

主論文の要約

生命起源解明へ向けた 2 方面からのアプローチによる研究：

太古代黒色チャートに含まれる微化石群の生息環境と
地球外天体によるアミノ酸およびペプチドの供給

Two approaches to understanding the origins of life: habitat environment of
microorganisms fossilized in Archaean black carbonaceous chert and extraterrestrial
delivery of amino acids and peptides.

菅原 春菜

名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

1. はじめに

生命はいつどのようにして誕生し、進化してきたのか？この問いは地球史における重要な未解決問題の 1 つである。生命の誕生を中心とした前後期間は「地球生命史における空白期」と考えられ、まだほとんど理解が進んでいない。この「地球生命史における空白期」について理解するためのアプローチとしては、生命の誕生の前後で 2 方面からのアプローチに分けられる。まず 1 つ目のアプローチの鍵となるのが「地球上に残る太古代の生命の痕跡」であり、これは地球上に地質記録として残る始原生命の痕跡から、「最初の生命はどのような生物で、どのような進化を遂げて地球上最古の化石記録として残る生命まで至ったのか？」を探求しようというものである。そして 2 つ目のアプローチの鍵となるのが「初期地球上に供給された有機物」であり、「いかにして生命の材料となる有機物が初期地球に供給され、それがどのような化学進化を遂げて最初の生命を誕生させるに至ったのか？」を理解しようとするものである。本研究では、これら 2 方面のアプローチから研究を行い、「地球生命史における空白期」についての新たな知見を得た。

2. 地球上に残る太古代の生命の痕跡から探るアプローチ

まず、第 1 のアプローチとして本研究が着目したのは西オーストラリア・ピルバラクラトンの 30 億年前の黒色チャート中に含まれる微化石群である。これらの微化石群を含む黒色チャート層は Mount Goldsworthy greenstone belt に位置

する Farrel Quartzite に属し、微化石群は極めて保存状態がよく、形態的多様性に富むという他の始生代の微化石と比べて極めて特異な特徴をもっている (Sugitani *et al.*, 2007). 本研究では、これらの多様な微化石群を含む黒色チャートの堆積環境から、微化石となった微生物群の生息環境を明らかにすることを目的として、この微化石を含む黒色チャートの他に同地域に存在する同年代の様々な産状の黒色チャートの希土類元素および Y(REE+Y)組成の分析を行った。REE+Y 組成は堆積岩や堆積物、特に化学的、生物的に沈殿した岩石の堆積環境を知るためのトレーサーとしてよく用いられるもので、始生代の岩石にも用いられている。本研究で分析した黒色チャート試料(51 試料)は Mount Goldsworthy および Mount Grant にて採取され、これらの試料はその岩石学的な特徴から 4 つのグループに分けられる。それらは laminated to banded chert (LC) (葉理が発達した、もしくは縞状のチャート)、vein chert (VC)(チャート岩脈)、stratiform chert associated with evaporite (CE1, CE2) (蒸発岩を伴う層状チャート)である。このうち微化石群が含まれるのは CE2 試料のみである。また、LC 試料(29 試料)は CE2 試料(13 試料)の上位の層序に位置し、VC 試料(計 5 試料)は CE2 試料の下位の変質した苦鉄質火山岩の中に含まれる。これらの黒色チャート試料の分析結果から、CE1 および CE2 試料は大陸から流入する河川水などの淡水が支配的な閉鎖性もしくは半閉鎖性の堆積盆において堆積し、その後、LC 試料が堆積する頃には海水の寄与が大きくなっていき、その堆積場は海洋のより水深の深い場へと移行していったことが示唆された。この結果から、30 億年前の淡水の流入が支配的な閉鎖性浅海域において既に多様な生態系が存在していたことが明らかになった。

3. 初期地球上に供給された有機物から探るアプローチ

第 2 のアプローチとして本研究が着目したのは、彗星や小惑星などの地球外物質により供給された有機物である。これらの地球外物質の中には多種多様な有機物が含まれることがわかっているが、その有機物の中でも本研究が注目したのは生命の誕生に必須と考えられているアミノ酸である。地球外物質の中でもそのアミノ酸組成がよくわかっているのが炭素質コンドライトであるが、これまで 80 種以上のアミノ酸が炭素質コンドライトの分析から同定されており (Botta *et al.*, 2007), その濃度は最高で 250 ppm に達する (Martins *et al.*, 2007). また彗星の塵の分析からも最も単純なアミノ酸であるグリシンが見つかった。

(Elsila *et al.*, 2009). しかしながら、地球外物質による初期地球へのアミノ酸供給について検証するためには、考えなければならない重要な問題がある。それは地球外天体が地球に衝突する際に被る衝撃波の影響である。衝撃波は瞬間的に高温高压状態を生み出すため、熱に弱いアミノ酸のような有機物は分解されてしまう可能性がある。また、衝撃波によりアミノ酸が別の物質へと変化する可能性も考えられる。そこで本研究では、天体衝突時の衝撃波が中に含まれるアミノ酸にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的として、以下の3種の衝撃実験を行った。

3.1. 炭素質コンドライトの衝突を模擬した衝撃実験

本実験では衝撃波によるアミノ酸の分解に着目した。炭素質コンドライトの衝突を模擬するため、マトリックスとして蛇紋岩粉末を選び、アミノ酸を混合して衝撃を与えるための出発物質を作成した。蛇紋岩を構成する蛇紋石($(\text{Mg, Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)は炭素質コンドライトの主要構成鉱物である。衝撃を与えるアミノ酸として選んだのはグリシン(Glycine: GLY), アラニン (Alanine: ALA), α -アミノ酪酸(α -Aminobutyric Acid: ABA), アミノイソ酪酸 (Aminoisobutyric acid: AIB)の4種類である。これらのアミノ酸は炭素質コンドライトに多く含まれる。混合比はアミノ酸各約 70 nmol ずつに対し、蛇紋岩粉末が 1mg である。与えた衝撃圧力は 3.2-35.3 GPa である。実験の結果、4種類のアミノ酸は衝撃圧力に対してほぼ同様の挙動を示し、その残存率は衝撃圧力の上昇に伴って 16.9 GPa まで徐々に 70%まで減少し、18.4 GPa にて 5-8%まで急激に減少した。本実験の結果から、アミノ酸の衝撃分解は μ 秒オーダーの極短時間にアミノ酸を分解する反応であること、その反応にアミノ酸の種類による違いはないことが明らかになった。これらの結果はアミノ酸の衝撃分解は大気圧下での熱分解とは異なる反応であることを示している。また、衝撃波がアミノ酸に及ぼす影響は従来考えられてきた以上に大きいことから、地球外天体によるアミノ酸供給について検証するためには、衝撃波の影響を考慮する必要があることを示唆する。

3.2. 彗星の衝突を模擬した衝撃実験

本実験では彗星という多量の氷が存在する天体の衝突において、アミノ酸の衝撃に対する挙動はどう変化するのか、またペプチドを生成するアミノ酸の重合反応は起きるのかどうかに着目した。彗星衝突を模擬するため、マトリックス

として氷とカンラン岩粉末(forsterite)の混合物を作成し、アミノ酸をアミノ酸：氷：カンラン岩粉末 = 0.1 : 0.8 : 1.0 の割合で混合した。Forsterite は彗星のケイ酸塩成分の主要構成鉱物である。衝撃を与えるアミノ酸は GLY および ALA(DL-ALA)を選び、1種類ずつ混合して2種類の出発物質を作成した。彗星衝突を模擬して極低温環境下(77 K)で衝撃を与えるため、出発物質を詰めたターゲットを液体窒素で満たした発泡スチロール容器の中に入れ、その状態のまま一段式火薬銃のチャンバーの中に設置して 26.3 GPa までの衝撃圧力を作用させた。実験の結果、GLY、ALA の両試料において 3 量体(トリペプチド)までのペプチドが生成することがわかった。また、生成したペプチドはアミノ酸が鎖状につながったジペプチドの方が環状のジケトピペラジンよりも 10 倍以上多かった。この結果は、アミノ酸水溶液に室温で衝撃を与える実験を行った Blank *et al.* (2001)の結果とは矛盾するが、この相違は衝撃時の環境が生成するペプチドの組成に影響を与えることを意味している。おそらく、衝撃波面での反応において水が極低温の氷として存在することが鎖状ペプチドの生成を促す結果になっている可能性がある。本実験の結果は、彗星衝突が化学進化にとって重要な物質である鎖状ペプチドの供給源となった可能性を示唆している。

3.3. 衝撃時の温度を変えた衝撃実験

アミノ酸の衝撃化学反応のさらなる理解のため、その温度・圧力に対する依存性を調べるためである。本実験の出発物質はカンラン岩粉末にアミノ酸を 1 : 10 の質量比で混合したものであり、GLY と ALA の 2 種類のアミノ酸を 1 種類ずつ混合して 2 種類の出発物質を作成した。本実験では 3 通り(液体窒素温度：77 K、常温：301 K、高温：473 K)に衝撃時の温度条件を変化させた。77 K での実験は前述の彗星の衝突を模擬した衝撃実験と同様に行い、473 K での実験はターゲットをヒーターで取り囲むことで実現した。実験の結果、301 K と 77 K の実験はアミノ酸の分解およびペプチドの生成の圧力が異なるものの、似たような挙動を示し、アミノ酸は衝撃圧力の上昇に伴って減少し、20-30 GPa で急激な減少を示した。しかし、この急減する圧力は 77 K の実験の方が 301 K の実験よりも高圧であった。また、ペプチドの生成についてはアミノ酸の分解に対応してその生成率が変化した。これらの結果について温度を軸にして見直すと、77 K および 301 K の実験結果は 1 つのグラフ上にのることから、衝撃によるアミノ酸の分解およびペプチドの生成は圧力よりも温度に依存した反応であることが

わかった。一方、473 Kの実験結果は他の2つの実験とは異なる挙動を示し、他の2つの実験から予想される圧力よりも低圧でアミノ酸の多くが分解された。この原因は確かではないが、衝撃時に473 Kに保つことでアミノ酸がより分解されやすい状況になっていた可能性がある。

3.4.3 種の衝撃実験のまとめ

これらの3種類の衝撃実験の結果から、アミノ酸の衝撃化学反応は大気圧下での通常の熱分解とは異なる反応メカニズムをもち、アミノ酸をより速く分解する反応であること、そして温度に依存した反応であることが明らかになった。これらの特異性の要因として衝撃波面における反応が大きく関与している可能性がある。また、衝撃により3量体までのペプチドが生成することもわかり、地球外天体の衝突が初期地球への重要なペプチド供給源となった可能性が考えられる。本研究の結果は、地球外天体によるアミノ酸やペプチドの供給について検証するための重要な基礎データを提供するものである。