

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01987

研究課題名(和文) 巨大物体の正確な絶対密度測定を実現する全方位ミュオンエネルギースペクトルの測定

研究課題名(英文) Hemispheric panorama muon energy spectrum measurements for absolute density derivation

研究代表者

田中 宏幸 (Hiroyuki, Tanaka)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20503858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子ミュオンを使った巨大物体透視技術「ミュオグラフィ」は、火山やピラミッドなどの透視を通して、世界のセーフティーへ社会実装できる強いポテンシャルを示してきた。ミュオグラフィの特長は「巨大物体内部における絶対密度の3次元空間分布が得られる」であるが、密度導出に必須となるエネルギースペクトルを適用できる範囲が不十分なため、正確な絶対密度が導出できないケースが多々ある。本研究では、全方位ミュオンエネルギースペクトルメーター並びに機械学習によるエネルギー推定法を開発することにより、巨大物体の絶対密度の正確な導出を可能とする世界標準スペクトルデータの作成手法を確立、本成果を公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国が世界に先駆けて成功させた宇宙に由来する素粒子ミュオンを使った巨大物体透視技術「ミュオグラフィ」は瞬く間に世界へ波及し、これまでに、火山内部のマグマ動態の検出やピラミッド透視による玄室の新発見などを通して、世界のセーフティーへ社会実装できる強いポテンシャルを示してきた。ミュオグラフィの特長は「巨大物体内部における絶対密度の3次元空間分布が得られる」であり、これまでにない画期的な非破壊検査方法として期待されている。本研究では、ミュオンエネルギーの不確実性を低減することにより、絶対密度の導出を可能とする世界標準スペクトルデータを作成、公開するものである。

研究成果の概要(英文)：Muography, which utilizes naturally occurring cosmic-ray muon probes, can be adapted for application to solve global safety issues (such as volcano eruption monitoring, pyramid survey, tsunami monitoring, and social infrastructure maintenance) as a uniquely non-destructive evaluation method. One of the most outstanding advantages of this method is that in principle the three-dimensional absolute density distribution inside gigantic objects can be revealed. However, the applicable range of the muon energy spectrum has been limited and thus, it is difficult for us to derive absolute density in several cases. In this work, by integrating a newly designed multi-directional muon energy spectrometer in conjunction with a machine learning energy prediction method, a methodology to generate world standard spectrum data which yields precise absolute density derivation within a larger targetable range of objects was presented.

研究分野：ミュオグラフィ

キーワード：ミュオグラフィ 宇宙線 ミュオン エネルギースペクトル 密度 機械学習 素粒子検出器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙線ミュオンはほぼ等方的に到来する一次宇宙線と大気原子核が反応する事で生成される荷電粒子である[1]。これまでミュオンエネルギースペクトルの天頂角依存性は数多く測定されてきている[2, 3]。宇宙線ミュオンは一般的に加速器で得られるミュオンよりもエネルギーが高く、これまで物理学や地球物理学的現象の研究に適用されてきた[4, 5]。例えば、空気シャワーの研究[4, 6]は、大気ニュートリノの理解に繋がり[7]、ニュートリノ振動メカニズムの解明に寄与した[8]。また、低いエネルギー成分 (<2~3GeV) は、地磁気[9]、地球大気[10]、岩石中における不安定原子核の生成[9] などの研究に応用されてきた。中でもミュオグラフィは人工的、自然問わず、x 線レントゲン写真に似た巨大物体の内部構造を視覚化する技術として、21 世紀に入ってから大きく発展してきた[11, 12, 13]。ミュオグラフィ測定法では物体透過後のミュオン数をオープンスカイのミュオンエネルギースペクトルと比較する。特に、数十メートル規模の物体を測定する場合、低いエネルギーのミュオンスペクトルの理解が必須である。更に、低エネルギーミュオンの正確な理解は、ミュオンの散乱を利用した物体イメージング法を改善するという観点[14]並びに火山ミュオグラフィの低ノイズ化[15]という観点からも重要である。そのため、これまで、様々な方法でミュオン運動量が測定されてきた。一例を挙げると、ミュオンの飛行時間測定[16]、ミュオンが発するチェレンコフ放射の測定[17, 22]、磁石を用いてミュオンの飛跡から運動量を推定する方法 [5]、ミュオンの多重散乱並びにstopping powerの測定[8, 19, 20]などがある。NEWCUT スペクトルメーターは回転可能な低エネルギーミュオンのスペクトルを多重散乱並びに stopping power の測定と機械学習とを組み合わせることで低いエネルギーのミュオンスペクトルを正確に測定するために開発されたものである。

### 2. 研究の目的

我が国が世界に先駆けて成功させた宇宙由来する素粒子ミュオンを使った巨大物体透視技術「ミュオグラフィ」は瞬く間に世界へ波及し、これまでに、火山内部のマグマ動態の検出やピラミッド透視による玄室の新発見などを通して、世界のセーフティーへ社会実装できる強いポテンシャルを示してきた。ミュオグラフィの特長は「巨大物体内部における絶対密度の 3 次元空間分布が得られる」であり、これまでにない画期的な非破壊検査方法として期待されている。しかしながら、密度導出に必須となるエネルギースペクトルを適用できる範囲が不十分なため、正確な絶対密度が導出できないケースが多々ある。本研究では、全方位型スペクトロメータを開発し、これを長期運用することで、全方向においてエネルギースペクトルを高い精度で測定、絶対密度の導出を可能とする世界標準スペクトルデータを作成、公開する事を目的とする。

### 3. 研究の方法

NEWCUT スペクトルメーターは長さ 6m の回転可能な鉄製のサポートの中にトラッキングシステムを装備した構造となっている。トラッキングシステムは面積 40 cm x 40 cm x 19 枚の多線比例計数管(MWPC)より構成されている。各々の MWPC は x、y 方向にセグメントされており、その間隔は 12 mm である。この検出器デザインにより、約 3.5 mm の位置決定精度が達成されている。MWPC 以外には各 MWPC の間に挿入されている鉛板がある。この鉛は、ミュオンの散乱と遮蔽両方の目的で挿入されている。鉛の厚さは可変である。このトラッキングシステムは 19 個のラックに分かれており、各 MWPC は、厚さ 1cm のアルミニウム板で支えられている(図 1)。MWPC は、Ar-CO2 混合ガス(Ar:80%, CO2:20%)をおよそ 1 リットル毎時流すことによって運用される。アノードワイヤーには 1750 ボルトの電圧がかけられ、ミュオンシグナルはこの混合ガスの原子をミュオンが電離することによって発生する電子をガス増幅することによって発生する。データ取得並びに検出器のコントロールはマイクロコンピュータを用いて行われ、データリードアウトは少なくとも 3 つの MWPC のコインシデンスによってトリガーされる。各々の検出器のトリガーエフィシエンシーは約 99%であるが、データを読み取る際、数百マイクロ秒程度の間、トリガーがブロックされる。ミュオンの到来頻度を考えると、これは無視できる時間と考えて良い。データファイルはイベントバイイベントで MWPC のどこを通ったか、トリガーパターン、時刻、ADC データが ASCII ファイルとして書き出される。

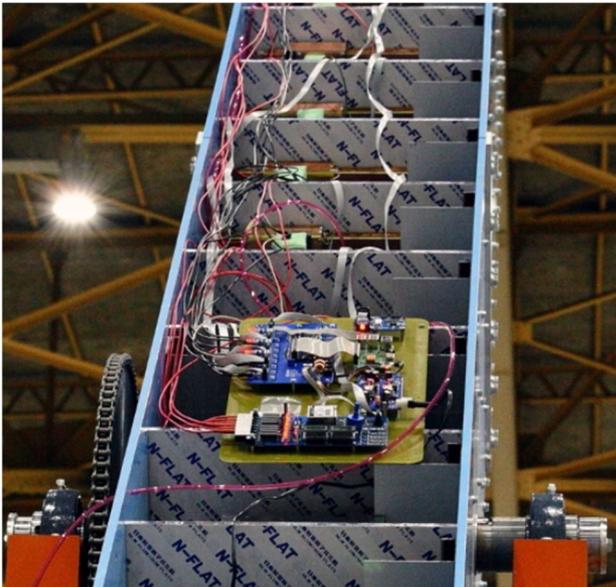


図 1 . NEWCUT スペクトルメータの写真。

#### 4 . 研究成果

機械学習用学習データは GEANT4 モンテカルロシミュレーションを用いて生成される。500,000 個のミュオンを仮想的に生成して、標準的な電磁相互作用を仮定してミュオンと NEWCUT との反応がシミュレートされた。イベントの位置情報やアルゴン中におけるミュオンのエネルギーデポジット各トラッキング層において記録される。図 2 (A) には、検出効率とエネルギーレシールドレベルとの関係が示されている。実験データの高精度モデリングのためには、シミュレーションにより得られたエネルギーデポジットの分布を実際得られた ADC データが MWPC 毎に合っている必要がある。図 2 (B) には、シミュレーションにより得られたエネルギーデポジットの分布と ADC のデータが比較されている。数十 GeV 以上の高エネルギー領域において、シミュレーションと実験データに多少の違いはあるものの、本研究には影響しないことが確認された。

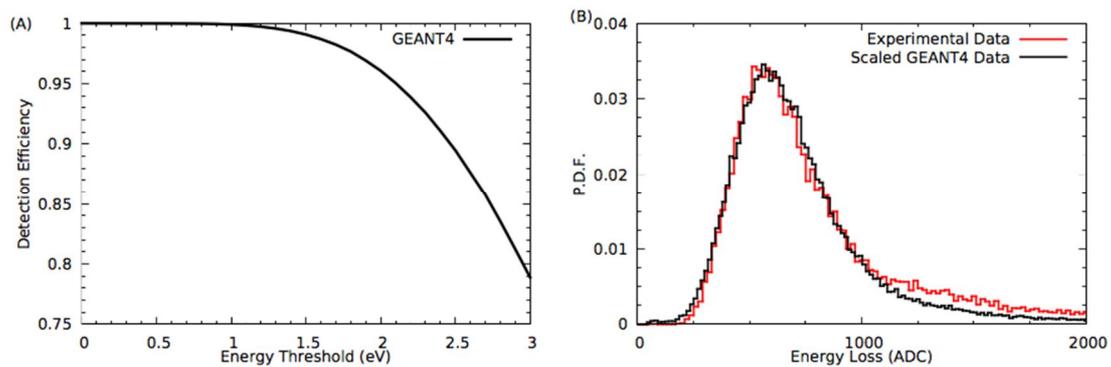


図 2 検出効率とエネルギーレシールドレベルとの関係 (A) . シミュレーションにより得られたエネルギーデポジットの分布と ADC のデータとの比較 (B) .

ニューラルネットワークを用いた機械学習 [21] の活用は、検出された粒子のエネルギーをトラックベースでクラシフィケーションするという観点から有用である。本研究では、4つのニューラルネットワークを組み合わせることとした。シミュレーションデータは 0.6 : 0.2 : 0.2 の比率で3つのセットに分割され、それぞれ、training, validating, testing に用いた(図 3)。

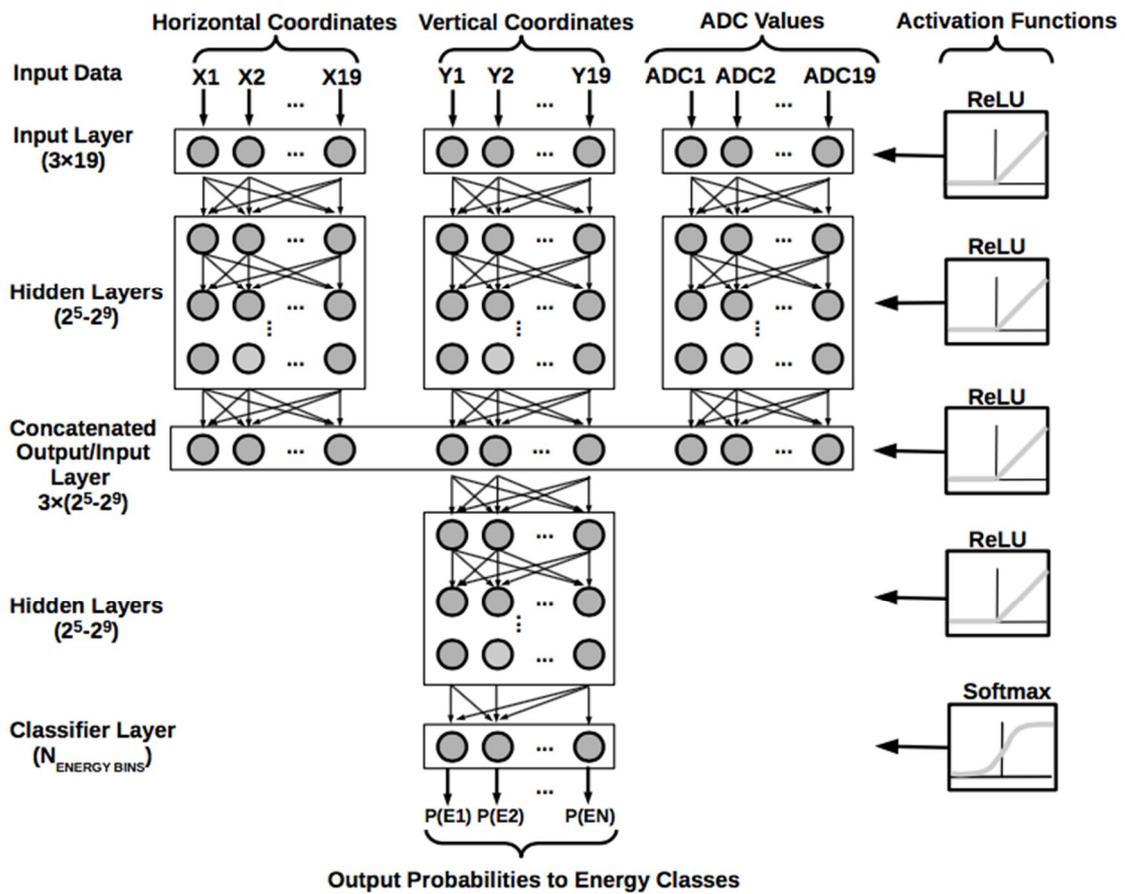


図3. 本研究に用いられたニューラルネットワークモデル。

エネルギービン幅は 0.25 GeV で 40 ニューロンが適用された。即ち、10GeV 以上のミュオンは全て同じエネルギービンにクラシファイされた。シミュレーションで生成されたスペクトルと機械学習で予測されたスペクトルの違いを計算することで、ハイパーパラメータを最適化した。結果を図に示す。図4 (A) には規格化されたミュオン数がシミュレーションで生成されたエネルギーと機械学習で予測されたエネルギーの関数として示されている。図4 (B) には、エネルギー予測値の平均値が 1SD のエラーバーと共に示されている。高エネルギー側で予測値の平均値はシミュレーション値よりやや高い値を示しているものの、予測値は、6GeV までシミュレーション値と良い一致を示している。

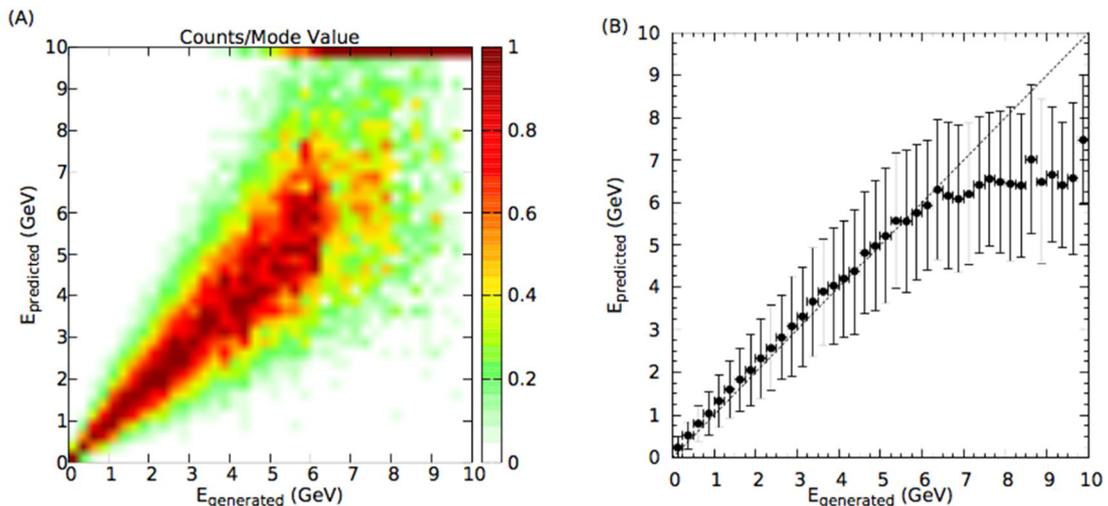


図4. シミュレーションで生成されたエネルギーと機械学習で予測されたエネルギーを関数した

規格化されたミュオン数のプロット (A)、エネルギー予測値の平均値。1SDのエラーバーが示されている (B)。

この結果は、NEWCUT スペクトルメーターに対して、予測値が約 6GeV でサチュレートすることを示している。そこで、シミュレーション値からの予測値のずれを本エネルギー決定におけるシステマティックエラーとすることとした。図 5 には決定されたミュオンスペクトルを示す。

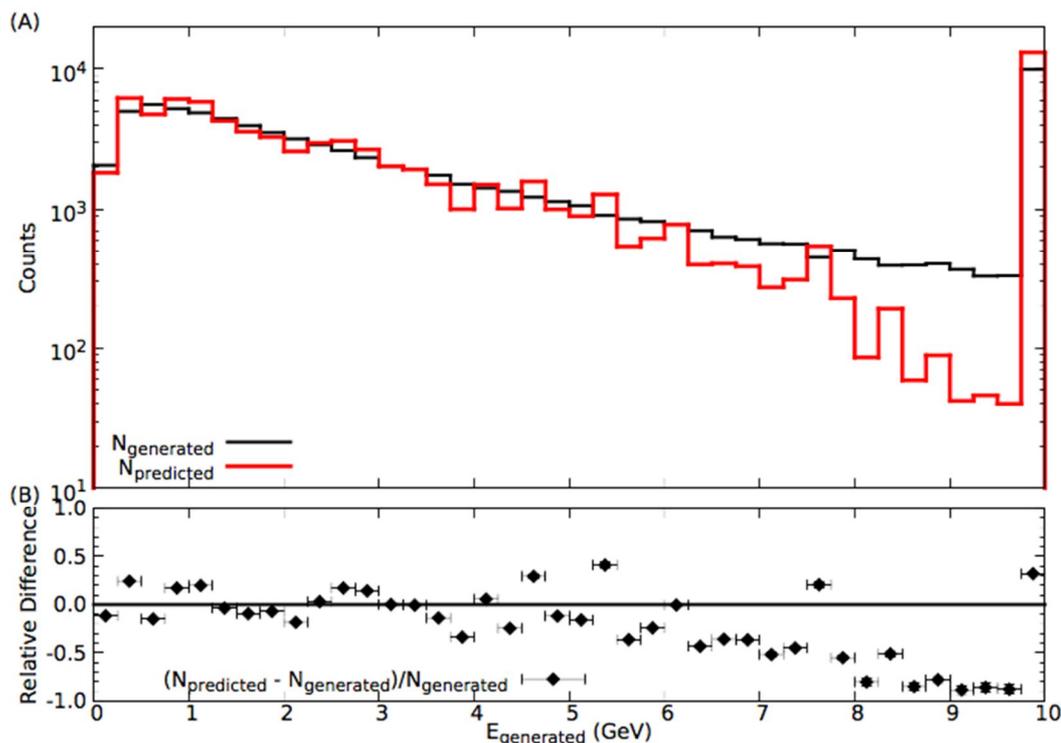


図 5. 機械学習により決定されたミュオンスペクトル(赤線)とシミュレーションにより生成されたエネルギー(黒線)との比較 (A)。両者のずれ  $(N_{\text{predicted}} - N_{\text{generated}}) / N_{\text{generated}}$  がエネルギーの関数として示されている (B)。

結論として NEWCUT スペクトルメーターを用いることで 6GeV までミュオンスペクトルを決定できることが分かった。6GeV ミュオンの SiO<sub>2</sub> 内での stopping power は 3000gcm<sup>-2</sup> である。すなわち、本研究により、全方向においてエネルギースペクトルを高い統計精度で測定、3000gcm<sup>-2</sup> 程度までのサイズの物体の絶対密度の正確な導出を可能とする世界標準スペクトルデータの作成手法を確立、本成果を公開した。

#### 参考文献

- [1] T. Gaisser, Cosmic Rays and Particle Physics. Camb. Uni. Press (1990).
- [2] T. Hebbeker and C. Timmermans, A compilation of high energy atmospheric muon data at sea level. *Astroparticle Physics*18, 107-127 [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(01\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(01)00190-3) (2002).
- [3] S. Cecchini and M. Spurio, Atmospheric muons: experimental aspects. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*1,185-196 <https://doi.org/10.5194/gi-1-185-2012> (2012).
- [4] O. C. Allkofer et al., Cosmic ray muon spectra at sea level up to 10 TeV. *Nuclear Physics B*259, 1-18 (1985).
- [5] L3 Collaboration, Measurement of the atmospheric muon spectrum from 20 to 3000 GeV. *Physics Letters B*598, 15-32 <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2004.08.003> (2004).
- [6] L. Bonechi et al., Development of the ADAMO detector: test with cosmic rays at different zenith angles. 29th International Cosmic Ray Conference Pune.9, 283-286 (2005).
- [7] S. Haino et al., Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer. *Physics Letters B*594, <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2004.05.019>35-46 (2004).
- [8] MACRO Collaboration, Atmospheric neutrino oscillations from upward thoroughgoing muon multiple scattering in MACRO. *Physics Letters B*566, 35-44 [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(03\)00806-2](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(03)00806-2) (2003).
- [9] M. P. De Pascale et al., Absolute Spectrum and Charge Ratio of Cosmic Ray Muons in the Energy Region From 0.2 GeV to 100 GeV at 600 m Above Sea Level. *Journal of Geophysical Research*48, 3501-3507 (1993).
- [10] M. Tramontini et al., Middle-Atmosphere Dynamics Observed With a Portable Muon Detector. *Earth and Space Science*61865-1876 <https://doi.org/10.1029/2019EA000655> (2019).
- [11] L. Bonechi, R. D'Alessandro and A. Gianmanco, Atmospheric muons as an imaging tool. *Reviews in Physics*5100038 <https://doi.org/10.1016/j.rvph.2020.100038> (2020).
- [12] G. Bonomi et al., Review Applications of cosmic-ray muons. *Progress in Particle and Nuclear Physics*12103768 <https://doi.org/10.1016/j.pnpp.2020.103768> (2020).
- [13] L. Oláh, H. K. M. Tanaka and D. Varga, Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles. *Geophysical Monograph*270, ISBN 9781119723028, American Geophysical Union, John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119722748> (2022).
- [14] K. N. Borozdin et al., Radiographic imaging with cosmic-ray muons. *Nature*422277, <https://doi.org/10.1038/422277a> (2003).
- [15] R. Nishiyama et al., Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons. *Geophysical Journal International*216, <https://doi.org/10.1093/gji/ggu331> (2014).
- [16] J. Marteau et al., Implementation of sub-nanosecond time-to-digital converter in field-programmable gate array: applications to time-of-flight analysis in muon radiography. *Meas. Sci. Technol.*25, 035101 (2014).
- [17] G. Gallo et al., Proof-of-Principle of a Cherenkov-Tag Detector Prototype. *Sensors*20, 3437 <https://doi.org/10.3390/s20123437> (2020).
- [18] J. Bae and S. Chatzidakis, Fieldable muon spectrometer using multi-layer pressurized gas Cherenkov radiators and its applications. *Scientific Reports*12, 2559 <https://www.nature.com/articles/s41598-022-06510-2> (2022).
- [19] H. K. M. Tanaka, T. Kusagaya and H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nature Communications*5, 338 <https://doi.org/10.1038/ncomms4381> (2014).
- [20] L. Oláh et al., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors. *Scientific Reports*8, 3207 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9> (2018).
- [21] A. Geron, Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow, ISBN 9781492032649, O'Reilly Media (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Laszlo Olah, Hiroyuki K. M. Tanaka, Hiroshi Suenaga, Shinichi Miyamoto, Gabor Galgoczi, Gergo Hamar, and Dezso Varga	4. 巻 2022
2. 論文標題 Development of Machine Learning-Assisted Spectra Analyzer for the NEWCUT Muon Spectrometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Instrumentation in Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.31526/jais.2022.264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Laszlo Olah, Hiroyuki K. M. Tanaka, Hiroshi Suenaga, Shinichi Miyamoto, Gabor Galgoczi, Gergo Hamar, and Dezso Varga
2. 発表標題 Development of Machine Learning-Assisted Spectra Analyzer for the NEWCUT Muon Spectrometer
3. 学会等名 International Workshop on Cosmic-Ray Muography (Muography2021), 24-26 Nov. 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ハンガリー	Wigner Research Centre for Physics		