展 望・解 説

生命の起源における放射線の役割

Prior to the generation of life on the Earth, bioorganic compounds such as amino acids should have been prebiotically synthesized. There have been proposed several possible sites for the abiotic formation of organic compounds including primitive Earth atmosphere and ice mantles of interstellar dust particles in molecular clouds. In these environments, galactic cosmic rays and other radiation could be important energies for prebiotic synthesis. In addition, enantiomeric excesses of amino acids could have been induced by some asymmetric radiation (*e.g.*, circularly polarized light and spin-polarized particles). In the present paper, I introduce prebiotic synthesis experiments utilizing radiation, and also describe future perspectives.

Keywords: origins of life, radiation, amino acids, enantiomeric excesses, cosmic rays

1 はじめに

生命がどのように誕生したのか.これは宇宙の起源 や知性の起源とならぶ人類に遺された大きな謎であ る.その科学的研究が本格的に始まったのは 1920 年 代である.ロシアの A. Oparin とイギリスの J. Haldane は独立に「生命は単純な物質から複雑な有機物への進 化によって誕生した」とする「化学進化仮説」を発表 した.しかし、当時は非常に長い時間を要したと考え られる化学進化の過程を実験で確かめることは困難と 考えられていた.

状況が変わったのは 1950 年代である。1953 年,シ カゴ大学の学生だった S. L. Miller は,フラスコにメタ ン・アンモニア・水素・水蒸気の混合気体を入れ、その

Roles of Radiation in Origins of Life Kensei Kobayasht* (YOKOHAMA National University), 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL: 045-339-3938

E-mail: kobayashi-kensei-wv@ynu.ac.jp

横浜国立大学大学院工学研究院 小林憲正*

中で火花放電を行った.フラスコの底の水を取り出し て分析したところグリシン,アラニンなどのアミノ酸 が生成していることがわかった¹⁾.メタンなどの単純 な分子の混合物に火花を飛ばすだけでアミノ酸という 生命に直結する有機分子が生成したということは,化 学進化過程が実証できるということを示す.この論文 を読んだ多くの科学者が生命の起源研究に参入した.

本稿においては、生命の起源にいたる化学進化過程, 特にアミノ酸などの生体有機物の起源や、アミノ酸な どの不斉分子の非対称性に関して放射線が関連するも のを中心に解説し、その重要性と今後の展望について 述べる.

2 Millerの実験と化学進化の古典的シナリオ

Miller の実験は, 原始地球大気中での雷を模擬した ものである. 雷(放電)によって大気中の分子には電 離や励起, さらには解離がおき, それがお互いに反応 することにより新たな分子が生成する. そこで, 他の 科学者たちは原始地球上に存在する他のエネルギーを 用いた実験も行った. なお, 出発材料にメタンやアン モニアを用いたのは, Miller の指導教員であった H. Urey の想定に基づいたものであった.

Table 1 は, 原始地球上で得られるエネルギーとその フラックスをまとめたものである²⁾. 当然ながら, 太 陽からの紫外線³⁾ が最も大きく, これに雷や火山熱⁴⁾, 隕石衝突時の衝撃波⁵⁾ などが続く. それぞれのエネル ギーをメタン・アンモニアを含む混合気体に与えた実 験が行われ, すべてのエネルギーを用いた実験で種々 のアミノ酸の生成が報告された. ただし, 紫外線照射 の場合は, 近紫外線を吸収しやすい硫化水素とエタン を加えている. すべてでアミノ酸の合成が可能という ことは, 想定エネルギーフラックスの大きいもの, つ まり紫外線や雷が化学進化を進める主要エネルギー であり, 地殻放射線の寄与はそれほどでもないことに なる.

Miller らは、火花放電実験を継続し、どのようにしてアミノ酸が生成するのかを調べようとした.放電

放射線化学 第114号(2022)

Table 1.	Energy	sources	for	chemical	evolu-
tion on th	e primiti	ve Earth	. (C	ited from	Ref.47
with modi	fication)				

Energy source	Estimated flux / eV m ⁻² yr ⁻¹			
	Miller & Urey ²⁾ Other refere		erences	
Solar radiation				
Total	$6.8 imes 10^{28}$			
$\lambda < 200 \text{ nm}$	2.2×10^{25}			
$\lambda < 150 \text{ nm}$	9.1×10^{23}			
$\lambda < 110 \text{ nm}$		4.2×10^{22}	Ref.14	
Electric discharge	1.0×10^{24}	1.8×10^{22}	Ref.48	
Volcanic heat	3.4×10^{22}			
Radioactivity*	2×10^{23}			
Cosmic ray	3.9×10^{20}	1.8×10^{21}	Ref.14	
Meteor impacts	1×10^{22}			

*0-1.0 km deep of Earth crust

を始めると、まずシアン化水素(HCN)とアルデヒド (RCHO; R が水素の場合はホルムアルデヒド)の濃度 が上昇する.しばらくすると、それらの濃度が頭打ち になり、アミノ酸の濃度が上昇する.このことから、 すでに有機化学で知られていた「ストレッカー合成」:

 $\begin{aligned} & \text{HCN} + \text{RCHO} + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{NH}_2\text{CHRCN} \\ & \text{NH}_2\text{CHRCN} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_2\text{CHRCOOH} + \text{NH}_3 \end{aligned}$

により,アミノ酸が生成したのではと Miller らは考 えた⁶⁾. つまり,アミノニトリル NH₂CHRCN が「前 駆体」として合成され,これが加水分解してアミノ酸 NH₂CHRCOOH ができるという機構である.さらに, アミノ酸を作る実験の他,シアン化水素やシアノアセ チレン (CH=CCN) などから核酸塩基 (アデニンやシ トシンなど)を合成する実験,アミノ酸をつなげてペ プチドを作る実験:

$$\label{eq:hardenergy} \begin{split} \mathsf{NH}_2\mathsf{CHR}_1\mathsf{COOH}+\mathsf{NH}_2\mathsf{CHR}_2\mathsf{COOH}\\ &\longrightarrow \mathsf{NH}_2\mathsf{CHR}_1\mathsf{CO}\text{-}\mathsf{NH}\mathsf{CHR}_2\mathsf{COOH} \end{split}$$

などが 1960-70 年代に多数行われたが,いずれも化学 式で表すことができる反応である⁷⁾.本稿では,この ような化学進化シナリオを「古典的シナリオ」とよぶ ことにする.

なお,実は Miller の実験よりも先に生命の起源の実 験的な研究が行われていた。1951 年,カリフォルニ ア大学の W. M. Garrison らは二酸化炭素と鉄 (II) イオ ンを溶かした水に,サイクロトロンからのヘリウムイ オンビームを照射した。これは海水中に溶けた放射線 核種からの α 線を模擬した実験であり,生成物中にホ ルムアルデヒドとギ酸 HCOOH が検出された⁸⁾. 無機 物のみの出発材料から 2 種類の有機物が生成したとい う重要な実験であったが,窒素化合物が含まれておら ず,アミノ酸の生成は望めなかった. このため,この 実験は Miller の実験の影に隠れてしまった.

3 弱還元型大気からのアミノ酸生成は可能か

原始地球大気は現在に残っておらず,その組成は不 明である.そこで太陽系の他の天体の大気を参考に原 始地球大気の推定が行われてきた.1950年頃は,木 星・土星大気をモデルとした,メタン・アンモニアを 多く含むとする「強還元型大気説」と火星・金星大気 をモデルとした,二酸化炭素・窒素を主とする「非還 元型大気説」間で論争が続いていた.ユーリーは前者 の陣営の中心人物であった.非還元型大気からはアミ ノ酸などの生成が困難であることから,化学進化実験 は主に強還元型大気説に基づいて行われることが多 かった.

1980 年頃から風向きが変わる.太陽系惑星は微惑 星の衝突合体に基づいて誕生し,原始大気はこの時の 衝突加熱により内部から脱ガスしてきたものとする説 が有力となった⁹.この場合,「強還元型大気説」はあ りえなくなり,二酸化炭素,窒素を主とし,一酸化炭 素などの還元性を有する気体を若干含むような「弱還 元型大気」であった可能性が高いとされる¹⁰.

メタンやアンモニアを含まない大気からのアミノ酸 生成は雷では限定的であることが模擬実験からわかっ た¹¹⁾.一方,紫外線では窒素が解離できないことから, アミノ酸のような含窒素有機物の生成は望めない.つ まり,原始地球大気からはアミノ酸の生成が困難だっ たとみなされるようになった.このため,後述するよ うに生命の材料が地球外から供給されたという考えの 重みが増した.

では、本当に弱還元型大気からはアミノ酸などの生成はできないのであろうか.ここで、それまであまり 重要とみなされなかったエネルギーを再考してみる. まずは宇宙線である.宇宙線のエネルギーフラックス は Table 1 では極めて低いとされており、化学進化で はよりフラックスの高い雷などと比べて無視しうると されてきた^{2,7)}.ただ、Table 1 の Miller と Urey による 宇宙線フラックス²⁾ の根拠は不明である.

私たちは、「弱還元型大気」に宇宙線が入射した時の 反応を模擬した陽子線照射実験(Fig. 1)を行った.ま ずは一酸化炭素・窒素・水の混合大気への陽子線照射



Figure 1. Proton irradiation to simulated primitive atmosphere. A gas mixture containing carbon monoxide and nitrogen was irradiated with 2.5 MeV proton from a tandem accelerator (Tokyo Institute of Technology).

を行ったところ,種々のアミノ酸¹²⁾ や核酸塩基のひと つであるウラシル¹³⁾ などの生成が確認できた.火花放 電の場合は,炭素源を一酸化炭素にするとアミノ酸の 収率は激減するが,陽子線照射の場合は一酸化炭素を 用いた場合のグリシンのG値(吸収エネルギー100 eV 当たりの生成分子数)は0.02 と高いエネルギー収率を 示した.さらに,照射する陽子線のエネルギーを変え たり,ヘリウム線や電子線に変えてもこのG値が変わ らないことも確認した(Fig. 2)¹⁴⁾.二酸化炭素を主と し,一酸化炭素を副成分とした混合気体への照射でも アミノ酸¹⁵⁾ やウラシル¹⁶⁾の生成は可能であった.

これまでに述べた実験は,銀河宇宙線を想定したものであった.そのフラックスを計算し直すと,460 J m⁻² yr⁻¹ 2 π ^{-1 14)} となった.これは,紫外線や雷のエネルギーフラックスよりはかなり低いものではあるが,他のエネルギーではアミノ酸の生成があまり期待できないため,原始地球大気中でのアミノ酸生成を考える場合,無視できないことになる.原始地球大気の組成を仮に CO₂:CO:N₂ = 15:1:4 とした時のグリシンの G 値は 0.0065 であった¹⁵⁾ ので,この値を使うと,年間 12 kt のグリシンが生成することになる.

4 地球外でのアミノ酸の生成

地球に飛来する岩石を隕石とよぶ. 隕石の中にはみ かけが黒っぽく,炭素を多く含むものがあり,炭素質 コンドライトと呼ばれている.炭素質コンドライトは



Figure 2. Energy dependence of glycine formation on the total energy deposited in the gases, where a mixture of carbon monoxide (280 Torr), nitrogen (280 Torr) and water (20 Torr–50 Torr) was irradiated. (Cited from Ref. 47 with modification)

水や有機物などの揮発性分子を有していることから, 他の揮発性分子を失った隕石よりも始原的で,初期太 陽系の情報を保持していると考えられている.近年の 日本の小惑星探査ミッション「はやぶさ」「はやぶさ 2」で持ち帰られた試料の分析から,隕石は小惑星由来 であることが明らかになった^{17,18}.

炭素質コンドライト中に含まれる有機物の多くは 溶媒に溶けない不溶性有機物(insoluble organic matter, IOM)であるが,熱水で抽出するとアミノ酸が検出さ れることが知られていた.しかし,それが地球に落 ちてきた後に付着したものかどうかが不明であった. 1969年にオーストラリアのマーチソン村に落下した 隕石はすぐに回収され,クリーンルーム内で注意深く 分析された.その結果,この隕石中には宇宙起源のア ミノ酸が含まれることが確認された¹⁹⁾.宇宙起源と判 断した決め手は,非タンパク質アミノ酸が多く含まれ ていること,そして多くのアミノ酸がラセミ体であっ たことである.後者については後で議論する.

隕石の起源とされる小惑星に関しては、はやぶさ2 が持ち帰ったリュウグウの試料中に多種類のアミノ酸

第114号 (2022)



Figure 3. Formation of organic compounds in an ice mantle of an interstellar dust particle in molecular clouds (Modified Greenberg model).

が存在することが 2022 年に報告された²⁰⁾.また,彗 星中にも多様な有機物が存在することが知られてお り,アミノ酸に関しては探査機スターダストにより ヴィルト第2彗星から持ち帰った試料からのグリシン の検出²¹⁾と,探査機ロゼッタによりチュリュモフ・ゲ ラシメンコ彗星近傍でのグリシンの検出²²⁾が報告さ れている.

隕石などに見られるアミノ酸はどこでどのように して生成したのだろうか.これにはいくつかの説があ り、模擬実験が行われてきた.ここでは分子雲説と小 天体内部説をとりあげる.

分子雲は星間で物質や塵の密度が比較的高い場所 で,そのため星からの光を遮るために黒くみえる (Fig. 3). その内部は極めて低温 (~10 K) であり, 塵の表面に H₂O の他, CO, CO₂, CH₃OH, NH₃ など の分子が凍り付き、「アイスマントル」を形成してい る. これに宇宙線や宇宙線により生じた紫外線が作用 して、より複雑な分子が生成することが期待される²³⁾ われわれは、クライオスタット中で10K-20Kに冷却 した基板に CO, NH₃, H₂O を吹き付けて氷を作成し, これに加速器からの陽子線を照射した(Fig. 4). 基板 上の生成物を取り出し,酸加水分解した後に分析する と,アミノ酸の生成が確認できた²⁴⁾. さらに CH₃OH, NH₃, H₂Oの混合物を液体窒素中で凍結しながら, 放 射線医学総合研究所(現量子科学技術研究開発機構量 子生命・医学部門 放射線医学研究所)の HIMAC から の 290 MeV/u の炭素線を照射する実験も行い、アミノ 酸前駆体(加水分解によりアミノ酸になる物質)が検 出された²⁵⁾.欧米のグループは、同様な氷に紫外線照



Figure 4. Schematic diagram of a proton irradiation to simulated interstellar dust ice mantles in molecular clouds.

射を行い,アミノ酸前駆体が生成したことを報告している^{26,27)}. これらの実験から,分子雲中の星間塵アイスマントル環境でアミノ酸前駆体が生成することが強く示唆された.

分子雲中の塵やガスが重力収縮により集まり, 原始 太陽系が生成したとされる。この時、太陽をとりまく 円盤中で直径 10 km 程度の微惑星が多数生成し、それ らの衝突合体により、惑星が生成したとされる。原始 惑星になりそこなった天体が小惑星や彗星などの「太 陽系小天体」としてアステロイドベルトやエッジワー ス・カイパーベルトなどに多数残存している、太陽か らある程度離れた小天体中にはH₂O, HCHO, NH₃な どの分子が氷として存在していたが、この氷が小天体 中に含まれる²⁶Al などの放射壊変による熱により融 けて液体となり、この中でさまざまな化学反応が起き たとされ、隕石中に多く存在する IOM もこの時に生 成した可能性がある²⁸⁾. Kebukawa ら²⁹⁾ は, このよう な溶液の加熱により, IOM の他にアミノ酸前駆体も生 成することを見いだした.このような反応は、一般的 に放射壊変による加熱の影響と考えられているが、放 射線が影響している可能性も考えられる³⁰⁾.

5 アミノ酸の不斉の起源

これまで,アミノ酸の起源について述べてきたが, 生命起源研究上での大きな謎のひとつが,アミノ酸の 不斉の起源である.グリシンなどを除き,多くのアミ ノ酸はL体(左手型),D体(右手型)という鏡像異性 体を有する(Fig.5).化学進化模擬実験で生成するア ミノ酸は通常,両者が1:1に混合したラセミ体である が,地球生物がタンパク質の合成に使えるのは基本的 にL体のみである.つまり,生命誕生時にはL体のア ミノ酸のみを選択的に使ったと考えられるのである. その理由としてさまざまな説が唱えられてきた³¹⁾.

1997年,アミノ酸の不斉の種が宇宙から来た可能性 が示された. Cronin と Pizzarello は,マーチソン隕石 に含まれる一部のアミノ酸にL体のエナンチオ過剰が あることを発表した³²⁾.炭素質コンドライト中のアミ ノ酸に不斉が存在することは他の研究者によっても確 認された³³⁾.ただし,不斉がみつかったのは,イソバ リンのように中心炭素に水素を持たない特殊な非タン パク質アミノ酸に限られている.中心炭素に水素を持 つアミノ酸はラセミ化速度が速いためにエナンチオ過 剰が消滅した可能性も考えられる.

宇宙でアミノ酸の不斉創生が起きるとすると,その 原因は何であろうか.まず注目されたのは,円偏光紫 外線である.中性子星からは極方向に強い円偏光が放 射されている.また,宇宙空間を漂う塵が光散乱を起 こし,円偏光を生じることも知られている.Fukueら は太陽系よりもはるかに大きく広がった右円偏光領 域,左円偏光領域が存在することを見いだした³⁴).

L-アミノ酸と D-アミノ酸の円偏光紫外線の吸光度 に差があるため、一方のアミノ酸が選択的に合成また は分解される可能性が考えられる。そのような模擬実 験も行われている。たとえば、Takanoらは分子雲中に 多く存在する CO、NH₃、H₂O 混合物に Van de Graaff 加速器からの陽子線を照射して「模擬星間有機物」を 合成した。これを加水分解するとアラニンなど多種類 のアミノ酸が生じるが、それらはラセミ体である。こ れにシンクロトロンからの右円偏光紫外線を照射する と D-アラニン過剰が、左円偏光紫外線を照射するとL-



Figure 5. Enantiomers (optical isomers) of α -amino acids.

アラニン過剰が検出された³⁵⁾. 宇宙の円偏光紫外線は 不斉源としてもっともポピュラーなものといえるが, どちら向きの円偏光が当たったかにより L-または D-アミノ酸の過剰が起きるため,地球で L-アミノ酸が選 ばれたのは偶然ともいえる.

これに対して、L-アミノ酸が必然的に選ばれたとす る説もあり、その多くはパリティ非保存則に由来する ものである.たとえば、β壊変時に飛び出してくる電 子は左スピン偏極である.このようなスピン偏極粒子 が円偏光と同じような作用をする可能性が考えられて きた. Gusev らはロシアの閉鎖都市スネジンスクに作 られた⁹⁰Y-⁹⁰Sr 線源(50 Ci)からの大線量のβ線を ラセミ体のアミノ酸(重金属を添加)に照射すると, 生成物の円二色 (circular dichroism, CD) スペクトルか ら小さな不斉が生じた³⁶⁾.この他,宇宙線が分子と衝 突した時に生じるパイ中間子(π)が崩壊して生じる ミュオン (μ⁺, μ⁻) もスピン偏極しており, これが不 斉に関わる可能性も考えられている³⁶⁾.現在, J-PARC の物質・生命科学実験施設(Materials and Life Science Experimental Facility, MLF)を用いてラセミ体アミノ 酸へのミュオン照射実験を行い、不斉創出の可能性を 探っている.

物理的な不斉源により生じるエナンチオ過剰は多く ても1%程度であり,隕石中で見つかっている10% 前後のエナンチオ過剰よりも低い.また,生命の誕生 時にはほぼ100%のエナンチオ過剰が必要とされる. つまり,物理的な非対称性により作った不斉の種は増 幅させる必要がある.その不斉増殖の機構としては, 不斉自己触媒反応が注目されている.これをうまく使 うことによりわずかなエナンチオ過剰をほぼ100%の エナンチオ過剰へと増幅できる可能性が示されてい る³⁷⁾.

6 放射線によるアミノ酸生成反応の特徴

かつて,アミノ酸などの有機物生成における放射 線,特に宇宙線の影響は過小評価されてきた.原始大 気中での化学進化のエネルギーとしては宇宙線のフ ラックスは他のものより低いとされてきた⁷⁾.一方, Greenberg らは分子雲中の星間塵環境での有機物生成 を考える時に,主として宇宙線の作用により生じた紫 外線が重要であり,宇宙線そのものはエネルギーが高 すぎて素通りしてしまうため,有用でないと考えてい た(G. M. Greenberg,私信).宇宙線の効果が広く研究 されてきたのは,いわゆる astrochemistry の分野であ り,宇宙線により分子がイオン化され,さらに他の分 子と反応する過程が詳細に研究されている³⁸⁾.光反応 や、気相での化学反応は多数の素反応の組み合わせで 議論されている.

しかし, 原始地球大気中や分子雲中でのアミノ酸生 成において, 宇宙線 (粒子線照射) が非常に効率的なエ ネルギーであることが模擬実験の結果からわかった. では, 宇宙線によるアミノ酸生成反応の機構はどのよ うなものだろうか. これまで Miller と Urey が提唱し たストレッカー合成説がアミノ酸生成機構として広く 信じられ, 隕石中のアミノ酸 (α-アミノ酸) もストレッ カー合成によると *a priori* に語られてきた³³⁾. もしそ うだとすると, 加水分解前の生成物からアミノニトリ ルが多く検出されるはずである.

そこで、CO、NH₃、H₂O 混合気体(約1気圧)に 陽子線照射して生成した有機物をさまざまな方法で分 析してみた。加水分解前の試料を限外ろ過膜で分離し て高分子画分と低分子画分に分け、それぞれを加水分 解後にアミノ酸分析したところ, 高分子画分からもア ミノ酸が検出され、分子量数千のアミノ酸前駆体が生 成したことが示唆された³⁹⁾. また,熱分解 GC/MS に より分析すると加熱時にイミダゾール、フェナントレ ンなど多様な分子が生成した40). 一方,ストレッカー 合成でのグリシンの前駆体であるアミノアセトニトリ ルは全グリシン前駆体の 0.07 % 未満であることがわ かった³⁹⁾. つまり, 高エネルギー放射線がからむ化学 進化過程は、従来の素反応組み立て型の反応機構では 説明できないような複雑な反応が起きることがわかっ た. その機構としては、粒子線が濃い混合気体に入射 した時にカスケードが生じ,その中で一気に多様な反 応が進んだ後に急冷される。この時に活性化されたイ オンやラジカルが再結合して巨大分子を作る可能性を 考えている.

7 近年の進展と今後の展望

原始大気中での有機物生成のエネルギーとして,主 として(銀河)宇宙線を考えてきた.最近になり,これ に加えて太陽から発生する「太陽エネルギー粒子(solar energetic particles, SEPs)」が注目されている.SEPs は 太陽フレアやコロナ質量放出時に発生する高エネル ギー粒子である.2012年 Maehara らは,ケプラー宇宙 望遠鏡のデータから太陽型の恒星がきわめて大規模な フレア(スーパーフレア)を起こしていることを発見 した⁴¹⁾.従来,太陽型星はスーパーフレアは起こさな いといわれていたが,この考えの見直しが迫られた. さらに一般に若い恒星は活発な活動を起こしフレアの 頻度も高いことが知られている. Airapetian らは初期 地球において高フラックスの SEPs は,大気中で N₂O や HCN を生成し,光量が現在の 70 % ほどだった若 い太陽の下で地球表面が凍結するのを防いだと考え た⁴²⁾.初期太陽の激しい活動は,銀河宇宙線を大きく 上回るフラックスの SEPs を放出し,原始大気中での アミノ酸などの有機物の生成をさらに加速したことが 考えられる⁴³⁾.現在,そのような観点から SEPs の評 価を行っている.また,もし SEPs により大量にアミ ノ酸が生成したならば,その過程で SEPs (数百 MeV のプロトンを含む)と大気との作用により生じたスピ ン偏極ミュオンに由来するアミノ酸の不斉創出が起き た可能性も考えられる.不斉の種は宇宙から届けられ たか,地球で生じたかの論争がまた激しくなりそうで ある.

一方、地球外起源の有機物の地球への伝搬に関して は、隕石よりは宇宙塵によるものが多いと考えられて いる. たとえば, Chyba と Sagan は, 40 億年前には 隕石を大きく上回る年間 10⁸ kg の有機炭素を地球に もたらしたと推算した44).ただ、宇宙塵は現在も地球 に多量に降り注いでいるが、非常に微小なために地球 上で採集したものに含まれるアミノ酸の評価は非常に 難しい、そこで、われわれは地球生物圏に到達する前 の宇宙塵を採集することを計画した。「たんぽぽ計画」 は国際宇宙ステーションの日本実験モジュール「きぼ う」曝露部において、超低密度シリカエアロゲルを用 いて高速で飛来するダストを捕集する「捕集実験」 有機物や微生物を宇宙環境に曝露してその安定性・生 存性を調べる「曝露実験」などを含む複合宇宙実験で ある^{45,46)}. 捕集したダスト中のアミノ酸の分析は現在 進行中であり、その結果はリュウグウのアミノ酸の結 果20) などと併せて宇宙起源のアミノ酸の地球への供 給のシナリオを強化することが期待される.

これまで述べてきたように,化学進化の過程におい て放射線が極めて重要な働きをしてきたことが強く示 唆されている.しかしながら,化学進化研究のコミュ ニティーの中にしめる放射線化学関連の研究者は極め て限られているため,どうしても多人数の分野(たと えば光化学など)の研究者の声が大きくなってしまう 傾向があるのは否めない.また,放射線化学,とりわ け高エネルギー粒子の関与する反応は,古典的シナリ オで考えられているような素反応を積み重ねるような 平衡論的な議論にはなじまない.なぜなら生命とは非 平衡論的な現象であるからである.放射線の関与する 非平衡論的な化学進化過程の解明が必要である.

〈謝 辞〉

本稿で紹介した研究の多くは横浜国立大学大学院工 学研究院の小林憲正研究室・癸生川陽子研究室で行 われたものであり,加速器などの施設をもちいた実験 は他の機関との共同研究によるものである.研究室メ ンバーおよび共同研究者の方々に深く感謝する.本研 究の一部は文部科学省科学研究費補助金(17H02991, 19K21895, 20H02014)などの補助により行われたも のである.

〈参考文献〉

- 1) S. L. Miller, Science, 117 (1953) 528.
- 2) S. L. Miller, H. C. Urey, Science, 130 (1959) 130.
- 3) C. Sagan, B. N. Khare, Science, 173 (1971) 417.
- 4) K. Harada, S. W. Fox, Nature, 201 (1964) 335.
- A. Bar-Nun, N. Bar-Nun, S. H. Bauer, C. Sagan, Science, 168 (1970) 470.
- S. L. Miller, J. E. Van Trump, in: Y. Wolmann (Ed.), Origin of Life, D. Reidel Publishing, Dordrecht, 1981, pp. 135–141.
- 7) L. E. オーゲル, S. L. ミラー, 野田 春彦訳, 生命の 起原, 培風館 (1975).
- W. M. Garrison, D. C. Morrison, J. G. Hamilton, A. A. Benson, M. Calvin, Science, 114 (1951) 416.
- 9) T. Matsui, Y. Abe, Nature, 319 (1986), 303.
- D. C. Catling, J. F. Kasting, Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds, Cambridge University Press (2017).
- G. Schlesinger, S. L. Miller, J. Mol. Evol., 19 (1983) 376.
- K. Kobayashi, M. Tsuchiya, T. Oshima, H. Yanagawa, Orig. Life Evol. Biosph., 20 (1990) 99.
- 13) K. Kobayashi, T. Tsuji, Chem. Lett., 26 (1997) 903.
- K. Kobayashi, T. Kaneko, T. Saito, T. Oshima, Orig. Life Evol. Biosph., 28 (1998) 155.
- K. Kobayashi, T. Sato, S. Kajishima, T. Kaneko, Y. Ishikawa, T. Saito, Adv. Space Res., 19 (1997) 1067.
- 16) S. Miyakawa, H. Yamanashi, K. Kobayashi, H. J. Cleaves, S. L. Miller, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 99 (2002) 14628.
- T. Nakamura, T. Noguchi, M. Tanaka, M. E. Zolensky, M. Kimura, A. Tsuchiyama, A. Nakaato, T. Ogami, H. Ishida, M. Uesugi, T. Yada, K. Shirai, A. Fujimura, R. Okazaki, S. A. Sandford, Y. Ishibashi, M. Abe, T. Okada, M. Ueno, T. Mukai, M. Yoshikawa, J.

- 18) T. Yokoyama, K. Nagashima, I. Nakai, E. D. Young, Y. Abe, J. Aleon, C. M. O'D. Alexander, S. Amari, Y. Amelin, K. Bajo, M. Bizzaarro, A. Bouvier, R. W. Carloson, M. Chausssidon, B.-G. Choi, N. Dauphas, A. M. Davis, T. Di Rocco, W. Fujiya, R. Fukai, I. Gautam, M. K. Haba, Y. Hibiya, H. Hidaka, H. Homma, P. Hoppe, G. R. Huss, K. Ichida, T. Iizuka, T. R. Ireland, A. Ishikawa, M. Ito, S. Itoh, N. Kawasaki, N. T. Kita, K. Kitajima, T. Kleine, S. Komatani, A. N. Krot, M.-C. Liu, Y. Masuda, K. D. McKeegan, M. Morita, K. Motomura, F. Moynier, A. Nguyen, L. Nittler, M. Onose, A, Pack, C. Park, L. Piani, L. Qin, S. S. Russell, N. Sakamoto, M. Schonbachler, L. Tafla, H. Tang, H. Tang, K. Terada, Y. Terada, T. Usui, S. Wada, M. Wadhwa, R. J. Walker, K. Yamashita, Q.-Z. Yin, S. Yoneda, H. Yui, A.-C. Zhang, H. C. Connolly Jr., D. S. Lauretta, T. Nakamura, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, K. Sakamoto, H. Yabuta, M. Abe, M. Arakawa, A. Fujii, M. Hayakawa, N. Hirata, N. Hirata, R. Honda, C. Honda, S. Hosoda, Y. Iijima, H. Ikeda, M. Ishiguro, Y. Ishihara, T. Iwata, K. Kawahara, S. Kikuchi, K. Kitazato, K. Matsumoto, M. Matuoka, T. Michikami, Y. Mimasu, A. Miura, T. Morota, S. Nakazawa, N. Namiki, H. Noda, R. Noguchi, N. Ogawa, K. Ogawa, T. Okada, C. Okamoto, G. Ono, M. Ozaki, T. Saiki, N. Sakatani, H. Sawada, H. Senshu, Y. Shimaki, K. Shirai, S. Sugita, Y. Takei, H. Takeuchi, S. Tanaka, E. Tatsumi, F. Terui, Y. Tsuda, R. Tsukizaki, K. Wada, S. Watanabe, M. Yamada, T. Yamada, Y. Yamamoto, H. Yano, Y. Yokota, K. Yoshihara, M. Yoshikawa, K. Yoshikawa, S. Furuya, K. Hatakeda, T. Hayashi, Y. Hitomi, K. Kumagai, A. Miyazaki, A. Nakato, M. Nishimura, H. Soejima, A. Suzuki, T. Yada, D. Yamamoto, K. Yogata, M. Yoshitake, S. Tachibana, H. Yurimoto, Science (2022), DOI: 10.1126/science.abn7850.
- 19) K. Kvenvolden, J. Lawless, K. Pering, E. Peterson, J. Flores, C. Ponnamperuma, I. R. Kaplan, C. Moore, Nature, 228 (1970) 923.
- 20) E. Nakamura, K. Kobayashi, R. Tanaka, T. Kunihiro, H. Kotagawa, C. Potiszil, T. Ota, C. Sakaguchi, M. Yamanaka, D. M. Ratnayake, H. Tripathi, R. Kumar, M.-L. Avramescu, H. Tsuchida, Y. Yachi, H. Miura, M. Abe, R. Fukai, S. Furuyua, K. Hatakeda, T. Hayashi, Y. Hitomi, K. Kumagai, A. Miyazaki,

A. Nakato, M. Nishimura, T. Okada, H. Soejima, S. Sugita, A. Suzuki, T. Usui, T. Yada, D. Yamamoto, K. Yogata, M. Yoshitake, M. Arakawa, A. Fujii, M. Hayakawa, N. Hirata, N. Hirata, R. Honda, C. Honda, S. Hosodam Y. Iijima, H. Ikeda, M. Ishiguro, Y. Ishihara, T. Iwata, K. Kawahara, S. Kikuchi, K. Kitazato, K. Matsumoto, M. Matsuoka, T. Michikammi, Y. Mimasu, A. Miura, T. Morota, S. Nakazawa, N. Namiki, H. Noda, R. Noguchi, N. Ogawa, K. Ogawa, C. Okamoto, G. Ono, M. Ozaki, T. Saiki, N. Sakitani, H. Sawada, H. Senshu, Y. Shimaki, K. Shirai, Y. Takei, H. Takeuchi, S. Tanaka, E. Tatsumi, F. Terui, R. Tsukizaki, K. Wada, M. Yamada, T. Yamada, Y. Yamamoto, H. Yano, Y. Yokota, K. Yoshihara, M. Yoshikawa, K. Yoshikawa, M. Fujimoto, S. Watanabe, Y. Tsuda, Proc. Jpn. Acad. Ser. B-Phys. Biol. Sci., 98 (2022) 227.

- 21) J. E. Elsila, D. P. Glavin, J. P. Dworkin, Meteorit. Planet. Sci., 44 (2009) 1323.
- 22) K. Altwegg, H. Balsiger, A. Bar-Nun, J.-J. Berthelier, A. Bieler, P. Bochsler, C. Briois, U. Calmonte, M. R. Combi, H. Cottin, J. De Keyser, F. Dhooghe, B. Fiethe, S. A. Fuselier, S. Gasc, T. I. Gombosi, K. C. Hansen, M. Haessig, A. Jackel, E. Kopp, A. Korth, L. LeRoy, U. Mall, B. Marty, O. Mousis, T. Owen, H. Reme, M. Rubin, T. Semon, C. Y. Tzou, J. H. Waite, P. Wurz, Sci. Adv., 2 (2016) e1600285.
- J. M. Greenberg, A. Li, Adv. Space Res., 19 (1997) 981.
- 24) T. Kasamatsu, T. Kaneko, T. Saito, K. Kobayashi, Bull. Chem. Soc. Jpn., 70 (1997) 1021.
- 25) K. Kobayashi, T. Ogawa, H. Tonishi, T. Kaneko, Y. Takano, J. Takahashi, T. Saito, Y. Muramatsu, S. Yoshida, Y. Utsumi, Electr. Commun. Jpn., 91 (2008) 293.
- 26) M. P. Bernstein, J. P. Dworkin, S. A. Sandford, G. W. Cooper, L. J. Allamandora, Nature, 416 (2002) 401.
- 27) G. M. Munos Caro, U. J. Meierhenrich, W. A. Schutte, B. Barbier, A. A. Segavia, H. Rosenbauer, W. H. P. Thiemann, A. Brack, J. M. Greenberg, Nature, 416 (2002) 403.
- 28) Y. Kebukawa, A. L. D. Kilcoyne, G. D. Cody, Astrophys. J., 771 (2013) 19.
- 29) Y. Kebukawa, Q. H. S. Chan, S. Tachibana, K. Kobayashi, M. E. Zolensky, Sci. Adv., 3 (2017) e1602093.

- 30) 浅野 伸哉, 依田 功, 村松 康司, 癸生川 陽子, 小 林 憲正, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 千 葉, PPS07-P02.
- J. Takahashi, K. Kobayashi, Symmetry, 11 (2019) 919.
- 32) J. R. Cronin, S. Pizzarello, Science, 275 (1997) 951.
- 33) D. P. Glavin, A. S. Burton, J. E. Elsila, J. C. Aponte, J. P. Dworkin, Chem. Rev., 120 (2020) 4660.
- 34) T. Fukue, M. Tamura, R. Kandori, N. Kusakabe, J. H. Hough, J. Bailey, D. C. B. Whittet, P. W. Nakajima, J. Hashimoto, Orig. Life Evol. Biosph., 40 (2010) 335.
- 35) Y. Takano, J. Takahashi, T. Kaneko, K. Marumo, K. Kobayashi, Earth Planet. Sci. Lett., 254 (2007) 106.
- 36) G. A. Gusev, K. Kobayashi, E. V. Moiseenko, N. G. Poluhina, T. Saito, T. Ye, V. A. Tsarev, J. Xu, Y. Huang, G. Zhang, Orig. Life Evol. Biosph., 38 (2008) 509.
- 37) K. Soai, T. Shibata, H. Morioka, K. Choji, Nature, 378 (1995) 767.
- 38) S. N. Milam, Interstellar Chemical Processes, in: M. Gargaud, W. M. Irvine (Eds.), Encyclopedia of Astrobiology, 2nd ed., Springer, Berlin, 2015, pp. 1225– 1232.
- 39) K. Kobayashi, H. Mita, K. Kanda, H. Shibata, Y. Kebukawa, S. Kuramoto, T. Sato, M. Nakayama, H. Fukuda, Y. Oguri, S. Yoshida, 43rd COSPAR Scientific Assembly (2021), F3.1-0024-21, id 1926.
- 40) Y. Takano, T. Tsuboi, T. Kaneko, K. Kobayashi, K. Marumo, Bull. Chem. Soc. Jpn., 77 (2004) 779.
- 41) H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagao, S. Kusaba, S. Honda, D. Nogami, K. Shibata, Nature, 485 (2012) 478.
- 42) V. S. Airapetian, A. Glocer, G. Gronoff, E. Hebrard, W. Danchi, Nat. Geosci., 9 (2016) 452.
- V. S. Airapetian, R. Barnes, O. Cohen, G. A. Collinson, W. C. Danchi, C. F. Dong, A. D. Del Genio, G. Gronoff, M. Güdel, K. Herbst, W. G. Henning, C. H. Jackman, M. Jin, C. P. Johnstone, L. Kaltenegger, C. D. Kay, K. Kobayashi, W. Kuang, G. Li, B. J. Lynch, T. Lüftinger, J. G. Luhmann, H. Maehara, M. G. Mlynczak, Y. Notsu, R. M. Ramirez, S. Rugheimer, M. Scheucher, J. E. Schlieder, K. Shibata, C. Sousa-Silva, V. Stamenković, R. J. Strangeway, A. V. Usmanov, P. Vergados, O. P. Verkhoglyadova, A. A. Vidotto, M. Voytek, M. J. Way, G. P. Zank, Y. Yamashiki, Int. J. Astrobiol., 19 (2019) 136.

- 44) C. Chyba, C. Sagan, Nature, 355 (1992) 125.
- 45) A. Yamagishi, S. Yokobori, K. Kobayashi, H. Mita, H. Yabuta, M. Tabata, M. Higashide, H. Yano, Astrobiology, 21 (2021) 1451.
- 46) K. Kobayashi, H. Mita, Y. Kebukawa, K. Nakagawa, T. Kaneko, Y. Obayashi, T. Sato, T. Yokoo, S. Minematsu, H. Fukuda, Y. Oguri, I. Yoda, S. Yoshida, K. Kanda, E. Imai, H. Yano, H. Hashimoto, S. Yokobori, A. Yamagishi, Astrobiology, 21 (2021) 1479.
- 47) K. Kobayashi, T. Saito, in: M. Akaboshi, N. Fujii, R. Navarro-Gonzalez (Eds.), The Role of Radiation in the Origin and Evolution of Life, Kyoto University Press, Kyoto, 2000, pp. 25–37.
- 48) C. Chyba, C. Sagan, Orig. Life Evol. Biosph., 21

(1991) 3.

〈著者略歴〉

小林憲正:昭和52年東京大学理学部化学科卒,昭 和57年同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了,昭和57年末メリーランド大学化学進化研究所研究 員,昭和61年日本学術振興会特別研究員,昭和62年 横浜国立大学工学部講師,平成3年同助教授,平成 15年横浜国立大学大学院工学研究院教授などを経て, 令和2年より同大学名誉教授.専門:分析化学とアス トロバイオロジー.