

領域略称名：冥王代生命学

領域番号：2605

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) 冥王代生命学の創成」

(領域設定期間)

平成26年度～平成30年度

平成28年6月

領域代表者 (国立遺伝学研究所・生命情報研究センター・教授・黒川 顕)

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

研究組織 (総括：総括班，支援：国際活動支援班，計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	26106001 冥王代生命学の創成	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	黒川 颯	国立遺伝学研究所・生命情報研究センター・教授	9
Y00 支援	15K21723 冥王代生命学の 国際研究ネットワーク展開	平成 27 年度 ～ 平成 30 年度	黒川 颯	国立遺伝学研究所・生命情報研究センター・教授	10
A01 計画	26106002 冥王代地球	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	丸山 茂徳	東京工業大学・地球生命研究所・特命教授	8
A02 計画	26106003 冥王代化学進化	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	Henderson Cleaves	東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授	6
A03 計画	26106004 冥王代類似環境微生物	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	鎌形 洋一	国立研究開発法人産業技術総合研究所・生物プロセス研究部門・研究員	9
A04 計画	26106005 ポスト冥王代	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	磯崎 行雄	東京大学・総合文化研究科・教授	8
A05 計画	26106006 生命惑星	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	戎崎 俊一	国立研究開発法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物理研究室・主任研究員	6
計画研究 計 7 件					
A06 公募	15H01057 冥王代プレ生命システムの実験室内再現	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	上田 卓也	東京大学・新領域創成科学研究科・教授	1
A06 公募	15H01058 ヌクレオシド合成：グリコーラルアルデヒドを起点とするアパタイトリン酸触媒反応	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	岡本 晃充	東京大学・先端科学技術研究センター・教授	1
A06 公募	15H01062 酸化還元反応と共役する冥王代ヌクレオチド生成反応	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	清尾 康志	東京工業大学・生命理工学院・准教授	1
A06 公募	15H01063 黎明期の光合成システムの解明	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	塚谷 祐介	東京工業大学・地球生命研究所・研究員	2

A06 公募	15H01064 限られたアミノ酸のみから原始タンパク質が構築できるか？	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	小田 彰史	名城大学・薬学部・教授	1
A06 公募	15H01065 RNA 型原始細胞モデルの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	梅影 創	豊橋技術科学大学・工学部・講師	1
A06 公募	15H01066 化学進化を促進する古代金属タンパク質の構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	藤枝 伸宇	大阪大学・工学研究科・助教	2
A06 公募	15H01067 冥王代の天体重爆撃による生命誕生場への電気化学的擾乱	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	黒澤 耕介	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員	1
A06 公募	15H01068 生命の誕生に必要なとなるアミノ酸情報量の実験による検証	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	赤沼 哲史	早稲田大学・人間科学学術院・准教授	1
A06 公募	15H01069 冥王代極限環境下での化学進化から原始生命に至るシミュレーション実験研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	川村 邦男	広島修道大学・人間環境学部・教授	1
A06 公募	15H01070 分子化石情報抽出による RNA World 再構成の試み	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	岡田 典弘	公益財団法人国際科学振興財団・主席研究員	1
A06 公募	15H01071 鉱物との電子授受にもとづく微生物酢酸生成代謝が生命初期進化に果たした役割を探る	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	加藤 創一郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・生物プロセス研究部門・研究員	1
A06 公募	15H01072 Thermus thermophilus リボソーム変異株の創成と進化	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	宮崎 健太郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・生物プロセス研究部門・研究グループ長	2
公募研究 計 13 件					

研究領域全体に係る事項

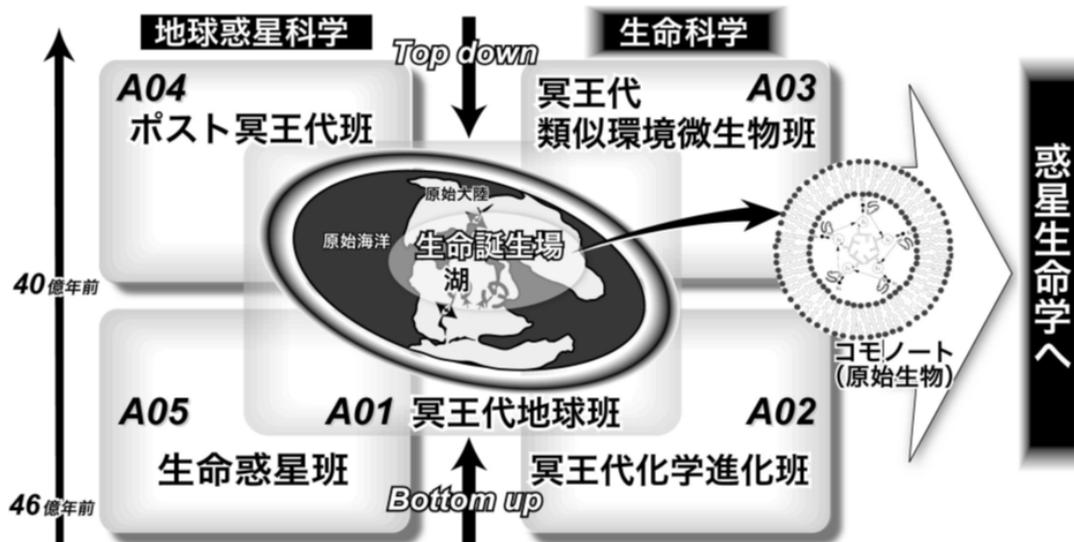
1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

課題の設定と方法論

本研究は、生命がいつ、どこで、どのように誕生したかを明らかにすることを目的とする。原始的な生命が誕生した時期は、地球誕生から約6億年間(46～40億年前)の「冥王代」と考えられている。しかし、冥王代の岩石記録は現在の地球表層には残っておらず、地質学的試料が極めて乏しいため、冥王代の研究は、地球科学ではこれまで「ミッシングリンク」とされてきた。一方、生命科学においても、単純な分子から複雑な有機化合物や高次構造体を合成するボトムアップアプローチ「化学進化」と、原始的な生命システムの誕生以降を扱うトップダウンアプローチ「生物進化」との間には、「ミッシングリンク」が存在する。両者の間には、分子量にして十萬倍から十億倍もの違いがもたらす大きな複雑性の隔りがあるためである。

そこで本研究領域では、これらの2つのミッシングリンクを克服するため、超学際研究を中核とし、地球惑星科学と生命科学の学際融合研究を進める。さらに、本研究チームがこれまでに蓄積してきた3つの重要な研究資源（冥王代類似環境微生物、地球史試料、微生物統合データベース）を統合した「地球生命アーカイブ」を整備し、世界中の研究者が活用できるようにする。これらの学際的研究と国際的研究を両輪とし、世界に先駆けて「冥王代生命学」を創成する。

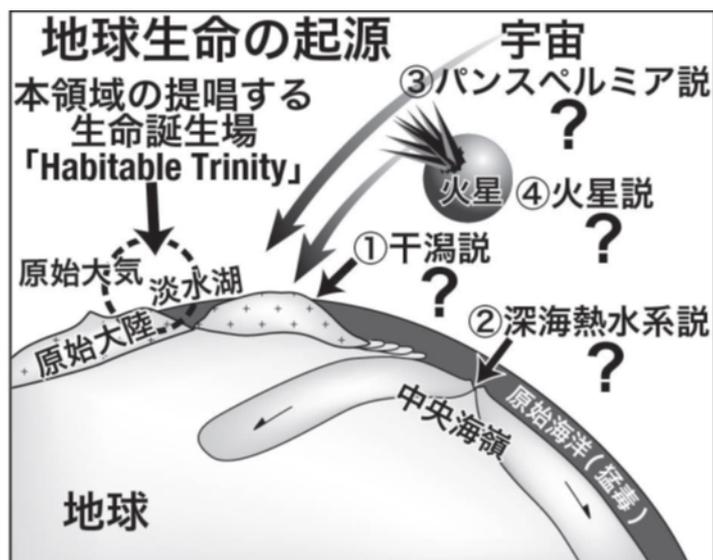


図：冥王代生命学の創成の研究体制

研究の学術的背景

生命の起源研究は、Oparin の①「干潟誕生説」に端を発する。有名な Miller の「化学進化」実験も、その延長上に位置づけられる。そこでは、還元的な原始大気を模したガスから、放電により数種類のアミノ酸（タンパク質の構成要素）やヌクレオチド（核酸の構成要素）の前駆体が合成された。ところが、惑星形成論の進展に伴い、原始大気は酸化的であったと推定されるに至り、干潟説の信憑性は低下した。代わって、②中央海嶺の「深海熱水系」が注目されるに至った。そこでは、原始的なゲノム配列をもつ古細菌型の超好熱細菌の生息が確認された。このことから、深海熱水系が原始的な生命の誕生場であるとされた。そして、それを模した条件下で、複数のアミノ酸やヌクレオチドが重合した高分子を合成する実験が盛んに行われた。さらに、出発物質としてアミノ酸やヌクレオチドが利用できる

試験管内の理想的環境を前提とした化学進化実験が盛んになった。しかし、当時の原始海洋は、猛毒の強酸と重金属を含んでいた。また、中央海嶺熱水系では、生命に不可欠なリンやカリウムなどの栄養塩の調達が困難であった。よって、深海熱水系は生命誕生場としては過酷である。事実、深海熱水系実験では、アミノ酸やヌクレオチドの重合以上の高次構造体の合成が困難となっている。これに伴い、③生命は宇宙から飛来したとする「パンスペルミア説」が復活している。1995年、NASAを中心に、「地球の生物学を宇宙で普遍的な生物学に拡張する」との標語を掲げ、宇宙生物学(Astrobiology)計画が開始された。そして、液体の水が存在する Habitable Zone 惑星が確認された。一方、探査ロボット・キュリオシティによる④火星生命探査が注目を集めた。しかし、火星には生命の痕跡も高分子有機化合物も見つからなかった。太陽系外から生物が飛来した可能性は否定できないが、その生物の進化段階に適した環境を、その時期の地球がたまたま提供できる確率は極めて低いと提案者らは考えている。



図：生命誕生場の諸説

「生命の起源」の解明に向けた最も直接的なアプローチには、「化学進化」実験と「人工生命」実験がある。その実現には、生命が誕生した原始地球の環境条件に関する知見を動員することが必要であり、「地球史」の解釈が重要となる。近年の地球科学の発達、ポスト冥王代（太古代から顕生代）に至る地球生命史を詳細に解明するに至った。一方で、惑星科学の進歩は、生命を育む星・地球の形成史を明らかにしつつある。また、化学進化実験の進展により、生命の構成物質の多くが、前生物的に合成できるようになった。さらに、人工生命実験は、現生の生命の機能の一部を模倣することに成功しつつある。そして、ゲノム解読技術の発達、全生物共通祖先群 (Last Universal Common Ancestors; LUCAs) の原始的機能の解明に迫ろうとしている。このように、ジグソーパズルのピースが次々に埋められ、残った最後のピースは「冥王代における生命誕生場の解明」となった。本研究領域が確立する「冥王代生物学」は、冥王代地球の「生命誕生場」に焦点を当てた研究であり、そこで得られる知見は、近年発見が相次いでいる太陽系外惑星の知見と組み合わせることにより、「惑星生物学」へと拡張することができる。こうしたテーマは、自らの存在の根拠を問い続ける人類の知的探求心が生み出した「我々はどこから来て、どこへ行くのか？ (ポール・ゴーチン)」といった問いかけに対する解答を与えるものであり、人類の文明の進歩に大きく貢献する。

本領域研究グループは、科学における3大ミステリー（宇宙の起源、生命の起源、脳の起源）のひとつ、「生命の起源」研究を物質科学に基づく総合的モデルの構築・検証によって推進し、複雑系科学研究の方法論を具現化している。このような具体的な手法を示すことは、日本の学術水準のみならず、世界の研究水準向上を牽引する最たる例となる。

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

X00：総括班 代表：黒川顕（国立遺伝学研究所）

中間評価までの目標：①本領域の研究成果を国内外へ発信（ウェブサイト、専門国際誌特集号、専門書等）、シンポジウム・ワークショップ開催、②地球生命アーカイブ構築・運用、③領域全体の研究マネジメント、④地球惑星科学から生命科学まで「一人学際」を実践できる若手の育成。

■**総括班主導の生命誕生シナリオ提案（③）：**原始地球表層環境（A01、A04、A05班）と前生物的化学進化（A02班）の研究から、自然原子炉により駆動される間欠泉環境において段階的に生命が誕生したとする「3段階モデル」を提案した（詳細は後述）。さらに、トップダウン研究の成果である原始生命の代謝モデル（A03班）とボトムアップ研究の成果である人工細胞膜実験（A02班）とを融合した原始生命体を人工モデル生物として、生命誕生3段階モデルを検証する実験計画を策定し、ミッシングリンク克服の新たな研究戦略とした。他方、計画班と公募班が一堂に会したブレインストーミングをほぼ毎月開催し（④）、生命誕生に必要な9つの環境条件を特定した。

■**領域全体のマネジメント：**強調すべき成果は、単に各班の個別の研究にゆだねるのではなく、総括班が領域全体を牽引することによって超学際研究の実質的な成果を導いた点である。H28年度発行予定の専門国際誌特集号（①）や全地球史アトラス映像（②）などはその代表的成果物である（③）。

※なお、これ以降の文中[]内の数字は、「5. 研究成果の公表の状況」ページの論文番号に対応する。

A01：冥王代地球班 代表：丸山茂徳（東京工業大学地球生命研究所）

中間評価までの目標：①大気CO₂がマントルに吸収される速度の評価、②生命誕生に先立つ化学進化の地球化学的環境の再現、③太陽系諸岩石惑星の全岩化学組成の決定、④生命誕生場の復元

■**原始大気モデルの更新：**目標①に関する先行研究によると原始地球の大気には100気圧以上のCO₂が存在したが、これでは地球は温室効果で金星化するため、「大気CO₂がプレート運動でマントルに吸収される速度の評価」を設定目標とした。ところが、月-地球-小惑星帯-隕石学の総合研究（主にD/H、酸素同位体比）から、地球は無水で誕生し、その2億年後に固体・大気・海洋成分（生命構成主要元素C,H,O,N）が10¹⁹⁻²¹トン付加したとする「ABEL（Advent of Bio-ELEMENTS）モデル」が生まれた[論文投稿済]。その結果、申請時の作業仮説は大きく修正され、約1.7億年をかけて増加した大気・海洋成分が起こす全球物質循環モデルへと発展している。

■**冥王代表層環境の復元：**目標②④の生命誕生場として自然原子炉間欠泉モデルに到達した[論文投稿済]。地表では安定なCO₂,H₂O,N₂は電離放射線と熱エネルギーにより分解・励起される。その生成物を元に、放射線源から離れた場所で生命構成高分子が連続的に生成される。そこでは、原初大陸を作る鉱物が様々な反応場（地表は酸化場、地下は還元場）を生み出し、多様な生命構成単位を段階的に進化させる。

■**原始惑星系円盤内部の累進的的化学構造の復元：**C,H,O,Nを地球にもたらしたのは、小惑星帯外縁部に存在した氷惑星である[論文投稿済]。小惑星帯の光学観測によると、化学組成は太陽からの距離(温度構造)に依存し累進的に変化している(③)。この累帯構造は生命惑星形成をもたらした地球へのC,H,O,N供給イベント(ABEL爆撃)の痕跡であり、A05班が構築した原始太陽系円盤モデルによる説明が期待される。

A02：冥王代化学進化班 代表：Henderson Cleaves（東京工業大学地球生命研究所）

中間評価までの目標：①酸化的リアクターと②還元的リアクターの構築、③鉱物表面での有機物重合機構の解明、④酸化的リアクターでのリボース合成、⑤還元的リアクターでの核酸塩基、アミノ酸、ポリ燐酸、脂肪酸合成、⑥合流リアクターでのヌクレオチド、ポリヌクレオチド、ポリペプチド、ベシクル形成

■**放射線実験始動と間欠泉リアクター構築：**A01班が生命誕生場モデルを「自然原子炉間欠泉」に更

新しなことを受け、東工大・コバルト 60 ガンマ線放射施設を利用し「放射線照射実験」の準備が完了した(①②)。目標⑥の重合反応を実現する装置として、間欠泉内の乾湿サイクルを再現する「間欠泉リアクター」実験装置を構築した。目標④⑤のために開始した放射線照射実験では、ホルムアミド(多様な有機化合物への有望な出発物質/溶媒)が生成された[論文投稿済]。間欠泉リアクター実験の前段階として、アミノ酸溶液を高温(300°C以上)で加熱したところ、溶液蒸発後すみやかに重合が起こり、これまで知られていたより高速に(1分以内)オリゴペプチドが形成されることが明らかになった(⑥)。

■**有機物-鉱物相互作用の単分子測定**：目標③のため、原子間力顕微鏡を用いて有機化合物単分子と鉱物表面との相互作用をナノスケールで定量・定性分析する手法を確立した。アミノ酸(リシン)単分子が FeS₂ 表面の硫黄欠陥部位に特異的に吸着することがわかった[10]。

■**原始細胞膜実験**：リン脂質膜内でのタンパク質操作技術[13]を応用し、脂肪酸ベシクル内で脂肪酸を合成するための 10 種の酵素の精製に成功した。A03 班からの情報をもとに人工細胞膜による半人工生命実験を行う目処がついた。

■**中間評価以降の目標設定**：生命構成要素の前生物的合成に関する先行研究の網羅的調査を経て、中間評価以降は「原始的代謝反応ネットワーク」の非酵素的実現を目標として設定することとなった[11]。

A03：冥王代類似環境微生物班 代表：鎌形洋一（産業技術総合研究所）

中間評価までの目標：①冥王代類似環境微生物のゲノム解読、②祖先型遺伝子・タンパク質・ゲノムの推定と復元、③半人工生命実験による祖先型生命体と原始的生命体の生命機能の推定

■**冥王代類似環境微生物のゲノム解読(①)**：A01 班が冥王代類似環境と同定した長野県白馬地域の蛇紋岩熱水系を対象に、メタゲノム解析に基づく難培養細菌のゲノム再構築手法[28]により優先種 Hakuba OD1 のドラフトゲノムを構築した。この結果、Hakuba OD1 は H₂ と CO₂ から炭素固定する還元型 acetyl-CoA 遺伝子群を保有していることが明らかになった[論文投稿済]。さらに、Hakuba OD1 の多くの遺伝子が古細菌と真正細菌の両者の特徴をもつことから、本菌が全生物共通祖先群 (Last Universal Common Ancestors; LUCAs) の性質を色濃く残している事を示した。

■**祖先型遺伝子・タンパク質・ゲノムの推定と復元(②)**：LUCAs のゲノム情報を復元するため、Hakuba OD1 の遺伝情報(①)に基づいた高精度な祖先型遺伝子配列を推定した。現在、推定した祖先型遺伝子を現生の細菌に組み込むことで、これらの発現条件や活性を解析している。

■**半人工生命実験による祖先型生命体の構築(③)**：半人工生命実験に向けた全ゲノム操作系を確立するために、大規模ゲノム操作の基礎技術の開発を試みた。酵母を用いることで数百 Kb のゲノム断片を分解させることなく扱うことに成功し、培養の出来る細菌のゲノム断片を用いた予備実験に成功した。

■**最小遺伝子代謝モデルの構築(③)**：現生細菌における必須遺伝子群を代謝モジュール単位で共通性を解析することで、最重要の必須代謝モジュール、すなわち LUCAs が保持していたと考えられる代謝モジュールの特定を試みた。その結果、必須の代謝モジュールは、解糖系、補酵素 A 合成、脂肪酸合成、ヌクレオチド代謝、テトラヒドロ葉酸等であった。こうしたトップダウン研究は、地球環境の変遷(A01, A04, A05 班)の情報を介し、ボトムアップ研究(A02 班)との間のミッシングリンクを埋める基盤となる。

A04：ポスト冥王代班 代表：磯崎行雄（東京大学）

中間評価までの目標：①ジルコン分離システムの開発、②既存試料の年代測定と分析、③波形インバージョン解析アルゴリズム開発(地震波トモグラフィーの解析)、④野外調査

■**ジルコン分離システムの開発と分析(①②④)**：高効率の自動ジルコン選別装置を設計・開発した。従来の地球最古物質は、豪州で 10 万粒の中から発見された 43.7 億年前の 3 粒のジルコンだった。

本装置により、43 億年前の 10 粒を含む約 200 粒の冥王代ジルコンを獲得し、世界最大の冥王代ジルコンを保有するに至った[論文投稿済]。磯崎を含む研究グループが過去 26 年間に集めた北米、アフリカ、豪州および北欧の太古代砂岩および、冥王代原初大陸起源の粒子を含むマントル起源岩からジルコンを抽出中である。また、43 億年前のジルコン中の包有微小鉱物の一部に含水鉱物であるアパタイトを検出できたので、その頃までに母マグマに水が存在したことがわかった。さらに、ジルコンを晶出した母マグマの起源を包有鉱物/流体、微量元素、同位体組成から推定する。その上、地球誕生直後（44 億年前以前）のジルコンを探索し、いつ水がもたらされたのかを特定する（ABEL モデルの検証）。

■原初大陸の地震学的探索（③）：月には冥王代地殻が存在するのに対して、地球には残されていない。そこで趙のグループは、月震波トモグラフィと、月震分布、月表層の地質記録、小天体の衝突史、及び含水鉱物の状態図とを組み合わせて、月の内部温度構造を推定した。その結果、マントル底で急激に温度が上昇して金属核表面が溶融していることがわかった。質量で地球の 1/100 の月に溶融金属核を生じるにはマントル最下部に熱源が必要である。その最有力候補は、マントル対流によって深部に運ばれた原初大陸地殻（U, Th, K, Fe に富む）である。したがって同様に、地球マントル最下部にも原初大陸の存在が示唆される（詳細は A04 班）。

A05：生命惑星班 代表：戒崎俊一（理研）

中間評価までの目標：①原始惑星系円盤の進化を記述する次元モデルを構築、②固体惑星の始原物質モデルの構築を開始、③系外惑星の観測を考慮し、Habitable Trinity 惑星の一般的成因論の構築を開始

■次元モデルの完成（①）：原始惑星系円盤内部の磁気乱流を考慮した次元モデルを構築した。その結果、原始惑星系円盤の 0.3~10AU(1AU=地球太陽間平均距離)の中央面付近に静穏領域が、その内側と外側には乱流域ができる事が分かった。そして、静穏領域の外側の境界には氷粒子が、内側の境界には岩石粒子が集積し、重力不安定を起こして効率的に惑星が形成される。このような次元円盤の二箇所では惑星が形成されるモデルを、「タンデムモデル」として発表した[論文投稿済]。時間の経過と共に、中心星へのガス降着率が減少し、二つの領域も中心星に向かって移動しつつ、それぞれ数個の惑星を形成する。このように、太陽系の惑星分布の間隙（いわゆる小惑星帯の問題）を自然に説明する。また、系外惑星の分布にも同様の間隙がある。さらに恒星系を生んだ母星雲の条件（銀河宇宙線と磁場強度）によっては、岩石惑星形成領域に地球よりはるかに重いホットジュピターやスーパーアースが生まれる事がわかった。

■始原物質モデルの構築開始（②）：タンデムモデルが与える固体惑星の始原物質モデルの構築に着手した。その結果を A01 班および A04 班が与える冥王代地球表層環境や小惑星帯に見られる累進的化学構造と比較して、タンデムモデルの検証を行う。**■生命惑星の一般的成因論の構築開始（③）：**タンデムモデルにおいては、岩石惑星は常に高温 (>1300K) で生まれるので、岩石惑星は大気・海洋成分を持たずに誕生し、二次的な氷惑星の衝突がなければ、Habitable Trinity が成立しない。タンデムモデルが与える合理的初期条件を使って、世界最大規模の重力多体問題シミュレーションを実行し、生命惑星の一般的成因論を構築する。

公募班（全13グループ）

岡本晃充氏はアパタイト存在下でグリコールアルデヒドからヒドロキシアセトン（三員糖）およびリブローズ（五員糖）の形成を確認した。これは、A02 班が行っている自然原子炉間欠泉を模した実験を補完するものである。藤枝伸宇氏は、ベータシート構造をもつキュピンタンパク（114 残基）が様々な金属イオン（V,Cr,Mn,Fe,Co,Ni,Cu,Zn など）と結合できることを示した。このような知見は、冥王代において比較的簡単に合成される短いペプチドと金属イオンの接合により原始酵素が誕生し化学進化を前進させたとする仮説を支持し、A02 班の研究との相乗効果をもたらした。

3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

所見1：領域全体の研究者構成は、東工大地球生命研究所（ELSI）とその周辺に集中している傾向がある。研究所設立の趣旨である学際研究の展開を本格化するものとして評価できるが、研究者構成に広がりを持たせることもまた考慮すべきであろう。特に、地球初期の表層環境の推定にあたり、大気科学に精通する研究者が手薄であり強化が望まれる。

対応策①：申請時における研究分担者構成は ELSI 所属者が全体の 35%であったが、現在は 24%となっている。総括班主導の外部に開かれた研究ワークショップの議論を通じて分担研究者の補強を進め、研究者構成に広がりを持たせた。新たに参加したのは、遺伝学を専門とする奈良先端大学の島助教（A03 班）、蛇紋岩熱水系微生物研究者である JAMSTEC の鈴木研究員（A03 班）、ジルコン研究の日本の最前線を走る横浜国大の山本准教授（A04 班）で、両者を加えた論文が生まれつつある。メンバーの入れ替えの詳細は次のとおりである（←：追加、→：削除）。A01 班（丹下→、横山←）、A02 班（林→）、A03 班（鈴木←、大島←）、A04 班（山本←）、総括班アドバイザリーボード（佐藤→、林←、牧野←）。

国外へのネットワークの広がり、英国ニューカッスル大のエリントン教授率いる研究所との共同研究を開始した。同研究所は、枯草菌を利用した細胞壁の研究を中核とした生命の起源研究のパイオニアの一つである。その他にも、ハーバード大の Adam 研究員との自然原子炉間欠泉における前生物的化学進化に関する共同研究が進行中で、論文も投稿済みである。

対応策②：冥王代表層環境復元に当たり、大気科学の専門家である神戸大学の林教授、岡山大学のはしもと准教授、北海道大学の石渡教授らと共同研究を進めることとなった。彼らを含む A01・A05 班との合同ワークショップを 5 回（2015 年 6 月、7 月、8 月、9 月、2016 年 2 月）開催し議論を詰め、彼らを加えた論文がすでに生まれつつある。

所見2：また、一部の計画研究については、本研究領域内での位置づけがやや曖昧であり、改善が必要と思われる。

対応策：予算決定状況から、これは A05 班へのコメントと判断した。以下の理由からわれわれは、A05 班の研究が必要であると考えている。まず、生命の起源、あるいは生命誕生場を解明するには、その母体である地球そのものの理解が不可欠である。それを主導する研究班が A01 班だが、彼らが提案する冥王代地球総合モデル（ABEL）を裏づけるためには、A04 班からの冥王代地球の記録に基づく復元だけでなく、A05 班からの惑星形成論の情報も必要である。つまり、A05 班は、A01 班が提案する生命誕生のための冥王代地球表層環境を作り出すための初期・環境条件を惑星形成論から限定し、裏付ける役割を担う。このような連携を確保するためには、一般的には、生物学からは遠いと思われる天文学あるいは惑星形成論も本研究領域に含めるべきであると考えた。

本所見を受けて、A05 班は水の地球への供給過程についての議論に注力した。A05 班が構築したタンデムモデルは、岩石惑星は水がない状態で生まれることを図らずも予言し、A01 班が提案する ABEL モデルが惑星形成論から見ても十分可能であることを示した。ABEL モデルでは、地球は水に富む小惑星の二次的な爆撃で大気・海洋成分を持つとする。そのような惑星形成の最終期における物質の再分配の記憶は、小惑星帯の化学組成累帯構造に残っていると考えられる。タンデムモデルは、小惑星帯に対応する固体成分の分布間隙の存在をも予言している。それは、系外惑星観測結果の観測と調和的である。これは、A01 班の提案する原始惑星円盤内部の化学組成累帯構造を合理的に説明する理論的背景を与える。

このように、A05 班が提供する情報は、A01、A04 班が導く冥王代地球の表層環境を惑星形成過程に遡ることによって裏づけるという点で、不可欠の研究分野であると考えている。

所見3（国際支援班）：国際シンポジウムの開催は、単なる会議開催に終わらず、持続的かつ戦略的な開催により、国際ネットワーク構築の基盤形成につながる取組となるよう更に工夫すること。

本研究領域では、シンポジウムやワークショップの開催を単なる会議の場として終わらせることなく、その後の研究に効果的に組み込めるよう努めている。特に、国際ネットワークの展開を重視しており、それらの活動状況は下記のとおりである。

2015年8月に、A01班率いる地質調査グループは、ガボン共和国マスク大学を訪問し、エドウミンコ教授らと自然原子炉周辺の地質調査について共同研究を行うことに合意した。同年12月にマスク大学からエドウミンコ教授とモサボウ教授を招聘し、地球史上最初の真核生物と考えられている化石試料の内部構造の観察を行った。

2016年1月には、Soblon 研究員（SETI 研究所）を招聘し、前生物学的化学進化プロセスをリアルタイムで観測・解析する装置を共同開発した。

2016年1月には、英国ニューカッスル大のエリントン教授率いる研究所を訪問し、共同ワークショップ（A01班、A03班、A05班）を開催した。エリントン教授らの研究グループと細胞膜研究の世界最前線の知見を共有するとともに、生命誕生場の環境条件等について議論を行った。本年6月ならびに9月に再訪し、ワークショップを開催するとともに今後の研究計画について詳細に議論する予定である。

2016年2月に東工大で開催した第3回冥王代化学進化ワークショップに参加した Adam 研究員（ハーバード大）は、その後、複数回にわたり来日し共同研究を進め、共著論文も投稿済みである。

2016年2月に、塩田研究員をアラバマ大学ハンズビル校の Center for Space Plasma and Aeronomic Research へ派遣し、太陽風と降着円盤の相互作用において重要な役割を果たす太陽風の乱流について、3次元太陽風構造の中での輸送・散逸過程を再現するモデル開発を Zank 教授らのグループとの共同研究で行った。

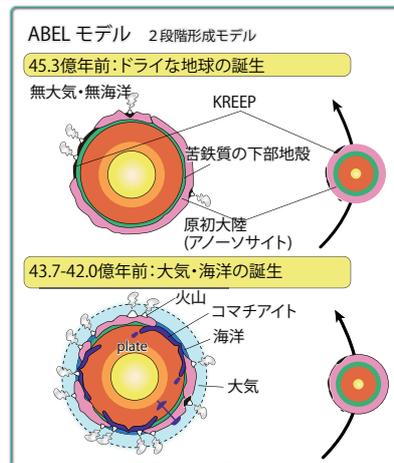
今後は、米国スタンフォード大のスリープ教授や Amos NASA 研究所、メキシコ自治大学の Lazcano 教授らとのワークショップ開催を計画している。これらの活動は、当新学術研究の班員が、国内外に関わらず、世界最前線の研究を把握し、新学術計画メンバーのみにとらわれずに、幅広い研究組織ネットワークを国内外で形成しようとする戦略の現れである。持続的で戦略的な研究姿勢を貫き、**考えられうる最高の成果を出し、なおかつ、計画が一過性ではなく、未来の研究へとつながることを意識したものである。**

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する] （3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

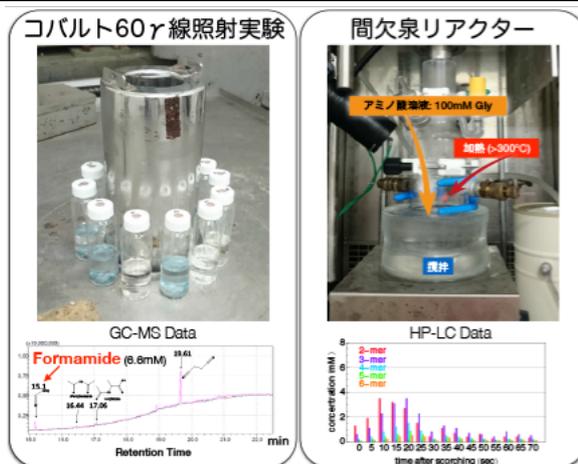
1) 生命惑星地球形成「ABEL モデル」の提案：A01 班

地球形成プロセスのこれまでの一般的理解は、地球は誕生直後から大気・海洋に覆われ、地球表層にはコマチアイト質の大陸が存在していたというものである。これに対し我々は、地球は 45.6 億年前にエンスタタイトコンドライトに似た隕石から無大気・無海洋の還元的な惑星として生まれ、表層にはアノーソサイトなどを中心とする原初大陸が存在していたとする「ABEL モデル」を提案した[論文投稿済]。これは、巨大ガス惑星の重力散乱によって、43.7 億年前から 1.7 億年間、小惑星帯外側に存在していた炭素質コンドライト起源氷惑星が飛来し、地球に大気・海洋が生まれたとする二段階形成モデルである。地球に大気・海洋成分をもたらした隕石爆撃は生命構成主要元素である C,H,O,N を初めて地球にもたらした点で地球史上非常に重要なイベントであることから、「ABEL 爆撃」として定義した。



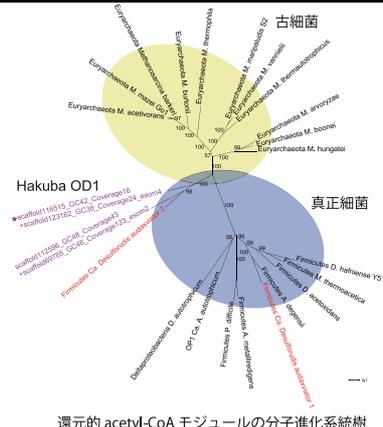
2) 「自然原子炉間欠泉」を模した前生物的化学進化実験：A02 班

A01 班が生命誕生場モデルを「自然原子炉間欠泉」に更新したことを受け、放射線照射実験(図:左)をセットアップし、間欠泉リアクター(図:右)を構築した。放射線照射実験では、ホルムアミド(多様な有機化合物への有望な出発物質/溶媒)が生成された[論文投稿済]。間欠泉リアクター実験の前段階として、アミノ酸溶液を高温(300°C以上)で加熱したところ、溶液蒸発後すみやかに重合が起こり、1分以内にオリゴペプチドが形成されることが明らかになった。有機化合物の重合機構を明らかにするため、生命構成分子と鉱物表面との相互作用をナノスケールで定量・定性分析する手法を確立した。リシン（アミノ酸）単分子が黄鉄鉱（FeS₂）の硫黄欠陥部位に特異的に吸着することを発見した[10]。



3) 原始生命体の特徴を持つ微生物ゲノムの解読：A03 班

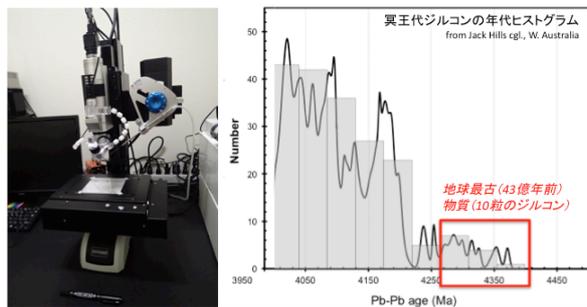
長野県白馬地域の冥王代類似環境で発見された細菌のドラフトゲノムの解読により、本細菌が、これまで存在は知られていたが詳細が一切不明である「bacterial dark matter」と呼ばれる OD1 門に属する細菌であることが明らかになった[論文投稿済]。さらに、Hakuba OD1 は他の OD1 と異なり、真正細菌と古細菌の両者の特徴を兼ね備えた極めて特異的な細菌であることが判明した。この特徴は、Hakuba OD1 がゲノム系統樹の LUCAs に対比される現生微生物に他ならないことを示唆する(図)。また Hakuba OD1 は、ポルトガルやカリフォルニアなど他の冥王代類似環境で存在が確認されている OD1 と



進化的に近縁であり、今後これらの環境中の OD1 のゲノムも解読し、冥王代類似環境微生物に特異的な遺伝子群を同定する。

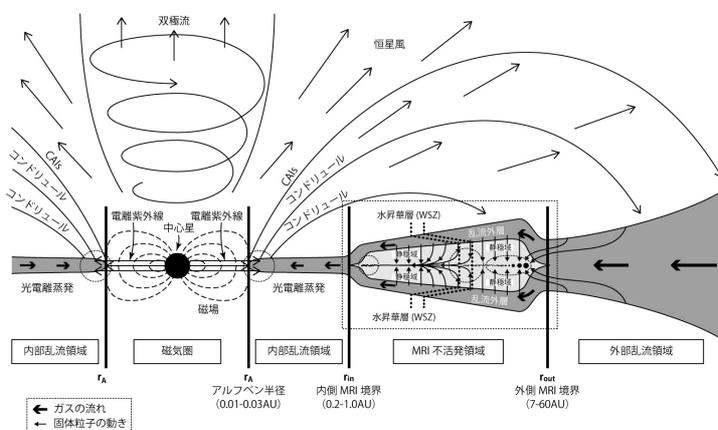
4) ポスト冥王代：冥王代ジルコン選抜装置の開発と成果

太古代堆積岩から冥王代ジルコンのみを選択的に分離する自動選別装置を世界で初めて開発し、冥王代ジルコンの発見効率を 100 倍向上させた[論文投稿済]。それによって、冥王代ジルコンを 200 粒、歴代最古の 43 億年前粒子を 10 個獲得することに成功し、世界最大の冥王代ジルコンの保有グループとなった。また最古ジルコン中に含水鉱物リン灰石の包有物を見つけ、43 億年前に地球マントルに既に水が存在したことを初めて確認した。冥王代ジルコンの微量元素・同位体分析によって、冥王代地球表層での原初大陸の存在を実証する。



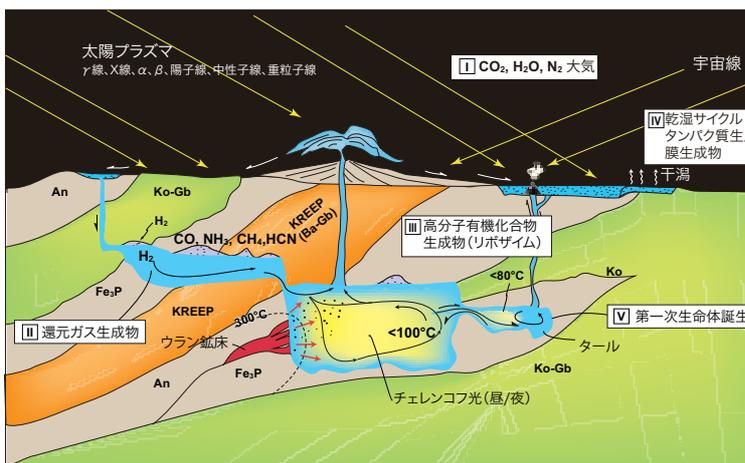
5) 古典的惑星系形成論に磁気乱流を加えアップグレードした「タンデムモデル」：A05 班

原始惑星系円盤は、大きく外部乱流領域、静穏領域、内部乱流領域に分けられる。静穏領域の外側の境界には氷粒子が、内側の境界には岩石粒子が集積し、重力不安定を起こして効率的に微惑星が形成されること、それらが地球質量まで成長することが分かった。このような惑星形成モデルを「タンデムモデル」と名付けた。このモデルでは、岩石惑星が 1300K を超える高温で、氷惑星とは完全に隔離されて成長する。これは地球が大気・海洋成分のない惑星として生まれたとする ABEL モデルと整合的である[論文投稿済]。



6) 生命誕生場「自然原子炉間欠泉モデル」の提案：A01、A05 班共同

ABEL 爆撃によって大気・海洋が地球に誕生した後、揮発性化学物質が飛散してしまうこと、太陽からの紫外線や大気放電現象などの非熱的エネルギー密度が低いことを考慮すると、地表では非生物的に有機分子を効率的に生産する条件は整わなかったことが明らかになった。我々は、地下水を減速剤としてウラン 238 の核分裂連鎖反応が進行する自然原子炉が、高密度の非熱的エネルギーを安定に供給できることに着目し、この原子炉間欠泉内部で生命誕生プロセスが進行したとするモデルを提案した。そこでは、栄養塩(P,K,Ca,Fe,Mg 等)と大気成分ガス (CO₂ と N₂) を含む地下水が周期的に循環する間欠泉により物質循環が維持され、Habitable Trinity 環境が成立し、前生物的化学進化が進行する生命誕生場が実現した[論文投稿済]。



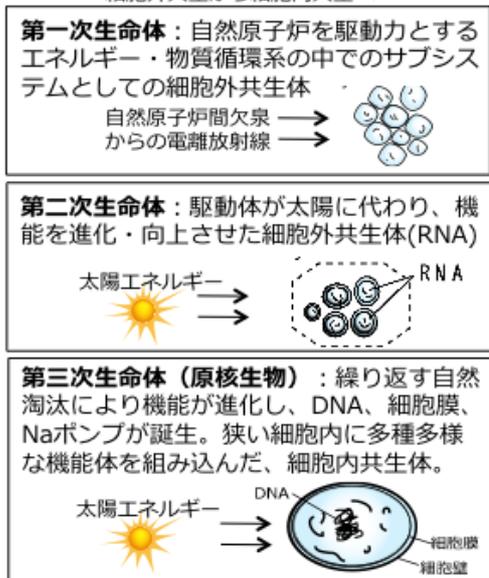
7) 「生命誕生の3段階モデル」の提案:A01, A02,A03, A05 班共同

最小遺伝子代謝モデルと地球環境変遷モデルを比較・検討し、前生物的化学進化から生命誕生に至る具体的描像を「生命誕生の3段階モデル」として提案した。このモデルでは、第一次生命体と呼ばれる最も原始的な生命体は、自然原子炉間欠泉内部で誕生したとする。ここでは、間欠泉地下空洞の壁岩（コマチアイト、KREEP 岩、アノーソサイト、Fe₃P）とそこに流入した大気の酸化的成分（CO₂, N₂, H₂O）が反応して還元的分子（H₂,NH₃,CH₄,HCN,CO,HS）が生成される。これらが空洞に濃縮し、局所的還元場を提供する。ウラン238の核分裂連鎖反応による電離放射線は、安定な H₂O や CO₂ を分解・励起し、高反応性の化学物質を大量に生産する。原子炉コアから適度に離れた場では、有機高分子の合成反応を促進する。間欠泉の噴出に伴い、地表の酸化的成分（CO₂, N₂）と栄養塩を含んだ水が地下の還元的分子と反応する。

このような、連続的に駆動されるエネルギー・物質循環系の中で、第一次生命体が生まれた。第一次生命体は、それぞれ異なる代謝モジュールをもつ多様な原始細胞からなる集合体である。それらは、エネルギーの供給が絶たれてしまう表層に放出されると生存できない。しかし、低密度の太陽エネルギーを利用できる第二次生命体の誕生により命をつないだ。一方、太陽エネルギーが供給されない夜にも代謝を可能にするために、半導体鉱物（FeS₂など）を電子の貯蔵体として利用する酵素を生み出した。エネルギー生産メカニズム（ATP 生産）が誕生したのもこの頃であろう。しかし、より高温のマントルをもつ冥王代地球では、激しいマントル対流のため原初大陸は分裂を余儀なくされ、大陸分裂によってできる分裂帯（リフト）には猛毒の海水（pH<1、現在の5~10倍の塩分濃度、高濃度の重金属）が侵入した。第二次生命体は、猛毒海水中では死滅したが、海洋から隔絶した陸水環境で生き延びた。一方で、海水の猛毒成分が浄化されたことにより生息可能領域が広がり、その中で生き残ったものが第三次生命体へと発展した。その過程で、生き残る方策として、膜の中に最小の代謝・構造モジュールを持つ第三次生命体が誕生し、膜の外に細胞壁と細胞内の過剰な Na を排除する Na ポンプを創り、DNA を遺伝情報とする全体として極めて小さな単細胞生物である「原核生物」が誕生した[論文準備中]。

生命の三段階進化

細胞外共生から細胞内共生へ



8) 生命誕生場の条件のまとめ：A01, A02, A03, A04, A05 班共同

化学進化からの生命誕生に必要な環境条件を洗い出し、生命誕生場として満たすべき最低限の条件を9つ抽出した(右図)。これらの条件をもとに、これまでの研究によって提案されてきた生命誕生場の実現可能性(干潟、中央海嶺熱水系、宇宙)を検証することが可能になった。このような研究の結果、自然原子炉間欠泉のみが全ての条件を満たす場であることを示した[論文投稿済]。

	環境的要素	自然原子炉間欠泉	中央海嶺熱水系	火星	宇宙
1	エネルギー源(電離放射線+熱エネルギー)	○	×	○	?
2	栄養塩供給(リン、カリウム等)	○	×	○	×
3	生命構成主要元素(C,H,O,N)	○	?	○	○
4	還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
5	乾湿反復環境	○	×	?	×
6	水のK/Na比(Naが少ない水)	○	×	○	×
7	猛毒ではない水環境	○	×	?	×
8	多様な環境(海洋:pH, 塩分濃度、重金属元素、大気:温度、圧力、大陸:多様な地質と鉱物)	○	×	?	×
9	周期性のある環境	○	×	×	×

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

A01 班

- *Nagai, Y., Yokoyama, T. (2016) Molybdenum isotope analysis by negative thermal ionization mass spectrometry (N-TIMS): Effects of oxygen isotopic compositions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31, 948-960.
- *Yokoyama, T., Walker, R.J. (2016) Nucleosynthetic isotope variation of siderophile and chalcophile elements in the Solar System, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. vol. 81. in Highly siderophile and strongly chalcophile elements in high temperature geochemistry and cosmochemistry, 81, 107-160
- ▲*Fairen, A.G., Dohm, J.M., Rodriguez, J.A.P., Uceda, E.R., Kargel, J., Soare, R., Cleaves, H.J., Oehler, D., Schulze-Makuch, D., Essefi, E., Banks, M.E., Komatsu, G., Fink, W., Robbins, S., Yan, J., Miyamoto, H., Maruyama, S., Baker, V.R. (2016) The Argyre Region as a Prime Target for in situ Astrobiological Exploration of Mars. *Astrobiology* 16, 143-158.
- ◎*Dohm, J.M., Hare, T.M., Robbins, S.J., Williams, J.-P., Soare, R.J., El-Maarry, M.R., Conway, S.J., Buczkowski, D.L., Kargel, J.S., Banks, M.E., Fairén, A.G., Schulze-Makuch, D., Komatsu, G., Miyamoto, H., Anderson, R.C., Davila, A.F., Mahaney, W.C., Fink, W., Cleaves, H.J., Yan, J., Hynek, B., Maruyama, S. (2015) Geological and hydrological histories of the Argyre province, Mars. *Icarus* 253, 66-98.
- *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 and Planetary Science*, 2:46.
- *Tanaka, R., Yokoyama, T., Kitagawa, H., Tesfaye, D.B., Nakamura, E. (2015) Evaluation of the applicability of acid leaching for the ²³⁸U-²³⁰Th internal isochron method. *Chemical Geology*, 396, 255-264.
- *Yokoyama, T., Fukami, Y., Okui, W., Ito, N., Yamazaki, H. (2015) Nucleosynthetic strontium isotope anomalies in carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 416, 46-55
- *Dohm, J.M., Maruyama, S., (2014) Habitable Trinity. *Geoscience Frontiers* 6. 95-101.
- ◎*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 CH₄-H₂-H₂O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters* 386, 112-125.

A02 班

10. Narangerel, G. , Matsuzaki, N., Nakazawa, Y., Afrin, R., Aono, M., *Yano, T., Hayashi, T., Hara, M. Surface force analysis of pyrite: its reactivity to amino acid adsorption, *Advances in Materials Physics and Chemistry* (accepted)
11. ©Aono, M., Kitadai, N., *Oono, Y. (2015) A principled approach to the origin problem, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45 (3), 327-338; DOI: 10.1007/s11084-015-9444-3
12. *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; DOI: 10.1007/s11084-015-9457-y
13. *Kuruma, Y., Ueda, T. (2015) The PURE system for the cell-free synthesis of membrane proteins, *Nature Protocols* 10: 1328–1344; DOI: 10.1038/nprot.2015.082
14. ©*Aono, M., Wakabayashi, M. (2015) Amoeba-inspired heuristic search dynamics for exploring chemical reaction paths, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45 (3), 339-345; DOI: 10.1007/s11084-015-9450-5
15. ©*Cleaves, H.J., Goodwin, J., Meringer, M. (2015) 227 Views of RNA: Is RNA Unique in Its Chemical Isomer Space?, *Astrobiology* 15(7), 538-58; DOI: 10.1089/ast.2014.1213
16. *Kuruma, Y. (2015) Creation of Simple Biochemical Systems to Study Early Cellular Life, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45: 359–360; DOI: 10.1007/s11084-015-9443-4
17. ©*Ilardo, M., Meringer, M., Freeland, S., Rasulev, B., Cleaves, H.J. (2015) Extraordinarily Adaptive Properties of the Genetically Encoded Amino Acids, *Scientific Reports* 5, 9414; DOI: 10.1038/srep09414
18. *Kitadai, N. (2015) Energetics of amino acid synthesis in alkaline hydrothermal environments, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45, 377-409; DOI: 10.1007/s11084-015-9428-3
19. Matsubayashi H., Kuruma, Y., *Ueda T. (2015) Cell-Free Synthesis of SecYEG Translocon as the Fundamental Protein Transport Machinery, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 44, 331-334; DOI: 10.1007/s11084-014-9389-y

A03 班

20. Okai S., Usui F., Yokota S., Hori-I Y., Hasegawa M., Nakamura T., Okada S., Yamamoto K., Nishiyama E., Mori H., Yamada T., Kurokawa K., Matsumoto S., Nanno M., Naito T., Kato T., Miyauchi E., Ohno H., *Shinkura R. (2016) High-affinity monoclonal IgA regulates gut microbiota and prevents colitis in mice. *Nature Microbiol.*, in press.
21. *Matsuki T., Yahagi K., Mori H., Matsumoto H., Hara T., Tajima S., Ogawa E., Kodama H., Yamamoto K., Yamada T., Matsumoto S., Kurokawa K. (2016) A key genetic factor for fucosyllactose utilization affects infant gut microbiota development. *Nature Commun.*, in press.
22. Nishihara H., Plazzi F., Passamonti M., *Okada N. MetaSINEs: Broad Distribution of a Novel SINE Superfamily in Animals. (2016) *Genome Biology and Evolution* 8: 528-539.
23. *Kato, S., Chino, K., Kamimura, N., Masai, E., Yumoto, I., Kamagata Y. (2015) Methanogenic degradation of lignin-derived monoaromatic compounds by microbial enrichments from rice paddy field soil. *Sci. Rep.*, 5.
24. *Kamagata Y. (2015) Keys to cultivating uncultured microbes: elaborate enrichment strategies and resuscitation of dormant cells. *Microb. Environ.* **30**: 289-290.

25. *Hori, T., Aoyagi, T., Itoh, H., T. Narihiro, A. Oikawa, K. Suzuki, A. Ogata, M. W. Friedrich, R. Conrad, and Kamagata Y. (2015) Isolation of microorganisms involved in reduction of crystalline iron (III) oxides in natural environments. *Frontiers in Microbiol.*, **6**: e368.
26. Katayama, T., *Yoshioka, H., Muramoto, Y., Usami, J., Fujiwara, K., Yoshida, S., Kamagata Y. and S. Sakata (2015) Physicochemical impacts associated with natural gas development on methanogenesis in deep sand aquifers. *ISME J.* 9: 436-446.
27. Higashi K., *Tobe T., Kanai A., Uyar E., Ishikawa S., Suzuki Y., Ogasawara N., *Kurokawa K., *Oshima T. (2015) H-NS facilitates sequence diversification of horizontally transferred DNAs during their integration process. *PLoS Genet.*, 12(1):e1005796.
28. Uchiyama T., Irie M., Mori H., Kurokawa K., *Yamada T. (2015) FuncTree: Functional analysis and visualization for large-scale omics data. *PLoS One*, 10 : e0126967.
29. Wang T., Mori H., Zhang C., Kurokawa K., Xing X.H., *Yamada T. (2015) DomSign: a top-down annotation pipeline to enlarge enzyme space in the protein universe. *BMC Bioinfo.*, 16:96.
30. Tanaka T., Kawasaki K., Daimon S., Kitagawa W., Yamamoto K., Tamaki H., Tanaka M., Nakatsu C.H., *Kamagata Y. (2014) A hidden pitfall in agar media preparation undermines cultivability of microorganisms, *Appl. Environ. Microbiol.*, 80: 7659-7666.
31. Yano M., Mori H., Akiyama Y., Yamada T., *Kurokawa K. (2014) CLAST: CUDA implemented large-scale alignment search tool. *BMC Bioinfo.*, 15:406.
32. *Suzuki S., Kuenen J.G., Schipper K., van der Velde, S., Ishii S., Wu A., Sorokin D.Y., Tenney A., Meng X-Y., Morrill P.L., Kamagata Y., Muyzer G., Nealson K.H. (2014) Physiological and genomic features of highly alkaliphilic hydrogen-utilizing *Betaproteobacteria* from a continental serpentinizing site. *Nature Commun.*, 5: e4900.
33. *Kato S., Yoshida R., Yamaguchi T., Sato T., Yumoto I., Kamagata Y. (2014) The effects of elevated CO₂ concentration on competitive interaction between acetoclastic and syntrophic methanogenesis in a model microbial consortium. *Frontiers in Microbiol.*, 5: e575.
34. *Takeuchi M., Kamagata Y., Oshima K., Hanada S., Tamaki H., Marumo K., Maeda H., Nedachi M., Hattori M., Iwasaki W., Sakata S. (2014) *Methylocaldum marinum* sp. nov., a novel thermotolerant methane oxidizing bacterium isolated from marine sediments. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 64: 3240-3246.

A04 班

35. *Sawada, H., Maruyama, S., Sakata, S., Hirata, T., (2016) Detrital zircon geochronology by LA-ICP-MS of the Neoarchean Manjeri Formation in the Archean Zimbabwe craton – the disappearance of Eoarchean crust by 2.7 Ga?. *Journal of African Earth Sciences*, 113, 1-11.
36. ▲ *Wei, W., Zhao, D., Xu, J., Wei, F., Liu, G. (2015) P and S wave tomography and anisotropy in Northwest Pacific and East Asia: Constraints on stagnant slab and intraplate volcanism. *J. Geophys. Res.* 120, 1642-1666.
37. ▲ *Steinberger, B., Zhao, D., Werner, S. (2015) Interior structure of the Moon: Constraints from seismic tomography, gravity and topography. *Phys. Earth Planet. Inter.* 245, 26-39.

A05 班

38. ▲ *Sasaki, T., Ebisuzaki, T. (2016) Population synthesis of planet formation using a torque formula with dynamic effects, *Geoscience Frontiers* (in press)

39. *Shibaïke, Y., Sasaki, T., Ida, S. (2016) Excavation and Melting of the Hadean Continental Crust by Late Heavy Bombardment, *Icarus* 266, 189-203
40. © *Ebisuzaki, T., Maruyama, S. (2014) United Theory of Biological Evolution: Disaster-forced Evolution through Supernova, Radioactive Ash Fall-Outs, Genome Instability, and Mass Extinctions. *Geoscience Frontiers* 6. 103-119.

公募班

41. *Kato, S. Microbial extracellular electron transfer and its relevance to iron corrosion. *Microbial Biotechnol.* (in press)
42. ▲Tokugawa, M.; Masaki, Y.; Canggadibrata, J. C.; Kaneko, K.; Shiozawa, T.; Kanamori, T.; Grøtli, M.; Wilhelmsson, L. M.; Sekine, M.; *Seio, K. (2016) 7-(Benzofuran-2-yl)-7-deazadeoxyguanosine as a fluorescence turn-ON probe for single-strand DNA binding protein, *Chem. Commun.*, 52, 3809-3812
43. *赤沼哲史 (2016) 全生物の最後の共通祖先コモノート、全生物の最後の共通祖先コモノート、*細胞工学* 35(2), 124-128
44. *Kurosawa, K., (2015) Impact-driven planetary desiccation: The origin of the dry Venus, Earth and Planetary Science Letters, 429, 181-190.
45. *Dauphas, N., Poitrasson, F., C. Burkhardt, C., Kobayashi, H., Kurosawa, K. (2015) Planetary and meteoritic Mg/Si and d30Si variations inherited from nebula chemistry, *Earth and Planetary Science Letters*, 427, 236-248.
46. *Kurosawa, K., Nagaoka, Y., Senshu, H., Wada, K., Hasegawa, S., Sugita, S., Matsui, T. (2015) Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120, doi 10.1002/2014JE004730
47. *Yanagisawa, M., Kurosawa, K., Hasegawa, S. (2015) Ultra-high-speed photography and optical flash measurement of nylon sphere impact phenomena, *Procedia Engineering*, 103, 657-662
48. *Okochi, K., Mieno, T., Kondo, K., Hasegawa, S., Kurosawa, K. (2015) Possibility of Production of amino acids by impact reaction using a light gas gun as a simulation of asteroid impacts, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, DOI 10.1016/j.sls.2015.04.004
49. *Kawamura, K., Da Silva, L., Ogawa, M., Konagaya, N., Maurel, M.C. (2015) Verification of chemical evolution of RNA under hydrothermal environments on the primitive Earth, *BIO Web of Conferences* 4, 00011.
50. © *Kato, S., Yumoto, I., Kamagata, Y. (2015) Isolation of acetogenic bacteria that induce biocorrosion by utilizing metallic iron as the sole electron donor. *Appl Environ Microbiol.* 81:67-73.
51. *Oda, A., Fukuyoshi, S. (2015) Predicting three-dimensional conformations of peptides constructed of only glycine, alanine, aspartic acid, and valine, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45, 183-193.
52. *Oda, A., Noji, I., Fukuyoshi, S., Takahashi, O. (2015) Prediction of binding modes between protein L-isoaspartyl (D-aspartyl) O-methyltransferase and peptide substrates including isomerized aspartic acid residues using in silico analytic methods for the substrate screening, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 116, 116-122.
53. Akanuma, S., Yokobori, S., Nakajima, Y., Bessho, M., *Yamagishi, A. (2015) Robustness of predictions of extremely thermally stable proteins in ancient organisms, *Evolution* 69(11), 2954-2962, DOI, 10.1111/evo.12779

54. *Tsukatani, Y., and Masuda, S. (2015) Elucidation of genetic backgrounds necessary for chlorophyll a biosynthesis toward artificial creation of oxygenic photosynthesis, *Orig. Life Evol. Biosph.* 45, 367-369.
55. *Fujieda, N., Schatti, J., Stutfeld, E., Ohkubo, K., Maier, T., Fukuzumi, S., Ward, T.R. (2015) Enzyme Repurposing of a Hydrolase as an Emergent Peroxidase upon Metal Binding, *Chem. Sci.*, 6, 4060-4065

書籍

1. Cleaves, H.J., "Prebiotic Syntheses of Biochemical Compounds: An Overview," In *Astrobiology: An Evolutionary Approach* (Vera Kolb, Ed.) CRC/Taylor and Francis, London (in press).
2. 丸山茂徳、地球史を読み解く、放送大学教育振興会、2016
3. 丸山茂徳、地球と生命の46億年史、NHK出版、2016
4. Cleaves, H.J., Mesler, W.M., "A Brief History of Creation: Science and the Search for the Origin of Life," W.W. Norton, New York. 2015.
5. 青野真土, "粘菌計算," 「自然計算へのいざない」小林聡, 萩谷昌己, 横森貴 編著 (ナチュラルコンピューティング・シリーズ 第0巻), 近代科学社, 第6章, 167-194. 2015.
6. Cleaves, H.J., Lazcano, A, Ledesma Mateos, I, Negrón-Mendoza, A, Peretó, J, Silva, E Herrera's 'Plasmogenia' and Other Collected Works. Springer, New York, 209 pp. 2014.

総括班

ホームページ

1. 領域ウェブページ, <http://hadean.jp/>

主催シンポジウム

1. キックオフシンポジウム, 東京都港区, 2014年9月19日.
2. 第2回シンポジウム, 長野県白馬村, 2015年3月13, 14日.
3. 第1回合同班会議, 東京都目黒区, 2015年6月11日.
4. 新学術横断合同ワークショップ with 「 π 造形科学」, 東京都目黒区, 2016年3月9日.
5. その他合同WS, 合計10回. Origins of Life meeting, 合計33回.

映像ライブラリ

1. 全地球史アトラス vol. I (地球誕生、プレートテクトニクス、原始生命誕生)

アウトリーチ

1. 教育講演会「白馬とカガクの奇跡」(後援:長野県教育委員会, 白馬村), 白馬村, 2015年3月15日.
2. 銀座 NAGANO 白馬イベント, 東京都中央区, 2015年9月14日.
3. 高校での出張講義、自由研究課題等, のべ4校.

メディア

1. 天然水素の長野・白馬八方温泉, 2015年9月21日 (毎日新聞電子版)
2. 白馬八方温泉で「溶存水素」を確認, 2015年10月23日 (フジサンケイビジネスアイ)
3. 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」, 2015年10月29日(信濃毎日新聞)
4. 蛇紋岩 八方は貴重な研究地, 2015年10月29日 (大糸タイムス)

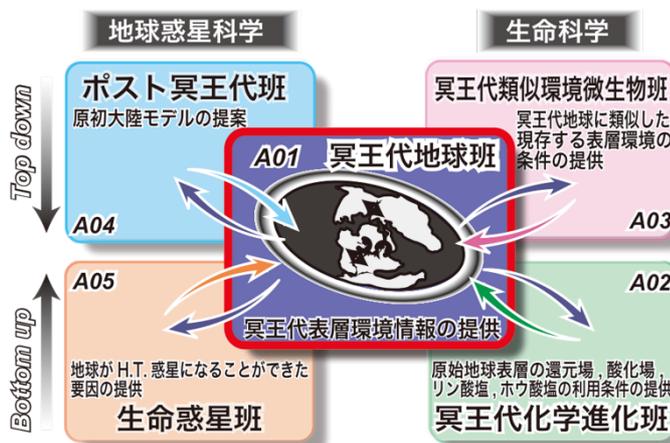
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

計画研究班間の連携状況

領域全体の研究方向の牽引役は総括班が担っている。地球科学、化学、生物学、天文学という様々なバックグラウンドをもつ各計画研究班の個別の研究成果を、領域研究の目的である生命誕生場ならびに生命の起源研究に効果的に結びつけるため、総括班会議をほぼ毎月開催し、研究の進捗状況ならびに問題点の確認、若手を含む領域メンバーの育成状況を確認している。

各計画研究班間の具体的な連携は、A01班が中核を担っている。（下図）。A01班とA02、03、04、05班、ならびに公募班研究の間で、研究手法や方向性の詳細な議論を繰り返し、作業仮説の検証を進めることによって研究を前進させている。研究途上で発生した問題点は、関係研究班による合同ワークショップ、あるいは、関係研究者のみを招集した集中的議論を通じて解決策を探る。



こうした各研究計画班の活動内容や成果は、頻繁に開催される総括班会議で研究代表者と共有され、研究代表者が分担者らと議論することによって、領域全体で見聞を共有する連携状況となっている。

具体的な連携研究項目

このような効果的な連携研究によって、生命誕生の3段階進化モデルが導かれた。研究前半を通して組織間の連携がいかに効率的かつ効果的に機能し、成果に直結したかを示す実例となっている。具体的な連携研究項目は以下の通りである。

1) 生命誕生の3段階モデルの提案（総括班主導；全班連携）

生命誕生場は自然原子炉間欠泉を中核とする物質・エネルギー循環系であり、生命は3つの段階を経て誕生したとするモデルを提案した。これは全計画研究班の成果を統合して構築されたモデルである。

2) 自然原子炉間欠泉を再現する化学進化実験系の構築（A01班+A02班）

A01班が生命誕生場モデルを「自然原子炉間欠泉」に更新したことを受け、電離放射線を使用する実験、および周期的な乾湿サイクルを模倣する実験を進める方針が定まった。そこで、A02班は東工大内のコバルト60ガンマ線照射施設を利用した実験を行う準備を完了し、乾湿条件反復機構を内蔵した反応容器である「間欠泉リアクター」と名付けた装置を構築した。これら2つの実験系を用いた研究成果がすでに出始めている。とくに、放射線照射実験に関する結果は論文としてまとめられ、投稿済みである。

3) 原始生命体の特徴を持つ微生物の発見（A01班+A03班）

A01班が冥王代類似環境と同定した蛇紋岩熱水系で発見した難培養細菌 Hakuba OD1 のドラフトゲノムを構築した。Hakuba OD1 は、 H_2 と CO_2 から炭素固定する最古の炭酸固定経路である還元型 acetyl-CoA モジュールを保有するとともに、多くの遺伝子が古細菌と真正細菌の両者の特徴をもつことから、Hakuba OD1 が全生物共通祖先群（LUCAs）の性質を色濃く残している微生物であることが明らかとなった。

4) 最小代謝遺伝子モデルの構築 (A01 班+A02 班+A03 班)

LUCAs が保持していたと考えられる代謝モジュールが、解糖系、補酵素 A 合成、脂肪酸合成、ヌクレオチド代謝、テトラヒドロ葉酸等であることを明らかにした。こうしたトップダウン研究は、地球環境の変遷 (A01, A04, A05 班) の情報を介し、例えば、グリセルアルデヒド 3 リン酸を出発物質とする前生物的化学進化反応の解明など、ボトムアップ研究 (A02 班) との間のミッシングリンクを埋める基盤となる。

5) 冥王代原初大陸の実証 (A01 班+A04 班+A05 班)

最古ジルコン中に含水鉱物リン灰石の包有物を見つけ、43 億年前に地球マントルに既に水が存在したことを初めて確認した。冥王代ジルコンの微量元素・同位体分析によって、冥王代地球表層での原初大陸の存在を検証する準備が整った。

6) Habitable Trinity 惑星を形成する条件の抽出 (A01 班+A05 班)

A05 班が提唱した「タンデムモデル」は、岩石惑星は水がない状態で生まれると予言する。したがって、地球が海洋・大気を持つためには、氷微惑星の二次的な爆撃が必要になる。また、無水でできた還元的な鉱物と、二次的に降臨した水との化学反応が、前生物的化学進化を支えた可能性がある。これらの議論を経て、A01 班が提唱した ABEL モデルに裏付けを与え、なぜ金星は分厚い灼熱大気を持っているのか、なぜ火星は大気が薄く寒冷で生命の痕跡がないのかも含め、地球が奇跡的に生命を育む星になった経緯を明らかにし、Habitable Trinity 惑星を形成する条件を抽出しつつある。

計画研究と公募研究の連携状況

本領域では、13 件の公募研究が採択されている。公募研究班の研究内容は、A02、A03 班と強く関連するものがほとんどであるが、本領域の研究内容の特質上、A01 班がそれらを橋渡ししている。基本的な連携活動は、本領域が開催するシンポジウムやワークショップにおける議論を通して進行している。具体例を挙げると、岡本晃充氏はアパタイト存在下でグリコールアルデヒドからヒドロキシアセトン (三員糖) およびリブローズ (五員糖) の形成を確認した。これは、A02 班が行っている自然原子炉間欠泉を模した実験を補完するものである。また、藤枝伸宇氏は、ベータシート構造をもつキュピンタンパク (114 残基) が様々な金属イオン (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn など) と結合できることを示した。このような知見は、冥王代において比較的簡単に合成される短いペプチドと金属イオンの接合により原始構造が誕生し化学進化を前進させたとする仮説を支持し、A02 班の研究との相乗効果をもたらした。

総括班は、各公募研究から提供される成果報告をもとに、場合に応じて、計画研究班との合同ワークショップを開催し、研究のさらなる深化を促している。これまでに特に議論が深化した研究のひとつは、「化学進化を促進する古代金属タンパク質の構築」である。この公募研究では、金属が結合したペプチドが原始金属酵素として機能する事を実験的に証明しようとしている。別の公募研究である「酸化還元反応と共役する冥王代ヌクレオチド生成反応」では、無水の原始地球表層に存在した超還元物質 Fe₃P と生命構成元素のひとつである水の化学反応実験を検討している。どちらの公募研究に対しても、より詳細な冥王代情報を A01、A05 班から提供し、実験内容の指針を探っているところである。

若手研究者の育成状況

異分野を勉強し「一人学際」を実践できる若手研究者を育成するために、若手主体 WS の開催、分野横断的な共同研究の指示など、領域全体で取り組んできた。学生 RA を雇用し異分野の PI のもとで共同研究に従事させ、学会発表や共著論文執筆まで達成している。また、研究費配分の少ない若手研究者に対しては、総括班主導のもと実験機器類購入や論文投稿料の補助を実施するなどの取り組みを実施している。

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

次世代の科学研究を担う若手研究者の育成は、特に重要と考えられる。若手育成にあたっては、総括班メンバーが主軸となり、各若手班員へやや高めの目標設定と頻繁な議論の場を持ち、結果中心主義で進めている。科研費を利用した研究において実績を残すことの重要性と、学際科学にもとづく研究の展開方法を、実地訓練を通して学ばせ「一人学際」を体得できるよう努めている。

若手研究者が特に集中している A02 班は、研究の方向性の策定や、個別の研究分野の詳細な理解において、多様な分野にまたがる PI からの指導が必要不可欠である。班員の所属が東工大 ELSI に集中していることが功を奏して、総括班主導による定期的な WS を毎月開催し、研究者としての育成が着実に進んでいる。一方では、研究の幅を拡張するために、他組織との共同研究を若手中心に計画しつつある。学生 RA を総括班が雇用し、専門外の PI のもとで共同研究に従事させる「一人学際」を徹底する試みを実施した結果、学会発表や共著論文執筆まで達成している。また、研究費配分の少ない若手研究者に対しては、総括班主導のもと実験機器類購入や論文投稿料の補助を実施するなどの取り組みを実施している。

さらに国際的な研究の場でも十分実力を発揮できるよう、国際支援活動班の活動として A05 班に所属する塩田研究員の米国への派遣や、A03 班に所属する柿澤研究員の米国 JCVI への長期派遣、A02 班の青野特任准教授とハーバード大 Adam 研究員との共同研究推進など、多様な取り組みを実施している。また A01 班で今後重要な野外調査となるガボン共和国での地質調査については、準備段階から責任者としての役割を与え、かつポスドク研究員とのチームワークの形成も含めて育成を進めている。

以下は、計画研究班における若手（39 歳以下）の人材育成実績である。

- ・ 学生 RA→研究員（3名：うち2名は学振 PD）
- ・ 研究員→特任准教授（1名）、主任研究員（1名）、助教（1名）
- ・ 文部科学大臣表彰・若手科学者賞受賞（1名）、手島精一記念研究賞受賞（1名）、日本ゲノム微生物学会若手賞受賞（1名）

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

総括班および各計画研究班で導入した高額(100万円以上)の装置・設備は以下の通りである。装置・設備等の購入は、各計画研究間での重複がなく、効果的に予算を使用できるよう、総括班主導のもと各計画研究班で導入を決定している。共用の装置の一部は、他の計画班、公募班の関連研究者とも共用している。

*①品目②導入年度③価格④設置場所⑤目的⑥稼働状況等

A01 班

- ①高精度 NC 加工機システム②H26③4,346,784 円④高輝度光科学研究センター⑤分析実験⑥2 名
- ①加圧システム一式②H26③1,185,624 円④東工大⑤岩石-水相互作用実験⑥2 名
- ①陰イオン・陽イオン分析システム②H27③7,452,000 円④東工大⑤イオン分析⑥2 名

A02 班

- ①超耐酸スピードバックコンセントレーダー②H26③1,451,159 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①高速大容量冷却遠心機②H26③1,544,712 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①超純水製造装置②H26③2,720,822 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①紫外可視近赤外分光光度計②H26③2,992,680 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①フーリエ変換赤外分光光度計②H26③5,003,100 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①質量分析装置②H26③39,852,000 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①スクラバー背面組込型ドラフトチャンバーx2②H27③2,484,000 円x2④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①マルチポテンショスタット②H27③4,104,000 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用
- ①電気化学セル ATR 用ダイヤモンドプリズムキット②H27③1,285,200 円④東工大⑤化学進化実験⑥共用

A03 班

- ①精密ろ過・限外ろ過システム②H26③1,865,160 円④産総研⑤熱水の濃縮ろ過⑥4 名
- ①次世代シーケンサ解析用ワークステーション②H26③2,052,000 円④産総研⑤ゲノム解析⑥4 名
- ①嫌気チャンバー②H26③4,639,680 円④産総研⑤嫌気培養⑥3 名
- ①マイクロタイタープレートリーダー②H26③4,499,928 円④東工大⑤細菌培養解析⑥共用
- ①高速液体クロマトグラフィー②H26③6,048,000 円④東工大⑤環境分析⑥共用
- ①大規模配列解析用サーバ②H26③2,624,400 円④東工大⑤メタゲノム解析⑥2 名
- ①窒素ガス発生装置②H27③1,620,000 円④東工大⑤窒素ガス発生装置⑥共用

A04 班

- ①タンデム LA-LIBS 装置②H26③22,528,800 円④東大⑤微量同位体比（年代）測定⑥毎週 20 時間程度、平均 4 名
- ①カソードルミネセンス検出機②H26③3,207,600 円④東大⑤ジルコン内部組織観察⑥毎週 30 時間程度、平均 6 名
- ①微小鉱物選別機②H27③7,142,040 円④東大⑤冥王代ジルコンの自動選別⑥毎週 50 時間程度、1 名
- ①自動選別・採取ソフトウェア②H27③5,508,000 円④東大⑤冥王代ジルコンの自動選別⑥毎週 50 時間程度、1 名

A05 班

- ①計算機クラスタシステム②H26③7,252,872 円④理研⑤原始惑星系計算⑥共用

9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

林祥介氏（神戸大学教授）：本領域の魅力の一つは秀逸な「物語」（モデルあるいは仮説）の存在にある。物理学の徒が地球科学を批判してよく言う話法に「物語にすぎんではないか」というのがあるが、まずは、しかし、「物語」を構成してみせることが研究の展開を促すにおいて大きな成果であり、冥王代という文字通り手探りで進まざるを得ない世界になんらかのモデルを構成してみせたことが評価されて本領域が存在するのであろう。今後は、この野心的なモデルを検証・実証可能な形で「晒す」ことが注目されるべき大きなポイントとなるのだと思う。領域関係者以外の研究者に対しても、研究会ならびに WEB 等を用いて当該モデルを参照可能な形で提示し、批判検討を受けやすい仕組みを充足していくと良いかと思う。

今回の中間報告を見る限りでは、それぞれの研究班が具体的な手法をもとに、相互批判的実証作業はよく試みられているように見える。学際研究という難しい問題の中、様々な手法をもつ異分野の研究者らを噛み合わせるための努力は、総括班主導の体制でうまくなされていると感じた。個々の研究が、学術的実質的にどれくらい踏み込んだ内容になっているのかは短時間では評価しづらいが、評者として指摘すべき、科学としてあきらかに間違った方向に進んでいるとかの問題は見出さない。

本領域計画提案評価時、A05 班の位置づけについて他班との関連性が弱くその存在に疑義がついたということであるが、A05 班の役割は他の班が置かれるステージを設計することであり、考察の基となる部分（地球の存在とその物質構成）に直結する。そもそも、時系列的に他班と並置する位置にはありえないので、関連性が弱く感じることは当然であり、この批判を気にして何かを無理に結びつけることはせず、太陽系惑星形成理論の研究を進め、地球の存在の普遍性あるいは特殊性にできうる限りせまるのが良いと。その観点で A05 班は、磁気乱流の効果に着目して太陽系の形成と地球に至る新しい可能性を提案するなど、評価できる成果をあげているのではないかと。

牧野淳一郎氏（神戸大学教授）：生命誕生に向けた具体的プランニングのもとに実現された研究計画で、非常に高く評価すべきと思う。きちんとフォーカスして話を進めている部分は評価できるし、成果もかなり出ている。生命起源研究の結果として、熱水系起源説やその他の説と比べて、どう世間向きに出すかというところは、ちょっと工夫がいるかなという気がします。A05 班の位置づけという話がありましたが、惑星形成研究の立場からすると、地球や太陽系といった個別の話題に集中するよりは、対象を宇宙に広げたほうが汎惑星形成理論の成果が期待できると同時に、結果的に地球の特殊性と一般性を説明することが可能になると思う。

藤本正樹氏（JAXA 宇宙科学研究所教授）：生命の誕生場や起源、さらに地球と太陽系の起源についてモデルを構築し、その実証に対して中立的な観点から証明しようとしているのは研究姿勢として評価できる。自然原子炉間欠泉モデルも、自然原子炉という新たなエネルギー源があって、そこではどういう反応が進むかということ、論理的に考えて実験によって検証しようとしている点は正当な手法だと思う。そして、きちんと結果を出しつつあるわけだから、非常に意味あるといえる。冥王代ジルコンの探査に関しても、機器の開発をしてジルコンの粒子の抽出レベルは世界記録を出したことは評価に値する。

長谷部光泰氏（基礎生物学研究所教授）：冥王代地球のどこでどのように生命が誕生したのかを明らかにすることを明確な目標として、これまで生物学単独で行っていた生命の起源研究とはまさしく次元の異なる学際的研究が展開されている。領域代表の適切なリーダーシップのもと、生物学、化学、地質学、天文学の融合を総括班が強い統率力を持って推進している。計画班を中心とした研究グループ構成も、計画班のそれぞれが天文学、地質学、生物学、化学というように異なった学問分野から構成されている点で新規性が高く、新学術領域の目的に合致した学際的な研究グループであり、それらが密に連携し、研究が効果的に機能している。計画班のコアメンバーに ELSI の研究者が複数含まれていることで、議論を身近に

活発に出来る点がとても良く機能している。そして、総括班を通して、計画班の研究計画と結果を定期的に徹底して検討、改善している。このような領域運営は、複雑系科学研究を学際的に研究する良いモデルとなっている。最終的に地球史と生命史を統合すべく、継続的全体の努力がされており、これまでに無いレベルで統合が進んでいる。領域終了時には今後の学術動向に指針を与えるようなアーカイブができることが期待できる。

A01 班が他の班のインターフェースとして総括班とともに各班からの成果を元に新作業仮説を提唱し、全領域の統合と研究の方向性決定に有効に機能している。A01 班では、各班の研究成果をいち早く取り入れ、地球形成の ABEL モデル、生命現象は地球環境のサブシステムという魅力的なアイデアと近年の新データを統合して考案された自然原子炉間欠泉モデル、生命の三段階進化仮説を提唱し領域の推進に貢献している。A02 班は自然原子炉間欠泉モデルに基づいた化学進化実験、A03 班と共同した人工細胞実験などを活発に研究している。A03 班は蛇紋岩熱水系に新規微生物が優占することを発見した。ゲノム比較や他班の研究成果を考慮して必須代謝経路モデルを構築した点は独自性が高く、今後、人口細胞による実証結果に期待したい。A04 班での Hi-Fi 自動ジルコン選別マシンを本領域で新規開発するとともに、本領域の世界的な優位性である既採取岩石を用いることによって、従来と比較し多量のジルコンの収集に成功している。今後の新しい概念形成が期待できる。A05 班では惑星の出来方に重点を置き研究を進めているが、他の班の研究者との活発な意見交換が、海と大陸のある生命誕生可能性のある惑星の出来方という方向への研究展開へとつながっている。

全体を通して地質学的な観察、観測から構築された作業仮説を化学、生物学の知見と技術を持って実証的に研究しようという研究方法が領域代表のリーダーシップと計画班代表者の協力によって結実しつつある。今後の残り期間で新規性の高い仮説の提唱に加え、突出した論文が発表されることを期待している。国際共同研究加速化基金を有効に利用し、単なる国際シンポジウムだけではなく、国際共同研究を開始すべく準備が進んでおり、同基金の主旨が十分に理解され国際活動が進んでいる。全地球史アトラス映像を制作し、研究成果の社会発信とともに、関連分野の研究者との今後の学際研究の進展に寄与できると評価できる。

久城育夫氏（東京大学名誉教授）：地球および生命の起源という地球科学・生物学における根本的な問題を、惑星の形成にまで遡って総合的に理解しようという超学際的研究である。そして研究開始から2-3年の間に地球の初期状態およびその場で生まれた生命の起源を組織的に体系立てて研究する体制をつくって多くの新しい成果を生み出し、内部矛盾のない総合的な検証可能なモデルを複数提案したことは高く評価される。具体的には、固体地球の研究から導かれた成果として、ABEL モデル、ABEL 爆撃、生命進化の3段階モデル、生命誕生までの9つの条件、自然原子炉間欠泉モデルといった検証可能なモデルを提唱し、「生命の起源研究」のフロンティアを開拓した。

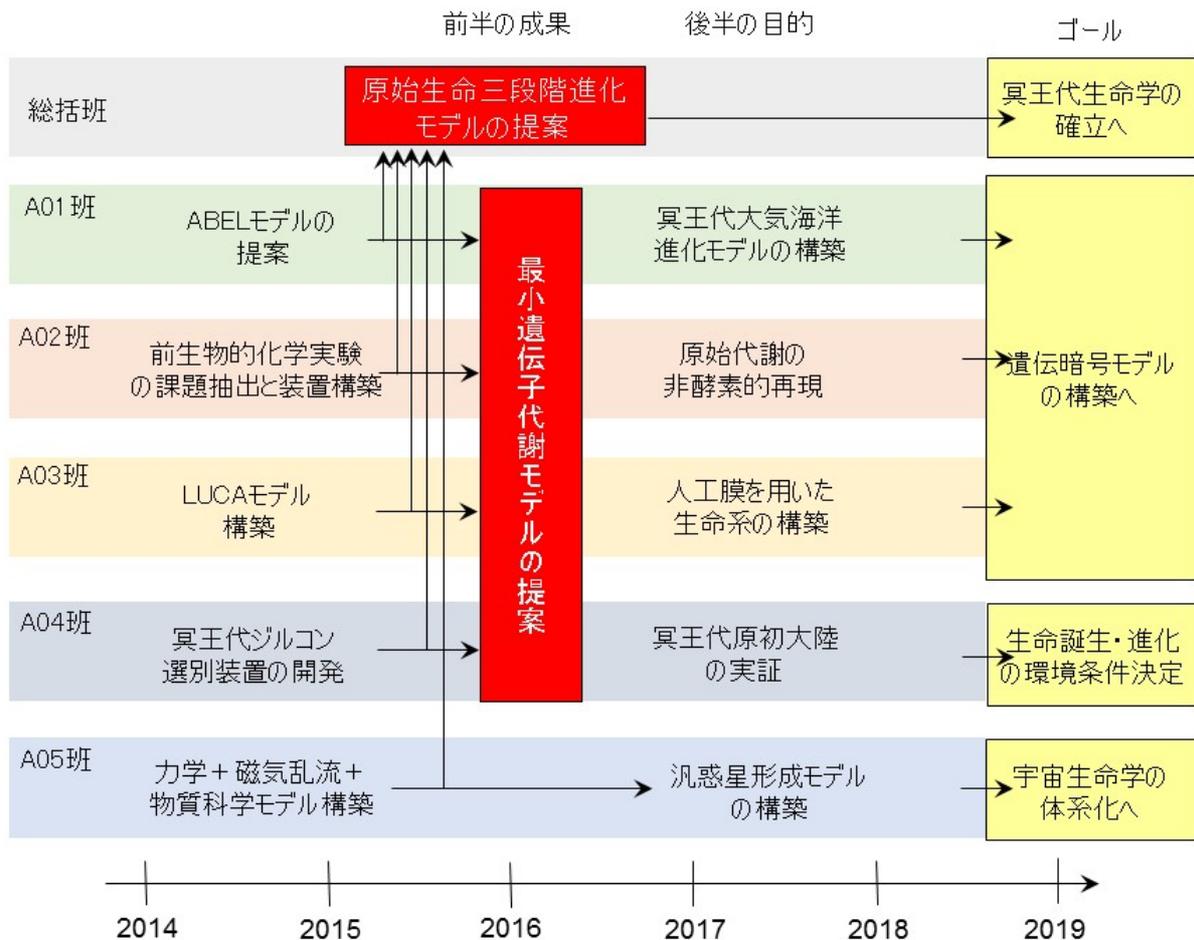
さらに、生命の起源についてこれまでの研究史にはない新しい束縛条件を導いたことも重要な成果の一つである。これによって生命誕生場の環境条件にかなりの制約が与えられたといえる。中間評価までの目標とした課題には達せられていないものもあるがそれを補う成果を挙げたと言える。今後の研究計画も説得力があり、最後の目標に向かって進まれることを期待したい。予測される成果もまた説得力に富むものである。新しいオリジナル、かつ検証可能なモデルがさらにいくつも出てくることを強く期待している。全体の運営に関しては、5つの班の研究成果を総合的に議論し、それによってそれぞれの班が新しい方向性を見出して研究を発展させるという手法をとっているが、総括班がよく采配をふって重要な役割を果たしていると云える。「冥王代生命学の創成」研究のような、天文学からゲノム科学までの極めて広範囲な分野を統合した研究はこれまでにないものである。このような研究領域を発展させてきたリーダーシップという点も高く評価する。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

研究領域の推進方策

本領域「冥王代生命学の創成」のゴールは、冥王代生命学を確立し、生命の起源の解明へ向けた研究を前進させることである。中間評価までの最大の成果は、(1) 生命誕生の3段階モデルと、(2) 最小遺伝子代謝モデルという2つの作業仮説を提案したことである。今後も、この作業仮説の実験的検証を共通目標として、総括班主導のもと全計画班および公募班が一体となり研究を推進する。



計画班の研究推進内容

各計画研究班の具体的な研究推進内容は下記の通りである。

- **A01班**：冥王代の大気・海洋進化モデルの構築を進め、地球表層環境を復元することにより原始生命誕生場の詳細で定量的な描像を得る（A04, A05班共同）。これをもとに、自然原子炉間欠泉周辺の物質・エネルギー循環系の時間変化をモデル化する。さらに、猛毒海洋組成の浄化プロセスを定量化してA02, A03班に提供する。両班は環境変化（pH、塩分濃度など）に対する応答として第一次生命体から第三次生命体へと発展するプロセスを実験的に検証する。そのために、代謝と膜がどのように発展したかを記述するモデルを構築する（A01, A02, A03班共同）。

- **A02 班**：自然原子炉間欠泉を模した条件下で、原始的代謝反応が非酵素的に実現し得るか検証する。A03 班は、解糖系等の代謝モジュールが原始生命体に必須であったと推定した。そこで A02 班は、解糖系の出発物質と目されるグリセルアルデヒド 3 リン酸が自然原子炉間欠泉から供給され得るか、放射線照射実験により検証する。現生生物の解糖系は、金属クラスターを包含した反応中心を持つ酵素群が触媒する。そこで、こうした金属を包含した短いペプチドが形成され、原始的酵素として機能し得るか、間欠泉リアクター実験により明らかにする。また、A02 班が確立した人工細胞膜の実験技術をもとに、A03 班と共同で半人工生命実験を進める。これらのボトムアップ研究により、トップダウン研究（A03 班）との間のミッシングリンクを埋める基盤を構築する。
- **A03 班**：米国やポルトガルの冥王代類似環境微生物の高品質なゲノム配列を決定、Hakuba OD1 と比較することで、冥王代類似環境に特化した遺伝子機能を特定する。さらに、LUCAs の生命維持にとって最小限の代謝・構造モジュールを最終決定し、A02 班と共同で半人工生命体の構築に取り組む。人工膜上に透過系と ATPase を埋め込み、膜内に転写、翻訳、複製系を含有させた半人工生命体が、自己複製することができるかどうかを検証し、原始細胞がどのような態様だったかを推定する。特に半人工生命体の維持のために外部から供給すべき物質を化学進化により生み出しうるか、金属包含酵素の触媒反応を模倣することが可能かを、A02 班や公募班とともに検証する。
- **A04 班**：冥王代大陸地殻の存在を実証するために、さらに多数の冥王代ジルコンを選別する。既存の太古代砂岩試料群に加え、新たに別種のマントル構成岩（超苦鉄質岩類）を収集する。新規開発した冥王代ジルコン専用装置を駆使し、1000 粒以上の冥王代ジルコンを選別し、組織／包有物分析および年代測定によって、表層環境変動史のみならずマグマオーシャン固結時直後のマントル／地殻情報を読み取る（A01、02、03 班へ提供）。またトモグラフィーの精密化と KREEP 岩の第一原理計算から、現世マントル底に期待される冥王代大陸地殻残骸のサイズと形態を把握する。
- **A05 班**：タンデムモデルが与える固体惑星の始原物質モデルを構築する。その結果を太陽系物質科学データ（A01 班および A04 班が与える冥王代地球表層環境、小惑星帯に見られる累進的化学構造）と比較して検証を行う。そのモデルが与える合理的初期条件を使って、世界最大規模の重力多体問題シミュレーションを実行し、生命惑星の一般的成因論を構築する。既に予察的に明らかになっている Hot Jupiter と Super-Earth 形成モデルを完成させる。これらの理論的予言を系外惑星観測データ（中心星の質量と化学組成、惑星の質量と周期分布、分子雲の磁場、宇宙線強度など）と比較・総合化して理論の体系化を図る。

研究領域の発展性

本領域の後半の研究により、原始生命誕生までの①原始代謝モデルと②原始膜モデルが完成すると期待される。生命に不可欠な要素は、代謝、膜、自己複製であると認識すれば、次の大きな課題は、③遺伝暗号モデルを構築することであろう。これらの研究は、既に英国ニューカッスル大と共同で進行中である。さらに来年度からの公募研究で、特に遺伝暗号モデルの構築に関し重点的に研究者の補充を図る。

地球生命を理解せずして、宇宙生命を理解できるだろうか？われわれが唯一知り得る生命は地球生命であり、その理解を通してこそ、生命の「一般性」と「特殊性」を明らかにできる。「冥王代生命学」により地球生命を体系的に理解できて初めて、その先に、宇宙生命学の体系化が視野に入ってくる。このように、冥王代生命学は「基礎研究」として、今後の宇宙生命学（Astrobiology）研究の中核に位置づけられるものとなるだろう。