

余震観測から推定した 2003年7月26日宮城県北部地震 ($M 6.4$) の 余震の震源とメカニズム解の分布

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター*

海野徳仁・岡田知己・中島淳一・堀修一郎・
河野俊夫・中山貴史・内田直希・清水淳平・
菅ノ又淳一・ガマゲシヤンタ・仁田交市・矢部康男・
迫田浩司・佐藤凡子・伊藤 実・長谷川 昭

防災科学技術研究所** 浅野陽一

山形大学理学部地球環境学科*** 長谷見晶子・出町知嗣・矢島良紀

Hypocenter and Focal Mechanism Distributions of Aftershocks of July 26, 2003, $M 6.4$ Northern Miyagi Earthquake Revealed by Temporary Observations

Norihito UMINO, Tomomi OKADA, Junichi NAKAJIMA, Shuichiro HORI, Toshio KONO,
Takashi NAKAYAMA, Naoki UCHIDA, Junpei SHIMIZU, Junichi SUGANOMATA,
Gamage SHANTHA, Kouichi NIDA, Yasuo YABE, Koji SAKODA,
Namiko SATO, Minoru ITO and Akira HASEGAWA

Reserach Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science,
Tohoku University, Aramaki, Aobaku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

Youichi ASANO

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
Tennoudai 3-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

Akiko HASEMI, Tomotsugu DEMACHI and Yoshinori YAJIMA

Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science, Yamagata University,
Kojirakawa-machi 1-4-12, Yamagata, Yamagata 990-8560, Japan

(Received September 24, 2003; Accepted December 26, 2003)

We conducted a temporary seismic observation just after the occurrence of July 26, 2003, $M 6.4$ northern Miyagi earthquake, in order to precisely locate aftershock hypocenters. Thirteen portable data-logger stations and one communication satellite telemetry station were installed in and around the focal area of the earthquake. Hypocenters of aftershocks were located by using data observed at those temporary stations and nearby stationary stations of Tohoku University, Hi-net and Japan Meteorological Agency. Obtained aftershock distribution delineates the fault planes of this $M 6.4$

* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

*** 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

** 〒305-0006 つくば市天王台 3-1

event in the depth range of 3–12 km, dipping to the west at an angle of ~ 50 degree in the northern part of the aftershock area and to the northwest again at ~ 40 degree in the southern part. Temporary observation data also allowed us to determine focal mechanisms of many aftershocks. The results show that focal mechanism of reverse fault type is predominant in this earthquake sequence including foreshock (M 5.6), main shock (M 6.4) and most aftershocks. Directions of P axes, however, are classified into three groups. P axes of M 5.6 foreshock and the main shock estimated from P-wave polarities have NW–SE directions. On the other hand, moment tensor solution of the main shock has a P axis of east–west direction. Moreover, the largest aftershock (M 5.5), that occurred in northernmost part of the aftershock area, has a P axis of NE–SW direction. Aftershocks with P axis of NW–SE direction occurred mainly in the southern part of the aftershock area where M 5.6 foreshock and the main shock ruptures initiated. Many aftershocks with P axes of east–west direction took place in the central part of the aftershock area where large amount of fault slips by the main shock were estimated by wave form inversions. Many aftershocks in the northernmost part of the aftershock area have the same focal mechanisms as that of the largest aftershock.

Key words: aftershock, focal mechanism, northern Miyagi earthquake, northeastern Japan arc

§ 1. はじめに

2003年7月26日00時13分に宮城県北部を震源とするマグニチュード(M)5.6の地震が発生し、宮城県鳴瀬町と矢本町で震度6弱が観測された。その7時間後の同日07時13分ころには、 M 5.6の震央の約3km南で M 6.4の地震(本震)が発生して、宮城県鳴瀬町、南郷町、矢本町で震度6強、河南町、小牛田町、桃生町、涌谷町で震度6弱が観測された。さらに、同日16時56分には M 5.5の最大余震が発生し、河南町で震度6弱を観測した。一連の地震活動により、宮城県を中心として600名以上の負傷者があったが、幸いにして死者はなかった。また、全壊家屋300棟以上を含む住家被害は8,500棟を超えている。東北大学、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)、気象庁の定常観測点は、今回の地震の震源域に最も近いものでも、約15km離れていたため、定常観測点のデータだけでは、地表から深さ10数kmの範囲に分布するであろう余震の深さを抑えられないこと、したがって本震の震源断層の位置・形状の推定に問題が生じることが予想された。そこで、余震の震源を精度よく決めることを目的として、東北大学では震源域の直上およびその周辺に13点のデータロガー観測点を設置して、26日17時頃から余震観測を実施した。また、28日には震源域の直上に臨時衛星テレメーター観測点(矢本観測点)を設置して、同日20時頃から観測データを送信した。これらの合計14点の臨時観測点のデータを、既存の定常観測点のデータと併合処理することにより得られた、余震の震源分布およびメカニズム解分布の特徴について報告する。

§ 2. 余震分布

東北大学では、地震発生の当日の7月26日からデータロガーによる臨時観測点を、震源域およびその周辺域

に設置した。各観測点には、2Hz地震計3成分を設置し、データロガー(白山工業:LS7000)を自動車用バッテリーで駆動することにより、100Hzサンプリングで連続波形収録を行った。各観測点ごとに観測開始時間は異なっているが、7月26日16時56分の最大余震(M 5.5)の直後から、連続波形データが収録されはじめた。データロガー観測点の位置をFig.1に黒四角印で、東北大学、Hi-net、気象庁の定常観測点の位置を、それぞれ、丸印、逆三角印、三角印で示す。図中の星印は、北から、最大余震(M 5.5)、前震(M 5.6)、本震(M 6.4)の位置を表す。また、宮城県矢本町の大塩小学校に衛星テレメーター観測点を設置し、2Hz3成分地震計の連続波形記録をリアルタイムで送信することにより、7月28日から、震源域直上の観測点の情報が、全国で受信可能となった。この矢本観測点の位置をFig.1に+印で示す。

データロガー観測点、矢本観測点、および震源域から20km以内の定常観測点(東北大学、Hi-net、気象庁)のデータを併合処理して $M \geq 2$ (東北大学観測網によるマグニチュード)の余震を震源決定した。7月26日17時から8月3日14時までの期間の結果を、Fig.2に示す。震源決定に用いた地震波速度構造は、東北大学ルーチン震源決定に用いている構造[Hasegawa *et al.* (1978)]である。余震は深さ2.5~13km程度に分布するが、震源域の直上に観測網を展開したので、深さの抑えの効いた震源決定をすることができた。

余震の震源の深さ分布を詳細に検討した結果、Fig.2(a)の破線XX'で示された北緯38.44度付近を境にして、震源域の北側と南側では、余震分布に相違が見られることがわかった。Fig.2(c)は北側領域の余震の深さ分布を、Fig.2(a)のAA'断面に沿って示したものである。一方、Fig.2(d)は南側領域の余震の深さ分布を、Fig.2(a)のBB'断面に沿って示したものである。また、すべて

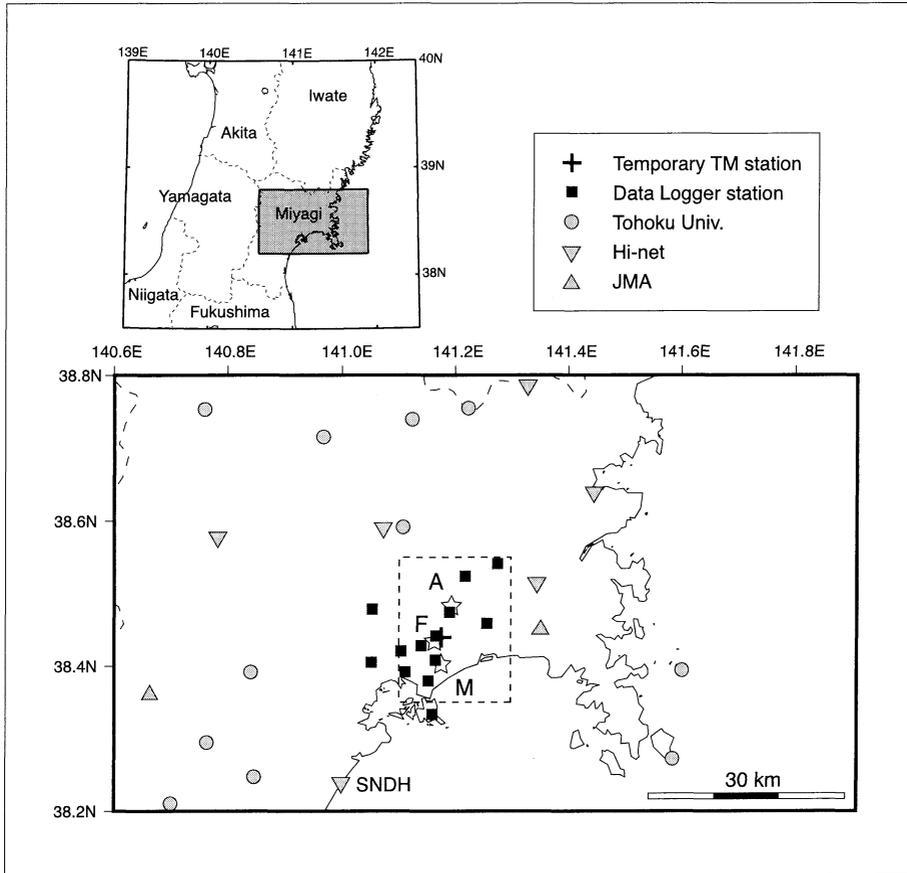


Fig. 1. Map showing observation stations and epicenters of July 26, 2003, northern Miyagi earthquake sequence. Solid squares and a cross denote locations of temporary data logger stations and a communication satellite telemetry station, respectively. Gray circles, reverse triangles and triangles show locations of seismic stations of Tohoku University, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), and Japan Meteorological Agency (JMA), respectively. Stars F, M and A denote epicenters of a foreshock (M 5.6), main shock (M 6.4) and the largest aftershock (M 5.5), respectively. Study area shown in Fig. 2 is indicated by a dashed rectangle. SNDH shows a location of Sendai bore-hole station of Hi-net.

の余震の南北断面を Fig. 2(b) に示す。AA'断面および BB'断面は、それぞれ、北側領域と南側領域の余震の深さ分布が最も薄くなる方向であることから、今回の地震の震源断層は、北側領域ではほぼ西側に約 50 度で傾斜した面であり、南側領域ではほぼ北西方向に約 40 度で傾斜した面であることがわかる。Fig. 2(c) の深さ分布をみると、震源断層のほぼ中間の深さに共役断層の存在を示唆する余震分布がみられることは、震源過程を調べる上でも興味深い。また、Fig. 2(b) の南北断面から明らかのように、北側の余震分布は南側のそれと比較して、より深部と浅部に拡がっており、深さ約 5~7 km 付近には余震活動の低調な領域が存在している。今後、これらの余震の空間分布と、震源断層面上における前震および

本震のすべり量の空間分布などとの比較研究を行う予定である。

§ 3. 余震のメカニズム解分布

OKADA *et al.* (2003) は、本研究の余震分布を基準として、定常観測点のデータを用いてダブル・ディファレンス法 [Waldhauser and Ellsworth (2001)] により震源再決定を行い、前震、本震、最大余震の震源位置と、それらの地震といくつかの余震の P 波初動分布によるメカニズム解を求めている。さらに、彼らは近地の観測波形を用いることにより、前震、本震、最大余震の地震のモーメントテンソル解を決定した。それらの結果を Fig. 3 に示す。図から明らかのように、これらの地震はすべ

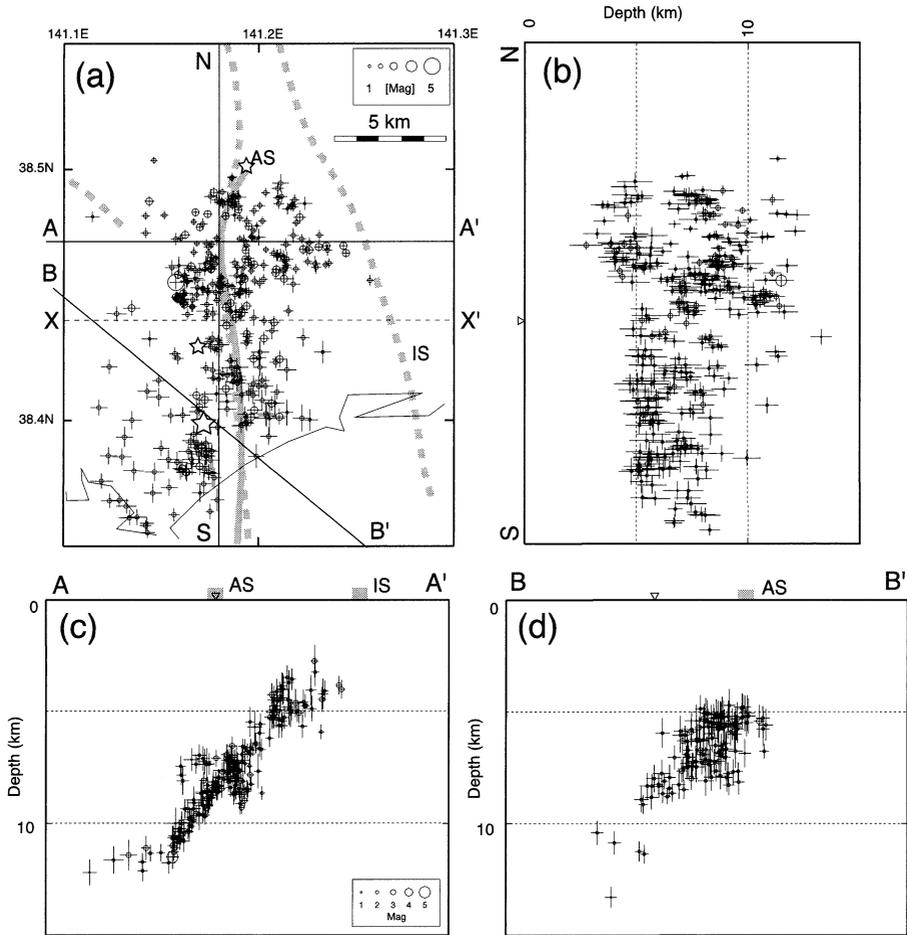


Fig. 2. Distribution of aftershocks determined by temporary observation data. Locations of aftershocks and standard deviations of them are shown by open circles and thin lines, respectively. Thick gray line AS denotes Asahi-yama flexure (Active Fault Research Group, 1991). Gray dashed line IS shows the location of Ishinomaki-wan fault (Nakamura, 1992). (a) Map view. (b) NS vertical cross section. (c) Vertical cross section along line AA' in (a). Aftershocks in the northern part (north of XX' in (a)) of the aftershock area are shown. (d) Vertical cross section along line BB' in (a). Aftershocks in the southern part (south of XX' in (a)) of the aftershock area are shown. Epicenters of $M_{5.6}$ foreshock, main shock and the largest aftershock determined by Okada *et al.* (2003) are shown by open stars.

て逆断層型のメカニズム解であるが、主圧力軸の方向には相違がみられる。すなわち、前震のP波初動極性によるメカニズム解とモーメントテンソル解はよく一致しており、北西-南東方向の主圧力軸である（以下、北西-南東方向の主圧力軸のメカニズム解をP型と呼ぶことにする）。また、本震のP波初動極性によるメカニズム解は同じく北西-南東方向の主圧力軸であるが、モーメントテンソル解は東西方向の主圧力軸である（東西方向の主圧力軸のメカニズム解をM型と呼ぶことにする）。さらに、最大余震のP波初動によるメカニズム解とモーメントテンソル解はよく一致しており、主圧力軸の方向は

前震や本震のP波初動によるメカニズム解のそれとはほぼ直交する、北東-南西方向である（北東-南西方向の主圧力軸のメカニズム解をA型と呼ぶことにする）。このように、前震、本震、最大余震のメカニズム解の主圧力軸は、互いに異なった方向を向いている。

震源域およびその周辺域に多数の観測点を設置したことにより、余震の震源位置のみならずメカニズム解をも高精度に決定することが可能となった。ここでは、臨時余震観測のデータと定常観測点のデータを併合処理し、P波初動極性によるメカニズム解の空間分布を求めた。7月26日17時から8月3日14時までの期間に発生し

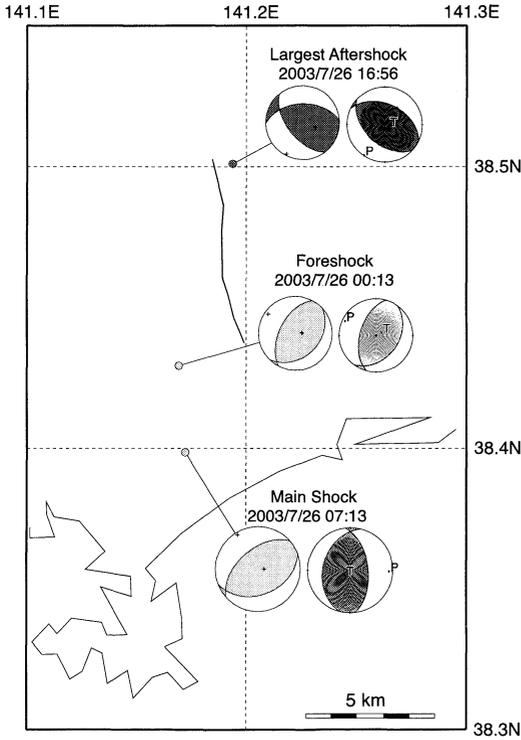


Fig. 3. Focal mechanisms of $M_{5.6}$ foreshock, main shock and the largest aftershock projected on lower focal hemispheres (OKADA *et al.*, 2003). Focal mechanisms determined by P-wave polarities are shown on the left, and moment tensor solutions determined by waveform inversions on the right. All focal mechanisms are reverse fault types. However, directions of P axes are classified into three groups (see text).

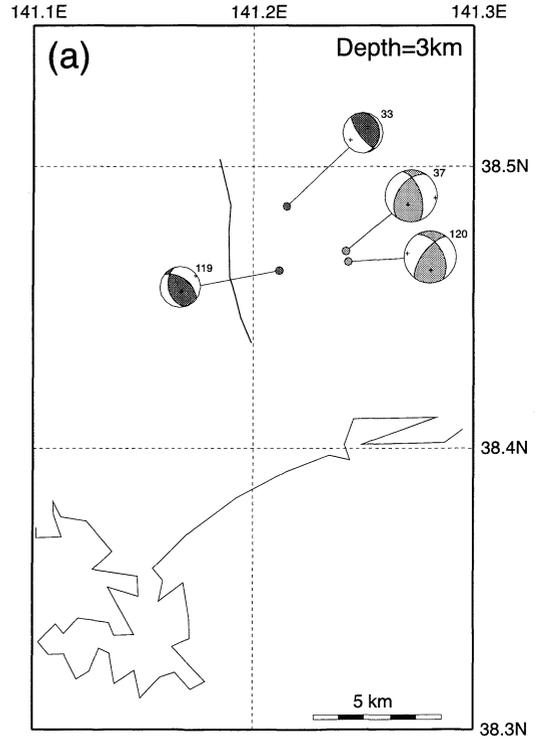


Fig. 4. Focal mechanisms of aftershocks determined by P-wave polarities. Gray colors in lower focal spheres denote three types of focal mechanisms (see text). Numerals attached to individual events are earthquake number allocated to aftershocks in chronological order. (a) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 3 km.

た余震のうち、P波初動の押し引きデータが10個以上の余震についてメカニズム解を求めた。震源域の直上に設置した臨時観測点の押し引きデータは、余震の震源が浅いために、震源球上で広い範囲に分布している。メカニズム解を決定する際には、最良解から順次エラーの少ない4個のメカニズム解を求めて、それら4個のメカニズム解のばらつきが少ない余震のみを解析に用いた。P軸の決定精度は、およそ15度以内であると考えられる。その結果、133個の余震についてメカニズム解が得られた。

それらのメカニズム解を、震源の深さ1 kmごとに分けて、Fig. 4(a)~(i)に示す。Fig. 3およびFig. 4の震源球および震央は、3種類の明暗の灰色を付してある。最も明るい灰色はP型のメカニズム解を表す。中間の明るさの灰色はM型のメカニズム解を表す。最も暗い灰色はA型のメカニズム解を表す。これらの余震のメカニ

ズム解の区分は、目視によるものである。なお、メカニズム解の横の数字は、余震の発生時刻順に付けた地震番号である。

例えば、Fig. 4(d)に示した深さ6 kmにおけるメカニズム解の空間分布をみると、P型のメカニズム解をもつ余震は、主に震源域の南側に分布しており、M型の余震は震源域の中央部に多く発生している。さらに、A型の余震は震源域の北側に多く分布している。このような余震のメカニズム解の空間分布の特徴は、ほかの深さに発生した余震についてもみることができる。このように、余震のメカニズム解分布から推定される震源断層は、北東-南西方向の走向をもつ南側の断層と、南北方向の走向をもつ北側の断層に大別される。P型のメカニズム解の余震の大部分が南側の断層面上に発生しており、M型のメカニズム解の余震が中央部に多く発生していることと、余震の震源分布から推定される震源断層の形

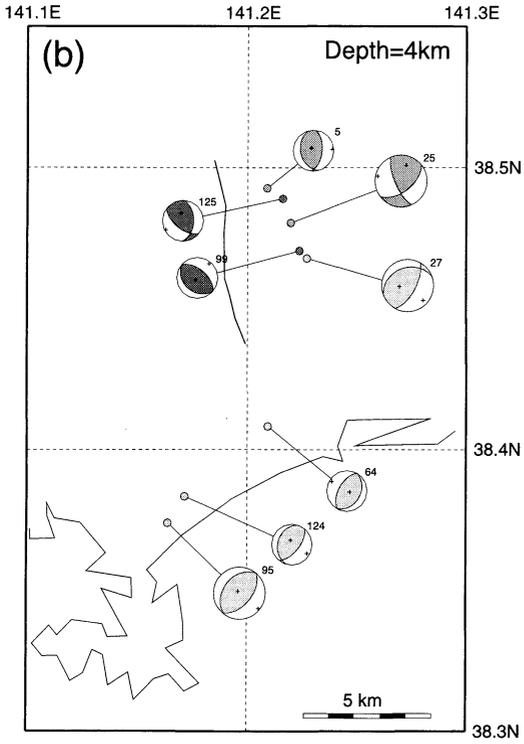


Fig. 4. Continued. (b) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 4 km.

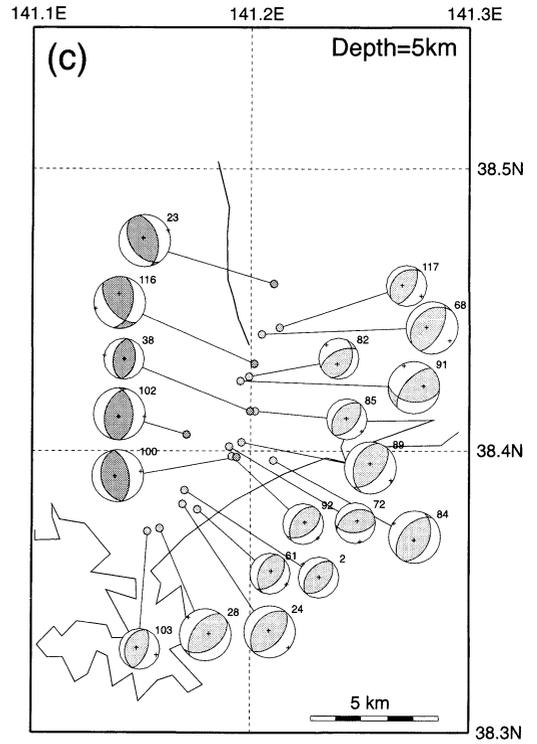


Fig. 4. Continued. (c) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 5 km.

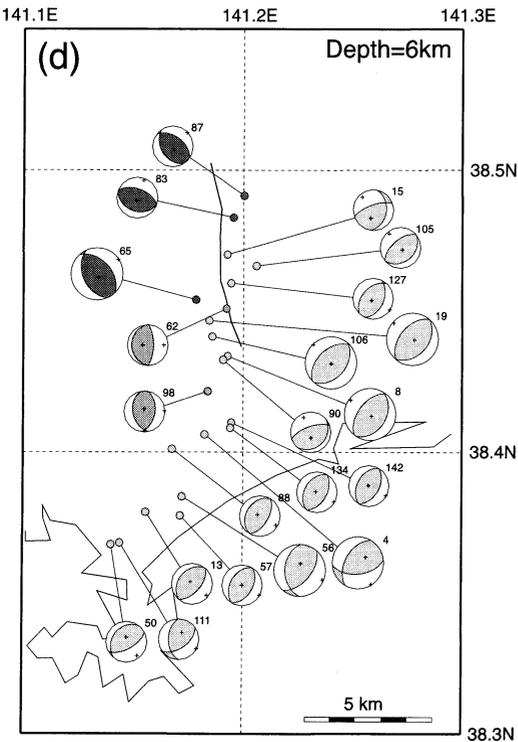


Fig. 4. Continued. (d) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 6 km.

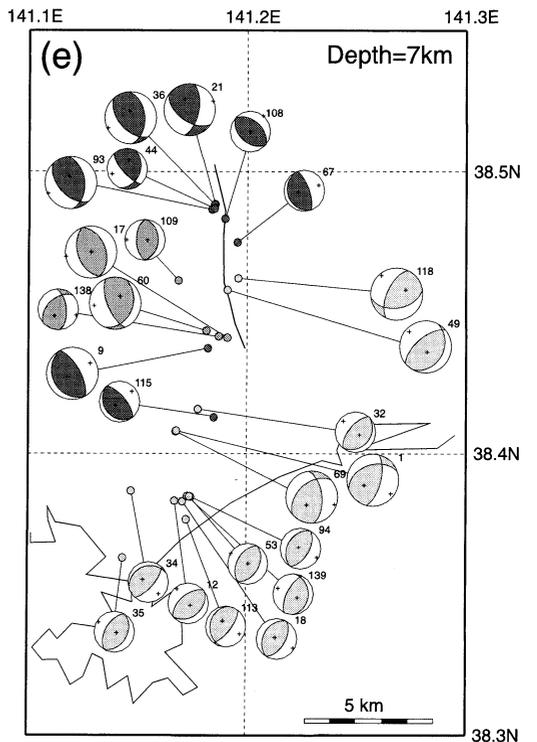


Fig. 4. Continued. (e) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 7 km.

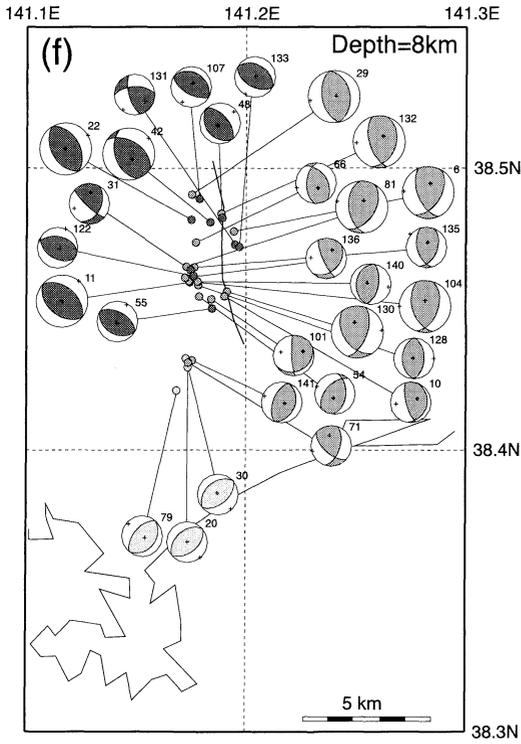


Fig. 4. Continued. (f) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 8 km.

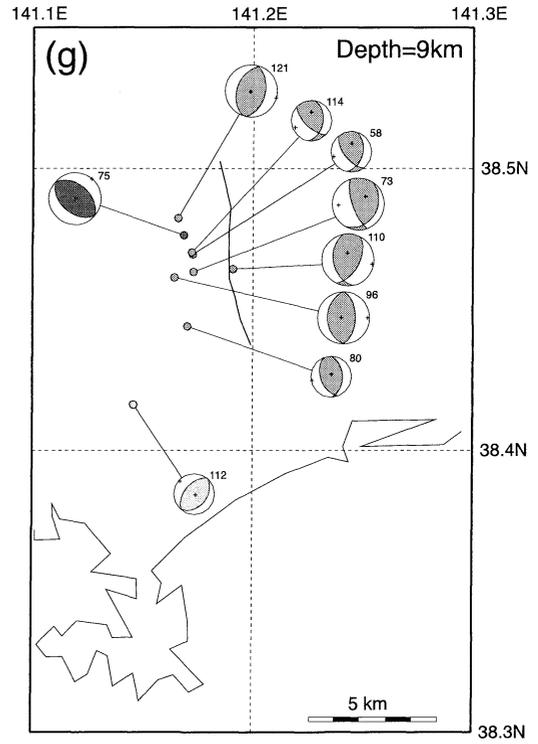


Fig. 4. Continued. (g) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 9 km.

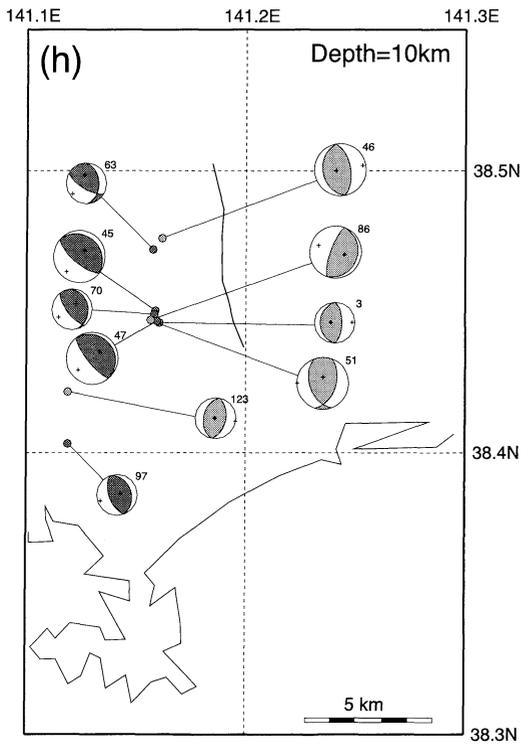


Fig. 4. Continued. (h) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 10 km.

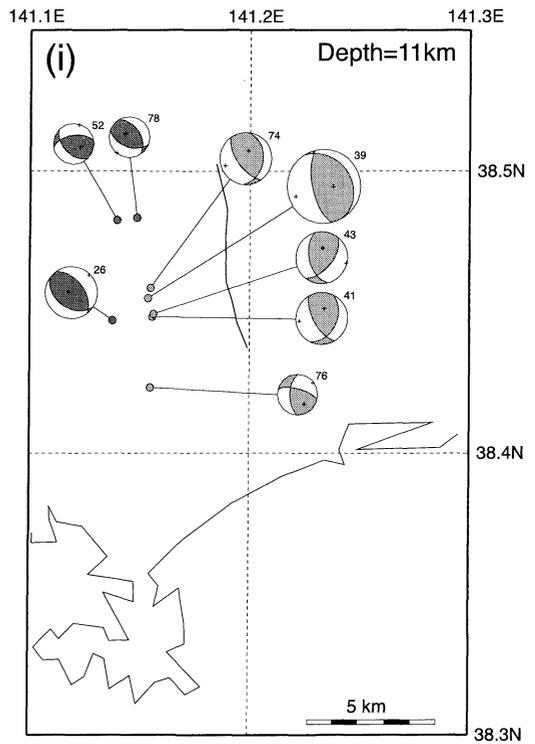


Fig. 4. Continued. (i) Focal mechanisms of aftershocks with focal depths of 11 km.

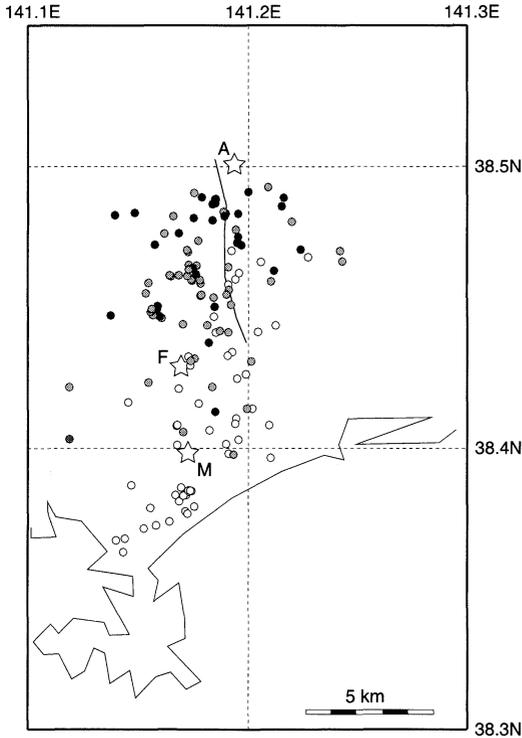


Fig. 5. Distribution of aftershocks having three types of focal mechanisms. White, gray and black circles denote aftershocks with NW-SE, east-west and NE-SW directions of P axes, respectively. Stars F, M and A denote epicenters of $M_{5.6}$ foreshock, main shock and the largest aftershock, respectively.

状 (Fig. 2) の関係は調和している。

メカニズム解が推定されたすべての余震の震央分布を Fig. 5 に示す。白色丸印は P 型の余震、灰色丸印は M 型の余震、黒色丸印は A 型の余震を表す。星印 F, M および A は、それぞれ、前震、本震、最大余震の震央 (破壊の開始点) を表す。八木・他 (2003) は、遠地実体波と近地強震動計記録を用いて、前震、本震、最大余震の詳細な震源過程を求めた。彼らによると、前震の破壊は南側に伝播している。また、本震の破壊は、前震の破壊が停止した領域から始まっており、北に向かって約 10 km 伝播して停止している。本震のすべり量の大きい領域は、震源域の中央部付近である。したがって、本震の P 波初動極性によるメカニズム解が P 型であるのは、破壊の開始点が南側の断層面に位置していたことにより、一方、モーメントテンソル解が M 型であるのは、本震の主要な破壊が北側の断層面で起こったことによると考えられる。さらに、最大余震の破壊は、本震の破壊が停止し

た領域から始まり、北西に約 3 km 伝播している [八木・他 (2003)]。これら 3 つの大きな地震の震源過程の様式と、余震のメカニズム解の空間分布の特徴には、次のような相関が見られる。(1) 前震および本震の破壊の開始点は、余震域の南側の北東-南西方向の走向をもつ断層面上にあり、その領域で発生した余震の大部分は P 型のメカニズム解である、(2) 本震のすべり量の大きい領域は、震源域中央部付近の南北方向の走向をもつ断層面上にあり、その領域では東西方向の主圧力軸を持つ M 型のメカニズム解の余震が多く発生している、(3) 震源域の北端部で発生した最大余震と同様なメカニズム解 (A 型) の余震が、主に、震源域の北側で発生している。

§ 4. 震源断層と地質構造の関係

内陸地震が発生すると、地下の震源断層と地表の活断層との関係について調査が行われることが多い。震源断層が地表まで到達した場合は活断層との関係は明白である。震源断層が地表にまで到達しない場合でも、震源断層が鉛直に近い傾斜角の場合には、地表の活断層との対比は比較的容易である。しかし、震源断層の傾斜角が小さい場合には、余震分布などから推定した震源断層の位置と、地表の活断層との相対的な位置を比較するには注意が必要である。

今回の地震の震源域近傍には、旭山撓曲 [活断層研究会 (1991)] や、日本海形成時の中新世に形成されたと考えられる正断層で、その後の短縮変形により逆断層として再活動した履歴を有している石巻湾断層 [中村 (1982), Sato *et al.* (2002)] の存在が指摘されている。震源域の北側の余震の深さ分布 (Fig. 2(c)) の上部の太線 AS は旭山撓曲の位置を、太線 IS は石巻湾断層の位置を、それぞれ示している。余震の深さ分布から、傾斜角約 50 度で西方に傾き下がった震源断層が推定できるが、この推定震源断層を浅部に延長すると、旭山撓曲の東方約 5 km に位置する石巻湾断層と交差するように見える。

ただし、今回の地震の震源域は、鳴瀬川や北上川の流域であり、データロガー観測点の直下では堆積層の厚さが厚いことが予想される。余震の震源の深さをより正確に決定するためには、この堆積層の影響を無視することはできない。ここでは、以下のように、堆積層の影響を調べた、まず、地表付近の地質構造が比較的似ていると考えられる Hi-net の仙台観測点 (Fig. 1 の SNDH) のボーリング孔のデータ (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>) を参考にして、堆積層の厚さを 650 m、堆積層内の P 波速度を 3.54 km/s、S 波速度を 1.29 km/s と仮定して、観測走時に対する観測点補正值を求めた。この観

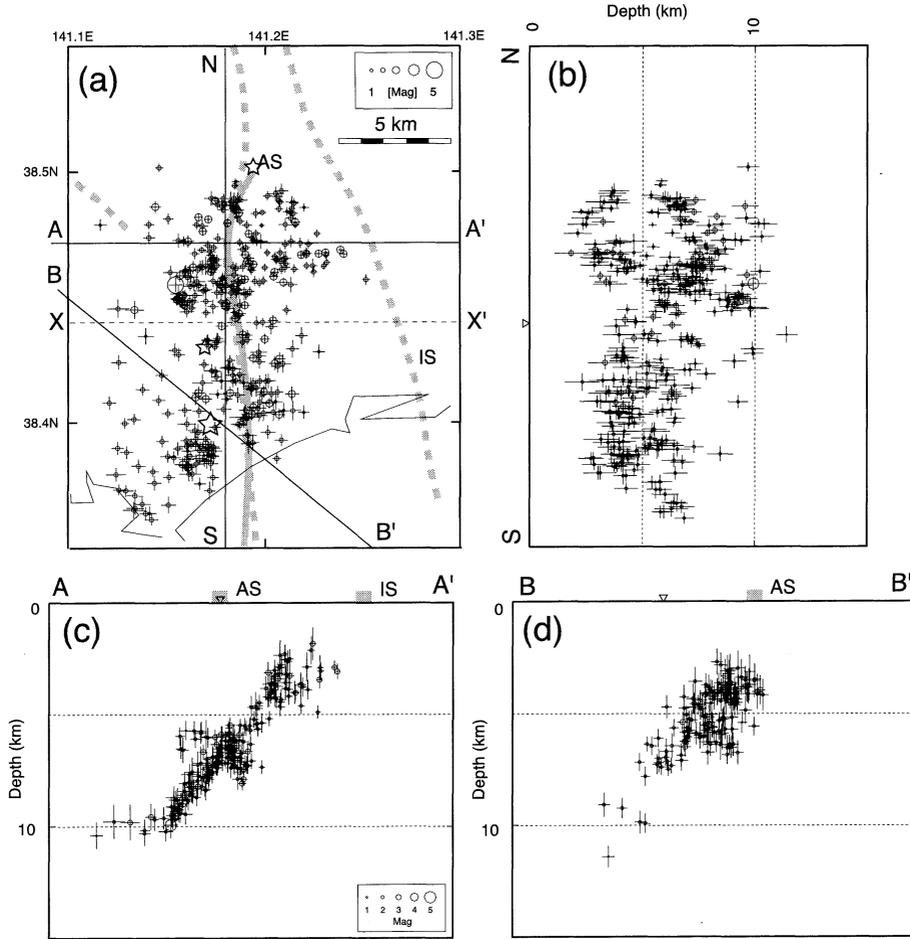


Fig. 6. Distribution of aftershocks relocated with station corrections. Others are the same as in Fig. 2.

観測点補正値を、データロガー観測点（13点）と矢本観測点に適用して、Fig. 2の余震を震源再決定した。その結果をFig. 6に示す。観測点補正値を加えることにより、震央はほとんど変化しないが、震源の深さは平均的に約2 km程度浅くなっていることがわかる。この場合、Fig. 6(c)の余震分布を地表にまで延長すると、地表との交線は旭山撓曲と石巻湾断層の中間に位置するようになる。

観測点直下の地震波速度分布に関する情報を詳細に検討して、震源決定に反映させなければ、震源の深さの絶対値を精度よく推定することはできない。震源断層と地表の地質構造との関連をさらに詳細に議論するためには、今後、震源域およびその周辺域において人工震源を用いた地下構造探査などを実施して、浅部地下構造の情報を抽出する必要がある。

§5. まとめ

2003年7月26日に発生した宮城県北部の地震 (M 6.4)の余震分布を詳細に調べるため、14点からなる臨時地震観測網を震源域に展開し、本震発生の当日から、観測を行った。この臨時余震観測データから、

- (1) 余震は、南側と北側で傾斜方向の異なるふたつの面上に分布している、
 - (2) 南側の領域の余震は、北西方向に約40度で傾き下がった面上に分布している、
 - (3) 北側の領域の余震は、西方に約50度で傾き下がった面上に分布している、
- ことが明らかとなった。すなわち、本震の断層面は、南側では北東方向の走向で北西に約40度で傾斜し、北側では南北に向いた走向で西に約50度で傾斜した、ふたつの面で形成されていると推定される。

さらに、臨時余震観測データを用いて、多数の余震のメカニズム解を求めることができた。その結果、

- (4) 大部分の余震は逆断層型のメカニズム解をもつ、
 (5) 余震のメカニズム解の主圧力軸は、震源域の南側領域では北西-南東、中央部では東西、北側領域では北東-南西である、
 ことが明らかとなった。

謝 辞

臨時観測点の設置に際しては、宮城県矢本町立大塩小学校、鳴瀬町立宮戸小学校、国民年金健康保養センターみちのく路の関係者の皆様に多大なご協力をいただきました。心より感謝いたします。また、本研究において、Hi-net および気象庁のデータを使用いたしました。匿名の査読者2名のコメントは本稿の改善に役立ちました。ここに記して感謝いたします。

なお、本研究の一部は、文部科学省科学研究費（特別研究促進費）「2003年宮城県北部の地震による地震災害に関する総合的調査研究」（課題番号：15800009）の一環として行われました。

文 献

Hasegawa, A., N. Umino and A. Takagi, 1978, Double-

planed structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, **47**, 43-58. 活断層研究会, 1991, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, pp. 437.

中村光一, 1992, 反転テクトニクス (Inversion) とその地質構造, *構造地質*, **38**, 3-45.

Okada, T., N. Umino and A. Hasegawa, 2003, Rupture process of Jul. 26, 2003 northern Miyagi earthquake sequence, NE Japan, revealed by precise hypocenter determinations, *Earth Planets Space* (submitted).

Sato, H., T. Imaizumi, T. Yoshida, H. Ito and A. Hasegawa, 2002, tectonic evolution and deep to shallow geometry of Nagamachi-Rifu active fault system, NE Japan, *Earth Planets Space*, **54**, 1039-1043.

Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2001, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.

八木勇治・伊藤喜宏・浅野陽一・関根秀太郎, 2003, 2003年7月26日宮城県北部で発生した地震の前震・本震・最大余震の震源過程とそれぞれの関係について, (社)日本地震学会講演予稿集 2003年度秋季大会, A086.