

地質調査

2021

第2号

(通巻158号)

Japan Geotechnical Consultants Association

編集 / 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

巻頭言

≫ 物理探査トランスフォーメーション

公益財団法人深田地質研究所 顧問 京都大学名誉教授 松岡 俊文

総論

≫ 持続可能な社会実現に向けた物理探査技術の役割

株式会社地球科学総合研究所 代表取締役社長 阿部 進

小特集 物理探査が拓げる地質調査

≫ 反射法地震探査による深部地質構造の可視化

東中 基倫

≫ 土木地質調査における弾性波探査の3次元化への取り組みと展望

佐藤 礼・菊池 竜之介・石垣 孝一

≫ 浅部地盤の特徴と浅部物理探査の役割

稲崎 富士

≫ 地球の内部を覗く科学の窓
～長期孔内観測システム～

許 正憲

≫ 遺跡探査における物理探査の役割

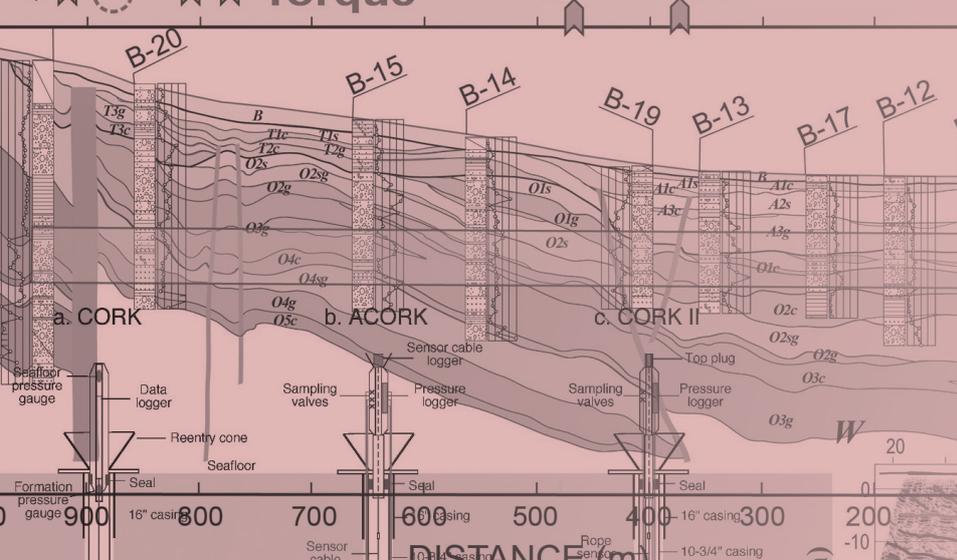
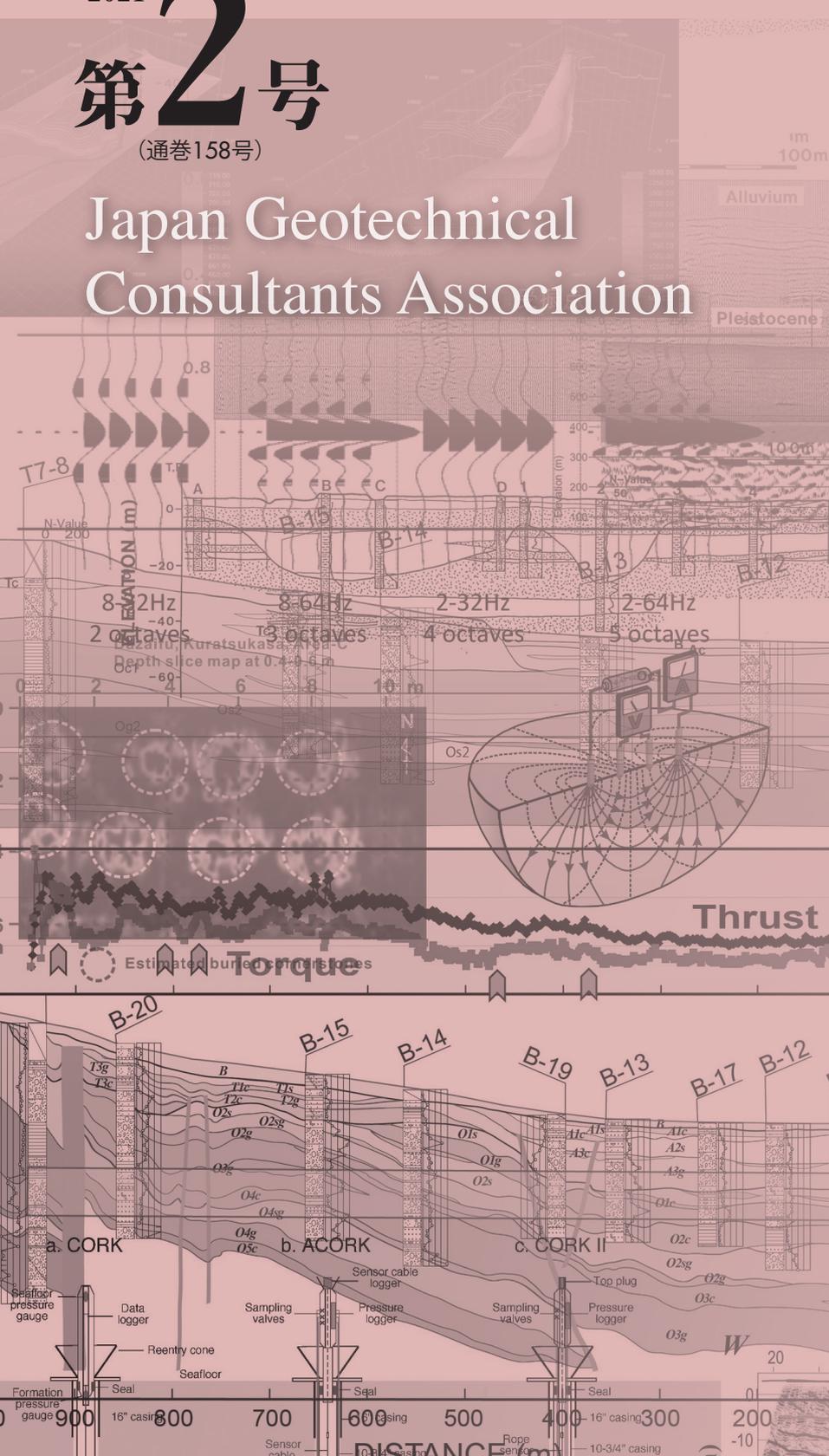
水永 秀樹

教養読本

≫ 干渉SAR技術 藤原 智

やさしい知識

≫ 宇宙線ミュオンによる非破壊イメージング 森島 邦博



巻頭言	≫ 物理探査トランスフォーメーション 公益財団法人深田地質研究所 顧問 京都大学名誉教授 松岡 俊文 …… 1
総論	≫ 持続可能な社会実現に向けた物理探査技術の役割 株式会社地球科学総合研究所 代表取締役社長 阿部 進 …… 2
小特集	■ 物理探査が拓げる地質調査 ≫ 反射法地震探査による深部地質構造の可視化 東中 基倫 …… 6 ≫ 土木地質調査における弾性波探査の 3次元化への取り組みと展望 佐藤 礼・菊池 竜之介・石垣 孝一 ……12 ≫ 浅部地盤の特徴と浅部物理探査の役割 稲崎 富士 ……16 ≫ 地球の内部を覗く科学の窓 ～長期孔内観測システム～ 許 正憲 ……24 ≫ 遺跡探査における物理探査の役割 水永 秀樹 ……30 ≫ 干渉 SAR 技術 藤原 智 ……36
教養読本	≫ 宇宙線ミュオンによる非破壊イメージング 森島 邦博 ……42
やさしい知識	≫ 地すべり調査 (前編) 杉本 宏之 ……46
基礎技術講座	≫ 氾濫原における調査ボーリング 鳥谷 亮一 ……52
私の経験した現場	≫ 沖縄の地盤と農業用水 溝渕 年哉 ……56
大地の恵み	≫ 大阪府大阪狭山市 大阪府立狭山池博物館 岡 伸次 ……58
各地の博物館巡り	≫ 立山連峰の水河群 内蔵助水河・三ノ窓水河 (富山県) 飯田 肇 ……60
各地の残すべき地形・地質	≫ 衛星の防災利用実証活動 (その1) 桐谷 浩太郎 ……62
研究所からの報告	≫ 福井の地盤 - 福井平野 - 福井地盤図作成実行委員会 ……68
書籍紹介	■ 2021年度 全地連資格検定試験の実施結果について …… 69 ■ 「地質リスク調査検討業務」の手引きの発行 …… 70 ■ 2021年度 地質リスク・エンジニア (GRE) 認定試験制度の実施について …… 70 ■ 地質リスクマネジメント事例研究発表会 (開催予定) …… 71 ■ 令和3年度 全地連資格制度 登録更新の手続きについて …… 72 ■ 福利厚生制度に関する情報発信 …… 72
地質だより	

既刊情報

下記の「地質と調査」は、次の URL または QR コードから、どなたでもご覧いただけます。

全地連の機関誌「地質と調査」

https://www.zenchiren.or.jp/jgca/jgca_geo-se.html



● 掲載概要

2000 年第 1 号 (通巻 83 号) ～ 2005 年第 4 号 (通巻 106 号) → メインテーマのみ

2006 年第 1 号 (通巻 107 号) ～ 2013 年第 1 号 (通巻 135 号) → 【会告】を除くすべてのページ

2013 年第 2 号 (通巻 136 号) 以降 → すべてのページ

※ Web 掲載版の「地質と調査」はカラーで閲覧いただけます。

● 最近の発刊

通巻	発行年月	メインテーマ
148 号	2017 年 4 月	小特集：ドローンの地質調査への活用
149 号	8 月	特定テーマ：～離島～
150 号	12 月	小特集：熊本地震
151 号	2018 年 4 月	小特集：インフラメンテナンス
152 号	11 月	小特集：地熱
153 号	2019 年 6 月	小特集：地盤情報データベースの現状と課題
154 号	11 月	小特集：沿岸
155 号	2020 年 4 月	小特集：AI で地質調査はどう変わるのか
156 号	11 月	小特集：防災・減災 - 豪雨災害の被害軽減に向けて -
157 号	2021 年 4 月	小特集：地図データの活用
158 号	11 月	小特集：物理探査が拓げる地質調査

次号予告

地質調査 2022 年 第 1 号 (通巻 159 号) 内容 (予定) 令和 4 年 4 月発行予定

小特集テーマ：堆積物

* 編集方針により小特集テーマは変更となる場合があります。

物理探査トランスフォーメーション

まつおか としふみ*
松岡 俊文*

K
ey Word

DX, デジタルツイン, 3次元可視化, BIM/CIM, PLATEAU プロジェクト,
数値基盤インフラ

世界は今大きな転換点に立っている。新型コロナウイルスは世界を席卷し、多くの人々の命を奪っている。温暖化による気候変動は日々顕在化し、2050年には脱炭素社会の実現を迫られている。このような状況は、我々の世界観や行動パターンを変えると共に、経済や社会構造も急激に変化して行くと考えられる。社会が大きくトランスフォーメーションしていく中で、物理探査が存在価値を持ち続けるためには、物理探査トランスフォーメーションは必須である。

DX（デジタルトランスフォーメーション）は、デジタル技術を活用して組織や社会を変革させる試みである。物理探査トランスフォーメーションは、物理探査による社会変革への寄与と言える。その為には、①物理探査の特徴を再認識する事、②変革の目標を明確にする事、③変革のロードマップを描く事の3点が重要である。

物理探査は地質調査の道具であるが、取得されるデータは全て数値情報である。新たな社会資本整備を見据えて国交省が推進している BIM/CIM の基礎は、地盤と構造物の数値情報を始めとする大量の空間情報である。特に PLATEAU プロジェクトでは、サイバー空間上に 3D 都市モデルを再現し、都市空間のデジタルツインを構築した。しかし歴史的には、現実の地下世界を計算機上に作り上げ、可視化出来るデジタルツインの構築に初めて成功したのは、物理探査である。

物理探査技術者は 20 年以上も前に、取得された地下に関する各種の物性データを統合し、地下 3 次元の仮想現実空間を計算機上に再現していた。惜しむらくはその利用に関して、物理探査の技術者が無関心であった点であろう。技術者は放っておいても自分の技術を最先端に保つ努力を行うが、その利用

と価値の創造には関心が薄い。

例えば地震に対して液状化するかは、地下のデジタルツインを基にシミュレーションを行えば判断できる。これが物理探査が作り出す社会的価値である。即ち地下空間のデジタルツインは、このような意味において数値基盤インフラと考えてよく、他分野のデータを加えシミュレーション等を利用して、社会が必要とするサービスを生み出す基である。インフラの価値は、高速道路と同様に、利用者数で判断される。

次に、物理探査トランスフォーメーションの目標は物理探査が作り出す社会的価値とすべきである。これからの時代、最も重要視される社会的価値は SDGs（再生可能な開発目標）であろう。今後物理探査を利用した新しいサービス群は、SDGs の理念に沿っているか常に問われる。業界はこのゴールに向けた物理探査の取り組みを議論し、示しておく必要がある。

最後は変革のロードマップにこれらをどの様に落とし込むかである。今までの適用領域である社会資本整備、防災、再生可能エネルギー関連（風力発電、地熱）等のユーザーが期待するサービス群の提供は、数値基盤インフラという視点で進めた方が良い。地下のデジタルツインと BIM/CIM やスーパーシティー構想との結合、さらに地下データの不確実性が生み出すリスク評価の提供などが、ロードマップ作成のターゲットになって来るであろう。これからの物理探査トランスフォーメーションの動きに期待したい。

*公益財団法人深田地質研究所 顧問 京都大学名誉教授

持続可能な社会実現に向けた 物理探査技術の役割

あべすすむ*
阿部 進*

Key Word

物理探査技術, カーボンニュートラル, 三次元モデル, 統合物理探査,
時間履歴抽出, 土木・インフラ維持, 地下空間利用, 活断層調査, 資源開発

1 はじめに

物理探査は能動的あるいは受動的な手法によって、様々な物理量を計測し、非破壊によって地下構造を可視化する技術である。日本における物理探査は、1920年頃より、主に石油・金属鉱床等の資源開発分野への地震・電気・重磁力探査の適用が徐々に進展し、1930年には土木調査分野への電気探査の適用が始まったとされている。以来100年の歳月を経て、現在、物理探査の適用領域は拡大し、地下構造の時間-空間における変動履歴を高精度に把握することが、強く要請されるに至っている。

物理探査の重要な社会貢献としては、第一に、地球温暖化に伴う気候変動に対するリスク軽減の観点で、土木・インフラ維持分野における設計・施工への直接貢献の拡大が挙げられる。第二に、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向け、二酸化炭素地中貯留、洋上風力発電における海底地盤調査、さらに、地熱資源開発への貢献が進展すると考えら

れる。第三に、活断層の活動履歴とジオメトリの把握を中心とした地震防災・耐震設計への基礎データの提供は、従前通り、物理探査技術の重要な使命であり続ける。また、第四に、天然ガスを主体とする炭化水素貯留層を対象とした物理探査は、基幹エネルギーを確保する観点で引き続き重要な役割を果たし、日本近海におけるメタンハイドレート探鉱や海底金属鉱床の賦存量把握に関しても貢献できる余地は大きいと考えられる。本稿では、物理探査技術の展開分野と要請される技術適用の現状を俯瞰的に記述する。

2 物理探査技術の適用分野

前述の通り、物理探査技術の適用分野は多岐に亘っている。表-1に物理探査の適用分野に応じた有効探査手法の一覧を示した。本章では、主要な5分野に関して、探査技術適用の現状・課題を概括する。

適用分野 探査手法	抽出物理量	土木・インフラ維持分野				環境・地下空間利用分野		防災・学術調査分野		カーボンニュートラル関連事業分野			資源開発分野	
		道路	トンネル	地盤評価	河川堤防 斜面	土壌 地下水	放射性廃棄物 地層処分	活断層・ 地盤構造	堆積層・ 広域深部構造	CCS	洋上風力発電	地熱開発	石油・天然ガス	金属鉱床
弾性波探査	反射法探査	反射強度分布	◎			△	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	
	屈折法探査	速度構造		△		△		○	○	△			○	
	表面波探査	S波速度構造		○	○	◎								
微動アレイ探査		S波速度構造			◎			○			○			
電気・電磁探査	電気探査	比抵抗分布		○		◎	◎	○	○				○	
	電磁探査	比抵抗分布		◎		◎	○	◎	○	○	△		◎	○
地中レーダー探査		電磁波反射 パターン	◎			○	○							
重磁力探査	重力探査	重力異常					△	○	○	○			◎	○
	磁力探査	磁気異常					△					△	△	◎

◎ 最適な探査手法 ○ 使用頻度の高い二次的な探査手法 △ 付加情報が取得可能な探査手法

表-1 物理探査の適用分野に応じた有効探査手法一覧

*株式会社地球科学総合研究所 代表取締役社長

2-1 土木・インフラ維持分野

地下に埋設された管路の老朽化が主要因となって発生する道路陥没は非常に多く、路面下の空洞を非破壊で迅速に検知することが重要な課題である。現在、地中レーダーを搭載した空洞探査車による高速・高密度測定が実用化され、AI解析による自動判定技術の進展と共に、対策工事の早期着手による陥没リスクの低減に大きく寄与している。また、トンネル建設に関しては、計画調査段階においては、高精度の地山評価を目的とした屈折法探査及び電気-電磁探査による統合物理探査が有用である。一方、開削段階の切羽前方探査においては、破碎帯等の脆弱箇所と湧水・土砂流出の可能性がある帯水層の抽出を目的として、VSP (Vertical Seismic Profiling) の概念を応用した反射法地震探査が広く適用され、掘削工程の最適化とリスク低減に貢献している。さらに、河川堤防の維持管理においては、表面波探査と電気-電磁探査の複合適用を通じて、堤体内部の不均質構造を空間的に可視化すると共に、すべり破壊・パイピング破壊等の浸透に関わる弱部検出を通じたリスク評価が可能となっている¹⁾。土木・インフラ維持分野においては、限定的なボーリング調査データのみからは推定が困難な地盤構造の変形・不均質構造を把握することが、埋め立地盤の性状把握、液状化予測、地盤増幅特性の予測、建造物の動的解析等に有効であり、三次元微動探査が実用化されている。

2-2 環境・地下空間利用分野

地下水の賦存量評価と共に、地下帯水層維持・管理の観点での流動予測及び汚染水-汚染物質の移流予測は、持続的な水資源利用の観点から、重要な課題である。電気-電磁探査は地下水の賦存ポテンシャルを把握すると共に、水理流動モデルを構築する上で基礎的なデータを提供する。今後、国内では、ブルー・グリーン水素製造事業における地下水管理・供給も課題であり、モニタリングの観点での物理探査の適用も望まれる。地下空間利用の観点では、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業への物理探査技術の本格適用が期待される。地層処分においては、地質-水理構造・力学特性・化学特性を含む広域地質環境モデルの構築が必要であり、反射法地震探査と電磁探査を中心として、重磁力データを包含した解像度の高い統合物理探査が、今後の概要調査・精密調査で不可欠となる。

2-3 防災・学術調査分野

防災・学術調査分野では、1995年兵庫県南部地震

以後に全国各地の地方自治体において、文科省交付金による活断層調査が継続的に実施され、地形・地質構造の形成過程、活断層の構造形態・活動履歴を含め、後期新生代テクトニクス of 解明に資する物理探査データが蓄積された。さらに、1990年代後半より、日本列島に沈み込むスラブの詳細形状、プレート収束帯における堆積盆の基本構造、陸域震源断層の位置・形状把握等の理解に向けた深部地殻構造探査が積極的に進められ、震源断層-活断層システムのイメージングの重要性が指摘されてきた²⁾。こうした断層システムを視覚的に理解する上では、反射法地震探査が重要な役割を果たすと共に、断層破碎帯の抽出には電気-電磁探査が非常に有効である。

2-4 カーボンニュートラル関連事業分野

2050年カーボンニュートラル社会実現において、CCS-CCUSに関わるサイト選定・評価は極めて重要な課題である。CCSに適した貯留層-遮蔽層構造の把握には反射法地震探査が不可欠であり、貯留可能性、貯留層物性及び遮蔽層健全性に資するデータが収集され、圧入CO₂挙動予測やジオメカニクス解析に必要な地質構造モデルが構築される。さらに、CCS-CCUS開始後のサイトでは、圧入CO₂の領域把握を目的とした繰り返し地震探査が実施されると共に、連続モニタリングシステムが構築・運用される。

次に、再生可能エネルギー関連では、先ず洋上風力発電事業において、海上音波探査を含む反射法地震探査を通じて、海底地盤の堆積状態を連続的に把握し、標準貫入試験やコーン貫入試験との対比を通じて、地盤構造モデルを構築することが求められる。さらに、工学的基盤の深度・形状を把握するために海底下のS波構造把握が重要な課題であり、海底微動アレイ探査や変換S波探査が開発されている。

さらに、日本国内における安定的ベースロード電源として地熱発電が位置付けられているが、地熱系の地質構造と水理構造を把握し、断層系を前提とした地熱貯留層モデルの構築が求められる。適用される物理探査手法としては、山岳・難地域における物理的な制約にも対応可能な重力探査と共に、溶解塩化物を多く含む高温地熱流体に充填された貯留層や難透水性の粘土鉱物が含まれるキャップロックを同定するには、電気-電磁探査が重要な役割を果たしている。近年、地熱貯留層及び断層系の高精度イメージングに関して、準三次元反射法地震探査や坑内光ファイバー計測を伴うVSP探査法の開発が進んでいる。

2-5 資源開発分野

地震探査技術は、天然ガス探鉱等において、詳細な三次元地下構造の可視化と共に、貯留層物性評価に不可欠な技術であり、未だにこの分野への適用を通じた技術開発が進展している。また、海洋電磁探査は、低飽和ガスに関わる地質リスク低減への貢献が期待されている。こうした物理探査技術は、日本近海の微生物起源ガスやメタンハイドレート探鉱において、エネルギー安定供給の観点から極めて重要である。

近年、排他的経済水域における海底熱水鉱床、レアアース泥及びコバルトリッチクラストなどが、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、鉱物資源の安定供給において期待されている。海洋鉱物資源開発は商業化への課題が大きいですが、将来的には、海底金属鉱床の発見・賦存量把握には、海中ロボット（AUV, ROV）を活用した物理探査手法の確立が望まれる。

3 物理探査技術の進展と今後の課題

前節で述べた様に、持続可能な社会実現に向けて、物理探査技術の適用分野は多岐に亘って拡張している。こうした時代の要請を踏まえ、物理探査の各要素技術は、センシングユニットの改良・多点化等に伴うデータ取得技術の発展と共に、AI技術の導入を含めたデータ処理技術の高度化も進展している。

適用分野毎に、有効な物理探査手法、抽出すべき物理量及び要求される解像度は異なるものの、多種物理探査データの解析・解釈・インバージョンを通じて、構造形態・岩相情報・物性情報・力学特性・水理特性を含む地質・地盤構造・地質工学モデルを三次元的に構築することが求められる。こうして構築された二次元・三次元モデルを総合評価することによって、土木・インフラ維持分野では、設計・施工への直接貢献が可能になり、防災関連分野では、防災・減災計画策定への寄与が期待できる。また、カーボンニュートラル関連分野の中でもCCSに関しては、貯留可能地点の選定・評価・操業への寄与が可能であり、資源開発分野では、貯留層・鉱床性状の把握を通じた資源賦存量の把握に帰結すると考えられる（図-1）。本節では、以下3点に関して、物理探査技術の進展と課題に関して記述する。

3-1 三次元モデル構築の標準化

三次元地質構造・地盤構造モデルの構築は、地下構造の可視化と共に、地質評価の不確実性に伴うリスク軽減に大きく貢献することが期待される。近年、

全国地質調査業協会連合会の支援を受け、国内の地質・建設コンサルタント会社35社によって、「3次元地質解析技術コンソーシアム」が組成され、地質・地盤三次元モデルの作成手法と品質管理に関わるマニュアル、ガイドブック及び入門ソフトウェアが公開されている³⁾。

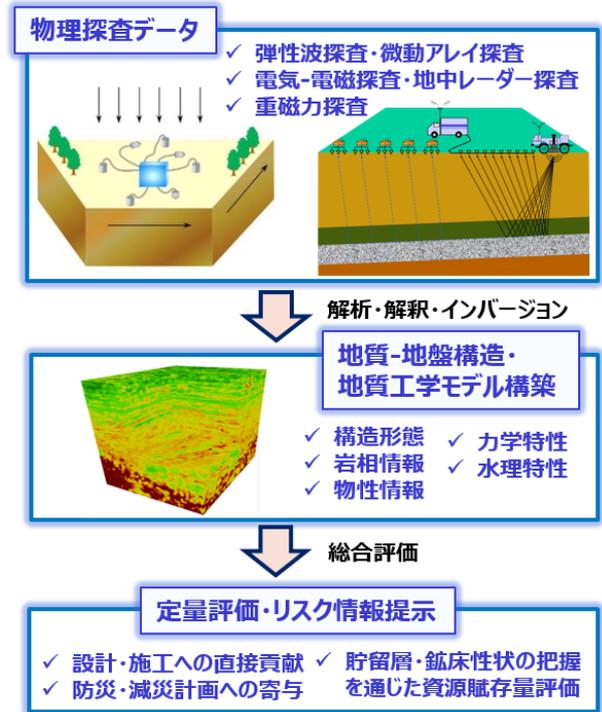


図-1 物理探査データの貢献に関するワークフロー

こうした三次元モデル構築において、その基礎データ自体が三次元で取得されることも重要な課題である。資源開発分野では、1990年代中期以降、24ビットA/Dを搭載した探鉱機、MEMS加速度センサーの導入及びケーブルレスシステムの開発に伴い、日本国内においても、陸域・浅海域・海域における三次元地震探査データが集積されてきた。一方、土木・インフラ維持管理分野においては、限定されたボーリング調査だけでは推定が難しい地盤不均質について、三次元常時微動トモグラフィによる高精度の推定手法が開発されている⁴⁾。また、近年、海底地盤の三次元構造可視化を目指し、資源探査用の三次元地震探査システムを小型化、高分解能化すると共に、異種震源によるマルチスケール探査が可能なシステムが開発されている⁵⁾（図-2）。

3-2 多種物理探査による統合解析

前述の様な三次元地質・地盤モデルを構築するに際して、単一の物理探査データに関しては一意性や不確実性が高く、多種物理探査データを用いた統合的な解析・解釈・インバージョンが不可欠である。

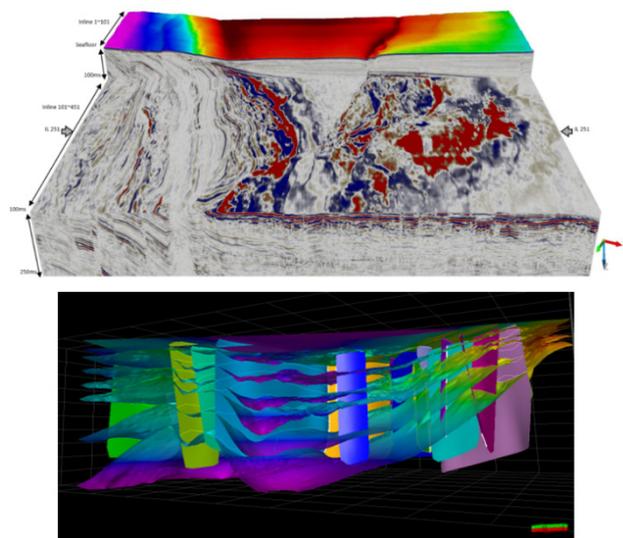


図-2 底下の三次元地盤構造に関する可視化例
 高分解能三次元海底地盤探査例(上) 寺西他(2020)⁵⁾
 及び三次元地盤構造解釈結果(下) 地球科学総合研(2021)⁶⁾

土木-建設分野及び地盤工学分野においては、物理探査データから物性-地盤工学パラメータを精度良く推定し、設計-施工への直接貢献を行う上で、多種物理探査による統合解析・解釈が担う役割は大きい。

物理探査学会では、統合物理探査調査研究委員会を通じて、統合物理探査の普及に向けた報告がされている⁷⁾。図-3に、河川堤防調査においてS波速度と比抵抗情報から粒径を推定し、透水係数をプロファイリングした事例を示す⁸⁾。

一方、深部構造を対象とした資源開発分野においては、地震探査データが主体であるが、電磁探査・重磁力探査データを加えて、流体性状や孔隙率等の貯留層物性、力学特性及びマクロ岩相モデルを構築するワークフローが確立し、AI技術を用いた物性値選定や統合インバージョンへの発展が期待されている。

3-3 時間履歴の抽出とモニタリング

三次元地下構造の可視化と共に、時間履歴の抽出とモニタリングがインフラ維持管理、災害に即応した地盤変動の把握において重要度が増していると考えられる。また、CCS-CCUS事業分野においても、坑井内における温度・圧力・微小震動の連続観測と共に、圧入CO₂の領域把握を目的とした繰り返し地震探査の効率的な実施が要請される。現在、時間履歴抽出においては、光ファイバーによる稠密・連続観測を通じた地層安定性の監視技術が進展している。

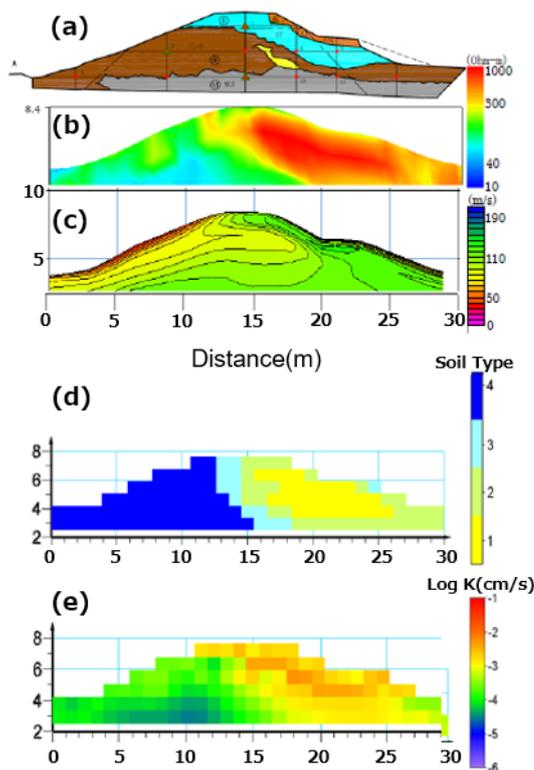


図-3 多種物理探査データの統合解析による堤体内部推定例
 高橋他(2015)⁸⁾ 図番号加筆

(a) 堤体断面スケッチ (b) S波速度断面 (c) 比抵抗断面
 (d) 推定土壌プロファイル (e) 透水係数プロファイル

4 総括

今後、物理探査技術は、そのデータ取得・処理・解析・解釈技術の進展に伴って、構造形態・岩相情報・物性情報・力学特性・水理特性に関して、より高精度な三次元地質・地盤構造・地質工学モデルを提供し、持続可能な社会を支えるカーボンニュートラルの実現に不可欠な基盤技術となることが期待される。

〈参考文献〉

- 1) 国立研究開発法人土木研究所 / 物理探査学会：河川堤防の統合的物理探査-安全性評価への適用の手引き-, 愛智出版, 2013
- 2) 佐藤 比呂志, 伊藤 谷生, 池田 安隆, 平田 直, 今泉 俊文, 井川 猛：震源断層-活断層システムのイメージングの意義と現状, 地質学雑誌, 110 (6), pp.838-848, 2001.
- 3) 三次元地質解析技術コンソーシアム：
<https://www.3dgeoteccon.com/> (2021年9月27日現在)
- 4) 林 宏一 他：二次元および三次元常時微動トモグラフィの開発と適用, 物理探査学会第138回学術講演会論文集, pp.79-82, 2018.
- 5) 寺西 陽祐 他：高分解能三次元地震探査システム実証試験(別府湾での調査例), 物理探査学会第143回学術講演会論文集, pp.123-126, 2020.
- 6) 株式会社地球科学総合研究所：技術パンフレット, 2021.
- 7) 統合物理探査調査研究委員会：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, 物理探査学会, 2017.
- 8) 高橋 亨, 相澤 隆生, 村田 和則, 西尾 英貴, 松岡 俊文：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, pp.167-175, 2015.

反射法地震探査による 深部地質構造の可視化

ひがしなか もとのり
東中 基倫*

K
ey Word

反射法地震探査, 地下構造調査, 深部探査, 資源探査, 地震防災,
学術調査, 物理探査

1 はじめに

反射法地震探査（以下、反射法探査）は、石油・天然ガス資源探査における地下構造推定と貯留層物性評価を目的として発展してきた。一方、地下構造を可視化する観点で、適用対象はこうした資源開発分野に止まらず、カーボンニュートラルに向けた温暖化ガス拡散抑制策の有力な手法である二酸化炭素地中貯留や再生可能エネルギーの一つである地熱開発、海底鉱物資源開発、土木インフラ維持管理及び地震防災等の多岐に及んでいる。

本稿では、数百mを超える深部地下構造把握を目的とした反射法探査の技術を近年の動向を含め、概要を示す。

2 深部地質構造の可視化の意義と 反射法地震探査の貢献

数百mを超える深部地下構造把握を目的とする技術は、地下資源探査、特に石油・天然ガス探査における大きな需要を背景に発展してきた。また近年日本国内では地震防災を目的とする地震動予測の基礎的な情報として、断層分布と形状把握を目的とした深部地下構造探査が実施されている。

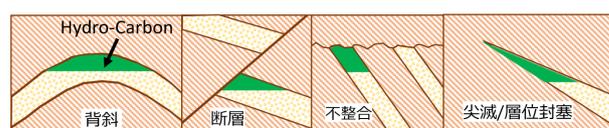
反射法探査は、人工的に生じさせた弾性波が地下の物性境界にて反射することを利用して、境界面の形状を可視化する物理探査手法である。一般的に、地表や水中において人工的に震動を起こし、地下境界面からの微弱な反射波を地表に設置した受振器（小型地震計）にて記録することによって情報を得る。石油・天然ガス探査では、対象深度が5,000mを超える場合もあり、探査深度に適した調査仕様が選択される。すなわち震源エネルギーを増大できる

大型震源、長大な受振展開の確保などである。また併せて、適切なデータ処理手法が選択される。

深部構造を対象とする反射法探査の利用法について、その代表的な適用分野である石油・天然ガス探査、および学術・防災分野について以下に概要を示す。

石油・天然ガス探査

石油・天然ガス等の流体は地層を構成する岩石の孔隙に貯留されている。反射法は、これら資源の貯留構造形状（トラップ）の抽出、振幅情報を用いる孔隙内流体の推定、既開発油・ガス田の生産管理など多岐に渡って利用される。トラップ構造は、単純な背斜トラップだけでなく、断層がシールとなる断層トラップや、不整合や地層の尖滅構造がトラップとなる層位トラップなど様々な貯留構造が存在する（図1）。



地球科学総合研究所 社内資料

図1 炭化水素探査における様々なトラップ構造

反射法探査は複雑な地下構造の可視化に適しており、概査としての二次元探査、精査としての三次元探査がトラップ抽出に広く用いられている。また、反射法データから、構造-堆積相把握に止まらず、貯留層評価に関わる物性解析や力学特性推定を通じて、探査に重要な情報が抽出されている。

学術・防災分野

地質学、固体地球物理学において、テクトニクス

*株式会社地球科学総合研究所 探査事業部長

を反映する深部地殻構造を把握するために反射法探査が活用されている。深部地殻構造探査への反射法探査の利用は、1960年代のヨーロッパ、北米およびオーストラリアを中心として爆薬震源を用いた調査に始まり、1980年前後から、米国のCOCORPプロジェクトを中心として、石油探鉱の技術を用いた大規模な地殻構造探査が開始されている¹⁾。

日本国内では1995年兵庫県南部地震以後に全国各地の地方自治体において、文科省交付金による活断層調査が実施され、地形・地質構造の形成過程、活断層の構造形態を含め、後期新生代テクトニクスの解明に資する貴重なデータが蓄積された。さらに、2000年代前半より、日本列島に沈み込むスラブの詳細形状、プレート収束帯における堆積盆の基本構造、震源断層－活断層システムの理解を目的とする位置・形状把握等に向けた深部地殻構造探査が積極的に進められてきた²⁾。

3 深部探査のための反射法地震探査技術概要

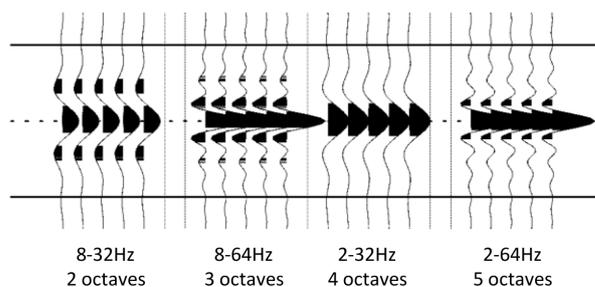
深部反射法探査における反射法記録の高精度化は、データ取得・処理両面における技術開発、また改良によって達成されてきた。深部反射法探査における主要な技術と現状について概略を紹介する。

3.1 データ取得技術

深部探査では、多様なノイズに被覆された微弱な深部反射波を抽出・解析する上で、不均質速度推定とイメージング技術の高度化に適したデータ取得仕様の選択が重要である。近年、実用化された取得技術として、広帯域化データ取得技術、長大展開の実現、また空間サンプリングの稠密化が挙げられる。

受発震システム応答の広帯域化は、時間分解能の向上と共に、低周波伝播エネルギーの拡充を通じた深部反射波の抽出を可能にする。データの広帯域化による基本波形の分解能向上について図2に示す。高周波成分を確保しても低周波を欠く場合（中央左）、低周波を含む右の波形に比してサイドローブが大きくなり分解能が低下することが分かる。広帯域探査による反射法断面改善例³⁾を図3に示す。低周波成分の確保によって、従来記録では、不明瞭であった深部反射波の振幅が強く明瞭になっていることが確認出来る。

長大展開の実現によって、屈折波、反射波及び広角反射波の同時取得が可能となり、屈折トモグラフィ解析、FWI速度解析及び重合前マイグレーション速度解析を組み合わせた高度の速度推定が可能と



地球科学総合研究所 社内資料

図2 周波数帯域によるウェーブレットの変換

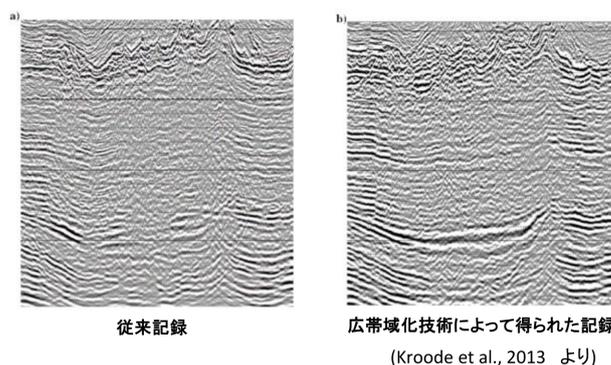


図3 広帯域探査による深部イメージ品質向上の事例（陸上探査）

なった。また受発震点間隔の稠密化によって空間エイリアジングの抑制、共通受振－発震－オフセット領域における均一サンプリングの実現、‘Acquisition Footprint’の抑制及び有効重合数の向上が達成される。空間サンプリング密度の向上は、データ処理手法の効果に大きく影響し、反射法記録の最終的な品質向上への寄与が大きい。

以下に、主にデータ取得における震源、受振、収録について近年の動向を記述する。

(1) 震源

深部構造探査で用いられる周波数帯域は、数Hzから50Hz前後が一般的であり、特に深部探査では5Hz以下の低周波の信号確保が重要である。深部探査に用いられる主要震源は、陸域では爆薬震源と大型バイブレータ、海域ではクラスター型エアガンである。本稿では陸上震源について紹介する。

爆薬震源

ダイナマイト震源は、深部へのエネルギー透過度が高く、震源波形がパルスに近い広帯域の周波数応答特性を持つ。調査目的により最大5～30kg/点の薬量が標準的である。近年、日本国内においては、騒音・振動など周辺環境への影響、掘削作業に関わ

る制約等から、爆薬震源の使用を控え、非爆薬震源で代替する事例が増加している。

バイブレータ震源

1950年代にConoco社（現ConocoPhillips社）により開発されたバイブレータ震源は、標準的な非爆薬震源として、石油・天然ガス資源探鉱のみならず広く用いられている。図4に広帯域バイブレータ震源車の例を示す。



製造会社	INOVA Geophysical Inc.
型式	UNIVIB2
全長×全幅×全高	8.0×2.2×3.0(m)
総重量	16,750kg
ピークフォース	34,000lbf
周波数範囲	1-400Hz

地球科学総合研究所 社内資料

図4 広帯域バイブレータ震源車の例

バイブレータ震源は、震源スペクトル及び出力エネルギーの柔軟な制御が可能であり、周辺構造物への影響を含め環境負荷が低いことが最大の利点である。地下深部を対象とする反射法では、複数バイブレータ震源の同時発震、同一点における発震回数の確保及びスウィープ時間長の増大を通じて、透過エネルギーの確保とS/Nの改善が図られ、探査対象に応じて調査仕様が設定される。

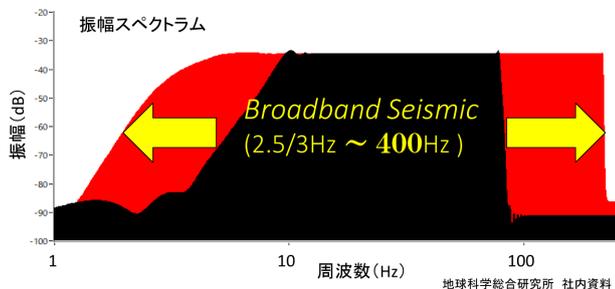


図5 広帯域バイブレータによる発震周波数の拡張模式図

深部構造探査では、低周波成分の確保が非常に重要である。近年、低周波応答に優れた広帯域バイブレータが開発されている。またハードウェア的な制限を超えない範囲で、低周波エネルギーの確保を目

的としたLow - Dwell - Sweepが使用され、高調波抑制技術も発展している。図5に広帯域バイブレータによる周波数帯域拡張の模式図を示す。

(2) 受振器

反射法で使用される受振器は、半世紀前から陸上ではジオフォン（電磁式地震計）、海域ではハイドロフォンであるが、小型化・耐久度の向上・高感度化が図られ、現在に至っている。本稿では陸上受振器について近年の動向を下記に示す。

陸域受振器

堆積盆・堆積平野における一般的な反射法探査では、受振器の耐久性及び可搬性の観点から、共振周波数10～14Hzの受振器が広範に用いられてきたが、近年では広帯域地震探査の必要性の認識とともに共振周波数5Hzの高感度ジオフォンが普及している。また、2000年代前半より、MEMS加速度センサーが開発され、効率的な三成分地震データの取得においては標準的に用いられている。

(3) データ収録システム

近年、ケーブルレス収録システムの小型化・無線伝送の導入に伴って、有線テレメトリ方式の陸域及び浅海域における受振システムとの複合化による自由度の高い観測システム構築が可能となり、異種震源を併用した反射法・屈折法データの取得が容易となった。以下に有線テレメトリ、ケーブルレス記録システムについて概要を示す。

有線テレメトリシステム

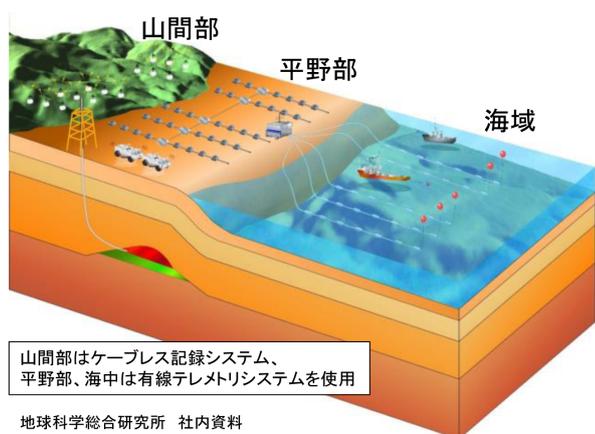
有線テレメトリシステムでは、受振器からのアナログデータは、受振点近傍においてA/D変換され、記録装置にリアルタイム伝送される。三次元探査では、複数のサイズミックラインが用いられ、10,000チャンネルを超える収録が可能である。このような多チャンネル化により空間サンプリングの稠密化が達成されている。

海域におけるストリーマケーブル曳航型の探査では、海面ゴースト波の抑制が広帯域化を図る上で重要な課題である。フィールドにおけるゴースト波抑制手法としては、ストリーマケーブルを端点方向に徐々に深度を増加させる傾斜曳航方式、ハイドロフォン-MEMSセンサーデータの同一点取得方式が現在採用されている。

ケーブルレス記録システム

チャンネル数の増加に伴う伝送系の負荷、測線維

持・管理にかかるコストの増加、不規則な受振点配置に関わる展開レイアウト設計の複雑化等の問題に対応するため、ケーブルレス記録システムが広く用いられるようになった。ケーブルレス記録システムは、単体の記録システムに受振センサーとGPS刻時装置を組み込むものである。またWi-Fiによるデータ伝送なども実装され、データ取得作業の効率化によって、深部構造探査に適した2,000chを超えるような長大オフセット展開や、海陸境界域でのシームレスな受振展開の効率化に大きく寄与している。図6に海陸境界域におけるデータ収録システムの構成模式図を示す。



地球科学総合研究所 社内資料

図6 海陸境界域におけるデータ収録システム模式図

3.2 データ処理

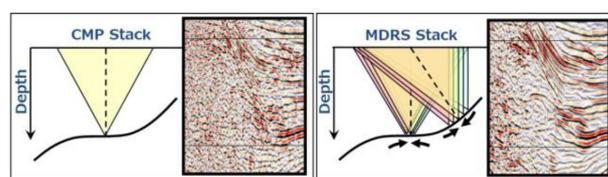
取得したデータの適切な処理・解析を通じて、地下構造を可視化した二次元断面図または三次元ボリュームを得ることができる。反射法探査では、近年、計算機システムの高速化・大容量化に伴い、大量のデータを迅速に扱うと共に、大深度からの微弱な信号をノイズから識別・抽出し、高い精度でイメージングする技術の向上が図られてきた。

反射法探査では、異なる発震-受振点距離のデータについて、走時補正を実施し、反射波を加算・強調する旧来型のCMP重合が1990年代後半まで基本処理手法であったが、正確な地下構造の把握には大きな課題があった。現在では、計算機システムの発展と共に、水平多層構造の前提を要しない重合前マイグレーション処理が、三次元データ処理においても標準的な手法として普及している。反射法処理におけるS/N向上は、信号加算を前提とするイメージング処理と、有効な信号と多重反射波などのノイズを分離し除去する手法によって達成される。取得されたデータの特徴に応じて、屈折波-反射波静補正処理、各種ノイズを複合型手法によって分離抑制する処理、振幅減衰を補償する振幅補償処理、波形

処理等の手法を最適化した手順にて適用される。これら処理法効果は、空間サンプリングの密度、均一性によって大きく影響されるため、データ取得仕様は適用可能なデータ処理手法を留意し検討されることが望ましい。

深部探査イメージング向上に関わる近年の動向

地下深部を対象とするイメージングでは、CMP重合を拡張したCRS (Common Reflection Surface) 法をマルチディップに発展させたMDRS (Multi-dip Reflection Surfaces) 法⁴⁾が、微弱な深部反射波を抽出する観点で重要な処理技術となっている。図7にMDRS法の概念図と適用事例を示す。



地球科学総合研究所 社内資料

図7 MDRS法の概念と適用事例

このMDRS法では、反射波の出現角毎に、広範囲のデータを用いて、反射走時における反射面の傾き、曲率等のパラメータを自動推定し、重合数を飛躍的に増大させることが可能であり、重合前イメージング処理との併用も実現しつつある。

4 深部地下構造探査事例

(1) 堆積盆スケールの深部探査事例

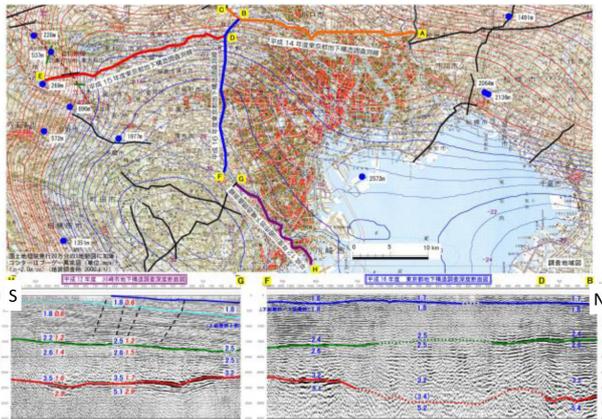
1995年の阪神大震災以降、都市圏の地震防災を目的として、全国各地の地方自治体において、文科省交付金による活断層調査が実施された。関東平野では、東京都、千葉県、川崎市などが調査を実施し、地震基盤に相当する先新第三系上面の構造形状が把握されている。本稿では東京都による平成16年度、「関東平野(東京都)地下構造調査(環状八号線沿い弾性波探査)に関する調査」⁵⁾での反射法探査について述べる。当該調査は、都道環状八号線に沿って、埼玉県和光市から板橋区・練馬区・杉並区をとり、世田谷区に至る測線長約22kmの反射法探査である。本調査は、大都市圏の人口稠密な市街地で行われた点が最も大きな特徴である。都市圏での強震動予測の入力となる基盤形状と速度構造を得ることが調査の目的であり、信頼性の高いP波速度を得るため屈折法データも合わせて取得された。S/N向上を目的として、パイブレイク震源を最大4台使用し発震エネルギーの確保を図ると同時に、バック

グラウンドノイズが少ない住宅地や河川沿いにケーブルレス記録システムを用いた受振測線が設定された。図8にバイブレータ夜間発震作業の写真を示す。反射法・屈折法のデータ取得、処理の結果、断面図と速度構造モデルが得られた。図9に測線位置と反射法断面図を示す。



(東京都、2004より)

図8 環状八号線におけるバイブレータ発震作業写真



(東京都、2004より)

図9 東京都平成15年度地下構造調査断面図

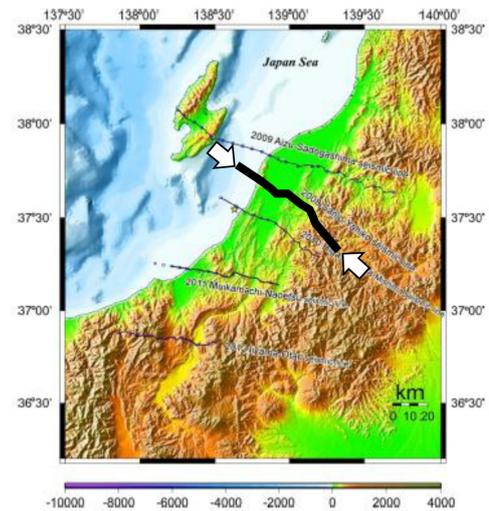
図中左下の断面図は、平成12年度川崎市地下構造調査の成果である。また断面図上の数字は屈折法によるP波速度値である。こうした関東平野における堆積盆スケールの複数の反射法探査によって、首都圏の堆積層構造モデルが作成され、強震動予測に利用されている。

(2) 地殻構造探査の事例

「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」プロジェクトは、日本海東縁のひずみ集中帯において、平成16年新潟県中越地震、平成19年新潟県中越沖地震等の被害地震の連続的発生を背景に、平成19年度から24年度にかけて実施された地震調査研究推進本部の研究プロジェクトである。プロジェクトの一環として、活褶曲・活断層などと地下深部の震源断層との関係を明らかにすることを目的に「制御震源を用いた地殻構造探査」が実施されている⁶⁾。本稿

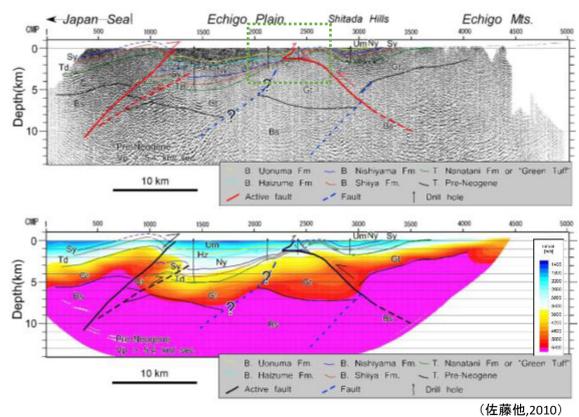
では平成20年度に実施された三条-弥彦測線の事例を紹介する。図10に測線位置図(図中、矢印が当該測線)を示す。

この三条-弥彦沖測線は、越後山脈から三条を経て弥彦沖に至る70km強(発震)の調査測線である。海域では海底着底ケーブルシステムが、陸域では有線テレメトリと独立型受振システムが複合的に使用され、長大固定展開が設定された。



(佐藤、2013に加筆)

図10 新潟地域における地殻構造探査測線位置図



(佐藤他,2010)

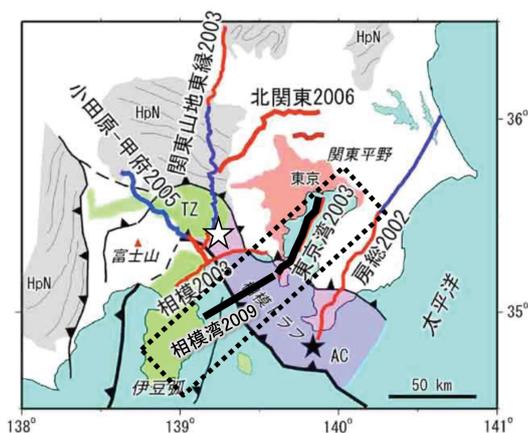
図11 三条-弥彦測線の反射法断面(上)と速度構造断面(下)

本調査では、屈折波、反射波及び広角反射波の同時取得によるマルチモード探査が実現し、屈折トモグラフィ解析(初期モデルランダム化方式)と反射法イメージングによる複合型処理によって、高精度の速度モデル構築と深部構造イメージングの実施が可能となった(図11)。本調査を通じて、新潟平野を東西で画する角田-弥彦衝上断層と新潟平野東縁断層の深部ジオメトリ把握と共に、階層的な火山岩分布の解釈に資する成果が得られた。

(3) 東京湾-相模湾における海陸統合調査事例

大都市圏・大災害被害軽減化プロジェクト

(https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm)の一環として、東京湾にて地殻構造探査が実施されている。当該プロジェクトでは、首都圏において、大規模な反射法を用いた地殻構造探査が6測線実施された(図13)⁷⁾。



TZ: 丹沢ブロック(伊豆-小笠原弧由来の島弧地殻)、IZ: 伊豆ブロック、AC: 主に新第三紀の付加体、HpN: 先新第三系。1703年元禄地震(黒い星印)と1923年関東地震の震源(白星印)。実線: 反射法地震探査測線

平田(2007)に加筆

図13 首都圏における地殻構造探査測線図

東京湾測線は、三浦半島の陸域区間を伴い、東京湾内を北上し浦安沖に至る全長約70kmの海陸統合探査測線である(図13, 図中“東京湾2003”)。当該調査では、陸域震源として4台のバイブレータ、海域震源として容量1,500立方インチのエアガンが用いられている。東京湾内では航行船舶への対応のため、限定された3.0kmの着底ケーブル区間を12展開分設定し、最大オフセット18kmの重複発震によってデータが取得されている⁷⁾。また、この東京湾測線に接続する構造探査が、2009年に「神縄・国府津-松田断層帯における重点的調査観測」の一環として、相模トラフにおいて実施された(図13中、相模湾2009)。同調査では、3,020立方インチのエアガン発震船と2kmの受振ケーブルを曳航するケーブル船を用いる二船式でデータが取得され、最大オフセット30kmを越える長大オフセットの海域データが収録された⁸⁾。両地殻構造調査測線を接続した断面図⁹⁾を図14に示す。

この相模湾-東京湾横断調査の実施を通じて、フィリピン海プレート上面相当の反射波群が断続的に可視化され、浦安沖では26km程度の深度として確認された。また、反射強度低下を示す相対的に高速度の領域において、アスペリティー領域の存在が示唆された。さらに、プレート境界から分岐する国府津-松田断層等のジオメトリーと共に、相模湾におけるトラフ充填堆積層と東京湾における新第三系堆積層構造の詳細が明確となった。

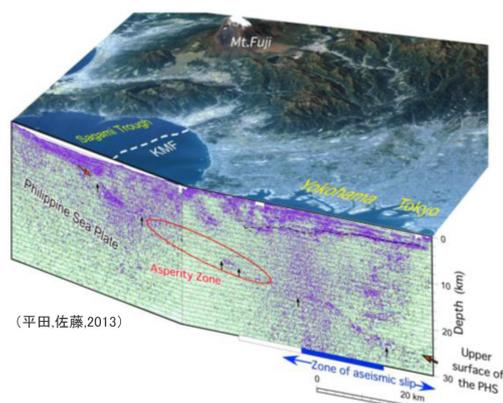


図14 相模湾-三浦半島-東京湾横断面図

5 まとめ

反射法地震探査は、資源探査における需要を背景として、探査深度の拡張と高精度イメージングを目的にデータ取得・処理・解析手法の開発、改良が行われてきた。今後は、資源探査・地震防災分野のみならず、カーボンニュートラルに関わる諸分野への適用を目的として、地下構造可視化への技術適用と発展が期待される。

〈参考文献〉

- 1) 高橋明久: 地下深部探査- 1980年代の陸上反射法地震探査を中心として-, 地震, 44, 159-171, 1991.
- 2) 佐藤比呂志, 伊藤谷生, 池田安隆, 平田直, 今泉俊文, 井川猛: 震源断層-活断層システムのイメージングの意義と現状, 地質学雑誌 110, 2001
- 3) Kroode, Bergler, Corsten, Maag, Srijbos and Tjihof: Broadband seismic data - The importance of low frequencies, Geophysics, vol.78, 2013
- 4) Aoki, N., Narahara, S., Takahashi, A., and Nishiki, T.: Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection surfaces method, SEG Expanded Abstract, 2010.
- 5) 東京都: 関東平野(東京都)地下構造調査(環状八号線沿い弾性波探査)に関する調査成果報告書, <https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Tokyo9frm.htm>, 2004
- 6) 佐藤比呂志: 反射法・屈折法による地殻構造調査, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究総括成果報告書, 防災科学技術研究所, 2013
- 7) 平田直: 「大都市圏地殻構造調査研究」, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト 総括成果報告書, 独立行政法人防災科学技術研究所, 2007
- 8) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 阿部進, 石山達也, 平田直: 2009年相模トラフ横断地殻構造探査, 第117年日本地質学会学術大会 講演要旨集, 2010
- 9) 平田直, 佐藤比呂志: 首都直下地震-見えてきた地下構造-, 日経サイエンス, No.4. 34-45, 2013

土木地質調査における 弾性波探査の3次元化への 取り組みと展望

さとう れい*・きくち りゅうのすけ*・いしがき こういち*

佐藤 礼*・菊池 竜之介*・石垣 孝一*

Key Word

3次元弾性波探査, 走時トモグラフィ解析, 反射法地震探査

1 はじめに

土木地質調査において利用される物理探査手法の一つである弾性波探査（屈折法地震探査）は、地盤の速度構造を求めることができる探査技術である。その他、目的とする物性値に応じて様々な物理探査手法が利用され、2次元および3次元の調査・解析が行われるようになってきたが、弾性波探査に関しては3次元での適用が遅れているように思われる。調査地において3次元的に複雑な地質構造が予想される場合にも、1本もしくは数本の直線的な測線配置による調査を行い、それぞれを2次元解析し補正・補間することで、擬似的に3次元速度構造を推定する場合も少なくない。従来の2次元弾性波探査ではハギトリ法解析および走時トモグラフィ解析を用いるのが一般的であるが、そのどちらの場合にも、複雑な3次元速度構造の影響を受けたデータを用いた解析結果が、誤った解釈の原因になる可能性がある^{1),2)}とされている。一方、調査領域に稠密なメッシュ状に測線を配置・測定し、3次元領域での解析を行なうことで3次元速度構造の影響を評価し解析精度を向上させ、3次元弾性波探査の適用性を示した事例もある³⁾。しかし3次元弾性波探査では、測点が2次元探査に比べて飛躍的に増加してしまうハードウェア的な課題と、データ密度が疎となる箇所において偽像が発生してしまうソフトウェア的な課題とがあり、これまで幅広い普及に至らなかったと考えられる。

そこで筆者らはこれらの課題を解決すべく、後述する解析アルゴリズムを導入した走時トモグラフィ解析技術「3D-HD トモグラフィ」を報告し⁴⁾、比較的疎な測線配置であっても、3次元速度構造が再現できる技術として適用してゆくこととした。ま

た3D-HD トモグラフィのような3次元解析では測点を必ずしも直線状に配置する必要がなく、柔軟な測線配置が可能となる。

本稿では、稠密な測線配置と比較的疎な測線配置とを比較した適用性の検討について、また屈曲した測線配置による適用性の検討についての2つの事例を紹介する。

2 相関距離を導入した解析アルゴリズム

3D-HD トモグラフィの特徴の1つである、相関距離を導入した速度モデルの修正は比較的疎な測線配置による3次元解析において重要な働きをもつ。ここでいう相関距離とは、逆解析の対象となる弾性波速度に相関性があると仮定する範囲のことである。相関距離は、逆解析の初期段階では広く設定し、解析の進行に伴い狭めてゆく^{5),6)}。そのため、仮定した全ての相関距離において観測走時と整合性のある速度構造が得られるとともに、波線が通過しない領域についても相関距離の範囲内であれば逆解析の対象とすることができる。

このアルゴリズムの導入により、3次元走時トモグラフィ解析で特に問題となりやすい、波線分布が疎となる測線配置においても解析を安定して進行させながら偽像を低減することが可能となり、精度の高い解析結果が得られる⁴⁾。これは、波線分布が疎になることを避けるためにメッシュ状に発振点・受振点を多数配置することが必要条件ではなくなることを意味する。そのため、屈曲した山道沿いでの測線配置や、都市部において私有地や構造物を回避しての測線配置などといった、柔軟な測線を設定することが可能となる。

*株式会社日本地下探査 事業本部

3 疎な測線配置についての検討事例

1つ目の事例として、稠密なメッシュ状の測線配置を用いた場合、疎な測線配置を用いた場合のそれぞれに対して3D-HD トモグラフィの解析を行い、その結果を比較した事例を紹介する⁷⁾。調査地は地表面から深度4m程度までローム層が分布し、その下位に粘土層及び砂層が分布する軟弱な地盤である。受振点は平坦な44m×10mの範囲に2m間隔のメッシュ状に138箇所設定し、発振点は遠隔発振を含めて38箇所設定した。

解析は、3D-HD トモグラフィの解析手法に基づき、下記に示す2通りについて実施した。

- ・138点の受振データを利用（稠密配置）
- ・51点の受振データを利用（フレックス配置）

図1にそれぞれの測線レイアウトを示す。フレックス配置に使用した51箇所の受振点は、屈曲した受振測線を想定して選定した。稠密配置、フレックス配置の両者についてすべての発振点を利用した。

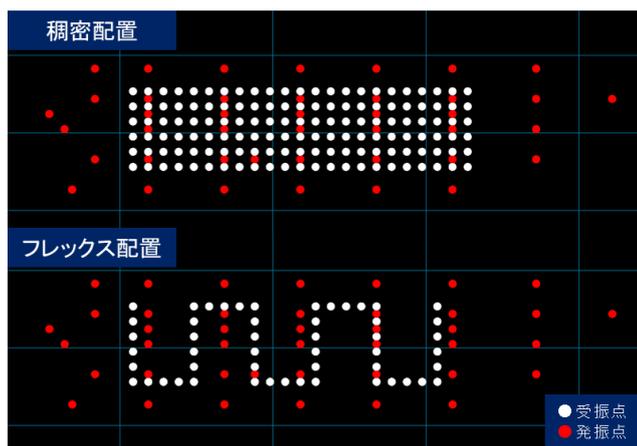


図1 測線レイアウト

図2に稠密配置およびフレックス配置の結果を、図3にそれぞれの結果について解析範囲中央の断面図を示す。稠密なメッシュ状の配置と比較して使用する受振点を大きく減少させたフレックス配置の受振測線を用いた場合であっても、3D-HD トモグラフィ解析の効果により、稠密配置とほぼ同等な3次元解析結果を得られた。このことから疎な測線配置による3次元弾性波探査が可能であることが示された。

4 屈曲した測線配置についての検討事例

2つ目の事例として、屈曲した測線配置の場合において3D-HD トモグラフィの解析を適用した例を

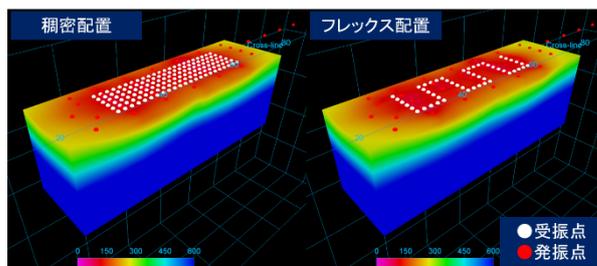


図2 3次元弾性波探査結果

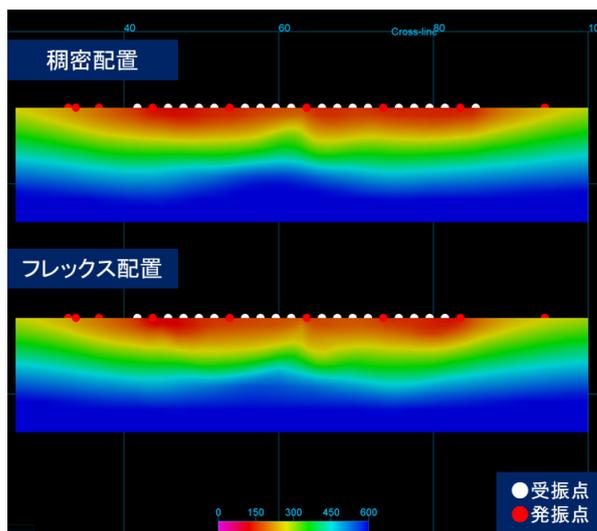


図3 解析範囲中央の断面

紹介する。本事例は白馬村北部の塩島地区において実施された反射法地震探査⁸⁾の記録を使用した。図4に調査位置図を示す。神城断層推定位置および地表地震断層を横断するように、白馬村塩島地区の松川沿い～城山丘陵東側道路にかけて、1,290mの測線が設定された。

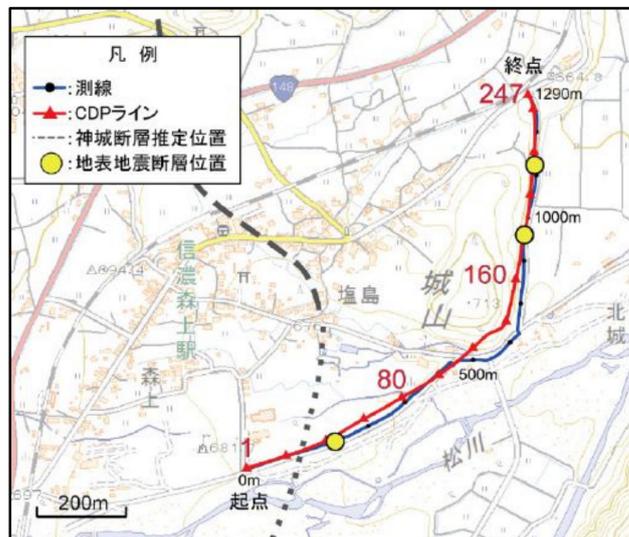


図4 調査位置図

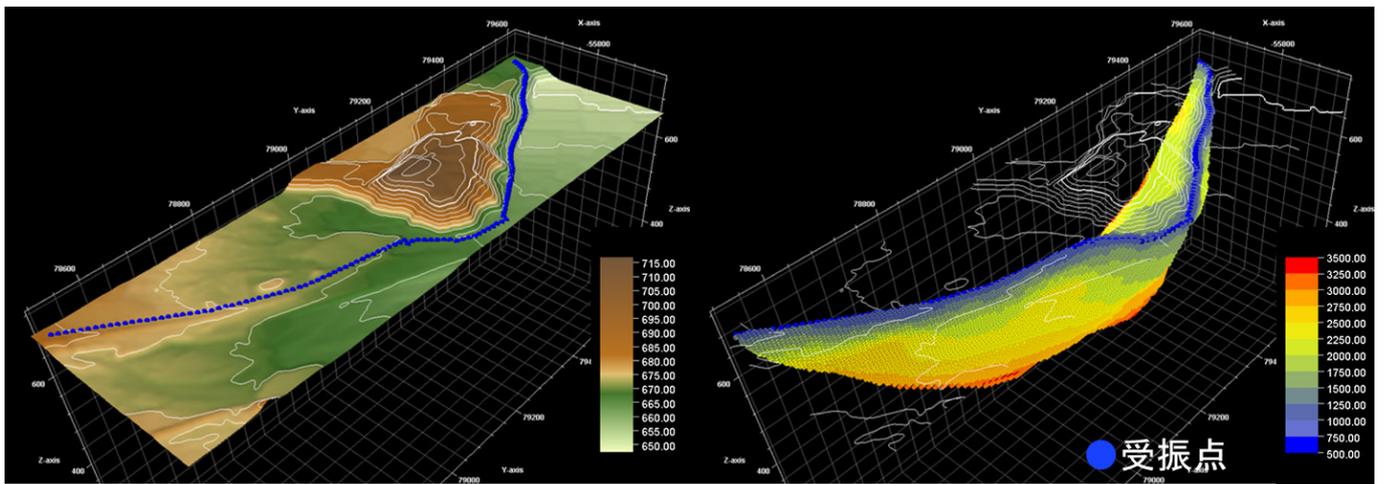


図5 俯瞰図（基盤地図情報数値標高モデル（国土地理院）を加工して作成）

調査測線近傍では、3箇所地表地震断層が確認されている。測線200m付近で確認された地表地震断層は、神城断層によるものと推定される。また、城山の東側で確認された二条の地表地震断層は、それぞれ走向が東西方向で断層によるポップアップ構造を形成しているとされている。

初めに、解析の対象とした範囲とその地形を現した俯瞰図と、解析結果の波線密度が十分に高い範囲を抽出したものを並べて表示したものを図5に示す。図5から、3次元領域で速度構造が解析されたことが確認できる。次に、3D-HD トモグラフィの解析結果について、反射法地震探査によって得られた結果との比較が可能な断面図を図6に示す。図6について南西部や北部に速度構造の段差が確認できる。最後に、反射法地震探査によって得られた結果図を図7に、図6と図7とを重ねて表示したものを図8に示す。図7には測線250m付近と測線1000m付近に地表地震断層であると解釈された構造を破線で示している⁸⁾。図8について、図7で示した地表地震断層と図6で確認された速度構造の段差の形状が部分的に一致している様子が確認できる。

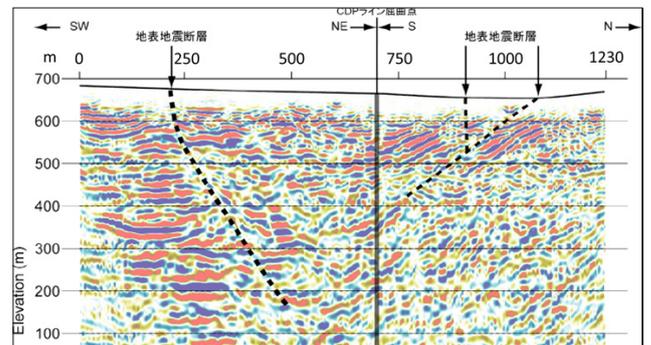


図7 反射法地震探査結果⁸⁾

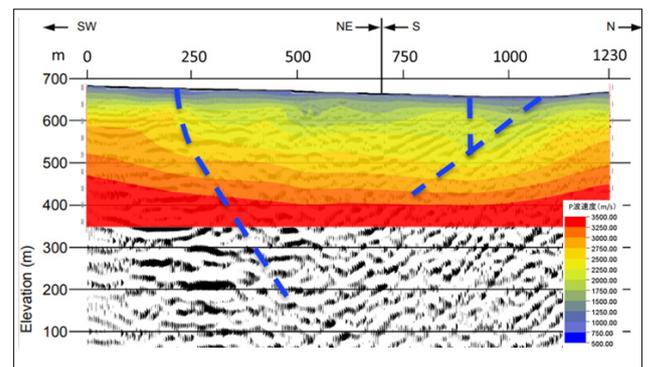


図8 結果比較図

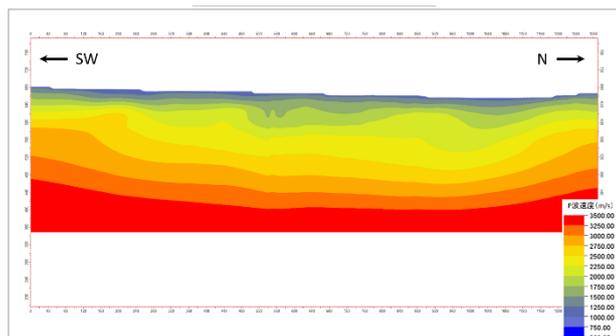


図6 3D-HD トモグラフィ解析結果

屈曲した測線配置での検討事例において、3D-HD トモグラフィ解析の結果は、反射法地震探査によって解釈された地下構造と整合的な速度構造の分布を得ることができた。2次元構造を前提とした2次元解析および直線的な測線配置に制限を受けることなく、3次元的な速度構造による影響を反映した解析が可能であることが示された。

5 まとめ

本稿では、土木地質調査における3次元弾性波探査について、2つの事例から適用性を検討した。その結果、稠密なメッシュ状の測線配置と比較的疎な測線配置とを比較した事例では、使用する測点数を大きく減少させた場合であっても、偽像が発生することなく、稠密配置を使用した場合とほぼ同等の3次元解析結果が得られることを示した。

また屈曲した測線配置について検討した事例では、従来の2次元構造を前提とした2次元解析および直線的な測線配置に制限を受けることなく、3次元的速度構造による影響を反映した解析が可能であることを示した。これらのことから、3D-HD トモグラフィ解析により、比較的疎な測線配置での3次元弾性波探査が可能であること、また必ずしも測点を直線状に配置する必要はなく、屈曲した測線配置での弾性波探査が可能であることが示された。3次元弾性波探査を適用する場合には、目的に応じた最適な測線配置を検討することが今まで以上に重要となる。無制限に測点数を減少させてなお解析精度を保てるわけでは無いことは明らかであり、速度構造を面的に把握したい、任意の断面に注目したい等、目的によって最適な測線配置は異なると考えられる。目的に応じた最適な測線配置に着目し、今後、さらなるデータ取得・解析を通して3次元弾性波探査の適用性を検討していきたい。

近年、3次元弾性波探査を取り巻く技術の発展については、弾性波探査で使用する測定器や受振器の多様化が進み、小型多チャンネル測定器やスタンドアロン型の受振器、DAS (Distributed Acoustic Sensing) 技術などにより、測点数の拡充が容易になりつつある。また、3次元解析に必須となる3次元標高データについても、UAVによるレーザ測量や写真測量が普及し、広域かつ高精度なデータが取得できる。これらの技術を活用し、本稿で紹介した解析技術と併せて検討を進めることで、3次元弾性波探査を幅広く普及できるよう取り組んでいきたい。

〈参考文献〉

- 1) 斎藤秀樹 (1992) : サイスマットモグラフィーの3次元への拡張の試み, 物理探査学会第86回学術講演会論文集, 94-97
- 2) 真田佳典, 白石和也, 松岡俊文, 芦田譲 (2005) : 屈折法の3次元構造による影響の検討, 物理探査学会第113回学術講演会論文集, 224-227
- 3) 八野祐二, 吉川猛, 久保田正史 (2004) : 3次元屈折法トモグラフィ探査の地盤調査への適用, 物理探査学会第110回学術講演会論文集, 215-217
- 4) 佐藤礼, 山田信人, 赫伸仁, 林和男, 佐藤進, 藤本潤 (2019) : 傾斜構造における「3D-HD トモグラフィ」適用の検討, 物理探査学会第140回学術講演会論文集, 37-40

- 5) Charara M., Barnes C. and Tarantola A. (1996) : Constrained Waveform Inversion of Seismic Well Data, Inverse methods, Lecture notes in Earth Sciences, 63, 98-112
- 6) Barnes C., Gerec C., Clement F. and Mougnot J.M. (2011) : Diving wave tomography: a robust method for velocity estimation in a foothills geological context, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011, 3953-3957.
- 7) 菊池竜之介, 佐藤礼, 山崎勇也, 山田信人 (2020) : フレックス配置による3次元弾性波探査の適用例, 物理探査学会第143回学術講演会論文集, 87-90
- 8) 川島裕貴, 山内泰知, 佐藤浩一, 近藤久雄 (2015) : 白馬村北部の神城断層周辺における反射法地震探査, 物理探査学会第132回学術講演会論文集, 233-236

浅部地盤の特徴と 浅部物理探査の役割

いなざき とみお*
稲崎 富士*

K
ey Word

浅部地盤, 浅部物理探査, 空間情報, 地下構造, 物性分布,
解像度, 診断, 検証

1 はじめに

地下 2900km にあるコアマントル境界の直上部に、D' 層と呼ばれる厚さ 300km 程度の境界領域が存在することが知られている。最近の詳細な地球物理学的研究¹⁾によって、ユーラシアプレートの下などに局所的に高速度層が分布すること、それが上部マントルから落下した海洋プレートのかげらであること、またその領域がどのような鉱物相で構成されているか²⁾、ということまで明らかにされつつある。ではその 1/10 万の深さに相当する足下の深さ 26 - 29m にどのような地層が分布しているか、その層の N 値がどの程度であるか、局所的なレンズ層を形成しているのか、を皆さんはご承知であろうか？残念なことにもそのような浅所の構造や物性を研究対象としている地球物理学研究者はほとんど（おそらく一人も！）いない。研究対象として科学的な興味を抱くような領域ではなく、また地球物理学的手法を用いなくとも他の手段によって容易に構造・物性を把握することができるからである。しかしこの評価は適切ではない。実は地球内部は極めて均質（な成層構造）で、ゆらぎの程度は P 波速度で高々 3% 程度に過ぎない（D' 層の場合）。均質であるからこそ微小なゆらぎをイメージングすることができるのである。それに対し浅部地盤は、後述するように構造も物性も極めて不均質である。S 波速度は 30m/s ~ 700m/s 程度の変動幅を有し、支持層の深さも直下から時には 70m 以下にまで落ち込むことがある。2016 年 11 月に発生した福岡市営地下鉄七隈線道路陥没事故ではトンネル天端部（深さ約 17m）に出現する風化岩層の層厚や透水性の不均質を事前のボーリング調査等で適切に捉えていなかったことが原因の一つとされた³⁾。2020 年 10 月には東京外かく環

状道路シールドトンネル工事に伴い、土被り 50m 程度の区間で地表陥没事故が発生した。現在も原因調査中であるが、シールドマシン前方に局所的にゆるみ領域が発生し地下水の流れによってその一部が空洞化し煙突状に地表に進展したというモデルが、事故後に実施された浅部物理探査の結果に基づいて提案されている⁴⁾。亜炭採掘空洞跡や残置防空壕などでも、地下水流によって天端が崩落し上方に空洞が進展する Upward Stoping が地表陥没を引き起こすという類似したモデルが提案されている⁵⁾。

これらの事故例が端的に示すように、浅部地盤の不均質性の程度は極めて大きく、加えて小さな空間スケールで生起する。それがまさしく潜在的な地質リスクとなっているのである。コアマントル境界の深さに比べたったの 1/10 万の深さに過ぎない、まさにロッドを繋げば届く深さでありながら、浅部地盤の構造や物性はいまだによくわかっていない領域の一つなのである。

地盤調査手法の一つである物理探査は、通常でも 2 次元、場合によっては時間軸を含めた 4 次元時空間の高解像度地下情報を提供することができる。この物理探査を活用することによって、我々ははじめて浅部地盤の不均質物性構造を高解像度でイメージングすることができるようになった。そして浅部地盤がいかに不均質であり、これまではそれを見落としてきたか、を目の当たりにしてきた。

さてここまで「浅部地盤」、「浅部物理探査」という用語を未定義のまま使用してきた。以下に節を改めて浅部地盤がどの領域を指すのか、また浅部物理探査とはどのような技術であるかを適用例をまじえて説明しよう。

*産業技術総合研究所 地質情報研究部門 客員研究員

2 浅部地盤とその特徴

2.1 浅部地盤の領域

地表からある程度の深さまでの空間を浅部地盤 (Near Surfaces) と称する。ここで筆者は浅部地盤を、「我々人類が生活のために手を加え、または開発してきた社会生産活動の主要空間」と人間活動の視点から定義する⁶⁾。図-1は地球の内部構造(中柱)と人間の生活および生産活動領域(左)、ならびに国内の地球科学(地形・地質・地球物理・地下水)研究者の推定概数(右)を並べたものである。化石燃料採取や鉱物資源採掘、学術ボーリングなどを除くと、我々の生活・生産対象空間はそのための社会インフラ整備を含め地表から60m程度までの領域に集中している。山岳トンネルなどの特殊な地下空間を除けば、我々が日常的にアクセスすることが可能な地下空間、とも言い換えることができる。日本では国土の約2/3が山岳地であり、人口は平野部に集中しており社会生産活動も平野部に集中している。したがって筆者の定義する浅部地盤は、「主として第四系の未固結層で構成され、地表では様々な生産活動が営まれており、人為的に改変されたか新たに形成された人工地質体で覆われた平野域の空間」と限定することもできる。

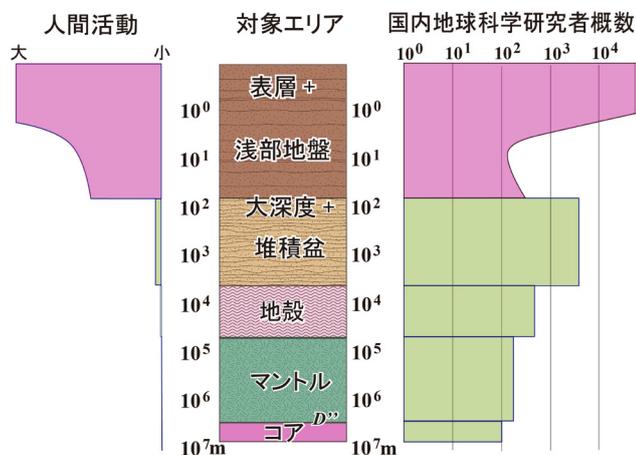


図-1 人間活動領域と浅部地盤

興味深いのは、人間の生活・生産活動のアクティビティと、その領域の研究に携わる地球科学研究者数(≒研究活動アクティビティ)とが必ずしも連動しない、ということである。表層(地表からトレンチ調査が可能なおよそ5m程度の深さまで)は地形・地質両分野にまたがるので、おそらく国内では1万を超える研究者がこの領域を研究対象としていると推定される。大深度地下と堆積盆に代表される地下100m～数kmの領域はテクトニクス研究の対象領域であり、地下水、CCS、資源探査、地震防災分野

での主対象領域でもある。おそらく数千人の研究者が研究に携わっているであろう。深さ数10km以深の地殻、マントル、コアは地球物理学、地震学など固体地球科学研究者が対象とする領域であるとともに海洋地球科学の対象領域でもある。所属は大学やJAMSTECなどの国公立研究機関に限られているであろうが、地震学会や地球惑星科学連合大会での発表件数、researchmapの登録者数等からは、合わせて千人程度の研究者が関係していると推察される。ただし上記の概数は複数の領域にまたがる場合は個別にカウントしているので実数はそれぞれの3-5割程度と見込まれる。これに対し深さ10mから数10m(60m程度)の浅部地盤を対象としている研究者は、多めに見積もっても数100人程度以下ではないだろうか。大規模ボーリングデータベースにアクセス可能な、そして層序ボーリングを遂行可能な限られた沖積層研究者、ネオテクトニクス研究者、加えて浅部物理探査研究者がこの中に含まれる。

2.2 浅部地盤の特徴

浅部地盤を特徴づけるのは人工地盤の存在である。平野部の表層は埋立てや盛土によって大部分が改変され人工地質体によって覆われている。建物はいうまでもなく、道路や農地も人工的に形成されたものであり自然地層とは異なった構造・物性を有している。歴史時代の遺跡・遺構も人工地盤に含まれる。全国で18万箇所以上もある縄文・弥生・古墳時代の遺跡の存在⁷⁾は、我々の祖先が生活空間としての浅部地盤に繰り返し手を加え、住みよい環境へと改変してきたかを如実に物語っている。

図-2を例にして人工地盤の拡がりを見てみよう。同図には静岡県掛川市大淵周辺の東西約8km×南北約6kmの範囲の代表的な表層地形区分を示してある(基図として地理院地図を使用)。このエリア

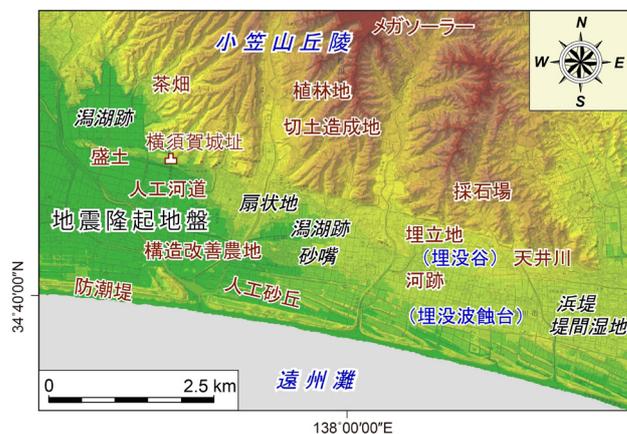


図-2 浅部地盤の特徴的地形区分例(掛川地域)

には北側に小笠山丘陵があり、その南縁に幅約2kmの海岸平野が分布する。丘陵と平野との境界は明瞭で、直線的に約7kmにわたって追跡することができる。北側の丘陵地は基本的に植林地であり、天然林は残されていない。集落近くの丘陵南向き緩傾斜面は茶畑に開墾されている。丘陵尾根部は切土され大規模農場やメガソーラー施設が立地している。また谷合部の山麓斜面も切土され工場用地や宅地が造成されている。さらに南部の低標高部には大規模な採石場・土取場が多く設けられており、採取された土砂は海岸部に運搬され大規模防潮堤の材料として使用されている。以上はこの丘陵の地形が人為的に改変された人工地形であることを物語っている。これらのうち植林地と茶畑には薄い人工地盤が、造成地には厚い盛土地盤が分布する。

小笠山丘陵と遠州灘との間にある海岸平野部も、ほぼ全域が人工地盤で覆われている。まず丘陵から南流する幾筋かの河川は河道が固定され一部では天井川となっている。付け替えによって形成された人工河道と河跡地形も見出される。海岸部には海岸線と斜交する浜堤列が分布するが、明治初期に作製された古地図と対比すると⁸⁾、これも近代に形成された人工地形であることがわかる。潟湖跡は現在は水田として整備されている。平野北縁部には他にも埋立て・構造改善された潟湖跡を見出すことができる。なお最近実施された現地調査によって、この海岸平野の下には波蝕台とそれを下刻する谷が埋没していることが明らかになった⁹⁾。ちなみに図示したエリア内では海成層の上限出現高度は標高5m程度と想定されており¹⁰⁾、中世までは海域が小笠山丘陵南麓部付近まで達していたことと推定されている。

人工地盤はどこにでもあり、まさに空気のような存在であり生活防災への影響は小さいものとして軽視されてきた。土質調査ボーリングでは人工地層は盛土・埋土として一括記載されてきた。臨海平野部はそのほぼ全域が人工地層に覆われているにもかかわらず関心を持つ地球科学研究者は少なかった。1987年千葉県東方沖地震(Mw 6.7)の際に、千葉県の利根川流域、東京湾臨海埋立地、九十九里沿岸域などで液状化被害が発生した。地震後に実施された詳細な地質調査によって、これらの液状化・流動化の被害が人工地層分布域に限られて発生したことが明らかにされるとともに、人工地盤と自然地層との識別と局所的不均質構造把握の重要性が認識され始めた¹¹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)では、関東平野の広い範囲で発生した地盤液状化被害に対して網羅的な被害調査が実施された¹²⁾。この調査は緊急広域調査という性格から現地踏査結果

と空中写真判読結果をとりまとめたものであり、液状化発生層としての浅部地盤、特に人工地盤の特性や不均質構造の影響の検討は含まれなかった。この地震では埋立地が市域の大部分を占める千葉県浦安市において戸建住宅やライフラインに甚大な被害が発生し、原因究明のため詳細な地盤調査が実施された。その結果埋立て時の排砂管吐出口の位置関係や埋立層内の性状の違いが液状化被害と密接に関係していることが改めて確認された¹³⁾。埋立て地盤に限らず、河川堤防や道路高盛土などの人工地盤も不均質である。その局所的な不均質構造が堤防・盛土の崩壊や変状発生の原因となっていることが、稠密浅部物理探査の適用などによって明らかにされてきている¹⁴⁾。

浅部地盤を構成する主要な地質体はいうまでもなく自然地層であり、その空間的不均質性は人工地盤に比べてずっと小さいと思われてきた。

産業技術総合研究所地質調査総合センターでは2000年代初頭より関東平野南部、特に東京低地、中川低地、荒川低地に分布する沖積層を研究対象とした都市地質プロジェクト研究を10年以上にわたり推進してきた¹⁵⁾。このプロジェクトでは延べ18地点での層序ボーリングの実施と採取コア試料の堆積相解析・放射性炭素同位体年代測定、それに基づく既存ボーリングデータのシーケンス層序学的解釈・対比が総合的に実施された。これにより当該地域の沖積層の詳細な層序と古地理が解明されるに至った¹⁶⁾。この研究の成果を簡潔にいうと、ある地点のある深度に出現する地質体が、なぜそこにあるのか、いつの時代にどのようにして形成されたかを時空間的に説明できるようになったということである。従来七号地層、有楽町層下部層、有楽町層上部層に区分されていた¹⁷⁾この地域の沖積層は、網状河川システム、蛇行河川システム、エスチュアリーシステム、砂嘴システム、デルタシステムという一連の5つの堆積システムと14の堆積相に再定義された¹⁶⁾。

関東平野の沖積層の最上位を構成する堆積相はデルタシステムに含まれる現世河川堆積物であるが、この河川堆積物は旧河道埋積物、埋積自然堤防、ポイントバーなどを含み側方変化が大きく上下流方向の連続性にも乏しいという特徴がある。数10m間隔のボーリング調査でも連続性が追跡できず¹⁸⁾、川表側と川裏側とで出現標高が大きく変化する場合もある¹⁹⁾。この2つの引用事例は堆積学的手法によるコア試料の詳細分析と、堆積相区分に基づいた空間的分布の把握が被災地盤調査に重要な役割を果たすことを端的に示している。

2.3 浅部地盤調査の問題点と課題

浅部地盤の最表層を覆う人工地盤は人為的に形成されたものなので、不均質であり小さい空間スケール内で大きく変化する。埋土など自然地層と区別が困難な地盤もある。自然地層のなかにも連続性が乏しく数10mのオーダーで消滅する地質体が存在する。沖積層の下には最終氷期最盛期までの海水準低下期に形成された古地形面が埋積されているが、数km幅の主埋没谷だけでなく100m程度の埋没枝谷が存在すること、また埋没段丘崖の部分でも同程度のオーダーで沖積層厚が急変することがある。従来採用されてきたボーリング調査間隔ではそれらを見落とすことがあるので注意を要する。いささか古い事例ではあるが、浅部物理探査（S波反射法地震探査）によって埋没谷を見出した事例を図-3に紹介する²⁰⁾。このサイトでは外かん道建設に先立って調査段階で約500mの区間に5本のボーリング調査が実施されており（上図）、測線左側に幅約200mの埋没谷が存在することがわかっていた。埋没谷の下部には層厚10m程度の軟弱な粘性土層が確認されていた。筆者らが実施した浅部物理探査によってもこの埋没谷が確認されたが、探査結果には他に一つの小規模な埋没谷がイメージされた（中図）。実施設計段階で5本の追加ボーリングが実施され、その埋没谷も確認することができた（下図）。

浅部地盤内の不均質物性構造を把握するには、想定した不均質のスケールに見合った稠密な群列ボーリングを実施する必要がある。しかしその稠密群列ボーリング調査でも浅部地盤内の断層関連撓曲変形構造を把握することが困難な場合がある。図-4は浅部物理探査によって高解像度断面として浅部地盤構造をイメージした例である²¹⁾。このサイトでは約400mの区間で9本のオールコア群列ボーリングが実施されており主断層の伏在位置がわかっていた。群列ボーリングコアに対する放射性炭素同位体年代測定を含む詳細なコア分析が行なわれたが断層前縁部の変形構造を復元することは困難であった²²⁾。これに対し浅部物理探査（ランドストリーマーS波反射法地震探査）断面には、断層関連撓曲変形が主断層東側300m程度まで及んでいること、前縁断層部でも個別のイベントが反射面に1m以上の変形を及ぼしていること（たとえば測線距離250m付近）、累積変形構造が認められること（下位の層準ほど変形量大きい）が明瞭に捉えられている。これは浅部物理探査の空間解像度が極めて高いことによる。図-4の断面では水平方向分解能は25cm、鉛直方向の分解能は約5cmである。断層前縁部の撓曲変形量が主部の1/2程度に達する事例も見つかっている²³⁾。これは、主断層表層のトレンチ調査のみから断層の活動性を評価すると過小評価に

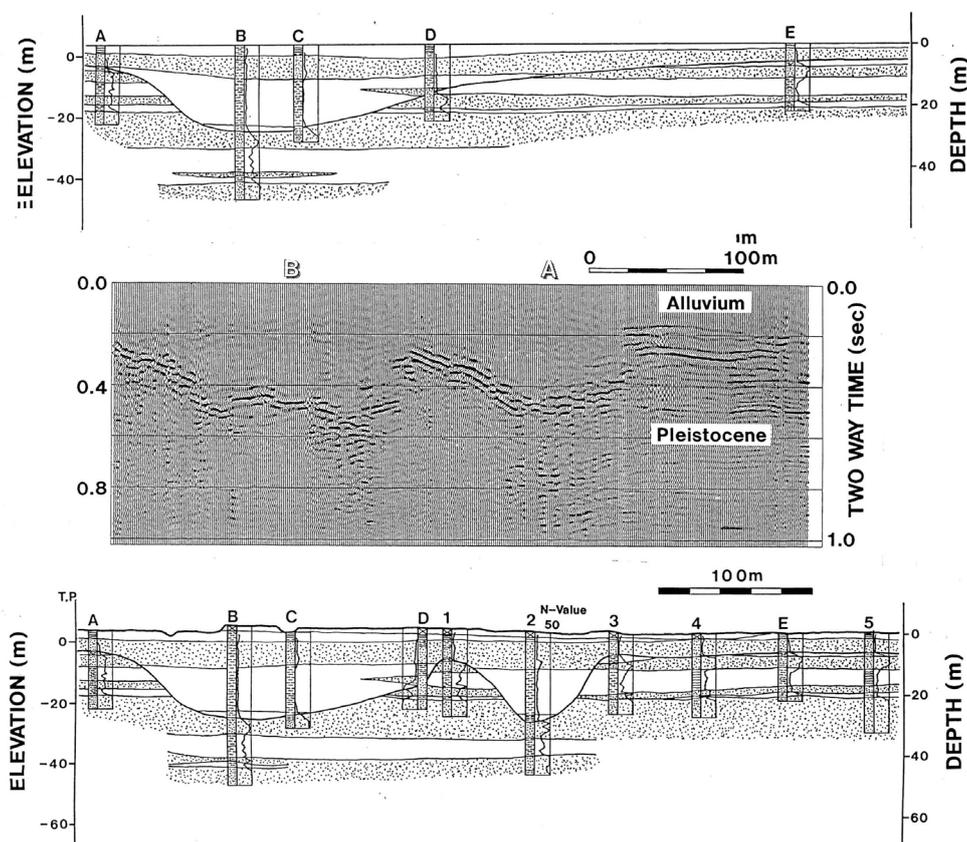


図-3 浅部物理探査による埋没谷検出例 (Inazaki,1990)

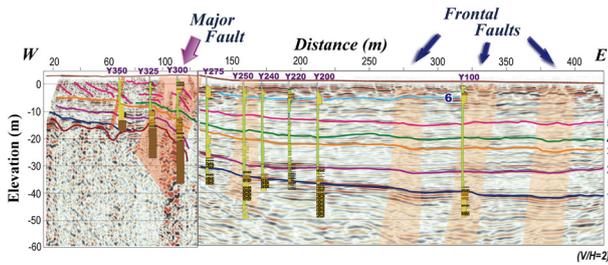


図-4 高分解能浅部物理探査結果 (S波反射法断面) と群列ボーリング柱状図との対比例 (Inazaki & Nakanishi, 2007)

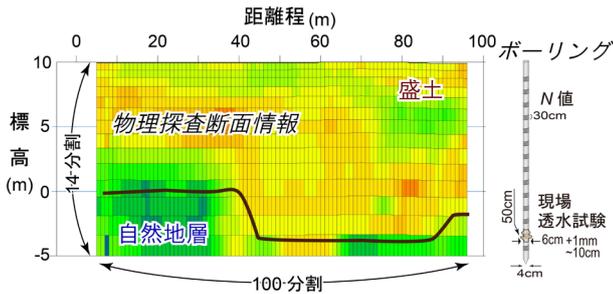


図-5 浅部物理探査とボーリングとの空間分解能比較

なる場合があることを意味している。

図-5は通常の土質調査ボーリング(関東ではノンコア半ペネ)と浅部物理探査とで空間情報密度(単位面積・体積あたりの情報量)がどれだけ違うかを概念的に示したものである²⁴⁾。地盤工学分野では土質調査ボーリングの間隔は通常は数100m,不均質構造想定部でも数10m程度である。厚さ10m程度の人工地盤上から15m程度までのボーリング調査を実施したとしても,得られる標準貫入試験データは15深度分のみ,「ノンコア半ペネ」ボーリングでは採取されるコア試料延長は全体の1/2-1/3にしかない。層相区分に関しても人工地盤部は盛土ないし埋土として一括記載されるか,せいぜい数層に区分される程度,残りの自然地層に対しても層相区分は5程度以下であろう。室内試験数も標準貫入試験データと同程度,また現場透水試験の感度領域は50cmの区間長に対して側方は数10cm程度以下である。仮に100m間隔でボーリングが実施されていたとしても,1本のボーリングデータから推定する領域は1500m²に達するので1個のN値や土質試験値が代表する空間は100m²にもなる。1点の透水試験データで上下流方向,あるいは横断方向に自然地盤の分500m²の代表させることがいかに危険であるかを自覚すべきである。これに対し同図の例では物理探査は同じ領域を連続的な1400個のセルで構成される空間情報として提供することができるのである。この物理探査断面には,ボーリングでは把握

することができなかった盛土の部分的な盤下げ構造が捉えられている。

離散のかつ疎なボーリング柱状図から断面図を作成する際には,ボーリング柱状図の空間情報としての限界と信頼性に対する認識に加え対象地域に対する深い専門的知識が必要とされる。さらに作図する地質断面図は,その空間に存在する地質体が何であるか,地質構造がどのように形成されたかを説明するものでなければならない。

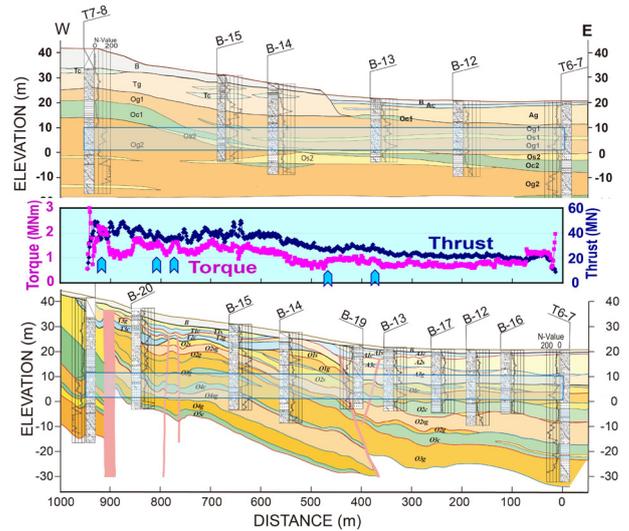


図-6 ボーリング柱状図からの断面作図の比較とシールドトンネル掘削実績との比較 (稲崎・芦田, 2001 に加筆)

たとえば図-6(上)は,京都西山断層系をまたぐ工事区間に対する推定地質断面図で,地質調査会社が調査段階に作図したものである²⁵⁾が,この断面図は地質断面図としての要件を満たしていない。まず第一点は,変動地形の見落としと,その結果としての断面図内の断層解釈の欠落があげられる。第二点は断層撓曲変形帯に位置するにもかかわらず,基盤の大阪層群を含め単純な水平成層構造を仮定していることである。断層伏在通過想定区間,すなわち断面西側のB-15とT7-8間でこの仮定は破綻し,それをOc1層の急激な層厚変化と局所的な撓曲構造で粉飾している。この区間では筆者らによって浅部物理探査が適用され,さらに追加実施された4本のボーリング情報を含め,筆者らが改めて断面図を作図しなおした(同図(下))。断層本体と前縁変形帯を解釈するとともに,周辺の既往の地質構造情報に基づき,大阪層群が東に約3.5度傾斜しているとして作図したものである。この区間ではその後シールドトンネル工事が施工され,マシンの推力やトルクなどの掘進情報が得られた(同図(中))。その掘進情報は筆者が作成した断面構造と整合的であった。

この事例のような陳腐な「地質」断面図は過去の遺物ではなく最近も多見される。ここでは2016年熊本地震被災地での調査事例を紹介する。読者各位が関連情報を参照されることを期待するが、変動地形帯であるにもかかわらずボーリングデータを基に表層の阿蘇火砕流堆積物に対して水平成層構造を仮定しているという事例である²⁶⁾。「地質」断面図では地表変状出現部にシャープな断層変位を推定する一方、物理探査断面図ではその断層変位出現箇所周辺に「低速度帯」を解釈している。相互に矛盾し、かつ両者とも断面解釈が不適切である典型的事例である。

人為的に形成された人工地盤内には自然地盤とは桁違いにスケールの小さい局所的な不均質物性構造が存在する。我々は人工地盤内の微細構造を非破壊で捉えることができる浅部物理探査というツールを手に行っているのである。

3 浅部物理探査とは

3.1 浅部物理探査とは

地表から日常的な人間活動が及ぶ、深さ60m程度までの浅部地盤を対象とする物理探査をここでは「浅部物理探査」(Near Surface Geophysics)と定義する。このうちの「物理探査」は「地球物理学的地下探査」の略称であり、1930年代は「物理学的地下探査」とも称されていた²⁷⁾。では「探査」とはどのような行為を指すものであろうか。物理探査の専門学術団体である物理探査学会は、物理探査を「私たちの目に代わって、地下を見る技術」、あるいは「力学や電磁気など物理現象を利用して地下を調べる技術」と定義している²⁸⁾。「探査」は地下を「見る技術」、あるいは「調べる技術」に相当するようであるが、実はこの説明は適当とは言えない⁶⁾。探査は本来的には“地下空間の構造・物性を工学的に評価する行為”のことであり、広義にはサイト評価(Site Characterization)の一部をなす。すなわち「探査」とは、単純な「見る」、「調べる」という行為ではなく、「診断する」：状態とその変化過程を記述し、異常を可視化し、今後を予測してその空間で行なわれようとする、あるいは既に行なわれている開発・保全行為の妥当性と手順を評価する行為なのである。たとえるならば、物理探査技術者・研究者は診療放射線技師と放射線診断専門医を兼ね備えた存在である。そして浅部物理探査とは、弾性波、電気、電磁気などに対する浅部地盤の応答を測定し、地盤内の物性分布がどうなっているか、どのように形成されたかを明らかにし、またそれが我々の生活・生産活

動にどのように影響するかを評価する浅部地盤の診断技術である、と定義される。

3.2 浅部物理探査の要件：診断と検証

これまで、浅部物理探査が浅部地盤の調査技術として極めて有用であると強調してきた。しかし実際には浅部物理探査が活躍する機会は少なく、また利用者に信頼を置かれているとは言い難い現状がある。現実と理想との間には常にギャップが存在するものであるが、浅部物理探査の技術能力と利活用現況の間の乖離は極めて大きいと言わざるを得ない。その原因と解決の方策について以下に私見を述べる。

実際の物理探査は、対象とする地盤に各種の観測装置を配列し、地盤内部の物性・構造に関わる情報を取得する観測過程と、得られた観測データに対して逆解析を適用し、空間的物性モデルを構築する逆解析過程とで構成される。さらに求めた物性モデルから地質モデルを構築する地質解釈過程が加わる(図-7)²⁹⁾。観測過程において対象とする浅部地盤の周りにまんべんなく十分な数のセンサを配置することは現実的に不可能である。限られた方位からの限定的なアレイでの観測を余儀なくされるため、観測データは不完全なものにならざるを得ない。オンサイトでの工夫が観測データの品質確保に大きく影響する。対象とする浅部地盤がどうなっているかというモデルを予め設定し、対象領域にフォーカスをあてた観測条件の設定が必要とされる。適用探査手法を熟知しているとともに探査対象の浅部地盤に対しても深い知識を有していることが求められるが、残念ながらこの条件を満たす浅部物理探査技術者・研究者は多いとは言えない。

限定された観測データから物性モデルを構築する逆解析過程は基本的に非線形で、構築モデルより観測データが少ないという劣決定系での解析が問題と

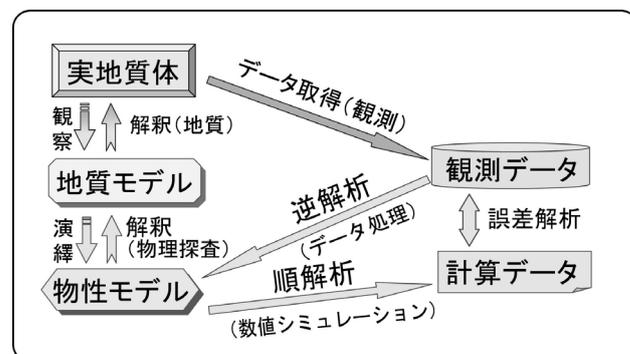


図-7 物理探査の過程(稲崎, 2001)

なる。この過程は非線形でユニークに解を求めることができない。解析結果は初期モデルの影響を受ける。ここでも適切な初期モデルを設定できるだけの背景知識が求められる。

逆解析で求めた物性モデルに対して順解析を適用し、そのモデルで観測データを説明できるかを検証し、モデルの妥当性を説明することも極めて重要な過程である。逆解析と順解析とを繰り返すことで物性モデルの妥当性・信頼性が検証されるのである。

物理探査で直接的に得られるのは2-3次元空間の物性分布（断面）であり、地質モデル（断面）ではない。求めた物性モデルに地球物理学的な解釈を加え作成する地質モデルが最終的に提供する空間情報となる。前述のように地質モデルとは、なぜそこにそのような物性分布が存在するのか、いつどのようにして形成されたかを時空間的に説明する空間情報のことである。浅部物理探査が提供する空間情報は、図-4に例示したように他の地質情報（多くの場合ボーリング柱状図情報）と対比させ整合性を検証したものでなければならない。この対比・検証という過程を経ることが浅部物理探査の要件であり、特徴づけるものなのである。浅部物理探査は掘削・開削すれば容易に検証することが可能な浅部地盤を対象としているからである。この過程を怠るか軽視し、物性モデル断面を提示するだけ、あるいは陳腐な地質モデルを提供し続けるならば、浅部物理探査への信頼を高め、利活用の機会を拡大することは見込めないであろう。

3.3 浅部物理探査の利活用

物理探査は、通常でも2次元、場合によっては時間軸を含めた4次元時空間の物性分布を提供することが可能な唯一の地下空間情報探査手段である。最近では独立型センサを用いた同時多点観測による浅部地盤の3次元構造のモデリング³⁰⁾、表層部に埋設した光ファイバDAS（分布型音響センシング）技術の開発³¹⁾とインフラ維持管理への活用³²⁾など、高速多チャンネル同時かつ長期測定技術が浅部物理探査のなかで重要な役割を担いつつある。

浅部物理探査が提供する代表的な地下空間物性情報として、弾性波速度（ V_p, V_s ）とその反射・減衰特性分布、比抵抗、自然電位、電磁気応答・反射特性、重力ポテンシャルなどがあるが、近年それらの物性と評価対象地盤物性である透水性や含水率などとの相関性に関する理論的・実験的考察が進展し、前者から後者を直接的に評価することが可能になりつつある³³⁾。これには既往適用成果のデータベース化、計測物性と評価物性の統計的関連性の追求が貢献し

てきた³⁴⁾。また石油資源分野では3次元反射法地震探査および物理検層データをベースに、地球統計学的手法と多学術分野の知見を統合して3次元地質モデルを構築することが一般化しつつある³⁵⁾。

4 浅部地盤調査の今後

浅部地盤調査は、そこで計画される開発のため、あるいは生活空間の持続的維持と防災・将来的なリスク低減を目的として実施される。すなわち対象優先（Target oriented）が基本姿勢でなければならない。しかし浅部物理探査には多くの専門領域・手法が含まれ、それぞれに専門技術者・研究者が存在する。彼らは往々にして自分が携わる要素技術・手法をもっとも優れたものとして評価し、一方で対象地盤の構造には関心を抱かないという手法優先（Method Oriented）の立場を取りがちである。しかし商用段階では当然ではあるが発注者の求めに応ずるために対象優先でなければならない。手法優先は避けなければならない。そのためには利用者である発注者側が何を求めているかを鮮明に伝達すること、さらに受注者との間に中間的なコンサルタントを配置し、多くの手法のうち特定あるいは複数の手法を公平な立場から推奨するような支援制度の整備が望まれる。

道路建設や河川整備などの公共事業は、計画、調査、設計、施工、供用・維持管理、リニューアルという段階を経て実施される。地盤調査はこのうちの調査段階で、補足的に施工段階で実施されるが、その「診断」の検証結果が実行者である調査会社に戻される機会はほとんどなかった。提供した空間情報が適切なものであったかについてのフィードバックがないと、結果にコミットしない・できないために不適切な空間情報を提供するリスクが高くなる。近年建設ITに関連した技術開発投資が進み、インフラ施設のDB化、「見える化」が急速に整備されてきている。さらに社会インフラのアセットマネジメント、ストックマネジメント、リスクマネジメントを統合化した総合インフラマネジメントシステムの構築が提唱されてきている³⁶⁾。下部構造や浅部物理探査断面などの地下空間情報も含むデータウェアハウスが構築され誰もがアクセスできるFAIR原則化が進めば、調査段階で提供された浅部地盤空間情報が維持管理やリニューアルまで活用されるようになるとともに、浅部物理探査技術の進展と信頼性向上につながると期待される。

〈参考文献〉

- 1) Borgeaud, A. F. E., Kawai, K., Konishi, K., and Geller, R.J. (2017) : Imaging paleoslabs in the D^{''} layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion, *Science Advances*, 3, e1602700, 10p.
- 2) Yoneda, A., Fukui, H., Xu, F., Nakatsuka, A., Yoshiasa, A., Seto, Y., Ono, K., Tsutsui, S., Uchiyama, H., & Baron, A. Q. R. (2014) :Elastic anisotropy of experimental analogues of perovskite and post-perovskite help to interpret D^{''} diversity, *Nature Communications*, 5, 3453.
- 3) 土木研究所 (2017) :福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書, 95p. <https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/houkokusyo.pdf>
- 4) NEXCO 東日本 (2021) :東京外環トンネル施工等検討委員会有識者委員会報告書, 92p. https://www.e-nexco.co.jp/assets/pdf/company/info_public/other/gaikan_tunnel/7nd/event09.pdf
- 5) 稲崎富士 (2005) :小間隔ランドストリーマーによる浅所空洞のイメージングー亜炭探掘空洞・防空壕調査への適用ー, 物理探査学会「地下空洞と物理探査」シンポジウム 講演概要集, 22-33.
- 6) 稲崎富士 (2018) :浅部物理探査・詳細地質構造調査における統合解析・検証調査の重要性, 地質情報研究部門主催研究会「浅層地盤・地質の詳細構造解明に資する精密物理探査の現状と課題」, 26-31. <https://www.gsj.jp/data/openfile/no0682/iggsymp20180320.pdf>
- 7) 文化庁 (2017) :埋蔵文化財関係統計資料, 41p. https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/pdf/h29_03_maizotokei.pdf
- 8) 谷謙二 (2017) :「今昔マップ旧版地形図タイル画像配信・閲覧サービス」の開発. *GIS-理論と応用*, 25 (1), 1-10.
- 9) 稲崎富士・楳原京子・岡田真介・中埜貴元・松多信尚 (2021) :高分解能 S 波反射法地震探査による海岸平野下の浅部地下構造イメージング, *JpGU2021,HTT17-03*.
- 10) 鹿島薫・長澤良太・宮崎隆 (1985) :静岡県菊川低地における完新世の海水準変動に関する資料, *第四紀研究*, 24-1, 45-50.
- 11) 楡井久・風岡修・香村一夫・楠田隆 (2003) :液状化・流動化の地層断面ー千葉県東方沖地震からー, *アーバンクボタ*, 40, 4-17.
- 12) 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会 (2011) :東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, 65p, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043569.pdf
- 13) 石井一郎・平舘亮一・東畑郁生・中井正一・関口徹・澤田俊一・濱田善弘 (2017) :2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた浦安市の地盤特性, *地盤工学ジャーナル*, 12, 1, 91-107.
- 14) Aoike, K., Fujita, T., and Inazaki, t. (2015) : Detailed GPR surveys for delineating near-surface deformation structure in embankments with aid of RTK-GNSS, *Expanded Abstracts of Near Surface Asia Pacific Conference*, 4p.
- 15) 木村克己 (2014) :都市地質プロジェクトの経緯, *特殊地質図*, No.40, 1-7.
- 16) 田辺晋・中西利典・石原与四郎・宮地良典・中島礼 (2014) :東京低地と中川低地における沖積層のシーケンス層序と古地理, *特殊地質図*, No.40, 8-50.
- 17) 遠藤邦彦・石綿しげ子・堀伸三郎・中尾有利子 (2013) :東京低地と沖積層ー軟弱地盤の形成と縄文海進ー, *地学雑誌* 122, 968-991.
- 18) 九州地方整備局 (2013) :矢部川堤防調査委員会報告書, 185p. http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf
- 19) 関東地方整備局 (2016) :鬼怒川堤防調査委員会報告書, 80p. https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000643703.pdf
- 20) Inazaki, T., (1990) : High-resolution shallow seismic reflection surveys using SH-waves, *Proceedings 6th International IAEG Congress*, 953-958.
- 21) Inazaki, T., and Nakanishi, T. (2009) : Detailed imaging of near-surface faulting structure using Land Streamer, *Proceedings of the 22nd Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2009)*, 373-382.
- 22) 中西利典・竹村恵二・須貝俊彦・中村正信・田沢雄二・松本博・広瀬昌憲・荻野晃也 (2006) : 桑名断層を挟んだ沖積層に記録された古地震イベント, *月間地球*, 54, 194-204.
- 23) 稲崎富士・宮地良典・ト部厚志・楳原京子 (2011) : ランドストリーマー反射法地震探査による新潟市四ツ郷屋・赤塚地区における角田・弥彦断層の浅部変形構造調査, *数値地質図 S-2 : 海陸シームレス地質情報集「新潟沿岸域」*, 1-35.
- 24) Inazaki, T. (2013) : Problems in practical application of integrated geophysical technique for the vulnerability assessment of levee systems, *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*, 252-255.
- 25) 稲崎富士・芦田 譲 (2000) : トンネル施工管理を目的とした京都西山断層系榎原断層の高分解能 S 波反射法探査, 平成 11 年度 活断層・古地震研究調査概要報告書, *地質調査所速報*, no. EQ/00/2, 165-177.
- 26) 国土交通省都市局 (2017) :熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書, 3/3, <https://www.mlit.go.jp/common/001296539.pdf>
- 27) 渡邊貴 (1937) :物理地下探査法, *工業雑誌社*, 99+43p.
- 28) 物理探査学会編 (2014) :地下を診る技術ー驚異の物理探査ー, 物理探査学会, 267p.
- 29) 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, *日本応用地質学会シンポジウム予稿集*, 61-70
- 30) Hayashi, K., Seik, Y.S., Seik, Y.Y., Wong, L.T., Pang J. and Suhartono K.E. (2020) : Bedrock Depth Mapping using a Three-Dimensional Ambient Noise Tomography at Northern Singapore Island, *Proceedings of 3rd Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience & Engineering*, 5p.
- 31) Kasahara, J., Yamaguchi, T., Sugimoto, Y., Kawashima, H., Yamauchi, Y., Hasada, Y., and Kubota, K. (2018) : Evaluation of fiber optic DAS as a dense seismic array for continuous monitoring of civil engineering structures, *JpGU 2018 Annual Meetings, HTT19-P01*, 2p.
- 32) 機械システム振興協会 (2019) :光ファイバーを用いた新たなインフラ維持管理手法に関する戦略策定事業報告書 (概要版), 5p. <https://www.mssf.or.jp/30fyhoukokusyo/30fiber.pdf>
- 33) 小西千里 (2017) :物理モデルに基づく解釈テンプレートを用いた統合物理探査結果の解釈ー不飽和土質地盤の粘土含有率と間隙率の推定ー, *物理探査*, 70, 56-68.
- 34) Hayashi, K., Inazaki, T., Kitao, K., and Kita, T. (2019) : Statistical Estimation of Soil Parameters in from Cross-Plots of S-Wave Velocity and Resistivity Obtained by Integrated Geophysical Method, in *Levees and Dams*, 1-21. Springer
- 35) 高野修・辻隆司 (2013) :石油探鉱開発における三次元地質・貯留層モデリングー堆積学・シーケンス層序学・サイズミック地形学・物理探査学・地球統計学の融合による地質モデルの構築ー, *地質学雑誌*, 119, 567-579.
- 36) 土木学会 技術推進機構 (2019) :社会インフラの維持管理・更新・マネジメントに関わる新技術の開発と活用拡大を考えるー取組みと提言ー, 74p. https://committees.jsce.or.jp/opcet_sip/system/files/SIP_tec_report.pdf

地球の内部を覗く科学の窓 ～長期孔内観測システム～

きよ まさのり
許 正憲*

K
ey Word

海底下観測, 地震観測, 地殻変動観測, 孔内流体観測, CORK, LTBMS,
NanTroSEIZE, JFAST, ODP, IODP

1 はじめに

30年を超える歴史をもつ国際深海科学掘削計画 (ODP: Ocean Drilling Program は1985～2002年, IODP: Integrated Ocean Drilling Program は2003～2013年, IODP: International Ocean Discovery Program は2013～2023年予定) で実施されてきた数多くの科学航海において, さまざまな長期孔内観測システムが設置され, 水理地質学, 地球物理学, 地殻力学, 地震学, 地殻内微生物学などを目的に長期的な海底下モニタリングが行われ, 地球科学の進展に大きな貢献をしてきた。

海底下地層サンプルの回収後, 海底に残された掘削孔は単なるコアリングの残骸ではなく, この孔内にセンサを設置することができれば, 地球の内部を覗くことができる貴重な科学の窓になる。一方で, 高圧, 高温といった厳しい環境に加えて崩壊のリスクが高く, 狭い孔内空間に高精度でとても繊細なセンサを設置することは容易ではない。また, 長期に安定して動作することも長期孔内観測システムに要求される重要な技術課題である。

本稿は著者が共著のひとりとして海外ジャーナルへ投稿した論文¹⁾をもとに, 今までIODPで開発されてきた長期孔内観測システムについて要約し, その中から特に, 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) がIODPとして実施した南海トラフ地震発生帯掘削プロジェクト (NanTroSEIZE: Nankai Trough Seismozenic Zone Experiment Project) および東北地方太平洋沖地震調査掘削プロジェクト (JFAST: Japan Trench Fast Drilling Project) において設置した長期孔内観測システムについて解説する。

2 CORK 開発の30年

科学目的とした長期孔内観測システム開発の歴史は1989年, Keir Becker, Earl Davisらによる北太平洋ファンデフッカ海嶺 ODP 航海中のある日の晩食での会話から始まった。彼らの論点は, もし, 1) 掘削後に掘削孔をシールすることができれば, 掘削による孔内の摂動は何れ回復し, 地温勾配による孔内流体の自然対流も抑制されるのではないかと, 2) 孔内に圧力・温度センサを設置することができれば自然の状態にある地層の熱的および地質水理学的観察が可能になるのではないかと, では, 3) これを実

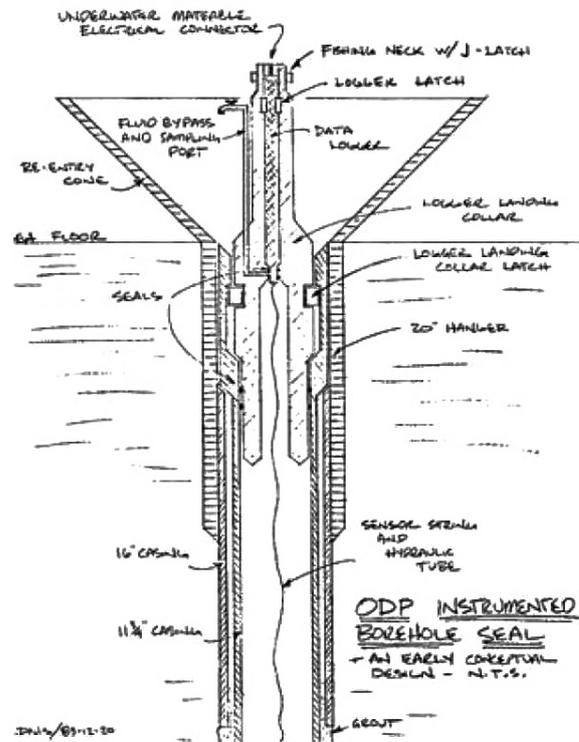


図1 CORK アイデア誕生のナプキンスケッチ

*国立研究開発法人海洋研究開発機構 研究プラットフォーム運用開発部門 特任上席研究員

現するには技術的にどのようにしたらよいのだろうか? という内容であり, そのアイデアは食卓にあった一枚のナプキンに残され, CORK (Circulation Obviation Retrofit Kit) と命名された (図 1) ²⁾。まさしく掘削孔をシールするコルク栓というわけである ³⁾。この 2 年後に初代 CORK が誕生し, それ以降, 多くの試行錯誤と新たな構想とともにさまざまな CORK が登場する。

2.1 元祖 CORK

初期の CORK (図 2a) はとても単純な構成であり, 地層にセメントで 10-3/4" ケーシングを固定し, 孔口に設置された圧力計 (図 2a 中, Formation pressure gauge) によりケーシング下方裸孔部の地層圧を計測するとともに, 孔内にサーミスタケーブルを展張して地温勾配を計測し, 孔底近傍に流体サンプラー (図 2a 中, Osmosamplers) を配置し, 地層流体のサンプリングを行えるものであった。しかし, 1) 圧力計測は単一のゾーンに限定され, 2) 裸孔部の地層圧力はケーシング内の全量の水を介して伝搬するため感度や応答性が鈍ってしまう, という二つの大きな欠点があった。

2.2 ACORK と CORK II

初代 CORK の欠点を改善すべく約 10 年の歳月をかけ, 多層分離できる 2 つのシステム, ACORK (Advanced CORK) と CORK II が開発された (図 2b および 2c)。これらは何れも孔内の隙間を閉塞

する膨張型パッカーを応用することでそれぞれの地層に対応した孔内ゾーンの分離を可能とした。

ACORK の場合, 10-3/4" ケーシングの外表面にパッカーおよびそれぞれのゾーンにおける地層圧を伝搬するための細管を装備し, 細管上端を圧力計に接続することでゾーン分離された地層圧を計測できるシステムとなっている。また, 10-3/4" ケーシング内には回収・再設置可能なサーミスタストリング等センサケーブルを配置し, 圧力以外の計測を同時に行えるよう拡張性を持たせた。

CORK II は ACORK をベースに, より海底下深部での計測を可能とさせたものである。10-3/4" ケーシングで上部地層を保護し, さらに深い目的深度まで掘進した後, ACORK と同じ圧力計測システムを装備した 4-1/2" ケーシングを設置する。パッカーは膨張型に加え, 水と接触すると膨潤するタイプも二重に装備することでゾーン分離の確実性を向上させている。

2.3 Genius Plug

掘削計画によっては, 一度の航海で目的の掘削深度に到達しないこともあり, 次航海までの間, 一時的に孔内観測を行える手法として, 単純で簡便な構造である Genius Plug (図 2d) が開発された。掘削途中で海域を離脱する場合, 孔内からの危険流体・ガスの流出を防ぐために, 回収可能なブリッジプラグをケーシング内に設置するのが一般的である。このブリッジプラグの下部に自己記録型デー

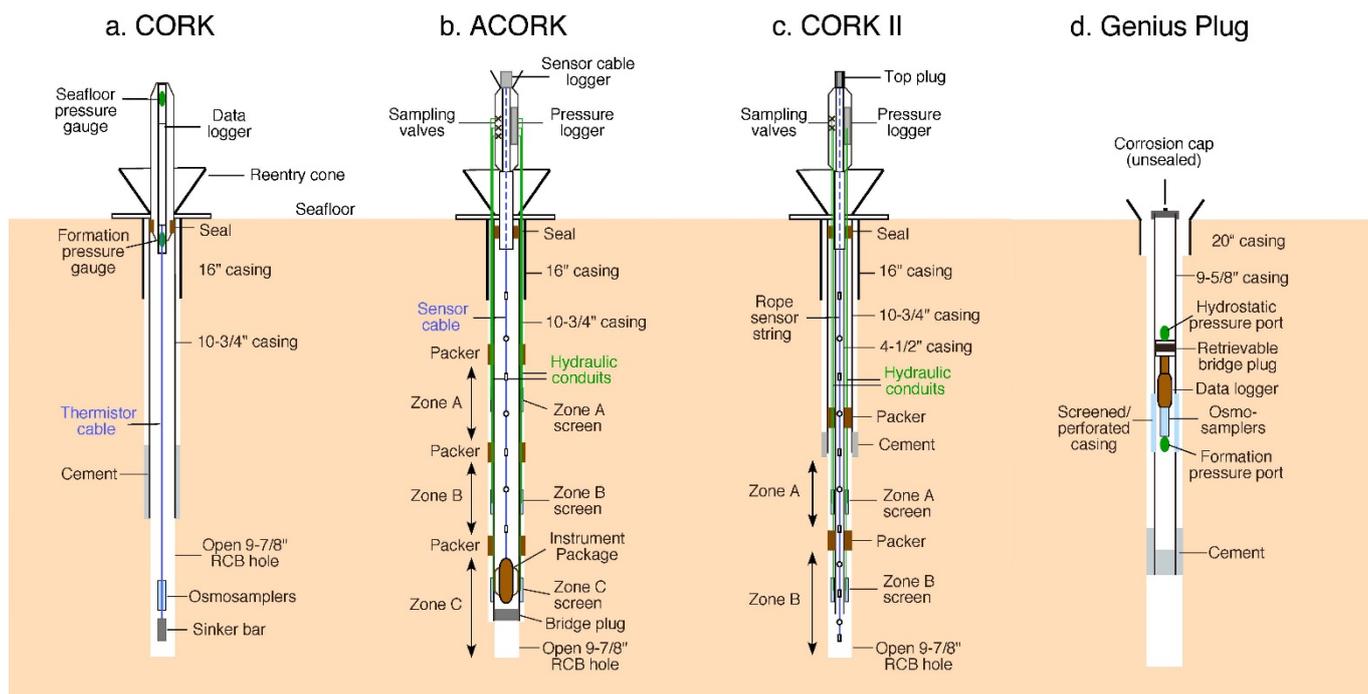


図 2 CORK ファミリー

タロガー、センサ、サンプラーを装備するとともに、予めケーシングに穿孔部（図 2d 中 Screened/perforated casing）を設けることでケーシング内と地層が流体を介して通じている状態をつくり、地層の圧力計測および流体サンプリングを行える仕組みとしている。

2.4 CORK による代表的な科学成果

初期の CORK 観測は、中央海嶺の熱水循環現象に焦点を合わせており、海底表層を覆っている堆積層の厚みが局所的に大きく変動しているにも関わらず、その下に広がる火成地殻内がほぼ等温であることが分かった。これは、地殻内流体の水平方向の流れが速い、つまり、水平方向の圧力勾配が非常に小さいことを示唆しており、一般に抵抗性堆積層では鉛直圧力勾配が大きいことを考えると、直感とは反する結論であるが、数キロメートルにわたる火成地殻層の浸透率決定が可能となったことは、CORK 観測だからこそ導き出すことができた重要な科学成果のひとつといえる。また、それ以後の継続研究では、近傍で掘削することにより生じる人工的な摂動をとらえることで、異方性である火成地殻の浸透率をさらに広域（100km 程度まで）にわたって精度よく求めることができた。

また、火成地殻とは異なり、一時的な圧力変動が

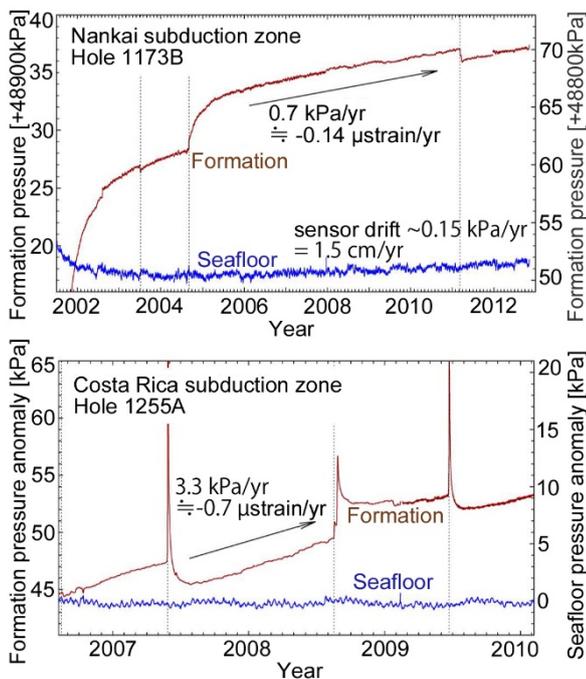


図 3 CORK 観測データによる科学成果の一例（圧力変化からひずみ速度を算定）

数百年から数千年の間保持されるような厚い堆積層では CORK 観測による圧力変化データから地殻のひずみ速度を算定することができる（図 3 中矢印で表示）。

3 進化を続ける長期孔内観測システム

CORK は元来、地質水理学研究を目的に考案されたため、地層流体の圧力・温度観測が主軸であり、まずはこれらの高精度化が進められ、あわせて他の観測も同時に行えるよう新たな開発が織り込まれ、付加価値を高めてきた。

3.1 電子部品の小型高性能化

初代 CORK が誕生してから約 30 年の間に、センサの信頼性、寿命が格段に向上し、測定分解能と帯域幅が大幅に改善された。例えば、もっとも単純な構造である温度計測を例にあげても、サーミスタを覆うジャケットとポッティングの材料が改良されただけで、初期に発生した高温時における漏れ電流などの深刻な問題は解消された。また、小型で高精度の自己記録型温度ロガーの登場により、設置オペレーションにおける大幅な時間短縮や保守整備のための回収を可能とした低コストなシステムなども開発され、長期孔内観測の普及に大いに貢献した。

圧力計測の進歩はさらに著しいといえる。CORK 初期に使用していた Paroscientific 社製 Digiquartz はフルスケールに対して 1ppm 程度の分解能であり、これは通常の稼働水深でみると 40～100Pa 程度となり、想定される最大地層圧とほぼ同等のオーダーであり、つまり、非常に大きな地層圧変化でないと検出できなかった。さらに内部メモリ、電力、通信速度などの制約からサンプリング間隔は 5～10 分程度となり、地震現象などは観測できなかった。これが ACORK の時代になると、Paroscientific 社製の水晶式絶対圧力センサには正確な周波数カウンター（PPC: Precise Period Counter system, Bennest Enterprises 社 John Bennest による開発）が導入され、出力周波数に対して 1ppb の分解能が実現し、これまでの精度の 100 分の 1（0.04～0.1 mm 水頭圧相当）に性能が向上した。また、サンプリングレートは最大 1sps（sample per second）となった。

3.2 静かな孔内環境の利用

掘削孔に地震計やひずみ計を設置する取組みは今まで行われてきたが、特に最近では効果的な密閉方法の導入により孔内を複数のゾーンで遮蔽し、孔内

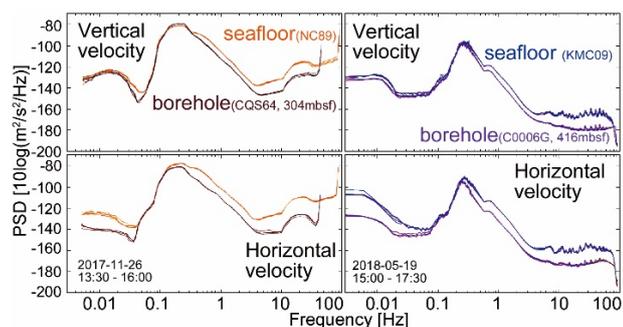


図4 孔内観測の利点の一例
(暗雑音が低く、高 S/N 比のデータが取得可)

流体の移動を抑えることで、これにともなう流れや熱揺らぎによって引き起こされるノイズを排除することが可能となり、より S/N 比特性に優れた高品質なデータ取得ができ、長期孔内観測の有効性をさらに高めている。図4はその利点の一例を示しており、海底から数百 m 下の孔内に設置された地震計(図4中 borehole)と海底に埋設された地震計(図4中 seafloor)による暗雑音データの比較であるが、ほとんどの周波数帯域で海底の信号レベルよりも孔内の方が5~10dB低くなっており、特に水平成分について優れている。

3.3 現場校正技術の導入

センサが高感度、広ダイナミックレンジ、広帯域となり、通常地震学や強震動から測地学に至るまでの幅広い研究に役立てられるようになってきた一方で長期観測において大きな誤差を生じるドリフト性能はいまだに悩ましい課題である。

圧力計測における最近の取組みとしては、内部に1気圧の基準圧力チャンバーを搭載し、低ドリフト特性の気圧センサを使用して、この基準圧力を定期的に監視することで、計測値を現場で校正する手法が提案されている。これは A-0-A (Paroscientific Application Report) として知られる手法であり、一般的には、最大1kPa/年オーダーで生じるドリフトを、この手法を使用することで10Pa/年レベルまで低減できることが実証されている。これは地層圧計測の場合、センサのドリフトから生じる経年ひずみ量を約2nstrain/年に減少でき、また、海底の静水圧計測の場合、1mm/年の水深の変化率を正確に決定でき、孔内観測だけでなく海底測地学でのベンチマークとしても有益な手法として活用されている。

4 日本近海の長期孔内観測システム

日本列島付近は太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート及び北米プレートの4枚のプレートが相接し、それらの境界が日本海溝、相模トラフ、南海トラフとなる地球規模でも地球内部ダイナミクスの活発なエリアであり、すなわち、長期孔内観測システムが最も必要とされているエリアといえる。

日本近海には、海底表面に埋設した観測システムは除き、今まで JAMSTEC により、日本海溝に1式(JFAST, 地震の事後観測)、南海トラフ紀伊半島沖に3式(NanTroSEIZE, 地震・地殻変動観測)、同じく室戸沖に1式(地下生物圏研究)、沖縄トラフ熱水噴出域に1式(黒鉱養殖実験³⁾)の6式の長期孔内観測システムが設置されてきた。

これらは何れも、大水深(日本海溝は水深7,000m)、悪海気象(南海トラフは世界的にも有数の強海流である黒潮がある)、高温(沖縄トラフ熱水噴出域では300℃を超える)という過酷な自然環境条件でのオペレーションが強いられてきた。

誌面の都合もあるので、本項ではこの中で、NanTroSEIZE と JFAST について解説する。

4.1 NanTroSEIZE

JAMSTEC は短周期地震計、広帯域地震計、強震加速度計、傾斜計、体積ひずみ計、サーミスタストリング、圧力計の7種類のセンサからなる、これ

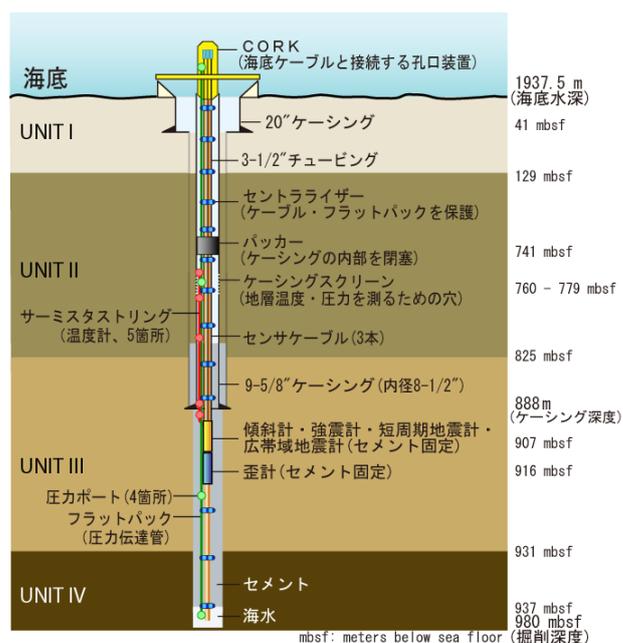


図5 NanTroSEIZE C0002 LTBMS の構成

まででない長期孔内観測システム (LTBMS: Long Term Borehole Monitoring System) を開発し、2010年12月、IODPのNanTroSEIZE C0002ライザーレス掘削孔 (水深1937.5m, 掘削深度980m) への設置に成功した⁴⁾。地震や地殻変動、断層帯中の流体挙動など、多角的なデータをひとつの孔内の各層において同時に観測できるLTBMSの設置は世界初であった。

LTBMSの構成を図5に示す。LTBMSは構造的にCORK IIに似ており、実際、圧力・温度計測系については同等のシステムを採用しているが、大きく異なるのは地震・地殻変動観測用の孔内センサを導入し、特に体積ひずみ計は新規開発であり、今まで地層圧から算定していたひずみ量を直接計測できるシステムとなっている。これらのセンサは孔壁に対してセメントで固定し、地層と機械的に結合させている。より精度よい計測を行うためにセメント物性については現場環境温度・圧力条件における地層の密度、ヤング率、ポアソン比とあわせるよう事前に陸上実験を行い調合している。また、孔内データを伝送するケーブルの上端には水中着脱式の電線コネクタが接続され、LTBMS設置後はこの水中着脱コネクタを介してデータロガーを接続し、初期観測を行っていたが、2012年1月に既設の海底ケーブルと接続し、現在ではリアルタイム孔内観測が行われている。

また、黒潮という強海流を有する南海トラフ海域にてLTBMSの降下オペレーションを行う場合、強海流によりパイプ周りに発生する渦が引き起こす振動 (VIV: Vortex Induced Vibration) で孔内機器が破損、最悪の場合には脱落事故に至ることもリスクとして想定されなければならない。VIVに対して頑強で冗長性のあるシステムの構築、さらにはVIVを抑制するオペレーション技術の開発なども今までのCORK設置オペレーションにはない重要な開発課題として取り組まれた⁵⁾。

4.2 JFAST

JFASTプロジェクトの重要な科学目的のひとつとしてすべり断層面に生じた摩擦熱の計測が挙げられる。これは発生した地震の状況をその事後観測から調べることができる唯一の方法であるが、摩擦熱は時間の経過とともに現場温度へ復帰することから、早急な観測開始が必要であった。十分な準備期間が確保できないため、実績のある既存技術を選定し、これらの導入についてリスクアセスメントを行い、7,000mという大水深でのオペレーションにおいて信頼性、確実性、冗長性、そして有効性の高いシ



図6 約9か月の観測を終え、水深6,897.5m、海底下深度854.81mの孔内から回収された55個の小型温度ロガー

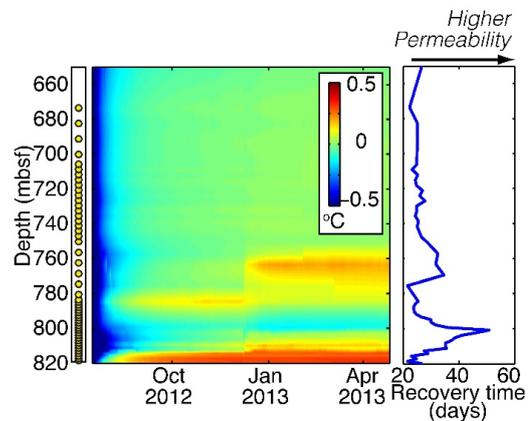


図7 地震学の常識を覆したJFASTの科学成果

ステムをどのように構築するかがポイントであった。

温度計測については一部の機器に損傷があった場合でも全被害に至らぬことを考慮し、独立した小型で高精度の自己記録型温度センサ55個を想定される断層近傍にはとりわけ密になるようロープに取付けて孔内へ設置した。センサの設置深度の精度は断層位置に対してmmオーダーが要求されるため、センサを連結するロープは伸び率の小さいもの (Vectran製高強度ロープ) を採用し、さらに吊り荷重に対する微小伸びも校正することで位置精度の向上を図った。回収中の孔口との接触によるロープ破断は致命的なリスクとなるため、陸上にて擦れ試験を実施し、十分な耐摩耗性を有することを確認した。また、降下中の振動や衝撃から繊細なセンサを守る工夫も行った。さらに、余震による孔内変形のためセンサが途中で引っかかり回収できない事態も想定し、所定の張力にて切り離される機構を設け、上部のセンサだけでも確実に回収できる仕組み (ウィークリンク) を導入した。また、観測システ

ムはJAMSTECの無人探査機「かいこう7000Ⅱ」を使用して回収されるが、無人機でのハンドリング性を重視して、徹底的な小型軽量化が図られた。

JFASTは海底地震による摩擦熱を直接計測した世界初の事例であり、観測システムは2012年7月に地球深部探査船「ちきゅう」により水深6,897.5m、海底下深度854.81mに設置し⁶⁾、また、2013年4月にはJAMSTECの「かいこう7000Ⅱ」により観測システムの回収に成功した⁷⁾(図6)。図7は約8か月間の温度観測から求めた温度異常値(地震によって生じた温度上昇分)を示し、掘削による摂動が消えた後のデータからプレート断層での温度異常値は0.31℃、これから算定した断層の有効摩擦係数は0.08となった。この値は事前の想定をはるかに下回るものであり、今までの地震学の常識を覆す結果であったとともに、「あの巨大津波はなぜ起きたのか?」、その地震の解明に役立てることができた⁸⁾。

5 おわりに

この10年超における長期孔内観測システムの科学的価値を大きく向上させたのは海底ケーブルとの統合によるところが大きい。今までに30を超える長期孔内観測システムが設置されてきたが、このうちの3式(ODP/IODP掘削孔1026B, 1027C, U1364A)がCascadia沈み込み帯とJuan de Fuca海嶺を跨いで設置された海底ケーブルシステムNEPTUNE(NorthEast Pacific Telemetered Undersea Networked Experiment, ONC: Ocean Networks Canadaが運用)に、さらに3式(IODP掘削孔C0002G, C0006G, C0010A)が南海トラフ沈み込み帯に設置されている海底ケーブルシステムDONET(Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis, JAMSTECが開発・設置を行い、現在では防災科研が運用)にそれぞれ接続されている。

海底ケーブルとの接続が可能となったことにより、電力供給、高速データ通信、高精度同期信号の提供によるリアルタイム観測が可能となり、それぞれのデータはONCとJAMSTECにアーカイブされ、科学研究のみならず、防災・減災にも役立てられている。また、黒鉱養殖システムやCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)など新たな資源開発、地球環境問題への取組においても海底下利用が注目されており、それらの実現に向け、長期孔内観測にも重要な役割が求められると考える。

30年前、船上での1枚のナプキンスケッチから始まり、今までにODP/IODPなどを中心に培わ

れてきた長期孔内観測技術は新たなフェーズを迎え、さらなる進化を遂げることを期待したい。

参考文献

- 1) Davis, E., Becker, K., Kyo, M., and Kimura, T.: 「Foundational Experiences and Recent Advances in Long-Term Deep-Ocean Borehole Observatories for Hydrologic, Geodetic, and Seismic Monitoring」, MTS journal, v. 52, n. 5, pp. 75-86, 2018
- 2) Deep Earth Academy: 「CORKS in the Crust: Part 1, Interpreting Pressure Measurements at the Seafloor and in the Earth's Crust on the Juan de Fuca Plate」
<https://joidesresolution.org/wp-content/uploads/2018/03/CORK-part-1.pdf>
(2021年9月10日現在)
- 3) Akiyama, K., Kyo, M., Saruhashi, T., Sakurai, N., Yokoyama, T., Nozaki, T., Watanabe, M., Masaki, Y.: 「Development of the Cultivation System for Seafloor Hydrothermal Deposit」, Techno-Ocean 2016, 1B.5, 2016
- 4) Kyo, M., Saruhashi, T., Sawada, I., Namba, Y., Araki, E., Kitada, K., Kimura, T.: 「Plan and Technological difficulties on NanTroSEIZE Long Term Borehole Monitoring System」, UT 2011 & SSC 2011, 1096, 2011
- 5) Kyo, M., Namba, Y., Saruhashi, T., Araki, E., Kitada, K., Kimura, T., Fulton, P.: 「Development on Long Term Borehole Monitoring System for Earthquake and Geodetic Research」, OCEANS 2014 Taipei, doi: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964509., 2014
- 6) Kyo, M., Namba, Y., Saruhashi, T., Sawada, I., Eguchi, N., Toczko, S., Kano, Y., Yamano, M., Muraki, H., Fulton, P., Brodsky, E., Davis, E., Sun, T., Mori, J., Chester, F.: 「Development of Observatories for the Japan Trench Fast Drilling Project」, AGU2012 Fall meeting, T13F-2691, 2012
- 7) Namba, Y., Kyo, M., Kano, Y., Kasaya, T., Fulton, P., Muraki, H., Nanbu, Y., Yamauchi, N., Miura, A.: 「The Retrieval of The Borehole Observatory System Installed in The Tohoku Earthquake Zone」, SEGJ, 190, 1-5, 2013
- 8) Fulton, P.M., et al., 「Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements」, Science, 342, 1214-1217, 2013

遺跡探査における 物理探査の役割

みづなが ひでき
水永 秀樹*

Key Word

遺跡探査, 物理探査, 電気探査, 比抵抗法, 地中レーダ探査, 磁気探査

1 はじめに

物理探査を使った遺跡探査の話を理解するために、最初に文化財や遺跡そのものについての基礎知識を整理する。ここでは文化庁の報告書¹⁾を参考にして、文化財および遺跡について概観する。

文化財保護法によれば、埋蔵文化財は文化財が土地に埋蔵されている状態の総称であり、集落跡・古墳・城跡などの遺跡や、そこから出土する石器・土器・埴輪などの遺物のことを指す。このような埋蔵文化財を包蔵する土地として知られている場所（狭義の遺跡）は、全国で44万ヶ所に達している。

国民の文化財に対する関心は高く、令和元年には大阪府の百舌鳥・古市古墳群が、令和3年には北海道・北東北の縄文遺跡群が世界文化遺産に登録された。この例からもわかるように、遺跡や埋蔵文化財は、その地域に住む人々のアイデンティティを確立するための有効な素材になっている。

また埋蔵文化財は、文字や記録の無い古い時代ではその地域の歴史を知るための唯一の手掛かりである。さらに、心の豊かさや潤いのある生活を求める地域住民にとっては、埋蔵文化財は大きな癒しの効果を持っている。

遺跡の発掘は、見方を変えれば遺跡の破壊である。そのため埋蔵文化財は、原則として現状のまま保存する傾向にある。したがって、やむを得ない場合にだけ発掘調査等を実施し、埋蔵文化財の記録を作成する決まりになっている。

2 遺跡探査の歴史と動向

埋蔵文化財や遺跡を破壊せずに調査する方法が、物理探査である。まずは、西村の著書²⁾を参考にし

て、考古学分野での遺跡探査の歴史を概観する。ヨーロッパでは、古くから地下にある遺跡や遺構が、様々な手掛かりを頼りに地上から分かる事が知られていた。明確な記録が残っているのは、イギリスのステファン・ストーンによる1857年の報告である。この報告書では、畑でのトウモロコシの生育状況が異なる大小17個の円形の異常域が詳細なスケッチと共に報告されている。また、この円形異常域の下に実際に掘ったところ、墓のような遺構が現れたことも報告されている。この植物の生育状況が異なる目印（マーク）は、今日ではクロープ・マークと呼ばれている。また、土壌の熱伝導率の違いから、降雪後の雪解けの速さが違うソイル・マークなどもある。

20世紀に入って写真技術が発達すると、土地の微妙な高低差を写真の影から判読する、シャドウ・マークと呼ばれる遺跡の指標も活用されることになる。シャドウ・マークは飛行機の発展に伴って、航空写真でも使われるようになった。さらに、人工衛星によりリモートセンシングが利用され始めると、宇宙空間からの遺跡探査も、ある種の遺跡では可能となった。最近では、ナスカの地上絵の新しい発見などが、その好例だろう。

日本で最初に遺跡探査に使われた物理探査は、電気探査・比抵抗法のようなものだ。イギリスではすでに1946年ごろに実施された電気探査の成果が翌年の1947年に発表されている。日本でもイギリスの研究とは独立して、1948年には電気探査の報告例がある。ただし、電気探査が日本で遺跡探査に広く利用されるようになったのは、イギリスで開発された遺跡探査専用の電気探査装置が輸入され始めた1980年代からである。この電気探査装置は、図1のようにウェンナー配置の電気探査装置で、固定さ

*九州大学大学院工学研究院 准教授

れた電極棒を地面に刺すと自動的に電流が流れ、比抵抗が計測できる仕組みになっている。

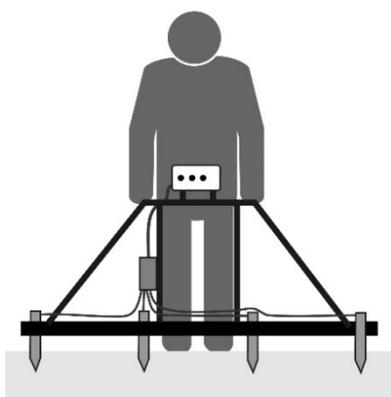


図1 遺跡探査用の比抵抗探査装置

電気探査に続いて遺跡探査に使われるようになったのは、磁気探査である。ヨーロッパやアメリカでは住居址の探査に磁気探査が成果を上げている³⁾が、当初日本では成果が上がらなかった。これは磁気探査に不適切な場所での探査の実施や、ノイズ環境の悪さなどが原因とされている。ただし、1970年代から高精度な磁気センサや磁気傾度計などの開発などもあり、遺跡探査の分野でも徐々に成果を上げ始めた。特に、熱残留磁気の大きな登り窯などの窯跡の探査では、磁気探査が最も適した探査法と考えられている。

地中レーダが遺跡探査に応用され始めたのは、1980年代からである。地中レーダは、水道管やガス管などの埋設管探査のために開発されたが、その分解能の高さが着目され、考古学分野で使われ始めた。今では、遺跡探査で最も使われている探査は、地中レーダ探査と言っても過言ではない。

その他の探査としては、電磁探査が使われることもあるが、日本では調査例は少ない。しかし、昨今のドローンの開発や普及を考慮すると、ドローンと非接触で探査可能な電磁探査との組み合わせは、遺跡探査に新たな展開をもたらす可能性があると個人的には考えている。

前置きが長くなってしまったが、本報では遺跡探査に使われることが特に多い、地中レーダ探査、電気探査・比抵抗法、磁気探査について概説し、実際の探査例を紹介する。

3 地中レーダ探査

コウモリやイルカなどは、バイオソナーとも呼ばれる超音波を利用した反響定位 (echo location) を

使って、餌となる虫や魚の位置を探し当てる。この反響定位の原理は、簡単に言えばヤマビコと類似している。まずは、音が反射して戻ってくる方向から、対象が存在する方向がわかるし、反響音が戻ってくるまでの時間から対象までの距離がわかる。生物の反響定位では超音波が使われるが、地中レーダ (GPR; Ground Penetrating Radar) では電磁波が使われる。

3.1 地中レーダ探査の原理

地中レーダは、数十 MHz から数 GHz の電磁波パルスを送信アンテナを地中に放射し、地層の境界や埋設物の境界から反射してきた電磁波の到達時間を計測する探査法である。地中レーダの探査装置には、電磁波を放射する送信アンテナと、反射して戻ってきた電磁波を受信する地震アンテナが取り付けられている。アンテナから放射される電磁波パルスの中心周波数は、装置によって異なるが、遺跡探査用では 300 MHz 前後の周波数が使われることが多い。

放射された電磁波は、図2のように比誘電率の異なる場所で反射するので、地中レーダでは地層の境界や緩み領域、地下に埋められた埋設管、コンクリート内の鉄筋・鉄骨などが検出可能である。

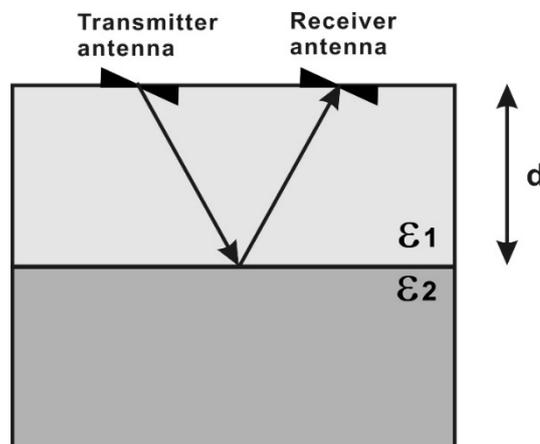


図2 誘電率が異なる境界面からの電磁波の反射

3.2 地中レーダ探査のケースステディ

地中レーダの調査例として、福岡県太宰府市の蔵司地区での地中レーダ探査の例を紹介する。学問の神様・菅原道真で有名な大宰府政庁は、古代の九州の中心都市である。この大宰府政庁には、数多くの部署があって、その一つが九州各地からの租税や特産物などを収める蔵司 (くらのつかさ) という部署である。大宰府政庁の建物は残っていないが、その跡地は公園として整備されて、市民の憩いの場になっている。この大宰府政庁跡の西隣には、蔵司 (くらのつかさ) という地名が残っており、この場所にか

つての蔵司の大型建物が建っていたと考えられている。通常の建物は、掘立柱と呼ばれる地中に穴を掘って埋めただけの柱を使って建てるが、大型の建築物の場合は、礎石という直径1m程度の円形の石を柱の基礎として使う。大宰府政庁跡にも、大型の礎石がたくさん残っているのので、礎石の存在が大型建物の存在を示唆する証拠にもなる。



図3 大宰府・蔵司地区での地中レーダの探査風景

た地中レーダ探査の結果を、データ処理して作成した深度スライス図である。この図で、白く見える部分が礎石からの反射応答と考えられ、測定範囲には直径1m程度の礎石が8個あることが推定された。図5は、地中レーダ探査の後に発掘された礎石の写真で、図4の強い反射応答が現れた場所とほぼ同じ場所で、礎石が発見された。



図5 実際に発掘された蔵司地区の礎石

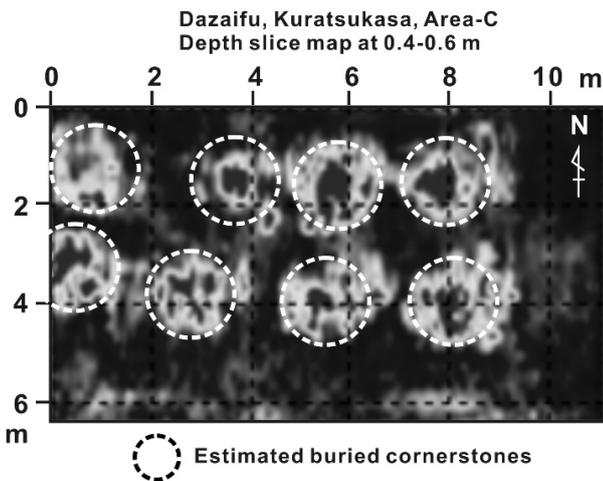


図4 大宰府・蔵司地区での地中レーダ探査の深度スライス。白く見えるのが礎石の応答。

図3は、大宰府蔵司地区での地中レーダの測定風景の写真である。地中レーダ探査には、カナダのSensors & Software社のNoggin Smart Cart Systemを使用した。この探査で使用したアンテナの中心周波数は250MHzである。写真から分かるように、調査区域に測線を設定し、車輪がついたカートを押しながら移動することで、測線上のデータを取得することができる。この調査では、測線間隔は0.2mとして、測点密度が高い測定を実施した。なお、進行方向である測線方向の分解能は0.05mである。

図4は、図3の調査区域に隣接する場所で得られ

た地中レーダでは、弾性波探査・反射法のように測線毎の反射断面図が得られるが、反射断面図から埋設物の深度や範囲を推定するのは、物理探査を専門としない考古学の研究者には難しい。そこで考案されたのが、複数の断面を用いて作成する深度スライス図である。適切な電磁波速度の情報が得られれば、電磁波の往復走時は深度に変換できる。この深度と、各測点での振幅強度を使えば、電磁波の反射強度の強弱を反映した深度スライス図が作成できる。この深度スライス図を利用することになってから、遺跡探査の分野での地中レーダ探査の活用が促進された。

4 電気探査

地中レーダ探査は、空間分解能に優れた非破壊調査なので、遺跡探査で使われることが多くなったが、決定的な弱点が1つある。それは探査が可能な限界深度（可探深度）が浅いことである。遺跡探査で一般的に使われる300MHz前後の電磁波パルスを使った方法での可探深度は2m程度で、最大に見積もっても3mが限界である。

3章での探査例のように、深度1m程度の場所にある埋設物は、地中レーダが最も得意とする探査対象である。しかし、大きな古墳内部にある石室などでは、石室が墳頂部から3m以深にあることも多く、地中レーダの電磁波が届かない。そこで利用される

のが、電気探査・比抵抗法である。広義の電気探査には、自然電位法（SP法）や強制分極法（IP法）が含まれるが、狭義で電気探査が使われる場合は比抵抗法（resistivity method）のことを指す。

4.1 比抵抗法の原理

比抵抗は物質固有の電気抵抗で、対象物の大きさや形状に依存しない物性値である。大雑把に言えば、比抵抗は“電流の流れ難さ”を表す物理量である。つまり、比抵抗値が大きいと電流が流れ難く、その反対に比抵抗値が小さくなれば電流は流れ易くなる。実際の比抵抗法では、土壌や岩石の比抵抗が対象となるが、土壌や岩石の比抵抗は、それらが持つ孔隙率とその内部に含まれる水の比抵抗によって決まる。土壌や岩石には微視的な孔隙が存在し、その孔隙を満たす水の導電性のお陰で地中に電流を流すことができる。

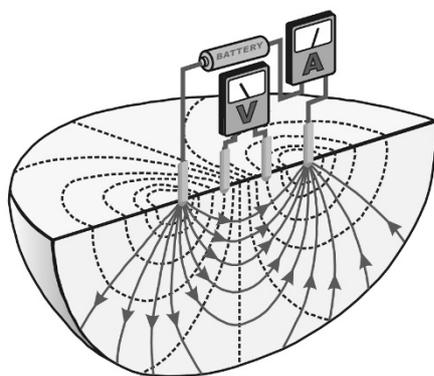


図6 大地の比抵抗の測定法

比抵抗法では、図6のように2つの電流電極を使って地下に電流を流し、2つの電位電極を使って2点間の電位差を測定する。一般的に、比抵抗法では合計4つの電極を使用するので、このような電極配置を4電極配置と呼んでいる。

この4電極配置での測定電位と測定電流の比に、電極の位置関係に依存する電極関係係数を乗じることで、地下の平均的な比抵抗である見掛比抵抗を計算できる。なお、観測によって得られた見掛比抵抗データから、データ解析することで地下の真の比抵抗分布を推定することができる。

4.2 電気探査のケーススタディ

九州大学・伊都キャンパスがある福岡市西区の元岡丘陵には、大小含めて多くの古墳が存在している。図7は伊都キャンパス内の大型古墳の分布図で、前方後円墳が6基と円墳1基が確認されている。ここでは、伊都キャンパスの中央部付近にある元岡・池ノ浦古墳の比抵抗探査の結果を紹介する。

池ノ浦古墳は、理系エリアの理系図書館の裏手の小山の頂上にある前方後円墳である。ちなみに前方後円墳の呼称は、“大塚”や“双子塚”のように同名が多いので、元岡・池ノ浦古墳のように、地名+俗称を正式な古墳名にするのが一般的である。ただし、大山古墳（だいせんこふん：仁徳天皇陵）のような有名な古墳は、この限りではない。

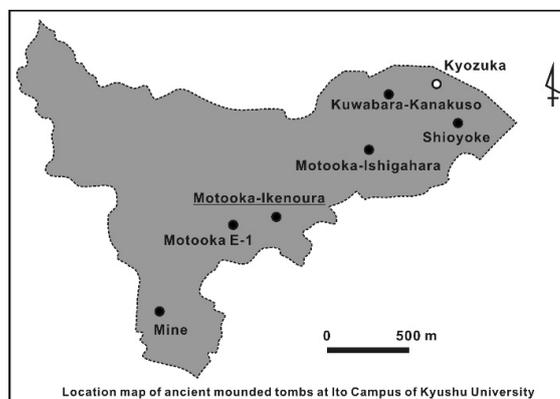


図7 九州大学・伊都キャンパス内の前方後円墳（●）と大型円墳（○）の分布

池ノ浦古墳の比抵抗探査は、応用地質（株）製のマルチチャンネル比抵抗測定機 Handy-ARM を使って実施した。この探査では、測線上に1mおきに32本の電極を設置し、2極法による自動測定を実施した。この探査データを使って求めた2次元比抵抗断面図が、図8である。この図から、後円部の直下に大きな低比抵抗異常部が検出されている。この低比抵抗異常部の下部は、この古墳の埋葬施設である石室およびそれを取り巻く粘土層と解釈された。この墳頂部に近いシャフト状の低比抵抗部は、盗掘によって生じた地層の緩み領域と解釈されている⁴⁾。

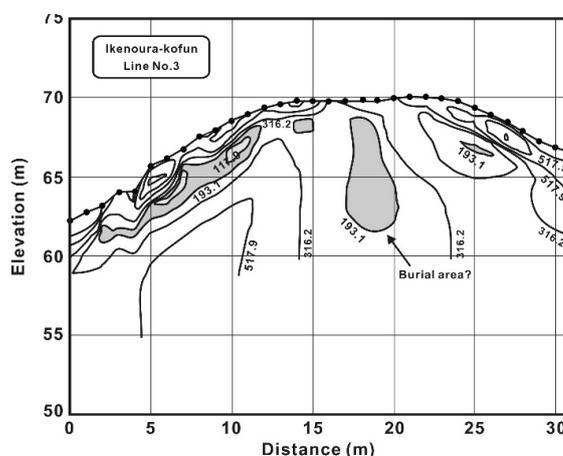


図8 池ノ浦古墳で得られた地下の比抵抗断面図

5 磁気探査

前述したが、磁気探査はヨーロッパやアメリカで

は古代人の住居址の探査で成果を上げている。竪穴式住居には、その周囲に溝が掘られているので、元々の土壌と、住居が使われなくなったあとで溝を埋めた土壌の帯磁率の違いから、**図9**のように円形の住居址の形を明瞭に抽出できている³⁾。一方日本では、耕作などによって、地表付近の土壌が繰り返し混合される場合が多いので、磁気探査で住居址を発見した例は少ない。

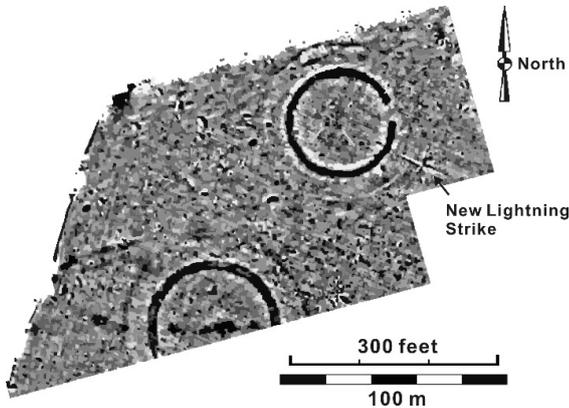


図9 磁気探査による北米先住民住居址の探査例（文献3の図を改編）

磁気探査が遺跡探査で役立つのは、鉄剣などの鉄製埋設物が存在する場合が多い。その他で、磁気探査が遺跡探査でその能力を発揮するのは、陶器や土器などを製作した古代の窯跡や、煮炊きなどの調理に使われた竈跡の探査である。これらは被熱遺構と呼ばれ、磁気異常の原因は被熱後に獲得した熱残留磁気である。

5.1 磁気探査の原理

磁気異常の現れ方には、原理の異なる2種類の磁化と、その磁化によって獲得した2種類の磁気関係している。1つは地磁気という大きな外部磁場によって、強磁性体などが磁化される誘導磁化である。もう1つは、岩石や土壌などがキュリー温度以上の高温に晒され、一旦は磁性を失うものの、その後の地磁気による磁化で安定した残留磁気を獲得する場合である（**図10**）。この磁化過程は熱残留磁化と呼ばれ、それによって獲得した磁気が熱残留磁気である。熱残留磁気は再び高温に晒されなければ長期間安定しているので、磁気を獲得した時の地磁気の方角を保持し続ける。そのため、地磁気の方角が変化した場合には、熱残留磁気は磁気異常として検出できる。鉄剣などによる磁気異常は誘導磁化によるもので、窯跡などの磁気異常は熱残留磁化による。

なお、その地域での地磁気の年間履歴がわかる場合には、熱残留磁気の磁化方向は年代測定に使うこ

ともできる。この年代測定法で推定した年代は、古地磁気年代と呼ばれている。

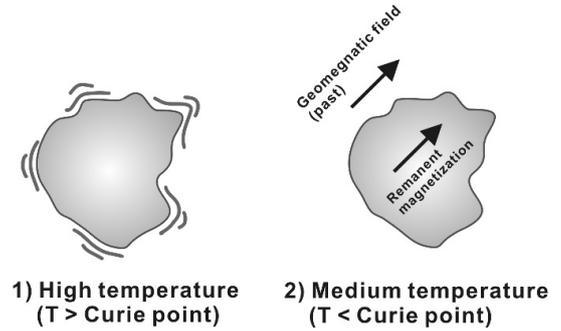


図10 熱残留磁気の獲得過程

5.2 磁気探査のケーススタディ

遺跡探査では、古墳や住居址などの大規模な遺構が目目される場合が多いが、窯跡・焚火跡などの生産遺跡は、当時の人々の日常生活や住環境を知るうえで貴重な遺跡である。

ここでは、福島県会津若松市・大戸古窯跡群の上雨谷12号窯跡の探査例⁵⁾を紹介する。測定が実施された地域では、従来から多数の須恵器の窯跡の存在が知られていた。さらに、測定領域にも、文献資料などから同様の窯跡があること推定されていた。この磁気探査では、磁気の測定に全磁力が測定できるプロトン磁力計を使用している。

図11の探査結果を見ると、測定領域中央部に正負の極性を持った双極子状の典型的な磁気異常が現れている。このような双極子状の磁気異常は、磁気探査で窯跡を探す際の目標となる。なお実際の窯跡は、正負の磁気異常の中間点に存在する。この磁気探査後の発掘調査では、長さが6mほどの8~9世紀に属する須恵器の窯が、1m程度の間隔で2基存在していることが確認された。

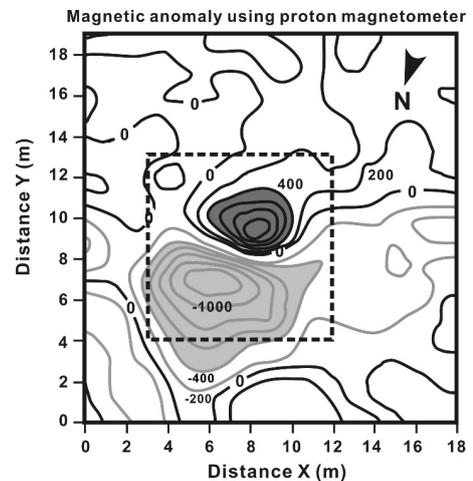


図11 プロトン磁力計で測定した会津若松市・上雨や12号窯跡の磁気探査結果（文献5の図を改編）

6 まとめ

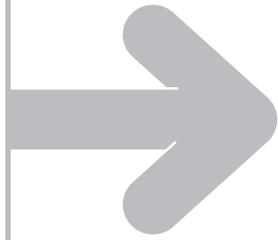
遺跡探査における物理探査の役割を理解してもらうために、地中レーダ探査、電気探査・比抵抗法、磁気探査を例にとって、それぞれの探査法の特徴や遺跡探査への適用方法を解説した。この総説では、探査の基礎となる数式等を省略して説明したが、詳しい探査理論を知りたい場合は、物理探査の教科書である拙著⁶⁾を参考にして頂きたい。

最先端の機器を駆使した遺跡探査にも、技術的な課題はある。地下に遺物があれば、どこにあるかまでは分かるが、それが何であるかまでは分からない。また、遺跡探査に取り組む国内の研究者が極端に少ないのは将来的な課題である。

古代の人々の生活や文化に触れることができ、考古学的新発見の可能性もある遺跡探査は、魅力的な研究分野である。この文理融合した学際的な研究分野に、多くの人に関心を持ってもらいたい。

〈参考文献〉

- 1) 文化庁：「埋蔵文化財の保存と活用（報告）」、https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/pdf/hokoku_07.pdf（2021年9月17日現在）
- 2) 西村康：「日本の美術 No.422 遺跡の探査」、至文堂、pp.19-29、2001.7
- 3) The Archaeology Conservancy: 「Magnetic Re-Survey of Junction Group Archaeological Preserve」、<https://www.archaeologicalconservancy.org/magnetic-re-survey-junction-group-archaeological-preserve/>（2021年9月17日現在）
- 4) 水永秀樹、田中俊昭、牛島恵輔、宮本一夫、辻田淳一郎：「九州大学伊都キャンパスの前方後円墳探査」、文化財と探査、Vol.11, No.2, pp.19-30, 2010
- 5) 西村康：「遺跡の磁気探査（3）」、奈良文化財研究所、https://repository.nabunken.go.jp/dspace/bitstream/11177/3274/1/AN00181387_1992_52_53.pdf、（2021年9月17日現在）
- 6) 水永秀樹：「はじめの一步 物理探査学入門」、九州大学出版会、2019.2



干渉 SAR 技術

ふじわら さとし
藤原 智*

Key Word 干渉 SAR, 地殻変動, 地盤変動, 地震, 火山, 地すべり

1. はじめに

地震・火山活動・地すべり・地盤沈下はそれぞれ、地下の断層・マグマ・すべり面・地下水等の動きによって発生する。原因となっている現象自体は地面の中なので直接見ることはできない。ただし、これらは、原因となるものが動くことによって周りが引きずられて動き、結果として地表面では地殻変動や地盤変動として現れる。こうした地表面での変位を宇宙から数 cm の精度かつ面的に捉え、本来は見えない地下の現象について様々な知見を与えてくれる画期的な技術が干渉 SAR である。

本稿は、地表の変位分布から地中で起こっている現象を捉える干渉 SAR 技術について実例を示しながら解説するものである。

2. SAR による地殻変動検出

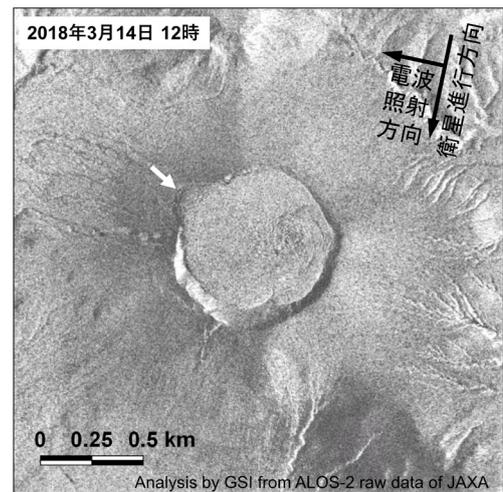
2.1 SAR

SAR（「サー」と発音）とは、英語の Synthetic Aperture Radar の頭文字で、日本語では「合成開口レーダー」である。SAR は人工衛星や飛行機などから地表をめがけて電波を発射し、反射された電波を受信して対象物の形状や表面の性質などを計測するレーダーの一種である。対象物の分解能を上げるためのアンテナの大きさ（開口）を稼ぐために、移動しながら電波の送受信を行うしくみ（開口を合成）からこの名前がついている。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）が 2014 年に打ち上げた人工衛星であるだいち 2 号（ALOS-2）は、SAR センサーを搭載し、繰り返し地球の周りを回って地表の観測を続けており、本稿ではこの ALOS-2 によって取得された画像を国土地理院で

解析したものを紹介する。

図表 1 に霧島山・新燃岳火口の SAR 強度画像を示す。火口内に溶岩が出現し、北西方向に火口縁を乗り越えて流出しているのがわかる。普通の空中写真のようにも見えるが、雲や噴煙等を SAR 電波が透過するために、昼夜や天候に左右されることなく継続した観測が可能であり、西之島や福徳岡ノ場といった離島の観測でも力を発揮している。



図表 1 霧島山・新燃岳火口の SAR 強度画像¹⁾

2.2 干渉 SAR

SAR 観測の優位性は、地表面の画像情報だけにとどまらず、地殻変動のような地表の変位を計測することにある。

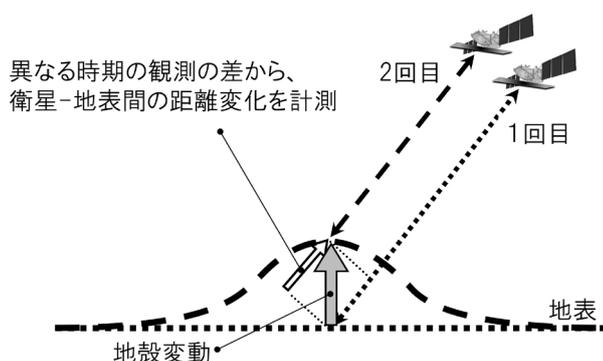
SAR を用いて地表の変位を計測するには、SAR 画像を空中写真のように用いて 2 時期間の地表の変位を画像上の画素のずれとして検出する方法（ピクセルオフセット法）、もしくは、干渉 SAR と呼

*国土地理院測地部長

ばれる方法が用いられる。ピクセルオフセット法の変位検出精度は、SAR 画像の各画素の空間分解能（数 m 程度）で決まる。したがって、得られる変位量には数 10cm ほどの誤差があるが、数 m 以上変位があるような大地震時等の大きな変位の検出にはピクセルオフセット法が用いられる。

これに対し、干渉 SAR（Interferometric SAR, InSAR）とは、同じ場所を撮影した 2 枚の SAR 画像中の対応する画素を個別に抽出し、その画素の 2 時期の反射電波の位相差を計測（干渉させる）ことにより地表の変位を精密に捉える手法である。干渉 SAR の変位検出精度は、使用している電波の位相検出精度で決まるために、原理的には 1cm を切る高い精度の変位検出を可能にしている。実際には、SAR 電波が通過する大気中の水蒸気量に応じて発生する伝播遅延ノイズ等により、変位検出精度は数 cm 程度である。

干渉 SAR では、画素ごとの SAR アンテナ－地表間の距離変化量を面的に得ることができる。図表 2 に示すように 1 回目の観測の後に地表面が隆起すると、同じ場所（画素）の 2 回目のアンテナ－地表間の距離が短くなり、この 2 回の差から地表の変位を精密に求める。このとき、地表面ではなく、アンテナの軌道がふらふらしてしまうと大きな誤差要因となってしまう。人工衛星からの観測であれば、衛星軌道は宇宙空間では極めて安定しており、こうした変化を高精度かつ広域で捉えることができる。



干渉 SAR は万能ではなく、アンテナ（衛星）－地表間の視線方向に沿った特定の方向の 1 次元の距離変化量しかわからない。実際の地殻変動は 3 次元（東西、南北及び上下）の各成分を持っていることから、地殻変動の一面しか捉えられないという弱点がある。また、変動量が使用する電波の半波長（ALOS-2 では 12cm）ごとに折りたたまれ

ていて絶対量が直接わからないという弱点がある。

そこで、特定の方向の変位量しかわからない弱点に対しては、衛星が進行方向の右側と左側の観測を行うこと及び衛星の南向きと北向きの軌道が平行でないことを利用し、複数の方向からの観測を合成することで地殻変動を 2 次元や 3 次元で求めることができる。また、変動量が一定の値で折りたたまれている点については隣接する画素ごとの変位量を画像処理技術で積算することで変動量の絶対値を得ることができる。

これら以外には、耕作や植生の変化等で地表面の状態が大きく変化した場合や変動の水平勾配が大きすぎる場合は干渉しなくなる（非干渉と呼ぶ）現象が生じ、変位情報を得ることができなくなるという弱点も持っている。こうした現象は波長の長い電波を使っている ALOS-2 では他のヨーロッパ等の衛星に較べると影響は小さく、植生の多い日本でも有効なデータが得られている。

2.3 干渉 SAR による変動検出は何に役立つのか

干渉 SAR では、地球表面の動きを広域で面的に測定することができる。このことが地下で起きていることの解明に大きな役割を果たす。地震による地殻変動を測定すれば、地表の変位の分布から地下の見えない断層の動きを明らかにすることができ、結果的に地震がどのように発生したのかがわかり、今後の地震活動の推移を予測することなどにつながる。火山ならば、地表の変位から地下のマグマの動きを捉えることができ、繰り返し観測を行うことでマグマ蓄積の盛衰から今後の火山活動の推移を予測することに役立つ。また、南極などの氷河の移動を捉えることもでき、地球温暖化の監視にも役立てられている。さらに、こうした自然現象自体の解明にとどまらず、例えば、人為的な地下水くみ上げに伴う地盤沈下を監視することができる。

2.4 SAR と他の測量との違い

地表の変位の測定は、GNSS（GPS）や水準測量といった他の測量方法でも可能であるが、SAR がこれらの他の測量と大きく異なる点は、

- (1) 面的に測定できる
- (2) 観測点の地表に観測機器が不要かつ観測のために現地に赴く必要がない

という 2 点である。人工衛星を利用する干渉 SAR は、数十 km 四方を一度に測定できる上に、その範囲内に機器を設置する必要がない。そのため、火口周辺等で人間が立ち入ることのできない場所

でもくまなく測定ができる。これは他の地上測量にはまねのできない、大きな利点となっている。人工衛星であれば、世界中の場所を繰り返し観測できるので、徐々に進行する現象から突然発生する現象まで様々な地表の変位を継続的に監視できる。

3. 地表の変位の検出例

3.1 地震 2016年熊本地震

大きな地震が発生すると、地表ではさまざまな地殻変動や地盤変動が現れる。図表3は2016年熊本地震によって生じた地表の変位を表すSAR干渉画像である。虹色の縞ごとに12cmのアンテナ（衛星）-地表間の距離の変化があったことを示している。熊本地震では1mを超える地殻変動が広範囲に現れた。

しかしながら、この図だけから具体的な変動の状況を把握するのはSAR干渉画像を見慣れた者にとっても困難である。そこで多方向からの複数画像を使うことや、干渉SARとピクセルオフセット法を併用することで変動量を3次元かつ絶対量として求めたのが、図表4である。

図表4の中央部に大きな地殻変動が集中しているのがわかる。よく見ると、中央部の北西側では東北東方向に地面が動いており、南東側では南西の方向に地面が動いている。これらの2つのそれぞれの領域内では、地殻変動が滑らかにつながっており、大地を構成している岩石は硬くてガチガ

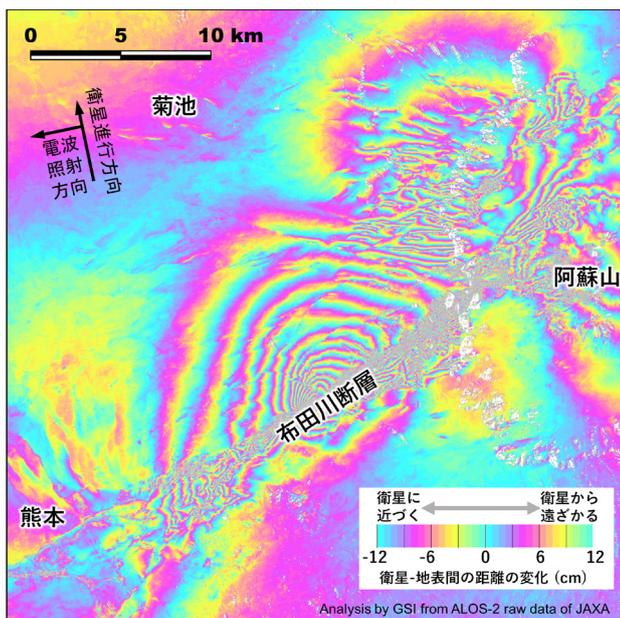
チに見えるものの、こうしたマクロなスケールで見るとゴムやプラスチックのようにしなやかな弾性も持っていることがよくわかる。

北西部と南東部の境では地殻変動は不連続となっており、この不連続は東北東-西南西方向に線状につながっている。この場所が布田川断層の上端部にあたり、動いた断層がどこにあり、どのようにどれくらい動いたのかがわかる。

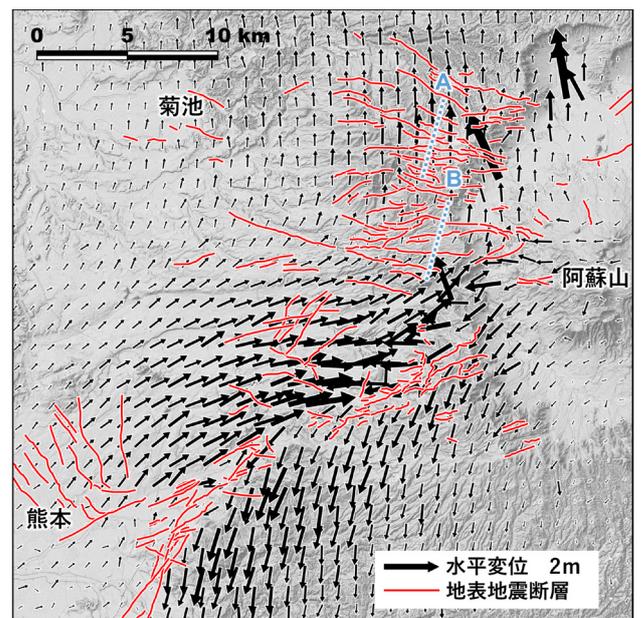
なお、阿蘇山のカルデラ内の北西部（図表4右上）に独立した大きな変動が見られる。この地域では、地面に大きな亀裂が多数見つかっており、新たな活断層ではないかとの指摘があったものの、衛星SARからのマクロな視点からは、地表の変動は線状にはつながらず、孤立したいくつかの変動地域に分かれており、これらは断層運動による地殻変動ではなく、強震動によって誘発された液状化がもたらした側方流動の可能性が高い。こうした現象を見いだした上で、原因にまで迫れるのは面的に地殻変動を詳細に捉える衛星SARの威力である。

布田川断層沿いでは地殻変動量が非常に大きくかつ複雑であるが、こうした震源断層から離れるにしたがって地殻を構成する岩石の弾性によって地殻変動がスムーズに減少していく。ところが、干渉SARを使って詳細に広域の地殻変動を観察してみると、震源断層から離れた場所でも断層状の細長い地殻変動が数多く発生していることがわかった。

図表4には、干渉SARで得られた画像を複数枚



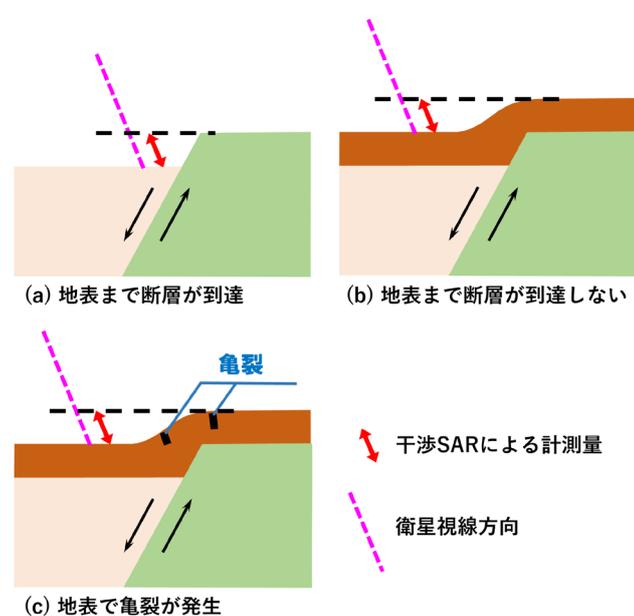
図表3 2016年熊本地震の地殻変動を表すSAR干渉図²⁾



図表4 複数のSAR画像から求められた2016年熊本地震による地表の変位及び地表地震断層³⁾

使用し、地殻変動が線状に不連続となっている場所を抽出したのも描いてある。地表には変位量は小さくとも細かい線状の変位が数多くあることがわかった（ここでは「地表地震断層」と呼ぶ）。これらは地表付近での小規模な断層運動による変位に類似したものであり、こうした地表地震断層の数は230本程にも及んでいる。それらのうちいくつかは既知の活断層と位置や変位の向きが一致しているものの、既知の活断層の数と比べると今回新たに検出された地表地震断層の数の方がはるかに多いのが特徴である。

地表付近での断層変位がどのように現れるかを図表5に模式的に示した。断層が地表面を突っ切って地上に到達してしまえば(a)、現地調査で断層の場所とその動きを疑いなく把握することができる。しかしながら、断層が地表面を直接切るまで到達することはまれである。地表付近の堆積層等で断層の動きは止まってしまう、地表ではゆるやかな変位となることがほとんどであり(b)、地表をいくら歩き回っても、断層変位を探し出すことは難しい。さらに現地調査を複雑化させているのは、地震に伴って発生した亀裂等の存在である(c)。亀裂は地表で容易に見つけられるが、断層そのものではない。断層から離れた場所の地すべりによる亀裂を断層だと誤認することもしばしばである。地上での観測に比べて、SAR干渉画像はマクロな視点を持ちながらも数cm程度の小さな変位を見逃さない技術であり、地下の断層の動きを詳細に描き出すことができる。

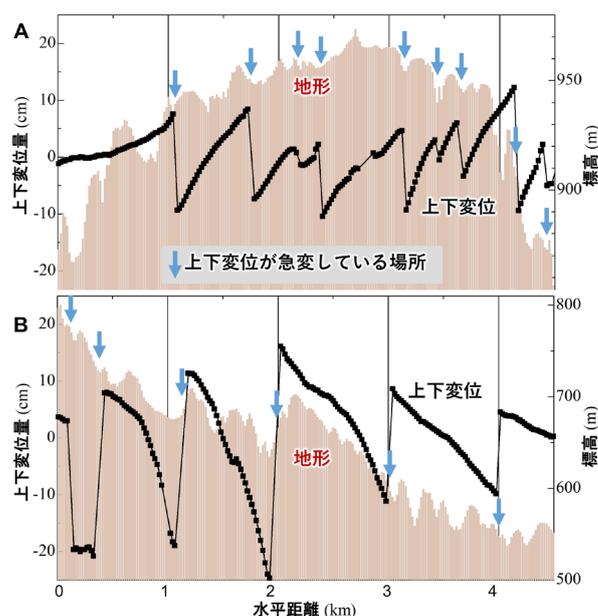


図表5 干渉SARによる地表付近の断層の動き検出の模式図³⁾

実際に、SAR干渉画像を元に現地調査で地表地震断層が確認できるかどうかを調査してみたところ、地表地震断層は、地表面が芝生やアスファルト舗装のように平らで地面自体が直接見やすい場所にあること、変位量が十分に大きいこと、というような条件に当てはまる場合にやっと確認できる状況であり、実際に現地で確認できたものはきわめて少なかった。道路のアスファルトがずれて変位が明瞭であっても、SARがなければこれが断層変位なのか、緩い地盤が震動でずれただけなのかの判断は困難である。

図表4の北東部のA及びBの測線ごとの上下変位と地形の断面図を図表6に示す。のこぎりの歯のように変位が連続しており、さらに面白いことには、北側では南落ち、南側では北落ちと南北対称の変位を示している。これらは、熊本地震を引き起こした震源断層である布田川断層等からは離れており、震源断層やそこからの分岐断層ではない。また、震源断層が動いたことによる応力の変化でもこの動きが説明できなかった。つまり、熊本地震は阿蘇カルデラ北西部の地表地震断層出現のトリガーではあったが原動力ではなかった。

この場所は広域の応力場の中で長期的には南北に開くような力を受け続けていることがわかっており、これらの地表地震断層群はこの蓄積したひずみを開放するように割れ目が規則正しく開いたと考えられる。地形と相関のある変位もあり、地形数10mで変位が数10cm(図表6下段中央)程度ということは、過去に同じ変位が100回以上起



図表6 図表4のAB測線での上下変位及び地形断面図³⁾

こってればこの地形が形成されることになる。また、地形から活断層と認識されていたものもあることから、地質的な長い時間のなかで同じような変位が繰り返し蓄積してきた可能性を示唆するものである。

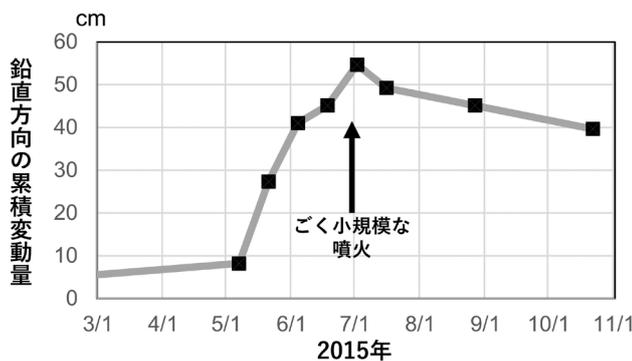
このように、地震の原因となった断層だけではなく、地震の結果として動かされた断層（お付き合い地震断層）がその周辺のあちこちに現れていたことがわかり、干渉 SAR は断層というものの多様性を明らかにした。

3.2 火山活動 2015年箱根・大涌谷

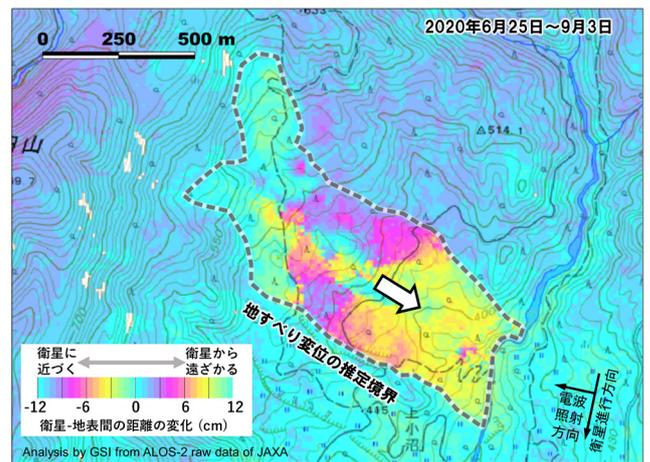
火山活動は、地下でマグマ自体やマグマに熱せられた流体が移動することで生じている。こうしたマグマ等が蓄積すれば、火山の山体は隆起することで噴火の危険性が高まっていることを知ることができる。図表 7 に、2015年に箱根・大涌谷で生じた小規模な噴火前後の累積変動量の変化を示す⁴⁾。変動が生じたのは直径 200m ほどのごく狭い領域であったが、干渉 SAR で繰り返し観測することで、噴火前には隆起が観測されたことで、自治体による立ち入り禁止継続の判断に利用され、噴火後は沈降することで危険が低下していることを見出している。干渉 SAR は、このように実際の防災業務でも幅広く活用されている。

3.3 地すべり等を見つけ監視する

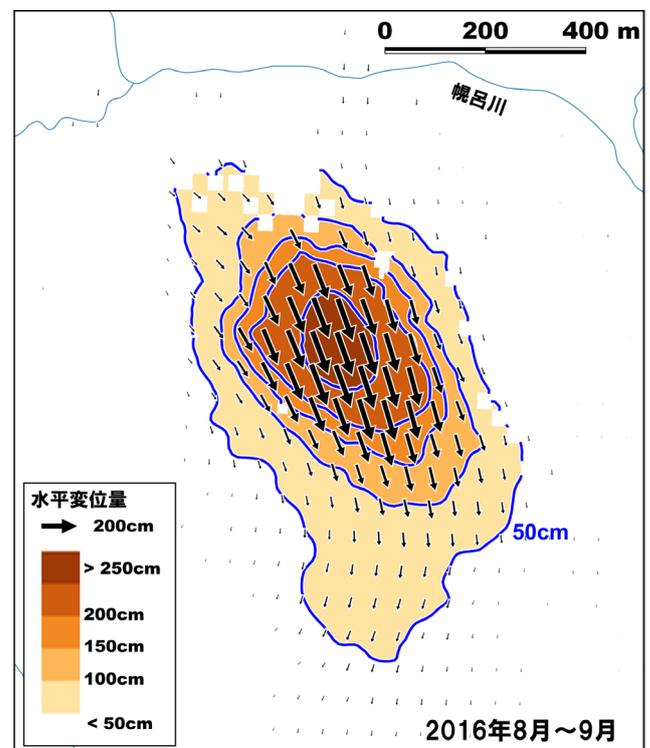
国土地理院では全国の地表の変位を干渉 SAR で監視している。そこでは地すべりや地盤沈下によると考えられるものが多く見つかる。地盤沈下はかつて工業や農業のために地下水を過剰にくみ上げることによって発生したために社会問題ともなったが、現在では冬期の融雪用地下水や水溶性天然ガスのくみ上げによるものが見いだされることが多い。また、地すべりは間欠的に数 cm 程度ず



図表 7 2015年の箱根・大涌谷の累積変動量の変化⁴⁾



図表 8 山形県西川町の地すべりを捉えた SAR 干渉図⁵⁾



図表 9 SAR によって捉えられた 2016年の大雨によって発生した釧路湿原の 2.5m を超える水平変位⁶⁾

れるものがあちこちに数多く見つかっている。図表 8 に干渉 SAR が捉えた地すべりの例を示す⁵⁾。この期間の変動量は数 cm 程度であるが、すべりが蓄積したり、急激に大きくすべったりするための監視は欠かせない。

SAR 観測は誰も見たことがない現象も数多く捉えている。図表 9 は、釧路湿原内で大雨に伴って 500m 以上の領域が最大 2.5m も水平移動したものを捉えた例であり、洪水で軟弱な泥炭層が浮島のように移動したものと推定される⁶⁾。さらにはこの変位の分布が地下水や植生と大きく関連する現象

であることを示す結果が得られており、このことは、湿原の環境保護対策等に必要なモニタリングに SAR が他では得られないデータを提供しうることを示すものである。

4. まとめ

本稿で紹介したような数多くの地表の変位現象を網羅的かつ高精度に捉えることは、現時点では SAR 観測にしかできないであろう。現行の ALOS-2 に加えて、観測頻度が大幅に増加する ALOS-4 の打ち上げも近づいており、さらなる活躍が期待できる。また、従来の SAR が持つ弱点を解決していく新しい解析技術も次々と発表されており、今後ますます発展していく分野である。

〈参考文献〉

- 1) 本田昌樹, 山下達也, 上芝晴香, 攪上泰亮, 林京之介, 桑原將旗, 松本紗歩, 仲井博之, 酒井和紀, 宮原伐折羅, 宗包浩志, 飛田幹男, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 藤原智:「だいち2号 SAR データの解析による霧島山噴火に伴う地表変動の検出」, 『国土地理院時報』, 93-108, 130 集, 2018
- 2) Fujiwara S, Yarai H, Kobayashi T, Morishita Y, Nakano T, Miyahara B, Nakai H, Miura Y, Ueshiba H, Kakiage Y, Une H: 「Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry」, 『Earth Planets and Space』, Article number 160, Vol 68, 2016
- 3) Fujiwara S, Nakano T, Morishita Y: 「Detection of triggered shallow slips caused by large earthquakes using L-band SAR interferometry」, 『Earth Planets and Space』, Article number 119, Vol 72, 2020
- 4) 山田晋也, 三浦優司, 山中雅之, 仲井博之, 和田弘人, 攪上泰亮, 上芝晴香, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊:「だいち2号 SAR 干渉解析によって検出された箱根山・大涌谷内の地表変動」, 『国土地理院時報』, 67-75, 128 集, 2016
- 5) 中埜貴元, 山中雅之, 小林知勝, 森下遊, 藤原智, 仲井博之: 「SAR 干渉解析による斜面変動検出—四国山地, 朝日山地の事例」, 『JpGU-AGU Joint Meeting 2017』, HDS17-P02, 2017
- 6) 藤原智, 森下遊, 中埜貴元, 三浦優司, 攪上泰亮, 村松弘規, 宇根寛: 「ALOS-2 の SAR によって捉えられた 2016 年の大雨による釧路湿原の 2.5 m を超える地表変位」, 『地学雑誌』, pp. 419-438, 128 巻, 3 号, 2019

宇宙線ミュオンによる 非破壊イメージング

もりしま くにひろ
森島 邦博*

Key Word

宇宙線, ミュオン, 非破壊イメージング, ピラミッド, 原子炉,
社会インフラ点検, 地下空洞調査, 原子核乾板

1. はじめに

放射線は、光に対して不透明な物質に対しても高い透過性を持つため、光では観察できない物体の内部を非破壊で可視化（イメージング）する手段として幅広く利用されている。特に、レントゲン撮影技術（X線イメージング）は、医療現場や空港の手荷物検査、工業製品の検査など幅広く用いられており、現代社会に必要不可欠な基盤技術である。レントゲン撮影は、X線を加速器により発生させて、観察対象に向けて照射する。対象となる物体の内部構造に伴う密度や厚さの違いによりX線の透過率に差が生じる。物体を透過したX線を、X線フィルムなどのX線検出装置により濃淡分布として可視化することで、対象物の内部構造を反映した透過像を得ることができる。しかし、X線は、その透過率と強度から1m以上の厚さの物体の内部を可視化することが困難であり、その対象は先に挙げたものなどに限られる。

私たちは、X線の透過距離の限界を飛躍的に拡張する方法として、地球上に降り注ぐ宇宙線を用

いることで、X線レントゲン撮影と同様の原理により巨大な物体内部の密度分布を可視化する非破壊イメージング技術（宇宙線イメージング）の開発を進めている（図1）。本稿では、宇宙線イメージング技術と私たちがこれまでに進めてきた2つの実施例、社会インフラ点検や地下空洞調査などへの活用の展望について紹介する。

2. 宇宙線イメージング

大気上層部から地球表面にあらゆる方向から降り注ぐ高いエネルギーの放射線を宇宙線と呼ぶ。宇宙線の中には、電子の約200倍の質量を持つミュオンと呼ばれる素粒子が含まれており、X線と比べて格段に高い透過力と直進性を持つ。ミュオンは、エネルギーが高いほど厚い物質を透過する事ができる。宇宙線中に含まれるミュオンの中には、数kmの岩盤でさえも貫通する高いエネルギーの粒子も含まれる。宇宙線は、加速器により人工的に発生させるX線とは異なり、あらゆる方



図1 宇宙線イメージングの対象

*名古屋大学 大学院理学研究科, 高等研究院, 未来材料・システム研究所, 未来社会創造機構 / JST さきがけ研究者 准教授

向から地球上に飛来してくるため、検出する装置には、宇宙線の方向を三次元的に検出する性能が必要となる。私たちは、二次元の撮像装置であるX線フィルムよりも高感度であり、かつ放射線の軌跡を三次元的に記録することを可能にした、特殊な写真フィルム「原子核乾板」を開発して宇宙線検出器として用いている¹⁾。宇宙線を検出する装置を観測したい対象物の周辺に設置して、観測対象を通過して検出器に入射する宇宙線の方向と数を計測することで、その観測対象内部の密度分布をレントゲン撮影と同様の原理により可視化できる。このような技術を宇宙線イメージング(宇宙線ミュオンラジオグラフィやミュオグラフィ)と呼び、大型構造物(ピラミッドなどの考古遺跡や原子炉・溶鉱炉などの工業用プラント、土木構造物や建築物など)や自然物(火山や地質、断層など)の内部など、様々な物体を可視化の対象とすることができる(図1)。

3. ピラミッドなどの考古遺跡調査

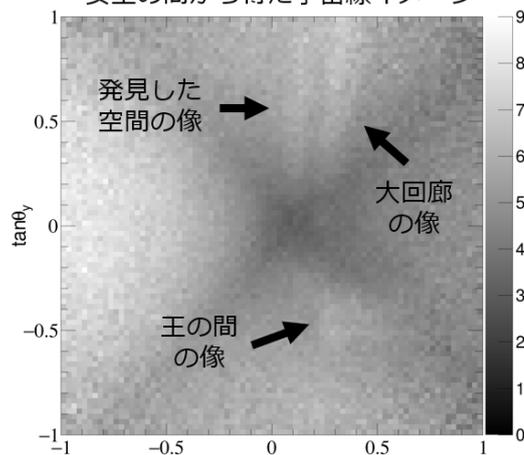
私たちは、宇宙線イメージングによりエジプトのクフ王のピラミッドの内部を非破壊で可視化することで、未知の内部構造の探査を進めている。この探査プロジェクトは、日本・エジプト・フランスなどの国際共同研究としてエジプト考古省の許可の下に進められており、ScanPyramids(スキャンピラミッド)²⁾と呼ぶ。

私たちは、ピラミッドの入り口から下降する通路(下降通路)と女王の間と呼ばれるピラミッド中心部の部屋に原子核乾板を設置して観測を実施した。2016年には、下降通路内に設置した原子核乾板の解析により、図2に示すように、検出器設置位置の上部に未知の空間を発見した³⁾。さらに、2017年には、女王の間に設置した原子核乾板の解析結果から、ピラミッドの中心部に未知の巨大な空間を発見した⁴⁾(図2)。これらの解析は、「観測結果のイメージ」と「既知の内部構造から予測されるイメージ」を比較することで行った。その結果、予測と異なり多くの宇宙線を検出する領域が検知されたことで、未知の空間の存在が示された。図2に示す宇宙線イメージは、宇宙線の飛来方向(横軸は東西方向、縦軸は南北方向)ごとの検出頻度をグレースケールで表現しており、宇宙線が多く検出された領域を白、少ない領域を黒で表している。これらの結果は、19世紀以降における初めてのピラミッド内部の未知構造の発見となり、従来のクフ王のピラミッドの通説を覆すものであった

ピラミッドの内部構造と発見した空間



女王の間から得た宇宙線イメージ



既知の構造からの予測イメージ

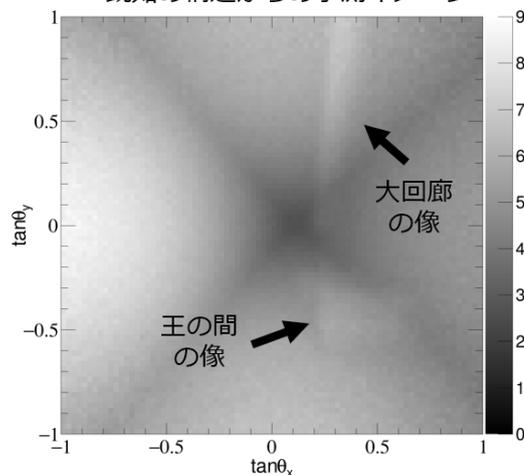


図2 クフ王のピラミッドの宇宙線イメージ

ことから社会的な注目を集めた。さらに、この発見は、世界中の様々な遺跡調査に宇宙線イメージングを用いる契機となり、これまでに、マヤ文明の神殿ピラミッドやイタリアの地下遺跡、日本の古墳などへの適用が始まっている。

ピラミッド調査における今後の課題は、発見した2つの空間の詳細な三次元形状を解明する事である。下降通路の上部に発見した空間については、下降通路内部の複数地点に原子核乾板を配置するだけではなく、アルマムーンの通路と呼ばれる下

降通路とは東西方向に異なる位置にある観光客用の通路からも観測を行うことで、様々な方向からの観測を進めている。中心部に発見した巨大な空間は、女王の間から40m近く上方に位置している。宇宙線イメージングは、より近距離からの観測を行うことで、より高い解像度でのイメージングが可能となる。そのため、現在、女王の間と発見した空間の間に位置する大回廊に原子核乾板を設置することで、女王の間よりも近距離からの観測を実施している。

このような近距離かつ多方向からの観測を行うことで、X線CTのように高解像度な三次元イメージを再構成して、発見した空間の詳細な形状を解明することで、考古学的な理解の進展が期待される。

4. 原子炉などの工業プラント診断

宇宙線イメージングの技術は、2011年3月11日に起きた東日本大震災により引き起こされた福島第一原子力発電所（福島第一原発）の1～3号機の炉心溶融の確認にも用いられた。2011年当時、事故の状況の把握や廃炉に向けた施策を講じるためには、原子炉内部の状態を把握することが不可欠であった。しかし、原子炉内外の放射線量は極めて高く、人が原子炉建屋内に侵入して確認する事は極めて困難であった。

私たちは、東芝と共同で2014年から2015年にかけて福島第一原子力発電所2号機および5号機を対象にした宇宙線イメージングを実施した⁵⁾。事故炉である2号機と健全な5号機は、ほぼ同じ大きさの同型の原子炉であることから、この2つの原子炉の状態を比較することで、2号機の炉心状況の把握を試みた。得られた宇宙線イメージを比較したものが図3である。この図は、宇宙線の観測結果から推定される密度の積算値をグレースケールで表現しており、積算密度が大きい領域を黒、小さい領域を白で表している。2号機と5号機のイメージからは、解像度は低いものの、共に原子炉の格納容器および燃料プールの構造が認識された。着目すべき領域は、燃料集合体が装填されている压力容器の内部（炉心部）であり、図3に示すように、2号機の炉心部に確認された積算密度は5号機よりも小さい事を確認した。これは、2号機と5号機の炉心部の状況が異なる事を示しており、これらの結果から、2号機では70%以上の炉心が溶融していることを明らかにした⁶⁾。私たちの観測の他、高エネルギー研究加速器機構（KEK）のグループも後に2号機の観測を行い同様の結果を得てい

る。さらに、1号機および3号機の観測が行われた結果、1から3号機の全ての原子炉で炉心溶融が起きていることが確認され、廃炉工程の策定に資する情報として活用されている。

原子炉のような工業プラントを対象とした研究は、他にも行われており、溶鉱炉の寿命を決める耐火レンガの厚さの測定や焼却炉の内部測定など、プラントメンテナンスへの適用が試みられている。

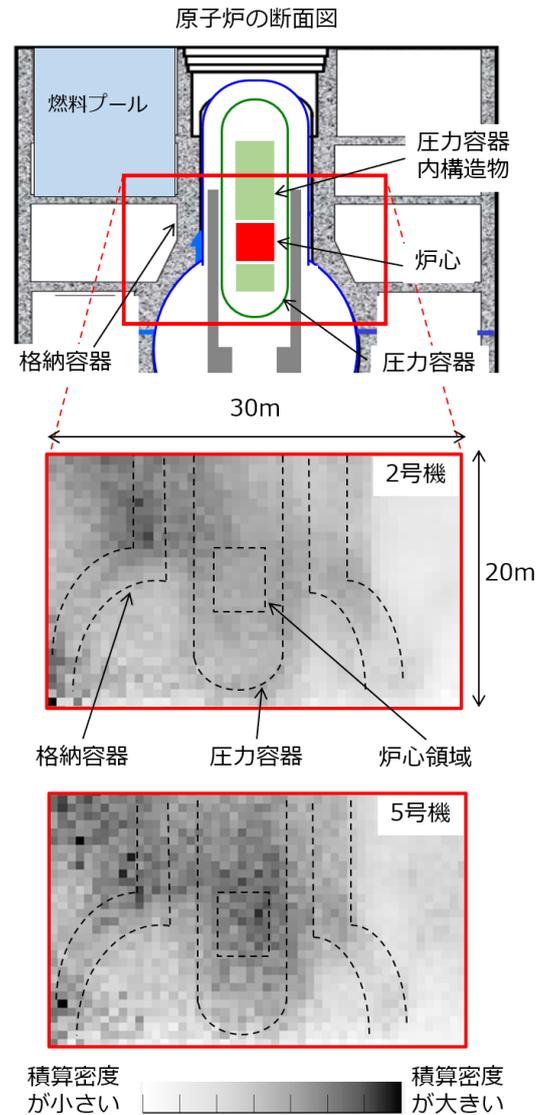


図3 原子炉の宇宙線イメージ

5. 社会インフラ点検と地下空洞調査

高度経済成長期に建造された社会インフラの老朽化や地下空洞による陥没事故、近年の集中豪雨による堤防の決壊などは、我々の社会生活に甚大な被害を引き起こす。これらの事故を未然に防ぐには、構造物や地盤の劣化状態や変状の早期把握が不可欠である。宇宙線イメージングは、これらの課題を解決する技術となり得る。

河川堤防の中には、何度も増改築が繰り返されているものもあり、一つの堤防であってもその増築時期や場所により断面の構造が異なるとされており、現状では、堤体内部の状態を十分に把握した維持管理はなされていない。宇宙線イメージングにより堤体内部の場所ごとの密度分布の測定により内部構造を把握することで、脆弱部を検知できる可能性がある。他の土木構造物としては、盛土やロックフィルダムなども対象となる。2016年の熊本地震により被災した熊本城では石垣が崩落したが、文化財保護の観点から、石垣の内部状況を把握することで耐震性の評価に用いることも可能ではないかと考えている。

地下空洞による陥没事故は、亜炭鉱廃坑や地下壕などの支柱の劣化や大きな地震などをきっかけに空洞が崩落することで生じる。このような地下空洞を検知するためには、空洞よりも深い位置に宇宙線を検出する装置を設置する必要があることから、ボーリング孔を掘削してその中に検出器を挿入することで地下構造を可視化する技術の開発が必要である。私たちは、原子核乾板が備える「小型化が容易であり電源も必要とせずに宇宙線のデータを記録することができる」という特徴を生かしたボーリング検出器の開発を進めている。このほか、地下埋設管の検知や、シールドトンネルの掘削現場で生じる懸念がある空洞の検知も原理的に可能である。

この他にも、床版や橋脚などの橋梁内部の劣化状態の確認や地中の建築基礎の可視化などへの活用も期待されている。

6. まとめ

本稿で紹介したように、宇宙線イメージングは従来の技術では見る事が出来なかった巨大な“もの”や“事象”の観察を可能にする。クフ王のピラミッドの観測により考古学者も予想だにできなかった新たな発見があり、新しい遺跡の調査手法として認知されつつある。原子炉の観測では、従来の技術では確認できなかった原子炉内部の炉心溶融を可視化することができた。また、社会インフラ点検や地下空洞調査などを対象とした技術開発も進められており、土木構造物の劣化状態や地盤を早期に診断・把握することができれば、社会インフラの長寿命化や維持管理に役立ち、安心・安全な暮らしや経済的な損失を抑える事にもつながる。さらに、火山や断層、地下資源の探査などより厚い対象に向けた技術開発も進められている。

今後、宇宙線イメージングの技術は、X線CTのような高精度な三次元密度再構成技術へと高度化され、多分野への適用および実証を通して更なる実用化が進むことで、レントゲン撮影のような社会の基盤技術となることが期待される。

〈参考文献〉

- 1) K. Morishima et al., “DEVELOPMENT OF NUCLEAR EMULSION FOR MUOGRAPHY”, Ann. Geophys. 60 (2017) 0112.
- 2) ScanPyramids, <http://www.scanpyramids.org/> (2021年10月26日現在)
- 3) 名古屋大学プレスリリース (宇宙線による最新の透視技術でエジプト・クフ王のピラミッドに未知の空間を発見), http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20161017_imass.pdf (2021年10月26日現在)
- 4) K. Morishima et al., “Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons”, Nature, 552, (2017) 386.
- 5) 森島邦博, 宇宙線を用いた福島第一原子力発電所の非破壊イメージング, 日本写真学会誌, 79巻1号, 2016.
- 6) 名古屋大学プレスリリース (福島第一原子力発電所2号機原子炉内部の宇宙線ミュオン粒子による透視に成功), http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20150320_esi.pdf (2021年10月26日現在)

Key Word 地形調査, 地質調査, すべり面調査, 地表変動状況調査,
地下水調査, 土質調査, 機構解析

1. はじめに

地すべりは、地形、地質等の素因がある所に、降雨や融雪等の気象条件、切土やダム湛水などが誘因となって発生する。地すべりの素因・誘因は単純ではなく、それぞれの地すべりによって異なることから、対象とする地すべりの特徴や発生機構を的確に把握した上で効果的な対策が実施できるよう、十分な地すべり調査が不可欠である。

地すべり調査は、それぞれの目的に応じて標準的な実施手法が示されており、河川砂防技術基準調査編¹⁾における地すべり調査の構成は表1のようになっている。

表1 地すべり調査の構成¹⁾

地すべり調査
1. 総説
2. 地すべり調査
3. 緊急時の調査
4. 恒久対策実施後の地すべりに対する観測・点検
5. 地すべり経済調査

表1の「地すべり調査」は、地すべり対策を実施する際に地すべり防止計画を策定するために必要な調査である。一方、地すべりによる変状が発生し、危機管理対応が実施される場合は、「緊急時の調査」で対応することとなる。また、対策後の地すべりの運動の活発化の発見や地すべり防止施設の機能維持のために、「恒久対策実施後の地すべりに対する観測・点検」が実施される。「地すべり経済調査」は、地すべり対策事業の事業評価に係る費用便益分析等である。本講座では河川砂防技術基準調査編¹⁾と地すべり防止技術指針及び同解説²⁾を中心として、これらの調査の概要と、その背景にある基本的な考え方、留意点、新しい技術

の活用等について説明する。本講座の前編では「地すべり調査」について説明し、後編では「緊急時の調査」以降を説明する。

2. 地すべり調査の概要

地すべり調査では、地形、地質、すべり面、地表変動状況、地下水、土質等の多岐にわたる項目の調査を行い、地すべりの素因及び誘因などについての発生機構を解析し、効果的かつ効率的な対策を立案する。多数の項目の調査を効率的に実施するために、予備調査、概査、精査に区分して段階的に実施する。予備調査は机上調査、概査は現地踏査であり、それぞれ後に続く調査の事前調査となる。精査は計測機器等を用いた詳細な調査である。

3. 予備調査

予備調査は、地すべりの徴候が現れたために対策を検討する場合等に、広域における地すべり地の分布、地形、地質、地下水状況等の概況を把握することを目的として行う。予備調査では、文献調査と地形判読調査を行う。同様な地形・地質の地域では類似した形態の地すべりが発生しやすいことから、後に続く概査を効率的に実施するためにも、文献調査と地形判読調査によって、対象地域周辺の地すべりの特性を把握しておくことは重要である。

3.1 文献調査

文献調査は、対象地域の地すべり特性を把握す

* 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 上席研究員

ることを目的に、表2に示すような地形、地質、気象、過去の地すべり履歴、近傍の地すべりの発生に関する資料収集と情報の抽出を行う。

表2 文献調査において収集する資料¹⁾

- | |
|-------------------------------|
| 1) 地形・地質等の地盤条件に関する資料 |
| a) 地形図
国土基本図や森林基本図等の大縮尺地形図 |
| b) 空中写真 |
| c) 地質図 |
| d) 地形分類図、土地条件図 |
| e) その他(既存の土質、地質調査報告書等) |
| 2) 過去の災害履歴、近傍の地すべりの発生に関する資料 |
| a) 既存の工事誌、災害調査報告書、土質(地質)調査報告書 |
| b) 学会等の研究論文、報告書 |
| c) 集落分布、土地利用状況に関する資料 |
| d) 地誌、新聞 |
| e) その他(地元住民からの聞き取り) |
| 3) 気象などに関する資料 |
| a) 気象月報 |
| b) 各種観測所の観測資料 |

3.2 地形判読調査

地形判読調査は、空中写真及び地形図等を用いて、広域における地形・地質上の特徴を知ることが目的に、地すべり地形及び地質構造上の特性を調査する。近年は、精度の良いレーザープロファイラーデータを用いて地形判読することが多くなりつつある。

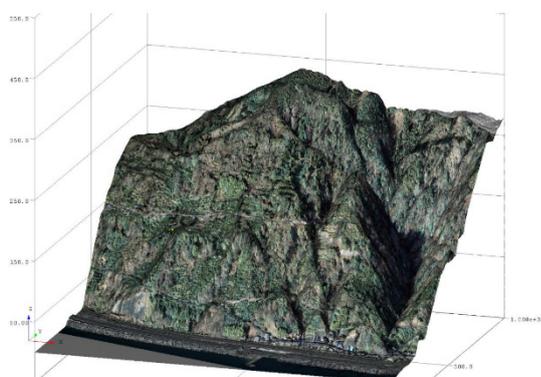


図1 予備調査で活用する BIM/CIM モデルの例⁴⁾

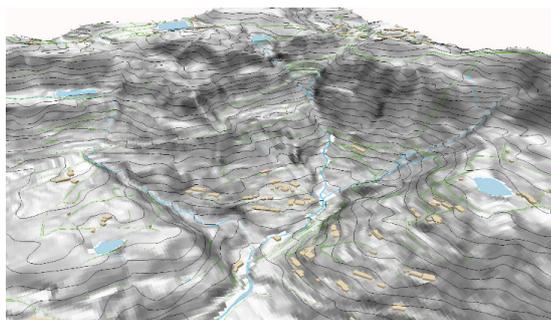


図2 BIM/CIM モデル上で3次元表示した等高線図と斜面勾配図の重ね合わせ図⁵⁾

地すべり地形判読については、等高線図と斜面勾配図の重ね合わせ図³⁾等の地形表現図が適していると考えられる。また、地すべり調査においても図1のように BIM/CIM の活用が行われつつあり⁴⁾、図2のように地形表現図を BIM/CIM モデルと組み合わせて3次元表示すると、等高線パターンによる地形判読に加え、空中写真判読と同様な立体形状の地形判読が、実体視を行わなくても可能である。

4. 概査

概査は、現地踏査と地すべり発生・運動機構の推定からなり、精査を効率よく行うための計画を立案する。また、対策の緊急性を判断し、必要な場合には応急対策の計画を行う。概査においても図3のように BIM/CIM が活用されている例もある。

現地踏査は、①地すべり範囲及び規模等の推定、②微地形や大地形による地質構造の推定、③地質性状と地質構造、地下水分布の推定に留意する。

地すべり発生・運動機構の推定は、現地踏査の結果を踏まえ、①運動形態の推定、②誘因の推定、③今後の地すべり運動予測、④被害の予測を行う。

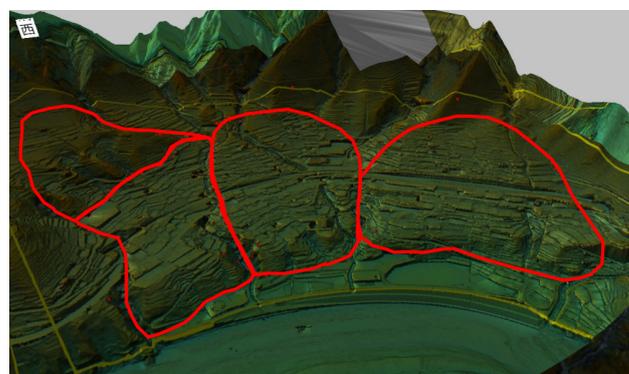


図3 概査で活用する BIM/CIM モデルの例⁴⁾

5. 精査

精査は、予備調査及び概査によって推定した地すべりの発生・運動機構を確認し、より精度の高い地すべりの機構解析をするために行う。精査では、①精査計画の立案、②地形調査、③地質調査、④すべり面調査、⑤地表変動調査、⑥地下水調査、⑦土質試験等を実施する。

5.1 精査計画の立案

精査計画の立案にあたっては、予備調査及び概査結果に基づき運動ブロックと調査測線を設定し、必要な精査項目・位置・種別等の内容を検討する。

精査項目については、表3を参考に、調査で把握すべき内容を踏まえ、必要な調査を実施する。

表3 精査において把握すべき内容と項目²⁾

		精査項目						
		地形調査	地質調査	すべり面調査	地表変動調査	地下水調査	土質試験	環境調査
把握すべき内容	① 地形・地質等に基づく地すべりの型(表参-1参照)	○	○					
	② 地質構造上の弱線帯	○	○					
	③ 運動ブロックの分割と各運動ブロックの到達範囲	○			○			
	④ 各運動ブロックの運動状況			○	○			
	⑤ 地すべり土塊の面積および量	○		○				
	⑥ すべり面の形状および位置		○	○				
	⑦ 地下水の分布・流動状況					○		
	⑧ 物性定数・その他		○				○	
	⑨ 地すべり地の自然環境	○						○

一般には、一体となって移動している運動ブロック毎に解析や対策計画立案を行うことから、予備調査及び概査の結果に基づき、必要に応じて地すべりをいくつかの運動ブロックに分割する。

調査測線は、地質調査、地下水調査等の実施位置を決定する基本となる測線であり、運動ブロックごとに設定する。地すべりの幅が広い場合には、調査測線を複数設定する。

5.2 地形調査

地形調査においては、地すべり対策の基礎資料となる地形図を作成する。地形図は、地すべり地及びその周辺地域の必要な範囲を対象として、地すべり運動ブロックの設定ができるような精度と範囲で作成する。近年は、精度の良いレーザープロファイラーデータによる地形図が作成されることも多くなっている。

5.3 地質調査

地質調査は、概査において推定した地すべりの発生・運動機構を確認することを目的として、地質、土質、すべり面等の状況を把握する。地質調査はボーリング調査を基本とし、必要に応じて物理探査等を行う。地質調査では、地すべり変動に関係すると考えられる脆弱な地層、すべり面の分布、主要な抵抗部、地すべりの移動範囲を規制する抵抗部、支持力の大きな地層などを把握する。

ボーリング調査は、地中から深度順に直接サンプルを採取し、地すべりのすべり面や地質及び地

質構造を明らかにするために実施する。そのため、オールコア採取を原則とし、品質の高いサンプルを採取することが重要である。ボーリング調査の結果の整理においては、地すべり地の地質、土質やすべり面を検討する上で必要な項目について観察した所見をボーリング柱状図に取りまとめる⁶⁾。

物理探査は、特に広大な地すべり地における地層の分布状況等を把握する場合に有効であり、ボーリング調査による直接サンプリングの結果と組み合わせる評価を行う。

5.4 すべり面調査

すべり面調査は、すべり面の位置(深度)を特定するための調査である。ボーリングコア観察とパイプ歪計・孔内傾斜計等による計測等の結果を併せて総合的にすべり面の判定を行う。

ボーリングコアの観察にあたっては、地質・土質、色調、風化、変質、破砕度、硬軟・稠度等について観察を行い、図4に見られるようなすべり面となる弱層(粘土、礫混じり土砂、破砕部等)や、図5のようなすべりの痕跡(鏡肌、条痕等)の存在、図6に示す地すべり斜面の構成(地すべり土塊、すべり面、基岩)等に着目し、総合的にすべり面を判定する。

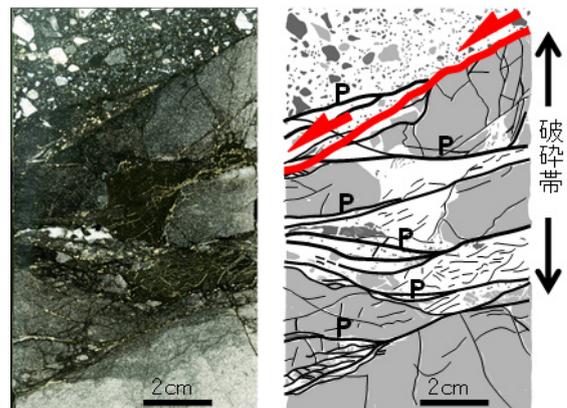


図4 すべり面付近の破砕等の微細構造(樹脂固定すべり面標本による観察)⁷⁾



図5 鏡肌と条痕



図6 地すべり斜面の構成²⁾

計測機器によるすべり面の調査では、パイプ歪計や孔内傾斜計が多く用いられる。

パイプ歪計による計測は、塩ビ管等のパイプにひずみゲージを通常1m間隔で貼り、ボーリング孔内に設置してゲージの歪を測定する方法である。

孔内傾斜計による計測は、ボーリング孔内にガイド管を設置し、傾斜計を挿入して等間隔でガイド管の傾斜角を測定する方法である⁸⁾。孔内傾斜計による計測では、ほぼ連続的にボーリング孔の曲がりによる形状の変化を追跡することが可能である。測定結果は、孔底からの傾斜量の積分で表現され、その曲りが著しくかつ歪が累積する位置をすべり面と判定する(図7)。地すべりが進行してガイド管の変形が大きくなると傾斜計が変形箇所を通過できなくなり、それより深い深度に傾斜計を挿入できなくなる。現在は、従来型に比べて数倍の通過性を有する小型挿入式孔内傾斜計も開発されている⁹⁾。

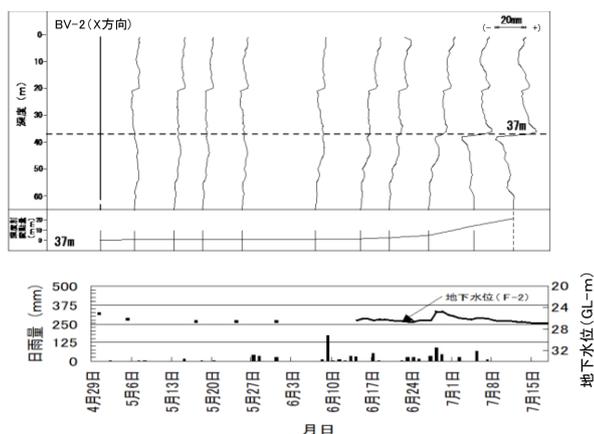


図7 孔内傾斜計による変動累積図²⁾

5.5 地表変動状況調査

精査で行う地表変動状況調査は、地すべり発生・運動機構を把握することを目的に、地表及び構造物に発生した亀裂、陥没、隆起等の変動を計測す

る。一般的な地表変動状況調査の方法としては、地盤伸縮計、測量(地上測量、GPS測量、LP測量)、地盤傾斜計等がある。観測期間は融雪、梅雨、台風期等をカバーするように計測し、降雨等に対する地すべりの移動特性が把握できるように、1年以上の長期観測を継続して実施することが望ましい。調査の結果は、縦軸に累積変動量、横軸に時間を取り、降水量または地下水位と対比できる図に整理する。図8に地盤伸縮計測定結果の例を示す。

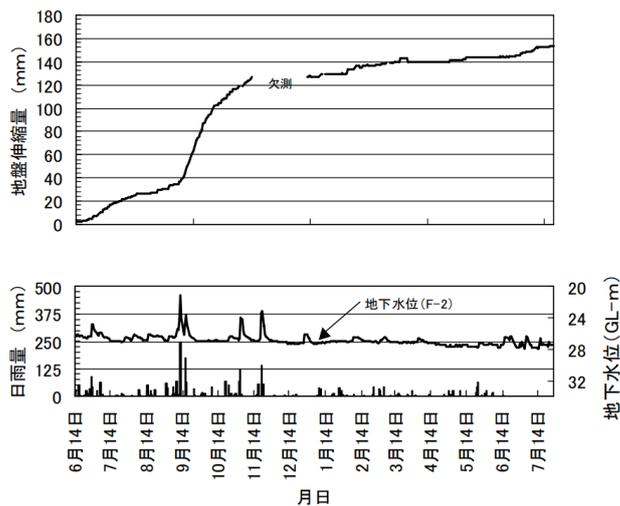


図8 地盤伸縮計測定結果の例²⁾

地すべりの運動方向が不明瞭な場合や運動の激しい場合には、測量による調査が実施されることもある。図9に2時期のレーザープロファイラー測量の差分による移動ベクトルの例を示す。

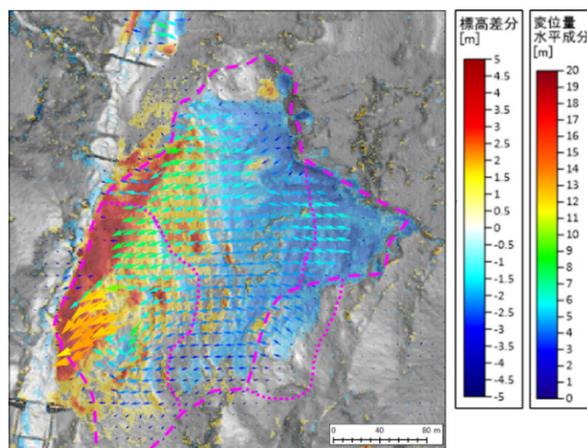


図9 2時期のレーザープロファイラー測量の差分による移動ベクトルの例

5.6 地下水調査

地下水調査は、斜面の安定解析や対策工の検討の基礎資料を得ることを目的に、地すべり地への地下水の供給経路、地すべり地内における地下水

の分布・流動傾向，すべり面に作用する間隙水圧等を調査する。地下水調査は，目的に応じて，地下水位観測，間隙水圧観測，ボーリング掘進中の水位変動測定，地下水検層等を行う。

表4 地下水調査の目的と項目²⁾

目的	調査項目
すべり面に作用する間隙水圧の把握	間隙水圧測定，地下水位測定
地山の地下水位変動と降雨との相関等の検討	間隙水圧測定，地下水位測定
地山の地下水流動層の把握	地下水検層，簡易揚水試験
地山の地下水流動経路の把握	地下水追跡，水質分析
地山の地下水分布の把握	電気探査，地温探査，水温調査，水質分析
地山の透水性の把握	透水試験，簡易揚水試験

すべり面に作用する間隙水圧は，直接的に間隙水圧計等によって計測することが望ましいが，技術的・時間的に難しいことが多く，ボーリング孔内の地下水位観測で代用されることが多い。地下水観測を行う観測孔には，全区間ストレナ孔と部分ストレナ孔¹⁰⁾があり，複数の地下水帯や漏水層がある場合には，全孔ストレナ孔による観測水位は正確な水位を示さないことから，部分ストレナ孔で計測することが望ましい。

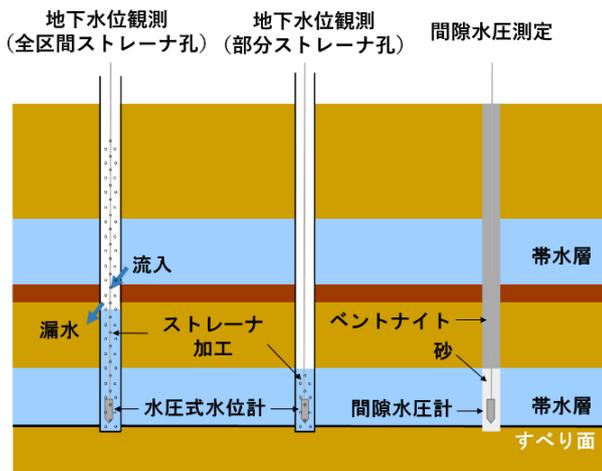


図10 地下水位観測の種類

5.7 土質調査

土質調査においては，すべり面強度や対策工設計に必要な地盤強度を把握する。すべり面強度の把握のための土質試験には，一面せん断試験・三軸圧縮試験・リングせん断試験等があり，必要に応じて適切な試験を行う。また，対策工の設計に必要な地盤強度を把握するためには，孔内水平載荷試験，標準貫入試験等が行われる。

6. 防止計画

地すべり調査結果を対策計画に反映させるため

に，地すべりの機構解析を行う。地すべりの機構解析は，地すべり発生の素因，地すべり発生の誘因，地すべりブロックの範囲・規模，すべり面形状・位置，地下水状況等の地すべり発生・運動機構について考察し，地すべり運動ブロック図（図11）と地すべり断面図（図12）を作成する。解析項目と利用する調査を表5に示す。また，対策計画についての考え方と各調査結果を添付する。

表5 解析項目と利用する調査²⁾

	利用する調査							
	予備調査	現地踏査	地形図の作成	地質調査	すべり面調査	地表変動調査	地下水調査	土質試験
解析項目	地すべり運動ブロック図の作成							
	地すべり運動ブロック図	○	○	○			○	
	土地利用・構造物等	○	○					
	地すべり地形の特徴		○	○				
	各種調査観測位置と結果				○	○	○	○
	すべり面等高線図		○	○	○	○	○	
	地すべり断面図の作成							
	地質断面図	○	○		○			
	地下水位分布		○					○
	土地利用・構造物等	○	○					
地すべり断面形状の特徴		○	○	○	○			
各種調査観測位置と結果				○	○	○	○	
地すべりの機構解析	○	○	○	○	○	○	○	

地すべり運動ブロック図は，解析の基本資料とし，地形図上に運動ブロックを記入する。

地すべり断面図は，地質断面図上に調査結果を記入する。作成方法としては，原則として地すべり運動方向に一致する主測線に沿った地すべりの地質断面図を作成し，推定されたすべり面や地下水位，亀裂の位置等を記入する。地質断面図は，ボーリング，その他の調査結果を十分検討した上で記載する。また，必要に応じて副測線や地すべりの横断測線についても断面図を作成する。

機構解析におけるBIM/CIM活用のメリットは，機構解析を行う上で必要となる多数の要素（例えば，地すべりブロックの範囲・規模，すべり面形状・位置，地下水状況等）の配置や要素間の相互関係の可視化，いわゆる「見える化」が特に重要と考えられる。地すべり機構解析は，地形，地質，地下水，移動状況に関する多種多様な調査データを基に，地すべりブロック形状やすべり面形状を決定し，地すべりの素因・誘因を特定し，効果的・効率的な地すべり対策の立案に繋げていくという，対策計画を決定するために重要なプロセスである。機構解析に必要な多種多様かつ多量のデータを頭

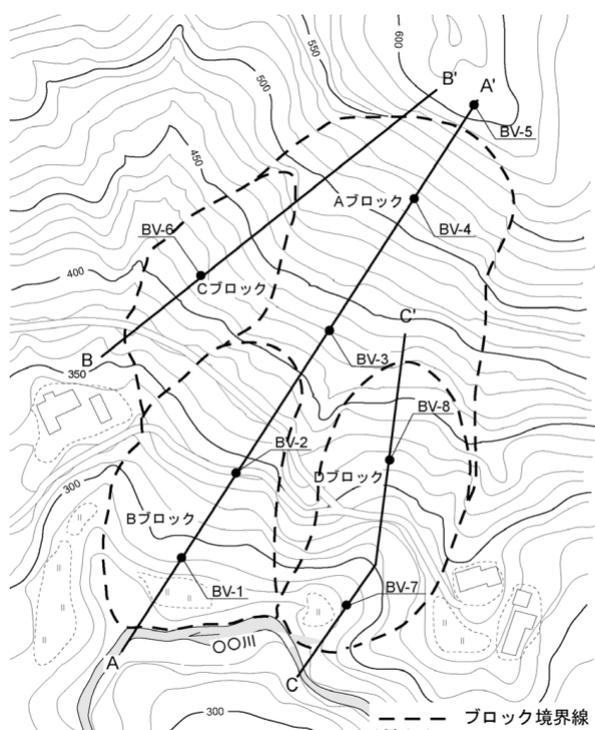


図11 地すべり運動ブロック図²⁾

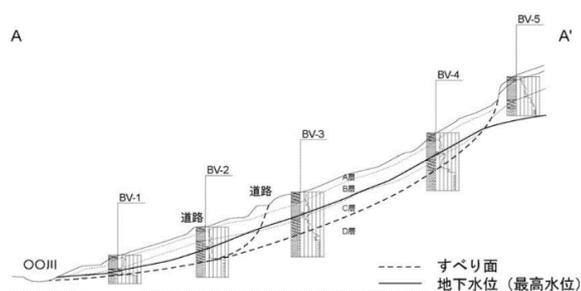


図12 地すべり断面図²⁾

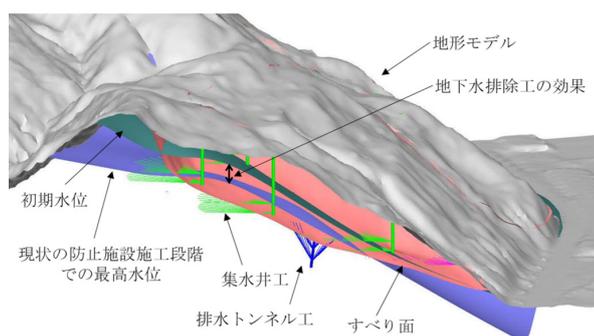


図13 機構解析で活用するBIM/CIMモデルの例⁴⁾

の中で3次元的な地すべりのイメージとして組み立てることは、技術的に高度な作業であるが、この作業をBIM/CIMで行い、「見える化」することで、理解が容易になり、誤認識の排除にもつながるメリットがあると考えられる。また、地すべり機構解析で用いられるBIM/CIMモデルは、その後の施設配置計画や対策工の効果評価でも用いられる。

図13は、対策工の施工位置、対策後の最高水位、対策前の初期水位等をBIM/CIMモデルを用いて表現することにより、地すべり防止施設の効果の視覚的な把握が容易になっている。

7. おわりに

今回は「地すべり調査」について概説した。次回(後編)では、緊急時の調査等について説明する予定である。

〈参考文献〉

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局:「河川砂防技術基準 調査編」, 2014.4
- 2) 国土交通省砂防部, (独) 土木研究所:「地すべり防止技術指針及び同解説」, 2008.4
- 3) (国研) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 土木研究所資料第4344号「航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き(案)」, 2016.10
- 4) 国土交通省:「BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編」, 2021.3
- 5) (国研) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 土木研究所資料第4412号「地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料」, 2021.4
- 6) (一社) 全国地質調査業協会連合会社会基盤情報標準化委員会:「ボーリング柱状図作成及びボーリングコア取扱い・保管要領(案)・同解説」, 2015.7
- 7) (独) 土木研究所, ハイテック(株), (株) 高知地質調査, (株) 地圏総合コンサルタント, 応用地質(株), (株) 建設技術研究所: 共同研究報告書第449号「すべり層のサンプリングと認定方法に関する研究 共同研究報告書」, 2013.1
- 8) (独) 土木研究所, 応用地質(株), 坂田電機(株), 日本工営(株):「地すべり地における挿入式孔内傾斜計測マニュアル」, 理工図書, 2010.7
- 9) (国研) 土木研究所, 応用地質(株), 多摩川精機(株), 坂田電機(株), (株) オサシ・テクノス: 共同研究報告書第530号「長期観測を可能にする地中変位観測技術の開発」, 2021.7
- 10) (独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 土木研究所資料第4283号「部分ストレナ孔による間隙水圧観測の手引き(案)」, 2014.5

氾濫原における調査ボーリング

とりたに りょういち
鳥谷 亮一*

K
ey Word

調査ボーリング, 圧密沈下, 現場管理, 氾濫原

1. はじめに

私が地質調査業へ就いて25年が経とうとしている。現在では主に現場管理、報告書のとりまとめをしているが、場合によっては原位置試験等の現場作業も行っている。業務エリアは、愛知・岐阜・三重県を中心に静岡・長野県を含めた中部地方としており、私の地元である三重県で実施した業務について紹介する。

2. 調査概要

(1) 調査目的

本地域（三重県南部）は降雨量が多い地域であり、過去に何度か豪雨災害が発生し、河川の氾濫により冠水している。交通機能確保のため県道の嵩上げが事業として進められ、本調査では道路改良（盛土）に伴う設計・施工に必要な地盤情報を得ることを目的とした。

(2) 調査内容

- ・調査ボーリング（孔径86～66mm）：
5箇所 計L=65m
- ・標準貫入試験 5箇所 計n=65回
- ・シンウォールサンプリング 1箇所 2試料
- ・室内土質試験 1式

3. 調査概要

(1) 地形

当地域は、紀伊山地の山地地形が大半を占めるが、熊野灘に沿った丘陵と小規模な台地・段丘や低地がそれぞれの地質条件と関連して発達する。

調査地西側の山地は、中央構造線南側の外帯に属

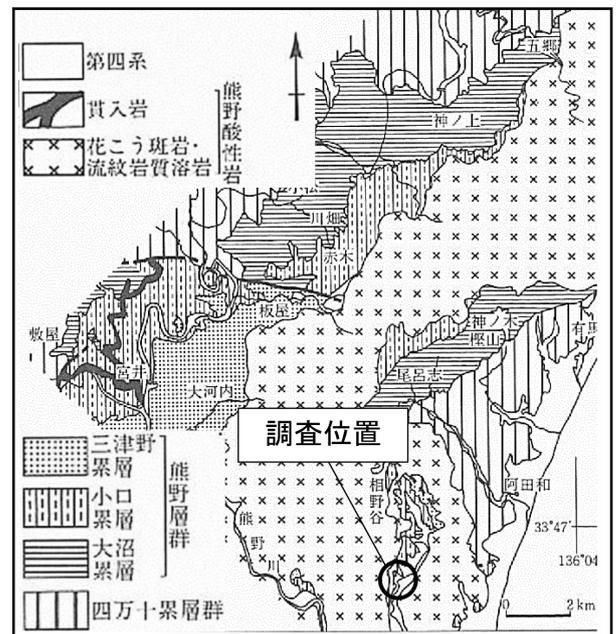


図1 熊野層群分布図¹⁾

表1 調査地周辺の地質系統表²⁾

地質時代	地層名	主な岩質	表層地質区分
第四紀	完新世	沖積堆積物	未固結堆積物
	完新世	段丘堆積物	
	更新世	古土石流堆積物	
第三紀	熊野酸性火成複合岩	花崗斑岩	固結堆積物及び火成岩
		凝灰岩	
	熊野層群	流紋岩	
中生代	四万十累層群	泥岩・砂岩・礫岩	
		音無川層群	
	日高川層群	砂岩・泥岩	

*株式会社東海環境エンジニア 技術部

する紀伊山地の一部で、第三紀の熊野層群や、それを貫入した熊野酸性火成岩類（主に花崗斑岩、流紋岩）の地質条件に関連した地形特性を持っている（図1、表1）。本調査地は、これらの山地と丘陵間を流下する相野谷川沿いに形成された河谷低地に該当し、氾濫原を主体とした狭長な谷底平野に位置する（図2、図3）。

(2) 地質

本地域は外帯に属し、白亜紀～古第三紀にわたる四万十累層、新第三系に属する熊野層群、これらを貫く熊野酸性火成複合岩が分布する。第四系は、海岸沿いの中・低位の海成段丘堆積物、河川沿いの河岸段丘堆積物、低地での後背湿地の海浜堆積物及び谷底平野に現河床堆積物が分布する。

調査地背後の山体は、熊野酸性火成岩類および熊野層群小口累層の分布域に該当する。熊野酸性火成岩類は、紀伊半島東部域に分布する。流紋岩・凝灰岩・花崗斑岩から構成され、花崗斑岩の分布が大半を占める。花崗斑岩は北岩体と南岩体に分かれ、両者を連結するように流紋岩・凝灰岩が分布する。熊野層群小口累層は、三重県南西部から和歌山県南西部にかけて広く分布し、塊状のシルト岩・砂岩と泥岩の互層からなる。

相野谷川沿いに形成された谷底平野には、泥質の砂泥に富んだ後背湿地性の軟弱な堆積物が分布する。

4. 調査結果及び考察

本調査区間は、図4に示すように3つの埋没谷を横断する。谷の深さは谷幅と相関を持ち、No5孔で最も深くなっている。谷を埋積する堆積物は、主に腐植物を混じる軟弱な粘性土（Ap1層）からなり、最厚域で15～20m程の層厚を有する。一方、尾根が迫り出した区間（No2、No4孔）では、浅所から当地域の基盤である熊野層群の泥岩が分布し、軟弱層の層厚は1m内外と薄くなっている。

Ap1層のN値は1～5の範囲にあり平均値は2.4程度を示す。本層を対象とした室内土質試験の結果は、以下の通りである。

- 土粒子の密度： $\rho_s=2.44\sim 2.60\text{g/cm}^3$
- 含水比： $w_i=95.2\sim 112.1\%$
- 土の分類： $(\text{OH-S}), (\text{CH-S})$
- 液性限界： $w_L=89.4\sim 154.2\%$
- 塑性限界： $w_P=38.5\sim 87.2\%$
- 湿潤密度： $\gamma_f=1.366\sim 1.427\text{g/cm}^3$

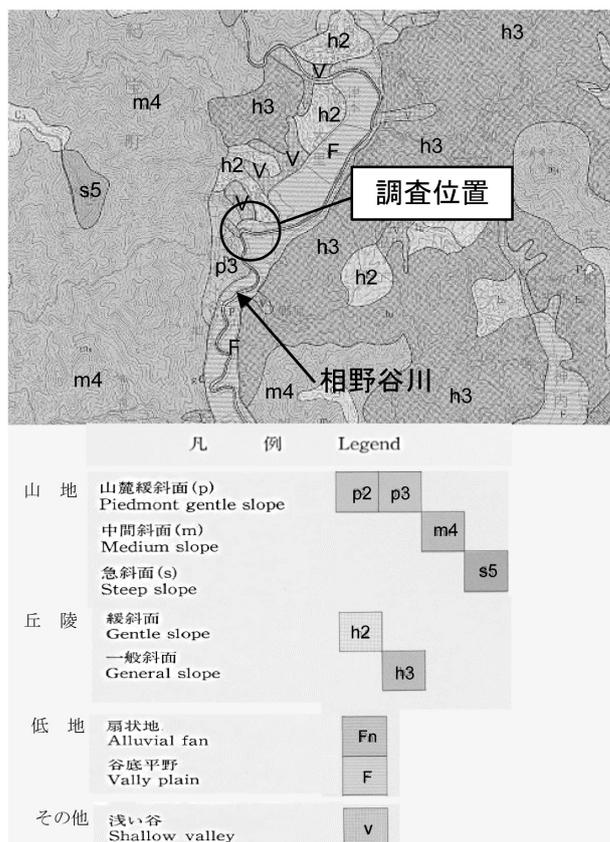


図2 調査地域の地形分類図³⁾



図3 調査地域の表層地質図⁴⁾

という特性がある。Ap1層に区分した粘性土の試験値は、沖積粘性土～腐植土がもつ一般値^{5) 6)}の範疇にある。

調査区間では、道路改良に伴い盛土が計画されており、No5孔で実施した圧密試験によれば、現応力下では過圧密粘土に区分(図5)されるが、盛土の規模によってはAp1層の圧密沈下が懸念される。また、Ap1層内の腐植物の混入度合は不規則に変化し、図6に示すようにe-logp曲線に差異が見られる。腐植物の混入状況は地点によって不規則であるため、沈下量等の検討を行う場合は、図6に示したe-logp曲線の平均値を採用する等の配慮が必要と思われる。

なお、圧密沈下の試算を行った結果、最大沈下量はS=16cm程度であった。このことは、対象土が現況で過圧密状態にあるため、計画される盛土に対して沈下量は軽微なものとなったと考えられる。

5. 終わりに

本業務では、予算の都合からサンプリングを行う箇所が1箇所に限定され調査区間全体に試験値を準用したが、本来であれば複数個所でサンプリングを実施し、試験値の妥当性確認が必要であろう。(本調査ではN値やコア判定等から同種の粘性土であると評価し試験値の準用を判断した)

また、地質調査(ボーリング)を行う上で、現地状況が安全・工程管理の重要な要素となり、今回のような幅狭な道路の場合(作業状況を写真1に示す)、事前に機材の搬入方法や作業区域等を念に計画し、交通障害等の地元トラブルを回避することが肝要であると考えられる。

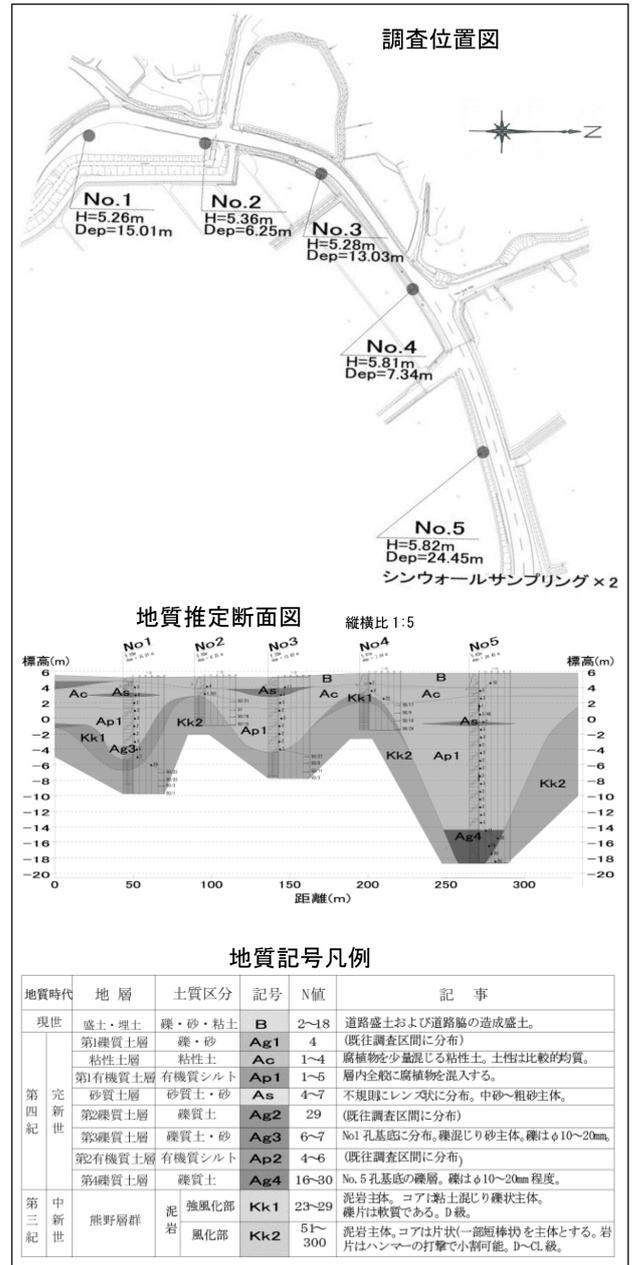


図4 調査区間の地質推定断面図



写真1 ボーリング調査概観

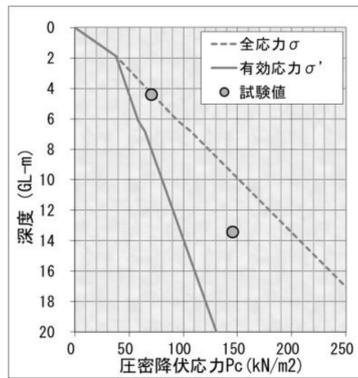


図5 深度と圧密降伏応力の関係 (Ap1層)

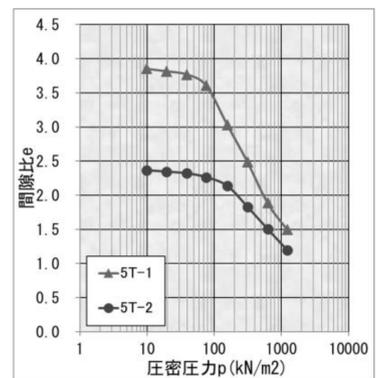


図6 各試料のe-logp曲線 (Ap1層)

あとがき

地質調査は、社会整備資本の最上流に位置する必要不可欠な工程であると考えており、地質調査から得られる技術的所見は、合理的かつ専門的な知識の活用が要求されるため、技術力の向上に一層尽力するとともに、好奇心を失わずに楽しみながら業務に携われればと思っている。最近ではドローンや遠隔カメラ等によりフィールドワークの効率化が図られているが、同時に新たな知識の更新とハード・ソフトウェアに順応する対応力が求められている。年々物忘れが増えていくことを実感しているが、身体が動く限りこの仕事を“楽しみながら”続けていきたい。

〈参考文献〉

- 1) 日本の地質『中部地方Ⅱ』編集委員会編：「日本の地質5 中部地方Ⅱ」pp141, 共立出版株式会社オーム社, 1988.12
- 2) 三重県企画振興部行政調整課：「土地分類基本調査 十津川・木本・新宮・阿田和」pp17, 中央地図株式会社, 1997.3
- 3) ,4) 三重県企画振興部行政調整課：「土地分類基本調査 図 十津川・木本・新宮・阿田和」, 中央地図株式会社, 1997.3
- 5) 小松田精吉著：「土質調査の基礎地質」, 鹿島出版会, 1984.1
- 6) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会：「地盤材料試験の方法と解説 第一回改訂版」, 地盤工学会, 2020.12

大地の恵み

沖縄の地盤と農業用水

筆者が初めて那覇空港に降り立った1997年から約四半世紀が経過した。その多くの期間を沖縄県内で寝起きしてきたが、断水などの給水制限を受けた記憶がない。来沖前、「沖縄は水事情が良くない」ことを聞き知っていたので、暫くの間給水制限が無いのが少々不思議だったが、それはダム建設や導水管敷設などが進んでいたからだった。1997年以降の直轄事業だけでも、羽地ダム（2004年竣工）、大保ダム（2010年竣工）が建設され、水事情はさらに改善されていった。

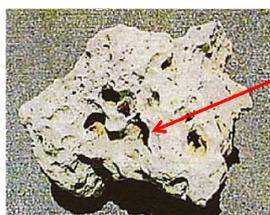
沖縄県は我が国としては珍しく人口増加している地方であるが、1994年以降県として給水制限を実施していないという事実は、ひとえに国・県の各種建設事業の先見性・計画性の正しさを証明していると思われ、沖縄に住まう一地質技術者として頭が下がる想いである。

他方、農業用水の事情はどのような推移をしてきたのだろう。断水など住民の記憶に残るイベントが無いため認識しづらいが、そこには、「南西諸島特有の地質」と「地下ダムの建設」とが密接に絡み、多くの農業用水を確保してきた歴史がある。

以下、それらについての情報を紹介する。

1. 南西諸島特有の地質と地下水

鹿児島県トカラ列島の小宝島以南の島々に点在する第四紀の石灰岩（通称 琉球石灰岩）は、非常に多孔質な地質である（写真1）。



この穴から水が地下に浸透し海に流出する。

写真1 琉球石灰岩の写真¹⁾

琉球石灰岩は多孔質のため水捌けが非常に良い地質であり、豪雨でも洪水は起きにくい。しかし空隙・空洞が発達するため保水性が悪く、降った雨のほとんどが地層内に貯まることなく短時間のうちに海に流出する、といったデメリットを有する。

農業用水として地下水を使用したいと思って井戸を掘っても、表層を琉球石灰岩に覆われる島域では水が確保しにくい。そのような島域では天水任せの営農を長い間強いられていた。1971年の大干ばつ時には、少雨環境に強いサトウキビですら枯れたようである。

2. 南西諸島の地下ダムの仕組み

海に流れ出る天水を地下で堰き止め、琉球石灰岩内の空隙に貯めそれを利用しようとするものが、南西諸島における主な地下ダムの仕組みである（図1）。

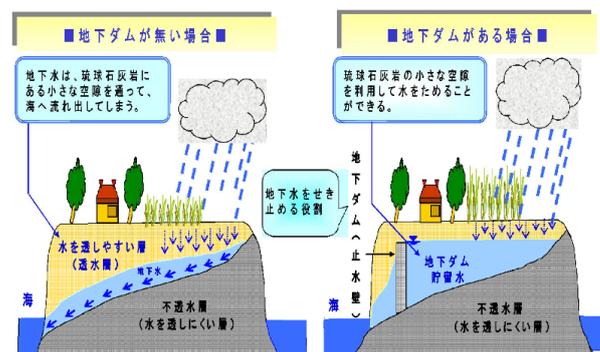


図1 南西諸島の主な地下ダムの仕組み¹⁾

琉球石灰岩の直下に比較的均質な難透水層（例えば、新第三紀島尻層群泥岩など）が分布している地域は地下ダムの適地といえる。一部例外はあるものの、地域要望があり、かつそのような地質層序を有す地域に、国や県が地下ダムを計画・建設していった（表1）。

表1 南西諸島の地下ダム一覧²⁾

県名	島名	地下ダム名	事業	市町村名	施工年度	総貯水量(m ³)	堤高(m)	堤長(m)	止水壁工法
沖縄県	宮古島	皆福(ミナフク)	国営調査	宮古島市	S52~S56	700	16.5	500	注入
		砂川(スナガワ)	国営/公団営 ^(※1)		S63~H6	9,500	50.0	1,677	SMW・注入
		福里(フクサト)	公団営 ^(※2)		H6~H10	10,500	27.0	1,790	SMW・注入
		仲原(ナカハラ)	国営		実施中	10,500	55.0	2,350	SMW・注入
		保良(ボラ)			実施予定	2,200	26.0	2,600	未定
	沖縄本島	米須(コメス)	国営	糸満市	H5~H15	3,457	69.4	2,345	SMW・注入
		慶座(ギイザ)		八重瀬町	H10~H14	389	53.0	970	SMW・注入
		与勝(ヨカツ)	県営	うるま市	H9~H19	3,963	67.6	705	SMW
	伊是名島	千原(センバル)	国営	伊是名村	H11~H20	790	14.0	479	鋼矢板
伊江島	伊江(イエ)	国営	伊江村	H16~H28	1,408	59.2	2,576	SMW・TRD	
久米島	カンジン	県営	久米島町	H7~H17	1,580	52.1	1,088	SMW	
鹿児島県	喜界島	喜界(キカイ)	国営	喜界町	H5~H13	1,800	35.0	2,281	SMW
		喜界第2	国営(調査中)		実施予定	調査中	調査中	調査中	未定
	沖永良部島	沖永良部(オキノエラブ)	国営	知名町	実施中	1,085	48.2	2,414	SMW・注入

※1) 農用地整備公団 ※2) 農用地整備公団(後 緑資源公団)

注) 実施中・実施予定の数値は計画段階の数値

3. さまざまな地下ダムのタイプ

一言に地下ダムといっても、その目的、構造、貯留の仕方等によって、さまざまなタイプが存在する(図2)。

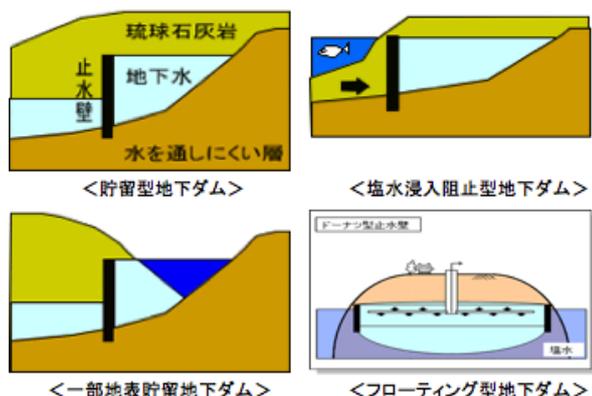


図2 南西諸島の地下ダムの主なタイプ³⁾

以下、筆者が携わったことのある地下ダムの一部を紹介する。

[溝淵 年哉：中央開発株式会社]

〈米須地下ダム…沖縄本島〉

タイプ；塩水浸入阻止型
貯留層；第四系 琉球石灰岩
難透水層；新第三系 島尻泥岩

〈伊江地下ダム…伊江島〉

タイプ；貯留型
貯留層；第四系 琉球石灰岩と基底部層
難透水層；中～古生界 伊江層粘板岩等

〈仲原地下ダム…宮古島〉

タイプ；貯留型
貯留層；第四系 琉球石灰岩
難透水層；新第三系 島尻泥岩

4. おわりに

地下ダム建設による農業用水の安定供給は確実に進んでおり、営農者に“そのメリットが享受されてきた”との実感がある。県内各地の道の駅などに多くの種類・量の地産野菜が並んでいるのは、筆者が来沖した当時にはあまり見られなかった光景である。

世界的に見るとレアな地下ダムを多く建設し、沖縄の農業用水事情を向上させてきた国・県等の農業土木の技術力は、“大地の恵み”を日本だけでなく他の亜熱帯～熱帯の島嶼国の人々にももたらせるだけの高いレベルを有しているものと考えられる。今後も我が国全体の地下ダム建設の技術力が維持・向上していけるよう、筆者も技術研鑽していこうと強く思う次第である。

〈参考文献〉

- 1) 内閣府沖縄総合事務局：「沖縄における水源開発の必要性」
<http://www.ogb.go.jp/-/media/Files/OGB/nousui/nns/c3/kouhoupaneru/suigenkaihatu.pdf>
- 2) 土地改良建設協会：「宮古農業を支える 五つの地下ダム」
https://dokaikyo.or.jp/kaishi_new/307t_04.pdf
- 3) 内閣府沖縄総合事務局農林水産部：「地下ダム」
<http://www.ogb.go.jp/o/nousui/nns/c2/page1-1.htm>

各地の博物館巡り

大阪府大阪狭山市

大阪府立狭山池博物館



狭山池博物館

はじめに

大阪府立狭山池博物館は、1,400年の歴史を刻む日本最古のダム式ため池である狭山池について土木遺産の保存と公開を目的として、2001年に開館しました。博物館の建物は、建物全体がコンクリート打ち放しの巨大な直方体であり、狭山池全体から見渡すことができます。建物内部には巨大な堤の断面や取水塔を収納展示しており、吹き抜けが多用されています。常設展示室では、時代順に7つのゾーンに分けて、水と大地との関係性を狭山池と出土文化財を中心に展示されています。

常設展示

本博物館では以下の7つのゾーンに区分して展示されています。

■第1ゾーン

高さ約15m、幅約60mの堤の断面が移築展示されています。

■第2ゾーン

長さ約60mにわたって、この飛鳥時代の東樋と江戸時代の東樋が展示されています。

■第3ゾーン

奈良時代に行われた2回の改修に関する情報を解説しており、開発事業で使われたと考えられる道具類が展示されています。

■第4ゾーン

鎌倉時代の改修に関する情報を詳しく解説し、石樋に転用された石棺などが展示されています。

■第5ゾーン

堤防の裾を固めるための木製枠工や灌漑範囲と水の流れを再現した巨大な水利模型、船材や船大工の技術が使われた西樋の壁板が展示されています。

■第6ゾーン

明治時代以降に国、大阪府が共同で狭山池の改修を進めることになる。大正・昭和の改修でつくられた取水塔が移築して展示されています。

■第7ゾーン

平成の改修後の狭山池の機能と役割について詳しい解説が行われています。

土木遺産としての狭山池

本博物館のトピックスとしては、平成の改修時に保存された築堤履歴や盛土材料が確認できる堤体盛土の断面、江戸時代の樋管と飛鳥時代の樋管などその時代に作られた樋管が保存されています。また、建設当時の時代に使用されていた工具類も展示されています。

○堤体の建設

堤体の断面模型を写真1、堤体の建設履歴を写真2に示します。堤体の左下部分が最も古い狭山池の堤体部分であり、その上位に奈良時代の改修履歴が確認できます。築堤材料の違いによりそれぞれの改修履歴が確認でき、また、2回の地震の痕跡が確認されました。

飛鳥時代と奈良時代に造られた堤は、樹木の小枝を敷き並べて土を盛る「敷葉工法」で造られています。盛土のすべりと崩れを防ぎ、丈夫な堤を造る土木技術です。

写真3に飛鳥時代の盛土からはぎ取った敷葉層を



写真1 堤体断面の模型

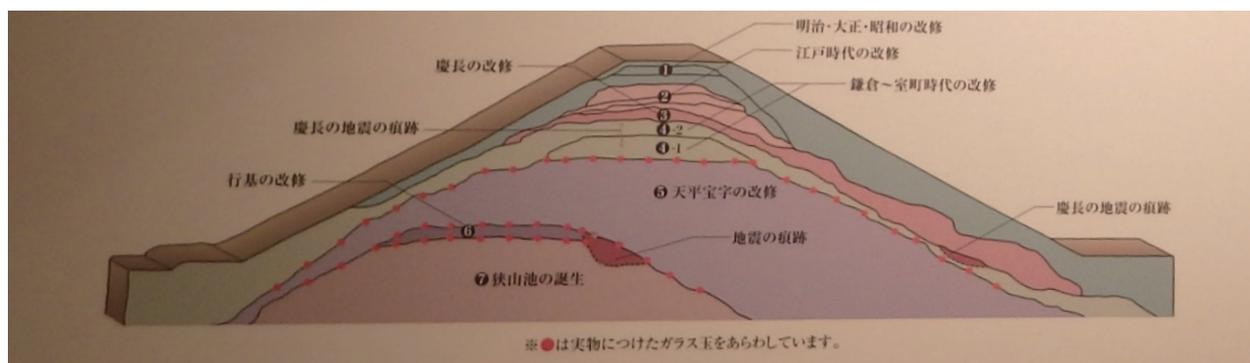


写真2 堤体の建設履歴

示す。飛鳥時代にすでに現在の補強土工法（ジオテキスタイル）といえる技術が使われていたようです。



写真3 保存した敷葉層

○樋管

飛鳥時代の樋管は、コウヤマキの大木をくり抜いて管をつないで造られており、江戸時代になると板材に釘を打って組んでいました。これらも発掘されて博物館に保管されています。

鎌倉時代になると木製の樋管に加えて、取水部および排水部の木材が腐りやすいことから、石製の樋管を設置しています。これらの石製の樋管は、古墳時代の石棺を加工して転用されました。

○木製の設備

堤体の下端には裾を固めるための木製枠工や船材を用いた船大工の技術も使われていました。当時から技術のコラボレーションが行われていました。

○狭山池の歴史

同博物館では、狭山池の土木遺産として国指定の重要文化財や近隣に位置する古墳時代の城山遺跡で発掘された土器類の展示も行われています。

狭山池博物館

●所在地・電話番号

〒589-0007 大阪府大阪狭山市池尻中2丁目
TEL：072-367-8891

●入館料 無料

●開館時間

午前10時から午後5時まで（入館は午後4時30分まで）

●休館日

毎週月曜日（月曜日が祝休日の場合は翌日）、
年末年始（12月28日～1月4日）

●アクセス

南海電鉄難波駅より高野線にて大阪狭山市駅下車、西へ約700m。一般の車両は狭山池の北堤駐車場をご利用ください。



[中央開発株式会社 関西支社技術部地盤環境課 岡 伸次]

立山連峰の氷河群 内蔵助氷河・三ノ窓氷河（富山県）

1. 現存する氷河

氷河とは、「重力によって長期間にわたり連続して流動する雪氷体」（白岩, 2005）, あるいは「陸上で重力によって常に流動している多年性の氷雪の集合体」（上田, 2014）と定義され, 厚い氷体を持つこと, 氷体が流動していることがその条件となります。

これまで日本には存在しないと言われてきた氷河が, 飛騨山脈, 立山連峰の3箇所に現存していることが, 富山県立山カルデラ砂防博物館の研究チームにより2012年に発見されました（福井・飯田, 2012）。立山（3015m）東面の御前沢氷河, 劔岳（2999m）東面の三ノ窓氷河と小窓氷河です（写真1, 図1）。アイスレーダーによる氷厚測定やGPSによる氷体の流動量測定の結果, これらの氷河は30m以上の厚さの氷体を持ち, 年間で推定すると0.6～3.8m程度流動していることが確認されました。

また, 2018年には, 立山の内蔵助氷河, 劔岳の池ノ谷氷河が現存する氷河であることが確認され, 立山連峰の氷河は合わせて5箇所となりました（福井・飯田・小坂, 2018）。これらの氷河の位置を図1に示します。さらに, 後立山連峰, 鹿島槍ヶ岳のカクネ里氷河, 唐松岳の唐松沢氷河で



図1 立山連峰の氷河分布地図

も厚い氷体の存在, 氷体の流動が確認されたことから, 日本の現存氷河は現在, 総計で7箇所となっています（福井・飯田・小坂, 2018）（有江他, 2020）。



写真1 立山連峰の氷河群（左より ①御前沢氷河、②内蔵助氷河、③三ノ窓氷河、④小窓氷河）

2. 内蔵助氷河

氷河は、特有の地形や水体構造を持っています。内蔵助氷河は、富士ノ折立（2999m）直下の内蔵助カール内の標高 2700～2830 m に分布し、長さ 350m、幅 120m で、稜線の風下側に位置するため吹きだまりや雪崩によって積雪が涵養されています。流動量は小さいものの、カールやモレーン等の氷河地形、融氷水流や水流が窪みに流れ込み出来た縦穴ムーラン等の氷河特有の水体構造が顕著です。

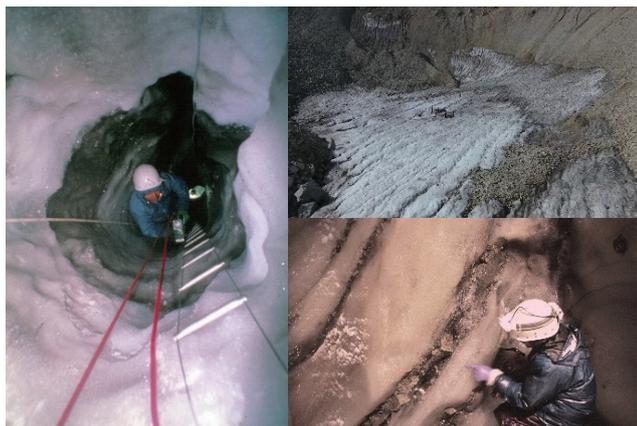


写真2（右上） 氷河表面に形成された融氷水流
 写真3（左） ムーランに潜った氷河内部の調査
 写真4（右下） 氷河底の氷河水と層構造

秋に内蔵助氷河を訪れると、氷体の表面を幾筋もの融氷水流が流れていて（写真2）、氷の縦穴ムーランに流れ込みます（写真3）。25m 深のムーランに潜り氷河内部や氷河底の調査ができるのは国内ではここだけです（写真3）。1970～1990年にかけて、名古屋大学等により融雪末期に出現するムーランに潜った観測やレーダーによる氷体の内部構造観測が実施され、氷体の厚さが 30m に達すること（山本他、1986）、氷体の上部に岩屑層から成る表面にほぼ平行な不整合面があり、それ以下の氷体には、流動の痕跡を示す下流方向にスラストアップする複数の岩屑層があることが確認されました（飯田他、1990）。この岩屑層はムーラン底部にも顕著に露出しています（写真4）。また、氷河水中の植物遺骸の放射性炭素年代測定より、氷河底部の氷は約 1700 年前にできた日本最古の氷河水であると推定されます（樋口他、1988）。

3. 三ノ窓氷河

三ノ窓氷河は、劔岳東面の標高 1700～2400m に位置し、長さ 1200m、幅 100m の日本最大の氷河です。アイスレーダー観測の結果、氷体の厚さは 50m 以上に達し、また、高精度 GPS 観測の結果、



写真5 三ノ窓氷河に開いた巨大なクレバス

1年間で 3.7m に及ぶ比較的大きな流動量があることがわかりました。三ノ窓氷河は、急峻な尾根に囲まれた深い氷食谷に存在するため、豪雪と雪崩により 25m 深に達する膨大な量の積雪の涵養があり、氷河の形成維持に大きく寄与していると考えられます。秋期になると、氷河表面に深さ 20m に達する大規模なクレバスが複数開いて、氷河特有の景観を見ることが出来ます（写真5）。

日本の氷河は、全て飛騨山脈北部にのみ現存しています。世界的に見ると、氷河の存在域としては温暖な地域と言えますが、夏期の多量の消耗量にも増して冬期に世界有数の涵養量があることが、氷河の形成維持に寄与していると考えられます。温暖化により世界の多くの氷河が縮小している中で、日本の氷河がどのような応答特性を示すか、今後の調査研究が待たれるところです。

立山連峰の氷河は、立山黒部ジオパークの重要なジオサイトに指定されています。

〈参考文献〉

- 上田豊（2014）：氷河。新版雪氷辞典，日本雪氷学会編，古今書院，307。
- 有江賢志朗，奈良間千之，福井幸太郎，飯田肇，高橋一徳（2019）：飛騨山脈北部，唐松沢雪渓の氷厚と流動。雪氷，81，269-296。
- 飯田肇，竹中修平，上田豊，伏見碩二（1990）：北アルプス内蔵助雪渓氷体の内部構造。日本最古の化石氷体（北アルプス内蔵助沢）の構造と形成に関する研究，平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書，19-30。
- 白岩孝行（2005）：氷河の定義・分類・分布・変動。『雪と氷の辞典』，日本雪氷学会監修，朝倉書店，277-287。
- 樋口敬二・山本勝弘・吉田稔・大畑哲夫（1988）：北アルプス内蔵助雪渓の下部氷体の形成年代について。名古屋大学加速器質量分析計業務報告書（1），33-35。
- 福井幸太郎，飯田肇（2012）：飛騨山脈，立山・劔山域の3つの多年性雪渓の氷厚と流動 - 日本に現存する氷河について。雪氷，74，213-222。
- 福井幸太郎，飯田肇，小坂共栄（2018）：飛騨山脈で新たに見出された現存氷河とその特性。地理学評論，91，43-61。
- 山本勝弘，飯田肇，高原浩志，吉田稔，長谷川浩（1986）：インパルスレーダーによる内蔵助雪渓の内部構造調査。雪氷，48，1-9。

〔富山県立山カルデラ砂防博物館 飯田 肇〕

衛星の防災利用実証活動（その1）

きりたに こうたろう
桐谷 浩太郎*

Key Word

地球観測衛星, レーダ衛星, 光学衛星, 防災利用実証, 緊急観測, 浸水災害, 土砂災害, 地震, 火山噴火

1. はじめに

一般的には、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、衛星やロケットの開発・打ち上げ、運用を行う機関として知られている。しかしながらJAXAではこのようなハードウェアの開発・運用だけではなく、打ち上げた衛星の利活用の研究開発も行っている。その中の重要な活動として、地球観測衛星である陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（ALOS-2）による観測画像データを防災・減災に活用する実証実験を実施している。この実証実験活動は大きく国内防災活動と国際防災活動に分かれており、国内外の災害時に防災機関に対して衛星画像データを提供している。

本特集では、今回及び次回（2回）にわたり、本活動の内容と状況を解説する。第1回目は、国内災害への衛星画像の活用について、活動の概要と具体的な災害抽出手法及びこれまでの災害対応事例について紹介する。なお、JAXAの本活動は実証実験であり、実災害に対しての画像データ及び災害状況の推定図の適用の可否及び方法は、各災害の特徴を熟知している画像データの提供を受けた各防災機関に委ねられていることを御承知おき願いたい。

2. 衛星の防災利用実証活動

まず、JAXAで実施している衛星の防災利用実証活動の概要について説明する。1. で述べたように、本活動は国内及び国際に分かれており、今回は国内の防災利用実証活動の概要を示す。

国内の防災利用実証活動は、JAXA 単独ではなく国及び地方の防災機関との取決め・協定に基づ

いて実施されている。図 2-1 に、全体の体制概要を示す。

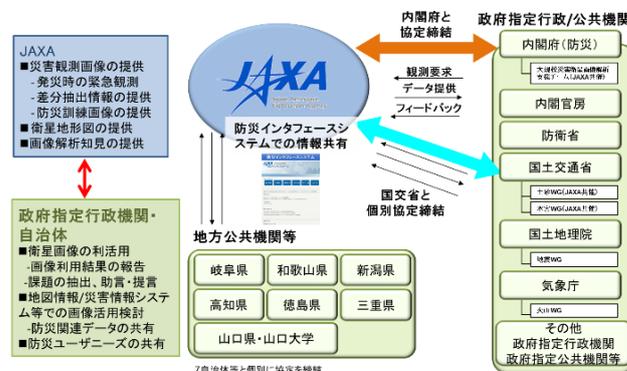


図 2-1 国内における衛星の防災利用実証体制

この中で、最上位の協定といえるものが、内閣府防災との取決めであり、その範囲には災害対策基本法に定義されている指定行政機関、指定公共機関が含まれている。JAXAは、発災時に衛星による緊急観測を実施し、これらの機関に対してその画像データを提供している。提供された画像データはそれぞれの機関で解析・判読され、実災害に適用され、そのフィードバックがJAXAに提供されるという Win-Win な関係となっている。フィードバックとは、実際に画像データを利用した際の効果や気づき事項、もしくは今後の活動への助言・提言等であり、JAXAはこれらの知見を次期の衛星や地上システムの仕様に反映することになる。

基本的にはJAXAが提供するデータは、画像データ自体及びその一次処理結果であるが、現在は実証実験の一環としてJAXAでも解析・判読を行っており、参考として防災機関に提供している。

なお、この協定では指定行政機関だけでなく、

*国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門 衛星利用運用センター 主幹研究開発員

指定公共機関である、いくつかの電力会社、通信会社にもこの枠組みに参加いただいている。

本実証実験については、国土交通省とも個別の協定を締結している。指定行政機関である国土交通省は、当然内閣府防災との取決めの対象である。にもかかわらず国土交通省と個別に協定を締結しているのは、以下のような経緯による。

元々、内閣府防災との取決めにおいては、3.1に示すようにレーダ画像が直観的な判読が難しく、誤解を招く恐れがあることから基本的に二次提供を禁止している。しかしながら、国土交通省は、災害発生時にはTEC-FORCEやLiaisonといった組織を現地に派遣し、現地にて災害対応を行っており、衛星画像データ自体を、直接被災自治体へ提供できる枠組みを要望されていた。その枠組みが、この国土交通省との個別協定である。ただし、これは国土交通省であれば、国土技術政策総合研究所等においてレーダ画像の解析実績もあるため、二次提供においても被災自治体等に誤解なく、その内容を伝達できることが前提となっている。

上記以外にも、図2-1に示す防災もしくは災害対応に関心の高い地方自治体とは、個別に協定を締結しており、衛星画像データの提供及びフィードバックを実施している。

実際のALOS-2による緊急観測のタイムラインを図2-2に示す。

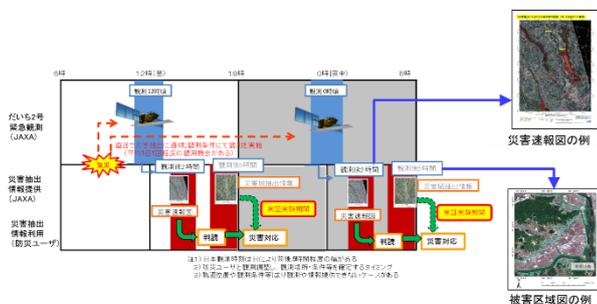


図2-2 ALOS-2緊急観測タイムライン

ALOS-2で日本を観測するタイミングは1日に0時頃、12時頃の2回ある。したがって、その観測前までには、ALOS-2に観測域、観測モード等の指示を与える必要がある。そのためにコマンドを送信する必要があるが、その作成には1時間程度かかる。したがって、昼12時の観測では11時前、夜0時の観測では23時前には、要求を固めておく必要がある。緊急観測は複数要請される場合もあり、観測実施判断には、それらの要請の競合確認も必要となるため、一定の調整時間が必要である。また、衛星の軌道により観測時刻は前後すること

等があり、要請受付時間はそれに依存して変わる。

観測後は、約2時間後に二時期カラー合成画像等による速報図を提供している。二時期カラー合成画像については3.1で説明するが、協定を締結している防災機関(防災ユーザ)はこの速報図に基づき災害の状況を把握するのが基本的な流れである。ただし、現在は実証期間中であるため、JAXAとしても観測から約5時間後を目途に、現地の発災前の状況等も考慮しながら速報図の目視判読を行い、災害域を示すエリアを多角形(ポリゴン)で囲んだ被害区域図として提供している。このポリゴンは、GIS上で地図データ等と重ね合わせることが可能であり、災害域の状況をより詳しく把握することができる。各防災ユーザは、速報図や被害区域図、もしくは原画像といった災害プロダクトを、JAXAの防災情報システムである「防災インタフェースシステム」にサインインすることでダウンロードすることができる。

JAXAは、この緊急観測を24時間365日、防災ユーザから受け付けており、観測計画を速やかに立案し、他要請との調整を実施した後、可能な限り迅速に観測を実施する体制を構築している。

また、国内の防災利用実証活動としては、緊急観測の他に以下のような活動を行っている。

- ・水害、土砂、地震、火山噴火、大規模災害の各種災害別のワーキンググループ(WG)の防災機関との連携運営と、各WGにおける災害毎の解析方法や、緊急観測の社会実装の方法の検討
- ・協定を締結している災害機関での防災訓練への参加

防災訓練の事例として、2020年1月に実施した徳島県における防災訓練の様子を図2-3に示す。このように、訓練の状況に応じて災害状況を模擬したレーダ衛星画像を提供し、利用いただくことで、災害時における衛星画像データの有効性を体感していただいている。



図2-3 2019年度徳島県における防災訓練の様子¹⁾

3. 衛星画像からの災害抽出手法

3.1. レーダ画像からの抽出手法

(1) レーダ衛星の概要

前述したように、現在JAXAでは「だいち2号」(ALOS-2)と呼ばれるレーダセンサを搭載したレーダ衛星を運用中である。レーダセンサとは、マイクロ波を地上に照射し、その反射波を計測することで、地上の状況を把握するセンサである。その原理の1つは、図3.1-1に示すように、衛星から斜め下方向にマイクロ波を照射し、その反射波の遅延時間の差、すなわち衛星からの距離の差により観測点を識別するというものである。これは、衛星の進行方向と直交する方向の識別方法である。

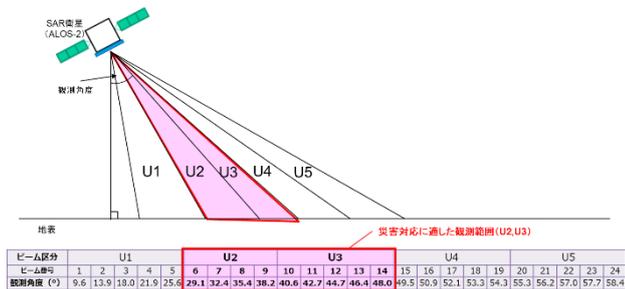


図 3.1-1 レーダ衛星の観測原理 (進行方向に直交)

地上に照射されるビームは地上では50kmの幅となるため、1回の観測領域は衛星の進行方向に沿った50kmの帯状の領域となる。このビームはいくつかのグループに分けられており、観測角度が29.1度～48.0度までのU2、U3のグループが災害観測には適していることが、これまでの実証から判明している。

一方、もう一つの原理は、衛星の進行方向に適用されるものであり、移動する衛星のアンテナが各点でとらえる信号を処理し合成することで、あたかも進行方向に大きな口径のアンテナが存在するような画像を合成することができる(図3.1-2)。これを合成開口技術という。これにより、衛星の進行方向については、直交する方向よりも高い分解能を得ることができる。

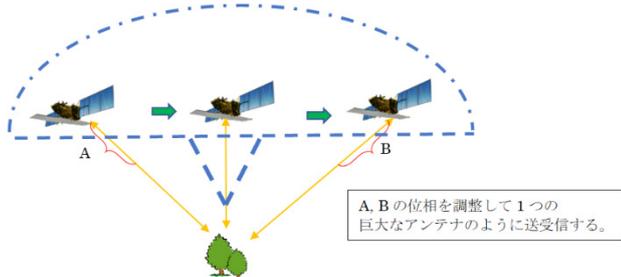
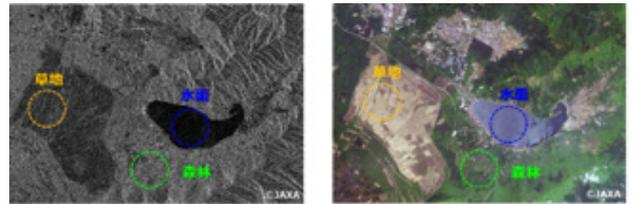


図 3.1-2 合成開口技術の概要

また、レーダ衛星は、自らマイクロ波を照射するため、夜間も観測可能であり、またマイクロ波が雲や雨を透過する性質があるため、悪天候でも観測が可能という耐天候性という長所を持つ。

(2) レーダ衛星画像からの災害抽出手法

レーダ衛星画像は、地上から反射されたマイクロ波を受信して、その強度もしくは位相情報を利用することで地上の状況を把握することができる。初動の災害把握には、強度を利用することが一般的であり、基本的には画像は強弱を表すモノクロ画像となる(図3.1-3)。



ALOS-2のレーダ衛星画像 左図と同じエリアの光学画像

図 3.1-3 レーダ衛星画像例

このモノクロ画像から災害を抽出する原理を以下に説明する。図3.1-4に示すように、浸水、土砂崩落、土砂移動によって発災前後で後方散乱強度が変化することがポイントとなる。浸水の場合、発災前は、住宅等の建物があるため後方散乱強度は大きいですが、浸水し建物が水に覆われると、鏡面反射を起こすため後方散乱強度が減少し、当該部分は暗くなる。これは土砂崩落も同様で、水面と同様裸地も鏡面反射を起こすため、土砂崩落により裸地化した部分は暗くなる傾向を持つ。逆に、土砂堆積の場合は、裸地だった場所に堆積物が現れることにより、その部分の後方散乱強度が増大し、明るく写ることになる。

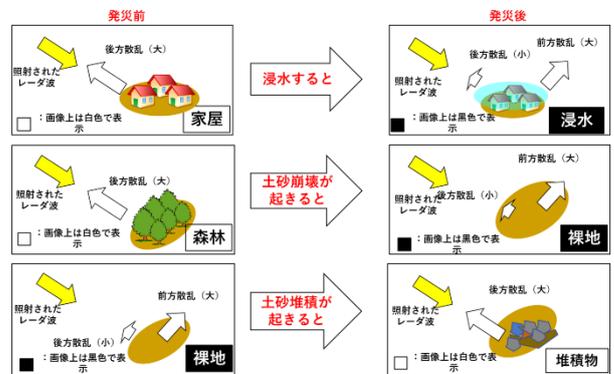


図 3.1-4 レーダ衛星画像からの災害抽出

このように、後方散乱波の強度変化をとらえることで発災後の状況を把握することがレーダ衛星画像判読の基本である。

ただし、この発災前後の強度変化を、人間が発災前後の画像を見比べて抽出するのは難しい。そのため、判読においては、図 3.1-5 に示すような光の三原色の原理を用いた二時期カラー合成という手法を用いる。これは、もともと白の強弱である強度画像を、発災前の強度画像を赤の強弱に、発災後の強度画像を緑と青を重ねた（シアン色）の強弱に変換した後、発災前後の画像を合成する手法である。この手法により、発災前後で強度の変わらない部分は光の三原色の原理により白になり、発災前より発災後に強度が弱まったところは、赤が強くなるため赤っぽく、逆に発災前より発災後に強度が強まったところは青っぽくなる。このように強度変化を色の変化に変えることで、目視による変化の抽出が容易になる。

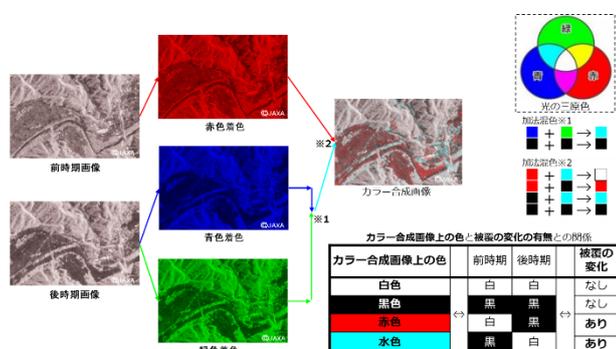


図 3.1-5 二時期カラー合成画像の原理

3.2. 光学画像からの抽出手法

(1) 光学衛星の概要

JAXA は、2021 年度に先進光学衛星「だいち 3 号」(ALOS-3) を打ち上げる予定である。光学衛星とは、光学センサを搭載した衛星であり、光学センサは、主に太陽光を反射した対象物の可視光や近赤外線等を捉えるものである (図 3.2-1)。



図 3.2-1 可視・近赤外リモートセンシングの仕組み

可視光域の観測により、カメラでの撮影画像のような、人間が目で見ることのできる情報に近い画像を取得することができる。そのためその視認性はレーダ画像と比較して非常に高く、一目見れば状況を把握できるという特徴がある。さらに可視光域以外を用いれば、近赤外域の観測により植生の様子を

詳細に把握すること等も可能である。ただし、光学センサは、太陽光の反射を観測しているため、夜間や、雲がある場合には地上の様子を把握することができない点には注意が必要である。

(2) 光学衛星画像からの災害抽出手法

光学画像は、基本的には人間が目を見た画像に近いので、限定されたエリアであれば目視により被災状況を把握するのはレーダ衛星画像よりも容易である。しかしながら、数千 km² 以上もあるエリアの中から、災害の発生している場所を特定するのは目視判読だけでは困難であり時間を要する。そのため、光学画像から浸水や土砂災害箇所を特定するための解析が必要となる。ここでは、代表的な解析手法を紹介する。

あらゆる物質は、表面の構造等の性質により各波長帯に対して固有の反射・放射の強さを示すことが知られている (図 3.2-2)。光学衛星を用いた解析では、このような物質によって異なる反射スペクトルを利用し、対象物の抽出に適した波長帯や、複数の波長帯を組み合わせた指標を用いることにより被害域を抽出する。

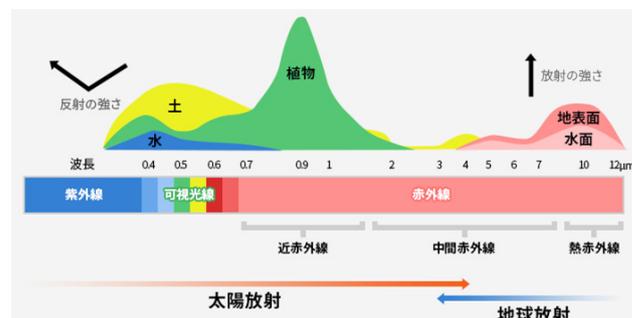


図 3.2-2 反射スペクトルのイメージ

浸水域や土砂災害の抽出に用いられる代表的な指標としては NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指標) がある。

NDVI は植物が強く反射する近赤外領域と、植物が吸収する赤色領域の差分から示される指標であり、値が大きいほど植物が繁茂していることを示すものである。図 3.2-3 に光学画像から土砂災害を自動抽出した場合のイメージ図を示す。



図 3.2-3 土砂災害の抽出例 (黄色が土砂崩落域)

他にも、光学画像を用いた深層学習による手法も多く提案されている。例えば、建物被害の抽出については、主にセマンティック・セグメンテーション手法を用いた自動抽出についての研究が行われている。セマンティック・セグメンテーションはピクセル単位でカテゴリ分類を行う手法であり、被害がある建物とそれ以外の物体を区別して抽出することができる（図 3.2-4）。災害抽出への深層学習の適用については JAXA で現在も検討中であり、将来的には災害対応にも取り入れる計画である。

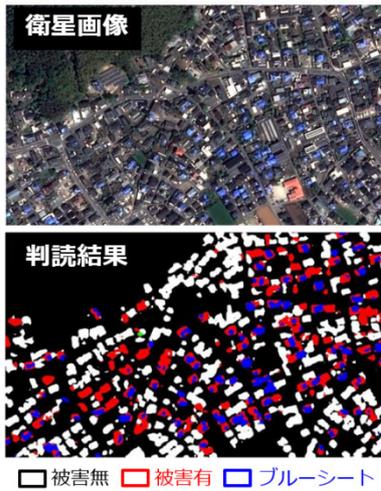


図 3.2-4 深層学習による建物被害の抽出例

4. 災害対応事例

本章では、ALOS-2 によって実施された災害対応事例を示す。

4.1. 浸水災害事例

近年は、台風や線状降水帯の影響により、風水害が広域化、長期化する傾向が顕著であり、河川の氾濫や内水氾濫により浸水被害が大規模化している。

図 4.1-1 に令和 2 年 7 月豪雨災害の熊本県の球磨川流域で発生した浸水被害の事例を示す。この豪雨では、令和 2 年 7 月 3 日に鹿児島県及び熊本県に局地的豪雨が発生、国土交通省及び農林水産省林野庁からの要請により緊急観測を計 11 回実施した。

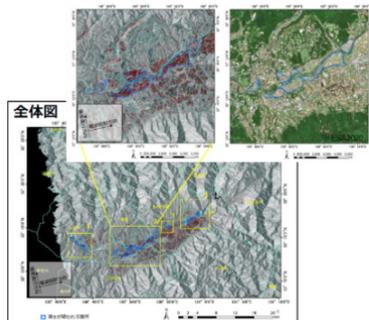


図 4.1-1 熊本県球磨川浸水推定判読結果（青枠）

4.2. 土砂災害事例

台風や線状降水帯の影響により高頻度化、広域化した災害は浸水災害だけではない。土砂災害もその被害が拡大している。これは、短期的な集中豪雨もしくは長期的な降雨により、土壌水分量が従来と比較し増大しており、従来は土砂崩壊が起きにくい地質や緩斜面でも土砂移動が発生する傾向が強まっているためと言われている。

4.1 で示した令和 2 年 7 月豪雨においても、豪雨はその後北上し、長野県や岐阜県でも大きな被害をもたらした。国土交通省では、北陸地整へ画像データを提供し、防災ヘリのルート検討に活用した。その後ヘリ調査の結果から崩壊箇所が確認された。また、林野庁でも中部森林管理局へ画像データが提供され、上空からの調査の目安として活用された。

図 4.2-1 に土砂崩壊箇所を観測した事例を示す。左図が豪雨期間に ALOS-2 で観測したレーダの二時期カラー合成画像、右図が後に北陸地整のヘリ調査の結果である。レーダ衛星画像が土砂崩落の形状を正確にとらえていることがわかる。

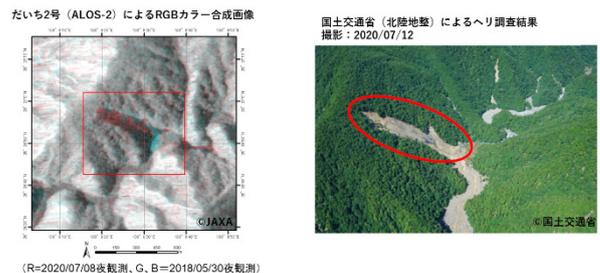


図 4.2-1 令和 2 年 7 月豪雨の土砂災害例

なお、風水害については、令和 3 年 8 月の前線による長雨の被害についても、計 11 回の緊急観測を行っており、防災機関へ情報を提供、災害対応に活用いただいた。

4.3. 地震災害事例

平成 30 年 9 月 6 日北海道胆振地方中東部を震源としたマグニチュード (M) 6.7 の北海道胆振東部地震が発生したことをトリガーとし、国土交通省砂防計画課等からの要請のもと、初動期の土砂災害の概況把握等を目的に計 3 回の緊急観測を実施した。判読結果は、北海道開発局及び北海道に共有された。結果として、厚真町での大規模崩壊や集中的な崩壊の把握が迅速に行われ、北海道開発局、北海道、関係自治体への警戒避難の助言が行われた。

図 4.3-1 は、地震 WG による干渉 SAR 解析の結果であり、「平成 30 年北海道胆振東部地震の評価」に掲載された。

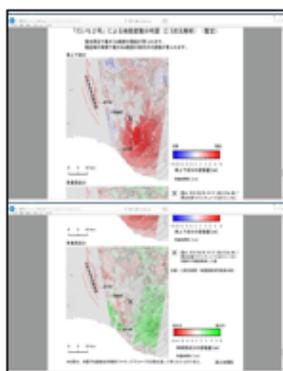


図 4.3-1 平成 30 北海道胆振東部地震「だいち 2 号」による地殻変動分布図 (2.5 次元解析) (暫定)²⁾

4.4. 火山噴火災害事例

火山噴火災害では、気象庁を事務局とする火山ワーキンググループ (火山 WG) において、衛星画像の利活用を進めている。災害対応時においては、火山 WG にて緊急観測要請の可否について検討がなされ、必要と判断されれば緊急観測要請が行われる。

図 4.4-1 に平成 30 年 4 月霧島山 (えびの高原 (硫黄山) 周辺にて発生した噴火の観測事例を示す。平成 30 年 4 月 19 日 15 時 39 分頃に噴火が発生し、更に活動が活発になる可能性があることから、同日 15 時 55 分に噴火警戒レベルが 3 に引き上げられたことをトリガーとして、火山 WG からの要請により 19 日の夜パス以降、計 7 回の緊急観測を実施した。

これらのデータは気象研究所、国土地理院にて解析され、地殻変動の状況把握に利用されるとともに、平成 30 年 5 月 1 日 14 時 00 分に発表された火山活動解説資料に掲載され、噴火警戒レベル引き下げ (3 → 2) 判断の材料の 1 つとして利用された。

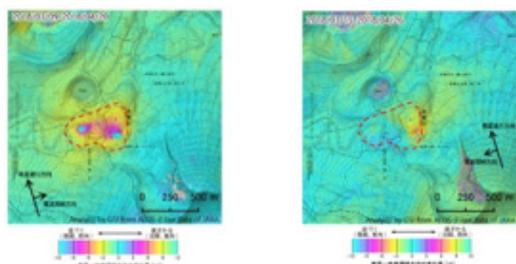


図 4.4-1 平成 30 年 4 月霧島山 (えびの高原 (硫黄山) 周辺)³⁾

また、緊急観測以外にも西之島のようにアクセスが困難な地域にある活火山観測において、有効な観測手段として、溶岩の流出及び堆積などの変動や海岸線の変化の確認を行っている。

5. まとめ

本稿では、JAXA が進めている衛星の防災利用実証、その国内防災活動について紹介した。レーダ衛星による災害監視は、その広域性及び耐天候性に優れた特徴を持ち、今般のように災害が広域化、長期化する状況において他の手段では入手不可能な災害情報を短時間で入手することが可能である。しかし一方で、衛星は軌道に縛られているため、観測の即応性や頻度が限定的になることも事実である。

この制約を緩和するためには、災害監視衛星の機数を増やし、広範な軌道に配置することが効果的であることは明らかであったが、10 数年前は打ち上げコスト等の費用が高額であり、非現実的と考えられていた。しかし、近年は打ち上げコストの低減化も進み、その実現性は相対的には高くなってきている。観測の即応性向上と頻度増加が達成できれば、衛星による災害対応は、災害の初期状況把握においてより有効となると思われる。

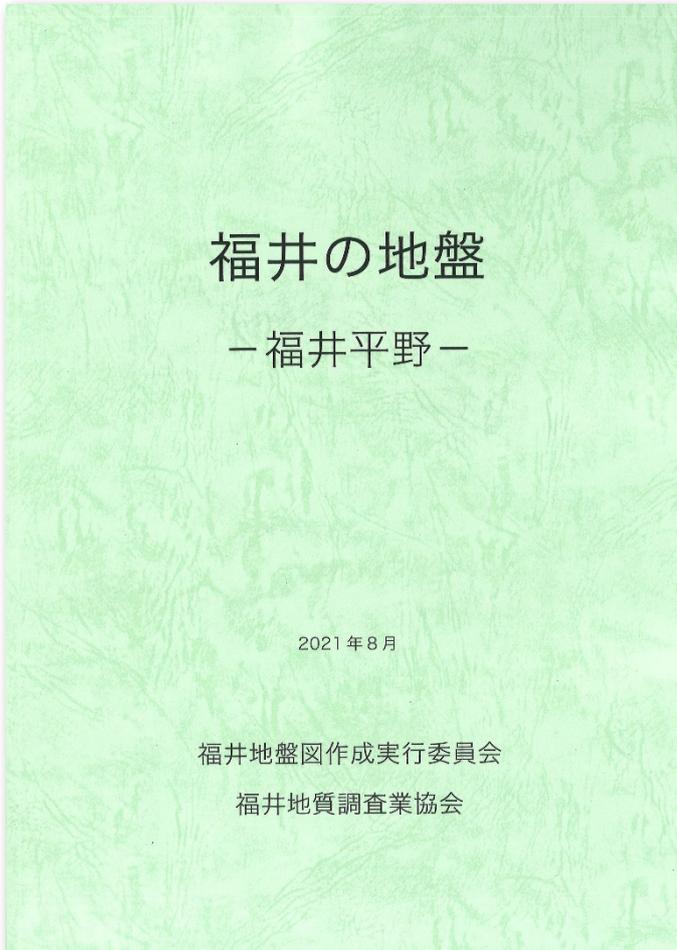
近年の災害の増加・甚大化は国内にとどまらない世界的な現象である。次回は、このような状況に対応した、JAXA 衛星を含めた各国の衛星を利用した国際的な枠組みで実施されている災害対応活動を中心に解説を行う。

〈参考文献〉

- 1) JAXA における国内防災の取り組みについて、有安恵美子, 新井史也, 中川宣隆, 桐谷浩太郎, 日本リモートセンシング学会, 第 44 巻第 1 号 p.21-24. (2021)
- 2) 平成 30 年北海道胆振東部地震の評価 (平成 30 年 9 月 11 日公表), 地震調査研究推進本部地震調査委員会 https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/20180906_iburi_2.pdf
- 3) 国土地理院 HP <https://www.gsi.go.jp/common/000187728.pdf>

福井の地盤 — 福井平野 —

著者 福井地盤図作成実行委員会*



近年多発する豪雨災害や地震災害に起因する主に表層地盤の地盤リスクを評価するためには、沖積層や洪積層の地盤内部の面的な分布を示す地盤断面図、さらに、土質試験データから得られる土の物理的・力学的特性の空間分布特性や物性値の相関性の把握が必要不可欠となります。

福井県内を対象とした第四紀の地盤に関する書籍は、約半世紀前の1965年に福井県が発行した「福井県水理（地下水）地質図説明書」がありますが、同書は主に第四紀の地質を断面図としてまとめたものであり、土質試験データを集約した資料は存在しません。

そこで本書では、福井県等が管理するボーリング調査結果のデータベース等から、ボーリングデータ、土質試験データを抽出し、福井平野に設定した南北方向1測線と東西方向2測線に関する地盤構成を把握するための地盤図を作成しました。さらに、土の物理的・力学的特性を測線別に整理し、福井平野を形成する土の工学的特性をマクロな視点で明らかにしました。

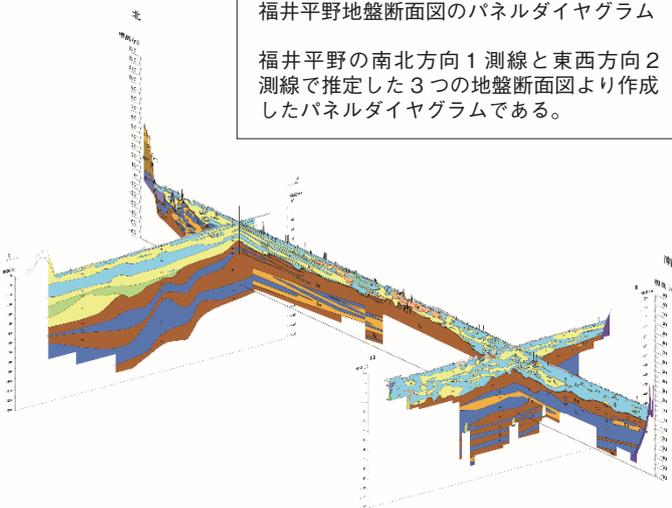
本書は、福井で初めての地盤図となります。社会資本整備の事業計画段階での地質・地盤リスクの抑制、自然災害や都市災害など対策を講じる際の基礎資料としての利活用が期待されるところであります。

なお、本書は下記のURLより、無償でダウンロードができます。

- 発行日：2021年8月30日発行
- 発行：福井地質調査業協会
- ダウンロード方法：下記URLにアクセス
<https://www.fk-kosha.or.jp/koueki/books.asp>
- 問い合わせ先：
福井地質調査業協会
Tel. 0778-25-1230
e-mail : fukui@geology.co.jp

福井平野地盤断面図のパネルダイアグラム

福井平野の南北方向1測線と東西方向2測線で推定した3つの地盤断面図より作成したパネルダイアグラムである。



* 福井県の地盤・地質を専門とする産官学の技術者と研究者で構成される組織である。(2019年に創立)

2021 年度 全地連資格検定試験の実施結果について

今年度の全地連資格検定試験（地質調査技士，応用地形判読士，地質情報管理士）は，7月に全国10会場で実施し，9月には合格発表を行いました。各検定試験の実施結果は次の通りです。

全地連資格検定試験 実施結果 概要

- 試験日：2021年7月3日（土）
- 試験会場：全国10会場 札幌，仙台，新潟，東京，名古屋，大阪，広島，高松，福岡，沖縄
- 受験者数及び合格者数：

資格検定試験		受験申込者数 / 受験完了者数	合格者数
①地質調査技士	現場調査部門	398名 / 384名	151名
	現場技術・管理部門	887名 / 817名	262名
	土壌・地下水汚染部門	45名 / 40名	13名
	(合計)	1330名 / 1241名	426名
②応用地形判読士〈一次試験〉		105名 / 89名	26名 ^{※1}
			26名 ^{※2}
③地質情報管理士		88名 / 79名	28名

※1 応用地形マスターⅠ級 ※2 応用地形マスターⅡ級

(ご参考：2022年度の試験日程)

- ・地質調査技士，地質情報管理士 7月9日（土） 全国10会場にて実施予定
- ・応用地形判読士 10月22日（土） 東京にて実施予定

「地質リスク調査検討業務」の手引きの発行

全地連では、地質リスクマネジメント（＝地質・地盤リスクマネジメント）の中核の一つとなる「地質リスク調査検討業務」について、業務の発注や実施に際して重要となる事項をまとめた本手引きを作成し、令和3年7月に発行しました。

作成にあたっては、国土交通省大臣官房技術調査課・国立開発研究機構土木研究所が2020年3月に発行した「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントの運用ガイドライン」や地質調査業協会関連の資料を参照し、さらに業務実施経験や最近の技術動向も踏まえて取りまとめました。

地質リスク調査検討業務の主眼は、各建設段階において地質リスクを抽出・分析・評価し、対応を検討することであり、建設生産システムにおける一貫通のリスクマネジメントの一部として極めて重要なものといえます。この業務が適切に発注・実施されるよう本手引きを有効に活用して頂ければ幸いです。



▶▶▶ https://www.zenchiren.or.jp/geocenter/risk/georisk_guide_2021.pdf

2021年度 地質リスク・エンジニア（GRE）認定試験制度の実施について

GRE 認定試験制度は、今年10月に第1回目となる認定試験を実施しました。

認定試験 実施結果 概要

- 試験日：2021年10月1日（金）
- 試験会場：東京
- 受験者数：18名 / 17名（申込者数 / 受験完了者数）
- 合格発表：2022年3月
- 運営主体：地質リスク学会、（一社）全国地質調査業協会連合会

本制度は、地質リスクに関する情報の収集整理や調査などの成果に基づき、地質に係る建設等の事業リスクの低減に向けたマネジメントができる地質技術者の育成を目的に、2015年度に現行制度の基礎となる“認定制度”を発足しました。制度発足以降では、2020年度までに約120名のGRE認定者を輩出してきましたが、この間では公共機関における「地質リスク調査検討業務」の発注が始まり、また地盤災害の多発などもあって、地質リスクに対する関心が一層高まりました。このような状況を踏まえ、運営主体である地質リスク学会等では、GRE認定者の業務における活用を進めていくにあたり、令和3年度には“認定試験制度”に移行し、新たな体制で制度を開始した次第です。

地質リスクマネジメント事例研究発表会（開催予定）

11月26日に開催します標記発表会は、今年で12回目の開催となります。今年のプログラムは、6編の事例研究発表を行うほか、特別講演として土木研究所様よりご講演をいただきます。また、今年7月に全地連が編集・公表した「地質リスク調査検討業務の手引き」についてもご紹介する予定です。

当日の開催結果や講演論文集は、下記のホームページに掲載する予定です。是非ご覧下さい。

▶▶▶ <http://www.georisk.jp/>（地質リスク学会ホームページ）

第12回地質リスクマネジメント事例研究発表会 開催概要

- 開催日：令和3年11月26日（金）
- 場 所：飯田橋レインボービル（東京都新宿区市谷船河原町11番地）
- 共 催：地質リスク学会、一般社団法人全国地質調査業協会連合会
- 協 賛：国立研究開発法人土木研究所
- プログラム

- 開 場：12：30
- 開 会：13：00～
- 開会挨拶：13：05～
渡邊 法美（地質リスク学会会長）（高知工科大学教授）
- 特別講演：13：20～14：00
「(国研)土木研究所における地質リスクマネジメントの活動について」
宮武 裕昭氏（国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ）
- 報 告：14：00～14：15
「地質リスク調査検討業務の手引き」の発行について」
岩崎 公俊（(一社)全国地質調査業協会連合会 技術参与）

事例研究発表会：14：30～16：30（発表編数は6編）

事例研究論文一覧

発表者	所属先	題 目	発表内容	事例の 種類
齋藤 和春	セントラル コンサルタン ト(株)	3次元電気探査を用いたトンネル拡幅湧水量予測による工事費・工期のリスク低減の一事例	既往の老朽化したトンネルを拡幅する場合、拡幅掘削に伴う地山の崩落、突発的地下水の湧水の発生などの問題を生じることが多い。これら問題解決のために、風化状況や地下水分布状況を高精度に予測することが施工安全性、工事費用のリスク低減に大きく寄与すると考える。	D型
居川 信之	(株)エイト日本 技術開発	山岳道路の維持管理における地質リスクマネジメント（盛土崩壊の事例）	筆者は、高山地に位置する全長17kmの一般自動車道において、15年間継続して維持管理業務を行ってきた。その間に発現した斜面崩壊や落石等の地質リスクに関する事象についての対応内容（発生機構・対策方法・対策コスト等）を紹介する。また、最近問題となっている施工過程の不詳な谷埋め盛土の崩壊事例とその対応方法についても言及する。	B型
近藤 桂二	(株)ダイヤコン サルタン	暫定2車線区間の4車線化に向けた地質リスクの検討事例	本事例は、現在供用している暫定2車線区間（I期線）の道路の4車線化施工（II期線）を見据えて、地質リスクの抽出・評価等を行い、今後の設計・施工・維持管理段階における地質リスクの低減等を図るため、後続調査計画を立案したものである。これらの検討事例について報告する。	D型
加藤 智久	中央開発(株)	深層崩壊危険斜面における地質リスクマネジメントに関する一考察	深層崩壊発生リスクが高い付加体地域において、深層崩壊が発生した現場を対象として実施した原因究明調査、モニタリングの結果等を報告する。また、深層崩壊に関する既往の研究結果や事例を収集し、筆者が実際の調査で得た知見と併せて、深層崩壊危険斜面における地質リスク抽出とリスク評価に関する考察を行ったので報告する。	D型

鄭 詩穎	岡山大学	応答曲面法によるため池のリスク評価 Risk evaluation for earth-fill dams by response surface method	平成 30 年豪雨で数多くのため池が絶堤し、環境と経済に大きな影響を与えた。自然災害によるため池の破堤を防ぐため、事前にリスク評価を行うことが必要となる。本研究はため池修復の優先順位から岡山県の 10 か所ため池を研究対象として選定した。氾濫解析を用いて被害額 A を算出し、それから回帰分析によって被害額 B を算定し、応答曲面を作成した。最後にグンベル分布で求めた確率降雨量から得られた破堤確率を合わせてリスク評価を行うこと。	B 型
奥田 朱音	応用地質(株)	地質リスク評価における簡易試験の有効性と適用上の留意点	従来から地質調査で用いられる簡易指標試験（シュミット式ハンマー試験や帯磁率測定等）は、物理的・化学的データを迅速かつ安価に多数取得可能であり、地形地質踏査とあわせて実施することで、地質特性の把握や地質が持つ不確実性への対応、その後の調査計画策定に活用できる。本発表では、道路事業の初期段階での簡易指標試験の具体的な適用事例について紹介し、地質リスク評価への有用性、今後の発展性について発表する予定である。	D 型

*リスクマネジメント事例の種類は以下の 4 タイプとなっております。

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 型以外的事例

令和 3 年度 全地連資格制度 登録更新の手続きについて

全地連で運営します資格制度（地質調査技士、応用地形判読士、地質情報管理士）の登録更新につきまして、令和 3 年度は次の通り実施します。

令和 3 年度 全地連資格制度 登録更新の実施概要

資格制度	登録更新の対象者	更新申込期間・締切	更新形態
地質調査技士	(1) 平成 28 年度（2016 年度）の登録更新講習会を受講した方 (2) 平成 28 年度（2016 年度）の第 51 回地質調査技士資格検定試験に合格し、登録した方	令和 3 年 9 月 10 日～ 令和 3 年 10 月 12 日 ※CPD 報告形式による 申込締切は 令和 3 年 12 月 10 日	講習会受講形式 または CPD 報告形式
応用地形判読士	平成 28 年度（2016 年度）の応用地形判読士資格検定試験〔二次試験〕に合格し、応用地形判読士資格に登録した方	令和 3 年 12 月 1 日～ 令和 4 年 1 月 15 日	CPD 報告形式
地質情報管理士	(1) 平成 30 年度（2018 年度）地質情報管理士資格検定試験に合格し、資格登録した方 (2) 平成 30 年度（2018 年度）地質情報管理士登録更新の手続きが完了した方	令和 3 年 12 月 1 日～ 令和 4 年 1 月 31 日	CPD 報告形式

詳しくは、全地連のホームページをご覧ください。

▶▶▶ <https://www.zenchiren.or.jp/>（全地連ホームページ）

福利厚生制度に関する情報発信

全地連では、会員企業における社員の皆さまの福利厚生の向上を目的に、2020 年度より小冊子や講演動画を作成し、以下のホームページでご紹介しております。健康経営やメンタルヘルスをテーマにした小冊子を掲載するほか、また関連する内容の WEB セミナーもオンデマンドでご覧いただくことができます。会社の福利厚生制度の見直しや社員研修などの機会にぜひご活用ください。

▶▶▶ <https://zenchiren-geo.jp/welfare>

昨今の社会の要請は多岐多様です。構造物は建設するだけでなくその維持が重要となりました。地盤改良などで都市部を中心に居住圏が拡がり、大深度空間などの地下利用も各所で行われています。これら開発の結果と表裏一体で近年顕著となった豪雨災害や活断層から発生する大地震への備えがますます重要となっています。さらに今年はSDGsのキーワードが広く知られるように、持続可能な社会へ向けての要請もあります。

地質技術者の役割の一つとして地下の地質情報を見える化し、社会の要請に応えることがあります。地下空間は、我々の目で直接全部を見渡すことのできない空間ですが、地質図作成に代表されるように、地表踏査でルートマップを作成し、ボーリング掘削などで得られた直接的な情報を総合的に検討することで、地下空間を図化し、

社会の要請へ対応してきました。

今号では、物理探査にスポットを当てました。物理探査は、物理現象を利用して計測することで、地下の地質情報の見える化を果たしており、石油・石炭などの資源探査のみならず、社会の要請に対して広く貢献しています。小特集では、地質調査という目的の中で、物理探査が果たしてきた役割とともに課題に対して改良を重ねチャレンジする姿を紹介いただきました。読者の皆様には本特集を通じて、技術や社会の今が少しでも伝わればと思います。

最後になりましたが、新型コロナウイルスが猛威をふるった今夏に寄稿いただきました執筆者の方々には心から感謝の意を表します。

(2021年10月 佐護記)

機関誌「地質と調査」編集委員会

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

委員長 鹿野 浩司

委員 尾高潤一郎、加藤 猛士、佐護 浩一、谷川 正志、細矢 卓志、土屋 彰義、須見 徹太郎、池田 俊雄、高橋 暁、村上 貴美恵、各地区地質調査業協会

委員 北海道：関根 幸博 東北：庄子 夕里絵 北陸：桜井 幹郎 関東：藤本 泰史 中部：今井 良則
 関西：東原 純 中国：西田 宣一 四国：大岡 和俊 九州：原田 克之 沖縄県：砂川 尚之

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階 TEL. (03) 3518-8873 FAX. (03) 3518-8876

北海道地質調査業協会	〒060-0003	北海道札幌市中央区北 3 条西 2 丁目 1 (カミヤマビル)	TEL. (011) 251-5766
東北地質調査業協会	〒983-0852	宮城県仙台市宮城野区榴岡 4-1-8 (パルシティ仙台 1 階)	TEL. (022) 299-9470
北陸地質調査業協会	〒951-8051	新潟県新潟市中央区新島町通 1 ノ町 1977 番地 2 (ロイヤル礎 406)	TEL. (025) 225-8360
関東地質調査業協会	〒101-0047	東京都千代田区内神田 2-6-8 (内神田クレストビル)	TEL. (03) 3252-2961
中部地質調査業協会	〒461-0004	愛知県名古屋市中区葵 3-25-20 (ニューコーポ千種橋 403)	TEL. (052) 937-4606
関西地質調査業協会	〒550-0004	大阪府大阪市西区靱本町 1-14-15 (本町クィーパービル)	TEL. (06) 6441-0056
中国地質調査業協会	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町 1-18 (佐々木ビル)	TEL. (082) 221-2666
四国地質調査業協会	〒761-8056	香川県高松市上天神町 231-1 (マリッチ F1 101)	TEL. (087) 899-5410
九州地質調査業協会	〒812-0013	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-4-30 (いわきビル)	TEL. (092) 471-0059
沖縄県地質調査業協会	〒903-0128	沖縄県中頭郡西原町森川 143-2 (森川 106)	TEL. (098) 988-8350

機関誌 「地質と調査」 '21 年 2 号 No.158

2021 年 11 月 15 日 印刷
 2021 年 11 月 20 日 発行

編集 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階

発行所 株式会社ワコー

〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-11-7 TEL. (03) 3295-8011 FAX. (03) 3230-2511

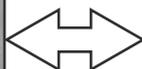
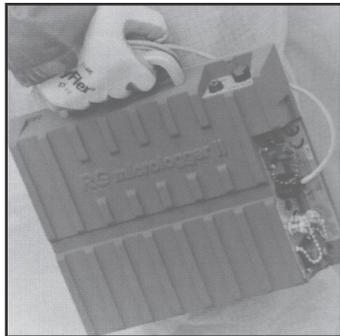
印刷所 株式会社 高山

無断転載厳禁

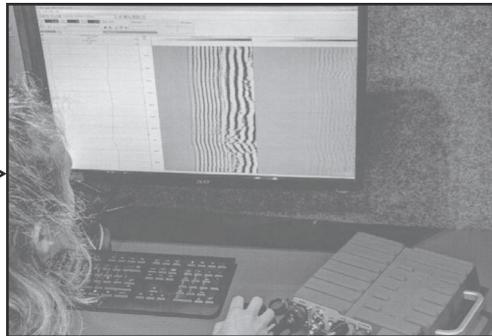
印刷物・Web 上等に本誌記事を掲載する場合は、一般社団法人全国地質調査業協会連合会に許可を受けてください。

RG社検層一筋40年、土木地質から資源分野まで豊富なプローブとウインチに加え、強力なデータ処理ソフト「Winlogger」を提供しています。

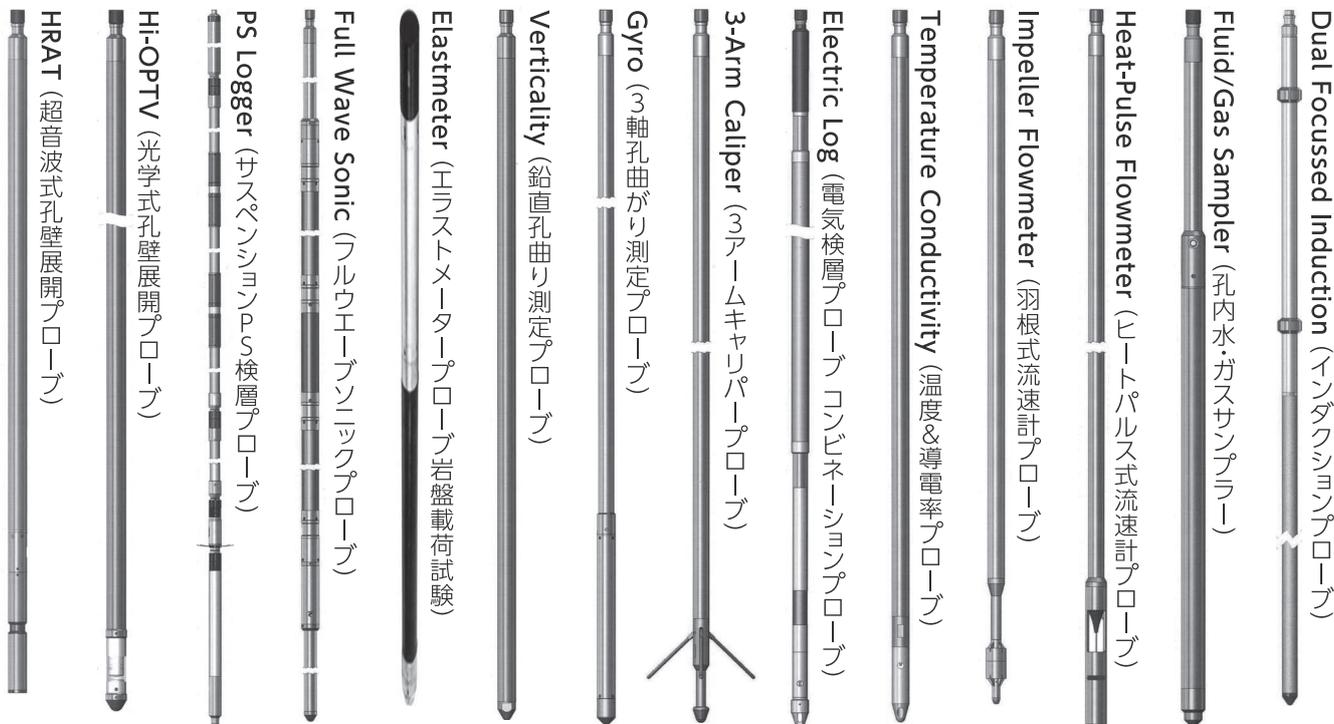
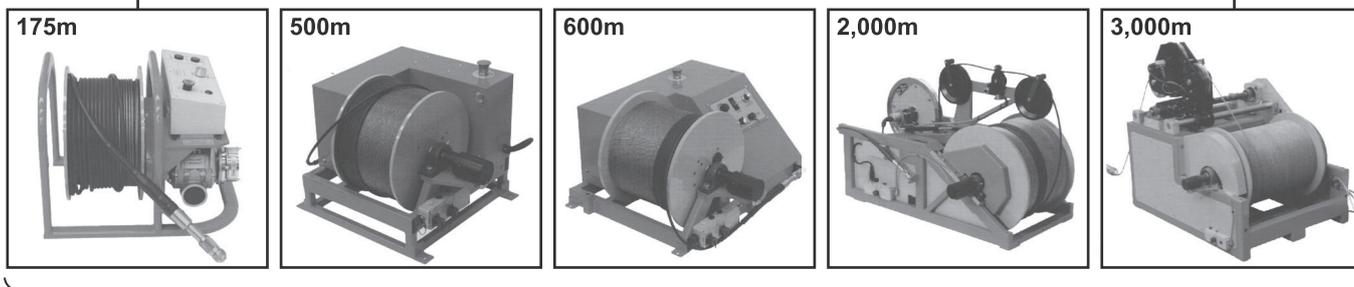
Micrologger-2



Winlogger Software



Cableは、同軸又は4芯アーマードで最大3,000m可能



株式会社 ジオファイブ

URL <http://www.geo5.co.jp/>

〒331-0812 さいたま市北区宮原 1-453-2

TEL 048-662-9175 FAX 048-662-9176

Email sales@geo5.co.jp

■業務内容■

計測機器販売 : 地質調査機器・土木計測機器・非破壊検査機器

計測機器レンタル : 地質調査機器及びその他計測機器レンタル

計測業務 : 現場計測業務・測定機器設置・3D計測業務

計測機器設計製作 : 各種地盤計測機器の設計製作



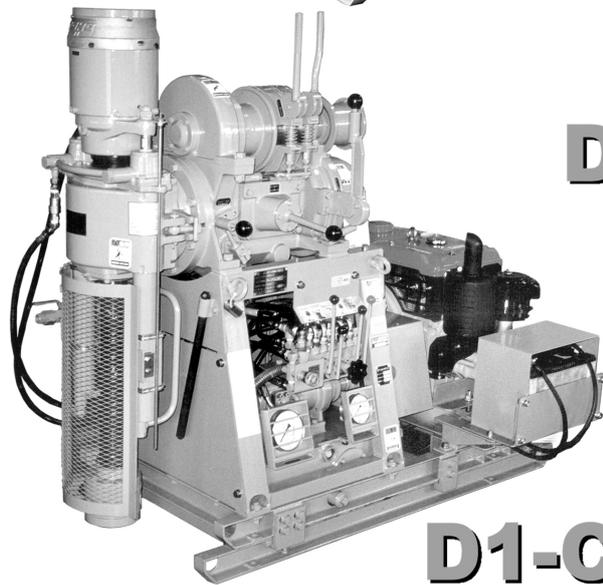
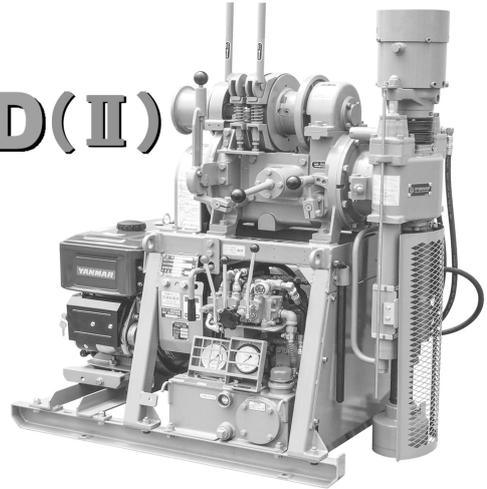
TOHO
DRILLING EQUIPMENT

小型ボーリングマシン

DM-03

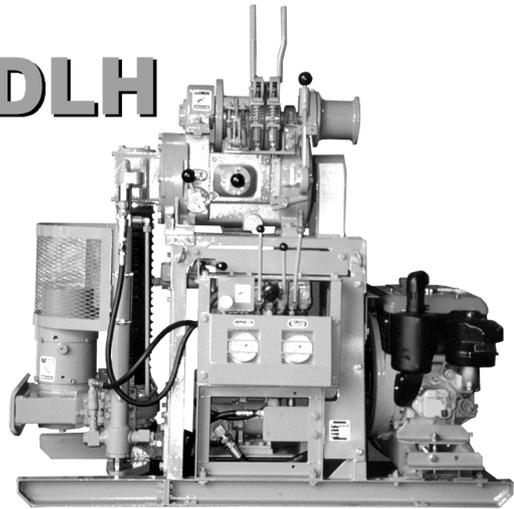


D0-D(Ⅱ)



D1-C

D0-DLH



試錐機には小型ボーリングポンプが内蔵できます。(DM-03を除く)

機種名		DM-03	D0-D(Ⅱ)	D0-DLH	D1-C
穿孔能力	m	30	100	100	280
回転数	min ⁻¹	65,125,370	(A)60,170,330 (B)110,320,625※	(A)60,170,330 (B)110,320,625※	(A)65,130,170,370 (B)90,170,320,490※
スピンドル内径	mm	47	43	43	48,58
ストローク	mm	400	500	500	500
巻上げ力	kN(kgf)	3.9(400)	5.9(600)	5.9(600)	10.8(1100)
スライド	mm		油圧式300※	油圧式300※	油圧式300
動力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質量	kg	180	350(油圧チャック装着時)	475	550
寸法	H×W×L mm	960×550×1115	1225×655×1285	1440×890×1415	1390×735×1580

右操作、左操作をご用意しております。 ※はオプションです。



東邦地下工機株式会社

東京都品川区東品川 3-15-8 TEL 03 (3474) 4141
福岡市博多区西月隈 5-19-53 TEL 092 (581) 3031
URL: <http://www.tohochikakoki.co.jp>

福 岡 ☎ 092(581)3031
東 京 ☎ 03(3474)4141
札 幌 ☎ 011(376)1156
仙 台 ☎ 022(235)0821
新 潟 ☎ 025(284)5164
金 沢 ☎ 076(235)3235

名古屋 ☎ 052(798)6667
大 阪 ☎ 072(924)5022
松 山 ☎ 089(953)2301
広 島 ☎ 082(533)7377
山 口 ☎ 083(973)0161
熊 本 ☎ 096(232)4763

地質調査

通巻158号