

旅行記

クフ王のピラミッド・女王の間における 宇宙線ミュオン測定までの長い道のり

九州大学
総合理工学研究院
金 政浩

tadahirokin@kyudai.jp

1. 背景

宇宙線ミュオン計測によるエジプトのピラミッド内部の未知の空洞の探査技術については、つい最近も名古屋大学の森島をリーダーとする ScanPyramid プロジェクトの Nature Communications 誌に掲載された成果[1]がニュースを騒がせたばかりなので記憶に新しい方も多いだろう。しかし、森島らが最も世間を騒がせたのは 2017 年、姉妹誌ではなく Nature 誌に掲載された成果[2]であろう。クフ王のピラミッド内部において、今回と同じ原子核乾板からなる検出器で宇宙線ミュオンの飛跡を多数記録、解析することでピラミッド内部の透過画像を生成し、王の間に続く大回廊の脇に未知の巨大な空洞を発見したのである。

宇宙線ミュオンによるエジプトのピラミッドの測定は素粒子物理学の成果でノーベル賞を受賞した Alvarez の研究[3]に端を発している。Alvarez はクフ王のピラミッドの隣にあるカフラー王のピラミッドに着目した。このピラミッドは、クフ王のピラミッドと同程度の大きさであるにもかかわらず、当時わかっていた玄室などの内部構造がクフ王のピラミッド内部に比べて少なく、きっと未発見の空洞があるはずだと彼は予測したのである。そこで彼はスパークチェンバーからなる大型計測システムをピラミッド内部に持ち込んでピラミッド全体の透過画像を得ようと試みたのである。写真で見る限り地下の部屋をいっぱい埋め尽くすほどの検出器、電源、データ収集系であり、非常に苦勞の多い計測だったことは想像に難くない。しかしながらその結果は、「王の間に匹敵する様な大きい未知の空洞はないことがわかった」というものであった。統計的不確かさを考

慮すると、その様に結論するしか無かったわけだが、仮に隣のクフ王のピラミッドを対象に選んでいたら、おそらく 2017 年に発見された空洞はその時に見つかったに違いない。運命というものはわからないものである。実験計画がサイエンス誌に掲載されて、誰もが華々しい成果を期待した中での...言葉を選ばずにいうならば、しかしおそらくほとんど誰がみてもはっきりと「地味な結果」に終わってしまったわけである。ゆえに、その後大型実験装置でピラミッドを計測しようという研究者は長らく現れなかった。

2017 年の森島らの Nature 誌に掲載となった研究は、電力を要さず、薄い板状の検出器である原子核乾板が、名大の高速読み出し技術によってピラミッドの透視に適用できる様になったからこそ進んだものと言えるだろう。その後、いくつかの研究グループが自身の開発した宇宙線検出器でピラミッド内部を調査しようと立ち上がっている[4-5]。そのような中、朝日新聞国内版、デジタル版および国際版にて 2020 年 1 月 5~11 日の期間に報じられた[6]様に、実は東日本国際大学の吉村作治学長をリーダーとする「大ピラミッド探査プロジェクト」の一部として、我々九州大学のグループは Alvarez ら、森島らに続く 3 番目の宇宙線ミュオンを用いた調査研究チームとして 2018 年初夏にはすでに研究をスタートさせていた。しかしてそこから実際の計測にいたるまでの道のりは順風満帆ではなかった。計測は現在も継続中であるため、本稿では計測結果や解析結果については触れず、旅行記として計測に至るまでの苦労談を綴ろうと思う。

2. 大ピラミッド探査プロジェクトへの参画

背景で述べたように、2017 年の年末に Nature に掲載された森島らの成果は 2018 年の正月に NHK で放送された特集番組の影響もあり、猛旋風を巻き起こしていた。日本のミュオグラフィコミュニティの仲間として、私も森島氏とは会えば食事に行く程度の仲ではあったため、大変嬉しく報道を眺めていたものである。当時から私が開発してきた宇宙線ミュオグラフィ検出器の計測対象はビルなどの人工建造物や地中空洞などが対象であり、自分が全く規模の異なるピラミッド計測に関連する研究に参画することになろうとは夢にも思っていなかった。

その 1~2 ヶ月後、何の前触れもなくある一通のメールが届く。それはギザのピラミッドでミュオンを測定して欲しい、というものであった。メールの送り主である山下先生の所属は東日本国際大学であり、この依頼は学長である吉村作治先生からのものだとおっしゃっている。私のいるキャンパスを一度訪問するので、話を聞いて欲しいということだったのだが、メールの文面で「名大の結果について本当に空洞があるのか再確認して欲しい」という依頼であることはわかっていたので、当初はお断りしようと考えていた。Nature の論文を読む限り、3 つの独立な計測で空洞の存在を予測しており、単なる追認にとどまる可能性が高いため、学術的な新規性という観点から食指が動かなかったのである。提示された研究費も比較的大きく、追認にかかる金額としては勿体無い気

もしていた。

山下先生と面会し話を伺っていると、エジプト考古省のザヒ・ハワス博士が吉村作治先生を直接指名して、次の様に指示したとのことである：

「ScanPyramids プロジェクトの研究成果の真否の再確認をせよ・・・君らの予算で」

実のところ今回お誘いを受けた「大ピラミッド探査プロジェクト」の予算は吉村先生の個人研究費だったのである。そして、このプロジェクトは大きく3つのパートに分かれていることを聞いた。

- 1) 電波...レーダーで見つかった空洞領域を探査する（東北大 佐藤先生）
- 2) 宇宙線ミュオンで今回の空洞の有無を他の研究者が測定しても観測できるかを確認し、ミュオンを用いた手法の正しさ（あるいは不確かさ）を知る（相談時は相手先が未定）
- 3) 写真測量や LiDAR を用いてピラミッドの既知の内外の構造を全て3次元的に捉える（有限会社タイプエス設楽代表取締役社長）

私は詳細な構造をレーダーで見るとすれば、ミュオン計測では物質質量...すなわち空洞の存在する領域の平均密度だけを判定すれば十分であると理解した。また、測量によって既知の空洞の構造は全て1 cm以下の分解能で得られるため、PHITS コード[7]によるモンテカルロシミュレーションによって、その他の領域がすべて石灰岩で満たされている場合のピラミッド内部のミュオンフラックスは予測できる。実測値をその値と比較することで、フラックスの高い領域を低密度領域として判定すればよい。さらにPHITS 計算と実測の比較は、研究で用いている宇宙線二重微分フラックスの解析的予測モデルPARMA[8-9]の精度を確認する点で十分に学術的に意味がある。また東日本国際大学の窓口担当の山下先生は九州大学の出自であり、ご実家が私の所属しているキャンパスに極めて近いことから、検出器の輸出などにおいても柔軟にご対応いただけそうだと感じたし、また、なによりその熱意は真摯に研究に向き合う姿勢を表していた。私はオファーから後もしばらく悩み続けていたが、総合的に考えてこれならばと参画を決断したのである。

その数ヶ月後、2018年7月5日に本プロジェクトに参画するメンバーが各々の担当箇所について紹介する公開研究発表会が福島県にある東日本国際大学において開催された。その研究会に引き続いて、プロジェクト参画メンバー全員で本プロジェクトに関する覚書を交わす運びとなった。図1はその当日の様子である。



図1 2018年7月5日東日本国際大学で開催された公開研究講演会(上)の終了後にプロジェクトに関する覚書が締結された(下)。著者の金は一番右側、そのふたつ隣が吉村作治代表。

なお、読者の皆さんが少々気になるであろう吉村作治先生の印象について、私が感じたお人柄について少し語ろうと思う。

初めてお会いしたのは2018年4月12日に西早稲田にあるエジプト考古学ビルの一室で行われた「対面の」キックオフミーティングの際である。

閑話休題。「対面の」などとはこの頃は書かなくても、当然対面以外は考えられなかったわけだが、最近ではミーティングには「会うミーティング」と「会わないミーティング」があることから、もはや「対面の」は必須ワードとなった。ここでも新型コロナによって大きく時代が動いたことが伺える。会わないのにミーティング・・・meet という語も、データ保存をするときに現在も多くの人々が日クリックしている3.5インチフロッピーディスクのアイコンのように、またひとつ抽象化が進んだものである。本稿のキーワードはまさに「新型コロナ」であるため強調させていただいた。

さて本題に戻ろう。この日は直後に予定されていた現地視察のスケジュールや、現地での注意点、持参物品などの説明を吉村先生より直接していただいた。そして、その場で食事や飲み物が提供されて、調査隊の懇親会となったのである。私は吉村先生に対して、もっとタレントっぽい人柄を想像していたのだが、研究に対する熱意と謙虚な姿勢に大変感銘を受け、すっかり印象がかわったことを覚えている。世間では色々と言われることも多いが、やはり研究者であり、衛星写真の活用など最新の科学技術を取り入れて太陽の船を発見するなど、エジプト考古学の進展のキーマンともなっていらっしゃるわけである。もちろん文化人としてもこの人あってこそ現在の日本とエジプトの関係があるのであって、エジプトと日本の教員が所属するエジプト日本科学技術大学(E-JUST)に吉村先生の弟子が教員として所属していたり(余談だが、E-JUSTには九州大学も参画しており、本学のE-JUSTのセンターは私の所属するキャンパスに設置されている)、エジプト考古学をご専門とされている駒沢大の大城先生などは「吉村ファンだからこそ、今の私があるんですよ」と明言されていたり、後進を育てるのにも一役買っているわけである。そしてまた、その大城先生も優秀な学生を世に輩出することで次世代にバトンを繋いでいるお姿を拝見すると、吉村先生の影響の計り知れなさを感じることもできる。端的にまとめると、魅力的な研究者、という一言につきる。もちろん、飛び出す冗談などのキレを拝見していると、テレビに出るためにはこれくらい面白いことを言えなくてはならないのかと感じ、まあ、自分は不可能だなと改めて認識したものである。

3. 現地視察、検出器のエジプトへの輸出まで

プロジェクトがスタートしてすぐ、2018年のゴールデンウィークの期間、現地視察を目的にさっそくプロジェクトメンバーのほとんどがエジプト入りを果たした。私は本務多忙につき、全日程は滞在できず現地では4日間を過ごすスケジュールで参加した。山下先生の案内で、研究対象となるギザのピラミッド群をはじめ、ピラミッドの歴史の中

でその構造に重要な意味を占める屈折ピラミッドを訪問し、実験時に現地で過ごす際に食事などに問題がないかの予備検討など・・・平たく言うとエジプト料理を堪能した。計画通りにいけば翌年中(2019年)には計測を実施する見通しであり、この時に食事をとったお店を忘れてしまうほど期間が経ってしまうとは思ってもよらなかった。



図2 左)当初は下部のような急峻な角度のまま最後まで建造予定だったらしいが、途中でどのように石灰岩積んでも力学的に構造がもたず崩壊することがわかり、より浅い角度に変更することとなった。結果「屈折ピラミッド」の名で知られている。右)ギザの3大ピラミッドのうちクフおよびカフラー王のピラミッド。一番上に化粧石が残っているものがカフラー王のものである。今回のプロジェクトではクフ王のピラミッドを計測する。

現地視察終了後、帰国して早々に検出器の設計と製作を開始した。データ収集系まで含めて全て1年程度で開発を完了させることを目標としていた。今回我々が開発した検出器は物質量のみわかればよいため、二次元的に高空間分解能で密度分布が見えることは目的としていない。よって、検出器の位置分解能を大幅に犠牲にして、検出効率をなるべく高くし、限られた計測時間の中で良い統計精度のデータを得ることで密度分解能が高くなる様に検出器を設計した。完成したものの写真を図3に示す。 $20 \times 40 \times 1 \text{ cm}^3$ のサイズのプラスチックシンチレータにフィッシュテール型のライトガイドを介して光電子増倍管を接合した素検出器を12台用意した。まず、各2台を対向させて一部重なる様に設置することで、同時計数イベントの識別により、ミュオンヒット位置を2台で3カ所識別できる様にした。こうすることで、上部・下部で各々9カ所のミュオンヒット位置がわかるため、最大で81方向からのミュオンを識別できる検出器となっている(※しかし容易に想像できるように、鉛直上向きのミュオンを捉える組み合わせは9通りあるが、これらは有意に異なるデータが得られるわけではないため、解析時には全て足し合わせる)。

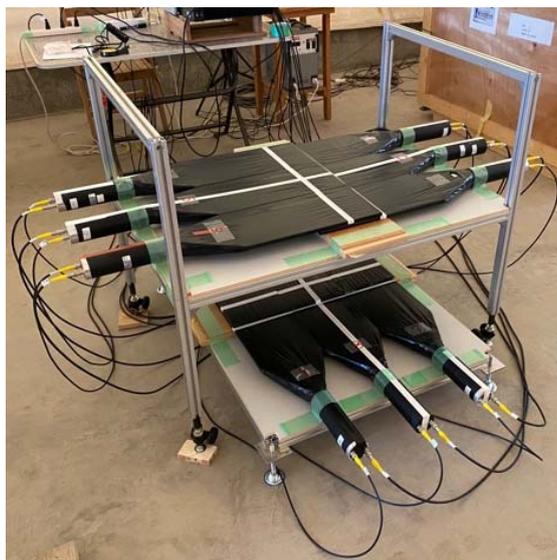


図3 開発した検出器。12台のプラスチックシンチレータで合計18ピクセルのヒット位置を識別できる様に工夫している。

大学敷地内でコンクリート建屋内におけるテスト計測を実施したのが、2019年秋である。テスト計測の結果には特に大きな問題があったわけではないが、検出器をエジプトに輸出する手続きのあたりから想像より時間を要する手続きや事件が色々と起こり始める。

まず、2019年当初は日本の輸出規制で輸出管理が優遇される「ホワイト国」と「非ホワイト国」に諸外国が分類されていたが、エジプトは「非ホワイト国」・・・つまり輸出規制の優遇がなんらうけられない国家に指定されていた。その後2020年にはホワイト国はグループAと呼称が変わり、非ホワイト国は国に応じてグループB～Dに分類された。エジプトは現在グループCにカテゴライズされており、現在でも優遇措置は得られない立場にある。この場合日本からの輸出許可を得る際は、ひとつの書類申請で許可申請が完了する一般包括許可申請をすることはできず、最大5種類の申請書を作成して許可を得ねばならなくなる。取るべき許可の種類もいくつか候補があるが、各々条件があり「継続的に相手国の特定の相手に輸出しているものを包括的に許可する場合」のように、1点ものの検出器にそぐわないものがほとんどであり、結局、ほぼ唯一の可能性として日本企業の子会社への輸出を包括的に許可する「特定子会社包括許可」の申請を通すことになる。具体的な手続きの全てを把握できていないわけではないが、山下先生が子会社を急遽立ち上げ、現地では荷受人に吉村先生の長男（エジプト在住）を指名し、複雑怪奇な作業を数ヶ月かけてひとつひとつ着々と進めてくださって、ようやく輸出できる状況に漕ぎつけたのである。自作した私たちの検出器もそのままでは輸出することはできず、九州大学製の製品としてカタログを急遽私の方で用意したのだが、これら全て

の手続きはほぼ山下先生の指示通りに作業したのみである。ご本人は見えなくて多量なる作業や手続きをなさっていたはずであり、本当に頭の下がる思いである。この紙面にてあらためて感謝申し上げたい。

輸出に際して準備した箱は11箱。アイテムリストの品数は、コネクタ1点までリストアップしてあり膨大な量となった。とにもかくにもついに輸出の準備が整い「明日装置は日本を発つ」という連絡を受けるに至った。しかし静かに「武漢ウイルス」の呼称で新型コロナのニュースをちらほらと耳にし始めている時期もまた到来していたのだった。

程なくしてカイロ空港の倉庫に貨物が到着した旨の連絡を受け取り、いよいよ通関待ちという段階になった。当時はこの研究に関わっている学生が4名おり、全員でエジプトに向かう準備に取り掛かった。到着してからの作業リスト、かかる日数などを考えて旅程を組み、通関の連絡を待つ。しかし、待てど暮らせど通関の連絡が来ない。結局1～2ヶ月たって、通関の連絡を受けた時にはすでに世界は新型コロナがパンデミックの様相を呈しており、大学から県境を越える出張に制限がかかる様になっていた。この時点で実験のための今回の出張は当面見送る決定を下さざるをえなくなったわけである。ほどなくして出張の全面禁止という状況に変化し、むしろ出勤にすら制限がかかる様になってしまった。この時点ではまだSARSやMARSの時のように1ヶ月程度でおさまらるだろうと高を括っていたのだが、現実はみなさんご存知の通りである。実際に次にエジプトを赴くことができたのは2022年の9月のことであった。しかし出張までの期間もただ指をくわえて待っていたわけではない。何もかもがオンライン化された2年間だったが、学生実験だけでなくこの実験もオンライン実験を試みたのである。2022年年始～5月頃に実施したこの実験について、あまり経験のある方がまだいらっしやらないと思うので、紙面を割こうと思う。

4. オンライン国際実験の監督

ピラミッドなどのエジプトの遺跡を調査するためには政府考古省から許可されて「調査権」を得るわけだが、毎年報告書を添えて更新手続きをせねばその権利を失うこととなる。2021年の年末頃だったのだろうか。検出器はエジプトの国立研究所NRIAGの倉庫に鎮座ましましていただけであり、1年間日本でやれる仕事がなかった時期、エジプト政府から突如「もうエジプトは安全だ。調査に来ないと調査権は更新できない」という連絡がきたようである。コロナ禍の期間、私もストレスからかすっかりと体調を崩しており、所属機関的にもまだ海外に教員を送り込むなどほぼ不可能な状況である。そこで出てきた案が「オンライン実験」である。全くの専門外で言語の壁もある外国人に適切に指示をあたえてその通りに動いてもらうことはほぼ不可能と考えて、私は難色を示していたわけだが、東日本国際大学の黒河内先生という方より「私がエジプト現地に入りますので、オンラインで監督して実施することはできないでしょうか」とご提案を受け

た。黒河内先生は考古学がご専門だが、出自は建築ということであり、一度やってみようということになった。2022年2月22日～3月5日の期間、修論審査会や卒研発表会がすみ、今度は職場の居室のある建屋の改築に備えて引っ越し準備が進む中での手探りの作業であった。前半は旧居室、後半は引っ越し後の居室から中継したのを覚えている。引っ越しの荷物の梱包を解く間もない、気の休まらない中のオンライン実験である。

接続先は装置を置かせていただいていた NRIAG の倉庫である。初回は黒河内先生のほか、サポート役に NRIAG の研究者も数名画面越しに見えた。しかし、そのサポートのはずの面々は初めて見る装置に興味津々で、画面の黒河内先生の背中越しに自由気ままに装置を触っている姿が見える。先生の「ラー！（ダメだ）！」という声が幾度となく響く。なんとかかんとか検出器が組み上がったのだが、ケーブルがあちらこちらで絡まっている。オンラインで実験を監督しながら当時私が先方に見せたスライドを1枚紹介しよう。次の図である。

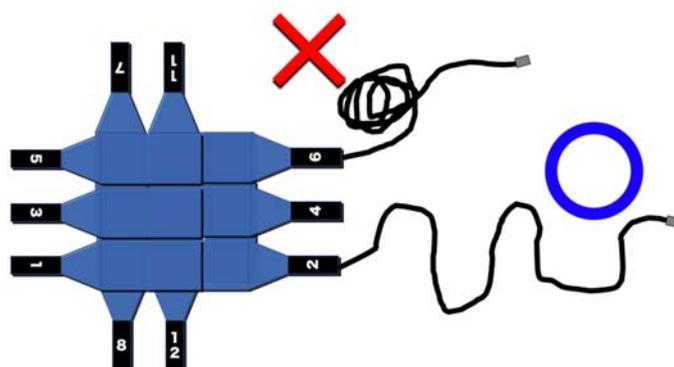


図4 普段は何も考えずにケーブルリングしていたが、たしかに何も知らない状態で検出器に線を繋げと言われると「×」で示した様になるかもしれない。つまりこちらの指示も適切でなかったわけである。

ケーブルを巻いた隙間に足を差し込んで通り抜ける人もあり、そのうち誰かが踏んでこわしそうである。鋭い方であれば、図4をみて検出器番号9と10がないことにお気づきになったかもしれない。この時点ですでに1台、原因は不明だが、光学セメントで接合していた PMT とライトガイドがポッキリと骨折して遮光テープの中で外れてしまっていたのである。これ以上故障させては実験が不可能になる。それを予感してか、おそらく黒河内先生の指示でサポート役の研究者はその翌日以降ほとんど見かけなくなった。なお、NRIAG の所長を務めるガドさんが（画面越しで申し訳なかったのだが）ご挨拶にいらした。流暢に日本語を操っていらっやって大変驚いたのだが、それもそのはず、出自は我が九州大学であるらしい。学生時代を同じ箱崎のキャンパスで

過ぎていた可能性もあり、会話も弾んだ。さて、このあたりで1回目のオンライン国際実験は終了となる。12台のうち故障した1台を除いて、数台はノイズレベルが高いもののなんとか使用に耐えると考えらる状態だったが、その他のほとんどは2年間アフリカの空調のない倉庫で放置されていたにも関わらず正常に動いていることが確認でき、胸を撫で下ろすことができた。

さて、1回目のオンライン実験では実測に至らなかったため2回目のオンライン実験も計画することとなったが、それより前に黒河内先生が一度日本に帰国するので、故障した検出器の修理法について九大まで出向くから指南してほしい、という依頼を受けた。本当に努力を惜しまない方である。セメントで修理するのは後戻りできないので心配ということで、結局はオプティカルグリスを少量お渡しして応急的に場を凌ぐこととなった。さて、黒河内先生がエジプトに帰って（時々日本を訪れてエジプトに帰られる先生というのが私の印象だ）、第2回戦の開始である。黒河内先生は1回目の実験ですっかりスキルアップして、私からの「Ch1に検出器3の生信号を入れて、トリガモードを立ち下がりエッジに設定し、スレッシュホールドレベルはホワイトノイズのちょっと上に設定して、その条件でCh2に検出器4の生信号を入れてみてください」というオシロスコープの操作の指示を瞬時に理解して実行してくださる様になっていらっしやった。正直なところ、最初の方は自分なら1時間で済む作業に、装置の操作方法や注意点などをオンラインで伝えながらの作業となり、数日を要する状況で終わりの見えない実験だったが、画面越しにテキパキと装置を操作してくださる黒河内先生の存在がその状況を大幅に改善してくれていたのである。オンラインで実験監督をする機会があれば、最初は時間がかかったとしても、操作方法だけでなくその操作の意味まで丁寧に伝えた方が、最終的に順調にことが運ぶという事実を覚えておいていただきたいと思う。研究室で学生相手には当然していることだと思う。

さて、検出器の準備を行なって、データ収集系へ信号線を配線し、FPGA ボード上に配置されている7セグメントLEDディスプレイに正常に上部と下部の同時計数事象のイベント数が表示されているところまでは順調だった。しかしながら、フロントエンドマシンとして使用するラズベリーパイ(ラズパイ)上で走らせる私がコーディングした計測ソフトが起動しないというトラブルが発生する。日本でテストデータを取得する際にも用いたソフトウェアがエジプトでは動かない。実験ではよくあることだが、今回はオンライン実験である。ここからラズパイにVNCを設定し、リモートで接続して修正・・・という作業に終始することとなった。判明まで時間を要してしまっただが、原因はエジプトで2年ぶりにラズパイを起動した時に実行したアップデートであった。その時にOSがメジャーアップデートされてしまっており、ソフトウェアに用いていた.NETフレームワークの互換性がなくなってしまっていたのである。ラズパイのOSのイメージファイルはエジプトの細いネットワーク回線に送るには極めて長い時間がかかりそうであり、

断念した。正常に動いているものは本番で変更を加えてはならない。これは実験の鉄則だったのに、最近ではアップデートによる更新トラブルがほとんどなかったのに油断していた。最終的に OS を古い Jessie にしたラズパイを予備も含めて 2 台私の方で準備して、ソフトウェアがきちんと動くことを確認した上で、これまで何度も届いていた私への現地実験の要請をうけることにしたのである。

5. エジプトにおけるオンサイト実験

研究院長に直訴し、出張許可をとりつけて、2022 年 9 月に久々に対面で実施されることになっていた原子力学会秋の大会をサボってエジプトに行くことになった。研究院長からは、「2022 年に入ってから数件海外出張を許可してきたが、ほぼ全員が帰国時にあるいは帰国直前に新型コロナに感染してしまい、空港で足止めをくらっている。ぜひ健康で帰ってきてください」とお言葉を頂戴した。原子力・放射線分野を見渡しても、身の回りの方々の中ではコロナ後の海外出張は私がトップバッターだったと記憶しているが、まだ新型コロナの影響が色濃くでているのを感じつつ空港に向かった。

2 年前にこの実験に参加予定だった学生は 1 名が研究室を移籍、その他は全員修了しており、自分の学生を連れて行こうにもまだ学生への出張許可を大学から得るには高いハードルがあった。そんな中、2 年前まだ学部 3 年生だった東出くんという学生が私にコンタクトをとり「自腹でよいから見学のために参加したい」と連絡してきたことを思い出した。当時、「ちょっとでも・・・それこそ荷物運びくらいでも構わないので、手伝うと表明してくれるなら、調査隊に加えて旅費も出せますよ」と伝えて、二つ返事で快諾していただいたので、彼を調査隊に加えた。

東出くんは 2 年たち、九大の大学院ではなく、総研大に進学したのだが、実は今でも交流がある。K 阪 Q 開発チーム(けいはんきゅうかいはつちーむ: KEK、阪大、九大のメンバーで構成される検出器開発チーム)というシチズンサイエンスでの活用を目指す OSECHI と命名された宇宙線検出器の開発を手掛けているチームのメンバーとして一緒に仕事をしているのである。OSECHI については附録として最後に簡単に紹介文を載せるが、この検出器のテストという名目なら、彼は一緒にエジプトで実験に参加してもらえるかもしれない、と考えた。他大学の学生を使うと言う暴挙に出たわけだが、私は彼がむしろエジプトにずっと行きたがっていたことも知っている。提案したところ、声をかけたことを喜んでくれたので、それが連れて行こうと決断した最大の動機となった。彼はその足でさっそく現在の指導教員から出張の許可を取り付け、晴れて 2 名体制でエジプトを訪問することとなったのである。もちろん彼はすでに九州大学の学生ではないため、予定通り、主に K 阪 Q 開発チームのメンバーとして「OSECHI による宇宙線ミュオン計測」を担当してもらうこととした。

成田空港から二人で深夜の便に乗って長時間かけてエジプトへ。久々の長距離フライ

トで、身体中岩になってしまったのではないかというほどに軋んだ体をひきずりながら、ドーハでの乗り継ぎで少しリフレッシュをした。まだほとんどの乗客はマスクをしており、数ヶ月後のサッカーの盛り上がりを予感するものはなにもなかったと記憶している。カイロ空港への飛行機の搭乗口に着いたらそこから先はマスクをしているのは東出さんと私のみになった。

カイロ空港に降り立ったのちは、空港まで迎えに来てくださっていた黒河内先生と会い、「今日はもうゆっくりしますか」とのご提案に「光電子増倍管とライトガイドをオプティカルセメントで接合するのに1晩の硬化時間が必要なので、明日から始めたのでは今日と合わせて二日も無駄になる。これからすぐに修理に向かいます」と、当時建造中だった大エジプト博物館の太陽の船の収められている倉庫に向かった。初日はその接合作業だけで終わったが、その甲斐あって翌日にはその故障していた検出器も元気に動くこととなった。なお、余談だがエジプトの一般的な勤務時間はおそらく朝8時頃から15時頃までのようだ。日本にいる時と同じ勢いで実験準備をしていたら、18時頃にさすがに帰ろうと声をかけられた。なお、その日の晩、車内で待っていただけのドライバーから「こんなに残業したら体調を壊すよ、明日は休みたいな」という電話がかかってきていた様だ。毎日の作業時間は概ね理解した。短時間でテキパキと仕事をせねばならない。郷に入れば郷に従え、とにかく慣れよう、と思った。

その倉庫にて行う最初の作業は主に2点が目的となる。ひとつめは、検出器調整をして全ての検出器のゲインをそろえ、適切な信号しきい値を設定することで、全ての検出器の計数率を一様に近い状態にすることだ。今回は12台の検出器からの出力信号の情報を捨てて、単にミュオンがヒットしたか否かだけをデータ収集するため、ここの調整がひとつの肝となる。二つ目は、ピラミッド外の...すなわち屋外の宇宙線ミュオンフラックスを測定することである。実は先に示した図3は、その時の写真だったのだが、「ケーブルの配線だけでまるで違う検出器の様に見える」という言葉を頂いたときに、あのオンライン実験の日々がありありと蘇ったものである。一時はどうなることかと思っただが、故障は1台にとどまり、それも修理できた。結果として、ここから3日間で検出器の調整は無事にすみ、最後の1晩でピラミッド外のミュオンフラックスの取得も実施できた。このフラックスからの減衰率でピラミッドの石灰岩の厚みを予測することも想定しているが、屋外であるためイベントレートは十分で、1晩でかなり統計精度の良いデータを取ることができた。ただし、宇宙線電子・陽電子が記録されるデータの2~3割を占めていることには気をつけておかねばならない。いずれにせよ、無事に倉庫での作業は終了し、次の日はピラミッドへの検出器の移動である。

ここは現地の方々にも大勢手伝っていただいた。エジプトの9月はまだ暑い。乾燥しているので汗はすぐ乾くと思ったら大間違いである。ピラミッド内部の気温は若干低めであるものの、その湿度はほぼ100%で石灰岩の壁はつねに湿っている状態である。乾

乾燥した砂漠におけるその水分の出所はそう・・・観光客である。呼吸によってピラミッド内に放たれた水分は、外に出ることなくそこに留まり続けるのである。さて、我々の検出器は観光客が自由にさわられてしまうと困ることと、ScanPyramid プロジェクトで見つけた空洞を臨むことができる地点ということで、観光目的では入ることができない王妃の間に検出器をセットアップすることになっていた。大回廊という王の間に続く大広間の麓から中腰で 35 m ほど進まねば入れない部屋だが、その距離のおかげで湿度は若干下がる。中腰での歩行による腰の痛みを年齢を感じながらこの日は運び込みだけで終わらせることにした。手伝ってくれたエジプトの方々をみていると、彼らは人の役に立つことを大きな喜びとしていると感じた。我々が装置の搬入の手伝いに深く感謝するとお祭りがはじまったかのような状態になった。我々もいささかテンションがあがっているのが下図からわかるだろう。



図5 検出器の搬入が終わった王妃の間にて。奥の4名は現地スタッフである。

翌日から検出器の調整を黒河内先生、同伴してくれた学生、私の3名で開始した。これ以降は、朝ピラミッドに入り、夕方 16 時に電源が落とされる直前までそこで作業する、という毎日を繰り返すことになる。王の間の床は綺麗に磨かれており平らなのだが、王妃の間は作りかけの通路があったり、床は凸凹していたりで、検出器の設置には不向きである。なお、「王妃の間」とはいつでも王妃に関連した部屋ではなく、最初に発見した

人が単にそう命名しただけらしく、王妃が蔑ろにされていたわけではないようだ。さて、検出器の設置調整に大変苦労しつつも、設置作業自体はなんとか1日で終了した。東出くんも早速彼のミッションである、「OSECHIでのピラミッド内ミュオン計測」をスタートしていた。自主的にテキパキ動く有能な学生である。実は私も1台 OSECHI を持ち込んでおり、こちらは開発中に若干改良を施していたため学生の個体よりも高検出効率となっているものである。OSECHI は普段の屋外環境における利用では数秒おきに宇宙線ミュオンを検出できる能力をもっている。しかし起動した2台は5分を経過してもミュオンを1イベントも計測しない。これは実は正しいのである。事前に PHITS コードで PARMA モデルを用いたモンテカルロシミュレーションを実施しており、王妃の間のミュオンフラックスは屋外の2~3%と予測していた。我々は物静かな検出器を見て、「本当にピラミッド内部にいるのだ」と感動していたのである。しばらくそのままにしていると「来た！」と学生が声を上げる。私の持ち込んだ OSECHI からの信号である。しかし、その時私はよそ見をしていて、ファーストイベントは東出くんのものとなったのであった。我々の旅程ももう3日しか残っていなかった。前半に体調不良で東出くんは1日休んでいたのだが、私も最後の2日には疲れが蓄積したのか体調が下降気味であり、日々の操作 g 検出器の電源操作だけになったので、それを黒河内先生にお願いして2週間ぶりの休みをいただいた。

さて、いよいよ帰国日である。若干体調不良に不安を覚えつつ、出国前の PCR 検査を現地でうけるも無事に陰性。エジプトを発つことができる。計測はまだまだ数ヶ月続いたため、エジプトに残る黒河内先生にのこりのルーティンワークをお願いし、帰路に着いた。カイロからドーハ、ドーハからバンコク、バンコクから羽田。しかし、「そしてついに福岡の地を・・・」とはならなかったのである。

6. おわりに

まだワクチンを2回して接種していなかった私は、帰国時に到着の羽田空港にて新型コロナに感染していないか検査する義務があった。東出くんは準備よくは渡航直前に3回目のワクチン接種をしており、入国審査に直行できることになっていた。私は検体を提出してから、結果が出るまで30分以上かかるということで、東出くんには先に帰る様に連絡した。そもそも彼の帰宅先は茨城であるため、ここで別れるのは既定路線だったのである。

私より後に待合室に来た旅行者の入国許可が出始めて不穏な空気が流れる。やがて空港の係員がそっと私に近づいてきて出た結果を耳打ちしてくれた...「陽性ですので、これから隔離施設に移動となります」。

実のところ先に帰宅した東出くんも極めて体調が悪そうに見え、結果として翌日の検査の結果陽性であることが判明している。彼は一人暮らしだからまだよいものの、もし

自分が3回ワクチン接種をすませていて自宅に帰ることができていたら、家庭内感染で大変なことになっていたはずである。あえて前章では伏せていたが、私もエジプトのPCR検査が陰性となった日、前日からの体調不良に加えて呼吸困難にも見舞われていたのである。呼吸困難は喘息の発作の時と同じで、吸うことができない呼吸困難だった。吐くことは普通にできる。しかし、吐ききっても、のどに通常の風邪よりも粘度が極めて高い体液が絡んだままである。しかし、全力で息を吸うと、ごくわずかに吸い込めた。これで最後と力一杯咳き込んだところで気道が開放されたのである。その時に「新型コロナでは？」と疑い、遠きエジプトの地に散るのかと家族に最後の電話をかけたりしていたのである。いまだになぜ出国前PCR検査が陰性だったのかは不明だが、やはり感染していたらしい。

はたして帰国の旅路で疲れ切った体を休める間もなく、やがて現れた検疫官につれられ私は隔離施設となっている品川の某ホテルに滞在することになったのである。秋の応用物理学会への参加もこの時点で絶望的となった。初めて対面で口頭発表する学生を引率する予定だったが、全てオンラインで対応することになった。学生は遅しく質疑応答もしっかりとこなし、私の出番はなかったため、結果的には問題なかったのだが。さて、2週間の海外出張に続き、隔離期間は8日間で、大学をほぼ1ヶ月留守にしたことになる。思ったより隔離施設での生活はつらいものであり、「カミソリなどの刃物の持ち込み禁止」のルールに妙に納得してしまった。私は旅行鞆にOSECHIが入っていたので「日本の方がやはり高い強度だな」などとミュオン計測に勤しむことができていたので、多少メンタルを正常に保つことができた。食事は扉を開ければそこにおいてあり、健康報告も携帯電話のアプリですませる。誰とも会わない毎日、誰とも話さない毎日である。新型コロナ感染対策初年の人と会わない生活のトラウマも蘇り、大学に出勤できず仕事が蓄積していつている焦りもあったがどうすることもできない。

8日経過後、やっとのことで本拠地に帰ってきたのだが、蓄積した仕事...とりわけ自分の苦手な事務仕事も全て自分でやる必要のある時期で、結局この遅れを取り返すのに翌年2月までかかった。現在は事務補佐員も雇うことができ、この時の感染のおかげで、1月に家族が次々と新型コロナに感染した時も一人だけピンピンして看病することができたのはある意味禊が済んだことを示していた。

ちなみに今回は感染ルートがわかっている。後発隊の日本からいらっしゃった方が感染しており、一度食事を一緒にしたことが原因で感染した様だ。その時の全員が一度体調を崩しており、感染の疑いがあったことを考えると、おそろしい感染力である（しかしエジプトに残った面々のみ、やはりPCRは陰性だったようで・・・エジプトで陽性と判定された方がいたらお目にかかりたい）。観光もせずスティックにホテルと王妃の間を往復する毎日だったので、海外出張に行ったから感染したというわけではなく、ある意味国内感染である。しかし、出張許可を得た時の研究院長の「ほとんど全員が帰国時に

感染している」というメッセージはある意味予言となっており、見事成就したのであった。

計測に関してはその後紆余曲折あり、再度私がエジプトを来訪する必要があることがわかっている。2023 年秋。今度はお土産に新型コロナを持って帰らない様に気をつけつつ渡航したい。

附録

重箱宇宙線検出器 OSECHI。KEK、阪大、九大の三者からなる開発チーム「K 阪 Q 開発チーム」で開発中の宇宙線検出器である。内部にプラスチックシンチレータを 3 個備えており、MPPC にてシンチレーション光を読み出すことができる。シンチレータには私が 2016 年頃に科研費で開発した 3D プリンタで造形できるものを採用し、1 台あたりの価格を大幅に下げること成功した。読み出しボードはほぼ KEK で開発したもので、若干の改良を施してある。このデータ収集系は各シンチレータの同時計数イベントを識別することができるように設計されており、3 つ同時計数したイベントを宇宙線ミュオンイベントとして識別する。

主にシチズンサイエンスでの適用を目的としており、現在近隣高校などへの貸し出しを進めているところだ。皆さんのまわりでも宇宙線検出器を好き放題つかって研究活動してみたい、という市民の方がいらっしゃれば私か K 阪 Q 開発チームのメンバーまで連絡する様にお伝え願いたい（高校生に限らず、研究活動をおこなっているのであれば老若男女問わない。職業科学者でないことだけが条件である）。開発チームから交流ツール Discord を用いたオンラインでのサポートも受けられるため、遠隔地からの希望も大歓迎である。今月行われる九州大学筑紫キャンパスのオープンキャンパスでも図 6 のロゴで広報していく。この件もいつか核データニュースで紹介できる日がくることだろう。



図6 OSECHI紹介用のロゴ。重箱は某100円ショップで販売しているものを買ったものである。

参考文献

- [1] S. Procureur *et al.*, “Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons,” *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 1144, 2023, doi: 10.1038/s41467-023-36351-0.
- [2] K. Morishima *et al.*, “Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons,” *Nature*, vol. 552, no. 7685, 2017, doi: 10.1038/nature24647.
- [3] L. W. Alvarez *et al.*, “Search for Hidden Chambers in the Pyramids,” *Science (80-.)*, vol. 167, no. 3919, pp. 832 LP – 839, Feb. 1970, doi: 10.1126/science.167.3919.832.
- [4] R. Kouzes *et al.*, “Novel Muon Tomography Detector for the Pyramids,” *J. Adv. Instrum. Sci.*, vol. 2022, no. 0 SE-International Workshop on Cosmic-Ray Muography (Muography2021) Ghent, Belgium, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.31526/jais.2022.240>.
- [5] A. Bross *et al.*, “Tomographic Muon Imaging of the Great Pyramid of Giza,” *J. Adv. Instrum. Sci.*, vol. 2022, no. 0 SE-International Workshop on Cosmic-Ray Muography (Muography2021) Ghent, Belgium, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.31526/jais.2022.280>.
- [6] S. Fukushima, “Team to re-scan Great Pyramid of Giza to pinpoint hidden chamber,” *The Asahi Shimbun*.
- [7] T. Sato *et al.*, “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 684–690, 2018, doi: 10.1080/00223131.2017.1419890.
- [8] T. Sato, “Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes,” *PLoS One*, vol. 11, no. 8, p. e0160390, Aug. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0160390.
- [9] T. Sato, “Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS,” *PLoS One*, vol. 10, no. 12, pp. 1–33, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0144679.