

「革新的な計測法のつくり方」

坂本直哉

北海道大学 総合イノベーション創発機構 (naoya@cris.hokudai.ac.jp)

はじめに

私はこれまで二次イオン質量分析法（SIMS）を使って研究を行ってきた。SIMS は固体試料にイオンを照射し、そこから放出される二次イオンを質量分析することで、微小領域の元素や同位体を調べる方法である。私自身、SIMS を使って隕石や地球惑星物質を分析するとともに、装置や測定法の開発にも携わってきた。

地球化学は、計測技術の進歩とともに発展してきた学問である。元素濃度や同位体比をより正確に測れるようになったことで、物質の起源、年代、反応、移動を議論できるようになった。質量分析計、電子線・イオンビーム分析、レーザー分析、放射光など、新しい計測法が登場するたびに、それまで測れなかったものが測れるようになり、地球化学の研究対象そのものが広がってきた。現在も計測装置の性能向上は著しい。感度、精度、空間分解能、測定速度はいずれも向上を続け、電子顕微鏡では原子を見ることができ、アトムプローブでは原子に近いスケールで元素の三次元分布を調べることも可能になっている。

しかし、ここで一つ疑問が生じる。計測性能が向上することは、そのまま新しい科学を生み出すことなのだろうか。空間分解能が2倍になった装置、感度が10倍になった装置、測定速度が100倍になった装置は、間違いなく優れた装置である。しかし、それだけで「革新的な計測法」と呼べるかどうかは別の問題である。原子が見えることと、原子を見ることによって、それまで知られていなかった自然の仕組みを見つけることも同じではない。

では、科学を変えるような計測法は、どのようにして生まれるのだろうか。近年、Krauss (2026) は、ノーベル賞につながった科学的方法や装置を横断的に調べ、科学に大きな影響を与えた計測法や研究手法の多くが、既存手法では研究を先に進めることのできない技術的な壁に直面し、それを突破する過程で生まれてきたことを指摘している。新しい装置を作ること自体ではなく、科学を進める上で障害となっている「測れないもの」を見つけ、その壁を突破することが重要であるという議論である。

これは、私自身がSIMSを使い、あるいは装置を作ってきた経験ともよく一致する。ただし、ここにはさらに一つ前の、もっと難しい問題があるように思う。その「測れないもの」は、どうやって見つけるのだろうか。

本稿では、自分自身の地球惑星物質研究とSIMS開発の経験を振り返りながら、革新的な計測法が生まれるまでの過程を考えてみたい。もちろん、革新的な計測法が必ずこのように生まれるという一般則を示すものではない。あくまで私自身の経験から得た一つの方

法論である。結論を先に書けば、現在の私は、それを次の四段階として考えている。

1. 未知に気づく
2. とことん追い詰める
3. 測れない壁を突き止める
4. その壁を越える測り方を作る

以下では、この四段階について考えてみたい。

1. 未知に気づく

科学は「分からないことを分かるようにする」営みである。しかし、その前にもっと難しい段階がある。何が分からないのかに気づくことである。すでに問題が明確になっているのであれば研究は比較的組み立てやすい。「この同位体比を 0.1‰の精度で測りたい」「この粒子を 100 nm の空間分解能で分析したい」と決まっていれば、必要な装置性能を考えることができる。既存装置で不足するなら、その性能を向上させればよい。

難しいのは、まだ誰もそれを問題だと認識していない場合である。私自身、このことを強く感じた経験がある。隕石中のプレソーラー粒子を探索するため、新しい二次元イオン検出器を使って同位体マッピングを行っていた。プレソーラー粒子は太陽系形成以前の恒星で作られた微小粒子であり、太陽系物質とは大きく異なる同位体組成を持つ。したがって、同位体イメージの中からサブミクロンサイズの大きな同位体異常を探していた。

その画像の中に、後に宇宙シンプレクタイトと呼ぶことになる物質は、すでに写っていた (Sakamoto et al., 2007)。しかし、最初はスルーしていた。探していたプレソーラー粒子とは様子が違った。また、鉄を多く含む物質では SIMS 測定が変になることもある。「鉄っぽいものだから変なのだろう」と考えれば、それほど不自然ではなかった。つまり、見えていた。しかし、見つけてはいなかった。装置は未知を写していた。しかし、人間の側がそれを未知として認識していなかったのである (坂本, 2009)。

これは計測装置を考える上で重要な問題だと思う。われわれはデータをそのまま見ているつもりでも、実際には「何を探しているか」というフィルターを通して見ている。プレソーラー粒子を探していれば、プレソーラー粒子らしいものに目が行く。それ以外のものは、たとえ画像に写っていても背景になってしまう。しかも研究者には知識がある。異常なデータが出れば、「コンタミだろう」「装置のせいだろう」「マトリックス効果だろう」と説明することができる。もちろん、その大部分は本当にそうなのであろう。

しかし、ここに難しさがある。知らなければ異常に気づけない。しかし、知りすぎて分かったつもりになると、異常を既知の説明の中に押し込んでしまう。これは文献を読むときにも同じである。何が分かっているかを知ることは必要である。しかし同時に、「なぜ、それが分かっていることになっているのか」を知る必要がある。実際に直接測定されたのか。何らかの仮定の下で推定されたのか。あるいは、最初の論文から引用が繰り返され、いつの間にか前提となったのか。既知は未知を探すための地図として使う。しかし、地図

を現実そのものだと思わない。

では、未知に気づくためにはどうすればよいのだろうか。確実な方法はないと思う。何を探せばよいか分からないから未知なのである。しかし、未知に気づく確率を上げることはできる。私なら、三つにまとめたい。たくさん見る。目的以外も見ると。違和感を捨てない。言い換えれば、多くの試料を測る。多くの場所を見る。条件を変える。まず自然との接触回数を増やす。そして特に新しい装置を使ったときには、「目的のものが測れたか」だけを見ない。ほかに何が写っているのかを見る。

新しい計測法が本当に従来とは違う情報を取得できるのであれば、そのデータの中には、開発者自身が予想していなかったものが現れても不思議ではない。実際、科学史を振り返っても、新しい装置は設計者自身が想定していなかった科学的問いを生み出してきただけでなく、予定した性能を達成することだけではなく、予定していなかったものを見せることにもある。そして、違和感を完全には捨てない。一度はスルーしてもよい。しかし、「鉄だからだろう」と説明できることと、「本当に鉄だからであることを確認した」ことは違う。同じ違和感が再び現れたときに、「前にもこれがあった」と戻れるようにしておく。未知に気づくために必要なのは、すべてを一度で見抜く天才的な能力ではなく、違和感を捨て切らずに持つておくことなのかもしれない。

2. とことん追い詰める

未知らしいものに気づいた後、すぐに新しい装置を作る必要はない。むしろ、作らない方がよいと思う。まず、今あるもので、とことんまで追う。私には、何か変なものをついつつけたときに信じていることがある。一個あるなら百個ある。一個だけなら偶然かもしれない。測定ミスかもしれない。特殊な試料にだけ現れたものかもしれない。しかし、本当に自然が作ったものであれば、それを作る仕組みがあるはずである。仕組みがあるなら、同じ条件がそろったところには二個目があるはずである。そこで、もう一個を探す。二個目が見つかったらしめたもの。一個目と二個目に共通する特徴を探し、それまでの探索基準を見直す。そうして捉え直した基準で三個目が見つければ、もう首根っこを押さえたも同然である。

宇宙シンプレクタイトの場合にも、最初に見つけた一個だけを詳しく分析して終わったわけではない。その特徴を手掛かりに探索方法をチューニングし、多数の粒子を探した。ここで、最初に発見した装置にこだわる必要はない。SIMS より SEM-EDSの方が大量に探すのに適しているのであれば、それを使えばよい。未知そのものを直接探すのが難しければ、未知が残した目印を探せばよい。一個の発見を、現象に変える。その過程で仮説を立てる。しかし、仮説に固執しない。未知を追い始めた段階では、その正体はまだ分からない。「これは A である」という精密な仮説よりも、「どうもこの辺がおかしい」という程度の方角の方が役に立つことがある。

仮説を早く固定すると、最初の仮説が間違っていた場合、非常に論理的に、非常に精密

に、間違った方向を追い続けることができてしまう。論理的に研究を組み立てる能力が高いほど、いったん前提を誤ったときには、整合的な説明を作り上げることもできてしまう。さらに現実の研究では、研究期間、予算、論文発表などの制約がある。限られた時間の中で結論を求められれば、「まだ分からない」と立ち止まるよりも、もっともらしい説明を与えて研究を完結させる方が容易である。未知の輪郭さえまだ見えていない探索初期に仮説を早く固定することは、探索範囲そのものを狭めることがある。未知を追っているときに最も避けなければならないのは、分からないものを、分かったことにしてしまうことである。

仮説はいくら変えてもよい。しかし、最初につかんだ「何だこれは？」からはピントを外さない。未知の輪郭を探す探索段階では、仮説を固定しすぎない。一方、現象が絞込まれた後の検証段階では、厳密な仮説検証が必要である。

そして、探索段階では使えるものは何でも使う。SIMS で見る。電子顕微鏡で見る。別の分析法を使う。試料を変える。測定条件を変える。正攻法にこだわる必要もない。目的は美しい実験をすることではなく、分からないものの正体に一步でも近づくことである。原因が分からないときには、最初から精密な測定をしない方がよい場合もある。怪しい変数があれば、思い切って極端に振ってみる。未知がぼんやりしているときには、精度を上げるよりコントラストを上げる。まず白黒をつける。その後で灰色を精密に測ればよい。

鉄中の水素を SIMS で測定したときにも、水素が見えたり見えなかったりするという問題があった。どうも温度が関係しているらしい。そこで、細かな温度依存性を最初から測るのではなく、試料の回収から搬送、分析までを徹底的に冷やしてみた。すると、水素を見ることができた。そこから、試料を低温状態のまま保持して分析する測定系が必要であることが明確になった。地球表面で生活するわれわれにとって、常温常圧はあまりにも当たり前である。そのため、それ以外の条件でしか保持されない情報があることを、無意識のうちに見落としてしまうことがある。しかし、地面の下は高温高压であり、地球の外に出れば低温や真空の世界が広がっている。私たちが Cryo-SIMS と呼んでいる方法は、物質を極低温に置くことで原子の動きをできるだけ抑え、それまで保持されていた情報を失わずに見るためのものである。特殊な測定法に見えるが、実はわれわれが当たり前だと思っている常温常圧の方が限られた環境であり、自然界の大部分を対象にしようとするれば、この方法の方が圧倒的に自然なのかもしれない。ここで重要なのは、最初から Cryo-SIMS を開発しようと考えていたわけではないことである。分からないものを追っていたら、必要になったのである (Sakamoto et al., 2026)。

3. 測れない壁を突き止める

今ある方法を使って、とことんまで追う。すると、やがて、「ここまでは分かった。しかし、ここから先だけは今の方法では分からない」という地点にたどり着く。ここが、新しい計測法を作る本当の出発点なのだと思う。近年の科学的方法の歴史を横断した研究で

も、画期的な科学ツールの多くは、既存手法が研究の進展を妨げる技術的な壁に直面したところから生まれていることが指摘されている。しかし重要なのは、壁を先に想像することではない。未知を追い詰めた結果として、壁が現れることである。最初から「空間分解能を2倍にしよう」「感度を10倍にしよう」と考えるのではない。追い詰めた結果、「この温度を維持したまま測れなければ分からない」「このサイズを分離できなければ分からない」「この同位体をこの精度で測れなければ分からない」「この状態を壊さずに測れなければ分からない」という具体的な一点が残る。

ここで、未知を追い詰めるために使う装置に一つ重要なことがある。何を測るかがあらかじめ分かっているのであれば、その目的に最適化された装置は強い。しかし、未知を追っている途中では、次に何を試すことになるのか自分にも分からない。分かっているものだけを、決められた条件で美しく測る「お上品な装置」は、未知の追跡には必ずしも向いていない。どんなに高性能を謳うピカピカの市販装置であっても、それで普通にできることは、たいてい他の誰かがすでにやっている。

実際に未知を追うときに役に立つのは、多少粗っぽく使えて、条件を大きく振ることができ、少々オーバースペック気味で、無理の利く装置である。通常なら使わない条件まで振ってみる。違う試料を入れてみる。本来とは違う測り方をしてみる。未知を追っている段階では、何が次の手掛かりになるか分からない。そのため、最初から目的に最適化された装置よりも、探索の余地を残した装置の方が役に立つことがある。一見無駄に見えるオーバースペックも、未知を追うときには「余白」になる。その余白まで使い切った先で、それでも越えられない一点が残る。それが、本当に新しい測り方を必要とする壁なのだと思う。

4. その壁を越える測り方を作る

そのとき初めて、必要な装置性能が決まる。必要な性能は、装置開発者が決めるのではない。追い詰めた未知が決める。既存装置で測れるなら、それを使えばよい。他分野の装置で測れるなら、借りればよい。少し改造すれば測れるなら、改造すればよい。それでも測れない。そこで初めて作る。

このとき、自分の専門分野の中だけで解決しようとししない方がよい。自分たちにとって越えられない壁でも、別の分野ですでに当たり前のように使われている技術と組み合わせることで、越えられる場合がある。違う分野に出かけて行って、自分たちに足りないものを探す。そして、使えそうなものがあれば持ち帰る。一から全部を発明するのは大変であるし、その必要もない。言ってしまうと、パクリである。

そもそも、ルールの決められたゲームとは違い、自然の未知を解き明かすことに、あらかじめ決められた攻略法や禁じ手はない。自然は、SIMSで測りやすいようにも、地球化学という学問分野の中だけで理解できるようにもできていない。既存の装置を本来とは違う使い方で使う。条件を極端に振る。使えそうなアイデアがあれば使う。それでも足りなけ

れば、自分で作る。

考えてみれば、われわれが相手にしているのは、これまで数え切れないほどの研究者が挑み、過去の天才たちですら解き明かすことのできなかった未知である。それを人類で初めて知ろうというのである。生半可なことではできないはずがない。自分の専門や慣習にこだわり、使う手段を自ら制限している場合ではない。あらゆる手を駆使して、目の前の壁を越える。

ところが不思議なことに、未知を追っている最中には、いろいろな現象がこんがらがって、とても解きほぐせないように思えても、いったん正体が分かれば、自然の仕組みは非常に単純で、「そりゃそうだよな」と思えるほど当たり前であることが多い。難しいのは、答えそのものではなく、そこにたどり着くことなのかもしれない。

私にとって、装置開発とはそのようなものであった。新しい装置を作ること自体が目的なのではない。分からないものを追い詰め、今あるものを使い尽くし、それでも越えられない壁が最後に残ったとき、その壁を越えるために必要なものを作る。そして、新しい測り方ができれば、それまで見えなかったものが見える。そこには、また予想していなかったものが写る。すると再び、「何だこれは？」から始まる。

スルーしがちな私にも、未知がいやでも目に入ってくる。そんな装置が欲しい。注意深く見なければ分からないものを、もっと注意深く見るための装置ではない。「ここだ！」とパトライトを煌々と光らせ、けたたましい警報を鳴らし、未知を露わにしてくれる装置が欲しい。

5. 「とことんまでやる」の装置化

ここまでが、これまで私自身が行ってきた研究を振り返って考える「革新的な計測法のつくり方」である。しかし最近、この方法には大きな問題があると感じるようになった。時間がかかりすぎる。

私自身、まだ元気だった頃には徹夜で分析をしていた。結果を見て、条件を変えて、また測る。朝になって結果が出れば、それを見て次の実験をする。当時は、それが「とことんまでやる」ということだった。しかし、人間が一台の装置を操作して探索できる範囲には限界がある。新型コロナウイルス感染症の流行で大学に行くことが難しくなった時期に、私は装置のパラメータを一つずつ調べ上げ、SIMSの測定を自動化し、大学の外から遠隔操作できるようにした。液体窒素デューワーも大型化し、数日間は補充せずに連続運転できるようにした。これで装置の前で眠る必要はなくなった。酒のつまみにリアルタイムの測定データを眺め、布団の中で次の点がプロットされていくのを見ながら寝落ちする。それでも、全然足りなかった。

自動化によって大量のデータを取得すると、それまで見えていなかったことも見えてきた。多数の分析を連続して行うことで、時間や分析箇所によってデータがどの程度揺らぐのか、逆に何がかわらないのかが一目瞭然となった。また、数日分の分析箇所をあらかじめ

めまとめて指定することで、「こうなっていてほしい」という人間の思い込みによるサンプリングバイアスも抑えることができた。

しかし、自動化しても一回の分析に必要な時間そのものがなくなるわけではない。十分な信号を得るには、どうしても一定の積算時間が必要である。しかも、目的の対象から明らかに外れた場所であっても、装置は指示された通り、重要な場所と同じ時間をかけて律儀に測定する。そして、そういうところに時間を使っているときに限って、装置が止まったりする。

試料の全領域を現実的な時間内に分析し尽くすことができない以上、「どこを測るか」が探索の成否を大きく左右する。しかし、そもそも正解を知らないから探索しているのである。自然が巧妙に隠している未知の匂いを必死に嗅ぎ、「こっち方向っぽい？」というぼんやりとした感覚だけを頼りに、数日分の分析箇所を選んでいく。当然、多くは無駄撃ちになる。しかし、すでに分かっていることから理詰めでたどれる範囲だけを探しては、人知を超えた未知にはなかなか出会えない。だからこそ、そのあやふやな方角を信じて、高価な装置を長時間占有し、連続運転を維持するために尋常ならざる努力を続けなければならない。とはいえ、研究できる時間は限られている。

そこで現在、私は SIMS を量産しようとしている。一台の装置の性能を極限まで高めるだけでなく、必要な性能を持つ SIMS を複数作り、多数の試料、多数の場所、多数の条件を並列して測定する。さらに AI を使って装置を制御する。測定する。結果を見る。条件を変える。また測る。

このサイクルを可能な限り高速に回す。ここでの目的は、単なる自動化や省力化ではない。未知を追い詰める速度を上げることである。そして、この仕組みは最初の「未知に気づく」にも役立つ可能性がある。大量に測れば、未知に遭遇する回数そのものが増える。さらに AI に、「これは何であるか」を答えさせる必要はない。むしろ、「これは普通と違う」「以前にも似たものがあった」「この条件だけ挙動が違う」というものを拾わせる。AI に正解を求めるのではなく、人間が見落とす異常や類似を提示させる。

そう考えると、SIMS の量産化と AI 化には二つの意味がある。未知に出会う回数を増やすこと。未知を追い詰める速度を上げること。かつては自分自身が徹夜することで行っていた「とことんまでやる」を、装置と AI に拡張する。言い換えれば、「とことんまでやる」こと自体を装置化する。

これは一台の SIMS を 100 倍高性能にすることとは、少し違う方向の装置開発である。たとえば 100 倍高性能な一台を目指すのではなく、多数の装置を並列化して、試すことのできる数そのものを桁違いに増やす。それによって、一年かけて到達していた既存計測法の限界に一月で到達できれば、次に本当に必要な計測法も、それだけ早く見えてくる。計測の高性能化だけではなく、探索そのものを高性能化する。これも、これからの計測装置開発の一つの方向ではないかと考えている。

おわりに

ジェームス・W・ヤングは『アイデアのつくり方』において、アイデアは単なる偶然のひらめきではなく、それが生まれやすくなる過程があることを論じた (Young, 1988)。革新的な計測法についても、同じことが言えるのではないだろうか。革新的な装置のアイデアそのものを、予定通りに生み出すことはできない。まして、何を発見するかをあらかじめ決めることはできない。しかし、その確率を上げることができる。たくさん見る。目的以外も見。違和感を捨てない。一つ見つけたら百個あると思う。仮説を守るのではなく、つかんだ未知の尻尾を離さない。今あるもので、とことんまで追い詰める。

その結果、「ここだけはどうしても測れない」という壁が残ったなら、その壁を越える測り方を作る。科学を大きく変えてきた計測法の多くが、既存の方法では越えられない壁を突破する過程で生まれてきたという近年の科学史的な分析は、この考え方ともよく一致する。

一方で、私自身の経験から強調したいのは、そのさらに前である。壁を見つけるためには、まず「何が分からないのか」に気づかなければならない。そして、おそらくそこが最も難しい。だからこそ、新しい計測装置を作ったときには、予定していたものだけを見てはいけない。装置が初めて見せた世界の中に、「何だこれは？」を探す。そこから新しい科学が始まる可能性がある。革新的な計測法を作るために、最初から革新的な計測法を作ろうとしない。未知に気づく。今あるもので、とことん追い詰める。測れない壁を突き止める。そして、その壁を越えるために作る。

このサイクルをさらに高速に回すには、一台の装置を高性能化することとは別の方向もある。計算機はすでに CPU の多コア化へ進み、スーパーコンピュータは多数の計算ノードを並列に動かしている。ALMA 望遠鏡も、その目的や原理は異なるものの、多数のアンテナを協調させることで、一つの装置では到達できない観測能力を実現している。分野は違っても、一つを際限なく高性能化するだけではなく、多数を並列に動かすという方向には共通するものがある。

ならば、計測も同じ方向へ進むのは自然な成り行きではないだろうか。一台の SIMS をひたすら高性能にするだけではなく、多数の SIMS を並列に動かし、さらに AI によってそれらを自律的に動かす。計測を並列化するだけではない。未知を追い詰める探索そのものを並列化するのである。

しかし、私にとって最も重要なのは、未知を追い続ける中で研ぎ澄ませてきた私の感覚が、「こっち方向だ」と強く訴えていることである。未知をとことんまで追い詰めるために、あまりにも多くの時間がかかること自体が、今の私にとって越えるべき壁のような気がしてきた。だとすれば、私の目の前には、未知へとつながる道が姿を現しつつあるのかもしれない。乗り越えるべき壁さえ見つければ、あらゆる手段を駆使して、あらゆる制約を無視して、全精力をかけて最短で突破する。

これが、現時点で私が考える「革新的な計測法のつくり方」である。

参考文献

Krauss, A. (2026) Discovery tools: How powerful new scientific methods and instruments emerge and catalyze innovation. *PNAS Nexus*, 5, pgag107. 10.1093/pnasnexus/pgag107.

Sakamoto, N., Seto, Y., Itoh, S., Kuramoto, K., Fujino, K., Nagashima, K., Krot, A. N. and Yurimoto, H. (2007) Remnants of the early solar system water enriched in heavy oxygen isotopes. *Science*, 317, 231–233. 10.1126/science.1142021.

坂本直哉 (2009) 重い酸素同位体に富む太陽系物質の発見. 遊・星・人, 18(1), 25–30.

Sakamoto, N., Ikuta, N., Hirose, K., Tagawa, S., Hikosaka, K. and Mita, S. (2026) Cryogenic SIMS preserving elemental distributions formed under extreme conditions: Hydrogen distribution measurement in iron. *Surface and Interface Analysis*, 58, 734–740. 10.1002/sia.70091

Young, J. W. (1988) 『アイデアのつくり方』 今井茂雄訳, TBS ブリタニカ, 東京, 102 pp.