

ELSI RISING

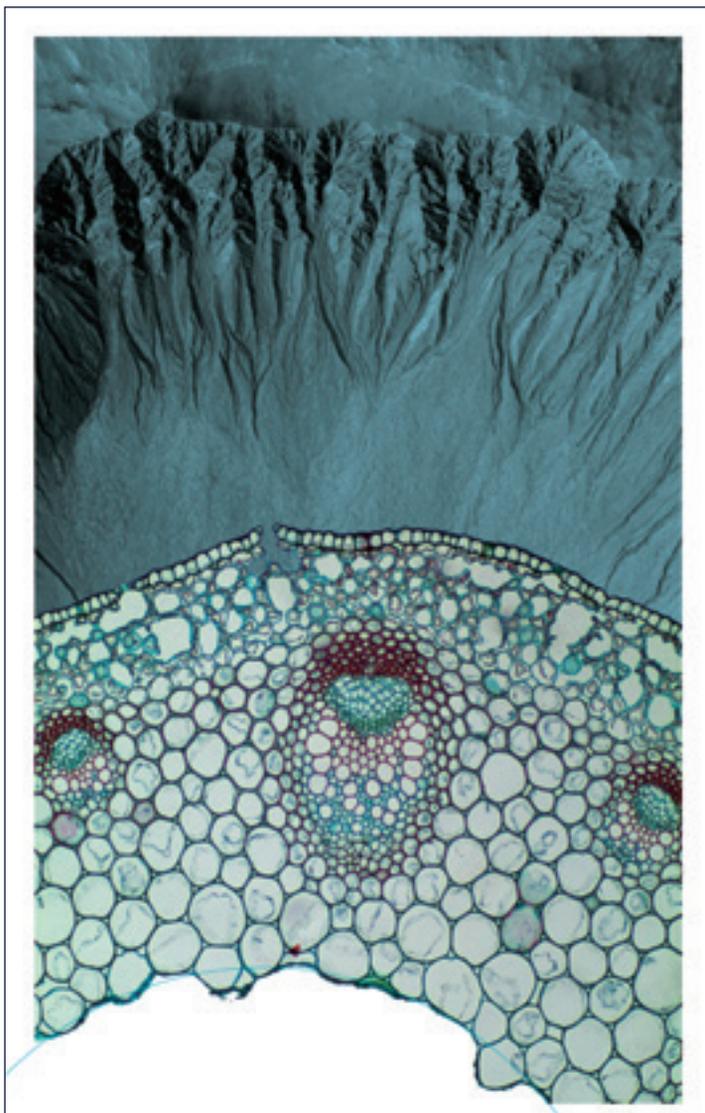
地球生命研究所 ことのはじまり



WRITTEN BY **MARC KAUFMAN**
PHOTOGRAPHY **NERISSA ESCANLAR**

著者 マーク・カウフマン

写真 ネリッサ・エスカンラー



地球
生命
研究
所
—
こ
と
の
は
じ
ま
り

ELSI RISING

BY
Marc Kaufman

PHOTOGRAPHY BY
NERISSA ESCANLAR



はじめに:村山齊 / 04

第1部:人々と研究所の生き立ち

01. しるし / 06

02. ELSIという考え方 / 08

03. 豊かな基盤 / 10

04. 創始者たち / 12

三島前学長とELSI / 16

05. 研究所には科学者が必要だ / 19

06. ELSIには標的とリーダーが必要だ / 24

写真で見るELSIメンバーたち / 26

07. ELSIの文化 / 30

08. 大きな研究助成金も充ちずユニークな新プログラム / 33

09. 初期の地球の秘密に満ちた日本の島々 / 38

10. 不可欠な理論家たち / 42

11. 変化の兆し / 47

起源の研究ハブとしてのELSI / 50

第2部:進行中の研究

12. 「く「ちゃく「ちゃ」の化学 / 56

13. 太古のマグマオーシャン / 61

14. 放射線、水、そして生命の起源 / 65

15. 初期の火星が「それほど寒かったなら、なぜ火星の表面に水があったのか? / 69

16. 大岡山の岩石ライブラリー / 72

製作者、謝辞 / 76

村山 齊

カブリ数物連携宇宙研究機構 前機構長

ELSIが生まれたとき、私たちは大喜びでした。一緒に遊べる弟ができたのですから！

ELSIは、生命の起源を研究しよう、と言いました。私の研究所、カブリ数物連携宇宙研究機構（略称IPMU）は、宇宙の起源を研究しよう、と言いました。どうしてそんなことに取り組むのでしょうか？ これらの謎が解けたとしても、健康によい食事ができたり、金持ちになったり、不老不死になったり、炭素排出量が減ったりするわけではありません。しかしこれらの問いは、私たちの心の奥、私たちの本質に語りかけてきます。どういうわけか私たち人間は、人間はどこから来たのか、人間の起源は何なのか、知りたくてたまりません。これらの問いこそ、私たちが人間にしているのです。ELSIの登場により、私たちはELSIと力を合わせて、人間の起源の探究に取り組むことができるようになりました。

2007年、カブリIPMUの初代機構長就任の誓約書に署名したとき、私は、これは幻覚に違いないと思えて仕方ありませんでした。カブリIPMUは、ELSIを助成しているのと同じプログラムが、最初に承認した5ヶ所の研究機構のひとつです。世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）と呼ばれるその文部科学省のプログラムには、壮大な目標があります。日本政府は、このプログラムによって、広く国際的な研究者が集まり、世界的に注目される、世界最高クラスの研究機関を作ろうとしているのです。学際的環境のもとで、新しい研究分野が創成されねばなりません。私たちは、ドイツのマックスプランク研究所や、プリンストンの高等研究所など、長く輝かしい歴史を持つ機関と互角に競争できるようになることを求められているわけです。

私たちは、いくつもの困難な仕事をやり抜く必要がありましたし、WPIプログラムの野心的な目標を達成するのは、今なお続く大きな試練です。2007年の設立直後、私は同僚らと共に、文字通り世界各地を巡って、IPMUのコンセプトと、それに伴い新設された研究員のポストを宣伝して歩き、これまでに200名近い科学者の採用に成功しました。東京大学キャンパス内に私たちが構想した建物を建設し、異分野の研究者たちがリラックスした雰囲気の中で交流できる、新しい科学文化を創出しました。東京大学には、国際研究機構を作る私たちのニーズに対応するために、新たなルールと方針を作成してもらいました。たとえば、ハーバードやケンブリッジに引けを取らない採用条件を提示できるようにするためです。さらに、日本語を話さない国際研究員の支援体制も構築しました。

IPMUの存在は、常に正当化し続けなければなりません。直接応用できそうもないテーマの研究に多額の税金を使わせてもらう資格が、なぜ私たちにあるのか。そうして出資してくれた人々にどんなお返しができるのか。私たちは、IPMUの目標として、5つの難問を掲げました。宇宙はいかにして始まったのか？ 宇宙はどのように終わるのか？ 宇宙は何でできているのか？ 宇宙の基本法則はどのようなものか？ 私



東京大学EMP提供

私たちはなぜ宇宙に存在しているのか？ この5つです。どなたでも共感し、支持してもらえないのではないかと思います。若い学生たちを刺激して、数学や科学を進んで学んでもらえるように、アウトリーチ活動も積極的に行いました。それらの機会に、このような基礎研究こそが、知識の飛躍的向上や、技術革新をもたらすのだと声を大にして言ったのです。ご存じのように、ユークリッドは紀元前400年ごろに、すべての整数は素数の積で表せることを発見しましたが、この、一見何の役にも立たないような発見が、今ではインターネット通信の基礎になっているのです！

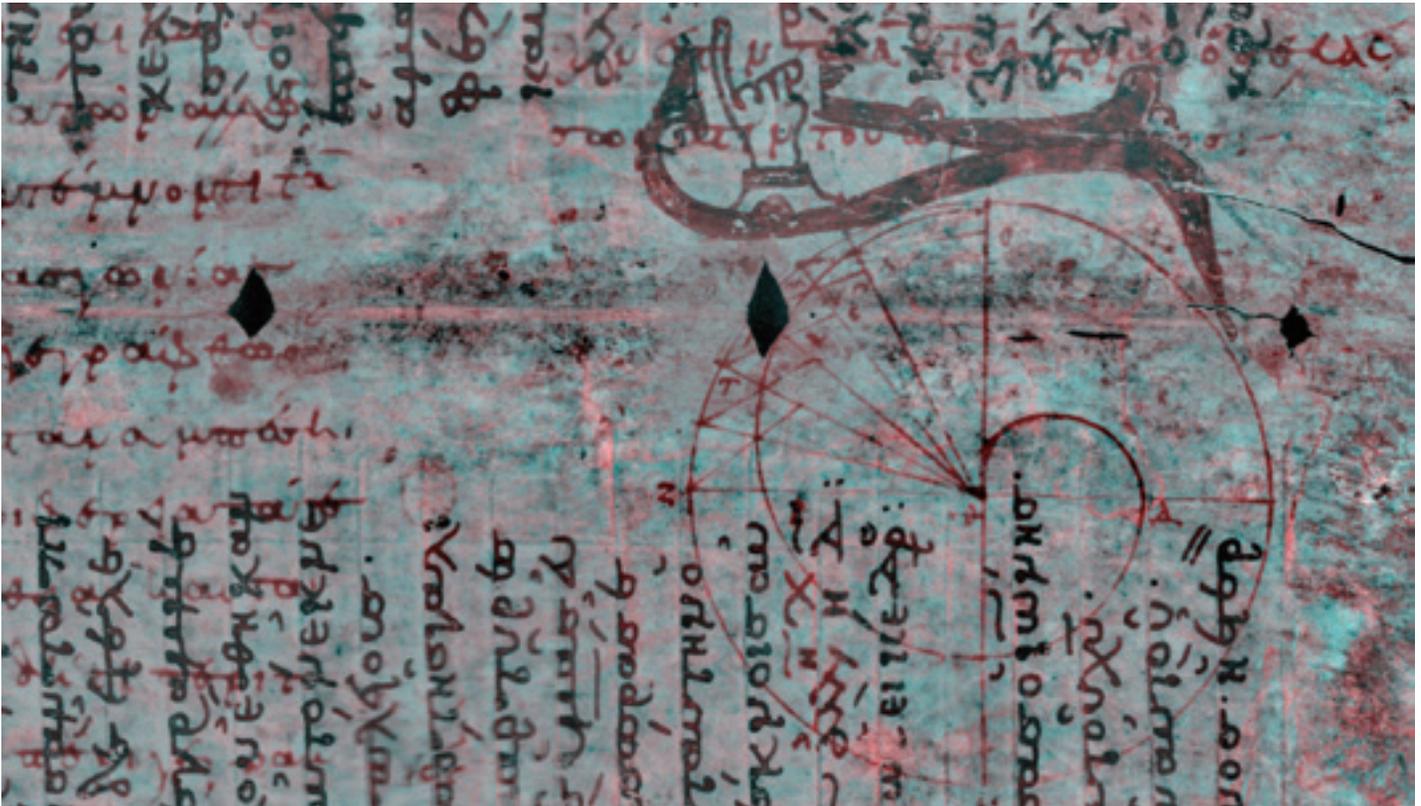
5年後、ELSIが、私たちと同じ道をたどり始めました。すべての苦勞と難題を共有する、弟ができたのです。IPMUとELSIは今、同じ船に乗って、長い旅を続けているところなのです。

世界が注目し始めました。私たちは、他の7ヶ所の拠点と共に、WPIプログラムは、資金提供機関から見て間違いなく成功したのだと認めてもらえるだけの成果を、どうやら上げることができたようです。日本のみならず世界各国の大学の、手本となったのです。WPI拠点は、論文引用数と、高被引用論文数で、素晴らしいインパクト・ファクターを達成しました。その結果日本政府は、WPI拠点をさらに増やす決定を下したのです。

しかしいちばん大切なのは、私たちには、深い謎を解こうと頑張るのが、ミステリー小説の謎解きのように楽しいということです。解決に向かい、ほんの小さな一歩を進められるだけで、大きな喜びを感じます。それに、私たちの取り組みは、孤独なものではありません。今では、手を携えて共に進む仲間がいるのです。

本書は、ELSIがいかに構想され、発足したか、その背後には誰がいたのか、どんな苦勞があったのか、なぜ偉大な科学者たちを引き付けたのか、そして、いかにして成功の軌道に乗ったのかという、わくわくする物語を記したものです。私には、どのエピソードもよくわかります。

そして願わくは、IPMUとELSIが力を合わせて、いつの日か生命と宇宙の起源を明らかにしたいものです。



1. しるし

それは、生命の起源を探る科学者としては、日常的に使うテクニックに過ぎないが、それでもやはり、感心せずにはいられない。

地球に初めて現れた、微生物のような形態の生命は、化石になって残ったりしないはずだ——骨や、証拠になる有機物が残ることはないだろう。しかし、同位体の存在比が示す証拠なら、はかない微生物の痕跡でも、保存されている可能性がある。ある岩石に含まれる炭素12の量が、異常に低かったとしよう。それは、かつてそこに生物が存在していたかもしれないという証拠だ。なぜなら生物は、炭素の同位体のなかでも特に炭素12を好むので、生物がいたなら、炭素13ばかりが残されるからである。

地球化学者は、これと同様の測定と推論を使って、残されたものを分析することにより、大昔の大気の化学組成を突き止めることができる。たとえば、ある試料の硫黄同位

アルキメデス・パリンピセストは、ビザンチン帝国時代に作成された、古代ギリシアの数学者、シラクサのアルキメデスの著書の写本。アルキメデスにこの著書があったことは、この写本が発見されるまで知られていなかった。アルキメデス・パリンピセストには、13世紀に祈祷書が上書きされていたが、その下に存在することが明らかになり、10年前、最新のイメージング技術により、数学的な内容を記したその文章と図形が復元された。

体の存在比が異常だったとすると、そこから科学者は、大昔のある時期、その試料があった場所の大気には、酸素がほとんど存在しなかった——つまり、その後酸素量が増えた——と推測できるのだ。

現在の地球の、動植物の生態、化学組成、地質などは直接測定して解析できる

が、生命の起源や、初期の地球に関する科学を推し進めるのは、独創性が求められる、紆余曲折の道のりだ。

また、スタート地点となるのも、大昔の相互作用が残した、かすかな同位体だけではない。現在のある事実注目し、それがもたらされるためには過去に何が起こったはずかを解明するのが、テーマになる場合も多い。有名な例をひとつ。RNAは現在至るところに存在するが、RNAの主軸の形成に必要な長鎖分子は、水中では分解してしまう。だが、生命の出現に関与したRNA以外のほとんどすべてのものに水が必要だったことからすると、最初のRNA分子がい



Andre'-P. Drapeau P.

かにして形成されたかは大きな謎だ。

このような回り道思考は、ある社会組織の現在と、将来の可能性を理解するにも役立つのだろうか？ たとえば、東京工業大学のキャンパスにできた、地球生命研究所 (Earth-Life Science Institute, 略してELSI [エルシイ]) のようなユニークな社会組織の理解に？

その、目に見える特徴の多く——熟慮の末設計された新しい建物。一連の、公開・非公開のセミナー、ワークショップ、プレゼンテーション。日本人と、世界中からの外国人が他に類を見ない形で混ざり合う、さまざまな科学分野から集まった研究者集団——は、極めてはっきりしている。

ELSIに科学者が存在し、科学が行われてきた時間は、まだ驚くほど短い。この短期間で挙げられた成果は、特筆に値する。しかし、なるべくしてそうなったわけでは決していない。生命の誕生の物語の、多くの場面と同じく、まったく違う結果になっていた可能性もあるのだ。

ストロマトライトは、シアノバクテリアの群集が堆積物となって何層も重なった、ドーム状の鉱物構造物。35億年以上前のものも現存し、地球に生命が存在した、最古の明白な証拠となっている。

それなら、なぜ、どのようにして、ELSIにはそんなことが達成できたのだろうか？ それを知るために、これまでにELSIに関して、なされた決断と回避された決断、そして、

これまでELSIに参画してきた人々、その科学、その価値観がELSIの歴史に刻み込んだ痕跡——かすかなものであることも多い——に注目してみよう。つまり、ELSIに対して、社会的、科学史的な、同位体年代測定法を使うわけだ。

もしかすると、敢えて明るみに出してやれば、それらの痕跡は、ELSIの過去、現在、予測される未来のみならず、ELSIの強みや弱点について、今私たちの目に見えるもの、耳に聞こえるもの以上のことを教えてくれるかもしれない。おまけに、今後設立される類似の社会組織に、洞察と教訓を提供できるかもしれないのだ。

起源にまつわる物語は常に、行動と、それに対する行動からなる、複雑な系に包まれている。だからこそ、起源の物語はどれも面白いのだ。



ELSI所長 廣瀬敬

2. ELSIという考え方

ELSIが生まれた大本をたどれば、つまるところ、日本の科学は、一部の領域では力強いようだが、全体としては後れをとっているという、政府の公式な見解に行きつく。当時、「危機」という言葉が頻繁にささやかれていた。

必要な措置が取られたのは、日本経済が長引く膠着状態にあった2007年のことだ。世界標準からすれば、依然として豊かな国だったものの、日本のリーダーたちが見るところ、日本は、本質的レベルで業績不振である一方、せっかく達成されている科学の進歩が、十分注目されていない状況だった。

そこから脱却するために政府が立てたひとつの方策は、将来世界第一級の研究機関となることを目指す、従来にない新しい運営法による研究機構を数ヶ所設立し、潤沢な資金を提供することだった。こうして世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)が始まったのである。

このイニシアチブの中心人物のひとり、日本学術振興会の黒木登志夫氏が私に語ったように、WPIの10年間にわたる多額の補助金の獲得を目指して競い合うグループは、高

く、かつ前例のない、次のようなハードルを越えねばならない。

- ・海外の優秀な科学者を相当な人数引き付け、留まってもらえるような計画を提示する。
- ・日本の多くの研究機関に比べ、より自由で、イノベーションに対して開かれた機関になるような方針を立てる。
- ・日本の科学と教育において行われてきた、伝統的な方法の一部を改革するためのモデルとなる。

「当時、日本の科学には変化が不可欠でした。それは今も同じですが」と、長年にわたりWPIのプログラムディレクターを務めた黒木登志夫氏は語る。「イノベーションを阻止するのではなく、奨励するような新しい方法が必要ですし、才能ある日本の若手科学者にとって、日本で研究を続けることが、もっと望ましくならねばなりません」。

研究機関の選定は5年にわたり、その結果、極めて多様性に富む9ヶ所が選ばれた。ごく実際的な目的——材料科



ELSI副所長 井田茂

学、ナノテクノロジー、睡眠研究、グリーン・エネルギー——を掲げる機関もあるが、2つの機関は、基礎科学に徹する。まず2007年、東京大学に、宇宙の起源と進化を研究するための機関が設立され、次いで2012年、東京工業大学にELSIが出現したのである。

高名な高圧地球科学者、廣瀬敬のリーダーシップのもと、ELSIは、地球において生命はいかにして始まり、いかに進化したかという、非常に大きな問題に取り組み始めた。

その努力は、極めて重要ないくつかの点で、ユニークである。ひとつには、ELSIでは、生命がいかに始まったかについてのみならず、地球はいかにして生命が出現できるような場所になったかという、地球科学的な問題にも注目する。また、同じような目的で似たような研究を行う科学者たちが、世界各地を拠点としつつ、ゆるやかに提携しあうというよくある形ではなく、生命の起源を巡る多くの困難な疑問に取り組みすることを目的とする、独立したひとつの研究機関の形を取る。

NASAの宇宙生物学プログラムのディレクター、Mary Voytekは、起源を巡る問題がいかに研究されているか、誰よりもよく知っている。彼女はこう結論する。「ELSIのようなところは、世界中探しても他にはありません」。相当な人

数の科学者をひとつの建物に集め、これらの問題について、個別に、また協力して取り組ませる、他に類を見ない研究機関なのだ。

雰囲気も運営も国際化しようと、科学者も事務方も含め、発足時のメンバーのほとんどが日本人だったにもかかわらず、ミーティングや研究室の打ち合わせは英語で行われることになった。

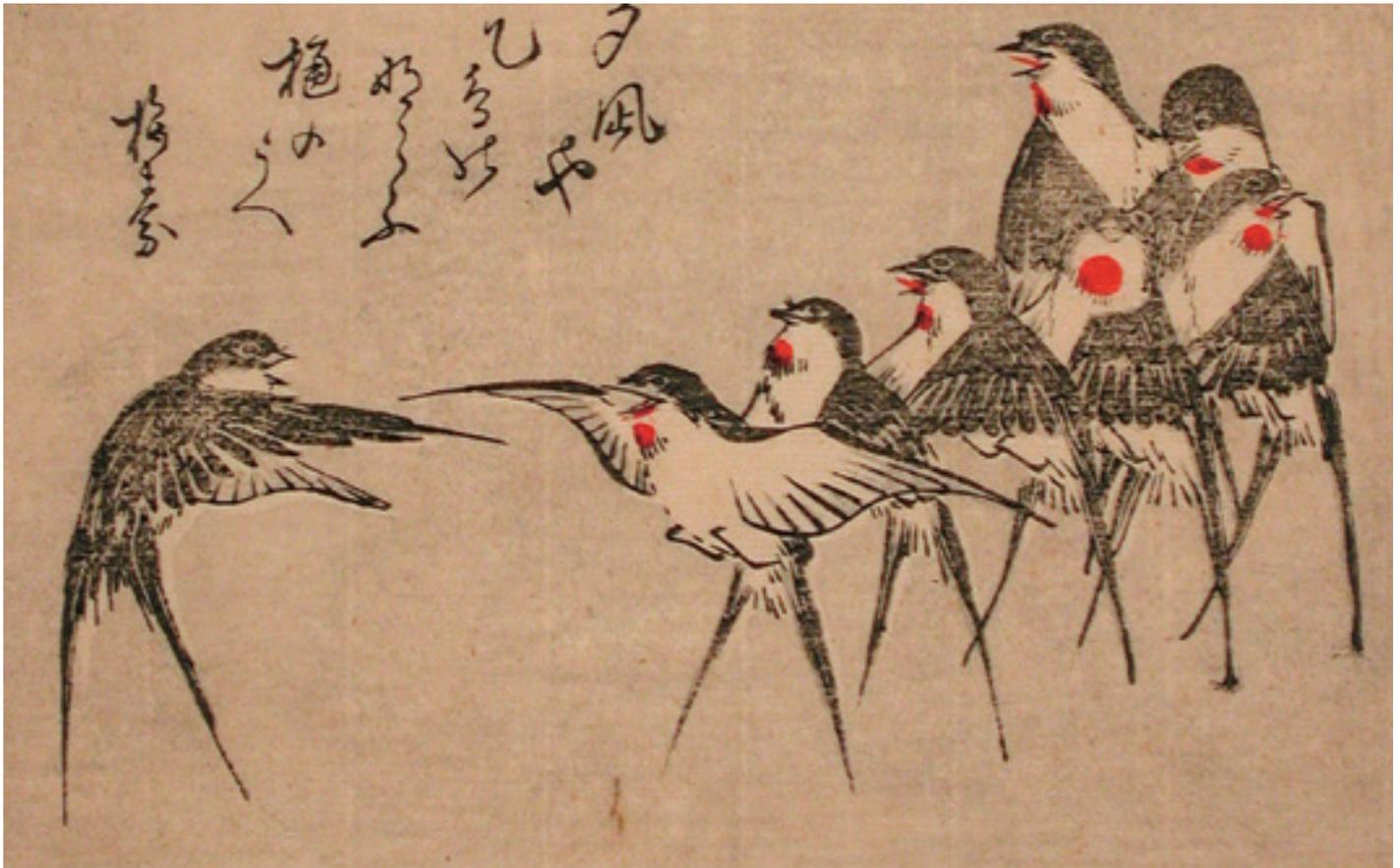
これは、どんな状況でも困難な取り組みだが、ELSIの誕生は、日本の科学者や教育者たちに言わせれば、依然として序列構造が残る、大学のキャンパスというところで起こった。日本の大学の科学者たちは、自分の研究分野に忠実になりがちで、科学へのアプローチは——ごく一般的に言って——いまだに極めて日本のままだ。

ELSI副所長の井田茂が言うように、日本の科学の大きな強みは、昔から、個々の人間を集めて、ひとつのテーマに集中的に取り組むことができる、結束したチームが作れることにあった。海外からやってきたメンバーの多くが、自分のテーマをできるかぎり広い視野から見ようとするのに対し、日本の科学者の多くは、逆に、自分が専門の特定の領域を深く掘り下げる傾向がある。伝統的な日本のアプローチは、大きな強みである一方、往々にして、そこから保守主義的科学が生まれてくると、井田は語った。

ELSIでは、これら2つの特徴が随所に現れており、その緊張関係がもたらす独創的な成果が多々見られる。



Mary Voytekは、NASAの宇宙生物学プログラム長で、ELSIを頻繁に訪問している。ELSIのEONプログラムのグローバル科学コーディネーターとして、ELSIにやってきた新米科学者たちを導くのみならず、科学と組織運営という両面で専門知識を提供している。また、NASAの科学者たちとELSIとの橋渡し役でもある。



変化の始まり。歌川広重による19世紀の浮世絵の傑作、「燕の子とろ子とろ」。ツバメたちが一種の鬼ごっこに興じている。

3. 豊かな基盤

なぜ東京に？ それに、なぜ生命の起源なのか？ いったいどうして日本政府は、このようなテーマを研究する機関を、トップ研究機関のひとつに選んだのだろうか？

日本には、高圧地球科学と、生物登場以前の初期地球の進化が重視されてきたという歴史的背景がある——環太平洋火山帯に位置するのだから当然である——が、生命の起源が大いに注目されたことはなく、東工大の場合なおさらだ。

しかし、生物学を専門とする東工大名誉教授で、かつてELSI事務部門長を務めた星元紀は、生命の起源を探る科学が、日本で反響を呼ぶと考えられる十分な理由がいくつか存在するという。

ところが、ELSIの起源について説明する星教授の話は、まったく予期していなかったところから始まる。遠い昔、エドワード・シルヴェスター・モースという人間が、日本にやってきた物語だ。モースは、ハー

バード大学で、革新者として名高い教授、ルイ・アガシーの学生だった。

冒険心旺盛な若きモースは、マシュー・ペリー提督の黒船来航に促された明治維新で日本が開国して間もなく、東京にやってきた。この時期、アメリカが演じた役割については、貿易ができるよう日本を開国させたこと、さらにそこから、近代化せねば他国に支配されかねないと日本の指導者たちに認識させたことが強調されがちだ。

しかし、物質主義や商業主義とは別の関心から、モースを始め、多くの欧米人が日本に渡来し、まったく異なる貢献を行った。軟体動物が専門の動物学者だったモースは、日本に動物学を紹介し、



E.S.モースは、1871年、科学研究のために海洋生物（腕足類）を収集する目的で、自費で初来日を果たした。彼の研究は広範に及び、進化などのテーマで講義を行った。日本初の動物学教授となった。



富士山麓を散歩するELSI科学運営委員長Eric Smithと元ELSI事務部門長の星元紀

日本初の臨海研究施設を設立した。また、日本の大学の教授として、たびたびダーウィンの進化論を教えた。

彼は日本とその文化に惚れ込み、日本の陶器の収集に夢中になった。あまりの熱意に、当時の有力者、大隈重信公爵は、所有する陶器をすべてモースに贈った。これらの高価な陶器は、現在ボストン美術館の「モース・コレクション」の一部となっている。その後モースは、アメリカ科学振興協会の会長となった。

星が説明するように、モースをはじめ、欧米の科学者たちは日本で大いに歓迎され、生物進化や地球の変化に関する彼らの教えに、日本の人々は熱心に耳を傾けた。

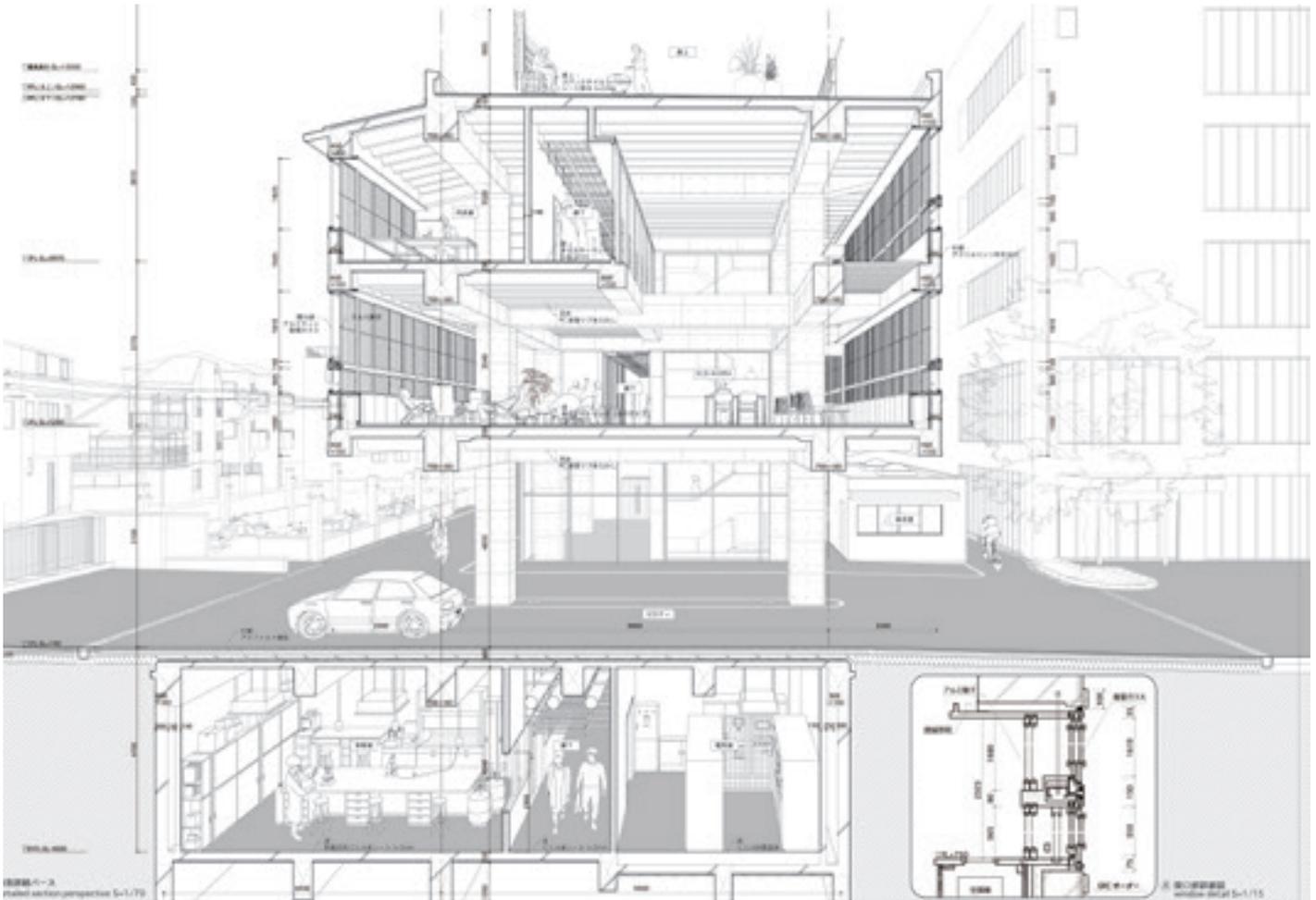
それは何ら不思議ではなかった。日本の文化に浸透していた仏教の中心に、万物の本質は変化だという思想があるからだ。

遠い昔に仏陀が発したこの象徴的なメッセージは、仏教の中核をなしている。変化は避けられないということを仏の教えとして受け入れていた日本人にとっては、世界は進化によって説明できるということに、何ら違和感はなく、

進化論に対して反論が出たことはほとんど(おそらくまったく)なかったと、星は言う。実際、この仏教の中心教義を科学の言葉で詳しく説明したものが、進化論だと言ってもいいかもしれない。

したがって、ELSIがWPIプログラムに採択された理由のひとつは、ELSIが扱うテーマが、社会全体が興味を抱き、誰もがその研究を歓迎できるものだったことにあったのだろう。ELSIの研究は社会と市民に好まれるに違いないと、採択審査会の場でくどくど説明しなくても、ELSIを強力に支える背景の一部となっていたことは間違いないだろう。

生命の起源という普遍性のあるテーマは、世界的にも重要になると期待できる研究機関の設立を目指す、WPIの構想にも適合する。WPIは、しばしば、他国ではまだそれほど取り組まれていない分野の研究機関を作ってきた。地球の起源や生命の起源に取り組むプログラムは世界中の多数の大学で実施されているが、この2つのテーマだけを専門とする大規模な研究機関は、ELSI以外に存在しない。



©Jumpei Suzuki

4. 創始者たち

ELSIを構想し、補助金を獲得した提案書をまとめた人々は、高圧地球科学が専門の廣瀬敬、長年尊敬を集める惑星形成の専門家、井田茂、地球生物化学者の上野雄一郎、経験豊富な地質学者、丸山茂徳、さらにのちに加わった、牧野淳一郎である。牧野はその後、理研に移ったあと、現在は神戸大学の教授である。宇宙関連の高性能コンピューティングの傑出した先駆者であると同時に、ほかのメンバーらと同様、自由な発想を持つ研究者だ。

もうひとり最初にいた人物が、プリンストン高等研究所の宇宙物理学者Piet Hutである。Hutは、高密度恒星系のコンピュータ・シミュレーションが専門で、極めて広範囲の学際的研究を行っている。

Hutは長年日本で過ごし、日本語も流暢で、ELSI推進に加わったのは主に牧野の働きによる。というのも、Hutはある意味、牧野のかつての師だからだ。牧野とHutの結びつ

き、この最先端の科学の世界において、重要な人間関係がいかにか形成されるかが垣間見られる好例だ。

ELSI新棟は塚本由晴のチームによって設計された。塚本は東京工業大学環境・社会理工学院建築学系の教授である。彼の設計思想は「建築のふるまい」を重視すること、つまり建物が人々とふれあい影響し合い、環境に溶け込んでゆく変化を大切に考えることである。

き、この最先端の科学の世界において、重要な人間関係がいかにか形成されるかが垣間見られる好例だ。

最年少でプリンストンの高等研究所 (IAS) の教授に就任したHutは、33歳だった1986年、自分が主催するIASの会議に、東京の高名な宇宙物理学者である杉本大一郎を招待した。ところが直前になって、杉本教授が急用で来られなくなってしまい、彼の学生を代理として送っていいかとHutに電話をかけてきた。Hutがその学生について尋ねると、修士課程を始めたばかりの23歳の青年で、英語はあまり達者ではなく、聴衆を前に話した経験も皆無だという。あまり期待できそうになかった。

さて、その国際会議で、立ち上がって話始めた牧野は、日本語訛りの英語で訥々と語り、やはり緊張していた。彼の話を理解した者はほとんどなかった。しかしHutと、少なくとももうひとり、その分野の専門家が、若い牧野は恒星系

力学のシミュレーションにおける重要問題のひとつを、つい先ごろ解決したばかりなのだと気づいた。歳月を経た今も、Hutはこの日のことを嬉しそうに語る。

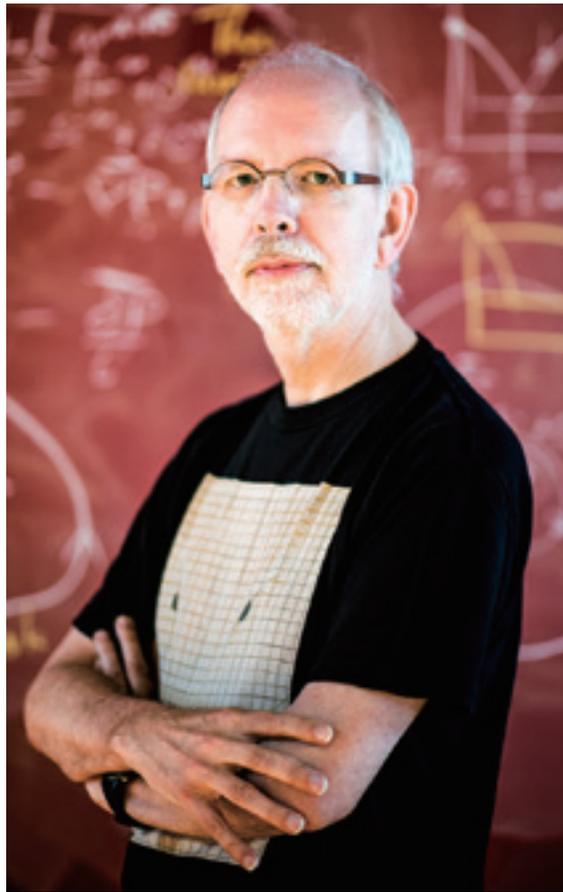
こうしてHutと、早熟な学生、牧野との、20年以上にわたる協力関係が始まった。そういうわけで、2012年、東工大にELSIを提案するに当たり、創設メンバーとして、もうひとり魅力的な人物を海外から加えるとすれば誰かを考える際、それはPiet Hutしかない、と、牧野は何ら迷うことなく決めたのだった。

「彼は有名な科学者で、多くの分野に広い人脈を持っています」と牧野。「彼は最初、物理学と天文学に取り組みましたが、その後、もっと哲学的なテーマや、数学へと移っていきました。彼は、他の誰にも不可能なものを、私たちにもたらしてくれたのです。」

WPIへの提案として、当時の段階で準備されていたのは、地球科学・惑星科学というハードサイエンス分野で東工大が既に持っていた強み——豊富な人員と、深い専門知識——を活かしたものだ。惑星形成、地球化学、そしてとりわけ、地球の奥深くにあるマントルやコアを研究する高圧地球化学。これらが東工大が輝かしい実績をおさめてきたハードサイエンス分野だった。

しかし、数年前に東工大が出した2つの提案と同じく、この提案も、もうひとつの重要な側面、生命科学分野に関しては、やや貧弱だった。Hutには、この弱点が特に気がかりだった。

人々を結びつけ、新しい科学テーマに取り組むチームをまとめあげる名人のHutは、まったく面識がなかったにもかかわらず、ELSIの提案に新たに加えるにうってつけと思ったある人物に、声をかけた。ハーバード大学のノーベル賞受賞科学者、Jack



Piet Hut

Szostakである。Szostakが受賞したのは、ノーベル生理学・医学賞だったが、その直後に彼は生命起源の研究に転向し、たちまち、こちらの分野でもスターとなった。

Hutは、自分がIASに在籍していることが、Szostakがすぐに折り返し連絡してきた理由だろうと言う。2人は面会し、ハーバードの初期地球科学の専門家、Andrew Knoll (Hutの古生物学に関する学際的な研究について多少知っていた)と夕食を共にした。そしてSzostakは、ELSIのチームと、その提案に加わることになったのである。日本では、ノーベル賞受賞者がまるで神のように扱われることが多く、Szostakが加わったことが、ELSIが他に抜きこんでWPIに選定された、ひとつの要因だと言っても過言ではないだろう。

しかし、たとえSzostakが参加してくれたとしても、東工大の三島良直前学長の強力な支援がなければ、そこまで至らなかったはずだ。本書のための取材時、学長としての正式な初仕事で、WPIのプログラム委員会において、ELSIを強く推す決意表明をすることだったと私に語る三島は、明らかに誇らしげだった。



牧野淳一郎

WPIに応募するに当たって各大学学長が、WPIプログラムの支援者なのは当然のことだ。しかし、三島前学長にとっては、それ以上の意味があった。WPIが最優先目標に掲げた改革——国際化、イノベーション、そして、日本の大学の科学が捨てられない、時代遅れの慣習からの脱却——は、三島前学長が東工大の学長として当時新たに取り組もうと強く決意した目標に、ちょうど含まれていたのだ。

三島前学長は、かつて大学院生時代にカリフォルニア大学バークレー校で数年間過ごした経験があり、彼の学長就任後の初仕事でELSIの推薦だったことは、幸先が良かったし、また、適任だったわけだ。

「(WPI)プログラム委員会での説明は、私が学長として行った、文字通り最初の仕事でした」と、三島前学長は述べた。「それは本当に嬉しい仕事でした。なにしろ、私はELSIを全面的に支持していましたから。」

2012年10月に、ELSIはWPIプログラムに採択された。

採択され補助金を獲得するのは困難だが、仕事としては明確で直接的だ。実際に研究機関を設立すること——科学者を集め、文化を作り、コミュニティーを構築すること——は、まったく違う仕事である。

ELSIは、東工大キャンパスの奥まったところにある建物の1階から始まった。実験室もなく、小さなランチルームのほかにはミーティング室もなく、また、彼らの構想を実施するための明確な道もなかった。

副所長のJohn Hernlund——地球深部モデルの専門家で、以前廣瀬と共同研究をしたことがあり、夫人のChristine Houserと共に、ELSIに初の海外メンバーとして迎えられた——は、何台もの汎用大型コンピュータと同じ部屋に割り当てられた、窮屈なオフィスを覚えている。少しでも仕事をするには、大きな耳栓をして、騒音を遮断するほかなかった。おまけに、来訪者や同僚に腰かけてもらうために、地球惑星科学科のロビーから椅子を数脚持ち込まねばならなかったことも、忘れられないエピソードだ。

主任研究員のほとんどが(生命科学者ではなく)地球科学者で、そのほとんどが日本人だった。若手の研究員にしても、これは同じだった。

起源の物語は概して、カオス的な状況に始まり、次に秩序が生まれ、必要な構造が作られ、やがて、好ましい複雑性が展開する。不安定な状況から、驚くようなかたちで優位性が出現する——現在ELSIのコンピュータ・シミュレーシ

ョンの専門家たちがちょうど取り組んでいるテーマさながらに。2010年代始めの日本は政治的変化の激しい時代だったが、研究所の建物新築の予算は無事認められた。

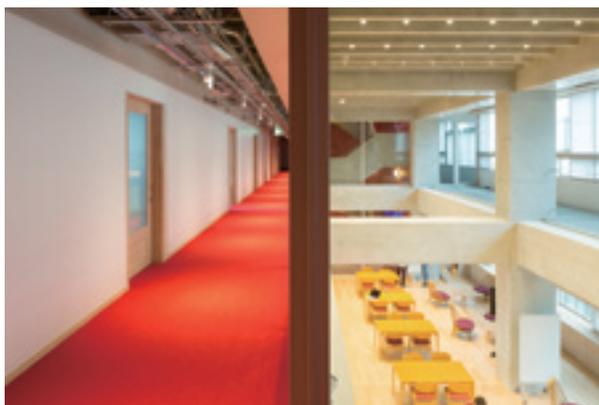
2015年8月に、魅力的な新しい研究棟が完成した。ELSIのリーダーたちの要望で、彼らの新しい建物の中心には、2階分を使い、アゴラと呼ばれる広々としたスペースが置かれている。古代ギリシアの学びと討論の場のELSI版だ。アゴラの壁には、所々に赤い黒板があり、その前で科学者たちが日常的に集まり、チョークの粉が舞う。心地よい椅子が取り囲む。

畳の部屋がひとつ、そして大小のミーティング・ルームが随所にある。また、アゴラのある新研究棟(ELSI-1)の地下と、それまで使ってきた建物(ELSI-2)に、たくさんの実験室があり、科学者たちが自分のテーマに取り組んでいる。

中心に据えられたアゴラは、西洋の伝統と雰囲気象徴しているようだが、これを最初に発案したのは、惑星形成論の専門家で、ELSIを最初に提案した科学者のひとりだった、井田茂だ。理論家の井田は、理論家たちが集まってアイデアを討論し合う場所がほしかったのだという。2階下で実験家たちが使っているのと同じような場所である。

井田は、ケンブリッジ大学とカリフォルニア大学サンタバーバラ校で、同様のスペースを見てきたので、ELSIの科学者とスタッフが共に集う、中心的なスペースが自然に思い浮かんだ。分をわきまえている井田がここでは自慢気に言うとおりに、アゴラがその目的を果たしているのは間違いない。

ELSIは2012年の末にWPIに採択されたが、遠方のオフィスから科学者たちがやってきて、彼らのために特別に建てられた、すっきりとしたラインの構成が印象的なエレガントな建物に落ち着いたのは、ようやく2015年の後半になってからのことだった。この新しい建物には、科学者たちに





井田副所長によると、ELSIの建物は、神楽坂のような路地が入り組む街や、和洋折衷の昭和モダンをイメージしたデザインになっている。

提供できる実験室が多数備わっていたこともあり、生命の起源にまつわる謎を探る、生物・化学側の専門家たちが集まり始めた。

当初からのELSIメンバーの多くが、ELSIがまっとうに立ち行けるところまで持って行くのに費やされた時間を今も惜しむ。WPI承認の10年間という期限に日一日と近づいていくのが常に意識されていることを思えば、それは驚くに当たらない。

しかし、その困難な船出から5年経った今、WPIが見込んだ世界トップクラスの研究機関への道をELSIが歩み

続けていることは間違いない。ELSIには、日本や世界各地からやってきた、広範な分野の研究者が集まっている——60名のフルタイムの研究員のほか、公的・私的に結びついた数百人のさまざまな研究者が集い、多くの先駆的研究や、関心を引く研究を行っている。

地球がいかにして生命を維持できる状態になり、いかにして生命が誕生したかを巡る疑問に対して、答えがすぐに見つかるとは誰も思っていない。だが、ELSIでは今、大勢の科学者たちが、これらの難問に集中的に取り組んでいる。

だが、少し話を急ぎすぎたようだ。



東京工業大学提供

三島前学長とELSI

東京工業大学の三島良直前学長は、一見したところ、地球と生命の起源を探る国際研究機関を最優先事項にするとは考えにくい。

彼は元々、最も応用が進んだ科学分野と呼ぶべき、材料科学の出身だ。学長就任前、最後に発表した論文は、『Electron Diffraction Study on the Crystal Structure of a Ternary Inter Metallic Compound Co_3AlC_x (電子回折法による三元系合金 Co_3AlC_x の結晶構造に関する研究)』というタイトルである。ELSIでの研究は、今後何らかの形で実用化される可能性がないわけではないが、それはELSIの目指すところではない。

一方で三島前学長は、学際的科学においてはかなりの経験を積んでいる。東工大の学長に就任する前は、学内に設置された、従来とは異なる2つの組織の長を兼任していたし、大学院総合理工学研究科の長も務めた。

加えて彼は、カリフォルニア大学パークレー校で博士号を取得しており、新しいスタイルの教育を、青年期から体

験していたのである。

「日本の科学の水準は極めて高く、とりわけ、材料科学、物理学、数学などの分野では傑出しています」と、三島前学長は先ごろ語った。

「100年前から、日本の教育制度は相当質が高く、研究者が自分の専門分野に没頭できる環境を提供してきました。常に、物事をより深く追究することが目指されてきたのです。狭くていいから深く、というわけです。」

「ところが、異分野の融合や、学際的研究となると、日本の科学者はあまり成果を上げていません。彼らはできるだけ自分の専門から出ないようにと懸命になる。たとえば、地球科学、化学、そして生物学を融合して、宇宙生物学を作ろうという提案に、日本人はなかなか馴染めません。」

「しかし、それは国際的レベルの科学にとって、非常に重要な方向性です——より学際的になることが求められています。これは、21世紀において不可欠な科学基盤と呼ぶべきものです。」

東京工業大学前学長の三島良直は、その6年の任期中ずっと、ELSIの強力なサポーターであった。

三島前学長が、WPIの補助金が終了する2022年以降も東工大がELSIの支援を続ける素地づくりに努力するのも、この思想ゆえだ。

三島前学長と大いに協力してきたELSI副所長John Hernlundは、ELSIの存続と成長に三島前学長の存在は不可欠だったと語った。

「三島前学長は、設立直後の困難な時期、私たちを導いてくれました。彼には皆敬服しましたね。打開策の見えない事態に何度も見舞われましたが、その都度彼は私たちを救ってくれたのです。」

これまでに多くのミーティングを三島前学長と行ってきた、ELSIの所長、廣瀬敬も、三島前学長は常に力強い味方だったと認める。

「三島さんは、バークレー（カリフォルニア大学）で大学院生だった当時、非常にいい経験をされており、東工大をバークレーのようにしようと努力を続けておられます」と廣瀬は言う。「東工大はグローバル化せねばならない、さもなければ、世界における東工大の存在感は、次第に希薄化せざるを得ない、というのが彼の信念です。」

日本全体の人口が減少し、文部科学省からの法人運営費も減りつつある現状で、教員ポストは重要であり、その人事裁量権は各部局長が握っているのが普通だ。しかし三島前学長は、固い決意で、人事裁量権の学長への移譲を実現し、ELSIを含む学内の重点拠点に対する人事の積極的なサポートをした。



WPIプログラムの重要な項目のひとつが、トップ研究機関の事務・支援体制を、日本の他の研究機関や大学で標準となっているものに比べ、階層的・お役所的ではなくしていくことだ。それに関連して、WPIでは、ホスト機関である大学に、多様な事務・支援体制を経験してもらい、その結果、より機敏で国際的な体制へと移行してもらおうという目標を掲げている。そのため、ELSIの事務・支援スタッフには、ELSIが採用したメンバーと、東工大からのメンバーの両方が存在しており、数年の周期でローテーションすることになっている。



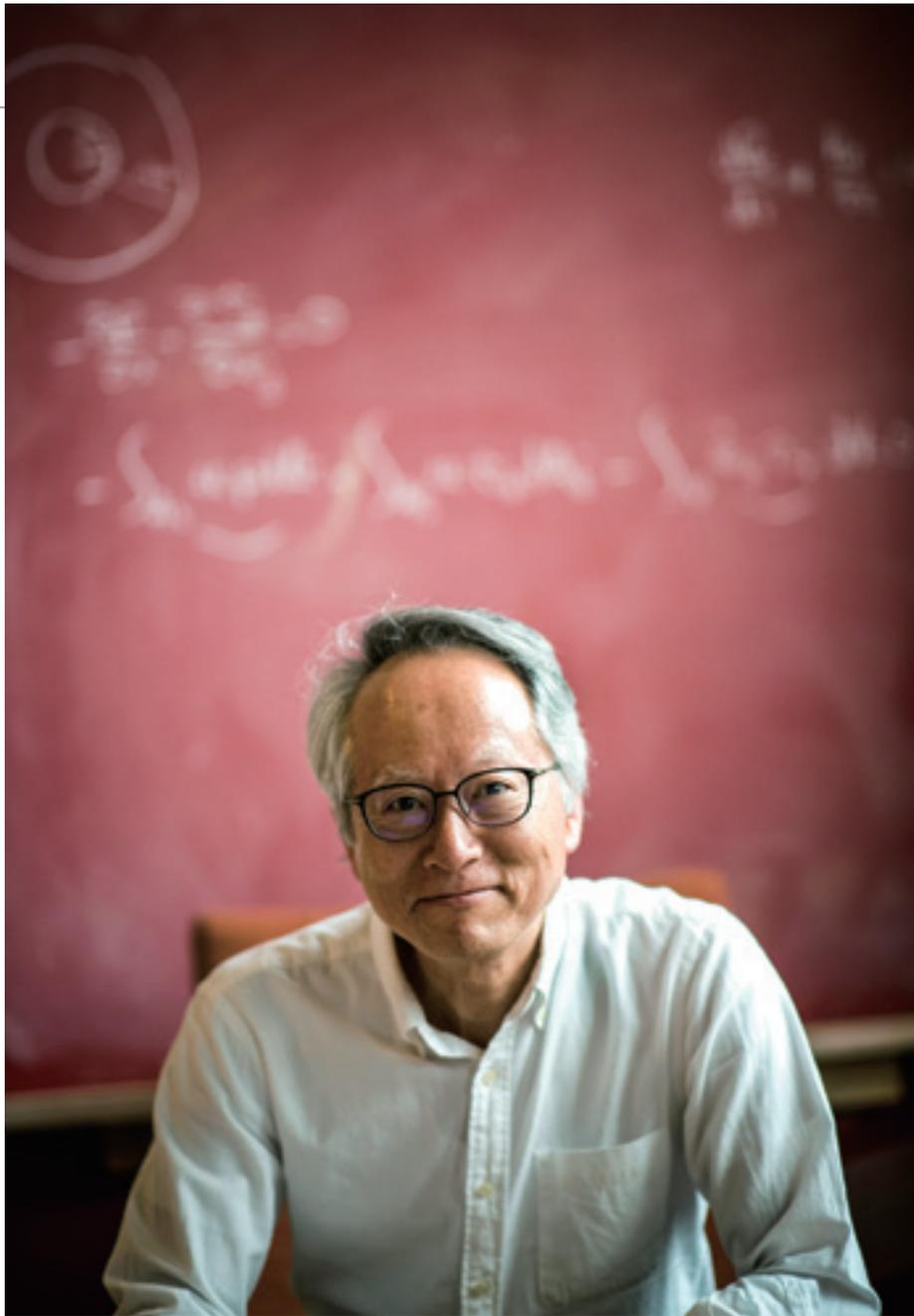
これらの方針を日々実施しているのが、上段左から、坂井玲香、松本胤明、櫻井隆、Malvicino 理恵、そして、下段左から、石渡佐知子、西村謙一、遠藤貴恵子（ローテーションで角野葉子〔左図〕と交代し、東工大本部事務に戻った）だ。



坂井玲香は現在、ELSIの「ライフサポートアシスタント」で、海外出身の科学者たちと協力して、大小の問題を解決し、ELSIのメンバーたちに住居、金融機関、医療機関を紹介する、独創性が要求される仕事を担っている。さらに、日本での人付き合いや、日々接する日本文化への対処のこつを助言するほか、初心者に日本語を教えている。彼女の（そしてELSIの）目標は、海外からの科学者たちに、できるだけ早く日本になじんでもらい、スムーズに研究を始めてもらえるようにすることだ。



納田明達は、計算機・ネットワークのマネージャで、ELSIの情報技術インフラを日々ひとりで管理している。彼を知る人々は、その技術スキルのみならず、料理の腕前も尊敬している。



吉田尚弘 地球環境化学

吉田尚弘は、ELSIが誕生する前からELSIに関わり、WPIへの提案の作成に尽力した。同位体を置換した分子を使った地球環境解析(アイソトポログ解析)を専門とする、東工大の地球環境化学者である。彼は、他のELSI創始者たちが、「初期の地球の環境と生命の起源について、生物学者たちと共同研究を始めてはどうかと、熱心に勧めてくれたのです」と言う。

精力的に、協力体制を作って事を進める吉田は、これまでにELSIの多くの科学者と共同研究を行っている。また、地球生物化学の中川麻悠子、分析化学のAlexis Gilbertをはじめ、教え子だった研究者を何名かELSIに招いている。ELSIを、日本地球化学会、欧州地球化学連合、国際地球化学会などの他の組織とつなぐ彼を、多くの人が、ELSIの外交官的存在と見なす。彼はまた、日本学術振興会からの大規模な科学研究費(5年継続)の管理も行っている。



5. 研究所には科学者が必要だ

ELSI発足直後の月日は、John Hernlundの場合と同様、玄田英典にも強い印象を与えた。それは当然である。

玄田は、惑星形成専門の研究者として初期にELSIに採用され、最初の2週間は、廣瀬所長と同じオフィスを使っていた。Hernlundと同じく、そのオフィスも電子計算機室の中であり、寒いうえに、騒音が途切れることがなかった。廣瀬は、別のオフィスが見つかって出て行ったが、玄田はしばらくそこに留まった。

玄田が名高い東京大学からELSIに来たのは、井田の強い勧めがあったからだ。ELSIの研究重視の方針に引かれたのはもちろんだが、重い教育デューティーがないことも魅力だったと、玄田は認める。

だが、これほど寒くやかましい部屋は、研究にとって理想とは程遠い。

おまけに、発足したばかりのELSIチームには、まともなミーティング・ルームがなく、最低限の実験室と、どう見て

多国籍の研究者集団：ELSI生命の起源ネットワーク (EON) により、ストラスブール大学から来てELSIに長期滞在しているJoseph Moranが、地表近くの生命地球化学における金属の役割についての最近の研究展開を説明している。

も狭いオフィス区画しかなかった。

ELSIの発足直後から、科学者コミュニティをゼロから築き上げる重要なプロセスが、一気に加速された。

科学者のヘッドハンティングで提示する、相手が魅力に感じてくれそうなものにはいろ

いろあるが、おそらく最も魅力的なのは、既に重要な実績を上げた科学者がその組織に存在していることだろう。ELSIには、スタート時点から、そのような科学者が何人もいた。

たとえば廣瀬は、傑出した高圧科学者で、地球深部、とりわけコア研究の分野で重要な貢献を行っている。廣瀬の研究室では、学生や同僚との協力のもと、地球深部のマントルやコアの条件をシミュレートし、地球深部に存在することが知られている鉱物や岩石が、圧力、温度、科学組成の違いにより、どのように振る舞うかの究明に取り組んでいる。

マントル最下層、コアのすぐ外側にある、地震学によってのみ知られる摩訶不思議な層を作っている物質を発見し



ELSI副所長 John Hernlund

たことにより、廣瀬はこの分野で不朽の功績をあげた。彼がポストペロプスカイトと呼ぶその物質は、 $MgSiO_3$ の、それまで知られていなかった相だ。特別に設計されたダイヤモンドアンビルセルを使って行われたその発見によって、コアや低部マントルの測定に現れる、他の異常を説明する道が拓かれたのだ。

そんなわけで、廣瀬に声をかけられた科学者は——とりわけ、若手科学者は——、大きく心が傾くに違いない。アメリカでNASAに勤務した経験があり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)でもいくつもの大きなミッションに関わってきた臼井寛裕がELSIにやってきたのも、廣瀬の働きかけの成果だ。当時は、科学に影響力がある海洋研究開発機構(JAMSTEC)をはじめ、日本のさまざまな組織が、人員の

採用や指名を通してNASAとの関係を築こうとしていたので、廣瀬は、ELSI-JAXA間の結びつきの確立を急務と考えたのだ。

もうひとり、科学者たちを引き付けたのが、長年東工大で教授を務め、尊敬を集めている、惑星形成の専門家、井田だ。彼は5年にわたって、WPIに先行する、別の補助金プログラムのリーダーをしていた。グローバルCOE (Global Centers Of Excellence) プログラムと呼ばれるそのプログラムは、学際研究を奨励してはいたが、国際的な舞台で活躍できるように日本の理系の学生を育成する目的で作られており、彼らと世界各国の科学者を直に協力させるものではなかった。

井田によれば、彼が指導したGCOEのグループは、地球での生物進化がテーマだったが、惑星形成、地球科学、地質学、そして究極的には惑星進化を非常に重視していた。5年間の政府支援が終わったとき、井田、廣瀬、そして東工大の地質学者丸山茂徳は、その学際的、国際的なアプローチをぜひ続けたいと思った。こうして、地球と、地球上の生命の起源を一緒に研究するという、他にはあまりない取り組みを、ELSIとして提案することになったわけだ。

だが、彼らはすぐに、必然的な障害に直面する。

「初期地球、原始大気、地球深部の研究者は大勢東工大にいましたので、初期地球の形成を、生命の起源の問題の中心に据えることを明確にしました」と井田。「しかし、

WPIに採択されて、周りを見回すと、実は、生命の起源を研究している人は誰もいなかったのです。おまけに、そういう研究者にどうやって接触すればいいのか、全然わかりませんでした。それは私たちの分野ではありませんでしたから。」

結局、生物・化学分野の海外の研究者を採用する仕事は、次の3名が担当することになった。まずHut。彼は生命の起源の専門家ではなかったが、すぐに知識を身につけた。そして、生物出現以前の地球を専門とする研究者で、生命の起源に取り組む科学者たちと結びつきがあるJim Cleaves。さらに、長年にわたり廣瀬と、研究のみならず、個人的にも友情を培ってきた、地球物理モデリングの専門家、Hernlund。実のところ廣瀬は、Hernlundと、彼の夫人で固

体地球物理学者(深部地球地震学)のChristine Houserの二人を東工大に招聘しようと、ELSIの誕生前から画策していた。

そして、海外の科学者、特に、チャンスと冒険を熱望する若手科学者の採用は、Hernlundが担当することになった。

Hernlundは、かれこれ3年も地球を旅しており、宇宙生物学会議の集まりや、米国地球物理学連合の年会などの国際会議で、有望な候補者に話をしている。2017年にアリゾナ州メサで開催された宇宙生物学会議の会合では、彼がELSIの代表を務めた。

特に発足直後は、海外の科学者の採用は容易ではなかった。ELSIはほとんど知られていなかったし、また、日本では生命の起源についての研究が始まってまだ間もなかった。その上、WPIの補助金が終了したあとのELSIの未来も依然として見通しがつかなかった。

廣瀬とは頻繁に共同研究しているHernlundには、ELSIの未来の不透明性が一番気がかりだった。できたばかりでまだ軌道にも乗っていない研究機関に、荷物をまとめて地球の裏側から来てくださいと頼んだ相手に対して、Hernlundは責任を感じずにおれなかったのだ。彼はELSIの副所長として、ELSIを東工大の永続的な組織としてもらえるよう、長年にわたり、懸命に努力を続けている。今ではELSIの存続もかなり確実に became したが、彼が採用活動を開始した当時は、そうではなかったのである。

「ELSIが短期的なプロジェクトでしかなかったなら、ELSIの成功のためには不可欠な犠牲を、わざわざ払って下さいなどと、頼んだりできないと痛感していました」とHernlund。「たった数年で終了してしまうものに、それほど大きな努力を、誰が払えますか? 三島前学長にこの状況を説明すると、前学長は完全に理解してくださり、ELSIがWPI終了後も存続するよう全力を尽くしてくださいました。」

注目を集めるため、Hernlundらは、研究科学者20名のポストの広告を出すことにした。求人広告は功を奏し、ユニークな科学者たちが、ELSIが何を目標しているかを知った。

たとえば、パリ地球物理学研究所で博士号を取得する直前だったMatthieu Laneuvilleは、インターネットの求人リストで、ELSIが研究科学者を求めているのを見つけた。彼はそれまで、物理学と地球物理学を学んでいた。

「とてもユニークな研究機関だと思ったので、John (Hernlund) と井田さんに連絡し、私のような経歴の者に関心を持ってもらえるかどうか尋ねました。それまで会ったこともありませんでしたが、二人は私に応募するようにと勧めてくれました。それで応募したのです。」

「自分にとって、研究者としても、また、人間個人として

も、本当にワクワクするようなポスト研究の機会は、ほかに聞いたことがありませんでした。ELSIのポストに興味を持ったのは、研究の面で何かうまくいかなかったとしても、人間として素晴らしい冒険になるに違いないとわかったからです。」

彼は面接を受けるために空路東京を訪れ、1週間のあいだ、にぎやかな東京の街と、びっくりするほど親切な人々に親しんでいった。彼は、Hernlund家で暖かいもてなしを受け、ELSIと東京に少し馴染んだ。

「2014年の4月に日本に移ったとき、私は26歳で、2週間後に27歳になりました。コーヒーブレイクのときに、ケーキを持ってきてくれたんです。とても嬉しかったですよ」

「科学については、私は月を専門としていて、地球そのものについての専門家ではなかったのだから、初めのうちは、どの問題がどの分野に属するのか、従来からの専門家のように直感的にはわかりませんでした。」

「本音を言えば、このような経験はどんどんしたいですね。というのも、何事も当然視してはいけないとわかりますから。……つまり、どんな文化にも固有のルールがありますが、外国で暮らせば、そういう文化固有のルールを意識的に捉えることができます。私は元々日本とは何ら特別



Julien Foriel と Matthieu Laneuville

な結びつきはありませんでした。しかし、西洋とはまったく違う文化を継承している国でしばらく暮らしたいと、本気で思ったのです。」

Laneuvilleは、東京での2年の契約が終了したあと、この先少なくとも2年間、特任助教としてELSIに留まる。彼は、自分の専門の、惑星と月の形成と進化の分野でも、また、彼が今長期的目標に据えているという、「生物と地球の力学を、同じひとつの系の2つの側面ととらえたうえで、生物が地球に及ぼした影響を、地球の力学的進化の図式のなかに組み込む」研究でも、大いに成果をあげている。

現在ELSIには、70名を超える科学者と実験技術者がいるが、その半分弱が外国籍だ。

かつて初期のELSIの「オフィス」で寒さに震えていた玄田英典は、ELSIに留まり、研究者、モデル作成者として実力を発揮している。彼の専門分野は巨大天体の衝突と、それが惑星形成で演じた役割だが、ここしばらくは、いかにして地球に水が存在するようになったのかという、盛んに議論されているテーマに集中的に取り組んでいる。彼は、先ごろ2017年ゴールドシュミット地球化学ジャーナル賞を受賞し、パリで、『地球の海の起源：水の総量、歴史、そして供給に関するアセスメント』という、その論文について講演を行った。

これまでのところ、ELSIは彼にぴったりだ——自分が選んだテーマを深く追究させてくれるし、論文をたくさん書かせてくれるのだから。「ELSIがある限り、私は喜んでELSIにいますよ」と玄田は言う。

彼は若手科学者の指導も再開しているが、教員というよりむしろ、ポスドクへの助言者、相談相手である。

彼が指導するポスドク研究員のひとりが、日本学術振興会のフェロシップで、惑星ごとに大気がまったく違うのはなぜかを彼の元で研究するためにELSIにやってきた、濱野景子だ。彼女は、玄田が得意とする、惑星への巨大天体衝突がその後まで及ぼす影響のシミュレーションなどの手法を習得した。これによって彼女は、衝突の結果生ずるマグマオーシャンに関する論文を書き、『Nature』誌に発表した。また、衝突後形成される新たな大気についても、現在最重要テーマとして取り組んでいる。

彼女の研究は、生命の起源そのものでは

なく、地球の起源に関連するものだが、生命が出現できる状態に地球が至った過程の究明につながるテーマだ。生命が存在し得る地球以外の惑星を探す取り組みで、惑星とその大気の形成に関する同様の問題がもちあがることを考えれば、彼女の研究はその最先端であり、本質的に学際的である。

それはまた、非常に厳しくもある。しかし彼女は、彼女が意欲的に取り組む困難な科学テーマを、さまざまな方法で追究させてくれる、「ELSIの自由な雰囲気」を重視している。

ELSIでは、ベテランの井田が、実力はあるのに満足していなかった玄田を引き付け、その数年後に玄田が、濱野のような才能のある若手科学者たちを引き付けるという、また別の好循環によって、複雑化を進める自己持続的バイタリティーが進化しているわけである。



玄田英典(左)と兵頭龍樹(右)





Marine Lasbleis 惑星科学

ELSIのフランス人研究者のひとりLasbleisは、地球深部、高圧科学が専門で、地球の下部マントルとコアの、形成と振る舞いの究明に取り組んでいる。現在、廣瀬所長、Hernlund副所長と共同で、「Growth of the inner core by snowfall（液体鉄の凝結による内核の成長）」という論文を執筆している。

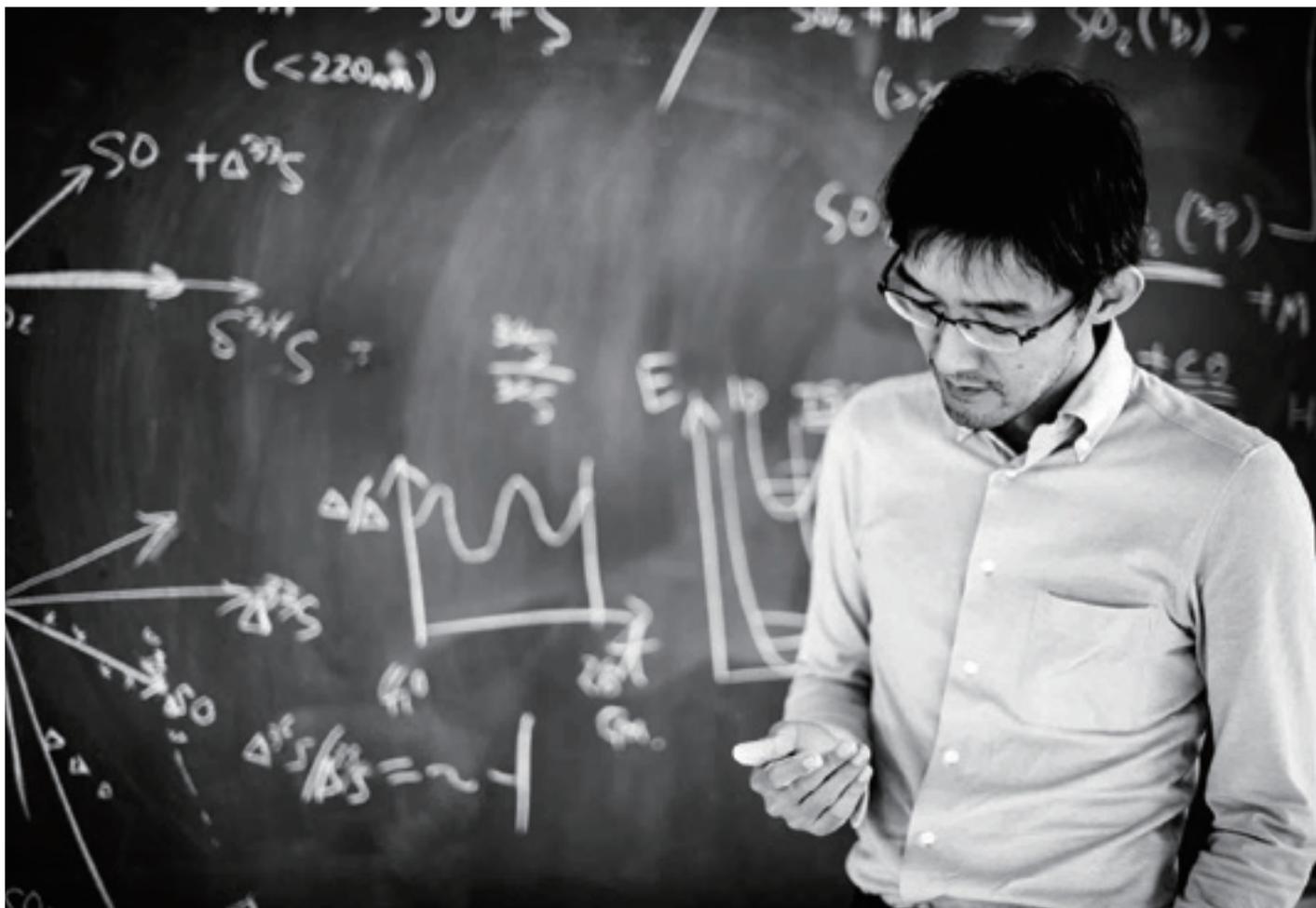
彼女は2014年にリヨン地質学研究所で博士号を取り、その後2年間日本学術振興会のフェローとして、ELSIの廣瀬と共に研究を行った。彼女は現在、融解物や固体が地球深部の動力学に及ぼす影響を、特に地球の内核形成や原始マグマオーシャンの進化への影響に注目して研究している。

Albert Fahrenbach 有機化学

Fahrenbachは有機化学者で、2013年にノースウェスタン大学で博士号を取得した。その後、ハーバード大学にある、ノーベル賞受賞者Jack Szostakの、生命の起源に取り組む研究室のポストに応募した。SzostakはELSIの主任研究員で、定期的にELSIに滞在しており、自分が指導するポスドク研究員たちにも、ELSIで過ごし、研究するよう勧めている。Fahrenbachは、それはいい機会だと関心を抱き、2013年にELSIにやってきた。

この4年間、FahrenbachはELSIに時折滞在しており、最近ELSIの准主任研究員になった。彼の研究は、生物が登場する前に起こっていた、酵素による複製に関するもので、彼は特に、放射線分解——放射線によって物質が分解する現象——が、生命登場前夜、生命の化学的構成要素が形成される過程で担っていた役割に、関心を抱いている。





上野雄一郎

6. ELSIには標的とリーダーが必要だ

研究所として軌道に乗ると、今度は、ELSIでは具体的にどのように科学研究を進めるべきなのかが大きな問題となった。個々の科学者は、重要な研究を行い、成果を論文として発表していたが、それらのテーマは、ともするとほかの同僚たちの研究とは無関係になりがちだった。ELSIには、これから取り組んでいく科学のマスタープランが必要だった。

ELSIが中心に据える問題は、基本的には、「地球はいかにして地球化学から生命化学へと移行したか」である。しかし、それはあまりに漠然とした問いで、多数の分野にまたがっている。この広大な活動範囲のなかで、どうすればELSIはユニークな存在になれるのか？ これが大きな問題だった。

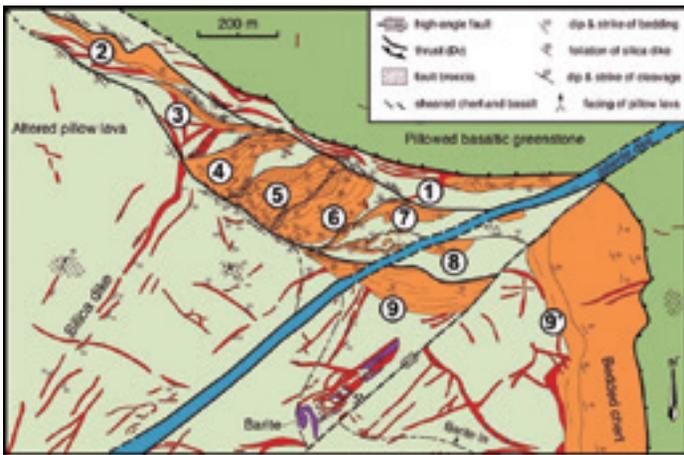
助言をもらいながらの一連のミーティングと、度重なる議論——そこには、深く掘り下げるのか、広い範囲をカバーするのかという、避けられない問題があった——を経て、いくつかの中核エリアが特定された。惑星形成および地球深部物理、「ぐちゃぐちゃ」の化学(メッシー・ケミストリー)という新分野、原始地球のマグマオーシャンおよびその大

気への影響、分子レベルでの進化、そして、非生命的代謝と人工生命がそれらの中核エリアだ。別々だが関連のある分野で研究する科学者たちもいて、彼らはそれを続けたいわけだった。

進捗の違いはあれ、これらの中核エリアのすべてが前進している。だが、それぞれのエリアがたどった道筋を振り返っても、ELSIの成果をお役所的な目線で見るだけになってしまいそうだ。それよりも、ELSIがやろうとしていることを多くの点で反映している、ひとりの科学者に注目したほうがいだろう。

その科学者とは、上野雄一郎である。彼は地質学者から地球化学者へ、そしてさらに地球生物化学者へと進化を遂げてきた。彼は、自分がどんどん広い領域に取り組むようになったのも、ELSIが促してくれたからだし、ある意味ELSIがそれを可能にしてくれたのだと言う。

上野は地質学者としての教育を受け、非常に多くの地質学上の重要地点——その多くは、太古の地球が残るところ——へ、現地調査に訪れている。キャリアの初期に行った、



上野雄一郎が作成した、オーストラリア西部のピルバラクラトンの、北端領域の地質図。この地域では、上野が35億年前の流体含有物と特定した試料(下図)も含め、世界最古の岩がいくつか発見されている。

オーストラリア北西部のピルバラ地域での調査で、大きな成功を収めた。そこは、地球に残る最古の微生物の痕跡がいくつか発見されている場所である。

上野は、東工大を中心としたチームの一員として、7年にわたり、毎年一回、ピルバラ地域で数ヶ月過ごした。最寄りの町からは100キロ以上離れていた。やがて上野たちは、熱水噴出孔の証拠となる化石を岩のなかに発見し、多くの試料を採取した。

彼の画期的な発見をもたらした試料のひとつが、岩のなかで見つかった気体包有物(ガスの入った泡)で、その内部にはメタンガスがあることがわかった。そして上野は、最先端の技術を使って、そのメタンが生物——メタンを消費し、メタンを生成する微生物——に由来することを突き止めた。ガスの泡は、35億年前のものとして特定され、2006年、この発見は『Nature』誌上で大きな反響を産んだ。

彼は母校の東工大に教員として採用されたが、地質学の研究をつづけ、さらに、地球化学の領域にもどんどん踏み込んでいった。彼は、岩石に含まれる硫黄に主に注目し、その同位体を分析して、残された痕跡を明らかにすることにより、その岩石が形成された当時の大気組成の究明に成功した。

前途有望な研究者で教員だった上野は、WPIへの提案書の作成に協力を求められ、できあがった提案書は、ついに採択された。こうして彼は、2012年以来、ELSIの「推進力」であり続けている。

その間彼は、海外からやってきたELSIメンバーらと10件もの共同研究を行い、アゴラでの打ち解けたディスカッションや、公式のワークショップに頻繁に参加し、生命の起源の研究にますます深く踏み込みつつある。

「ELSIで議論して、もっと重要で根本的な問題に取り組めるように、自分の視野を広げる道を、ぜひ見つけたいと思うようになりました」と彼は言う。

「私は仲間たちと共に、初期の地球は、現在の地球とはまるで別の惑星だったと認識するようになりました。生物が生息可能な、あるいは生息しているさまざまな種類の惑星の一種だと。このような認識——地球は生物が生息する惑星の一例に過ぎないという——は、ELSIで過ごすなかで私に芽生えたのです。おかげで、自分の研究について、まったく違う考え方ができるようになりました。」

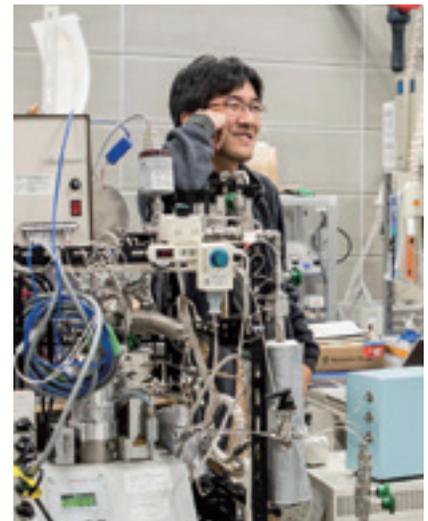
現在、上野は、初期地球における地表と大気の相互作用に注目している。今なお実験室での実験に(そして教える仕事に)多くの時間を割く一方で、彼はさらに、理論の領域にも足を踏み入れはじめた。

初期地球には大量の一酸化炭素(CO)が含まれていたという仮説を彼が打ち立てたことに、これが最も明白に表れている。多くの生物を窒息させることで最もよく知られているこの気体が、生命が出現する前の大気に存在していたことは、これまであまり研究されていなかった。だが上野は今、これこそが、生命を可能にした大気を理解する鍵だと考えている。

一酸化炭素は、有機化合物の合成に極めて有用な分子で、初期の微生物は、一酸化炭素を取り込むことで存続していたのだらうという考え方を、上野がより明確に把握したのは、ELSIで他の研究者たちとディスカッションしていた最中のことだった。この新しい認識に到達した彼は、一酸化炭素のロジックをもっと追跡したいと考えた。ひとつには、大気にCOが豊富なことで、彼が以前の研究で気づいた、硫黄同位体の存在比の異常を説明できる可能性があるからだ。

最近彼は、世界各地で頻繁に、初期地球の大気における一酸化炭素存在の可能性、そして、ひょっとすると火星大気と同様の可能性について、講演をしている。NASAの科学者たちも、上野の仮説を受けて、火星探査ローバー、キュリオシティが収集したデータを再検討し、太古の火星大気に一酸化炭素が含まれていた痕跡と見なせる、同位体の特徴が残っていないか調べている。

上野の研究が、画期的な成果につながりそうな、こんな方向転換を遂げたのも、ELSIでの時間と交流のおかげなのだろうか? 上野は、「もちろんそうです」と答える。



上野は2017年、東工大の常勤の教授に就任し、ELSIでも主任研究員となった。



写真で見るELSIメンバーたち

ダビンチ、アインシュタイン、あるいはハッブルが、科学の問題を解決するために、たったひとりで研究に没頭している姿は、市民が思い描く科学者のイメージとして今も健在だ。だが、科学の現実には、もうかなり前から変化している。ELSIや、その他の多くの研究機関の目標は、さまざまな分野の科学者たちを積極的に集め、彼らの間にどんな議論が起こり、どんな意外なものが飛び出すか試すことだ。

とはいえ、科学者が学際的分野でも活躍できる実力を付けるには、まず自分の専門分野を深く掘り下げなければならない。たとえば、電気化学が専門の中村龍平は、ELSIに主任研究員として加わり、やはり主任研究者で微生物生態学者のShawn McGlynnと共に研究を行うことになった。

共有するテーマでより効率よく前進するためには、互いに相手が持っている知識が不可欠だ。

ELSIのコラボレーションには、正式なもの——系外惑星のよりよい分類法を模索するCYCLOP (Cycles and Life on Planets) グループなど——がいくつかある。そのほか、さまざまな分野の科学者たちがプロジェクトや論文作成のために協力し合ったり、あるいはまだ混沌とにコラボレーションもある。

ここに、ELSIの科学者の一部と、研究者を支えるスタッフの一部を写真で紹介する。

1. 亀谷将史

微生物代謝学



1.

2. Alexis Gilbert

分析化学



2.

3. Ramon Brasser

惑星科学



3.

4. 小南淳子

惑星形成



4.

5. 佐藤友彦

地質学



5.

6. 中村龍平

電気化学



6.



1.



2.

1. Julien Foriel

同位体地球化学

2. 斎藤貴之

銀河形成

3. 黒川宏之

惑星科学

4. Christine Houser

固体地球物理学

5. Joe Kirschvink

地球生命論



3.



4.



5.



10.



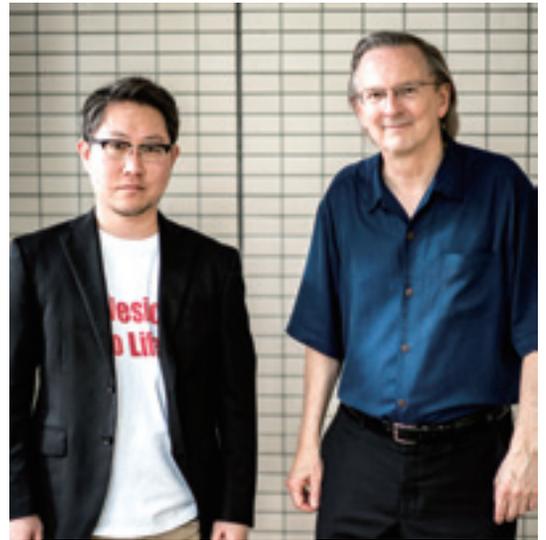
11.

6. ^{くるま ゆうてつ} 車 兪 澈 合成生物学
/ Jack Szostak 生物物理学、生化学

7. 秋山京子
EONプロジェクトマネージャー

8. 古水千尋
特任専門員 (URA)

9. 齋藤ちさと
特任専門員 (URA)



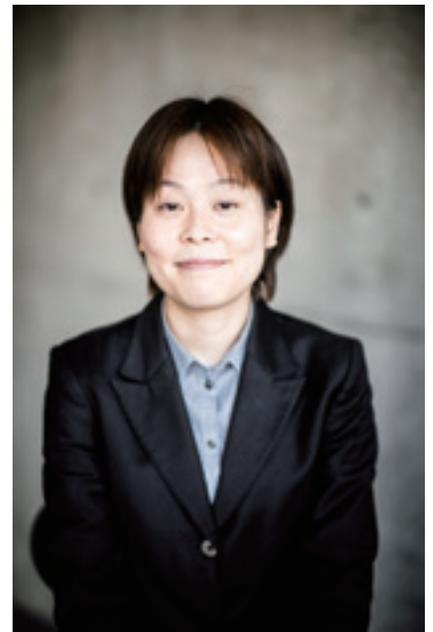
6.



7.



8.



9.

10. 本郷やよい
分析化学

11. Olaf Witkowski
人工生命、複雑系科学

12. George Helffrich
固体地球物理学



12.



7. ELSIの文化

午後3時。ELSI秘書チームのひとりがベルを鳴らしながら、廊下を回っている。誰もが知っているとおり、お茶の時間だ。

ELSIの創設者たちは最初から、若手とベテランの科学者が、毎日リラックスした雰囲気が集まることのできる環境を作ろうと取り組んだ。入れ替わりも珍しくない、異なるけれど関連のあるさまざまな分野の科学者たちを集めれば、独創的なひらめきが飛び交って、科学のコラボレーションが生まれるに違いない、というわけだ。

アゴラの突きあたりの板張りの床に、長いカウンターがあって、たくさんの椅子が円形に並んでいる。昼下がりになると、そこはしばしば科学者たちの会話と笑い声に満たされる。(同様のものがELSI-2にもある。)

同じ分野、あるいは関連する分野の科学者たちのコラボレーションは、珍しいことではない。むしろ、それが普通だ。

だが、非常に多様な分野の科学者たちのコラボレーションは、あまり行われな。なぜなら、研究の対象も、研究方法もあまりに遠すぎる、あるいは、そのように見えるから

だ。

しかし、アゴラの喫茶カウンターでの会話は、ときにはELSIの敷地のあちこちや、その周辺の大岡山の町のなかまで続いて、いつのまにか科学者たちを結びつける。特に、若手科学者たちは、会話のなかで突然、同僚に予期せぬ共通点を発見することが多い。

たとえば、研究員のJennifer Hoyal Cuthillは、コンピュータ・シミュレーションと、「機械学習」と総称されるものの、才能と情熱にあふれる専門家、Nicholas Guttenbergとおしゃべりを始めたところ、その会話のなかで、ある種の機械学習が、Hoyal Cuthillの古生物学のデータにメリットをもたらす可能性があるという、意外な結論に達した。

「コラボレーションは、ただ偶然に起こるものではありません」と彼女は言う。「こういう議論の重要性を強調し、奨励する真剣な努力が行われています。大部分のメンバーが、その努力に大きな恩恵を受けていると思います。」

ELSIは、立ち上がりの過程で、未知の領域へと、決定的なステップをいくつも進めた一方で、ELSIの文化とスタイ

ルには、一種血統めいたものがある。まったく当然ながら、それは、ELSIのリーダーたちの経験から来ている。

学際的研究の強調、ばらばらの個人には不可能なことを達成できるコミュニティの形成の重視、アイデアと笑いを交換するための毎日のティータイム——これは、プリン



Hanako Ricciardi はELSIの国際連携コーディネーターだ。いくつもの文化のなかで自然体でいられる彼女は、ELSI内部で、そして、ELSIと外部とのあいだで、結びつきを促す役割を担っている。その上、問題特定、問題解決の達人でもある。

ストン高等研究所のモデル、とりわけ、Hutのモデルだ。

科学者たちが研究だけを行う——しかも、応用研究ではなく、主に基礎研究を行う——独立した研究所というアイデアは、100年以上前、ワシントンD.C.のカーネギー研究所、ならびに、カリフォルニアのパサデナで具現化された。ELSIの中心人物の多くが、日本人も海外メンバーも、ワシントンのカーネギー研究所で過ごした経験を持っている。

また、井田も廣瀬も、WPIに先行する政府プログラム、グローバルCOEプログラムの一環としての東工大での活動を積極的にリードしてきた経験があり、その際に奨励された学際的・国際的な可能性から大いに学ぶところがあったと感じている。

これらの、研究機関文化と呼べそうなもののすべてが、強みと落とし穴の両方をもたらし、東工大のDNAに消すこ

とのできないしるしとして刻み込まれた。

さらに、ELSIに満ちている、助け合い尊重し合う雰囲気を生み出した、最大の要因のひとつである、間違いなく日本的な流儀が存在している。それは、既にELSIの建物から始まっているのだ。

派手なところはまったくないが、あちこちに精妙な趣がある。窓を覆う障子や、オフィスやほとんどのミーティング・ルームの天井に配置された垂木は、伝統的な日本家屋の内装を反映している。誰かが一言触れなければ、気づく人はほとんどいないだろう。これらのしつらえは、ELSIが日本生まれであることを体現しているのである。

だが、日本と外国を結ぶコラボレーションや友情が多数ELSIで生まれたのは確かだが、その一方で、日本の研究と外国の研究を融合する実験が始まってからの5年間で、完全に成功だった、あるいは完全に成功であり得ると考えるのは、外国人メンバーの大半が親日家で、日本人メンバーの大半が友好的であるとはいえ、純朴に過ぎよう。

障害はたくさんあるし、外国人どうし、日本人どうしで固まってしまうがちで、科学以外の面では特にそうだ。この習慣がなかなかなくなることはないのは、反感のせいではなく、むしろ、文化の違い、個人的な心地よさ、文化のなかにどれだけ深く浸かっているかの違い、そして、言葉の違いのせいなのだ。

Hanako Nakano Ricciardiは、ELSIの国際連携コーディネーターだ。ELSIでの日常生活を国際化するためのさまざまな方策を幅広く実施する一方、起こり得る問題に常に気を配るのが彼女の仕事である。コーディネーターとしては、戸惑い、場合によっては苛立っている外国人メンバーに、日本のやり方を説明し、戸惑い、場合によっては苛立っている日本人メンバーに、国際的な(主には欧米の)やり方を説明することが多い。

台湾で日本人の両親の元に生まれ、アメリカでも教育を受けた彼女は、この3つのうち、どの文化のなかでも窮屈に感じることはない。そのうえ、彼女の夫はアメリカ人で、息子共々、一家で国際港湾都市横浜で暮らしているほか、彼女の両親は今も生活の一部を台湾で過ごしている。したがって、多文化世界での生活は、彼女にとってはまったく自然なことなのだ。

彼女が見るところ、ELSIでは、個々のメンバーの多くが、自力でちゃんとしようと頑張っているけれど、やはりコミュニケーションにおいて、絶えず問題が生じている。そして、その多くは、文化的な問題で、表面化しにくいという。

「だいたい日本人は、物事を明確に説明することを嫌います。そのせいで、日本人でない人にとっては、余計に難しい状況になってしまうのです」とRicciardi。「でも、均質的

な島国文化のなかでは、多くのことが直感的にわかります。みんなが成長の過程で、ある特定の考えを身につけるので、言葉で説明しなくてもコミュニケーションできるようになるわけです。」

「たとえばアメリカでは、その多文化性ゆえに、言葉によってコミュニケーションせざるを得ません。誰もが明確にならないといけません。ところがここでは、誰かが片方の眉をほんの少し上げたり、空気をちょっと吸い込んだり、ある独特のやり方で『ふーん』と声を出したりするだけで、ほかの日本人たちは、それがあつた特定の意味だとわかります。場合によっては、同じことが状況に応じて、さまざまな意味になります。」

「でも、外国人には、いくら眉を上げ、いくら空気を吸っても、その意味は、説明しない限りわかりません。あなたが何かをしたくないとはわからないですし、その背後にある理由など到底わかりません。文化を意識する訓練を双方がしなければなりません、私たちは学びつつあります。」

彼女は、これまでの経験から、日本の文化は西洋文化よりも細部にこだわる傾向があり、それがまた誤解につながりがちだと言う。さらに、日本人は、他者と自己の社会のなかでの位置づけを正確に見極め、社会的調和を保つために自分の行動を調整することを非常に重視しているのも確かだという。

「日本人の科学者やアドミニストレータは、ミーティングにやってくる時には、何か特定の目的のために準備してきます。ところが、そのミーティングが、明確な結論に至らずに終わると、彼らはイライラしてしまうのです。「なんで私がここにいるんだ？ 自分は何をやらばいいんだ？ いったいどんな成果が出せるんだ？」と、途方に暮れます。日本人は、何か指示を与えられれば落ち着くようです。」

「一方、外国人メンバーたちは、『ねえ、これがどうなるか見てみようよ』というわけです。というのも、それが彼らが教えられたやり方で、彼らの流儀ですから。予期せぬ可能性を探すのです。」

彼女は、コミュニケーションの失敗から、いくつかの影

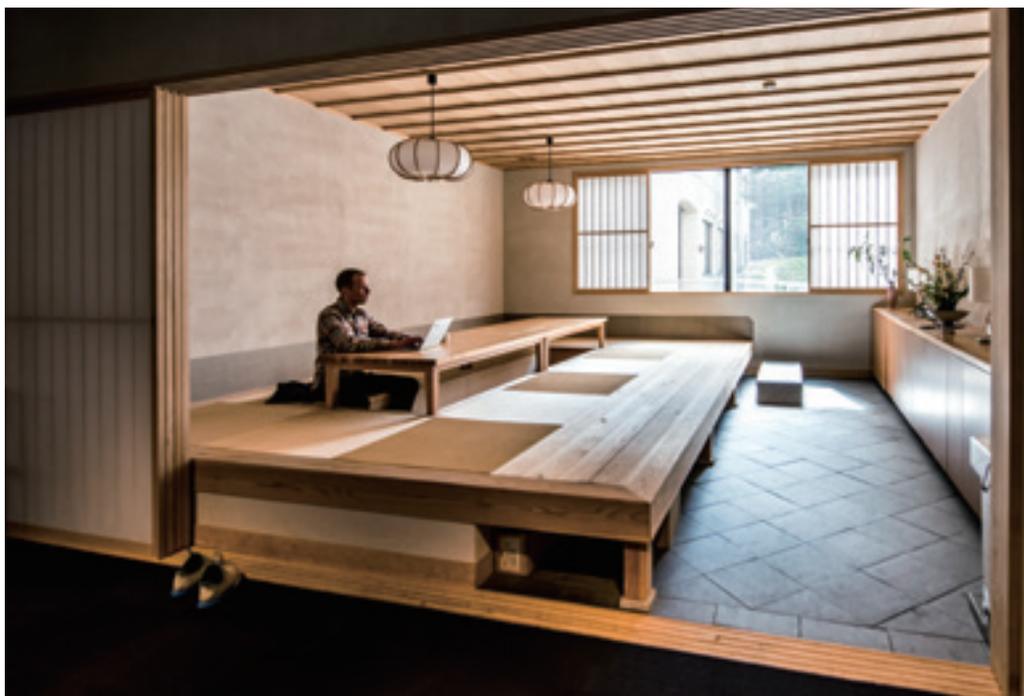
響が生じてきたと言う。ELSIのスケジュールには、ミーティングがびっしり詰まっている。メンバー全員、それより小さなグループ、そして、ELSIの科学者と客員科学者のためのさまざまなミーティングだ。とくに、全体的で学際的なミーティングでは、圧倒的に外国人の出席者のほうが多くなるという。日本人科学者が欠席しがちだからである。

「その理由は、言葉の問題かもしれませんし、もっと生産的な別の仕事があるのかもしれませんが」と、Ricciardiは、日本人科学者らについて分析する。「でも、これはELSIにとっては深刻な問題なのです。日本人たちのもたらすものは、とても価値がありますから。」

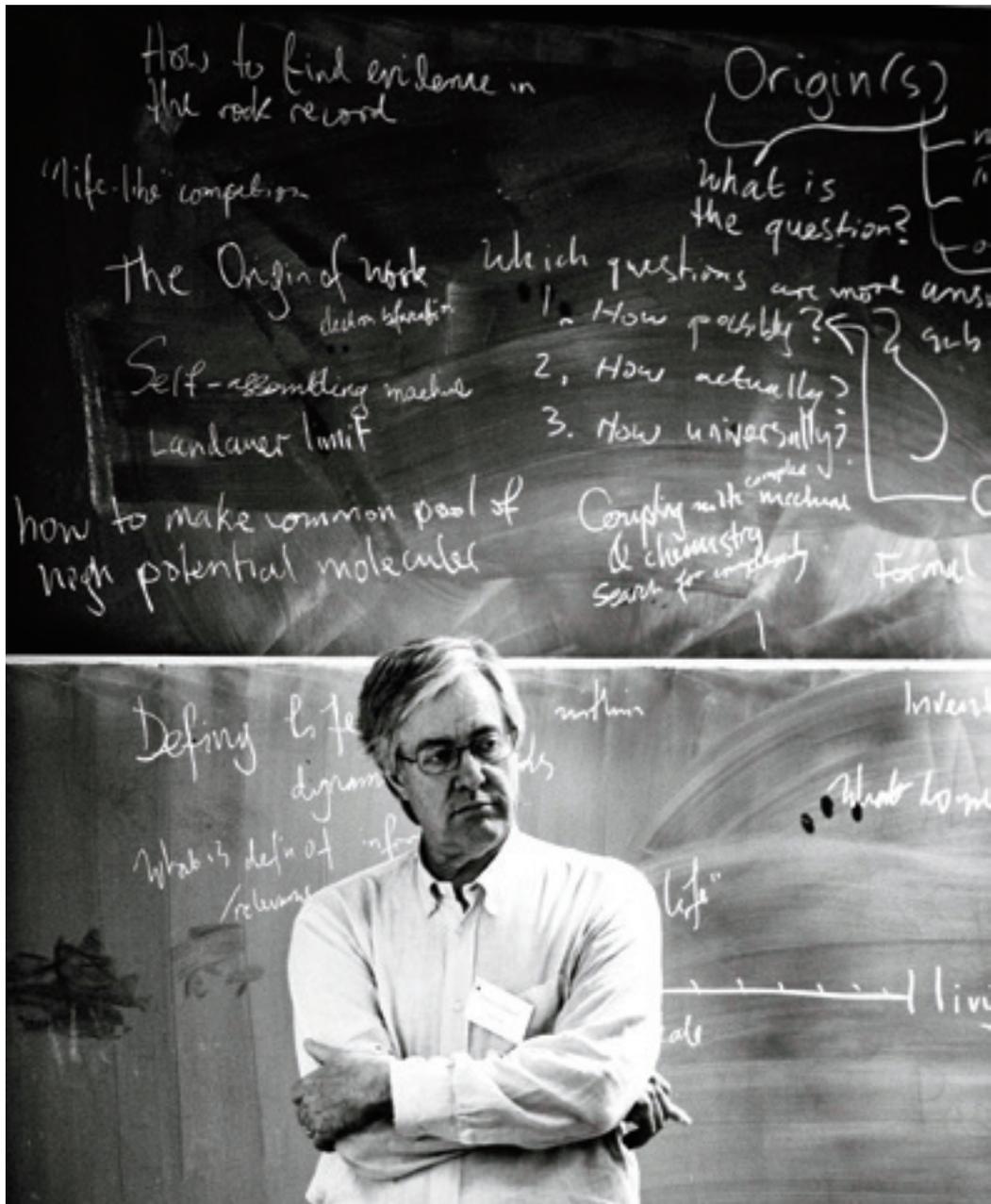
しかし、異文化をまとめあげるのは困難だとしても、彼女は、自分はいつでも協力できる体勢にあるし、明らかに前進しているし、関係者全員にとって、この努力に価値があることは間違いないと言う。その上、これはWPIミッションの正式な一環でもあるのだ。

「私たちは、改革や国際化は、トップダウンのものと考えがちですよ、つまり、実行して成功させなければならない命令のようなものだ。」

「もちろん、最初はそのようなかたちで推進されます。でも、私の考えでは、国際化と改革が成功し、本当に成果が出て、本当にそれらが根付いていくために必要なのは、一步一步信頼を築き上げることと、コミュニケーションです……私が考える国際化の成功とは、日本が、日本以外の外国のお手本に変貌することではなく、海外の例からインスピレーションを受けて、日本の強みを認識し、それを利用して、弱みを改善していく努力をすることです。」



ELSIには畳の部屋がふたつあり、日本文化に囲まれて仕事をしたい科学者たちが、その雰囲気に入ることで、日本趣味のしつらえになっている。



8. 大きな研究助成金もろろすユニークな新プログラム

ELSIの歴史のある時点で、このプログラムには、もっと多くの科学者が必要になったことがあきらかになった。新しいアイデアをもたらし、キャンパス自体を一層活気づかせ、進行中の科学を、より広い範囲へと拡張するために、さらに多くの科学者が必要だった。

そして、拡張したいのなら、WPIプログラムがELSIやほかの選定研究機関に課した重要目標のひとつを達成しなければならなかった——できる限りの国際化を目指すという目標だ。

これらの必要性と、さまざまな希望が集まって、「ELSI生命の起源に挑むネットワーク (EON: ELSI Origins Network)」が生まれた。ELSIで進行中の多数のユニークなイニシアチ

生命の起源を探る研究の道筋を描こうとするEON初のワークショップで、最終討論を指導する、Protolife社のNorman Packard。彼は、EON長期訪問者プログラムのもとでELSIにやってきた国際共同研究者のひとり。

ブのなかでも、EONは、最も先駆的なもののひとつである。

EONは、科学者としてスタートしたばかりのポスドク研究員10名を、世界各地から集めたプログラムだ。彼らは、2年の任期中、一年のうち6ヶ月を日本で過ごし、残り6ヶ月を本拠地の研究機関で過ごすことになっている。

その見返りに、ポスドクのポストとしては珍しく、彼らは教員としての仕事を免除される。生命の起源を対象とする広範な分野のなかで、あるいは、それに関連する彼ら自身の研究分野のなかで、自分が重要だと思うテーマに大胆に取り組むことができるわけだ。そして、そこそこの給与と研究予算が与えられる。

彼らの本来の研究分野はさまざまで、多くの者が既に何か別のプロジェクトに取り組んでいるため、彼らの元々のテーマでの研究も並行して続ける自由を大いに与えられている。

「私たちの分野で、EONのようなものはほかにありません。おそらく、科学全体でも、そうでしょう」と、EONのディレクターで、2015年にEONの立ち上げに参画した数名のELSI科学者のひとり、Jim Cleavesは言う。

「EONが、独立独歩で、自発的に行動でき、異なる文化のなかで暮らすことを恐れない人々を引き付けているのは間違いありません。これは、非常にやりがいがあると同時に困難なプログラムですが、これまでのところ、どの側面においても、好ましい成果が出ています。」

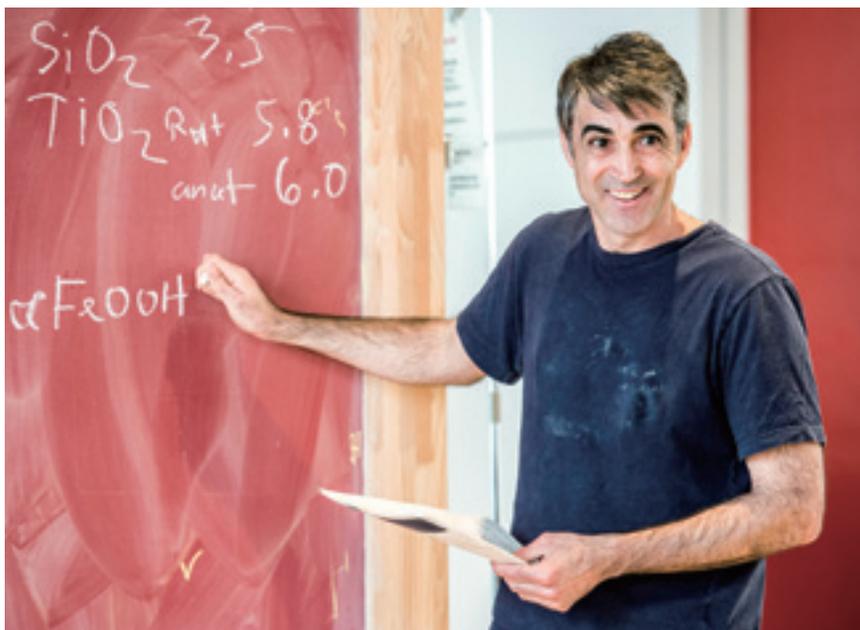
発足時の10名のEON研究員の中には、ポストドクを終了して、常勤の職を得た人もある。新メンバーも数名加わった。

彼らの全員が、「ELSI」という種を形作るうえで不可欠な構成要素となっている。

EONの創始者たちによると、EONの背景にある考え方は、単により多くの科学者にELSIに来てもらおうというだけでなく、最も広い意味で生命の起源に関連するテーマに取り組んでいる、世界中の科学者たちの結びつきを作り、関係をより強化し、さらにコラボレーションを生み出そうというものだ。

この分野は、とりわけ1950年代前半に、ユーリー・ミラーの実験で、単純な化合物を放電にさらせば、生命体の構成要素である化学物質が合成できることが示されて以降、世界中で大いに関心が持たれたが、近年は、あまり注目を浴びていなかった。だが、生命の起源に関する疑問をテーマとする研究で前進を遂げる科学者は、常にわずかながら存在してきた。何しろ、これらの疑問はどれも、最大の難問に数えられるもので、特にNASAは、生命の起源に関する研究に予算を当てている。とはいえ、ホットな分野とは言えない。

「自分が、生命の起源に関する問題に取り組んでいると自覚している科学者はごく少数です」とPiet Hut。「しか



Jim Cleaves: EONのディレクターで、このプログラムの創設者のひとり。

し実際に、生命の起源に関連するテーマに取り組んでいる科学者の数は、はるかに多いのです。これらのつながり（一見そうとは思えないテーマと生命の起源にまつわる疑問とのつながり）をはっきり見えるようにし、科学者たちが連携できるようにすることも、私たちの仕事のひとつなのです。」

EONプログラムの誕生へとつながったいくつもの結びつきを作ったのは、プリンストン高等研究所の学際研究のトップであり、かつELSIの創設者・提案者のひとりでもあるHutだ。

彼は、このように語る。他の科学者たちと共に、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を擁する欧州原子核研究機構 (CERN) に集まって、この施設の絶大な計算能力についてジョン・テンプレトン財団 (以下テンプレトン財団) の代表たちが話すのを聞いたときのこと。生命の起源の研究やその他の基礎研究を長年支援してきたこの財団の代表たちは、集まった科学者に、テンプレトン財団の支援基準を満たすような研究プロジェクトを提案できる人はいないかと尋ねた。

この呼びかけに果敢に応えたのは、Hutだけだったという。彼がこのとき提案したものが、やがてEONとなったのである。

「彼ら (CERNでLHCを使って研究した物理学者たち) は、物質の起源



EON研究員のひとり、藤島皓介。各種メディアのプログラムに多数出演し、宇宙生物学について語っている彼は、ELSIで過ごした時間は、「私の宇宙生物学者としてのキャリアで最も素晴らしく、最も充実した時期でした」と言う。



進化微生物学者で、極限性微生物ハンターのDonato Giovannelli。ラトガース地球海洋大気科学研究所を拠点としていた。

——(物質に質量を与えた起源とされる)ヒッグス粒子——を発見しましたが、私たちは生命の起源について研究しているわけです。だから、テンブルトン財団の趣旨にぴったりだと思ったのです。そしてこれは、私たちにとっては実にありがたい機会でした。」

こうして得られた33ヶ月にわたる560万ドルの研究助成金は、EONの研究員の支援のみならず、短期訪問プログラムで、各分野の専門家たちを大勢招聘し、ELSIのワークショップに参加してもらうのにも使われている。ここでもやはり、科学者たちを結びつけ、コラボレーションを促し、そして何が生み出されるかを見ることが目的だ。

「EONの研究員たちから、既に数多くの論文が発表されていますし、さらに多数の論文が目下執筆されています」



南デンマークからやってきたJacob Andersenは、ELSIのEONに在籍した期間に、新しい種類のパーチャル化学を生み出す研究を大いに前進させた。

とCleaves。「しかし、それと同じくらい重要なのが、これらの科学者たちが、世界中の仲間たちに、ELSIについて、そして、コラボレーションを重視する私たちのやり方について、どんな話を伝えてくれているかです。ここでの経験を経て、彼ら全員が、ELSIの真の支持者になっているのだと言えるでしょう。」

関連する事務も決してたやすいものではなかった。EONのプロジェクトマネージャー、秋山京子の説明によれば、大変な仕事のひとつが、給与の支給額を、6ヶ月ごとに更新される対米ドル為替レートに連動させて変更する作業で、これをきちんとやらないと、為替の変動が大きくなった場合、研究員たちは一定額の月給を当てにできなくなる。

さらに、EONの研究員が海外の自分の本拠地の研究機関に戻っているあいだは、EONのスタッフが、彼らが東京にいる間に使ったポストドク研究費を申告せねばならなかった。単純にはいかない仕事が尽きなかった。

「EONプログラムの活動は、その国際的なネットワーク構築によって、東工大の事務・管理の慣習の多くに難問を突き付けました」と秋山。そして、世界トップレベル研究拠点プログラムの一員としての、ELSIの正式な任務のひとつが、まさにこのような、事務・管理体制の改革だった。

EONプログラムがいかにユニークで大胆かを理解するには、EONの研究員に何人か会ってみるのが一番だ。

EONの研究員は、パーチャル化学を作ろうとしているコンピュータ科学者から、最古の極限性微生物を研究する進化微生物学者、認知と意識の本質を探ろうとする哲学者、さらに、前生物化学や初期生物学の研究者まで、多岐にわたる。

ELSIが中核に据える重要項目に沿って、EONグループは、多様な専門分野、国籍、経歴のメンバーからなる集団となっている。6ヶ月を日本で、残りの6ヶ月を海外の提携大学で過ごさねばならない彼らは、必然的に柔軟性のある人々である。

その代表として、藤島皓介を紹介しよう。宇宙生物学を学んだ彼は、ELSIに滞在した期間、惑星科学と地球化学に関連した、「試験管の外の実験」に取り組む一方、JAXAおよび海洋研究開発機構(JAMSTEC)の研究者らと共に、将来実現する可能性がある、土星の興味深い衛星、エンケラドゥスへのサンプ

ル回収ミッションのための基礎研究を行うコラボレーションの立ち上げに携わった。

彼はまた、NASAのエイズ研究センターで6ヶ月過ごし、タンパク質とRNAの相互作用を調べる実験を始めた。生命の起源を巡るひとつの重要問題である。彼は、タンパク質とRNAは共存し、共に進化したという仮説を立てており、それを確かめる実験を始めたわけだ。この仮説の有効性が明らかになれば、その結果、タンパク質とRNAという、今では切っても切れない関係にある、2つの重要な生体高分子が、かつてそれぞれ単独で存在した可能性が説明でき、両者のうちどちらが先に存在できたかという、いわば「ニワトリと卵」の問題の解決につながるかもしれない。

Donato Giovannelliは、極限性微生物——かつては生物が生息不可能と考えられていた極限環境に生息する微生物——を専門とする微生物学者だ。EON在籍中、彼はコスタリカとアイスランドの火山湖を訪れ、湖底の熱水噴出孔の周辺で、珍しい極限性微生物の試料を収集するために湖に潜った。EONプログラムに参加できた自分は実に幸運だと、彼は言う。

「たいていのポストドクプログラムでは、自分が配属された研究室に行って、そこで既に行われている研究に加わるだけです。それがEONでは、『あなたの最高のアイデアを教えてください』と言われて、次には、『それを研究する予算を用意しましたよ』ですからね。メンバーは完全に自由なのです。」

「このような環境に適した人には、素晴らしいところですよ。大きな自由がありますが、それには、この機会をちゃんと有効に活用していますよと示す、大きな責任が伴います。」

Jakob Andersenは、アルゴリズム化学情報学という新しい分野の専門家で、化学系が持つ形式的な「文法」を見出して、コンピュータの言葉で記述できるようにすることを目指している。そうすれば、化学反応を解析する機械的な作業の多くが、可能な範囲で、コンピュータで素早く行えるようになる。「この方法が確立すれば、質量分析や、同位体ごとに結果の違いを特定する作業から、退屈で間違いが生じやすい機械的な部分をなくすることができます。ルールをきちんと把握していれば、正しい結果を予測できますからね。」

「もちろん、化学は広大な分野で、一筋縄ではいきませんし、これらのルールを特定するのも困難です。それに、たとえばシアン化物の化学は、ほかの種類化合物とは違うはずですよ。」

Andersenの手法には、化学反応をよりよく、より速く解

析する可能性があるため、ELSIの化学者や地球化学者と、さまざまなコラボレーションが起こり得た。しかし、彼が気づいたとおり、実際の物質を相手にする(ウェットな)化学者と、コンピュータ化学者とのコラボレーションが成り立つには——別種の科学者どうしが互いに相手の言うことが本当にわかるようになるには——かなりの時間がかかる。そして、残念ながら、彼の取り組みのほとんどがまだ初期段階だった。

「私はEONには実にありがたかったと思いますよ。だって、私はコンピュータ1台あればよく、高価な実験装置など一切必要ないんですから」と彼は言う。「しかし、その一方で、私の研究に関しては、私たちは一緒に取り組む時間がもっと必要だったのでしょ。」

だが、このようなコラボレーションのいくつかは、実はAndersenがELSIを去ったあとも継続しており、今なお前途有望なのである。さらに、Andersenは、2017年10月に



毎週定例のEON科学対話の場にいるStuart Bartlett, Jacob Andersen, Piet Hut.



EONの生物学者で、まもなくカリフォルニア大学サンディエゴの教授に就任する予定のKatherine Petrie.

ELSIで行われたコンピュータ化学をテーマとするEONのワークショップで、主催者側のひとりとして尽力した。20数名の参加者全員がこの分野の最高の研究者で、EONは、彼ら全員を初めて一堂に集めることに成功したわけだ。

この分野はまだ初期段階だが、EONのディレクターで、前生物化学のベテラン、Cleavesは、20年以内に、現在のウェット化学の多くが、コンピュータによって行われるようになると考えている。「これが化学の未来であり、その創始者の多くが、ここのメンバーで占められるでしょう。」

このようなワークショップは、EONプログラムの重要な一環で、常時開催されている。この2年間、ワークショップや年次シンポジウムに、Cleavesの推定で総計約500名の科学者が出席しており、その多くが各分野の最高の科学者だ。

研究機関やプログラムの成功度を、公式・非公式に評価するもうひとつの指標が、所属していた研究者たちが、競争の激しい各分野で、ポストに就けたかどうかである。これまでのところ、EON参加者の半数以上が、就任先が決まっているか、既にどこかに就任しているかのいずれかだとCleavesは言う。

たとえば、生物学者のKatherine Petriは、地球の生物圏の出現とその初期段階において、寄生生物が進化の推進力として果たした役割に関心を抱いている。彼女のEONでの研究は実り多く、カリフォルニア大学サンディエゴ校で、

常勤ポストにつながる教員の職に就けたのも、このときの研究のおかげだと、彼女は考えている。

「(EONは)自分の科学研究の成果を示す場でもありますが、自分は、2つの土地での結構複雑な生活を切り盛りでき、研究予算を管理でき、より大きなグループの一員として働けるのだと示す場でもありました。これらのことが、私がポストに就くのを助けてくれたかどうかと言えば、私は、そうだと思わずにはおれません」

EONの研究助成金は、2018年前半に終了する予定で、万一更新されないとすると、ELSIには大打撃だ。更新の申請はCleavesが担当することとなったが、彼は(2017年)10月後半、ELSIはテンプレトン財団の研究助成金の対象に残らなかったとの知らせを受けた。

「私たちのプログラムに何か問題があるということではなく、財団の研究助成金を、ELSIが要望するレベルより低く抑えることに決めたからだ、と説明されました。残念には違いありませんが、プログラムマネージャーは、来年はより大きな研究助成金が再開するはずだと言っていました。私たちも再度応募するようにと言ってくれました。」

複雑化の一途をたどるすべての生命体と同じく、ELSIも、存続し繁栄する新しい道を見出さねばならない。進化し、適応しなければならぬのだ。研究機関たるもの、それ以外に存続の道はない。



EON Science chatの様子



2017年秋、式根島で試料を収集する、ELSIの科学者、望月智弘（右手前）とShawn McGlynn

9. 初期の地球の秘密に満ちた日本の島々

データ収集——室内での実験、安定同位体分析、モデリング、あるいは観察など、どんな手段を使うのであれ——は、科学者の仕事の中心にある。ここでは、それがELSIでどのように行われているかを紹介しよう。

太平洋に浮かぶ伊豆諸島の一つの小島の、小さな入り江に沿って、24億年前、14億年前、そして現在という、3つの時代の地球の状況を示す場所が、隣り合って存在している。

最初の場所は、鉄さびの赤色をした、湯気の立つ小さな水路だ。その水は酸素がほとんど含まれておらず、71度以上の熱湯の状態で、水底から泡を立てて湧き上がってくる。これは、おおまかに言って、約24億年前、酸素の量が増えつつあった頃の地球の状態だ。生物は、せいぜい極くわずかな微生物が存在しただけだった。

そのすぐ隣に、別の古代環境がある。シアノバクテリアという微生物が繁殖した、緑と赤に色づいた水の領域である。シアノバクテリアは、地球の大気と海に大量の酸素をもたらした単細胞生物だ。地元の人々は、ここを昔から天然の温泉として使っているが、水底の岩は、緑色のシアノ

バクテリアがびっしり付いていて、つるつる滑るので、気をつけて歩かねばならない。

そのまた隣は、太平洋の海水で、ひんやり冷たいが、海底からは、温水が入り江に向かって噴き上げてくる。

これら3つの場所がすべて、3メートル四方ほどの範囲内にある。

熱水がこのような状態で観察できる場所は、他にはなく、先ごろ、2人のELSI科学者がここで調査を行った。微生物学者のShawn McGlynnと、地球ウイルス学者で古代ウイルスの専門家の望月智弘である。

彼らは、鉄さびの赤色の水から、高温ガスと微生物の試料を収集したほか、温度、塩分濃度、その他の測定を行った。緑色の水からは、マット状に密生したシアノバクテリアを収集したほか、目で見つけられる他の微生物も採取した。

目的は、次のような、具体的な疑問に答えることだ。湧き上がる泡は生物学的プロセスの結果なのか、それとも地球化学的プロセスの結果なのか？ ガスの同位体比は何を示しているのか？ 特に高温の部分には、どんな微生物やウ

ウイルスが生息しているのか？ そして、シアノバクテリアは鉄と共存できるのか？

これらの疑問はすべて、長い年月を経て地球上の条件がどのように変化していったか、そして、これらの条件が、生命がいかに誕生したかを巡る根本的な謎の解明に、どう役立つかの究明を目指す、より広範な科学活動のなかで、結びついている。

「25億年前や15億年前に微生物はどんな状況だったか、まだよくわかっていません」と、McGlynn。「しかし、ここは、実際に訪れ、それを突き止めようと試せる場所です。時間をさかのぼることができる、素晴らしい場所なんです。」

とりわけ、自然環境のなかでこれだけの鉄が水に溶けている場所は、現在ここ以外にわずかしかない。だが、岩石に残った記録から、過去の地球には、海中にこれと同じくらい大量の鉄が溶けていた時期があったことがわかっている。

望月はこう説明する。「大昔に存在したいくつかの条件のもとで、化学的に、そして生物学的に、どんなことが起こり得たかを明らかにしようとしています。」

「この、酸素と鉄が熱水のなかで混ざり合って、赤くなっている、他にはめったにない場所で、今何かが起こってい

ることが発見できたなら、それは、数十億年前にも起こっていた可能性があるのです。」

地^じ鉦^な温泉と呼ばれるこの地域は、東京湾から連なる伊豆諸島のひとつ、式根島にある。式根島は、東京から160キロメートル以上離れているが、東京都の一部だ。

伊豆諸島はすべて火山性で、海底で起こっている、フィリピン海プレートと太平洋プレートの動きによって生まれた。プレートどうしの境界は現在も動いており、温泉や火山が多く、地形は凹凸が激しい。地鉦という名前は、この温泉が、大地を鉦で割ったような大きな崖の切通しを歩いた突き当りにあることに由来する。

数十年前、温泉と海底熱水噴出孔が、相当量の生命体——微生物や、それより大きな生物——を維持でき、栄養を与えるのみならず、噴出孔から発生する電気や、化学反応に伴う電子の移動によって、エネルギーも供給していることが知られて以来、生命の起源を考える際に、温泉と海底熱水噴出孔が重視されるようになっていく。

そんなわけで、当然のことながら、ELSIの科学者たちは頻繁に各地の熱水噴出孔を訪れ、試料を収集している。McGlynnは、この夏(2017年)、EON研究員のDonato GiovanelliやELSIの主任研究員で電気化学者の中村龍平ら



Shawn McGlynn



望月智弘

と共に、アイスランドの熱水噴出孔に調査旅行を行った。

McGlynnは、元素や化合物のあいだの電子の流れに注目している。このような電子の流れが、すべての生命体の基本構造をなしているという考え方が、今日共通認識となっているからだ。これほど狭い所に、それらしき電子の流れが無数に起こっている式根島は、至高の実験室と呼べるだろう。

望月にとっては、ここは面白い場所には違いないが、宝の山ではないことがはっきりした。というのも、彼は、極高温で生息するウイルスが専門なのだが、地鉾温泉の鉄が豊富な水路で湧き出している温泉ですら、約73度しかないからだ。彼が培養しているウイルスは、90度近くという、沸点寸前の高温で生息している。

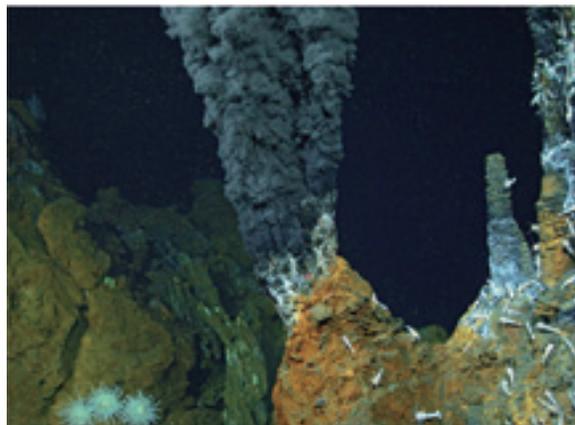
これらの高温を好む、好熱性ウイルスの研究における彼の目標は、これらのウイルスに導か

れながら、地球で生命が誕生しつつあった最初期の状況と推定されるものを、現代にしながら確認していくことだ。

一部の科学者は、生命は高温のRNAワールドで始まったと考えている（原始生命体では、RNAが今のDNAとタンパク質の役割を担っていたとする仮説）ことから、望月は、現在もそのような条件で生息しているウイルスを調べることで、何がわかるか確かめたいと考えている。彼のこれまでの

の発見のなかには、高温RNAワールド仮説に疑問を投げかけるものもある。なぜなら、始生代に生息していた原始的な生命体のRNA上に存在するウイルスは、彼も他の研究者らもまだ発見していないからだ。ロジックは複雑だが、これまでの結果は、望月にとって不可解であると同時に魅力的だ。

そのようなわけで彼は、好熱性ウイルスを収集し、答えと予期せぬ新事実を求めて、温泉と熱水噴出孔で試料採取することに常に意欲を持っている。



ブラックモーカー・チムニーと呼ばれるタイプの熱水噴出孔は、177°Cもの高温の水と化学物質を、地球の奥深くから噴出している。このような極限的環境に多くの生命体が生息することから、生命はこのような熱水噴出孔の周辺で誕生したという説を提唱する科学者もいる。

現地調査では、研究者が独創性を発揮する必要に迫られることが多い。地鉤はまさにそんな場所だ。McGlynnが初めて、泡立ちながら湧き出ている水の試料をその源で収集しようとしたときのこと。手足が火のように熱く感じ、彼はすぐに退却せねばならなかった。保護ブーツと保護手袋を身に付けていたにもかかわらず、辛い目に遭ってしまったのだ。

そこで彼は望月と共に、手を熱に近づけなくても、泡立つ温水を試料瓶に集められるようなじょうごを、大型のペットボトルで作った。しかし、足のほうは、うまい対策がなく、熱さに耐えるほかなかった。

温泉源の近くには、赤い水流の底に、微細なエッチングのような模様が見られた。McGlynnによれば、これらのうっすらとしたライン状の模様は、水底を進む微生物が、移動しながら、酸化鉄を沈殿させていった痕跡だという。つまり、このエレガントな模様は、生物そのものではないが、それを作ったのは確かに生物だというわけだ。

「そのあたりに触れると、模様はいっぺんにフッと消えてしまいます」とMcGlynn。「ただの酸化鉄ですからね。そのすぐ隣の水は、もっと鉄が少なく、酸素が多いので、そこには(緑色の)シアノバクテリアのブルーム〔訳注：バクテリアなどが水中で大量発生したもの〕がたくさんあります。ブルームに触れても、消えたりしません。それは生物ですから、手にくっつくんです。」

McGlynnは、「フッと消えるもの」も少し収集した。この珍しいエッチング模様を作る微生物を捕えたいからだ。新発見の微生物の可能性もある。

微生物学者である彼は、微生物を特定し分類することにも当然関心を抱いている。彼は当初、鉄分が豊富なこの水路にいる微生物は、嫌気性だと考えていた。しかし、大気から熱水噴出孔付近まで入り込む酸素が微量でも存在するなら、ほとんどの微生物は好気性のはずだと、彼は気づいた。

だが、McGlynnをほんとうに

駆り立てるのは、やはり電子の流れだ。夜、夢のなかにも出てくると、彼は私に語った。

彼の研究目標のひとつが、今非常に重視されている、地球のコアからの電子の流れ(電流)を巡る、未解決の諸問題の解決に貢献することだ。そのエネルギーは、マントルを通過して地表に至り、そこでしばしば生物圏(すべての生物)と接触し、その後大気に入り、宇宙へと拡散するか、何らかの元素や化合物と結びつく。

彼は、このプロセスを巨大なひとつの電池の働きになぞらえる。鉄でできた地球のコアが陽極で、大気中の酸素が

陰極だ。今日電子がたどる道筋を化学的に理解すれば、初期地球の条件についても、多くのことが明らかになるだろう。

彼らが式根島で行ったような現地調査は運任せで、採取した試料から成果が得られるかどうかは、研究室に帰るまでわからないのが常だ。ところが、McGlynnと望月は、即座に、驚くべき発見をした。ただ、その発見には、微

生物も電流もウイルスも、まったく関係なかったのだが。

ある日の午前中、別の温泉に行った際に、2人はどこかの団体に出くわした。彼らは、伊豆諸島の島々からやってきた職員たちで、全員がスーツにネクタイをしていた。経済発展の機会がどの程度ありそうか評価するために、島を順に巡っており、その日は式根島に来たとのことだった。

職員たちは、科学者たちが何をやっているかを知って興味を抱き、試料収集によさそうなほかの場所をいくつか教えてくれた。そのひとつは、自衛隊が占有する島で、普通部外者は立ち入り禁止だ。しかし、その島には、100度になることも珍しくない超高温水が地表のすぐ下に出る場所があることが知られていた。

職員たちは2人に名刺を渡し、その島に試料採取に行きたければ、連絡するようと言った。式根島の職員は、早くも大いに期待を寄せていた。

「もしうちの島で生命の起源を見つけてもらえたなら、すごいことになりますよ。」



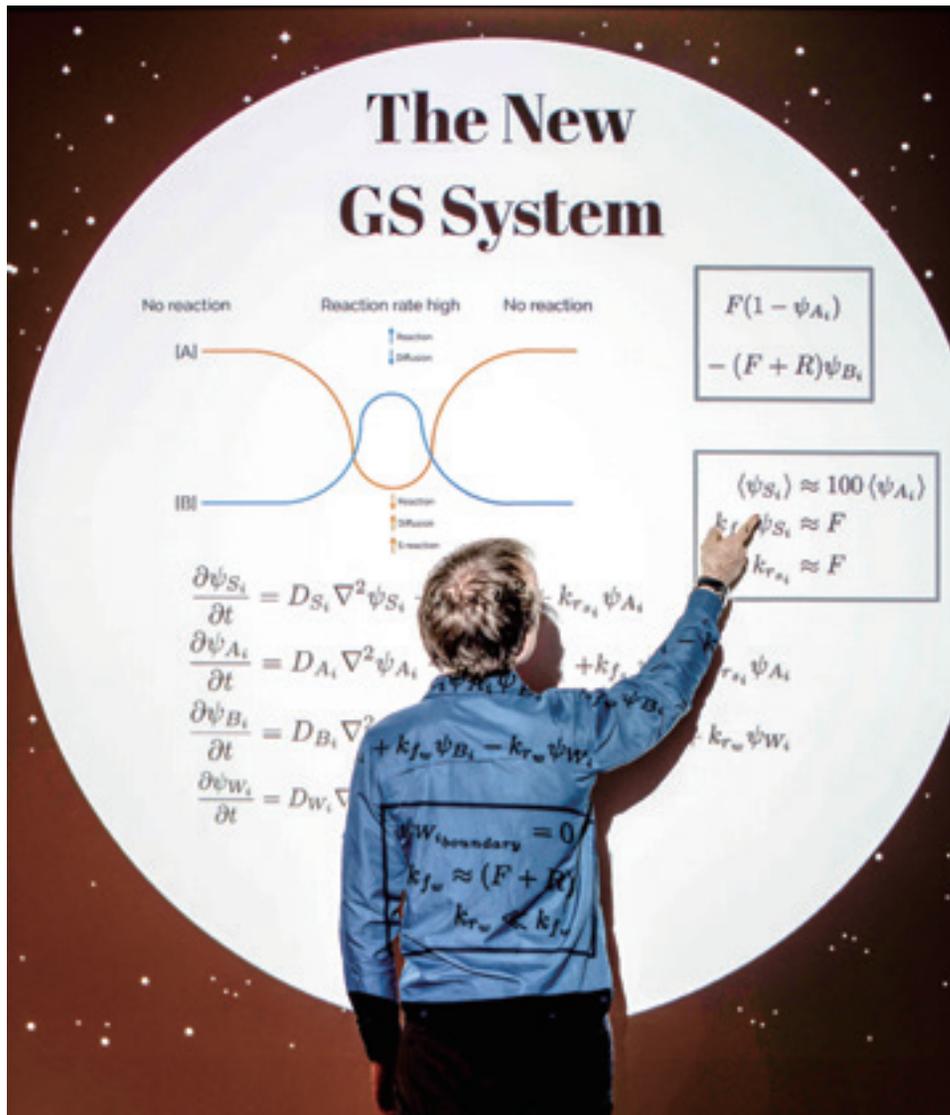
地鉤温泉の高温の水流の底に見られるフィラメント状の模様は、微生物がそこを通った際に残した酸化鉄が線状に堆積したもの(Marc Kaufman撮影)



望月智弘



Shawn McGlynn



ELSI研究員Stuart Bartlettは、人工生命と複雑系を専門とする。

10. 不可欠な理論家たち

室内実験、測定、試料採取、そしてモデル作成など、あらゆる種類の基礎科学が、今後の糧となるものを常にELSIに提供している。一方、アゴラは、午後のお茶の時間に留まらない、ある重要な目的のために作られた。それは、理論家が、実験科学者やモデル作成者と顔を合わせる場所として設計され、開所以来ずっと、その目的をよく果たしている。

ELSIのような研究機関で、最も理解されていないが影響力は強い科学者の代表が、理論科学者だ。

ELSIの理論家には、Hut、Nicholas Guttenberg（意識の起源などを探って日本の企業とも共同研究中）、惑星科学者・井田、そして、地球物理モデリングが専門のHernlundらがいる。

だが、アゴラで特に頻繁に、ほかの科学者らと活発に議論を交わすのは、物理学と複雑系科学の出身のEric Smithと、Nathaniel Virgoの2人だ。彼らが何をどんな理由で研

究しているか、正確に説明するのは難しいだろうが、彼らが優れた研究を行い、広く尊敬されているのはすぐにわかる。

Virgoはイギリス出身だが、ELSIに来る前は、東京大学の池上高志研究室で2年過ごした。2人は、いくつか関心を共有し、また、科学をどういうふうにやりたいかという好みも近かった。とりわけ、pH傾斜に沿って泳ぐ油滴など、自ら運動する物質系には2人とも特に興味を持っていた。

VirgoはEONのエグゼクティブディレクターも務めており、その立場から、ELSIのあちこちを回って研究しているEONメンバーを、月曜の午後、サイエンス・チャットに召集する。彼はこれを、個々のメンバーに自分の研究の理論面に利用してもらうほか、テーブルに集っている異なる分野の研究者らの結びつきを促すことにも役立てたいと考えている。

「科学では、仮説を立て、それを検証し、そしてまた別の仮説を立てる、というのが理想のサイクルです。しかし、本当にいい仮説を思いつくのは、実に難しい。ELSIでは、生命の起源を知りたいと皆が思っています。ですが、意味をなすような科学的な問いかけさえ、どうすればできるのかわからないのです。ここで理論が役立つ可能性が出てきます。」

Virgoは、コンピュータ科学、理論生態学、そして人工生命が専門だ。これら3つの分野すべてが、特定の生命体や場所の、特定の機能や成り立ちを深く追究するのではなく、物事を成り立たせているパターンやルールを突き止めることを目標としている。そして、生命の起源を巡る科学的な問題に、これと同じ抽象的なアプローチを使えば、同僚たちや自分自身が前進する有効な方法を探り出せるのではないかと、彼は期待している。

彼自身の研究は、現在、地球科学から生命科学へとつなぐ道の模索に焦点を当てている。ELSIでは、化学者であり宇宙生物学者でもあるIrena Mamajamovと共に、『「ぐちゃぐちゃ」の化学・イニシアチブ』に取り組んでいる。

これは、初期地球にあったことが既に知られている、複雑性というものを、たとえばRNAやタンパク質が最初はいかに形成されたかを理解するのを阻む邪魔者と見るのではなく、むしろ、理解へと導いてくれるものとして利用しようという動きだ。

彼の役割のひとつが、これらの「ぐちゃぐちゃ」のシナリオのなかで進行している可能性がある膨大な数の化学反応を追跡し、理解するためのコンピュータ手法を構築することだ。この取り組みの目標は、化学プロセスの結果生じる特定の分子ではなく、パターンとプロセスを特定することである。これらのパターンやプロセスのなかでは、「微視的構造がまったく違うさまざまな系のなかでさえも、広義の分類では同じと認められる振る舞いが、繰り返し起こっている可能性があるのです。」反応生成物が、その反応自体の触媒になるような、いわゆる「自触媒」が、特に注目されている。というのも、自触媒が存在すれば、系は実際に成長できるからだ。

Virgoと実験化学者のCleavesは、Virgoが特に興味を抱く種類の化学反応を調べる実験を目下実施中だ。この実験については、まだ具体的な話はできないそうだが、数ヶ月、もしくは数年かかる、ゆっくりした化学反応が研究対象で、何ら制御を受けない「ぐちゃぐちゃ」の、予期せぬ変化が起こるのではないかと期待される。

生命の起源に関するVirgo自身の仮説は、「ぐちゃぐちゃ」の化学に始まり、それが「それほどぐちゃぐちゃではない」化学となり、次に「ぐちゃぐちゃ」の生命現象となり、それがついには「それほどぐちゃぐちゃではない」生命になるというものだ。彼の考えの多くには、根底に、進化的変化——彼が見るところそれは、化合物と鉱物の世界に始まる「パターン」である——は、つまるところ、どのプロセスが、そして、のちにはどの生命体が、最も巧みに進化するかだ、という認識がある。進化可能性の進化と呼ばれるものだ。

「私の研究が抽象的である理由は（そして、理論的研究のほとんどがそうだと思うのですが）、いわゆる「普遍的な」現象を捉えることを目指しているからです。これらの現象を抽象的なレベルで

理解できれば、それらが起こるためには何が必要かがわかりますから、現実の世界のどこを見れば、それらの現象が見つかるかがわかるわけです」と彼は言う。

彼の理論家仲間のEric Smithは、複雑系科学が専門で、このアプローチの世界的中心地、サンタフェ研究所からやってきた。Smithが正式な教育を受けたのは物理学と数学だが、彼はほかの分野に関しても貪欲に学んでいる。

ELSI研究者の多くが、彼らが自分自身の研究について広い視野から考えられるようになったのも、ELSI科学運営委員会の委員長でもあるSmithのおかげだと、自発的に感謝の言葉を口にする（上野雄一郎もそのひとりだ）。

広い視野から考えることは、Smithにはごく自然なことだ。それは彼のELSIでの研究のみならず、彼が行った影響力のある多くの講演にもはっきり見て取れる。それらの講演のテーマのひとつが、地球における生命の出現の必然性である。太陽系の物理的・化学的性質からすると、初期の地球のような特徴を備えた惑星の上で、生命をもたらす動き



ELSI副所長 井田 茂

が生じることは、驚くべきことでもなければ、ランダムなことでもなく、予測可能だったと彼は主張する。

その、複雑かつエレガントな議論は、ELSIの電気化学者で主任研究員の、中村龍平との会話のなかで生まれた。中村は、Smithの講演（インターネットで視聴可能）を聞いて、自分自身の科学を見る目が変わったと言う。

このような交流が、理論家が意識的、あるいは直感的に目指すもののひとつだと、Smithは語る。

「頭のいい人をびっくりさせて、向かうはずもなかった方向へと突き動かすことは、歴史的に見ても、非常に重要な仕事ができ遂げられるひとつのパターンです」と、彼は進んで説明する。そのようなわけでSmithは、アゴラや会議やワークショップで、ある研究者が（ときには彼自身が）抱えている具体的な問題を、より広い視野から捉えられないかと考えながら、話したり、聞いたり、見たりしている。

Smithは、生命の起源を研究する理論家として、ほかにも2つの点で極めてユニークである。

ひとつ目は、生命はいかに出現したかという謎の有効な解決法を探る取り組みにどんどん参画してくる多くの科学分野は、理論家がこれに取り組むために必要な経験的知識をまだ提供していないと、Smithが考えていることだ。これは何も、彼の不満というわけではない。問題は極めて難しいのだと、Smithは言う。

その実情を踏まえ、彼は、この取り組みに参画する多くの分野を専門的に理解しようと努力し、そして、今ELSIに欠けているのはどの分野で、その空きスペースを埋めるに最適な人物は誰かを、ELSIの意思決定者たちに提案することを、理論家としての自分の仕事のひとつだと考えている。彼の意見は重視されており、それに従った措置が取られることも多い。



Nathaniel Virgo と Nicholas Guttenberg



Eric Smith

また、彼は複雑系理論の専門家として、直感的に、学際的アプローチこそ最も有効だと見る。彼は問題を次のように説明する。

自分の専門分野のなかにいる科学者は、「フェンスで囲われた庭にいるイヌのようなもので、科学の問題を、それがまるでウサギか何かのように、捕まえようと追っています。ウサギがフェンスをくぐって外に出たなら、イヌは結局フェンスのところで止まってしまいます。そのためのフェンスですからね。」

だが、彼が言うには、複雑系科学では、「たとえどんなに遠くとも、ウサギを捕らえるために、自分の庭から隣の庭へと踏み込むことを目指さなければなりません。」そして、ELSIでもその傾向がますます強まっているという。

Smithは、生命の起源に関する自分自身の数学的・物理的研究も行っている。しかしELSIでは、ELSI創設者たち、ほかの大勢の研究者たち、そして管理スタッフが共有するゴールを目指して、一種のコミュニティーを構築するという、もうひとつの理論家としての仕事も行っているのだ。

そのゴールとは、ELSIを、科学の戦力、文化、自由に満ちた場に、そしてまた、ひとりの優秀な科学者ではなく、大勢の優秀な科学者の成果として——必然的にそうならざるを得ない——重要な何かを達成する駆動力のある場にあることである。



藤井友香 惑星物理学者

東京大学で物理学を学んだELSIプロジェクト准教授の藤井友香は、ニューヨーク市にあるNASAのゴダード宇宙科学研究所で2年過ごしたあと、再びELSIに戻ってきた。NASAの研究所では、地球や太陽系外惑星の三次元モデリングに取り組み、赤色矮星の惑星周辺のハビタブルゾーン（生命居住可能領域）の大気の性質について論文を執筆し、先ごろそれが出版された。

太陽系外惑星が地球と生命の起源にどんな意味を持つかと尋ねたところ、彼女はこう答えた。「太陽系外惑星の研究のおかげで、地球と地球の生命の起源を、以前より大きな視野で捉えられるようになってきたのだと思います。より大きなスケールで惑星系を見ることによって、地球の形成と進化に関する洞察を得たいというのが私たちの考えです。地球のような惑星には、だいたいどれくらいの水があるものなのか？ その水はどこから来たのか？ 原始大気はどんな組成だったのか？ 初期の惑星進化、長期的な惑星進化に関する私たちの理論は正しいのか？ 太陽系外惑星を研究することで、これらの疑問を解く手掛かりが得られるのです。」



東京工業大学学長 益一或(2018年4月1日就任) 東京工業大学広報・社会連携本部提供



11. 変化の兆し

地球と生命の起源に的を絞った研究所を紹介するには、その研究所の起源を詳しく述べるのが、その設立の精神に沿うと思われた。

軌道に乗りつつある新しい研究所が示していた、初期のさまざまな特徴は、今では、地球と生命の起源に関する、研究と研究者のハブとして、成熟を深めるELSIの姿に現れている。ELSIは今や、生命を持つ有機的な存在である。

続いて、ELSIの科学者の世界の今日——誰もが面白いことや潜在的に重要なことに日々取り組んでいる状況——を描くために、彼らの研究の概要をご理解いただけそうな、ストーリーをいくつかご紹介した。ELSIで今まさに何が起きているか、現在進行中の研究は、組織の起源とは別にお話すべきだと考えたからだ。

だが、その前途に待ち受けているものにも触れておかねば、ELSIの全容をご紹介したことになるだろう。

WPIの補助金は、2022年3月で終了してしまう。補助金の5年の延長を認められたのは、これまでに1ヶ所、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (IPMU) のみだ。ほかの

すべてのWPI研究機関のなかで、ELSIは唯一、IPMUと同じく純粋基礎科学に取り組んでおり、最もIPMUに近いと思われる。だが、IPMUは、WPIの目標のひとつ、外部——カブリ財団——からの研究助成金を獲得した、数少ない研究機関のひとつでもある。

2018年、ELSIに、WPI支援期間の後半に入るに先立つ一種の再評価という形で、変化の兆しが現れた。井田副所長は、研究機関には改革が必要であり、退屈で保守的な組織にならないためには、定期的な再編が必要だと確信している。そしてこの年のうちに、ELSIの改革が行われた。

それは、Mary Voytekの着任という形で起こった。Voytekは、NASAの宇宙生物学プログラムのリーダーとして強い意思で改革を進めてきた人物で、また、長年にわたり、ELSIのグローバル・アドバイザーとして、ELSIの活動を支持し、協力してきた。Voytekを幹部として招く計画はしばらく前からあったのだが、極めて異例な措置であるため、各方面の承認が出そろうのに時間がかかっていた。最終的にVoytekは、廣瀬所長のもとでELSIのエグゼクティ



廣瀬敬所長とMary Voytek



Mary Voytek

ブディレクターを、そして、三島前学長の後任者、益一哉学長の特別補佐を務めることになった。

廣瀬によれば、Voytekは組織管理者、科学者、プログラムの改革者としてELSIを先導し、また、ELSIの国際的な注目度を高めるうえでも力になってくれるはずである。

「Mary Voytekを、この重要な役割を担ってもらう方と

して招聘できたこと自体が、ELSIの世界的存在感と競争力が向上している証拠です」と廣瀬は語り、Voytekの招聘を、ELSIの10年間にわたるWPI期間の後半に向けての「戦略的補強」だとする。

「Voytekは、この10年に積み重ねてきたNASAの宇宙生物学プログラムのディレクターとしての経験により、ELSIの目標と構想の実現を支援するための知識とスキルを備えています。」

10年以上NASAで上級管理者としての経験を積んできたVoytekが、大規模な科学者チームを作り上げ維持する方法を熟知していることは実証済みだ。彼女は、自らが責任者を務めるプログラム（その多くは設立にも関与している）の支援を求めて常に働きかけ、それを勝ち取ってきた。

その結果NASAは、多くのミッションで、地球外生命体の研究を優先順位の高い研究目標として据えることが多くなってきた。また、地球上での、そして、それ以外の場所での、生命の起源についての研究も、ますますNASAで重視されてきている。ここ数年、Voytekは、生命体の特徴、生命体の痕跡と認めるに必要な条件、そして、それらを測定する手段について、議論、討論、そして更なる研究を刺激する出発点となる、「生命体検出のための梯子 (Ladder to Life Detection)」（地球以外の天体で生命体を検出するための指標）の構築を主導している。

Voytekの革新性を示すもうひとつの良い例が、NASAの学際的イニシアチブ、Nexus for Exoplanet System Science (NExSS) の2015年設立をもたらした、Voytekの尽力である。NExSSは、アメリカの13の研究機関から実に多様なチ

ームが集まって、宇宙生物学と太陽系外惑星研究に関連するプロジェクトに協力して取り組むものだ。NExSSは、バイオシグニチャーと呼ばれる、生命の存在を示す特徴——太陽系外惑星の大気や地表で探すべき、生命体の副産物かもしれないもの——の研究分野で特に注目されている。

米国科学アカデミーは先ごろ、Voytekが構想し、その発展を促してきたNExSSイニシアチブに、他の多くのNASAの科学者たちも参加させて拡張するほか、財政的支援もするよう提言した。

このように、Voytekは、生命はいかに始まったかを、そして、はるか彼方の太陽系外惑星にはどのような特徴があり、はたしてそれらに生物居住可能性があるかを探求する、多くの分野が複雑に絡み合った研究の強力な原動力としてELSIにやってきたのだ。

Voytekは、非常勤でNASAでも勤務し続けるが、日本を愛する彼女は、1年のうち約8か月東京に滞在し、ELSIで働くことになっている。彼女は、「世界でも類を見ない」ELSIの運営に参加することを大いに楽しみにしているという。また、「ELSIの非常に才能豊かなさまざまな人々と共に働けることは光栄だ」と感じているという。

では、Voytekが科学研究の面でELSIにもたらしてくれるものは何かといえば、それは複雑な科学を研究理解するための「システムズ・アプローチ」(対象をシステムと捉え、個別の要素のみならず、それらの関係にも着目して課題に取り組む手法)だ。現在行われている科学のなかで最も学際的な分野のひとつである海洋学での経歴を持つ彼女

には、システムズ・アプローチはごく自然なことなのである。

Voytekは、地球における生命体研究と、これから始まるであろう太陽系外惑星における生命体研究とを、ほとんど違いのないものになりたいと考えている。

Voytekが太陽系外惑星について次のように説明したとおりだ。「天文学者は惑星を見るだけではだめなのです。その惑星が廻っている中心の星(彼らの太陽)といかに相互作用するかも見なければなりません。特に居住可能性については、その惑星上での大気のプロセス、光化学、そして惑星形成プロセスを理解しなければなりません。学際的な、一種のシステムズ・アプローチを使わないかぎり、これらを理解することは不可能です。」

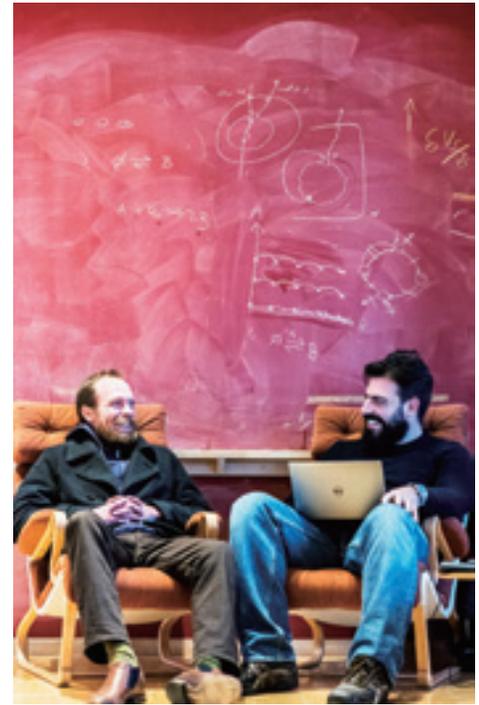
これはまさに、ELSIが設立以来作り上げようとしているものそのものだ。

ELSIのホスト大学、東京工業大学は、WPI補助金の5年間の延長が終了したあとも、ELSIを存続させる構えだが、この移行で、ELSIは成長するのだろうか？ それとも先細りになるのだろうか？ また、これに関連した疑問だが、ELSIは、その創始者たちが思い描いた、国際的レベルの地球と生命の起源に関する研究所として開花するほどに拡張し、外部の支援を十分得られるのだろうか？

それはわからないが、ELSIの起源は強固であったし、また、ELSIが、比類のない環境のなかで進化し、多くの点で成功を収めている、能動的な高度複雑系に成長したことは間違いない。



毎週金曜日に開催される生命の起源に関する研究会議に参加するMary Voytek (中央)



起源の研究ハブとしてのELSI

2013年3月、ELSIが生命居住可能な地球の起源と、それに続く生命の起源をテーマに第1回の国際会議（第1回地球生命研究所国際シンポジウム）を開催したのは、設立後わずか5ヶ月のことだった。発足したばかりの事務局にとっては大変な仕事だったが、同時に非常に重要でもあった。なぜなら、これらのテーマについて議論するために世界中の科学者を集めることは、ELSIの最大の使命のひとつだからだ。

ELSIの6回目の国際シンポジウム（第6回地球生命研究所国際シンポジウム）が2018年1月に開かれた。この、地球と生命の起源に取り組む著名な内外の科学者を集わせる伝統は、今後も継続し、拡張していくことだろう。このシンポジウムの最大の魅力は、これらの科学者たちから、さまざま

な最先端の研究について話を聞くのみならず、アイデアや発見を巡り、ELSIのメンバーや、関連分野の他の科学者たちと議論できる3日間を提供していることだろう。

このシンポジウムに先んじて、ELSI Origins Network (EON)の年会も行われ、ここでも世界中の科学者が集まった。EONはこのほか、地球生命の起源に関するさまざまなテーマのワークショップも開いており、こちらもやはり、世界最高の頭脳が集まっている。

ELSIとEONで、これまでに900名以上の公式な訪問者を受け入れている。これらの会合の参加者としてキャンパスに来てもらうことで、ELSIと東京の科学者たちに、彼らと知り合うのみならず、より大きな意義として、彼らの話から学ぶ機会を作っているのである。



1.



2.

1. Norman Packard

複雑系科学の専門家。自ら製作した装置を、東大の人工生命の専門家池上高志教授（中央）と、ELSIメンバーのStuat Bartlett（左奥）とOlaf Witkowski(右)に説明しているところ。

2. 廣瀬 敬

学生に助言中。

3. ELSIの化学者たち

アゴラでよく見かける、皆でデータを見ているシーン。



3.



1.

1. Jack Szostak / David Deamer

2017年5月にELSIで開催された、「Reconstructing the Phenomenon of Life (生命という現象の再構築)」をテーマとするEONの国際ワークショップに、カリフォルニア大学サンタクルーズ校の生物学者David Deamer (左) と共に参加する、ノーベル賞受賞者でELSIの主任研究員のJack Szostak (右)。



4.

2. 池上英子

2. ニューヨーク市のニュースクール大学の社会学部学部長。自然界に存在する生命体の起源のなかに、文化のなかにある自律的な実在の類似物を探し、それに関する洞察を得ようというテーマの、「Cells to Society (細胞から社会へ)」ワークショップで基調講演者のひとりを務めた。

3. Jennifer Hoyal Cuthill / Simon Conway Morris

純古生物学者でEON研究員のJennifer Hoyal Cuthillと(右)、彼女のケンブリッジ大学での指導者で、名高い古生物学者のSimon Conway Morris (左)

4. Steven Benner / Kuhan Chandru / Sudha Rajamani

EONが初めて開催したワークショップ、「ELSI Origins Network (EON) Strategy for Origins of Life Research」で、ELSI研究員Kuhan Chandru (左)、インド科学教育研究大学の化学者兼宇宙生物学者Sudha Rajamani (右) と、議論する応用分子進化機構のSteven Benner (中央)。



6.



7.

5. Betul Kacar

5. 宇宙生物学者で分子進化学の専門家であるBetul Kacarは、EONグローバルサイエンスコーディネーター。ELSIに最初に訪れ、その後最も頻繁に訪問している科学者のひとり。

6. Andy Knoll

ハーバード大学の生物学および地球惑星科学の教授。始生代(太古代)地質学者でもあり、ハーバード大学の生命の起源イニシアチブの共同創始者のひとり。



2.



3.



5.



7. Antonio Lazcano

メキシコ国立自治大学の進化生物学者。ELSIの、起源を巡る研究の歴史と哲学についてのワークショップでプレゼンしているところ。International Society for the Study of the Origin of Life (ISSOL) の会長も務めた。

8. 亀谷将史

微生物代謝学の専門家で、かつてのELSI研究員。現在は東京大学助教でELSIの連携研究員。毎年恒例の視察に訪れた、WPIのELSI担当ワーキンググループのメンバーたちに自分のポスターのプレゼンをしているところ。
(右から2人目)



8.



1. 渡邊志緒
2. 秋元真希
3. 細道初夏
4. 田中晴美
5. 佐藤麻子
6. 松浦恵子
7. 玉井文子
8. 白倉美奈子
9. 奥山文女

ELSIのセクレタリーたちと日本のチームワークという心得

所長秘書・佐藤麻子が統括する秘書室の業務が円滑に進まなければ、ELSIは立ち行かないが、それはチームワークなしには不可能だ。「それぞれの秘書がすべてのことをこなします」と佐藤は説明するが、その意味する仕事の範囲は、なかなか圧倒される。ELSIの秘書たちは、毎日のように、研究者らの出張の手配を行うほか、新しい装置や設備の購入をサポートし、複雑な日常を少しでもシンプルにし、研究所の安定を保っている。

「みんな目標は同じです。研究者たちをサポートし、研究者たちが、研究以外のことでわずらわされないようにすることです。」と佐藤。「ELSIの秘書は全員、それが自分でわかっていなければならないのです。教えられることはありません。」

ELSIにはフルタイムの秘書が9名いる。ELSI内で互いに接しやすい、和やかな雰囲気を作り出し、それを維持するという、大きな役割を果たしていることは、キャンパス内の誰もが認める。

ELSIでは、アイデアどうしが絶えずぶつかり合うし、ときには人間どうしがぶつかり合うこともある。だが、それはとげとげしいところが自然に丸くなるように管理された環境の中でのことだ。

3階で佐藤と共に働くこのチームは、この和やかな雰囲気と、その環境の中でもたらされる研究者らの高い生産性は、自分たちのおかげだと主張できるはずだが、典型的な日本の勤勉なチームである彼女らが、そんな主張をすることはあり得ないだろう。

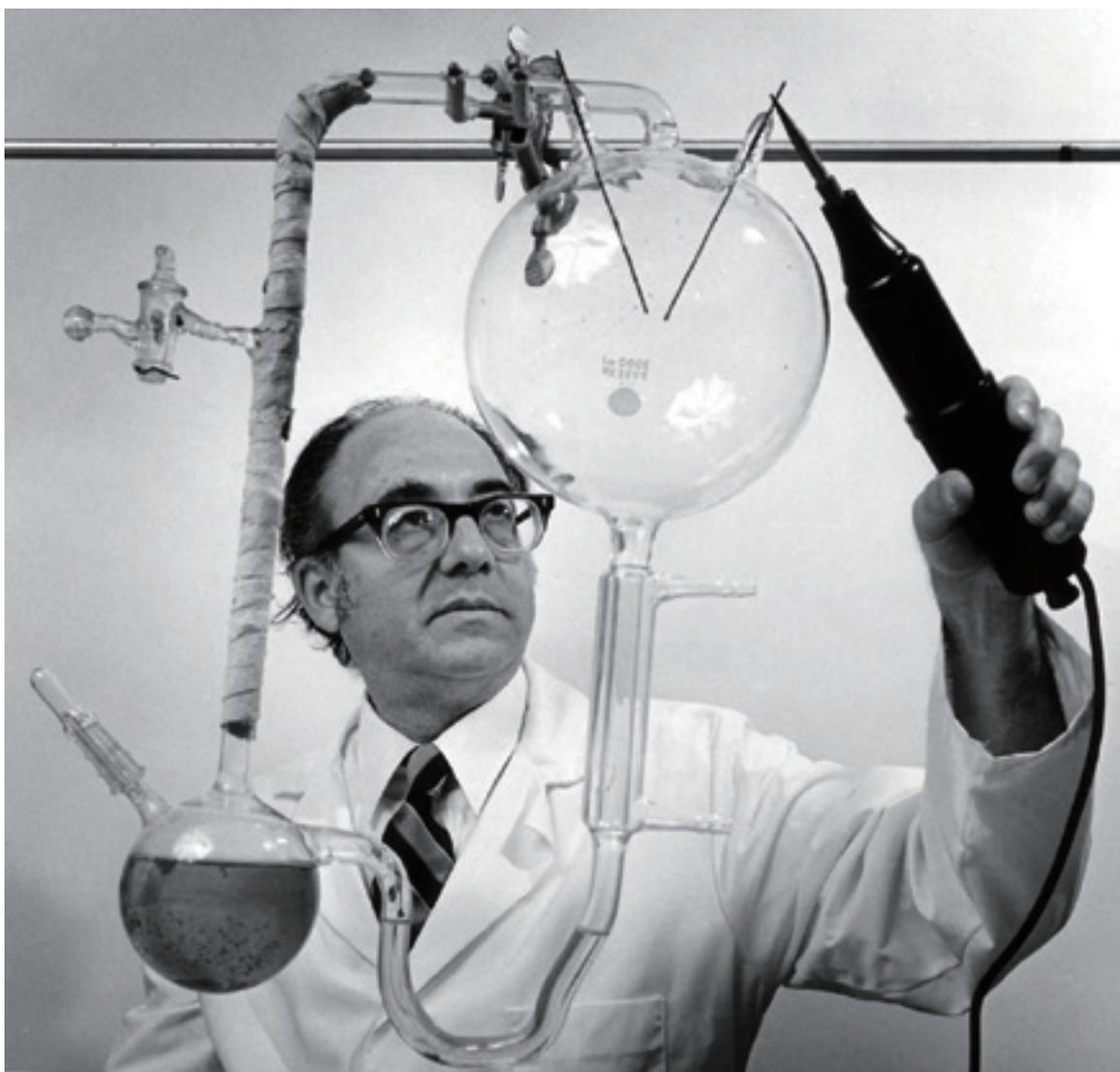


Lucy Kwok

イラストレーター・
ELSIランゲージエディター



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(つまり、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、システムの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



「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。

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。

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ときに学んだ部分が多いという——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か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か？ 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か？

ELSI-1 (石川台7号館)の地階にある自分の実験室で、

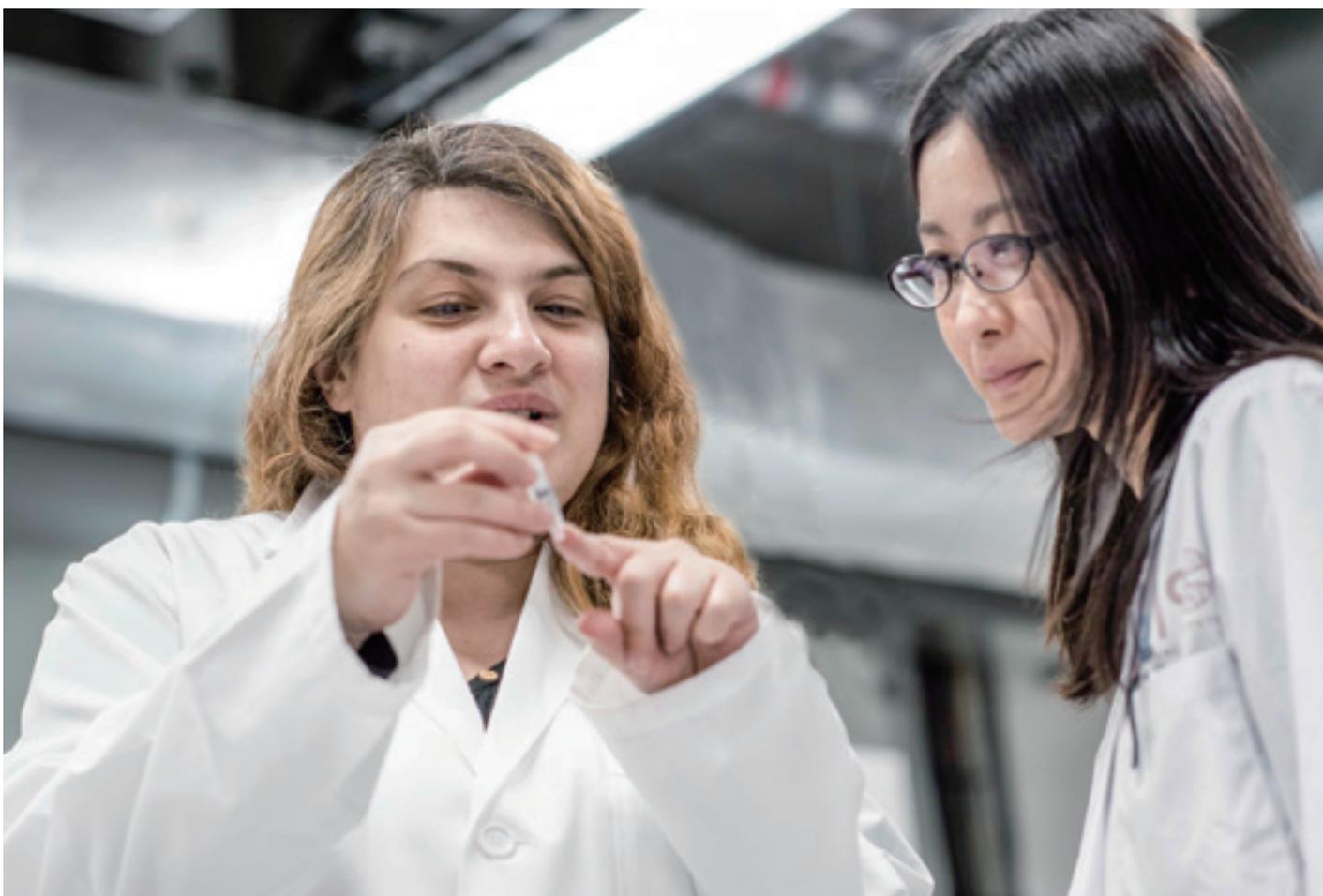
Mamajanovは同僚たちと共に「ぐちゃぐちゃ」の分子を合成し、その構造、潜在的適応性、そして、生命に特有のRNAおよびDNA分子の前駆体である可能性について、より深く攻め込んだ研究を行っている。

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。つまりところ、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ようだ。

「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、何が起き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。

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の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



Nathaniel Virgo

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-代謝産物システム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ตอบสนอง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。

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



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、残っていたものなのだろうか？

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CO₂、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いない。

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、惑星とその大気は、まったく異なる運命をたどるといって、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。

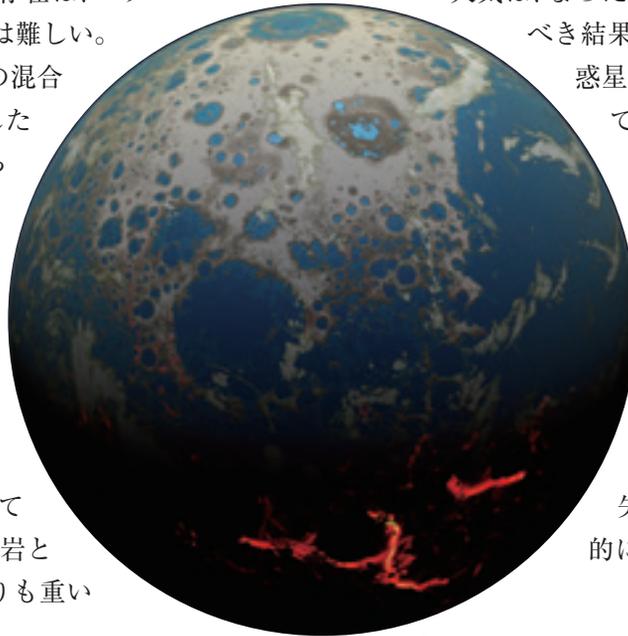
しかし、主星との距離が短く、マグマオーシャン期が長い惑星では、いくばくかの水が分子の状態で元々存在していたとしても、水の分子が崩壊し、軽量の水素は上層大気や宇宙へと上昇して、水は失われてしまう可能性が高い。最終的には、その惑星は乾燥すると同時に、大気中に放出された水蒸気と、大気に含まれる温室効果ガスのせいで、超高温温室状態にとどまり続けるだろう。

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

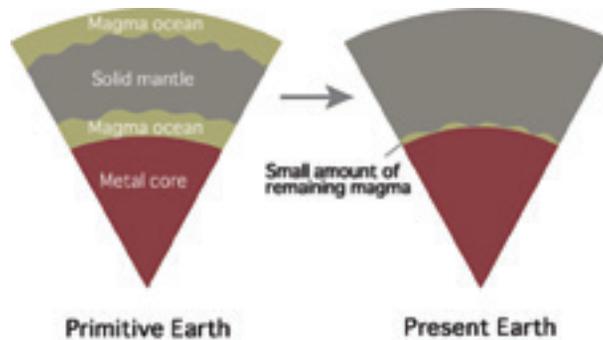
ャンの研究者は初期の大気についてはあまりよく知りません」と濱野。「私は、この2つの分野を結び付けたいのです。なにしろ、両方を理解しようとしないうちに、どちらも本当に理解することはできませんから。」

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、惑星形成の専門家である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、岩石を熔融させ、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。「ものすごい熱があつて、熔融が起こり、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ることだ。

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步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

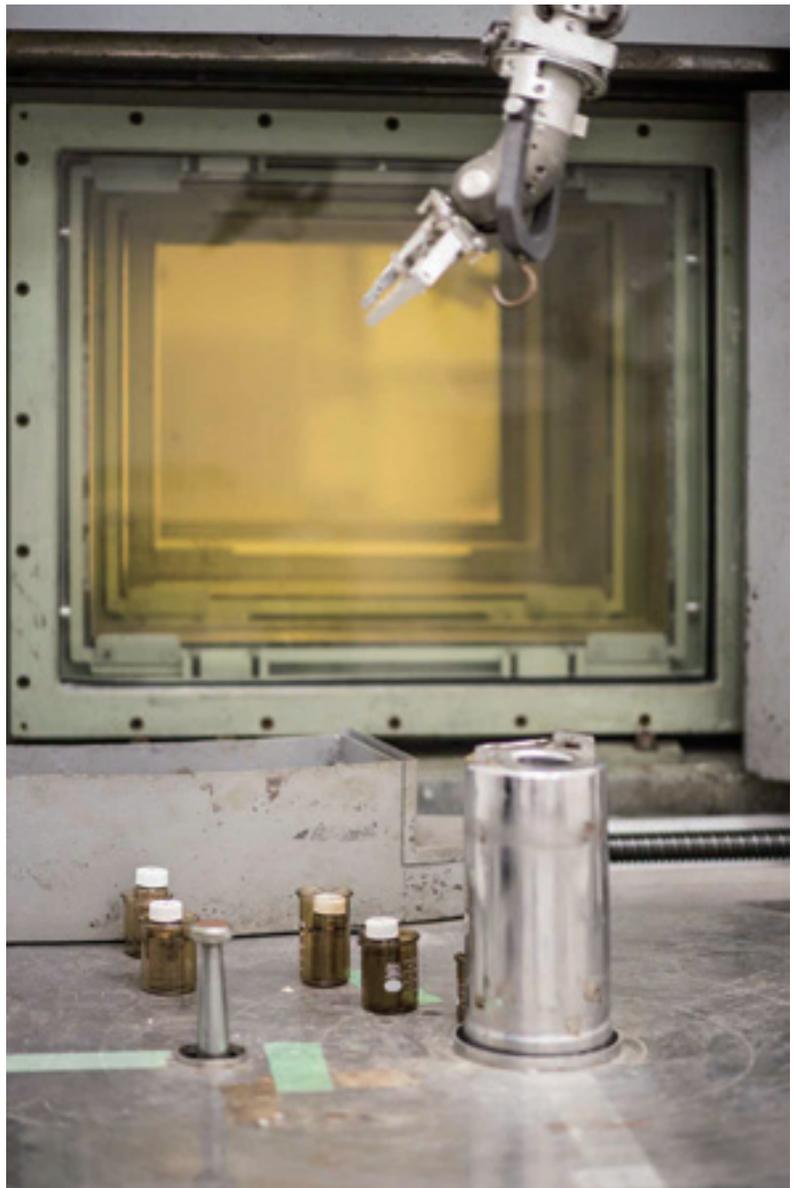
外の溶媒が、放射線源からのエネルギー供給を受けて、単純な化合物が、より複雑な生命の構成要素へと変化するために必要な条件を作り出していたかもしれないわけだ。

「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」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



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。

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。



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。

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

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。

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ん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、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。

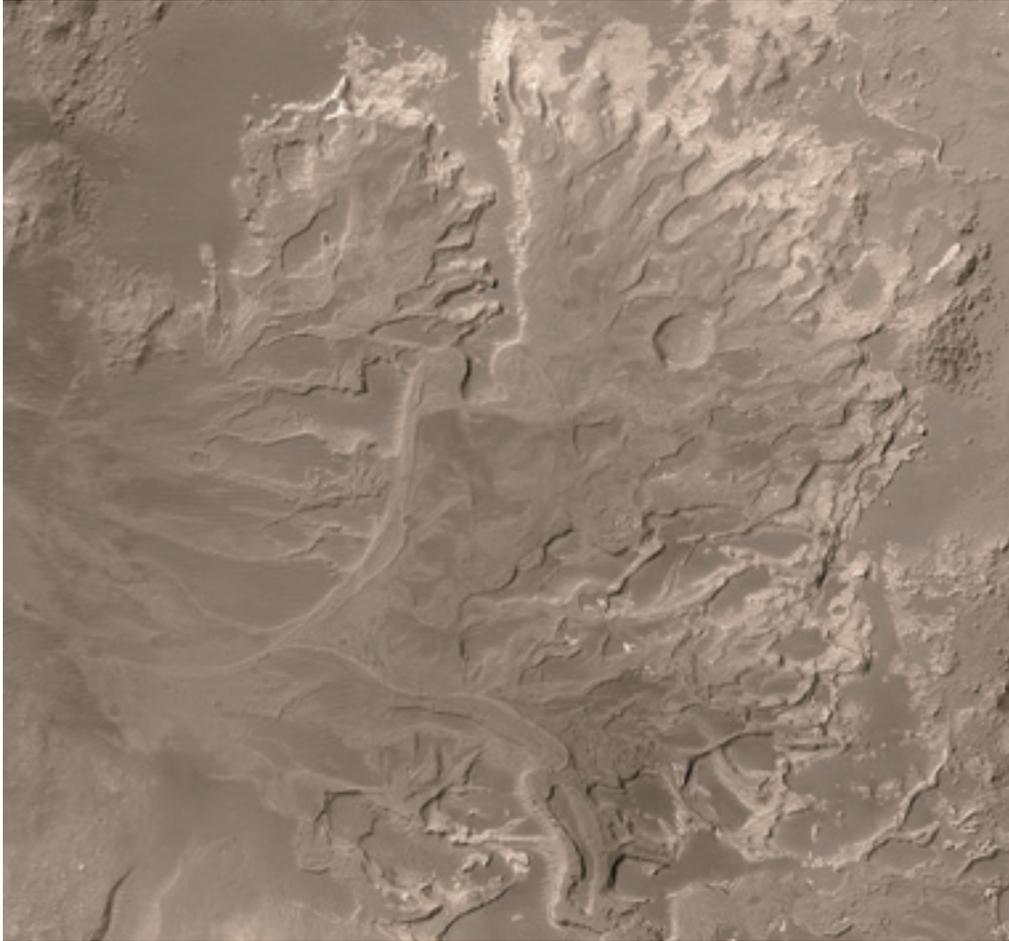
コバルト60のチームのもう一人のメンバーが、かつてはハーバード大学のノーベル賞受賞者Jack Szostakの研究室でポスドクだったAlbert Fahrenbachで、彼は今ELSIの准主任研究者だ。

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、マーズ・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。

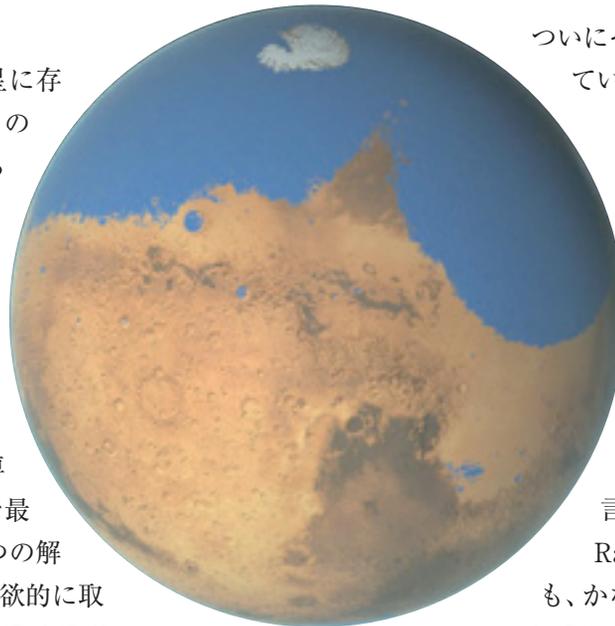
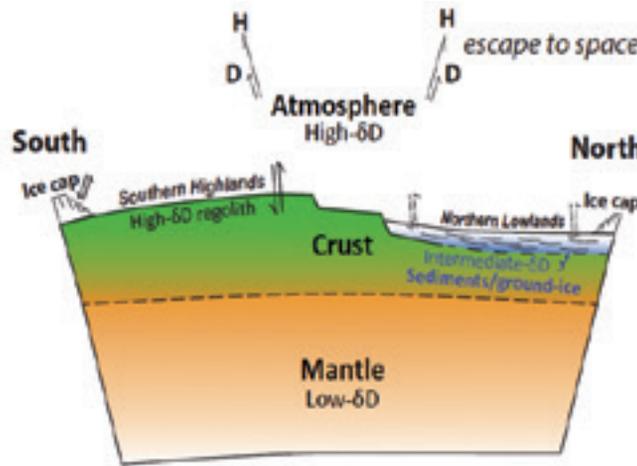
Ramirezが指摘する温室効果も、かなりの量のCO₂が必要だが、彼が提案する、豊富な水素の存在は、より

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





マーズ・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。

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はほぼ二分され、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H₂O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。



Ramses Ramirez (本人提供)



臼井寛裕

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



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

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。

結びつけるとどうなるかを見ることができません。」

「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。

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いき岩石を発見した。

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



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。

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だった。

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、そのうちいくつかは、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



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「解説」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トドクたちと共に、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ら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が目標になっている。しかし、それが可能かどうかは、まだはつきりしない。

「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。

Marc Kaufman

さて、ここまで、ELSIに滞在した間に私が学んだことの一部をご紹介しますので、ここからは、私自身について少しお話させていただきたい。

私は、40年以上にわたり著述業に携わっている——ワシントン・ポスト紙とフィラデルフィア・インクワイアラー紙の編集局が主な職場だが、それ以外に2冊の本を出版している。『First Contact: Scientific Breakthroughs in the Search for Life Beyond Earth (地球外生命を求めて：宇宙は生命にあふれているのか?) 奥田裕士訳、デイスカヴァー・トゥエンティワン [2011]』は、2011年にサイモン&シュスター社によって出版され、『Mars Up Close: Inside the Curiosity Mission (未訳)』は、2014年にナショナルジオグラフィック・ブックスより刊行された。

また、この2年間、NASAが提供する、太陽系外惑星や宇宙生物学をテーマとするコラム、『Many Worlds』(www.manyworlds.space)を執筆している。

この十年あまり、私は宇宙、宇宙生物学、そして科学に注目してきた。それ以前は、何年にもわたり、記者や海外特派員として、科学以外のほとんどすべてのことについて



て書いていた。それが一変したのは、ワシントン・ポストでNASA関連の報道の担当になったのがきっかけだった。それ以降、以前の守備範囲に戻りたいと思ったことは一度もない。

科学に取り組むこれほど多くの人々が、男性、女性に関わらず、何を研究し、測定し、どんな仮説を立て、何を発見しているかを学ぶことは、困難だが素晴らしく、また同時に、大きな喜びでもある。そして、ELSIの科学者の皆さんには、時間を割いて、自身の研究について私と一緒に話をしてくださったことに感謝申し上げます。

Nerissa Escanlar · 写真家

私は2015年にELSIを訪れ、この科学者やスタッフの、極めて人間らしい姿を捉える仕事に取り掛かった。ELSI



©Jennifer Spelman

に来る前は、10年にわたり、芸術写真家や報道写真家と共に仕事をしてきた。彼らが写真家としての私に与えてくれた最も重要なものは、友情と冒険、そして、さまざまな点で私を成長させてくれたことだ。

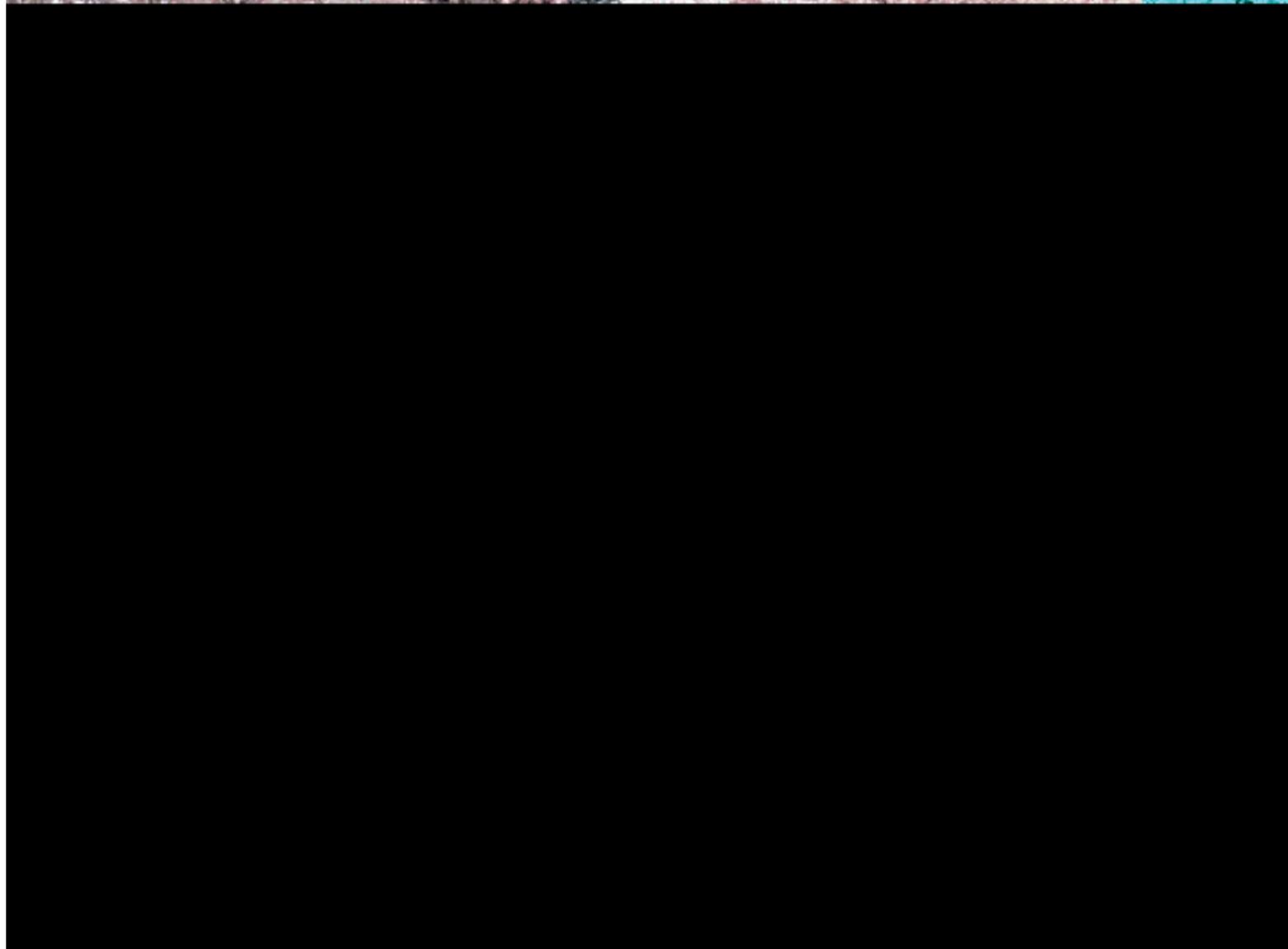
長年写真家をやってきた私は、何事も主に視覚によって考え、理解する。旅をするこ

と、時間に縛られないこと、そして、人々と交わることが、私のインスピレーションとアイデアの源だ。

被写体が私とどう関わり合うかが、写真を創造する過程で極めて大きな意味を持つ。ある人物がどのように立っているか、その人はどんな表情か、自分が置かれているところで、心地よく感じているのか(それとも、不快なのか)——このような情報を、写真を撮るときの私は探している。外から見えるこれらの事柄をまとめあげ、そこに他の諸々のことをたくさん加えれば、ひとりの人間を決定している本質の一部、その人の奥深くにある何かを、捉えられるかもしれないチャンスが、写真家に訪れるのだ。

ELSIの科学者たちはどんな人間なのかを、一般の皆さんに見てもらふ必要性を、私はひしひしと感じている。ELSIの研究者たちの姿を、ぜひ見てもらふべきだ。そうすればきっと、彼らのことをよりよく理解してもらえるはずだ。彼らは、素晴らしい、そして、粘り強い集団なのだ。







著者：Marc Kaufman

写真：特に明記しない限りすべてNerissa Escanlar撮影

英語版レイアウト及びカバーデザイン：Michael Sakas
Sakas Photographic、www.sakasphoto.com

日本語訳：吉田三知世

日本語版レイアウト：ダイヤモンド・グラフィック社

画像クレジット：

アルキメデス・パリンプセスト

Krock, Lexi. "Inside the Archimedes Palimpsest"

www.pbs.org/wgbh/nova/physics/inside-archimedes-palimpsest.html (2018年3月23日にアクセス) (p.6)

ストロマトライト：

写真：Andre-P. Drapeau P.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StromatoliteUL03.JPG> より (p.7)

2017年12月10日に取得 (2018年3月23日にアクセス)

歌川広重 『燕の子とろ子とろ』1878年、錦絵

ロサンゼルス・カウンティ美術館、ロサンゼルス

<https://collections.lacma.org/node/201293> より2017年12月9日に取得 (2018年3月23日にアクセス) (p.10)

Appleton, D and Company. (1878) エドワード・S・モース肖像 NY: Popular Science Monthly, Volume 13.

https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_S._Morse#/media/File:PSM_V13_D008_Edward_S._Morse.jpg

(2018年3月22日にアクセス) (p.10)

スタンリー・ミラー

カリフォルニア大学サンディエゴ校放電装置を操作するスタンリー・ミラー (1953) 写真 (p.56)

NASA/ジェット推進研究所 Global View Of The Surface of Venus (金星表面図)

<https://www.jpl.nasa.gov/topics/solarsystem/features/pia00104.html> より2017年12月9日に取得。

2018年3月22日現在、<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA00104> に移動。(p.61)

Simone Marchi/SwRI. 初期の地球の想像図。巨大な小惑星の衝突により、地球深部のマグマが噴出する様子を描いたもの。

<https://sservi.nasa.gov/articles/new-nasa-research-shows-giant-asteroids-battered-early-earth/>

より2017年12月10日に取得 (2018年3月22日にアクセス) (p.63)

NASA/ジェット推進研究所/MSSS. Eberswalde Delta (エーベルスヴァルデ三角州)

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/triff/PIA04293.tif> より2017年12月9日に取得

2018年3月22日現在、<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA04293> に移動。(p.63)

NASA/ジェット推進研究所/MSSS. Strata at Mount Sharp (シャープ山の地層)

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/triff/PIA19839.tif> より2017年12月9日に取得

2018年3月22日現在、<https://www.nasa.gov/image-feature/jpl/pia19839/strata-at-base-of-mount-sharp> に移動。(p.71)

謝辞

英語版のレイアウトについて卓抜な仕事をしてくれたMike Sakasに感謝する。香港をベースに活動する彼は、きついスケジュールにもかかわらずこの本のコンセプトをよく理解し適切なレイアウトを設定してくれた。ELSIのLucy Kwokには、イラスト、校正およびこの本の製作全般にわたる支援に感謝したい。

This page intentionally blank.



地球のような惑星はどうやってできたのか？ 生命誕生前の地球における化学（地球化学）はどのようにして生化学になり生命を誕生させたのか？ 何が起き、何がそのような発生を可能にしたのか？

これらの疑問が、ELSIでの研究の根幹にあるものだ。

これらの疑問に答えることは難しい。実際これらは、成長しつつある地球の起源の研究所、生命の起源の研究所、ELSIだけで答えられる問題でもない。この変化を理解するとは、我々の惑星・地球の誕生と変化、その核と大気の進化、生命の構成物が通ってきたごちゃごちゃしたプロセス、生命の誕生、他の惑星での生命の可能性、生命はどのように進化し地球を変えたか、を考えることである。そしてこの冒険には必然的に、生命とは何か、生命はどのようにしてそれ自身を知らしめるのか、という科学的な曖昧さがある。

どんな科学者グループにとってもぞくぞくするようなチャレンジでいっぱいなのだ。