

空中重力偏差法探査を用いた茨城県北部地域における断層構造調査

An investigation of fault and structural boundary in the northern part of the Ibaraki Prefecture by Airborne Gravity Gradient survey

*佐藤 秀幸¹、山下 伊智朗²、Craig Annison³、二ノ宮 淳⁴、千葉 昭彦⁴、代田 敦⁴、相部 翔⁴

*Hideyuki Satoh¹, Yamashita Ichiro², Craig Annison³, Atusi NINOMIYA⁴, Akihiko Chiba⁴, Shirota Atsushi⁴, Aibe Sho⁴

1. 原子力規制委員会原子力規制庁、2. 株式会社フグロジャパン、3. CGG Aviation (Australia) Pty Ltd.、4. 住鉱資源開発株式会社

1. Secretariat of Nuclear Regulation Authority, Nuclear Regulation Authority, 2. Fugro Japan Co., Ltd., 3. CGG Aviation (Australia) Pty Ltd., 4. Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd.

原子力施設周辺に分布する断層の位置や長さを特定することは、基準地震動の策定に大きく影響することから、その評価にあたっては科学的な根拠に基づき評価する必要がある。特に、多くの原子力施設は、海岸付近に立地していることを踏まえると、海域と陸域の境界域（以下、「海陸境界域」という。）に推定される断層の位置や長さを調べることは、原子力施設の安全性向上の観点から極めて重要である。しかしながら、海域と陸域とでは物理探査データ取得に際し調査仕様が異なるため、両地域において同じ品質のデータが得られない、あるいは地形の制約により海陸境界域においてデータ取得ができない領域、すなわち、データの空白域が生じることから、海陸境界域に推定される断層構造の抽出には困難さが伴う。

そこで、これらの課題を解決するため、本研究では、近年開発された航空機（回転翼）を用いて空中から重力偏差法探査を行う手法（以下、「空中重力偏差法探査」という。）により、海域から陸域にかけて断層が延伸していると推定される地域のひとつである茨城県北部地域を調査対象とし、断層構造抽出可能性の検討を行うことを目的とした。調査範囲は、茨城県北茨城市、高萩市、日立市及びその周辺海域を含む約300km²である。調査は、探査ヘリコプターに搭載されたFALCON AGGシステムにより、東西方向の主測線（250m間隔）と南北方向の交差測線（2.5km間隔）上を対地高度150m一定で、探査飛行した。

取得した重力偏差データは、同時に計測された地形データにより地形補正を行うとともに、海底地形データを用いた水深補正を施し、フーリエ変換法によって陸域から海陸境界域を通り、海域まで連続した鉛直重力偏差異常図、水平重力偏差異常図及び合成重力異常図を作成することに成功した。これらの図面から得られた特徴は、以下の通りである。（1）調査地域中央北部から東南東にかけて、高/低鉛直重力偏差異常の境界（以下、「ゼロ値線」という。）が急勾配を伴い分布する。このゼロ値線は、駒木断層及びF12断層（地質調査所,1957;日本原電（株）,2015）のやや南西側に位置し、高鉛直重力偏差異常がこのゼロ値線の北東側に分布することから、南西傾斜の正断層であると考えられる。この特徴は、既往文献による地質調査の結果とも調和的である。また、この対をなす高/低鉛直重力偏差異常は、陸域から海岸域に連続的に分布することから、駒木断層～F12断層は一連の断層であることが推定される。（2）調査地域中央部には、顕著な低鉛直重力偏差異常（負値）帯が、高鉛直重力偏差異常（正值）に挟まれるように北西-南東方向に分布している。20万分の1地質図「白河」及び「水戸」（久保ほか、2007；吉岡ほか、2001）によると、この低鉛直重力偏差異常帯は大局的に見ると密度の高い岩石から構成される日立変成岩類と阿武隈変成岩類の境界付近に対応しているように見える。一方、水平重力偏差異常図に着目すると、上述のゼロ値線と高水平重力偏差異常が対応していること、ゼロ値線の北側で急勾配を南側で緩勾配をそれぞれ示すことから、高角度で南西傾斜を有する正断層の存在を示唆する。

本研究では、海陸境界域での断層構造を検出できたことが大きな成果であるとともに、これまで陸域と海域で別々に想定されていた断層が連続性を有する可能性が明瞭に示された。なお、平成28年12月28日に発生した茨城県北部地域を震源とする地震（Mj6.3）の余震分布及びこの地震に伴って観測された地殻変動と重力偏差異常分布との関係についても速報的に紹介する。

謝辞：本研究を進めるにあたり，産業技術総合技術研究所大熊茂雄上級主任研究員、北海道大学大学院茂木透特任教授，富山大学大学院楠本成寿准教授には，現地調査及び現地検討会においてご指導いただくとともに，報告書作成において貴重なご助言をいただいた。現地調査の実施に際して，茨城県，海上保安庁茨城海上保安部，北茨城市，高萩市及び日立市の関係各位よりご協力をいただいた。ここに記して，謝意を申し上げます。

追記：本研究は，平成26年度原子力施設等防災対策等委託費（原子力施設における地質構造等に係る調査・研究（海陸境界域における空中重力偏差法を用いた断層調査））事業の一部として実施されたことを付記する。

キーワード：空中重力偏差法探査、重力偏差、断層、構造境界、海陸境界域（沿岸域）

Keywords: Airbornrne Gravity Gradient survey, gravity gradient, fault, structural boundary, coastal region

Fault dip estimation based on gravity gradient tensor on a profile

*楠本 成寿¹

*Shigekazu Kusumoto¹

1. 富山大学大学院理工学研究部(理学)

1. Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama

It is widely accepted that the area of a disaster occurrence is generally wider on the hanging wall side than on the foot wall side of a fault and that the fault dip affects the size of the disaster area. Therefore, fault dip is an important fault parameter and has played an important role in numerical simulations for the development of hazard maps. To determine or estimate the fault dip, morphological, geological, and geophysical surveys such as excavation, seismic reflection survey, gravity survey, and other research means have been employed worldwide and have yielded extensive knowledge on fault dip and shapes.

In recent years, gravity gradiometry surveys have been widely conducted to obtain detailed subsurface structure data. This type of survey collects the gravity gradient tensor defined by the second derivatives of the gravity potential. Compared with the gravity anomaly, its response to subsurface structures is more sensitive. Various analysis techniques using gravity gradient tensors such as inversion and the semi-automatic interpretation method have been employed and discussed. Among these methodologies, a technique for estimating the fault dip by using the gradient tensor has been developed. Although the technique has yielded excellent results, gravity gradiometry surveys have been conducted in only a few areas in Japan. Hence, analyses conducted in areas in which gravity gradiometry surveys have not been conducted require use of the tensor estimated from existing gravity anomaly data.

In this study, techniques for estimating the gravity gradient tensor from gravity anomalies are shown for a profile that is frequently employed in active fault research. Moreover, these methods are employed for estimating the fault dip by using eigenvectors of the observed or calculated gravity gradient tensor on the profile. As a result, the dip of the maximum eigenvector is shown to closely follow that of a normal fault, and the dip of the minimum eigenvector closely follows the dip of the reverse fault. As an application to field data, the dip of the Kurehayama Fault located in Toyama, Japan, was estimated. A fault dip of about 42° was obtained as the dip of the minimum eigenvector of the gravity gradient tensor because the fault is a reverse fault. This dip is in agreement with conventional geological information. Although the calculated gravity gradient tensor was employed here for estimating the fault dip, the technique shown in this study is applicable to the observed data for each profile directly obtained through gravity gradiometry surveys by helicopter.

キーワード：断層傾斜角、固有ベクトル、重力偏差テンソル

Keywords: Fault dip, eigenvector, gravity gradient tensor

航空機搭載型センサ（ARTS-SEカメラシステムユニット）の多視点画像からの3次元情報抽出手法の開発

Development of a three dimensional information extraction method from an airborne sensor (ARTS-SE) multiple-view images

*實渕 哲也¹

*Tetsuya Jitsufuchi¹

1. 防災科学技術研究所

1. NIED

観測機会の向上を図るため、防災科研は2015年6月に単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ（the Airborne Radiative Transfer Spectral Scanner for a single-engine aircraft (ARTS-SE)）を開発した。ARTS-SEの搭載航空機は広く活用されている単発エンジン機であるセスナ208である。ARTS-SEは我々の以前の装置であるARTSのpush-broom方式のイメージングスペクトロメーターと新規に開発したカメラシステム; Structure and Thermal Information Capture (STIC)から構成される。STICは4つのカメラで構成される。その2つは可視カメラ、他の2つは熱赤外カメラである。STICの性能は、火山活動評価にオペレーショナルに利用できるSfM処理が可能な可視画像と熱赤外画像を取得することを考慮し設計されている。本報告では2015年12月5日にSTICで取得した箱根山大涌谷の可視および赤外画像を商用の写真測量画像処理ソフトウェアパッケージを用い処理した最初の解析結果について報告する。STICで取得した画像が火山の地熱地帯の3次元情報の検出にいかに関与できるかについて例証する。

キーワード：航空機センサ、SfM、火山観測、赤外リモートセンシング

Keywords: airborne sensor, SfM, volcano, infrared remote sensing

空からの放射線測定に対する逆解析の適用

Basic study for application of inverse radiation problem to airborne radiation measurement

*佐々木 美雪¹、石崎 梓¹、眞田 幸尚¹

*Miyuki Sasaki¹, Azusa Ishizaki¹, Yukihisa Sanada¹

1. 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

福島原子力発電所の事故以来、有人や無人のヘリコプターを用いて空からの放射線計測が行われている。ドローンは安価・小型及び操縦が簡単であることから、狭い地域を手軽に測定できるツールとして有用である。原子力機構では、環境中の放射線量率分布の詳細な測定のために、ドローンを用いた放射線測定手法の研究を行っている。上空からの放射線モニタリングにおいて、地上への線量換算は、地表面の線量率が一定であり地形が平面であるモデル(平面モデル)及び高度と検出器の計数率の指数関数的な相関関係を前提としている。よって、線量率の不均一な場所や山間部での測定データは地上値をトレースすることが難しい。特に、ドローンがフライトするのに適している50 m以下の高度では、周辺の樹木や地形に勾配等が影響し、単純な平面モデルによる換算では地上値と一致しない場合がある。本研究では、医療分野において用いられている逐次近似画像再構成の手法を応用し、環境の放射線測定用のアルゴリズムを作成、空からの測定値を地上値へ換算する手法を検討した。

放射線の測定には、市販のドローン(3D Robotix社製)をベースにした開発機を使用した。放射線測定器にはGAGGシンチレーション検出器(2×2×2cm)を使用し、3秒毎にγ線スペクトルデータ及びGPSデータを取得するとともに、比較のため歩行式サーベイメータを用い地上の放射線分布情報を得た。また、同エリアにおいて写真測量を実施し、DSM(Digital surface model)データを取得した。試験は福島県内における数箇所のエリアで測定を実施した。本研究の逐次近似法のアルゴリズムは、検出器 i での測定値 Y_i は地上地点 j での地上値 λ_j と地上 j から検出器 i への減衰係数 C_{ij} の積の和で表されると仮定した。検出器 i における測定値 Y_i は、式[1]で表される。

$$Y_i = \sum_{j=1 \rightarrow B} \lambda_j C_{ij} \quad [1]$$

ここで B は計算する地上地点ポイント数である。減衰係数 C_{ij} には距離に応じた空気源弱係数と検出器の角度に応じた角度補正係数を適用した。距離及び角度による減弱係数にはCs-137の放出する662 keV点線源の距離に応じた全エネルギーカウントの光子の減衰をPHITSにより計算した結果を使用した。

福島県内の団地における測定結果に対して、従来手法適用結果ではNMSE=0.105だったのに対し、逐次近似法適用結果ではNMSE=0.034と、従来に比べ地上値により近い結果を得ることができた。森林・住宅を含むエリアでは従来法でNMSE=0.302、逐次近似法でNMSE=0.214となり、従来法からの大きな改善は見られなかった。この原因は、放射線のエネルギー情報が考慮されていないことや、森林部の遮蔽係数の調整が上手くできていないことなどが考えられる。今後、様々な条件における測定結果を蓄積し、アルゴリズムの最適化を行うことで、マップの詳細化に有用な手法になると考えられる。

キーワード：ドローン、 μ UAV、遠隔放射線測定、地形補正、逐次近似法、福島第一原子力発電所事故

Keywords: Drone, micro UAV, Remote radiation measurement, Terrain correction, Successive approximation method, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

無人ヘリコプター放射線モニタリングの解析精度向上について

Improvement of analysis accuracy of radiation monitoring using unmanned helicopter

*結城 洋一¹、前島 正道¹、中山 英二¹

*Youichi Yuuki¹, masamichi maeshima¹, Eiji Nakayama¹

1. 応用地質株式会社

1. Oyo corporation

2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の後、発電所周辺の放射線の高線量地域において、無人ヘリコプターを用いて継続して空間線量率を測定している。測定は高度約100m、測線間隔80mでLaBr3(Ce)検出器を用いてガンマ線の計数率を測定し、これを解析して地上1mの空間線量率に換算している。ガンマ線の計数率は高度とともに指数関数的に減少し、同一高度での計数率と空間線量率は比例関係にあることが知られている。この地域における実効的な高度補正係数と計数率-線量率換算係数を求めるために、地表が平坦で空間線量率の変化が少ない地点において、キャリブレーション測定を行った。

解析は、グロスカウント法を用い、計数率を、検出器の不感時間補正、高度補正係数、計数率-線量率換算係数を使い、線量率に換算する。測定は1~2ヶ月を有するため、測定日の異なる線量率データを、天然核種由来の線量率を考慮した減衰補正式で、基準日（通常測定終了日）の線量率に統一する。これを、最終的にArcGISを用いて、クリギング法でマッピングを行った。測定結果の妥当性確認のために、サーベイメータによる地上測定を併せて実施し、無人ヘリコプターから求めた空間線量率と地上の測定値の比較検討を行った。また、解析結果を過去の測定結果と比較検討することも行っている。

これらの比較検討の結果、最近になって、季節、測定日の気象条件により無人ヘリコプターで測定される計数率が影響を受けること明らかになった。

事故当初は汚染による空間線量率が高く放射性物性物質の物理的減衰やウェザリング等による減衰が速いため変化がわからなかったが、事故から5年以上が経過したため、低線量地域ではより正確に計数率を出す必要がある。そこで、解析パラメータの改良と地形や飛行高度による放射線源からの影響を考慮した解析を検討した。

解析パラメータに関しては、従来、定数としていた高度補正係数を空気密度の関数と考え、高度補正係数を空気密度で除した『質量高度補正係数』を定数とし、測定日の空気密度を考慮して解析を行うことで解析精度が向上した。また、地形や飛行高度による放射線源からの影響を改良するために逆解析を行い、より高い分解能で解析できることを確認した。

キーワード：ガンマ線スペクトロメトリー、無人ヘリコプター、質量減弱係数、三次元インバージョン

Keywords: gamma-ray spectrometry, Unmanned Helicopter, Mass attenuation coefficient, 3D inversion

High-resolution Aeromagnetic Survey over the Eastern Sagami Bay Area, Kanto Region, Japan

*岩田 光義¹、大熊 茂雄¹、中塚 正¹、宮川 歩夢¹、木下 佐和子¹

*Mitsuyoshi Iwata¹, Shigeo Okuma¹, Tadashi Nakatsuka¹, Ayumu Miyakawa¹, Sawako Kinoshita¹

1. 産業技術総合研究所地質情報研究部門

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

The Geological Survey of Japan (GSJ), AIST has been conducting various geophysical surveys such as seismic reflection, ocean floor gravity and aeromagnetic surveys in the transition zones of the Japanese Islands to better understand the subsurface structures related to active faults and geologic basement structures for some model areas.

A high-resolution aeromagnetic survey was conducted over the eastern Sagami Bay Area, Kanto Region, Japan in November 2016. The survey was flown along E-W traverse lines and N-S tie lines spaced 250 m and 1,000 m, respectively. The flight altitudes were 150 m above sea level over offshore areas and 300 m above terrain over onshore areas, respectively. Total magnetic intensities were observed by a Cesium magnetometer at 10 Hz and flight paths were recovered by DGPS. A preliminary aeromagnetic map without height correction has been compiled. According to the map, characteristics of magnetic anomalies are summarized as follows:

- (1) An ESE-WNW trending magnetic high belt, parallel to a gravity high belt (Okuma et al., 2016) extends from the northern part of the Miura Peninsula to Enoshima Island, corresponding to the Hayama Upheaval Belt.
- (2) A NW-SE magnetic trend extends from the south of Enoshima Island to the Takeyama Faults in the Miura Peninsula.
- (3) In the middle of the Miura Peninsula, a magnetic high is distributed over the area where ultrabasic rocks like serpentinites outcrop.
- (4) In the Miura Peninsula, another magnetic high lies over the distribution area of the Early ? Middle Miocene Yabe Formation, Hayama Group in which small outcrops of basaltic rocks reside at its northern boundary. This magnetic high further extends southeastward along the Kinugasa Faults.
- (5) Two dipoles of magnetic anomalies with a reverse polarity are distributed over the Kamegi Spur offshore of the western Miura Peninsula.

キーワード : 空中磁気探査、磁気図、葉山層、葉山隆起帯、三浦半島、相模湾

Keywords: aeromagnetic survey, magnetic map, Hayama Formation, Hayama Upheaval Belt, Miura Peninsula, Sagami Bay

Three-dimensional resistivity modeling of GREATEM survey data from Ontake Volcano, northwest Japan

*Sabry Abd Allah¹, Toru Mogi²

1. Institute of siesmology and volcanology-faculty of science, HOKKAIDO UNIVERSITY, 2. Division of Sustainable resources Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Ontake Volcano is located in central Japan, 200 km northwest of Tokyo and erupted on September 27, 2014. To study the structure of Ontake Volcano and discuss the process of its phreatic eruption, which can help in future eruptions mitigation, airborne electromagnetic (AEM) surveys using the grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) system were conducted over Ontake Volcano. Field measurements and data analysis were done by OYO Company under the Sabo project managed by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

Processed data and 1D resistivity models were provided by this project. We performed numerical forward modeling to generate a three-dimensional (3D) resistivity structure model that fits the GREATEM data where a composite of 1D resistivity models was used as the starting model. A 3D electromagnetic forward-modeling scheme based on a staggered-grid finite-difference method was modified and used to calculate the response of the 3D resistivity model along each survey line. We verified the model by examining the fit of magnetic-transient responses between the field data and 3D forward-model computed data. The preferred 3D resistivity models show that a moderately resistive structure (30–200 m) is characteristic of most of the volcano, and were able to delineate a hydrothermal zone within the volcanic edifice. This hydrothermal zone may be caused by a previous large sector collapse.

Keywords: Airborne EM, 3D resistivity modeling, GREATEM survey, Volcanic surveys

繰り返し空中磁気測量による三宅島雄山周辺の磁場変化の検出 Geomagnetic change detected by repeated aeromagnetic survey in Miyakejima, Japan

*小山 崇夫¹、金子 隆之¹、大湊 隆雄¹、渡邊 篤志¹

*Takao Koyama¹, Takayuki Kaneko¹, Takao Ohminato¹, Atsushi Watanabe¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Miyakejima is a volcanic island on the Izu-Bonin arc and the last eruption occurred in 2000 with the summit subsidence. A huge amount of gas emission as about ten thousand tons per day has continued for a few years after the eruption and is decreasing gradually. Now amount of gas emission is as small as about a couple of hundreds tons per day. Although the previous volcanic activity seems ceasing, there are LP events, volcanic tremors and a large amount of gas emission sometime in these days. Recent activity seems to gradually increase again and we need to prepare the next coming eruptive events.

We've carried out the aeromagnetic survey by using an UAV in the end of May 2014 and Nov. 2016 to detect the temporal changes of geomagnetic field. It took flights in the area inside "Hachimaki-rindo" except the crater, in which elevation is 300 m above the sea level and over. The flight height is almost kept as about 100 m above the ground and the measurement line interval is also about 100 m. Total distance of flight is about 130 km. By comparing the measurements of two surveys, they are very consistent as a whole but have some difference/changes.

The most significant change shows a characteristic pattern of which is positive in south and negative in north. It simply indicates that the magnetization occurs in volcanoes. Another explanation may be piezomagnetic effect due to increase of the pressure under the ground. Actually it is difficult to judge which mechanism is correct, but the latter mechanism looks more likely to be, according to other evidences of increase of recent volcanic activities.

キーワード：無人航空機、三宅島、地球磁場

Keywords: UAV, Miyakejima, geomagnetic field