

## 1984年長野県西部地震の断層モデル

### —三角点測量データの解析—

地震研究所 山科 健一郎

国土地理院 多田 堯

(昭和60年5月20日受理)

#### 要 旨

三角点網の辺長距離の変化から、1984年長野県西部地震 ( $M6.8$ ) の断層モデルを作成した。用いたのは8点からなる三角点網の観測データで、ここでは1978年と1984年(11月)に改測が行なわれている。四角い形の断層上で一様なすべりが生じたものと仮定すれば、断層の走向  $N70^{\circ}E$ 、傾き  $74^{\circ}N$ 、スリップ角  $24^{\circ}$  (正断層成分を含む右横ずれ)、長さ  $14\text{ km}$ 、幅  $2\text{ km}$ 、上端の深さ  $0.5\text{ km}$ 、くいちがい  $1.6\text{ m}$  という値がそれぞれ得られた。辺長歪みの変化から求めた断層モデルも、長さが少し短い ( $11\text{ km}$ ) のを除けば、ほぼ同様の結果を与える。これらは地震観測その他のデータとも概ね調和する。ただし余震域の広がりとは比べ、断層の幅は短かすぎる。これは、くいちがいが浅い所に集中していることを示すのかもれない。今回の解析に用いた三角点網は、震央域の一部をおおっているにすぎず、観測点網のみかけの回転や平行移動を無視できない。ここでは辺長距離や辺長歪みのデータから断層パラメータを解析したが、観測点網の回転や平行移動とは無関係に議論できるという点で、有意義な方法である。

#### 1. はじめに

1984年9月14日の長野県西部地震(気象庁によるマグニチュード  $M6.8$ ) の発生後、震央域の一部において三角点の改測が行なわれ、前回測量された1978年7~8月との差が検出された(国土地理院, 1985; 多田, 1985)。測量されたのは本震の震源域の東端付近の2等および3等三角点で、1978年と1984年の両回とも共通して測られたのは、そのうちの8点である(Figs. 1-2)。これらの三角点は、御岳湖北側の1246mピークを中心に、他の7点がこれを取り囲む形になっていた。三角点間の距離は2~4kmで、全体として東西約6km、南北約7kmの広がりを持っている。なお、地震後の改測は1984年11月であるから、本震だけでなく余震活動の影響も含まれている。

今回の地震の余震域は、東北東~西南西に10~10数km延びていた(例えば、気象庁, 1985; 名古屋大学, 1985; 東京大学, 1985; 国立防災科学技術センター, 1985)。この事実からも判るように、改測された三角点網は震央域の一部をおおっているにすぎない。従ってこのデータは、断層運動の全体像を知る目的には必ずしも適さないが、そのかわり、震源域のごく近傍の変動がとらえられているわけであるから、地下の断層運動の実態を伝える重要な情報を持っている。しかし、震央域を囲む広い範囲の測量でないために、不動

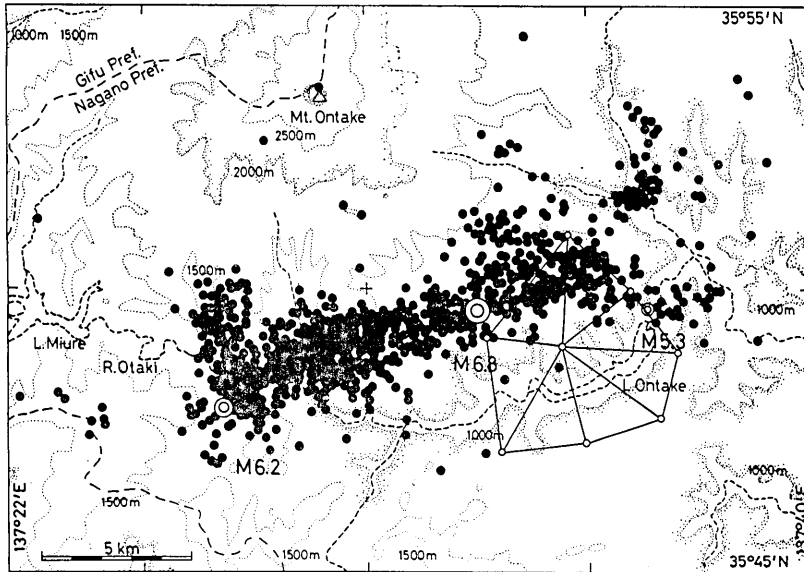


Fig. 1. Location of the network of the resurveyed trilateration points (open circles) and the epicentral distribution of the mainshock ( $M=6.8$ ) and aftershocks (double and solid circles) during September 14–October 31, 1984 (after NAGOYA UNIVERSITY, 1985).

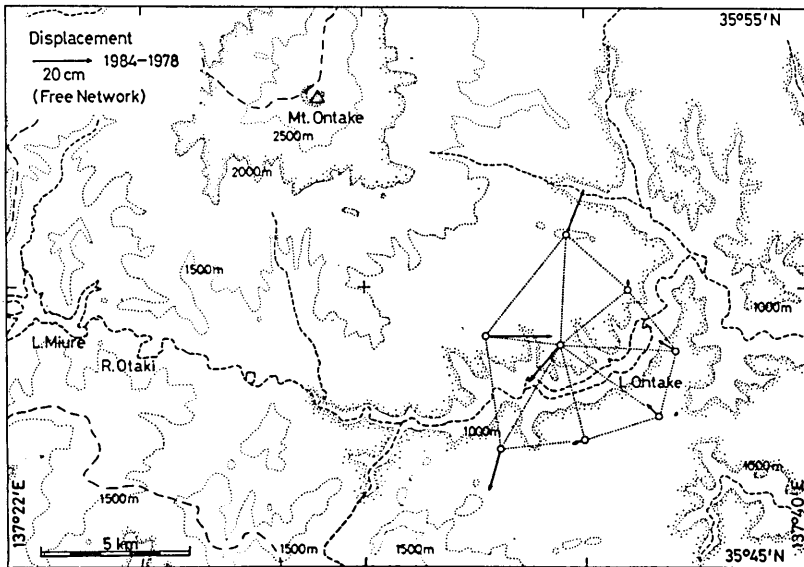


Fig. 2. Observed displacements of the trilateration points during 1978–1984 (GEOGRAPHICAL SURVEY INSTITUTE, 1985). In this figure, the rotation and lateral shift of the network are assumed to be zero.

点を仮定することや、よく使われるフリー網平均（観測網全体の回転や平行移動を0と仮定する）で観測値を処理することが実状に合わない可能性が大きく、データの取り扱いには配慮が必要である。今回の地震は、そうした問題を考えるよい機会であった。そこで、震源域近傍の小ネットの測量値から断層運動の情報をひきだす際に留意すべき点に注意しながら、1984年長野県西部地震の断層モデルを求めることにする。

## 2. データの選択

三角点網の測量結果は、観測値そのままではなく、変位ベクトルや歪みの変化（主軸の方向とその大きさ）として公表されることが多い。ただし歪みの大きさは、通常は最大せん断歪み（差歪み）と体積歪みの値で表現される。データに基づいて解析を始める前に、これらのデータの性格について考えておこう。三角点網（や放射基線網）の変動は、今述べた 1) 変位ベクトル、2) 歪み変化の主軸の方向とその大きさ、他にも、3) 辺長距離の変化、4) 辺長歪みの変化、5) 角度変化などで表わすことができる。実際の測量では、かつては経緯儀を用いた 5) の角度変化の測定（三角測量）が中心であったが、最近では、光波測距儀を用いた 3) の辺長距離の測定が普及している。変位ベクトルや歪みの主軸の変化は、これらの測定値に基づいて計算される。

さて、1) の変位ベクトルは、観測網全体の回転運動や平行移動の有無によってその方向や大きさが変わることには留意する必要がある。観測網全体の回転や平行移動は、測量すれば判るという性質のものではない。変位ベクトルを用いた表現は、確かに直感的にも理解しやすい表現ではあるが、回転や平行移動に対する問題点を含んでいることを忘れてはならない。これに対し、1) 以外の 2~5) の表現には、回転や平行移動の影響が含まれない。この点は大きな利点である。ただし 5) の角度変化による表現には、距離の情報が全く含まれない。日本における三角点網の測量には、ほとんど必ず距離の測定が（一部または全面的に）伴っているから、角度変化だけの表現では、せっかくの情報が十分には生かされない。

さて、上記のどの表現に基づいたとしても、それぞれデータを一番よく説明できるモデルを作成することが可能である。しかし、どの表現に注目した解析を行なうかによって、最適モデルを求める手続きやその結果に、差が生じる。解析手順が単純で、また後述するようにその意味が明確なものとして、筆者は、他の特別な理由がなければ 3) の辺長距離や 4) の辺長歪みの変化に注目するのがよいと考えている。例えば 1) の変位ベクトルをとり上げた時には、回転や平行移動に対する自由度（純粋な回転や純粋な平行移動ならそれぞれ 3 つと 2 つ）を適宜つけ加えた上で最適解を求める必要がある。これは、解析の能率という点で、無駄が多い。2) の主歪みの変化を議論すれば、その点の困難は回避できる。しかし主軸の方向（角度）と歪みの大きさを、互いにどのような重みをつけて評価するかという点に、任意性が生じる。例えば、角度が  $1^\circ$ 、歪みが  $2 \times 10^{-6}$  だけ観測と異なるモデルと、角度が  $2^\circ$ 、歪みが  $1 \times 10^{-6}$  だけ異なるモデルとでは、どちらがよく合うモデルと言えるだろうか。その約束のしかたいかんで、最適解の内容も当然異なってくる。角度を用いているのをやめ、あらかじめ任意に決めた座標軸に関する歪みの各成分  $(\partial u_x / \partial x,$

$\partial u_y/\partial y$ ,  $(\partial u_y/\partial x + \partial u_z/\partial y)/2$  をとり上げてよいが、それでもやはり法線方向の歪みとせん断歪みとは性格が異なるから、今述べたような問題点を解消することはできない。他方、5) の角度変化のデータには、前述のように距離の情報が含まれない。角度変化と距離の変化のデータを併用することはもちろん可能だが、仮にそうしたなら解析の複雑さを増し、2) と同様、角度と距離をどういう重みをつけて比べるのかという任意性が残される。

これらに対し、3) の辺長距離または 4) の辺長歪みの変化に注目すれば、今指摘した難点は解消する。もともと、最近の測量では光波測距儀を用いた辺長距離の測定が主体となっている。いったん変位ベクトルや主歪みを計算で求めてから、改めてそれに合うモデルを作成するという手順を踏む必然性はない。特別な目的がない限り、辺長変化のデータを直接解析した方が、ずっと単純であろう。各測線の距離に注目するか、それを線歪みに換算したものに注目するかについては、あまり大きな差はない。測定誤差の内容などを考えながら、どちらの方法を採るか決めればよいであろう。

なおここで、独立なデータの数について整理しておこう。具体例があった方がよいので、Fig. 1 のような三角点網での水平変動だけを考える。3) 4) の場合、辺の数は 14 あり、これがそのままデータの数となる。しかし、その全部が独立というわけではない。個々の三角形が並び、全体としてひとつの大きな七角形を作っているが、幾何学的な制約のために独立なデータの数が 1 つだけ減少する。1) の変位のデータの場合には、各測点 (三角点) について 2 つずつ、合計 16 の独立なデータが与えられる。独立なデータの数が 3) や 4) の場合の 13 よりも増えるが、その分だけ観測網の回転や平行移動に結びついたパラメータの数が増えることは、先に述べた。2) の主歪みのデータの場合には、各三角形要素ごとに 3 つずつのデータが与えられるから、Fig. 1 の例では、データの数の合計は 21 になる。しかし、隣接した三角形要素は互いに辺を共有し、この辺の上で歪みのある成分が連続になることを考えると、独立なデータの数は 8 つ減少し、結局 13 個となる。5) の角度変化の場合には、三角形の内角の和が  $180^\circ$  であることから、各三角形要素ごとに 2 つずつ、合計 14 個の角度のデータが与えられる。しかし、最後の三角形の形状は他の三角形によってすでに決められている。このため、余分に数えた 2 つを引き算すれば、独立なデータの数は結局 12 個となる。他の場合よりも 1 つ数が少ないのは、距離の情報が含まれないことに対応している。

### 3. 断層モデル

ここではまず、国土地理院 (1985) による三角点網の測量結果 (Fig. 2) から、辺長距離の変化のデータに最もよくあてはまる断層モデルを求める。すなわち、辺長距離の変化の観測値とモデルの差の標準偏差を最小にするモデルを捜す。三角形要素の形を見ると、極端に細長い三角形はない。そのことから予想されるが、辺長歪み変化のデータに最もよくあてはめるモデルも、だいたい似たようなモデルとして求まるが、それについては後述する。

断層モデルとしては、単一の矩形の断層面を考える。本震の主断層の西端と東端付近で発生した大きな余震 (それぞれ  $M6.2$  と  $M5.3$ ) は、本震とは異なる走向の断層運動によ

Table 1. Fault parameters inferred from the distance change (during 1978-1984) between the 8 trilateration points. The range in which the standard deviation (of observation minus calculation) is less than twice as much as the best fitting model is shown in parentheses. The ranges for the fault location indicate the deviation at the eastern edge of the fault.

Location (center of the upper margin)		
	137°30.47' E	-0.3~0.5km
	35°48.64' N	-0.2~0.2km
(Depth)	0.5 km	( 0.3~0.7km)
Strike	N70° E	( 68°~71° E )
Dip angle	74° N	(57° N~87° S )
Slip angle	24°	( 9°~37° )
Length	14.0 km	( 3.3~∞ km)
Width	1.9 km	( 1.0~3.9m )
Fault slip	1.6 m	( 1.2~2.0m )

って生じたが(例えば, 名古屋大学, 1985; 東京大学, 1985), 現在とり上げている観測データではそれらを分離して求めることはむずかしい. さらに, くいちがい量は断層面上のいたる所で一定とし, 断層の上端と下端は地表に平行とする(断層の位置が一方の端から他方に向かってだんだん深くなるというようなことは考えない). ポアソン比  $1/4(V_p/V_s = 1.732)$  の一様な半無限媒質を仮定する.

このように単純化しても, 求めるべき断層パラメータは, 断層の走向, 傾き, スリップ角, くいちがい量, 長さ, 幅, 東端の位置  $(x, y)$ , 上端の深さ, の合計 9 つある. 独立なデータ数は 13 あるから, これをすべて未知数として求めることは, 原理的に不可能ではない. 測定誤差が解を不安定にすることを心配して, 初めはいくつかのパラメータをもっともらしい値に固定して予備的な解を求めた. しかし, 今回用いたデータは, 9 つのパラメータをすべて未知数として求めても, 最終的にかなりもっともらしい値が得られた. この時のデータとモデルの差の標準偏差は 1.8 cm である.

求められた結果を Table 1 に, 各三角点の変位ベクトルを Fig. 3 に示す. 観測値と視覚的に比較できるように, Fig. 3 には, Fig. 2 のデータに適当な回転(この場合右回りに  $0.0005^\circ$ ) を加えたものを新たな観測値として重ねて示してある. これを見れば, 単純な断層モデルを仮定して得られた今回の結果が, かなりよく観測データを説明していることがわかる. 実際の辺長距離の変化の観測値と求めたモデルからの計算値の相異は, Fig. 4 に示されている.

今回得られた断層の走向 (N70°E). 傾きが高角度であること (北へ 74° 傾斜), 主として右横ずれ (断層変位 1.6m) であることなどは, 発震機構 (例えば, 気象庁, 1985; 名古屋大学, 1985; 東京大学, 1985; 国立防災科学技術センター, 1985) や地震波形の解析結果 (例えば, 三雲ほか, 1985; 武尾・三上, 1985) とも概ね調和する.

断層の長さ約 14 km, 幅約 2 km, 上端の深さ 0.5 km という値は, 余震分布の広がり

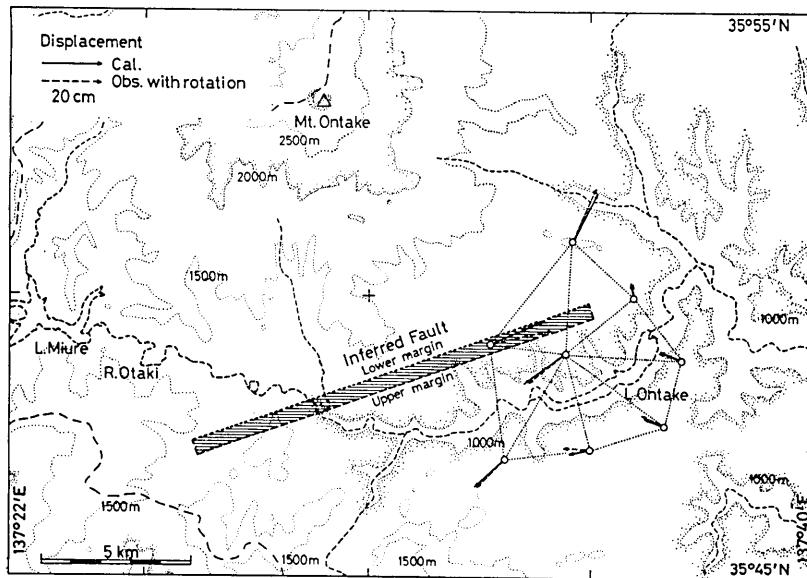


Fig. 3. Location of a proposed fault which is fitted to the distance change of the trilateration points. Solid and broken arrows show the calculated and observed displacements, respectively. The observed displacements differ slightly from those in Fig. 2, because they include little clockwise rotation of the network by 0.0005 degree in this figure.

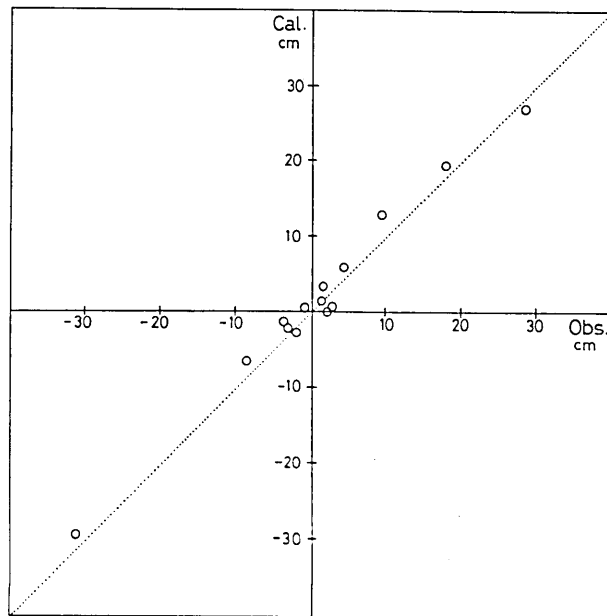


Fig. 4. Observed and calculated distance changes between trilateration points.

(例えば、名古屋大学, 1985; 東京大学, 1985) と比べて、そうかけ離れていない。確かに断層の長さが約 14 km というのは、本震の断層モデルとしては長すぎるかもしれない。しかし、三角点の改測が行なわれたのは本震発生から 2 ヶ月後の 1984 年 11 月であった。従って、主要な余震活動の影響も含まれており、断層の長さがみかけ上長く求まったとしても不思議はない。なお、余震分布を見ると、余震域の西方では東方よりも少し深い所 (深さ 10 km 前後) まで広がっている (例えば、名古屋大学, 1985)。その影響が、単純な仮定をして断層パラメータを求めた時、断層の長さをみかけ上長くすることとして現われたのかもしれない。あるいは、くいちがい量が西方で大きいことも考えられる。

一方、断層の幅が約 2 km というのは、恐らく少し短かすぎる。比較的大きな断層変位が、浅い所に集中していたことを示すのかもしれない。

今回の地震では、対応する地震断層は地表では発見されなかった (松田ほか, 1985; 山科ほか, 1985)。しかし余震はかなり浅い所でも起きているから、断層の上端が地表近くまで達していることはまちがいない。今回の結果は、0.5 km という深さ (ただしこの値は地表からの深さであるから、海拔に直せば +0.6 km 程度) がよいかどうかは別にしても、断層上端がかなり浅いこと、しかし地表までは届かなかったことを示している。

なお、上のモデルから計算される地震モーメントは、剛性率を  $3.3 \times 10^{11}$  c. g. s. と仮定すれば  $1.4 \times 10^{25}$  dyne·cm となる。ちなみに地震波の解析から求められた地震モーメントは (剛性率の仮定に多少の差はあるが)、三雲ほか (1985) が  $2.9 \times 10^{25}$  dyne·cm, 武尾・三上 (1985) が  $4.5 \times 10^{25}$  dyne·cm である。今回求めた断層モデルでは、断層の幅が短いことを反映して、少し小さなモーメントの値を与えている。

さて、震央域の一部だけしかカバーしていないデータから、全部の断層パラメータがかなりもっともらしい値として得られたことは、予想した以上のことであった。特異点 (この場合断層の東端) を囲んで測量が行なわれたことが、よい結果に結びついたものかもしれない。いずれにしても今回の例は震源域近傍での観測が、仮にその範囲が狭くてもたいへん重要なデータになることを示している。

Table 1 には、推定された各パラメータの誤差の目安として、観測データとモデルの標準偏差が、最適解の場合の 2 倍になる所の値を示した。これを見れば、精度よく推定できたパラメータとそうでないパラメータのあることが、一目で判る。一例として、断層上端および下端の深さをいろいろ変えた時の標準偏差の変化を Fig. 5 をに示す。ただし、この時、他のパラメータはすべて固定し、注目するパラメータだけを動かして標準偏差を求めた。断層の上端の深さやくいちがい量、断層の走向、東端の位置などは、かなりよく決まったパラメータと言える。これに対し、断層面の傾き、スリップ角 (横ずれ縦ずれの割合)、断層面の幅 (断層下端の深さ) は、推定誤差の大きいパラメータであった。特に断層の長さ (言い換えると断層西端の位置) は決まりにくく、仮に無限遠方まで延びていたとしてもかまわないほどである。これは、観測点網が断層の東端付近に偏っているために生じることでやむをえない。

ここで、2 つ以上のパラメータを同時に変化させることを考えると、標準偏差を 2 倍にする範囲は Table 1 の値よりももう少し広がる。特に断層の幅の場合にそれが著しく、他のパラメータ (特に断層変位) を変えることにより、深さ無限大まで断層が延びていた

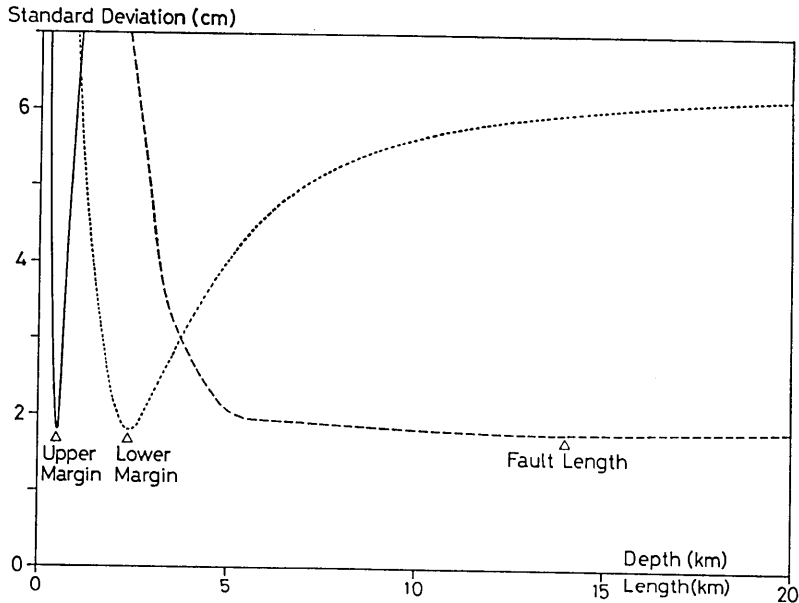


Fig. 5. Standard deviations between observed and calculated distance changes versus the depth of the upper (solid curve) and lower (dotted curve) margins, and the length (dashed curve) of a rectangular fault (when the eastern edge is fixed). Triangles indicate the values for the best fitted fault model.

としても、標準偏差は 3 cm 以内にとどまる。

ところで、同じデータを測点間の歪みの変化に換算し、これに最もよく合う断層モデルについても検討した。その結果は、辺長距離の変化から求めた解とほとんど変わらないので、ここでは特に議論しない。ただ、断層の長さについては（もともと解像度の低いパラメータではあるが）もう少し小さな値となり、約 11 km と求められた。

#### 4. 観測誤差

三角点網の辺長距離の変化（や辺長歪みの変化）から、これを最もよく説明できる断層モデルを求めたわけであるが、その際の標準偏差は、辺長距離の変化の場合 1.8 cm であった。実際の観測データとのくい違いは (Figs. 3-4 参照)、観測そのものの誤差、四角い形の断層が一樣にずれるという単純なモデルであること、性質の異なる余震の活動を無視していること、地震前の変動や、地震後の断層運動によらない変動を考えないこと、半無限の一樣な媒質を仮定すること（地表の凹凸や地下の複雑な地質構造、非弾性的性質などは考慮しない）、などに由来しているものと思われる。

今回の解析に用いた 1978 年、1984 年の測量値は、いずれも光波測距儀による辺長測量によって得られたものである。地震後の 1984 年 11 月に行なわれた測量は精密変歪測量に準じており、高い精度を持っている。三角点網の平均辺長は 3.3 km ほどであるが、測距精度（辺長距離の精度）は  $\pm 0.2$  cm、各三角点の座標精度も  $\pm 0.2$  cm であった。1978 年



7~8月の測量は四等測量であり、精度はひと桁ほど低い。四等三角点の平均辺長1.7kmに対し、測距精度は $\pm 2.2$ cm、三角点の座標精度は $\pm 2.7$ cmであった。従って1978~1984年の間に生じた辺長距離の変化の精度は、結局ほとんど1978年の測量の精度によっている。しかもその大きさは、ここで得られた標準偏差1.8cmよりも大きい。測量の誤差によって断層パラメータがどのくらい変わるかという点について、ここで特に検討することはしないが、Table 1に示した範囲の広がりかひとつの目安になるであろう。データの性質上、パラメータによってはかなりの推定誤差がみこまれるが、やむをえないところである。

## 5. 結 論

(1) 三角点網の測量成果をもとにして、1984年長野県西部地震(M6.8)の断層モデルを作成した。辺長距離の変化から求められた断層パラメータは、走向N70°E、傾斜74°N、長さ14km、幅2km、上端の深さ0.5km、主として右横ずれで、くいちがい量1.6mなどである。辺長歪みの変化から求められた断層パラメータもほぼこれと同様であるが、長さは約11kmと少し短い。余震分布を見ると、実際の断層の幅はもっと大きいと思われる。くいちがいが、浅い所に集中していることを示すのかもしれない。

(2) 三角点網の変動の解析には、変位や主ひずみではなく、各測点間の辺長距離の変化、または辺長歪みの変化を解析することが望ましい。上述の数値は辺長距離の変化のデータに対する最適解である。

(3) 今回の例の場合、三角点網は、震央域の東端付近をおおむね小範囲のものであった。これまではあまり強調されてこなかったが、仮に小範囲の観測網であっても、震源域近傍の測量データはたいへん有用である。

## 謝 辞

今回の結果は、ひとえに1984年長野県西部地震の震央域付近(御岳湖付近)で行なわれた三角点測量の成果に基づいている。建設省国土地理院ならびに関係の方々に深く感謝したい。また、東京大学地震研究所の加藤照之博士、村田一郎助教授、笠原慶一教授、石井紘助教授ほかの方々にはいろいろ議論していただいた。合わせて感謝したい。

## 文 献

- 気象庁地震予知情報課・地震津波監視課, 1985, 昭和59年(1984年)長野県西部地震, 地震予知連絡会会報, 33, 116-122.
- 国土地理院, 1985, 1984年長野県西部地震による地殻変動, 地震予知連絡会会報, 34, 164-169.
- 国立防災科学技術センター, 1985, 長野県西部地震(1984年9月14日)について, 地震予知連絡会会報, 33, 106-110.
- 松田時彦・山科健一郎・有山智雄, 1985, 長野県西部地震の震源断層に対する地表調査, 自然災害特別研究突発災害研究成果 1984年長野県西部地震の地震および災害の総合調査(飯田汲事編), 67-72.
- 三雲 健・今川一彦・加藤正明, 1985, 1985年長野県西部地震の断層モデル, 地震学会講演予稿集, 昭和60年度春季, 13.
- 名古屋大学理学部, 1985, 1985年長野県西部地震について, 地震予知連絡会会報, 33, 123-134.
- 多田 堯, 長野県西部地震に伴った地殻変動, 日本測地学会第63回講演会要旨, 127-128.
- 武尾 実・三上直也, 1985, 長野県西部地震の震源過程, 地震学会講演予稿集, 昭和60年度春季, 14.
- 東京大学地震所北信微小地震地殻変動観測所・和歌山微小地震観測所・地震予知観測室, 1985, 1984年9月14日, 長野県西部地震(M6.8)の余震観測(その1)余震分布, 地震予知連絡会会報, 33, 116-122.
- 山科健一郎・松田時彦・有山智雄, 1985, 1984年長野県西部地震による地変, 地震研究所集報, 60, 249-280.

*A Fault Model of the 1984 Western Nagano Prefecture  
Earthquake Based on the Distance Change  
of Trilateration Points*

Ken'ichiro YAMASHINA  
Earthquake Research Institute  
and  
Takashi TADA  
Geographical Survey Institute

A rectangular fault model for the western Nagano prefecture earthquake of September 14, 1984 ( $M=6.8$ ) is obtained purely based on the distance changes of a network of 8 trilateration points surveyed in 1978 and 1984 (Nov.). The inferred fault parameters are:  $N70^\circ E$  in strike,  $74^\circ N$  in dip angle,  $24^\circ$  in slip angle (right lateral with a slight normal component), 14 km in length, 2 km in width, 0.5 km in depth of the upper margin, and 1.6 m in fault slip. An almost identical model is obtained based on the linear strain changes between these trilateration points with a shorter fault length (11 km in this case). These parameters are generally consistent with seismic and other data, excepting the fault width. The hypocentral distribution of aftershocks represents, a longer width than the calculations mentioned above, suggesting a concentration of the fault slip at shallower depths. Although the available network of trilateration points covers only a part of the epicentral region, the present method, which is independent of the apparent rotation and lateral shift of the network, is useful in analyzing the fault parameters.