

地熱資源ポテンシャル評価を目指した空中物理探査 Regional Airborne Survey for the Evaluation of Geothermal Potential in Japan

島田 忠明^{1*}; 高井 克己¹; 三宅 一弘¹; 久谷 公一¹; 當舎 利行¹
SHIMADA, Tadaaki^{1*}; TAKAI, Katsumi¹; MIYAKE, Kazuhiro¹; HISATANI, Koichi¹; TOSHA, Toshiyuki¹

¹ 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

¹ Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

2012年8月の法律改正により、石油天然ガス・金属鉱物資源機構に地熱資源の開発を促進する業務が追加となった。この業務は、地熱開発事業者が実施する地質構造調査における助成、探査段階における出資、開発における債務保証、自主的な調査による情報提供、技術開発がある。その自主的な調査の一環として、広域的な空中物理探査を実施することとした。この調査により、地熱開発事業者が新規の地熱資源調査に着手する際に参考となる基礎的なデータの提供ができることになる。

地熱資源の多くは山岳地域にあり、その多くは国立・国定公園に指定されていることが多い。空中物理探査は、現地へのアクセスが困難な地域や地表の改変許可を得るのが困難な地域において物理探査データが取得できる有効な調査手法である。最新の技術である重力偏差法探査（Gravity Gradiometer method）および時間領域電磁探査（Time-Domain Electromagnetic method）の手法によって、地熱資源ポテンシャル評価の基礎的な情報である地質構造の把握を主な目的として空中物理探査を行うこととした。

重力偏差法探査は重力勾配計を用いた探査手法で、重力ポテンシャルの二次微分値を直接測定する。通常重力探査に比べ、高分解能で地下構造を把握することが可能である。一方、時間領域電磁探査は、周波数領域電磁探査と比べ地下の比抵抗の変化に敏感であるという利点から高精度な測定が期待できる。また、使用する測定機器の仕様から探査深度数百メートル程度を期待している。

ただし、空中重力偏差法探査および時間領域空中電磁探査とも、国内での実績がまだないことから、手法の検証も含め、既往調査が多く行われている地域を対象に実施することとなった。

実際に空中物理探査を行うには、計測機器を航空機に搭載することになる。今般の探査では固定翼機ではなく、ヘリコプターに計測機器を搭載することとした。なお、航空機に計測機器を搭載するには、改造の許可を航空局より受ける必要がある。この手続きに時間を要し、電磁探査は実施できなかったが、重力探査は実施することができた。

2013年10月から11月に九州のくじゅう地域および霧島地域において空中重力偏差法探査のみ実施した。くじゅう地域では測線長約2,200km、霧島地域では測線長約500kmのデータを取得することができた。この空中物理探査の内容について報告する。

現地の調査にあたり、地元自治体および関係機関の各位に協力をいただいた。ここに謝意を表する。

キーワード: 空中物理探査, 地熱, 重力, 重力探査, 電磁探査

Keywords: airborne survey, geothermal resources, gravity, gravity survey, electromagnetic survey

空中電磁探査技術を活用した深層崩壊の予測技術に関する研究 Study on the prediction of the deep catastrophic landslide using the Airborne Electromagnetic Survey

河戸 克志^{1*}; 木下 篤彦²; 高原 晃宙²; 一色 弘充²; 石塚 忠範²; 奥村 稔¹; 内田 浩一¹

KAWATO, Katsushi^{1*}; KINOSHITA, Atsuhiko²; TAKAHARA, Teruyoshi²; ISSHIKI, Hiromitsu²; ISHIZUKA, Tadanori²; OKUMURA, Minoru¹; UCHIDA, Koichi¹

¹ 大日本コンサルタント株式会社, ² 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

¹ Nippon Engineering Consultants Co., LTD., ² Public Works Research Institute

平成23年台風12号による紀伊半島の災害をはじめとして、近年、深層崩壊による災害が多発している。深層崩壊による被害としては、崩壊そのものによって被害も大きなものになるが、河道が閉塞し天然ダムが形成された場合には決壊により下流域に大きな被害が生じるおそれもある。このため、深層崩壊によるリスクを評価するための様々な取り組みが行われている。特に国土交通省は、平成22年に過去に深層崩壊が発生した箇所での第四紀隆起量と地質に着目した深層崩壊推定頻度マップを公表するとともに、平成24年には深層崩壊溪流レベル評価マップ及び深層崩壊跡地密度マップを公表している。今後は想定しうる深層崩壊対策をハード・ソフトの両面から実施するため、斜面スケールでのリスク評価が求められている。斜面スケールでのリスク評価手法として、これまでレーザ計測による微地形要素の抽出などが主流であったが、最近になって空中電磁探査がクローズアップされている。空中電磁探査のメリットとして、深層崩壊に関連する地質境界が明らかとなる可能性があること、地下の水文特性が明らかとなる可能性があること、などが挙げられる。一方で、地質境界の比抵抗値や地下水の賦存箇所の決定方法が明確でないなどの不確定要素もある。本研究では、これまでに空中電磁探査が実施された深層崩壊発生箇所を対象に、空中電磁探査、地質調査、水文調査等の結果を整理し、深層崩壊の発生の恐れがある箇所での鉛直方向の比抵抗パターンの特徴や、深層崩壊のすべり面となる可能性の高い地質境界での比抵抗値のしきい値の設定方法について検討を行った。

研究対象は、別府田野川流域(約4.4 km²)、富士川流域(約3.7 km²)、姫川流域(約15.2 km²)、熊野川流域(約10.1 km²)の4地域である。これらの地域は、いずれも深層崩壊の発生実績があり、かつ空中電磁探査による広域調査が実施されている。なお、別府田野川流域・富士川流域・熊野川流域の地質は四万十帯の砂岩・頁岩であり、姫川流域の地質は火山岩類が優勢である。

本研究では、先ず、空中電磁探査による地域ごとの比抵抗特性について検討した。対象地域に出現する比抵抗値の範囲は、別府田野川流域と富士川流域では1~400 Ω・mであるのに対し、姫川流域では1~1,200 Ω・m、熊野川流域では1~2,400 Ω・mを示し、地質や地域によって比抵抗値の分布に差があることが分かった。一方、深層崩壊の発生の恐れがある箇所での地表から深部への鉛直方向の比抵抗パターンに着目すると、低比抵抗から高比抵抗に変わるパターン、高比抵抗から低比抵抗に変わるパターン、高比抵抗から低比抵抗に変わりさらに高比抵抗に変わるパターンの3パターンがあることが分かった。このことから、鉛直方向に比抵抗値が変化する深度が深層崩壊の基底部となる可能性がある。別府田野川流域、富士川流域、姫川流域ではボーリング調査が実施され、ボーリングコアの観察から風化部と新鮮部の地質境界が認定されている。この地質境界に対応する比抵抗値は、別府田野川流域では100 Ω・mが、富士川流域では70 Ω・mが、姫川流域では500 Ω・m、680 Ω・m、1,000 Ω・mであった。

これらのことから、比抵抗値の出現頻度や地質境界に該当する比抵抗値は、地域や地質によって異なることが確認された。したがって、空中電磁探査を実施する際には代表箇所でもボーリング調査を併せて実施し地質と比抵抗値の関係を整理した上で深層崩壊のリスク評価を実施する必要がある。

なお、熊野川流域の深層崩壊箇所では、尾根から谷部に連続する低比抵抗ゾーンや鉛直方向の低比抵抗ゾーンが共通して確認され、水文調査結果による地下水状況と一致している。このことから、今後、深層崩壊に関連する比抵抗構造についてもデータを蓄積し、深層崩壊の発生の恐れがある箇所の抽出方法、崩壊深・土砂量の推定方法を検討していきたいと考えている。

キーワード: 空中電磁探査, 深層崩壊

Keywords: Airborne Electromagnetic Survey, deep catastrophic landslide

空中電磁探査技術を活用した火山体における大規模崩壊予測技術に関する研究 Study on the prediction of the large landslides of the volcanoes using the Airborne Electromagnetic Survey

木下 篤彦^{1*}; 高原 晃宙¹; 一色 弘充¹; 石塚 忠範¹; 大平 知秀²; 大森 徹治³; 山根 宏之³; 荒井 健一⁴; 清野 耕史⁵; 辻岡 秀樹⁶

KINOSHITA, Atsuhiko^{1*}; TAKAHARA, Teruyoshi¹; ISSHIKI, Hiromitsu¹; ISHIZUKA, Tadanori¹; OODAIRA, Tomohide²; OMORI, Tetsuji³; YAMANE, Hiroyuki³; ARAI, Kenichi⁴; KIYONO, Koji⁵; TSUJIOKA, Hideki⁶

¹ 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム, ² 国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所, ³ 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所, ⁴ アジア航測株式会社, ⁵ 大日本コンサルタント株式会社, ⁶ 応用地質株式会社
¹Public Works Research Institute, ²Fukushima River and National Highway Office, ³Fuji Sabo Office, ⁴Asia Air Survey Co., Ltd., ⁵Nippon Engineering Consultants Co., Ltd., ⁶OYO Corporation

活動が活発な火山の下流域では常に土砂災害が発生する危険性がある。特に豪雨時に大規模な山体崩壊が発生した場合には崩壊土砂が土石流化し下流域で土砂堆積や氾濫により大きな被害が発生する恐れがある。これまで例えば深層崩壊地などで空中電磁探査を用いて風化土層厚を推定する手法が提案されている。一方で、豪雨時等に崩壊の可能性がある斜面を予測するには、崩壊面を推定する手法を確立すること、斜面における水文過程を推定すること、等が必要であるが、現在のところこれらについて十分に検討されているとは言い難い状況である。そこで本研究では吾妻山、富士山を事例とし、空中電磁探査を実施し併せて実施した地質調査や水質調査の結果から崩壊面の推定手法及び水文過程を予測する手法について検討を行った。

本研究では、まず、吾妻山、富士山において、地形・地質の特徴、土砂災害の実績、火山活動履歴等の文献調査を行った。次に現地調査を行い、大規模土砂移動に関連した土質構造の確認、土砂移動の原因となる熱水変質状況の確認、湧水・温泉湧出状況の確認を行った。これらの結果を参考にして空中電磁探査のエリア等を検討した。探査対象は山体の頂部や代表的な火口が含まれ、大規模な崩壊が起こりうる15°以上の勾配を含むエリアとした。探査エリアは吾妻山が約18km²、富士山が約120km²であった。空中電磁探査の結果は深度ごとに平面的に整理するとともに火口や地下水位が高い箇所等土砂災害の発生が予想される箇所については測線を引いて深度方向の比抵抗値も縦断的に把握できるように2次元的に整理した。これらの低比抵抗値結果を従来の地形・地質の調査結果と照らし合わせ空中電磁探査の結果との適合性を検証した。また、さらに詳細に空中電磁探査の結果の適合性を確認する目的で、吾妻山では周辺の10溪流で水文・水質調査を行った。調査項目は、流量・電気伝導度・pH・水温・イオン状シリカ濃度などであった。また、富士山では、空中電磁探査による比抵抗値と地質との関係を調べる目的でボーリング調査も実施した。

これらの調査結果から、火山地域で空中電磁探査を用いることにより、地質区分をおよそ推定できること、地下の水文状況を把握できることが分かった。このことから、空中電磁探査を用いれば豪雨時に崩壊する可能性がある斜面をおよそ予測することが可能である。一方で、空中電磁探査のみであると崩壊深や崩壊土砂量などを詳細に推定することはできない。これらを推定するには、空中電磁探査の結果から危険な箇所を推定すること、その箇所でボーリング調査や地上での物理探査を実施すること、水質・水文調査を実施することなどその他の調査を実施することによって空中電磁探査の結果を補足する必要がある。今後はモデル的にいくつかの火山で空中電磁探査を含む調査を実施し、データを蓄積していくことにより火山地域での崩壊危険箇所の推定技術、崩壊深・土砂量の推定手法を確立していきたいと考えている。

キーワード: 空中電磁探査, 大規模崩壊, 火山

Keywords: airborne electromagnetic survey, large landslide, volcano

空中磁気測量データ解析にもとづくトンネル地質構造とその検証 Verification of the tunnel geological structure based on the helicopter-borne magnetometry data analysis

岡崎 健治^{1*}; 伊東 佳彦¹
OKAZAKI, Kenji^{1*}; ITO, Yoshihiko¹

¹ (独) 土木研究所寒地土木研究所
¹ CERI, PWRI

1. はじめに

トンネル建設では、地質工学情報の精度向上が、工程管理や事前のリスク回避にとって重要である。特に、付加体のような複雑な地質地域では、より正確な情報がトンネル建設において求められる。筆者らは、北海道東部の付加体堆積物分布地域の山岳トンネルを対象に空中磁気探査を実施し、地表踏査やボーリング調査など事前の地質調査結果と、その後のトンネル掘削で明らかとなった地質情報を比較検討することで本調査地域における適用性を明らかにしたので報告する。

2. 調査概要

調査地は北海道東部における山岳地帯である。調査対象トンネルは、延長910m、最大土被り厚さ150mの道路トンネルである。トンネルの地質は、付加体堆積物である緑色岩類、火山砕屑性堆積岩、ハイアロクラスタイト、枕状溶岩、チャート、石灰岩（以上、仁頃層群）ならびに正常堆積物である白亜系の主に礫岩および砂岩（佐呂間層群）からなる。また、調査地周辺では、付加体形成時およびその後の構造運動で形成されたと考えられる断層破砕帯が多数発達する。

空中磁気探査では調査範囲の相対的な磁力強度分布を求めた。トンネル地山の地質構造は、計測した磁気データをもとに Mag2dc (Cooper, 2003) によって推定した。この事前調査で推定した地質モデルを、実際のトンネル建設で判明した地質状況と比較し、本調査手法のトンネル地質調査への適用性について検討した。なお、検討に先立ち、磁気データが示す基本的な情報を把握するため、特定の磁気異常体を設定して、その角度、傾斜、幅、深さ位置および帯磁率の違いによる磁気異常体の検出の違いや傾向について確認した。

3. 調査結果

北海道の付加体地域のトンネル地山を対象に空中電磁探査を行い、他の地質調査結果と比較検討し、トンネル地質調査における適用性を明らかにした。

1) 空中磁気探査によって求めた磁気強度分布と地表踏査などで推定した地質構造から逆解析により地質モデルを構築した。対比にあたっては、岩石サンプルでの磁気強度計測結果を参考に、高い磁気強度は佐呂間層群の堆積岩、断層が発達する水冷破砕岩、塊状玄武岩の分布箇所、低い磁気強度はチャートや石灰岩の分布箇所であると推定してモデルを構築した。

2) 事前に構築した地質モデルを、トンネル掘削直前の先進ボーリングのコア調査結果を対比したところ、地質モデルは概ね対応していることが判明した。

本地域での検討の結果、空中磁気探査による磁気強度の分布は、地質の分布状況を検討するために有効であり、また、事前に構築した地質モデルは、概略的な検討に活用できることがわかった。これらの岩石の分布をトンネルの掘削前に把握することができれば、地質に起因する問題点を検討するための情報として有効といえる。

キーワード: 空中磁気探査, 磁気異常, 付加体, 道路トンネル

Keywords: helicopter-borne magnetic survey, magnetic anomalies, accretionary complex, road tunnel

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波浸水域の磁気構造 Magnetic structure of the tsunami inundation area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

大熊 茂雄^{1*}; 上田 匠¹; 中塚 正¹; 光畑 裕司¹; 神宮司 元治¹; 内田 利弘¹
OKUMA, Shigeo^{1*}; UEDA, Takumi¹; NAKATSUKA, Tadashi¹; MITSUHATA, Yuji¹; JINGUUI, Motohara¹; UCHIDA,
Toshihiro¹

¹ 産業技術総合研究所地質調査総合センター

¹ Geological Survey of Japan, AIST

仙台平野南部地域および福島県松川浦地域の2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波浸水域では、津波浸水の影響を評価することを主目的に2012年6月に空中電磁探査を実施している。その際、地下の比抵抗分布に対応した電磁応答の測定(電磁探査)とは別に、高感度空中磁力計により地磁気全磁力の測定(磁気探査)も行っている(Okuma et al., 2013)。電磁探査による可探深度は当該地域において高々100m程度である一方、磁気探査ではより深部の調査も可能であり、対象とする物性は異なるものの地下構造解釈の点で相補的な利用が見込める。そこで、今回観測した地磁気全磁力データの処理と解析を行ったので、この結果について発表する。

空中磁気探査は電磁バードの中央に収容されたセシウム磁力計センサーにより、空中電磁探査と同様に10Hzのサンプリング周期で実施された。調査地域には、住宅地や工場、沿岸域の臨時ゴミ集積場、焼却場などがあり、これらに伴う人工的な磁気異常も観測されている。加えて、今回観測磁気データに通常の処理を行ったところ、いわゆるHerringbone effectと呼ばれる矢筈模様の磁気異常が検出された。これは、機体磁気による影響と考えられ、約20nT程度の方位誤差が認められた。この誤差は、当該地域が概ね磁気異常の静穏域であることから、決して無視できない大きさである。磁気センサーを収容した電磁バードは機体から30m下方につり下げられているものの、使用した機体が比較的磁気ノイズが大きいことで知られているAS350B3であったため、その影響が地磁気に重畳して観測されたものと考えられる。

機体磁気の影響を軽減するため、日変化補正、IGRF残差計算を行った後、拡張交点コントロール法(Nakatsuka and Okuma, 2006)を観測地磁気データに適用し、滑らかな観測面上の全磁力異常図を作成した。この結果、機体磁気による方位誤差の影響が軽減され、以降通常の磁気異常の解析が可能となった。

磁気図を参照すると、仙台平野南部地域では、磁気異常は人工起源と考えられるものを除くと、割山山地の白亜紀花崗岩類露出地域において分布する高磁気異常が顕著である。付近では、高磁化率(10^{-2} SI以上)の花崗岩試料が採取されており(日本列島基盤岩類物性DB:PB-Rock21)、当該花崗岩が磁気異常源と推定される。一方、沿岸部の鳥の海南方および牛橋河川北方において、長波長の高磁気異常が各々分布する。これらの高磁気異常は帯状に南西方に延び、割山山地の高磁気異常に連続しているように見える。したがって、沿岸部の高磁気異常源としては花崗岩の可能性がある。

一方、松川浦地域では、松川浦の北東端付近において高磁気異常が分布する。当該地域には磁気異常源と考えられる露頭は分布しない。しかし、付近で行われた温泉ボーリングの結果、深度約300m付近で花崗岩に到達し、その磁化率が高い(10^{-2} SI以上; PB-Rock21)ことから、当該の花崗岩体が磁気異常源であると推定される。

上述のように、当該地域の磁気異常は孤立型の磁気異常源を想定できるものではなく、高磁性の基盤岩類の隆起に対応するようなものであるため、磁気異常源の構造を推定するために、3Dイメージング(Nakatsuka and Okuma, 2013)を適用した。予備的な解析の結果、割山山地において南北性のほぼ直立した高磁性の構造がイメージングされた。また、仙台平野南部沿岸部において高磁化強度域が解析され東方に向かって深度が浅くなることが分かった。一方、松川浦地域では松川浦の北東端で顕著な高磁化強度域が解析され、その深度は温泉ボーリングで確認された花崗岩の賦存深度と調和的であった。

キーワード: 空中電磁探査, 津波, 地下水環境, 空中磁気探査, 磁気構造, 基盤

Keywords: airborne EM survey, tsunami, groundwater environment, aeromagnetic survey, magnetic structure, basement

無人ヘリによる新燃岳における繰り返し空中磁気測量 Repeated aeromagnetic surveys in Shinmoedake volcano, Japan, by using an unmanned helicopter

小山 崇夫^{1*}; 金子 隆之¹; 大湊 隆雄¹; 渡邊 篤志¹; 武尾 実¹; 柳澤 孝寿²; 本多 嘉明³

KOYAMA, Takao^{1*}; KANEKO, Takayuki¹; OHMINATO, Takao¹; WATANABE, Atsushi¹; TAKEO, Minoru¹; YANAGISAWA, Takatoshi²; HONDA, Yoshiaki³

¹ 東京大学地震研究所, ² 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, ³ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

After the 2011 eruptions of Shinmoedake volcano in Japan, we conducted three repeated aeromagnetic surveys around this area, by using an autonomously driven unmanned helicopter. Shinmoedake volcano had sub-Plinian eruptions in the end of January 2011 and its vent was filled by uprising intrusive lavas. After that, some Vulcanian eruptions followed, and then volcanic activities were decreasing gradually up to the beginning of April 2011.

After these events, we conducted aeromagnetic surveys in the end of May 2011, the beginning of November 2011, and the end of October 2013. The Yamaha RMAX-G1 unmanned helicopter was used for our surveys, which was usually used to spray the agricultural chemicals to fields, and can make flights following the programmed tracks within about 1 m precision. Availability of precise flights are a great advantage for repeated surveys in order to detect easily the changes of circumstances, such as, geomagnetic changes due to volcanic activities by measuring at the same positions. Almost 85 km flights in total were made in every survey with a flight speed of about 10 m/s. Flight heights above the ground were almost kept in 100 m.

As the result of some data processing, we clearly detected the change of the magnetic fields around the vent of Shinmoedake, which has a kind of a dipolar pattern with positive changes in South and negative changes in North. This indicates a region around the vent got magnetization due to cooling. The intrusive lava is supposed to be the source of magnetization, and 2.0×10^7 Am² magnetization of lava is evaluated at the second survey (0.5yr) and 4.8×10^7 Am² is evaluated at the third survey (2.5yr), compared with the first survey. This means the magnetizing rate is almost related to a square root of the elapsed time and it leads to an implication that the lava cooling is dominantly made gradually by thermal diffusion, not by other cooling processes such as thermal convection. The common thermal diffusivity of rocks, however, is too small by one order of magnitude to explain this cooling rate, and intrusion of water in lava, say, rainfall water, may play an important role to raise the effective thermal diffusivity to make the lava cool.