

断層運動の非線形最小二乗法に基づく推定 (1995年三陸はるか沖地震への応用)

Facal Mechanism Estimated by Non Linear Least Squares Fitting (Applications to the 1995 Sanriku Far off the Coast earthquake)

地殻調査部 小沢 慎三郎
Crustal Dynamics Department Shinzaburo OZAWA

要旨

非線形の最小二乗推定により、地殻変動データから断層運動の推定を行うプログラムを開発し、1994年三陸はるか沖地震に適用した。その結果、三陸はるか沖地震の余震分布や地震波解析結果とよく一致する地震断層モデルを推定することができた。これにより、国土地理院の全国GPS網に代表される高精度の地殻変動データを用いることにより、他の観測と非常に調和のとれた地震断層の解析を行えることが示された。今後、国土地理院の地殻変動観測業務に、このような解析手法を導入し、地震が起きた際、即座に地震断層運動のメカニズムを解析し、情報を提供するシステムを構築することが可能性として考えられる。

1. はじめに

地震が起きると、地下において地震断層の食い違いが生じる。通常はこのような地震断層は地表に現れないことが多いが、兵庫県南部地震の際の野島断層のように、地震断層が地表に出現する場合もある。現在地震波、地殻変動の観測により、地震断層が地震の際にどのように動いたかをかなりの精度で調べることができるようになっている。通常、モデル推定の際に、地震断層は図-1に示されるような矩形の面として記述される。断層を記述するパラメータとして、10個のものがあり、表-1にまとめて示す。

これらのパラメータの推定方法はいろいろあるが、地震波の解析により、地震断層の走行、地震のモーメント、滑りの角度 $[\tan^{-1}(U_2/U_1)]$ といった量を推定することができる。しかしながら、地震断層の大きさと位置に関しては、地震波の解析は正確な情報を与えてくれず、これらのパラメータは通常、地震後の余震分布の情報を元に推定される。余震分布以外に、地殻変動データは、地震断層の位置やその大きさを調べる際に非常に重要な

役割を演じることが多い。従来はその複雑さのために、地殻変動データを使用した断層モデルの推定は、フォワードモデリングで行われることが多かった。本研究では、地殻変動データに基づき、地震断層運動の推定を行うプログラムを開発し、三陸はるか沖地震に適用したのでその結果について述べる。

2. 地震運動の解析手法

地震が起きると地下において地震断層が動き、そこで食い違いが生じる。半無限媒質中で、矩形の地震断層に食い違いが生じた際に地表でどのような変動が起きるかということは、岡田(1985)によりまとめられている。地表の変位を u_x, u_y, u_z とした際、

$$u_x = u_x(\text{strike, dip, depth, } w, l, x_1 - x, y_1 - y, U_1, U_2, U_3)$$

$$u_y = u_y(\text{strike, dip, depth, } w, l, x_1 - x, y_1 - y, U_1, U_2, U_3)$$

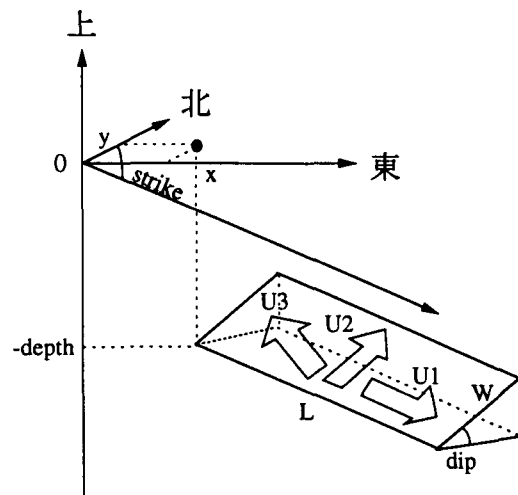


図-1 断層面の記述。岡田(1985)の図より。

表-1 地震断層を記述するパラメータ。岡田(1985)の断層面の記述に基づく。

走行	傾斜角	深さ	東西座標	南北座標	幅	長さ	走行方向 滑り量	傾斜方向 滑り量	開口量
strike	dip	depth	x	y	W	L	U1	U2	U3

表-2 地震波解析に基づく菊池他1995及び仙台管区気象台の推定した断層パラメータ

	走行	傾斜角	滑り角度 [$\tan^{-1}(U2/U1)$]
菊池他	N164E	22度	55度
気象庁	N224E	15度	101度

$$uz = uz(\text{strike, dip, depth, } w, l, x1 - x, y1 - y, U1, U2, U3)$$

ここで, ux, uy, uz は地表における, 東西, 南北, 上下変動成分を示す。この式において $U1, U2, U3$ は線形のパラメータであり, それ以外のパラメータは非

線形となっている。また式中のパラメータの意味は表1の通りである。 $x1, y1$ は地表の地殻変動観測点の東西, 南北の位置を示す。

地殻変動の観測値としてGPS測量では, 相対変位

$$ux(\text{strike, dip, depth, } w, l, x1 - x, y1 - y, U1, U2, U3) - ux(\text{strike, dip, depth, } w, l, x2 - x, y2 - y, U1, U2, U3)$$

$$uy(\text{strike, dip, depth, } w, l, x1 - x, y1 - y, U1, U2, U3) - uy(\text{strike, dip, depth, } w, l, x2 - x, y2 - y, U1, U2, U3)$$

$$uz(\text{strike, dip, depth, } w, l, x1 - x, y1 - y, U1, U2, U3) - uz(\text{strike, dip, depth, } w, l, x2 - x, y2 - y, U1, U2, U3)$$

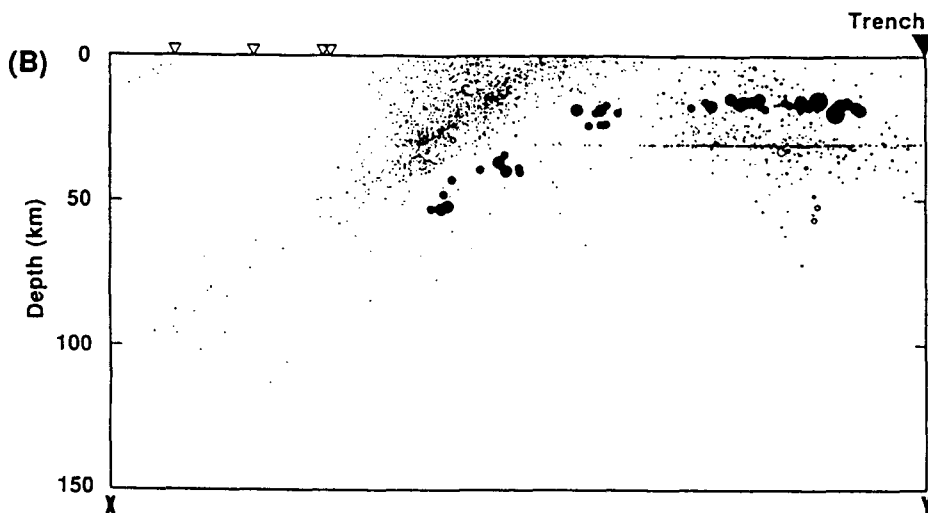
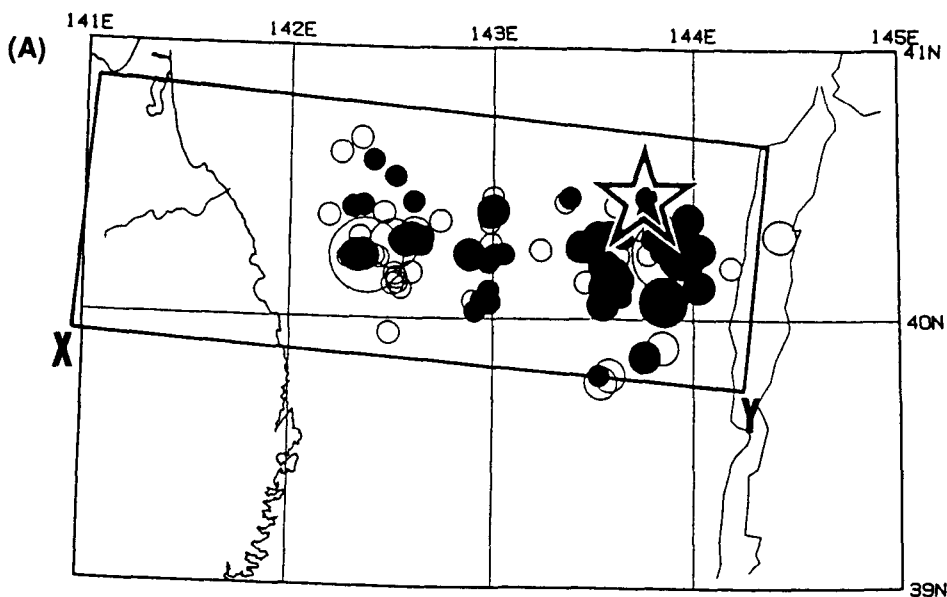


図-2 東北大学により決められた1995年三陸はるか沖地震の余震分布。地震予知連絡会会報54巻92ページ東北大学資料より。

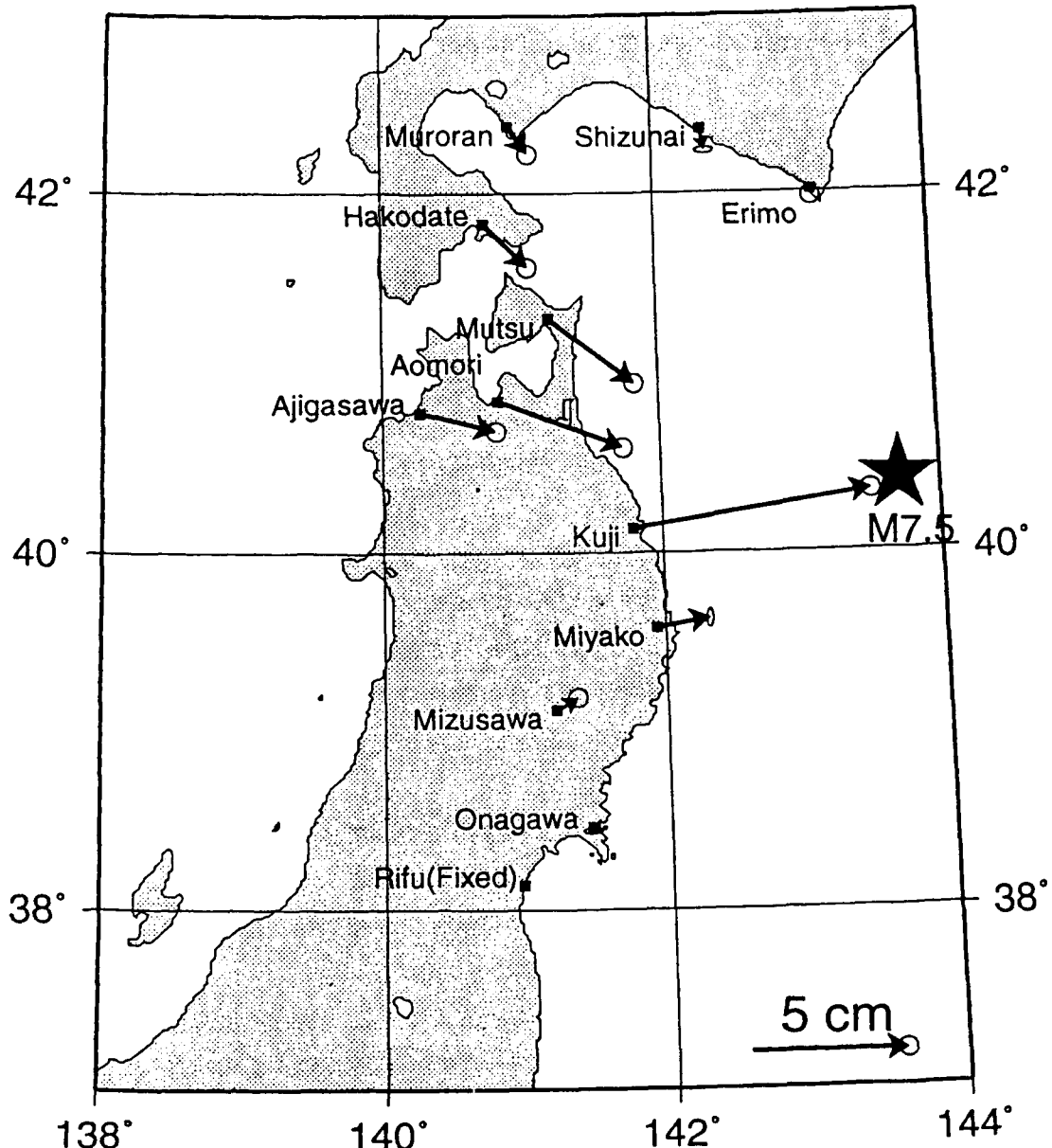


図-3 国土地理院のGPS連続観測網によりとらえられた1995年三陸はるか沖地震に伴う地殻変動。地震予知連絡会会報54巻130ページ。国土地理院資料

が観測される。ここで x_2 , y_2 はGPS解析の際の固定点の座標である。 u_x , u_y , u_z のモデル式はわかっているので、これらの観測量の観測方程式は書き表せる。水準測量、辺長測量に関しても、 u_x , u_y , u_z の岡田の式を使って観測方程式を同様に書き下ろせる。

これら各種地殻変動観測データの観測方程式を用い、地殻変動データから地震断層のパラメータ10個(strike, dip, depth, w , l , x , y , u_1 , u_2 , u_3)を推定する。断層パラメータは非線形であるため、線形化を行い逐次近似でパラメータ推定が行われる。一つの地震において数枚の地震断層が存在することが往々にしてある。このような場合、地震断層間の位置関係を拘束する必要があるが、そのために本研究では条件方程式を使用している(Mikhail, 1976)。

3. 三陸はるか沖地震

1994年12月28日にマグニチュード7.5の三陸はるか沖地震が、三陸海岸の沖合で発生した。菊池他(1995)及び仙台管区気象台(1995)により地震波解析から推定された震源解パラメータを表2に示す。東北大学によって決定された余震分布が図-2に示される(東北大学, 1995)。この地域においては、太平洋プレートが陸側プレート下に沈み込んでおり、1994年三陸はるか沖地震はこの2つのプレートの沈み込み境界において発生した典型的な海溝型地震である。図-2に示されるとおり、沈み込むプレートの境界と思われる部分にそって三陸はるか沖地震の余震分布が発生している。余震分布からプレートの沈み込みの形状に沿って、地震断層の傾斜角度が急になっているのが明瞭に見てとれる。図-3に国土地理院のGPS観測網により検出された、1994年三陸は

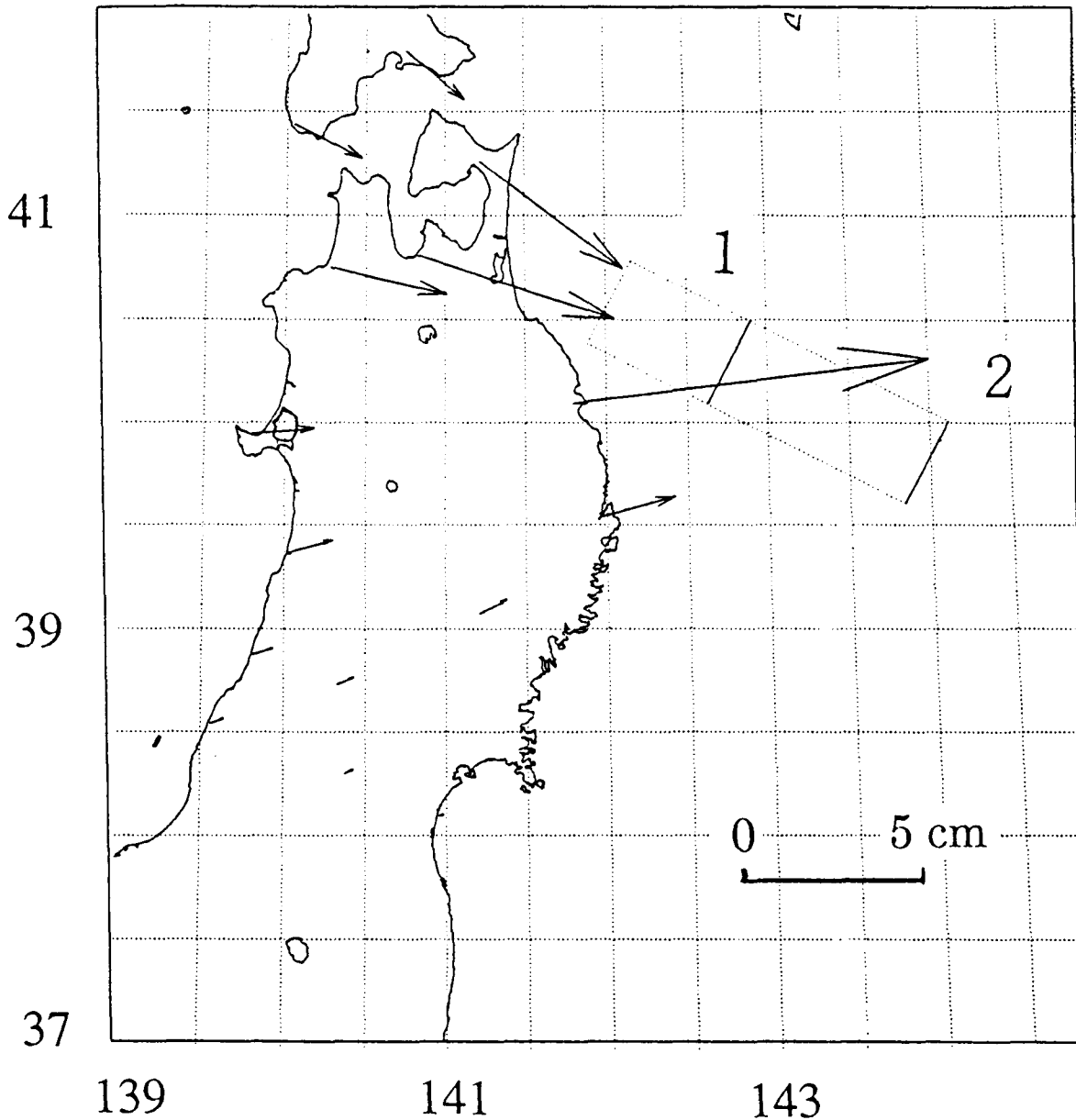


図-4 推定された断層モデルに基づく理論地殻変動

るか沖地震に伴う地殻変動を示す(国土地理院, 1995)。図-3に示されるように、この地震に伴い太平洋沿岸の各観測点が一様に東方向に動いている。本研究では、これらの地殻変動データに基づいて、地震断層パラメータを推定した。データは観測センターの宮崎氏から提供して頂いている。上記に述べたように、1994年三陸はるか沖地震の地震断層は途中で傾斜角度が明瞭に変化しており、一枚の断層で記述するのは不適當である。そこで本研究では2枚の断層を使用し、お互いの断層が下端と上端で結合しているという条件で、地震断層パラメータを推定した。表2に推定された地震断層パラメータを、図

4にこの地震断層モデルに基づく計算地殻変動結果を示す。図-2と図-4を比較してわかる通り、推定された地震断層の位置は非常に1994年三陸はるか沖地震の余震分布に一致している。特筆すべきは、地殻変動データだけを使用した断層パラメータ推定結果は、余震分布に見られる地震断層の傾斜角度の変化を見事に再現している。またそれ以外の地震断層パラメータも表-2に示される震源解結果と比較的よく一致している。

4. 結果と考察

非線形最小二乗推定により、1994年三陸はるか沖地震

表-3 推定された地震断層のパラメータ。表記は図1と表2に基づく。

断層	走行 (度)	傾斜角 (度)	深さ k m	経度 (度)	緯度 (度)	幅 k m	長さ k m	走行方向 滑り量,m	傾斜方向 滑り量,m	開口量 m
1	N207E	23	25	142.9	40.5	77	50	-0.3	0.99	0
2	N207E	3	19	144.1	40.0	118	50	0.03	1.28	0

の断層パラメータを推定した。その結果は余震分布、震源解と非常に調和的であった。このことから国土地理院のGPS連続観測網の精密な地殻変動データを使用することにより、かなりの精度で地震に伴う断層運動の情報を調べられることがわかった。今後の課題としては、このようなプログラムを自動化し、地震が起きた際に観測

された地殻変動データに基づき、即座に解析を行い、地震断層運動の情報として一般に公開することが考えられる。気象庁や大学においては、地震波の解析に基づく地震断層パラメータの公開を即時的に行っている。国土地理院でもこのようなシステムを構築できる可能性があることが本研究で示された。

参 考 文 献

- Okada Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, No. 4, 1135-1154.
- Mikail, E. M., Observations and least squares, 497pp, Harper & Row, New York, 1976.
- Tohoku University, Aftershock activity of the 1994 Far Off Sanriku Earthquake observed by a micro earthquake observation network, Rep. Coord. Comm. Earth. Pred., 54, p92, 1995.
- Geographical Survey Institute, Crustal deformation in the Tohoku region, Rep. Coord. Comm. Earth. Pred., 54, p130, 1995.
- Kikuchi K. et al., Quick analysis of source process with broadband records, Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, p34, 1995.
- Sendai District Meteorological Observatory and Seismological and Volcanological Department of Japan Meteorological Agency, Report of the 1994 Earthquake far off Sanriku, Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, p32, 1995.