

最大加速度記録を用いた簡易断層位置推定法の適用性について

Applicability of Simple Method to Identify Location of Earthquake Fault

辻原 治*・池田 勝平**・沢田 勉***

Osamu TSUJIHARA, Katsuhira IKEDA and Tsutomu SAWADA

*正会員 博士 (工学) 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77)

** 近畿大学理工学部工学部 (元和歌山工業高等専門学校学生) (644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77)

***正会員 工博 徳島大学工学部教授 建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

In this study, the applicability of the method to identify the location of earthquake fault after the event using the records of peak acceleration observed at ground surface is described. The applicable limit is defined as the standard deviation of the identified location of an fault line in relation to the magnitude and the length of fault line. Finally, the results of identification in 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake is discussed.

Key Words : earthquake fault, identification, 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)やノースリッジ地震(1994)が契機となって、被害の早期把握の重要性が強く認識され、省庁や自治体等でも様々な取り組みがなされている。独自の地震計ネットワークを配置した地震情報システムや地震被害推定システムを構築しているケースもあるが、震源情報としては推定された点震源とマグニチュードのみ利用されているのが現状である。

地震動特性を推定する方法は、断層モデルによる解析的手法と経験的手法に分類される。経験的手法は最大加速度の距離減衰式に基づき、マグニチュードと断層位置から任意地点における最大地動を推定するものである。マグニチュードおよび震源位置は地震発生後、数分以内に気象庁から発表されるが、断層位置については、そう簡単にはいかない。従来、第一近似として、点震源を用いて距離減衰式から最大地震動を推定しているが、この方法では断層の広がりやが考慮されていないため、特に震源域の地震動強度を評価しきれない。地震発生直後すみやかに断層位置が推定できれば、第二近似としてより精度の高い最大地動の推定が可能となる。

著者らは、最大地動の距離減衰式に基づき、断層を線とみなして、逆解析により両端点の経緯度を同定する問題と推定値の信頼性を評価する方法を定式化した^{1,2)}。得られた断層線から、計器の設置されていない地点の最大地動が推定される。このような方法は、地震発生直後に震源情報が発表されてから断層に関する詳しい情報が明らかになるまでの間で利用することにより、マグニチュードと震源のみ用いた方法よりも高い精度で被害の概略

推定を行う場合などに効果を発揮すると考えられる。しかし、断層位置の推定精度が悪い場合は、それより求められる最大地動の信頼性も低くなり、断層位置を推定することに価値がなくなることもある。

本研究では、著者らが提案した断層位置の同定手法において、同定された断層線から推定される任意点の最大地動の精度を明らかにし、この手法の適用限界について検討することを目的とする。また、1995 年兵庫県南部地震への適用性について検討する。

2. 断層線の同定問題の定式化²⁾

図-1 に示すように、地震断層の傾斜角が大きく断層の地表への投影が直線で近似でき、また n 個の地点で水平最大加速度が得られているものとする。このとき、地震断層位置の同定問題は次式の最適化問題に置き換えることができる。

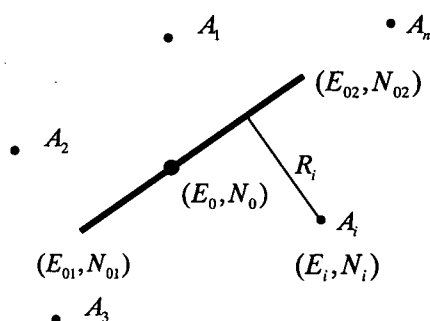


図-1 地震断層と観測点の配置

$$S(X) = \sum_{i=1}^n \{\log A_i(X) - \log A_i\}^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

ここに、 X は未知変数を表し、この問題では断層端点の東経および北緯 $E_{01}, N_{01}, E_{02}, N_{02}$ である。 $M, (E_0, N_0)$ は気象庁マグニチュード、震央の経緯度を表し、 $A_i, (E_i, N_i), R_i$ はそれぞれ地点 i の最大加速度、経緯度および地点 i から断層面までの最短距離を表す。式(1)の $A_i(X)$ は、それらの未知変数とマグニチュードおよび断層面の深さ（地表から断層上面までの最短距離）の関数として距離減衰式から計算される最大加速度である。近年、断層の広がりやを考慮し、断層近傍の近距離地震まで適用可能な式が提案されている²⁾（たとえば 3, 4)）が、ここでは、次式の福島による距離減衰式³⁾を用いることとした。

$$\log A_i(X) = 0.51 \cdot M - \log(R_i(X) + 0.006 \cdot 10^{0.51 \cdot M}) - 0.0033R_i(X) + 0.59 - 0.17L \quad (2)$$

上式の L は加速度レベルを補正する因子で、日本では $L = 0$ とする。

式(1)の最小化問題は未知量 X を次式により逐次更新することによって解くことができる。

$$X^a = X^0 + \lambda \Delta X \quad (3)$$

$X^0, X^a, \Delta X$ はそれぞれ未知変数の初期値、更新値、修正量を表す。 λ は修正量を与える係数である。また、 ΔX は次式で得られる。

$$\Delta X = -N^{-1}U \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} N &= A^T P A \\ U &= A^T P L \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial N_{02}} \\ \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial N_{02}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial N_{02}} \end{bmatrix}$$

$$L = \{\log A_1(X) - \log A_1, \log A_2(X) - \log A_2, \dots, \log A_n(X) - \log A_n\}^T \quad (6)$$

式(5)の P は観測記録によって重み $p_i; i = 1, 2, \dots, n$ を付

ける場合に、それらの係数からなる行列であり、観測が相互に独立の場合は対角行列で表される。

図-1 に示すように、地震発生後に地震波到達時間から決まる震央が、同定しようとする断層線上に存在すると考えた場合、断層端点の経緯度 $E_{01}, N_{01}, E_{02}, N_{02}$ の間にはつぎの関係が成り立つ。

$$\frac{N_0 - N_{01}}{E_0 - E_{01}}(E_{02} - E_{01}) + N_{01} - N_{02} = 0 \quad (7)$$

式(7)の左辺を W_c とおくと、式(3)の ΔX は次式で得られる。

$$\Delta X = N^{-1}\{U - C^T(CN^{-1}C^T)^{-1}(W_c + CN^{-1}U)\} \quad (8)$$

ここに、

$$C^T = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{(N_0 - N_{01})(E_0 - E_{02})}{(E_0 - E_{01})^2} \\ \frac{E_0 - E_{02}}{E_0 - E_{01}} \\ \frac{N_0 - N_{02}}{E_0 - E_{01}} \\ -1 \end{array} \right\} \quad (9)$$

ところで、実際の最大加速度の観測値は、式(2)の距離減衰式のまわりでばらつく。そのような観測値を用いて同定された未知変数がどの程度信頼できるかを評価することは重要である。

式(3)および(8)により更新された未知量 X^a の分散は、誤差伝播法則より、次式で与えられる。

$$\sigma_{x_j^a}^2 = \lambda^2 Q_{jj}^{-1} \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 / (n - m + u) \quad (10)$$

ここに、 Q_{jj}^{-1} は次式で表される行列 Q^{-1} の第 j 行、第 j 列の係数を表す。

$$Q^{-1} = N^{-1} - N^{-1}C^T(CN^{-1}C^T)^{-1}CN^{-1} \quad (11)$$

また、 v_i は、式(6)のベクトルの係数 $\log A_i(X) - \log A_i$ を表し、 m, u はそれぞれ未知変数の数と、未知変数間の拘束条件の数を表す。断層線が震央を通るという条件

を課した場合は、 $m=4$ ， $u=1$ となる。

なお、定式化の詳細については文献2)を参照されたい。

3. 推定断層から求められる最大加速度とその精度

3.1 定式化

最大地動の観測値から得られる断層端点の経緯度は、確率変数として同定される。このような断層から計算される任意点の最大地動もまた確率変数としての性質を持つ。

一般に y が式(12)のように複数の確率変数 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ で与えられるものとする。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

関数 f を確率変数 X の期待値 $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}$ のまわりでテーラー級数展開すると式(13)が得られる。

$$y = f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}) + \sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x_i}) \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \overline{x_i})(x_j - \overline{x_j}) \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} + \dots \quad (13)$$

ただし、偏導関数は $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}$ における値である。

級数を一次の項で打ち切ると、一次近似の平均値と分散が次のように得られる⁵⁾。

$$E(y) \approx f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Var(y) &= E\left[\left\{y - f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n})\right\}^2\right] \\ &\approx E\left[\left\{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x_i}) \frac{\partial f}{\partial x_i}\right\}^2\right] \\ &\approx \sum_{i=1}^n c_i^2 Var(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_i \cdot c_j Cov(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 c_i は関数 f の x_i による偏導関数 $\partial f / \partial x_i$ を表し、 $Var(x_i)$ 、 $Cov(x_i, x_j)$ はそれぞれ、確率変数の分散および共分散を表す。とくに、すべての i, j に関して x_i, x_j が無相関であれば、式(15)は次のように表される。

$$Var(y) \approx \sum_{i=1}^n c_i^2 Var(x_i) \quad (16)$$

断層端点の推定値 E_{01} 、 E_{02} 、 N_{01} が互いに独立である

とき、このような一次近似法に基づく対数最大加速度 $\log A_i$ の分散および標準偏差は次式で表される。

$$Var(\log A_i) \approx \sum_{j=1}^3 c_j^2 Var(x_j) \quad (17)$$

$$\sigma_{\log A_i} \approx \sqrt{\sum_{j=1}^3 c_j^2 Var(x_j)} \quad (18)$$

ここに、 x_j, c_j は次式で表される。

$$\begin{aligned} x_1 &= E_{01} \\ x_2 &= E_{02} \\ x_3 &= N_{01} \\ c_j &= \frac{\partial \log A_i}{\partial x_j}, \quad j=1,2,3 \end{aligned}$$

3.2 数値計算結果

ここでは、直交座標を用いて式(14)および式(15)の検証を行う。図-2 に示す座標系において、表-1 に示す条件で、モンテカルロシミュレーションを行った。

解析の手順を以下に述べる。

- 1) 断層端点の座標のうち、経緯度座標の E_{01} 、 E_{02} 、 N_{01} に相当する x_{01} 、 x_{02} 、 y_{01} について、これらを確率量とみて、それぞれの期待値を表-1 に示す値として、標準偏差 σ の正規乱数を発生させる。
- 2) y_{02} を 1) で求めた x_{01} 、 x_{02} 、 y_{01} の値と震央の座標を用いて次式で求める。

$$y_{02} = (y_0 - y_{01})(x_{02} - x_{01}) / (x_0 - x_{01}) + y_{01}$$

ただし、 $x_0 = x_{01}$ の場合は、 $y_{02} = y_{01}$ とする。

- 3) 1) および 2) で得られた断層端点の座標を用い、座標原点を任意点 i として対数最大加速度を式(2)により計

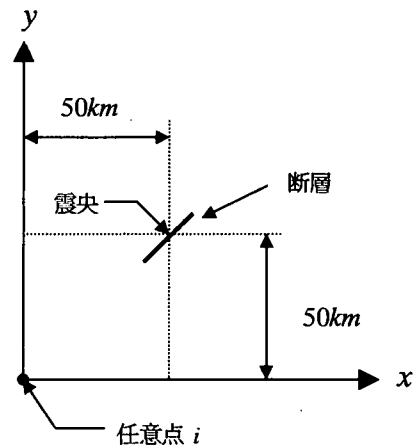


図-2 断層線と任意点 i の位置関係

表-1 解析条件

震央の座標(x_0, y_0)		(50km,50km)
マグニチュード		7.0
断層面の深さ		10km
断層線の傾き		45 度
断層線の長さ		19.95km
断層端点の座標	(x_{01}, y_{01})	(57.05km,57.05km)
	(x_{02}, y_{02})	(42.95km,42.95km)
断層端点の標準偏差		1km~10km
断層端点の推定誤差の相関		なし
任意点の座標		(0km,0km)

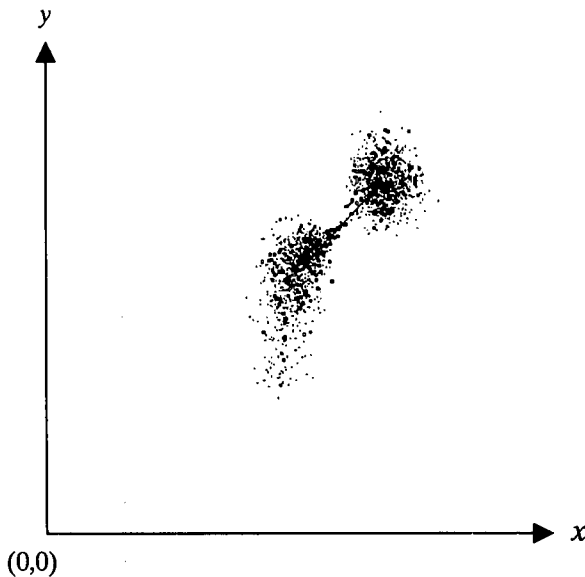
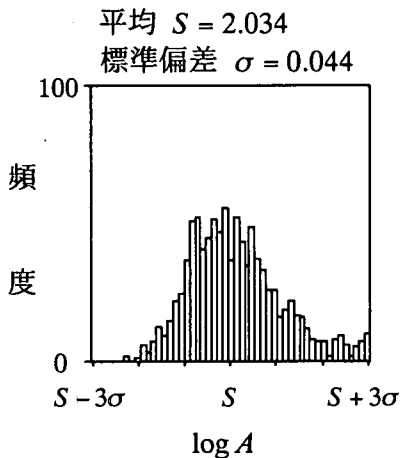
図-3 x_{01}, x_{02}, y_{01} を正規乱数($\sigma = 3.0\text{km}$)としてシミュレートした 1000 組の断層端点

図-4 座標原点における対数最大加速度の頻度分布

算する。

- 4) 1)~3)を 1000 回繰り返す。
- 5) 1000 組の座標原点における対数最大加速度の平均

表-2 座標原点における対数最大加速度 (断層端点の標準偏差 $\sigma = 3.0\text{km}$ の場合)

	一次近似法	モンテカルロシミュレーション
平均値(gal)	2.033	2.034
標準偏差(gal)	0.043	0.044

表-3 座標原点における対数最大加速度(断層端点の標準偏差 $\sigma = 1.0 \sim 10.0\text{km}$ の場合)

断層端点の標準偏差 (km)	一次近似法		モンテカルロシミュレーション	
	平均値 (gal)	標準偏差 (gal)	平均値 (gal)	標準偏差 (gal)
1.0	2.033	0.014	2.034	0.015
2.0	2.033	0.029	2.033	0.030
3.0	2.033	0.043	2.034	0.044
4.0	2.033	0.058	2.031	0.058
5.0	2.033	0.072	2.027	0.071
6.0	2.033	0.087	2.024	0.082
7.0	2.033	0.101	2.018	0.089
8.0	2.033	0.116	2.015	0.097
9.0	2.033	0.130	2.013	0.103
10.0	2.033	0.145	2.014	0.108

値と標準偏差を求める。

そして、式(14)および(15)の一次近似法で得られる期待値および標準偏差と比較する。

このような計算を、断層端点の x_{01}, x_{02}, y_{01} の標準偏差 σ を 1.0km から 10.0km まで 1.0km 刻みで変化させて繰り返す。

一例として、図-3 に $\sigma = 3.0\text{km}$ の場合の、1000 組の断層端点の位置を示す。図-4 は、座標原点における対数最大加速度の頻度分布を表す。表-2 に、モンテカルロシミュレーションと一次近似法による座標原点における対数最大加速度の平均値と標準偏差を示す。また、表-3 に、断層端点の標準偏差を 1.0km から 10.0km まで変化させた場合の比較を示すが、両者はよく対応している。断層端点の標準偏差が大きくなるにつれ、両者の対応が若干悪くなっているが、これは一次近似法が、式(13)の級数において 2 次以上の項を無視しており、推定誤差が大きくなると、それらの影響が大きくなるためである。

このように、断層端点の推定誤差が大きくなると精度が低下するものの、一次近似法により、推定された断層から任意点における対数最大加速度の期待値とその推定誤差分散を求めることが可能であることがわかる。

4. 断層同定法の適用限界

4.1 定式化

前述の方法により、同定された断層線から、任意点の最大加速度の期待値 $\log \bar{A}_i$ とその推定誤差分散を求める。

一方、震源情報（震央の経緯度と震源深さ）のみを用いて距離減衰式から同じ点の対数最大加速度を計算することができる。これを $\log A'_i$ とし、式(2)から計算できるものとする。 $\log \bar{A}_i$ と $\log A'_i$ にあまり差がなければ、わざわざ断層線を同定するまでもなく、点震源からの推定値で十分なわけである。しかし、 $\log \bar{A}_i$ の推定精度が高いものであるならば、 $\log \bar{A}_i$ と $\log A'_i$ との差があまり大きくなっても、 $\log \bar{A}_i$ を用いた方が良いということになる。また、最大加速度を推定しようとする点の位置によっては、 $\log \bar{A}_i$ と $\log A'_i$ との差に大きな違いが出てくる。とくに、マグニチュードが大きく、断層が長くなると、断層近傍の領域において、その違いが著しくなると考えられる。

そこで、本研究では、震源情報のみから計算される対数最大加速度が、断層線から推定される $\log \bar{A}_i$ の標準偏差内に存在するかどうかを適用基準として次のように定める（図-5 参照）。

$$|\log \bar{A}_i - \log A'_i| \geq \sigma_{\log \bar{A}_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

この関係が成立する地点 i については、同定された断層線から最大加速度を推定することに意味があると考えることとする。

4.2 数値計算結果

図-6 に示すように、正方形の領域を縦横の平行線で区切って、メッシュを作り、各メッシュの中心の座標を (x_i, y_i) とする。震央は正方形の中心で (x_0, y_0) 、断層線は水平に対して 45° 傾き、震央を中点とする直線とする。断層線の端点の座標は一般の直交座標で与えるものとし、それらを (x_{01}, y_{01}) 、 (x_{02}, y_{02}) とする。

そして、各メッシュの中心の対数最大加速度 $\log \bar{A}_i$ と点震源に対する対数最大加速度 $\log A'_i$ を求め、式(19)が満足されるメッシュのパーセンテージを求める。

数値計算では、 $100\text{km} \times 100\text{km}$ の領域を 200×200 のメッシュに分割し、マグニチュード 7.0、断層面の深さ 10km とした。図-7 は、断層端点 $x_{01}, y_{01}, x_{02}, y_{02}$ の標準偏差を 1.0, 3.0, 5.0, 10.0km としたときに、式(19)の基準が満たされた領域を白抜きにしたものである。標準偏差が大きくなるにつれて白抜きの部分の面積が小さくなっているのがわかる。断層線に対して垂直方向のメッシュで基準が満たされていないのは、断層線を用いた場合と点震源を用いた場合の観測点までの最短距離の差が小さく、

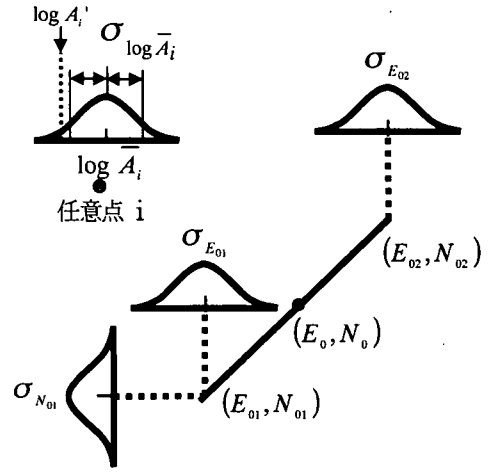


図-5 断層線から推定される任意点の対数最大加速度の精度と、点震源から推定される対数最大加速度との関係

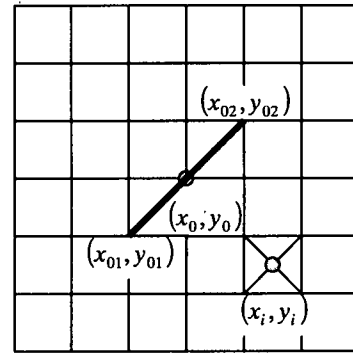


図-6 地震断層と観測点の位置関係

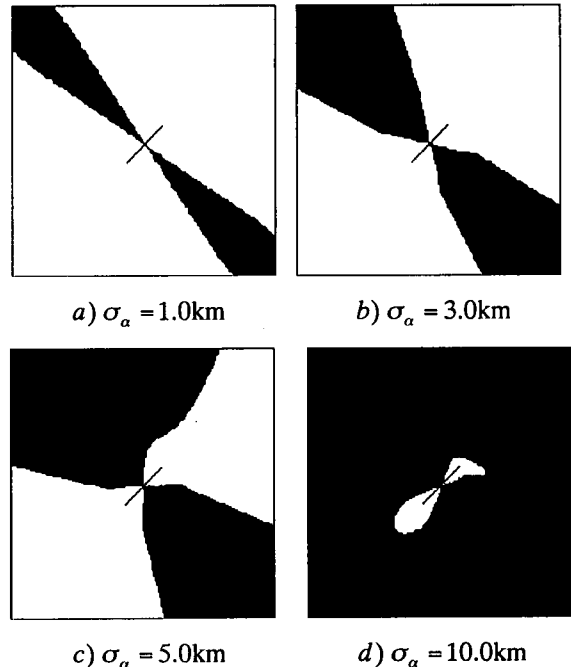


図-7 適用基準を満たす領域（白抜きの領域）

対数最大加速度に大きな差が生じないためである。それに対して、断層線の延長上では、その差が大きくなるので断層端点の標準偏差が大きくなっても基準が満たされ易くなる。

図-8 に示す白抜き領域は、断層端点の推定精度が低い場合（図-7 の d)参照）に、式(19)の基準を満足する領域の形状を近似的に表したものである。これは、断層の両端点を中心とし断層長の 1/2 を半径とする円に相当する領域である。ただし、図-7 の d)は、断層線の中点に震央がある場合のものであり、実際の地震でそうなるとは限らないが、震央の位置にかかわらず、図-8 における白抜き部分を、断層近傍を表す領域と捉えても差し支えない。

そこで本研究では、断層同定法の適用限界として次式を定義することとした。

$$Area < \pi \frac{L^2}{2} \quad (20)$$

ここに、 $Area$ 、 $\pi L^2 / 2$ はそれぞれ、式(19)の基準を満足する領域と図-8における白抜きの領域の面積を表す。また、 L は断層長さを表し、マグニチュードとの関係で次式⁹⁾を用いることとする。

$$L = 10^{(0.6 \times M_j - 2.9)} \quad (21)$$

数値計算では、マグニチュードを 5.0 から 7.0 まで 0.1 ずつ変化させ、それぞれに断層端点 x_{01}, x_{02}, y_{01} の標準偏差を 0.5~10.0km まで 0.5km 刻みで与えて、式(20)の適用限界が満足されときの標準偏差を求めた。マグニチュードあるいは断層長さ、断層端点の標準偏差との関係を調べた結果を図-9 に示す。断層面の深さを 0km(◇)、10km(□)、20km(△)、30km(×)、40km(◆) および 50km(■)とした場合についてそれぞれ示している。

図より、マグニチュードとの関係においては、適用限界に相当する断層端点の推定誤差の標準偏差は、指数関数の形状を呈している。断層長さとの関係においては、直線近似できそうであり、断層端点の座標の標準偏差が断層長さの 1/2 程度までであれば、適用可能であることがわかる。また、このことは断層面の深さにあまり影響されないことが図より理解できる。

図-9 は断層端点 x_{01}, x_{02}, y_{01} の標準偏差がどれも同じ場合の結果である。実際には観測点の配置などにより、断層端点の推定誤差が同じであるとは限らない。その意味において、図-9 は、提案した同定手法の適用限界を表す目安として捉えるべきである。

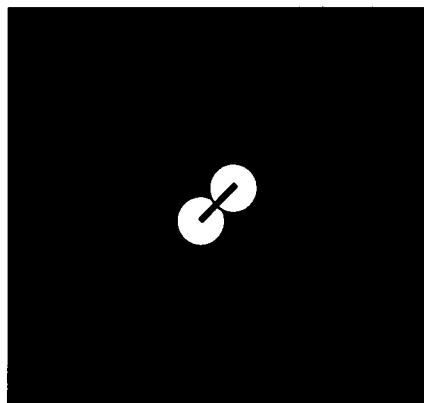
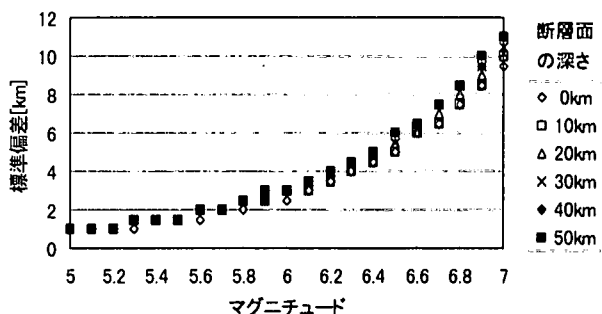
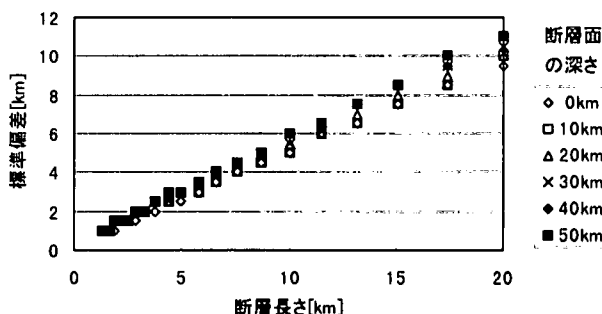


図-8 同定手法の適用限界を表す領域（白抜きの領域が式(19)を満足する領域を表す）



(a) マグニチュードとの関係



(b) 断層長さとの関係

図-9 断層面の深さを 0~50km として求めた同定手法の適用限界

5. 1995 年兵庫県南部地震との対応

1995 年兵庫県南部地震に断層線の同定手法を適用した結果を以下に示す。最大加速度の記録については、文献 7)に掲載されているうち、計器の振り切れがなく、かつ、地表で観測された水平最大加速度を用いた。なお、式(2)が水平 2 成分の平均最大加速度に対する距離減衰式であるが、文献 7)に示されている水平加速度は、観測された 2 成分の大きい方またはそれらの合成値であることに注意する必要がある。図-10 に観測点の位置を黒丸で



図-10 1995年兵庫県南部地震の地震計配置

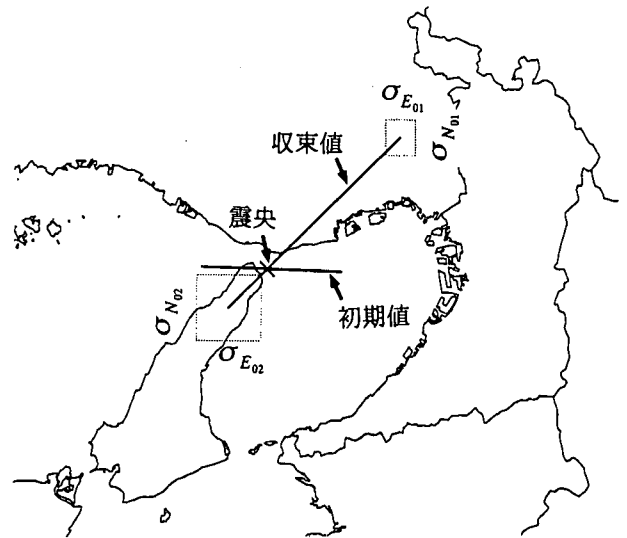


図-12 断層線の同定結果

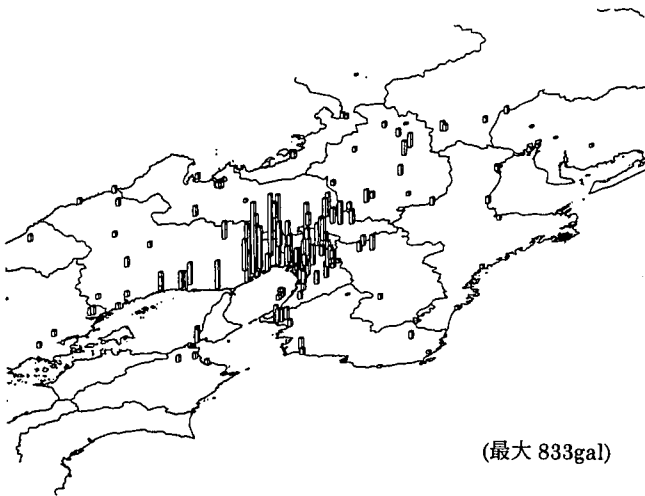


図-11 1995年兵庫県南部地震における最大加速度

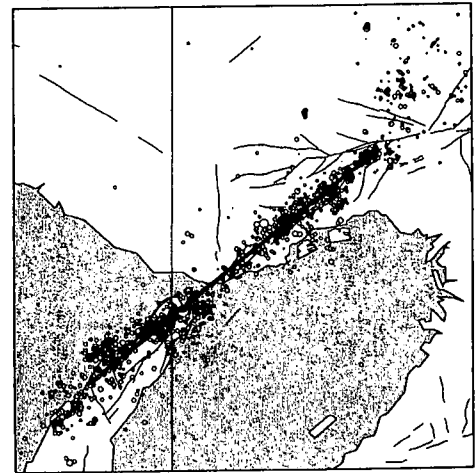


図-13 地震後1ヶ月の余震分布から推定される断層位置(文献8)に加筆

示す。また、図-11に、それぞれの観測点における最大加速度の大小を示す。最大の値は833galである。

図-12に断層線の同定結果を示す。震央は東経135.038度、北緯34.595度とし、マグニチュード7.2、断層面の深さ0kmとした。図には、断層線の初期値と収束値および断層端点の推定誤差の標準偏差を示す。なお解析の際、表層地盤による増幅の影響を取り除くために、岩盤、硬質地盤、標準地盤、軟弱地盤の最大加速度記録をそれぞれ0.6、1.07、0.87、1.39で除した。これらの値は、本研究で用いた距離減衰式によって計算される最大加速度と観測値の比の平均的な値として報告されている³⁾。また、最大加速度に比例する重みを付けている。同定された断層線は余震分布から推定される断層(図-13)と比較すると、やや北向きに推定されているが、かなりよく対応している。図-14は、同定された断層線から観測点までの距離と最大加速度をプロットしたもので、距離減衰式まわりではばらついていないことがわかる。

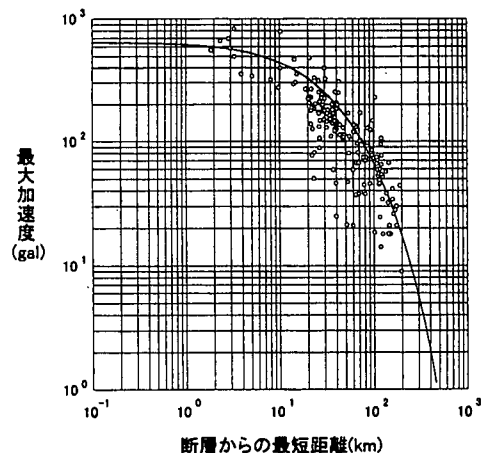


図-14 推定された断層線に基づく最短距離-最大加速度の距離減衰式まわりのばらつき

表-4 同定された断層線の長さと同定断層端点の推定誤差の標準偏差

断層の長さ(km)		47
標準偏差	E_{01} (km)	2.9
	N_{01} (km)	3.5
	E_{02} (km)	6.4
	N_{02} (km)	6.6



図-15 式(19)の適用基準を満足する観測点（白丸）

同定された断層線の長さと同定断層端点の推定誤差の標準偏差を表-4 に示す。断層端点の経緯度のうち、 N_{02} は E_{01} 、 N_{01} 、 E_{02} の従属変数であり、これら 3 つの独立変数の推定誤差が決まると、誤差伝播法則により N_{02} の推定誤差も求められる。具体的には式(10)で N_{02} を含む断層端点に対する推定誤差の標準偏差が得られる。 E_{01} 、 N_{01} 、 E_{02} に対する推定誤差の標準偏差のうち、最大の値が長さにして 6.4km であり、断層線の長さが 47km であることから、図-9 の(b)を外挿すると、同定結果は、本研究で定義した適用限界を超えるものではないことがわかる。図-15 に、式(19)の適用基準を満足する観測点位置を白丸で示す。断層線近傍および断層線に沿った方向において白丸が多く存在しており、同定された断層線を用いることにより、地域における地震動強度のより高い精度での推定が期待できる。以下では、観測記録との対応について述べる。

まず、同定された断層線を用いることにより、地域の地震動強度を精度よく推定できるのかについて検討する。図-16、図-17 にそれぞれ同定された断層線および点震源から計算した観測点における最大加速度を示す。ただし、点震源に対する計算にも式(2)の距離減衰式を適用してお

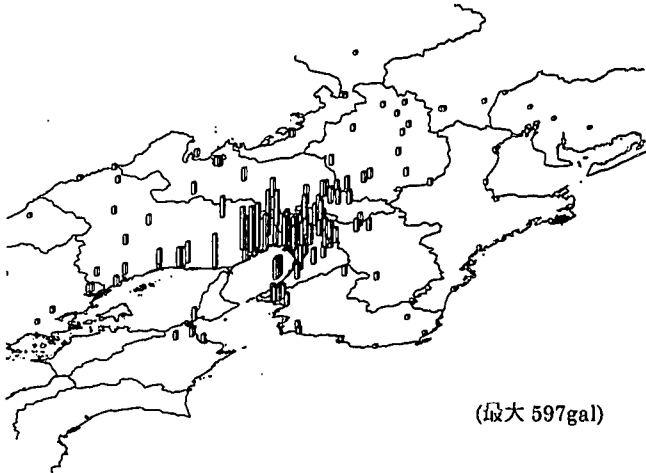


図-16 同定された断層線から距離減衰式を用いて計算した地震計設置点における最大加速度

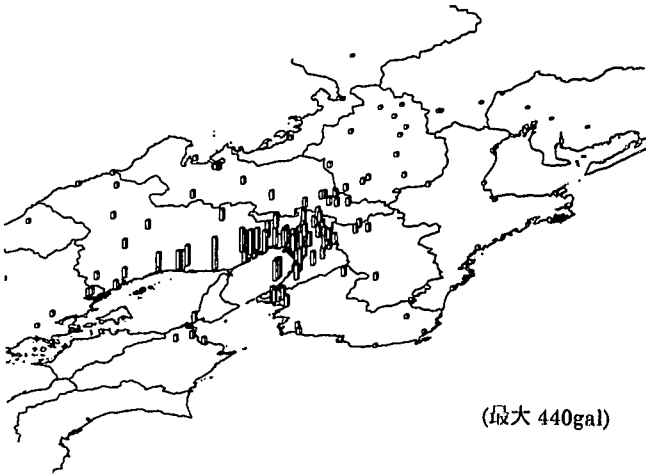


図-17 点震源から距離減衰式を用いて計算した地震計設置点における最大加速度

り、その際、震源深さは 0km としている。これらの図と図-11 の最大加速度記録を比較すると、断層線からの推定値の方が近似度がよく、とくに断層線近傍については、点震源からの推定値との差は明らかであり、断層線の推定の重要性が強調される結果となっている。

つぎに、式(18)で得られる対数最大加速度の推定誤差の標準偏差が、観測記録とその推定値の関係をどの程度説明できるのかについて検討する。ここでは、推定誤差、すなわち同定された断層線から距離減衰式に基づいて計算した対数最大加速度と最大加速度記録の対数値との差 ε が正規分布に従うと仮定して、 ε が式(18)で得られる標準偏差内にあるかどうかを調べることにした。図-18 に、推定誤差 ε が式(18)で得られる標準偏差 ($\pm 1\sigma_{\log A}$) 以内に収まる観測点を白丸で表し、標準偏差から外れる観測点を黒丸で表す。図より、とくに断層線の近傍で白丸が多く、計算値に対する標準偏差内に観測値が存在するケースが多いことがわかる。また、標準偏差の 2 倍 ($\pm 2\sigma_{\log A}$)



図-18 地震計設置点における対数最大加速度の推定誤差と式(18)で計算される標準偏差との関係
 $(|\varepsilon| \leq \sigma_{\log A}$ の場合○, $|\varepsilon| > \sigma_{\log A}$ の場合●)



図-20 地震計設置点における対数最大加速度の推定誤差と式(18)で計算される標準偏差との関係
 $(|\varepsilon| \leq 3\sigma_{\log A}$ の場合○, $|\varepsilon| > 3\sigma_{\log A}$ の場合●)



図-19 地震計設置点における対数最大加速度の推定誤差と式(18)で計算される標準偏差との関係
 $(|\varepsilon| \leq 2\sigma_{\log A}$ の場合○, $|\varepsilon| > 2\sigma_{\log A}$ の場合●)

および 3 倍($\pm 3\sigma_{\log A}$)についても同様の調査を行った。その結果を図-19 および図-20 に示す。これらの結果を整理し、対数最大加速度の推定誤差 ε が標準偏差の倍数内に存在した観測点の数を求め、すべての観測点の数に対する割合を、観測値に付けた重みを考慮して算出した。標準偏差の倍数 $\pm 1\sigma_{\log A}$, $\pm 2\sigma_{\log A}$, $\pm 3\sigma_{\log A}$ に対する割合はそれぞれ 57.0%, 73.0%, 82.1%であった。これを正規分布の理論値 68.3%, 95.4%, 99.7%と比較すると 10%~20%の差があるが、この程度の精度で説明できることがわかる。

6. おわりに

地震発生後、水平最大加速度記録から断層を直線とみなして同定する方法の適用性を検討した。本研究を通じて得られた結果を要約すると以下になる。

- 1) 同定された断層線から推定される任意点の最大加速度の推定精度を誤差伝播法則により定式化し、数値計算によりその妥当性を検討した。一次近似法に基づいているため、断層線の推定誤差が大きくなると信頼度は低下するものの、モンテカルロシミュレーションと対応する結果が得られた。
- 2) 点震源から推定される任意点の対数最大加速度が断層線から推定されるその標準偏差内にあるかどうかを適用基準として定義した。そして、数値計算により、同定の精度がかなり低下しても、断層線近傍については、断層線を用いることで最大加速度のより精度の高い推定値が得られることを明らかにした。
- 3) 断層同定法の適用限界として、断層の両端点を中心とし断層の長さの 1/2 を半径とする円の面積に相当する領域において 2) で定義した適用基準が満足されたときと定め、その時の断層端点の標準偏差を求めた。
- 4) 1995 年兵庫県南部地震の際に得られた最大加速度記録から同定された断層線について検討した。点震源からよりも同定された断層線を用いた方が最大加速度の再現性がよいことがわかった。また、同定された断層線から計算される対数最大加速度の推定誤差が正規分布に従うものと仮定すると、その頻度は理論値に対して 10~20%の差の範囲内でおさまることがわかった。

謝 辞

兵庫県南部地震で得られた水平最大加速度と観測点位置は、本文でも述べたとおり文献 7) (著書) から引用した。関係各位の御努力とデータ公開の御厚意に敬意を表する。

参考文献

- 1) 辻原 治, 沢田 勉, 谷口亜希子: 距離減衰式に基づく断層位置の即時推定について, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3367-3372, 1998.
- 2) 辻原 治, 江川智之, 沢田 勉: 最大加速度記録を用いた断層位置の簡易推定法と精度について, 応用力学論文集, Vol.2, pp.503-514, 1999.
- 3) 福島美光: 地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, 東京工業大学学位論文, pp.50-55, 1995.

- 4) W.B. Joyner and D.M. Boore : Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America ,Vol.71, No.6, pp.2011-2038, 1981.
- 5) 伊藤 学, 亀田弘行訳: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, pp.168-214, 1977.
- 6) 松田時彦: 活断層から発生する地震断層と周期について, 地震, Vol.28, pp.269-283, 1975.
- 7) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告, 共通編-2, 1編 地震・地震動, 2編 地盤・地質, 社団法人土木学会, pp.179-182, 1998.
- 8) 前掲 7) の p.80.

(2000 年 4 月 21 日受付)