技術報告

Geotomography－現状と展望

羽　竜　忠　男

1．は　じ　め　に

Geotomographyという技術とその内容については既に広く知れ渡っているが、完全に実用化され広く普及するところまでには到っていない。現在なお基礎的研究と現場への適用がはかられているところである。これから実用的使用が増すにつれその技術の評価がなされるであろう。今のところこの技術の“光”の部分にのみスポットがあてられ、“影”の部分の評価が十分なされていないように見える。その技術の特徴（長所と短所）を見きわめ、正しい適用をはかることがその技術を生かし普及させるものと信ずる。そこで筆者のこれまでの研究や現場への適用の経験を通して、この技術の現状における率直な評価と今後の展望について述べてみたい。

尚、Geotomographyの定義については、ここでは広くとらえ「地殻内部における解析領域を囲む周辺で物理的方法を使ってデータを取得し、そのデータに基づいて逆問題（Inverse Problem）を解くことによって、その内部の物性値分布を再構成する技術」としておく。

2．研究開発の歴史

Geotomographyの歴史的レビューを以下に簡単にまとめる。

Geotomographyに関して実用的研究を最初に行なったのはBois et. al（1971）であり、その解析に関する基本的考え方は今なお引き継がれている。彼らはボーリング孔間（クロスホール）において弾性波の走時を測定し、順解析（波線追跡）に波線方程式、逆解析に拘束付最小二乗法を使用し、解析空間における格子点速度を求める方法を提案した。

その後組織的研究としては、核廃棄物の地下処理に関する国際機関（ＯＥＣＤ）による国際研究として始められたStripa Projectにおける岩盤の力学的・

地下水理学的研究の一環として、1982年頃よりGeotomographyの研究が精力的に行なわれた。以後この技術の研究が急速に進むことになる。

日本においては、1984年頃からぼつぼつ研究報告が出されるようになったが、1984年に応用地質学会に土木地質調査技術検討委員会（委員長：小島圭二東大教授）ができ、ここでGeotomographyが取り上げられるようになってから急速に研究が発展すると共に、多くの機関が関心を持つようになった。筆者も委員の１人として参加した。ここでは岩盤の特性、岩盤内の地下水の挙動、リモートセンシング等が主な検討対象となったが、前二者の研究のためにGeotomographyの利用が検討された。このため実験フィールドとして山形県の長井ダムが使われ、各種の計測がなされている。この成果は内部資料としてまとめられた他、外部にも公表されている（小島他、1989)。

地震学の分野では自然地震を使って地球内部の構造を調べることが行なわれ、日本列島に沈み込む太平洋プレートをとらえることに成功している。この分野において指導的役割を果たしたのがAki et al（1980）である。

現在、弾性波（透過、反射、減衰）・電磁気（比抵抗）及び電磁波（透過、減衰）を使ったトモグラフィーが研究され、実際への適用がはかられているほか、波動を扱うトモグラフィーにおいては波形そのものを使ったトモグラフィ（回析トモグラフィー等）や岩盤の異方性を考慮したトモグラフィーの研究が進められている。

Geotomographyは物理探査技術の中でも主要な研究対象となっており、一昨年に引続き昨年も東京においてGeotomographyの国際シンポジウムが開催され、その成果はGeotomography vol.2としてまとめられた。昨年度のものはvol.2として既に刊行されており、興味のある方は一読を勧めたい。

3．“解析”と“解釈”

解析（Analysis）と解釈（Interpretation）は他の物理探査技術と同様にGeotomography技術においても車の両輪である。両輪といっても同列ではなく

順番から言えば解析があって解釈が伴う。解析は得られたデータからその現象を支配する方程式を解いて地盤内部の物理的パラメーターを求めるものであり、解釈はその物性値分布を地質学的あるいは工学的パラメーターへ翻訳するものである。従って不十分な「解析」結果に基づいて「解釈」されたものはまさしく絵に描いた餅であり何ら役に立たない。またいかに立派な「解析」を行なっても、「解釈」が不十分であれば猫に小判であり、その技術が死んでしまう。これらのことは至極当然のことではあるが、最近画像化技術が発達しその“きらびやかさ”に目をうばわれ、その背後にある仮定条件やその技術のもつ精度が無視されている場合が見うけられる。このようなことは地球内部に関する学術研究においても指摘されており（Nolet, 1987)、十分留意しなければならない事柄である。

Geotomographyにより得られた結果（トモグラム）は地質構造や力学的特性と1対1に対応するものではない。トモグラムは対象とする地盤のその物理的特性に対する応答結果であり、従ってその応答特性を知らなければ地質的あるいは工学的解釈はできない。同じ2.0km／secの弾性波速度を示す地層には、新第三紀層のような軟岩もあれば地下水の飽和していない亀裂のある火山岩や変成岩のような硬岩もある。弾性波速度は固体（岩塊）－間隙（亀裂）－間隙水（亀裂水）の3要素の組合せに対する応答であり、比較的単純であるので解釈も容易である。一方比抵抗は対象岩盤の物理的性質の他に物理化学的な応答も含まれ、多くのパラメーターが関与することによって解釈が非常に難しい。従って、比抵抗値だけから岩盤の特性、特に力学的あるいは水理学的特性を判断するのははなはだ危険である。電磁波速度及び減衰パラメーター（hまたはQ値）は岩盤の比抵抗と誘電率の2つの物理量に依存するため、さらに解釈は慎重に行なわなければならない。できれば弾性波速度等他の物性値と組み合わせると、解釈を誤らせることが少なく、また設計・施工上多くの情報が得られる。しかし今のところ経済的な制約で、2つ以上組み合わせて利用するということは少ない。我々物理探査屋は

探査に金をかけたけれども、それ以上に経済的・合理的設計施工ができたと言われるようになりたいものである。

4．土木建設分野におけるGeotomography

現在土木建設分野において利用されまたは実験的研究が行なわれているGeotomographyには、弾性波、比抵抗及び電磁波トモグラフィーがある。弾性波と電磁波トモグラフィーには、利用する物理データによって走時トモグラフィーと減衰トモグラフィーがある。表４－１にこれらのトモグラフィーの特性をまとめてあるが、以下にそれぞれのトモグラフィーの特徴を簡単に述べる。

尚、地表データのみ及び孔中－地表データを利用して、逆解析により地下の物性値分布を求める方法もトモグラフィーの範疇に含める。これには反射トモグラフィー、ＶＳＰトモグラフィー、二次元・三次元比抵抗探査があるが、前二者は石油探査の分野に利用されているが、ここではふれない。

(1) 弾性波トモグラフィー

Geotomographyのうち最も古くから研究されており、弾性波速度分布を求める走時トモグラフィーはほぼ実用化されている。岩盤の工学的評価（岩盤分類）や劣化部の検出に有効であり、またグラウト等による岩盤改良の判定にも使うことができる。適用分野としては、ダム、のり面、大橋梁、原子力等の基礎岩盤の調査、地下核処理施設、地下石油備蓄、ジオフロント等の地下空間利用施設等の岩盤調査等がある。

減衰トモグラフィーは、弾性波が岩盤内部を伝播する間に熱エネルギー等の形でエネルギーが失われ振幅が減少する現象を利用し、岩盤内部の減衰パラメーター（Ｑ値等）分布を求めるものである。従って、特に割れ目の多い劣化部の検出に有効となる。しかし、振幅を扱っているため観測系に起因する振幅の補正や伝播に伴う内因的エネルギーロス以外の影響を補正する必要があり、実用化するにはもう少し時間がかかりそうである。

弾性波トモグラフィーはボーリング孔間で測定が行なわれることが多いため、高角度の断裂帯等の垂直構造の検

出に向いていない。このためこのような構造を調べたい場合には、孔間距離に比べて測定深度を大きくとることや地表データを活用するような工夫が必要である。

(2) 比抵抗トモグラフィー

比抵抗トモグラフィーは、岩盤の地下水理学的特性を把握するのに適しているが、特に外部から物理的条件を変化させることにより、物性変化の時間的変動を調べるモニターリングに利用するのが有効である。例えば塩水トレーサーの注入による地下水挙動の追跡やグラウトや薬液注入前後の比抵抗変化による地盤改良の効果判定等である。

電極の幾何学的配置には、ポール・ポール配置、ポール・ダイポール配置、ダイポール・ダイポール配置等がある。ダイポール・ダイポール配置の方がポール・ポール配置に比べて分解能が高いとされているが、どのような条件にどの方法が有利か今後の研究が必要である。

(3) 二次元・三次元比抵抗探査

地表電位の高密度測定によって、地下の二次元・三次元的比抵抗分布を求めるもので、垂直探査（一次元探査）では探査ができないような複雑な地下構造の探査に有効である。岩盤中における断裂帯地下水探査やトンネルにおける変質帯調査や特殊構造の探査に利用されている。特に屈折法地震探査では上部に高速度帯があるとその下位の情報は得られないが、比抵抗探査の場合にはその制約がないため、火山地帯における探査に有効である。また、空洞探査にも利用され、特に防空壕のように細長いものでなく、孤立した空洞探査には三次元探査が有効である。

電極配置には比抵抗トモグラフィーと同様ポール・ポール配置、ポール・ダイポール配置、ダイポール・ダイポール配置が使用されるが、構造探査には前者が、空洞探査等のように地盤の不均質性を調べるには後二者が有利である。

二次元探査の場合には、地形及び地質構造が二次元条件を満たすように測

線配置を取るよう心がける必要がある。電気探査はポテンシャル場を扱っているために、弾性波探査に比べて三次元効果の影響を受け易い。V字谷の谷底に沿うような測線は、二次元条件を満たさず不適当である。

(4) 電磁波トモグラフィー

地表におけるレーダー探査の手法を応用したものであるが、トモグラフィーの場合には反射波ではなく透過波を利用する。電磁波は弾性波と同様波動であるため、その取扱は弾性波トモグラフィーと類似しているが、扱う物理現象は全く異なる。電磁波の波動伝播現象は導電率（σ）、誘電率（ε）、透磁率（μ）等に依存するが、$\sigma / \omega \varepsilon \ll 1$（$\omega$は角周波数)、つまり使用する周波数が十分大きければ、電磁波速度（c）は誘導率（ε）の関数で、減衰定数（α）は導電率（σ）の関数となる。従って、走時及び振幅情報を使ったトモグラフィーにおいては、比抵抗及び誘電率の分布を求めることができ、岩盤の多様な情報が得られる。特に岩盤内の亀裂の分布や“水みち”の検出が指向されている。

電磁波は波長が短いため分解能が高いかわりに、その透過距離に限界がある。比抵抗が小さいほど波の減衰が大きくなり、探査範囲がせばまる。従って、本方法は硬岩における割れ目やその中を通る地下水の挙動探査に有効であるといえる。尚低比抵抗帯においても伝播距離を伸ばすための研究が、ハード及びソフトの両面から続けられている（長棟他、1992)。

5．Geotomographyの制約条件

個々の問題点については既にふれたが、Geotomography一般としての制約条件をまとめておく。

(1) 医学分野の診断におけるX線CTは、まさに人間の断面を生々しく再現している。これは解析対象全周にわたってデータが完全に取得できるためであり、投影理論によって完全な再成が保証されている。一方、Geotomographyの場合には解析領域を完全に囲むようなデータ収集はできず、不完全なデータ取得となる場合が多い。このため弾性

表－1　土木建設分野に利用されるトモグラフィーの特性

方法		測定対象	測定空間	解析物理量	特徴と適用
弾性波	走時トモグラフィー	弾性波の伝播時間	ボーリング孔間、横坑間、及びこれらの組合せ	弾性波速度	岩盤の工学的判定、劣化部の検出。
	減衰トモグラフィー	弾性波の振幅	同　上	減衰パラメーター（減衰比、Q値）	岩盤劣化帯の検出
電気	比抵抗トモグラフィー	電位または電位差	同　上	比抵抗	地下水挙動のモニターリング。岩盤改良の判定
	二次元・三次元比抵抗探査	同　上	地表－地表	同　上	岩盤地帯の複雑な構造の探査。変質帯、断裂帯の検出
電磁波	走時トモグラフィー	電磁波の伝播時間	ボーリング孔間、横坑間、及びこれらの組合せ	電磁波速度	誘電率分布に相当するものが得られ、岩盤の割目、水みちの検出。
	減衰トモグラフィー	電磁波の振幅	同　上	減衰パラメーター（減衰比Q値）	比抵抗分布に相当する結果が得られる。細かい岩盤評価が可能

波トモグラフィーの項で述べたように垂直構造を検出できない場合が生ずることや、波線密度の違いによる偽像が発生することになる。

(2)　波動を扱うトモグラフィーの場合には、分解能は波長によって決まる。例えば弾性波速度4km／sec、周波数1KHzの場合には波長は4mとなり、分解能を波長の4分の1程度とみると分解能は1m程度である。分解能をあげようとするならば使用する震源の周波数を大きくする必要があるが、周波数を大きくすれば透過距離が短くなり、探査範囲が限られるようになる。これは分解能と解析距離のトレードオフ関係であり、ほとんどの物理探査についてまわる。

(3)　二次元解析の場合には、地形的にも地質構造的にも二次元条件を満たすような条件を必要とする。特にポテンシャル場を扱う比抵抗トモグラフィーや二次元比抵抗探査は三次元効果の影

響を受け易く、二次元条件が満たさなければ、実際の構造と大きく異なる結果を生ずる。

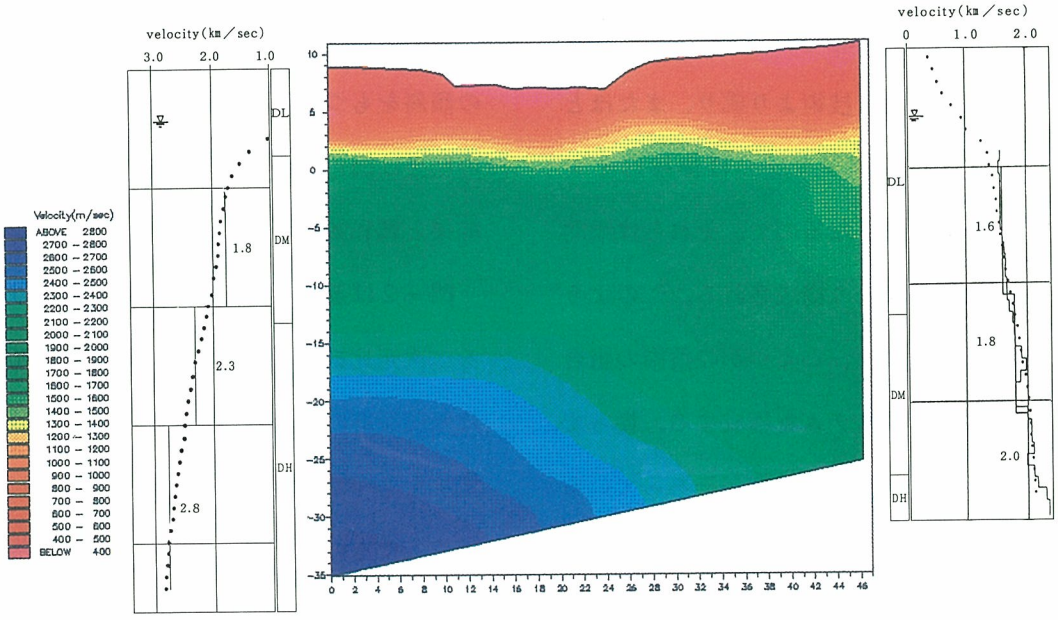
(4) Geotomographyの技術は、データ取得技術と解析技術より成り、またほとんどのトモグラフィーは非線形インバージョンとなるので、それらは順問題と逆問題より構成される。このようにこの技術は、いくつかの技術の組合せによるシステムを構成する。従って、それぞれの技術の精度がそろっていることが必要で、1つの技術の精度を高くしてもシステムの精度は向上しない。今のところ解析技術の研究は進んでいるが、測定技術の方はそれに比べてやや遅れているのが現状である。

実際にGeotomographyを適用する場合には、上記の制約条件を考慮し、目的に合った方法の選択と測定配置を行なうことが大事である。

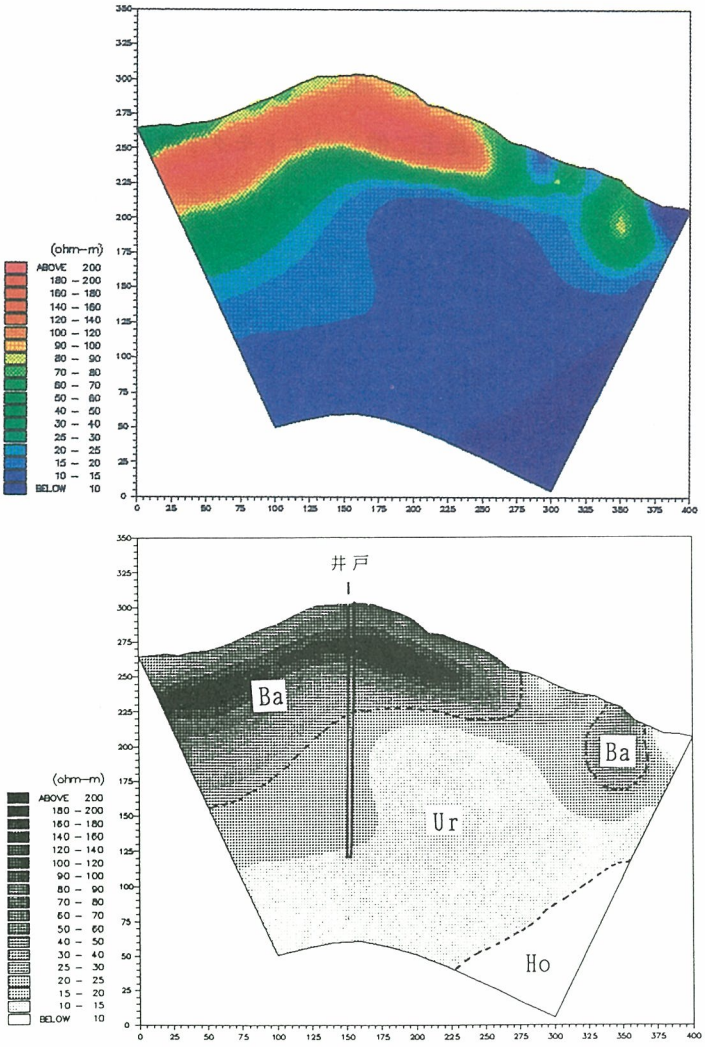
6．トモグラム例

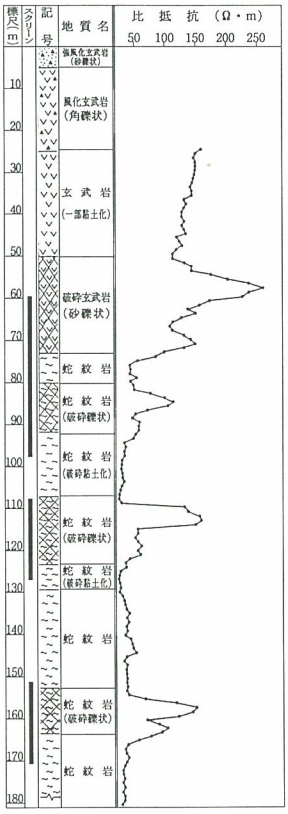
筆者がこれまで行なった探査の内いくつかを紹介する。図－1は風化花崗岩地帯で行なった弾性波トモグラフィーの例である。このトモグラムより、表層部7～8mは速度1km以下の強風化帯で、それ以深は深さとともに速度が漸増している。図の右から左側に向かう40度程度の傾斜をもつ低速度帯が認められる。この結果は図に示す岩盤柱状図や速度検層結果と調和的である。

図－2は房総半島の嶺岡構造帯における二次元比抵抗探査結果である。ここでは保田層群、嶺岡層群中に分布する高比抵抗をもつ玄武岩の分布を調べるために実施したものである。比抵抗の低い超塩基性岩上に分布する高比抵抗の玄武岩の形状がよく再成されている。図に示すボーリングによってその構造はチェックされている。



図－1　風化花崗岩帯における弾性波トモグラム





図－２　嶺岡構造帯における二次元比抵抗探査、ボーリング柱状図、
Ba：玄武岩、Ur：蛇紋岩化した超塩基性岩、Ho：保田層群

7．あ と が き

Geotomographyの現状と展望として、筆者の力の及ぶ範囲でまとめてみたが、いくつかの取りこぼしや誤りがあるかもしれない。御指摘いただければ幸いである。現状の分析に偏りすぎ展望についてはやや不足しているかもしれない。これについては別の機会に補足してみたいと考えている。実際の現場にGeotomographyを計画する際の参考になれば幸いである。

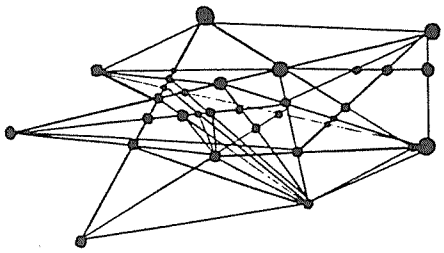
（北光ジオリサーチ㈱）

参 考 文 献

Bois, P., et. al : Essai de determination automatique des vitesses seismiques par measures antre puits, geophy. prop., 19

小島圭二他：ジオトモグラフィーによる岩盤の画像化（その１、その２）、応用地質30巻３号、４号、1981

Nolet G. et. al : Seismic Tomography, 1987

Aki, K. et. al : Quntitative Seismology, Vol.2, 1980

The Organization of SEGJ International Symposium on Geotomography : Geotomography Vol.1, SEGJ, 1990