

第161回
地震予知連絡会資料

2004年11月15日



九州大学地震火山観測研究センター
京都大学防災研究所地震予知研究センター

2004年新潟県中越地震についての第161回地震予知連絡会資料の説明

(2004年11月18日)

京大・九大合同余震観測班

第161回地震予知連絡会(平成16年11月15日)に、京大・九大合同余震観測班が提出した資料とその説明を以下に示します。この資料は、解析結果の速報であり、データ処理・解析が進み、結果が修正されることもあります。この資料の内容を引用される場合には、「第161回地震予知連絡会(平成16年11月15日)資料・京大・九大合同余震観測班」と明記してください。

謝辞

観測に際して、新潟県・栃尾市・小千谷市・山古志村をはじめ、地元の方々の暖かいご支援ご協力を頂いております。解析に当たっては、気象庁による一元化震源読み取りデータを使わせて頂きました。また、山古志村小松倉観測点では、東京大学地震研究所所有の衛星テレメーター装置を使わせていただきました。なお、本調査研究は、本調査研究は科学研究費補助金(特別研究促進費)「2004年新潟県中越地震の余震に関する調査研究」の補助を受けています。

p01 臨時観測点配置図

震源域直上、図中黒四角印で示した3箇所に衛星テレメーター方式のオンライン余震観測点を設置した。図中丸印は、既設定常観測点を示す。観測点コードの頭文字は、設置・維持管理にあたっている組織を示している(H=防災科研 Hi-net ,J=気象庁 ,E=東大地震研)。

p02 再決定余震分布図。

精度の良いものを選んでプロットした。ただし、主要な地震については、大きな白丸を用い、決定精度に関係なくプロットした。10/23 18:03, 10/23 18:11についての深さの誤差は、それぞれ1.05km および2.96kmである。の誤差が大きいことに注意されたい。

p03 余震の深さ分布図。

幅4kmの領域毎の余震の深さ分布。AA',BB'断面において、大局的に西下がりの余震分布が見られる。11/08 11:15, 10/23 18:03の震源は、余震分布の最浅部付近に位置している。その南側CC', DD', EE'断面でも、同様の位置に、西下がりの余震分布が見られ、本震の震源は、分布の最下部付近に位置する。これらの断面では、最大余震の震源を含む西下がりの余震分布も明瞭であり、最大余震の震源は本震同様に余震分布の最下部付近に位置する。一方、D'断面で明瞭であるが、最大余震の分布にほぼ直交する分布が見られ、

10/27 10:40 の震源はその分布の最下部付近に位置する。FF',GG'断面では、余震分布は団子状になっているが、10/23 18:11 の震源付近から、東下がりの余震分布が見える。

これらの余震分布のデータから、M6 クラスの主要な地震の断層面を p10 で推定した。EE'以北で見える、本震の断層面に対応する西下がりの余震分布は、FF'以南では、東下がりで見える。EE'と FF'の間付近に、柏崎-銚子線と呼ばれる鉛直な地質構造境界があることが知られており(山下, 1970)、断層面の傾斜方向の変化は、この構造線の存在と関係しているかも知れない。

さらに、大局的な傾向として、余震域中央部で余震分布の下限が深く、南北両端へ向かって浅くなっていることが分かる。

p04-05 期間別の余震分布。

精度の良くないものも含めて、本震発生直後からの余震分布の時間的推移を示した。臨時観測点は、10/27 の午後から観測開始したので、それまでの読みとり値は定常観測点のみである。本震発生直後は、本震の震動や多数の余震がほぼ同時に発生するため、処理されていない地震も多く、かつ、決定精度も相対的に悪いと考えられる。

p06 本震の断層面付近の余震分布とすべり分布の比較。

本震の推定断層面から $\pm 1.5\text{km}$ 以内に再決定された余震を断層面に投影して表示した。すべり量分布は、八木(2004)の HP

<http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/20041023/Japan20041023-j.html> より引用させて頂いた。赤で囲んだ領域は、より深部に余震活動があるにもかかわらず余震活動が低く、本震および余震によるすべり量が小さいと推定され、すべり残しのアスペリティである可能性がある。ただし、その領域が今回の余震活動において破壊するのか、あるいは、数百年から数万年先の次のサイクルにおいて破壊するのかは、現時点では全く不明である。

断層面の最深部付近に の震源が位置している。この地震は他の余震から飛び離れて深く、その上部の分布との間にも、余震の空白域が見える。 の地震およびこの部分の空白の意味は不明である。

p07 3次元地震波速度構造

p02 よりもやや広い範囲における速度構造を示した。左側が P 波、右側が S 波。

余震域の西側で速度が遅く、東側で早い傾向が見られる。また、余震域は、周辺に比べてやや速度が速い傾向も見られ、その南側の速度が遅い領域との境が、柏崎-銚子線に対応しているように見える。

p08 CFF 値

主要な余震(黒星印)に対して、それまで発生した本震および M6 クラスの余震(灰色星印で示した)による応力変化を調べた。主要な地震の断層面は、余震分布および F-net の CMT 解を下に決定された。面上で一様なすべり分布を仮定している。したがって、本解析で評価できるのは、断層面外の応力集中の度合いであり、断層面内については、何ら情報を持たない。また、断層面上のすべり量分布が一様なすべり分布で近似できないほど不均質な場合には、断層面外の CFF 値といえども誤差が大きいことに注意されたい。八木(2004)らの本震のすべり量によると、断層面の下半部では震源付近にすべりが局在化されている。よって、本震の断層の下半部両端では、CFF 値を過大に評価している可能性が考えられる。

最大余震以外は、CFF がプラスの場所に震源があり、断層面の拡がりも、CFF の増加量が 0.5MPa 以内に限られているように見える。

p09 11月15日現在の CFF 値

本震から 10/27 11:15 の余震までの 5 つの M6 クラスの地震による CFF 値を示した。ターゲットとする余震の断層面が西下がりか東下がりかによって、上下 2 通りの分布が得られた。黄色から赤色で示した領域が、すべりがより起こりやすくなっている領域である。

(ア) 5 つの M6 クラスの地震の断層面以外に新たな断層面が形成されない、

(イ) 余震域両端では、本震発生前に、深い部分で応力集中が発生していない (p11 の解説参照)

と仮定すると、5 つの断層面の延長部において、M6 クラスの断層面を含むような広い範囲で、CFF 値が大きくなっているのは、の余震の両端部、特に南側のみである。

p10 震源分布から推定される断層面

までの M6 以上の地震の断層面を、p03 の余震分布に基づいて推定した。それぞれの断層面が色分けして示されているが、上端部が濃くなっている。推定された断層面と震源位置(破壊開始位置)から推定した、大局的な破壊伝播の方向を白矢印で示した。については、断層面は表示されていないが、と同じ面であると見なした。

の深さは他の余震に比べて誤差が大きく、p03 で示されているように、この付近の深さ分布は ほど明瞭なトレンドが見えないため。この東下がりの断層面については検討の余地がある。

上記の推定が正しいとすると、破壊伝播は、両端部では浅い方から深い方へ、中央部では、深い方から浅い方へ進んでいると考えられる。

p11 Weak zone と周辺の応力場

M6 クラスの余震の推定断層面とその破壊伝播方向、および余震の深さ分布から、新潟県中越地震の発生過程を以下のように推定した。

余震域両端部

本震直後に余震域両端で起こった2つのM6クラス、の内、南側の は、本震と逆の東下がり傾斜の断層面が推定されている。この断層面と本震の断層面の間に柏崎 - 銚子線が存在すると推定され、その付近で余震活動が低いという指摘がある（気象庁第160回予知連資料）。また、本震のすべり量の大きな領域は、柏崎 - 銚子線の北側に限られているように見える（八木,2004;地震研究所地震火山災害部門・地球計測部門 HP 資料;）。つまり、本震の破壊過程においては、柏崎 - 銚子線がバリアーとなった可能性が考えられる。

柏崎 - 銚子線は、日本海が開いたとき、日本列島の折れ曲がりに伴って形成されたと考えられているが、さらに平行な断層が存在する可能性も考えられる（例えば、富山大竹内章氏のHP）。今回の地震の余震活動が活発な理由は、本震の断層に平行な複数の断層が活動したことが挙げられているが、同時に、断層の走向方向に存在する不均質（柏崎 - 銚子線など）がバリアーとなって、本震のスムーズな破壊の進展が妨げられた可能性も考えられる。実際にも、p03のDD'断面において、の破壊の進展は最大余震の断層面で止められているように見える。

一方、北側の の断層面は、本震の断層面の延長上にあるが、その下端の深さは、本震の断層の半分程度である、浅い部分から始まった破壊は、本震の断層の上半分くらいを破壊して終わっていると考えられる。については深さの誤差が大きいが、現在の推定値が正しいとすると、同様に、破壊開始点が浅く、破壊が浅い方から深部へ伝播したと考えられる。

これらの観測データから、両端部の応力状態は以下のように推定される。本震のすべりによる CFF 値は深さにあまり依存しないのに対して、断層の強度は、法線応力の深さ変化のため、深いほど大きくなるのが推定の物理的な背景である。余震域の両端部で本震発生前に十分に応力蓄積が行われておらず、断層に加わっている応力がその強度より低い場合には、浅い部分から破壊開始し、浅い部分のみですべりが起こると考えられる（p11 右上図）。余震分布の下限の走向方向での変化も、概ね上記の推定と調和的であり、両端に向かって、下限が浅くなっている。

ただし、p08で述べたように、断層面の下半部では震源付近にすべりが局在化されていると推定されているため、本震の断層の下半部両端で、本震による応力変化が小さいことも関係している可能性がある。また、余震域北端の最深部で、の地震が発生しているが、この地震がどうしてこのような深部で発生したかは不明である。上記の推定、つまり、余震域の両端部では本震前の応力蓄積は十分ではないという推定は、北側については、正しくない可能性も考えられる。

余震域中央部

余震域中央部では、破壊が深部から始まり、浅部へ伝播している。しかも、最大余震の震源付近は、CFF 値が負の領域となっている、これは、余震域中央部の直下の下部地殻に低粘性領域、weak zone が存在することによって説明可能である。プレートの相対運動

に起因して weak zone が変形することにより、その直上の地震発生域に応力蓄積を起こす。すると、そこでのせん断応力の深さ変化は p11 右下図に示すように、地震発生域の下端で、応力が強度に近くなっている可能性が考えられる。そのため、本震の破壊は最深部から始まった。最大余震は、本震のすべりにより直下の下部地殻の粘性流動が促進され、それによる応力が最大余震の断層面に加わり、すべりを発生させた。

Weak zone の内部構造は、多数の断層帯が分布すると推定されている(Iio et al.,2004)。下部地殻が多数の断層帯によって「ぐちゃぐちゃ」変形したので、直上の上部地殻も多数の断層ですべりが引き起こされた可能性が考えられる。(文責 飯尾能久)

京大・九大合同余震観測

京都大学（防災研究所附属地震予知研究センター）と九州大学（大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター）は合同で、新潟中越地震震源域内に、オンラインの臨時地震観測点を設置し、リアルタイムでデータの解析を行なっています。

臨時観点設置後の震源分布等を自動処理にて作成し、下記URLで公開・自動更新しています。

<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/CHUETSU/>

衛星テレメータ観測点

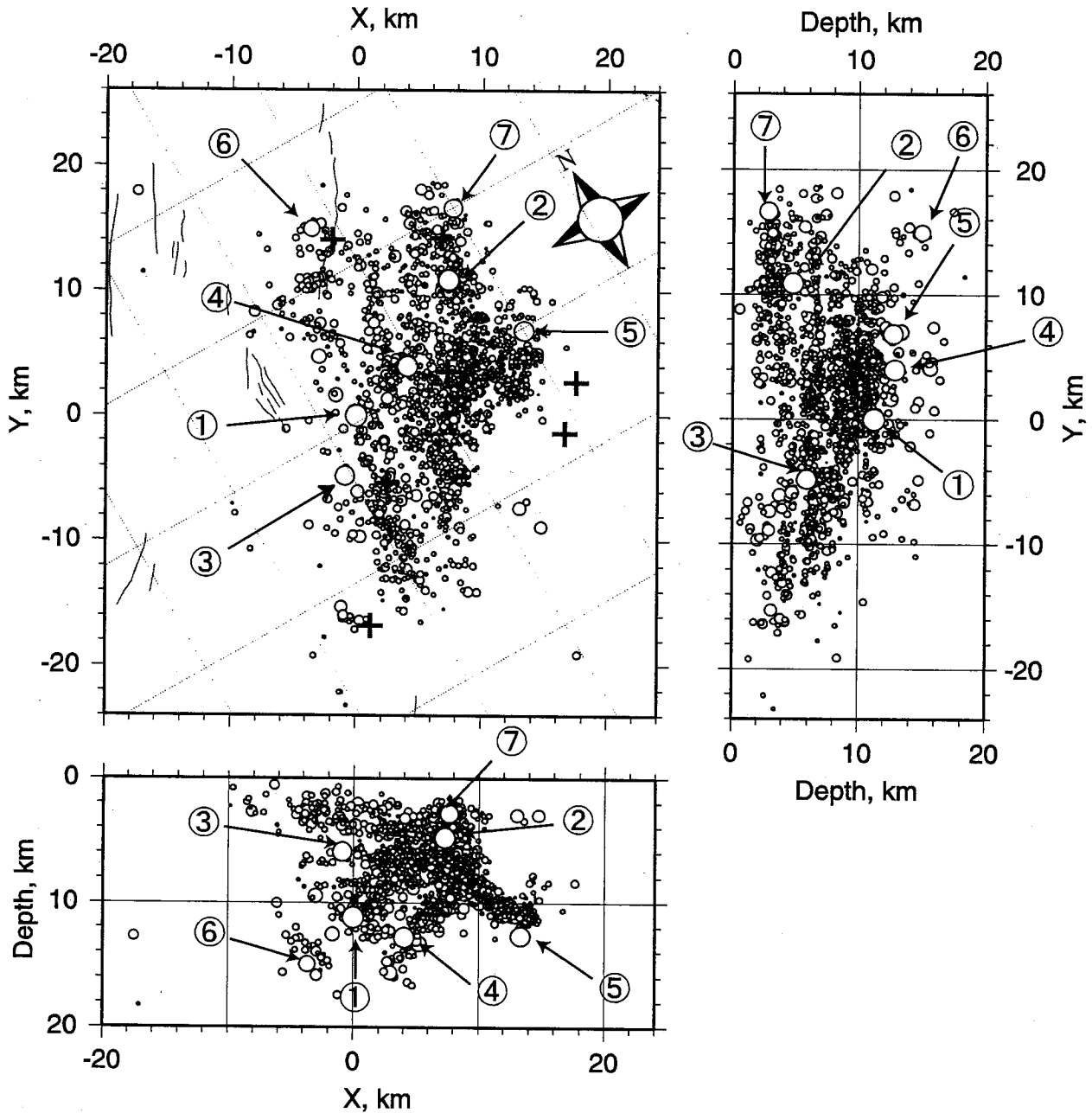
| 観測点名 | 緯度 | 経度 | ロガー | 場所の概要 |
|---------|---------|----------|------|---------------|
| DP.TDOM | 37° 23' | 138° 58' | VSAT | 栃尾市西中野俣杜々の森公園 |
| DP.OJKW | 37° 15' | 138° 49' | VSAT | 小千谷市川井 |
| DP.YMKS | 37° 18' | 138° 55' | VSAT | 山古志村小松倉 |

※DP.TDOMは27日12時より、DP.OJKWは27日18時より、DP.YMKSは29日14時より稼働中。



テレメータと同時に、
右の各点に於いて
オフラインの地震観測を
行っている。

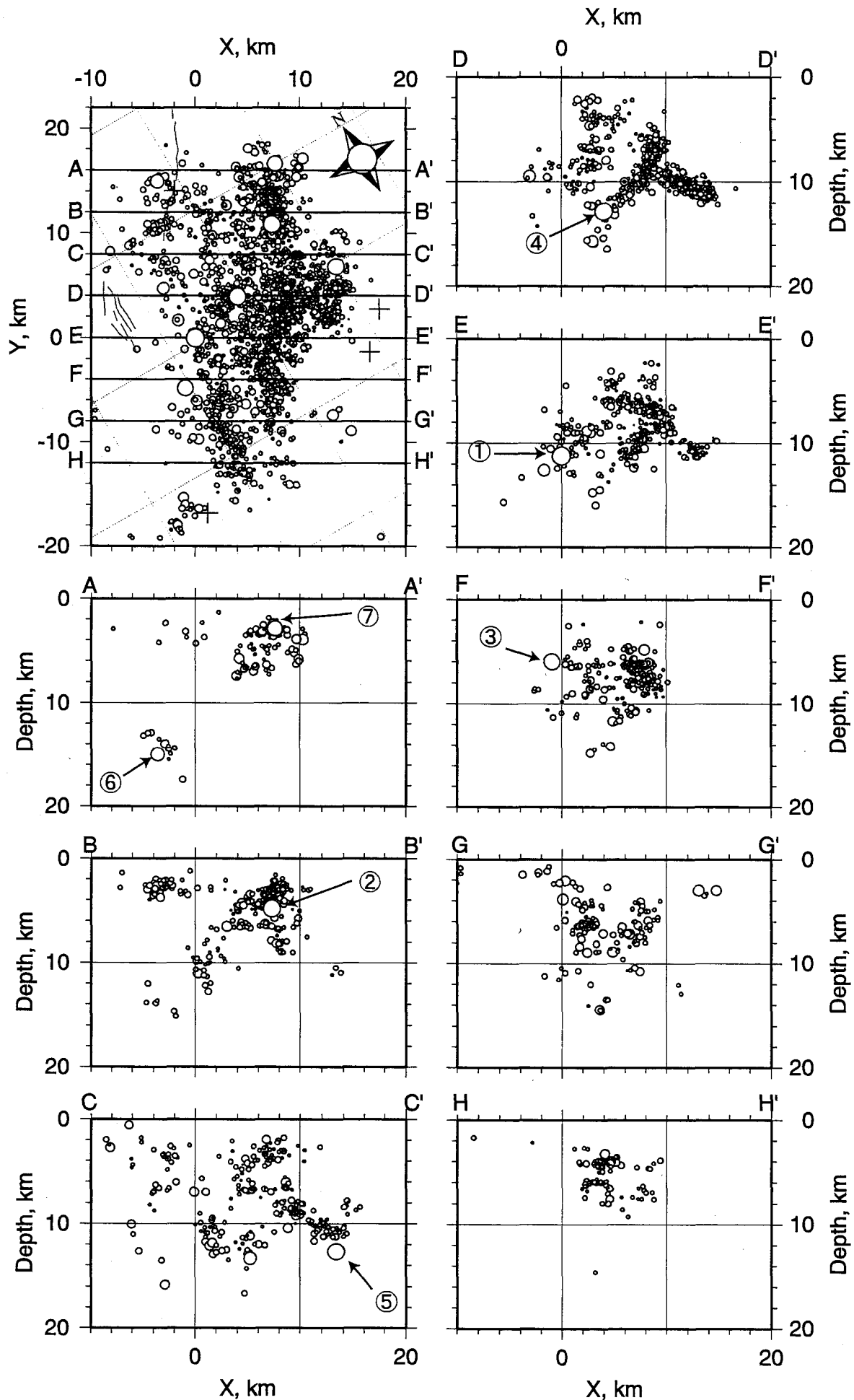
| 緯度 | 経度 | ロガー | 期間 | 場所の概要 |
|---------|----------|-----|-------------|------------------|
| 37° 25' | 138° 56' | LS7 | 10/26- | 栃尾市一之貝八方台県民いこいの森 |
| 37° 18' | 138° 54' | LS7 | 10/29-11/10 | 山古志村東竹沢 |
| 37° 18' | 138° 55' | LS7 | 10/29-11/10 | 山古志村中山トンネル |
| 37° 19' | 138° 55' | LS7 | 10/29-11/10 | 広神村水沢新田 |
| 37° 19' | 138° 58' | LS7 | 11/10- | 広神村小平尾 |
| 37° 21' | 138° 51' | LS7 | 11/11- | 長岡市六日市町 |
| 37° 23' | 139° 04' | LS7 | 11/11- | 魚沼市守門村二分 |



京大・九大と気象庁の手動検測のデータとを用いて、JHD法を適用して得られた余震分布。期間は本震の発生から11月8日12時ごろまで。M5以上の主要な地震を白丸で示す（番号は発生順）。+は観測点（臨時オンライン点3点を含む）。震源誤差が1km未満の地震のみをプロット。ただし、②と③の深さの誤差は、それぞれ1.05kmと2.96kmである。

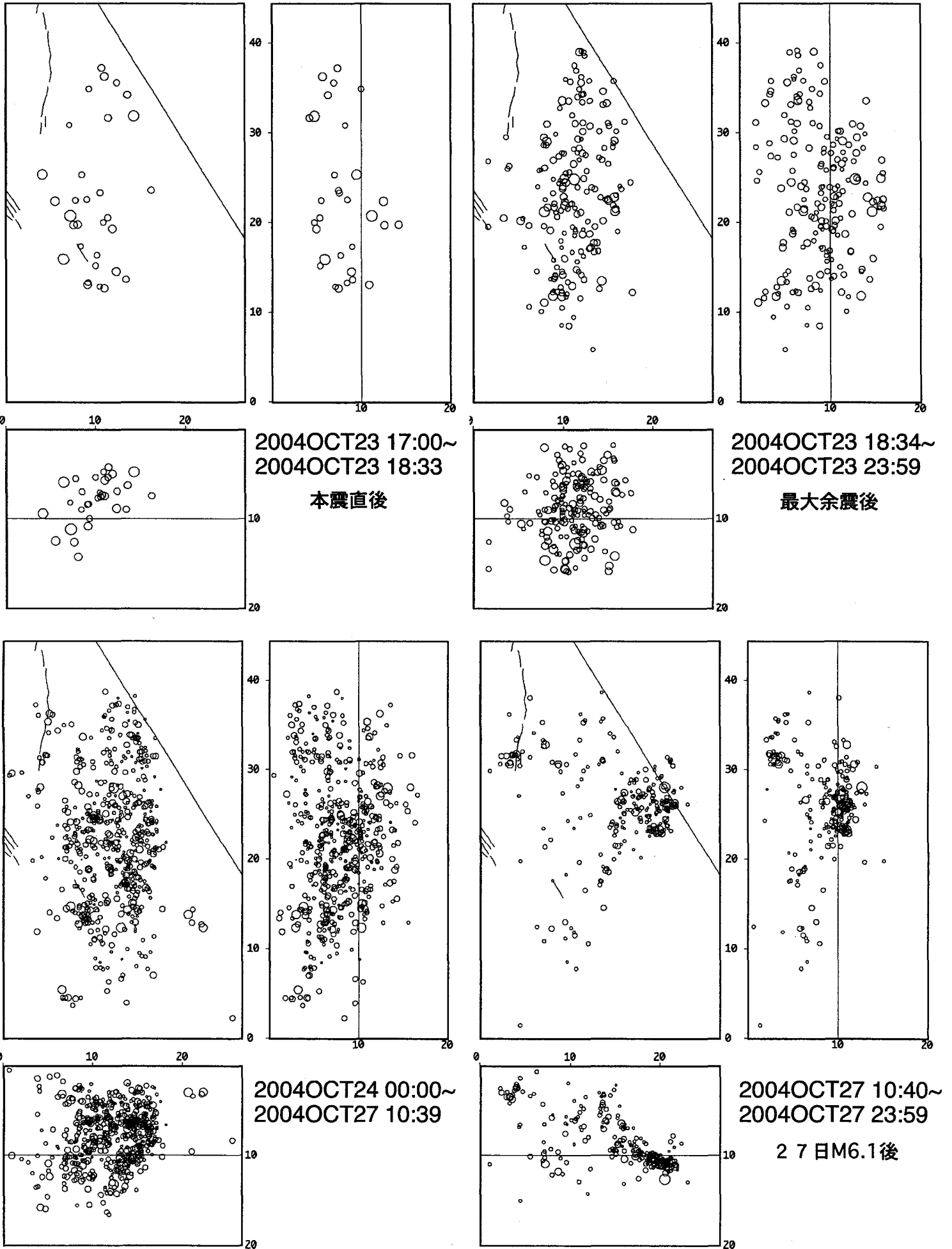
- | | |
|-------------------|-------------------|
| ①10/23 17:56 M6.8 | ⑤10/27 10:40 M6.1 |
| ②10/23 18:03 M6.3 | ⑥11/04 08:57 M5.2 |
| ③10/23 18:11 M6.0 | ⑦11/08 11:15 M5.9 |
| ④10/23 18:34 M6.5 | |

【京大・九大合同観測班】

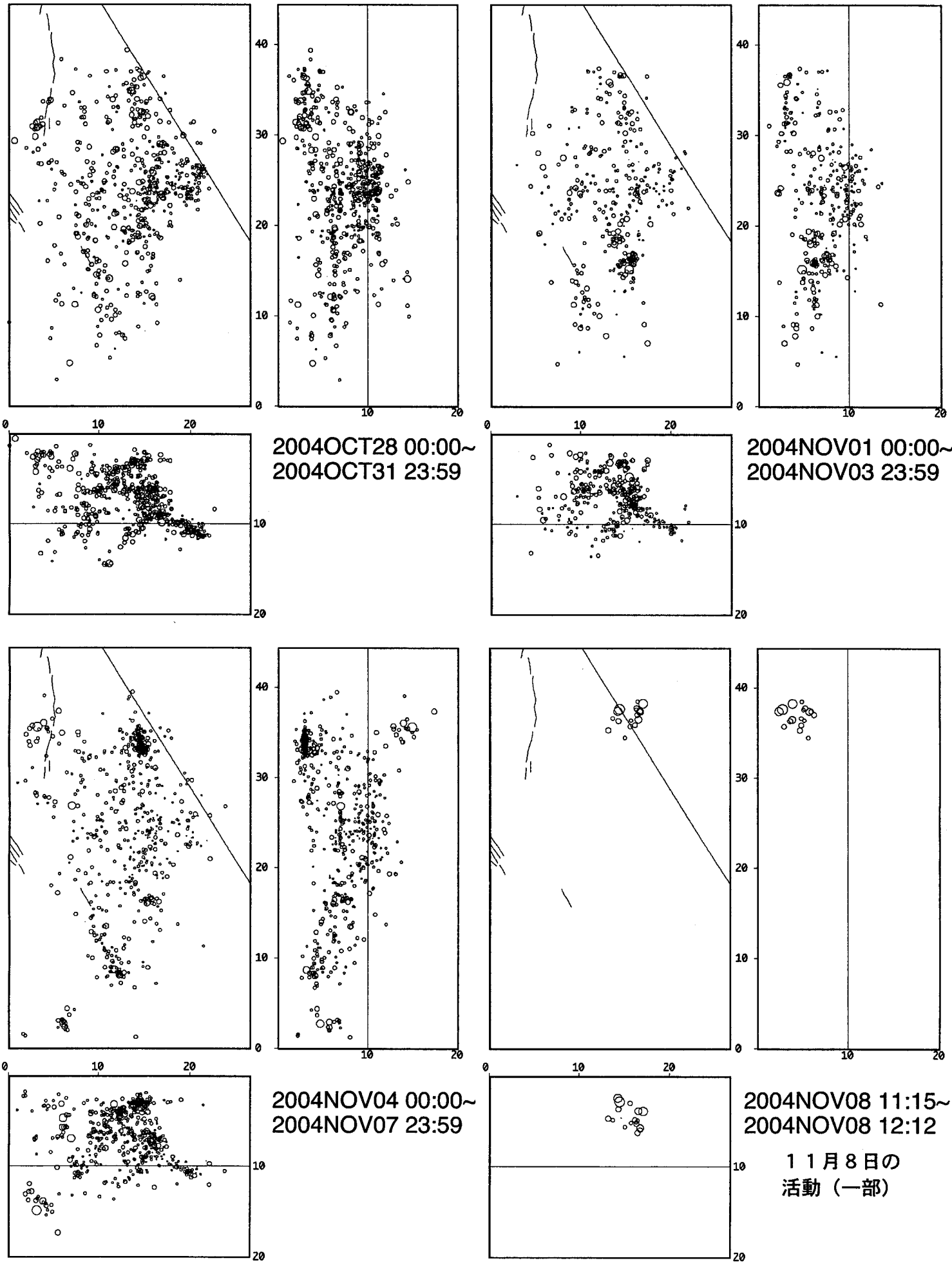


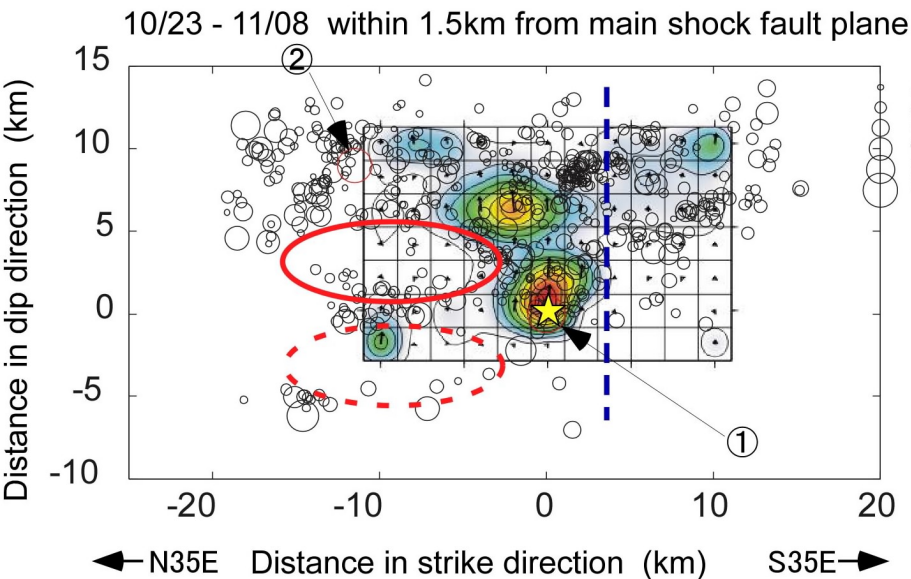
震央分布図のAA' ~ HH' に沿う断面での深さ分布。各断面からY軸方向に±2kmの領域内に発生した地震をプロット。その他は前図と同じ。

気象庁の読み取り値+京大・九大臨時観測の読み取り値によるJHD結果に基づく、余震活動の時間変化(1)



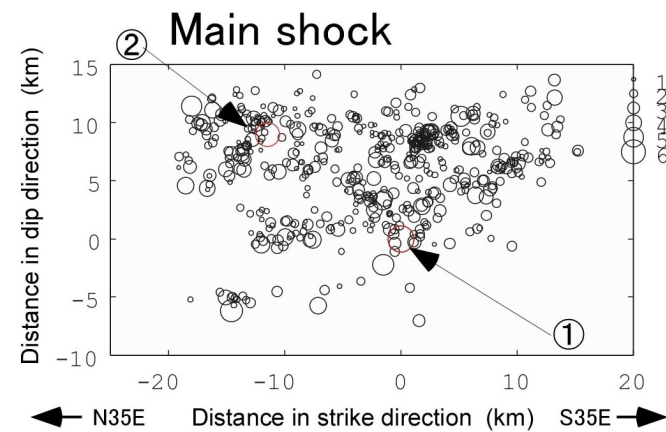
気象庁の読み取り値+京大・九大臨時観測の読み取り値によるJHD結果に基づく、余震活動の時間変化(2)



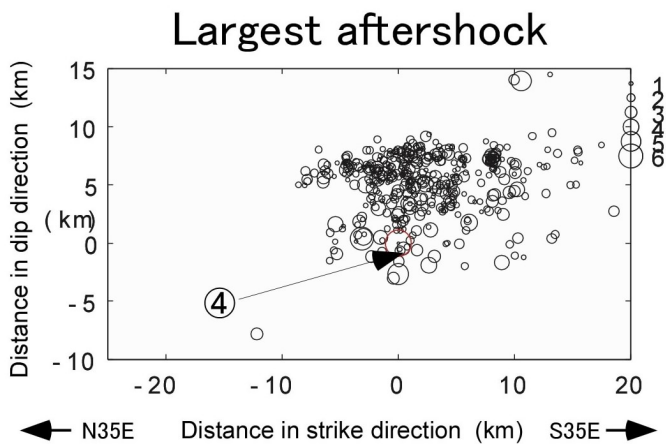


Yagi (IISSE, BRI, 2004); Kyoto and Kyushu Univ.

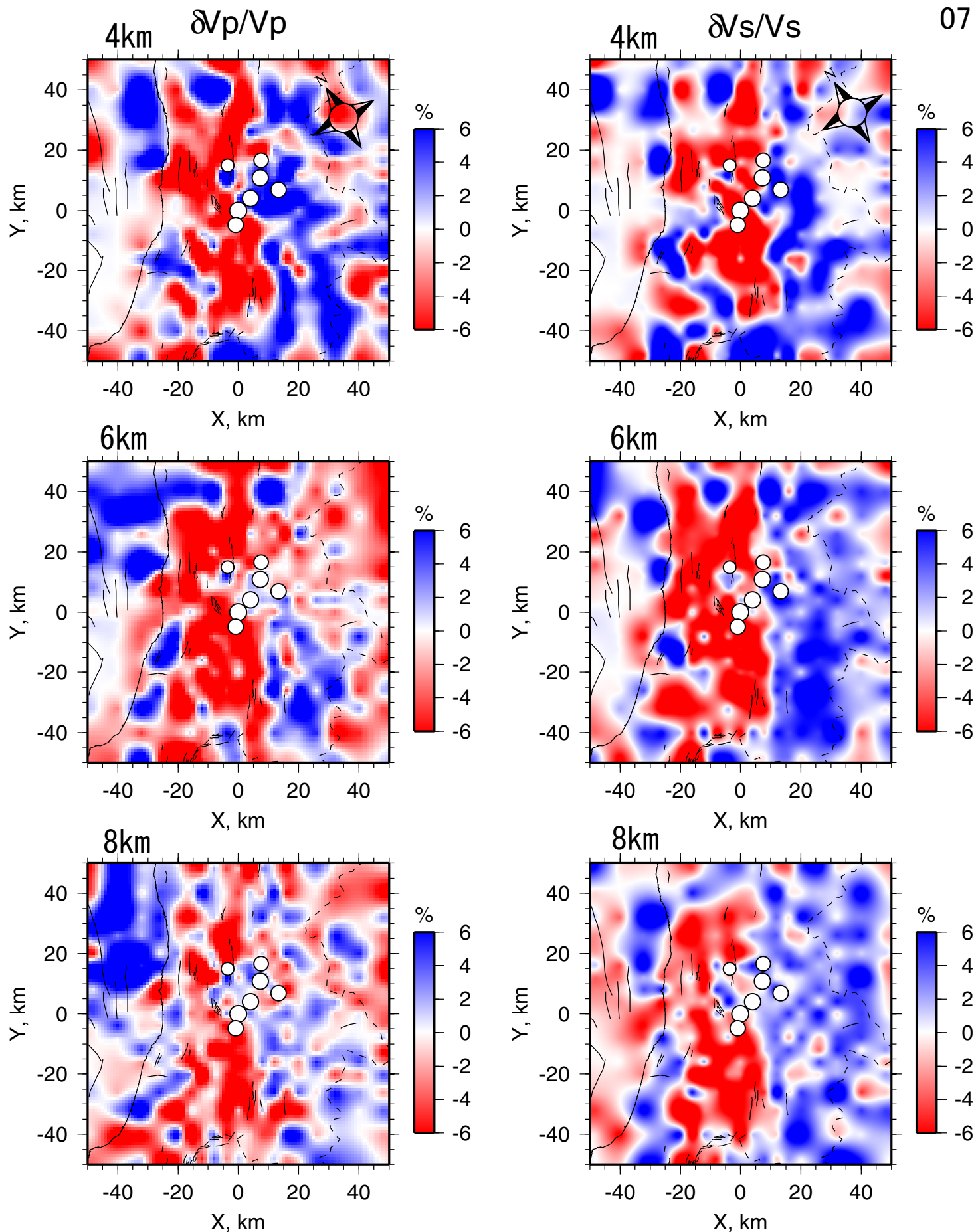
本震の断層面付近の余震分布とすべり量分布。
 本震の推定断層面から1.5km以内に再決定された余震を断層面に投影して表示。すべり量分布は、八木(2004)のHPより引用させて頂いた。赤で囲んだ領域で、より深部に余震活動があるにも関わらず余震活動が低い。青点線は柏崎-銚子線の位置。



本震および最大余震の断層面付近の余震分布。それぞれの推定断層面から1.5km以内に再決定された余震を断層面に投影して表示。本震および最大余震の震源を座標原点とした。



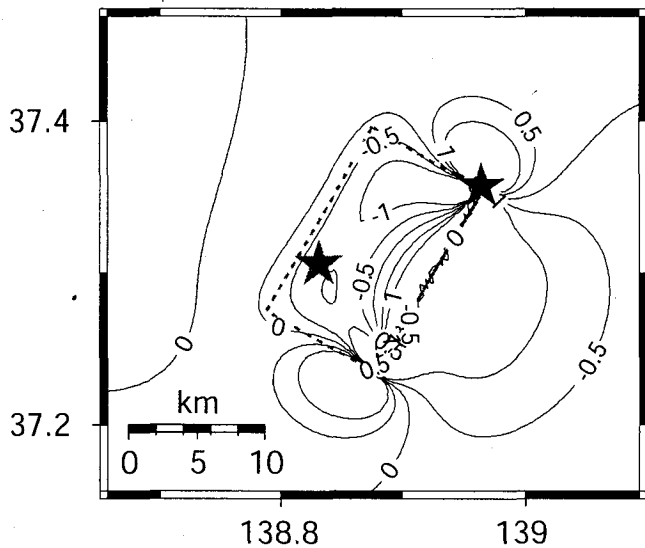
{京大・九大合同
観測班}



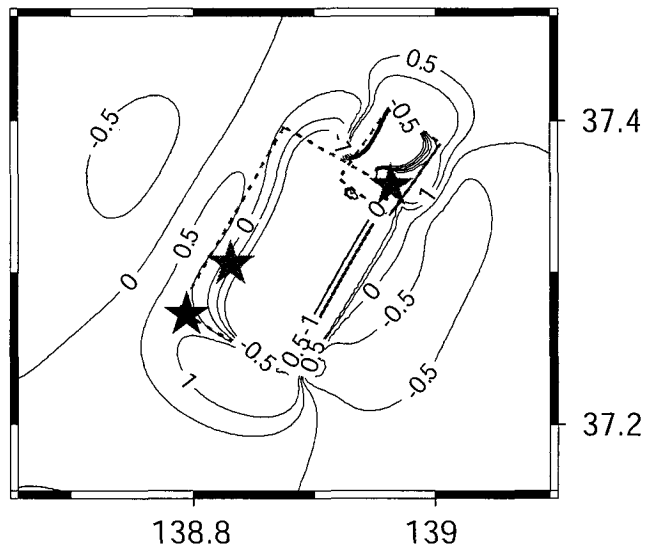
オンライン臨時観測と定常観測のデータを用いてトモグラフィーにより求めた震源周辺の地震波速度の不均質構造。白丸はM5以上の主な地震。

規模の大きな余震に対する Δ CFF値 (MPa)

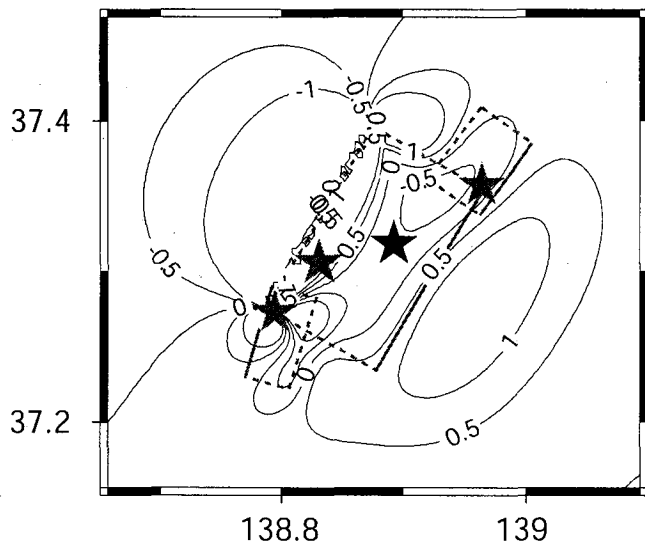
for 200410231803 - 4.8 km



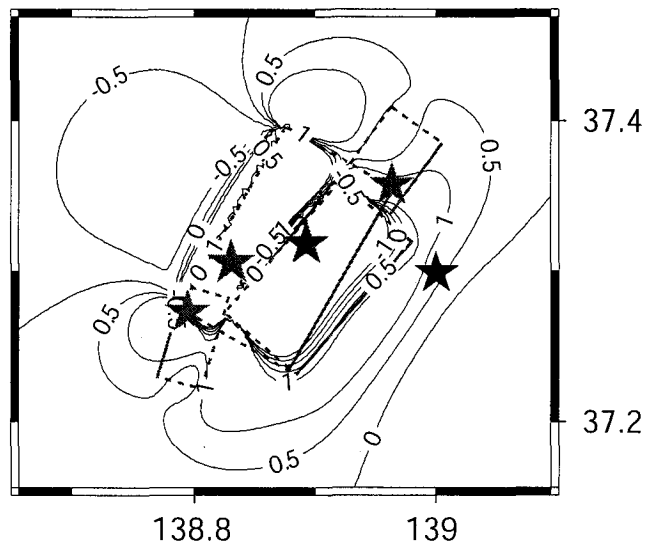
for 200410231811 - 5.9 km



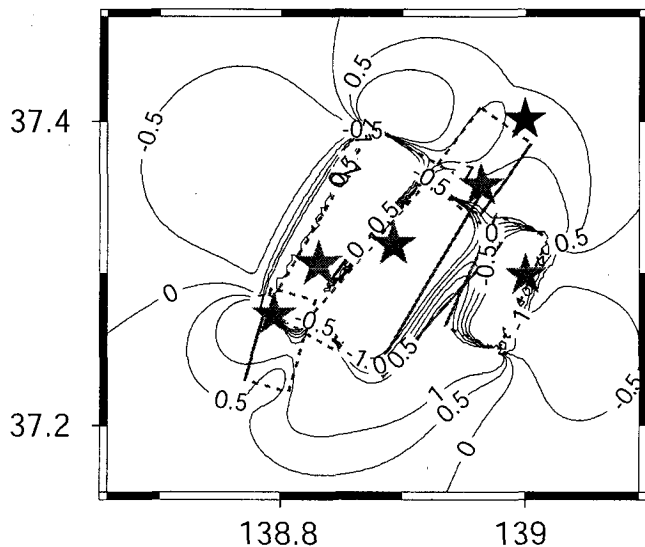
for 200410231834 - 12.8 km



for 200410271040 - 12.7 km

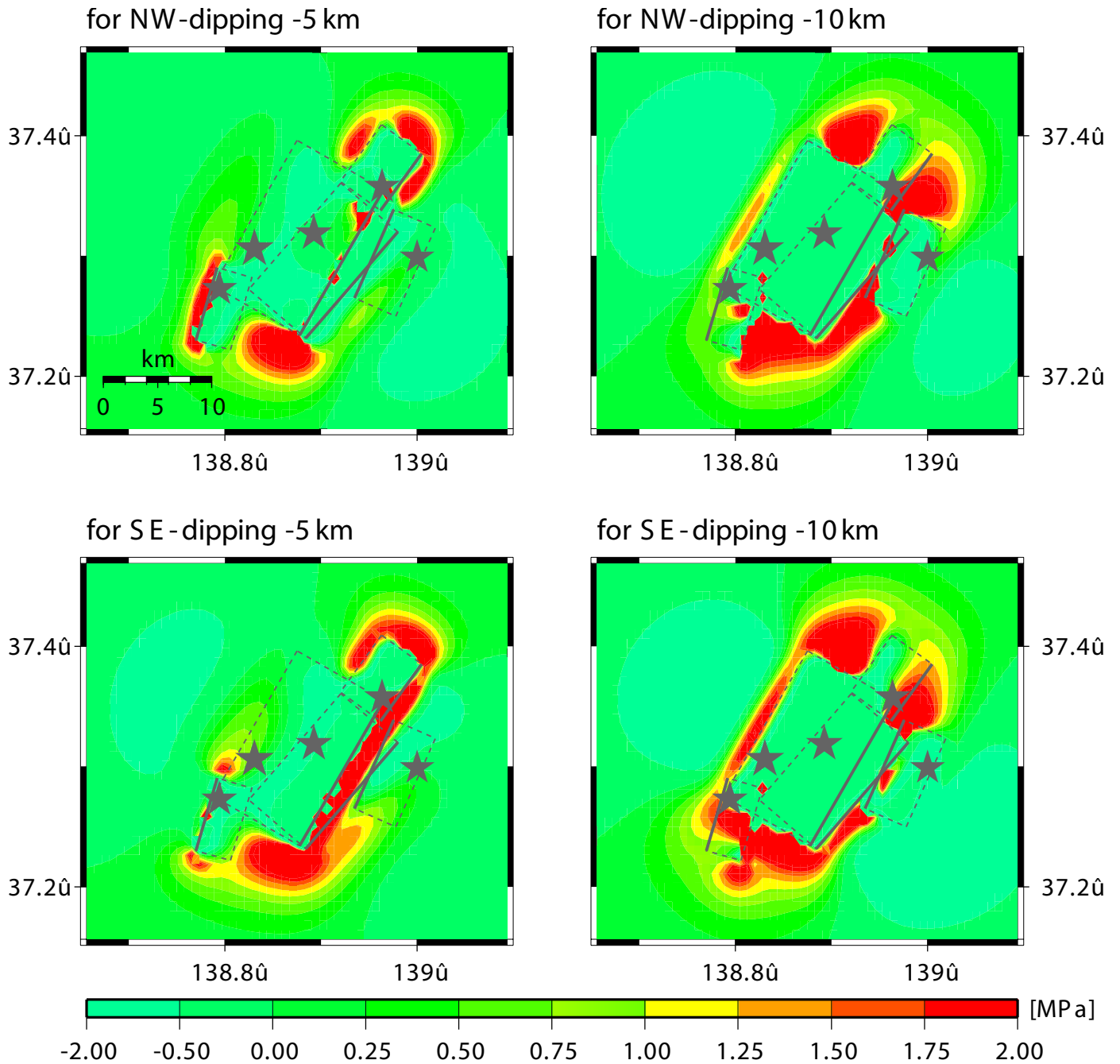


for 200411081115 - 3 km



各余震のメカニズムに対する Δ CFF値 (MPa). 震源は★. 同じ深さでの値を示す. 影響を及ぼす地震断層面と震源を, 灰色線と★で示す. 断層面の形状は余震分布から, その他の断層パラメータはCMT解を参考に, モーメントが合うように与えた. 見かけ摩擦係数 $\mu'=0.4$, 剛性率40GPa. 10/23 18:34 (M6.5)のイベント以外, Δ CFF値が正(>0.5 MPa)の場所で起きている. 余震域北西部の浅発地震の活動域でも, 正值を取る (左下図).

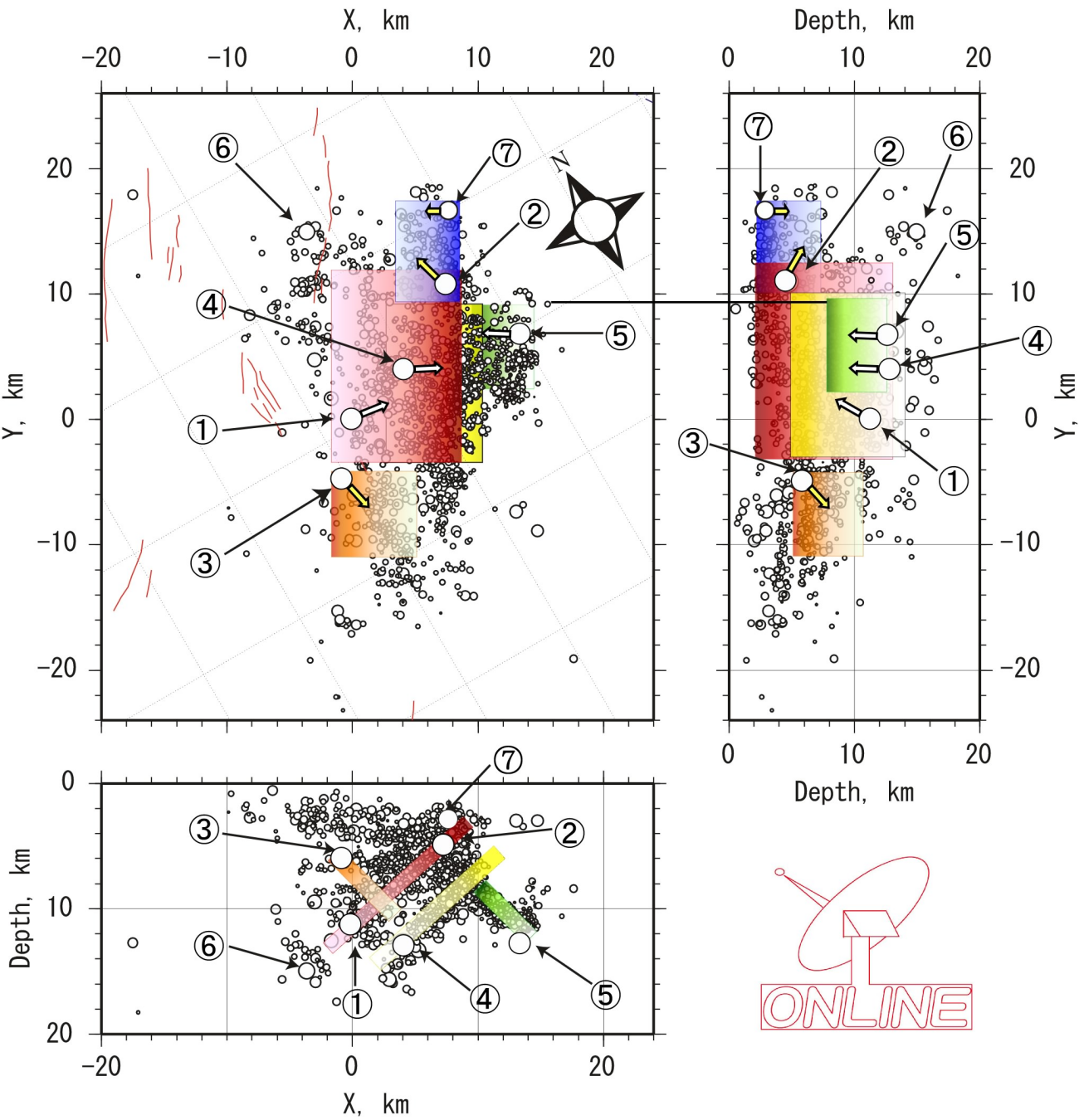
現在の Δ CFF値 (MPa)



本震と規模の大きな余震から求めた、現在の Δ CFF値。
 以下のようなメカニズムに対して、示した深さでの値を表示。
 走向：210度(NW-dipping), 30度(SE-dipping)
 傾斜：45度
 滑角：90度

計算に用いた断層面と震源を灰色線と★で示す。
 各種パラメータは前出と同様。

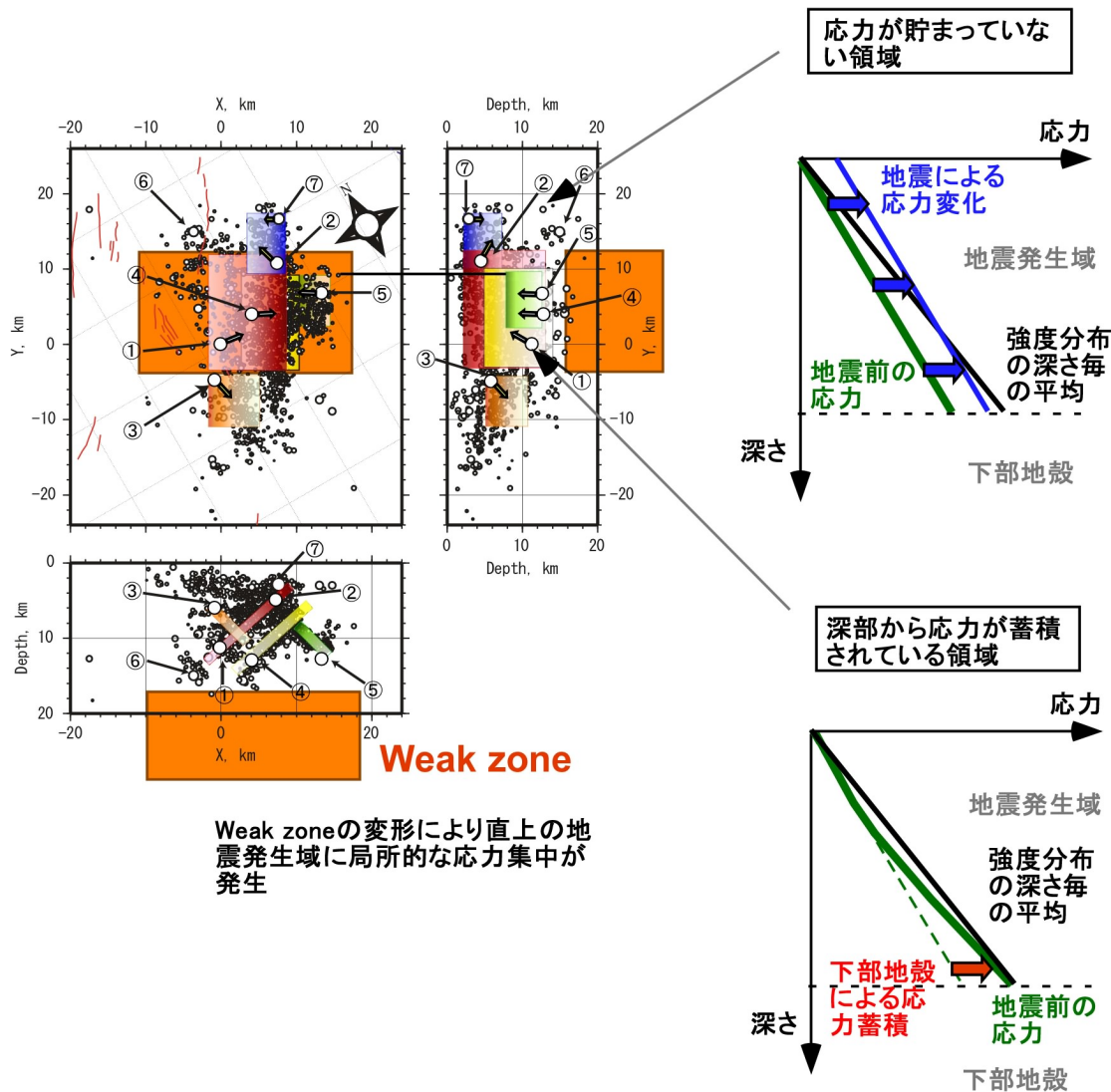
震源分布から推定される断層面



京大・九大と気象庁の手動検測のデータとを用いて、JHD法を適用して得られた余震分布。期間は本震の発生から11月8日12時ごろまで。M5以上の主要な地震を白丸で示す（番号は発生順）。+は観測点（臨時オンライン点3点を含む）。震源誤差が1km未満の地震のみをプロット。破壊伝播方向を矢印で推定。

- | | | | |
|---|------------------|---|------------------|
| ① | 10/23 17:56 M6.8 | ⑤ | 10/27 10:40 M6.1 |
| ② | 10/23 18:03 M6.3 | ⑥ | 11/04 08:57 M5.2 |
| ③ | 10/23 18:11 M6.0 | ⑦ | 11/08 11:15 M5.9 |
| ④ | 10/23 18:34 M6.5 | | |

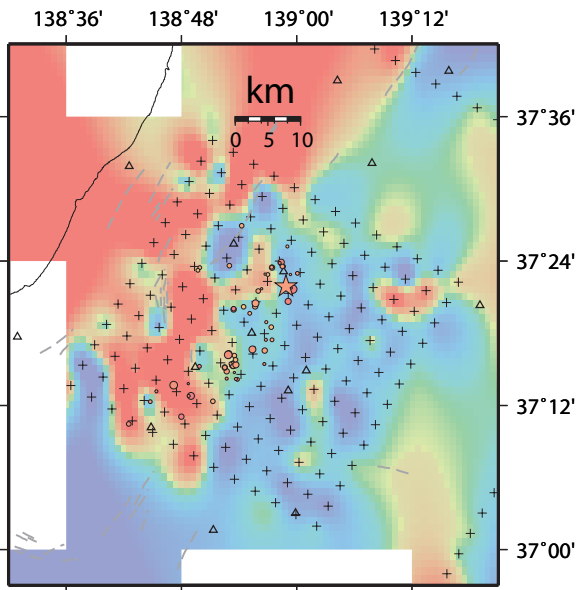
震源域直下に推定されるWeak zoneと周辺の応力場



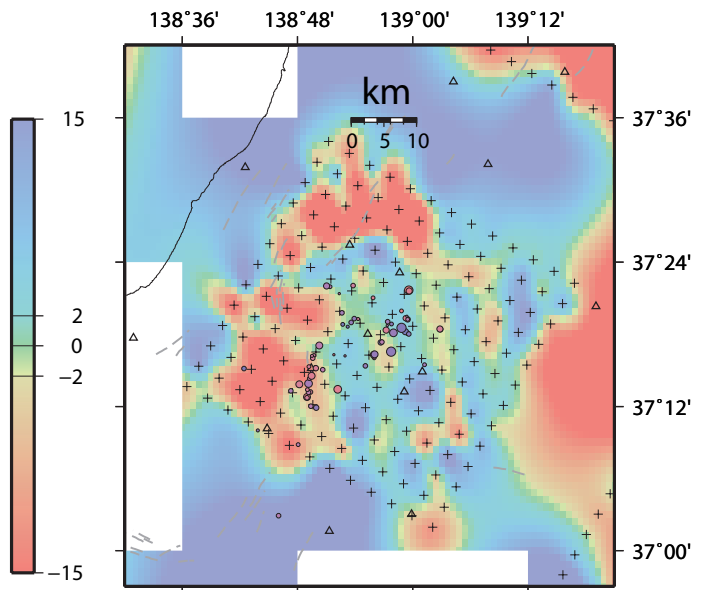
余震域の両端で発生した大きめの余震は、浅い部分から破壊が始まり、すべりは浅い領域に限られているように見える。本震のすべりによる応力変化の大きさは深さにあまり依存しないのに対して、断層の強度は、深部ほど大きくなる。余震域の両端部で、本震発生前に十分に応力蓄積が行われておらず、断層に加わっている応力がその強度よりかなり低い場合は、浅い部分から破壊開始し、浅い部分のみですべりが起こると考えられる。断層の走行方向における余震分布の下限の変化も、概ね上記の推定と調和的である。

一方、余震域中央部で発生した大きめの余震は、深部から破壊が始まっている。これは、断層への応力蓄積における下部地殻の関与を示唆している。余震域中央部の直下の下部地殻に、weak zoneの存在が推定される。

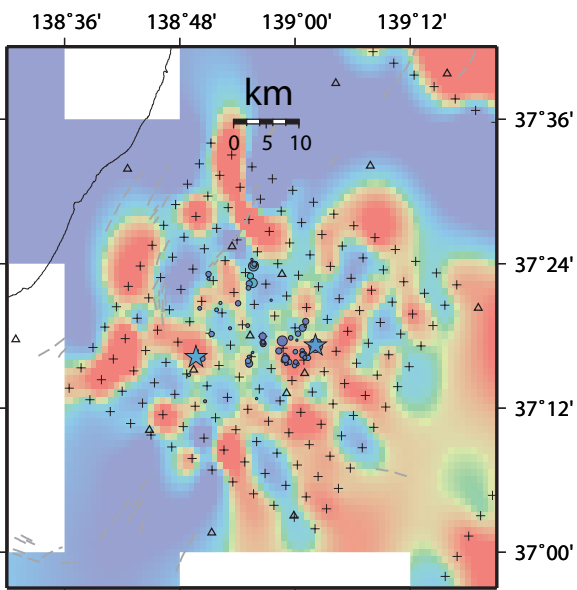
δV_p (Depth = 5km)



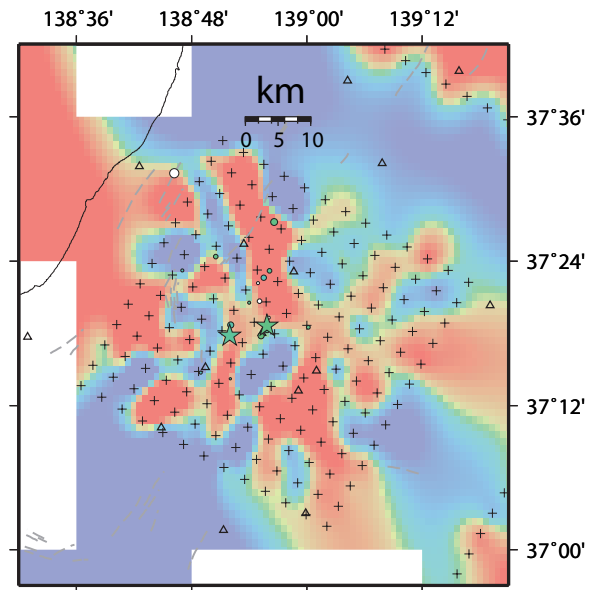
δV_p (Depth = 7.5km)



δV_p (Depth = 10km)

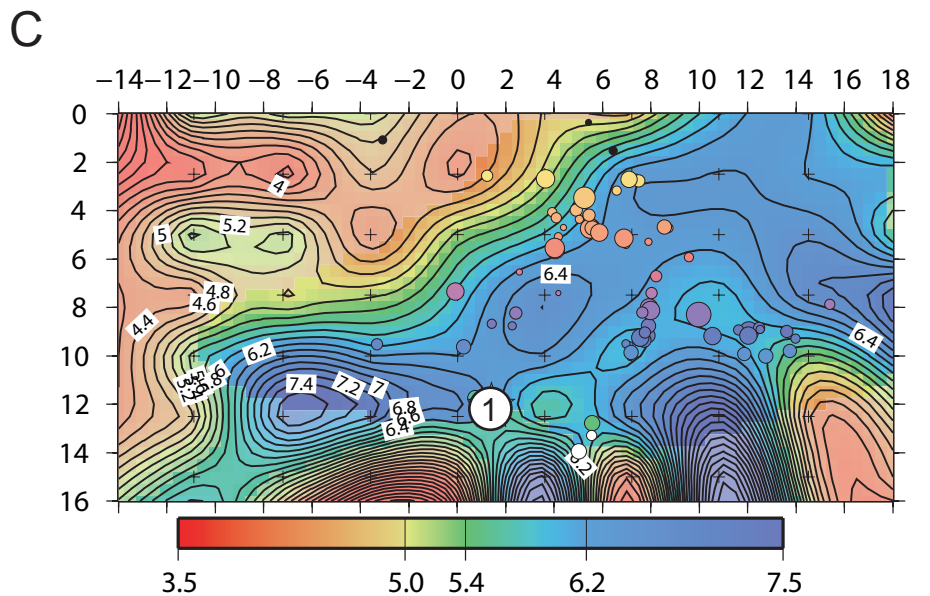
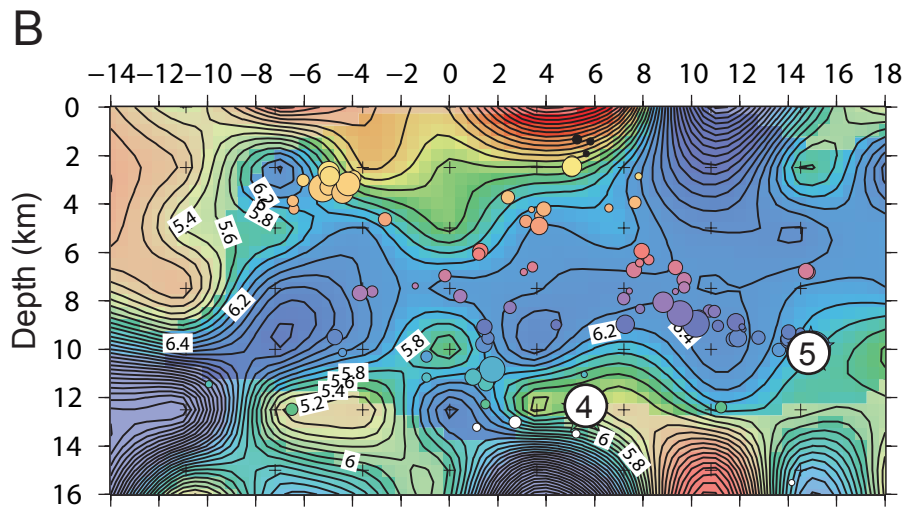
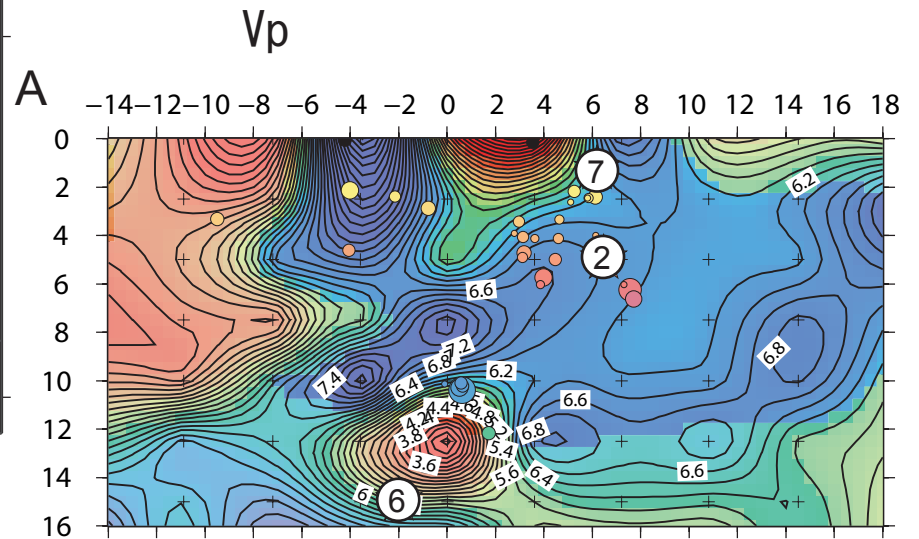
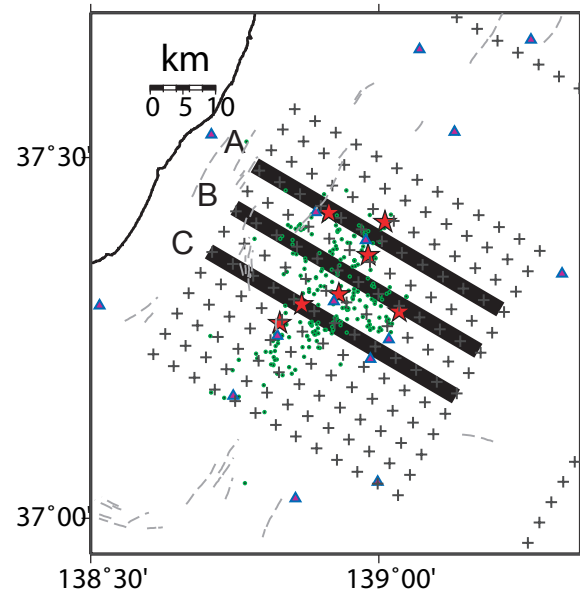


δV_p (Depth = 12.5km)



Double difference トモグラフィーによる P 波速度構造暫定値
 (震源の数は 259 個, 波線は P 波 5668, S 波 5392,
 DD は P 波 23537, S 波 21046)

謝辞: トモグラフィーのプログラムは東北大学大学院理学研究科
 地震・火山観測研究センターの岡田知己氏に便宜を図っていただいた。記して感謝します。



左上図の実線に沿ったP波速度の断面

