

地盤構造物の可視化技術を考える

Visualization of Underground World

松 岡 俊 文 (まつおか としふみ)

京都大学大学院 教授

1. はじめに

フランスの科学冒険小説家であるジュール・ヴェルヌは、19世紀末に未来の世界を想像して幾つかの SF 小説を著した。このうち、人類は月に到達し、潜水艦も、飛行船も、80日間での世界一周も実現されたが、地球の中心への旅（地底旅行）¹⁾は未だに実現されていない。それどころか、将来にわたっても実現できるとは考え難い。

我々が暮らしている大地の下の地盤がどうなっているのか、地球の内部がどうなっているかを知りたい、見てみたいという興味と要求は昔からあった。地底を旅行出来れば、これらの望みは達成できるわけである。

たとえば大きな災害を引き起こした地震の震源断層を見てみたいと思っても、大変難しい。地表に現れた地表地震断層あるいは活断層をトレンチして、断層での地盤の破碎の状態を見ることは出来るが、地下深部に存在する震源断層の状態を、直接見ることは我々には不可能である。

地下の状態を知る第一義的な方法は、ボーリングを行い、地下の岩盤をコア試料として採取してくることである。地震断層をターゲットにボーリングを行う意義はこのような点にある。2002年に進水した海洋での深海掘削船「ちきゅう」は、水深が2 500 m でも掘削が可能であり、海底から7 000 m 以上のボーリングを計画している。

現在ボーリング可能な最大の深度は、地表からおおよそ10 km 程度である。またボーリングは、深度方向に調査する一次元の調査手法である。これらの限界性を克服する一つの手段として、地下の非破壊での調査法技術が開発されてきた。

通常この地下を調査する技術は物理学的な理論を基礎に行われるため、物理探査と呼ばれている。地盤工学分野においても、ボーリングが不可能な場所や、ボーリング孔間の状態や、ボーリング孔よりも深い地下の状態を知りたいという要求がある。物理探査はこの様な要求に答える技術である。

人間が物理的に直接到達できない場所の状態を知るには、どうしたら良いであろうか。つまり我々が直接見たり、触れたりする事が出来ない対象物に対する情報を取得したいという要求である。人間が直接見る事が出来ない対象物を、視覚に訴えて「見る」ことが出来るようにすることを、一般的に可視化²⁾と言う。

本稿においては、対象物を人間の視覚では「見る」ことが不可能な場合において、何らかの手法や技術を利用して、対象物を視覚に訴える形に変える技術、すなわち可視化技術の地盤工学への応用に関して考えることにする。

2. 可視化とは

ここで問題にする「見るができない対象物」とは上記の例の様に、①本来直接目で見ることが出来るにもかかわらず、物理的に観測点に到達できないため、見えない場合と、②本質的に人間の目では捉えることが出来ない対象物を指す場合がある。前者は断層での地盤の破碎の状況であり、後者は断層で切断された二つの地盤における弾性波速度などである。これからの議論の中心は、後者の場合である。

可視化を行うには基本的に二つの手続きが必要になる。第一の段階は、①目には見えない対象物に関する情報入手することである。次の段階は、②入手した対象物に対する情報を視覚に訴える表現方法で表すことである。

なぜ、見えない対象物に対して我々は視覚に訴える表現方法を利用するのであろうか。その理由は、人間が持っている五感の中で、単位時間あたりに処理できる情報量が、視覚が最も多いからだと考えられる³⁾。可視化を行うことで、対象物に対する理解が、直感的に、簡単に、そしてより深く行えるからである。

データが持っている性質や特徴を視覚に訴えて表現する方法は、統計学などの分野では古くから用いられて来た。近年発達してきたデータマイニング法などは、一種の可視化手法とも考えられる。携帯電話などで広く使われている絵文字も、視覚に訴える表現方法である。実は視覚に訴える表現方法は、直感に訴える必要上、量的な数値情報であっても質的な表現方法にして提供される。これは情報の送り手に、情報の解釈を一部委ねているところがあり、恣意的な表現となる可能性がゼロではない。

この視覚に訴える表現方法の特徴は、絵文字のような場合には長所として捉えられる。しかしながら工学などで利用する際の対象物の表現には、十分な注意が必要である。地下の地盤の状態を探索した結果を表示する際に、カラー表示の断面図がしばしば利用されるが、この時カラーバーの設定には注意深さが要求される。また情報の受取手は、この点を十分知っておく必要がある。カラー表示が持っているトリックに引っかかるようでは、専門

総 説

家ではないと言われるゆえんである。

3. 三次元の世界

視覚に訴える可視化技術では、対象物の全体像を一瞬で理解できるように対象物を描く必要がある。これは五感の一つである触覚と比較すれば明白である。諺にあるように「群盲象を撫でる」という状況では、可視化されたとは言えない。このためには、本来三次元的に変化している地下地盤の状況を、三次元の世界として可視化することが必須である。無論このためには、地下調査法もそれに対応した三次元調査が必要になってくる。

エネルギー資源の探鉱や開発に利用される物理探査の世界では、1990年代に三次元調査法が確立し、広く利用されている。また昨年、国内においても資源探査を目的に三次元物理探査船「資源」が導入され、我が国においても本格的な三次元物理探査の時代を迎えつつある。

地層の状態の表現手法として、地質断面図は古くから利用されてきた。通常これは地質柱状図を基に描かれた二次元での地下の可視化と考えて良い。仮に逆断層があれば、柱状図には繰り返し同じ地層が出てくるが、地質断面図では断層の存在は直感的に理解できる様に描かれる。また三次元的な変化を知るには、この様な二次元的な表現方法を複数組み合わせ、三次元の世界を可視化しようとしてきた。

また等高線図も地形を表現する手法として昔から用いられてきた。地下の地層の形状を表現するにも、コンタマップが利用されてきた。これらは三次元的に変化する境界面に対して、二次元平面を使った表現法である。

しかしながら現在はバーチャルリアリティ⁴⁾と呼ばれる技術体系が開発され、計算機上において三次元的に自由に地形の凸凹を表現できるようになった。等高線図から複雑な地形の傾斜角度などを想像することは、全くの素人には困難な場合が多い。しかしながら、バーチャルリアリティを利用した可視化技術はこのような困難性を取り除き、非専門家に対しても、地盤構造物などに親しみを持って接することが出来るようになった。

この様な可視化技術は、近年発達してきた計算機技術に依存しているところが大きい。1980年代にワークステーションが脚光を浴び、それと同時に計算結果を画面で手軽に表示する技術が開発された。それ以前は、科学計算は数値を取り扱うことであったが、このころを境に、図形といった情報も計算機で取り扱えるようになってきた。地質学的な情報は基本的に図形情報であり、この種の技術開発が物理探査において地下の三次元可視化を夢の段階から、現実の段階へと変化させていった。

4. 見えない対象物の計測

次に、直接目では見えない対象物に対して、対象物に関する情報を入手する手法について考える。ここでの議論も大きく二つの観点からなされる。一つめは、①観測手段に関する議論であり、もう一つは②観測されたデータに関する処理解析の議論である。前者は対象物に対す

る物理学的な視点に立った観測手法の議論となり、後者は一般的に、雑音に埋もれたデータから必要な信号を取り出す信号処理の方法論に関する議論となる。

人間の視覚では直接捉えることが出来なかった世界を見せてくれる技術として、最も古くから利用されて来た技術は、望遠鏡や、顕微鏡等であろう。その延長線上として、近年人工衛星を利用したりリモートセンシング技術が広く利用されるようになった。

この技術は、対象を見る視点が今までと全く異なり、かつては不可能であった宇宙から地球を見るという手法の導入である。さらに可視光から遠赤外線までの広い周波数帯の電磁波を利用して眺めた地球は、今までとは異なった姿を提供しつつある。またマイクロ波を地球に向けて照射し、その反射波を観測する合成開口レーダ(SAR)技術⁵⁾が提案され、人工衛星に搭載された。この技術は能動的(アクティブ)に地球を観測する手法と言える。

SAR技術では、地表でマイクロ波を反射する場所の情報を、反射してくる波を計測して取得している。具体的には反射波の振幅や位相等がデータとして取得される。さらに電磁波であるマイクロ波は横波であり偏波しているので、水平偏波(H)と垂直偏波(V)成分を有している。そのため衛星に搭載されているアンテナを上手に利用する事で、上記2成分の組合せとなる合計4種類の違った観測データも取得可能である。最近この性質を利用できるパラメトリックSARの観測衛星が打ち上げられ、今後の利用範囲の拡大が期待されている。

またマイクロ波が反射した場所と、衛星との間の距離も計測可能である。このため合成開口レーダは地表のデジタル標高モデル(DEM)の作成にも利用されている。さらに、もしも地震などによって、地表がわずかに変形した時には、地震が発生する前と、発生後の二つのSARの観測データを干渉させることで、地表変形を数cmの精度で計測できるようになった(インターフェロメトリックSAR)。この技術体系を利用すれば、地下における地盤構造物の状態が変化し、その影響が地表に現れたときには、それを広範囲に簡便に計測出来る。このため、地盤状態などのモニタリング技術として、今後広い利用が期待される。

5. 地下を伝播できる波

物理探査において地下を見通すために利用されるのは、弾性波と電磁波と電流がその中心である。これらは皆、地盤中でかなりの距離を伝播することが出来る。また可視化される直接的な物理量は、弾性学的な性質である弾性波速度と、電磁気的な性質である比抵抗、誘電率、透磁率等である。しかしながら、透磁率は地盤を構成している物質の違いによる変化量が小さく、通常は地下探査の計測の対象にはならない。また波動の場合には、SAR技術と同様に反射波を計測して、波動が反射した場所の情報が入手出来る。

可視化のために利用する波動の波長は、対象物を見た

ときの分解能に直接的に比例する。このため、高分解能の可視化を望むのであれば、波長が短い波動を利用した方がよい。一方残念なことに、波長が短い波動は、媒質内での減衰が激しいため、探査できる地下の範囲は、波長に反比例する。

電磁波は波長の長いものから、電磁波(含マイクロ波)、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマー線などと呼ばれている。波長の短いX線を用いて、コアの内部状態を高い分解能で観察することは可能であるが、地面の中を対象にする調査でのX線の利用はほとんどない。

反射法地震探査は、前述した合成開口レーダの手法と多くの類似点がある。S波は偏波である。地震探査では地下が対象であり、一方リモートセンシングは地表が対象であると一般的に考えがちである。しかしながら、上記のアナロジーから言えば、マイクロ波が侵入可能な地表直下の地盤の状態を知る事は、条件が良ければ合成開口レーダにおいても不可能ではない⁶⁾。

観測者が対象物に近づかないと、観測データはこれらの波動や電流が伝播してきた経路上の、すべての影響を含んでしまう。つまり、観測データは経路上の物性値が作り出す波動への影響の積分値に対応している。そこで、積分されてしまった値を、経路上の各点に戻してやる操作が必要となる。これは数学的に考えると、積分方程式の解法であり、通常インバージョンと呼ばれている数学的な操作となる。物理探査工学においてはインバージョンと呼ばれるデータ処理操作が必要となる場合が多いのは、この様な理由によっている⁷⁾。

一方、ボーリング孔内での物理検層では、測定対象物が近いので、上記の物理量以外に、ガンマー線や中性子などが利用されている。また重力探査や磁力探査は、受動的(パッシブ)な探査手法であり、広範囲を手軽に探査できるため古くから利用されてきた。

6. 可視化された情報の利用

地下の可視化技術の利用範囲は非常に広く、これらを一概に議論することは困難であるが、可視化技術に対する考え方と、利用目的には多くの共通点が見られる。

歴史的に物理探査は、応用地球物理学の一部として誕生し、地球内部構造の決定に寄与してきた。その後工学的な適用の場として、石油や金属資源の探鉱開発に利用されてきた。さらに、地盤工学分野においては、物理探査は非破壊で行える地盤構造物に対する調査法と位置づけられ、広く利用されてきた。この歴史は技術の発達によって、探査ターゲットの大きさが、各々2桁ずつ低下し、対象に見合う分解能が向上してきた歴史でもある。

昨年発刊された物理探査学会編の「最新の物理探査適用事例集」⁸⁾によれば、物理探査工学の適用の分野として、10分野(地球科学、石油・天然ガス探鉱、金属・地熱探鉱、維持管理、農業、防災、放射性廃棄物地層処分、CO₂地中貯留、土壌・地下水、遺跡・文化財)が取り上げられている。

地下資源の探鉱を目的にする場合と、地盤構造物への

応用を目的とする場合では、用いる手法も、規模も、可視化する物理量も異なっている。また、地盤構造物に対しても、計画、設計、施工、維持管理の各段階で必要となる地下に関する情報も質も異なってくる。しかしながら、これらを通して最も重要視されるのは、事業全体にわたるコストの削減と、地下の可視化に関わる費用対効果である。

今まで見てきたように、物理探査と言う技術は①見えない対象物の計測作業、②取得データの処理解析作業、そして最後に③可視化作業と、三つに分けることが可能である。これら一連の作業の流れや、その留意点に関しては、昨年物理探査学会より出版された「新版物理探査適用の手引き」⁹⁾は非常に参考となる。この時各作業のコストを比較すると、①が最も経費がかかり、②と③は、PC能力の著しい向上と価格の低下によって低コストで、誰でも簡単に実現出来ると考えがちである。しかしながら、これは大きな間違いである。

物理探査が非破壊検査と最も大きく違う点は、処理結果を示すだけでは全く意味がないことである。計測し処理された結果に対して、地質工学的な観点で正しく解釈を行い、利用者のニーズに適合した可視化を行って、初めて物理探査の利用価値を理解してもらえらる。その意味で、③の作業においては地質工学技術者による結果の解釈と、利用目的に合わせた可視化が行われるべきであり、この部分においてこそ物理探査に係わる技術者の真の実力が問われる場面である。

また解釈作業は標準化が最も遅れている分野であり、現状としては、担当技術者の個人的な力量に依存している部分が非常に大きい。費用対効果に関して議論するには、まずは利用者の目的に適したプロダクトの提供が行われているかを考えるべきである。作業③の可視化技術は、この様な視点に立って、まだまだこれからも技術開発が進められるべき分野である。今後に期待したい。

参 考 文 献

- 1) ジュール・フェルヌ:「地底旅行」, 岩波文庫, 岩波書店, 1997.
- 2) 白石 晋: 知的可視化, 丸善, 2006.
- 3) デビッド・マー: ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書, 1986.
- 4) Midttun, M., Helland, R. and Finnstrom, E.: Virtual reality—adding value to exploration and production, *The Leading Edge*, Vol. 19, pp. 538~544, 2000.
- 5) 飯坂謙二監修, 日本写真測量学会編: 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998.
- 6) McCauley, J. F., Schaber, G. G., Breed, C. S., Grolier, M. J., Haynes Issawi, B., Elachi and C., Blow, R.: Subsurface valley and geoeastern Sahara revealed by shuttle radar, *Science*, Vol. 218, 1982.
- 7) 松岡俊文: 地盤を診る物理探査—地盤情報の取得と解釈技術, 土と基礎, Vol. 52, No. 4, p. 53~60, 2004.
- 8) 物理探査学会標準化検討委員会編: 新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル2008, 物理探査学会, 2008.
- 9) 物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会編: 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, 2008.

(原稿受理 2009.2.23)