

ミュオグラフィの最近の動向と造山古墳への応用

角谷賢二（国際美術研究所） 林武文（関西大学） 田中宏幸（東京大学）

1. はじめに

ミュオグラフィは、宇宙線ミュオンの通過を検出することによって、物体の内部構造をイメージするために使用される。ミュオンは、宇宙線が空気中の原子と衝突したときに上空の大気中で作られる素粒子である。これらの粒子は地球の1 km くらいの深部にまで浸透し、特殊な検出器によって検出することができる。

ミュオグラフィは、2006 年ごろから火山や地殻などの内部を調べて、密度や内部構造を決定するために使用され始めた。ミュオンが物体を通過する際のミュオンの数を測定することにより、内部構造の2D あるいは3D イメージを作成し、物体の構造や組成についての洞察を提供することができる。

かかる観点から、ミュオグラフィは内部構造を研究するための強力なツールであるため、発掘調査できない古墳やピラミッドなどの貴重な遺跡の内部構造を理解するための研究に重要な役割を現在果たしつつある。

2. 最近のミュオグラフィの動向

最近のミュオグラフィは世界的にすばらしいスピードで進歩している。2022 年 12 月には、東京大学の共同研究者田中宏幸のコーディネートでミュオグラフィーズ 2022 と題した世界的な総会が Web 上で開催され、17 か国、200 名近い研究者が参加した⁽¹⁾。この総会でもわかるようにミュオグラフィに関する発表は、火山、ピラミッド、原子炉などの透視からさらに進んで多岐に渡っている。

田中宏幸らの最近の研究例を紹介する。同研究者らはミュオンを用いて透視技術の分野だけでなく、測位技術、時刻同期技術、通信技術など新たな領域にもその応用を拡大させている。2021 年 3 月には世界で初となる海底ミュオグラフィセンサーアレイを東京湾アクアライン海底トンネル内部に設置した⁽²⁾。ミュオンは、東京湾の海水を貫通し、海底下の東京湾アクアライン海底トンネルにまで到達する。このミュオンの数をセンサーアレイで観測することで海水の動きや海底岩盤内部の変化をイメージングすることを可能にした。この実験により、陸上での巨大物体が対象とわれてきたミュオグラフィの視野を海への応用に広げた。

また、銀河系における超新星の爆発などによって非常に高いエネルギーを持った1次宇宙線が地球に届くと地球の大気が界面付近で反応して多数の2次粒子が発生し、それらがシャワーのように地球上に降り注ぐ。これらの粒子は光速で飛行してほぼ同時に地球に降り注ぐ。2022 年には、この粒子を利用して GPS が使えない屋内、地下、海中などで高精度

な時刻同期ができることを見出した⁽³⁾。これは、Cosmic Time Synchronizer(CTS)と命名されている。

さらに田中宏幸らは、2022年には、ミュオグラフィの応用が個体と液体に限れていたことから脱却して気体すなわち大気現象への応用に挑戦し、台風を300kmから400km離れたところから捉えることに成功した⁽⁴⁾。

次に、本目的であるミュオグラフィの考古学への応用について解説する。

3. 考古学ミュオグラフィ

上述のようにミュオグラフィは多岐にわたる分野に応用されつつある。考古学の分野においても例外ではなく、いくつかの試みが展開されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

特に有名になったのはピラミッドへの応用である。ピラミッドは、古代エジプト文明の代表的な建造物であり、その内部には謎が多く残されている。しかし、ピラミッドは一般的な非破壊的な技術では内部を観察することが困難であった。すでに述べてきたようにミュオグラフィは、宇宙線ミュオンを用いた非破壊的な技術であり、ピラミッドの内部を透視するのに最適な方法の一つとなる。具体的には、ピラミッドの外壁からミュオンが通過していく際に、ピラミッド内部で生じるミュオンの数を検出することで、ピラミッド内部の密度分布を測定できる。このようにして、ピラミッド内部に何があるかを非破壊的に観察することができるのである。

ミュオグラフィを用いたピラミッドの調査は、2016年に名古屋大学の森島邦博らを中心とした日本とエジプトの共同チームによって行われた。この調査では、カイロのギザ地区にあるクフ王のピラミッドを対象に内部調査が行われた。調査の結果、ピラミッド内部に新たな空洞が存在することが判明し、これが多くの注目を集めた⁽⁵⁾。このように、ミュオグラフィは非破壊的な方法でピラミッドの内部を調査することができ、ピラミッドの構造や秘密に迫る手がかりを得るために非常に有用な技術であることがここでも証明された。

一方著者らは、2019年9月から大阪府高槻市にある今城塚古墳の透視を開始した。その後、闘鶏山古墳の透視に挑戦後、現在装置を岡山市の造山古墳に移し、透視実験を開始した。これらの状況を順次詳しく説明する。

4. 今城塚古墳のミュオグラフィ

今城塚古墳は、高槻市に所在し、墳長190mの前方後円墳である。この古墳は、日本で43番目の大きさで一般の人が自由に中に入ることができる。考古学研究者からは、この古墳は継体天皇陵と考えられているが、宮内庁指定の継体天皇陵は今城塚古墳から2kmほど離れた太田茶臼山古墳とされている。今城塚古墳は、高槻市が管理しており調査が可能である。したがって、高槻市によって約10年に渡って詳細な発掘調査が行われており、この今城塚

古墳が継体天皇陵であることの多くの事実が解明されている。そのような観点から、ミュオグラフィ透視実験にはモデルケースとして最適と考えて、まず最初に、ミュオグラフィ透視実験を2019年9月から開始した。このプロジェクトは、関西大学、東京大学、高槻市ならびにハンガリーのウイグナー物理学研究所の共同プロジェクトにより遂行された⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

名 称 : 今城塚古墳ミュオグラフィプロジェクト

主な関係者 : 関西大学 角谷賢二 米田文孝 井上主税 林武文

東京大学 田中宏幸 László Oláh

高槻市 鐘ヶ江一朗 内田真雄

4. 1 今城塚古墳の透視観察

今城塚古墳の第1次、2次、3次と3か所から透視を行った。図1にその測定場所と透視方向を示す。

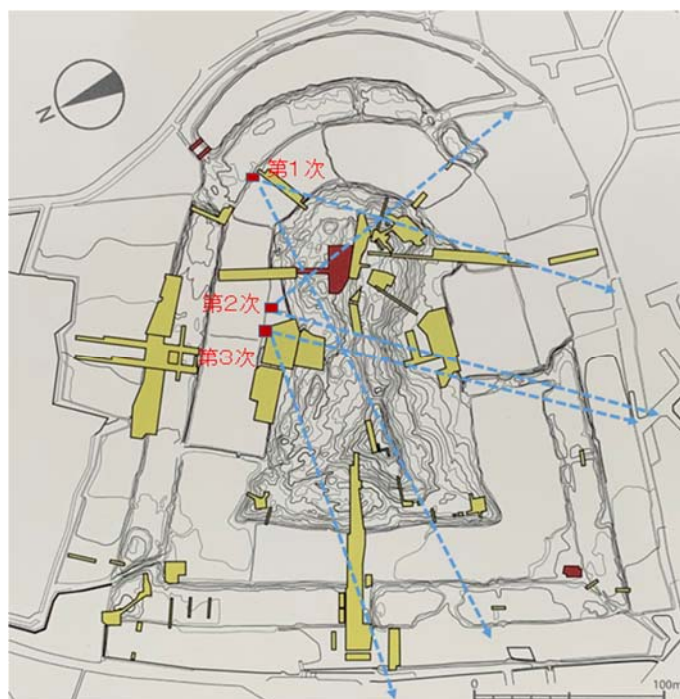


図1 今城塚古墳での測定位置と透視方向
黄色：高槻市による発掘調査跡

4. 2 今城塚古墳のミュオグラフィで得られた結果

本透視実験により得られた今城塚古墳の透視結果の一部を報告する。図2には、第2次の透視図を示す。これによると新たな石室などは見つからなかった。しかし、1596年の慶長伏見地震によってくずれた下部盛土、上部盛土などに相当する地滑りの全体像が映し出された。

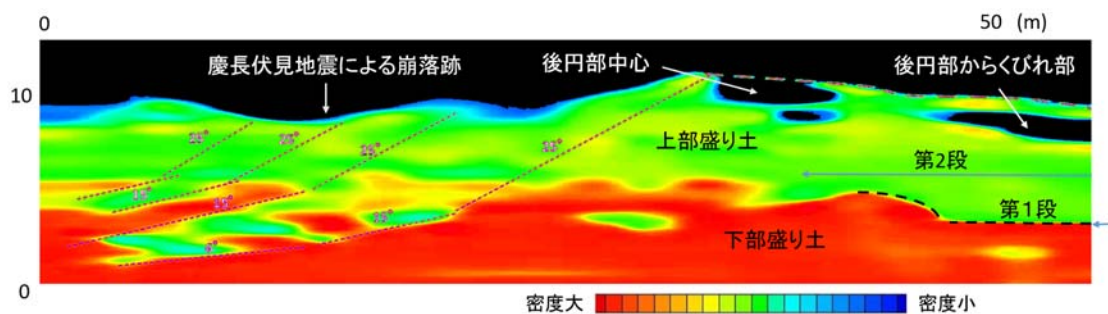


図2 今城塚古墳後円部のミュオグラフィ透視図（第2次の測定結果）

これらの測定結果をもとに下記のような議論を展開した。

(1) 墳長 180mを超える大型の前方後円墳を対象として、ミュオグラフィ透視を実施した例はないことから、その研究意義は大きい。また、高槻市教育委員会による発掘調査の内容とミュオグラフィ透視による内容を比較検証できた。

(2) 後円部側第1次・第2次の地点で実施した透視の結果からは、別の埋葬施設の存在は確認できなかった。しかし、発掘調査で検出されていた慶長伏見地震による盛土の滑落の様子が捉えられた。この滑落の結果は、欧州の地質関係の論文として発表した⁽⁶⁾。

(3) 前方部側第3次の地点で実施した透視の結果からは、墳丘内部における密度の違いの単位が明らかになった。この密度の違いは、「盛土の単位」なのか、墳丘内の「墳丘内石積み」なのか、またはもともと表面を覆い、経年でテラスへ滑落し集積した「葺石」石材なのかはこの実験からは不明であった。また、前方部側に新たな埋葬施設の存在は確認できなかった。

(4) ミュオグラフィ透視の結果、地山および墳丘の単位を確認することができ、墳丘の内部構造やその構築過程に関する情報が得られた。これらのことは、高槻市による発掘調査による成果とも符合していた。

これらのことからミュオグラフィ透視は、非破壊的方法で地下に埋もれた情報を探る手法の一つとして有用であると考えられる。さらに、将来的には、透視の結果をふまえ、最適な発掘手法を採用するなど、未調査の古墳の調査計画の立案にも役立てることができると考えられた。

5. 造山古墳のミュオグラフィ

造山古墳はすでに周知のように墳長 350m の日本で 4 番目に大きい前方後円墳である。この古墳の内部構造は最近に至るまで調査らしい調査はなされていなかった。そこで、2021 年 4 月 24 日から最先端科学であるミュオグラフィで後円部の透視調査を開始した。本プロジ

ェクトは、関西大学、東京大学、岡山市ならびにハンガリーのウイグナー物理学研究所の協力により遂行されている。なお、2023年6月の時点ではまだ継続中である。

名 称 : 造山古墳ミュオグラフィプロジェクト

主な関係者：国際美術研究所 角谷賢二

関西大学 林武文

東京大学 田中宏幸 László Oláh

岡山市 安川満

5. 1 造山古墳への装置の導入

著者らのミュオグラフィ装置は総重量約1トンあり、ユニック付きトラックで現場に運び入れた。2021年4月24日のことである。装置には簡易な車輪がついておりトラックから降ろした後は測定場所まで人力で移動した。



図3 装置の導入の様子

5. 2 ミュオグラフィ装置とその原理

このミュオグラフィ装置は、東京大学とハンガリーのウイグナー物理学研究センターの共同で開発した装置である。図4と図5に今回使用した装置を示す。この装置の検出器は、マルチワイヤー比例チェンバー (MWPC) ベースのシステムが組み入れられた装置である。検出器は80cmx80cmの大きさに6枚設置している。検出器の中には、1ないし2cm間隔で格子状のワイヤーが張り巡らされており、密閉されたワイヤー部にはアルゴン/2酸化炭素の混合ガスを1分間に0.05リットルの割合で流している。また、各ワイヤーには2000V近い電圧をかけており、ミュオンの衝突でガスのイオン化で生じた電子が作用して、その部分に微弱の電流が流れる。それを検出することでミュオンの通過が検出できる。

この装置の別の特徴の一つとしてステンレススチールケースに収納された厚さ2cmの鉛板が挿入されている。この鉛板は5枚あり、検出器の間に設置している。これにより、ミュオン以外の宇宙線をカットしてノイズを大幅に低減できる。

もう一つの特徴は、電氣的に検出できるため、そのデータを WiFi によって PC や Web に通信できることである。



図4 ミュオグラフィ装置



図5 装置の内部 (6枚の検知板と5枚の鉛板)

5.3 測定場所

測定場所は、図6と図7に示すように後円部の東側の民家が立ち退いた跡地の2か所を利用した。



図6 ドローンによる後円部の写真

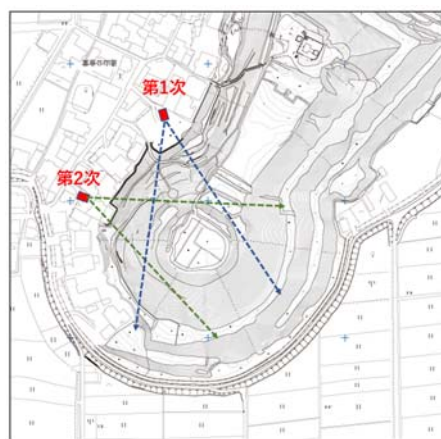


図7 測定位置と透視方向

5.4 透視結果

第1次の透視結果を図8に示す。これによると赤い部分で示した密度の高い部分と低い部分が見られた。ミュオグラフィでは、密度の濃淡しかわからないが、この部分は岩と空洞が存在することが予想される。後円部の頂上は、図の中の破線で示した。後円部の中心の頂上がこの図の下の方に位置するのは、測定器を斜め下から見上げるように設置しているためである。これによると密度の高い部分の頂上は頂上から下に1.5mから2m前後と予想される。

後円部

5bin 93days

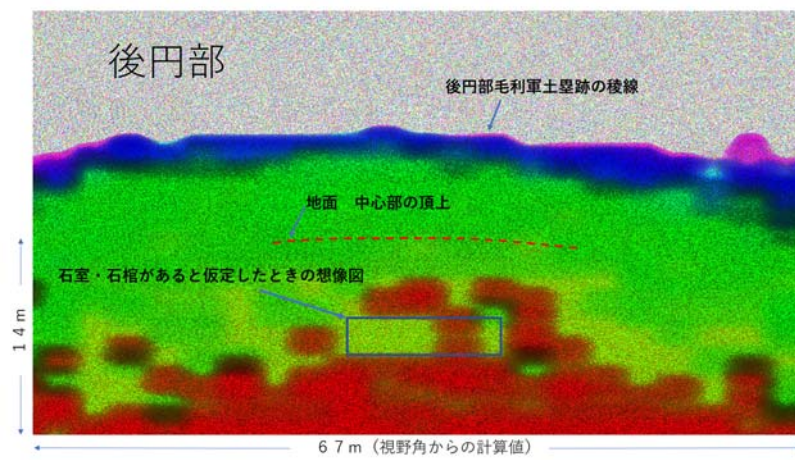
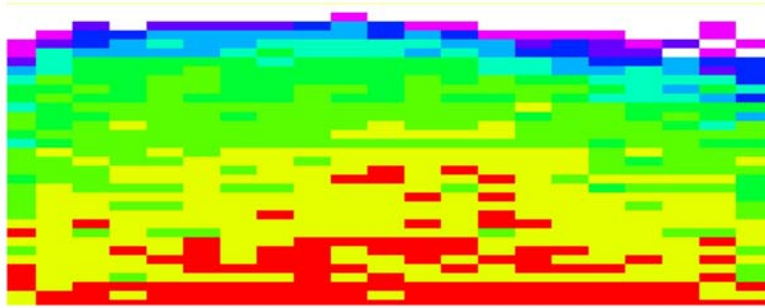
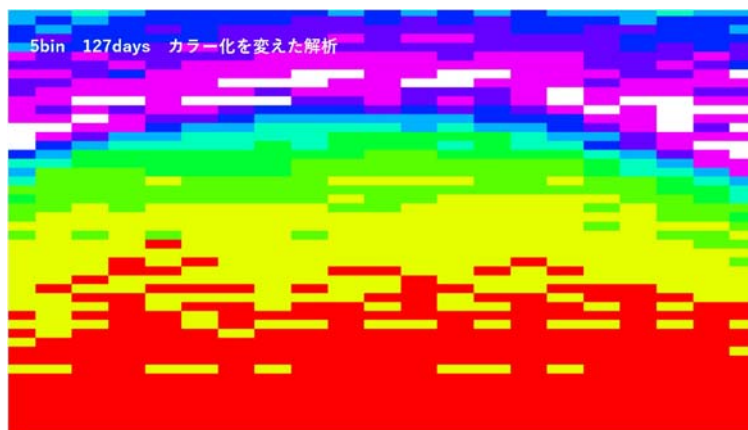


図8 造山古墳後円部の第1次の透視結果 上：ミュオグラフィ図 下：画像解析図

第2次の透視結果を図9に示す。これによると濃淡部分が2か所あるいは3か所見られた。このことから石室部分は、1か所に限らないかもしれないが、これまでの結果だけでは現在論じることはできない。



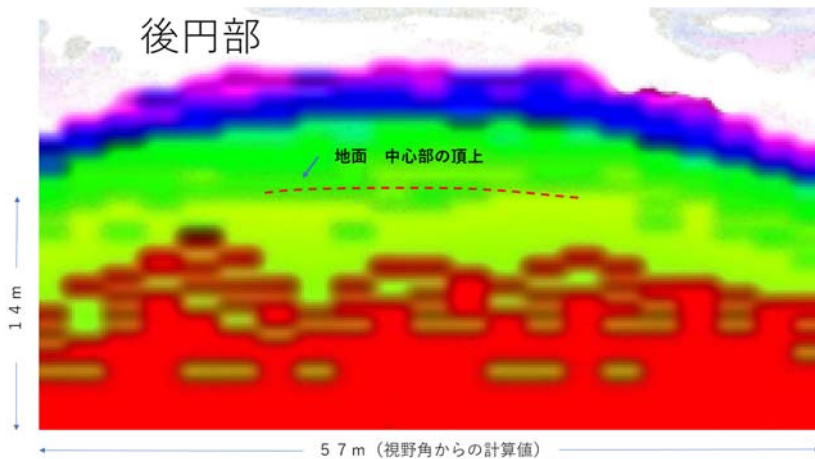


図9 造山古墳の第2次の透視結果 上：ミュオグラフィ図 下：画像解析図

5.5 シミュレーション

現在これまでの結果と合わせて透視結果といくつかのモデルとのフィティング作業中である。現在6つのモデルを想定しさらなる解析中である。これまでの結果からは後円部の約1.5から2m下に密度の濃淡部が観測され、石室の存在が予想される。

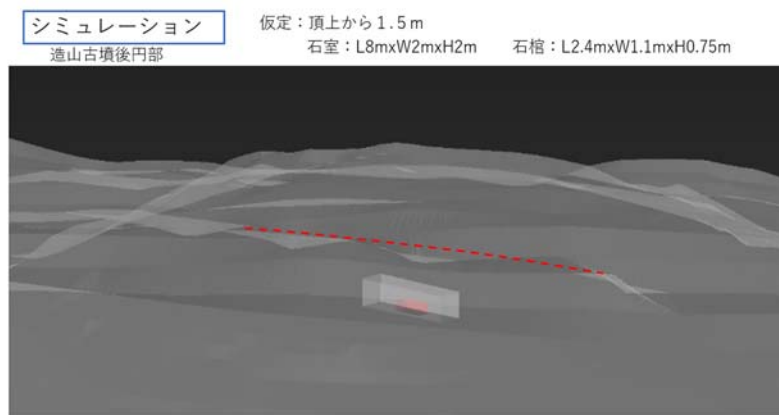


図10 シミュレーションモデル

6. おわりに

造山古墳後円部のミュオグラフィ透視実験は、現在も継続している。レントゲン撮影のように短時間で結果は得られないが、古墳は千年以上の長年に渡って存在しているので、ミュオグラフィの実験に必要な時間はさほど問題にならないと考えている。また、石室や石棺を確認するには、発掘調査が最も確実な方法である。しかし、千数百年も存在してきた古墳を傷つけることは、さらに長期に（未来に）渡って保存する観点からもできるだけ避けるべきである。その意味で、ミュオグラフィは重要なツールと言える。

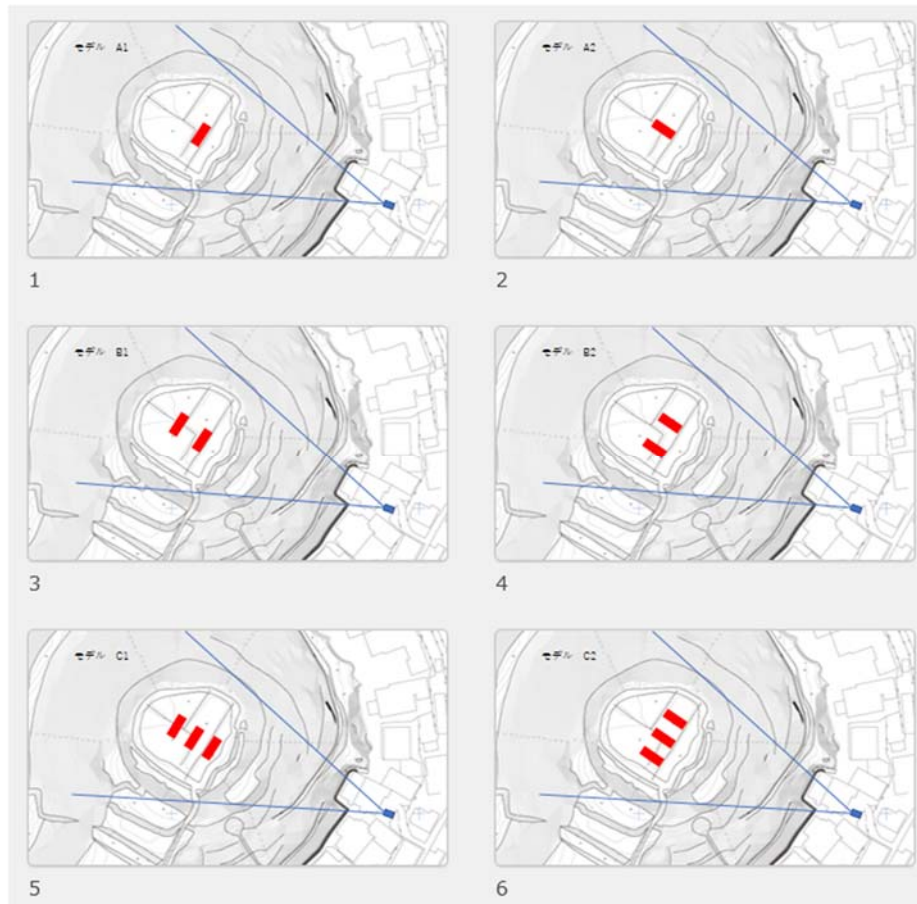


図 1.1 石室の 6 つのモデル図（フィッティング作業中）

ところで、別の観点から興味ある調査を行った。すなわち最先端科学もいいが、古老による言い伝え事象を整理することも重要との観点から、2022 年 4 月から 11 月にかけて古くから造山に住んでいる古老による聞き取り調査を行った⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。メンバーは、本稿の筆頭著者角谷賢二、造山古墳蘇生会の定廣好和氏、岡山大学の清家章氏、岡山市埋蔵文化財センターの安川満氏との共同である。そのなかで多くの証言を得ているが、造山古墳の後円部の証言としての一例を紹介する。明治の終わりか大正の始めころ千足古墳、榊山古墳に引き続いて造山古墳は盗人により盗掘されかかったが、あまりにも石が大きくてあきらめたこと、また、掘っていくと石のコーナーに間隙があり、竿を突っ込んでみたけど底には届かなかったなどの証言を得た。このことも石室など語るうえで重要な話として大事にしている。

文献

- (1) MUOGRAPHERS 2022, General Assembly I-III (Dec 13-15, 2022, Online)
<http://muographers2022.muographers.org/> (参照 2023.05.09).
- (2) Hiroyuki K. M. Tanaka et al, First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector. Scientific

- Reports, 11, Article number: 19485, 2021.
DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8>
- (3) Hiroyuki K. M. Tanaka, Cosmic time synchronizer (CTS) for wireless and precise time synchronization using extended air showers. Scientific Reports, 12, Article number: 7078, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11104-z>
- (4) Hiroyuki K.M. Tanaka et al, Atmospheric Muography for Imaging and Monitoring Tropic Cyclones. Scientific Reports, 12, Article number: 16710, 2022.
DOI : <https://www.nature.com/articles/s41598-022-20039-4>
- (5) Kunihiro Kunishima et al, Discovery of a big void in Khufu' s Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature, 552, pp.386-390, 2017.
DOI: <https://www.nature.com/articles/nature24647>
- (6) Hiroyuki K. M. Tanaka, Kenji Sumiya, and László Oláh, Muography as a new tool to study the historic earthquakes recorded in ancient burial mounds. Geoscientific Instrument Methods and Data System, 9, pp.35-364, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-9-357-2020>
- (7) 林 武文, 角谷賢二, ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査—高槻市今城塚古墳透視実験—, 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会資料 PI-20-055, pp.33-37, 2020.
- (8) 林 武文, 新世代ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査に関する研究, 考古学ジャーナル 767, pp.32-35, 2022.
- (9) 角谷賢二, 定廣好和, 安川満, 清家章, 「古きを訊ねて未来につなぐ 造山古墳群伝承物語」、国際美術研究所、造山古墳蘇生会発行, 2022.
- (10) 清家章他, 「造山古墳群周辺集落における古墳関係資料の研究」, 岡山大学文明動態学研究所発行, 2023.