

ミュオン研究の最前線！ —古代からミライを可視化する技術を語る—



登壇者 寺田健太郎¹⁾ 氏
 足立匡²⁾ 氏
 森島邦博³⁾ 氏
 永谷幸則⁴⁾ 氏
 下村浩一郎⁴⁾ 氏
司会者 久保けんや⁵⁾ 氏

【2023年8月18日（金）対面開催】

—自己紹介—

久保 国際基督教大学の久保と申します。ミュオンを始めて何年でしょう、1986年から実験をします。もともとは化学の出身なので、最近、ミュオンの化学的挙動というのをずっとやってきました。非破壊元素分析とかに実態が移っているという感じになります。

下村 下村浩一郎といいます。高エネ研というところに所属しております、普段は茨城県東海村のJ-PARCで仕事をしています。

僕がミュオンを始めたのは1991年で、僕でももう32~33年たちます。その前は、理研の仁科センターというところで不安定核の研究をしていましたので、仁科にはすごく思い入れがあります。基本的にミュオンにかかわるものなら何でもおもしろいなと思って、装置から物性から基礎物理についてからいろいろなことをやりましたが、実は最初の頃に宇宙線ミュオンもちらっとやっていたりもしました。

- 1) 大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻
- 2) 上智大学 理工学部 機能創造理工学科
- 3) 名古屋大学大学院 理学研究科
- 4) 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系
- 5) 国際基督教大学 教養学部アーツ・サイエンス学科

よろしくお願ひします。

足立 上智大の足立と申します。私がミュオンに携わったのは博士の学位を取った直後です。学位取得後に在籍していた研究室で職を得ましたが、あるとき教授に呼ばれて、 μ SR という実験があるけれども行ってみないかと言われたのが初めてでした。20年ちょっとやっていることになります。私の研究の専門は超伝導で、超伝導体をつくってその磁気的特性や超伝導特性をミュオンを使って調べるという仕事をずっとやってきております。

加速器を使った実験はもちろん初めてだったものですから、非常に新鮮で刺激は大きくて、今でも続けているという状況です。よろしくお願ひします。

永谷 高エネルギー加速器研究機構、KEKの永谷です。たぶんこの中ではミュオンをやり始めて一番年が浅いというか、若い人間になるかと思ひます。もともと私は素粒子理論の研究をしていて、いろいろあって、いまから十数年前に電子顕微鏡の研究を

新春座談会のフルバージョンを協会ホームページで公開中！

本誌ではやむを得ず割愛した内容や写真、詳しい解説を加えた完全版はこちら。





寺田 健太郎 氏

始めまして、そこで線形加速器を使った電子顕微鏡とかの開発をしていました。

その中で、いまは KEK を退官されて名誉教授になっていますが、三宅康博先生に「何でミュオン顕微鏡はないのか」とある意味文句みたいなことを言ったら、「実は私も考えている、じゃあ一緒にやろう」と、それでとんとんとプロジェクトが始まった。

いまから5年前に、KEK に来てミュオン顕微鏡のハードウェアをつくり始めて、まだ装置はできていませんが、いまに至るという感じです。

森島 名古屋大学の森島邦博といいます。僕がミュオンに携わり始めたのはだいたい20年ぐらい前で、もともとは大学院に入ったときからニュートリノ振動実験 OPERA に参加していました。原子核乾板¹という検出器で反応して出てくるミュオンをとらえてニュートリノ反応を観測するというをやっていました。ドクターを取った後で宇宙線に関係あることをやりたいなと思っていました。

もう1つは原子核乾板の技術自体がおもしろいので、それをだれもやっていないような方向に展開したいというのがあって、本格的に宇宙線を使ったミュオンの研究を始めました。

アルバレ²が1970年ぐらいにピラミッドを透視し



足立 匡 氏

たというのを大学院のときに知って、ミュオンのイメージングをやりたいというのもありました。

いろいろ新しい方向に更に展開したいと思っていま研究しています。よろしくお願いします。

寺田 大阪大学の寺田です。もともと僕は大阪大学理学部物理学科出身で、湯川秀樹先生の原子核物理の系譜がすごく強い環境でしたが、当時僕は原子核物理や素粒子に全く興味がなく（笑）、X線天文学の研究室に行きまして、ブラックホールのX線観測でドクターを取りました。

その後、広島大学理学部地球惑星システム学科のいろいろな石を分析する地球化学研究室に行きまして、それ以来29年ずっと隕石や小惑星物質の同位体分析をやっています。

2010年頃にJ-PARCで大強度ミュオンビームをつくれるようになったと聞いて、ミュオンで隕石を測って見たらどうなるかということで久保先生、下村先生たちと分析を始めました。小惑星リュウグウまでに実用化は間に合わないのではないかなと正直思いながらやっていましたが、いろいろなミラクルが重なりまして、2021年、リュウグウの分析に成功して、翌年発表しました。そんなわけで、僕自身がミュオンとかかわりだしたのは2010年からです。

今日は楽しみにしております。

—ミュオンの特性—

久保 皆さんの自己紹介で、それぞれ全然違うバックグラウンドを持っている、それがいまミュオンというキーワードで結びつけられているというの

1 古くから素粒子実験に使われてきた検出器で、写真フィルム的一种。

2 ルイス・ウォルター・アルヴァレス（米）物理学者（1911-1988）。ノーベル物理学賞受賞者。専門分野以外で恐竜の隕石衝突による絶滅説を提唱したことで有名である。線形加速器の形式の1つ「アルバレ型リニアック」にも名前を残している。「アルバレ」と呼ばれることが多い。



森島邦博氏

は大変おもしろいと思います。

ミュオンは電子の仲間ですが、第2世代粒子と呼ばれ、普通に身の回りにはない。だから、実験するには自分で作り出すか、どこかから来るのを待つしかないというので、昔は簡単に実験できるようなものではなかったと思います。

それが、最近では人工的にどんどんつくれるようになって研究が進んだということ、空からずっと降ってきている宇宙線をイメージングの研究に使えるということが分かったのが50年ぐらい前ですか。

あとミュオンは、湯川先生が発見された π 中間子が崩壊してできる粒子です。そのときに、進行方向と反対にスピンの100%偏極するということが起こっていて、スピンというのは小さな磁石なので、その磁石を物質の中に入れて、物質の中の磁場はどう向いているか、乱雑に動いているかが分かる

ミュオンとは？

素粒子の一つでレプトン（軽粒子）の仲間にし、電子の仲間。電子と同じく負の電荷をもつ粒子と、正の電子をもつ粒子があり、スピンは2分の1という値を持つ。

質量は電子より200倍重く、陽子の9分の1程度。電子と違うところは寿命があり2.2マイクロ秒（約45万分の1）。

ミュオンは普段身の回りになく、実験するには加速器を使って人工的に作りだすか、宇宙線として地球に降り注ぐものをとらえる方法しかない。



永谷幸則氏

いう方法があって、それが μ SR法で、人工ミュオンを使う非常に大きな研究の1つです。

— μ SR法の研究—

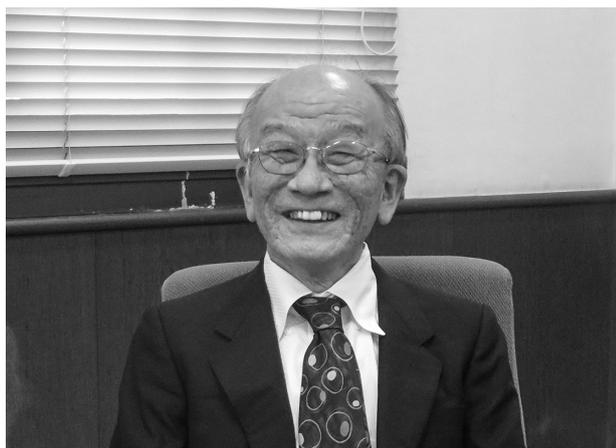
久保 じゃあ、スピンの話が一番関係している足立さんからいいですか。

足立 先ほど久保先生が言われたスピンを使って、物質の磁氣的性質や私が行っている超伝導の性質を調べるのがミュオンスピン緩和法、 μ SRという方法なわけです。

私たち超伝導の研究者が目指すところは主に2つあって、1つは、室温で、つまり、冷やすことなく、しかも、圧力をかけずに超伝導になる材料を開発したい。もう1つは、超伝導が発現するメカニズムを解明したい。私は、メカニズムを解明することにミュオンを使ってきたというところです。

超伝導のメカニズムを解明するには何が分かればいいのかというと、超伝導になると抵抗ゼロで電気が流れます。普通の物質は電気の担い手である電子が1個ずつ流れていますが、超伝導になるためには電子が2つ対をつくらなければいけません。これをクーパー対といいます。マイナスの電子とマイナスの電子が対をつくるということは、マイナスとマイナスは普通反発しますから、何か引き付け合う力がないと。だから、何の力が引力になっているのかが知りたいというところです。要するに、媒介する力の源です。

それを知るためには、専門的に言うと、電子対の対称性という、要するに、力の源を反映したものに



下村浩一郎氏

着目します。その対称性を知るためには、超伝導の特徴的な量である磁場侵入長というものを調べる必要がある。磁場侵入長を調べる手段はあまり多くなくて、その中の有力な1つが μ SRです。だから、その実験をするためには、測りたい試料に磁場をかけて、ミュオンを打ち込む。そうすると、外からかけた磁場と物質の中の磁場を合わせたものを感じて、ミュオンが物質の中をぐるぐる回ります。この現象から磁場侵入長を知ることができるので、超伝導のメカニズムを解明するうえで、 μ SRはなくてはならない実験手法になっています。

あとは、 μ SRの十八番としては、ミュオンがスピンを持っていることを利用して、磁性材料や新しい磁気的な性質を持つような材料に広く使われています。電子のスピンには向きがあるので、例えばある温度よりも冷えるとその向きが互いに反対になって、あたかも消えてしまっているなんていうスピン液体だとか、何か新しい、変わった性質を示す材料に使われたりもする。そんなところもあって、 μ SRは結構古くから物質科学、物性物理等の分野で使われてきているという状況があります。

新しい材料ができたときに、 μ SRは実験手法としてぱっととっつきやすいものです。すごく詳しい精密な物性を知ろうと思ったら単結晶等のクオリティーの高いものを準備しないとダメですが、まずどうなっているのだろうと見るときに、 μ SRは非常に有力です。

あと、ちょっと長くなりましたが、それとは別に、応用に近い話ですが、リチウムイオン電池等の電池材料にも使われています。リチウムイオンの動きを



久保謙哉氏

ミュオンを介してとらえようという方法。イオン伝導やイオンの性質を調べるのにもよく使われています。

半導体材料なんかもありますが、半導体に関しては下村先生にお願いしようかと（笑）。

下村 ミュオニウムというものがあって、正の電荷を持ったミュオンと電子がくっついた水素原子みたいなものが物質の中ででき上がります。ミュオンというのは、陽子の9分の1ぐらいの重さしかありませんが、ミュオニウムの電子状態は水素原子とほぼ同じ。だから、物質にミュオンを打ち込んでミュオニウムというものができると、それは物質の中の水素原子の挙動をシミュレートすることができるというお話があります。

例えばいま青色半導体はものすごく有名で、あれは長いことダイオードというのをつくることができませんでした。何でかという、半導体はp型とかn型とか両方の性質を持ったものが合わさったときに初めていろいろな応用ができますが、長いことn型のものしかつくれませんでした。何でn型かというのがずいぶん長いこと分かりませんでした。そういうものをミュオンを使って調べると、実は微量に含まれている、自然に含まれたような水素原子がn型の原因になる結果がミュオンから出ているということになります。

久保 もう1つ、スピンを使って物質の中の磁場を調べるというお話ですが、ミュオンは非常に磁場に敏感だということがあると思います。だから、実験されるときに、実は地球の磁場が邪魔になる。

足立 磁場を検出するのが得意だから私たちが使

うというところもありますが、最近では、超伝導になると磁場が出てくるなんていう変わった超伝導材料もあって、カイラル超伝導といいますが、そういう実験をするときに、出てくる磁場が非常に小さいので、地球の磁場、地磁気が邪魔です。だから、できるだけシャットアウトしないといけない。既存の、我々人類が持っている磁気プローブの中でもおそらくトップかもしれないぐらいの感度があるということも非常に重要な部分になっていますね。

久保 話はがらっと変わって、寺田先生、ご自身の研究について話をさせていただきますか。

—ミュオンを使った非破壊分析—

寺田 僕は、いまどういふことに興味があるかと言いますと、まさにポール・ゴーギャン（仏）の有名な言葉で、「我々はどこから来たのか。我々は何者か。我々はどこへ行くのか」というようなモチベーションで研究をしています。我々の体をつくっている元素がいつ、どうやってできたのかというのを調べようと思うと、遠くの星や実験ではなくて、まさに我々の体をつくっている物質を使わないと、調べないと分からないというモチベーションでやっています。例えば僕らの体をつくっている10%はビッグバンの頃の元素がそのまま残っていますし、75%は重い星起源の超新星爆発でできた元素でできているし、残りの十何%は軽い星起源のもの、それが混ざって僕らの体ができているわけです。

我々はよく星屑からできているといいますが、隕石を同位体顕微鏡で見ると、ごく稀ですが1 μm サイズの星屑が存在していて、太陽系ができる前の超新星爆発の情報とかを我々に教えてくれるわけです。

ところが、隕石ではどうしても避けることができないことがあります。それは、地球の汚染です。流れ星が燃えて隕石が落ちてくる時点で、地球の大気と化学反応をしましてしまっていますし、砂漠や南極で見つかる隕石はそれ自身どんどん風化していってしまうので、小惑星から直接持ち帰ってくる試料を分析するのは非常に重要で、ミュオンを使うと物質を非破壊で測れる、特に軽元素を壊さずに測れるというのは、おもしろいと思いました。

隕石の分析で炭素や窒素のような軽い元素を分析する際には、だいたい煮たり焼いたり削ったりして、

要するに壊しながら消耗しながら分析をします。隕石はたくさんありますから破壊分析しても全然構いませんが、小惑星物質は非常に貴重で、なるべく壊さず消耗せずに、基本的な情報を得たいわけです。

ミュオンを使うと炭素、酸素、窒素のような軽い元素を非破壊で測れるので、我々が分析した後にほかの破壊分析に回せるので、少ないサンプルでもよりたくさんの情報が得られる可能性があるということで、2010年から基礎実験を始めました。

当時は、直径数cmの大きな隕石にミュオンを当てて、炭素や酸素のシグナルが見えたというようなことをやっていたわけですが、小惑星リュウグウから持って帰ってきたサンプルは5.4gで、巷では大量に取れたと報道されていましたが、我々に配分される量は少なく、分析できるかできないか非常に微妙でした。

我々がリュウグウの分析をしたのは2021年6~7月にかけてですが、実際に分析ができると決まったのは4月です。バックグラウンドをいかに下げるかというところで皆さんと努力しまして、いけるぞということが分かったのが2か月前の4月でした。

初期分析チームのリーダーの東北大学の中村智樹さんは「失敗は許されない」と。貴重なリュウグウ試料にミュオンを当てるからには結果を出さなければいけないというかなりのプレッシャーがある状況で分析をしました。

小惑星リュウグウから一度も空気にさらすことなくJ-PARCの実験室に持ち込んで分析することによって、炭素と酸素を測ることができました。2010年からずっと「小惑星リュウグウの炭素ピークが出ます、出ます」と方々でアピールしていたので、シグナルが見えた時点は、やったというよりはほっとした。

実は、エクストラサクセスがありまして、窒素のシグナルが見えました。窒素は今回の小惑星物質には少ないと思われていたからです。窒素のピークがちゃんと見えた時は、これはやったという感じになりました。ミュオン非破壊分析の結果、小惑星リュウグウの平均組成は、酸素の濃度以外はほぼCIコンドライト隕石（CI隕石）³と同じだった、という惑星科学にとっては重要な知見が得られました。今日、

3 いろいろな化合物や有機物の形で炭素を含む隕石（炭素質コンドライト隕石）の中でも特に気化しやすい成分を多量に含んでいる隕石グループ。

CI 隕石を持ってきました（写真1）。我々は、このCI 隕石を基準にして地球はこうやってできたとか、ああやってできたということやずっと議論しているわけですが、小惑星リュウグウの分析をすることによって、基準としてきたCI 隕石自身が地球の大気、酸素によって既に汚染されていることも分かりました。

久保 CI 隕石はすごく貴重ですね。

寺田 はい。最初は米粒1粒ぐらいだったんですが、こんなふうにしてアウトリーチで皆さんに見せている間にどんどん脆くなってしまって粉々に砕けてしまった（笑）。言い換えると、いままさに地球大気でCI 隕石に風化が起こっているということです。

2010年からJ-PARCで実験をやってきたわけですが、何と私の所属する大阪大学でも大型加速器があってミュオンが出ると後から知ったので、灯台下暗しでした。そんなわけで、自分の研究のルーツや「ご縁」を感じながら、いまは楽しみながらやっているところです。

久保 さっきCI 隕石と酸素の濃度が違うというお話をされましたが。

寺田 小惑星リュウグウは炭素が多い小惑星だろうということは行く前から分かっていたんですが、ただ、どんなタイプの石かというのは実際に持って帰ってくるまでは分かりませんでした。

地球にある隕石は細かく分類されていて、実際に分析してみると、CI 隕石と呼ばれる隕石の中でも非常に珍しい、70000個か80000個ある隕石のうちの4個ぐらいしかないようなタイプの隕石と同じタイプだったことが分かりました。

実際にミュオンで分析してみると、リュウグウの酸素がCI 隕石と比べて20%ぐらい少ないことが分かりました。このことから、我々は、リュウグウの酸素の量が正しく、CI 隕石の酸素は地球落下後に地球の酸素と結びついたため、見かけ上、酸素濃度が増えてしまったと結論づけました。

久保 ありがとうございます。人工的なミュオンの話はいったん置いておいて、宇宙線ミュオンの話を森島さん。



写真1 CI 隕石

—ピラミッド研究の最前線—

森島 最初に、私がいま進めている宇宙線のミュオンイメージングを簡単に説明させていただくと、地球の外を飛んでいる陽子とかヘリウムといった宇宙線が地球の大気につかかって、そこで2次的に出てくるミュオンを使っています。

そこで出てくるミュオンは非常にエネルギーが高いので、地表まで降り注いでくる。岩盤とか一般的な人工構造物をつくっているような石であれば数kmぐらいまで通れるような高いエネルギーのミュオンが宇宙線の中に含まれている。そういう宇宙線を利用して、巨大な構造物の中を非破壊で透視するというのが宇宙線のイメージングです。

私たちがいまそこで一番注目して進めている研究が、ピラミッドの中の構造を探るというものです。1970年代にアルバレが宇宙線を使ってギザの3大ピラミッドと言われるクフ王、カフラー王、メンカウラー王の3つのピラミッドのうちカフラー王のピラミッドを調べました。

なぜそれを調べたかという、クフ王のピラミッドとカフラー王のピラミッドは、親子の関係にあるピラミッドですが、内部構造が全然違って、クフ王のピラミッドは、中に3つ部屋があって、それが1つの入口に全部つながっていて、大回廊という巨大な空間があり、すごく複雑な構造をしている。それに対して、カフラー王のピラミッドは、入口は2つあって、途中で合流しますが、その奥に1つしか大きな部屋はありません。

アルバレは全然構造が違うところに着目して、クフ王のピラミッドにもまだ見つかっていない未知の内部構造が残っているかもしれないと考えました。それを実際にミュオンの高い透過力を生かしてX線レントゲン撮影的にピラミッドを見ようという初めての試みでした。

実際にピラミッドの中の全部の玄室にはほぼ部屋を埋め尽くしてしまうほど大きな検出器を置いて、宇宙線、ミュオンの飛来方向の分布を調べて、ちゃんとデータが得られましたが、結果は特に異常は見られなかったということでした。

しかし、その技術自体はいろいろなことで使われ始めて、永嶺謙忠先生（東京大学名誉教授）が水平方向から来るミュオンを使って火山や溶鉱炉を調べたり、僕らやKEKの高崎史彦先生が原子炉を調べました。

僕はその後、クフ王のピラミッドという逆に中がよく分かっているだろうと思われている、一番大きなピラミッドを対象に調査しました。ピラミッドの中に装置をいくつか置いて測定したところ、ある方向からたくさん宇宙線が飛来してくる場所を見つけることができました。

さっき内部構造は3つ部屋があると言いましたが、その中の1つに大回廊という幅2 m、高さ9 m、長さ40 mの超巨大な空間があって、その大回廊のちょうど真上に、もう1つ大回廊と同じぐらいの大きさの空間があることを2017年に発見しました。

そもそも考古学者の人は大回廊の上に空間があるとはだれも言うておらず、そこを調べようというアイデアもなかったし、調べる方法もなかった中で、宇宙線の高い透過力が生かされて、初めて巨大な構造が見えました。それで考古学の人たちからも注目されているところです。

最近新しい進展がありまして、2016年に小さな空間がピラミッドの入口付近にあるのは同じように宇宙線で見つけていましたが、その形があまりはっきりしていなかったため、その調査を2019年に大規模に行いました。具体的には、原子核乾板をピラミッドの入口付近にある空間の周囲に全部で7か所配置して、X線CTみたいなことを宇宙線で実施しました。ピラミッドの入口付近にある空間の形が、直方体だったら2 m×2 m×9 mだということを10 cm以下の精度で出しました。

その場所が分かったことによって、ピラミッドの表面から80 cm、石1枚隔てたすぐ近い場所にその空間があることが宇宙線の観測で分かりました。そこで、石と石のすき間から直径6 mmのファイバースコープを押し込み、中の空間の撮影に成功しました。宇宙線を使ったイメージングで発見した空間がそこに実在するのを初めて明らかにしました。

ここまで来ると、考古学遺跡の調査に宇宙線ミュオンが使えるという実証までできている。考古学者の中には空間が本当にあるのか疑う否定的な意見が多かったのですが、現実的な実証結果を見た瞬間に否定的な意見を持っていたエジプトの大御所みたいな人たちが好意的な意見にがらっと変わって、これは発表するという話になった。僕らの予定は関係なく記者会見をやると決められてしまって、ピラミッドの前に1日でテントが建って（笑）、数日後に本当に記者会見が開かれたぐらいなので、実証はすごく重要です。

僕らが使っている原子核乾板という装置は写真フィルム的一种なので、宇宙線をつくったら常に記録し続けて、電源を必要としません。更に、大きさも自由に変えられるといういい特徴があります。薄くてコンパクトで軽いから、人が持ち込めて、いろいろなところに置けるといことで、ピラミッドの中ですごく活躍しています。

他にもKEKのグループが開発したシンチレーション検出器や、東京大学の田中宏幸先生が最近進められているガス検出器等いろいろな方法があります。最近、火山等の研究でもこれらが注目されていて、東京大学の地震研究所のグループはガス検出器をたくさん並べて10平米ぐらいの検出器をつくって、桜島の火山活動をずっとモニタリングし続けるということにも使われています。

久保 おもしろいですね。寺田先生が紹介されたのも非破壊分析といえば、ピラミッドも非破壊分析だという。規模は全然違うけれども、0.1 gを一瞬懸命測っているのと、何m、数十m？

森島 クフ王は140 m。

久保 原子核乾板が使われているということですが、いまはほとんど世界中どこでもやってないという。

森島 そうですね。原子核乾板自体はかなり歴史の長い方法です。ただ、この方法は粒子をとらえる



座談会風景

性能としてはものすごく優れていますが、現像をしないと中が見えないのでリアルタイムで見られないとか、実際に中を宇宙線の粒子が通った跡を見るためには、顕微鏡を使って観察しなければいけないのでかなり時間を使ってしまい、大変な作業を伴うということでだんだん使われなくなっていきました。宇宙線や放射線を検出する方法は、電気的な信号に変換して読み出すものに置き換わっていきました。

僕らの名古屋大学の研究グループは、フィルムをいかに早く読み出して、高速に解析するかというところに技術的な開発の重点を置いていて、高い解像度を生かした素粒子の研究に使ってきました。読み取り装置と僕は呼んでいますが、原子核乾板を読み取る速度を上げることで、この技術を使えるものにしていく、というところはずっとやってきました。

また、最近写真フィルム自体がもう使われなくなってきて、デジカメに置き換わってしまったので、2010年頃に原子核乾板がほとんどつくられなくなってしまって、入手できなくなるという時期がありました。それでは困るということで、もともと写

真乳剤を開発していた富士フィルムの技術者の方に作り方を教えていただいて、ここ10年大学の中で内製化しています。

現状はフィルムをつくって読み取って分析するという一連の流れは名古屋大学でしかできない状態です。なので、研究するときは共同研究というかたちでやらせていただいています。

久保 いろいろなところから話も来たりするのではないですか。

森島 そうですね。僕個人としては、将来的に社会実装まで持っていきたいなというモチベーションが高いです。

例えば、土木構造物の中の健全性を評価したり、地下の構造や陥没事故の原因になる地下空洞を調べたり、最終的には資源探査みたいなのところまでいろいろ考えています。最近は企業からの問い合わせで、こういうことはできますかという連絡を結構いただくようになってきています。

久保 古墳を見ようという人もいるみたいですね、下村さん。

下村 そうそう。J-PARCは東海村にありますけど、いまのJ-PARCの小林隆センター長が東海村の古墳を宇宙線ミュオンで見るといふ話を始めて、協力していました。

そのときおもしろかったのは、カミオカンデ⁴まで飛ばすニュートリノがどのくらい出ているか見る前置検出器というものすごいエレクトロニクスの塊のお古を全部使って、いま宇宙線ミュオン用の測定器を組み直そうとしています。驚きなのは、その組立て作業を全部小学生、中学生にやらせている。

ついこの前デモ機をつくらせたら、プラスチックシンチレータにファイバーを通して、MPPC⁵というやつを付けて、光シールドして、回路を組み立てさせて信号を見るところまで3時間でやってしまったので。小学生がですよ。

すごく夢があるなと思っていて、東海村の村長さんがわざわざやってきて、にこにこしているのを見て、よかったなと思いました。宇宙線ミュオンはいいですよ。普通の小中学生もアクセスできるし、ものすごくロマンがあるので、科学の入口としてはものすごくいいなと思います。

久保 あと、原子核乾板は電源を必要としない。一方でJ-PARCとかRCNP⁶の加速器でミュオンをつくらうと思うと、絶対電気が必要です。ところが、いまは電気代がとんでもなく高い。実は、リュウグウのサンプルを測ろうというときも、特別に加速器の運転時間を2週間くらい延ばしてもらった。

下村 普通7月になる前に閉じるのを、7月15日くらいまで延ばしてもらった。

久保 そう。そのためにどれくらいお金がかかっていると思うとか言われて、結果が出なかったら切腹だぞとかいう。

下村 暑い中で運転するのは非常に難しいので、加速器の人たちもめっちゃめっちゃ気合いを入れて運転してくれて、確かにあの暑い中でビーム強度を一切落とさずに乗り切ったというのは、いまから考えると奇跡ですね。簡単に言うと1日数千万円じゃない

ですか。

寺田 1日数千万円!?

久保 それを2週間やってもらった。

下村 数億円。

寺田 延ばしたのは知っていましたが、値段とかは。

足立 知らないほうがエンジョイできて(笑)。

久保 いま電気代が上がっていて、加速器の運転は非常に大変だという話になっていて、それに比べると、宇宙線ミュオンは逆に止められない。

森島 どこにでも来ているので、何でも対象にできる。

久保 ミュオンの透過力的なことを使っている永谷さん、顕微鏡の話。

—ミュオン顕微鏡の開発—

永谷 では、顕微鏡の話を私からしたいと思います。基本的に私が進めているテーマは、今日森島先生がおっしゃった非常に物質をよく透過する能力を使って、透過型ミュオン顕微鏡をつくるのがまず1つ。それから、足立先生の μ SRの話、あるいは非破壊元素分析という話を使って、走査型のミュオン顕微鏡をつくる、あるいは超低速ミュオンを使って表面だけを見る、というものです。ミュオン顕微鏡としては、透過型のミュオン顕微鏡と走査型のミュオン顕微鏡、あるいは走査まではいかないけれども表面を見る超低速ミュオン顕微鏡に大別されます。

ここでミュオニウムの話をし少ししなければいけません。物質に正のミュオンを当てると物質中に止まります。その中からミュオンが出てくるときには、ミュオニウムとして物質表面から湧き上がってきます。そのときには熱化されていますから、非常に低エネルギーで湧き上がってきます。そこに光を当てることによってミュオニウムから電子をはぎ取ってやることができます。その結果として、非常に遅いミュオンを生成することができますが、これは永嶺先生たちの開発によって、超低速ミュオンと呼ばれるものです。それを再加速してやると、加速しても ΔE 、エネルギーが広がることはありませんので、非常に単色性のいいビームをつくることができます。ミュオン顕微鏡はそれを基本的に使います。ミュオンは数十MeV以上に加速してあげると非常に物

4 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設(岐阜県飛騨市神岡町) <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index.php>

5 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は、SiPM (Silicon Photomultiplier) と呼ばれるデバイスの1種で、ガイガーモードAPDをマルチピクセル化した新しいタイプのフォトンカウンティング(光子計測)デバイス

6 大阪大学 核物理研究センター

をよく透過し、放射光を出さないということから、電子に比べても非常に物をよく透過する。

まず、単色性がよくて、かつ輝度も高いので、光源として非常に優れています。それをいま我々はサイクロトロンを用いて5 MeVまで加速して、物を透過してみようと。たぶん直接イメージングする手法として、電子顕微鏡は世界最高性能の最大加速精度を持っている阪大の3 MeVの電子顕微鏡をもってしても、生物系試料で3ミクロン厚さぐらいのものしか透過できないです。ミュオンであれば1 mmぐらいまで透過できますし、非常に厚いものでも高い分解能が出せることが期待できる。だから、1ミクロンよりも薄いものであれば電子顕微鏡で見ればいいですし、例えばmm厚さのものを数十nm分解能で見たいときにはミュオンを使う。

ミュオンの基本的な性質として、スピンを持っている、もう1つ重要な性質として、電荷を持っています。ゲージ相互作用の結果としてミュオンの波動関数が電場もしくは磁場によってくるくる回るといふ現象を使うと、例えばmmとかcmまで厚い物質の中の電場、あるいは磁場を、更に試料を回してみることによって、物質の中の電磁場を立体構造として見ることができる。

じゃあ、それで何をやるのかということ、非常に役に立つことができる。ミュオン顕微鏡は、例えばmmぐらいの大きさ、あるいは0.1 mmぐらいの大きさの半導体素子の中で実際どう電圧がかかっているのか、あるいはモーターの磁石の中でどういう磁場分布をしているのかを数十nmぐらいの分解能で見ることができる。しかも、量子干渉まで使うと非常に高い電磁場分解能が出て、トランジスタの中でどう電界が生じているか実際に見ることができる。そういうものを目標に開発を進めています。

あと、いま超低速ミュオンの話をしましたが、更に顕微鏡の光学系をこれからつくらなければいけません。ただ、ここは電子と非常にパラレルで、電子顕微鏡の技術をそのままミュオンに応用してやることができます。超伝導対物レンズの技術はだいたい前、1980年代にディートリッヒというドイツの女性科学者が開発に成功しています。

その技術は電子顕微鏡の大手メーカーの日本電子が受け継いだのですが、それを既に我々は日本電子のご厚意でただでもらってきて、それがすぐに使え

るような状態にあり、いまサイクロトロンで加速するところまではできました。

もう1つ、走査型に関しても少しだけコメントします。先ほど超低速ミュオンの話をしましたが、超低速化はいま1回だけ加速器で出てきたミュオンを物質で止めて、出てきたミュオニウムにレーザーを当てて低速化したやつをそのまま使っているわけですが、非常に性質がいいビームになったので、それを絞ってもう1回物質で止めて超低速化してやると、それだけで輝度がだいたい500倍ぐらいになります。

輝度というのは、ざっくり言えば絞ったときの数の密度みたいなもの。何回か繰り返せば30 nmぐらいまで絞れる。

超低速ミュオンを使ってやれば、このへんは足立先生のご専門ですが、いまの研究ではバルク⁷の μ SRの測定しかできないものが、超低速ミュオン顕微鏡では表面数nmとか非常に薄いところの、本当に表面の物理を観測するのに使える。更にそれを多段階冷却してやると、ごく表面だけでなく、照射範囲が数十nmと小さく絞れるので、非常に微量な試料、あるいはそれをスキャンすることによって μ SRのイメージングを撮ってやるということが可能になるはずで、透過型ミュオン顕微鏡と走査型ミュオン顕微鏡は光源を共用しますので、そういう研究開発もいま進めているところです。

寺田 理想的には数nmと言いましたが、いまだれぐらいまで絞れるのですか。

永谷 いまは1 mmです。

久保 ミュオン顕微鏡のアイデアは、永谷さんと三宅さんの2人で。

永谷 そうですね。基本的には三宅さんと一緒にやりましたが、KEKのだいたい前の機構長でした菅原寛孝先生も、いろいろ計算結果資料を送ってきてもらって、我々はこんなのをやっているといろいろやりとりしました。たぶんその3人ぐらいしかいなかったのではないのでしょうか。

そもそも強度があるミュオンがないとやろうとすら思わないので、たぶん三宅先生とか菅原先生。更に、たまたま私が加速器と電子顕微鏡の両方の技術に携わるようになって、一式知識があったので、そ

7 物体や流体のうち、界面に触れていない部分のこと。

れが組み合わさったことによって、2011年か2012年ぐらいから話として立ち上がって、いろいろ計算していくうちに、できるじゃないか、電子顕微鏡の技術をそのまま使えるじゃないか、光源も最初1段冷却だけれども、2~3段増やせば本当に意味がある顕微鏡になるじゃないかと。

更に、電磁場が見えるということに気づいたのが一番大きくて、これをやれば、まず光学的な、エレクトロニクスに対する応用も非常に広いし、それどころか、感度がものすごくいい。1ミクロンの中にある数十mVの電位差も測定できる感度を持っているので、これは量子干渉を使うからですが、その結果として脳とか神経細胞の活動電位も見えるようになるというわけで、応用範囲はすごく広い。

久保 顕微鏡として透過型で見るのもおもしろいけれども、足立さんがやっているような μ SR法という物質の性質を調べる方法をもものすごく小さい領域、あるいは表面にごく近いところから深いところまで、ミュオンのエネルギーを変えてやるといういろいろできるというのは、物性の人たちにはどうでしょうか。

足立 ええ。いま表面や、2つの異なる物質を張り合わせた境界である界面での物性にみんな結構注目しています。だから、いま言われた超低速ミュオンをまずぱっと何に使えるかなと思ったときに、超伝導ではないですが、トポロジカル絶縁体⁸というものがあります。

これは基本的に絶縁体なので普通に測ると電気を流さないですが、表面だけは金属になっているというのが理論で言われていて、実際にそれを示唆するような実験結果はいろいろなものがあります。表面の金属の部分ではスピン流といって、電子のスピン自体がぐるぐる表面だけ流れています。表面から3~4nmくらいの薄さのところではスピンが流れていると言われてはいますが、直接見る方法はいままでなかったし、だれも見ることがない。それを見る唯一の方法がおそらく超低速ミュオンです。超低速ミュオンを使えば、その3~4nmくらいの薄さのところにジャスト止めることができるので、そこでスピンが流れていればミュオンは絶対検出できますから、

8 その内部電子状態を量子力学的に記述する波動関数が持つトポロジカルな性質のために、表面に伝導状態が自然に現れる絶縁体。

超低速ミュオンがトポロジカル絶縁体の表面状態を見るほぼ唯一だといまのところ考えられている実験方法です。

もう1つは、超伝導のことで言うと、ある金属と絶縁体を選んで張り合わせると、ちょうど張合わせの境界、界面のところで超伝導が出るという物質があって、しかも、超伝導になる温度がかなり高い。絶縁体と金属ですから、何で界面だけ超伝導になるのかだれも分からないですし、調べるすべがなかったのです。だけど、おそらく超低速ミュオンを使ってその付近にだけミュオンを止めて測ることができれば、ダイレクトにそこでの超伝導の特性も見られるし、磁気的な情報も分かります。

あとは、表面ということのもう1つの例として、鉄を含む化合物の超伝導体がありますが、それをすごく薄くしていくとだいたい原子5~6個分くらい、もっと薄くすると T_c (超伝導転移温度)、超伝導になる温度が5~6倍に増えるという物質もあります。だけど、何せ薄すぎるので、いまの技術は使えない。超低速ミュオンができたときの物性研究への応用は非常に広いと思います。表面も界面もみんな知りたいところですが、界面なんて内側ですから見る方法がないし、顕微鏡でも見られないので、これは私を含めてかなりの人たちが期待している、待っているという状況があります。

久保 永谷さんの責任重大ですね (笑)。

足立 期待しています。

寺田 サイクロトロンはどれぐらいの大きさですか。

永谷 サイクロトロン本体は大型冷蔵庫ぐらいですが、ミュオンを加速するためにRF⁹、マイクロ波ほど周波数は高くない、108MHzの電磁波が必要で、それを起こすための機械が大型冷蔵庫2台ぐらいの感じですよ。

いま組み立てていて、サイクロトロンまでは完成しました。あとは、ビームを投入すれば、いつでも加速できる状態で、これが加速できたら世界初のミュオンの直接加速だということで、論文も書きたいしプレス発表もしたいというところですよ。

その後、顕微鏡本体のレンズ系統は基本的にそ

9 RF(Radio Frequency)。無線通信に使われる周波数のこと。「高周波」と表現されることもある。

ろっているんで、あとは架台を組み立てて顕微鏡本体をくみ上げて、まずは1ミクロンぐらいの分解能の顕微鏡を撮影して、それからどどんブラッシュアップしていきたいという研究です。

久保 夢のある話ですね。でも、こういう夢が実現しそうだと思えるようになったのは、もともとミュオンの施設が筑波にありましたが、そのときに比べていまはたぶん1000倍ぐらいビーム強度が強いですよね。僕がミュオンを始めた三十何年前と比べていまは1000倍ぐらいミュオンの強度が強いです。隕石の非破壊分析とかもできるようになりましたが、当時からいて、いまの新しい施設をつくり上げたという立場の下村さんから言うと。

下村 僕というよりは三宅さんが先頭に立ってやっていたんですが、隔世の感があるという。

私が就職した頃は、筑波でミュオンと中性子がブースターというやつを使ってやる頃で、そのときのエネルギーは1kW、2kWの世界で、いまはそれが1MWですから、ちょうど1000倍ぐらい大きくなっているということがあります。

ただ、あのときもいまも同じだと思いますが、ミュオンを使う研究なら何でもやれるという雰囲気があった。物性ももちろんやっていたし、ミュオンを使った核融合もやっていたし、超低速ミュオンは僕が就職したときからやっていて、三十何年かかっている。

いままさに、本当によく物性の研究に使えるような雰囲気まで持ってきたというところは、ある意味J-PARCができていろいろな若い人が本気になってだんだん実現してきたというところはあるかなと思います。

いまようやくすべて花開こうとしている感じはする。

久保 1000倍強くなったからできるようになった実験もたくさんあって、例えば文化財の非破壊検査。

—いま注目の文理融合研究—

下村 そうそう。最近ではミュオンを使って考古学上の史料、あるいは小判等の文化財の中の元素がどういう割合であって、どういう深さ分布をしているかというのがものすごくよく分かるようになってきていて、ミュオンが考古学でも信頼をだんだん得

つつあるという状況にもなってきています。

具体的な例としては、昔、江戸時代の小判は金ピカですが中は半分以上銀が入っていて、そのままのものすごく鈍い色になってしまって、あまり魅力がないから、色揚げという表面にある銀だけ溶かして金ピカに見せてしまう手法があるそうです。この手法は、いったいつ、だれが、どうやって開発したのかというのは、歴史学者にとって結構興味のあるお話らしいですが、調べていくと、どどん昔にさかのぼっていく感じがあって、まだ決着はついていません。そういうエキサイティングな状況もあります。

それから2022年、文理融合のシンポジウムで一般講演会を行いました。その中で、大阪大学の高橋京子先生¹⁰から、江戸時代の医学者の緒方洪庵が往診に行くときに持っていった箱の中に、ガラス瓶に入っているお薬が封を開けることができないままずっと保管されていて、このお薬は何なのか。それをミュオンを使うともの見事に調べることができたという話があって、これも結構いろいろな方の興味を引いたような結果になりました。ミュオンの非破壊分析は分かりやすいので、最近いろいろな結果が出てきていて、おもしろがっていただけていると思います。

久保 今回の塩化水銀が入っていたという話で、まだ他にも開かない瓶がいくつかあるという。

下村 いくつかありますね。でも、あれはあれでJ-PARCまで持ってくるのに非常に大変な手続きが必要です。

久保 いろいろな方がかなり貴重なものをJ-PARCに。

下村 だんだん信用は得るようになってきたというところはありますね。でも、それもこの5、6年。10年はたっていないですよ。

そこは僕らがミュオンの施設をつくったときは全く想像ができなかった世界で、もちろん僕、リュウグウの試料も、最初はそんなことできるわけじゃないと思っていたわけですよ。できたときは感動しました。

10 *Isotope News* 2021年12月号 (No.778) 「医療文化財「洪庵の開かずの薬瓶」のミュオンX線分析による薬物成分特定について」https://www.jrias.or.jp/pdf/2112_RIYOGIJUTSU_SATO_HOKA.pdf

同じように、薬瓶も、そんな難しいものを持ってこられるんですかと思っていたのができるようになったので、どんどんできるようになってきている。

今世紀に入ってからミュオンが非常に盛り上がっているなと思います。2020年ぐらいを境にこうなっている。

ちなみに、ミュオンが見つかったのは1938年から1939年で、あと十数年すると100年になります。だから、歴史を語っていい？

久保 もちろん。

—素粒子論は日本のお家芸—

下村 お年寄りだから少し言いたいことがあって(笑)。まず、ミュオンという粒子が見つかる前に、そういう粒子を予言しかけたという話があります。それは、湯川秀樹さんが π 中間子を予言したという話。そういうのはどこから見つかるかという、まず宇宙線だったわけですよね。それが π 中間子ではなくてミュオンだったというのが後になって分かりますが、それを見つけたのがアンダーソンという人になっています、外国では。

だけど、僕はせっかくこの分野をやってきたから絶対言っておきたいのは、日本の仁科先生がほぼ同時期にミュオンを見つけていらっしゃいます。論文でもたしか1年違いで報告がなされています。だから、ミュオンという粒子は、日本人が予言したものの脇で日本人が発見した粒子だ、くらいに僕らは思っているわけです。

東大の山崎敏光先生のグループがいろいろなミュオンの実験を始められて、最初にパークレーというアメリカの大学のサイクロトロンを使ってやりました。その後、1970年代にさっきおっしゃっていたような TRIUMF¹¹ や、あの頃は PSI¹² とか SIN と言っていたんですが、中間子工場ができて上がります。

それとほぼ同時期に筑波の施設ができて上がりましたが、筑波の施設は中間子工場に比べてビーム強度が100分の1でしかなかった。ただし、ビームの構造も全く違って、あちらはサイクロトロンが

ベースですから連続的にやってくるというものだったのが、我々のところは20 Hzでバンバンと出てくるパルス状のミュオンだった。

そういうミュオンを使って、いろいろ何でもやりなされと言っていたのが昔の東大の中間子の施設で、あの頃はいろいろなホラ話もたくさんあったのが、いままさに現実になってきている。30年たつと、言い続けると何でも現実的になるのだなと思っていますので、そういう意味でも感慨深いと思います。

それこそ宇宙線ミュオンでやられている透視が、もちろんピラミッドをやるには何 TeV という世界だから、そんなものすぐ加速器ではできないかもしれないけれども、ほどほどのサイズのやつだったら、永谷さんがやっているような顕微鏡プラス加速みたいなのを組み合わせることによって、十分なサイズのやつを可視化できて、産業利用なんかもできるかもしれません。

また、ミュオンを加速して研究するというのは、話の趣旨からずれるかもしれないけれども、ミュオンの素粒子としての性質そのものを調べるのものすごく注目されている技法です。僕らが一緒に素粒子原子核研究所でやっているように、超低速ミュオンから始めて加速して、そのミュオンを素粒子の実験にも使うし、顕微鏡にも使うという話がもうすぐちゃんといくだろうと思っています。これは30年と言わず、10年以内に全部いきたいなと思います。

久保 そうですね。ミュオンの基本的な性質を調べるというのは、いわゆる小林・益川理論という素粒子の標準理論がどこまで正しいかというところを調べる。また、それは、日本人がつくった理論がどこまで正しいかみたいな話を日本で検証することもできるというのが夢です。

下村 素粒子論は昔から日本のお家芸ですので、仁科先生ももともとそういうことをやっていた人です。

—月の研究のこれから—

久保 あと、寺田先生は、今日リュウグウのお話しかされていませんが、月の石とか月の専門家ですよ。

寺田 月もやっています。

久保 子供向けの絵本とか描いたりして。

11 カナダにある国立粒子加速器センター

12 パウル・シェラー研究所 (スイス)。EIR (スイス連邦原子炉研究所) と SIN (スイス原子核研究所) から成る。素粒子物理学研究の拠点であり、実験用の原子炉を保有する。

寺田 そうなんです。

久保 急にそういう話もしたいと思ったのは、分野の広がりというところでお話を聞かせていただきたいのですが。

寺田 JAXA が火星の衛星のフォボスに行ってサンプルを持って帰ってくるのは、国内の話なので、我々がリュウグウでできたからと一生懸命アピールすればチャンスがあるかなと思います。

このフォボスという衛星が火星からもげてできたのか、小惑星帯のものをたまたま捕まえたのかという2つのシナリオがありますが、フォボス試料をミュオンを使って非破壊で分析できれば決着がつかます。将来の分析を目指して学生さんが頑張っています。

久保 地球の月はどうですか。

寺田 はい。これから月の国際競争が激しくなります。近い将来月からまたサンプルリターンをすると思います。

これまでアポロ計画とルナ計画と中国の嫦娥計画で計10か所からサンプルを持って帰ってきています。そのほとんどが地球に向いている側の赤道付近±40~50℃ぐらいですが、いま研究者が注目しているのは極域です。月の極域は氷があるかもしれない、ドライアイスがあるかもしれない、アンモニアの氷があるかもしれないということが分かっているので、そこからサンプルを持って帰ってきて、空気にとらすことなく非破壊分析できるといいなと思います。

久保 例えばアンモニアや氷が見えるということで、何か重要なことが分かりそうですね。

寺田 これまでアポロ計画での知見をもとに「月には揮発性元素¹³がほぼない」と考えられてきましたが、極域から採取した試料に揮発性元素がどれぐらいあるかというのは知りたいですね。これはたぶん世界初の成果になるのではないかなというのがおもしろいところだと思います。

もう1ついいですか。普通、我々は隕石を破壊分

析します。破壊分析をすれば、当然精度は上がりますが、破壊分析に使う試料の量はすごく限られています。隕石の分析はより小さなもの、より微量なものを探するという方向に進んでいますが、ミュオンはむしろその逆ができて、平均組成を壊さずに測ることができるというところで、従来の分析方法とは違うベクトルで分析できるのが大きな特徴かなと思います。

μmとかnmで削って、そこから出てきたものを調べるという方向に何となく業界全体が行っていますが、むしろmmぐらいのものの平均組成（特に軽元素）を壊さずに調べるというのは実は難しかったりするのです、ミュオンで軽元素を非破壊で測れるというのはすごく強いと思います。

久保 ぜひそれは寺田先生が中心に実現させてもらいましょう。ちなみに森島さんは、いまもピラミッドをやっているんですか。

森島 やっています。先も話しましたがスキャンピラミッドというプロジェクトでピラミッドの調査をやっていて、2022年10月からアルバレがやったカフラーをあえて始めました。僕らの検出器は小さく、入口の上にある細い通路にも置けるので、アルバレが見ていた範囲よりも更に広い範囲で、見えないところも見る。

もう1つは、永嶺先生が火山を見られたような水平ミュオンを使って、ピラミッドの全方位を見ようとしています。それができてくると、アルバレの検証にもなりますし、更に新しい空洞探査にもなる。

更に、もう1つおもしろいのは、僕らはクフも計測しているので、クフとカフラーを比べられます。何を比べるかということ、ミュオンが透過してくる数の割合から密度を比べることができます。そうすると、いままでは外からしか見ていませんので中でどう積んでいるか分かりませんが、同じ石を使っても密度が違えば、積み方が違うということにもつながってきます。更に、3個目のメンカウラーもやろうという話になって（笑）、3大ピラミッド全部やるみたいなことをいま計画しています。

あとは、マヤのコパン遺跡のピラミッドでもやっています。更に、ティカル遺跡はマヤ文明の中でも一番大きな、かつ、一番有名な都市で、「スターウォーズ」のモデルになったそうです。そこにあるピラミッドをできればいいかなと思っています。

13 蒸気圧の高い元素。地球化学、宇宙化学の分野ではアルカリ金属、希ガスのほかVIII族、VIb族、Vb族（リンを除く）、IVb族（ケイ素を除く）、IIIb族（アルミニウムを除く）、IIb族、Ib族（金を除く）の元素全体を指すことが多い。揮発性元素に対し蒸気圧の低い元素を耐火性元素という。ここでいう「揮発性元素がほぼない」とは、「H₂OやCO、CO₂、NH₃などの分子が地球や火星と比べてほぼない」という意味。

特にマヤでおもしろいのは、マヤで見つかった空洞はほぼ確実に王墓です。何か見つけれればそこをピンポイントで確実に発掘してもらえるといたちでいま金沢大学の考古学の先生と一緒に計画しています。うまく見つければ2~3年。宇宙線なので、結構時間がかかるので、数か月ぐらいかけて測定します。

久保 そうか、早められない。

森島 でも、大きさによります。メンカウラーのピラミッドは60mぐらい、マヤ系のティカルも数十mとすごく小さいので短期間で分かります。これから考古学で遺跡を調べるのに使えるとなったら、原子核乾板はフィルムなので、置きたい放題でどこでも置けるし、外にピットという1mぐらいの穴を掘ってそこにいれると下から見上げるかたちになるので、同時にいろいろな遺跡で使ってもらって、どんどん新しいことが分かってきたらおもしろいと思います。

いまお話ししたような考古遺跡だけではなくて、地下空洞調査や資源探査も計画していますし、最近では樹木の中を見るというのもやっています。

高校生が大学に来て最先端の研究を一緒にやるというのがあったんです。割と手軽な対象として樹木がいいんじゃないかということでやってみました。木は宇宙線に対してスカスカすぎて見えにくいのではないかと思ったら、ものすごくよく見えました。

選んだ木は3mの杉の木で、昔、木の上部が腐って倒れたので中に空洞があるのではないかと思われますとネットで書いてあったので、神社の人に連絡してやらせていただくことになりました。樹木の中に空洞があるかを確認する方法は打音、たたいて音で調べる、針を刺して電流を流して調べる、もしくは γ 線を当てるぐらいしかありません。でもそれらはすべて弱点があって、まず、御神木等はたたけないし、針を刺せない。あと、 γ 線も放射線の線量を出さないといけない。いろいろ計算すると、宇宙線を使ったら見えそうだということで、そこに実際に機材を持って行って、1週間ぐらい置いておいたら、見事に3mの木の中に2mぐらいの空洞があるのが見えました。追加でドローンを使って上から見たら、本当に穴が開いていました。

ちゃんと確認と実証までできましたし、1週間かけて見ましたが、もっと早く1日ぐらいで見られる

ことも分かったので、樹木を診断するのに使えますよね。

おもしろいテーマはあるし、ある程度できるとなったら、あとはどんどん広めたいわけですよね。ただ、本当に手が回らないので、スタートアップみたいなことも含めてやり方も考えないといけないと思います。

読み取り装置が1つの鍵を握っていますが、そういう方向に行こうと思ったときには、読み取り装置自体いま大学に1台しかないの、その調子が悪くなると全体のプロジェクトが……。

世界に1台みたいな装置なので、いま2台目もつくってはいますが、1台目が主力です。装置側の問題やフィルムをつくるというのもセットでクリアすれば、いろいろなものを調査するところには原子核乾板をばらまいていくという使い方はすごくおもしろいだろうと思います。

寺田 原子核乾板はどんなものですか。使い捨てですか。

森島 原子核乾板は写真フィルムと同じ材料でできていますので、写真乳剤をプラスチックの板に塗ったものです。なので、光が当たると感光するのと同じで、宇宙線がそこを通ると感光して記録される。現像したものを後から見ることによって中の様子を調べられる。使い捨てというか、情報を1回記録して定着してしまったら再利用はできないというかたちです。

フィルム代はいまは高いですが、流通してしまえばすごく安く使えるので、X線フィルムでもたぶんいまそんなに高くないです。なので、本当にうまくこういうのが社会的に使われるようになったら、たぶんフィルムはコスト的にはそんなに高くない。

寺田 例えば古墳を1個測ろうと思ったらおいくらぐらい？

森島 いまだと、大きさにもよりますが、たぶん規模的には100万円、200万円ぐらいだと思います。もちろん読み取り装置がある前提ですが、フィルムとかを考えたら、たぶんそれぐらいかかってしまうという。

下村 もう1つ大事なのは、小中高生がそれを見られるところまで持っていきたいというのがあって、そこがもううまくつながったら、乾板でやるのはすごく魅力的です。

久保 考古遺物や木だけではなくて、例えば橋とかコンクリート製のものも見えるわけですよ。

森島 例えば昔の橋とかは軽量化するために中に穴を開けてある橋がありますが、橋の下から原子核乾板を置いて見ると、中に開いた穴がきれいに見えました。

久保 いま土木構造物の老朽化が問題になっているから、そういうことまでやがて使えるようになれば。

森島 土木構造物は土でできているので、水が土の中にしみ込んだり出たりするときに土が出たりする。そうすると、その部分の密度が少なくなるというのが結構問題になっていて、そういうところの密度を宇宙線で調べられますし、最悪の場合は穴が開いているということも分かります。特に海岸道路は結構水がかかって陥没事故が年間数件起きますので、そういうところを見るのに使えるかもしれないというのは自治体と話をしています。

トンネル工事をしながら調べるという需要もありますね。それはリアルタイムで見られたほうがいいかもしれませんが、一方で、時間がたって変わってくる変化を見たりフィルムは同じところに置いて1か月後に交換とかすればいいので割と適しています。

久保 放射線の社会利用ということで。

これはぜひアイソトープ協会さん。読み取り装置を1台ここに置いていただければ(笑)。

あと、ソフトエラーの話もしておかないと。

下村 自動車の自動運転をやるときに、宇宙から降ってくる粒子のせいでそこにある半導体デバイスが急に動作不良になってしまうということがあったら、命がけだからものすごく嫌がる。

飛行機を自動運転していると、突然急降下したなんていう話もあるらしいですが、その原因は宇宙から降ってくる中性子もありますが、ミュオンも結構悪さをしているのではないかという話が出てきます。そういうソフトエラーの原因としての宇宙線ミュオンの性質、あるいはそれが何で起きるのか調べようと。

宇宙線ミュオンが何十年、何百年とずっと調べられてきましたが、我々の施設だったら、例えば宇宙線ミュオンの1億~10億倍の強度で出せて加速試験ができるので、いまそういうニーズもだんだん広

がってきています。

—ミュオンを取り巻く世界の動向—

久保 本当にいろいろな分野に広がっていて、研究者もどんどん増えています。

1つ言っておかないといけないのが、たまたま今日の6人は男性しかいませんが、女性の研究者も結構ミュオンの業界にはいて、かなりのパーセンテージでいると思います。

下村 明らかに女性は増えていますよね。大学院生の方にもいらっしゃるし、特に僕が目しているのは、東南アジアの方は、足立さんも一緒に行ってくださいしていることもあるけれども、ものすごく女性が多いです。ものすごい元気。

足立 私がかかわっているのはインドネシア、マレーシアの学生さんですが、あちらは物理はむしろ女性のほうが多い。

大学院進学は男性よりも女性のほうが多いので、熱意ある女子たちが日本に来て、例えばJ-PARCで実験したり、理化学研究所の研究室に滞在したりしていますので、全然日本と世界は率が違う。

一般的に女性のほうがモチベーションが高いという感じはします。

久保 今日出たいろいろな話題は、いろいろな人の興味を引いているので、若い人に興味を持ってもらって、どんどん参入していただけたら。

下村 そうですね。

久保 ミュオンが出る施設のお話を補足しますと、人工的にミュオンをつくり出しているいろいろな応用的なことに使っている施設は世界中に5か所もあるというか、5か所しかないと言うべきか。それが日本には東海村のJ-PARCと大阪大学のRCNPの2か所、あとはカナダとスイスとイギリスにあって、わずかその5か所で世界中の人工的なミュオンを使って物質を調べる人たちはやるしかないということですね。たまたま日本は本当に恵まれていて、しかも、その2つの施設でつくられるミュオンのビームの性質が全然違って、できることが違います。日本は本当にいい条件だと思います。また世界に5か所しかないのも、お互いの交流が非常に盛んであるというのが特徴だと思います。

下村 コロナで止まってしまいましたが、行っ

たり来たりするような。

久保 お互いのものすごく秘密にしていることはあるかもしれないけれども、いろいろなことの研究結果はだいたい知っているし、ミュオンの実験施設はどんな実験をしているか公開されているし、お互いに相手のところに行って実験したりもしているし、非常に世界的にも交流が盛んだということ、特に非破壊分析は他の研究所もこれから始めるという。

寺田 もうスイスのパウル・シェラー研究所は始めていますね。

久保 たぶん5か所全部でそういう非破壊分析を始めるということになっているので。宇宙線ミュオンの人たちは、日本以外でも結構いますよね。

森島 結構いますね。本当に最近増えてきた印象がありますが、イタリアはすごく多いですね。イタリアはこういうのをいろいろやる素粒子の実験グループが結構あるので、まさに僕らと同じぐらい、シンチレーション検出器を使って火山を見たり、堤防を見たり、遺跡もやったり。

彼らと一緒にナポリの地下遺跡で原子核乾板を使ってやりました。ナポリは地下10mぐらいのところにギリシャ時代の遺跡が埋まっていて、いったん埋まってしまった後、割と最近、地下に穴を掘って地下利用した時代があって、そのときにたまたま埋まっているお墓に当たったんです。何も調べられてない場所、たまたま見つからない場所があって、そこにまだ見つからないお墓があるのではないかとずっと前から言われていたので、そこをミュオンを使って調べられないかという話が来て、ナポリ大学と一緒にやりました。

それができたのは、地下の一番下に釘を打って生ハムをつるした生ハムの貯蔵庫の跡があったからです。貯蔵庫に台があったので、そこにフィルムを置いて見たら、地下の構造が全部きれいに見えて、お墓があるのではないかとされたところに本当に空間が見つかりました。それが1個確実にあることが分かってきたので、そこを発掘できると、だれも開けてない1000年ぐらい前のものが見えてくるかもしれないということも最近ありました。

日本はミュオンのイメージングの歴史があるので、数を見たらすごく盛んですし、ヨーロッパの国も結構興味を持っていて、火山があるところはだいたいどこでもやっているの、ヨーロッパと日本が

いますごく強いかなと思います。

アメリカではミュオンの透過型はあまり聞かなくて、今回話に出ませんでした。ミュオンの散乱角を測って、大きな散乱角が出る場合はそこに重いものがあるという散乱型ミュオグラフィがすごく進んでいて、アリゾナとかで国防に使われています。

久保 重いものというのは、つまり、原子番号の大きなものという意味の重いものですね。そんなものを運んでいるかどうかというのを。

森島 それを国から持ち出させないとか国防的なところ。あと、キャスクとって、燃料を保管するところの中にちゃんと入っているかみたいなことにも使おうとしています。海外では散乱型、透過型のミュオンのイメージングでスタートアップがいくつかあります。日本にはまだない。

だから、そこは1つやりたいという気はありますが。海外ではミュオンのスタートアップに結構お金が集まっていて、そういうところに乗り遅れるのもよくない。

下村 宇宙線ミュオンのイメージングはもともと日本人が始めたものだと思っているので、何かもつたいないなど。

森島 海外は早い。素粒子の研究者はそういうスタートアップを始めています。いろいろな専門分野の人たちをスタートアップに集めて、検出器を地下にボーリングで埋めて資源を探索することまでやっている会社もカナダにあります。いろいろなところがどんどん並行して、いろいろな方向性で会社が立ち上がっています。

最近企業もいろいろ本当にすごいスピードで参入してきている気がします。

原子核乾板ではないものでいろいろなスタートアップが立ち上がっている。逆に原子核乾板は小さいコミュニティーになってしまっていますね。本当に名古屋大学ぐらいしかやっておらず、そこは強みでもあり弱みでもあるので、強みにしていき、一気に広げないといけない。

久保 その分野が広がってきて、文理融合ということになってくるというのはありますね。加速器の人たちが電子を加速すると放射光が出ますという話から、いまは放射光X線の利用がどこでも普通になったという。ミュオンもその先にもっと広がるといいと思います。(終わり)

ねえ ねえ はかせ、かぐや姫は どうやって 月に帰ったの？ ～満月に吹く地球の風のおはなし～



新春座談会の中で、登壇者である寺田健太郎先生が絵本をお書きになっているとのお話がありました（14ページ参照）。それが、こちらの大阪大学出版会から発行されている、はかせのわくわく科学絵本「ねえねえはかせ、かぐや姫はどうやって月に帰ったの？～満月に吹く地球の風のおはなし～」です。

お話は、満月の夜、「かぐや姫」の絵本を読んでいた小学4年生のゆりちゃんが「かぐや姫は無事に月に帰れたのかな？」と考えるところから始まります。すると、大学の先生のけんたろうはかせが、満月のときだけ、地球の風が月に酸素を運んでいたことを教えます。すい星みたいに、じつは地球にも月までとどく「しっぽ」があるのです。他にも、かぐや姫が暮らせるほど、月に酸素はあるのか？そもそも月はどのくらい遠くにあって、地球にとってどんな存在なのか？など、ゆりちゃんの質問に答える会話形式で物語は進んでいきます。

寺田先生のねえねえはかせシリーズは他にも

◆詳細はこちら



「ねえねえはかせ、月のうさぎは何さいなの？」が発行されており、どちらも可愛いイラストで、小学生でも非常に理解しやすい絵本です。お子様、お孫様、お正月に集まる甥っ子姪っ子さんへのお年玉としてはいかがでしょうか？

「これから月の国際競争が激しくなる」と語る寺田先生。本シリーズを読めば、月に関する知識が学べること間違いなしです！



❖ Isotope News 読者アンケート ❖

今後の誌面作りの参考のため、アンケートにご協力をお願いいたします。《目安時間：約3分》

◎回答方法：右のQRコードからアクセスし、入力をお願いいたします。

(<https://forms.gle/sXxxGCBCtf2Z93XeA>)

◎締 切：2024年2月16日(金)

郵送またはFAXでの回答希望の場合、22ページをご参照ください。

