

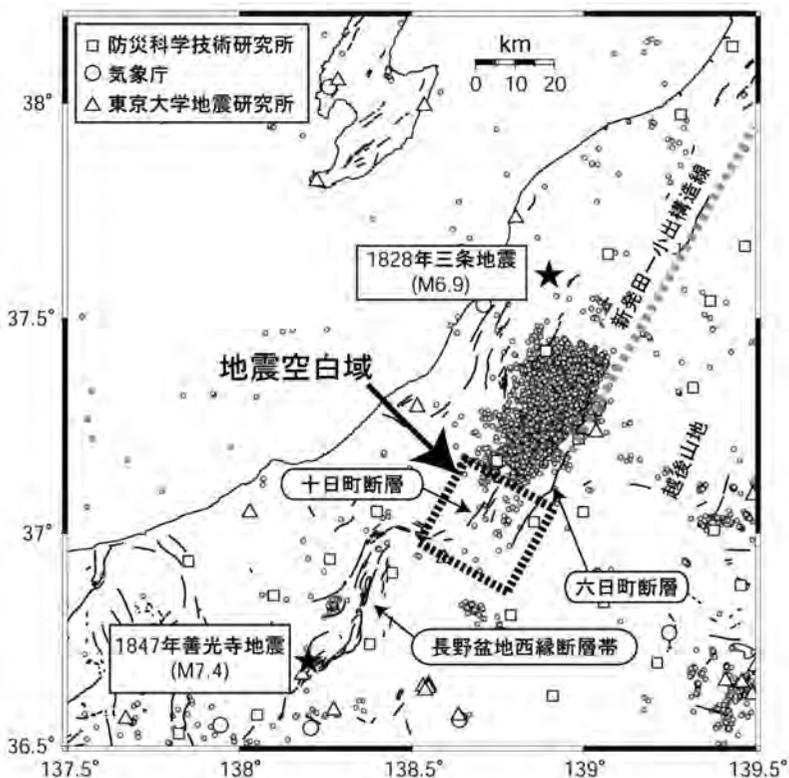
2004年新潟県中越地震の震源域南部隣接域の地震空白域における臨時地震観測

今西 和俊¹⁾・桑原 保人¹⁾・長 郁夫¹⁾・干野 真¹⁾・武田 哲也²⁾・針生 義勝²⁾

1. はじめに

2004年10月23日にマグニチュード6.8の新潟県中越地震が発生し、周辺地域では多大な被害が生じた。震源域の震源断層、地下構造、応力場を詳しく調べるために、地震発生直後から大学を中心とした余震観測が実施された(例えば, Kato *et al.*, 2006)。一方、我々が注目したのは、今回の震源域と1847年善光寺地震(M7.4)の震源域(長野盆地西縁断層帯)に挟ま

れた領域である(第1図の四角の点線で囲まれた領域)。ここでは近い将来、M7級の大地震が発生する可能性が高い地震空白域として指摘されており(例えば, 大竹, 2004)、今回の地震による影響が懸念される。第1図に示されるように、この地震空白域の東側には活動度A級の六日町断層が南方に伸び、西側には活動度A~B級の十日町断層帯が存在している。我々はこの地震空白域の活動推移予測を目的とした調査研究が緊急に必要であり、地下構造、地震活動、



第1図 調査地域。定常観測点を白の四角、丸、三角で示す。灰色の丸は2004年10月23日から12月31日までの気象庁一元化震源を示す。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 防災科学技術研究所

キーワード: 2004年新潟県中越地震, 地震空白域, 臨時地震観測, 地震活動, メカニズム解, 応力場



写真1 砂防ダムの一例。当地域には写真のような砂防ダムが多数存在し、微小地震観測には比較的良い場所を提供してくれた。

応力場の情報を得る必要があると考えた。しかし、この地震空白域には定常地震観測点がほとんどなく(第1図)、詳細な研究に踏み込むことが困難であった。そこで我々は、この地震空白域で臨時の地震観測を行うこととした(桑原ほか, 2005)。本稿では、取得データを用いて推定した地震空白域における地震活動と応力場について報告する。

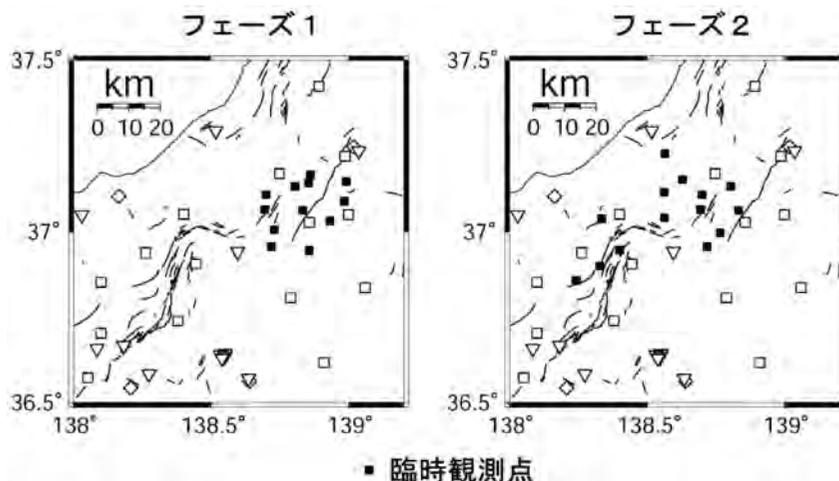
2. 臨時地震観測

小さい地震になるほど信号レベルが微弱になり、また、高周波成分が卓越するようになる。そのため、通

常我々が微小地震観測を行うときは、人里から離れて人為的ノイズが少なく、かつ、高周波の波の減衰が小さいとされる岩盤が露出した場所を探す。しかし、本研究で対象とする領域は主に新第三紀と第四紀の地層が数kmの厚さで分布し、岩盤が露出している場所は見つからなかった。一方、この地域は地すべり地帯として有名であり多くの砂防ダムが建設されている。砂防ダムは比較的深部の固い岩盤に固定されていることが想定され、今回は主にダムの堰堤に地震計を設置固定することとした(写真1)。

臨時観測は新潟県中越地震発生後から2005年6月まで(第1フェーズ)と、2005年7月から06年11月まで(第2フェーズ)に分かれている。第2図にそれぞれのフェーズにおける臨時観測点の分布を示す。第1フェーズは新潟県中越地震の南部隣接域の地震空白域を対象にしているのに対し、第2フェーズではより広域的な調査研究のため、十日町断層の西方や長野盆地西縁断層帯周辺にも臨時観測点を展開した。観測には微小地震観測で良く使われる固有周波数2Hzの3成分地震計(Mark Products社製のL22E)を用い、地震計の出力は白山工業社製LS7000を用いてサンプリング周波数100Hzで連続収録した。電源にはバッテリーを用いた。観測点の風景を写真2と3に示す。我々はデータ回収とバッテリー交換のため、約1ヶ月半に1度の頻度で現地に赴いた。

第3図に第1フェーズの観測期間中に得られた観測波形データの1例を示す。いくつかの観測点を除き、波形の立ち上がりは明瞭であり、観測点によっては



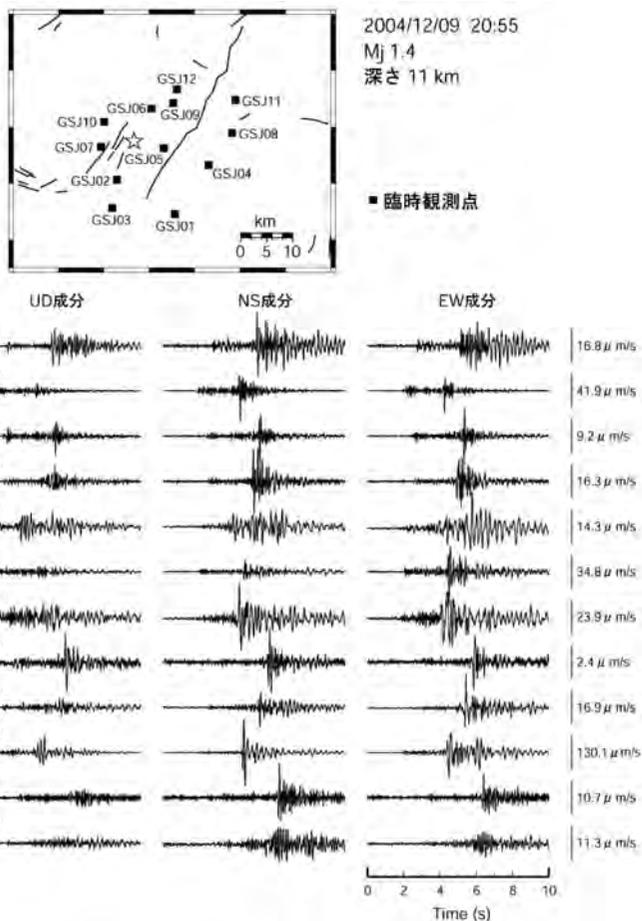
第2図 観測点分布。臨時観測点を黒の四角で示す。



写真2 地震計の設置。地震計の脚は石膏で固定し動かないようにする。また、雨や風によるノイズ対策のため、地震計の横に置いてある植木鉢を地震計の上に被せた。



写真3 収録装置は、バッテリーや除湿剤とともに衣装ケースの中に収められた。



第3図 観測波形例。微小地震の解析にも耐えられる良質の記録が得られている。

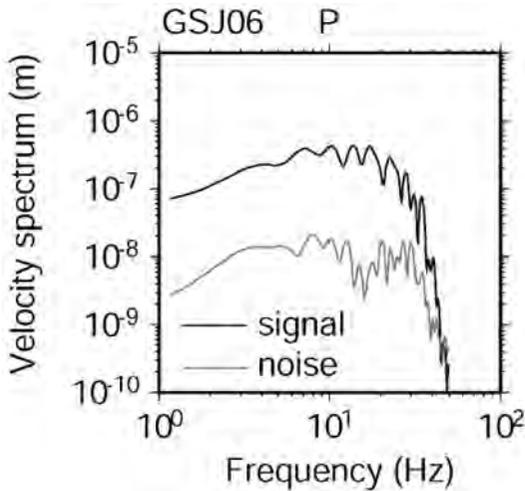
10 Hzまでの高周波成分が記録されている(第4図)。このように、砂防ダムの堰堤に地震計を設置することにより、微小地震の解析にも耐えられる良質の記録が得られたことが分かる。

本稿では、第1フェーズのデータを使い、地震空白域における地震活動と応力場について調査した結果について紹介する。解析の詳細は別稿(Imanishi et al., 2006)を参照して頂きたい。なお、第2フェーズで取得したデータの解析結果については、別の機会に報告したい。

3. 地震空白域における地震活動

地震空白域における地震活動の特徴を調べるために、2002年6月から2005年4月末までに発生した地震の震源決定を行った。解析した地震は、気象庁の一元化震源カタログに含まれる地震と臨時観測点の設置により新たに検出できた地震を合わせた128個である。

第5図は精密震源決定法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により推定した震源分布である。地震活動は深さ2~17kmの範囲に分布し、明瞭なクラスターが5つ確認できた。クラスター1は約



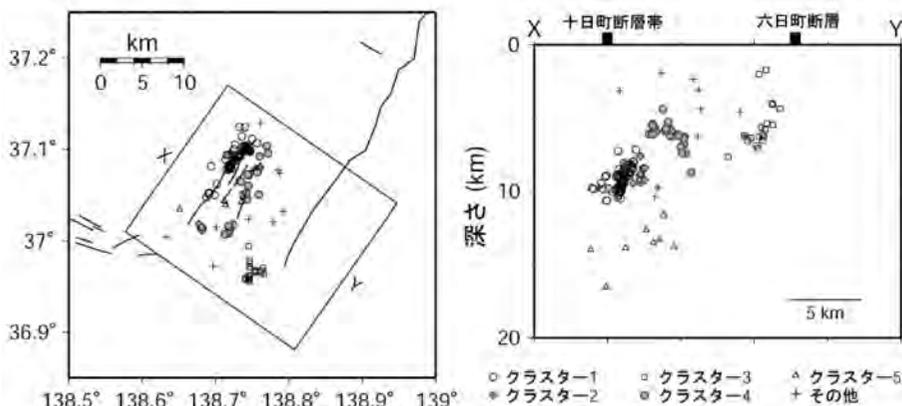
第4図 P波のスペクトルの例. 灰色の線はノイズスペクトルを示す.

70度で北西に傾斜した面状分布を示し、十日町断層の地表トレース下7~11kmに位置している. このクラスターは2002年3月28日に始まった群発地震活動で形成された(気象庁, 2002). その後, 活動は減衰に向かっていったが, 新潟県中越地震後に活発化したことがわかる(第6図). クラスター2は十日町断層の南端の極狭い範囲に集中して分布し, 主に2002年7月から8月にかけて発生している. その活動域と後述のメカニズム解から, クラスター1とは別種のクラスターに分類した. クラスター3は六日町断層の南端に分布し

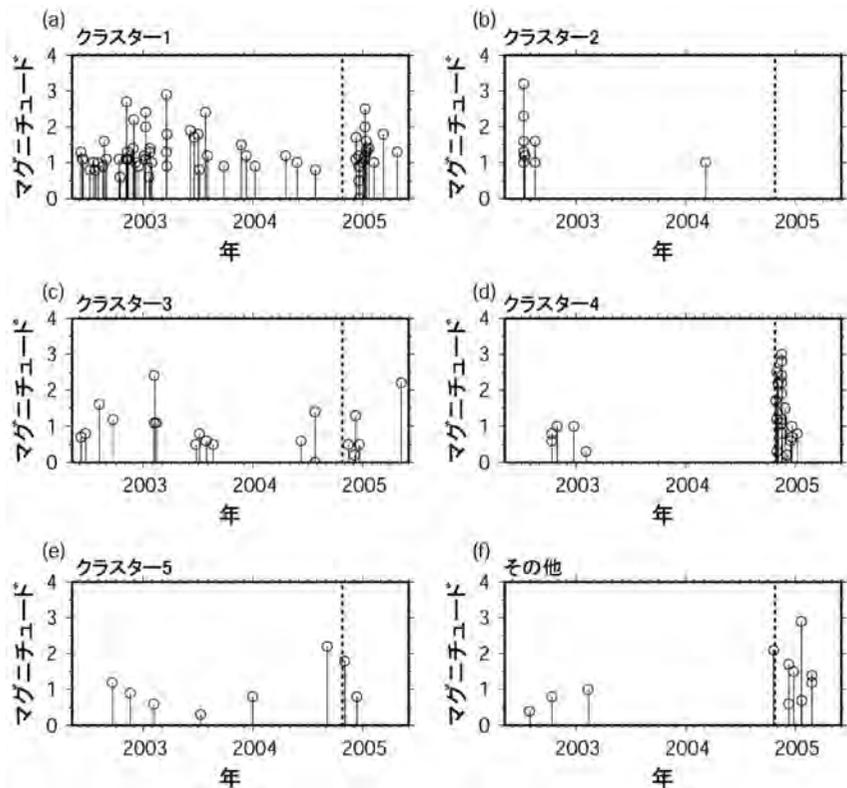
ている. ここでは2001年1月4日にマグニチュード5.1の地震が発生しており, 東西圧縮の横ずれ成分を持つ逆断層型のメカニズム解を持つことが報告されている(気象庁, 2001). クラスター3にはこの地震の余震も含まれているであろう. クラスター4は約40度で南東に傾斜した面状分布を示し, ほとんどが新潟県中越地震後に発生している(第6図). クラスター5は深さ11~17kmで起こっており, 発生場所は他のクラスターと比べて明らかに深い. 震源分布にばらつきがあるためはっきりとは言えないが, 北西に約30度で傾斜した分布を示すように見える. このクラスターの活動度は高くはないが, 定常的に発生しているのがわかる.

4. 地震空白域における応力場

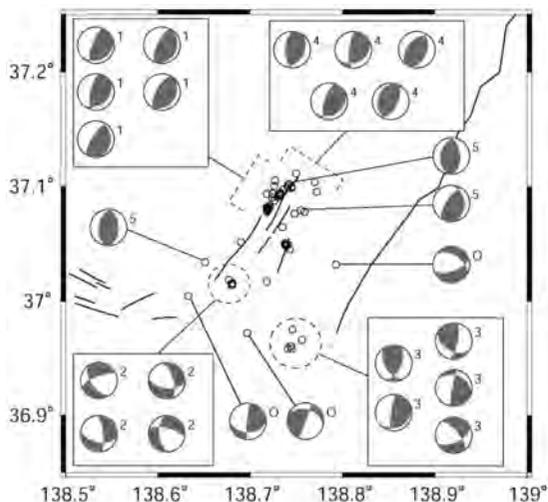
次に, 地震空白域の応力場を推定するために, メカニズム解の推定を行った. メカニズム解は通常, P波初動の押し引きデータから決定される. しかし, 地震が小さくなるにつれてP波初動の押し引きデータも少なくなり, 一意に解を決定することが難しくなる. このような問題を克服する方法の一つとして, P波とS波の振幅比を用いる方法(例えば, Kisslinger, 1980)や絶対振幅値を用いる方法(例えば, Slunga, 1981)が提案されている. 本研究では, P波初動の押し引きデータに加えてP波とS波の絶対振幅値も同時に使うことによりメカニズム解を推定した. ここで扱う



第5図 地震空白域における地震活動. 活動域とメカニズム解をもとに5つのクラスターに分類した. 左図のX-Y断面を右図に示す.



第6図 各クラスターにおけるマグニチュード時間分布図. 点線は新潟県中越地震が発生した時刻に対応する.

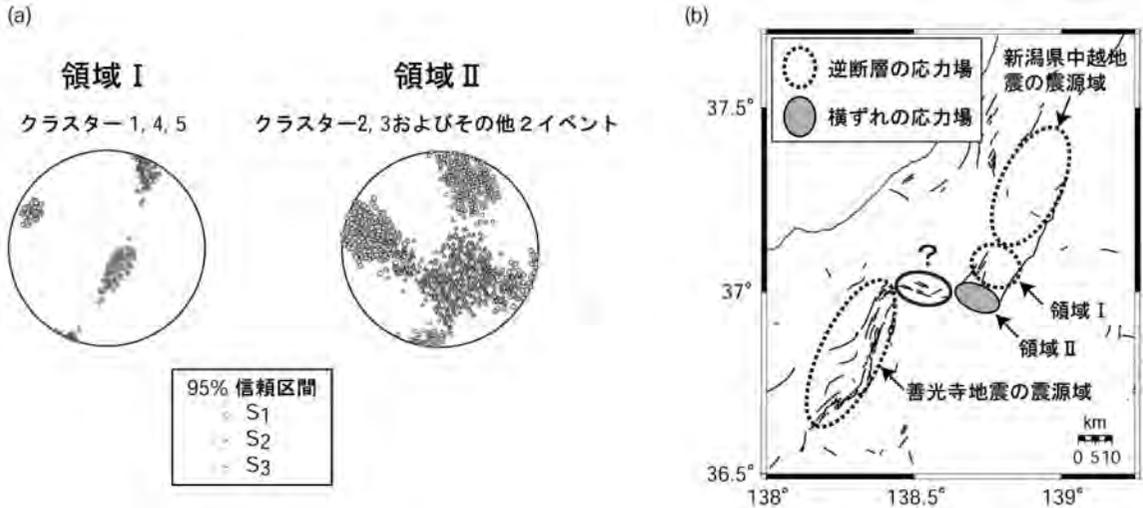


第7図 本研究で推定したメカニズム解. 等積投影の下半球投影で表す. 震源球の右上の数字はクラスター番号を示す. Oはどのクラスターにも分類されなかった地震を示す.

手法は今西ほか(2006)でも使用され, その有効性が示されている.

本研究では全部で55個のメカニズム解を推定した. 第7図に得られたメカニズム解の一部を示す. ほとんどのメカニズム解は逆断層タイプで, その走向は六日町断層や十日町断層の走向とほぼ同じである. 一方, クラスター2や3のように本調査地域南部で発生している地震は横ずれ成分を持ったメカニズム解を示していることがわかる. 前述のように, クラスター3で2001年に発生したマグニチュード5.1の地震にも横ずれ成分が含まれている. このように, 本調査地域内で応力場が空間的に変化していることが伺える.

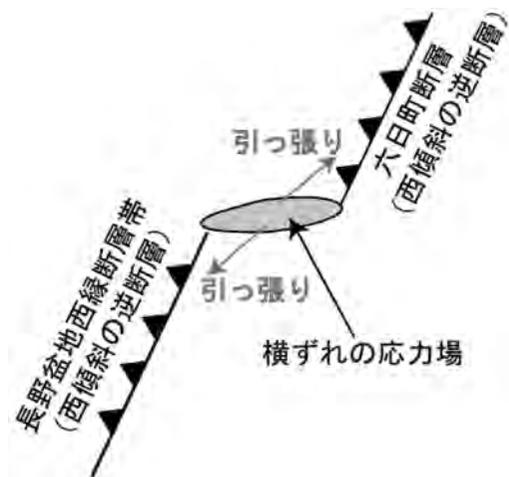
対象とする領域内に複数のメカニズム解のデータが存在すれば, 応力テンソルインバージョンと呼ばれる手法により, 主応力方位と応力比 ϕ を推定することができる. ここで応力比 ϕ は, 最大主応力, 中間主応力, 最小主応力を S_1, S_2, S_3 とすると, $(S_2 - S_3) / (S_1 - S_3)$ と定義される. 本稿では, 地震学でよく使われ



第8図 (a) 応力テンソルインバージョンの結果, (b) 応力場の空間分布.

ているMichael (1984)の手法を用いた結果を紹介する。手法の適用に際しては、クラスター1, 4, 5を含む領域Ⅰと調査地域南部で発生しているクラスター2, 3, およびその他の2イベントを含む領域Ⅱの2つに分割した。地震数は前者が43イベント、後者が12イベントである。第8図はそれぞれの領域に対して応力テンソルインバージョンを適用した結果である。領域Ⅰは逆断層の応力場を、領域Ⅱは横ずれの応力場を示している。応力比 ϕ は領域Ⅰが0.35で領域Ⅱが0.65と推定された。2つの領域では異なる応力場が得られたが、最大主応力軸の方位には顕著な違いは見られず、広域応力場に調和的な西北西-東南東を示している。この方位は六日町断層や十日町断層の走向と直交しており、現在の応力場は両断層が逆断層運動として起こりやすい状態であるといえる。

2004年新潟県中越地震は西傾斜の逆断層型であった(Kato *et al.*, 2006)。また、1847年善光寺地震も西傾斜の逆断層であったことがわかっている(活断層研究会, 1991)。このように、新潟県中越地震の震源域から長野盆地西縁断層帯にいたる領域は基本的に逆断層の応力場になっている。その中で領域Ⅱにおいて横ずれの応力場が出現するのは非常に興味深い。その解釈のひとつとして、我々は以下のようなモデルを考えている。六日町断層と長野盆地西縁断層帯は約25km西北西-東南東方向にずれている。そのため、両断層による逆断層運動により、その境界領



第9図 横ずれの応力場が生ずる解釈のひとつ。

域では引っ張り力が発生する。これにより、領域Ⅱに横ずれの応力場が出現するという解釈である(第9図)。ただし、この解釈には十日町断層帯の断層運動を考慮していないという問題点がある。今後、フェーズⅡのデータ解析結果や応力比 ϕ の情報も加味し、定量的にこの解釈を再考していく予定である。

5. まとめ

2004年新潟県中越地震の震源域南部隣接域の地

震空白域において臨時の地震観測を行い、地震活動と応力場について調査した。推定された地震活動は複数のクラスターから構成されており、複雑な断層構造であることが予想される。また、応力場が空間的に変化していることも明らかになった。このような応力場の空間変化が起こりうる原因を追究することは、地震空白域の現在の応力状態を把握する上で重要である。一方、最大主応力方位には空間変化は見られず、地震空白域に存在している六日町断層と十日町断層の走向に対してほぼ垂直に作用している。両断層共に逆断層として動くための応力が着実に蓄積されているといえる。

本研究の調査地域のように、大地震の空白域とされている領域でも微小地震は少なからず起こっている場合が多い。本研究の成果は、臨時観測や詳細なデータ解析を行えば、大地震が発生する前に地震空白域についての情報を得られることを示した点にあると言える。今後は地震活動や応力場の時間変化に着目した調査を実施し、地震空白域にどのように応力が蓄積され大地震発生につながるのかを明らかにする研究が必要になってくるであろう。

謝辞：本研究では、気象庁が文部科学省と協力して求めた震源カタログを使用させて頂きました。解析には防災科学技術研究所 (Hi-net)、気象庁、東大地震研究所の波形データを利用させて頂きました。メカニズム解の決定には、東京大学の井出哲博士が作成したプログラムを参考にさせて頂きました。図の作成には、Generic Mapping Tool (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。また、産業技術総合研究所の松下レイケン氏と中井未里氏にはデータ処理に協力頂きました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 今西和俊・長 郁夫・桑原保人・平田 直・Yannis Panayotopoulos (2006) : 活断層・古地震研究報告, 第6号, 55-70.
- Imanishi, K., Y. Kuwahara, T. Takeda and Y. Haryu (2006) : The seismicity, fault structures, and stress field in the seismic gap adjacent to the 2004 Mid-Niigata earthquake inferred from seismological observations, *Earth Planets Space*, **58**, 831-841.
- Kato A., S. Sakai, N. Hirata, E. Kurashimo, T. Iidaka, T. Iwasaki and T. Kanazawa (2006) : Imaging the seismic structure and stress field in the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake: Structural zones of weakness and seismogenic stress concentration by ductile flow, *J. Geophys. Res.*, **111**, B08308, doi:10.1029/2005JB004016, 2006.
- 活断層研究会 (1991) : [新編]日本の活断層-分布図と資料-, 東京大学出版会, 437pp.
- 気象庁 (2001) : 関東・中部地方とその周辺の地震活動 (2000年11月~2001年4月), 地震予知連絡会会報, **66**, 114-122.
- 気象庁 (2002) : 関東・中部地方とその周辺の地震活動 (2001年11月~2002年4月), 地震予知連絡会会報, **68**, 72-82.
- Kisslinger, C. (1980) : Evaluation of S to P amplitude ratios for determining focal mechanisms from regional network observations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **70**, 999-1014.
- 桑原保人・今西和俊・武田哲也 (2005) : 新潟県中越地震の震源隣接域における微小地震観測, 地質ニュース, **607**, 34-38.
- Michael, A. J. (1984) : Determination of stress from slip data: faults and folds, *J. Geophys. Res.*, **89**, 11, 517-11,526.
- 岡村行信・柳沢幸夫 (2005) : 新潟県中越地震と地質構造との関係, 地質ニュース, **607**, 13-17.
- 大竹政和 (2004) : 第160回地震予知連絡会議資料, 国土地理院.
- Slunga, R. (1981) : Earthquake source mechanism determination by use of body-wave amplitudes- An application to Swedish earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **71**, 25-35.
- Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth (2000) : A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.

IMANISHI Kazutoshi, KUWAHARA Yasuto, CHOU Ikuo, HOSHINO Makoto, TAKEDA Tetsuya and HARYU Yoshikatsu (2008) : Temporal observation of micro-earthquakes in a seismic gap adjacent to the 2004 Mid-Niigata earthquake.

<受付: 2008年7月8日>