

統合物理探査調査研究委員会報告書
統合物理探査による地盤物性評価と
土木建設分野への適用

平成29年12月

物理探査学会
統合物理探査調査研究委員会

発刊にさいして

公益社団法人物理探査学会は平成 30 年に創設 70 周年を迎える。物理探査学会は物理探査技術協会として 1948 年に創立されて以来、物理探査に関する学問および技術の進歩・発展・普及に努めてきた。物理探査技術は、黎明期には石油や石炭、金属資源などの資源・エネルギー分野において主に使われてきた。その後さまざまな分野で用いられるようになり、現在では資源・土木・環境・防災・維持管理など幅広い分野で利用されている。

物理探査の手法も多岐にわたり、「新版 物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル」（2008）では、屈折法地震探査、反射法地震探査、電気探査をはじめとする探査手法を全 19 項目に分類し、各探査手法について説明されている。

計測技術やデータ処理方法なども、ハードウェア・ソフトウェアの進歩とともに技術も発展しており、さまざまな分野や探査対象、探査条件などの多様なニーズに適用できるよう物理探査技術の向上を目指し研究・検討が進められている。

その一方で、探査結果によって得られるのは地盤物性値であり、実際の地盤状況を推定するためには地盤の解釈と評価が必要になってくる。物理探査学会では、土木研究所との共同研究による成果を「河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き—」（2013）にまとめて出版するなど、物理探査法の標準化と評価方法の普及に努めてきた。この「河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き—」では主に河川堤防に関する評価を実施しているが、他の土木建設分野にも適用できるようにするために、物理探査結果を用いた地質モデルの構築や評価方法、標準書式を研究することを目的として、統合物理探査調査研究委員会を発足して、平成 26 年から平成 29 年にかけて検討を行ってきた。

今回、物理探査学会 70 周年記念事業の一環として、統合物理探査調査研究委員会の成果報告書「統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野への適用」を上梓した。本書では統合物理探査として複数の物理探査を用いての地盤物性評価、統合物理探査の分野ごとの適用事例、標準書式とデータベース、物理探査の活用方法の提案などがまとめられており、物理探査技術者だけでなく、土木建設分野の計画・調査・設計・施工に携わる技術者に役立つ内容となっている。この報告書が、本書を手にとって頂いた皆様の実務・研究の一助になれば幸いである。

平成 30 年 2 月
物理探査学会会長
山中 浩明

まえがき

物理探査は、①現場での計測、②取得したデータの処理、解析、結果の図化③得られた弾性波速度や比抵抗で表された地下構造の解釈、という3つの要素からなる。計測技術は、電子計測技術やコンピュータ技術に基礎を置いており、近年のこれら技術の進歩により、大きなダイナミックレンジで高速サンプリングしたデータを取得することが可能となり、計測制度は大幅に向上した。そうして得られる大量のデータの収録も容易となり、データの処理・解析技術も、コンピュータの高速化、大容量化により大量のデータを処理し、2次元、3次元の弾性波速度や比抵抗による地下構造が美しい図に表されるようになった。

ところが、近年になってもあまり発展せず、困難な問題があるのは解釈技術である。地盤を構成する物質は多様であり、その物理的性質は広い範囲にわたって変動する。測定、解析により弾性波速度構造や比抵抗構造が求められたとしても、その解釈には常に不確実性が伴う。このような物理探査の技術要素を考えると、前節で挙げた役割のうち、調査地全体からの不均質抽出は、測定、データ解析の問題であり、強度や透水性の推定は、主として解釈の問題ということになる。物理探査を土木・環境問題にいままで以上に役立てるためには、この解釈技術の向上が必要であり、その突破口として統合物理探査という考え方が提案されてきた。これをさらに発展させる方策について検討するために、この統合物理探査調査研究員会は設立された。

統合物理探査には、物理探査で求まる物性分布から設計・施工に必要な地盤定数を求めること、物理探査のような連続的に調査できる方法による地盤調査の高精度化、地盤調査の効率化への期待がある。物理探査学会が、このような期待に応えていくことは当然のことであるが、同時に、応用地質学や地盤工学、土木工学といった周辺領域に学究を広げていかなければならない。統合物理探査調査研究委員会は、そのさきがけとなった委員会であり、委員会のメンバーは、研究者、物理探査の実務に携わる技術者、施工会社における技術者と幅広い構成として、現役でご活躍の方を中心にご参加していただいた。委員会は、主として、統合物理探査に関わる現状調査、物理探査物性値による地盤評価の方法、標準書式の検討を行なったが、さらに標準書式の延長上にある成果の電子納品について、物理探査学会案を作成し関連外部委員会との対応を担当した。委員会で研究された成果は、物理探査関係者のみのならず応用地質や地盤工学に係わる研究者や技術に役に立つものである。物理探査学会においても、従来の物理探査の枠を超えた活動であり、今後の物理探査の発展にとって不可欠な成果となった。5年間にわたる委員会活動の成果をこのような形でまとめられた委員会メンバーに敬意を表したい。

平成30年2月

統合物理探査調査研究委員会設立発起人代表

茂木 透

はじめに

物理探査学会では、今まで、「新版物理探査の手引きー土木物理探査適用マニュアル」などを出版し、物理探査手法の標準化と普及に努めてきた。最近では、土木研究所との共同研究成果を「河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き」（愛智出版刊）にまとめた。ここで、「統合物理探査」には、探査対象に対して、①複数の探査手法を組み合わせ信頼性の向上を図ること、複数の物性値で評価を行うこと、②単に探査を実施するだけでなく地質調査プロジェクト全体の中で地盤の解釈と評価に探査結果を活かしているという2つの意味が込められている。

物理探査学会では、物理探査法としての検討、標準化に努めてきたが、探査結果による地盤解釈と評価の視点が弱かったといえる。物理探査の有用性をアピールするためには、適切な物理探査の実施と適切な地盤評価、プロジェクト全体における物理探査の有効性を評価する方法の研究が不可欠である。

他学会（地盤工学会・応用地質学会など）では、物理探査技術の利用・地盤評価に視点を置いた研究委員会を企画実施している。また、その中では、物理探査学会の多くのメンバーが中心的な役割を果たしてきた。地盤分野における物理探査技術の普及・発展には探査技術の向上に加えて、利用技術と結果による地盤評価を含めた研究・検討が不可欠であり、物理探査学会が主導的に進める必要がある。

統合物理探査調査研究委員会は、地盤分野において、物理探査技術の適切な適用および計画・実施・適切な探査結果の評価、地盤の評価が実施されることによりプロジェクト全体における効果を検討し、物理探査技術が有用な調査技術として利用拡大されることを目的として、平成25年1月に発足した。

統合物理探査調査研究委員会では、この目的に沿って、3つのワーキンググループに分け活動を行ってきた。各ワーキンググループの活動内容は、以下に示すとおりである。

・ワーキンググループ1（調査対象別検討）

調査対象別にニーズを整理し、物理探査の適用法、統合物理探査の方法を調査・検討した。対象別および目的別の統合物理探査法、設計・施工への活用方法の提案を行なった。

・ワーキンググループ2（評価法検討）

探査物性値間あるいは他調査結果との相関、影響パラメータ、工学的指標への変換方法などの調査・検討を行なった。適用条件や要求精度など、統合物理探査の基礎となる部分の検討を行い、地質工学モデル作成における物理探査の利用方法を示した。

・ワーキンググループ3（標準書式・データベース検討）

統合物理探査結果の利活用のための仕組みの検討、データベースの活用について検討した。また、その基礎となる物理探査成果の標準書式、電子納品への検討および対応を行なった。

本報告書は、平成25年1月から平成29年12月までの活動期間において、検討・整理内容を取りまとめたものである。統合物理探査調査研究委員会の当初の目的を達成できたと

は言いがたいかもしれないが、新たな視点で「物理探査の利用と物理探査による地盤の解釈」についてまとめられたといえる。本報告書が、今後の土木建設分野における物理探査の発展の礎となれば幸いである。

物理探査学会 統合物理探査調査研究委員会 平成 29 年 12 月

委員会名簿

委員会名簿

	氏名	所属
委員長	三木 茂	基礎地盤コンサルタント株式会社
委員	井上敬資	農業・食品産業技術総合研究機構
委員	金田朋之	日本物理探査株式会社
委員	倉橋稔幸	土木研究所寒地土木研究所
委員	小西千里	応用地質株式会社
委員	佐々木勝	基礎地盤コンサルタント株式会社
WG 長	鈴木浩一	電力中央研究所
委員	鈴木敬一	川崎地質株式会社
委員	津野靖士	鉄道総合技術研究所
委員	林 宏一	応用地質株式会社
WG 長	升元一彦	鹿島建設株式会社
委員	村田和則	サンコーコンサルタント株式会社
委員	山上順民	大成建設株式会社
委員	山下善弘	応用地質株式会社

委員会活動記録

委員会活動一覧表

	開催日	概要
第1回委員会	平成26年2月18日	委員会の進め方とスケジュールについて
第2回委員会	平成26年4月22日	委員事例報告, 委員会のロードマップについて
第130回学術講演会	平成26年5月30日	「統合物理探査調査研究委員会の立ち上げについて」発表
第3回委員会	平成26年7月29日	委員事例報告, WG 討議, 報告
第4回委員会	平成26年9月25日	委員事例報告, WG 討議, 報告
第131回学術講演会	平成26年10月22日	「標準データ書式」セッション
第5回委員会	平成27年2月4日	平成27年度スケジュール, WG 討議, 報告
第6回委員会	平成27年4月16日	電子納品要領試案について, WG 討議, 報告
第7回委員会	平成27年6月23日	学術講演会セッションについて, WG 討議, 報告
第8回委員会	平成27年9月11日	事例文献調査報告, WG 討議, 報告
第133回学術講演会	平成27年9月25日	「統合物理探査」セッション
第9回委員会	平成28年2月9日	委員事例報告, WG 討議, 報告
第10回委員会	平成28年4月19日	報告書取りまとめについて, WG 討議, 報告
地球惑星科学連合会 2016年大会	平成28年5月23日	「土木地質分野における統合物理探査」発表
第11回委員会	平成28年7月8日	委員事例報告, 報告書とりまとめ
第12回委員会	平成28年10月20日	共催シンポジウムについて, 報告書案検討
第13回委員会	平成28年12月22日	報告書案検討
物理探査学会・深田地質研究所共催シンポジウム「物理探査の評価と解釈の最前線」	平成29年1月26日	本委員会より以下3件を発表 「統合物理探査と複数物理探査の事例収集による適用傾向の分析」 「物理探査法による地盤物性評価の最新動向」 「S波速度と比抵抗による土質判定の方法」
第14回委員会	平成29年9月22日	報告書案検討
第15回委員会	平成29年12月22日	報告書最終取りまとめ

物理探査法の名称について

物理探査法を表す名称は，適用される分野などにより異なる場合がある．本報告書においては，原則として下表で示す名称を用いた．ただし，引用図表については原著で使用されている名称とした．

本報告書における名称	該当する手法の名称・使用する場合
屈折法地震探査	弾性波探査屈折法 弾性波探査 地震探査屈折法
反射法地震探査	弾性波探査反射法 地震探査反射法 反射法・反射法探査・浅層反射
二次元比抵抗探査	高密度電気探査 比抵抗映像法 比抵抗二次元探査 電気探査
多チャンネル式表面波探査	高精度表面波探査 表面波探査
電磁探査	電磁気探査 電磁法探査
電気探査	方法を区別しない場合，あるいは総称する場合
表面波探査	多チャンネル式表面波探査と起振器利用の表面波探査を区別しない場合，あるいは総称する場合
微動探査	微動アレイ探査と単点式の微動測定を区別しない場合，あるいは総称する場合

目 次

1. 統合物理探査とは	鈴木浩一・三木茂	1
1.1 建設分野における物理探査の適用と課題		1
1.2 統合物理探査調査検討委員会発足の経緯		2
1.3 物理探査による地盤評価の現状		2
1.4 複数物理探査と統合物理探査		5
2. 統合物理探査と地盤物性評価		7
2.1 物理探査結果と工学的に利用される地盤物性値の関係		7
2.1.1 弾性波速度と地盤物性値	山下善弘	7
2.1.2 比抵抗と地盤物性値	井上敬資	10
2.1.3 その他の物理探査結果と地盤物性値	鈴木敬一	16
2.1.4 室内物性値と原位置物性値の相違	金田朋之	24
2.1.5 物理探査結果とボーリング結果との相違	金田朋之	27
2.2 物性評価の方法	鈴木浩一	29
2.2.1 岩石物理学に基づく複合解析の概要		29
2.2.2 岩石物理モデルの基礎		31
2.2.3 クロスプロット法に基づく方法		32
2.2.4 経験式に基づく方法		33
2.2.5 岩石物理モデルに基づく方法		33
2.2.6 弾性波速度分散性に基づく方法		35
2.3 物理探査による地盤物性評価の課題と展望	小西千里	35
2.3.1 分解能の違い		35
2.3.2 キャリブレーション		36
2.3.3 物理探査結果の不確かさの評価		37
2.3.4 信頼性設計に対する貢献		38
2.3.5 資源分野での不確かさの取り扱い事例		38
3. 統合物理探査の適用例		45
3.1 調査事例の分析	升元一彦	45
3.2 複数物理探査と統合物理探査の構造物毎の事例		47
3.2.1 トンネルの事例	山上順民・村田和則	47
3.2.2 盛土・堤防の事例	村田和則	55
3.2.3 斜面・地すべりの事例	村田和則・升元一彦	60
3.2.4 資源・地下水探査の事例	佐々木勝・村田和則	62

3.2.5	空洞・埋設物調査の事例	佐々木勝	64
3.2.6	地震・防災の事例	津野靖士	64
3.2.7	地層処分の事例	升元一彦	65
3.2.8	遺跡調査の事例	山上順民	68
3.2.9	ダム基礎の事例	鈴木浩一	70
3.3	構造物のニーズに応じた統合物理探査の提案	升元一彦	73
4.	統合物理探査とデータベース		76
4.1	標準書式・データベースと統合物理探査の関係	三木茂	76
4.1.1	統合物理探査における標準書式とデータベースの必要性		76
4.1.2	物理探査学会における取り組み		76
4.1.3	標準書式の例		77
4.2	河川堤防探査における統合物理探査のデータベース例	佐々木勝	81
4.3	データベースを利用した地盤物性評価	佐々木勝	82
4.4	電子納品	三木茂	84
4.4.1	物理探査電子納品の現状と重要性		84
4.4.2	物理探査電子納品要領試案（物理探査学会案）の概要		85
5.	統合物理探査の普及		90
5.1	地盤調査における統合物理探査の位置づけ	三木茂	90
5.2	地盤調査における物理探査活用の提案	鈴木浩一	90
5.2.1	斜面防災		93
5.2.2	河川		94
5.2.3	空洞・埋設物		94
5.3	統合物理探査の効果の検討	小西千里	95
5.3.1	統合物理探査による地質リスクの回避		95
5.3.2	経済効果の試算		96
5.4	統合物理探査普及のために	三木茂	99
6.	資料		資-1
	文献調査リスト		資-2
	委員会関連発表論文		資-10
	原稿執筆者および原稿執筆協力者		資-12

1. 統合物理探査とは

1.1 建設分野における物理探査の適用と課題

建設分野，地質工学分野における物理探査における現状や問題点は，稲崎（2001）で詳しく分析検討されている．図 1.1.1 は，物理探査の問題点を，探査の計画から成果の報告までのプロセスに沿って整理したものである．プロジェクトに対して，先ず，既往資料に基づき地質モデルを想定した探査計画が立案される．この段階では，ニーズや地質工学モデルを考慮せず，機械的に物理探査が適用されることがある．探査技術者が不在で探査手法や測線が計画されることもある．現場においては，データの品質がおろそかにされがちである．測定データを解析する段階においては，解析技術の高度化に伴い，解析がブラックボックス化し，機械的に解析が実施される傾向がある．物性値モデルから地質工学モデルを構築する段階では，探査技術者と地質技術者のコミュニケーションの不足が問題となる．また，設計・施工への理解不足が，探査結果を活用できない状態を招くこともある．これらの背景には，地質調査の分業化，専門化が進行し，地質技術者と探査技術者の相互不理解が生じていることがあげられる．物理探査のブラックボックス化を助長しているとも言える．探査手法のみの標準化では問題は解決できず，物性モデルから地質工学モデルの構築を含めた対応が求められている．

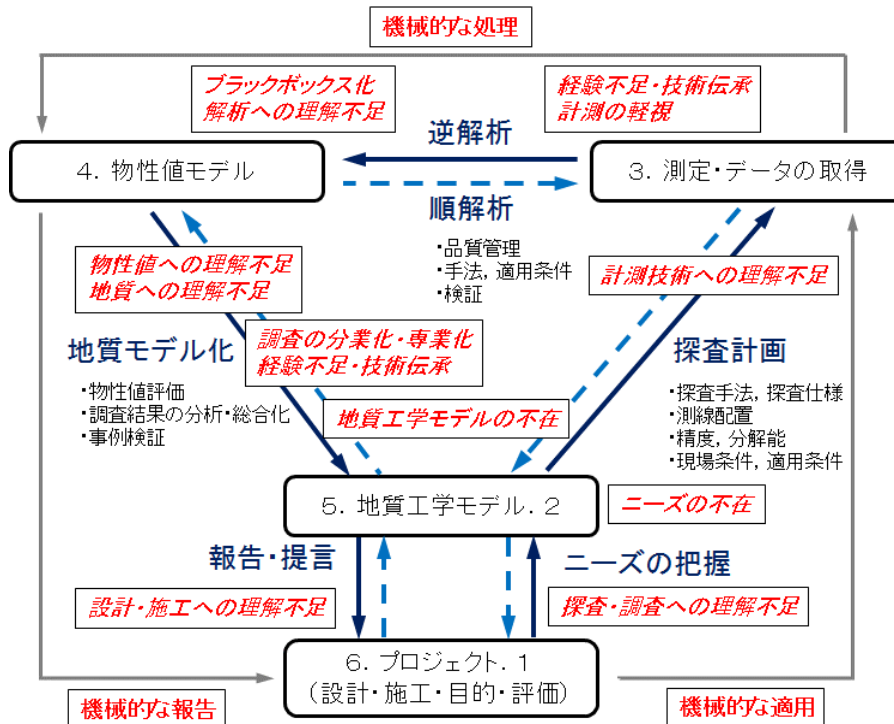


図 1.1.1 物理探査のフローと問題点（三木・統合物理探査調査研究委員会, 2014）

1.2 統合物理探査調査検討委員会発足の経緯

建設分野・地盤工学分野において物理探査結果が十分活用されていないことから、地盤工学会では、物理探査手法適用上の問題とその解決方法に関する検討を行った（物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会, 1997）。また、日本応用地質学会では、「物理探査評価研究小委員会」を組織し、物理探査結果の地質工学解釈に関する検討を行った（日本応用地質学会, 2001）。

一方、物理探査学会では、2006年に「河川堤防の統合物理探査適用検討委員会」を組織し、2013年に土木研究所との共編で「河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－」を出版した。同書では、河川堤防の安全性評価におけるニーズを基に、探査計画・現場測定・解析・探査結果の整理・安全性評価までまとめている。単に物性値断面を得ることにとどまらず、地質工学モデルの構築に踏み込んでいることに特徴がある。また、複数の探査手法を適用することで、ニーズに答える方法を示している。

土木地質学、地盤工学の分野では、物理探査に対する不信感と同時に期待が大きい。物理探査学会では、手法としての標準化に努めてきたが（標準化検討委員会, 2008）、探査結果を利用した地質モデルの構築、地盤解釈の視点が弱かったと言える。物理探査技術の普及や発展には探査技術の向上に加えて、利用技術、結果による地盤評価を含めた研究・討が不可欠であり、物理探査学会が主体的に進める必要がある。このような経緯のもと、「統合物理探査調査研究委員会」は設立された。

1.3 物理探査による地盤評価の現状

「河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－」では、統合物理探査として主に地震探査と電気探査を統合し、得られた弾性波速度と比抵抗から堤防の安全性を評価することを試みているが、本委員会では「統合」をもう少し広い意味で用いている。図 1.3.1 に物理探査結果を建設分野のプロジェクト（設計・施工）に用いる上での問題点を単純化して示す。問題点（A）は、波形記録や測定電位など物理探査で得られたデータから、弾性波速度や比抵抗などの物性値やその分布を求める解析における精度や分解能に関するものである。問題点（B）は得られた物性値あるいはその分布から、地盤の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）や透水係数などの設計・施工で必要となる情報を得ること、施工区分や施工方法の判断基礎となる地質工学モデルを構築することである。物性値モデルから地質工学モデルに翻訳すること、すなわち、解釈に関わる問題である。本章では以下、問題点をふたつに分けて議論する。

（A）解析に起因する問題

地震探査や電気探査など、地表における測定から地下の物性値を推定する多くの物理探査の解には一意性がなく、単一の物理探査のデータだけから正しい地下構造を一意的に求めることは困難であることが多い。図 1.3.2 は、屈折法地震探査における簡単な一例であり、二層および三層構造とスムーズに速度が増加する構造の三つのモデルで走時曲線が完

全に一致する場合である。したがって、走時曲線から一意的に正しい速度構造を求めることは不可能である。ここで、図 1.3.3 に示すような標準貫入試験 N 値のデータがあれば、適切な解析を行うことができる。図 1.3.3 (a) に示す N 値であれば二層構造、図 1.3.3 (b) ではスムーズな構造で解析を行うことができる。異なるデータを「統合」することの必要性を示している。本委員会では、物理探査同士の統合に限らず、このように他の調査結果も含めてデータを統合することにより、物理探査結果の解析精度向上を目指している。

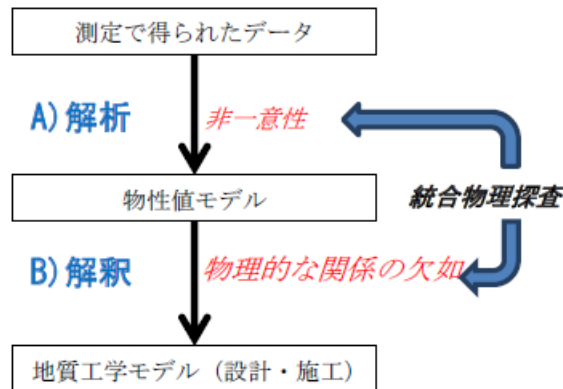


図 1.3.1 物理探査における解析と解釈の課題 (三木・統合物理探査調査研究委員会, 2014)

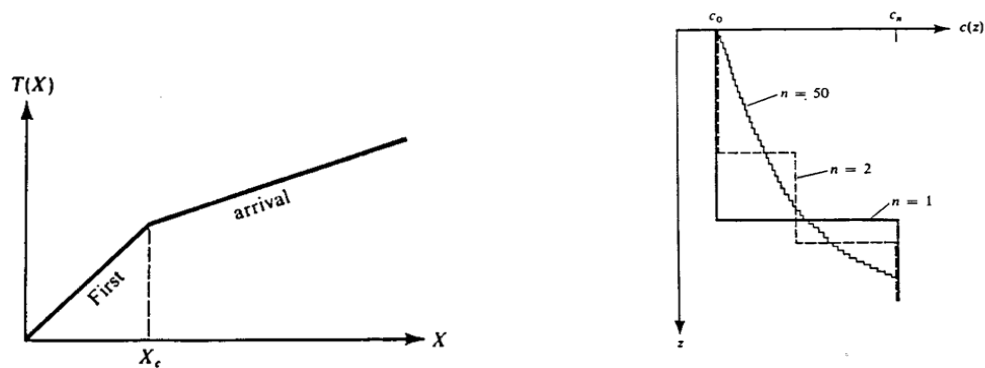


図 1.3.2 屈折法地震探査における非一意性の例 (Lay and Wallace, 1955)

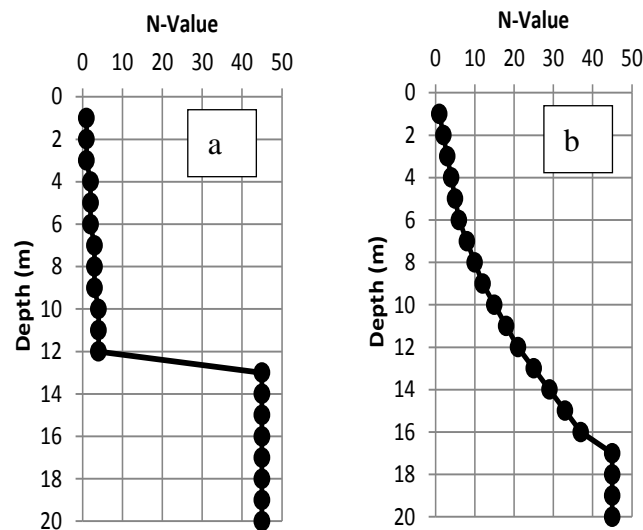


図 1.3.3 二層構造 (a) とスムーズな構造 (b) を示唆する N 値の例

(B) 解釈に起因する問題

物理探査で得られた物性値が、そのまま設計・施工に使えることは少ない。堤防調査であれば粘着力 c ・内部摩擦角 ϕ や透水係数、トンネル調査では岩盤区分や一軸圧縮強度など、設計・施工に用いる諸量への変換、グループ分けをしなければならない。物理探査を建設分野に用いる上では、こちらの方がより重要な問題となる。弾性波速度や比抵抗は、 c ・ ϕ や透水係数と物理的に直接関係しない物性値であり、相関関係を明らかにしなければならない。一方、 N 値や岩盤分類など建設分野で用いられている諸量には、施工対象に合わせた簡易な指標値として経験的に決められたものが多く、物理的な意味は定かでないものが多い。この問題を解決する一つの方法は、地道にデータを蓄積し、物理探査で得られる物性値と建設分野で用いられる諸量との関連性を統計的に整理・分類することである。地盤物質の多様性やばらつきなどを考慮した作業が必要となるが、物理探査に最も求められている重要な課題である。

図 1.3.4 は海外の研究者が集めた S 波速度と液状化強度比の関係である。このデータには日本の液状化のデータも含まれているが、これは海外の研究者が来日して測定・収集したものである。物理探査学会はこのようなデータの蓄積を近年あまり行っていない。物性値と建設分野で用いられる諸量との関連性をデータベース化していくことが重要な役割を占める。このように、物理探査結果を集めて整理し、そこから得られる統計的な関係を用いることも物理探査の「統合」である。

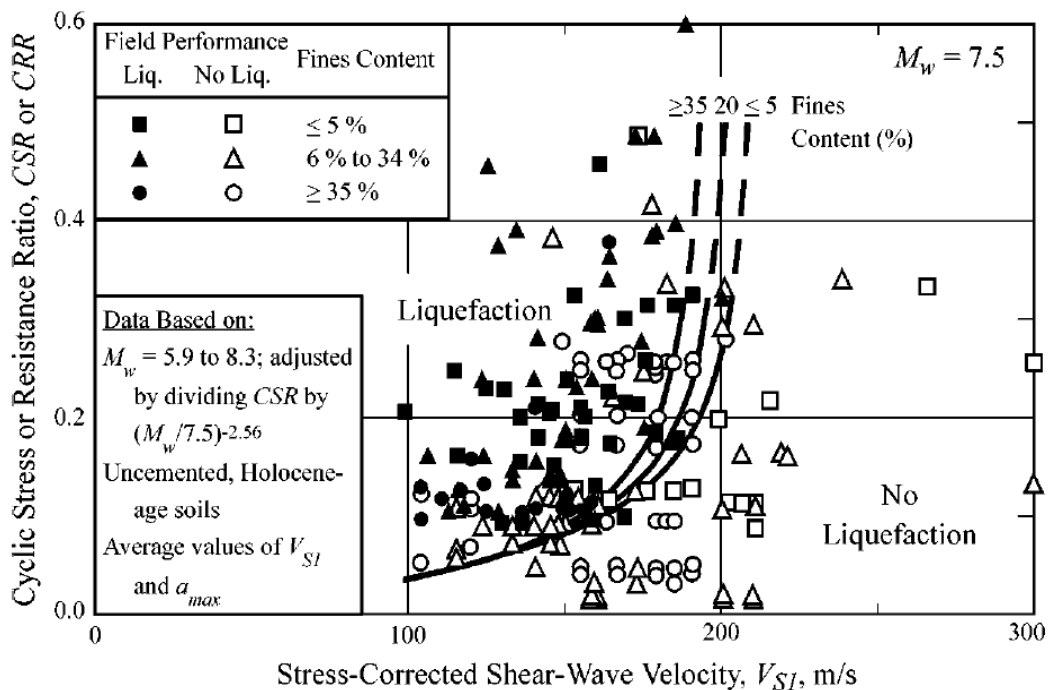


図 1.3.4 S 波速度と液状化強度比の関係 (Andrus et al., 2004)

1.4 複数物理探査と統合物理探査

ここでは、「統合物理探査」は2種類以上の探査法を実施し、得られた値を用いて新たに別の物性値を求める探査、「複数物理探査」は2種類以上の探査法を実施し、得られた値を用いて解釈する探査、と定義する。

「統合物理探査調査研究委員会」は、対象を河川堤防に限定していない。建設分野の多くの対象について、物理探査の適切な適用および計画・実施、探査結果の評価、地質工学モデルの構築、ニーズに即した地盤評価を目指している。プロジェクト全体における効果を検討し、物理探査が有用な調査技術として利用拡大されることを目的としている。

引用文献

- Andrus, R. D., Stokoe, H. H., and C. H. Juang (2004) : Guide for Shear-wave-based liquefaction potential evaluation, *Earthquake Spectra*, **20**, 285–308.
- 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会 (1997) : 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究報告書, 地盤工学会.
- 物理探査学会標準化検討委員会 (2008) : 新版物理探査適用の手引き, 物理探査学会. .
- 土木研究所・物理探査学会 (編) (2013) : 河川堤防の統合物理探査 – 安全性評価への適用の手引き –, 愛智出版.
- 稲崎富士 (2001) : 地質工学分野における物理探査の適用・解釈を巡る諸問題, 日本応用地質学会平成 13 年度シンポジウム予稿集, 61-70.
- Lay, T. and Wallace, T. C. (1995) : *Modern Global Seismology*, Academic Press.
- 三木 茂, 統合物理探査調査研究委員会 (2014) : 統合物理探査調査研究委員会の発足について, 物理探査学会第 130 回学術講演会論文集, 95-98.
- 日本応用地質学会 (2001) : 日本応用地質学会平成 13 年度シンポジウム予稿集.
- 高橋 亨, 物理探査書式研究検討委員会 (2013) : 物理探査データのアーカイブ化を目的とした標準書式案の検討について(その 2), 物理探査学会第 129 回学術講演会論文集, 213-232.
- Zelt, C. A., Haines, S., Powers, M. H., Sheehan, J., Rohdewald, S., Link, C., Hayashi, K., Zhao, D., Zhou, H., Burton, B. L., Petersen, U. K., Bonal, D. D., Doll, W. E. (2013) : Blind test of methods for obtaining 2-D near-surface seismic velocity models from first-arrival traveltimes, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **18**, 183–194.

2. 統合物理探査と地盤物性評価

2.1 物理探査結果と工学的に利用される地盤物性値の関係

2.1.1 弾性波速度と地盤物性値

均質・等方な完全弾性体の弾性定数は体積弾性率 (K) と剛性率 (G) の2つであり、これらが決まれば P 波速度 (V_P) および S 波速度 (V_S) は、密度を ρ とするとそれぞれ次式の通りに表すことができる。

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

実際の地盤は不均質媒質であり、弾性定数や密度が異なる複数の媒質がさまざまな結合状態で存在している。さらには間隙や間隙流体の存在も弾性波速度に影響を及ぼすため、同種の地質や土質であっても異なる速度を示すことも多い。図 2.1.1 は弾性波速度が変化する要因と変化の傾向を模式的に示したものである (Takahashi, 2000)。通常、得られる弾性波速度にはこれら複数の要因が同時に表れる。このため不均質媒質の弾性波速度を理論的に得ることは容易ではない。不均質媒質における弾性波速度のばらつきは、例えば岩石では、多様な間隙率、微細構造および二次的鉱物の存在などに起因する (ゲガンほか, 2008)。土質では、P 波速度は大きさが不規則に分布する構成粒子や間隙水の体積弾性率、S 波速度は粒子の大きさや形状およびそのしまり具合に支配される (今井ほか, 1975)。このように、物理探査結果で得られる地盤の弾性波速度は、複合物質としての弾性応答の一つの表現として示される。

弾性波速度は、岩盤や土質地盤の評価、とりわけ一軸圧縮強度や N 値のような強度特性との関係が密接であることから (図 2.1.2; 今井ほか, 1975; 大久保・寺崎, 1971)、これらの基礎的評価へ有効に利用されている。弾性波速度の応用について、これまでも数多く工学的分野への応用研究や事例が蓄積されており、種々の岩盤や土質地盤の速度測定事例が地盤物性評価へフィードバックされている (例えば、物理探査学会, 1990)。工学分野での利用例として、土木地質調査の分野においてトンネル事前地質調査やダム基礎地質調査などで屈折法地震探査により求められる P 波速度の値が地山分類に利用される (例えば、日本応用地質学会, 1984)。切り取り斜面の評価では掘削性の判定や法面勾配の検討 (日本道路協会, 1999) などに用いられる。土質地盤においては、S 波速度は N 値などの土質工

学で用いられる工学的物性値と強い相関があることが認められており，土質地盤の評価においては重要な物性値となっている．地震工学の分野では耐震設計における地盤の振動特性を表す卓越周期の算定に用いられる．地震動予測および耐震設計を目的とした地震動応答計算では，S波速度が重要な要素となる．また，弾性波速度は地盤の飽和度の変化とも密接に関係する性質を利用し，CO₂ 地中貯留におけるモニタリング評価 (Saito et al., 2006) や，メタンハイドレートの飽和率に関する評価 (稲盛ほか, 2010) などにも用いられている．

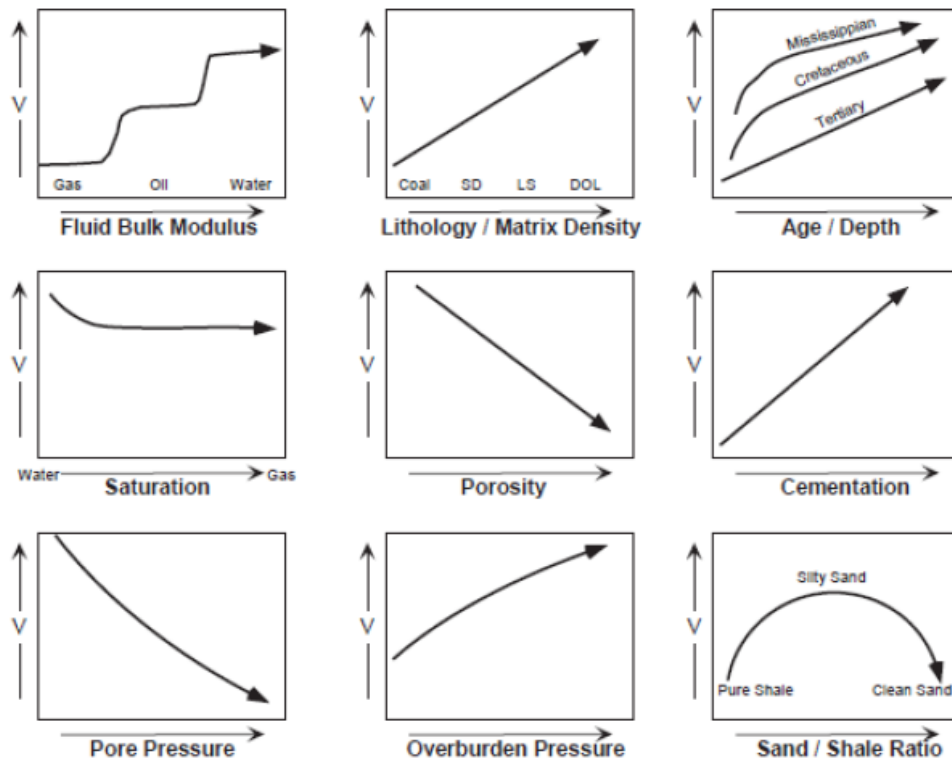


図 2.1.1 弾性波速度が変化する要因と変化傾向の模式図 (Takahashi, 2000)

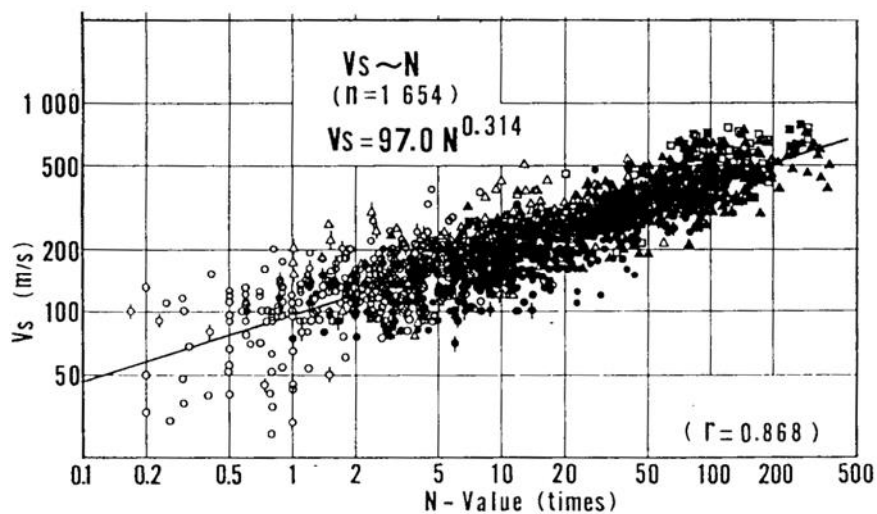


図 2.1.2 N 値と S 波速度との関係 (今井ほか, 1975)

最近の研究動向として、岩盤や土質地盤をモデル化して理論的な考察を行う手法である岩石物理学の考え方をを用いて、弾性波速度から地盤物性値を解釈する研究が進んでいる。岩石物理学は、複合物質としての不均質媒質の物性を合理的に説明する手法である。例えば、図 2.1.3 は砂泥比の異なる岩石と堆積物の間隙率と P 波のデータに対し、間隙率ごとに理論的に想定される P 波速度の上限値と下限値を示したものである (Avseth et al., 2010)。間隙率が大きく懸濁状態にある堆積物の P 波速度は概ね下限値となることがわかる。また粘土含有率が小さいほど P 波速度が大きくなる傾向も確認できる。図 2.1.4 は同程度の間隙率であっても粒子のセメンテーションの違いによって弾性定数が大きく異なることを示したものである (Avseth et al., 2009)。図 2.1.5 は大きさと弾性定数が異なる大小二つの粒子の配置に変化する間隙率と弾性定数を表した二粒子岩石モデルの模式図である (Dvorkin and Gutierrez, 2001)。このモデルを用いて、例えば高橋・田中 (2009) は、日本国内の堆積性軟岩を対象として、深度依存性を含む粘土含有率と間隙率の違いによる弾性波速度の変化を定量的に評価できることを示した。これらの理論的なアプローチとは別に、これまで蓄積された弾性波速度と地盤物性に関する知見をデータベース化し、弾性波速度の利用を高度化する研究も行われている。林ほか (2010) は、トンネル地質調査で実施された屈折法地震探査で得られた弾性波速度と、地山分類や過去の施工実績などを比較検討できるデータベースを構築した。また高橋・稲崎 (2010) は、国土交通省が運営する国土地盤情報検索サイト“KuniJiban”の拡充を目的に、国土交通省がこれまでダムやトンネル建設等に伴って実施してきた調査で行った岩石試験データを収集している。このように理論的なアプローチとともに多くの事例が体系的に収集され容易に入手が可能になることにより、地盤物性解釈のための弾性波速度利用の高度化が期待される。

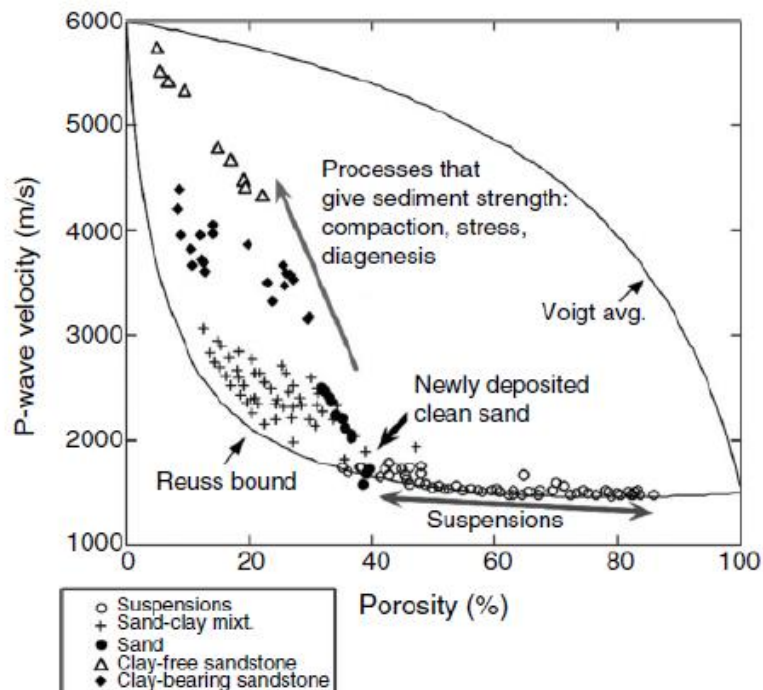


図 2.1.3 砂泥比の異なる堆積岩と堆積物の間隙率と P 波速度の関係 (Avseth et al., 2010)

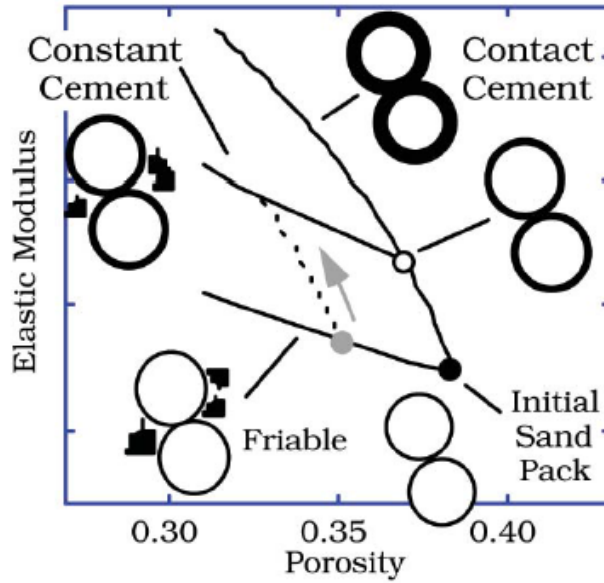


図 2.1.4 粒子のセメンテーションの違いによる間隙率と弾性定数の関係 (Avseth et al., 2009)

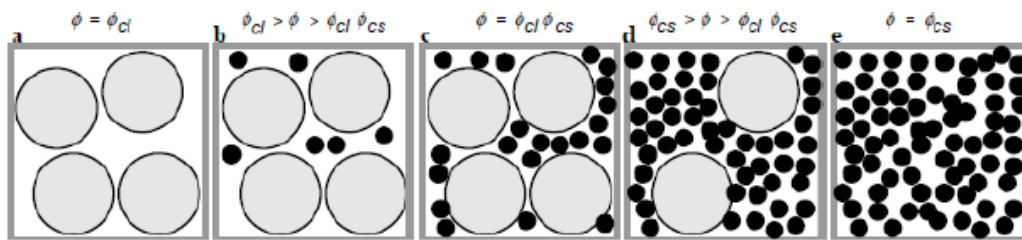


図 2.1.5 大小二つの粒子の配置により変化する間隙率を表した二粒子岩石モデルの模式図 (Dvorkin and Gutierrez, 2001)

2.1.2 比抵抗と地盤物性値

比抵抗とは電気的特性を示す値で、地盤材料の電気の流れにくさを示す値である。電気の流れ易さを示す電気伝導度(S/m)の逆数であり、単位は $\Omega \cdot m$ である。地盤の比抵抗は、地盤材料の細粒分含有率・間隙率・飽和度・間隙水の比抵抗・温度などによって値が変わる(表 2.1.1)ことから、地質区分や地盤状態の評価に利用されている(図 2.1.6)。同じ比抵抗でも複数の地質区分が該当することから定性的な評価がなされることが多い。しかし、同じ地質でも比抵抗が広範囲に広がることから、間隙率や飽和度といった地盤の状態を表していることが期待される。物理探査で得られた比抵抗の値を用いて地盤状態を評価するためには、あらかじめ比抵抗と地盤物性値との関係を把握しておく必要があり、室内試験によって多くの経験式が提案されている。間隙率の大きい岩石に対してはアーチーの式が有名であり、岩石の比抵抗 ρ_R について次式が提案されている (Archie, 1942)。

$$\rho_R = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad (2.3)$$

ここで、 a 、 m 、 n は岩石の性質に依存する定数であり、 ϕ は間隙率、 S は水飽和度、 ρ_w は間隙水の比抵抗である。これより、岩石の比抵抗は、間隙率の m 乗、水飽和度の n 乗に反比例し、間隙水の比抵抗に比例することが分かる。以下に比抵抗とさまざまな地盤物性との関係をまとめる。

表 2.1.1 岩石・土質の状態と比抵抗の関係 (物理探査学会, 2008)

状 態	岩石・土の比抵抗の変化			備 考
	低	⇒	高	
地下水・間隙水の比抵抗	低	⇒	高	塩分濃度、塩水楔
水飽和度	高	⇒	低	
間隙率(飽和状態)	大	⇒	小	
粘土分	多	⇒	少	
風化・変質程度	強	⇒	弱	
温度	高	⇒	低	地熱

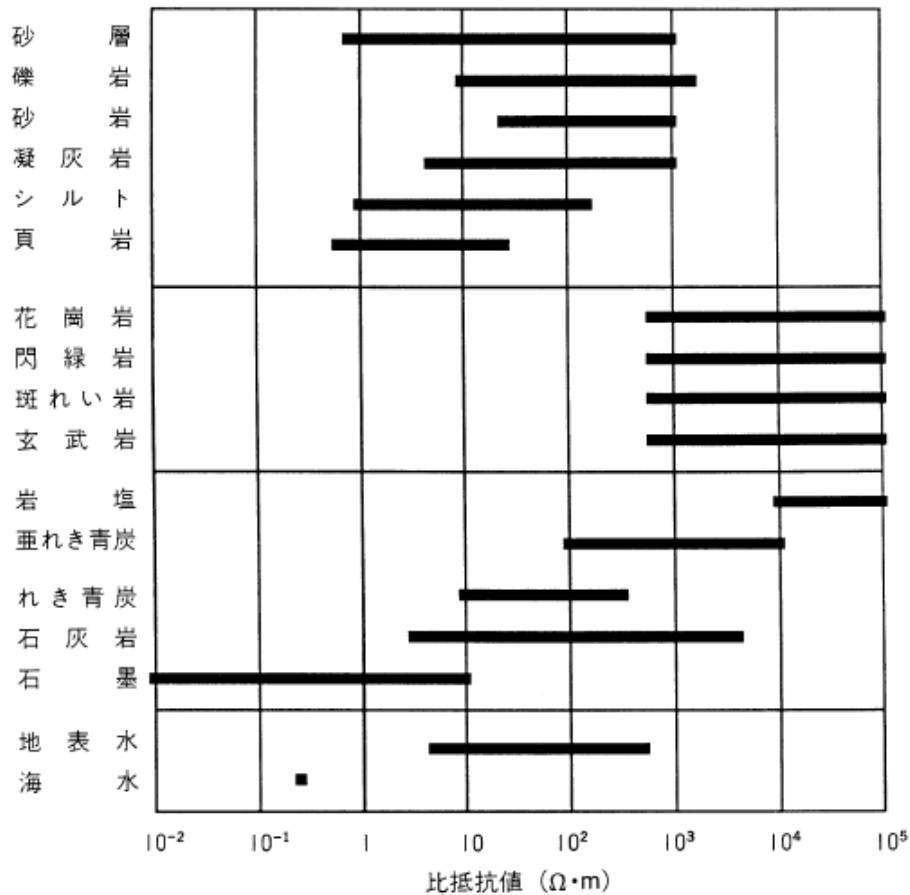


図 2.1.6 岩石と比抵抗の関係 (物理探査学会, 1998)

① 比抵抗と粘土（細粒分）含有量

図 2.1.7 に示すように岩石に粘土鉱物が含まれると比抵抗が低下することが知られている（例えば，高倉，2009）．また，粘土鉱物の種類により，その低下する比抵抗の程度も変わり，粘土鉱物の陽イオン交換容量（CEC）の大きさと深く関連する．岩石や土質の区分は含まれる鉱物や細粒分量によって決まるため，物理探査で得られた比抵抗から地質区分等が行われている．

② 比抵抗と水飽和度

アーチーの式から岩石の比抵抗は水飽和度の n 乗に反比例することが分かり，図 2.1.8 に示すように水飽和度が増加すると比抵抗が低下することが知られている（例えば，朴ほか，1999）．間隙率に飽和度を乗じたものが体積含水率であることから，比抵抗値から工学的に利用される体積含水率を推定することができる．土木分野では水に関する問題が多く，地下水や水みちの調査への利用が期待されている．

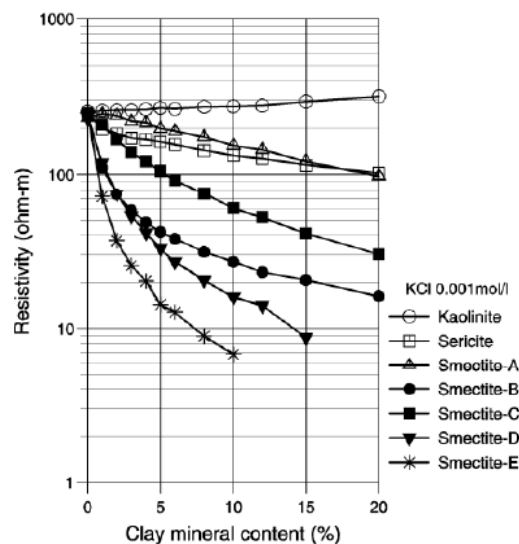


図 2.1.7 比抵抗と粘土含有量（高倉，2009）

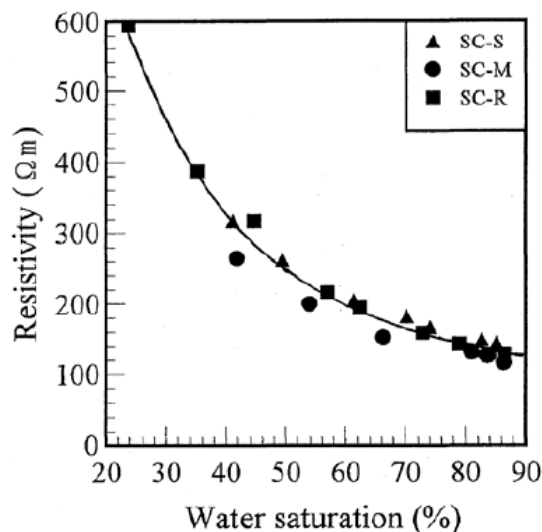


図 2.1.8 比抵抗と水飽和度（朴ほか，1999）

③ 比抵抗と間隙率

地盤材料の間隙率が増加すると、地盤材料以外の割合が相対的に高くなり、それらの影響が大きくなる。図 2.1.9 に示すように水飽和した試料の場合は、間隙率が大きくなると比抵抗値は下がることが知られている（例えば、朴ほか, 1999）。また、飽和度が 1 の時、地層比抵抗係数 F が次式で定義される。

$$F = \frac{\rho_R}{\rho_w} = a \cdot \phi^{-m} \quad (2.4)$$

地層比抵抗係数は間隙率の関数であり、岩石の間隙の大きさや形状を反映している。

④ 比抵抗と間隙水

図 2.1.10 に示すように間隙水の比抵抗によって地盤材料の比抵抗が変わることが知られている。地盤に含まれる細粒分が少ない場合、間隙水の比抵抗増加と共に地盤の比抵抗は線形的に増加する。しかし細粒分が多くなると、線形関係から外れ、間隙水の比抵抗増加による地盤の比抵抗変化は小さくなり、一定に近づく（例えば、朴・松井, 1998）。これは細粒分（粘土鉱物）の増加によりイオン濃度の高い電気二重層が発達し、電気伝導度が大きくなるからと考えられている（例えば、千葉・熊田, 1994）。粘土鉱物の影響を考慮した式として次式が提案されている（Katsube and Hume, 1983）。

$$\frac{1}{\rho_R} = \frac{1}{F\rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (2.5)$$

ここで、 $1/\rho_c$ は粘土鉱物の電気二重層による電気伝導を表す。

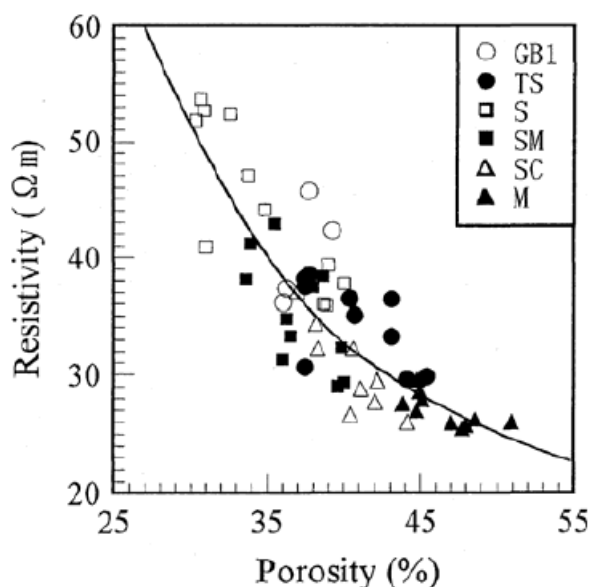


図 2.1.9 水飽和した試料の間隙率と比抵抗（高倉, 2000）

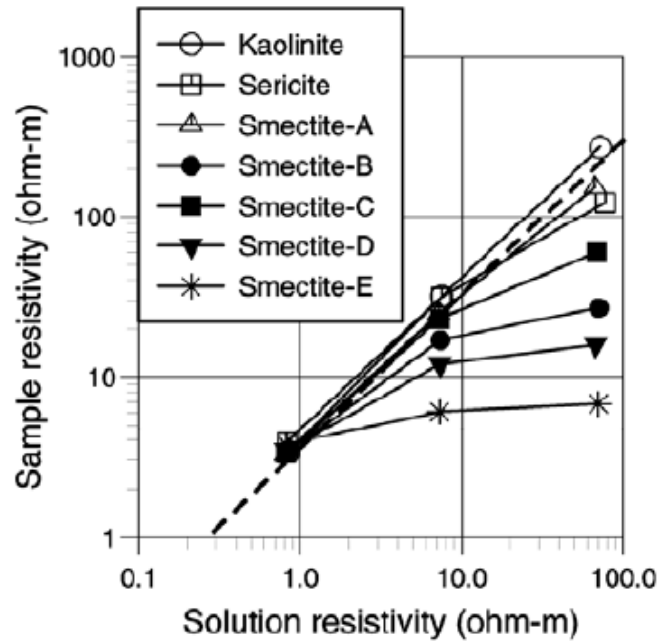


図 2.1.10 間隙水の比抵抗と岩石の比抵抗 (高倉, 2000)

⑤ 比抵抗と温度

岩石・土質試料は、温度の影響を受けることが知られている (図 2.1.11)。これは地盤の比抵抗が間隙水の比抵抗の影響を大きく受けることによるためである。水の比抵抗の温度特性についてはいくつかの実験式が提案されており (図 2.1.12) 温度増加とともに電気電導度が増加、すなわち比抵抗が低下する。したがって、温度増加とともに比抵抗が増加する金属材料と異なり、地盤の場合は温度増加とともに比抵抗は低下する。この関係は地熱開発や地中熱開発での利用や、気温変化による地表温度の変化の評価などで利用されている。

⑥ 比抵抗と透水係数

岩盤中を流れる水は電流と同様に割れ目等の間隙を流れると考えられることから、図 2.1.13 に示すように比抵抗から透水係数 (図中の透水量係数は、透水係数に層厚をかけた値) を推定することが試みられている (例えば, Katsube and Hume, 1987)。また、図 2.1.14 に示すように河川堤防の透水係数を簡易に推定する方法も行われており、堤体材料の粒度や間隙率と透水係数の関係を利用し、比抵抗から粒径を推定し、透水係数を推定することも行われている (例えば, 岡崎ほか, 2014)。

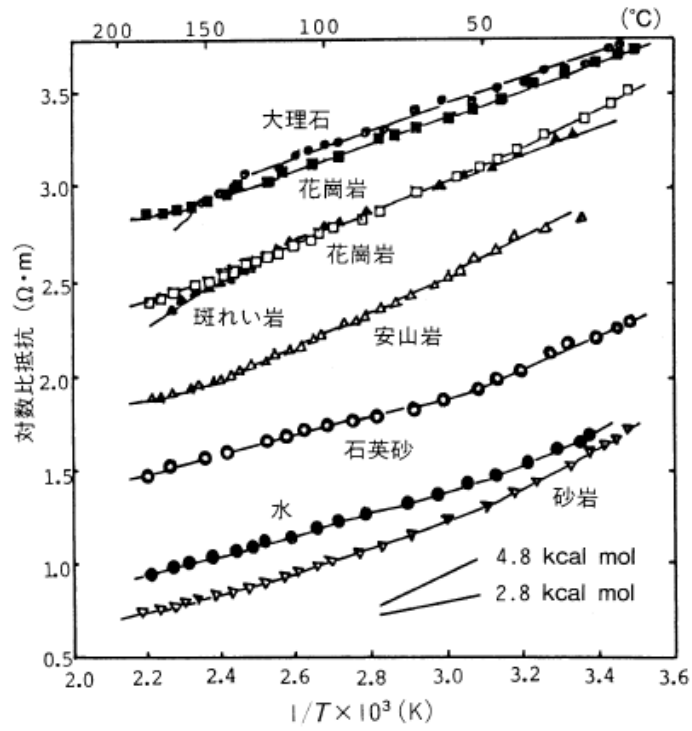


図 2.1.11 岩石の温度と比抵抗の関係 (横山他, 1983)

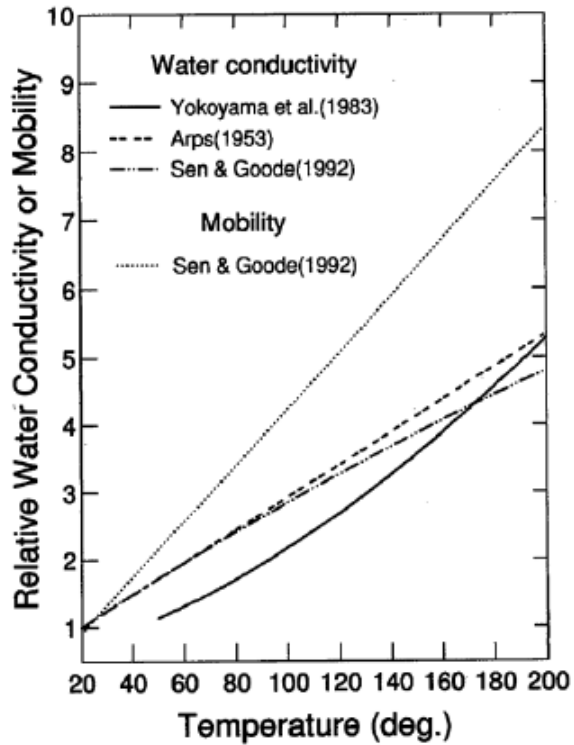


図 2.1.12 間隙水の電気伝導度の温度度特性 (高倉, 1995)

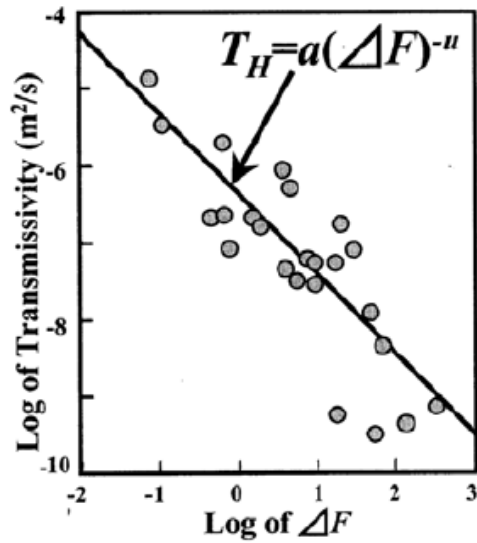


図 2.1.13 岩盤における透水量係数と地層比抵抗係数の比 (Katsube and Hume, 1987)

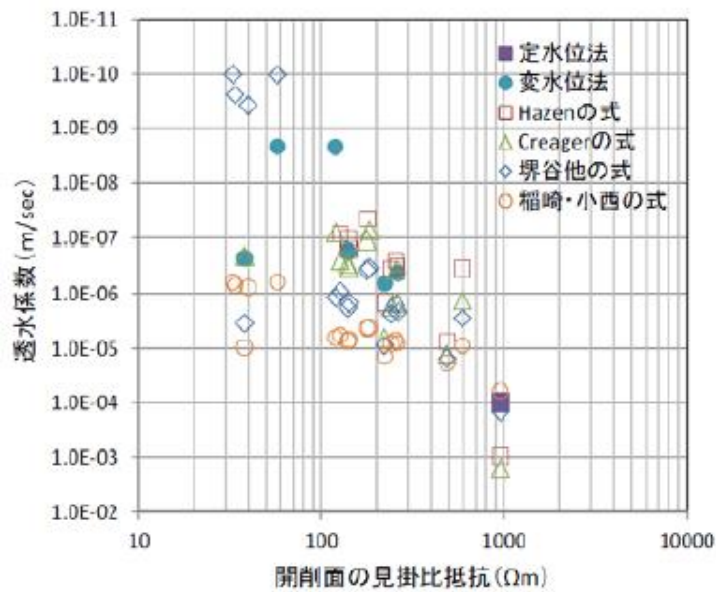


図 2.1.14 透水係数と開削面の見掛比抵抗 (岡崎ほか, 2014)

2.1.3 その他の物理探査結果と地盤物性値

ここでは地中レーダや電磁探査に関わる比誘電率と導電率，重力探査に関わる密度，磁気探査に関わる帯磁率とキュリー温度，リモートセンシングに関わる赤外線スペクトルについて説明する。

① 物理探査に利用する電磁波

地中レーダと電磁探査について説明する前に電磁波について説明する。電磁波は電場と磁場の変化によって形成される波動である。波動には周波数（あるいは振動数）があり、1秒間に振動した回数をいう。図 2.1.15 に電磁波の波長 λ (m) と周波数（振動数） f (Hz) の関

係を示す．空気中の電磁波の伝搬速度を C とすると $C=f \cdot \lambda$ の関係がある．空気中の電磁波の伝搬速度は $C=2.998 \times 10^8(\text{m/s})$ であることが知られている． C は定数であるから，波長 λ が大きくなると周波数 f は小さくなり， λ が大きくなると f は小さくなる．電磁波のうち低い方の周波数を「電波」という．電波法第二条第一項によれば“「電波」とは，三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう”（原文ママ，総務省 HP：http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/72001000001.html, 2017/11/2）．これより高い周波数は遠赤外線から可視光，放射線（ガンマ線）となる．地中レーダは電波のうち極超短波（UHF）帯以下の電磁波を利用する．UHF 帯より高い周波数を利用した物理探査はリモートセンシングである．従って，地中レーダと電磁探査は「UHF 帯以下の電波を利用する探査」，リモートセンシングは「UHF 帯より高い周波数の電磁波を利用する探査」ということができる．紫外線より高い周波数はレントゲンで用いられる X 線，それより高いものをガンマ線という．放射能探査では主にガンマ線を測定する．

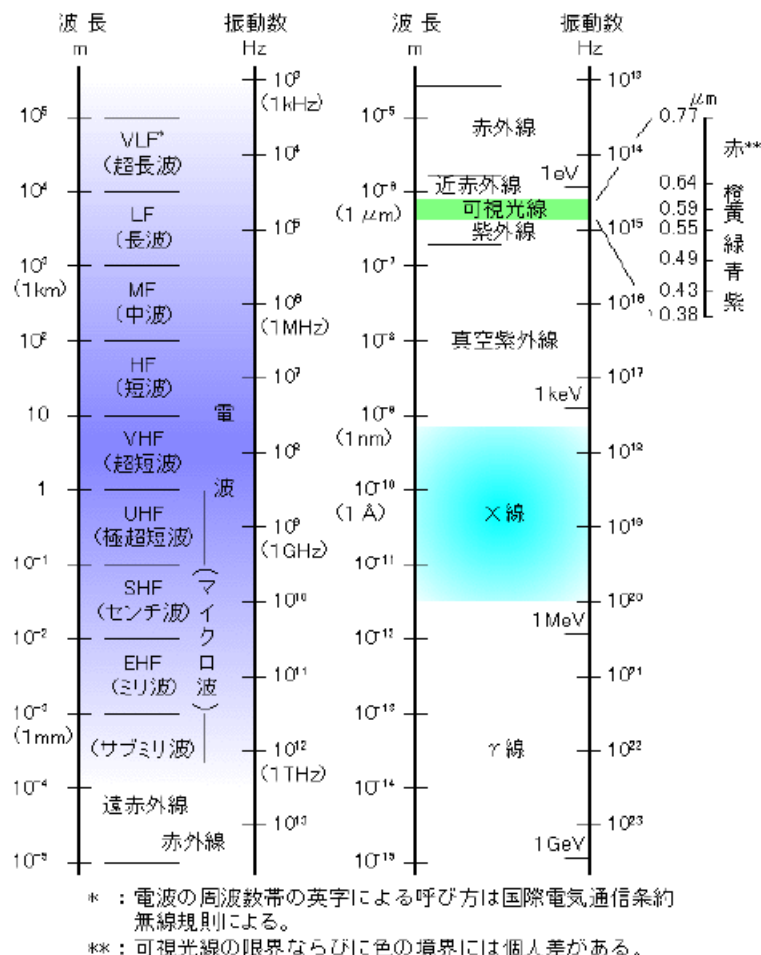


図 2.1.15 電磁波の波長と周波数（振動数）（一般財団法人高度情報科学技術研究機構 HP 原子力百科事典：http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=18-04-03-02, 2017/12/25）

② 導電率と比誘電率

導電率は比抵抗の逆数として定義される。詳細は 2.1.2 で説明した通りである。

比誘電率は、真空の誘電率 $\epsilon_0 (=8.854 \times 10^{-12} \text{F/m})$ に対する比のことである。誘電率とは、電場中に置かれた物質の分極を生じる割合を表す。地中を構成する物質のうち、空気の比誘電率は真空とほぼ同じであるから 1 である（厳密には 1 より大きい有効数字 6 桁程度の精密な測定をしないと違いが出ないほどの大きさである）。鉱物粒子は 4~7 程度である。これに比べて水は 81 と非常に大きい値を示す。よく知られているように、水分子は酸素原子の片側に水素原子が 2 個、偏って結合している。イオンの状態では水素が正、酸素が負であるから、水分子全体は水素側が正、酸素側が負となる分極を呈する。これが電場中に置かれると、水分子の分極によって個々の水分子の方向が揃う。そのため全体として大きな誘電率の値を示す。地中の構成物質としては、水の比誘電率が大きな値を示すことから、比誘電率から土壌の体積含水率を測定するために利用されている（Topp et al., 1980）。

比誘電率 ϵ_r は地中レーダ探査においては電磁波伝搬速度と関係している。媒質の電磁波速度を v とすれば、

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

とあらわすことができる。

表 2.1.2 には岩石、土壌と主な物質の導電率と比誘電率の値を示す。同じ土壌でも、間隙の大きい粘土などでは自然の状態でも水を多く含むことから比誘電率の値は大きい。砂質の場合は、間隙が少ないため、湿潤状態でも比誘電率はあまり大きな値を示さない。乾燥状態では、水が鉱物粒子から離れるため比誘電率の値は小さくなる。

導電率が大きくなると電磁波の減衰が大きくなる、表 2.1.2 に海水の値を示したが、これは 4S/m と極めて高い値を示す。海水中の電磁波は、ほとんど伝搬しないのはこれが理由である。そのため河口付近や海岸付近では地盤中に海水が浸入していると、地中レーダ探査が行えない場合もある。

導電率と誘電率は、電磁波の伝搬に関わる重要なパラメータである。導電率と誘電率は、複素数表示をすると一度にあらわすことができる。電磁探査では低い周波数（0Hz 近くから数 10kHz）の電波を用いるため導電率が支配的になり、地中レーダ（10 数 MHz~数 GHz）では高い周波数を用いるため比誘電率が支配的となる。式(2.6)は周波数が十分高く、導電率もあまり高くない場合の近似式である。泥炭のように導電率の高い媒質の場合、式(2.6)が適用できない場合もあるため注意が必要である。

表 2.1.2 岩石、土壌及び物質の導電率と比誘電率（物理探査学会, 2005）

媒 質	導電率 (S/m)	比誘電率
空気	0	1
アスファルト：乾燥	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	2 ~ 4
アスファルト：湿潤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	6 ~ 12
粘土：乾燥	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	2 ~ 6
粘土：湿潤	$10^{-1} \sim 1$	15 ~ 40
石炭：乾燥	10^{-2}	3.5
石炭：湿潤	10^{-1}	8
コンクリート：乾燥	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	4 ~ 10
コンクリート：湿潤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10 ~ 20
真水	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	81
真水氷	10^{-3}	4
花崗岩：乾燥	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	5
花崗岩：湿潤	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	7
玄武岩：湿潤	10^{-2}	8
石灰岩：乾燥	$10^{-9} \sim 10^{-6}$	7
石灰岩：湿潤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	8
凍土	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	4 ~ 8
岩塩：乾燥	10^{-4}	4 ~ 7
砂：乾燥	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4 ~ 6
砂：湿潤	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	10 ~ 30
シルト：湿潤	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	9 ~ 15
砂岩：乾燥	$10^{-9} \sim 10^{-6}$	2 ~ 3
砂岩：湿潤	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	5 ~ 10
海水	4	81
海水氷	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	4 ~ 8
頁岩：湿潤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	6 ~ 9
雪：固結状態	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	8 ~ 12
土壌：砂質，乾燥	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	4 ~ 6
土壌：砂質，湿潤	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	15 ~ 30
土壌：ローム質，乾燥	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	3 ~ 6
土壌：ローム質，湿潤	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10 ~ 20
土壌：粘土質，乾燥	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	3 ~ 6
土壌：粘土質，湿潤	$10^{-2} \sim 1$	10 ~ 15

③ 密度

岩石の密度は、重力探査から推定することができる。弾性波速度などから求めることもできるが、その場合は別の情報を用いる必要がある。

重力探査からは、地下の密度構造を得ることができる。土壌や岩石の密度を図 2.1.16 に示す。乾燥した土壌は空気を多く含むため密度が小さく、湿潤すると密度は増加する。岩石については堆積岩よりも火山岩の方が、密度が大きい傾向にある。石英を多く含む流紋岩よりも、有色鉱物の多い玄武岩の方が密度は高い。岩石の密度は、岩石中の割れ目や風化の度合いによって密度が大きく異なるため、物理探査データの解釈には、それらを考慮して解釈する必要がある。

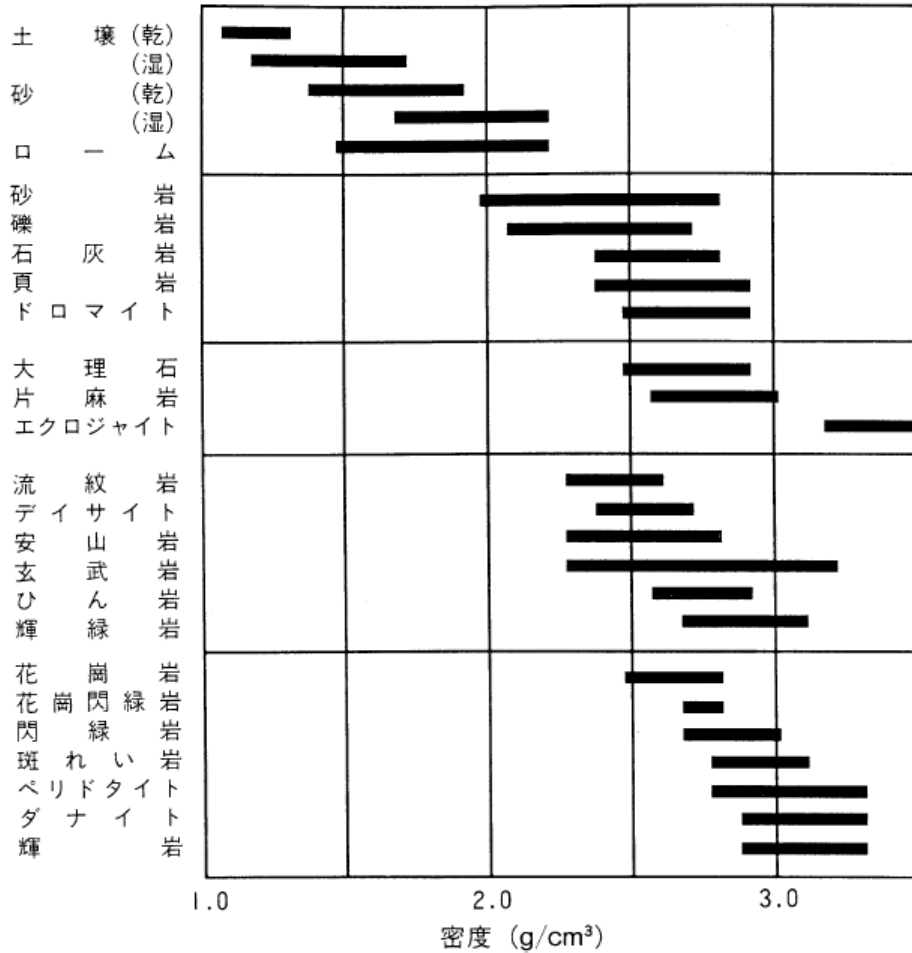


図 2.1.16 岩石の密度 (物理探査学会, 1998)

④ 帯磁率とキュリー温度

帯磁率は磁気探査の結果から得ることができる、帯磁率は磁化率とも呼ばれる。誘電率と同様に外部磁場によって生じる磁気分極の度合いのことである。一般的に鉄・コバルト・ニッケルなどの強磁性体を含む物質の帯磁率は大きい値を示す。岩石と帯磁率の関係を図 2.1.17 に示す。堆積岩に比べて火成岩の帯磁率は大きく、火成岩でも有色鉱物が多い、あるいは深成岩ほど大きい傾向にある。

帯磁率と関わりの深い物理量としてキュリー温度がある。キュリー温度は強磁性体が磁性を失い、常磁性体に転移する温度である (図 2.1.18)。磁気探査の結果からは、キュリー温度の深度分布も推定することができる。キュリー温度の地下での分布がわかれば、地下の熱分布 (これを熱構造という) が把握できるため、地熱の貯留層の推定などに用いることができる。

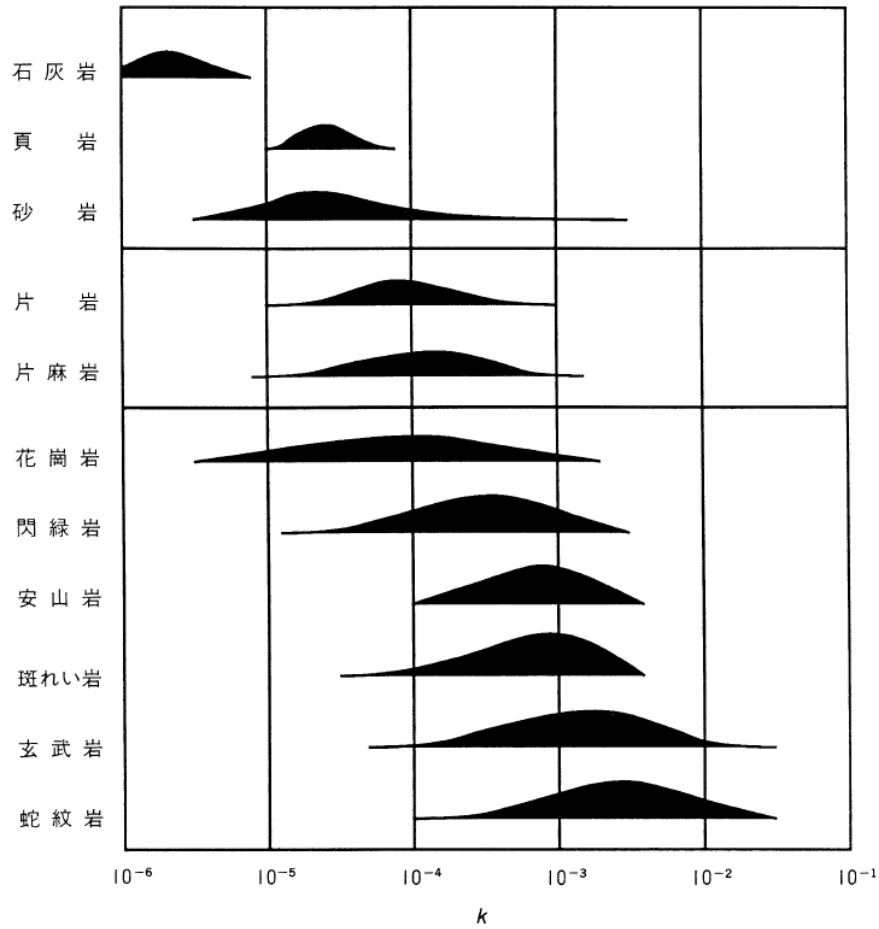


図 2.1.17 岩石の帯磁率 (物理探査学会, 1998)

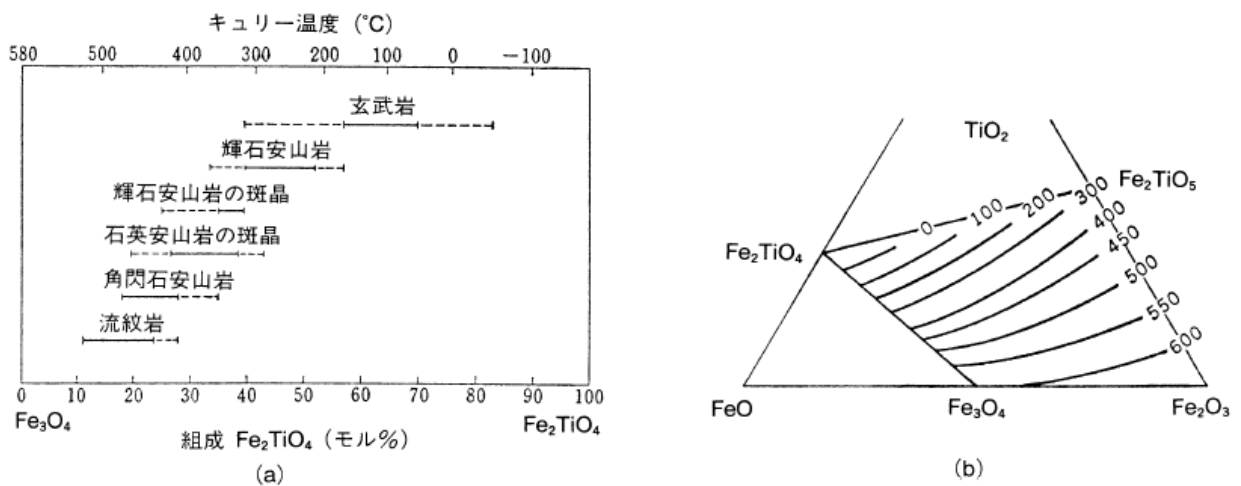


図 2.1.18 (a) 岩石のキュリー温度 (小嶋・小嶋, 1972). (b) チタノマグネタイトのキュリー点 (Nishitani and Kono, 1983)

⑤ 赤外線スペクトル

衛星を使って行う物理探査にリモートセンシングがある。その手法のひとつに地表から放射される赤外線のスเปクトル（波長による反射強度の違い，分光反射率）を利用して，地表の物質を推定することができる。例えば，土壌についていえば関東ロームと黒ボクでは色が異なる。同じ砂でも乾いたものと湿ったのでは，前者の方が明るく見える。肉眼でもある程度推定できるが，赤外線の領域の分光反射率についてセンサを用いて測定することである程度地表物質の推定が可能となる。可視光に近い近赤外線のスเปクトルを，物質ごとに図 2.1.19 に示す。例えば石灰岩では全ての波長に対して反射率が高いが，特定の粘土鉱物があると，特定の波長の反射が弱くなる（吸収される）。これを利用して，同じ石灰岩でも風化したところと新鮮なところを区分することができる。

リモートセンシングでは広帯域の波長成分を測定できるので，可視光より波長の長い遠赤外線も利用することができる。図 2.1.20 に遠赤外反射スเปクトルを示す。これを参照すると花崗岩のような酸性岩では短い波長の吸収が多く，蛇紋岩のような超塩基性岩では長い波長の吸収が大きい。

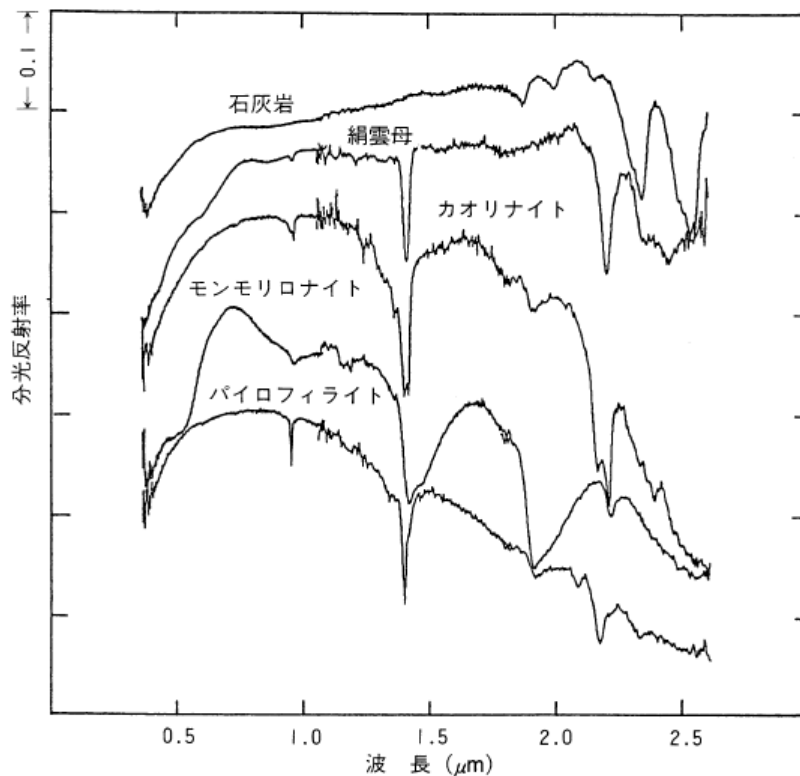


図 2.1.19 岩石・鉱物の近赤外反射スเปクトル（浦井・山口, 1988）

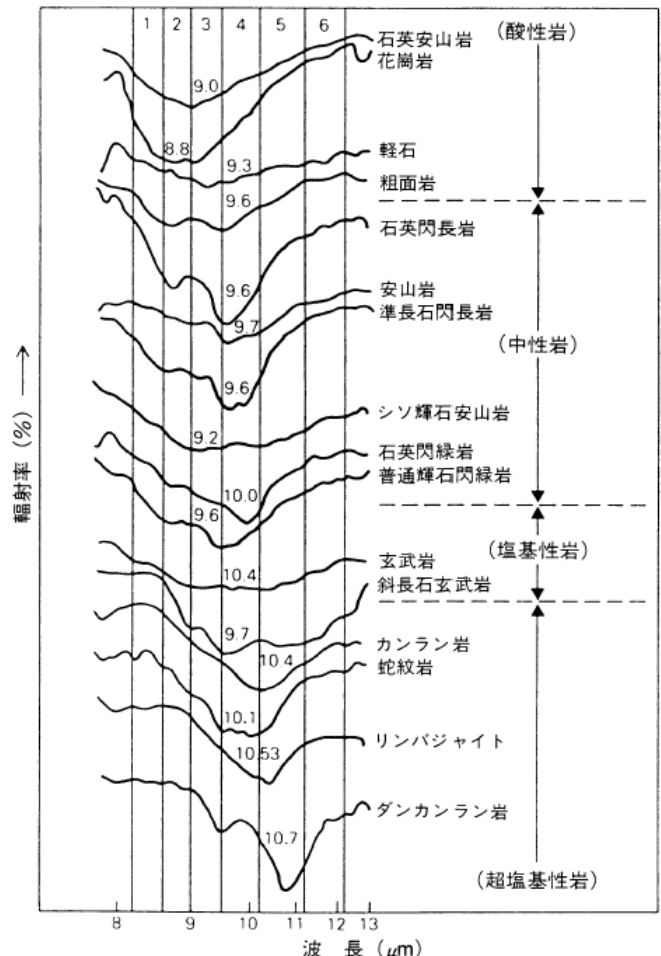


図 2.1.20 岩石・鉱物の遠赤外反射スペクトル (物理探査学会, 1998)

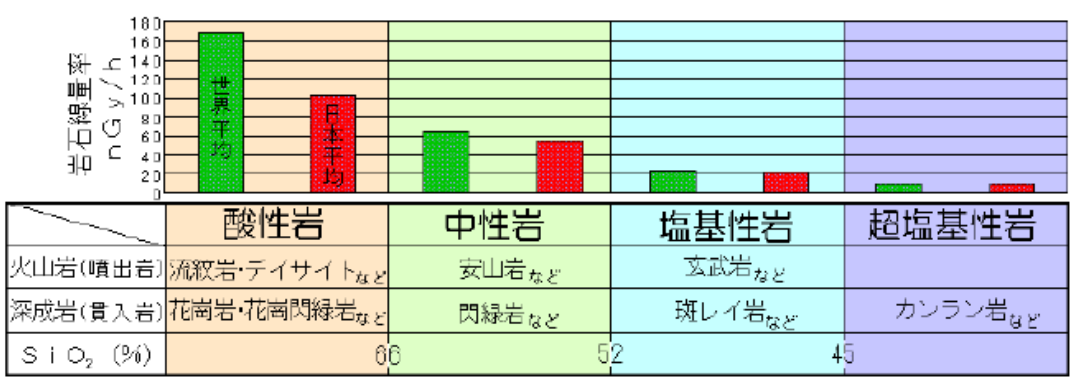


図 2.1.21 岩石の種類と線量率 (地上 1m における換算値) (Minato, 2002)
<http://www1.s3.starcat.ne.jp/reslnote/fudou.html>, 2017/12/25)

⑥ 放射線

放射線を用いた物理探査に放射能探査がある。地下には自然のウランが存在し、これが放射性崩壊をすると、ラドンという別の元素に変化する。これが地下の断層などを伝わって地表に現れることがある。断層を横切るように放射能探査を行い、ラドン起源のガンマ

線を測定することにより断層の位置を推定することができる。

物理探査で放射線や放射能と岩石の種類などを研究した事例は多くない。近年、岩石の種類と空気吸収線量率(nGy/h)との関係を研究した事例が報告され、将来的に放射能探査で岩石の種類なども区分できる可能性がある。

2.1.4 室内物性値と原位置物性値の相違

ここでは主に、異なる手法で得られた物性値（室内物性値と原位置物性値）を設計値として用いる場合の注意点について整理する。

一般的な土木・建築分野の設計においては、表 2.1.3 に示す調査・試験が目的に応じて行われ、つぎの物性値が設計用の地盤定数として用いられることが多い。

- ・単位体積重量
- ・粘着力
- ・せん断抵抗角
- ・変形係数
- ・透水係数

これらの地盤定数は、物理探査や物理検層、原位置試験、および室内試験から求めることができるが、設計値として評価する場合には、つぎの点を考慮することが望まれる。

表 2.1.3 土木・建設分野の各種事業と調査手法の組み合わせ（全国地質調査業協会連合、2013）

事業 調査方法	建築物	切土のり面	盛土構造物	上下水道	橋梁・高架構造物	河川堤防・河川構造物	埋立て・港湾構造物	トンネル	ダム	地すべり	斜面崩壊	地下水影響	土壌・地下水汚染	維持管理
	機械ボーリング	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎
標準貫入試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	○			
サンプリング	◎		◎	○	◎	◎	◎	○	△				◎	○
孔内水平載荷試験	◎		○		◎	○	◎	△	○					
透水試験	◎	△	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△	△	◎		
湧水圧試験								◎	○					
ルジオン試験									◎					
速度検層	○	◎			○			◎	○					
ポアホールカメラ									◎	○	○			△
室内土質(岩石)試験	◎		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○				△
弾性波探査		○						◎	○	○	○			
比抵抗法二次元探査		○						○	○	○	○	△		
スウェーデン式サウンディング	○		○		○									
簡易動的コン貫入試験											◎			
移動量観測										◎				
地下水観測										◎		◎		
井戸調査												◎		
土壌分析													◎	
地中レーダ探査														◎

◎しばしば用いられる
○用いられる
△まれに用いられる

① 対象となるひずみ領域

ひずみとは、「物体に外力を作用させたときの物体に生じる変形量と初期状態との比」(物理探査学会, 2005) のことであり, 耐震設計をはじめ地震時の地盤問題を扱う際には, ひずみレベルに応じた物性値の変化が着眼点となる。

従って, 地盤定数を求める場合は, 対象とする地盤の問題に応じてひずみ領域が異なることに注意が必要となる (図 2.1.22)。また, 調査・試験手法によってもひずみ領域は異なるので (図 2.1.23), 対象となる問題に応じた調査・試験手法を選定することが重要となる。

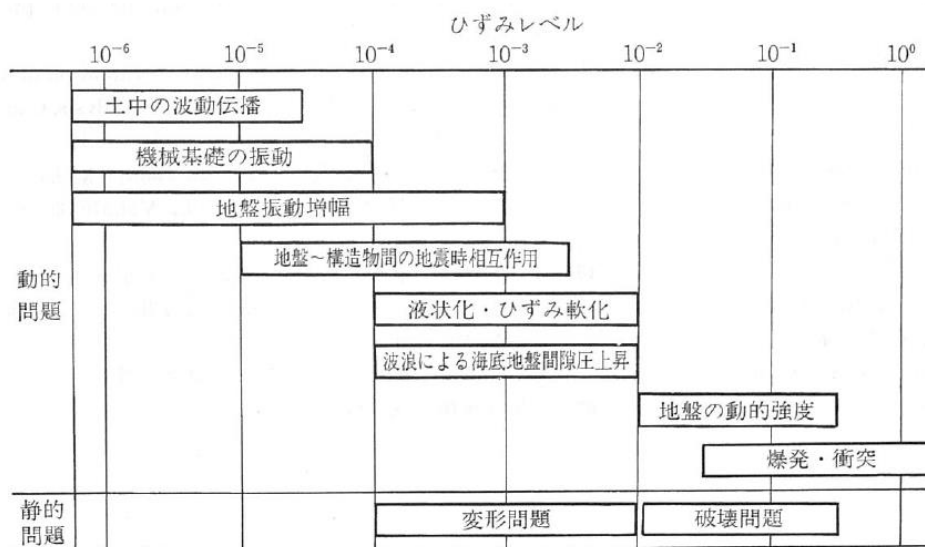


図 2.1.22 動的問題で対象とするひずみレベルの範囲 (地盤工学会, 1999)

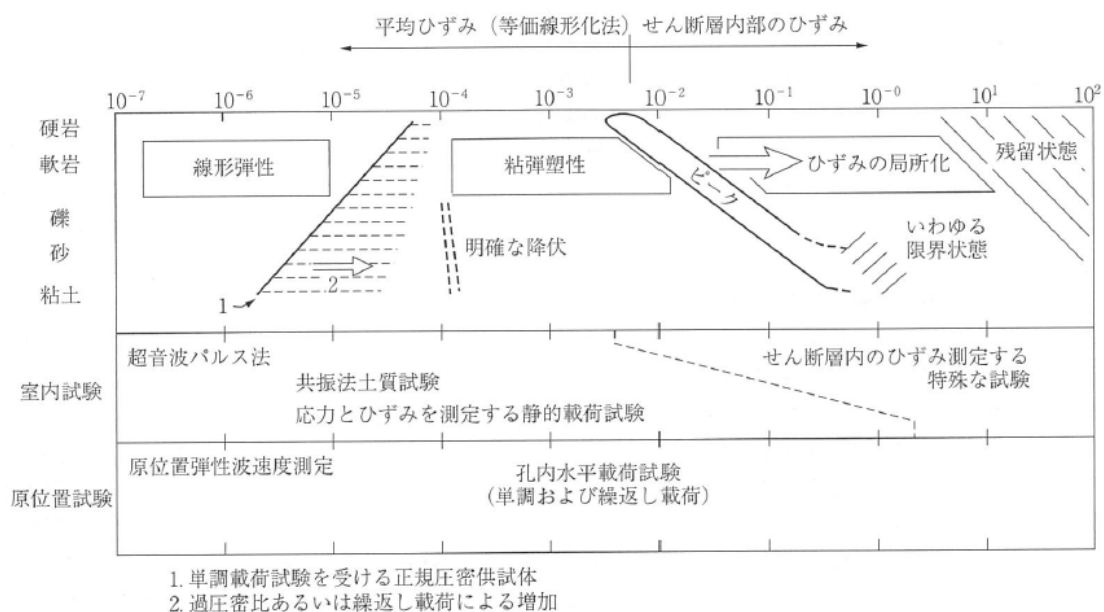


図 2.1.23 地盤のひずみレベルと土の性質および試験法 (地盤工学会, 2009)

② 寸法（サイズ，スケール）効果

寸法効果とは、「対象とする物質・物体の大きさ（寸法）により，強度を初めとする様々の物性に変化すること」であり，ほとんどの物質において見られる現象である（大久保ほか，1996）。

例えば，室内試験で得られる物性値は，比較的小さな試験片（供試体）に関するものであるが，大きな岩盤内構造物の設計の際は，寸法（サイズ）による物性の変化を考慮して，室内試験で求めた物性値を勘案・調整することが必要になってくる。

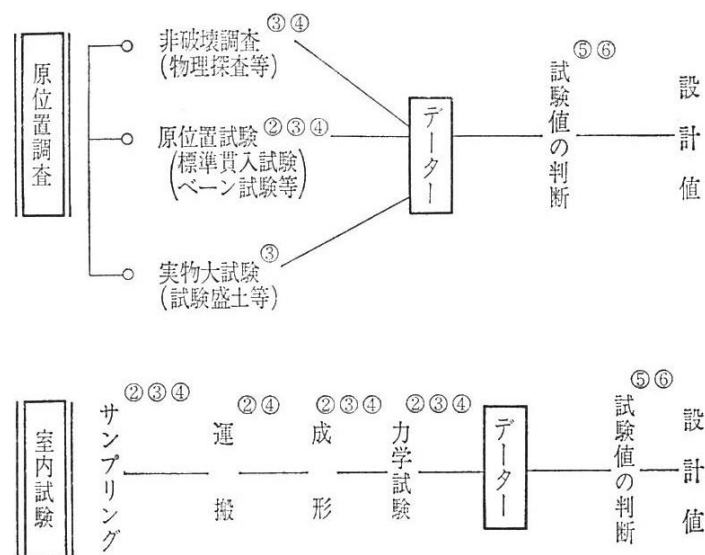
③ 堆積年代・堆積環境による影響

堆積年代による影響は，土砂・軟岩と硬岩で異なる傾向を示す。軟岩の室内試験試料は，応力解放により拘束圧が除荷されることで地盤の強度よりも小さい値が得られることが予想される。

また，堆積環境による影響としては，海水成と淡水成の違いによって一軸圧縮強度が異なる事例が報告されている（亀井，1997）。この原因としては，淡水成試料のほうがより速く圧密が進行することが考えられ，土の強度・変形特性に堆積環境が影響していることを示している。

④ 試験結果のばらつきや誤差に関する評価

地盤定数の評価におけるプロセスと誤差要因については，例えば図 2.1.24 が示されており（正垣・日下部，1987），設計値を決定するまでには様々な要因が存在している（亀井，1997）。なお，2.3 では「不確かさを含む物理探査結果の評価」についてもまとめている。



①: 計画者判断の相違， ②: 力学的状態量の変化， ③: 調査・試験方法の相違
 ④: 調査・試験における人為的誤差， ⑤: 試験値の判断誤差
 ⑥: サンプル数による推定誤差

図 2.1.24 地盤定数評価におけるプロセスと誤差要因（正垣・日下部，1987 に加筆）

2.1.5 物理探査結果とボーリング結果との相違

物理探査は、土木地質調査において概略調査として利用され、ボーリング調査のような点での成果を補完する目的で実施される場合が多い。一方、ボーリング調査は、土木・建設分野で最も実施されている地質調査である。また、ボーリング孔を利用した原位置試験・検層やサンプリング及び室内試験を合わせて行うことで、各種構造物の目的に応じた地盤情報が獲得され、設計・施工に反映されている。物理探査結果とボーリング結果を比較する際には、最初に、それぞれの特徴を十分把握しておく必要がある。

物理探査は、地質や土質の物理量を測定して間接的に地盤性状を解析する調査技術であり、例えば、表 2.1.4 に示す物理探査法が土木・建設分野で利用されている。ボーリングは、実際に地盤を掘削する調査なので地下の情報を直接的に入手することができる。

物理探査法や調査目的によって、対象とする深度や必要とされる分解能が異なるので、ボーリング結果と比較する場合、それぞれの探査法の測定・解釈限界を理解した上で評価することが重要である。

ここでは、土木分野でよく利用されている屈折法地震探査結果とボーリング結果の比較事例について紹介する。

表 2.1.4 物理探査の対応深さと探査効率（全国地質調査業協会連合会, 2007）

探査手法	対応深さ			探査効率	備考
	～10m	～100m	100m～		
弾性波探査	○	◎	○	○	
浅層反射法		○	○	△	
表面波探査	◎	○		◎	起振器利用と多チャンネルの2方式
常時微動	○	○	△	○	
電気探査 (比抵抗法)	○	◎	○	○	
地中レーダ探査	◎	△		◎	
電磁探査	△	△	●	○	
音波探査		○	△	○	
(海上) 磁気探査	○	△	●	○	
(精密) 重力探査	△	△	●	○	
地温探査	△	△		○	赤外線熱映像法も含む
放射能探査	△	△		○	
ジオトモグラフィー		○	○	△	

注1) 対応深さ ◎:最適 ○:適 △:適用可 ●:主として資源探査で適用

注2) 探査効率 ◎:手軽に測定 ○:普通 △:大がかりに測定

① 屈折法地震探査結果が示す精度と分解能

図 2.1.25 は屈折法地震探査測線上でボーリング調査を行った事例を示している。断面 a)は、ボーリングが 3 本の場合（ボーリング間隔 50m）で、ボーリング結果による基盤面を点線で示し、弾性波探査による基盤面を赤実線で示した。一方、断面 b)はボーリングを 11 本行った場合（ボーリング間隔 10m）で、屈折法地震探査結果による基盤線は同様に赤実線で示している。

屈折法地震探査は受振点間隔 5～10m で行われるので、ボーリング 3 本の断面図 a)と比較するとより空間分解能が高く基盤面位置が解析される。仮に、同一断面内に密な間隔で 11 本のボーリングが行われている場合（断面 b）、基盤面の形状はより細かく表現される。この際、図 2.1.25 に示すようにボーリング結果から得られた基盤岩形状が屈折法地震探査結果と一致しない箇所が存在することがある。

この場合、屈折法地震探査で得られた断面図が間違っているということではなく、屈折法地震探査の解析精度の「限界を超えたことはわからない」（不確実性が大きくなる）ということを理解しておく必要がある。屈折法地震探査は、解析の過程において探査に用いた弾性波の波長と比較して、著しく小さい起伏に対してはこれを平均化した断面図が描かれる。屈折法地震探査結果とボーリング結果が一致しない箇所が生じる原因の一つとして、上記のように屈折法地震探査の解析精度を越えた箇所はその部分が平均化された構造として表されている状況があげられる。

② 探査結果およびボーリング結果が示す尺度

図 2.1.26 は、屈折法地震探査で解析された速度断面図と岩盤状況の概念図およびボーリング位置（A 孔、B 孔）を示している。岩盤状況図は説明をしやすいするため、ボーリング位置のほかに、速度層 $V_p=0.6\text{km/s}$ 、 1.2km/s 、および 1.8km/s の上面を赤点線で示した。

速度層 $V_p=0.6\sim 1.2\text{km/s}$ の風化部に注目すると、屈折法地震探査結果は深度方向に徐々に（一様に）速度が増加する傾向を示している。一方、ボーリング結果は、A 孔は土砂状コア、B 孔は短柱状コア主体であり、A 孔と B 孔で異なる岩盤状況を示している。この場合、どちらが「正しい・間違っている」ということではなく、調査の尺度が異なることを理解されたい。ボーリング調査は点の調査であるため、極端に地質性状が変化する場合、局所的な影響を受けやすい傾向がある。一方、屈折法地震探査は面的な調査なので、探査区間の平均的な岩盤状態を表現していると考えられる。

このように、物理探査結果とボーリング結果を比較する場合、それぞれの特徴を十分理解しておくことで、有効な地盤情報を得ることができる。物理探査結果は、地盤の物理量から間接的に地盤性状を表現したものであるため、探査精度や分解能を把握した上で、ボーリング結果が示す地質特性（風化の程度や地下水状態等）も考慮して評価されたい。

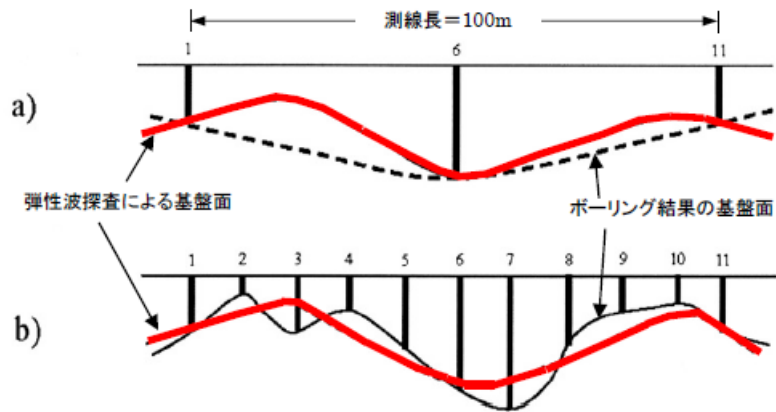


図 2.1.25 屈折法地震探査とボーリング結果の比較例 (吉田, 2010)

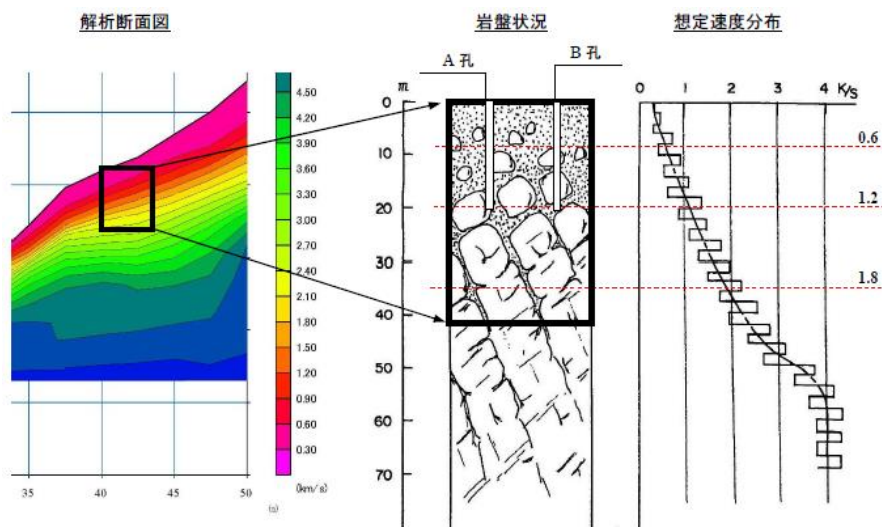


図 2.1.26 屈折法地震探査結果の速度分布と岩盤状況の概念図

2.2 物性評価の方法

2.2.1 岩石物理学に基づく複合解析の概要

近年、物理探査結果の解釈技術として着目されている岩石物理学 (Mavko et al., 1998) は、物理探査で得られる岩盤の弾性波速度や比抵抗などマクロな特性と間隙率や透水性といった工学的な特性との相互関係を、岩石粒子レベルのミクロなモデルに基づき理論的に説明する研究分野である。海外の石油や天然ガス鉱床の探査分野では、貯留層となる泥質砂岩を対象としたモデルに関する研究が精力的に行われている (Avseth et al., 2005)。図 2.2.1 に岩石物理学に基づく複合解析の基礎概念を示す。複合解析を行うためには、物理探査で得られる物性値 (主として弾性波速度と比抵抗) と工学的に重要な力学強度や水理特性など他の物性値との相関性を示す物理モデルが必要不可欠である。現状では一部の岩種を扱うモデルしか構築されていないため、検層や岩石試料で得られた物理探査で得られる物性値と地質工学的物性値がそろったデータを収集・整理して、モデル化の研究を進める必要がある。これらを扱うデータベースとして「ロックフィジックスデジタルライブラリ」

(高橋ほか, 2008) が整備されている。

複合解析は3種類に大別され、それぞれ一長一短を持つ(図2.2.2)。クロスプロット法は、例えば間隙率を横軸、弾性波速度を縦軸にとって得られる線形関数あるいは累乗関数の回帰式を用いる手法である。現地より採取した岩石試料の物理試験データおよび物理検層による計測データ量が十分あり、その地点に適用を限定すれば、同法でもおおよそその精度で解析を行うことができる。経験式に基づく方法はクロスプロット法より汎用性は高く数多く提案されているが、経験式を導出した岩種や地質条件を超えて利用することは難しい。岩石物理学に基づく手法が最も信頼性はあるが、その理論を構築するには様々な岩石試料に基づく膨大な実験データが必要となる。現状では一部の岩種に対するモデル化しか行われていない。

表2.2.1(鈴木, 2014)に国内において複合解析が試みられた適用例に対し、調査目的、根拠となる理論、評価したい岩盤物性、対象岩種により整理した一覧を示す。

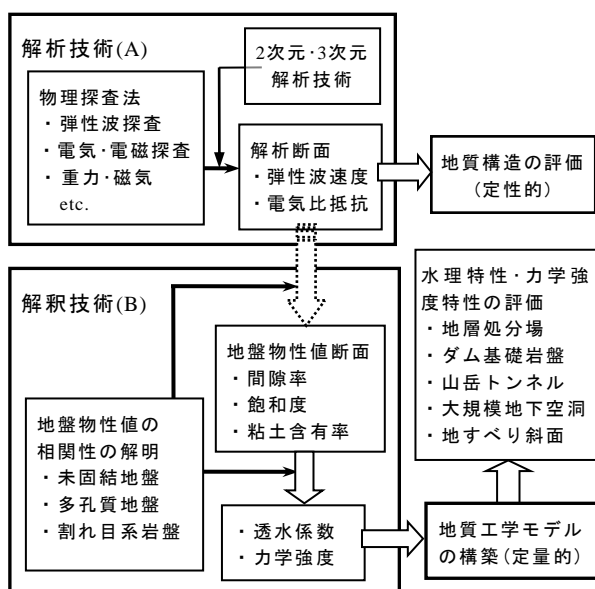


図 2.2.1 岩石物理学に基づく複合解析の概念 (鈴木, 2014)

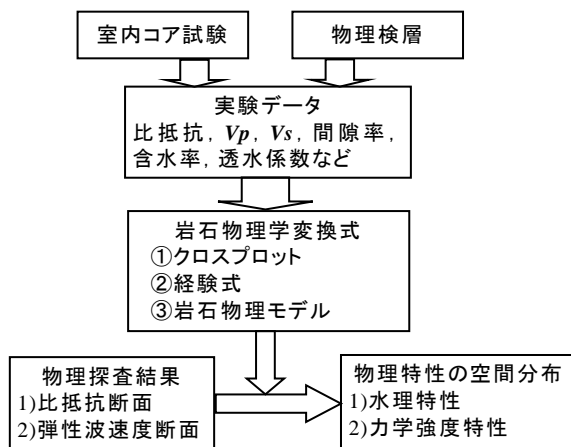


図 2.2.2 物理探査における解析と解釈の問題 (鈴木, 2014)

表 2.2.1 複数の物理探査法を併用した地盤物性評価に関する論文リスト (鈴木, 2014)

著者(年)	件名	対象岩種	探査データ	評価したい物性	理論
鈴木ほか, 2001	電気探査法・IP法・マイクロ重力探査法による石灰質埋立地盤の物理特性の評価について	土壌(盛土)	比抵抗, IP, 密度	含水率, 間隙率, 力学強度	実験式(間隙率, or 含水率—軸圧縮強度)
窪田ほか, 2012	物理探査法による地中送電線周辺の固有熱抵抗の評価(その5)—地中送電線埋設地点への適用—	土壌(未固結堆積物)	比抵抗, Vs	熱抵抗	実験式(電気比抵抗—熱抵抗, $D_{50}-V_s$)
楠見ほか, 2006	比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法	硬質岩盤	比抵抗, Vp	含水率, 間隙率	
楠見ほか, 2009	比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価法	硬質岩盤	比抵抗, Vp	含水率, 間隙率	アーチーの式+ウィリーの式
鈴木ほか, 2002	風化花崗岩表層の緩みと斜面内部への降雨の浸透—物理探査と実測データを用いた検討—	風化花崗岩	比抵抗, Vp	含水率, 間隙率	
羽竜, 2001	電気比抵抗—弾性波速度モデルによる地盤工学的特性の評価	火山岩(地すべり地)	比抵抗, Vp	含水率, 間隙率	Gassman-Biot model + Buggeman-Hanai model
羽竜ほか, 2003	電気比抵抗—弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定	花崗岩	比抵抗, Vp	変形係数, 透水係数	
高橋ほか, 2008	ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術に関する研究—岩石物性データの収集と予備的な岩石モデル解析—	堆積性軟岩, 花崗岩	Vp, Vs	間隙率, 粘土含有率	Friable Sand Model, Kuster-Toksoz モデル
小西ほか, 2007	堆積性軟岩地域の Rock Physics model	堆積性軟岩	Vp	間隙率	Friable Sand Model
高橋ほか, 2009	ロックフィジックスをベースにした浅層物理探査データの解釈技術に関する研究—堆積性軟岩の岩石物理モデル—	堆積性軟岩	Vp, Vs	間隙率, 粘土含有率	
高橋ほか, 2010	ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術に関する研究(その2)—堆積性軟岩の岩石モデル解析—	堆積性軟岩	比抵抗, Vs	間隙率, 粘土含有率→Ed, Es	二粒子岩石モデル
Takahashi et al., 2010	An attempt at soil profiling on a river embankment using geophysical data	盛土(河川堤防)	比抵抗+Vs	土質区分	Friable Sand Model
安藤ほか, 2010	二粒子モデルを用いた弾性波速度と電気伝導度の組合せ解釈	堆積性軟岩	比抵抗, Vp, (密度)	間隙率, 粘土含有率, 地下水比抵抗	
下山ほか, 2012	ロックフィジックスを用いた S 波速度と比抵抗の複合解析手法の検討	堆積性軟岩	比抵抗, Vs, (密度)	間隙率, 粘土含有率, 地下水比抵抗	二粒子岩石モデル
鈴木ほか, 2012	沿岸域堆積軟岩地点での物理探査データの複合解析—微動アレイ探査および電磁探査結果への適用—	堆積性軟岩	比抵抗, Vs, (密度)	間隙率, 粘土含有率, 地下水比抵抗	
西山ほか, 2013	間隙流体の挙動と縦波弾性波の分散特性の関係に関する研究	堆積岩, 花崗岩	P 波速度分散性	間隙率, 透水係数	Squirt flow + Biot 理論
佐々木, 1999	音響トモグラフィによるダム基礎の透水性の推定	硬質頁岩	P 波速度分散性	間隙率, 透水係数	

2.2.2 岩石物理モデルの基礎

岩石の比抵抗モデルとして、アーチーの式 (Archie, 1942) が 1940 年代より貯留岩における電気検層の解釈に使われてきた。弾性波速度モデルとして、岩石を構成する鉱物粒子、間隙中の地下水および空気の混合体とし、各相を波動が伝播に要する時間の平均式としてウィリーの式 (Wyllie, 1956) が提案された。これらは比較的簡易な経験式であり、比抵抗と弾性波速度から間隙率や含水率を算出し易い利点はあるが、適用可能な地質条件が限られることが知られている。

近年の岩石物理学に基づく手法の代表例として、堆積岩の P 波速度に関する物性値を扱った「二粒子岩石モデル」(Dvorkin et al., 2002) がある。これは、図 2.2.3 に示すように岩石を大小二種類の球状粒子の集合体として表している。大粒子を砂粒子、小粒子を粘土粒子とみなしており、砂粒子のみでパッキングされた場合の間隙率を ϕ_{ss} 、粘土粒子のみでパッキングされた場合の間隙率を ϕ_{sh} としている。このモデルでは、粘土含有率の増加に伴い間隙率が一旦減少し、その後増加する様子を、砂粒子の間を粘土粒子が埋めていく頁岩質砂岩 (図中の a~c) と砂粒子が粘土粒子に取り囲まれた砂質頁岩 (図中の c~e) の 2 通りの状態に分けて考えている。P 波速度は、同モデルに基づき間隙率および粘土含有率から算出できることを示している。

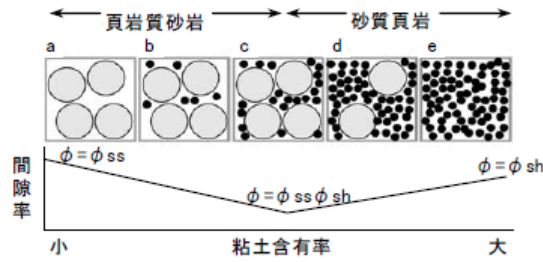


図 2.2.3 二粒子岩石モデルの概念 (Dvorkin et al., 2002)

2.2.3 クロスプロット法に基づく方法

石炭灰埋め立て地の力学強度を評価することを目的に、電気探査、電気探査 IP 法、重力探査を組み合わせる複合解析を行った事例がある (鈴木ほか, 2001). 石炭灰の未燃分 (炭素) の含有量により充電率が大きく異なる特性, および石炭火力発電所の燃焼炉と石炭の産地で区別して作成した供試体による物理試験や一軸圧縮強度試験結果から導かれた各種物性間の相関性を示す実験式に基づき、力学強度の分布が算出されている (図 2.2.4). また、都市部における地中送電線を埋設する未固結地盤の熱抵抗を評価することを目的に、比抵抗と S 波速度を組み合わせる熱抵抗の分布を求めた事例もある (窪田ほか, 2012). 土質ごとに供試体より求めた比抵抗と熱抵抗, および土質 (50% 粒径) と S 波速度との相関性を示す実験式に基づき熱抵抗が算出可能であることを示している. しかし、これらの実験式の精度には問題があり、今後の室内試験データの蓄積と物理モデルの構築が望まれる.

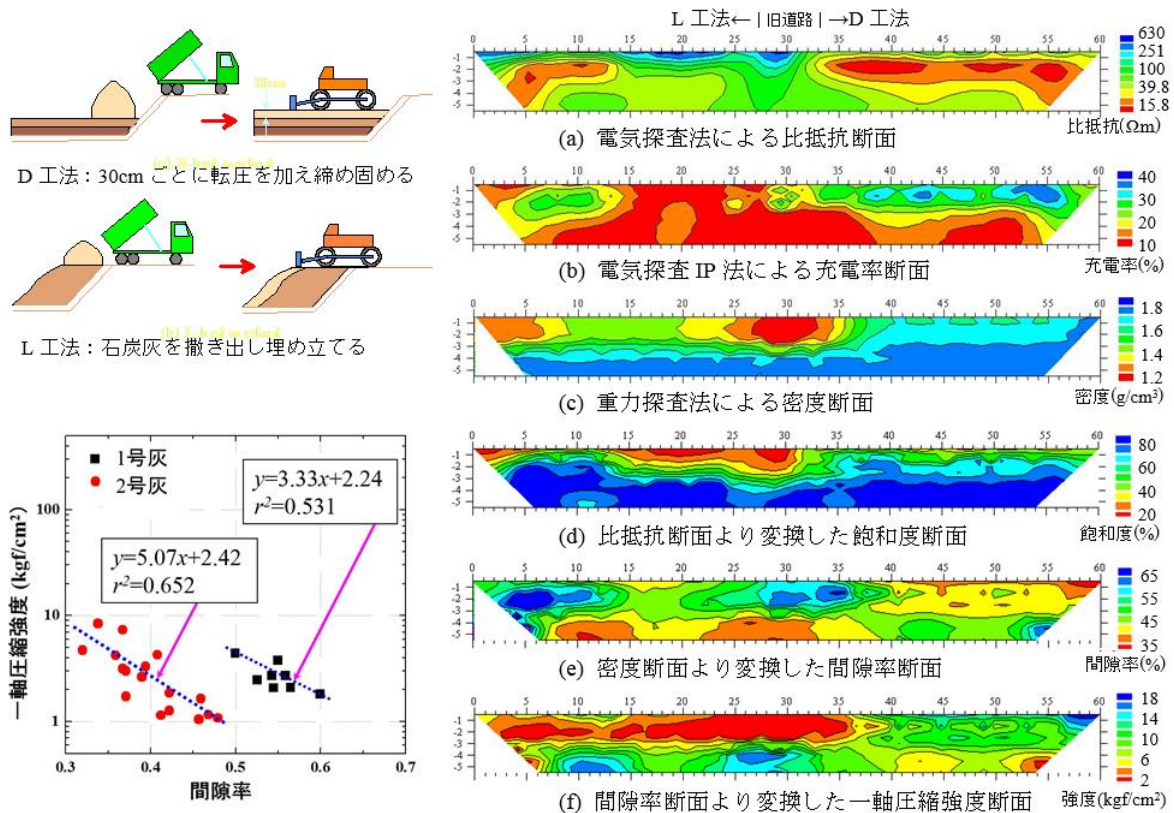


図 2.2.4 クロスプロット法による複合解析例 (石炭灰埋め立て地での適用事例) (鈴木ほか, 2001)

2.2.4 経験式に基づく方法

国内では最初に、比抵抗と弾性波速度（P波）を組み合わせ、比較的簡易に扱えるアーチーの式とウィリーの式に基づき、間隙率と含水率の分布を算出する試みがなされた（楠見ほか, 2006; 2009; 鈴木ほか, 2002）（図 2.2.5）。これらはトンネル掘削予定ルートや滑動斜面などにおいて、複合解析で得られた間隙率と含水率の分布から数値的指標に基づき岩盤等級を区分し、設計・施工に役立つ情報を提供することを目的としている。しかし、アーチーの式は淡水条件（Katsube et al., 1983）、ウィリーの式は未固結堆積物や軟岩では適用が難しいため（南雲, 1957）、本手法は海水域の比較的硬質な岩盤に限定される。

さらに一般的な適用性を考慮し、弾性波速度に関するモデルにガスマン-ビオの理論式（Gassmann, 1951; Biot, 1956）、比抵抗に関するモデルに Bruggeman-Hanai の理論式（Bussian, 1983）に基づく複合解析が試みられている。花崗岩地点においては、岩石試料・物理検層・孔内透水試験データにより求められた比抵抗および弾性波速度と間隙率あるいは透水係数との関係式に基づき、電気探査と弾性波探査結果を組み合わせ、間隙率や透水係数の分布が算出されている（羽竜, 2001; 羽竜ほか, 2003）。

2.2.5 岩石物理モデルに基づく方法

粒子間の膠着度の小さいモデルとして提案されている Friable Sand Model (Dvorkin, 1996) を用いた計算値と、海外 2 地区と国内の泥質岩地点で行われた検層データによる測定値とを対比した研究例がある（小西ほか, 2007）。これら 3 地区のデータは地域も深度も異なるにもかかわらず、同じモデルで説明できることが示されている。また、花崗岩を対象に亀裂がランダムに分布する岩石を想定し、亀裂の形状を示すアスペクト比を考慮した Kuster-Toksoz モデル（Kuster et al., 1974）を用いることにより、弾性波速度と間隙率の関係が説明できることを示した例もある（高橋ほか, 2008）。

国内の堆積性軟岩地点で得られた PS 検層データを用いて、拘束圧依存性を考慮できる二粒子岩石モデルに基づき、間隙率と粘土含有率が精度良く予測できることを示している（高橋ほか, 2009）。また、変形係数（静的ヤング率）も算出できる可能を示している（高橋ほか, 2010）。

同じく二粒子岩石モデルに基づき、P波速度あるいはS波速度と比抵抗を組み合わせ、地下水の電気伝導度の分布を予測する研究も行われている（安藤ほか, 2009; 下山ほか, 2012）。

浅部地盤への適用例としては、表面波探査や微動アレイ探査により得られる S 波速度構造と電気探査により得られる比抵抗構造を組み合わせたものであり、Friable Sand Model に基づき、河川堤防の土質区分を定量的に評価する試みである（Takahashi and Yamamoto, 2010; 図 2.2.6）。また、沿岸域堆積性軟岩地点での塩淡境界を評価することを目的に、S波速度と比抵抗を組み合わせ、地下水の電気伝導度分布を算出する試みも行われている（鈴木ほか, 2012）。ただし、国内に分布する様々な堆積性軟岩に対し二粒子岩石モデルが適用できる岩種は限られると考えられ、今後は一般的な岩種に対するモデル化の研究が重要である。

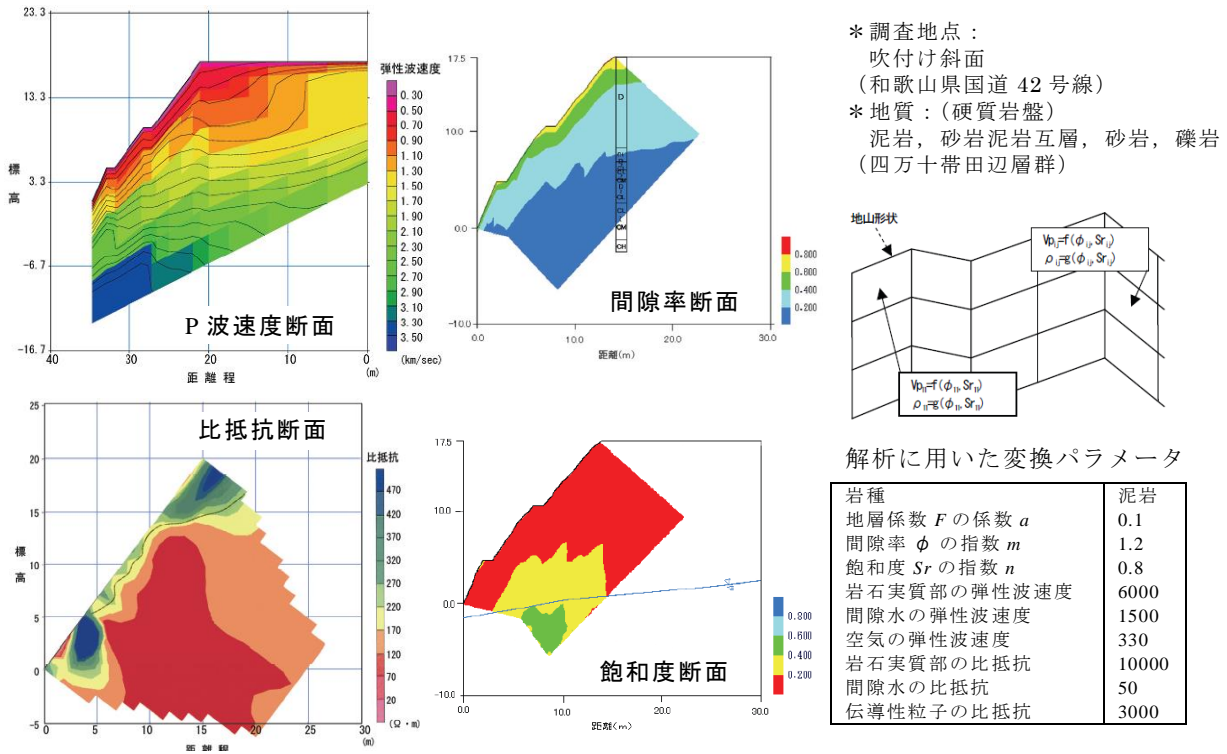


図 2.2.5 経験式による複合解析例 (硬質岩盤地点での適用事例) (楠見ほか, 2006)

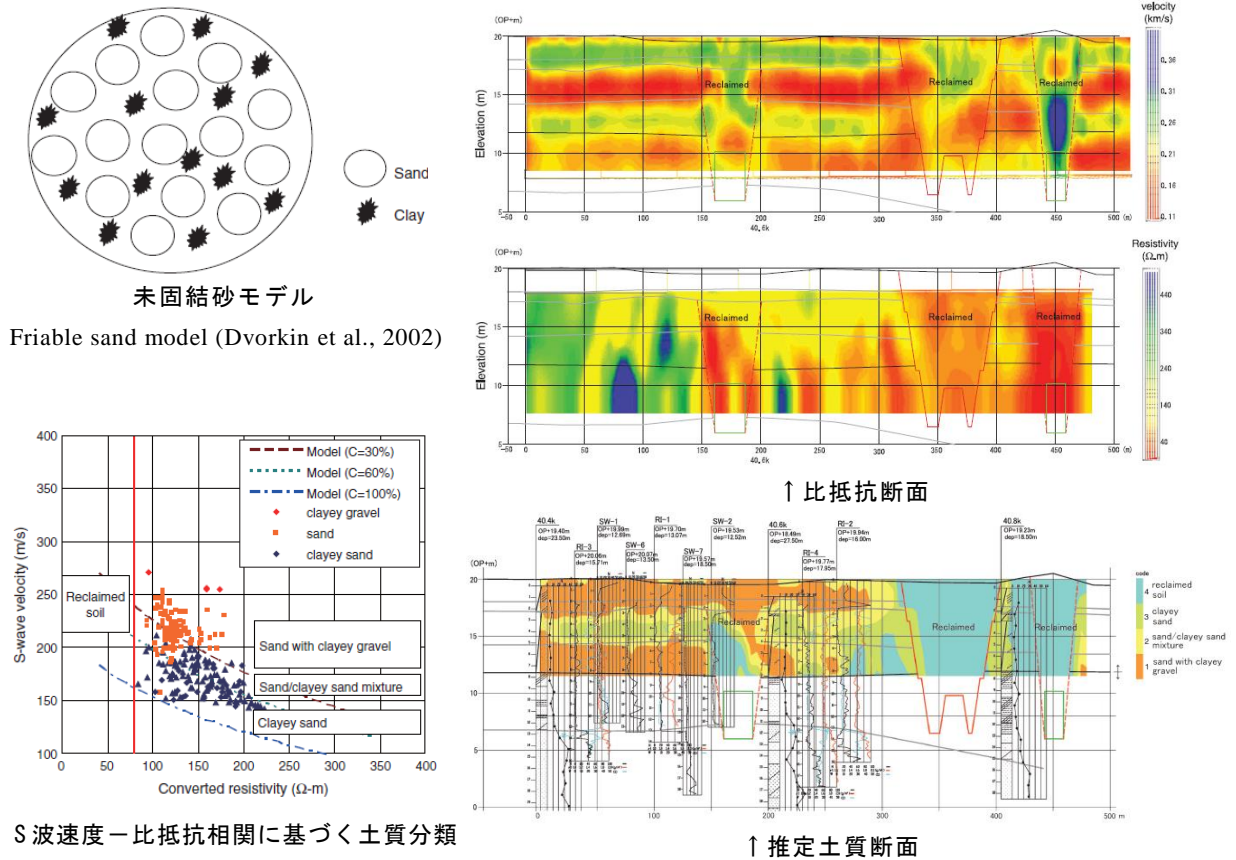


図 2.2.6 岩石物理モデルによる複合解析例 (未固結地盤での適用事例) (Takahashi and Yamamoto, 2010)

2.2.6 弾性波速度分散性に基づく方法

複数の物理探査法を組み合わせず単独の手法として、Squirt flow 理論とビオ理論 (Dvorkin et al., 1993; 西山ほか, 2013) に基づき、弾性波速度の分散性を利用して透水係数の分布を算出する音響トモグラフィが開発されている。圧電素子と疑似ランダム波を利用した振源により、通常の弾性波探査より1桁以上高い周波数を測定できるため、減衰率の測定と高分解能な探査を可能としている。地盤調査だけでなく高齡樹木の内部診断や鉄鋼材内の潜在亀裂の診断調査など他分野での実績も多い。一方、海外の堆積岩地点では透水係数分布を求めた事例は何件かある (Yamamoto et al., 1994; 1995)。国内での適用例はまだ少ないようであるが (佐々木, 1999)、堆積岩地点の坑道内壁面より掘削された水平ボーリングを利用して音響トモグラフィを実施し、壁面周辺のゆるみ域を可視化した事例はある (図 2.2.7; Suzuki et al., 2004)。

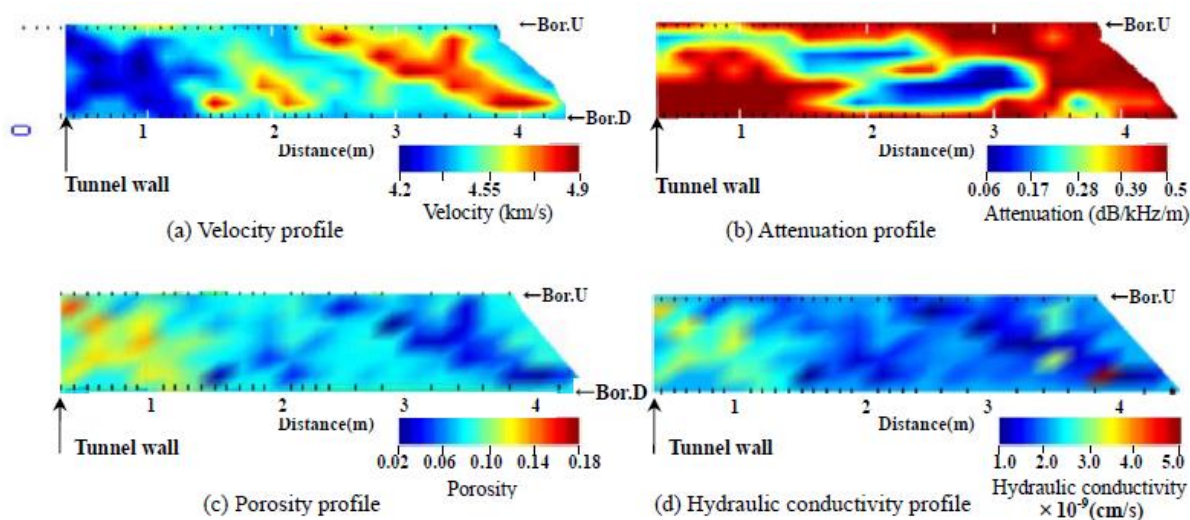


図 2.2.7 音響トモグラフィ法による P 波速度・減衰率・間隙率・透水係数の断面図 (Suzuki et al., 2004)

2.3 物理探査による地盤物性評価の課題と展望

物理探査結果から地盤物性を評価するにあたっては、物理探査の手法毎の分解能の違い、解析方法に起因する分解能の違い、キャリブレーションにおける不均質の大きさの取り扱い、といった「空間スケール」に起因する問題と、探査結果の不確かさと地盤本来のパラツキの取り扱い、信頼性設計に対する貢献といった「不確かさ」にかかわる事項が考慮すべき項目としてあげられる。それらに関する現状の課題や今後の展望について以下に述べる。

2.3.1 分解能の違い

物理探査によって得られる地盤物性分布の分解能は、適用する探査手法によって異なる。また、たとえ同じ探査手法を用いた場合でも、測定方法が異なれば分解能も異なる。さら

に、逆解析の中で設定する地盤モデルによっても最終的な物性断面のセルサイズが異なってくる。したがって、複数の探査手法を用いる統合物理探査では、分解能が異なる複数の物性断面図をどのように取り扱うべきか、という課題がある。たとえば、ある探査では高密度でデータ取得し高分解能な物性断面が得られたにも関わらず、もう一方の探査ではデータ密度が疎なデータ取得しかできなかった場合を考えてみる。この場合、空間的な分解能は犠牲にして信頼性の高いデータだけを利用するという考え方もあるが、複数の物性間の相関関係や理論的な関係を用いて物性値を内挿する方法や、地球統計学的な手法によって空間的に補間することで高分解能なデータを有効活用する方法が考えられる。このような考え方が今後は重要になってくる。

2.3.2 キャリブレーション

物理探査で得られる物性値は、測定結果から逆解析によって推定した値である。周知のとおり、逆解析によって得られる解は唯一解ではないため、正しい物性値を得るためには、なんらかのキャリブレーションが必要となる。キャリブレーションデータとしては、ボーリング調査による柱状図・室内試験・原位置試験・検層結果等が用いられることが多いが、河川堤防調査においては、開削調査の結果を利用できる場合もある。このような、いわゆる Ground Truth データを利用することは正しい物性値を得るために必要であるうえ、取得したデータの信頼性を向上させるためにも非常に重要である。しかしながら、キャリブレーションにも注意が必要である。すなわち、物理探査と室内試験では対象とする空間的なスケール（分解能）が異なるため、非常に不均質な地盤の場合には、室内試験で得られる10cm程度の範囲の物性値と、物理探査で得られる数m程度の範囲の物性値が大きく異なる場合があるためである。たとえば、図2.3.1（左）のように非常に不均質な物性分布を

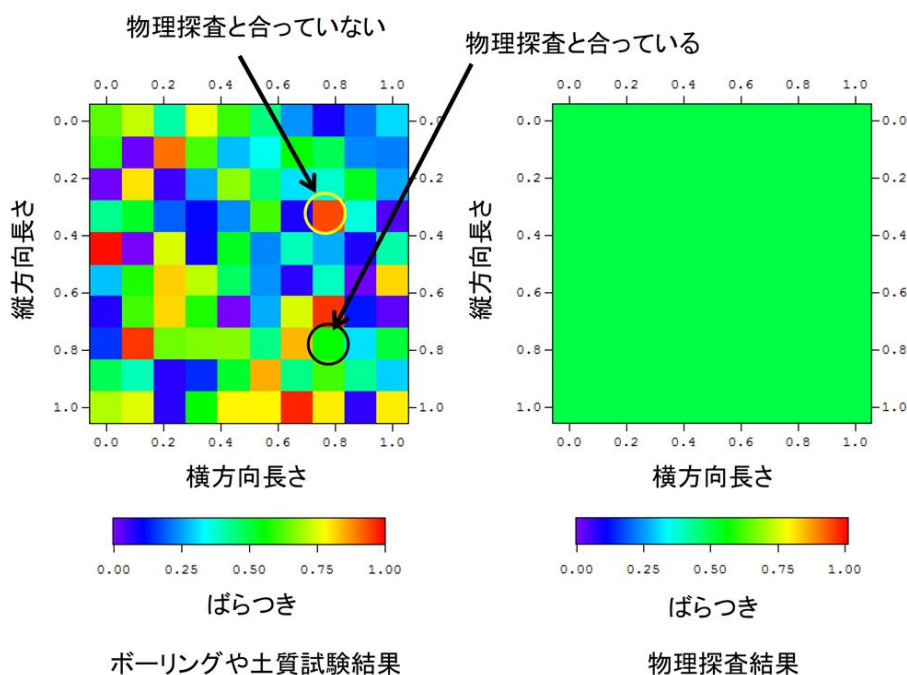


図 2.3.1 室内試験と物理探査で評価する空間的なスケールの違い

考えた場合、ボーリングや室内試験では各セルの値を測定できるが、物理探査ではこれらを平均化した図 2.3.1 (右) のような値が測定されていると考えることができる。この場合、室内試験結果と物理探査結果を比較すると、ある場所では両者は整合しているが、別の場所では全く異なる値を示すことになる。この図はやや誇張した表現ではあるが、実際には類似したことが起こっていると思われる。両者の違いを意識し、同様なスケールでの比較ができることが望ましいが、そのためには、アップスケールやダウンスケールといった処理についての研究が今後さらに必要になると思われる。

2.3.3 物理探査結果の不確かさの評価

測定データの S/N、ノイズ状況、逆解析の非一意性、地盤の物性値と測定データの対応の非一意性といったさまざまな要因により、物理探査の結果には必ず不確かさが含まれる。そのため、物理探査結果を利用する側である発注者や物理探査以外の技術者には、“不確かな（不審な）結果”として捉えられることがある。物理探査は役に立たない、という不信感を生まないためには、その不確かさを数値化して定量的に示すことが重要である。その際、単純に探査結果のばらつきを示すのではなく、探査結果の不確かさが本来の調査目的に対しどの程度の影響があるかを示すことが重要である。例えば地下水シミュレーションの場合、地下水水頭の予測結果に対し、地盤モデルの元となる物理探査結果の感度を求めておくことで、予測に必要な探査結果の精度がわかり、さらに用いた結果の妥当性も示せるはずである。これは、実際の調査の目的に必要な不均質の大きさを知ることにもなり、2.3.2 で述べたキャリブレーションの問題とも関連する。

複雑な地盤解析を行う場合には、モンテカルロ法、**Sequential Simulation** といった方法で物理探査結果から予測される複数の入力地盤モデルを作成して、複数の解析結果から信頼幅等の評価を行うことも不確かさを含む物理探査結果の有効な利用法のひとつである。

比抵抗は土質とよい相関を示すことが知られているが、土質を粘土、砂、砂礫といったグループに区分しグループ毎の比抵抗の頻度分布をみると、多くの部分でオーバーラップしていることがわかる（島ほか、1995）。これは、比抵抗という連続値に対し土質の区分数が少なすぎるせいもあるが、比抵抗を変化させる要素が他に多くあることが主たる原因である。一般には、物理探査によって得られる測定値から一意的に他の物性を予測することはできない。このことは、物理探査データが不確かさを含んでいるということに他ならない。このように不確かさを含む物理探査データがもつ情報は、たとえば信頼性行列とベイズの定理を用いて示すことができる（Caers, 2011）。信頼性行列（表 2.3.1）は事前のシミュレーションによって得られ、これにベイズの定理を用いることで機械学習の分類における混同行列（Confusion Matrix）（表 2.3.2）が得られる。表 2.3.2 の混同行列は探査結果から土質を推定した例で、砂と判定したものの 75%は正しく判定されており、粘土と判定したものは 81%正しく判定されたということを示している。このようにして、不確かさを含む結果から判定された土質判定の信頼度を数値的に表すこともできる。

表 2.3.1 探査結果の信頼性（信頼性行列）（Caers, 2011）

		Real world is (A)				Real world is (A)	
		Sand	Clay			Sand	Clay
Data says (B)	Sand	1	0	Data says (B)	Sand	0.70	0.15
	Clay	0	1		Clay	0.30	0.85

表 2.3.2 物理探査データがもつ情報（混同行列）（Caers, 2011）

		Data says (B)				Data says (B)	
		Sand	Clay			Sand	Clay
Real world is (A)	Sand	1	0	Real world is (A)	Sand	0.75	0.19
	Clay	0	1		Clay	0.25	0.81

2.3.4 信頼性設計に対する貢献

本城（2015）において「地盤工学における信頼性設計法に関する研究の展望と課題」がまとめられているが、信頼性設計において考慮すべき要素として次の5点が挙げられている。

- ① 地盤パラメータの空間的バラツキのモデル化
- ② 空間的バラツキが構造物性能に与える影響評価
- ③ 地盤パラメータの統計的推定誤差
- ④ 地盤パラメータの変換誤差
- ⑤ 設計法のモデル化誤差

上記の要素のうち、①と③は、少ないボーリング調査で得られる地盤パラメータを空間的に展開する方法、あるいはその空間分布推定にかかわる誤差評価のことと考えられるが、もともとボーリングと比べるとはるかに空間的に広がりをもつデータを取得できるのが物理探査の利点であり、物理探査データを活用することによって、これらに関わる課題の解決に貢献できるはずである。②については、実務においてどの程度のバラツキを把握することが必要か、ということの意味している。扱う問題によっては、室内試験レベルの小さなスケールの不均質が重要な場合もあれば、場合によっては物理探査で扱うような比較的大きなスケールの不均質がわかれば十分な場合もあるため、ここでも物理探査による貢献が期待できる。④については、N値と変形係数の関係が例として挙げられているが、物理探査で得られるパラメータから地盤工学に必要なパラメータに変換する場合でも同様の議論があると思われる。

このように、物理探査結果を活用することで、信頼性設計における課題の解決に貢献できると考えられる。

2.3.5 資源分野での不確かさの取り扱い事例

資源探査分野では、以前から不確かさを含めた解析結果が示されている。例えば、Mukerji et al.（2001）は、地震波探査のインバージョンによって得られた音響・弾性インピーダンス結果から岩相を判定する際、それぞれの岩相の存在確率として表し、図 2.3.2 のように

80%以上の確率で石油を含む砂岩の分布位置を示している。また Grana and Rossa (2010) や Grana et al.(2012)は地震波探査のインバージョンに地球統計学的手法やベイズ統計、さらに岩石物理のモデルを組み込んで地下の岩相分布や間隙率分布を得ている(図 2.3.3)。一般的な地震探査の逆解析では、地震探査結果から地震波属性を逆解析によって求めた後、その地震波属性を他の貯留層特性へと変換するが、彼らの手法は逆方向からの解析である。つまり、地球統計学によって貯留層特性分布(貯留層モデル)を得て、それを岩石物理モデルによって地震波特性へと変換し、地震波形を計算する。計算された地震波形と観測波形が一致するまで貯留層モデルの修正をする逆解析を行う。この場合、不確かさは結果に直接的に表れるわけではないが、最終的に得られた結果は、不確かさを考慮した最適結果ということになる。このような逆解析の方法は、土木分野でも積極的に取り入れていくべきである。

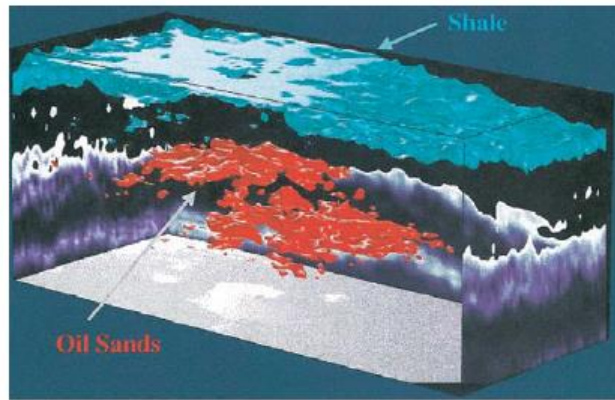


図 2.3.2 不確かさを含んだ探査結果の表示例(石油を含む砂岩がある確率が 80%以上の部分を赤く表示) (Mukerji et al., 2001)

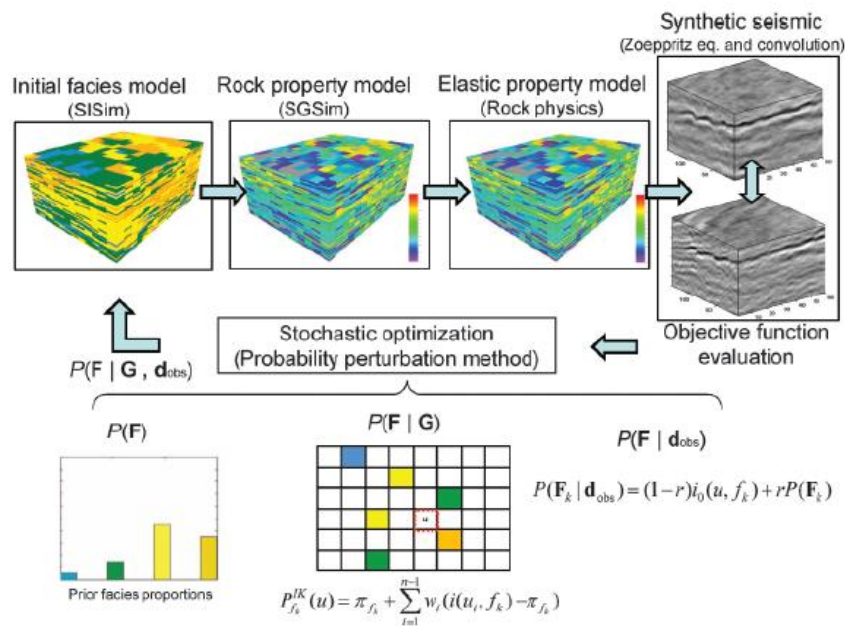


図 2.3.3 不確かさを含んだ探査結果の表示例(石油を含む砂岩がある確率が 80%以上の部分を赤く表示) (Grana et al., 2012)

引用文献

- 安藤 誠・東 宏幸・内田利弘 (2009): 二粒子モデルを用いた弾性波速度と電気伝導度の組合せ解釈, 物理探査学会第 121 回講演論文集, 87-90.
- Archie G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans, A. I. H. E.* **146**, 54-67.
- Avseth, P., Mukerji T. and Mavko, G. (2005): Quantitative Seismic Interpretation. *Applying Rock Physics to Reduce Interpretation Risk*, Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Avseth, P., A. Jørstad, A.-J. van Wijngaarden, and Mavko, G. (2009): Rock physics estimation of cementation, sorting and net-to-gross in North Sea sandstones: *The Leading Edge*, **28**, 98–108, doi: 10.1190/1.3064154
- Avseth, P., Mukerji, T., Mavko, G., and Dvorkin, J. (2010): Rock-physics diagnostics of depositional texture, diagenetic alterations, and reservoir heterogeneity in high-porosity siliciclastic sediments and rocks — A review of selected models and suggested work flows, *Geophysics*, **75**, No. 5, 75A31-75A47.
- Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, *Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 179-191.
- Bussian, A. E. (1983): Electrical conductance in a porous media, *Geophysics*, **48**, 1258-1268.
- 物理探査学会 (1989): 図解物理探査
- 物理探査学会編 (1990): “土と岩”の弾性波速度—測定と利用—, 物理探査学会
- 物理探査学会 (1998): 物理探査ハンドブック.
- 物理探査学会 (2005): 新版物理探査用語辞典, 愛智出版
- 物理探査学会 (2008): 物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル 2008—.
- 千葉昭彦・熊田政弘 (1994): 花崗岩及び凝灰石試料の比抵抗測定, 物理探査, **47**, 162-172.
- Caers J. (2011): *Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*, Willey-Blackwell.
- Dvorkin, J., and Nur, A. (1993): Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms, *Geophysics*, **58**, 524-533.
- Dvorkin, J., and Nur, A. (1996): Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two north sea datasets, *Geophysics*, **61**, 1363-1370.
- Dvorkin, J. and Gutierrez, M. A. A. (2001): Textural sorting effect on elastic velocities, part II: Elasticity of a bimodal grain mixture, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001*: 1764-1767.
- Dvorkin, J., Mavko, G., and Mukerji, T. (2002): Rock physics reservoir characterization - Approaches and methods tutorial -, Stanford University, S150-006.
- Gassmann, F. (1951): Elastic waves through a packing of spheres, *Geophysics*, **59**, 428-438.
- Grana, D., and E. Della Rossa (2010): Probabilistic petrophysical-properties estimation integrating statistical rock physics with seismic inversion, *Geophysics*, **75**, 3, O21–O37.
- Grana, D., T. Mukerji, J. Dvorkin, G. Mavko (2012): Stochastic inversion of facies from seismic data

- based on sequential simulations and probability perturbation method, *Geophysics*, **77**, 4, M53-M72.
- 羽竜忠男 (2001): 電気比抵抗－弾性波速度モデルによる地盤工学的特性の評価, 物理探査学会第 104 回講演論文集, 186-190.
- 羽竜忠男・西川 貢 (2003): 電気比抵抗－弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定, 第 32 回岩盤力学シンポジウム, 81-88.
- 林 宏一・斎藤秀樹・赤澤正彦, トンネル物理探査研究委員会 (2010): トンネル弾性波探査の高度化における解釈補助のためのデータベース及びソフトウェアの検討
- 本城勇介(2015): 地盤工学における信頼性設計法に関する研究の展望と課題, 地盤工学会誌, **63**, No.5, 1-5
- 今井常雄・麓 秀夫・横田耕一郎 (1975): 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第 4 回日本地震工学シンポジウム論文集, 89-96.
- 稲盛隆穂・羽藤正美・鈴木清史・佐伯龍男 (2010): 未固結堆積物のメタンハイドレート胚胎層の岩石物理モデル, 石油技術協会誌, **75**, 59-71.
- 地盤工学会 (1999): 地盤工学ハンドブック.
- 地盤工学会 (2009): 地盤材料試験の方法と解説.
- 地盤工学会 (2013): 地盤調査の方法と解説.
- 亀井健史 (1997): 室内試験結果の評価とその信頼性, 島根大学地球資源環境学研究報告 **16**, 1-20.
- Katsube T. J., and Hume, J. P. (1987): Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, *Geophysics*, **52**, 342-352.
- Katsube, T. J., and Hume, J.P. (1983): Electrical resistivities of rocks from Chalk River, *Proc. Ws. Geophys. Geosci. Res. at Chalk River*, 105-114.
- 高度情報科学技術研究機構 :
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=18-04-03-02, 2017/12/15.
- 小嶋 稔・小嶋美都子(1972): 岩石磁気学, 共立全書, 128.
- 小西千里・東 宏幸・Dvorkin, J.・萩沼正之 (2007) :堆積性軟岩地域の Rock Physics model, 物理探査学会第 116 回講演論文集, 141-144.
- 窪田健二・鈴木浩一・海江田秀志・山本隆喜・山口伸治 (2012): 物理探査法による地中送電線周辺の固有熱抵抗の評価 (その 5) -地中送電線埋設地点への適用-, 物理探査学会第 126 回講演論文集, 187-190.
- 楠見晴重・高橋康隆・中村 真 (2006): 比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法, 土木学会論文集, **62**, 603-608.
- 楠見晴重・山本 剛・中村 真 (2009): 比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価法, 第 38 回岩盤力学シンポジウム, 35-38.
- Kuster, G. T. and Toksoz, M. N. (1974): Velocity and attenuation of seismic waves in phase media, *Geophysics*, **39**, 567-618.
- 正垣孝晴・日下部治(1987): 地盤定数評価におけるプロセスと誤差要因, 土と基礎, **35**-1, 348.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (1998): *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University

- Press.
- 三木 茂 (2014), 物理探査学会統合物理探査調査研究委員会: 統合物理探査調査研究委員会の発足について, 物理探査学会第 130 回講演論文集, 95-98.
- Minato, S. (2002): Simple soil mass balance approach to interpret the distribution of global terrestrial gamma ray dose rates in relation to geology, *The science of the total environment*, **298**, 229-231.
- Mukerji, T., A. Jorstad, P. Avseth, G. Mavko, and J. R. Granli (2001): Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir: Seismic inversions and statistical rock physics, *Geophysics*, **66**, 988-1001.
- 南雲昭三郎 (1957): 砂岩を伝わる弾性波速度に関する研究, 地質調査所月報, **8**, 523-534.
- 日本応用地質学会 (1984): 岩盤分類, 応用地質特別号.
- 日本道路協会 (1999): 道路土工一のり面工・斜面安定工指針.
- Nishitani and Kono (1983) : Curie temperature and lattice constant of oxidized titanomagnetite, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **74**, 598.
- 西山 哲・佐野 修・伊藤久男・高橋 学 (2013): 間隙流体の挙動と縦波弾性波の分散特性の関係に関する研究, 地学雑誌, **122**, 170-191.
- 大久保彪・寺崎 晃 (1971): 岩石の物理的性質と弾性波速度, 土と基礎, **19**, 31-37.
- 大久保誠介・福井勝則・趙 顕 (1996): 数値計算による寸法効果の検討, 地質ニュース 507 号, 5-19.
- 岡崎健治, 倉橋稔幸, 茂木 透, 重藤迪子, 高井伸雄, 稲崎富士, 堀田 淳 (2014) : 河川堤防の比抵抗分布と S 波速度分布による構造的特徴と開削後の土質状況, 物理探査学会第 131 回学術講演会論文集, 63-66.
- 朴 三奎・松井 保(1998): 岩石比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, **51**, 201-209.
- 朴 三奎・藤原 寛・朴 美京・松井 保 (1999): 土の比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, **52**, 299-306.
- Saito, H., Nobuoka, D., Azuma, H., Xie, Z., Tanase, D. (2006): Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, *Exploration Geophysics*, **37**, 30-36.
- 下山みを・鈴木浩一・江波戸昌徳・小林貴幸・東宏幸 (2012): ロックフィジクスを用いた S 波速度と比抵抗の複合解析手法の検討, 物理探査学会第 127 回講演論文集, 139-142.
- 佐々木靖人 (1999): 音響トモグラフィによるダム基礎の透水性の推定, 平成 11 年度日本応用地質学会講演論文集, 175-178.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹編 (1995): 比抵抗映像法, 古今書院.
- 総合土木研究所 (2009): 最近の基礎設計に用いる地盤物性値, 基礎工, **37**, No.4.
- 鈴木浩一・・大家靖裕・山口寛大・野口康二 (2001) : 電気探査法・IP 法・マイクロ重力探査法による石炭灰埋立地盤の物理特性の評価について, 物理探査, **54**, 277-289.
- 鈴木浩一 (2002): 物理探査法による地盤の工学的物性値の可視化について : 地盤の透水係数を例として, 応用地質, **42**, 342-350.
- 鈴木浩一・伊藤栄紀・千木良雅弘 (2002): 風化花崗岩表層の緩みと斜面内部への降雨の浸透 - 物理探査と実測データを用いた検討 -, 応用地質, **43**, 270-283.

- Suzuki, K., Nakata, E., Minami, M., Hibino, E., Tani, T., Sakakibara, J., and Yamada, N. (2004): Estimation of the zone of excavation distribution around tunnels, using resistivity and acoustic tomography, *Exploration Geophysics*, **35**, 62-69.
- 鈴木浩一・佐藤浩章・近藤浩文・吉村公孝・江波戸晶徳・今井幹浩・小林貴幸 (2012): 沿岸域堆積軟岩地点での物理探査データの複合解析－微動アレイ探査および電磁探査結果への適用－, 物理探査学会第 127 回講演論文集, 143-146.
- 鈴木浩一(2014): 岩石物理学に基づく物理探査結果の解釈技術の動向－物理探査データに対する複合解析の適用－, 応用地質学会北海道支部平成 26 年度研究発表会講演予稿集, **34**, 27-30.
- Takahashi, I., (2000): Quantifying information and uncertainty of, rock, property estimation from seismic data: Ph.D. dissertation, Stanford University.
- 高橋 亨・田中荘一 (2008): ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術に関する研究－岩石物性データの収集と予備的な岩石モデル解析－, 第 37 回岩盤力学シンポジウム, 323-328.
- 高橋 亨・田中荘一 (2009): ロックフィジックスをベースにした浅層物理探査データの解釈技術に関する研究－堆積性軟岩の岩石物理モデル－, 物理探査, **62**, 437-446.
- 高橋 亨・田中荘一 (2010): ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術に関する研究 (その 2)－堆積性軟岩の岩石モデル解析－, 第 39 回岩盤力学シンポジウム, 184-189.
- 高橋 亨・稲崎富士 (2010): 地盤物性データベース「KuniJiban」整備を目的とした岩石物性データの収集と分析, 物理探査学会第 123 回学術講演会論文集, 9-12.
- Takahashi, T. and Yamamoto, T. (2010): An attempt at soil profiling on a river embankment using geophysical data, *Butsuri-Tansa*, **63**, 102-108.
- 高橋 亨・稲崎富士 (2013): 物理探査データを用いた河川堤防の浸透性の推定について, 物理探査学会第 128 回学術講演会論文集, 166-169.
- 高倉伸一 (1995): 新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗, 物理探査, **48**, 161-175.
- 高倉伸一 (2000): 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係, 物理探査, **53**, 415-426.
- 高倉伸一 (2009): 粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗－間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響－, 物理探査, **62**, 385-396.
- Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, **16**, 3, 574-582.
- 浦井 稔・山口 靖 (1988): 短波長赤外域に複数チャンネルを持つ航空機 MSS データのデータ処理, 物理探査学会第 78 回学術講演会論文集, 312.
- Wyllie, M. R., Gregpt, A. R. and Gardner, L. W., (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, **21**, 41-70.
- Yamamoto, T., Nye, T., and Kuru, M. (1994): Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry, *Geophysics*, **59**, 1530-1541.
- Yamamoto, T., Nye, T., and Kuru, M. (1995): Imaging the permeability structure of a limestone

aquifer by crosswell acoustic tomography, *Geophysics*, **60**, 1634-1645.

Y.ゲガーン・V.パルシアウスカス・西澤修・金川久一訳 (2008): 岩石物性入門, シュプリンガー
ジャパン.

横山秀吉・中塚勝人・阿部 司・渡部賢一(1983): 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下
温度への応用について, 地熱学会誌, **5**, 103-120.

吉田壽壽(2010): 山岳トンネル地質調査としての弾性波探査の適用, 物理探査, **63**, 289-309.

一般社団法人全国地質調査業協会連合会(2013): 地質調査業務発注ガイド, 21.

社団法人全国地質調査業協会連合会(2007): 防災・維持管理分野における物理探査の適用.

3. 統合物理探査の適用例

3.1 調査事例の分析

本章では、建設分野の調査対象別に、統合物理探査および複数物理探査を実施した調査事例の収集を行い、その結果を基に統合物理探査や複数物理探査の適用性や課題等についての検討を行った。調査対象とする構造物は、以下の14項目とした。

- 1) トンネル
- 2) 盛土・堤防
- 3) 斜面・地すべり
- 4) 資源・地下水探査
- 5) 空洞・埋設物
- 6) 地震・防災
- 7) 地層処分
- 8) 遺跡
- 9) ダム基礎
- 10) 環境調査
- 11) 橋梁基礎
- 12) 鉄道構造物
- 13) 原子力基礎
- 14) その他

複数探査、統合探査の調査事例として、既存の発表文献、発表を元に事例収集を行った。公開のし易さから学会等での発表事例を対象とすることとして、土木学会年次学術講演会、物探学会誌掲載論文、日本応用地質学会研究発表会、地盤工学会研究発表会、全地連「技術フォーラム」の5つを対象とし、2000年以降の発表事例を調査対象とした。この結果、収集した事例は合計160件であり、そのうち統合物理探査は30件であった。収集した事例集を、巻末に一覧表としてまとめる。今回収集した事例について、調査対象別に分類したグラフを図3.1.1に示す。事例の多い調査対象は、多い順にトンネル18%、盛土・堤防16%、斜面・地すべり11%、資源・地下水9%、空洞・埋設物9%となった。調査対象別の統合物理探査の件数を表3.1.1に示す。事例が10件以上のものでは、盛土・堤防、地層処分、斜面・地すべりを対象とした事例が多く、トンネルや空洞・埋設物では件数に比べ統合物理探査の事例は少ないという結果であった。これらの中で比較的事例の多かった、トンネル、盛土・堤防、斜面・地すべり、資源・地下水探査、空洞・埋設物、地震・防災地下水、地層処分、遺跡、ダム基礎に関して、構造物毎に調査実績の分析を行った。その内容を以下

にまとめる。

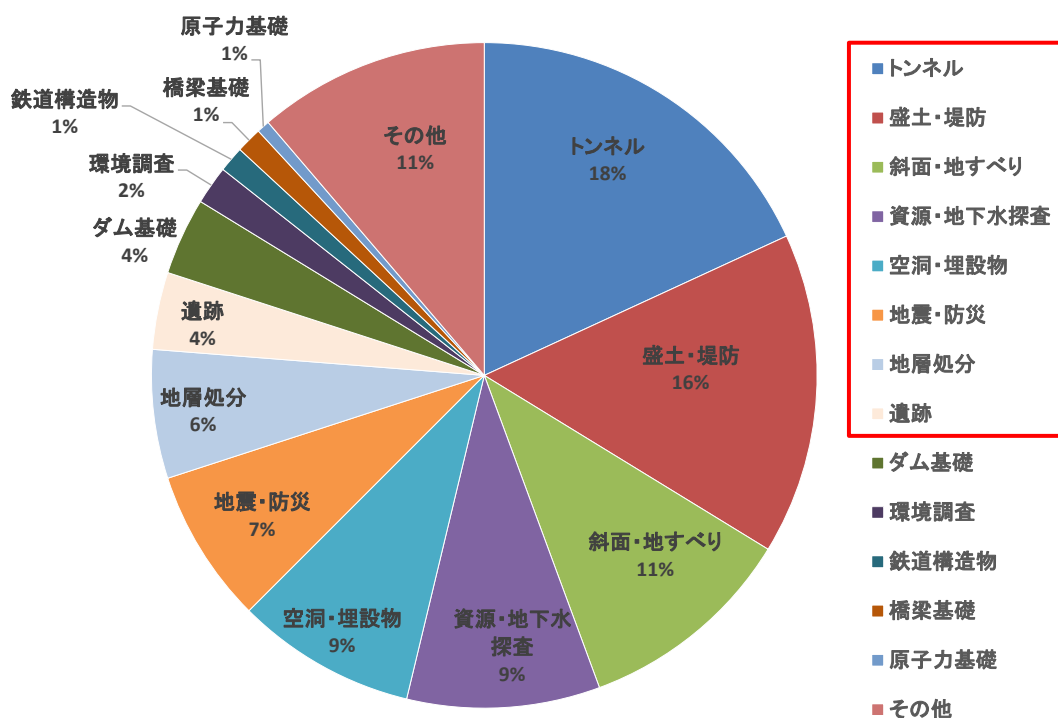


図 3.1.1 2種類以上の物理探査が適用された事例の調査対象別割合

表 3.1.1 調査対象別の統合物理探査の割合

対象	事例数	統合物理探査事例数	統合物理探査の割合 (%)
トンネル	29	3	10
盛土・堤防	25	8	32
斜面・地すべり	17	4	24
資源・地下水探査	15	4	27
空洞・埋設物	14	2	14
地震・防災	12	0	0
地層処分	10	3	30
遺跡	6	0	0
ダム基礎	6	1	17
環境調査	3	2	67
橋梁基礎	2	0	0
鉄道構造物	2	0	0
原子力基礎	1	0	0
その他	18	3	17
合計	160	30	19

3.2 複数物理探査と統合物理探査の構造物毎の事例

3.2.1 トンネルの事例

(1) トンネルにおける物理探査

トンネルは、地下深部に位置する線状構造物であることを特徴とする。このため、地山条件調査として、下記の特徴が指摘されている。

- ① 地上の条件や地下深部に位置するなどの制約により直接的な情報が得にくい
- ② 線状構造物であるため掘削対象区間を含む広範囲な地域を調査対象とする必要がある
- ③ 日本の特性として、地質構造が複雑で構成岩石が変化に富む

このため、十分な調査成果が得られないまま、設計、施工が行われる場合や、十分な調査を実施したつもりでも必ずしも全長にわたって満足できる精度で必要な各種条件を把握できていない場合があり、結果的に計画の大幅な変更や工事費の増大、工期の延伸等、不測の事態を招く場合が少なくなかった。このような調査の不足、不備による問題発生を未然に防ぎ、安全に予定通りの工事を進めるために、計画的かつ効率的に必要な基礎資料を得るように調査が実施される。

トンネルの地山条件調査は、計画から維持管理までの各段階で実施される（図 3.2.1）。また、各段階で適用される探査法を表 3.2.1 に示す。

路線選定時には、概査により、工区区分、掘削方法と掘削方式、工期・工費等を大きく左右する地山条件の全体的な把握を行う。物理探査法としては、リモートセンシング、弾屈折法地震探査、二次元比抵抗探査が実施されることが多い。この段階で併用される調査法としては、地形調査や地表踏査が挙げられる。

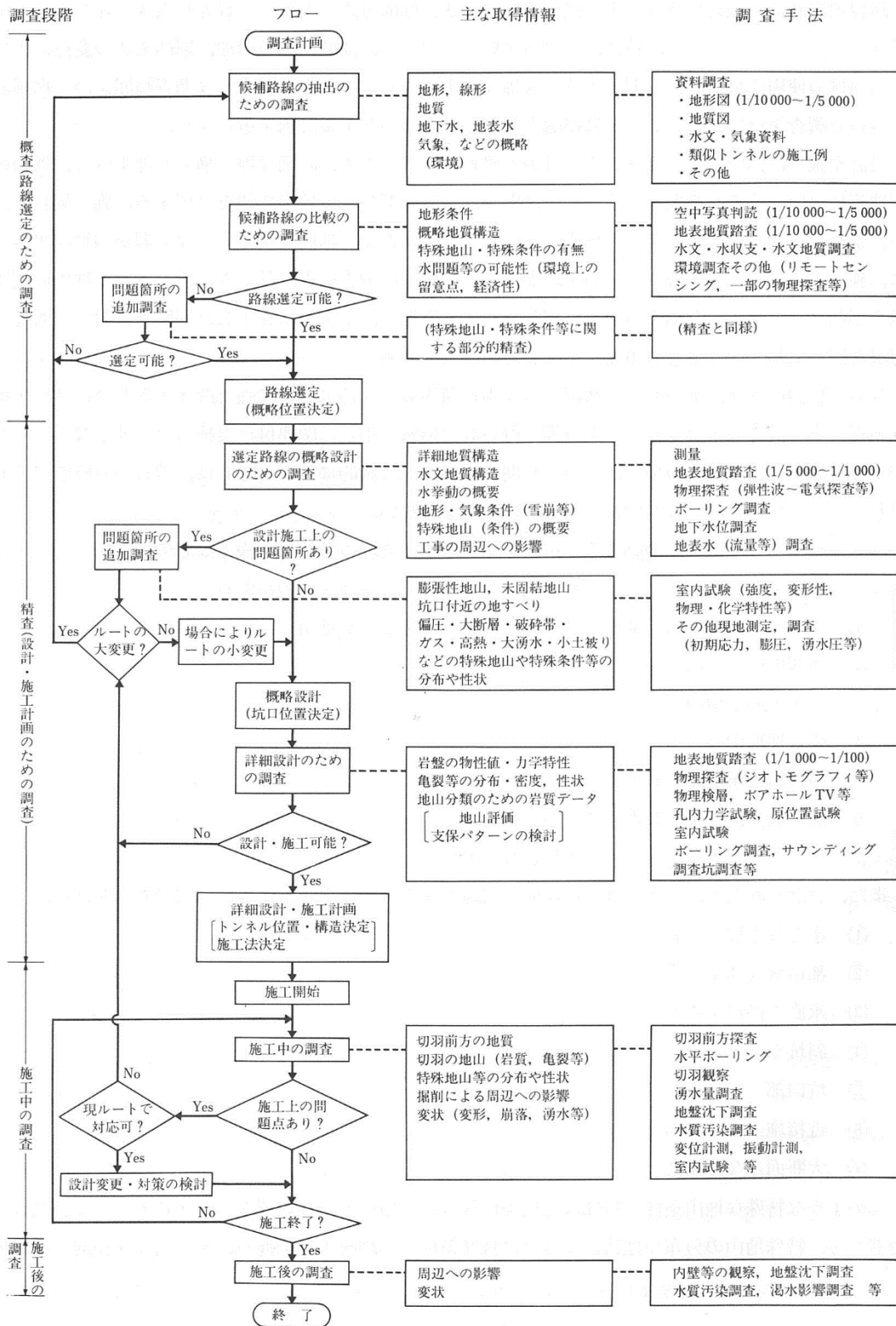


図 3.2.1 地山条件の調査の流れと調査手法および取得情報 (土木学会, 1996)

設計や施工計画時には、支保工の設計の基礎的資料を得るため、詳細な地質構造や地山区分、地山の物性等について、精査が必要となる。この段階で、設計に関与する地山性状を整理する。物理探査法としては、屈折法地震探査、二次元比抵抗探査の他、ボーリング調査との組み合わせで弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィが実施されることが多い。施工延長が長い、または土被りが大きいなどの理由で、この段階の調査では地山性状の十分な把握が困難な場合には、施工中の調査へと継続する。

施工段階では、施工前の調査結果に基づき、想定される地山の問題点や不明な点に対応した調査項目を整理した上で実施する。物理探査としては、坑内からの切羽前方探査が実施されることが多い。施工中に発生した問題点に対してもその解決を図るために必要に応じて迅速に追加調査を計画・実施する。

(2) トンネルにおける物理探査適用に関する文献調査結果

トンネルにおける統合および複数物理探査の事例は合わせて 28 件であった。そのうち、約 3 割が P 波速度と比抵抗の組合せであった。P 波速度や比抵抗は地山分類や破碎帯の分布の把握に有効であることが要因と考えられる。P 波速度を求める方法としては、屈折法地震探査が多く、比抵抗を求める手法としては二次元比抵抗探査、電磁探査の順が多かった。

トンネルにおける統合物理探査は 2 件のみであった。トンネルにおいて複数物理探査は多く実施されているにも関わらず、統合物理探査の適用に関する研究は進んでいないことが分かった。

以下にこの 2 例の概要を示す。

a) 弾性波・比抵抗を用いた統合探査事例

トンネルにおける弾性波・比抵抗複合探査としては、主に 2 つの方法が適用されている。1 つ目は、松井 (1995)、松井ほか (1995) に示された岩盤の比抵抗と P 波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係にあることを用いて、比抵抗から換算弾性波速度を求め、これに基づき地山分類を行う方法である (図 3.2.2)。2 つ目は、中村 (2003) に示された方法で、種々の岩石における比抵抗と間隙率、飽和度の関係を室内試験で把握し、現地で得られた P 波速度と比抵抗の測定結果を換算して求めた間隙率と飽和度によって地山分類や湧水箇所の評価を行う方法である (図 3.2.3)。

2000～2006 年まで複数の発表が認められたが、2006～2015 年までの文献調査結果では、中村 (2003) の変換解析をシステム化し現場検証を実施した楠見 (2006) と、このシステム化された方法を現場適用 (検証は未実施) した大久保ほか (2010) の合計 2 件が認められた (式(3.1)、式(3.2)、図 3.2.4、表 3.2.2、図 3.2.5)。

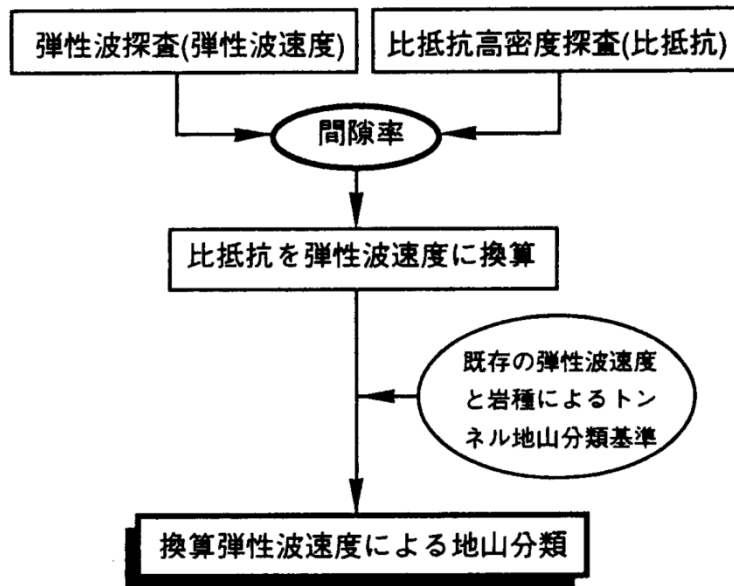


図 3.2.2 比抵抗と P 波速度の定量的評価による地盤分類フローチャート (松井, 1995)

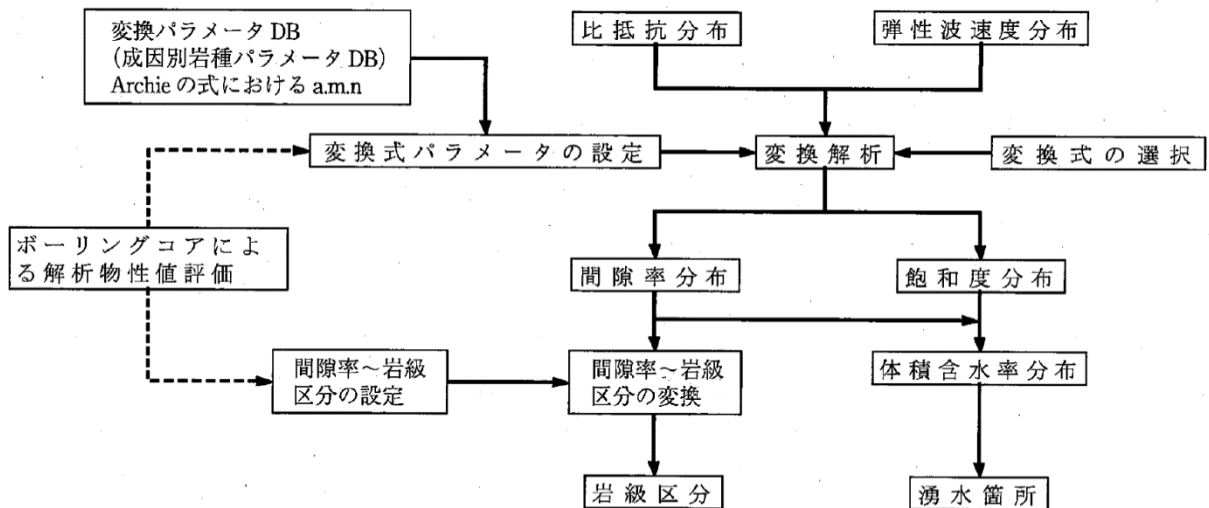


図 3.2.3 比抵抗と P 波速度による地盤構造評価システムのフロー (中村ほか, 2003)

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-\phi)}{V_m} + \frac{\phi \cdot S_r}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-S_r)}{V_a} \quad (3.1)$$

ここに、 V_p ：岩盤の弾性波速度、 V_m ：供試体の弾性波速度、 V_f ：空隙水の弾性波速度、 V_a ：空隙空気の弾性波速度、 ϕ ：空隙率、 S_r ：飽和度。

$$\rho = m \cdot S_r^{-B} \cdot \phi^{-n} \quad (3.2)$$

ここに、 ρ ：比抵抗値、 m 、 n 、 B ：地質の違いによる係数

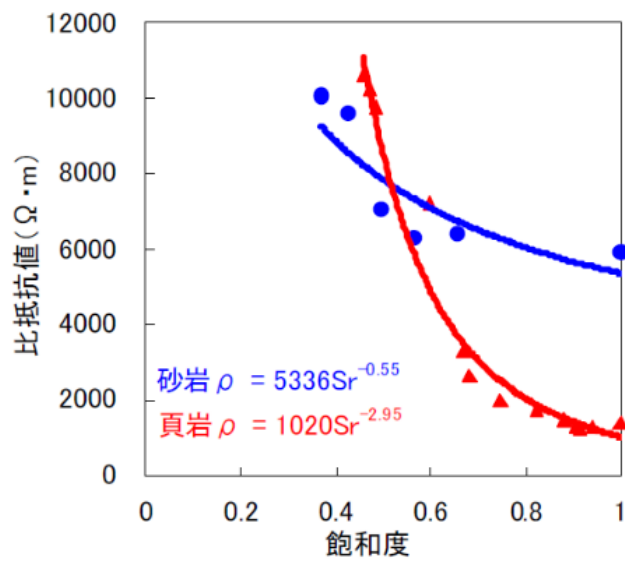


図 3.2.4 飽和度と比抵抗の相関関係 (大久保ほか, 2010)

表 3.2.2 測定パラメータ (大久保ほか, 2010)

岩種		砂岩	頁岩
変換パラメータ	m	4.72	4.72
	n	1.36	1.36
	B	0.55	2.95
弾性波速度 m/sec	岩石実質部	V_m	6700
	間隙水	V_f	1500
	空気	V_a	330

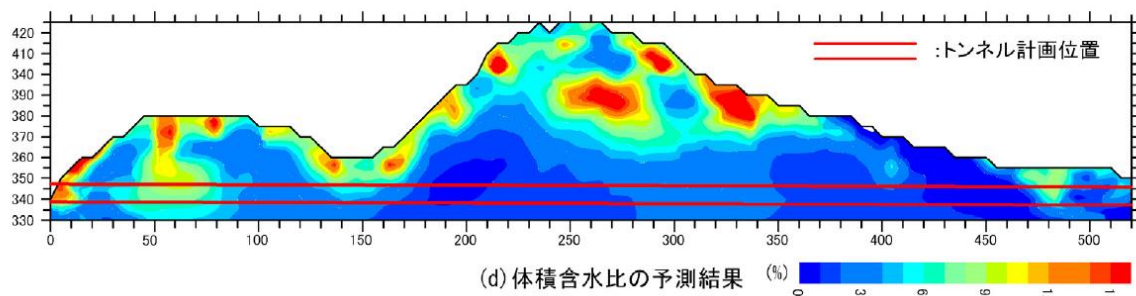
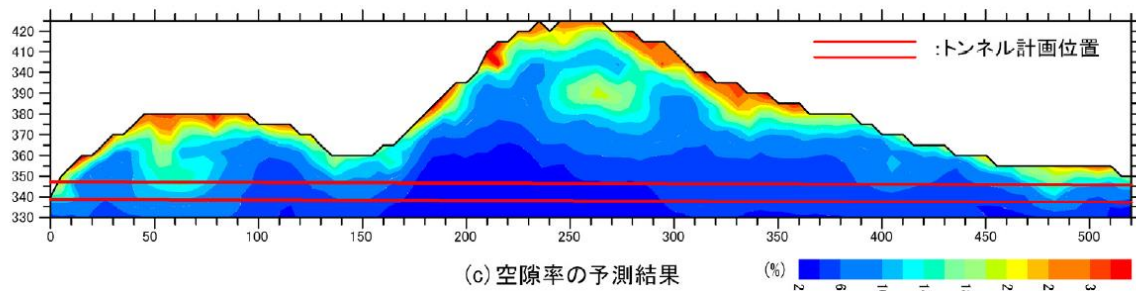
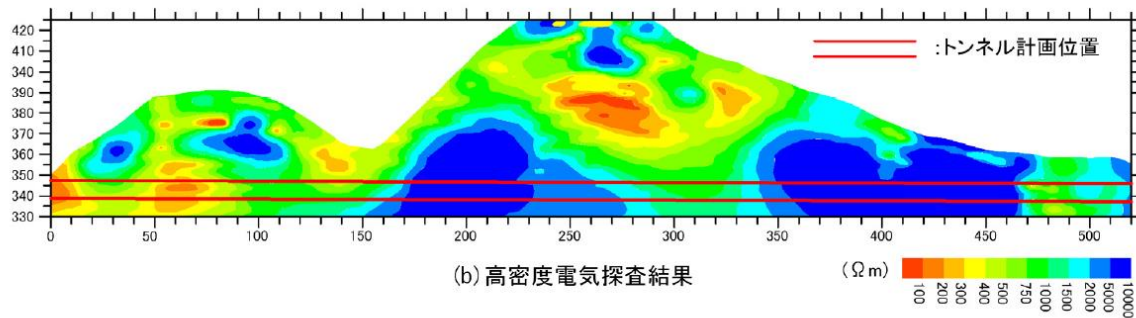
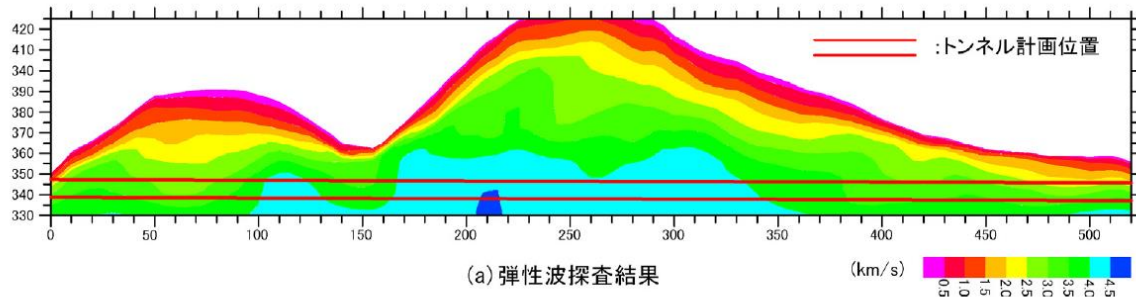


図 3.2.5 地山の空隙率分布と体積含水率分布の予測解析結果 (大久保ほか, 2010)

b) 削孔データ・P波速度を用いた統合探索事例

切羽前方探査の1つとして、削孔検層が多くの山岳トンネルで活用されている。削孔検層では、削孔中の機械データを用いて、削孔に必要なエネルギーなどの定量的な物性値を求め、地山評価に適用されてきた。ここで得られるエネルギーなどの物性値は、削孔条件の影響を受けるため、硬軟の指標にはなるものの、直接的な地山物性値を把握することが出来なかった。宮嶋ほか(2014)は、削孔検層によって削孔した孔を利用して地山のP波速度を直接的に測定できるシステムを開発した(図3.2.6)。本システムでは、削孔検層で

求めた破壊エネルギー係数と弾性波速度の相関性を事前に把握後、削孔検層で求めた破壊エネルギーを弾性波速度に読み換えた予測弾性波速度で地山を評価する。砂岩、頁岩が複雑に分布するトンネルにおいて適用し、補助工法の要否の判定が可能であることが報告された（図 3.2.7）。

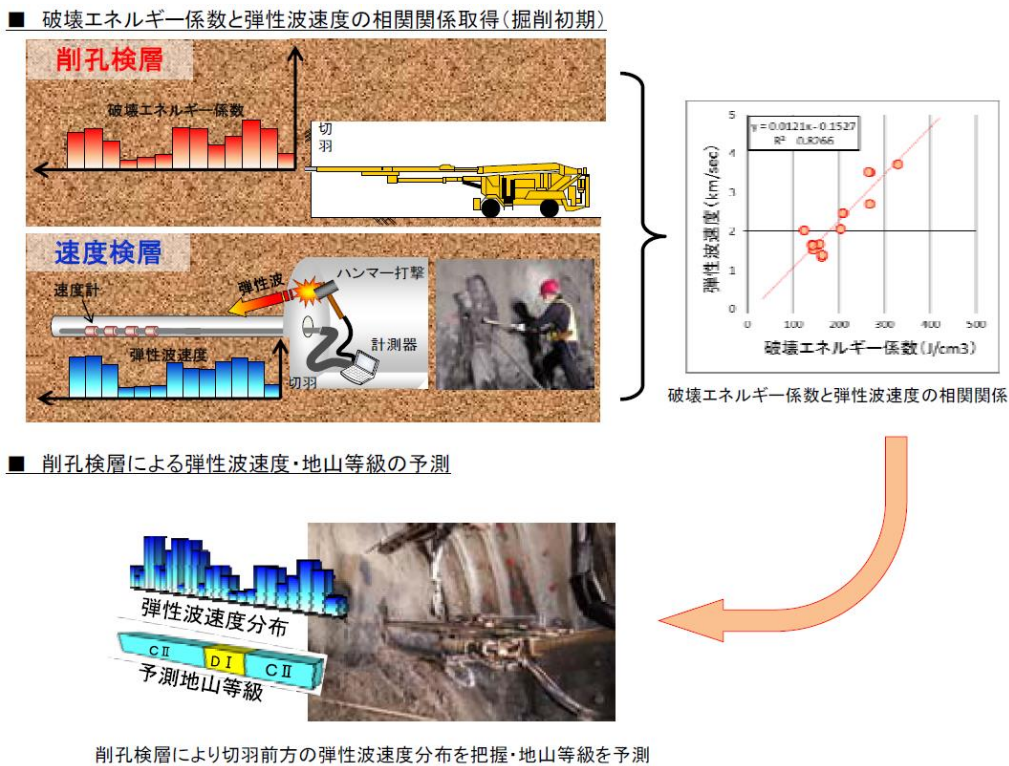


図 3.2.6 削孔データによるトンネル切羽前方の地山等級予測技術（宮嶋ほか，2014）

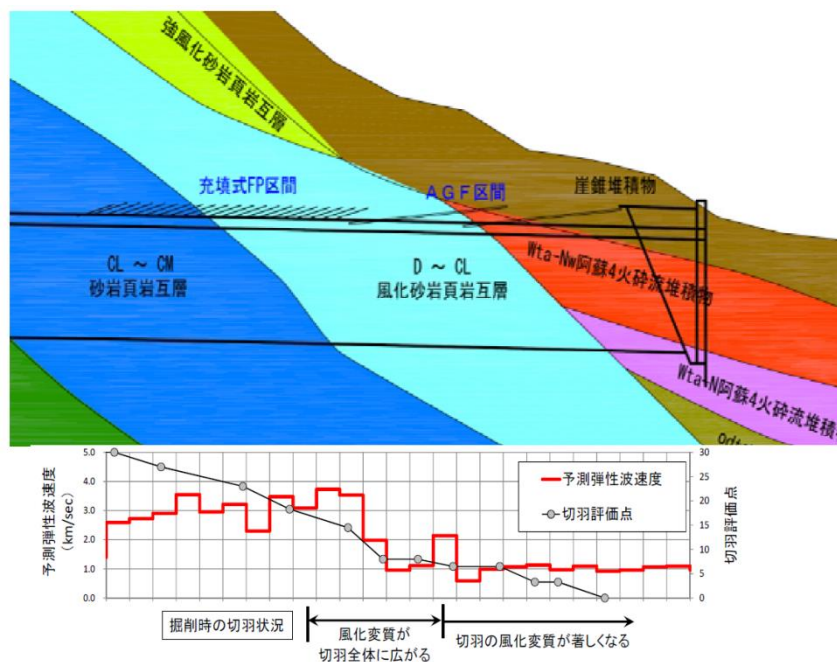


図 3.2.7 到達側の坑口部における適用事例（宮嶋ほか，2014）

3.2.2 盛土・堤防の事例

盛土・堤防における統合および複数物理探査の事例は合わせて 20 件の調査事例があった。そのうち 6 割の調査が S 波速度と比抵抗を求める組み合わせであった。S 波速度は N 値と相関が高く、強度をよく反映していること、比抵抗は細粒分含有率と相関が高く、土質構成をよく反映していることから、S 波速度を求める物理探査法が多く利用されていると考えられる。S 波速度を求める方法としては多チャンネル式表面波探査が多く、比抵抗を求める方法としては電気探査（二次元比抵抗探査・牽引式電気探査）、電磁探査の順が多かった。多チャンネル式表面波探査と電気探査の組み合わせで行われた調査は全体のおよそ半数を占めている。

今回集めた統合物理探査の事例の中で最も多かったのが堤防の事例である。堤防における統合物理探査は、2013 年に河川堤防の統合物理探査（土木研究所・物理探査学会（編）、2013）が出版され、多くの河川堤防で実施されてきている。表面波探査と牽引式電気探査により S 波速度と比抵抗を求め、両者のクロスプロット図（図 3.2.8）を作成し、S 波速度、比抵抗にそれぞれ閾値を設定して 4 象限に区分することで安全性の評価を行うものである。

最新の研究では、クロスプロット評価のように 4 象限に区分して評価するのではなく、岩石物理モデルを用いることで連続的な地盤物性値を算出し、安全性の評価を行う方法が提案されている。

小西ほか（2015）では S 波速度と比抵抗から粘土含有率と間隙率を推定し、これらの地盤物性から、ある危険度を定義し、危険度を連続値として評価している。同論文では、岩石物理モデルを用いることで、図 3.2.9 に示すような S 波速度および比抵抗と粘土含有率、間隙率の関係を表す理論的なクロスプロット作成している。この図に実際に得られたデータをプロットすることで、その時の粘土含有率および間隙率を得ることができる。図 3.2.10 は実データを適用して得られた土質分布および緩みの指標を表している。

さらに、粘土含有率と間隙率から計算される危険度（式(3.3)）を定義することで、連続的な危険度評価を提案している（小西ほか, 2015）。

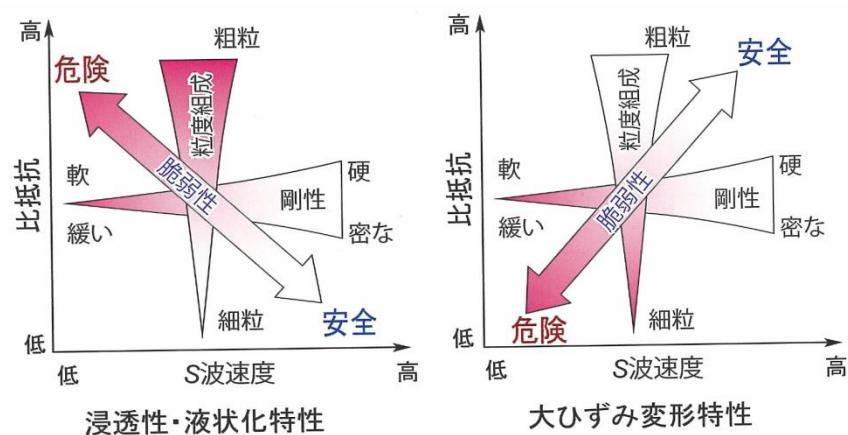


図 3.2.8 S 波速度と比抵抗のクロスプロットの定性的解釈（稲崎ほか, 2013）

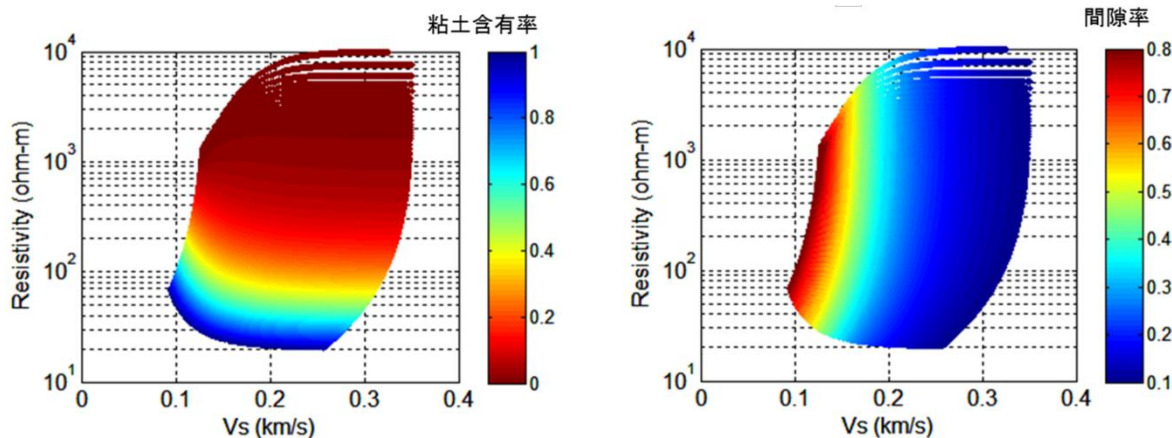


図 3.2.9 S 波速度および比抵抗値と粘土含有率の理論的なクロスプロット図（左），S 波速度および比抵抗値と間隙率の理論的なクロスプロット図（右）（小西ほか，2015）

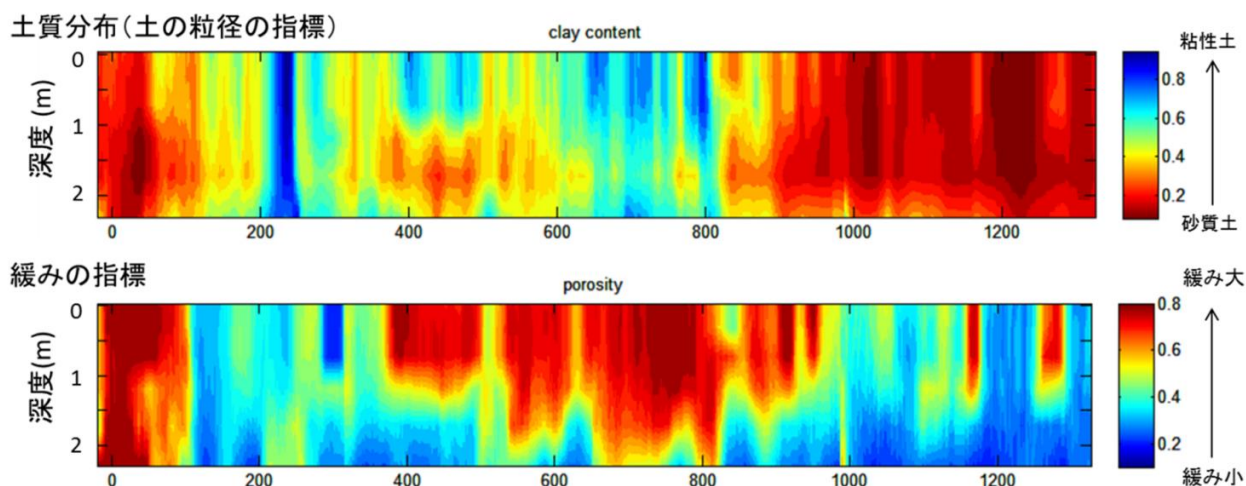


図 3.2.10 実データを用いて得られた土質分布（上）および緩みの指標（下）（小西ほか，2015）

さらに，粘土含有率と間隙率から計算される危険度（式(3.3)）を定義することで，連続的な危険度評価を提案している（小西ほか，2015）。

$$\text{Vulnerability} = \{ (1 - C)^2 \times \phi \} \times a \quad (3.3)$$

C ：粘土含有率， ϕ ：推定間隙率， a ：定数

図 3.2.11 の上段は 4 象限に分類する評価方法を示し，下段は岩石物理モデルを用いた連側的な危険度評価を示している。

また，高橋ほか（2015）は，比抵抗と S 波速度を組み合わせることで透水係数のプロファイルを算出する手法を提案している。同論文では，まず弾性波速度と間隙率の関係を表すため

にロックフィジックス分野で示されている未固結砂モデル (Avseth et al., 2005) を用いている。これは、図 3.2.12 で示すように、硬い砂粒子と柔らかい粘土粒子から構成されるものとし、粘土粒子の含有率を変化させる、あるいは間隙率を変化させることにより、異なる力学特性をもつ土壌を表している。次に、比抵抗は土の基質部と間隙水の両方を導電体と考える並列回路モデルの一つとして、Glover et al.の式 (2000) を使用している。これより、S 波速度と間隙率ならびに比抵抗と間隙率の関係は、粘土含有率を一つの制御パラメータとして表しているのので、この両モデルを組み合わせて S 波速度と比抵抗の関係式を得ることができる。

また、高橋ほか (2015) は、比抵抗と S 波速度を組み合わせて透水係数のプロファイルを算出する手法を提案している。同論文では、まず弾性波速度と間隙率の関係を表すためにロックフィジックス分野で示されている未固結砂モデル (Avseth et al., 2005) を用いている。これは、図 3.2.12 で示すように、硬い砂粒子と柔らかい粘土粒子から構成されるものとし、粘土粒子の含有率を変化させる、あるいは間隙率を変化させることにより、異なる力学特性をもつ土壌を表している。次に、比抵抗は土の基質部と間隙水の両方を導電体と考える並列回路モデルの一つとして、Glover et al.の式 (2000) を使用している。これより、S 波速度と間隙率ならびに比抵抗と間隙率の関係は、粘土含有率を一つの制御パラメータとして表しているのので、この両モデルを組み合わせて S 波速度と比抵抗の関係式を得ることができる。

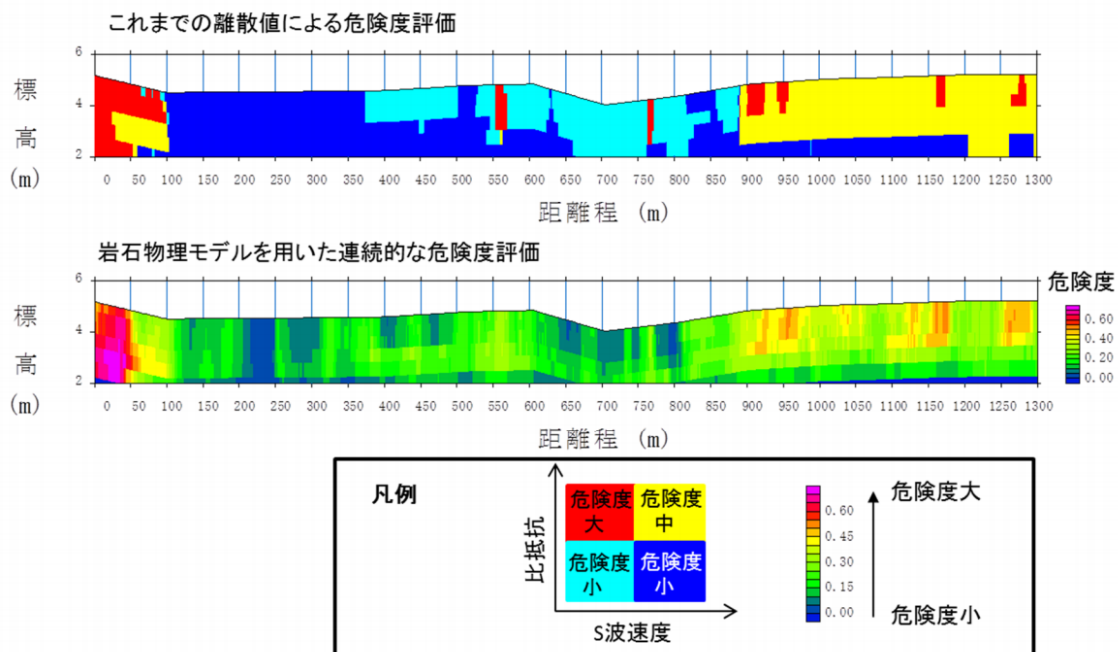


図 3.2.11 4 象限に分類する離散値による危険度評価 (上) と岩石物理モデルを用いた連続的な危険度評価 (下) (小西ほか, 2015)

実際に、河川堤防の不飽和土を想定して設定したパラメータ（表 3.2.3）を用いて、河川堤防調査でよく利用される S 波速度と比抵抗の間隙率との関係を計算し、それらを組み合わせ求めて S 波速度と比抵抗の関係を図 3.2.13 として示している。さらに、S 波速度と比抵抗により推定される間隙率と粒径から、Kozeny-Carman の式（Dvolkin et al., 2002）を利用して透水係数のプロファイルを推定するフロー（図 3.2.14）を提案している。本フローに基づき、物理探査法により得られる S 波速度と比抵抗の断面図から、粒径を推定し、透水係数のプロファイルを推定した結果を図 3.2.15、図 3.2.16 として示している。さらに、これらの結果は、堤防開削断面で採取した土質試料の室内試験による透水係数と一桁以内の精度で整合していることを示している。

この例のように、適切な物理モデルが与えられれば、複数の物理探査データから透水係数という工学的な物性値のプロファイルを推定することが可能となり、統合物理探査の活用が期待できる。

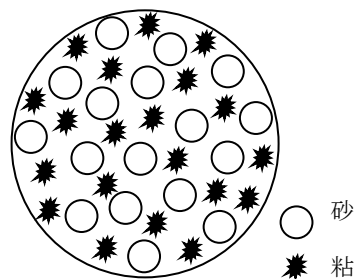


図 3.2.12 未固結砂モデル（Avseth et al., 2005）

表 3.2.3 計算に使用した物理特性（高橋ほか, 2015）

n	5	Coordination number
ϕ_c	0.8	Critical porosity of soil
K_{clay}	21.0 GPa	Bulk modulus of clay
G_{clay}	3.0 GPa	Shear modulus of clay
K_{sand}	36.6 GPa	Bulk modulus of sand
G_{sand}	45.0 GPa	Shear modulus of sand
K_{air}	0.00015 GPa	Bulk modulus of pore fluid (air)
ρ_s	1400 kg/m ³	Density of soil
ρ_f	1.2 kg/m ³	Density of pore fluid (air)
P	1×10 ⁻⁶ GPa	Confining pressure
R_{clay}	20 Ωm	Resistivity of clay
R_{sand}	10,000 Ωm	Resistivity of sand
R_f	1×10 ¹⁴ Ωm	Resistivity of pore fluid (air)
m	1	Cementation factor

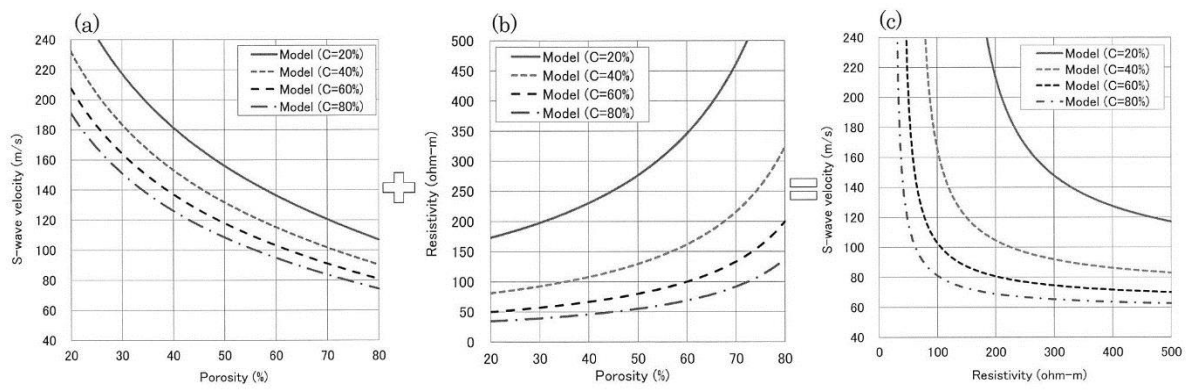


図 3.2.13 S 波速度と間隙率の関係 (a) と比抵抗と間隙率の関係 (b) より求められる S 波速度と比抵抗の関係 (c) (高橋ほか, 2015)

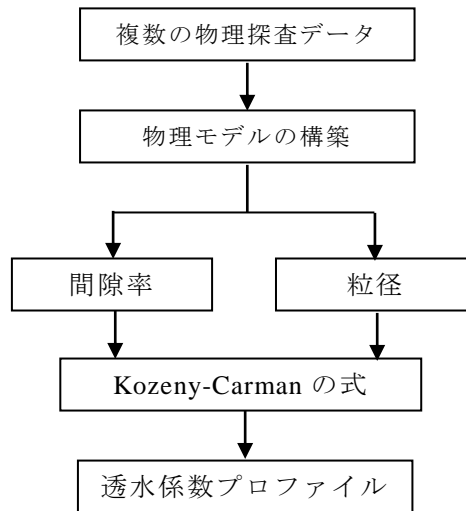


図 3.2.14 物理モデルに基づく複数の物理探査データによる透水係数プロファイルの推定フロー (高橋ほか, 2015)

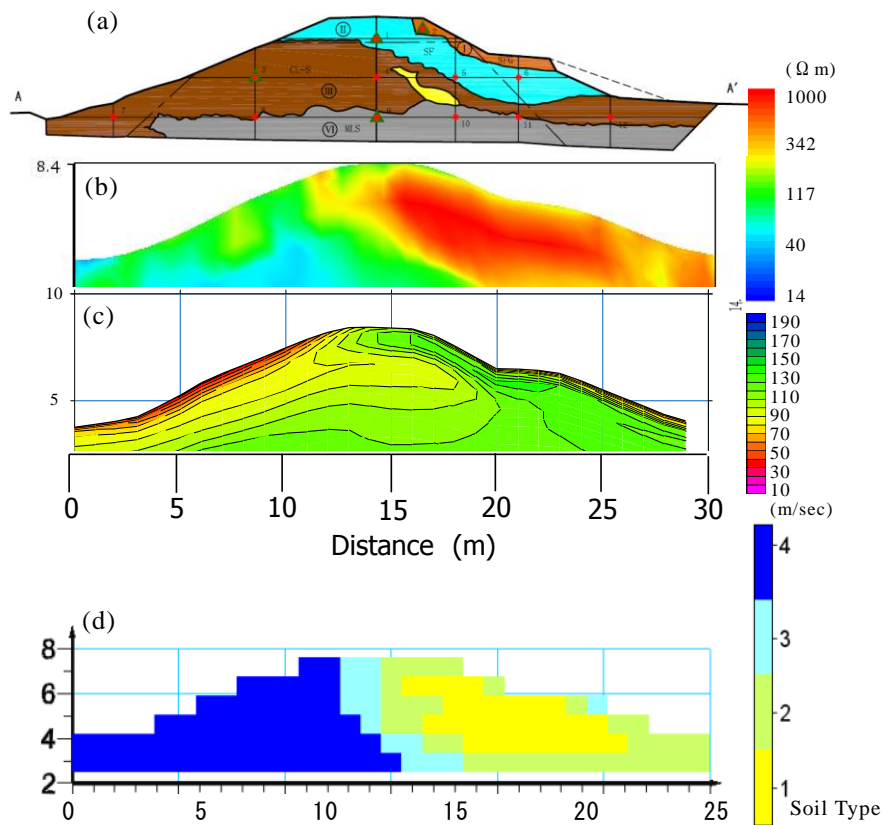


図 3.2.15 S波速度断面(b)と比抵抗断面(c)より推定した堤体の土壌プロファイル(d). 堤体断面のスケッチ(a) (高橋ほか, 2015)

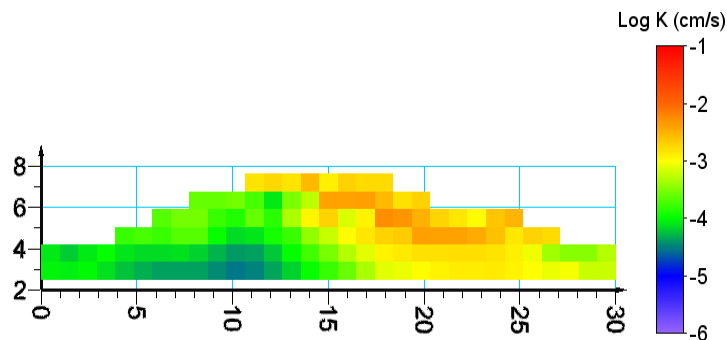


図 3.2.16 S波速度と比抵抗より求めた間隙率と粒子サイズに基づき算出された透水係数プロファイル (高橋ほか, 2015)

3.2.3 斜面・地すべりの事例

斜面・地すべりにおける統合および複数探査の事例は合わせて 14 件の調査事例があった。そのうち、P 波速度と比抵抗を求める組み合わせが約 8 割を占めた。P 波速度から風化層やすべり面の深度等の地質境界を、比抵抗から地下水位を推定し、地すべりの評価、対策を行っている。P 波速度は屈折法地震探査および屈折法トモグラフィにより求め、比抵抗は二次元比抵抗探査により求める方法が多く見られた。

統合物理探査の事例は 4 件であり、山本・楠見 (2009) や楠見ほか (2009) によると、ウィリーの式とアーチーの式を用いて、弾性波速度および比抵抗から逆解析(最適化手法)により間隙率、飽和度を求める方法を提案している (図 3.2.17)。これにより得られる飽

和度分布から地下水の存在を予測している。鈴木ほか（2002）では、同様にウィリーの式とアーチーの式を用いて間隙率、飽和度を求め、これから間隙率×飽和度として体積含水率を推定している（図 3.2.18）。これらの結果を別途実施した TDR（Time Domain Reflectometry）や簡易貫入試験の結果と比較した結果、両者は整合しており、その要因としては降雨による乾湿の繰り返しと斜面掘削時の応力開放による法面表層部の割れ目の増加によるものと推定している。

また、統合物理探査ではないものの、複数の物理探査結果に自己組織化マップ（Self-Organizing Maps; SOM）を適用することで複合的評価を行う試みがなされている（大藤ほか, 2011, 増満ほか, 2014, 増満ほか, 2016）。これは学習ニューラルネットワークの一種の手法で、増満ほか（2014）は、斜面での P 波速度分布, S 波速度分布, 比抵抗分布を, k-means 法により 5 つのクラスにクラスタリングを行っている（図 3.2.19）。各クラスが有する岩盤性状が推定でき, 探査結果の複合的な評価手法として適用可能であることを示している。

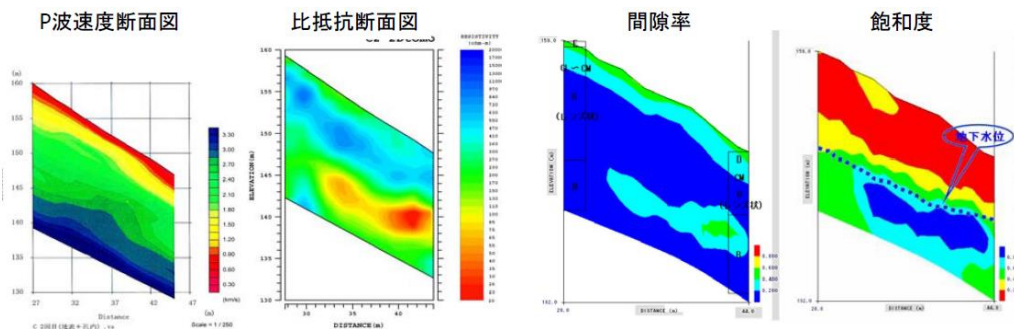


図 3.2.17 P 波速度と比抵抗値に基づく間隙率, 飽和度の評価例（山本・楠見, 2009）

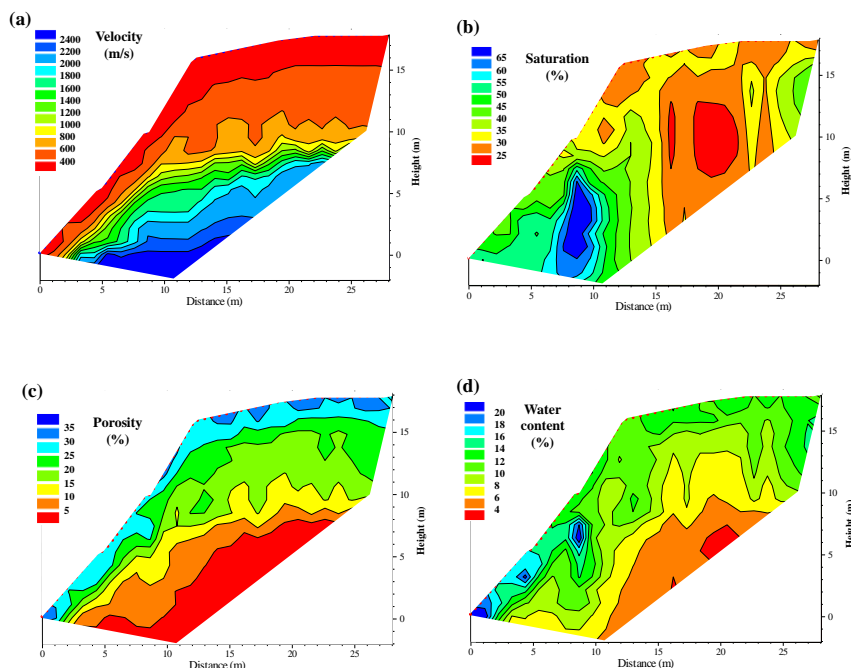


図 3.2.18 斜面の物理特性の解析断面図。(a)P 波速度断面, (b)水分飽和度断面, (c)間隙率断面, (d)含水率断面（鈴木ほか, 2002）

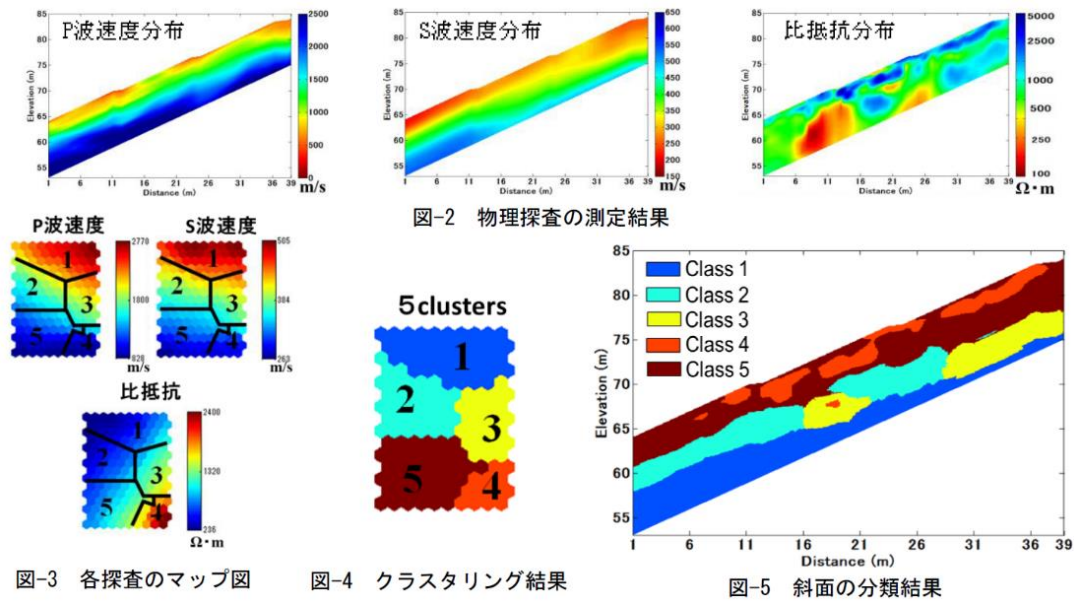


図 3. 2. 19 探査結果の k-means 法によりクラス分類結果 (増満ほか, 2014)

3. 2. 4 資源・地下水探査の事例

(1) 資源探査における物理探査

資源探査における統合および複数探査の事例は合わせて 6 件の調査事例があった。探査の組合せは、すべての事例において異なり、同一の組合せは認められなかった。探査の目的と探査法の関係は、メタンハイドレートの調査では反射法地震探査、地熱開発の調査では、電磁探査が多く用いられているなど、目的により探査法を選択していることが窺える。

資源探査による統合物理探査の事例は 2 件であり、多田ほか (2000) は、メタンハイドレート含有量と弾性波速度との関係を求めるための基礎実験として、ケロシンと水の乳化液を用いた実験より得た P 波速度と S 波速度から、ビオ理論を用いて骨格粒子体積弾性率と孔隙率の関係を求めている (図 3. 2. 20)。

(2) 地下水調査における物理探査

地下水調査における複数探査の事例は、合わせて 7 件であった。組み合わせとしては、電気探査と表面波探査、電気探査と 1m 深地温探査、電気探査と放射能探査がそれぞれ 3 割を占めている。一般に地層中に水が存在すると比抵抗が低下すると考えられていることから、全ての事例において、電気探査が利用されている。

電気探査と表面波探査の組み合わせの例として、鬼武 (2009) では多チャンネル式表面波探査により岩盤層の上面を推定し (図 3. 2. 21)、二次元比抵抗探査により、地下水流動層を推定している。高水位時と低水位時の二次元比抵抗探査結果を比較し、低水位時に高比抵抗値であった部分が、高水位時に低比抵抗に変化した箇所を地下水流動層と推定している (図 3. 2. 22)。両結果から、地下水流動箇所が岩盤層の上位に分布する土砂層であると推定している。

電気探査と 1m 深地温探査の組み合わせでは、電気探査により得られた比抵抗結果と、1m 深地温探査により得られた地下水流動路との関係性を検証しており、調和的な結果が

報告されている．電気探査と放射能探査の組み合わせでは，両者から亀裂帯の分布を推定しており，調和した結果が得られている．

地下水調査における統合物理探査の事例は報告されていなかった．

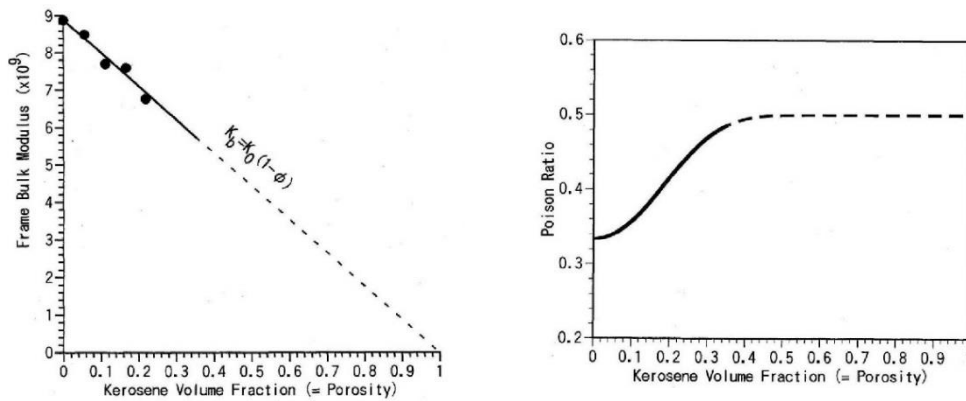


図 3.2.20 ケロシンの体積割合（孔隙率）と骨格弾性率（左），ポアソン比（右）の関係（多田ほか，2000）

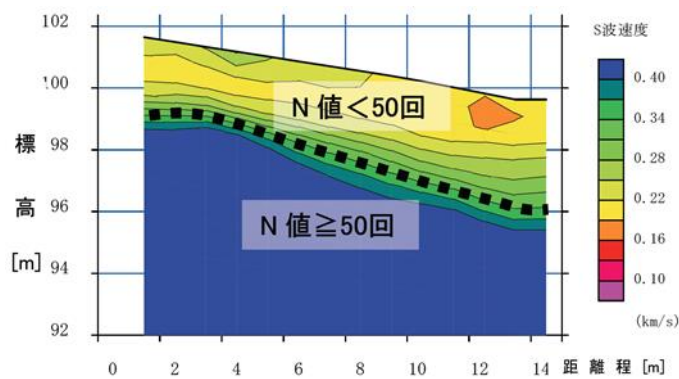


図 3.2.21 表面波探査による S 波速度断面図（鬼武，2009）

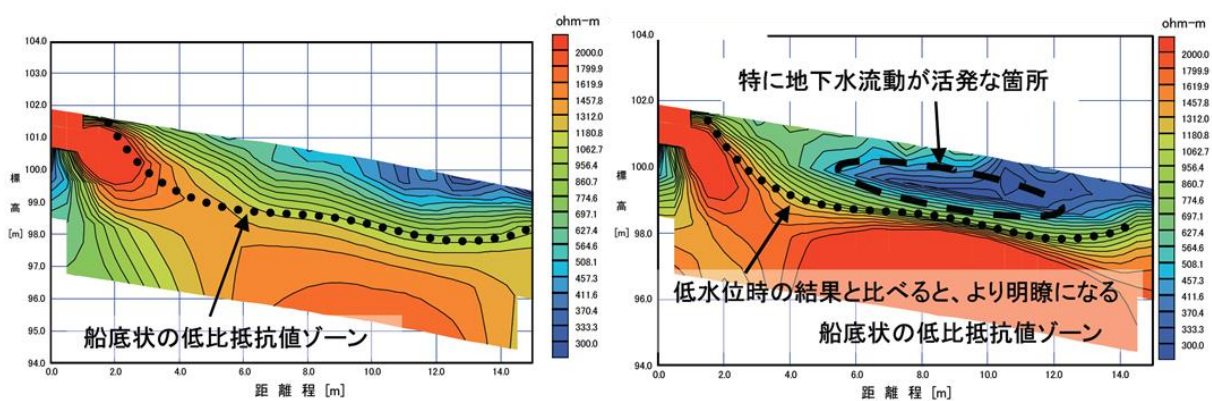


図 3.2.22 低水位時の比抵抗断面図（左）と高水位時の比抵抗断面図（右）（鬼武，2009）

3.2.5 空洞・埋設物調査の事例

空洞・埋設物における統合および複数探査の事例は合わせて13件の調査事例があった。そのうち、約7割が比抵抗と反射深度断面を求める組合せであった。比抵抗を求める手法としては二次元比抵抗探査が多く、反射深度断面を求める手法としては反射法地震探査と地中レーダが同数であった。これは空洞や埋設物による比抵抗変化と反射面の把握が有効であることが要因と考えられる。その他、屈折法地震探査や表面波探査、磁気探査なども多く用いられており、様々な組合せにより実施されている傾向がある。これは、目標物となる空洞・埋設物が深度、規模、地下水の有無、対象物の状態などにより有効な探査手法が変わるため、目的に応じた手法が選択されていることが考えられる。また、それだけ空洞・埋設物探査は難しい探査であるとも言える。また、空洞・埋設物調査による統合物理探査の事例はなく、これから研究が期待される分野である。

3.2.6 地震・防災の事例

地震・防災における複数探査について、合わせて10件の調査事例があった。調査手法としては、反射法地震探査や表面波探査、電気探査、微動探査、電磁探査が利用されており、自然地震データを併用した文献も見受けられる。防災分野では、物理探査により地震時の強震動予測に重要なパラメーターであるS波速度構造を把握することを目的としている事例が多く、微動探査や反射法地震探査が主な調査方法として選択されている。統合物理探査の事例がなかったことは、上記S波速度構造の把握が調査のターゲットとなっているため、他の物性値と統合した解析が必要でないことが考えられる。一方で、防災分野では広域な強震動の予測が重要であることから、自然地震データを利用した多点同時逆解析が実施されている事例があった。Kurose and Yamanaka (2007)では、深部地下構造のS波速度構造を把握することを目的として、レシーバー関数と表面波位相速度の多点同時逆解析を行っている(図3.2.23)。その結果、レシーバー関数あるいは表面波位相速度のみを利用した逆解析結果よりも、両手法を併用した逆解析結果の方が反射法地震探査やボーリング・データと整合する結果が得られたとしている。

地震分野では、例えば麻植ほか(2007)は、深部探査に有効な電磁探査(MT法)を布田川断層に適用し、比抵抗分布に基づく深部構造と微小地震分布との関係について検討した(図3.2.24)。その結果、布田川-日奈久断層帯は地形的には連続した同一断層系のように見えるにもかかわらず、破碎構造、力学的物性、応力環境は大きく異なることを明らかにしている。

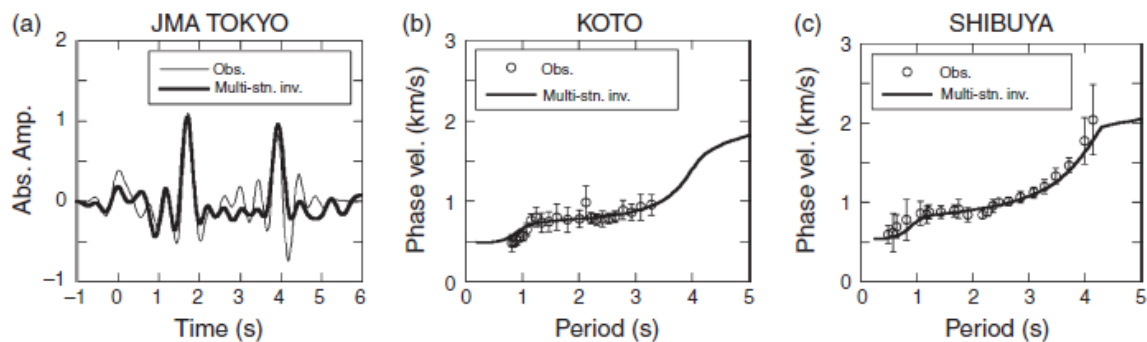


Fig. 9. Comparison of observations and synthetic data obtained from the result of multi-station joint inversion. (a) Receiver function at JMA TOKYO. (b) Rayleigh-wave phase velocity dispersion at KOTO. (c) Rayleigh-wave phase velocity at SHIBUYA.

図 3. 2. 23 多点同時逆解析結果から得られた理論値と観測値の比較 (Kurose and Yamanaka, 2007)

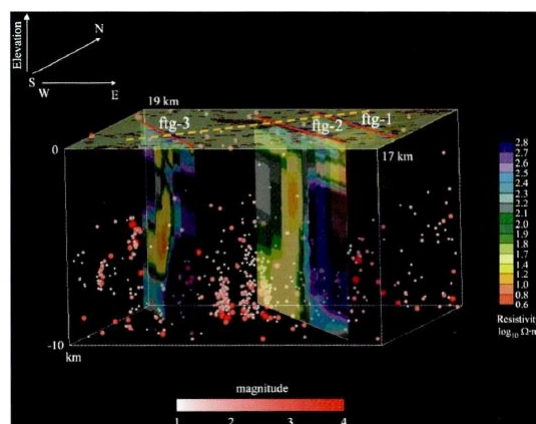


図 3. 2. 24 布田川断層での MT 法による比抵抗断面図と震源分布 (麻植ほか, 2007)

3. 2. 7 地層処分の事例

地層処分における統合および複数探査の事例は合わせて 10 件の調査事例があった。選択されている探査法としては、弾性波・比抵抗・電磁波を用いた探査、ボーリング孔における検層と多岐にわたっている。これは地層処分における探査の目的が、今回の文献調査だけでも、地質構造の把握、塩淡境界の把握、坑道周辺の EDZ の調査、水みちの調査と多岐にわたっているためと考えられる。

トンネルなどの地下空洞掘削に伴い生じる掘削影響領域 (EDZ: excavation disturbed zone) の評価は、空洞の長期安定性や空洞沿いの卓越した水みちを検討する上で重要である。EDZ の調査例として、升元ほか (2003) は地中レーダによるプロファイル測定、CMP 測定と屈折法地震探査の結果から EDZ と飽和不飽和領域の範囲が異なっていることを示している (図 3. 2. 25)。また、スイス・モンテリ地下実験場の難透水性の泥岩 (Opalinus clay) が分布するトンネル内において、掘削後 14 年が経過した坑壁においてボーリング調査を実施し、坑壁周辺の劣化の状況をボーリングコアによる物理試験・化学分析、原位置での物理探査を組み合わせ、その物理・化学的風化のメカニズムを明らかにし、EDZ の影響範囲を予測した研究が行われている (鈴木ほか, 2004)。本研究では、坑壁より上方～水平方向に掘削した 3 孔を使用した比抵抗トモグラフィ法および電気・音響検層によるトンネル断面方向の

比抵抗・音響速度分布（図 3.2.26）とコア試料による物理試験結果に基づき、岩盤の含水状況と EDZ の空間分布について評価した。その結果、推測されるトンネル周辺岩盤の EDZ の分布を図 3.2.27 に示す。割れ目や風化状況より考えられる厚さ 1m 程度の

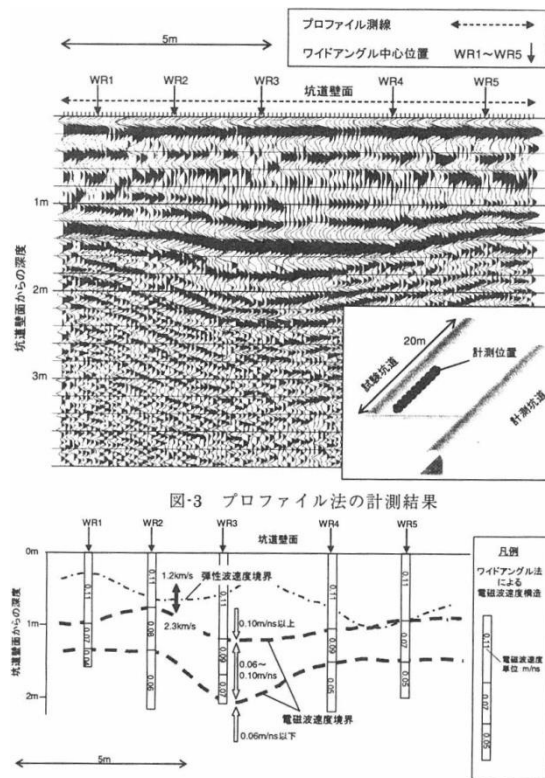


図 3.2.25 坑道壁面の EDZ, 飽和不飽和領域の評価例 (升元ほか, 2003)

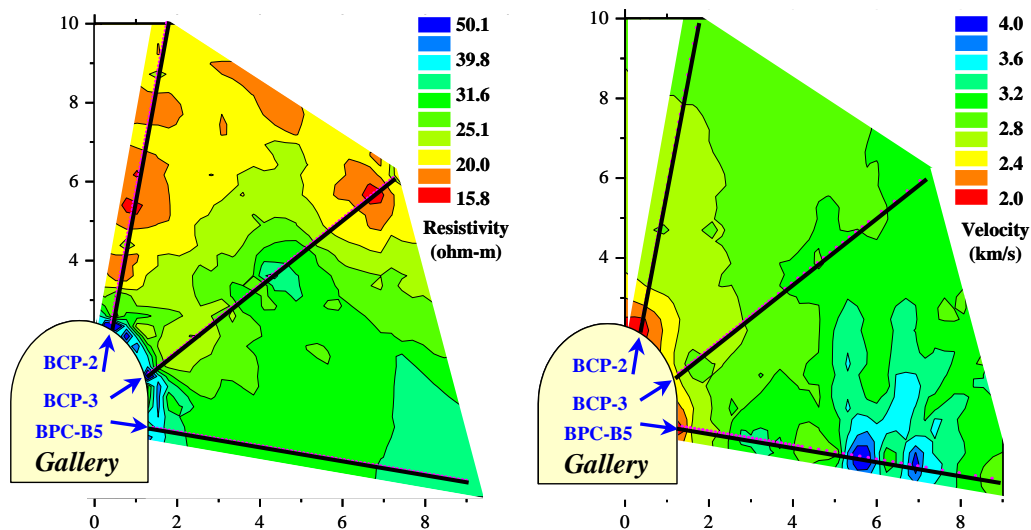


図 3.2.26 物理探査法によるトンネル周辺岩盤の比抵抗および P 波速度分布。(a) 比抵抗 トモグラフィによる比抵抗断面, (b) 音響検層による P 波速度分布 (速度異方性補正後) (鈴木ほか, 2004)

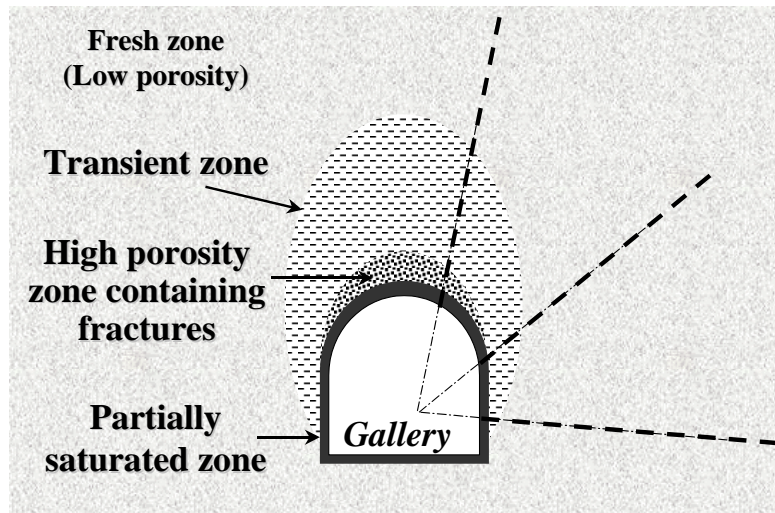


図 3. 2. 27 物理探査結果より推測されるトンネル周辺岩盤の EDZ の分布 (鈴木ほか, 2004)

ゆるみ域は図中の High porosity の領域に相当し、物理特性で若干の影響が現れる領域が Transient zone としてその周囲に数 m の厚さで存在していると推測される。壁面より数 10cm の領域には不飽和域が覆っていると考えられる。

地層処分特有の目的として、岩盤の透水係数を統合物理探査により求める試みがなされている。鈴木ほか (2006) は物理検層から変換式により透水係数を求めているが、室内コア試験結果とはほぼ整合したが、原位置透水試験結果とは割れ目帯において整合しなかった (図 3. 2. 28)。これは原位置の透水試験では割れ目の影響を受けやすく、これを反映させた変換が難しいためと考えられた。また、吉村ほか (2009) が P 波速度の周波数分散特性に着目して、弾性波トモグラフィ結果から透水係数を計算しているが、定性的な傾向を得る段階にとどまっている。

また、地下 300m 程度までの地下水塩分濃度などの分布を地表からの物理探査で求める研究が行われている。鈴木ほか (2012) は微動アレイ探査と電磁探査 AMT/MT 法により得られる S 波速度分布、比抵抗分布を用いて二粒子岩石モデルによる複合解析により間隙率、粘土含有量、間隙水電気伝導度、等価 NaCl 濃度を求めている (図 3. 2. 29)。間隙水電気伝導度、等価 NaCl 濃度は深部に行くほど大きくなる傾向が見られ、平面的な分布の評価に展開できる可能性を示している。

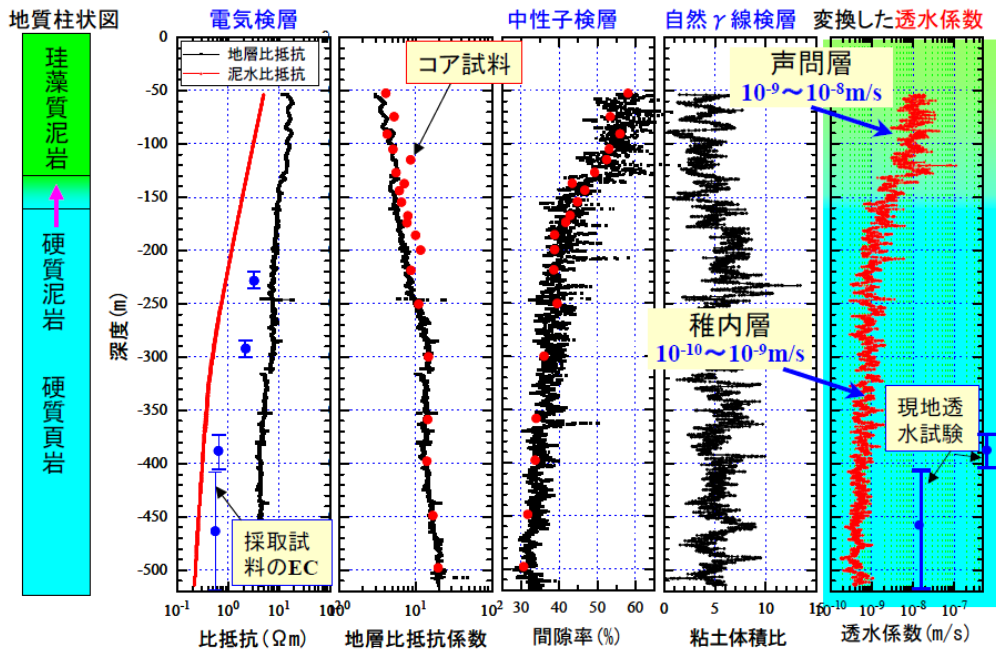


図-5 物理検層データおよび変換した透水係数プロフィール

図中赤丸印は岩石供試体による室内試験データを示す。

図 3. 2. 28 物理探査結果に基づく透水係数への変換 (鈴木ほか, 2006)

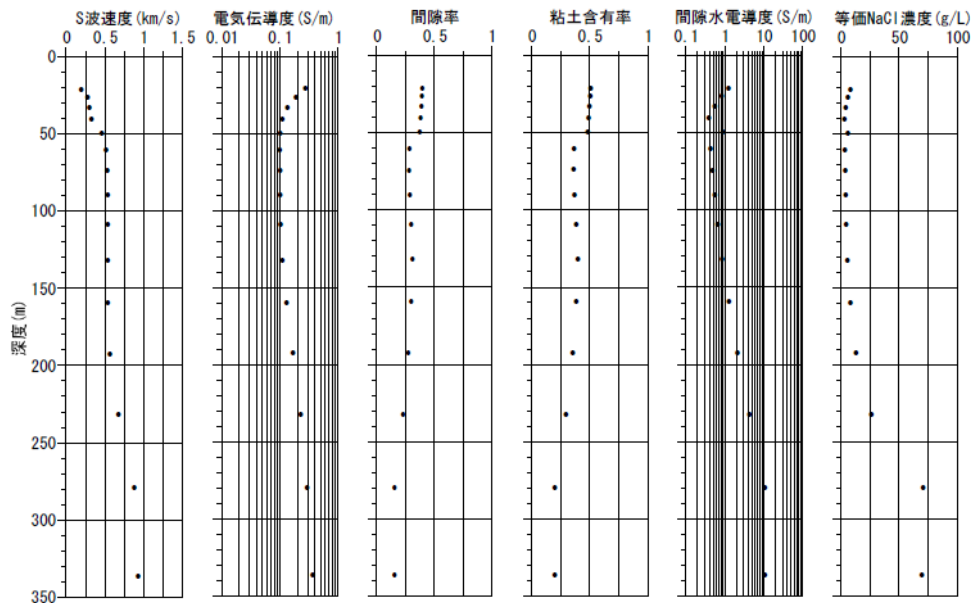


図 3. 2. 29 複合解析による各物性値の深度分布 (鈴木ほか, 2012)

3. 2. 8 遺跡調査の事例

遺跡や遺物は、通常地下に埋まっており、発掘により調査が行われる。しかし、発掘すると完全な復旧ができないため、発掘は1種の破壊行為と認識される。このため、発掘の目的が学術調査の場合も、開発事業により破壊される遺跡の記録保存の場合も、文化財保護法（昭和25年，法律第214号）にのっとりた手続きが必要である。

遺跡調査に対する物理探査の適用は、遺跡の破壊を最小限にとどめることができるという点に特長がある。遺跡の埋没深度は、一般に地下数 10cm から数 m の範囲であり、物理探査の中では探査深度が浅いと位置づけられるが、遺物による地下の変化は局所的なものが多く、十分な分解能をもつ探査手法が要求される。

また、遺跡には古墳、石室、水路跡、住居跡、貝塚、窯業、鉄製遺物など埋蔵状況の異なるものがある。このため、対象とする遺跡に適した探査法が適用されている(表 3.2.4)。

表 3.2.4 遺跡の埋蔵状況と探査上の着目点 (物理探査学会, 1998)

(坂山 (1986), 軽部 (1997) に加筆・修正)

対象の類型	主な遺構・遺物の種類	遺構・遺物の埋蔵状況と探査上の着目点	主な適用探査法
掘り込み状遺構	柱穴, 土壇, 溝状遺構	小規模の掘り込みで、その中には表層部の表土、耕作土が堆積している。局所的な変化を捉える高い分解能が要求され、精密な探査が有効である。	地中レーダ探査
	竪穴式住居跡, 水路跡 古墳の周溝, 環濠	中規模の掘り込みで、その中には表土、耕作土が堆積している。旧地表面であった地層境界の起伏あるいは局所的な表層土の変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
	古墳の周溝, 堀跡, 谷筋	規模が大きい掘り込みで、その中に新しい堆積物が順次凹状に堆積している。地層変化の規模が比較的大きいので、地層構造の変化や地層の起伏を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査 浅層反射法探査
盛土状遺構	縄文の盛土遺構 古墳の墳丘, 城の曲輪	堀削、盛土、突き固めによる大規模な造成跡である。自然地形が利用されている場合が多い。旧地表面であった地層境界の起伏や、人為的な土砂の移動による堆積状況の変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
叩き締め跡 (硬質地盤)	古代の道路跡 建物の基壇(版築)跡 古墳の石室被覆	粘土・土・玉石などを交互に突き固め、厚さ 10 cm 程度の層状に盛り上げられている。人為的な所作による堆積状況の変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
石造・配石遺構	縄文の環状列石・配石遺構 古墳の石室・石棺、葺石 城の石垣, 石段, 石敷 建物の礎石	時代や地域による一定の法則性をもって配列されている場合が多い。墳丘の葺石や城の石垣などは面的な広がりをもって埋没しているが、石棺や礎石などは局所的な埋蔵物である。局所的な変化を捉える精密な探査や、比抵抗の面的な変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
空洞状遺構	弥生の甕棺墓・石棺墓 古墳の埋葬主体部(石室) 横穴墓	規模は被葬者に応じて様々である。完形で埋蔵されている場合は中が空洞である。崩壊・陥没し、その中に表土や耕作土が堆積している場合も多い。局所的な変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
貝塚	貝塚の貝層・地点貝塚	大型の貝塚は、純貝層の厚さが 1 m 以上に及び、表面が比較的薄い表土で覆われている。地点貝塚は、竪穴式住居跡の中に形成されることが多く、貝層の厚さは 50 cm 程度である。貝層による局所的な変化を捉えるためには、分解能の高い探査が必要である。また貝層の材質による物理的変化として、比抵抗の変化を捉える探査が有効である。	地中レーダ探査 電気探査
焼成土 焼成地盤	窯跡, 炉跡, 製鉄炉跡	窯跡の周囲は土が焼けており、焼土特有の赤色を呈する。完形の窯跡は中が空洞である。空洞探査としては地中レーダが有効である。また崩壊した窯跡を含め焼成土としては、熱残留磁気を検出する探査が有効である。	磁気探査 地中レーダ探査
金属遺物	青銅器・鉄製遺物	特別な祭祀に埋納されていたり、古墳に埋葬されていることが多い。金属物の引き起こす電磁誘導反応や、鉄などの磁気反応を検出する探査が有効である。	電磁法探査 磁気探査
大規模構造物	堤跡, 堰跡	堅牢な石造りで近世あるいは近代に築かれたものが多い。現代になって不用になったりあるいは改修により人為的に埋められている場合が多い。密集する石材と埋積土の密度差や比抵抗の変化を捉える探査が有効である。	電気探査 マイクログラビティ探査

文献調査の結果、最近 10 年での報告は確認されていない。また、複合探査の事例を確認されなかった。しかし、特筆すべきは、沖縄県の普天間飛行場返還の日米合意後、施設内の埋蔵文化財の迅速かつ効果的に調査し、跡地利用をすすめるために、沖縄県教育委員会の組織した委員会により、埋蔵文化財に対する物理探査のマニュアルが作成されているこ

とである（沖縄県教育委員会ほか, 2004）。

3.2.9 ダム基礎の事例

発電用のダム・堰は、竣工後 50 年以上経過したものが多い。特に、洪水吐ゲートを有するダム・堰の約 5 割はダム設計基準制定前に設置されており、工事記録等の資料も乏しく、今後の経年に伴う弱部位の劣化進行が懸念されている。これらの高経年化水土木設備の維持管理に役立つ診断・調査法の構築、今後の設備保全の高度化方策に関し図 3.2.30 に示す堤体左右岸アバット部とダム基礎岩盤に潜在する劣化部の非破壊探査技術が必要とされている。

高経年化ダム構造物を対象に行われた物理探査法として、堤体直下の岩着部に予測される劣化部を調査することを目的に実施された事例が幾つかあげられる（例えば、鈴木ほか, 1991 ; 1992 ; 鈴木, 1998）。ダム左右岸には急斜面が広がり、天端部には様々な構造物が存在するため、通常地表面で行われる物理探査法の測線を十分な長さで設置することは困難である。そのため、堤体天端部あるいは監査廊より掘削したボーリング孔内にセンサを配置したジオトモグラフィ法を実施せざるを得ない。堤体天端より掘削した複数のボーリング孔を使用した比抵抗および弾性波トモグラフィ法の適用例（鈴木, 1998）では、堤体部は低比抵抗・低速度、岩盤は高比抵抗・高速度として捉えており、両者の境界を比抵抗と弾性波速度分布から推定している（図 3.2.31）。岩盤の中で低比抵抗・低速度を示す箇所は相対的に岩質の良くない箇所を示唆している。しかし、岩着部に想定される厚さ数 10 cm ~ 1 m 規模の劣化部を把握するのは精度的に厳しいと考えられ、その存在は不明瞭となっている。これより、着岩部に潜在する劣化部を検出するためには、より分解能の高い物理探査法を実施する必要がある。

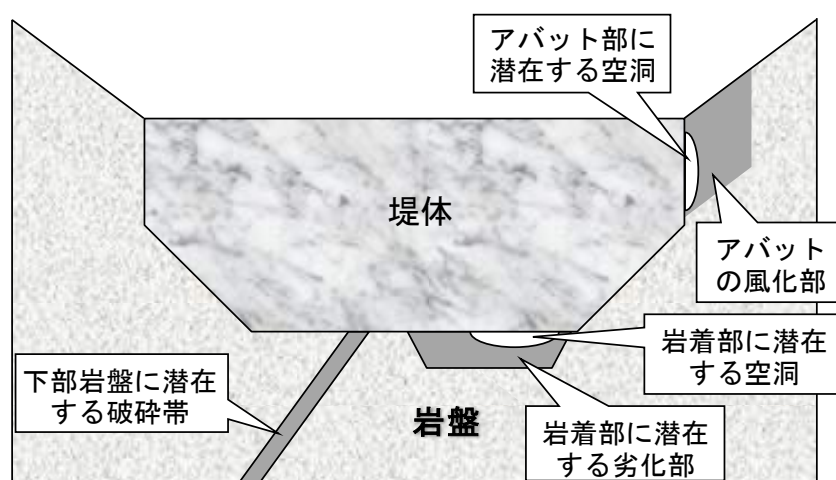


図 3.2.30 高経年ダムの探査対象の概念図（鈴木ほか, 2017）

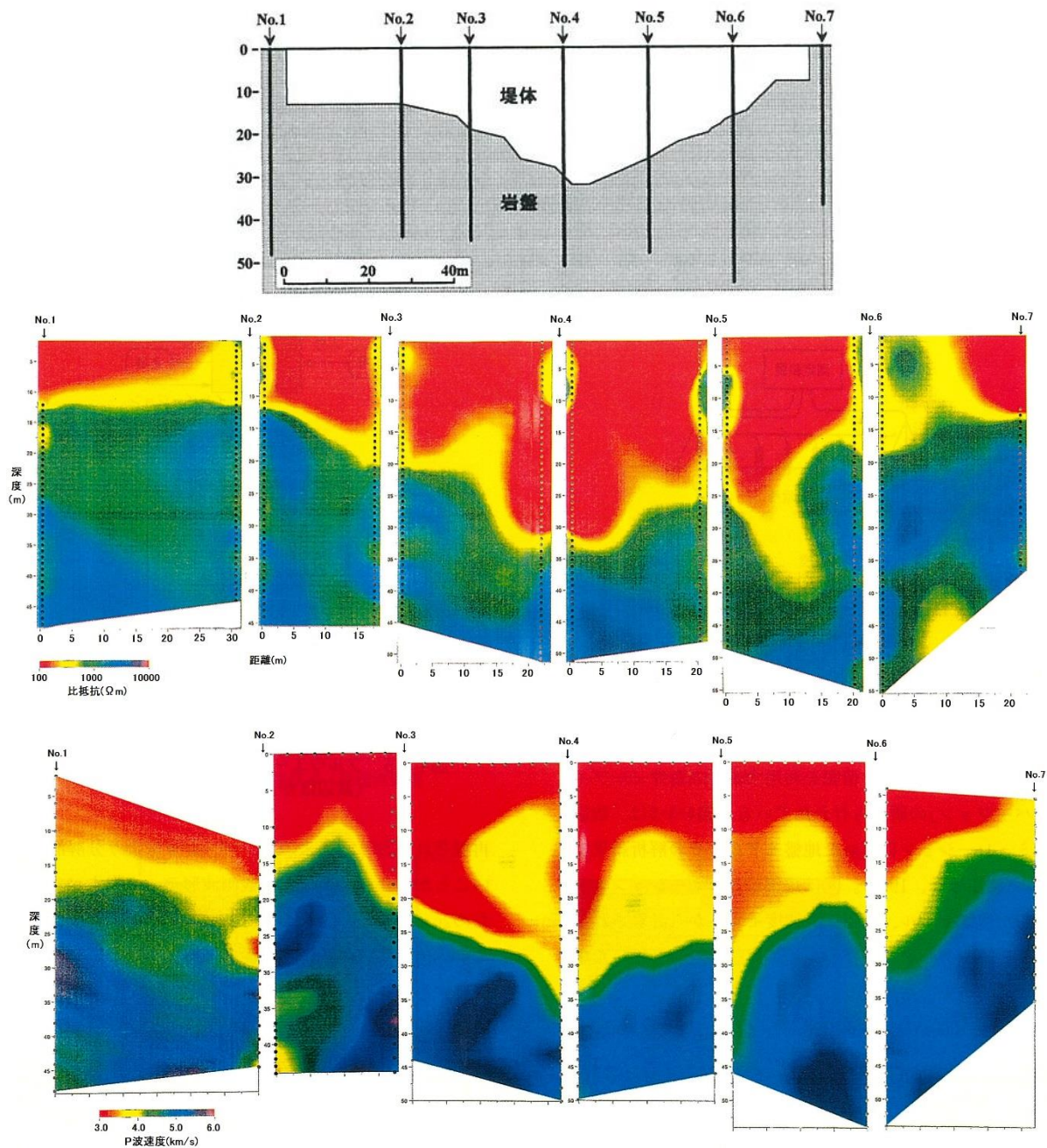


図 3.2.31 比抵抗および弾性波トモグラフィ法による既設ダムでの適用例（鈴木, 1998）

近年、2 か所の高経年化ダムにおいて、電磁波トモグラフィ法と音響トモグラフィ法を実施し、初動部の伝播速度だけでなく減衰率の断面を求めた事例がある（図 3.2.32，図 3.2.33 参照；鈴木ほか, 2017）。これによると、堤体直下のダム基礎岩盤中にほぼ水平方向に広がる岩質の劣化した凝灰岩薄層（厚さ数 10cm）の連続性を検出している。さらに、電磁波トモグラフィによる減衰率断面より、着岩部にある劣化部の存在を推定している。

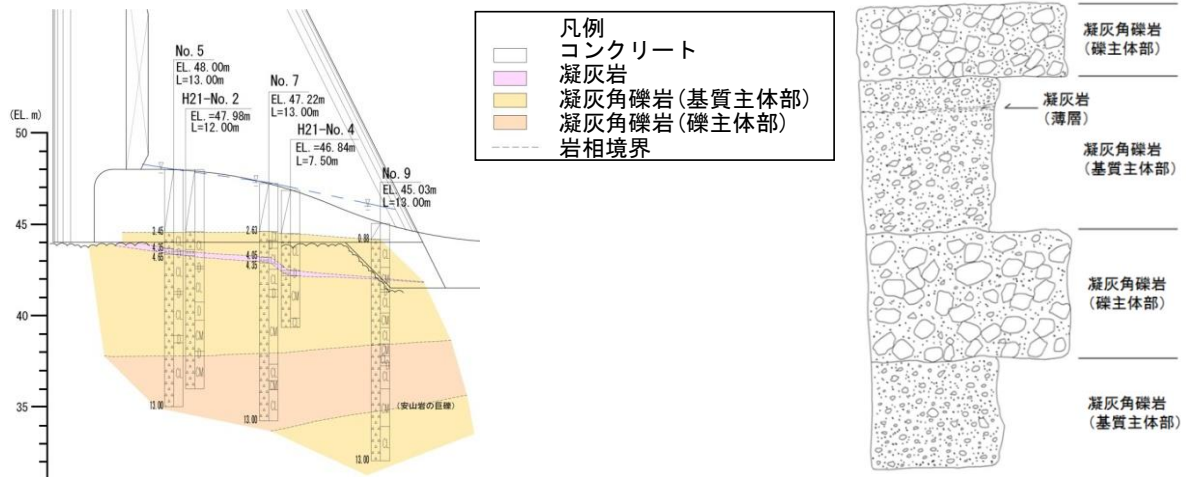


図 3.2.32 既設ダム地質概要 (鈴木ほか, 2017)

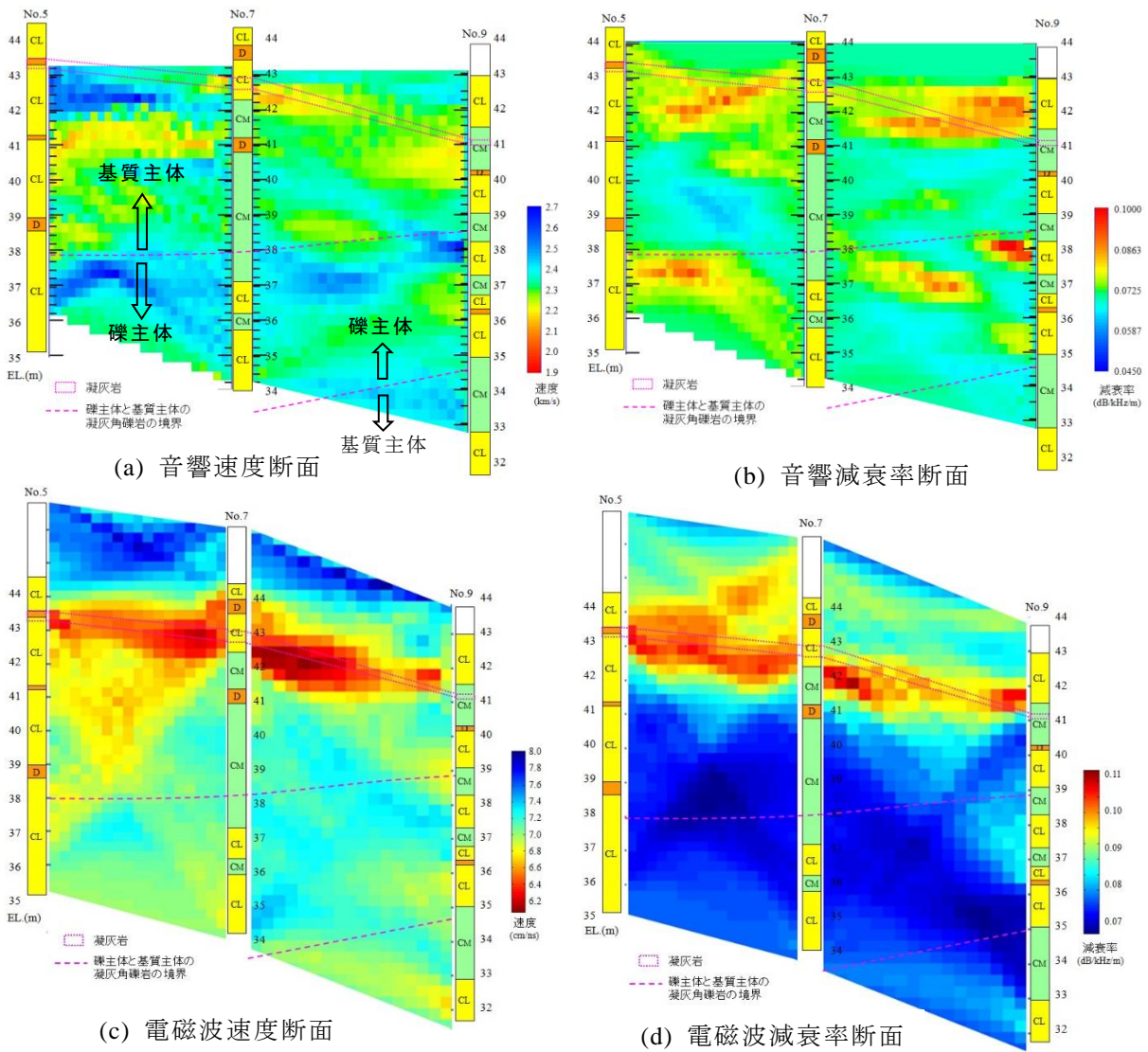


図 3.2.33 音響および電磁波トモグラフィ法による解析結果 (鈴木ほか, 2017)

3.3 構造物のニーズに応じた統合物理探査の提案

以上の調査実績の分析結果に基づき、構造物のニーズに応じた統合物理探査の適用についての検討を行う。

これまで、探査対象や目的に対する物理探査法の組み合わせ例について整理が行われている（表 3.3.1）。一方、本章での分析の結果、探査の目的は構造物ごとにさらに細分化されていることが明確になった。構造物ごとの目的に応じて、文献で確認できた統合物理探査の方法の整理を行った結果を表 3.2.2 に示す。単一の物理探査法では評価が難しい飽和度や透水性を、統合物理探査では評価が可能であるため、これらの物性分布の把握がニーズとしてある構造物には積極的に活用が期待できると考えられる。盛土堤防や斜面地すべりには適用が既に進められているが、トンネルにおいては湧水箇所の分布、地層処分における岩盤内の含水状態の評価といった方面での発展が考えられる。

表 3.3.1 探査対象・目的と物理探査手法の組み合わせ例（災害科学研究所 トンネル調査研究会，2009）

探査対象・目的	物理探査手法，等
地山評価	弾性波探査，電気探査，等 ボーリング調査，速度検層，キャリパー検層，密度検層，等
変質帯	弾性波探査，電気探査，自然電位法，等
断層	弾性波探査，自然放射能探査，電気探査，自然電位法，等
地下水（器）	弾性波探査，電気探査，等
（流路）	1 m 深地温探査，自然電位測定調査，等
（流動層）	多点温度検層，電気検層，地下水検層，等
（流向流速）	単孔式流向流速計，地下水追跡法，流動電位法，自然電位法，等
堤体漏水	1 m 深地温探査，自然電位測定調査，多点温度検層，等

表 3.3.2 構造物別の目的に応じた統合物理探査手法の整理

構造物	目的	統合物理探査による出力	探査手法	
トンネル	安全で合理的な施工	地山分類 湧水箇所の把握	間隙率分布 体積含水率分布	弾性波探査＋比抵抗探査 削孔検層＋P波速度検層
	補助工法の要否	地山評価	相関図	
盛土・堤防	安全性（危険度）評価	浸透性・液状化特性の把握	クロスプロット 粘土含水率/間隙率分布	表面波探査＋電気探査
		ひずみ変形特性の把握	透水係数分布	
斜面・地すべり	地すべり安定性評価	地層境界の把握	間隙率分布	屈折法探査＋電気探査
	地すべり対策	地下水位の把握	飽和度分布	
資源・地下水探査	メタンハイドレート含有率		体積弾性率、孔隙率	P波速度＋S波速度
	地下水流動箇所		－	電気探査＋表面波探査 電気探査＋地温探査/放射能探査
空洞・埋設物調査	空洞・埋設物深度		－	比抵抗探査＋弾性波反射法/地中レーダ
地震・防災	地震時の強震動予測	S波速度構造	（レシーバー間数と表面波位相速度の多点同時逆解析）	微動探査/弾性波反射法探査
地層処分	掘削影響領域評価	力学的ゆるみ域	間隙率分布	地中レーダ＋弾性波屈折探査
	岩盤の透水性評価	飽和不飽和領域の把握	含水率分布	比抵抗トモグラフィ＋音響P波速度検層
	塩淡水境界		透水係数分布 等価NaCl濃度分布	物理検層/弾性波トモグラフィ 微動アレイ探査＋電磁気探査
遺跡調査	非破壊による遺跡位置同定		－	地中レーダ/電気探査
ダム基礎	基礎岩盤劣化部の非破壊による把握		－	比抵抗トモグラフィ＋弾性波トモグラフィ 電磁波トモグラフィ＋音響トモグラフィ

引用文献

- 麻植久史・小池克明・吉永 徹・高倉伸一（2007）：布田川-日奈久断層帯の深部比抵抗構造のイメージングと微小地震分布からの考察，応用地質，**48**，第4号，180-191.
- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005): Quantitative seismic interpretation, Cambridge University Press.
- 物理探査学会（1998）：物理探査ハンドブック ケーススタディ編.
- 土木学会（1996）：トンネル標準示方書.
- 稲崎富士・林 宏一・徳丸哲義（2013）：河川堤防の安全性評価のための統合物理探査，河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－，愛智出版，30.
- Dvorkin, J., Mavko, G. and Mukerji, T. (2002): Rock physics reservoir characterization-Approaches and Methods Tutorial, Stanford University.
- Glover, P.W.J., Hole, P.J. and Pous, J. (2000): A modified Archie's law for two conducting phases, Earth and Planetary Letters, 180, 369-383.
- 小西千里・橋本裕司・信本 実・佐藤喜一郎（2015）：統合物理探査結果を用いた堤体評価に関する考察，第132回物理探査学会学術講演会論文集，83-86.
- 楠見晴重・高橋康隆・中村 真（2006）：比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法，土木学会論文集 F，**62**，No.4，603-608.
- 楠見晴重・山本 剛・中村 真（2009）：比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価法，第38回岩盤力学シンポジウム，35-38.
- 増満岳也・楠見晴重・大西有三・上出定幸（2014）：自己組織化マップを利用した複合物理探査による切土斜面の定量化評価法に関する研究，土木学会第69回年次講演会，III-194.
- 増満岳也・楠見晴重・大西有三（2016）：SOM・変換解析を利用した併用物理探査による道路斜面の評価手法に関する研究，第44回岩盤力学シンポジウム，228-233.
- 升元一彦・片岡達彦・竹内真司（2003）：連続波レーダーとTDRを用いた坑道周辺の不飽和領域の評価，日本応用地質研究平成15年度発表会講演論文集，191-194.
- 松井 保（1995）：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用，物理探査，**48**，530-538.
- 松井 保・朴 三奎（1995）：比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネルの地山区分，物理探査学会第92回学術講演会論文集，418-421.
- 宮嶋保幸・岩村武史・白鷺 卓・戸邊勇人・岩熊真一（2014）：ドリルジャンボ削孔データによる切羽前方の地山等級予測技術の開発，土木学会第69回年次学術講演会，VI-04
- 中村 真・近藤悦吉・楠見晴重（2003）：併用探査によるトンネル施工ルート上の岩盤および湧水予測評価法，土木学会論文集，**735**，IV-59，209-214.
- 沖縄県教育委員会・物理探査学会（2004）：平成15年文化庁支出委任，埋蔵文化財広域発掘手法検討調査事業報告書，物理探査を利用した埋蔵文化財広域発掘調査手法物理探査実施マニュアルおよび解説.
- 鬼武裕二(2009)：電気探査及び表面波探査による地下水流動状況の調査事例，全地連「技術 e-フォーラム 2009」松江.
- 大藤貴也・楠見晴重・中村 真・山本 龍（2011）：自己組織化マップを用いた物理探査の複合評価手法に関する研究，第46回地盤工学研究発表会発表講演集，69-70.

- 大久保伸介・酒井信介・成子浩明・田中秀幸 (2010) : 弾性波・比抵抗複合探査結果を用いたトンネルルートの岩盤及び湧水予測事例, 全地連「技術フォーラム 2010」那覇.
- 災害科学研究所 トンネル調査研究会 (2009) : 地盤の可視化技術と評価方法, 鹿島出版会.
- 鈴木浩一・楠健一郎・本島 睦・藤光康宏 (1991) : ジオトモグラフィのダム基礎岩盤調査への適用, 第 84 回物理探査学会春季学術講演会論文集, 340-345.
- 鈴木浩一・東 貞成・藤光康宏・楠健一郎・本島 睦・田辺一夫・天野雄二 (1992) : ジオトモグラフィのダム基礎岩盤調査への適用(その 2), 第 86 回物理探査学会学術講演会講演論文集, 432-437.
- 鈴木浩一 (1998) : 物理探査法の地質工学への適用(その 3) - 硬質岩盤の透水性評価への適用例 -, 物理探査, **51**, 83-95.
- 鈴木浩一・伊藤栄紀・千木良雅弘 (2002) : 風化花崗岩表層の緩みと斜面内部への降雨の浸透 - 物理探査と実測データを用いた検討 -, 応用地質, **43**, No.5, 270-283.
- 鈴木浩一・大山隆弘・中田英二・木方建造 (2004) : 物理探査法による堆積岩トンネル坑壁周辺のゆるみ域の可視化 - スイス・モンテリ実験場での調査 -, 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会講演論文集, 237-240.
- 鈴木浩一・木方建造 (2006) : 物理検層データによる地盤の透水性および力学強度特性の評価, 日本応用地質学会平成 18 年度研究発表会講演論文集, 229-232.
- 鈴木浩一・佐藤浩章・近藤浩文・吉村公孝・江波戸昌徳・今井幹浩・小林貴幸 (2012) : 沿岸域堆積軟岩地点での物理探査データの複合解析 - 微動アレイ探査および電磁探査結果への適用 -, 第 127 回物理探査学会学術講演会講演論文集, 143-146.
- 鈴木浩一・陣内久雄・黒田清一郎・榊原淳一・相澤隆生・伊東俊一郎・江藤芳武・永松由之 (2017) : 複数の物理探査法による高経年ダム基礎の健全性評価への適用, 第 136 回物理探査学会春季学術講演会論文集, 80-83.
- 高橋 亨・相澤隆生・村田和則・西尾英貴・松岡俊文 (2015) : 統合物理探査データを用いた河川堤防の浸透性のプロファイリング, 物理探査, **68**, 167-175.
- Takeshi Kurose and Hiroaki Yamanaka (2007): Multi-station joint inversion of receiver function and surface-wave phase velocity data for exploration of deep sedimentary layers, BUTSURI-TANSA, Vol. 60, No.1, 19-28.
- 多田良平(2000) : 骨格弾性率と孔隙率の関係について, 物理探査, **53**, 427-434.
- 山本 龍・楠見晴重 (2009) : 弾性波及び比抵抗併用探査による老朽化法面のモニタリング手法に関する研究, 土木学会第 64 回年次講演会, III-69.
- 吉村公孝・安藤賢一・坂下 晋・パトリック・プライネス・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, **62**, 307-318.

4. 統合物理探査とデータベース

4.1 標準書式・データベースと統合物理探査の関係

4.1.1 統合物理探査における標準書式とデータベースの必要性

蒔苗（2008）によると、公共物としての情報モデルに求められる特徴として、①データ構造の中立性、②相互利用性、③長期利用、④依存情報との関連性の考慮をあげている。物理探査成果についても、公共物であることが大半であり、この要件を満す必要がある。探査結果の書式化の利点は、探査成果の利用が容易となり、再解析やデータ整理が行えることにある。同じ地域や同種の地質で実施された探査結果と比較することは、探査結果の評価の向上に役立つと考えられる。一方、複数の調査業者が関係するプロジェクトにおいては、各業者が共通書式で探査データを共有することになり、業務の効率化につながる。標準書式は、①データ構造の中立性、②相互利用性、③長期利用、④依存情報との関連性を実現するための手段であり、蓄積されたデータを広く二次利用するための基盤技術である。

統合物理探査においては、複数の探査結果で得られた物性値を、ボーリング調査や土質試験結果と併せて分析する必要がある。その際、取得した物性値や採取試料の位置や時期について照合しておく必要がある。また、解釈モデルの構築に際しては、複数の地域や地質について、物性値を取得した位置や時期を明確にして分析を行なう必要がある。このためには、データ標準書式化とデータベースの構築は、不可欠な技術要素となる。さらに、多くの研究者、技術者がデータ収集、分析を行なえる環境が構築されることが理想である。

4.1.2 物理探査学会における取り組み

物理探査学会では、物理探査成果の標準化、データベース化に関連した活動を行ってきた。関連した活動を表 4.1.1 に示す。

書式検討研究委員会では、探査断面表示の統一化、物理探査データのアーカイブ化と再利用を目的として、XML 書式をベースとした標準書式の検討を行い、(独) 土木研究所と共同で二次元断面について書式案を示した(林ほか, 2010; 稲崎ほか, 2011)。また、代表的な探査法について標準書式案(以下、標準書式)を示した(高橋・物理探査書式検討委員会, 2012)。また、標準書式は、河川堤防における統合物理探査に利用されている(稲崎ほか, 2013)。一方、統合物理探査調査研究委員会では、書式検討研究委員会の成果を引き継ぎ、物理探査結果の利活用について検討を行った。また、物理探査成果の電子納品を目指し、物理探査電子納品試案(物理探査学会案)の作成・検討を行うとともに、物理探査電子納品の実施に向けた外部委員会への対応を行ってきた。

表 4.1.1 最近の物理探査学会の取り組み

期 間	物理探査学会関連 委員会	備 考
H16～19	物理探査標準化検討委員会	「物理探査適用の手引き－土木物理探査マニュアル 2008－」出版
H18～21	河川堤防の統合物理探査適用検討委員会	土木研究所と共同で、河川堤防における統合物理探査を検討、実務化。探査から解析・評価にいたる手続きを標準化。成果を「河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－」として出版
H21～24	トンネル探査研究委員会	トンネル弾性波探査の標準化。トンネル調査総合データベースを構築
H22～23	物理探査書式検討委員会	土木研究所からの委託業務。物性断面の XML 化
H23～24	物理探査学会書式検討委員会	代表的な物理探査手法について、XML タグ構造の検討
H25～	物理探査学会・日本応用地質学会・全地連合同会議（物理探査学会・応用地質学会の連携作業）	物理探査の標準化、信頼性、電子納品などについて懇談
H26～29	統合物理探査調査研究委員会	WG で電子納品要領試案作成開始
H27	河川堤防 GPR 研究委員会	土木研究所からの委託業務。GPR 探査の標準仕様の検討とデータベースシステムの試作
H28～29	電子納品 WG	統合物理探査調査研究委員会の WG メンバーを補強し、専門に検討開始

4.1.3 標準書式の例

図 4.1.1 は、物理探査学会書式検討委員会で検討された標準書式の基本構造を模式的に示したものである。標準書式は、大きく標題情報データブロック、断面データブロック、探査測定解析データブロックから構成される。標題情報データブロックには、調査概要などが記述されている。断面データブロックには、探査結果としての物性断面が記述されている。これには、物理探査書式検討委員会で検討された書式を採用している。標準書式は XML ベースで記述されおり、前述の①データ構造の中立性、②相互利用性、③長期利用および④依存情報との関連性の要件を満す構造となっている。すなわち、各データの相互関連性を確保しつつ、利用者の目的により、必要データを抽出できる構造となっている。例えば、物性断面を必要する場合、断面データブロックのみを全体データから抽出すればよい。探査データを再解析する場合、断面データブロックと探査測定解析ブロックを抽出すれば良い。以下、各データブロックの概要を示す。

(1) 標題および断面データブロック

林ほか（2010）で検討された標題および断面データブロックのツリー構造を図 4.1.2 に示す。XML ファイルは、1つのファイルに複数の断面（測線）を記録できる構造となっているが、1つのファイルに1断面のデータを収録することを基本としている。構造の概要を以下に示す。

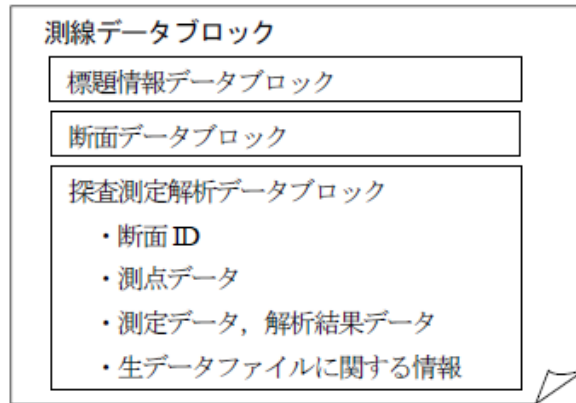


図 4.1.1 標準書式の基本構造 (三木ほか, 2014)

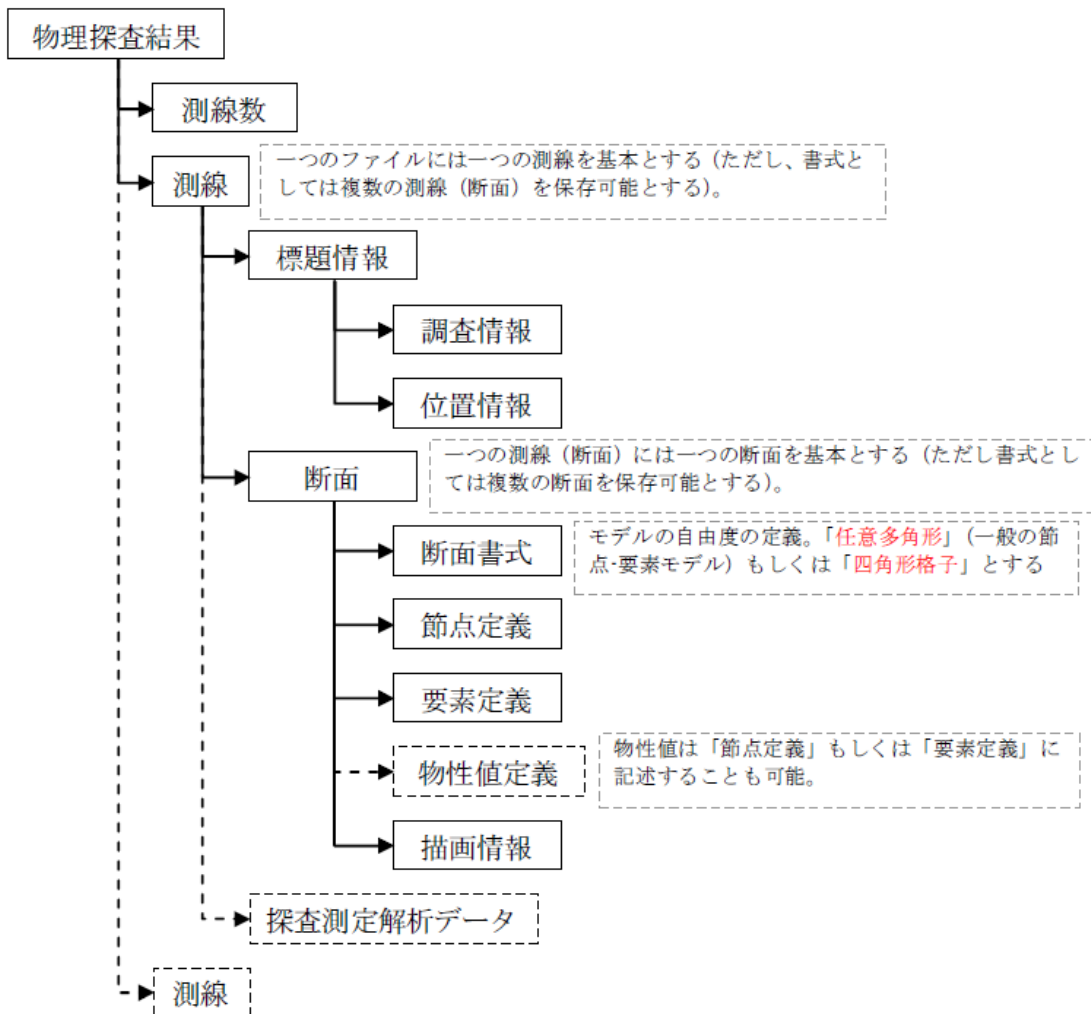


図 4.1.2 標題情報および断面データブロックのツリー構造 (林ほか, 2010)

ファイルには、「測線」エレメントを基本単位として、「標題情報」「断面」および後に示す「探査測定解析データ」が収録される構造となっている。「標題情報」には、件名や探査手法、探査実施者など調査業務に関する基本的なデータに加えて、測線位置や座標に関する情報が記述される。「断面」には、物性断面を描画するための地盤物性値が記述される。物性断面は格子状の要素と節点から構成され、物性値は節点か要素を選択して定義する構造となっている。このデータを読み取ることにより、断面の任意の位置における物性値を抽出することができる。

(2) 探査測定解析データブロック

探査測定解析データブロックの例を屈折法地震探査と二次元比抵抗探査について示す。

図 4.1.3(a)は、屈折法地震探査の標準書式のタグ名と記載例を示したものである。屈折法地震探査のデータは、測点の位置と区分を記述するブロック、測定走時を記述するブロックに加えて、T' 曲線、パス計算結果（波線）および生測データの参照を記述するブロックから構成される。標準書式で記述されたデータにより、速度断面だけではなく、解析結果の状態を確認できるとともに、再解析が可能な構造となっている。なお、図中で*を付した部分については、解析形態や使用ソフトを考慮してデータ作成者選択としている。

図 4.1.3(b)は、二次元比抵抗探査の標準書式のタグ名と記載例を示したものである。二次元比抵抗探査のデータは、基本的には、屈折法地震探査と同じ構造を有しており、測点の位置と区分を記述するブロック、測定データを記述するブロックおよび生測データの参照を記述するブロックから構成される。また、モニタリングへの適用を考慮して、測定時刻についても記述できるが、通常の探査では、省略して良い。比抵抗断面だけではなく、再解析が可能な構造となっている。

```

<屈折法地震探査>
  <屈折法地震探査_断面ID>0
  <屈折法地震探査_測点>
    <屈折法地震探査_測点数>48
    <屈折法地震探査_測点位置>
      <屈折法地震探査_測点番号>0
      <屈折法地震探査_測点区分>1
      <屈折法地震探査_測点水平位置>0.000000
      <屈折法地震探査_測点高さ>129.000000
      <屈折法地震探査_測点オフセット>0.000000
      <屈折法地震探査_測点絶対位置X>0.000000
      <屈折法地震探査_測点絶対位置Y>0.000000
      <屈折法地震探査_測点絶対位置Z>0.000000

  <屈折法地震探査_走時>
    <走時測定数>211
    <走時単位>ms
    <走時データ>
      <起振点番号>43
      <受振点番号>10
      <走時データ番号>9
      <測定走時>28.700000
      <計算走時>28.319990

  <屈折法地震探査_T曲線>
    <T曲線数>1
    <T曲線>
      <T曲線番号>0
      <T曲線データ数>42
      <始点起振点番号>43
      <終点起振点番号>47
      <T曲線区分>1
      <T曲線データ>
        <T曲線X>5.000000
        <T曲線T>3.000000

  <屈折法地震探査_波線>
    <波線経路数>168
    <波線経路>
      <波線経路番号>0
      <走時データ番号>0
      <波線分点数>45<波線分点数>
      <波線分点>
        <波線分点番号>0
        <波線_水平位置>5.000000
        <波線_高さ>130.000000

  <屈折法地震探査_波形>
    <屈折法地震探査_波形ファイル数>5
    <屈折法地震探査_波形ファイル>
      <屈折法地震探査_波形ファイル番号>0
      <屈折法地震探査_波形ファイル参照番号>File0
      <屈折法地震探査_野帳ファイル参照番号>Node0

<電気探査2D>
  <電気探査2D_断面ID>0
  <電気探査2D_測点>
    <電気探査2D_測点数>31
    <電気探査2D_測点位置>
      <電気探査2D_測点番号>0
      <電気探査2D_測点区分>1
      <電気探査2D_測点水平位置>0.000000
      <電気探査2D_測点高さ>120.310000
      <電気探査2D_測点オフセット>0.000000
      <電気探査2D_測点絶対位置X>0.000000
      <電気探査2D_測点絶対位置Y>0.000000
      <電気探査2D_測点絶対位置Z>0.000000

  <電気探査2D_データ>
    <データ数>410
    <単位_抵抗> $\Omega$ 
    <単位_電流>A
    <単位_電位>V
    <単位_充電率>mV/V
    <電気探査データ>
      <測点時刻>
      <測点番号_C1>5
      <測点番号_C2>-1
      <測点番号_P1>7
      <測点番号_P2>-1
      <測定値>
        <抵抗>3.457600
        <電流>1.000000
        <電位>3.457600
      <計算値>
        <抵抗>3.497810
        <電流>1.000000
        <電位>3.497810

  <電気探査2D_保存データ>
    <保存データファイル数>1
    <保存データファイル>
      <保存データファイル参照番号>SampleData
      <野帳ファイル参照番号>SampleNote

```

(b) 二次元比抵抗探査のタグ名と記述例

(a) 屈折法地震探査のタグ名と記述例

図 4.1.3 屈折法地震探査と二次元比抵抗探査のタグ名と記載例 (三木ほか, 2014)

4. 2 河川堤防探査における統合物理探査のデータベース例

「河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－」（稲崎ほか，2013）では，統合物理探査成果は，所定の XML 形式の電子ファイルとして納品し，河川堤防物性データベースとして登録することが示されている．河川堤防物性データベースは，物理探査結果断面，N 値・S 波速度・比抵抗，室内試験結果・S 波速度・比抵抗のデータベースから構成されており，河川堤防の統合物理探査の解釈に必要な分析を可能としている．

河川堤防の統合物理探査におけるデータベース例として，林ほか（2013），林ほか（2014）により報告されている．林ほか（2013）におけるデータベースは，標準書式による統合物理探査結果にボーリング柱状図および堤防の概略点検結果をまとめたデータベースとなっている．データベースの構成を図 4.2.1 に示す．

林ほか（2014）では，東日本大震災後，関東地方の延長 160km の河川堤防で実施された統合物理探査において，標準書式やデータベースを用いて，統合的かつ統一的な解析・解釈を効率的に行うことを試みている．長大な河川堤防調査における物理探査の解析・解釈には，一般の標準書式（土木研究所，2010）では不十分であるため，標準書式の XML ファイルを拡張し，基本情報，距離標，ボーリング情報を加えた書式を構成して実施したことが示されている．課題として，当時標準書式の規定と利用が進んでいたのは多チャンネル式表面波探査および牽引式電気探査だけであり，他の物理探査法の標準書式の規定も行われなければならないことと，調査対象に応じてそれぞれの対象に特化した書式の拡張を検討する必要があることを挙げている．

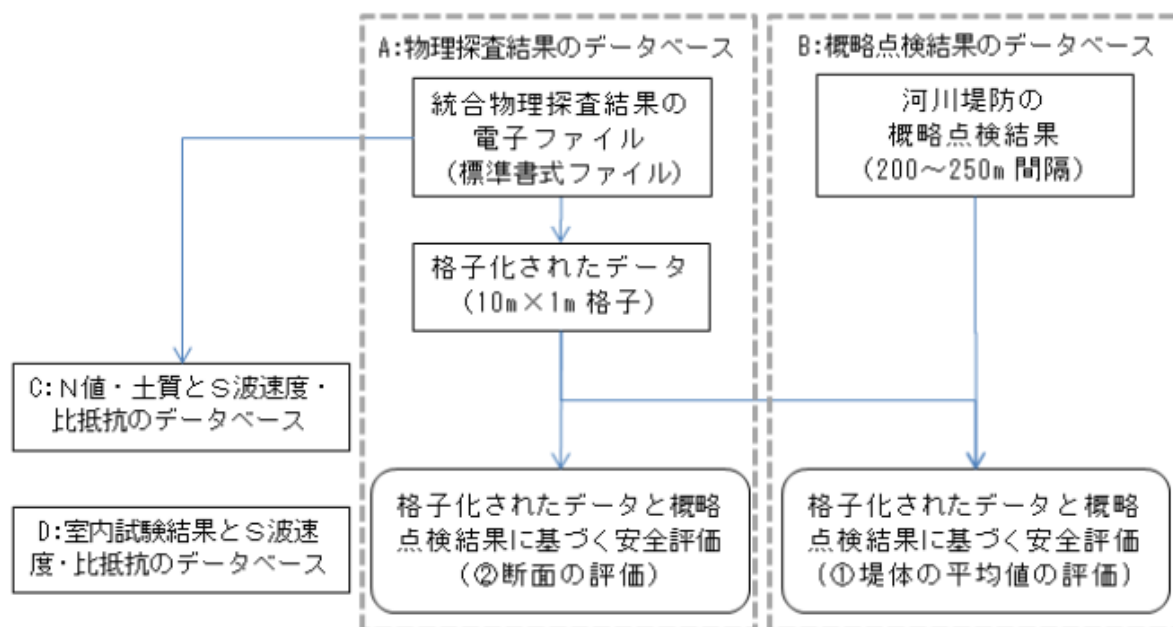


図 4.2.1 統合物理探査データベースの基本構成（林ほか，2013）

4.3 データベースを利用した地盤物性評価

物理探査成果等のデータベースを用いて、分析や地盤物性評価に利用することが提案されている。

林ほか（2010）は、トンネル調査において弾性波探査により得られた P 波速度断面に対する地質解釈や地山分類などの問題点を整理し、データベースを用いてデータを収集・分析して解釈を補助するシステムを検討し、ソフトウェアの試作を行っている。

図 4.3.1 は、施工基面の弾性波速度を抜き出し、地山の種類、土被り厚を合せてデータベースで検索を行い、過去のトンネル支保区分の施工実績を集計しその割合を表示したものである。トンネル支保区分は設計と施工実績が乖離することが多く、よりの確な支保区分の決定が求められている。トンネル地山分類に従えば、地山種類と弾性波速度でトンネル支保区分は決定できるが、土被り厚や施工実績を考慮することで、弾性波探査結果の解釈を多面的に行おうとするものである。

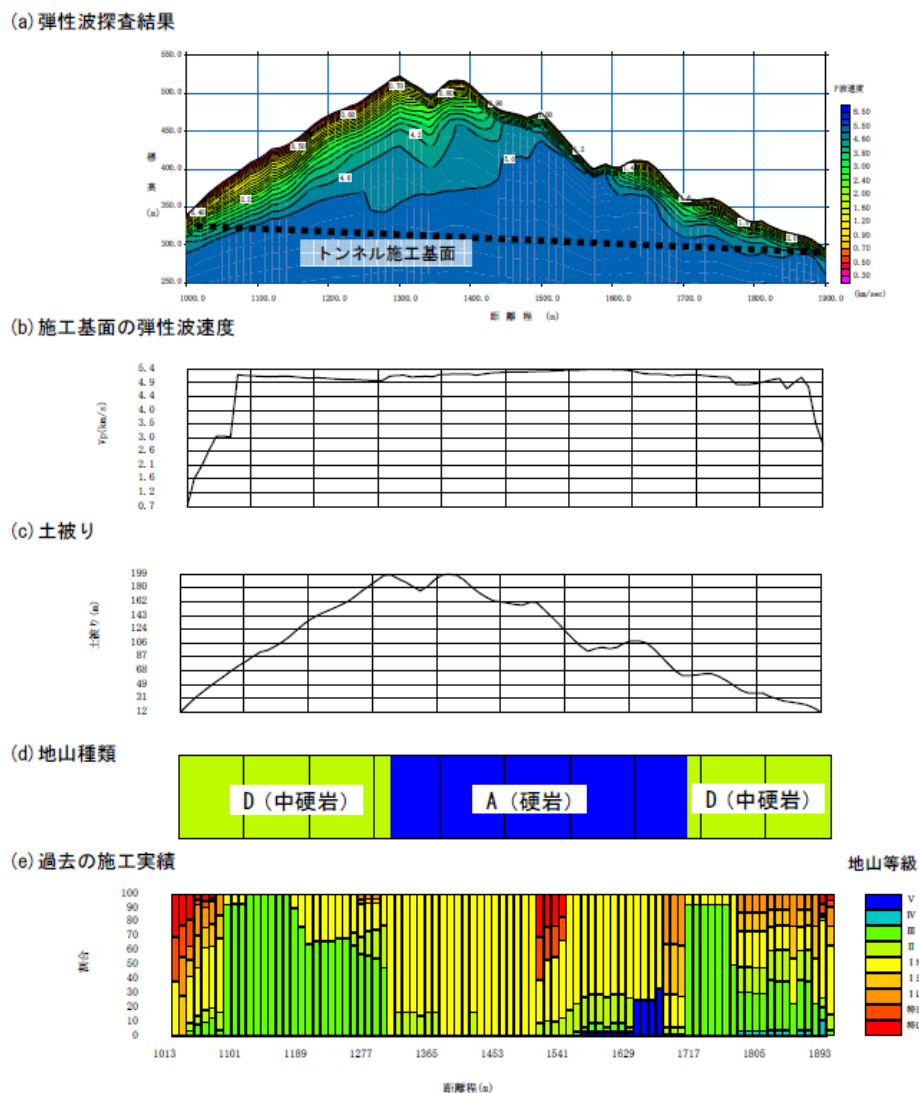


図 4.3.1 データベースを用いた地山解釈図の例（林ほか, 2010）

高橋・稲崎（2010）は、国土交通省の国土地盤情報サイト「KuniJiban」整備を目的として、ダムやトンネル建設等に伴って実施してきた約 1600 件の岩石試験データ（超音波速度、一軸圧縮強度、変形係数等）をデータベース化し、物性間の相関を示している。図 4.3.2 は、構築されたデータベースから各種物性値と有効間隙率の関係を岩種ごとに整理されたものである。このようなデータベースは、2 で示した岩石物理学による解釈の基礎データとなるものであり、土質試料、岩石資料を問わず整備、維持され、また公開されることが望まれる。また、変形係数などについては測定方法により物性値が異なった値となる場合があり、データベース化に際しては測定方法の記載を行う必要性を示している。

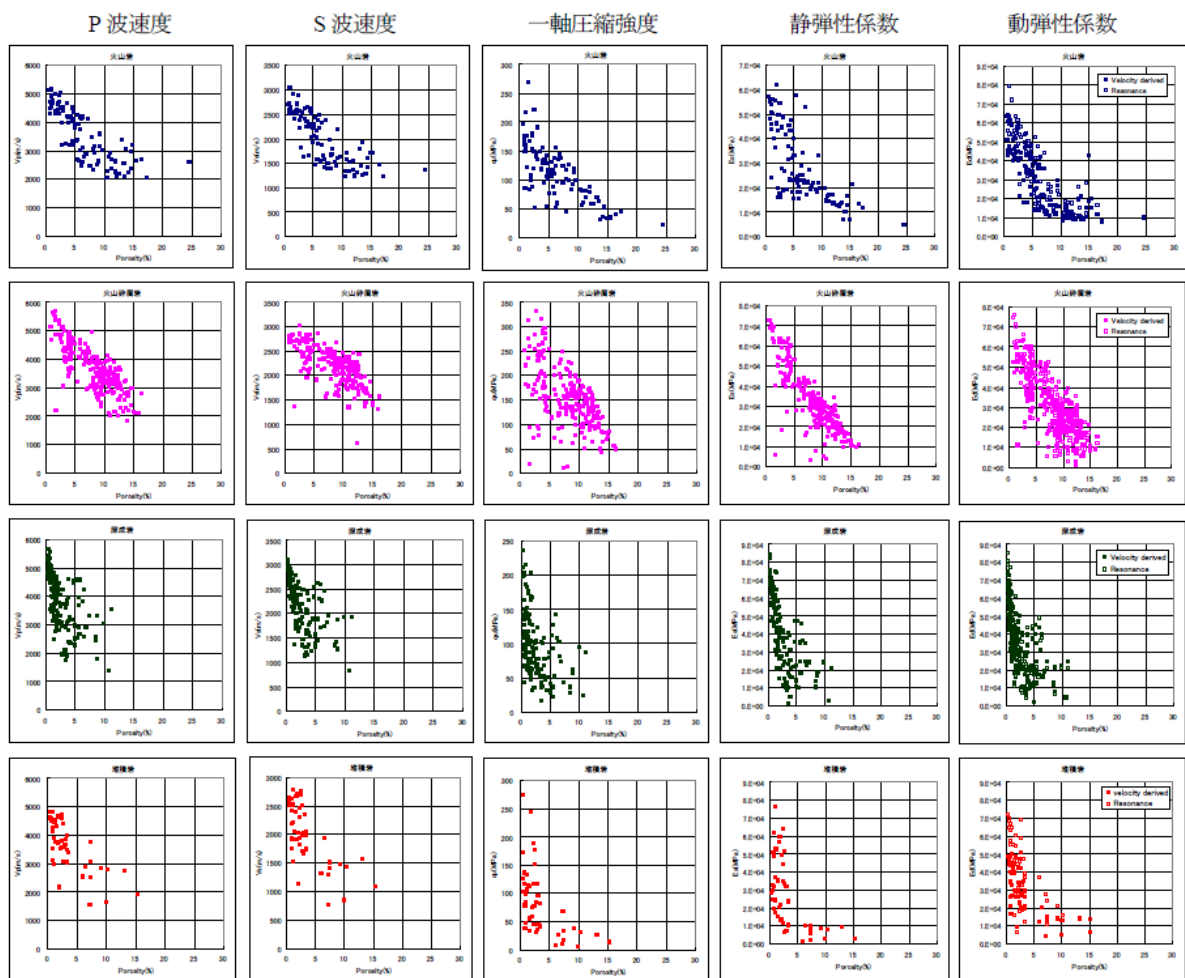


図 4.3.2 各種毎の各物性の有効間隙率との関係図（縦軸：各物性，横軸：有効間隙率，上から火山岩，火山砕屑岩，深成岩，堆積岩．動弾性係数の図中，■：速度値からの推定，□：共振法による測定値）（高橋・稲崎，2010）

4.4 電子納品

4.1 において物理探査結果の標準書式の例を示したが、標準書式を定めただけではデータベースの構築は困難である。データベースを構築するためには、物理探査結果について所定の品質が確保されており、品質が揃ったデータが探査方法や探査対象などに偏りがなく収集可能であることが理想である。そこで、物理探査学会では、表 4.1.1 に示したとおり、物理探査方法の標準化、物理探査結果データの標準書式化の作業を進め、本委員会においても、物理探査の電子納品要領試案の作成を行なった（金田ほか，2015）。ここでは、検討試案の概要を示す。

4.4.1 物理探査電子納品の現状と重要性

土木分野における土質・地質調査における主だった調査内容は、ボーリング調査、土質・岩石試験、物理探査および原位置試験である。図 4.4.1 は、これらの調査内容における調査方法およびデータの取り扱いについて示したものである。物理探査においては、方法が標準化されているのは速度検層のみであり、他の方法については物理探査学会における標準化にとどまっている。一方、他の調査内容については、標準化および規格化に及んでいる。また、それぞれの調査方法において、調査結果のデータシート化および XML などによる電子納品の方法が定められている。物理探査においては、調査結果として提出すべきもの、電子化の方法などは定められておらず、物理探査実施者の任意で行われているのが現状である。表 4.4.1 は、代表的な物理探査について、電子納品の状況をまとめたものである。物理探査結果の電子化は行われているが、納品する成果物やデータ形式については、ばらばらであり、また、データベース構築に必要な物性値については、利用可能な形式での納品は殆ど行なわれていない。また、測定生データが納品、保存されることも殆どない。

このように、物理探査方法の標準化・規格化、探査結果の統一的な扱いが進まないのは、以下の事由によるもと考えられる。

- ・ 数多くの探査方法が存在し、同じ探査方法であってもバリエーションが多い
- ・ 調査対象、調査深度などにより、同じ探査方法であっても探査実施仕様が異なる
- ・ 大量のデータを扱う
- ・ 測定データが最終成果になることは少ない。データ処理、解析を経て最終成果を作成
- ・ 測定データから最終成果のデータシート化が困難

	ボーリング調査	土質・岩石試験	物理探査	原位置試験
手法の標準化	規格化	規格化	規格化	規格化
基本データ	柱状図	データシート	データシート	データシート
電子化の方法	XML化	XML化	任意	XML化

図 4.4.1 物理探査の現状

表 4.4.1 代表的な物理探査の電子納品状況

物理探査手法	成果の内容	データ形式	収録場所(フォルダ)	備考
速度検層 ダウンホール方式	区間速度分布図	CAD, PDF, XML, 図形式	DRAWING, REPORT, BORING/DATA	柱状図の付加データとしてBORING/DATAにXMLファイルで収録。そのほか、DRAWING, REPORTにも収録されることも多い。
	走時曲線	CAD, PDF, 図形式	DRAWING, REPORT	PDFでREPORT, CADでDRAWING, 図として報告書本文中, 収録せずなど様々。
	波形図	PDF, 図形式	REPORT, 収録せず	走時曲線と組み合わせて, PDFでREPORTに収録されることがある。
	測定波形データ			殆ど収録しない。
速度検層 孔内起振 受振方式	区間速度分布図	CAD, PDF, XML, 図形式	DRAWING, REPORT, BORING/DATA	柱状図の付加データとしてBORING/DATAにXMLファイルで収録。そのほか、DRAWING, REPORTにも収録されることも多い。
	波形図	PDF, 図形式	REPORT, 収録せず	PDFでREPORTに収録されることがある。
	測定波形データ	PDF, 表形式	REPORT, 収録せず	殆ど収録しない。
電気検層	比抵抗深度分布図	PDF, 図形式	REPORT	PDFでREPORTが多いと推定。
	測定データ			殆ど収録しない。

一方、統一した形式で物理探査結果の電子納品を行なう利点・効果としては、以下があげられる。

- ・ 探査実施者の明記による意識向上、技術向上、責任の明確化
- ・ 探査成果の品質向上
- ・ 測定生データ、探査成果のデジタル保存による第三者の見直し、再評価が可能
- ・ 探査成果のデータベース化、二次利用

電子納品において所定の書式で納品する調査内容は、全て調査実施者および担当者を実名で記入することが規定されている。このことは、データの品質確保に有効に作用していると考えられる。物理探査については、実施者を実名記入することは少ない。物理探査結果の標準書式化およびその電子納品は、物理探査結果の品質確保およびデータベース化に大きく寄与するものと考えられる。

4.4.2 物理探査電子納品要領試案（物理探査学会案）の概要

物理探査電子納品要領試案（物理探査学会案）（以下、物理探査学会案）は、以下の基本概念の基に作成された。

- ① 「地質・土質調査成果電子納品要領（案）」との整合性
- ② 電子納品成果作成の簡略化、重複納品の回避
- ③ 物理探査物性断面データのXML化
- ④ 測定原データ（生データ）の納品
- ⑤ データ整理、解析過程の明確化、追跡可能化

①②は、現行の電子納品要領に整合させることで、物理探査の電子納品に伴う混乱、作

業の煩雑化を回避するものである。③の XML 化については、林ほか（2010）による書式を採用しており、既に河川堤防の統合物理探査（土木研究所・物理探査学会，2013）で実施されている電子納品と同じ書式としている。また、④測定生データを納品すること、⑤データ整理、解析過程の明確化、追跡可能化とするファイル構成とすることで、第三者による再評価、再解析を可能としている。

表 4.4.2 に物理探査学会案の構成を示す。また、図 4.4.2 に物理探査学会案のフォルダ構成を示す。物理探査成果は、現行の電子納品における「BORING」フォルダ下の「GEOPHYS」フォルダに、データごとに所定のフォルダに収録する構造としている。各フォルダに収録するデータの内容を表 4.4.3 に示す。

表 4.4.2 物理探査電子納品要領試案（物理探査学会案）

章	タイトル	内容
1章	適用	物理探査成果電子納品要領案の主旨，用語の解説
2章	物理探査の電子成果品	電子納品を行う物理探査成果の種類と区分
3章	フォルダ構成	フォルダの全体構成と作成規則
4章	物理探査基本情報ファイル	物理探査情報ファイルの記述項目と作成規則
5章	物理探査交換用断面データ	該当する物理探査成果内容と収録規則
6章	物理探査物性平面データ	該当する物理探査成果内容と収録規則
7章	物理探査解析データ	該当するデータと収録規則
8章	物理探査測定原データ	該当するデータと収録規則
9章	物理探査その他データ	収録するデータの内容
巻末	付録	物理探査交換用断面データの仕様と作成例，物理探査電子納品の例
巻末	参考資料	物理探査学会標準書式(案)の仕様

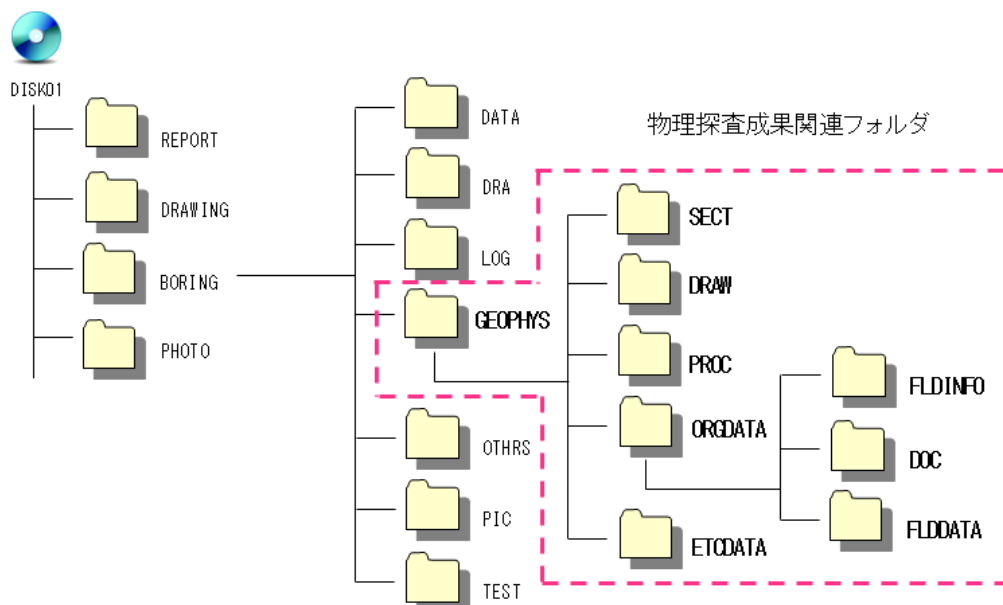


図 4.4.2 フォルダ構成

表 4.4.3 各フォルダに収録する物理探査成果（物理探査学会案）

サブフォルダ		概要	成果品の例
物理探査サブフォルダ			-
SECT	物理探査物性断面図サブフォルダ	物理探査交換用断面データ(所定の書式でXML化した物性断面図)を収録.	速度断面図 比抵抗断面図
DRAW	物理探査物性平面図サブフォルダ	物理探査平面図データ. 探査成果が平面図となる物性分布図, XML化できない物性断面図など. SECTサブフォルダに収録できない成果は,ここに収録.	反射強度断面図 磁気異常平面図
PROC	物理探査解析データサブフォルダ	物理探査解析データ管理ファイル, 物理探査解析データ, 整理結果図, 解析中間成果図表類など. 格納する成果の種類や数量が多い場合, 任意にフォルダを作成し収録する.	波形図・走時曲線 見掛比抵抗断面図 電位減衰曲線 解析ファイル
物理探査測定原データサブフォルダ			-
ORGDATA	FLDINFO	現場測定・解析記録サブフォルダ	現場測定・解析記録データ(測線連番ごとに作成)を収録. 物性断面図と測定原記録の対応や解析過程を示すデータ収録.
	DOC	オリジナルファイル読み取り手順文書サブフォルダ	原測定ファイルの読み出し方法, 書式を記述した文書を収録.
	FLDDATA	オリジナル測定ファイルサブフォルダ	現場測定オリジナルデータを収録. 探査の種類や数量が多い場合, サブフォルダを作成. 収録は, 原ファイルのままが良い.
ETCDATA	物理探査その他データサブフォルダ	測定機器の校正記録など, 上記に該当しない記録, データを収録. 不要な場合, 省略可.	再解析結果 機器校正試験結果

表 4.4.4 物理探査成果品の収録フォルダと形式の例（物理探査学会案）

物理探査手法	成果品の名称	形式	案(GEOPHYS以下)	現行
弾性波探査屈折法	速度断面図	XML	SECT	DRAWING, REPORTなど
	走時曲線	PDF, 表形式	PROC	DRAWING, REPORTなど
	波線図	PDF, 図形式	PROC	DRAWING, REPORTなど
	波形図	PDF, 図形式	PROC	REPORT, 収録なし
	現場測定野帳, 解析記録	PDF, 表形式	ORGDATA/FLDINFO	収録なし
	測定波形ファイル	任意*	ORGDATA/FLDDATA	収録なし
二次元比抵抗探査	比抵抗断面図	XML	SECT	DRAWING, REPORTなど
	見掛比抵抗断面図	PDF, 図形式	PROC	REPORT, 収録なし
	減衰曲線・等深度電位曲線	PDF, 図形式	PROC	REPORT, 収録なし
	現場測定野帳, 解析記録	PDF, 表形式	ORGDATA/FLDINFO	収録なし
	測定結果ファイル, 測定原データ	任意*	ORGDATA/FLDDATA	収録なし
地中レーダ探査	反射強度断面図・平面図	PDF, 図形式	DRAW	REPORTなど
	反射強度断面図・平面図(処理前)	PDF, 図形式	PROC	収録なし
	現場測定野帳, 解析記録	PDF, 表形式	ORGDATA/FLDINFO	収録なし
	測定反射波形ファイル, 測定出力	任意*	ORGDATA/FLDDATA	収録なし

任意*:測定機器固有の形式

表 4.4.4 は、代表的な物理探査について、納品する成果品種類と収録フォルダおよびファイル形式を示したものである。例えば、弾性波探査屈折法では、探査の最終成果となる速度断面図は、XML 形式で「SECT」フォルダに収録する。中間成果となる走時曲線や波線図（パス計算結果）は「PROC」フォルダに PDF 形式、表形式で収録する。測定波形データは測定機器固有のファイル形式で、「ORGDATA/FLDDATA」に収録する。また、測定機器固有のファイルを読み出すための手続きやファイル書式を記録した文書ファイルを「ORGDATA/DOC」に PDF 形式で収録する。測定生データと中間成果との関係、中間成果と最終成果の関係、現場測定時および解析時の記録などについては、「ORGDATA/FLDINFO」に測線ごとに PDF 形式あるいは表形式で収録し、第三者による再解析を可能としている。

物理探査学会案は、地質地盤情報電子データ標準化小委員会で検討され、「物理探査電子納品要領（原案）」「物理探査電子納品要領 付属資料（原案）」として公開された（日本建設情報総合センター：<http://www.jacic.or.jp/hyojun/2015shouiinnkai-03.html>, 2017/10/23）。

引用文献

- 稲崎富士・林 宏一・徳丸哲義（2013）：河川堤防の安全性評価のための統合物理探査，河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－，愛智出版，40-42.
- 林 宏一・稲崎富士・倉橋稔幸・物理探査書式検討研究委員会（2010）：土木地質調査分野における物理探査結果の標準書式の提案，物理探査学会第123回学術講演会論文集，13-16.
- 林 宏一・斎藤秀樹・赤澤正彦・トンネル物理探査研究委員会（2010）：トンネル弾性波探査の高度化における解釈補助のためのデータベース及びソフトウェアの検討，物理探査，**63**，357-369.
- 林 宏一・稲崎富士・北尾 馨・北 高穂（2013）：河川堤防の安全評価のための統合物理探査のデータベース，物理探査学会第128回学術講演会論文集，170-173.
- 林 宏一・稲崎富士・北尾 馨・北 高穂（2014）：河川堤防の統合物理探査における標準書式の利用例，物理探査学会第131回学術講演会論文集，90-93.
- 稲崎富士・倉橋稔幸・物理探査書式検討研究委員会・北尾 馨（2011）：標準書式に基づいた物理探査断面DBの構築（その1）－データベースの概要－，物理探査学会第124回学術講演会論文集，251-254.
- 金田朋之・三木 茂・統合物理探査調査研究委員会（2015）：物理探査成果の電子納品，物理探査学会第133回学術講演会論文集，88-89.
- 蒔苗耕司（2008）：土木における情報の意義と役割，土木学会論文集F，**64**，No.2，148-162.
- 三木 茂・物理探査書式検討研究委員会・統合物理探査調査研究委員会（2014）：物理探査データ標準書式のトンネルプロジェクトへの適用試案，物理探査学会第131回学術講演会論文集，94-97.
- 日本建設情報総合センター・地質地盤情報電子データ標準化小委員会（2017）：物理探査電子納品要領（原案），<http://www.jacic.or.jp/hyojun/2015shouiinnkai-03.html>，2017/10/23.
- 日本建設情報総合センター・地質地盤情報電子データ標準化小委員会（2017）：物理探査電子納品要領 付属資料（原案），<http://www.jacic.or.jp/hyojun/2015shouiinnkai-03.html>，2017/10/23.
- 高橋 亨・稲崎富士（2010）：地盤物性データベース「KuniJiban」整備を目的とした岩石物性データの収集と分析，物理探査学会第123回学術講演会論文集，9-12.
- 高橋 亨・物理探査書式検討研究委員会（2012）：物理探査データのアーカイブ化を目的とした標準書式案の検討について，物理探査学会第126回学術講演会論文集，79-82.

5. 統合物理探査の普及

5.1 地盤調査における統合物理探査の位置づけ

土木分野における物理探査において、屈折法地震探査は、弾性波速度が大きくなる基盤深度を得ること、地山の状態を空間的に連続的に把握すること、局所的な弱部を検知することなどを目的に利用されてきた。弾性波速度(V_p)と地山の強度の相関が比較的良いことから、弾性波速度(V_p)と地山区分を結びつけて利用されることが多い。すなわち、弾性波速度は大まかな地山区分のひとつの指標として使用されてきたものであり、間隙率、飽和度、強度定数などの地山の工学的な物性値を得るために使用されてきたものではなかった。しかし、地山の工学的な物性値を空間的に連続的に取得することへの期待は大きいといえる。

一方、電気探査は、帯水層を検出するための調査法として発展し、比抵抗と地質の関係を利用して定性的に帯水層を判定してきた。二次元比抵抗探査（例えば、島ほか、1995）が実用化されると、土木分野の利用が拡大し、地山の弱部の検出や地山状態の把握などに適用されるようになった。比抵抗を用いた地山区分も試みられたが（日本道路協会、1996）、成果を得るには至っていない。比抵抗値が体積含水率に関係することから、弾性波速度と同様、間隙率や飽和度などの工学的な物性値を連続的に取得することへの期待は大きいといえる。

このような背景のもと、統合物理探査は、単なる異常箇所の検出や大まかな地山区分ではなく、従来の探査で必ずしも明らかにできなかった部分をより定量的に把握するための方法として期待されている。その対象としては、地質区分・飽和度・間隙率・透水係数などである。従来、単一の物理探査として行われてきた物理探査と統合物理探査では、得ようとするものが質的に異なっていると考えられる。ここで留意しておかなければならないことは、従来の単一物理探査と統合物理探査で、期待している地盤情報の空間スケールが異なっている可能性があることである。例えば、従来 5m 間隔の測点で探査を行い、数 10m 単位で地山の区分を行っていたものを、統合物理探査では、5m 間隔の工学的物性値を期待されているのかもしれない。

従来の一般的な仕様で実施した複数の物理探査として統合物理探査を実施した場合、期待に応える成果となっていない懸念がある。統合物理探査の実施に際しては、従来以上に空間スケールを意識した探査計画、探査結果の解釈とすることが重要であると考えられる。

5.2 地盤調査における統合物理探査活用の提案

本節では、社団法人全国地質調査業協会連合会（2007）の報告書に基づき考察する。同報告書では、防災・維持管理分野への物理探査の適用可能な対象分野として、以下 9 つの

分野をあげている。

- ① 河川堤防（破堤の原因となる堤防土材の不均質や強度不足，浸透や漏水，堤防護岸や構造物周辺に存在する空洞）
- ② ダム・貯水池・溜め池（ダム貯水池沿いの斜面の不安定化，堆砂による貯水量の低下，堤体劣化・堤体からの漏水）
- ③ 海岸・港湾・空港・埋立地（海岸護岸や港湾埠頭，空港滑走路下に存在する緩みの検出，埋立地での液状化）
- ④ 道路・鉄道・トンネル（道路・鉄道沿いの不安定斜面，道路・鉄道の盛土地盤の変状，トンネル覆工裏の空洞）
- ⑤ 土地造成（地震時や降雨時の盛土崩壊，文化材の保護）
- ⑥ ライフライン（地盤の不同沈下に伴う埋設管損傷，埋設管劣化に伴う空洞・緩み）
- ⑦ 建築（コンクリートの強度低下，鉄筋間隔不足・鉄筋腐食）
- ⑧ 地すべり・斜面（降雨時の表層崩壊，吹付け法面の劣化）
- ⑨ 活断層・液状化（地震による液状化）

これらの分野には様々な物理探査法が適用されているものの，適用課題を「探査結果の解釈」と「総合的判定」とし，経験や技術力の差が表れ判定の信頼性が問題になる点や，物理探査単独ではなく他の調査結果を含めて総合的に判断する必要性を示している。また，維持管理分野で対象となる地表から十数 m の範囲において，数 cm～m オーダーの分解能で探査できる技術が空白となっている点を今後の技術的課題としてあげている。

次に，防災・維持管理分野への物理探査法の適用性や市場化にあたっての課題と必要とする技術開発の方向を検討するため，物理探査法に対するニーズの把握作業を行っている。まず，国土交通省，農林水産省およびその関係機関他のネット上で目的・適用手法等のニーズ情報を収集し，次に収集資料を分野別・段階別に整理し，さらに物理探査適用検討の対象の絞り込みを行っている。具体的には，表 5.2.1 に示す斜面防災，河川，空洞・埋設物の 3 分野，14 対象，47 目的のニーズ項目に整理し，図 5.2.1 に示す 3 分野，11 対象，7 項目に絞り込んでいる。次節より，各 3 分野につき主要ニーズに対して物理探査法の適用性について取りまとめた結果を示す。

表 5.2.1 物理探査適用のニーズ項目（全国地質調査業協会連合会, 2007）

斜面防災		河川		空洞・埋設物				
対象	点検・調査目的	対象	点検・調査目的	対象	点検・調査目的			
岩盤斜面	内部構造特に風化・弱層	堤防・堤体内部	内部構造	空洞(路面下)	有無			
	内部構造特に間隙率・含水率		弱点部		位置			
	亀裂分布		空洞		規模			
	地下水形状		漏水箇所	空洞（トンネル）	有無			
表面形状	水位・湿潤線	規模						
地すべり	すべり面形状	基礎地盤・河床	地山風化	空洞（海岸堤防・護岸・エプロン）	覆工の浮き			
	範囲		弱点部		有無			
	地質構造	河川構造物・管理施設	洗掘	位置				
	崩壊規模		損傷	規模				
アンカー工の維持管理	変状	特殊地下壕（防空壕・坑道・古洞）	有無					
空洞	老朽化		位置					
吹付法面	亀裂	地下埋設物			規模			
	劣化				有無			
	地山風化				位置			
斜面	地下水				地下埋設物			亀裂状況
	雨水・表流水の浸透・浸食							敷設状況
雪崩	範囲・規模							
	発生時期							
地震動と斜面	崩落							
	地すべり							

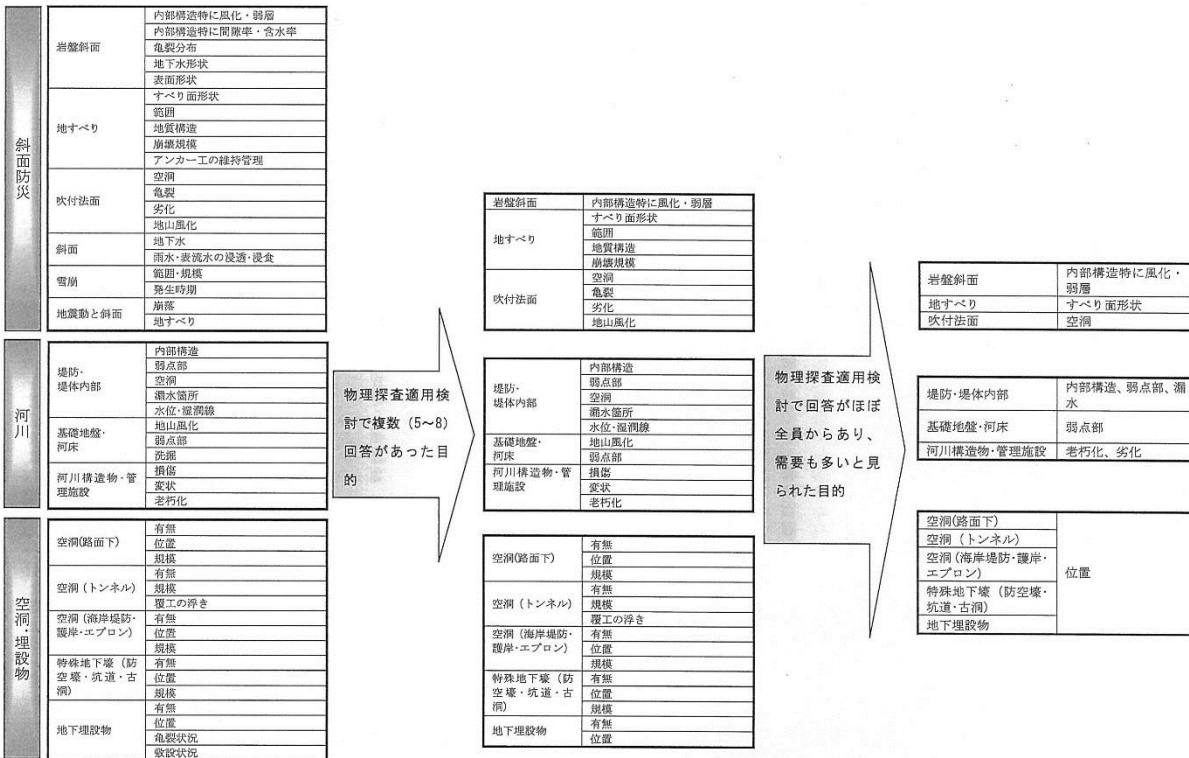


図 5.2.1 ニーズ項目の絞り込みの流れ（全国地質調査業協会連合会, 2007）

5.2.1 斜面防災

斜面防災における着眼点は図 5.2.2 の概念図に示す通りで、以下のニーズをあげている。

- ・ 岩盤斜面における風化構造・弱層部の把握
- ・ 地すべり・斜面崩壊における地すべり面の形状，地質構造の把握
- ・ 吹付け法面における吹付け背後の空洞位置等の把握

斜面防災に対する従来の物理探査法の役割は，対策工設計のための外力規模を算出する「災害発生規模の予知」を担う手法として，すべり面に関する地中の連続的な情報を提供し，調査全体の経済性を確保するという一定の成果をあげてきた。一方で，広域の対象範囲から危険区域を迅速・正確に抽出する役割が物理探査法にも求められてきており，探査により取得される物理量と斜面危険度の因果関係に対し，直接の決め手に欠ける部分が残されている。今後，この問題は複数の物理探査データを組み合わせることにより，地盤判定の精度を向上させること，航空測量，GNSS のような衛星測量，空中写真判読技術等の地形解析技術との融合により解決できることが期待できるとしている。統合物理探査において，S 波速度と比抵抗の 2 つの物性値が得られる複数の物理探査法を組み合わせることで，間隙率・含水率・粘土含有率のプロファイルを算出することにより，風化構造・弱層部の把握，すべり面の含水率の変化をモニタリングすることなどで精度向上が期待できる。

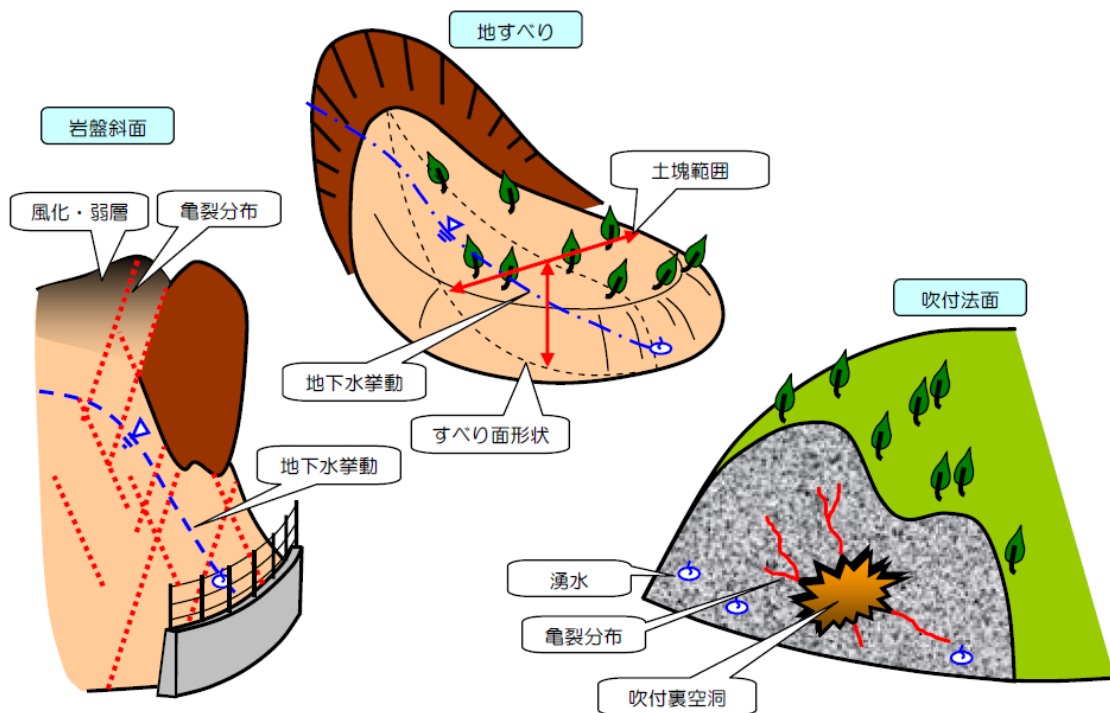


図 5.2.2 斜面防災における着眼点（全国地質調査業協会連合会，2007）

5.2.2 河川

河川における着眼点は図 5.2.3 の概念図に示す通りで、以下のニーズをあげている。

- ・ 堤体の土質・弱層部，堤体の変状・緩み・空洞，漏水箇所の把握
- ・ 基礎地盤の土質，基礎地盤時間からの漏水箇所の把握
- ・ 河川構造物の変状・沈下，周辺地盤の緩み・空洞・漏水箇所の把握

河川堤防における代表的な物理探査法として、表面波探査・電気探査・地中レーダ探査・電磁探査（スリングラム法）がある。統合物理探査に期待される課題として、S 波速度と比抵抗の 2 つの物性値が得られる複数の物理探査法を組み合わせ、間隙率・含水率・粘土含有率・透水係数のプロファイルを算出することにより、土質区分の判定精度、緩み・弱層部の検知精度の向上が期待できる。

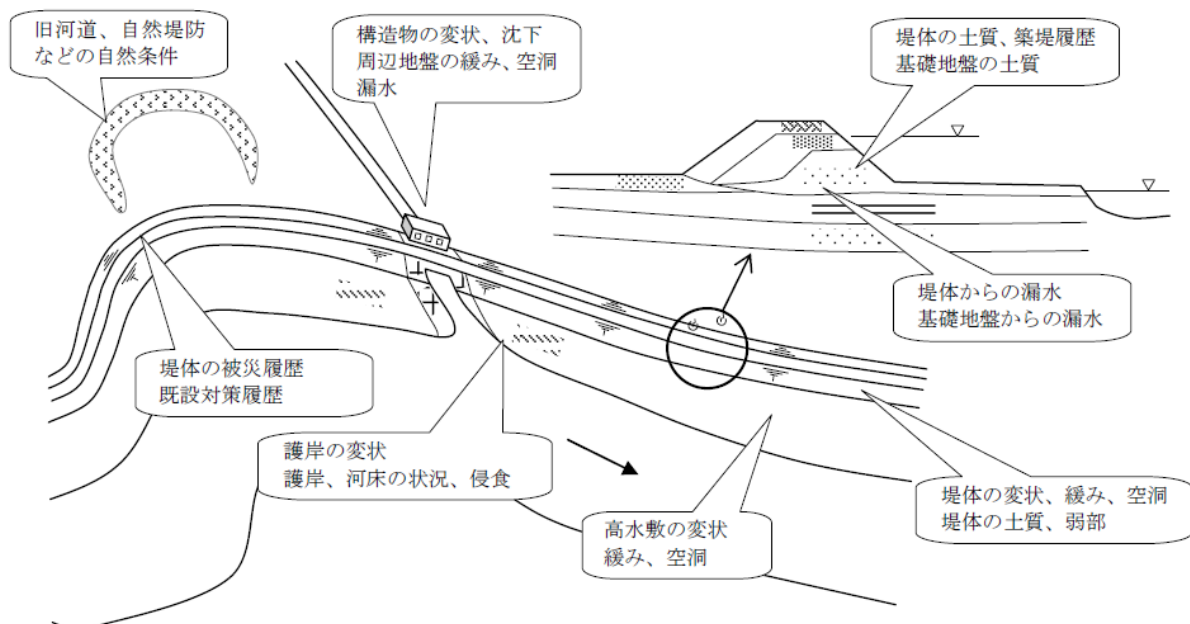


図 5.2.3 堤防調査における着目点（全国地質調査業協会連合会, 2007）

5.2.3 空洞・埋設物

空洞・埋設物を対象としたニーズは図 5.2.4 の概念図に示す通りで、以下のニーズをあげている。

- ・ 路面下の空洞位置の把握
- ・ トンネル覆工背面の空洞位置の把握
- ・ 港湾・海岸部の空洞位置，特殊地下壕の把握
- ・ ライフライン沿いの地盤の不同沈下に伴う埋設管損傷，埋設管劣化に伴う空洞・緩み箇所の把握

空洞・埋設物を対象とした代表的な物理探査法として、地中レーダ探査、RCレーダ探査、電磁誘導法があり、これらの探査法の埋設管種に対する適用性について表 5.2.2 に示している。この分野では、空洞や埋設物などの異常部の存在を判定することが主要なニーズではあるが、複数の物理探査データを組み合わせて、空洞が水で満たされているかどうか、埋設物を構成する素材などの種別まで判定する精度の向上が期待される。

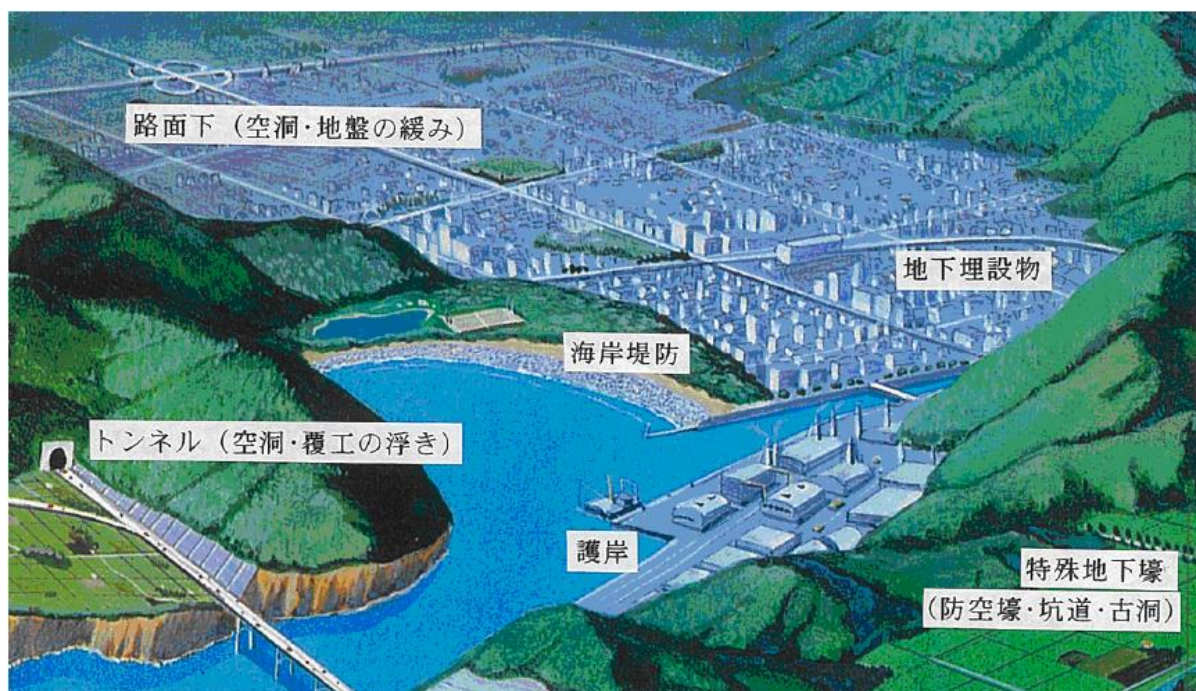


図 5.2.4 空洞・埋設物を対象としたニーズ（全国地質調査業協会連合会, 2007）

表 5.2.2 埋設管の探査器と探査対象の適用性（全国地質調査業協会連合会, 2007）

	RCレーダ	地中レーダ	電磁誘導法	
			間接法	直接法
油配管	×	○	△	○
鋼管	○	○	△	○
塩ビ管	○	○	×	×
POS	×	△	△	○
動力・弱電	○	△	△	○

○：探知可能，△：今後の検証が更に必要，×：探知困難

5.3 統合物理探査の効果の検討

5.3.1 統合物理探査による地質リスクの回避

地質リスクとは、地質にかかわる事業リスクのことで、事業コスト損失そのものとその要因の不確実性をさす（地質リスク学会，2010）。渡邊ほか（2009）が行った地質リスク

評価にかかわる既往研究の調査結果によれば、ボーリングや物理探査等の観測または測定結果によって直接得られる情報（一次情報）から、地質モデルのような二次情報へと解釈を行う過程で、値の精度、正確さやあいまいさ等の変更が行われており、その情報が伝達されていないという問題が指摘されている。また、一次情報のばらつきについては調査・試験方法の吟味や統計的操作等によってある程度除去可能であるが、それを二次情報へと加工・解釈する際の不確実性については定量的な処理方法がなく、技術者の経験や判断をまじえた総合的見地が必要とされている。

統合物理探査委員会は、まさに上記の一次情報から二次情報への解釈を正しく行うことを目指して設立されたものであり、その目的を達することが地質リスクの回避へとつながると考えることができる。地質リスクを回避もしくは低減するということは、事業コスト損失を小さくすること、およびその分散（予測幅）を小さくすることといえる。事業コスト損失とその分散の低減に対し、物理探査がどのように寄与できるかを以下に述べる。

ボーリングやサウンディングといった特定位置における一次元の調査だけでは、各調査地点の間のデータがないために、事前情報などによって地盤構造や地盤物性を推測するほかない。このような情報不足によって、たとえばボーリング孔間に存在する断層の見落としや支持層深度の誤りといった地質リスクが生じる可能性がある。このような問題に対しては、統合物理探査に限らず、通常の物理探査であっても、ボーリング孔間になんらかの情報（データ）を追加するという形で地質リスクの回避に貢献できる。また、統合物理探査として複数の調査を行った場合には、1種類の物性だけでは判別できないような地盤の特性を抽出することにより、推定誤差の低下が可能である。これは不確実性の低減によって地質リスクを低減させていることになる。さらに、統合物理探査によって弾性波速度や比抵抗という物性値から地盤の土質推定や土質定数といった別の指標に解釈できれば、物理探査結果を有効に設計へ取り込むことによって事業コスト損失と要因の不確実性をともに低下させることが可能と考えられる。ただし、情報の追加によって地質リスクを低減したにも関わらず、追加した情報の不確かさのため、結果として事象の不確実性が増加する可能性があることには留意する必要がある。

5.3.2 経済効果の試算

物理探査、ひいては地質調査が生み出す経済効果を測る指標のひとつとして、事前に調査を行っておけば顕在化を避けられた可能性のある地質・地盤リスクによる人的・物的被害や工事・対策費用の増大増加額が考えられる。言い換えれば、これは事前情報への投資不足により最善の意思決定を行えなかったことで発生した損失ともいえる。ここではこういった観点での経済効果の試算として、(1)地質リスクマネジメントによる効果、(2)物理探査結果の情報価値（VOI: Value of Information）の2点についてまとめる。

(1) 地質リスクマネジメントによる効果

地質リスク学会では、地質リスクマネジメント事例を積極的に収集し、以下の4つの型に分類し、整理を行っている。

- ・ A 型：地質リスクを回避した事例
- ・ B 型：地質リスクが発現した事例
- ・ C 型：発現した地質リスクを最小限に回避した事例
- ・ D 型：上記の A 型，B 型，C 型以外の事例

A 型とは，事前に地質リスクに対する検討・調査を十分に実施することによって地質リスクそのものを回避した事例である．物理探査は，その手法の特長から調査地域の概略調査に用いられることが多く，地質リスクが発現した後に実施することは少ないため，主に A 型の事例で物理探査が貢献できると考えられる．

「マネジメント効果」は，上記の型ごとに費用として算出される．たとえば，A 型はリスクを未然に管理することによって当初工事費の縮減を達成したもので，効果は次式によって算出される．

$$\text{マネジメント効果} = (\text{当初工事費用①}) - (\text{変更費用③}) - (\text{リスク対策費用②})$$

A 型の事例として，複合探査により重金属対策が必要な変成帯の分布を絞り込むことによって，不要な費用の計上を抑えることができた事例がある（尾高・高田，2016）．この事例では，トンネル調査で通常実施される屈折法地震探査に加え二次元比抵抗探査と追加のボーリングを実施することで，弾性波速度では区別できなかった変質帯と非変質帯の分布を詳細に把握している（図 5.3.1）．その結果，既往調査では 200m と想定されていた重金属対策が必要な変質帯の長さが 130m と見直され（図 5.3.2），トンネルの支保パターン変更により 1000 万円の減額，70m 区間が重金属対策不要となったことにより，9775 万円が減額となっている．

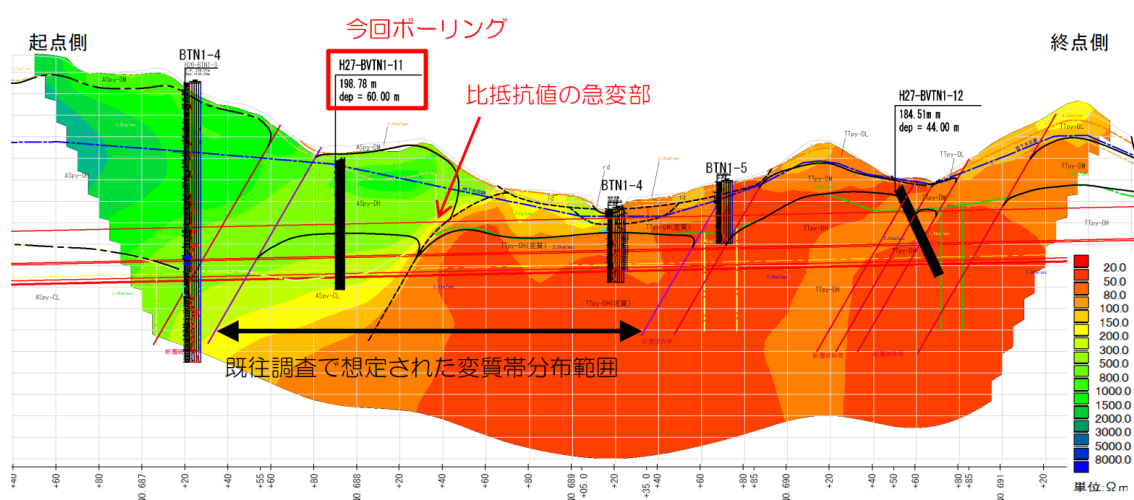


図 5.3.1 高密度電気探査結果（尾高・高田，2016）

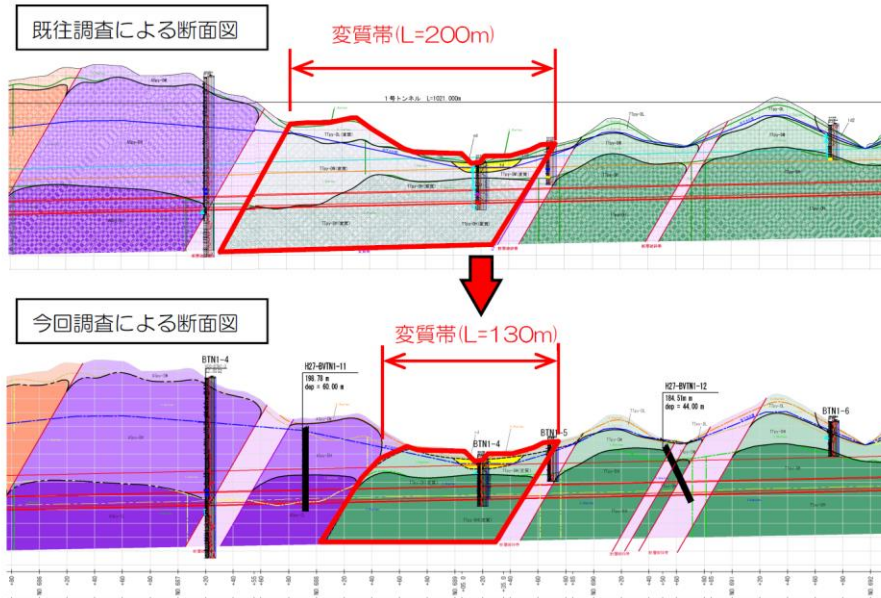


図 5.3.2 既往調査による断面図と更新された断面図（尾高・高田, 2016）

本事例で示した調査は、現時点では施工前段階であり、算出された費用やマネジメント効果は想定のものである。しかしながら、物理探査を実施することによって事業コスト損失が防止できることを示している。

当初工事費用①：(200m 区間の掘削費と重金属対策費)	2 億 3030 万円
変更した工事費用③：	1 億 2255 万円
リスク対策費用②：(高密度電気探査とボーリングの費用)	800 万円
マネジメント効果：(①－③－②)	9975 万円

(2) 物理探査結果の情報価値

物理探査結果のように不確かさを含む結果を用いてある判断を行うにあたっては、論理的整合性を持った意思決定過程が必須であり、合理性が求められる（佐藤, 2012）。合理的な意思決定を行う方法のひとつとして、確率を用いた決定木（Decision Tree）がある。決定木を用いた場合、期待値が最も大きくなる選択が最も合理的な判断であるとされる。情報の価値 VOI は、決定木に情報を加えた時と情報を加えなかった時の期待値の差として定義される。例えば、佐藤（2012）が示した油田開発の意思決定の例では、追加情報として得られる不確かさを含む掘削結果の VOI が示されている。VOI は事前確率（この例では巨大油田がある確率）によっても異なり、また掘削結果の確度（信頼性）によっても異なるが、それぞれの場合について計算されている。他にも、沿岸域での地下水利用に伴う地下水塩水化問題に対し電磁探査の VOI を求めた例がある（Nenna and Knight, 2014）。この例では電磁探査結果の VOI が 0 以上となり、物理探査結果を取り込むことによって合理的な意思決定に貢献できたことが示されている。複数の物理探査法に関連する VOI の利用例として、地質・地盤リスクとは異なるが、海洋油田開発における地震探査と電磁探査の販

売データについて、それらのデータの良否による金銭的価値を見積もった事例がある (Eidsvik et al., 2008)。VOI の値は 2 つの手法による加算になり、両手法の組み合わせが貯留層評価に有用な情報を提供する場合、VOI も大きくなる。

VOI は事前情報等によって異なるため、常に探査結果の VOI が 0 以上になるとは限らない。これは、仮に探査結果に価値がないと判断された場合には、計画の見直しが必要であるということを意味している。また、探査結果の VOI が探査に必要な費用を下回った場合には、物理探査を行うことは合理的な判断とはいえ、経済効果は少ないと言える。このような計算方法を取り入れることも今後必要である。

5.4 統合物理探査の普及のために

統合物理探査では、同一測線において複数の物理探査法を実施することになる。調査コストは増加することになるが、統合物理探査を実施することの効果を定量的に明示することは簡単ではない。一方、地質調査・地盤調査に関わる多くの技術者は、物理探査について十分な知識や経験を有していない。このため、統合物理探査が目的にあって実施されて、今後より普及していくためには、物理探査技術に携わる者は以下の視点で活動を継続することが重要であるといえる。

- ① 物理探査の測定・解析技術の向上
- ② 物理探査結果の解釈技術の向上
- ③ 物理探査の効果評価法の検討
- ④ 物理探査の有用性認知と普及

① 物理探査の測定・解析技術の向上

統合物理探査に関わらず、測定・解析技術の維持、向上は常に必要であり、物理探査の信頼性の確保には不可欠である。また、新しい測定技術や解析技術の研究・実用化により精度向上、効率化を目指す必要がある。

② 物理探査結果の解釈技術の向上

統合物理探査は、複数の物理探査結果により地盤・地質解釈の向上を目指している。確たる根拠に基づき地盤・地質解釈を行なう方法の研究、地盤・地質解釈を行なうための物理モデルおよび地質（地盤）モデルの研究、事例研究による検証と更新は不可欠である。また、不確実要素を伴う地質や地盤を対象とする上で、バラツキやこれまでの知見の中で想定できるモデルでは説明が難しい特異な現象があらわれるのは不可避である。バラツキの大小や特異な現象の有無を判断する方法やその判断根拠について研究・習得していく必要がある。同時に、物理探査の適用範囲・適用限界についても検討しておかなければならない。一方、物理探査成果の標準書式化・データベース化による知見の共有は、解釈技術の向上において重要な基盤整備といえる。

③ 物理探査の効果評価法の検討

統合物理探査を実施した効果を示すことが普及には不可欠である。統合物理探査を実施

することで得られた地盤情報の価値，あるいは得られた地盤情報の精度向上による価値を定性的・定量的に評価する方法が必要である．このような検討・研究はこれまでほとんど行なわれておらず，今後の課題として取り組んでいく必要がある．

④ 物理探査の有用性認知と普及

統合物理探査が有効な地盤・地質調査法のひとつであっても，その有用性が認知されなければ，利用されない．また，信頼できる技術であっても，調査としてニーズがなければ利用されることはない．統合物理探査を物理探査技術から地盤・地質調査技術へと視野を広げ，幅広い技術者層，研究者層にわかりやすい言葉でその方法，有効性，適用限界を説明し続けることが重要である．このためには，①から②に示した物理探査技術の維持・向上に加えて，幅広い普及活動が重要である．

引用文献

- Eidsvik J., Bhattacharjya D. and Mukerji T. (2008): Value of information of seismic amplitude and CSEM resistivity, *Geophysics*, **73**, 59-69.
- Nenna V. and Knight, R. (2014): Demonstration of a value of information metric to assess the use of geophysical data for a groundwater application, *Geophysics*, **79**, 51-60.
- 日本道路協会 (1996): トンネル地山の電気・電磁探査—二次元比抵抗探査手順(案)—.
- 尾高潤一郎・高田嘉典 (2016): 複合探査により地質リスクを評価した事例, 地質リスクマネジメント事例研究発表会講演論文集, 論文 No.2.
- 佐藤光三 (2012): 資源開発と不確実性下における意思決定, 石油技術協会誌, **77**, 第2号, 128-136.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹 (1995): 比抵抗映像法, 古今書院.
- 渡邊法美・佐橋義仁・小笠原正継・尾園修治郎 (2009): 日本の公共工事地質リスクマネジメントの現状と変革の方向性, 建設マネジメント研究論文集, **16**, 215-230.
- 全国地質調査業協会連合会 (2007): 防災・維持管理分野における物理探査の適用, 地質調査関連技術図書シリーズ.

編集後記

物理探査は地盤調査の重要な一分野であることは多くの人が認めていることであるが、有効的に活用されているとは言いがたく、十分な信頼性を得ている状況ではない。物理探査関係者は、新しい探査方法・解析方法の開発、探査方法の標準化などをおして物理探査の適用性および信頼性の向上に努めてきた。しかし、探査機器や探査方法、解析方法といった物理探査のハード面だけでは、物理探査へのニーズに対応しきれていない。一方、ソフト面での対応である標準化は、物理探査の信頼性維持に貢献しているが、必ずしもニーズに対応するものにはなっていない。ソフト面では物理探査結果の解釈が不可避であることを実感している。そこで、統合物理探査は、物理探査のハード面とソフト面をつなぐものであり、探査方法と解釈を有機的に結合するものである。

物理探査が正しく評価され、一人前の調査方法として広く活用されるためには、まず、物理探査関係者が、探査方法と探査結果の解釈に向きあわなければならない。

このような観点から、本報告書では、物理探査の解釈について、解釈方法、事例、解釈基盤整備について調査検討結果をまとめた。また、物理探査結果の解釈について、今後あるべき姿を検討した。本報告書が、調査ニーズに即した探査方法の選択、探査仕様の設定、探査結果の解釈に関する参考書として、物理探査関係者のみならず地盤調査関係者に広く利活用されれば幸いである。

平成 29 年 12 月

資 料

文献調査リスト

【 】は、本文中で参照され、結果を引用しているもの

事例 No.	出席	年	タイトル	部門	ページ等	著者 ファーストのみ	種別 種数の場合	対象構造物 No.	対象構造物 No.	対象構造物 No.	探査の目的	手法①	手法②	手法③	手法④	コメント
1	土木学会年次 講演会	2000	トンネル調査におけるIP映像法 による前線掘削の把握		なし	斎藤秀樹	複数	1	トンネル	トンネル	トンネルの掘削の進展の把握	IP映像法				掘削状況により新しく掘られた た物性値(結合のみ)
2	土木学会年次 講演会	2002	高層切羽切羽方探査システムの 適用	1327-1328	石山宏二	複数	複数	1	トンネル	トンネル	切羽前方の地山性状の把握	TDEM	DRISS			
3	土木学会年次 講演会	2002	トンネルの物理探査法を組み合わせた トンネル切羽方探査	1333-1334	城まゆみ	複数	複数	1	トンネル	トンネル	切羽前方の地山性状の把握	TSP	EM			
4	全地連フォー ラム	2002	切羽掘削の物理探査法と地質探査 との併用	87	川村 晃	複数	複数	1	トンネル	トンネル	岩盤内部の亀裂評価	地中レーザ探査	電気探査			
5	土木学会年次 講演会	2003	トンネルの事前調査および掘削 中における弾性波探査について	313-314	藤原 浩	複数	複数	1	トンネル	トンネル	事前調査と掘削中調査の比較	掘折法弾性波(掘 削)	掘折法弾性波(掘 削)			
6	応用地質学会	2003	掘折法によるトンネル切羽方探査 に関する研究	pp.41-44	志田 巧	複数	複数	1	トンネル	トンネル	石炭層中の空洞調査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			それぞれの探査結果を総合的に評価し、空 洞などの地質不良箇所を特定。
7	全地連フォー ラム	2004	掘折法の手法を用いたトンネル調 査	108	関野 理子	複数	複数	1	トンネル	トンネル	地山評価	掘折法地震探査	電気探査			
8	土木学会年次 講演会	2006	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	336-365	山本 拓治	複数	複数	1	トンネル	トンネル	特に掘削トンネルにおける 地質物および地質調査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			・コンクリート製の下水型トンネルの位置を 水圧孔同弾性波トモグラフィと掘削トンネル 弾性波探査により調査
9	土木学会年次 講演会	2006	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	022-243	神崎 健治	複数	複数	1	トンネル	トンネル	トンネル地質調査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
10	応用地質学会	2006	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	5-50	越谷 賢	複数	複数	1	トンネル	トンネル	地質調査の調査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			それぞれの結果を比較検証。
11	全地連フォー ラム	2006	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	102	新野 昇平	複数	複数	1	トンネル	トンネル	地山評価	掘折法地震探査	掘折法地震探査			
12	地質工学会 発表会発表 講演会	2006	トンネル掘削調査における空中 掘折法弾性波探査	100	堀川 滋雄	複数	複数	1	トンネル	トンネル	トンネル掘削調査の比較	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
13	土木学会年次 講演会	2006	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	62	堀見 清重	複数	複数	1	トンネル	トンネル	岩盤評価	掘折法地震探査	掘折法地震探査			
14	応用地質学会	2007	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	234	堀見 保行	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査の調査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			掘折法弾性波探査 によるトンネル地質調査の調査
15	全地連フォー ラム	2009	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	75	堀川 祥司	複数	複数	1	トンネル	トンネル	地山評価	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			掘折法弾性波探査 によるトンネル地質調査の調査
16	土木学会年次 講演会	2010	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	41	桑原 敬	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
17	全地連フォー ラム	2010	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	30	今井 千鶴	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
18	全地連フォー ラム	2010	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	31	成子 浩明	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
19	土木学会年次 講演会	2011	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	181	山上 勝民	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査の比較	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			掘折法弾性波探査 によるトンネル地質調査の比較
20	土木学会年次 講演会	2011	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	47	志農 和智	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
21	土木学会年次 講演会	2012	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	53	山上 勝民	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
22	応用地質学会	2012	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	60	山上 勝民	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			
23	土木学会年次 講演会	2014	掘折法弾性波探査によるトンネル 地質調査	399	山上 勝民	複数	複数	1	トンネル	トンネル	掘折法弾性波探査	掘折法弾性波探 査	掘折法弾性波探 査			掘折法弾性波探査 によるトンネル地質調査の比較

24	土木学会年次 講演会	2014	低土盛り部での斜面地山調査と 補助工法	VI-39	77	橋野昭	橋野昭	橋野昭	トンネル	1	トンネル	低土盛り部の地山評価	TDEM時間領域 電磁探査手法	DRISS	*TDEMとDRISSを組み合わせて実施し、 低土盛り部での地山評価
25	土木学会年次 講演会	2014	ドリル・ジャンボンプによるトンネル切羽 の地山調査	VI-44	87	岩崎謙幸	岩崎謙幸	岩崎謙幸	トンネル	1	トンネル	ドリル・ジャンボンプによるトンネル 切羽を用いた地山評価	速度換層	断面換層で得られる層構造 エネルギー一価数からVp 値を推定	*OMP重合法により断面の位置を、トモグラ フィ解析で弾性波速度分布を評価。
26	応用地質学会	2014	電磁探査(AMT)法および誘導電 位法を用いた大深部地層 の定量的評価	pp-89-90	pp-89-90	橋野昭	橋野昭	橋野昭	トンネル	1	トンネル	広域地下岩層性状の把握	【電磁探査】	ボーンリング法における電気探査結果と電磁 探査結果を比較。	
27	応用地質学会	2014	線探査で検出される未固化石 の分布	pp-109-110	pp-109-110	田村辰朗	田村辰朗	田村辰朗	トンネル	1	トンネル	線探査の分布	γ線探査	γ線探査と弾性波速度分布で劣化帯を評価	
28	応用地質学会	2014	トンネル掘削現場を起爆源とし、 切羽前方の地山調査	pp-241-242	pp-241-242	中谷隆志	中谷隆志	中谷隆志	トンネル	1	トンネル	切羽前方探査	SP202	同一箇所での実施。両結果は整合的。	
29	物理探査学会	2015	トンネル弾性波探査とニュートン 法を用いたトンネル地質調 査	71-81	71-81	岩澤 隆生	岩澤 隆生	岩澤 隆生	トンネル	1	トンネル	地山評価	電磁探査		
30	全地連フォー ラム	2003	各種物理探査手法による地盤調 査	76	76	小坂 尚	小坂 尚	小坂 尚	河川堤防	2	盛土・堤防	種々の探査手法の適用性検 討	電磁探査	高深部電磁探査、高時間 域Aレイ探査	
31	全地連フォー ラム	2003	堤管周辺の空洞調査における物 理探査適用例	77	77	飯田 研	飯田 研	飯田 研	河川堤防	2	盛土・堤防	堤管周辺の空洞の把握	地中レーダ探査	地中レーダ探査	
32	土木学会年次 講演会	2004	新法探査による地中埋設物探 査	177-178	177-178	小林建志	小林建志	小林建志	河川堤防	2	盛土・堤防	堤管周辺の空洞の把握	地中レーダ探査	地中レーダ探査	
33	土木学会年次 講演会	2005	各種物理探査手法を用いた河川 堤防の構造調査	947-948	947-948	岡二生	岡二生	岡二生	堤防	2	盛土・堤防	堤防構造調査	高深部電磁波	連続レーダ	
34	土木学会年次 講演会	2005	堤土・軟弱地層における物理探 査を用いた土質汚染地調査に關 する一考察	949-950	949-950	橋岡 崇	橋岡 崇	橋岡 崇	河川堤防	2	盛土・堤防	土質調査手法としての適用 性確認	レイレーダ電磁	高深部電磁	
35	土木学会年次 講演会	2005	低土内部空洞探査手法の開発	251-252	251-252	高野良二	高野良二	高野良二	河川堤防	2	盛土・堤防	低土内部空洞探査	EM	レイレーダ	
36	全地連フォー ラム	2005	堤防構造における物理探査の有 効性について	123	123	橋野 隆志	橋野 隆志	橋野 隆志	河川堤防	2	盛土・堤防	堤防の内部構造および強度 の把握	電磁探査	表面波探査	電磁探査
37	応用地質学会	2006	堤防構造における物理探査と 誘導電位法の適用性	97	97	木村 隆行	木村 隆行	木村 隆行	河川堤防	2	盛土・堤防	地盤物性の評価	表面波探査(S波)	弾性波探査(小波)	既往の調査手法を用いて、VpとVrの間隔比 一内部摩擦角、透水係数
38	全地連フォー ラム	2006	河川堤防における非破壊探査手 法適用事例	86	86	渡川 真也	渡川 真也	渡川 真也	河川堤防	2	盛土・堤防	堤防内部性状の把握	電磁探査	表面波探査	
39	全地連フォー ラム	2006	高深部電磁探査と1m深部地層探 査を利用した堤防漏水調査事例	87	87	飯島 昭仁	飯島 昭仁	飯島 昭仁	河川堤防	2	盛土・堤防	漏水状況の把握	電磁探査	高深部地層探査	
40	全地連フォー ラム	2007	新引式電磁探査と表面波探査に よる河川堤防調査事例	9	9	飯田 聡	飯田 聡	飯田 聡	河川堤防	2	盛土・堤防	堤防の安全性評価	電磁探査	表面波探査	土質構成、強度
41	土木学会年次 講演会	2008	河川堤防構造点検の一環として 地盤強化におけるFDEM探査の適 用事例	II-212	423	飯島 聡	飯島 聡	飯島 聡	堤防	2	盛土・堤防	堤防強化対策区間の最適化	FDEM	ボーンリング	
42	全地連フォー ラム	2008	米代川左岸堤内地下で発生したス ラッシュ現象の調査事例について	28	28	八松田 孝寿	八松田 孝寿	八松田 孝寿	堤防	2	盛土・堤防	基礎地盤性状の把握	表面波探査	電磁探査	透水性、土の強度
43	地質工学会 発表会・講演 会	2008	大規模斜面崩壊における物理探 査の適用例	131	131	橋田 聡	橋田 聡	橋田 聡	堤防	2	盛土・堤防	しらすを材料にした堤防への 適用性調査	牽引式電磁探査	表面波探査	クロスプロット
44	土木学会年次 講演会	2009	河川堤防のモニタリングにおけ る物理探査の適用性の検討	II-197	393	橋本 清治	橋本 清治	橋本 清治	堤防	2	盛土・堤防	堤防のモニタリングの把握	比較電磁探査	表面波探査	
45	全地連フォー ラム	2009	物理探査手法を用いた河川堤防 における要注意地層の検出につ いて	83	83	中田 智広	中田 智広	中田 智広	堤防	2	盛土・堤防	堤防の安全性評価	表面波探査	電磁探査	
46	土木学会年次 講演会	2010	堤防構造におけるFDEM探 査の適用事例	II-42	83	橋野 隆志	橋野 隆志	橋野 隆志	堤防	2	盛土・堤防	特殊堤の性状原因調査と設 計基礎資料の把握	FDEM	新方式動的コーン 貫入試験	
47	土木学会年次 講演会	2010	特殊堤における動的コーン貫入 試験とFDEM探査を用いた相対 密度による層分け評価事例	II-38	75	橋川 浩樹	橋川 浩樹	橋川 浩樹	堤防	2	盛土・堤防	特殊堤の性状原因調査と設 計基礎資料の把握	FDEM	新方式動的コーン 貫入試験	地中レーダ探 査
48	Bidcuri-Tamesa	2010	An attempt at soil profiling on a geophysical data	63	102-108	橋野 隆志	橋野 隆志	橋野 隆志	堤防	2	盛土・堤防	土質断面の評価	電磁探査	表面波探査	表面波探査による地盤土質の 評価
49	土木学会年次 講演会	2011	物理探査による毛地盤土質の 評価	III-303	725	神村孝	神村孝	神村孝	地盤	2	盛土・堤防	低土造形地に対する表面波 探査と電磁探査の適用性検 査	表面波探査	電磁探査	表面波探査による毛地盤土質の 評価

50	全地連フォーラム	2011	物理探査による堤防三次元構造調査について	67	野牧 優彦	統合	河川堤防	2 盛土・堤防	堤防の安全性評価	電気探査	表面波探査	反射法探査	土質構成、強度	
51	地盤工学研究委員会発表会	2013	堤防堤脚別掘削工法相互関係の中心的3次元可視化	279	新橋 亨	統合	堤防	2 盛土・堤防	堤防内部の3次元可視化	S波屈折法弾性波探査	電気探査	表面波探査	クロスプロット	2手法の同時測定・解析システム
52	応用地質学会	2014	古いための池の堤防	pp-57-58	古谷 元	複数	古いための池の堤防	2 盛土・堤防	堤防構造の把握(老朽化)	表面波探査	電気探査	電気探査	含水比	それぞれの結果を評価・S波速度と斜角入射結果の相関式を提案
53	物理探査学会	2015	堤防と盛土の健全度診断への地盤調査計画・適用性と課題	101-117	一井 二郎	複数	堤防	2 盛土・堤防	水の影響による地盤の性状変化の把握	常時観測計測	表面波探査	表面波探査	含水比	
54	物理探査	2015	川堤防の透過性のプロファイリング	68	新橋 亨	統合	堤防	2 盛土・堤防	透水係数プロファイリング	電気探査	表面波探査	表面波探査	透水係数	
55	物理探査	2000	粘土質土質を含有する材料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係	415-426	高橋 伸一	統合	斜面、地すべり	3 斜面、地すべり	粘土質土物の分布	比抵抗	比抵抗	比抵抗と内部摩擦角の関係		
56	全地連フォーラム	2002	弾性波探査と電気探査の併用による斜面調査事例	56	水野 俊兵	複数	斜面	3 斜面、地すべり	地山状況の把握	屈折法地震探査	電気探査	電気探査		
57	応用地質	2002	風化花崗岩系層の層厚と断面の長さへの適用の検証 -物理探査と地質学的手法を用いた検討-	43	鈴木 浩一	統合	斜面	3 斜面、地すべり	風化による層厚の調査	電気探査	屈折法弾性波探査TDR	電気探査	間隔率、飽和度	
58	応用地質学会	2003	物理探査手法を用いた斜面調査事例	pp-325-326	西川 星	複数	斜面	3 斜面、地すべり	地質構造の調査	弾性波探査	弾性波探査	弾性波探査		各調査結果を総合的に評価
59	全地連フォーラム	2003	物理探査手法を用いたのり面の調査と検討事例	79	津間 盛由	複数	斜面	3 斜面、地すべり	のり面の状況把握	屈折法地震探査	電気探査	電気探査		
60	土木学会年次講演会	2004	斜面地帯における季節間の地山状況と地質構造に関する調査 -北海道の常呂帯に調査事例における調査事例	235-236	永利 方彦	複数	斜面	3 斜面、地すべり	地質的特異箇所抽出	空中電磁	空中電磁	空中電磁		
61	応用地質学会	2004	斜面地帯における季節間の地山状況と地質構造に関する調査 -北海道の常呂帯に調査事例における調査事例	pp-49-52	細崎 健治	複数	連防	3 斜面、地すべり	地すべり斜面の地質構造を評価	屈折法弾性波探査	電気探査	電気探査		弾性波分布から透層部の風化層の厚さが、比抵抗から大域的な地質構造が分かった。
62	全地連フォーラム	2008	トンネル掘削に隣接する地すべりの調査及び対策工の検討事例	103	小野 晃	複数	地すべり	3 斜面、地すべり	すべり面深さの把握	屈折法地震探査	電気探査	電気探査		
63	全地連フォーラム	2008	物理探査を用いた地下水流動調査と地すべりの安定性評価	104	鎌倉 一路	複数	地すべり	3 斜面、地すべり	すべり面	表面波探査	表面波探査	表面波探査		
64	土木学会年次講演会	2009	弾性波及び比抵抗併用探査による老朽化法面のモニタリング手法に関する研究	113-117	山本 龍	統合	斜面	3 斜面、地すべり	法面の地盤評価	弾性波探査	弾性波探査	弾性波探査		
65	地盤工学研究会発表会	2009	比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価手法に関する研究	305-308	嶋見 晴重	統合	斜面	3 斜面、地すべり	表面のひき、飽和度	屈折法地震探査	電気探査	電気探査		
66	土木学会年次講演会	2010	物理探査の連続計測による斜面地盤の工学的評価手法に関する研究	VI-186-171	山本 剛	複数	法面	3 斜面、地すべり	法面の系図モニタリングへの適用性評価	電気探査	電気探査	電気探査		
67	土木学会年次講演会	2010	斜面地帯における各種物理探査の適用性に関する研究	III-25-49	佐藤 秀文	複数	斜面	3 斜面、地すべり	崩壊土砂の分布状況の把握	表面波探査	表面波探査	表面波探査		
68	土木学会年次講演会	2011	物理探査手法を用いた地下水流動調査と地すべりの安定性評価	VI-232-163	山本 剛	複数	斜面	3 斜面、地すべり	法面の地盤評価	比抵抗探査	比抵抗探査	比抵抗探査		
69	地盤工学研究会発表会	2011	自己組織化マップを利用した物理探査の適用性に関する研究	569	大澤 典也	複数	斜面	3 斜面、地すべり	吹付け法面の安定性	屈折法弾性波探査	電気探査	電気探査		
70	土木学会年次講演会	2014	自己組織化マップを利用した物理探査の適用性に関する研究	113-117	嶋崎 岳也	複合	斜面	3 斜面、地すべり	崩壊調査結果に列して自己組織化マップを適用し、層合的評価を定量的に評価	弾性波探査	弾性波探査	弾性波探査		
71	地盤工学研究会発表会	2016	SOM・家数解析を利用した物理探査による連防斜面の評価手法に関する研究	228-233	嶋崎 岳也	複数	斜面	3 斜面、地すべり	斜面の安定性、耐久性の経時変化の評価	弾性波探査	弾性波探査	弾性波探査		
72	物理探査	2000	弾性波探査と比抵抗の関係について	427-434	多田 良平	統合	資源	4 資源	メタンハイドレート含有量	弾性弾性率	弾性弾性率	弾性弾性率		
73	物理探査学会	2001	電気比抵抗-弾性波速度モデルによる地盤工学的特性の評価	186-190	羽電 忠男	統合	資源	4 資源	地下水資源構造の把握	電気探査	電気探査	電気探査		
74	全地連フォーラム	2003	電気探査と自然放射能探査を併用した岩盤中の水理構造調査事例	72	鈴木 五五郎	複数	地下水	4 資源	地下水資源構造の把握	電気探査	電気探査	電気探査		

75	物理探査	2003	坑井データと地震探査データを 用いたメタンハイドレート賦存層 の抽出一南海トラフ海域を例とし て	453-460	細盛隆博	横敬	資源	4	資源・地下水 探査	メタンハイドレート賦存層の 抽出	坑井データ	地震探査データ				
76	岩盤力学シミュレーション ソフトウェア	2003	電気抵抗トモグラフィ探査と地質 情報を用いた地質構造の解析	81-88	明電忠男	統合	資源	4	資源・地下水 探査	資源地下の平面分布の把握 および深部地下水と地下 構造の把握	抵抗トモグラフィ	電気抵抗トモグラフィ				
77	全地連フォーラム	2004	松山平野における地下水源調査 調査例	5	山田 晃	横敬	地下水	4	資源・地下水 探査	資源地下の平面分布の把握 および深部地下水と地下 構造の把握	1m深地温探査	電気探査				
78	全地連フォーラム	2004	高野半島北西部山田原地区に おける地下水源調査	109	新田 直哉	横敬	地下水	4	資源・地下水 探査	基礎深度の推定	放射能探査	地温電気探査				
79	応用地質学会	2005	地下水源調査における空中写真 解析と物理探査の適用例：西田北 西部山田原地区の事例	pp.217-220	嶋王 利寛	横敬	井戸	4	資源・地下水 探査	帯水層の深さ・分布を調査	表面波探査	高密度電気探査				
80	全地連フォーラム	2005	電気探査と1m深地温探査による 地下水源調査	120	井上 純	横敬	地下水	4	資源・地下水 探査	地下水の運動経路の把握	電気探査	1m深地温探査				
81	物理探査	2005	石炭層の定量的物理探査解析 に基づく岩石の力学物性評価 (原文)	112-117	ヒーター・ハザ ー	統合	資源	4	資源・地下水 探査	炭鉱調査	各種物理探査		検層レスポンスと検層分 布の相関性			
82	土木学会年次 講演会	2007	地下レーザ探査と比抵抗トモ グラフィによる地下水源調査の特 性	Ⅲ-289-297	清水智明	横敬	資源物区分場	4	資源・地下水 探査	資源物区分場の地下水分布 や流動状態の把握	地下レーザ	比抵抗トモグラフィ				
83	物理探査	2007	三次元地震探査と海面地形化 学調査の融合によるメタンハイド レート探査(原文)	37-43	狭久保 定雄	横敬	資源	4	資源・地下水 探査	メタンハイドレート探査	3D seismic exploration	surface geophysical survey				
84	全地連フォーラム	2009	電気探査及び表面波探査による 地下水源調査の適用例	79	横敬 裕二	横敬	地下水	4	資源・地下水 探査	地下水の運動状況の確認	電気探査	表面波探査		S波速度からN値		
85	物理探査学会	2014	石井天然ガス・金属鉱物資源機構 の地熱調査事例について	37-48	江頭沙織	横敬	資源	4	資源・地下水 探査	地熱開発	電気探査	重力探査				
86	物理探査学会	2014	秦州クワンバーベイズン高圧岩体 地熱調査における物理探査	271-285	柳江田秀忠	横敬	資源	4	資源・地下水 探査	地熱開発	電気探査	重力探査				
87	土木学会年次 講演会	2000	ボリング孔を利用した地質 構造調査の調査法に関する研 究(その1)	なし	山山公年	横敬	基礎物基礎	5	空間・埋設物 探査	基礎基礎の深さや形状の把握	孔内弾性波法	坑井データ				
88	土木学会年次 講演会	2002	地中構造物の構造化度および 位置・形状に関する技術 調査(その1)	263-264	上出定幸	横敬	構造物基礎	5	空間・埋設物 探査	基礎構造物の構造化度、 位置・形状の把握	反射法弾性波	弾性波トモグラフィ				
89	土木学会年次 講演会	2002	地中構造物の構造化度および 位置・形状に関する技術 調査(その2)	265-270	新瀬康孝	横敬	構造物基礎	5	空間・埋設物 探査	基礎構造物の構造化度、 位置・形状の把握	反射法弾性波	弾性波トモグラフィ				
90	土木学会年次 講演会	2002	地中構造物の構造化度および 位置・形状に関する技術 調査(その3)	271-272	命野路行	横敬	構造物基礎	5	空間・埋設物 探査	基礎構造物の構造化度、 位置・形状の把握	反射法弾性波	弾性波トモグラフィ				
91	全地連フォーラム	2003	電気・電磁探査による埋設物 調査事例	53	山下 善弘	横敬	資源物区分場	5	空間・埋設物 探査	埋設物位置の推定	電気探査	電磁探査				
92	全地連フォーラム	2004	産業廃棄物処理施設での電 磁法探査および電気探査の調 査例	59	永来 裕年	横敬	資源物区分場	5	空間・埋設物 探査	埋設物位置の推定	電磁探査	電気探査				
93	全地連フォーラム	2004	一般廃棄物処分場の地熱利用 に伴う物理探査の適用事例	104	神木 勝宏	横敬	資源物区分場	5	空間・埋設物 探査	基礎深度の推定	反射法地温探査	電気探査				
94	物理探査	2004	Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography	92-99	Yoichi Suzuki	統合	空間・埋設物	5	空間・埋設物 探査	a zone disturbed by excavation around tunnels	電気探査	電気探査				
95	応用地質学会	2006	産業廃棄物処分場の地熱利用 に伴う物理探査の適用事例	54	神松 太	横敬	資源物	5	空間・埋設物 探査	地下産業廃棄物の調査	地下レーザ	電気探査(二次元 比抵抗探査)				
96	地盤工学学会 発表会 発表会	2006	しらす中の特殊地下層を探索す るための物理探査手法の検証実 験	139	中田文雄	横敬	空間	5	空間・埋設物 探査	しらす中の地下層調査の突 破実験	電磁探査	レーザ探査				
97	土木学会年次 講演会	2008	表面波探査を用いた産業廃棄物 調査の適用例	Ⅲ-388	森谷麻穂子	横敬	資源物区分場	5	空間・埋設物 探査	産業廃棄物地盤構造の把握	表面波探査(ハン ター一起)	表面波探査(超磁 気型記録)				
98	応用地質学会	2014	埋設物の物理探査手法を用いた石 灰岩地域における空間調査	pp.55-66	細瀬 雅美	横敬	埋設物	5	空間・埋設物 探査	石灰岩中の空洞検出	電気探査(二次元 比抵抗)	表面波探査				
99	全地連フォーラム	2014	埋設物の物理探査手法による埋設物 調査とその有効性	67	中村直文	横敬	埋設物	5	空間・埋設物 探査	埋設物の有無の確認	電磁探査	電磁探査				

100	物理探査	2015	物理探査	68	177-188	鈴木浩一	統合	埋設物	5	空間・埋設物	電磁探査	S波屈折法	表面探査			
101	物理探査	2000	埋設物	68	153-166	山本英和	複検	地震・防災	6	地震・防災	レイリー波位相速度					
102	物理探査	2002	埋設物	68	191-198	内田洋平	複検	地震・防災	6	地震・防災	地下水位相速度					
103	土木学会年次講演会	2003	埋設物	68	571-572	土肥謙雄	複検	地震・防災	6	地震・防災	深部孔井データ					
104	応用地質学会	2004	埋設物	68	80-70	楢村久史	複検	地震・防災	6	地震・防災	常時変動					
105	物理探査	2005	埋設物	68	421-430	山中浩明	複検	地震・防災	6	地震・防災	反射法弾性波					
106	物理探査	2006	埋設物	68	83-101	熊瀬 健	複検	地震・防災	6	地震・防災	CSAMT					
107	応用地質学会	2007	埋設物	68	P35	伊藤 久敏	複検	地震・防災	6	地震・防災	弾性波位相速度					
108	物理探査	2007	埋設物	68	19-28	熊瀬 健	複検	地震・防災	6	地震・防災	MT法					
109	地学雑誌	2008	埋設物	68	997-1010	熊瀬忠徳	複検	地震・防災	6	地震・防災	誘導比抵抗					
110	物理探査学会	2011	埋設物	68	425-438	鈴木浩一	複検	地震・防災	6	地震・防災	S波速度構造					
111	物理探査学会	2013	埋設物	68	45-55	楢崎富士	複検	地震・防災	6	地震・防災	S波速度構造					
112	応用地質	2017	埋設物	68	180-191	楢村久史	複検	地震・防災	6	地震・防災	S波速度構造					
113	土木学会年次講演会	2003	埋設物	68	413-414	竹内真司	複検	地震・防災	7	地震・防災	空中電磁探査					
114	応用地質学会	2003	埋設物	68	pp-191-194	井元 一彦	複検	地震・防災	7	地震・防災	空中電磁探査					
115	土木学会年次講演会	2004	埋設物	68	31-32	井元 一彦	複検	地震・防災	7	地震・防災	多点同時逆解析					
116	応用地質学会	2004	埋設物	68	pp-237-240	鈴木 浩一	複検	地震・防災	7	地震・防災	反射法地磁探査					
117	応用地質学会	2006	埋設物	68	229-232	鈴木浩一	複検	地震・防災	7	地震・防災	電気伝導度探査					
118	物理探査学会	2009	埋設物	68	307-318	吉村公孝	複検	地震・防災	7	地震・防災	フロロメータ探査					
119	地盤工学シンポジウム	2008	埋設物	68	47-54	藤田敏紀	複検	地震・防災	7	地震・防災	TDR					
120	土木学会年次講演会	2011	埋設物	68	CS3-06/119	吉村公孝	複検	地震・防災	7	地震・防災	コアの誘電率計測					
121	応用地質学会	2011	埋設物	68	52	鈴木浩一	複検	地震・防災	7	地震・防災	弾性波トモグラフィー					
122	物理探査学会	2012	埋設物	68	143-146	鈴木浩一	複検	地震・防災	7	地震・防災	弾性波トモグラフィー					

123	物理探査学会	2001	本宮前水城跡跡の遺跡調査	248-251	水永秀樹	様歌	遺跡	8	遺跡	地中レーザ探査	電気探査	電気探査	電気探査				
124	物理探査	2005	Integrated archaeological exploration using geophysical methods at Futema area, Okinawa prefecture, Japan	491-502	Rad El-Qady	様歌	遺跡	8	遺跡	電気探査	電気探査	表面波探査	浅層放射法探査				
125	物理探査学会	2005	普天間飛行場における埋蔵文化財調査への物理探査の適用について	290-302	山下書弘	様歌	遺跡	8	遺跡	電気探査	電気探査	電気探査	地中レーザ探査	電気探査			
126	物理探査学会	2005	物理探査手法を用いた遺跡調査	389-392	高沼利明	様歌	遺跡	8	遺跡	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
127	物理探査学会	2007	アンコール・バイヨン寺院の地中レーザ探査	291-294	尾西恭亮	様歌	遺跡	8	遺跡	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
128	物理探査学会	2008	アンコール・バイヨン寺院における物理探査手法の適用	288-291	柳本浩一	様歌	遺跡	8	遺跡	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
129	物理探査	1998	物理探査法の地質工學への適用(その3)-埋蔵岩盤の透水性評価への適用例-	83-95	柳本浩一	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
130	土木学会年次講演会	2004	ロックフィルダムの底下分析および遊立中の弾性波探査について(その1)	376-378	柳本浩一	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
131	物理探査	2005	水文地質学および物理探査手法によるアンソールドラムの漏水源の検出(英文)	92-96	Sung-Ho Song	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
132	全地質フォーラム	2007	ダム堤体内の劣化・性状把握調査事例	103	本野 健彦	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
133	全地質フォーラム	2010	ダム近傍の断層破砕帯に対する地質調査事例	25	柳月 清司	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
134	物理探査学会	2017	探査の物理探査手法による高層岩盤ダム基礎の健全性評価への適用	80-83	柳本浩一	様歌	ダム	9	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
135	物理探査	2001	電気探査法・計法・マイクロ重力探査法による石灰岩地帯の地質調査	277-289	柳本浩一	様歌	ダム	10	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
136	物理探査	2001	石灰岩地帯の比抵抗・IPに關する基礎的研究	290-300	柳本浩一	様歌	ダム	10	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
137	物理探査	2004	Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging and electrical sounding at the Seohwa Sanitary Landfill, Yongsong-gu, Korea	89-104	Seoho Hwang	様歌	ダム	10	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
138	全地質フォーラム	2008	電気探査・IP・重力探査による埋設物調査の比較	110	小坂 信孝	様歌	ダム	11	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
139	全地質フォーラム	2011	ローリング孔を利用した物理探査による橋台基礎調査事例	74	柳本浩一	様歌	ダム	11	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
140	物理探査学会	2014	宮城県中部沿岸部における橋台基礎のS波速度構造および地震動の推定	95-106	柳田直彦	様歌	ダム	12	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
141	物理探査学会	2015	巨高干線鉄道沿線における地下空洞構造および地震動の空間変動評価	91-100	柳田直彦	様歌	ダム	12	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
142	応用地質学会	2010	瀬戸内海西部海域における深部地質構造一次元断面構造調査及び重力探査結果	11	小西 秀文	様歌	ダム	13	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
143	土木学会年次講演会	2003	北海道大井町新設に付する深部地質構造調査(注:効果的な地質調査)	163-164	柳本浩一	様歌	ダム	14	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
144	土木学会年次講演会	2005	空中物探査による広域的な地質構造調査	941-942	石外 勝仁	様歌	ダム	14	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
145	土木学会年次講演会	2005	比抵抗の頻度分布による地質区分の試み	940-944	柳本浩一	様歌	ダム	14	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
146	土木学会年次講演会	2007	重力異常と地質構造を用いた地質構造調査(注:効果的な地質調査)	1-517	柳本浩一	様歌	ダム	14	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			
147	応用地質学会	2008	状在地質構造の地震動特性性への影響	54	中里 祐臣	様歌	ダム	14	ダム	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査	電気探査			

148	物産探査学生 2009	コックフィジックスをベースにした 深層物理探査データの解釈技術 に関する研究 - 堆積性軟岩の 定石モデル -	437-446	高橋亨	—	堆積性軟岩	14	その他	堆積性軟岩の地盤特性の推 定	PS探査			
149	土木学会年次 講演会	震動HVVと重力探査に基づく構 造解析の東西両面の地下構造 推定	1-314-327	榎本勇一	複数	地盤	14	その他	地盤構造を推定する簡便な 推定方法の提案	重力探査 震動アレイ探査			
150	応用地質学会	空想における物理探査事例	89	香野高弘	複数	空想の清走路	14	その他	清走路直下の地盤調査	震動アレイ探査 高密度重力探査	チエーンアレイ探 査		それぞれの結果を総合的に解釈。
151	全地運フォー ラム	物理探査手法を用いた樹木根系 の非破壊調査事例	28	鎌谷 竜一住雄	複数	樹木根	14	その他	樹木根の分布や伸長方向の 推定	地中レーザ探査			
152	土木学会年次 講演会	物理探査による地盤改良体の記 録手法の検討	II-335-365	江波戸昌徳	複数	地盤	14	その他	地盤改良工法における地盤 改良体の把握手法の開発	電磁法探査			
153	土木学会年次 講演会	空想探査に関する地盤改良体 の記録手法の検討	II-46-89	中澤博志	複数	地盤	14	その他	地盤改良効果の確認	重力探査			
154	全地運フォー ラム	重力探査を用いた軟弱層分布 調査	68	榎本 裕司	結合	空港	14	その他	地盤改良効果の確認	重力探査	震動アレイ探査		土質構成、強度
155	全地運フォー ラム	重力探査を用いた軟弱層分布 調査	69	伊藤 亮太	複数	複数	14	その他	基礎や液状化層の分布の把 握	重力探査	震動アレイ探査		
156	物産探査学生 2013	重力および磁気探査の併用 による地盤構造境界の検出 法の検討	167-177	高橋千佳	結合	地盤	14	その他	地盤構造境界の検出	重力探査			
157	物産探査学生 2013	重力探査・表面探査による ピーチロックの地下構造一冲縄 県名護市鹿我地高浜地点で の適用例一	277-285	鈴木浩一	複数	ピーチロック	14	その他	ピーチロックの地下構造の 解明	重力探査 電磁探査			
158	全地運フォー ラム	基礎コンクリート下の杭を対象と した非破壊手法による探査	66	野本真吉	複数	基礎コンクリート	14	その他	基礎杭の位置および長さの 把握	地中レーザ探査			
159	物産探査学生 2014	中国地方北部域における重力・ 磁気探査を用いた3次元地盤 構造モデル推定の試み	157-170	石田勇介	結合	地盤	14	その他	3次元地盤構造モデルの推 定	重力探査 電磁探査			
160	物産探査学生 2015	物理探査手法による地中送電線 路上の固有動特性の評価 - 土工実験の固有動特性と電 気伝導率との関係 -	131-147	榎田健二	—	地中送電線	14	その他	土壌の固有動特性の推定	電磁探査			

委員会関連発表論文

物理探査学会学術講演会

- 三木茂・統合物理探査調査研究会（2014）：統合物理探査調査研究委員会の発足について，物理探査学会第 130 回学術講演会論文集，95-98.
- 三木茂・物理探査書式検討委員会・統合物理探査調査研究会（2014）：物理探査データ標準書式のトンネルプロジェクトへの適用試案，物理探査学会第 131 回学術講演会論文集，94-97.
- 金田朋之・三木茂・統合物理探査調査研究会（2015）：物理探査成果の電子納品，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，88-89.
- 升元一彦・村田和則・佐々木勝・津野靖士・山上順民・三木茂（2015）：統合物理探査および複数物理探査の事例収集と調査対象別適用傾向の検討，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，90-92.
- 鈴木浩一（2015）：岩石物理学に基づく物理探査データに対する複合解析技術の動向，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，93-96.
- 小西千里（2015）：不確かさを含む物理探査結果の評価と意思決定について，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，97-100.
- 横田俊之・山下善弘・高橋一徳・鈴木浩一・鈴木敬一・林宏一・稲崎富士（2015），河川堤防施設に対する GPR 探査の標準仕様検討及びデータベース試作業務報告（その 1）－業務概要－，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，101-104.
- 山下善弘，横田俊之，高橋一徳・鈴木浩一・鈴木敬一・林宏一・稲崎富士（2015），河川堤防施設に対する GPR 探査の標準仕様検討及びデータベース試作業務報告（その 2）－標準技術仕様案の検討と DB 試作－，物理探査学会第 133 回学術講演会論文集，105-108.

地球惑星科学連合大会

- 三木茂・升元一彦・鈴木浩一・統合物理探査調査研究委員会（2016）：「統合物理探査」セッション，MTT30-02.

物理探査学会・深田地質研究所共催シンポジウム

「物理探査の評価と解釈の最前線」平成 29 年 1 月 26 日

- 升元一彦：統合物理探査と複数物理探査の事例収集による適用傾向の分析

鈴木浩一：物理探査法による地盤物性評価の最新動向

小西千里：S波速度と比抵抗による土質判定の方法

原稿執筆者および原稿執筆協力者

原稿執筆者（敬称略）

井上敬資	2.1.2
金田朋之	2.1.4, 2.1.5,
小西千里	2.3, 5.3
佐々木勝	3.2.4, 3.2.5, 4.2, 4.3
鈴木浩一	1, 2.2, 3.2.9, 5.2
鈴木敬一	2.1.3
津野靖士	3.2.6
升元一彦	3.1, 3.2.3, 3.2.7, 3.3
三木 茂	1, 4.1, 4.4, 5.1, 5.4
村田和則	3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4
山上順民	3.2.1, 3.2.8
山下善弘	2.1.1

原稿執筆協力者（敬称略）

倉橋稔幸
林 宏一
茂木 透

物理探査学会 統合物理探査調査研究委員会報告書
統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野への適用
平成 30 年 3 月 非売品