



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦
—地球最大のフロンティアに挑む—

深海ミュオグラフィと マントル掘削：マントル からの海洋地殻密度構造 の可視化

田中宏幸

Deep-ocean muography and the mantle
drilling: the internal structure of the oceanic
crust visualized from the mantle

Tanaka Hiroyuki

たなか ひろゆき：東京大学国際ミュオグラフィ
連携研究機構

巨大物体の透視技術ミュオグラフィは火山、ピラミッドなど陸域における透視に成果を上げてきた。2021年、同技術を海域へと展開することで陸域ミュオグラフィでは極めて困難であった1%を切る密度の時間変化をオーダーで改善できることが確認され、ミュオグラフィは新たな局面を迎えた。本稿ではミュオグラフィを深海へと展開することで、海洋科学掘削計画にどう貢献できるかについて論ずる。

1. ミュオグラフィ

固体地球浅部の密度の空間分布を知る方法として、ミュオグラフィと呼ばれる技術が実証され、ここ10年の間に世界的に観測が展開され始めている。ミュオグラフィはX線が透過しない、巨大物体内部の密度分布を投影する手法である。その原理はX線レントゲン写真とほぼ同じだが、X線の代わりにミュオンと呼ばれる素粒子を用いる。この素粒子はエネルギーが高く、強い透過能力を持つため、キロメートルにも及ぶ岩盤を透過できる。X線レントゲンは照射されたX線の一部が物体内部に止まる性質を利用して、内部の影をフィルムに映し出す手法である。ミュオグラフィも同様に、巨大物体を透過するミュオンの一部が取り抜けることで、内部構造の影を映し出す。2007年、火山を対象として、ミュオグラフィが実証されてから (Tanaka et al. 2007)、ミュオグラフィの応用が急速に展開されつつあり、洞窟 (Olah et al. 2012)、遺跡 (Morishima et al. 2017)、氷河 (Nishiyama et al. 2019)、鉱山資源 (Schouten, 2019) など多方面に広がっている。

本格的な高エネルギー素粒子の実験観測は1930年ごろから始まり、1937年にアメリカの物理学者アンダーソンとネッダーマイヤーがミュオンを宇宙から降り注ぐ粒子「宇宙線」の中に発見した (Neddermeyer & Anderson, 1937)。宇宙線には高い透過力を持つ成分があったため測定実験は地下空間で展開された。ミュオンは中でも貫通力が高かった。ミュオンは宇宙線が地球の大気と反応して生成され、上半球から $100 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のレートで降

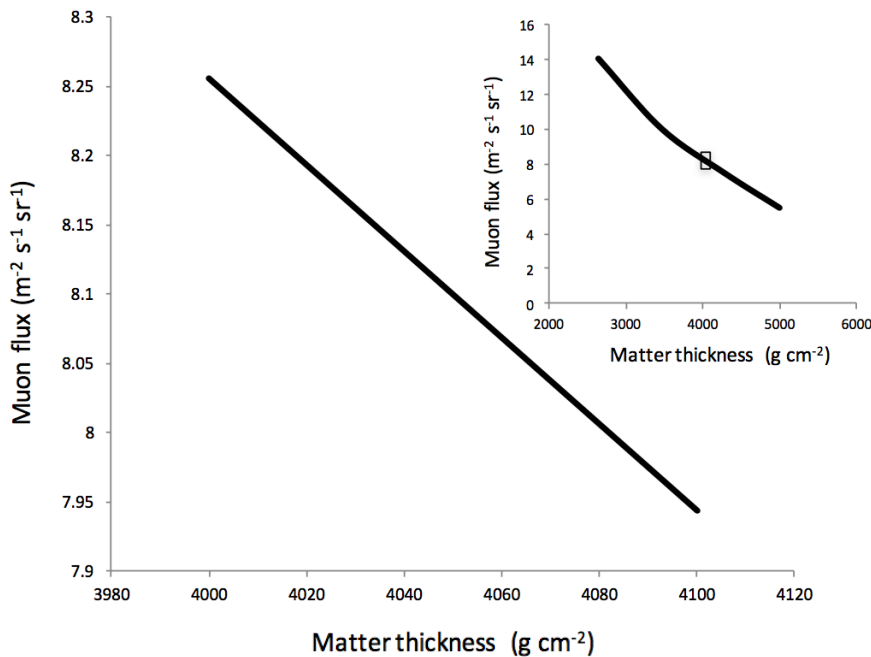


図1 鉛直ミュオンの透過距離4,000~4,100 g cm⁻²に対応するミュオンフラックスの変化量. Insetは、透過距離 3,000~5,000 g cm⁻²に対応するミュオンフラックスの変化量を示す. Inset中のboxは透過距離4,000~4,100 g cm⁻²に対応する.

り注いでいる。宇宙線が、窒素や酸素などの大気原子核と反応することで、パイオンやケイオンなどのメソンが生成され、 10^{-8} 秒程度でミュオンとニュートリノに崩壊する。ミュオンはレプトンの仲間強い相互作用はしないが、電磁相互作用をする。ミュオンは電子と似た性質を持つが、ミュオンは電子の207倍重く透過力が強い。一方、ミュオンの崩壊係数は 2.2×10^{-6} sである。これに単純に真空中の光速をかけると660mであるが、相対論的エネルギーがミュオンの静止質量を超える場合は、エネルギーに応じてこれが伸びる。超新星などの銀河の高エネルギー事象によって加速され、銀河に捕捉された宇宙線は、地球に対して等方的に少しずつしみ出している。そのため、ミュオンの方位角分布は、ほぼ一様である。一方、水平方向から飛来するミュオン（水平ミュオン）は鉛直方向から飛来するミュオン（鉛直ミュオン）に比べてフラックスが低いかわりに平均エネルギーが高い。これは大気の密度勾配の天頂角依存性により、メソンの平均自由行程に依存する。メソンの多重度が異なることに起因する。

ミュオグラフィは、passive sourceであるミュオンを測定する装置を可視化したい対象物体の下に設置することで、地球上あらゆるところで実施可能である。一方、ミュオグラフィの欠点としては、調査深度に限界があること、密度が同じ物質について、ミュオグラフィでは区別がつかないことが挙げられる。

ミュオンが巨大物体を透過する際、(ミュオンがたどった経路の長さ) × (経路に沿った原子密度) に比例するエネルギーを損失する。経路長が同じであれば、対象物体の密度が高いほど、トータルのエネルギー損失は大きい。トータルのエネルギー損失量に分かれれば、ミュオンのエネルギースペクトルから、透過フラックスを計算できる。火山やピラミッドなどの一般的な対象物の場合、ミュオンの到来方向によって経路長が異なるので、このエネルギー損失量を各々の方向に対して計算することで、ミュオグラフィ画像を推定可能である。逆に実測から得たミュオグラフィ画像からミュオン経路に沿った平均密度を導出可能である。1980年代以降、ミュオンエネルギースペクトル

ルの天頂角依存性が精密測定されるようになり、更にコンピューターの処理速度も向上した。加えて、素粒子伝搬をモデリングするためのコンピュータシミュレーション技術が確立したことで (Groom et al. 2001)、様々な物質に対して、ミュオンの入射エネルギーと物質を通り抜けられる距離に関する計算を正確に行うことができるようになった。図 1 には、一例として、鉛直ミュオンの透過距離 $4,000\text{--}4,100\text{ g cm}^{-2}$ に対応するミュオンフラックスの変化量を示す。全体の透過距離に対して、透過距離 (あるいは密度) の変化量が小さい場合は、ミュオンフラックスはそれに応じて、線形に変化することがわかる。

2. 観測技術

ミュオグラフィ観測は、ミュオン飛跡の正確な記録と同値である。検出器と対象物体の間におけるミュオンの直進性が担保されるため、飛跡角度から対象物体のどこを通過してきたかがわかるからである。ミュオン飛跡の記録装置の一つとしてシンチレーション検出器が挙げられる。光電子増倍管とプラスチックシンチレーターを組み合わせるシンチレーション検出器では、イベントの数え落としがほとんどなく、高い時間分解能が得られる。プラスチックシンチレーターは比較的軽い、不燃性、衝撃に強い、非毒性などの特長があり、さらに形状、大きさが自由に変えられるため、ミュオグラフィ各種の測定をよい条件で行える。シンチレーターと光電子増倍管をライトガイドでつなぐことにより、ミュオンがシンチレーターを通った瞬間とほぼ同時にシンチレーション光が電子に変換され、電流パルスとして取り出せる。シンチレーションカウンターを用いたミュオン飛跡の記録法では、空間内において少なくとも異なる 2 点を決定する。そのために、光学的に独立した複数のシンチレーターストリップの同時信号を用いる。

シンチレーション検出器以外では、ミュオグラフィ観測に適した検出器として、ガス検出器が挙げられる。ガス検出器では、検出器内部を特殊な

ガスで満たして使用する。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。ワイヤーに高電圧を流す事で、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事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ガス分子を電離する。ガス検出器は、このような過程を繰り返して電子を増幅させ、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の場合ではシンチレーターで一旦ミュオンを光に変換してからその光を更に電子に変換して増幅するという過程が必要だったが、ガス方式ではミュオンが電離した電子を直接増幅して取り出す点が大きく異なっている。そのため、容器そのものを検出器として使え、将来的には海底観測に適した検出器となる可能性がある。

信号処理のための電子回路は光電子増倍管などから出力されるアナログパルスをデジタルパルスに変換するコンパレータとデジタルパルスの論理 AND、論理 OR、パルスをカウントする回路からなる。特に後者についてはこれまで、低消費電力化、小型化が図られてきた。そのための有効な手段は、データ収集部を一つの集積回路 (チップ) 上に実装することである。そうすれば、同一チップ内の信号伝達距離が短くなるため、信号伝達に使用する電力を抑えられる。この問題の practical な解決方法として FPGA (Field Programmable Gate Array) の技術が用いられる (Uchida, Tanaka & Tanaka 2010)。FPGA は何度でも書き込み内容を変更することができるため、開発効率が飛躍的に向上する。

3. HKMSDD

陸のミュオグラフィは Alvarez et al. (1970) により発明され、その後火山などへと展開されたが、海のミュオグラフィは Tanaka et al. (2021) により発明され、海底におけるミュオグラフィデー

(A)



(B)



図2 東京湾海底ミュオグラフィセンサーアレイを構成するミュオグラフィセンサーモジュール (A). 素粒子ミュオンを検知する度にダイオードが点灯する. HKMSDDはミュオグラフィセンサーモジュールを一定の間隔に配列した同モジュールの一次元集合体である (B).

タの取得に成功した。海底におけるミュオグラフィが陸上のそれと大きく異なる点はIBEの有無である。陸上におけるミュオグラフィでは、ミュオンフラックスが周囲の気圧変動によって時間的に変動する。一方、海底におけるミュオグラフィでは、測定装置の上に位置する海水の「吸い上げ効果 (IBE)」によってミュオンフラックスの時間変化の大部分を補償する (Tanaka et al. 2021)。IBEとは海面が気圧の変化に応じて上下する現象である。台風や低気圧の中心では気圧が周辺より低いため、中心付近の空気が海水を吸い上げるように作用する結果、海面が上昇する。逆に気圧の高い空気は海水を押し下げる。そのために、海底においては、気圧変動に起因するミュオンフラックスの時間変動がキャンセルアウトされる。一方、大気と海水を構成する原子核における、 Z/A (Z は原子番号、 A は原子量)の違いから同じ表面密度でも海水の方が若干ミュオンを通しにくい(例えば、 4 GeV ミュオンの空気中でのCSDA (continuous slowing down approximation) rangeは $1.845 \times 10^4\text{ gcm}^{-2}$ であるのに対して、水中ではこれが $1.810 \times 10^4\text{ gcm}^{-2}$ となる)。)。そのため、気圧変動によるミュオンフラックスの変化が海水準変動による

ミュオンフラックスの変化によって完全にキャンセルアウトされるわけでは無い。とはいえ、陸域での測定において1%を切る密度の時間変化を捉えることは極めて困難であったことを考えると、IBEはミュオグラフィの時間精度をオーダーで向上させることが期待された。

2021年3月、世界初となる海底ミュオグラフィセンサーアレイ (HKMSDD: Hyper KiloMetric Submarine Deep Detector) の一部が東京湾アクアライン海底トンネル内部の100 mにわたって設置された (図2)、東京湾における天文潮位のリアルタイム測定に成功した。このHKMSDDは東京湾海底に設置されたことからTokyo-Bay Seafloor HKMSDD (TS-HKMSDD)と呼ばれる。ミュオンは透過力が強く、東京湾の海水を通り抜けた後、更に海底の岩盤を貫通し、アクアライン内部に設置してあるセンサーに到達する。このミュオンの到達数を時間毎に計数することで、海水の厚み、即ち海水準の変動を測定することが可能である。逆に、海水準の変動を活用して、海底ミュオグラフィの観測精度を検証することも可能である。TS-HKMSDDを用いて、79日間に渡って2時間毎に取得されたミュオグラフィデータを天文潮位データと比較し

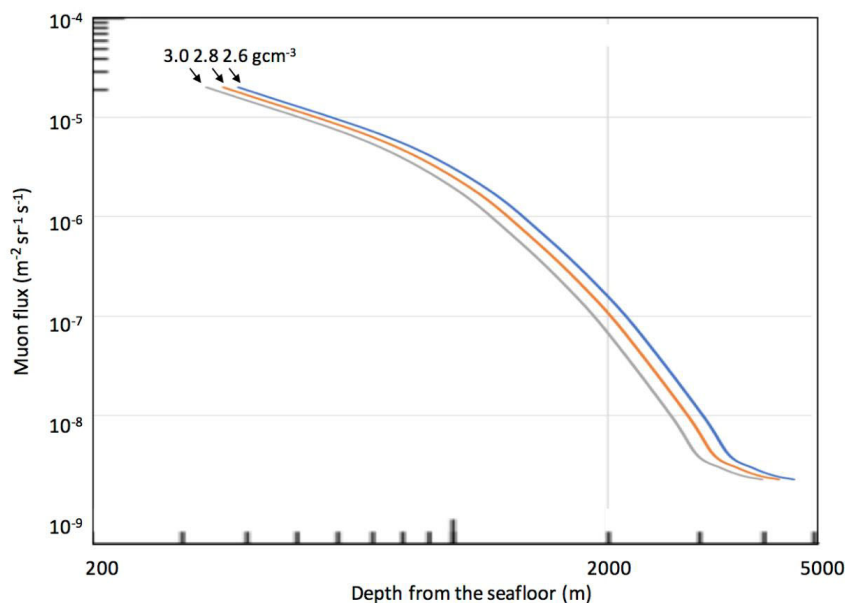


図3 深さ4 kmの海底からの深さを関数とした鉛直ミュオンフラックス. 図中数字は海洋地殻の平均岩盤密度を表す.

た結果、天文潮位を正解とした値からのずれの標準偏差は12.85 cmであった (Tanaka et al. 2021). 水等量で40 m (40 m.w.e.) の surface density (密度×経路長) を考慮すると、密度の時間変化にして3%の観測精度を達成したと言える。また、Lunar day (月の1日) 単位では海水準が変動しないと仮定した時のミュオンカウントレートのゆらぎの標準偏差は、1 lunar day あたり、2.8%であった (Tanaka et al. 2021). これと、図1に示すミュオンフラックスと surface density の関係図に適用すると、約1日の時間分解能では、密度の時間変化(密度ゆらぎ)にして1.5%を切るゆらぎを達成したと言える。

4. 深海への適用

TS-HKMSDDは40 m.w.e.の深さで実施されたが、同様の議論は深海へ適用することが可能である。およそ20 km.w.e.の深さまでは、深海ミュオグラフィが浅海ミュオグラフィと異なる点はミュオンカウントレートの違いのみである。この深度以深では、ニュートリノ起因のミュオンフラックスが大気ミュオンフラックスを上回るようになり、ミュオンフラックスは透過距離に依存しなくな

る。事実上、これがミュオグラフィの実施可能深度を決めている。現在のマントル掘削計画では、海底面の水深が4 km、それから5.5 km地殻を掘削してさらにその下のマントルを最低0.5 km掘り進めるというのが基本的な方針となっている。この掘削孔の最深深度は、20 km.w.e.の深さであり、ニュートリノ起因のミュオンフラックスが大気ミュオンフラックスに拮抗してくる深度である。また、フラックスそのものの値も $3 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ と極めて小さく、例えば100 m²の有感面積を持つ検出器を用いて、年間10イベント程度が測定される程度である。

一方、モホール本坑の前に同じハワイ沖で上部地殻貫通する2 kmの掘削を行う計画の立案が現在進行している。この掘削孔の最深深度は、10 km.w.e.の深さであり、ミュオンフラックスが透過距離に対して最も急激に変化する深さ領域である。フラックスそのものの値も $1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ と増え、100 m²の有感面積を持つ検出器を用いれば、年間300イベント程度を測定できる。この深さではミュオンの透過量は貫通する物質の密度に非常に敏感になり、平均密度が25%減るとミュオンカウントレートが3倍に増える。図3には、平

均岩盤密度 2.6, 2.8, 3.0 gcm⁻³を仮定した海洋地殻において、深さ 4 km の海底からの深さを関数とした鉛直ミュオンフラックスの値を示す。

5. 将来展望

通常の孔内計測で測定できるような局所的な密度分布ではなく、深海ミュオグラフィに期待される広域的なバルク密度成層構造のイメージングは、「プレートがどのように拡大し、形成されるか」という、マントル掘削計画の主要な目的の一つを達成する上で鍵となる。プレートの拡大レートを決定する要因として、プレート拡大に伴う歪み量に対して供給されたマグマ量の比 M (マグマ量 / 歪み量) が重要であることがモデル計算で示されている (Buck, 2005)。高速拡大海嶺では、地殻の拡大は全てマグマの貫入・付加 ($M=1$) でまかなわれるが、マグマ供給率が低い低速拡大海嶺では、断層変位 ($M=0$) のみによりプレートが拡大する。一方、Buck のモデルでは M 値は初めから与えられており、何が M 値を規制するのか明らかではない。海野・草野 (2021) は、プレート (海洋地殻) の密度構造が M 値を規制することを提唱している。彼らの考え方ではプレートの拡大レートは、マグマが噴火するか、地下に停滞するかで決定され、それをコントロールするのが海洋地殻の密度構造であるとしている。高速で拡大するプレートでは、上部地殻はマグマよりも高密度のため、ひとたびマグマ溜まりからマグマ上昇が始まると、マグマは容易に地表に到達して噴火する。一方、マグマ溜まりから上昇するマグマが浮力の中立点にトラップされて岩脈群となり、マグマよりも低密度の噴出岩層は断層変位によって拡大することになる。すなわち、プレート拡大速度の違いによって広域的なバルク密度成層構造が逆転するというのが、海野・草野 (2021) 及び海野ほか (2022 本特集号) の仮説である。

現時点でミュオグラフィは広域的なバルク密度成層構造を可視化できる唯一の手法である。ミュオグラフィの深海への適用はチャレンジングではあるが、技術的に大きな障壁があるわけではな

く、新しいイメージング技術としての応用展開が期待される。

謝辞：本稿、特に 5 節の「将来展望」は海野教授との議論の結果である。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Buck, W.R., Lavie, L.L. and Poliakov, A.N.B. (2005) : Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, 434, 719-723.
- [2] Groom, D. E. et al. Muon stopping-power and range tables (2001) : 10 MeV-100 TeV. *At. Data Nucl. Data Tables* 78, 183-356.
- [3] Morishima, K. et al. (2017) : Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature* 552, 386-390.
- [4] Neddermeyer S. H. & Anderson, C. D. (1937) : Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles *Phys. Rev.*, 51, 884 1-7.
- [5] Nishiyama, R., Ariga, A., Ariga, T. et al. (2019) : Bedrock sculpting under an active alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography. *Sci Rep* 9, 6970. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43527-6>.
- [6] Oláh, L. et al. (2012) : CCC-based muon telescope for examination of natural caves. *Geosci. Instrum. Method Data Syst.* 1, 229-234.
- [7] Schouten, D. (2019) : Muon geotomography: selected case studies, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 377, 2137. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0061>
- [8] Tanaka, H. K. M. et al. (2007) : 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, 104113.
- [9] Tanaka, H.K.M., Aichi, M., Bozza, C. et al. (2021) : First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector. *Sci Rep* 11, 19485. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8>.
- [10] Uchida, T., Tanaka, H.K.M. & Tanaka, M. (2010) : Development of a muon radiographic imaging electronic board system for a stable solar power operation. *Earth Planet Sp* 62, 167-172. <https://doi.org/10.5047/eps.2009.03.002>
- [11] 海野進・草野有紀・宮下純夫・足立佳子 (2022) : 「海洋地殻の構造と進化：高速拡大海嶺系」(本特集号). 号外地球, 72.
- [12] 海野進・草野有紀 (2021) : 「ハワイ沖上部地殻掘削から海洋プレートの形成過程に迫る」*地学雑誌*, 130(4), 599-614. [doi:10.5026/jgeography.130.599](https://doi.org/10.5026/jgeography.130.599)

□