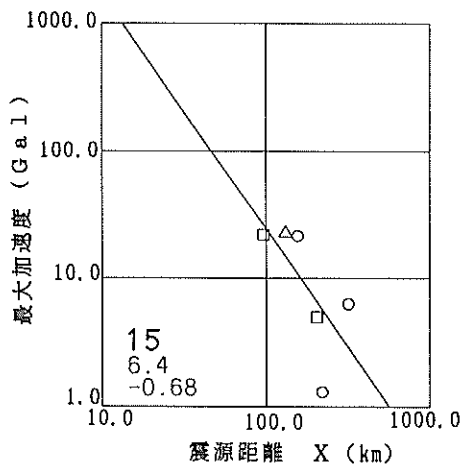
以下に示す各図において、「A～C地盤」は、表－4－2に示す地盤種を示す。また、左下に示す数字は、上から順に、表－3－3における地震番号、地震のマグニチュード、および距離減衰の傾き（式（5－1）における（-b）の値）を示す。



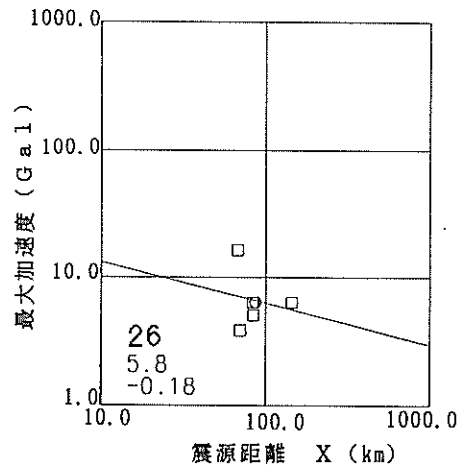
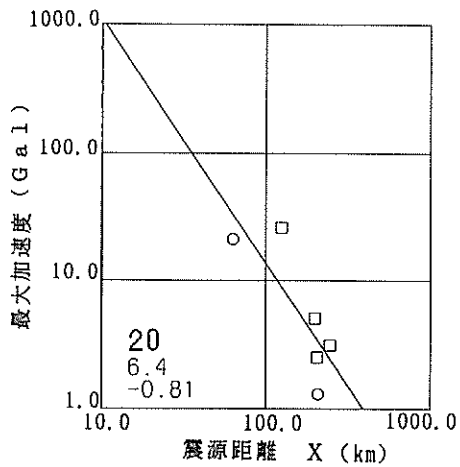
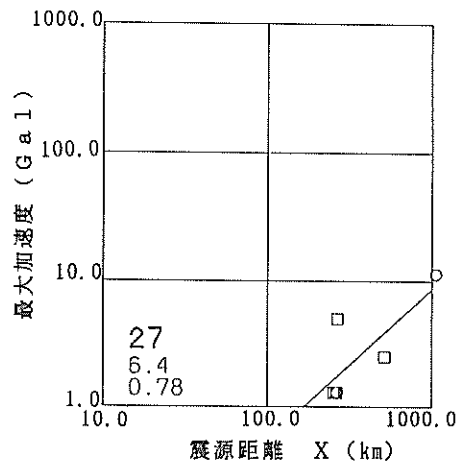
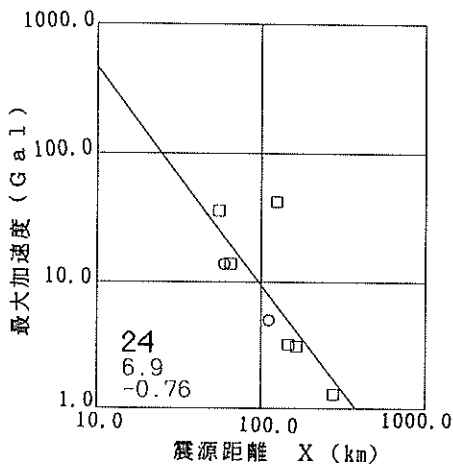
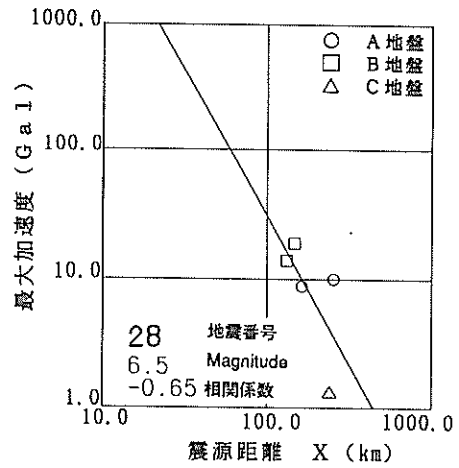
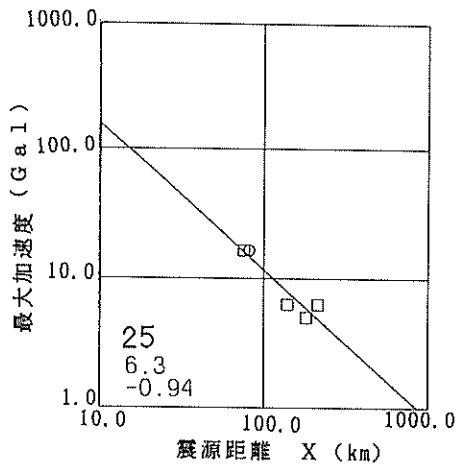
付図-D-1 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



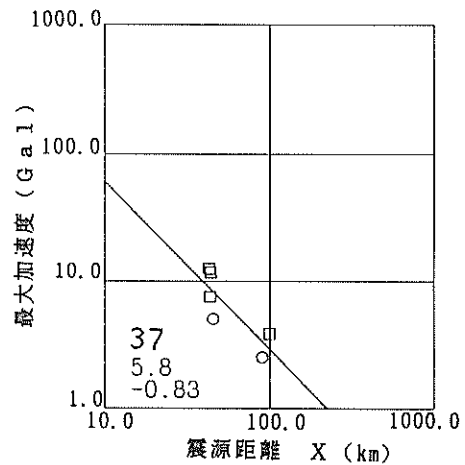
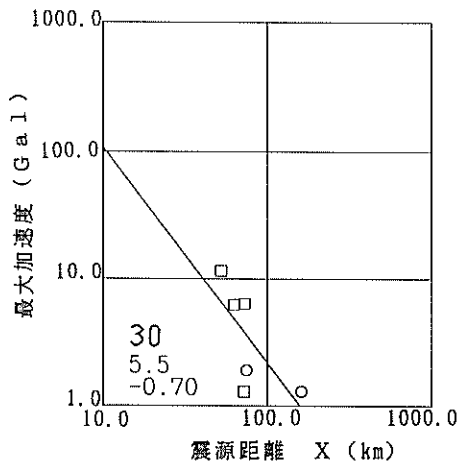
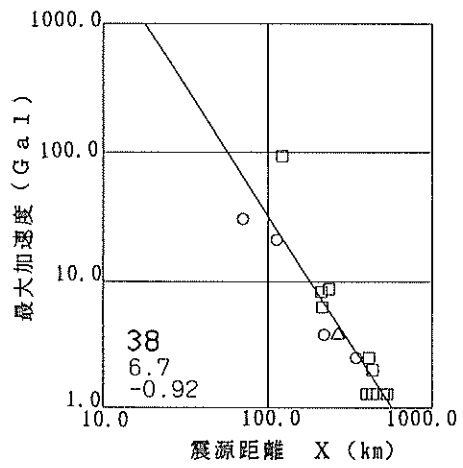
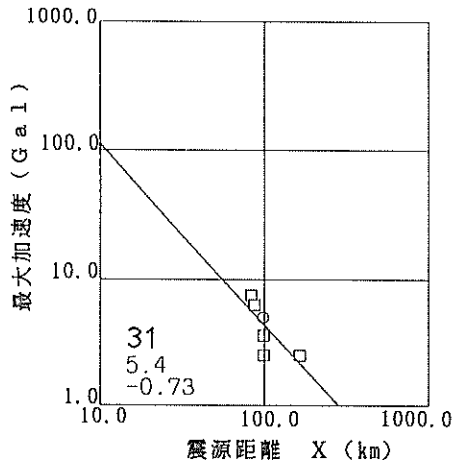
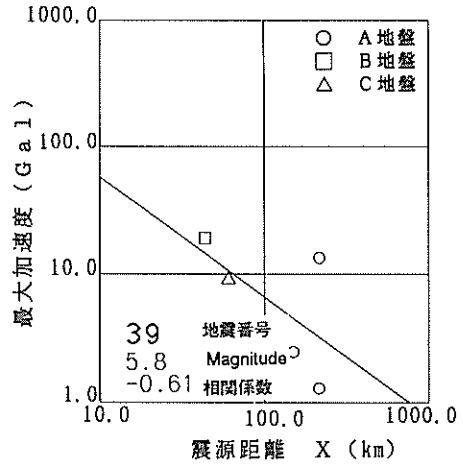
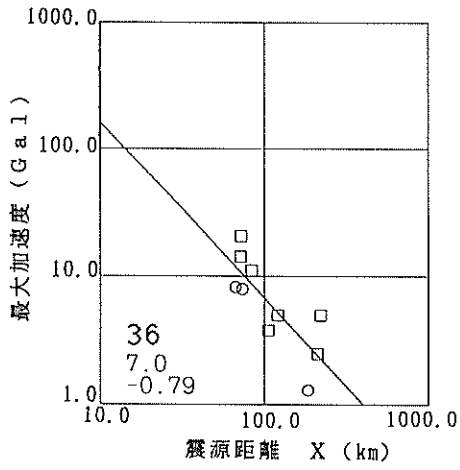
付図-D-2 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



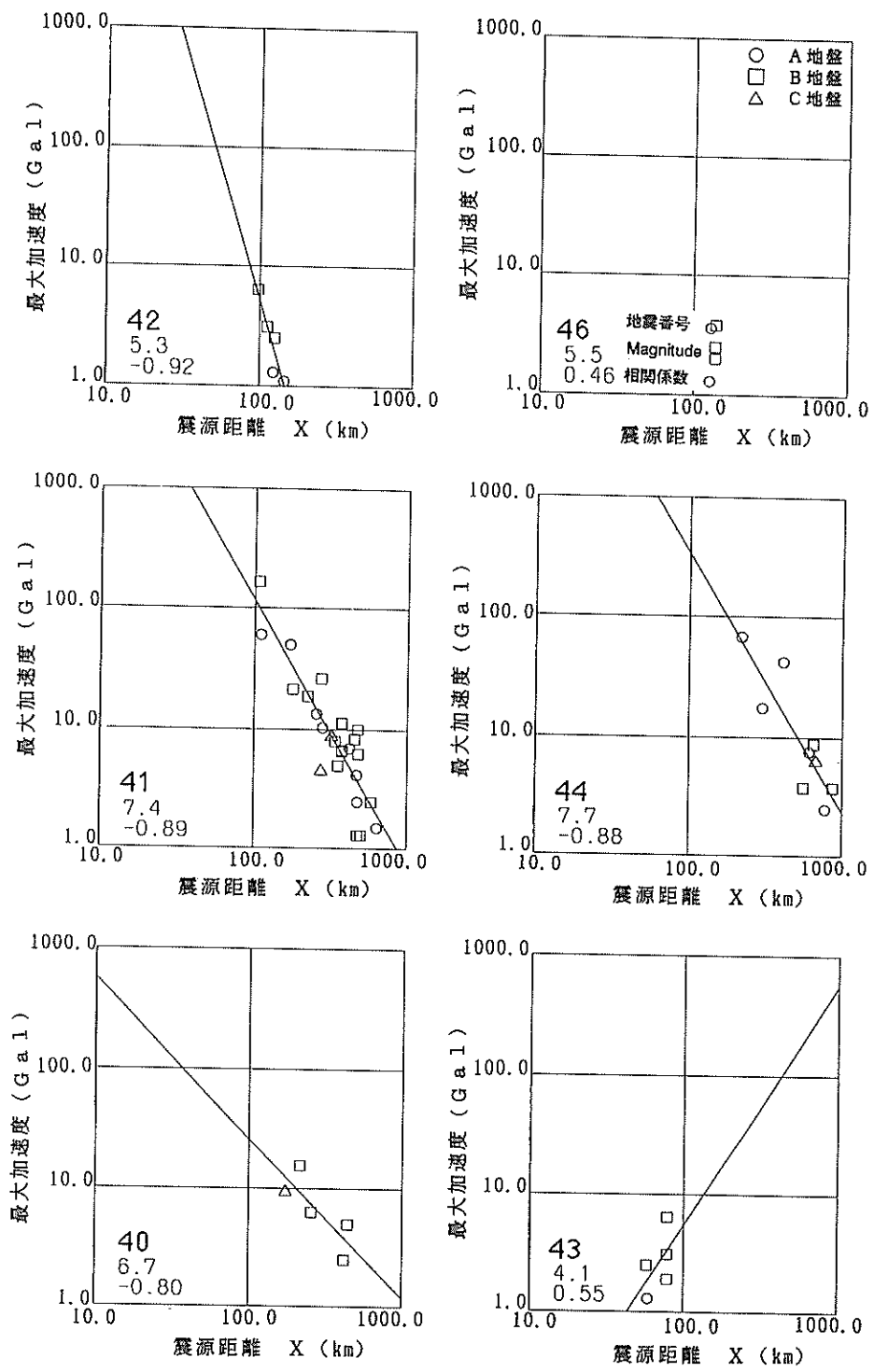
付図-D-3 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



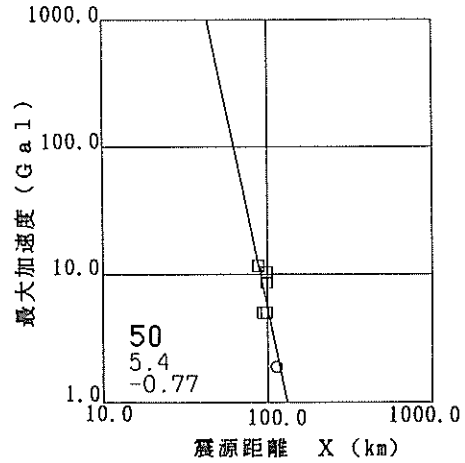
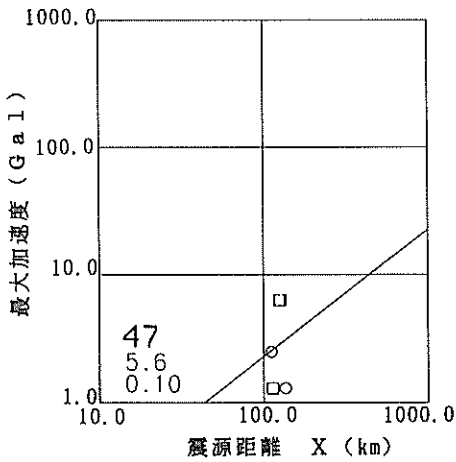
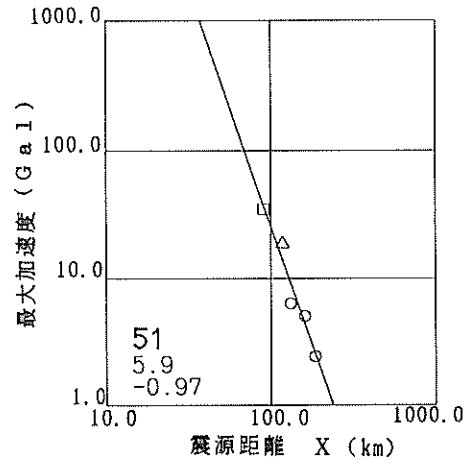
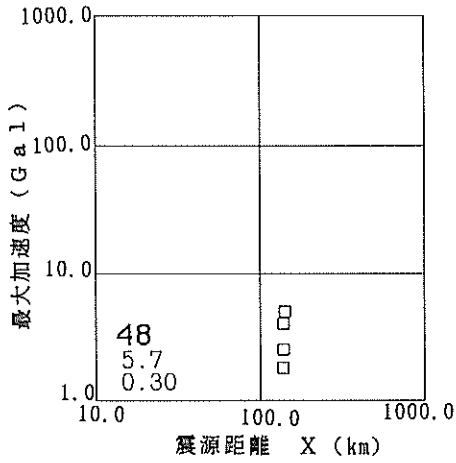
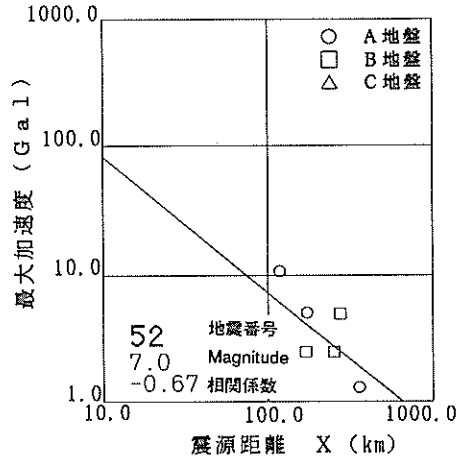
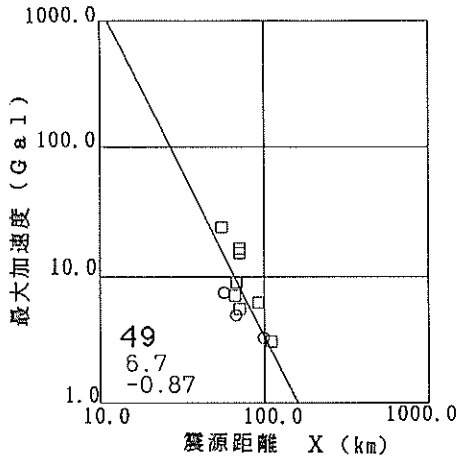
付図-D-4 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



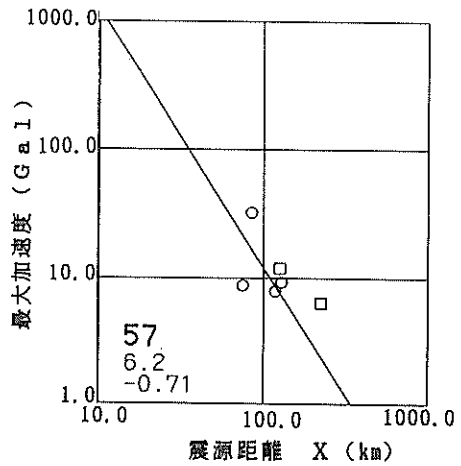
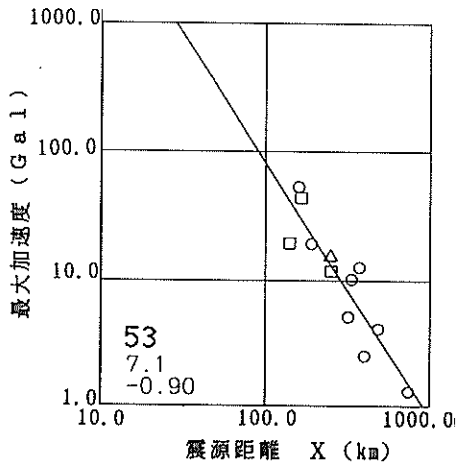
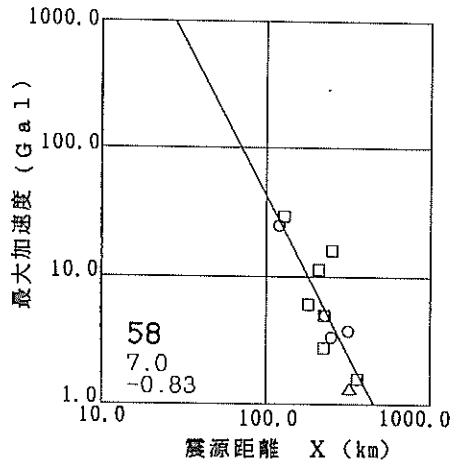
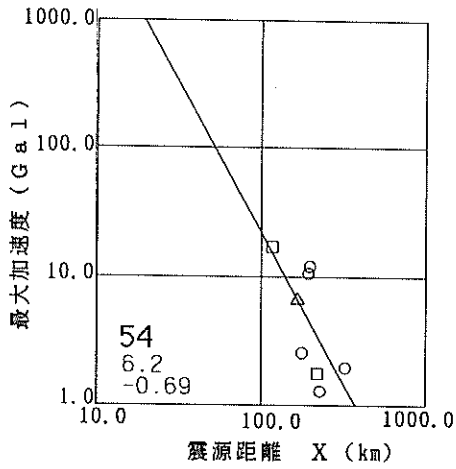
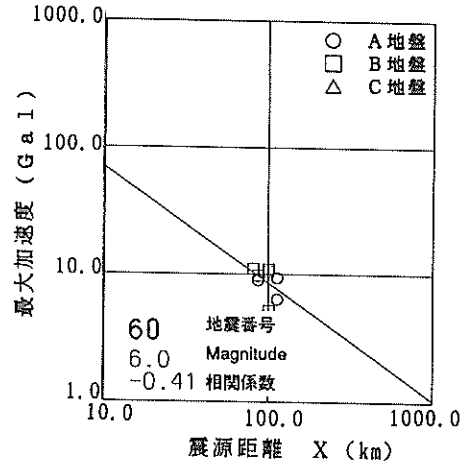
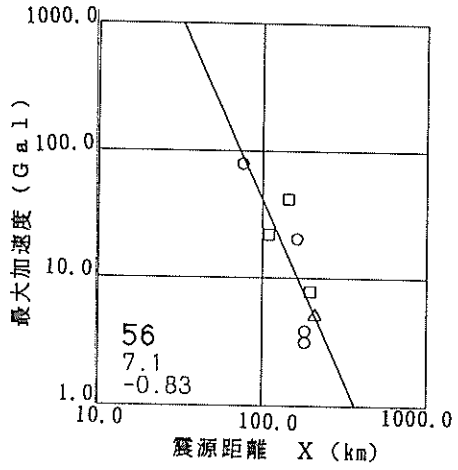
付図-D-5 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



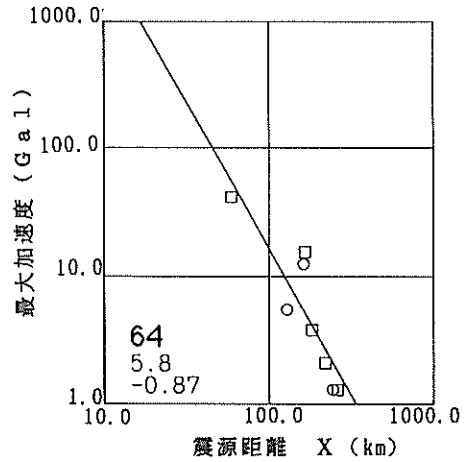
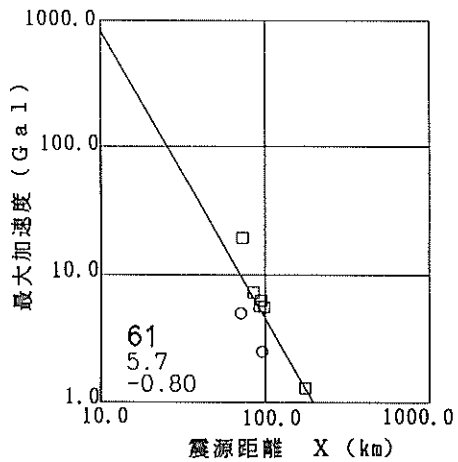
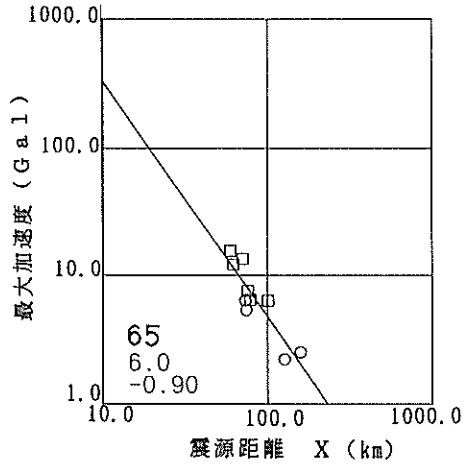
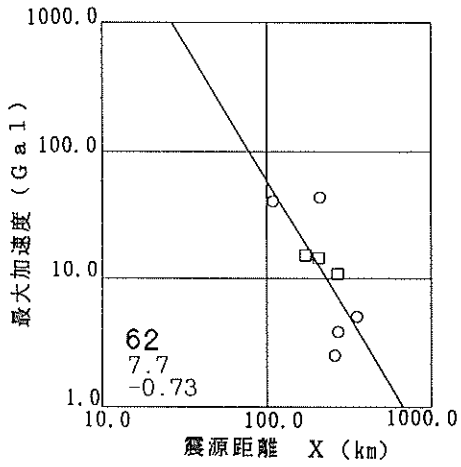
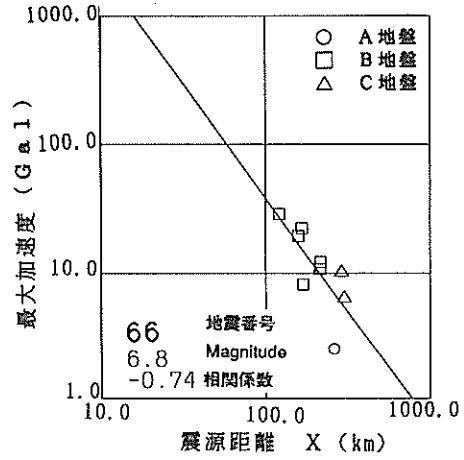
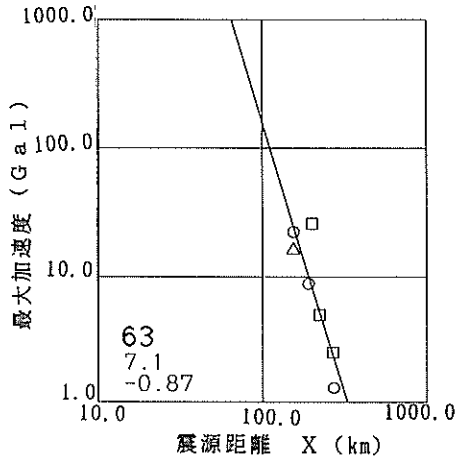
付図-D-6 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



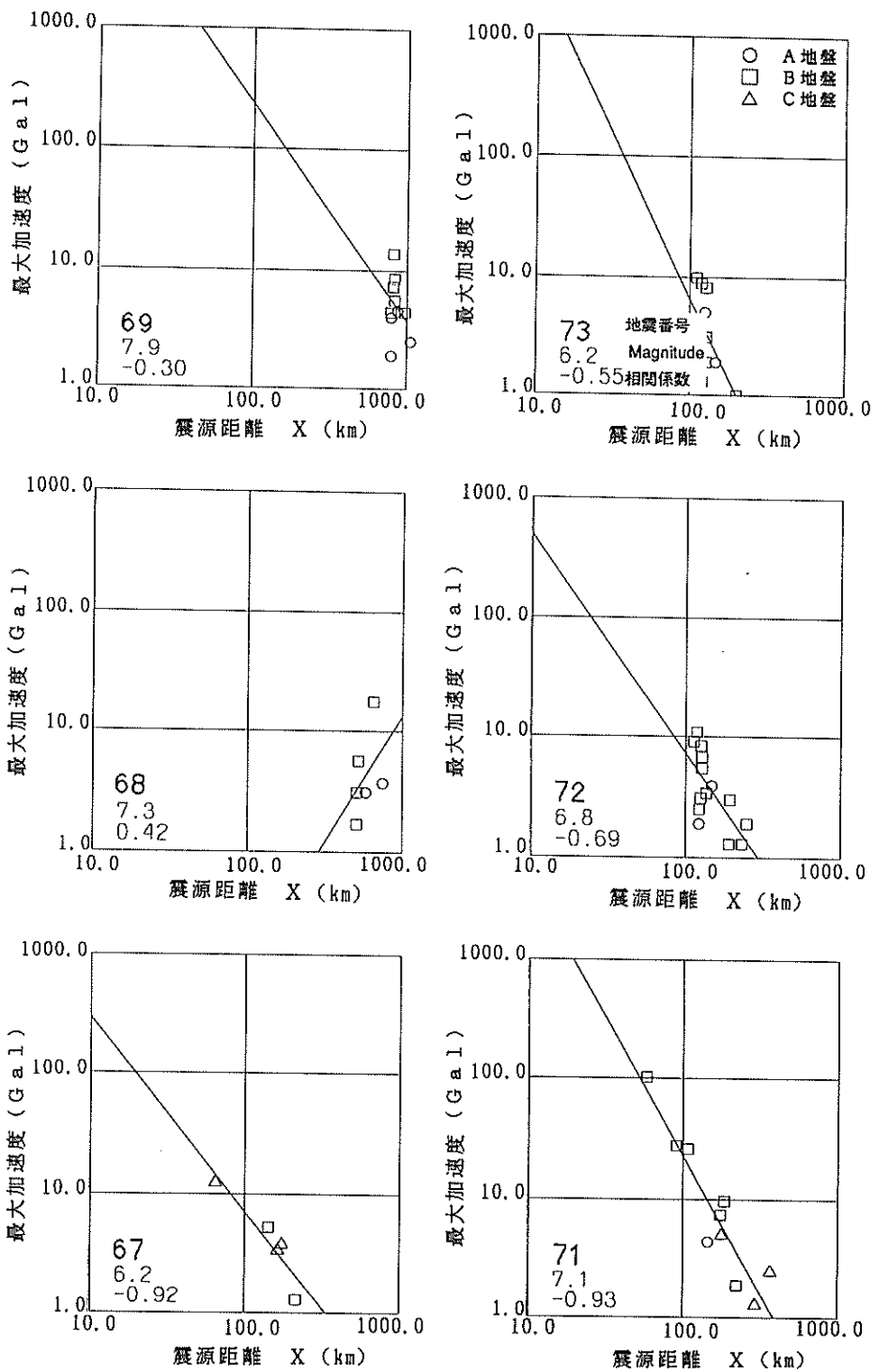
付図-D-7 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



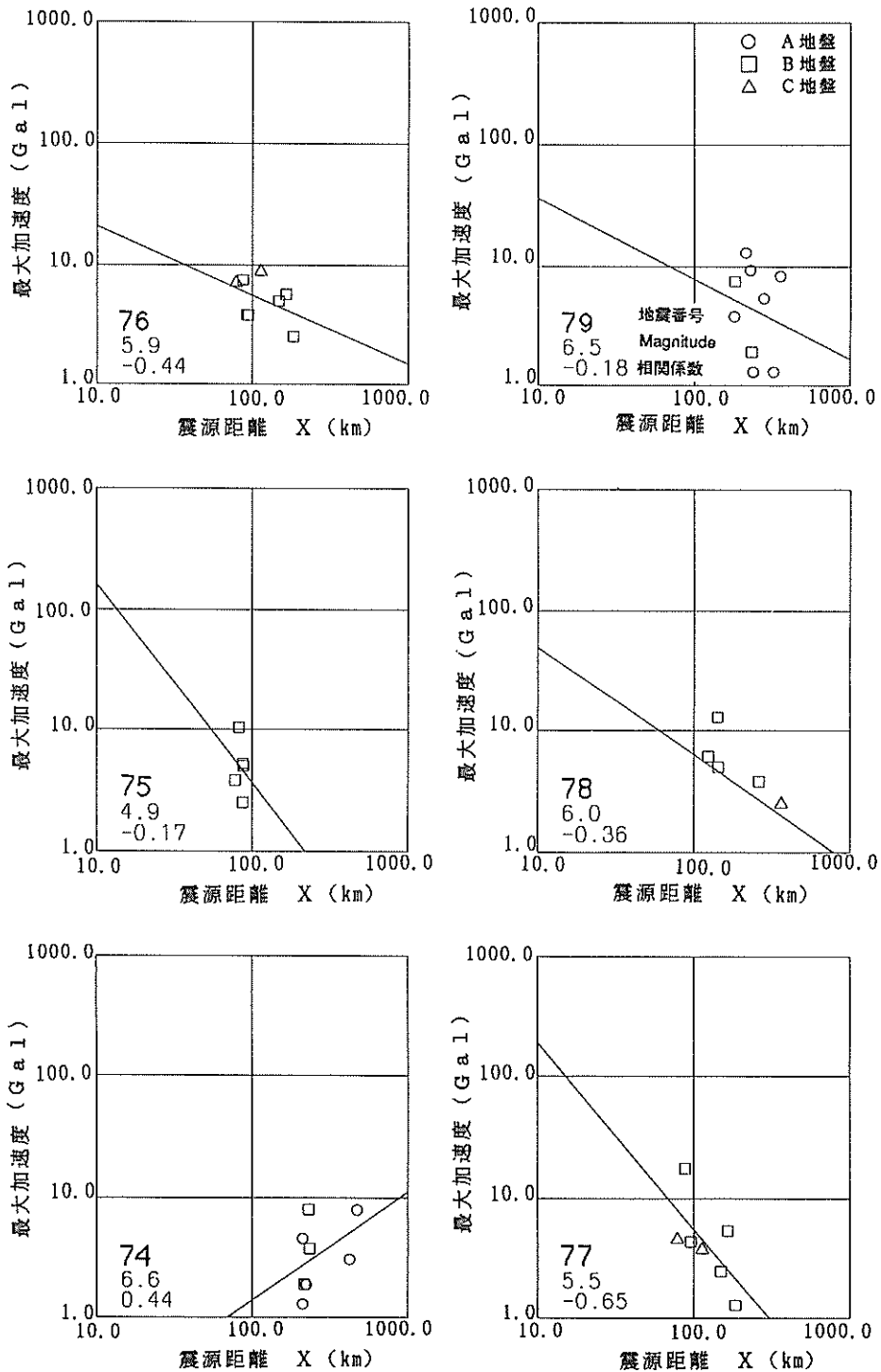
付図-D-8 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



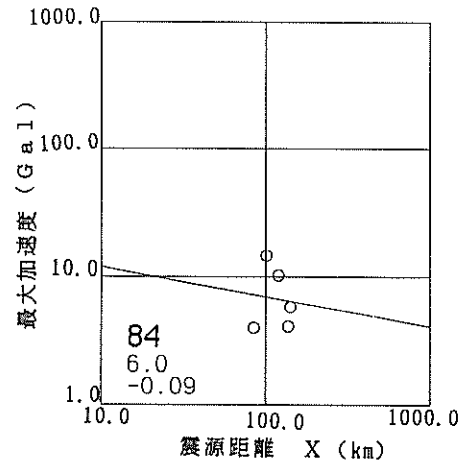
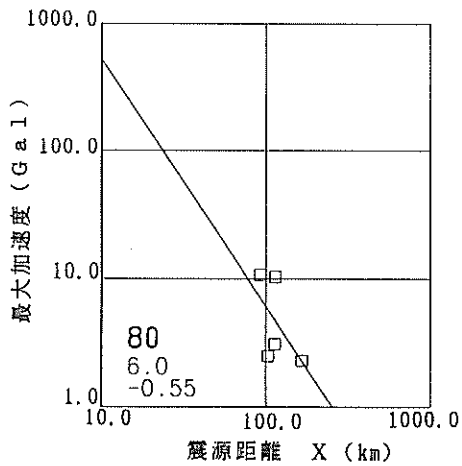
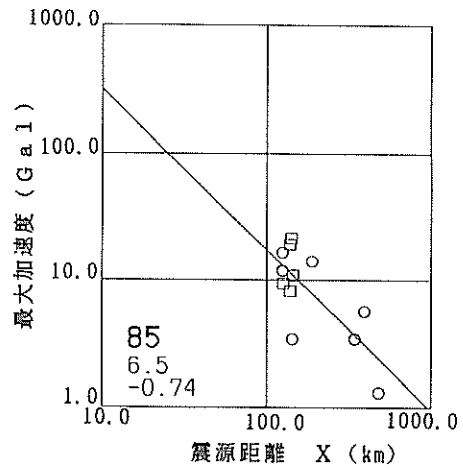
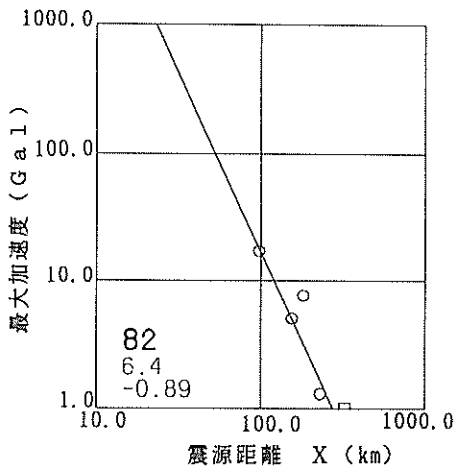
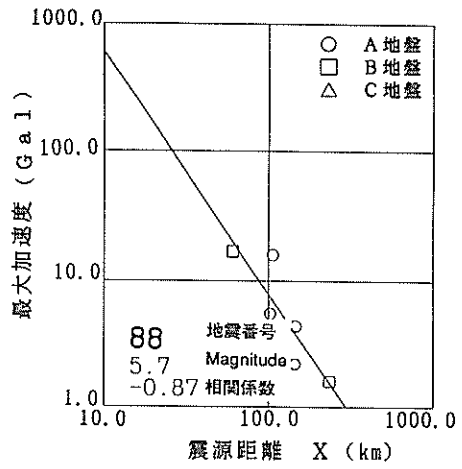
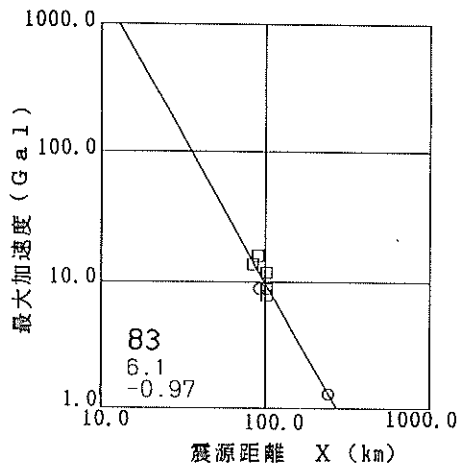
付図-D-9 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



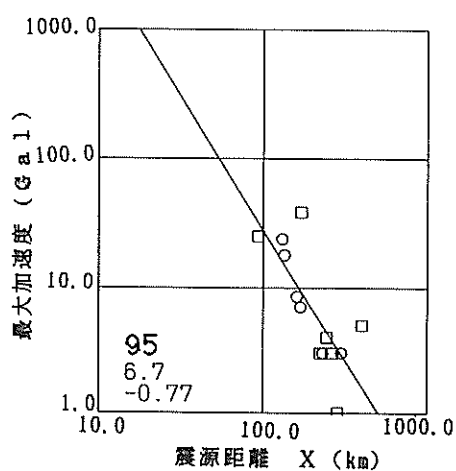
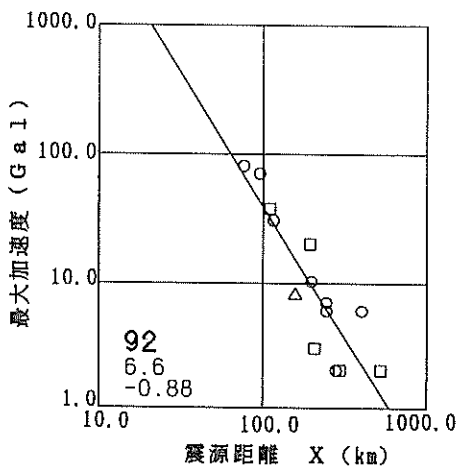
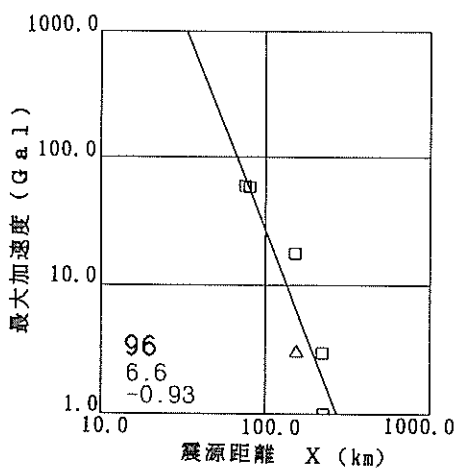
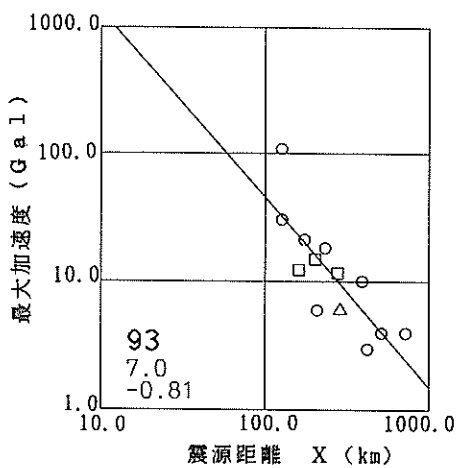
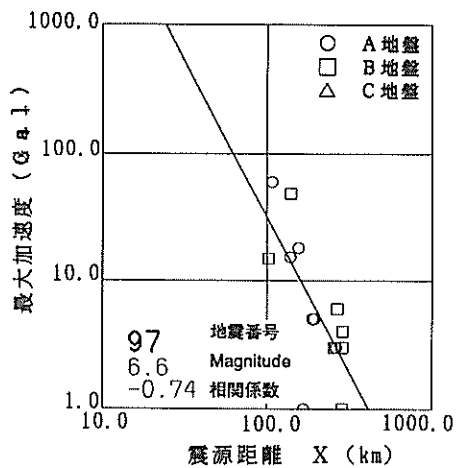
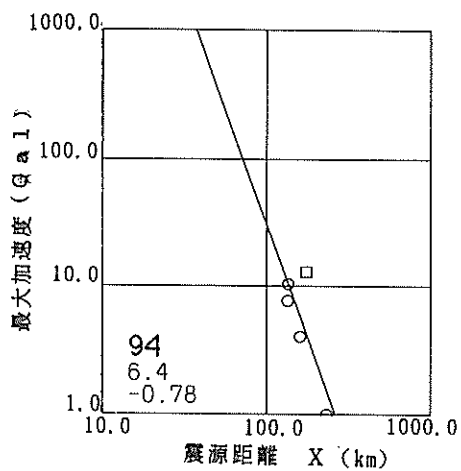
付図-D-10 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



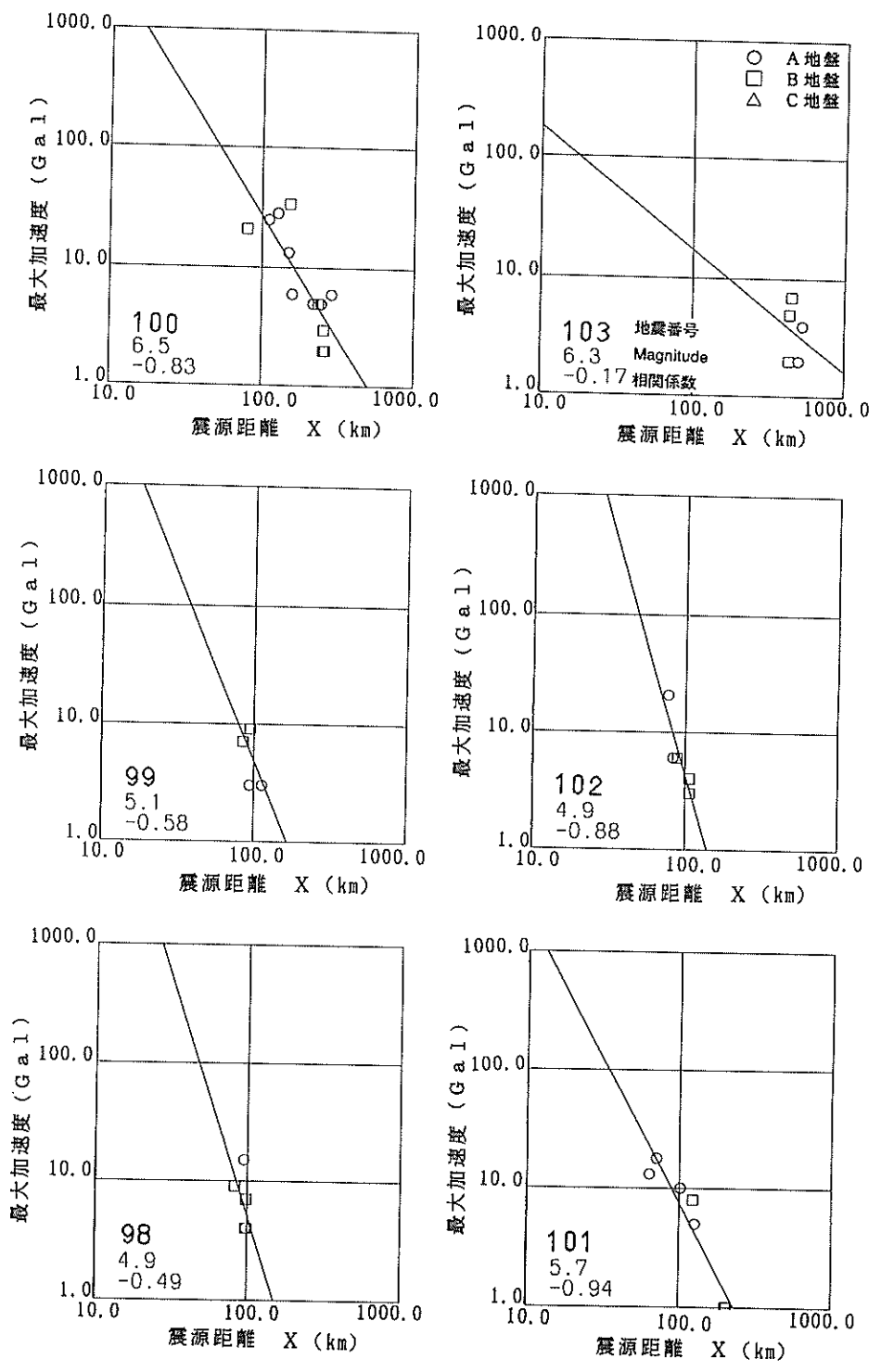
付図-D-11 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



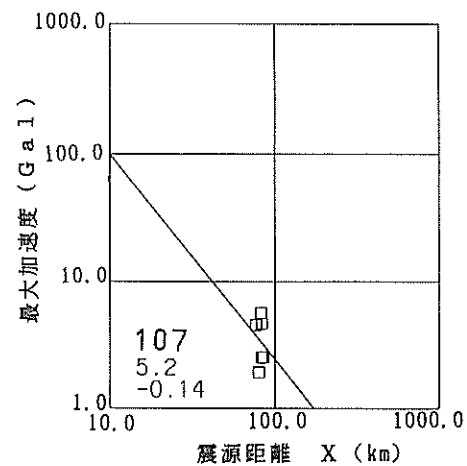
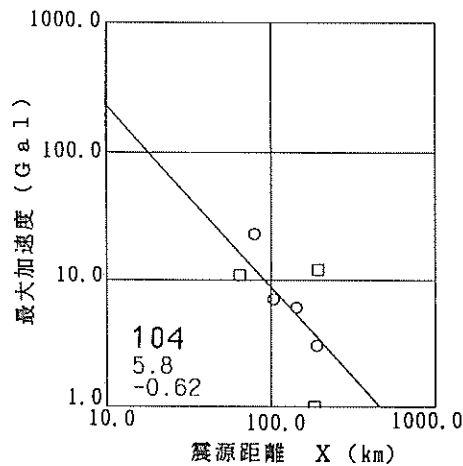
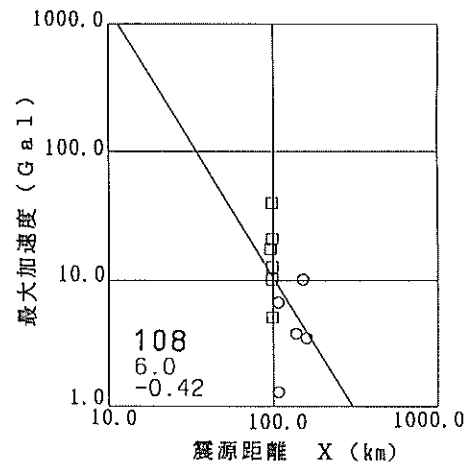
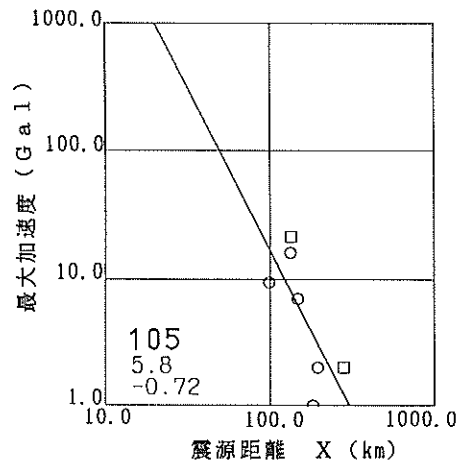
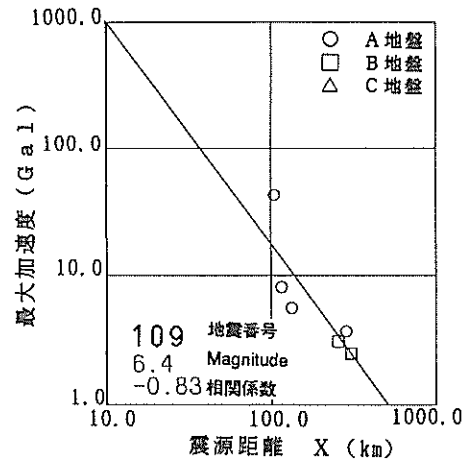
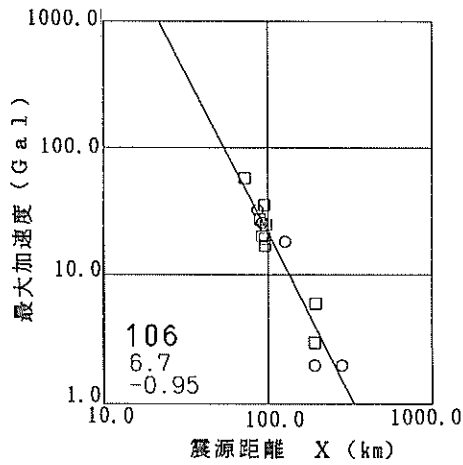
付図-D-12 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



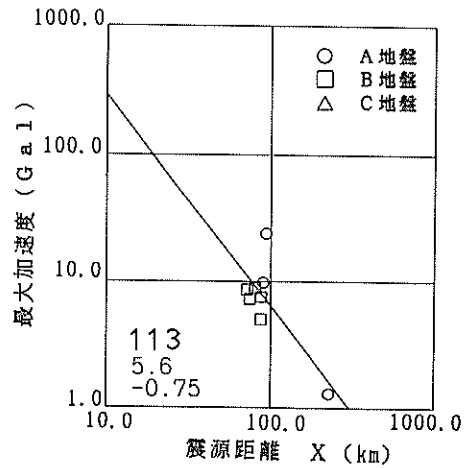
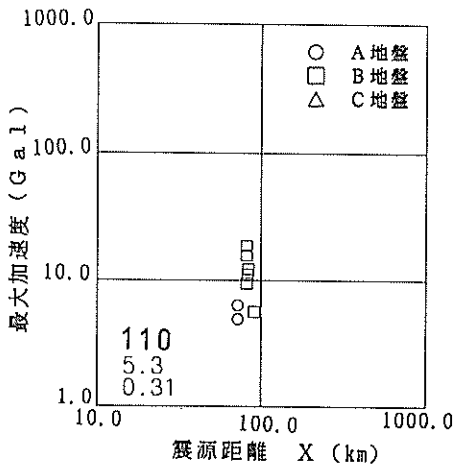
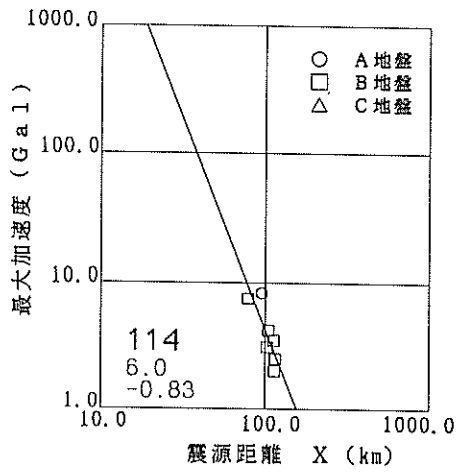
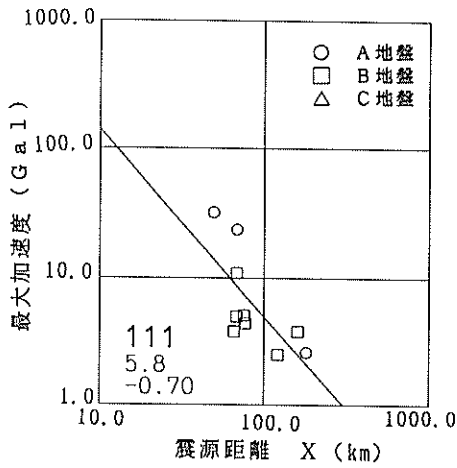
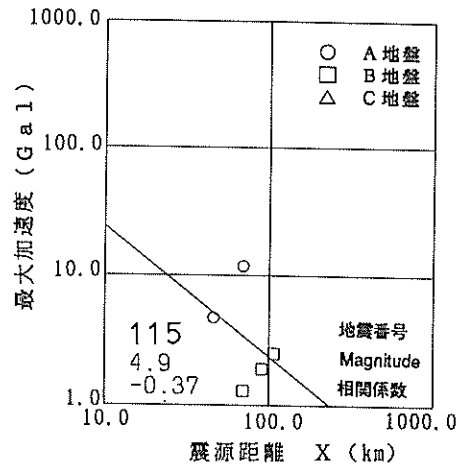
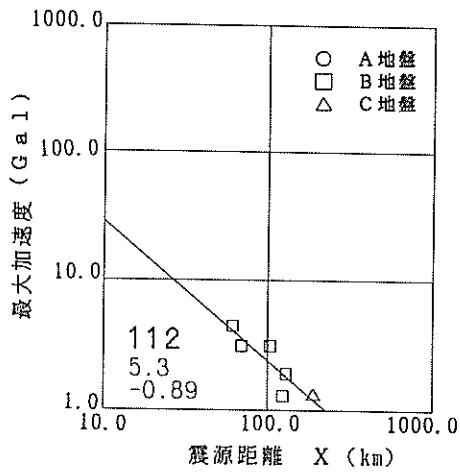
付図-D-13 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



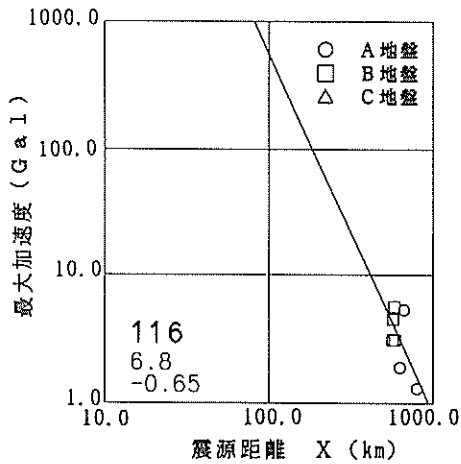
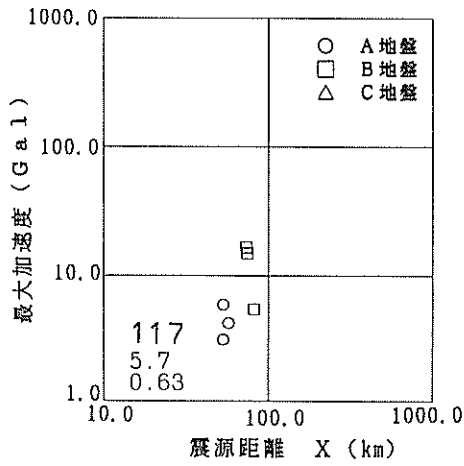
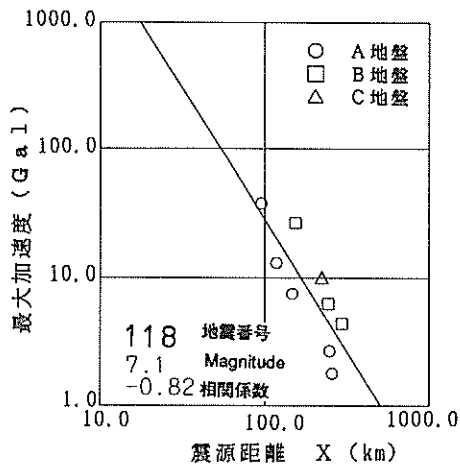
付図-D-14 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)



付図-D-15 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



付図-D-16 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式 (上下動)



付図-D-17 個別の地震ごとの観測記録と線形回帰式(上下動)

港湾技研資料 No. 724

1992・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1992) by P.H.R.I

Allright reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。