

「第3回地球生命研究所(ELSI)国際シンポジウム」 開催報告

木村 淳¹, 玄田 英典¹, 藤井 友香¹, 木賀 大介¹, 青野 真士¹,
北台 紀夫¹

1. はじめに

2015年1月13日(火) - 15日(木)の日程で、「第3回地球生命研究所(Earth-Life Science Institute)国際シンポジウム」を東京工業大学大岡山キャンパスにて開催した。2013年3月、ELSIの開所式を兼ねて開催された第1回シンポジウムでは、ELSIの理念・ミッションとして「地球惑星科学と生命科学の2つの学問を融合し、生命が生まれた地球初期の研究から生命の起源と進化を解き明かす」ことを掲げ、200人超の参加者とともにELSIの目指す科学目標が議論された。昨年3月の第2回シンポジウムでは「Origin & Evolution of the Earth-Life System」をテーマとし、サブテーマを「Origin of Life : Scenarios & Approach」「Water in the Early Solar System」「Where Did Life Emerge? Deep Sea, Surface, or Mars?」「Exploring the Hadean Earth」「Early Evolution of Earth and Life before Oxygen」とする議論を3日間にわたって行った。

第3回となる今回のテーマは「Life in the Universe」である。ELSIは、先に挙げたミッションとともに、そのような「地球生命学」の研究を通じて地球外生命の姿と生命惑星としての地球の特殊性、そして同時に、生命惑星の普遍性を理解しようとしている。この文脈の中で系外惑星や衛星などにおける生命の探索条件を新たに提案しつつ、「生命惑星学」という分野の確立を目指している。こうした視点での現状理解の整理と将来の展望、そして必要とされる学際性や分野融合を企図し、サブテーマを「Planets as Cradles of Life」,

「Towards Universal Biology」, 「Signs of Life on Other Planets」と据えて3日間にわたる議論を行った。以下、簡単かつ著者陣の視点ではあるが、本シンポジウム的一端を紹介したい。

2. 講演会概要

表1にシンポジウムのプログラムを示す。本シンポジウムの口頭発表は全て招待講演であり、国内外からの講演募集はポスター発表として行った。3日間それぞれに上に挙げたサブテーマを掲げ、対応する話題の口頭講演とポスター講演を揃えた。また、議論を十分に行いたいという趣旨のもと、基調講演は30分の発表の後に20分の議論時間、一般講演は12分の発表の後に8分の議論時間を設けた。口頭講演の後にその日のサブテーマに対応するポスターセッションとパネルディスカッションを行い、参加者の間で活発な議論が展開された。プログラムでも分かるように多彩な分野から豪華な顔ぶれが揃ったのは文部科学省世界トップレベル研究拠点(WPI)プログラムの採択拠点であるELSIならではのであろうと主催者一同自負している。

2.1 Day 1 “Planets as Cradles of Life”

シンポジウム初日は、「生命のゆりかごとしての惑星」というテーマで3つのセッションが組まれ、国内外から9名の研究者が講演を行った。Session 1では、生命を育んだ地球の特殊性および一般性と、生命惑星「地球」がいかにして誕生したのかについて議論が行われた。まず、David Stevenson氏(カルフォルニア工科大学)が基調講演を行い、太陽系の惑星たちが実に様々な特徴を持った惑星であることを指摘した上で、

1. 東京工業大学地球生命研究所 (ELSI)
junkim@elsi.jp

表1：第3回ELSI国際シンポジウムプログラム.

Day 1 (Tuesday, January 13, 2015) "Planets as Cradles of Life"	
08:50 – 08:55	Welcome Message by Kei Hirose, Director of ELSI
08:55 – 09:00	Introductory Remarks by Piet Hut, Chair of the Symposium
09:00 – 10:30	Session 1 :
	David J. Stevenson (Caltech), "Planetary Diversity" (keynote speech)
	Shigeru Ida (ELSI), "Planet formation and origins of H ₂ O, C and N on the Earth"
	John Hernlund (ELSI), "The potential importance of Mg/Si ratio in terrestrial planet evolution"
11:00 – 12:30	Session 2 :
	Stephen Mojzsis (Univ. of Colorado), "Early Earth vs. Origin of Life" (keynote speech)
	Yuichiro Ueno (ELSI), "Carboxylic acids from Hadean and Archean atmosphere"
	Hidenori Genda (ELSI), "Splashed Hadean Seawater Hypothesis"
14:00 – 15:30	Session 3 :
	Seiji Sugita (Univ. of Tokyo), "The Early Atmospheres of Terrestrial Planets inferred from Impact Experiments and Asteroid Missions" (keynote speech)
	Hikaru Yabuta (Osaka Univ.), "Expansion of Organic Cosmochemistry in the New Era of Small Body Missions"
	Tetsuo Irifune (ELSI/GRC), "Chemical compositions of the mantle transition region and the lower mantle of the Earth"
15:30 – 17:00	Posters with flash talks on "Planets as Cradles of Life"
17:00 – 18:00	Panel Discussion
18:30 – 20:00	Public Lecture "Life in the Universe"
	Mary Voytek (NASA), "How do we look for life beyond Earth?"
	Shigeru Ida (ELSI), "Clues from the Moon for understanding the Earth and its life's origins"
Day 2 (Wednesday, January 14, 2015) "Towards Universal Biology"	
09:00 – 10:30	Session 1 :
	Nicholas Hud (Georgia Tech), "A Self-Assembly Approach to Proto-RNA" (keynote speech)
	Chrisantha Fernando (Google DeepMind), "Open-Ended Evolution Revisited"
	Mary Voytek (NASA), "Towards a Universal Biology"
11:00 – 12:30	Session 2 :
	Paulien Hogeweg (Utrecht Univ.), "Toward a bioinformatic theory of living systems" (keynote speech)
	Nicholas Guttenberg (ELSI), "Detecting the signatures of heredity in generative chemistries"
	Takashi Ikegami (Univ. of Tokyo), "A study of a boids model at large scale"
14:00 – 15:30	Session 3 :
	Lee Cronin (Univ. of Glasgow), "Engineering the Transition to Evolvable Chemistry : Inorganic Biology" (keynote speech)
	Bruce Damer (UC Santa Cruz), "Coupled Phase Cycles : A Testable Origin of Life Scenario for Fluctuating Inland Volcanic Hydrothermal Fields"
	Jim Cleaves (ELSI/IAS), "Some Perspectives on the Origin of Life from Organic Chemical Space"
15:30 – 17:00	Posters with flash talks on "Towards Universal Biology"
17:00 – 18:00	Panel Discussion
19:00	Symposium Banquet
Day 3 (Thursday, January 15, 2015) "Signs of Life on Other Planets"	
09:00 – 10:10	Session 1 :
	Rolf de Groot (European Space Agency), "The ExoMars Programme : searching for traces of life on Mars" (keynote speech)
	Bethany L. Ehlmann (Caltech), "The Aqueous Environments of Early Mars : Where are the Biosignatures and Where Should We Be Looking?"
10:40 – 11:50	Session 2 :
	Chris McKay (Ames/NASA), "Search for life on other worlds of our Solar System" (keynote speech)
	Takeshi Naganuma (Hiroshima Univ.), "Generation and transportation of molecular oxygen to sub-ice ocean of Europa"
13:20 – 15:40	Session 3 :
	Wesley Traub (JPL/NASA), "Future Prospects for Characterizing Earth-size Exoplanets" (keynote speech)
	Tyler Robinson (Ames/NASA), "Strengths and Limitations of Reflected-light Observations of the Pale Blue Dot"
	Antigona Segura (UNAM), "Oxygen as a biosignature, the importance of the geological context" (keynote speech)
	Yuka Fujii (ELSI), "Color variation of planets"
15:40 – 17:10	Posters with flash talks on "Signs of Life on Other Planets"
17:10 – 18:10	Panel Discussion



図1：シンポジウムの集合写真。



図2：口頭講演会場の様子。

星の分類でよく使われるHR図のように系外惑星を単純に分類することは極めて難しいことが述べられた。その後、生命誕生に本当に必要な惑星としての条件は何であるのかについて考察が行われ、地球以外の太陽系の惑星・衛星および系外惑星での生命存在の可能性について議論が行われた。井田茂氏(ELSI)は、惑星形成と生命誕生環境にとって極めて重要な H_2O 、C、Nが地球では太陽組成に比べ著しく欠乏していることに着目し、まず従来の惑星形成モデルでは地球に供給される H_2O が多すぎる問題を解決する考え方として、cmスケールのpebbleだけが円盤の外側から移動し H_2O を供給するモデルが紹介された。CとNの欠乏についてはレイトベニヤ仮説による供給過程に可能性のあるものの、未解決な問題がいくつか残っていることを指摘した。John Hernlund氏(ELSI)は、生命誕生には表層のどこかで化学的非平衡の状態を保つ必要があるとして、プレート運動による惑星表面の連続的更新と惑星内部の化学進化の関係性について議論を行った。

Session 2では、生命が誕生したと考えられている冥王代の地球表層環境について議論が行われた。最初に基調講演を行ったStephen Mojzsis氏(コロラド大学)は現在唯一、冥王代地球の情報を引き出すことができる冥王代ジルコンのこれまでの分析結果から、冥王代地球の最新の描像が語られた。地球の形成とほぼ同時に地球への水供給が行われたこと、冥王代にも少量の大陸が存在していたこと、地球形成後の隕石爆撃期においても、生命圏は維持可能であること、などが述べられた。続く上野雄一郎氏(ELSI)は、無機物質から生命へ進化する段階で初期地球環境が地球化学的になどのような役割を果たしたのかについて考察をした。また、冥王代地球表層環境を解読する新たな手段とし

て、玄田英典(ELSI)は月サンプルに冥王代地球の原始海洋の情報が記録されているとする仮説を提唱し、その可能性および検証法が議論された。

Session 3では、杉田精司氏(東京大学)が基調講演を行い、地球型惑星の大気形成に関するレビューを行った。特に、隕石衝突による脱ガス大気の化学組成について、最近の実験結果をふまえた発表がなされた。従来考えられていたよりも還元的な大気が衝突脱ガスによって作られることがわかり、生命の前駆物質を生成するのに有利な条件であることが述べられた。また、2014年12月に打ち上げられた「はやぶさ2」の科学目標および現状報告が行われた。薮田ひかる氏(大阪大学)は地球に生命の前駆物質を供給した可能性のある小天体(隕石・彗星)に関するこれまでの研究成果について発表し、将来の小天体探査計画によって有機地球化学という新たな分野が展開されていくことを述べた。入船徹男氏(愛媛大学・ELSI)は、高圧実験によって得られた地球深部、特にマントル遷移層と下部マントルの最新の描像について発表が行われた。パイロライトは、上部マントルやマントル遷移層上部では実験結果と観測された地震波の速度が一致するものの、マントル遷移層下部の条件では一致せず、むしろ沈み込んだスラブの本体であるハルツバーチャイトに富む層が調和的だと結論が示された。

2.2 Day 2 “Towards Universal Biology”

2日目は、現在の地球生命の枠組みを超えたUniversal biologyに取り組む各分野の研究者による講演とパネルディスカッションが行われた。Session 1の基調講演では、Nicholas Hud氏(ジョージア工科大)が、RNA類似化合物の化学合成と特性測定を通じた、

RNAワールドに至るシナリオについて講演を行った。RNAの単量体であるヌクレオチドは、その構造中にそれぞれ異なる合成条件を要する塩基部分と糖部分が存在するために、アミノ酸や脂質分子よりも複雑であることが知られている。同様に、現在のACGUの塩基は、複素環化合物の中で最初の遺伝情報単位として複雑であると氏は注目した。そして、化学進化条件によって容易に合成される複素環化合物のうち2種類からなるペアが共存した際に繊維状の複合体を形成することや、糖と容易に結合することが可能なことを示した。さらに、別のペアによっても同様の現象が生じるという最新の知見も示した。生命の起源において、要求される複数の特性は各個に出現することで漸進的にシステムが遷移していく、という一般則を追求するものとして、氏の一連の研究は興味深い。続いての一般公演ではChrisantha Fernando氏(Google Deep Mind)が、計算機上の人工生命のopen-ended evolutionを達成するための新たなアイデアを紹介した。続いて、NASA AstrobiologyプログラムのDirectorを務めるMary Voytek氏が、当該分野の各種研究を網羅的に紹介する中で、地球外の生命を認識するためには生命の定義が重要であることに触れた。さらに、実験進化を含む合成生物学、および計算機実験が、原始類似環境や古サンプル収集のフィールドワークと同様に有用であることが紹介された。

Session 2では、生命システムの起源や進化を理解するための計算機シミュレーションやデータ解析手法に関し、3名の研究者が講演を行った。基調講演者のPaulien Hogeweg氏(ユトレヒト大)は、進化を駆動するために重要な「情報保存(information storage)」と「触媒」の機能を担うRNAに注目し、突然変異による複製エラーが発生し得る環境中で、これらの機能がいかんして分化し、そして維持され得るかを計算機シミュレーションにより探る研究を紹介した。Nicholas Guttenberg氏(ELSI)は、生命システム誕生以前の化学進化の段階における「遺伝(heredity)」すなわち、化学分子により情報が保存され継承される機構を明らかにしたいとの動機から、こうした遺伝の存在を検知するためのデータ解析手法を提案し、これを多様な化合物を生成する化学モデルに適用した研究を紹介した。池上高志氏(東京大)は、これまで計算機シミュレーションが生命システムの理解に大きなブレイクスルーを

もたらすことができなかった理由の一つとして、計算スペックの制約から自由度の小さい系しか扱えなかったことを重視するべきとの立場から、鳥の群れのダイナミクスを再現するシミュレーションモデルにおいて、自由度を数桁大きくすると以前には見られなかった多様なパターンが生じることを紹介し、計算スペックの向上がもたらす「人工生命」研究の将来への期待を述べた。

Session 3では、Session 2に引き続き生命の起源解明に向けた新たな方法論、戦略についての提案が3名の研究者によって行われた。基調講演者のLee Cronin氏(グラスゴー大)は無機システムが発達し生命システムが誕生する過程の実証を目指し、既知の生物進化学にとらわれない新しい進化メカニズムを探る実験的アプローチを紹介した。彼の手法では、化学反応条件に関するパラメタ探索を、反応条件の最適化を計算機によって効率よく行うことで達成している。Bruce Damer氏(カリフォルニア大)は初期地球の熱水噴気孔周辺で生命が誕生する独自のモデルを紹介し、この再現に向けて彼らが行っている実験的取り組みを紹介した。Jim Cleaves氏(ELSI)は生物が利用する有機化合物の種類が実現可能な有機化合物の数に比べて非常に限られている点に注目し、この選択がどのようなメカニズムによってなされたのかを理論的に探る試みを紹介した。このメカニズムの解明によって、地球上の生命がどこで、どのように誕生したのかについての重要なヒントが得られる可能性が期待される。

2.3 Day 3 “Signs of Life on Other Planets”

3日目は地球外天体における生命発生の可能性とその検出方法について取り組む研究者による講演が行われた。火星に焦点を当てたSession 1の基調講演を行ったRolf de Groot氏(ESA)は、ESAが旗艦ミッションに位置付けロシア連邦宇宙局との連携体制で実施するExoMars Programmeと、火星サンプルリターン技術の開発と実証を見据えたMars Robotic Exploration Preparation Programmeの概要を紹介した。ExoMars Programmeは、火星周回機のMars Trace Gas Orbiterと着陸実験モジュールのSchiaparelli EDM landerを2016年に打ち上げるミッションと、ローバーと表面観測用プラットフォームを2018年に打ち上げるミッションとの二本立てである。2016年のミッ

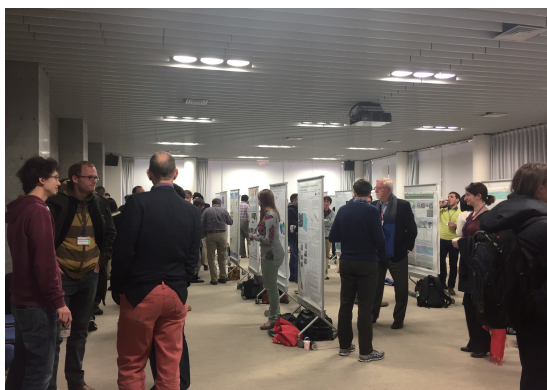


図3：ポスター会場の様子。

ションは、火星大気中のメタン等の微量気体の分布と起源を調査することを主目的とし、2016年1月の打ち上げと同年10月の火星到着を見込んでいる。着陸機EDM Landerは突入・降下・着陸実験モジュール(Entry, Descent and Landing Demonstrator Module)という名の通りに技術実証を主眼としつつも、ダストストームの時期に周回機から切り離され降下する間に大気の流れや風速や温度圧力などの特徴量を計測し、最終的にMeridiani平原へ着陸、その後も数ヶ月にわたって環境データの取得を行う。2018年のミッションでは、現在または過去の生命の兆候を探ることを主眼とし、レーダーや中性子分光計による地下調査や、掘削サンプルの分析などを行って有機物を詳細に調べる。ExoMars後はMars Robotic Exploration Preparation Programmeが待機していることも紹介され、火星探査を推進する国際的な潮流に対して欧州が主体的な寄与を果たすための一連のミッション群であり、その一環として2024年の打ち上げを見込む衛星フォボスからのサンプルリターン(Phootprint)計画が示された。続いて講演したBethany L. Ehlmann氏(カリフォルニア工科大)は、近年の探査によって火星表面に数多く見つかっている水質変成鉱物、例えばフィロ珪酸塩や炭酸塩、塩化物などに着目し、それらの分布と推定地質年代との照合を通して古火星環境とその変遷を見出すアプローチを紹介した。それによれば、Pre-Noachian/Early Noachianでは水や地下水の形で水が全球的に広がっていた環境が、Late Noachian/Hesperianでは液体水が表出するなど多様な形で水が存在する環境へと一時的に変化したことなどが示された。



図4：Day 4: Symposium @ ELSIの様子。

Session 2で基調講演を行ったChris McKay氏(NASA/Ames)は、太陽系に今や数多くの地球外生命圏候補天体が存在する中で特に土星衛星Enceladusとその南極からの氷噴出に焦点を当て、米日協働で検討が進められている氷プルーム物質のサンプルリターン計画「LIFE」の概要を紹介した。また火星におけるPhoenixやCuriosityによる掘削調査にも触れ、地下における熱・放射線環境の見積もりと絡めて生命存在領域の考察が行われた。さらに、炭化水素の湖が存在する土星衛星Titanでは、Huygens着陸プローブが表層付近での水素の欠乏を検出したことに触れ、アセチレンと水素を使ってメタンとエネルギーを得る「メタンベースの生命体」の可能性が示された。長沼毅氏(広島大)は、生命や有機物を構成する炭素(ホルムアルデヒド)が H_2O から生じる水素(還元力)と酸素(酸化力)を介して還元端であるメタンと酸化端である二酸化炭素の間を巡る「準安定な生命システム」モデルを提示し、地球や金星、火星、そして氷衛星における水の有無とその固液状態、地熱、放射線、光分解環境などの違いがこのシステムをどのように駆動させるかについて議論した。

Session 3では視点を系外惑星に移し、将来的に系外惑星上の生命や居住環境を探る可能性について、基調講演2件と一般講演2件が行われた。まず基調講演1件目のWesley Traub氏(NASA Jet Propulsion Laboratory)は、2020年代中ごろから系外地球型惑星の検出・特徴付けを目指すWFIRST-AFTA/starshadeやEXO-C/Sなどの宇宙探査機計画の見通しを紹介した。Keplerの観測結果から惑星の存在確率を見積もった上で、WFIRST-AFTAでは、現在のところ、数個程

度の地球型惑星ないしスーパーアースの検出が期待され、ハビタブルゾーン内のものも視野に入ってくる見込みが示された。続いてTyler Robinson氏(NASA/Ames)は、酸素やオゾンといったいわゆるバイオマーカーを含む気体分子が惑星の反射光スペクトルに与える影響を、見込まれる観測誤差と共に議論した。また、海を持つ惑星が軌道上の位置によって測光・分光特性を変える(液体表面が持つ反射特性“glint”に起因する)ことを具体的に示し、海の同定方法を議論した。基調講演2件目のAntigona Segura氏(メキシコ国立自治大)の講演では、バイオマーカーとされる酸素やオゾンが光化学反応で(非生物的に)生成され蓄積するシナリオがいくつか指摘された。これらのシナリオの効率には、主星のスペクトル型・二酸化炭素や水素の量・大気圧などに依存するので、これらを同時に制限することが生命活動の存在を正しく推定するために必要であろう。最後に藤井友香(ELSI)が、生命の居住可能性を探る上で重要な表層環境の情報が将来の系外惑星の直接撮像でどこまで得られるかという問題を念頭に置き、太陽系内固体天体に見られる多様な表層の状態と、点源として測光・分光特性との関係を議論した。大陸の存在や火成活動、風化などさまざまな地質学的プロセスが惑星色に影響を及ぼすことが指摘され、惑星色の変動によって地表の活動性や地表の大規模な非一様性についての示唆が得られることが示された。

2.4 ポスターセッション

各日の口頭講演終了後には、それぞれのサブテーマに対応したポスターセッションを設け、セッション冒頭には各自1分間でポスター講演の概要を紹介するFlashtalkを行った(図3)。国内外から3日間合計で55件(Day 1: 23件, Day 2: 20件, Day 3: 12件)のポスター講演が揃い、ELSIと本シンポジウムが包含する幅広い研究分野を反映した様々な議論が交わされるとともに新たな連携研究の提案など多彩なコラボレーションの場となった。

3. さいごに

今回のシンポジウムは、国内外から合計143名の参加者が集まり、大盛況のうちに終えることができた。また、上のプログラムには書かなかったが、シンポジ

ウム後の1月16日(金)には、シンポジウムでの講演やそこで交わされた議論のフォローアップを行うざくばらんな場を「Day 4 “Symposium@ELSI”」と題してELSI棟のラウンジで開催した(図4)。次回、第4回のELSI国際シンポジウムは、2016年1月13日から15日にかけて東京工業大学大岡山キャンパス内で開催予定である。回りのテーマは本稿執筆時では未定だが、ELSIならではの幅広い分野から講演者を招き、盛んな議論と新たなアイデアを掘り起こすような会になることを願っている。従来の会では国内からの参加者が少ない印象があるので、次回にはぜひとも足を運んで頂きELSIのエネルギーを感じていただきたい。