

OYO 空中地下探査システム*の地すべり調査への適用

中山 文也・五十嵐 亨

OYO Airborne Survey and Imaging System for landslide applications

Fumiya Nakayama and Toru Igarashi

Abstract

Airborne survey can be applied to a wide area investigation in a short time without trespasses on survey ground. Our airborne survey can get three kinds of geophysical properties, such as electromagnetic, magnetic and radioactivity which provide us for various and useful geological information. Also, we have enhanced our own interpretation technique of these geophysical data by using the Geological Interpretation Support System (GISS) which enables us to present survey result in three dimensions and to extract more useful information.

In this technical note, we introduce the feasibility of the airborne geophysics in landslide investigation. We present a field exploration result for typical Hokusyo type landslide. In this field, we could specify several characterizations of landslide using the result of airborne survey and integrated interpretation by GISS.

キーワード：空中物理探査, GISS, 地すべり, 比抵抗, 磁気, 放射線

まえがき

空中物理探査の大きな特徴は、調査地に直接立ち入らずに、どんなに急峻な地形でも、迅速にかつ一度に広い地域が探査できること、なによりも、その結果が、我々に種々の有用な地質情報が提供されることにある。

また、空中物理探査と3次元地質解析支援システム(以下GISS)¹⁾を組み合わせた「OYO空中地下探査システム」では、探査結果を3次元表示にすることによって、さらに有用な情報の抽出も可能になった。

この技術が、地形や地質、地下水等に大きく影響される地すべり地形の調査に対して、調査手法から地質的解釈に至るまで大きく貢献できるであろうことは容易に想像できる。

ここでは、空中物理探査とGISSを簡単に紹介した後、これらの技術を活かした地すべり調査法、および探査事例を紹介する。

空中物理探査

主として行う空中物理探査は、電磁法探査、磁気探査、放射線探査の3項目で、それぞれの探査概要は以下の通

りである。図-1に空中物理探査の測定状況および測定機器、図-2に測定原理、表-1に測定機器仕様一覧表

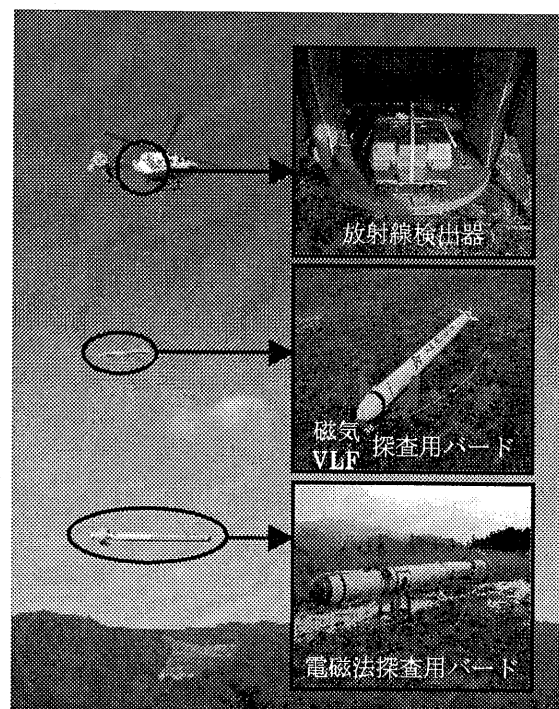


図-1 空中物理探査測定状況および測定機器

Figure-1 View of airborne survey and measurement devices.

* OYO空中地下探査システムとは、空中物理探査技術と3次元地質解析支援システム(GISS)を組み合わせ、空中物理探査結果から地質を総合的に解析する技術で、2002年4月に国土交通省NETISに登録。

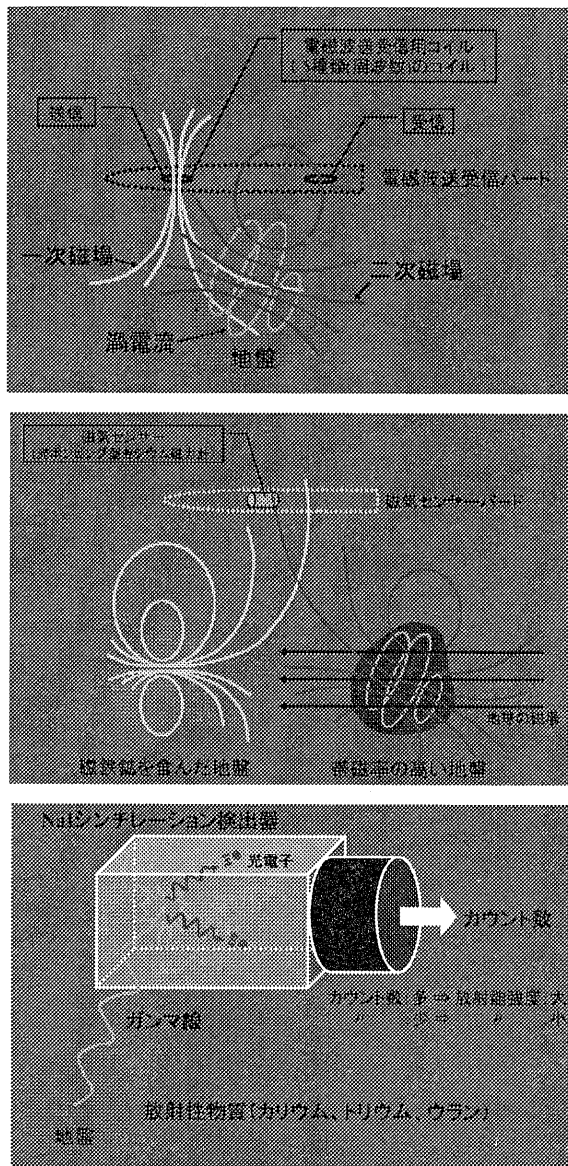


図-2 空中物理探査測定原理
 上図：空中電磁法探査，中図：空中磁気探査，
 下図：放射線探査

Figure-2 Principles of Airborne geophysics.

を示す。また、図-3 に岩石と各物性値との相関図を示す。なお、「岩石の帯磁率」と「岩石の放射線強度」で示す値は、空中物理探査で直接得られる物性値と関係が深いものの、それぞれの値を直接対比できるものではない。

(1) 電磁法探査

電磁気センサー（5周波数：56KHz, 7200Hz, 4800Hz, 900Hz, 385Hz）を収納したボードをヘリコプターによって曳航し、人工的に1次磁場を発生させ、それによって引き起こされる大地の2次磁場を測定・解析し、地下100m～150mまでの3次元的な比抵抗値の分布を探査する方法。

(2) 磁気探査

電磁探査と同様に、磁気センサーを収納したボードをヘリコプターによって曳航し、地層、岩石の持つ磁気を測定し、構成地質、岩質、資源の賦存等を探査する方法。

(3) 放射線探査

ヘリコプターに搭載した、γ線スペクトロメータによって、岩石に含まれるウラン（U）、トリウム（Th）、カリウム（K）等の天然放射性同位元素が放出する放射線の強度により構成地質や岩質等を探査する方法。

GISによる3次元表示

従来の物理探査結果の地質的解釈では、探査結果の2次元的な平面図あるいは断面図等から3次元的な地質構造を解釈してきた。しかしながら、3次元的な地質構造の解釈においては解析者の主観やイメージによるところが大きいため、探査結果の持つ3次元的な情報を見落とししたり、解析者と関係者間で異なる認識をもったりするおそれがあった。また、3次元地質構造のイメージを人間の記憶に頼ることから、長期的なデータ管理の面で問題であった。

これらの問題点をGISや新たに開発した3次元地質解

表-1 空中物理探査測定機器の仕様一覧表

探査手法	仕 様
電磁法探査	<ul style="list-style-type: none"> 水平コイル：56kHz, 4800Hz, 385Hz 水平コイル：56kHz, 4800Hz, 385Hz 各周波数同相・離相2成分測定 ノイズレベル 2 ppm サンプリング間隔 0.1秒 長さ×直径：10,000×600mm 重さ：約200kg
磁気探査	<ul style="list-style-type: none"> 光ポンプ・セシウム磁力計 分解能 0.001nT 測定レベル 20,000～100,000nT サンプリング 0.1秒 長さ×直径：4,300×210mm 重さ：約30kg
放射線探査	<ul style="list-style-type: none"> NaIシンチレーション検出器 容量 16.8^{リットル} (1024cu インチ) チャンネル数 256ch サンプリング間隔 1秒 幅×奥行×高さ：550×900×330mm 重さ：約100kg

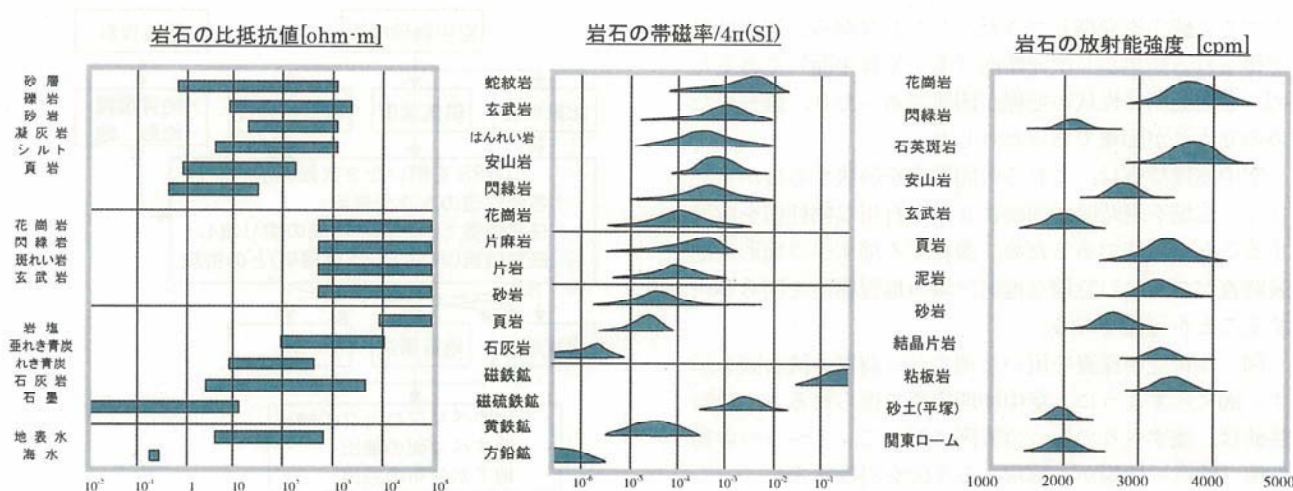


図-3 岩石と各物性値との関係図

左図・中図: 「図解 物理探査」物理探査学会 (1989)

右図: 「地下水・温泉の放射能探査法」落合敏郎 (1989)

Figure-3 Relationship between rock and physical properties.

析支援システム (以下, GISS) を利用して, 空中物理探査の解析結果や他の既知情報等を同時に 3 次元表示することにより解決した。

図-4 に GISS を用いた空中探査結果等の 3 次元表示例を示す。GISS を用いた空中物理探査結果の 3 次元表示の主な特徴は以下の点にある。

- ① 地質情報と種々の探査結果とを同時に 3 次元表示が可能。
- ② 簡単なマウス操作により, あらゆる視点からの動的な 3 次元表示が即時に可能。

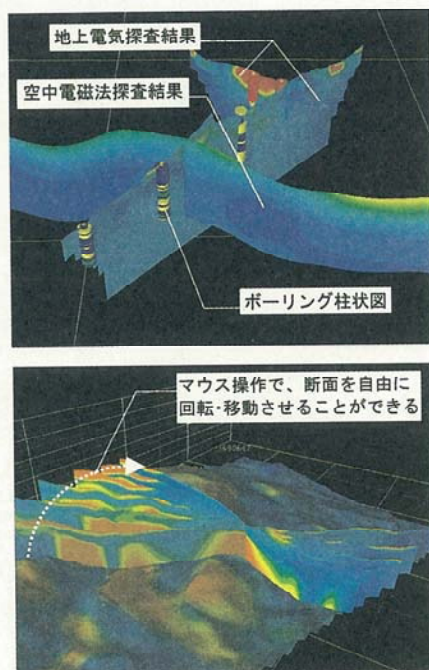


図-4 GISSを用いた3次元表示

Figure-4 Examples of 3-dimension view interpreted by GISS.

③ 簡単なマウス操作により, 任意の位置・角度での断面図の 3 次元表示が即時に可能。

④ 種々の 3 次元的情報を視覚的な情報として保存が可能。

前述したように, 当社の空中物理探査では, 同時に 3 種類の物性値を取得する。これら 3 種類の物性値と地表踏査結果やボーリング結果等の既知情報とを GISS を用いて 3 次元表示することにより, 地形⇔各物性値, 地質⇔各物性値, またはそれぞれの物性値同士の相関関係等を容易に検討することができる。

さらに, これらの相関関係から地質的解釈および地質構造の推定を行い, 地質的な異常箇所を抽出する。この結果を元に, 詳細調査箇所の選定や詳細調査項目の検討を行うことができる。

このように, 空中物理探査を GISS と組み合わせて利用することにより, 広域の地質解釈や詳細調査のための検討を効率よく, かつ正確に行うことができ, 調査全体の効率化および低価格化を図ることができる。

地すべり調査への空中物理探査の適用

地すべり調査では以下の点に着目する。

- ① 素因
 - a) 構成地質: 岩質, 土質
 - b) 地質構造: 地層構成, すべり面となる弱線の存在と傾き
 - c) 水: 地下水, 表面水
- ② 誘引
 - a) 人為的: 設計・管理
 - b) 降水: 降雨, 融雪
 - c) 地震

これら地すべり調査において, 弾性波探査や電気探査等の地表からの物理探査は, ①で述べた素因を把握する

上でその威力を発揮してきた。しかしながら、探査結果で得られる結果が2次元断面（もしくは平面）であるため、3次元的な性状の把握が困難であったり、調査のための立入りが困難であったりした。

空中物理探査は、これらの問題点を解決するばかりでなく、広域を短時間で同時に3つの有用な物性値を取得することが可能であるため、潜在する地すべり地形や地表踏査ができない急峻な地形区域の地質構造を明らかにすることが可能である。

図-5に空中探査を用いた地すべり調査の流れ図を示す。図に示すように、空中物理探査で得られる3つの物性値は、地すべりの3つの素因に対して、1~3つの物性値（観点）情報から解釈する手段を提供する。

地すべり地での適用例²⁾（長崎県北松型地すべり地）

図-6に調査地位置図および図-7に調査地の地形および測線配置図を示す。

調査対象となった地すべり地は、長崎県松浦市の北東端今福川の左岸斜面であり、なだらかな尾根部の前面には急峻な斜面をはさんで緩斜面が発達している。尾根から急斜面部にかけて（高標高部）は玄武岩類、山麓の緩斜面（低標高部）には古~新第三系が分布しており、典型的な「北松型地すべり」の素地を持っている。

ここで、北松型地すべりとは、佐世保層群を中心とする緩傾斜の古~新第三系の上に松浦玄武岩が不整合に広く覆うように台地を形成し、その縁辺部で風化した玄武岩類が滑動・崩壊する大規模な地すべりである。

表-2に調査仕様一覧表を示す。実施した空中物理探

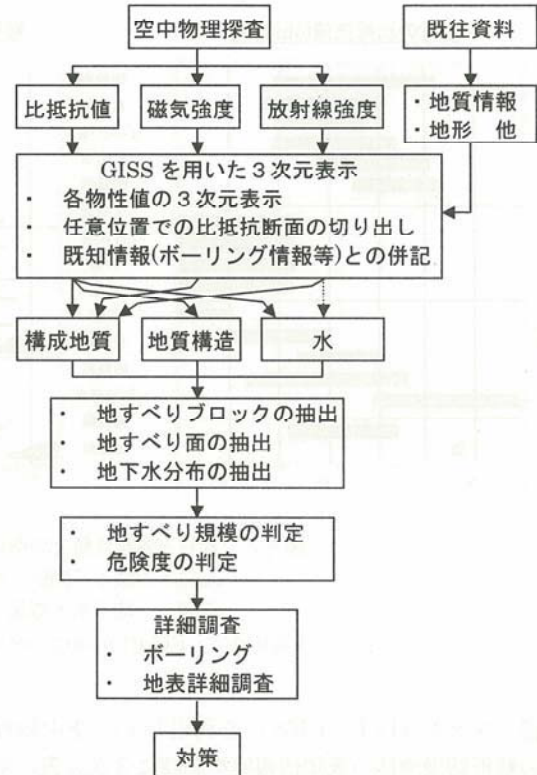


図-5 地すべり調査における空中物理探査の利用方法
Figure-5 A Flow of airborne survey at investigation of landslide.

査の項目は、空中電磁法探査・空中磁気探査・空中放射能探査の3項目である。測線は原則として100m間隔、最重要区域を50m間隔で測定飛行を行った。

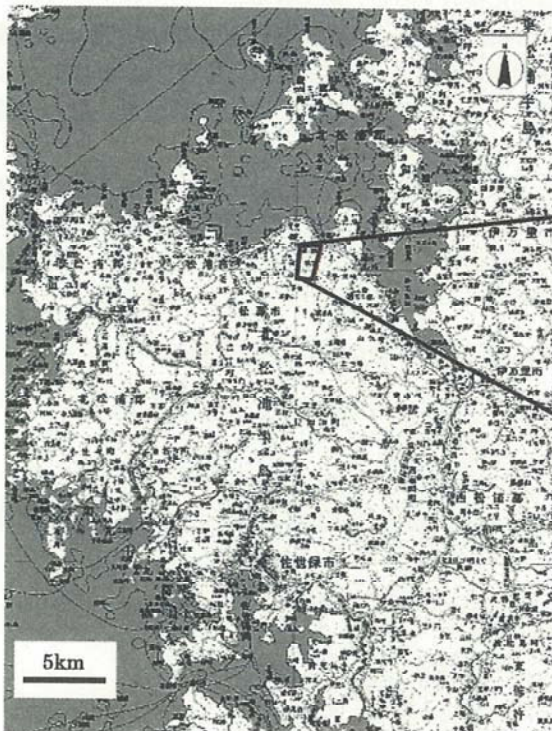


図-6 調査地位置図
Figure-6 Location of survey area.

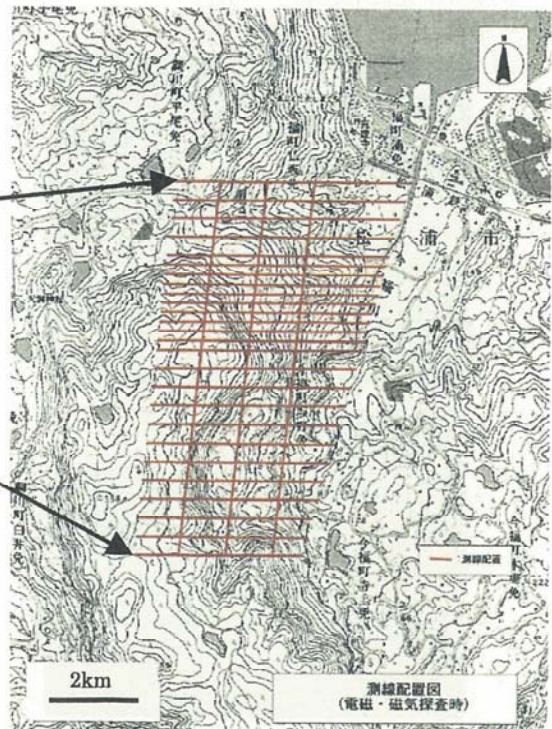


図-7 調査地の地形および測線配置図
Figure-7 Geography of survey area and location of survey lines.

表-2 調査仕様一覧表
Table-2 Specification of Survey

探査手法	測定仕様	数 量
空中電磁探査 (空中磁気探査と同時測定)	主測線方向：東西方向 測線間隔：50m および 100m 対地高度：30~60m 対地速度：50km/h 程度	<ul style="list-style-type: none"> 調査距離：33.7km 調査面積：2.13ha 測線数：29 測線
空中磁気探査 (空中電磁探査と同時測定)	主測線方向：東西方向 測線間隔：50m および 100m 対地高度：45~75m 対地速度：50km/h 程度	
空中放射線探査	主測線方向：東西方向 測線間隔：100m および 200m 対地高度：100m 対地速度：50km/h 程度	<ul style="list-style-type: none"> 調査距離：28.1km 調査面積：2.13ha 測線数：24 測線

探査結果

図-8 に探査結果を示す。

比抵抗平面図は、電磁法探査から得られたデータ（2次磁場の同相・離相成分および対地高度）から測線下の比抵抗値とその重心深度を求め（sengpiel, 1988）³⁾、3次元的にグリiddingすることにより、深度60mにおける比抵抗分布を示したものである。

極磁気異常図は、得られた全磁力から国際標準地球磁場（IGRF）を差し引き、より表層付近の磁気異常を抽出した。また、磁気異常を見やすくするため極磁気変換を行った。

放射線強度分布図はカリウムからの放射線を示した。どの物性値もキャップロックを呈する玄武岩とその下の堆積岩類の境界が明瞭に現れていることが分かる。

探査結果から推定される地すべり素因

地すべり調査では、地すべりの素因となる構成地質や

その構造、水の分布を把握することが重要である。そこで、GISSを用いて空中物理探査結果および地形から、それぞれの素因について推定を試みた。

① 物性値と表層地質について

図-9 に磁気異常分布図および表層地質区分（地質調査所発行 5万分の1地質図を引用）を示す。

一般に空中物理探査で得られる物性値のうち、磁気異常分布と放射線強度分布が表層地質分布との対応が高い。本調査地においては、磁気異常分布図と既存資料とが概ね合致しているが、むしろ玄武岩類の分布は磁気異常分布の方が、後述するボーリング結果との対比や現地踏査結果などから、現地の状況をより詳細に表現していると考えられる

また、電磁法探査は地層の3次元的な比抵抗情報が得られ、地層や岩石の相違のみならず、風化や変質程度、あるいは地盤の含水率などにも鋭敏に反応するため種々の検討が可能である。

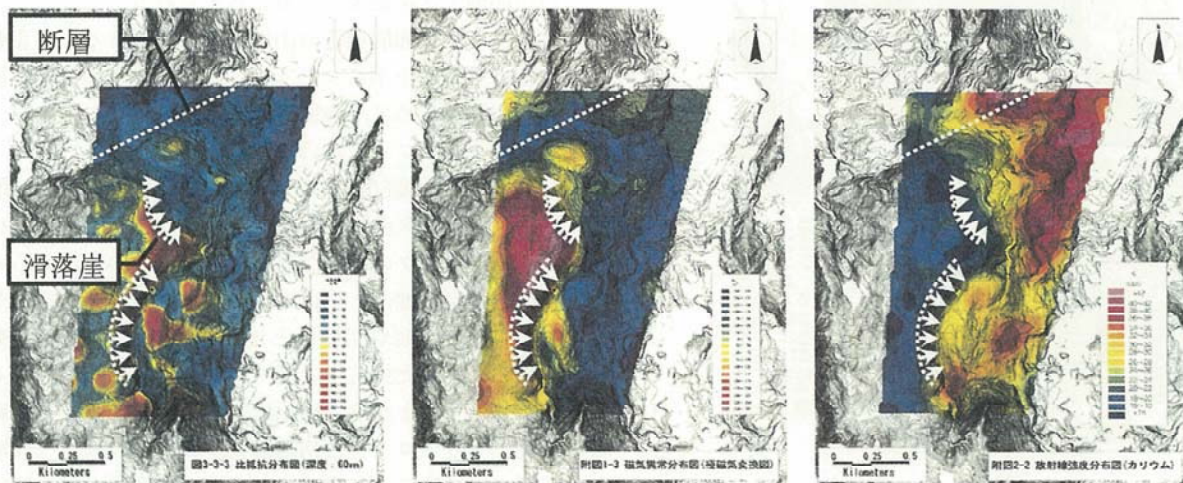


図-8 空中物理探査結果平面図

左図：比抵抗平面図（深度60m）、中図：極磁気異常分布図、右図：放射線強度分布図（カリウム）

Figure-8 The result of airborne survey(plane view).

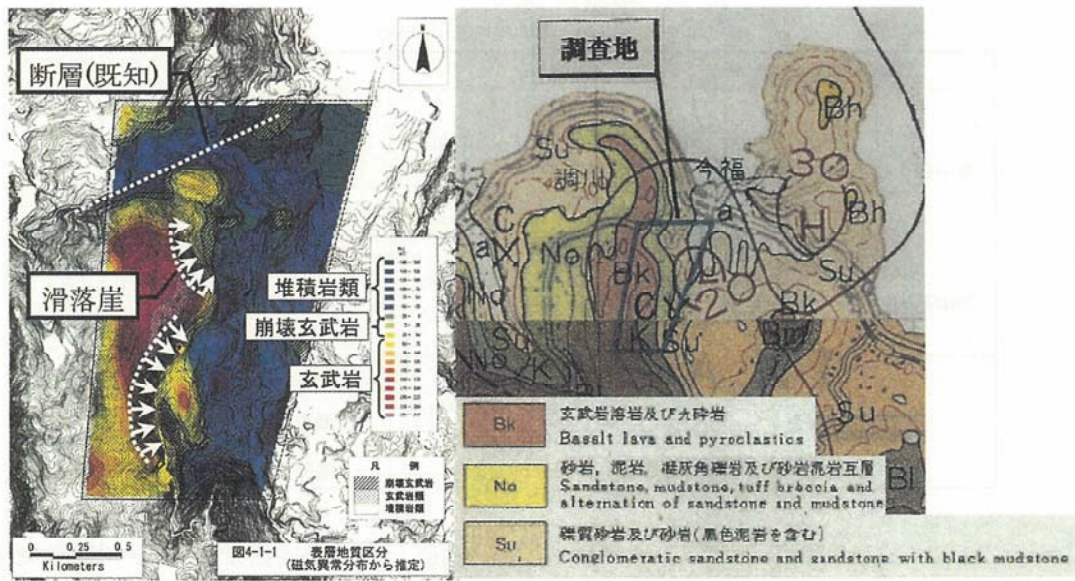


図-9 磁気異常分布図と表層地質区分
 (右図は地質調査所発行 5万分の1地質図を引用)
 Figure-9 Magnetic survey result and geological map.

② 地下水の分布について

図-10に深度10mにおける比抵抗分布図を示す。空中電磁法探査で得られる比抵抗値から地下水の情報が得られる。今回の一連の調査では、地形と現地踏査した時得られた情報を基にして、約50Ω・mを基準値とした。その結果、大局的には堆積岩類からなる滑落崖下の低地やその周辺斜面、および谷部などでは50Ω・m未満の低比抵抗であり、高含水の地層が分布しているものとみ

なされる。

また、山頂部に分布する玄武岩類の地域でも、深度10mの比抵抗値は変化に富んでおり、低比抵抗部が“島状”に点在する。これは、現地踏査の結果、多くは亀裂の発達した、あるいは岩塊状の堅固な玄武岩であるが、一部には細粒の火砕物を含む箇所もある。また調査地の西部、山頂に近い緩斜面には、赤褐色に風化変質して土状化した層が地表面に分布している。これらの状況から、玄武岩分布域での低比抵抗箇所は、細粒物が卓越しているものと推定される。細粒分が多いということは滞水し易いということであり、高含水の場所とみなされる。

しかしながら、本調査地においては地下水面を抽出するに至らなかった。比抵抗は地すべり土塊中に存在する自由面地下水を捉えていると考えられる。

地すべり斜面崩壊等の山地災害を解明する上で重要な要因となる地下水については、比抵抗構造の詳細解析手法の開発を含めて、今後の課題である。

③ 地すべりブロックの抽出について

図-11に深度60mにおける比抵抗分布図および地すべりブロック区分図を示す。地すべり調査・対策では地すべりブロックの把握が重要であることからこれらの抽出を試みた。地形、特に本地すべり地特有の滑落崖や滑落崖下の平坦地や凹地形と地下深部(深度60m以深)まで伸びる低比抵抗帯(図-13参照)との分布がよく一致していることから、低比抵抗帯によって囲まれた範囲を地すべりブロックと想定した。一般には地すべり地は初期すべりである一次すべりによって形成された移動土塊中に二次・三次すべりが重なる場合が多い。ここで抽出したブロックは初期すべりに相当する最も大規模な移動土塊と考えている。

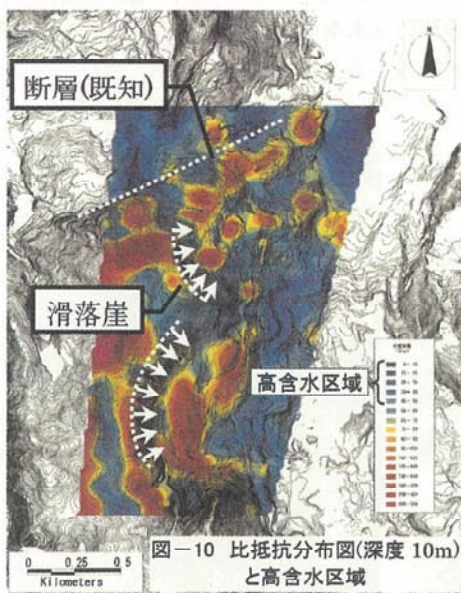


図-10 比抵抗分布(深度10m)と高含水区域
 Figure-10 High water content area estimated by resistivity distribution result at the depth of 10m.

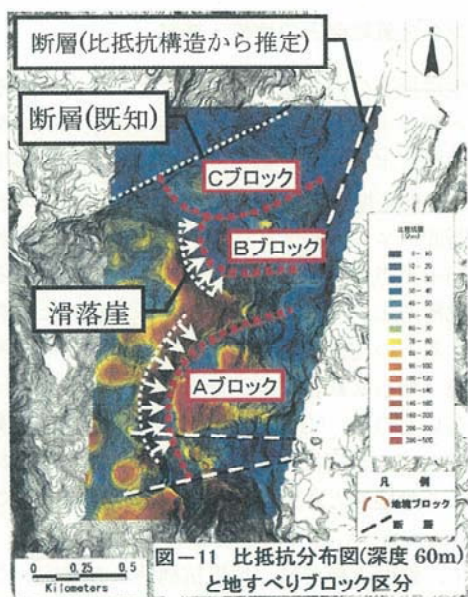


図-11 比抵抗分布図(深度60m)と地すべりブロック区分
Figure-11 Landslide block distribution estimated by the resistivity distribution at the depth of 60m.

④ 地すべり規模の抽出

図-12に比抵抗分布図(深度60m)と各ブロックの代表比抵抗断面図を示す。地すべり規模の抽出には三次元の比抵抗情報を持つ空中電磁法探査が有効である。

以下に、各ブロックの特徴を述べる。なお、地質分布に関しては、既存資料(地質調査所発行の地質図)を参考にした。

【Aブロック】

Aブロックの中央やや南を東西に切る比抵抗断面図である。基盤岩は砂岩を主とした堆積岩類と、高標高部には玄武岩類が載っている。大局的な比抵抗構造は、地表からある深度まで比抵抗は低下し、その後深度の増加とともに高比抵抗となる。この最も低くなっている比抵抗部をつないだ線が、不動地盤と移動土塊の境界とみなした。

これは、一般に不動地盤の表面は風化変質しており、粘土などの細粒分が多く比抵抗値が低くなるからである。また、斜面下部ほど低比抵抗層が厚くなっており、急傾斜をなす山地よりも裾野の緩傾斜で風化が激しい一般的事実とよく合致している。

一方、不動地盤の上に乗る移動土塊とした層の比抵抗構造は、表層部で高く深度とともに低比抵抗となっている。これは表層部が不飽和帯を形成し、徐々に含水比が多くなって、飽和帯が形成されていると考えられる。

【Bブロック】

Bブロックのほぼ中央を南西-北東方向に切る断面である。不動地盤と移動土塊との境界は、Aブロックに比べて明瞭でない部分があるものの、Aブロックの基準に従った。

断面左側の基盤岩類をなす堆積岩類と玄武岩類との境界は、比抵抗構造と比較的よく整合している。すなわち両層の境界は、急崖の末端部では標高約200m程度、それから南西へ高くなり標高約250m程度が境界となっている。また、移動土塊中の低比抵抗部は、Aブロックの場

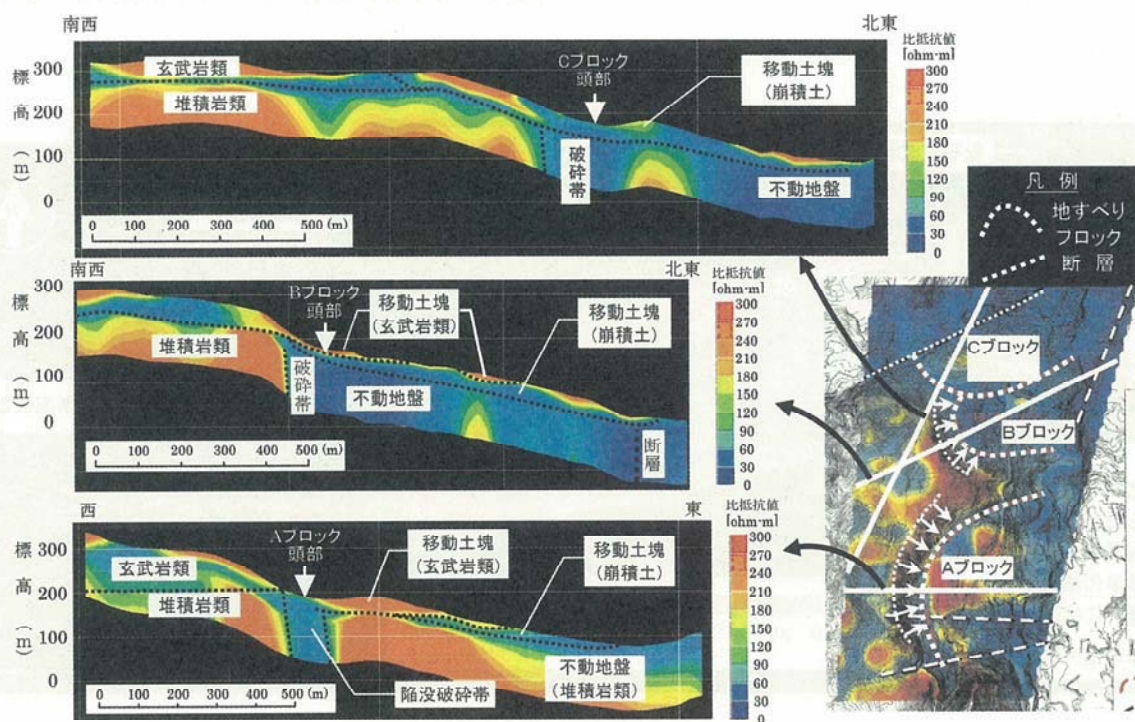


図-12 比抵抗分布図(深度60m)と各ブロックの代表比抵抗断面図
Figure-12 Distribution of resistivity at the depth of 60m and sectional view of resistivity distribution on each landslide block.

合と同様に、緩傾斜をなす場所の下部に分布し、強風化変質層が厚く分布しているものと考えられる。

移動土塊中の低抵抗部は、Aブロックの場合と同様に、緩傾斜をなす場所の下部に分布しており、強風化変質層が厚く分布しているものと考えられる。

また、不動地盤である堆積岩類に相当する比抵抗値は、急崖付近（ブロック頭部付近）を境として対照的となっている。すなわち、南西部の山地下では、高比抵抗であるが、急崖よりも北東側では全般に低比抵抗となっている。地域による基盤岩類の比抵抗値の相違が何に起因するものなのか、現時点では必ずしも定かではない。また、断面図の右端の低比抵抗帯は、断層を捉えた結果と考えられる。さらに、急崖の地下に見られる比抵抗の急変は、地質構造に起因した不連続面と考えられる。

【Cブロック】

調査地の北部、Cブロックのほぼ中央を南西—北東方向に切った断面である。不動地盤と移動土塊との境界は、他のブロックと同じ基準に従って設定した。

山頂部に載る玄武岩類とその基盤をなす堆積岩類との境界は明瞭であり、標高約240m～270m付近で、全体的には緩い傾斜となっている。

一方、不動地盤の堆積岩類に対比される比抵抗構造は、Bブロックと同様に、断面図の中央付近を境にして異なる。この境界は、断面中央の分離小山の北麓に相当し、北東—南西方向の断層の位置である。したがって、急傾斜をなす比抵抗構造は、基盤に形成された断層に伴う破碎帯を捉えているものとみなされる。

ボーリング調査結果との比較・検討

空中物理探査の内、電磁法探査によって得られる比抵抗構造と既存ボーリング調査結果との比較・検討を行った。図-13にボーリング結果と比抵抗断面図（深度100m）および推定地質断面図、図-14にボーリング結果と比抵抗断面パネル（50mピッチ、深度50m）の鳥瞰図を示す。図中の点線は、ボーリング位置近辺における3次元比抵抗構造とボーリング結果とから推定した地質境界である。双方の結果を比較すると、表層付近や局所的な地質構造（転石玄武岩）等細かい層区分については一致していないものの、GISSを用いて3次元比抵抗構造と比較すると、これらは大局的に一致し、また、これらの結果から不動地盤と移動土塊との境界を推定することができた。

ここで、斜面下部では、比抵抗構造より推定した境界深度が掘削深度よりも深い深度にある。空中物理探査を実施し地すべり規模の概略を把握することは、ボーリング調査等の詳細調査を行うにあたり非常に重要な基礎資料に資すると考える。

おわりに

全国でも有数の地すべり地帯である長崎県において、典型的な北松型地すべりの素地を持つ区域で空中物理探査を実施し、その結果をGISSを用いて地質解析することにより、今後の詳細調査や対策工事のための基礎資料として有意な結果を得ることができた。

今後は他の種類の地すべりに対してはもちろん、砂防事業等のより細かな調査地への空中物理探査の適用性を

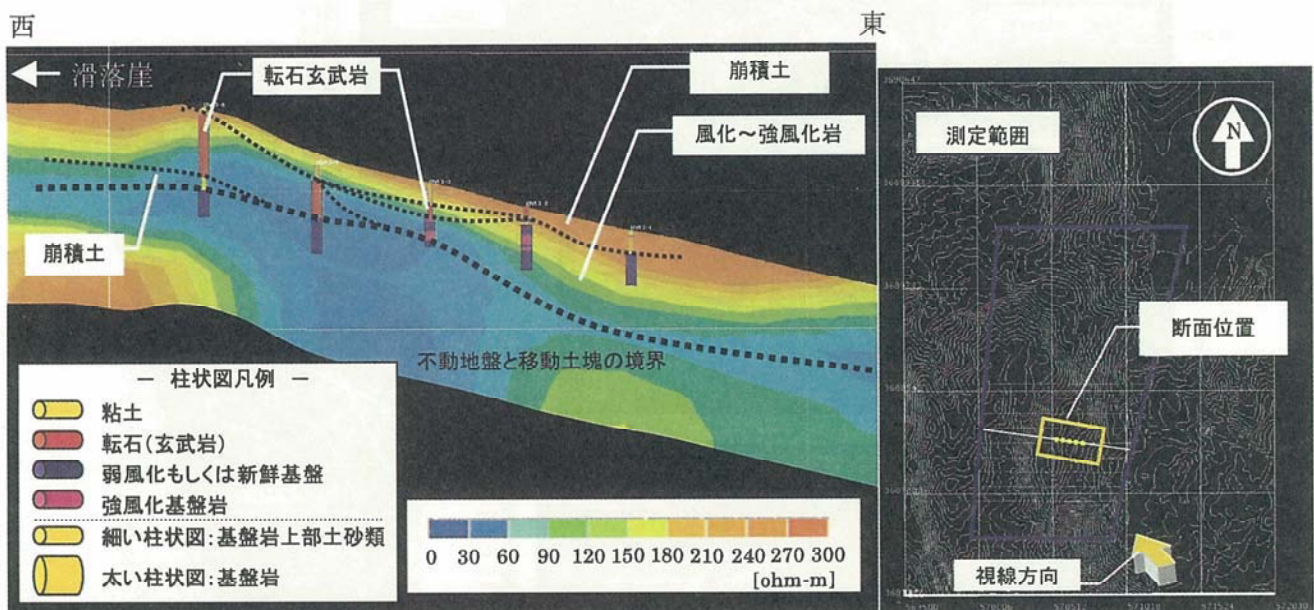


図-13 ボーリング結果と比抵抗断面図および推定地質断面

Figure-13 Sectional view of resistivity distribution with borehole logging data and estimated geological layer.

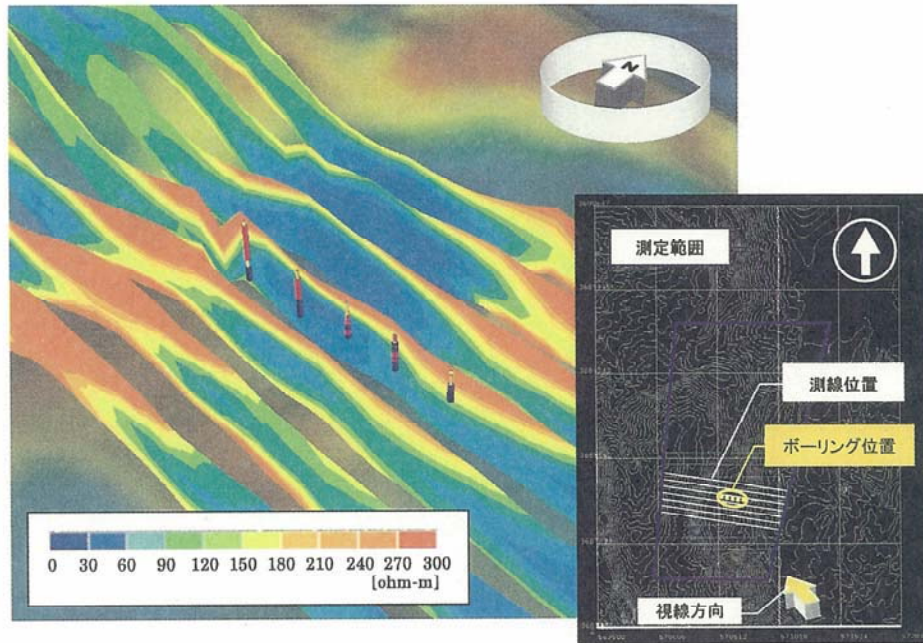


図-14 ボーリング結果と比抵抗断面パネル鳥瞰図

Figure-14 Bird view of resistivity distribution sectional panel and borehole logging data.

評価・検討するとともに、他技術との組み合わせによる新たな事業を展開していきたいと考えている。

謝 辞

長崎県北振興局森林土木課の新見氏には、データの使用に関するご承諾、および多くの御教示、御助言を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原 弘, 小川卓司 (2000): 3次元地質解析支援システム, 応用地質年報, No.20, pp.131-138.
- 2) 長崎県 (2002): 13林地測第3号 地すべり防止工事調査等業務 (溪流3工区).
- 3) Sengpiel, K. P. (1988): Approximate inversion of AEM data from a multilayered Ground, Geophys. Prosp., 36, pp446-459.

