水縄断層西部地域の地溝状構造

九州大学工学部資源工学科* 茂 木 透・江原幸雄・西島 潤・本山達也

A Graben Structure at the Western Part of the Minou Fault, Southwest Japan

Tohru MOGI, Sachio EHARA, Jun NISHIJIMA
and Tatsuya MOTOYAMA

Department of Mining, Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki Higashi-ku, Fukuoka 812-81, Japan

(Received April 21, 1997; Accepted November 10, 1997)

The Minou fault is an active fault system and runs through 25 km long from Kurume City to Ukiha Town, North Kyushu, Southwest Japan. The fault is considered as the source fault of Tsukushi great earthquake that occurred at 679 A.D. We carried out geophysical surveys such as gravity, controlled source magnetotelluric and γ -ray intensity survey, at the western part of the Minou fault to discuss the subsurface structure around the fault. Based on the gravity survey, the conspicuous graben structure was detected as the low Bouguer anomaly at the north side of the fault. The maximum depth of the graben was estimated at around 2 km deep. A steep slope dipping to northward appeared at the south side of the graben and located at 0.5 to 1 km north of the active fault line drawn by the topographic discontinuity. The difference of resistivity structure was also detected at the same place. These results show that a buried fault is located at 0.5 to 1 km north of the active fault. A marked displacement of the basement was not detected by the gravity data nor the resistivity structure at the active fault. We interpreted that the fault seemed to have been active at the south wall of the graben before the Alluvium. The active place was moved to the south and the new activity has been started at the topographic discontinuity in recent time. These fault displacement suggests that extensional movement has been prevailing in this area during Quaternary.

Key words: Active fault, Graben, Gravity survey, Controlled source magnetotelluric method.

§1. はじめに

水縄断層は、福岡県久留米市付近からほぼ東に延び、浮羽町に達する延長約 25 km の活断層系である [千田 (1981)]。この断層は、679 年に起こった筑紫地震の震源断層と考えられており [松村 (1990)]、地形的にも明瞭に追跡される [九州活構造研究会 (1989)]。

九州北部と中部地域との境に位置するこのような東西方向の断層系は、東は別府湾から西は佐賀県伊万里市まで連り、松山-伊万里構造線と呼ばれており、水縄断層はその構造線の一部をなす断層系と見ることができる [千田 (1979)]。この構造線に沿って、明瞭な低重力異常が点々と見られる [駒沢・鎌田 (1985)]。このような重力

基盤の落ち込みによる地溝状の地質構造が活断層とどのような関係にあるのかは明確ではない。

本研究では、水縄断層の西部地域において、重力測定、コントロールソースマグネトテルリク探査 (CSMT 探査) および地表 γ 線強度測定を行い、負の重力異常から推定される地溝状の構造の規模や水縄断層との位置関係を調べ、断層周辺の地質構造の発達過程について考察した。

§2. 水縄断層の概要

水縄断層は、主として筑紫変成岩類および佐賀花崗岩類からなる水縄山地の北麓をほぼ東西に走り、山麓の扇状地を変位させている 12 個の活断層からなるとされている [千田 (1981)]。断層の西端にある久留米市での遺

* 〒812-81 福岡市東区箱崎 6-10-1

跡調査により、679年に発生した筑紫地震はこの断層の活動による可能性が極めて高いと考えられている [松村 (1990)]。九州北部地域では、ほぼ東西方向の松山-伊万里構造線の存在が考えられており、それは別府北断層、入実断層、水縄断層、都渡城-川久保断層等の東西系の活断層により構成されていると考えられている [千田 (1992)]。九州内でのこの構造線においては、水縄断層東部等一部で最近微小地震活動が比較的活発なところもあるが、全体的には地震の発生は少い [三浪 (1992)]。また、駒沢・鎌田 (1985) の九州中北部地域重力図によると、松山-伊万里構造線に沿って、東西方向に延びた低重力異常が点々と分布している。このような基盤の落ち込みと考えられる低重力異常は、松山-伊万里構造線を構成する断層の活動に伴って形成された可能性が考えられるが、現在の活断層としての活動との関係についてはよく分かっていない。本研究ではこの点についての議論を試みた。

§3. 探査方法

3.1 重力測定

重力探査は、シントレックス社製 CG3 型重力計を用い、Fig. 1 に示した 140 地点において測定を行った。各測点での測定はサンプリング間隔 1 秒で 1 分間行った。ほとんどの測点は 1/2500 国土基本図に記されている標高点を利用した。国土基本図の標高の表示は 0.1 m 単位であるが実際は 1 m 程度の精度と考え、重力の鉛直勾配を 0.3 mgal/m 程度と考えると、それにより 0.3 mgal 程度の誤差が生じる可能性はある。また、重力計の精度は 0.01 mgal 程度であることを考慮すれば、本探査の重力値は 0.5 mgal 程度の精度では得られたと考えられる。ドリフト補正は基点における閉合差を時間に応じて配分した。重力値は国道 210 号線上の 1 等水準点 2523 の国土地理院による値を参照して決定した。潮汐補正は CG 3 型重力計標準装備の式である [LONGMAN (1959)] により行った。本地域の周囲には基盤岩類が分布しているの

Fig. 1. Location of survey sites. ●: Gravity, ■: CSMT survey, Bold lines show lines of γ -ray survey. The fault lines were drawn after CHIDA (1981). ▼: point of high γ -ray intensity, and *: drilling site. A dash-dot-line denotes the fault inferred from this study.

で、地形補正、ブーゲー補正の際の仮定密度は 2.67 g/cm^3 として行った。

3.2 CSMT 探査

CSMT 探査は水縄山地の北麓から筑後川の方向に断層を横切る3測線に沿って測点をおいた。Fig. 1 に示すように各測線上の6ないし9箇所に測点をおいた。送信線は測定地域から東に約5 km離れた地域に南北方向に約2 kmの長さで設置した。送信線には2~8Aの電流を流した。受信機は千葉電子製の複素位相検波方式CSMT探査機[茂木・他(1990)]を用いた。測定した周波数は8700~4.2 Hz間の12周波数である。伝統的なCSMT法では、送信線と平行な方向の電場とそれに直交する方向の磁場を測定し、見掛け抵抗を求める。今回の探査では、測点が送信線より南側に片寄っているため、必ずしも測線に平行な方向の電場が卓越しているとは限らないので、電場、磁場それぞれ南北、東西方向の成分を測定し、それぞれの組から得られる見掛け抵抗の相乗平均値を測定値として使うことにした。このような

値を用いることで送信線の正面からはずれた測点でも妥当な見掛け抵抗が得られると考えられる。測定した電場、磁場は、スミルノフの棄却検定[岸根(1977)]により異常値を除き、さらにそれらの間の相関が最大になるように選択的にパワースペクトルのスタッキングを行った。

3.3 地表 γ 線強度測定

地下深部のラドンガスは、岩盤の割れ目に添って上昇してきて、地表に濃集すると考えられている。 γ 線強度測定は、それが壊変していく際にその娘核種である、Bi(ウラン系列)やTl(トリウム系列)から放射される γ 線を測定するもので、その強度はラドンが上昇して来る割れ目の多い地点で大きいと考えられている。

今回の探査では、断層を横切るようにほぼ南北方向の測線沿いに20 m毎に γ 線強度を測定した(Fig. 1)。測定には日本原子力研究所製E560A型ポータブル γ 線スペクトルメータを用いた。センサーは4インチ径のNaI(Tl)型シンチレーションセンサーを用いた。各測点で

Fig. 2. Bouguer anomaly map. Density of the rock was assumed at 2.67 g/cm^3 . Contour interval is 2 mgal.

は、原則として5分間測定し、その結果から、カリウム、ビスマス、タリウム、の正味のカウンツ数を茂木・神宮司(1993)の方法により算出し、 γ 線強度の異常を抽出した。

§4. 探査結果

4.1 重力測定

ブーゲー異常図をFig. 2に示す。この図には、千田(1981)による水縄断層の地表での位置を示した。これによると、断層の北側に大きな負の異常があり、それはほぼ東西方向に延びている。負異常の中心は断層の2 km位北にある。この結果を基に、基盤岩と表層の密度差を 0.5 g/cm^3 と仮定した時の、基盤深度をFig. 3に示す。この計算はCORDELL *et al.* (1992)による3次元インバージョンプログラムを用いた。この結果を基にFig. 3のA-A'断面に沿って基盤の分布をFig. 4に示す。

これらの結果によると、水縄断層の北側には東西方向の長さ約7 km、南北約2 kmの地溝状構造が見られる。基盤は山側から少しづつ深くなり、断層の北500 m付

近からは急激に深くなり、最も深いところではその深度は1.5 kmに達する。最も深い地点から北側では再び基盤深度は徐々に浅くなり、断層から約3 kmの筑後川付近では深度は1000 mより浅くなる。すなわち、この地溝状構造は南側が急斜面であり北側は比較的ゆるい傾斜を持つ非対称な形状である。このように水縄断層の北側には、大きな基盤の落ち込みがあるが、基盤の傾斜が最も大きい所は、現在見られる断層の北側500 m~1 kmの所であり、地形上の断層の位置では基盤の大きな変位は見られない。地溝状構造の南斜面では、傾きは最大約60度にもなり、落差も大きいことから、この構造は単なる侵食等で生じたものではなく、断層の活動によるものと考えられる。

Fig. 1の*印で示した地点では、温泉水採取のための掘削が行われた。その結果、深度970 mにおいて変成岩類からなる基盤岩に到達した[久留米市(私信)]。この地点の重力探査から推定された基盤深度は約1000 mであり、掘削結果とほぼ一致したことから、推定された構造は妥当なものであったと考えられる。

Fig. 3. Depth of the basement layer. Density difference between surface and basement was assumed to be 0.5 g/cm^3 . Contour line interval is 0.1 km and the depth indicates at km in unit.

Fig. 4. Subsurface structure on the north-south cross section along A-A' line shown in Fig. 3.

4.2 CSMT 探査

探査の結果得られた見掛け比抵抗と位相差を用いて、各測線沿いの断面について2次元インバージョンを行った結果得られた比抵抗構造をFig. 5に示した。各測点での測定値とインバージョン結果の比抵抗構造に対する見掛け比抵抗値、位相差とを比較したA測線の例をFig. 6に示した。2次元インバージョンは、今回のデータは送信電流によるニアフィールドの影響はないと考え、UCHIDA (1993) によるMT法用の平滑化拘束付きインバージョンプログラムを使用した。

西側のA測線の比抵抗構造では、測点A3より南では500 Ωmより大きい高比抵抗構造が目立つが、それより北側ではほとんど100 Ωm以下の地層が分布している。この高比抵抗層が見られる境界はB測線では測点B2、C測線では測点C4と考えられる。これらの測点はいずれも現在知られている水縄断層の北側500 m～1 kmにあり、重力探査で推定された基盤が急激に落ち込む地点とほぼ一致する。従って、この高比抵抗構造が基盤岩と対応しているものと考えることができる。

4.3 地表γ線強度測定

γ線強度の強い場所は地下にラドンガスの上昇が比較的容易に行われるような割れ目が存在するものと考えられる。γ線強度が相対的に強い地点をFig. 1に▲で示した。このような地点は、地形的に推定された水縄断層付近や重力探査やCSMT探査で推定された基盤岩深度が

急激に変化する所に見られる。

5. 議 論

Fig. 1には、重力探査で基盤岩深度が急激に変化すること及びCSMT探査で比抵抗構造が変化することから推定された断層の位置を一点鎖線で示し、γ線強度が強い地点を▲印で合わせて示した。図によると、地下構造が大きく変化している地点は水縄断層の北側500～1000 mの所にあり、明らかに地形で認識される断層の位置とは異なる。その位置では明瞭な地形の変化は現在では見られない。また、地形上の断層の位置では、重力や比抵抗構造に大きな変化は見られないが、γ線強度はその上で強い所もある。以上のことから、地形上の水縄断層の位置では地下構造の変化は小さく、その大きな変化はそれより北側の500～1000 mの所にあるものと考えられる。この基盤深度が急激に変化している地点では、地形の変化は見られないことから、主として沖積層の堆積完了以前に断層として活動していたところではないかと推定される。それ以降、断層活動は現在の地形上明瞭な断層の位置に移動したのではないかと考えられる。地形上の水縄断層の位置では、重力やCSMT法で検知されるような大きな基盤の変位は見られず、この断層は活動を開始してからあまり時間が経っていないので大きな変位の累積を生じていないものと考えられる。

水縄断層は、正断層的な様相を呈する所が多いとされ

Fig. 5. 2D resistivity model along each survey line.

ているが、全体的な動きは不明確である [千田(1981)]. 木戸(1993)は、水縄断層を含む久留米-日出線の右横ずれの可能性を指摘している。重力異常で見られた基盤の断層は、明らかに北傾斜であり正断層と考えられる。水縄断層も正断層と考えれば、このことは正断層が山側に後退したことを示唆している。このような正断層の移動は、Fig. 7に模式図を示したように、いわゆる imbricate

listric fault [WERNICKE and BURCHFIEL (1982)] の発達過程と考えられ、現在は一番南側の断層による変位のみが地形に現れていると考えられる。このような地質構造は、断層の走向と直交方向に延びるような地殻変動があるときに生じることが多い [GIBBS (1984)]. また、駒沢・鎌田(1985)による九州中部地域の重力構造によると、地溝状構造の多くは南側は急斜面であるが北側は

Fig. 6. Some examples of fit between observed and calculated data for the resistivity structure shown in Fig. 5. Observed values were denoted together with error bar.

ゆるい傾斜であることが多く、いわゆる半地溝状を呈することが多い。このような構造は、南北方向に地殻が伸張しているときに生じることが多い。九州中部地域では南北方向に拡大している可能性が指摘されており〔千田

(1981)〕, それに伴って正断層が発達していると考えられている〔池田(1979)〕. このようなことを基にすると水縄断層付近の断層の発達過程は、南北方向の拡大に伴い、半地溝が南方へ拡大していくようすを示しているも

Fig. 7. Schematic figure of imbricate listric fault, modified from WERNICKE and BURCHFIELD (1982). The arrow in the upper block indicates direction of the displacement.

のと考えられる。九州中部地域にはこれまで7個の地溝(別府湾, 由布院, 崩平山, 万年山, 九重, 鞍岳, 雲仙)が認められてきたが[千田(1992)], 水縄断層地域にも地溝帯が存在しており, 今なお形成されつつあるとみなせる。

前述したように, 重力異常から推定された断層の地点に温泉が掘削され, 深度1000 mで温度51℃が記録され, 200 l/minの温泉水が湧出した。このことは, 断層に沿って地下深部から温泉水が上昇して来ていることを意味している。比抵抗構造をみると, 断層の北側に10 Ωm以下の低比抵抗構造が見られる。これを温泉貯留層と考えることもでき, それが地溝の中に広がっているものと推定される。実際この周辺には温泉がいくつか存在することからこのことは支持されるであろう。

§6. 結 論

本研究で得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- ① 水縄断層の北側に深さ1.5 kmに達する地溝状構造が存在する。その南側は正断層により区切られている。
- ② 水縄断層では大きな基盤の変位は見られないので, この活断層は活動を開始してあまり時間が経っていないものと考えられる。
- ③ 基盤の地溝状構造を作った断層の位置では地形的な変位は見られないので, この断層の活動は少なくとも沖積層の堆積完了以前に活動したのと考えられる。
- ④ 水縄断層を正断層と考えれば, 地溝の南縁となる断層は, 本研究で推定された断層の活動の後, さらに南側にある現在の水縄断層が活動の場となったものと考えられる。このような正断層の後退は南北伸張の応力場で生じたものと考えられる。

本研究により議論した地溝状の構造は, 水縄断層に沿って, 東方にも続いており, それらの地域での研究も今後必要であろう。また, この地溝を作った活動時期に

ついて議論を深めることは, 九州北部地域と中部地域とのテクトニクスの特徴を考える上でも重要であろう。

謝 辞

水縄断層での調査にあたっては, 久留米市企画調整課にご協力を頂いた。また, 九州大学理学部下山正一博士および匿名の査読者には査読を通して原稿の不備な点のご指摘や有益なコメントを頂いた。記して感謝の意を表します。

文 献

- 千田 昇, 1979, 中部九州の新期地殻変動—とくに第四紀火山岩分布地域における活断層について—, 岩手大学教育学部研究年報, **39**, 37-75.
- 千田 昇, 1981, 中部九州・水縄山地北麓の断層変位地形, 岩手大学教育学部研究年報, **40**, 67-78.
- 千田 昇, 1992, 中部九州の活断層—九州における中央構造線の第四紀活動—, 地質学論集, No. 40, 39-51.
- CORDELL, L., J. D. PHILLIPS and R. H. GODSON, 1992, U.S. Geological Survey Potential-Field Geophysical Software Version 2.0, USGS Open File Rep. 92-18.
- GIBBS, A. D., 1984, Structural evolution of extensional basin margins, J. Geol. Soc. London, **141**, 609-620.
- 池田安隆, 1979, 大分県中部火山地域の活断層系, 地理学評論, **52**, 10-29.
- 木戸道男, 1993, 九重—別府地溝北西縁部の地質構造形成史, 地質学論集, No. 41, 107-127.
- 岸根卓郎, 1977, 統計学, 養賢堂, 402 pp.
- 駒沢正夫・鎌田浩毅, 1985, 豊肥地域の重力基盤構造, 地質調査所報告, **264**, 305-333.
- 九州活構造研究会, 1989, 九州の活構造, 東京大学出版会, 553 pp.
- LONGMAN, I. M., 1959, Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun, J. Geophys. Res., **64**, 2351-2355.
- 松村一良, 1990, “日本書紀”天武七年条にみえる地震と上津土塁跡について, 九州史学, **98**, 1-23.
- 三浪俊夫, 1992, 地球物理, 唐木田芳文・早坂祥三・長谷義隆編, 日本の地質, 九州地方, 共立出版, 303-310.
- 茂木 透・楠 建一郎・鈴木浩一・川崎逸男・城森明・東 義則, 1990, 複素位相検波方式CSMT探査装置の開発, 物理探査, **43**, 164-169.
- 茂木 透・神宮司元治, 1993, γ線スペクトルメータによる活断層調査—NaI(Tl)シンチレーション検出器によるデータの自動評価解析—, 地震2, **46**, 1-8.
- UCHIDA, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J. Geomag. Geoelect., **45**, 841-858.
- WERNICKE, B. and B. C. BURCHFIELD, 1982, Modes of extensional tectonics, J. Structural Geol., **4**, 105-115.