

## 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（中間評価用）

ホスト機関名	東京工業大学	ホスト機関長名	三島 良直
拠点名	地球生命研究所	拠点長名	廣瀬 敬

※自己点検評価報告書の概要を、以下の見出しをつけて記述すること。（このページを含め4ページ以内）

## 1. 拠点構想の概要

地球生命研究所（Earth-Life Science Institute, ELSI）は、地球の誕生とその変遷を究めつつ、「生命はいつどこで生まれ、どのように進化して来たのか」という、壮大なテーマに挑む世界的拠点を目指している。具体的には、生命誕生前後の初期地球環境とその後の変動の解明に重点を置き、生命及び持続可能な生態系の誕生とその進化を探るとともに、深海底の微生物生態系や始原的小惑星の探査を通じて初期の地球環境に迫る。このような地球科学を通じて地球の特殊性・普遍性を理解し、生命惑星学という新しい学問へと発展させることで太陽系内外の生命探査計画に貢献する。

以下、ELSIのこれまでの足取りを、WPIプログラムの4本柱及び申請時の目標を参照しながら概観するが、ELSIの研究は融合無くして進展は望めないことから、ScienceとFusionを一体的に述べる。サイエンスの目標は、地球と生命の両方に横たわるギャップを埋め、中盤期以降の研究シナリオを具体化することであった。以下にELSIで進展した代表的なトピックスを挙げる。

- ① 地球や多様な惑星の「水」をキーワードとした研究に基づく、ハビタブル惑星の理解
- ② 生命誕生と関連する「初期地球における磁場の形成と効果」と、関連して地球の大気変動の解明
- ③ 「化学から生物学へ」に関連し、非生物学的にアミノ酸からタンパク質が重合される過程
- ④ 逆クエン酸回路を非酵素的に回すことに関する研究
- ⑤ 炭化水素の非生物学的形成の解明
- ⑥ 分子系統学による「初期生態系」の検討

以上の研究は、ヘテロな研究者集団の協働から生まれたものであり、異分野融合研究が確実に定着したことを示している。これを踏まえ、地球生命研究所は「生命の起源」を「地球化学的活動から重合体が介在する生化学反応ネットワークへの遷移」と新たに定義したうえで、中盤期の研究課題を具体化した。

Globalizationの目標は、「地球・生命の起源と進化に関する研究の世界的ハブになる」というものであった。外国人副所長が主導するリクルート委員会は、様々な国際的会合にブースを置き、ELSIのアピール及び若手研究者との対話の機会を設けている。この結果、外国人主任研究7名とあわせて、ELSIの全研究者に占める外国人研究者の割合は36%になっている。さらに、自然科学研究機構のアストロバイオロジーセンターと連携して日本アストロバイオロジーコンソシアム（JABC）を立ち上げ、NASA Astrobiology Centerとパートナーシップ協定を締結した。また、JAXA/ISASと連携協定を結び、ISASが国際火星探査計画の枠組みで展開するMars Moon (Phobos/Deimos) eXploration (MMX) ミッションにおいて、サイエンスを先導する役割を担うことになった。なお、EONプロジェクト研究員の海外受け入れ機関等を連携機関(Affiliated Center)としてELSI国際ネットワークに参画してもらい、約10機関と実質的な共同研究を展開している。

Reformの目標は、所長のリーダーシップの下、特に外国人研究者にとって快適な研究環境・生活環境の整備、及び研究に集中できる実務支援体制の構築であった。ELSIはこの目標実現のために、

- ① 「研究」の前では研究者は皆平等、すなわちオープン・フラットな研究体制の確立
- ② WPI補助金及び大型科研費、海外ファンドも活用した研究機器と環境の整備・拡充
- ③ 全ての意思決定を所長に委ねるトップダウン型組織運営
- ④ 研究者の相談窓口を秘書室に集約したワンストップ型の研究支援体制
- ⑤ ライフアドバイザーによる外国人研究者の生活支援

に重点的に取り組み、「ELSI Style」を確立した。東京工業大学の理解・協力を得て、クロス・アポイントメント制の導入、テニュアポジションの確保、能力給制度の実施、大学院教育の分担を実現した。東京工業大学も、ELSI Styleを導入し、キャンパスの国際化や女性研究者の働きやすさのために、保育園や宿舍拡充などの基盤整備を行った。

## 2. 拠点の研究活動

## 1) 研究成果：

ELSIの第1期の研究では、惑星の形成、揮発性物質の供給と貯蔵、地磁気、初期地球の表面環境、前生

物化学、乱雑な化学 (messy chemistry)、電気化学、地球化学と結びついた微生物生態学、初期の微生物進化、化学における情報の起源などに関連した難しい問題に取り組んだ。例えば、ELSIでは、観測事実をより良く説明する新たな惑星形成モデルを採用し、遠方の若い恒星系についての天文学的観測によって確認されているジャイアントインパクトの諸性質を予測することに成功した。ELSIの研究者による実験と *ab initio* 計算の結果は、地核に約1%の水素が存在することを示唆するものであった。この結果には降着時における含水マグマオーシャンと相当量の揮発性物質の供給が必要である。地核の熱伝導率と導電率が高いことを示すELSIの実験結果は地球深部の進化を示す標準的なモデルをかなりの混乱に陥れるものではあったが、このことが代替モデルを模索する契機となり、 $\text{SiO}_2$ が初期の地核から結晶化した可能性を発見するに至った。地質学的、生化学的調査を通じたELSIの初期大気の研究から、冥王代および始生代初期の環境に対する新たな統合的全体像が構築され、生命が以前に考えられていたよりもはるかに還元的な環境で誕生したことが明らかになった。また、「間欠型リアクター」などの実験を用いて前生物化学のプロセスと環境条件のシミュレーションを行うことにより、単純なアミノ酸からペプチドのような複雑な分子の合成を実現した。ELSIは、容易で可逆的な重合反応を通じた高分子生成への最も達成しやすい経路の同定や、初期の結合モチーフや制御された微環境の創出に分岐ポリエステルが果たす可能性のある役割など、「乱雑な」化学的現象がどのように体系化されるのかについての知見を大きく進展させた。また、ELSIの電気化学実験チームは鉱物表面における嫌気性の触媒作用について調べ、炭素および窒素の固定から生物学的に到達可能な分子への前生物的経路を評価した。ELSIの生物学研究者は、窒素固定のような重要な機能や、酸素発生型光合成の起源などの進化的遷移がどのようにして以前に予測されていたよりも容易に起こりえたのか、ウィルスゲノムのように、進化を形成するいくつかの単位がどのようにして極めて多様な形態をとりえるのかを実証した。進化的変化の構造に対するELSIの研究を合成生物学的方法と組み合わせることにより、遺伝子コードやタンパク質の複雑さがどのようにして生じるのか、膜機能化のような新たな相乗効果がどのようにして発生しうるのかの解明に取り組んだ。また、ELSIの理論的、計算論的、実験的な研究は、どのようにして遺伝が基本的な化学過程から一般的に発生するのかを明らかにしたほか、他に起こりうる情報保持システムと比較してRNAを研究するとともに、最小のオリゴマー系から現代の生命を構成する遺伝物質への拡張的な遷移を再現するための研究を実施した。

- 2) 今後5年間における研究：ヘテロな研究者集団による協働・融合が根付き、地球・生命の起源と進化の研究における“伝統的な疑問”を解きほぐす段階へと至った。具現化された後半期間の課題群を解決し、研究成果と統合することで、新しいシステム科学の礎を構築することが次なる挑戦である。
- 3) 社会・学会からの評価：主任研究者、若手研究者共に、それぞれのキャリアに相応しい名高い賞や著名な学会のフェローとして表彰されている。いずれも、各世代がそれぞれのレベルで活躍し評価されているものであり、ELSIの研究レベルの高さがうかがえる。
- 4) 特筆すべきアウトリーチ活動：
  - ①小中高生を対象とした研究所見学会や出前授業を積み重ねた結果、旅行会社が展開する高等学校の修学旅行パッケージにELSIにおける見学・体験学習が組み込まれるようになった。
  - ②Kavli IPMUと合同で一般講演会「起源への問い」を開催し好評を得た（2015年12月）。他拠点との連携を考える端緒であり、拠点やWPIプログラムの知名度向上に資するものであった。
  - ③東工大広報と連携した“Tokyo Tech Inspiring Lecture Series”では、ノーベル賞受賞者のSzostak主任研究者ら4名のELSI研究者が講演を行った。最先端の研究を紹介するイベントとしては学内最大規模のものであり、本イベントは東工大の連続イベントとしてノウハウとともに引き継がれた。

### 3. 異分野融合

- 1) 戦略的融合領域創出に向けての取り組み状況
  - ・ 大型研究資金獲得の取り組み：融合研究の推進には一定規模の研究資金を獲得する必要があるとの認識に立ち、設立当初から戦略的・組織的に大型研究費獲得に尽力した。その結果、ELSI及び愛媛サテライトにおいて、2014年度、2015年度に5年総額10億円規模の大型科研費プログラムを獲得した。最も大きな成功は、米国財団からの支援（33ヶ月・総額US\$ 5.6M）を受けて2015年7月から“ELSI Origins Network (EON)”プロジェクトを開始したことだろう。Hut主任研究者/参与は、広範なネットワークを駆使しつつ、財団との交渉、申請書作成を先導し、ELSIを採択に導いた。
  - ・ Bridge Builderの招へい：生命の起源に関する研究を主導するため、ELSIは、特定の分野に精通したトップランナーよりも、広い視野を有し、多様な共同研究に横串を通して新たな融合領域の形成を先導し得る人材の招へいに注力した。その結果、Smith博士及び鎌形博士というELSIの戦略を共有できる2名のBridge Builderがそれぞれ、主任研究者及びELSI Fellowとして着任するに至った。
  - ・ 年次評価会 (Annual Evaluation Meeting)：年次評価会は、異分野研究者間の相互理解を深める目的で、年1回、ELSIの全研究者が参加して開催される。各自が一年間の活動を総括した書面の事前提出

と口頭発表を行う。他者の研究をより良く理解する目的で、スコア/コメントシートを配布し、若手研究者は主任研究者を、主任研究者は全研究者を採点する双方向評価を行う。評価項目には、異分野融合研究に積極的に関わろうとしているか、若手研究者については、主任研究者から独立して研究を進める姿勢があるか、と言ったものが含まれている。

- ・ オープン・フラットな研究実施体制の構築と若手研究者リクルート戦略：これらは、ELSIの異分野融合の土壌を作り出す上で極めて重要である。融合研究の主要な担い手である若手研究者は、主任研究者らから独立して自らの研究テーマをELSI内外の研究者らと推進する。若手研究者が、立ち位置を見失うことのないよう、リクルートのプロセスも重視している。面接選考の際は、研究者らとの討論を重ねる機会を設け、研究テーマを微調整した上で、着任してもらうようにしている。
- 2) 研究者間のボトムアップ的融合研究創出に向けての取り組み状況
  - ・ 所長ファンド(ELSI Director's Fund)：若手研究者の自由で柔軟な発想や、異分野研究者間の議論から生まれたアイデアを奨励する目的で、本ファンドを創設・運用している。分野が異なる研究者複数名で申請書をまとめることを要件としている。
  - ・ Study Group, ELSI-Seminar, -Assembly, -Youchien：研究者間において研究目標を共有し、相互理解を深めるために、様々なミーティングが開催された。当初は5つのStudy Groupを設置し、研究者は2つ以上のグループに属し、異分野研究者とのコミュニケーションを図った。その後、研究者の増加に伴って、Study Groupの活動はELSI-Seminar, -Assembly, -Youchienへと継承された。Seminarは外部研究者を講師に迎えて議論を深める場であり、AssemblyはELSI研究者によるセミナーである。2015年度は、PI Scopeと称し主任研究者の展望を聞いた上で議論を行う回と、話題提供を行う数名の若手研究者を中心にRound table形式で議論する回を交互に行うスタイルを取った。Youchienは、若手研究者が自身の研究内容などを他の研究者や事務職員に平易に伝えることで、分野間に立ちほだかるバリアを取り除くことを目的としている。
  - ・ ボトムアップ型ワークショップ等の開催支援：本支援は、ELSIの研究を対外的にアピールすること、外部研究者も巻き込んだFusionを目的として、研究交流委員会が課題を審査し予算を配分して、ワークショップ開催をサポートする制度である。新たな異分野間共同研究の端緒となるケースがある他、ELSIの知名度向上にも一役買っている。本支援を活用したワークショップの成果の一部は、Physics of the Earth and Planetary Interiors誌など3誌の特集号として公表されている。

#### 4. 国際的な研究環境

- 1) 国際的頭脳循環：ELSIは多数の機関・個人間の国際共同研究を展開している。代表的なものとして、地球深部研究チームがミネソタ大学・カリフォルニア大学サンタバーバラ校と展開する国際共同研究がある。また、研究者個人が独自のネットワークから展開する国際共同研究の事例を7つ報告書中で記述した。
- 2) 海外で活躍する世界トップレベルの研究者の拠点滞在実績：ELSIでは主任研究者16名中7名が外国人であり、うち4名が日本に常時滞在して研究を推進している。また、海外からの訪問者を積極的に受け入れ、特にサバティカル中のトップクラスの招へいに注力している。
- 3) 若手研究者の採用・就職状況：採用に関しては、1. 拠点構想の概要、Globalizationで述べた取り組みが奏功し、これまで216の応募があったうちの90%近くが外国人研究者であった。そのうち優秀な若手研究者を13名採用した。7名の主任研究者（うち1名は女性）をあわせ、ELSIでの外国人研究者の割合は36%を占めている。
- 4) その他環境整備など：国際的な研究環境を下支えする取り組みとして、組織的な国際シンポジウムの開催、きめ細かい外国人の生活支援や日本語教育、競争的資金獲得支援、外国人が快適に過ごせる組織作りを行っている。

#### 5. システム改革

##### (1) システム改革

- ・ 新しい組織運営：オープン・フラットな研究体制、テニユア・トラック制、クロスアポイントメント制、能力給制等の導入等からなるELSI Styleが定着した。
- ・ 英語が堪能な事務支援スタッフによる、研究と生活支援が定着した。
- ・ 戦略的な研究資金獲得の取組が日常化した。
- ・ このようなELSIの好事例が学内に波及し、全学的な組織改革が進行した。

##### (2) ホスト機関による支援

- ・ ELSIを学長直属の恒久的な研究拠点（研究特区）、かつ研究改革・システム改革の先導役と位置づけ、テニユアポジションの措置を含む人的支援・財政的支援、スペースの便宜供与を継続している。
- ・ 大学の国際交流会館中20室の優先的使用に加え、保育所の設置、宿舍の拡充を図っている。
- ・ 大学の事務と協力して、法人クレジットカードの導入を決定した。

## 6. 今後の展望

- 1) 東工大中期計画等：大学は、中期計画・中期目標においてELSIを「戦略性が高く、意欲的な目標・計画」に位置づけ、学長直属の組織としている。また、研究改革のフロントランナーと認識し、構想時の「ホスト機関のコミットメント」に加え、サイトビジット及びプログラム委員会において人的・物的支援に止まらない積極的な支援を表明している。
- 2) 資金計画等：海外財団から大型研究資金を獲得した成功体験・教訓を活かし、グローバルファンドを戦略的に獲得するため、法人格を有する海外拠点の設置を検討している。
- 3) 本プログラムの実施期間が終了した後も、当該拠点が「世界トップレベル研究拠点」であり続けるための取組み：引き続き、研究に専念できる充実した研究環境、若手研究者の育成、世界トップレベルの研究者との交流、異分野融合研究の推進等、研究者自らの探究・研鑽の場を提供する。さらに、きめ細かな外国人支援体制を一層充実させる。
- 4) ホスト機関からの支援等：大学は、ELSIを研究特区に位置づけ、恒久的に世界トップレベル研究拠点であり続けるための人的支援、スペース支援、財政支援を継続する。

## 7. その他、特筆すべき事項

グローバルファンド (EONプロジェクト) の獲得：2015年7月、ELSIは米国のジョン・テンブルトン財団から、33ヶ月、総額550万ドル(約6億7千万円)の研究資金を獲得した。これを資金源として、特に生命の起源の解明に関する研究の加速と国際研究ネットワーク構築を目的とした「EON (ELSI Origins Network) プロジェクト」を開始した。

## 8. フォローアップ結果(現地視察報告書を含む)への対応とその結果

### 8.1 フォローアップ結果・検討すべき課題

- 1) 生命の起源に関する研究：当該研究分野の推進を担う外国人主任研究者2名、ELSIフェロー1名を招へいし、研究体制を強固なものにした。これまでの研究成果・見通しを踏まえて、生命の起源とは何かを改めて定義し、そのうえで中盤期において追究すべき具体的3課題を明示した。
- 2) 若手研究者とのコミュニケーション：若手研究者とのコミュニケーションは、日常的なミーティング、年次評価会後の所長面談、電子目安箱の設置により展開してきた。今後は、事務職員らも活用して、多様なコミュニケーションを図ることに努める。
- 3) 外国人研究者の研究資金の改善：URA職員と外部資金獲得経験豊富な主任研究者らが中心となり支援を行ってきた結果、徐々に採択数が増えてきた。今後は、申請書添削経費の措置などの援助を一層充実する。
- 4) 若手研究者の雇用改善：世界の頭脳循環の一端を担うという観点から、若手研究者の雇用期間は原則3年としているが、著しい業績や貢献を行った研究者には2年間の雇用期間延長を可能にしている。大学と協議して、テニュアトラックポジションの確保に努めているが、ELSIでの経験がキャリアアップに資するよう、研究・雇用環境を更に改善する。

### 8.2 平成27年度現地視察報告書:6. 拠点に対する要望と提案 に対する回答

- 1) 中間評価に向けた取りまとめのあり方：所長を中心にこれまでのELSIのサイエンスを一本のストーリーとして追求することについて議論を重ねている。また、中間評価では、計量書誌学的解析結果も紹介しつつELSIのサイエンスを取りまとめることとする。
- 2) ロードマップ更新と共有：議論を重ねてロードマップの更新を継続すると共に、ロードマップを全研究者で共有し、最新のロードマップに沿って成果報告を行ってもらうよう工夫する。
- 3) 生命の起源の研究に対する具体的手がかりの提示：ELSI独自の「生命の起源の定義」を分解した3課題は、1) 生化学的な反応に普遍的な性質の抽出、2) 触媒の発生と触媒による有機化学的反応の制御、3) 生命の誕生への遷移において、地球化学的エネルギーおよび生物学的エネルギーが果たした役割とその歴史、である。
- 4) 若手研究者の海外派遣：2015年度に新たに海外派遣制度を創設し、渡航費と滞在費を補助して、若手研究者の海外派遣促進に努めている。
- 5) Phobos/Deimos missionにおけるELSIの位置づけ・意義：ISAS/JAXAとの連携協定に基づき、ELSIは、惑星・衛星形成論、アストロバイオロジー、その先につながる普遍生物学 (universal biology) といったELSIの将来目標を踏まえてサイエンスに関する議論を主導し実践する。
- 6) (WGに寄せられた)若手研究者の要望に対する対応：これまで、あらゆる要望に対して支援することが必ずしも最適ではないとの考えから、旅費支援を含めた研究費サポートメニューを設定・実施・改善してきた。しかし、若手研究者と支援の在り方を議論し、実現可能な施策から実行に移すこととする。
- 7) 外国人若手研究者に対する競争的資金獲得のサポート：前述の 8.1 3)を参照されたい。なお、外国

人若手研究者の競争的資金獲得のサポートも含めて、研究支援を拡充する必要性が増してきたことから、2016年度よりURA職員を増員し、2名体制で支援を行うこととしている。

- 8) 若手研究者が安心して研究できる雇用環境の実現： 前述の8.1 4)を参照されたい。

# 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

## 自己点検評価報告書 (中間評価用)

2016.04.26

ホスト機関名	東京工業大学	ホスト機関長名	三島 良直
拠点名	地球生命研究所	拠点長名	廣瀬 敬

共通事項：

※平成28年3月31日現在の内容で作成すること

※各項目について、原則として指定のページ数以内で記述すること。なお、添付様式は、ページ数に含めない。

※文中で金額を記載する際は円表記とすること。この際、外貨を円に換算する必要がある場合は、使用したレートを併記すること。

### 1. 拠点構想の概要 (このページを含め2ページ以内)

拠点のアイデンティティ、申請時に設定した目標の達成状況について記述すること。

・主任研究者、構成員数、運営体制、拠点施設配置図及び事業費については[添付様式1~5]に記載すること。

地球生命研究所 (Earth-Life Science Institute, ELSI) は、地球と生命の誕生とその変遷を究めつつ、「生命はいつ地球上で生まれ、どのように進化して来たのか」という、ギリシャ哲学に始まり、自然科学が問い続けてきた壮大なテーマに挑む研究拠点の確立を目指してきた。具体的には、生命誕生前後の初期地球の特殊な環境とその後の環境変動の解明に重点を置き、生命ならびに持続可能な生態系の誕生とその進化を探る。実証ベースの研究も指向し、深海底の微生物生態系や始原的小惑星の探査を通じて、初期の地球環境に迫る。またこのような地球学を通じて生命惑星地球の特殊性と普遍性を理解し、新たに生命惑星学へと発展させ、現在開始されつつある太陽系内および系外の生命探査計画に貢献する。

生命の起源に関するこれまでの研究は生化学的なものが主だった。地球は生命のゆりかごとされ、支えであって相互作用するものとの位置づけはなかった。生命とは周囲の環境と物質・エネルギーのやりとりを通じて成り立っているものである。その結果として、生命活動が環境に影響を与えている。このような観点から、本拠点では地球と生命の双方の研究を重要視する。これが、ELSIのアイデンティティである。

以下、2012年12月、ELSIが発足して以降、ELSIならではのアイデンティティを確立し、地球及び生命の誕生・進化を追う世界トップレベルの研究拠点となるべく歩んできた3年強の道のりを、WPIプログラムの4本柱及び申請時に設定した目標を参照しながら概観する。

#### 【Science・Fusion】

Scienceについては、初期の地球と生命の両方に横たわるミッシングリンクを埋め、中盤期以降の研究戦略を具体化することが目標であった。ELSIのサイエンスはFusion無くしては進展しない点に鑑み、ここではScienceとFusionを一体的に述べる。まずELSIのサイエンスの推進に大きく貢献した下記4トピックスを紹介する。

#### 1) ハビタブル惑星は如何にして形成されたのか

生命の存在を可能とする水を地球はどのように獲得し、その表面に海としてたたえるようになったのか。地球を含めた様々な惑星における水についての議論は、これまでの3年間のELSIの研究において最もホットなトピックスの一つであった。地球深部の研究グループは、実験的に地球が形成時に獲得した水の大部分は還元されてコアに取り込まれ、その量を水に換算すると現在の海水の約80倍に相当することを明らかにした (Nomura et al. 2014)。惑星形成理論の研究グループは、地球型惑星におけるマグマオーシャンの固化プロセスを検討し、惑星が誕生した場所によって、その後の初期進化の様相が2つのタイプに分かれることを示した (Hamano et al. 2013)。Type I は、短い時間でマグマオーシャンが固化して海を形成する惑星で地球はこれに該当する。Type II は、固化に非常に長い時間を要しその間に水を失う惑星で金星がこれに相当する、というものである。液体の水が存在し得るハビタブルゾーン (HZ) にある岩石惑星/氷惑星の存在確率を予測する研究においては、ガス抵抗によって内側に流れてくる氷ダストが原始惑星に捕えられる確率を導いている (Guillot et al. 2014)。低質量であるM型矮星は低温のため、氷の凝縮する境界が中心星に近い。したがって、遠い位置で凝縮した氷が円盤との相互作用によって内側領域に運ばれてくる効果が重要となる。しかし、若い段階のM型矮星の紫外線は強力であり、HZに位置する惑星でも、地球の海洋質量程度の水が蒸発し宇宙空間へ散逸してしまうため、M型矮星ではHZにある惑星は深い海を持つ惑星 (もともと大量の海があった) か全球が砂漠で覆われた惑星 (形成当初は地球海洋質量程度またはそれ以下の海を持っていた) になること (Tian & Ida 2015) を明らかにした。

#### 2) 初期の地球における強い磁場の形成とその効果

地球に天気が存在したことは、地球に生命が誕生し、進化・繁栄したと密接に関連する。火星は太陽風により大気を失ったとされるが、ではなぜ地球には大気が存在し得たのか。このことは磁場の存在と関連している。初期地球では、火星と異なり、強い磁場が形成されていた。既に原始バクテリア中にマグネタイトの存在を確認しているが、ELSIは、トンネル磁気ジャクション走査電子顕微鏡を導入し (Kirschvink et al. 2014 Nature)、地球最古の岩石サンプルの磁気強度測定を進め

ている。一方、地質学・古生物学的アプローチとは異なる地球深部研究チームの高温・高圧実験から、初期地球においてコアの対流があったことが示され、これにより地球磁場がもたらされたと考えられている (Hirose et al. 投稿準備中, Hearnlund & McNamara 2015)。地球には磁場が存在し、これが太陽風から地球の大気を守ったということが、多様な視点から明らかになりつつある。Kirschvink 主任研究者らのチームは、初期地球の岩石試料中の初生鉱物と二次鉱物を識別するために新たな古地磁気学的手法を構築した (Fischer, Kirschvink et al. 2014 PNAS)。そして、この手法と、硫黄同位体を用いた大気化学の追跡手法を組み合わせ、大気変動は後期太古代に始まったことを明らかにした。

### 3) 化学から生物学へ

化学進化から生命の誕生に至る過程を理解するには、冥王代に原始的な酵素がどのようにして生じたか、酵素反応群からどのようにして原始的な代謝系が組織化されたか、遺伝情報がどのようにして獲得されたか、さらには脂質複合体を基盤とする二重膜によって環境から隔離された細胞がどのような形成されるに至ったかを検討しなければならない。原始酵素の形成に関しては、冥王代の環境下でアミノ酸からタンパク質への重組がどのように起こりえたかを検証し始めた。まず、加熱・冷却サイクルを繰り返すことで「間欠型リアクター」を開発し、これを用いて、黄鉄鉱などの鉱物を触媒に非平衡条件下でアミノ酸からオリゴペプチドを合成できるかを検証している (Aono et al. 投稿準備中)。黄鉄鉱などの鉱物を触媒としてアミノ酸の重合が起こるためには、アミノ酸が鉱物の表面に付着し、局所的に濃縮される必要がある。このため、原子間力顕微鏡を用いてアミノ酸分子の黄鉄鉱に対する付着力を定量的に測定している (Yano et al. 投稿準備中)。

一方、熱水噴出孔が原始代謝系の形成された場であったという仮説を実験的に検証するために、さまざまな生体物質を合成する出発点となりうる還元的クエン酸回路を、熱水噴出孔にみられる電気化学的エネルギー勾配の存在下で非酵素的に再現できるかを検証している (Kameya et al. 投稿準備中)。また、RNAやDNAの出現以前には、情報はどのような分子(群)によって記憶されていたのか、言い換えれば原始遺伝子の実体は何で、これがどのようにして核酸型の遺伝情報へと進化したのかという問題の手掛かりを得るために、計算化学を駆使した理論研究を展開している (Guttenberg et al. 2015)。さらに、原始細胞膜と呼ぶべき構造がいかにして構築されるに至ったのかを、リン脂質を基盤とするモデル膜系を用い、物理化学的、生化学的に解析している (Kuruma et al. 2014)。

### 4) 初期生態系の検討

須田ら (2014) の地質学的研究によって、水素に富む珍しい温泉 (白馬温泉) からメタンが発見されたことを契機に、初期生態系の解明を目指す温泉プロジェクトを進めている。まず、蛇紋岩層において、水と二酸化炭素から水素とメタンが非生物的に形成され、さらに炭化水素鎖の伸長が起きていることを確認した (Suda et al. 2014)。この系における非生物炭化水素群の合成がどのような経路に依るのかを明らかにするために、炭化水素を構成する炭素の分子内安定同位体分析法を開発し、この技術を駆使した分析化学的研究を進めている (Gilbert et al. 2013)。同時に、水と二酸化炭素が蛇紋岩と反応して、炭化水素群を非生物的に形成する条件を、合成実験によって確認している (Ueda et al. 投稿準備中)。

一方、メタゲノム解析により、上記温泉から発見された Hakuba OD 1 という古細菌型代謝を行うバクテリアは、分子系統学的にきわめて古いことが明らかにされ、最初期の炭素固定反応を反映しているのではないかと推定されている。このようなバクテリアを中心とした初期生態系の検討が進められている (Nishiyama et al. 査読中)。

以上の成果は、ヘテロな研究者集団の協働からこそ生まれたものであり、Fusionが醸成・定着したことを物語っている。ELSIの前半期間におけるサイエンスの成果は、地球・生命の起源にまつわる伝統的な疑問の解決に貢献するものだと言えるだろう。この経験を踏まえながらロードマップを見つめ直す機会を重ねる中で、ELSIは生命の起源を「地球化学的活動から重合体が介在する生化学反応ネットワークへの遷移」と新たに定義し、WPIプログラム中盤期に向けた具体的な研究課題を明確にした。

ELSIのサイエンスは基礎科学である。イノベーション指向の昨今の外部資金プログラム事情の中で、ELSIは我々の基礎研究を支えるリソースの確保に戦略的に取り組んできた。その結果として、大型科研費プログラムである新学術領域研究2件の採択に恵まれたことに加えて、海外財団から6億円超の支援を獲得するに至ったことを付記する。

### 【Globalization】

Globalizationの目標は、地球と生命の起源と進化に関する研究の世界的ハブになる、というものであった。研究所の国際化については、2015年秋までに研究者の30%程度以上を外国人研究者が占めるようにリクルートを進めるという数値目標を立てた。外国人副所長をヘッドに据えたリクルート委員会は広報部門と共に協力して、世界各地で開催されるサイエンスミーティングでブースを置き、ELSIをアピールすると共に、直接若手研究者と対話する機会を設けた。公募サイト、学術誌の求人欄ページに投稿、関連学会やコミュニティが持つメーリングリストによる周知を徹底した。ELSIのホームページ上にリクルート用特設サイトを設け、常時応募、随時審査を原則とするリクルートシステムを構築・運用している。こうした取り組みによる効果で、これまでに216件の応募があり、うち90%近くが外国人からのものとなった。この中から選抜された優秀な若手外国人研究者は13名にのぼり、外国人主任研究7名 (うち1名は女性) とあわせると、ELSIの全研究者に占める外国人研究者の割合は36%になっている。

国際的な研究ハブを目指す取り組みの一環として、自然科学研究機構 (NINS) に置かれているNINS

アストロバイオロジーセンターと連携して日本アストロバイオロジーコンソシアムを立ち上げ、NASA Astrobiology Instituteとパートナーシップ協定を締結したことは前半期間の大きな成果である。また、近い将来の火星探査に向けた国際協力の枠組みのメンバーであるJAXA/ISASと連携協定を結び、ELSIは、ISASが進めるMars Moon (Phobos/Deimos) eXploration (MMX) ミッションにおけるサイエンスを先導する役割を担うことになった。

こうした大きな研究の枠組みの中にELSIを位置付ける取り組みとあわせて、例えばEONプロジェクト研究員の海外受け入れ機関を連携機関(Affiliated Center)としてELSIの国際ネットワークに参画してもらう仕組みを構築し、現在約10機関と実質的な共同研究を展開している。

このように、前半期間において、ELSIは研究の国際ハブとして名実共に認識されるための基盤を固めたと言えるだろう。これに加えてELSIは、一般/国際社会と科学の窓口を担うために、この種の活動に実績があるSAGANet(Social Action for a Grassroots Astrobiology Network)に参画した。SAGANetのポリシーでもある“Share Science, Learn Science, Do Science”を実践しつつ、科学と社会の対話のあり方を学び、追究しているところである。

### 【Reform】

Reformに関する目標は、1) 所長のリーダーシップの下、特に外国人研究者にとって快適な研究環境・生活環境を整備すること、2) 研究に専念するための実務支援体制の構築、であった。ELSIはこの目標実現のために、

- ・ 「研究」の前では研究者は皆平等、すなわちオープン・フラットな研究体制の確立、
- ・ WPI補助金及び大型科研費、海外ファンドも活用した基盤的研究機器、研究環境の整備・拡充、
- ・ 全ての意思決定を所長に委ねるトップダウン型組織運営とそれを支える事務体制の構築、
- ・ 研究者の相談窓口を秘書室に集約したワンストップ型の研究支援体制、
- ・ ライフアドバイザーによる外国人研究者の生活支援、

に取り組み、改善を重ねてきたところである。これらは“ELSI Style”としてホスト大学内に浸透し、事務組織改革が始まっている。

ELSIは、優秀な研究者集がELSIに結集しやすくなるように、学長の理解・協力を得て、クロス・アポイントメント制度の導入、テニユアポジションの確保、能力給制度の実施、大学院教育の分担を実現した。大学は、ELSI Styleを参考に一層の国際化、女性研究者の活躍を促すために、保育所の設置、宿舍の拡充など基盤的施設の整備に着手するに至った。

## 2. 拠点の研究活動（8ページ以内）

### 2-1. 研究成果

拠点の研究活動の全貌を記載するとともに、2012～2016年3月までの代表的研究成果5～10件を挙げ、その解説について記述すること。なお、各成果は箇条書きとし、[1]～[10]までの通し番号を付すこと。

- ・ 上記の研究成果を裏付ける論文一覧とその解説を[添付様式2-1]に記載すること。

ELSIは地球と生命に関する最大かつ最も深遠な疑問に取り組んでいる。すなわち、地球はなぜ今ある姿に形成されたのか、地球の進化に寄与した因子は何か、地球の進化の過程はどのようにして生命に適した条件を創出したのか、そして、どのようなメカニズムで生命は誕生したのかという疑問である。これらの疑問に取り組むことにより、今、我々が存在する世界を生じさせた過程に関する歴史的洞察が得られるであろう。さらに、宇宙全体における生命と生命を宿す惑星との関係についての理解もより完全なものとなるであろう。このような情報は、将来の宇宙探査ミッションから得られるデータを理解し、解釈するために必須である。ELSIで行われている研究の最も重要な主題は、第一原理に基づく理論を経験的観測と結び付けることにより、生命を地質学的現象への一連の応答として明らかにすることである。我々のミッションと関連が深いのは、地球深部科学、惑星形成、地質地球化学、地球外観測、微生物生理学、環境ゲノミクス、前生物化学、合成生物学、複雑系科学などの研究領域である。我々は既存の学問分野間の境界を取り除くことによって動的で協調的な研究環境を構築しており、現在ELSIで行われているのは国際的にも独自の取り組みである。すなわち、さまざまな学問分野の意欲の高い優秀な頭脳が持続的に対話を行うことで、各々の研究者が多様な研究角度から地球-生命系を理解するという目標に迫りつつある。今やこの独自の環境は自己触媒的に作用するようになり、多彩な卓越した研究者を惹きつけているだけでなく、ELSIが地球-生命科学を考える一流の拠点であると認識されるようになった。一つの研究機関として、我々は以下のような根源的な疑問への研究に取り組んでいる：1) 地球の構成要素、2) 初期の地殻、マントル、地核、3) 原始における海洋および大気の組成、4) 地球と生命の共進化、5) 前生物学的分子の地質学的供給、6) 原始代謝、7) 原始細胞、8) 当時における微生物の生理と進化。このような取り組みはELSI第1期の目標を達成すると同時に第2期の土台を作るものであり、ELSI第2期では新たな学際的研究領域を育成し、確立しようとしている。このような学際的研究領域は、i) 従来の研究運営形態に大変革をもたらし、ii) 宇宙におけるハビタブル環境の特徴の決定などの壮大な科学的目標を達成するであろう（ELSI第2期）。以下に、現在までの代表的な研究成果と研究のハイライトを要約する。

[1]

(上記の研究成果を裏付ける論文とその解説：[添付様式2-1]1～○)

[1] 惑星集積のシナリオとジャイアントインパクト：惑星形成の理解は、地球やその他の惑星の初期状態を読み解くのに不可欠である。惑星の初期状態は、生命を育んだ地球の初期環境や生命の源となる材料物質を供給した地質環境と直接関係があるため重要である。ELSIの研究者らは、観測と矛盾する結果にある従来のモデルを改善するため、地球型惑星の集積、特に集積の後期段階に注目した研究を実施してきた。ELSIでは、木星および土星の移動を考慮した寡占的成長（kmサイズの物体の集積）や、ペブル集積（10～100cmサイズの天体の集積）という新しい発想を取り入れた様々な地球型惑星形成のモデルを探究してきた。前者のモデルの場合、火星は地球から遠く離れたところに形成されることになり（Brasser, Ida et al. 投稿中）、同位体データと整合している。一方、後者のモデルについては、我々はペブルの集積率に対する包括的な式を導出し、これらをN体計算コードに組み込んだ。そこから得られた結果は、ペブル集積によって形成される惑星の軌道配置が初期の原始惑星系円盤のパラメータ（Ida et al. *Astron. & Astrophys.* 印刷中）に強く依存し、水の地球への供給が円盤の構造と雪線が通過するタイミングに強く依存することを示した [1]。地球の形成は原始惑星間の激しい衝突（ジャイアントインパクト）が断続的に起こることで特徴づけられ、月[2]や火星の衛星[3]が形成されるに至った。ジャイアントインパクトによって放出されたデブリ円盤が他の若い恒星の周りで観測されており、ジャイアントインパクトが宇宙において惑星形成がいたるところで起きている特徴であることをELSIの研究者は示した。ELSIにおける数値モデルの開発者らは地球の核-マントル境界の取り扱いに問題のあった計算アルゴリズムの欠点を訂正し、月の形成と整合する巨大天体衝突のシナリオを大きく改訂した[2]。

[2] 揮発性物質の供給と蓄積：水素や炭素などの揮発性元素は有機分子に必須の構成要素であるだけでなく、地球の内側を循環し、無数の地質学的プロセスに極めて重要な役割を果たしている。ELSIでは実験的、観測的、理論的アプローチを統合することにより、惑星形成における揮発物の降着、時間の経過を通じた脱ガスとガス流入、惑星内部における揮発物の蓄積といった問題に取り組んでいる。ELSIのモデルにより、マグマオーシャンからの水蒸気の漏出が地球と金星の水分含有量の違いを生み出した可能性があることが実証された[4]。高圧実験や第一原理計算から得られたデータは、地球の核の圧倒的大部分を占める軽元素として約1重量%の水素が含まれており、これが現代における低温の地球核や観測データと整合する地震特性を生じさせたことを示している[5,6]。一方、地球マントルの水に関するELSIの地震学的予測から、遷移ゾーンは予想外に含水量が少ないことが示された（Hauser et al. 印刷中）。これらすべての結果を説明するための統合的モデリングは、原始地球が無水のエンスタタイト・コンドライト型の物質によって火星のサイズまで成長し、その後氷を豊富に含む物質が降着することで、現在の約100倍の量のH<sub>2</sub>O海洋がもたらされた可能性があることを示唆している。玄田准主任研究者、Hernlund主任研究者らによって現在も行われている集積モデリングの取り組みでは、原始地球におけるマグマオーシャンが原始大気中の水素ガスと反応し、成長する惑星におけるH<sub>2</sub>OとFeOの両方の含有量を調節したと思われることを示しているのである。

[3] 地球磁場および地球の進化：地磁気は太古から存在しており、我々の惑星の深部で起こっているプロセスを表面環境や生命と結び付けるものである。地球の磁場は流体外核の対流におけるダイナモ作用によって維持されており、その時間変動が地表の大気損失や含水量、酸化状態に影響を及ぼす。地球の磁場は走磁性細菌によって原始形態の視力として利用され、生命の歴史における劇的な進化的変化と結びついているのではないかと考えられている。ELSIの世界トップレベルの高圧試験施設における実験から、これまでの推定値とは劇的に異なり、核中の鉄合金は電気と熱の伝導率が極めて高いことが明らかになっている[7,8]。また、熱モデリングの結果は、これらの高い伝導率から、初期の地球では核の温度が極めて高かったと考えられることを示唆するものであった[7]。このことから、我々は太古の時代には別のメカニズムが地球ダイナモを駆動していたのではないかと考え、さらに探究を進めた後で、SiとOの両方を含有する核中の鉄合金がSiO<sub>2</sub>を結晶化させることを発見した（Hirose et al. *Nature*に投稿中）。この発見は地球核の進化に関する知見を根本から変えるものであり、現在の核組成の制約に加え、核の伝導率が高いという逆説を解決するものである。一方、ELSIは古地磁気学的研究にも深く関与しており、カンブリア爆発（535-515Ma）と同時期頃、大陸の緯度に急激な変化があったことを明らかにしている。これは、急速に進んだ一連の生物進化と密接に関連していると想定されている「真の極移動」という現象に光を投げかけるものである[9]。ELSIの最先端の古地磁気実験装置は製作がほぼ終わっており、冥王代の地球における地球磁場の制約を目的とした研究が主要な重点として行われる予定である。

[4] 初期大気および、現代の類似環境の地球化学：統合的なELSIのこの一連のプロジェクトは、初

期の地球における大気や岩石圏の水の化学組成や動力学に新たな制約をあたえている。これは、実験室における素過程の研究を、太古代や冥王代の環境に類似する現代の特殊環境についてのフィールドでの調査と統合することにより進められてきた。初期大気での化学過程を追跡するため、硫黄同位体組成をナノモルレベルで決定するための新たな分析法を考案した[10]。この手法を用いることにより、COの存在下で、ごく低い $p$  SO<sub>2</sub> (1-10Pa) 条件における新たな光化学実験が行われ、初めて太古代のS-MIF ( $\Delta^{36}\text{S}/\Delta^{33}\text{S} \sim -1$ )を再現することに成功した[11]。この結果、初期の大気がこれまでに考えられてきたよりも還元的であり、相当量のCOが含まれていた可能性があることが示唆された。このような還元性の大気は有機化合物の前生物的合成に有利である。我々のグループがC-H-Oシステムに関して実施したUV化学実験の結果、CH<sub>4</sub>大気はCOによる化学作用に比べて還元性が高すぎ、生命の基本的構成要素を生成できないことが実証された。また、同じ実験結果は、ギ酸が初期の地球海洋に絶えず供給され、「原始代謝」を駆動した可能性があることを示唆している。パルスレーザーラマン分光計を用いた新たな実験システムを設計しており、リアルタイムのその場分析を行うことができると期待される。現在進行中の主要なプロジェクトとして、初期の地球に化学エネルギーをもたらしたと考えられるマントル物質の変質作用を現場で研究するため、白馬八方温泉オフィオライトシステムの地質と微生物学的研究を行っている。白馬におけるHおよびC同位体の研究結果[12]は、無機的なH<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>の生成が、かんらん石の変質を通じて起きていることを示唆するものである。かんらん岩を母岩とする現在の特殊な温泉環境を、初期地球モデルとして理解するため、上部マントル物質が海洋底にそれほど曝露されていなかったと思われる初期地球上において、主たる水素発生源となったであろう、コマチアイト溶岩の水岩石反応について研究した[13]。その結果、コマチアイトと海水の反応によるH<sub>2</sub>発生量は、かんらん岩を母岩とするシステムから生成する水素量と、玄武岩を母岩とするシステムのそれとの中間であることが確認され、現在の類似環境を初期地球条件と比較校正することができた。

[5] 前生物的化学：前生物的化学の調査は、初期の地球と生命を結びつけるELSIの研究の中核である。まず我々は、生命起源研究の構想化に重点的に取り組んだ。丸山主任研究者らは、冥王代の地球には天然の原子炉とその周辺の間欠泉が存在し、こうした環境で放射線誘起の有機化合物合成が促進されたという仮説を立てた。そこで、青野准主任研究者とCleaves特任准教授が率いる研究チームは、東京工業大学のガンマ線放射施設を利用して放射線分解実験を開始し、水とアセトニトリルからホルムアミドを作り出すことに成功した（結果はまもなく投稿予定）。これは、生命構成分子（アミノ酸や核酸塩基、脂質など）の非生物的合成に関する有望な可能性を提示している。間欠泉の仮説に触発され、青野准主任研究者らは密閉したフラスコ内で湿潤-乾燥サイクルを反復する「間欠型リアクター」と呼ばれる実験システムを考案し、アミノ酸のオリゴマー化が高温での加熱により触媒がなくとも起こることを実証した（結果はまもなく投稿予定）。北台研究員は、極めて多様な温度とpH値におけるアミノ酸の熱力学的挙動を計算した[14,15]。これらの結果は、冥王代の環境下においてアミノ酸からのオリゴペプチド合成が起こりうることを証明している。鉱物の存在下においてどのようにして金属結合型のオリゴペプチドが形成され、原始酵素に進化していくのかを理解するため、原連携研究者、矢野、およびその他の研究者は、原子間力顕微鏡を用いて単分子アミノ酸と鉱物表面の相互作用力を定量化した（結果はまもなく投稿予定）。さらに、我々は物理化学的制約の存在を重視し、生命の起源に関する研究から何を除外し、何を組み入れるかを考察した。これが契機となり、原始代謝の炭素固定ネットワークを引き起こすことができるとされる特定の化合物に注目するChandru研究員らの実験研究が進められた。その結果、生命の起源に対する有望なシナリオから熱水駆動型の原始代謝を除外するべきであるという主張が提示されるに至った（原稿査読中）。新しい計算的アプローチの開発は、前生物的化学には大きな意義を持つ。Cleaves准教授らは遺伝的にコードされた20種類のアミノ酸の集合を、計算によって導出された複数の代替的集合と比較することにより、前者が大域的最適解に対応している可能性を示した。これは、この集合が自然淘汰に大きく影響を受けて選択されたことを示唆している[16]。青野准主任研究者らは、様々な制約充足問題を解くためのヒューリスティック探索モデルを開発し、このモデルが未知の化学反応の速度論を半定量的かつ少ない計算資源でシミュレートできる可能性を示唆した[17, 18]。

[6] 「乱雑な化学 (Messy Chemistry)」の概念化：生化学反応ネットワークは、酵素が司る触媒作用、鋳型選択的複製、シグナル伝達などの精緻な制御機構によって支配されているが、化学進化の初期段階ではこのような機構は存在していなかったものと考えられる。従って、前生物的反応のネットワークは、抑制の効かない「乱雑な」ものだっただろう。我々のチームは、乱雑な化学システムからの組織化と創発の特質を把握し、そこからもたらされる生命システムへの進化的な遷移を理解するため、計算的アプローチと実験的アプローチを統合した。まず、どのようにして単純な化学的現象の中から自己触媒作用が発生し、集束と増幅をもたらすことができるのかを、反応ネットワークシステムのトポロジーをそのダイナミクスの特質と関連づける理論的取り組みにより明らかにした[19]。また、ゲノムの遺伝が可能になる前に、どのようにしてバルク化学システムから進化を

可能にするような遺伝的記憶が発生し得たのかを明らかにするため、動的な「リザーバー」モデルも考案された[20]。実験的取り組みでは、タンパク質の構造やその触媒機能に代わる前生物的手段として、可逆的な重合が容易に起こる化合物に注目した。これらの化合物は、単量体の動的な組み換えによって独自の配列を持つ多数の高分子を生成することができる（コンビナトリアルライブラリ）。特に注目すべきは、多分岐高分子である。これらは本質的に球状であり、特異的なフォールディングを必要とせずに機能を発揮することができる。前生物的に有り得る条件のもとで合成された多分岐高分子は、金属を結合させる機能のようなタンパク質に類似した特質を示した(Mamajanov et al. 2015 Orig. Life Evol. Biosph. 45:123-137)。さらに、昨年ELSIに参加した研究者らによって、このテーマにおける多くのプロジェクトが活発化している。アルゴリズムから生成され得る化合物を探る計算的手法を発展させるために、我々のチームにはグラフ文法的手法に関する詳細な専門知識を有する研究者が加えられた。金属中心のような分子の立体化学的特質を取り込み、反応経路のような基本的な概念を定式化するため、現在これらの手法の拡張が試みられている(Andersen、投稿中)。一方、多分岐高分子に関する研究では、微視的環境の調節から生じる触媒作用の実証が行われており(Mamajanov and Cody、投稿準備中)、形状や配列、機能にもとづいて淘汰される新たな動的物質を構築する試みが進められている。

[7] 電気化学がもたらす生命の起源：原始地球における熱水活動は現在よりもはるかに活発であり、これらが生み出す電気化学場は、生命の発生と初期進化に必須なCO<sub>2</sub>固定と生体分子合成の駆動力となった可能性がある[12, 13]。我々はこの仮説を検証するため、有用な触媒や電気ポテンシャル範囲を評価する実験環境を確立してきた。また、高井主任研究者らは現在の熱水系の多様性や特性を調査しており、これら2種の情報を組み合わせることで、我々はこの場の生命起源への役割を解き明かそうとしている。我々の室内実験は、生物誕生前と後を繋ぐ化学進化プロセスを紐解くものであり(Yamaguchi et al. 2014 Electrochimica Acta 141:311-318など)[21]、ELSIはこのような熱水系での電気化学反応を調べる研究において世界のトップに位置している(Nunoura et al. 2015 PNAS 112:E1230-E1236)。熱水系は地球外の惑星や衛星で発見されているため、我々の調査は地球のみならず、宇宙における生命の起源に迫る重要なデータを獲得することとなるだろう[5]。この取り組みはJAXAやNASAなどが計画している、地球外生命の探査についても重要な基礎情報を提供できると考えられる。

[8] 地球化学と連結した微生物生態学、および現代の初期地球類似環境における生物学：生物学的プロセスと地質学的プロセスには複雑なつながりがあり、これらのつながりが、初期の生命は地球化学的活動の産物であったという確信をもたらしている。我々は、生物学的プロセスと地質学的プロセスにおける過去および現在の物質とエネルギーの流れに対する知見を向上させることにより、地球や他の惑星上に生物細胞を創出させる重要な機構的因子とプロセスの特定を模索している。ELSIの研究者は、多くの異なる角度と学問分野からこの調査領域に取り掛かっているところである。現存の生物学的プロセスや、各プロセスが要求するエネルギーおよび栄養素に関する見識を得るとともに、これらを最初の細胞の誕生と関連付けることを目的とし、多様なデータセットを統合するため多くの学問領域から研究者や教授陣をELSIに招集した。我々は最近、これらの取り組みを主導し指導する役割に、微生物生理学、生化学、地球化学に専門的知識を持つShawn McGlynnを准教授に選任した。異なる環境における多様な分子の安定性を問いかけることで、ELSIの研究者は考えられる代謝の中間体と最終生成物をまとめることができた[15]。熱力学的駆動力に固有の反応プロセスを解明するため、ELSIで考案された先進的な同位体測定手法を生物学的プロセスと「非生物学的」プロセスの識別に利用した結果、化学的な経路と流量を理解できるようになった[22]。ELSIの研究者は、モデルシステムを創出することによって実験系の複雑さを軽減し、プロセスの進化において重要な因子を研究するとともに[23]、現存の生物学的機能に代わる代替機能を提案した(Mamajanov et al. 2014 Macromolecules 47:1334-1343など)。最後に、ELSIの研究者は、他の惑星上での化学物質の不安定さ[24]やその検出限界[25]を考察することにより、我々はどこから地球外の生物学的現象を探求する必要があるか、また探求できる可能性があるか、についての見識を得ることができた。これらの研究は、例えば前生物学的化合物の地質学的供給やその結果生じる地球-生命システムの共進化のほか、原始代謝や原始細胞形成など、ELSIロードマップのフェーズIの重要な構成要素に取り組むものである。

[9] 初期分子および微生物の進化と合成生物学：地球上に最初に生まれた生命の性質を推論するには、40億年の進化が、原始的で現代とははるかに異なる形態から、生物の化学的性質と構造をどのように変化させてきたかを理解することが必要になる。系統発生前の生物については、サンプル不在の理由から直接的な歴史考察が不可能なため、生命システムを成り立たせる一般原理にもとづいて推論しなければならない。このテーマにおける成果は、ゲノミクスや分子生物学を合成生物学と統合することにより、進化の構成要素や生命における不変の特性を理解するのに資するものである。

現代の深海噴出孔における水素資化性メタン生成の同位体研究により、微生物群が生息する始生代熱水系類似体において、窒素固定に伴う増殖条件と必要な金属条件が定量化された[26]。窒素固定の驚くべきエネルギーコスト範囲は、これまで考えられていたよりも類似生物の生息環境が広いことを示唆している。直接的な突然変異誘発実験により、非酸素発生型から酸素発生型の光合成に至る大規模な進化的変遷の可能性が実証されている[27]。この実験では、非酸素発生型光合成細菌である紅色細菌が、酸素発生型光合成に重要な色素である、クロロフィルaの合成能を進化させた。最近の好熱性古細菌の繊維状ウィルスにおける多様な構造の発見や[28]、好熱性古細菌ウィルスがdsDNAゲノムに限定されないことが発見されたことにより（Mochizuki、未発表）、ゲノムの不可解な進化だけでなく、初期RNAおよびDNAワールドの性質についての根本的な疑問が解明された。合成生物学の二つのプロジェクトでは、工学的なシステムを用いて生命システムを再現することにより、進化における制約を理解しようと試みている。ジェネティックコードを構成する20種類のアミノ酸のうち、1種から4種のアミノ酸を排除できる人工的なtRNAシステムを構築することで[29]、少ない種類のアミノ酸からなる翻訳システムがジェネティックコードを単純化したことが実証された。これにより、トリプトファンを含まない19種のアミノ酸のみで緑色蛍光タンパク質を人工的に進化させることができた[30]。初期の細胞膜がどのように複雑性を増し機能化するようになったのかを理解するために、試験管内で膜タンパク質を合成し、脂質膜上に自己集合させることで、機能を持った細胞膜の再構築を行った。これにより、タンパク質が膜透過・膜挿入する際のゲートとなるSecYEG複合体を人工膜上に構築することに成功した。[24, 31]。昨年参加したELSIの構成員が着手している研究は、単なるDNA配列の系統発生を超えた機能分子システムの進化的再現に重点を置いたものである。また、最古の生命にさかのぼる還元的クエン酸サイクル（Kameya、未発表）と、酸素発生型光合成の出現に機能したRuBisCOという主要な炭素固定経路における酵素の履歴と機能を、in vivoにおいて再現しようという二つのプロジェクトが試みられている[27]。

[10] 化学進化における情報の起源：RNAワールドの起源、より具体的には生命誕生以前の有機化学物質の集団がどのように情報を伴った物質の集合に遷移したのかは、生命の起源解明における極めて重要なステップである。この遷移を司った物理化学プロセスの理解は、生化学の起源の解明を目標とするELSIにおける重要な研究テーマである。これらの研究は、実験と理論的アプローチを統合することにより、RNA分子の起源に関わる次の三つの遷移を理解しようとするものである。1) Guttenburg研究員らは、雑多なバルク化学から情報を含んだ最初の化学システムへの遷移の研究を行っている。このテーマにおける主要な取り組みは、初歩的な化学プロセスから遺伝可能な情報物質の出現をシミュレーションすることに重点が置かれている[32]。2) Cleaves特任准教授が率いるチームは、理論上、情報伝達能を有するあらゆる代替物質のプールからのRNAの選択性に関する研究を行っている。このテーマにおける取り組みは、計算化学を用いて理論的に可能な代替物質を列挙し、起こりうるこれら全ての可能性と比較しRNA分子にのみ見られる特殊性を把握することにその重点が置かれている[33, 34]。3) Fahrenbach研究員、Szostak主任研究者らは、最小のオリゴマーシステムから、現生生命における拡張型の遺伝物質への遷移に関する研究を行っている。このテーマにおける取り組みは、RNAの伸長と複製における物理化学的性質を理解することに重点が置かれている[35, 36]。

## 2-2. 新たなチャレンジ

WPI拠点にふさわしい新たなチャレンジの実績について記述すること。

### (1) ELSI 教員による大学院学生指導

ELSI の最先端の研究者が大学院学生を指導することが次代の研究者育成に資することから、積極的に大学院生の教育研究指導に参画している。

### (2) 研究設備・機器共用システムの導入

ELSI における最先端の研究設備・機器を学内外の学生・研究者と共用し、ELSI 研究者との共同研究の推進、後継者の育成等に貢献すると共に研究の好循環を図っている。

### (3) 国際アドバイザーボード

世界トップレベルの学際的研究活動の推進及び国際的研究交流の展開を図るため、従来の発想にとらわれない組織運営の構築、国際的認知度を高める努力、アウトリーチ活動、東京工業大学への貢献、ホスト機関からのコミットメント等について評価及び助言を元に世界研究拠点としてさらなる発展へと繋げている。

### (4) リサーチアドバイザー及び ELSI フェロー制度の導入

各分野のトップ研究者によるリサーチアドバイザー及び ELSI フェローが研究グループ又は研

研究者に対して、専門的立場から積極的に研究指導及び助言を行っている。

#### (5) 研究業績評価制度の導入

毎年、全員参加型の年次業績評価会を2日間に渡って開催し、事前に評価対象者から提出させた業績シート (Research Activity Sheet) 及び15分程度のプレゼンテーション・ディスカッションに基づき、全ての研究者による評価を実施している。特に優秀な研究を推進していると認められた研究者に対して ELSI Award を授与し、表彰している。また、評価結果について、所長が各研究者とフィードバック面談を実施し、評価結果の内容及び今後の研究の方向性等について意見交換している。

#### (6) グローバルファンド(EON プロジェクト) の獲得

米国のジョン・テンプレートン財団から、平成27年7月から2018年3月にかけて、総額550万ドル(約6億7千万円)の研究資金を獲得し、「EON (ELSI Origins Network) プロジェクト」を開始した。ELSIはこの有力なグローバルファンドの獲得により、研究基盤の一層の強化を図り、地球と生命の起源の解明の研究を加速する。ELSIでは、今回の資金とプロジェクトを礎とし外国からのファンド獲得を積極的に行う予定である。また、グローバルファンドの獲得に向けて海外に法人格を有する拠点の設置を検討している。

#### (7) クロス・アポイントメント制度の導入

生命系分野、特に“生命の起源・進化”を牽引するトップレベルの研究者を獲得するため、大学と共にクロス・アポイントメント制度を整備し、これを適用して大阪大学の教授を主任研究者として雇用した。さらにクロス・アポイントメント制で雇用した主任研究者の本務先である大阪大学大学院情報科学研究科を本研究所のサテライトとし、生命の起源に関する研究を推進した。

#### (8) 今後5年間における研究について

ELSIのこれまでのチャレンジは、ELSIに集った異分野研究者集団のシナジーから生まれるユニークな融合研究 (fusion) をいざない、育む研究環境実現するための新たな挑戦であった。Fusionを促進するために、主任研究者の下に(若手)研究者が付いて研究を進める従来型の研究体制を脱した、オープン・フラットな研究体制を導入した。若手研究者は、自身の研究テーマ、フェーズにマッチした主任研究者、分野の異なる研究者からアドバイス・協力を得る中でオリジナルなネットワークを形成し研究を進める。各研究の方向性や進捗をシェアすると共に、ELSIのサイエンス進展に大きく貢献した若手研究者をエンカレッジする機会として年次業績評価会 (Annual Evaluation Meeting) の開催やELSI Incentive Awardを創設した。分野の異なる若手研究者達の議論から生まれた融合研究シーズの試行を促すDirector's Fundを確立した。

所長・副所長らは俯瞰的に研究動向を見守り、課題の改善/解消、異分野間の橋渡しを担うトップサイエンティスト招へいに向け、大学の協力を得つつクロスアポイント制やELSIフェロー制の導入・実施に取り組んだ。また、国内外で活躍する著名研究者、研究機関のトップマネジメント経験者を国際アドバイザリーボードメンバーやリサーチアドバイザーに任命し、多角的/客観的にELSIの研究・運営について助言を得る仕組みも構築した。外国人若手研究者のリクルート活動や化学進化研究の進展は、こうした外部有識者の資するところが大きかった。

基礎科学の協働・融合による研究を下支えする日本の外部研究資金事情が厳しいことを踏まえ、グローバルファンド獲得に向けた取り組みを外国人PI/参与を中心に展開したことも大きな挑戦であった。海外ファンディング機関・財団の調査から数えて2年を要したが、米・Templeton財団からの大型研究助成を受け、EON (ELSI Origins Network) プロジェクトを開始できたことは、ELSIの融合研究促進に弾みをつけるものであった。

次いで、今後に向けた挑戦を、融合研究推進の点から簡潔に述べる。ELSI設立から3年強をかけた種々の取り組みの結果、異分野研究者集団による協働・融合が根付き、地球・生命の起源と進化の研究における“伝統的な疑問”の一部を解きほぐしつつあるフェーズへと至った。その過程で、ロードマップ中で漠然としていた後半期間の課題が具体的にブレークダウンされてきた。これらは、設立当初に見通すことが難しかったものである一方、真の異分野融合を予感させるものである。こうした課題群の解決とそれらを統合すること、換言すると“Origins”を指向する新しいシステム科学の礎を構築することが次なる挑戦である。

### 2-3. 共同研究の推進

国内外の研究機関との共同研究の実績について記述すること。

- ・ 共同研究協定締結状況について、[添付様式2-3]に記載すること。

ELSIは、添付様式2-3に記載されている機関と共同研究を実施している。また、個々の研究者も

積極的に他の研究機関と共同研究を実施している。添付様式2-3に掲載されている代表的な研究論文は、いずれもELSI内に閉じた研究ではなく、ELSI及びELSI研究者が展開する多彩な外部研究機関との共同研究の成果である。

例えば、藤本主任研究者は欧州宇宙機関（ESA）による木星とその氷衛星の探査計画（JUICE計画）において、搭載機器開発を含む日本からの参加が円滑に進むように調整役を務めている。木村研究員は、「はやぶさ2」に搭載されたレーザ高度計（LIDAR）のチーム及びJUICEに搭載されるレーザ高度計（GALA）のチームに参画している。ゴダード宇宙科学研究所と共同研究を行っている若手研究者もあり、また惑星形成理論の研究者達は、「アルマ」や「すばる」に関わる天文学者との共同研究を実施してきた（たとえば <http://www.jicfus.jp/field5/jp/130320pressrelease/>）さらに、NASAアストロバイオロジー研究所とのパートナーシップ協定締結の議論を行っている。

EONプロジェクトにおいて、10名の若手研究者が積極的に海外の研究機関と生命の起源に関する共同研究を行っている。

## 2-4. 社会・学会からの評価

科学的成果に対する社会・学会(国内外)からの評価について記述すること。

・ 主要な賞の受賞、及び招待講演の実績を[添付様式2-4]に記載すること。

添付資料2-4に示すようにELSIは、国内外から多くの賞の受賞及び招待講演等において高い評価を得ている。

### (1) 受賞およびフェローの称号

主任研究者らシニアな研究者が紫綬褒章や日本学術振興会賞をはじめとする賞の受賞やRoyal Institute of Navigationなど著名学会のフェローとなっているだけでなく、若手研究員らもIUPAC-SOLVAY International Award for Young Chemists等若手を対象とした賞を受賞しており、各世代がそれぞれのレベルで活躍し評価されている。

### (2) 招待講演

幅広い分野でシニアクラスだけでなく若手も、国際的な学会において延べ78回の招待講演を行っている。

### (3) 国内外機関との連携ワークショップの開催

サテライト機関のハーバード大学や愛媛大とのワークショップ共同開催など計25回の研究集会を開催している。詳細は4-2-1で述べる。

## 2-5. 施設・設備等の研究環境

施設・設備等の研究環境の整備、活用状況について記述すること。

### (1) ELSI-1, 2 棟

石川台 8号館（ELSI-2：2,670 m<sup>2</sup>）に加え、新たに石川台 7号館（ELSI-1：5,000 m<sup>2</sup>）が平成27年3月竣工し、実験室及び研究者の居室を拡充し、研究に専念できる環境を整えた。また、両方の建物にコミュニケーションスペースを設け、異分野間に潜在する“言葉の壁”“文化の壁”を取り払い、様々なバックグラウンドを持つ研究者の相互理解を促進させるとともに、異分野融合研究の達成に大いに貢献している。

### (2) ELSI が所有する研究設備

- ・ **地球史シミュレータシステム**：Cray XC30 960 コアからなるクレイ社製スーパーコンピュータで、第一原理シミュレーションによる地球コア物質の物理状態の研究や、地球マントル、月形成、惑星形成、銀河形成等のシミュレーション研究に利用されている。
- ・ **FACSAria II セルソーター**：細胞や人工膜小胞をそれらが発する蛍光の大きさと波長により選別・分取できる装置であり、人工細胞研究や生物学実験に利用されている。
- ・ **Xevo G2 XS Q-TOF システム**：化学・生物進化実験の生成物として得られる種々の有機化合物を定性・定量できる装置である。ピコモルレベルの微量極性分子検出に用いられ、精密質量分析および衝突誘起解離が可能である
- ・ **超高压極微小試料分析装置**：地球内部を再現する高温高压実験を行う上で有力な装置である。超高压発生に必要な数10 μm程度の微小試料を加工するのみならず、化学分析まで行うことが可能である。ほぼ毎日稼働しており、既に約500を超える試料が加工された。
- ・ **分子内同位体分布計測システム**：分子構造の位置ごとに安定同位体比を高精度に計測するための、多段階ガスクロマトグラフィーを用いた連続流高精度安定同位体質量分析装置。まだこのシステムは世界に一台しかない新しい計測装置であり、非生物起源分子と生物起

源分子の判別や、前生物的反応経路の解明に用いている。

- (3) サテライト機関(愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター(GRC))における研究設備
- ・ 3000 トンマルチアンビル超高压装置：世界最大のDIA型装置であり、物性測定用の試料合成や相転移・融解・元素分配実験等に用いられている。年間300日程度の高温高压実験に活用されている。
  - ・ 弾性波速度測定用超音波測定装置：GRC及びSPring-8に設置されており、超高压高温下での超音波パルス法を用いた弾性波速度実験に用いられている。特殊な装置であるが、年間50回程度の放射光実験及びラボでの実験に活用されている。
  - ・ 電界放出型走査型電子顕微鏡：電子線後方散乱回折装置及びエネルギー分散型X線分析装置が付随しており、超高压合成試料の組織観察・結晶方位分布・組成分析が可能である。年間300日程度の分析に活用されている。

## 2-6. WPI補助金以外の研究プロジェクト費

WPI補助金以外の研究プロジェクト費の獲得実績について記述すること。

- ・ WPI補助金以外の研究プロジェクト費の推移、及び特筆すべき外部資金について[添付様式2-6]に記載すること。

### ELSIにおけるWPI補助金以外の研究プロジェクト費

年 度	金 額(千円)
平成24年度	283,787
平成25年度	819,004
平成26年度	616,146
平成27年度	750,373

特に、平成27年度は米国のジョン・テンブルトン財団から、平成27年7月から2018年3月にかけて、総額5百50万ドル(約6億7千万円)の研究資金を獲得した。

## 2-7. 研究成果の応用

成果の実用化、Innovationへの効果、IP実績、企業との共同研究等について記述すること。

ELSIの研究は、純粋サイエンスの範疇にあり、企業と協働して成果の実用化を図る、あるいは技術革新に寄与し得る研究を指向していない。本節の趣旨に近い事例は、①小林厚子研究員が、生体試料を扱った観察/実験研究を行う中で、生体内マグネタイト微粒子に着目した新たな凍結技術を提案・出願すると共に企業数社と共同研究に向けた情報交換を行っている事例、及び②青野准主任研究者が、高効率な化学反応シミュレータやタンパク質機能シミュレータへの適用が期待される新しい計算手法・デバイスの出願を検討する事例、に留まっているのが現状である。ELSIは、本来の研究を進める中で、スピノフ的に生まれた技術シーズの実用/応用展開については、それが結実するための支援を惜しまないものの、むしろ成果発信などを通じて一般社会の科学リテラシー向上に資することが使命であると認識しているところである。

## 2-8. アウトリーチ活動

- ・ メディア報道掲載等の実績を[添付様式2-8]に記載すること。

平成27年度に広報室を新たに設置し、添付資料2-8及び以下に示すようにELSIは、積極的なアウトリーチ活動及びメディア報道を行ってきた。

### (1) ELSI International Symposiumの開催：

平成28年の第4回国際シンポジウムでは「SAGANet」というサービスを活用し、世界中のSAGANetメンバー(一般市民含む)に講演を配信し、好評を得た。

### (2) WPIのプログラム全体の普及のためのアウトリーチ活動：

AAAS年次総会、SSH生徒研究発表会、WPI合同シンポジウムなどのWPIアウトリーチ活動に参加し、拠点だけでなくWPIプログラム全体の広報に取り組んでいる。

### (3) 小中高へのアウトリーチ：

平成28年3月末までに国内では11件、延べ243人の研究所訪問及び10件の出張授業を行った。高校の修学旅行先として旅行会社のパッケージに採り入れられた他、チラシやニューズレターを利用した学校への広報活動の結果、全国から小中高生が研究所を訪問し、広くELSIを周知することが出来ている。さらに海外からは2回中国やベトナムからの学生がELSIを訪問している。

### (4) 一般向け講演会・サイエンスカフェ及び蔵前工業会、如水会、朝日カルチャーセンター等との連携：

平成28年3月末までに18回の一般向けイベントを主催・共催し、参加者は延べ1220人に上る。

そのうち1件はニコニコ動画による視聴者参加型とし延べ337回の閲覧があった。その他、外部のイベントなどでELSIの研究者が38回の講演を行っている。なおELSIの研究者らは日本人外国人問わず積極的にアウトリーチ活動に参加している。イベントごとにターゲットを設定し、そのターゲットに見合った方式を採用している。高校生を対象としたイベントではELSIの若手研究者や関係分野の大学院生を講師とし、研究生活の話や進路相談を行えるブースを用意した。また一般の若者の科学的興味を引く企画として、映画「オデッセイ」監修のNASAの惑星科学部門長Jim Greenの講演会を、米国大使館の協力や20世紀FOX社の許可を得て行った。110人の参加者のうち6割強がイベントを機にELSIを知り、参加者の半分強が映画をきっかけにイベントに参加したと答えており、新たな層を取り込むことに成功した。このようにELSIの研究者による講演だけでなく、NASAのディレクター、ワシントン大教授、ユタ大学教授など外国人研究者を招いての講演会も行っている。また、同窓会や特定の団体と連携しELSI研究者によるシリーズ物のレクチャーを行った。この活動によりELSIの研究活動を深く理解してもらうとともに団体メンバーからの寄付金を得るなどの成果をあげている。

(5) SNS :

ELSIの公式ツイッターは、ツイート数約630件フォロワー数約880名と、WPI全拠点の公式アカウントの中でもトップのフォロワー数である。ほぼ毎日のペースで拠点の活動やお知らせだけでなく、生命と地球の起源の研究に関わるニュースをツイートし、分野全体への理解と関心を深める取り組みを行っている。

(6) ELSIの研究活動の世界への発信 :

ELSIの研究紹介記事を日英で作成し、WEBサイトやニューズレター等刊行物にて国内外の研究コミュニティや一般社会へ発信している。日本語版は高校生以上が、英語版は異分野の研究者が理解できるレベルで編集している。紹介記事に付随する解説動画、図表、写真については原則転載を認めメディア等で取扱いやすい仕組みを取り入れている。重要な研究成果については、プレスリリースや記者会見を行っているが、特に海外へはVocusというリリース配信サイトへの投げ込みを行うなど速報性も考慮して世界中のメディアへ研究を発信することを心掛けている。

(7) 海外の機関からの訪問対応 :

海外の大使館や大学・研究機関から13件、延べ124人の視察訪問があり対応を行った。研究所紹介のビデオ上映やプレゼンの他、研究所内ツアーを行っている。

(8) その他 :

① 他の拠点との連携 (2015. 12. 10 ELSI/Kavli IPMU 合同一般講演会「起源への問い」)

WPI拠点であるKavli IPMUと合同で、お台場・日本科学未来館にて一般向けイベントを行った。両拠点長と哲学者の先生が起源をテーマに講演と鼎談を行った。申込は定員を大きく上回り抽選となり当日は298名の参加があった。また10社のメディアが参加し講演の様子が雑誌で取り上げられるなど、拠点とWPIの広報において大きな成果をあげることが出来た。

② “Tokyo Tech Inspiring Lecture Series”

標記イベントは東工大広報とELSI広報が主体的に企画し開始したもので、ハーバードサテライト・ディレクターでノーベル賞受賞者のSzostak主任研究者ら4名のELSI研究者が講演を行った。参加者数は340名と、大学で行われている最先端の研究を紹介するイベントとしては学内最大規模のものであり、本イベントは東工大の連続イベントとしてノウハウとともに引き継がれた。

### 3. 異分野融合 (2ページ以内)

- ・ 融合研究についての論文一覧とその解説を[添付様式3]に記載すること。

#### 3-1. 戦略的融合領域創出に向けての取り組み状況

##### (1) 大型研究資金獲得の取り組み

ELSIのサイエンスは、Fusionなくしてなし得ないこと、及びきわめて基礎的なサイエンスであることに特徴がある。融合研究を安定的に推進するためには、一定程度の規模で研究資金を獲得する必要があるが、イノベーション指向・出口指向の研究助成プログラムが増加する最近の競争的研究資金事情は、ELSIにとっては厳しいものと言わざるを得ない。ELSIのトップマネ

ジメントは、設立当初からこの点に危機意識を持って融合研究のための大型研究費獲得に向けた議論を重ね、実行に移してきた。

その結果として、2014年度には原始的な生命が誕生したと考えられる、地球誕生から約6億年間（46-40億年前）の「冥王代」に焦点をあて、生命がいつ、どこで、どのように誕生したかを、最先端の地球惑星科学、生命科学および有機化学などを結集し明らかにする新たな学術領域の創成を目的とした研究提案（タイトル：冥王代生命学の創成）が科研費・新学術領域研究に採択された（代表：黒川副所長、ELSI関係者への配分はおよそ5億円）。こうした取り組みは愛媛サテライトでもなされ、2015年度には土屋連携研究者を代表とする新学術領域研究、「核 - マントルの相互作用と共進化 ～統合的地球深部科学の創成～」が立ち上がった（5年総額約10.9億円）。当該領域は、地球深部での元素分配や同位体分別を実験と理論の両面から決定することにより進化の時間軸を明確にし、地球内部ダイナミクスを支配する核-マントルの相互作用と共進化の理解を目指すもので、ELSIにおける地球の起源とその進化の研究促進に大きく貢献するものと期待されている。

そして、最も大きな成功は、米国財団からの支援（33ヶ月・総額US\$ 5.6M）を受けて2015年7月から“ELSI Origins Network (EON)”プロジェクトを開始できたことである。Hut主任研究者／参与は、それまでに培ってきたネットワークも駆使しながら財団との交渉、プロポーザルの作成を先導し、ELSIを採択に導いた。EONプロジェクトの獲得は、ELSIに融合研究を担う人材とリソースをもたらしただけでなく、海外ファンドの獲得ノウハウを会得したという点でもベンチマークとなる成功事例と言える。ELSIでは、EONプロジェクト獲得の経験に基づき、“Fund Raising Committee”を立ち上げ、海外ファンドの調査や海外事務所立ち上げ準備を本格化させているところである。

## (2) Bridge Builderの招聘

生命の起源に関する研究を主導する主任研究者級の研究者を拡充することは、ELSI設立当初からの課題であり、Program CommitteeやWorking Groupからも指摘をうけてきたポイントである。ELSIは、生命の起源に関連する特定の分野にけるトップランナーよりも、広い視野を有し、かつELSIで異なるバックグラウンドを有した研究者達が展開している共同研究に横串を通す形で新しい融合領域形成の道筋を先導する人材、すなわちBridge Builderの招聘に注力した。若干時間を要したものの、2015年、Smith博士及び鎌形博士というELSIの戦略を共有できる2名のBridge Builderがそれぞれ、主任研究者及びELSIフェローとして着任するに至った。Smith主任研究者は、ELSIにおける微生物学の位置づけや初期代謝系の進化に対するアプローチを明確にし、ロードマップに示された課題、「原始バイオシステム」、「より複雑な系への変遷」を具体化した。鎌形フェローは、初期の代謝ネットワークの進化を解明するための糸口となる原始のエネルギー保存システムと現代のそれをつなぐ役割を担っている。彼らの加入により、化学と生物学が架橋されつつあり、ELSIとしての生命の起源を「地球化学的活動から重合体が介在する生化学反応ネットワークへの遷移」と定義づけするに至った。

## (3) 年次評価会 (Annual Evaluation) = 相互理解の促進

異なるバックグラウンドを持つ研究者が協働する時、まず必要になることは、互いに相手の研究（分野）／言葉をシェアすることだろう。ELSIでは後述するように様々な形で異分野研究者が対話・交流する機会を持っている。そのうち、トップマネジメントが主導するものが、年1回、ELSIの全研究者（サテライトを含む。）が参加して開催する年次評価会である。全研究者は、事前に書面（Research Activity Sheet）で一年間の活動をまとめると共に、15～20分のプレゼンテーションを行う。他者の研究に対する理解を深め、以降の研究に役立ててもらうことを目的として、スコア／コメントシートを配布し、若手研究者は主任研究者を、主任研究者は全研究者を採点する双方向評価を行っている。評価の判断基準には、異分野融合研究に積極的に関わろうとしているか、あるいは若手研究者については、主任研究者に頼らず独立して研究を進める姿勢があるか、といった項目が含まれている。研究者個人にとっては、他者がどのような視点で自身の研究を見ているのかを知る機会であり、トップマネジメントにとっては、ELSIの研究の進捗を把握し、ロードマップ更新のための議論のベースとなる他、オープンな研究体制の中で異分野の研究者同士が協働できているか、不足する点は何かを知る拠り所にもなっている。なお、スコアシートなどから、ELSIのサイエンス進展に貢献していると判断された若手研究者には、研究費の配分、賞与、雇用期間の延長などからなるIncentive Awardを授与し、研

究に対するモチベーションの維持・向上を図っている。また、所長は年次評価会終了後に、スコアシートに基づき各研究者と個別に面談する機会を持ち、率直な意見・要望を収集し拠点運営に活用している。

#### (4) オープン・フラットな研究実施体制の構築と若手研究者リクルート戦略

恐らく最も地味な取り組みではあるが、現在のELSIにおける異分野融合／異分野協働の土壌を作りだしているのは、標記のオープン・フラットな研究実施体制の構築と若手研究者のリクルート戦略にあると言えるだろう。「2-2. 新たなチャレンジ」に記したように、ELSIは、設立当初から日本の伝統的な講座制に類似する研究体制を取っていない。融合研究の担い手である若手研究者は、特定の主任研究者らから独立し、自らの研究テーマをELSI内外の研究者らと推進する。所長はじめ主任研究者は若手研究者のメンターの役割を持つものの、「研究」については主従関係を持ち込まないように努めてきた。

オープンな研究体制の中に気概を持って飛び込んできた若手研究者が、ELSIでの立ち位置を見失うことのないように、リクルートのプロセスも重視している。書類選考を経て面接選考に招く際は、必ずELSIセミナーでプレゼンテーションをすると共に、研究テーマが近い、あるいは関連する研究者とディスカッションを重ねる機会を設けている。必要に応じて、研究テーマをファインチューンした上で、ELSIでの研究に就いてもらうようにしている。こうした取り組みが奏功し、いわゆる“たこつぼ的研究”からの脱却が自然となされるようになったところである。

### 3-2. 研究者間のボトムアップ的融合研究創出に向けての取り組み状況

#### (1) 所長ファンド(ELSI Director's Fund)

若手研究者の自由で柔軟な発想や異なるバックグラウンドを持つ研究者同士の議論から生まれたアイデアの可能性を試す機会を与える目的でELSI Director's Fundを創設・運用している。研究の芽を育み、手ごたえを得たものについては科研費をはじめとする競争的資金を獲得し本格的な展開へと促す意図もある。本制度は、融合研究の芽を見出し、その助走をサポートするものであることから、個人からの提案は受け付けない。必ず分野が異なる研究者複数名でプロポーザルをまとめることが要件である。運用当初は年1回の募集、支援規模は1課題当たり年間100万円を上限とする限定的なものであった。その後、検討グループからの提案や若手研究者の要望も踏まえ、募集を春と秋に行うと共に、実験研究者ばかりでなく理論研究者にも使いやすい財源となるように、1課題あたりの支援額の上限を300万円、100万円、50万円の3段階に分けるなど制度の拡充を図った。これまでに、計19件の課題を採択している。思わぬ研究者の組み合わせによるユニークなプロポーザルが見られ、今後の深化・発展に期待するところである。また、初期に支援した研究をベースに科研費など外部資金プログラムに応募するケースも見られることから、支援課題について追跡調査を行い中盤期以降の本制度の在り方を検討することとしている。

#### (2) スタディ・グループ, ELSI Seminar, ELSI Assembly, ELSI Youchien

ELSI発足から研究人材が揃うまでのおよそ2年弱の期間、ELSIの研究目標を共有すること、研究者の相互理解を深めることを目的として、Planetary water, Prebiotic chemistry, Biosphere evolution, Solid earth, Planetary exploration & lifeをキーワードに据えた5つのスタディ・グループを設置していた。ELSI発足時に着任した研究者は、最低2つのグループに属し勉強会をする中で異分野研究者とのコミュニケーションを図り、協働の形を生み出していった。Solid earthのグループには愛媛サテライトのメンバーも参画し、“Monthly one day workshop”を分担した。上記で触れた愛媛大学サテライトにおける大型科研費プロジェクトのベースの一端は、スタディ・グループが基点となっている。同様のことは、もう一つの大型科研費プロジェクトである冥王代生命学の創成やEONプロジェクトについても言える。

研究者の数が増えた後は、一連のスタディ・グループの活動は、ELSI Seminar, ELSI Assembly, ELSI Youchienへと複数に発展し、様々な分野の基礎的から世界の最前線の動向を理解するまで幅広いレベルの需要に答えるようになった。ELSI Seminarは外部研究者を講師に迎えての講演会・ディスカッションの会であり、ELSI AssemblyはELSI研究者によるサイエンスミーティングである。2015年度は、PI Scopeと称し主任研究者の展望を聞いた上で議論を行う回と、話題提供を行う数名の若手研究者を中心にRound table形式で議論する回を交互に行うスタイルをとった。ELSI

Youchien (幼稚園をローマ字読みしたもの) は、若手研究者が自身の研究内容、専門分野を研究者だけでなく支援スタッフにもわかるように、文字通り平易に伝えることで、分野間に立ちはだかる障壁を取り除くことを目的としている。

このように、多様な形で異分野研究者の話を聞き、議論する機会を設けることで ELSI の融合研究スタイルが醸成されていると言えよう。例えば、冥王代表層環境における生命誕生場の復元や、自然原子炉間欠泉で生命が三段階で進化したとする説の提案などはこの成果を顕著に反映した例といえる。

### (3) ボトムアップ型ワークショップ等の開催支援

上記(2)の取り組みは ELSI 内部における Fusion の醸成を意図したものであるのに対し、標記の取り組みは ELSI の研究を外に向けてアピールすると共に、外部研究者も巻き込んだ Fusion のためのものである。研究交流委員会は研究者からのワークショップ開催のプロポーザルを審査し、必要と認められる予算を配分する。これまでに17回の支援を行い、ELSI の研究者と外部研究者による新たな異分野間共同研究の端緒となるとともに、研究所の知名度の上昇にも一役買っている。また、本支援を活用したワークショップの成果の一部は、Physics of the Earth and Planetary Interiors 誌、Origins of Life and Evolution of Biospheres 誌、Geoscience Frontiers 誌の特集号として公表されている。

## 4. 国際的な研究環境 (4ページ以内)

### 4-1. 国際的頭脳循環

#### 4-1-1. 国際共同研究の実績 (サテライトを除く)

##### (1) ELSI との共同研究実績

ELSI 及び ELSI サテライトは多数の国際共同研究を展開している。ここでは、ELSI が主導的な役割を務め、かつ、研究成果が ELSI 内の研究チームにフィードバックされている代表的な4件に絞って報告する。共同研究の最初の動機が、ELSI のサイエンスと一見縁遠いところに置かれていたものの、ELSI のサイエンスが触媒となり、ELSI のサイエンス進展に資する国際共同研究となっているものもある。ELSI が国際的な研究ハブとして機能し始めていることがうかがえる事例とも言える。

#### ◆ 地球深部 (ミネソタ大学・カリフォルニア大学サンタバーバラ校)

本国際共同研究グループは、各種物質の第一原理計算によって原子スケールで地球のコアやマンツルの組成を求める研究を進めている。硫黄を含む溶融鉄合金について、地球外核に相当する温度-圧力条件のもとで一連の第一原理計算を行った結果、重量ベースで16%程度硫黄を含む溶融鉄合金の密度は、仮に溶融鉄合金中の軽元素が硫黄のみと仮定して地震学的観測から得たそれと非常に近い値を示した。ここで得られたデータは、今後、地震学的制約と比較を行うために、コアやマンツル物質の物性定数を圧力・温度・硫黄濃度の関数として求める研究に利用される予定である。さらに、外核の温度圧力条件下で、純粋な溶融鉄のシミュレーションを行い、溶融鉄の状態方程式を立てて音速の値を推定した。その結果、溶融鉄についても適用できると考えられていた Birch の法則 (密度と音速の間には、温度によらず線形関係が存在する) に従わないことが明らかになった。さらに、このグループは、理論研究と実験研究の協働により、非常に低温な沈み込みスラブに含まれる下部マンツルで安定と考えられる新しい含水ケイ酸塩を見出した。この新しい相は、水が下部マンツルへ入るメカニズムを供するもので、初期地球の含水量推定に資する成果である。

【代表的な論文など】 Umemoto K, Himmetoglu B, Wang J-P, Wentzcovitch RM, Cococcioni M. 2015. Searching for high magnetization density in bulk Fe: the new metastable Fe-6 phase. Journal of Physics-Condensed Matter, 27. DOI: 10.1088/0953-8984/27/1/016001.

#### ◆ 地球磁場形成 (カリフォルニア工科大・マサチューセッツ工科大)

惑星の磁場は、大気侵食をもたらす太陽からの帯電粒子をそらすので、生命の起源を知る上での根源的な問題は、地球に似た惑星において、いつ磁場が形成されたのかという問題とも言える。地球に関して言えば、最初のダイナモ作用について制約を与える冥王代の良好な岩石記

録は存在しない。しかし、西オーストラリアで採取された32億年前の砂岩は、少なくとも44億年前のジルコン鉱物粒子をわずかであるが有している。このジルコン鉱物には、マグネタイトをはじめ様々な鉱物がごく微量含まれている。従って、超高解像度の磁気イメージング技術が、地球のダイナモの起源を探る上での制約条件を与える可能性を持っていると考えられる。本国際共同研究グループは、磁気トンネル接合技術を用いて、サブミクロンのステップ幅でイメージングすることができるシステムの開発を含めてジルコン鉱物の分析から地球磁場の形成過程解明を目指している。一方で、西オーストラリアの基盤岩が、それらの小さなジルコン中で初生磁化を保てないほどの温度まで熱的変成作用を受けたか否か、という文献間の激しい議論がある。そこで、本国際共同研究グループとは異なる見解を示すロチェスター大学のグループや、この問題に取り組む研究者に呼びかけ、2015年秋に国際ワークショップを日本で開催するなど、国際共同研究の枠組みを超え、世界を巻き込み“地球磁場形成”という大問題に取り組んでいる。

【代表的な論文など】 International Workshop “Geophysical & Geochemical Constraints on Early Planetary Dynamos”, 2015年9月15~19日, 於: 河口湖

#### ◆ 化学進化（クリーヴランド州立大学、物質・材料研究機構、理化学研究所）

本国際共同研究グループは、「どのようにして生体の構成要素が非生物的に合成され得たのか？」という本質的な課題と対峙すべく、前生物的反応をシミュレーションするための理論的アプローチについて検討を進めてきた。そして、粘菌アメーバから着想を得た動的システムモデルを改良し、制約充足問題に対して迅速に安定解を求めることが可能なユニークなモデルを構築するに至った。こうした成果も活用して、ELSIの化学進化グループは、最小限の代謝回路や自己複製するRNA配列を得ることを目的として、安定な有機分子やRNAの二次構造の形成ダイナミクスをシミュレーションするなどしている。生命の起源に関するシナリオは多数あるが、全て、実験的検証や理論的研究が求められている。本国際共同研究は、理論的研究に裏打ちされた実験的検証を可能とするものと位置付けられる。

【代表的な論文など】 Aono M, Kim SJ, Hara M, Munakata T. 2014. Amoeba-inspired Tug-of-War algorithms for exploration-exploitation dilemma in extended Bandit Problem. *Biosystems*, 117: 1-9. DOI: 10.1016/j.biosystems.2013.12.007.

#### ◆ 合成生物学（マサチューセッツ工科大学・マサチューセッツ総合病院）

本国際共同研究グループは、RNAやペプチドを含んだ微小な膜小胞を人工的に構築することから原始細胞の研究を進めている。特にRNAは、代謝プロセスの実行と並行して、当該世代の原始細胞から次の世代を複製するためのテンプレートとして機能するなど、一連のプロセスを制御している。これは、鋳型効果に由来するにすぎない触媒が、最終的には現在の複製システムへと移行したダーウィンの進化の最初の一步をもたらすことが可能であることを示唆するものである。非酵素的な鋳型依存のRNA複製メカニズムの基本的な理解が進むと、RNAから地球にありえた生命の諸起源についての重要な知見が得られるものと期待される。2014年度、Szostak主任研究者とFahrenbach研究員は、RNAモノマーの鋳型-プライマー複合体への結合に関する熱力学とその結合に続く鋳型に従った反応の化学速度を調べることから、鋳型依存合成の前生物学的メカニズム、すなわちRNA複製の研究を進めてきたところである。

【代表的な論文など】 Izgu EC†, Fahrenbach AC†, Zhang N, Li L, Zhang W, Larsen AT, Blain JC, Szostak JW. 2015. Uncovering the Thermodynamics of Monomer Binding for RNA Replication. *Journal of the American Chemical Society*, 137: 6373-6382. DOI: 10.1021/jacs.5b02707. († Equal Contributions)

### (2) 研究者個人の共同研究実績

#### ◆ 地球深部

Ballmer特任助教らは、マントル上昇と火山活動の仕組み、マントル深部へと降下するリソスフェアの停滞及びマントル深部から上昇するプルーム内部の化学的不均質性に関する研究をハワイ大学やネバダ大学の研究者らと展開している。（例えば、Ballmer MD, Conrad CP, Smith EI, Johnsen R. 2015. Intraplate volcanism at the edges of the Colorado Plateau sustained

by a combination of triggered edge-driven convection and shear-driven upwelling. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16: 366-379. DOI: 10.1002/2014gc005641.)

#### ◆ 惑星形成論

地球の水の起源や惑星進化における水の影響を明らかにすることは、惑星形成理論グループの重要な研究課題である。井田主任研究者らのグループは、カリフォルニア大学サンタクルーズ校及び北京大学の研究者らと「氷ダスト粒子が外部領域の円盤内で凝縮した後、ガス抵抗により内部へと移動した」ということについて、既往のシナリオを検証すると共に、新たなシナリオを検討した。彼らは、少量の氷粒子が地球型惑星に降着すること、降着の効率が惑星上の水の量を決定することを見出した。(例えば、[Ida S, Lin DNC, Nagasawa M. 2013. TOWARD A DETERMINISTIC MODEL OF PLANETARY FORMATION. VII. ECCENTRICITY DISTRIBUTION OF GAS GIANTS. \*Astrophysical Journal\*, 775. DOI: 10.1088/0004-637x/775/1/42.](#))

#### ◆ 惑星探査 1

藤本主任研究者は、インペリアル・カレッジ・ロンドン、アテネアカデミー、ロスアラモス国立研究所、フランス国立科学研究センター、ボストン大学、ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドンの研究者らと土星探査機カッシーニが得た、土星の弧状衝撃波によるプラズマや磁場データの解析を進め、高マッハ数衝撃波で、かつ、衝撃波法線方向と上流の磁力線が平行な領域で生じる相対論的電子加速の解明に取り組んだ。超新星残骸は、X線で明るく輝くが、それは超新星残骸の衝撃波において高エネルギー電子が加速されることを示す。これまでの理論的考察では、平行衝撃波が電子加速にとって好適な場所とされてきたが、一方で、太陽系内の地球近傍での観測結果はそれとは反対の結果を示していた。この研究で扱う土星の衝撃波は、地球の場合とは異なり、衝撃波のマッハ数が超新星残骸において予測される値と同程度であった。データ解析の結果は、これまでのマッハ数が低い場合での研究とは対照的に、十分にマッハ数が高ければ、平行衝撃波は相対論的電子をよく加速させるものであることが判明した。この研究は、高エネルギー天文学における最も重要な問題であった衝撃波での粒子加速について新たな知見を得たことに加えて、JUICEのような外惑星ミッションが宇宙プラズマ物理学のテーマに対しても高い潜在可能性を有することを示したという点でも意義深いものである。(例えば、[Masters A, Stawarz L, Fujimoto M, Schwartz SJ, Sergis N, Thomsen MF, Retino A, Hasegawa H, Zieger B, Lewis GR, Coates AJ, Canu P, Dougherty MK. 2013. Electron acceleration to relativistic energies at a strong quasi-parallel shock wave. \*Nature Physics\*, 9: 164-167.](#))

#### ◆ 惑星探査2

藤井特任助教は、系外惑星のバイオマーカーの同定における衛星の影響を指摘した論文を、トロント大学の研究者らと共同でまとめた。これは、地球型惑星に衛星タイタンのような大気を持つ衛星が付随していた場合に、それらのスペクトルが現在および近い将来の観測装置では二つの天体に起因するものとして分離できないため、たとえば「酸素とメタンが共存することから大気が大きく非平衡である」と判断する指標が使えなくなることを指摘するものである。それと同時に、それらを分離するのに必要な観測条件や、誤った発見を除外する可能性について議論した。これは、系外惑星の大気組成の同定における今まで考慮されていなかった問題を浮き彫りにすることになった。(Rein H, [Fujii Y](#), Spiegel DS. 2014. Some inconvenient truths about biosignatures involving two chemical species on Earth-like exoplanets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111: 6871-6875. DOI: 10.1073/pnas.1401816111.)

#### ◆ 地質学・地球化学1

Kirschvink主任研究者らは、ワシントン大学及びセント・アンドルーズ大学の研究者らと、初期地球の岩石試料中の初生鉱物と二次鉱物を識別するために、新たな古地磁気学的手法を構築した\*。そして、この手法と、硫黄同位体を用いた大気化学の追跡手法を組み合わせ、大気変動は後期太古代に始まったことをNature誌に報告した\*\*。( \*Fisher, W. W, Fike, D. A., Johnson, J. E., Raub, T. D., Guan, Y., [Kirschvink, J. L.](#), Eiler, J. M., SQUID-SIMS, a useful approach to uncover primary signals in the Archean sulfur cycle. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*, 111(15), 5468-5473, 2014.

www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1322577111 及び Kirschvink JL. 2014. SENSORY BIOLOGY Radio waves zap the biomagnetic compass. *Nature*, 509: 296-297.)

#### ◆ 地質学・地球化学2

吉田主任研究者とGilbert特任助教は、CNRS・ナント大学の研究者らと、NMR（核磁気共鳴）による分子内同位体測定が2.1%以下の高精度で、異なるラボ間や異なる分光計間で再現可能であることを示した。そして<sup>13</sup>C同位体のNMR測定から、天然脂質中の分子内同位体分布は一様ではないこと、また、位置の違いによる分布の相違は20%までであることを観察した。この手法は、初期地球における脂質の生物地球化学的理解を深化させる新たなツールを構成するものとなるだろう。彼らの研究で観察された生物起源の脂質に関する特異な分布パターンは、新たなバイオマーカーとして使える可能性があると考えられる。（例えば、Bayle K, Gilbert A, Julien M, Yamada K, Silvestre V, Robins RJ, Akoka S, Yoshida N, Remaud GS. 2014. Conditions to obtain precise and true measurements of the intramolecular C-13 distribution in organic molecules by isotopic C-13 nuclear magnetic resonance spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 846: 1-7. DOI: 10.1016/j.aca.2014.07.018.)

#### ◆ 化学進化

Cleaves特任准教授らは、コペンハーゲン大学、ハワイ大学、ドイツ航空宇宙センター、メリーランド大学バルティモアカウンティ校、ジャクソン州立大学の研究者らと、計算科学の新しい手法を開発し、現行生物が用いている20種のアミノ酸のセットは、存在可能な約2000種のアミノ酸からランダムに選択された複数のセットと比較して、複数の物理化学的特質が張る空間の広い範囲をカバーできるという意味で、極めて「適応的」であることを明らかにした（Ilardo M, Meringer M, Freeland S, Rasulev B, Cleaves HJ. 2015. Extraordinarily Adaptive Properties of the Genetically Encoded Amino Acids. *Scientific Reports*, 5: 6. DOI: 10.1038/srep09414.)

#### 4-1-2. 海外で活躍する世界トップレベルの研究者の拠点滞在実績

主任研究者としての参加、共同研究者としての短期滞在、拠点主催のシンポジウムへの参加状況等について記述すること。

・ 全研究者中の外国人研究者数とその年次推移を[添付様式4-2]に記載すること。

ELSIは、拠点立ち上げ当初から①魅力的なリーダーを招聘する、②世界から優れた頭脳（研究者）を獲得する、③前記①②のために、研究環境及び研究支援体制を充実させる、という世界トップレベルの研究拠点としての要件を念頭に運営を進めてきた。その結果、主任研究者17名中7名が海外で活躍する外国人研究者という陣容となった。外国人主任研究者7名のうち4名は日本に常時滞在于して研究を推進しており、単に数合わせでない、真に世界トップクラスの外国人研究者が集う研究拠点となっている。Eric Smith主任研究者がELSIに常時滞在し研究することを決定した理由が、「ELSIでは、①～③に加え地球の起源及び生命の起源に関して世界トップレベルの研究者と研究できることである」と述べたことは、ELSIが世界トップレベルの研究拠点としての環境を作り上げた査証である。

ELSIは、ELSIに常駐する外国人研究者を充実させる取り組みと並行して、海外研究機関からのビジターを積極的に受け入れている。特に、数ヶ月から1年程度と一定程度以上の期間、ELSIに滞在するビジターは、ホストとなるELSI研究者との共同研究を推進させることに加えて、ELSI若手研究者に新たな視点や問題解決の糸口をもたらす、あるいは研究者間のブリッジビルダー的役割を担うなど、ELSIのサイエンスの前進・深化に不可欠なものとなっている。この“教え”を抛り所に、特にサバティカル休暇中のトップクラス研究者の招聘に注力しているところである。

#### 4-1-3. 若手研究者の採用・就職状況

ポスドクを含む若手研究者の採用・就職の状況について記述すること。

・ ポスドクの国際公募の実施と応募・採用状況を[添付様式4-3]に、外国人ポスドク比率を[添付様式4-4]に、ポスドクの就職先の実績を[添付様式4-5]に記載すること。

ELSIでは、若手研究者の選考において、彼らが抱く疑問の大きさを測り、既存の概念に囚われない発想・アプローチでそれに挑むことができる人材を求めてきた。外国人主任研究者をヘッドとするリクルート委員会が、この選考ポリシーをアピールすると共に、欧米のリクルート様式を踏まえたELSIならではの若手研究者リクルーティング法を確立した。JST（JREC-IN）、*Nature*誌、*Science*誌、ELSIウェブサイト、関連する学会やコミュニティのメーリングリスト等を活用して国際公募を実施した結果、添付様式4-3及び4-4に示すように、世界31カ国から206名の応募があり、その殆ど（86%）が外国人若手研究者からのものであった。なお、ELSIにおける雇用期間は原則3年としているが、毎年実施している年次業績評価会の結果に基づき、特に優秀な若

手研究者は雇用期間を2年延長し5年としている。また、添付様式4-5に示すようにELSIに採用された51名の若手研究者のうち17名がELSIでの研究経験を経て、世界の一流研究機関へのプロモーション（昇進）を果たしている。これは、ELSIがキャリアパス機関として認められている証である。

#### 4-1-4. その他

日本人研究者への国際経験の促進策や、世界的な頭脳循環を背景として当該拠点が研究者のキャリアパスに組み込まれている好例があれば記述すること。

##### (1) 海外派遣プログラム

ELSIに常駐する若手研究者が、海外研究機関で一定期間研究を展開することを促すためのサポートについての一つの対応策として、a) 自身が過去に在籍したことが無い海外研究機関を訪問し、b) 数週間以上、訪問先に滞在して自身の研究課題を進める/受入研究者と共同研究を実施する、の2点を満たすプロポーザルについて、渡航費・滞在費の一部をサポートするプログラムを創設し、運用を開始したところである。

##### (2) EONプロジェクトデザインの際の工夫

EONプロジェクトの研究体制をデザインするにあたり、ポスドク研究者に対して、任期の概ね半分の期間は、海外研究機関で自身の研究を実施する研究計画を求めることとした。海外受け入れ機関の内諾を、EONプロジェクト研究員に応募する要件とした結果、国際経験をいとわない前向きな若手研究者確保に繋がった他、ELSI全体に海外研究機関での研究を検討する雰囲気醸成されつつあると言った波及効果が見られるようになった。

## 4-2. 環境整備

### 4-2-1. 国際的な研究集会の開催

主な国際的な研究集会の開催実績について記述すること。

- 国際的な研究集会開催の回数と代表例（年度別に2件以内）を[添付様式4-6]に記載すること。

#### (1) ELSI「キックオフ」シンポジウム

ELSIの最初の国際シンポジウムは、東京工業大学の蔵前会館で2013年3月27日のELSI開所式に続いて2日半にわたって開催された。東京工業大学や愛媛大学、プリンストン高等研究所（IAS）、ハーバード大学のようなELSIのサテライト研究機関のほか、海外の研究機関やカリフォルニア工科大学、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校から多くの人が参加した。国内研究機関や海洋研究開発機構（JAMSTEC）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）など、合計で30の研究機関がこのイベントに集まり、参加者は140名を超えた。将来におけるELSIの戦略にとどまらず、多様な研究領域に関する知見の向上に向けて、すべての参加者が活発な議論を行った。

#### (2) ELSIの国際シンポジウム

ELSI国際シンポジウムはELSIにとって年次イベントであり、毎年、海外や国内から招待講演者が集まり、ELSIの科学に関連する優先課題に取り組む機会を提供している。第2回のシンポジウムは、「地球—生命システムの起源と進化」をテーマに2014年3月に開催し、ミシガン州立大学やフランス国立科学研究センター（CNRS）、ワイツマン科学研究所、コートダジュール天文台、ならびに世界中の数多くの主要研究機関から招待講演者をお迎えした。このイベントには145人が参加した。

第3回のシンポジウムは「宇宙に生命はいるのか」というタイトルで開催した。グラスゴー大学、欧州宇宙機関（ESA）、ユトレヒト大学、メキシコ国立自治大学（UNAM）、アメリカ航空宇宙局エイムズ研究センターなど、様々な研究機関から144人の参加者が集まり、「宇宙には、地球以外に生命が存在するか」という根源的な疑問について議論した。毎日、その日のテーマに関連するポスター論文も発表された。

4回目のシンポジウムは、過去3回と異なり、3日半のイベントとして開催した。「初期の地球、金星、火星 生物の起源に対する三つの実験」をタイトルとし、比較惑星科学が初期の地球と生命の起源に対する我々の理解にどのように役立つかを探求した。実際には生命の存在する惑星の例は一つしかないが、火星および金星を生命発生の失敗例として活用することが可能である。149人の参加者がこのテーマを共有し、議論し、有意義な時間を過ごした。

## (3) ELSIの構成員が企画する国際的なワークショップ/セミナー

2013年の「キックオフシンポジウム」から始まり、ELSIは2013年7月、2014年9月、2015年9月と、これまでに全期間を通じて国際的なワークショップや会議を企画し、主催した。主なワークショップは以下のとおりである。

「地球の核の輸送特性に関するワークショップ」（2013；山梨県河口湖；29人が出席。うち18人は海外研究機関からの参加）は、主要な研究者を集め、研究結果の相違について考察するとともに、地球の核のダイナミクスや地球深部システムの進化との関わり合いという背景状況において、地球の核の熱伝導率の上方への修正が確実なものであるかどうかをともに検討することを目的とし、ELSIの所長である廣瀬敬が企画したものである。

「国際アストロバイオロジーワークショップ2013、日本アストロバイオロジー・ネットワークによる第6回年次ワークショップ（JABN6）」（2013；神奈川県相模原市；157人が出席。うち23人は海外研究機関からの参加）は、JAXA／宇宙科学研究所（ISAS）相模原キャンパスにおいて、2日間の日程で開催された。これは、宇宙生物学研究者間の学際的な対話と、日本におけるこの領域の進展を促進することを目指したものである。

「生命の起源のモデリングに関するIASワークショップ」（2014年；米国ニュージャージー州プリンストン；10人が出席。うち4人は海外研究機関からの参加）は、ELSIの主任研究員（PI）で参与でもあるPiet Hutによって企画され、ELSIサマースクールのフォローアップワークショップとして、米国におけるELSIのサテライトの一つであるIASで開催された。人工的生命シミュレーションプログラムであるAvidaの開発で有名なミシガン州立大学のChris Adamiも招待講演者の一人である。

「RNA、ペプチド、小胞、太陽系外惑星－初期の地球およびその他の惑星体における生命の化学的起源」（2014；米国マサチューセッツ州ケンブリッジ；25人が出席。うち10人は海外研究機関からの参加）は、Albert Fahrenbach氏の助力を得て、ELSIとハーバード大学のOrigins of Life Initiativeが共催したものである。同氏は、一年の一時期はハーバードのJack Szostak研究室で、また別の一時期は東京のELSIで研究活動を行っている。このワークショップでは、起源研究の専門家が一同に会し、生命の起源の理解に向けた過去、現在、将来の研究について議論することができた。

「合成生物学は人工知能に何を提供できるか？－ECAL2015サテライトワークショップ「SB-AI」」（2015；英国、ヨーク；20人が出席。うち19人は海外研究機関からの参加）は、イタリアのシチリア島で開催されたECAL 2013と、米国のニューヨークで開催されたALIFE 2015の二つの国際会議に続くセッションとして、ELSIの研究員である車兪激が企画した。

「初期の惑星ダイナモに関する地球物理学的、地球化学的制約」（2015；山梨県河口湖；21人が出席。うち10人は海外研究機関からの参加）は、特に太陽系の原始磁場に関する我々の知見を押し戻す近年の試みから生じた問題に関して、ELSIのPIであるJoseph Kirschvinkが企画したものである。

## (4) ELSIのサマースクール

ELSIのサマースクールは、2013年に神戸の惑星科学研究センター（GPS）でスタートした、理化学研究所計算科学研究機構（RIKEN/AICS）とELSIの共催による5週間のイベントである。ELSIのPIで参与のPiet HutとPIの牧野淳一郎が、惑星系の形成と進化の大規模シミュレーションというトピックに関する形式張らない「研究ワークショップ」というコンセプトでスクールを企画し、30人が出席した。このうち8人は海外からの参加であった。このイベントの最も重要な特徴は、米国コロラド州ボルダーのサウスウェスト研究所からの二人の招待者による招待講演、Bill Bottkeの「太陽系の前期重爆撃期の探究」と、Hal Levisonの「惑星の形成に関する諸問題への取り組み－火星のサイズからのネプチューンの迅速な形成」である。

1回目のスクールが成功したことを受け、翌年のイベントは「生命の起源のモデリング」をタイトルとし、最初の2週間はELSIで、次の3週間は神戸のGPSで開催した。16人が出席し、このうち10人が海外からの参加であった。目標は新たな発想のコミュニティを構築することであり、目標を十分に達成することができた。

2015年には参加者の数が38人に増え、このうち13人が海外研究機関からの参加であった。「意識の研究に対する統合的なアプローチをめざして」というタイトルのもとで、メンフィ

ス大学、モナシュ大学、エクセター大学などから講演者が参加した。ジョン・テンプレート財団が資金を提供し、2015年7月にスタートしたELSI Origins Networkも、ELSIとRIKEN/AICS以外の共催事業である。

(5) **ELSIが主催するその他のイベント**

ELSIはゴードン会議（GRC）やOrigins of Life and Nara Origins 2014など、注目度の高い国際会議をいくつか企画しているだけでなく、これらのスポンサーになっており、科学界、特に生命の起源領域における存在感を示している。

ELSIの科学者はこれらの会議に出席し、ELSIの学際的な研究を世界中の出席者に積極的にアピールしてきた。

**4-2-2. 外国人研究者への支援体制**

(1) **生活支援（ビザ取得を含む。）**

ELSI では、外国人研究者が来日後早い段階で安心して研究に専念できるよう、ビザ取得支援の他にも、来日前より住居や保育園の確保などの生活支援を行っている。日本での生活を始めるにあたって必要な住所登録や銀行口座の開設はもちろん、病院の検索や予約、住宅探し、携帯電話やクレジットカードの契約など、必要に応じてその他の支援を行っている。緊急時には、24 時間体制の電話を通じた通訳サービスと契約を結んでおり、外国人研究者は携帯電話を通じて通訳サービスをいつでも利用できる。ビジターに対しても訪問中に発生する諸問題の解決を支援する。

(2) **日本語教室**

生活支援の一環として、外国人研究者が異文化での生活によるストレスを軽減できるように、日常生活で使用できる日本語を教えている。講師は、外注・委託ではなく、ELSI のライフアドバイザーが務めている。初級クラスと会話クラスの2クラスを設け、週2回それぞれ開催している。各クラス4~9名の参加者がおり希望者は短期滞在者でも自由に参加できる。また、日本語クラス自体が研究者の負担とならないよう、研究者からの希望もあり、基本的に宿題はなしとしている。その代わりに、クラス内において日本語で発言できる機会をできるだけたくさん設け、実践的な内容となるよう努めている。特に子供のいる研究者は、日常生活において日本語で会話する機会が多く、日本語に関する質問をクラス内に限らずメール等でも対応している。日本語を気軽に学ぶ環境があることで、緊急時に日本語で対応できる可能性が増え、日常生活の一助となっているとともに、研究に専念できる環境を設備している。

(3) **保育所の設置**

大学のグローバル化に伴い、若手の外国人研究者が外国から着任することが増加し、すぐに託児を必要とする子を連れた着任者及び出産後の研究者が安心して研究に専念できる環境を整備するため、ELSI に最も近い国際交流会館内に保育所を平成29年4月に開園することとした。

(4) **競争的資金獲得支援**

科研費においては、採択経験豊富な日本人主任研究者による科研費セミナーを英語で開催すると共に、研究分野が近い日本人研究者や大学院生、専任URA（所長補佐）による申請書を和訳するサポートを実施してきた。しかし、採択数が不調なことから、2015年度は、特に外国人若手研究者に対して申請予定の研究計画の概要を秋口までに提出してもらい、それを主任研究者クラスがそれに対してアドバイスをつけて戻すという取組を始めたところである。その他の競争的資金プログラム、各種財団助成については、専任URAを中心に、情報を収集・分析し、各外国人研究者の研究分野に合致する競争的資金プログラムを紹介することとしている。科研費同様、申請書の和訳もさることながら、プログラムの趣旨に即した申請書となるよう、URAが助言する。こうした取組が功を奏し、2014年度から採択件数が増加しているところである。

(5) **安全管理教育**

ELSI では、全学に先駆けて平成26年度から年に1回、大学の総合安全管理センターと共同で主に外国人研究向けに英語による「実験に関する規則・注意事項の説明会」を開催している。実験に関する大学独自の規則やシステムを理解してもらうとともに、大学の担

当者と直接顔を合わせることで問い合わせ等のコミュニケーションを取りやすい環境を構築することを狙いとしている。今年度も2月1日に開催し、外国人研究員12名、日本人研究員7名が出席した。今後も外国人研究者が着任した際は、随時説明会の動画視聴や資料配布を実施する予定である。

## 5. システム改革 (3ページ以内)

### 5-1. 拠点長のリーダーシップによる運営

拠点長とホスト機関側の権限の分担、拠点長の拠点滞在実績についても記述すること。

#### (1) 拠点長とホスト機関側の権限の分担

所長の選・解任はホスト機関の長である東京工業大学長が決定し、所長の選・解任以外のELSIの管理・運営については所長が決定する。なお、副所長は所長を補佐する。また、大学執行部と月1回の意見交換を行い大学とELSIの緊密な連携を図っている。

#### (2) 拠点内の意志決定システム

- 所長は、所長の下に設置した所長室会議、運営会議及び関係委員会の審議結果を参考にELSIの管理・運営を決定している。また、国際アドバイザリーボードから世界トップレベルの学際的研究活動の推進及び国際的研究交流の展開を図るための助言を得ている。
- 研究所構成員の増加に対応し、より合理的に業務を遂行するために、新たに外国人主任研究者1名を副所長に任命し、3人体制とした。副所長3名は、Fusion・Globalization・Reformの推進を担当する。
- 所長室会議は、所長、3名の副所長及び事務部門長から構成され、定期的に週1回開催し、ELSIの重要案件の最新情報・問題意識の共有、専門委員会などへの指示系統を一元化するとともに業務の円滑な執行を図っている。
- 運営会議は、所長、事務部門長、副所長2名から構成され、定期的に月1回開催し、研究所の運営に必要な学内調整・規則整備・研究環境整備・人事案件などについて所長に対し助言・サポートを行っている。また、運営会議では、研究所の意思決定をスムーズに実行・実施するため、事務部門のチーフ級以上及び研究系秘書の職員を陪席させ情報を共有している。また、ELSIの管理・運営上の機能毎に必要な事項に対応するために各種委員会を設置し、業務の円滑な執行を図っている。

### 5-2. 英語その他必要な専門性を有する事務支援スタッフの配置状況

#### (1) 事務部門の改組

事務部門が担っていた業務を、いわゆる秘書業務と研究所全体に関わる、あるいは大学本部などとの連携を要する業務に整理し、各事務職員の担当を明確にした。また、研究者の要望も踏まえ、各研究ユニット毎に担当秘書（コンタクトパーソン）を割り当て、研究者にとってのワンストップサービスを実現した。秘書が事務部門から独立したのに伴い、秘書間の情報・ノウハウの共有・蓄積を目的として秘書委員会を設置した。この取り組みを参考に、大学は「研究室における経理関係業務の集中に関する方針」を策定し、経理関係業務の集中化・チェック機能の強化を図るとともに、教育研究の充実を図った。なお、事務部門と秘書委員会は定期的にリエゾンミーティングを開き、情報共有や業務の効率化／改善について議論を行っている。また、事務部門に社会連携部門として設置していた広報担当部署を、国内外への情報発信及びアウトリーチ活動等の強化・充実を図るため所長直轄の組織として広報室を設置した。

#### (2) 支援部門の構成

事務部門は、運営部門及び外国人研究者支援部門合わせて7名、秘書室は4名、広報室3名、国際コーディネーター1名、ネットワーク担当1名の16名)のうちバイリンガル14名であり、業務上のやりとりを日本語と英語の両方で行っている。特に、財務系業務及び研究系の秘書業務並びに生活支援業務において外国人研究者支援の強化・充実を図っている。

### 5-3. システム改革・ホスト機関への波及効果

研究成果評価システムと能力運動型俸給制度の導入等、WPIプログラムにより進めた研究運営上の改革、拠点運営上の改革、システム改革のホスト機関全体への波及効果等について記述すること。

**(1) トップダウンによる意志決定**

ELSI は所長のトップダウンにより管理・運営している。研究者は、日常の研究所運営等の業務に携わることなく研究に専念できる体制を構築している。また、学長は ELSI を学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として、従来の慣例や運営体制にとられない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーとして位置付けている。学長は、ELSI のようなスキームをもつ同様の研究組織を学内に 2 拠点設置することを明言している。さらに、大学の研究力強化や国際化推進のため ELSI のシステム改革を全学に波及することを目指している。

**(2) 国際的な研究活動を展開するための「世界の研究ハブ」の実現**

東京工業大学は、ELSI のノウハウを活かした「Tokyo Tech World Research Hub Initiative (WRHI)」を新たな研究領域や次世代産業の芽の創出を目指す科学技術創成研究院に置き、世界から第一線級の研究者、研究グループを招へいすることなどを通じた、国際的ネットワークの強化や学生と教職員の国際交流の飛躍的な活性化により、東京工業大学が理工系分野における知と人材の世界的環流の研究ハブとなることで「真の国際化」を目指す。

**(3) 異分野融合研究の推進****○異分野間のコミュニケーションの推進**

異分野間に潜在する“言葉の壁”“文化の壁”を取り払い、様々なバックグラウンドを持つ研究者の相互理解を促進させるため、週 2 回のランチトーク及び毎日 15 時に Tea Time を設けるなど、研究者、ビジターらの異分野間交流を促進する取り組みを継続して実施している。このような取り組みを全学に普及することを目指している。

**○スタディ・グループ**

様々なアプローチで地球と生命の起源を明らかにしていくため、研究分野の異なる研究者が参加する 5 つのスタディ・グループを設置し、積極的に議論を行っている。この取り組みは、東京工業大学における融合研究を推進する手本となっている。

**(4) テニユア制度の導入**

大学は、ELSI に 8 ポストのテニユアポジションを措置した。さらに、平成 28 年度に新たに 3 ポストのテニユアポジションを措置することとしている。この方針は、東工大として ELSI を中長期的視点に立って強化すべき戦略的重点教育研究分野として位置づけた結果である。

**(5) 能力給制度の導入**

ELSI は、「東京工業大学地球生命研究所における特定有期雇用職員の賃金に関する細則」の規定に基づき、能力に基づく賃金体系を採用している。年次業績評価会（Annual Evaluation Meeting）を毎年実施し、所長、副所長、事務部門長らの執行部で特に優秀な研究を推進していると認められた者に対して表彰するとともに、賃金改訂を行っている。また、研究所において特に貢献のあった者に対する報奨制度を制定し、報奨金を支給している。

（平成 25 年度：3 名、平成 26 年度：9 名、平成 27 年度：8 名、）

**(6) クロス・アポイントメント制度の導入**

生命系分野、特に“生命の起源・進化”を牽引するトップレベルの研究者を獲得するため、大学と共にクロス・アポイントメント制度を整備し、東京工業大学として初めて同制度を適用して教授を主任研究者として雇用した。今後、東京工業大学としてさらにクロス・アポイントメントを推進し、より優秀な教員を獲得する予定である。

**(7) グローバルファンド（EON プロジェクト）の獲得**

米国のジョン・テンプレート財団から、平成 27 年 7 月から平成 30 年 3 月にかけて、総額 5 百 50 万ドル（約 6 億 7 千万円）の研究資金を獲得した。東京工業大学にとって、このような多額のグローバルファンドの獲得は初めてであり、今後、海外からのファンド獲得を積極的に行う予定であり、グローバルファンドの獲得に向けて海外に法人格を有する拠点の設置を検討している。

**(8) コーポレートカードの導入**

研究者が海外において研究活動をする際の物品等の購入に際し研究者の立替払いによらず、コーポレートカードを導入することにより研究者の負担を軽減するとともに研究費の不正経理

防止を図り、研究に専念できる制度を ELSI において平成 28 年 4 月から導入することとした。

**(9) 世界最先端研究者の大学院教育への参画**

専任教員である廣瀬所長、井田教授及び黒川教授は流動教員として学士論文研究学生及び大学院学生の指導が可能となっている。当該教員は専攻の教員と同等の権利・義務を負っている。ELSI の世界最先端の研究者が大学院学生を指導することが次代の研究者育成に資することから、他の研究者も積極的に大学院生の教育研究指導に参画している。

**(10) その他**

学長は、大学の研究力強化のため ELSI のような異分野融合システムを全学に波及することを目指している。

**5-4. ホスト機関による支援**

ホスト機関による支援の実績と効果とともに、中長期的な計画への位置づけについても記述すること。

・ 具体的措置については、[添付様式5-1]に記載すること。

**(1) 東京工業大学中期計画等**

東京工業大学は研究に関する中期目標・計画において、ELSIを「世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互いに関連づけて明らかにすることを目指す研究を学長裁量資源の提供等により推進する。」と明記するとともに、「戦略性が高く、意欲的な目標・計画」として位置づけている。

中期計画を達成するため、ELSIを学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として学長直属の組織として位置づけ、従来の慣例や運営体制にとらわれない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーと位置付けている。ELSIは、学長裁量ポスト、学長裁量スペース及び学長裁量経費等の提供を受け、地球と生命の起源と進化の解明の研究に邁進している。また、学長は、本拠点の運営に対して、大学から構想時の「ホスト機関のコミットメント」に加え、サイトビジット及びプログラム委員会において人的・物的支援に止まらず積極的な支援を表明した。

**(2) 拠点への人的支援**

大学は、「東京工業大学地球生命研究所における流動定員及び流動教員に関する申合」を制定し、常勤の教員5名をELSIに措置すると共に主任研究者が学部教育を免除されることに伴い、学部教育に支障が生じないように、学長裁量による教員ポスト3名の提供を受け、元部局では教員補充を行い学部教育の充実を図っている。また、事務職員2名をELSIに配置した。

さらに、生命系分野、特に“生命の起源・進化”の強化を図るため、大学からELSIに対して学長裁量ポスト2名（教授及び准教授、平成26年4月1日から平成34年3月31日まで）並びに大学院教育の強化・充実のため助教ポスト1名が措置された。

また、平成28年度に新たに3ポストのテニュアポジションを措置することとしている。

**(3) スペースの便宜供与**

大学からキャンパス内の既存建物（2,670m<sup>2</sup>）を地球生命研究所棟（ELSI-2）として提供された。また、大学の敷地の提供を受け、新たな研究棟（ELSI-1：5,000m<sup>2</sup>）を平成26年度に竣工した。また、ELSIの外国人研究者用に大学の国際交流会館のうち20室を優先的に入居するために確保している。

**(4) 財政面の優遇措置**

大学からELSIに既存拠点形成措置額として毎年9,000万円の学長裁量経費の支援を受けている。また、空調機改修費用等の支援を受けるとともに、大学から提供される学長裁量スペース料のうち、約4,000万円を免除された。さらに、大学から4名の主任研究者及び専任の事務職員2名の人件費等の支援を受けた。

**(5) 保育所の設置**

大学のグローバル化に伴い、若手の外国人研究者が外国から着任することが増加し、すぐに託児を必要とする子を連れた着任者及び出産後の研究者が安心して研究に専念できる環境を整備するため、ELSIに最も近い国際交流会館内に保育所を平成29年4月に開園することとした。

## 5-5. その他

### 5-5-1. 若手研究者の育成についての取り組み (スタートアップ経費等)

ELSIに着任した若手研究者が円滑に研究を開始できるように、また、外部資金獲得までの間のサポートを目的として、WPI経費で雇用した若手研究者に対して年間50万円程度をスタートアップ経費として支給している。WPIプログラムの趣旨も踏まえ、なるべく早く外部資金などを活用した研究への移行を促す目的で、毎年少なくとも一件は科研費を含む外部資金プログラムへ応募することが、スタートアップ経費を受けられる条件となっている(採否を問うものではない)。一人当たりのスタートアップ経費の額は十分ではないと認識しているが、Director's Fundの活用も組み合わせる計画的に、また競争を制して研究資金を得るといふ、独立研究者にとって必須のノウハウをOJT的に会得してもらいたいと考えている。

2-8に述べた通り、ELSIのアウトリーチ活動においては、研究に支障のない範囲で、若手研究者にも参画するよう促している。これは、研究キャリアの早い段階で、科学と社会の対話の重要性、醍醐味を実感してもらい、公的資金を使った研究活動の社会に対する説明のトレーニングを積んでもらう意図がある。

### 5-5-2. 女性研究者の登用

・女性研究者数の推移については、[添付様式5-2]に記載すること。

女性研究者の採用を促進するために、所長及び副所長等はあらゆる機会にELSIにおける世界トップレベルの研究環境と将来性を積極的にアピールするとともに、本学のWeb、JST(jREC-IN)、進化学会及び細胞を創る研究会で国際公募している。また、PIクラスの女性研究者の着任に際しては、基準のスタートアップ経費を割り増しして支給する、ポスドクの優先的採用、研究スペースの優先的措置など、ELSIでの研究を円滑に開始できるように支援している。現在の女性比率については添付様式5-2に示すように24% (PIの女性比率6%、その他の研究者の女性比率29%)である。

## 6. 今後の展望 (2ページ以内)

### 6-1. 拠点構想を実現するための今後の方針、計画等の取り組み

#### (1) 東京工業大学中期計画等

東京工業大学は研究に関する中期目標・計画において、ELSIを「世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互いに関連づけて明らかにすることを目指す研究を学長裁量資源の提供等により推進する。」と明記するとともに、「戦略性が高く、意欲的な目標・計画」として位置づけている。

中期計画を達成するため、ELSIを学長が特に認める研究拠点組織(研究特区)として学長直属の組織として位置づけ、従来の慣例や運営体制にとらわれない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーと位置付けている。ELSIは、学長裁量ポスト、学長裁量スペース及び学長裁量経費等の提供を受け、地球と生命の起源と進化の解明の研究に邁進している。また、学長は、本拠点の運営に対して、大学から構想時の「ホスト機関のコミットメント」に加え、サイトビジット及びプログラム委員会において人的・物的支援に止まらず積極的な支援を表明した。

#### (2) 資金計画等

米国のジョン・テンプレトン財団からの研究資金獲得を礎とし外国からのファンド獲得を積極的に行うため、海外に法人格を有する拠点の設置を検討している。

### 6-2. 本プログラムの実施期間が終了した後も、当該拠点が「世界トップレベル研究拠点」であり続けるための取り組み

#### (1) 充実した研究環境

引き続き、充実した研究環境、研究に専念できる環境、大学院学生教育を始め若手研究者の育成、世界トップレベルの研究者との交流、異分野融合研究の推進等、研究者自らの探究の場を提供する。

#### (2) 外国人研究者支援

研究者来日前から、来日前のビザ取得、住所登録や銀行口座の開設、病院の検索や予約、住宅探し、携帯電話やクレジットカードの契約などの生活支援を行っている。また、緊急時には、24時間体制の電話を通じた通訳サービス(株式会社クロスランゲージ)と契約を結んでおり、外国人研究者は携帯電話を通じて通訳サービスをいつでも利用できる体制を整

え、外国人研究者が来日前から安心して研究に専念できる環境を整備している。

(3) **ホスト機関からの支援**

東京工業大学は、WPIプロジェクト終了後もELSIが「世界トップレベル研究拠点」であり続けるための以下の取り組みを継続して行う。

- ① 人的支援, スペース支援, 財政支援
- ② ELSIを「研究拠点組織（研究特区）」として恒久的な研究組織とする。
- ③ グローバルファンドを含む外部資金を積極的に獲得するため、海外に法人格を有する拠点を設置する。

(4) **将来構想検討委員会の設置**

大学に世界トップレベル研究拠点プログラム終了後のELSIの将来構想について検討する委員会を設置し、世界トップレベル研究拠点としてあり続けるため議論を行う。

(5) **研究拠点との連携**

他のWPI拠点とアウトリーチ活動及びWPI拠点の運営等について積極的に連携を図る。

**7. その他、特筆すべき事項（1ページ以内）**

(1) **グローバルファンド（EONプロジェクト）の獲得**

米国のジョン・テンプレート財団から、平成27年7月から2018年3月にかけて、総額550万ドル（約6億7千万円）の研究資金を獲得した。ELSIはこの有力なグローバルファンドの獲得により、研究基盤の一層の強化を図り、地球と生命の起源の解明の研究を加速する。この資金をもとに、ELSIがハブとなり生命起源に関わる世界中の研究者同士をつなぐネットワークの強化と拡大を目的とする「EON (ELSI Origins Network) プロジェクト」を開始した。EONプロジェクトの第一弾として8月26日から、国際ワークショップを開催した。ELSIでは、今回の資金とプロジェクトを礎とし外国からのファンド獲得を積極的に行う予定である。EONプロジェクトによって得られた成果は、ELSIの研究へと活かされ、人類の長年の謎である地球と生命の起源の解明に向け、研究がさらに加速されることが期待される。また、グローバルファンドの獲得に向けて海外に法人格を有する拠点の設置を検討している。

(2) **インターネット講義配信**

東京工業大学は、平成27年10月7日から、東工大初のMOOCによる講義「Introduction to Deep Earth Science-Part1 (GeoS101x) outer」の配信を始めた。東京工業大学は初回に提供する講義にELSI 廣瀬敬所長・教授を選び、「地球内部の構造について」を全世界に英語で発信する講義を行った。世界159か国から5,402人の学生が登録し、インターネット上で世界トップレベルの研究内容について講義ビデオやテキストなどを使って、この講義で学んでいる。

**8. フォローアップ結果（現地視察報告書を含む）への対応とその結果（ページ制限なし）**

平成27年度フォローアップ結果への対応を記述すること。ただし、既に記載済みの場合は〇〇ページ参照、などと記載箇所を明示することに代えて良い。

**「平成27年度世界トップレベル研究拠点プログラムフォローアップ結果：3. 検討すべき課題」**

(1) **「生命の起源」に関する研究：**

ELSIにおける生命の起源に関する研究は、本報告書の冒頭で述べた通り、「生命の起源に関するこれまでの研究は生化学的な視点からのものが主で、地球は生命のゆりかごとされ、支えであって生命と相互作用するものとの位置づけはなかった。生命とは周囲の環境と物質・エネルギーのやりとりを通じて成り立っているものである。その結果として、環境が生命活動に影響を与えるだけでなく、生命活動が環境に影響を与えている。このような観点から、本拠点では地球と生命の双方の研究を重要視する。（1. 拠点構想の概要に記したものを再掲）」というユニークな視点に基づくものである。それ故に、研究者／研究体制・研究インフラいずれもゼロからの出発であった。事実、WPIプログラムの4本柱の一つである“Science”の達成に向けた取り組み・投資の多くを、生命の起源に関する研究に投じてきた。“一流の研究は、一流のヒト、一流のラボ無くしてなし得ない”を信念として、ELSIが掲げる生命の起源に関する研究に合致する“一流のヒト”を主任研究者やELSIフェローとしてリクルートした。あわせて、サバティカル中のトップランナーを招聘するなど、多様な形で一流の人材を確保し、極めて異分野融合的な研究チームを編成するに至った。こうしたキーマンらが主導する議論、これまでの研究の成果・見通しを踏まえて、ELSI独自の生命の起源を以下のように定義付けた。すなわち、「地球化学的活動から重合体が介在する生化学反応ネットワークへの遷移」である。そして、この重要な変化を追究するため、1) 生化学的な反応に普遍的な性質の抽出、2) 触媒の発生と触媒による有機化学的反応の制

御、3) 生命の起源に向けた変遷における、ジオエネルギーおよびバイオエネルギーが果たした役割とその歴史、という具体的な研究課題に問題を分解し、それぞれを解明する具体的かつ精緻な実験を計画する。こうした課題の推進を目的として、2016年1月から6月にかけて化学進化、有機物理化学などの分野で独創的かつ秀逸な成果を挙げている外国人研究者2名をPIクラスで迎えることとした。ELSIのサイエンス展開において最もチャレンジングな課題を追及するための理想的な体制がほぼ整い、WPIプログラム中盤期間において大きな前進が期待できる。

## (2) 若手研究者とのコミュニケーション：

ELSIのトップマネジメントあるいは主任研究者らと若手研究者間のコミュニケーションは、日常的には、既述のランチミーティング、ティータイム、Izakaya ELSI、あるいはリクルート委員会、研究交流委員会、広報委員会など副所長らが委員長を務める所内の専門委員会活動を通じて展開してきたところである。さらに、2014年度より所長は年次評価会終了後、全研究者と個別面談を行ってきた。加えて、直接口頭では伝えにくい案件・懸案事項を吸い上げる目的で“電子目安箱”を設置すると言った取り組みも実施しているところである。しかし、これで十分とせず、特にトップマネジメントはTP0に応じた多様なコミュニケーションの機会を検討することとする。また、研究職とは異なるマネジメント/サポート職である事務部門長やリサーチ・アドミニストレーターも活用して、引き続き、若手研究者とのコミュニケーションを図ることとする。

## (3) 外国人研究者の研究資金の改善：

これまでの具体的な取り組みについては、「4-2. 環境整備 (4) 競争的資金獲得支援」に記した通りであり、例えば2014年秋の科研費申請分については採択に至らずとも審査結果を見ると、惜敗であったものが多く、採択という結果を出せる段階に近づきつつある手応えを感じているところである。また、2015年秋の申請シーズンにおいては、それまでの間に培ってきたELSI内外の共同研究のパートナーの研究計画に研究分担者として参画するように促すなどのアドバイスも行った。

発足から3年が経過し、ELSIが最も恐れていることは、諦めムードが広まることである。科研費のように審査結果が把握できるようなファンディングプログラムに応募した結果、惜敗と判断できるような研究提案をした者については、その研究提案をさらにブラッシュアップするために必要な研究費を一定程度サポートするようなスキームを創設するなどして、彼らのモチベーション維持・向上を図りたいと考えている。

## (4) 若手研究者の雇用改善：

ELSIでは、その構想段階からOrigins とEvolutionに強みを持つ、ユニークな研究人材の輩出をもって世界における頭脳循環の一端を担うこと、及び刻々と進化するELSI全体の研究フェーズに即した研究人材の確保、の履行を念頭に置き当初の雇用期間は3年間という原則のもとにリクルート活動を行っている。一方で、Annual Evaluationを経て優秀な成果を挙げた、あるいは顕著な貢献を果たしたと認められる者については雇用期間を2年間延長する仕組みを設ける、あるいはテニュアポジションの確保に向けてホスト機関と調整を図るなど、少しでも多くの若手研究者が、腰を据えて自身の課題に取り組める環境の実現に注力してきたと自負している。誤解を恐れずに述べれば、我が国の雇用契約に係る規制、世界の若手研究者の雇用情勢を鑑みるに、恐らく、全ての研究者が満足する雇用システムをELSI単独で構築することは不可能に近いと言わざるを得ないのではないだろうか。しかし、これに絶望する、あるいは言い訳とせず、一人でも多くの若手研究者が、ELSIでの経験がキャリアアップに繋がったと思ってもらえる研究・雇用環境の実現/改善に尽力したい。なお、発足から3年を経た現在、最も初期から雇用された若手研究者の中には、任期満了をもってELSIを離れる者が居ることは事実であるが、その数は極めて限られている。既述の通り、ELSIでの成果をアピールしてキャリアアップを果たす者、Incentive Awardを獲得して任期の延長に至った者が多くいることを付記する。

## 「平成27年度現地視察報告書：6. 拠点に対する要望と提案」

- 1) For the forthcoming interim evaluation, careful arrangement of presentations is highly recommended so as to make clear ELSI's identity. Also, publication metrics should be better provided as reference to the center's scientific achievements. The presentations should better highlight the progress that ELSI has made since the start of its program.

ELSIでは所長・副所長・主たるPIを中心に、2016年6月のサイトビジットから始まる一連の中間評価に向け、これまでELSIが展開してきたサイエンスを一本のストーリーとして訴求するには、誰が

何をどのように説明するのが適切か、について議論を重ねている (Science Committee)。2016年3月下旬には、Science Committee はELSIの研究員を招集し、アピールすべき論点の整理・共有を図った。また、指摘に従い、中間評価においては、これまで蓄積されてきたPublicationを客観的解析、すなわち計量書誌学的解析に供し、その結果も紹介しつつELSIのサイエンスを取りまとめることとする。

- 2) Many members of the working group think that the institute's current road map is much better than the previous one. However, a more conscious effort is needed by all ELSI members to identify the place and direction of their research within the ELSI roadmap.

これまで、ELSIでは、既述の年次評価会において全研究者の研究進捗を把握した上で、Science Committee が主導してロードマップの見直しを図ってきた。これらの取り組みについては、一定の評価を得てきたと認識している。こうしたロードマップの更新は、引き続き継続していくことには変わりはない。ELSIはこの提言を、「ロードマップ更新」はELSIのサイエンスの促進・質の向上に欠かせない作業であるという好意的な意味で受け止める。一方、1)とも関連するが、少なくとも前回のELSIにおけるサイエンスのアピールがやや発散していたきらいがあることを示唆するものでもある。ロードマップを全研究者で共有することを徹底すると共に、成果のアピールにあたっては最新のロードマップを踏まえつつ、筋道だった構成となるよう工夫する。

- 3) The WG understands well that solving the "origin of life" problem is very difficult and quite a big challenge. Nevertheless, in next year's interim evaluation, ELSI is expected to give some clues on how it is moving forward in tackling this challenge.

「8. フォローアップ結果（現地視察報告書を含む）への対応とその結果 (1) 「生命の起源」に関する研究」に記したELSI独自の「生命の起源の定義」をブレイクダウンした3課題が提言中の「鍵 (clues)」に相当するものと認識している。中間評価においては、これら3課題の成果、課題、見通しを提示・説明することとする。

- 4) ELSI remains much more focused on "import" (of visitors) than on "export" (of its scientists) to overseas institutions.

ELSIから恒常的に研究者を海外研究機関に送り出すことが、ELSIが真にグローバルな研究拠点である証の一つとなると認識しているものの、これまで海外から優秀な研究者を招聘し、ELSIの研究基盤を強化することに偏向していたことを否定できない。拠点設立から3年が経過し、設立後早い段階で着任した研究者の中には、ELSIで始めた研究を強みとして海外研究機関へと巣立って行く者が始まったところである（2015年度はBallmer特任助教がETHのテニュアトラック助教相当職に、藤井特任助教（女性）がNASA Postdoctoral Fellowsに採用された）。他方、ELSI研究者として中短期間、海外機関を訪れ研究活動を展開する取り組みを強化する必要があることから、4-1-4に述べた通り、2015年度に海外派遣プログラムを創設し、運用を開始したところである。また、大半のEONプロジェクト研究者は、雇用期間の50%程度を海外機関に滞在して研究活動を展開するよう義務付けている。今後、これまでの成果や取り組みをELSI全体に浸透させると共に、特に日本人若手研究者が自らの意志で海外機関で活動することを積極的に選択できる仕組み作りの検討を進めていくこととする。

- 5) While the importance of collaboration with ISAS/JAXA on the Phobos/Deimos mission is understandable in general terms, more specific and convincing reasons for how that collaboration is relevant to ELSI's objectives was not presented. ELSI should clarify its view on the role it hopes to play and the research benefits it hopes to obtain from such collaboration.

周知のとおり、Mars Moon (Phobos/Deimos) eXploration (MMX) は、将来の火星（及び火星生命）探査の国際的な共同研究の枠組みの中で我が国が技術的視点及びサイエンスの視点から貢献するための礎となるものである。月の探査と月のサンプルから地球の生い立ちが垣間見ることができ

たように、フォボスやダイモスといった火星の衛星の探査とそこからのサンプル採取（すなわちフォボス/ダイモス・ミッション）と物的証拠から得られる我々の知識を組み合わせることによって、比較衛星学や火星本体の起源・進化に進展をもたらすだろう。ELSIは、惑星・衛星形成論、アストロバイオロジー、その先につながる普遍生物学（universal biology）をも踏まえてサイエンスに関する議論をリードし、実践する。ELSIは既に2名の特任准教授らを MMX のサイエンス牽引役に決めた。2016年2月には彼らと藤本主任研究者らがオーガナイザーとして国際シンポジウムを開催し、フォボス/ダイモス・ミッションも含めた将来の火星探査におけるサイエンス像を描き始めたところである。

- 6) The WG received a request from young researchers for more travel support. They also wanted to see the development of experimental facilities and employment of excellent technicians. We understand that some parts of their requests are reasonable while others are difficult given the present funding system. We want to ask the ELSI center members to carry out appropriate communication with an eye to working toward satisfying the young researchers' desires.

若手研究者がグローバルな環境で研究活動を展開し、自身を高めることについてサポートすることは、若手研究者自身のみならずELSI自体にとっても重要である。一方で、予算上の限界もさることながら、若手研究者育成の観点からも、あらゆるリクエストに対して支援を提供することが必ずしも最適解ではないとの考えに基づき、旅費を含む研究費サポートメニューを設定・実施・改善してきた。例えば、Director's Fundは、応募のチャンスは年1回としてデザインしたが、春・秋2回の応募機会を設けた他、個々のニーズに沿えるよう、配分額の上限を3段階に設定するなどの工夫を講じている。また、予算編成において、研究交流委員会の裁量で用途を決めることが可能な枠の確保や、海外派遣プログラムの新設も行った。しかし、本提言を見るに、若手研究者との間でミスマッチが起きている可能性がある。前述の「8. フォローアップ結果（現地視察報告書を含む）への対応（2）若手研究者とのコミュニケーション」とも関連するが、若手研究者とのコミュニケーションのあり方を見つめなおす機会と捉え、若手研究者も交えて旅費サポートも含めて若手支援の在り方を議論し、実現可能な施策から実行に移すと共に、PDAサイクルの中で改善を講じることとする。

- 7) The young foreign researches are having some trouble acquiring research funds, such as KAKENHI. It is important for Japanese administrative staffs to assist them in improving their research proposals. They also need to be informed about research funding offered by private foundations.

「4-2. 環境整備（4）競争的資金獲得支援」や「8. フォローアップ結果（現地視察報告書を含む）への対応とその結果（3）外国人研究者の研究資金の改善」で述べた通り、外国人若手研究者の外部資金獲得支援を進めているところである。URA職員をはじめとする研究支援担当者は、これらの支援に積極的である。ELSIの研究は基礎科学であり、昨今のイノベーション指向の外部資金プログラム、財団などの助成プログラムの趣旨と合致しないケースが多く、結果として応募可能な外部資金プログラムが限定されていることは不利な点ではある。引き続き、情報提供及び日本語訳を含む申請書作成支援をきめ細かく実施することとする。なお、外国人若手研究者の競争的資金獲得のサポートも含めて、研究サポートを拡充する必要性が増してきたことから、2016年度よりURA職員を1名増員し、2名体制で支援を行う体制を取ることとしている。

- 8) Crossing disciplinary boundaries is notoriously difficult, time consuming and ultimately risky (project success rates are far lower than with purely single discipline efforts). Young researchers who must face the job market within 1 to 2 years are at a career stage that makes it very awkward for them to take on such gambles, especially in today's very unfavorable job market. This appears to be a major source of stress and even discontent among ELSI postdocs and other young researchers. The problem could be substantially alleviated by making ELSI postdoctoral appointments carry a normal or expected duration of five years (with renewal subject to adequate performance, of course). In addition to giving young researchers at ELSI

the “room” they need to take risks without gambling away their careers, such a system would be an extremely powerful recruitment tool for hiring the very best young scientists into positions at ELSI. Management should very seriously consider implementing such long-duration postdoctoral appointments as the norm at ELSI.

前述の「8. フォローアップ結果（現地視察報告書を含む）への対応（4）若手研究者の雇用改善を参照されたい。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

## 添付資料1-1. 平成27年度主任研究者一覧

作成上の注意：

- ・「氏名」欄で、海外の機関に所属する研究者には下線を付すこと。また、世界トップレベルと考えられる研究者氏名の右側には\* (アスタリスク) を付すこと。
- ・応募時計画もしくは平成26年度拠点構想進捗状況報告書に名前のなかった研究者が参加した場合には、主任研究者個人票 (添付様式1-1別紙) を添付すること。

例1) 常時拠点本部に滞在して参画  
 例2) 拠点本部 (月1回) 及び△△サテライト (週3回) において参画  
 例3) 所属機関からTV会議 (週2回) 等により参画

		【平成27年度末実績】						主任研究者 計 17名		
氏名 (年齢)	所属機関・部局・職	学位 専門	作業時間 (全仕事時間:100%)				拠点構想 参加時期	拠点構想への参画状況 (具体的に記入)	海外の機関に 所属する研究者の 拠点構想への貢献	
			拠点関連		拠点以外					
			研究	研究以外	研究	研究以外				
拠点長 廣瀬 敬* (47)	東京工業大学 地球生命研究所 所長・教授	理学博士 高圧地球科学	50%	40%	0%	10%	2012年12月	常時拠点本部に滞在して参画	例) 若手研究者の 派遣・受入 (人数・期間)	
丸山 茂徳* (65)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	理学博士 地質学 テクトニクス 地球生命史	70%	10%	0%	20%	2012年12月	常時拠点本部に滞在して参画		
井田 茂* (55)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	理学博士 惑星科学 惑星物理学	70%	10%	0%	20%	2012年12月	常時拠点本部に滞在して参画		
<u>Piet HUT*</u> (63)	Full professor, Institute for Advanced Study, Princeton, Program of Interdisciplinary	Ph.D 理論天文学 複合科学	40%	10%	40%	10%	2012年12月	拠点本部 (5ヶ月) 及びプリンストンのサテライトにおいて参画	- ELSIの若手研究者をサテライトで受入 (5ヶ月および7ヶ月) - 異分野融合研究を促進 - ワークショップを企画	

	Studies 東京工業大学 地球生命研究所 教授								- 若手研究者のリクルート
牧野 淳一郎* (52)	理化学研究所 計算科学研究機構 粒子系シミュレーション チーム チームリーダー	学術博士 理論天文学	35%	5%	40%	20%	2012年12月	拠点本部（週1回）において参画	
吉田 尚弘* (60)	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 化学環境学専攻 教授	理学博士 地球環境学	70%	10%	0%	20%	2012年12月	拠点本部（週3回）において参画	
黒川 顕* (47)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	薬学博士 メタゲノム 生物情報科学	70%	10%	0%	20%	2012年12月	常時拠点本部に滞在して参画	
入船 徹男* (61)	愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター 教授	理学博士 高圧地球科学 物質科学	56%	10%	14%	20%	2012年12月	愛媛のサテライトにおいて参画	
Joseph Lynn KIRSCHVINK* (62)	Professor, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology	Ph.D 地球生物学 古地磁気学 生物物理学 神経生物学	40%	10%	40%	10%	2012年12月	拠点本部（5ヶ月）に滞在する他、定期的にEメールなどで連絡を取り合っている	- フィールドワークを行い、研究装置のカスタマイズを準備

	東京工業大学 地球生命研究所 教授								
John HERNLUND (42)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	Ph.D. 地球物理学 モデリング	90%	10%	0%	0%	2013年8月	常時拠点本部に滞在して参画	
藤本 正樹* (49)	宇宙航空研究開発機構 宇宙化学研究所 教授	理学博士 太陽系プラ ズマ物理学	25%	5%	25%	45%	2012年12 月	拠点本部（週1回）において参画	
高井 研* (44)	海洋研究開発機構 極限環境生物圏領域 プログラムディレクター	農学博士 地球生物学 宇宙生物学	45%	5%	45%	5%	2012年12 月	拠点本部（月数回）に滞在する他、 定期的にEメールなどで連絡を取り合っている	
國中 均 (54)	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授	工学博士 航空宇宙工 学 電気推進工 学	25%	5%	25%	45%	2012年12 月	拠点本部（月数回）に滞在する他、 定期的にEメールなどで連絡を取り合っている	
Jack William Szostak* (62)	Professor of Genetics, Harvard Medical School	Ph.D 分子生物学 合成生物学	50%	10%	10%	30%	2012年12 月	ハーバードのサテライトにおいて参画	- ELSIの若手研究 者をサテライトで 受け入れ (5ヶ月) - 2機関での若手を 相互に派遣

George HELFFRICH* (62)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	Ph.D., 地質学	75%	10%	10%	5%	2014年7月	常時拠点本部に滞在して参画	
Eric SMITH* (49)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	Ph.D. 航空宇宙工 学 電気推進	75%	10%	10%	5%	2015年2月	常時拠点本部に滞在して参画	
Irena MAMAJANOV* (40)	東京工業大学 地球生命研究所 教授	Ph.D., 物理化学	85%	15%	0%	0%	2016年1月	常時拠点本部に滞在して参画	

平成27年度に拠点構想に不参加となった研究者

氏名	所属機関・部局・職	拠点構想 参加時期	理由	対応
<u>Renata</u> WENTZCOVITCH* (59)	Professor of Materials Science and Engineering, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of Minnesota	2015年10月 開始時期を再調 整	家庭の事情による	
四方 哲也* (52)	大阪大学・大学院情報理工学研究科・教授 東京工業大学・地球生命研究所・教授  クロスアポイントメント制度適用 大阪大学 75% ・東京工業大学 25%	2014年の11月	東京工業大学と大阪大学のサテライト契約の満了による	

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) 新規主任研究者個人票

氏名 (年齢) ※ 世界トップレベルと考えられる研究者は、氏名の右側に* (アスタリスク) を付す。	Irena Mamajanov (40)
現在の所属機関・部局・職	東京工業大学・地球生命研究所・教授
学位、現在の専門	Ph.D システム化学, 高分子科学
<p>研究・教育歴</p> <p>研究:</p> <p><b>東京工業大学 地球生命研究所 主任研究員/教授,</b> <span style="float: right;">2016-現在</span></p> <p>・<b>研究領域:</b> 生命の起源, 機能性高分子, 前生物的に妥当な多種高分子の構造に関する研究, 酵素の出現, 多分岐高分子.</p> <p><b>Research Fellow,</b> カーネギー研究所 <span style="float: right;">2014-2015</span></p> <p>・The Simons Foundation Collaboration on the Origin of Life Fellowshipを獲得し、多分岐高分子の前生物学的な潜在性について研究を実施</p> <p>・夏季インターンを指導</p> <p><b>Research Scientist,</b> ジョージア工科大学 <span style="float: right;">2012-2013</span></p> <p>・平衡から遠い条件での機能性高分子と動的コンビナトリアルケミストリの分野において研究を実施</p> <p>・大学院・学部生を指導</p> <p><b>Postdoctoral Fellow,</b> ジョージア工科大学 <span style="float: right;">2009 – 2012</span></p> <p>・核酸の生物物理学、化学進化や新しい無水溶媒に関する研究を実施</p> <p><b>Research and Teaching Assistant,</b> ブランダイス大学 <span style="float: right;">2002-2008</span></p> <p>・<b>博士論文:</b> Potentially Biogenic Polymers</p> <p>・<b>担当したコース:</b> General Chemistry, Art and Chemistry, Physical Chemistry Laboratory</p> <p><b>Research and Teaching Assistant,</b> ヘブライ大学 <span style="float: right;">1999-2001</span></p> <p>・<b>修士論文:</b> Petroleum Bioremediation by Cyanobacterial Mats</p> <p>・<b>担当したコース:</b> General Chemistry Laboratory for Medicine and Biology Students, Inorganic Chemistry Laboratory, Advanced Chemistry Experiments</p> <p>教育:</p> <p>2008 PhD, Physical Chemistry Brandeis University, Waltham, MA, USA</p> <p>2001 M. Sc., Organic Chemistry Hebrew University, Jerusalem, Israel</p> <p>1997 B. Sc., Chemistry Hebrew University, Jerusalem, Israel</p>	

これまでの研究の成果、アピールすべき点 (※ 世界トップレベルと考えられる研究者については、その理由を明記)

Irena Mamajanovはシステム化学、高分子化学、バイオミメティクス（生物模倣）に関心のある分光学の専門家である。大学院以来、生命の起源に関する研究に携わっており、大学院ではJudith Herzfeldの指導のもと、固体核磁気共鳴を通じたシアン化水素（HCN）高分子の構造解明に取り組んだ（Mamajanov and Herzfeld, 2009）。HCNは長い間ペプチド様構造が含まれていると仮定されていたが、この仮定は収集した<sup>13</sup>Cや<sup>15</sup>NのNMRスペクトルと整合していないことを示した。その代わりに、研究から得られたデータは、単純なモノマーの添加により、まずは頭一尾結合形態で直鎖状の共役鎖が形成され、続いて側方に飽和した二次元ネットワークが構築されることで高分子が形成されることを示唆するものであった。さらにデータは、以前に発表されたEPRデータと整合するラジカルな開始メカニズムと、HCN重合の自触媒的性質を検証可能な形で指し示していた。

博士課程を修了した後、Mamajanovはポスドクとして、その後は博士研究員としてジョージア工科大学に移籍し、その関心は核酸やペプチド、多糖類のような縮合脱水高分子、熱力学的に不都合な水溶液条件下での形成など、前生物学的な「水の問題」に移行した。Mamajanovは、低水分活性条件下においてヌクレオシド

（Sheng *et al.*, 2009）、ポリエステル（Mamajanov *et al.*, 2014）、ポリペプチド（Forsythe *et al.*, 2015）の合成を試みるため、いくつかの実験を行った。ペプチドの形成は、縮合のアミド基転移メカニズムに代わるメカニズムを誘発することによって熱力学的障害を克服するものであり、特に注目に値する。慣例にとらわれない「水の問題」へのアプローチとして、Mamajanovは非水系溶媒における核酸の挙動を調査した。この研究から、塩化コリンおよび尿素で構成される無水の深共融溶媒におけるDNAとRNAの可逆的フォールディングや異常構造の動力学を詳述した独創性に富む文献が発表されるに至った（Mamajanov *et al.*, 2010; Lannan *et al.*, 2012）。

2013年、Mamajanovは、権威あるSimons Foundation Collaboration on the Origin of Lifeのフェローシップを授与された。同氏はその後、酵素触媒作用に関する研究を行うため、カーネギー研究所に移籍した。同氏のプロジェクトは、高度の分岐を有する高分子（多分岐高分子またはデンドリマー）や球状タンパク質の構造的類似性にベースを置くものであった。Mamajanovは前生物学的に妥当だと思われる条件下での多分岐高分子の合成に成功し、これらの高分子が金属イオンと結合する性質を実証した。また、同氏は、重合プロセスの際に金属イオンを添加することでサブユニット配列に影響が生じ、実質的に原始におけるスマート材料特性を持つシステムが創出されることを明らかにした（Mamajanov *et al.*, 2015）。さらに、Mamajanovはある原理証明実験において、短分岐オリゴエステルの異種混合物は、低水分活性による微小環境を提供することでケンプ脱離反応を触媒する能力があることを実証した（Mamajanov *et al.*, 準備中）。

要約すると、Mamajanovの業績には、1) HCN高分子の構造解明、2) 前生物学的に妥当なヌクレオシドおよびポリエステル合成における制約の特定、3) アミド基転移メカニズムを通じたペプチド形成の適正な実証、4) 非水系溶媒におけるDNAおよびRNAの可逆的フォールディングの実証、5) 前生物学的に妥当な条件下における多分岐高分子の生体模倣特性の断定などがある。ELSIにおける新たな職位では、同氏は多分岐高分子の触媒作用をさらに詳しく研究し、異質な高分子構造分析を行うための分光分析やクロマトグラフィー分析のための方法を考案するとともに、生命の起源研究に関連するシステム化学の研究を行う計画である。

#### 研究活動実績

(1) 国際的影響力 a) 分野を代表する国際学会での招待講演・座長・理事・名誉会員、b) 有名レクチャーシップへの招待講演、c) 主要国アカデミー会員、d) 国際賞の受賞、e) 有力雑誌の編者の経験 等

Gordon, Abscicon and MOL conferencesでの招待講演

(2) 大型の競争的資金の獲得 (過去5年の大型の競争的資金の獲得実績)

Simons Foundation Collaboration on the Origin of Life Fellowship (\$90,000/年, 3年間)

(3) 論文被引用 (主要な発表論文名、被引用の程度等)

Mamajanov, I; Cody, G.D. Protoenzymes: The Case of Hyperbranched Polyesters, *in preparation*

Mamajanov, I; Callahan, M. P.; Dworkin, J. P.; Cody, G. D. (2015) Prebiotic Alternatives to Proteins: Structure and Function of Hyperbranched Polyesters. *Origins Life Evol. Biosph.*, 45(1-2):123-37

Mamajanov, I; McDonald, P. J.; Duncanson, D. M.; Jingya, Y.; Walker, C. A.; Grover, M. A.; Hud, N. V.;

Schork F. J. (2014) Ester Formation and Hydrolysis during Wet–Dry Cycles: Generation of Far-from-Equilibrium Polymers in a Model Prebiotic Reaction. *Macromolecules*, 47(4), 1334-43 **12 citations**

Mamajanov, I.; Engelhart A. E.; Bean, H. D.; Hud, N. V. (2010). DNA and RNA in Anhydrous Media: Duplex, Triplex, and G-Quadruplex Secondary Structures in a Deep Eutectic Solvent. *Ang. Chem. Int. Ed.* 49 (36), 6310-4 **68 citations**

Forsythe, J. G.; Yu, S.-S.; Mamajanov, I.; Krishnamurthy, R.; Grover, M. A.; Fernández, F. M.; Hud, N. V. (2015) Ester-Mediated Amide Bond Formation and the Prebiotic Origin of Peptides, *Ang. Chem. Int. Ed.*, 127(34), 10009–10013 **4 citations**

Lannan, F. M.; Mamajanov, I.; Hud, N. V. (2012). Human Telomere Sequence DNA in Water-Free and High-Viscosity Solvents: G-quadruplex Folding Governed by Kramers Rate Theory. *J. Am. Chem. Soc.*, 134 (37), 15324–15330 **36 citations**

Chen, M. C.; Cafferty, B. J.; Mamajanov, I.; Gállego, I.; Khanam, J.; Krishnamurthy, R.; Hud, N. V. (2014) Spontaneous Prebiotic Formation of a  $\beta$ -Ribofuranoside That Self-Assembles with a Complementary Heterocycle. *J. Am. Chem. Soc.*, 136 (14), 5640-6 **21 citations**

Mamajanov, I. and Hud, N. V. (2011) DNA, In *Encyclopedia of Astrobiology* (Gargaud, M., Cernicharo, J., Viso, M., Cleaves II, H. J., Pinti, D., Amils, R., and Kobayashi, K., Eds.), Springer, New York, NY, 443-447.

Mamajanov, I. and Herzfeld, J. (2011) HCN polymer, In *Encyclopedia of Astrobiology* (Gargaud, M., Cernicharo, J., Viso, M., Cleaves II, H. J., Pinti, D., Amils, R., and Kobayashi, K., Eds.), Springer, New York, NY, 730-732

Herzfeld, J.; Rand, D.; Daviso, E.; Mak-Jurkauskas, M.; Mamajanov, I. (2011). Molecular Structure of Humins and Melanoidins via Solid State NMR. *J. Phys. Chem. B* 19, 5741-5 **8 citations**

Sheng, Y.; Bean, H. D.; Mamajanov, I.; Hud, N. V.; Leszczynski, J. (2009). Comprehensive investigation of the energetics of pyrimidine nucleoside formation in a model prebiotic reaction. *J. Am. Chem. Soc.* 131 (44), 16088-95 **17 citations**

Mamajanov, I., Herzfeld, J. (2009). HCN polymers characterized by solid state NMR: chains and sheets formed in the neat liquid. *J. Chem. Phys.*, 130 (13), 134503 **20 citations**

Mamajanov, I., Herzfeld, J. (2009). HCN polymers characterized by SSNMR: Solid state reaction of crystalline tetramer (diaminomaleonitrile). *J. Chem. Phys.*, 130 (13), 134504 **9 citations**

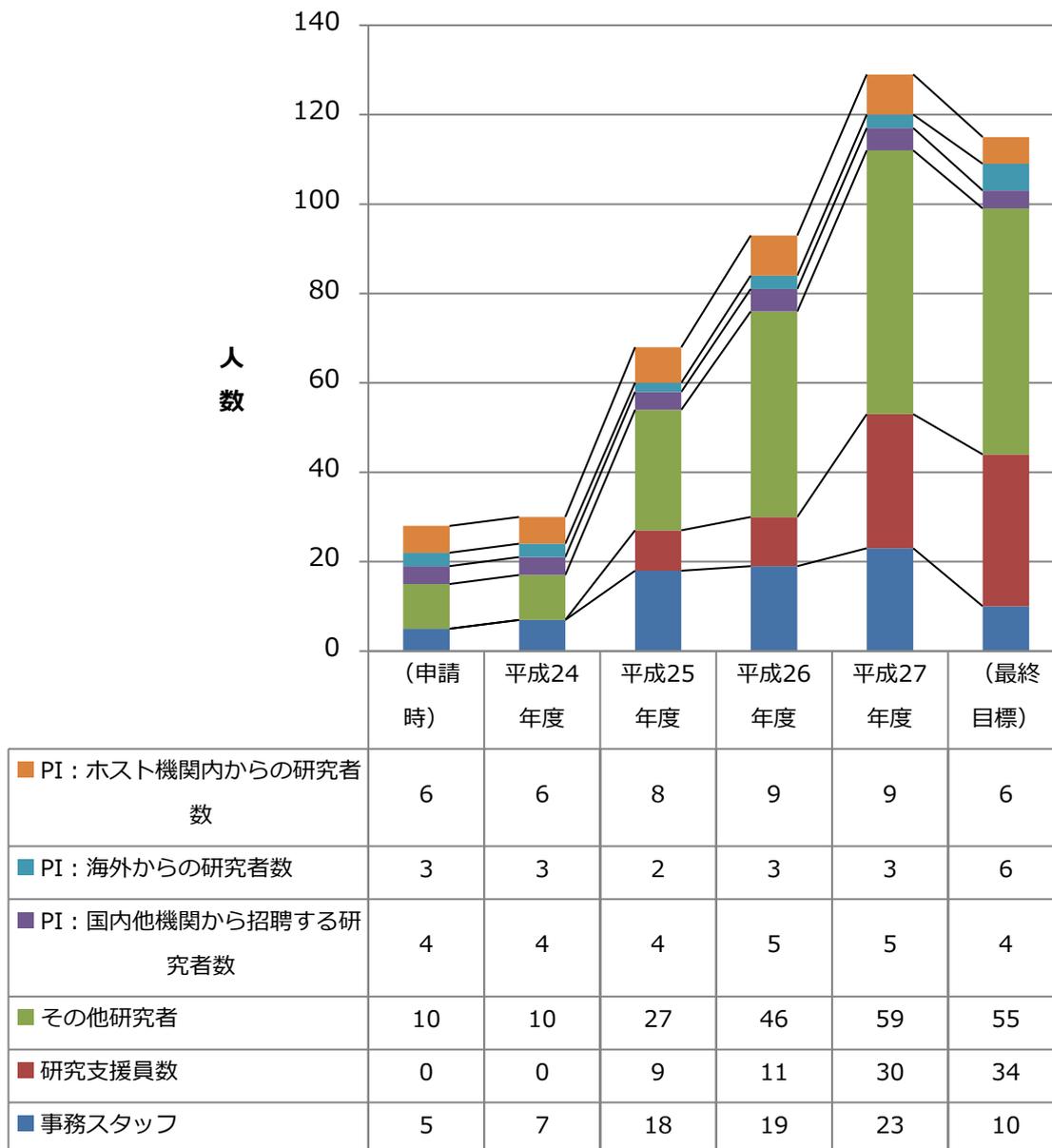
(4) その他 (当該研究者が世界トップレベルと判断するに足る実績 等)

## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料1-2.「ホスト機関内に構築される中核」の研究者数

※発足時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。

拠点の構成員数と年次推移

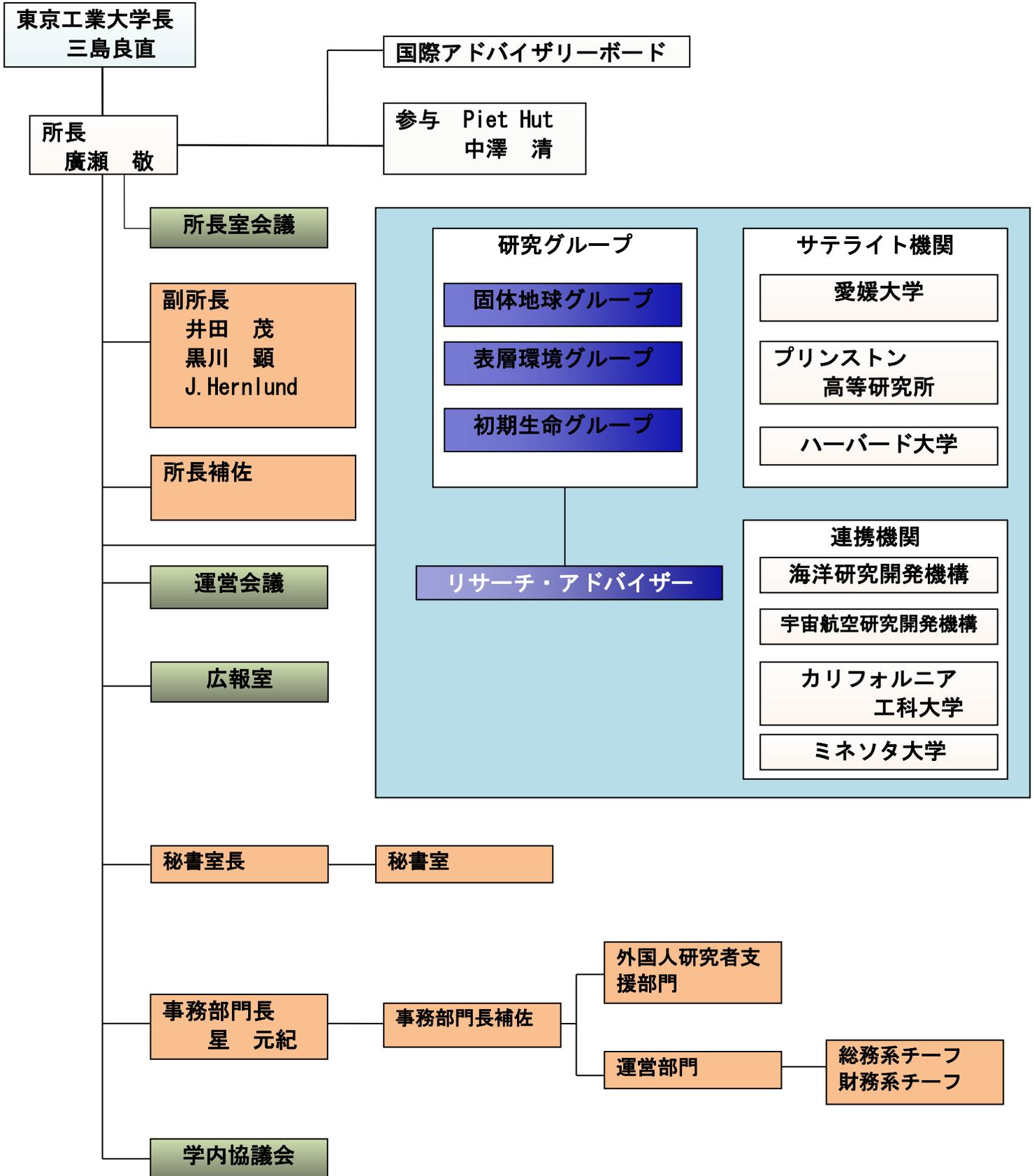


- 最終目標に向けた具体的な計画や既に決定している主な研究者採用予定（特に主任研究者の場合）など、特記すべきことがあれば記載すること。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料1-3. 拠点の運営体制

・以下に拠点の運営体制をわかりやすく示した図を掲載すること。

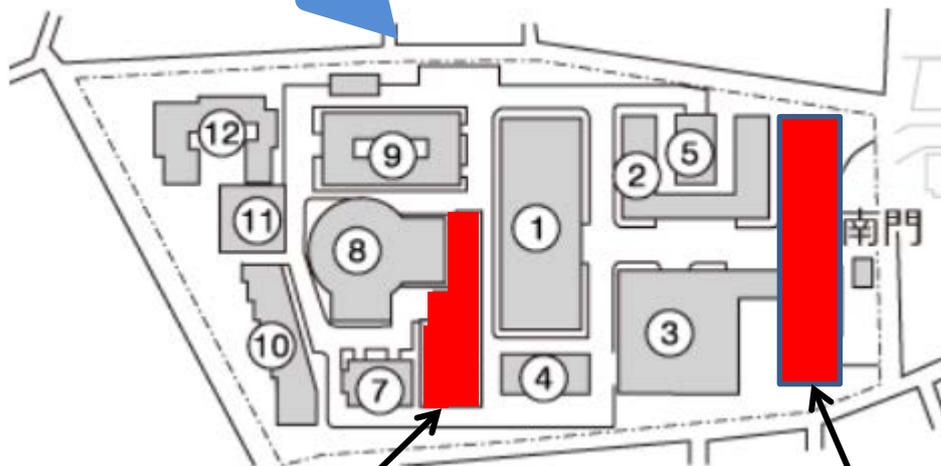
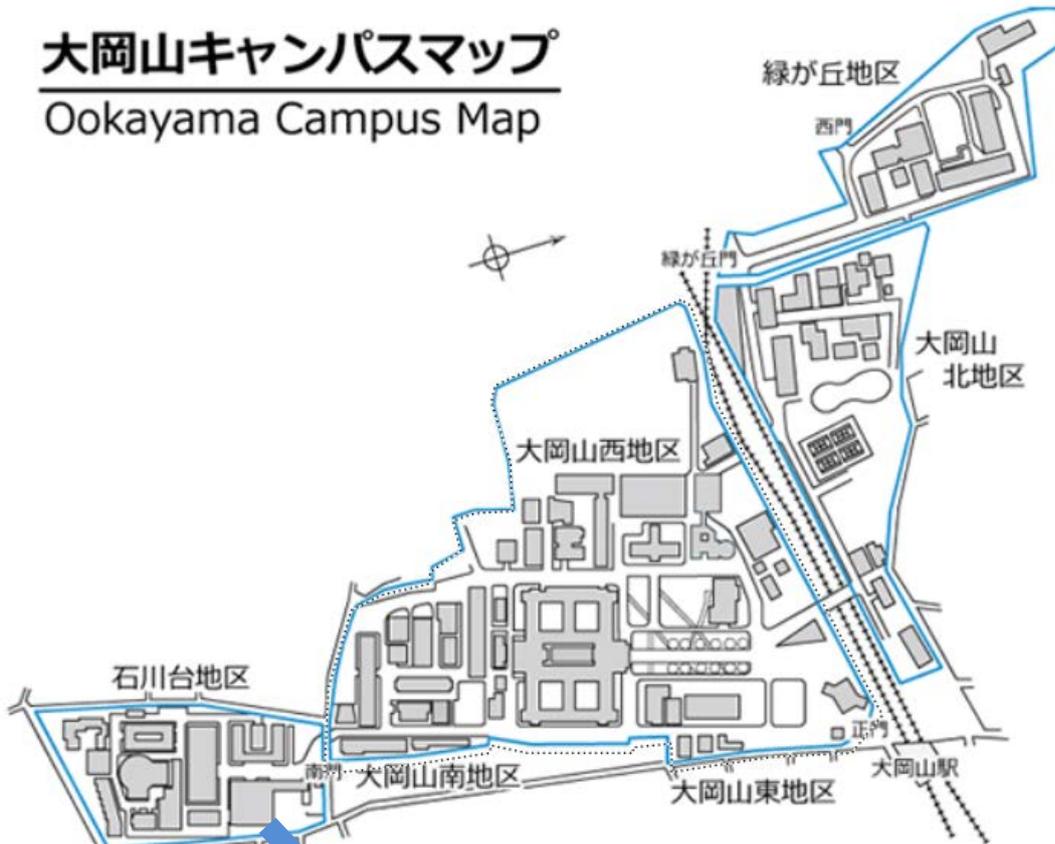


## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料1-4. 拠点の施設配置図

・以下に拠点のキャンパス及びPI等の配置をわかりやすく示した図を掲載すること。

### 大岡山キャンパスマップ Ookayama Campus Map



地球生命研究所棟 (ELSI-2) R4 2,670m<sup>2</sup>

地球生命研究所新棟 (ELSI-1) R3-1 5,000m<sup>2</sup>

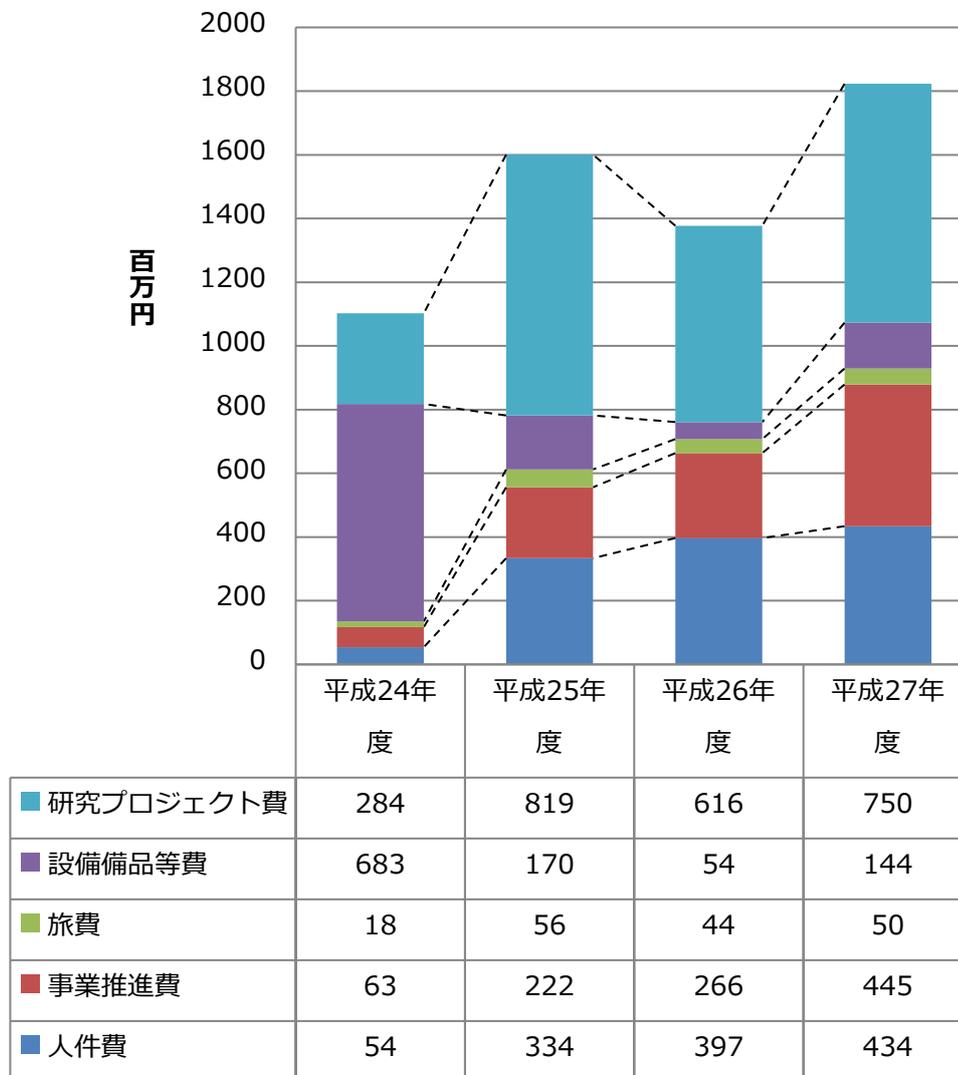
## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料1-5-1. 事業費額の推移

※拠点活動全体の事業費額の推移を棒グラフで表すこと。

(例)

事業費の年次推移



・ これまでの事業資金がどのような考え方で、どのような用途に供されたのかを以下に記述すること。

- 世界トップレベル研究拠点の施設・設備環境の整備
- 国際シンポジウム及び国際ワークショップの開催
- スタートアップ支援（融合研究の支援を含む）
- 若手研究者の海外派遣プログラム
- WPIプログラム及びELSIの広報活動
- 優秀な研究者のリクルート活動（著名な国際学会へのブース出展及びELSIロゴの掲載）

世界トップレベル研究拠点プログラム

添付様式1-5-2

添付資料1-5-2. 平成27年度 事業費（為替レート：1ドル＝110円）

○拠点活動全体

(単位：百万円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・拠点長、事務部門長	23
	・主任研究者 10人	87
	・その他研究者 42人	228
	・研究支援員 14人	29
	・事務職員 16人	64
	計	431
事業推進費	・招へい主任研究者等謝金 5人	1
	・人材派遣等経費 0人	
	・スタートアップ経費 32人	29
	・サテライト運営経費 1ヶ所	50
	・国際シンポジウム経費 1回	3
	・施設等使用料	156
	・消耗品費	51
	・光熱水料	0
	・その他	156
		計
旅費	・国内旅費	3
	・外国旅費	11
	・招へい旅費 国内32人、外国104人	34
	・赴任旅費 国内0人、外国3人	2
	計	50
設備備品等費	・建物等に係る減価償却費	12
	・設備備品に係る減価償却費	226
	計	238
研究プロジェクト費	・運営費交付金等による事業	275
	・受託研究等による事業	72
	・科学研究費補助金等による事業	403
	計	750
合計	合計	1915

(単位：百万円)

平成27年度WPI補助金額	565
平成〇年度施設整備額	0
・〇〇棟新営 〇㎡、前払金	
・〇〇棟改修 〇㎡	
・その他	
平成27年度設備備品調達額	126
・ドラフトチャンバー 5台	16
・ACQUITY APC System 1台	10
・HPLCシステム 1台	4
・高速ネットワークシステム 1式	11
・遠隔テレビ会議システム 1式	22
・その他	63

○サテライト等関連分

(単位：百万円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・主任研究者 1人	/
	・その他研究者 9人	
	・研究支援員 0人	
	・事務職員 1人	
	計	33
事業推進費		9
旅費		4
設備備品等費		4
研究プロジェクト費		77
合計	合計	127

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料2-1. 代表的な研究成果を裏付ける論文一覧

- ・ 「2. 拠点の研究活動」の「2-1. 研究成果」で挙げた代表的な研究成果[1]~[10]を裏付ける論文を挙げ(40編以内)、それぞれについてその意義を10行以内で解説すること。
- ・ それぞれの論文は箇条書きとし、著者名・発行年・雑誌名・巻号・掲載ページ・タイトルを記載すること。(記載順番は様式中で統一してあればこの限りではない) なお、著者が複数ある場合には、拠点の研究者に下線を記すこと。
- ・ 著者が多数(10名以上)の場合は、全著者名を記載する必要はない。

#### 研究成果[1] 惑星集積のシナリオとジャイアントインパクト

1. Sato T, Okuzumi S, Ida S. 2016. On the water delivery to terrestrial embryos by ice pebble accretion. *Astronomy and Astrophysics*, 589: A15.

標準的な降着円盤モデルでは、原始太陽系円盤のスノーラインが円盤進化の後期段階に、地球軌道よりも内側に移動してくる。このことにより、この時期に、氷で覆われたペブルが外部領域から1 AUまで輸送された可能性がある。このことは、現在の地球がなぜここまで水に乏しい惑星なのかという疑問を生じさせる。本研究では、簡易化した合体成長方程式を用いて、スノーライン移動後に原始惑星に集積する氷ペブルの量を評価した。本研究では、原始惑星の最終質量と含水量がガス円盤の半径方向の広がり、円盤乱流の強度、スノーラインが1 AUに到達した時間に大きく依存することがわかった。原始太陽系円盤が300 AUまで広がっていれば、スノーラインの移動がゆっくりでない限り、最初は岩石で構成されていた原始惑星が1~10倍の地球質量の氷の惑星に進化してしまうだろう。原始地球の含水量が約1重量%であったとすると、乱流が弱く、スノーラインの移動が早ければ(> 0.5-2 Myr) 原始地球の形成が可能であったということになる。

2. Hosono N, Saitoh TR, Makino J, Genda H, Ida S. 2016. The giant impact simulations with density independent smoothed particle hydrodynamics. *Icarus*, 271: 131-157.

現在、ジャイアント・インパクト(GI)が最も広く受け入れられている月形成のモデルである。GIに対する数値シミュレーションの多くは、標準SPH法が用いられてきた。しかしながら、近年、標準SPH法(SSPH)では接触面の不連続性と自由表面の取り扱いが難しいことが指摘されている。この問題は、SSPHにおける密度の微分可能性に対する前提条件から生じるものである。ELSIの惑星形成理論チームはこれまでに、密度に依存しない形のSPHの別の定式化であるDISPHを考案した。これは、密度ではなく圧力の微分可能性にもとづいて接触不連続という問題の解決を試みたものである。本研究ではDISPHによるGIシミュレーションの結果を報告し、これらをSSPHから得られる結果と比較した。DISPHによって作成される質量や角運動量などの円盤特性は、SSPHとは異なった。これらのことは、ジャイアント・インパクトに対する数値シミュレーションから得られた結果については慎重に考慮しなければならないことを示唆している。

3. Citron RI, Genda H, Ida S. 2015. Formation of Phobos and Deimos via a giant impact. *Icarus*, 252: 334-338.

火星の、フォボス、ダイモスの二つの衛星は、長い間、火星に捕獲された小天体であると考えられてきたが、衛星の組成や軌道に対する近年の観測結果は、火星衛星が約0.01倍の火星質量を有する天体の1回または複数回のジャイアント・インパクトから発生したデブリによって形成された可能性があることを示唆している。近年の研究から、火星におけるジャイアント・インパクトによって生じたデブリ質量が解析的に推定され、同時に火星を取り巻くデブリ円盤の進化が数値計算によって調べられた。本研究では、特にボレアレス盆地を作ることのできるボレアレススケールのジャイアント・インパクトに注目して、供給されるデブリの質量を数値計算(SPHE法)を用いて調べた結果を報告した。本研究から、ボレアレススケールの衝突は質量が約 $5 \times 10^{20}$ kgの円盤を生じさせることができ、少なくとも火星の一つ以上の衛星を形成できるだけのデブリが生じることが確認された。これらの結果は、火星のデブリ円盤の進化に対する今後の研究を進展させていくために極めて重要な結果であったと考えられる。

#### 研究成果[2] 揮発性物質の供給とインベントリ

4. Hamano K, Abe Y, Genda H. 2013. Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean. *Nature*, 497: 607-610.

太陽系では金星が地球と同じ程度の大きさと同じようなバルク組成を持つが、金星は水に欠乏して

いる。極めて多様な太陽系外惑星の発見が期待されていることから、これらの惑星の大気や表面環境を予測するため、惑星進化に関する一般的な枠組が必要である。本研究では、放射対流平衡の計算とモデリングにより、地球型惑星は、初期の高温溶融状態からの固化時における進化の歴史にもとづいて、2つの明確に異なるタイプに分類できることを明らかにした。主星からある臨界距離を超えたところに形成されるタイプIの惑星は、数百万年以内に固化する。惑星集積の際に惑星が水を獲得した場合、この水の大部分が保持され、原始海洋を形成する。これに対して、臨界距離の内側で形成されるタイプIIの惑星では、初期の水量が多くても、マグマオーシャンが長期間にわたって維持される可能性がある。地球はタイプIIに分類されるのに対し、金星はタイプIIの惑星の典型であると考えられる。

5. Nomura R, Hirose K, Uesugi K, Ohishi Y, Tsuchiyama A, Miyake A, Ueno Y. 2014. Low Core-Mantle Boundary Temperature Inferred from the Solidus of Pyrolite. *Science*, 343: 522-525.

本研究では、高圧実験と三次元のX線マイクロトモグラフィ画像法を通じて、原始（パイロライト）マンツルの固相線温度が、地球のマンツルと外核の境界近くにおいて予想される圧力で $3570 \pm 200$ ケルビンの低さであることを実証した。所見は、マンツル最下部の広い範囲にわたってポストペロブスカイト相が存在し、外核の融解温度が水素などの不純物によって大きく低下することを示唆している。本研究の結果は、一般的にマンツル最下部で安定性を失うと考えられているいくつかの相が、予想されていたよりも広範囲にわたって分布している可能性があることを示すものである。

6. Umamoto K, Hirose K. 2015. Liquid iron-hydrogen alloys at outer core conditions by first-principles calculations. *Geophysical Research Letters*, 42: 7513-7520.

地震波のデータから推論的に導き出された暫定標準地球モデル（PREM）は地球の液体核にかなりの量の軽合金元素が存在していると予測しているものの、核における軽元素の特定はいまだに議論を呼んでいる。本研究では、地球の外核条件における液体鉄-水素合金の第一原理分子動力学計算結果を報告する。外核における約1%の水素濃度の存在により、密度やバルク音速といった地震学的所見が再現されることが確認された。本研究は、水素が核における原始の軽元素である可能性を示唆するものである。

### 研究成果[3] 磁気および地球の進化

7. Gomi H, Ohta K, Hirose K, Labrosse S, Caracas R, Verstraete MJ, Hernlund JW. 2013. The high conductivity of iron and thermal evolution of the Earth's core. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 224: 88-103.

本研究では、鉄および鉄-シリコン合金の100GPaへの電気抵抗を測定した。また、地核の圧力に対する鉄の抵抗についても計算を行った。本研究では、地核金属の飽和抵抗を考慮した最初の地球物理学モデルと複合的に考慮した結果から、地核の最も外側の部分における熱伝導率が $90 \text{ W/m/K}$ を超えることが確認された。これらの値は従来の推定値よりもはるかに高く、初期の地球における急激な地核の永年冷却や、内核が1Gaよりも若く、最下部のマンツルがいたるところで溶融したことを暗に示すものである。これらの所見は初期の地球においてマンツルの最下部が溶融したに違いないことを示唆するものであり、基底マグマオーシャンモデルや地球のマンツルソリダスに対して行われている近年の数多くの実験的測定結果と整合している。

8. Ohta K, Kuwayama Y, Hirose K, Shimizu K, Ohishi Y. 2016. Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions. *Nature*, in press.

地球は、自己維持型のダイナモ作用によって対流液の外核に双極子磁場を常に発生させている。金属鉄が支配的な要素であることから、その電氣的、熱的伝導率が地球核の動力学と熱的進化を支配している。ただし、地核条件下における鉄のこのような輸送特性についてはいまだに議論がある。自由電子が電流と熱の両方における主要な輸送媒体であることから、高圧および高温下（P-T）での鉄の電子散乱メカニズムが惑星核の輸送特性を理解する鍵を握っている。本研究では、レーザ加熱型ダイヤモンド・アンビル・セル（DAC）において、地核に関連のある条件下で電気抵抗を測定した。測定によって得られた低い鉄の電気抵抗値は急激な地核冷却の発生と0.7G年よりも若い内核年齢を示唆するものであり、1.3G年前後における古地磁気強度の突然の上昇を内核の発生と関連づけた従来の理論の信ぴょう性が

弱まる結果となっている。

9. Mitchell RN, Raub TD, Silva SC, [Kirschvink JL](#). 2015. Was the Cambrian explosion both an effect and an artifact of true polar wander? *American Journal of Science*, 315: 945-957.

最近、反復的な真の極移動（TPW）がエディアカラ紀－カンブリア紀における動物の生命の大爆発を誘発したという、当初は議論を呼んだ仮説が、古地磁気や地質年代に対する数多くの精緻化によって理論的に裏付けられている。これらのデータは、5億3500万年前から5億1500万年における約75°のTPWを示唆しており、古生物学的に認められた後生動物の多様性と不同性の増大と一致している。本試験の結果は、よく知られている低緯度での多様性の生態駆動的増加と、TPW駆動型の海進期における堆積岩の堆積増加を結びつけて考えるだけで、この進化傾向は説明できることを示すものである。四分円のTPWによる多様性の変化は、なぜ初期カンブリア紀に発生率と絶滅率が同時に上昇し、発生率が優勢だったのかという点に関する統一的な説明を提供している。

研究成果[4] 初期大気および、現代の類似環境の地球化学

10. [Ueno Y](#), Aoyama S, Endo Y, Matsu'ura F, [Fioriel J](#). 2015. Rapid quadruple sulfur isotope analysis at the sub-micromole level by a flash heating with  $\text{CoF}_3$ . *Chemical Geology*, 419: 29-35.

硫黄の安定同位体比は多様な生化学的プロセスを追跡するのに有効に機能してきた。従来の $\text{SF}_6$ 法は四つの硫黄安定同位体（ $^{32}\text{S}/^{33}\text{S}/^{34}\text{S}/^{36}\text{S}$ ）のすべてを高精度で分析することができるが、フッ化の手順に時間がかかり、有毒なフッ素元素（F2）が必要になる。本稿では、硫黄同位体を分析するための新しい瞬間フッ化法について報告する。新たなフッ化コバルトによる瞬間フッ化法により、マイクロモル以下の物質量の四種硫黄同位体を高精度で分析するための迅速で簡便、かつ安全な手順が確保される。

11. Endo Y, [Danielache SO](#), [Ueno Y](#), Hattori S, Johnson MS, [Yoshida N](#), Kjaergaard HG. 2015. Photoabsorption cross-section measurements of  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ , and  $^{36}\text{S}$  sulfur dioxide from 190 to 220 nm. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120: 2546-2557.

$\text{SO}_2$ 同位体分子の紫外吸光断面積は、惑星大気における硫黄同位体の光化学的分別を理解するのに不可欠である。本報告では以前に測定されたスペクトルを向上させ、これらを $^{36}\text{S}\text{O}_2$ まで拡張した。得られた結果は、 $\text{SO}_2$ のUV光解離によって太古代の堆積記録における同位体の痕跡が再現されることを示唆している。

12. Suda K, [Ueno Y](#), Yoshizaki M, Nakamura H, [Kurokawa K](#), Nishiyama E, Yoshino K, Hongoh Y, Kawachi K, Omori S, Yamada K, [Yoshida N](#), [Maruyama S](#). 2014. Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: The  $\text{CH}_4$ - $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters*, 386: 112-125.

本研究では蛇紋岩を母岩とする新たなシステムの体系的な同位体研究について報告する。研究の結果は、水素ガスからではなく、水からの直接的な非生物的メタン産生の方が一般的であった可能性が高く、蛇紋岩を母岩とするシステムにおけるメタン発生機構を再考する必要があることを示唆している。

13. Shibuya T, Yoshizaki M, Sato M, Shimizu K, Nakamura K, Omori S, Suzuki K, Takai K, Tsunakawa H, [Maruyama S](#). 2015. Hydrogen-rich hydrothermal environments in the Hadean ocean inferred from serpentinization of komatiites at 300 °C and 500 bar. *Progress in Earth Planetary Science*, 2: 46.

この研究は初期地球と初期生命を結びつけるELSIでの研究の核であり、生命が誕生した環境と考えられている冥王代の海洋および海洋底下における地球化学的環境の制約を試みている。最近何十億年もの間、地球上では噴出していない古代溶岩（コマチアイト）の風化研究は、惑星の居住可能性に関する疑問、すなわち、初期の地球における環境は現代の地球環境とどのような点が類似しており、どのような点が異なっていたかという疑問の核心であり、これらの類似点や相違は生物圏出現の本質である。本研究はロードマップのうち「初期の海洋と大気、前生物的化合物の地質学的供給」に分類されており、惑星全体の反応ネットワークと生物圏の出現に重点を置くものである。

研究成果[5] 前生物的化学

14. Kitadai N. 2015. Energetics of Amino Acid Synthesis in Alkaline Hydrothermal Environments. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45: 377-409.

本研究では、いくつかのアミノ酸に関する文献に報告されている実験的な高温、体積、熱容量と、相関アルゴリズム、Helgeson-Kirkham-Flowers (HKF) の修正状態方程式を併用することにより、高温とアルカリpHにおけるアミノ酸の熱力学的特性を推定した。研究結果は、冥王代のアルカリ熱水環境がアミノ酸の合成と重合にエネルギー的に最も適した環境である可能性を示唆するものであった。この環境では、低温でわずかに酸性の冥王代の海洋水と、噴出孔-海洋境界面における高温でアルカリ性の熱水流体の間に、pHと温度の急勾配が存在していたのではないかと考えられている。

15. Kitadai N. 2016. Predicting Thermodynamic Behaviors of Non-Protein Amino Acids as a Function of Temperature and pH. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 46: 3-18.

生命はなぜタンパク質の構成単位として $\alpha$ -アミノ酸を使用するのか。本研究では、文献に報告されている関連の実験的測定結果にもとづき、双性イオン性、マイナス、プラスの電離状態にある三つの非 $\alpha$ -アミノ酸および $\alpha$ -アミノ酸の標準モル熱力学的データを推定することにより、エネルギー的見地から、この根源的な疑問に取り組んだ。結果は、 $\alpha$ -アミノ酸を生物システムに取り入れるのに、合成のエネルギーコストは重要な淘汰圧ではないことを示唆している。本研究は、生命がなぜ $\alpha$ -アミノ酸のみを排他的に使用するのかについての考察に有益な意味を有するものである。

16. Ilardo M, Meringer M, Freeland S, Rasulev B, Cleaves HJ, II. 2015. Extraordinarily Adaptive Properties of the Genetically Encoded Amino Acids. *Scientific Reports*, 5: 9414.

多様なタンパク質高分子は遺伝子上にコードされた、20種類のアミノ酸で構成され、地球上のほぼあらゆる生命が共通のアミノ酸を利用する。これまでの研究は、遺伝的にコードされた20のアミノ酸の集合は非ランダムで適応的な特性を示すという考え方を強く支持していたが、これらの結果の説得力は、考察対象とした代替的なアミノ酸の範囲が限られていたために限定的なものであった。本研究では、計算化学の新規な手法を導入することにより、遺伝的にコードされたアミノ酸の集合を、過去に使用可能だったものよりもはるかに大きく包括的な化学的可能性のあるアミノ酸集合と比較し、前者が自然淘汰に大きく影響されてきたことを実証した。本研究ではまた、適応的性質を考慮し、代替的な生化学的選択肢の妥当な候補になりうるいくつかの「より優れた集合」の探究に初めて取り組んだ。

17. Aono M, Kasai S, Kim SJ, Wakabayashi M, Miwa H, Naruse M. 2015. Amoeba-inspired nanoarchitectonic computing implemented using electrical Brownian ratchets. *Nanotechnology*, 26: 234001.

本研究では、アメーバ状生物が環境に適応的に振る舞い複雑な計算問題の解を探索する際に示す時空間ダイナミクスの本質を抽出することにより、多様な制約充足問題に対する解を探索するためのバイオインスパイア・アルゴリズムと、それを物理的に実装するナノアーキテクトニクス計算システムを提案した。

18. Aono M, Wakabayashi M. 2015. Amoeba-Inspired Heuristic Search Dynamics for Exploring Chemical Reaction Paths. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45: 339-345.

未知の化学反応の速度論を定量的に予測するために、第一原理計算に基づくアプローチで数マイクロ秒よりも長い時間のシミュレーションを行おうとすると、莫大な計算コストが要求される。本研究では、NP完全の制約充足問題を解くためのバイオインスパイア・アルゴリズムを拡張し、化学反応を原子の結合状態に関する最適な組み合わせが探索される確率的ダイナミクスとしてモデル化する、ヒューリスティックなアプローチを導入した。これにより、将来的には未知の化学反応ダイナミクスを低計算コストで半定量的に予測することが可能になると期待できる。

#### 研究成果[6] 「乱雑な化学 (Messy Chemistry)」 の概念化

19. Virgo N, Ikegami T, McGregor S. 2016. Complex Autocatalysis in Simple Chemistries. *Artificial Life*, 2: 1-15.

地球上の生命は、最初は非生物学的化学現象から発生したはずである。本研究では、熱力学的に可逆なレジームにある非常に単純な化学現象であっても、複雑な自触媒サイクルの形成を自己組織的に実現

できることを、単純ではあるが熱力学的に合理性のある人工化学モデルを用いて実証した。サイクルを調節することで、振動や双安定性といった非線形現象が生じる。とくに後者は、生命の起源を考える上で興味深い知見である。

20. Virgo N, Guttenberg M. 2015. Heredity in Messy Chemistries. Proceedings of the European Conference on Artificial Life 2015, 325–332.

生命の起源における興味深い疑問の一つは、化学的現象からどのようにして自然選択が出現するのかという問題である。自然選択が進展するためには、十分な大きさの進化的な探索空間が必要である。遺伝のような鋳型ベースの複製を行うシステムの場合、この空間のサイズは情報伝達分子の長さが作り出す組み合わせによって規定され、それは十分に大きくなければならない。このことから、反応ネットワークの構造はそれがサポートする遺伝的状態の数とどのような関連にあるのか、特に、遺伝的状態の数は任意のネットワークトポロジーにおけるシステムのサイズにどのように対応するのかという疑問が生まれる。本研究では、固定点の近傍で機能できる独立した自触媒的サブネットワークの集合を検知できることを実証した。さらに、非構造的ネットワークにおいて、コアの数は最良のケースでも  $\log(N)$  のスケールとなるが、ネットワークトポロジーに強いエネルギー的制約を加えることにより線形のスケールが可能になり、これが起こりうる最良のケースであることを示した。

#### 研究成果[7] 電気化学がもたらす生命の起源

21. Aono M, Kitadai N, Oono Y. 2015. A Principled Approach to the Origin Problem. Origins of Life and Evolution of Biospheres, 45: 327-338.

生命の起源に至るキーポイントとなったのは生命の多様な構成部品が非生物的に合成されたことではなく、複雑なシステムが出現したことにあったと主張することにより、本稿では、複雑システムの起源の実験的調査のために「原始代謝」と呼ばれる非酵素的炭素固定ネットワークを構築する方法を示唆した。

#### 研究成果[8] 地球化学と連結した微生物生態学、および現代の初期地球類似環境における生物学

22. Yamazaki T, Hozuki T, Arai K, Toyoda S, Koba K, Fujiwara T, Yoshida N. 2014. Isotopomeric characterization of nitrous oxide produced by reaction of enzymes extracted from nitrifying and denitrifying bacteria. Biogeosciences, 11: 2679-2689.

亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) は強力な温室効果ガスの一つであり、多様な微生物によって脱窒や硝化の際に生成される。 $N_2O$  中における  $^{15}N$  の部位優先性 (SP値) は、 $N_2O$  生成経路を定量的に識別できる有効なツールであることが報告されている。本研究では、異なる生物学的経路で生成された  $N_2O$  の SP 値を測定することにより、従来の培養実験では  $NH_2OH$  酸化経路による SP 値は過小評価されていた可能性が明らかになった。その原因は、おそらく  $N_2O$  が亜硝酸還元経路からもわずかに寄与する可能性がある。さらに、 $N_2O$  に関わる他の代謝過程については、一般的な酵素を用いて、それぞれ  $N_2O$  同位体分子種の特徴を評価することにより、多様な環境における  $N_2O$  の同位体分子種による解析法が改善されると思われる。

23. Matsubayashi H, Kuruma Y, Ueda T. 2014. In Vitro Synthesis of the E. coli Sec Translocon from DNA. Angewandte Chemie-International Edition, 53: 7535-7538.

人工細胞とは、タンパク質や DNA、RNA、リン脂質などの生体成分で構成された、自律的で自己複製能を持つ擬似細胞である。このような人工細胞を作製する実際的な戦略は、生体分子を組み立てて、生物システムの構造と機能を再現することである。本研究では、タンパク質膜透過チャネルである、Sec トランスロコンの構成タンパク質を試験管内で合成し、人工的に脂質膜上に構築することに成功した。このように合成された大腸菌の Sec トランスロコンは、細胞内と同様な膜透過チャネル機能を示した。これらの結果は、遺伝情報からタンパク質合成を介して、膜の機能化までを再構築したものであり、現実的な人工細胞の構築を示唆するものである。

24. Kimura J, Kitadai N. 2015. Polymerization of Building Blocks of Life on Europa and Other Icy Moons. Astrobiology, 15: 430-441.

本研究の結果は、熱力学的計算結果にもとづき、氷衛星 (エウロパなど) の低温環境においてアミ

ノ酸とヌクレオチドの重合が自然発生的に進行した可能性を明らかにした。これは、地球外生命の起源と初期進化に対して適正な制約条件を提示するものである。

25. Rein H, Fujii Y, Spiegel DS. 2014. Some inconvenient truths about biosignatures involving two chemical species on Earth-like exoplanets. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111: 6871-6875.

太陽系外惑星の大気において強力な熱化学的非平衡が検出されていることは、生命の潜在的な徴候ではないかと考えられている。本研究では、系外惑星の周囲を回る衛星の存在によって起こりうる偽陽性に対し、これまでは特定されていなかったシナリオを詳述する。このシナリオは、本手法に付随する非平衡やその他のあらゆる生物の痕跡を模倣することができる。最も楽観的なスペクトル分解能から考えても、単独の惑星と惑星-衛星システムの識別は一般的には不可能と考えられる。本研究ではまた、真正の生物痕跡をもたらし得る二つの可能性について考察する。

#### 研究成果[9] 初期分子および微生物の進化と合成生物学

26. Nishizawa M, Miyazaki J, Makabe A, Koba K, Takai K. 2014. Physiological and isotopic characteristics of nitrogen fixation by hyperthermophilic methanogens: Key insights into nitrogen anabolism of the microbial communities in Archean hydrothermal systems. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 138: 117-135.

本研究では、地球の熱水環境に生息する超好熱性および好熱性メタン生成菌 (*Methanocaldococcus* and *Methanothermococcus* strains) の窒素固定を含む窒素同化過程の生理学的特性と、その同位体的特徴について初めて報告する。これらのメタン菌は、嫌気性のメタン酸化古細菌とともに、特異的なニトロゲナーゼ同族体を有しており、それはすでに特性付けが行われている鉄-モリブデン、鉄-バナジウム、鉄-鉄補因子を有するニトロゲナーゼとは系統的にクラスターを形成しないことが知られている。培養実験は、現代および過去の海洋熱水環境を再現するために、多様な環境条件下で行った。その結果、窒素固定を行うメタン菌は窒素固定能をもつ光合成原核生物よりも<sup>15</sup>N含有量が低いバイオマスを生成すること等、新知見が得られた。メタン菌の比較的大きな同位体分別効果とその進化的意義についても考察した。

27. Tsukatani Y, Masuda S. 2015. Elucidation of Genetic Backgrounds Necessary for Chlorophyll a Biosynthesis Toward Artificial Creation of Oxygenic Photosynthesis. Origins of Life and Evolution of Biospheres, 45: 367-369.

本研究は、現代における光栄養色素の出現に必要であったゲノム背景の特性を実験的に明らかにすること試みるものである。一般的に、新たな機能の進化は、既存の機能を組み合わせることにより新たな分子的な状況を作り出すという方法でのみ実現することができる。光合成システムという進化的イノベーションのシステム生物学を強調するという点で、本論文はKacar et al.の研究 (Reconstructing the phylogenetic history of RuBiSCO proteins. 2015. LPI Contributions, 7580) と同じ方向性で、補完的なものである。本研究は「地球-生命システムの共進化」のロードマップ領域に分類されており、地球-生命の重要な遷移を重点的に取り上げている。

28. Rensen EI, Mochizuki T, Quemin E, Schouten S, Krupovic M, Prangishvili D. 2016. A virus of hyperthermophilic archaea with a unique architecture among DNA viruses. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113: 2478-2483.

本研究は、初期の生命と進化の二つの側面の理解に核心的な役割を果たすものである。すなわち、1) ウィルス圏の進化史に現われているゲノム系譜や細胞系譜との部分的独立性を理解し、2) 核酸/タンパク質から成る単純な会合体が取りうる構造の多様性の理解を試みる。単純なDNAおよびRNAシステムにおける温度限界と、このような環境下でもたらされる構造についての知見は、現在のタンパク質翻訳機構が出現する前のRNAワールドの動態とも関連すると考えられる。初期生命に関するいくつかの仮説には、細胞からは独立した系譜であるウィルスが果たす重要な役割が含まれており、例えばDNA分子の起源のような生命進化上の重要な遷移に資すものもあったのではないかと考えられている。本研究は「地球-生命システムの共進化」のロードマップ領域に分類されており、地球-生命の主要な遷移、古代の生物システム、生存状態の性質を重点的に取り上げている。

29. [Amikura K](#), Sakai Y, Asami S, [Kiga D](#). 2014. Multiple Amino Acid-Excluded Genetic Codes for Protein Engineering Using Multiple Sets of tRNA Variants. *Acs Synthetic Biology*, 3: 140-144.

本研究で扱うのは現在のアミノ酸リストやその遺伝コードの前に存在していた可能性のある、より単純な段階の生物学的アミノ酸のリストやその遺伝コードである。より一般的に言うと、合成生物学的アプローチを駆使して生物学的機能の問題に対する進化的解を再発見しようとするELSI研究者らの研究の一例である。我々は、このような方法により、伝統的な推論では直接的に再構築できない進化の制約を理解できるのではないかと期待している。このような能力は遺伝コードの発生には特に重要である。これらの発生は安定したゲノム系譜が存在するよりも前の時代に起こったものと考えられるからである。本研究は「原始細胞」のロードマップ領域に分類されており、複雑系への移行を重点的に取り上げている。

30. Kawahara-Kobayashi A, Hitotsuyanagi M, [Amikura K](#), [Kiga D](#). 2014. Experimental Evolution of a Green Fluorescent Protein Composed of 19 Unique Amino Acids without Tryptophan. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 44: 75-86.

本研究では、ランダムな突然変異誘発と淘汰から構成されるラウンドを反復的に行う定向進化を用い、トリプトファンなしの19のアミノ酸から構成される緑色蛍光タンパク質 (GFP) の作出について報告する。最初の変異体GFPタンパク質は活性が低かったが、2ラウンドの実験的進化を通じて有益な突然変異を蓄積することにより、活性を獲得した。実験的進化を使用し、トリプトファンなしの19のアミノ酸タンパク質において確認された活性向上の記録は、有益な突然変異の蓄積を容易に観察できるものであり、タンパク質進化の後期段階に対する補足的な見識を提供するものである。

31. Kuruma Y. 2015. Creation of Simple Biochemical Systems to Study Early Cellular Life. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45: 359-360.

本研究では転移タンパク質の発現を調べるための無細胞実験システムの開発について報告する。これは、(Amikura et al. [29]による研究とともに) 人工システムで中心的な生物学的機能を再現するシステム生物学的アプローチの二つ目の例である。本研究は「原始細胞」のロードマップ領域に分類される。

#### 研究成果[10] 化学進化における情報の起源

32. [Guttenberg N](#), [Laneville M](#), Ilardo M, Aubert-Kato N. 2015. Transferable Measurements of Heredity in Models of the Origins of Life. *Plos One*, 10: e0140663.

生命の起源理論におけるマイルストーンの一つは、非生命的環境から連続的に進化が起きる環境への移行がどのように起きたかを理解することである。複製能に加え、ダーウィン進化の仕組みには、遺伝可能な変異を産み出し、かつ選択圧に適応することのできるシステムが必要である。本研究では、任意の動的システムにおいて遺伝可能な変異量の計算を可能にする主成分分析 (PCA) ベースの遺伝学的メトリックを提示する。このメトリックは任意のテスト系において存在する種やモジュールの数を正確に検知するだけでなく、非自明型モデルシステムにおける組成遺伝率の事前条件を精確に再現することができる。

33. [Cleaves HJ](#), Meringer M, Goodwin J. 2015. 227 Views of RNA: Is RNA Unique in Its Chemical Isomer Space? *Astrobiology*, 15: 538-558.

RNAワールド仮説は広く受容されているが、過去50年間にわたって活発な研究が行われているにも関わらず、RNA分子の非生物的合成の過程はあまりよく理解されていない。本研究では、リボシドのあらゆる異性体とその類縁体の構造を列挙し、それらの重合反応の可能性と、生じる分子の物理化学的特性を、計算機上で評価した。複数のデータベースを用い、計算した異性体のうち実際に合成されているものの有無を照会したところ、この構造セットの多くの分子は未報告であることも明らかになった。我々は、地球史においてリボヌクレオシドは数多くの異なる物質と競合した可能性がある」と結論付けた。原始生化学や非生物的合成の時代におけるこれらの代替物質が潜在的に果たした役割は今後の研究対象である。

34. Wang J, Bonnesen PV, Rangel E, Vallejo E, Sanchez-Castillo A, [Cleaves HJ](#), Baddorf AP, Sumpter

BG, Pan M, Maksymovych P, Fuentes-Cabrera M. 2016. Supramolecular polymerization of a prebiotic nucleoside provides insights into the creation of sequence-controlled polymers. *Scientific reports*, 6: 18891-18891.

本論文では、特定の基板物質上での重合反応は配列が制御されたポリマー高分子の作製に有効なアプローチとなるかどうかを確認することを目的に、Au(111)におけるヌクレオシドの自己集合化について研究した。走査型トンネル顕微鏡と密度汎関数理論を用いて、アデノシンの前生物学的ヌクレオシド類縁体と考えられている(RS)-N<sup>9</sup>-(2,3-dihydroxypropyl)adenine (DHPA) のAu(111)上での自己集合化について調査した。その結果、DHPA分子は水素結合型ポリマー高分子へと自己集合し、この高分子はほぼ例外なく、ヘリンボーン型の再構築パターンに沿って成長しながら、数百ナノメートルにわたって繰り返される二つの構成要素からなる配列を持ち、電子誘発励起によって消去可能であることが確認された。ポリマー化反応は乾燥した基板上で起こり、高分解能の撮像法と精確なモデリング手法によって測定することができる。これらの特性から、基板物質上でのヌクレオシドの自己集合反応は配列制御型ポリマーを設計する際の魅力的なアプローチになりうると考えられる。

35. Izgu EC, Fahrenbach AC, Zhang N, Li L, Zhang W, Larsen AT, Blain JC, Szostak JW. 2015. Uncovering the Thermodynamics of Monomer Binding for RNA Replication. *Journal of the American Chemical Society*, 137: 6373-6382.

原始RNAの非酵素依存複製は、生命の起源において非常に重要な段階であったものと考えられている。しかしながら、数十年に及び取り組みにもかかわらず、モデル鋳型を複製する効率や精確さが低いことが、これまでのところ非酵素型RNA複製の実験による実証を阻んでいる。本研究では、<sup>1</sup>H NMR分光法を分子動態の構造計算で補完することにより、リボヌクレオチドリン酸(rNMP)がRNAとDNAの両方のプライマー-鋳型複合体と非共有結合する結果を示している。本研究は、結合反応はその後起きるプライマーの伸長反応とは異なる化学反応であることを示したことで、酵素非依存的に、鋳型分子により引き起こされるRNAの重合反応に関する新たな知見を提供するものである。本研究において得られるリボヌクレオチドの熱力学的会合定数は、より忠実度が高く、効率の良いRNA複製系の設計に有益である。

36. Larsen AT, Fahrenbach AC, Sheng J, Pian J, Szostak JW. 2015. Thermodynamic insights into 2-thiouridine-enhanced RNA hybridization. *Nucleic Acids Research*, 43: 7675-7687.

RNAの重要で多様な役割には、多くの正確な3次元構造が必要である。核酸塩基の修飾により、核酸の構造と熱力学は変化する。本研究では、tRNAにおいて見出され、U:A塩基対を安定化するとともに、U:Gゆらぎ対を不安定にする修飾核酸塩基である2-チオウリジン(s2U)に注目し、内部にs2U:Aやs2U:U対を含むRNA二本鎖とその天然型であるU:AやU:U対を含むRNA二本鎖の形成に関する熱力学的評価結果を提示する。本研究ではまた、s2Uが一本鎖の構造やヌクレオシドの構造に及ぼす影響を実験的に評価する。これらの結果は核酸塩基の修飾がRNAの構造と熱力学的特性に及ぼす影響に対する情報を提示し、リボザイム触媒型と非酵素型のRNA複製実験の効率改善に向けた取り組みに知見を与えるものである。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料2-3. 国内外共同研究協定締結一覧

1. 協定の相手方：  
国立大学法人愛媛大学  
協定の名称：  
地球深部の化学組成と進化過程に関する実験的・理論的研究に関する共同研究契約書  
締結時期：  
平成24年12月7日  
協定の概要：  
愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターが所有する世界最大・最多の特徴あるマルチアンビ  
ル装置群を駆使するとともに、世界を先導する第一原理シミュレーション計算に基づき、固体地球  
の起源と進化・物質循環・熱構造などを追究する。
2. 協定の相手方：  
国立研究開発法人海洋研究開発機構  
協定の名称：  
地球初期、生体分子、地殻マントルに関する物質科学的研究に関する共同研究契約書  
締結時期：  
平成26年4月1日  
協定の概要：  
初期地球生体分子、地殻・マントル・構成物質と化学的特徴を解明することは固体地球の初期環  
境進化と初期生命史を解明する上で必要不可欠である。本共同研究は、初期地殻、初期海洋、初期  
生命史の解読をめざす。
3. 協定の相手方：  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
協定の名称：  
「惑星生命探査基礎科学」の連携・協力の推進に関する協定書  
締結時期：  
平成27年8月26日  
協定の概要：  
地球外生命探査及びサンプルリターンに向け現在の知見を超えた基盤的基礎科学を究明し、それ  
に基づいた斬新かつ独創的な科学探査目標を設定するとともに、探査を支える若き人材の発掘・育  
成を図る。
4. 協定の相手方：  
慶応大学  
協定の名称：  
原始地球環境における生体関連高分子の合成と進化に関わるアストロバイオロジー的研究に関  
する共同研究契約書  
締結時期：  
平成28年2月18日  
協定の概要：  
地球生命誕生を準備する原始海洋環境での分子進化プロセス研究を大きく展開するため、慶應大  
学先端生命科学研究所が有する最先端の化学物質分析装置である液体クロマトグラフィー質量分析  
計（LCMS）とキャピラリー電気泳動質量分析計（CE-MS）を利用することで、ELSIで行う模擬深海熱  
水反応実験を通じて得られる様々な有機化合物の種類と時間的变化に伴う定量的データを得るこ  
とを目的とする。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料2-4. 主な賞の受賞・招待講演・基調講演等一覧

#### 1. 主要な賞の受賞

- ・既に受賞したあるいは内定しているもの（国際的に認知されている賞）について新しいものから順に記載すること
- ・それぞれの受賞について、受賞者名、賞の名前、受賞年を記すこと。なお、共同受賞の場合には、拠点関係者に下線を記すこと

- 1) 廣瀬敬、アメリカ地球化学会フェロー、2014
- 2) 廣瀬敬、ヨーロッパ地球化学会フェロー、2014
- 3) 丸山茂徳、日本地球惑星科学連合フェロー、2014
- 4) Joseph Kirschvink、日本地球惑星科学連合フェロー、2014
- 5) Albert C. Fahrenbach、IUPAC-SOLVAY International Award for Young Chemists、2014
- 6) 入船徹男、A. E. Ringwood賞、2014
- 7) 野村龍一、SPRUC 2014 Young Scientist Award、2014
- 8) 丸山茂徳、GSA Honorary Fellow、2014
- 9) 土屋卓久、日本鉱物科学会学会賞、2014
- 10) Joseph Kirschvink、George P. Woollard Award、2014
- 11) 野村龍一、Spring-8萌芽的研究アワード、2014
- 12) 西真之、日本高圧力学会奨励賞、2014
- 13) 野村龍一、井上研究奨励賞、2014
- 14) 市川浩樹、文部科学大臣表彰科学技術賞、2015
- 15) Joseph Kirschvink、Royal Institute of Navigationフェロー、2015
- 16) Joseph Kirschvink、Geological Society of Americaフェロー、2015
- 17) 入船徹男、紫綬褒章、2015
- 18) 入船徹男、R.W. Bunsen Medal (EGU)、2015
- 19) 藤井友香、井上研究奨励賞、2016
- 20) 木賀大介、日本学術振興会賞、2016

#### 2. 国際会議・国際研究集会での招待講演・基調講演等

- ・主要なもの10件以内について新しいものから順に記載すること
- ・それぞれの講演等について、講演者名、発表タイトル、国際会議等名、開催年を記載すること

- 1) 青野真士 "Oligopeptide formation in geysers"、 [Invited talk] Gordon Research Conference on Origins of Life, Galveston, Texas, Jan. 19, 2016.
- 2) 木賀大介 "Simplification of the genetic code: Restricted diversity of genetically encoded amino acids"、 [Invited talk] Chemical approaches to astrobiology, Pacificchem 2015, Honolulu, HI, USA, Dec 20, 2015
- 3) Kirschvink, J.L. & Kobayashi, A., "Biophysical Puzzles Concerning Magnetite-Based Magnetoreception in the Common Nematode, *Caenorhabditis elegans*"、 [Invited talk] AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 2015  
<https://agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/59724>
- 4) David Eric Smith, "Phase transitions in the origin of the biosphere"、 [Keynote talk] Workshop "Reconceptualizing the Origin of Life", Carnegie Institution of Washington, November 15, 2015
- 5) 黒川顕 "Small Bugs, Big Data": Developing an integrated database for microbes with semantic web technologies" [Invited talk] ICSTI2014 General Assembly & Annual Conference in Tokyo, Oct 20 2014
- 6) 入船徹男 "Multi-anvil high-pressure technology and mineralogy of the deep mantle" [keynote, invited] Australian Earth Sciences Convention 2014, Canberra, July 2014

- 7) 廣瀬敬 “The discovery of post-perovskite and its unique physical property” [keynote talk] A meeting for the 10<sup>th</sup> anniversary of the discovery of post-perovskite, Bristol, UK, June 2014
- 8) 井田茂 “Planetary Dynamics: Semi-Analytical Approach” [Invited talk] Secind ISSI Meeting, Bern Switzerland, June 2014
- 9) 上野雄一郎 “Archean geology” [Invited talk] Gordon Research Conference, Galveston, USA , January, 2014
- 10) 藤本正樹 “BepiColombo MMO” [Invited talk] AOGS Meeting, Brisbane, Australia, , June 24-28, 2013,

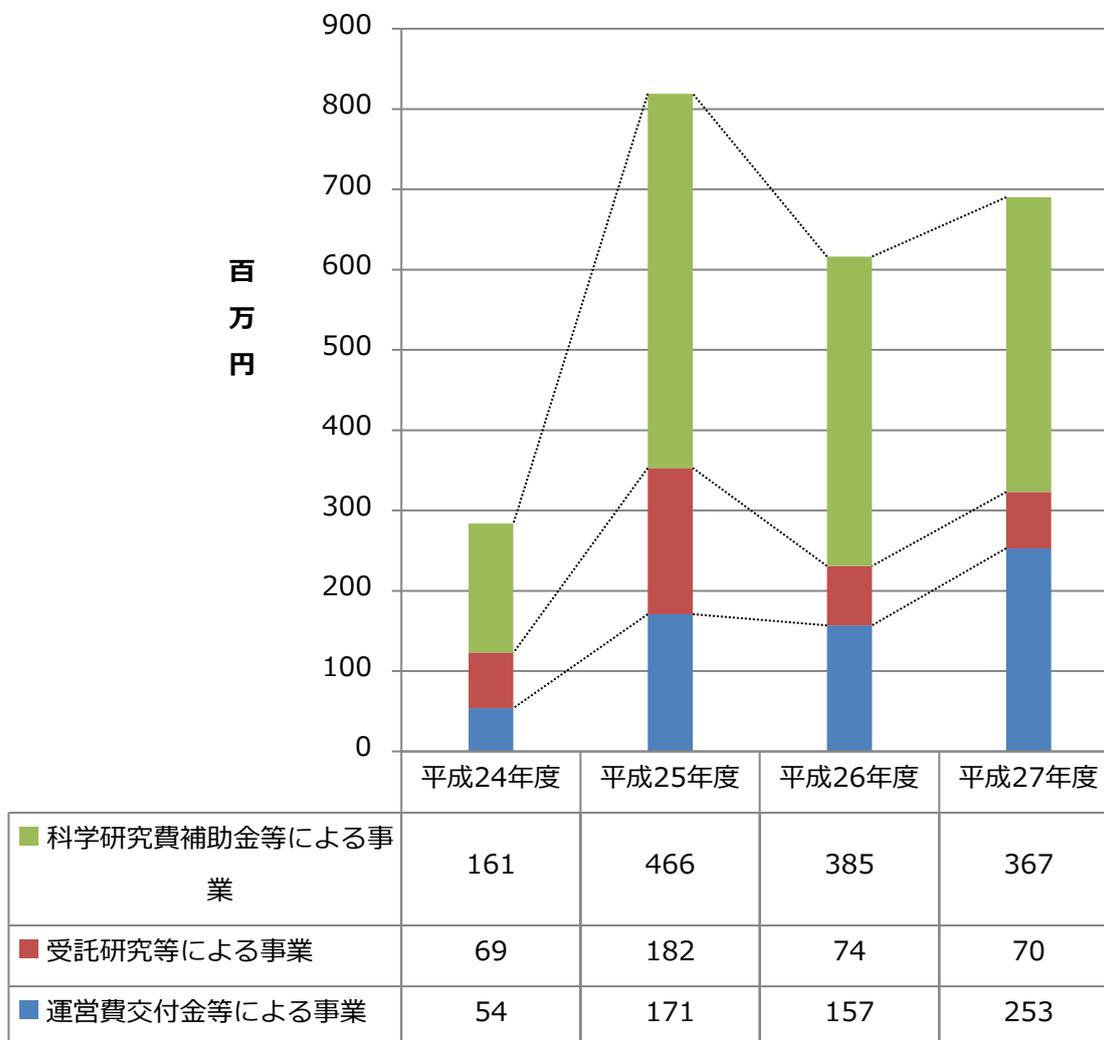
## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料2-6. 研究プロジェクト費の獲得実績

※研究プロジェクト費の獲得実績を棒グラフで表すこと。

(例)

#### 研究プロジェクト費の年次推移



・特筆すべき外部資金については、その名称と総額を含めつつ、以下で説明すること。

平成24年度

・  
・

平成25年度

・ 科研費 特別推進研究 165,000,000

・

平成26年度

・ 科研費 新学術領域研究（研究領域提案型） 68,200,000円

・

平成27年度

・ 寄附金 テンプルトン財団 88,104,017円

・

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料2-8. 平成27年度の主な研究成果等に係るメディア報道一覧

※主なものを精選し、2ページ以内で作成すること

No.	日時	媒体名 (新聞、雑誌、テレビ等)	内 容 概 略
1	2015/4/13	NHK総合 (テレビ)	クローズアップ現代「ついに発見!? 地球外生命に挑む科学者たち」
2	2015/4/14	NHKラジオ第1 (ラジオ)	先読み! 夕方ニュース「生命体がいそうな天体探し」
3	2015/5/19	岩波書店 (書籍)	できたての地球——生命誕生の条件——
4	2015/5/19	美匠社 (書籍)	日本のトップレベル研究者に聞く
5	2015/7/16	GrassRoots Community Network (テレビ)	Aspen Science Highlights - "New Theories on the Origin of Life" with Eric Smith, Ph.D.
6	2015/7/31	東京大学出版会 (書籍)	宇宙生命論 Life in the Universe
7	2015/8/8	毎日新聞 Yahoo! News LabOnline他 (新聞、WEBニュース)	東工大: 米財団が6億7000万円寄付 東工大地球生命研究所が米財団から約6億7000万円の研究資金を獲得! A new search for the origin of life
8	2015/8/17	Nature Japan	<Scientific Reports> 単一光子による意思決定
9	2015/9/25	新潮社 (書籍)	地球の履歴書
10	2015/10/1	NHK BS プレミアム (テレビ)	コズミック フロント☆NEXT 「地球誕生のミステリー」
11	2015/10/5	BBC、Huffington Post Science News他 (テレビ、新聞、WEBニュース)	The tsunami that engulfed an island Ancient Tsunami Was Nearly As Tall As The Eiffel Tower, Scientists Say Ancient tsunami heaved 700-ton boulders over island cliffs

1 2	2015/10/28	日経バイオテク ONLINE (WEBニュース)	国立大学法人東京工業大学、地球初期の大気環境復元に手がかりー二酸化硫黄の紫外吸収スペクトルを全同位体で決定ー
1 3	2015/10/29	信濃毎日新聞 大系タイムズ (新聞)	東工大・黒川教授 白馬高校で講義 「白馬で探る生命のルーツ」 蛇紋岩 八方は貴重な研究地
1 4	2015/11/18	Phys.org 日経バイオテク ONLINE (WEBニュース)	Researchers provide a unified explanation of changes in volume of ice 国立大学法人 東京工業大学、氷の体積同位体効果の本質を解明ー統一的な理論構築と実験による実証に成功ー
1 5	2015/11/24	EurekAlert! (WEBニュース)	Liquid acoustics half way to the Earth's core
1 6	2015/12/7	W. W. Norton & Company (書籍)	A Brief History of Creation: Science and the Search for the Origin of Life
1 7	2016/1/4	Scientific American (雑誌)	The Search for the Origin of Life
1 8	2016/1/14	日経産業新聞 (新聞)	生命の起源 解明に懸ける
1 9	2016/1/14	河出書房新社 (書籍)	生物はなぜ誕生したのか: 生命の起源と進化の最新科学
2 0	2016/1/16	株式会社文藝春秋 (雑誌)	文藝春秋 2月号<新・リーダーの条件>日本を元気にする逸材125人
2 1	2016/2/5	Natureダイジェスト (雑誌)	<News in Japan> 生命誕生のカギを宇宙に探す新拠点誕生!
2 2	2016/2/5	月刊星ナビ (雑誌)	人類の根源的な問いに挑む
2 3	2016/2/12	ITmedia (WEBニュース)	<宇宙ビジネスの新潮流> 「地球外生命体」と「火星移住」を研究する日本人を知っていますか?
2 4	2016/2/14	Eテレ (テレビ)	サイエンスZERO「惑星誕生! ジャイアントインパクト」

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料3. 代表的な融合研究の成果論文一覧

- ・融合研究の成果を裏付ける論文のうち代表的なもの10編以内を挙げ、それぞれについて10行以内で解説すること。
- ・それぞれの論文は箇条書きとし、著者名・発行年・雑誌名・巻号・掲載ページ・タイトルを記載すること。（記載順番は様式中で統一してあればこの限りではない）なお、著者が複数ある場合には、拠点の研究者に下線を記すこと。
- ・著者が多数（10名以上）の場合は、全著者名を記載する必要はない。

1. Tian F, Ida S. 2015. Water contents of Earth-mass planets around M dwarfs. *Nature Geoscience*, 8: 177-180.

ハビタブルな太陽系外惑星の同定するにあたり、太陽質量の半分未満の暗い恒星であるM型矮星周りの系に重点が置かれてきた。M型矮星周辺のハビタブル惑星は、太陽のようなG型惑星の回りを周回するものよりも数が多く、検知しやすいと考えられている。ただし、G型矮星と異なり、M型矮星はその歴史の初期に光度が長期にわたって低下し、ハビタブルゾーンが内側に移行して、その後に水が失われる。本研究は数値的な惑星統計合成モデルと水散逸モデルを統合し、恒星光度の進化によってM型矮星周辺のハビタブルゾーンに地球のような質量を持つ二種類の惑星が作られることを示した。これらの惑星とは、大陸のない海惑星と、地球よりも何倍も表面水が少ない砂漠惑星である。シミュレーションの結果は、太陽の大きさに近い恒星（G型矮星）を地球型惑星の検出における主要なターゲットとすべきであることを示唆している。

2. Nakajima Y, Imada S, Hirose K, Komabayashi T, Ozawa H, Tateno S, Tsutsui S, Kuwayama Y, Baron AQR. 2015. Carbon-depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid iron-carbon alloy. *Nature Communications*, 6: 8942.

地核における軽元素の相対的度数は長い期間にわたって議論を呼んできた。近年、地核中の炭素の存在が強制的に取り上げられている。内核の密度や音速が固体Fe7C3と一致する可能性があるからである。本研究では、非弾性X線散乱測定結果にもとづいて、70GPaまでにおける液体Fe84C16の縦波音速を報告する。この速度は固体鉄やFe3Cよりも実質的に遅く、液体鉄よりは速いことが確認された。また、1バールにおける以前の密度測定と速度データを組み合わせることにより、液体Fe84C16に対する熱力学的状態式を得た。液体鉄よりも約4%速い外核の縦速度は、4~5%の原子状炭素の存在と一致する。ただし、この量の炭素では値が小さすぎて外核の密度欠損を説明することができず、炭素が地核における支配的な軽元素にはなりえないことを示唆している。

3. Nishizawa M, Miyazaki J, Makabe A, Koba K, Takai K. 2014. Physiological and isotopic characteristics of nitrogen fixation by hyperthermophilic methanogens: Key insights into nitrogen anabolism of the microbial communities in Archean hydrothermal systems. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 138: 117-135.

本研究では、地球の熱水環境に生息する超好熱性および好熱性メタン生成菌 (*Methanocaldococcus* and *Methanothermococcus* strains) の窒素固定を含む窒素同化過程の生理学的特性と、その同位体的特徴について初めて報告する。これらのメタン菌は、嫌気性のメタン酸化古細菌とともに、特異的なニトロゲナーゼ同族体を有しており、それはすでに特性付けが行われている鉄-モリブデン、鉄-バナジウム、鉄-鉄補因子を有するニトロゲナーゼとは系統的にクラスターを形成しないことが知られている。培養実験は、現代および過去の海洋熱水環境を再現するために、多様な環境条件下で行った。その結果、窒素固定を行うメタン菌は窒素固定能をもつ光合成原核生物よりも<sup>15</sup>N含有量が低いバイオマスを生成すること等、新知見が得られた。メタン菌の比較的大きな同位体分別効果とその進化的意義についても考察した。

4. Aono M, Kitadai N, Oono Y. 2015. A Principled Approach to the Origin Problem. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45: 327-338.

生命の起源に至るキーポイントとなったのは生命の多様な構成部品が非生物的に合成されたことではなく、複雑なシステムが出現したことにあったと主張することにより、本稿では、複雑システムの起源の実験的調査のために「原始代謝」と呼ばれる非酵素的炭素固定ネットワークを構築する方法を示唆した。

5. Suda K, Ueno Y, Yoshizaki M, Nakamura H, Kurokawa K, Nishiyama E, Yoshino K, Hongoh Y, Yoshida

N, Maruyama S, et al. 2014. Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: The CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters*, 386: 112-125.

本研究では蛇紋岩を母岩とする新たなシステムの体系的な同位体研究について報告する。研究の結果は、水素ガスからではなく、水からの直接的な非生物的メタン産生の方が一般的であった可能性が高く、蛇紋岩を母岩とするシステムにおけるメタン発生機構を再考する必要があることを示唆している。

6. Tahata M, Sawaki Y, Ueno Y, Nishizawa M, Yoshida N, Ebisuzaki T, Komiya T, Maruyama S. 2015. Three-step modernization of the ocean: Modeling of carbon cycles and the revolution of ecological systems in the Ediacaran/Cambrian periods. *Geoscience Frontiers*, 6: 121-136.

エディアカラ紀には、多細胞動物の出現により、地球の生態学的システムが、根本的に変化したと考えられている。このイベントは大気海洋の酸化、栄養素供給量の増大、および超大陸ロディニアの分裂と時を同じくしている。本研究では、エディアカラ紀から初期のカンブリア紀における炭素同位体記録を再現するための数値モデルを構築した。本モデルによる研究の結果、エディアカラ紀における、炭素同位体比の負異常イベントは、全球的炭素循環もしくは生態学的な三つの主要な変化に関連していることを示している。これらの三つとは、(1)好気呼吸を効率的に行う動物の出現により、有機物酸化効率が高まったこと、(2)シアノバクテリアから大型藻類への一次生産者への変化に対応する炭素同位体分別係数の上昇、さらに(3)後生動物に属する動物プランクトンによって駆動される生物ポンプが機能し始めたことにより、効率的な有機炭素の埋没が開始したことである。

7. Kimura J, Kitadai N. 2015. Polymerization of Building Blocks of Life on Europa and Other Icy Moons. *Astrobiology*, 15: 430-441.

本研究の結果は、熱力学的計算結果にもとづき、氷衛星（エウロパなど）の低温環境においてアミノ酸とヌクレオチドの重合が自然発生的に進行した可能性を明らかにした。これは、地球外生命の起源と初期進化に対して適正な制約条件を提示するものである。

8. Mitchell RN, Raub TD, Silva SC, Kirschvink JL. 2015. Was the Cambrian explosion both an effect and an artifact of true polar wander? *American Journal of Science*, 315: 945-957.

最近、反復的な真の極移動（TPW）がエディアカラ紀ーカンブリア紀における動物の生命の大爆発を誘発したという、当初は議論を呼んだ仮説が、古地磁気や地質年代に対する数多くの精緻化によって理論的に裏付けられている。これらのデータは、5億3500万年前から5億1500万年における約75°のTPWを示唆しており、古生物学的に認められた後生動物の多様性と不同性の増大と一致している。本試験の結果は、よく知られている低緯度での多様性の生態駆動的増加と、TPW駆動型海進期における堆積岩の堆積増加を結びつけて考えるだけで、この進化傾向は説明できることを示すものである。四分円のTPWによる多様性の変化は、なぜ初期カンブリア紀に発生率と絶滅率が同時に上昇し、発生率が優勢だったのかという点に関する統一的な説明を提供している。

9. Wang J, Bonnesen PV, Rangel E, Vallejo E, Sanchez-Castillo A, James Cleaves II H, Baddorf AP, Sumpter BG, Pan M, Maksymovych P, Fuentes-Cabrera M. 2016. Supramolecular polymerization of a prebiotic nucleoside provides insights into the creation of sequence-controlled polymers. *Scientific reports*, 6: 18891.

本論文では、特定の基板物質上での重合反応は配列が制御されたポリマー高分子の作製に有効なアプローチとなるかどうかを確認することを目的に、Au(111)におけるヌクレオシドの自己集合化について研究した。走査型トンネル顕微鏡と密度汎関数理論を用いて、アデノシンの前生物的ヌクレオシド類縁体と考えられている(RS)-N9-(2,3-dihydroxypropyl)adenine (DHPA)のAu(111)上での自己集合化について調査した。その結果、DHPA分子は水素結合型ポリマー高分子へと自己集合し、この高分子はほぼ例外なく、ヘリンボーン型の再構築パターンに沿って成長しながら、数百ナノメートルにわたって繰り返される二つの構成要素からなる配列を持ち、電子誘発励起によって消去可能であることが確認された。ポリマー化反応は乾燥した基板上で起こり、高分解能の撮像法と精確なモデリング手法によって測定することができる。これらの特性から、基板物質上でのヌクレオシドの自己集合反応は配列制御型ポリマーを設計する際の魅力的なアプローチになりうると考えられる。

10. Endo Y, Danielache SO, Ueno Y, Hattori S, Johnson MS, Yoshida N, Kjaergaard HG. 2015.

Photoabsorption cross-section measurements of  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ , and  $^{36}\text{S}$  sulfur dioxide from 190 to 220 nm. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120: 2546-2557.

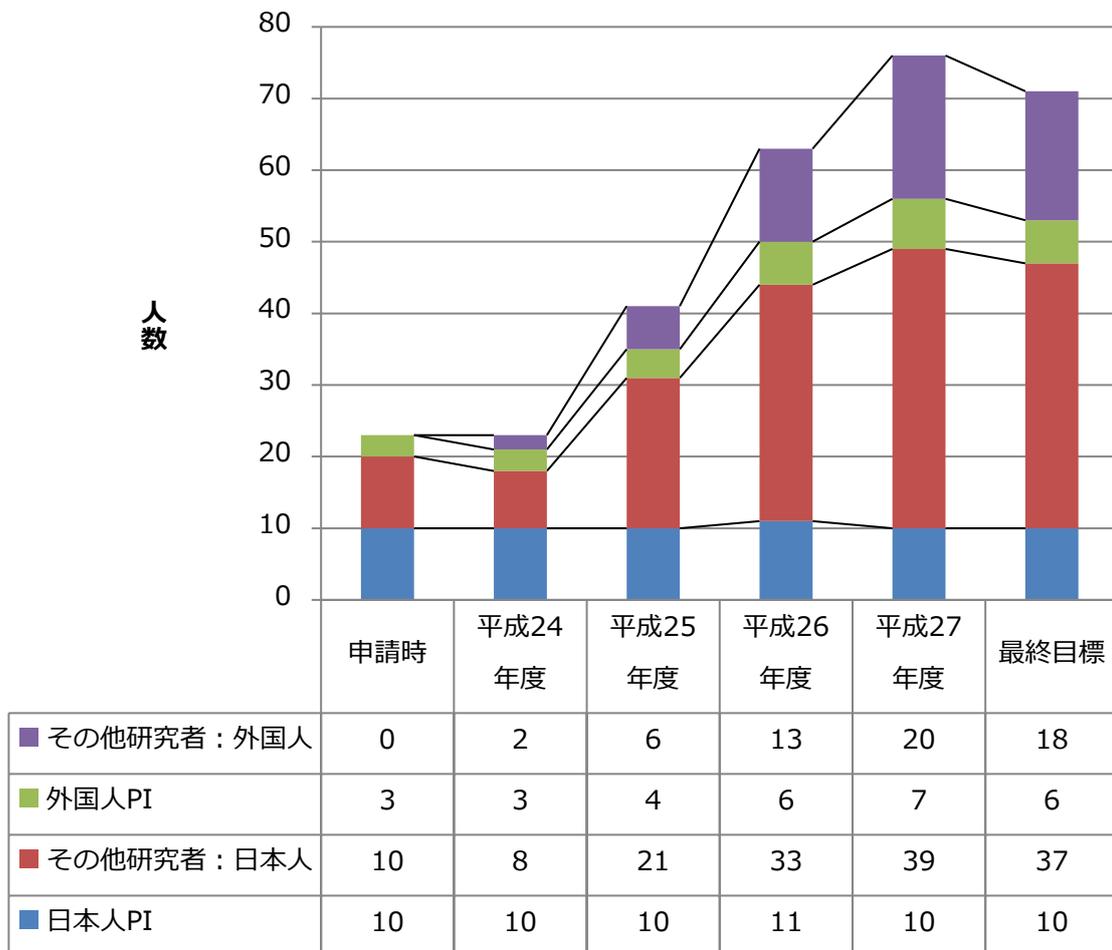
S<sub>2</sub>同位体分子の紫外吸光断面積は、惑星大気における硫黄同位体の光化学的分別を理解するのに不可欠である。本報告では以前に測定されたスペクトルを向上させ、これらを $^{36}\text{S}$ S<sub>2</sub>まで拡張した。得られた結果は、S<sub>2</sub>のUV光解離によって太古代の堆積記録における同位体の痕跡が再現されることを示唆している。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料4-2. 全研究者中の外国人研究者比率の年次推移

※申請時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。

#### 外国人研究者比率の年次推移



## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料4-3. ポスドクの国際公募の実施と応募・採用状況

・ 応募人数、採用人数の欄の下端に<外国人研究者数,%>としてそれぞれ内数を記載すること。

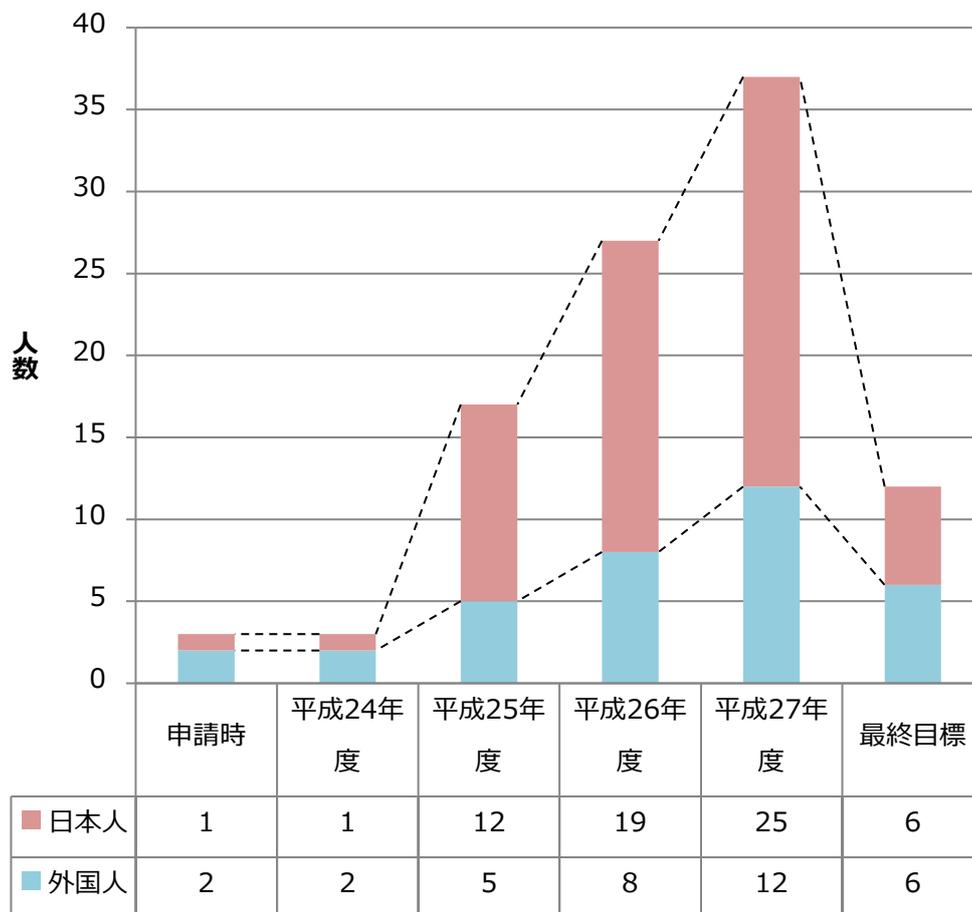
年度	応募人数	採用人数
平成24年度	該当なし < , %>	該当なし < , %>
平成25年度	134 < 125, 93%>	10 < 8, 80%>
平成26年度	該当なし < , %>	該当なし < , %>
平成27年度	72 < 52, 72%>	8 < 6, 75%>

## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料4-4. 外国人ポスドク比率の年次推移

※申請時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。

#### 外国人ポスドク比率の年次推移



## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

## 添付資料4-5. ポスドクの就職状況

・1名につき、1行で作成すること。記入欄が足りない場合は、適宜追加してもよい。

拠点所属期間	前職機関・所在国名	役職・就職先機関・所在国名	国籍
H25.3.8-H26.3.31	アリゾナ大学・米国	准教授・東京大学・日本	米国
H25.4.1-H27.10.31	東京大学(大学院生)・日本	ポスドクプログラムフェロー・NASA-GISS・米国	日本
H25.4.1-H28.3.31	理化学研究所・日本	研究員・東京工業大学・日本	日本
H25.4.1-H28.3.31	東京工業大学・日本	研究員・国立遺伝学研究所・日本	日本
H25.4.1-H28.3.31	東京工業大学・日本	研究員・九州大学・日本	日本
H25.4.1-H27.8.31	海洋開発研究機構・日本	研究員・岡山大学・日本	日本
H26.4.1-H28.3.31	東京工業大学(大学院生)・日本	研究員・愛媛大学・日本	日本
H26.4.1-H27.9.30	広島大学・日本	技術研究員・海洋開発研究機構・日本	日本
H26.4.1-H27.7.31	東京工業大学(大学院生)・日本	助教・東京大学・日本	日本
H26.6.1-H27.3.31	東京工業大学・日本	研究員・東京工業大学・日本	日本
H26.9.1-H27.7.31	ハワイ大学・米国	研究主幹・スイス連邦工科大学・スイス	ドイツ
H26.4.1-H28.3.31	東京工業大学・日本	研究員・産業技術総合研究所・日本	日本
H26.4.1-H26.8.31	東京工業大学・日本	研究員・理化学研究所・日本	日本
H26.4.1-H26.8.31	東京工業大学(大学院生)・日本	ポスドク研究員・カーネギー研究所・米国	日本
H27.4.1-H28.3.31	広島大学(大学院生)・日本	日本学術振興会特別研究員・九州大学・日本	日本
H27.4.1-H27.6.30	名古屋大学(大学院生)・日本	ポスドク研究員・ニールスボーア研究所・デンマーク	日本
H27.4.1-H27.9.30	東京工業大学(大学院生)・日本	研究員・高輝度光科学研究センター・日本	日本

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料4-6. 国際的な研究集会の開催

年度ごとの開催回数と代表例（年度別に2件以内）を以下の表を用いて整理すること。

平成24-25年度: 7 meetings

代表例（会議名称・開催地）	参加人数
Workshop on Transport Properties in the Earth's Core 山梨県 河口湖	国内: 11名 海外: 18名
The International Astrobiology Workshop 2013 神奈川県 ISAS/ JAXA 相模原キャンパス	国内: 134名 海外: 23名

平成26年度: 9 meetings

代表例（会議名称・開催地）	参加人数
Modeling Origins of Life Workshop at IAS Institute for Advanced Study, Princeton, NJ, USA	国内: 10名 海外: 4名
RNA, Peptides, Vesicles and Exoplanets -The Chemical Origins of Life on Early Earth and Other Planetary Bodies Harvard University, Cambridge, MA, USA	国内: 15名 海外: 10名

平成27年度: 9 meetings

代表例（会議名称・開催地）	参加人数
What Can Synthetic Biology offer to Artificial intelligence? - ECAL2015 satellite workshop "SB-AI" York Centre for Complex Systems Analysis at The University of York, York, UK	国内: 1名 海外: 19名
Geophysical & Geochemical Constraints on Early Planetary Dynamics 山梨県 河口湖	国内: 11名 海外: 10名

## 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

### 添付資料5-1. ホスト機関による支援の実績

#### 1. ホスト機関からのリソース供与等（人件費、研究スペースの提供等）

##### (1) 流動教員制度の導入

東京工業大学は、WPI採択後「東京工業大学地球生命研究所における流動定員及び流動教員に関する申合」を制定し、常勤の教員5名をELSIに流動教員として措置すると共に主任研究者の学部教育を免除した。これに伴い、学部教育に支障が生じないよう学長裁量による教員ポスト3名を元部局に配置し、元部局では教員補充を行い学部教育の充実を図っている。

##### (2) 学長裁量ポスト

東京工業大学は、生命系分野、特に“生命の起源・進化”の強化を図るため、大学からELSIに対して学長裁量ポスト2名（教授及び准教授、平成26年4月1日から平成34年3月31日まで）並びに大学院教育の強化・充実のため助教ポスト1名が融通された。また、事務職員2名をELSIに配置した。

##### (3) 人件費の支援

東京工業大学は、大学から4名の主任研究者及び専任の事務職員2名の人件費等を支援している。

##### (4) テニユアホストの配置

平成28年度に新たに3ポストのテニユアポジションを措置することとしている。

##### (5) 財政面の優遇措置

東京工業大学は、ELSIに既存拠点形成措置額として毎年9,000万円の学長裁量経費の支援している。また、空調機改修費用等の支援をするとともに、大学から提供する学長裁量スペース料のうち、約4,000万円を免除した。

#### 2. 人事・予算執行面での拠点長による判断体制の確立

東京工業大学は、ELSIを学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として学長直属の組織として位置づけ、従来の慣例や運営体制にとらわれない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーとして位置付けている。この方針に基づきELSIは、拠点長が人事・予算執行等を含む拠点の運営についての権限を有している。

#### 3. 機関内研究者集結のための、他部局での教育研究活動に配慮した機関内における調整

WPI採択後「東京工業大学地球生命研究所における流動定員及び流動教員に関する申合」を制定し、常勤の教員5名をELSIに流動教員として措置すると共に主任研究者が学部教育を免除した。これに伴い、学部教育に支障が生じないよう学長裁量による教員ポスト3名を元部局に配置し、元部局では教員補充を行い学部教育の充実を図っている。これにより、他部局の教員がさらにELSIの研究に参画できることが可能となっている。

#### 4. 従来とは異なる手法による運営の導入に向けた機関内の制度整備

（例：英語環境、能力に応じた俸給システム、クロスアポイントメント、トップダウン的な意志決定システム等）

##### (1) 研究成果評価システムと能力運動型給与制の導入

ELSIは、「東京工業大学地球生命研究所における特定有期雇用職員の賃金に関する細則」の規定に基づき、能力に基づく賃金体系を採用している。年次業績評価会（Annual Evaluation Meeting）を毎年実施し、所長、副所長、事務部門長らの執行部で特に優秀な研究を推進していると認められた者に対して表彰するとともに、賃金改訂を行っている。

また、研究所において特に貢献のあった者に対する報奨制度を制定し、報奨金を支給している。

（平成25年度：3名、平成26年度：9名、平成27年度：8名、）

##### (2) クロス・アポイントメント制度の導入

生命系分野、特に“生命の起源・進化”を牽引するトップレベルの研究者を獲得するため、大学と共にクロス・アポイントメント制度を整備し、これを適用して大阪大学の教授を主任研究者として雇出した。さらにクロス・アポイントメント制で雇用した主任研究者の本務先である大阪大学大学院情報科学研究科を本研究所のサテライトとし、生命の起源に関する研究を推進する。

##### (3) 融合研究の推進

ELSIで展開している融合研究促進・国際化・研究支援システムなどの取り組み（ELSI-Style）は、大学の国際化・研究力強化におけるロールモデルとしたい。これは、長期的にはELSI-Styleが、他の“研究拠点組織”の取り組みとも融合しながら、大学における研究の標準スタイルとなることを意味する。「学院、科学技術創成研究院の有り様は、ELSIを含む研究拠点組織発の研究スタイル/研

究システムが源流にある」となることを期待する。

## 5. インフラ（施設（研究スペース等）、設備、土地等）利用における便宜供与

### (1) スペースの便宜供与

東京工業大学は、キャンパス内の既存建物（2,670m<sup>2</sup>）を地球生命研究所棟（ELSI-2）として提供した。また、大学の敷地の提供を受け、新たな研究棟（ELSI-1：5,000m<sup>2</sup>）を平成26年度に竣工した。また、ELSIの外国人研究者用に大学の国際交流会館のうち20室を優先的に入居するために確保している。

### (2) 学長裁量スペース抛却の免除

新たな地球生命研究所棟について学長裁量スペース（新築建物は20%抛却）の抛却を免除した。

### (3) 保育所の設置

大学のグローバル化に伴い、若手の外国人研究者が外国から着任することが増加し、すぐに託児を必要とする子を連れてきた着任者及び出産後の研究者が安心して研究に専念できる環境を整備するため、ELSIに最も近い国際交流会館内に保育所を平成29年4月に開園することとした。

## 6. その他

### (1) 東京工業大学中期計画等

東京工業大学の研究に関する中期目標に関する中期計画においてELSIを、「世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互いに関連づけて明らかにすることを目指す研究を学長裁量資源の提供等により推進する。」と明記するとともに、「戦略性が高く、意欲的な目標・計画」として位置づけている。

中期計画を達成するため、ELSIを学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として学長直属の組織として位置づけ、従来の慣例や運営体制にとらわれない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーとELSIの世界最先端の研究者が大学院学生を指導することが次代の研究者育成に資することから、積極的に大学院生の教育研究指導に参画している。位置付けている。また、ELSIにおける、研究拠点組織で培われた先駆的で成果の上がった取組は、科学技術創成研究院をはじめ他組織に逐次取り入れ、本学全体の研究水準の向上に反映させることとしている。

ELSIは、学長裁量ポスト、学長裁量スペース及び学長裁量経費等の提供を受け地球と生命の起源と進化の解明の研究に邁進している。また、学長は、本拠点の運営に対して、大学から構想時の「ホスト機関のコミットメント」に加え、サイトビジット及びプログラム委員会において人的・物的支援に止まらず積極的な支援を表明した。

### (2) WPI終了後の展望

ELSIは“Earth-Life Science Institute”という名前が示すように、その設立以来、惑星、特に地球の起源という枠組みの中で、生命の起源にかかわる研究をきめ細かく進めてきた。これまでの研究は、宇宙物理学、地球物理学、地球化学、生物化学、微生物学、進化生物学等といったさまざまな分野の統合を指向したものであり、既にそれ自身が融合研究（fusion research）の好例となっている。現在、ELSIは融合研究により生命の起源を追求する研究ハブとなりつつある。

最近のELSIでは、自らのブランドである融合研究のさらなる進展に向け、新たな異分野融合テーマを取り込んだ研究が始まっている。それは、地球における生命の起源に関する私たちの知識に基づいてシミュレーションを行うことにより、地球の生命を越えて、より普遍的な“生命様複雑系の起源”を追究することである。ここには、地球における生命の起源を一般化して、系外惑星など他の惑星における生命の起源に迫ろうとする狙いがある。

今のところ、他の惑星における生命（地球外生命）がどのような生物化学に基づくものなのかは解っていない。炭素／水ベースの化学に基づく地球型生命を一旦離れて、生命様プロセスに必須な元素を探し出すことによって、地球型生命に関する知見の一般化を目指すのが、現在考え得る最善の策であろう。このような普遍生物学の探求に向けた試みは、将来、地球外生命の存在を示唆する化学的な観測結果が得られた時に、そのデータを解釈をするうえで、良い手引きとなるであろう。

WPIプログラム期間終了時までには、ELSIは研究の焦点を当初の地球から宇宙へと移して、アストロバイオロジーを体系化するという野心的な挑戦を先導する確固たる地位を築いているだろう。

ELSIの次なる研究フェーズでは、JAXA、NASA、ESAといった宇宙探査を担う機関と緊密かつ広範な協働を展開することになる。そこにおいてELSIは、普遍生物学（universal biology）の研究ハブとして、壮大なアストロバイオロジーの全体像を描くうえで欠くことのできない諸知識を提供するユニークな研究所となっていることであろう。

大学は、このような大規模研究拠点のホスト機関として、WPI-academyや国内外の研究機関とELSIを共同運営することについて検討する必要があると認識している。

### (3) 大学院教育研究への展開

東京工業大学は、ELSIの世界最先端の研究者が大学院学生を教育研究指導することは次代の研究者育成に資することから、積極的に大学院生の教育研究指導に参画できる体制を構築する。

## 世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

### 添付資料5-2. 女性研究者数

※以下の各欄の女性研究者数及び総数に対する割合を記載し、総研究者を下段に記載すること。

	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	最終目標
研究者	1, 4%	8, 20%	11, 17%	18, 24%	13, 18%
	23	41	63	76	71
主任研究者	0, 0%	0, 0%	0, 0%	1, 6%	2, 12%
	13	14	17	17	16
その他の研究者	1, 10%	8, 30%	11, 24%	17, 29%	11, 20%
	10	27	46	59	55