

軽量高解像度ミュオグラフィ撮像装置

田中 宏幸 Tanaka Hiroyuki

1. はじめに

我が国で火山を透視する技術「ミュオグラフィ」 が世界で初めて実証され、その後急速に世界に広ま りつつある。ミュオグラフィとはキロメートルにも 及ぶ岩盤を透過可能な高エネルギー素粒子、ミュオ ンを利用することで、X線レントゲン写真撮影法で は可視化が難しい、巨大な物体内部を撮影する方法 である。X線レントゲン写真撮影術は透視したい対 象に照射されたX線の一部が物体内部に止まる性質 を利用するが、ミュオグラフィも同様に、巨大物体 を透過するミュオンが一部途中で止まることを利用 して、内部構造の影を映し出す。

ミュオンは銀河宇宙線がもととなって,地球の大 気中で二次的に生成される素粒子である。宇宙線は 主に超新星爆発によって,ほぼ光速まで加速される が直進することはできず,銀河磁場の影響で複雑な 経路をたどりながら地球に到達する。すなわち,地 球に到達する頃には,元々の進行方向に関する情報 は完全に失われており,地球から見ると,宇宙線が 等方的に降り注いでいるように見える。地球大気に 突入した宇宙線は窒素や酸素などの大気原子核との 反応の結果,パイオンやケイオンなどのメソンを生 成するが,高度約16kmでこれらのメソンが崩壊す ることでミュオンとニュートリノが生成される。 ミュオンは約100万分の2秒で崩壊するが,ローレ ンツ因子が一般的に大きく,その多くが地表に到達 する。

今から 60 年ほど前の 1955 年, ミュオンの強い透過 力を利用した岩盤の密度測定を試みたのがオースト ラリアの物理学者 E.P. ジョージである¹⁾。ジョージが 用いた測定装置はガイガーカウンターであり, ミュオ ンの到来方向の検出ができなかったが,ミュオグラ フィのパイオニア的研究として重要である。1968 年 アルバレはジョージの実験を発展させ,エジプトの ピラミッドを対象にミュオグラフィ観測を挑んだ²⁰。 チームは総重量 10 t を超えるスパークチェンバー ベースの装置をベルゾーニ玄室と呼ばれるほぼピラ ミッドベース中央部に位置する空洞に設置した。彼 らは数か月間に渡る観測で,ピラミッドを上から下 に向けて通り抜けてきたミュオンの飛跡データが十 分な量を記録した。この実験では未発見の構造を発 見することはできなかったが,ミュオンを利用した イメージングという観点から,非常に重要な実験と 言える。

その後40年近くが経過した2006年,我が国が世 界に先駆けて火山内部を透視したことを契機に,今, 世界ではミュオグラフィの応用研究が急速に展開さ れつつある³⁾。ミュオグラフィの調査対象は我が国 の火山からベスビオ(伊)⁴⁾,ストロンボリ(伊)⁵⁾, エトナ(伊)^{6,7)}, ピュイドドーム(仏)⁸⁾, ラ・ス フリエール(仏)⁹⁾, ラパルマ(西)¹⁰⁾など世界の 火山へと広がり,更に火山だけでなく,洞窟¹¹⁾, 遺 跡¹²⁾, CCS¹³⁾,地下鉱山資源¹⁴⁾, 産業プラント^{15,16)}, 地球外天体^{17,18)}などにも広がっている。

2006年、火山内部を撮影した際に用いた撮像装置は原子核乾板の技術を応用したものであった。この第1世代の撮像システムは高い角度分解能、電力不要などの火山観測に極めて適した特徴を持っていたが、リアルタイムモニタリングの目的には使えなかったので、その後、Field Programmable Gate Array (FPGA)の技術を応用した第2世代の撮像システムが開発された¹⁹⁾。この装置はプラスチックシンチレーターストリップを縦横に並べたシンチレーショ

ン検出器複数台で構成されており,Wi-Fi技術を適 用することで,遠隔地からリアルタイムモニタリン グを行うことが可能となった。2009年2月に発生 した浅間山噴火では噴火前と噴火後の透視像が比較 され,火口底の一部が吹き飛んだことが確認され た²⁰⁾。

火山等巨大物体を透視撮像するためにはミュオン のみをとらえる必要があるが,大気中にはミュオン 以外にも電子,陽電子,陽子,メソンなど様々な荷 電粒子が存在している。これらがノイズ粒子となっ て,透過像のコントラストを下げる。

ノイズ粒子を取り除く有効な手段は複数の粒子検 出器を用いて直線性の良い粒子飛跡のみを取り出す ことである。その際には、検出器の間に物質を挿入 することでノイズ粒子の散乱を助長する。ミュオン とは異なり、ノイズ粒子は物質中で散乱しやすい性 質を持っているからである。複数の検出器を一直線 上に通り抜けた粒子だけを選別して記録することで ミュオンだけを選択的に取り出すことが可能である (図1)。この仕組みは、鉛直方向から同時入射する 荷電粒子のシャワーが各々の検出器で生成する反応 点が直線上に並ぶ可能性が低いことと、水平方向か ら入射するミュオン以外の荷電粒子は図中Radiation Shield によって阻止されるか散乱されるため、反応 点が直線上に並ぶ可能性が低いことを利用してい る。このような目的で検出器の間に挿入する物質を 放射線シールドと呼んでいる。

一方,この方法では,観測装置の角度分解能を下 回る角度で散乱したイベントを除去することができ ない。検出器の仕様上,装置の角度分解能を上げる ことができない場合には,放射線シールドを厚くし て散乱角を増大させる以外方法はない。このように, 観測装置の角度分解能,放射線シールドの厚みノイ ズ粒子の除去率にはトレードオフの関係がある。

筆者らは上記の方法によって第2世代システムの ノイズ低減能力を強化することで2013年に薩摩硫 黄島で発生した噴火において、マグマの昇降をとら えることに成功している²¹⁾。ノイズの低減は透視画 像の撮影にかかる時間の短縮に繋がるからである。 この改良型第2世代ミュオグラフィ観測装置は幅 10 cm、長さ1.5 mのプラスチックシンチレーター ストリップを縦横に並べたシンチレーション検出器 6 台で構成されており、有感面積約2 m²、観測装置 の角度分解能は33 mrad であった。この角度分解能 でノイズを十分に低減させるためには、総厚 50 cm の鉛製放射線シールドを実装する必要があった。

放射線シールドには radiation length の観点から, 鉛を用いることで重量を軽量化することができる。 それでも鉛の密度は 11.2 g/cm³ もあり, 鉛シールド の総重量は 11 t を超えた(同じ radiation length の厚 みを持つシールドを鉄で作ろうとすると 20 t を超え る)。すなわち, それを支えるフレームも強固に作 る必要があり,装置全体の重量は 16 t にも及んだ。 重厚長大な観測装置は運搬において,大型のクレー ンを要する,小型フェリーのタラップの重量制限を 超えるため,何台ものトラックに分載する必要があ るなど,運搬を高コスト化する要因となっていた。 装置を軽量化することで,設置場所や運搬方法の選 択肢が増え,より実用的な火山透視観測が可能とな るが,そのために必要となるのが,高い角度分解能



図1 複数の粒子検出器を用いてノイズ粒子を低減する仕組み

を持つミュオグラフィ観測システムである。本報文 は、東京大学地震研究所とハンガリー科学アカデ ミーウィグナー物理学研究センターとの共同開発に よって(1)従来のミュオグラフィ観測システムの重 量を大きく低減できたこと、(2)従来と同程度以上 のノイズ低減能力が確認できたこと、そして(3)新 たに開発された第3世代ミュオグラフィ観測システ ムの将来展望について論ずるものである。

※電子の radiation length は鉄が 17 mm に比べて鉛 は 6 mm である。

2. MWPC-based Muography Observation System (mMOS) の開発

第1節で述べたように, 観測装置全体の重量を低 減するためには、その大部分を占める放射線シール ドの量を減らす必要があるが、そのためには装置の 角度分解能を向上させることが必須である。角度分 解能を向上させるためには粒子検出器間の距離を長 くする方法もあるが、これだと装置全体のボリュー ムが増大する。一方、検出器の位置分解能を向上さ せることで、装置のボリュームを変えずに角度分解 能を上げることが可能である。第2世代で用いられ たプラスチックシンチレーターを粒子検出器として 利用する場合でも、チャージシェアリング技術²²⁾ などを応用することで、高い位置分解能を達成でき る。だが、検出器そのものの重量を低減させる観点 からは、ガス検出器を用いる方が理に適っている。 そこで、注目されたのがマルチワイヤプロポーショ ナルチェンバー (Multi Wire Proportional Chamber;

MWPC) である。

MWPC は日本語では多線式比例計数管とも呼ば れるが、ワイヤーが張られたチェンバーの中を特殊 なガスで満たして使用する(図2)。その中をミュ オンなどの荷電粒子が通過するとガス分子をイオン 化する。MWPC では細いワイヤーに高電圧を流す ことで、ワイヤー周辺に高い電場勾配を形成する。 ガスのイオン化で、できた電子がワイヤーに寄って 来ると、電場からエネルギーをもらって加速される。 加速された電子は他のガス分子を電離することで更 に多くの電子を発生させる。発生した電子はすぐさ ま電場からエネルギーをもらって加速され別の電子 を作る。このような過程を繰り返して電子を増幅(ガ ス増幅)させ、最終的に電流パルスとして取り出す 粒子検出器である。シンチレーション検出器とは異 なり、光センサーが不要なので、比較的安価に製作 することが可能である。

MWPC 自体はポーランド生まれのフランスの物理 学者ジョルジュ・シャルパックが開発して以来何十 年もの長い歴史と多くの実績を持つが,野外におけ るミュオグラフィ観測への適用には長い時間を要し た。MWPC は従来振動に弱く運搬には細心の注意を 要したからである。また,イソブタンなどの可燃性 ガスの利用が必須であったため,屋外,特に無人で の長期観測を行うことが困難であった。この技術的 バリアは,ハンガリー科学アカデミーウィグナー物 理学研究センターによって克服された。同研究セン ターが開発に成功した MWPC は二酸化炭素とアル ゴンの混合ガスで動作可能でかつ衝撃に強い。この ようにして,MWPC を実装した低ノイズミュオグラ





図3 駐日ハンガリー大使館において,日ハンガリーのミュ オグラフィ研究開発についての協定書に調印する小原一成 東京大学地震研究所長(左)とピーター・レヴァイハンガリー 科学アカデミーウィグナー物理学研究センター長(右)



図4 千葉ミュオグラフィ実験施設で組み上げられた第3世 代ミュオグラフィ観測システム試作機

フィ観測システムの実現可能性が広がった。

2015年、東京大学地震研究所とハンガリー科学 アカデミーウィグナー物理学研究センターは MWPCを活用した第3世代ミュオグラフィ観測シ ステムの開発に向けて国際協定を結び、日ハンガ リー間で本格的な国際共同研究が始まった(図3)。

ハンガリー製の MWPC はワイヤーピッチが 12 mm と第2世代ミュオグラフィ観測装置のシン チレーターのストリップ幅と比べて 1/10 近く狭く, システム全体のボリュームを変えずに,ノイズ粒子 除去用の放射線シールドを大きく低減できる見込み があった。2016 年9月,既に薩摩硫黄島における マグマ動態観測に実績がある第2世代システム (Scintillator-based Muography Observation System; sMOS) のプラスチックシンチレーター部分を MWPC に置 き換えた第3世代システム (mMOS) が千葉県にあ るミュオグラフィ実験施設で組み上げられ,装置の 予備実験が進められた (図4)。実装された MWPC



図 5 桜島の観測風景(上)及び観測小屋内部に設置された 観測装置(下)

のサイズは 80 × 80 cm² である。この検出器の重量 は~10 kg m² であり、第 2 世代システムで実装され たシンチレーション検出器の重量~100 kg m² の 1/10 である。すなわち、6 層実装型の MOS では 540 kg m² の重量削減となる。更に予備実験の結果、 放射線シールドの厚みを従来の 50 cm からその 1/5 の 10 cm に低減できることが示唆された²³⁾。この差 は放射線シールドだけで 1 m² 当り 4 t もの削減に相 当する。更にシールドの軽量化により、システム全 体を支えるフレームの強度も下げることができるの で、これも重量低減に繋がる。こうして、単位面積 当りのシステム重量を一桁近く低減することに成功 した。

予備実験終了後,2017年1月,第3世代ミュオ グラフィ観測システムは日本有数の活動的火山の 1つ鹿児島県桜島に移設され,第3世代装置を用い た世界初の火山観測が始まった(図5)。システム の有感面は現在も活発な噴火活動を続けている昭和 火口方向に向けられた。システムから昭和火口まで の距離は~2.8 kmである。途中ガスの流量不足によ る感度の低下があったが、それを除くとほぼ、問題 なく安定的に動作している。ノイズレベルは 10⁻⁷gcm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ と期待通りであり、位置分解能 10 cm の第2世代システムと比べても同等かそれ以上の高 いノイズ低減能力を示した。

3. まとめ

第3世代ミュオグラフィ観測システムを火山観測 に投入することにより,第2世代システムと比べて 一桁近くの軽量化を実現しても,実用に十分耐える 高いノイズ低減能力があることが実証された。だが, 第3世代システムによる火山観測はまだ始まったば かりで,まだまだ未知な要素が存在する。例えば, 筆者らはまだ夏季における観測を経験していない。 40℃を超える環境下で観測装置がどのような振る舞 いをするのか見当がつかない。また,台風シーズン 到来に伴い,雷の発生が危惧される。雷サージに対 して,装置がどれほど脆弱なのかについても筆者ら には経験が無い。これは今後,1年を通した観測で 明らかにされていくことだろう。

第3世代システムにも欠点はある。このミュオグ ラフィ観測システムはガス検出器の技術を応用して いるため、第2世代システムと違い、常に連続的な ガスフローを必要とする。一旦設置すれば、ほぼメ ンテナンスフリーで運用できる第2世代システムだ が、第3世代システムでは、定期的にボンベを交換 する必要がある。現在,この交換頻度は3か月程度 に1回である。一方,この欠点は火山観測において 長所ともなり得る。活動的火山を観測する場合、常 に火山灰の影響を考慮しなければいけない。火山灰 が装置に入り込むと故障の原因となるが、それを防 ぐためにシステムを完全密閉してしまうと今度は熱 がこもる。システムを密閉する場合, 第2世代シス テムでは何重ものフィルタ付きの空調が必要だった が, 第3世代システムの場合, 連続的なガスフロー が常にシステム内部から外部への流体の流れを作る ため,特別な空調が無くても熱がこもりにくくなる。 だが、桜島で運用されている第3世代システムの有 感面積はまだ~0.6 m²である。既に設置されている 第2世代システムと比べても1/4程度しか無い。す なわち、同じ統計精度のデータを取得するのに4倍 時間がかかる。この問題は今後, 第3世代システム

を第2世代システムと同レベルにまで有感面積を強 化していくことで解決していく予定である。

今後,第3世代ミュオグラフィ観測システムは火 山観測以外にも、より一般的な巨大物体の透視撮像 に広く活用されていくことが期待されている。シス テムの軽量化は透視装置のポータブル性の向上に繋 がることは言うまでもなく、粒子検出器の位置分解 能の向上は装置のダウンサイジングに直結するから である。前節でも述べたが、検出器の位置分解能が 高ければ、同じ角度分解能を達成するために必要な 検出器間の距離を縮めることができるため、システ ム全体のボリュームを下げられる。安価でかつポー タブルなミュオグラフィ観測システムができれば、 これまで難しかった様々な場面での観測が可能とな る。

謝辞

本研究は東京大学地震研究所とハンガリー科学アカ デミーウィグナー物理学研究センターとの国際共同 研究である。

参考文献

- George, E.P., Cosmic rays measure overburden of tunnel. Commonw. Eng. 1955, 455-457 (1955)
- 2) Alvarez, L.W., *et al.*, Search for hidden chambers in the pyramid. *Science*, **167**, 832-739 (1970)
- Tanaka, H. K. M., *et al.*, High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 104–113 (2007)
- 4) Macedonio, G., MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November
 7, 2016. http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/ MUOGRAPHERS16/General-Assembly/program.html
- Tioukov, V., *et al.*, Muography with nuclear emulsions -Stromboli and other projects, *Annals of Geophysics.*, 60, S0111 (2017)
- 6) Carbone, D., *et al.*, An experiment of muon radiography at Mt. Etna (Italy). *Geophys. J. Int.*, **196**, 633-643 (2013)
- 7) Catalano, O. ASTRI muography project, MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November 7, 2016. http://www.eri.u-tokyo. ac.jp/ht/MUOGRAPHERS16/General-Assembly/program. html
- 8) Carloganu, C., TOMUVOL muography project, MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November 7, 2016. http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS16/ General-Assembly/program.html
- 9) Jourde, K., et al., Muon dynamic radiography of density

changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano 6, 33406 (2016)

- 10) Miyamoto, S., et al., Annals of Geophysics, 60, 1 s0110 (2017)
- Olah, L., et al., CCC-based muon telescope for examination of natural caves, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 1, 229–234 (2012)
- 12) Saracino, G. Imaging underground cavities by cosmicray muons: observations at Mt Echia, Naples, Italy, MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November 7, 2016. http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS16/ General-Assembly/program.html
- Thompson, L, MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November 7, 2016. http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS16/ General-Assembly/program.html
- 14) Liu, *et al.*, Muon and Neutrino Radiography, Clermont-Ferrand, France (2012)
- 15) Morishima, K. Muographic investigation of Fukushima nuclear power plant. Muography: Perspective Drawing in the 21st Century, 87 (2015)
- 16) Tanaka, H. K. M. Development of stroboscopic muography, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 2, 41–45 (2013)
- 17) Miyamoto, H. H.K.M. Tanaka, T. Yoshimitsu, M. Otsuki,

M. Taguchi, S. Saito, Y. Uchiyama, S. Kameda, H. Kikuchi, and J. M. Dohm, MUOGRAPHY FOR FUTURE PHOBOS LANDING MISSION, 47th Lunar and Planetary Science Conference (2016)

- 18) Kedar, S., H. K. M. Tanaka, C. J. Naudet, C. E. Jones, J. P. Plaut, and F. H., Webb Muon radiography for exploration of Mars geology Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2 NA 157 164 (2013)
- Tanaka, H.K.M., *et al.*, Development of a portable assemblytype cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma, *Earth Planets Space*, **62**, 119 (2010)
- 20) H.K.M. Tanaka, et al., Geophys. Res. Lett., 36, L17302 (2009)
- 21) Tanaka, H. K. M., *et al.*, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano Nature communications, **5**, 3381 (2014)
- 22) F. Ambrosino, et al., Journal of Instrumentation, 9, C02029 (2014)
- 23) Tanaka, H. Kusagaya, T., Varga, D. G. Hammer, L. Olah: Muographic Observation Instrument, Japanese Ref. No. 2016-087436, data 25/04/2016.

(東京大学地震研究所)