

地殻の低比抵抗層

東京大学地震研究所 行武 毅

1. まえがき

地殻内の電気抵抗分布を調べると、表層は水を含んだ堆積層などに覆われて、数10 mから場合によると数kmの深さまで抵抗の低いことが多い。最近、東北地方や中部地方などでの観測結果を見ると、表層の低比抵抗層の下には抵抗の高い層が続き、およそ15～20 kmの深さから再び低比抵抗層が現れる。この低比抵抗層の上面は、地震波速度のコンラッド不連続面と対応しているように見える。地震の発生状況を見ると、ほとんどが上部地殻で発生し、下部地殻で少いという事実がある。このような上部地殻と下部地殻との岩石力学的性質の違いは、上部地殻が高比抵抗で下部地殻が低比抵抗という電気的性質の相違と無関係ではないように思われる。我国では地殻の電気抵抗構造の研究はようやく緒に着いたところである。本報告では、世界各地でどのような構造が得られているか、下部地殻はどこでも抵抗が低いのかどうか、低比抵抗の原因として何が考えられているか、を概観し、我国の研究の現状に触れる。

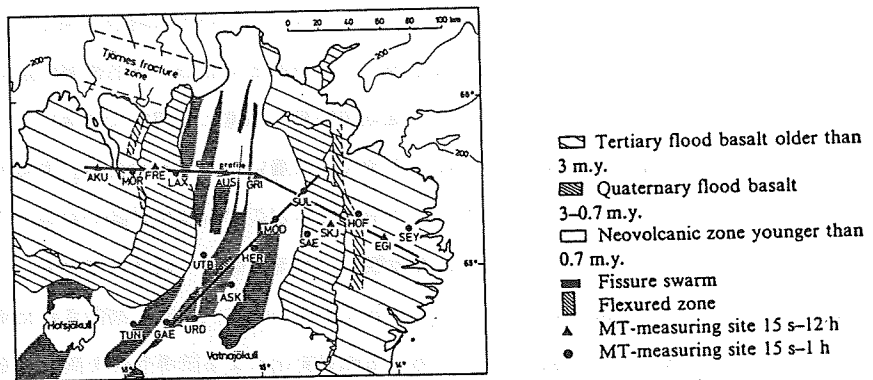
地殻の電気抵抗を調べるには、よく知られているように人工的に制御された電流を直接大地に流し込んで調べる人工電位法と、自然の電磁場変化による誘導効果を調べる電磁誘導法とがある。しかしいずれの場合も、電気抵抗分布が水平方向に不均質であると、その解析は容易ではない。例えば、観測点が高抵抗と低抵抗との境界近く、高抵抗側に位置していたとする。抵抗分布が深さだけに依存するとして解析すると、水平方向の低比抵抗帯の影響で、見かけ上ある深さに低比抵抗層が現れる。この点を厳しく批判したのが Porath^{1) 2)} である。1970年頃下部地殻の低比抵抗モデルがいくつか提唱されていたが、これらは表面の比抵抗不均質分布によって、堆積層内に集中的に流れる誘導電流の影響（一種の海峽効果）による見かけ上のものである、と強く主張した。

その後このような効果をも考慮に入れた2次元モデルや3次元モデルが採り上げられるようになった。それにもかかわらず地殻内部に低比抵抗層が存在するという報告が多い。以下には、地殻活動の活発な変動帯と、安定な大陸地域とに分けて、これまでに提唱された地殻構造モデルを検討してみる。

2. 変動帯における低比抵抗層

典型的なのは、よく例に出されるアイスランドの場合である。アイスランドの北東部で第1

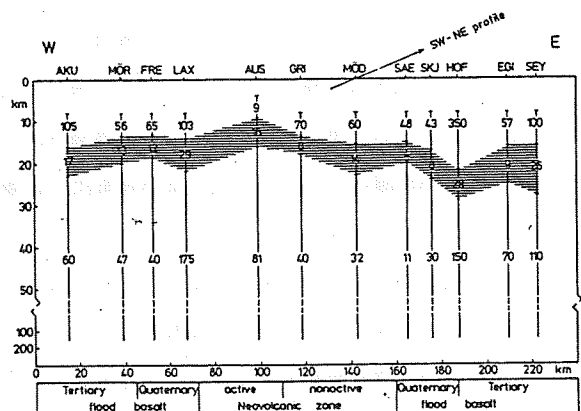
図に示す地溝帯および火山帯を横断する測線について Magnetotelluric 測定が行なわれた。³⁾ 火山帯に平行な電場成分と直交磁場成分とを用いて、電気抵抗が深さだけに依存するとして求めた、1次元解析の結果が第2図である。これをもとに差分法を用いて2次元構造を求めたのが第3図である。磁場または電場が構造に平行な場合の解析結果とモデル計算の結果とを、それぞれ周期30秒、100秒、300秒について示してある。構造に平行な磁場成分を用いた H-polarization の測定では、場所による見かけ比抵抗の違いが大きいが、これは表層における電気抵抗の不均質分布のためであると解釈される。これに対して、構造に平行な電場成分による E-polarization の測定では、表層の不均質さの影響が H-polarization の場合程顕著ではない。



第1図 アイスランド北東部における magnetotelluric 観測点分布と地質図。³⁾

第3図を見ると、アイスランドでは、地殻内に厚さ5~10kmで、比抵抗は15 ohm·mという抵抗層が存在するのがわかる。火山帯ではその表面が浅くなって、10kmの深さまで盛り上っている。その原因としてBeblo等は、この深さで温度が約1,000°Cに高まっていて、玄武岩が約10%ほど融けた部分溶融状態にあるためである、としている。

北米の Basin and Range では、電力線を利用して周期1.4分から20分の矩形波で最大300Aの電流を流して、地下の電気抵抗分布を求めている。⁴⁾

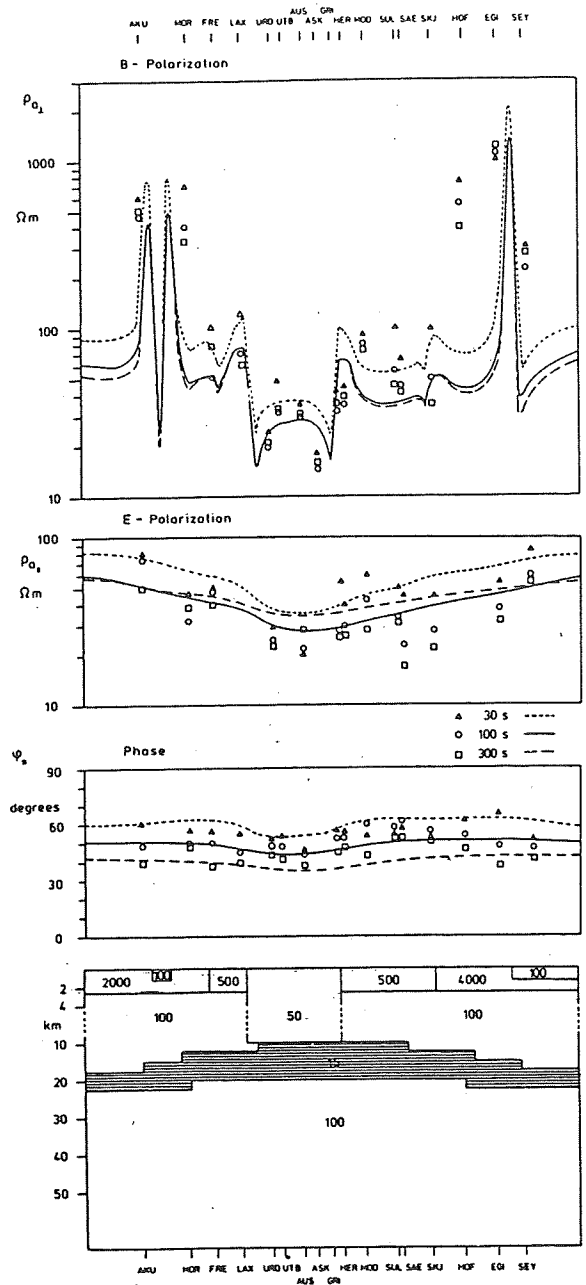


第2図 アイスランド北東部の東西測線上の magnetotelluric 1次元解析結果。数値は比抵抗値 (ohm·m)。³⁾

Gough-Reitzel 型磁力計30台を電力線に直交して配置して、磁場の測定を行なった結果、深さ約20kmに、1~5 ohm・mの低比抵抗層の存在が認められた。層の厚さは10km以上と推定されている。この地域は地殻熱流量が高く、 $1.5\sim 2.0 \times 10^{-6}$ cal/cm²・sの値が得られている。しかし深さ20~25kmでの温度は500~600℃と推定され、岩石が乾いた状態では5 ohm・mという低い抵抗値にはなり得ない。Lienert等は、恐らく部分熔融が起っているのであろうと考えている。またこの低比抵抗層は地殻内の低速度層とも関係しているのではないかと推察している。

Basin and Rangeの近くのRio Grande riftでは、最近Magnetotelluric法による詳しい調査が実施された。⁵⁾ 第4図が調査地域で、測点0および1での測定結果を第5図に示す。測定は0.03~1,700秒の周期範囲にわたっている。第4図の測点0~3の附近の比抵抗分布を、2次元構造を仮定して求めた結果が第6図である。深さ約10kmから、厚さ約15kmの比抵抗値10 ohm・mという低比抵抗層が存在すると考えられる。この地域も測定された地殻熱流量値は大きく、地下の温度は高くなっていると推定される。爆破地震の実験からは、地下にマグマ溜りの存在も予想されている。しかしJiraceckは低比抵抗層の原因を直接このマグマ溜りに求めず、不透水性のductile層が薄く下部地殻を覆い、水が下部地殻の空隙内に捕捉されて広く分布するためであるとしている。

この他、南アフリカの変動帯でも、人工電位法により深さ25kmに厚さ15km比抵抗10 ohm・mの低比抵抗層が見出されているが、⁶⁾ これについては次の項であわせて紹介する。



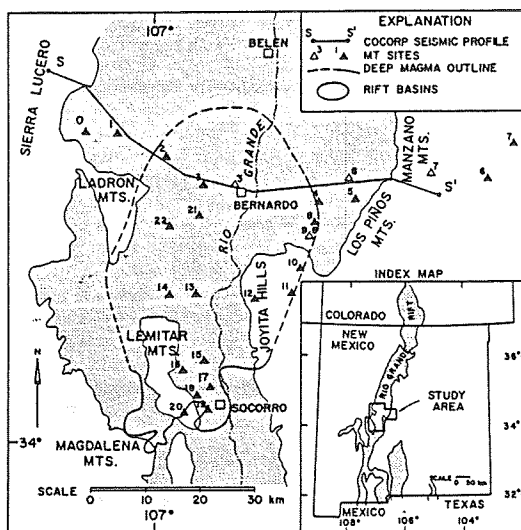
第3図 2次元モデルによるアイランド比抵抗分布東西断面図と、このモデルを用いて計算した周期30, 100, および300秒に対する見かけ比抵抗と位相差。2次元モデル中の数値は比抵抗値 (ohm・m) 3。

3. 安定大陸での低比抵抗層

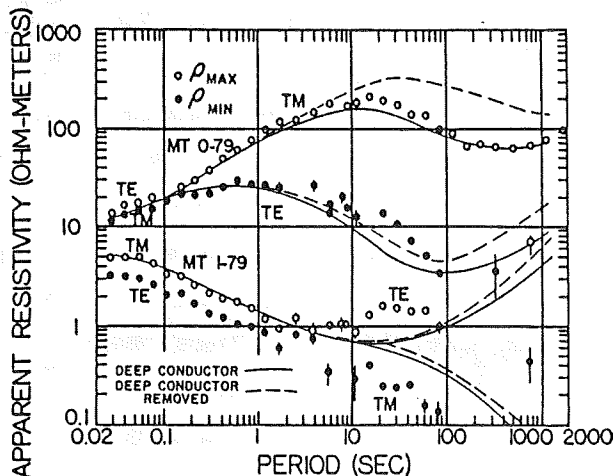
南アフリカでは、電力線などを利用して、人工電位法による地殻深部探査が実施された。6) Schlumberger 配置により電極間隔を最大 1,200 km まで拡げて垂直探査を行なっている。第 7 図が測定を行なった場所である。

Kaapvaal や Rhodesia は古い地殻で変成作用を受けていないが、中間の Limpopo 地域は何度も変成作用を受けた跡のある変動帯である。Kaapvaal 地塊と Limpopo 変動帯で得られた見かけ比抵抗 ρ_a と電極間隔の $\frac{1}{2}(AB/2)$ との関係を示したのが第 8 図である。この関係をもっともよく説明するモデルが第 9 図に示してある。実線が Kaapvaal Craton (C), 破線が Limpopo 変動帯に対する構造モデルである。いずれの場合も地殻内に低比抵抗層が存在する。

Limpopo 変動帯では、前節にも述べたように約 25 km の深さから約 15 km の厚さをもった 10 ohm·m の低比抵抗層の存在が推定されている。つまり下部地殻では比抵抗値が低く、その下のマントルでは抵抗値は再び高くなり、25 kilo·ohm·m となる。これに対して Kaapvaal Craton では、深さ約 35 km に 43 ohm·m の低比抵抗層が現れるが、これは地殻とマントル境界に

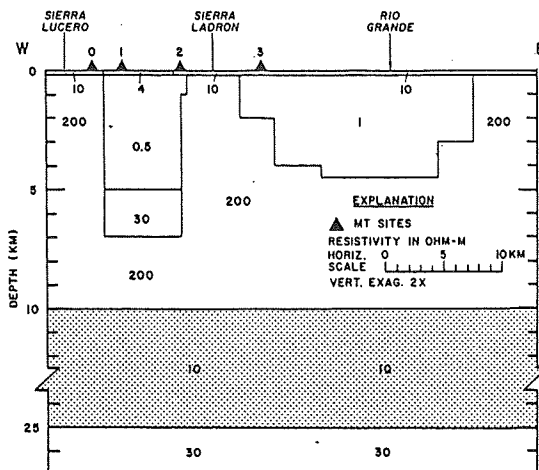


第 4 図 Rio Grande rift における magnetotelluric 観測点。5)



第 5 図 第 4 図の観測点 0 および 1 における magnetotelluric 観測結果。実線は第 6 図に示す 2 次元モデルにより計算した見かけ比抵抗。破線は低比抵抗層の代わりに 200 ohm·m の物質を置いた場合。5)

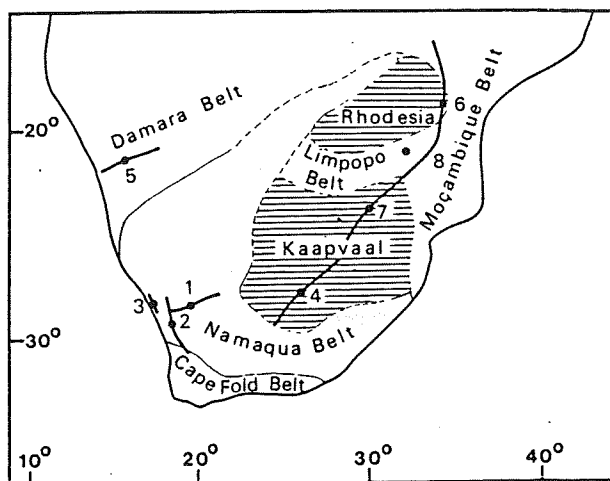
僅か5 kmの薄い層として存在すると解釈されている。これらの地域での地殻熱流量は格別大きな値ではないので、地殻の岩石が高温の状態にあるとは考えられず、下部地殻の低比抵抗は、地殻底部の水が何らかの形で関与していると推定されている。マントル岩石が水酸化されてできるserpentiniteがこの低比抵抗層を形成しているのではないかとVan Zijlは推測している。



第6図 Magnetotelluric 2次元モデル。⁵⁾

南アフリカではこのほかにも興味ある構造が見出されている。それは低比抵抗帯と地磁気異常帯の共存である。地磁気深部探査が実施された結果、Southern Cape Conductive Belt と呼ばれる東西に延びる低比抵抗帯が発見された。^{7) 8)}

第10図は地磁気3成分変化(X, Y, Z)をフーリエ解析して、周期48分に対する振幅と位相(単位は分)を示したものである。低比抵抗帯に沿ってX成分の振幅が大きく、この帯を境にZ成分の位相が



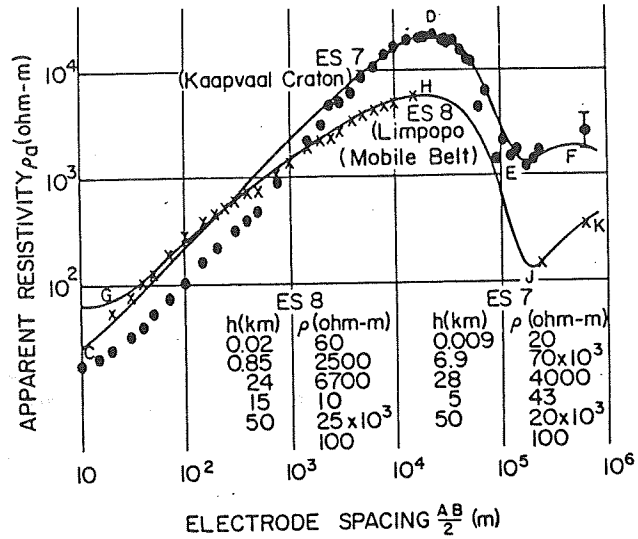
第7図 アフリカの Schlumberger 配置による垂直探査地域。⁶⁾

急変しているのがわかる。この低比抵抗帯の特徴は、この帯沿いに数百 nT に達する全磁力および鉛直成分異常(Beattie anomaly)が存在することである。第11図は低比抵抗帯と地磁気異常帯との関係を示したもので、十字印が磁気異常の極大の位置である。この磁気異常は、帯磁率 $7.1 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ の磁性物質がおよそ7~8 kmの深さから約24 kmの厚さで、第12図に示すように下部地殻に分布すると考えれば説明がつく。このような帯磁率をもつ岩石として考えら

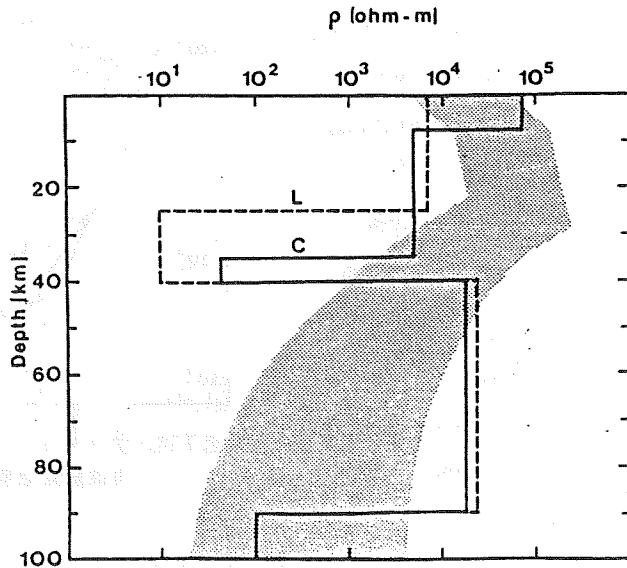
れるのは Serpentine で、玄武岩の一部が水和化作用でできたと推定される。この Serpentinization の過程でマグネタイトが折出するが、このマグネタイトが磁気異常の原因となると同時に、低比抵抗帯を形成していると考えられている。

下部地殻が低比抵抗層になっているのは、何も南アフリカ大陸に限ったことではない。北米大陸の盾状地域の周辺部やヨーロッパ、中国大陸などでも数多く見出されている。

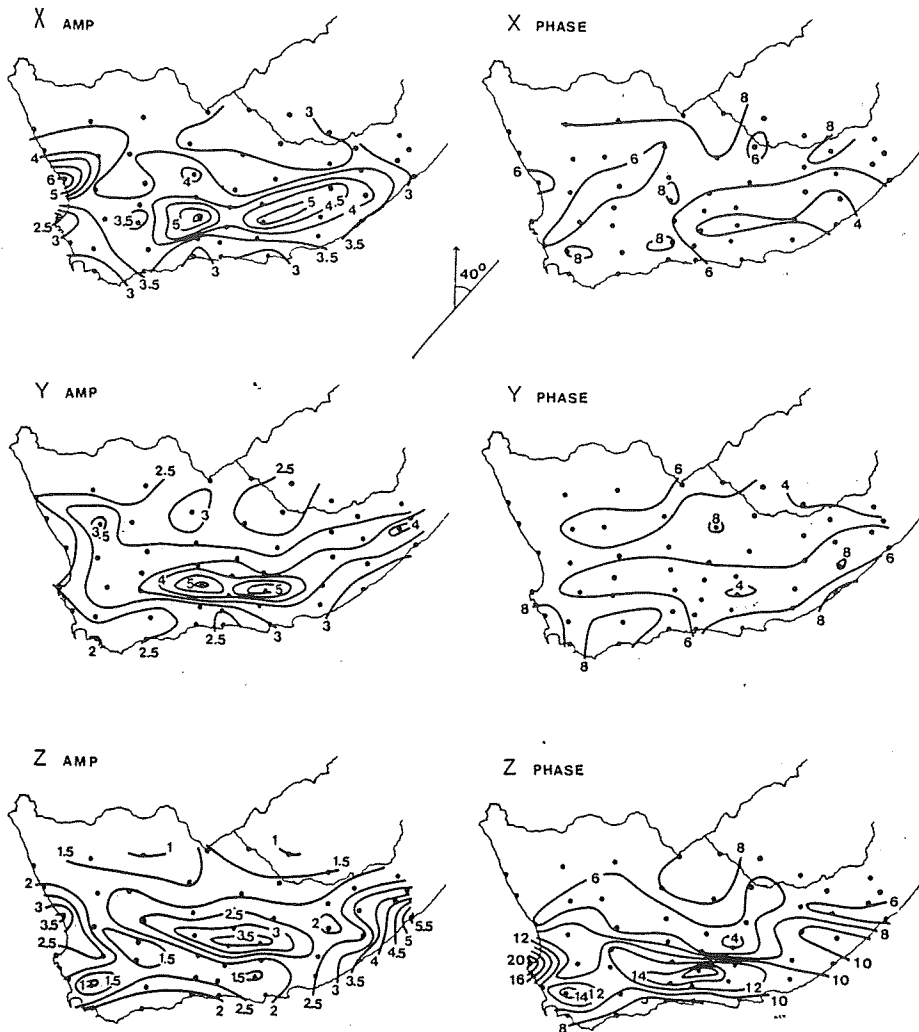
ニューヨーク州北部の Adirondack 地域は、先カンブリア紀の基盤が露出している盾状地域であるが、人工源および自然源の電磁変化を用いた探査が実施された。^{9) 10)} 人工源としては、直径 4.5 km の 1 回捲きのコイルに、65 A の 0.05 ~ 0.1 Hz の矩形波型をした電流を流している。自然源としては、周期 10 ~ 200 秒の磁場変化を用い、4 点での観測から磁場変化の空間勾配を求め、地磁気変化深部探査を行なった。自然源、人工源いずれの場合も深さ 20 km 位



第 8 図 Kaapvaal Craton と Limpopo 変動帯における見かけ比抵抗値と最適モデル。6)



第 9 図 Kaapvaal Craton (C) と Limpopo 変動帯 (L) の比抵抗構造。陰影は室内実験に基づく Brace の比抵抗モデル。6)



第10図 Southern Cape Conductive belt。周期48分に対するX, Y, Z成分の振幅と位相(単位は分)。7)

から35～40 kmにかけて、10～30 ohm・mの低比抵抗層が得られている。この地域で観測された地殻熱流量は著しく低いことから、下部地殻の温度が400℃以上になっているとは考え難く、Connerney等は低比抵抗層の原因としては、温度より水の存在を考慮しなければならない、としている。オリビンに富んだ岩石が水和化してserpentineが形成され、抵抗を低くしているという。

カナダ東部の先カンブリア紀盾状地域のGrenville Provinceで行われたmagnetotelluric観

測によると、地殻の中には10 kmの深さと、地殻底部とに低比抵抗層があり、地殻底部の比抵抗としては50 ohm·m以下という低い比抵抗が得られている。¹¹⁾ またEdwards等は、地磁気変化鉛直成分の振幅が海岸から内陸部にかけて減衰する割合から、

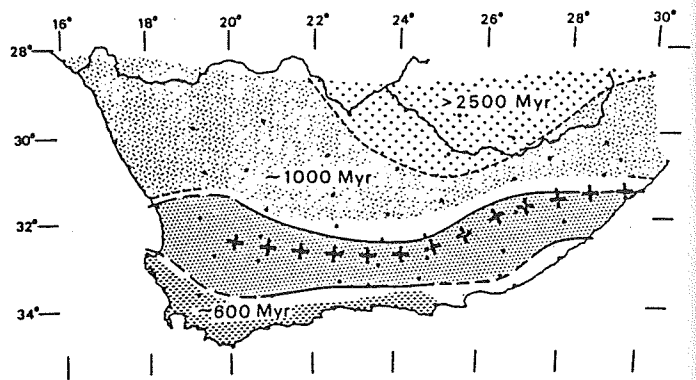
米国東部の Appalachia 山脈の下では下部地殻が低比抵抗層になっていると推定している。¹²⁾ 大陸下に沈降した海洋地殻が大量に水を含んでいるのが原因ではないかと考えられている。

一方地中海から死海に至るイスラエル内での magnetotelluric 観測の結果も下部地殻に低比抵抗層の存在を示している。¹³⁾ 第13図に示すように $10^{-3} \sim 25$ Hzの周波数帯について測定を行ない、およそ23 kmの深さに1 ohm·mという低い比抵抗層が求められている。5か所の観測点ではいずれも21~24 kmの深さから低比抵抗層が始まっている(第14図)。

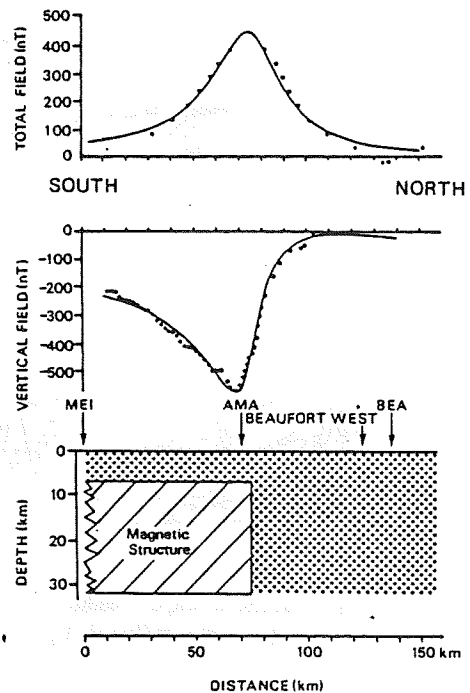
4. その他の低比抵抗帯

その他変成帯や地溝帯でも低比抵抗帯が見ついている。中でも規模が大きいのは北米大陸中西部のカナダから米国にかけて連なる低比抵抗帯である。Gough-Reitzel型磁力計の群列観測によって得られた。第15図の陰影を施した部分がそれで、延長1,800 kmに及ぶ。^{14) 15)} 比抵抗値や深さは求まっていな

いが、Proterozoic plateの境界の褶曲軸や断層系と一致しており、多量のグラファイトが見出されることから、低比抵抗の原因は、過去のプレート境界沿いの破砕帯に含まれるグラファ

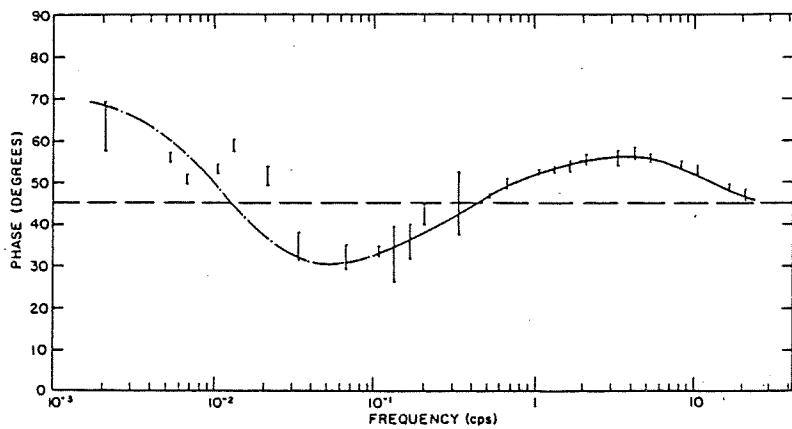
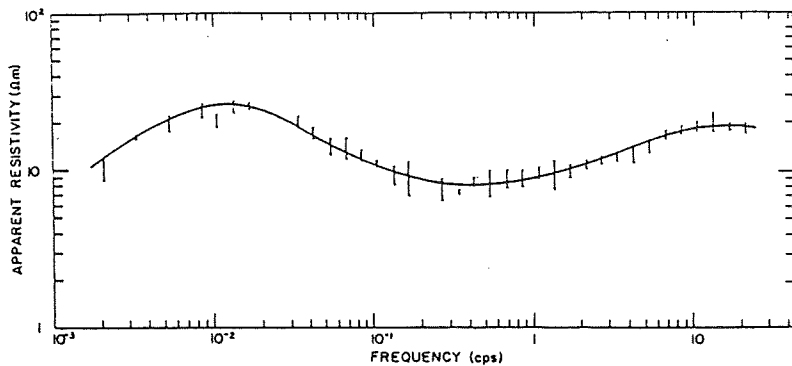


第11図 Southern Cape Conductive beltと Beattie 磁気異常。
十字印は磁気異常の極大点。7)

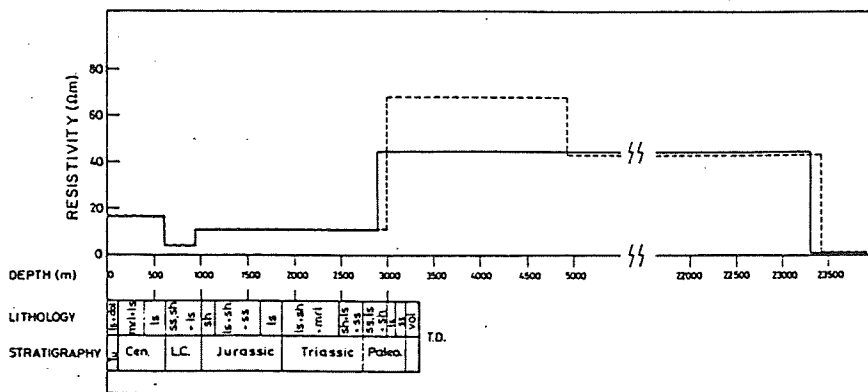


第12図 Beattie 磁気異常の全磁力および鉛直成分断面と地下構造モデル。帯磁の強さは 7.1×10^{-3} emu/cm²。8)

ZOHAR MAGNETOTELLURIC SITE



ZOHAR MAGNETOTELLURIC SITE



第13図 イスラエルの Zohar における magnetotelluric 観測結果と比抵抗モデル。¹³⁾

イトであろう、と考えられている。

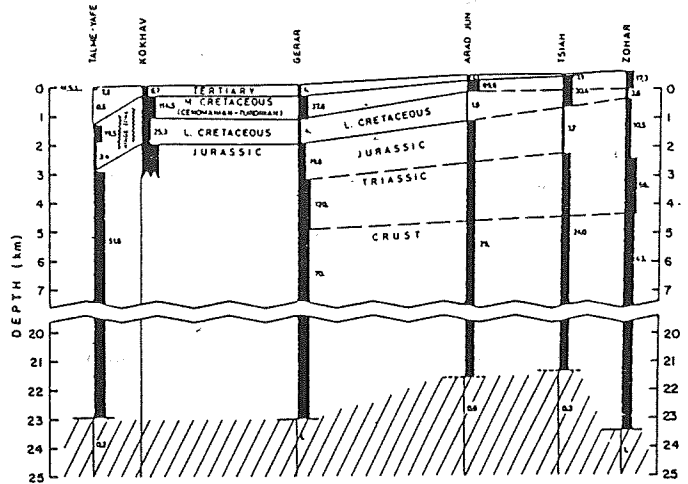
またテキサス州の Ouachita 構造帯を横断して行なわれた magnetotelluric 観測では、 10^{-4} ~10 Hz の周波数帯の測定が行なわれ、10~30 km の深さに 20~60 ohm·m の低比抵抗層が求まっている。¹⁶⁾

フランクフルト地方の Rhenish Massif およびその周辺地域において magnetotelluric 観測が行なわれた。¹⁷⁾

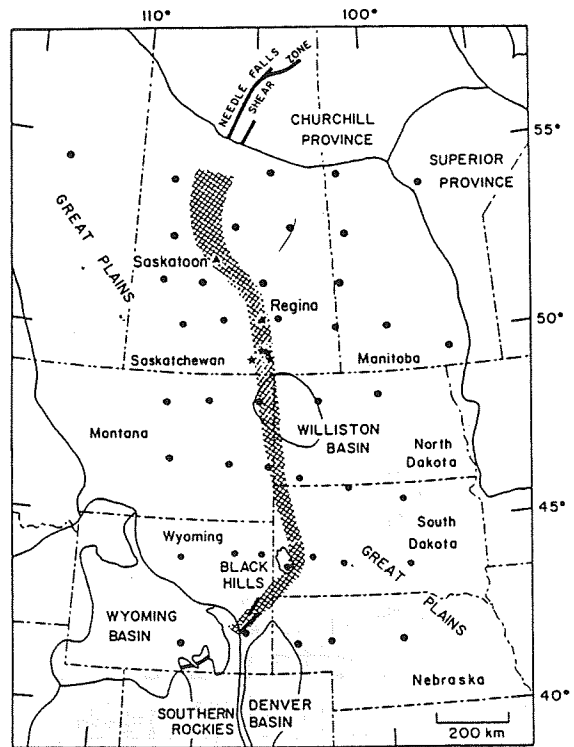
周期 5~3,000 秒の変化を観測し、2次元モデルを用いて解析した結果、深さ15~30 km にかけて厚さが5~10 km の低比抵抗層 (6~40 ohm·m) が求められた。この地域の地殻熱流量は特に高いということではなく、15~20 km の深さに存在するとされているグラファイトが低比抵抗の原因であろうと考えられている。

5. 地殻の低比抵抗層

上に述べた地殻の低比抵抗層を、その現れる深さ、厚さ、比抵抗値、観測方法などについて表にしたのが第1表である。比抵抗値としては 1 ohm·m という低い見積りもあ



第14図 イスラエルの比抵抗構造モデル。¹³⁾



第15図 北米大陸中西部の低比抵抗帯。¹⁴⁾

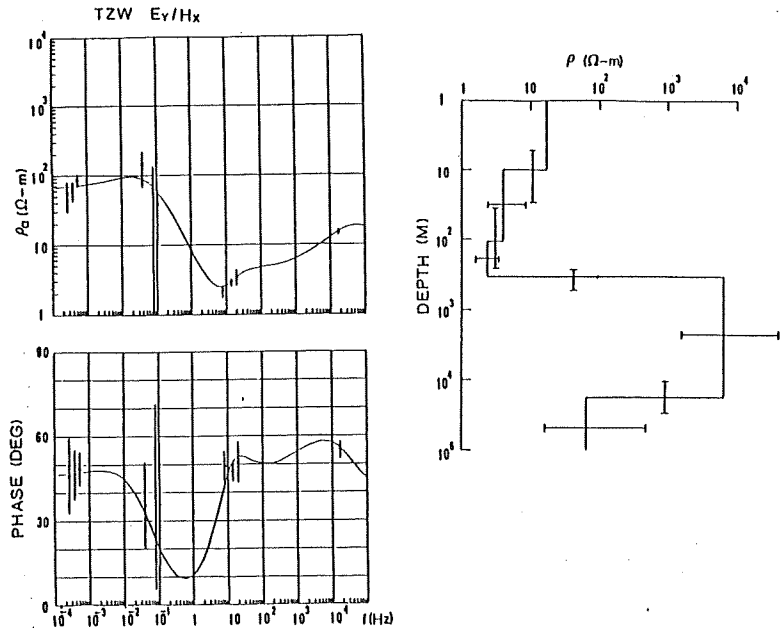
るが、概して10~20 ohm·mの範囲のものが多い。アイスランドのような火山地帯では、低比抵抗層は浅くて薄い、大部分は深さ15~20kmより下の下部地殻が低比抵抗になっている。

低比抵抗をもたらす原因として考えられているのは、(1)温度、(2)水、(3)低比抵抗鉱物である。変動帯や火山帯では、地殻が高温で岩石が部分溶融しているためとする考え方が多い。古い大陸の地殻となると、ほとんどはその原因を水に求めている。しかしながら比抵抗を減少させているのは自然水の形でなのか、結晶としてなのかとなるとはっきりしない。水の多い環境下で、ペリドタイトなどがserpentine化すると、マグネタイトを析出することが多く、低比抵抗の原因になっているとする考えがある。これは低比抵抗層に伴って見出されることの多い地磁気異常の存在をも同時に説明し得る考えで、極めて示唆に富んでいる。

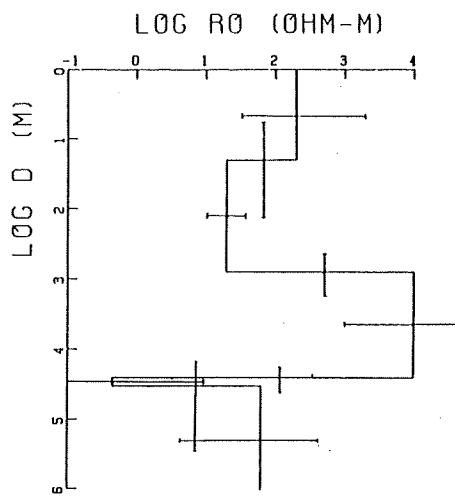
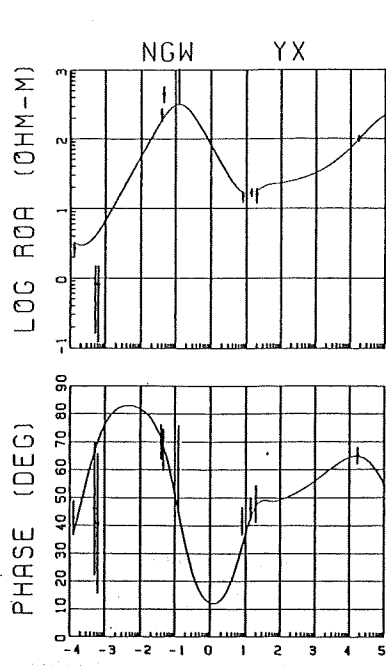
6. 日本における低比抵抗層

日本における地殻の比抵抗構造の研究は、1981年以来、地殻比抵抗研究グループによって強力に進められてきた。1981年には東北地方、1982年には東海・甲信越地方、1983年には北海道東部で共同観測を実施し、地磁気地電位差変化の同時観測を行なった。第16図(a)(b)(c)は、それぞれ東北地方新庄盆地、中部地方乗鞍に近い奈川、北海道屈斜路湖付近の川湯でのmag-

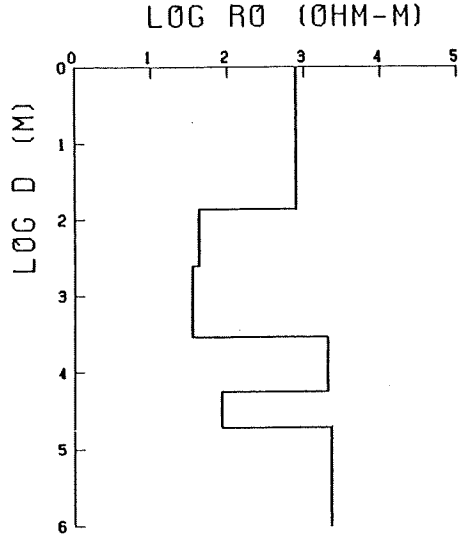
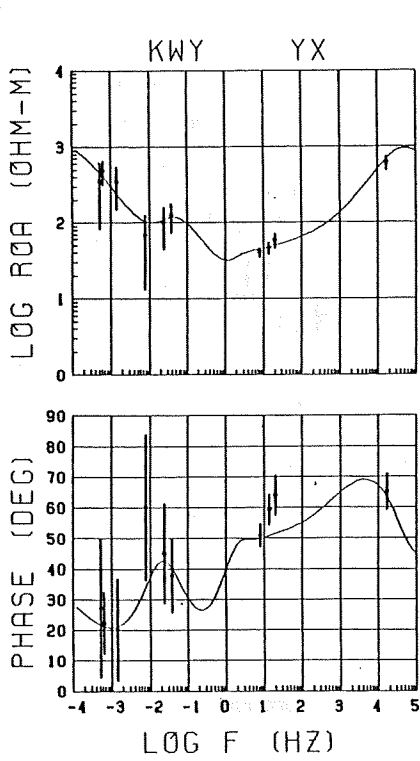
netotelluric 観測結果である。いずれも18~20 kmの深さに低比抵抗層が現れる。比抵抗値は数10 ohm·mである。これに対して地磁気変化変換関数の解析からは、東北地方では火山前線より日本海側の下部地殻が5 ohm·mという低比抵抗であるという結果が



第16図 日本における magnetotelluric 観測結果
(a) 新庄盆地戸沢 (TZW)



第16図 日本における magnetotelluric 観測結果。 (b) 中部地方奈川 (NGW)



第16図 日本における magnetotelluric 観測結果。 (c) 屈斜路湖川湯 (KUY)

得られた。比抵抗値については、今後さらに詳しい検討が必要である。

東北地方、中部地方、北海道地方、いずれにおいても約20kmの深さに低比抵抗層が現れるということは、この三者に共通にその低比抵抗の原因を求めたくなる。温度や水がその原因として考えられるが、少なくとも東北地方を除いて温度が原因とは考え難い。高い地殻熱流量の観測されている東北地方においても、下部地殻の温度は500~1,000℃と推定されており、もし岩石が乾燥した状態にあるとすると、上に求められた低比抵抗値を温度で説明することは困難である。

下部地殻の比抵抗の問題を考える上で、さらに考慮すべき事実がある。それは地殻内での地震の起り方である。多くの地域で地殻内の地震は、大部分が上部地殻で発生し、下部地殻で発生する地震は少ない。特に東北地方ではこの傾向がはっきりしている。岩石の力学的性質が地殻内で脆性から延性へ変化していると考えられる。このような下部地殻の力学的性質も下部地殻の低比抵抗と共通の原因から出ている可能性が強い。

6. 結 び

最近世界各地で地殻内の低比抵抗層の存在が報告されるようになった。低比抵抗の原因をある場所では地殻内の温度分布に、ある場所では深部地下水に帰している。しかし下部地殻については不明なことが多い。地殻内では、上部地殻と下部地殻とで地震の発生の仕方も異なっている。地殻の低比抵抗の原因を解明するには、岩石物性的、力学的、岩石学的、多方面からの究明が必要である。

第 1 表

	Depth (km)	Thick- ness(km)	ρ (ohm.m)	Method	Causes	Refer- ences
<u>1. Tectonic regions, mobile belts</u>						
Iceland	10-20	5	15(4-29)	MT	Partial melt	3)
Basin and Range	20	10 <	1-10	Cotrol Source EM	Partial melt	4)
Rio Grande Rift	< 10	15	10	MT	Pore fluids	5)
Northeast Japan	18	-	60	MT	-	
Northeast Japan	18	15	5	GDS	-	
Central Japan	25	-	60	MT	-	
Hokkaido	17	-	85	MT	-	
<u>2. Continents</u>						
South Africa	25-35	5-15	10-50	Schlum- berger	Hydration Serpentinite	6)
SCCB (Southern Cape Conductive Belt)	< 10	24	-	GDS	Hydration Serpentinite	7) 8)
East USA (Adirondacks)	22	6-12	10-25	Control source EM	Hydration Serpentine	9)
-	15-25	10-25	10-20	GDS	Same as above	10)
East Canada (Grenville)	24	11	20	MT	Hydration	11)
East USA (Virginia Piedmont)	10	30?	2-20	GDS	Hydration	12)
Israel	23	-	1	MT	-	13)
<u>3. Others</u>						
NACP (North American Central Plains)	-	-	-	GDS	Graphite	14)15)
Rhenish Massif	15-30	5-10	6-40	MT	Graphite	17)

参 考 文 献

- 1) H. Porath, A Review of the evidence on low-resistivity layers in the earth's crust, in the structure and physical Properties of the Earth's Crust, ed. by J.G. Heacock, AGU Geophys, Monogr. Ser., 14, 127-144, 1971.
- 2) H. Porath and A. Dziewonski, Crustal resistivity anomalies from geomagnetic deep-sounding studies, Rev. Geophys. Space Phys., 9, 891-915, 1971.
- 3) M. Beblo and A. Björnsson, A model of electrical resistivity beneath NE-Iceland, correlation with temperature, J. Geophys., 47, 184-190, 1980.
- 4) B. R. Lienert and D.J. Bennett, High electrical conductivities in the lower crust of the northwestern Basin and Range: An application of inverse theory to a controlled-source deep-magnetic-sounding experiment, in The Earth's Crust: Its Nature and Physical Properties, edited by J.G. Heacock, pp. 531-552, AGU, Washington DC, 1977.
- 5) G.R. Jiraceck, E.P. Gustafson, and P.S. Mitchell, Magnetotelluric results opposing magma origin of crustal conductors in the Rio Grande rift, Tectonophys., 94, 299-326, 1983.
- 6) J.S.V. Van Zijl, The relationship between the deep electrical resistivity structure and tectonic provinces in southern Africa. Part 1. Results obtained by Schlumberger soundings, Trans. Geol. Soc. S. Afr., 81, 129-142, 1978.
- 7) J.H. de Beer and D.I. Gough, Conductive structures in southernmost Africa: A magnetometer array study, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 63, 479-495, 1980.
- 8) J. H. de Beer, J.S.V. Van Zijl, and D. I. Gough, The Southern Cape conductive belt (South Africa): Its composition, origin and tectonic significance, Tectonophys., 83, 205-225, 1982.

- 9) J.E.P. Connerney, A. Nekut, and A.F. Kuches, Deep crustal electrical conductivity in the Adirondacks, *J. Geophys. Res.*, 85, 2603-2614, 1980.
- 10) J.E.P. Connerney and A.F. Kuckes, Gradient analysis of geomagnetic fluctuations in the Adirondacks, *J. Geophys. Res.*, 85, 2615-2624, 1980.
- 11) R.D. Kurtz, Magnetotelluric interpretation of crustal and mantle structure in the Grenville Province, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 70, 373-397, 1982.
- 12) R.N. Edwards and J. P. Greenhouse, Geomagnetic variations in the Eastern United States: Evidence for a highly conducting lower crust ? , *Science*, 188, 726-728, 1975.
- 13) Y. Shoham, A. Ginzburg, and F. Abramovici, Crustal structure in central Israel from the inversion of magnetotelluric data, *J. Geophys. Res.*, 83, 4431-4440, 1978.
- 14) A.O. Alabi, P.A. Camfield, and D.I. Gough, The North American Central Plains conductivity anomaly, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 43, 815-833, 1975.
- 15) P.A. Camfield and D.I. Gough, A possible Proterozoic plate boundary in North America, *Can. J. Earth Sci.*, 14, 1229-1238, 1977.
- 16) D.R. Word, H.W. Smith, and F.X. Bostick, Jr., crustal investigations by the magnetotelluric tensor impedance method, in *The Structure and Physical Properties of the Earth's Crust*, edited by J.G. Heacock, AGU, 14, 145-167, 1971.
- 17) H. Jödicke, J. Untiedt, W. Olgemann, L. Schulte, and V. Wagenitz, Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle beneath the Rhenish Massif, in *Plateau Uplift*, ed. by K. Fuchs et al., Springer-Verlag Berlin, 288-302, 1983.