

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

エグゼクティブサマリー（延長審査用）

ホスト機関名	東京工業大学	ホスト機関長名	益 一哉
拠点名	地球生命研究所	拠点長名	廣瀬 敬

作成上の注意事項：

このサマリーは、拠点形成報告書、進展計画書に記載された内容に基づいて、以下の項目についての概要を6ページ以内の記述で作成してください。

A. 拠点形成報告書

I. 概要

生命を無機物質から合成することは、少なくとも一度は達成された現象である。しかし、その合成は人間が行ったのではなく、38億年以上前の初期地球上で自然環境のもとで起きた。この歴史的な成功例にヒントを得て、地球生命研究所（ELSI）では、生命の起源という挑戦的課題を解明するための科学的かつ組織的な戦略を立てた。このユニークなアイデアにより、科学研究の進展とともに組織運営の変革を促し、それによって新たな課題に挑戦する機会を生み出すことができる。ELSIでは、研究ネットワークを拡大しながらも（国際化）、あらゆる分野を一拠点に集中させ、かつ学際化することで、斬新かつ進化しうる革新的研究を推進している（融合研究）。さらに、必要に応じて柔軟に適応する独特な文化を確立しようとしている（改革）。

ELSIは、研究者の活動やそれを支える助成金・補助金の双方を有機的に結合することで価値を生み出している。それによってELSIは科学研究や組織の急成長、新たな機会の創出、ネットワークの構築、将来のビジョン、問題解決、研究上の発見をなしとげた。ELSIに集まるトップレベルの研究者は、最初から素晴らしい成果の創出を保証していたともいえるが、私たちはそれをさらに超える結果を（科学的にも組織的にも）出したと考えている。しかし、こうした成果は、ELSIという組織の存在なくしてはあり得なかった。そしてELSIは、WPIによる支援を最大限に活用するとともに、国内外の個人寄付によってWPIの補助金に見劣りしないレベルの外部資金を獲得した。これは、東工大史上、前例がないことである。

ELSI設立以前に、生命の起源研究はすでに始まっていた。しかし、専門家たちは、分野を超えて研究者同士が議論するというよりは、各分野の過去の研究成果に基づく議論をしていた。その理由は、分野を超えた学際研究の前に大きな壁が立ちはだかっていたからである。そして、生命の起源研究を議論する核となる場は存在していなかった。しかし、今では、そのための場としてELSIが存在している。

II. 各論

1. 形成拠点の全体像

ELSIは地球と生命の起源を総合的に研究するために作られた研究機関であり、バーチャルではなく実質的な研究所として活動する世界で唯一の研究所である。そしてELSIは、世界のトップクラスに位置する、生命の起源の研究者を魅了する研究所となっている。ELSIは、生命の起源、あるいは宇宙における生命の可能性に関する研究で社会や研究者の強い関心を集めてきた。ELSIのアウトリーチ活動やTV番組への出演、報道発表、インターネットでの情報発信によって、ELSIは、日本のみならず海外においても注目を集める存在として確固たる地位を得ている。また、東工大において、ELSIは変革の中心的役割を担ってきた。国際環境を整備した場であると同時に、日本の最高水準の科学研究の場である東工大を世界のトップレベルにランク付けされる国際的な大学とする活動を推進する存在である。ELSIはWPIの一拠点として誇りを持ってそのミッションを遂行している。世界トップレベル研究拠点として達成されるべき4つのミッションは、ELSIに刺激を与え、世界中から多くの先見の明のあるリーダー（若手もシニアも）を獲得し、彼らが日本のELSIという拠点に集まることを可能にした。

2. 世界最高水準の研究

ELSIは科学における大きなゴールに向けて動き出した。それは、生命の起源を地球や惑星の起源という観点から解明するという研究である。ELSIの研究は、すでに大きく進展し、

非常に多くの論文を発表している（900以上）。そして、関連する研究分野に大きなインパクトを与えている。

A. 地球の起源 – ELSI の研究者たちは、地球形成の鍵となる過程を再構築した。どこで、どのように惑星が形成され、何がその組成を決定し、地球内部の状態は時間とともにどう変わったのか、大気や海洋の形成に必要な成分がいかんにもたらされ、維持されたのか、生命にとって重要な表層環境は初期地球の時代にはどのようなものだったのかについてである。ELSI は、原始惑星系円盤における集積と輸送に関して、初めての統合モデルを作った。このモデルは、ガスやダストから、“小石 (pebbles)” と呼ばれる重要な中間段階を経て、原子惑星の軌道の移動、ジャイアント・インパクトの効果までのスケールの異なる過程を考慮したものである。宇宙化学的証拠と計算モデルを組み合わせることによって、ELSI では太陽系における多様性（系外惑星の恒星系も含めて）や、初期地球における軽元素（C, O, Si, H, S, N）の起源を推定することが可能になった。

さらに ELSI は、惑星深部から表層環境をつなぐ惑星磁場がどう形成されるかという疑問についても大きな成果を出した。地球の核がこれまで考えられていた以上に多くの水素を含有していることを発見したのである。この発見は、ELSI が保有する世界最高水準の高圧実験施設においてなされた。それによれば、地球核における酸化ケイ素の初期沈殿が地球磁場を生み出し、その結果、地球大気が太陽風によって剥ぎ取られることを阻止したのである。これは、地球物理学におけるパラドックスのひとつに対する新たな答えとなった。

また、ELSI は、初期惑星表層の冷却率は太陽放射照度に極めて敏感であること、さらに、同様の組成から始まった金星が誕生初期から熱く乾いた惑星になったにも関わらず、なぜ地球は海洋を保持し、ほとんどの二酸化炭素を地下に隔離することができたのかということについても説明した。

B. 地球 – 生命システムの誕生 – ELSI では、生命の起源を新たな地質環境の出現として理解しようとしている。そのためには、初期化学環境の主要要素である海洋、大気、固体地球の相互作用を理解する必要がある。ELSI の研究者らは初期地球における還元環境の形成と維持に関する証拠を前生物的な有機化学の重要な成果とともに提示し、新分野を開拓した。地球形成の後期に起きた唯一のジャイアント・インパクトが水素大気を二次的に生み出し、それが冥王代初期の2億年の間、存在しうることも発見した。これらの発見と調和的に、地球化学を研究するチームは、古い岩石に残された硫黄が持つ複雑な安定同位体の特徴は、CO と CO₂ の濃度が太古代に至るまで高濃度であったことを示した。これは、地球化学者らが数十年にわたって達成できなかった発見であり、複雑な有機物合成の重要な条件である。

ELSI では、生命が誕生するためには、惑星表層の多様な環境が必要であると考えている。栄養塩の供給源としての海洋底や大陸、太陽、岩石-水相互作用、エネルギー供給源の役割を果たす地下の放射性物質、地球に水を供給する時期や範囲、初期海洋や表層岩石の組成が前生物的化学進化や生命誕生を助ける初期条件を決める役割について研究を進めた。ELSI の研究者らは、新たな研究分野として地球電気化学 (Goelectrochemistry) を作った。バルク相の電位が地質条件の差が生み出す酸化還元反応と作用することによって、反応性のあるCやNを生成し、それによって地球に現存するすべての生物の中心代謝経路に類似した流れを駆動することを説明した。ELSI の研究者が行ったこの重要な研究により、生命が必要とする条件が特定され、初期地球の地質情報をハビタブルプラネットの探索という観点でさらに応用することが可能である。

現在の ELSI における最も重要な成果は、一拠点において理論家や実験家がともに研究を行ったことによって可能になった。生命は、実験室のビーカーに作られたような環境で誕生したのではない。実際の惑星の化学環境では、様々な組合せがもたらす複雑性が存在する。ELSI の研究者は、それらを研究に組み込みつつ、計算や分析の新たな手法を作り、それらを様々な機能性高分子の形成、構造、特徴の解読に応用した。

C. 生命と地球の共進化 – ELSI では、進化し続ける生命圏を形成するに至った主要な進化イベントや、その構造、進化の方法、時間とともに変わる惑星状態への依存性、そして生命進化がどのように地球環境史を変えたかという大きな転換点を見極める研究をしてきた。

ELSI の研究者は、始原的とされるバクテリアのゲノムと生体エネルギーシステムを再構築し、それらが惑星の化学状態の進化に呼応してどう変わったかを明らかにした。我々は、同位体および鉱物学的特徴から生物の大きな進化と岩石中の記録を結び付け、硫黄代謝と酸素発生型光合成という、地球のあらゆる表層環境に影響を与えた生物の革新的進化を説明した。地球上のゲノムは2種類のライフサイクルによってもたらされる。1つは、自由生活性の細胞であり、もう1つはウイルスである。我々は、好熱性古細菌ウイルスの多様性に関する知見をほぼ2倍に増やした。そして、RNA ワールドをより理解するために、一重鎖DNAとRNAに必要な条件を研究した。ELSI は現在、古細菌ウイルスに関しては世界最大規模のコレクションを保有している。

我々は、始原的生物の構造や機能を理解するために合成生物学と進化生物学を統合した。より単純な遺伝コードを使って翻訳された機能性たんぱく質や、配列内に酸を必要としない主要なアミノ酸を合成する酵素を明らかにした。さらに、細胞膜合成における複雑な機能

や、細胞膜の内外における分子システムの配列を解読した。どのようなプロセスが生物における大革新を駆動するかを理解するために、我々は、新たな複雑性を作り出すための足場として、外的制約を利用して進化における新たなパラダイムを作った。また、触媒機能の正確さがどのように新たな機能を作るきっかけとなりうるかを示した。こうした機能はおそらく、短いゲノムや信頼性の低い自己複製機能に不可欠なメカニズムである。

D. 宇宙における生命—我々が実施してきた地球と生命の起源に関する研究は、ひとつの統一的な概念を形成しつつある。それは、多様化と選別という2つのプロセスの繰り返しであり、このことは、恒星のまわりをめぐる惑星における生命の可能性や、地球と異なる、あるいは類似の惑星における生命誕生の原則を理解するためのきっかけとなる。

生命の原理は、本質的な性質として、地球生命の在り方とは独立して形作られ得るものである。そういった性質のひとつが遺伝であり、それなくしては生命における選別がその後の適応につながることはない。一方で、ELSI は遺伝子や遺伝情報によらない遺伝の多様性を探るとともに、様々な組成モデルや、より一般的な動的システムを利用した。計算科学における組み合わせを利用した手法は、地球生命のどのような要素が化学反応に固有な限界を反映しているのか、そして普遍的な要素は何かという研究を可能にした。我々は、生物が生み出す一連のアミノ酸は、ランダムにできる同様の大きさのアミノ酸群よりも、たんぱく質が機能するために必要な幅広い特性を網羅していることを示した。生体アミノ酸群が選別されたのは、これらが化学的可能性の上限に近かったからだと考えられる。

普遍的生物学 (Universal biology) は、動的な複雑系の中にある単純なパターンが、いかにしてより複雑なパターンを自己維持型の階層性の中で作っていくかを説明しなければならぬ。我々はこの問題を、遺伝子コードの形成段階における系統出現と関連させて研究した。革新的進化が起こる時代には、すべての構成要素が独立してやり取りされることによって、生物の遺伝コードのエラーを許容するシステムが誕生する。そして、それが信頼性の高いたんぱく質の合成や、分子の正確な複製、ダーウィン進化の世界における遺伝的系統の出現を可能にするのである。

3. 融合領域の創出

自然は、地球物理学、地質学、生物学といった垣根を作って、38 億年以上も前に生命を誕生させたのではない。したがって、我々もそのようなことをすべきではない。光合成や多細胞化などの生命の進化における革命的变化を可能にしたのは、生命のユニークな組み合わせの結果であり (複雑さ)、交雑を促進し (会話)、外的要因の変化に対する応答として具体的かつ頑強なシステムの挙動を生み出すこと (行動様式) を可能にした。ELSI では、生命が達成した革命的な進化と同様に、様々な分野を融合することに成功している。

ELSI が行う融合研究は、こうした条件のもとで可能になった。上述したような研究成果は、実験家から理論家まで、様々な研究者が一拠点に集まり共同研究を進めたことによる。ELSI の学際研究チームは、生命の起源に関するモデルや、地球に与えられた水の量の算出、従来型のコンピュータでは解決しえない問題を解くためのバーチャルコンピューターとしてのアメーバモデル利用など様々な課題に取り組んだ。我々は火星の化学組成や軌道半径を議論するために天体物理学者と宇宙化学者のチームを作り、氷衛星における前生物学的化学反応モデルを構築し、生命の起源研究への新たなアプローチを考案するとともに、生物学的観点から地球の形成、組成、長期的な進化についてのモデルを提案した。そして、系外惑星のバイオマーカーを議論するための新たなアイデアを見出し、無生物の惑星における窒素サイクルをモデル化した。そして、深海の熱水系から得られる地球化学的成果と地球電気学的成果についての重要な考察を統合した。また、深海底の環境において、窒素サイクルがどのように生命にエネルギーを供給し、初期地球環境における多種多様な金属が生物代謝の化学反応経路の多様化をどのように促進するのかを探った。これらの研究は、かつて類を見ないほど学際的であり、科学における最大の課題に取り組み、新たな道を見つけるために極めて重要なものである。

ELSI は、融合研究を生み出すための活動を積極的に進めている。一般的な研究資金は、融合研究というよりはむしろ特定のテーマに絞った研究テーマを想定している。そこで、ELSI は学際研究のための外部資金獲得を目指し、大きな成功を収めた。たとえば、ELSI Origins Network (EON, PI:ハット)はアメリカのテンブルトン財団からの支援を獲得し、日本国内では、冥王代生命学 (2014-2019, PI:黒川)、核-マントル共進化 (2015-2020, PI:土屋)、水惑星学 (2017-2022, PI:関根) の3つの新学術領域研究が採択された。さらに、ELSI は、融合研究を支援するための内部の研究資金制度を設けている。融合研究を維持し、多様な研究分野の研究者を呼び、専門分野の垣根を超えた議論と協力のための最善の戦略を練っている。また、ELSI の内外において、実践的な指導 (ELSI 幼稚園) や戦略会議、ELSI のPI による学際研究コースなどを実施している。

4. 国際的な研究環境の実現

ELSI の業績を際立たせているのは、その確固たる国際研究環境とスタッフだと言える。こうした環境が科学研究の飛躍的前進（上述）と組織改革（後述）の相互作用を生むのである。ELSI は幅広い国際ネットワークを構築しており、若手からベテランまで世界トップクラスの研究者が集まっている。今では ELSI は、生命の起源研究において世界最高レベルと評価されている。ELSI の研究に参加したいと考える大学院生は増加しており、研究者公募においても極めて高い人気を誇っている。

ELSI は、国際的に競争力のある若手研究者を獲得するため、極めて戦略的な採用方法を用いている。これは日本の大学では珍しいといえるだろう。ELSI の主任研究者達は、その国際的な人脈を用いて、トップレベルの大学院生やポスドクを採用候補者として列挙する。そして、ELSI のシンポジウムの招待講演者の研究室に所属する学生を共同研究のため ELSI に招いたり、ウィンタースクールやサマースクールの主催、若手研究者が主催するシンポジウムの経費支援などにより、良い結果を得てきた。これまでの若手研究者の採用では、30カ国以上から 363 人の応募があり、その過半数（75%）が海外からの応募であった。これには海外滞在中の日本人研究者も含まれる。

ELSI はサテライト機関として、愛媛大学、プリンストン高等研究所、ハーバード大学、東京大学、コロンビア大学（ニューヨーク）と密接に連携して研究を進めるほか、研究協力協定を締結した研究機関・大学は世界で 23 にのぼり、その数はますます増加している。これまでに 7 回の国際シンポジウム、ワークショップやサマースクール、ウィンタースクールなどを主催しており、またビジタープログラムとして積極的に優秀な科学者を招き、ELSI の研究者との交流や協力研究体制を促進している。米国のジョン・テンブルトン財団からの多額の寄付により設置された ELSI Origins Network (EON) は、ELSI の国際的ビジビリティを如実に表したものだといえる。EON が雇用するポスドクは、任期の半分は ELSI で、他の半分は海外の自分の研究機関で研究することと定められた。このことを含め EON の活動は、生命の起源研究の新しい国際ネットワーク形成に大きく貢献し ELSI の国際的評価を高めただけでなく、WPI 予算への強力な追加支援となった。

5. 組織の改革

ELSI が成功するかどうかは、ELSI のユニークな研究テーマと学内での位置づけに適した新しい組織的戦略を打ち立てられるかどうかにかかっている。新しい運営機構を導入し、試験し、学内に広く展開させる東工大の「特区」として、ELSI は、東工大を世界最先端の大学にするという学長のビジョンを実現するためのキープレーヤーといつてよい。学内の異動で ELSI に配属され、数年してまた異動する事務職員はそれを「ELSI スタイル」と呼び、実際多くの ELSI 起源の組織改革はこのルートに乗って全学に波及してきた。

ELSI が東工大の中で先行して進め、大学全体に普及した、あるいはしつづつある改革には以下のものがある：

- 研究所に特有の科学的、文化的、あるいは運営上の困難をうまく乗り切る柔軟性をもたらす、所長に権限を集中した WPI のトップダウン運営システム
- 業績を反映した給与システム、国際的に競争力のある給与体系
- トップレベルの研究者の雇用を可能にする、クロスアポイントメント制度。ELSI で最初に実現した後、東工大の他部局で 22 名がクロスアポイントメント制度を利用した雇用となっている（2019 年 1 月現在）。
- 従来の寄付講座のシステムに加え、より自由度がある「寄付プログラム」制度の設置。これにより ELSI での最初の寄付プログラムによる准教授雇用が実現した。
- 東工大内の事務連絡メールへの英文添付、英語による人事案件相談窓口の設置、英語による安全衛生講習の実施
- 分野融合研究を可能にする、オープンでフラットな研究組織
- 海外出張の祭の旅行保険の大学予算による負担、コーポレートクレジットカードの導入
- 米国からの免税措置を適用した個人的寄付をやりやすくする、非営利法人 Tokyo Tech USA の設置

ELSI の運営改革の顕著な到達点は、東工大の学長や ELSI の国際アドバイザーボードと協力し、WPI の初めの 10 年間の予算後の新しい拠点長の選定に向けて実質的な筋道を作ったことである。2018 年に ELSI は、米国 NASA の著名なシニアサイエンティストで運営管理者でもある Mary Voytek 氏を、ELSI のエグゼクティブディレクター及び東工大の学長特別補佐として雇用することができた。Voytek 博士はすでに、ELSI の組織改革や研究戦略の改定に取り組み、また新規の外部資金（公的なものも個人のものも）の獲得に向けた努力を始めている。

6. その他特筆すべき事項

(1) ELSI は、世界的に著名な研究者に大学院生の指導を依頼するなど、次世代の研究者の育成に向けた重要な貢献をしている。また、ELSI の海外のネットワークを通して優秀な外国人学生を受け入れ、ポストドク教育プログラムの開発などにも力を注いでいる。

(2) ELSI の極めてユニークな研究環境と意欲的な研究ゴールが評価され、海外からの寄附を獲得した。2015 年 7 月には、アメリカのジョン・テンブルトン財団から 6 億 7000 万円 (1 ドル=122 円で換算) の寄付金を得た。この寄付の目的は、ELSI を生命の起源研究の世界的ハブとして確立することだった。ジョン・テンブルトン財団が、生命の起源研究における主要な機関として機能するために ELSI を選んだということは、ELSI が国際的に高い評価を得ている証だと言える。

(3) ELSI は自身をサイエンス・コミュニケーションにおけるリーダーであると位置づけている。国際化の一環として、ELSI は日本国内の英語によるサイエンス・コミュニケーションの変革に注目している。我々は、Japan Scicom Forum 2018 と 2019 を主催した。このフォーラムは、コミュニケーター、ライター、研究者、ジャーナリスト、海外から選出された専門家を一同に集め、アイデアを共有するとともに日本におけるサイエンス・コミュニケーションの団結力を向上させることを目的としている。ELSI におけるコミュニケーションに関しては、新たなコミュニケーション・ディレクターを雇用し(2018年11月)、より効果的な発信にむけて東工大の広報室とも連携して活動している。