

1998年9月15日仙台市で発生した地震 (M 5.0) の余震データに基づく応力場の推定

伊藤喜宏・岡田知己・松澤 暢・海野徳仁・長谷川昭
東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

Estimation of stress tensor using aftershocks of 15 September 1998 M 5.0 Sendai, NE Japan, earthquake

Yoshihiro Ito, Tomomi Okada, Toru Matsuzawa, Norihito Umino and Akira Hasegawa
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

Abstract

We estimated stress tensor in the focal area of M5.0 earthquake that occurred on 15 September, 1998, in Sendai city, NE Japan. Many aftershock focal mechanism solutions, which cannot be determined by P wave polarity data alone, were obtained by moment tensor inversion using empirical Green's tensor derivatives. The result of stress tensor inversion based on these mechanism solutions shows that the maximum principal axis of the stress tensor is perpendicular to the strike of Nagamachi-Rifu fault and is consistent with the P axis of the main shock. We found a tendency that events with relatively large mis-fit of slip direction are located around the area with a large slip by the main shock rupture. Stress tensor inversions for 16 subdivided areas show that stress ratio $R = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ approaches to zero in areas where the slip caused by the main shock rupture is small and aftershock activity is high. These facts suggest local stress field perturbations caused by the slip of the main shock.

Key words: stress field, moment tensor inversion, empirical Green's tensor derivatives, stress tensor inversion

1. はじめに

地震は地下の応力状態を反映した破壊現象であり、震源域近傍での応力場を知ることは地震発生予測のうえで重要である。地下の応力状態を推定する方法としては、原位置で直接応力を測定する水圧破碎法や応力解放法、ボーリング孔で採取されたコアを用いて実験室で応力を測定するAE法 [金川・他, 1977] や変形率変化法 [Yamamoto *et al.*, 1990] などがある。これらの方法は直接応力を測定できるが、通常は地震発生域付近の深度までボーリングができないため、震源域での応力状態を反映しているという保証はない。一方、間接的な方法として、震源域周辺で発生する多数の地震のメカニズム解から推定する応力テンソルインバージョン法 [例えば, Gephart and Forsyth, 1984, Horiuchi *et al.*, 1995] があ

る。この方法は、前述の直接的測定法と比べ、実際に地震が発生する深さでの応力場の情報を抽出できる利点があり、群発地震発生域や余震域のように地震活動度が高い場合には、震源域近傍での応力場を知る上で重要な方法である。

1998年9月15日に仙台市愛子付近の深さ約12kmを震源としてM5.0の地震が発生し、多数の余震を伴った。本論では、この地震を例に、多数の余震のメカニズム解を用いて震源域での応力場の情報を抽出することを試みた。まず、P波初動押し引きデータだけではメカニズム解を推定することが困難な余震について、モーメントテンソルインバージョン法を用いることによって推定を可能とした。次に、求めた多数の余震のメカニズム解から応力テンソルインバージョンにより震源域近傍での

応力場を推定した。これらの結果を本震のすべり分布 [Okada *et al.*, 2000] と比較し、本震のすべりによる応力場の擾乱について議論する。

2. データ

解析に用いた地震は1998年9月15日に仙台市西部で発生したM5.0の地震の余震である。海野・他(1999)は、P波初動の解析により本震のメカニズム解が、北西-南東方向にはほぼ水平なP軸をもつ逆断層型の地震であることを示した。さらに、余震の分布を詳細に求めて断層面を特定し、それに基づいて本震のすべりは長町-利府線断層帯の最深部で発生したと推測している。

我々は本震発生直後より、オフラインレコーダを用いた臨時観測点2点を震源域周辺に展開した (Fig. 1)。用いた地震計は固有周期2 Hzの短周期地震計3成分である。これらの臨時観測点と東北大学および気象庁の定常観測点で得られたデータを用いて、均一観測点法 [Ansel and Smith, 1975] により震源を決定した。震源決定には、KMF, AY2でのP及びS波到達時刻の読み取り値, AOB, AY3, JOUでのP波到達時刻の読み取り値を用いた。

波形解析には、全解析期間を通して3成分のデータが記録されていたJOU (気象庁) および臨時観測点AY2のデータを用いた。なおJOUに設置されていた地震計は固有周期1 Hzの短周期地震計3成分である。

3. 経験的グリーンテンソルを用いたモーメントテンソルインバージョン

海野・他(1999)は本震および余震についてP波初動押し引きデータを用いてメカニズム解を推定している。ここではより多数の余震のメカニズム解を決定することを可能とするために、モーメントテンソルインバージョンによるメカニズム解の推定を試みた。モーメントテンソルインバージョンはKikuchi and Kanamori (1991)の方法を用いた。ただし、インバージョンに用いる基底モーメントテンソルに対するグリーン関数は数値計算により求めたものではなく、経験的手法を用いて求めたものを使用した。これにより地下構造に対する仮定を置く必要がなくなった。

以下に計算方法の概要を述べる。Plicka and Zahradnik (1998)は、震源距離に比べて狭い領域内で発生したメカニズム解が既知である複数の地震の観測波形を用いて、グリーンテンソルを経験的に求める方法を提唱した。ここでは、彼らの手法を拡張し、震源分布の有限の広がりを補正した基底モーメントテンソルをモーメント

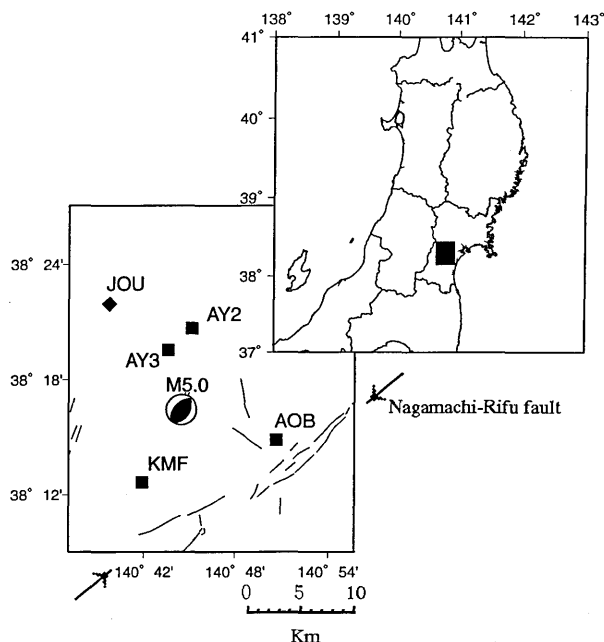


Fig. 1. Map showing locations of observation stations and focal mechanism of 1998 M5.0 earthquake. Squares and a diamond show seismic stations of Tohoku University and Japan Meteorological Agency, respectively. Focal mechanism solution for the M5.0 main shock is shown at its hypocenter location on the lower focal hemisphere by equal area projection. Solid lines show active faults around Sendai city.

テンソルインバージョンに用いた [伊藤・他 1998, Ito *et al.* 1999]. この方法では、解析する領域内では地下構造が大きく変化しないという仮定のもとで、グリーンテンソルの計算に用いる全ての地震が、その震源域の重心位置で発生したと考える。つまり、観測点ごとに到来方向および入射角が震源球上で全ての地震について等しくなるように座標軸を回転し、それらを用いて震源分布の重心における経験的グリーンテンソルを計算した。到来方向および入射角の補正を行った後のj番目の地震のk成分のモーメントテンソルを M_k 、観測点xでのグリーンテンソルのl成分を G_{lk} とすると、観測波形 u_k^i は

$$u_k^i(x, f) = M_k G_{lk}(x, f)$$

となる。ただし、fは周波数である。ここで観測値である u_k^i および M_k より逆問題により G_{lk} を求めた。経験的グリーンテンソルの計算には、P波初動押し引きデータが10観測点以上ありメカニズム解が精度良く推定できた9つの余震の記録波形をデータとして与えた。これらの余震はM1.7からM2.7の範囲で余震域全体に分布する。

このようにして求められた経験的グリーンテンソルを用いて、モーメントテンソルインバージョンを行った。

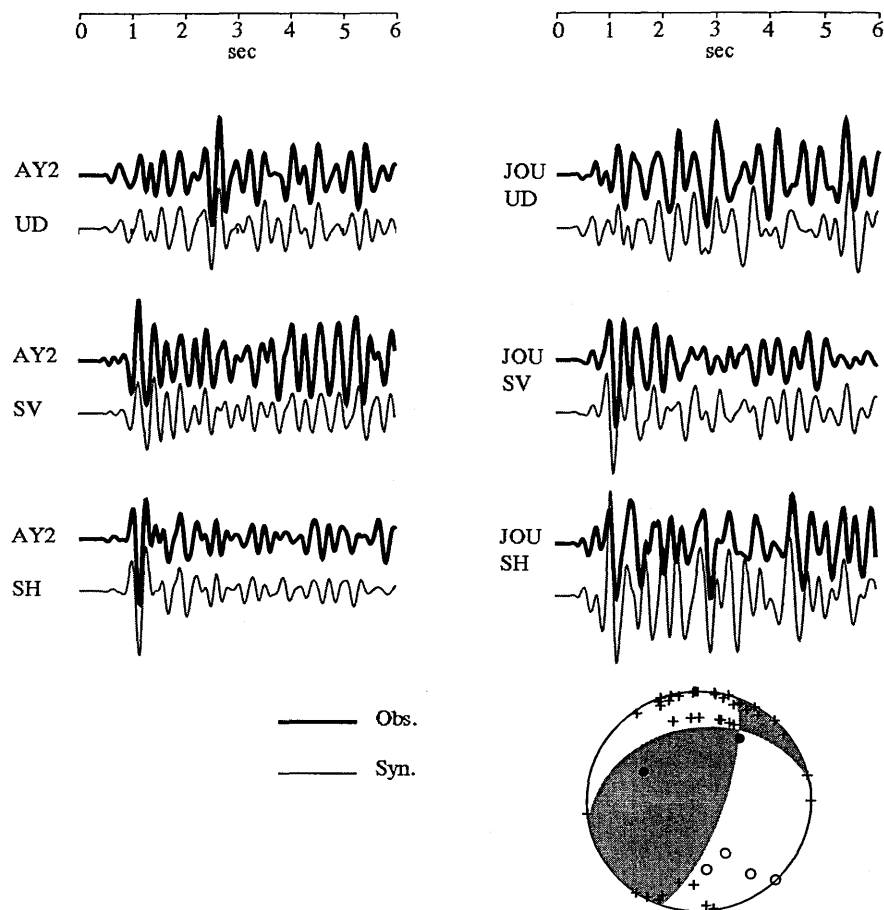


Fig. 2. An example of the results of moment tensor inversion using empirical Green's tensor derivatives. Thick and thin lines are observed and the synthetic waveforms, respectively. Focal mechanism solution obtained by this analysis is shown at the bottom. Open circles, solid circles, and crosses show compressional, dilatational, and indistinct P wave first motions, respectively.

ここでも、震源域の有限の広がりやを考慮して、その補正をした。重心位置とそれぞれの地震の震源位置の違いは、各観測点における方位角および入射角の違いにあらわれる。先の方法により重心位置での基底モーメントテンソルに対する応答はすでに得ている。重心の位置における5つの基底モーメントテンソルの応答を線形結合することによって、任意のモーメントテンソル解の応答を得ることができる。そこでこれらの食い違いをうち消すような基底モーメントテンソルを重心位置で合成し、モーメントテンソルインバージョンに用いる。

インバージョンの結果の一例を Fig. 2 に示す。得られたモーメントテンソル解による合成波形は直達S波のみならず後続波まで観測波形を良く再現している。また、観測されたP波初動の押し引き分布もよく一致している。ここで解析に用いた周波数帯域は1-4 Hzであり、時間ウィンドウは直達S波到達時の0.5秒前より5秒間を解析に用いた。また、インバージョンでは解がダブル

カップル型になるように拘束を与えた。

上記の方法により、P波初動の押し引きデータのみからではメカニズム解を決定することができなかった、M1からM2程度の大きさの余震225個についてのモーメントテンソルインバージョン解析を行った。得られたモーメントテンソル解の信頼度をみるために、残差のランク0.1sごとに解をそれぞれ無作為に3つずつ選び出し、ここで得られたモーメントテンソル解に観測されたP波初動押し引きデータを重ねて示す (Fig. 3)。ここでの残差は、観測波形と理論波形の残差自乗和を観測波形の自乗和で規格化したものを示す。インバージョンで残差が小さくなったモーメントテンソル解は観測された押し引きデータと調和的であるが、大きな残差を示したモーメントテンソル解ほどP波初動の押し引きデータを満足しない。そこで、今回の解析ではインバージョンにより得られた225個の解の中から残差が0.7以下になった179個の解を信頼性の高い解として以後の解析に

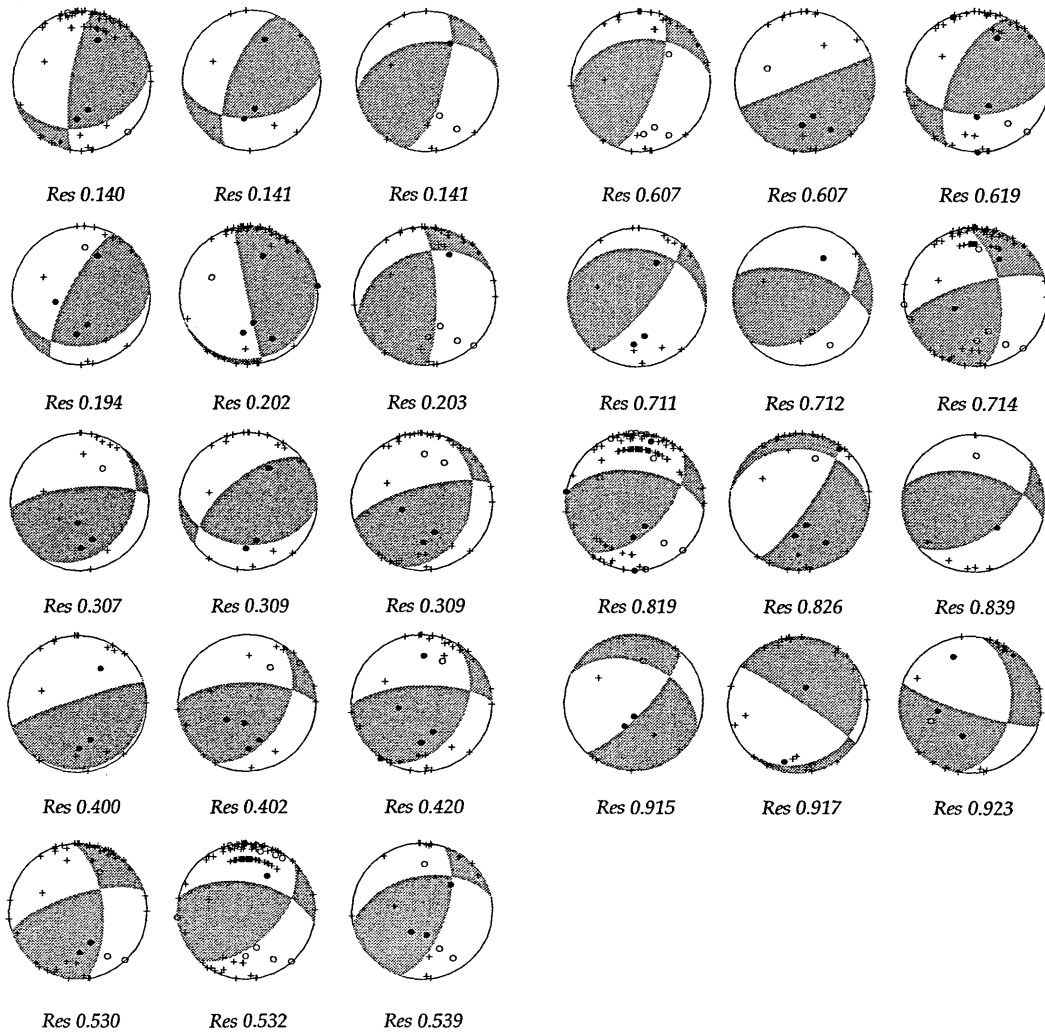


Fig. 3. Comparison of obtained moment tensor solutions and observed P wave first motions. Numerals at the bottom of each solutions show residuals normalized by observed values in the moment tensor inversions. Twenty-seven events are randomly selected for every 0.1s of residuals.

採用した。

得られたメカニズム解とP軸, T軸, B軸の分布をFig. 4に示す。この地震では顕著な前震が観測されている。海野・他(1999)によると、波形の相似性とP波初動の押し引き分布から、前震群は本震のメカニズム解(Fig. 1参照)とほぼ同一の解を示す。これに対し、モーメントテンソルインバージョンにより得られた余震のメカニズム解は、P軸, T軸, B軸ともに色々の方向を向き比較的变化に富んでいる。断層の北東部に分布する余震のP軸は東西に近い走向を、B軸はほぼ南北の走向を示す。一方で南西部では余震のP軸がほぼ南北、B軸がほぼ東西の走向を示す。余震のP軸とB軸の走向の変化は、断層の走向に沿って系統的に変化しているようにもみえる。

4. 応力場の推定

前節で求めた多数のメカニズム解をデータとして応力場の推定を行った。ここではGephart and Forsyth(1984)の方法により、最大主応力 σ_1 、中間主応力 σ_2 、最小主応力 σ_3 の単位ベクトルの各方向と応力率Rをグリッドサーチにより求めた。ここでRは

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

である。 σ_1 および σ_2 , σ_3 の各方向は3度ごと、Rは0.1ごとのきざみ幅でグリッドサーチを行った。

まず、モーメントテンソルインバージョンの信頼性が高いと考えられる、残差が0.7以下になったメカニズム解179個を用いて応力場の推定を行った。その結果、応力率Rが0.6で北西-南東方向にほぼ水平な最大主応力軸を持つ応力場が得られた(Fig. 5)。この方向は地表で

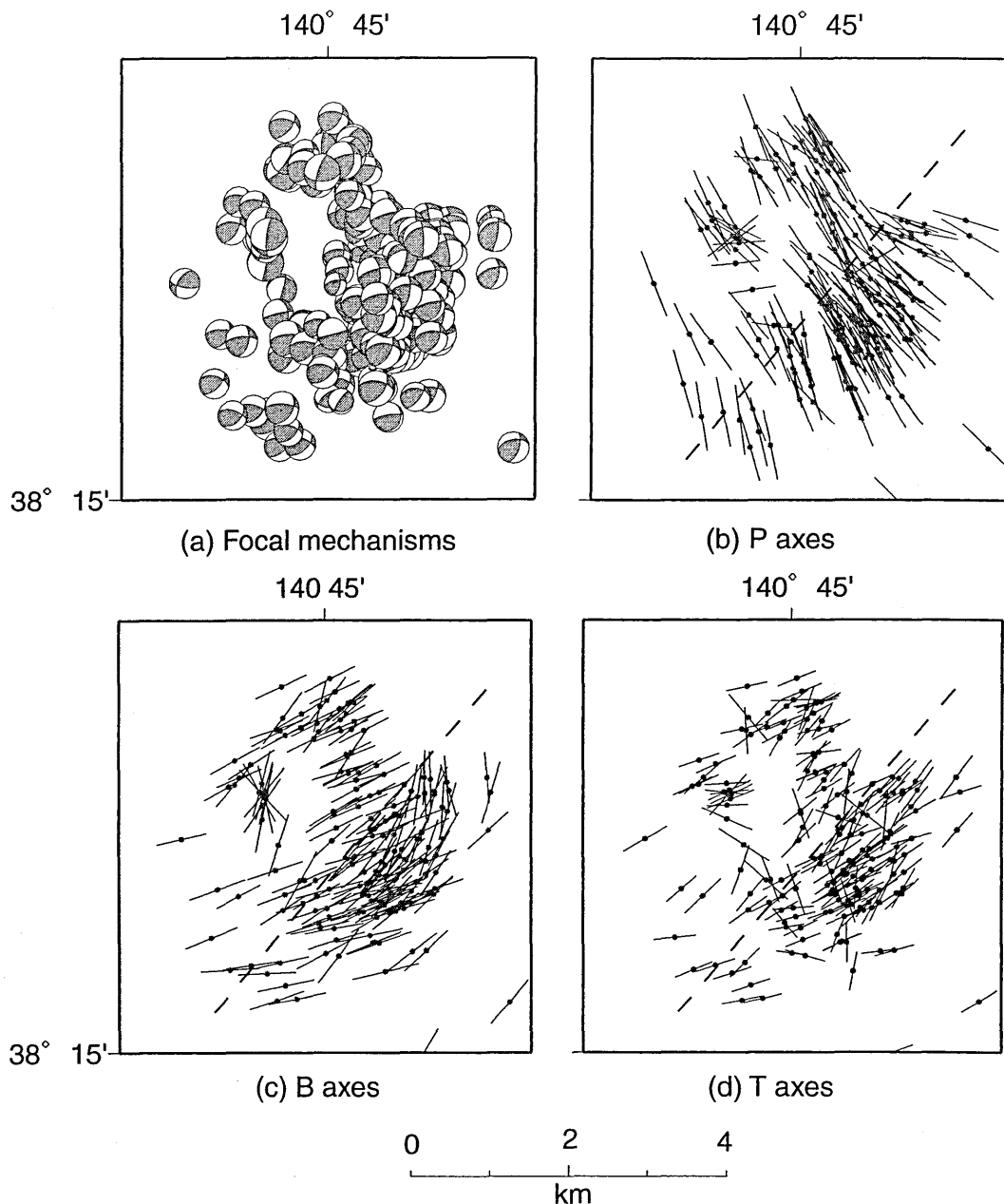


Fig. 4. Focal mechanism solutions obtained for all events used in the analysis. (a) Focal mechanisms of events plotted at their hypocenter locations. (b), (c) and (d) Directions of P, B and T axes of the obtained focal mechanisms. Dashed lines indicate the fault strike direction of the main shock.

みられる長町-利府線断層帯の走向とほぼ直交する。また求めた応力場の最大および中間, 最小の各主軸方向は, 本震のメカニズム解のP軸, T軸, B軸の向きとほぼ一致する。ここで得られた応力場を, 震源域全体で最も卓越する応力場と考え, 以後“平均的な応力場”と呼ぶことにする

Gephart and Forsyth (1984) の方法では, 個々のメカニズム解の2つの節面のうち1つが断層面として選択される。平均的な応力場から期待されるすべり方向と選

択された断層面でのすべり方向の食い違い量を各余震に関して求め, その空間分布と Okada *et al.* (2000) により推定された本震のすべり量分布との比較を行った (Fig. 6)。その結果, 平均的な応力場から期待されるすべり方向と個々のメカニズム解から決まるすべり方向との食い違い量が大きい余震の震源は, 本震のすべり量の大きな領域の周辺に分布する傾向があることがわかった。さまざまなメカニズム解の余震が震源域全域に分布しているにもかかわらず, 上記のようにすべり方向の食い違い量が

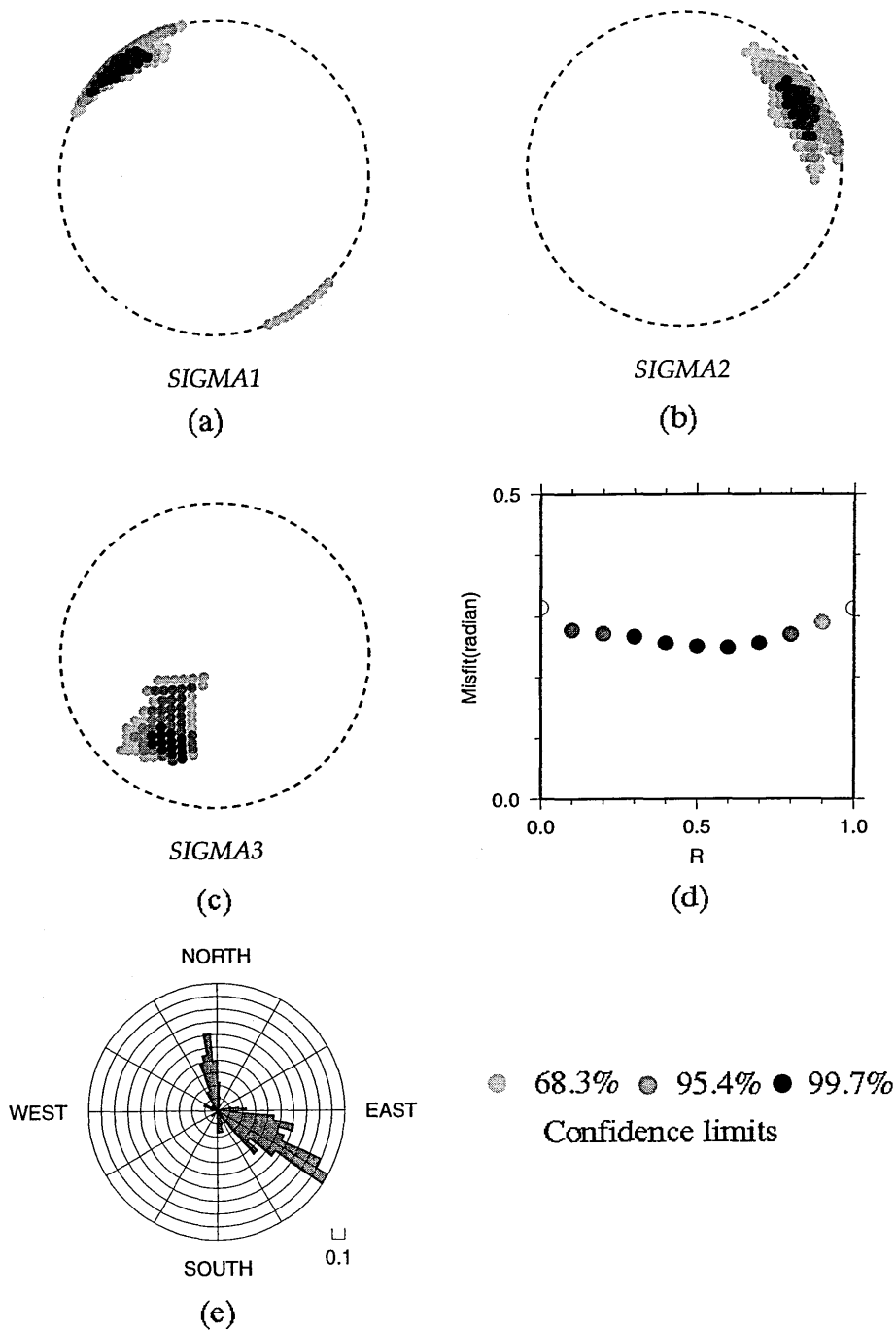


Fig. 5. Result of stress tensor inversions using focal mechanisms of all the events. (a), (b), and (c); Directions of principal axes of stress field. (d) Stress ratio R versus misfit in the stress tensor inversion. (e) Rose diagram of slip directions for all events. The shading of circles indicates the confidence limit of the result of the tensor inversions.

きな余震が局所的に分布することは、それらの余震の震源近傍での応力場が、震源域全体で卓越する応力場（平均的な応力場）から局所的に変化している可能性を示唆する。

そこで応力場の空間変化を調べるために、Okada *et al.* (2000) による断層モデルを参考に 1 km 間隔の 4×4

のグリッドに分け、各グリッド位置から最も近い距離にある 40 個の地震のメカニズム解を用いて、それぞれのグリッド位置ごとに先に述べた方法で応力場を推定した (Fig. 7).

Fig. 7 をみると先の結果から期待された通り、各グリッド位置で推定した応力場が、本震のすべり量分布に

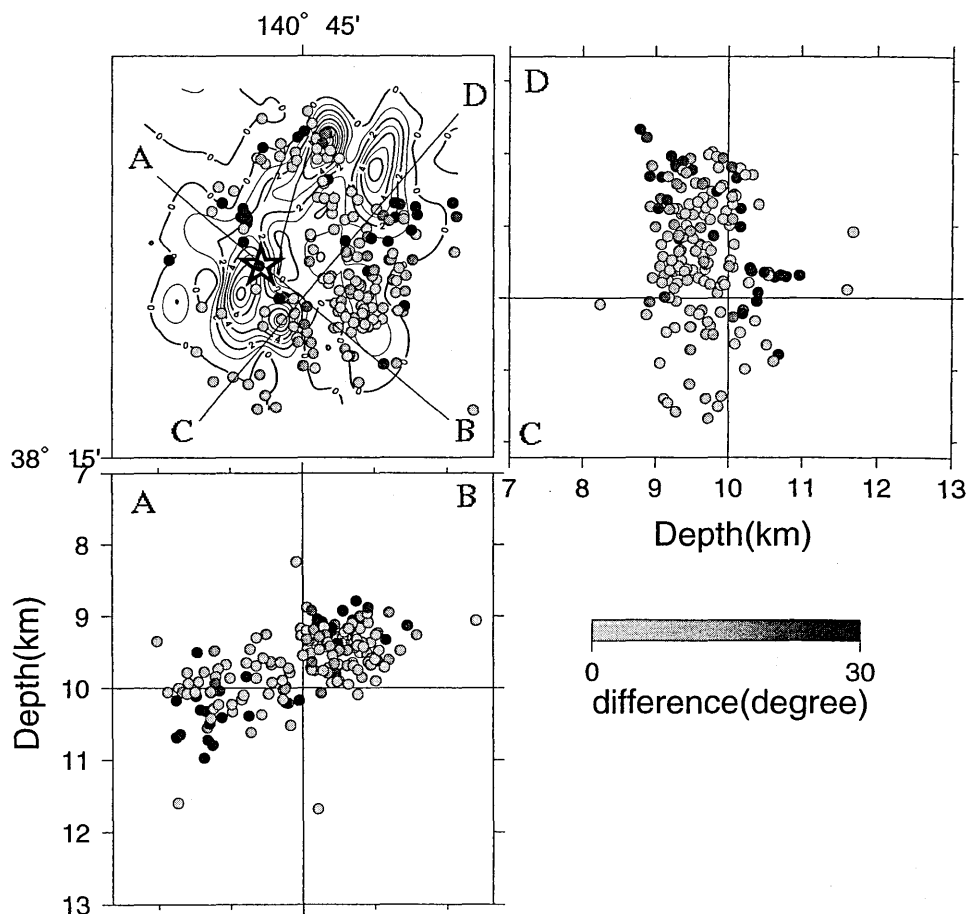


Fig. 6. Hypocenter distribution of aftershocks (circles) used for stress tensor inversion and slip distribution (contours) of the main shock [after Okada *et al* (2000)]. The shading of circles shows the difference in angle between the slip direction of each event and the average stress field obtained. Top left; Map view. Slip distribution of the main shock after Okada *et al* (2000) is shown by contours. A star indicates the initial point of the rupture of the main shock. Top right and bottom are cross-sections along A-B and C-D on map view, respectively.

対応して変化しているように見える。特に、最も余震が集中し、本震のすべり量の小さな、破壊域の浅部中央の領域での応力率 R の値は顕著に小さな値を示す。この原因の1つとして、この領域では本震により応力が解消されず、差応力がすべり量の大きな領域に比べ高い状態にあることが考えられる。

5. まとめ

1998年9月15日に仙台市で発生した地震 (M5.0) の余震のメカニズム解を多数求めた。解析方法は経験的グリーンテンソルから合成したグリーン関数を用いたモーメントテンソルインバージョン法である。本解析により、P波初動押し引きデータのみではメカニズム解の決まらない179個のM1-M2程度の余震のモーメントテンソル解を決定することができた。求めたモーメントテ

ンソル解を用いて、応力テンソルインバージョンにより応力場を推定した。得られた最大主軸方向は $N40^{\circ}W$ でほぼ水平にあり、それは長町-利府線断層帯の走向とほぼ直交し、また本震のP軸とほぼ同じであった。震源域における平均的な応力場から期待されるすべり方向と顕著に異なるすべり方向を持つ余震は、本震のすべり量が大きな領域の周辺に分布する傾向がある。これは本震のすべりによる局所的な応力場の変化を示すと考えられる。さらに、本震のすべり量が小さく余震が多く発生している領域では、応力率 R は小さく0に近い値であった。

謝 辞

気象庁の大倉観測点 (JOU) のデータを本解析に使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。

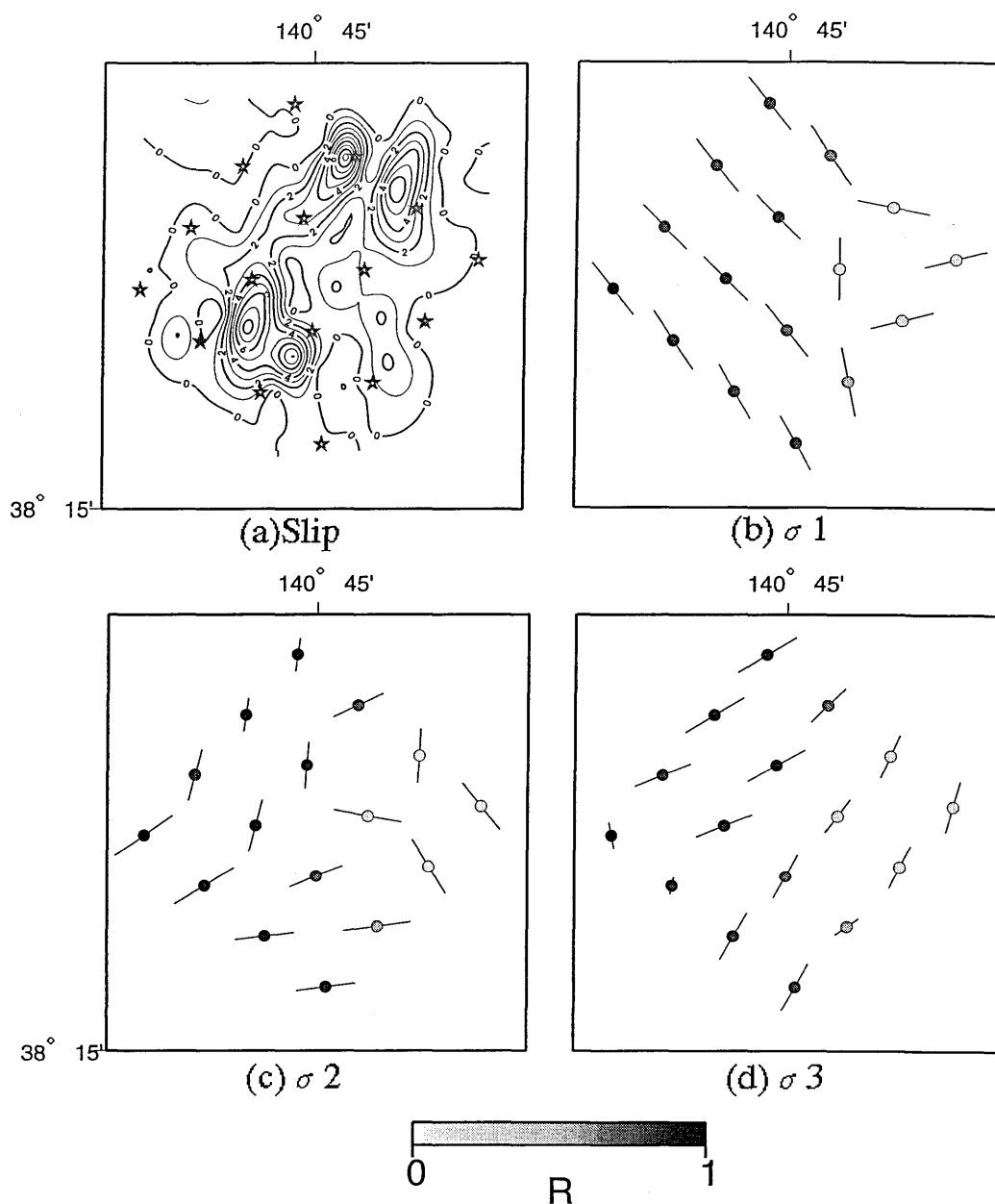


Fig. 7. Spatial variation of stress field on the fault plane of main shock. (a); Slip distribution (contours) after Okada *et al* (2000) and the location of grid points (stars). (b) (c) and (d); Directions of principal axes and stress ratio R at each grid point. The shading of circles denotes the value of stress ratio R .

参考文献

Ansel, J.H. and E.G.C. Smith, 1975, Detailed Structure of a Mantle Seismic Zone using the Homogeneous Station Method, *Nature*, **253**, 518-520.

Gephart, J.W. and D.W. Forsyth, 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence, *J. Geophys. Res.*, **89**, 9305-9320.

Horiuchi, S., G. Rocco and A. Hasegawa, 1995, Discrimination of fault planes from auxiliary planes based on simultaneous determination of stress tensor and a large number of fault plane solutions, *J. Geophys. Res.*, **100**, 8327-8338.

伊藤喜宏・岡田知己・松澤 暢・伊東明彦・海野徳仁・長谷川昭, 1999, 経験的グリーンテンソルを用いた微小地震のモーメントテンソルインバージョン, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Se-007.

Ito, Y., T. Okada, T. Matsuzawa, A. Ito, N. Umino and A. Hasegawa, 1999, Moment tensor Inversion for micro-earthquakes using empirical Green's function derivatives, *AGU 1999 Fall meeting*, T41-B01.

金川 忠・林 正夫・仲佐博裕, 1977, 岩石における地圧成分

- の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文報告集, 258, 63-75.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1991, Inversion of complex body waves-III. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **81**, 2335-2350.
- Okada, T., N. Umino, Y. Ito, T. Matsuzawa, A. Hasegawa and M. Kamiyama, 2000, Source process of 15 September 1998 M5.0 Sendai, NE Japan, earthquake and its M3.8 foreshock by waveform inversion, submitted to *Bull. Seism. Soc. Amer.*
- Plicka, V. and J. Zahradnik, 1998, Inverting Seismograms of weak events for empirical Green's tensor derivatives, *Geophys. J. Int.*, **132**, 471-478.
- 海野徳仁・岡田知己・松澤 暢・堀修一郎・河野俊夫・仁田交市・長谷川昭・西出則武, 1999, 長町・利府断層の深部で発生した 1998 年 9 月 15 日の地震 (M5.0) について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Sk-042.
- Yamamoto, K.H. Yamamoto, N. Kato and T. Hirasawa, 1990, Deformation rate analysis: A new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compressions, *Tohoku Geophys. J. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser.5)*, **33**, 127-147.

(Received August 21, 2000)

(Accepted March 1, 2001)