

GEONET データが示す近畿地方のテクトニクス

藤森邦夫

京都大学大学院理学研究科

要旨

近畿地方において、GEONET データを解析し均質歪を除去した結果、クリープ性の変位を示す地殻変動境界（クリープ断層）が見出された。このクリープ断層は、明石海峡から琵琶湖北部を通り、多くの活断層を横切り、中部地方北部に達すると推定される。北東-南西走向のクリープ断層の存在は、東西圧縮下にある中部地方から近畿地方にかけての日本列島中央部において、巨大なせん断破壊がゆっくり進行中であることを示すと考えられる。

キーワード： GPS, 地殻変動, クリープ断層, 活断層, 地震

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以後、GPS連続観測システム（GEONET）が稠密化され、GPSデータの解析により日本列島の地殻変動が明らかになつてきた。しかし、近畿地方中央部は歴史大地震が数多く発生しているにもかかわらず、比較的地殻変動が小さいため、そのテクトニクスは必ずしも明らかになっていない。またこの地域においては、古くから歪計や傾斜計による地殻変動連続観測も多く行われてきたが、地殻変動を統一的に解釈することはできず、その原因は地殻変動の局所性が大きいためであると考えられる。

近畿地方の地殻変動の概要は、国土地理院（2002）によるGPS水平変動ベクトル（Fig. 7）で見られるように、プレート運動に関係する北部（日本海側）の東方への変位と南部（中央構造線以南の太平洋側）の西方への変位が顕著である。すなわち近畿地方は、東西方向に大きなせん断歪を受けており、東西方向の変動が支配的である。従って、ほぼ同程度に位置するGPS観測点を選び、それらの東西変位を調べれば、局所的な地殻変動または地殻変動傾向の変化地点を検出できる。

2. 局所的な地殻変動

使用したGEONETデータは、主に1994年と1995年に設

置されたGPS観測点の1996年4月から2002年7月までの日データであり、1997年設置の観測点データも一部使用した。また、各観測点の平均変位（mm/年）は、固定観測点からの座標変化（東西、南北、上下成分）に直線近似を適用して求めた。

丹後半島から淡路島を通り太平洋に至る測線（Fig. 7のA）の東西、南北、上下成分の変位分布をFig. 1に示す。観測点固有の変動が小さい三木（No.950352）を固定して各観測点の変位を求め、その変位を丹後基準に直して表わしている。なお、淡路島より南は、四国と紀伊半島の太平洋岸の観測点を使用した。東西変位は、その変化様相から3地域の変動、すなわち日本海側（丹後-久美浜）、近畿中央部（福知山-明石）、太平洋側（一宮-室戸）に分けられる。日本海側と近畿中央部の間（久美浜-福知山；約30km）に約3mm/年の右横ずれの不連続がみられ、近畿中央部では変化が小さく、そして太平洋側では淡路島に始まる西方への変位が中央構造線を越えて南方ほど大きい。注目すべきことは、明石海峡（明石-岩屋；約10km）での変位不連続が約2mm/年の右横ずれと大きいことである。また南北変位も約2mm/年の伸張を示す。これらの変位は、北東-南西走向の六甲断層系における右横ずれを想起させる。

同様に、近畿地方東部における地殻変動を調べるため、南北方向に比較的密に観測点が位置する三方からすさみに至る

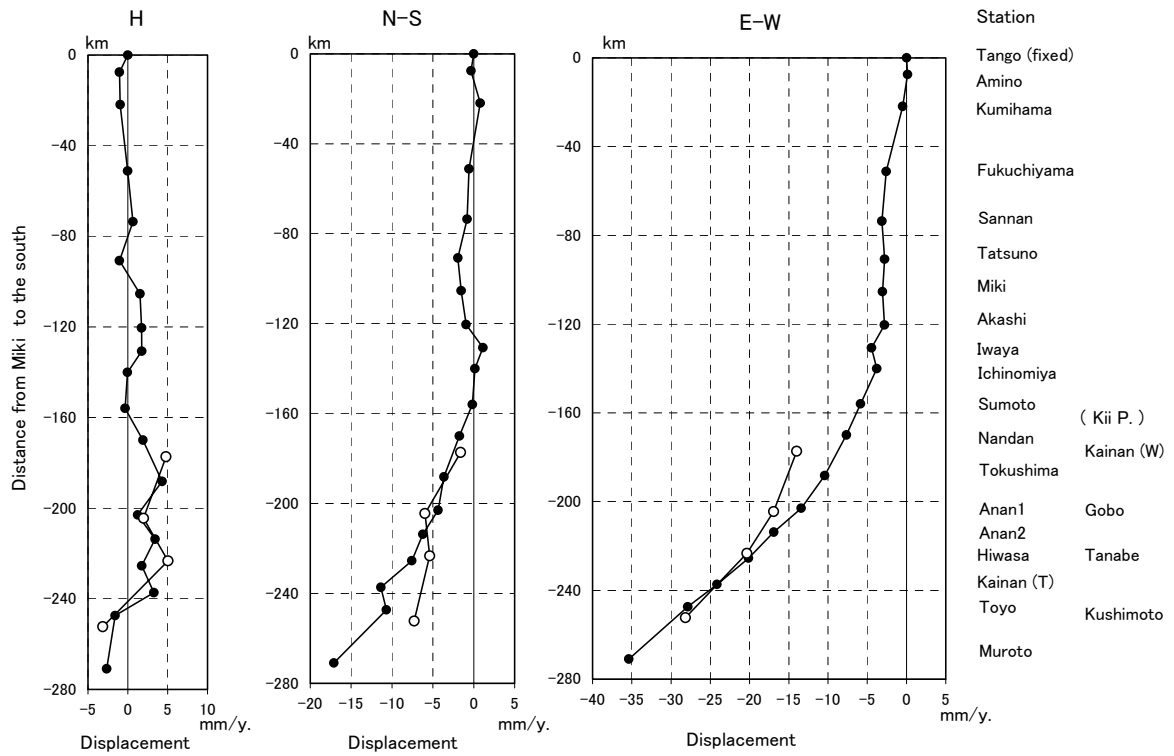


Fig. 1 Displacement rates (mm/y) of the GPS stations along traverse line A shown in Fig. 7. Tango is fixed. Open circles mean the stations on the Kii peninsula. The discontinuity of displacement is seen in Akashi - Iwaya.
 Left: Vertical displacement, positive for rise. Middle: N-S displacement, positive for the south.
 Right: E-W displacement, positive for the east.

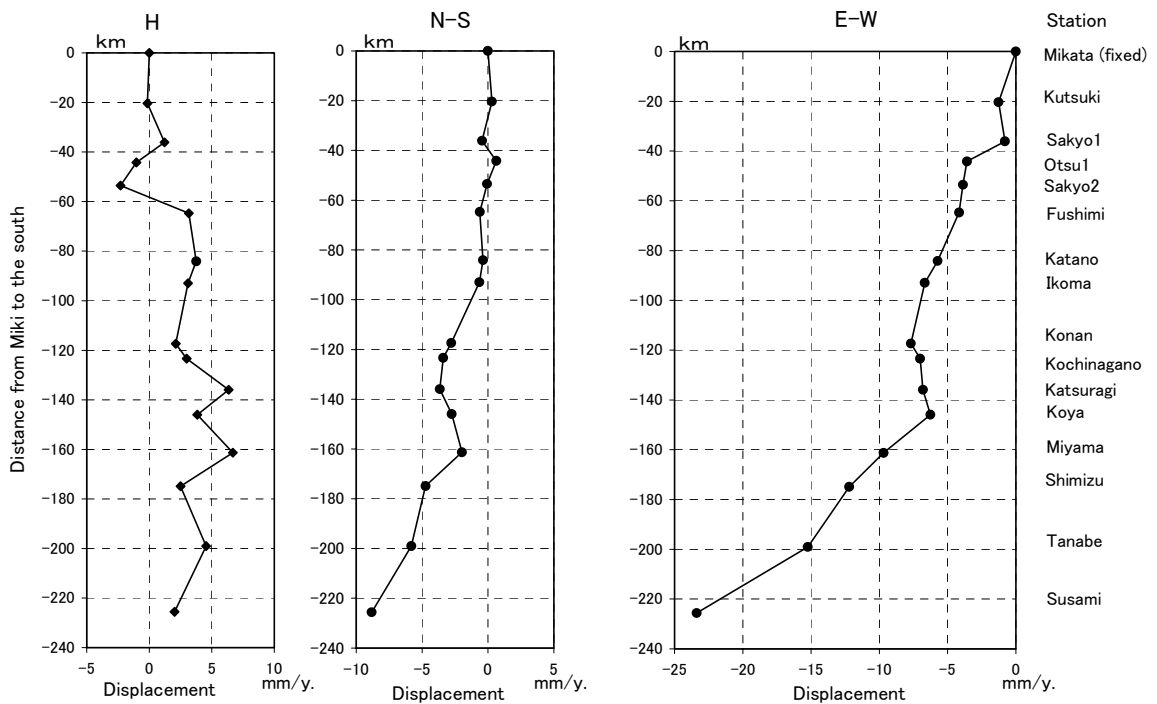


Fig. 2 Displacement rates (mm/y) of the GPS stations along traverse line B shown in Fig. 7. Mikata is fixed. The discontinuity of displacement is seen in Sakyo1 - Otsu1.

測線 (Fig 7 の B) の結果を Fig. 2 に示す。この測線においては、交野固定に対する変位を求め、三方を基準として表わしている。この測線においても東西変位は、その様相から3地域の変動、すなわち近畿北部 (三方-左京1)、近畿中央部 (大津1-高野)、太平洋側 (高野-すさみ) に分けることができる。日本海側と近畿中央部との間 (左京1-大津1; 約10km) に約3mm/年の右横ずれの不連続がみられ、近畿中央部では比較的緩やかな変化があり、そして太平洋側では中央構造線付近の高野に始まる西方への変位が大きい。この測線における顕著な変化は左京1-大津1にあり、この間には約2mm/年の南北伸張も見られる。この地点には、北東-南西走向の比良断層が存在する。

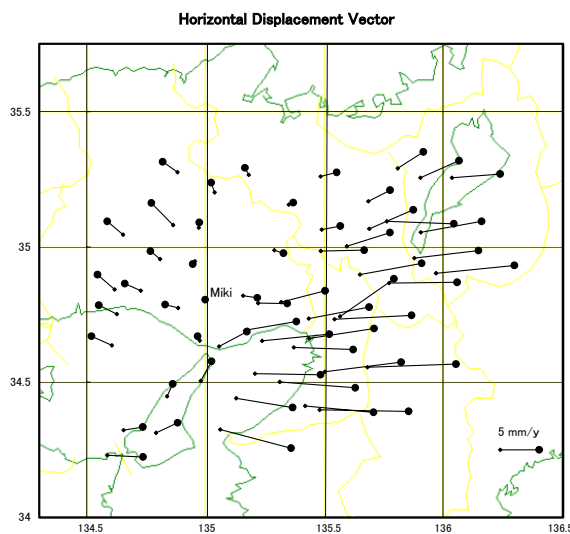


Fig. 3 GPS horizontal displacement vectors in the central Kinki. Miki station is fixed.

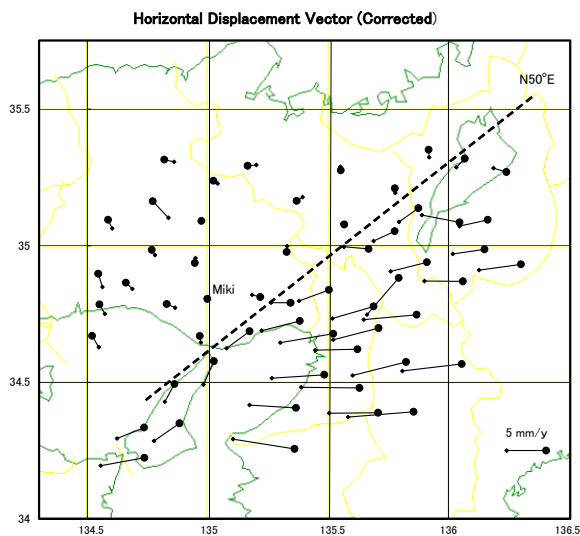


Fig. 4 Corrected GPS horizontal displacement vectors. The correction amounts are 0.04 mm/km/y in E-W and 0.02 mm/km/y in N-S. The broken line (N50°E-S50°W) shows a displacement boundary.

南北方向の測線A, Bにおける変位分布は、六甲断層系と比良断層が右横ずれのクリープ性変位を持つことを示す。

3. クリープ断層

変位データに適切な補正を施せば、先の測線A, Bの変位直線分布を調べたのと同様に、変位の空間的分布をみることができる。ここでは、クリープ性変位の空間的分布を調べるため、変位の大きい日本海側と中央構造線以南を除き、近畿中央部のみの観測点を使って解析を進める。

Fig. 3 に、三木を固定した水平変位ベクトルを示す。この地域は圧縮場であり、三木に向かうベクトルが目立つ。そこで、北西部の変位が小さくなるように東西と南北方向にそれぞれ0.04mm/km/年と0.02mm/km/年の補正を行った。その結果を Fig. 4 に示す。破線で示される明石海峡から琵琶湖北部を通る線 (N50°E-S50°W) で、小さい変位の北西部と大きい西向き変位をもつ南東部とに、明瞭に2分される。南東部の破線に近い変位は、南西を向く。すなわち、変位境界は右横ずれである。また Fig. 5 に示す上下変位も、水平変位境界の南東部で先ず沈降があり、その南東側では隆起である。これらの変位分布は、測線A, Bでみられたクリープ性変位の地点は繋がっており、明石海峡から琵琶湖北部にかけて長さ約150kmに亘り直線状に存在することを示す。変位境界がクリープ断層であると考えられる。

水平変位をクリープ断層に平行成分と直交成分に分け、それらと上下変位を断層の直交方向 (N40°W-S40°E) に投影する。各々の変位分布を Fig. 6 に示す。実線は、変位のばらつきが大きいので主観的になぞったものであり、変位分布の概観を現す。これらの変位分布から、クリープ断層は三木のS40°E方向の約18km地点を通り、N50°E-S50°W走向で、幅約20kmのshear zone (歪: 約 2×10^{-7}) を伴うことが判る。そして北西部と南

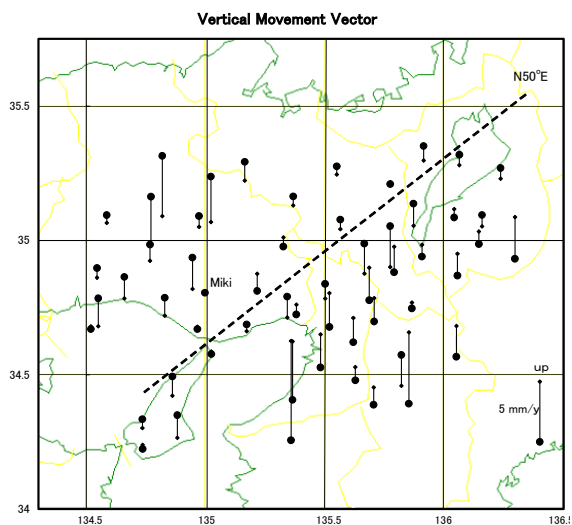


Fig. 5 GPS vertical displacement vectors in the central Kinki. Miki is fixed. The broken line is the same as Fig. 4.

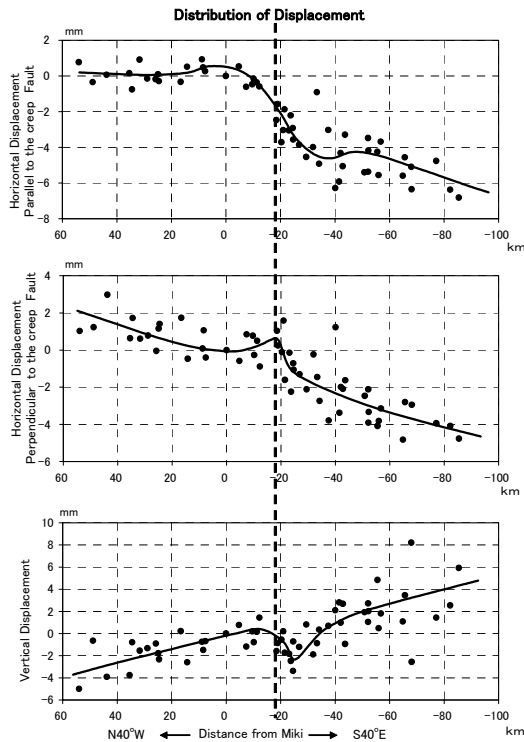


Fig. 6 Displacement distributions projected in N40°W-S40°E direction perpendicular to the displacement boundary. The solid line indicates a mean displacement trace. The broken line shows the presumed creep fault position.

東部との剛体的変位から、クリープ断層は約3mm/年の水平右横ずれ成分と約2mm/年の北西側隆起成分をもつと推定される。また、この断層は、六甲断層系と比良断層とは一致するが、その間は既存の活断層を横切る。さらに、クリープ断層平行の水平変位は、断層の北西部はほぼ一定値(歪:ほぼ0)であるのに対し、南東部では勾配(歪:約 1×10^{-7})をもつ。これは、断層を境に両地塊の歪が異なることを意味する。

Fig. 7に、2001年4月から2002年4月の大潟(新潟県)を固定したGPS水平変動ベクトル(国土地理院, 2002)を示す。先のクリープ断層は、この図においても変位ベクトルの微細な差異として見る事ができる。近畿中央部で見られる長さ約150kmにも及ぶクリープ断層が突然終るとは考え難く、ベクトルの差異を追えば、クリープ断層は琵琶湖より北東方向へ中部地方北部に延長でき、跡津川断層に達する。それを破線で示している。GPS観測点の密度が低いので不正確ではあるが、一連のクリープ断層であると考えられる。

4. クリープ断層と歴史大地震

先のクリープ断層を活断層(活断層研究会編, 1991)およびM ≥ 7 歴史大地震(国立天文台編, 2002)と合わせてFig. 8に示す。クリープ断層に近い地震を黒丸、遠い地震を白丸で示している。クリープ断層は多くの活断層を横切り、内陸大

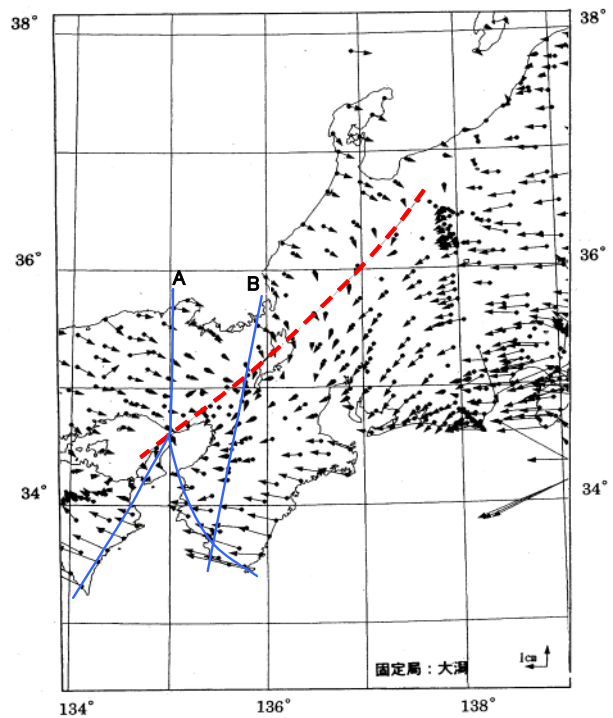


Fig. 7 GPS horizontal displacement vector (2001/4-2002/4). Oogata is fixed. The broken line shows creep fault presumed. Slid lines attached A and B shows traverse line used in Figs. 1 and 2. (retouched to Geographical Survey Institute, 2002)

地震はクリープ断層近傍に多く発生したことが分かる。このクリープ断層の存在は、東西圧縮下にある中部地方から近畿地方にかけての日本列島中央部において、巨大なせん断破壊がゆっくり進行中であると考えるのが自然であろう。もしこのクリープ断層が地震の核となる歪集中の場所ならば、せん断歪が約 $4\text{mm}/20\text{km} = 2 \times 10^{-7}$ strain/年で蓄積されており、数100年に一回地震を発生させることになる。なお、地殻浅部に微小地震が無いことや兵庫県南部地震の断層がクリープ断層と一致する神戸側では地表に現れなかったことは、その浅部ではまたクリープにより応力開放が常に行なわれていることを示すものかも知れない。

5. 地震予知に向けて

西日本の内陸大地震は南海トラフの巨大地震前後に発生する(Mogi, 1981; Hori and Oike, 1996)と言われる。Fig. 9に、クリープ断層近傍の歴史大地震と南海トラフの巨大地震の発生を年代順に並べて比較する。なおここでは868年播磨の地震をクリープ断層に近い地震とし破線で示す。これをみると両者の発生には関連が見られる。すなわち、684年の南海トラフの巨大地震から1つ跳びこ印を付けると、○印の地震後に琵琶湖北東の両白山地で地震が発生し、次にクリープ断層の端近くで地震発生、その後両地震に挟まれた地域で地震が発

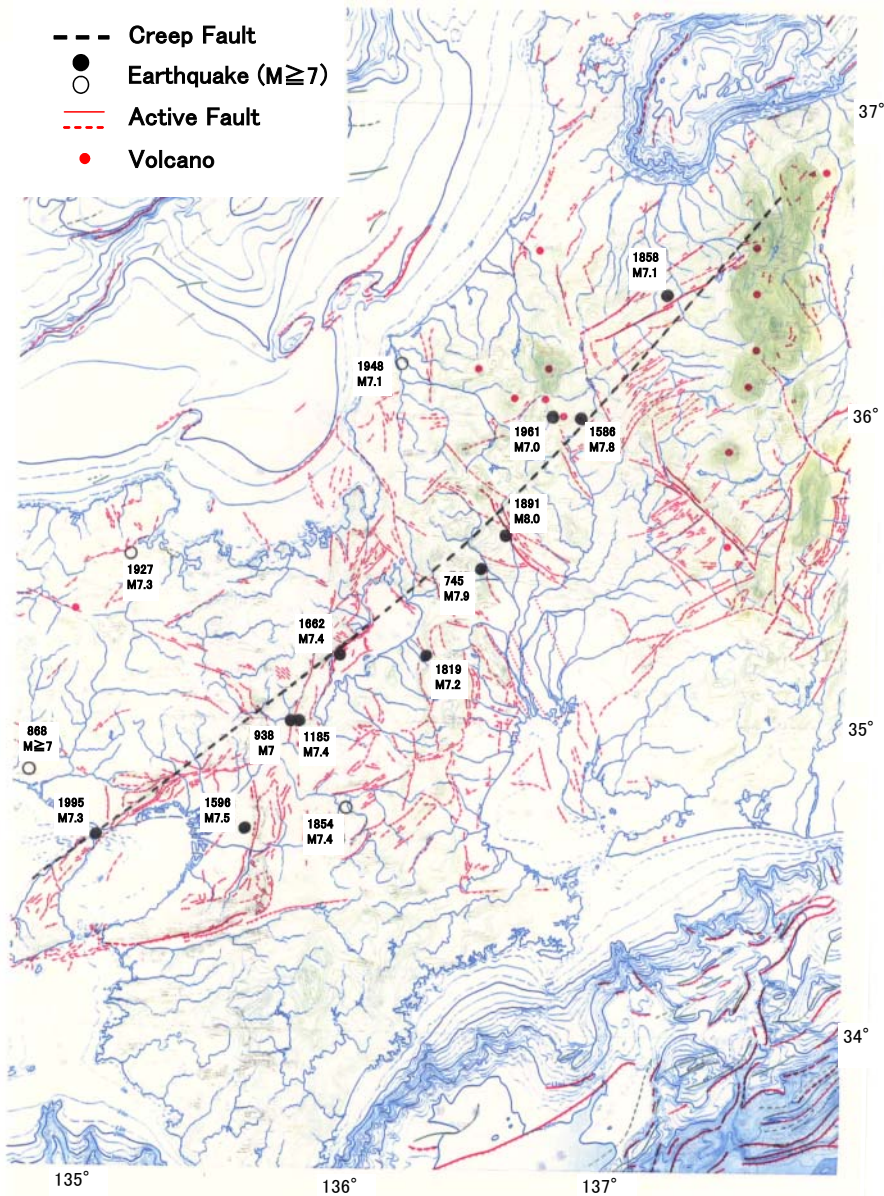


Fig. 8 Locations of creep fault (broken line), historical large earthquake $M \geq 7$ (large closed and open circles), active faults (thin lines), and volcanoes (small closed circles). The large closed circles indicate earthquakes along the creep fault. (retouched to the Research Group for Active Fault of Japan, 1991)

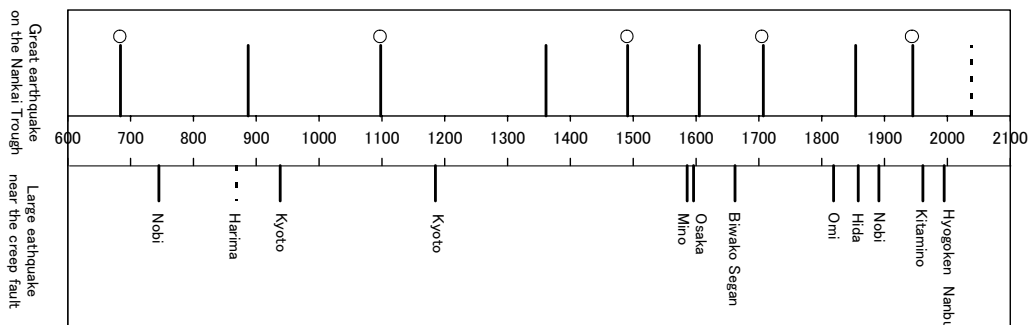


Fig. 9 Comparison in occurrence time between great earthquakes on the Nankai Trough and historical large earthquakes along the creep fault. Broken lines show 868 Harima earthquake and following Nankai earthquake.

生する傾向にある。この間約 100 年である。なお、南海トラフの巨大地震も 1 回発生する。1 つ跳びの南海トラフの巨大地震毎に、クリープ断層の地震発生サイクルがリセットされるようにみえる。1944・1946 年東南海・南海地震は○印に当たり、その後 1961 年北美濃地震と 1995 年兵庫県南部地震が発生した。次の南海トラフの巨大地震は 2030 年代後半にも発生すると予測されており (Hori and Oike, 1996), クリープ断層近傍の内陸大地震は、京都あるいは滋賀に発生が予想される。

中期と短期の地震予知のためには、クリープ断層の変動を監視することが不可欠である。そこには、GPS はノイズが多く不適であり、高精度の地殻変動連続観測が有効である。クリープ断層と関連する六甲鶴甲観測室の地殻変動連続観測結果を Figs. 10, 11 に示す。この観測坑は六甲断層系の大月断層と斜交しており、坑内に幅数 10cm の断層粘土が見られる。断層運動の検出を目的として、伸縮計のアレイ観測ならびに 6 個のポットが連結された水管傾斜計による観測が行われてきた (大塚ら, 1986)。1977 年頃の歪速度は約 1×10^{-5} /年と非常に大きく、兵庫県南部地震発生まで徐々に減少を示した。なお、地震直前に顕著な変化は見られない。地震時に 10^{-4} オーダーの歪変化があり、地震後は、断層を跨ぐ歪が大きな伸張を示す。また、上下変動も大きく、最北に位置するポット WT1 が定常的に約 0.1mm/年の相対的隆起を示す。これらはク

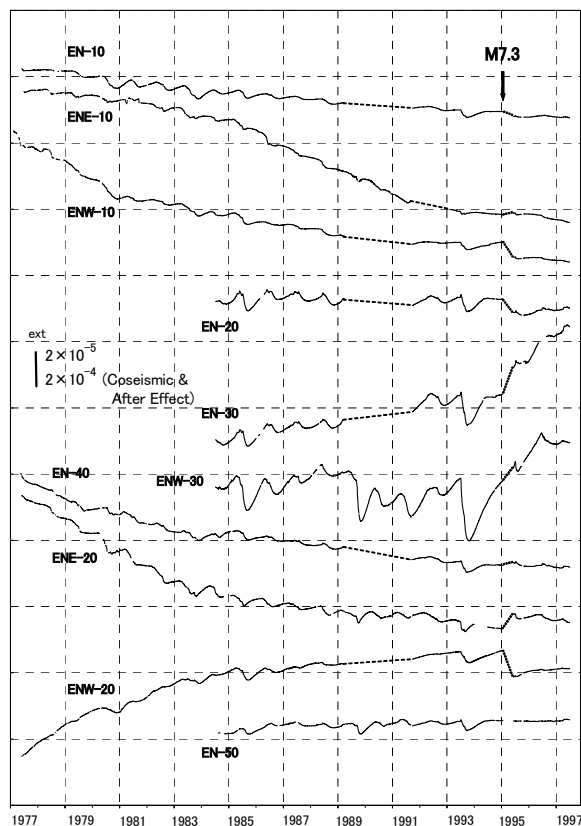


Fig. 10 Extensometer records of the Rokko-Tsurukabuto station (1977-1997). Extensometers EN30 and ENW30 were installed across the Otsuki fault. The arrow indicates the Hyogo-ken Nanbu Earthquake.

リープ断層の変動を反映したものであり、平常は広い幅で変動があり (地表断層の固着)、地震後は地表断層が変位していると考えられる。なお、観測される地球潮汐歪の分布も特異であり、断層を跨ぐ伸縮計の潮汐歪の振幅は他のものと比べて数倍大きく、また断層の北側と南側における潮汐歪の位相は約 180° 異なる。Omura (1995) は、その原因を断層のすべりであると考えた。

6. 考察とまとめ

GPS データから均質歪を除去することは、ある領域における局所的な地殻変動あるいは地殻変動傾向の変化地点を検出するために有効であることが示された。近畿地方中央部に北東-南西走向のクリープ断層が推定され、地塊の剛体変位と考えれば、その変位は約 3mm/年の水平右横ずれと約 2mm/年の北西側隆起である。解析期間 (1996 年 4 月から 2002 年 7 月) における変位速度は年周変化があるもののほぼ一定であることから、得られた結果はかなり定常的なものであると考えられる。またクリープ断層は、既存の活断層と必ずしも一致しない。

クリープ断層は、幅約 20km の shear zone を形成する。このような広い shear zone が生じる原因として、断層面におけるクリープを考えれば、1) 地殻深部にクリープ断層が存在する、2) 浅部にクリープ断層が複数個並列して存在する、3) クリープ断層の形状が直線的でない、等が挙げられる。一方、明石-岩屋と左京 1-大津 1 では、これらの区間のみで顕著な変位不連続が見られ、区間距離は約 10km なので shear zone の幅は 10km より狭く、クリープ断層はシャープな形状であるとも考えられる。クリープ断層の位置は山間地であり GPS 観測に適する場所ではないが、断層に沿って観測点を密に配置

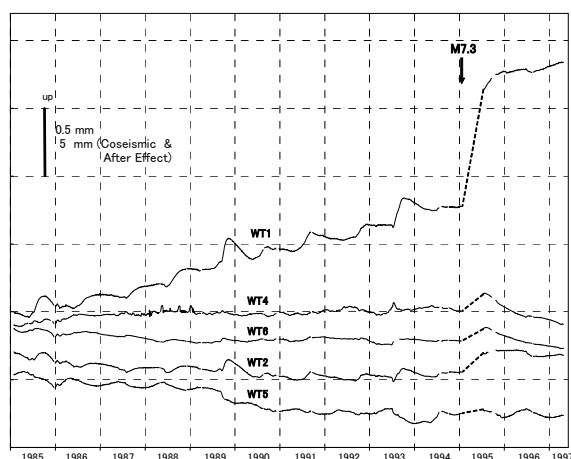


Fig. 11 Watertube tiltmeter records of the Rokko-Tsurukabuto station (1985-1997). Displacements of pots are shown for fixed pot WT3 at the center of the observation tunnel. Pot WT1 which is located in the north shows an upheaval of about 0.1 mm/y.

すれば、1~2年でクリーブ断層の正確な位置、地表形状およびその変動は決定できるであろう。

このクリーブ断層を含む淡路島から北陸に至る地帯は、三角測量結果からはせん断歪が大きい(国土地理院, 1987), そしてGPSデータからは幅約100kmの歪集中帯である(Sagiya et al., 2000)と指摘されていた。歪集中帯内に幅の狭いshear zoneを持つクリーブ断層が見出されたことは、歪集中帯の存在についての議論に寄与するものと思われる。本論では、水平右横ずれクリーブ断層の存在から、東西圧縮下の日本列島中央部における巨大なせん断破壊がゆっくり進行中であると単純に考えたが、詳しい議論のためにはより広域の変位場を考察しなければならない。

兵庫県南部地震はクリーブ断層近傍に震源をもち、多くの内陸歴史地震もクリーブ断層近くに発生した。また、クリーブ断層と一致する大月断層における地殻変動連続観測は、大きな経年的歪変化と傾斜変化を記録した。クリーブ断層は、近畿地方における北西部と南東部の地塊相対運動の接点であり、地殻応力変化を敏感に反映すると考えられる。地震予知のためには、クリーブ断層に沿って、地下深部の地殻変動連続観測点を密に配置することが必要である。

7. おわりに

GEONETデータは、微細な地殻変動を検出するためにも有効であることが示された。ただし、観測点固有の変動が含まれているため、データを吟味し観測点の選別が必要である。

今回得られた結果は、歪の異なる地塊がクリーブ断層において定常的に相対運動をしていることを示し、歪計により観測される地殻変動はその一部を見ていると考えられる。クリーブ断層は他にも存在するであろう。GPS観測によりクリーブ断層の位置およびその変動を特定し、場所を選んで地殻変動連続観測点を設置することが重要である。

謝辞

国土地理院のGEONETデータを使用させていただいた。奈良産業大学向井厚志氏との議論は有益であった。ここに感謝いたします。

参考文献

- 大塚成昭・大村 誠・藤森邦夫・田中 豊 (1986) : 六甲断層地域で観測された1984年山崎地震による特異な地殻変動, 地震2, 第39巻, pp. 405-417.
- 活断層研究会編 (1991) : 新編日本の活断層一分布図と資料一, 東京大学出版会.
- 国土地理院 (2002) : 全国の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 第68巻, pp. 504-533.
- 国土地理院 (1987) : 日本の地殻水平歪1985年-1883年.
- 国立天文台編 (2002) : 理科年表-日本付近のおもな被害地震年代表一, pp. 700-731.
- Hori, T. and K. Oike (1996): A statistical model of temporal variation of seismicity in the inner zone of southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough, *J. Phys. Earth*, Vol. 44, pp. 349-356.
- Omura, M. (1995): Influence of a fault structure on earthtidal strains and tilts in the Rokko fault system, Kobe, Japan, *Bulletin of Kochi Women University, Natural Science Chapter*, Vol. 43, pp. 73-94.
- Mogi, K. (1981): Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting, *Earthquake Prediction*, D. W. Simpson and P. G. Richards, Eds., AGU, pp. 43-51.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000): Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 157, pp. 2303-2322.

Tectonics Revealed by GEONET Data in the Kinki District

Kunio FUJIMORI

Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

A GPS array with about 1,000 stations (GEONET) is operating in Japan. The strain displacement field in the Kinki District was obtained from the GPS data analysis. When a homogeneous strain was removed from the displacement field, a fine boundary in displacement, which is assumed to be a creep fault, was found. The creep fault will extend from the Akashi Strait to the north part of the Chubu District through the north Biwa Lake. The existence of the fault will mean that a giant shear fracture is progressing slowly in the center part of the Japan Island, the Kinki and Chubu Districts, under the E-W compression.

Keywords: GPS, crustal movements, creep fault, active fault, earthquake