

ジオトモグラフィ：物理探査の新しい道具 —中国における研究から—

馮 銳¹⁾・周海南¹⁾・郝錦綺¹⁾(訳：宮崎光旗²⁾・村上 裕²⁾)

(訳注)トモグラフィ技術は医療において欠くべからざる技術となっている。地球科学分野においても地球内部のマントルトモグラフィから海洋トモグラフィ、そして資源開発・土木建設におけるジオトモグラフィとして発展の経緯をたどっている。本文は中国におけるジオトモグラフィ研究の一端を紹介するものである。なお、日本語訳にあたってはなるべく原文の意に沿うことを基本とした。

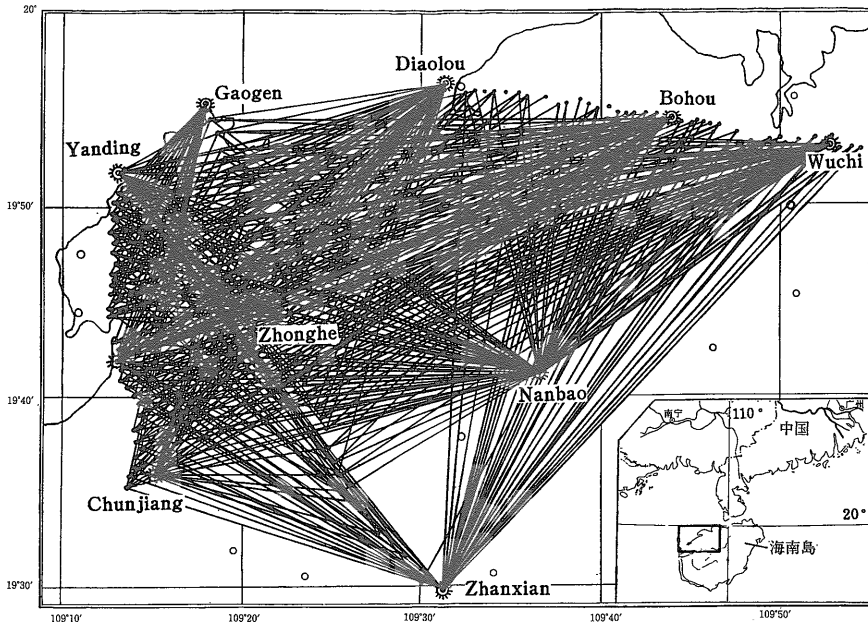
国語で層析(技術)と訳されている。これは tomogram が特別なインバージョン処理により得られる二次元的な、あるいは断面のイメージであることを意味している。この特別なデータ処理はイメージの再構成(画像重建)と呼ばれている。1984年以来、ジオトモグラフィに関する一連の研究が中国において行われている。ここでは、応用も含めたいくつかの例を紹介する。

1. はじめに

ジオトモグラフィは物理探査における新しい有用な道具であり、物理探査技術の新時代の到来を示している。技術用語としての TOMOGRAPHY は中

2. 結晶質基盤の弾性波速度分布

中国南部の海南島(Hainan Island)での急速な地域開発に伴い、同島の結晶質基盤までの断層帯分布とテクトニクスを明瞭に同定することが重要となっ



第1図 南海島(Hainan Island)におけるファンシューティング観測の震源・観測点を結ぶ経路

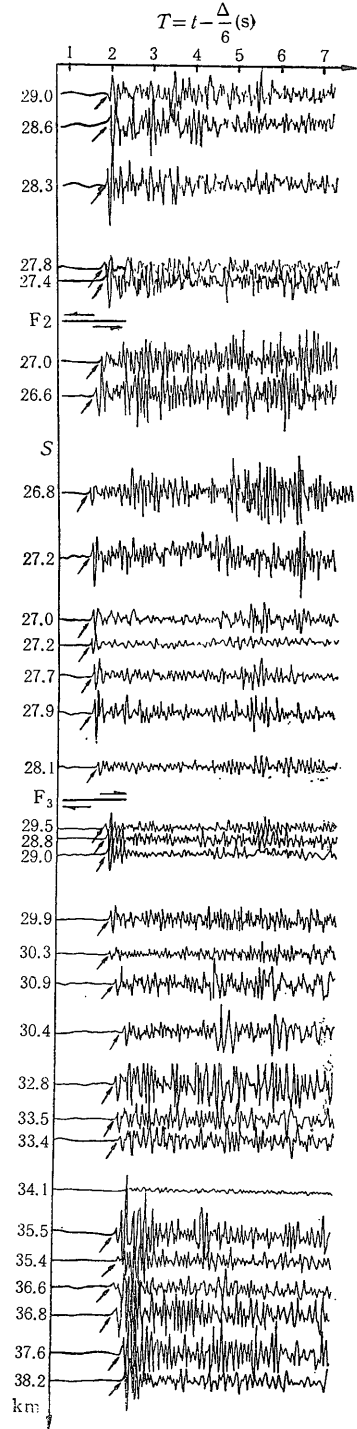
1) 国家地震局地球物理研究所：北京100081, 中国
2) 地質調査所 地殻物理学部

キーワード：ジオトモグラフィ, 中国,

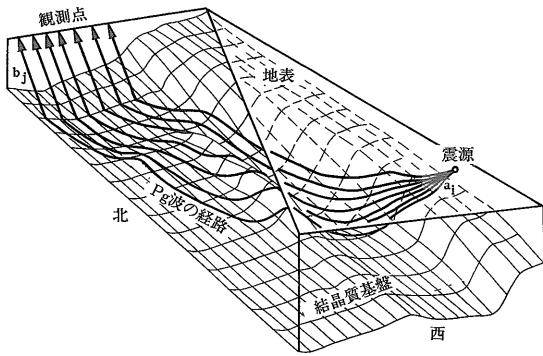
てきた。そのため、地質調査はもちろん、リモートセンシングや重力探査、空中磁気探査、逆測線を含む大規模屈折法探査などが1982年から1984年にかけて行われた。その結果、それぞれの調査方法によって個別に、全部で11もの断層帯が提示された。それらのいくつかは相容れないものもあった。その大きな原因は、島の広い範囲を覆っている第四紀溶岩や火山岩、密集した植生などに妨害されての不十分な調査によるものと考えられた。そこで結晶質基盤まで至る断層帯検出と基盤上の弾性波速度分布を知るために、そしてより合理的な地質解釈を得るために、1984年我々は弾性波探査として屈折法測線観測と同時にくつものファンシューティング観測^{注1}を行った(Feng et al., 1991)。

トモグラフィ的な見方をすると、ファンシューティング観測における震源と観測点を結ぶ線は扇状となって探査領域を覆うことになる。海南島北西部の調査では、屈折法3測線とともに14箇所の発破によるファンシューティング観測が行われた(第1図)。第1図に示すような震源・観測点配置により、深部の断層位置が臨界反射波の時間遅れとして検出できようし、また基盤境界面上の速度がPg波^{注2}走時から再構成されるであろう。震源としては94-500 kgのダイナマイトによる水中発破や坑内発破などが用いられた。観測点数は102箇所、震源・観測点距離は20 km から90 km にわたった。全部で1080もの記録がMCD-2地震観測用アナログテープレコーダにより得られた。

屈折法測線記録中の地震波位相追跡結果によると、ファンシューティング観測記録での初動は見掛周期0.1-0.14秒、ほぼ一定の波形と明瞭な立上りを有したPg波であることがわかる(第2図)。実際に、ここで選んだ初動は基盤からの屈折波か、または緩やかな速度勾配をもつ層を通過した波である。しかしながら、この地域の基盤はむしろ浅く、またはほぼ平坦である(ほとんどのところで1.5 km 深程度で最大傾斜も5度程度)。堆積層と基盤の速度コントラストはおおよそ2.7-3.0 km/sである。さらに震源・観測点間距離は数十 km であるなどを考慮すると、トモグラフィ解析での計算を簡単にするために、Pg波を湾曲した結晶質基盤面、すなわち堆積層と古生代変成岩類の境界に沿ったヘッドウェーブとして取り扱って差し支えない(第3図)。地下にお



第2図 ファンシューティング観測データの例
 図中の矢印はPg波の到達を示す。Sは震源位置、F2とF3はPg波の到達時刻がずれている断層帯を示す。



第3図 速度分布を再構成する結晶質基盤上でのPg波の経路

る結晶質基盤の起伏は屈折法探査や他の調査などから調べられている。

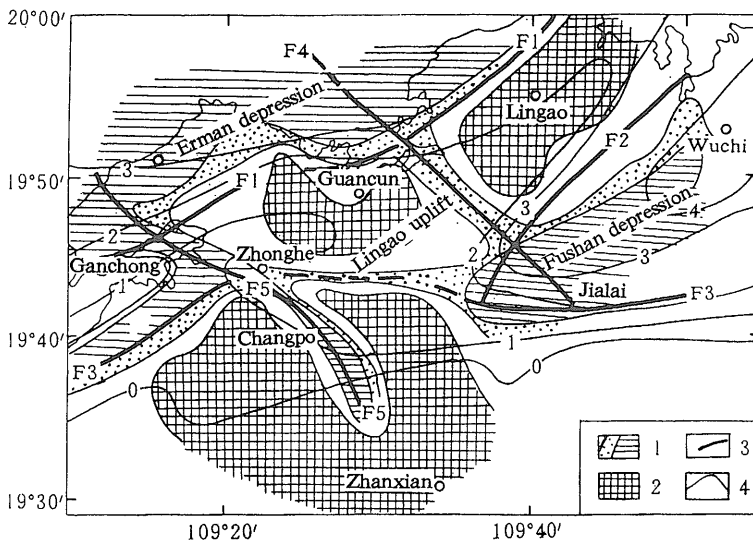
いま、震源 i と観測点 j 間で観測された走時を t_{ij} としよう。震源でのタイムターム a_i と観測点でのタイムターム b_j を t_{ij} から差し引いた t^*_{ij} は、基盤面を伝播するヘッドウェーブの走時となる。これにより、地表と基盤間の走時に関する三次元的問題は湾曲した基盤面内の波の伝播に置き換えられる。湾曲した面上の波の経路さえうまく取り扱えば、基盤上の速度分布はトモグラフィ解析の通常の二次元アルゴリズムにより再構成できる。

調査区域は 3.4×3.4 km 四方の300ものセルに分割された。境界面上での波の伝播経路は折れ線とし

て取り扱われた。波線経路の両端での深度は隣接するセルの既知の深さを内挿して決められた。

インバージョン結果(第4図)は北西海南地域における基盤速度が平均6.0 km/s, 4.2-6.4 km/s の範囲にあることを示している。これは屈折法探査から得られた結果と調和的である。得られた速度分布の中で、4.2-5.0 km/s の低速度域は堆積層の平均的速度2.4-3.5 km/s より速いが基盤の平均的速度5.8-6.3 km/s より随分と遅い。この速度は堆積層最下部の中生層の弾性波速度に近く、フラクチャゾーンや低変質岩類などによるものに違いない。北西部の海岸域と吳池(Wuchi)周辺に広く分布する低速度域は、厚い新生代の堆積層と短い伝播経路のため波があまり深くまで侵入しなかったことによるものと考えられる。高速度域での速度6.2-6.4 km/s は地殻中深部での速度と同程度であり、貫入花崗岩体とか塩基性岩類を反映しているのであろう。ここでの基盤上の速度分布から低速度域や高速度域などが読み取れる。地質調査によれば、調査域は西から東に、峨蔓(Erman)沈降域、臨高(Lingao)隆起域、福山(Fushan)沈降域の3つの構造区分からなる。基盤上の速度分布はこの地質構造区分と一致して、低速度、高速度、そして低速度を示す。地表における地質構造などとの比較により、7つの低速度域と3つの高速度域が抽出された。

高速度域は：



第4図 南海島(Hainan Island)北西部の結晶質基盤の構造
1: 低速度域, 2: 高速度域, 3: 断層, 4: 基盤の等深度線(km).

- (1) 縣(Zhanxian)区域：この地域でもっとも速度の速い地域であり，東西方向に少なくとも27 km 広がっている．ここでの速度分布はほとんど一様ではほぼ6.4 km/s である．
- (2) 臨高(Lingao)区域：速度6.3-6.4 km/s を示す．
- (3) 光村(Guancun)区域：広がりには臨高(Lingao)区域と同じ程度であり，構造的まともりは弱く，速度は6.1-6.4 km/s である．

ファンシューティング観測データから基盤上のフラクチャを決めるために，断層の垂直変位を走時のギャップから推測し，その空間的位置を速度分布の不連続性から推測した．それにより，基盤上の確からしいフラクチャとして次の5つが上げられた：

- F1：干冲-干棠(Ganchong-Mutang)断層
- F2：臨高(Lingao)断層
- F3：王五-中和(Wangwu-Zhonghe)断層
- F4：新盈-加来(Xinying-Jialai)断層
- F5：三都-長坡(Sandu-Changpo)断層

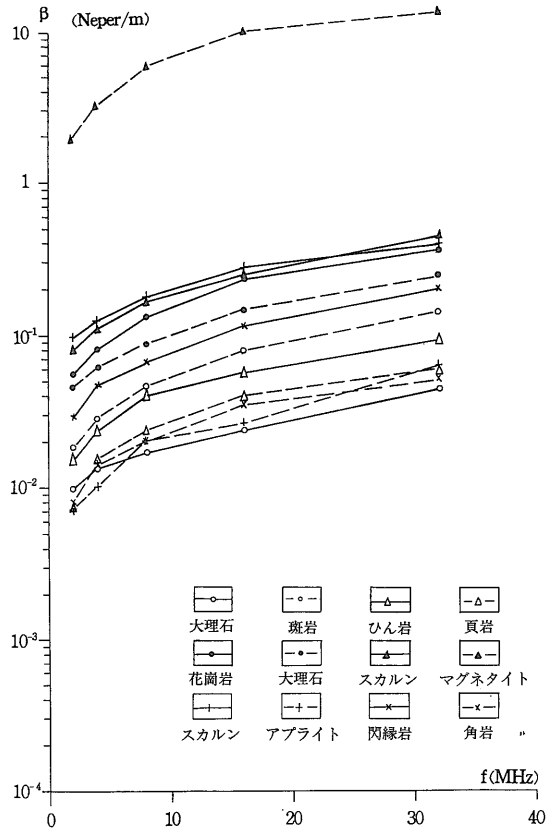
このようにして，ファンシューティング観測データのトモグラフィ解析から得られた結果から，今までに推定していた地表付近の11の断層のうち，5つの断層だけが結晶質基盤まで延びていることが判明した．

3. 坑井間電磁トモグラフィ

中国における土木建設や鉱床探査の場合，坑井間トモグラフィにおいては，弾性波を用いた方法と電磁波を用いた方法の両方が使われているが，いくつかのケースにおいては電磁波を用いた方法は弾性波に比べ使いやすく感じられた．我々は周波数帯域が0.5-40 MHz で出力が1-100 W の電磁法の測定装置を各種，設計し製作した．

電磁法の観測にはいくつかの特徴がある．多くの地質環境において，乾燥した比較的破碎の少ない岩と，水が飽和した空隙率の高い岩の電磁特性の違いは極めて大きい．減衰率や吸収係数は破碎した岩石の含水率に非常に依存する．また，電磁法装置はフィールドで操作しやすいという特徴がある．

電磁の理論によれば，分散性媒質には次の関係が成立する．すなわち長さRのある経路に沿って伝播する電磁波の受信パワーEと送信パワーE₀の間



第5図 岩石試料のβ値の周波数依存性

には

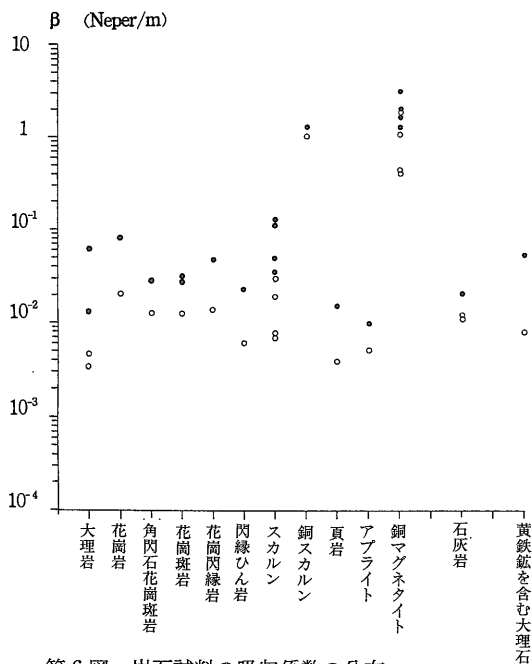
$$E = E_0 f \exp[-\beta dl] / R$$

が成り立つ．ここにfは送信アンテナと受信アンテナの放射パターン，dlは積分線素，βは吸収係数である．一連の投影方向に沿ってEを測定すれば，吸収係数を再構成することができる．

高周波電磁波において吸収係数に対する各種因子の効果を解析するために，岩石試料を用いて実験室内において各種測定を実施した．

吸収係数βは周波数とともに増加する(第5図)．フィールド観測における電磁波の適切な周波数を決める際に，このデータは非常に重要である．β値は岩石により大きく変化する(第5図)ので，坑井間測定により岩石を分別できる可能性がある．

一方，岩石試料のβ値をプロットした第6図をみると，同じ岩種でもある幅をもって分布するので，再構成したイメージから岩種を一意的に決定することは難しく，その地域の地質的・岩石学的情報



第6図 岩石試料の吸収係数の分布
白丸は乾燥岩を、黒丸は水飽和岩を示す。

が必要である。さらに、同じ試料でも乾燥したときよりも水に飽和したときのほうが吸収係数は高い。この違いの大きさは試料の空隙率や構造に依存する。

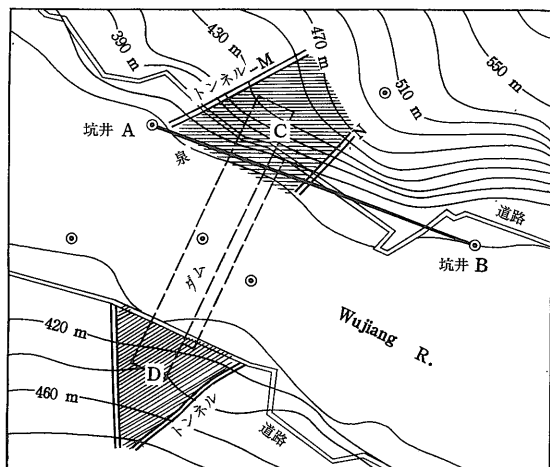
ところで実際の観測で直面する最も重要な問題は、送信の投影角と受信の開口角が制限されることであろう。例えば、坑井間測定システムにおいては、送信も受信も調査領域の下側では行えないので、不完全な投影条件下でしか問題を解くことができず、再構成されたイメージの分解能は著しくそこなわれる。坑井間測定システムの設計において最も重要なことはイメージの分解能の向上である。波線理論が仮定する理想的な場合で考えると、隣接する送信源や受信器の間隔を小さくするか、井戸の深度と坑井間の距離の比を大きくするとよい。また、坑井間の地表面での測定を加えることもよい。しかし、フィールド測定においては、予期せぬ多くの不利な要因が存在し、理想的な条件はめったに実現されない。

高分解能なイメージの再構成に関する限り、逆ラドン変換が示す2つの必要条件がある：すなわち、対象領域内に波線の交点が多数存在することと、すべての交点において波線が180度に渡って走査して

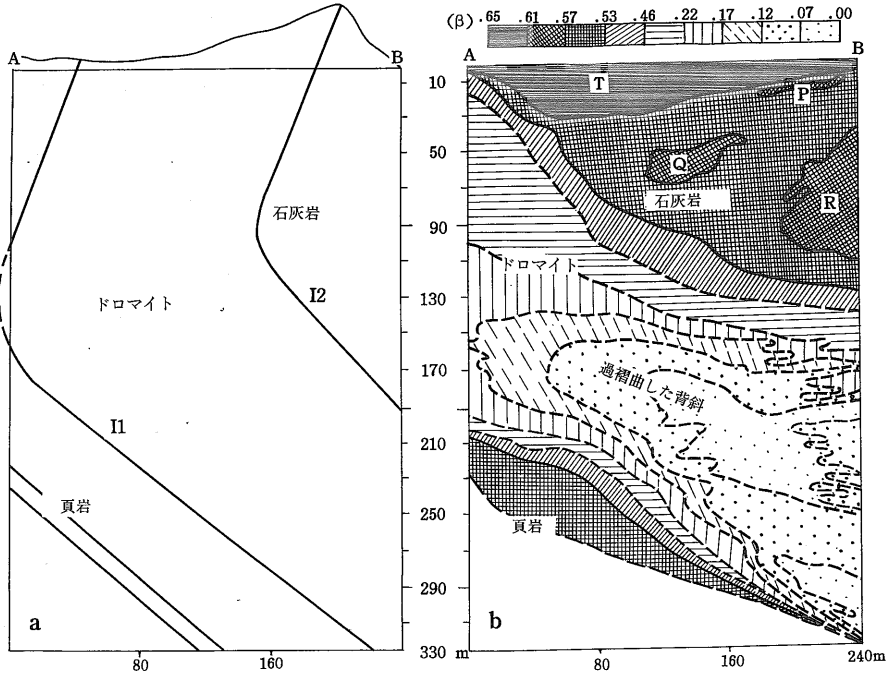
いること、である。測定系の設計は波線の均質走査の原理に従わなければならないことが、理論からも数値モデリングからも示される。すなわち、波線は全対象領域にできうる限り均質に分布しなければならず、さもなければ波線の不均質分布に相関した形状をもつ偽の異常が最終イメージ上に現れることになる。また、覚えておかねばならないことは、たとえ波線が均質に分布していても、中央上部および下部に三角形状をした2つの粗な領域が存在することである。この2つの領域には、殆どいつもといっていいほど、値が高すぎたり低すぎたりする異常域が現れるので、地質的解釈により取り除く必要がある。

4. 発電所下部の吸収係数イメージ

鳥江(Wujiang)水力発電所は中国南西部の貴州(Guizhou province)の北東部に位置する。地質は複雑で、多くのカルスト構造と破碎帯が三疊紀の石灰岩層のなかに不規則に分布している。発電所のサイトで石灰岩、ドロマイト、頁岩の試料を採取し、電磁気的パラメータを測定した結果、電磁トモグラフィを適用するに極めて適した環境であることが確認された。主要母岩である石灰岩は高比抵抗(～3000 Ωm)であり、水で飽和した岩と乾燥岩との比抵抗比も大きい。従って、坑井間距離が長くとも可であるし、再構成イメージの分解能もある程度高いものが期待できる。



第7図 鳥江(Wujiang)水力発電所のダム、坑井、水平トンネルの位置



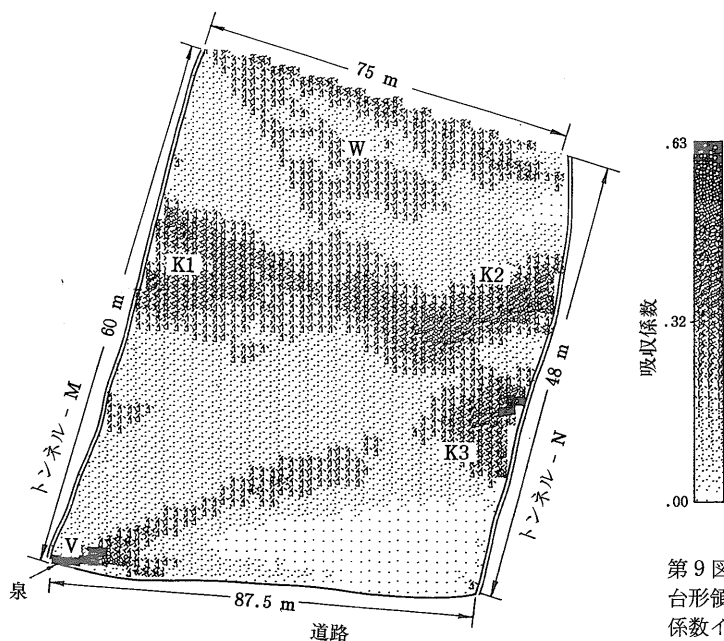
第8図 (a)地質データのみから推定した坑井 AB 間のモデル (b)坑井 AB 間の吸収係数トモグラム

ダム、坑井、水平トンネルの位置を第7図に示す。フィールド調査において、測定周波数は坑井-トンネル間測定においては4 MHz、坑井間測定においては2 MHz、受信機や送信機の移動距離は1 mとし、電磁検層も実施した。第8-9図のグレイスケールの吸収係数(neper/m)はすべて相対値であるので注意されたい。

第8図bはプロファイルABのトモグラムを示すが、掘削の結果や隣接するプロファイルとよく一致している。このイメージを地質調査から推定された古いイメージ(第8図a)と比べると、トモグラムは坑井間の地質情報を与えるだけでなく、従来の方法ではいくつかの場合避けることのできなかった誤りの部分を以下のように正すことができる。まず、地表面に現れる2つの境界面I1とI2(第8図a上端参照)はこのプロファイルでは深部構造と直接的な関係はないようである。第8図bから面白い構造をいくつか容易に読みとることができる。例えばドロマイト層内の過褶曲した背斜、石灰岩層内の3つのカルスト空洞または破砕体(P, Q, R)、第四紀堆積層や、上部の河川堆積物(T)等。石灰岩、ドロマイト、頁岩の層はすべて下流(B)方向に向かっ

て傾斜している。イメージの計算に関する限り、多くの電磁波線を用い、初期モデルは仮定しなかったもので、計算結果は比較的信頼できるものである。勿論、イメージのカラースーケンスを適切に選ぶことにより、像のコントラストはより強調される。

トンネル間測定は坑井間測定ほどやりやすいものではないが、ある場合に完全な投影条件を満たすことができ、180度の観測が可能となる。これは大いにイメージの分解能を向上させる。例えば、三角形領域(第7図中のD)がそれで、極めて良いイメージが得られている(Feng, 1992参照)。もう一つトンネル間イメージを台形領域(第7図のC)について示したものが第9図である。減衰の大きい3つの領域(K1, K2, K3)は実際大きなカルスト空洞で、その位置はトンネルで目で確認された位置とよく一致している。魅力的なことに、ちょうど点Vに泉があり、この点を通る吸収係数の高い帯状の領域は地下水チャンネルによる減衰を示しているようにみえる。高吸収係数域Wについては、説明ができない。前節で述べたように、坑井間(トンネル間)で波線が少なくなる部分に現れる偽像とも考えられる。これらのトモグラムは重要な情報をもたらし、この水力



第9図
台形領域のトンネル間吸収
係数イメージ

発電所の工学的処置に重要な役割をはたした。

5. 今後の課題

ジオトモグラフィは大量の測定データを必要とする技術であるが、限られた数の信号源や受信機で巨大な地質体を走査する必要があり、現在の測定で得られる波線の数は決して十分でない。高速な計算アルゴリズムや分解能の評価法などの理論的な研究や実験室の測定試験なども更に進める必要がある。

注1：ファンシューティングとは、ある地点で発生させた弾性波を、それを取り囲むような一定の距離だけ離れた多くの地点で観測するものである。原文では非縦(扇形)剖面(broadside profile)という言葉が使われている。

注2：Pg波とはせいぜい200-300 km程度の測線記録で現れる直線的な走時曲線を示す波で、速度約6 km/sと8 km/sの二種類がある。ここでは前者に相当する地殻中を伝播する直達P波である。添え字のgは花崗岩質(granitic)の意味である。

文 献

- Feng, R. (1992): Research and application of geotomography in China. *in* Asakura, N., ed., *Geotomography*, Vol. 2, SEGJ Intern. Pub. No.2, SEGJ, 193-208, Tokyo.
- Feng, R., Xue, G. Y., Tang, Y., Chen, G. Y., and Ma, G. M. (1991): Image reconstruction of velocity on the crystalline basement in Hainan Island. *Acta Geophys. Sinica*, **34**, 442-454 (in Chinese).

FENG Rui, ZHOU Hannan and HAO Jinqi (1993): *Geotomography: a new tool in geophysical exploration.*

〈受付：1993年5月24日〉