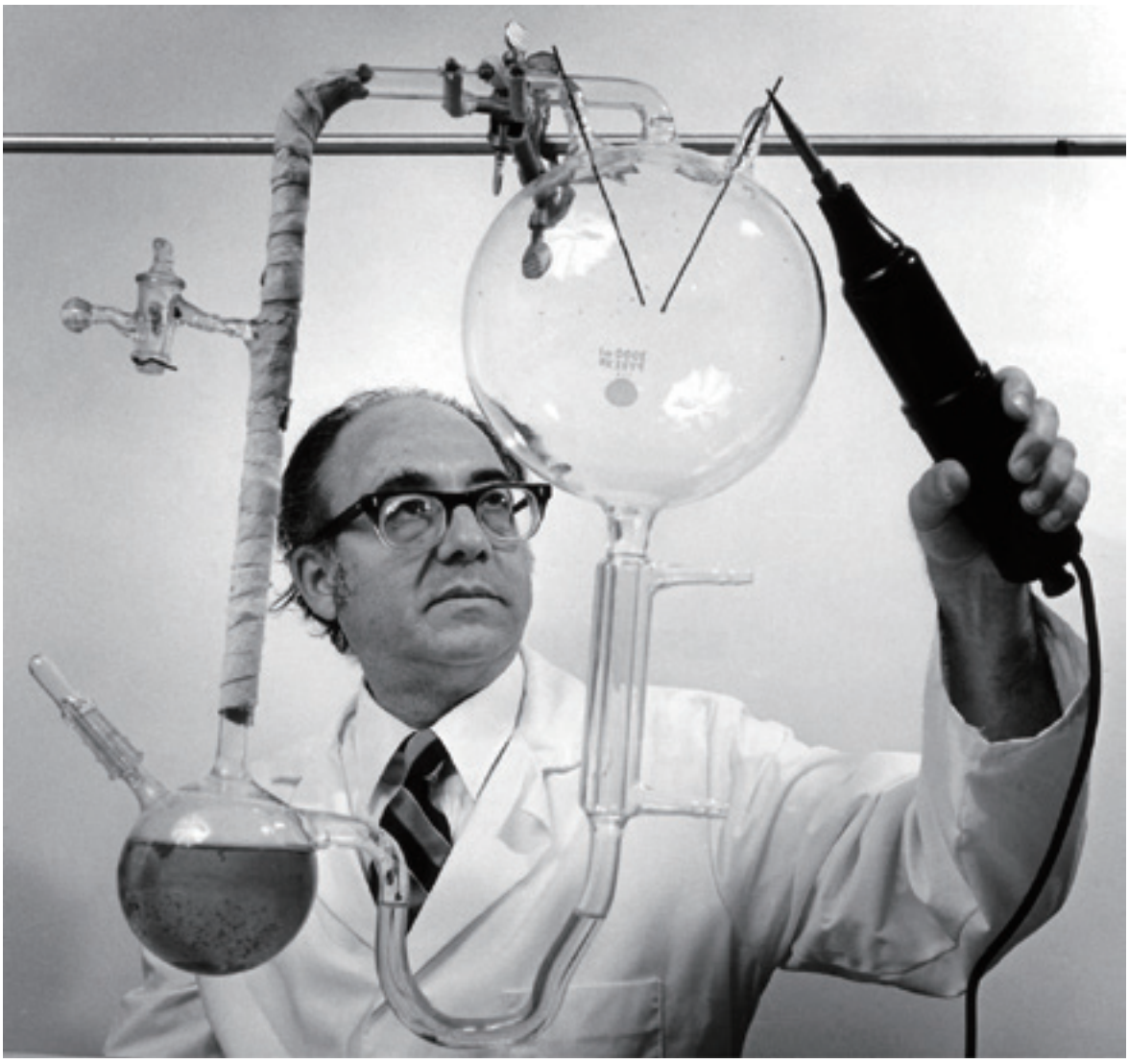
毎年開催されるELSI国際シンポジウムのディスカッションセッション



12.「ぐちゃぐちゃ」の化学

生命の起源に迫る新しいアプローチ

よく知られているように、50年以上前、スタンリー・ミラーとハロルド・ユーリーは、水と、地球の初期の大気の成分だったと考えられる各種ガスをフラスコのなかに入れ、内部で放電を起こすことによって、アミノ酸をはじめとする、生命の構成要素となる化合物を生成した。

生命の重要な構成要素が初期の地球でいかに生成されたかを再現した、あるいは少なくとも、生命の重要な構成要素は、さらに単純な要素から合成できるという説を証明した、画期的な実験として称賛を集めた。

生命の起源に取り組む科学者コミュニティーの外側ではほとんど語られることがなかったのが、この実験では、これと同時に、ビーカーの内側にびっしりと、黒っぽい色をした、べとべとのタール状のものが付着していたことだ。この黒っぽいべとべとしたものも、彼らの実験で生成されていたのである。この残留物は当時、そして、その後何千回と繰り返された、生命の起源の再現を試みる同種の実験でも、大した意味のない、無用のものと

片付けられた。

ところが今日では、一部の大胆な研究者たちが、このタール状の残留物を、違う角度から見ている。

ひょっとすると、タール状のものも、もてはやされているアミノ酸以上ではないにせよ、少なくとも同じくらい重要かもしれないと、彼らは言う（つまるところ、アミノ酸は、抽出されるまでタールのなかにあったのだから）。もしかすると、ぐちゃぐちゃのタール――有機性の成分とエネルギー源との相互作用で生成したもの――は、かなりの進歩を遂げながら、真のブレークスルーはまだ起こっていない分野に、状況打開の道を提供してくれるかもしれない。

現在このタールを研究している者たちは、アミノ酸等の重視されている有機化合物を対象にする、「クリーン」な化学の対極にあるものとして、自分たちの研究を「ぐちゃぐちゃ」の化学と呼ぶ。

タイプの異なる「ぐちゃぐちゃ」の化学に取り組んでいる研究所は、ほかにもある――カーネギー研究所のGeorge Codyの研究室や、ジョージア工科大学のNicholas Hudの研究室など――が、最も集中的に取り組んでいるのは、おそらく東京のELSIだ。

そこでは、「ぐちゃぐちゃ」の化学は、これまで無視されてきたが、実は前途有望な方向で、ほとんど使命に近いものだ、と受け止められている。

「古典的な生命の起源を探る合成化学・生物学では、ひとつの反応に注目して、その主要な結果を分析していました。A + B = C + Dです」と、ELSIの主任研究員で、「ぐちゃぐちゃ」の化学プロジェクト全体のリーダーでもある、化学出身の宇宙生物学者、Irena Mamajanovは言う。

「しかし、生命はそのようなものではありません。それはひとつの反応ではないのです。科学者たちは、膨大な数の反応の、ごく一部の反応群を対象に研究していますが、私たちは、『この複雑な系全体を見ればいいじゃない？』と問いかけているのです。」

実は、「ぐちゃぐちゃ」の化学は、既にかなり広範囲にわたって脈々と続いてきている。たとえば、複雑系や反応系の研究は、多くの分野で長年にわたって研究されているが、「ぐちゃぐちゃ」の化学も基本的にはそれらと同じだ。初期の地球で、非生命的な化学物質が、「生命」のさまざまな性質を持った化学系へと、ゆっくりと変換されていった（あるいは、自ら変化した）、「ブラックボックス」的で、まだよくわからない時期に、システム的アプローチを適用する手法が、「ぐちゃぐちゃ」の化学で多用される。

「ぐちゃぐちゃ」の化学の研究の認知度は次第に上っており、Mamajanovは、アリゾナ州メサで開かれた2017年Astrobiology Science Conference（宇宙生物学会議）の全体会議で、基調講演者となった。ELSIだけでも、さまざまな研究者が、金属、電気、放射能、コンピュータ化学、そして分析化学を使って、ユーリーとミラーの実験で生じたようなタールのなかに、パターンと構造を見出そうと努力している。

「MESSY CHEMISTRY（「ぐちゃぐちゃ」の化学）」のTシャツを着る、宇宙生物学者で化学者でもあるIrena Mamajanov（右）と、前生物化学者のKuhan Chandru（左）。Mamajanovは、ELSIで、初期の地球の化学系が、無数の未知の反応を経て、生命の構成要素へと変貌することを可能にした「ぐちゃぐちゃ」の経路を新たに発見する取り組みの、先頭に立っている。

Mamajanovは、この「ぐちゃぐちゃ」の化学のアプローチ――彼女自身は、カーネギー研究所とジョージア工科大学のそれぞれで研究員だった当時に学んだ部分が大きいという――は、直感的にも、科学的にも納得の行く方法だと言う。なぜなら、複雑でなければ生命ではあり得ないからだ。

生命の起源は、周囲で起こっているすべての化学プロセスとは無関係に、まっすぐ進むプロセスよりもむしろ、地

球に出現した最古の複雑系のいずれかに見つかると考えるほうが理に適っているのではないだろうか？

タールは、いくつかの重要なプロセスを起こすので、べとべとしたタールが何らかの役割を演じると考えるのは合理的だと彼女は言う。タールは、さまざまな化合物を集中させ、封じ込め、そして、やがて生きた実体の基本的な構造へと進化させられる、原始的な（すなわち「ぐちゃぐちゃ」の）足場のようなものを生むことができる。

「ぐちゃぐちゃ」の化学の、特に有望な側面のひとつとして際立っているのが、構造だ。より伝統的な合成化学では、「クリーン」な反応によってもたらされる単純な分子を探しているが、「ぐちゃぐちゃ」の化学は、まさに正反対のことをしている。

「ぐちゃぐちゃ」の化学の目標は、ある特定の量の「ぐちゃぐちゃ」で複雑な試料のなかで、どんな面白い化学プロセスが起こるかを見ることだ。どんな驚異的な化合物や化学構造が形成されるのだろう？　さらに、それらのものは、化学的自己組織化のプロセスについて、ひいては、生命の起源を巡る疑問全般について、何を明らかにしてくれるのだろう？

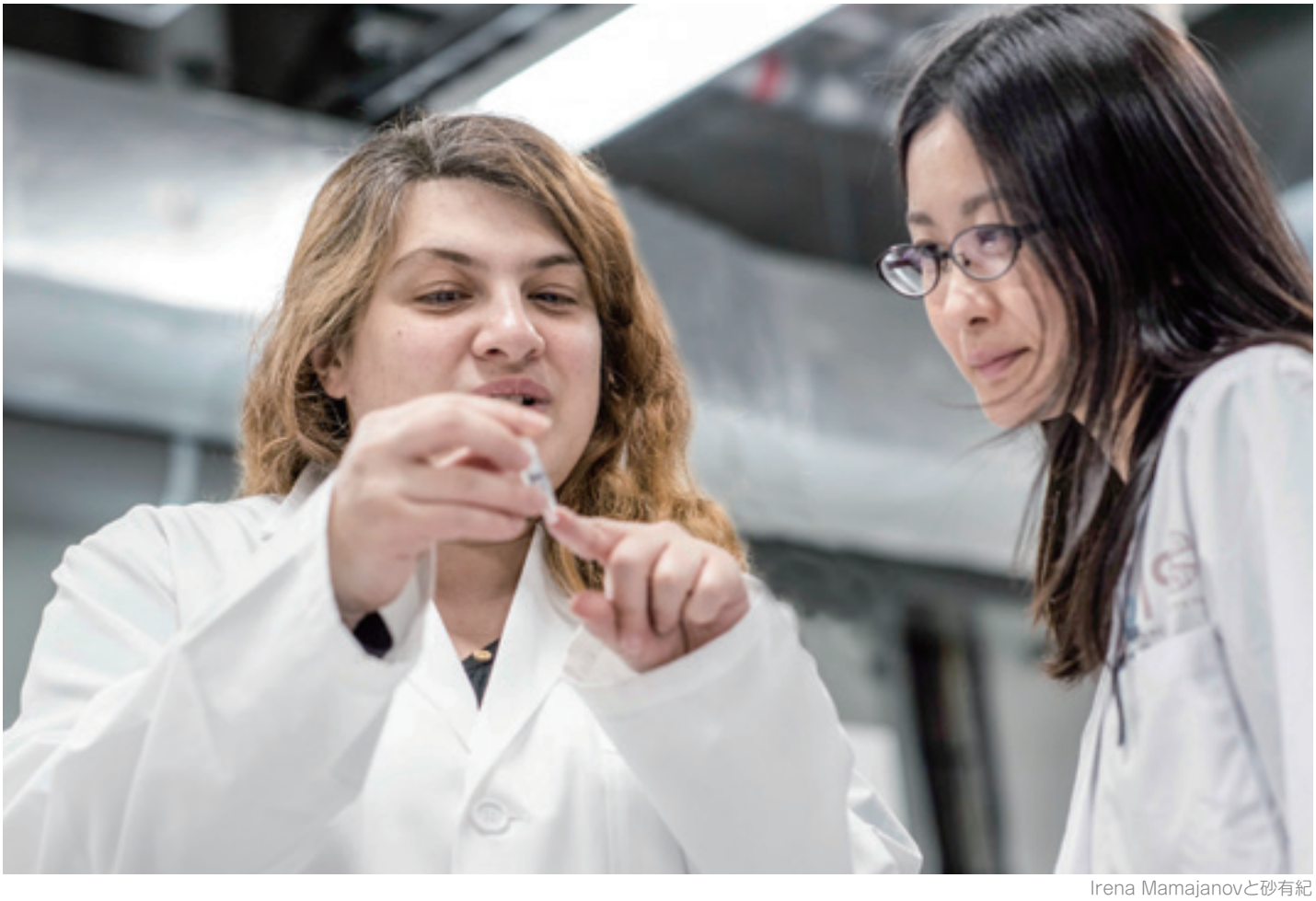
ELSI-1（石川台７号館）の地階にある自分の実験室で、Mamajanovは同僚たちと共に「ぐちゃぐちゃ」の分子を合成し、その構造、潜在的適応性、そして、生命に特有のRNAおよびDNA分子の前駆体である可能性について、より深く攻め込んだ研究を行っている。

彼女自身の研究テーマは超分岐ポリマー――同じ構造が繰り返して結合し、３次元の樹状分子となったもの――だ。結合の結果、球状となり、さまざまな化学反応を起こし、球の内部には、周囲から隔離された空間が多数存在する。彼女が取り組んでいるものに近い合成化学物質やバイオミミック（生物模倣）化学物質（生体化合物や生体プロセスを真似て作られた化学物質）が、以前から製薬産業で利用されている。

これらの超分岐ポリマーを使って、Mamajanovは、「ぐちゃぐちゃ」の系のなかに、ポリマーが進化可能性を示す経路を作る研究を行ってきた。

超分岐ポリマーは自然界に存在し、特に石油が形成されるプロセスで多く生じるが、研究目的で人為的に合成することもできる。Mamajanovが化学物質から合成するタールは、べとべとしてはいるが、茶色くはなく、透明だ。

彼女の超分岐ポリマーは、応用分子進化基金（FfAME）のSteven Bennerやスクリップス研究所のGerald Joyceを



Irena Mamajanovと砂有紀

はじめとする、生物学研究目的の合成化学を行う著名な研究者らのものと同じく、合成物である。

だが、彼らの研究は、目標のみならず、出発点も、彼女のものとはまったく違っている。BennerとJoyceは、生命の構成要素である分子を生み出す「クリーン」な化学系を作ろうとしており、彼らは、タール抜きでそれを達成したいと考えている。一方Mamajanovは、意図的にタールを作っている。

複雑系、物理学、そして化学の専門家で、やはりELSIのメンバーであるEric Smithは、「ぐちゃぐちゃ」のアプローチには、重要な新しい前進の道をもたらす種(たね)が含まれていると考える。「私たちが今『ぐちゃぐちゃ』の化学と呼んでいるものは、かつては完全に主流から外れていました」と彼は言う。「今はもう、そうではありません。」

Smithは、イギリスのケンブリッジの、MRC分子生物学研究所で、かつてJohn Sutherlandが、「ぐちゃぐちゃ」なものをすべて排除した、制御された化学を使った、RNAの重要な構成要素の前生物学的な構築に関する研究を行い、称賛を得た経緯を説明してくれた。

ところがその後 Sutherlandは、このような制御されたモデルを使ったことで批判されるようになった。つまるところ、初期の地球には、外部の制御者などいなかったからだ。今ではSutherlandも、前生物学的化学の「ぐちゃぐちゃ」な側面も取り入れていると、Smithは言う。とはいえ、Sutherlandは今なお、タールの大部分は障害物に過ぎないと考えているそうだ。

「今彼は、『ワンポット合成』〔訳注：容器に反応物を順に投入し、中間生成物の単離や精製を行わずに、多段階の反応を連続して行わせる合成手法〕に戻り、以前に比べればはるかに制御されていない反応が起こる状態で研究しています」と、Smith は説明する。「彼のやり方は、Mamajanovをはじめとする、『ぐちゃぐちゃ』の化学をやっている人々とはまったく違うかもしれませんが、それでもやはり、複雑な反応を多数起こせるはずです。」

そして、複雑性こそ、目指すゴールだ。単に繰り返し起こる反応というのではなく、また、ランダムな反応でもなく、極めて複雑だが、突き詰めると構造を持っている反応である。

果てしない複雑性のなかに構造を探すというこの取り組みにおいて、「ぐちゃぐちゃ」の化学によるアプローチの、新しい側面が関わってくる。ELSIのMamajanovらは、「人工」化学の研究者たちとコラボレーションを行っている。人工化学とは、「ぐちゃぐちゃ」の相互作用のなかで、何が起こっているかをコンピュータでシミュレーションして推測する分野だ。

この研究を中心になって進めているのが、人工生命の専門家Nathaniel Virgoだ。彼は、ごく少数の化学成分が制御下にある状態にしておいて、研究室を立ち去ったあと、その化学系はどのように振る舞うかを、コンピュータを使って探ろうとしている。

彼が今抱えている重大な疑問は、「化学において、『無秩序から秩序』が得られるような状況――つまり、『ぐちゃぐちゃ』の系から出発して、それが自然に、より秩序ある状態になるような状況――があるだろうか？もしもあるのなら、それが起こるにはどんな条件が必要で、その結果生じるのはどんな種類の秩序なのだろう？」というものだ。

Nathaniel Virgo

Mamajanovにとって、「ぐちゃぐちゃ」の化学系がどんな振る舞いをするかを解析し、予測するためには、Virgoのコンピュータ手法が必要だ。というのも、関与している可能性がある化学反応だけでも膨大な数にのぼるからだ。そしてVirgoにとって、「ぐち

ゃぐちゃ」の化学は、彼の抽象的な問い――一見するとカオスのように思えるものから、秩序を生み出す可能性を巡る問い――の、一種の実験台として必要だ。彼らは互いに、相手のための仮説生成マシンなのだ。Virgoは、無秩序から秩序を（そして彼の考えでは、最終的に、無生物から生物を）生み出す可能性を巡る問いに答えるために、コンピュータによる研究が重要である主な理由をいくつか挙げた。

「ひとつ目は、単純に、『ぐちゃぐちゃ』の化学を実験で研究するのは本当に困難だということです。『ぐちゃぐちゃ』が入った試験管が１本あるとすると、そのなかにどんな分子があるか突き止めるには、たくさんの作業が必要ですし、どんな反応が起こっているかを把握するのは、少なくとも膨大な量の作業なしには、不可能です。これとは対照的に、シミュレーションでは、どんな分子とどんな反応が存在するか、正確にわかるのです。たとえ数百万の異なるタイプがあったとしても。」

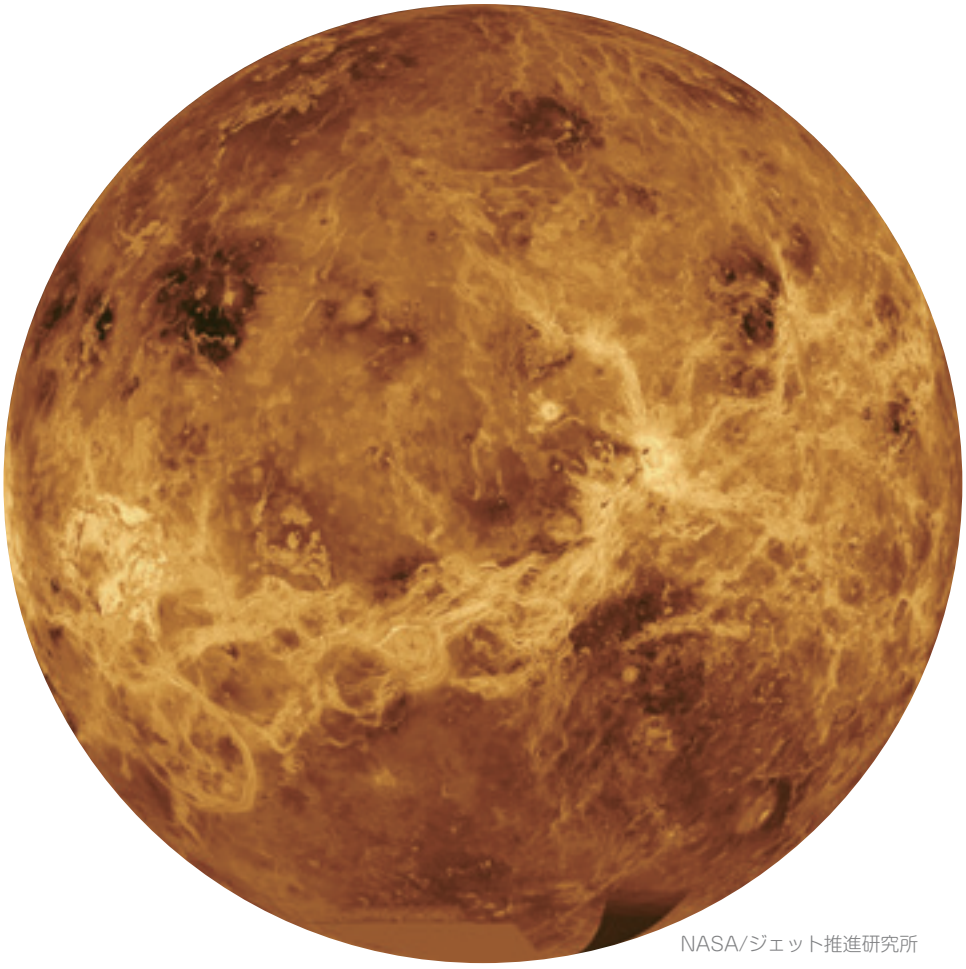
「複雑系科学者として、私はまず、どんな現象でも、それが起こるためには何が必要かを知りたいのです。これがわかれば、現実に存在するどんな系が、それを満たす特性を発現するか、はっきりするでしょう」とVirgoは語る。

「その結果、私たちは、生命の起源に関する莫大な数の仮説のなかで、正解を絞っていくことができるでしょう。一度にひとつずつ、仮説の検証実験をする必要はなくなります。また、現在地球に存在している、タンパク質－核酸－代謝産物系統の化学とはまったく違う化学による生命は可能かという問いにも、何らかの洞察をもたらしてくれるはずです。」

自身の研究で、彼はこれまでに、「ぐちゃぐちゃ」の化学系では、化学的自己生産が起こること、そして、温度の上昇などの些細な変化に応答して、系は劇的に変化し得ることを発見した。

「このことは、『ぐちゃぐちゃ』の化学は、『クリーン』な化学とは根本的に、質的に異なることをうかがわせます――多くの種（しゅ）を加えても、系はただ研究しづらくなるだけではなく、根本的に新しいことが起こり得るということなのです。」

そして、生命の起源に取り組む研究の世界では、間違いなく新しいことがいろいろと起こっている。



NASA/ジェット推進研究所

13. 太古のマグマオーシャン

形成の最終段階にあった地球は、耐えがたい暑さの、苛酷な場所だった。だが、おそらく、皆さんが想像されているのとは少し違った苛酷さだった。

ポピュラーサイエンスの本などでは、この時期の地球を、隕石が降り注ぎ、至る所で火山が噴火して、ごつごつした岩の周りに赤熱の溶岩が流れている姿に描いていることが多い。しかし、この時期を研究している科学者たちによれば、実際はこれとはかなり違っていたという。

その時期を通して、陸地が存在したことはほとんどなく、中型から大型の隕石が2〜3000年ごとに飛来し、地表は、室温ぐらいの一定温度の油状のものに覆われていた。もちろん、まだ生命が出現する前なので、石油ではない。主に溶融したケイ酸塩と鉄が、地表を覆っていた。いわゆるマグマオーシャンである。

このマグマオーシャンは、ところによっては、火星の半径ほど深かったようだ。そして、二酸化炭素、シリカ粉塵、その他の有毒ガスと、のちには水蒸気も混じった、分厚い大気層を形成したと推測される。

隕石の衝突は、この最初期の頃から大きな役割を演じていたが、マグマオーシャンのダイナミクスは、むしろ超高温マグマ（1000℃以上）の対流

によって決まっていた。ほかにも重要な役割を担っていたのが、地表を吹いていた強風、マグマが頻繁に形成した蒸気雰囲気、そして最終的には、数億年にわたって続き、固体の地殻を形成した、冷却のプロセスだった。

今、マグマオーシャンには急速に科学的関心が高まっている。というのも、すべての地球型惑星や、一部の衛星の形成に、マグマオーシャンが関わっていた可能性があるからだ。

研究では、マグマオーシャンの性質と多様性を理解することに注目しているが、最近では、地球で、そして、ひょっとするとほかの惑星でも、マグマオーシャンが生命の起源の物語で演じたかもしれない重要な役割について、ますます注目が集まっている。

濱野景子

科学者たちは、惑星の歴史の最初期にマグマオーシャンが持っていた性質と、その役割について、ますます詳しく調べようとしている。地球の溶融岩石の海は、比較的短時間で固化し、脱気した。一方、金星の表面は現在、乾燥した灼熱状態だが、これは、金星のマグマオーシャンが非常に長期間存続したあと、残していったものなのだろうか？

この地球の初期を理解することが非常に重要なのは、単純な理由からだ――つまり、地球上の生化学は、地球化学（すなわち、岩石や堆積物）から始まったからである。最初の地球化学の一部は、マグマオーシャンで起こったのであり、最終的に生命の誕生につながっていった、最初期の条件をできる限り詳しく知ることは理に適っている。

その上、マグマオーシャンは、溶融鉄が沈下して、地球のコア（磁場を形成するには不可欠）を形成できるような条件をもたらしたと、科学者たちは考えている。また、コア形成プロセスの結果、より複雑で分厚い大気が形成され、この大気が水の循環をもたらしたのだと推測されている。地球で起こったこれらの変化のすべてが、生息可能な惑星の形成と、生命の出現の前提条件であろうと、科学者たちは考えている。

このようなわけで、マグマオーシャンはELSIの中心的なテーマとなっている。マグマオーシャンを巡るさまざまな問題には、世界中の研究者たちが個別に取り組んでいるが、ELSIには、このテーマに本格的に取り組むに十分な人数の、さまざまな分野の科学者が、世界中から集まっている。ELSI副所長のJohn Hernlundと、彼の妻で地震学者のChristine Houserもそのチームのメンバーだ。

地球物理学者のHernlundは、「つまるところ、マグマオーシャンは、私たちはどこから来たのかという問いに対する答えなのです」と言う。そしてそれは、生命の誕生につながった地球進化がいかにして始まったかという問いの答えでもある。

彼は、この液化した金属と鉱物の広大な海原を、集めた材料から料理を作るキッチンになぞらえる。

「野菜と肉を水を張ったなべに入れただけ、あるいは、それらのものをただ置いておいただけでは、面白いものは何もできないでしょう」とHernlund。

「加熱しなければなりません。そして、マグマオーシャンは、その熱を、悠久の時に対して、提供するわけです」とHernlundは続ける。

これらの溶融物質の大海は、主に金属とケイ酸塩からなり、ほかにCO_2、メタン、水蒸気などのガスと、宇宙から小天体が飛来して地球に衝突したあとに残った微量元素が含まれていた。マグマオーシャンは、地球全体を覆うこともあれば、部分的にしか存在しないこともあったが、やがて、十分冷えて結晶化し、最初の地殻が形成された。

しかし、ここで注意しなければならないのは、マグマオーシャンが初期の地球に存在したことと、その基本的な性質について、一部の地球化学者たちが一致した見解に達した一方で、彼らの共通認識を具体的に証明するものはほと

んど存在しないことだ。マグマオーシャンそのものの残留物は存在しない。遠い過去にそれが存在したことを示唆する証拠となる化学的な兆候があるだけだ。マグマオーシャンが存在したこと自体に異論を唱える科学者がいるのも驚くに当たらない。

しかし、HernlundやHouserなどの科学者が、マグマオーシャンなしにはあり得なかったはずだ、と考える物理的実在がいくつか存在している。第１に、地球の中心にある、主に鉄でできたコアだ。コアの存在は、マグマオーシャンなしに説明するのは難しい。

鉄は、ケイ素やケイ酸塩との混合物として、原始の地球に飛来したと考えられる重金属だ。これらの元素を融かしてしまうほどの熱が存在しなかったなら、鉄は元々の場所に、ケイ酸塩や原始の地球にあったほかの物質と混合した状態で、存在しつづけたはずだ。

Hernlundやほかのの ELSIメンバーの深部地球科学者にしてみれば、論理的に考えるなら、岩と金属を融解して、他のものよりも重い液体状の鉄が地球の中心まで沈降できるようにした、超高温のマグマオーシャンが存在したと考えるのが自然だ。これと同様のことが、地球の衛星、月で起こったことが知られている。

地球では、十分な量の鉄が沈降し、地球を保護する磁場の源として重要な、コアとなった。

マグマオーシャンは、際立った現象で、はっきりそれだとわかりやすいものの、その存在、振る舞い、凝固のしかたは、すべての惑星と衛星で、まったく同じわけでは決してない。

もうひとりのELSI研究者で、惑星システム学の専門家、濱野景子は、地球と金星という、非常に共通点が多い２つの惑星において、生じた可能性があるマグマオーシャン期に関する論文を『Nature』誌に発表した。実のところ濱野は、惑星の主星に対する位置、大きさ、化学組成に基づく、より包括的な、太陽系外惑星も含めた結論を出している。

濱野は、主星から、ある特定の距離――一種の臨界距離のようなもの――よりも遠い惑星は、マグマオーシャン期がかなり短く、数百万年程度だった一方、臨界距離よりも近い惑星では、マグマオーシャン期が数億年を超える場合もあると考えられることを発見した。

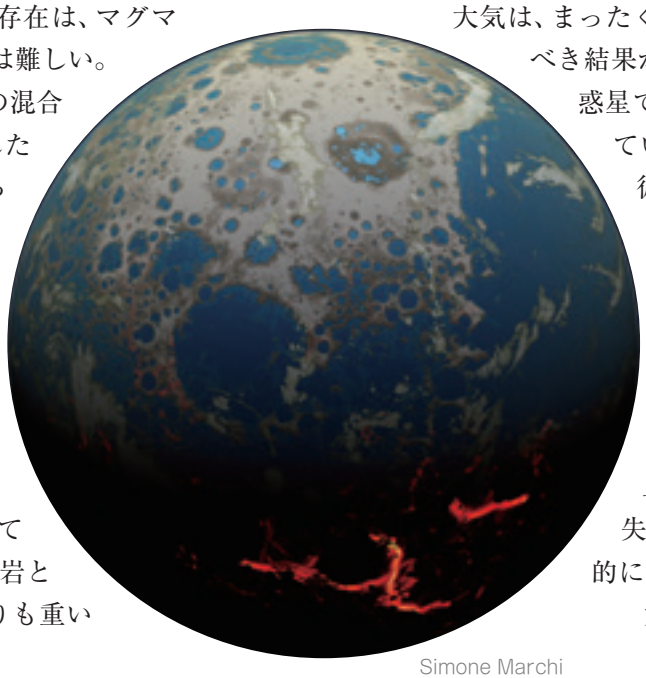
モデルを使った研究で、マグマオーシャン期の長さが違えば、それ以外の点でいかに似ていようとも、惑星とその大気は、まったく異なる運命をたどるという、驚くべき結果が出た。マグマオーシャン期が短い惑星では、マグマ内部に水蒸気が存在していれば、それが保持され、徐々に再循環されて、やがて水の海ができる可能性が高い。

しかし、主星との距離が短く、マグマオーシャン期が長い惑星では、いくばくかの水が分子の状態で元々存在していたとしても、水の分子が崩壊し、軽量の水素は上層大気や宇宙へと上昇して、水は失われてしまう可能性が高い。最終的には、その惑星は乾燥すると同時に、大気中に放出された水蒸気と、大気に含まれる温室効果ガスのせいで、超高温温室状態にとどまり続けるだろう。

遠い昔にこのようなマグマオーシャンが存在したことが、地球は気候が穏やかで、生命を維持しているのに対し、それ以外の点では非常に似通っている金星は、干からびて、表面温度も460℃だという、大きな違いを説明してくれるかもしれない。少なくとも、説明に役立つに違いない。

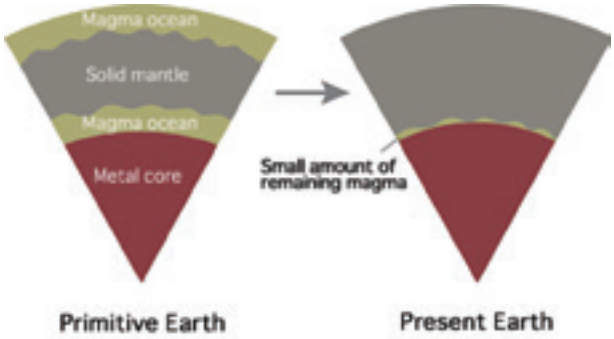
「大気を研究する人々は、マグマオーシャンそのものには関心がありませんし、マグマオーシャンの研究者は初期の大気についてはあまりよく知りません」と濱野。「私は、この２つの分野を結び付けたいのです。なにしろ、両方を理解しようとしない限り、どちらも本当に理解することはできませんから。」

濱野はさらにもうひとつ、実に興味深い可能性を紹介してくれた。金星を巡る長年の疑問のひとつが、その表面が、ほぼ滑らかで、クレーターがないことだ。惑星科学では、こ



Simone Marchi
/サウスウェスト研究所

原始の地球では、小惑星の頻繁な衝突と、地球形成の熱とにより、固体マントルの下まで続く、深いマグマオーシャンが生まれた。マグマオーシャンは徐々に冷えたが、おそらく今なお、マントル底部の超低速領域として、ごく微量ながら残っていると考えられる。(東京工業大学廣瀬敬)。



アゴラで、環太平洋造山帯に関連付けられる、地震活動や火山活動について議論するJohn HernlundとChristine Houser.

れは一般に若い惑星の兆候だ。ところが金星はそうではない。地球と同時に形成されたのだ。

濱野は、滑らかな表面は、マグマオーシャンと大気の関係によってもたらされたのかもしれないと示唆する。金星では熱が失われなかったため、金星の大気が金星全体を非常に高温に保ち、マグマオーシャンが35億年ものあいだ存続できたのかもしれない。そんなマグマオーシャンに隕石が落下しても、クレータが残ることはない。

マグマオーシャンがいかにして出現したかについても、惑星ごとに違うはずだ。

おそらく最も多いと思われるのが、微惑星、小惑星、あるいは、地球の月の場合のような、火星に近いサイズの惑星などの衝突で生じるケースだ。衝突時の衝撃で、莫大な熱が生じ、その熱が外に放出され、惑星全体に広がり、場合によっては内部の深くまで及ぶ。

初期の内太陽系には、現在見られるよりもはるかに多くの物体が飛翔しており、地球のような惑星は、マグマオーシャン期を何度も経験した可能性があると、惑星形成の専門家でELSIの副所長の、井田茂は言う。

マグマオーシャンは、高圧水素が大気に放出され、まとまることによって生じるような、猛烈なグリーンハウス効果で形成された可能性もある。このプロセスは、衝突説の代案、あるいは結果として提案された、岩石をも融かすほどの高温をもたらすものだ。

井田の説明によれば、アルミニウムの同位体のひとつで、主に超新星で形成されるが、原始太陽系でも多量に存在したことが知られている、アルミニウム26の放射性崩壊によって、マグマオーシャンは、もっと小さな物体にも生じる可能性があるという。この放射性崩壊により原始太陽系で発生した熱は、小惑星セレスやベスタのような小さな天体や、一部の原始惑星の上で、岩石を溶融させ、ケイ酸塩から鉄を分離させたと考えられている。

「地球にマグマオーシャンをもたらした原因は何かについて、私たちはそれぞれの説を持っていますが、誰もまだ証明できていません」と井田。「ものすごい熱があって、溶融が起こり、そして、鉄とケイ酸塩の分離が起こったことはわかっていますが、実のところ私たちは、地球についてすら、その熱が大型の天体の衝突によるものか、グリーンハウス効果によるものか、まだわかっていないのです。」

マグマオーシャンで泳ぎたければ、私たちの太陽系にこだわる必要はない。

濱野（Astrophysical Journal誌掲載の論文で）もHernlundも、マグマオーシャンは、現在もあちこちの銀河で常に形成されており、このようなマグマオーシャンのある惑星は、将来、太陽系外惑星の直接撮像を行う際、対象の候補に必ずあがるだろうと言う。そんな惑星を見つけるコツは、若い恒星と、それを周回する若い惑星を探すことだ。

ある特定の化学的兆候を検出することによって、太陽系外惑星のマグマオーシャンを発見できたなら、それは、現在の惑星形成についての重要な洞察を、そしてまた、私たちの遠い過去についての、非常に興味深い事実を、垣間見させてくれることだろう。

14. 放射線、水、そして生命の起源

初期の地球で、生命は、あるパラドックスから始まったようだ。生命には溶媒としての水が必要だが、その一方で、初期の生命を形成した分子の根幹となる化学骨格は、水のなかでバラバラに分解してしまうのだ。

このパラドックスは、生命――あるいは、生命の前駆体――は、どこか別の天体で誕生し、その後彗星もしくは隕石によって運ばれてきたという証拠だと指摘する者たちもいる。一方、生命形成に必要な水の性質を持つが、結合を切断してしまう腐食性を持たない溶媒を探す者たちもいる。

最近、水に代わる原初生命生成溶媒として、候補にふさわしいものとしてよく提案されるのが、ホルムアミドだ。ホルムアミドは、水素、炭素、窒素、酸素からなる、透明で軽い刺激性がある液体である。水とは違い、生命の鍵となる最初の指示マニュアル、RNAを構成する核酸やタンパク質の長鎖分子を分解したりしない。その一方で、ホルムアミドは、いくつかの有用な反応を経て、核酸を一から形成するのに必要な成分に変化する。

ホルムアミドは、宇宙のなかで恒星が盛んに形成されている領域に多く存在するが、科学者たちはこれまでのところ、初期の地球にホルムアミドが広まっている、あるいは、

局所的に集中している状況が生じるシナリオを、まだ見つけていない。じつのところ、ホルムアミドは、人為的に合成されたもの以外、現在地球にはほとんど存在しないのである。

ハーバード大学の地球化学者、Zachary Adamと、ELSIの複雑系科学者・青野真士（2017年４月１日から慶應義塾大学 環境情報学部 准教授着任）は、放射性粒子の照射という、驚異的だが再現性のある方法でホルムアミドを生成することに成功した。

2人とその同僚たちは、初期の地球上に存在していたことが知られている２つの化学物質（シアン化水素と含水ニトリル）を混合したものに、コバルト60――がん治療に広く利用されている、人工的に作り出された放射性同位体――が入ったシリンダーから放出される高エネルギー粒子を浴びせた。その結果、相当な量のホルムアミドが、理論的モデルや実験による従来の試みよりも短時間で生成されたと、彼らは報告している。

初期の地球に、ホルムアミドの生成につながる一連の化学反応を起こすに十分な量の放射性物質が、しかるべき場所に存在したかどうかはまだわからない。また、たとえ条件が整っていたとしても、ホルムアミドが生命の起源において重要な役割を演じたかどうかについても、まだ結論が出ていない。

とはいえ、この新しい研究は、水以外の溶媒が生命の起源で重要な役目を果たした可能性を一歩前に推し進める証拠であり、また、生命の基礎について、異なる描像を提供している。さらに、このようなプロセスが太陽系外惑星でも起こっていた可能性も示唆している――どこかの系外惑星でも、水以外の溶媒が、放射線源からのエネルギー供給を受けて、単純な化合物が、より複雑な生命の構成要素へと変化するために必要な条件を作り出していたかもしれないわけだ。

「想像してみてください。私たちが知っている生命に似ているけれども、明確に異なり、違う化学的ルールに従う、まったくユニークな、相互作用する分子のネットワークが生み出した、水溶性の生命というものを」と、Adamは言う。

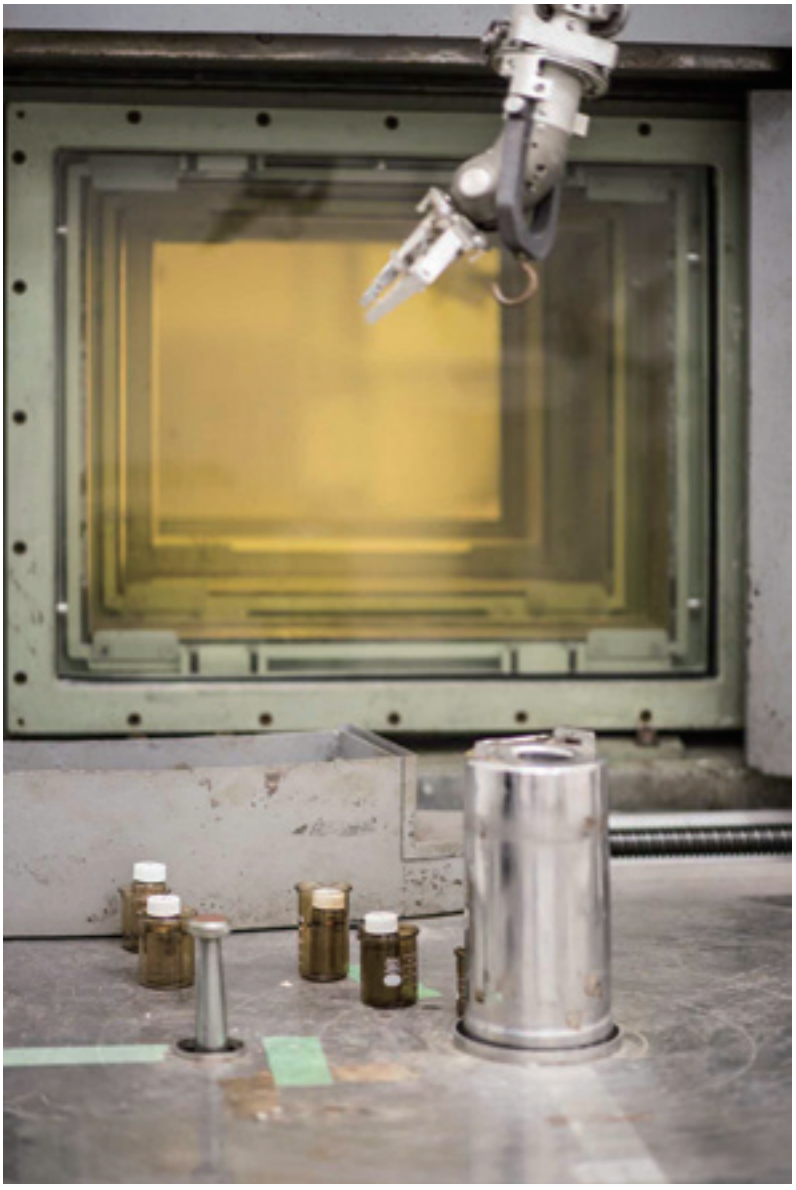
彼らの研究は、最近行われた、国際生命の起源学会と、宇宙生物学会議、それぞれの会合で発表された。

水のパラドックスの解決策としてホルムアミド仮説を提唱したのも、また、高エネルギーの放射性粒子が、生命の起源で演じていたかもしれない役割を推測したのも、決してAdamと青野のチームが最初ではない。

トゥーシア大学のRafaelle Saladinoが率いるイタリアのチームは、先ごろホルムアミドを、生命に必要な元素を供給し、水のパラドックスを回避する化学物質として提案した。マリー・キュリーが放射能の現象を記述して以来、粒子を捨てていく原子核から出る放射線が、地球の生命の誕生で果たした大小の役割を、科学者たちは無数に提案してきた。

Adamと青野がやったように、ホルムアミドと放射能の科学を融合することは、重要な前進である可能性は高いが、より深い研究が必要だ。

「もしも溶媒としてホルムアミドがあるなら、これらの前駆体分子は安定に保たれます。非常に面白い生成物を保存する、一種のゆりかごですね」と、ELSIのファローを続けながら、現在は東京を拠点とする慶応大学に移っている青野は言う。



東工大のキャンパスにある、厳重に保護された保管庫のなかに、放射性のコバルト60が入ったキャニスタが置かれている。コバルト60は、航空学や軍事研究で長年使用されてきたが、今では生命の起源の研究にも関わっている。

放射線実験施設にいる青野真士（右）と、技官の依田功（左）。コバルト60は安全に格納されている。

元素（アルミニウム26、鉄60、ヨウ素129など）が、数分間から数百万年間放射線を出し続ける能力を持った、放射性同位体として、地球の初期から今日に至るまで存在してきたが、これらの同位体は、現在よりも初期の地球で多く見られたこともよく知られている。実のところ、今例として挙げた３つの同位体は、現在の地球では、自然界のものは、消滅してしまったか、ほとんど消滅しまったかのいずれかである。

それほどよく知られていないのが、天然原子炉の存在だ。水の存在するところに高濃度のウランがあると、ウランは自律的な核分裂を起こし、天然原子炉を形成するのである。

これまでに発見された天然原子炉は、アフリカのガボン共和国のオクロ地域の１ヶ所のみだが、ここでは、周囲に比べ、放射性物質が異常に多く消費されている場所が16地点特定されている。科学者たちは、オクロ地域では約20億年前に、自然発生的な核分裂反応が広範囲にわたって起こっていたと、最終的に結論づけた。

そのころは、もう地球に生命が出現してから相当経っていたはずだが、そのような天然原子炉が存在していたという事実は、オクロにこれができるずっと以前に、どこか他の場所で同じようなものが存在した可能性を示唆している。

コバルト60を使った実験は、ホルムアミドの生成を集中的に行う方法を見つけるために始まったのではなかった。Adamは、もっと全般的に、さまざまな分子や溶媒に対してガンマ線が及ぼす影響を調べていたのだし、青野は、生命の起源において重要な役割を担った可能性のある放射線源を探していたのだった。

２人は、一種幸運な偶然で、ELSIで出会った。アメリカでは、自分の実験を行う実験室を確保できないでいたAdamは、ELSIにやってきて、東工大のキャンパス内に、ほとんど使われていない（しかも無料で使える）コバルト60専用の実験室があると、青野に教えられた。そこで２人は、すぐさまコラボレーションを始めたのだった。

初期の地球には、高エネルギー宇宙粒子やガンマ線が降り注いでいたことは、よく知られている。また、さまざまな

ホルムアミドを生成した放射性粒子がどこから来たかについては、Adamも青野も未だにわかっていない。しかし、２人は、そのような反応が実際に起こり、RNAの主鎖の前駆体がすべて近くに見つかるような環境の成立につながった可能性は、十分にあると確信している。

ホルムアミドがいかにして地球に出現したかに関して、現在の科学界では、小惑星の衝突の際にごく微量持ち込まれたか、あるいは、砂漠のような条件で、水とホルムアミドの混合物が蒸発して、ホルムアミドの濃度が上昇したかのいずれかだろうという見解が主流だ。それらの主流の意見では、初期の地球ではホルムアミドの量は少なかったことになると、Adamは認める。

「私たちは何も、主流の説に反論を唱えているわけでは

Jim Cleaves

ハーバード大学のAndrew Knollの研究室に所属する地球化学者、Zachary Adam。

ありません。ただ、それはこのことには関係ないのでは、と言いたいだけです〔訳注：ホルムアミドが地球全体でわずかしかなかったとしても、それは局所的に高濃度な場所があった可能性を否定するものではないと言おうとしているだけ、ということ〕」と彼は言う。

初期の地球に、そのような環境が、ごく限られた数存在しただけでも十分かもしれない、つまり、それらの環境で、非常に長い期間にわたって、放射性分解が続き、かなりの量のホルムアミドが生成されていたなら、それで十分かもしれないと、Adamは言う。そうなれば、生命の真の前駆体となる化合物の生成を促進する、ユニークな化学反応が始まる機会も生じるわけである。

「すると、次の論点は、『このユニークな場所が存在した可能性はどれくらいあるのか？』になります。その答えはこうです。地球全体で、この条件に合う特別な場所は、たった一ヶ所あればいいのです」とAdam。

そのあとは、一旦働きだした系そのものが、生命の化学的構成要素をすべて、集めてまとめることができるはずだ。

「それが、この先何年かの間に、調べられたらいいな、と、私たちが期待している可能性なのです」とAdamは言う。

やはりELSIに在籍する有機化学者で、コバルト60の論文の共著者でもあるJim Cleavesは、ホルムアミドが、はるかに単純な化合物から合成できることは、確かに前進を意味するが、「生命の起源に関する研究には、確実な方法はありません。私たちは、このような事実を集めて、それらの事実がどこへ導いてくれるのか、様子を見るのです」と言う。

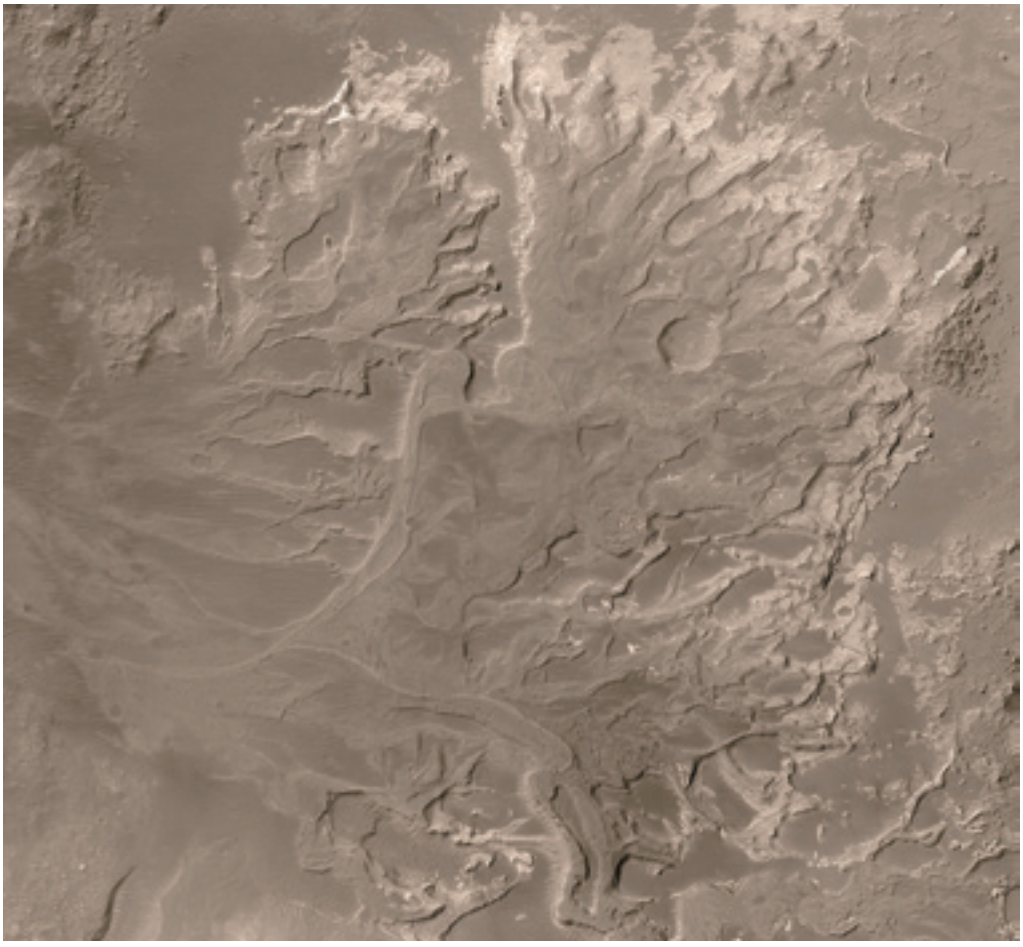
コバルト60のチームのもう一人のメンバーが、かつてはハーバード大学のノーベル賞受賞者Jack Szostakの研究室でポスドクだったAlbert Fahrenbachで、彼は今ELSIの准主任研究者だ。

有機化学者のFahrenbachは、その専門知識はこのプロジェクトに役立つはずだとのCleavesの見立てで、このプロジェクトに後から招かれたメンバーだ。

「生命の起源、あるいは、前駆体化合物を、放射線分解と結びつける研究は、1970年代と80年代にたいへん盛んでした」とFahrenbach。「その後は、ほとんど廃れて、見捨てられてしまったのです。」

Fahrenbachは、生命の起源に放射線分解が何らかの役割を演じた可能性については、いまだにはっきりとしたことは言えないという。しかし、コバルト60の実験には大変興味を引かれたと言い、そこから派生して、ガンマ線照射で生じた化合物の一部を使って彼自身の実験も実施し、その結果は非常に有意義だったそうだ。

「この実験に参加していなかったなら、私は、今進んでいる大変面白い道には、絶対に踏み込んでいなかったでしょう」とFahrenbach。



長さ113キロメートルに及ぶ、火星のエベルスヴァルデ・クレーターは、かつて川が流れており、平らな土地に広がっていたことを示す痕跡として最も明白なもののひとつ。2003年に、マース・グローバル・サーベイヤーという火星周回探査機から撮影された画像（NASA/JPL-Caltech/MSSS）。

15. 初期の火星がそれほど寒かったなら、なぜ火星の表面に大量の水があったのか？

地球と、そこに存在する生命の起源――地球科学はいかにして生命科学へとシフトしたか――を探る研究は、かつては地球にのみ注目していた。だが、もはやそうではない。

火星や、生命居住可能かもしれない、木星や土星の衛星への、NASAその他のミッションによって、そして太陽系外惑星に関する知識の爆発的増加によって、生命の起源の研究には、今新しい情報が押し寄せている。生命の起源の物語は、既に地球の外へと広がっており、生命の起源に取り組む研究機関も、対象域を地球外へと拡張しなければならない。

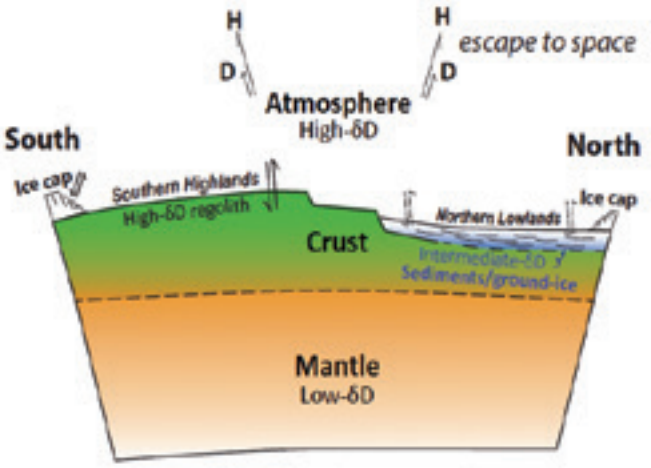
ELSIでは、惑星形成と、地球型惑星の最初期に存在したマグマオーシャンに注目していることに、この拡張がはっきりと見て取れる。だが新たに、初期の火星の生物居住可能性と、太陽系外惑星の大気をいかに把握するかに関する研究にも、注力し始めている。

ELSIの初期火星研究は、水に注目したもので、30～40億年前の火星表面に、どれだけの量の水が存在し、そのうちどれだけが液体状態で流れていたのか、という、重要で、盛んに議論されている問題に、特に焦点を当

てている。

ELSIの准主任研究者（2018年からはJAXA宇宙科学研究所の教授）で、地球化学と宇宙化学が専門の臼井寛裕は、現在は完全に乾燥しきっている火星の初期に、どれだけ水が存在したかという問題に、数年間取り組み続けている。

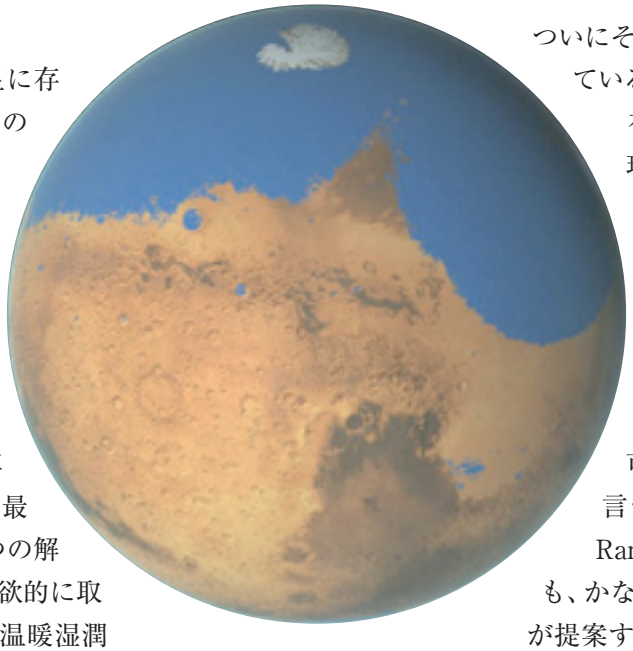
臼井をはじめ、NASAやその他の研究機関の同じテーマを研究する者たちは、火星の隕石に含まれる、水素と、水素の同位体で重さが約２倍の重水素の存在比を調べることによって、この問題に取り組んでいる。



彼らの結論はこうだ。火星にはかつて大量の水が存在したが、その大部分――90パーセント――が、火星の表面下に凍結した状態で今も残っており、火星の大気が消失した際にも、水素と酸素に分離したりして、吹き飛ばされることはなかった。

この表面下の貯水層に、初期の火星に存在した水の大部分が保存されているのだと臼井は言う。「私たちのデータからすると、そのはずです。」

初期の火星に存在した水を理解するELSIの取り組みは、Ramses Ramirezが最近ELSIに研究員として加わったことで、ますます拡張しつつある。



気候モデル作成者で初期の火星を専門とするRamirezは、初期火星研究で最も盛んに議論されている問題のひとつの解決につながるかもしれない研究に、意欲的に取り組んでいる。それは、初期の火星が温暖湿潤な気候であった可能性を否定しない気候モデルを構築し、広く受け入れてもらうことだ。

これを一層難しくしているのが、火星に関する地質学、地形学、地球化学的研究が進むにつれ、初期の火星はただ温暖湿潤だったのみならず、温暖湿潤な状態が相当長期にわたって続いたことが明らかになってきたことだ。

しかし、たいていの気候モデルでは、そのようなシナリオはほとんど不可能である。なにしろ、どんなモデルも、太陽系の初期には、太陽は約25パーセント暗かったことを考慮に入れなければならないのだ。

この問題は、NASAの火星ローバー、キュリオシティに加え、火星を周回する人工衛星によっても、初期の火星にかなりの量の水が存在したという十分な証拠が得られてからは、一段と深刻になった。

最近、キュリオシティ・ミッションの科学チームのリーダー、Ashwin Vasavadaは、ゲール・クレーター内部の、キュリオシティの着陸・探索場所には、最長10億年間――それまで推定されていたよりもはるかに長い――にわたって水が存在した可能性があると述べた。

火星から地球に送られてくる証拠は、どう見ても、モデルとまったく一致していなかった。

以前は、コーネル大学のカール・セーガン研究所でポスドクとして過ごしていたRamirezは、何年にもわたって、この問題の解決策を模索してきた。そして今、ついにそれを手にしたと、彼は確信している。

初期の火星（そして初期の地球でも）において、火山の噴火によって放出される大量の水素は、たいていのモデル作成者が使う、主に二酸化炭素によって引き起こされるものとは、まったく異なる温室効果をもたらした可能性があると、Ramirezは言う。

Ramirezが指摘する温室効果も、かなりの量のCO_2が必要だが、彼が提案する、豊富な水素の存在は、より強力で、長期に及ぶ温室効果を可能にする。

「現在のほとんどのモデルは、まったく間違っています」とRamirezは言う。「私が見るところでは、問題は、使われている仮定が、地質学的観察とは矛盾しているところにあります。」

彼の推論の鍵となっている因子は、臼井の研究が、初期の火星で大量の水が表面に存在していたことを支持していることだとRamirezは言う。火星の表面下に、非常に大きな氷の貯水層が現在も残っているのなら、初期の火星には大量の表面水が存在したと仮定するのはまったく理に適っている。

臼井もRamirezも、互いの研究についてよく知っていた

マース・ローバー、キュリオシティが2012年以来探査を続けているゲール・クレーターの巨大湖の痕跡を覆う泥岩（NASA/JPL-Caltech/MSSS）

ので、Ramirezが東京にやってきた直後から、２人のコラボレーションが始まった。

「私たちは、気候モデルと、トモ（臼井）の研究、火星の地質学、そして地球化学的研究で発見された事柄から推定される、初期の火星における水の存在量との矛盾をなくしたいと望んでいます」とRamirezは言う。「そこにどれだけの量の水があったのかや、水はどのくらいの期間表面に存在し続けたかなどの疑問について、お互いに情報を得ることができるでしょう。２人とも同じ問題に関心を持っているのですから。」

彼らの研究の根底にあるのが、今日では、別の惑星で起こったかもしれない生命の出現を研究することが、地球における生命の起源の理解につながる道のひとつになっているという確信だ。

この分野では、液体の水は極めて重要だ。なぜなら、それは地球上の生命にとって不可欠と考えられており、また、それが溶媒として理想的であるため、他の場所の生命にも不可欠である可能性が高いと推論されるからだ。

Ramirezによれば、火星の水を巡る議論は、最近非常に興味深い方向転換を遂げて、つい２、３年前にはほとんどあり得ないと考えられていた理論が浮上してきた。それは、火星の北部の低地には、遠い昔、海が存在していたという理論だ。

火星の北部の低地は、南部の高地よりも、地表面の高さが１～３キロメートル低い。このように、南部と北部で高低差がはっきりある事実には、多くの火星科学者が納得できる説明がまだなされていない。この高低差を、大昔に巨大隕石が衝突した証拠と見る者たちがいる一方で、北部低地には、それが巨大な海によって作られた、あるいは、そこには巨大な海が存在したという証拠が多数みられると主張する者たちもいる。

Ramses Ramirez（本人提供）

臼井寛裕

Ramirezは先ごろ、アメリカの月惑星研究所（Lunar and Planetary Institute）とNASAが主催する、第４回初期火星会議（the Fourth Conference on Early Mars）に出席したが、その際、火星が南部高地と北部低地にほぼ二分され、高低差が１～３キロメートルにも及んでいることを説明できるかもしれない、北部の海の存在が頻繁に議題に上っていたという。

「火星の北部に海が存在したという説は、今、かつてないほど支持を集めています」とRamirez。「この仮説を支持する発言をたくさん聞きましたよ。」

最も目立つのは、この10年間で湖や川の痕跡が発見されたことで、火星の水循環の中心に、極めて大きな海が存在したことは、ほとんど必然的となったと主張する人々だ。地球の川や湖は、大気にH_2Oを供給する海を必要としている。大気中の水蒸気は凝結し、雨となって降り注ぎ、やがて再び蒸発する。今や、これと同じ循環を火星で仮定することが、理に適っているようだ。

そのうえ、最近発表された２件の論文は、海岸線だったと思われる箇所の近くに、巨大津波の痕跡があることを報告している。はっきりと特定された海岸線が存在しないことは、火星北部に海があったという説の弱点だと長年考えられてきたが、もしも津波の痕跡が確認されたなら、それは、海岸線が明確に見えない理由を説明するものとなるだろう。

Ramirezは、気候モデルその他に基づいて彼が出した結論に基づき、遠い昔、火星の北部に海が存在した可能性は極めて高いと考えている。では、地球化学者の臼井は、「火星の水」研究予算による彼自身の研究に基づき、これと同じ考えを抱いているのだろうか？

臼井は、それは確かにあり得たでしょう、と答える。それが、長期間持続した海だったのか、一時的な大きな湖だったのかは、まだ確かではないですが、と、科学者らしい注意深さで彼は語る。

だが、Ramirezや他の科学者たちの、火星上で長期的に存在した湖や川の痕跡が発見されたことで、大きな海を含む水循環系が火星に存在したことがほぼ必然的になったという結論に同意するかと質問すると、臼井は、「ええ、私は彼に完全に同意しますよ」と答えた。

16. 大岡山の岩石ライブラリー

東京工業大学の大岡山キャンパスに、忘れ去られてしまったような建物がひとつある――周りには背の高い草が生い茂り、入り口の扉の、煉瓦造りの張り出し屋根には、小さな木が１本生えている。この建物の２つの階に、初期の地球の岩石の、世界最高のコレクションのひとつが収蔵されている。

岩石試料は、一見すると工場の屋根裏のような場所にぎっしり詰め込まれているので、ここにそんなものがあるとは気づかないかもしれない。岩石の試料が収められた、透明な樹脂の容器が、図書館の可動書架のような、レールに乗った棚に載せられている。

室内には岩石粉が舞い、立っている場所もないことが多い。

しかし、ここに収蔵されている岩石はみな、初期の地球を理解するため、そして、願わくは、地球に生命が出現したときのことを知るための試料としては、世界第一級のものばかりだ。グリーンランド、オーストラリア西部、中国の三峡地帯、カナダ北部、インド、そして、深海の海底数ヶ所

丸山茂徳が、初期地球の岩石試料を、世界中の地質学的に重要な場所から収集し始めたのは1991年のこと。そのコレクションは今では膨大なものとなり、東工大のキャンパスに保管されている。しかし、その運命は定かではない。

からやってきた岩石たちである。

そのほか、最初期の地球のジルコン結晶のコレクション――この岩石ライブラリーの創設者、丸山茂徳によれば、科学的に重要な指標となるジルコン結晶の、世界最高のコレクション――や、中国で採取された、長さ25メートルのコア試料〔訳注：岩盤等をボーリングで掘削して取得する柱状の試料〕のコレクションもある。コア試料は、多数の薄片にスライスして分析することで、長い時間の経過による変化を追跡できる。

岩石のなかに記録されている太古の生命に関する重要な発見の多くは、これらの地域の、これらの種類の岩石の研究でなされたものだ。

ここのコレクションは、高名で、多数の論文や書籍を発表している、東京工業大学の特命教授でELSI主任研究員の丸山が率いた、数えきれない現地調査の際に採取された。

「これらの岩石はすべて、何かを物語っています」と丸山は、試料が乱雑に置かれているあたりに向かって片手を振りながら言う。「私たちは、世界中の、重要な場所のすべてから、試料を集めることを目標にしています。そうすれば、それぞれの試料が語ることを詳しく調べ、それらをすべて結びつけるとどうなるかを見ることができます。」

「このような岩石、たとえばグリーンランドの岩石を持っているコレクションは、たくさんあるでしょう。1、2個、あるいは10個とか。私たちのコレクションには、グリーンランドの、最も重要なすべての場所の試料が大量にあるのです。これが私たちの違いです。」

この岩石ライブラリーは、地質学・地球化学の宝箱だが、その未来は決して確実ではない。東京ではどこでも土地が非常に高値で、東京工業大学のキャンパスも例外ではない。岩石ライブラリーは、既に一度、前より狭い場所に移転しており、さらなる移転の恐れも残っている。

「はい、私たちには助けが必要です」と丸山。「私たちの状況は安定していません。しかも私たちは、ハーバード大学とケンブリッジ大学の地質学科とコラボレーションを実現しようと努力しています――世界的なネットワークを作ってシェアしようというわけです。しかし、これは容易ではありません。」

この状況は非常に残念だと、かつて丸山研究室の学生であり、現在は岩石ライブラリーのディレクターである上野

雄一郎は言う。世界中を見ても、これに匹敵するようなコレクションは他に知らない、と彼は言う。大岡山のコレクションは、とても大規模で（試料点数にして20万点近く）、その多くに、採取場所を正確に示す厳密な地質学的・地球化学的マップが伴っている。上野は、これは世界中の科学者にとって、そして、彼の研究室の若手科学者たちにとっても、貴重な資源だと言う。

「カナダ北部の40億年前の岩について研究したいという学生たちは、ここに来ればそれを見つけることができます。あるいは、オーストラリアのピルバラ地域（やはり、極めて古い岩が発見されている）の試料がほしければ、それもここにありますし、しかも、それは、素性がはっきりしているのです」と上野は言う。

コレクションには、中国の三峡ダムの敷地の地面から採掘した長い柱状のコア試料のほか、グリーンランド、カナダ、インドその他の場所で、地表付近で採取された試料も含まれる。

この岩石ライブラリーのコレクションから、重要な結果がいくつも出ており、さらにたくさんの結果、それも、注目を浴びる可能性が高い結果が、これから出てくるはずだと、上野はほほ笑みながら語る。

大岡山岩石ライブラリーには、上野がオーストラリアのピルバラ地区で現地調査を行った際に収集した岩石も、ひとつ収蔵されている。ピルバラでは、別の科学者が、これまでに発見された最古の地球の岩の試料のひとつと考えられるものを発見している。上野、丸山、そして他の科学者たちは、ピルバラ地区全域に数度調査に行っており、上野は、熱水鉱床の一部として形成されたと思しき岩石を発見した。

上野と同僚らは、岩石のひとつに、小さな流体の含有物があることに気づき、調べてみると、その流体のなかには、メタン生成古細菌が生成したメタンガスの痕跡が認められた。『Nature』誌で発表された、ピルバラ現地調査の成果をまとめた論文は、この岩石のなかに生息していた細菌は、35億年近く前のものだと結論付けており、この含有物は、これまでに発見された最古のメタン生成の痕跡となったのである。

東工大の岩石試料の保管庫から、今後も新たな重要な発見が行われるのだろうか？　もちろんですとも、と上野は答える。彼は、そのうちいくつかが、自分の学生たち――彼らも正式なELSIの関係者だ――によってなされることを期待している。

上野によれば、岩石試料の地球化学的性質を把握する技術が向上し、何をどこに探すべきかについての科学的理解も進歩している今、この岩石ライブラリーには特別な意義があるという。世界中の太古の岩石が存在する重要な地点のほとんどすべてからの岩石試料が集まった、大規模なコレクションは、他に類を見ないユニークな資源なのだ。

さらに、この岩石ライブラリーは、理想的には整理整頓されていないように見えるかもしれないが、実際には、重要な部分は、既に十分よく分類されており、データベース化されて、簡単に特定したり検索したりできるようになっている。

丸山と上野が、やや熱っぽく語るように、日本の科学は、日本という国が、海に囲まれており、さらに、2つのプレートが海底でぶつかり合う場所という、地質学的にユニークな位置に存在することに由来している場合が往々にしてある。たいていのプレートは、現在では、海洋プレートか大陸プレートかのいずれかに進化しているが、日本付近では、太古の様相――多くの地質学者が、初期の地球の状況だったと考えている、陸といえば、海に囲まれた、岩石でできた島々だけで、海底では多数のプレートが相互作用をしていたという様相――に近い状態が残っているのだ。

東京の東南海上に、伊豆諸島と呼ばれる有名な島々が、ほぼ直線状に並んでいる。すべて、フィリピン海プレートと太平洋プレートの活動で生じた火山によって形成されたものだ。丸山の博士論文は、これらの火山島のひとつに関して、徹底的に研究したものだった。

丸山茂徳

丸山が岩石の収集を始めたとき、彼の目標は、決して小さなものではなかった――地質学を通して、地球の歴史全体の「解読」をすること、これがその目標である。彼の研究は、日本地球惑星科学連合と、他の複数の国際組織とのパートナーシップとして始まった。丸山が最近岩石収集に訪れたのは、2017年の夏のことだ。彼は、東工大、東京大の学生とポスドクたちと共に、日本からは遠く離れた、ガボン共和国のオクロのジャングルのなかにある、普段は立ち入り禁止の天然原子炉の痕跡に、必要な装備を携えて立ち入ったのである。

丸山は彼の研究で、生命の起源を、初期の地球に自然発生していた放射能に結び付けようとしていたので、オクロについては長年にわたり、大きな関心を寄せていた。彼にとってオクロは、そのような結び付きはあり得るという証明だった。実のところ彼は、ごく初期の地球には、天然の原子炉が広く分布していたと確信しているのだ。

オクロの天然原子炉は、1972年、ウランを採掘していたフランス人チームによって発見された。そこで放射性核分裂が過去に起こっていた証拠を見つけ、彼らは驚いた。その後も、同じ地域に、同様の天然原子炉跡が16ヶ所発見された。証拠のひとつとなったのが、ウラン235同位体の、別の同位体に対する存在比が、通常より若干低いことで、それは、ウラン235が何等かの理由で消失したことを意味していた。

数年のうちに、オクロ地域では、ウラン鉱床のなかで核反応が自然に起こり、おそらく数十万年にわたって続いたのだろうと結論付けられた。

丸山が長年収集し続けている岩石のコレクションは、生命の起源に関する洞察を提供してくれる可能性があることから、ガボン政府は、丸山の訪問と試料採取を承認したのである。

彼は既に３度オクロを訪れており、毎回ガボン共和国で１ヶ月を過ごしている。数週間かけて、オクロ地域でドローンによる測量とマップ作成を行った結果、彼は、岩石を掘削すべき理想的な地点を特定した。大量の放射線は、環境と生物学的プロセスを変えることができ、実際に変えたのだという、地質学的・地球科学的物語を、その岩が語ってくれることを丸山は期待している。

「これは困難なプロジェクトですので、他の国々の地質学者たちが協力してくれるよう願っています」と丸山。「オクロは、私たちが知る限り、世界でも他にないような場所ですから、これは非常に魅力的なプロジェクトに違いありません。」

もちろん丸山は、最終的には、オクロのコア試料を東工大に持ち帰り、岩石ライブラリーで徹底的に調べることを目標にしている。しかし、それが可能かどうかは、まだはっきりしない。

「大部分のウランはフランス人たちがもう採掘してしまいましたし、残っていたとしても、放射性はもうないでしょう。」そのため、コア試料を持ち帰っても、何ら危険はないはずだと丸山は言う。

しかし、コア試料が日本に到着する日、税関は面白いことになるでしょうと、彼は笑いながら語る。