

ミュオグラフィを用いた岩盤の密度測定

末永 弘^{1*}・田中 宏幸²

¹一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

²東京大学 国際ミュオグラフィ連携研究機構（〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1）

*E-mail: suenaga@criepi.denken.or.jp

土木分野や資源開発分野で対象となる20m程度の規模をもつ炭鉱の山体を対象に、ミュオグラフィを実施して密度測定を試行した。その結果、亜炭の分布する範囲において、一般的に我が国に分布する石炭の密度と整合的な平均密度が得られたことから、数十m程度の規模の山体を対象にしたミュオグラフィが有効であることが示された。また、ミュオグラフィを地下に適用することを目的に径0.1m程度のボーリング孔に対応するミュオグラフィ検層装置を開発し、上方に50m程度の山体を持つ水平ボーリング孔に適用した。その結果、得られた山体の平均密度は、近傍のボーリング孔から得られたコア試料を用いた測定値と概ね整合的な値となり、検層装置の適用性が示された。

Key Words : muography, inner structure, visualization, density logging tool, borehole

1. はじめに

宇宙線ミュオン（ミュー粒子）を用いた、巨大物体を対象とした内部可視化技術（以降、ミュオグラフィと称す）については、1950年代から開発・適用が開始され¹⁾、近年では火山内部におけるマグマのイメージング²⁾、未知の洞窟や空洞の探査³⁾、古代遺跡の探査⁴⁾、断層破碎帯内部の降雨浸透の可視化の試み⁵⁾、金属鉱床の鉱量の推計⁶⁾など、適用先は多岐にわたる。本研究では、土木分野や資源開発分野で多く対象となるものと考えられる、数十m程度の炭鉱の山体を対象にミュオグラフィを適用して密度測定を試行するとともに、この技術を地下に適用する際に必要となるボーリング孔に挿入可能なミュオン密度検層装置を開発しボーリング孔へ適用した。ここでは、炭鉱への適用結果、開発した検層装置の特徴およびボーリング孔への適用結果⁷⁾について述べる。

2. 炭鉱におけるミュオグラフィ

対象とした山体は、岐阜県瑞浪市の深沢炭鉱内にある。現場の地質は、新第三紀中新世瑞浪層群の砂岩・泥岩であり、一部に亜炭が分布している。ミュオグラフィは、ミュオン検出器を2トントラックに載せて計測することにより実施した。図-1に測定の概念図を、写真-1に現場

で実施した際の計測の様子をそれぞれ示す。ミュオンの検出には、プラスチックシンチレータを用いた。プラスチックシンチレータにミュオンが通過した際に発光したものを光電子増倍管（フォトマル）で検出する方法を採用した。図-1に示したように、検出器を山体の方向に向けてミュオンの飛来数を計測すると、空気中で測定した計測数よりも減少することが想定される。このミュオンの飛来数の減少する割合は、通過する物体の密度に依存する⁸⁾ことから、単位時間当たりのミュオンの飛来数を計測することにより、通過した物体の平均的な密度を求めることができる。本計測では、山体を対象にして5時間計測を行い、周囲に山体などの物体が存在しない場所において5時間計測を行った。後者は、空気中で飛来するミュオンを計測したことに相当し、山体を対象にした計測と同じ方向に検出器を向け測定した。

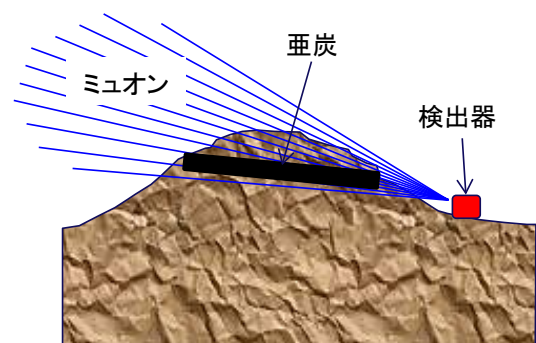


図-1 炭鉱におけるミュオグラフィ（概念図）

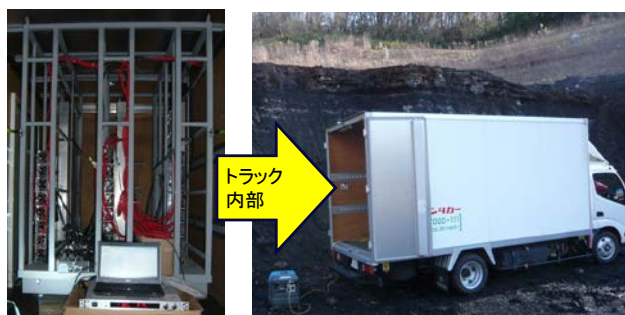


写真-1 炭鉱におけるミュオグラフィ計測の様子

測定されたデータは、ミュオンが検出される方向と単位時間当たりの飛来数（ミュオンフラックス）である。まず、DEM（数値標高モデル）のデータを用いて、ある方向に対する山体の厚み、すなわちミュオンが通過する物体の経路長を計算した。ある方向から山体を通過し飛来したミュオンフラックスと同方向において空気中で測定されたミュオンフラックスの比は、密度に経路長を掛けた値である密度長と一対一の関係があることが知られており、既存の測定データに基づき作成された密度長データ群を用いてミュオンフラックスの比から密度長を算出し、この密度長と経路長から平均密度を求めた⁹⁾。

得られた密度分布を図-2に示す。図では、検出器の50m先の山体に視点を置いたと仮定した場合の山体の輪郭に山体の平均密度分布を重ね合わせた状況を表している。計測を行った山体のうち、検出器の正面（水平距離=0mの位置）から左右に20m、高さ5m程度に垂炭が分布しており、この範囲を図中青い四角で示している。この範囲における密度の平均値を求めると1210kg/m³となった。垂炭についての密度の測定データはほとんど見られないため、石炭の密度データを参照すると、我が国では1300kg/m³程度であり⁹⁾、概ね整合的な値が得られた。垂炭が分布すると考えられる範囲以外の密度が比較的大きくなっているのは、砂岩か泥岩が分布していることを反映しているものと考えられる。また、山体上部の密度が比較的小さくなっているのは、特に水平距離-20～0m、標高390m付近については山体上部斜面において過去地すべりがあり、山体が緩んでいることが影響している可能性がある。

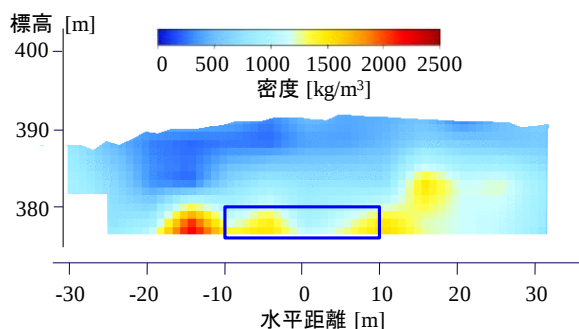


図-2 炭鉱におけるミュオグラフィ結果（密度分布図）

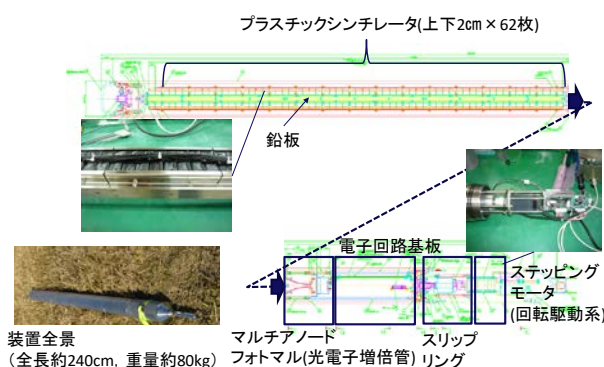


図-3 開発したミュオグラフィ検層装置

以上から、数十m程度の規模の山体を対象としたミュオグラフィが有効であることが示されたものと考えられる。しかしながら、本結果は1箇所の事例のみであることから、他の現場への適用を行うこととした。また、山体の密度をミュオグラフィにより評価する場合、ミュオンは鉛直上方からの飛来数が最も多く、山体にボーリング孔を掘削し地下から計測した方が効率が良いと考えられる。さらに地下に掘削したボーリング孔にミュオグラフィを適用することができれば、密度分布を評価する対象が広がるものと考えられる。以上のことから、本研究ではボーリング孔に挿入可能なミュオグラフィ検層装置を開発し、山体に適用することとした。次章以降に検層機器の開発概要ならびに適用結果について述べる。なお、検層機器の開発の詳細は文献⁷⁾を参照されたい。

3. ミュオグラフィ検層装置の開発と現場適用

(1) ミュオグラフィ検層装置の開発

本研究で開発したボーリング孔対応のミュオグラフィ検層装置は、炭鉱の時と同様プラスチックシンチレータを用いてミュオンを検出する方法を採用した。このシンチレータ、フォトマル、信号処理のためのFPGA（Field Programmable Gate Array）、後述する回転駆動のためのステッピングモーターおよびスリッパリングを組み合わせ、これらを1MPaの耐圧容器に格納することにより、検層装置を開発した⁷⁾（図-3）。検層装置の全長は2.4m、外径は114mm、重量は約80kgである。以下、開発した検層装置の特徴について述べる。

a) ダウンサイジング

従来ミュオン検出器に使用するプラスチックシンチレータでは1m×1m程度を受光面積として、これを複数枚組み合わせて用いている⁸⁾。しかしながら、ボーリング孔の内径（0.1m程度）を考慮した場合、同様の受光面積を確保するには10m程度の長さのシンチレータが必要と

なり、現実的でない。また、ミュオンの飛来方向を決定するため複数枚のシンチレータを同時に通過する信号を検出するが、長いシンチレータを用いると、捉えられるミュオンは幅広い方向から飛来し、角度分解能が低下することが考えられる。そこで、シンチレータの幅は0.06mとし、長さを0.022mとして、これを多数組み合わせることにより角度分解能を向上させることとした。

複数並んだシンチレータのうち、上下2枚のシンチレータでミュオンを捉えた場合、検層装置の軸方向に直交する方向のミュオンを検出したことになる（直交方向）。また、あるシンチレータの直上にあるシンチレータの前後にあるシンチレータでミュオンを捉えた場合、検層装置の軸方向に斜交した方向のミュオンを検出したことになる（ $n-1$ 方向、 $n+1$ 方向）。シンチレータの前後と上下を定め、上のあるシンチレータとその直下のシンチレータの1つ後方にあるシンチレータでミュオンを捉えた場合、その方向を $n-1$ 方向、上のあるシンチレータとその直下のシンチレータの1つ前方にあるシンチレータでミュオンを捉えた場合を $n+1$ 方向とする（図-4）。

b) 回転駆動系の導入

ボーリング孔内ではシンチレータの方向を変化させることが困難であることから、ミュオンの飛来方向が限定的となることが考えられる。そこで上下のシンチレータを回転させる機能を持たせることとした（図-5）。上下のシンチレータを同時に回転させ、ある角度で停止した後にミュオンを計測することにより、異なる方向のミュオンを計測することが可能となる。回転はステッピングモータと呼ばれる、モータ駆動の回転装置を用いて検層

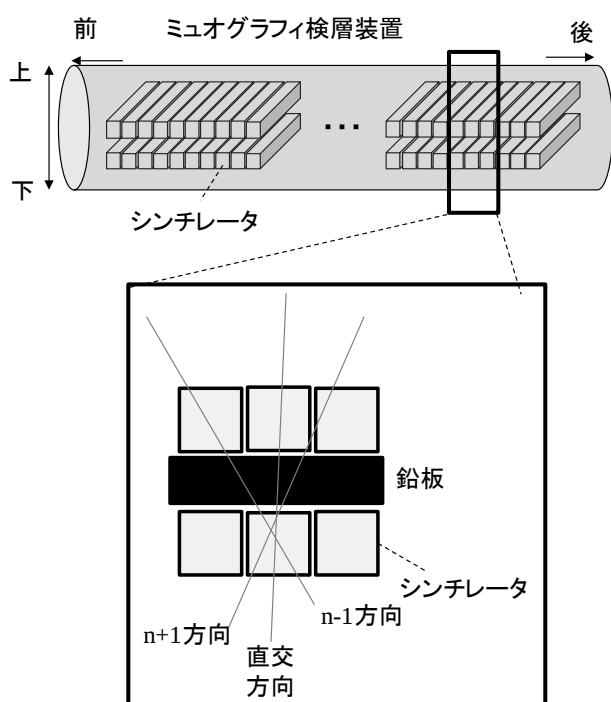


図-4 シンチレータの細分化とミュオン飛来方向の概念図⁷⁾

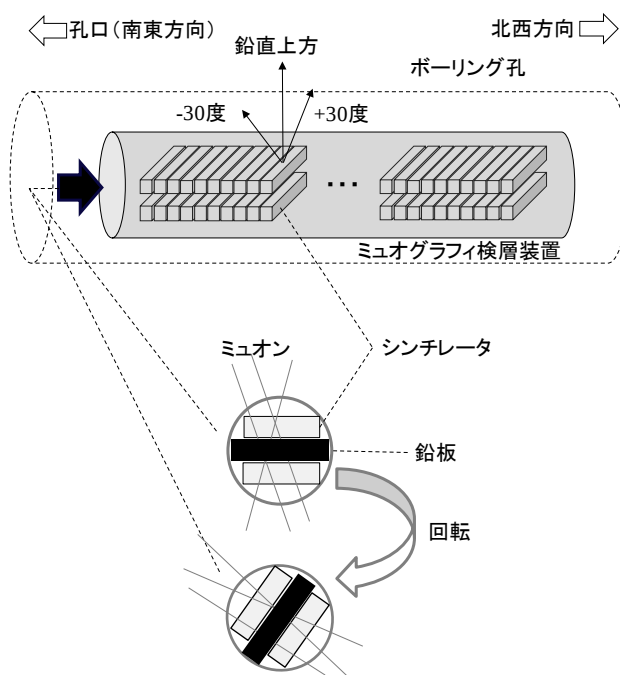


図-5 回転駆動による方向変化（概念図）

装置の軸方向、すなわちボーリング孔の軸方向に対して作動させることとした。ステッピングモータとシンチレータ、フォトマル、FPGAは電気的に導通している必要があり、これをケーブルで結線すると、回転によりケーブルがねじれ、切断してしまう恐れがある。これを回避するため、ステッピングモータと回転する駆動部をスリッパリングと呼ばれる回転コネクタを用いて接続した。

(2) 検層装置の現地への適用試験

a) 試験方法

現地適用試験を行った現場は、電力中央研究所（以降電中研と称す）の横須賀地区の裏にある小丘に掘削された防空壕である（図-6）。この防空壕の一箇所から水平に掘削されたボーリング孔を対象に試験を実施した。この小丘は東西に150m程度、南北に200m程度の大きさであり、地質は新第三紀三浦層群の粗粒凝灰質砂岩である。また防空壕内のボーリング孔の上部には約50mの上載地盤が存在する。ボーリング孔の全長は20mであるものの、ボーリング孔長4.5～8.0mまで孔径が小さくなっており、この区間に検層装置が挿入できなかったことから、孔口からボーリング孔長4mまでを試験範囲として設定した。

試験ではプラスチックシンチレータの中心位置がボーリング孔長1.5m、2.5m、3.5mになる位置に設置後、ミュオンの計測を実施した。北西-南東方向に掘削されているボーリング孔内において、鉛直上方の方向を中心に、北東方向へ30度（-30度）、15度（-15度）、南西方向へ15度（+15度）、30度（+30度）回転し、これらの状態を保持してミュオンの計測を行った（図-5参照）。これら5方向およびミュオンを捉えるシンチレータの配置によ

り直交方向, $n \pm 1$ 方向 (図-4参照) の計測をボーリング孔長1.5m, 2.5m, 3.5mの3箇所で行ったことから, 合計45の方向においてミュオンを計測したことになる。

ミュオグラフィ検層装置を用いた計測においても空気中のミュオンフラックスと山体におけるミュオンフラックスの比を用いることとした。空気中のミュオンフラックスは, 周囲に障害物の無い広場 (電中研横須賀地区敷地内) において, ボーリング孔と同様の方向に検層装置を置き, -30° , -15° , 0° , 15° , 30° の方向に回転した後計測した。



図-6 検層装置適用試験位置⁷⁾

表-1 試験結果 (山体と空気中のミュオンフラックス比) ⁷⁾

孔長(m)	方向	-30°	-15°	$\pm 0^\circ$	$+15^\circ$	$+30^\circ$
1.5	n-1	0.089	0.112	0.100	0.082	0.136
1.5	直交	0.051	0.105	0.063	0.158	0.096
1.5	n+1	0.128	0.174	0.115	0.126	0.220
2.5	n-1	0.089	0.094	0.080	0.103	0.200
2.5	直交	0.098	0.129	0.075	0.067	0.088
2.5	n+1	0.118	0.221	0.132	0.143	0.253
3.5	n-1	0.117	0.135	0.080	0.169	0.160
3.5	直交	0.084	0.081	0.090	0.192	0.096
3.5	n+1	0.138	0.123	0.098	0.261	0.167

b) 試験結果

試験結果として, 山体におけるミュオンフラックスと空気中のミュオンフラックスの比を表-1に示す。このミュオンフラックスのデータと以下の湊の式¹⁰⁾により算出されたミュオンフラックスを比較することにより, ミュオン飛来方向ごとの密度長を求めた。

$$I_\mu(X, \theta) = I_{\mu 0} \cos^{\alpha + \beta X} \theta \cdot \exp \left(-\frac{X}{A + BX + CX^2} \right) \quad (1)$$

ここに, $I_\mu(X, \theta)$ はミュオンフラックス, X は密度長 [kg/m^2], θ は天頂角 [rad], $I_{\mu 0}$, α , β , A , B , C は定数である。このうち $I_{\mu 0}$ はオープンスカイフラックス, すなわち空気中を飛来するミュオンのフラックスを表す。式を見ても明らかのように, 計測された山体と空気中のミュオンフラックスの比を取ると, 密度長 X と天頂角 θ の関数となるため, 天頂角を決定すると密度長が一意に定まることとなる。

経路長については, 炭鉱の時と同様DEMの5mメッシュデータを用いて算出した。ミュオンフラックスの比をもとに, ミュオンの飛来方向ごとの密度長を各方向の経路長で割ることにより得られた密度の分布を三次元的に表したものを図-7に示す。図では, ボーリング孔口から1.5, 2.5, 3.5mの位置における各方向 (-30° , -15° , 0° , $+15^\circ$, $+30^\circ$) の直交方向, 斜交方向 ($n-1$, $n+1$) の算出密度分布をそれぞれ扇型で示してある。扇型の上方の端は山体の表面の形状を表している。青い矢印は, 1.5, 2.5, 3.5mの位置での測定結果の三次元図化した際の視点の方向を表している。また, 図中左下に表示しているものは平面図であり, $-30^\circ \sim +30^\circ$ のそれぞれの扇型の平面図上の位置を点で表している。この図を見ると, 計測位置の南西方向の一方向が低密度であるものの, それ以外は $1500 \sim 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 程度の値を示していることが分かる。

c) 試験結果の考察

電中研横須賀地区敷地内において掘削された鉛直下向きボーリングから採取されたボーリングコアのうち, 今回対象とした山体と地質の新第三紀三浦層群のものについて, 様々な物性値取得のための室内試験を実施している¹¹⁾。このコアを用いて, 蒸留水で飽和させたときの重量とコアの寸法を用いて算出した体積から飽和密度,

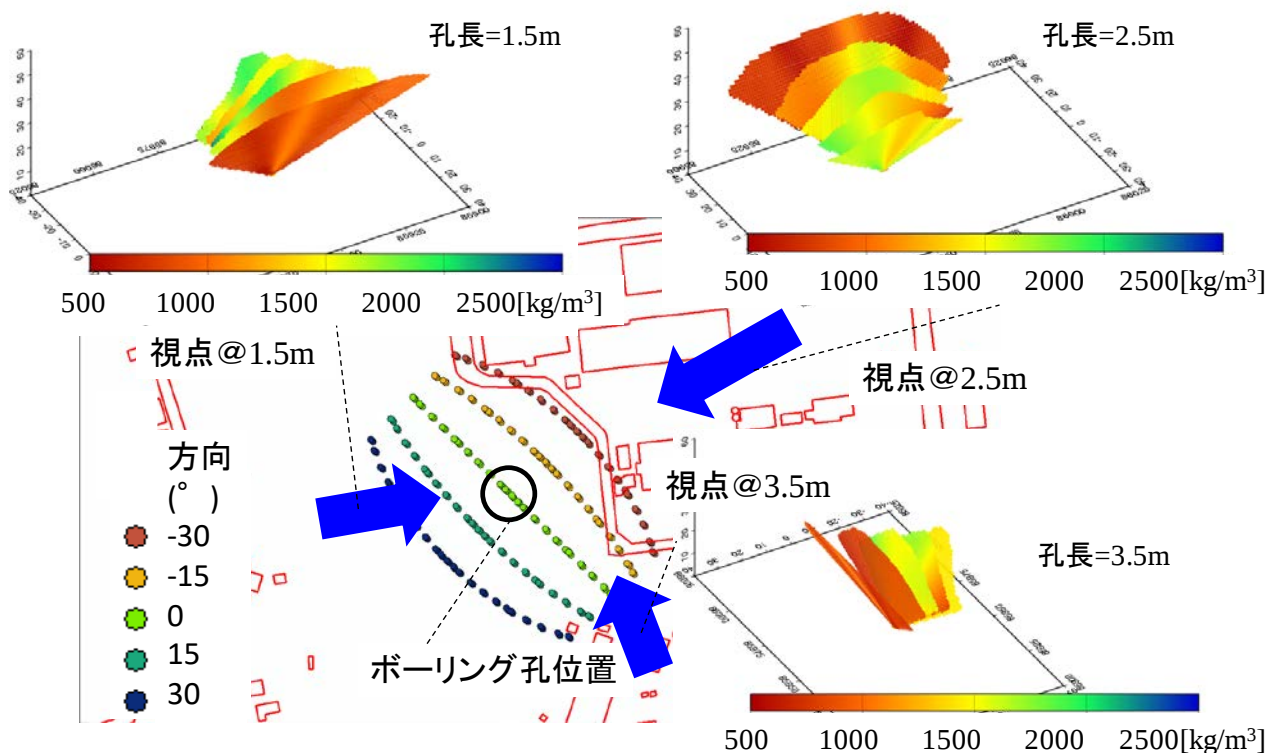


図-7 密度分布推定結果

110度の乾燥炉で乾燥させたコアの重量と体積から乾燥密度をそれぞれ測定した。その結果、小丘の地質である凝灰質な岩石の乾燥密度は1061～1653（平均1313） kg/m^3 、飽和密度は1633～2032（平均1910） kg/m^3 であった⁷。ミュオグラフィの結果から求められた平均密度は1300 kg/m^3 であり、コア試験で得られた乾燥密度と同様の値であることが分かる。ただし、ミュオグラフィ、コアを用いた測定ともそれぞれ不確実性を含んでいる可能性があることから、数値を直接比較する際には注意を要する。また、小丘は周辺地下水位よりも上位に存在することが想定され、かつ防空壕は掘削して70～80年経過していることから、周辺は水飽和しておらず、不飽和状態であったものと考えられる。さらに、小丘の表層部付近では一般的には風化が進んでおり、これに伴って密度が低下することも考えられる。以上のことから、小丘を対象に実施したミュオグラフィから得られた密度分布は、コア試験による現地の地質に対する密度測定結果と概ね整合的であると考えられる。

4. まとめ

土木分野や資源開発分野で多く対象となるものと考えられる、数十m程度の規模を持つ炭鉱の山体を対象にミュオグラフィを適用して密度測定を試行するとともに、

この技術を地下に適用する際に必要となるボーリング孔に挿入可能なミュオン密度検層装置を開発しボーリング孔へ適用した。

炭鉱へのミュオグラフィの適用結果から、垂炭の分布する範囲において、一般的に我が国に分布する石炭の密度と整合的な密度が得られたことから、数十m程度の規模の山体を対象としたミュオグラフィが有効であることが示されたものと考えられる。

ミュオグラフィ技術を地下のボーリング孔に対して適用させるため、径0.1m程度のボーリング孔に対応する、ミュオグラフィ検層装置を開発した。検層装置は、プラスチックシンチレータをダウンサイジングすることによりミュオンの飛来方向についての角度分解能の向上を図るとともに、ミュオンの飛来する視野を広げるためにプラスチックシンチレータを回転させることができるという特徴を持つ。

検層装置の機能検証を行うため、上方に50m程度の山体を持つ水平ボーリング孔においてミュオグラフィを実施した結果、得られた山体の密度分布は、近傍のボーリング孔から取得されたコア試料を用いた密度の測定値と概ね整合的な値となり、検層装置の適用性が示されたものと考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、炭鉱におけるミュオ

グラフィの実施について、(株)トークンヒロミの稲垣宏氏、(有)エムエスの関眞民氏、エヌ・アンド・エヌの長崎吉宏氏には多大な協力を頂いた。ボーリング孔対応ミュオグラフィ検層装置の製作、現場適用の実施について、(株)レアックスの佐藤伸哉氏、立野直樹氏、竹花政勝氏には多大な協力を頂いた。また、ミュオン飛来方向ごとの経路長の算出には、(株)電力計算センターの高橋健吾氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表明する次第である。

参考文献

- 1) George, E.P.: Cosmic rays measure overburden tunnel, *Commonwealth Engineer*, 455, 1955.
- 2) Tanaka, H.K.M., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H. and Taira, H.: Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 36, L01304, 2009.
- 3) Olah, L., Bamafoldi, G.G., Hamar, G., Melegh, H.G., Suranyi, G. and Varga, D.: CCC-based muon telescope for examination of natural caves, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1, pp.229-234, 2012.
- 4) Menichell, M., Ansoldi, S., Bari, M., Basset, M., Battiston, R., Blasko, S., Coren, F., Fiori, E., Giannini, G., Iugovas, D., Papi, A., Reia, S. and Scian, G.: A scintillating fibres tracker detector for archaeological applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 572, pp.262-265, 2007.
- 5) Tanaka, H.K.M., Miyajima, H., Kusagaya, T., Taketa, A., Uchida, T. and Tanaka, M.: Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 306, pp.156-162, 2011.
- 6) Liu, Z., Bryman, D. and Bueno, J.: Application of Muon Geotomography to Mineral Exploration, International Workshop on "Muon and Neutrino Radiography 2012", pp.17-20 April 2012, Clermont-Ferand, France, 2012.
- 7) 末永弘, 田中宏幸: ボーリング孔を対象としたミュオン密度検層装置の開発及び現場への適用, 物理探査, 71, pp.148-160, 2018.
- 8) Tanaka, H., Nagamine, K., Kawamura, N., Nakamura, S.N., Ishida, K. and Shimomura, K.: Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 507, pp.657-669, 2003.
- 9) 藤井修治, 戸叶浩敬, 新畑俊治: 石炭の炭化初期段階に関する研究 (II) —石炭の Helium Dnsity—, 燃料協会誌, 45(470), pp.434-441, 1966.
- 10) 湊 進: 宇宙線透視像, 放射線, 19(1), pp.49-56, 1992
- 11) 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永 弘, 中田弘太郎, 田中彦郎, 長岡 亨, 窪田健二, 土 宏之, 三和 公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏: 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究—地質環境に応じた掘削・孔内調査・試験方法の適用性と課題—, 電力中央研究所報告, N15, 117p, 2011. .

DENSITY MEASUREMENT OF ROCK MASS USING MUOGRAPHY

Hiroshi SUENAGA and Hiroyuki TANAKA

A density measurement was tested for a mountain with 20 m height in the coal mine using muography for use in civil or resource engineering field. The muography for the mountain showed effectiveness because the averaged density of lignite was similar to density of the general coal samples in Japan. We also developed a muon density logging tool that can be installed in a borehole around 0.1 m in diameter. The verification of the logging tool function was conducted in a horizontal borehole located beneath a small mountain at a depth of 50 m. The density of the mountain obtained via muography with the logging tool was roughly consistent with the density of cores in a borehole drilled adjacent to the mountain.