

無人放射線測定により得られた γ 線スペクトル上の特徴に基づく土壤中放射性セシウムの深度分布の推定

Estimation of depth profile of radiocesium in soil based on characteristics of gamma-ray spectra obtained by airborne radiation monitoring

*越智 康太郎¹、佐々木 美雪¹、石田 睦司²、佐藤 友彦³、濱本 昌一郎⁴、西村 拓⁴、眞田 幸尚¹

*Kotaro Ochi¹, Miyuki sasaki¹, Mutsushi Ishida², Tomohiko Sato³, Shoichiro Hamamoto⁴, Taku Nishimura⁴, Yukihisa Sanada¹

1. 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島環境安全センター、2. 株式会社 NESI、3. 家畜改良センター、4. 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻

1. Fukushima Environmental Safety Center, Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency, 2. NESI Corporation, 3. National Livestock Breeding Center, 4. Department of Biological and Environmental Engineering, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo

2011年の福島第一原子力発電所 (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, FDNPP) 事故により、大量の放射性セシウムが大気中に放出された。文部科学省は、事故による環境への影響を評価するために、FDNPP周辺で空間線量率の測定を行ってきた。しかし、除染が行われ、事故から6年が経過したにも関わらず、依然としてFDNPP近傍のエリアでは、空間線量率が高いままである。この結果は、効率的な除染方法の提案が喫緊の課題であることを示している。土壤中放射性セシウムの深度分布に関する情報は、効率的な除染のために重要である。多くの場合、土壤中放射性セシウムの深度分布を把握するのは、土壤試料の採取及び測定という観点から煩雑である。我々のグループでは、広範囲の汚染されたエリアの空間線量率分布を迅速にモニタリングする手法として、無人ヘリコプターやマルチコプターなどの無人機を用いた放射線計測技術を開発してきた。本発表では、土壤中放射性セシウムの深度分布を、無人放射線測定により得られた γ 線スペクトル上の特徴から推定する方法について報告する。この方法は、優先的に除染が必要なエリアの効率的な選別をする際に有効である。

本手法を検討するために、独立行政法人家畜改良センターが所有する広大な圃場 (160,000m²) を対象にモニタリングを行った。圃場は、FDNPPから南西約100kmの福島県西郷村に位置している。2016年6月6-10日に、自律飛行型無人ヘリコプター RMAX G1 (YAMAHA) にLaBr₃:Ceシンチレータ (3.8cm ϕ ×3.8cmH×3本) を搭載し、圃場内の空間線量率の測定を行った。LaBr₃:Ceシンチレータは、エネルギー分解能に優れているため、 γ 線スペクトル上で ¹³⁴Csの放出する γ 線のエネルギーピーク (605keV) と、¹³⁷Csの放出する γ 線のエネルギーピーク (662keV) を弁別するのに適している。しかし、検出器に含まれる²²⁷Acの子孫核種や、Laの放射性同位元素の¹³⁸Laによる自己汚染によって、バックグラウンドが高いという特徴がある。ヘリコプターの位置は、Differential GPSに基づき、プログラムフライトによって制御した。モニタリングは、測定高度 (対地高度):10-30m、速度:8m/s、側線間隔:20-30mの条件で行った。 γ 線エネルギースペクトルは、位置情報と共に1秒間に1回連続測定した。さらに、土壤中放射性セシウムの深度分布の影響を評価するために、 γ 線スペクトル上の散乱線領域 (50-450keV) と直接線領域 (450-760keV) のROI比から、ピークコンプトン比 (RPC) を定義した。土壤中放射性セシウムが深い深度に存在するほど、土壤粒子等に散乱される γ 線は多く、 γ 線スペクトル上で全吸収ピークよりもエネルギーの低い散乱線として検出される。よって、RPCの値は土壤中放射性セシウムの深度分布を反映して変化すると考えられる。

土壤試料はライナー採土器で深さ30cm、ルートオーガーで深さ 30-60cmを採取し、測定容器に充填した。土壤試料中の放射性セシウムは、東京大学の所有するNaI(Tl) シンチレータにより定量分析を行った。さらに、土壤中放射性セシウムの深度分布に係るパラメータ (深度 D_{20-90}) を算出した。例を挙げると、 D_{90} は対象地点の土壤中放射性セシウムの全沈降量 Bq m⁻² のうち、90%が存在する深度のことを指す。よって、パラメータの値が大きくなるほど、土壤中放射性セシウムが深い位置に存在していることを意味している。無人

ヘリによるモニタリング結果から、RPCと D_{90} との間に良好な相関性があることが分かった。これは、 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ シンチレータの γ 線スペクトル上の特徴は、土壤中放射性セシウムの深度分布に影響を受けるということを示している。よって、土壤中で放射性セシウムが深い深度に存在するほど、土壤粒子等に散乱される γ 線は多く、 γ 線スペクトル上で散乱線として検出されるという仮説を支持するものとなった。さらに、定量分析の結果から、今回対象とした圃場では、土壤中放射性セシウムの深度分布が通常と大きく異なることが分かった。これは、反転耕と呼ばれる除染によるものである。通常、土壤中放射性セシウムの深度分布は、表層から深層にいくほど指数関数的に減少することが報告されている。しかし、今回対象とした圃場のように反転耕の行われた環境では、放射性セシウム濃度の最大となる深さが表層から深層へと移っていることが予想された。これらの結果を要約すると、本手法は γ 線スペクトル上の特徴に着目することで、効率的に除染の必要なエリアの迅速な選別の一助になることが期待される。本研究は、生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）」の支援を受けて行った。

キーワード：福島第一原子力発電所事故、放射性セシウム、無人放射線測定、深度分布、除染

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, radiocesium, airborne radiation monitoring, depth profile, decontamination

Airborne Geophysical Survey for the Evaluation of Geothermal Potential in Japan

*毛利 拓治¹、村上 龍介¹、石丸 卓哉¹、亀山 正義¹、木田 祥治¹

*Takuji MORI¹, Ryosuke Murakami¹, Takuya Ishimaru¹, Masayoshi Kameyama¹, Yoshiharu Kida¹

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

Airborne survey is one of the most effective methods which can investigate subsurface structures in areas where are difficult to access and/or exploration activities are restricted by surface conditions. Most of geothermal areas in Japan are located in mountainous regions. Furthermore, about 80% of geothermal resources are situated within areas designated as a national park, where geothermal development activities causing big impacts on environment are limited. In recent years, regulations on geothermal development in the natural parks are gradually relaxed because accelerating renewable energy is required to mitigate global warming. However, geothermal development movements by private companies are not active in those areas due to huge risk of subsurface uncertainty caused by lack of geological information. Therefore, since 2013, according to a government policy, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) has been conducting airborne geophysical surveys to provide regional basic information for evaluation of geothermal potential, which leads to promote the geothermal development.

Airborne Gravity Gradiometry (AGG) method and time domain electromagnetic and magnetic method using a helicopter (HELITEM) are applied in the surveys. AGG survey is suitable for delineating geological structures in detail. HELITEM survey has an advantage over frequency domain electromagnetic survey as it has deeper penetration. A helicopter can fly at lower altitude with lower velocity than a fixed wing, which provides higher resolution and higher signal intensity data. Adopting the helicopter is beneficial especially for topography with steep slopes such as the mountain regions in Japan.

We are studying analysis methodologies for the acquired geophysical data. For example, we tried a variety of filtering to extract structural features such as lineaments from AGG data. Ground truth surveys with outcrop sampling are also conducted to ascertain the analysis results of the airborne geophysical surveys. We have completed the airborne geophysical surveys in more than 10 areas in Japan, so far. In this presentation, we will introduce results and our experience from the surveys recently acquired.

The authors acknowledge local municipalities and related organizations for their understanding and cooperation with us to conduct the airborne survey.

キーワード：空中物理探査、地熱、重力探査、電磁探査

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

CONTRIBUTION OF THE INTERPRETATION OF AERO-GEOPHYSICAL DATA IN THE INCREASE OF GEOLOGICAL AND STRUCTURAL KNOWLEDGE, IN THE PROVINCE OF CABO DELGADO, MOZAMBIQUE.

*Carlos Castigo Macuacua¹

1. Hokkaido University

Macuácu, Carlos.¹

¹Faculty of Engineering, Hokkaido University, Japan; ccmacuacua@gmail.com

Abstract:

The evolution of geosciences, with the appearance of new techniques of data collection and analysis, and the implementation of new technologies in its various fields of action have led to the development of more realistic geological maps, thus contributing to the growing discovery of new mineral deposits.

In 1970, the first aero-geophysical surveys were carried out by Italian company CGG with a view to boosting geological research work and contributing to the increase of geological knowledge at the country level. But it was in 2004/5 that the geophysics in Mozambique witnessed a major evolution, with the performance of aero-geophysical surveys by FUGRO, of high resolution, with flight lines spacing of 300 m, flight height of 100 m, and comprises data from Total magnetic field and gamma-spatter.

The integration of the high-density aero-geophysical data interpretation as a tool to support the geological mapping allowed an easy discrimination of the geological complexes, structural and kinematic interpretation and identification of intrusive bodies. The examples presented here refer to the province of Cabo Delgado, an area with potential for research of several mineral resources, but which has few publications of geological mapping works.

In this region, the aero-geophysical surveys conducted by FUGRO in 2004/5 were of fundamental importance in assisting the geological mapping for the project to compile the Geological Map of Mozambique, carried out by Norconsult in the periods of 2002 to 2007, and financed by several national and foreign institutions.

In addition, some dissertation work was carried out in the Province of Cabo de Delgado, being (Danta, 2009) the most relevant on processing and interpretation of aero-geophysical data, in the province of Cabo Delgado.

As an example, the interpretation of radiometric data of high resolution added to field observations revealed the existence of folded and mylonitic contact between the geological complexes of Xixano and Marrupa, in the province of Cabo de Delgado.

In addition, Nipepe Klippe is a geological structure whose discovery was made possible by combining ternary images of radioelements (K, Th, U) resulting from high-density aero-geophysical data and field observations. The image of the first vertical derivative superimposed on the satellite image revealed the existence of dikes inside the complex of Marrupa.

This information, based on the data processing related to high-density aero-geophysical surveys and field observations, contributed significantly to the increase of geological and structural knowledge for the improvement of the geological map of the province of Cabo Delgado.

Keywords: Importance, aerogeophysic, geological mapping

小型無人航空機（UAV/ドローン）を用いた周波数領域空中電磁探査法システムの開発

Development of frequency domain electromagnetic exploration system using unmanned aerial vehicle (UAV/drone)

*上田 匠¹、光畑 裕司¹、加藤 晋²、神村 明哉²、谷村 和彦³、伊豆 智幸⁴、植田 大造⁵、藤井 純一郎⁵

*Takumi Ueda¹, Yuji Mitsuhashi¹, Shin Kato², Akiya Kamimura², Kazuhiko Tanimura³, Tomoyuki Izu⁴, Daizo Ueda⁵, Junichiro Fujii⁵

1. (国研)産業技術総合研究所 地質調査総合センター、2. (国研)産業技術総合研究所、3. (株)日立製作所、4. (株)エンルート、5. 八千代エンジニアリング(株)

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. AIST, 3. Hitachi, Ltd., 4. ENROUTE CO., LTD., 5. Yachiyo Engineering Co., Ltd.

近年、無人機、特に小型無人航空機（UAV、ドローン）を利用した様々な分野での産業活動（環境、インフラ、農業、物流、治安など）が世界的に非常に活発になっており、地下可視化技術である物理探査手法の開発に関しても急速に関心が寄せられている。しかしながら、地表情報を取得するための空中からの光学計測はすでに技術開発が進んでいるのに比較して、地下調査技術である物理探査については、機材の大きさ、重量、また測定する信号強度、品質などの問題から、未だ技術の確立には至っていない。

従来、広域の効率的な探査や、立ち入り困難箇所の探査では、通常の固定翼機やヘリコプターを用いた重磁力探査・電磁探査が開発・利用されてきたが、機体改造や飛行高度規制など運用の難しさや、探査能力(探査深度や解像度)の限界または制限から適用対象が限られていた。一方、既存の地上探査においては、人力による有人探査では探査調査効率の低下や、作業要員の確保、コストなど様々な課題があることが明らかになってきている。そのため、その間を埋めるための新しい探査手法としてドローンを用いた物理探査への期待は高い。

また、2014年の広島土砂災害や御嶽山噴火、2016年の熊本地震などの災害が頻発する現状にあって、広範な領域や人の立ち入りが困難な場所に対して迅速かつ安全でより正確に、地表の情報だけでなく、地下・地盤の状況を把握する手段の確立が急務となっている。

そこで、本研究では、電磁場を用いて地下の電気抵抗（比抵抗）に関する情報を取得する電磁探査法の一つである周波数領域電磁探査法について、既存の可搬型探査装置のドローン吊り下げ飛行による測定・解析を行う新しい手法の開発を進めている。本発表では、野外実験結果を含めたドローン吊り下げ型電磁探査法システム開発の経過、内容を紹介する。

キーワード：物理探査、応用地球物理学、電磁探査、空中物理探査、小型無人航空機、ドローン

Keywords: exploration geophysics, applied geophysics, electromagnetic exploration, airborne geophysics, unmanned aerial vehicle, UAV, drone

Penetration depth of the GREATEM survey

*QIONG WU^{1,2}, Sabry Abd Allah², Toru Mogi²

1. Jilin University, 2. Hokkaido University

The grounded electrical source airborne transient electromagnetic (GREATEM) system uses a grounded electrical transmitter and an aircraft equipped with a receiver. Numerical forward modelling, using a finite-difference staggered-grid method, is performed to generate a three-dimensional (3D) resistivity structure model. A 3D electromagnetic forward-modelling scheme is modified and used to calculate the response of the study model in which a conductor is suited under ground surface at different depths. The sizes of conductor are 100 x 100 x 100 m, 200 x 200 x 200 m, 400 x 400 x 400 m. Depths of conductor are set to 50, 100, 200, 400, 600 m under ground surface. The bedrock has a resistivity of 100 $\Omega \cdot m$, and the resistivity of conductor is 1 $\Omega \cdot m$, 10 $\Omega \cdot m$. The vertical magnetic (Hz) field response decay curves for the different depths are compared. The results showed some differences between the Hz of different depths, so it is possible to detect that conductor in cases of different depths at flight altitude $Z = 50$ m. We used the relative difference (RD), defined as $|(Hz^{stand} - Hz^{case}) / Hz^{stand}|$, of Hz field response for different depths to estimate responses difference quantitatively. When the size of conductor is bigger, it is easier to be detected. For low-resistivity conductor, the detection depth of GREATEM is up to 600m at flight altitude $Z = 50$ m.

The Ogiri geothermal area is located in southwestern Japan, a southern part of Kyushu Island. The arrangement of the geological structures is Quaternary volcanic rocks and Mesozoic metamorphic formation from the top down. Synthetic numerical models was used to construct 3D resistivity structure model of GREATEM system data in the study area. A 3D model of $3.7 \times 4.2 \times 2.3$ km³ was designed, and discretized into $52 \times 38 \times 41$ cells using the grids coordinates that are modelled to the geothermal area. The 3D resistivity model has been based on layered earth resistivity structures. In order to estimate the penetration depth of GREATEM in a geothermal field, we set the resistive basement rock layer at various depth and investigated change of GREATEM responses. There are some differences between the Hz of different depths. The RD of Hz field response is also calculated. The results showed that, the GREATEM can detect structure of a cap rock layer and top of geothermal reservoir, and the penetration depth is up to 1600 m below the ground surface.

Keywords: GREATEM, 3D resistivity structure model, penetration depth, geothermal survey

Can magnetic survey estimate locations of intrusions?

*大熊 茂雄¹、石塚 吉浩¹、中塚 正¹

*Shigeo Okuma¹, Yoshihiro Ishizuka¹, Tadashi Nakatsuka¹

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, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

The Geological Survey of Japan (GSJ), AIST conducted various magnetic surveys such as stinger-mounted helicopter-borne magnetics, helicopter-borne EM and magnetics and ground magnetics in the Usu Volcano area, Hokkaido Japan after its 2000 eruption to better understand the subsurface structure of the volcano (i.e. Okuma et al., 2010). Recently, 3D imaging method was developed (Nakatsuka and Okuma, 2014) and applied (Okuma et al., 2014) to the aeromagnetic anomalies of the volcano observed by the stinger-mounted helicopter-borne magnetics flown at an altitude of 150 m above terrain. The result revealed the subsurface distribution of basaltic somma lava but no information about magmas intruded during the recent eruptions in 1977-1978 and 2000 was obtained. This implies a difficulty to estimate locations of intrusions by a single magnetic survey and instead we proposed an alternative repeat survey (Okuma et al., 2013).

This time, we took a different approach to overcome the problem. We thoroughly reexamined the aeromagnetic anomalies observed by helicopter-borne EM and magnetics flown at an altitude of 70 m above terrain. Since the flight altitude of this survey is lower than that of the former one, a dipole of magnetic anomalies with a reverse polarity was found on the southwestern flank of the main edifice of volcano. To confirm the magnetic anomaly, we, then, conducted a ground magnetic survey along some profiles. As a result, a comparable magnetic anomaly was observed on ground. Whereas, the survey area is underlain by basaltic somma lava which shows high NRM intensities (6-10A/m) (Okuma et al., 2014). This suggests the existence of an intrusive body with a magnetization intensity lower than that of the somma lava. There are two possibilities which account for the magnetic anomaly. A hot magma of the recent eruptions might have intruded in the somma lava since some fumarolic activities were observed nearby during the ground magnetic survey. A cooled magma intruded during older eruptions is another possibility. Volcanic activities of the volcano changed from basaltic to dacitic after the formation of the main edifice. Since the NRM intensities of dacite is lower than that of soma lava (Nemoto et al., 1957), an old dacitic intrusion can account for the magnetic anomaly as well. Consequently, a repeat magnetic survey might play a role of judging if which hypothesis is more suitable by observing temporal magnetic changes.

キーワード：貫入岩体、マグマ、磁気探査、3次元イメージング、有珠火山、有珠2000年噴火

Keywords: intrusion, magma, magnetic survey, 3D imaging, Usu Volcano, Usu 2000 Eruption