

北米大陸太平洋岸の異常

東大地震研究所

笹井洋一

1. はじめに

1959年から62年にかけて Schumcker¹⁾ は合衆国の太平洋岸から内陸にかけて地磁気変化観測を行ない、Coast Effect と思われる Californian Coast Anomaly, 地下の良導層の凸凹によるらしい Texas Anomaly, そして良導体である堆積層の影響による Sierra Anomaly を見つけた。その後カナダの太平洋岸でも前2者と同様な性格の Coast Effect と Inland Anomaly が見つけられている。(Lambert and Caner²⁾) Lambert 等は更に Coast Effect は単純な海陸の σ (電気伝導度) のコントラストによるものではなく、大洋と大陸の下で良導層に落差があるためではないかという考えを提出している。

ところが最近スクリップス海洋研のグループが海洋底で地電位差と D の変化を測定し、Schumcker のプロファイルとつなげて、カリフォルニア沖では地殻のすぐ近くまで 10^{-12} emu 程度の導体層が顔を出している、というおどろくべき結果を発表した。(Filloux³⁾) 北米大陸の太平洋岸は、地震波速度、重力、地殻熱流量などもよく調べられている。それ等の情報から推定される地下構造に新たなチェックポイントとして、電気伝導度分布が加わったわけである。ここでは代表的なこの3つの論文の内容をまとめて紹介する。

2. Californian Coast Anomaly 及び Sierra Anomaly

Schumcker はカリフォルニア州の太平洋岸から内陸にむかって、4本のプロファイルによって地磁気変化の観測を行なった。第1図にその例を示す。この2つの Bay は北東の方向に水平成分が増えており、大体海岸線に直交する変化である。この時 ΔZ は沿岸部でかなり大きく(水平成分の約60%)、内陸へ行くに従って減少し、150~200km内陸ではほとんど消失している。又、その途中でかなり位相のずれる所(NAP, LIO)がある。Schumcker はこの前者の傾向を Californian Coast Anomaly, 又後者のシェラ・ネヴァダ山脈西側附近の局所的な異常を Sierra Anomaly と名づけた。水平成分に着目すると、沿岸部では内陸に比べて15~30%振幅が小さい。これは日本などとはかなり事情がことなっている。いくつかの短周期変化を見ると、その ΔZ は海岸線に直角な水平成分の変化とよく似ている。

このように水平成分も異なり、 ΔZ も位相がずれる異常の周期特性を表現するために、彼は Parkinson の方法を改良して第2図のように表わした。これは内陸の正常と思われる点での海岸線に直角な水平成分と、各点の ΔZ をフーリエ解析し、正常な水平成分と位相の合っている ΔZ の振幅をとり出して比べたものである。(Schmucker は $\frac{Z}{B_0} = Z_u(B) + iZ_v(B)$ という表現を使って、In-Phase Part Z_u を比較している。通常の Parkinson Vector では位相差を無視できる変化をとり出している。即ち $Z_v = 0$ とみなすことに相当せる。)

第3図はいろいろな周期に対する Z_u と Z_v を示すが、全体に Z_v は小さく (B_0 との位相差が小さく)、内陸に行くに従って Z_u も減少している。尚、短周期で NAP と COA に大きな Z_v が見られるのは Sierra Anomaly の影響である。

日変化ではどうだろうか。第4図に示された通り、沿岸の Z の振幅は内陸の2倍近くになっている。しかし日本のような位相のずれは見られない。又、期待された D や H の沿岸部での減衰も見られなかったと云う。

Schmucker は第5図に示したような2次元的なモデルについて、電磁感応の計算をおこなった。San Joaquin Valley の厚い堆積層は深さ 500 m の海に相当する σ を持つとし、シエラ・ネウエダ山脈は $\sigma = 0$ として、太平洋も含めて薄層導体で近似し、地下のある深さ h に完全導体の仮想的な "Core" を置いた。色々な周期に対し、実測の Z_u と Z_v に合うような h を決めてやる。当然 h は周期の函数となるが、周期 15 分に対し $h = 80$ Km、2 時間の時 $h = 250$ Km、と周期が長くなるにつれて Core も深くなっている。これはカリフォルニア地下の上部マントルでは深さと共に σ が増していることを示唆している。しかしすべての周期にわたって Z_u と Z_v を説明し得るような有限な σ による分布は求めていない。又もしこの Coast Effect を仮想的な Core のステップによるものとする、太平洋の下でその深さは 20 Km 以内、陸側では周期によって 80 ~ 250 Km 位でなければならない。勿論当時はまだ海底で地電位差や地磁気変化が測られていなかったのも、この点の解決は将来にもちこされた。なお Sierra Anomaly は第5図のように地表の堆積層と火成岩の σ のコントラストでよく説明できる。

3. Texas Anomaly

アリゾナ州の Tucson には地磁気観測所があって、以前から短周期の ΔZ が小さいことで知られていた。この傾向がどこまで続いているかを調べるため、Schmucker は Tucson

から東へプロファイルを伸ばしてみた。(第2図の一番南のグループの東方)第6図にその結果を示す。Tucson から約400Km東のLACとCORの間あたりから ΔZ が大きくなって、その傾向はテキサス州の方まで続いている。又LACにおいては ΔZ の位相がずれている。 ΔZ が小さいことは水平な導体層が浅い所まで来ていることを示しているので、 ΔZ が急にふえ、しかもその東方でも同じ傾向を示すLACとCORの間でこの水平層が大きく落ちこんでいると考えられる。又 ΔZ の形が ΔD とよく似ている点から、このステップは大体ロッキー山脈の東縁にそって南北にのびているものと思われる。 ΔZ の振幅はあまり大きくなく $\frac{\Delta Z}{\Delta D} \sim 0.2$ 程度で、日変化には差がみとめられない。

SchmuckerはCoast Anomalyの場合と同様に、フーリエ解析から $\frac{Z}{B}$ の比を求め第7図のようなモデルで実測と比べてみた。CORから東方とTucson附近では計算値と実測がよく合うが、LACを中心としたあたりでは、観測される ΔZ が大きく減衰している。このLACでの ΔZ の減衰とそこから100Km位しかはなれていないCORでの急激な ΔZ の増大を説明するには、LACのあたりの浅い所に幅100Km位で南北にのびた良導層をつけ加えればよい。このような層が実際に存在するのかどうか説明がないが、リオ・グランデ川流域の堆積層を考えているらしい。地下のCoreの深さはステップを境に西側で160Km、東側で320Km(周期1時間の変化に対して)と求められている。

4. カナダ西部の異常

Lambert等はカナダのブリティッシュ・コロンビア州太平洋岸で地磁気変化観測を行ない、Californian Coast Anomalyと同様に、海岸近くで ΔZ の増大を見つけた。彼等は ΔZ 増加の周期特性を調べるために、日変化やBayをフーリエ解析し、約250Km内陸の観測点(ABB)と比較した。第8図でTOFが海岸近くの観測点で、FRA, VIC, WESの順に80Km位の間隔で東の方にならんでいる。まず注目すべきはTOFにおいて全ての周期にわたって ΔZ が大きいことであろう。 ΔZ の増大は周期30分から1時間あたりで極大を示す。この周期では Z は D とよく似た変化を示し、 $\frac{\Delta Z}{\Delta D} \sim 0.5$ である。ところがこれより周期が短くなると、 ΔZ は北東—南西方向の変化と相関がよくなる。この近くの海岸線と大陸棚のへのり走向は、ほぼ北西—南東方向である。このことから、彼等は短周期($T < 20$ 分)の現象は海と陸の σ のコントラストによる単純なCoast Effectであり、周期30分～1時間の異常はほぼ南北に走る地下の良導層のステップによるものではないか、と推論した。日変化の周期になるとより内陸の観測点でも ΔZ が大きくなってくる。周期が長くなる程、 ΔZ

の大きい領域が内陸までひろがってくるのは Schmucker の観測とも一致する。

ところでこのプロフィールを更に東へのばしたロッキー山脈のあたりで、Texas Anomaly と同様な異常が Hyndman⁴⁾ によって発見されている。Schmucker の観測などを考えあわせると、この内陸の異常は大体ロッキー山脈にそって存在し、ここを境に東側では地下の良導層が大きく落ちこんでいるらしい。

Lambert 等はこれ等の沿岸部と内陸の異常から推定される北米大陸太平洋岸の電気的構造と地震波速度分布を統一的に解釈しようと試みた。合衆国からカナダにかけての太平洋岸ではモホ面直下の P 波速度が異常に遅いことが知られている。Herrin と Taggart⁵⁾ による Pn 速度の分布を見ると、大雑把にいてロッキー山脈を境に西側で 7.6 ~ 7.9 Km/S と非常におそく、東側では 8.0 Km/S 以上の正常な速さを示す。又太平洋の下でも正常な値にもどっている。そして Texas Anomaly と Hyndmann による Inland Anomaly はいずれも Pn 速度が 8.0 Km/S という正常な値にかわる漸移帯に位置している。一方 Dorman 等⁶⁾⁷⁾ によると上部マントルの低速度層の深さは大洋の下で 60 Km、大陸の下で 120 Km 位である。北米大陸太平洋岸では、この低速度層の上に Pn 速度が遅いマントルが乗っている(あるいはモホの下から低速度層が始まっているというべきか)ことになる。

そこで Lambert 等は第 9 図のような地震波速度と電気伝導度分との対応づけを行なった第 9(b) 図の右にある σ の値は Srivastava²⁾ 等によって Magneto-Tellurics から求められたものである。このようなモデルは定性的にはこの附近の地磁気変化異常を説明できる。しかし実際にこのモデルに東西方向の磁場度変化を与えた時、観測と一致する ΔZ が得られるであろうか。このような計算はなされていない。Schmucker のモデルとの大きな差のひとつは、内陸の異常を Pn 速度の異常と対応づけ、原因をかなり浅い所にもってきている点である。彼等は Pn 速度の遅い所は同じ深さの正常なマントルと比べて温度が高いことを示唆するとして、この部分の σ を少し大きくしているが、これは現在の段階では全くの仮定以外の何物でもない。もうひとつの相違点は海陸の境で良導層にステップをつけ、Coast Anomaly は主として上部マントルに原因があるとしたことである。しかしこの点も陸上での観測だけからでは断定できず、次にのべる Filloux 等の観測によってたしかめられたのである。

従って第 9(b) 図のモデルはあくまで予想にすぎないのであって観測から確立されたものではない。このような推定をたしかめるにはより密な観測点と周波数分析、いろいろなモデルによる数値実験が必要であろう。又もし Pn 速度の異常が高い温度によるものか、“もの”の違いによるのかといった議論に σ 分布がひとつのチェック・ポイントを提供し得るとしたら、その

分布は地震学からの情報とは一応独立に得られたものでなければならないし、この点で彼等の議論は逆であるかのような印象を受ける。

5. カリフォルニア沖の上部マントルの電気伝導度分布

スクリッブス海洋研のCoxを中心としたグループは海底で地電位差と地磁気D成分の連続観測に成功し、その結果がFillouxによってまとめられた。第10図に観測点の分布を示すが、陸上の点はSchmuckerのプロファイルのひとつで地磁気3成分を観測し、この同時時にGEO, ABL, EASにおいて海岸線と平行な地電位差変化を測った。1965年になってD成分磁力計が完成され、SFにおいて観測が行なわれた。そしてその数カ月前に、ほぼ同じ地点で2成分の地電位差観測を行なって、CAMを基準としてDと電場を比較してmagneto-Telluricsによって、前述の地電位差(海底) - 地磁気3成分(陸上)の同時観測から得られた結果を補足している。

Fillouxは磁気嵐にかさなっている短周期変化をスペクトル解析して、周期8時間から30分の成分をとり出しCAMの水平成分と比較している。先ず陸上の点ではZ成分が、海底では地電位差の海岸線と平行な成分(E_{\parallel})が、それぞれCAMの海岸線と直交方向の水平成分(H_n)ときわめて良い相関を持つことをたしかめ、この附近では海岸線と平行な方向にほぼ一様な、2次元的な σ 分布を持つであろうと推定した。そしてSchmuckerと同様に $\frac{E_{\parallel}}{H_n}$ $\frac{Z}{H_n}$ という振幅比、位相差のプロファイルに沿った分布を求め、2次元のモデルによってこの分布に合うような電気的地下構造を探した。

彼は第11図のように順次モデルを改良して計算を行なっている。外部誘導磁場としては、海岸線に直角方向に変化し、十分大きい波長を持っていて、考えている領域にはほとんどZ成分が0であるような定常波を考え(但し8時間成分だけは日変化によるものとして、この図で海の方に進む進行波を考える)、海や堆積層は薄層導体で近似し、緩和法で解を求めている。

先ず最初にType 1モデルによってSchmuckerのCoast Effectは海の影響のみによるものとする考えをチェックした。仮想的な完全導体のCoreの深さを陸上の $\frac{Z}{H_n}$ が説明できるよりにきめてやって、このCoreが同じ深さで海の下にも続いているとすると、計算された海での E_{\parallel} の大きさは観測値に比べてはるかに大きくなければならないし位相差もはっきりと異なっている。つまり実際にはCalifornian Coast Anomalyをそれだけで説明できるような強い電流が、海の中に流れていないのである。従って海の下ではもっと浅い所に良導体があって、そこに流れる電流が dZ の異常を生み出し、一方海電流を弱めたり位相をず

らしているにちがいない。

そこで彼は次の段階として Type 2 のモデルを考える。爆破地震から分っている平均的な海の堆積層の厚さを加え、その σ として同じく実測されている 8×10^{-12} emu を与え。陸上では Sierra Anemaly の原因である San Joaquin Valley の堆積層をつけ加えてやる。更に仮想的な Core の深さを第 11 図のように海の下では浅くしてやる。これによって観測と計算との一致はかなりよくなる。Core の深さやステップの位置は周期の函数で、周期が長くなるにつれ、Core は深くなり、ステップの位置は沖合にずれる。

表層からある深さまで $\sigma = 0$ でそこから完全導体の Core を考えるのは、上部マントル全体に流れている電流を Core 表層に流れる面電流におきかえることであるから、Core の深さは上部マントルの電流密度の一種の重心の位置を示すと考えられる。表皮効果から考えて周期が長い程 Core が深くなるのは少なくとも上部マントルの σ が一定か、深さと共に σ が増していると考えた方がよい。

Filloux はそこで Type 3 モデルとして上部マントルに有限な σ を与えてみた。先ず上部マントルの σ の見当をつけるために、表層の σ 分布はそのままにしておいてその下では無限遠まで 3×10^{-14} emu としてやる。そうすると陸地の Z は小さくなりすぎ、海の $E_{//}$ は大きくなりすぎて、この値は大陸の下での σ としては大きすぎ、海の下では小さすぎることを示している。次に大陸の下で 10^{-15} emu、岸から 120 Km 沖合から急に 10^{-14} emu になるとしてやると、 Z も $E_{//}$ も大きくなりすぎて、この値では海陸の下とも σ が小さすぎる。

実際の分布はある深さで突然 σ が ∞ になる Type 2 と無限遠まで有限の σ を持つ Type 3 との間であろう。即ち σ が深さと共に増し、しかもその増え方は海の下と陸の下では異なっているであろう。このような考えの下に Filloux は適当な分布として次のようなものを与えた。大陸と大陸棚の下では 20 Km の深さまで $\sigma = 0$ 、そこから $\frac{d\sigma}{dz} = 2.7 \times 10^{-15}$ emu/Km の割合で深さと共に σ が増えて行く。一方岸から 120 Km 沖合から先の海の下では、海底から 5 Km 下までが $\sigma = 0$ 、そこから $\frac{d\sigma}{dz} = 1.5 \times 10^{-13}$ emu/Km という急な σ の増加があるとする。

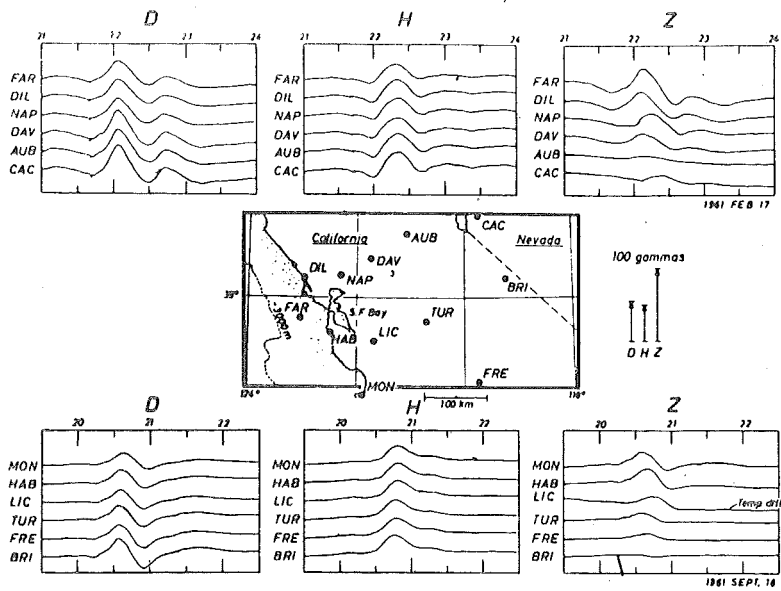
実際には、このモデルでも周期によってステップの位置を少し動かさなくてはならない。海と陸の下における σ のちがいはステップで表現される程極端ではないだろうから、大陸棚の所で海型から陸型へ除々にかわっているに違いない。Filloux が最終的に与えたカリフォルニア附近の σ 分布は第 12 図のようなものである。このモデルによる計算は行っていないが、観測点が少ないから止むを得ない。大陸の下においては 400 Km の深さを見ると 10^{-12} emu 程度で従来得られている地球内部の平均的な σ 分布と大体一致しているが、海の下で見られる σ

の急増は、おどろくべきものである。

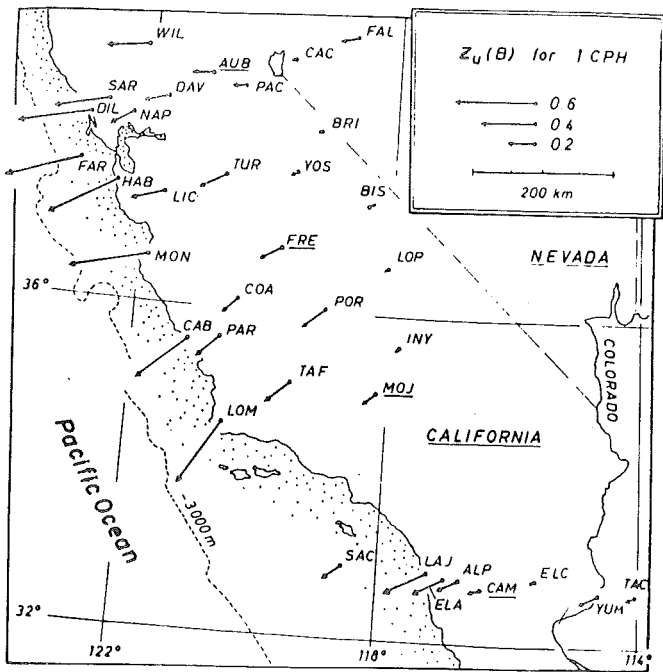
第10図のSFにおいてはD成分と地電位差が観測された。比較的岸に近いGEO等の地電位差観測から得られた海底下での σ の急増を確かめるため、FillouxはSFでのDとEを使ってMagne-to-Telluriosを行なっている。同時観測でないため、SFでのDとEをCAMのDと比較して間接的にSFにおけるDとEの振幅比と位相差を求めている。これ等の手続きや、平面波の仮定を使っていることなど、いろいろ問題はあるが、一応彼の求めた結果によると、海底から25Kmまで $\sigma=0$ でそこから 4×10^{-12} emuの層が存在することになる。いずれにしても岸から約750Kmはなれた沖合でも海底の下数10Kmの所から 10^{-12} emu程度の良導層があることはたしからしい。

以上簡単に北米大陸太平洋岸での σ 分布を求める試みを紹介してきた。現在の段階では、他の地球物理的な情報と直接対応づけて考察するにはまだ不十分であろう。Lambert等が主張するように内陸の異常は P_u 速度異常と関係があるのかもしれない。又Fillouxによって示された海底のモホ面のすぐ近くで 10^{-12} emuという σ の値は、従来の常識をくつがえすものである。本シンポジウムで渡部によって報告されているように、カリフォルニア沖で地殻熱流量から推定される温度分布によれば、上部マントルにありそよな岩石では、その温度でとうていこの大きな σ は期待できない。しかしこの種の議論は現在の筆者の手に余るのでさしひかえる。

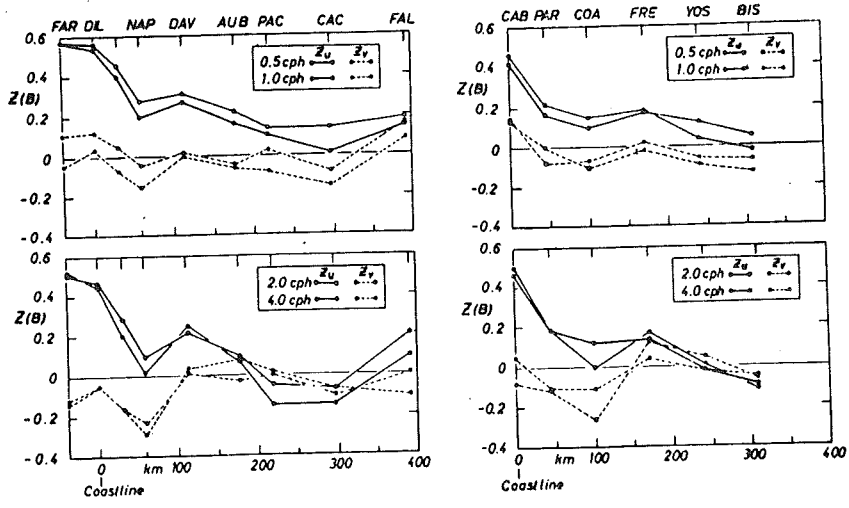
- 1) Schmucker, U., "Anomalies of Geomagnetic Variations in the Southwestern United States", J.G.G., 15, p.193, 1964.
- 2) Lambert, A. and B. Caner, "Geomagnetic 'Depth-Sounding' and the Coast Effect in the western Canada", Can. J. Earth Sci., 2, p.485, 1965.
- 3) Filloux, J. H., "Oceanic Electric Currents, Geomagnetic Variations and the Deep Conductivity Structure of the Ocean-Continent Transition of Central California", Thesis for Ph. D., University of California, San Diego, 1967.
- 4) Hyndman, R. D., "Electrical Conductivity Inhomogeneities in the Earth's Upper Mantle", Unpublished Thesis, University of British Columbia, 1963.
- 5) Herrin, E. and J. Taggart, "Regional Variations in Pn Velocity and their Effect on the Location of Epicenters", Bull. Seismol. Soc. Am., 52, p1037, 1962.
- 6) Dorman, J., M. Ewing and J. Oliver, "Study of Shear-Velocity Distribution in the Upper Mantle by Mantle Rayleigh Waves", Bull. Seismol. Soc. Am., 50, p.167, 1960.
- 7) Brune, J. and J. Dorman, "Seismic Waves and Earth Structure in the Canadian Shield", Bull. Seismol. Soc. Am., 53, p.167, 1963.
- 8) Srivastava, S.P. and J. A. Jacobs, "Determination of the Resistivity Distribution at Meanook, Alberta, Canada, by the Magnetotelluric Method", J.G.G., 15, p.280, 1964.



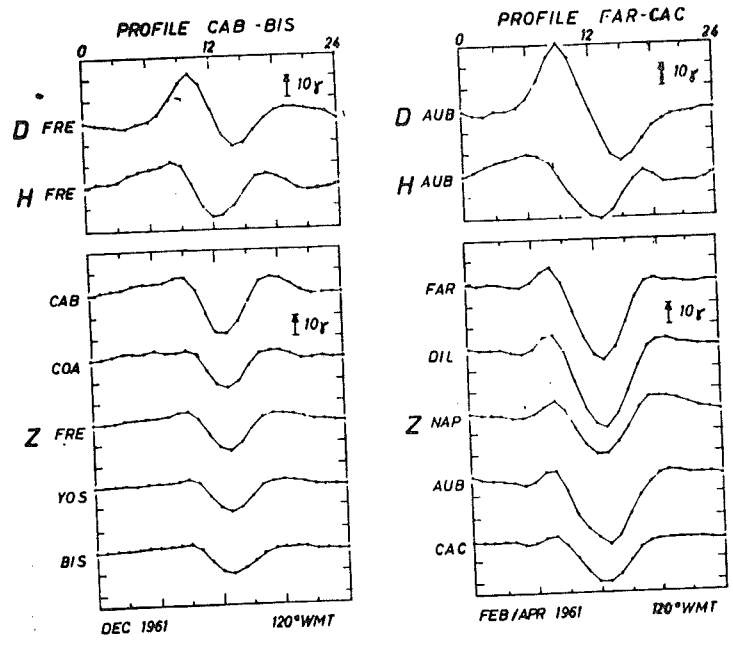
第 1 图



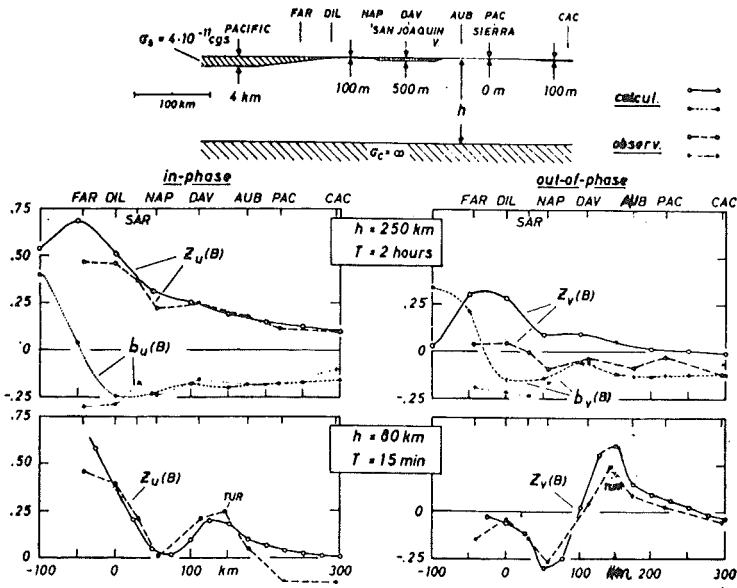
第 2 图



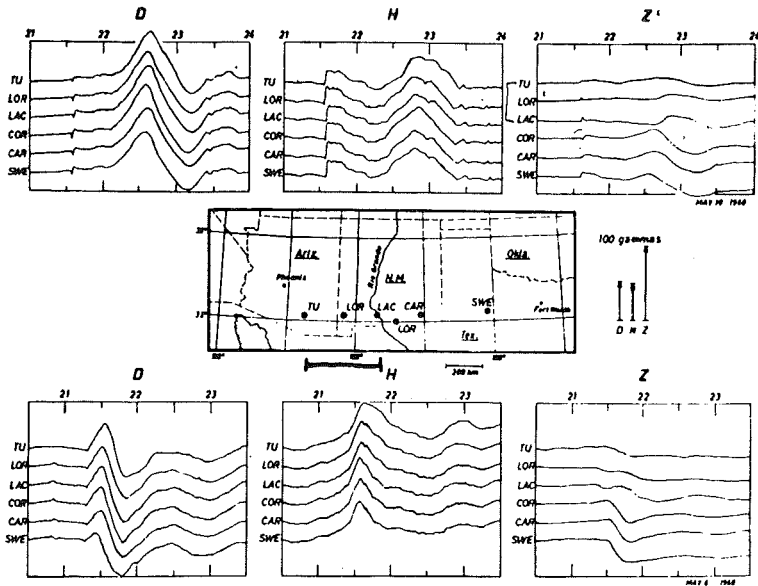
第 3 图



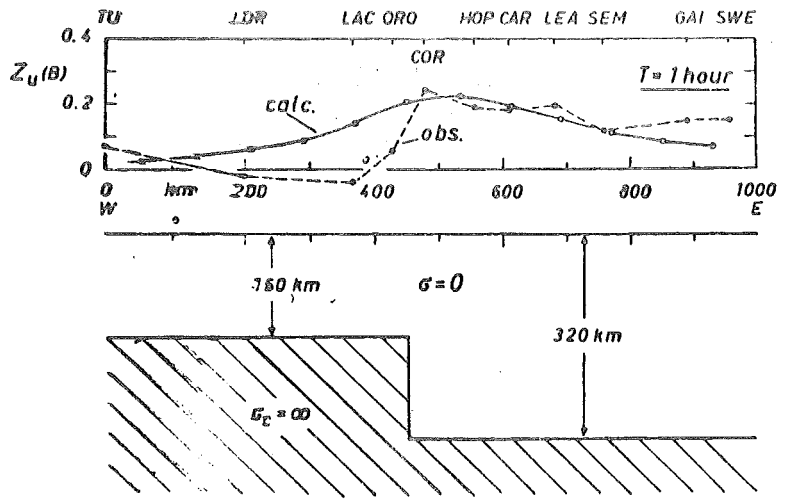
第 4 图



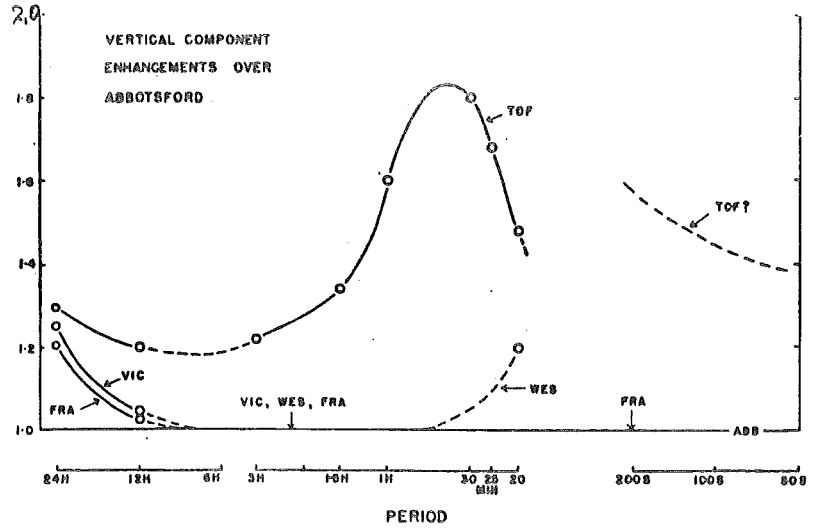
第 5 图



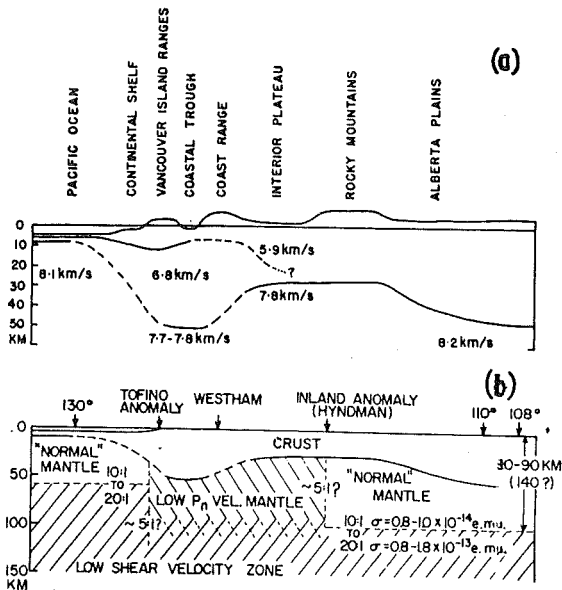
第 6 图



第 7 图

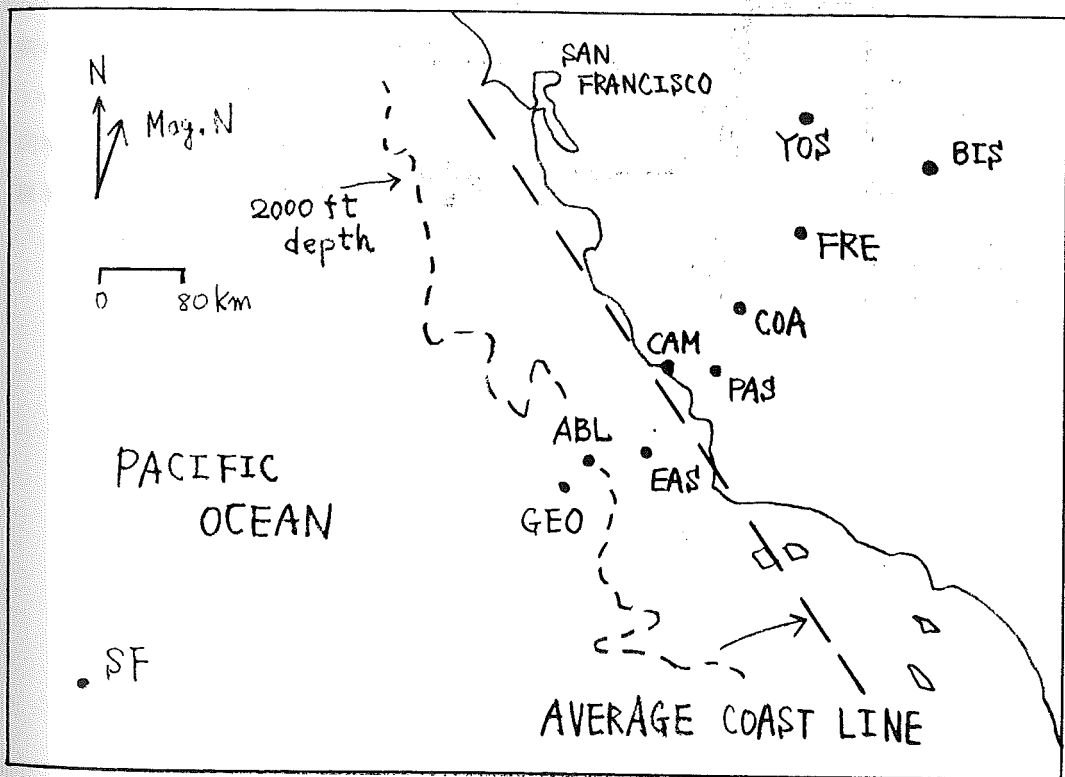


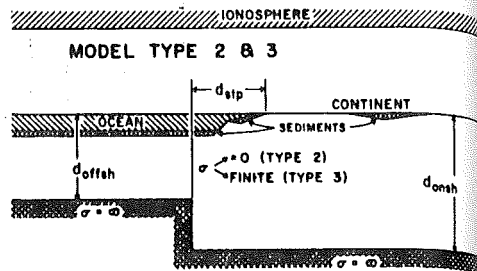
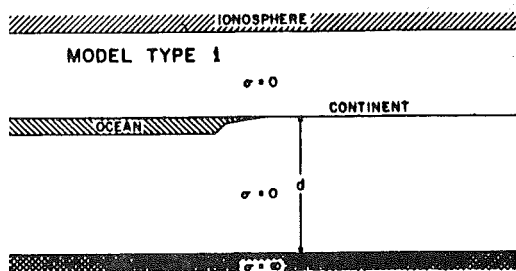
第 8 图



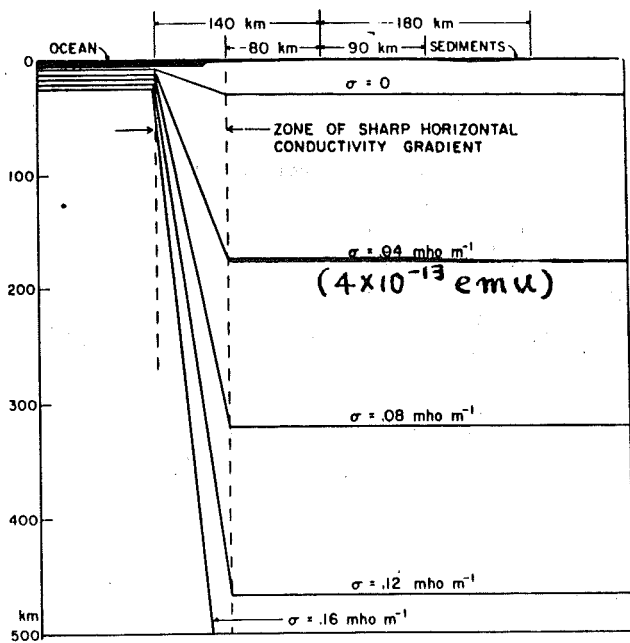
第 9 图

第 10 图





第 1 1 图



第 1 2 图