

領域略称名：冥王代生命学  
領域番号：2605

令和元年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る事後評価報告書

「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

令和元年6月

領域代表者（国立遺伝学研究所・情報研究系・教授・黒川 顕）

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	12
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	17
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	22
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	24
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	28
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	29
11. 総括班評価者による評価	30

**研究組織** (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：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	26106001 冥王代生命学の創成	平成 26 年度 ～ 平成 30 年度	黒川 顕	国立遺伝学研究所・生命情報研究センター・教授	9
Y00 支	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 顕	国立遺伝学研究所・生命情報研究センター・教授	10
A01 計	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	7
A02 計	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	9
A03 計	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	8
A04 計	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	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	4
統括・支援・計画研究 計 7 件					
A06 公	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	15H01058 ヌクレオシド合成：グリ コールアルデヒドを 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	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	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	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	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	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	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	15H01068 生命の誕生に必要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	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	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	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	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	3

A06 公	17H05227 ヌクレオシド合成：グリコー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 29 年度 ～ 平成 30 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	17H05229 超好熱古細菌ウイルスゲノムの分子組成解析—DNAの起源解明に向けて—	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	望月 智弘	東京工業大学・地球生命研究所・研究員	4
A06 公	17H05230 シュライバーサイト由来リン化学種の反応を起源とする生命分子の生成反応	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	清尾 康志	東京工業大学・生命理工学院・准教授	1
A06 公	17H05231 未知光合成生物の単離による始原的光エネルギー代謝系の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	塚谷 祐介	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋生命理工学研究開発センター・研究員	2
A06 公	17H05232 RNA進化を可能にする冥王代の細胞構造の探索	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	市橋 伯一	東京大学・大学院総合文化研究科・教授	1
A06 公	17H05233 化学進化を促進する原始金属酵素の探求	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	藤枝 伸宇	大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科・准教授	1
A06 公	17H05234 分裂するプロトセル：設計原理と力学機構の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	前多 裕介	九州大学・理学系・准教授	1
A06 公	17H05235 冥王代における高分子濃度シナリオの検証	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	藤原 慶	慶應義塾大学・理工学部・専任講師	1
A06 公	17H05236 アミノアシル tRNA 合成酵素の分子系統解析に基づく遺伝暗号進化経路の推定	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	横堀 伸一	東京薬科大学・生命科学部・講師	3
A06 公	17H05237 初期地球環境に相対的に多く存在したアミノ	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	赤沼 哲史	早稲田大学・人間科学・准教授	1

	酸種を用いた原始的タンパク質の構築				
A06 公	17H05239 エネルギー保存システムの分子進化で辿る原始生命の機能解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	成廣 隆	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・主任研究員	3
A06 公	17H05240 硫化金属－ペプチド複合体が初期生命の代謝構築に果たした役割の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	五十嵐 健輔	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	17H05241 初期地球解読に向けた陸上蛇紋岩温泉の炭素循環研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	須田 好	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・研究員	1
A06 公	17H05242 原始生命におけるエネルギー通貨産生システムの再現	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	千葉 洋子	国立研究開発法人海洋研究開発機構・深海・地殻内生物圏研究分野 ポストドクトラル研究員	2
公募研究 計 27 件					

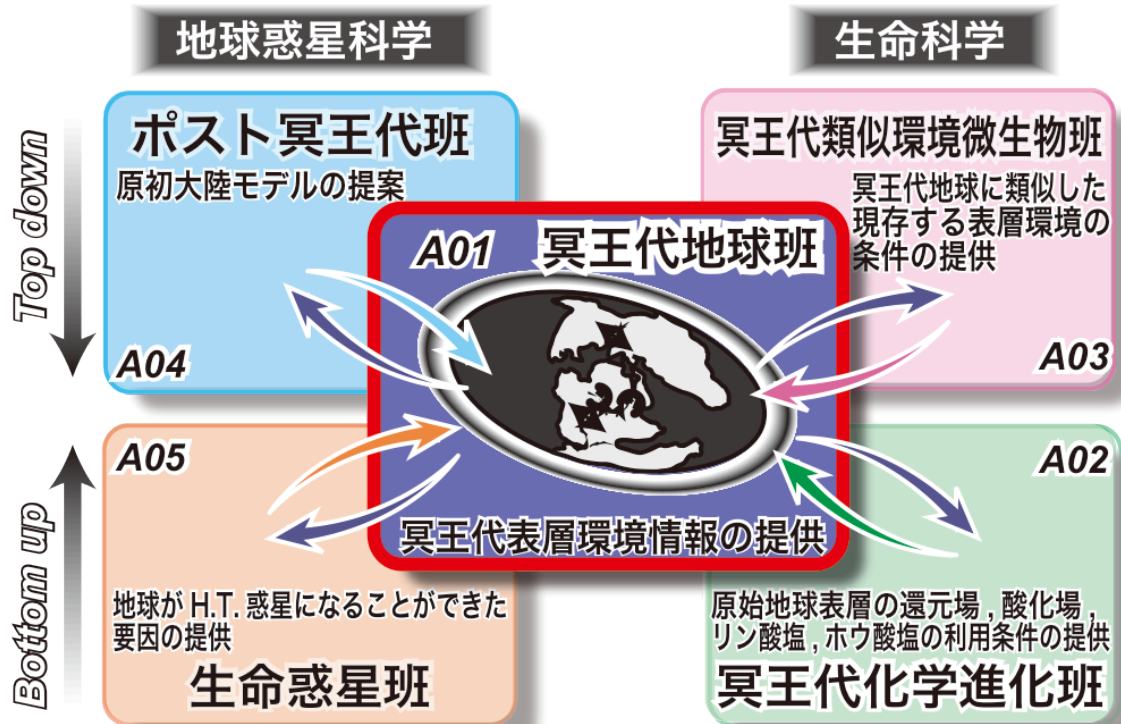
## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

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（応募研究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。

### 研究目的および全体構想

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。



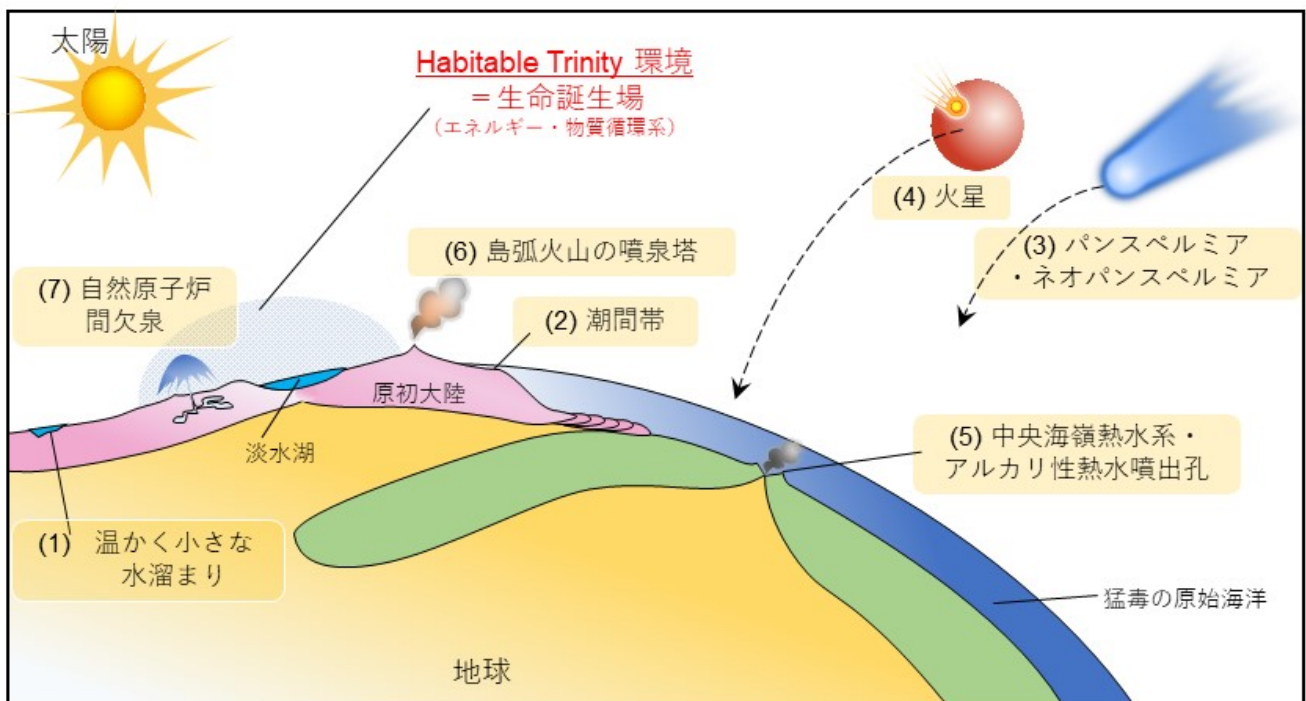
### 研究の学術的背景

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。ここでは、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。ここでは、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。

「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は、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は、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「冥王代生命学」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、「惑星生命学」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。



上図) 生命誕生場の諸説（火星説、パンスペルミア説、中央海嶺熱水系説）と、本研究領域が提案する「Habitable Trinity 環境」



## 2. 研究領域の設定目的の達成度（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、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

### X00：総括班 代表：黒川颯（国立遺伝学研究所）

#### 目的 1:地球生命研究グローバルセンターの設立

**達成度 1:**100%。地球惑星科学と生命科学からなる学際融合研究の連携の核として地球生命研究グローバルセンターを WPI-ELSI を拠点として設立した。本領域全体の活動を駆動する中核として、領域代表の黒川のもと運営された。国際ワークショップ、横断型ワークショップ等開催のための準備、また、総括班の活動補佐チームとして機能し、領域全体の研究・運営活動の効率化に役割を果たした。

#### 目的 2:地球生命アーカイブの構築

**達成度 2:**70%。上記センター内に、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、最終年度まで継続的に管理・運用することを目指した。研究者らの異動に伴い、物理的な観点で 1 点に集約することは困難になったため、バーチャル展開を可能にするための総合データベース整備を進めている。冥王代類似環境微生物を含む微生物統合データベースは MicrobeDB.jp として活用可能であり、現在、地球史試料データベースとの統合化を進めている。また、最新の研究成果の映像ライブラリを制作し、ネット配信により公開している。

**目的 3:**総括班に運営・情報・広報の委員会制度を設け、領域全体での研究ロードマップの設定、指示、リスク管理、情報の一元化などのマネジメントシステムを構築し、戦略の立案および戦術の指示をトップダウンで実施する。

**達成度 3:**100%。中間評価後には、総括班会議を 2 か月に 1 度の割合で実施し、領域全体の研究ロードマップの検討、リスクの早期発見、研究情報の共有などを進めたことが、本領域を成功に導いた。当初は各委員会制度（運営、広報等）による運営を計画していたが、議論ならびに決定の場を総括班会議に集約させたことにより、効率的かつ機能的なマネジメント体制を構築した。このことによって、領域代表や研究代表者らの負担は増えたことは否めないが、領域内の研究を有機的に結びつけ、研究を推進する効果を得た。トップダウン方式のマネジメント体制を敷くことで、領域全体を活性化し、全体を牽引することに成功した。また、当初予定していた中規模 WS や内部評価、アドバイザーボードによる外部評価等はすべて予定どおり実施した。

**目的 4:**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、分野を横断した共同研究の指示など、領域全体で育成に取り組む。

**達成度 4:**100%。各班に配置されていた若手研究者は、より経験をもつシニア研究者らとの闊達な議論を体験し、共同で研究を進めることによって、異分野を勉強し「一人学際」を実施しながら、学際研究の難しさや厳しさを知るとともに実践することができたと思われる。特に 50 回にもおよび分野横断型ワークショップにおける自由な議論は、専門外の多様な知見を必要とする学際研究を実施するためには不可欠であり、特に特定の専門分野に固執しがちな若手研究者らにとって良い学びの機会となった。

### 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）

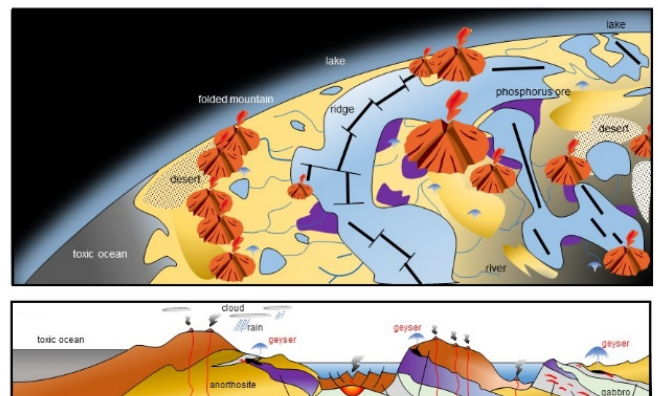
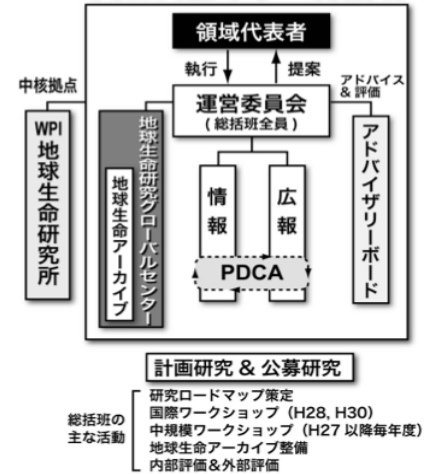
A01 班の研究ゴールは、冥王代の地球表層環境の復元である。本班は、A5 班が導いた新たな惑星形成理論に基づき、地球の初期大気・海洋が、これまでに漠然と得られていたイメージと異なることを示し、かつ固体地球の初期進化を考慮しつつ、隕石学や月の地質学を用いて、地球表層環境を導いた (Maruyama and Ebisuzaki, 2017)。

#### 目的 1:大気 CO<sub>2</sub> がマントルに吸収される速度の評価

**達成度 1:**50%。本提案の研究を開始した段階では、地球誕生時に地球が保有していた大気 CO<sub>2</sub> の量は、惑星形成論の研究から 100 気圧に相当すると考えられていた。大気 CO<sub>2</sub> が 100 気圧もある場合、地球は金星化してしまうが、実際には地球は金星化を免れた。そこで、初期地球大気の定量的な理解

のために大気 CO<sub>2</sub> の吸収速度の評価を A01 班の研究に組み込んだ。地球の形成プロセスを改めて見直し、原始大気に含まれる CO<sub>2</sub> 量を考察した結果、これまでの説が誤りであることに気づいた。その結果、新たに提案されたのが ABEL モデルである。ABEL モデルにおいては、地球が二段階で形成されたとする。地球は、無大気・無海洋の裸の惑星として約 45.67 億年前に誕生し、その後 43.7~42.0 億年前の約 2 億年間に大気・海洋成分（生命成分）が氷小惑星によってもたらされた。我々は、氷小惑星の飛来を ABEL 爆撃と呼ぶことにした。このモデルが正しいとすると、大気 CO<sub>2</sub> は ABEL 爆撃の間に徐々に大気中

### 冥王代生命学・総括班



蓄積するため、金星のように灼熱化することなく徐々に原始海洋を生むことが導かれた (Maruyama and Ebisuzaki, 2017)。ABEL 爆撃の間に、大気 CO<sub>2</sub> がどれくらい速度で地球内部に吸収されたかについての定量的評価は現在進行中である。この点が未済であるが、これまでの地球形成論の見直しとそれに代わる新たなモデルを提案した点を考慮して、達成度を 50%とした。

**目的 2:** 生命誕生に先立つ化学進化の地球化学的環境の再現

**達成度 2:** 100%。本研究の開始以前の段階では、冥王代の地球表層環境に関する情報はほとんどなく、Maruyama et al. (2013) が予察的情報を示すにとどまっていた。A01 班では、隕石学、月の地質学、惑星形成論、冥王代ジルコンの年代学などを学際的に研究し、上述した ABEL モデルを提案した (Maruyama and Ebisuzaki, 2017)。そして、それに基づき、冥王代の地球表層環境を示し、原初大陸の構成岩石、地形、原始海洋の化学組成などを明らかにした。また、地球におけるプレートテクトニクスの開始年代も明らかにした (Maruyama et al., 2018)。また、生命誕生に至る化学進化の研究を A02 班と共同でレビュー (Kitadai and Maruyama, 2017) することによって、生命誕生場に必要 9 条件を洗い出し (Maruyama et al., 2018)、生命誕生場の新たなモデルとして自然原子炉間欠泉モデルを提案し (Ebisuzaki and Maruyama, 2017)、生命誕生に至る 3 ステップモデルを提案した (論文準備中)。

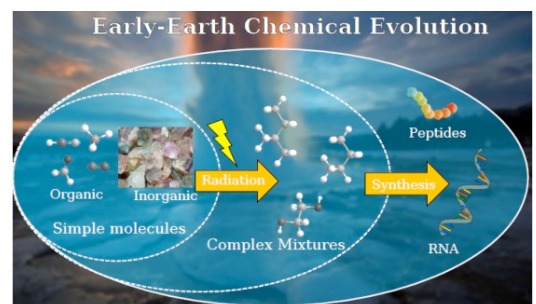
### A02 : 冥王代化学進化班 代表 : Henderson Cleaves (東京工業大学地球生命研究所)

A02 班の研究ゴールは、冥王代の生命誕生場で起きた前生物的化学反応のプロセスを具体的に解明することである。過去の研究において実証されてきた有機物の合成実験は、生命誕生を語るうえでは極めて断片的な有機物合成反応のつぎはぎでしかなく、無機物から DNA 合成へ至る一連の連続した化学反応が、地球のどのような場で、どう進行したかを解明することが究極のゴールである。

**目的:** Habitable Trinity モデルが示唆する複数の異なる立地の淡水湖において、種々の鉱物の供給により実現される多様な動的な環境を想定し、次の研究を実施する。(1) 酸化的環境の再現実験、(2) 還元的環境の再現実験、(3) 合流環境の再現実験。

**達成度:** 100%。冥王代地球における全生物的化学進化を再現するために、当初モデルとして採用されたのが「淡水湖モデル」だった。しかし、A01 班の研究結果から、淡水湖モデルに様々な問題点が指摘され (例えば、全生物的化学進化を駆動するエネルギー源の欠如、アミノ酸合成に必要な還元ガスを濃集する場の欠如)、それを改良して、より合理的な「自然原子炉間欠泉モデル」が提案され、A02 班の全生物的化学実験の環境場のモデルとして採用された。それに伴い、A02 班が整備すべき実験設備の見直しを余儀なくされたが、東京工業大学 (大岡山キャンパス) が所有するコバルト 60 の放射線照射施設を利用し、冥王代における生命誕生場を模擬した環境において、多くの全生物的化学反応を再現することができた。具体的には、ヌクレオチド (シチジン三リン酸; CTP) 前駆体のアンヒドロシチジンなどの化学進化時の基本構成分子の合成に成功し、また、2-アミノノキサゾールや数種のイミダゾールなど RNA の前駆体となる有機物の合成を確認した (Fahrenbach et al., 2017, Adam et al., 2018, Yi et al., 2018)。これらは、当初の想定を超えた実験成果となった。

A02 班では、過去の生命合成実験研究の集中的なレビューを通して、生命合成は複数の異なる環境を循環し、かつ化学反応における熱力学的な壁を超えるための高エネルギー供給源が必要であることを改めて浮き彫りにした。これが、A01 班との共同研究において、「生命誕生場に必要 9 条件 (Maruyama et al., 2018)」へと発展し、生命誕生場の新たな仮説としての「自然原子炉間欠泉モデル」となった。



### 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)

**目的 1:** 冥王代類似環境微生物のゲノム解読および基本的性質を解析し、生活環および基礎代謝系を明らかにする。

**達成度 1:** 90%。白馬ならびに米国 Cedars の蛇紋岩熱水系メタゲノム解析が徹底的に行われ、各微生物のゲノムの不完全性ならびに相互補完性、さらには基本的なエネルギー代謝ならびに細胞骨格出発物質生産に関わる Wood-Ljungdahl 経路ならびにその様々な変型代謝系が見出されたという点で十分に目標を達成したと言える。他方で念願だったこれら微生物の培養は、考えられるあらゆる試みを行ったものの遂に実現できなかった。これは、個々の微生物が独立した生育が不可能である、というゲノム解析の結果と符号している。培養を実現するには、この点を克服するより斬新なアイデアが必要だった。

**目的 2:** 比較ゲノム解析により冥王代類似環境微生物に特徴的な遺伝子レパートリーを推定する。また、分子進化解析により基礎代謝系遺伝子を中心に祖先型ゲノム配列を推定する。

**達成度 2:** 60%。計画班内にゲノムインフォマティクスの強力なメンバーが複数いたことからこの最少遺伝子モジュールの推定は比較的円滑に実現できた。また、Wood-Ljungdahl 経路における鍵酵素 ACS/CODH に関しては、比較ゲノム解析により、冥王代類似環境微生物においては、真正細菌型と古細菌型のハイブリッドである事を明らかにしたが、祖先型配列へと遡及する段階には至らなかった。メタゲノム解析の結果と最少遺伝子モジュールの推定結果は整合性が高く、中枢的遺伝子をもった最小ゲノムの生物は、多様な生体構成材料が化学的に供給される場においては生物活動が可能であると考えられる。

**目的 3:** 冥王代類似環境の微生物に特徴的な遺伝子群や代謝モジュールの機能推定および機能解析を行う。また冥王代類似環境微生物ゲノムの再構成、原始的なゲノムの設計・再構成を行い、より原始的な生命体の生命機能の解明に挑む。

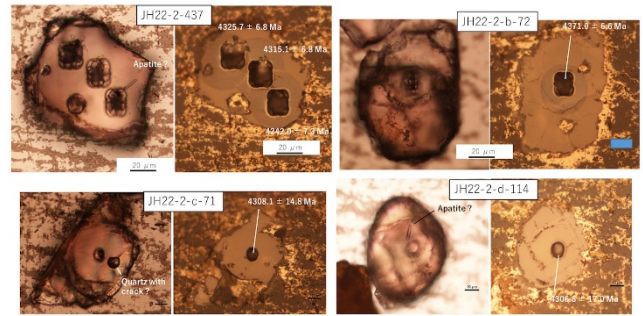


**達成度 3** :20%。原始的な膜、代謝、自己複製のメカニズム解明に向けた半人工生命実験の実施は、当初から順次研究を進めた。人工膜に各種タンパク質を埋め込むために、さまざまな蛋白を用意し、自律的な自己複製を目指した。その結果、光駆動型 ATPase の合成が可能な人工膜系、すなわち自らエネルギーを造り出す事が可能な人工生命を世界で初めて構築することに成功した。この成果は革新的であるが、ATP の生成に成功しただけの初期段階であり、最終目標への道程はなお遠い。

**A04 : ポスト冥王代班 代表 : 磯崎行雄 (東京大学)**

**目的 1** :最古のジルコンの採集と測定による原初大陸の存在の実証

**達成度 1** :100%。冥王代ジルコンの大量獲得を最優先し、「冥王代ジルコン選別装置」を開発した。初年度に装置の設計を進め、二年目に完成させた。当該装置によって、1 cm x 2 cm角のガラス板上にジルコン結晶 3,000 個を自動配列させ、樹脂で固定/研磨する前の状態で、3,000 個のジルコンの半定量 Pb-Pb 同位体分析を行うことが可能である。さらに、Tandem-LA-LIBS 装置を用いる簡便年代測定法を考案したことによって、3,000 個の分析を 30 時間程度で完了させることを可能にした。冥王代ジルコンの選別と年代測定に特化した新装置は、従来の手動作業に比べて冥王代ジルコンの選別で 2 桁高い効率を達成した。冥王代ジルコン選別装置によって、43 億年前よりも古い時代の最古粒子を 10 粒、そして冥王代ジルコンを総数 200 粒以上確保した（先行研究では 10 万粒のジルコンから冥王代ジルコンを 3 粒のみ抽出）。また、冥王代最古ジルコン(43 億年前(Pb-Pb 年代による))の包有鉱物の中に含水鉱物であるリン灰石  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$  を発見した。この事実は、地球マントルが少なくとも、43 億年前までに加水されていたことを示す世界初の証拠である。



**目的 2** :マントル深部に沈み込んだ原初大陸の存在の同定

**達成度 2** :100%。マントル深部に沈み込んだ冥王代の原初大陸の存在を検証するためには、広域分布の精密なトモグラフィー像が必要であり、これらのデータは中国人地質学者らとの共同研究で行われた。その結果、KREEP による発熱効果を利用した超低速帯がマントル最下部にスポット状に点在することが明らかになった。かつて、Zhao らは、太平洋とアフリカのスーパープルームはマントル最下部に崩落した原初大陸から直接生成されたと考えたが、今回明らかになった分布を考慮すると、スーパープルーム誕生に寄与しているのは第 2 大陸（マントル遷移層にたまったスラブ）であり、後に CMB 起源の能動的プルームと連結したらしいことが明らかになりつつある。

**目的 3** :冥王代における生命の痕跡の探索

**達成度 3** :30%。多種多様な前生物的化学進化を可能にする地球生命誕生場の実態解明には、現在の地表における生命誕生場の類似環境の研究が不可欠である。その場を東アフリカ地溝帯の湖沼群に求め、その化学的多様性とその原因を探索した。我々は、アフリカ東部リフトバレーで堆積した第四紀の湖沼成功堆積物の層序および周辺の火山岩の放射能（空間線量）の測定を H29 年から一部の層序で始め、現在も検査を継続中である。

**追加課題** :太陽系外物質の検出

**達成度** :100%。冥王代の時代には、大量の地球外物質の流入があったと推定されるが、その検出方法が確立されていない。堆積速度の低い遠洋深海層のヘリウム同位体比の測定を、約 2.5 億年前の古生代/中生代境界層から見出し、この化学指標が極めて有効であることを世界で初めて示した。

**A05 : 生命惑星班 代表 : 戎崎俊一 (理研)**

**目的 1** :磁気回転不安定による磁気乱流の影響を考慮して原始惑星形成円盤を外縁部（~100AU; 1AU=地球太陽間の平均距離）から内縁部（~0.01AU）までを统一的に扱う一次元モデルを降着円盤の定常解として求める。

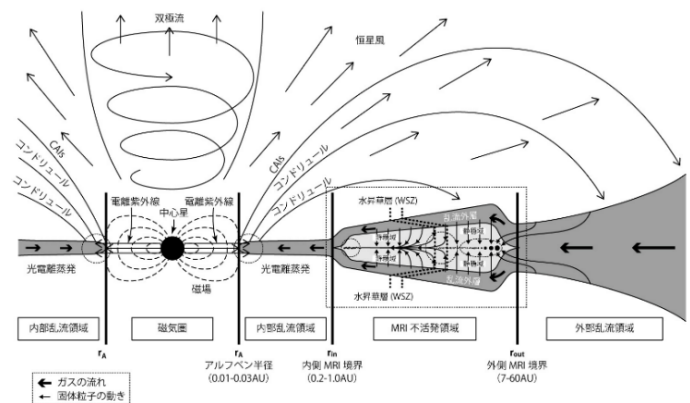
**達成度 1** :100%。当該モデルが完成し、タンDEM惑星モデルと名づけ、論文を執筆して発表した。

**目的 2** :上記モデルをもとに固体惑星の始原物質モデルを作る。

**達成度 2** :80%。平衡凝縮計算を用いて、岩石惑星形成領域（内側のMRIフロント）において凝集する物質モデルを形成し、バルクシリケートアースや、隕石の主要化学組成を比較したが、論文未発表。

**目的 3** :系外惑星の観測を考慮し、Habitable Trinity惑星の一般的成因論を構築する。

**達成度 3** :50%。タンDEM理論による惑星形成域を中心星の質量と降着率の関数として導出し、系外惑星の観測データと比較した。現在、観測データのバイアスなどの評価を行って論文をまとめる準備を進めている。



### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

#### 問題点：

本領域の研究推進時に我々が直面した問題は、中間評価において、研究の遅れに対する厳しい指摘を受けたことである。中間評価における指摘の内容は、生命誕生の環境について、提案時の「淡水湖モデル」から、「自然原子炉間欠泉モデル」に拡張され、より妥当性の高いモデルが領域活動によって見出されたことは領域発足による成果として評価しうるものの、研究手法の立て直しに伴う若干の遅れがあるとするものであった。生命誕生場モデルの進化に伴い、生命誕生の前駆的進化や冥王代類似環境微生物の研究において、領域発足時には想定しなかった知見が必要となり、これらを補充するための研究者の獲得に伴う組織変更が必要となった。

#### 問題点に対する対策：

最も大きく影響を受けたのは冥王代化学進化（A02）班である。A02 班は、新たなモデルに基づいた冥王代における生命誕生場を模擬した実験環境を早急に構築するために、東工大岡山キャンパスが保有するコバルト 60 の放射線照射施設を活用するため早急に交渉を進め、生命誕生場である自然原子炉間欠泉モデルを実証するための実験にとりかかった。生命誕生場において生命合成を駆動する主要な役割を担う放射線化学の研究者（Fahrenbach、焼山）や分析の専門家（本郷）を A02 班に新たに組み込み、研究体制を強化した。そして、無機物から複雑な有機物を合成する前駆的化学進化の具体的プロセスの解明と検証作業に取り組むために、RNA の分子生物学や合成生物学の分野における第一人者（金井）を新たに招き入れるとともに、若手研究者（藤島）も積極的にメンバーに組み込んだ。その結果、研究期間の後半 2 年間で成果が一気に始まり、自然原子炉間欠泉を想定した化学プロセスにおける RNA 前駆体の合成まで成功した（Fahrenbach et al., 2017, Adam et al., 2018, Yi et al., 2018, 他 1 報）。他方、A03 班は、最古生命のモダンアナログである Hakuba OD1 の完全ゲノム解読に挑んだが、Hakuba OD1 の培養が困難を極め、ドラフト版の解読に留まった。そこで、OD1 を含む蛇紋岩環境の細菌研究者（鈴木）を新たに組み込み、最古生命 LUCAs を解明する研究を推進し、白馬および米国 The Cedars の蛇紋岩熱水系に生息する OD1 や WS2 などの原始的な性質を色濃く残す未培養細菌群に関する多くの成果を挙げる事ができた（Suzuki et al., 2017, 2018, Nobu et al., submitted）。また、細胞膜や複製など細菌の遺伝学研究者（大島）を加え、生物の基本機能のひとつである膜と自己複製の研究に幅を加え、最古生命の解明に迫った（Higashi et al., 2018, Nishino et al., 2018, 馬場ら, 2019）。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価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。

##### <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>

審査結果の所見において指摘を受けたのは2点である。

**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、総括班主導の外部に開かれた研究 WS の議論を通じて研究分担者の補強を進め、研究者構成に広がりを持たせた。その結果、中間評価時までには全体の 24%となった。また、大気科学に精通する研究者の強化については、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推進した。

**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2：**予算決定状況から、これは生命惑星（A05）班へのコメントと判断した。A05 班は、一般的には生物学からはほど遠い研究領域であり直接的に結びつく分野とは言い難いが、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上で重要である。本所見を受けて、A05 班は地球の水の供給過程についての議論に特に注力し、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。

##### <中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

中間評価の所見で指摘を受けた事項は6項目あり、それぞれの対応状況は下記のとおりである。

**事項1：**前モデルを採用した際の妥当性・理由・新旧モデルの比較を説明すること

**対応策1：**自然界の複雑な現象の仕組みを解明するために最重要かつ必要なアプローチは、作業仮説を立案し、それを繰り返して検証することである。もし、作業仮説が説明できない証拠（反証）があった一つでも示されれば、その作業仮説はただちに却下され、反証に耐えうる新たな作業仮説を構築し、検証作業を繰り返すのである。前モデルである「淡水湖モデル」は、生命誕生場として過去に提案された「中央海嶺熱水系説」、「宇宙（火星）説」に対して与えられた反証をクリアすることができる場として提案・採用されたものである。その後の研究を通じて、生命誕生に必要な条件を洗い出し検証することによって、「淡水湖モデル」は「ナイアガラ瀑布モデル」、さらに「自然原子炉間欠泉モデル」へと進化した。

**事項2：**「淡水湖モデル」から「自然原子炉間欠泉モデル」への変更の領域内・総括班メンバー間のコミュニケーションの状況・議論の経緯（反論なども含む）を説明すること。

**対応策2：**本領域では、領域代表者ならびに5つの計画研究班の代表者らが参加する総括班の強い主導のもと、各班の研究計画の妥当性や研究結果の相互フィードバックなどを議論するため、総括班会議、シンポジウムあるいは中・小規模の合同ワークショップなどを国内外含めて、過去2年半の間に合計47回実施した。これら議論の場を通して、各計画研究班内で閉じた研究ではなく、領域一丸となった研究を推進した。当初採用された「淡水湖モデル」は、A02（冥王代化学進化）班が反証を唱えた（ダイナミックに変化する冥王代の表層環境では、淡水湖環境が多様に変化してしまい、生命構成分子の生成機構の定常的な維持が困難である）ことがわかった。そこで、モデルの見直しを行い、その結果、最終的に導かれたのが、「自然原子炉間欠泉モデル」である。冥王代に存在したと考えられる自然原子炉と間欠泉が組み合わさった一連の環境では、複数の生命構成分子（リポース、アミノ酸、核酸塩基、脂肪酸、ポリリン酸）が定期的に生成されるという長所が認められると同時に、生命誕生場に必要なその他の条件もすべて満たしていた。このような議論の流れから、A02 班内では自然原子炉を模擬した化学合成実験に着手することとなった。

**事項3：**新モデルに対する国際誌への論文投稿時のレフェリーコメント（やりとりを含む）について説明すること。

**対応策3：**国際誌投稿時のレフェリーコメントは、本来、論文審査関係者以外に伝達すべき内容のものではないというのが国際誌編集者、査読者、あるいは投稿者の間の共通したルールとなっている。したがって、レフェリーコメントややりとりを説明せよという要請に対し、道義上の疑問を感じるというのが率直な感想であるが、本研究の本質的な重要性を理解するために必要であることだと判断し説明する。しかし、この情報が外部に漏れた場合の、文部科学省および審査委員会の責任の所在と対応については別途ご検討いただきたい。

①新モデル「自然原子炉間欠泉モデル」について、レフェリーからは69項目にわたる詳細なコメントを得た。指摘事項の多くは、引用すべき論文の指摘であったため、指摘された箇所を含め、改めて引用論文を見直した。その結果、引用論文は132編の多数に及んだ。もう一つの重要な指摘は、冥王代の地表で、どの程度の太陽エネルギーが到達していたかという記述に、論文内で矛盾があったことである。このことは、論文執筆過程で、冥王代地球の大気の厚さについての理解が深化したために、矛盾した記述が残っていたことによる。したがって、この点を修正した。

②新モデル「ABEL モデル」について

2名のレフェリーから12件の具体的なコメントを得た。多くはタイプミスや挿入すべき引用文献の指摘、記述内容の確認だが、特に2012年前後以降の同位体元素分析に基づく研究成果が紹介されていないという指摘があった。これに従い、近年の同位体分析データに基づく研究成果を論文内に追加記述したが、モデル自体をサポートする具体的なデータであったため、本モデルの本質をより強化するものとなった。

**事項4：**以下の個別事項を含め、上記に伴う研究項目A02～A05に与えた影響および、それぞれの具体的な変更内容について、研究成果との結果も含め、説明すること。

<研究項目A02> 6個のテーマ中2個は、計画を練り直し、準備を完了したとのことだが、具体的な内容、その他のテーマの対応について説明すること。

**対応策：**中間評価までの目標としていたテーマは次の6項目である。(1) 酸化リクターと(2)還元リクターの構築、(3) 鉱物表面での有機物重合機構の解明、(4) 酸化リクターでのリボース合成、(5) 還元リクターでの核酸塩基、アミノ酸、ポリリン酸、脂肪酸合成、(6) 合流リ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。上記テーマのうち計画の変更が必要となったのは、(4)(5)の生命構成分子の合成についてである。これは、生命誕生場モデルの変更に基づくものである。新しく提案された「自然原子炉間欠泉モデル」では、複数の生命構成分子が、一連の「自然原子炉間欠泉」環境から定期的に生成され得ると想定している。この想定背後にあるのは、化学進化を生化学的に捉える新たな視点から出発し、原始的な代謝反応ネットワークからなる単一のシステムを安定的に成立させることができ、その下流の反応で主要な生命構成分子を定期的に生成することが可能になるとする考え方である。原始的代謝反応ネットワークとして、A03 班は現生細菌における必須遺伝子群の共通性を代謝モジュール単位で解析し、解糖系/糖新生のモジュールが原始生命体に必須であったと推定した。現生生物の解糖系/糖新生は酵素によって実現し、その反応ネットワークの下流で糖(リボース)、アミノ酸(S,G,C,W,F,Y,A,V,L,I)、核酸塩基、リン脂質等の生命構成分子が合成される。そこで、A02 班は原始的な解糖系/糖新生ネットワークが「自然原子炉間欠泉」環境で非酵素的に構築され、そこから複数の生命構成分子が定期的に生成されるという仮説を実験的に実証することを新たな目標とすることになった。これが実現できれば、当初目標の(4)(5)(6)は達成される。A02 班が目標とした6個の実験テーマは、自然原子炉間欠泉モデルの採用によって、ゴールに向けて一気に快進撃が始まったと言える。

<研究項目A03> 半人工生命体実験で、脂質合成系を内包させ、人工膜が再生可能になるかを検討、その後、最小遺伝子系を導入することであり、これまでの *in silico* の研究から、大きく飛躍することが想定されるが、*wet* 実験の計画など、今後の具体的な計画を説明すること。

**対応策：**半人工生命体の実験は、脂質合成系遺伝子を筆頭に最小遺伝子系を導入した人工膜を構築し、人工膜が自己的に複製し、生命体として増殖を開始するかを証明しようとするものである。人工膜には種々の物質の流入に必要な膜タンパク質を埋め込んでおき、膜内では合成できないさまざまな生命物質材料の取り込みができる系を構築する(H29 まで)。こうしてできた半人工装置を最適化しながら、最終的に人工培地上で分裂増殖を行うことができるかどうかを確認する(H30 まで)。こうした実験はこれまでに進めてきた *in silico* の研究結果を受け、それを実験的に証明しようとするものであり、研究としては妥当なステップを踏んでいる。本実験は *in silico* で得られた最小遺伝子モジュールで生命体を実際に再現できるのかという挑戦的な課題であると同時に、(1) A02 班が鋭意行っている生命構成分子の化学合成実験のボトムアップアプローチと、(2) 冥王代類似環境としての蛇紋岩熱水系に存在する現生の微生物のゲノム・生化学情報をもとに「最も原始的な基本代謝系は何であったか」を解析するトップダウンアプローチ、の「橋渡し」研究として重要な意味を担っている。最終的には、光駆動型 ATPase の合成が可能な人工膜系の構築に成功している。

<研究項目A04> 冥王代ジルコンを2桁高い効率で大量自動選別する装置の開発に成功したとあるが、その精度について説明すること。

**対応策：**従来は約100ミクロンのサイズのジルコン粒子分離のために、通常の破壊/水篩/重液分離/電磁分離の後、顕微鏡下で手作業にてピックアップを行ってきたが、この7手作業工程に最も時間と労力を要してきた。新たに設計・開発した装置(automatic zircon separator; AZS)は、未分離の粉末試料を設置すれば自動運転でジルコンのみを画像識別/機械的選別し捕獲トレイに整列配置することができる。これによって、20時間で約1,500個の粒子の選別が可能となった(熟練した作業員が2日間のフル労働で得られる結果にほぼ匹敵)。さらに、精密な年代測定の前段階に、カソード・ルミネッセンス像やラマン分光計による詳細観察で粒子表面の化学組成を簡便に測定し、ジルコン以外の混在粒子及び若い年代のジルコン粒子を識別除去することが可能になった。これによって、冥王代ジルコン抽出の精度が向上し、分析に有望なジルコン粒のみを濃集することに成功した。過去の研究では、地球最古(43億年前)のジルコン粒子は、10万粒の中から3粒発見されただけだった。それに対して、新規開発したAZSにより、同じ試料から分離した約3,000粒の中から200粒の冥王代ジルコンを、その中から地球最古粒子(43.7億年前)を10粒採取した。回収率はほぼ100倍に向上した。

**事項5：**個々の計画研究間の領域内の連携について、生物学、地質学、大気科学などの関連分野から複眼的・総合的な視点から、領域形成を推進していくための具体的な方策を説明すること。

**対応策5：**様々な分野を横断的に理解し超学際研究を進めるためには、常日頃から活発な議論を専門外の研究者らと進める以外に方法はない。そこで、我々は、日常的な議論に加えて、シンポジウムや合同ワークショップなどを国内外含めて、過去2年半の間に合計47回実施した。このような議論の場を絶えず提供することによって、各研究の最前線を常に把握すると同時に、領域全体における、それぞれの研究の立ち位置を総合的・俯瞰的視点から理解することを後押しした。一方で、そのような議論の場では、専門領域に全く接点のない者同士(例えば、本領域においては、生物学者、地質学者、天文学者)が相対する。そのような場で重要なことは、①必要以上の専門用語を多用しない、②身の回りに観察される具体例を使いながらわかりやすく説明する(数式などは使わない)、③過去の研究の成果と現在の問題点を整理する、④いかに簡単な質問でも受容できる雰囲気醸成する、⑤一人学際(一人で複数の専門領域をまたいで研究すること)を意識的に実施する、ということだ。このような場における説明能力を向上させることは、専門家にとっても、ものごとの本質をより深くかつ俯瞰的に理解するうえで重要である。このような手法と環境のもとで、各研究者が研究を進めることで、様々な分野を総合的・俯瞰的な視点から理解しながら領域を形成し、研究成果を確実に出していくことが可能になる。しかし、こういった研究活動は「言うは易く行うは難し」である。なぜなら、研究者としての強い情熱がなければこのようなことは長続きしないからである。

**事項6：**今後の展望について、モデルが変わる可能性なども含めて、説明すること。

**対応策6：**自然界の複雑な現象の仕組みを解明するために最重要かつ必要なアプローチは、作業仮説を立案し、それを繰り返して検証しながら、さらに新しい作業仮説へと進化させ、限りなく真実に近づくことである。我々が提案した「淡水湖モデル」が、多様な研究分野からの検証作業を経ることによって「自然原子炉間欠泉モデル」へと変貌を遂げたように、モデルが進化することは、自然科学の発展に欠かせないステップである。こうした検証作業の結果、作業仮説はより真実へと近づく。反証可能性のないモデルは科学にはならず、根拠のないモデルもまた無意味であることは言うまでもない(カール・ポパー著「科学的発見の論理(1971年)」)。



## 5. 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）

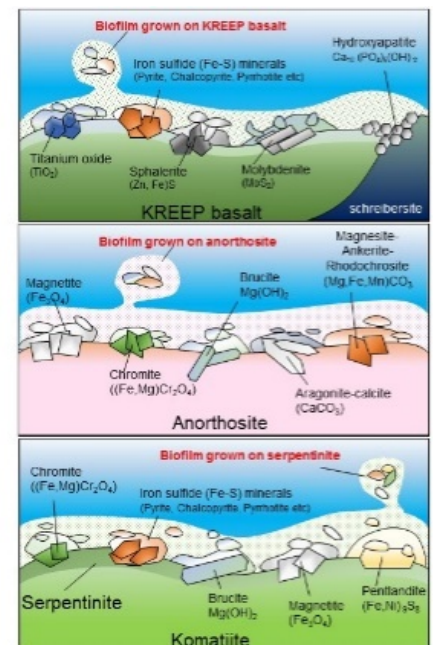
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

### 最古生命ゲノム：冥王代類似環境微生物Hakuba OD1の分析（A01+A03融合研究）

冥王代類似環境微生物（A03）班では、A01班が特定した冥王代類似環境である白馬やThe Cedarsなどの陸上蛇紋岩熱水系に生息する細菌群集を解析し、OD1やWS2などのCandidate Phylum Radiation(CPR)や、Nitrospiraなど極めて特異的な微生物群により構成されている事を明らかにした（Suzuki et al., 2017, 2018）。特にエネルギー代謝に関しては、原始エネルギー代謝の中核を担っていたと考えられているWood-Ljungdahl 経路ならびにその様々な変型代謝系が見出された（Nobu et al., submitted）。この経路の鍵酵素であるACS/CODH（アセチルCoA合成酵素/一酸化炭素脱水素酵素）の5つのサブユニットがそれぞれ、archaeaタイプあるいはbacteriaタイプの組み合わせによって構成された独特のキメラ酵素であることが判明した。またOD1を初めとする主要未知微生物のゲノム全体では、遺伝子数が500程度と一般的な細菌と比べて圧倒的に少なく、また、解糖系の前半部分を欠くこと、多くのアミノ酸合成遺伝子が欠失しているなど、各細菌種がそれぞれ単独では生存が困難と思えるゲノム構造を有していることを明らかにした（戎崎ら, 2019）。またゲノムデータベースからインフォマティクスの手法を駆使して、生命体を維持するための最少モジュールの推定を行ったところ、脂質合成、核酸合成など、最小限のモジュールさへ細胞が備えていれば、他の生命構成材料が化学的に供給されれば、原理的に生命の自律増殖が可能である、との解析結果を得た（Higashi et al., 2018）。こうした知見は、冥王代類似環境における微生物群集においては、異種微生物間の相互依存を想起させるものであると同時に、これら細菌群が特定の環境に適応した優占種となっていることや、環境と関連した生存機構を示唆することから、その依存性が他の生物種というよりも、環境そのものであることを示唆している。ここでさらに重要なのは、我々が研究対象としているHakuba OD1は、遊離酸素がほとんど存在しない超還元的な水素に富む環境下で生息しているという点で、世界の他のOD1とは全くことなっている。遊離酸素がなく水素に富む環境とは、すなわち冥王代類似環境であり、Hakuba OD1は冥王代類似環境微生物だと我々は位置づけている。つまり、Hakuba OD1のもつ代謝や機能、その生態系は最も始原的なものとみなせるのである（金井ら, 投稿中）。

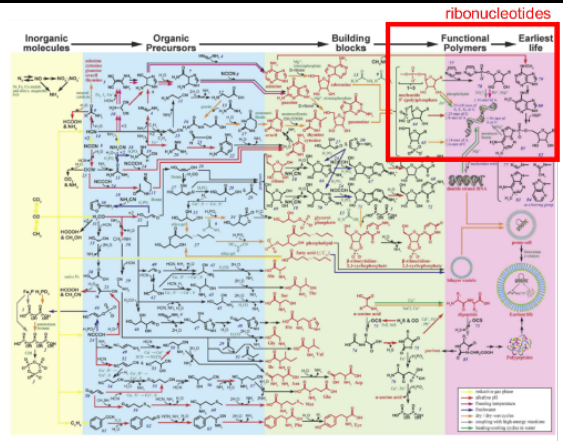
### 金属たんばくの起源：冥王代表層で起きた岩石—水相互作用の具体的プロセス（A01+A02融合研究）

生体構成元素の95%はCHONの4元素で占められているが、残りの5%はリン、カルシウム、鉄、マンガン、マグネシウム、モリブデン、ニッケル、硫黄、塩素などの栄養塩である。中でもリンは、リン酸塩（ $PO_4^{3-}$ ）として、生命現象そのものを特徴づける最も重要な金属イオンであり、リン酸塩の合成や分解で発生するエネルギーは、生命の代謝反応の基本メカニズムである。この反応の永続性を保証することが生命現象の本質であり、その基本は電子の永続的な流れである。こうした反応を可能にするために、リンを提供する岩石が冥王代環境でどのように化学進化に関与したかが重要な研究対象となっている。とりわけ、冥王代表層環境では、遊離酸素が全くない環境であることに注意することが重要である。そうした環境下で、最重要なリンやそれ以外の生体必須元素を供給する岩石と水の相互作用によって、ATPやフェドキンが生成されるプロセスの解明を目指した。栄養塩供給源である岩石は、1000℃以上の温度でマグマから晶出した鉱物である。一方液体の水の安定領域は0–100℃なので、この水—岩石相互作用は典型的な非平衡したで起きる化学反応である。これらの反応を通じて鉱物から放出される潜熱が原始的金属タンパク生成反応と関係しているはずである。最も始原的生物とみなされているCPR微生物群に含まれるOD1の生息形態をみると、かんらん石の表面に集団で固着しており、水と反応して橄欖石の蛇紋岩化作用で生じる潜熱と電子を利用していると推察される形態をとっている（Suzuki et al., 2017）。こうした特徴は、自然界における非平衡反応を利用して電子を利用していることを示唆している。このような冥王代類似表層環境下で生息する生物が、岩石—水反応によってホストの岩石上に形成されるバイオフィームの中で複数の種と細胞外共生している状況が分かり始めた。こうした岩石—水相互作用のプロセスについては、シュライバサイト（公募班：清尾：最古代謝の起源, Seio et al., 2019）、パイライト（A02班：最古金属タンパクの起源, Narangerel et al., 2016, Afrin et al., 2018, Motohashi et al., 2019）、ペントランダイト（A01班：最古金属タンパクの起源）、アパタイト（公募班：岡本：核酸塩基の起源, Usami et al., 2017）に着目し、無機のプロセスを解析して有機的な結合の可能性を検討している。（Yoshiya et al., 2019）



## 自然原子炉間欠泉モデルの実証実験：RNA前駆体の合成（A01+A02+A05融合研究）

電離放射線の照射によってさまざまな有機物（例えば、ホルムアミド（ $\text{H}_2\text{NCHO}$ ）やアミノ酸のグリシン（ $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$ ））が合成されることはA02班が研究を開始する以前からすでに様々な実験によって確認されている(Miller & Cleaves(A02班代表), 2007)。A02班では、こうした実験を、A01班から提供される冥王代の表層環境を模した場（電離放射線や冥王代大気、冥王代岩石）を想定しつつ進めた。大気中の窒素( $\text{N}_2$ )とメタン( $\text{CH}_4$ )からアセトニトリル( $\text{CH}_3\text{CN}$ )が生じたであろう冥王代環境系を想定し、アセトニトリル水溶液（ $\text{CH}_3\text{CN}/\text{H}_2\text{O}$ ）に $\gamma$ 線を照射し、アミノ酸ほか生命関連分子の前駆体として有望なホルムアミド( $\text{NH}_2\text{CHO}$ )の生成を確認した。また、ホルムアミド（ $\text{NH}_2\text{CHO}$ ）のほか、アセトアミド（ $\text{NH}_2\text{CHOCH}_3$ ）、酢酸（ $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ ）ギ酸（ $\text{HCO}_2\text{H}$ ）とサクニトニトリル（ $\text{NCCH}_2\text{-CH}_2\text{CN}$ ）、アセトアルデヒド（ $\text{CH}_3\text{CHO}$ ）について標準化合物とのスペクトルと保持時間照合から構造を確認した。その他、NIST 70eV電子イオン化スペクトルデータベース照合から、3200 kGy照射試料からはメチル化したアラニン（N-methylalanine）、ホルムアミド(N-methylformamide)、アセトアミド（N-methylacetamide）やピリミジン類縁構造の化合物の存在が示唆された(Fahrenbach et al., 2017, Adam et al., 2018, Yi et al. 2018 他1報)。



## 生命誕生までのプロセス：生命誕生の三段階モデル（A01+A02+A03+A05融合研究）

生命進化は環境変化によって駆動される。冥王代の地球環境変遷モデルと最小遺伝子代謝モデルとを比較・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、アノソサイト、 $\text{Fe}_3\text{P}$ ）とそこに流入した大気の酸化的成分（ $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ）が反応して還元的分子

（ $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HS}$ ）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。ウランの核分裂連鎖反応による電離放射線は、安定な $\text{H}_2\text{O}$ や $\text{CO}_2$ 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（ $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ）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（ $\text{FeS}_2$ 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だと考えられる。しかし、時間とともに、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（ $\text{pH}<1$ 、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、猛毒海中では死滅したが、海洋から隔離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

**第一次生命体：**自然原子炉を駆動力とするエネルギー・物質循環系の中のサブシステムとしての細胞外共生体

自然原子炉間欠泉からの電離放射線



**第二次生命体：**駆動体が太陽に代わり、機能を進化・向上させた細胞外共生体(RNA)

太陽エネルギー



RNA

**第三次生命体（原核生物）：**繰り返す自然淘汰により機能が進化し、DNA、細胞膜、Naポンプが誕生。狭い細胞内に多種多様な機能体を組み込んだ、細胞内共生体。

太陽エネルギー

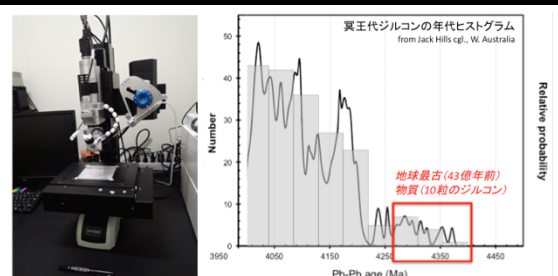


DNA

細胞膜  
細胞壁

## 発見効率を100倍向上：冥王代ジルコン選抜装置の開発（A01+A04+A05融合研究）

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。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 (Isozaki., et al., 2018)。





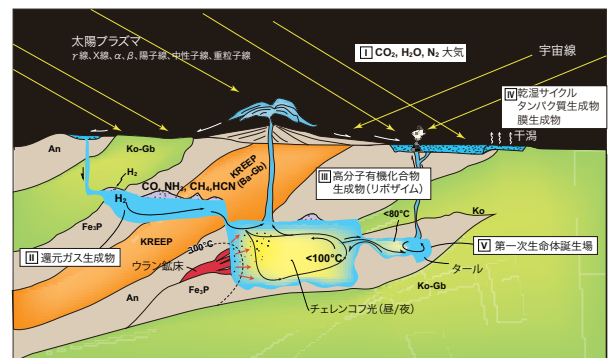
## 生命誕生場の必要条件を抽出：生命誕生場の9条件（領域融合研究）

化学進化を通して生命誕生に向かう一連の環境において、生命誕生に最低限必要な環境条件を9つ抽出した。9条件の中でも特筆すべき点は、前駆的化学進化を駆動するエネルギー源として、太陽エネルギーや海嶺熱水鉱床の熱ではエネルギー密度が桁違いに不足していることを明らかにした点である。冥王代の表層環境において、前駆的化学進化に貢献したのは、自然原子炉から供給される高エネルギー粒子である。生命誕生場に必要の9条件をひとつでも満たせない場合、生命誕生に至ることはない。抽出された条件をもとに、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（Maruyama et al., 2018）。

	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	○	×	×	×

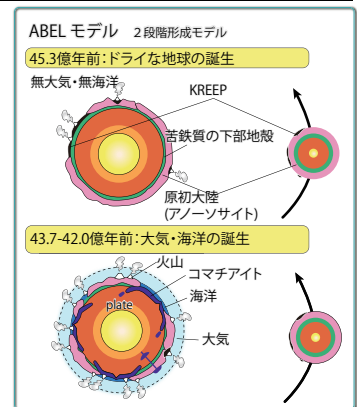
## 生命誕生場：自然原子炉間欠泉モデルの提案（A01+A02+A05融合研究）

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は低い。このことを考慮すると、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(CO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>)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（Ebisuzaki et al., 2017, Maruyama et al., 2018, 戎崎ら, 2019）。



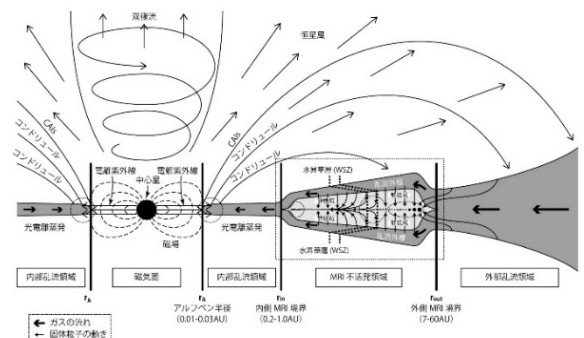
## 生命惑星・地球の起源：二段階形成モデル「ABELモデル」の提案（A01+A05融合研究）

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。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（Maruyama et al., 2017）。



## 古典的惑星形成論に新たなパラメーター（磁気乱流）を加え理論をアップグレード：タンデムモデルの提案（A05）

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、それらが地球質量まで成長することが分かった。そして、このような惑星形成モデルを「タンデム惑星形成モデル」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（Ebisuzaki et al., 2017, Imaeda et al., 2017, Imaeda et al., 2017）。



## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（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であるについては、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。

### 特集号に掲載された主要論文（合計33報）

本領域では、生命の起源研究の成果を発表するための特集号を2つのジャーナル（計3冊）で提案し、主要論文を発表した。なお、地学雑誌特集号はあと2冊が発表予定（Part II-冥王代地球表層環境と生命誕生場（仮、2019年夏発行予定）、Part III-生命の初期進化（仮、2020年春発行予定））。最後の青色の数字は引用回数を示す。

#### (1) Geoscience Frontiers; Frontiers in Early Earth History and Primordial Life- Part I

- ▲ \* Sasaki, T., Ebisuzaki, T. 2017. Population synthesis of planet formation using a torque formula with dynamic effects, Geoscience Frontiers 8, 215-222. (5)
- ▲ \* Imaeda, Y., Ebisuzaki, T., 2017. "Tandem planet formation for solar system-like planetary systems", Geoscience Frontiers, 8,223-231. (5)
- ▲ \* Imaeda, Y., Ebisuzaki, T., 2017. "The origin of high eccentricity planets: The dispersed planet formation regime for weakly magnetized disks", Geoscience Frontiers 8, 233-245. doi: 10.1016/j.gsf.2016.07.001. (4)
- ◎▲ \* Kataoka, R., Sato, T., 2017. Ionization of protoplanetary disks by galactic cosmic rays, solar protons, and supernova remnants. Geoscience Frontiers 8, 247-252. (1)
- ◎▲ \* Maruyama, S., Ebisuzaki, T., 2017. Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL. Geoscience Frontiers 8, 253-274. (31)
- ◎▲ \* Ebisuzaki, T., Maruyama, S., 2017. "Nuclear geyser model of the origin of life: Driving force to promote the synthesis of building blocks of life" Geoscience Frontiers, 8, 275-298. (13)
- ▲ \* Arai, T., Maruyama, S., 2017. Formation of anorthosite on the Moon through magma ocean fractional crystallization. Geoscience Frontiers 8, 299-308. (7)
- \* Santosh, M., Arai, T., Maruyama, S., 2017. Hadean Earth and primordial continents: The cradle of prebiotic life. Geoscience Frontiers 8, 309-327. (27)
- \* Azuma, S., Yamamoto, S., Ichikawa, H., Maruyama, S., 2017. Why primordial continents were recycled to the deep: Role of subduction erosion. Geoscience Frontiers 8, 337-346. (13)
- \* Ichikawa, H., Greaux, S., Azuma, S., 2017. Subduction of the primordial crust into the deep mantle. Geoscience Frontiers 8, 347-354. (6)
- \* Komiya, T., Yamamoto, S., Aoki, S., Koshida, K., Shimojo, M., Sawaki, Y., Aoki, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Maki, K., Ishikawa, A., Hirata, T., Collerson, K.D., 2017. A prolonged granitoid formation in Saglek Block, Labrador: Zonal growth and crustal reworking of continental crust in the Eoarchean. Geoscience Frontiers 8, 355-385. (10)
- ▲ \* Ueda, H., Sawaki, Y., Maruyama, S., 2017. Reactions between olivine and CO<sub>2</sub>-rich seawater at 300 degrees C: Implications for H<sub>2</sub> generation and CO<sub>2</sub> sequestration on the early Earth. Geoscience Frontiers 8, 387-396. (4)
- ▲ \* Sawaki, Y., Moussavou, M., Sato, T., Suzuki, K., Ligna, C., Asanuma, H., Sakata, S., Obayashi, H., Hirata, T., Edou-Minko, A., 2017. Chronological constraints on the Paleoproterozoic Francevillian Group in Gabon. Geoscience Frontiers 8, 397-407. (2)

#### (2) Geoscience Frontiers; Frontiers in Early Earth History and Primordial Life- Part II

- ▲ \* Dohm, J.M., Maruyama, S., Kido, M., Baker, V.R., 2018. A possible anorthositic continent of early Mars and the role of planetary size for the inception of Earth-like life. Geoscience Frontiers 9, 1085-1098. (2)
- ▲ Higashi, K., Kawai, Y., Baba, T., Kurokawa, K., \* Oshima, T., 2018. Essential cellular modules for the proliferation of the primitive cell. Geoscience Frontiers 9, 1155-1161. (2)
- ▲ \* Imaeda, Y., Ebisuzaki, T., 2018. Single planet formation regime in the high-ionization environment:

Possible origin of hot Jupiters and super-Earths. *Geoscience Frontiers* 9, 1023-1031. (1)

17. ▲ \* Isozaki, Y., Yamamoto, S., Sakata, S., Obayashi, H., Hirata, T., O-bori, K., Maebayashi, T., Takehima, S., Ebisuzaki, T., Maruyama, S., 2018. High-reliability zircon separation for hunting the oldest material on Earth: an automatic zircon separator with image processing/microtweezers-manipulating system and double-step dating. *Geoscience Frontiers* 9, 1073-1083. (3)
  18. ◎▲ \* Kitadai, N., Maruyama, S., 2018. Origins of building blocks of life: A review. *Geoscience Frontiers* 9, 1117-1153. (23)
  19. ◎▲ \* Maruyama, S., Santosh, M., Azuma, S., 2018. Initiation of plate tectonics in the Hadean: Eclogitization triggered by the ABEL Bombardment. *Geoscience Frontiers* 9, 1033-1048. (25)
  20. ▲ \* Sawada, H., Isozaki, Y., Sakata, S., Hirata, T., Maruyama, S., 2018. Secular change in lifetime of granitic crust and the continental growth: a new view from detrital zircon ages of sandstones. *Geoscience Frontiers* 9, 1099-1115. (19)
- (3) 地学雑誌「特集号：冥王代の世界 (Part I) -ハビタブルトリニティ惑星の誕生-」
21. ▲ \* 戎崎俊一, 2018, タンDEM惑星形成理論, 地学雑誌 127, 577-607
  22. ▲ \* ジェームズ・ドーム & 丸山茂徳, 2018, ハビタブルトリニティモデルと太陽系におけるハビタブルプラネットの存否, 地学雑誌 127, 609-618
  23. ◎ \* 趙大鵬・丸山茂徳・磯崎行雄, 2018, 月の地震波トモグラフィーと初期地球, 地学雑誌 127, 619-629
  24. ◎▲ \* 丸山茂徳・戎崎俊一・丹下慶範, 2018, ドライな還元地球の誕生と大気海洋成分の二次的付加で説明される ABEL モデルと, 生命惑星誕生における ABEL 爆撃の重要性, 地学雑誌 127, 647-682
  25. ▲ \* 沢田輝・磯崎行雄・丸山茂徳, 2018, 地球史を通じた大陸の成長パターンとその変遷, 地学雑誌 127, 705-721
  26. \* 堤之恭・沢田輝・磯崎行雄, 2018, 冥王代ジルコンの探索—年代分析過程の迅速化—, 地学雑誌 127, 723-734
- (4) 地学雑誌「特集号：冥王代の世界 (Part II) —生命誕生場の準備—」あるいは、  
地学雑誌「特集号：冥王代の世界 (Part III) —生命誕生と初期進化—」に掲載予定の論文
27. ▲ \* 戎崎俊一・西原秀典・黒川顕・森宙史・鎌形洋一・玉木秀幸・中井亮佑・大島拓・原正彦・鈴木鉄兵, 2019, 原子炉間欠泉に駆動された冥王代原初代謝経路 (in press)
  28. ▲ \* 高畑直人・尾上哲治・佐野有司・磯崎行雄, 古生代末 (2.5 億年前) 大量絶滅層準の高いヘリウム同位体記録—冥王代以来の地球史を通じた地球外物質流入同定方法の探索—(in press)
  29. ▲ \* 上田修裕・澤木佑介, 初期地球の蛇紋岩熱水系 (accepted)
  30. ▲ \* 澤木佑介・佐藤友彦・藤崎渉・上田修裕・丸山茂徳, 天然原子炉の地質と真核生物誕生 (accepted)
  31. ▲ \* 佐藤友彦・丸山茂徳・吉屋一美, 冥王代の「生きた微化石」OD1と超還元場の歴史 (accepted)
  32. ▲ \* 吉屋一美・佐藤友彦・大森 聡一・丸山茂徳, 原始生命誕生場で起こる岩石-水相互作用と金属タンパク合成のための二次鉱物の役割 (accepted)
  33. ▲ 馬場知哉・柿澤茂行・森宙史・車愈澈・黒川顕・ \* 大島拓, 最小ゲノム：細胞が生きるために必要な遺伝子数はいくつか? (accepted)

## その他の主要論文 (合計305報)

以下は、特集号とは独立して発表された主要論文のリストである。特集号に掲載された論文も含め、主要論文の内容をまとめた専門書は、「冥王代生命学」として 2020 年に出版予定である。新たに確立された学術分野としての知見を体系的に整理し、最前線の内容をいち早く関連研究者らに還元するものである。

### A01 班 (出版論文合計：118 報)

1. ▲ \* Yoshiya K., Sato T., Omori S., Maruyama S., 2019. The Birthplace of Proto-Life: Role of Secondary Minerals in Forming Metallo-Proteins through Water-Rock Interaction of Hadean Rocks. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*. 48. 373-393. (0)
2. ◎▲ \* Maruyama S., Kurokawa K., Ebisuzaki T., Sawaki Y., Suda K., Santosh M., 2018. Nine requirements for the origin of Earth's life: Not at the hydrothermal vent, but in a nuclear geyser system. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.09.011> (1)
3. \* 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. (13)
4. \* Dohm J.M., Maruyama S., 2015. Habitable Trinity. *Geoscience Frontiers* 6. 95-101. (32)
5. \* Maruyama S., Sawaki Y., Ebisuzaki T., Ikoma M., Omori S., Komabayashi T., 2014. Initiation of leaking Earth: An ultimate trigger of the Cambrian explosion. *Gondwana Res.* 25, 910-944. (39)
6. \* 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 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Hoppo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters* 386, 112-125. (46)

A02 班 (出版論文合計 : 51 報)

7. Berhanu S., Ueda T., \*Kuruma Y. 2019. Artificial photosynthetic cell producing energy for protein synthesis, *Nat. Commun.*, 10, 1325 doi: 10.1038/s41467-019-09147-4. (4)
8. ▲Furusato T., Horie F., Matsubayashi HT., Amikura K., Kuruma Y., \*Ueda T. 2018. De Novo Synthesis of Basal Bacterial Cell Division Proteins FtsZ, FtsA, and ZipA Inside Giant Vesicles. *ACS Synthetic Biology*, doi: 10.1021/acssynbio.7b00350. (11)
9. ▲ \*Adam Z.R., Hongo Y., Cleaves H.J., Yi R., Fahrenbach A.C., Yoda I., Aono M. 2018. Estimating the capacity for production of formamide by radioactive minerals on the prebiotic Earth. *Scientific Reports* 8. (6)
10. ▲Yi R., Hongo Y., \*Fahrenbach A.C. 2018. Synthesis of imidazole-activated ribonucleotides using cyanogen chloride. *Chemical Communications* 54, 511-514. (6)
11. ▲Yi R., Hongo Y., Adam Z.R., \*Fahrenbach A.C. 2018. Radiolytic synthesis of cyanogen chloride, cyanamide and simple sugar precursors. *ChemistrySelect* 3, 10169-10174. (2)
12. ▲ \*Fahrenbach A.C., Giurgiu C., \*Tam C.P., Li L., Hongo Y., Aono M., \*Szostak J.W. 2017. Common and Potentially Prebiotic Origin for Precursors of Nucleotide Synthesis and Activation. *Journal of the American Chemical Society* 139, 8780-8783. (16)
13. ▲Chandru K., Gilbert A., Butch C., Aono M., \*Cleaves H.J. 2016. The Abiotic Chemistry of Thiolated Acetate Derivatives and the Origin of Life. *Scientific Reports* 6, 29883. (11)
14. \*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. (31)
15. Matsubayashi H, Kuruma Y., \*Ueda T. 2014. In vitro synthesis of the E. coli Sec Translocon from DNA. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 53:7535-8. DOI: 10.1002/anie.201403929(37)

A03 班 (出版論文合計 : 44 報)

16. ◎▲ \*Suzuki S., Neelson K.H., Ishii S. 2018. Genomic and in-situ transcriptomic characterization of the candidate phylum NPL-UPL2 from highly alkaline highly reducing serpentinized groundwater. *Frontiers in Microbiology* 9: 646-649. (0)
17. Higashi K., Suzuki S., Kurosawa S., Mori H., \*Kurokawa K. 2018. Latent environmental allocation of microbial community data. *PLoS Comp. Biol.*, 14(6):e1006143. (1)
18. ▲ \*Suzuki S., \*Ishii S., Hoshino T., Rietze A., Tenney A., Morrill P.L., Inagaki F., Kuenen J.G., Neelson K.H. 2017. Unusual metabolic diversity of hyperalkaliphilic microbial communities associated with subterranean serpentinization at The Cedars. *ISME Journal* 11: 2584-2598. (8)
19. Kohl L., Cumming E., Cox A., Rietze A., Morrissey L., Lang Q.S., Richter A., Suzuki S., Neelson K.H., \*Morrill L.P. 2016. Exploring the metabolic potential of microbial communities in ultra-basic, reducing springs at The Cedars, CA, USA: Experimental evidence of microbial methanogenesis and heterotrophic acetogenesis. *Journal of Geophysical Research* 121: 1203-1220. (9)
20. ▲Mayumi D., Mochimaru H, Tamaki H., Yamamoto K, Yoshioka H, Suzuki Y, \*Kamagata Y., \*Sakata S. 2016. Methane production from coal by a single methanogen. *Science* 354: 222-225. (45)
21. ▲ \*Nishihara H., \*Plazzi F., Passamonti M., Okada N. 2016. MetaSINEs: Broad distribution of a novel SINE superfamily in animals. *Genome Biology Evolution* 8: 528-539. (6)
22. \*Narihiro, T., Nobu, M., Tamaki, H., Kamagata, Y., Liu W.T. 2016. Draft Genome Sequence of *Syntrophomonas wolfei* subsp. *methylbutyratica* strain 4J5T, a mesophilic butyrate- and 2-methylbutyrate-degrading syntrophs. *Genome Announc* 4: e0047-16. (3)
23. Tanaka T., Kawasaki K., Daimon S., Kitagawa W., Yamamoto K., Tamaki H., Tanaka M., Nakatsu C.H., \*Kamagata Y. 2014. A hidden pitfall in the preparation of agar media undermines microorganisms cultivability. *Applied and Environmental Microbiology* 80: 7659-7666. (61)
24. \*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. Neelson K.H. 2014. Physiological and genomic features of highly alkaliphilic hydrogen-utilizing Betaproteobacteria from a continental serpentinizing site. *Nature Communications.*, 5: e4900, (30)

A04 班 (出版論文合計 : 50 報)

25. ▲ \*Sawada H., Isozaki Y., Sakata S., Hirata T., Maruyama S. 2018. Secular change in lifetime of

granitic crust and the continental growth: a new view from detrital zircon ages of sandstones. *Geoscience Frontiers* 9, 1099-1115. (19)

26. ▲ \*Zhao D., Isozaki Y., Maruyama S. 2017. Seismic imaging of the Asian orogens and subduction zones. *J. Asian Earth Sci.* 145, 349-367. (18)
27. Tashiro T., Ishida A., Hori M., Igisu M., Koike M., Méjean P., Takahata N., Sano Y. \*Komiya T. 2017. Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 549, 516-518, doi:10.1038/nature24019. (17)
28. ▲Liu X., \*Zhao D., 2016. Seismic velocity azimuthal anisotropy of the Japan subduction zone: Constraints from P and S wave traveltimes. *J. Geophys. Res.* 121, 5086-5115. (15)
29. ▲ \*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. (57)

A05班 (出版論文合計 : 20 報)

30. ▲ \*Ebisuzaki T., Imaeda Y. 2017. United theory of planet formation (i): Tandem regime. *New Astronomy*, 54,7-23. (4)
31. \*Zank G.P., Adhikari L., Hunana P., Shiota D., Bruno R., Telloni D. 2017. Theory and Transport of Nearly Incompressible Magnetohydrodynamic Turbulence, *The Astrophysical Journal*, Volume 835, article id. 147. (51)
32. ▲ \*Sasaki, T., Ebisuzaki, T. (2016) Population synthesis of planet formation using a torque formula with dynamic effects, *Geoscience Frontiers* 8. 215-222. (5)
33. \*Kataoka R., Ebisuzaki T., Miyahara H., Nimura T., Tomida T., Sato T., Maruyama S., 2014. The Nebula Winter: The united view of the snowball Earth, mass extinctions, and explosive evolution in the late Neoproterozoic and Cambrian periods. *Gondwana Res.* 25, 1153-1163. (11)

公募班 (出版論文合計 : 55 報)

34. ▲ \*Seio K., Shiozawa T., Sugiyama D., Ohno K., Tomori T., Masaki Y. 2019. 31P NMR study on the reactions of amino acids and sugar derivatives with pyrophosphorous acid as a possible prebiotic phosphorylating agent. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 92, 905-911. (0)
35. ▲Usami, K., Xiao, K., \*Okamoto, A. 2019. Efficient Ketose Production by Hydroxyapatite Catalyst in a Continuous Flow Module. *ACS Sustainable Chem. Eng* 7, 3372-3377. (0)
36. ▲Furusato T., Horie F., Matsubayashi H.T., Amikura K., Kuruma Y., \*Ueda T., 2018. De Novo Synthesis of Basal Bacterial Cell Division Proteins FtsZ, FtsA, and ZipA Inside Giant Vesicles. *ACS Synthetic Biology* 7: 953-961. (7)
37. Mizuuchi R. \*Ichihashi N. 2018. Sustainable replication and coevolution of cooperative RNAs in an artificial cell-like system. *Nat Ecol Evol.* 2 (10), 1654-1660.(3)
38. ▲Shibue R, \*Akanuma S. 2018. Reduced amino acid set proteins suggest a role of prebiotic amino acids in primitive protein synthesis. *Viva Origino* 46, 4.(6)
39. ▲ \*Kawamura K., Maurel M., 2017. Walking over 4 Gya: Chemical evolution from photochemistry to mineral and organic chemistries leading to an RNA world, *Origins Life Evol. Biopsheres*, 47, 281-296, DOI 10.1007/s11084-017-9537-2. (6)
40. ▲ \*Fujieda N., Nakano T., Taniguchi Y., Ichihashi H., Sugimoto H., Morimoto Y., Nishikawa Y., Kurisu G., Itoh S. 2017. A Well-Defined Osmium-Cupin Complex: Hyperstable Artificial Osmium Peroxygenase, *J. Am. Chem. Soc* 139 (14), 5149-5155. (4)

## 書籍

1. Shinzato, N. and \*Y. Kamagata : The methanogenic and archaeal endosymbionts in free-living anaerobic ciliates. In: *Endosymbiotic methanogenic archaea* (Edited by J.H.P. Hackstein). Springer Verlag. pp. 37-53. 2018.
2. Narihiro, T. and \*Y. Kamagata : Anaerobic cultivation. In: *Manual of Environmental Microbiology* 4th edition (Edited by Marylynn Yates). American Society of Microbiology. 2-1-2 12pp. 2016.
3. 丸山茂徳、地球史を読み解く、放送大学教育振興会、2016
4. 丸山茂徳、地球と生命の46億年史、NHK出版、2016
5. Cleaves, H.J., "Prebiotic Syntheses of Biochemical Compounds: An Overview," In *Astrobiology: An Evolutionary Approach* (Vera Kolb, Ed.) CRC/Taylor and Francis, London. 2015.
6. 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.

## ホームページ

領域ウェブサイト, <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「n造形科学」, 東京都目黒区, 2016年3月9日.
5. 中規模ワークショップ, 東京都目黒区, 2016年7月2日
6. 新学術横断合同ワークショップ with「ゆらぎと構造の協奏」, 東京都港区, 2016年10月22日
7. キックオフワークショップ, 東京都港区, 2017年5月15日
8. 冥王代生命学の創成 国際シンポジウム 2018, 東京都千代田区, 2018年11月22日~23日
9. その他合同WS 合計49回. Origins of Life meeting, 合計33回.

## 映像ライブラリ

本領域の研究成果を映像ライブラリとして日英両言語で制作し、DVDを配布した。2016年からYouTube上で公開を開始し、2019年6月にシリーズ全編が完了した。2019年6月時点での総視聴数30万回を超えた。

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)
2. 全地球史アトラス vol. II (生命進化の第1ステージ、生命進化の第2ステージ、生命進化の第3ステージ)
3. 全地球史アトラス vol. III (生命大進化の夜明け前、カンブリア紀の生命大進化、古生代)
4. 全地球史アトラス vol. IV (中生代から人類の誕生まで、人類代：人類の誕生と文明の構築、地球の未来)



## 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), 長野県白馬村, 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.
4. 教育講演会「白馬とカガクの奇跡2」(後援:長野県教育委員会, 白馬村), 長野県白馬村, 2017年10月15日.
5. 教育講演会「白馬とカガクの奇跡3」(後援:長野県教育委員会, 白馬村), 長野県白馬村, 2018年10月20日.
6. 公開講座「地球生命の起源と進化〜ヒトの誕生と現在から近未来の課題まで〜」(主催:東北大学東北アジア研究センター), 東京エレクトロンホール(宮城県民会館), 2019年2月23日
7. 蒲都市生命の海科学館開館20周年記念特別展「カンブリアン・キングダム」, 2019年7月13日~11月24日(予定)

## 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)
5. 自然科学の魅力 専門家に学ぶ, 2017年12月24日(大糸タイムス)
6. 生物史の最新研究 CG 動画「全地球史アトラス」新作「カンブリア紀の生命大進化」など, 2018年7月19日(IT media NEWS)
7. 「“科学”からの招待状〜地球と生命の誕生〜」, 2018年10月6日(再放送2018年10月7日、2018年10月27日、2019年5月18日)(放送大学BS231チャンネル)
8. 「“科学”からの招待状〜人類につながる生命進化〜」, 2018年10月13日(再放送2018年10月14日、2018年10月28日、2019年5月18日)(放送大学BS231チャンネル)
9. 「原始生命」探り白馬巡る, 2018年10月26日(大糸タイムス)
10. 「吉岡里帆 神秘のハワイ 宇宙と地球をつなぐ島」, 2019年1月18日(BS-TBS)
11. 「チョコちゃんに叱られる!」, 2019年2月1日(NHK総合)
12. 「ウェークアップ! ぷらす」, 2019年2月23日(読売テレビ)

**7. 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）**

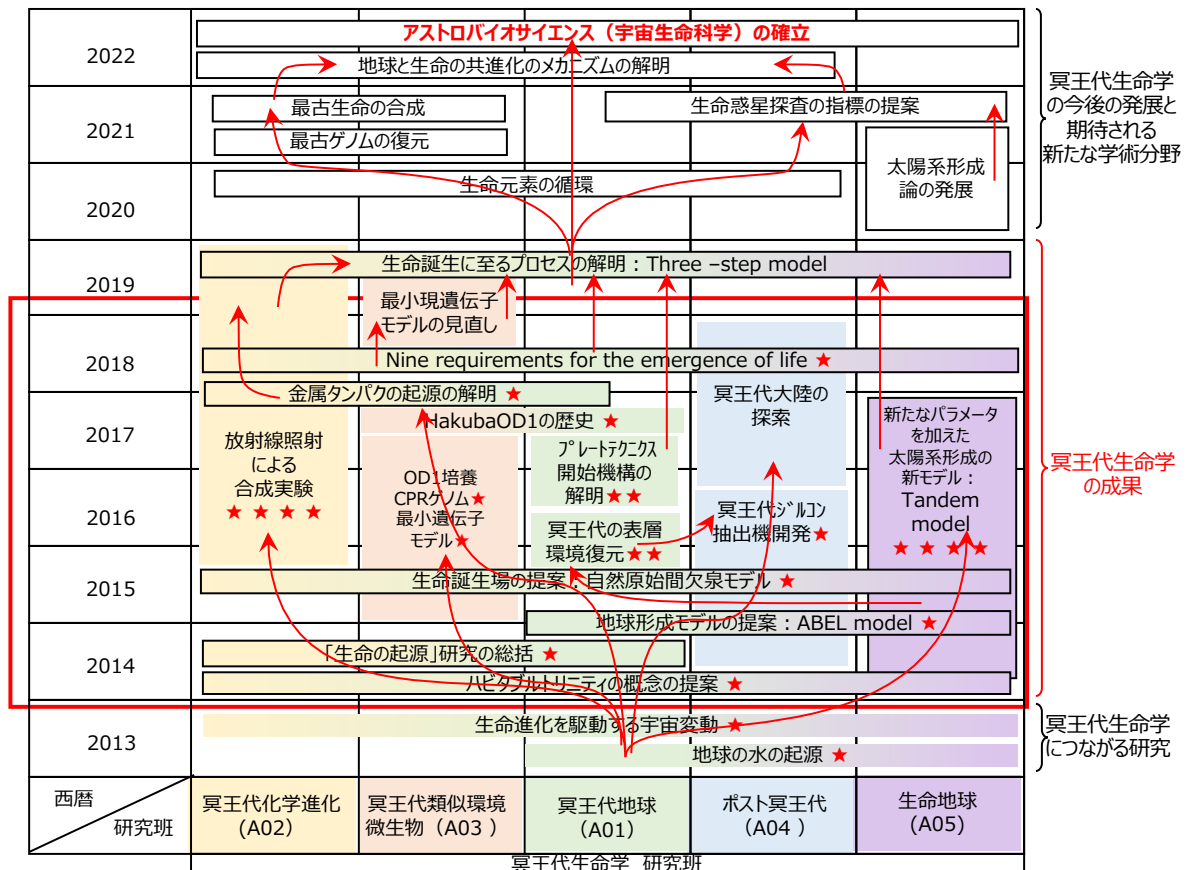
領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域では、5つの計画研究班および公募班が有機的に相互連携を図りつつ研究を推進することによって成果を出してきた。

**本領域の先駆的研究**は、「冥王代生命学」研究が採択される前年までに発表された2つの論文に見ることができる。生命惑星地球にとって重要な要素の一つである水の起源を、地質学と天文学を中核として議論し、地球は水を持たない裸の惑星「Naked Planet Earth」として生まれたことを発表したのが Maruyama et al. (2013)である。また、地球生命の大進化をゲノムのレベルも含めて支配しているのは、宇宙の大変動であることを地質学的記録と宇宙変動の記録を組み合わせることによって解明可能であると示したのが Kataoka et al. (2014)である。これらの知見を、前生物的化学進化、分子生物学、ゲノム生物学などの生物学全般の知見と組み合わせ、地球生命の起源の解明に取り組んだのが「冥王代生命学の創成」研究である。

**本領域が持つ特異性かつ戦略的優位性**は、複雑系科学である天文学、地質学、生物学が有機的に組み合わせ、定量的議論が重要となる局面で、物理学、化学を正當に組み込みつつ**超学際研究を本質的な意味で真剣に推進**してきた点である。生命の起源という最も難解な問いに挑戦する際の中核をなしているのは、冥王代地球（A01）班である。冥王代地球は、生命のゆりかごとして直接的に機能し、生命誕生までのプロセスにおいて最も重要な役割を果たしている。本領域で参加する地質学者らは、地球史ならびに地球生命史の研究において世界を牽引してきた実績がある。そのため、本領域を強力に駆動する中心的研究班となってきた。彼らが、本領域発足直後に、極めて単純ではあるが最も重要な概念として提案したのが「ハビタブルトリニティ」の概念である。それまで、水の存在のみが生命にとって最重要かつ必要十分条件だという「常識」に異を唱え、岩石の存在の重要性を的確に示した。彼らは、生命にとって必要不可欠なリンやカルシウム、鉄などの元素は岩石のみから供給されるものであり、**大気・海洋とともに岩石がなければ生命は誕生しえない**と説明した。

「生命のゆりかご」を明らかにする研究は、冥王代地球（A01）班ならびに生命惑星（A05）班がタッグを組み、領域発足から2年の間に精力的に冥王代表層環境を復元した。この研究は、トップダウンアプローチとしての地球史研究と、ボトムアップ研究としての太陽系惑星形成理論研究の組み合わせによって成果を生み、新たな地球形成モデルである ABEL モデルの提案へと発展した。ABEL モデルによって冥王代表層環境の描像が具体的に明らかになり、原初大陸の構成岩石、大気・海洋組成が提示されると、冥王代化学進化（A02）班は、これまでの**生命合成実験に冥王代地球環境の制約を組み込む**ことによって、より生命誕生プロセスに近い実証実験を行うことが可能になった。ここで組み込まれたのが放射線照射実験である。これは、自然原子炉間欠泉モデルとして提案された生命誕生場を模した実験プログラムで、結果的に我々の想像した以上に多くの有機物が合



上図) 冥王代生命学の研究の有機的なつながりを示した。A01 班から A05 班までの 5 班が本領域の研究期間（2014-2019）に取り組んだ研究項目とその関係性を記した。公募班は省略(各班に有機的に紐付いている)。図中の★印は、発表論文があることを示す。



成されることを明らかにした。生命誕生にいたる化学反応プロセスでは、かねてよりターム問題（反応が途中でストップし、それ以上の合成反応が進行しなくなる問題）が報告されており、前生物学的化学進化における大きな問題とされていた。しかし、**化学反応を駆動したエネルギー源が電離放射線**であると考えれば、熱力学的な活性化エネルギーの壁を問題とせず、より高次の有機化合物を高温にすることなく合成可能であることを合理的に説明したのが自然原子炉間欠泉モデルであり、それを実証するための様々な実験で成果を出したのが冥王代化学進化（A02）班である。こうした一連の研究は、化学実験もさることながら、冥王代地球におけるエネルギー密度についての物理的な知見、さらに自然原子炉の妥当性を裏付ける冥王代地質学の知見がすべて必要になる点で、超学際研究だけが解明できる問いであることは明らかであろう。

一方では、冥王代表層に露出していた岩石種と冥王代表層水との間で起こる岩石—水相互作用に着目し、**岩石から溶解する金属元素が、生命にとって必要不可欠な金属たんぱく質の合成に関与している**ことを導いたのは、冥王代地球（A01）班と冥王代化学進化（A02）班の共同研究である。冥王代の原初大陸上に露出する岩石は現在のそれとはまったく異なり、KREEP 玄武岩、コマチアイト、アノソサイトの3種が金属元素の供給源となっている。これら3つの岩石表面層では、水との反応によって低温の二次鉱物が形成され、それぞれの岩石表面上で異なる金属元素が供給され、様々なバイオフィルム様の有機物が形成されることによって、原始生命の金属たんぱく質の起源となったと説明した。

冥王代疑似環境微生物（A03）班は、A01 班が特定した冥王代類似環境に焦点を当て、その生息場が水素環境であることを手掛かりに、陸上蛇紋岩熱水系に生息する OD1 や WS2 が始原的な性質を色濃く残す微生物であることを説明した。地球環境史を読み解くと、古い時代ほど遊離酸素が少ない。つまり、「**祖先型生物**」は、**遊離酸素に乏しい環境にいるはず**である。地球史における酸素濃度の増加に伴って高酸素濃度に適応した種は、体が巨大化し、生命維持のために高酸素が確実に必要となるため、貧酸素環境には二度と後戻りできない。つまり、貧酸素濃度環境で生息し続けている生物ほど「祖先型生物」だと近似することが可能である。OD1 は多様な環境で生息しているが、酸化場に適応した OD1 がほとんどであり、我々が研究対象とした Hakuba OD1 のように水素環境（ほぼ遊離酸素がない環境）で生息しているものは他に例がない。したがって、Hakuba OD1 は極めて重要な冥王代類似環境微生物である。これは、46 億年に及ぶ地球生命史と、微生物研究を組み合わせた斬新な研究成果のひとつと言える。

また、総括班会議および分野横断 WS を通じて公募班の研究者らとも積極的に連携し、冥王代地球環境の制約を共有することで、例えば、最小単位の古代金属酵素 ACS を復元する事、シュライバーサイト由来のピロ亜リン酸が、セリン、トレオニン、チロシン、リボースなどの水酸基を亜リン酸化する事、グライカイトは高い触媒能を有し、還元的アセチル CoA 経路の多くの反応を触媒できる事、ヒドロキシアパタイトのリン酸とカルシウムによる効率的なリボース合成ルートを確立した事、など、冥王代地球環境における岩石鉱物を触媒とする前駆的的化学進化において重要な化学反応に関する多くの成果を挙げることができた。

このように「冥王代生命学」は、多くの融合研究をととして、様々なモデルを提案するとともに生命の誕生場の謎を解明してきた。我々のこのような研究計画は、科研費申請書を書く段階で思いついたような話ではない。冥王代生命学に総動員されている知見は、1992 年に始動した「全地球史解読」の超大型プロジェクトに始まる地球生命史の解読研究によって得られたものである。過去 30 年間に渡る、全地球的規模での地球史研究によって、地球生命史の世界標準モデルを提案し、更にモデルの修正を行ってきたのが A01 班の参加メンバーたちである（Maruyama et al, 1997, Island Arc 6, 121-142; Maruyama et al., 2007, Gondwana Res. 11, 7-37; Maruyama and Ebisuzaki, 2017, Geoscience Frontiers 8, 253-274）。そして、**宇宙空間から地球中心核まで連動する地球のシステム変動のメカニズムを明らかにし**、生命は、冥王代に誕生して以来、地球と共に進化したことを導き出した。そして、これらの知見を、新学術領域研究「冥王代生命学の創成」において研究の中核としたのである。我々は、地球生命のゆりかごとなった地球や、地球上の生命誕生場に必要となる条件を洗い出し、どのような環境圧が生命の誕生と進化を促進したかの解明に邁進してきた。

極めて大きなスケールでの俯瞰的な研究計画に基づき、「冥王代生命学の創成」が設定されたが、本研究が終了した今、その先に見えてくる**新たな学術分野は、「アストロバイオサイエンス（宇宙生命科学）」**である。生命に関するすべての手掛かりは地球生命にある。地球生命の誕生と進化の謎が冥王代生命学によって、大局的には、ほぼ解明されつつあるが、今後は、この知見を宇宙生命へと発展させることが可能となる。つまり、「宇宙に生物はいるか？ いるとすればどのような惑星に生息するのか？」という問いに答えを導くことが可能になるということである。そのためには、「**宇宙生物**」とは**一体なにかという根源的な問題**に取り組まなければならない。我々が知っている生物は地球生物のみである。したがって、生物の存在を議論するためには、宇宙でも存在しうる生物とは何かを考える必要がある。すると、**宇宙生物に共通する性質（普遍性）と、地球生物に限られる性質（特殊性）を区別する**必要がある。これは、宇宙生物を議論するうえで最初の重要な課題である。この時に、冥王代生命学や全地球史解読で得られた知見は、地球生物を理解するための重要な中核を占めるはずである。



## 8. 研究経費の使用状況（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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

### A01 班

A01 班は海外の野外調査と旅費、滞在費、ならびに掘削費用や岩石サンプル輸送費用が研究上の主要な経費である。海外野外調査は、集中的に複数人のチームを組んで数週間の期間で実施し、滞在費や複数の出張による移動費用の重複を避け、限られた経費の中で最大限研究成果を引き出すよう工夫した。

また、分析装置としては、岩石-水相互作用の解析に必要な陰イオン・陽イオン分析システム（（株）島津製作所製：約 750 万円）や高精度 NC 加工機システム（ローランド製：約 440 万円）が主要な品目となっている。可能な限り、使用希望者との共有を図り、共有設備の合理的な共有に努めた。

### A02 班

A02 班の研究目的は、前生物的化学進化実験にあり、自然原子炉間欠泉環境を模したガンマ線照射実験系などを新しく構築すると同時に、合成された分子種の詳細な分析を行うことが必要不可欠で、高感度高分解能の質量分析装置（約 4,000 万円）、フーリエ変換赤外分光光度計（約 500 万円）、紫外可視近赤外分光光度計（約 300 万円）などを、初期に導入した。例えば、液体クロマトグラフ四重極飛行時間型質量分析装置（約 600 万円）では、その性能を最大限に活用するために専門の研究者を雇用し、普通の解析では得られない、多くの分子種の同定とその反応経路を検証する研究成果に至っている。それらの分析装置は、利用希望者に公開し、共用設備として多くの実験系に使用されている。また、その他に化学進化実験環境整備や合成条件制御などに導入した設備も、利用希望者と共用して活用している。

### A03 班

A03 班は基本的に毎夏、長野県白馬八方の蛇紋岩熱水系水試料のサンプリング、本試料を用いた微生物培養、DNA 抽出、ゲノム・メタゲノムシーケンシング、得られたメタゲノム情報の解析という一連の流れを繰り返しながらデータを着実に蓄積していった。そのため研究費の多くはサンプリング、とりわけ大量の水を迅速に濃縮するための濾過システムの導入、微生物培養のための絶対嫌気培養装置の導入、次世代シーケンシングのための試薬購入、シーケンス後の大量のゲノム情報を解析するプラットフォーム（サーバー）の導入、さらにはこうした研究を遂行するための博士研究員の雇用費に充ててきた。

また得られたゲノム情報からゲノムを完全に人工合成し、大腸菌等で異種発現させて予測される活性を測定し機能実証する研究を行ってきた。この過程でゲノムの人工合成外注、遺伝子発現解析のためのテクニシャンの雇用にも研究費が有効に用いられた。また、国内外での研究発表のための旅費としても有効に活用し、国際共同研究の実現に至った。

### A04 班

A04 班の重要課題は、1 mm に満たない冥王代ジルコンを岩石から抽出し精度の高い年代測定を可能にする新たな特別装置を開発することだった。そこで、世界初のジルコン抽出機の開発に約 4,600 万円が投資された。装置の完成・導入後は、早々に成果が出始めた。ただし、これには、冥王代生命学の研究に先行して国内の東工大の地球史グループが別途約 10 年かけて研究を進めた豪州のナリエコンプレックスの試料の貢献も大きい。冥王代ジルコンが抽出可能である特定の地質学的な層準を突き止めていたことは大きな成果につながった。そして、こうした試料を用いて、冥王代ジルコンを迅速かつ大量に分析することによって、200 粒の冥王代ジルコン抽出に成功した。当装置については、外国人研究者らから利用の申し出もあり、希望者へ装置の利用を認める手順を進めている。本装置用の使用状況は国際的な広がりを見せつつある。

また、マントル深部に沈み込んだ冥王代の原初大陸の存在を検証するために、その広域分布を精密なマントルトモグラフィーで確定する必要があった。近年、莫大な数の地震計が中国を中心にアジア各地で整備されたことに伴い、中国人地震学者を中心に継続的に招聘し、世界最高品質のトモグラフィー像を構築した。

### A05 班

A05 班の研究は、磁気回転不安定を考慮した一次元降着円盤とその中での固体粒子の成長を追いかけるシミュレーションコードで主に行われた。研究開始当初は、それを開発するための人件費と実行するための計算機クラスシステムとシミュレーション結果を蓄えるハードディスク装置の導入にあてた。そこで開発されたコードは、専門のプログラマに依頼して、コメント文の挿入と変数の整理、それらを記述したマニュアルを整備してグループ内で有効利用できるようにした。また、計算結果と観測データの整理、それらを使った図の作成のために協力研究員とテクニカスタッフを雇用した。

・研究費の使用状況（（１），（２），（３）を合わせて３ページ以内）

（１）主要な物品明細（計画研究において購入した主要な物品（設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。）について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。）

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価（円）	金額（円）	設置(使用)研究機関
26	質量分析装置	米国ウォーターズコーポレーション製	1	39,852,000	39,852,000	東京工業大学
	LIBS	Tandem LA-LIBS System	1	20,275,920	20,275,920	東京大学
	計算機クラスタシステム	HPC-5000-XH224R2P-SIP	1	7,252,872	7,252,872	理化学研究所
	高速液体クロマトグラフィー	日立ハイテック	1	6,048,000	6,048,000	東京工業大学
	フーリエ変換赤外分光光度計	日本分光（株）製 FT/IR-6800（多重反射 ATR）	1	5,003,100	5,003,100	東京工業大学
	嫌気チャンバー	シールドン製バクトロン 300	1	4,639,680	4,639,680	産業技術総合研究所
	マイクロプレートリーダー	Tecan M200PRO-ABS&FL/T-TTLN	1	4,499,928	4,499,928	東京工業大学
	高精度 NC 加工機システム（合算）	ローランド MODELA PR011 MDS-540S	1	4,346,784	4,346,784	（公財）高輝度光科学研究センター
	紫外可視近赤外分光光度計	日本分光（株）製 V-670（セル温調）	1	2,992,680	2,992,680	東京工業大学
	27	陰イオン・陽イオン分析システム	（株）島津製作所製 CMA-20 Aほか	1	7,452,000	7,452,000
微小鉍物選別機		マイクロサポート社製 アクシスプロ SS 型	1	7,142,040	7,142,040	東京大学
自動選別・ソフトウェア		マイクロサポート社製 APSS-ADWR 型	1	5,508,000	5,508,000	東京大学
マルチポテンシヨスタット		（株）東方技研製 PS-08	1	4,104,000	4,104,000	東京工業大学
28	リアルタイム定量 PCR システム	ThermoFisher	1	3,996,000	3,996,000	産業技術総合研究所
	ガスクロマトグラフ	（株）島津製作所製 GC-2010 PlusA	1	2,991,600	2,991,600	東京工業大学
	高感度バックイlluminate型 CMOS カメラ	米国ローオーサイエンティフィック社製 KURO-LF	1	2,940,840	2,940,840	東京工業大学
29	ラマン解析システム	堀場製作所製 XploRA PLUS-IS	1	9,990,000	9,990,000	東京大学
	ラマン用自動システム	堀場製作所製 XploRA PLUS-IS 用	1	3,801,600	3,801,600	東京大学
30	ビーズ式細胞破碎装置	トミー精工 MS100R	1	1,294,380	1,294,380	国立遺伝学研究所

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に用途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

**【平成26年度】**

・旅費

カナダ野外調査 2,404,412 円 (代表者ほか2名) 野外調査および岩石試料採集のため  
アメリカ野外調査 1,399,140 円 (分担者ほか1名) 野外調査および岩石試料採集のため  
東北大学へ招聘 1,322,204 円 (江 国明博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 1,152,956 円 (陳 伝緒博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
アメリカ学会出席 1,085,730 円 (分担者ほか2名) AGU Fall Meeting2014 に参加のためのため

・人件費・謝金

人件費 11,756,428 円 (事務支援員 x2、技術職員 x2、ポスドク x1、協力研究員 x1、研究補助 x1)

・その他

野外調査諸費用 833,664 円 (アメリカならびにカナダ野外調査におけるレンタカー、岩石輸送費用等)  
研究開発費用 622,080 円 (先端力学シミュレーション研究所による生命惑星形成シミュレーションプログラム開発)

**【平成27年度】**

・旅費

東北大学へ招聘 2,211,823 円 (Niu Xiongwei 博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 1,368,523 円 (Cheng Bin 博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東工大へ招聘 1,081,880 円 (Mathieu Moussavou 博士ほか1名 (ガボン共和国)) ガボンにおける共同研究の打合せのため  
ケニア野外調査 215,350 円 (代表者1名) 野外調査および岩石試料採集のため

・人件費・謝金

人件費 59,028,572 円 (ポスドク x4、事務支援員 x1、技術職員 x4、協力研究員 x1、研究補助 x2)

・その他

なし

**【平成28年度】**

・旅費

東北大学へ招聘 1,347,477 円 (Wang Zewei 博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 1,190,539 円 (華 遠遠博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 1,153,297 円 (Liu Xin 博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
豪州野外調査 950,100 円 (分担者ほか2名) 野外調査および岩石試料採集のため  
東北大学へ招聘 615,251 円 (王 新洋博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため

・人件費・謝金

66,119,030 円 (ポスドク x8、事務支援員 x1、技術職員 x8、協力研究員 x1、研究補助 x1)

・その他

鉱物処理費用 626,400 円 (冥王代ジルコン分析にかかる鉱物処理のため)

**【平成29年度】**

・旅費

ガボン野外調査 3,297,594 円 (代表者他3名) 野外調査ならびに岩石試料採集のため (のべ85日)  
東北大学へ招聘 814,044 円 (華 遠遠博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 781,511 円 (王 海波博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
東北大学へ招聘 781,464 円 (荀 濤博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため  
アメリカ学会出張 761,722 円 (代表者1名) GSA 129<sup>th</sup> Annual Meeting で発表、ならびに野外調査のため (のべ14日間)  
アメリカ学会出張 554,460 円 (代表者1名) Gordon Research Conference で発表のため  
カナダ野外調査 387,680 円 (代表者1名) 野外調査および岩石試料採集のため

台湾学会出張	119,330 円 (代表者 1 名) Int. Conf. Asian Orogeny & Continental Evolution にて発表
・人件費・謝金 人件費	61,121,045 円 (ポスドク x7、事務支援員 x2、技術職員 x6、協力研究員 x2、研究補助 x1)
・その他 野外調査諸費用	233,327 円 (アメリカならびにカナダ野外調査におけるレンタカー、岩石輸送費用等)

### 【平成 30 年度】

#### ・旅費

東北大学へ招聘	1,545,585 円 (Wang Zewei 博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため
東北大学へ招聘	1,184,291 円 (華 遠遠博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため
モンゴル野外調査	916,280 円 (代表者ほか 3 名) 野外調査および岩石試料採集のため
ガボン野外調査	794,122 円 (研究協力者 2 名) 野外調査および岩石試料採集のため (のべ 14 日間)
東北大学へ招聘	716,303 円 (范 建柯博士 (中国)) トモグラフィー解析の研究打合せのため
アメリカ学会出張	712,760 円 (代表者 1 名) ゴダード宇宙飛行センターでの国際学会発表のため
ロシア出張	623,430 円 (代表者ほか 2 名) 野外調査および岩石試料採集のため
イタリア出張	564,360 円 (代表者 1 名) 国際学会 Mondello Workshop にて発表のため
欧州学会出張	338,960 円 (代表者 1 名) Int. Paleontological Congress (パリ) での発表ほか

#### ・人件費・謝金

人件費	53,754,157 円 (ポスドク x6、事務支援員 x2、技術職員 x6、協力研究員 x2、研究補助 x2)
-----	--

#### ・その他

研究開発費用	864,000 円 (先端力学シミュレーション研究所による生命惑星形成プログラム整備のため)
野外調査費用	1,045,807 円 (ガボン共和国オコンジャ地域アンビンダ村での掘削作業 (計 20 日間) のため)

### (3) 最終年度 (平成 30 年度) の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

#### ●ガボン共和国 SOCOBA mine, Franceville での掘削作業 8,890,000 円

平成 30 年 9 月までに、事前準備、現地掘削会社との交渉、ガボン鉱山省の許可証取得を行い、平成 31 年 3 月までに、掘削準備、掘削開始、現地にて採取試料の選定、試料分析、研究成果とりまとめを行う予定であった。しかし、ガボン・鉱山省への掘削許可証取得をお願いしていた研究協力者の都合により連絡が取りづらくなり、更に平成 31 年 1 月のクーデター未遂事件が重なり、許可申請が滞る事態となった。本研究遂行上必須である掘削許可証取得には当該研究協力者の参画が不可欠であり、引き続き先方と連絡を取り続けたところ、3 月に許可が取れる見込みになり、掘削作業は時期をずらして実施することになった。

#### ●全地球史アトラス映像全章 DVD 版の企画、制作 1,000,000 円

平成 30 年 12 月までに、全地球史アトラス映像第 4 章の企画、仕様策定ならびに業者との調整、全地球史アトラス映像第 4 章の制作を行い、平成 31 年 3 月までに、全地球史アトラス映像全章 DVD 版の企画、全地球史アトラス映像全章 DVD 版の制作を行う予定であった。映像ライブラリ第 4 章の制作を行っていたところ、本研究で目的とするレベルの映像を制作するためには、当初の予想よりも詳細な古生物の映像データの構築が必要であることが判明し、業務の完了が平成 31 年 3 月末となった。この事により、第 1 章～4 章までを収録した DVD 版の制作が年度内に実施できなくなった。遅れていた第 4 章の制作が完了し、現在全章収録の DVD および解説書の制作を実施している。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

本領域研究は、地球と生命の起源に焦点を当て、地球生命誕生のシナリオを解き明かそうと試みた。「宇宙からゲノムまで」をテーマに宇宙の大変動が生命の誕生と進化を支配したメカニズムを解明しようとした超学際研究を展開した。その結果、様々な分野に大きなインパクトを与えたと自負する。また、科学雑誌への発表のみならず、「全地球史アトラス」として研究成果の映像ライブラリを制作し、CC-BY ライセンスで広く一般に公開している。すでに 30 万回（まとめ動画を含めると 100 万回）以上再生されており、専門家のみならず一般に至るまで高いインパクトを与えることができています。

**(1) ハビタブルトリニティ**：これまで、「生命誕生に必要なのは液体の水の存在である」ということが大きく強調されてきた。これに対し、生物の体の約 5% を占める栄養塩元素は岩石から供給されることから、大気・海洋・陸地の 3 要素がなければ生命誕生はありえない、と説明したのがハビタブルトリニティという概念である。この概念は極めて単純ではあるが、**生命惑星を考えるうえで大きなパラダイムシフトをもたらした。**

**(2) ABEL モデル（地球の二段階形成モデル）**：惑星形成論を展開してきた研究者らは、これまで漠然と、地球誕生直後から地球は海をたたえていたと考えてきた。そして、地球の海洋の形成は、地球内部からの脱ガスの結果であるとする説を展開してきた。しかし、我々は、太陽系の初期進化を太陽系内に残された誕生当時の記録（小惑星帯）や隕石学、同位体化学を組み合わせることで研究することによって、地球はもともとドライな岩石惑星として生まれたことを示した。そして、月の地質学をもとに、43.7~42.0 億年前の約 2 億年をかけて氷小惑星の爆撃によって地球に大気海洋成分（生命成分）が二次的に不可されたことを導き、氷小惑星の飛来したイベントを ABEL 爆撃として再定義した。本論発表後、**地球形成モデルや形成プロセスを対象とした研究が活発化し、様々なデータやシミュレーションをもとに議論が繰り広げられている。**

**(3) タンデム惑星形成モデル**：太陽系の惑星形成理論は過去 40 年近くにわたって、いわゆる京都モデルに支配されてきた。京都モデルを提案した意義は十分にあったとはいえ、いくつかの問題点が含まれているにも関わらず惑星形成の「標準」モデルとして受け入れられてきた。タンデム惑星形成モデルは、静的な京都モデルに対し、新たなパラメーターを加えて動的な惑星形成理論を構築し直した点に大きな意義がある。こうした試みは他に例をみないものであり、京都モデルに代わる**現代的な惑星形成理論の基礎を築くものとして評価**されつつある。今後は、力学を中心とした惑星形成論に化学平衡凝縮理論と磁気回転不安定、さらに隕石学からの制約を総合化した新しい惑星形成論を展開し、それを系外惑星の急激に増えつつある汎惑星形成論を展開中である。これらは、太陽系諸惑星における生命存否を念頭においた研究に発展すると期待している。

**(4) 生命誕生場に必要 9 条件**：これまでの生命の起源の研究は、極めて断片的な要素に関する議論に終始していた。たとえば、乾湿サイクル、還元環境、pH、あるいは栄養塩の種類といった個別の研究テーマにだけ焦点を当て、その一つの条件の有無が生命誕生にどう左右するかを論じてきた。これに対して、我々は、生命誕生にいたる一連の連続プロセスにおいていくつかの条件がどの順番で満たされるべきかを追求し、9 条件を導いた。それが実現される場を深く考察することにより自然原子炉間欠泉モデルが導かれた。これまで、生命は地球上のどこか一箇所ですべて誕生すると漠然と考えられてきたが、こうした**「常識」を破ったのが 9 条件の提案**であり、生命誕生場は、いくつかの異なるドメイン（酸化場と還元場、酸性環境とアルカリ環境など）の間を循環する環境でなければならないことを具体的に示した点で、大きなインパクトを与えた。

**(5) 自然原子炉間欠泉モデル**：上述（4）の生命誕生場に必要 9 条件を満たす場として提案されたのが自然原子炉間欠泉モデルである。自然原始炉が放つ電離放射線のある場が生命のゆりかごであると説明する新しいアイデアは日本から始まったが、そのインパクトは大きく、**すぐさま米国ハーバード大学の研究者らが電離放射線を利用した実験に着手し、ハーバード大出身の若手研究者 Fahrenbach は、我々の研究班 A02 班の一員となり研究を進めた。**当該モデルの世界的拡散により、多くの研究者らが電離放射線照射による化学合成実験に着手し始めている。こうした実験で重要になるのは、刻々と反応し続ける有機化合物の同定であるが、高放射線環境における実験のため人の介在が困難である。したがって次のステップは、高電離放射線環境で進む化学進化のプロセスを数秒間隔で自動的に行う自動計測機器を開発することである。我々は現在、理研のレーザー研究グループと共同で新たな自動計測機器の開発を進めているが、**このような機器の開発は世界で初めて**であり、機器完成後は大きなインパクトともに、各国に実験設備として波及することが見込まれる。

**(6) 化学進化に必要な高エネルギー（電離放射線）の重要性**：アミノ酸の合成を成功に導いたのは、有名な「ユリー・ミラーの実験」である。彼らの実験で強調されたのは、出発物質として使用されたアンモニアやメタン、一酸化炭素を含む還元物質である。そこで、一般的には、生命誕生には還元ガスがなければならない、と考えられている。しかし、彼らの実験における本質的な重要性は、還元物質があったことではなく、放電によって極めて高い密度のエネルギーを与えたことにある。高エネルギー粒子が与えられることによって、 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $N_2$  などの安定的な物質がバラバラに壊され、生命の基本単位であるアミノ酸の合成に必要な不可欠な還元ガスが生まれ、その結果アミノ酸合成に至るのである。エネルギー密度の重要性は、生命の起源研究ではほとんど議論されてこなかった課題のひとつだが、自然原子炉間欠泉モデルの提案によって、その重要性の理解は世界に一気に広がった。

**(7) 冥王代類似環境微生物である Hakuba OD1**：10 年余り前、長野県白馬地域で我々が発見した微生物である Hakuba OD1 は、現在では Candidate Phylum Radiation (CPR) に分類される種であることがわかっている。OD1 は、近年、世界各地で発見が相次いで報告されているが、冥王代類似環境（=遊離酸素が 0）での生息は Hakuba OD1 のみである。このことは、Hakuba OD1 が最も原始的な膜・代謝・自己複製の機能を保持していることを示唆しており、生命の起源へのアプローチにおいて極めて重要である。こうした発見による波及効果は大きく、OD1 に関する研究論文は数多く発表されている。

## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

### A01 班

丹下 慶範：愛媛大・地球深部ダイナミクス研究センター・助教として当該研究に初年度（2014～2015 年）に携わった後、大型放射光施設（SPring 8）の運営・維持管理にあたる公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）に就職し、利用研究部門、構造物性 I グループにて勤務している。

澤木 佑介：東京工業大学大学院・理工学研究科・地球惑星科学専攻・助教として当該研究に4年間（2014～2017 年）携わった後、東京大学大学院・総合文化研究科・広域科学専攻・広域システム科学系・自然体系学講座・宇宙地球グループ・助教として就任し、その後も当該研究を継続した。2018 年 9 月に、地質学会・小澤儀明賞を受賞した。

東 真太郎：博士研究員として 2015 年～2016 年に当該研究に携わった後、JSPS 特別研究員として九州大学へ異動し、その後、東京工業大学・理工学研究科・地球惑星科学専攻・助教として活躍している。

斎藤 拓也：博士研究員として、2015～2017 年に当該研究に携わった後、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の超先鋭研究開発部門・超先鋭研究プログラム・特任技術スタッフとして就任・勤務している。

佐藤 友彦：博士研究員として 2014～2019 年まで当該研究に携わったあと、東京大学大学院・総合文化研究科・広域科学専攻・広域システム科学系・自然体系学講座・宇宙地球グループの博士研究員として、研究活動を継続している。

岡林 識起：博士研究員として 2015～2019 年に携わった後、関西学院大学・理工学部・環境・応用科学科・講師として就任し、活躍している。

### A02 班

車 愈澈：東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授として 2014～2019 年の間、当該研究に携わった後、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の超先鋭研究開発部門・超先鋭研究プログラム・研究員として、新たな研究に着手している。

北台 紀夫：東京工業大学・地球生命研究所・研究員として 2014～2019 年の間、当該研究に携わった後、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の超先鋭研究開発部門・超先鋭研究プログラム・研究員として、新たな研究に着手している。

Albert Fahrenbach：東京工業大学・地球生命研究所・研究員として 2017～2018 年の間、当該研究に携わった後、オーストラリアのニューサウスウェールズ大学（University of New South Wales）Lecturerとして就任。新たな研究に着手している。

本郷やよい：東京工業大学・地球生命研究所・特任助教（ラボマネージャー）として、2016～2019 年まで当該研究に携わったあと、沖縄科学技術大学院大学（OIST）・進化新家生物学ユニット・技術補佐員として就任した。

### A03 班

玉澤 聡：博士研究員として 3 年にわたり当該研究に携わった後、北海道科学技術総合振興センター傘下の幌延地圏環境研究所の研究員となり活躍中である。

中井 亮介：博士研究員として 1 年間、当該研究に携わった後、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の tenure track 研究員として採用され、研究活動を継続し活躍中である。

### A04 班

山本 伸次：博士研究員として 2014 年から当該研究に参加したが、2015 年には横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授に就任し、その後も当該研究に貢献している。

沢田 輝：2016～2019 年に東京大学大学院総合文化研究科博士課程に在籍（JSPS の DC2 を）し、当該研究に参加した。2019 年 3 月に博士号を取得すると同時に、平成 30 年度（2018 年）の「東京大学一高賞」を授与された。博士号取得後、現在は東京大学地殻化学研究施設の博士研究員として研究を続けていおり、今後のさらなる活躍が期待できる。

### A05 班

加藤 成晃：理化学研究所・協力研究員として、2016～2017 年に当該研究に携わった。加藤は、薄い降着円盤（放射平衡）を安定に世界で始めて計算することに成功し、惑星形成への適用の準備を進めている。これは、計算科学上のブレークスルーであり、今後大きな展開が期待できる。近々、主要大学もしくは研究機関にポストを得る可能性が高い。

二村 徳宏：2015 年 5 月までは、岡山天文台に所属しながら、当該研究に携わっていたが、2015 年 6 月以降は日本スペースガード協会に研究員として所属し、当該研究に貢献した。二村は、惑星形成領域における平衡凝縮計算を実行し、惑星や隕石の原初物質モデルの導出に成功しつつある。これは史上初めて理論モデルからえられた惑星と隕石の化学組成の予言である。これをもとに惑星科学を、物質科学により実証主義的に全面的に書き改める作業を進めており、近々、現所属機関における昇進が期待される。

## 11. 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。

### 久城郁夫氏（東京大学名誉教授）

本新学術領域研究は、生命の起源という極めて重要かつ未解決の問題を、地球・惑星科学分野および生物学分野の研究者が惑星の形成および地球の起源に遡って解明しようという意欲的な学際研究である。このような生命の起源に関する総合的かつ根本に遡った学際研究は世界でもこれまでに殆ど行われた例がないと云ってよい。

惑星の起源に関する研究ではタンデムモデルを、また冥王代の地球についてはABELモデルを提唱し、内部矛盾のない地球の起源および初期進化論を構築した。生命の起源に関する研究では、種々の環境条件を考察し、考えられる9つの条件を満足する環境として、自然原子炉間欠泉が最も可能性が高いと結論した。

ABELモデルにおいて、地球に水をもたらしたとされる大規模な隕石の落下と月の大クレーターを生じた大規模な隕石落下による激変（cataclysm）とが内惑星における同時期の同現象であるとしたことは合理的で説得力がある。また、初期の還元的地球物質が炭素質コンドライトの付加によって酸化される過程において多くの化学反応が起り、生命源となる化学物質が生成される可能性が示唆されたことは興味深い。これは生命の起源を探求する上で地球の起源・進化を考えねばならない理由の一つと云える。

本研究プロジェクトにおいては、各グループの研究者が密接に連携して研究を推進し幾つものオリジナルな研究成果をあげたことは高く評価される。これらの研究において提唱されたモデルや仮説は今後さらに詳細な研究によって改善や改訂が行われると考えられるが一つの重要な到達点と云える。

### 長谷部光泰氏（基礎生物学研究所 生物進化研究部門 教授）

本領域は、生命の起源を探求するために化学、ゲノムに加え、当時の地球環境を考えるという融合的な研究を挑戦的に推進してきた。環境を研究する冥王代地球班が領域の中心となり、領域代表者の適確かつ献身的なリーダーシップのもと4班との相互作用が効率的に進行した。また、領域代表者が異分野の大御所研究者を上手に調和させ多くの成果をあげた功績は大きい。研究が進展することにより、当初想定していた淡水湖モデルではなく、新たに自然原子炉間欠泉モデルへと研究方針を転換したことは、妥当であり、その後の大きな研究の進展に繋がった。中間評価後、領域の当初予定どおり論文が順調に発表されており、研究の適確な進展が示されているとともに新分野の創成に成功したと評価できる。本新学術領域が産み出した異分野融合の成果を今後も維持できるような努力を続けていただきたい。

### 東俊行氏（理化学研究所 東原子分子物理研究室 教授）

自然原子炉間欠泉モデルは、化学進化における放射線エネルギーの必要性という観点から、本新学術領域の研究者によってあらたに提唱された冥王代の生命誕生場の作業仮説である。本新学術領域では、地球惑星科学、生命科学および有機化学の研究者が結集して、このモデルのもとに生命誕生の様相を議論しさらに検証するため、極めて有効な仕掛けによって研究が推進された。特に総括班のもとに領域全体のコミュニケーションの活性化、参加した研究者が様々な学際研究を担当するという「一人学際」を徹底するための仕組み、研究実施期間中にも新たな人材を発掘し、組織内部に参入させる融合研究の推進などが有効に機能した様子が伺える。各々の班の成果としては、海も大気も無い原始地球に小惑星の重爆撃によって大気海洋成分が生成されたというABEL地球モデルの提案や、地球生命誕生場に近い環境と考えられる白馬蛇紋岩熱水系の微生物を対象としたメタゲノム解析など様々な成果が得られている。総じて本新学術領域の仕掛けは成功したと判断した。本研究のユニークな研究集団から育まれた若手研究者も加わることで、さらなる作業仮説の検証や改良を経て、大きく広がった普遍的な「惑星生命学」を対象とする領域へと展開されることを期待する。

### 林崎良英氏（理化学研究所 予防医療・診断技術開発プログラム プログラムディレクター）

生命の起源の研究のような、すべての学問に関係する研究テーマは学際研究が重要であることは言うまでもない。本研究グループは、生物学（生化学、ゲノム科学、微生物学など）、化学（放射化学、有機化学、無機化学）、地球科学（岩石学、年代学、惑星科学、隕石学）、物理学（核科学、放射線科学、天体物理学）に跨る議論に果敢に挑戦し、その結果として生命起源の原子炉間欠泉モデル、タンデム惑星形成モデル、地球のABEL形成モデル、生命三段階進化モデルなどのユニークなモデルを提案した。これらモデルは国外の研究者にも浸透しつつある。また、検出すら困難であった冥王代類似環境微生物のゲノム解読に成功し、その結果、冥王代類似環境に棲む特異な微生物群集OD1が、ゲノムサイズ非常に小さく、非常に限られた遺伝子しか持っていないことが明らかになった。エネルギー・物質生産に関与するものとしては、嫌氣的解糖系の遺伝子の一部（グリセルアルデヒド周辺の反応に関与するもの）のみ持っていることは、原子炉間欠泉モデルと整合的である。また、これらはバクテリアというよりはウイルスに分類されるものとも考えられ非常に興味深い。また、冥王代類似環境微生物のゲノム解読の結果が、仮説から予想された必須代謝回路と一致した事は、異分野融合研究だからこそ得られた重要な成果である。これらの研究結果や新規モデルの検証は今後にゆだねられる部分もあるが、全く新しい分野を創生しつつあることは明らかであり、「新学術領域研究」にふさわしい成果を挙げたと考えられ、さらなる次のプロジェクトの展開を図るべきである。

## 牧野淳一郎氏（神戸大学 理学研究科 惑星学専攻 教授）

総括班での「Habitable Trinity」仮説にもとづいて、仮説実証のために必要なパーツを整理し、その全てを明らかにしようという極めて意欲的な研究であり、各班で大きな成果をあげていると思います。以下特に A05 班について述べます。太陽系の惑星形成理論は過去 40 年近くにわたって minimum mass solar nebula model、すなわちいわゆる京都モデルに支配されてきました。これは、実際の原始惑星系円盤は本来「降着」円盤である、すなわち質量・角運動量輸送がある、ということを見捨てるモデルであり、もちろんその意義は大きかったとはいえ、もちろんこれだけが正しいというものではありません。それにもかかわらず、「標準」モデルとして受け入れられてきました。A05 班の大きな成果は、静的な京都モデルではなく、動的な標準降着円盤モデルの上に惑星形成理論を構築しなおしたところにあります。その個々のパーツとなっている、MRI、dead zone、圧力勾配による微惑星ドリフト等は従来から知られているものであり、特に微惑星ドリフトは近年 pebble accretion として盛んに研究されているところです。しかし、標準降着円盤モデルから統一的・総合的な進化のピクチャーを与える試みは他に例をみないものであり、京都モデルに代わる現代的な惑星形成理論の基礎を築くものとして非常に高く評価されるべきと考えます。その意味では、プレゼンテーションや発表スライド等で、従来のモデルとそれにもとづいた色々な研究に比べた本研究の位置付けが十分に強調されていないように思われること、また、名称が「タンDEM惑星形成」となるのですが、「汎惑星形成理論」としては「タンDEM惑星形成」ではない場合も扱える、という意味でネーミングがよくない気がします。御検討いただければ幸いです。