

えびの群発地震域周辺の地下比抵抗構造

後藤忠徳、大志万直人、住友則彦（京大防災研）
地殻比抵抗研究グループ

The resistivity structure around the hypocentral area of the Ebino earthquake swarms in Kakuto caldera, in southern Kyushu, Japan.

T. Goto, N. Oshiman and N. Sumitomo (DPRI, Kyoto Univ.)

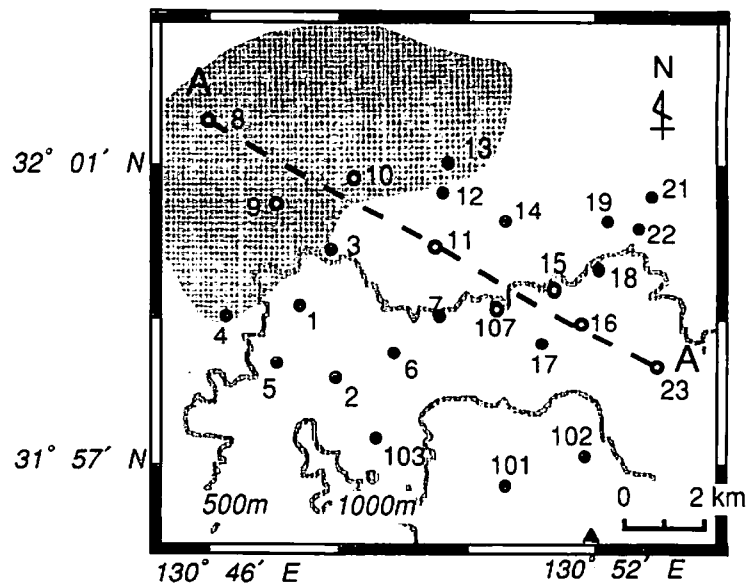
Research Group for Crustal Resistivity Structures

1. 目的

霧島火山群の北西に位置する加久藤カルデラでは、1968年のえびの群発地震（最大M6.1）をはじめとして、しばしば群発地震が発生する。最近では群発地震の発生原因として、上部地殻の厚さの不均質や、地下深部からの自由水の上昇が指摘されているが（笹井、1994）、本地域でどのような要因が群発地震を制御しているのであろうか？本研究の目的は、1968年に起きたえびの群発地震の震源分布域の周辺で地下比抵抗構造を詳細に調べ、これと群発地震の震源分布を比べることで、えびの群発地震の発生原因を探ることである。また、えびの群発地震の起きた加久藤カルデラの地下にはマグマだまりが存在するという説やその反論もあり、火山学的にもこの地域の地下比抵抗構造を探ることは興味深い。なお本研究の目的については、笹井他(1994)、地殻比抵抗研究グループ(1995)、歌田他(1995)に詳しいのでそちらも参照していただきたい。

2. 観測結果

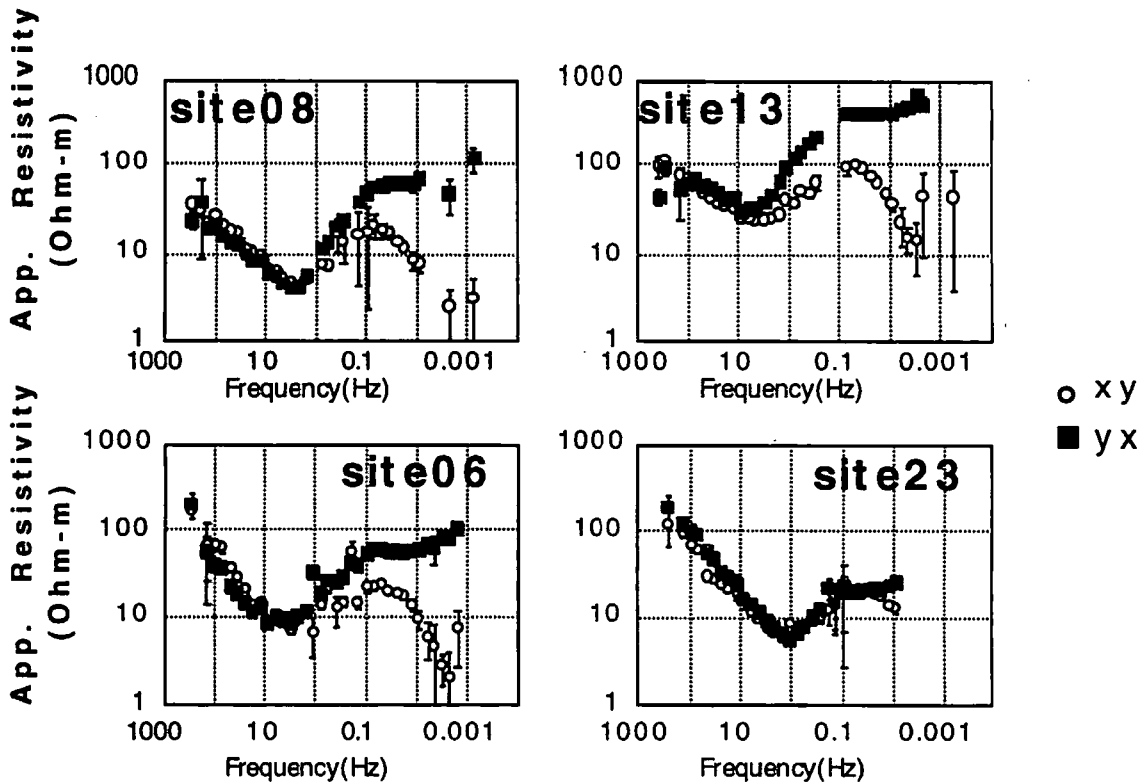
加久藤カルデラでのMT観測は、第7次地震予知計画に基づく1994年の電磁気共同観測の一部として行われた。本観測の詳細については笹井他(1995)、地殻比抵抗研究グループ(1995)等で報告されている。観測点の分布を第1図に示す。観測点は合計27点であり（うち1点は本研究地域



第1図 観測点の分布図。丸印が観測点（数字は観測点番号）、網目地域はえびの群発地震の震源域、網線は等高線をそれぞれ示す。▲は霧島火山群韓国岳の位置を示す。

外のリファレンス点であり、第1図に示されていない)、測定装置にはPhoenix社製のV5-MT systemを用いた。各観測点毎に1~4日間の自然の電場磁場変動を記録し、384~0.00055Hzの周波数帯域について見かけ比抵抗値や電場-磁場間の位相差などの大地の電磁応答を算出した。以下の議論やモデリングでは、見かけ比抵抗値については誤差が100%以下、位相については誤差が30度以下の値のデータのみを採用した。

まず、本地域の比抵抗構造のおおまかな特徴を示すため、第2図に代表的な見かけ比抵抗値を示した。地殻比抵抗研究グループ(1995)で述べられているように、全観測点について見かけ比抵抗値は高周波数から低周波数へ移るにつれ減少し、数Hz以下では逆に増加の傾向を示している。この事は、本地域は10~100Ωmの比抵抗値を持つ表層下に、表層よりも比抵抗値の低い層が共通して存在し、その下では再び比抵抗値が上昇するような地下構造を定性的には示していると考えられる。ここでさらに第2図の見かけ比抵抗値について、数Hz以下での増加傾向に注目する。えびの地震の震源域上のSite 8及び13ではこの増加傾向は大きく、0.1Hz付近の見かけ比抵抗値は300Hz付近の見かけ比抵抗値と同程度かそれよりも高い値を示す。これに対して霧島火山群に近いSite 6や23などでは、Site 8や13と比較すると見かけ比抵抗の増加傾向は小さいことが認められる。この見かけ比抵抗

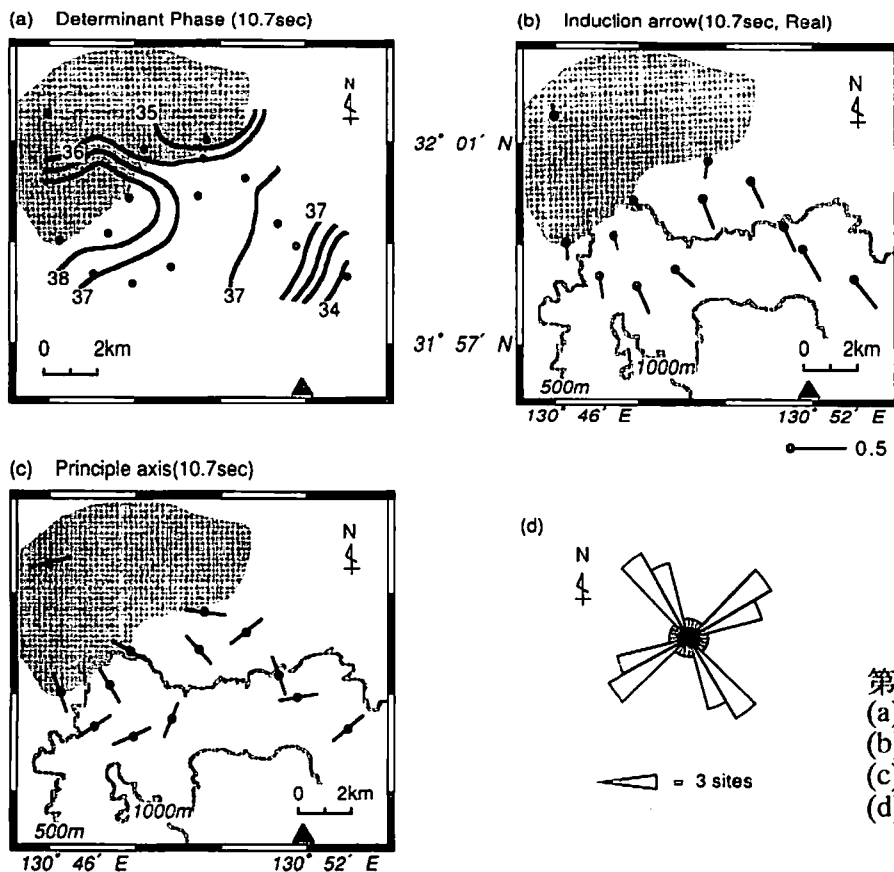


第2図 Site 6,8,13,23についての見かけ比抵抗曲線。xy=南北電場より算出、yx=東西電場より算出。縦棒は67%の信頼区間を示す。

値の特徴は後述の地下比抵抗構造のモデル化で重要な要素となる。

次に水平方向にはどのように地下比抵抗構造が変化しているのかを知るために、各観測

点で得た電磁応答の空間分布について調べた。本研究では特にえびの群発地震域の地下比抵抗構造について関心がある。Minakami et al.(1970)によるとその震源域の深さは約3~9kmである。そこで、各観測点の表皮深度が5~15kmになる周波数帯に的をしぼり、そのなかでも比較的多くの観測点で良質なデータを取得できた0.09375Hz(周期10.7秒)について電磁場間の位相、Induction arrow、主軸方向の空間分布を第3図に示した。まず位相について(第3図(a))であるが、ここではDeterminant Phaseを示した。これは座標回転によらない値であり、static shiftやgalvanic distortionを受けない安定した量である。第3図(a)によればDeterminant phaseは観測地域の中央付近では同じような値を取るが、霧島火山群の近傍やえびの地震の震源域付近では複雑な分布をしている。従ってこの地域の比抵抗構造は3次元性を示している。次にInduction arrowの分布(第3図(b))であるが、全体に南を向く傾向があり、その方向の平均はN22W-S22Eである。これは鹿児島湾もしくは太平洋の影響かもしれないが、霧島火山群に近づくにつれ急速にInduction arrowが大きくなることや、えびの地震の震源域の北西部に当たる観測点ではInduction arrowがほぼ真北に向くことは注意すべき点である。また、主軸方向(第3図(c))は各観測点でのInduction arrowに平行もしくは垂直な方向を指し示している。これは主軸のRose diagram(第3図(d))を描くとより明瞭に認められる。主軸のRose diagramは90度の任意性を持っていることに注意が必要である。第3図(d)から主軸方向の平均値はN54E or N36Wである。



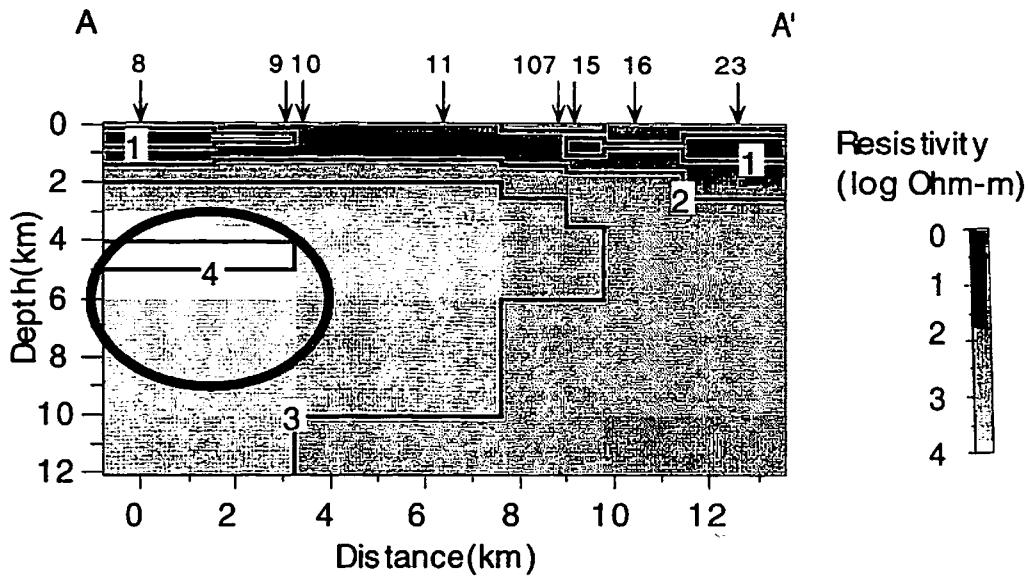
第3図 周期10.7秒での
 (a)Determinant phase、
 (b)Induction arrow(実部)、
 (c)主軸の方向、
 (d)主軸方向のRose diagram

3. 地下比抵抗構造の2次元モデル化

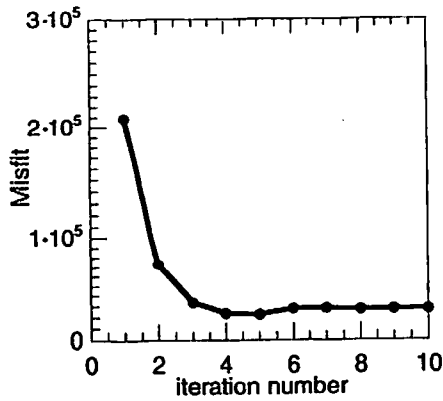
この地域の地下の比抵抗構造のモデル化を行い定量的な地下構造の解釈を進めることにする。本地域は前章で述べたように3次元的な地下構造を示している。3次元的な地下比抵抗構造のモデル化は模式的な構造については行われているが、実際の地下構造に対して適用するには、計算の精度や計算機的能力不足のため実用には問題がある。そこで本研究では、本地域を2次元構造と仮定してモデル化を行うことにする。これは、地下構造の3次元性を示すパラメータである impedance skew については、0.1Hz以下では0.2以下の低い値を示す観測点が多いこと、また前述の Determinant phase のばらつきも5度以内と比較的小さいことなどから、3次元的な構造は局所的であると考えられるためである。また Induction arrow と主軸方向は共に NNW-SSE の似た値を示している。以上の点からこの地域の地下比抵抗構造を ENE-WSW の走向を持った2次元構造であると仮定し、以下で予察的な地下比抵抗構造の見積もりを行うことにする。

2次元地下比抵抗構造のモデル化には Uchida(1993)による、平滑化制約付きインバージョンをおこなった。インバージョンに用いた観測点を第1図に白丸で示した。これらの観測点は(1)モデル化の際にできるだけ長い測線をとること、(2)できる限り直線上の観測点を用いること、(3)できるだけ良質なデータの取れた観測点を用いること等の点に注意して選択した。2次元構造の走向は主軸方向を用いて決めるべきだが、主軸方向は観測点間のばらつきが大きかったため、本研究では白丸の観測点についての10.7secの Induction arrow の平均値である N65E を採用した。2次元インバージョンには TE・TM 両モードの見かけ比抵抗値と位相を用いた。

2次元比抵抗インバージョンの結果から得られた最適モデルを、第1図の測線 AA' に投影して、第4図に示す。この図には Minakami et al.(1970)から読みとった、おおよそのえびの地震の震源分布域を楕円形状に示してある。また10回 iteration する間の残差自乗和の減少を第5図に示す。ほぼ4回の iteration で残差が収束していることが分かる。第4図は残差が最小になった5回の iteration 後のモデルである。最適モデルの特徴は大きく2つある。1つは、本観測地域下の約0.5~1kmには共通して10Ω m以下の低比抵抗層が広がっていることである。もう一つは加久藤カルデラの地下約3~10kmの地域の比抵抗値が、同深度の周辺部と比較して1~2桁高い比抵抗値を示していることである。この地域は、えびの地震の震源域に概ね一致している。この最適モデルからの計算値と、観測値の比較を第6図に示す。最適モデルは観測値を概ね説明しているが、とくに前述した数Hz以下での見かけ比抵抗の増加傾向をよく表現している。また前述の最適モデルの特徴は地殻比抵抗研究グループ(1994)に示されている、位相疑似断面や Bostick inversion の結果とも整合している。またえびの地震の震源域北部では北を向き、霧島火山群に近づくほど大きく南方を向く Induction arrow の振るまいも、この最適モデルで定性的には説明できるようである。

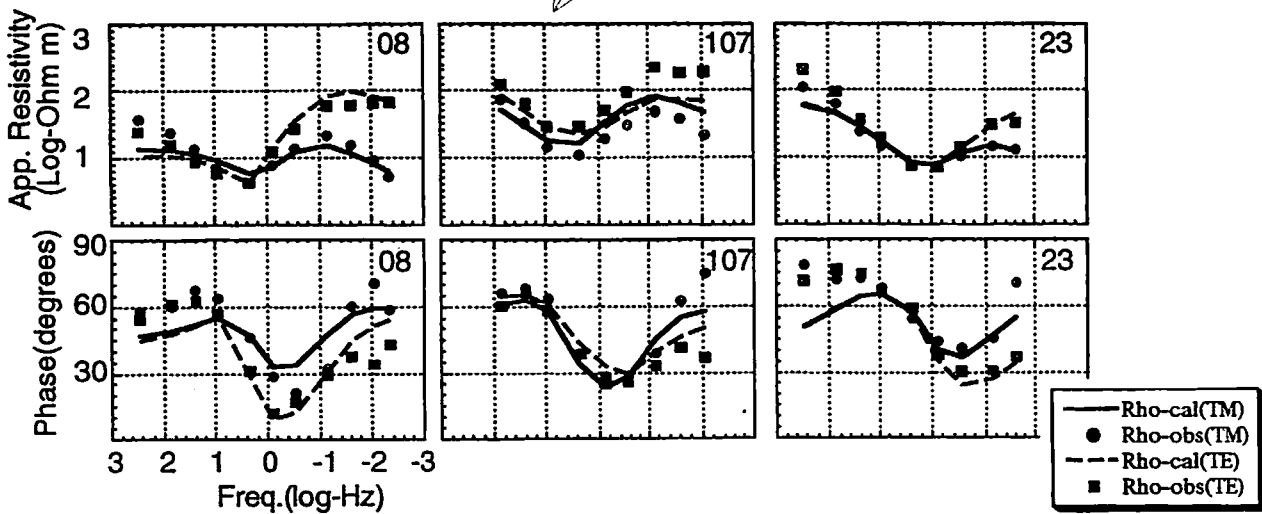


第4図 測線AA'に投影した2次元比抵抗モデル(最適モデル)。黒丸の内側がえびの群発地震の震源域である。矢印は観測点を示す。



第5図 残差自乗和の減少の様子

第6図 第4図のモデルから得られる計算値(cal)と実測値(obs)。上はSite 8, 107, 23の見かけ比抵抗値、下は同Siteの位相差。



4. 考察

今回見積もられた比抵抗構造について若干の解釈と考察を行う。

まず深さ約0.5~1kmに存在する低比抵抗層は、ボーリングや地質調査の結果と照らし合わせると、地下の熱水層と考えるのがもっともらしい。荒牧(1968)は加久藤カルデラ底でのボーリング結果から、地表から深度367mまでは凝灰岩等の堅硬でないカルデラ堆積物が分布し、深度367mより深部には熱水変質作用を受けた堅硬な凝灰岩または安山岩質溶岩等の基盤岩が分布すると報告している。今回明らかになった低比抵抗層はこれらの熱水変質作用を与えた熱水層と考えられる。しかし、この低比抵抗層の存在深度は約0.5~1kmであったが、堅硬な基盤岩がそのうえの堆積物よりも水を多く含むとは考えにくい。今回用いた平滑化制約付きインバージョンは比抵抗境界をスムーズに表現する特徴があるので、熱水層は実際には基盤岩のすぐ上の堆積物内に主に存在し、薄層でかなり低い値の比抵抗層を作っているのかもしれない。また第4図をみると、この低比抵抗層は霧島火山群の中腹まで徐々に厚さを増しながら続いている。これはさらに鍵山他(1994)によって報告されている霧島火山群硫黄山付近の地下100m以深に存在する低比抵抗層と連続している可能性がある。

次にえびの地震の震源域に対応すると思われる高比抵抗体の要因について、微小地震活動や地震波速度構造などから考察する。井田他(1986)は加久藤カルデラの地震のうち、カルデラ壁の斜面からカルデラの中央下部約10kmまで緩やかに続く微小地震列があることを報告している。この地震列よりカルデラ内側に今回の高比抵抗体やえびの地震の震源域は当たるようである。この事から、今回見つかった高比抵抗体は、最近の微小地震活動にも何らかの影響を与えていると考えられる。一般に、高比抵抗体は、その周辺部と比べて含水率が低い、温度が低い、もしくは伝導性鉱物の含有率が低い等で説明できると考えられる。このうち、えびの地震の震源域(約6km四方)程度の小さい領域とその周辺部に地震活動の違いを与えるのは、含水率の空間的变化である可能性が高いと考えられる。ここでは周辺部の含水率の違いから、高比抵抗体の要因について説明を試みる。高比抵抗体の周辺の岩石のクラックは水で飽和されていると考え、高比抵抗体を構成する原因としては、次の3通りの含水率の低い岩石が考えられる。まず、周辺部と同様の飽和クラックが、周辺に比べて低い密度で分布する岩石が考えられる。次にクラックの分布密度は周辺部と同程度であるが、ガス等を含んでいて不飽和のクラックを多く含む岩石が考えられる。最後に1番目と2番目の中間、つまり周辺よりも低い密度でクラックが分布し、それらのクラックも不飽和な状態である岩石が考えられる。この3つの高比抵抗体の原因のうち、この地域でもっとも可能性が高いものについては、クラックの分布密度や飽和率に対する地震波P波速度の理論計算(O'Connell and Bundiansky, 1974)と、本地域のP波速度構造(山本他, 1994)を考慮すると考察できる。O'Connell and Bundiansky(1974)は、クラック

の飽和度が同じ場合はクラックの分布密度が低い岩石ほどP波速度は速くなり、またクラックの分布密度が同じ場合は不飽和クラックを多く含む岩石ほどP波速度は遅くなると報告している。また彼らの結果によると、飽和クラックが密に分布する岩石と、不飽和クラックが疎に分布する岩石は同程度のP波速度を持つことが可能である。一方、山本他(1994)による霧島火山群周辺の3次元P波速度構造解析によると、加久藤カルデラとその周辺の深さ3.5~8.5kmの地域では、大きなP波速度異常はないと報告されている。これらの地震波速度の解析からは、えびの地震の震源域に対応すると思われる高比抵抗体の原因は、上記の3番目の岩石、すなわち周辺部に比べてクラックの分布密度が低く、またクラックも不飽和な状態である岩石で構成されている可能性が一番高いと考えられる。具体的にどのような種類の岩石がこの高比抵抗体に相当するかはここでは不明であるが、加久藤カルデラの形成に関与したマグマが固化したものであるのかもしれない。

最後にえびの群発地震などの加久藤カルデラ内で起きる群発地震について、今回判明した地下比抵抗構造から若干の考察を試みる。鍵山(1994)によると、1979年以降、加久藤カルデラではその周辺に比べて地震の少ない状態が続き、現在まで地震の空白域となっている。また神沼(1973)は、えびの群発地震の前には霧島火山群中のえびの高原の地震活動は活発であったが、えびの群発地震時には同地域の活動度が低下したことを示している。以上の霧島火山周辺の地震活動の推移と、本研究により明らかになった、えびの群発地震の震源域に対応するような高比抵抗体(=硬い岩体)の存在から、本研究では以下のような地震発生過程を推測する。まず、霧島火山周辺の歪の蓄積に伴って、加久藤カルデラに比べてクラックの密度の高いカルデラ周辺部の岩石が、現在の地震活動にみられるような微小地震を伴いながら破壊をおこすと考えられる。この時、加久藤カルデラの高比抵抗体は多少の歪では破壊を生じず、地震の空白域になると考えられる。その後、加久藤カルデラの高比抵抗体部にも大きな歪みが蓄積され、それにともない地震活動は徐々に加久藤カルデラ部で盛んになり、最終的にはえびの群発地震のような大きな地震を引き起こすのではないかと考えられる。加久藤カルデラ周辺ではしばしば群発地震が生じるが、以上のような地震発生過程が繰り返し起きているのかもしれない。

以上の地震発生過程のモデルとはまた別に、笹井(1994)が指摘している深部地下水の上昇が、この地域の地震の発生過程に関与している可能性もある。たとえば、次のような地震発生過程が考えられるかもしれない。まず第1段階では加久藤カルデラ下にある高比抵抗体は深部地下水の上昇を妨げるCap Rockの役割を果たし、第2段階ではこの高比抵抗体は地下水の圧力に耐えきれず、Cap Rockの一部が崩壊し、えびの地震のような群発地震を引き起こすような可能性も考えられる。

5. まとめ

加久藤カルデラ内でしばしば生じる群発地震の発生要因を調べるために、1994年の電磁気共同観測でおこなわれた広帯域MT観測によって得られたデータを用いて、当地域の2次元的な地下比抵抗構造を見積もった。その結果、表層下約0.5~1kmに熱水層と思われる、低比抵抗層が加久藤カルデラから霧島火山群方面まで広く分布することと、えびの群発地震域と対応するような地域で高比抵抗体が存在することが明らかになった。地震波速度構造との対比などから、この高比抵抗体は周辺の岩石よりもクラック密度の低い岩石で構成されているようである。えびの群発地震などの加久藤カルデラ内での地震はこの高比抵抗体と密接な関係があると考えられる。

本研究では加久藤カルデラ内での群発地震と地下水との関係を論じることは多くは出来なかった。今後、比抵抗モデルの分解能をより向上させることでこれらの点について議論できるかもしれない。また3次元的な比抵抗構造のモデル化も急務であると考えられる。

参考文献

- 荒牧重雄、加久藤盆地の地質—えびの・吉松地域の地震に関連して—、Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 1325-1343, 1968
- 地殻比抵抗研究グループ、宮崎県えびの市周辺における広帯域MT観測、CA研究会1995年論文集、4-10、1995
- 井田喜明・山口勝・増谷文雄、霧島火山と加久藤カルデラの最近の地震活動、地震、39、595-605、1986
- 鍵山恒臣、霧島—やや張力場に生成した火山群、地学雑誌、103、5、479-487、1994
- 鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄・歌田久司、霧島火山群・硫黄山周辺のVLF, ELF-MT測定、Bull. Earthq. Res. Inst., 69, 211-239, 1994
- Minakami, T., Hagiwara, M., Yamaguchi, M., Koyama, E. and Hirai, K., The Ebino earthquake swarms and the seismic activity in the Kirishima volcanoes, in 1968-1969. Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 205-233, 1970
- O'Connell, R.J., and Budiansky, B., Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, J. Geophys. Res., 79, 35, 5412-5426, 1974
- 笹井洋一、松代群発地震の生成機構—自然発生的大規模水圧破碎、CA研究会1994年論文集、181-195、1994
- 笹井洋一・歌田久司・住友則彦、1994年電磁気共同観測について、CA研究会1995年論文集、1-3、1995
- Uchida, T., Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J. Geomag. Geoelectr., 45, 841-858, 1993
- 歌田久司・鍵山恒臣・神田徑・三品正明・山本哲也・山崎明・地殻比抵抗研究グループ、宮崎—水俣測線のULFアレー観測、CA研究会1995年論文集、11-22、1995
- 山本圭吾・井田喜明、やや遠地地震を用いた霧島火山群の3次元P波速度構造解析、Bull. Earthq. Res. Inst., 69, 267-289, 1994