

国府津・松田断層付近の電磁氣的構造調査

気象庁地磁氣観測所 山本哲也

Research of Resistivity Structure around the Kouzu-Matsuda Fault

Tetsuya YAMAMOTO

Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

地震予知のための基礎的な調査として、地震をひきおこす可能性のある活断層の調査が重要であり、山崎断層をはじめとする国内各地の活断層では、種々の手法による構造調査が行われている。このような調査には電磁氣的な手法も精力的に応用されている¹⁾。特に、地下の比抵抗構造の調査は、断層破碎帯が一般的に低比抵抗帯となっていると考えられることから、活断層の活動的な部分をしるために非常に有効であるといえる。

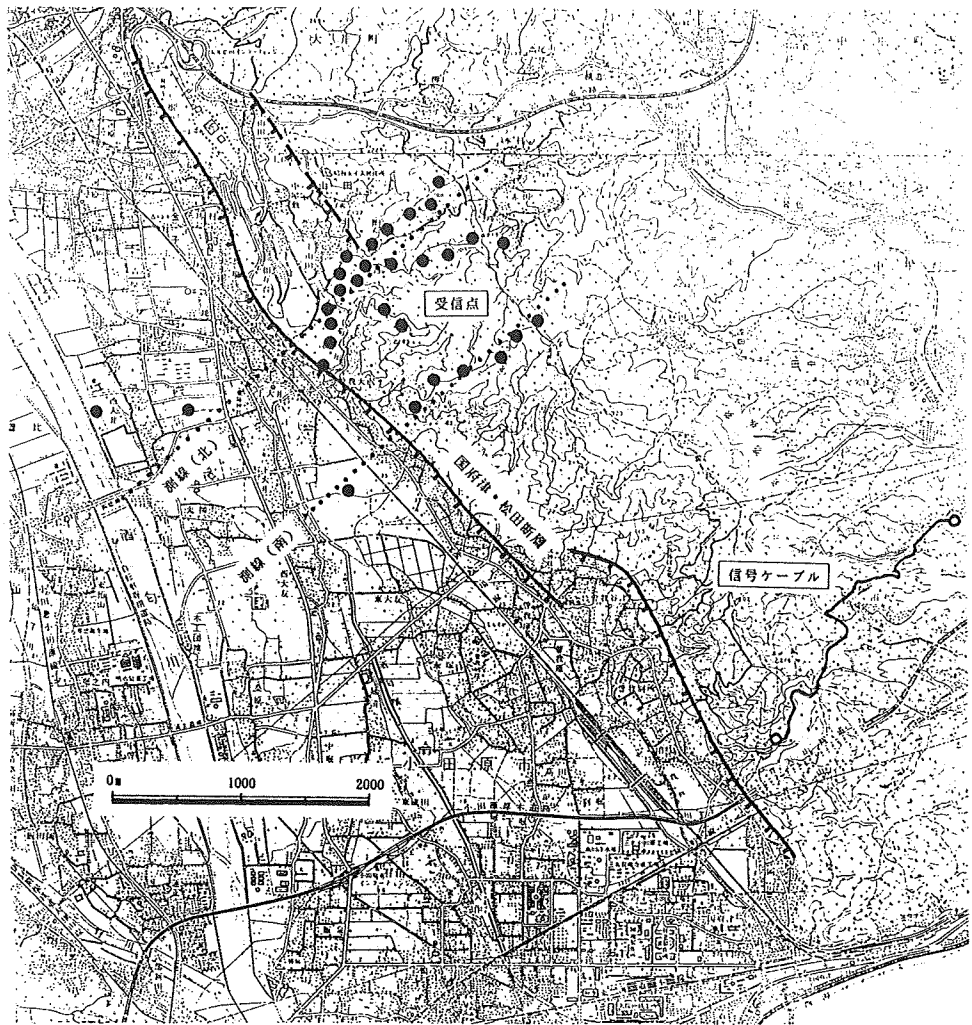
国府津・松田断層は相模湾北西部に位置する確実度 I、活動度 A と分類される活断層である²⁾。断層の走向はほぼ北西-南東で南側は相模湾に抜けている。長さは陸上部分で 10 数 km であり、東上がりの逆断層とされており、その変位は 100 m 以上、平均変位速度は 1 m/1000 年以上と推定されている。太平洋プレートとフィリピン海プレートの境界であるといわれたこともある断層である。第 1 図に示したように、地形的にみた主要な断層線は、西側の足柄平野と東側の大磯丘陵の境界に引かれるが、北部では大磯丘陵側に平行な断層線が 1-2 本引かれることも多い。

国府津・松田断層は、国内の第一級の活断層とされているにもかかわらず、これまでに電磁氣的調査はほとんどなされていない。これは、周辺の都市化の状況や、御殿場線、東海道線、小田急線等の直流電車の路線から近いことなどから、人工雑音の大きいことが予想されるためであろう。そこで、我々は、交流の人工電磁場を用い信号雑音比を向上させる電磁探査法である CSAMT (Controlled Source Audiofrequency MagnetoTellurics) 法を用いて、国府津・松田断層付近の比抵抗構造の調査を行った。

2. 調査手法

CSAMT 法は、人工信号源から交流磁場を放射し、その磁場が大地に入射して作る電磁場を用いて、地下の比抵抗を探査する手法である³⁾。人工信号源は高精度に制御されているため、受信 (電磁場測定) の際に、信号周波数にあわせた重ね合わせを行えば、信号雑音比を飛躍的に向上させることができる。したがって、従来の MT (MagnetoTellurics) 法では測定が難しかった雑音レベルの比較的高い地域でも、比抵抗測定が実施できる。

今回の調査の人工信号源としては接地双極子型のものを使用した。調査地域の南側に 2.



第1図 国府津・松田断層の位置と、調査に用いた信号ケーブル、受信点の配置。

5 kmほどの両端を接地した信号ケーブルを置き(第1図の実線), 交流電流を流して磁場を作った。信号ケーブルおよび電流の向きはほぼ $N45^{\circ}E$ であった。信号周波数は, $0.5\text{ Hz} - 8192\text{ Hz}$ の15周波数, 測定時に使用した電流は, 最大20 A程度だった。受信(電磁場測定)は, 信号源の北側の地域で実施し, ほぼ30点で $N45^{\circ}E$ 方向の電場と $N45^{\circ}W$ 方向の磁場の測定を行った(第1図の黒丸)。調査測線は国府津・松田断層の主要な断層線を横切るように設定した。ほとんどの測定点は南側および北側の調査測線上に位置する。北側の測線の東半分はさらに2つに分岐しており, より詳細な調査が行われた。調査地域の平野側(西側)では, 人家や電灯線の電線のために電磁場の測定に適する場所も少なく, また, 雑音レベルも高かったため, 測定点の密度を高くすることができなかった。そ

れに対して丘陵側（東側）では、測定可能な場所もかなり残されており、良好な測定値を取得することができた。

調査地域のほぼ中央を断層に平行に御殿場線が走っているが、測定点に間近なところを電車が通過している場合を除けば、測定の著しい障害にはならなかった。これは直流電車の迷走電流の周波数帯が、CSAMT法の測定周波数帯とは異なっているためであると思われる。したがって、運行密度のあまり高くない御殿場線のような路線であれば、測定時間を適切に選ぶことにより線路にかなり近い場所でも測定が可能であるとみられる。

各測定点について、各周波数の見かけの比抵抗と電場と磁場の位相差を求めた。一例を第2図に示す。高周波側では信号強度が低いために精度が低くなっている。低周波側では信号の重ね合わせ数や信号強度が不十分であったために測定精度が低くなっている。これらは、図示した測定点に限らずほとんどの点に共通してみられた特徴である。測定点によってはCSAMT法に特有の近地効果（near-field effect）⁴⁾のみられたところもあった。これは、地中を伝播してくる電場が十分に減衰していない、信号源から比較的近い測定点にみられる。この場合、低周波側で、測定される電場は大きくなり、また電場と磁場の位相差はほとんどなくなる。このような理由から地下の比抵抗構造を推定する際には、低周波側、高周波側のデータにはあまり加重をかけないように配慮している。

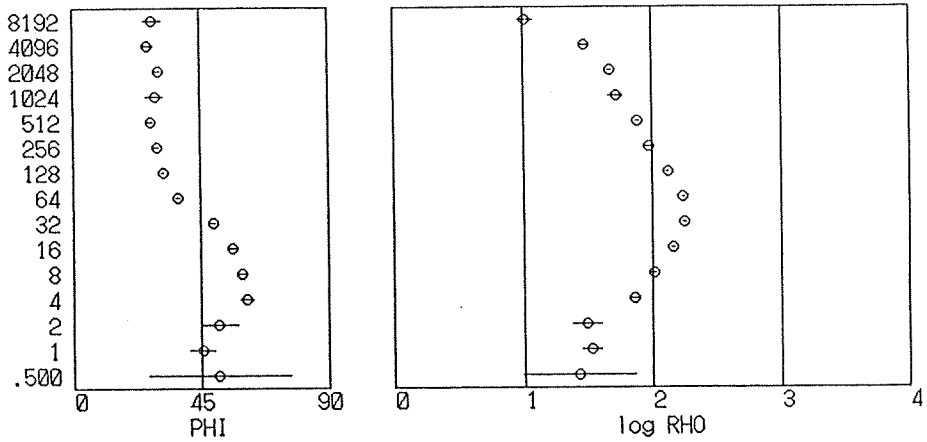
調査地域の比抵抗は全体として低く、数100Ωmを超えるような見かけ比抵抗はまったく測定されなかった。

3. 調査結果

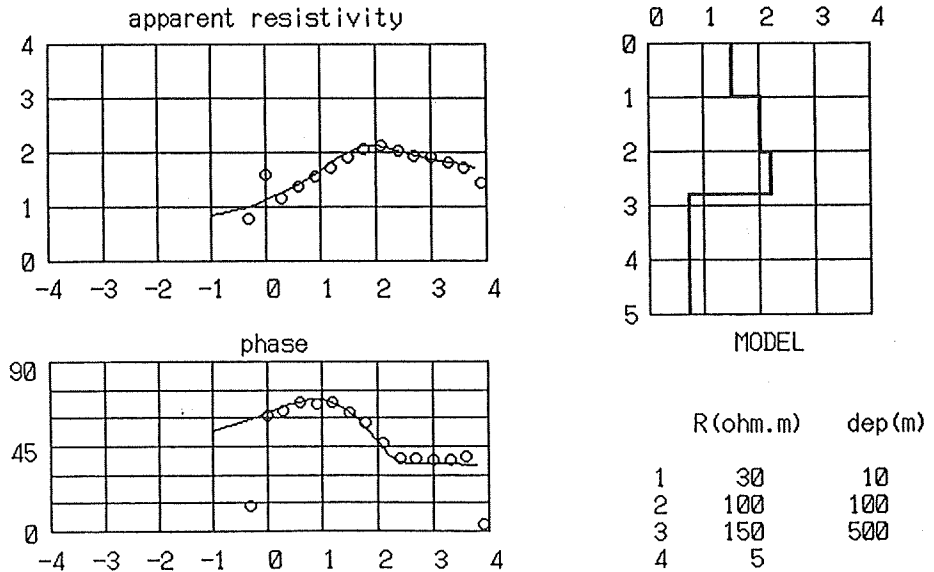
各測定点のデータを、1次元の多層構造モデルで解釈した。モデルの層の数は4-5とした。また、各層の比抵抗と厚さのとりえる値は連続的に変化しえるものとしては扱わず、対数的な間隔の離散的な値をとると仮定した。その結果、それぞれのモデルはデータを説明する最良のモデルとはいえなくなるが、モデルを求める過程は大幅に簡略化される。通常、MT法による見かけの比抵抗は対数的な精度を持ち、また周波数と深さの対応も概ね対数的であるので、このようなモデルと最良モデルとから計算される見かけ比抵抗や位相差の差異は、それほど大きくはならない。

第3図に示したのは、南側の測線の西端の測定点の結果と、それを説明するモデルである。モデルは対数比抵抗と対数深さで表している。このモデルには、おおまかにいって低比抵抗な表層（30Ωm, 10m）、高比抵抗な中間層（100-150Ωm, 600m）、低比抵抗な下層（5Ωm）という構造がみてとれる。前述のとおり、最良モデルとはいえないモデルであるが、測定結果（見かけ比抵抗、位相差）をかなりよく説明できている。求められたモデルの構造は、測定周波数、比抵抗、近地効果の影響等から考えて、深さ1000m程度まで有効であると考えられる。

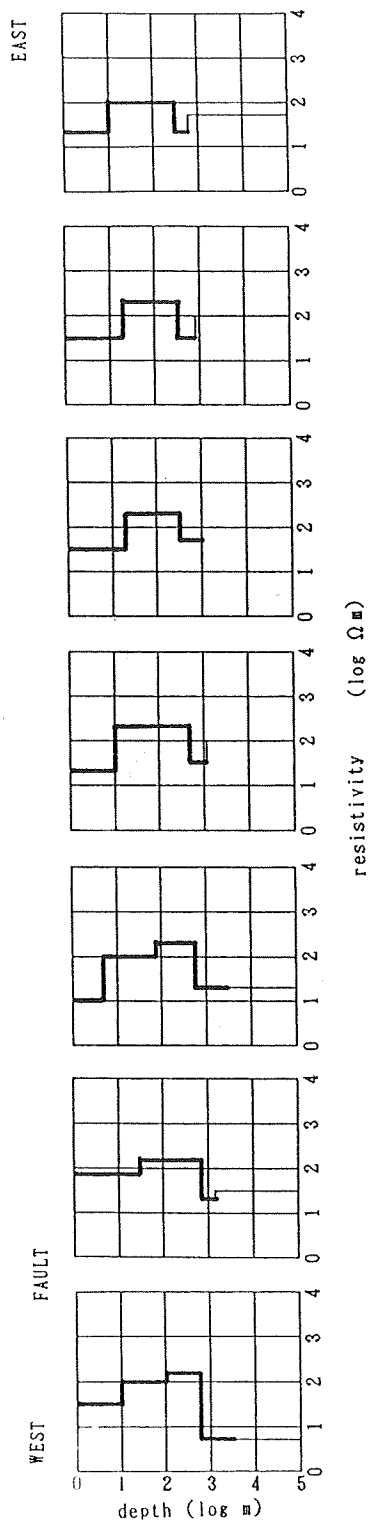
第4図は、南側の測線について、各測定点のモデルを並べたものである。地形上の断層線は、西端と西から2番目の点の間に位置する。いくつかの測定点では、最下層が高比抵抗になっているのがわかるが、これらは、近地効果による見かけの構造で、実際の地下構造を反



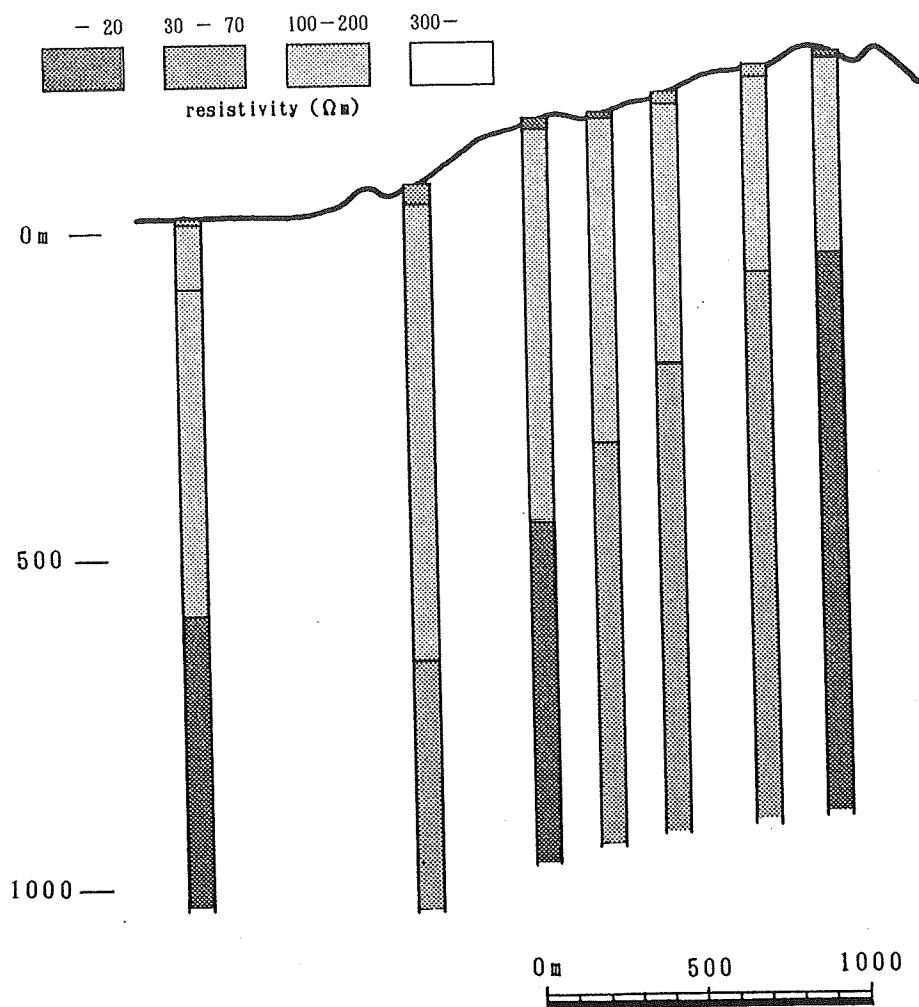
第2図 CSAMT法による測定結果. 縦軸は周波数 (Hz). 左図は電場と磁場の位相差 ($^{\circ}$). 右図は見かけの比抵抗 ($\log \Omega m$). 図中の白丸が測定値を, 実線が測定誤差を示す.



第3図 測定結果と比抵抗構造モデル. 右図が1次元多層構造モデルを表わす. 縦軸は深さ ($\log m$), 横軸は比抵抗 ($\log \Omega m$). 左上図は見かけ比抵抗のモデルによる計算値 (実線) と測定値 (白丸). 縦軸が比抵抗 ($\log \Omega m$), 横軸が周波数 ($\log Hz$). 左下図は位相差のモデルによる計算値 (実線) と測定値 (白丸). 縦軸が位相差 ($^{\circ}$), 横軸が周波数 ($\log Hz$).



第4図 南側の測線の、各測定点のモデル。



第5図 南側の測線の地形断面と、各測定点の比抵抗構造の柱状図。

映したものではないと思われる。南側の測線ではどの点も表層から低-高-低という3層か、それに類似した比抵抗構造がみられる。下層の比抵抗は西側で5-20 Ωm 、東側で20-30 Ωm と、東側の点のほうが高くなる傾向があるようにみえる。また、地表から下層までの深さは、東側の点のほうが浅くなるようである。興味深いのは、断層の平野側に位置する西端の点の構造と、断層の東側に位置するそのほかの点の基本的な構造に差異がないという点である。

南側の測線の地形の断面と各測定点の比抵抗構造の柱状図を第5図に示す。地形上の断層線より東側では低比抵抗な下層までの深さがだんだん浅くなっているのがわかる。深さの変化はおおむね連続的で、この図をみるかぎりでは下層までの深さがどこかで食い違っている

ようには思われない。また、平野側の下層までの深さと、丘陵側の下層までの深さにも、大きな食い違いといえるようなものはない。そして、下層のなす傾斜は、明らかに地形にみられる傾斜よりも大きい。足柄平野で行われたボーリングの結果⁵⁾からすると、平野側の構造の中間の高比抵抗の層は、砂礫層（酒匂川の堆積物）にあたとみられる。また、この砂礫層は、断層線を超えて東側まで分布しているとみられる。

第6図に、北側の測線の西半分の測定点のモデルを図示する。平野にある2点は周辺からの人工雑音のために、あまりデータの質がよかったとはいえないが、下層が低比抵抗になっていることが推定される。平野側の点は、南側の測線にみられた構造との類似がみられるようである。この平野側の構造は、東に進み断層線を過ぎ、断層崖を登っても大きな変化もなく続いている。平野側にみられる構造は地形上の主要な断層線のかかなり東側まで続いているようである。また、この図に示した測定点の範囲では、地表から低比抵抗な下層までの深さもおおむね一定で、系統的な変化があるとはいえない。

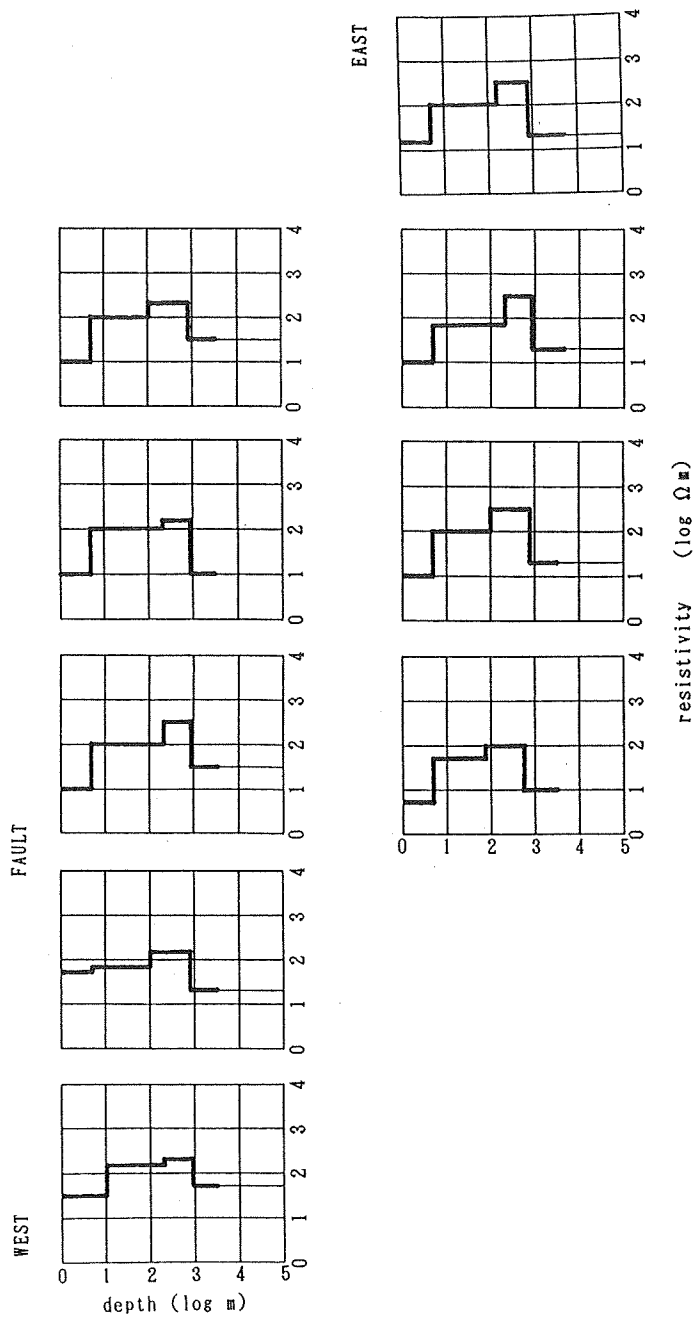
第7図に、北側の測線の東半分の測定点のモデルを図示する。北の分枝（上段）、南の分枝（下段）とも、図中の最も西側の測定点では、平野側にみられたのと同様の構造がみられる。各層の比抵抗の大きさと、下層までの深さも、平野側の構造と区別することはむずかしい。しかしながら東に進むにつれ、平野側でみられた低-高-低の構造がみられなくなる。すなわち、下層の比抵抗が大きくなるとともに、中間層の比抵抗が小さくなり、各層間の比抵抗の差異は小さくなっている。測線の東端付近の点では、低比抵抗な下層がみられなくなり、平野側の構造とは明らかに区別される。図中の東よりの測定点では、点によって推定される構造が様々であるが、おおまかにいって地表からほぼ一定の比抵抗が続く1層構造か、または地表付近がやや低比抵抗、その下がやや高比抵抗という2層構造かに区分されるものが多い。後者の場合、2つの層の比抵抗の対比は、それほど大きなものではない。いずれにしても、平野側でみられたような下層の低比抵抗は存在しない。北側の測線の東半分は南北2つの分枝によって構成されるが、双方に類似した構造の移り変わりがみられ、断層線に平行な構造の境界があるようである。ただし、その境界はそれほど明瞭なものとはいえない。

北側の測線の結果を、地形断面と比抵抗柱状図にまとめたものを第8図に示す。低-高-低のいわゆる平野側の構造はかなり広い範囲でみられ、主要な地形上の断層線（足柄平野の東端）から東側に1 kmほどのところまで続いている。そこから、数100 mほどで平野側の構造はあいまいになり、低比抵抗の下層を持たないいわゆる丘陵側の構造となる。

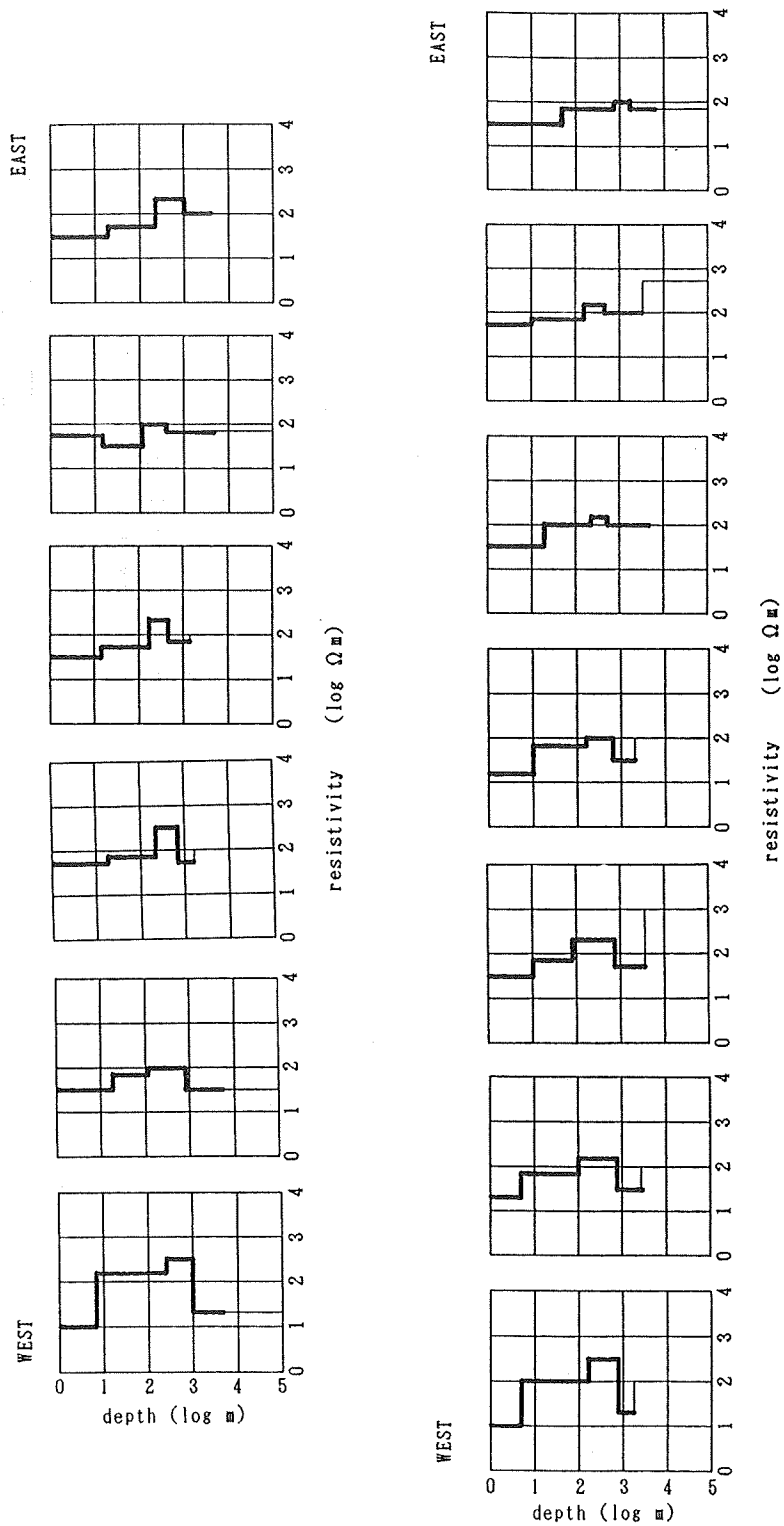
4. 考察

今回の調査では、南側、北側の2つの測線で国府津・松田断層を切り、その比抵抗構造の断面を調査している。どちらの測線の場合も、平野側と主要な断層線から丘陵側1 km程の範囲は、地表から低比抵抗-高比抵抗-低比抵抗の3層構造がみられる。

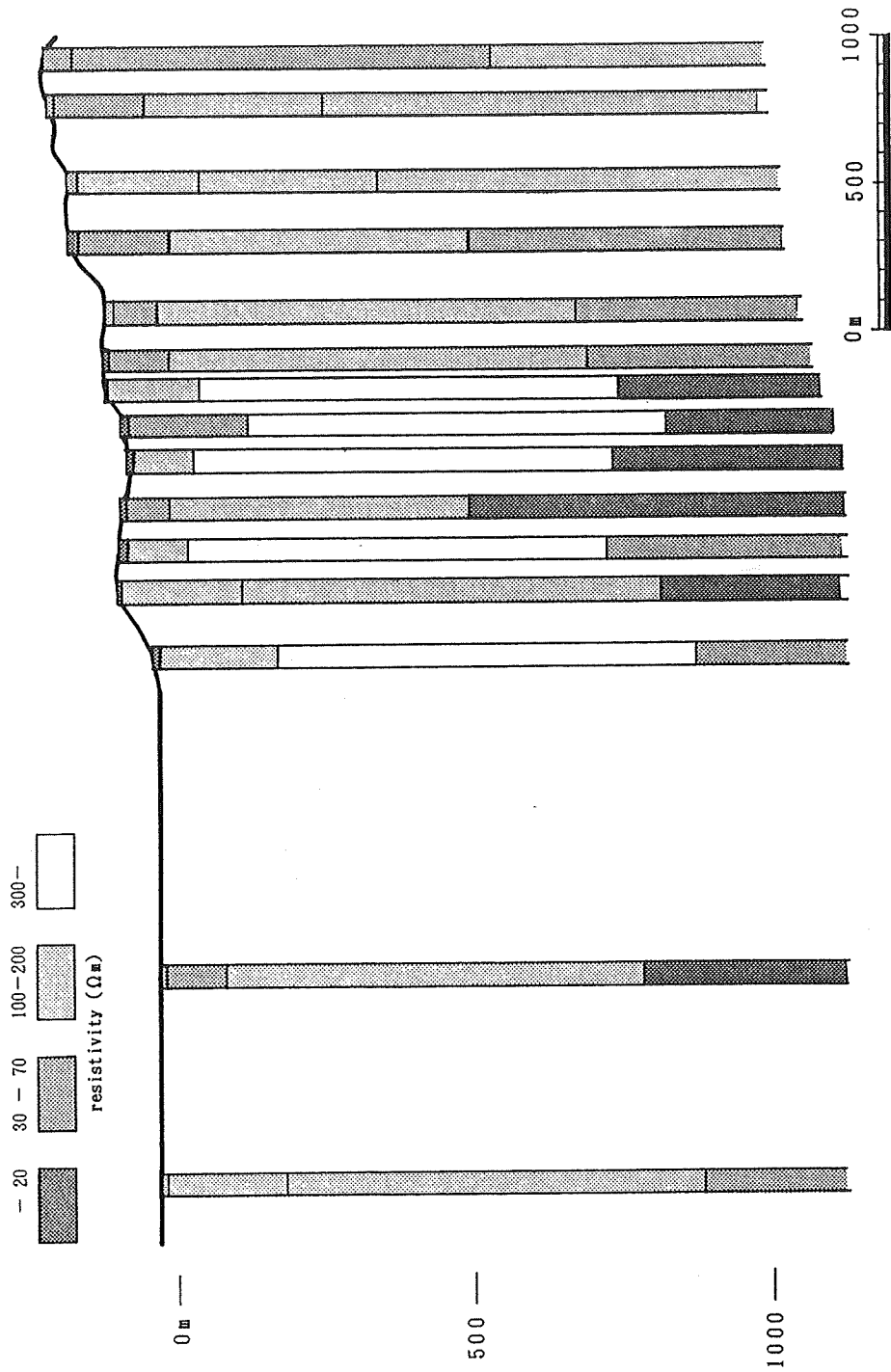
国府津・松田断層は足柄平野と大磯丘陵の境界をなす断層であり、地形的には断層線の東西で明瞭に区別される。しかし、断層線の両側の高度差が形成される以前には、どちらの側も同様の地質もしくは堆積環境にあったと考えられる。したがって、平野側と丘陵側が、基



第6図 北側の測線の西半分の、各測定点のモデル。



第7図 北側の測線の東半分の、各測定点のモデル。上段は北側の分枝の、
下段は南側の分枝のモデルを示した。



第8図. 北側の測線の地形断面と、各測定点の比抵抗構造の柱状図. 東半分については、南側の分枝の構造を示した。

本的に同様の地下構造をもっていたとしても、不自然ではない。そのように考えて、それぞれの比抵抗の層と、地質との対応を推定することにする。

3層構造に見られる高比抵抗な中間層については、足柄平野でのボーリングの結果⁵⁾から、河川の堆積物である砂礫層にあたと考えられる。また、大磯丘陵にも国府津礫層、曾我山礫層と呼ばれる砂礫層が存在し、対応する地層であるとみなされる。足柄平野でのボーリングは深さ500mまで行われたが、砂礫層の下の地層には到達しなかった。比抵抗モデルにもこの事実と矛盾しないような厚さの中間層がみられる。

低比抵抗な下層は、河川の堆積物に覆われる以前の、海中で堆積した層ではないかと思われる。足柄平野では、砂礫層の下にそのような地層があるかどうかはわからないが、大磯丘陵では、砂礫層の下位に海成シルト-砂層（前川層）がしばしばみられる。モデルにみられる砂礫層よりも比抵抗が低いという特徴も説明しえるので、下層がこのような海成層である可能性は高い。

河川による堆積層である砂礫層は、河川の氾濫原の高度に、平坦でほぼ水平に近い堆積面をもっていたと考えられるので、現在の砂礫層の上面の高度が、比抵抗構造モデルにみられるように平野側と丘陵側で200m以上の高度差をもつのは、なんらかの上下運動を考える必要がある。おそらく、その運動は、国府津・松田断層の断層運動なのであろう。ちなみに、前川層が堆積したのは現在から50万年前以前、国府津礫層、曾我山礫層が堆積したのは50万年前よりも新しい時代、国府津・松田断層の活動は30万年前以後と推定されている⁵⁾。

今回の調査の南側の測線付近の構造では、河川による堆積物であると考えられる中間層の厚さが、断層線から遠ざかるにつれて薄くなっている。しかも、中間層の厚さが、ある境界から急激に変化するのではなしに、次第に薄くなっていくということは、南側の測線付近での断層の活動にともなう地表の高度変化が、東上りの傾動であったことを推定させる。また、断層による食い違いとみられる構造はみられない。国府津・松田断層の地質調査でも、断層の南部では断層線よりも東側に軸を持つ南北走向の背斜が存在することが知られている。南側の測線が背斜軸の西側にあたとすれば、東上りの傾動が予想され、今回の調査結果と整合的である。このような背斜構造は、断層の南部から、南側の測線のある断層中部付近まで続いているようである。

北側の測線のうち西側の部分、すなわち平野側と断層線の東1km程度までの範囲は、南側の測線とほぼ同様の高-低-高の3層構造がみられる。この地域では、傾動を明瞭に示すものはない。むしろ、地形と下層の上面の形がよく対応していて、下層の起伏がそのまま地形に現れているようにみえる。これは、むしろ褶曲といったほうが適切であろう。下層の形に断層による食い違いがあるかどうかは定かではない。

北側の測線の東側の部分は、低比抵抗な下層、高比抵抗な中間層をもたない。これは、この地域が大磯丘陵というよりは、地質的には北側の丹沢山地に属する地域であり、国府津・松田断層の活動以前から陸であったため、他の地域にみられるような海成層も、砂礫層も持たないためではないかと思われる。北側の測線では、ある領域を境に西側には厚さ1kmを越える水成堆積層があり、東側にはそれがない。この結果は、高角度の断層の存在を示唆しているのではないだろうか。

この構造の境界は、主要な断層線から1-1.5 kmほど丘陵側にみられ、地形上の断層線のうち東側の断層線の位置に対応している。東側の断層線は、国府津・松田断層の中部で西向きに曲がり、主要な断層線に合流するとの見方が一般的であるようだが、単純に延長すると小田原市曾我（第1図の断層線が不連続になっているあたり）の断層崖につながる。また、この断層崖は、前述の背斜軸にほぼ一致しており、この断層崖が東側の断層線、すなわち地下の比抵抗構造の境界の延長上にあるということは興味深い。国府津・松田断層の基盤の運動を反映しているのではなかろうか。

これまでの活断層の電磁気学的調査により、活断層の破碎帯が低比抵抗となっている例が数多く知られており、また、比抵抗の調査により断層の活動的な部分を推定するということが行われている。今回の国府津・松田断層の調査では、破碎帯に対応するとみられる低比抵抗な部分は、西側の断層線（平野と丘陵の境界）および東側の断層線（北側の測線の比抵抗構造の境界）付近とも発見されなかった。比抵抗がどの測定点でもあまり高くはないということを見ると、破碎帯の低比抵抗が周辺とあまり大きな比抵抗の対比がないために発見できなかったのかも知れないし、測定点の密度が不十分だったのかもしれない。しかしながら、これまでに述べてきた結果からは、低比抵抗な部分、すなわち破碎帯が、地表に露出していないということを経験的に考える必要があるだろう。足柄平野から大磯丘陵にかけての狭い範囲できわめて変位の大きい運動があったことから、国府津・松田断層が存在することは疑いえないが、それはあくまでも基盤の運動であって、地表付近の未固結な地層は、断層の運動によって地形の変形をひきおこしはするものの、明瞭な断層面や破碎帯を地表付近に形成しえないのかもしれない。これは、大磯丘陵の砂礫層、海成層に傾動や、褶曲がみられることから示唆される。このように考えると、地形にみられる主要な断層線（足柄平野と大磯丘陵の境界）は傾動によって生じた高低の低い側を河川の礫層が埋めて作った純粹に地形的なものであるとみなせる。したがって破碎帯をとまなう本当の意味での断層線とはいえないことになる。

この調査は科学技術振興調整費で実施された。

参考文献

- 1) 乗富一雄（研究代表者）、地球電磁気的手法による断層活動度の研究、1981。
- 2) 活断層研究会、日本の活断層、東京大学出版会、150-153、1980。
- 3) Goldstein, M.A., and D.W. Strangway, Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source, *Geophysics*, 40, 669-683, 1975。
- 4) 内田利弘、CSAMT法の基礎と適用、Conductivity Anomaly 研究会1989年論文集、1-17、1989。
- 5) 山崎晴雄・水野清秀・加藤完・下川浩一、断層の活動史に関する研究、マグニチュード7級の内陸地震の予知に関する研究第I期成果報告書、79-92、1991。