

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

Simple Method to Identify Location of Earthquake Fault and its Accuracy

辻原 治*・江川 智之**・沢田 勉***

Osamu TSUJIHARA, Tomoyuki EKAWA 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)
 **学生員 徳島大学工学部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)
 ***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)

This paper describes the method to identify the location of earthquake fault after the event using the records of maximum amplitude of ground accelerations. First the identification of longitude and latitude of both ends of the fault line is formulated using the method of least squares, in which attenuation equation of peak acceleration is used. Numerical analysis of identification has been carried out. Subsequently the method to evaluate the estimation error is described, and its validity as well as the effect of the number and location of records has been demonstrated by Monte Carlo Simulation. Finally, this method has been applied to 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake.

Key Words : earthquake fault, identification, estimation error, 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。地震学の分野では、断層モデルに基づいて、逆解析により、地盤震動の波形から断層の位置や破壊過程を決定論的に推定する研究が進められているが、大量のデータを扱うことからデータ収集および解析にかなりの時間を必要とする。

一方、本研究で述べる方法は、経験的方法である最大地動の距離減衰式に基礎を置くもので、断層の破壊過程までは推定できないにしても、扱うデータ量が少なく、簡便かつ迅速に断層の位置を推定することが可能である。したがって、自治体などで開発されている既存の被害早期把握システム等にも容易に組み込むことができ、より精度の高い被害推定に役立つと考えられる。

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を定式化し、推定値の信頼性を評価する方法を展開した¹⁾。しかし、この方法では、同定しようとする断層線を取り巻くように観測点が存在する場合はよいが、兵庫

県南部地震(1995年)のときのように、断層の南西側の記録が著しく欠落しているような偏った地震計配置の場合は、同定が困難であった。また、推定精度の面でも課題があった。

本研究は、震央やマグニチュードと関連づけた断層長さの情報を取り入れることにより、安定し、かつ精度の高い推定値が得られるように方法を改良することと、兵庫県南部地震(1995)の断層位置の同定を行い、実問題への本手法の適用性について検討することを目的とする。

2. 断層線の同定問題の定式化

2.1 距離減衰式を用いた断層線の同定

地震動の強さを推定する方法として、過去の地震観測記録の回帰分析に基づき、最大加速度や最大速度の距離減衰式を用いる方法がある。近年、断層の広がりや考慮し、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), 3)}。ここでは、次式で表される Fukushima and Tanaka³⁾の距離減衰式を用いて断層の同定問題を定式化する。

$$\log A_i = 0.51 \cdot M - \log(R_i + 0.006 \cdot 10^{0.51 \cdot M}) - 0.0033 R_i + 0.59 \quad (1)$$

ここに、 A_i 、 M 、 R_i はそれぞれ地点*i*の最大加速度、気象庁マグニチュード、地点*i*から断層面までの最短距離を表す。

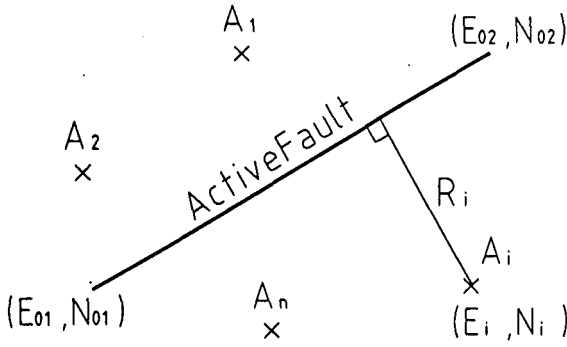


図-1 地震断層と観測点配置

いま、地震断層を直線で表すことができ、マグニチュードおよび断層の深さがわかっているものとする。そして、図-1に示すように、 n 個の地点で最大加速度が得られているときに、地震断層の端点の経緯度 E_{01} , N_{01} , E_{02} , N_{02} を未知変数とし、これを同定する問題を考える。図の A_i は地震計設置点 i の最大加速度を表し、 (E_i, N_i) はその点の位置を表す。

一般に、 n 個の観測可能な量 $l_i; i=1, 2, \dots, n$ が m 個の未知変数 $x_j; j=1, 2, \dots, m$ の関数として次式のように表されるものとする。

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ l_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &\vdots \\ l_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &\vdots \\ l_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

l_i を観測して得た値を l_i^b とすると、これは観測誤差を含んでいるので、観測値に対し未知の補正値 v_i を加えて、最確値 l_i^a が得られたとする。

$$l_i^a = l_i^b + v_i \quad (3)$$

さて、式(2)は未知量 x_j に関して非線形であるものとし、テーラー展開して次式のように線形化する。

$$x_j^a = x_j^0 + \Delta x_j \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

$$\begin{aligned} f_i(x_1^a, x_2^a, \dots, x_m^a) &= f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0) \\ &+ \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)_0 \Delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_m} \right)_0 \Delta x_m \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 x_j^0 は x_j の近似値であり、 Δx_j はその補正量である。また、 x_j^a は x_j の最確値を表す。 $(\partial f_i / \partial x_j)_0$ は f_i を x_j で偏微分し、 x_j の値に近似値 x_j^0 を用いて計算したものである。 $(\partial f_i / \partial x_j)_0$ を a_{ij} で表せば、式(4)は次式のようになる。

$$l_i^a = l_i^b + v_i = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0) + \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta x_j \quad (5)$$

また、 $l_i^0 = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ と書くと次式のように表される。

$$v_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta x_j + (l_i^0 - l_i^b) \quad (6)$$

上式は観測方程式とよばれる。ここで未知量は v_i と Δx_j である。観測方程式の全体は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} a_{11}\Delta x_1 + a_{12}\Delta x_2 + \dots + a_{1m}\Delta x_m + (l_1^0 - l_1^b) &= v_1 \\ a_{21}\Delta x_1 + a_{22}\Delta x_2 + \dots + a_{2m}\Delta x_m + (l_2^0 - l_2^b) &= v_2 \\ &\vdots \\ a_{n1}\Delta x_1 + a_{n2}\Delta x_2 + \dots + a_{nm}\Delta x_m + (l_n^0 - l_n^b) &= v_n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式を行列表示すると、次のようになる。

$$A\Delta X + L = V \quad (8)$$

ここに、 ΔX , L , V , A は次のベクトルあるいは行列である。

$$\Delta X = \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{Bmatrix}, \quad L = \begin{Bmatrix} l_1^0 - l_1^b \\ l_2^0 - l_2^b \\ \vdots \\ l_n^0 - l_n^b \end{Bmatrix}, \quad V = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

これに最小二乗法を適用すると、 ΔX は次式の誤差関数を最小化することにより求められる。

$$V^T V \rightarrow \min \quad (9)$$

ここに V^T は V の転置を表す。式(9)に式(8)を代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} V^T V &= (L^T + \Delta X^T A^T)(A \Delta X + L) \\ &= \Delta X^T A^T A \Delta X + \Delta X^T A^T L + L^T A \Delta X + L^T L \end{aligned} \quad (10)$$

X と L はベクトルであるから、 $\Delta X^T A^T L = L^T A \Delta X$ となる。また、つぎの行列を導入すると、

$$\begin{aligned} N &= A^T A \\ U &= A^T L \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)は次式で表される。

$$V^T V = \Delta X^T N \Delta X + 2 \Delta X^T U + L^T L \quad (12)$$

式(12)を最小にするためには ΔX のすべての要素について $\partial(V^T V)/\partial \Delta X$ が零になる必要があり、このとき、次式が満足されなければならない。

$$\Delta X = -N^{-1}U \quad (13)$$

式(13)により未知量 X の更新量 ΔX が求められ、 X の最確値が次のように得られる。

$$X^a = X^0 + \Delta X \quad (14)$$

実際には、次式で得られた X^a をあらたな X^0 として計算が繰り返される。

$$X^a = X^0 + \lambda \Delta X \quad (15)$$

上式の λ は修正量を与える係数である。

観測記録によって重み $p_i; i=1,2,\dots,n$ を付ける場合、すなわち次式を最小化する場合には、

$$V^T P V \rightarrow \min \quad (16)$$

式(11)の行列 N および U は次式で求められる。

$$\begin{aligned} N &= A^T P A \\ U &= A^T P L \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、 P は重み行列であり、観測が相互に独立の場合は、次式の対角行列で表される。

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & & & 0 \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

なお、ここで扱っている断層線の同定問題について、式(11)あるいは式(17)の行列 A およびベクトル L を考えると、それぞれ次式で得られる。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_1(X)}{\partial N_{02}} \\ \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_2(X)}{\partial N_{02}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial E_{01}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial N_{01}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial E_{02}} & \frac{\partial \log A_n(X)}{\partial N_{02}} \end{bmatrix} \quad \dots(19)$$

$$L = \{\log A_1(X) - \log A_1, \log A_2(X) - \log A_2, \dots, \log A_n(X) - \log A_n\}^T \quad (20)$$

ただし、未知変数ベクトルは $X = \{E_{01}, N_{01}, E_{02}, N_{02}\}$ である。

2.2 震央の位置を考慮する場合

図-2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 $E_{01}, N_{01}, E_{02}, N_{02}$ 、

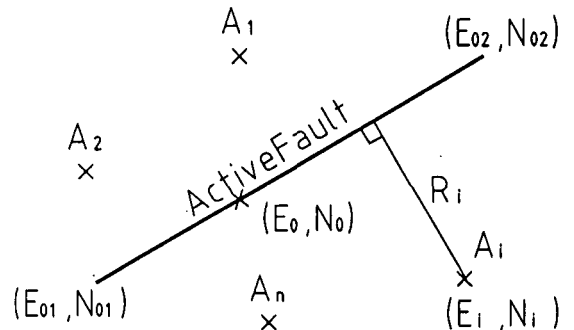


図-2 地震断層と震央および観測点配置

N_{02} の間にはつぎの関係が成り立つ.

$$\frac{N_0 - N_{01}}{E_0 - E_{01}}(E_{02} - E_{01}) + N_{01} - N_{02} = 0 \quad (21)$$

この関係を

$$G(X^a) = 0 \quad (22)$$

と表すものとする. $X^a = X^0 + \Delta X$ として, 上式をテーラー展開すると次式が得られる.

$$C\Delta X + W_c = 0 \quad (23)$$

ここに,

$$C = \left(\frac{\partial G}{\partial X} \right)_0, \quad W_c = G(X_0) \quad (24)$$

であり, 未知変数ベクトルを $X^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}^T = \{E_{01}, N_{01}, E_{02}, N_{02}\}^T$ とすると, ベクトル C は次式で表される.

$$C^T = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{(N_0 - N_{01})(E_0 - E_{02})}{(E_0 - E_{01})^2} \\ \frac{E_0 - E_{02}}{E_0 - E_{01}} \\ \frac{N_0 - N_{02}}{E_0 - E_{01}} \\ -1 \end{array} \right\} \quad (25)$$

したがって, 問題は, 式(16)を式(8)および(23)の条件の下で解くことになる. これにラグランジュの未定係数法を適用し, 次式を最小化することとする.

$$\varphi = V^T P V - 2K_L^T (V - A\Delta X - L) - 2K_C^T (C\Delta X + W) \quad (26)$$

ここに, K_L, K_C は未定係数である. φ を V と ΔX で微分して零とおけば次式が得られる.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial V} = V^T P - K_L^T = 0 \quad (27)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial \Delta X} = K_L^T A - K_C^T C = 0 \quad (28)$$

式(27)より, $V = P^{-1} K_L$ となり, これを式(8)に代入すると次式が得られる.

$$K_L = PA\Delta X - PL \quad (29)$$

さらに, 上式を式(28)に代入すると次式が得られる.

$$\Delta X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L + C^T K_C) \quad (30)$$

式(17)より, 上式は次のように表される.

$$\Delta X = N^{-1} (U + C^T K_C) \quad (31)$$

上式を式(23)に代入し, K_C を消去すると, 最終的に次式が得られるので, これを式(18)に代入し未知変数ベクトルを更新する.

$$\Delta X = N^{-1} \{U - C^T (C N^{-1} C^T)^{-1} (W_c + C N^{-1} U)\} \quad (32)$$

2.3 震央の位置を考慮し, 断層の長さを固定した場合

兵庫県南部地震(1995)のときのように, 断層の南西側に地震計がほとんど無いような, 偏った地震計配置の場合に, 上述の方法では一方の断層端点を特定し難い. そこで, マグニチュードに応じて断層の長さを予め決めてから同定を行うことが考えられる. 断層長さとマグニチュードの関係自体に不確定性が介在するが, 解が不定になるといった不都合は避けられる.

いま, 断層の長さを F_L , 断層端点 (E_{01}, N_{01}) から震央までの距離を F'_L とすると, 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.

$$G_1 = E_{01} + \frac{F_L}{F'_L} (E_0 - E_{01}) - E_{02} = 0 \quad (33)$$

$$G_2 = N_{01} + \frac{F_L}{F'_L} (N_0 - N_{01}) - N_{02} = 0 \quad (34)$$

ここに, F'_L は次式で表される.

$$F'_L = \sqrt{s^2 + t^2} \quad (35)$$

$$s = r \cdot \cos\left(\frac{N_0 + N_{01}}{2}\right)(E_0 - E_{01})\frac{\pi}{180}$$

$$t = r \cdot (N_0 - N_{01})\frac{\pi}{180}$$

また、断層の長さ F_L として、本研究では次式⁴⁾を用いることとした。

$$F_L = 10^{0.6M-2.9} \quad (36)$$

r および M は、それぞれ地球の半径 (6377.4km とした) およびマグニチュードである。

式(33)および(34)をテーラー展開して線形化すると、式(23)と同じ形の式を導くことができる。ただし、 C および W_C は次のように表される。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{cases} c_{11} = 1 - \frac{F_L}{F_L'} - \frac{F_L(E_0 - E_{01})}{F_L'^2} \frac{\partial F_L'}{\partial E_{01}} \\ c_{12} = -\frac{F_L(E_0 - E_{01})}{F_L'^2} \frac{\partial F_L'}{\partial N_{01}} \\ c_{13} = -1 \\ c_{14} = 0 \\ c_{21} = -\frac{F_L(N_0 - N_{01})}{F_L'^2} \frac{\partial F_L'}{\partial E_{01}} \\ c_{22} = 1 - \frac{F_L}{F_L'} - \frac{F_L(N_0 - N_{01})}{F_L'^2} \frac{\partial F_L'}{\partial N_{01}} \\ c_{23} = 0 \\ c_{24} = -1 \end{cases}$$

$$W_C = \{G_1(X_0), G_2(X_0)\} \quad (38)$$

これらを式(32)に代入して ΔX が得られるので、さらにそれを式(18)に代入して未知変数ベクトルを更新する。

以上のように、最大加速度の距離減衰式を基礎式として用い、断層を線分と見なして断層位置の同定問題が定式化できる。

ところで、観測記録には断層の破壊過程の影響（ディレクティビティ等）が含まれるため、そのような記録を用いた場合には見かけ上の断層を推定することになる。真の断層から少し偏ったものを推定する可能性があることは否めない。しかし、推定された断層を、地震直後の

第一近似的な被害想定に用いるという目的に限定すれば、断層破壊過程の影響が含まれた見かけ上の断層位置を同定することの方がむしろ意味があると考えられる。また、距離減衰式自体にも断層破壊過程の影響が反映されていると考えられるが、これについては特別な配慮はしていない。

3. 推定断層の精度評価

距離減衰式は、過去の地盤震動記録を基に統計解析を行って、その平均的な傾向をとらえたものであり、記録はその式のまわりでばらついている。そのようなデータを用いて断層を同定する場合、得られた結果の信頼性がどの程度であるかを評価することは重要である。

観測記録に含まれる真の誤差を E とする。 E は偶然誤差で相関がなく、次式で表されるものとする。

$$E = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}^T \quad (39)$$

各要素の期待値はつぎのとおりとする。

$$E\{\varepsilon_i\} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (40)$$

$$E\{\varepsilon_i \varepsilon_j\} = \begin{cases} \sigma^2 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (41)$$

ΔX の誤差を $E_{\Delta X} (= \{\varepsilon_{\Delta x1}, \varepsilon_{\Delta x2}, \dots, \varepsilon_{\Delta xm}\}^T)$ とすると、式(11)および(13)より次式が得られる。

$$E_{\Delta X} = -(A^T A)^{-1} A^T E \quad (42)$$

上式の転置 $E_{\Delta X}^T$ をとり、 $E_{\Delta X}$ との積を求めると次式が得られる。

$$E_{\Delta X} E_{\Delta X}^T = (A^T A)^{-1} A^T E E^T A (A^T A)^{-1} \quad (43)$$

式(41)より $E\{E E^T\} = \sigma^2 I$ の関係を用い、上式の両辺の期待値をとると次式が得られる。

$$\begin{aligned} E\{E_{\Delta X} E_{\Delta X}^T\} &= (A^T A)^{-1} A^T E\{E E^T\} A (A^T A)^{-1} \\ &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} A^T A (A^T A)^{-1} \\ &= \sigma^2 (A^T A)^{-1} \\ &= \sigma^2 N^{-1} \end{aligned} \quad (44)$$

観測記録に重みを考慮する場合は、式(44)において、 N に式(17)を用いればよい。上式の σ^2 は観測誤差の分散であり、その不偏推定量は次式で表される。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \hat{v}_i^2 / (n - m) \tag{45}$$

$\hat{v}$ は i 番目の観測量とその推定量との残差を表し、 m は未知変数の総数を表す。重みを考慮する場合には、次式が用いられる。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i \hat{v}_i^2 / (n - m) \tag{46}$$

したがって、 ΔX の分散は次式で表される。

$$\sigma^2_{\Delta x_j} = N_{jj}^{-1} \sum_{i=1}^n p_i \hat{v}_i^2 / (n - m) \tag{47}$$

ここに、 N_{jj}^{-1} は N^{-1} における主対角線の j 番目の係数を表す。

ところで、未知変数の X の最確値が式(15)で表されるため、最確値 X^a の分散は次式で表される。

$$\sigma^2_{x_j^a} = \lambda^2 \sigma^2_{\Delta x_j} = \lambda^2 N_{jj}^{-1} \sum_{i=1}^n p_i \hat{v}_i^2 / (n - m) \tag{48}$$

震央あるいは震央と断層長さを考慮する場合には、式(44)の $E\{E_{\Delta X} E_{\Delta X}^T\}$ として次式が導かれる。

$$E\{E_{\Delta X} E_{\Delta X}^T\} = \sigma^2 Q^{-1} \tag{49}$$

ただし、 Q^{-1} は次式で表される。

$$Q^{-1} = N^{-1} - N^{-1} C^T (C N^{-1} C^T)^{-1} C N^{-1} \tag{50}$$

また、式(49)の σ^2 は、未知変数間の拘束条件数 u （震央を考慮する場合は $u = 1$ で、震央を考慮し断層長さを固定する場合は $u = 2$ ）によって次式で表される。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 / (n - m + u) \tag{51}$$

したがって、 X^a の分散は次式で表される。

$$\sigma^2_{x_j^a} = \lambda^2 Q_{jj}^{-1} \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 / (n - m + u) \tag{52}$$

4. 数値計算結果

4.1 断層同定のシミュレーション

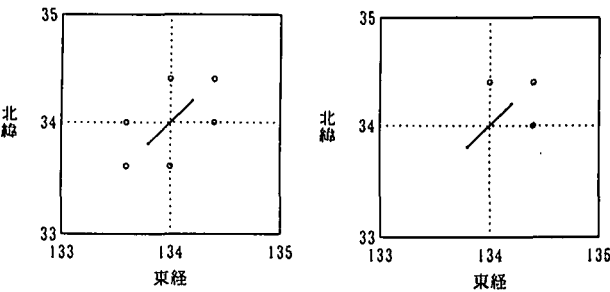
仮定した断層と観測点の位置を図－3に示す。断層端点の経緯度はそれぞれ(133.8°，33.8°)，(134.2°，34.2°)である。この断層線を真の断層と見なして、6個または3個の観測点における最大加速度を距離減衰式から計算し、これを観測記録の代わりに用いる。観測点の経緯度および最大加速度を表－1に示す。マグニチュードは7.7、断層の深さは10km、また震央位置は(134.0°，34.0°)とした。

6観測点の場合は、

- A)震央を考慮しない場合
- B)断層線が震央を通ることを考慮した場合
- C)断層線が震央を通り、かつ、断層長さを固定した場合

のいずれのケースでも断層の推定値は真値に一致した。

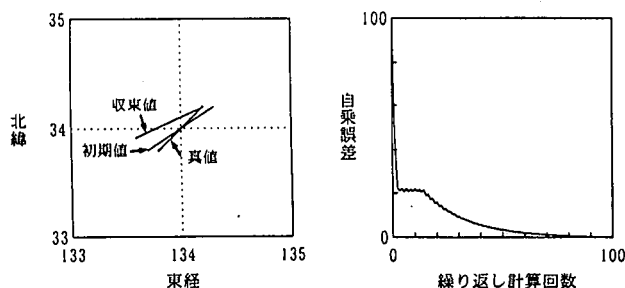
しかし、3観測点の場合は、A)およびB)において、式(9)の誤差関数がほぼ零になるにもかかわらず、断層線の一方の端点は真値に収束するが、他方は真値に収束しないという結果になった。A)およびB)の同定結果を



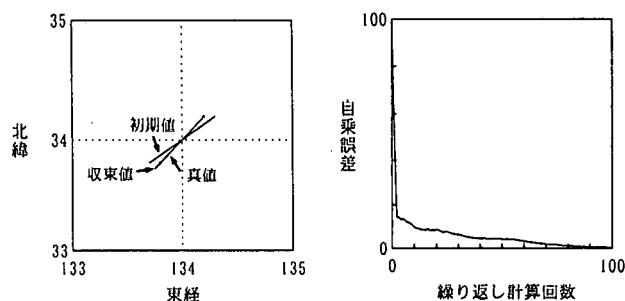
(a) 6観測点 (b) 3観測点
図－3 仮定した真の断層と観測点配置

表－1 観測点の位置と最大加速度

番号	東経	北緯	最大加速度 (gal)	対数最大加 速度(gal)
1	134.4	34.0	323.7	2.510
2	134.4	34.4	320.8	2.506
3	134.0	34.4	320.8	2.506
4	133.6	34.0	323.5	2.510
5	133.6	33.6	320.3	2.506
6	134.0	33.6	320.3	2.506



(a)断層の収束値 (b)誤差関数
図-4 解析条件 A)による3観測点の同定結果



(a)断層の収束値 (b)誤差関数
図-5 解析条件 B)による3観測点の同定結果

それぞれ図-4と図-5に示す。このように偏った観測点配置の場合は、観測点での最大加速度が一方の断層端点の位置の情報のみから説明できるため、他方の位置が不定になってしまう。C)により解析した場合は、一方の端点と同定されれば、他方が自動的に決まるため、このような不都合を避けることができ、安定した結果が得られる。

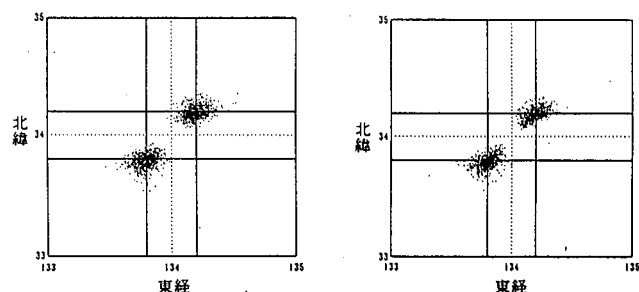
4.2 解析条件による推定精度の違い

距離減衰式は、これまでの地震で観測された最大加速度と断層距離（断層から観測点までの最短距離）の関係を回帰した式であり、データは式のまわりでばらついていて、したがって、距離減衰式を基礎式として定式化した同定手法で得られた推定値には誤差が含まれる。

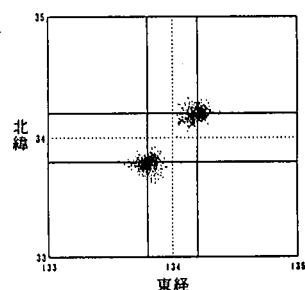
モンテカルロシミュレーションにより、前節のA)、B)およびC)について、未知変数の推定精度を比較する。

解析はつぎの手順で行った。図-3の6観測点モデルを用い、表-1に示す各観測点の対数最大加速度を平均値とする標準偏差 0.05 の正規乱数を発生させる。それらを観測された最大加速度の対数値と見なし、断層端点に初期値を与えて未知変数を同定する。以上の手順を1000回繰り返す。

ここでは、A)、B)およびC)の解析条件による推定精度の違いを比較することが目的であり、同定の際の解の発散を防ぐために標準偏差を0.05と設定した。



A)震央未知 B)震央既知



C)震央および断層長さ既知

図-6 1000組の模擬観測記録に対して推定された断層端点

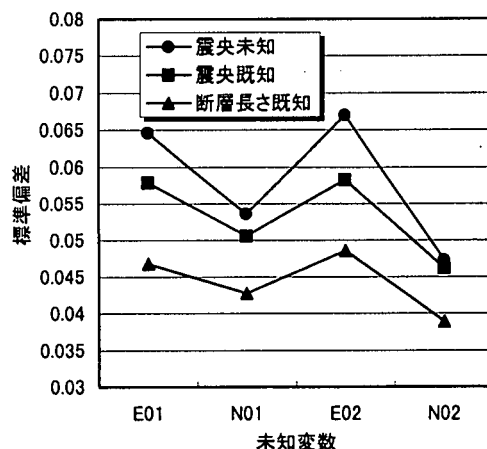


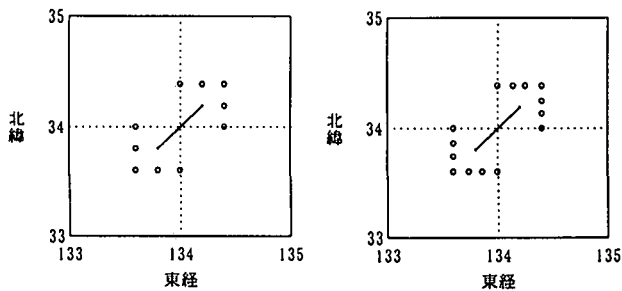
図-7 未知変数の標準偏差

図-6は、1000組の模擬観測記録（対数最大加速度）に対して、推定された断層端点の経緯度を示す。図-7は、各未知変数の推定誤差を標準偏差で表したものであり、震央や断層の長さを考慮することで推定精度が向上することがわかる。

4.3 観測点の数と位置が同定結果に及ぼす影響

断層位置の同定問題の基本的性質を理解するために、観測点の数と位置が未知変数の推定精度に及ぼす影響を検討する。

観測点の数が断層端点の推定精度に及ぼす影響を調べるために、図-3に示す6観測点のモデルに加え、図-8に示すような、観測点が10および14の場合について、



(a)10 観測点 (b)14 観測点

図-8 観測点の配置

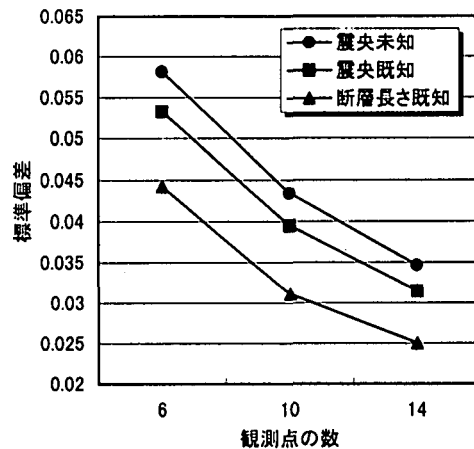
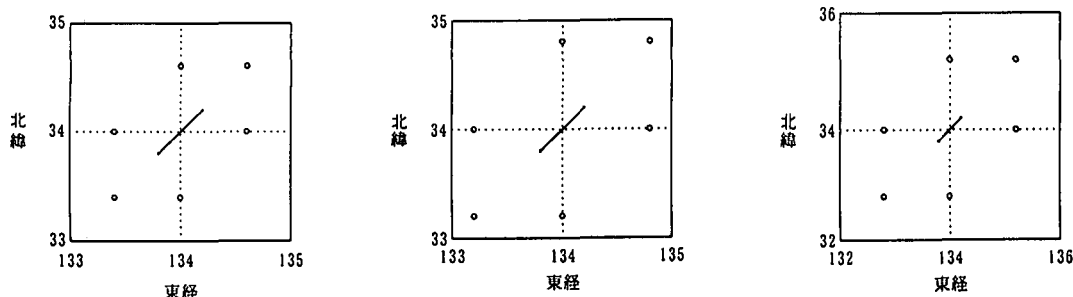


図-9 観測点の数が異なる場合の未知変数の標準偏差 (平均値)



(a)観測点距離 2 倍

(b)観測点距離 3 倍

(c)観測点距離 5 倍

図-10 観測点の配置

前節に述べた手順でモンテカルロシミュレーションを行った。図-9は、A)、B)およびC)の各ケースにおいて、未知変数の標準偏差の平均値を表している。観測点の数が多くなれば、未知変数の推定精度が良くなる傾向が表されている。

つぎに、観測点の位置が断層端点の推定精度に及ぼす影響を調べるために、図-3に示す6観測点のモデルに

加え、図-10に示すような、断層から観測点までの距離を2倍、3倍および5倍にしてモンテカルロシミュレーションを行った。その結果を図-11に示す。観測点が断層から遠くなれば、それだけ推定精度が悪くなる傾向がある。このことは、すべての観測記録を同じように扱うより、断層からの距離に応じた重みを付けて扱う方が合理的であることを示唆する結果といえる。

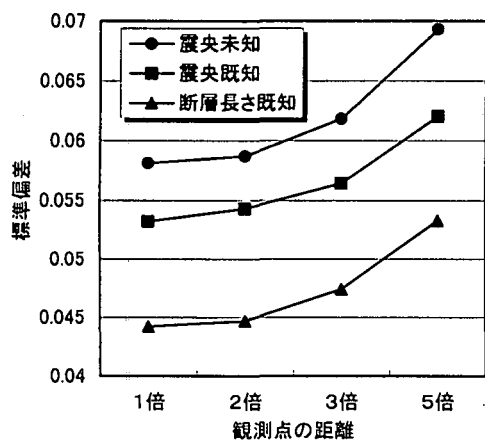


図-11 観測点の距離が異なる場合の未知変数の標準偏差 (平均値)

4.4 推定された断層の精度評価シミュレーション

前章において、未知変数である断層端点の経緯度の推定精度が式(48)または式(52)で評価できることを示した。ここでは、数値計算により、その妥当性を検証する。

解析には、前節で述べた14観測点のモデルに対するモンテカルロシミュレーションの結果を用いた。そして、それぞれの未知変数の推定誤差(推定値と真値との差)を式(48)または式(52)で得られる $\sigma_{x_j}^2$ で除し、その分布を標準正規分布と見なすことができるかどうかに着目した。図-12～図-14に、その頻度分布と理論度数を表す曲線を示す。この頻度分布を正規分布と仮定した場合の χ^2_0 値を表-2に示す。 $\chi^2_{0.01,24} = 42.98$ であるから、解析条件A)の E_{02} とB)の N_{02} を除き、有意水準1%で頻度分布は正規分布と見なすことができる。したがって、

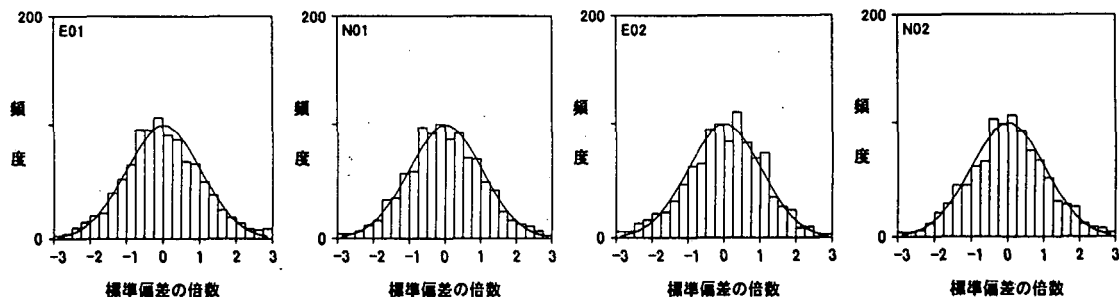


図-12 震央を未知としたときの推定誤差の頻度分布およびその理論度数（曲線）

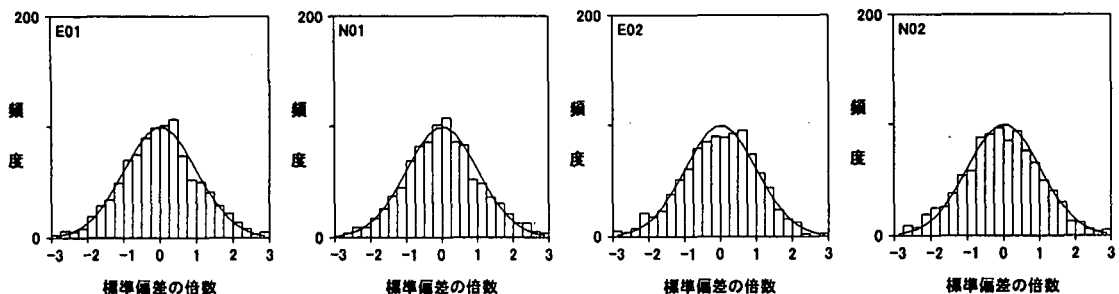


図-13 震央を既知としたときの推定誤差の頻度分布およびその理論度数（曲線）

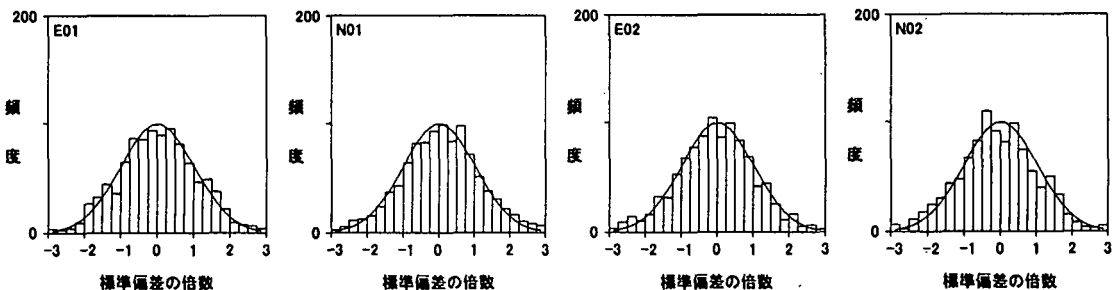


図-14 震央および断層長さを既知としたときの推定誤差の頻度分布およびその理論度数（曲線）

表-2 未知変数の推定値の頻度分布を正規分布と仮定した場合の χ^2_0 値

解析条件	χ^2_0 値			
	E_{01}	N_{01}	E_{02}	N_{02}
A)	41.63	21.20	44.11	26.72
B)	21.47	23.16	32.92	37.53
C)	30.74	38.10	40.49	53.64

前節で述べた式(48)または式(52)で得られる標準偏差は、推定された未知変数の精度を評価する指標としてはほぼ妥当であり、推定値±標準偏差の中に真値が 68.3 パーセントの確率で存在するという解釈が成り立つ。ただし、観測点の配置や数および観測値のばらつきの程度によっては、このような解釈が必ずしも成り立つとは限らない。しかし、それは本手法の適用限界に関する問題であり、別途明らかにする必要がある。

5. 1995 年兵庫県南部地震への適用

1995 年兵庫県南部地震に本手法を適用した結果について述べる。最大加速度の記録については、文献 5)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(1)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、ここでは、水平 2 成分のうち最大加速度の大きい方の値もしくは 2 成分が合成された値を用いていることに注意する必要がある。図-15 に観測点の位置を黒丸で示す。また、図-16 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。なお、文献 5)には各観測点の地盤種別が記載されており、表層地盤による増幅の影響をつぎの方法で取り除いた。地盤種別は、①岩盤、②硬質地盤、③標準地盤、④軟弱地盤の 4 種類であり、それぞれ文献 6)の Rock, Hard soil, Medium soil, Soft soil に対応するものとして、地盤種

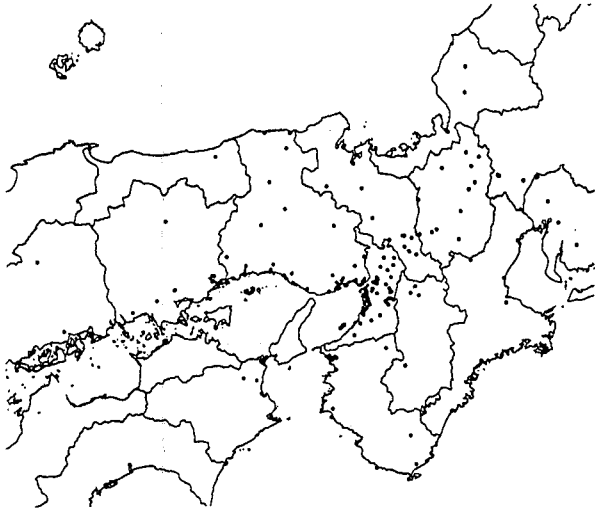


図-15 1995年兵庫県南部地震の地震計配置

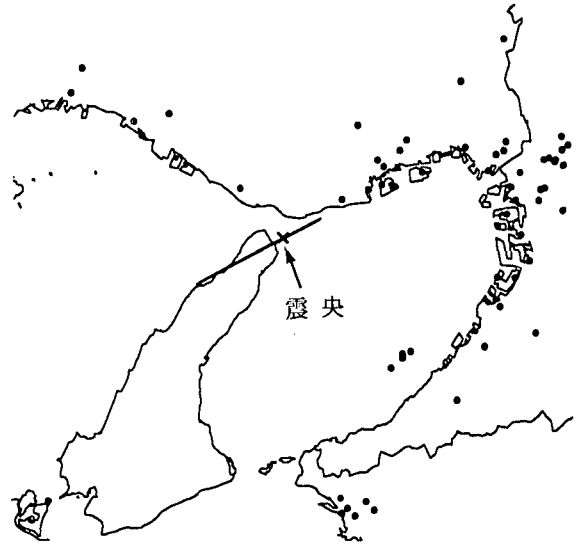


図-17 断層の初期値

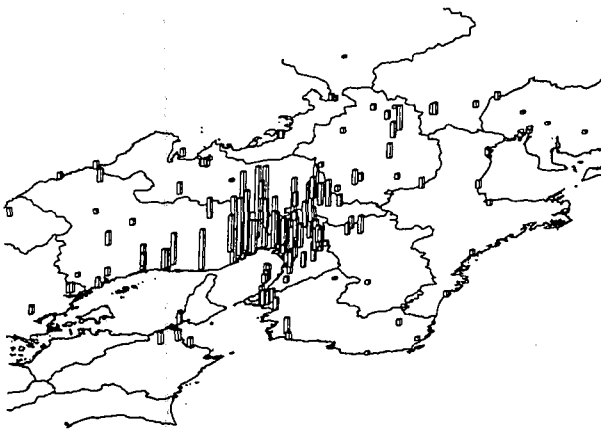


図-16 1995年兵庫県南部地震における最大加速度

別が①, ②, ③, ④の記録をそれぞれ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⁹⁾。

震央は東経 135.038 度, 北緯 34.595 度とし, マグニチュード 7.2, 断層の深さ 0km とした。

図-17 に解析の際, 初期値として与えた断層位置を示す。図-18 および図-19 に, それぞれ解析条件 B) と C) により同定された断層を示す。後者においては, 式(3.6)より断層の長さを 26km とした。どちらも, 断層線の傾きはほぼ同じであるが, 余震分布から推定される断層 (図-20 参照) と比べると, やや北向きに推定されている。

4.3 で検討したように, 観測点が断層から離れると推定精度が悪くなることから, 断層の近くで得られた記録に重みを付けることとした。一般に, 断層からの距離が近いほど最大加速度が大きいと考えられることから, 最大加速度に比例する大きさの重みを付けて解析を行った。



図-18 震央を既知として推定された断層



図-19 震央および断層長さを既知として推定された断層

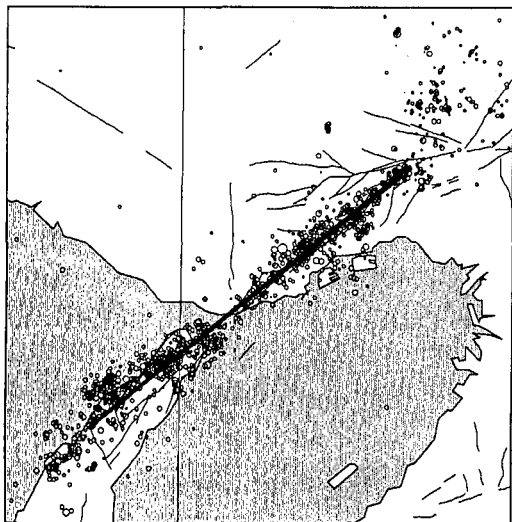


図-20 地震後1ヶ月の余震分布から推定される断層位置 (文献7) に加筆

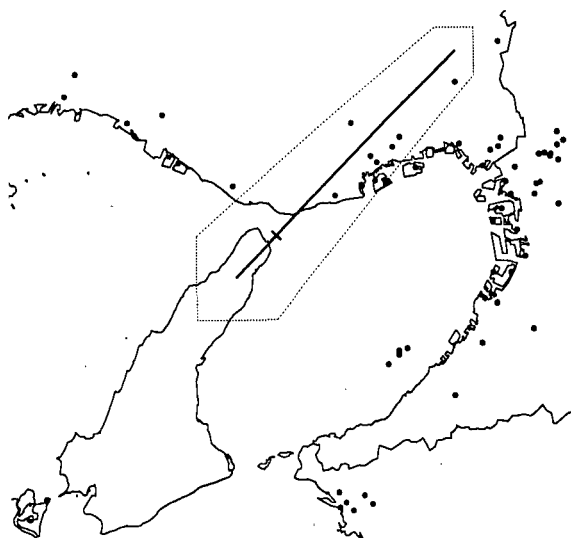


図-21 震央を既知として推定された断層 (観測記録に重みを付けた場合) とその標準偏差

具体的には、式(18)の p_i に観測点 i の加速度を代入した。その結果を図-21～図-24に示す。図-21および図-23の点線は式(52)で計算される標準偏差を表している。解析条件B)で推定された断層 (図-21) が、余震分布に比べて北東側で若干伸びているのは、ディレクティビティの影響とも考えられる。図-22および図-24は、それぞれ解析条件B)とC)により推定された断層に基づき、断層から観測点までの最短距離と最大加速度記録の関係をプロットしたものであり、距離減衰式も表示している。最大加速度記録は前述の方法により基準化した値で表している。最大加速度の距離減衰式まわりのばらつきは、標準偏差で、それぞれ0.250および0.249であった。

図-21および図-23の推定された断層は、図-20の

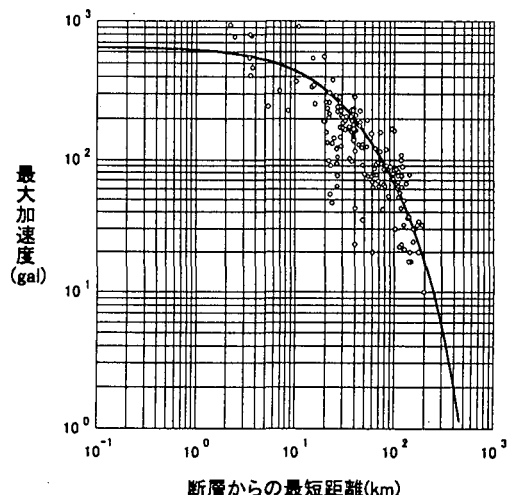


図-22 震央を既知として推定された断層 (観測記録に重みを付けた場合) に基づく最短距離-最大加速度の距離減衰式まわりのばらつき

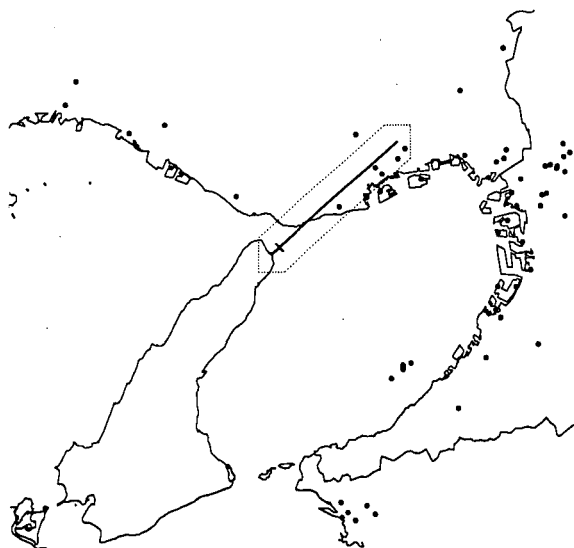


図-23 震央および断層長さを既知として推定された断層 (観測記録に重みを付けた場合) とその標準偏差

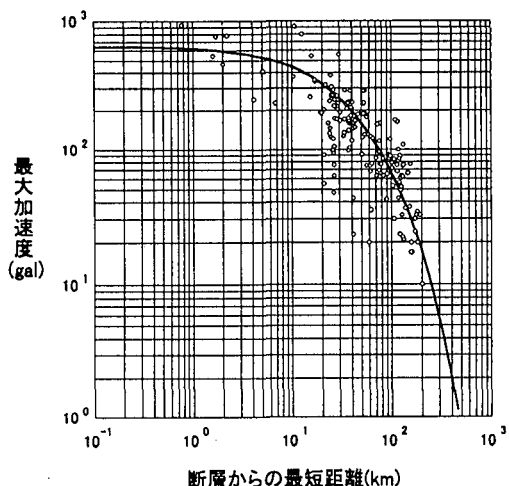


図-24 震央および断層長さを既知として推定された断層 (観測記録に重みを付けた場合) に基づく最短距離-最大加速度の距離減衰式まわりのばらつき

余震分布から推定される断層との対応も良好であり、実記録を用いても妥当な結果を得ることができた。

しかし、観測値に対する重みの付け方については、さらに検討が必要があり、この点に関して今後合理的な方法を見いだすことが重要である。

6. おわりに

本研究は、地震断層を線分で近似し、最大加速度から地震発生後速やかに地震断層の位置を特定し、また、その精度についても評価できる方法を提案した。

以下、本研究を通じて得られた結果を述べる。

- (1) 線分として近似した断層の両端点の経緯度を距離減衰式に基づいて同定する従来の方法に改良を加え、断層線が震央を通ること、また、同定すべき断層に対して地震計配置の偏りが予想される場合に、断層長さを固定することで安定した結果が得られるようにした。
- (2) 最大加速度の記録から推定される断層端点の経緯度の信頼性を、標準偏差というかたちで同定結果から求める方法を展開し、数値計算により、その妥当性を検証した。
- (3) 観測点の数と配置が同定の精度に及ぼす影響を検討し、観測点の数が少ないほど、また観測点の距離が遠いほど、推定精度に悪影響を及ぼすことを数値計算により明らかにした。
- (4) 1995 年兵庫県南部地震に本研究で提案した手法を適用した。上述 (3) の結果を受けて、観測記録に対して、水平最大加速度の大きさに比例した重みを付けて計算を行ったところ、余震分布から推定される断層と対応した良好な結果が得られた。今後の課題を以下に述べる。
- (1) 本研究で展開した断層位置推定法は、用いる距離減衰式の精度に大きく影響される。ここでは、Fukushima and Tanaka³⁾による式を用いたが、地震発生の際に得られるデータの種類に応じて距離減衰式を適当に選択できるようにした方がよい。
- (2) 断層長の短いものについては推定誤差の中に埋もれてしまう可能性がある。そのような検知能力の問題や、断層線の初期値の問題等、本手法の適用限界について明らかにする必要がある。
- (3) 1995 年兵庫県南部地震への本手法の適用に際し、観測記録に対して最大加速度に比例する重みを付

けたが、断層の推定精度が観測点の断層からの距離あるいは加速度の大きさに比例するという結果が得られているわけではない。観測点の断層からの距離と断層線の推定精度について、その定量的な関係を明らかにし、観測記録に対する合理的な重みの付け方を見いだす必要がある。

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 5) (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。また、本文の 3. で展開した推定精度評価手法の定式化にあたっては、文献 8) (著書) を参考にさせて頂いたことを付記する。

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) 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.
- 3) Y. Fukushima and T. Tanaka: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.80, pp.757-783, 1990.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 前掲 5) の p.80.
- 8) 田島 稔・小牧 和雄: 最小二乗法の理論とその応用 [改訂版], 東洋書店, 1996.

(1999 年 4 月 23 日受付)