新春座談会

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―

迎春
フルバージョン

登壇者　寺田健太郎氏[1]
足立匡氏[2]
森島邦博氏[3]
永谷幸則氏[4]
下村浩一郎氏[4]
司会者　久保謙哉氏[5]

【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 年から実験をしているので，37 年か。そんなにたちますね。もともとは化学の出身なので，放射化学というところでミュオンの化学的挙動というのをずっとやっていました。それもいま少しやっていますが，最近は，自分が実験しなくても，ここの若い人たち皆さんにやっていただけるので（笑），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して，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，久保さんより 4 年ぐらい後ですので，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。よろしくお願いします。

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，μSR 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。私の 1 つ上の先輩が μSR を用いた研究で学位を取っ

ミュオンとは？

素粒子の一つでレプトン（軽粒子）の仲間に属し，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つくりだすか，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。

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　教学部アーツ・サイエンス学科

寺 田 健 太 郎 氏

足 立 匡 氏

たので，データ等は見てはいましたが，どんな実験なのか，どれくらい大変？面白い？等はわからず，ともかく参加したのを覚えています。だから，今日まで 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。

ということで，学生時代はもちろんミュオンが自分の主たる研究のプローブになるなんて思ってもおらず（笑），それまで電気抵抗等の結構静的な実験が多く，こういう動的（ダイナミクス）な実験，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。よろしくお願いします。

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います。実は，ちゃんとミュオン実験を始めたのはたかだかこの 5 年，6 年目に入ったというところでして，もともと私は素粒子理論の研究をしていて，そもそも実験屋ですらありませんでした。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始めまして，そこで線形加速器を使った電子顕微鏡等の研究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「電子顕微鏡があるの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，じゃあこれで科研費だ」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。実験屋になって十数年，ミュオンを本格的に始めて 6 年ですが，すごく新しいことをやれているのでとてもありがたいところにいると思っています。

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ことをやっていました。

ドクターを取った後で，素粒子よりも宇宙線にもともと興味があったので，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，基礎研究よりも，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，最初の頃は，ミュオンに限らず，中性子等いろいろ原子核乾板で観測していました。2011 年に福島第一原発の事故が起きたときに，原子核乾板を使って原子炉の中を見るということを私たち名古屋大学の中でも考えました。KEK の髙﨑史彦先生も別のチームでやられました。そこから僕は本格的に宇宙線を使ったミュオンの研究を始めました。

ミュオンを使った宇宙線の研究がおもしろそうだ

1　古くから素粒子実験に使われてきた検出器で，写真フィルムの一種

森　島　邦　博　氏

永　谷　幸　則　氏

と思ったのは，アルバレ[2]が1970年ぐらいにピラミッドを透視したというのを大学院のときに知って，もともとピラミッド等の遺跡に興味があったので，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。

なので，いま言ったようにミュオンを使って原子炉やピラミッド，他のことにも使えるというところで，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，就職するときに，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きいて，ミュオンで隕石を測ってみ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ということが非常によくわかりましたが，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つくり出すか，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（**図1**）。

それが，最近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のと，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。

森島　そうですね。

久保　人工的なものはオンにしたりオフにしたりできて，自分の好きなときに使える。逆に，宇宙線ミュオンは常に飛んできているから待っていればいいけれども，オンオフできない。

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が偏極すると言っていいんだっけ，e+だとそれでいいかな。100％偏極するということ

2　ルイス・ウォルター・アルヴァレズ（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も有名である。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。

下　村　浩　一　郎　氏

久　保　謙　哉　氏

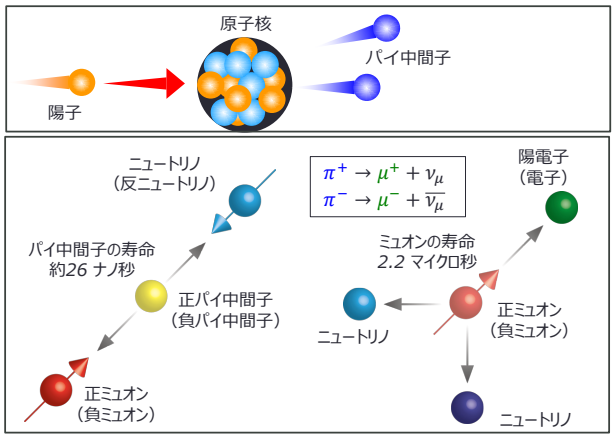

図 1　高速陽子を原子核に照射してパイ中間子を生成

パイ中間子が壊変してミュオンが生成する。ミュオンとニュートリノの矢印はスピン方向を表す（久保氏提供）

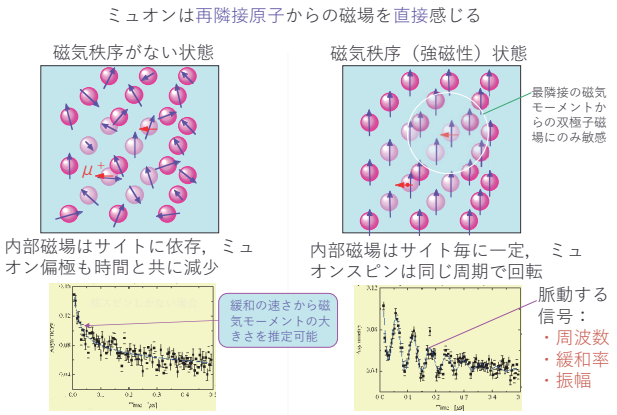

図 2　μSR スペクトル

物質内部に一様な磁場があるかどうか，その大きさが時間変動していないかどうかが分かる（久保氏提供）

が起こっていて，それもまた自然界の不思議ですが，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ると，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という方法があって，それが μSR 法というやつで，人工ミュオンを使う非常に大きな研究の 1 つです（**図 2**）。

—μSR 法の研究—

久保　皆さんそれぞれもう少し詳しいお話をしていただけると思います。じゃあ，スピンの話に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，物質の磁気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，μSR という方法です。

先ほど申しましたように，超伝導材料の性質，特に何で超伝導になるかというメカニズムの解明が私の研究の主たるところです。私が扱っている超伝導体はいろいろありますが，物質中のスピンが超伝導の源というか関係しているかもしれない材料，例えば比較的高い温度で超伝導になるのは高温超伝導材料といいますが，そういう材料の磁気的性質を調べるのにミュオンを使っています。

超伝導のことで言いますと，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。圧力をかけずに室温で超伝導を示す物質を開発するために，いま私たちが知っている物質の中で圧力をかけずに比較的高い温度で超伝導になるもののメカニズムを知り

たい。どうやったら高い温度で超伝導になるのか。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かというと，超伝導になると抵抗ゼロで電気が流れますが，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。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，たぶん片手で数えられるぐらいしかないですが，その中の有力な 1 つが μSR 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でくるくる回ります。この現象から磁場侵入長というもの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，μSR はなくてはならない実験手法になっています。

あとは，μSR 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。超伝導体よりも磁性体に対して μSR を使うことのほうがたぶん多いと思います。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お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，μSR 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。

μSR は実験手法としてぱっととっつきやすいものです。あまり試料の形態によらないからです。すごく詳しい物性を知ろうと思ったら単結晶等のクオリティーが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，μSR は非常に有力ということもあって，私はずっとやってきたというのもあります。

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。私は専門ではないですが，リチウムイオン電池ではリチウムが正極と負極の間を動くことで電圧が発生しますが，リチウムイオンの動きをミュオンを介してとらえようという方法。あとは，電池の劣化の原因を調べようというときに，ミュオンを打ち込むエネルギーをいろいろ変えると電池の中の見たい位置に止めることができるので，例えば電池の内部で金属リチウムができてきて，それが劣化の要因になっているなんていう最近の研究もあります。ですから，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。

あとは，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が専門ですので，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時々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 ぐらいの重さしかないですが，ミュオニウムの電子状態はすごく水素原子に似ているのとほぼ同じ。だから，簡単に言うと，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まず前提としてあります。

真空中に出たミュオニウムのほうは，また永谷さんにお話ししていただくとして，そのミュオニウムというやつは何でおもしろいのというと，半導体はいろいろありますが，例えばいま青色半導体，窒化ガリウムはものすごく有名で，ノーベル賞を取ったようなやつがありますが，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。何でかというと，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が，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型の原因になることがわかったという話がありまして，その界隈ではそれなりにおもしろがられている結果がミュオンから出ているということになります。

足立　ありがとうございます。無茶振りしてすみません。

久保　正の電荷を持ったミュオンの周りを電子が回っているということで。ちょうど陽子の周りを電子が回っている水素原子と同じように振る舞うという。ミュオンによってその物性的な研究がされているという話ですね。

下村　そういうことですね。

久保　足立先生から，超伝導のメカニズムの研究というお話がありましたが，私の理解では，既に解明されている超伝導，要するにBCS理論[3]で説明できる超伝導は大昔からあったけれども，1985年か1986年ぐらいに新しい材料ができて，それは新しいというか，もう三十何年も前ですよね。

足立　そうですね。

久保　いまだにそのメカニズムが分からないということですか。

足立　分かったという人はほぼいない。いま久保先生がおっしゃられたのは酸化物の超伝導材料で，スピンを持つ銅を含んでいるので，そのスピンが電子対を作るのに深くかかわっているのではないかというのが有力な考えとしてあります。そういうこともあって，銅酸化物の高温超伝導材料の研究にμSRがふんだんに使われているという状況があります。もちろん分かってきた部分もあるけれども，まだ完全に解明できたところまではいっていないという状況ですね。

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　もちろんおっしゃるとおりで，敏感な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。そこは結構気を使ってシールドをするなり，測定中にモニターするなりということをやりますが，そういうケアさえしていれば，現存の，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ところも非常に重要な部分になっていますね。

久保　じゃあ，話はがらっと変わって，寺田先生に，いまのスピンとは関係ない話ですが，ご自身の研究について話をしていただけますか。

―ミュオンを使った非破壊分析―

寺田　僕は，いまどういう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。天文学をやっている人も，それから，素粒子，原子核をやっている人もみんな同じ言葉を使っていますが，隕石の分析の方がより根源に迫れるのではないかなと考えています。

というのは，遠くの星の元素合成を調べても，我々の体がどうやってできたのかということは分からないわけです。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は分からないからです。それを調べようと思うと，遠くの星や原子核実験ではなくて，まさに我々の体や太陽系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研究をやっています。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で，それが混ざって僕らの体ができているということが，実際に隕石を調べることで分かっています。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。そういうことにすごくロマ

3　1957年に米国，イリノイ大学のジョン・バーディーン，レオン・クーパー，ジョン・ロバート・シュリーファーの三人によって提唱された。三人の名前の頭文字からBCSと付けられた。この理論のモデルによると超伝導転移温度や比熱等が，式により表される。1911年の超伝導現象発見以来，初めてこの現象を微視的に説明した理論。

ンを感じていて，この 30 年ぐらい隕石の同位体分析というのをやってきています。

このように隕石は太陽系初期や誕生前のことが分かりますが，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，本当に太陽系初期の生の情報が得られているのかどうかは注意が必要です。そういう意味で，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，日本は一生懸命やっているというわけです。

そういう研究背景もあり，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（**図 3**）。といいますのは，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するからです。隕石はたくさんありますから破壊分析をしても全然構いませんが，小惑星物質は非常に貴重で，特にはやぶさ一号機なんかは目で見えないような粒が 1500 粒というぐらいのレベルでしたので，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他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。

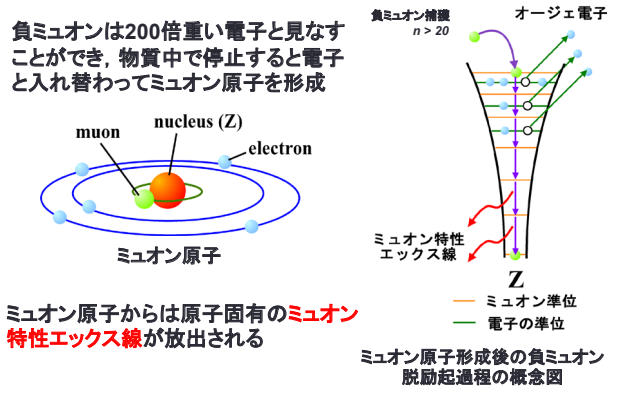

図 3　電子 X 線の 200 倍のエネルギーをもつミュオン特性 X 線の放出

原子番号の小さな元素も試料を破壊せずに分析可能。動画は http://jmeson.org/muon-video/（久保氏提供）

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か，窒素が見えそうだ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 5.4 g 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。バックグラウンドのノイズに埋もれてしまって正確な濃度が出ないのではないか，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」とおっしゃっていたので，我々としても，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何となくのプレッシャーが，何となくじゃないですね（笑），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ました。

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ときは，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）[4] 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。

今日は CI 隕石を持ってきました（**写真 1**）。さすがにリュウグウは持ってこれません（笑）。この隕石とめちゃくちゃ似ているというのが小惑星リュウグウの分析結果です。小惑星リュウグウは黒い，黒

4　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）の中でも特に気化しやすい成分を含んでいる隕石グループ。

座談会風景①（寺田氏，久保氏）

写真 1　C1 隕石

いと言われていますが，実際に黒いというのが見て取れると思います。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を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よね。

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。

久保　そうなんですね。

寺田　久保さんたちと一緒に実験していて思ったのは，ミュオンというのは確かに学生時代に聞いていましたが，まじめに勉強していなかったので，いま頃になって当時もっと原子核物理について勉強しておけばよかったということと，出てくる X 線を分析する技術はまさに学生時代の X 線天文学でやっていた知識が使えるなということです。実際 30 年前の学生時代に携わっていた X 線天文学の高橋忠幸先生らと，いま共同研究をしているので，いろいろ時代はめぐってくるんだなと感じています。また 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。

座談会風景②

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，その話を少ししていただいたらいいかなと。

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ましたが，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まして，炭素が入っている隕石だけでも10種類ぐらいあるので，どのタイプか，それとも全く新しいタイプなのかというのが興味の1つでしたが，実際に分析をしてみると，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。このCI隕石は数ある隕石のなかでも揮発性元素[5]が多いことから，太陽系で最も始原的で，太陽系固体物質の基準とされてきた隕石です。ところが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。ということで，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。

―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ぶつかって，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，相対論的効果で2.2マイクロ秒という寿命がかなり長くなって，地表まで降り注いでくる。降り注いでくるミュオンは結構いろいろなエネルギーのものがあります。例えば水であれば水深10 kmぐ

5　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VIIb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。

らい通りますが，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，X 線のレントゲン撮影と同じように，ミュオンを使うことによって，X 線レントゲン撮影だと最大でも 1 m ぐらいまでしか通らないようなものを数 km までの厚さの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研究で，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初めて 2 次元のイメージを撮るというアイデアを提案して，実際実験しています。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 つのピラミッドが並んでいますが，その中のカフラー王のピラミッドをアルバレは調べました。

なぜそれを調べたかというと，クフ王のピラミッドとカフラー王のピラミッドは隣に並んでいて，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いて，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，カフラー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。考古学をやっている人はみんなそう思うかもしれませんが，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，宇宙線がどの方向からどれぐらい飛来しているか分析して，もし仮に空洞があれば，宇宙線はそこの方向からたくさん通り抜けてくるはずということで，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いったん終わりました。

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）がアルバレとは別の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と，日本でも結構宇宙線のイメージングの研究が進んでいたと思います。その流れの中で，さっきも言いましたが，僕らや KEK の高﨑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，宇宙線がピラミッドの中を通っていく中で，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（**写真 2**）。

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

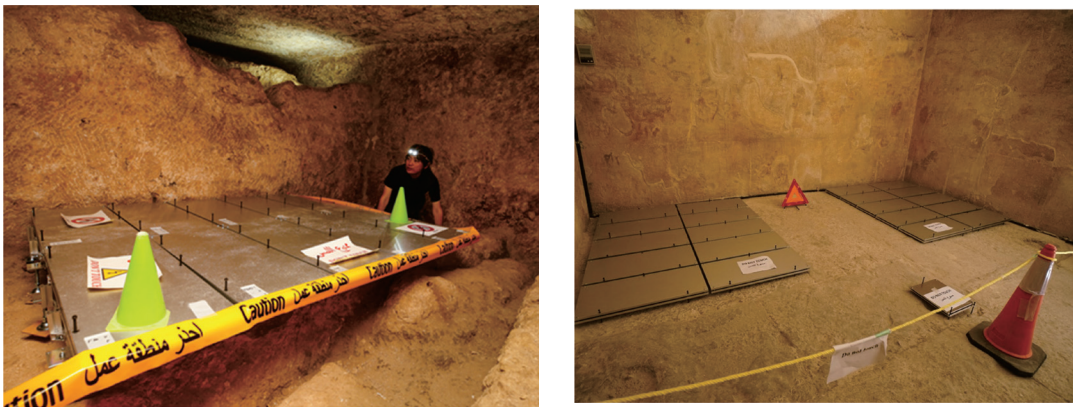

写真 2　ピラミッド内で原子核乾板を設置している森島氏
アルミ板の中に原子核乾板が搭載されている（森島氏提供）

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誰も言っておらず，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，初めてピラミッドの本当に奥のほうにある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，ピラミッドの入口付近の小さい通路状の空間をファイバースコープで確認しました。確認したという言い方をしたのは，巨大な空間を見つける前に，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ので，その調査を 2019 年に大規模に行いました。具体的には，私たちは原子核乾板という写真フィルム型の装置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，いろいろな方向からその空間を撮影する，要するに，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という仮定は入れていますが，直方体だったら 2 m×2 m×9 m だというのを 10 cm 以下の精度で出しました。

ピラミッドの表面から 80 cm，石 1 枚隔てたすごく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，その空間を見る方法はないか考えて，空間の床面の場所とピラミッドの形を見たら，ピラミッドのくぼんでいるところから床面まで 20 cm ぐらいで，石と石のすき間から 20〜30 cm 行けば空間に届くことがわかりました。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（**写真 3**）。

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ですが，現実的な実証結果を一緒に見てもらったら，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

写真 3　ピラミッド内に検出器（原子核乾板）を設置している様子
（森島氏提供）

（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。いま宇宙線はそういう方向に活用されています。

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の一種なので，宇宙線を常に記録し続けて，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。ピラミッドの中の通路は 1 m×1 m ぐらいしかなく狭いので，そこで装置を好きな方向に向けられるとなると，相当小さくないとだめです。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うことで，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，もともと永嶺先生がやられていたようなアイデアで火山の動画を撮影するという方法で，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 を一生懸命測っているのと，何 m，数十 m ？

森島　クフ王は 140 m。

久保　莫大な大きさのものも，非破壊分析しているということですね。原子核乾板を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

座談会風景③

やってないという。

森島　そうですね。原子核乾板自体（**写真 4**）は本当に古い技術なので，写真フィルムでも放射線が映ることが分かってからずっと使われている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行きました。宇宙線や放射線を検出する方法は，さっきのシンチレーション検出器やガス検出器のようにもっと電気的な信号に変換して読み出すというものに置き換わっていきました。

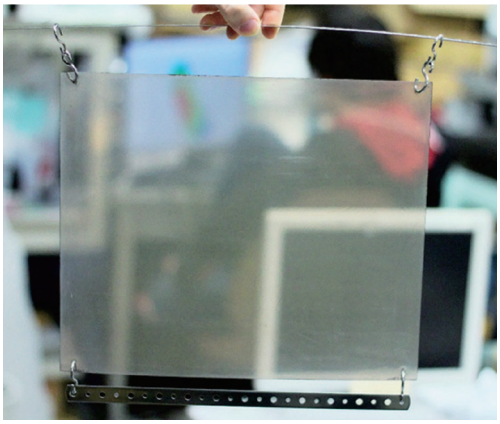

写真 4　原子核乾板（透明なシート状）
（森島氏提供）

僕らの名古屋大学の研究グループは，原子核乾板をずっと活用し続けてきた研究グループなので，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，そうすることによって，高い解像度を生かした素粒子の研究に使ってきました。原子核乾板自体はもともとみんな誰でも使っていましたが，それが使われなくなった中で，読み取り装置と僕らは呼んでいますが，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，実用化していくというところでずっとやってきました。

また，昔は原子核乾板を写真フィルムの会社がつくっていたので，どこでも入手して使えましたが，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

座談会風景④（下村氏，足立氏，永谷氏）

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イルムの技術者の方につく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。

いま名古屋大学は読み取る速度も世界で一番優れた技術を持っていて，更に，原子核乾板本体も名古屋大学だけがつくれる状態にあるので，企業でもできないような写真乳剤を使った放射線検出器の開発をやっています。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　でも，ピラミッドの研究とかで最近有名になってきているので，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，この技術を社会的に使えるものにする，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ところまでいろいろ考えています。最近は企業からの問合わせで，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が，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う話を始めて，協力してくれと言われたので協力していました。最初は森島さんたちの乾板を使うという話もしていましたが，あれは名古屋大でしかできませんよという話になって（笑），結局オリジナルのシンチレータで見る方向に行きました。

そのときおもしろかったのは，カミオカンデ[6]まで飛ばすニュートリノも見るけれども，前のほうでニュートリノがどのぐ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みたいなのがあって，それがお古になったわけです。そのお

6　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

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。もっと驚きなのは，その組立て作業を全部小学生，中学生にやらせている。

森島　高校生でもない。

下村　もちろん高校生もいますが，驚いたのは，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，MPPC[7] というやつを付けて，光シールドして，回路は出来合いですが，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。

久保　小学生が（笑）！

下村　いま小学生はものすごいです。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 RCNP[8] の加速器でミュオンをつくろうと思うと，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 週間ぐ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 日ぐらいまで延ばしてもらった。

久保　そう。6 月の終わりというのが普通の加速器のシャットダウンで，それから夏のメンテナンスに入るところ，2 週間ぐらい特別に延ばしてもらったということがあって，そのためにどれぐ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（笑）。日本刀用意していましたよね（笑）。

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ちゃめ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。

ビームライン 1 本につき 300 万円の課金なので，例えば MLF だけで 23 本ぐらいあって，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　それは，結果が出なかったら切腹ですね（笑）。

久保　でも，リュウグウのサンプルをやるということを理由にそれだけのことをしていただいた。

下村　それはそうです。あのときは，センター長の決断というやつですね。

久保　その話はいま知りました。みんなはその情報を？

寺田　延ばしたのは知っていましたけれども，値段とかは。

足立　知らないほうがエンジョイできて（笑）。

下村　知らないほうがいいです。

久保　でも結果がちゃんと出たので。

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　ミュオンが長い距離を透過できるというのがすごく重要な点で，電子だと長い距離で高いエネルギーのものを通していると途中で光に変わってしまいます。あと，逆に，陽子だと原子核反応が起こってしまって全然長い距離は飛べないので，ミュオンがそこで使えるというのは本当にすばらしいアイデアだと思います。そんなミュオンの透過力的なことを使っている永谷さん，顕微鏡の話を。

―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 μSR 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。いままであるミュ

7　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
8　大阪大学　核物理研究センター

オンを使ったいろいろな測定技術を何でもかんでも顕微鏡イメージングに応用して，世の中の役に立てよう，あるいは新しいサイエンスを始めようというのが基本的なモチベーションです。ミュオン顕微鏡は，すごく大ざっぱに分けると，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。

まず透過型ミュオン顕微鏡ですが，ミュオンは数十 MeV 以上に加速してあげると非常に物をよく透過し，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します。非常に幸運なことに，我々は加速器を使って大量のミュオンをつくることができる。そして，これまで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を我々は既に利用できるようになっています。

ここでミュオニウムの話を少ししなければいけませんが，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，正のミュオンが電子を捕獲して，正のミュオンの周りを負の電子がくるくる回っているミュオニウムと呼ばれるものになります。水素原子様の物質というか，そのようなもの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，具体的には加熱タングステンであれば 0.2 eV，あるいは室温のシリカゲルであれば 30 meV とか非常に低いエネルギーで湧き上がってきます。ここからは大変な努力が必要となりますが，ライマン α 光[9]とか 1s2s の光とか何種類か方法がありますが，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，それを再加速してやると，加速しても Δ E，エネルギー分布が広がることがありませんので，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光源として使います。

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加速。まずプロトタイプとして 5 MeV まで加速して，物を透過観察してみようと。直接イメージングする手法として，電子顕微鏡は分解能が 1 nm をはるかに切るような非常に高い分解能が得られる装置ではありますが，残念ながら，先ほどの電子の透過能の限界により，どう頑張っても 1 ミクロン厚さ，世界最高の加速エネルギー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観察できない。それ以上厚いものを見ると，基本的に真っ暗になって何も見えないですが，ミュオンであれば頑張れば 1 mm 厚さぐらいまで透過できますし，もともと高い運動量を持っていてそんなに散乱されないので，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。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のですが，例えば mm 厚さのものを数十 nm 分解能で見たいということは電子顕微鏡ではできないですが，世の中にはそれくらいのものが見えると非常にうれしい分野がたくさんあります（**図 4**）。

ミュオンの基本的な性質として，スピンを持っています，もう 1 つ重要な性質として，電荷を持っています。電荷を持っているということは，磁場，あるいは電場があれば軌道が曲げられます。あるいは，もっと高感度で見たい場合は，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う現象が知られています。それを使うと，例えば mm とか cm までの厚い物質の中の電場，あるいは磁場，あるいはその両方を観ることができ，更に試料を回して観ることによって，トモグラフィー，すなわち CT スキャンとして，物質の中の電磁場を立体構造として見ること

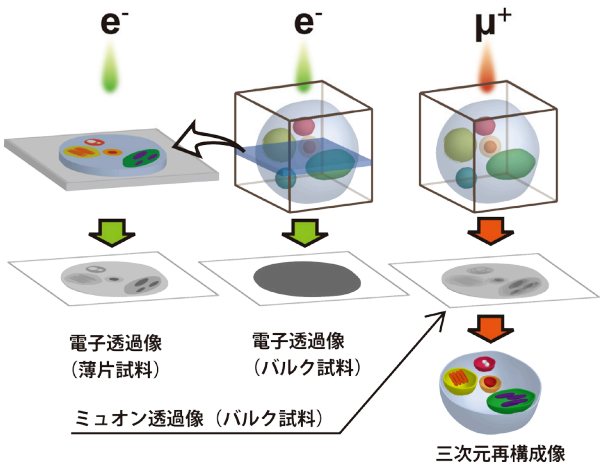

図 4　透過型ミュオン顕微鏡
電子よりも透過力が大きい（久保氏提供）

9　水素原子に由来する特定の波長で明るい光

座談会風景⑤（足立氏，永谷氏）

ができる。

じゃあ，それで何をやるのかというと，非常に役に立つことができる。我々の現代文明はエレクトロニクス，IT，コンピューター，通信等の半導体を用いた装置，あるいはモーター，電池等，電磁気を用いたデバイスにあふれているわけです。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，mmぐらいの大きさのものを数十nmぐらいの分解能で見ることができる。しかも，ゲージ相互作用による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。

だから，単に厚いものを見るというだけであれば，X線を使えばいいとかいろいろな手法がありますが，電荷を持っているというミュオンの一番基本的な性質でバルク[10]試料の中の電磁場分布をnmの分解能で見えるというのは，電子顕微鏡であれば数百nmの物質の中の電場分布，あるいは磁場分布を見るということは既にやられているわけですが，実際に我々の周りのあるデバイスはmmぐらいのものが多いので，それくらいの中のものの電磁場分布を見られるおそらく唯一の，中性子を使うと磁場だけは見ることができますが，それくらいなものになる予定です。予定ですというのは，いまは開発中で，現物としての顕微鏡はまだ世の中には存在しない状況ですが，超低速化しない，加速器で生成されたミュオンそのものを使ってちゃんと電場，あるいは磁場が見えるかということは既に実験を始めて，少なくとも磁場に関しては確実に見えることが証明されていて，電場はどうも見えていそうな雰囲気であるのが現状です。

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。ミュオンはエネルギーが高いので，焦点距離の短いレンズをつくるのはとても大変ですが，既にそういうことを可能にする超伝導対物レン

10 物体や流体のうち，界面に触れていない部分のこと

ズの技術はだいぶ前，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無償でもらってきて，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が，それを使ってこれから組み上げるというところに入っていきます。ミュオンを使って顕微鏡と呼ばれる測定器をこれからつくろうというところです。

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。

ここで，区別しなければいけませんが，強度というのは単に数です。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で，どれだけ強度が高くても密度が薄いと分解能は出ない。ところが，超低速化という既に永嶺先生によって確立された技術を用い，超低速化とビーム収束を何回か繰り返せば 30 nm ぐらいまで絞れることを計算やシミュレーションで既に明らかにしています。何回か繰り返すから多段冷却と呼んでいます。

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，いまの研究ではミュオンのエネルギー幅がすごく広いので，物質の中まで入っていったバルクの μSR 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。更に多段冷却までしてやると，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 μSR 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，いまどれぐらいまで絞れるのですか。

永谷　いまは 1 mm です。加速器ミュオンがだいたい 1 cm ぐらいに絞れているかなという感じで，超低速ミュオンもいまは 1 mm ぐらいです。ただ，だいたい一段階で直径で 30 分の 1 ぐらいに絞れます。だから，1 mm に絞れたやつをもう 1 回やると 30 ミクロンぐらいまで絞れるのではないかと。ということは，密度で言うと 30×30 だから 1000 倍になるわけです。1000 倍になるけれども，もちろんロスがある。

ただ，非常に薄い薄膜を使ってやりますが，最初の加速器で出てきたミュオンはものすごくエネルギー幅が広く，物質に当てても物質に満遍なく止まるので，実際に出てくるのは本当に表面からだけ。だけど，いったん超低速化されてしまうと，原理的にはコンマ何 eV ですから，非常に加速しても単色性がいいので，薄い薄膜に止めることもできるし，もっと頑張れば薄い薄膜の後ろぎりぎりのところに 9 割止めるということも可能で，そうすると，後ろから半分ぐらい出てくる。だから，ロスは半分で済む。しかも，非常に小さく絞れているので，そんなにレーザーのパワーも要らない等々があって，そんなに大変な技術ではないということは分かっています。

久保　みんな最初はそう言うんだけど（笑）。

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 のだいぶ前の機構長でした菅原寛孝先生も，私に「こんなことを考えている」と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でしょうか。

久保　世界中で？

永谷　はい。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，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ことになった結果として，一式知識があったので，そ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

源も最初は一段冷却だけれども，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，まず工学的な，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。少なくともポテンシャルはある。そうすると，あとは，いかにそれをつくり上げるかというところで，それをいま頑張っているわけです。

久保　でも，お話を聞いていると，たぶん 30 年とかはかからず，10 年ぐらいでできそうな感じはしていて。

永谷　10 年のオーダーですね。

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 μSR 法という物質の性質を調べる方法を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ろいろできるというのは。物性の人たちは，いま表面だけを特に見たいような何かがありますよね。

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[11]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，さっきのスピン，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 3〜4 nm くらいの薄さのところでスピンが流れていると言われていますが，直接見る方法はいままでなかったし，誰も見たことがない。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 3〜4 nm くらいの薄さのところにジャストで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，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のに非常に有力というか，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結構高いです。絶縁体と金属ですから，何で界面だけ超伝導になるのか誰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，超低速ミュオンを使ってその付近に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。

おもしろい表面についてもう 1 つの例を挙げると，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，もっと薄くしていくと Tc（超伝導転移温度），超伝導になる温度が薄くする前の 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，もちろん中性子は使えないですし，普通のミュオンもだめです。私たちの業界で低速，低エネルギーミュオンと言っているミュオンビームがありますが，それでも深すぎて全然アクセスできないぐらい薄い。

そういうものもあるので，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）。

永谷　そうですね。基本的に深いところ，かつ特定のところに止めるのは，実際のところは深さの 10％ぐらいにはどうしても広がってしまいますが，そういうことができるほぼ唯一のデバイスというか手法なので，これはぜひとも完成させたいと思います。

足立　期待しています。

11　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。

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RF[12]，マイクロ波ほど周波数は高くない，108 MHz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台ぐらいな感じです。

久保　縦型のサイクロン。

永谷　普通のサイクロトロンは縦方向の磁場の中で粒子を水平に回しますが，ミュオンサイクロトロンでは，水平に入ってきたビームを，インフレクターと呼ばれる装置で90度くいっと回して，横方向の磁場の中で垂直に回して加速し，最後には斜め上方向に引き出し，上で135度曲げて真下に打ち下ろし，打ち下ろした先に縦型の顕微鏡を置きます。

久保　すごい。

永谷　というものを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。

そのあと，顕微鏡本体はレンズ系統は基本的にそろっているので，あとは架台を組み立てて等々の作業がこれから。ミュオン加速の実験は11月にでもやりたいところで，あとはお金次第というところではありますが，さっさと顕微鏡本体を組み上げて，まずは1ミクロンぐらいの分解能の顕微鏡像を撮影して，それからどん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　すばらしいです。垂直にビームが来るというのがすごくよくて，というのは，加速器の実験をやるときに，サンプルをどう保持するかというのは一番大変です。いろいろなことをやりますが，普通は水平にビームが出てきて，そこにサンプルを置くためにはつるさなければいけないので，そこに結構苦労しますよね。

寺田　特に粉っぽいサンプルは縦にできないので。

永谷　縦置きにする理由は非常に単純で，まず，ほとんどの電子顕微鏡は縦置きです。何でかというとすり合わせをするため。基本的に円柱状のものを積み上げてつくりますが，ここの面出しさえちゃんとすれば，非常に剛性が高くて精度の良い設置が可能となります。

ところが，横に置いてしまうと，すごい自由度がありますので，これを調整するのがすごく大変です。だから，現状は世の中にある電子顕微鏡のほぼ99％，商業機では100％が縦置きです。

それから，もう1つの理由が，超伝導顕微鏡をもらってきましたが，それは液体ヘリウム冷却で縦置きを前提につくってあって，いまからそれを横置きに改造するほうが大変なので，まずは最初の装置はいまある装置をそのまま使えるといいということで縦置きにする。その2つが一番大きな理由ですね。

久保　夢のある話ですよね。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ので，こういう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ましたが，隔世の感があるという。

久保　隔世の感。

下村　また，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500 MeVで5 μAですから，kWにすると1 kW，2 kWの世界で，いまはそれが1 MW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ましたし，ミュオンを使った核融合，触媒がどういうものであればという研究もやっていらっしゃったし，超低速ミュオンは僕が就職したときからやっていて，営々三十何年かかっている。

いままさに，本当にようやく物性の研究に使えそ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

12　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。

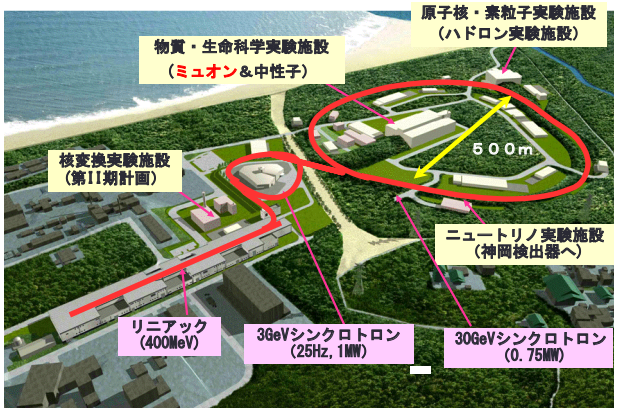

図 5　J-PARC（茨城県東海村）
日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構の共同事業（久保氏提供）

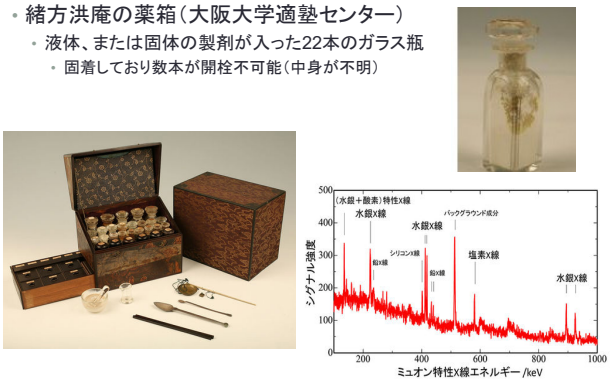

図 6　緒方洪庵の残した薬瓶
開封せずに負ミュオンをガラスを透過して内部に停止。中身は塩化水銀（Hg_2Cl_2）と判明（久保氏提供）

てやってくれれば……。僕らも本気でしたが，いかんせん最終的なビームの強度というのが効いていて，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（**図 5**）。

J-PARC をつくるのに，建設がゴーになったのはおそらく 2002 年か 2003 年ぐらいで，それから 10 年ぐらいかかりましたが，それから更に 10 年かかって，いまようやくすべて花開こうとしている感じはする。何かまとめにかかっている感じ。

久保　いやいや（笑）。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，これはミュオンが考古学でものすごく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，そのままだと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，いったいいつ，誰が，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，どん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。江戸時代かなと思ったけれども，もっと昔の人がそういうことも頑張っていた片鱗が見えてきて，あまりまだ言ってはいけないのかもしれないけれども，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やりました。その中で，寺田先生にリュウグウのお話をしていただいて，もう 1 人，大阪大学の髙橋京子先生[13]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ていた箱の中に，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。そういう意味では，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ると思います（**図 6**）。

久保　あれは，瓶を開けてはいけないのではなくて，開かないんですね。ミュオンによって非破壊でできたという話ですよね。

寺田　水銀が見えたんでしたっけ。

久保　今回のは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

13　*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

J-PARC に持ってくるのに非常に大変な手続きが必要です。

久保　でも，そういう時代になってきたということですよね。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 年はたってないですよね。

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，おっしゃるとおり，最初はそんなことできるわけないじゃんと思っていたわけですよ。できたときは感動しました。

久保　そうですね。

下村　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。

久保　本当にここ数年の大きな。

下村　数年ですね。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 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と，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，手前みそになってしまいますが，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。

宇宙線ミュオンについては，しばらくそういう状態があったし，東大の山崎敏光先生のグループが非常に興味を持っていろいろなミュオンの実験を始められて，最初にバ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TRIUMF[14]や，あの頃は PSI とか SIN[15] と言っていましたが，中間子工場ができ上がります。

それとほぼ同時期に筑波の施設ができ上がりましたが，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，もっと大事なのは，ビームの構造も全く違っていて，あちらはサイクロトロンがベースですから，宇宙線ミュオンが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。

久保　確かにね。私なんかは，非破壊検査分析を筑波でやろうとして，何かできるかな，何かシグナルみたいなものがあるという感じだったのが，J-PARC で本当に分析に使えるというのは感動でしたね。

下村　そうですよね。だから，久保さんはそれをずっとやっていらっしゃったし，我々も超低速ミュオンをやっていた。いつまでたってもできねぇぞと言われながらもだらだらやっていると，何となくできてしまうところまで行ったので，何でも時間がかかるということですよね。だから，10 年でできるかどうか知らないけれども，顕微鏡も。

久保　それはやるしかない。でも，宇宙線ミュオンもそうで，神岡なんかも宇宙線ミュオンが邪魔だ

14　カナダにある国立粒子加速器センター
15　ポール・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）が 1988 年に合併して設立。素粒子物理学からエネルギー応用等広範な研究を行い，大型加速器や実験用原子炉を保有。

から深いところにいるんですよね。あれは地下何百 m でしたっけ。

森島　1000 m とか。

久保　あれはほとんどミュオンが来ないという。

下村　そうですね。でも，きっと宇宙線ミュオンはあれでも来るんですよね。

森島　わずかに来ますね。

久保　逆に，それが来るところに持っていって何かやるという逆転の発想的なところですよね。ただ，バックグラウンドが神岡とはね。

森島　そうですね。神岡は特別な実験なので，宇宙線がバックグラウンドになっちゃうとあれですけど。

久保　ミュオンは嫌だという人たち。そういうのを考えると，逆に人工ミュオンでかなり高いエネルギーを出せるようになれば，もっといろいろなことができるのではないか。

下村　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ば，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も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に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，質のいいものは加速して，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から，そういうことも実現するといいなと。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。そういうミュオンは何でもありますよという雰囲気がいまでもあるので，そこは大事にしたいなと思います。

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ね。そう言っちゃいけない。月も専門の一部としては。

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。

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　その前に，日本のはやぶさが C 型小惑星から持って帰ってきましたが，この 9 月に NASA のオシリス・レックスというのが同じく C 型小惑星ベヌーからサンプルを持って帰ってきます。そういうものにもミュオンの非破壊分析は使えるのではないかなと思っています。

これは NASA と日本のいろいろな関係がありますので，分析するチャンスがあるのかどうかというのは僕レベルではどうしようもないですが，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きます。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。8 月 26 日に日本の衛星が上がりますし，21 日にはロシアの衛星が 50 年ぶりに着陸予定，インドも 23 日に着陸するという，8 月だけでもものすごく月はフィーバーしています。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。

これまで米国のアポロ計画と旧ソ連のルナ計画と中国の嫦娥（じょうが）計画で月面の計 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 ℃ぐらいなのですが，今，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，空気にさ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か。

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[16]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。

久保　それが非破壊でできるというのが非常に重要。

寺田　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，破壊分析に使える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，より微量なものを分析する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，そこそこの量の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長かなと思います。

そういう意味で，火星の衛星からのサンプルもたぶん皆さん少量を測りますが，そもそもフォボスはどんな組成なのか調べるには，非破壊で試料全体の組成を壊さずに測るというニーズは必ずあると思っています。

久保　なるほどね。確かに分析法というと，どれだけ細かいものをやるかということでずっと開発が進んでいますよね。

寺田　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，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らっしゃるんですか。

―原子核乾板の可能性―

森島　やっています。先に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，ギザの 3 大ピラミッドのうち，アルバレがカフラーをやって，僕らがクフをやりました。コロナが明けて 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。アルバレが検出器を置いた場所と全く同じ大きな部屋に僕らも検出器を置いたので，アルバレの結果を検証しつつ，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，見ていないところも見る。

更に，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（**写真 5**）。

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と，ミュオンが透過してくる数

写真 5　原子核乾板が設置されている様子
（森島氏提供）

16　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 VII b 族，VIb 族，Vb 族（リン除く），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。ここでいう「揮発性元素がほぼない」とは，「H_2O や Co，Co_2，HN_3 などの分子が地球や火星と比べてほぼない」という意味。

の割合から密度というか，ある意味では重さを比べることができます。そうすると，ピラミッドの建造方法とか，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，同じ石を使っていてもし密度が違えば，積み方が違うということにもつながってきます。更に，2023 年 9 月の頭にエジプトに行く予定ですが，そこで 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，エジプトに限らず，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」のモデルになったり，僕は知らないですが「ワンピース」で出てくるところだそうです。そこにあるピラミッド，大きな神殿とかまだ調べられていないところをできればいいかなと思っています。

特にマヤでおもしろいのは，エジプトのピラミッドは何もない空間が結構あって，僕らが発見した空間にもいまのところ何もないのに対して，マヤで見つかった空洞はほぼ確実に王墓です。なので，空洞が見つかればそこに埋葬されている可能性があります。何か見つけら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うか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。

久保　そういうことは，2〜3 年ぐらいで何か結果が出て，その先に行くという感じですか。

森島　うまく見つかれば 2〜3 年。宇宙線なので，結構時間がかかるのはそのとおりで，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。3 大ピラミッドのうち，クフ，カフラーのピラミッドは 140 m と大きいので数か月かかりますが，メンカウラーのピラミッドは 60 m 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 1 m ぐらいの穴を掘ってそこに入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やってもらって，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。

久保　おもしろいですね。

森島　さっき下村さんに言っていただいた古墳は，僕らもやりたいと思います。声をかけていただけたらと（笑）。

下村　来てください。ピラミッドで有名な先生が来ると東海村の子に言ったら食いつきますから。

久保　持ち上げられないものの重さを量っている人という。私はピラミッドの重さが分かりますみたいな。

森島　そうですね。ピラミッドの場合はそういう。古墳の場合は，形に対してどこに穴があるかとか，縦穴か横穴かによって年代が分かるという話は聞いたことがあります。

久保　そうやっていると，人手が足りないということは？

森島　それが本当に問題になっていて，やりたいことはいっぱいあって，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，最近は樹木の中を見るというのもやっています。

さっき下村先生がおっしゃっていたのと同じようなかたちで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。僕らは原子核乾板を使って宇宙線で見られる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 3 m 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もらえませんかと言ったら，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 線も放射線を出さないといけないし，それでも見れる太さに限界があります。だけど，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いって，1 週間ぐらい置いておいたら，見事に 3 m の木の中

に 2 m ぐらいの空洞があるのが見えました。本当に空洞が開いているのかどうか調べようと思って，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。

久保　へぇー。

森島　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。

下村　そうですね。おもしろいですね。

森島　こんな感じでいろいろやりたいこと，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，人が足りないというか，本当に手が回らないので，研究対象にするものと社会実装するものの両方を進めたいとなってくると，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。

久保　読み取りの装置さえできれば，原子核乾板を一方で配って。

森島　そうですね。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 台しかないので，それの調子が悪くなると全体のプロジェクトが……。

久保　ということは，世界に 1 台。

森島　そうですね。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か，そういう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。それを現像して初めて像が定着するので，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。1 回使ったら終わりなので，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。

寺田　そちらのお金もかかるということ？

森島　フィルム代は毎回かかります。でも，フィルム代はいまは高いですが，昔写真フィルムが使われていたときは安かったです。流通してしまえばフィルムは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，そこがもしうまくつながったら，乾板でやるのはすごく魅力的です。ただ，我々は乾板に手が出ないよねといって始めていたので。

森島　一緒にやらせていただければ。

下村　これも小林センター長に言っておきますので（笑）。

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にクラックが入っているというのも見えるわけですよね。

森島　クラックまでは小さすぎて難しいですが，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，そういう橋も試したことがあります。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　10 cm ぐらいの切れ目だったら見えますか。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　土木構造物の切れ目とかは難しいかもしれません。例えば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，そこ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。

久保　私の生まれ故郷の博多は，博多駅前で陥没事故が起こりましたよね。あれで地下鉄の工事がだいぶ遅れましたが，陥没するぐらいの穴があったら，そういうのも分かりますよね。

森島　分かりますね。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，1年に何回か定期点検したりするには，検出器は置きっぱなしにしない限り持っていって持って帰ってくることが絶対必要ですが，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。フィルムは本当にそういうのに向いているので，検査事業みたいな。

下村　ビジネスになるような気がします。

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)。いやしかし，小中学生から，本当に仕事で使っている人たちまで，いろいろなことができそうな感じがしますね。

寺田　夢がありますね。

久保　すごいですね。いいと思いますね。

あと，ソフトエラーの話もしておかないと。

下村　宇宙線ミュオンはいまみたいにものすごく役に立ちますが，ある業界の人たちはめちゃくちゃ嫌がっているところがあって，例えば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。

あと，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粒子で，宇宙から降ってくる粒子には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最近急に盛り上がってきています。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いうのがここ5年，10年かけて盛り上がってきています。

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，10%はいかないかもしれないけれども，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，特に僕が注目しているのは，東南アジアの方は，足立さんも一緒に行ってくださっ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，あちらでは，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，熱意ある女性たちが日本に来て，例えばJ-PARCで実験したり，理化学研究所の研究室にドクターの学生さんとして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いて，できることが違います。日本は本当にいい立地条件だと思います。また世界

に 5 か所しかないので，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　コロナで止まっていましたけれども，行ったり来たりするような。

久保　お互い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。

ナポリ大学と僕らは一緒にやっていて，なぜ一緒にやっているかというと，ナポリ大学は原子核乾板を使った OPERA 実験のコラボレーターでした。

久保　そうですか。

森島　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 10 m ぐらいのところにギリシャ時代の遺跡が埋まっていて，お墓がある場所がいくつか分かっています。何で分かっているかというと，いったん埋まってしまった後，割と最近，ここ数百年以内ぐらいに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からです。発掘されてお墓がいくつか見つかりましたが，何も調べられてない場所，たまたま見つかっていない場所があって，そこにまだ見つかって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。

それができたのはなぜかというと，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言われたところに本当に空間が見つかりました。それはおそらくギリシャ時代のお墓で，特にそこらへんのお墓にはフレスコ画や彫刻があるので，結構裕福な人のお墓だろうと言われています。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。

久保　すごくいろいろなことを発見していますね。すごいな。

森島　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，イギリス，イタリア，フランスといった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で，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が，ミュオンが通ってきた入射角と出ていくときの両方の角度を測って，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ーは，取り囲まないといけないのでそんな大きなものはできませんが，アメリカではすごく進んでいて，アリゾナとかで国防に使われています。

下村　そうですね。どちらかというと安全保障の文脈で。

森島　あと，イギリス，中国でもやっています。透過型は中国でもやり始めていて，いろいろなところに広がっています。

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，キャスクといって，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。そういう意味で言うと，いろいろなことに使えるので，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。

下村　ないですね。不思議なんだよね。

森島　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，何かもったいないなと。

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。素粒子の研究から始まっていますが，もはや関係なくなってきていて，例えば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査することまでやっている会社もカナダにあります。僕らも原子核乾板を使ったボーリングの方をいろいろと開発をしていますが，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。

久保　人手が足りない。

森島　最近は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。

久保　人が増えてくると，知識の普及もものすごく大変ですね。みんなが原子核乾板が何か知っている人たちでもないし。

森島　でも，原子核乾板に限るとそうですが，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）

ねぇねぇはかせ、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（23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「ねぇねぇはかせ，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。

寺田先生のねぇねぇはかせシリーズは他にも「ねぇねぇはかせ，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！

◆詳細はこちら