

# 地質調査

'10 第 3 号

[小特集] 物理探査とその最前線

編集 / 社団法人全国地質調査業協会連合会



発行 土木春秋社

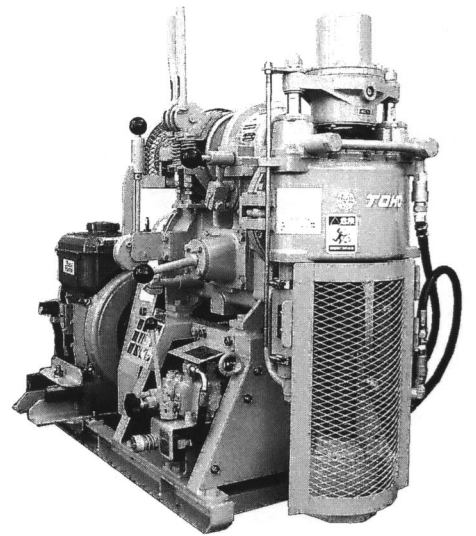




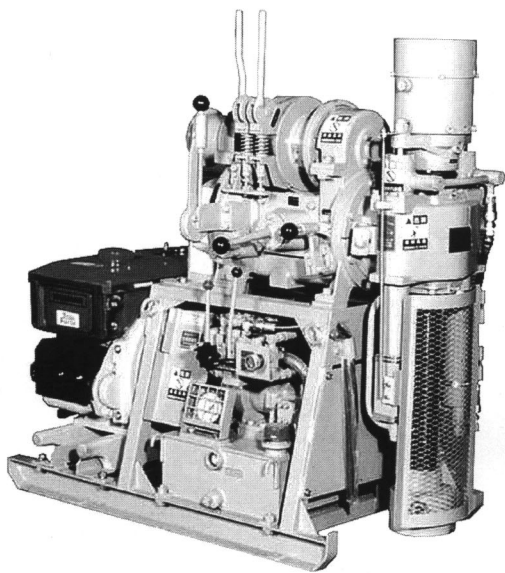
**TOHO**  
DRILLING EQUIPMENT

# 小型ボーリングマシン

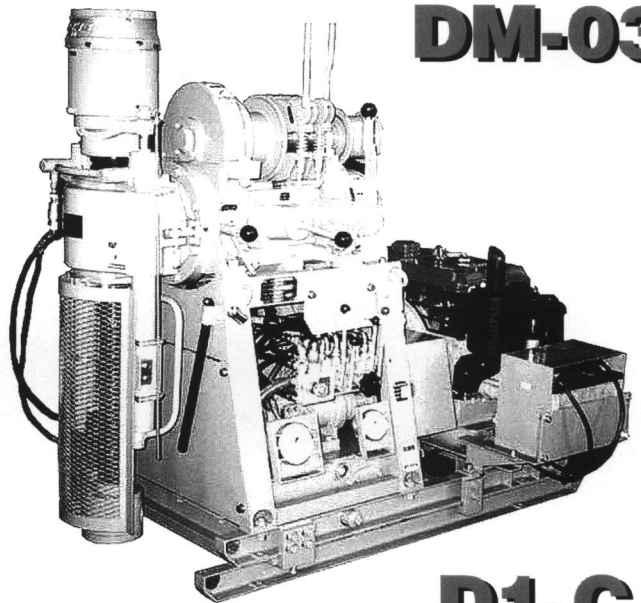
- ニーズに合わせて、ホイストドラムを取外し  
コンプリータイプに変更することができます。
- ブーリの交換で地質にあったスピンドル回転数  
が選択できます。
- 試錐ポンプが内蔵でき、しかも原動機は1台で  
済みます。



**DM-03**



**D0-D**



**D1-C**

仕 様

右操作・左操作をご用意致しております。

機 種 名		DM-03	D0-D	D1-C
穿孔能力	m	30	100	280
スピンドル回転数	rpm	65、125、370	(A) 60、170、330 (B) 110、320、625	(A) 65、130、250、370 ※2 (B) 90、170、320、490
スピンドル内径	mm	47	43	48 ※2 58
スピンドルストローク	mm	300	400	500
ホイスト巻揚げ能力	KN (kgf) 400	3.9 (400)	5.9 (600)	10.8 (1,100)
フレームスライド	mm		※1 油圧式 300	油圧式 300
動 力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質 量	kg	180(本体)	315(本体)	550(本体)
寸 法 H×W×L	mm	960×500×1,115	1,200×660×1,180	1,390×735×1,580

※1 オプション

※2 スピンドル内径58の場合

**東邦地下工機株式会社**

東京都品川区東品川4-4-7 TEL 03 (3474) 4141

福岡市博多区西月隈5-19-53 TEL 092 (581) 3031

URL: <http://www.tohochikakoki.co.jp>

福 岡 宮 092 (581) 3031  
 札 幌 宮 011 (785) 6651  
 仙 台 宮 022 (235) 0821  
 新 潟 宮 025 (284) 5164  
 名 古屋 宮 052 (798) 6667  
 大 阪 宮 0729 (24) 5022

松 山 宮 089 (953) 2301  
 広 島 宮 082 (291) 2777  
 山 口 宮 083 (973) 0161  
 北 九 州 宮 093 (331) 1461  
 熊 本 宮 096 (232) 4763



巻頭言	物理探査における革新的技術開発への期待	松岡 俊文	1
総論	物理探査の社会貢献と将来への課題	六川 修一	2
小特集	「物理探査とその最前線」		
防災・減災	(1) 河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究成果の紹介	山本 剛・高橋 亨	4
	(2) 地すべり・斜面調査における物理探査の適用	八野 祐二・山本 勇夫・三木 茂	10
環境保全	(3) 高レベル放射性廃棄物地層処分における物理探査技術の適用性について	吉村 公孝	19
	(4) 廃棄物処分場における漏水モニタリングへの物理探査技術の応用	小林 剛	27
維持管理	(5) コンクリート構造物における非破壊試験 (物理探査技術) の適用性について	森濱 和正	34
	(6) 土木構造物の維持管理における物理探査技術の現状について	杉山 長志	39
やさしい知識	物理探査を用いたモニタリング	杉本 芳博	48
教養読本	地震波干渉法 —地中に満ちあふれる雑震動を使って地中を可視化する技術—	相澤 隆生	53
基礎技術講座	室内土質試験第1回工学的分類と物理試験の意義	中村 裕昭	57
私の経験した現場	山口県防府豪雨土砂災害現場より	森岡 研三	63
各地の博物館めぐり	徳島県立博物館 日本列島のはじまりと四国のおいたちを知る	小田 桐七郎	67
車窓から見る地形・地質	濃尾平野 愛知県名古屋市～三重県桑名市東名阪自動車道	津坂 喜彦	69
大地の恵み	あなたもワイナリーに挑戦してみませんか	佐竹 道郎	71
(独)土木研究所と企業との共同研究③	挿入式孔内傾斜計の標準化に関するマニュアル	藤澤 和範・千葉 伸一・菅沼 健・樋口 佳意	73
(独)土木研究所と企業との共同研究④	建設工事における自然由来重金属等への対応	品川 俊介	75
会告	地質調査技士資格検定試験 339名が合格		77
	平成22年度 地質調査技士資格検定試験 合格者発表		78
	地質調査技士 登録更新講習会 9月10日受付開始		81
	地質情報管理士資格検定試験 受験願書受付開始		81
	全地連「技術フォーラム2010」那覇 開催案内		82
	“土壌汚染調査技術管理者試験対応” 事前講習会開催のご案内		82
書籍紹介	「福井県地質図2010年版」について	服部 勇・三井一寿	84



小特集テーマ 「地質産業と社会貢献」

地域活性化

〈災害と災害後の基盤整備〉—地附山地すべり地の事例—

〈ジオパーク〉

大深度地下利用を支援する地質環境技術—地下河川機能と遊水池機能を有す首都圏外郭放水路の事例—

サポート事業

防災教育

〈地震防災〉—地震防災に関する市民参加型公開シンポジウムの事例—

〈火山防災〉—火山防災に関する地質産業界の社会貢献—

教養読本 “第四紀” の定義変更

やさしい知識 シームレス地質図

各地の博物館巡り

大地の恵み

車窓から見る地形・地質

私の経験した現場

【表紙写真を募集いたします！】

読者の皆様の撮影された「地質と調査」の表紙用写真を募集しております。  
地形・地質・土・岩などこの雑誌にふさわしいと思われる自然現象をご投稿ください。  
季節感のあるものでもかまいません。ただし固有名詞がはっきり見えるものは不可です。

土木春秋社 ホームページ <http://dobokushunjyuu.ehoh.net/>

メールアドレス [doboku-s@pd6.so-net.ne.jp](mailto:doboku-s@pd6.so-net.ne.jp) へお願いいたします。

データ条件 (3008×2000 ピクセル程度)

ご採用させていただいた場合は、図書券 (1万円分) をお送りいたします。

表紙：兵庫県加東市の「闘竜灘」加古川の河床に露出する流紋岩により形成された滝

[撮影：(株)ダイヤコンサルタント 関西支社 松村法行]



# 物理探査における革新的技術開発への期待

京都大学工学研究科 都市社会工学専攻 教授 松岡 俊文 まつ おか とし ふみ

2010年の6月に7年間に渡って宇宙を旅してきた小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰ってきました。「はやぶさ」の旅は困難に満ちたものであり、一時は地球に帰り着けないとも言われましたが、地球へ帰還した時は、日本中が喝采を送りました。総重量500キログラムしかない探査機を7年間も飛び続けられるように作り上げた日本のもの作り技術と、それを運行してきた宇宙探査技術は、世界に対して胸を張って誇れる技術です。

さらに2007年の9月に打ち上げられた月探査機「かぐや」は、月表面の元素組成、鉱物組成、地形、さらに表面付近の地下構造、磁気異常、重力場の観測を月全域にわたって行いました。まさに月の地質調査です。そしてこれらのデータを長期間地球に送り続け、最後は2009年の6月に月の裏側に落下しました。現在これら数多くの地質調査データの解析が精力的に行われています。これらの成果は「惑星地質学」をもっと発展させることに大いに寄与すると思われま

す。一方、内閣官房宇宙開発戦略本部は7月末に「我が国の月探査戦略」をまとめて公開しました。それによると、2015年に日本は無人ロケットを打ち上げて、最新鋭の地震計等を月面に設置し、月の内部構造探査を行う予定となっています。月の地質調査がさらに一歩前進する様です。

低重力、真空という大変過酷な環境下で、しかも無人のためロボットを使って行う月探査技術は、利用される計測システムを含め多くの技術開発が要求されそうです。ロケットで月まで運んでいくことが出来て、高精度のデータを長時間取得出来るシステムは、現存の技術の延長線上にはないことが、充分想像出来ます。消費電力量なども、現存のシステムに比べれば桁違いに小さくなるかもしれません。また無人で運用される計測システムや、ロボットによる地震計の設置なども大変興

味深い技術です。想像するに、月面での観測システムに要求されるであろう小型、低消費電力、温度対策など、どれを取っても今まで民間では技術開発が困難だった課題への大きなチャレンジと思われま

す。米国が1961年から始めたアポロ計画の為に開発した多くの革新的な技術が、その後民生技術へ広く転化されていった歴史を考えると、今回我が国が開発しようと考えている月地震探査システムは、地球における物理探査や地質調査においても広く利用出来る基盤技術になることが充分期待できます。

現場作業の困難な山間部や火山地帯、人間が近寄れない災害現場などでのデータ取得などにおいて、小型軽量無人探査システムは大変魅力的です。また坑井内での計測環境は、月面での計測環境と比べると、まだまだマイルドな環境です。

いま我が国では「コンクリートから人へ」と言う標語によって、地質調査分野も厳しい環境に直面しています。そのため、地質調査の為に計測機器の技術開発に必要となる予算獲得は、大変難しいのが現状です。技術革新が滞り、新たな市場開拓の方向が見えない状況は、業界に取っては大変良くないことです。

しかしながら一方において、我々の業界とは全く異なった月探査という場面において、国家的プロジェクトとして、我々の業界においても充分利用可能な革新的な探査計測システム技術が開発されようとしています。我々は地球の上で、地質調査に携わる技術者ですが、この様な技術の大変大きなユーザでもあります。いつの時代においても、我々の分野に関連した技術革新はどこかで起こりつつあり、それをどの様にいち早く取り込み、そして利用するかは、我々の業界が今後とも延命して行く上で、大変重要であると考えます。



# 物理探査の社会貢献と将来への課題

ろく がわ しゅう いち  
六 川 修 一\*

本号のテーマである「物理探査」を冠するわが国唯一の学会である社団法人物理探査学会は、2008年に創立60周年を迎え、これまでの技術総括をするとともに、今後の物理探査技術の発展に向けての知的投資として何をなすべきかをシンポジウム主体の議論によって多面的に追求した。本稿は、同学会がその際にとりまとめた議論を一部再録しつつ今後の物理探査の果たすべき役割を俯瞰したものである。

## 物理探査の方向性

今後の物理探査の方向性を総括すれば、以下の2点に集約されると考えられる。

- ・地下の状態や変化をより詳細に把握する技術体系へと進展していく方向にある。このため、地震探査、電磁探査等多くの技術において3次元化および時間軸を含めた4次元化が進展しており、今後ともその方向が強まっていく傾向にある。

- ・技術面から高レベルの探査結果が期待されると共にプロジェクト面からもメッセージ性の高い最終成果が求められてようになってきた。このため、物理探査のみならず、関連分野と連携したシステム技術としてより最終目的に近い成果を生み出すフレームワークの重要性が増してきている。

一方、これらに加え、産業振興の上から事業の海外展開が課題となっている。

- ・社会インフラ整備の進んだわが国の技術を核に社会インフラ事業の海外展開を進める必要性が認識されてきた。

## 物理探査に求められる社会的役割の認識

物理探査では、電磁気学、地震学、地化学など様々な分野の基礎学問を基に、応用数学的手法を

駆使して実用的な調査や解析の学術体系が形成されている。しかしながら、一般に、物理探査に対しては、やや難解な物理学を基礎にしているため、結果の提示方法や最終メッセージのまとめ方が難しいとの指摘がなされているのも事実である。私自身はこの原因が探査・調査に従事する技術者あるいは業界に求められる社会的役割が変化したためであると考えている。これまでの技術者は、学理にかなった方法によって自分のテリトリーの調査・解析を行い、次の工程にその結果としてのメッセージを届けることであったといえる。しかし、物理探査そのものがよく知られた技術分野となった今日、社会が求めるものは最終目的により近い明確なメッセージになってきた。いわば、床の間に飾られていた技術が居間に吊るされる技術となり、成果において明快な具体性が求められるようになったといえる。

筆者自身は、物理探査技術の位置づけを次の3つに大別して捉えている。第一は、石油、天然ガス及び金属資源探査等に見られるような「目標物発見の技術」。次いで第二は、土壌汚染や地層処分適地選定に見られるような条件を満たさない地域を特定あるいは除外するプロセス、言い換えれば当該地域の「健全性保障の技術」。そして第三は、感染症防止あるいは安全保障にみられるような発見漏れを許さない水際の「完全阻止に資する技術」である。これらはいずれも物理探査技術だけで成り立っているわけではないので、複数の技術が連携したシステム技術の一翼としての物理探査を意識することも重要である。換言すれば、「目的からみた物理探査の役割」を明確に認識することが大事で、各々の目的に従った技術活用戦略が必要であるということの意味している。第一の例では、目標が明確であり、かつ発見のための主要な方法論がほぼ固まっているため、ケースス

\* 東京大学教授・(社)物理探査学会会長



タディを積み上げて、より洗練した探査の適用方法を追求することが重要になる。第二の例は、医学に例えれば予防医学であり、微細な諸現象を様々な方法によって調査し、危険を回避するタイプの技術である。この場合、予防や調査の論理そしてプロトコルの標準化・規格化などが重要である。第三の例は、検出誤差は許容するが未検出は許さないというタイプの技術であり、技術的ハードルが極めて高いのが一般的である。

社会に貢献できる探査技術をめざすためには、物理探査技術に求められる上記のような社会的役割に対し、常に高いアンテナを張り、的確に対応することが大切である。

### 国際化に向けての課題

海外に比べ、相対的に成熟国家となったわが国では、社会インフラ整備も一巡し、現在はその適切な保守・管理に重点を置く時代となっている。このため、海外でのビジネス展開を模索する動きが中小企業でも盛んである。これまで、エネルギーや鉱物資源開発を展開してきた企業においては海外展開に対するノウハウ等が蓄積されているが社会基盤調査業のように国内を主たる事業基盤にしてきた企業にとっては現地の生活や文化への理解、人的ネットワークさらには技術インフラ等、様々な面から海外での事業展開はそう容易ではない。ここでは主に調査業・探査業における国際化の課題を考えてみたい。

まず、自明のことであるが事業展開において最も大切なことは現地の人々や行政が何を求めているのかを的確に把握することであろう。いわゆる「御用聞き」機能を高める必要がある。この際、一般に何が必要かと聞かれた方もそれを明確に表現できない場合の方が普通であるので、あらかじめわが国で実現していて、その当該国にとっても有用であると思われる様々な例を用意し、そのフレームワークを例示しながら現地側とコミュニケーションをとることが有効であろう。韓国の優良企業のサムソン社では、派遣社員に、まずは現地にとけ込み、当地の実情を自由に把握させるような研修をしているそうである。イスラム圏で販売するテレビでは、GPSで聖地メッカの方向が常にかかるとおり、お祈りの時間になると自動的にコーランが流れるとのことである。この種の痒いところに手が届くようなサービスはかつて日本のお家芸であったはずである。インフラ型の業態は、大量販売する製品を生み出す産業ではないので、基本は人々（社会）が必要としているも

のを愚直に提供することしかないのではないか。

次に人的リソースの面から考えてみよう。近年、海外に行きたがる若者が激減しており、わが国を代表する主要大学においてもこの傾向は顕著である。現在、わが国の合計特殊出生率（一人の女性が生涯に生む子供の数）は約1.32人である。従って子供の大部分が長男あるいは長女であり、数軒に一人程度しかいない貴重な遊軍（家制度の制約の少ない人材）である次男は、長女と婚姻する可能性が高く、遊軍たる資格を失うに至る。また、高度成長期に田舎から都会に出てきた青年も今や壮年の域となり、昔の次男、三男も今は戸主として家も墓も所有するに至っている。いわば、今のすべての若者は家制度の象徴的意味で親の「墓」を守らねばならないのである。少なくとも深層心理ではそのように考えている若者が多いように感じる。では、一体どうしたらよいのだろうか。

まずは人々の意識から海外の遠隔感を無くし、いつでも「墓守」に戻ってこられるという意識を持ってもらうことが必要である。この点、アジア・オセアニア圏のように時差が前後2時間程度の地域を海外展開の目標にすることが適当であろう。このことは本社との連絡を密にしなければならない海外拠点においても便利である。

人材に関するもう一つのキーは、留学生である。大学そのものも生き残りをかけて優秀な留学生の獲得に奔走しているが、彼らの卒業後の進路や処遇は彼らにとって不本意な状況で、民間企業にあっては、数年以内に退職するケースが多い。アジアからの留学生の場合、わが国以上に家族を大切にしているため、最終的には母国で認められる地位の職場に就職することを望んでいる。従って、日本での留学、企業における国内研修での技術力・実践力向上、そして現地駐在員さらには現地法人の責任者あるいは独立した関連企業としての展開、といったキャリアパスが見える形での雇用展開がなされることが望ましいのではないか。留学を通じ、他民族とのコミュニケーションを円滑に行うことができ、かつ現地の状況に精通している留学生を将来的に彼らや彼らの親族の名誉になる形で活用することは新規の事業展開には必須のように感じている。さらに発展して現地企業との協調をはかることも、成功の近道ではないか。

以上、物理探査の社会貢献および関連産業の将来についてとりとめの無いことを書き連ねてしまったが、読者のなにかがしかのお役に立てば、幸いである。

# 河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究成果の紹介

**【Key Word】**

河川堤防, 物理探査, S波速度, 比抵抗

やまもと 山本      つよし たか はし 剛\*・高橋      とおる 亨\*\*

## 1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨等による河川堤防の被害の発生例も多く、その質的整備の重要性が高まっている。河川堤防は、一般に、過去の災害等を契機にかさ上げや拡幅等の補強が繰り返されその内部構造は一様ではなく、排水樋門や樋管等の人工構造物等による不連続箇所も存在する。また、基礎地盤は周辺地形の変化や過去の河道の変化等によって土質構成が急変する箇所も多く、一般にはその構造は複雑である。そのため、河川堤防の安全性に関わる調査では、堤防内部と基礎地盤の構造を把握することが特に重要である。従来から、ボーリングを主体とした調査手法が用いられているが、膨大な延長を有する河川堤防の調査において、必要な精度と信頼性のある調査結果を得るためには、点の情報しか得られないボーリング調査を補完するために、近年発展の目覚ましい物理探査の適用が期待されている。しかしながら、探査精度やコスト面での課題、あるいは探査結果を堤防の評価に直接役立つ情報に変換する技術の課題等のため、期待ほど利用が進んでいないのが現状である<sup>1)</sup>。

そこで、これらの諸問題を解決し、河川堤防調査に適した有効な物理探査法の開発を目的に、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所では、京都大学に委託し、河川堤防調査研究に関わる民間を含む各機関からなる研究委員会を構成し、平成18年度～平成20年度の3年間にわたり研究を実施した。本研究では、既存の手法に加え、最近開発された新しい探査手法も積極的に取り上げ、その適用性を実際の堤防において評価を行った上で、河川堤防調査に適した手法の選定、改良を行

い、実堤防での探査結果例も含めて適用の手引として取り纏めた。

本稿では、本研究の成果としてとりまとめた報告書<sup>2),3),4)</sup>および適用の手引き<sup>5)</sup>をもとに、●河川堤防調査における物理探査の役割と求められる要件、●河川堤防調査に適した探査手法、●実堤防での試験探査結果例について紹介する。

## 2. 河川堤防調査における物理探査の役割と求められる要件

国土交通省では、平成14年以降堤防の質的整備を目的に全国の河川堤防の調査点検および対策を行っている<sup>6)</sup>。そのような日常的あるいは予防

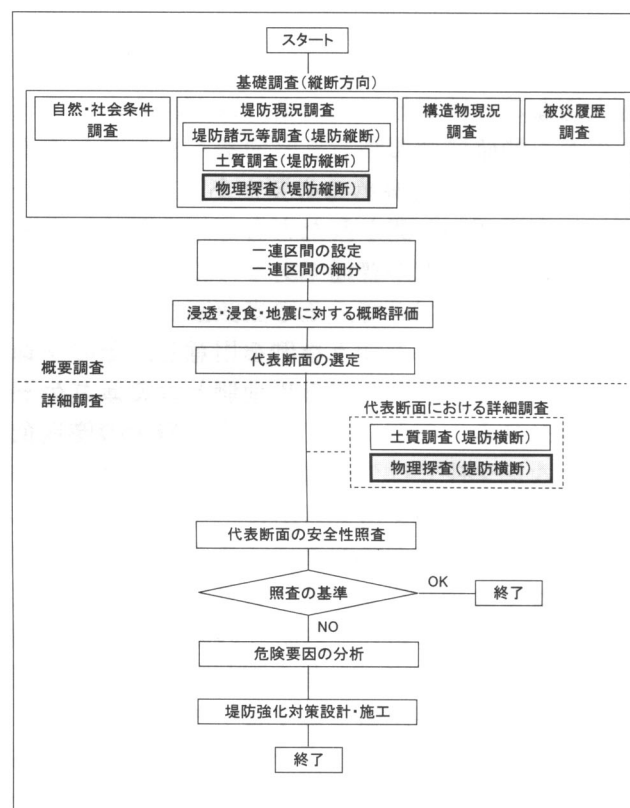


図1 平常時あるいは予防的な点検・調査の流れ

\* 国土交通省近畿地方整備局企画部技術調整管理官

\*\* 財団法人深田地質研究所理事



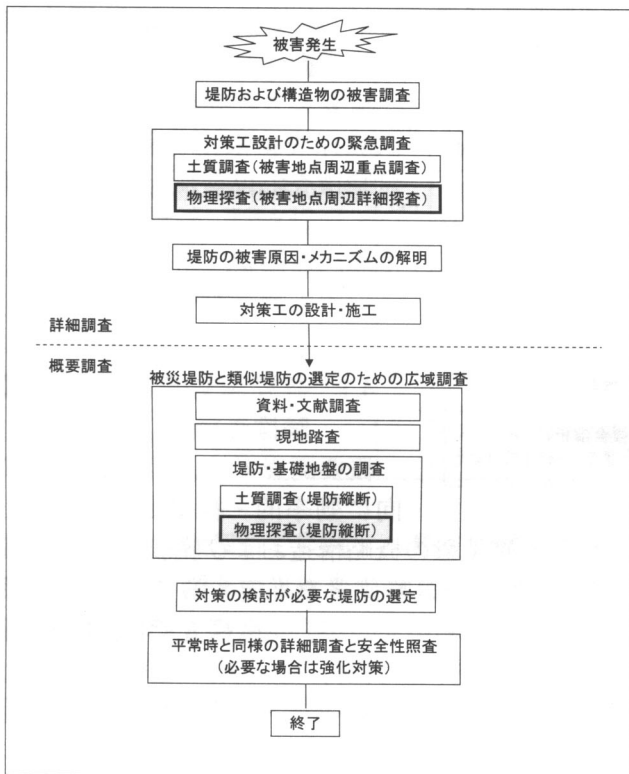


図2 被害発生時およびその後の調査の流れ

的な点検・調査の流れの一例を図1に示す。通常、河川堤防に沿って縦断方向に基礎的な調査を行い、安全性の評価が必要な代表断面を設定した上で安全性照査が行われる。このような調査の中で、堤防の現況調査として、必要な場合には土質調査や物理探査が実施される。この場合、土質調査を補完するため、物理探査では長大な堤防を効率的に探査することが求められる。一方、代表断面の安全性照査を精度よく実施するためには、堤体や基礎地盤の土質構成の精度のよい推定が不可欠であり、必要な場合にはボーリングや室内試験を含む土質調査が行われる。その際、数量が限られるボーリング調査を補完して堤防全体の内部構

造を精度よく把握するためには物理探査が有効である。この場合、物理探査によって堤防横断方向に詳細な内部構造の情報を提供することが求められる。

一方、堤防に被害が発生した場合に想定される堤防調査の流れの一例を図2に示す。この場合、対策工の設計・施工のための緊急調査が被災堤防周辺で実施される。ここでも有効な設計を行うために被災堤防の内部構造を把握することが要求される。そのため、ボーリング調査を主体とする土質調査が行われる場合が多いが、物理探査による詳細調査の併用が有効である。さらに、同種の災害の再発を防ぐためには、同様なリスクを有する堤防に対して必要な対策を講ずることが重要である。そのためには、同様なリスクを有すると想定される堤防について広範囲に調査を実施し、対策の必要性が高いと判断される堤防を設定し、安全性の照査を行う必要がある。その際、上記の予防的な調査の基礎調査と同様な流れに沿って調査が実施されると想定されるが、堤防や基礎地盤の現況を把握するために、土質調査と合わせて物理探査を実施することが有効である。

以上のような堤防調査で把握すべき事項と物理探査に求められる要件をまとめたものが表1である。表中には、各要求事項に対する物理探査の適用の現状と課題もあわせて示した。本研究では、これらの課題に対して、1) 高速探査法の適用による探査効率の向上、2) 3次元探査および複合探査による検知精度の向上、3) 複数の物性の利用による探査データの解釈技術の向上を目標に研究を実施し、河川堤防に適した探査手法として取り纏めた。

### 3. 河川堤防調査に適した探査手法

堤防調査における縦断方向での概要調査と横断

表1 河川堤防調査での要求事項と物理探査の適用の現状と課題

調査対象	調査で把握すべき事項と深度	物理探査への要求事項	適用の現状と課題
堤体	縦断方向 ・土質構成の連続性 (弱点箇所の特定)	-10m	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気探査、表面波探査の適用例が多い。土質境界の概略推定には有効性を示すが、土質の判定は今後の課題。</li> <li>堤体内異常の検知精度の向上が今後の課題。</li> <li>経済性については、最新技術の適用の有効性が示されつつある。</li> </ul>
	横断方向 ・堤体内異物の有無 (廃棄構造物、木、瓦礫など)	-10m	
基礎地盤	横断方向 ・土質構成 ・築堤履歴	-10m	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボーリングの補完による精度向上</li> <li>電気探査が適用される例が多いが、精度の点で更なる向上が求められている。</li> </ul>
	堤防縦断方向 ・要注意地形の分布範囲 (旧河道、旧砂州など) ・透水層の分布、層厚 ・液状化層の分布、層厚	-20m	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボーリングの補完による精度向上 (ボーリング点間の地層の連続性把握)</li> <li>経済的な(早く安く)精査箇所抽出</li> <li>電気探査、表面波探査、反射法地震探査が適用されている。土質境界の推定には有効性を示すが、土質の判定は今後の課題。</li> <li>経済性については、最新技術の適用の有効性が示されつつある。</li> </ul>
河川構造物周辺	堤防横断方向 ・土質構成の連続性 (特に透水層の連続性)	-20m	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボーリングの補完による精度向上</li> <li>電気探査が適用される例が多いが、精度の点で更なる向上が求められている。</li> </ul>
	樋門等の構造物周辺におけるゆるみや空洞の有無・規模	-10m	<ul style="list-style-type: none"> <li>非破壊的な検知</li> <li>空洞やゆるみの拡がりの推定</li> <li>樋門周辺の変状については、反射法等により検知された例はある。</li> <li>樋門下空洞については、過去多くの試みを実施されるも、導通試験を超える結果を提供できていない。</li> </ul>
護岸	護岸背面の空洞の有無・規模	-2m	<ul style="list-style-type: none"> <li>非破壊的な検知</li> <li>地中レーダ探査がルーチン的に利用されているが、より深部の空洞の検知が課題</li> </ul>

表2 河川堤防調査に適した物理探査

調査段階	概要調査	詳細調査
要求事項	堤防を縦断方向に効率的(早く安く)に探査し、堤体、基礎地盤の概略構造や土質構成および弱部、異常部(旧河道や空洞、緩み領域等)の概略位置を推定する	ボーリングデータを補完して堤防横断面の詳細な構造や土質構成を推定する
探査基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベルト状の発受信機による牽引探査</li> <li>・リアルタイムに近いスピード解析</li> <li>・成果:概略の構造や土質構成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象断面での横断あるいは3次元探査</li> <li>・詳細解析</li> <li>・成果:横断面の構造や土質構成</li> </ul>
探査手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ランドストリーマ牽引型反射法</li> <li>・ランドストリーマ牽引型表面波法</li> <li>・牽引型電気探査</li> <li>・浅部電磁法探査</li> <li>・地中レーダ探査</li> <li>・複合探査(上記データの複合解析)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3次元電気探査(2次元を含む)</li> <li>・屈折法トモグラフィ</li> <li>・複合探査(上記データの複合解析)</li> </ul>

方向での詳細調査では、物理探査に求められる要件が大きく異なる。それぞれの調査で求められる要件と探査の基本仕様、ならびに本研究の結果選定したそれぞれの調査に適した探査手法を、表2にまとめる。

上述のとおり、概要調査段階における物理探査では、堤防縦断方向に詳細調査箇所選定等の目的で実施される資料・文献調査や現地踏査、土質調査等を補完して、堤防を縦断方向に効率的(早く安く)に探査し、堤体および基礎地盤の概略の構造や土質構成、あるいは脆弱部・異常部(旧河道、空洞、緩み領域等)の概略位置を推定することが求められる。そのため、利用される物理探査法は、ベルト状の発受信機を牽引しながら高速に探査でき、解析も出来るだけリアルタイムに近いスピードで提供できるシステムが求められる。このような要請に応えるため、ランドストリーマと呼ばれるベルトに受振器を装備した地震計を用いた弾性波探査や、非接触型の電極を使用した電気探査が開発され利用されるようになってきている。また、従来から高速な探査法として利用されている浅部電磁法や地中レーダ探査、あるいは最近開発されたそれらの測定装置を複数装備した複合探査法も概要調査に適した手法である。

詳細調査段階における物理探査では、代表断面や被害発生日点などで、主に堤防横断方向に実施されるボーリング調査を補完して、断面内の構造や土質構成を推定することが求められる。そのため、築堤履歴に応じた土質構成の変化の規模、例えば、厚さ2m以下の土質境界を検出することが必要なため、3次元探査や横断断面でのトモグラフィ探査等の高精度探査の実施が必要となる。また、土質構成の推定等では、弾性波速度と比抵抗等を組み合わせた複合的なデータ解析が必要である。

## 4. 実堤防での試験探査結果例

概要調査と詳細調査に分けて試験探査結果例を示す。また、試験探査で得られたデータを用いて検討を行った探査データの工学的な解釈技術の研究結果についても述べる<sup>7)</sup>。

### 4.1 概要調査を想定した試験探査結果

概要調査では、堤防を縦断方向に効率的・経済的に探査し、堤体と基礎地盤の概略構造および脆弱部、異常部(旧河道等)の概略位置を推定することが物理探査に求められる。そこで、試験探査では、1) 経済性(作業性、探査時間)、2) 堤体・基礎地盤の土質構成の推定精度、3) 堤体・基礎地盤の異常個所の推定精度、の3点をポイントに適用性を評価した。

試験探査は、京都市南部に位置する宇治川左岸堤防(距離程40.6K付近)で実施した。試験地は、排水樋門の撤去・設置のための開削工事が行われており開削断面が得られていること、既往のボーリングデータが多数あることから探査結果の評価に適しているという理由で選定した。試験時には、更にRIコーン試験とスウェーデン式サウン

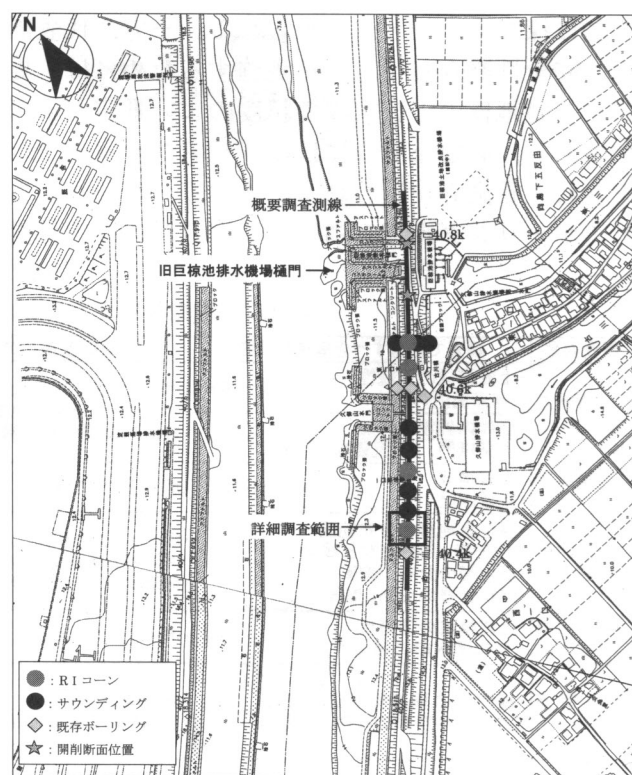


図3 探査測線位置図



表3 概要調査を想定した試験探査の評価結果

調査で把握すべき事項と深度		評価結果
堤体縦断	・土質境界の連続性 (弱点箇所の特 定) ・土質構成の概略把握	8m ・堤体内の3層構造(層厚2-3m)の境界と物性分布を明瞭に検知 ・開削による埋め戻し箇所(幅15-30m)を物性変化や反射面の不連続から検知 ・物性値の関係から概略の土質構成についても推定
	・堤体内異物・異常個所の検知 (廃棄樋門、木、瓦礫など)	8m ・樋門箇所を反射波(地震波)および物性変化箇所として検知 (ただし、深度や形状までの判断はできない)
基礎地盤縦断	・土質境界の連続性 ・土質構成の概略把握	20m ・堤体直下の礫混り砂層および粘性土層を反射波、物性変化から把握 ・反射法地震探査以外の探査では、可探深度は15m程度
	・要注意地形(旧河道、旧砂州 など)などの異常個所の検知	20m ・埋め戻し箇所以外の異常個所については不明
探査効率、作業性、要員数		・ランドストリーマ牽引型反射法: 270m/日(4名)、・連続波地中レーダ探査: 500m/5時間(3名) ・ランドストリーマ牽引型表面波法: 500m/1.5日(3名)、牽引型電気探査: 500m/0.5日(2名)

ディングを複数個所で実施し、探査結果の検証データを得た。図3に、探査測線と検証データの位置関係を示す。堤体高は8~9mで、3世代の履歴を持つ堤体からなり、上位から粘性土質砂礫、粘性土質砂、砂層から構成されている。基礎地盤は深度20m前後で砂礫層に達するが、その上位には、4~5mの厚さの砂質シルト層と8~9mの厚さの礫混り砂層が分布している(後述する図4と図5を参照)。

試験探査では、表2に記載した6種類の探査法を、天端上に設定した長さ500mの測線上で実施した。試験探査の評価結果をまとめたものを表3

に示す。試験地の堤防は規模が大きく、各履歴堤体の土層の厚さも2m程度と厚かったこともあるが、探査の結果、履歴に応じた土層境界や構成を推定することができた。異常部としての樋門箇所・樋門撤去箇所も物性の変化点として把握することができた。基礎地盤については、反射法地震探査により礫混り砂層と砂質シルト層の境界の連続性を把握できた。作業性については、最近開発されたランドストリーマ牽引型表面波法と牽引型電気探査は、従来手法に比べて、倍以上の効率での探査が可能であることが確かめられた。探査結果例として、この両探査法で得られたS波速度と比抵抗の縦断面図を土質断面図とともに、図4に示す。S波速度の変化から3世代の堤体の分布状況が、低比抵抗層の分布から樋門の設置・撤去に伴う開削箇所が明瞭に捉えられていることがわかる。

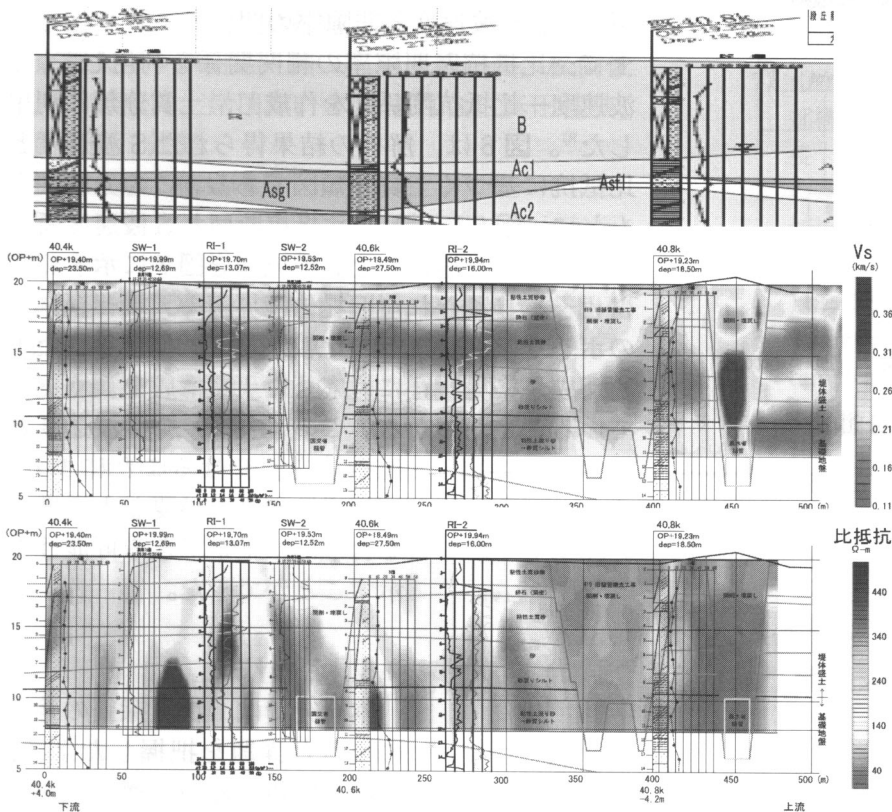


図4 概要調査での試験探査結果

(上:土質断面図(既往資料),中:S波速度断面,下:比抵抗断面)

## 4.2 詳細調査を想定した試験探査結果

詳細調査段階では、ボーリングデータを補完できる堤防断面の詳細な土質構成や物性分布を提供することが求められる。そこで、試験探査では、1)堤体内の埋設物や弱部・異常部の検知精度、2)土質構成・築堤履歴の推定精度、の2点を主たるポイントとして適用性を評価した。

試験探査地は、概要調査と同じ宇治川左岸堤防(図3参照)である。詳細調査段階に適用性の高い高精度の探査法として、横断面での屈折法トモグラフィと3次元電



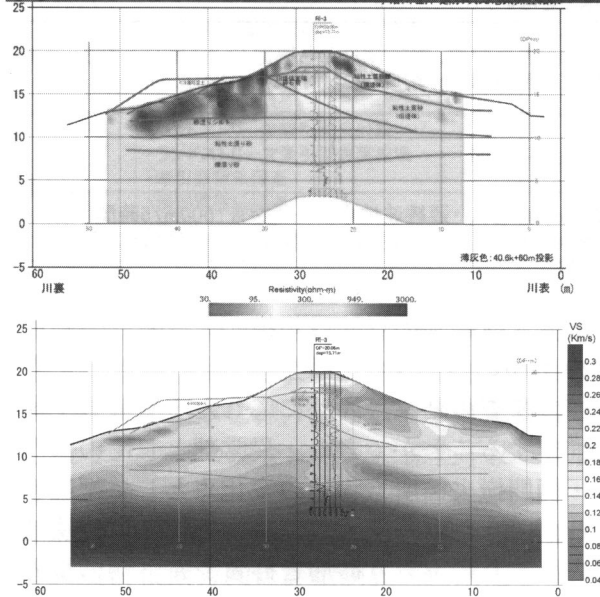


図5 詳細調査での試験探査結果  
(上：開削断面写真，中：比抵抗断面，  
下：S波速度断面)

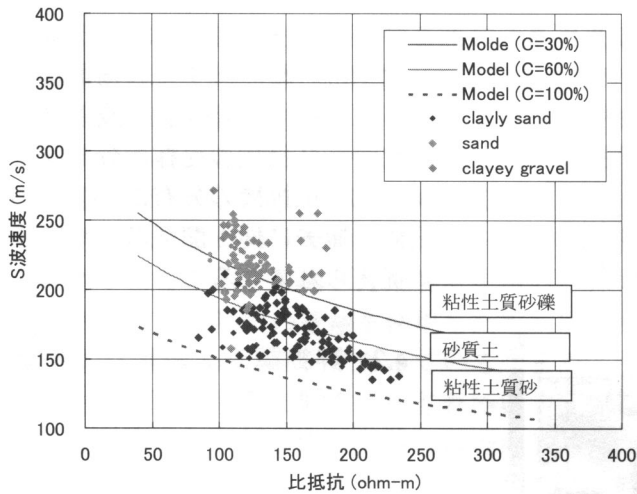


図6 S波速度と比抵抗に基づく土質分類図

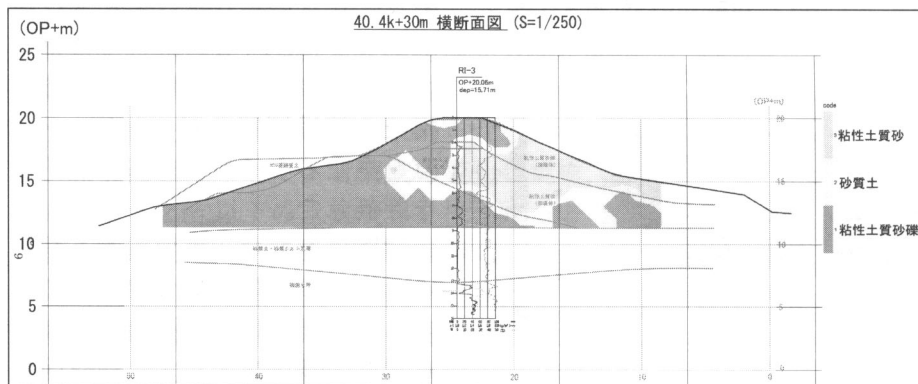


図7 S波速度断面と比抵抗断面から推定した土質構成図

気探査を実施した。屈折トモグラフィは、堤体断面の形状を利用して堤体を囲むように起振点・受振点を配置できるため、断面内の詳細な弾性波速度分布を求める手法として有効な手法である。3次元電気探査は、2次元探査では困難な堤体の縦断方向の土質変化の影響も加味した精度の高い横断面の探査が可能である。

図5に、3次元電気探査で得られた3次元データから抜き出した2次元の比抵抗断面と屈折法トモグラフィで得られたS波速度断面を、開削断面の写真と一緒に示す。両断面図には、開削面のスケッチから得られた旧堤体の境界線図を重ねて示している。上位から粘性土質砂礫、粘性土質砂、砂層の堤体であるが、それに対応して、比抵抗とS波速度が変化しており、両物性から築堤履歴に対応した土質構成を推定できる可能性を示している。

### 4.3 探査結果の工学的解釈の試み

上述の通り、S波速度と比抵抗から土質構成を推定できる可能性があることがわかった。そこで、探査結果の工学的解釈の試みとして、試験探査で得られた両物性を利用して、河川堤防調査で必要な土質構成の推定を試みた。

本研究では、新しい試みとして、ロックフィックス分野で利用されている未固結砂岩モデルを用いて、S波速度と間隙率の関係をモデル化した上で、比抵抗と間隙率の相関関係を利用して、S波速度—比抵抗関係図を作成し、土質分類に利用した<sup>8)</sup>。図6は、解析の結果得られたS波速度と比抵抗に基づく土質分類図である。この分類図をもとに、図5に示した比抵抗断面とS波速度断面から推定した堤体の土質構成図を図7に示す。図にオーバーレイされた旧堤体境界線や天端センターのボーリング結果との比較からも、推定された土質構成が築堤履歴に対応した土質構成をよく捉えていることがわかる。このように、弾性波速度と

比抵抗を組み合わせることにより、河川堤防調査に必要な土質構成を合理的に推定できる可能性を示すことができた。

### 5. おわりに

本研究では、物理探査の適用の現状と課題を把握した上で、実際の堤防において適用性が高いと思われる複数の探査法の試験探査を実施、評価し、最適な



探査手法の選定を行った。その際、河川堤防調査で求められる要件の異なる概要調査と詳細調査のそれぞれについて適した手法を検討した。また、探査で得られた物性データを、土質構成のような堤防調査に必要な特性に変換するための解釈技術についても新しい試みを行った。

研究の成果は、「河川堤防調査における物理探査適用の手引き」としてまとめ、整備局管内の河川事務所等、実際に河川堤防調査に携わる関係者に配布し、調査計画の立案や実施に役立ててもらっている。今後、適用事例が蓄積され、その結果をもとに手引きの改訂を重ねなければならないほど、河川堤防調査において物理探査の利用が促進されることを期待している。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所の関係者の皆様には、試験探査現場ならびに各種調査データのご提供をいただきました。ここに記して感謝いたします。

本稿は、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所が、京都大学に委託、実施した「河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究」の成果をもとに取り纏めたものです。本開発研究を実施するに当たり、下記メンバーからなる研究委員会のご指導をいただきました。ここに記して感謝いたします（所属は当時、敬称略）。

・京都大学：芦田讓，岡二三生，細田尚，松岡俊文，三ヶ田均，岸田潔，木元小百合，真田佳典，尾西恭亮，辻健

・関西大学：楠見晴重

・国土交通省近畿地方整備局河川部：松山宣行，小畑直樹，中村甚一

・同淀川河川事務所：吉田延雄，小俣篤，芝田弘一，宮崎元紀，服部浩二，日朝洋明

・同近畿技術事務所：山本剛，小段栄一，糸川政孝，船曳誠二，富田経直

・(財)深田地質研究所：田中莊一，高橋亨

・建設コンサルタント(五十音順)：エイトコンサ

ルタント(五百木耕二)，応用地質(利岡徹馬，住田賢二)，川崎地質(北川義治，鈴木敬一)，環境総合テクノス(片山辰雄)，キンキ地質センター(太井子宏和)，サンコーコンサルタント(相澤隆生)，新日建コンサルタント(岩田淳)，大日本コンサルタント(小西尚俊)，ダイヤコンサルタント(藤原八笛)，日建シビル(園井啓士郎)，日本地下探査(山口伸治)，日本物理探査(風嵐健志，渡辺文雄)，ニュージェック(與田敏昭，浦山克)，阪神コンサルタント(今吉隆)，復建調査設計(中西典明)

## 参考文献

- 1) 渡辺文雄，河川堤防の統合物理探査適用検討委員会(2007)：河川堤防の統合物理探査手法の適用性検討(その1)－河川堤防健全度評価への統合物理探査の役割とコンソーシアムの取組み，物理探査学会第116回学術講演会後援論文集，277-280.
- 2) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所(2007)：平成18年度河川堤防の内部構造と探査機器の開発研究報告書
- 3) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所(2008)：平成19年度河川堤防の内部構造と探査機器の開発研究報告書
- 4) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所(2009)：平成20年度河川堤防空洞探査に関する検討報告書
- 5) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所(2009)：河川堤防調査における物理探査適用の手引き
- 6) 宇野尚雄(2004)：河川堤防の質的整備に関する技術検討概要，土と基礎，52-4，36.
- 7) 山本剛，小段栄一，糸川政孝，京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究 研究委員会(委員長：芦田讓)(2008)：河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究－国土交通省近畿技術事務所河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究の成果－，物理探査学会編 最新の物理探査適用事例集，113-122.
- 8) Takahashi T. and Yamamoto T. (2010)：An attempt at soil profiling on a river embankment using geophysical data, *Exploration Geophysics*, 41, 102-108.

# 地すべり・斜面調査における物理探査の適用

【Key Word】

弾性波探査, 2次元比抵抗探査, S波速度, 電気探査, モニタリング, 複合探査

はちの ゆうじ やまもと いさむ みき しげる  
八野 祐二\*・山本 勇\*\*・三木 茂\*

## 1. はじめに

日本では、自然災害における斜面災害の割合は、大きな比率を占めており、地形地質条件に加え、豪雨や地震など斜面災害が発生しやすい条件にある。地すべり、斜面崩壊、落石などは、斜面災害の代表的なものであり、斜面災害に対する対策は古くから実施されてきた。

地すべり、斜面崩壊調査における物理探査は、空中写真あるいは空中レーザー測量図による地形判読、資料調査、現地踏査に引き続き、地下の地質構造、地下水状況などを把握する目的で、ボーリング調査とともに実施されることが多い。物理探査手法としては、地表における弾性波探査、電気探査、地温探査などが代表的なものであり、ボーリング孔を利用したものとしては、電気検層、地下水検層、PS検層などがあげられる。

物理探査の地すべり、斜面崩壊調査への適用は、物理探査が土木建設分野で本格的に利用されるようになった頃、1970年以前にさかのぼることができる。例えば、大阪府と奈良県の県境付近に位置する亀の背地すべりへの適用があげられる<sup>1)</sup>。物理探査が有する利点の一つに、効率的かつ広範囲に調査することが可能であることがあげられ、ボーリング調査を補間して地下の状況を把握することが求められている。最近では、計測機器、解析技術の発達に伴い、物理探査は地中の可視化、プレゼンツールとしての役割を果たしている。また、物理探査は、地下の状態の時間的な変化を捉えることや、斜面のモニタリングツールとして適用されることが行われている。

一方、物理探査技術は発達してきたが、物理探査結果で得られた地盤の物理量は、調査で把握す

る必要がある地盤の状態を表す指標と一致していないことが多い。このことは、地すべりや斜面崩壊調査に限ったことではなく、物理探査全体に当てはまることであり、物理探査における大きな課題の一つである。例えば、電気探査で得られた比抵抗値の分布を示すだけでは物理探査は役にたたず、比抵抗値の分布から導かれる地盤状況を示さなければならない。物理探査で得られた地下の物理量と地盤の状態は、必ずしも一対一の対応を示すわけではない。このため、物理探査の適用に際しては、地盤の状態や物理探査目的に関する事前の検討が必要不可欠である。このとき、多くの現場で実施された事例が役に立つことは言うまでもない。

物理探査の計画に先立ち、対象調査における物理探査の目的と限界を十分検討しておくことが、効果的な物理探査の適用に不可欠である。本文では、このような視点に基づき、物理探査実務者の立場から、地すべり、斜面崩壊調査における物理探査の適用と事例について示す。まず、地すべり、斜面崩壊調査における物理探査の位置づけ、適用される物理探査の種類について述べる。続いて、適用上の課題について述べ、適用事例を紹介し、今後の可能性について言及したい。

## 2. 物理探査の役割と現状

### (1) 物理探査の位置づけ

地すべり、斜面崩壊調査における物理探査の特徴としては、以下の点があげられる<sup>2)</sup>。

- ① 探査対象となる深度が比較的浅く、概ね、深度50mまでのものが多い。
- ② 地質構造の把握とともに、地下水状況の把握を目的として適用されることがある。
- ③ 測線に沿った断面の探査に加えて、平面分布や3次元構造を求めることが重要となること

\* 基礎地盤コンサルタンツ(株)保全・防災センター

\*\* 基礎地盤コンサルタンツ(株)中部支社



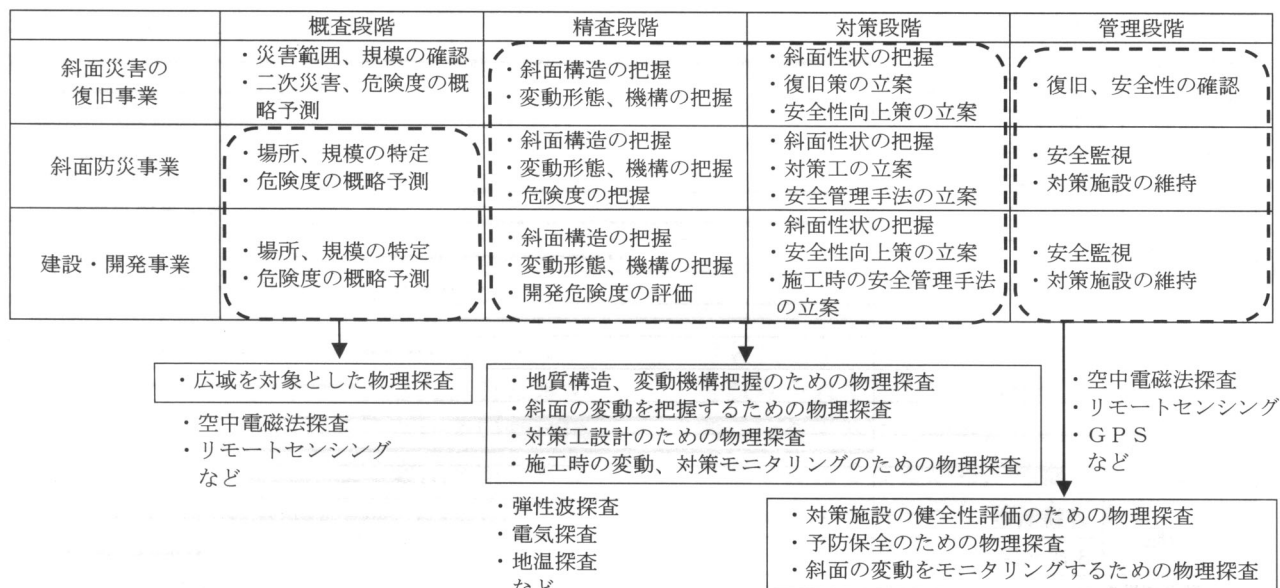


図1 斜面災害に関する調査目的と物理探査の適用範囲

表1 適用される物理探査手法<sup>4)</sup>に加筆

形態	手 法	判明する事柄	主な適用目的			主な適用段階			
			分布・運動状況の把握	地質構造、弱部の把握	地下水状況の把握	計画・概査	精査・対策	管理	
空中	空中電磁法	地盤の比抵抗	○	○	○	○		○	
	リモートセンシング	分光反射特性、変位	○			○		○	
地表	弾性波探査屈折法	地盤のP波速度		◎			◎		
	表面波探査	地盤のS波速度		○			○		
	電気探査	水平探査	地盤の比抵抗		○	○		○	
		垂直探査			○	○		○	
		2次元比抵抗探査			◎	◎		◎	
	自然電位法	地盤の自然電位差			○		○		
	電磁法探査	地盤の比抵抗		○	○		○		
	電磁波探査(地中レーダ)	電磁波の反射位置						○	
	地温探査(1m深)	地温分布			○		○		
	放射能探査	γ線強度			○		○		
GPS	地盤の変位	◎				◎	◎		
孔内	速度検層	地盤のP(S)波速度		○			○		
	電気検層	地盤の比抵抗		○	○		○		
	地下水検層	地下水の流動位置			◎		◎		
	温度検層	温度分布			○		○		
	放射能検層	γ線強度			○		○		
	トモグラフィ	弾性波	地盤のP(S)波速度		○			○	
比抵抗		地盤の比抵抗		○	○		○		

○：適用実績のある手法、 ◎適用が多い手法

がある。

④ 探査結果の解釈が、地質状況、地すべりや斜面崩壊の形態、地下水状況により異なり、物理探査結果単独で判断することは困難である。

一方、図1は、斜面災害を防止する事業の区分と、事業段階における適用される調査内容を示したものである。この中で、物理探査は、様々な事業段階において、弾性波探査や電気探査を主として様々な手法が適用されている。最近では、構造物を含めて斜面の維持管理のための物理探査の適

用方法の検討が増加している<sup>3)</sup>。

物理探査が適用される目的は、地質構造の把握、地すべりの分布と地すべり面の把握、風化層厚の把握、地下水状況の把握、水みちの把握、斜面運動状況の把握など様々である。また、物理探査の用途も、すべり土塊や不安定土塊の把握にとどまらず、対策工の設計資料とされることも多い。

表1は、地すべり、斜面崩壊調査に適用される物理探査手法を整理したものである。計画概査段階から、維持管理段階まで多くの物理探査が適用





方法としては、層構造を仮定したハギトリ法が一般的に使用されているが、最近では、層構造を仮定しないトモグラフィ法も多く用いられるようになった。トモグラフィ法は、高精度屈折法地震探査、高密度弾性波探査などと呼ばれている。得られた速度構造から、風化層や崩積土層の厚さ、地すべり面の位置、弱部の位置などを求める。

## (2) 電気探査

地盤の電気的特性が地下水の状態と関係することから古くから適用されてきた。また、特に地すべり調査において、適用されることが多い物理探査手法である。また、地すべり調査に適用される電気探査には、地盤の比抵抗分布を求める比抵抗法と、地盤に発生している自然電位の分布を求める自然電位法がある。

自然電位法は、測線に沿って2極間の電位差を測定する探査法であり、地表付近の水みちや地層境界(砂岩と泥岩の境界など)を把握するために実施される。簡単な装置で測定できることから、平面的に測定されることもあるが、深度方向の情報を解析することは難しい。

比抵抗法で、現在、主に適用されているのは2次元比抵抗探査であり、比抵抗映像法あるいは高密度電気探査とも呼ばれることがある。2次元比抵抗探査は、測線に沿って一定間隔で電極を設置し、色々な電極の組み合わせで見かけ比抵抗を測定し、トモグラフィ技術を用いた解析を行うことで、測線に沿った断面の真の比抵抗分布を求める探査手法である。地盤の比抵抗分布から、地質構造、風化層の層厚、地下水の状態などを把握する。

一方、比抵抗法では、降雨による地下水の状態の変化や地下水の移動を把握するため、同じ測線において連続的にモニタリングとして探査が実施されることもある<sup>11)</sup>。

## (3) 電磁法探査

電磁法探査には多くの種類があるが、地すべり調査や斜面崩壊調査に用いられる代表的な探査手法としては、EM探査、空中電磁法探査などがある。電磁法探査は、電気探査比抵抗法と同様、地盤の比抵抗分布を求める探査法であり、適用目的も類似する。

EM探査(ループ・ループ法)は、1対の送信ループ(導線を円盤状に巻いたもの)と受信ループを用い、送信ループに交流電流を流したときの地盤の応答を受信ループで測定することで、地盤の比抵抗を測定する。交流電流の周波数を変化させることや、送信ループと受信ループの間隔を変化させることで、深度方向の比抵抗分布を把握する

ことができ、比較的浅部の探査に適用される<sup>12)</sup>。地面に電極などを打ち込む必要がないため、迅速に測定を行うことができる。EM探査は、測定に沿って測定装置を移動させながら行うが、迅速に測定できることから平面的な探査も可能である。

空中電磁法探査は、地表におけるEM探査を空中で行うものであり、ヘリコプターを用いて広域的に探査を行うことが可能である<sup>10)</sup>。また、ラジコンヘリを用いて、限られた範囲の探査への適用も試みられている<sup>13)</sup>。空中電磁法探査では、平面的に探査することが可能であり、短時間で大量の測定が行えることから、地盤の比抵抗の3次元分布を探査する手法として有力である。

## (4) 地温探査

地すべり調査では、1m深地温探査<sup>14),15)</sup>が広く用いられている。地表の付近の水みちを把握するために実施する探査法であり、測線に沿って一定間隔、あるいは斜面上で格子状に細い孔を明け、精密温度計で地温を測定する。測定温度に地形や土地利用状況などに関する補正を行い、地温分布の異常から水みちの位置や規模の把握を行う。1m深地温探査では、地温と外気温の関係から探査を実施する季節に制限がある。

## (5) 放射能探査

放射能探査は、地面から放出される放射線(主にγ線)の強度を測定することにより、地層境界伏在する断層、裂か部の位置などを把握するために用いられる<sup>16)</sup>。放射能探査は、様々な条件による影響を受けるため精度面の限界があるが、簡易に効率的に探査できること、地表地質踏査と同時に探査が可能であることから、概査としての利用が主となる。

## (6) GPS

GPSは、今日では、地理測量からカーナビゲーション、位置管理システムまで多目的に利用されている。測量精度も向上し、cm単位の変位計測からmm単位の変位計測が可能となり、地すべりや斜面変動のモニタリング手段として多く利用されるようになった<sup>17)</sup>。天候に左右されず測点間の見通しが無くとも測量が可能であること、変位測量に熟練を要しないこと、地表面変位の3次元測定が可能であることなどが特徴である。インターネットを利用したリアルタイム自動測定システムも開発されている<sup>18)</sup>。

## 4. 物理探査適用の留意点と課題

### (1) 適用上の留意点

物理探査で得られる地盤の情報は、表1に示し

たように、弾性波速度や比抵抗、地温などの物理量である。これらの物理量の分布から、地質構造や地下水状況を定性的に判断することが多い。このため、技術者の経験や技術力により判断に個人差が生じることになり、物理探査の信頼性や精度について問題となることがある。この問題は、地すべりや斜面崩壊調査に限ったことではなく、また、1970代以前から今日まで続いている問題である<sup>19)</sup>。地表からの物理探査の特性として、深度とともに探査結果の精度や分解能の低下は回避できない。物理探査結果から地盤状況を把握するに際しては、物理探査技術者と地質調査技術者の協力は不可欠である。物理探査全般における留意点をまとめると、以下のようになる。

- ・物理探査の計画に際しては、対象地域の地形地質特性を、既往資料、空中写真、詳細地形図などで把握しておく。
- ・物理探査を適用する目的を明確にし、探査地の土地利用状況を考慮し、適切な探査手法の選択、測線の設定、平面的な探査の必要性などの検討を行う。
- ・物理探査の適用限界、分解能に留意して探査・測定を計画する。適用限界、分解能は、一律ではなく、探査地の地形地質条件および土地利用状況によって変化する。
- ・物理探査結果の解釈は、他の調査結果を合わせて総合的に行う。

## (2) 可視化における課題

最近では、2次元比抵抗探査や屈折法弾性波探査トモグラフィ法で代表されるように、地盤の速度分布や比抵抗分布が、きれいなカラー区分図で表されることが増えてきた。探査結果から目的とする構造を抽出するため、カラー区分の色彩や区分値を調節することが行われることが多く、抽出された構造がカラー区分に依存することもある。すなわち、どのような構造を見せるかは、技術者の判断となっているともいえる。このような手法は、構造を抽出する上で有効であるが、速度や比抵抗値の絶対値が示す意味や、断面でのこれらの値の変化が示す意味を理解してカラー区分を行う必要がある。

## (3) すべり面と地下水状態

一方、前述のように、地すべり、斜面崩壊調査に物理探査を適用する代表的目的は、地すべり面あるいは風化層、崩積土層厚の把握、地下水状況あるいは水みちの把握である。以下、これらの探査について留意を示す。

### ①地すべり面の把握

地すべりにおいて、移動層と不動層の弾性波速度や比抵抗値に明瞭な差が無い場合、物理探査により地すべり面の位置を把握することは困難である。上野は、地すべりの形態を区分し、物理探査の適用性について検討を行っている<sup>20)</sup>。移動層と不動層で比抵抗値に明瞭な差がある場合は電気探査が、弾性波速度に差がある場合は弾性波探査が有効な探査手法となる。物理探査の適用に際しては、空中写真判読や地表踏査により地すべりの形態を見分け、適切な物理探査手法を選択することが重要である。

### ②地下水状況の把握

比抵抗値が地盤の含水状態と関係していることから、地下水状況、水みちの把握を目的として電気探査が採用されることが多い。しかし、泥岩など地質の比抵抗が低い場合、地下水状況の変化による比抵抗の変化が小さくなる傾向がある。また、地すべり地や斜面崩壊地では、電気探査結果単独で地下水位分布を把握することは、困難であることが多く、ボーリング調査結果と合わせて判断する必要がある。

一方、比抵抗分布断面の低比抵抗部から水みちの位置を推定することが多いが、低比抵抗部が水みちであるか否かの判定が困難な場合がある。低比抵抗部の3次元的な分布がわかれば判定精度の向上が期待できる。3次元探査が理想的であるが、まだ十分実用段階に達しているとは言い難い。電気探査水平探査やEM探査などの平面的な探査と2次元比抵抗探査など断面の探査を組み合わせることが有効な手段であると考えられる。

### (4) 複合探査

地すべり面や風化層厚の分布、地下水状況を把握するためには、単独の物理探査だけではなく複数の探査結果を照合して判断することは有効である<sup>21)</sup>。また、地すべりのような比較的浅部の薄い構造を把握するには、前述のように、断面における探査と平面的な探査を組み合わせることが有効であると考えられる。

### (5) 電気探査の連続探査への適用と留意点

降雨による斜面の地下水状態の時間変化や水の移動を把握することを目的に、電気探査において同一測線における連続探査が試みられている。一方、塩水などのトレーサを地中に注入し、その動きを見る探査も試みられている<sup>22)</sup>。地すべり機構や斜面崩壊機構を把握するのに有効な調査手法と考えられる。

このような探査においては、測線設定位置が重要となる。効果的な結果を得るためには、事前に



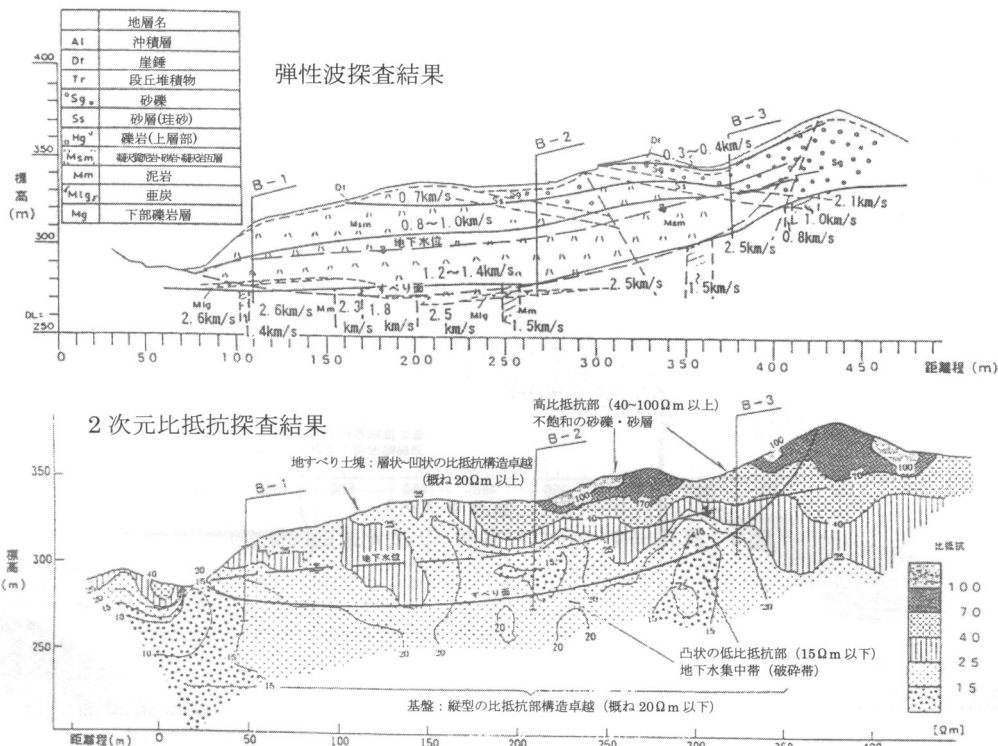


図3 風化岩すべりでの事例（弾性波探査，2次元比抵抗探査）

ある程度、地質構造や地下水状況を把握しておく必要がある。降雨などによる浸透水の移動速度が極端に早いと、探査速度が追い付かず、変化を把握できない。また、トレーサを注入する場合、変化を捉えるのに必要な注入量や、注入位置（深度）が重要となる。

## 5. 適用事例

いくつかの地すべり、斜面崩壊に適用した物理探査の事例を示す。

### (1) 風化岩すべり（新第三紀層）の事例<sup>23)</sup>

新第三紀中新世の凝灰質泥岩、砂岩、凝灰岩互層における風化岩地すべりである。未風化の不動層の弾性波速度は2.1~2.6 km/s、移動層の風化した土塊の弾性波速度は、1.4 km/s 以下であり、地すべり頭部には鮮新世~更新世の砂層および砂礫層が分布している。すべり面は風化部と未風化の境界に存在する厚さ2~7mの破碎ゾーン中であり、孔内傾斜計観測により確認されている。

図3に、弾性波探査結果（ハギトリ法）と2次元比抵抗探査の結果を示す。この事例では、すべり面の位置は、概ね弾性波探査結果に一致しているが、2次元比抵抗探査では明瞭でない。地すべり頭部に分布する不飽和の砂層、砂礫層は高比抵抗部（40~100 Ωm）となっており、地すべり頭部に位置する凸状の低比抵抗部（15 Ωm 以下）は、弾性波探査結果の低速度帯と概ね一致しており、地下水集中帯と推定された。

この事例では、地すべり頭部に位置する低比抵抗部から地下水を排除するために排水トンネルが計画された。

### (2) 風化岩すべり（新第三紀層）の事例<sup>24)</sup>

新第三紀中新世の泥岩における風化岩すべりであり、大規模地すべりの第二滑落崖より下方の斜面に発生した再発地すべりである。地すべり土塊は、主として亀裂が発達した風化泥岩からなり、所所粘土化している。すべり面は比較的堅硬な泥岩と砂岩の互層と脆弱な風化泥岩の境界に想定され、主として粘土化した凝灰岩の薄層となっている。

図4は、2次元比抵抗探査の結果である。すべり面はやや連続した低比抵抗部（10~20 Ωm）として検出していると推定され、ボーリング調査結果およびパイプひずみ計観測から以下のことが明らかになった。地下水の比抵抗値は20~80 Ωmと、泥岩や凝灰岩（数 Ωm~10 数 Ωm）より高いため、泥岩や凝灰岩に亀裂が存在する場合、亀裂内での地下水の有無にかかわらず、新鮮な岩に比較して高い比抵抗値となる傾向がある。地すべり土塊中の亀裂集中部（不飽和）は、高比抵抗部（20~40 Ωm）となっており、亀裂の少ない分離小丘部は低比抵抗部（14~16 Ωm）となっている。

### (3) 崩積土すべり（結晶片岩）の事例<sup>21)</sup>

主に崖錐堆積物が移動層となっている地すべりでの探査事例である。基盤の地質は、泥質片岩、砂質片岩、ひん岩である。すべり面は基盤の泥質片岩の強風化部付近と推定されている。

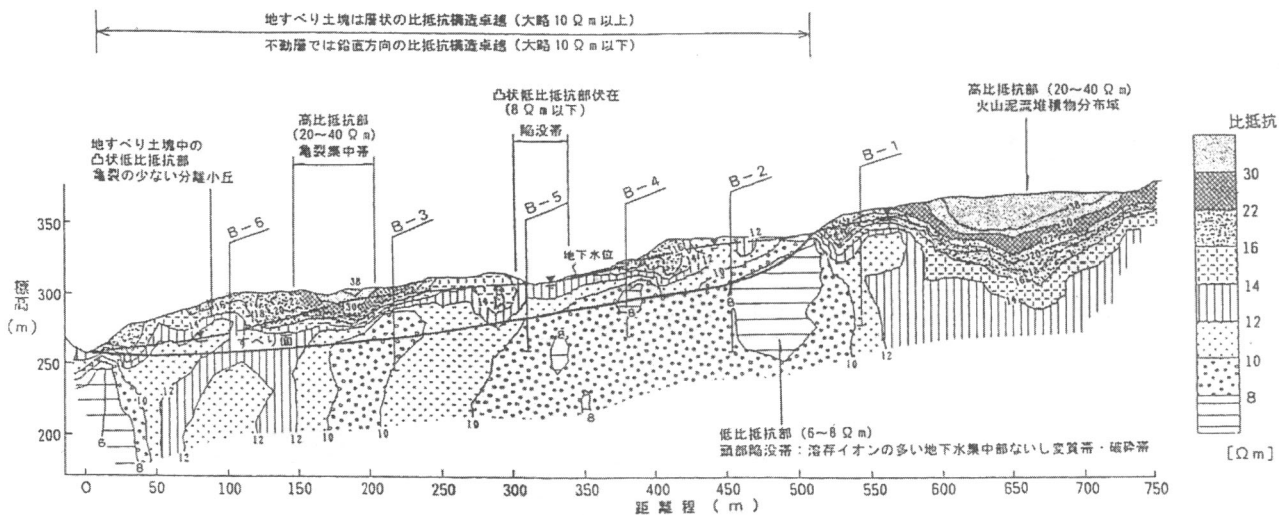


図4 風化岩すべりでの事例 (2次元比抵抗探査)

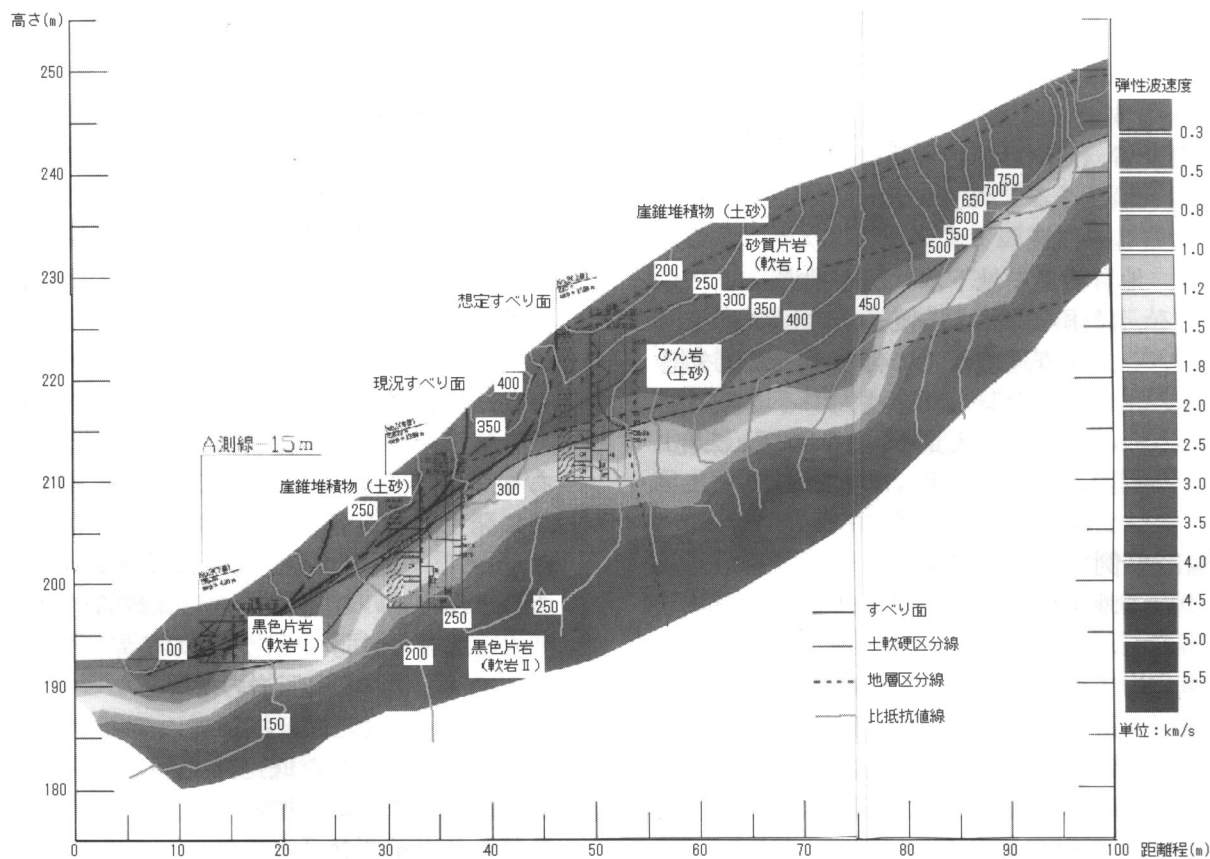


図5 崩壊土すべりでの事例 (弾性波探査 (トモグラフィ法) と2次元比抵抗探査)

図5は、弾性波探査 (トモグラフィ法) と2次元比抵抗探査の結果を示したものである。以下、探査結果を示す。移動層の弾性波速度は概ね 0.8 km/s 以下であり、移動層と不動層の境界は、概ね弾性波探査から把握できている。移動層末端には、低比抵抗部 (概ね 100 Ωm 以下) が見られ、盛土層に対応している。基盤の終点側の高比抵抗低速度部は、砂質片岩と推定される。

#### (4) 連続探査 (電気探査) の事例

図6は、地すべり地において地下水の流動機構を把握するために実施された電気探査による連続探査の事例である。降雨などにより水が流入し、

地盤の含水量が上昇すると比抵抗が低下することを利用した調査法である。降雨量と地盤の比抵抗の変化には相関が認められ、降雨により地表付近の比抵抗が低下し、降雨終了後、比抵抗が上昇する様子が確認できる。

#### 6. 最後に

ここでは、地すべり斜面崩壊調査において適用される物理探査について述べた。これらの調査では、弾性波探査屈折法 (ハギトリ法, トモグラフィ法), 2次元比抵抗探査が多く用いられており、探査事例では、弾性波探査屈折法と2次元比抵抗



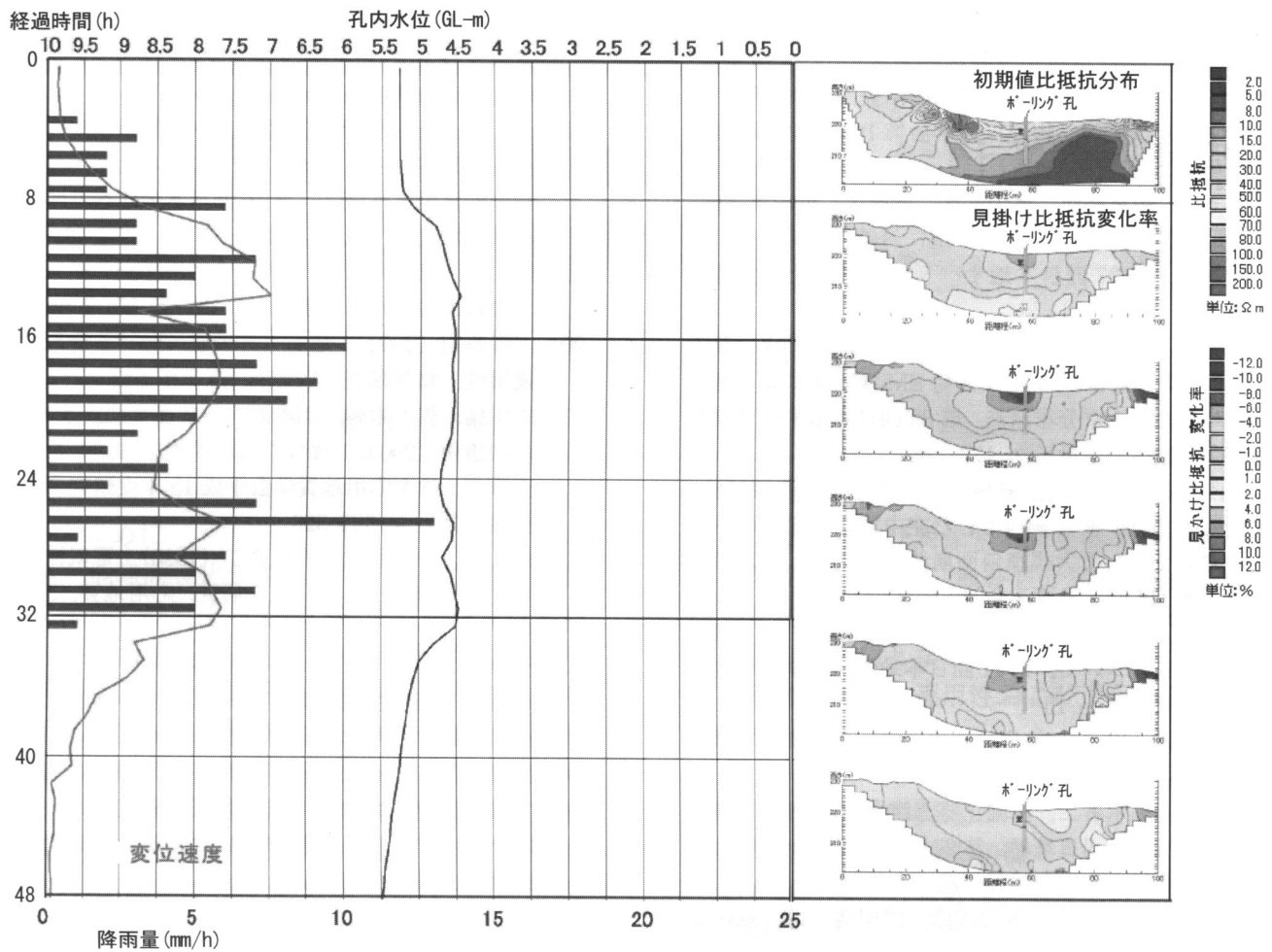


図6 電気探査における連続測定の場合

探査を併用することにより多くの情報が得られることが示されている。一方、同時に、物理探査結果単独では、地盤の状態を適切に判断できないことも明らかである。

物理探査を計画、実施する場合、探査目的を明確にし、探査対象および目的に適した探査法を選択することが重要であり、適切な測線を設定することが重要である。また、得られた物理探査結果を地質技術者だけで判断するのではなく、物理探査技術者などと共同で検討、判断することが重要であると考えられる。本文が、多少なりとも物理探査の適切な適用に貢献すれば幸いである。

## 謝辞

本文を作成するにあたり、調査結果の利用をご了解いただきました各関係機関に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 玉城逸夫, 川本整, 藤田崇, 大場康行 (1966) : 亀の背地すべりの研究 (2), 地すべり, 第2巻, 第3号,

pp. 5-11

- 2) 物理探査学会地盤探査研究会第三分科会 (1998) : 物理探査技術の適用事例集 (その1)
- 3) 例えば, 山本剛, 満下淳二, 楠見晴重, 小山倫史, 松岡俊文, 大西有三 (2008) : 道路法面管理と物理探査, 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, pp. 87-96
- 4) 菅智浩, 三木茂, 中司龍明 (2008) : 地すべり調査における物理探査の適用と事例, 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, pp. 245-250
- 5) 日本地すべり学会 (2001) : 日本地すべり学会研究発表会講演集, 第1回~第40回 CD-ROM 版
- 6) 物理探査学会 (2008) : 学術講演会論文集, 第43回~第118回 DVD 版
- 7) 上野将司 (2008) : 地すべり調査における物理探査の役割と問題点, 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, pp. 241-244
- 8) 物理探査学会 (2008) : 新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル—
- 9) 例えば, 楠見晴重, 中村真, 西田一彦 (1996) : 連続計測による岩盤斜面の不連続帯部における見かけ比抵抗変化と降雨との関係について, 物理探査学会第

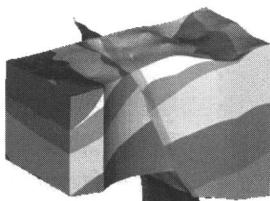
95 回学術講演会論文集, pp. 219-223

- 10) 例えば, 河戸克志, 浅井聡, 藤田拓生, 中里裕臣 (2003): 空中電磁法による四国中央部三波川帯での地すべり調査例, 物理探査学会第 108 回学術講演会論文集, pp. 255-258
- 11) 例えば, 中里裕臣, 奥山武彦, 森充広, 黒田清一郎, 下川弘晃 (1998): 地すべり地における比抵抗モニタリング, 第 37 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 253-256
- 12) 例えば, 中村三郎, 東年春, 山田茂治, 柘植孝, 登内正治, 野口静雄 (1994): 簡易 EM 探査法による地すべり地の地下水分布調査, 第 33 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 177-178
- 13) 畠山晃陽, 中山文也, 結城洋一, 黒田清一郎 (2006): 無人ヘリコプターを利用した空中電磁探査法の中越地震で発生した大規模斜面崩壊への適用, 物理探査学会第 114 回学術講演会論文集, pp. 247-249
- 14) 例えば, 竹内篤雄 (1973): 地すべり地における地温測定調査について, 第 11 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 15
- 15) 竹内篤雄 (1983): 地すべり地温測定による地下水調査法, 古今書院
- 16) 例えば, 栃木省二, 海堀正博, 鈴木滋 (1988): 自然放射能探査と岩質境界, 第 27 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 178-182
- 17) 例えば, 中里裕臣, 奥山武彦, 黒田清一郎, 畑山元

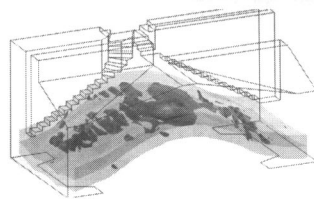
晴, 長束勇, 直江次男 (2000): 湯殿山巨大地すべりにおける GPS 移動観測, 第 39 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 167-170

- 18) shamen-net 研究会技術委員会・高知県中央西土木事務所越知事務所 (2008): GPS による地すべり地表面計測の実用性検証②, 第 46 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 313-316
- 19) 例えば, 田治米鏡二 (1972): 物理探査の結果と地質との対比の哲学, 物理探査, Vol. 25, No. 2, pp. 1-3
- 20) 上野将司 (2002): 地すべり調査における物理探査の適用性, 物理探査, Vol. 55, pp. 505-512
- 21) 吉川猛, 佐々木勝, 岡本直人, 佐藤真悟, 永井勝也, 多田康信 (2003): 複数の物理探査を併用した斜面調査事例, 日本応用地質学会平成 15 年度研究発表会講演論文集, pp. 325-326
- 22) 例えば, 竹内睦雄, 長江亮二 (1990): 電気検層による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, 31 巻, 1 号, pp. 12-18
- 23) 佐々木實, 三木茂, 山本勇, 菊池淳一, 平田晴昭 (1995): 高密度電気探査の地すべりへの適用, 第 34 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 215-218
- 24) 荒井敬悦, 三木茂, 佐々木實, 平田晴昭 (1995): 地すべり調査における高密度電気探査実施例—山形県滝の平地すべり—, 日本応用地質学会平成 7 年度研究発表会講演論文集, pp. 41-46

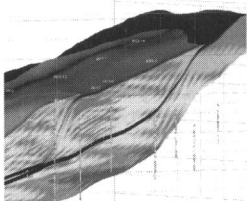
## 3次元+時間 可視化技術 MVS(Mining Visualization System) EVS(Environmental Visualization System)



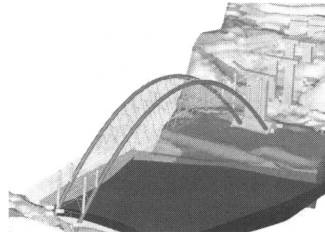
層状データ



連続値データ

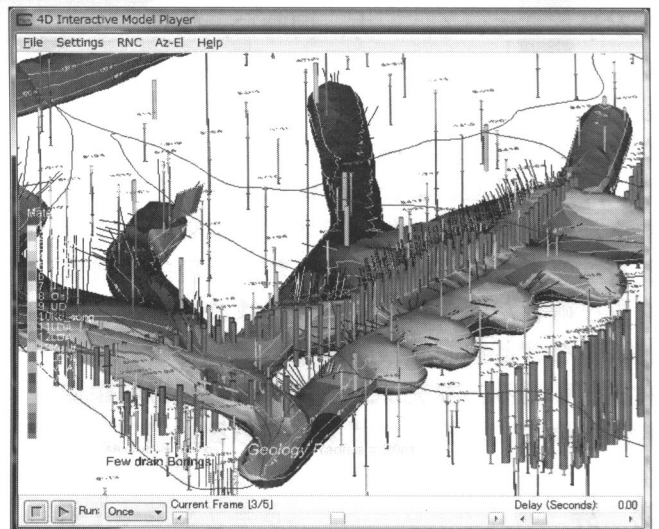


離散値データ



構造物データ

MVS・EVSは、地層のような層状データ、計測値・プリウムなどの連続値、岩級区分などの離散値、および構造物データを3次元表示し、その変化も表現します。そしてモデルは、無料のビューワーで顧客に配布できます。



4D Interactive Model Playerで自由に配布

YouTube

ohtageoresearch

検索

有限会社 太田ジオリサーチ  
<http://www.ohta-geo.co.jp/>

無料3次元可視化モデル自動作成配信サービスは太田ジオWEBから

TEL 078-907-3120(担当:林)



# 高レベル放射性廃棄物地層処分における物理探査技術の適用性について

【Key Word】

非破壊調査, 地下水, 断層, 透水性, 沿岸域

よし むら きみ たか  
吉村 公孝\*

## 1. はじめに

近年, 地球温暖化やエネルギー安全保障の観点から, 海外では原子力発電への期待が高まっている。いわゆる原子力ルネサンスと呼ばれるもので, 米国など原子力発電の先進国はもとより, 中国やインドのような新興諸国においても, 国内の電力不足を補うために本格的な原子力開発を進めている国々も現れてきた。わが国でも大間や島根で新設の原子力発電所の建設が進められているほか, さらに12基が着工準備中である<sup>1)</sup>。一方で, 原子力発電および核燃料サイクルで生じる放射性廃棄物の地層処分事業については, 高レベル放射性廃棄物の地層処分実施主体として, 平成12年に原子力発電環境整備機構 (NUMO) が設立され, 平成14年からは, 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に沿って, 高レベル放射性廃棄物の地層処分施設建設地を調査・選定する手順の第一段階である概要調査地区選定のための文献調査地区を, 全国の市町村に対して公募しているが, 平成22年現在で文献調査は開始されていない状況である。

原子力発電を取り入れている国においては, 使用済燃料を含む高レベル放射性廃棄物の処分は, 速やかに解決しなければならない課題である。しかし, 現在に至るまでに地層処分場の建設地を選定したのはフィンランドとスウェーデンのみである。わが国では, 今後文献調査を経て, 概要調査から精密調査へと段階的に地層処分場建設の候補地が選定されることになる。

本論では, 放射性廃棄物のうち, 高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念を概説するとともに,

これまで国および関係する研究機関が実施してきた研究開発について, 最終処分場選定過程のうち, 概要調査から精密調査の初期段階までを想定して, そこで対象となる地質環境要件と, それらに対する物理探査の適用性および適用事例について紹介する。

## 2. 地層処分の概念

### 2.1 放射性廃棄物の特徴

わが国の原子力発電は, 発電後の使用済核燃料を再処理して, 核燃料として再使用できるウラン235, ウラン238およびプルトニウム239を分離回収する核燃料サイクルを取り入れている。再処理の際に残留した廃液は, 高レベル放射性廃棄物と呼ばれ, ガラスと混ぜてステンレス製の容器に入れて固めたガラス固化体として保管されている。また, 使用済燃料の再処理に伴い, 原子燃料の被覆管などのTRU廃棄物 (超ウラン元素を含む長半減期低発熱放射性廃棄物) が発生する (図1)。

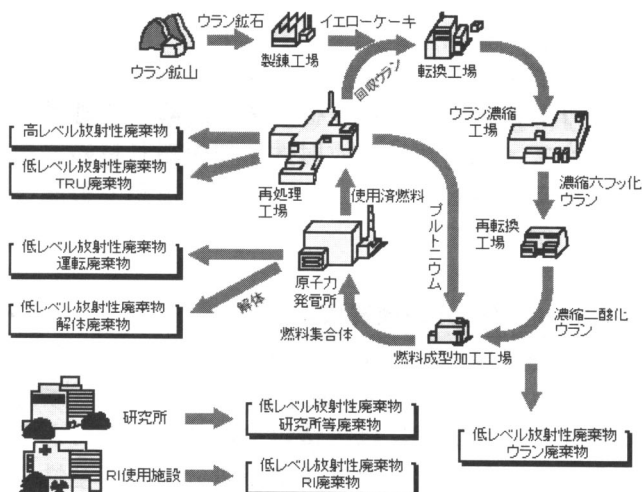


図1 核燃料サイクルと発生する放射性廃棄物の種類<sup>2)</sup>

\* (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (現所属: 原子力発電環境整備機構 技術部) 技術士 工学博士

放射性核種は原子核崩壊を起こし、時間とともに放射能が減衰する特徴を持つ。高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種の大部分は、発生してから数百年で急速に減少するが、一部は放射能が低いものの長期間放射線を出し続ける放射性核種もある。そのため、これら放射性核種を人間が活動する場所から離して地中深く閉じ込めてしまうのが地層処分であり、わが国では、高レベル放射性廃棄物および地層処分対象の TRU 廃棄物については、NUMO が地層処分を実施する。

## 2.2 地層処分の概念

わが国の現状の地層処分概念では、高レベル放射性廃棄物については、図 2 に示したように、ガラス固化体を炭素鋼を用いたオーバーパックに入れ、その周りをベントナイトによる緩衝材で覆った人工バリアを作り、図 3 に示すような地層処分場を建設して、地下 300 m 以深の安定した地層中に埋設する計画である。TRU 廃棄物については、放射性物質の特徴に応じた廃棄体パッケージを緩衝材で覆い、地層中に埋設することが考えられている。

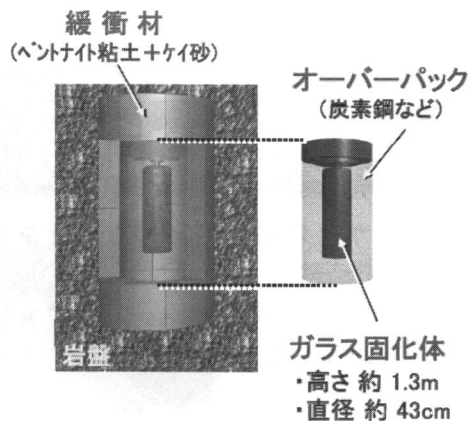


図 2 人工バリアの概念図<sup>3)</sup>

高レベル放射性廃棄物の地層処分概念では、人工バリアによる放射性核種の閉じ込め・遅延効果に加えて、地層が持つ放射性核種の閉じ込め・遅延性能を組み合わせた、多重バリア構想で長期安全性が示されている。

## 2.3 地層処分の地質環境

わが国には高レベル放射性廃棄物の最終処分地となりうる場所として、地形的には島嶼、沿岸域、内陸など、地質的には堆積岩や結晶質岩などが考えられる。地質調査では、地層処分場の安全性を評価できるように、地域と地質環境に応じた評価材料が提供されることが求められる。

地層処分場閉鎖後に、長期間において、人工バリアの劣化等で地層処分場から漏出する放射性核種は、地層中の地下水によって流動することがシナリオで想定されている。地層中の地下水は、地層を構成する岩石の粒子間や亀裂を通じて流動する。放射性核種は、流動する間にも原子核崩壊を繰り返し、徐々に放射能が減衰していくが、断層や破碎帯で流速が早い地下水で運ばれると、十分に放射能が減衰しないうちに人間が活動する場所に出現する可能性がある。また、火山・火成活動が活発な地域、活断層がある地域、地層の隆起および侵食が著しい地域では、地層処分場が破壊されたり、埋設した放射性廃棄物の放射能が十分に減衰しないうちに地上に現れたりする恐れがあるため、処分場の選定段階では、これらの自然事象が著しく地層処分場に影響を与えない場所が選定されることになる。

したがって、処分場周辺の地質環境の長期安定性にかかる活断層の性状、施設設計や地下水の移行に関連する地質構造、岩盤や断層の透水性並びに地下水の性質等は、放射性廃棄物を人間の生活環境との間に長期間にわたり、十分な離隔距離を保つことの評価に必要である。よってこれらの地質性状は重要な調査項目と言えるため、地質環境調査においては、これらの性状を精度良くかつ信頼性高く調査・評価することが必要であると考えられる。

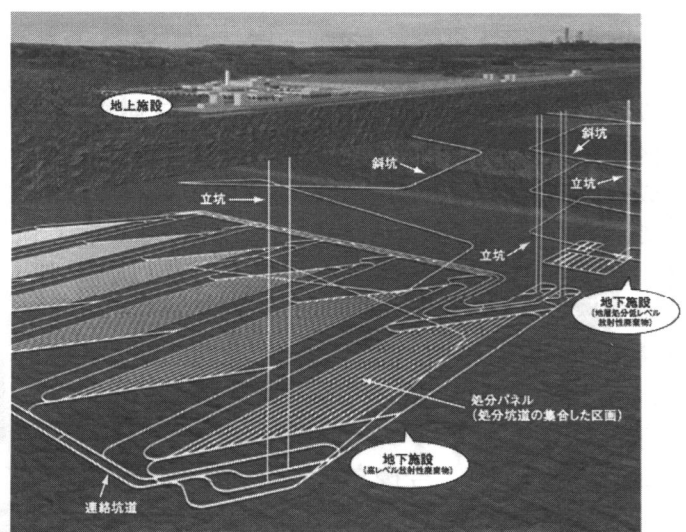


図 3 高レベル廃棄物地層処分場のイメージ<sup>4)</sup>

## 3. 物理探査の役割

### 3.1 物理探査の特徴

地下深部の地質環境を把握することは、地層処分以外にも、学術調査、資源探査、環境問題、防災などさまざまな観点から重要である。しかし、



地下深部の地質環境を知ろうとした場合、直接的に地質環境を確認できる手法は、ボーリング孔掘削による調査だけといえる。しかし、大深度のボーリング孔掘削及びコア採取には多くの時間と費用が必要であり、場所と数量は限定される場合が多い。地層には天然バリアとしての放射性核種閉じ込めと核種移行の遅延効果を期待していることから、ボーリング孔は核種移行経路となる恐れがあるため、この観点からも、むやみに多数のボーリングを掘削することは得策ではない。非破壊で遠隔的に広域の地下情報を得ることができる物理探査は、このような制約の中で実施する地下深部の調査においては大変有効な手法であると言える。

物理探査は、空中、海上、地表、地中において、地下からの物理的情報を取得し、その情報を解析して可視化することで、広域を非破壊で連続的に調査することが可能な技術である。原理的には、信号を地下に送りそのレスポンスを診る能動的な手法と地下で発生した信号を受け取るだけの受動的な方法に大別できる。最近では、計測・解析技術の進歩により、広域的な地下の状態を詳細かつ3次元的に可視化することができ、深部の地質環境を把握する上で非常に有力な手法となってきた。物理探査は既に資源探査や土木分野等の多岐の分野で広く適用されていて、技術的信頼性も高い。

このように、非破壊で地下深部を調査できる物理探査は、天然バリアの性能を低下させず、広域を効率的に調査できること、また調査スケールや探査密度を調整することで、概査にも精査にも適用できる柔軟性を持つことから、地層処分場の選定の各段階の様々な場面で用いられるものと期待されている。概要調査段階以降で使用される可能性がある物理探査技術については、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、原子力環境整備促進・資金管理センター（以後、原環センターと略記）がその適用性も含めてとりまとめている。それらを表1に示す。

物理探査の反映先としては、火山・火成活動、地震・断層活動、地下水の流動特性に係る調査・評価、岩盤中の地下水分布状況や塩水系の地下水の存在、母岩の物理・力学・熱特性など、様々な場面とスケールで適用されることが期待される。

### 3.2 主要な物理探査手法

表1に示した様々な物理探査技術のうち、深部地質環境を探査できる手法として、概要調査の初

期段階から様々な場面で適用されるものと考えられる反射法地震探査と電磁法探査について説明する。

表1 主な物理探査技術<sup>5)</sup>

空中		電磁探査, 重力探査 磁気探査, 放射能探査
地表 (陸上・沿岸域・水上) [2次元及び3次元探査]	地震探査	微動探査, 常時微動測定 反射法, 屈折法 表面波, 微小地震観測
	電気探査	自然電位法, 比抵抗法 強制分極法
	電磁探査	MT法, VLF法, CSAMT法, TDEM法 地中レーダー
	重力探査	
	磁気探査	
ボーリング孔		放射能探査
	単孔	VSP シングルホールイメージング法 流電電位法 シングルホールレーダー
	複数孔	走時トモグラフィ 孔間反射法 フルウェーブトモグラフィ 音響透水トモグラフィ 比抵抗トモグラフィ IPトモグラフィ EMトモグラフィ レーダートモグラフィ
	検層	音波検層, 電気検層 放射能検層, 温度検層 微流速検層, NMR検層 孔間イメージング

#### 3.2.1 反射法地震探査

反射法地震探査は、爆薬や人工震源装置を用いて、地上から地中に人工地震波を送り込み、密度や弾性波速度が異なる地下の地層境界などから反射して、地上に戻ってくる微弱な振動を等間隔に設置した受振器で捉え、共通反射点ごとに反射波形を並べて表示することで地質構造を把握する手法である(図4)。反射波をボーリング孔内で受振するVSP探査も反射法地震探査の一種である。

本来、石油探査など大深度の構造探査に用いられてきたが、近年、土木事業や活断層調査などに幅広く適用されている。堆積構造の探査に向いていることから、地層処分では、断層構造等を含む地質構造を把握するために用いられることが期待される。

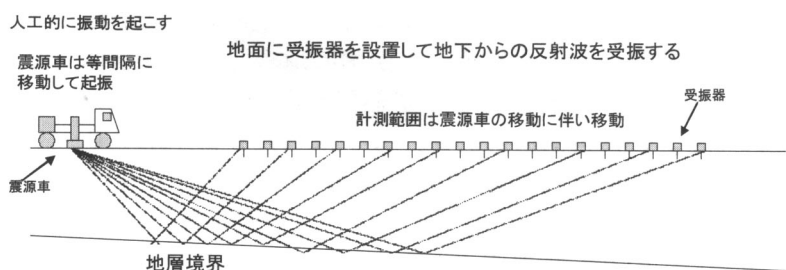


図4 反射法地震探査の概念図

### 3.2.2 電磁法探査

電磁法探査は、図5の概念図で示したように、雷の放電による電磁波や、太陽風による磁気圏・電離層の電磁気活動など自然界に存在する電磁波信号を用いて行うMT法や、送信アンテナを用いて人工的に発生させた電磁波を用いるCSAMT法、TDEM法などがある。地下深部の比抵抗構造が得られるため、地層処分では、岩盤中の地下水分布の性状、沿岸域における塩水系地下水と淡水系地下水の境界等の把握に期待されている。本手法は結晶質岩のように明瞭な反射面を形成しない岩盤に対して、反射法地震探査を補完する位置づけとしても期待されている。

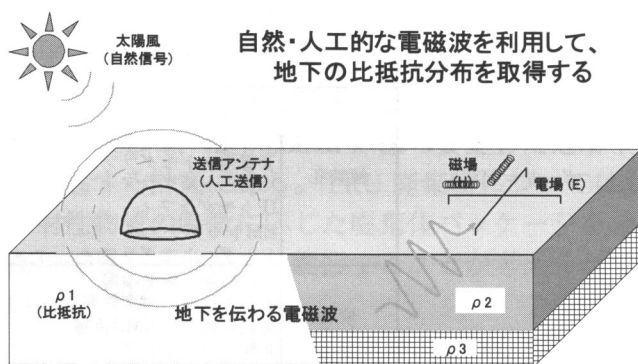


図5 電磁法 (MT法, CSAMT法) の概念図

### 3.3 物理探査高度化

核燃料サイクル開発機構 (現: 日本原子力研究開発機構) は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念と安全確保の考え方を示し、地層処分の技術的信頼性についてとりまとめている<sup>6)</sup>。ここでは、物理探査を含めて現状の地質調査技術で、処分地選定に係る地質環境調査が実施できると述べている。

このような背景のもと、経済産業省資源エネルギー庁は、国の責任のもとで、地層処分に係る技術基盤の継続的強化を図り、実施主体とは異なる立場で、客観性をもって技術的信頼性や安全性を高め、処分事業に対する国民の理解を推進すること、さらに処分事業や安全規制に先行する形で技術基盤の整備を進め、わが国の地層処分計画全体の着実な進展に資する基盤研究開発<sup>7)</sup>を進めている。この目的のもとで、地下水年代分析、ボーリングや物理探査の高度化開発等が実施されてきた。

このうち物理探査の高度化開発は、資源エネルギー庁の委託研究「高精度物理探査技術高度化調査」として、原環センターが平成12年度から平成

18年度まで実施した。本研究では、従来からある地下構造調査手法としての物理探査要素技術開発だけでなく、ボーリングや地表踏査などの既存技術と合理的かつ適切に組み合わせることにより、高精度で信頼性高く地下深部の情報を取得できる総合的な物理探査技術を確立することを目的として実施された。

具体的な技術開発として、電磁法に視点を当て、従来の2次元探査による解析結果の不確実性を低減させ、地下深部の探査精度を向上させるために、MT法の3次元解析プログラムを開発した。そして、断層の検出を目的として米国や中国のフィールド、および北海道幌延で実証試験を行い、横ずれ断層のように、反射法では検出しにくい断層を検出している<sup>8)</sup>。また、音波探査の調査船が侵入できないような沿岸の浅海域において、従来手法による深部探査を補完する目的で、CSEM法の解析プログラムと機器開発を行った。そして、機器の性能確認を兼ねて米国のモンテレー湾で実証試験を行い (写真1)、海底下に伏在する断層探査を行っている<sup>9)</sup>。

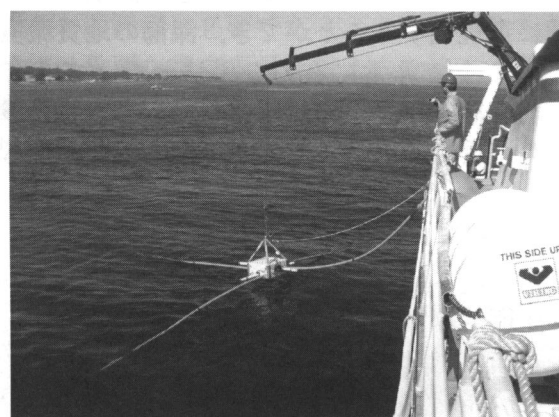


写真1 海底電磁法の実証試験

電磁法以外では、構造探査の高精度化を目的としたフルウェーブトモグラフィや岩盤中の透水係数分布を推定する弾性波透水トモグラフィの技術開発を行い、米国およびスイスのフィールドで実証試験を行っている。

このほかにも、リモートセンシングデータを3次元化する手法<sup>10)</sup>、岩盤中の間隙率や透水係数を推定する岩石物理学の適用性評価<sup>11)</sup>なども行った。

### 4. 地層処分研究での物理探査適用事例

地層処分事業では、法律で記載された地下300m以深に処分場を建設する。初期段階の地質環境調査では、処分パネルを設置するエリアはもと



より、長期安定性に関する周辺の断層活動や隆起・侵食などの変動要素に関する情報も重要であるため、広域でかつ地下深部を探索できる手法がより重要となる。後に精密調査段階に進み、詳細な地質環境情報が必要となった場合には、様々な範囲、深度、解像度、分解能を持った探索手法が適用されるものと考えられる。ここでは、地上からの最初の調査段階である概要調査段階を念頭にした物理探査の適用事例について示す。

#### 4.1 深部地質構造・断層探査

地層処分場の長期安定性を視野に入れた際に、地殻変動による影響は処分場選定段階で考慮しておくべき重要な調査項目である。このうち、断層については、断層が深部地下水の流出経路となりうるほか、断層活動そのものにより、処分場が破壊される可能性や、著しい変動によって、地下水流動等の性状が変化する可能性を否定できない。地層処分場のパネル設計では、処分対象岩体の規模と連続性を把握することが重要である。

地下深部の地層境界や断層の位置・形状を広域で把握するには、重力探査、反射法地震探査並びに電磁法探査（MT法、CSAMT法）が適用されることが多い。陸域の反射法地震探査では、一般に測線配置による2次元反射法探査が適用されているが、近年では記録器の多チャンネル化に伴い、3次元探査が実施される事例が増加している。

地層処分の分野では、例えば、Nagra社がスイスの堆積岩地域で3次元反射法を実施し、粘土層の広域的な連続性とこれを分断する落差10m程度の断層を検出した事例がある（図6）。国内では、佐々木ほか<sup>13)</sup>が青森県で3次元反射法地震探査を実施しており、中新世の堆積岩を対象にして、探査深度200m程度において落差5m程度の断層を検出した事例がある。海域では、マルチチャンネル音波探査が一般に用いられ、海底に分布する断層調査に多くの実績があるが、地層処分分野ではまだ適用された事例はない。

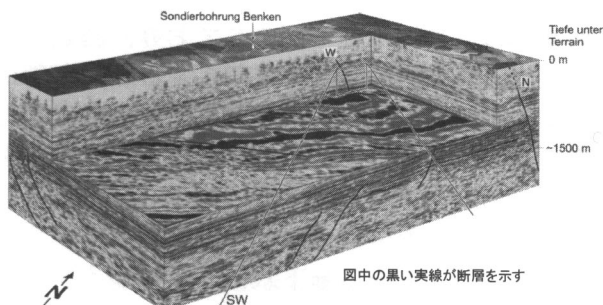


図6 3次元反射法地震探査の実施例<sup>12)</sup>

電磁法探査については、深部探査にはMT法が一般に使用されることが多い。この手法は、解析に使用する電磁波の周波数帯によって、深度数10km程度まで探査できる特徴がある。この手法は探査深度能力から地球科学分野や、地熱開発分野で広く用いられたものであるが、近年地層処分事業でも適用される事例が増えてきており、地質環境の長期安定性に関連して、宮城県の鬼首・鳴子火山を対象にした地下深部のマグマや高温流体の探査に関する事例がある（図7）。

近年は地下深部の情報取得の高度化が進み、3次元電磁法探査が行われるようになった。吉村ほか<sup>14)</sup>は、米国のサンアンドレアス断層を対象にした3次元MT法探査を実施しており、比抵抗値の空間分布から断層構造を示している（図8）。また、花崗岩地域の断層を対象にした電磁法探査では、人工送信源を使ったCSAMT法により、3次元探査を実施し、深度2km程度の範囲で花崗岩内に分布する断層を検出した事例<sup>16)</sup>がある。

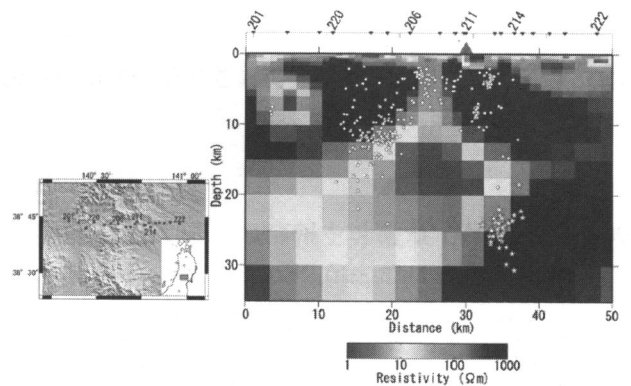


図7 MT法で地下深部のマグマ形状を探索した事例<sup>14)</sup>

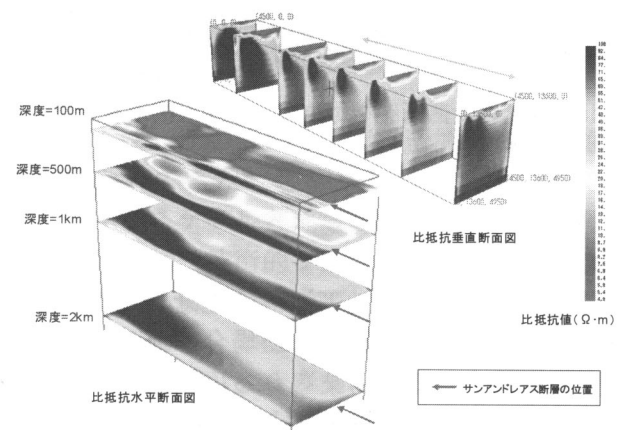


図8 サンアンドレアス断層を対象にした3次元MT法の実施例<sup>15)</sup>

深地層を対象にしては、日本原子力研究開発機構が結晶質岩と堆積岩を対象にした科学的研究を

行っている。平成 22 年現在で、岐阜県瑞浪の超深地層研究所敷地内では 2 本の立坑と水平坑道が掘削されている。超深地層研究所周辺では、花崗岩とその上部に堆積する中新世の堆積岩を対象にした反射法地震探査や、坑道掘削時の発破振動を利用した逆 VSP<sup>17)</sup> など、新しい試みが行われている。また、幌延の深地層研究センターにおいては、研究所敷地周辺において MT 法 (図 9) や反射法地震探査 (図 10) によって大曲断層を調査したほか、空中電磁探査や磁気探査によって広域の調査を実施した事例がある<sup>18)</sup>。

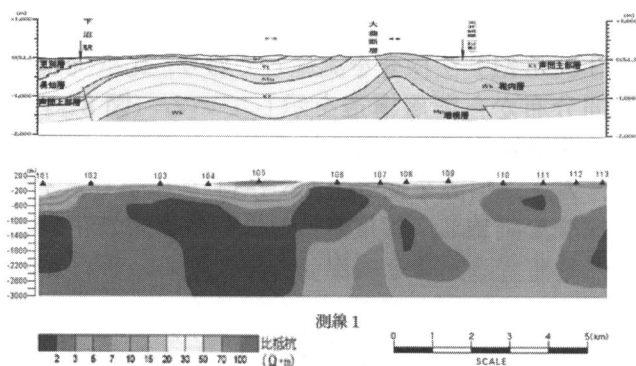


図 9 幌延深地層研究所周辺で実施された MT 法の実施例<sup>18)</sup>

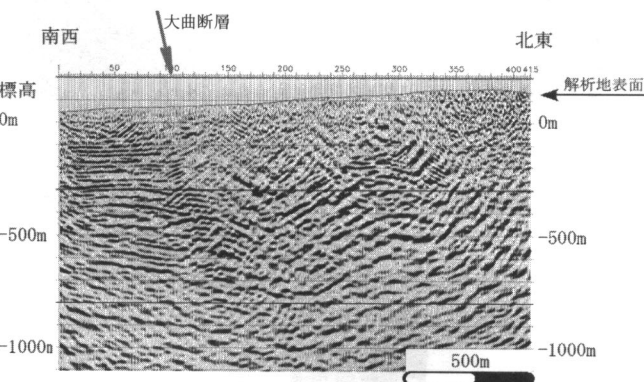


図 10 幌延の大曲断層を対象にした反射法地震探査の実施例<sup>19)</sup>

## 4.2 水理地質

前述したように、地下深部に処分した放射性核種が人工バリアから漏出した場合、地下水流動によって運搬されると考えられる。流動モデルとして、地下水が地層を構成する空隙間を流れる連続体モデルと、亀裂内を流れる亀裂ネットワークモデルが考えられている<sup>6)</sup>。これらのモデルを処分場スケールに適用させるには、地下水流動特性を表す透水係数データを空間的に評価する手法が必要となる。亀裂特性や透水係数分布などはボーリ

ング孔を用いた調査によって得られるため、地質構造モデルを基にして、内挿・外挿によって空間的に展開する手法が一般的である。

物理探査を用いた水理情報の把握については、従来は間隙水分布に感度がある電気探査や電磁法探査を用いた比抵抗情報を基にして、Archie の式や並列回路モデルによる間隙率分布推定から、透水係数を推定する手法が用いられてきた。

最近では、石油貯留層評価技術で用いられている岩石物理学モデルによる推定方法が開発されつつある。この手法では、例えば軟岩系の堆積岩は粒径の異なる砂粒子と粘土粒子とで構成され、この粒子の混合割合の違いによるモデルに基づいて、物理検層データやボーリングコアデータを用いて間隙率や透水係数を推定するものである<sup>20)</sup>。

また、最近では、間隙水で飽和した岩石中を弾性波が伝わる際に、伝播する周波数によって弾性波速度が分散する現象を用いて、岩盤中の透水係数の空間分布を推定する手法も開発されている。吉村ほか<sup>21)</sup>はこの手法を用いて、スイスのアルプス山中にあるグリムゼル試験場の花崗岩を対象にして、複数の周波数による弾性波トモグラフィを行い、弾性波速度の分散現象を用いて、岩盤中の破碎帯の透水係数を推定した。さらに、ボーリングを掘削して水理試験を実施し、弾性波トモグラフィによる透水係数との整合性を検討した事例を示している。物理探査と同じ範疇であるが、ボーリング孔内で実施する物理検層のうち、電気伝導度検層を用いて、花崗岩中の透水性亀裂を検出した事例<sup>21)</sup>もある。

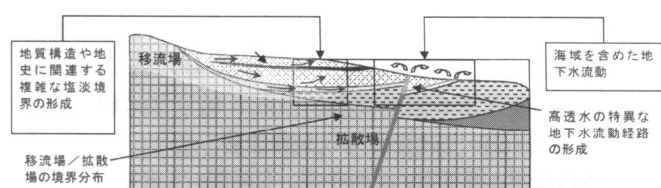
また、広域の地下水流動の評価については、反射法のデータに基づいた地質構造モデルに対して、電磁法による比抵抗データを加えた水理地質構造モデルを作成し、このモデルによる 2 次元および 3 次元の地下水流動解析を試み、地下水流動に対する地質構造の影響について検討した事例<sup>23)</sup>がある。

## 4.3 沿岸域

わが国は、四方を海で囲まれており、総延長約 34,000 km にも及ぶ海岸線が存在することが特徴である。地層処分では沿岸域も処分場建設候補地となり得る。沿岸域は内陸から流れてきた降水を起源とする淡水系地下水が海に流出し、淡水と塩水との境界領域ができる。このような塩淡水境界では、化学成分が異なる地下水による影響も考慮される。また、将来的には気候変動による海水準変動に伴い、地下水流動場が変化して、塩淡水境界も

変化する可能性も考えられるため、**図 11** に示すように海水の影響や塩淡水境界の分布を考慮する必要がある。このような水質が変化する可能性がある場所では、特に下記に示すような調査項目が重要と考えられる。

- ・水理地質構造については、岩盤および断層の高透水のみならず低透水の3次元分布の把握
- ・地下水駆動力については、過去・現在・将来の動水勾配・密度勾配の評価、3次元的影响範囲
- ・地下水流動系については、化学的調査と物理的調査の整合性、地史を踏まえた地下水流動場の評価
- ・拡散場の評価については、拡散場の同定、移流場—拡散場境界の把握、核種移行パラメータの評価



**図 11** 沿岸域に特徴的な地質環境<sup>7)</sup>

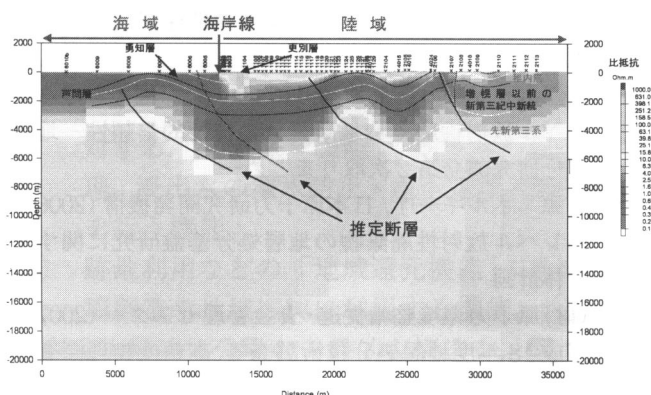
また、沿岸域では、陸域から海域にわたる広域かつ地表から深部の空間的な連続性や変化の把握が重要であり、これらは、できるだけ自然状態での場の把握が重要であることから静穏な環境を乱さない調査が求められる。

そこで、岩盤の透水分布や断層の透水性状分布の把握、水理地質構造を規制する地質要素（不透水層など）の抽出技術、あるいは塩水/淡水の広範囲な分布を把握する手順を検討した。まず、地下深部に至る地質構造を把握するための反射法地震探査や電磁法探査等を実施するとともに、地下空間で塩水系地下水の分布状況を推定し、次に、限定的にコアサンプリングや地下水性状を直接調査できるボーリングや物理検層を用いて、対象地層の間隙率や透水係数等の地質情報を導き出し、これを物理探査手法による現地計測に基づいて、広領域空間へ展開することが考えられる。

沿岸域のうち、陸域と海域が接する汀線付近は、海上から調査船が接近できず、一方で陸上からのアプローチも限られるため、これまで調査の空白域として残されていた。しかし近年では、深部地質構造調査等で海陸連続の反射法地震探査<sup>24)</sup>により、地下深部の構造探査が行われているほか、北海道幌延において海域と陸域で電磁法探査により、汀線近傍で褶曲構造を探索した事例 (**図 12**)

があり、技術的には空白域ではなくなりつつある。

資源エネルギー庁は、平成 19 年度から地層処分事業に資する基盤技術開発として、沿岸域を対象にしたプロジェクトを開始している。平成 22 年現在、幌延の沿岸域を対象にして、深部調査ボーリング、広域の地質構造探査を対象にした電磁法や反射法地震探査の適用性について研究開発が行われていることから、さらなる新しい技術的知見が得られるものと期待されている。



**図 12** 幌延沿岸域において海陸連続で実施された MT 法探査の実施例<sup>23)</sup>

## 5. おわりに

物理探査は地下の情報を非破壊で取得できる唯一の調査手法である。現在までに資源開発や土木事業など様々な分野で使用されてきて、独自の技術開発が行われてきた。地層処分分野については、地下水流動特性が放射性物質の移行に影響するため、地下水の分布性状の把握、流動経路となる断層や破碎帯の検出、そして地層処分場の選定段階を想定した広域の地質構造調査などで既存技術の適用性確認が行われ、同時に技術開発が行われてきた。

ここでは、地層処分分野で技術開発や適用性評価が行われてきた物理探査について説明してきた。様々なスケールと地域を対象にして、物理探査が適用され、技術的な課題も徐々に解決されてきている。地層処分は、現在わが国の総発電量の約 30 パーセントを担う原子力発電<sup>1)</sup>を維持するためにも必要不可欠な事業である。今後、概要調査、精密調査と進展する地層処分場選定の各段階で、様々な物理探査が活躍することを期待する。

## 参考文献

- 1) 電気事業連合会ホームページ，原子力発電の現状，<http://www.fepec.or.jp/present/nuclear/setsubi/>



index.html

- 2) (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センターホームページ, 原環センターライブラリ ポケットブック, <http://www.rwmc.or.jp/library/pocket/book/>
- 3) 核燃料サイクル開発機構 (2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—
- 4) 原子力発電環境整備機構 (2009): 放射性廃棄物の地層処分事業について, 分冊—1 処分場の概要
- 5) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2001): 平成12年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書 (第1分冊) —高精度物理探査技術高度化調査—
- 6) 核燃料サイクル開発機構 (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—
- 7) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2006): 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究に関する全体計画
- 8) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2007): 平成18年度地層処分技術調査等 高精度物理探査技術高度化調査 物理探査技術信頼性確認試験報告書
- 9) 吉村公孝, 大久保秀一, 山根一修 (2006): 海底電磁法探査による伏在断層や地下水理情報の取得可能性について, 地学雑誌, Vol. 115, No. 3, 400-415
- 10) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2003): 最近のリモートセンシング技術の動向—地質環境調査への適用性—, 原環センタートピックス, No. 65
- 11) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2006): 平成17年度地層処分技術調査等 高精度物理探査技術高度化調査 物理探査技術信頼性確認試験報告書
- 12) Birkhäuser P., Roth P., Meier B., Naef H. (2001): 3D-Seismik Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, NAGRA NTB 00-03, nagra, Switzerland
- 13) 佐々木泰, 浜田憲彦, 藤原八笛, 鶴旨純, 中東秀樹 (2008): 地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析, 物理探査 第61巻第3号, 243-249
- 14) 浅森浩一, 梅田浩司 (2005): 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術—鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用—, 原子力バックエンド研究, Vol. 11, No. 2, 147-153
- 15) 吉村公孝, 坂下晋, 大久保秀一, 山根一修 (2006): 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その7) —サンアンドレアス断層を対象にしたMT法3次元調査—, 物理探査学会第115回学術講演会論文集, 213-216
- 16) 吉村公孝, 坂下晋, 岡崎幸司, 武田康人, 大里和己 (2007): 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その8)—中華人民共和国甘粛省北山地区における3次元調査—, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 185-188
- 17) 松岡稔幸, 程塚保行, 鶴田忠彦, 石垣孝一, 山田信人, 山口伸治 (2008): 花崗岩を対象とした立坑掘削工事振動を利用した物理探査技術の開発—逆VSP探査の適用—, 物理探査学会第119回学術講演会論文集, 65-67
- 18) 核燃料サイクル開発機構 (2002): 幌延深地層研究計画平成13年度調査研究成果報告書
- 19) 核燃料サイクル開発機構 (2005): 幌延深地層研究計画平成16年度調査研究成果報告書
- 20) 吉村公孝, 坂下晋, 小西千里, 安藤誠, 東宏幸 (2007): デバインサイトにおける岩石物理学的手法による透水係数断面の推定, 物理探査学会第116回学術講演会論文集, 129-132
- 21) 吉村公孝, 安藤賢一, 坂下晋, パトリック・ブライネス, 奥村裕史, 西山哲, 大西有三 (2009): 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤の透水係数イメージング手法に関する実験的研究, 物理探査, Vol. 62, No. 3, 307-318
- 22) 松岡清幸, 竹内真司, 新堀雄一 (2007): 電気伝導度検層を用いた水みちの検出例, 物理探査学会第116回学術講演会論文集, 149-152
- 23) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2009): 平成20年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発報告書
- 24) 千葉県 (2004): 平成15年度 地震関係基礎調査交付金 千葉県地下構造調査成果報告書

# 廃棄物最終処分場における漏水モニタリングへの物理探査技術の応用

【Key Word】

遮水シート、維持管理、電氣的漏洩検知法、電気探査、漏水検知システム

こばやし つよし  
小林 剛\*

## 1. はじめに

近年、地球環境や自然環境などへの関心が高まり、生活環境を保全する機能が重要となっている。日本においては、ごみゼロ社会の実現に向けた廃棄物の3R（リデュース、リユース、リサイクル）が推進されており、循環型社会の形成に向けた活動が盛んになっている。その結果、廃棄物の最終処分量は減少傾向を示しているが、今後も日常生活や産業活動によって排出される廃棄物を適正に処理する必要がある。この廃棄物を最終処分する施設である廃棄物最終処分場においては、廃棄物を安全に貯留・保管・処理するために、遮水シートによる遮水工が設けられている。しかし、遮水工（遮水シート）は外的要因により破損するリスクを有しており、漏水モニタリングによる監視・維持管理が必要とされるようになった。

ここでは、廃棄物最終処分場における漏水モニタリングへの物理探査技術の応用として、廃棄物最終処分場の重要な設備である遮水工（遮水シート）の漏水モニタリング技術（電氣的漏洩検知法）の概要、適用事例、技術的課題について述べ、物理探査技術である電気探査法がどのように活用され、漏水モニタリング技術の発展に貢献しているかについて紹介する。

## 2. 廃棄物最終処分場の概要

廃棄物最終処分場には主に以下の機能があり、社会生活において重要な役割を果たしている。

- (1) 廃棄物の「保管・処理機能」：廃棄物を安全に貯留・保管し、浸出水の漏水を防止するとともに、浸出水を適正に処理する機能。
- (2) 廃棄物を貯留することによる環境リスクに

対する「環境保全機能」：地下水の安全な処理、浸出水の漏水防止・適正処理・発生抑制を行う機能。

- (3) 跡地利用などの「地域還元機能」：地域の環境創造や地域振興に利用する機能。

廃棄物最終処分場の一般的な構造を、図1に示す。

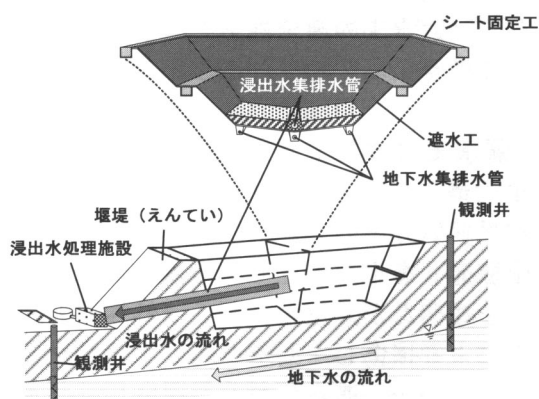


図1 廃棄物最終処分場の構造

その一方で、廃棄物最終処分場は環境を汚染するリスクを内在していることから、施設周辺の地域住民や社会の目は厳しく施設の建設や運用を監視しており、適正な管理が求められている。

このような背景のもと、安全性の高い廃棄物最終処分場を設置するために、廃棄物最終処分場に関する基準省令の改正として、「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令」（総理府、厚生省の共同命令）の改正が平成10年6月に行われ、以下の基準が明記されることとなった。

廃棄物処理法に基づく最終処分場の構造・維持管理基準の強化・明確化（一般廃棄物最終処分場、管理型最終処分場）

○遮水工の要件の強化・明確化

\* 応用地質(株)機器事業本部技術部 計測技術第2グループ

・遮水層の二重化（粘土等の層と遮水シートの組み合わせ、二重シート）

- (イ) 厚さ 50 cm 以上、透水係数が  $10 \text{ nm/秒}$  ( $=1 \times 10^{-6} \text{ cm/秒}$ ) 以下である粘土等の層に遮水シートが敷設されていること。
- (ロ) 厚さ 5 cm 以上、透水係数が  $1 \text{ nm/秒}$  ( $=1 \times 10^{-7} \text{ cm/秒}$ ) 以下であるアスファルト・コンクリートの層に遮水シートが敷設されていること。
- (ハ) 不織布その他の物の表面に二重の遮水シート（二重の遮水シートの間に車両の走行等の衝撃により双方のシートが同時に損傷することを防止できる不織布その他の物が設けられているものに限る。）が、敷設されていること。

廃棄物最終処分場では、この遮水工により、浸出水による地下水や公共水域の汚染を防いでおり、共同命令では遮水工の遮水機能が強化されることとなった。さらに、「廃棄物最終処分場性能指針」が平成 12 年 12 月 28 日に出され、この性能指針には、遮水工破損（漏水）検知設備が明記されており、遮水工の健全性をモニタリングする設備の必要性が公に認知されることとなった。

### 3. 漏水モニタリング技術の概要

廃棄物最終処分場の遮水工（遮水シート）が、廃棄物最終処分場の「保管・処理機能」および「環境保全機能」を果たす上で非常に重要な設備であることを述べたが、遮水シートは外的要因、施工的要因により損傷し、漏水を起こすリスクを持っている。万が一、遮水シートが損傷し浸出水が漏水した場合は、迅速に漏水の発生を検知（モニタリング）してその損傷箇所を特定し、補修等の適切な処置を施して、地下水や公共水域への汚染の影響を最小限に止める必要がある。

遮水工（遮水シート）の漏水モニタリングは、主に浸出水の漏水の有無を監視する技術であり、その稼動期間は、廃棄物最終処分場が供用されている期間（約 10 年～15 年）が最も多く、長いものでは供用中から閉鎖後の約 30 年の長期運用が求められているケースもある。主な遮水工の漏水モニタリング技術を、表 1 に示す。

水質調査法は、2 重遮水シート間を数百から数千  $\text{m}^2$  に仕切り、各区画にモニタリング管を取り付け、下流の管出口から排出される出水量や水質を分析することにより損傷の有無を検出する漏水モニタリング技術である。

空気圧力測定法は、2 重遮水シートを袋構造体

表 1 主な遮水工の漏水モニタリング技術

検知方法	計測値	損傷位置 特定精度	遮水構造
水質調査法	漏水量、水質	数千 $\text{m}^2$	2 重シート 区画構造
空気圧力 測定法	真空圧 漏水量、水質	数百 $\text{m}^2$	2 重シート 袋構造
電氣的 漏洩検知法	電流、電位、 抵抗	数 $\text{m}^2$	2 重シート 1 重シート

として数百  $\text{m}^2$  単位に仕切り、各袋構造体に管理ホースを取り付け、吸引装置で気密性を確認することにより損傷の有無を検出する漏水モニタリング技術である。この方法は、損傷が確認された場合、損傷している袋構造体にグラウト材を注入して補修することができる。

電氣的漏洩検知法は、遮水シートの電氣的な絶縁性を利用した漏水モニタリング技術であり、1 重または 2 重遮水シートの上下に設置した電極を使用して、電圧や電流を印加した際に遮水シートの損傷部近傍で発生する電氣的な変化（電流、電位、抵抗）を検出して損傷位置を特定する。

上記 3 種類の漏水モニタリング技術は、数多くの廃棄物最終処分場に導入され、遮水機能の維持・管理方法として運用されている。以下、物理探査技術（電気探査法）の適用により、遮水シートの漏水の有無を迅速に検知し、漏水の位置を正確に特定できる電氣的漏洩検知法について詳述する。

### 4. 電氣的漏洩検知法

廃棄物最終処分場で使用される遮水シートには、合成ゴムおよび合成樹脂系（ポリエチレン、塩化ビニル、ポリウレタン等）、アスファルト系の材料が使用されており、これらの材料は  $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$  以上の高い比抵抗値（電流の流れにくさ）を有している。この遮水シートが地盤（遮水基盤）上に表層遮水工として施工されると、廃棄物が埋め立てられる埋立地内と地盤は、遮水シートにより電氣的に絶縁された状態となる。この状態で埋立地内と地盤（遮水基盤）の間で電流を通電（電圧を印加）すると、損傷がない場合には電流は流れないが、損傷がある場合は損傷箇所から漏水が発生し電流が流れる。

電氣的漏洩検知法は、この遮水シートの電氣的な絶縁性を利用した漏水モニタリング技術であり、遮水シート上・下に格子状（面的）に配置し



た測定電極を使用して、遮水シートの損傷の有無を検知（モニタリング）し、損傷がある場合はその位置を特定する技術である。電気的漏洩検知法の一般的な原理を、図2に示す。

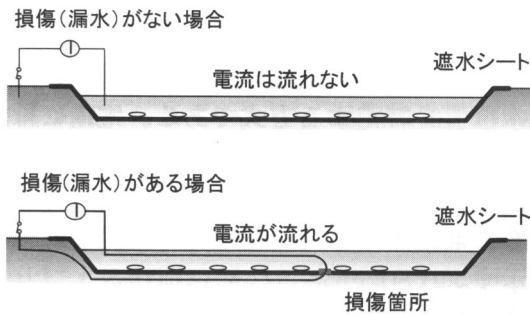


図2 電気的漏洩検知法の原理

遮水シートの漏水位置を電気的に検出する技術（電気的漏洩検知法）は、1980年代中ごろよりアメリカ環境保護局（EPA）からの委託を受けたSwRI（Southwest Research Institute）により実施され、その研究成果は、Shultz（1984）、Parra and Owen（1988）等により報告されている。

国内においては、1980年代後半から適用実験が行われ、これまでに、国内で導入されている電気的漏洩検知システムは、測定に使用する電極と計測値の違いから、主に表2に示す検知方式に区分される。

表2 電気的漏洩検知システムの検知方式

検知方式	電極の種類	計測値	分類
電位測定方式	点電極	電位	①
		電位、比抵抗	②
	線電極	電位	③
電流測定方式	線電極	電流、位相差	④
抵抗測定方式	点-面電極	インピーダンス	⑤

① 電位測定方式（点電極・電位方式）

野口他（1986）、押方他（1990）などによって、モデル実験や模型実験の結果が報告されている。

この方式は、遮水シートの内部（上部）と埋立地外部に設置した固定の供給電極間で電流を流し、遮水シート上部に設置した基準電極と測定電極間の電位差を計測して、電位分布を作成する。遮水シートの損傷箇所は、電位分布の歪みとして検出され、歪の発生位置を漏水位置として特定する方式である。電極には点電極を使用し、測定電極を遮水シートの上部に置くシステムと、下部に置くシステムがある。測定データの解析方法として、海老原他（2000）による数値シミュレーショ

ン技術が用いられており、遮水シートの損傷位置の特定精度を向上させている。

図3に電位測定方式（点電極・電位方式）の概要を示す。

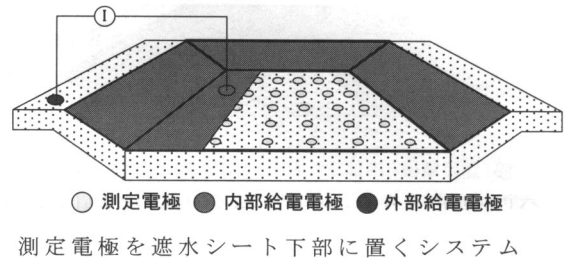
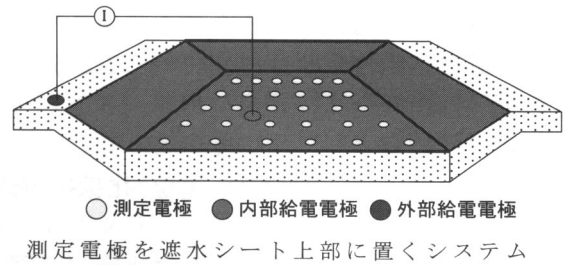


図3 電位測定方式（点電極・電位方式）の概要

② 電位測定方式（点電極・電位-比抵抗方式）

島他（1993）、福岡他（1994）は、廃棄物の不均質な比抵抗構造を考慮した高精度な電気的漏水検出法を提案し、漏洩電流の強度から複数の損傷箇所の検出と損傷規模の相対的な大小の評価が可能であることを報告している。

この方式は、遮水シートの上部と下部に設置した電流電極間（一方は、測定電極と共用）で電流を流し、遮水シート下部（または上部）に設置した測定電極間の電界を計測し、電界分布を求める。さらに、測定電極を使用して、相向型配置（ダイポール-ダイポール）の比抵抗測定を行い、比抵抗分布を求める。これらの値から、漏洩電流量を算出し、漏洩電流分布を作成する。遮水シートの損傷箇所は、漏洩電流量の多い箇所として検出され、漏洩電流量のピーク値を漏水位置として特定する方式である。電極には点電極を使用し、測定電極は遮水シートの上部または下部に置くシステムである。このシステムでは、比抵抗を計測することにより、廃棄物、地下水、地盤の比抵抗の影響を除去し、遮水シートの損傷箇所から発生している電気的な変化を確実に検出する。また、測定電極と電流電極を共用しており、電流電極の位置を変えた測定を行うことにより、電流電極近傍の影響を除去し、複数の漏洩電流分布を作成して、検知結果の信頼性を評価する。測定データの解析方法として、青池他（2003）によるインバージョ

ン法を用いた点電流源の解析方法が用いられている。これは、測定で得られた平面電界データと理論値（遮水シートの損傷位置を点電流源でモデル化した値）が最小となるように、インバージョン解析を行い、遮水シートの損傷位置を修正して、高精度に決定する方法である。また、解析を自動化するために、漏洩電流評価法で得られた遮水シートの損傷箇所数および損傷位置を、インバージョン解析の初期値として用いている。

図4に電位測定方式（点電極・電位-比抵抗方式）の概要を示す。

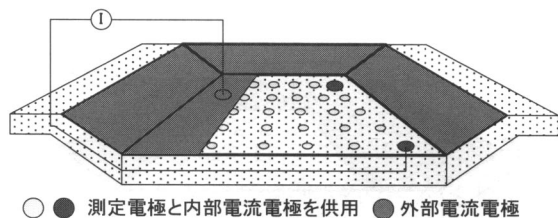


図4 電位測定方式（点電極・電位-比抵抗方式）の概要

③ 電位測定方式（線電極・電位方式）

浦他（1997）は、浸出管の遮水シート貫通部の影響を把握することを目的として実施した模擬処分場における実証実験の結果を報告している。

この方式は、上下遮水シート間に交点を絶縁した格子状の線電極を設置し、遮水シートの上部および下部に点電極（現在は線電極）を設置し、それぞれの遠電極を埋立地外部に設置する。点電極と遠電極間に交替直流電圧を印加し、格子状の線電極と遠電極間の電位差を測定して、電位差の分布を作成する。遮水シートの損傷箇所は、電位差の大きな箇所として検出され、この箇所を漏水位置として特定する方式である。電極には、線電極を使用するシステムである。

図5に電位測定方式（線電極・電位方式）の概要を示す。

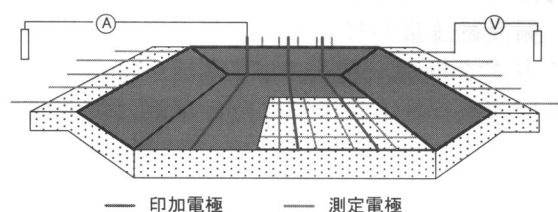


図5 電位測定方式（線電極・電位方式）の概要

④ 電流測定方式（線電極・電流方式）

荒井他（1992）は、お互いに直行する複数の線電極を遮水シートの上部と下部に配置し、それらの電流値の大きさから遮水シートの損傷箇所を検出する方法を報告している。

この方式は、お互いに直行する複数の線電極を遮水シートの上部和下部に配置し、遮水シート上部の線電極と遮水シート下部の線電極間で電流を流し、遮水シート上下の線電極全ての組み合わせから得られた電流の測定値を平面図にプロットする。遮水シートの損傷箇所は、電流値の大きい箇所として検出され、電流の最大値と電極の位置から漏水位置を特定する方式である。電極には線電極を使用するシステムであり、電流測定、伝導異方性、位相検波を特徴としている。

図6に電流測定方式（線電極・電流方式）の概要を示す。

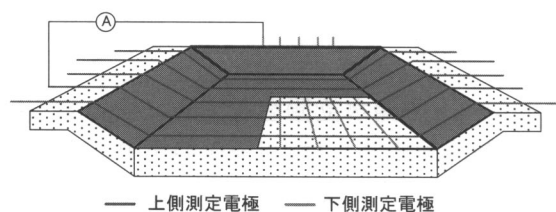


図6 電流測定方式（線電極・電流方式）の概要

⑤ 抵抗測定方式（点-面電極・インピーダンス方式）

西山他（1997）は、遮水シート下部の保護マット内にアルミシートを挟んで一体化させた面電極を設置し、遮水シート上部には測定用点電極を設置し、その間の自然電位や交流インピーダンス（抵抗値）を測定するシステムを考案した。このシステムの有効性を確認するためにフィールド実験を実施して、遮水シート損傷部の検出精度を検討した結果を報告している。

この方式は、遮水シート下部に設置した面電極と、遮水シート上部に設置した測定電極間の交流インピーダンス（抵抗値）を測定して、交流インピーダンス分布を求める。遮水シートの損傷箇所は、交流インピーダンスの小さい箇所として検出され、この位置を漏水位置として特定する方式である。

図7に抵抗測定方式（点-面電極・インピーダンス方式）の概要を示す。

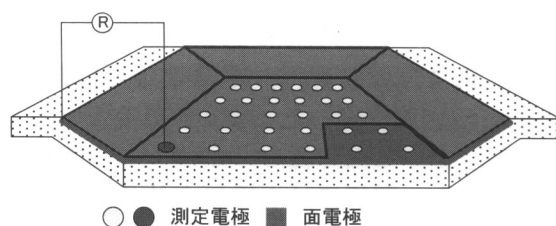


図7 抵抗測定方式（点-面電極・インピーダンス方式）の概要

以上のように、国内では複数の電氣的漏洩検知法が提案され、モデル実験から実規模模型実験による検証が行われ、実際の廃棄物最終処分場に適用されるに至っている。

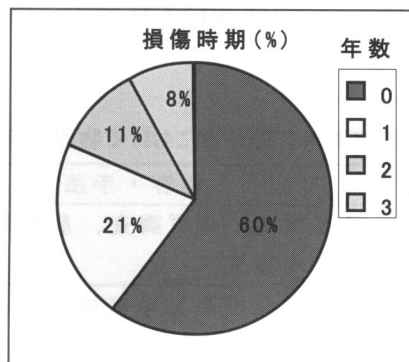
電氣的漏洩検知法が廃棄物最終処分場の漏水モニタリング技術として普及するとともに、計測装置の開発も進められ、実験段階では従来の電気探査装置が用いられていたが、漏洩検知専用の計測システムが導入されるようになった。また、計測システムは常時監視用として自動計測が可能となり、通信回線による遠隔操作機能やマルチチャンネル化による計測時間の短縮が図られている。さらに、電極やケーブルの改良も進められ、長期間のモニタリングが可能になっている。

このように、電氣的漏洩検知技術には、理論的な検討から計測方法・計測機器・解析技術の研究開発に至るまで、電気探査技術のノウハウが生かされており、実際の廃棄物最終処分場への適用を通じて、遮水工の漏水モニタリング技術に特化した発展を続けている。

## 5. 適用事例

現在、廃棄物最終処分場で稼働している電氣的漏洩検知法の内、電位測定方式（点電極・電位-比抵抗法）による漏水検知システムを中心として適用事例を紹介する。

漏水検知システムによる廃棄物最終処分場の遮水シートの施工検査、および供用中の漏水モニタリングにおける遮水シートの損傷検知事例から、遮水シートがどの時期に損傷を受けるかをまとめた結果を、**図8**に示す。



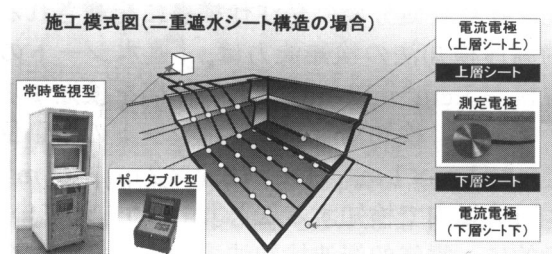
**図8** 遮水シートの損傷時期

遮水シートが一番損傷を受けやすい時期は施工中（図中の0年）であり、遮水シートの保護を目的とした保護護土（通常50cm）を施工する際に、重機による遮水シートの破損事故が発生している。また、廃棄物を埋め立てる初期段階において、

埋立作業を行う重機による遮水シートの破損事故例もあり、遮水シートとの距離が近い位置で重機による作業を行う場合の事故が多くなっている。その他の原因としては、埋立物（金属物）、遮水シートの施工不良（接合部）、鳥獣、人為、気象、地盤沈下、地下水の湧水圧などがある。

以上のことから、施工中から漏水検知システムを利用して、遮水シートの健全性を確認することが重要となり、現在では、遮水シートの施工中に実施する中間検査、施工完了時の竣工検査、供用後のモニタリングに活用されている。

**図9**に漏水検知システムの施工例を示す。



**図9** 漏水検知システムの施工例

廃棄物最終処分場に施工される漏水検知システムは、埋立地内に設置される電極およびケーブル、管理棟内に設置される計測システムで構成される。

埋立地内に設置される測定電極と電流電極の設置位置は、遮水シート構造（一重遮水シート、二重遮水シート）や検知対象となる遮水シート（上層、下層、両方）によって異なるが、図で示した2重遮水シート構造の場合、測定電極を二重遮水シート間に設置することで、上層遮水シートと下層遮水シートの両方を検知対象とすることができる。

漏水検知システムによる遮水シートの監視方法としては、管理棟内に設置した計測システムを用いて遮水シートを常時監視する常時監視型と、定期的に測定装置を接続して遮水シートを検査する随時検査型がある。常時監視型では、一日に1回～数回計測を行い、検知結果をモニター表示・印刷（保存）することで、遮水シートの健全性が確認されている。

常時監視型の計測システムによる1回の計測時間は、埋立地内に設置される電極数（規模、検知精度）にもよるが、約1時間程度で計測を終えるように設計されている。なお、漏水検知システムの導入当初はシングルチャンネルの電気探査装置が主流であったが、高速化を図るために、現在は



マルチチャンネル（10CH、20CH など）の電気探査装置が開発され、漏水検知システムに利用されている。

随時検査型の漏水検知システムは、事前に埋立地内に電極とケーブルを設置しておき、定期的に電気探査装置を持ち込んで遮水シートの検査を行う。この随時検査型の漏水検知システムは、漏水モニタリング設備が導入されていない既設の廃棄物最終処分場の遮水工の漏水調査や、新設の廃棄物最終処分場の遮水工の施工検査にも利用されている。

## 6. 技術的課題

廃棄物最終処分場の発注仕様書に記載される電氣的漏洩検知法の検知能力は、「遮水シートの損傷規模が $1\text{ cm}^2\sim 10\text{ cm}^2$ 以上の損傷を検知すること」であり、検知精度は「遮水シートの損傷位置を $1\text{ m}^2$  ( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ )、 $4\text{ m}^2$  ( $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ )、 $25\text{ m}^2$  ( $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ )以内で検知すること」が求められている。一般的に、電氣的漏洩検知法の検知能力および検知精度は、電極数が多い（電極間の距離が近い）ほど高くなるが、電極数が多くなると施工コストが高くなり遮水シートへの影響も懸念される。このことから、少ない電極数で施工コストが安く、高い検知能力と検知精度をもつ漏水検知システムが求められており、測定技術と解析技術の改良により、少ない電極数で検知能力と検知精度を向上させる漏水検知システムが開発されている。しかし、その効果を十分に発揮させるためには、廃棄物最終処分場の構造に対して、電氣的な絶縁対策（外周部での遮水シートの立ち上げなど）を施す必要があり、設計段階からの提案が必要となっている。

電氣的漏洩検知法は、遮水シートの損傷（漏水）箇所を検知することはできるが、遮水シートの補修は別作業となり、廃棄物が $10\text{ m}\sim 20\text{ m}$ 埋め立てられた状態で遮水シートの損傷を検知しても、遮水シートを補修することが非常に困難になる場合がある。この問題を解決するため、小林他（2006）は、廃棄物を掘り起こさずに補修ができる装置を備えた電氣的漏洩検知システムを提案した。図10にシステムの概要を示す。このシステムは、遮水シートとその上層の保護材で袋構造ブロックを作り、漏水を検知したブロックに、注入ホースから止水材を注入して遮水シートを補修するシステムである。電氣的絶縁性の高い止水材を用いることにより、電氣的漏洩検知システムで補修の効果を確認することができる。ただし、この

検知・補修システムは、施工コストが通常の漏水検知システムよりも高く、長期間の漏水モニタリングにおいて、検知と補修の関係を明確にして、導入を考える必要がある。

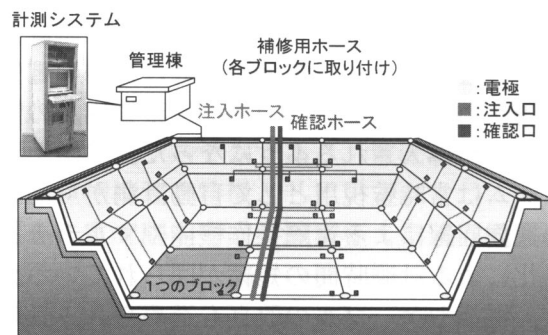


図10 補修ができる電氣的漏洩検知システム

## 7. おわりに

廃棄物最終処分場の漏水モニタリング技術（電氣的漏洩検知法）は、現在、漏水モニタリングの主流として標準化され、遮水機能の維持管理手法として運用されている。また、廃棄物最終処分場の建設計画時における、住民合意を得るための必要条件として、重要な役割をもつに至っている。

漏水モニタリング技術（電氣的漏洩検知法）は、遮水シートの損傷箇所を検出する「目標物発見の技術」であり、漏水の発見漏れが許されない「完全阻止に資する技術」でもあることから、技術的なハードルが高いものであるが、今後も継続して技術的な課題を克服し、廃棄物最終処分場が安全で安心の得られる施設として機能するように、技術及び設備の維持管理を行っていく所存である。

最後に、本稿では廃棄物最終処分場における漏水モニタリングへの物理探査技術の応用として漏

表3 廃棄物最終処分場における物理探査技術

時期	内容・手法
計画段階	建設地の地質調査、基盤調査、水理調査
	弾性波探査、電気探査、表面波探査
施工中	遮水工の検査、基盤検査
	電氣的漏洩検知法、表面波探査
供用中	漏水モニタリング、安定化計測
	電氣的漏洩検知法、電気探査、表面波探査
供用後	跡地利用のための地盤調査
	電気探査、表面波探査

水モニタリング技術を紹介したが、廃棄物最終処分場における物理探査技術には、表3に示す技術がある。

廃棄物最終処分場の建設、維持管理から廃止における諸問題の解決策の糸口として、物理探査技術に対する期待は大きく、今後、ますます物理探査技術が活用されるものと考えている。

#### 参考文献

- 1) 青池邦夫・並木久・小林剛・利岡徹馬 (2002) : 廃棄物最終処分場における漏水検知システムの漏水位置決定の高精度化, 物理探査学会第107回(平成14年度秋季) 学術講演会講演論文集, 213-216.
- 2) 小林剛・濱田正志 (2003) : 電気式漏水検知システムの実処分場への適用, 第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 989-991.
- 3) 花島正孝・古市徹 (2006) : 廃棄物最終処分場新技術ハンドブック.
- 4) 荒井健・新井斉・山崎宣悦・波多野雅一郎 (1992) : 廃棄物処分場の漏水位置検出方法, 物理探査学会第86回(平成4年度秋季) 学術講演論文集, 390-395.
- 5) 島裕雅・伊関伸一・坂下晋 (1993) : 管理型廃棄物処分場における電気的漏水検出法の高精度化, 物理探査学会第88回(平成5年度秋季) 学術講演論文集, 211-216.
- 6) 野口康二・押方利朗・川上純・白井直人・金子伯男 (1986) : 電気探査を用いた管理型最終処分場の漏水位置検出法—モデル実験結果, 物理探査学会第61回(昭和4年度春季) 学術講演論文集, 211-212.
- 7) 押方利朗・白井直人・金子伯男 (1990) : 管理型最終処分場の漏水位置検知に関する研究, 第1回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 309-312.
- 8) 西山勝栄・伊藤洋・木内幸則・古谷野直行 (1997) : 面電極によるしゃ水シートの漏水検知システムの検知精度について, 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 852-854.
- 9) 浦満彦・若林秀樹・土弘道夫・牟田口茂・広野進 (1997) : 廃棄物最終処分場における電気的漏水検知システムの検知特性, 第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 843-845.
- 10) 海老原正明・石井弘充・小野隆・押方利朗 (2000) : コンピュータ支援による最終処分場の遮水シートの損傷検出方法の検討, 第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 1144-1146.
- 11) 福岡晃一郎・島裕雅 (1994) : 漏洩電流評価法による廃棄物処分場の漏水探査の高精度化—重および二重遮水シート構造への適用性の検討, 物理探査学会第90回(平成7年度秋季) 学術講演論文集, 345-349.
- 12) 小林剛・光本純・柴田健司・黒岩正夫・高原正和・吉田和久 (2006) : しゃ水シートの漏水検知・補修システムの廃棄物最終処分場への適用, 第17回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 901-903.
- 13) Parra, J.O. and Owen, T.E. (1988) : Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrane-lined impoundments, *Geophysics*, 53, 1453-1458.
- 14) Shultz, D.W., Duff, B.M., and Peters, W.R. (1984) : Electrical resistivity technique to assess the integrity of geomembrane liners: Final Technique Rep., U.S. Environmental Protection Agency, Contract 63-03-30331, SwRI Project 14-6289.
- 15) 特定非営利活動法人最終処分場技術システム研究会 最終処分場機能検査資格認定委員会 (2005) : 最終処分場機能検査者資格認定試験テキスト.
- 16) 社団法人 物理探査学会 創立60周年記念事業委員会 (2008) : 最新の物理探査適用事例集, 295-300.
- 17) 六川修一 (2009) : 物理探査学会の将来を考える—創立60周年記念行事を経て—, *物理探査*, 62, 173-175.

# コンクリート構造物における非破壊試験（物理探査技術）の適用性について

【Key Word】

予防保全，定期点検，劣化診断，鉄筋腐食，試験方法

もり はま かず まさ  
森 濱 和 正\*

## 1. はじめに

コンクリート構造物は、1960～70年代に多くの構造物が建設され、維持していくために大変な時代を迎えつつある。道路橋についてその現状を見ると、次のような状況になっている。

図1は、道路橋の建設数の推移である。橋の寿命が50年とすると、今後寿命を迎える橋は急激に増加し、今後は寿命を迎える橋が急増する。

一方、図2はデータはちょっと古いが建設予算の推移と予測を示している。予測は、国の予算が毎年3%ずつ低下、地方自治体は7%ずつ低下すると仮定している。同図には建設予算に占める維持管理費の予算の推移と予測も示されている。昨年度(2009年度)まではほぼ予測どおりに推移し、総額はピーク時のほぼ半額になった。今年度(2010年度)は、政権交代により民主党が政権をとり、一気に18%も減っており、今後の推移の予測は難しい。そのため、図2の予測で見ておくと、2020年ころ以後は維持管理に必要な予算さえ確保できない可能性がある。このままでは寿命を迎えた橋の架け替えさえ出来ないことになってしまう恐れが高い。

上記予測は、橋の寿命を50年と仮定した結果である。橋の供用年数を10年ごとに分け、補修を行なった比率を調査した結果が図3である。供用年数が長くなるほど補修を行なった比率も高くなるが、50年でも50%程度である。より適切な維持管理が行われれば、より寿命を延ばすことができる可能性を示しているものと見ることができる。

維持管理は、これまでは劣化が進行した状態で大規模な補修・補強が行われる「事後保全」が行

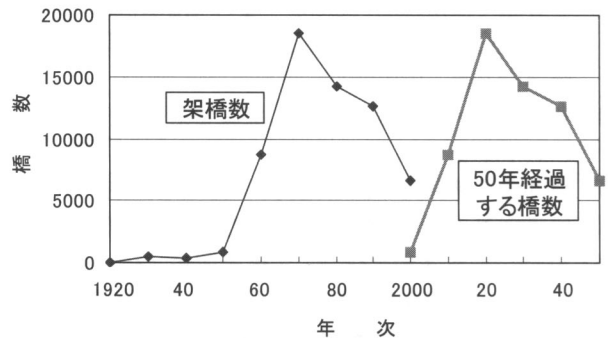


図1 年代ごとの橋梁建設数

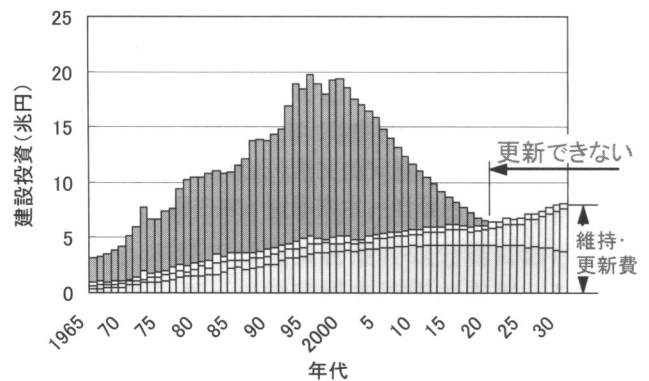


図2 年代ごとの建設投資

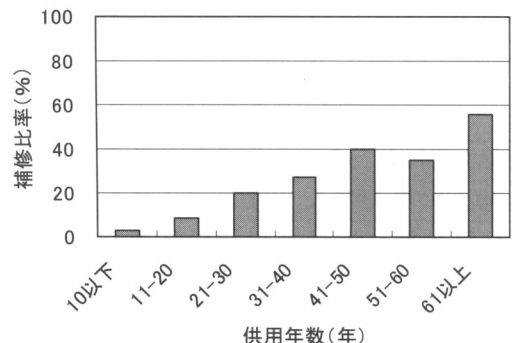


図3 供用年数と補修比率

\* 土木研究所材料地盤研究グループ基礎材料チーム 総括主任研究員



われていた。しかし、事後保全では、多額の費用を必要とするが、その後の寿命を飛躍的に延ばすほどの効果がないことが多い。そのため、最近では「予防保全」に移行しつつある。予防保全は、定期点検を充実させ、早期に劣化の兆候を把握し、早期に対処することにより、補修・補強などの費用の増減を極力抑制しながら構造物の寿命を延ばそうとする方法である。

予防保全を行うにあたって定期点検、すなわち現状の把握と経年変化を把握することがきわめて重要となる。定期点検の基礎は目視点検であるが、目視は表面の状態がわかるだけであり、コンクリート内部の状態を把握するためには非破壊試験技術が欠かせない。

以下に、コンクリート構造物の点検にとって重要な項目と、点検項目を調査するための非破壊試験方法について紹介する。

## 2. コンクリート構造物の主な劣化と非破壊試験

コンクリートは、使用材料や配合が適切でなかったり、構造物の立地環境、使用状態などによってさまざまな劣化を生じるため、劣化診断を行うに当たってはさまざまな非破壊試験が必要となる。劣化の種類を列記するだけでも多くの紙数を費やすため、ここではコンクリート構造物にとって最も深刻な劣化である鉄筋腐食の原因と、その診断のための調査に使用される非破壊試験の主なものを紹介する。

まず、鉄筋腐食の原因について簡単に説明する。コンクリート中にある鉄筋は、コンクリートがアルカリ性であることから鉄筋表面に不動態皮膜が形成され、腐食することはないといわれている。ところが、**図4**のように空気中の二酸化炭素や、海岸付近の構造物では塩分（塩化物イオン）が飛来し、コンクリート中にこれらが浸入し、鉄筋に達すると不動態皮膜が破壊され鉄筋が腐食するといわれている。

鉄筋が腐食するとさびによって体積が膨張するため、ひび割れを生じ、さらに腐食が進行するとはく離、はく落を生じる。

鉄筋の腐食に対する調査は、まず、腐食の可能性を確認する。そのためには、**図4**の関係から、**かぶり厚さ**が確保されているのか、コンクリートは緻密であり二酸化炭素や塩分が浸入しにくいかどうか（**緻密性**）を確認することが重要である。

次に、鉄筋が腐食する条件である**中性化深さ**、**塩化物イオンの浸透量と浸透深さ**が重要である。

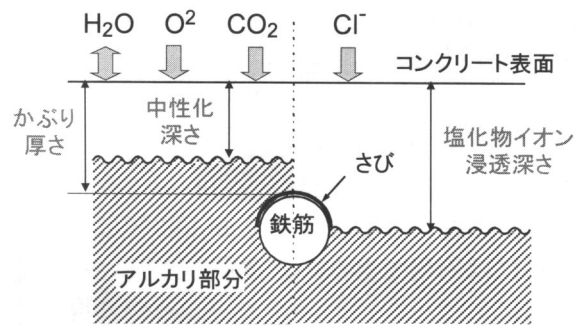


図4 鉄筋腐食の原因

また、コンクリート中の含水状態により、乾燥していれば鉄筋の腐食は生じにくいですが、湿潤状態では腐食を生じやすくなる。コンクリート中の乾湿によって鉄筋腐食の進行が異なることから、**電気抵抗**を測定することにより腐食進行のしやすさを予測することが行われている。

中性化の進行などにより次第に腐食条件に達するようになると、鉄筋の腐食が始まり腐食電流が流れることから、**自然電位**による腐食の可能性を確認する。

腐食が始まっていることが明らかになれば、分極抵抗による**腐食速度**などの測定が行われる。

腐食が進むと、さびによってコンクリートに**ひび割れ**を生じる。ひび割れが鉄筋まで達していれば、鉄筋への塩素イオンなどの供給が多くなるため、加速度的に腐食が進み、コンクリートは**はく離・はく落**する。場所によっては、はく落によって人的被害を生じる恐れもあることから、はく離の段階で早期に発見することが必要である。また、はく落すると鉄筋がむき出しになるため、塩素イオンなどが鉄筋に直接付着し、腐食が急激に進むことから、遅くともはく離の早期発見が極めて重要である。

以上のとおり、鉄筋腐食に関する調査は時期に応じて、鉄筋のかぶり厚さ、コンクリートの緻密性、中性化深さ、塩化物イオンの浸透量と浸透深さ、電気抵抗、自然電位による腐食条件、分極抵抗による腐食速度、ひび割れ深さの測定、はく離の検出が必要である。これらのうちいくつかの方法について紹介する。

## 3. 調査項目と非破壊試験方法

調査項目ごとの非破壊試験には**表1**のような方法がある。促進中性化、中性化深さ、塩化物イオン浸透量・深さ、電気的方法、腐食状態の観察は、コアを用いたり、はつったりするため、非破壊試験ではなく、コンクリート分野では、最近、微破壊試験に分類されることが多いが、広義には非破

壊試験に分類される。以下、表中のゴシックの試験方法について説明する。

表1 調査項目と非破壊試験方法

調査項目		非破壊試験方法
鉄筋	かぶり厚さ	レーダ, 電磁誘導, X線
コンクリート品質	緻密性	小径コア, ボス供試体による促進中性化 接触時間, 音速分布 透気・透水
腐食条件	中性化深さ	(JIS法), 小径コア, ドリル
	塩化物イオン浸透深さ・量	(JIS法), 小径コア, ドリル
	電気的方法	電気抵抗, 自然電位, 分極抵抗
劣化現象	腐食状態	はつりによる目視,
	ひび割れ深さ	超音波, 衝撃弾性波
	はく離	赤外線サーモグラフィ, 打音, 衝撃弾性波

\* ゴシックの方法について紹介,

### 3.1 レーダ法によるかぶり厚さ測定

かぶり厚さ測定方法は、主にレーダ、電磁誘導、X線の3方法があるが、X線は厚い部材には適用できない、危険性が高いなど適用にあたっては制限が多い。電磁誘導は、かぶり厚さが深い場合に適用できないことから、レーダ法について説明する。

レーダによるかぶり厚さは、電磁波の鉄筋までの往復伝搬時間  $t$  が測定される (図5)。コンクリート内を伝搬する電磁波速度  $V$  が既知であれば、かぶり厚さは式 (1) によって求めることができる。しかし、 $V$  は式 (2) によって表わされ、コンクリートの比誘電率  $\epsilon$  がわからなければかぶり厚さを求めることができない。

$$D = \frac{1}{2} V \cdot t \quad (1)$$

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

ここに、 $D$ : かぶり厚さ、 $V$ : コンクリート中を伝搬する電磁波速度、 $t$ : 電磁波の鉄筋までの往復伝搬時間、 $C$ : 真空中を伝搬する電磁波速度 ( $3 \times 10^8$  km/s)、 $\epsilon$ : 比誘電率である。

比誘電率は物質の電気的特性であり、主に水の影響を強く受ける。コンクリート内の含水率は絶えず変化するため、測定するときにはコンクリートの比誘電率を求める方法が必要である。これまでは、レーダによってかぶり厚さを測定したあと、コアを採取してかぶり厚さの実測値を求め、両数値から逆算して比誘電率を求めていた (コア法)。しかし、コア法は損傷を伴うこと、そのため、比誘電率が違っていると考えられる部分から何か所もコアを採取することは難しいこと、コアを採取した深さの平均的な比誘電率しか求めることができず、コンクリート内部の含水状態を考慮することができないことなどから、実測したからといって必ずしも精度良く比誘電率が求められるとは限らない。

非破壊によって比誘電率を求める方法は、以前から双曲線法が提案されているが、この方法を適用するには鉄筋間隔が十分確保されている必要がある。最近、鉄筋量が増え、間隔が狭くなっているため、双曲線法を適用できる構造物は限られる。実質的に非破壊で比誘電率を求めることができる方法は、現状では、鉄筋径を用いる方法

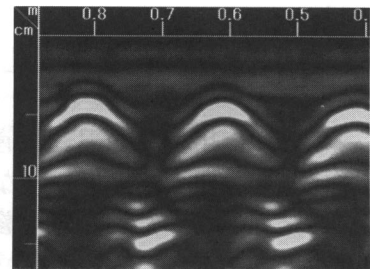


図5 レーダによるかぶり厚さの測定結果

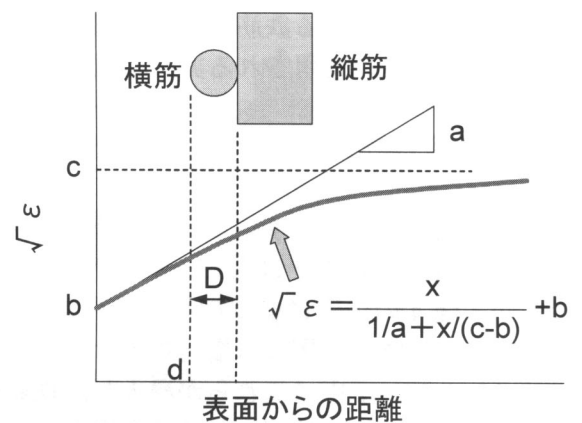


図6 鉄筋径法

(鉄筋径法) と考えられる。鉄筋径法は、図6のように格子状に入っている鉄筋の、縦筋と横筋のかぶり厚さを測定し、その差がコンクリート表面に近い鉄筋の径になることを利用して、逆算で求める方法である。その際、コンクリート内部の含水分布を考慮して、比誘電率も図6の曲線のように変化しているものと仮定して求める方法である。ただし、この方法は、鉄筋が緊結されていること、測定装置の分解能が高くなければ測定精度も向上

しないという問題がある。

### 3.2 接触時間

コンクリート表面をパチンコ玉程度の鋼球で打撃し、鋼球がコンクリートに接触している時間を測定する(写真1)。鋼球に加速度センサを付けておき、加速度の測定結果を積分することにより接触時間が求められる(図7)。接触時間によってコンクリート表層の品質を求めることができる。その一例を図8に示す。

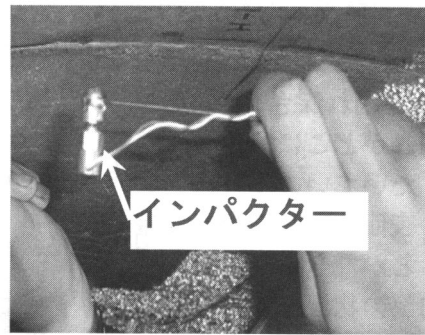


写真1 接触時間の測定

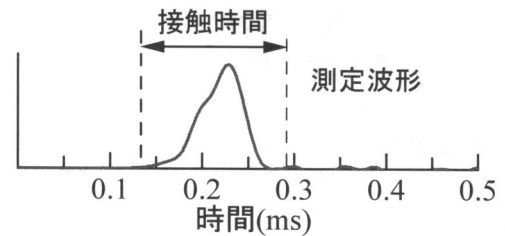


図7 接触時間の求め方

図8は、横軸が鋼球の接触時間、縦軸が中性化速度係数である。凡例はコンクリートの種類と呼び強度である。接触時間が短いほど中性化速度係数は小さくなっており、中性化しにくいことを示している。接触時間を測定することにより、簡単に硬さだけでなく、中性化抵抗性を間接的に評価できる。短時間で簡単に測定できるため、広い面の品質分布を把握することなどへの適用が考えられる。

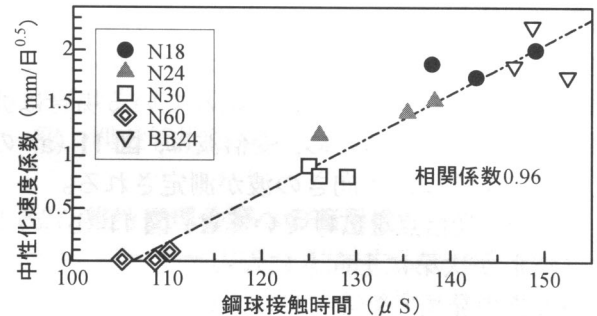


図8 中性化速度係数と接触時間の比較

### 3.3 透気試験

緻密性を評価する直接的な方法として、透気・透水試験があり、多くの試験方法が提案されている。そのうちここでは、現在、最も期待されているトレント法について紹介する(図9)。透気・透水試験の多くは微破壊試験であること、吸引するとき、周りからも吸引され、評価が難しかった。トレント法は図9のように非破壊で試験できること、2重の吸引口を設け、中央とその周りの吸引口の吸引圧力を同じにすることにより、外側のまわりこんで吸引される部分と、中央の一樣な吸引を分け、中央のみの一樣な評価を可能にしている。

ただし、透気・透水試験の共通する問題点として、コンクリート内部の含水状態の影響や、コンクリート表面の影響を受けることに変わりはない。

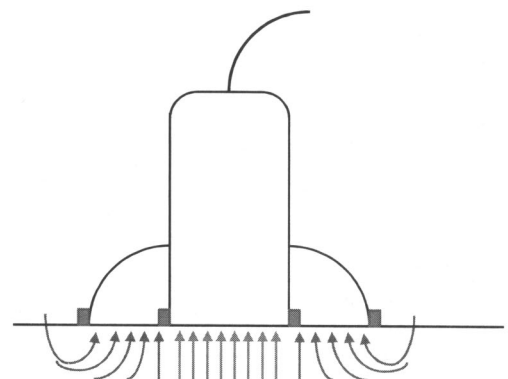


図9 トレント法

### 3.4 自然電位法

鉄筋の腐食は、酸化・還元反応であり、腐食する際には腐食電流が流れる。この電流を測定できれば腐食環境にあることがわかる。この測定方法を自然電位法と呼んでいる。現在、鉄筋が腐食環境にあるかどうかを調べる唯一の方法である。

電位測定は、図10のように電位差計と照合電極を用い、一方は鉄筋をはつり出してつなぎ、もう一方は鉄筋上に当てて電位を測定する。測定の結果、低い電位が測定された場合は、腐食環境になっている可能性が高い状態にあることを示して

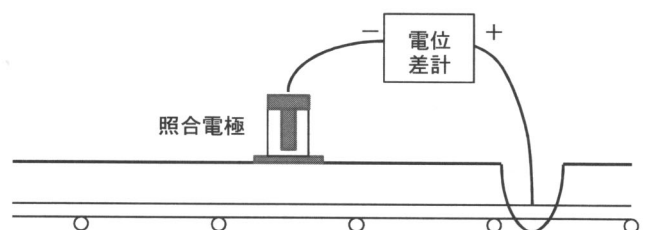


図10 自然電位法



いる。

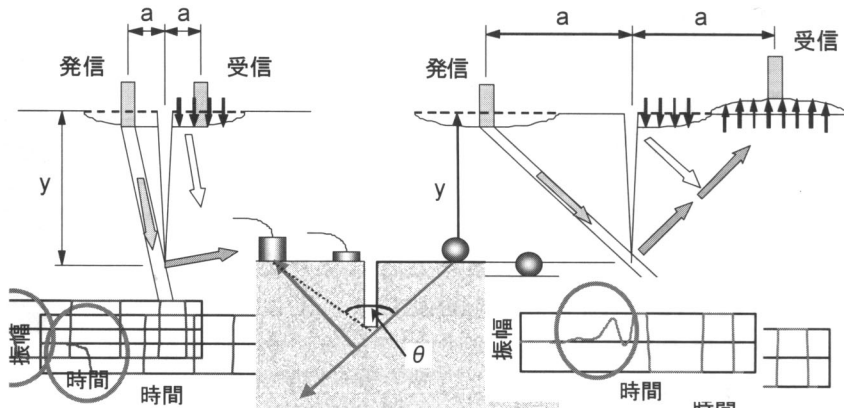
### 3.5 ひび割れ深さ

ひび割れがどこに発生しているかは、たいていこの場合はコンクリート表面に現れるために確認することができるが、コンクリート内部の状況を知るためには非破壊試験が必要になる。

ひび割れがコンクリート内部にどのように伸びているのかを知る手段は、現状では難しい。ひび割れがどの程度の深さまで達しているのかを測定する方法

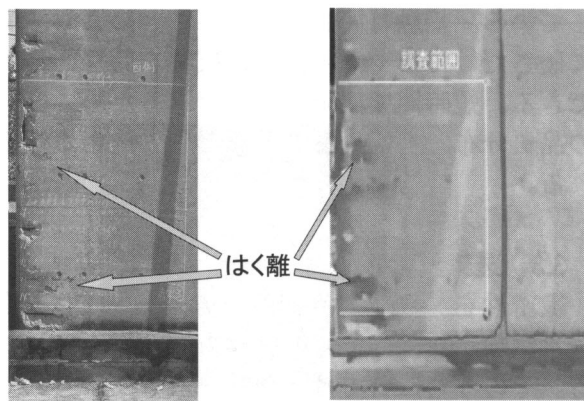
は、いくつかの方法が提案されている。そのうちのひとつに直角回折波法がある(図11)。この方法の原理は、図11(a)のように、ひび割れ近傍に発信点、受信点を設けた場合、入力した波がひび割れ先端に達した時、その波に直角な方向にポアソン効果による二次的な押し波が発生する。受信位置が二次的な押し波から離れている場合は引張りの波になる。そのため、受信波は、図11(a)の下の図のように、下向きの波が測定される。

発信点、受信点を広げていくと、図11(b)のように波形が次第に上向きになってくる点があり、このときの発信・受信点間の距離が $2a$ であり、ひび割れ深さは $a$ と求められる。



(a) 入力、受信間隔が狭い場合 (b) 先端の角度が90度以上の場合

図11 直角回折波法



(1) 通常の写真 (2) 赤外線サーモグラフィ

写真2 はく離

### 3.6 赤外線サーモグラフィ

はく離の検出は、これまでは打音を用いる場合が多かった。打音法は、ハンマで打撃しなければならないため、足場などを使ってコンクリート表面まで行って直接測定していた。また、人の耳で聞き分けるため、人為誤差を生じる恐れも多分にある方法である。

赤外線サーモグラフィは、離れた位置から赤外線の強度を測定することによりコンクリート表面の温度変化をとらえる方法である。はく離を生じていると、薄い空気の層ができていることから、

健全部分と熱の伝わり方が異なる。この特性を利用してはく離部分の検出を行おうとするものである。温度変化の与え方は、日照を考慮するパッシブ法がよく用いられる。この方法は離れた位置から温度分布の変化を捉えることから、実用化が待たれている方法である(写真2)。

## 4. まとめ

鉄筋腐食に関する、腐食発生原因からひび割れ、はく離などの変状を検出するまでの代表的と思われる試験方法について紹介した。

# 土木構造物の維持管理における 物理探査技術の現状について

**【Key Word】**

物理探査技術, 維持管理, 空洞調査, 高密度表面波探査

すぎ やま たけ し  
杉 山 長 志\*

## 1. はじめに

人類が便利で、より安全で、より幸福な社会を求めて過去から構築してきた土木構造物は非常に多種多様な構造物を生み出し、それぞれに維持していくための固有な管理技術が存在し、日々研究されている。一方、土木分野で利用されている物理探査技術も扱う物理量は数種類以上となり、それぞれが高度に専門化して発展している。

さて、これらの両者を結びつけた維持管理における物理探査の適用性の現状を概説するには、筆者は浅学しすぎてとてもできるものではない。幸いにも、本誌発行元である(社)全国地質調査業協会連合会が平成16年から19年にかけて「地質調査技術による維持管理分野への展開に関する調査・研究事業」を実施し、「防災・維持管理分野における物理探査の適用」と題して報告書<sup>1)</sup>を発刊している。

本稿の前半部はこの報告書を引用させていただき、主に土構造物(道路、港湾・空港施設、埋設されたインフラ施設を覆う地盤、大規模盛土など)を対象とした維持管理における物理探査技術全般の適用性と土構造物の調査で最も適用頻度の高い空洞調査の現状について概説し、後半部では、検討対象とする物理探査技術を筆者がこの数年従事してきたレイリー波(表面波の一種)を利用した物理探査手法に限定して、維持管理分野への適用事例を紹介する。

## 2. 維持管理に適用される物理探査技術

### 2.1 土構造物の維持管理の概要

土構造物の分野別の維持管理における主な調査目的は次のようなものがあげられる。

1) 港湾・空港・埋立地では護岸・堤防の沈下、海

岸地盤の洗掘・空洞、液状化、滑走路下の空洞や液状化、地盤沈下、地盤改良など。

- 2) 道路・鉄道・トンネル構造物では路面下の空洞、盛土地盤の沈下、橋梁の洗掘、覆工背面の空洞や周辺地山の風化による劣化・変状など。
- 3) 土地造成では盛土法面の崩壊や地震時の液状化、大規模地すべりなど
- 4) ライフラインでは地表の陥没、埋設管の位置確認、埋設管周辺地盤の空洞やゆるみなど。

### 2.2 維持管理分野への適用性

表1に示す物理現象を利用する物理探査技術のうち調査目的に適合した探査技術を単独あるいは複数種目を組み合わせて実施している。

表1 各種物理探査技術における利用する物理現象と得られる物理量

物理探査手法	物理現象	物理量
屈折法地震探査	弾性波動(屈折波)	P波速度
反射法地震探査	弾性波動(反射波)	反射波
表面波探査	弾性波動(表面波)	レーリー波速度 S波速度
微動探査	弾性波動(表面波)	S波速度 H/Vスペクトル
電気探査	電場の変化	比抵抗
地中レーダ探査	電磁波の散乱	散乱波
電磁探査	電磁誘導	比抵抗
磁気探査	磁場の強さ	磁気異常 比抵抗
重力探査	重力	密度
赤外線熱映像探査	熱の伝導・放射	伝導率
地温探査	地中温度	温度

表2は文献調査によって抽出された維持管理に利用された物理探査技術を整理したものである。従来からの地質調査分野でも利用頻度の高い代表

\* 中央開発(株)ソリューション本部探査計測部専門部長

表2 維持管理分野の対象とする現象と適用物理探査技術<sup>1)</sup>

分野	対象	災害の事象	要因	現象	適用物理探査技術															
					弾性波探査			電気探査			電磁探査									
					屈折法	反射法	トモグラフィ	表面波(二次元)	比抵抗(垂直探査)	比抵抗(二次元)	トモグラフィ	I P法	電磁法	電磁誘導法	地中レーダ	その他レーダ				
河川堤防	河川堤防	変状あるいは破堤	施工性能(技量・材料の良否)	堤体自体の沈下				○	○											
		部分的な変状	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
		漏水	不同沈下による構造物の破損	漏水による堤体材の流失・空洞化																
ダム・貯水池・ため池	ダム・貯水池・ため池	堰堤の変状・破堤	施工性能(技量・材料の良否)	堤体自体の沈下																
		部分的な変状	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
		漏水	不同沈下による構造物の破損	漏水による堤体材の流失・空洞化																
海岸・港湾・空港・埋立地	埋立地	埋立地盤の変状	施工性能(技量・材料の良否)	埋立地盤自体の沈下																
		埋立地盤の変状	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
		埋立地盤の変状	地震動による液状化	埋立地盤及び基礎地盤の乱れ																
海岸・港湾	海岸・港湾	施設の変状・破損	液状化による洗掘	吸出しによる空洞化																
		施設の変状・破損	液状化による損傷	吸出しによる空洞化																
		施設の変状・破損	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
道路・鉄道・トンネル	道路・鉄道	盛土地盤の変状	施工性能(技量・材料の良否)	堤体自体の沈下																
		盛土地盤の変状	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
		盛土地盤の変状	不同沈下による構造物の破損	埋設構造物と周辺土の剥離・空洞化																
トンネル	トンネル	覆工の変状	覆工厚および保工の不足	流失による空洞化																
		覆工の変状	覆工背面充填不足・地下水洗掘	流失による空洞化																
		覆工の変状	特異地質、地すべり末端部	地すべり・偏圧・盤膨れ																
土地造成	切土	法面崩壊	表層土の崩壊	風化土、雨水・表流水による侵食、間隙水圧	○			○	○	○										
		法面崩壊	崩積土の崩壊	流れ壁上の崩積土等に雨水・地下水の浸透																
		法面崩壊	特異層からの崩壊	挟在する粘性土に地下水が集中																
土地造成	盛土	盛土法面の崩壊	浅い表層崩落	不十分な締め固めに雨水の浸透																
		盛土地盤の変状	施工性能(技量・材料の良否)	基礎地盤の沈下				○												
		盛土地盤の変状	基礎地盤の強度不足・軟弱地盤	基礎地盤の沈下				○												
土地造成	地盤改良	地盤面の変状	不同沈下による埋設管の破損	埋設物と周辺土の剥離・空洞化																
		地盤面の変状	施工の不均質	改良体の破壊・変形				○	○	○										
		地盤面の変状	地震動による液状化	改良体の破壊・変形																
ライフライン	ライフライン	埋設管の損傷	埋立廃棄物層の存在	地盤強度の不安定、有害物質の漏洩																
		埋設管の損傷	空襲	不発弾の存在																
		埋設管の損傷	地域の歴史認識	法制度等による確認行為の義務																
建築	建築	建物の経年劣化	耐震性の監視	振動特性の把握																
		建物の経年劣化	建築構造物強度の確認	鉄筋配置と太さ																
		建物の経年劣化	コンクリートの劣化・強度低下	比割れ、剥離、及び中性化、鉄筋腐食																
地すべり・斜面	斜面	地すべり調査は、それ自体が	防災調査であり、従来からの調査手法	法により防災分野の調査も確立されている																
		法面の変状・崩壊	表層土の崩壊	風化土、雨水・表流水による侵食、間隙水圧	○			○	○	○										
		法面の変状・崩壊	崩積土の崩壊	流れ壁上の崩積土等に雨水・地下水の浸透																
防災(活断層・液状化等)	防災(活断層・液状化等)	大規模地震の発生	地質構造の詳細な把握	活断層、破砕帯(粘土化帯)の位置				○	○	○										
		大規模地震の発生	地震動による液状化	地盤の破壊・変形																
		大規模地震の発生	地震動による液状化	地盤の破壊・変形																



適用技術											要求成果・探査技術概要	備考									
磁気探査	重力探査	熱赤外線	1m深地温	常時微動	微動探査	速度・PS	磁気	ポアホールレーダ	自然電位	分極抵抗			衝撃弾性波	打音	AE	超音波(速度)	超音波(反射)	X線	光ファイバー(変位)	光ファイバー(温度)	音響
																					<p>構造物の把握 施工時及び竣工時 地盤改良 樋門や排水溝等の構造物 堤体自体の老朽化 基礎地盤及び堤体構造 漏水自体の把握よりも漏水経路の把握が重要</p>
																					<p>構造物の把握 施工時及び竣工時 地盤改良 取水溝や排水溝等の構造物 堤体自体の老朽化 基礎地盤及び堤体構造 漏水自体の把握よりも漏水経路の把握が重要</p>
																					<p>堤体と同様の物理探査手法となる。特にため池等で行う電気探査では、満水時と退水時の2回測定を行い、結果を比較することにより漏水状況を把握する手法が有効である。</p>
																					<p>空港施設、特に滑走路や誘導路に発生した変状調査は、空間的・時間的にも制約され、物理探査手法によることが多い。表面波探査や地中レーダによる手法が有効である。</p>
																					<p>埋め立て地盤の変状や空洞の存在等の調査が主体で、表面波探査や地中レーダが多く利用される。</p>
																					<p>吸い出しによる地盤の空洞化や施設のコンクリート劣化・鉄筋腐食などの調査主体。地中レーダによる空洞位置の把握が実施される。</p>
																					<p>道路・鉄道を対象とする物理探査手法は多岐にわたる。大局的には、盛土地盤の変状では表面波探査や地中レーダ探査が、また切土地盤では弾性波探査・二次元電気探査等が実施される。対象となる構造物や変状種類によって、有効な調査を決定し、場合によってはボーリング調査との併用等を考慮する必要がある。</p>
																					<p>トンネルの変状は主に背面空洞の存在やクラック等である。背面空洞については地中レーダにより覆工巻厚や空洞厚を把握するのが主流となっている。</p>
																					<p>造成による切土部の変状は、法面崩壊・吹き付け法面の変状等が主体である。吹き付け法面の変状では熱赤外線カメラによる調査が実施されることが多い。ただしこの方法のみでは定性的な成果にとどまることから、ボーリングや吹き付け法面の目視調査等を併用するとさらに有効となる。</p>
																					<p>盛土地盤の変状は、法面崩壊や不同沈下による構造物の破壊、雨水流出による空洞化等の多岐にわたる。物理探査手法もこれらの変状を把握するために種々の方法から選定される。なお、選定に際しては、その変状状況・種類に対して、補充する形でクロスチェックすることが望まれる。</p>
																					<p>同上</p>
																					<p>擁壁の変状は、背面土圧の影響によるものが多く、土圧によるクラックの発生・目地部の開き等の現象であり、物理探査手法として地中レーダによる背面空洞の特定や熱赤外線による空洞状況の把握が一般的である。</p>
																					<p>ライフラインの変状として、埋設管の損傷等による地盤の陥没があげられる。原因としては周辺の空洞化や埋設管自体の老朽化による。探査手法として、地中レーダや音響調査等があげられる。</p>
																					<p>建築物の変状は、経年による劣化が主因である。劣化状況を把握するため、多種の探査方法が実施される。</p>
																					<p>地すべりに起因する変状として、法面変状があげられるが、前述の手法による物理探査が実施される。</p>

的な物理探査技術についてその適用性を示す。

#### 1) 屈折法地震探査

地質調査の延長上として利用されることが多く、鉄道・道路・トンネル・土地造成などの分野で、地盤のゆるみ領域や風化層の厚さなどを把握する目的で適用されることが多い。探査分解能は受振点間隔や起振方法などにより異なるが概ね1 mより深く、cm単位の異常を検知するには適さない。

#### 2) 反射法地震探査

地層境界、地盤中の埋設物や空洞を検知する目的で土地造成やライフラインなどの分野で適用されている。浅部を対象にした反射法地震探査の探査分解能は、起振方法、受振点間隔、重合数、探査深度などにより異なるが、屈折法地震探査よりは良いものの、概ね1 mより深く、cm単位の異常を検知するには適さない。また、調査費が比較的高価なことも課題である。

#### 3) 表面波探査

##### ①定常振動法

表層約30 m以浅のレイリー波速度分布、地盤中の異常検知、ゆるみ領域の把握を目的として、港湾・空港・埋立地、土地造成などの分野に適用されている。探査分解能は表層部では概ね1 mであるが深度とともに低下する。傾斜地や地表部がコンクリートで覆われている場合などは適用困難となる場合がある。

##### ②高密度表面波探査法（表面波探査（2次元））

数年前から実用化された探査法であり、表層約20 m以浅のS波速度分布、ゆるみ領域の把握を目的として利用される。この探査手法は測線に沿った2次元のS波速度分布が得られる特徴があり、その適用分野は道路・鉄道、港湾・空港・埋立地、土地造成、ライフラインなど多岐にわたっている。また、地中レーダ探査と併用することで、地表から約3 m以浅を地中レーダ探査で詳細に、深度約20 mまでは高密度表面波探査で調査する併用探査法も多用されている。探査分解能は表層部では約1 mであるが深度とともに低下する。地表面がコンクリートで覆われている場合は、コンクリート下面直下部の情報は得られないことが多いが、それ以深については探査可能である。

#### 4) 二次元比抵抗探査

地盤の比抵抗分布を求めて、地質構造、土質、地下水の状態、地盤中の異常、ゆるみ領域の把握を目的として、道路、港湾・空港・埋立地、土地造成、ライフラインなど多岐にわたって適用されている。また、河川堤防調査では高密度表面波探

査との併用探査が定着している<sup>2)</sup>。分解能は、電極間隔や電極配置などで異なるが表層部では約1 mであるが深度とともに低下する。最近では2次元の測定データを3次元解析することにより、高精度でより信頼性の高い結果が得られる解析手法も開発されている<sup>3)</sup>。金属を含む構造物周辺、電気を地面に流すことにより障害が生じる場所では適用困難である。また、都市部周辺では迷走電流による電氣的ノイズが障害になる場合がある。

#### 5) 地中レーダ探査

地盤中の埋設物、空洞や地盤のゆるみなどの異物や異常個所の検出、構造物と周辺地盤との状態を把握する目的として、土構造物全ての分野で多岐にわたって適用されている。最近では複数のアンテナをアレイ配置した測定や、アンテナ位置を自動検出する装置を取り付けて解析結果を3次的に表現できるものもある。探査深度は、測定周波数により異なるが土質地盤では2~3 m程度であり、分解能は20~30 cm程度で高分解能を有する。また、探査深度を土質地盤で10~15 mに大幅に増大させた（分解能は数十 cm程度）ステップ式連続波レーダ探査<sup>4)</sup>も開発されている。地下水面以下に適用することは困難な場合が多い。

### 2.3 空洞調査への適用事例

空洞調査に物理探査技術を利用する頻度は道路路面下、トンネル、海岸堤防・港湾施設、特殊地下壕などの分野において高いものとなっている。

土構造物の内部または構造物を支持している地盤あるいは覆っている地盤に発生する空洞は、構造物の強度や周辺地盤の強度を低下させて構造物に悪影響を及ぼし、放置すれば空洞は「水みち」を作る原因ともなり、空洞を拡大させる要因になる。最近顕著な「ゲリラ豪雨」による降雨の氾濫は土構造物や周辺地盤の空洞の発生や拡大を増大する懸念がある。その対応としては早期に空洞を発見して位置・規模を把握し、対策工の検討が必要となる。トンネル覆工コンクリート背面、吹き付けのり面背面、道路路面下、港湾護岸周辺など、コンクリートやアスファルトで覆われたほとんどの土構造物において、空洞調査が必要とされている。これらの空洞は目視確認できない位置に存在するために物理探査技術を用いて可視化する期待も大きい。空洞の存在だけでなく規模を把握することは対策工における埋め戻しの量を見積もるために必要とされる。また、物理探査技術で空洞の存在が間接的に解釈された場合には、次に直接的にその空洞を確認する調査（例えばボーリング、

サウンディングなど)の併用が望ましく、近年では空洞内に挿入した機器のレーザー光や音波で壁面までの距離を計測して空洞の形状や規模が得られる3D計測方法も開発され利用されている<sup>5)</sup>。

### 1) 道路路面下の空洞調査

空洞調査の多くは、下水・雨水・汚水などの埋設管が比較的深部に敷設されている道路路面下を対象としたものである。シールド工事(埋設管工事や地下鉄工事など)が行われている路線に発生する空洞は、埋め戻しの不良や周辺土砂の取り込みなどに起因することがほとんどであるが、工事の直後に空洞が発見されない限り、空洞発生との因果関係を明らかにすることは難しい。多くの場合は陥没事故が発生することによって空洞の存在を知ることになるが、陥没後の調査では空洞が埋まり新たな空洞が発見されないこともある。そのため、掘削工事着手前に路面下の探査を実施しておき、工事完了後に定期的な探査を実施することによって、事前調査との比較により変化の起こった地点を空洞が発生した箇所として抽出できる。この方法は空洞の検知確度を向上させることができ、陥没事故が発生する前に空洞を検知することが可能となる。



図1 地中レーダ探査装置

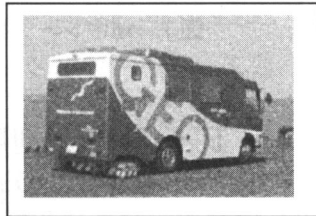


図3 車載型地中レーダ探査装置

物理探査技術としては、探査深度2~3mの地中レーダ探査が最も多く利用されている。図1は地中レーダ探査装置例を、図2に地中レーダ探査結果例を示す。また、1回の走行で1車線を探査できる7センサーを搭載し、最大時速50km/hで測定可能な車載型地中レーダ探査装置<sup>6)</sup>も開発され、道路点検に威力を発揮している(図3参照)。一方、探査深度が2~3mを超える場合には、高密度表面波探査の併用が実施される場合が多い。高密度表面波探査では地中レーダ探査のように「空洞」そのものを検知することは難しく、空洞を含めた周辺地盤のゆるみ領域(低速度帯)を捉えることで判断する。

空洞を高比抵抗部とみた場合の二次元比抵抗探査や電磁探査、低速度部とした場合の地震探査、低密度として捉えたときの微重力探査も理論的には可能であるが、これらの探査技術の精度に比較

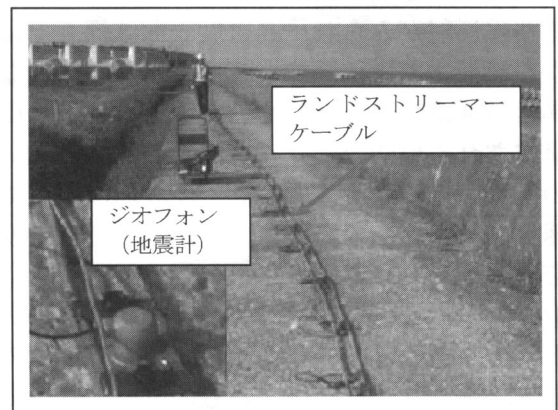


図4 高密度表面波探査の測定状況

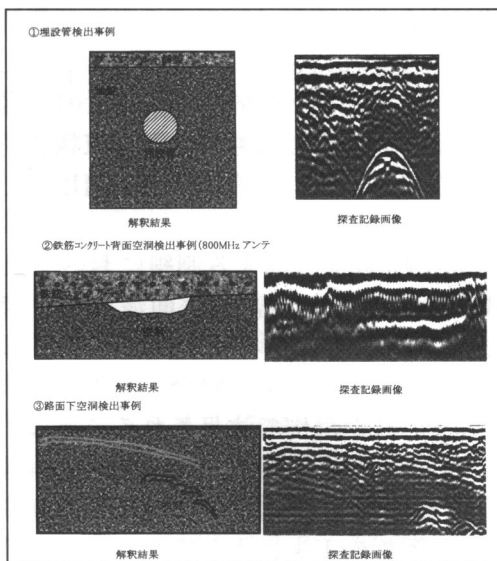


図2 地中レーダ探査結果例<sup>1)</sup>

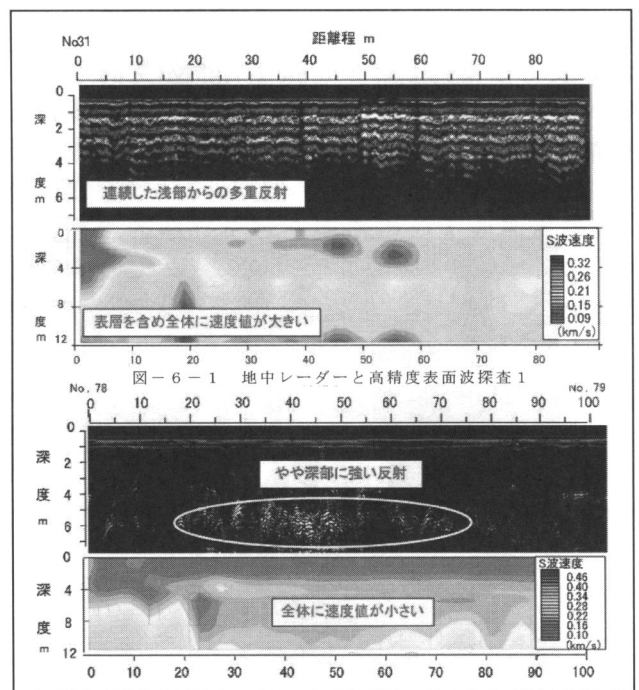


図5 地中レーダ探査と高密度表面探査の解析例



して対象とする空洞の規模が大きくない場合が圧倒的に多く、前述2つの探査技術に比べて成果を期待することは難しい。

## 2) 海岸・港湾部の空洞探査

海岸・港湾に発生する空洞の多くは、コンクリート構造物に生じた隙間から、海水の浸入・流動に伴って砂などの地盤が吸出されて発生する。

この調査でも地中レーダ探査が最も多く利用されている。調査の方法は道路路面下と同様である。

エプロンに鉄筋が入っている場合には、鉄筋の間隔によっては調査できない場合もある。また、海面以下の空洞には適用できない。このような場合に、高密度表面波探査で空洞部を地盤のゆるみ領域として捉えられる場合もある。

図4～図5は海岸堤防における地中レーダ探査と高密度表面波探査を併用した空洞調査事例<sup>7)</sup>である。図5の上図においてレーダ波形では鉄筋による多重反射がみられ、高密度表面波探査では表層から深部までほぼ同様な速度を示し、空洞などの異常の連続性は見られない。一方、下図は中砂で構成される堤防で、レーダ波形の深部に強い反射の乱れが見られる箇所が高密度表面波探査では低速度ゾーンとして表現されており、地盤のゆるみを反映している。

## 3) トンネル覆工背面空洞調査

トンネル覆工背面の空洞には、裏込め充填の施工不良で施工時から存在するものや地下水の影響などで経年的に発生するものなどがある。特に覆工が薄くその背面に空洞が存在する場合には、覆工の剥離・落下の危険度が増すので緊急の対策工が必要となる。トンネル覆工背面の空洞の多くは、天端および天端から45度付近までに多いとされている。

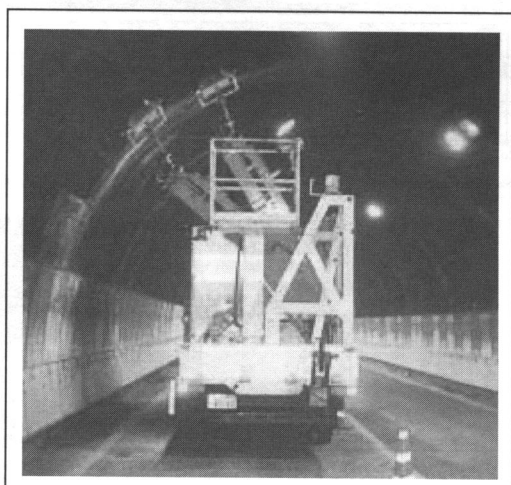


図6 高所作業用機能を持った地中レーダ探査装置

トンネル覆工背面の空洞調査は、打音調査が日常点検として利用されているが、最近では地中レーダ探査も併用することが多くなっている。地中レーダ探査では高所作業用機能を持った装置(図6)を用いて、アンテナをトンネル内部に覆工面に押し当てて調査を行うことになる。測定記録から支保工や巻厚の情報が得られ、空洞の判定は強反射パターンを抽出することで行うが、湧水箇所では空洞と判定できない場合がある。図7に測定記録と解釈事例<sup>1)</sup>を示す。

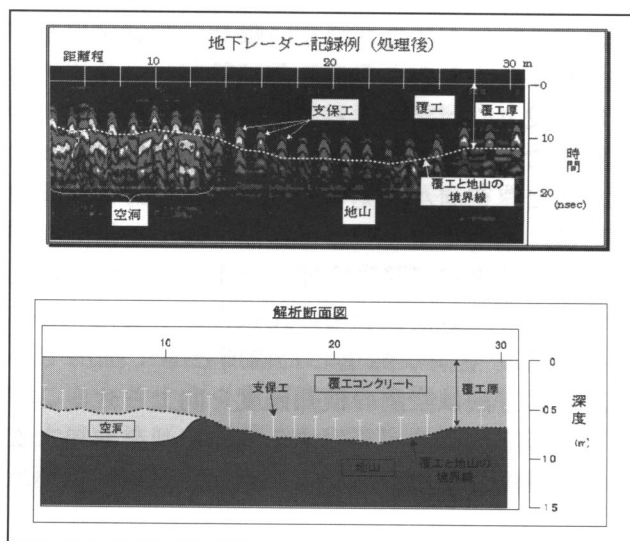


図7 地中レーダ探査記録と解釈事例<sup>1)</sup>

## 3. レイリー波を利用した物理探査技術の維持管理分野への適用事例

### 1) 空港施設の液状化対策調査

1995年兵庫県南部地震を契機に空港・航空保安施設の耐震性が検討され、大規模地震が発生した場合には全国約4割の空港で地盤の液状化が発生し、災害時の空港運用に障害が生じる可能性があることが指摘されている<sup>8)</sup>。

本事例<sup>9)</sup>は、空港滑走路の地震対策の一環として、レベルIIの地震動にも耐えうる液状化対策の基礎資料を得るために、物理探査を適用した事例である。

探査は、滑走路を横断する測線において深度20m以浅を対象とした高密度表面波探査と深度数10mまでを対象とした小規模微動アレイ探査の併用を行い、両者の結果は整合性のある結果が得られている。この事例で注目されることは、多少課題が残っているにしても、従来適用が難しいといわれていた地表部が剛性の高い滑走路部において、測定と解析の工夫により高密度表面波探査の適用が可能であることが判明したことである。

液状化の検討に当たっては、S波速度から液状化の判定に用いられている「N値」を推定して行っている。また、深部S波速度構造から著しい地層の傾斜は無いものと推定し、地震時の地盤の挙動に関しても言及している。

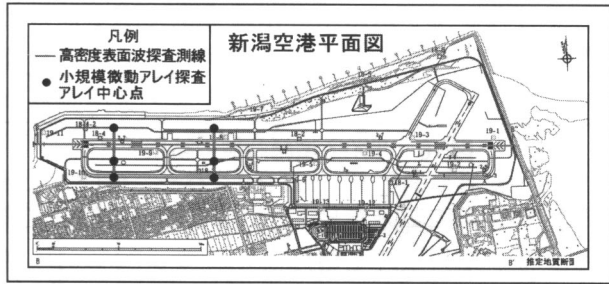


図8 調査測線・測定点配置図

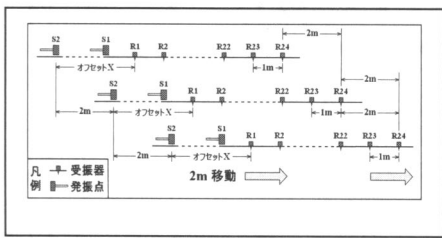


図9 高密度表面波探査の測定方法

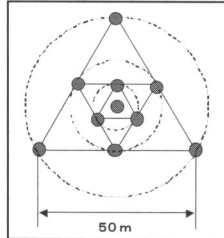


図10 小規模微動アレイ探査のアレイ形状

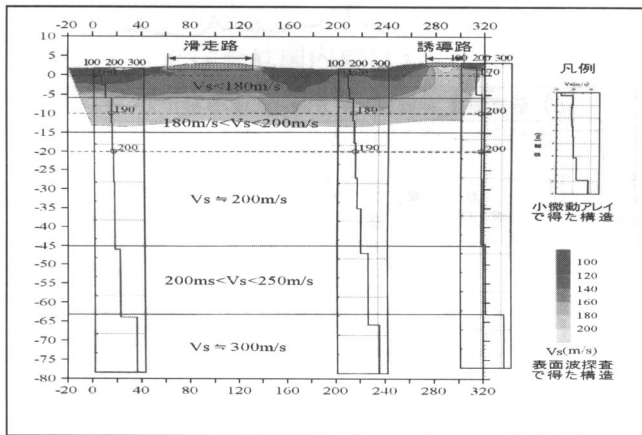


図11 併用調査により得られたS波速度断面

## 2) トンネル覆工コンクリート及び背面岩盤の劣化状況調査

老朽化したトンネルにおいて、数kHzまでの表面波を対象とした高密度表面波探査を実施し、覆工コンクリート内部とその背面岩盤の劣化状況を調査した実験事例<sup>10)</sup>である。固有周期100Hzのジオフォンを20cm間隔で12個コンクリート

壁面に人力で圧着し、震源はハンマー打撃を利用している。

ここで着目されるのは、圧縮強度（コア試験）と位相速度（表面波探査）との相関関係を求め、地中レーダ探査では求められないコンクリート及び背面岩盤の強度分布を2次元断面として表示されていること、また、レイリー波の超音波領域を利用することにより、地中レーダ探査とほぼ同等な分解能が確保されていることである。この技術は是非実用化レベルの技術に高め、活用して欲しいものである。

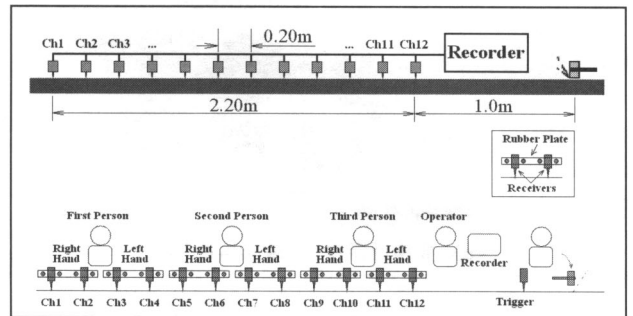


図12 高密度表面波探査の測定模式図

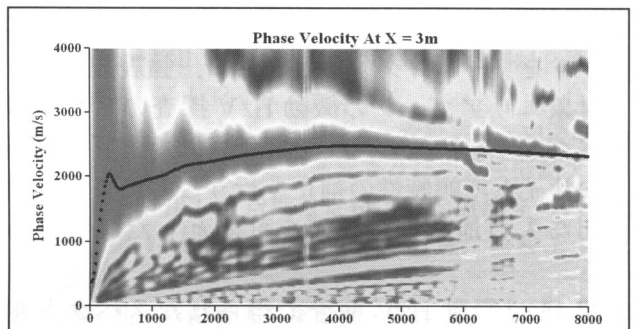


図13 得られた位相速度例

## 3) 小規模アレイ探査と微動H/V探査の併用探査を実施した入力地震動評価への適用事例

耐震性能照査を行う構造物の入力地震動は、2007年の新港湾基準の改定により、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した時刻歴波形として表現することとなり、順次適用されている。本事例<sup>11)</sup>は、撫養港の護岸施設の耐震性能照査として、小規模アレイ探査と微動H/V探査を行ったものである。

- ①強震観測が行われているものの工学的基盤までの地盤条件が未知の場合⇒小規模アレイ探査を適用して工学的基盤までのS波速度構造を把握することにより、強震観測点の工学的基盤におけるサイト増幅特性を評価可能とした。
- ②強震観測点から対象構造物の距離が比較的近い

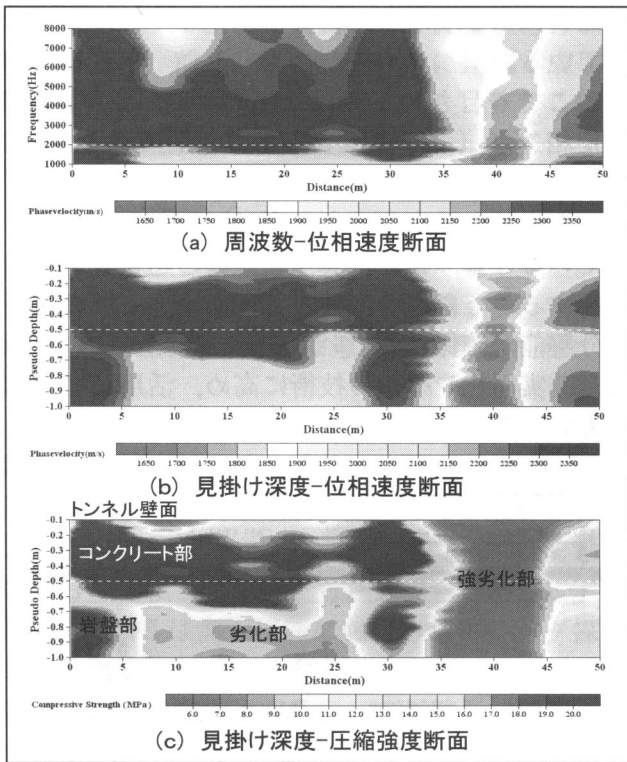


図 14 高密度表面波探査解析結果例

ものの、検討対象エリアが比較的広く、且つ地盤条件の不均質が想定される場合⇒密な微動 H/V 探査を行い、スペクトル形状から対象エリアをゾーニングするとともに、強震観測点と対象エリアゾーンの微動 H/V 探査のピークスペクトルを比較し、①で評価された強震観測点のサイト増幅特性の補正を行うことにより、適切な入力地震動の評価を可能とした事例である。

図 15 は微動 H/V 探査で得られたスペクトルを示したもので、実線を境に東西でピークが異なり、地盤構造を東西 2つのサイトにゾーニングさ

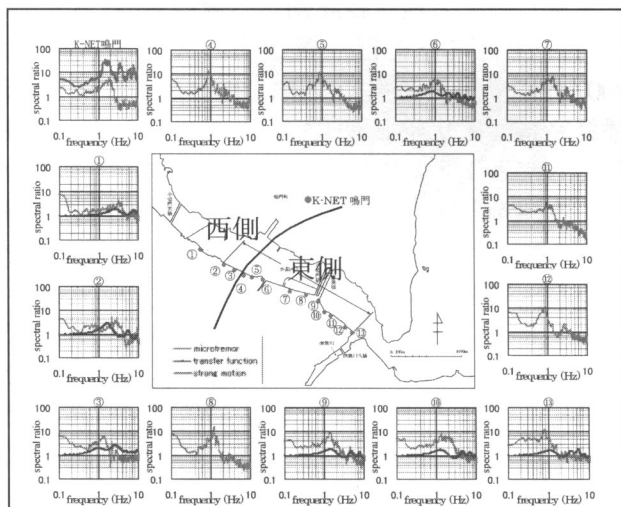


図 15 撫養港で観測した微動 H/V 探査

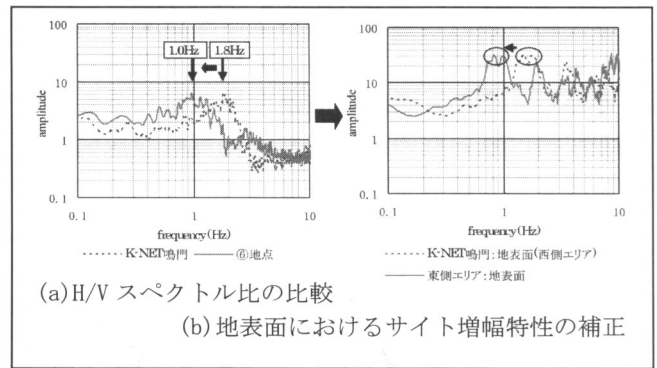


図 16 サイト増幅特製の補正

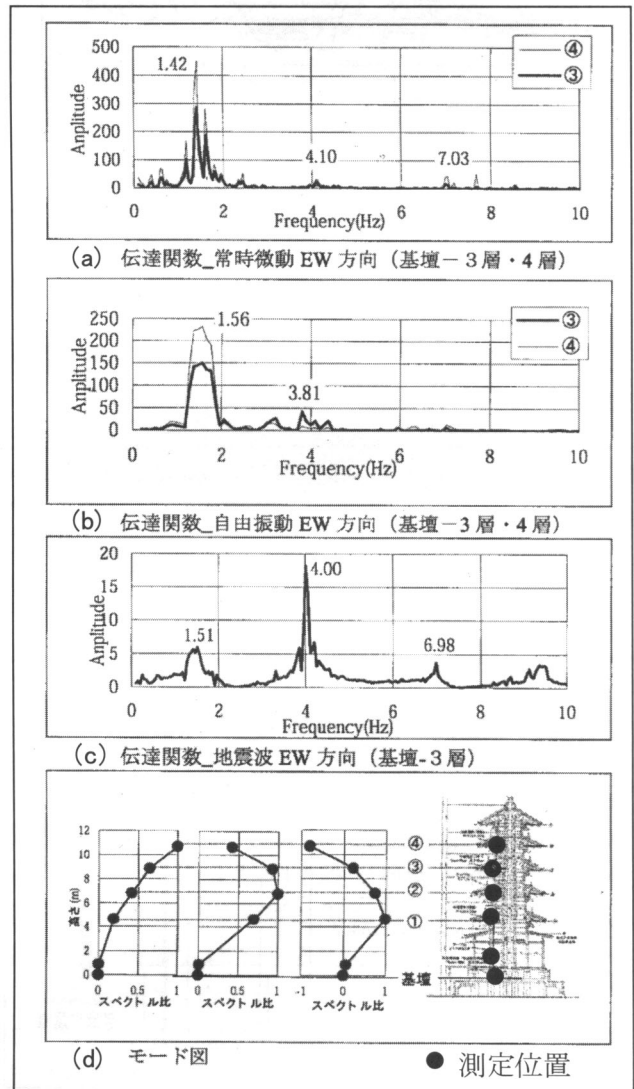


図 17 津観音五重塔の振動特性実験結果

れる。

図 16 は地表面における増幅特性の補正方法を示す。西側サイトは強震観測点 K-NET 鳴門が位置しサイト増幅特性が得られている。しかし、東側サイトは西側サイトとは地盤構造が異なり、そのまま適用することはできないため、微動 H/V スペクトルをもとにサイト特性を補正する。

4) 歴史的建築物の維持管理分野への適用事例



1995年兵庫県南部地震は在来工法の木造家屋とともに多くの歴史的建築物が未曾有の大被害を受けたことを契機に、文化財建造物の耐震性に対する関心が高まり、2001年に文化庁文化財部から『重要文化財建造物耐震診断指針』<sup>12)</sup>が示された。

本事例<sup>13)</sup>は、伝統的木造五重塔の振動特性評価に常時微動測定を適用した事例である。建物は三重県津市に所在する津観音五重塔を対象とし、常時微動測定・人力加振試験・地震観測を行い、図17に示す卓越する固有振動数（一次：1.4 Hz，二次：4.1 Hz，三次：7.0 Hz）及び曲げ型振動モード特性が得られた。また、耐震補強竣工後の設計解析の検証にも常時微動測定が利用されている<sup>14)</sup>。

文化財保護（維持管理）の基本は非破壊の調査となり、構造物やそれを支持している周辺地盤の調査に物理探査技術が利用されている。

#### 4. おわりに

維持管理分野での調査の基本は目視観察と直接的な試験であり、一方、物理探査技術は間接的（非破壊）で地盤（構造物）の状態を把握することが特徴であるために、物理探査技術は構造物内部の可視化する技術として要望されている。しかしながら、物理探査技術には探査深度と分解能の関係や物理探査特有の「結果の解釈技術」など高精度化していかなければならない課題がたくさんあり、地道な努力が必要であり、今後も経験、ノウハウ、技術の集約を諮っていく必要がある。

地中レーダ探査は国内ではおよそ30年前から本格的に大学・研究機関や大手企業等より実用化に向けての努力が始まり現在に至っており、空洞探査や埋設物探査に多用されている。一方、レイリー波を利用する物理探査のうち高密度表面波探査は、10年ほど前から実用化され、地中レーダ探査に比べて歴史の浅い探査手法である。本稿の適用事例で示したように、調査目的に適した周波数帯の表面波を使い分けることで、コンクリート構造物内部調査から数10m深までの地盤調査に適用できる可能性が考えられる。この探査技術をさらに発展・普及していくには、このご時勢で企業の疲弊は激しく研究開発の余力は無くなりつつある。大学・公共機関での積極的な研究が望まれる。

最後に、本稿の前半で引用させていただいた「報告書」作成に携わった委員の皆様に感謝の意を表

します。

#### 参考文献

- 1) (社)全国地質調査業協会連合会：防災・維持管理分野における物理探査の適用 報告書，平成19年8月。
- 2) 稲崎 富士：統合物理探査による河川堤防の内部構造評価，物理探査学会第114回学術講演会講演論文集，pp234-237.2006
- 3) 井上敬資・中里裕臣・竹内睦雄・杉本芳博・金喜俊：比抵抗法3次元解析における2次元電気探査測線の合理的な配置の数値的検討，物理探査学会学術講演会講演論文集，119, pp143-146，物理探査学会，2008
- 4) 笠井弘幸・阿部信太郎・鈴木浩一：活断層の地中レーダ法によるイメージング：その現状と展望，活断層研究，15, pp73~86, 1996
- 5) 山邊晋・坂上敏彦・植谷勝之・藤原盛光：3D キャビティスキャナー“C-ALS”の空洞調査への適用—従来型技術との比較—，全地連「技術 e-フォーラム 2007」札幌
- 6) 財団法人 道路保全技術センター（2008）：リーフレット「路面下空洞探査」2008.5
- 7) 西川一・小池田真介・脇本直樹：高精度表面波探査と地中レーダーを併用した海岸堤防の空洞化調査事例，北陸地方整備局平成18年度管内事業研究会，平成18年7月
- 8) 岩田賢・麻山健太郎：空港の危機管理，国際交通安全学会誌，Vol. 32, No. 2, pp29-34
- 9) 馮少孔・鍛冶義和・杉山長志・菅野高弘・中澤博志・吉田秀樹：高密度表面波探査及び小規模微動アレイ探査を併用した空港滑走路下部地盤調査への適用例，第44回地盤工学研究発表会，地盤工学会，2009.8
- 10) 馮少孔・杉山長志・車愛蘭・羅先啓・常旭：Application of surface wave survey for nondestructive test of tunnel concrete lining, 第9回SEGJ 国際シンポジウム，SEGJ（国際物理探査学会・日本），2009.10.
- 11) 長尾毅・平松和也・曾根照人・野津厚：撫養港における入力地震動のゾーニングに関する研究，海洋開発論文集，第23巻，pp. 805-810, 2007.
- 12) 文化庁文化財部：重要文化財（建造物）耐震診断指針，2001
- 13) 藤田香織・花里利一・坂本功：伝統的木造五重塔の振動特性に関する研究その3 津観音五重塔の地震観測，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），2003.9, pp465-466
- 14) 花里利一・森田仁彦・柳沢孝次：伝統木造五重塔の動的挙動調査，大成建設技術センター報，No. 35, 2002

# 物理探査を用いたモニタリング

**【Key Word】**

物理探査, モニタリング, リアルタイム, 偽像

すぎもと よしひろ  
杉本 芳博\*

## 1. はじめに

地下で起こっている現象をリアルタイムに追跡して、テレビ画面を見るように把握したいというニーズは、地球科学をはじめ防災等の様々な分野で聞かれる。最も確実な方法は、ボーリングを掘削して原位置にセンサーを設置し、直接、データを取得する方法であろう。しかし、センサーの設置によって本来の地下の状態を乱してしまうというデメリットもある。また、予算上の問題もあり十分な数のセンサーを設置できない場合には、少数のデータに頼って「木を見て森を見ず」という事態にもなりかねない。物理探査を使ったモニタリングは、地表や最小限のボーリングを使って、非破壊に対象領域全体をカバーすることができるため、大局を判断する上で大変有効なツールである。本稿では、物理探査によるモニタリングの現状と今後の課題について述べる。

## 2. 物理探査によるモニタリングの適用対象

表1は、土木や資源、環境といった工学の分野において利用されている、物性の変化に着目した物理探査によるモニタリングの適用対象を示した

表1 物理探査を使ったモニタリングの適用対象

探査手法	適用対象	原理	備考
電気探査 電磁探査	地下水位変化や飽和度の変化のモニタリング	飽和度が大きくなると比抵抗が増加する現象に着目する。	
	地下水流動のモニタリング	高電気伝導度のトレーサー(塩水など)を注入し、低比抵抗領域がどのように移動するかを調べる。	
	水質変化のモニタリング	間隙水のイオン濃度の違いによって、地盤や岩盤の比抵抗が変化する現象に着目する。	CO <sub>2</sub> による比抵抗変化を検出する試みもされてる。
	塩淡境界の把握		
	グラウト効果判定	グラウト材の浸透による比抵抗変化に着目して、グラウト範囲の確認を行う。	グラウト材の種類や注入後の経過時間により、比抵抗が増加する場合もあり、また低下する場合もあるため注意が必要である。
	ゆるみの把握	ゆるみの進行とともに間隙率が増加し、比抵抗が変化する現象に着目する。	一般に、間隙率の増加により、乾燥状態では比抵抗は増加、飽和状態では比抵抗は低下する。
自然電位法	地下水流動	水の流れに伴って水頭勾配に比例した流動電位が発生する。これを測定することで地下水の流動方向を調べる。	受動的な測定のため高速測定ができ、現状でもリアルタイム・モニタリングが可能である。通常、逆解析は行わないため探査の分解能は低い。自然電位法と電気探査とを同時に行い地下水流動を調べる方法のことを、流体流動電位法と呼ぶ。
	水や水蒸気、CO <sub>2</sub> 圧入時のモニタリング	①水の流れに伴って発生する流動電位を測定して流体の流動方向を調べる。 ②地下の酸素濃度変化に伴う酸化還元電位の変化に着目する。 ③温度変化による熱電位の変化	
弾性波トモグラフィ 速度検層	地下水位変化、飽和度の変化	飽和度が大きくなると弾性波速度が低下し減衰率が上昇する現象に着目する。	飽和度90%~100%の領域では、微小な飽和度変化に対してP波速度が大きく変化するため、CO <sub>2</sub> モニタリングや不飽和化施工のためのモニタリング手法として期待されている。
	ゆるみの把握	ゆるみの進行とともに弾性波速度が低下する現象に着目する。	
	グラウト効果判定	グラウト材の固化による弾性波速度の増加に着目して、グラウト範囲の確認を行う	
反射法地震探	石油の貯留槽評価 CO <sub>2</sub> 地下貯蔵におけるモニタリング	反射波の振幅情報に着目し、貯留槽内の石油、ガス、CO <sub>2</sub> などの量的変化に伴う音響インピーダンスやV <sub>p</sub> /V <sub>s</sub> の変化を検出しようとする方法である。	四次元反射法探査(三次元探査を繰り返す方法)が注目されているが、測定、解析に時間がかかるため、リアルタイム・モニタリングとして実施することは難しい。
地下レーザ 電磁波トモ グラフィ	地下水位変化 飽和度変化 水質変化	地中を伝播する電磁波の速度や減衰から地下水の飽和度や水質を調べる。	
重力探査	地下水位変化 CO <sub>2</sub> モニタリング	地下水位変動に伴う質量増減による重力変化や、CO <sub>2</sub> の注入による密度の減少を検出する。	

\* (株)ダイヤコンサルタント  
ジオエンジニアリング事業  
本部地質解析センター物理  
探査グループ マネージャ

ものである。地下水流動や水質、地盤や岩盤のゆるみ、石油や地熱の貯留槽の評価、CO<sub>2</sub> 地下貯留におけるモニタリングなど、その適用範囲は多岐にわたる。物理探査によるモニタリングの特徴は、遠隔的に取得したデータから、コンピュータ解析によって対象領域の物性変化を間接的に推定・解釈するところにある。このような解析は一般に逆解析と呼ばれている。逆解析による間接的な推定においては、測定データに含まれる誤差が増幅して、時として解析精度を著しく低下させることがある。物理探査を実用的なモニタリング手法として定着させるためには、このような誤差の問題を解決する必要がある。

### 3. 物理探査によるモニタリングの事例

物理探査によるモニタリングの事例として、最終処分場における廃棄物内の内部保有水の状態を検討するために行った比抵抗モニタリングを示す。本試験は、最終処分場内に製作した高さ4m、直径5mの円筒形のセル内部に一般廃棄物を充填して、2年間にわたってモニタリングを実施した。廃棄物層の上部には中間覆土層として厚さ1mのスラグ層、また廃棄物層の下には有機物を吸着することを目的として、スラグ+黒ボク+ゼオライト+鉄粉からなる厚さ0.5mのPRB (Permeable reactive barrier) 層を設けた (図1 (a))。測定は、多芯ケーブルに10cm間隔で38個の電極をとりつけた電極ケーブルを使って比抵抗トモグラフィを実施した (図1 (b))。

図1 (c) に2年間の比抵抗変化を示す。廃棄物層上部の比抵抗が時間と共に上昇し、かつ下部に向かって高比抵抗化ゾーン (色が濃いゾーン) が拡大する様子が明瞭に検出されている。これは、廃棄物層から溶出した塩類のため当初低比抵抗だった内部保有水が、雨水の浸透によって上部から高比抵抗化している状況を示していると判断される。高比抵抗化領域は一様に下方に広がっているわけではなく、断面右側において拡がり方がやや速くなっている。透水性の不均質性または水みち

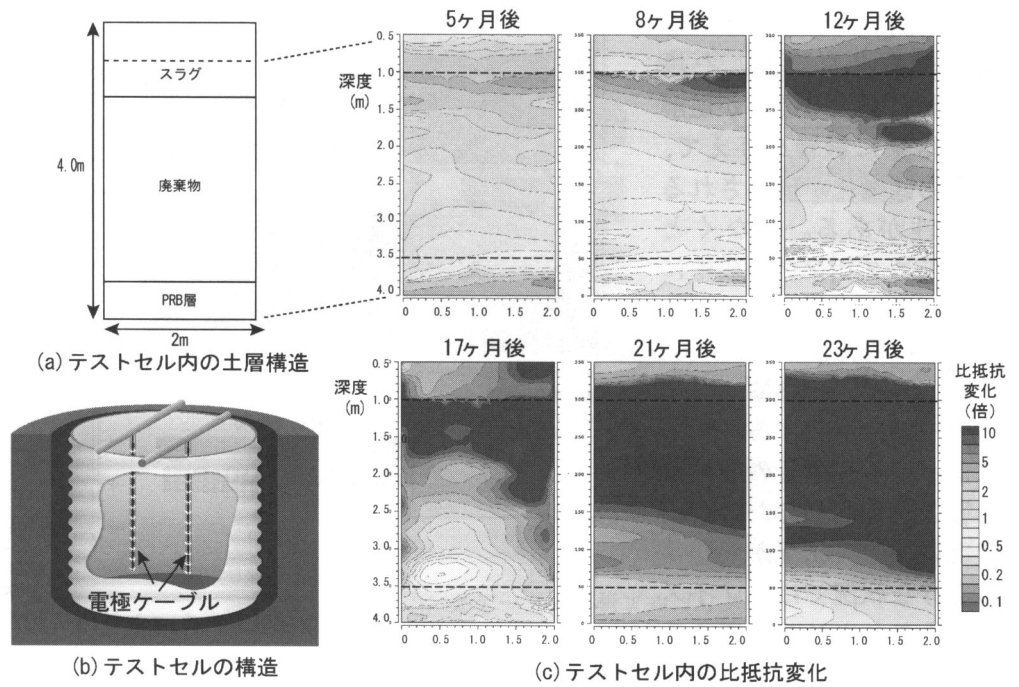


図1 比抵抗トモグラフィによるモニタリングの例

の存在をうかがわせる結果となっている。

電気伝導度計や水分センサーを配置した直接的なモニタリングでは、センサーの数に制限があるため、内部をこのように可視化することは難しい。物理探査による面的なモニタリングが有効であることを示す事例である。

### 4. 物理探査によるモニタリングの精度を低下させる要因

物理探査によるモニタリングでは、繰り返し測定されたデータから任意の時間のデータセット毎をサンプリングして、それぞれのデータセット毎に逆解析を行ってから、物性の時間変化をみるというやり方が一般的である。逆解析には解析誤差が含まれるため、それぞれの解析結果を断面表示すると、本来はありえない偽の構造 (例えば比抵抗構造) が含まれているのが一般的である。解析断面上に現れるこのような偽の物性構造のことを一般に偽像と呼んでいる。それぞれの解析断面上では偽像の影響が小さく目立たない場合でも、時間変化を調べるために2つの断面の差を求めると、通常は偽像が強調されることが多い。このため、解釈に苦しむ結果が得られることが少なくない。偽像の発生は以下の要因に左右されるため、測定や解析においてはこれらの影響を極力少なくするように工夫する必要がある。

#### ① 測定配置の影響

モニタリングの途中で測定点に増減がある場合



や、欠測データやノイズを含むデータを除去した場合、測定配置の違いが逆解析の結果に影響を与えて、偽の物性変化が検出される可能性がある。少なくとも、モニタリングの最中に測定配置を変更することは極力さけた方がいい。

### ② ノイズの影響

データに混入するノイズによっても逆解析の結果は影響される。このため、測定毎にノイズ状況が変化するような状況では、ノイズ状況をモニタリングできる物性変化のない定点観測などの工夫が必要であろう。

### ③ 解析パラメータの影響

測定時期の異なる2つの解析結果を比較して物性変化を求めようとするのであれば、解析アルゴリズムやパラメータは同じ設定で解析したものを比較すべきである。しかし、解析プログラムによっては、解析の実行中に最適なパラメータを自動的に決めてある場合もあり、ユーザーが知らないところでパラメータの値が変わっている場合があるため注意が必要である。

### ④ 物性変化の影響

モニタリングの目的は比抵抗や弾性波速度などの「物性の変化」を検出することである。しかし、物性が増えることによって、逆解析断面における偽像の大きさや強さも変化するため、これが偽の物性値変化として検出され、シグナルと区別することが難しい。

比抵抗モニタリングのシミュレーション検討において、物性変化の影響が認められた例を次に示す。図2は、岩盤中に幅1mの破碎帯が鉛直にのびる構造に対して比抵抗探査を適用したときの解の再現性をシミュレーションによって調べたものである。破碎帯の比抵抗値を500 ohm-mとし、塩水注入によって100 ohm-mまで低下したという状況で、電極間隔1m、探査深度20mの比抵抗探査をしたものとした。シミュレーションによって模擬的にデータを作成し、これを逆解析して元の比抵抗構造を再現できるかどうかを検討した。逆解析の結果によると、鉛直にのびる低比抵抗帯は概ね再現されているものの、低比抵抗帯の両側

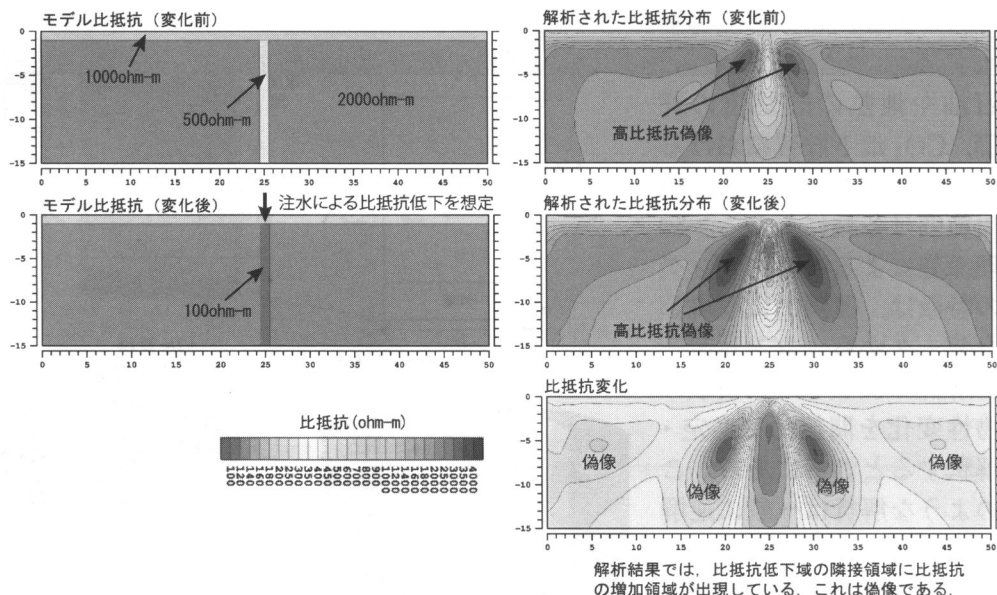


図2 シミュレーション結果に現れた偽像の例

に高比抵抗の偽像が発生していることが特徴的である。低比抵抗帯と周囲の比抵抗コントラストが大きくなるほど偽像は大きくなるため、比抵抗変化の断面では、比抵抗低下域に隣接したところの比抵抗があたかも増加したかのような結果が得られている。このように、比抵抗の低下した領域周辺に高比抵抗の偽像が発生する現象は、実データを使った解析結果でも認められており、解釈に際しては、このような偽像のことを十分考慮しなければならない。

## 5. モニタリングデータの高精度解析法

以上のようなモニタリングの解析精度を低下させる要因を取り除くため、杉本(2002)は図3に示す解析アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、測定ごとに別々に解析することをやめ、データの変化をそのまま1回で逆解析しようというやり方をしている。非線形性の効果を考慮するため、リファレンス用の初期モデルから計算したシミュレーションデータに測定された見掛け比抵抗変化を加えて解析し、得られた結果から初期モデルを引いて比抵抗変化を求めている。同一の測定配置のデータしか使わないことや、解析パラメータの影響を受けないことがないため、偽像の発生を少なく抑えることができる。また、このアルゴリズムでは、物性値は増加しない(または低下しない)という制限のもとに物性値の変化を求めることも容易であり、先に述べた物性値の変化に起因する偽像を除去する方法として使える可能性がある。

従来法と高精度解析法の結果を比較した事例を次に示す。この調査は石炭の採掘跡を比抵抗探査

を確認することを目的として実施したものである。ボーリング調査によって確認された坑道 (GL-5 m ~ 6.55 m) の上を通過する測線で、2 m 間隔に電極を設置して比抵抗モニタリングを行った。ボーリングを使って、約 1600 リットル (塩 120 kg, 塩分濃度 7% 程度) の塩水を延べ時間 3 時間にわたって断続的に注入し、比抵抗の変化を調べたものである。

図 4 (a) は、塩水注入前後の 2 つの比抵抗断面から比抵抗変化率を計算したものである (従来法)。低比抵抗の塩水を注入したにもかかわらず、比抵抗増加を示す領域が広く分布している。先のシミュレーション結果を参考に比抵抗増加を示す領域は偽像と考えるほうが自然である。図 4 (b) は高精度解析法による解析結果である。この解析では比抵抗は増加しないという制約条件のもとで解を求めているが、比抵抗が低下している領域はボーリングの直下に限られており、塩水注入に対するレスポンスとしては妥当な結果が得られていると判断できる。

## 6. リアルタイム・モニタリングへの適用

グラウト効果判定のような施工管理を目的としたモニタリングでは、測定だけ済ませて、後でゆっくり解析するという時間的余裕はない。データを取得しながらリアルタイムで結果を出し、施工のための判断材料を提供することが求められる。

物理探査によるリアルタイム・モニタリングの試みとしては、古くは井上 (1986) による岩盤試験に伴う比抵抗変化を調べた事例に遡る。井上は、PC 制御の 50 チャンネル電気探査装置を使い、測定された見掛け比抵抗をリアルタイムに PC 画面上にプロットするシステムを開発した。比抵抗の変化を瞬時に検出できることから、降雨浸透やグラウトに伴う地下の比抵抗変化等をモニタリングする目的で使われている。

牛島他 (1995, 1998) は、地熱や石油の貯留槽評価を目的として、ケーシングを電流電極とした電気探査法と自然電位法とを同時に実施して地下の比抵抗分布と流体の流れを調べるハイブリッド探査を提案し、流体流動電位法と命名した。これ

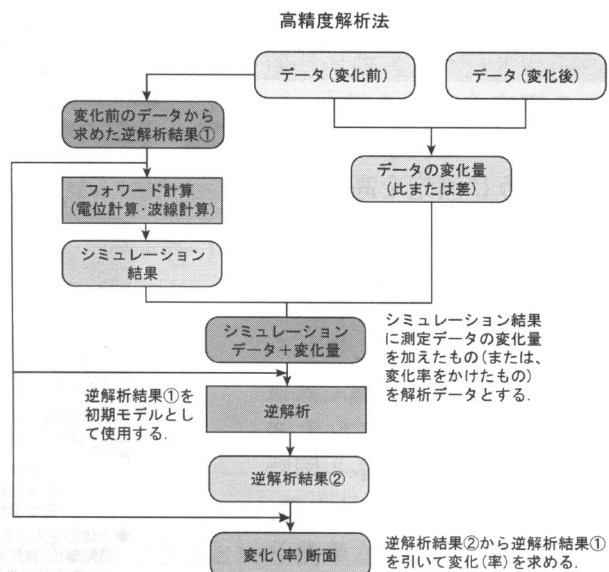
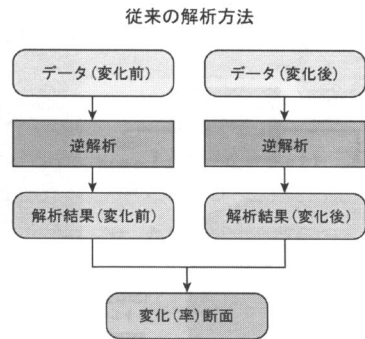


図 3 モニタリングデータの解析アルゴリズム

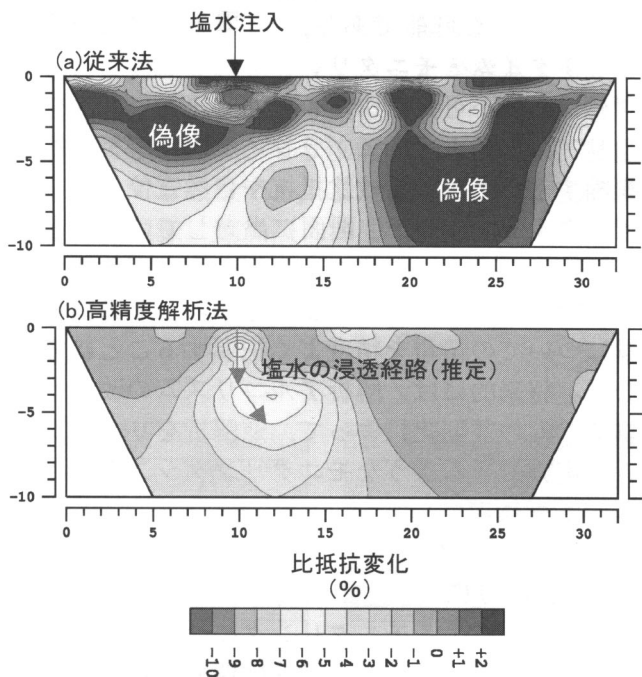


図 4 従来法と高精度解析の比較

は、注水による比抵抗変化を電気探査で検出するとともに、地下水の圧力分布の変化によって発生した流動電位を、地表の自然電位測定で検出しようという方法である。図 5 は流体流動電位法の測定方法、ならびにボーリングへの注水試験で検出された自然電位の変化を図示したものである。注水開始直後にボーリング孔周辺において自然電位の低下が認められている。地下の流体挙動に関する情報がリアルタイムに検知されることを示した事例である。

現在、一般に普及している比抵抗探査の測定システムでは、1 断面の測定に数 10 分から数時間程度の測定時間を要するため、変化の速い現象に対

しては測定が追いつけない。リアルタイムの名に値する測定を行うためには、起こっている現象に追従できるように測定を高速化する必要がある。比抵抗モニタリングにおいて近年注目されているのが、複数の場所に同時に通電しこれをマルチチャンネル測定装置で同時受信するマルチ送信・マルチチャンネル同時測定的方式である(神宮司, 2007, 今村, 2009)。チャンネル数さえ増やせば、一回の通電で全てのデータを取得することも可能であり、リアルタイム・モニタリングには必要不可欠なツールである。

リアルタイム・トモグラフィでは、解析時間を短縮するために見掛け比抵抗や自然電位など生のデータをそのまま PC 画面に出力していることが多い。このような方法では、何らかの変化の兆候を瞬時に捉えることはできるものの、その位置や量についての情報を精度よく把握することはできない。将来的には、解析アルゴリズムの改良やプログラムの並列化によって、逆解析をリアルタイムに実施できるようなモニタリングシステムの開発が望まれる。

## 7. おわりに

物理探査によるモニタリングについて現状と今後の課題について述べた。非破壊でデータ取得ができることから、多くの分野で期待されている技術である。しかし、結果の妥当性が十分に検証されていないこともあって、その評価は定まっていない。過去の事例を見ると、モニタリングによって検出された比抵抗や弾性波速度の変化について、十分な検証をすることなく都合の良い解釈を加えて調査を終えるというケースが少なからず認められる。例えば偽像をシグナルとして解釈していると思われるケースもある。モニタリング結果を適切に解釈するためには、原位置データによる検証は欠かせないが、できない場合は、図2に示したようなシミュレーション検討や、浸透流解析のようなフォワード解析結果との対比を行って、多面的に検証していくことも必要であろう。実用化には解決すべき課題はまだ多いというのが

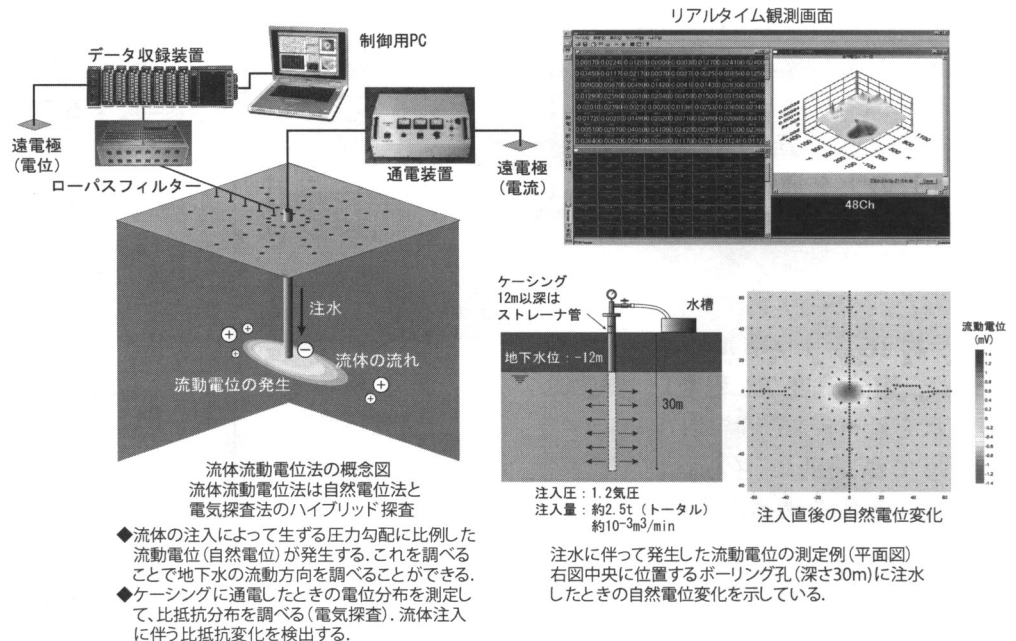


図5 流体流動電位法によるリアルタイム・モニタリングシステムと測定結果の一例

現状である。

## 参考文献

- 1) 井上誠, 小俣明 (1986): 比抵抗による岩盤試験のモニター法—その1—, 物理探査学会第75回学術講演会講演論文集, 98-99.
- 2) 今村杉夫 (2007): CDMA方式を用いた多チャンネル同時通電による瞬時電気探査の可能性(その1:原理と基礎実験), 物理探査学会第117回学術講演会講演論文集, 219-222
- 3) 今村杉夫, 杉本芳博, 青野哲男, 牛島恵輔, 水永秀樹, 鈴木浩一 (2005): 流体流動電位法による貯留層内のリアルタイム流体挙動推定システムの開発 その1:ハードウェアの開発, 物理探査学会第113回学術講演会講演論文集, 95-98.
- 4) 牛島恵輔, 海江田秀志, 水永秀樹, 田中俊昭, 橋本幸治 (1995): 電気探査法による地熱貯留層のモニタリング—流体流動電位法, 地熱32(2), 91-107.
- 5) 牛島恵輔, 水永秀樹, 田中俊昭, 玉川哲也, 増田一夫 (1998): 流体流動電位法による石油強制回収法のモニタリング, 物理探査51(6), 659-675.
- 6) 神宮司元治, 狩野嘉昭 (2006): マルチ送信比抵抗トモグラフィ計測システムの開発とその応用について, 物理探査学会第114回学術講演会講演論文集, 215-218.
- 7) 杉本芳博 (2002): 比抵抗トモグラフィによる時系列探査の新しい逆解析法, 物理探査学会第107回学術講演会論文集, p207-210
- 8) 杉本芳博 (2007): 比抵抗トモグラフィを用いた大型ライシメーター充填廃棄物のモニタリング, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, p365-368.



# 地震波干渉法

—地中に満ちあふれる雑振動を使って地中を可視化する技術—

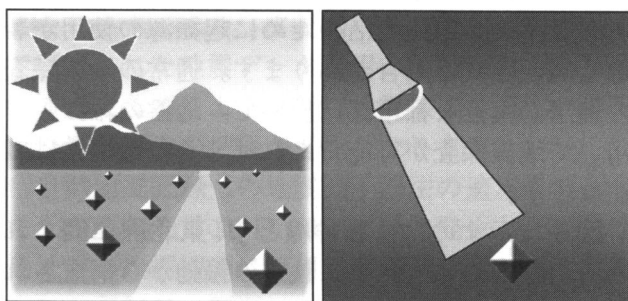
**【Key Word】**

可視化, 地震波干渉法, 擬似ショット記録, 雑振動, 反射法地震探査

あいざわ たか お  
相澤 隆 生\*

## 1. はじめに

我々は、昼間の太陽光によって、その物体からの光の反射波を目で捉らえることにより、全てのものを見ることができます。一方、地面の下を見たいとき、地球の中を見たいとき、我々は地震波の反射波を使って、その構造などを認識しています。これには、光と同様に地震波が物質境界で反射・屈折する現象を利用しています。しかしながら反射法地震探査では、謂わば懐中電灯を使って闇の中を照らしてみているようなもので、照らしたところしかみることができません(図1(b))。地上で日の光を浴びるように、地中を常時照らすことにより、地面の下をいつも眺めること(図1(a))はできないのでしょうか。「地震波干渉法」によってそれを可能にすることができるのではないかと期待しています。



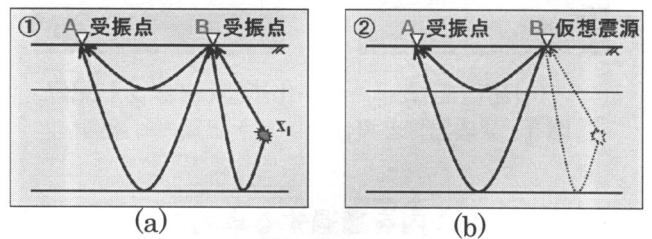
(a)昼間の太陽光 =地震波干渉法 (b)懐中電灯の光 =反射法地震探査

図1 地震波干渉法概念図

## 2. 地震波干渉法の理論

地震波干渉法の基となる理論は、異なる2つの受振点で同時刻に測定された振動記録を相互相関を取ると、片方の受振点を起振点としたときの2地点間を伝播する反射波または全ての波動を再現

することができるという簡単なものです。例えば図2に示すように、受振点A, Bでどこかの振動源の記録を同時刻に受振(a)してそれらを相互相関を取ることにより、(b)図の様な片方を起振点とした反射波記録を合成することができます。この合成した波形記録を「擬似ショット記録」と呼んでいます。擬似ショット記録の合成には、振動源が単一でも複数でも、または連続的な振動であっても、同様に地震波干渉法の理論が適用できることが分かっています。地震波干渉法=擬似ショット記録を合成する理論といっても過言ではありません。



受振点A,Bで同時測定 (a)を相互相関した受振点Aにおける波形の模式図

図2 地震波干渉法の理論説明図

## 3. 地震波干渉法による探査

日常生活をしている我々の周囲では、地下鉄や鉄道、自動車の走行、工事現場や工場の振動など社会生活に伴う種々の雑振動が常に存在しています。また、海岸線では波浪、風が吹いて木々が揺れ、地震国日本では日常的にどこかで多くの地震が発生しているなど、地中は振動で満ちあふれています。地震波干渉法の理論を使うと、地表に受振器を多数設置してこれら雑振動の同時測定を行うことにより、人口震源を使わないでいつでも反射法地震探査の波形記録を合成できることになり

\* サンコーコンサルタント株式会社地盤調査・防災部副部長

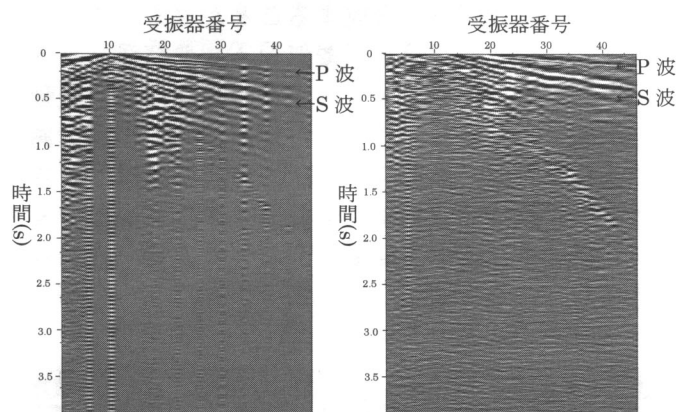
ます。

それでは地震波干渉法の理論の、実際の適用事例を挙げてみます。

### 3.1 地震探査の起振ができない場合の補完

屈折法地震探査や反射法地震探査を実施する際に土地利用の関係で、ダイナマイトや起震車両による起振ができない場合があります。起振できない場所に受振点を設けることにより、他の起振点からの振動記録を用いて擬似ショット記録を作成し、全ての起振点データを用いたデータ処理・解析を行うことができます。

実際の発破記録と、他の地点の発破記録を用いて擬似ショット記録の対比図(図3)では、発破記録と同様に擬似ショット記録にもP波S波が確認できることが分かります。



(a)発破記録 (b)擬似ショット記録

図3 発破記録と擬似ショット記録の対比図

### 3.2 トンネル内を通過する車両の振動を利用した反射法地震探査

トンネル地盤の検討や追加工事のために供用中のトンネルを対象に地表からの地震探査を行う場合、トンネルの交通振動や人工震源が与える影響が問題となることがあります。トンネルの交通振動を使用して地震波干渉法により反射記録が合成することによりこの様な問題を解決すること可能です。

延長600m程度のトンネル地表部に地震計を設置し、トンネル内に2tトラックを繰り返し走行させて26分間程度の交通振動を測定しました。交通振動記録を基に、各受振点における擬似ショット記録を合成し、擬似ショット記録を用いて反射法地震探査のデータ処理を行い、反射断面を作成しました。通常の測定・データ処理を行った反射断面(図4(a))には、3つの顕著な反射面(A,

B, C)が認められ、交通振動から地震波干渉法を適用して得られた反射断面(図4(b))にも同様な位置に反射面が認められます。また、ここでは26分程度の交通振動記録を用いましたが、長時間の測定を行うことによってさらに分解能が向上することが期待できます。

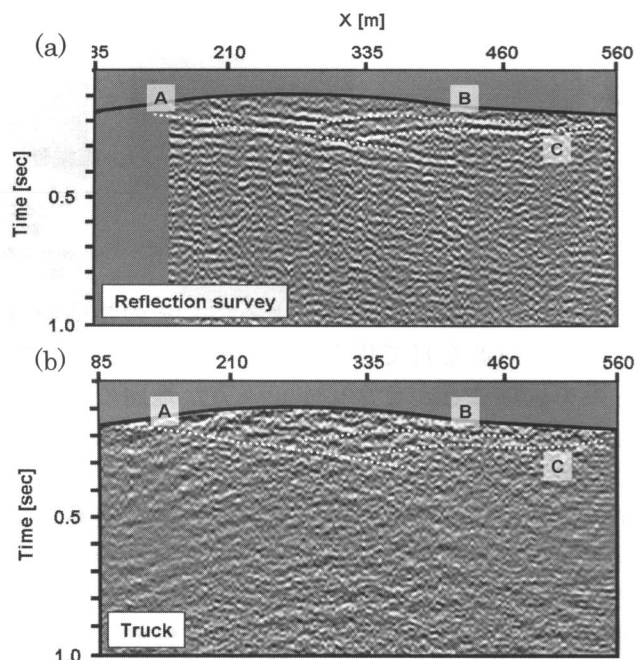


図4 従来の反射断面(a)とトンネル内を通過する車両の振動による反射断面(b)との対比

### 3.3 鉄道の振動を利用した反射法地震探査

都市部では、車や鉄道などの交通ノイズに加えて工場や建設工事など生活に関連する雑振動のために地震探査の適用が困難な場合があります。それどころか、市民生活のために起振源の使用が著しく制限される場合があります。通常地震探査の適用が困難な都市部に於いて、地盤の雑振動を用いて地震探査が可能であれば、その適用性は広がります。

図5に示すのは、新幹線とJR東北線に囲まれた河川敷において、主に鉄道の振動から構成される地盤の雑振動を1時間程度測定しました(写真1)。雑振動の測定記録に地震波干渉法を適用し擬似ショット記録を合成し、反射法地震探査のデータ処理を行うことによって得られた、S波の反射断面です。深度50~60m付近(矢印)に連続する反射面が認められます。それ以深にも顕著な反射面を幾つか認めることができます。地表面に受振器を設置して1時間程度鉄道の雑振動を測定することにより、深度200m程度までのS波反射構造を求めることが可能と考えられます。

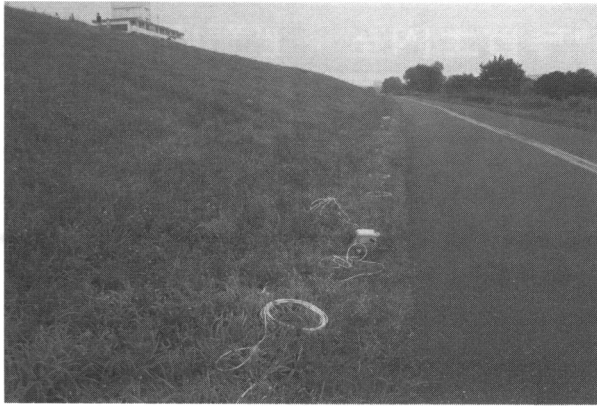


写真1 地震波干渉法の測定状況

印で示した反射面は、反射断面の中で最も顕著なものであり、この火山岩類と堆積岩類の構造境界面に対応したものと推定されました。

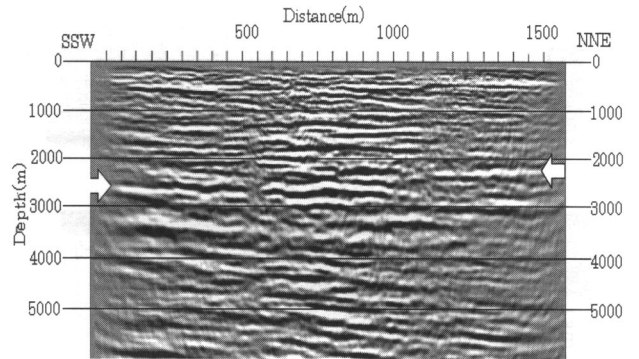


図6 群発地震を利用した地震波干渉法による反射断面

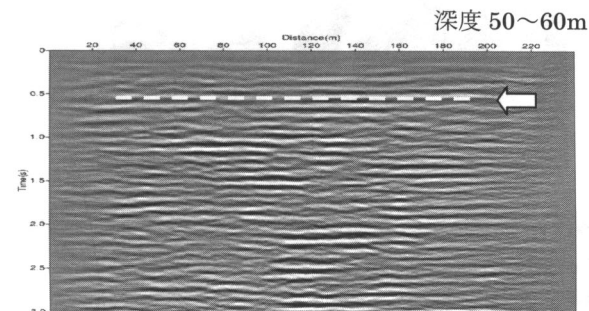


図5 鉄道の振動を用いた地震波干渉法によるS波反射断面

### 3.4 群発地震を利用した数 Km の地質構造調査

自然地震は身近な雑振動の一つです。自然地震の測定記録から反射法地震探査の記録が合成できれば、地震発生直後の震源域付近での余震測定により速報的な震源域の反射断面を得ることが可能となります。また、広範囲に分布する地震観測網で収録された地震データを用いることにより、通常の人工震源による反射法地震探査の測定が不可能な深部構造の把握が可能となります。

自然地震記録への地震波干渉法の適用事例として、2007年3月26日9時41分に発生した能登半島地震の余震観測に適用した事例を示します。取得した記録は、震源付近の道路沿いに展開した約1.5 kmの測線上に、鉛直成分2 Hz型地震計を10 m間隔で156 ch設置し、サンプリング間隔1 msの連続測定を行ったものです。連続測定には12 chごとのA/D変換ボックスを持つ分散型の測定システムを用い、4日間にわたって累計約30時間の群発地震を測定しました。深度断面上には、深度3000 mより浅部に反射面がいくつも認められており、北陸地方土木地質図(1990)によりますと、調査地域構造は上盤に花崗岩・火山岩類、下盤に堆積岩類が分布するとされています。図中矢

### 3.5 高速道路の走行振動を利用した数十 m の深い表面波探査

表面波探査は、表面付近を打撃することによりレイリー波を発生させて深さ10 m程度までのS波速度構造を解析する方法です。高速道路の走行振動を用いることにより、従来の表面波探査と併せて解析することで、深さ50 m程度までのS波速度構造を解析することが可能となります。

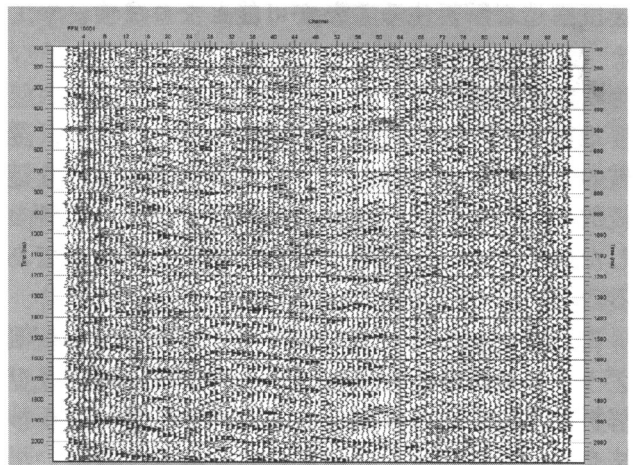
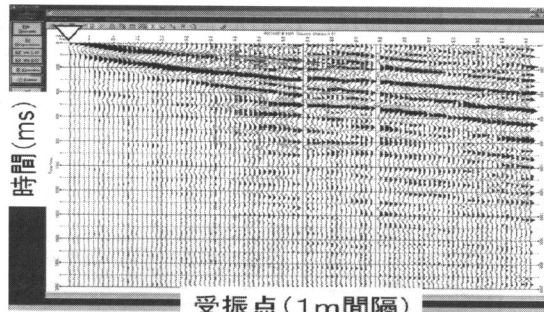


図7 高速道路の交通振動波形記録(雑振動)

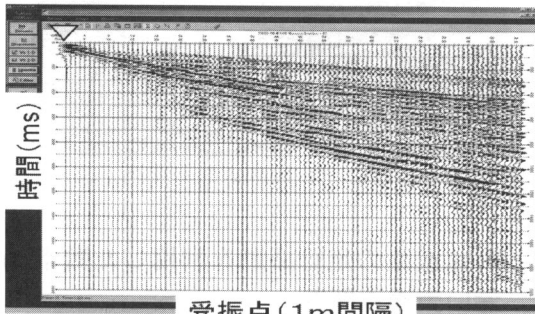
測定された雑振動記録(図7)は、全く無相関ではなく至る所に連続する波群が認められます。この記録を用い、地震波干渉法の理論を基に相互相関を行い合成した擬似ショット記録(図8(a))を合成することができます。擬似ショット記録(図8(a))は、カケヤ起振記録(図8(b))に比べて低周波数の表面波(太く黒く帯状に見える)が卓越していることがわかります。

カケヤ起振と交通振動によるそれぞれの記録を用いて表面波の分散曲線を求め他後に分散曲線を



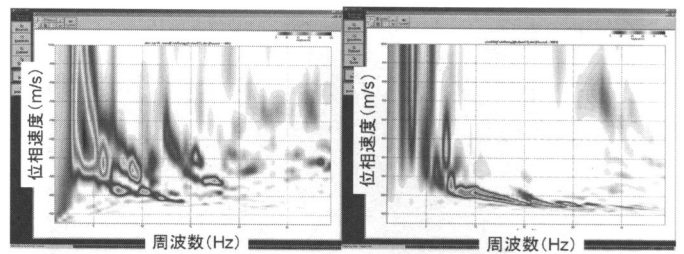


(a) 擬似ショット記録



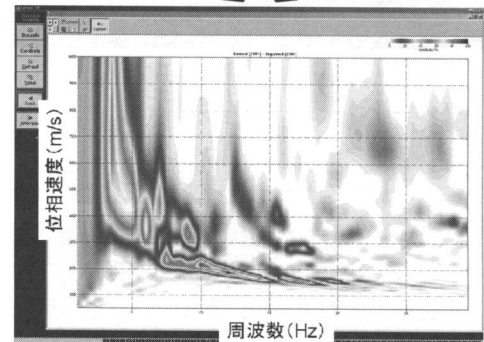
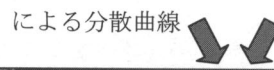
(b) カケヤ起振記録

図8 カケヤ起振と交通振動による擬似ショット記録で得られた表面波の対比図



(a) 擬似ショット記録

(b) カケヤ起振記録



(c) 合成した分散曲線

図9 カケヤ起振と交通振動による擬似ショット記録で得られた表面波の対比図

合成することにより浅部（カケヤ記録）から深部（擬似ショット記録）までの分散曲線（図9）を合成することが可能になり、やや深い所までのS波速度構造を解析することが可能となります。

#### 4. まとめ

地震波干渉法の理論を適用することにより、発破のような単一の波動および交通振動のような連続的な波動を基に、任意の受振点を仮定の震源とした擬似ショット記録を合成することが可能であることが分かりました。

ここに示しました幾つかのフィールドでの観測データに基づき、地震波干渉法のデータ処理及び解析結果について検討しました結果、地震波干渉法を用いれば、少ない発震点しか確保できない場合の反射法地震探査や、自動車の走行振動を用いた反射法地震探査が可能であることが分かりました。また、自然の雑振動である自然地震を振動源として利用する方法も有効であることが分かりました。

これまで筆者らが実施した地震波干渉法の適用試験の中では、必ずしも全ての雑振動や地震・人

工地震を用いて目的とする擬似ショット記録が得られるわけではありませんでした。地震波干渉法では、元となる振動の周波数、エネルギーやS/N比など、適用対象によって観測時間や観測方法など、まだまだ不明な点が多く、できるだけ多くの事例を蓄積することが特に重要と考えています。また、今後はMEMSセンサを使ったセンサネットワーク等の先端技術と組み合わせることで、都市全体規模での地中の可視化が実現できることと期待しています。

#### 参考文献

- 1) 相澤隆生, 他 (2008): フィールドでの観測実データを用いた地震波干渉法の適用条件に関する検討, 物理探査, Vol. 61, No. 2
- 2) 黒田清一郎, 他 (2010): 直線アレイによる微動観測記録からの地盤のS波速度構造の評価, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, 283-284
- 3) 白石和也, 他 (2008): 地震波干渉法による地下構造イメージング技術の実用化にむけた実験的研究, 物理探査, Vol. 61, No. 2

## 工学的分類と物理試験の意義

### 【Key Word】

判別, 固有の性質, 状態量, 一次性質, 二次性質

なかむらひろあき  
中村裕昭\*

### 1. はじめに

土質試験とは、土の性質を調べる試験のことで、試験の実施条件によって野外の原位置試験と、原位置で採取した試料について行う室内試験とに大別され、更に試験目的（土の性質）によって、物理試験、化学試験、強度変形試験、圧密・透水試験、安定化試験（材料試験）等に分けられる。また、最近では試験対象を土に限らず岩石や人工材料にも拡張した場合には、地盤材料試験と呼ぶ。

土質試験の方法は、その求める性質ごとに規格（JIS）や基準（JGS）が整備され、これらの規格・基準の内容と解説は、原位置試験については「地盤調査の方法と解説（通称：青本）」<sup>1)</sup>に、室内試験については「地盤材料試験の方法と解説（通称：赤本）」<sup>2)</sup>にまとめられている。

本講座は、対象を地盤材料の内の土質材料に、かつ室内試験に絞り、室内土質試験理解の一助となるようなポイントを紹介する。

第1回の本稿は、工学的分類と物理試験の意義について概説する。

### 2. 土の分類

#### 2.1 分類と判別

分類（classification）とは、例えば外観（色、形）、触感、素材、性質、等の類型基準によって同一性を有するグループごとに区分することで、その分類したグループの全体像かつ相互関係を「分類体系」、分類に用いた類型基準を「分類基準」とか「分類指標」、同一性を有するグループごとに付けた区分名を「分類名」と呼ぶ。

一方、判別（identification）は、対象とするものが、分類体系上のどのグループに属するかを見分ける（識別する）ことである。

「分類」と「なまえ」について、生物学者である池田清彦は「分類することは思想を構築することだ」、「分類となまえあるいはコトバは不可分の関係にある」、さらに「なまえをつけることは、もっとも初元的な分類なのである。世界はなまえをつけられてある同一性に分節され（もちろんこれは事物の方からみれば幻想である）、逆にこの同一性と差異性は世界を見る基準となる。」と述べている<sup>3)</sup>。

池田の言う「分類」と「なまえ」に関するこの概念は、全ての分野に共通して適用できる。地盤工学分野然りである。地盤工学分野では、ここでいう「分類」を「土の分類（地盤材料の分類、地盤の分類）」に、「なまえ」を「土質名（地盤材料名）」に当てはめて考えることができる。即ち、地盤工学を体系化する上で、土の分類は全ての基礎的作業であると言える。

#### 2.2 粘土と砂

代表的な土の種類かつ名称に「粘土」と「砂」がある。私達は子供の頃から、例えば工作用の「粘土」、公園の砂場の「砂」、海の砂浜の「砂」として身近に接してきており、馴染みが深い。また粘土は陶器の材料、砂はセメントの材料といった具合に身近なものの素材となっていることも知られている。このように何れも身近な材料ではあるが、「粘土」は「砂」の代わりには使えないし、「砂」も「粘土」の代わりにはならないことを誰もが知っている。「粘土」と「砂」は、性質が全く異なっている別物だし、誰もが見ためや触感（手触り）で見分けることができる。粘土と砂の特徴を身近な視点で表1に示す。「粘土」は、粘土鉱物からなるが、粘土鉱物を視認することはできず、一般的には塊として認識する。手で捏ねると自由に造形できる。工作材料となる所以である。一度含んだ水はなかなか抜けず、また長期間放置して乾燥し

\* (株)地域環境研究所代表取締役

たり強制的に高温で焼くと固結したり固化するのも特徴である。

表1 身近な視点での粘土と砂の特徴

区分	目視・触感	主な特徴
粘土	塊状に存在。表面に艶がある。構成粘土鉱物は視認できない。	粘り感に特徴。練って軟らかくして自由に造形できる。切り取ったりくっ付けたりする自由度もある。工作後の造形は比較的安定している。乾燥すると固まる。
砂	粒状に存在。容易にほぐせて粉々になる。構成砂粒子を視認できる。	造形に制約がある。上が小さく下に大きい形が基本。一般的には大きな塊から削りとして造形する。不安定で壊れやすい。例外的にトンネルと砂団子がある。乾燥すると傾斜角が $\phi$ の角度の円錐状に落ち着く。粉々なので、外力があればすぐに崩れる。

一方「砂」は、砂粒子からなり、その粒々は視認できるし触感でも確かめられる。砂粒子同士は独立しており、簡単にほぐすことができる。砂は乾燥すると完全にバラバラ（粉々）になるが、少し水を含むと毛管力で砂粒子同士がくっつく性質がある。粒々材料ではあるが、砂団子を作ることができる。しかし更に水を加え飽和状態に達すると毛管力は失われ、どろーっと流出してしまう特徴がある。

前述の定義に従って、土の外観や、性質の違い等を踏まえて、同一性を有するグループとして括り、それぞれに「粘土」と「砂」というグループ名を付けて区分することを「分類」と呼び、目の前の土が「粘土」に分類されるか「砂」に分類されるか見極める（識別する）ことが「判別」である。

蛇足だが、上記のように物質としての土ではなく、日本語として「粘土」と「砂」を考えてみると、粘土の「粘」は粘り気を指し、どちらかというところを好意を持たれる性質を意味しているが、砂の方は残念ながら日本語的にマイナスイメージが強い。「砂上の楼閣」は有名な用法で「長続きしないこと」や「実現不可能な計画」の例えに使われ、「砂にする」とは「無駄にする、だまし取る」の意だし、「砂をかむ」は「味気ない、おもしろくない」ことを指す。

地盤工学技術者として長く「砂」と付き合いしてきた者として、これら「砂」という漢字を含む用語の日本語としての意味と用法に、違和感を感じるのは私だけだろうか。

### 2.3 分類基準の基本

土の代表的分類方法に、地盤 工学会基準の「地盤材料の工学的分類方法(JGS 0051)」があり、前述の赤本<sup>2)</sup>に収録されている。この基準の基本は、表2に示すように土の構造と構成粒子の大き

さによる大区分である。

表2 土の大分類

構造による土の大分類		構成粒子による土の大分類	
(構造)	(大分類)	(主体構成粒子)	(大分類)
多孔体 (スポンジ状)	細粒土	0.075mm未満	粘性土
粒状体	粗粒土	0.075mm以上 2mm未満	砂質土
		2mm以上 75mm未満	礫質土

基本としては表1に示した粘土と砂は、それぞれ表2の粘性土と砂質土とに対応すると考えてよい。

前述の通り、地盤を構成する土の代表的なものに「粘土」と「砂」がある。「粘土」は粘土鉱物がイオン結合して多孔質のスポンジ状の構造を呈しており、間隙が大きい割に透水性は低く、強度特性は拘束圧に依存しない粘着力で表現される。また、荷重が加わっても変形するのに時間が掛かる圧密特性がある。一方、「砂」は砂粒子の集合で粒状体構造を示し、間隙が小さい割に透水性は大きく、強度特性は拘束圧に依存する内部摩擦角で表現される。また、荷重が加わると一般的にはその土が持つ変形係数に応じて直ちに弾性変形を生じる。このように土はその種類ごとに性質が大きく異なっている。従って、同じような性質を示す土ごとにグループ化することは、土を科学的に扱う上での基本作業である。ここに土の分類の意義がある。表3に工学的な視点での粘土と砂の特徴を、表4に工学的な視点での粘土と砂の物性対比を、表5に物性の一般値を示す。

表3 工学的な視点での粘土と砂の特徴

土質	構造	間隙	課題
粘土	粘土鉱物がイオン結合したもので多孔質のスポンジ状構造	小さな部屋が多数あるイメージで、パイプに例えると細く長い	地盤沈下 支持力 斜面安定
砂	砂粒子の集合体で乾燥もしくは飽和時には砂粒子同士は結合関係はないが、不飽和時には水の毛管力で吸着している。粒状体構造	大きな部屋が少数しかないイメージで、パイプに例えると太くて短い	液状化 コーラス 斜面安定

注：課題は地盤としての主な工学的課題

表4 工学的な視点での粘土と砂の物性対比

	間隙	比表面積	含水	密度	透水性	強度	変形
粘土	大	大	大	小	小	c	圧密
砂	小	小	小	大	大	$\phi$	弾性

### 2.4 土粒子と土の名称

前述した「粘土」と「砂」や、「シルト」、「礫」という呼び名は、工学的分類基準では土粒子区分



表5 土質別の主な物性値の一般値の例

土質区分	土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) の例	間隙比 $e$ の例	間隙率 $n$ (%) の例	有効間隙率 $n_e$ の例	含水比 $w$ (%) の例	透水係数 $k$ (m/s) の例
礫質土	2.6~2.7	0.3~0.7	30~35	15~25	10~20	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-9}$
砂質土	2.6~2.7	0.6~0.9	30~40	15~30	15~30	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4}$
粘性土	2.5~2.8	0.7~2.6	45~50	15~20	25~100	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-7}$
関東ローム	2.7~2.8	2.0~4.0	50~70	20	80~150	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$
高有機質土	1.4~1.8	2.0~20.0	70~95	60~85	120~1,300	$1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-7}$

- 注.1) 高有機質土は泥炭・PEAT・腐植土とも呼ぶ  
 注.2) 土の間隙比(大文字のVは体積) :  $e = (V_v/V_s)$ ,  $n = e/(1+e) \times 100$   
 注.3) 土の含水比(大文字のWは質量) :  $w = (W_w/W_s) \cdot 100$   
 注.4)  $\rho_s = 2.7$  と仮定した時の  $e$  と  $w$  の関係(高有機質土以外の場合) :  $e = 0.027 \cdot w$   
 注.5)  $\rho_s = 1.7$  と仮定した時の  $e$  と  $w$  の関係(高有機質土の場合) :  $e = 0.017 \cdot w$

表6 粒径境界値の分野と年代による違い<sup>4)</sup>

分野・国による土粒子区分粒径境界値の違い(単位: mm)										
①理学 (堆積学)分野		②農学 (土壌学)分野		工学(地盤工学)分野						
				③海外の例 <sup>(注2)</sup>		日本				
岩片 区分	粒径	土粒子 区分	粒径	土粒子 区分	粒径	土粒子 区分	粒径 <sup>(注3)</sup>			
							④1990年 <sup>(注4)</sup>	⑤1987年	⑥1964年	⑦1950年
礫	巨礫/ 大礫	巨岩/ 巨礫/ 大礫	100	ラージボルダー/ ボルダー/コブル	63	石(巨石/ 粗石)	75	53	50.8	4.8
	中礫/ 細礫									
	砂	粗砂/細砂	0.02	砂	0.063	砂	0.075	0.075	0.074	0.05
泥	シルト	シルト	0.002	シルト	0.002	シルト	0.005	0.005	0.005	0.005
	粘土	粘土	0.0039	粘土	0.002	粘土	0.005	0.005	0.005	0.005

- 注.2) ISO 14688-1(2002)  
 注.3) 土の粒度試験方法(JIS A 1204)における土粒子区分粒径境界値の時代による変遷  
 注.4) 地盤材料の工学的分類方法(JGS 0051-2000)

の名称と土の分類名の両方で用いている。

そもそも「土粒子の集合体が土」という関係にある。ここで紛らわしいのは、土粒子としての「粘土」「シルト」と土としての「粘土」「シルト」との関係である。土としての「粘土」と「シルト」の分類基準は、構成土粒子の種類ではなく、あくまでも塑性図上のA線である。従って、結果論としてシルト粒子主体の粘土 {C} という土や粘土粒子主体のシルト {M} という土が存在する可能性がある。そこで工学的分類基準では、土粒子区分の名称には「粒子」とか「分」を語尾に付けること、土の名称には分類記号を必ず併記することを義務付けている。

また、分類結果に基づく土質材料の名称について、JGS 0051「地盤材料の工学的分類方法」では、分類体系図に例示された分類名に拘らず、特殊土名やローカルソイル名、慣用土質名がある場合には、それらで表示してもよいとしている。むしろそのような表示の方が、その土の特徴を捉えていることが多いので、推奨している。

### 2.5 粒径境界値の分野と年代による違い

土粒子を区分する粒径境界値が、分野や国、また時代によって異なったり変遷している。代表的なものを表6に示す。これより砂粒子と礫粒子の

粒径境界値は、分野、国、時代に関わらず2mmで共通だが、粘土粒子とシルト粒子との粒径境界値、シルト粒子と砂粒子との粒径境界値、礫粒子の粒径上限値は、分野、国、時代によって微妙に変わっていることが分かる。既往データを活用したり、統計処理する場合には注意が必要である。

## 3. 土の物理的性質と物理試験

### 3.1 物理試験の意義

土は、その種類ごとに、工学的課題が異なり、その土を特徴付ける物性値とその評価指標(物差し)も異なっている。この物差しの一つに物理試験で求められる物理的性質がある。

物理試験の意義は以下に代表される。

- ① 目視・触感による判別結果の検証および中分類・小分類・細区分。工学的分類の指標〔粒度、コンシステンシー特性〕
- ② 土質ごとの工学的特性の基礎情報(簡易な方法で求められる、一次と二次)
- ③ 力学特性や透水性等の概略把握
- ④ 複数供試体で物性を求める試験法における供試体の同一性(バラツキ)の評価

### 3.2 判別分類の検証手段としての物理試験

土の判別・分類は先ず目視・触感で行うが、土

表7 土の種類に関わらず共通して指標となる土の性質とその試験方法

項目	土粒子固有の基本的性質(一次性質)			状態量としての基本的性質(二次性質)	
	JIS A 1204	JIS A 1226	JIS A 1202	JIS A 1225	JIS A 1203
試験方法	粒度試験	強熱減量試験	土粒子の密度試験	湿潤密度試験	含水比試験
試料の状態	乱した	乱した	乱した	乱さない	乱した
直接求められる値	粒径加積曲線他	強熱減量Li	土粒子の密度 $\rho_s$	湿潤密度 $\rho_t$	含水比 $w$
計算で求める値	—	—	—	乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$	
	—	—	間隙比 $e = \rho_s / \rho_d - 1$		—
	—	—	飽和度 $S_r = w \cdot \rho_s / (e \cdot \rho_w)$ [注: $\rho_w$ は温度 $T^\circ\text{C}$ における水の密度]		
用途	分類	高有機質土	土粒子起源の推定	—	—

表8 粘性土と砂質土の一次性質と二次性質

	固有の性質(一次性質)	状態量(二次性質)
粘性土系の土	液性限界 $w_L$	含水比 $w$
	塑性限界 $w_p$	液性指数(相対含水比) $I_L$ ( $= (w - w_p) / I_p$ )
	塑性指数 $I_p (= w_L - w_p)$	コンシステンシー指数 $I_c$ ( $= (w_L - w) / I_p$ )
砂質土系の土	最小密度 $\rho_{dmin}$	乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$
	最大密度 $\rho_{dmax}$	間隙比 $e = \rho_s / \rho_d - 1$
	最大間隙比 $e_{max} (= \rho_s / \rho_{dmax} - 1)$	[注: $w$ は含水比, $\rho_s$ は土粒子の密度]
	最小間隙比 $e_{min} (= \rho_s / \rho_{dmin} - 1)$	相対密度 $Dr(\%) = (1 / \rho_{dmin} - 1 / \rho_d) / (1 / \rho_{dmin} - 1 / \rho_{dmax}) \times 100 = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \times 100$

表9 物理的性質と工学的性質との相関例示

物理的性質	工学的性質
粒径: $D$	透水係数: $k$
間隙比: $e$	透水係数: $k$
湿潤密度: $\rho_t$	一軸圧縮強さ: $q_u$
液性指数: $I_L$	一軸圧縮強さ: $q_u$
液性限界: $w_L$	圧縮指数 $C_c$

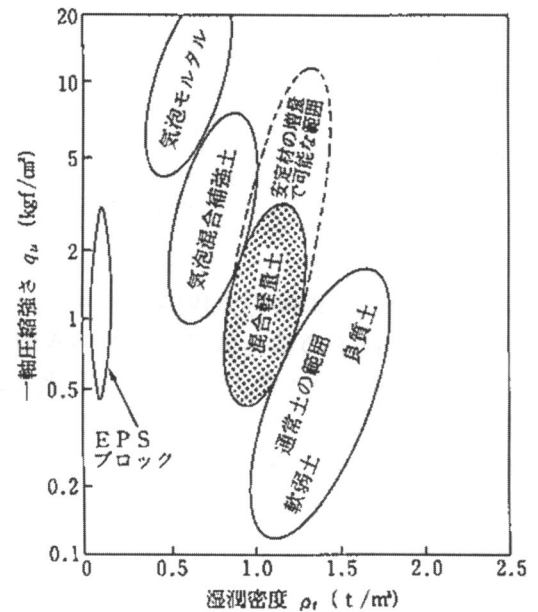


図1 地盤材料別の密度と一軸圧縮強さの関係<sup>6)</sup>

粒子の構成割合は、分類基準では質量比だが、目視は体積比だし目の錯覚というかスケールマジックもあるので判別結果には個人差が出易い。検証および中分類・小分類・細区分の為に、粘性土と砂質土との判別には細粒分含有率試験 (JIS A 1205) もしくは粒度試験 (JIS A 1204), 粘性土の中分類・小分類に対しては液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205), 砂質土の小分類に対しては粒度試験 (JIS A 1204) が必要となる。

### 3.3 土質別の基礎情報

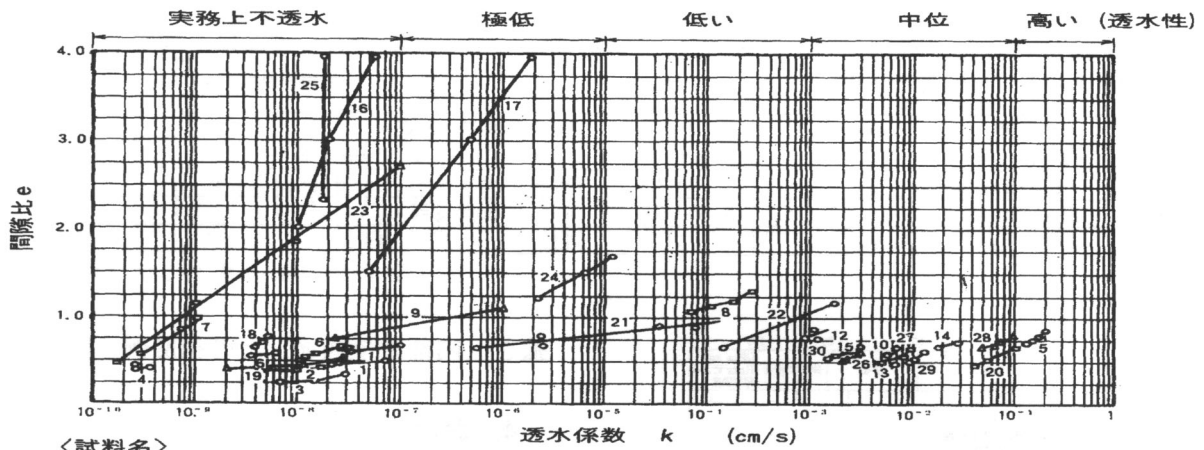
土の物理的性質には、その土固有の性質 (一次性質, 状態量の分布範囲) と、その土の現在の状態や履歴によって変化する状態量 (二次性質) とがある<sup>5)</sup>。この内、特に物理的性質の状態量は、土の種類に応じてせん断特性や変形特性、透水特性等と密接な関係がある。表5に示したように土質区分ごとに物理的性質は大きく異なっていることが分かる。

表7に土の種類に関わらず共通して指標となる物理的性質とそれを求めるための試験方法を、表8には粘性土と砂質土別の一次性質と二次性質を示す。

### 3.4 力学特性や透水性等の概略把握

長年のデータの蓄積によって、土質区分ごとに表9に示すような物理的性質と工学的性質 (強度, 変形, 透水, 等) との間に一定の相関があることが分かり、物理的性質の諸量から工学的性質の諸量を定量的に想定できる実用式が提案されている。重要なことは、土の種類ごとに相関があり、土の分類が細かい程、その相関性の信頼度が高まるという点である。ここに工学的地盤分類の意義と物理試験の効用がある。表9の内、密度と一軸圧縮強さとの相関の極端な例として、人工材料を含めた材料別の相関分布の例を図1に、間隙比と透水係数との土質別の相関分布の例を図2に示す。

ここで、図1と図2の何れも、個々の地盤材料 (土質区分) ごとに正の相関だが、材料の種別を行



〈試料名〉

1 Compacted caliche	10 Ottawa sand	19 Lean clay
2 Compacted caliche	11 Sand - Gaspee Point	20 Sand - Union Falls
3 Silty sand	12 Sand - Franklin Falls	21 Silt - North Carolina
4 Sandy clay	13 Sand - Scituate	22 Sand from dike
5 Beach sand	14 Sand - Plum Island	23 Sodium - Boston blue clay
6 Compacted Boston blue clay	15 Sand - Fort Peck	24 Calcium kaolinite
7 Vicksburg buckshot clay	16 Silt - Boston	25 Sodium montmorillonite
8 Sandy clay	17 Silt - Boston	26-30 Sand (dam filter)
9 Silt - Boston	18 Loess	

図2 地盤材料ごとの間隙比と透水係数の関係 (ラム&ホワイトマン, 1969)<sup>7)</sup>

わずに全ての値の関係を求めると負の相関となることが分かる。工学的性質の評価には地盤材料ごとの種別の重要性が分かる。

### 3.5 供試体間のバラツキの評価

力学的性質を求め一面せん断試験や三軸圧縮試験では、供試体が同一条件 (均質) であることを前提に複数供試体を用いて試験を実施し、モール円等の図解法によってせん断強さを求める手法を採用している。供試体の均質性が確保されていない場合、この図解法は成立しない。供試体間の均質性評価に供試体ごとに物理試験を行い、物理的性質の同一性をチェックする。物理的性質の同一性が確保できない供試体の場合には一面せん断試験は実施できないし、三軸圧縮試験も基準通りの標準的方法では実施できず、1 供試体によって、ひずみ規定による繰り返し載荷方式<sup>8)</sup>で便宜的にせん断特性を求めざるを得ない。

### 3.6 粘性土系の土の評価のポイント

表8に示したように、粘性土系の土を特徴付ける物理的性質にはコンシステンシー特性がある。

コンシステンシー特性と力学的性質との塑性図上での関係のイメージを図3に、鋭敏比をパラメータに液性指数 (相対含水比) と非排水せん断強さとの相関を図4に示す。

ここで、鋭敏比は土の種類 (起源、履歴) の違いを表している。また、図4の右側の縦軸の区分は、相対稠度 (粘土のコンシステンシー特性) として粘性土の硬軟の評価に使われている指標である。

### 3.7 砂質土系の土の評価のポイント

表8に示したように、砂質土系の土を特徴付け

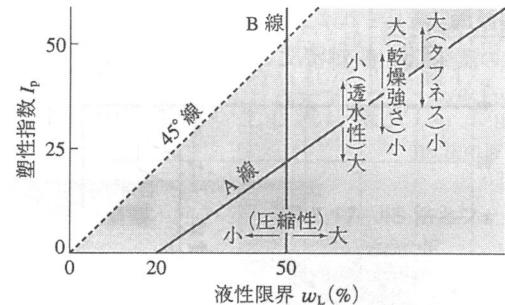


図3 塑性図における力学的性質との関係

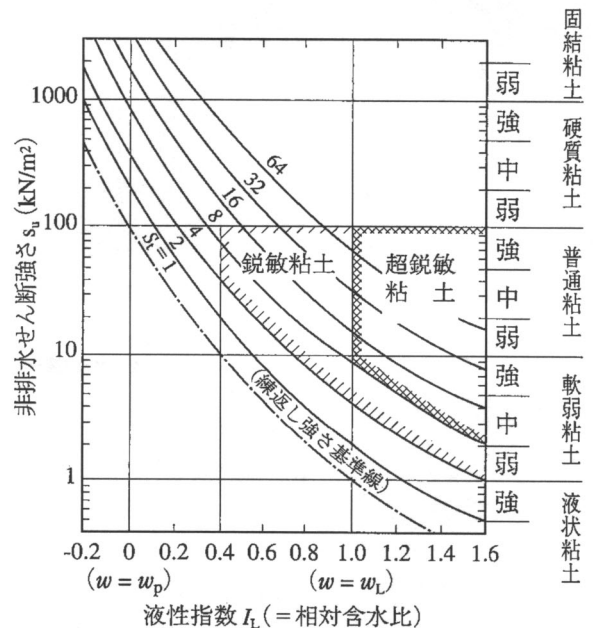


図4 土の状態図 (鋭敏比と液性指数の相関)<sup>9)</sup>

る物理的性質には密度特性 (相対密度) がある。相対密度は「砂の最小密度・最大密度試験方法 (JIS A 1224)」もしくは「礫の最小密度・最大密度試験



表 10 粗粒土の相対密度と N 値の関係<sup>10)</sup>

相対密度 $D_r(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100$		N 値	現場判別法
0~20	非常に緩い(very loose)	0~4	鉄筋が容易に手で貫入
20~40	緩い(loose)	4~10	ショベル(スコップ)で掘削可能
40~60	中位の(medium)	10~30	鉄筋を 5 ポンドハンマーで打ち込み容易
60~80	密な(dense)	30~50	同上, 30cm 程度貫入
80~100	非常に密な(very dense)	50 以上	同上, 5~6cm 貫入, 掘削につるはし必要, 打ち込み時金属音

注. 1) 鉄筋は  $\phi 13\text{mm}$ , 注. 2) 5 ポンド  $\approx 2.27\text{kg}$

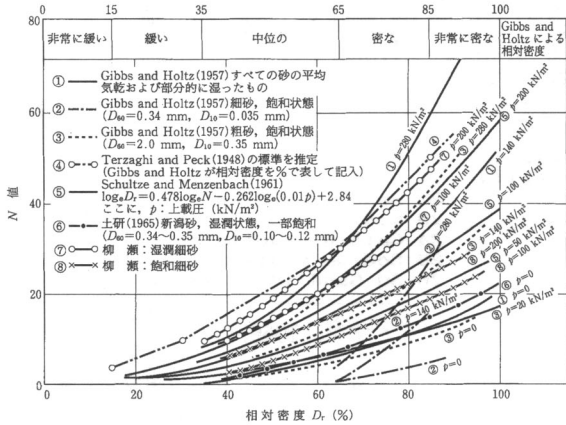
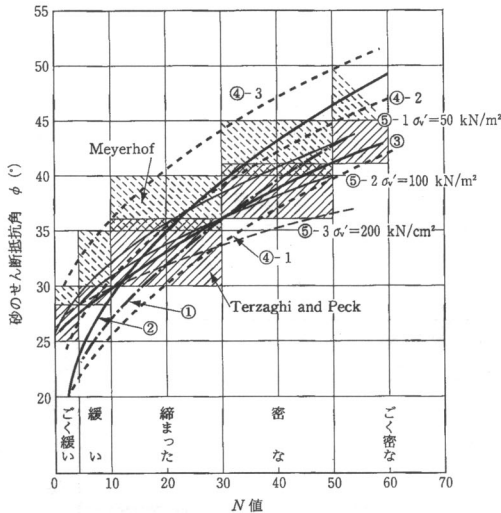


図 5 相対密度と N 値との関係<sup>10)</sup>



- ① 道路橋示方書  $\phi = 15 + \sqrt{15N} (N \geq 5)$
- ② 大崎  $\phi = 15 + \sqrt{20N}$
- ③ Peck  $\phi = 0.3N + 27$
- ④ Dunham ④-1.  $\phi = 15 + \sqrt{12N}$  (粒子丸・粒度一様)  
④-2.  $\phi = 20 + \sqrt{12N}$  (粒子丸・粒度良, 粒子角・粒度一様)  
④-3.  $\phi = 25 + \sqrt{12N}$  (粒子角・粒度良)
- ⑤ 国鉄建造物設計標準解説  
 $\phi = 1.85 \left( \frac{N}{0.01\sigma'_v + 0.7} \right)^{0.6} + 28$   
ここに,  $\sigma'_v$ : 有効上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)

図 6 N 値と内部摩擦角との関係<sup>10)</sup>

方法(JGS 0162)」と「土の湿潤密度試験方法 (JIS A 1225)」との組み合わせで求めるのが基本だが、実務的には「標準貫入試験方法 (JIS A 1219)」で求めた N 値から相対密度を評価することが一般化している。粗粒土の相対密度と N 値の関係を表 10 と図 5 に、また N 値 (相対密度) とせん断

強さ (内部摩擦角  $\phi$ ) との相関例を図 6 に示す。

#### 4. おわりに

本稿では、工学的分類と物理試験の意義の一端を述べた。そのポイントは以下の通りである。

- ① 土の性質は土の種類ごとに異なること、その性質はその土固有の性質 (一次性質, 状態量の分布範囲) と、その土の現在の状態や履歴によって変化する状態量 (二次性質) に大別できること。
- ② 対象とする土の的確な工学的分類ができ、物理的性質の一次性質と二次性質が把握できれば、その土の力学や透水性等の工学的性質の想定が可能なこと。言い換えれば、力学・透水・安定化試験等の試験結果の品質評価に工学的分類と土質に応じた物理試験が欠かせないこと。

#### 引用・参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, 2004.6.
- 2) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, 2009.11.
- 3) 池田清彦：分類という思想, 新潮選書, 1992.
- 4) 中村裕昭：土木に見る数字 その 6 『0.005, 0.075, 2, 75』, 土木学会誌, Vol. 94, No. 1, p. 42, 2009.1.
- 5) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, Vol. 12, No. 4, pp. 17~24, 1964.4.
- 6) 山田純男・白井 朗：発泡ビーズ混合軽量土盛土工法, 基礎工, Vol. 22, No. 10, 通巻 255, pp. 22~27, 1994.10.
- 7) T. William Lamb・Robert V. Whitman: Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., p. 286, 1969
- 8) 例えば, 斎藤正男・中村裕昭・深澤明雄：緩い礫地盤の強度定数調査事例, 全地連「技術フォーラム '96」仙台, pp. 453~456, 1996.9.
- 9) 三笠正人：粘性土の状態図について, 第 22 回土学会年次学術講演会講演概要集 III, pp. III 6-1~III 6-2, 1967.
- 10) 文献 2) の pp. 263~264

# 山口県防府豪雨土砂災害現場より

もり おか けん ぞう\*  
森 岡 研 三\*

## 1. はじめに

平成 21 年 7 月 21 日未明より降り始めた豪雨により、防府市を中心に各地で大規模な土石流が発生した。この土石流により、多くの尊い人命や物的損害を受けた。

私は、地元コンサルとして、未だ災害復旧中の 7 月 27、28 日の両日に現地調査入りし、土石流の原頭部の崩壊の特徴及びそのメカニズムの解明を行った。これらの調査結果は、今後の防災事業のあり方について、ある一定の方針を打ち出せるものとなった。また、既設の砂防ダムや治山ダムが、ある程度石礫を捕捉することで、土石流災害をかなり軽減していることがわかった。

ここでは、今回、甚大な土砂災害が発生した「剣川水系」の下流側で合流する「下右田地区」を調査した際に、感じたことを紹介する。

## 2. 被害の概要

平成 21 年 10 月 6 日現在、山口県及び国土交通省のまとめた「山口県下の被害状況」は表 1 に示すとおりである。

表 1 山口県下の被害状況

被害の分類	被害の状況	
人的被害	死者	17名
	重傷者	8名
住家被害	全壊	33棟
	半壊	78棟
	一部損壊	17棟
	床上浸水	708棟
	床下浸水	3,862棟
公共土木施設	道路・河川等	約670箇所
土砂災害	土石流	66箇所
	崖崩れ	132箇所
	地すべり	2箇所

(H21.10.20 山口県まとめ)

このうち防府国道 262 号線沿いにおいては、勝坂・下右田などの溪流で大規模な土石流が発生し、剣川を土石や流木が閉塞したため、土石流が国道を流下し、佐波川トンネルから新幹線高架橋付近まで 2.5 km の区間に土砂が押し寄せ、通行中の車両数台とそれを救出するために駆けつけた消防車が土砂の中に閉じこめられた(写真 1)。また、勝坂・下右田で家屋が土石流に埋没し、多くの犠



写真 1 土砂の中に取り残された車両



写真 2 突き上げられた国道交差部の勝坂橋

\* 宇部興産コンサルタント株式会社 調査部 部長

死者が出た。特に勝坂の土石流は、溪流の長さが約2kmにも及び、多くの支溪が発生して多量の土砂が流出された。下右田では、国道を挟んで、両側から土石流が襲った。

### 3. 被災地の地質概要

今回の被災地は、佐波川とその支流の両岸における標高300～400m程度の山地である。図1の防府市周辺地質図に示すように、被災地周辺の地質は、主として広島花崗岩から成っている。これらの花崗岩の多くは、深層までマサ土状に風化しており、斜面部や尾根部に玉葱状に風化した花崗岩（オニオンストラクチャー）や低角度節理（シーティング・ジョイント）を有する。今回の土石流により流出した土砂は、ほとんど粘性のないマサ土及び巨礫であった。



図1 被災地周辺の地質図（新編山口県地質図山口地学会1995に加筆）

### 4. 2基の砂防ダム状況

#### ①下右田地区全体状況

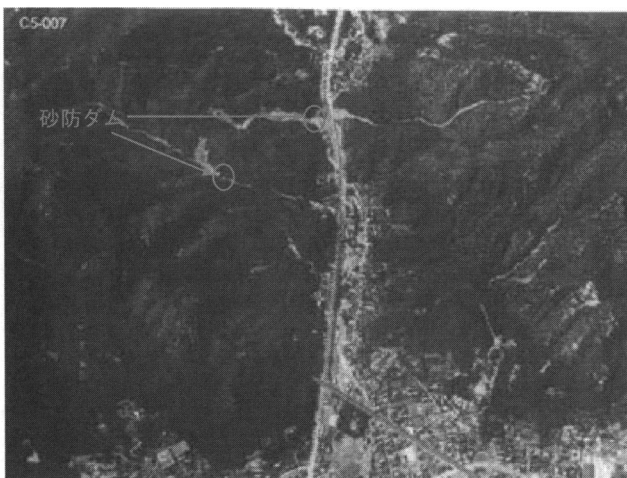


写真3 下右田地区航空写真（アジア航測(株)より引用）

写真3に今回の土石流発生後の航空写真を示す。写真に示す2水系はいずれも国道262号線沿いの剣川に流入している。これらの河川には、写真3中に示す位置に砂防ダムが建設されていた。これらを平面図に示すと、図2のとおりである。



図2 下右田地区の平面図

下右田地区では国道262号線をはさんで西側に位置する「西目山」の東向き斜面と東側に位置する「右田ヶ岳」の西向き斜面で土石流が発生し、国道262号線及びそれに沿った剣川に多量の土砂が流出した。

今回、調査に入ったのは、このうち「西目山」の東向き斜面で発生した土石流で、図面北側の砂防ダムを「上流側」とし、南側の砂防ダムを「下流側」とする。

上流側砂防ダムについては、国道262号線及びそれに沿った剣川のすぐ上流に砂防ダムが設置されている。また、下流側砂防ダムについては、国道262号線から、上流に200m程度上がったところに砂防ダムが設置されていた。

今回は、主に、下流側砂防ダムの源頭部までの



写真4 土石流が一気にオーバーフローした状況





写真5 剣川の状況

調査を行い、砂防ダムの上流と下流において、流路幅が狭くなっているところに着目した。

②上流側砂防ダム状況

上流側砂防ダムについては、源頭部が比較的標高の低い位置にあるが、一直線に土石流が流出し、一瞬のうちに満砂となり、オーバーフローし、剣川に達したものと予想される（写真4, 5）。

③下流側砂防ダム状況

下流側については、航空写真（写真3）や平面図（図2）に示すように、土石流の流出幅は5~10m程度と比較的狭い。流出途中には、写真6のように過去の土石流堆積物と推定される土砂が明らかに数層に堆積しており、過去に何回か同様な土石流が起こったことを示唆している。



写真6 過去の数回にわたる土石流跡

また、所々には、1.5×3m程度の巨石が点在していた（写真7）。

崩壊源頭部は、写真8のように花崗岩とマサ土



写真7 所々に点在する巨石



写真8 崩壊源頭部状況

との境界部で発生しているようで、その幅は10~20m程度、崩壊部の勾配は20~10度、崩壊深さは1~2mで比較的浅い崩壊と推定される。

また、シーティング・ジョイントを有する花崗岩も明瞭に観察された箇所もあった。当現場の植生については、ウラジロやコシダが優勢で、表層部の根の付き方は悪く、表層土の厚さは薄いのが特徴である。

もう一方の源頭部については、確認していないが、航空写真等によれば、かなり狭い幅で「西目山」の上位に及んでいることが伺える。

当源頭部の直下に砂防ダムが設置されていた。砂防ダム下流側については、写真9のように、激しい土石流に洗掘され、基礎部が露出していた。しかしながら、下流側については、幅がかなり狭まっていた（写真10）。

一方、上流部においては、写真11, 12のように、水通し部まで満砂となり、水通し部をオーバーフローした土石流が、下流に及んだと推定される。

これらの調査結果から、下流側砂防ダムにおい



写真9 砂防ダム下流側洗掘状況



写真10 砂防ダム下流側土石流幅の狭まった状況



写真11 砂防ダム上流側満砂状況

ては、一旦発生した土石流を多量に捕捉し、下流側には水通し部をオーバーフローした土石流のみ流下したことが判明した。すなわち、当砂防ダムは、ある程度の土石流を捕捉することで、下流側の家屋等保安物件を守る効果が十分あったことが

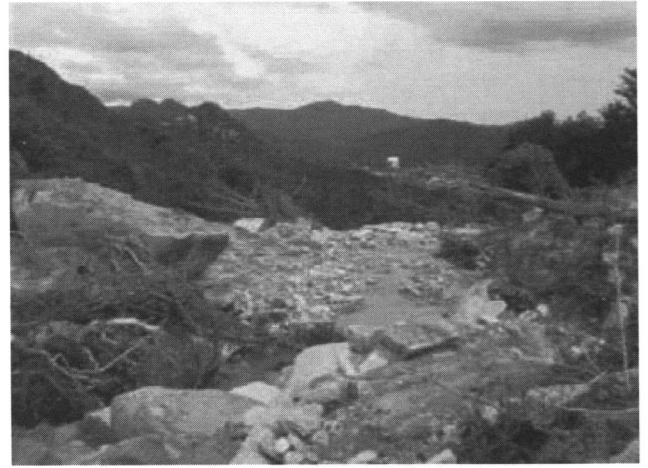


写真12 砂防ダム上流側満砂状況

分かった。

また、甚大な土砂災害が発生した剣川水系を資料解析により調査し、国道262号線の土砂災害は、剣川本川が最初に国道と交差する位置での土砂流出量が決定的に効いていることも分かった。これは、上流の砂防ダムの下流で合流する谷の崩壊によるものであることも分かった。

## 5. おわりに

今回、甚大な被害をもたらした防府市土砂災害の崩壊の源頭部までを現地調査し、自然の力をまごまごと見せつけられた。近年、地球温暖化の影響か、「台風の巨大化」、「集中豪雨（ゲリラ豪雨）の多発」等、降雨強度の増大が益々懸念されている。

こう言った状況下で、今回、砂防ダムが土石流災害を軽減している箇所がいくつか確認できた。その一方で、土石流が防災施設の想定レベルや範囲を超えて、防災施設を破壊したものや、土石流が下流に流下した箇所も多数見受けられた。

今後においても、砂防ダム等のハード対策を適切な箇所に、適切な規模で作ることが重要である。しかしながら、本地域のように土石流跡の扇状地が数多い地域は、全国に多く存在し、これら全ての溪流に十分な防災施設を整備することは、多額の費用と長い時間を要することは言うまでもない。引き続き、ハード対策とソフト対策との両立で効果を上げる方策を考えていくことが重要である。

最後に、今回の災害で亡くなられた方のご冥福をお祈りすると共に、被害に遭われた方々の一日も早い復興をお祈り申し上げます。

# 各地の博物館巡り

## 徳島県立博物館 日本列島のはじまりと 四国のおいたちを知る



写真1 徳島県立博物館の全景  
(県立21世紀館, 県立近代美術館, 県立博物館が入る)

### はじめに

徳島県立博物館は、県庁から南西4.2kmの園瀬川を見下ろす約40haの緑豊かな公園内に位置する。公園は「徳島県文化の森総合公園」と呼ばれ、置県100年のモニュメントとして、文化創造活動の拠点、県民の文化意識高揚のシンボルとなることを願って、博物館のほかに県立近代美術館、県立図書館、県立21世紀館、徳島文書館の五つの文化施設等からなり、平成2年(1990年)11月3日にオープンした。

ここでは、「地質」に関連する展示がある徳島県立博物館を紹介します。

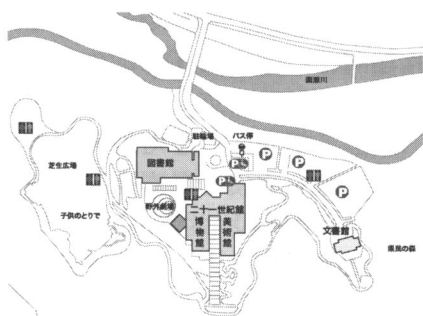


図1 公園内の施設配置図

### 展示内容の概要

館内は常設展示として総合展示、部門展示、ラブラタ記念ホールがあります(図2参照)。

総合展示では、「徳島の自然と歴史」をテーマに日本列島と四国の生い立ちから、徳島の歴史と文

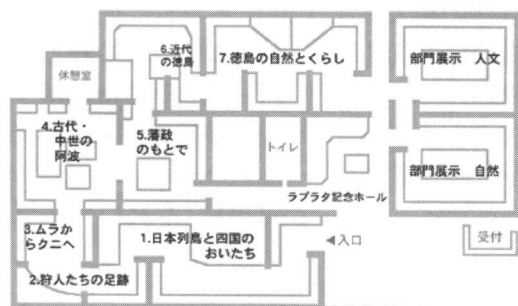


図2 博物館の常設展示案内図

化、現在の自然の姿まで総合的な展示となっています。その他の展示は、次頁末に示したホームページに譲り、ここでは“地質”と関わりの深い“日本列島と四国のおいたち”をみてみましょう。

### 「日本列島と四国のおいたち」

この展示室では、日本列島と四国の生い立ちを、四国の岩石や当時の生物の化石を基に紹介しています。



写真2 展示室の様子

- 内容は、1) 生命の生い立ち  
2) 太古の日本 3) 青石は語る 4) 四万十帯の成長  
5) 恐竜とアンモナイトの時代 6) 四国島のはじまり  
7) 中央構造線の発達と展開される。

#### 1) 生命のおいたち

地球の生い立ちと生物の進化の過程を大きなパネルと岩石や化石の展示で案内しています。なかでも地球上の最古の岩石(カナダ・アカスタ産39億6000万年前)や約20億年前の先カンブリア代の頃、酸素が増え始め大量の酸化鉄が沈殿してできた堆積性縞状鉄鉱層(オーストラリア産)等は一見しておきたい。



写真3 地球上で最古の岩石



写真4 縞状鉄鉱

#### 2) 太古の日本

このコーナーでは、古生代中期から中生代にか



けて Gondwana 大陸が移動した過程を大型のパネルで古地理図に展開しています。

また、その頃の一部が日本列島の地塊となっていることを日本列島の地帯構造図と徳島県地質図のパネルに示されています。徳島県では黒瀬川帯の石灰岩があげられています。

### 3) 青石はかたる

日本列島の土台の大部分は、古生代末から中生代中ごろまでにつくられた付加体からできています。三波川帯は、その付加体が変成してできた結晶片岩類からなる地帯であり、青石と呼ばれている岩石は、結晶片岩類のうち緑色岩が変成してできた緑色片岩のことを指します。

展示物の中には、眉山産の微褶曲が見られる緑色片岩や紅れん石片岩、木沢村産の緑色岩や石灰岩、粘板岩など県内各地から産した岩石が展示されています。なかでも黒瀬川構造帯の構成岩類（徳島県の勝浦町・谷）から産した石灰岩（シルル紀）は、四国で最も古い岩石であることを知らされます。



写真5 微褶曲の発達する緑色片岩（眉山産）



写真6 紅れん石片岩（眉山産）

### 4) 四万十帯の成長

白亜紀になると、堆積盆の中心はしだいに北から南へ移り、秩父帯のさらに外側に付加体がつくられた。ここでの付加作用は第三紀中新世のはじめまで続き、こうして、四万十帯がつくられた。



写真7 シルル紀の石灰岩（四国で最も古い岩石）

展示パネルでは、白亜紀西南日本の地帯の重なりが領家帯、三波川帯、秩父帯、四万十帯と続く模様が大型の模式断面図パネルと代表的な岩石と化石群とで示されています。

### 5) 恐竜とアンモナイトの時代

中生代になると、多くの新しい生物が発展した。陸上では裸子植物が生い茂り、爬虫類、とくに恐竜類が全盛をきわめた。一方、海の中ではアンモナイト類が大繁栄した。この年代の代表的な地層

及び化石として勝浦盆地の立川層が紹介されています。立川層は汽水域の環境を示し、シジミ等の貝化石の他に植物化石を産出します。立川層より新しい地層からは、三角貝やアンモナイト等の海成生物の化石が見つかることが展示されています。

### 6) 四国島のはじまり

第三紀中新世のはじめ（約1900万年前）、アジア大陸の東のはしに裂け目ができ、しだいに拡大して、そこへ海が入りこみ、日本海が生まれた。この変動により、それまでアジア大陸の一部だった日本列島は大陸から切り離され、いまの日本列島の原型ができはじめたことがパネルに示されています。

四国が第一瀬戸内海によって本州から切り離され、“四国島”として歩みはじめたのもこの時期であると云われています。（注：この説は、最近の新知見により、展示替えが行われる予定です。）

### 7) 中央構造線の発達

県下の中央構造線は、阿讃山脈の南縁を東西方向に切るいくつかの断層群として認められ、それに沿って、土柱礫層をはじめとする扇状地性の堆積物が発達していることが阿讃山脈の模式断面図パネルと露頭の写真で示されています。なお、土柱礫層は、第二次「日本の地質百選」に選定されています。

以上、紹介してきたようにパネル、写真、岩石や化石等を駆使し日本列島と四国のおいたちが分かるように展示されています。地学に興味ある方、地質業界の方も是非一度、見ておくべきでしょう。

### その他の展示・活動

常設展示の他に、次のような活動も行っています。「企画展示の開催」年に3回程度、1Fの企画展示室で開催。「普及行事」「調査研究」「資料の収集と保存」などの他に、毎月様々な催しものが活発に開催されています。また、当博物館は、徳島の自然や歴史、文化についての資料・情報にもとづく学びの場として、県民とともに成長することを目指し、「知」と出会う博物館、地域の魅力を「探」る博物館、未来をまもり「伝」える博物館とすることを使命とすることを高らかに宣言しています。【徳島県立博物館ホームページ：<http://www.museum.tokushima-ec.ed.jp>】（本文の作成にあたり、ホームページを引用させて頂きましたことをおことわりします。）

（四国建設コンサルタント（株）小田桐 七郎）



# 車窓から見る地形・地質

## 濃尾平野

愛知県名古屋市～三重県桑名市  
東名阪自動車道

### はじめに

東名阪自動車道は、1993年に東名高速道路と連結され、名古屋市北部、濃尾平野の中南部を横断し、三重県津市までを結ぶ総延長100km程の高速自動車道として多くの人々に利用され、東海地域の物流を支えている。

この内、濃尾平野を通るのは名古屋ICから桑名東IC間の約45kmであり(図1)、前半10km弱は丘陵地の地下を通過し、中後半は平野部に設けられた高架橋となる。

濃尾平野は、岐阜県南西部から愛知県北西部にかけて広がる平野で、おもに木曾三川(木曾川・長良川・揖斐川)により形成された沖積平野で、その面積は1485km<sup>2</sup>に及ぶ日本第2の平野である。西は伊吹山地と養老山地、東は尾張丘陵、北は美濃山地に囲まれ、南は伊勢湾に面する。

濃尾平野の西端には養老断層があり、この断層を境に西側は隆起して養老山地となり、東側は沈降して木曾三川が流れている。これにより、濃尾平野の地下には西側にむかって傾斜する構造が見られる。この現象を濃尾傾動運動と呼び、木曾川、長良川は、濃尾平野に出るとこの傾斜により、西に流れを変え、養老断層際の揖斐川へ向かって流れる。



図1 東名阪自動車道の位置

### 濃尾平野の微地形

濃尾平野は、図2に示すとおり、おもに木曾川が平野に流出する犬山市北東部を扇頂とする扇状地、平野中南部まで広がる氾濫平野・自然堤防、平野南部に広がる三角州平野・干拓地で構成され、平野東部に低～高位段丘が点在する。多くの市街地は限られた段丘面上に集中し、低地部は水田、畑に利用されてきた。

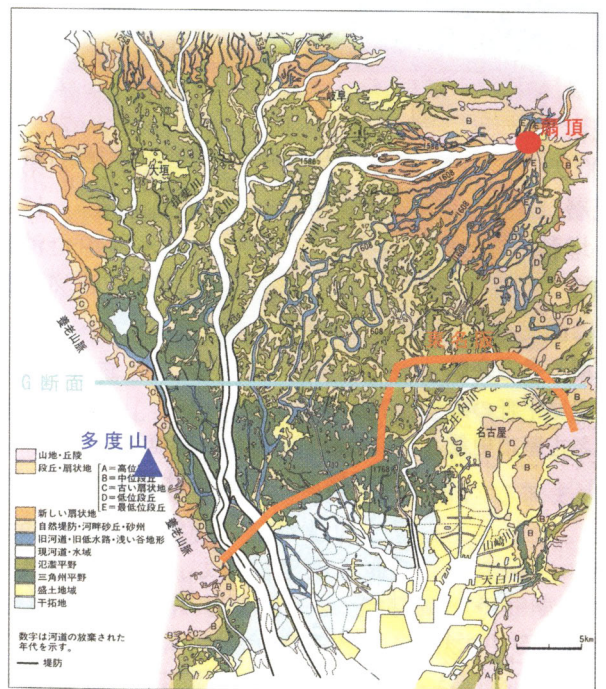


図2 濃尾平野の微地形と構成(桑原1975)

東名阪の通過する地形は、「名古屋IC」より10km程度は丘陵地で、半地下トンネルを通過する。

トンネルを出ると眼下には広大な平坦地が広がり、始めに庄内川を渡り氾濫平野を15kmほど横断する。

後半の20kmは濃尾平野の南部、三角州・干拓地を横断する。三角州平野に位置する「名古屋西IC」以降は視界を遮るものは人工物のみ、目前には平野西縁を南北に連なる養老山脈を眺望することが出来る。



濃尾平野の終点「桑名東IC」を降り、国道258号を北上すること30分程度で養老山脈の麓に位置する多度山（標高403m）に到着する。

多度山は白馬伝説で有名な多度大社のある登山初心者向けの山で、車でも山上公園に辿り着くことができ、公園の展望台からは広大な濃尾平野を一望できる隠れた名所である。

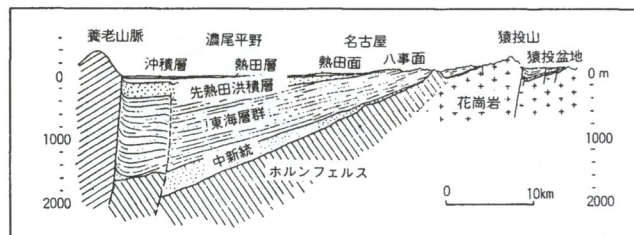


図3 濃尾傾動盆地の東西断面



写真1 多度山からの眺望

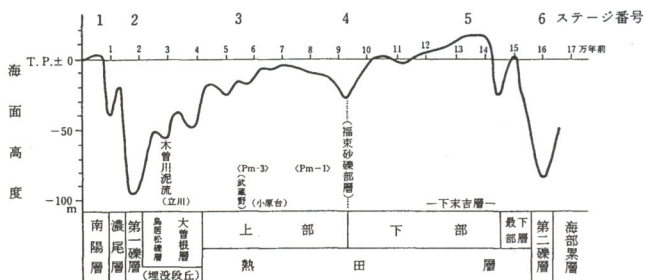


図4 伊勢湾周辺地域における氷河性海面変動曲線

## 濃尾平野の地質

濃尾平野を構成する地質（図3）は、下位より基盤岩となる古生層、領家帯の花崗岩・片麻岩、約400万年前の東海湖底に堆積した東海層群の第三紀層、約20万年前の氷河性海面変動（図4）により堆積した洪積層、現在の温暖期に堆積した沖積層よりなる。図5に洪積層以浅の地質断面図、表1に濃尾平野の地下層序表を示す。

### 引用・参考文献

濃尾平野の地盤沈下と地下水

名古屋市史第八巻自然編 最新名古屋地盤図

[津坂喜彦 株式会社アオイテック]

表1 濃尾平野の地下層序表

地質時代	濃尾平野	周辺地域の同時代の地層	地 史	
新 世	完新世	南陽層	沖積層	(推定年代×10 <sup>4</sup> 年前) 濃尾沖積平野の形成 縄文海進 (1) (1.3) [Aillerod期] 更新世最末期小海面上昇
	更新世	濃尾層		(2) 最終氷期海面最低期 (3) 海面小変動期 (4-5) (7-9) 最終氷期の始まり (12) 熱田海 (最終間氷期)
		第一礫層		(15) 氷河期 海面低下期 小海進・小氷期の繰返し
	中 世	(埋没低位段丘群)	鳥居松礫層 小牧・大曾根礫層	
		熱田層 上部	熱田層・各務原層・碧海層・野間層	
		熱田層 下部	桃山礫層 桃花崗礫層 潮見坂礫層	
	紀 世 (洪積世)	第二礫層	高位段丘群	
		海部系層	高位礫層群 (武豊層群・見当山系層)	
		第三礫層		
	前 世	弥富系層	八事層 唐山層 上米層	永河期 氷河性海面変動の繰返し (80+)
東海層群		瀬戸層群・茶清層群・竜雲層群	東海湖時代 第一瀬戸内海海進期 (2,000)	
鮮新世	東海層群	瑞浪層群・節崎層群・一志層群	基礎の波曲的変形 (500)	
中新世	中新統			
中・古生代	基盤	基盤山地の中古生層、花崗岩類		

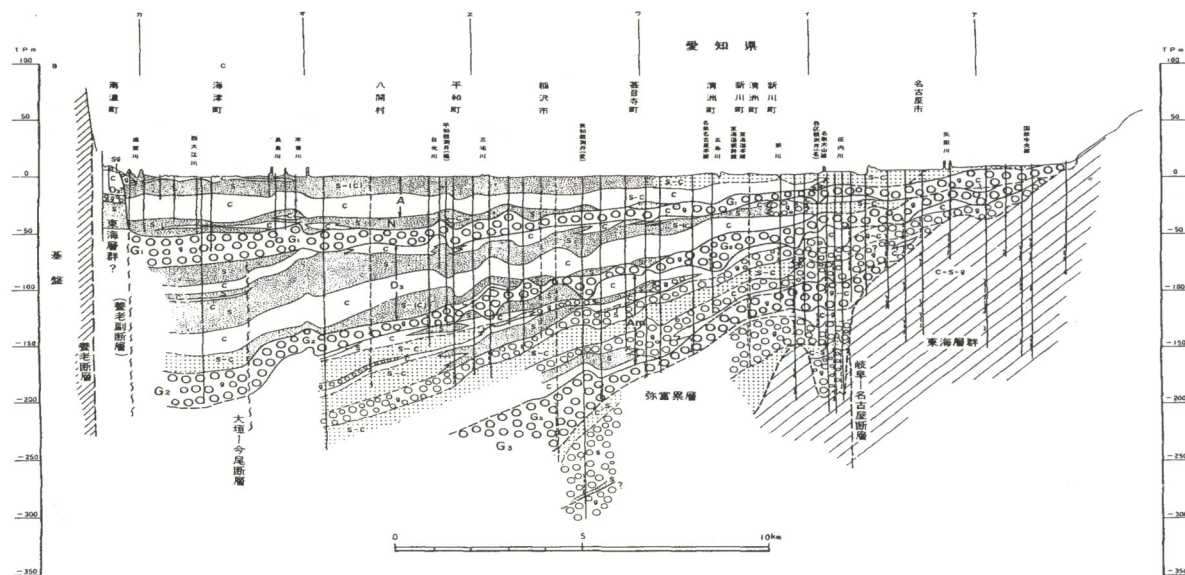


図5 濃尾平野の地質断面図 (G断面)



# あなたもワイナリーに 挑戦してみませんか

《趣味の世界をひろげるために》

私がワイン造りに挑戦してはや、8年になります。造りたては本当にワインになるのかと、疑心暗鬼で教わったとおり造ってみました。師匠は、小料理屋の親方です。あるとき親方の勧めで、ワインを試飲してみるとその味は市販では味わえない味でした。これが手造りかと疑うほどの美味しさでした。

それから病みつきになり、またひとつ趣味が増えたわけです。最初、4、50キロ位を造ってみました。4、50キロといっても収穫箱2つ以上の量です。それでも、その量をこなすのに四苦八苦して挑戦していました。出来上がるにつれ、なんと不思議なことに、収納部屋がワインの匂いでいっぱいです。味見をすると正にワインそのものでした。その後、年々生産量がエスカレート、現在は300キロまで造るようになりました。45キロ入りポリが7、8個、一階のキッチンに並びます。この頃からただの趣味の世界から一歩踏み出し、ワイン造りに凝る様になりました。最初の1、2年は赤湯の路地の出店から、食用用デラウエアーを買い付けたりしていましたが、専門種でない為割高でした。その後、高畠ワイナリー専門生産者を紹介してもらい、直接出向いて買い付けるようにしています。赤はマスカットベリーA、白はシャル

ドネ他5品種ほど造っていましたが、処理するのに楽な粒の大きい3種類にしぼり1種類の量を多く造っています。(kg@=150~250円)



写真2 シャルドネ種をビン詰めした状況

ぶどう買い付け費用だけでも馬鹿になりませんが、みんなにご馳走様でしたといわれると、今年もまた、味を追求する製作意欲が湧いてきます。体の動く限り挑戦し続けたいと思っています。

われわれ素人は、白を作る場合、皮を剥いて搾るようなことはしません。全てぶどうを潰します。白ワインは、緑色のぶどうを潰すので、結果ウイスキー色に近い色になります。葡萄色のぶどうは鮮やかな綺麗なワイン色に仕上がります。色は市販のワインに劣りません。

ここで、高畠に行く途中のワイナリーを紹介します。山形県最大の高畠ワイナリー、高畠ワイン一般向けするフレッシュ&フルーティなワインとワイン通も満足する上質なワインの双方を造る。味見はいくらでも出来る。そこから山形よりは傾斜のきつい斜面をぶどう畑が埋め尽くす山々が眼前に迫ってくる。赤湯の温泉街だ。明治25年創業で古武士の風格を持つワインを造る酒井ワイナリーは、5代目が伝統を守りながら新しいワイン造りに挑戦しており将来が楽しみである。大浦

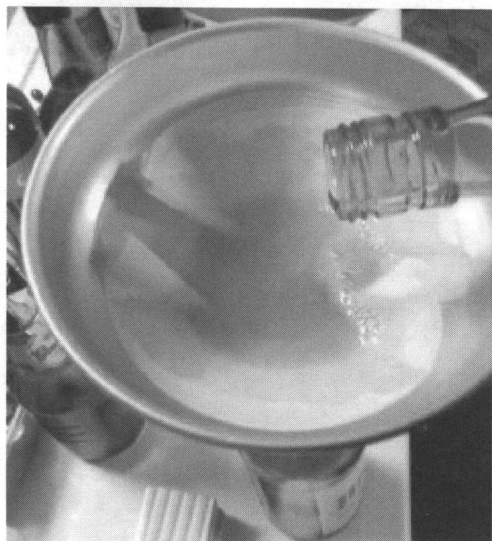


写真1 シャルドネ種を濾してビン詰めしている状況

ぶどう酒も 30 代になったばかりの 3 代目が造りを任され品質が向上している。上山市に行くとき南西向き斜面に 15 ha の自社畑をもつ老舗のタケダワイナリーがある。何れの店も手ごろな値段のワインがあるので立ち寄って試飲した上でお買い求めは如何でしょうか。

ここで私なりの造り方の手順を申しますと、房からもぎ取ります。単純作業ですが、根気強くやらないと、すぐ飽きてしまいます。ワインに成る原理は簡単です。ぶどうを潰してほったらかしていれば果皮の自然酵母が発酵して後はワインになるだけです。

ワインになったらポリから移し変えビン詰めです。このビン集めが大変といえば大変です。ビンの形状はワイン、ウイスキービンどちらでも構いませんがネジ栓ないと自噴します。行きつけの飲み屋さんから集めたビン今年も 100 本程家に保管してあります。



写真3 マスカットベリー A 発酵中 (30 日前後)

ここでサタケ流美味しいワインの造り方のレシピを紹介します。興味のある方はぜひ挑戦してみてください。あなたもワイナリーになれます。

1. 食用、ワイン用ぶどうを 10 キロ単位で購入する。
2. ポリ容器くまる、角可>を用意する。
3. ぶどうは絶対水洗いせず房から実をはずし、袋に入れ潰す。<ミキサーで潰すも可>
4. ワインの甘辛は白砂糖の量で調整する。<普通 500 g/ぶどう 10 キロ>ワイナリーでは砂糖は使用しない。甘辛は温度調整と比重を見て調整する。熟成につれ酵母菌が糖分を食べるので、自然と辛くなり同時にアルコール濃度をます。約 2 週間でアルコールと炭酸に分解し発酵を増す。このときのワインが続に生ワインであり、手造り者しか味わえないワインです。皮が浮き、比重の重い種、オリはポリ底に沈む。皮は取り除き荒濾して炭酸が抜けるまで寝かす。
6. 発酵原理は砂糖とぶどうと酵母菌が絡み合っ

てアルコールと炭酸に分解する。アルコールに落ち着くまで、スパークリングワインを味わえる。

7. 炭酸が抜き切れればワインの出来上がり。
8. ビン詰めして、冷蔵庫保存で 1 年以上は楽しめます。でも、出来立てヌーボー (新酒) が最高です。

正に無添加, 100% ぶどうのワインです。また, 1 本 720 ml 造るのに何キロ必要かですが, 7 割程度に目減りします。

以上がワイン造りの手順ですが誰にでも簡単に出来ますので自家製ワイン造りに挑戦してみてください。

ここで, S さんにご賞味いただいたコメントをご紹介します。

### ~2009 サタケワインについて語る~

まず驚かされたのは、ワインボトル。キャップは未開封に加工。さすが、これぞ 7 シーズン目の貫禄だろうか。細やかで温かな配慮が、よりいっそう手作り感と高級感を醸し出し、飲み手の心をくすぐる。

毎シーズン、違った味わいが体験できるこの時期、この瞬間、ピカピカに磨いたワイングラスにいつもより意識して音色を奏でながら注ぐ。

キュンとひとくち、口で転がす。「なるほど、今年はこの味か〜、うん、美味しい」

今シーズンはさっぱり系でキレを感じた。

今宵は、最高のワインに、湯豆腐をあわせてみた。不思議と調和した。ごちそうさまでした。

今年もがんばる気持ちが湧いてきた。有難う。

[佐竹 道郎 ((株)復建技術コンサルタント)]



写真4 S さんにあげたワインを湯豆腐で味わっている

# 挿入式孔内傾斜計の標準化に関するマニュアル

ふじさわ かずのり ちば しんいち すがぬま たけし ひぐち けい  
藤澤 和範\*・千葉 伸一\*\*・菅沼 健\*\*\*・樋口 佳意\*\*\*\*

## 1. はじめに

挿入式孔内傾斜計は、土木分野の地中変位の計測に広く用いられており、地すべりのすべり面の位置を決定する手法としても利用されている。しかし、孔内傾斜計計測データの中には、地中変位のメカニズムを解釈できないデータ（以下、不良データと呼ぶ）もある。その際には、すべり面の特定が困難となり、適切な地すべり対策の実施に支障をきたす可能性がある。

本稿では、不良データの発生防止とデータの適切な理解を目的として実施された、土木研究所地すべりチームと民間企業3社の共同研究による「孔内傾斜計データ不良の原因に関する実態調査と計測技術の改善・開発」、「孔内傾斜計データ不良の原因に関する実態調査と計測技術の標準化」の研究成果をもとに作成された、孔内傾斜計の標準化に関するマニュアルの概要について紹介する。

## 2. 孔内傾斜計の測定原理と不良データ

### 2.1 測定原理

挿入式孔内傾斜計は、**図1**に示すように、ボーリング孔にグラウト材などの充填材で間詰めをして設置したガイド管に、測定者がプローブを挿入して、ガイド管の傾斜角を測定する計測器である。測定は、0.5~1.0mごとに孔底から順に行われ、各区間での傾斜角が変位量に換算される。その変位量を最深部から地表部まで累加することで、測定時のガイド管全体の形状を求める。地すべり調査では、ガイド管設置時とその後の測定時の形状との差分を深度ごとにプロットして、累積変位図

が作成される。

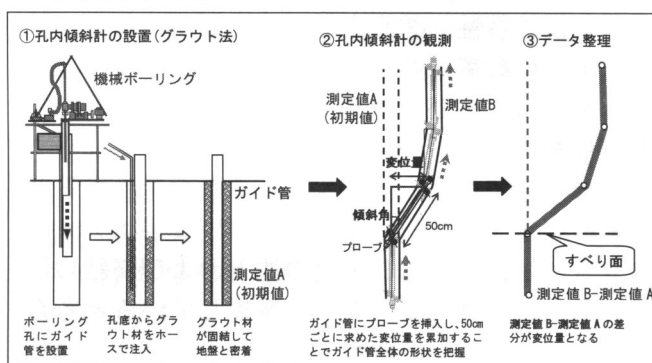


図1 観測原理と変位検出の流れ

### 2.2 不良データ発生の原因とその対処

ガイド管には十字に溝が設けられており、プローブの車輪を合わせる主変動方向をA軸、それに直交する方向をB軸と呼ぶ。**図2**は、A軸の累積変位図からすべり面の位置が検出された例である。

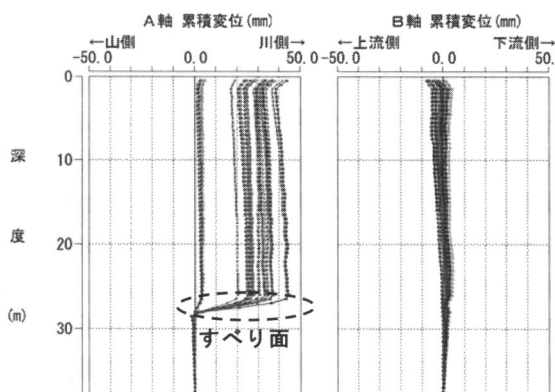


図2 検出されたすべり面の位置

他方、**図3**に示すような実際の地すべり土塊の移動を表しているとは解釈できない①、②のような累積変位図も散見される。

① 孔底からグラフ全体が傾くような「倒れ込み」を示す

\* (独)土木研究所地すべりチーム 上席研究員

\*\* 応用地質(株)

\*\*\* 日本工営(株)

\*\*\*\* 坂田電機(株)



② グラフの一部が波打つような「S字状の曲がり」を示す

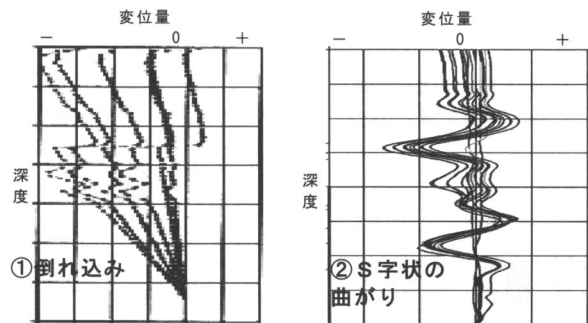


図3 挿入式孔内傾斜計の不良データを示した累積変位図の例

不良データの発生の要因は、図4に示すように、①計測器の特性、②測定者による観測の仕方、③ガイド管の設置状態、の3つに大別されると考える。例えば、前述の倒れ込みデータの発生には、測定作業中に計器の状態（センサー軸のずれやプローブの姿勢など）が変化することで発生すると考えている（要因①と②）。一方で、S字状データの発生には、地すべり土塊の沈下および間詰め作業時の充填不良（要因③）が関係していると考えているが、これらの要因とデータの関連性について検証された事例は多くはない。要因①と②により不良データが発生した場合は、計測器を校正したり測定作業を正しい手順で行ったりすることでデータの改善を見込むことができる。しかし、要因③により不良データが発生した場合には、校正された計測器で正しい測定作業を行ってもデータの改善は不可能である。したがって、土塊の移動を的確に反映した孔内傾斜計測定データを得るためには、パッカーを用いてガイド管を地盤と密着するように設置することが不可欠である。

### 3. 挿入式孔内傾斜計マニュアル

本マニュアルは挿入式孔内傾斜計の原理や理論の解説は最低限に留めて、実務でそのまま役立てることができる実用書になるよう配慮したものであり、2010年7月20日に出版された。

マニュアルの構成は本編と資料編からなり、本編は重要事項について要点を絞って述べた指針、資料編は本編を補足して理論や原理の説明や詳細な作業方法を記載した解説書の位置づけで作成した。

なお、本マニュアルは軟弱地盤などの地すべり以外の観測対象にも適用可能であるが、設置の際の充填材の配合の差異や、観測される変動形態・変位量が異なること、および変位量大きい場合は測定誤差の判定基準を適用することができない

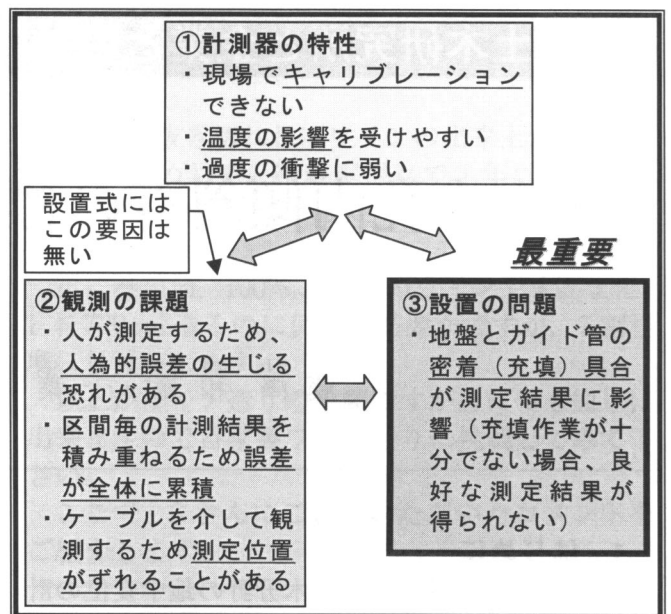
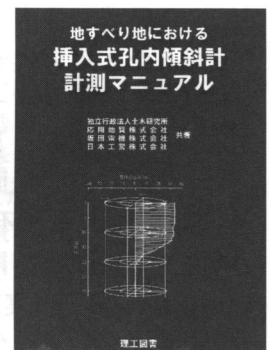


図4 不良データを生じさせると考えられる要因

ケースがあることに留意する必要がある。

書籍/地すべり地における挿入式孔内傾斜計計測マニュアル  
著者/独立行政法人土木研究所、応用地質株式会社、坂田電機株式会社、日本工営株式会社  
発行所/理工図書 B5判 222頁  
2010年7月14日初版発行  
定価/本体3,200円+税



### 4. 従来のマニュアル（案）との違い

これまで土木研究所地すべりチームのホームページ (<http://www.pwri.go.jp/team/landslide/index.htm>) に掲載していた従来のマニュアル（案）は、半年程度の研究期間で得られた重要事項のみ記載したものである。それに対し書籍版マニュアルは3年分の研究成果やマニュアル（案）公開後に寄せられた意見を反映して、新たに「解析手法、関連技術、良くある質問」の章を盛り込むとともに、「設置、観測、検定、報告」の章も全面的に改編している。また、固有誤差のバラツキの基準値なども見直しており、両書の完成度は大きく異なるものである。

今後、地すべり調査や対策設計などの実務において、挿入式孔内傾斜計の設置や測定データの補正が適切に実施されることで、本マニュアルが効果的な地すべり対策工の整備に寄与することを期待する。

# 建設工事における自然由来重金属等への対応

しな がわ しゅん すけ  
品 川 俊 介\*

## 1. はじめに

岩石や堆積物中には、一般に微量ながら天然の状態では重金属などの有害物質が含まれている。これらの物質を経済的に見合う程度に多く含むものは採鉱の対象とされ、人類の生活に役立てられている。一方、鉱山開発に伴い、天然に含まれる有害物質による環境汚染が発生した。

建設工事に際して発生する、掘削ずりに含まれる天然の有害物質の環境影響に関して、事例は少ないものの、従前より鉱山周辺において個別に調査、評価、対策が実施されてきた。その後、平成15年の土壤汚染対策法の制定や掘削ずりからの浸出水による水質事故の発生<sup>1)</sup>などを契機として、建設工事において生じる掘削ずり中に天然に含まれる鉛、カドミウム、クロム(VI)、水銀、セレン、ヒ素、フッ素、ほう素(以下、「重金属等」という)の環境影響について、評価の必要性が次第に認識されるようになった。一方、土壤汚染対策法は自然的原因により基準値を超過する岩石および土壤は対象としておらず、現場に混乱が生じた。

一つは、土壤汚染対策法の施行に伴い、建設発生土の流通が混乱した。それは掘削ずりの搬出にあたって、人為的な汚染の可能性がないと考えられるケースにおいても受け入れ先が公定法試験を準用する(岩石の場合は粉碎して試験に供する)場合が見られるようになったためである。

いま一つは、前述の状況の中で、岩石・土壤中の自然由来重金属等の環境影響についての不十分な知見に起因して、事業者の対応が混乱した。工事で移動させる岩石・土壤から発生する、重金属等による環境影響が生じた事例が過去にほとんど知られていないにもかかわらず、公定法試験を準用する(岩石の場合は粉碎して試験に供する)と

しばしば土壤溶出量基準値を超過する結果が得られた。その結果、調査を行った事業では時に大規模な対策が行われた一方、調査をしなかった事業では無対策となった。

このような状況の中、(独)土木研究所では岩石・土壤に含まれる自然由来の重金属等に関する調査、評価および対策について、平成14年度から平成17年度まで「岩石に由来する環境汚染に関する共同研究」を実施した。本稿では共同研究の成果と建設工事における自然由来重金属等問題をとりまくその後の状況について紹介する。

## 2. 「岩石に由来する環境汚染に関する共同研究」の概要

本共同研究は、(独)土木研究所、応用地質(株)、三信建設工業(株)、住鉱コンサルタント(株)、大成建設(株)および日本工営(株)によって実施された。本研究の主な成果は次のようである。

- 1) 重金属等の空間的偏在性を明らかにして、調査の必要性を事前に把握する目的で、鉱山データベースを作成して地質と鉱山の分布に関する考察を行い、「重金属リスクマップ」としてとりまとめた<sup>2)</sup>。
- 2) 各種岩石の溶出特性を把握するために各種溶液を用いた溶出試験を行い、元素ごとの溶出特性にpH依存性があることを明らかにした<sup>3)</sup>。
- 3) 溶出特性の長期的な変化を把握するために土研式雨水曝露試験を開発し、溶出特性の時間変化を把握した。その結果、粉碎した岩石を用いて行う溶出量試験(公定法を準用した試験)の結果が溶出量基準値程度の試料において、曝露試験において数ヶ月後に基準値の200倍以上の溶出濃度を記録したものを確認した一方、公定法を準用した試験の結果が基準値

\* (独)土木研究所地質チーム 主任研究員

を超過した試料の多くが、時間の経過とともに溶出濃度が低下して、基準値以下となった。すなわち、公定法を準用した方法では、岩石からの重金属等の溶出特性を適切に把握できないこと、特に長期的に酸性化する岩石については危険側に評価してしまう可能性を明らかにした<sup>4)</sup>。

- 4) これらの結果を踏まえ、「建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）」<sup>5)</sup>をとりまとめた。本マニュアルは、公共事業を対象とし、自然由来の重金属等への対応に特化してまとめられた最初の出版物であった。

### 3. 国土交通省版マニュアル（暫定版）のとりまとめ

共同研究版マニュアル発刊後、より実務的な内容の公的なマニュアル整備を求める声に対応するため、平成20年10月に国土交通省総合政策局事業総括調整官室が「建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会」を組織し、平成22年3月に「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」<sup>6)</sup>をホームページで公表した。

本マニュアル策定中に土壌汚染対策法が改正され、運用上平成22年4月より、自然的原因により基準値を超過する土壌についても法の対象となった。本マニュアルは土壌汚染対策法の対象外の事案についてのみ適用できることに留意が必要である。

本マニュアルの詳しい内容については文献<sup>6),7)</sup>を参照されたいが、重金属等の人の健康への影響評価については以下のような考え方としている。

- 1) これまで行われてきた建設工事の結果、掘削ずに起因する重金属等の環境汚染がほとんど知られていないことに鑑み、日本（ないしは地球）の上部地殻の平均的な含有量以下の岩石・土壌については人の健康への影響の懸念がないものとした。
- 2) 岩石・土壌からの自然由来の重金属等の溶出に関して、硫化鉱物の酸化によって有害物質の溶出濃度が時間とともに増加する場合や、逆に溶出濃度が時間とともに減少する場合がある。このことに鑑み、発生源評価としては短期溶出試験、酸性化可能性試験および実現象再現溶出試験のいずれかもしくは複数を実施し、専門家が対応の必要性を総合的に判断することとした。
- 3) 2) で対応が必要と判断された場合について、リスク評価の結果を用いて対策の要否を判断

できることとした。

また対策に関しては、土壌汚染対策法に規定されていない方法について、いくつか提示した。

### 4. 今後の課題

国土交通省版マニュアルでは、自然由来の重金属等への対応について考え方を示したものの、現状においては知見が不足しており、岩石・土壌からの溶出性の評価に関してはケースバイケースで判断せざるを得ない。また、対策に関しても設計指針がない工法が多い。さらには改正土壌汚染対策法の運用がどのようになされるか不明な点があり、現場における混乱はしばらくの間解消されないと思われる。

(独)土木研究所では、自然由来の重金属等への対応に関する研究を引き続き実施している。特に、現場で採用される機会が増加している不溶化工法、吸着層工法に関して指針が存在しないことから、「盛土内処理による自然由来の重金属等対策工法の材料評価に関する共同研究」を平成22年3月より開始し、上記工法の標準化に資する検討を進めて行く予定である。

### 参考文献

- 1) 新滝ヶ洞溜池の水質異常に係る対策協議会（2003）：第1回新滝ヶ洞溜池の水質異常に係る対策協議会資料、国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所ホームページ <http://www.cbr.mlit.go.jp/tajimi/suishitsu/information/i030805/i030805.html>.
- 2) 阿南修司ほか（2007）：岩石による環境汚染リスクマップ、応用地質、47-6, pp. 354-359.
- 3) 宮口新治、岩石由来の環境汚染対策研究グループ（2006）：溶出条件の違いによる岩石からの重金属類の溶出特性について、地質と調査、2006年第2号, pp. 14-19.
- 4) 品川俊介ほか（2007）：重金属等含有岩石の各種溶出試験の相互比較、平成19年度研究発表会講演論文集、日本応用地質学会, pp. 241-242.
- 5) 独立行政法人土木研究所ほか（2007）：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書 建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）、共同研究報告書, 358, 91p.
- 6) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会（2010）：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）、国土交通省のリサイクルホームページ <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/recyclehou/manual/index.htm>, 90p.
- 7) 品川俊介（2010）：「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」の公表、土木技術資料, 52-6, pp. 44-45.