

7-3 2004年新潟県中越地震 2004 Mid Niigata earthquake

東京大学 地震研究所
Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

緊急地震観測による余震分布

2004年10月23日17時56分頃に発生した新潟県中越地震(M6.8)は、最大震度7を観測した。また、同日18時12分頃にM6.0、18時34分頃にM6.5の地震が発生し、いずれも最大震度6強を観測した。その後も、27日10時40分頃にM6.1が余震域の東端で、11月8日11時15分頃にはM5.9の地震が余震域の北東端で発生するなど、震度5以上を伴う余震が数多く発生している。これらの震源は、北北東-南南西方向に広がる長さ約30kmの範囲に分布している。本震の発震機構解は、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、M6級の余震の発震機構も同様であり、推定される断層の走向と余震分布の走向は、ほぼ一致している。今回の地震は陸域の既設地震観測網の中で発生したものの、正確な地震活動、地震を発生させた断層の位置形状などの詳細の把握は、現在得られるデータからだけでは困難であり、今回の活動と周辺の知られている活断層との対応は不明である。

そこで、オフライン型の地震計を余震発生領域に設置した(第1図)。全国の大学や関係機関が協力し設置したが、はじめの頃に設置した地震計14台を回収して、予察的な解析を行った。まず、気象庁一元化震源リストに基づいて波形を切り出し、震源決定を行った。震源決定に用いた速度構造は、人工地震探査によって得られた速度構造¹⁾を基にしている(第2図)。この地域は、遅い堆積層が厚く存在する地域であるため、東西で異なる速度構造を用いて震源決定を行った。さらに、緊急余震観測点と余震域近傍の観測点を使って、走時残差の平均値を観測点補正值として、震源決定を行った。その結果、走時残差のRMSは、P波が0.175秒から0.074秒へ、S波が0.476秒から0.166秒へ減少した。

切り出した波形数は約900個で、そのうちP波の読み取り数が3個以上でS波の読み取り数が1個以上あり、気象庁一元化震源と対応した地震が719個である。対応する気象庁一元化震源と比較すると、全体的に震央は北西方向へ移動し、深さ約3kmから17kmの範囲内に分布している。得られた震源情報を元にして、周囲の観測点に対しても走時残差の平均値を求め、それを観測点補正值とした。この観測点補正值を使って、緊急余震観測点設置前の主な地震に対して震源再決定を行った。

震源は複雑な分布をしているため、北西-南東方向の断面にスライスしてみたところ、いくつかの線状の分布が見られた(第3図)。本震を含む領域では、高角な北西傾斜の線状分布が見られ、その下端部分に本震が位置する。前後の断面図にも同様な線状配列が見られることから、この分布は面的に広がりを持っていて、それが本震の地震断層であると考えられる。この面状配列の北東端と南西端では、本震発生直後にM6級の地震が発生している。この面の東約5kmにも同様な高角な北西傾斜の線状配列が見られ、その下端部分には最大余震が位置する。本震を含む分布に比べて、水平方向の広がりはいくつか小さいが、薄い面を形成している。その後、27日に発生したM6.1の地震に対応した分布も見られ、これは低角な東傾斜の面状分布をしていて、本震や最大余震に関係する分布と共役な方向である。これらの面の走向や傾斜は、それぞれの地震の発震機構解と矛盾しないことから、これらが地震断層面を表していると考えられる。その他にも、余震域の周辺部分で南東傾斜や北西傾斜の余震分布が見られる。

余震分布と速度構造モデル

緊急余震観測データに、Double-Difference トモグラフィー法²⁾を適用して、余震分布と震源域周辺の

速度構造との関係を検討した（第4図）。地表付近の東側では基盤が露出し、西側では厚い堆積層があるだけでなく、深さ10 km程度まで東西方向に速度の不均質が存在する。本震の震源断層に対応する余震（主断層余震群）は、高速度領域と、低速度領域の境界部に位置する。主要な3枚の断層面の他に、東傾斜の低角の断層面も見える。主断層余震群は深4 km程度で傾斜が変わり、浅部ではより低角になる。その延長部は小平尾断層もしくは六日町盆地西縁断層に一致する。

余震分布に基づく応力再配分の解析

緊急余震観測により得られた余震分布から震源断層を設定し、本震(M6.8)、及び、最大余震(18:34, M6.5)による応力再分配と最大余震、及び、10/27に震度6弱を記録した余震(10/27余震)の発生について検討した（第5図）。その結果、クーロン応力の増加領域で余震が発生したと考えることが可能であることが分かった。

中越地震震源域の地殻・地質構造

今回の地震が発生した領域は、厚い新第三系から第四系の堆積層が分布する新潟堆積盆地の東縁部に相当する。この堆積盆地は地質学的には日本海拡大に引き続いて1千7百万年前頃に形成されたリフト（地殻が伸張薄化して形成された凹地）であり、盆地中央部では6,000mをこえる火山噴出岩や堆積層が充填されている。この堆積盆地の東縁は新発田－小出線と呼ばれる中新世に形成された断層によって限られ、東方の越後山脈には中生代の岩石が露出する。震源域の魚沼丘陵は、北北東方向の断層・褶曲をともなって第四紀後期から急激に隆起した地域であり、この丘陵は軟弱な堆積層から構成され、発生した多数の地滑りの地質学的な要因となっている。本地震の震源域は、日本海拡大時に背弧リフトとして形成された新潟堆積盆地の東縁を限る新発田－小出線と、リフト内のtear faultとして形成された柏崎－銚子線の交差部に位置し、複雑な構造を呈する（第6図）。

震源域周辺の地質・活断層と余震分布

震源域周辺は、日本海東縁から連続する歪みの集中域に位置しており、第四紀後期以降の短縮変形が大きく、しばしば大規模な地震が発生してきた。震源域の南方には魚沼丘陵の東縁を限る六日町断層が分布する。この断層は基本的には、新発田－小出線延長部の新潟堆積盆地の東縁を限る中新世に形成された西傾斜の正断層が、逆断層として再活動したものである。この断層は延長30kmに渡って追跡され、断層帯南部で2mm/千年、北部で1mm/千年の大きな垂直平均変位速度を示す⁴⁾。六日町断層における第四紀後期の累積変位は北方に向かって減少し、代わって魚野川周辺では東に傾斜する諏訪峠撓曲に沿った地形面の変形が現れる。地質構造的には南方の魚沼丘陵が概ね西傾斜の等斜構造をなすのに対し、震源域では複背斜構造をなしその様相を異にする（第7図）。

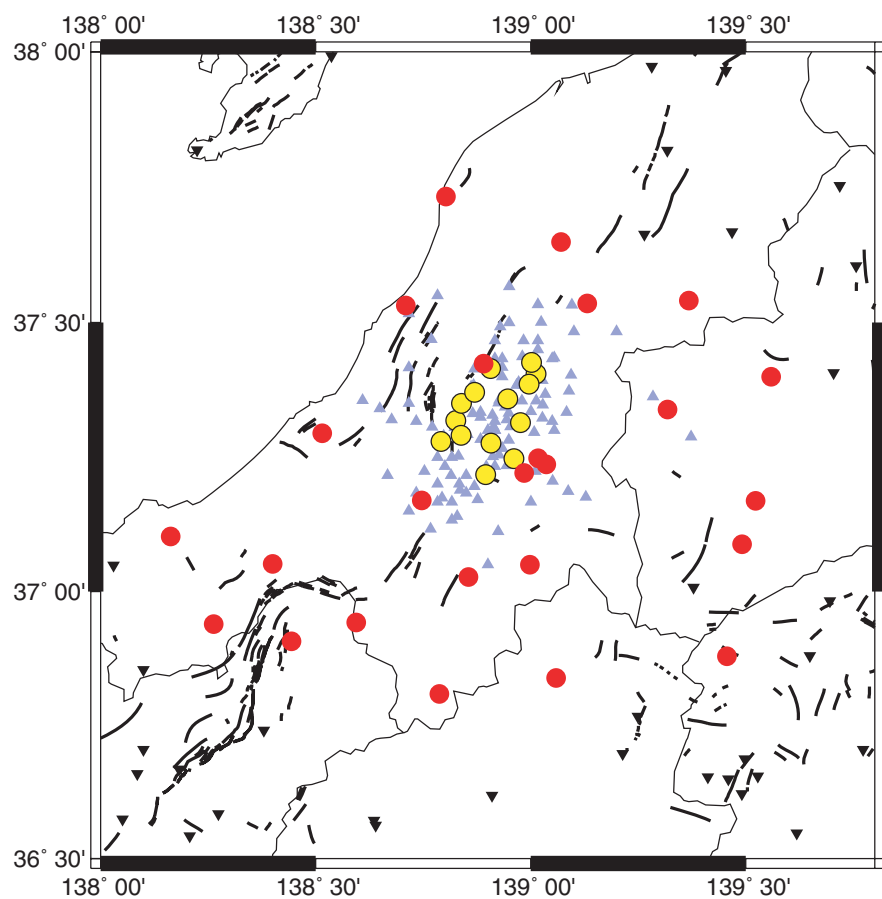
震源域の地質構造断面と震源域の空間配置概念図

第8図に魚野川に沿った断面（第7図のA-A'）に投影した余震の深さ分布を示す。本震（第8図の1）から浅部に向かって一つのクラスターを構成しており、余震分布からは高角度西傾斜の震源断層面が推定される。断層の上盤側では多数の余震が発生している。この浅部延長は、ほぼ諏訪峠撓曲下に達する。地表地震断層による変位が報告¹¹⁾されている小尾平断層はこの東方に位置する。活褶曲を伴う北日本の第三系では低角度のデタッチメント（ほぼ水平な断層）が堆積層中にしばしば認められることから、高角度の震源断層に沿った滑りが、堆積層中のデタッチメントを経て、小尾平断層まで達していた可能性がある。10月23日の午後6時34分に発生したM6.5の最大余震（第7・8図の4）は、本震より東方でより深い位置に認められる余震のクラスターに対応しており、この地震を発生させた

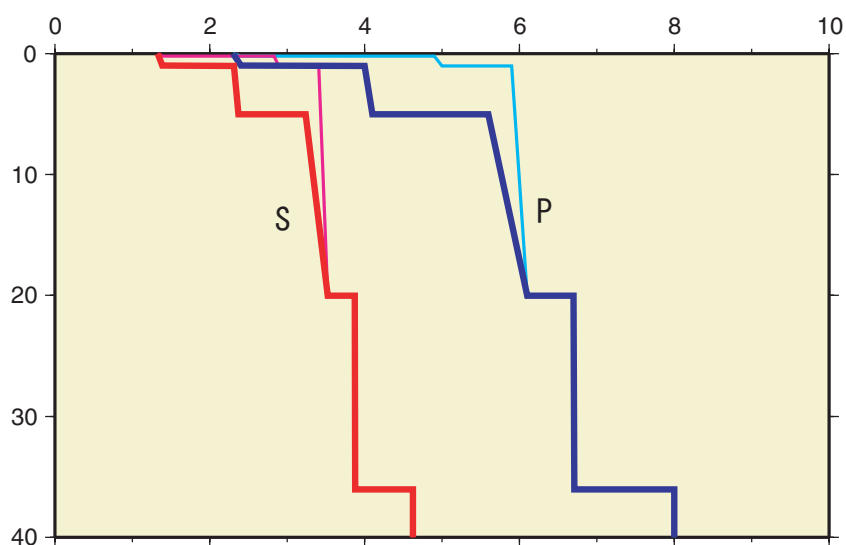
震源断層は本震の震源断層とほぼ平行し、より東側の深い位置にあったことが分かる。最大余震の浅部延長はほぼ六日町断層に対応し、余震分布は六日町断層の深部延長部のみがずれ動いて最大余震が発生したことを示している。10月27日午前10時40分のM6.1の余震（第7・8図の5）も、その2次余震の分布から震源断層の形状が明瞭に推定できる。この地震は、東傾斜の低角度の逆断層で越後山脈側が隆起するセンスの断層であった（第8図）。第9図に余震も含めた震源断層の空間配置概念図を示した。

参 考 文 献

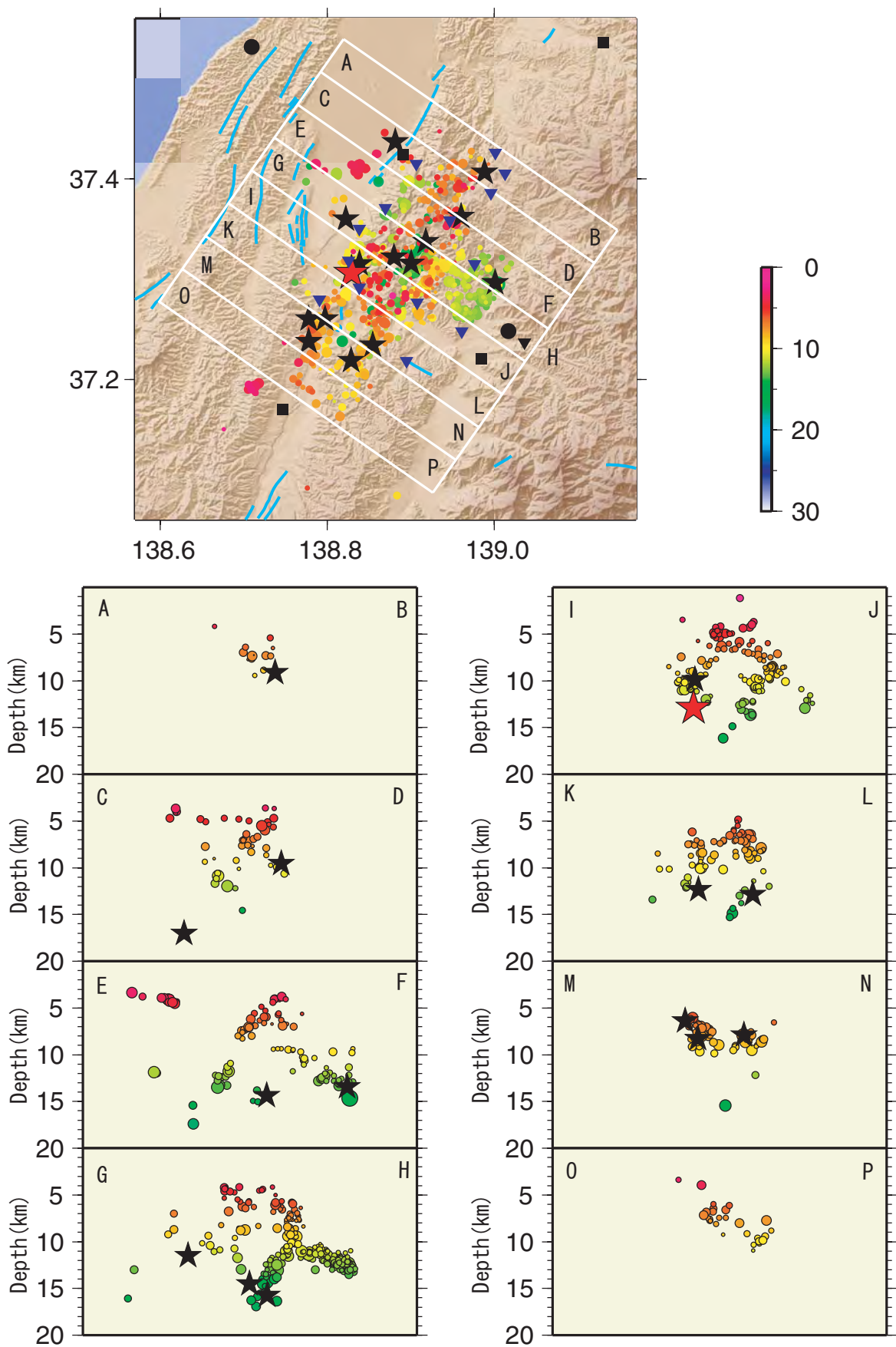
- 1) Takeda, T., H. Sato, T. Iwasaki, N. Matsuta, S. Sakai, T. Iidaka and A. Kato, Crustal structure in the northern Fossa Magna region, central Japan, from refraction/wide-angle reflection data, *Earth Planets Space* (2004).
- 2) Zhang, H., and C., Thurber, Double-Difference Tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1875-1889 (2003).
- 3) 地質調査所編, 日本地質アトラス (第2版) (1992).
- 4) 金 幸隆: 魚沼丘陵の隆起過程と六日町断層の活動累積. 活断層研究, 24, 63-75 (2004)
- 5) 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和: 長岡地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 132p. (1991) .
- 6) 柳沢幸夫・茅原一也・鈴木尉元・植村 武・小玉喜三郎・加藤碩一: 十日町地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 104p. (1985) .
- 7) 柳沢幸夫・小林巖夫・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一: 小千谷地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 177p. (1986) .
- 8) 北陸地方土木地質図編纂委員会, 北陸地方土木地質図, 799p (1990) .
- 9) 中田高ほか: 活断層詳細デジタルマップ, 60p, 東京大学出版会 (2002).
- 10) 渡辺満久ほか: 1:25,000 都市圏活断層図「小千谷」. 国土地理院技術資料 D.1-No.388. (2001) .
- 11) 産業総合研究所活断層センター: 2004年10月23日新潟県中越地震速報・緊急調査報告 (2004)
<http://unit.aist.go.jp/actfault/niigata/report/index.html>, 鈴木康弘ほか: 地震断層調査の結論 (Wed, 17 Nov 2004 08:14:41 +0900), <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/INFO/niigata/reportAF1024.html>.
- 12) 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会: 「改訂版日本の石油・天然ガス資源」. 520p. (1992) .



第1図 観測点分布 (定常観測点:●, 緊急観測点:○, 臨時観測点:▲).
Fig.1 Location of permanent stations (●) and temporal stations(○, ▲).

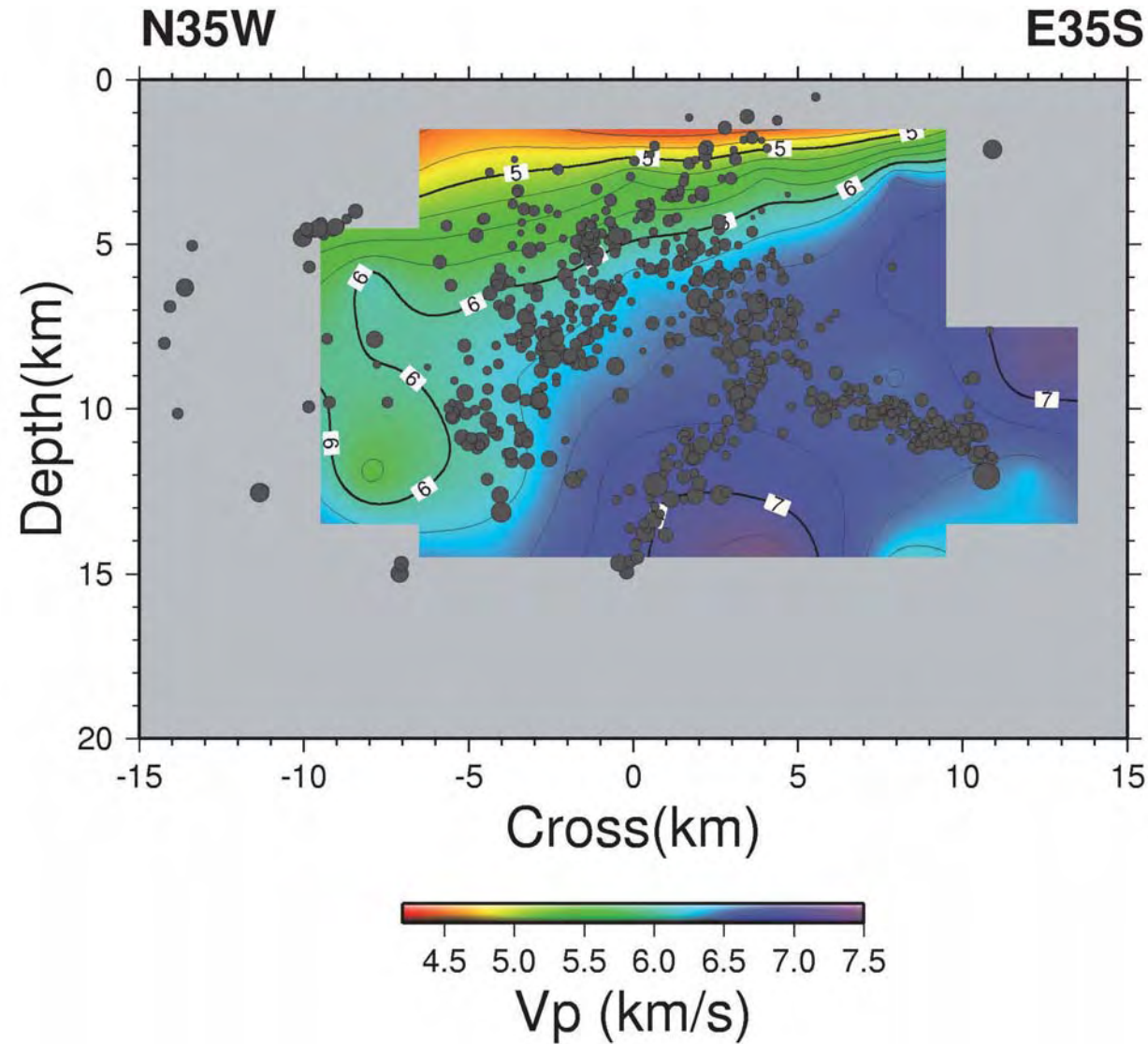


第2図 速度構造 (西部:太線, 東部:細線).
Fig.2 Model of velocity structure (W:thick line, E:thin line).



第3図 震源分布. 本震 (★) と主な余震 (★) も示した.

Fig.3 Hypocentral distribution. The main shock (★) and some large aftershocks (★) are shown.



第4図 トモグラフィー法 (Double-Difference トモグラフィー法, Zhang ;Thurber, 2003) によって同時に求められた余震の震源分布と速度構造深さ断面を示す。灰色の丸印が余震の震源, カラーコードはP波の速度 (km/s) を表す。

Fig.4 Depth section showing the P wave velocity structure and the relocated aftershocks derived from the double-difference tomography (Zhang and Thurber, 2003). Gray circles denote the locations of the aftershocks, and the color contour shows the P wave velocity.

余震分布に基づく応力再分配の解析

	長さ	幅	すべり量	モーメント	Mw
本震	30 km	10 km	1 m	9.0×10^{18} Nm	6.6
最大余震	20 km	10 km	0.5 m	3.0×10^{18} Nm	6.3

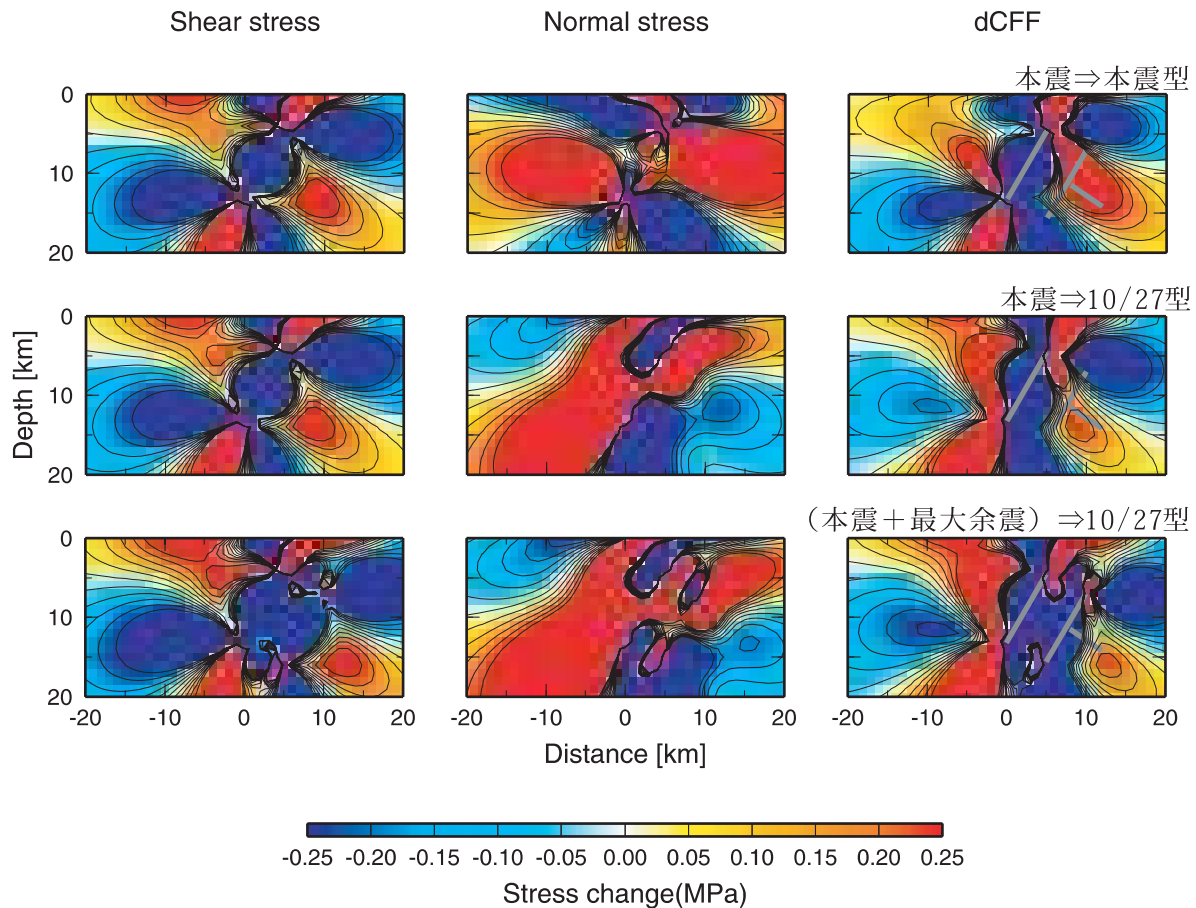
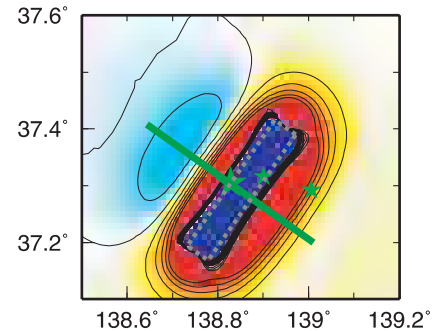
緊急余震観測により得られた余震分布から震源断層を設定し、本震(M6.8)、及び、最大余震(18:34, M6.5)による応力再分配と最大余震、及び、10/27に震度6弱を記録した余震(10/27余震)の発生について検討した。本震、最大余震ともに、断層中央下端が震源になるような一様なすべりを持つ西傾斜の逆断層(走向:215°;傾斜:60°)を仮定した(表)。10/27余震の断層は国土地理院の断層モデル(走向:24°;傾斜:34°;すべり角:81°)を用いた。なお、剛性率:30Gpa、ポアソン比:0.25、実効摩擦係数:0.4とした。

最大余震(下図上段)については、本震による Δ CFFの上昇域にその震源断層が位置する。また、10/27余震については、本震による影響(下図中段)は Δ CFFの上昇(約0.2Mpa)が見られたが、最大余震の効果も含めるとやや減少する(下図下段)。

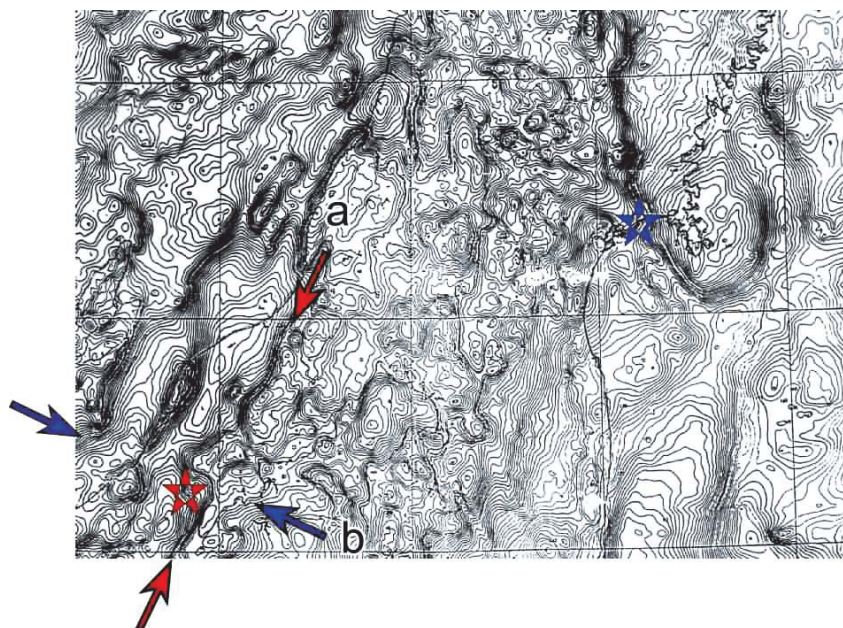
右図: 深さ10kmにおける本震による同じタイプの逆断層にかかる Δ CFF。
★は西から本震、最大余震、10/27余震を示す。緑線は下図の断面の位置を示す。

下図: 本震震源を通るN125°E断面における応力変化。横軸の原点は本震震源とした。灰線は左から、本震、最大余震、10/27余震それぞれの仮定した断層の位置を示す。応力変化は、上段、中段はそれぞれ本震によるもの、下段は本震と最大余震によるものを足したもの。応力を計算した断層タイプは、上段は本震と同じ、中段、下段は10/27余震。

dCFF (10 km depth)



第5図 本震および最大余震によるクーロン応力の変化
Fig.5 Change of Coulomb stress due to the main shock and the largest aftershock.

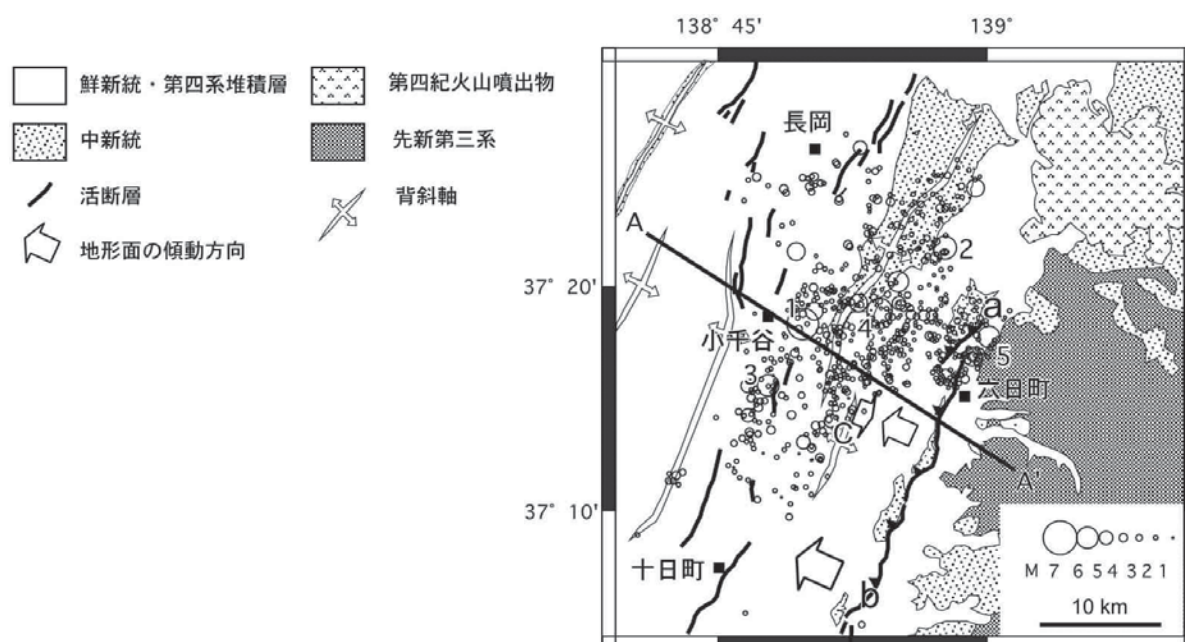


第 6 図 新潟－東北地方南部のブーゲ異常と震源域の位置

a: 新発田－小出線, b: 柏崎－銚子線, 赤い星印: 2004 年新潟中越地震の震央, 青い星印: 2003 年宮城県北部地震の震央, ブーゲ異常図は地質調査所 (1992) ³⁾ による。

2004 年新潟中越地震と 2003 年宮城県北部地震はともにブーゲ異常の急変帯で発生した。

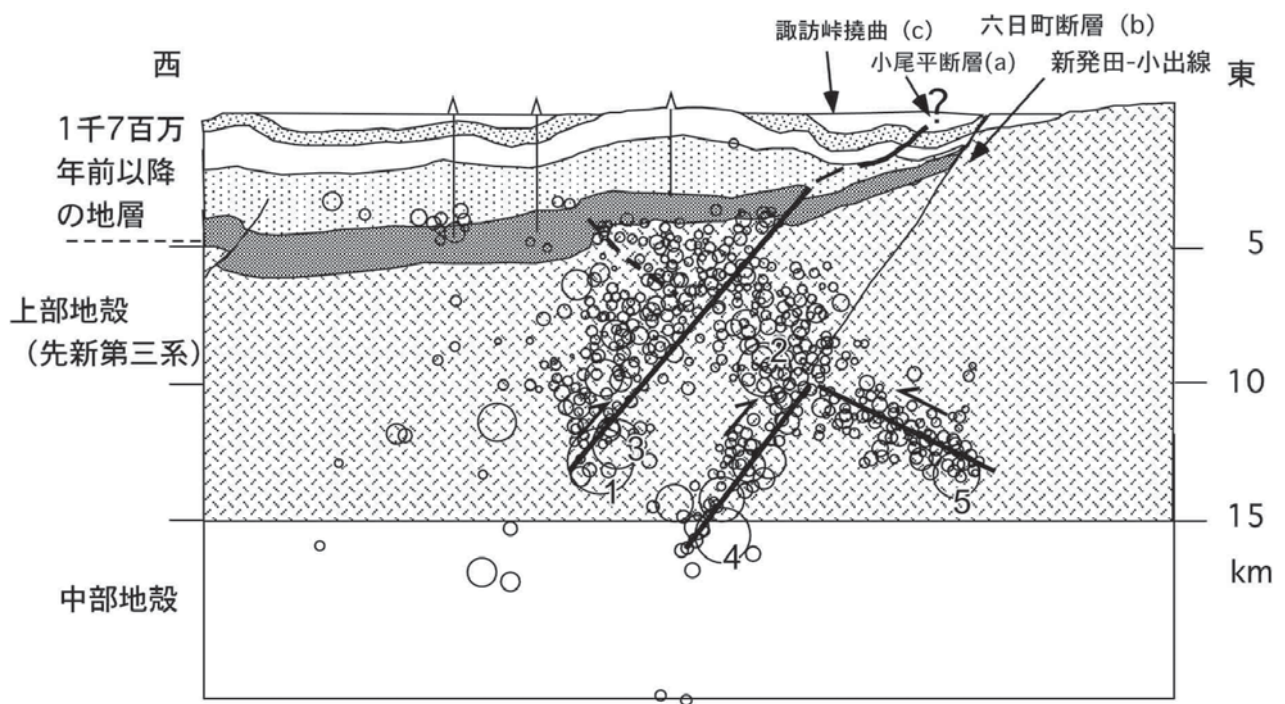
Fig.6 Bouguer anomaly map of Niigata and southern Tohoku district and the hypocentral location of the 2004 Mid Niigata earthquake. a: Shibata-Koide tectonic line, b: Kashiwazaki-Choshi tectonic line, red star: hypocenter of the 2004 Mid Niigata earthquake, Blue star: hypocenter of the 2003 Northern Miyagi earthquake, Bouguer anomalies are after Geological Survey of Japan (1992).



第 7 図 新潟中越地震震源域の地質構造と余震分布

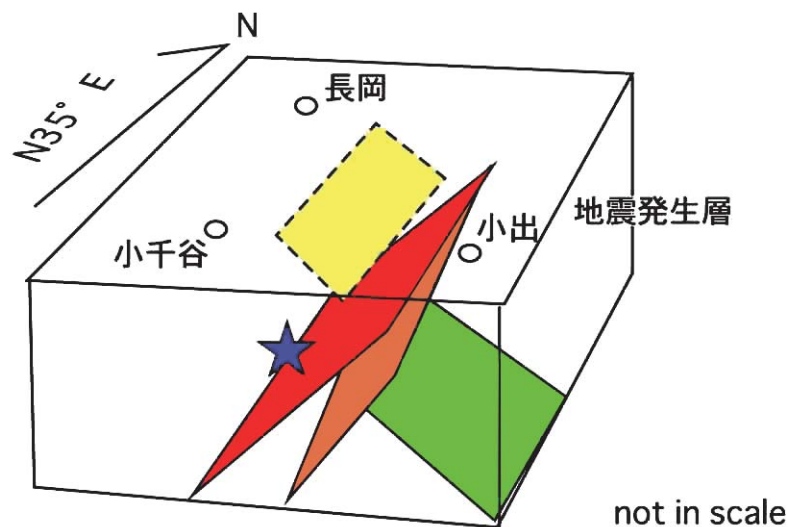
1: 本震 (10 月 23 日 17 時 56 分 M6.8), 2: 余震 (23 日 18 時 3 分 M6.3), 3: 余震 (23 日 18 時 11 分 M6.0), 4: 最大余震 (23 日 18 時 34 分 M6.5), 5: 余震 (27 日 10 時 40 分 M6.1), a: 小尾平断層, b: 六日町断層, c: 諏訪峠撓曲。地質図は ^{5), 6), 7), 8)} 活断層は ^{9), 10)}, 地形面の傾動は ⁴⁾ による。

Fig.7 Geological structure and hypocentral distribution around the source area of the 2004 Mid Niigata earthquake. 1: Main shock (October 23, 17:56' M6.8), 2: Aftershock (Oct. 23, 18:03' M6.3), 3: Aftershock (Oct. 23, 18:11' M6.0), 4: Largest aftershock (Oct. 23, 18:34 M6.5), 5: Aftershock (Oct. 27, 10:40 M6.1), a: Obirou fault, b: Mikamachi fault, c: Suwa-toge flexure. Geological map is compiled after ^{5), 6), 7)} and ⁸⁾, active fault is ⁹⁾ and ¹⁰⁾, tilting of river terraces is after ⁴⁾.



第8図 新潟中越地震震源域の地殻構造概念図
 太い実線は余震も含めた推定震源断層. 1～4は, 第7図参照. ○は余震分布, △はボーリング位置の断面への投影. ボーリング資料は⁵⁾,¹²⁾による.

Fig.8 Schematic diagram showing the crustal structure across the source faults of the 2004 Mid Niigata earthquake. Thick solid line represents an estimated source fault. Circle: aftershock, triangle: site of drill hole projected onto cross section. The data of drill holes is after ⁵⁾ and ¹²⁾.



第9図 震源断層の空間配置概念図
 空間配置の大まかな概念を示したもので, 破壊領域も含め正確な表現ではない.

Fig.9 Schematic diagram showing the 3D view of the source faults (not in exact scale).