

(2-2) 非地震性すべりのモデル化

飯尾能久（京都大学防災研究所）

iio@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

有限要素法等を用いて、兵庫県南部地震の断層への応力蓄積過程を検討した。飯尾(1996)によって提案されたデタッチメント仮説は、観測されている歪速度を説明するために、デタッチメントのすべり速度を数 cm/年程度とプレート境界と同程度の値に仮定しなければならない点が問題であった。上部地殻に非弾性変形を導入すると、下部地殻における変形を効率的に地表まで伝えることができるため、デタッチメントのすべり速度を小さくできることが分かった。

(b) 業務の実施方法

昨年度までは、地震調査委員会によって公表された近畿および四国地方の活断層の評価結果を活用することにより、六甲・淡路・大阪湾断層系と隣接領域の断層の活動との時空間的關係に着目して、兵庫県南部地震の発生過程の推定を行い、以下のような作業仮説を提示した。重要なポイントは、内陸地震の断層への応力蓄積には、その断層に固有の応力蓄積過程と、隣接する断層のすべりによる応力増加の2とおりがあるということである。独立した2つのプロセスがあるために、それぞれの断層の活動履歴が不規則になる可能性があると考えられる。具体的なケースとして、固有の応力蓄積過程によっては十分に応力蓄積していなかった断層において、隣接する断層のすべりによって応力が増加して地震の発生が早まる場合が考えられる。その断層に固有の応力蓄積過程としては、断層の深部延長のすべりが第一の候補であると考えられるが(Iio and Kobayashi, 2002¹⁾)、それによる応力蓄積が十分でない場合は、地震発生域の断層の深部において、断層面上の応力と強度の差が接近していないと考えられる。その場合、隣接する断層がすべった場合、強度の小さい浅部の断層はすべるけれども、地震発生域の最下部はすべり残しが出る可能性が考えられる。兵庫県南部地震は、そのすべり残しで起こった地震であるという仮説である。明石海峡下の地震発生域の最深部ですべりが始まり、破壊は六甲断層系の深部に広がった。ただし、南西側に進展した破壊は野島断層の地表まで達した理由はよく分からない。新潟県中越地震の余震域両端で発生したM6クラスの余震が、地震発生域の浅い部分しか破壊することが出来なかったことは、上記の推定を支持する知見である(飯尾・他, 2006²⁾)。

上記の仮説は、兵庫県南部地震に関して説明が難しかった観測事実、どうして1596年慶長伏見の巨大地震から400年程度の間隔で発生したのか？なぜ神戸側では地表に地震断層が表れなかったのか？ということの説明可能である。しかしながら、2つのプロセス中でより本質的な、兵庫県南部地震の断層への固有の応力蓄積過程についてはまだよく分かっていない。今年度は、既存の観測データを総合的に解釈するとともに、有限要素法等を用いることにより、兵庫県南部地震の断層への固有の応力蓄積過程の推定を行った。

(c) 業務の成果

1) 兵庫県南部地震前の地殻活動とデタッチメントモデル

飯尾(1996³⁾)は、兵庫県南部地震前約 100 年間に於ける、震源域周辺の地殻水平歪(国土地理院, 1985⁴⁾, 1986⁵⁾)に見られる南北伸張の歪速度場を、有馬高槻構造線の北側に発見されていた低角(傾斜角 20 度程度、走向は東西)の S 波の反射面(片尾, 1994⁶⁾)上の正断層的なゆっくりすべりによって'定性的'に説明した。しかし、この'定性的'な説明には、2つの問題があった。観測された地殻水平歪を定量的に再現するためには、S 波の反射面(デタッチメント)上に、数cm/年を越えるようなプレート境界並みのすべり速度を与える必要があること(図 1)(飯尾, 2002⁷⁾)、および、下部地殻内の正断層的なすべりにより、その上端付近の地表では、沈降に伴って、下部地殻内の変形とは逆センスの短縮歪が現れるということである。2 番目の点については、下部地殻内の断層の傾斜が高角になるほど影響が大きくなる。

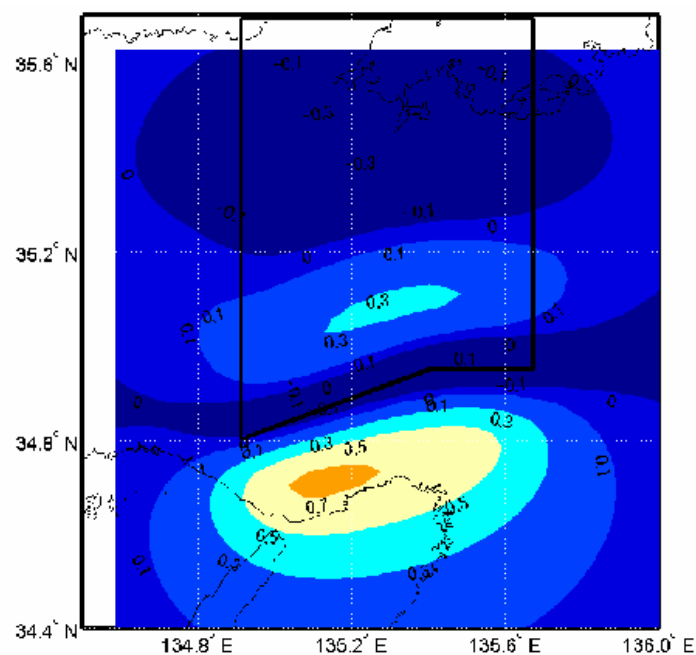


図 1 S 波の反射面(デタッチメント、黒太線)上の 1m の正断層すべりによる地表の歪場(南北方向の成分)。最大で 7×10^{-6} の伸張歪が見られるが、約 100 年間の地殻水平歪の観測値(国土地理院, 1985⁴⁾, 1986⁵⁾)はその約 3 倍である。デタッチメントの上端の深さは 20km、傾斜角は 10 度。

2) Weak zone モデル

飯尾(2004⁸⁾)は、上記の問題点を解決するために、有馬高槻断層帯の周辺の下部地殻に、複数の断層からなる Weak zone の存在を仮定して、観測データを説明しようとした。複数の断層帯を仮定することにより、個々の断層のすべり速度を小さくしようという考えである。ただし、上記の 2 番目の問題点は、Weak zone を仮定する場合でも考慮する必要がある。図 2 に示すように、上部地殻の厚さに比べて Weak zone の幅が広くない場合は、Weak zone の変形と地表付近の変形は逆センスとなるからである。一方、Weak zone の広がり方が上部地殻の厚さに比べて大きい場合は、地表の歪場は、Weak zone の変形と整合的となる。

したがって、Weak zone モデルにより、兵庫県南部地震前の南北伸張の歪速度場を再現

する方法として以下の2とおりの可能性が考えられる。

1 番目は、複数の正断層からなる幅広い Weak zone を仮定するものである。しかしながら、定量的に検討すると、直上で南北伸張を起こすためには、Weak zone の幅を 50km 程度以上にする必要がある。この Weak zone の幅は、伸張歪の観測されている領域の幅より有意に広く、観測データと合わない。

2 番目は、比較的高角 (>30 度程度) の逆断層からなる幅の狭い Weak zone を仮定するものである。この場合は、直上に逆センスの南北伸張歪を起こすことが出来る。しかし、断層の密度が小さいと、個々の断層のすべり速度が大きくなり、1 の問題をクリアできなくなる。

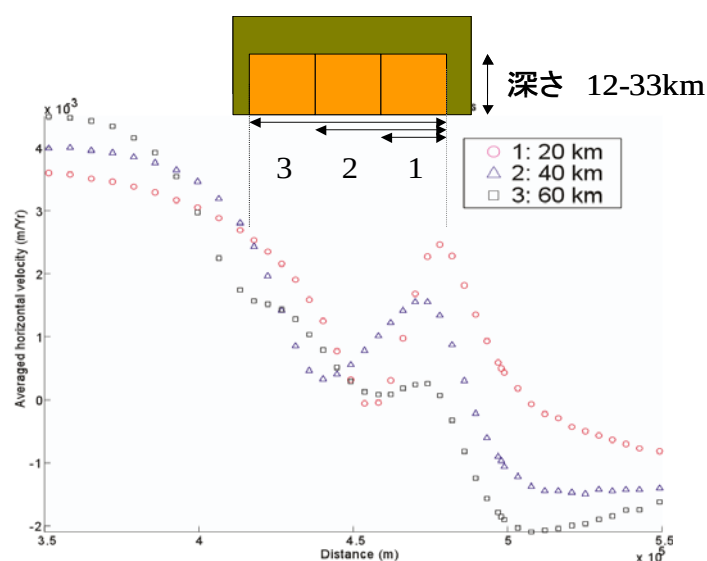


図2 下部地殻の Weak zone の幅と地表における変形の関係。地殻がプレートの沈み込みにより西向きに短縮されている。横軸は東西方向の距離。縦軸は東向きの変位をプラスにとった。下部地殻の Weak zone の幅を3とおりに変化させた。Weak zone が狭いと、その直上の地表では、下部地殻と違って伸張歪みが生じる(1と2で顕著)。地殻の厚さは33km、Weak zone (オレンジ)の幅は、20~40km。

3) 非弾性変形モデル

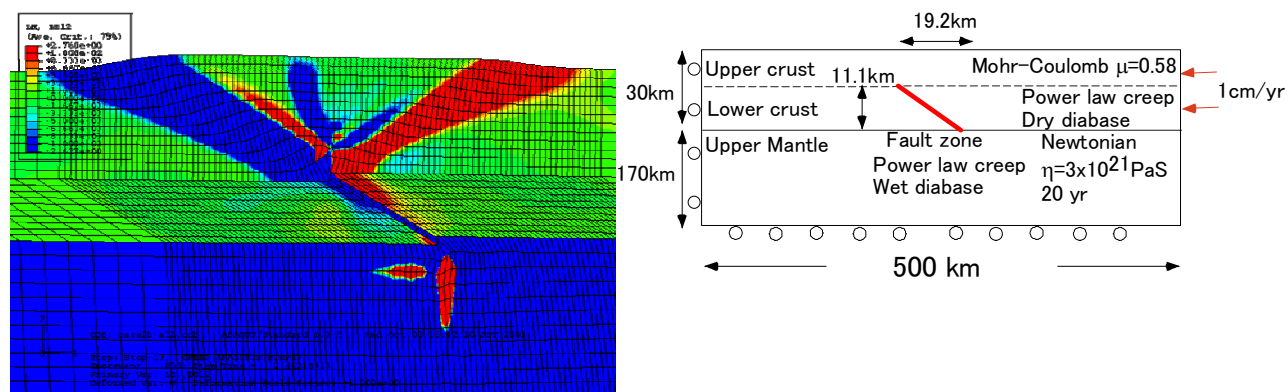


図3 有限要素法による上部地殻の非弾性変形の効果の見積もり。(左)変形後の状態。せん断対数歪みが色で表示されている。(右)モデルの構成。

下部地殻内のデタッチメント断層上に大きなすべり速度を与える必要があるのは、それが地表から遠くにあるため、弾性体中の単位量のくいちがいによって得られる地表変形が小さいからである。しかしながら、もしデタッチメント断層の直上付近の上部地殻で非弾性変形が起こるならば、深部の変形を効果的に地表に伝えることが出来ると考えられる。

そこで、有限要素法 (ABAQUS) を用いて、非弾性変形の効果を確認を調べてみた。

表 1 地殻のヤング率、ポアソン比、密度

	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	質量密度 (kg/m ³)
Diabase	1.06×10^{11}	0.280	2940

表 2 ベキ乗則のパラメータ

	Q (kJ mol ⁻¹)	n	B (MPa s ^{1/n})
Diabase (wet)	259	3.4	3.68
Diabase (dry)	485	4.7	0.191

表 3 マントル部の物性値 (Olivine (wet))

パラメータ	SI 単位系
ヤング率 E [Pa]	1.90×10^{11}
ポアソン比 ν	0.26
密度 ρ [kg/m ³]	3310
緩和時間	20 年

図 3(右)に示すように、地殻を単純な長方形で近似し、上部地殻をMohr-Coulomb則に従う塑性領域、下部地殻・上部マントルをベキ乗型の流動則に従う領域とした。下部地殻内に幅 3kmの断層帯を導入し、Wet diabaseの流動則を用いることにより、周辺の岩石 (Dry diabase) よりも変形しやすくした。温度構造としては、62.5kmより浅部は線形の温度勾配 (20 度/km) とし、それより深部は 1250 度で固定した。簡単のために、流動則のパラメータは、最初の位置の関数とし、変形後も同様のパラメータを持つものとした。用いた物性値を表 1～3 に示した (Ellis et al., 2001⁹⁾)。境界条件としては、地殻の右端は変位速度、マントルの右端およびモデルの下側・左端・下端はローラー境界とした。平衡状態に達した後、地殻の右端を 1cm/yrの変位速度で水平左向きに押した。図 3(左)に 90 万年後の変形図を示す。下部地殻の断層帯のずれの量と同程度の上下方向の変形が上部地殻にも生じていることが分かる。この図は 90 万年間のトータルの変形量を示しているが、定常的に変形していることから、長時間経過後の変形速度についても、下部地殻の断層帯のずれと上部地殻の変形の速度が同程度であると考えられる。比較のために、上部・下部地殻を弾性体とした場合の変形図を図 4 に示す。断層帯ではずれが生じているが、地表の変形は大変小さい。このように、上部地殻で非弾性変形が起こるならば、深部の変形を効果的に地表に伝えることが出来ることが分かった。

非弾性変形の導入により、1) で指摘した 2 番目の問題も解決できる。地表において下部地殻内の変形と逆センスの変形が現れるのは、上部地殻の弾性的な応答によるからである。伸張歪の領域の拡がりに関しても、非弾性変形している領域の幅を然るべく仮定すること

により、観測データに合わせる事が可能であると考えられる。

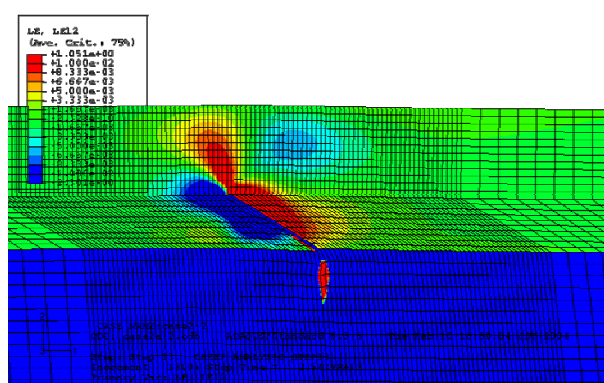


図4 上部・下部地殻とも弾性体と仮定した場合の変形図。

(d) 結論ならびに今後の課題

兵庫県南部地震の断層への応力蓄積過程に関するデタッチメント仮説(飯尾, 1996³⁾)の弱点は、観測されている歪速度を説明するためには、デタッチメントのすべり速度を数cm/年程度と非常に大きな値に仮定しなければならない点であった。上部地殻に非弾性変形を導入すると、下部地殻における変形が効率的に地表まで伝わるため、デタッチメントのすべり速度を小さくできることが分かった。ただし、上部地殻の広い領域にわたって非弾性変形を導入すると、南北伸張と同時に、最大圧縮応力の方向における東西短縮歪みが表れると考えられる。兵庫県南部地震の断層および有馬高槻断層帯周辺で観測された約100年間の地殻水平歪みは、東西短縮歪よりも南北伸張歪の絶対値が大きかった(飯尾, 1996³⁾)。このことは、上部地殻の非弾性変形も、東西走向を持った断層の非地震性のすべりで起こっている可能性を示唆している。これらを取り入れて、3次元のモデル化を行うことが今後の課題である。

謝辞 防災科学技術研究所・岡田義光氏による歪計算のプログラムを使わせていただいた。

(e) 引用文献

- 1) Iio, Y., and Kobayashi, Y.: A physical understanding of large intraplate earthquakes, *Earth Planets Space*, Vol.54, pp.1001-1004, 2002.
- 2) 飯尾能久・他：2004年新潟県中越地震の発生過程—オンライン合同余震観測結果から—, 地震2, 印刷中, 2006.
- 3) 飯尾能久：兵庫県南部地震の発生機構—断層の固着とデタッチメントのすべり—, 地震2, Vol.49, pp.103-112, 1996.
- 4) 国土地理院：近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 34, pp.346-357, 1985.
- 5) 国土地理院：近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 34, pp.333-354, 1986.
- 6) 片尾浩：近畿地方の微小地震活動域直下に存在する顕著な地殻内反射面, 地球惑星関連学会合同大会予稿集, 122, 1994.
- 7) 飯尾能久：非地震性すべりのモデル化, 大大特(平成14年度)成果報告書, pp.445-448,

2002.

- 8) 飯尾能久: 歪集中帯のメカニズムと近畿北部における最近および兵庫県南部地震前の地殻活動, 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, 2004.
- 9) Ellis S.: Silke Wissing and Adrian Pfiffner, Strain localization as a key to reconciling experimentally derived flow-law data with dynamic models of continental collision, Int. J. Earth Sciences, Vol.90, pp.168-180, 2001.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
飯尾能久	兵庫県南部地震前の地殻活動と非弾性変形モデル	日本地震学会秋季大会	平成 17 年 10 月 19 日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし