

惑星科学フロンティアセミナー

—惑星科学と生命の起源—

田近 英一¹

「第1回惑星科学フロンティア・セミナー」が、さる7月18日—20日、草津セミナー・ハウス（会場は草津ナウリゾートホテル）において開催された。筆者は今年度の代表世話人を務めた立場から、ここで個人的な感想を交えたセミナー報告をしてみたい。

まず最初に、「惑星科学フロンティア・セミナー」についての説明が必要であろう。これまで、惑星科学を志す若手研究者の交流を目的として、1989年の夏から「惑星科学夏のセミナー」が開催されてきた。しかしながら、参加者の年齢層が幅広いことの当然の結果として、このセミナーに惑星科学の基礎的な話を望む声と、最先端の研究についての集中的な議論を望む声とが出てきた。前者については、惑星科学の系統的な教育体制が整っている大学がほとんど存在しないこと、特に惑星科学関連の講座がない大学の学生にとってはこの機会が惑星科学に直接触れることのできるほとんど唯一の場であること等を考えると、そのようなセミナーの存在は大変に意味があると考えられる。一方、すでにある程度以上の研究経験がある者にとっては、もっと有意義な場を求めたくなるのは当然であろう。このような経緯から、従来の「夏のセミナー」は「夏の学校」と名称を変更して大学院修士課程が中心となって行い、それとは別に大学院博士課程以上の“若手研究者”が中心となって、新たに「フロンティア・セミナー」を立ちあげることになった。

「惑星科学フロンティア・セミナー」の主旨は、最近のホットな話題や境界領域のテーマを設定し、

その分野における研究の最先端のレビューと討論を通じて、その領域の現状理解と問題点の整理を目指すことにある。そして、特に境界領域の研究対象について各分野（理論、実験、観測といった手法の違いも含む）の相互理解と、異なるバックグラウンドをもつ研究者同士の相互交流をはかることで、新たな研究発展の方向を模索することを大きな目的としている。今回は、そのようなセミナーの第1弾として「惑星初期進化/原始地球環境と生命の起源」というテーマを取り上げた。

“生命の起源”には誰もが関心を抱いていると思われるが、惑星科学とは縁遠い分野であると感じている人は多いのではないだろうか。しかし、Urey-Millerの実験を思いだしても明らかのように、有機物質の合成実験には実験条件の設定、すなわち原始地球環境（大気・海水組成、温度、エネルギー源など）についての情報を必要とする。生命の誕生が地球形成から数億年以内であるとすれば、この時期の地質学的な証拠がほとんどない以上、当時の地球環境を語ることができるのは惑星形成論と惑星初期進化の研究において他にはない。特に、この時代は隕石大爆撃期にあたるが、隕石の衝突頻度や衝突現象の解明はまさに惑星科学における主要な研究テーマのひとつである。さらにいえば、生命誕生後についても、地球環境の進化（地球システムにおける生物圏の役割）や地球外天体の影響（第三紀/白亜紀境界に代表される巨大隕石衝突による周期的な生物種の大絶滅の可能性）など、地球進化と生物進化とは密接な関係を持っていると考えられる。このようなことを考

¹東京大学気候システム研究センター

え合わせると、惑星・地球の進化の枠組みの中で生命の起源の問題を捉えていくということは非常に重要なことであり、地球初期進化についての知見と認識が高まりつつある現在、われわれ惑星科学の側としても、そろそろこのような視座を持ってよい時期ではないかと思われる。

前置きが長くなったが、セミナーの内容についてまとめてみたい。このセミナーのほとんどの参加者は生物学や生化学についての知識が乏しい、もしくは“アミノ酸”と聞いただけでアレルギー反応を起こすかも知れないことに配慮して、生化学の基礎用語集を用意した上で、以下のようなプログラムを組んだ。

(1) 生化学の基礎講座

生命とは何か—生命の起源を理解するために—
(朝原治一/宇宙研)

(2) 原始地球環境

a) 大気・海洋・地表面状態 (阿部 豊/東大・理)

b) 隕石重爆撃とその地球表層環境に対する影響
(杉田精司/東大・理)

c) 原始地球環境についての地質学的な情報について (萩谷 宏/東大・理)

(3) 生命の起源

a) 模擬原始地球環境下での生体有機物質モノマーの合成 (小林憲正/横浜国大・工)

b) 模擬原始地球環境下でのポリペプチドの生成
(伊藤雅彦/名大・水圏研)

c) 生命起源論の新しい展開 (柳川弘志/三菱化成生命科学研究所)

(4) 総合討論

これ以外についてはポスター講演にまわし、そちらの方でも熱心な議論がなされた。

まず初日には、朝原氏による生化学の“教養講座”が行なわれた。マクロにみたときの生命の定義づけ (自己維持機能を持ち、自己複製をする) からはじまって、ミクロに見たときの生体構成分子 (タンパク質、核酸とそれらを構成するアミノ酸、核酸塩基、糖、リン酸)、エネルギー、遺伝情

報の流れなど、今回のセミナーに必要な知識についての説明がなされた。最初で落ちこぼれては大変と、参加者からは基本的な述語 (DNAは何の略か?) からはじまってエイズ・ウィルスの遺伝情報変化の原因にいたるまで、さまざまな質問が熱心に飛びかっていた。

二日目、外は素晴らしい青空だったが、休憩時間もそこそこに5つの講演が行なわれた。最初に地球惑星科学側から原始地球環境に関する3つのレビュー講演が行なわれた。まず阿部氏が、微惑星集積による地球形成過程とそれに伴う原始大気・海洋の形成、地表面状態について講演した。地球形成期において、マグマオーシャン中に金属鉄が存在するような還元的な環境の場合、大気組成は水素、水蒸気、一酸化炭素、二酸化炭素であり、また大気量は数百気圧程度であると推定される。集積末期に水蒸気大気が凝結して原始海洋を形成した後、大気中の一酸化炭素は水蒸気の光分解の影響で二酸化炭素になる。後述するように有機物質の合成には二酸化炭素よりも一酸化炭素の存在が有利なためこのタイムスケールは非常に重要であるが、現在のところよく分かっていない。一方、マグマオーシャンの冷却を考えると地球形成直後の原始地殻は非常に薄く (数十 m)、熱水活動が活発であり、熱水循環や地殻の更新自体が重要な冷却機構であったという可能性が議論された。最近の生命起源論は熱水環境に注目していることを考えると、このことは非常に興味深い。

次に、杉田氏が、原始地球環境に対する隕石重爆撃の影響についてのレビュー講演を行なった。前述したように、生命が誕生したと考えられる時期は、われわれ惑星科学の立場からみれば、惑星形成後も続いたと考えられる隕石爆撃期にあたる。生命の誕生に関してこの影響がなかったとは考えにくく、すでにいくつかの研究がなされている。この時期における隕石や彗星の衝突がもたらす原始地球環境への影響はいろいろ考えられるが、このうち特に生命の誕生に対して衝突現象がもたら

し得る有利な点（特に vapor plume の発生による有機物質合成の可能性）と不利な点（大規模衝突による地殻破壊と海水蒸発による環境悪化）に関して議論がなされた。しかし、衝突現象の理解不足や衝突フラックスの不確定性によって、この問題を議論するのは現時点では難しい。

もうひとつ、萩谷氏が原始地球環境についての地質学的情報について講演した。原始地球の状況は、地球最古の地質体のひとつであるグリーンランドのイスア地域の調査によって最近明らかになりつつある。今から38億年前に海洋が存在していた可能性は以前から指摘されてきたが、当時すでに現在と同様なプレートテクトニクスが存在していた可能性も最近報告されている。萩谷氏は、実際にイスア地域の調査を行なった経験を持っており、数多くのスライドと自身の体験を交えた解説はとても興味深かった。しかし一方においては、なじみのない参加者にとって、地質学の話は生命科学にまさるとも劣らないほど難解であったようである。余談になるが、彼は膨大な資料を用意しており、講演で話せなかった分は夜の特別講演（ポスター3、4枚分！）として一部の参加者を集めて行なわれた。これは大好評で、アルコールが入って気軽に質問できる雰囲気の中、熱心な議論が深夜にまでおよんだ。参加者は、萩谷氏の博識ぶりに驚嘆するとともに“ストロマトライト踊り”などのパフォーマンスに強烈な印象を受けていた。

さて、後半は生命の起源に関する3つの講演が行なわれた。まず、小林氏が基本的な有機物質の模擬原始地球環境下における合成実験についてのレビュー講演を行なった。Millerの実験（1953）が行なわれた当時は、原始大気として原始太陽系星雲ガスを直接捕獲したいわゆる1次大気（水素、メタン、アンモニアなど還元的な大気）が考えられてきた。しかし、その後の研究によって、地球大気は地球内部から2次的に脱ガスしてきたもの（火山ガスからの類推で水蒸気、二酸化炭素、窒素が主成分）であることが指摘されるようになっ

た。さらに、最近の地球形成理論によると、地球形成直後の衝突脱ガス大気は金属鉄の存在を考慮すると一酸化炭素、窒素、水蒸気が主成分であることが分かってきた。原始大気に対するこのような認識の変化に伴って、有機物合成実験で設定される条件も変化してきた。そうした実験結果によると、有機物質の合成には還元的な環境が好ましく、一酸化炭素の存在はぜひとも必要であるという。小林氏らは原始地球環境のみならず、有機物質合成のエネルギー源についてもさまざまなものを想定した実験を行っており、惑星科学の最新の成果をフォローしているその様子に参加者は一様に驚き、また勇気づけられもした。

さて、基本的な有機物質が生成された後、アミノ酸が重合してタンパク質に、核酸塩基などが重合して核酸になる必要がある。まず、伊藤氏によってアミノ酸から生体関連機能（触媒作用など）をもつようなポリペプチドの生成実験について講演があった。ポリペプチド合成にはアミノ酸が何らかの形で濃縮することが望ましい。伊藤氏らは原始地球上の波打ち際のような環境に注目した。そこでは海水の流入と蒸発が繰り返されることによって有機物質の濃縮が実現される。そのような環境を設定した実験により、分子量が1,000-4,000程度のポリペプチド合成に成功した。しかも、そのポリペプチドにはタンパク質の重要な機能である触媒活性を持つことが確認されたという。タンパク質の合成に何らかの濃縮メカニズムが不可欠であるとすれば、この波打ち際モデルは非常に有望であろう。

最終日には、最近話題になっているRNAワールドについて柳川氏が講演した。核酸が先かタンパク質が先か—これは生命の起源を考える上で常に問題とされてきたことである。タンパク質は遺伝情報を担う核酸によってつくられるが、その核酸の合成にはタンパク質が持つ触媒作用が不可欠である。一体どちらが先に出現したのであろうか。最近、核酸の一種であるRNAが触媒作用

を持つという発見によって、初期の地球上には遺伝情報と触媒作用の両方を備えた RNA による世界 (RNA ワールド) が存在した可能性が提唱されている。柳川氏はこのような新しい枠組みのもとで、最初の生命がどのようなものであったのかについて分かりやすいレビューを行ない、現時点における生命起源論の全体像を提示した。

最後に「フロンティア・セミナー」の“核心”である総合討論が行なわれた。正直なところ、地球初期進化の研究も生命の起源研究もまだ分からないことが多い上に両者の隔たりも大きいので、今回のテーマでは総合討論は成立しないのではないかと思われた。しかし、予想に反して多くの質疑応答と議論がなされた。特に、“惑星科学は生命の起源に対してどのように貢献できるか”という問題について熱心に議論された。ひとつは、原始大気・海水の組成がどのようなタイムスケールでどう進化するかという問題であり、もうひとつは原始地球環境に与える隕石爆撃の影響である。前者については不確定性は大きいですが、ある程度の理論的推定は可能であるという意見がでた。さらに熱水活動による海水組成変化を実験的に推定することも可能であるという。また後者については、impact flux の確定にはもっと直接的情報を必要とするが、最近の惑星形成理論の発展により別の角度からの推定も可能であろうという意見があった。また、衝突による vapor plume の挙動や衝突現象の解明はこれから研究可能な重要な問題であるということが認識された。一方、有機物質合成の場として干潟（波打ち際）や熱水噴出孔が考えられているが、その両方の特徴を兼ね備えた場として、大陸内のリフト帯（蒸発残留岩の形成や熱水活動を伴う）が有力ではないかという指摘は、大変に興味深かった。

ところで、生命の起源に携わる若手研究者は、実はほとんどいないのだという。これは、生命の起源というテーマで学位論文を書くのが大変であるということらしい。柳川氏からは、“生命の起源

研究にはとりわけ柔軟な頭脳が必要であり、このセミナー参加者のような若手諸君は、もし現在の研究テーマがつまらなかったら、そんな研究はすぐにやめて迷わず生命の起源をやみましょう”という提言があり場内大拍手だった。

セミナー終了後、このセミナーについてのアンケートを提出してもらった。それによると、“今回のテーマは大変良かった”という意見が圧倒的に多く、この問題に対して多くの人が関心を持っていることをうかがわせた。また、「フロンティア・セミナー」に期待することとしては、(1)異なる分野の研究者と会うこと、(2)普段聞かない話を聞くこと、(3)惑星科学の今後の研究の模索、(4)議論の場、というのが上位だった。ちなみに期待しないことは、学会的なもの、他の分野で行なわれているような夏の学校、避暑などであった。今年のセミナー（参加者は約80名）には、地球物理以外に地質や鉱物出身の参加者も多く、その他にも天文、物理、化学、生物、工学などきわめて広範囲にわたった。これは、惑星科学の総合科学としての特質を反映しており、本セミナーが持つユニークな特徴として評価されるであろう。実際、このセミナーの参加者が幅広い分野にわたっていたことや、このセミナーが外に対して開かれていることを肯定する意見が大変に多かった。一方で、過密スケジュールの改善や講演内容の工夫が必要との声も多かった。

最後に、このようなセミナーの成功は多数の人々の協力なくしては有り得ない。今年は、東京大学理学部地球惑星物理学教室の多くの大学院生の協力を得た。特に倉本圭、中本泰史、吾妻瞬一の各氏は世話人として、宮崎明子さんは会計として、また研究スタッフ室の古谷具子さんはセミナー事務局として大変な働きをしてくれたことを、ここに記しておきたい。なお、来年の代表世話人は加藤工氏（東北大・理）と荒川政彦氏（北大・低温研）に決定している。