

山崎断層系、安富断層周辺での重力測定

竹内文朗・中村佳重郎・渡辺邦彦・松村一男・

河野芳輝*原宏史*駒澤正夫**西田良平***

* 金沢大学理学部
** 国土交通省国土地理院
*** 鳥取大学工学部

要旨

兵庫県、岡山県、鳥取県にまたがる山崎断層系で重力の測定をした。ここでは、その内安富断層と暮坂峠断層について解析した。これら2断層をまたぐ地域では通常とは逆に、断層上に高いブーゲー異常値が見られた。これらのデータを用いて地下構造を求めるべく、我々は断層周辺の地上の石を集め、密度を正確に求めた。結果は、予想通り断層周辺の石が周りよりも $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ 重い事がわかった。この値を用いて計算した2次元地下構造によると、断層の下に深さ数百 m ～ 数 km まで重い物質があることが示唆された。

キーワード: 山崎断層系, 安富断層, 重力測定, ブーゲー異常, 高密度岩石

1. はじめに

山崎断層系は、数本の主要な断層と幾つかの小断層の総称で、岡山県から兵庫県にかけてほぼ北西-南東方向に 80km にわたって続く西南日本内帯有数の活断層である(活断層研究会, 1991)。断層の明瞭度はA、活動度はBとされている。この地域に支配的な応力場(例えば大倉, 1988)に対応して左横ずれ成分が卓越し、若干の北東側隆起を示す。断層系の北西端には大原断層があって、南東へ下って土万(ひじま)断層にかわり、兵庫県山崎町付近で、暮坂峠、安富の両断層に枝分かれする。暮坂峠断層はその走向が土万断層の延長とほぼ一致するが、最近の活動を示す断層変位地形は見られない(福井, 1981)。一方の安富断層は、走向を西北西～東南東にかえ、兵庫県福崎町に至る。途中随所に活発な断層運動を示す地形がみられる。さらに東には、三木断層があって、これらが断層系を構成している。西南日本では、この断層系より東側には多数の活断層が分布するのに対し、西側では数が明らかに少なく、その境界としての意味が有りそうである。

この断層系は、1978年に「地震予知テストフィールド研究計画」によるテストフィールドに指定され(岸本, 1980)、それ以前からの各種の地球物理学的、地球化学的研究が促進された。計画の拠点ともなった春

(うすづく)の観測坑道は、安富断層の破碎帯内に掘られたトンネルである。トレンチ発掘による調査(岡田・他 1979)もこのトンネルの近くで行われ、A.D.868年の $M \geq 7.0$ の地震(宇佐美, 1996)が、この断層によるものであった可能性も推定されている。

断層周辺では比較的微小地震活動が盛んである。1977年の $M=3.7$ の地震は安富断層より北約 3km に発生した(佃, 1977)。規模は小さいながら、安富断層より 2km 南の塩田温泉における塩素イオン濃度に前兆的变化が認められた事で、小地震の予知に希望を与えた(吉岡, 1978)。1984年の $M=5.6$ は、この断層系では久しぶりの $M>5$ の地震であった(岸本・尾池, 1985)。震央が観測坑の南方わずか 3km であったため、伸縮計にも大きな跳びが生じ、トンネル近傍の破碎帯の性質を示すデータが得られた(渡辺・尾池, 1985)。この本震および付随した余震群は、最近の活動が低いと見られていた暮坂峠断層に沿って分布した(西上・佃, 1985)。ただし、震源の深さは 20 km に及ぶほどであった。また等域は通常的に微小地震活動数が比較的多く、数十 km 離れて発生した兵庫県南部地震前(1995)後の発生数の変化には特徴が見られた(渡辺・他, 1997)。

テストフィールドの成果の中には、破碎帯を意識した研究が多い。渡辺・尾池(1985)は、上の地震の際のストレイン・ステップや余効変動が、弾性論で期待

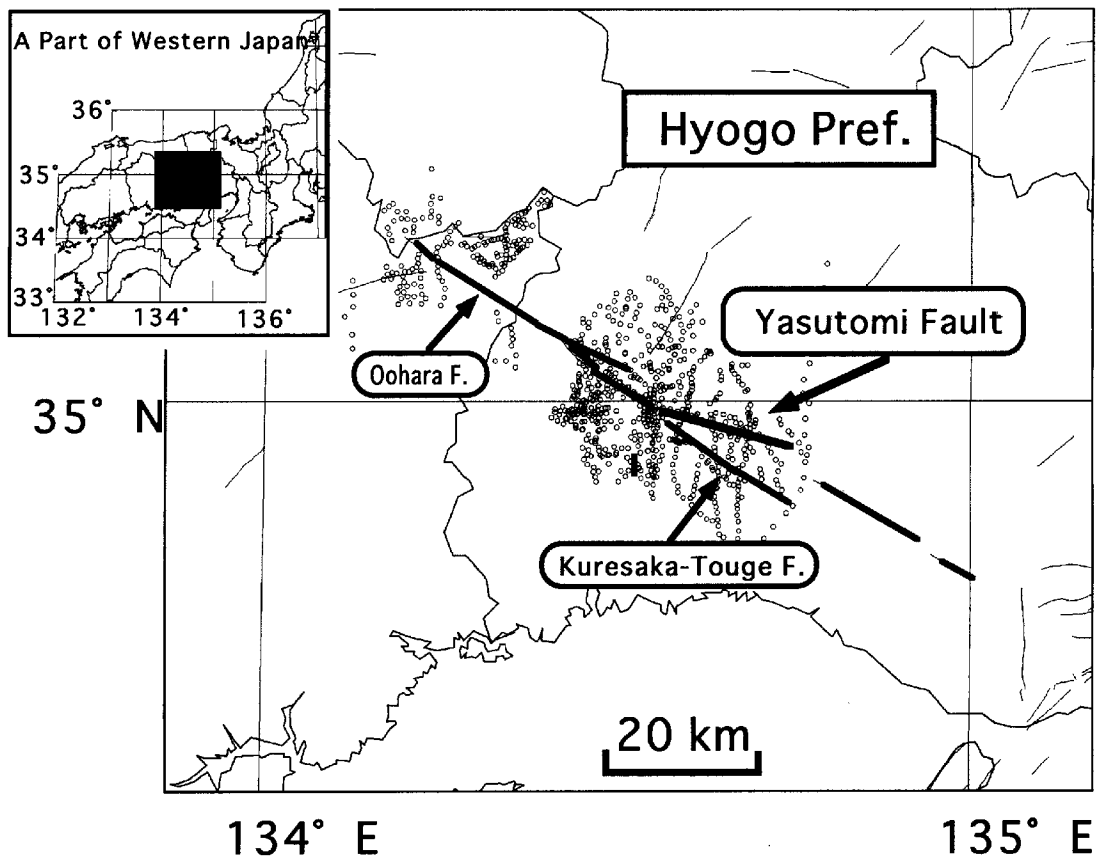


Fig.1 Observation points with Yamasaki Fault System. In this paper, data of the regions around the Yasutomi and Kuresaka-Toge faults are mainly analyzed.

される動きとは大きく異なることから、断層破砕帯あるいは、観測点近傍の局地的な歪の状態を見たものと解釈している。尾池（1977）は、降雨が地震発生の引金になり得ると考え、その際破砕帯に異常な動きの伸縮変化を伴う例を挙げている。

しかし現在までのところ、基本的な知識である破砕帯の構造についての研究は多くない。それは、山崎断層系の規模が数十 km と長く、構造探査の範囲が広大になることや、周辺部の山地や安富断層に沿って走る高速道路などの人工構造物が諸観測の妨げになることによると思われる。地表踏査には、福井（1981）など詳細なものがあるが、地下の構造を扱ったものは、半田・住友（1979）や Electromagnetic Research Group for the Active Fault（1982）など電磁氣的調査がある。

また、山崎町周辺では中村・渡辺（1985）（以後、前報と略す）が重力測定を行っている。我々はこのデータに加え山崎断層系全体を含む地下構造推定を

目的とし、測定点を増やした。ここではその内の安富断層周辺構造を求めることを主として考察する。

2. 測定

2. 1 測定点の配置

Fig. 1 に測定点の分布を示す。前報による測定点も併せてプロットした。総数は七百点であるが、ここではそのうち山崎町より東方の安富断層を対称とするため、四百点程度のデータを利用する。測定点の位置と高度は、市町村の大縮尺地図や土地台帳に所載の値に頼った。このため、比較的道路の発達した地域に測定点が集中することになった。当域の道路は大局的に南北に走り、安富断層と直角に交わるものが多く、構造推定には便利である。測線は数本を採ることが出来、精度や観測の日程などからおおよそ 500 m 間隔で測定し、各々長さ 10～20 km となった。

2. 2 測定方法

測定は1987年の7月と9月にそれぞれ3日間ずつ行った。前報の値は1984年の9月と11月に測定して求めた値であるが、ここではこれら全期間にわたって重力変化が無かったものと仮定して重力値を求めた。用いた重力計は、前報と同じくLaCoste & Romberg 重力計 G-605である。各回の測定にあたっては、1984年に測定した国土地理院水準点のうち3ヶ所以上で毎日重なるようにした。基本的には、片道測定であるが、同一測定点での何回かの測定結果を比べてみると、約0.02 mgalの精度が保たれたと考える。

2. 3 補正作業

観測点の位置は上記の市町村による地図に測定現場でプロットし、後に国土地理院発行の2万5千分の1の地形図に引き移し物差しによって肉眼で読み取った。従って、位置の読み取り精度は数メートルである。高度は、地図等に出ている値を用いて、10 cm～数 mの誤差を含むと思われる。フリーエア勾配は0.3086 mgal / mとし、ブーゲー補正では周辺の岩石密度を2.6 g / cm³と仮定した。地形補正にも同じ密度を用いて250 mメッシュの地形データから計算した。

3. 結果と考察

3. 1 ブーゲー異常

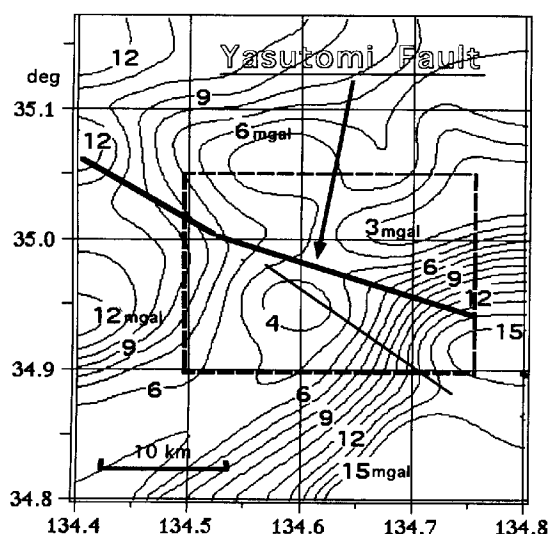


Fig.2 Bouguer anomaly around the observed faults

得られた、ブーゲー異常のコンターを Fig.2 に示

す。測定域の東西両側でブーゲー異常の高い傾向が見られる。また、南北方向にも両端が高く中央部分が低い傾向が伺える。コンターが断層の走向に平行な部分もあるが、端に高く中央に低い全体的な傾向の方が優勢である。さらに断層を南北に横切る6本の断面の位置を Fig. 3 に、またそこでのブーゲー異常を Fig. 4 に示した。図では▽で示した位置は安富断層が確認されている位置である。また断層を含むブーゲー異常値の高まりには直線を加えてある。この直線の位置を Fig.5 で地質図上に示すと、Utで表される中生代～古生代の粘板岩等のある位置とよく一致する。直観的には断層破碎帯の密度は、破碎されていない所よりも低いと思われたので、この点を確認するために、実際の岩石の密度を測った。

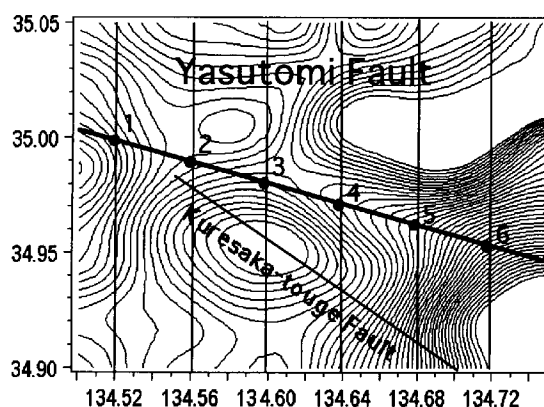


Fig.3 Six analyzed lines with Bouguer anomaly.

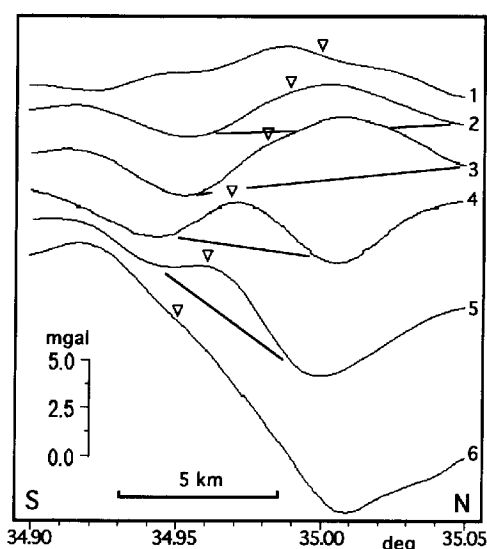


Fig.4 High Bouguer anomaly regions along the 6 lines shown in Fig.3

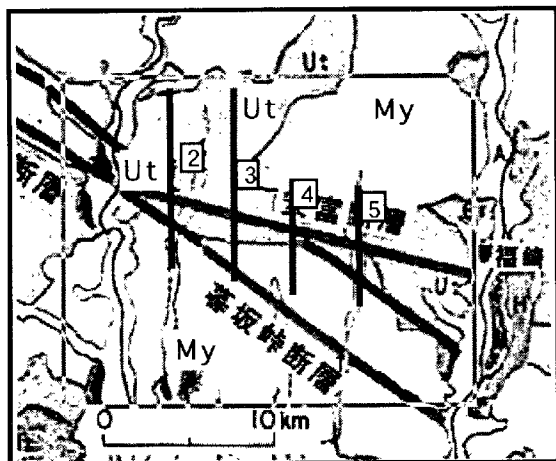


Fig.5 High Bouguer anomaly regions shown by 2,3,4,5 lines on the geological map.

3. 2 岩石密度の測定と結果

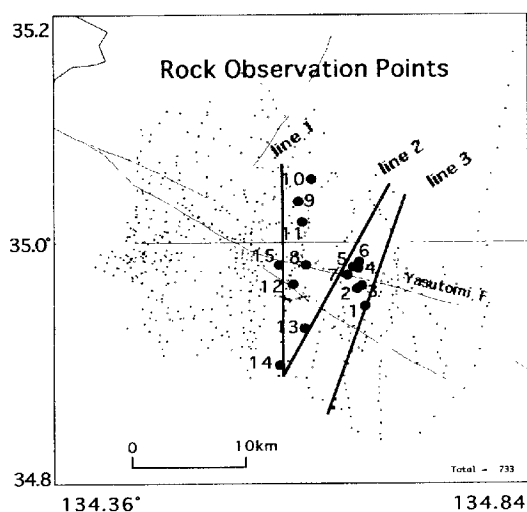


Fig.6 Rocks observed points (1 - 15). Lines 1, 2, 3 show the lines where the crustal structure are calculated from Bouguer anomalies.

前節の結果を理解するため、Fig. 6 の地点で地表の岩石を採集して、その密度を測定した。採集場所は破碎帯と思われるところ、その外側にあたるところの合計 15ヶ所である。比抵抗の違いは、岩石そのものの密度よりも、水をどの程度含むかの方が影響するので、岩石密度と孔隙率、飽和率を測定した。このため、採集した岩石はビニール袋に入れて、元の状態の保存を心がけた。持ち帰った石は、こぶし大に整形しその重さ W_r を測った。次ぎにそれを水に浸して、浮力を除いた時の重さ W_w を測った。この差を水の密度で割ったものが、石の排除した水

の体積、即ち石の体積である。重さの測定には天秤棒秤を用いた。簡単なテストで、0.5 g の精度が保証できたが、石を水に漬ける時、気泡が出て天秤棒の釣合が崩れる場合もあり、全体としてはもう少し精度は落ちる。

次に、孔隙率と飽和率を求めるため、岩石を水で飽和した時と完全に乾かした時の重さを測った。飽和時の重さ W_s は、石を水道水に約 1 週間漬けて測った。その後、この石を約 105° C の恒温槽で 2 日間乾かし重さ W_d を測った。これらから、以下により石の密度 ρ を求めた。

$$\rho = \rho_0 \times W_r / (W_r - W_w) \quad (1)$$

で、 ρ_0 は水の密度である。孔隙率 $\phi(\%)$ は、石全体の体積に対する孔隙の容積の百分率で、

$$\phi = 100 \times (W_s - W_d) / (W_r - W_w) (\%) \quad (2)$$

である。また、孔隙を水が満たしている割合、飽和率 $s(\%)$ は、

$$s = 100 \times (W_r - W_d) / (W_s - W_d) (\%) \quad (3)$$

を用いた。測定時の水温は 15.5° C ~ 16.5° C である。水の密度は 1.0000 g / cm³ と仮定して、石の採集時の密度を求めると 2.35 ~ 2.73 g / cm³ と大きく異なる。破碎帯との対応を見るために、西村 (1988, 私信) による岩石の区分を同時に示した。Fig. 7 には、岩石の密度を安富断層からの距離を横軸にとってプロットした。

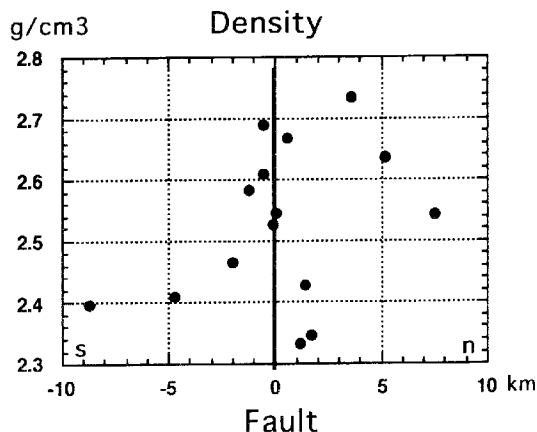


Fig.7 Density of the rocks gathered at the points in Fig. 6. High values are shown near the fault.

3. 3

以上から、安富断層を交叉する領域で断層近く数 km では、地表で集めた石が $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ 程度重い事がわかった。これを原因としてブーゲー異常値が大きく求まっているとすれば、重い石の存在は地表面のみならず地下にも及んでいると考えられる。そこでその大体の形を二次元モデルの計算で求めてみた。Fig.8 は Fig.6 の line 1 にそって得たブーゲー異常の平均値（下図なめらかな線）と、これを用いて計算が求めた地下構造（上図）である。

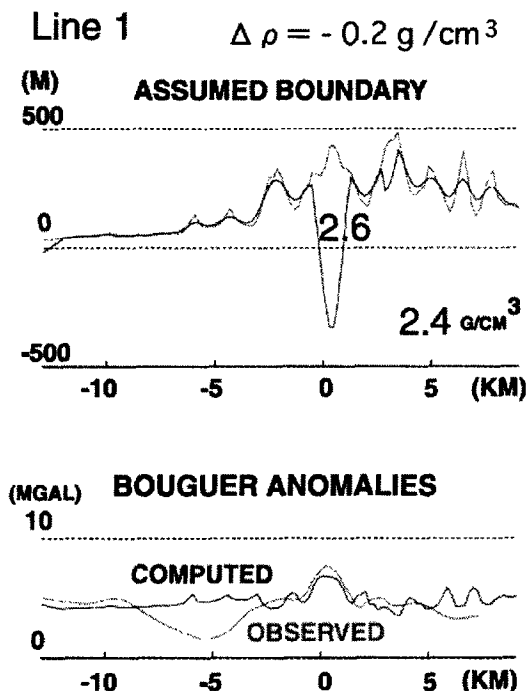


Fig.8 Automatically calculated 2-dimensional structure along line 1. The result does not fit so well because only 2-layer model is used.

上図では縦軸が高さで横軸が南 - 東の距離である。図で 0 km の位置は安富断層に選んである。我々の与えた観測値から十回の iteration で求めた二層構造が上図である。得られたブーゲー異常では、南側 (-5 km 付近) で観測地との大幅な食い違いが解消されないことがわかる。

そこで次に 3 層構造を作成し試行錯誤的に解を求めた結果を Fig.9 に示す。これによると観測結果と非常に対応の良い計算結果が得られている。なお、計算では $\rho = 2.6$ を基準に置いたが、これは上記の測定した石の平均的な値である。断層付近では $\rho = 3.0$ と高い値を仮定にしたのは、地表での測定では浅い所の影響を受けやすい事を考慮しての事である。

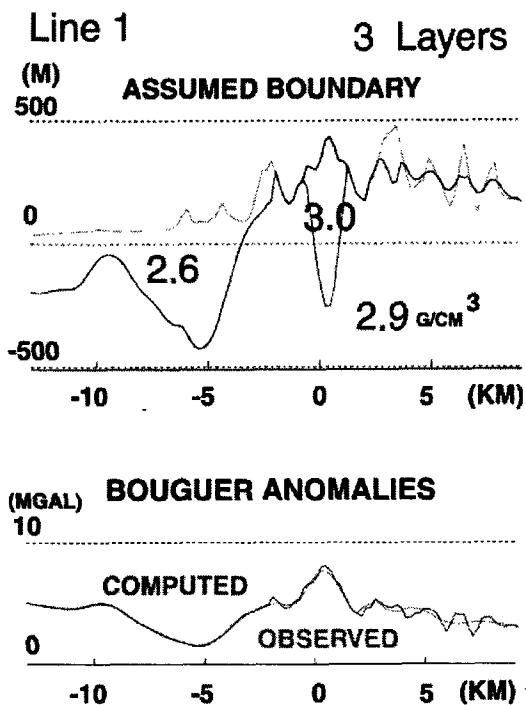


Fig.9 By using 3-layer model, the fitness comes good along the line 1. This model shows a high density model below the Yasutomi fault.

以下、line.2, line.3 でも同様の計算を行ってみたが、line.1 と同様、断層線の下に高い密度を仮定する事が必要であった。(Fig.10, Fig.11)

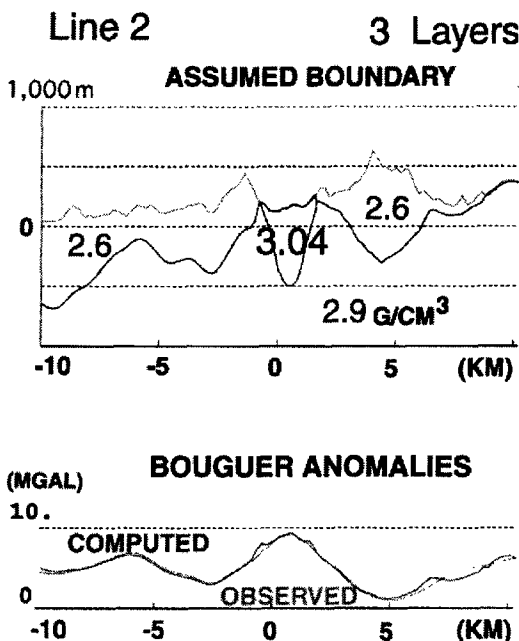


Fig.10 The same method for line 2.

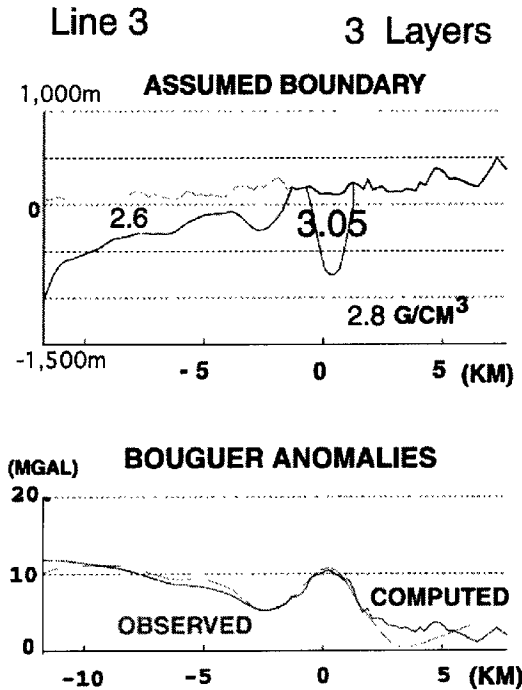


Fig.11 The same method for line 3.

また、例えば line 3 (Fig. 11) で、安富断層下は 3.05 g/cm³ の重い石を仮定しているが、これを借りて 2.9 g/cm³ まで軽い仮定をすれば、深さ 7 km 程度までのばしてみても大差は出ない (Fig. 12)。

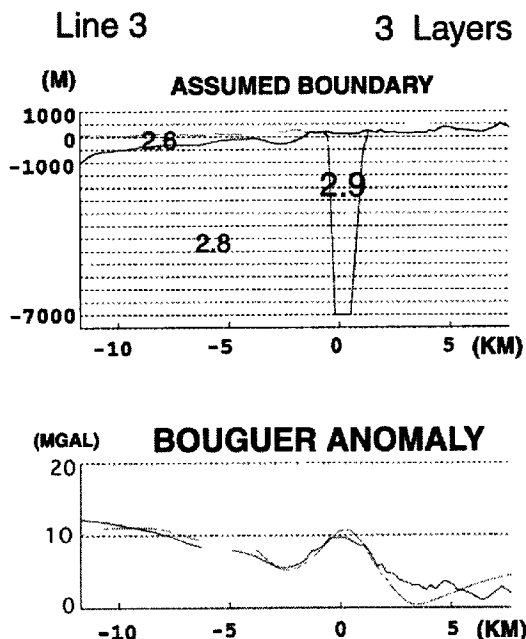


Fig.12 Showing a deep model by using a high density model near the fault region. In this case depth is 7 km, however the result is not so different from the case of Fig.11.

さらに深くする事も、深い所での形状に相当な変化を与える事も、重力が距離の二乗に反比例する事から、あまり影響は出ない。従って、信頼性を重視すれば、正確な深さ構造は地震探査など他の方法との組み合わせが必要と考える。

4. 考察と議論

序で述べたように、山崎断層系の安富断層に破碎帯の存在する事は疑いが無い。センチメートルメートル規模の厚さの破碎帯が存在する事は、トンネル掘削時の目視による観測からも伸縮計の動きの特徴からも確認されている。測量結果は、その様な薄い面の動きは見られないが、巾数百m規模の破碎帯が動くとしている。電磁的に調べた比抵抗構造では、さらに広く数 km の巾で低比抵抗帯があって、その深さも 3 km あるいはそれ以上と推定している。数字が異なるのは、対象とする破碎帯の規模が違うからである。即ち、数 km の破碎帯の中に、数百m単位で動くブロックがあり、その中にたくさんの薄い破碎帯を挟んでいるのであろう。我々の結果では、比抵抗構造から推察される破碎帯と一致する範囲に、重力異常の高まりが見られた。江坂・古本(1981)は、阿寺断層で巾数 km の破碎帯が重力の負の異常として見られる事を報告している。ただし、それが1つの破碎帯であるのか、多数の破碎帯が寄り集まった広義の破碎帯であるのかは、測定の分解能から、判別できないとしている。いずれにせよ、破碎帯が負の重力異常を示す方が、直観的には受け入れ易い。しかし、必ず負の重力異常をもたらすことは自明ではない。例えば、大久保・他(1988)は、跡津川断層の西半部で見られる 10 mgal に及ぶ正の重力異常を、断層破碎帯に沿って貫入した高密度岩体に因るものと考えている。山崎断層の我々の結果についても西村(1988, 私信)は、何枚かの破碎帯に沿って高密度の岩石がダイク状に貫入している可能性を指摘した。少なくとも事実として、山崎断層系では、破碎帯内の地表岩石の密度が周辺より大きい事を強調しておきたい。破碎帯における重力異常のデータの集積と分類、そのメカニズムの説明は、破碎帯の定義自体と共に今後の課題であろう。

次に、比抵抗構造との関係を考えてみる。Electromagnetic Research Group for the Active Fault (1982) は、山崎断層の破碎帯が低比抵抗を示すのは、岩石の種類によらず、含まれる水の量により、破碎帯内は水が豊富であると解釈している。ところが、前節に見た通り、採集した岩石に含まれる水の量は、岩石の密度が小さい程多く、破碎帯内の密度

の高い岩石は比較的乾いていた。地表に見られる岩石が地下深くまで続く保証はないが、密度的には同じものが続くとして重力異常を説明できる。水の含み具合も地表でと同様に、この断層の破碎帯の下では少ないとすれば、比抵抗は低くならない。密度と比抵抗の両方の観測事実を満足する構造はどんな物であろうか。例えば、岩石そのものに含まれる水ではなく、薄い破碎帯が深くまで続いていて、これに沿って水が存在する場合は、密度や飽和率に影響を与えることなく、比抵抗値を大幅に下げるであろう。あるいは、破碎帯域の地下にたくさんの水溜りがある事も考えられる。見野（1980）は、この地域の井戸水の水頭の高さを調べた。その結果、安富断層と暮坂峠断層の間が破碎帯になっていて、スポンジのように水を含んでいると考えている。そのような事が実際起こっているのかどうか、判定する材料に乏しいので、ここでは可能な解釈として示すにとどめたい。適当な場所を選んで、格段に密な重力測定を行ったり、より精度の高い地震探査等の実施が望まれる。

5. 結論

山崎断層系の安富、暮坂峠断層を中心にして 400 点余りで重力測定をした。南北に断層を横切る測線において、南北両端でブーゲー異常が大きく中央で小さい傾向があった。この傾向を差し引いた残差重力異常は、ほとんどの測線で共通に、断層破碎帯部分で数 mgal に及ぶ高まりを示した。高まりの南限は暮坂峠断層と重なったが、北限は安富断層よりさらに北数 km に位置し安富断層と平行する。高まりの原因を調べるため、現場の岩石を採集してその密度を測定してみると、高まりの部分の石の密度がその外側の石より $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ だけ大きいことが分かった。この密度差を用いて破碎帯部分の構造を 2 次元的に求めると、巾 km 深さ 500 m $\sim$ 10 km 程度の溝を考えればよい事が示された。これは、電磁氣的に求められていた低比抵抗帯と位置、規模共にほぼ完全に一致した。両方の結果が一致したことから、このような溝状の構造は実在のものと思われるが、破碎帯の方が密度が高いことや、そこが低比抵抗値を示すのに、岩石に含まれる水の量は周りより少ないなど、なお疑問点が残った。密度の大きな岩体が破碎帯に貫入し、断層面に沿う水が比抵抗値を下げていていると考えれば、説明が可能である。今後は、このような可能性を念頭に置きつつ更に詳しく検討を加えたい。

謝辞

本論文作成にあたりお教えいただいた澁谷拓郎博士、平野憲雄博士、名古屋大学志知龍一教授（当時）に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 江坂照也・古本宗充（1981）：重力からみた阿寺断層の破碎帯，月刊地球，第 3 巻，pp. 211-215.
- 福井謙三（1981）：山崎断層系の変位地形，地理学評論，第 54 巻，pp. 196-213.
- 半田駿・住友則彦（1979）：ELF 帯自然雑音を用いた活断層周辺での MT 探査，-山崎断層-，九十九地学，第 14 巻，pp. 19-31.
- 活断層研究会（1991）：新編日本の活断層，東京大学出版会，pp. 238-239.
- 岸本兆方（1980）：山崎断層テストフィールドにおける地震予知実験，地震予知研究シンポジウム（1980），pp. 133 - 142.
- 岸本兆方・尾池和夫（1985）：概論：山崎断層，月刊地球，第 7 巻，pp. 4-8.
- 見野和夫（1980）：山崎断層周辺の地下水分布（1）-安富町の場合-，地震 2，第 33 巻，pp. 117-130.
- 中村佳重郎・渡辺邦彦（1985）：重力測定による山崎断層付近の地下構造（序報），京都大学防災研究所年報，第 28 巻，B-1，pp. 111-118.
- 西上欽也・佃為成（1985）：地震の発生過程，月刊地球，第 7 巻，pp. 43 - 49.
- 尾池和夫（1977）：降雨と地震発生との関係について，京都大学防災研究所年報，第 20 巻，B-1，pp. 35-45.
- 岡田篤正・安藤雅孝・佃為成（1979）：トレンチ発掘による活断層の調査，月刊地球 第 1 巻，pp. 608-615.
- 大久保義弘・古瀬慶博・河野芳輝（1988）：跡津川断層周辺のブーゲー異常と地殻構造，地震 2，第 41 巻，pp. 97-102.
- 大倉敬宏（1988）：山陰，近畿，北陸に発生する浅発地震の発震機構，地震 2，第 41 巻，pp. 89-96.
- 佃為成（1977）：山崎断層の地震（1977 年 9 月 30 日， $M_{3.7}$ ）の震源付近の V_p/V_s 異常，京都大学防災研究所年報，第 21 巻，B-1，pp. 27-36.
- 宇佐美龍夫（1996）：新編日本被害地震総覧，p.33.
- 渡辺邦彦・尾池和夫（1985）：安富観測坑で記録された山崎断層の地震（1984 年 5 月 30 日， $M_{5.6}$ ）にかかわる地殻変動，京都大学防災研究所年報，第

28 卷, B-1, pp. 99-109.
渡辺邦彦・中尾節郎・松村一男・竹内文朗 (1997):
京都大学防災研究所年報, 第 40 号, B-1, pp. 21-
26.
吉岡龍馬 (1978): 山崎断層・塩田温泉の塩素濃
度と地震現象との関連, 京都大学防災研究所年報,

第 21 卷, B-1, pp. 37-41.
Electromagnetic Research Group for the Active Fault
(1982): Low Electrical Resistivity along an Active
Fault, the Yamasaki Fault, J. Geomag. Geoelectr.,
Vol.34, pp. 103-127.

A Gravity Survey around the Yasutomi Fault in the Yamasaki Fault System, Southwest Japan

Fumiaki TAKEUCHI, Kajuro NAKAMURA, Kunihiro WATANABE,

Kazuo MATSUMURA, Yoshiteru KONO *, Hiroshi HARA *,

Masao KOMAZAWA * * and Ryohei NISHIDA * * *

* Faculty of Sciences, Kanazawa University

* * Geological Survey of Japan

* * * Department of Civil Engineering, Tottori University

Synopsis

A gravity survey is carried out around the Yamasaki Fault region,, southwest Japan, especially to cross the Yasutomi and the Kuresaka-toge faults. The Bouguer anomaly shows a high residual between Kuresaka toge fault and a few km north to the Yasutomi fault.

We measured the density of the rocks in and around the fault zone. The result shows the rocks in the fractured zone are almost larger in density than those out of the zone by 0.1 to 0.2 gr/cm³. This density difference well suggests the high Bouguer anomaly by modeling a high density structure with some km width, reaching to the depth of 0.5 to 10 km depth, is existing below the faults.

Key words: Yamasaki fault system, Yasutomi fault, Gravity Observation, Bouguer Anomaly, High density rocks