

各種物理探査法の変遷と現状

History and Present Activities of Geophysical Explorations

藤村 健司 (ふじむら けんじ)

(株)ジオジャイロ 本社技術部

深沢 晋治 (ふかざわ しんじ)

明治コンサルタント(株) 名古屋事務所技術課

梶 永幸介 (ますなが こうすけ)

パシフィックコンサルタンツ(株)総合研究所

1. はじめに

歴史的経過の中で物理探査法は、各分野においてその特徴を発揮できた手法が定着しつつあるように思える。主に地下の構造調査を目的に発展してきた物理探査は、徐々に地盤物性の把握にも適用され、最近では防災・環境分野などに対して一部の探査法ではあるが、地盤物性や状態の時間的変化の追跡に有効性が認められるようになってきた。また、社会的ニーズは多岐にわたっており、物理探査の手法も各分野におけるそれぞれの目的に応じて多種多様な発展をみせている。これには、現場測定技術の向上や解析手法の高精度化がもたらす結果の信頼性が高く評価されつつあることが背景にあると思われる。

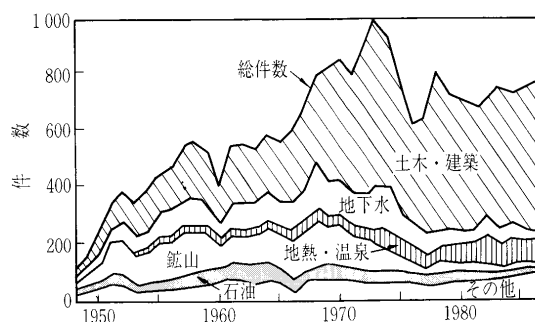
しかしながら、物理探査という定義は相当広義なもので、それに従事する者以外にとって非常にわかりにくいというのが正直なところであろう。

ここでは、昭和40年(1965)頃から現代における代表的な物理探査手法の歴史を表—1に示した。この表に示す標注は論文数やその他資料から判断した活動状況で、上下の項目同士の関連は無い。また、1965年以前のイベントについては代表的なものの記述にとどめた。また、その中で現在多用されていたり、将来的に有望な探査手法の代表的なものについては、文献^(4)~16)から手法図や結果図を抜粋して、本号32~35ページの資料に示した。

2. 物理探査法の変遷と活動状況

物理探査の歴史については、代表的なものとして地質調査所が毎年実施している調査をまとめた「物理探査調査研究一覧」⁽³⁾や文献^(1),2)などがある。それらによると、ここ50年間にわたる我が国の物理探査活動の件数は1950年頃より急激な増加をみせ、1965年頃より土木・建築分野での活動が飛躍的に伸びていることが分かる。

一方、土木建築関係に限定した分野別の実施件数では、トンネル・ダム・道路という、現在、土木分野の主体を成す分野で半数以上が実施されており、そのほか地すべりや造成工事に関するものも10数%を占めている。このなかで建築分野については、その工事の性質上物理探査の実施件数は多くはないものと思われるが、1975年頃より「振動・騒音」の分野に含まれる常時微動測定や、



図—1 我が国の物理探査活動(年別件数)
1948~1991^(1),2)

建築時の振動・騒音測定が増加している。この分野は地震防災の面で、今後も増加が見込まれる。

また、近年の特徴として、デジタル技術の発達と物理探査法の発展は切っても切れない関係になってきており、現場における測定だけでなく、解析においても従来からの大型コンピュータから、パーソナルコンピュータレベルでの解析が可能となってきている。

また、1980年代初頭より発達してきたジオトモグラフィは、従来の二次元探査を三次元に拡張する試みへと発展するとともに、探査結果をカラーを用いてわかりやすく視覚化する傾向に拍車をかけたのも事実である。

3. 各種物理探査法の現状

ここでは、現在使用されている多くの手法を整理する意味で、使用頻度の高いものならびに頻度は少ないが重要なものとして、資料—515(本号32~35ページ)および表—1に示す手法を抽出した。以下に各物理探査法の現状と展望を示す。

3.1 空中からの探査

空中からの探査は、航空機や衛星を利用して行われるが、その探査可能領域を利用して広域探査に用いられる。元々は資源探査を主な目的として発展してきた経緯があるが、最近は環境関連調査や地盤情報収集、土木分野に深く関連する地表地質調査や防災調査方面での実績が著しい。ここでは、その中でも特に発展がめざましいリモートセンシングと空中電磁探査法を取り上げた。

(1) リモートセンシング

1) 空中写真や衛星写真による活断層や過去の地す

表—1 主な物理探査法の

物理探査手法		年表	～1965	1965	1970	1975
空中からの物理探査	リモートセンシング	・1909 (アメリカ) 最初の航空写真 ・1923 日本への器材導入	・1957 (ロシア) 人工衛星スプートニク打ち上げ成功	・1965 (アメリカ) ジェミニ 5号手持ちカメラで地球表面の撮影 ・1969 (アメリカ) マルチカメラの本格的使用	・1970 (日本) 日本初の人工衛星おおすみ ・1972 (アメリカ) マルチスペクトルスキャナ, LANDSAT に搭載	
	空中電磁探査		・1950年頃 カナダで金属鉱床の探査に使用され, 成果を上げる		・1970年代に日本に導入され, 金属鉱業事業団が調査を実施開始	
海上からの物理探査	弾性波探査反射法				・1973 第二次オイルショック	
地表からの物理探査	弾性波探査屈折法	・1851 (MALET) 最初に実施 ・20世紀初頭に実用化 ・1930 アメリカでは石油探査に利用	・1929に日本で初めて実施 本格的には1935～6関門トンネルで ・1935～40 (地質調査所) 石油探査に利用し, 関心高まる	・1956～58頃 S波屈折法や板たたき法の考案・実験 ・1938 はぎとり法の考案 (萩原)		
	弾性波探査反射法	・20世紀初頭に実用化に成功 ・1927 (アメリカ) 油田探査に成功	・1935～40 アメリカで普及 (主に石油探査)	海上反射法 陸上反射法		
	比抵抗電気探査法	・1800年代初期 イギリスで初めて実施される ・1912 (シュランベルジャ) 4極法を考案 ・1916 (Wenner) 4極法を考案	・1920年代前半 日本へのシュランベルジャ探査器の導入, 以後研究・実験開始 ・1932～1942 比抵抗法による資源探査 (地調) 他の機関でも油田探査実施	・1950～資源調査の他に土木, 建築, 地下水関連で比抵抗法の実施が増大	・1970年代後半より有限要素法や有限差分法などの二次元シミュレーションが盛んになる (吉住, 佐々木他)	
	電磁探査法	・1915 (アスカニア社) シュミット型磁力計を開発実用性が増大 ・1921 (京大) 磁力計輸入, 磁鉄鉱床に試用その後, 研究・実験が実施される ・1930年代 TDEM 法の実験	・1950～53 MT 法の考案 ・1951～理論, 測定技術の進展 (Wait)	・カナダの McPhart 社によって各種電磁探査装置が製作・市販される ・1950～ TDEM 法の実用化研究開始	・1970年代初頭 CSAMT 法の考案 ・1960年代 TDEM 法の地表や空中電磁法用の装置が開発される	
ボーリング孔を利用した物理探査	速度検層 PS 検層		・1965頃～ 土木地質調査分野で独自の発展		・1970頃～ S波測定が多用されるようになる	
	ジオトモグラフィー	[弾性波] ・1960年代 扇射法による平均速度測定がダム現場を中心に実施される。	・1971 国外で最初の報告 (Bois 他) 平均速度測定法	・1976 地核構造解析に逆解析を採用 (微小地震データによる, Aki 他)	・1970頃より各手法の研究が進む	
		[電磁波] ・1960年代後半 パルス波による反射法の研究		・1970年代 (欧米→鉱床探査) 電磁波透過による調査実施	・1970年代後半～1980年代初 地中レーダー実用化	
		[比抵抗]			地中レーダー 比抵抗トモグラフィー	

べり地形などの抽出。砂漠地帯の遺跡などの発掘に実績が多い

- 2) GPS を利用した地すべり動態観測
- 3) 合成開口レーダー (SAR) による広域的な地形変動の明確化
- 4) そのほか地盤情報システムとリモートセンシング技術の融合による解析やシミュレーション

などの技術が今後も期待される。また, 高解像度衛星の打上げ計画も目白押しで, その利用可能範囲はますます広がるものと期待される。

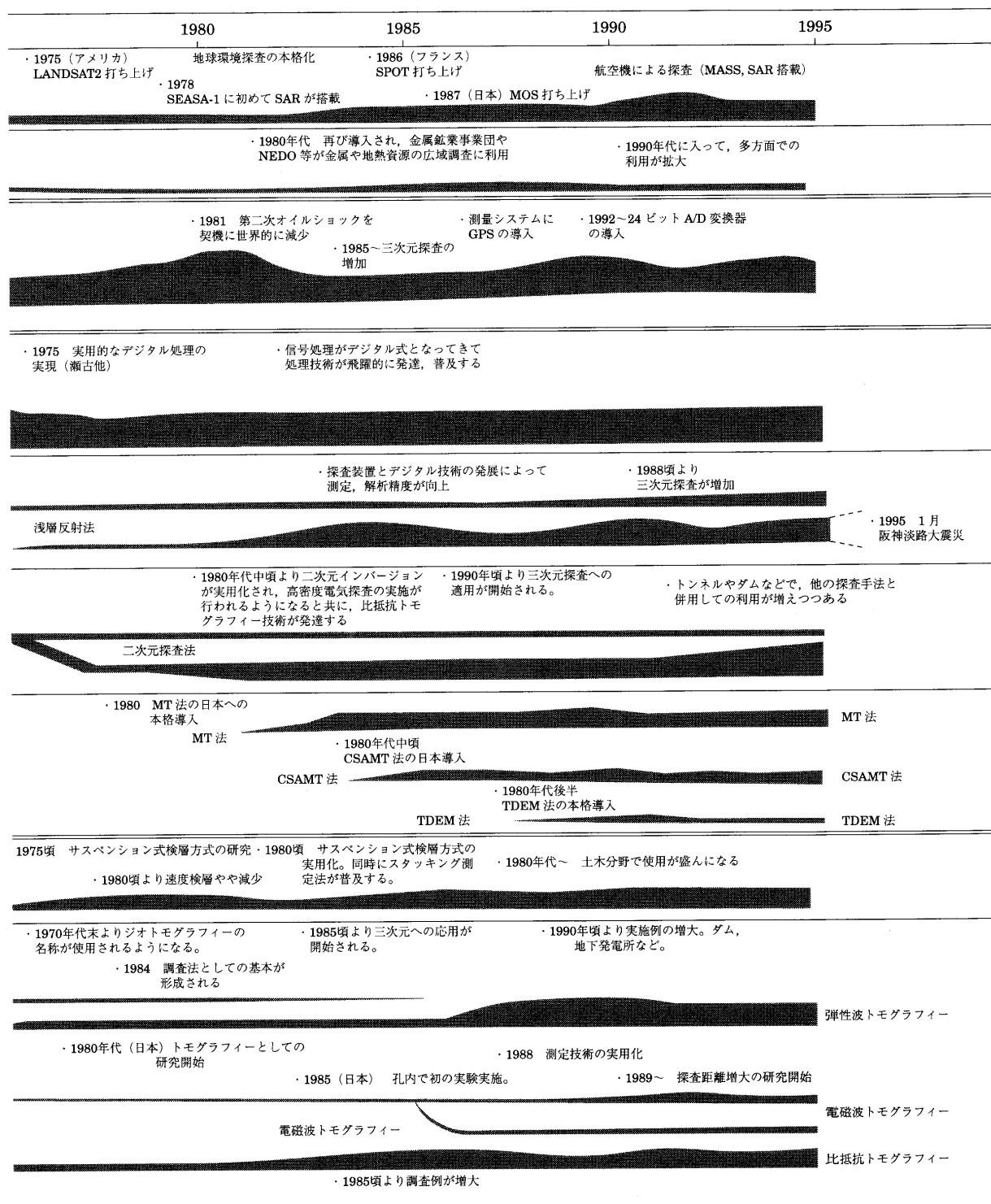
(2) 空中電磁探査法

空中電磁探査法 (AEM 法) は小型飛行機やヘリコプターに電磁法の測定器を載せて飛行し, 比較的浅部の比抵抗を迅速かつ広範囲にマッピングする方法である。1980年代までは主に資源探査に用いられてきたが, 最近はそのほかに地下水, 地熱, 温泉などの探査だけでなく, 土木分野での地表地質調査にも用いられ始めている。

3.2 海上からの探査

海上からの探査法としては最も使用される「弾性波探査反射法」を取り上げた。当探査法は周知のとおり元々は石油資源探査を主な目的として発展してきた経緯があるが, 最近ではほかの探査手法では検知が困難な海底に

歴史変遷総括表



おける地質構造の把握、特に海底活断層の抽出が注目されている。今後も、海岸部や埋立地では発電所や長大橋梁、海上空港などの大きな土木建造物の建設も増加するものと予想されるが、これらの立地選定や耐震面での利用も期待される。

なお、当探査を実施するに当たっては、探査母船等の海上航行が必要であるので、海上保安庁や漁協など関係機関との協議が不可欠である。

3.3 地表からの探査

地表からの探査は土木技術者にとっては最も身近な探査手法である。その中で、ここでは実績が比較的多く今

後もその需要が増加すると予想される4種類の探査手法を取り上げた。

- ・弾性波探査屈折法
- ・弾性波探査浅層反射法
- ・二次元比抵抗探査法
- ・電磁探査法 (CSAMT 法)

(1) 弾性波探査屈折法

人工的に発生させた (発破や人力による起震等) 地震波の屈折波の初動走時 (波が観測点に最初に到達した時間) から地下の速度構造を求める手法で、土木分野では最も実績が多い。断層・砕帯を検出しやすいことや、速

度値から岩盤分類ができるという利点がある。

ただし、速度の大きい層の下位にそれより速度の小さい層が存在するような逆転構造においては、正確な結果が得られないケースもある。したがって、適用にはその精度を十分に考慮することが必要である。また、発破法を用いる場合には火薬類消費許可や地権者（場合によっては隣接地や保安物件も追加される）の同意が必要となる。

(2) 弾性波探査浅層反射法

従来より石油分野で深部（数百～数千 m）探査に用いられてきた反射法の技術を、地下 2～3 百 m 以浅の詳細な地質構造探査に応用したもので、最近では P 波だけでなく S 波の利用も増加している。この手法は軟弱地盤の構造探査や都市部での活断層調査、あるいは空洞探査に応用されており、阪神大震災以降その需要はますます増加していくものと思われる。震源は小型バイブレーターや板たたき法が用いられる。

(3) 二次元比抵抗探査法

従来の水平および垂直電気探査を組み合わせたもので、あらかじめ多数の電極を地表に配置し、そこへ電流を流すことによって各電極配置でのデータを収録する。その後各種の処理を施して得られる比抵抗分布図から地盤構造を解釈するものである。ほかの探査手法に比較して断層や地下水脈の検出に優れると言われており、最近では弾性波探査屈折法と同時にされるケースも増加している。比抵抗値から岩盤分類等への指標が現段階では研究段階であるが、今後ますますその需要が見込まれる探査手法の一つである。

(4) 電磁探査法

電磁探査法は電気探査法と同じく大地の比抵抗を調査することにより地下構造を推定する手法で、自然あるいは人工の電磁場を利用して比抵抗分布の影響を測定するものであり、ここでは CSAMT 法を取り上げた。

CSAMT 法は人工電流を大地に流すことによって形成される磁場を信号源として、大地の見かけ比抵抗をはかり、地下の比抵抗構造を推定するものである。土木分野ではまだまだ利用の頻度が小さいが、これからの 10 年に期待するところが多い。

3.4 ボーリング孔を用いた探査

ボーリング孔で実施する探査手法は原位置試験を含めれば多種多様にわたる。したがって、ここでは代表的な探査手法として PS 検層とジオトモグラフィ法を取り上げた。

(1) PS 検層

地表に設置した震源から P 波および S 波を発生させ、孔壁に圧着させた受振器で記録する。波動記録から走時曲線を作成して区間速度を求める。最近では耐震設計上、深い深度における P・S 波速度、特に S 波速度を求める必要性が高いが、孔内起震・孔内受振が行える機器も開発されており、今後ジオトモグラフィの技術と共に需要が期待できる。

(2) ジオトモグラフィ法

ジオトモグラフィ法とは地表のみならずボーリング孔や調査横坑等を利用して立体的に多数の送信点と受信点を配置し、弾性波や電気、電磁波などを用いて計測した多くのデータをコンピューターによって逆解析し、地下の物理定数や構造を求める方法である。一般的には弾性波を用いたものが最も多く、ついで比抵抗、電磁波を利用したものが多く、地盤内部の物理的な性質を断面像として視覚化（カラー化）でき、ジオトモグラフィの発達と共に、ほかの探査結果においても視覚・カラー化が発展したのも事実である。現段階ではダムサイトでの適用例が多いが、今後はほかの土木分野での適用が期待される。

4. おわりに

以上、各種物理探査法の変遷と現状を述べてきた。物理探査法を議論する場合に、我々はその精度に関する議論に陥りやすい。もちろん探査結果の精度は最も重要なことであるが、それより重要なことは各々の精度の限界をよく理解し、場合によっては複数の探査法を組み合わせる努力も必要なことである。

なお、ここに掲載した図や表は各種文献から収集・整理したものであるから、主観的なものや整合性がとれていない可能性もあるが、その点をご容赦いただきたい。

参 考 文 献

- 1) 飯田汲事：物理探査 時間座標軸からの視点，物理探査，Vol. 47, No. 1, 1994.
- 2) 特集号「物理探査システムの最新動向」，物理探査，Vol. 47, No. 6, 1994.
- 3) 広島俊男・武居由之：物理探査・調査研究一覽，地質調査所，1995.
- 4) 物理探査学会：図解 物理探査，1989.
- 5) 中村・佐々木・藤井・小西：空中電磁波法による地すべり土塊可視化例，土と基礎，Vol. 42, No. 5, 1994.
- 6) 地盤工学会：地盤調査法，地盤工学会，1995.
- 7) 物理探査学会，第 7 回物理探査基礎講座，講習会テキスト，1991.
- 8) 香川・岩崎・澤田・大志万・井川：反射法探査による大阪湾の深部構造，第 25 回土質工学研究発表会論文集，1990.
- 9) 今井・五十嵐：物理探査，地質と調査，1993 第 3 号，1993.
- 10) 今村遼平：地表地質調査（リモートセンシング・エアープーン探査），地質と調査，1996 第 4 号，1996.
- 11) 小島・神尾・石橋・内山・斉藤・島：ジオトモグラフィによる岩盤の画像化（その 1），応用地質，Vol. 30, No. 3, 1989.
- 12) 小島・神尾・石橋・内山・斉藤・島：ジオトモグラフィによる岩盤の画像化（その 2），応用地質，Vol. 30, No. 4, 1989.
- 13) 島・梶間・神谷：比抵抗影像法，古今書院，1995.
- 14) 西田・杉本：弾性波トモグラフィ，地質と調査，1991 第 2 号，1991.
- 15) 土質工学会編：岩の調査と試験，土質工学会，1989.
- 16) 藤光・鈴木・楠・本島・曾根：沖積層下の断層調査，電力中央研究所研究報告，U92002，1992.

（原稿受理 1997.5.16）