

2018. 7. 8

第120回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

代表・世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail: jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail: chaino@cf6.so-net.ne.jp

■ホームページ■

<http://abductionri.jimdo.com/>

第120回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

第119回アブダクション研究会のレポートの取りまとめに相当の時間を要しました結果、本状の配信が大幅に遅れてしまいましたことをお詫び申し上げます。

このため、『第120回アブダクション研究会のご案内』は別途の簡易案内状をもって関係者に連絡配信し、予定通りの2018年5月19日に第120回アブダクション研究会を実施いたしました。

第119回アブダクション研究会のご報告をします。

■2018年3月31日（土）に開催しました第119回アブダクション研究会は、『ピーター・ワード／ジョゼフ・カーシュヴィンク著＝梶山あゆみ訳／2016河出書房新社＝を輪読研究して「進化とは何か」を考える』という重要なテーマで開催し、大河原敏男氏と世話人の福永征夫が分担して解説発表をいたしました。

■藤本悦郎、村上忠良夫妻、北村晃男の各氏が出席され、終始積極的に質疑と議論を展開されました。

そして「地球の生命の起源と進化に関する先進的な新発見」を記述する「新しい生命史」の広く深く輻輳する豊かな知見を研鑽し探求する、この上なく有意義な機会を共有することができました。

■先ずは、大河原敏男氏と参加者の皆様に心より感謝しお礼を申し上げます。

【1】「新しい生命史」に登場する知見の幅と量は真に膨大で深奥です

ピーター・ワードとジョゼフ・カーシュヴィンクが著した「生命の起源と進化」に関する「新しい生命史」に登場する知見の幅と量は真に膨大で深奥です。

【2】多様な領域学の知見とそれらの境界域で発見された事実と想定される仮説の数々が包含されています

ピーター・ワードとジョゼフ・カーシュヴィンクが記述する「生命の起源と進化」に関する「新しい生命史」という注目すべき広域学には、地質学、天文学、古生物学、化学、遺伝学、物理学、動物学、植物学、など、多様な領域学の知見とそれらの境界域で発見された事実と想定される仮説の数々が包含されています。

【3】広域学としてより簡明に把握して、未来の人間の行動によりの確に結びつけていくための何らかの新しい筋道を見出すことはできないものでしょうか

われわれが、時代を隔てて営々と積み重ねられ、多様に拓かれてきた「生命の起源と進化」をめぐる人類の最大級の知識群を、広域学としてより簡明に把握して、未来の人間の行動によりの確に結びつけていくための何らかの新しい筋道を見出すことはできないものでしょうか。

【4】わたくし（世話人）は『自然の循環と融合のモデル』を提出しています

わたくし（世話人）が提出しています『自然の循環と融合のモデル』によりますと、自然や生命・社会の系には、①安定度を増大させる保存の方向性、すなわち、内部エネルギーを減少させる方向性と、②自由度を増大させる変革の方向性、すなわち、エントロピーを増加させる方向性、の相補的な二つのベクトルが相互に作用し、循環して、融合という臨界性を実現し、システムの恒常性（ホメオスタシス）や定常性が維持されているものと考えられます。

【5】中沢弘基（物質・材料研究機構名誉フェロー）著『生命誕生—地球史から読み解く新しい生命像』の卓越した理論と実証実験のすばらしい成果に瞠目しています

中沢弘基（物質・材料研究機構名誉フェロー）著『生命誕生—地球史から読み解く新しい生命像』（2014 講談社）では次のように述べられています。

（1）降雨現象をはじめ、地球表層の海洋や大気を動かす主たる熱源（99.97%）は太陽からの輻射熱ですが、その熱は年単位の短い時間内で使われたり逆に放射されて、収支は打ち消し合ってゼロになります。

しかし、地球内部の熱エネルギーは宇宙空間に向かって一方的に、地球創生直後は急激に、そしてその後は徐々に46億年間ずっと海洋や大気の対流と降雨現象を経由して放出し続けられてきました。

（2）地球内部の熱エネルギーの大半は、地球誕生時に微惑星や隕石が衝突して、それら

が凝集することによって得た重力エネルギーです。

地球を融解するほど膨大だった熱エネルギー（ $\sim 10^{31}$ ジュール）はいったん地球内部に蓄えられて、その後現在まで「固体地球は一方向的に冷却している」と考えられています。

（3）地球から宇宙空間に放出されている熱量のうち、地球誕生時に得た熱と放射性元素の崩壊によって生じる熱の比率はこれまで不明でしたが、2011年、地球ニュートリノの観測から明らかになりました。

その間得られたデータから、ニュートリノを発生する放射性元素の核崩壊による熱量を逆算して、地球全体で約21兆ワットのエネルギーが生じていることがわかりました。

この値は、現在地球から放出されている全熱流量（約44.2兆ワット）のほぼ半分です。したがって残りの半分は、46億年前に得た熱エネルギーを現在でも宇宙空間に放出して、地球は冷却し続けていることがはっきりしました。

（4）熱を放出して地球が冷却すると、地球全体のエントロピーは減少します。

その分、地球はだんだんに複雑な構造に秩序化（組織化）しなければなりません。

熱力学第二法則の示すところです。

大まかに言えば、創成期の衝突エネルギーでいったん熔けて均質になった地球は、熱の放出にともなって温度が下がり、重い金属元素は核に、軽いアルミニウムやケイ素の鉱物はマントルに、そしてもっと軽い水素（H）、炭素（C）、窒素（N）、酸素（O）などの軽元素は水や大気となって地表に濃集する、そういう層構造に“秩序化”したのです。

（5）熱の放出が続く限り、地球の構造はますます複雑になるはずで

す。陸をつくり離合集散させるプレートテクトニクスやプルームテクトニクスは、内部の熱を地表に運んで熱を放出するメカニズムでもあり、地球を秩序化するメカニズムでもあるのです。

陸地や海の形状は時代とともに複雑になり、核・マントルの層構造もさらに細分化するとともに3次元的に複雑になるでしょう。

地球の進化とは、熱の放出によるエントロピーの低下による構造の秩序化なのです。

地球にあるH、C、N、Oなどの軽元素、“地球軽元素”もエントロピーの減少によって秩序化します。

その結果が有機分子の生成であり、生命の発生、さらにはその進化なのです。

すなわち、「生命の発生と生物進化は、地球のエントロピーの減少に応じた、地球軽元素の秩序化（組織化・複雑化）である」といえるでしょう。

（6）地球軽元素の秩序化の結果として誕生した地球の生命は、その後も進化し続けています。

このまま地球の熱放出が続いて、地球のエントロピーが減少し続けられれば、今後も地球の構造はより秩序化して複雑になり、生物も生物系もさらに複雑に進化するはずで

す。そして万物の進化は、地球創生期に得た熱量が放出し尽くされて、それ以上温度が下がらなくなるまで、すなわち、放射性崩壊で発生する熱量と等しくなるまで続くはずで

【6】「地球の構造がより秩序化して複雑になり、生物も生物系もさらに複雑に進化する」という現象は、2つの相補的なベクトルの狭間で発現している地球史における自己組織化の現象だということができるようです

中沢弘基著『生命誕生—地球史から読み解く新しい生命像』において、

「地球の創生期に、微惑星や隕石が衝突して、全地球が熔融している状態」は、『自然の循環と融合のモデル』では、【4】②の「自由度を増大させる変革の方向性、すなわち、エントロピーを増加させる方向性」を示すカオス化のベクトルに該当します。

そして、「創生された地球が地球内部の熱エネルギーを宇宙空間に向かって一方的に、地球創生直後は急激に、そしてその後は徐々に 46 億年間ずっと海洋や大気の流れと降雨現象を経由して放出し続け、地球のエントロピーを減少させている状態」は、『自然の循環と融合のモデル』では、【4】①の「安定度を増大させる保存の方向性、すなわち、内部エネルギーを減少させる方向性」を示す秩序化のベクトルに該当します。

宇宙的なシステム論の視点から見ると、「地球の構造がより秩序化して複雑になり、生物も生物系もさらに複雑に進化する」という現象は、上記の2つの相補的なベクトルの狭間で発現している地球史における自己組織化の現象だということができるようです。

【7】生命史の基本指標となる酸素の濃度と炭酸ガスの濃度は概ね逆方向の動きを示しているように見えます

始生代から原生代への移行期に発生する大酸素事件以降、生命史の基本指標となる酸素の濃度と炭酸ガスの濃度は概ね逆方向の動きを示しているように見えます。

(1) 酸素濃度が上昇し、炭酸ガス濃度が下降する時代は、炭素の長期循環のような地球物理的な条件がないとすれば、植物の活動を主成分とする還元的作用を主成分とする時代ではないかと考えられます。

これは寒冷に向かう時代だと考えられ、行き過ぎるとスノー・アース現象や生命の絶滅にもつながるのではないかと考えられます。

『自然の循環と融合のモデル』では、【4】①の「安定度を増大させる保存の方向性、すなわち、内部エネルギーを減少させる方向性」を示す秩序化のベクトルに該当する時代です。

(2) 炭酸ガス濃度が上昇し、酸素濃度が下降する時代は、炭素の長期循環のような地球物理的な条件がないとすれば、動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代ではないかと思われれます。

これは温暖に向かう時代だと考えられ、行き過ぎると地球温暖化現象や生命の絶滅にもつながるのではないかと考えられます。

『自然の循環と融合のモデル』では、【4】②の「自由度を増大させる変革の方向性、すなわち、エントロピーを増加させる方向性」を示すカオス化のベクトルに該当する時代です。

(3) 生命誕生以来の生物の環境変化への適応と進化の現象は、上記の(1)と(2)の2つの相補的なベクトルの狭間で発現している生命史における自己組織化の現象だということ

ことができるようです。

この(1)と(2)の相補的なベクトルは、生命史の小時間・小空間、中時間・中空間、そして大時間・大空間のそれぞれにおいて、相互に交替して作用しているものと考えられます。

【8】ピーター・ワードとジョゼフ・カーシュヴィンクは大規模な大量絶滅について、下記のように記述しています。

ピーター・ワードとジョゼフ・カーシュヴィンクは大規模な大量絶滅について、下記のように記述しています。

ただし、文中の⇒から右のコメントは、わたくし(世話人)の解釈です。

「本書では、大規模な大量絶滅が実際には10回起きたと考えている。

いずれも、PETM(暁新世-始新世境界温暖化極大イベント)や、ジュラ紀、白亜紀に起きた小規模の絶滅とは区別されてしかるべきものだ。

10回を年代順に並べると次の通りである。

1. 大酸化事変による絶滅 ⇒ シアノバクテリアの光合成活動を主成分とする還元的作用を主成分とする時代
2. クライオジェニアン紀の絶滅 ⇒ 植物の活動を主成分とする還元的作用を主成分とする時代
3. エディアカラ紀後期の絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
4. カンブリア紀後期のSPICE イベントによる絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
5. オルドビス紀の大量絶滅 ⇒ 植物の活動を主成分とする還元的作用を主成分とする時代
6. デボン紀の大量絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
7. ペルム紀の大量絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
8. 三畳紀の大量絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
9. 白亜紀-古第三紀境界の絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化的作用を主成分とする時代
10. 更新世末期～完新世にかけての大量絶滅 ⇒ 動物の活動を主成分とする酸化の

250 万年前から現在まで。
気候変動と人間の活動による絶滅。
私たちが憂慮すべきはこの 10 番目である。」

作用を主成分とする時代

■この案内状の最後部には、2部構成のレポート資料を掲載しました。

【第1部】

『「生物はなぜ誕生したのか-----生命の起源と進化の最新科学」
ピーター・ワード／ジョゼフ・カーシュヴィンク著
＝梶山あゆみ訳／2016河出書房新社＝を輪読研究して
「進化とは何か」を考える

【本書の序章+20章のうち、第8章までの範囲に絞って、周密に抜粋し引用再録をさせていただきます】

【第2部】

オルドビス紀以降における生物の進化

【D・サダヴァ他著＝石崎泰樹・斎藤成也監訳「大学生物学の教科書／第4巻進化生物学」（2014・7講談社）から重点的に抜粋し引用再録をさせていただきます】

■案内状の最後部のレポート資料を、粘り強く、繰り返しお読みいただき、
『生命の起源と進化』の広域学について、広く深く研鑽する機会になさってください。
また、それらをこれからの研究活動とアブダクション研究会での探究に大いに生かしていただくようお願いをいたします。

記

◇ 日時： 2018年5月19日（土） 13：00～17：00（本会）
17：15～19：15（懇親会）

◇ 場 所： 3331 Arts Chiyoda 2階・会議室

〒101-0021 東京都千代田区外神田6丁目11-14（旧・練成中学校内）

TEL 03-6803-2441（代表）

東京メトロ・銀座線 末広町下車④出口 徒歩10分 練成公園隣の旧・練成中学校内です。

*当日の連絡先（福永征夫・携帯電話）080-3515-9184



◇ テーマ： 輪読研究

『「生命、エネルギー、進化----Why is Life the Way it is?」
ニック・レーン著＝斉藤隆央訳／2016・みすず書房＝を
輪読研究して「進化とは何か」を考える』

===絶え間なく流動する生体エネルギーが、40億年の進化の成り行きに
さまざまな制約を課してきたと著者はいう。
その「制約」こそが、原初の生命からあなたに至るまでのすべての生物を彫刻
してきたのだ、と。 ===

■いよいよ、「進化」という自然の「高深度・広域・高次の知識」に挑戦する「輪読研究」の第二弾が始まります。

●本書の章立ては、次の通りです。

はじめに----なぜ生命は今こうなっているのか？

第一部 問題

- 1 生命とは何か？
- 2 生とは何か？

第二部 生命の起源

- 3 生命の起源におけるエネルギー
- 4 細胞の出現

第三部 生命の起源

- 5 複雑な細胞の起源
- 6 有性生殖と、死の起源

第四部 予言

- 7 力と栄光

エピローグ----深海より

■■会員の皆様には、知人や友人もお誘いいただいて、
積極的なコミットメントをお願いします■■

◇プログラム：

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| (1) 輪読研究[PART-1] | <u>13:00~14:20</u> |
| <小休止> | <u>14:20~14:30</u> |
| (2) 輪読研究[PART-2] | <u>14:30~15:50</u> |
| <小休止> | <u>15:50~16:00</u> |
| (3) 総合的な質疑応答： | <u>16:00~16:30</u> |
| (4) 諸連絡： | <u>16:30~17:00</u> |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | <u>17:15~19:15</u> |

【第120回 アブダクション研究会の出欠連絡について】

- 5/14(月)までに、下欄の要領で、必ず、ご返信ください。
- なお、研究会会場では、飲み物のサービスがありませんので、皆様が各自で、ペット・ボトルや水筒をご持参ください。

第120回 アブダクション研究会(5/19)の出欠連絡

- 5/14(月)までに、**必ず、ご返信ください。**
- 研究会、懇親会とも、必ず、下記により、ご連絡ください。
新会場のため、研究会、懇親会とも、より綿密な準備が必要なことを、何卒、ご理解ください。

FA X： 042-356-3810
E-mail： chaino@cf6.so-net.ne.jp 岩下 幸功 行

出席

出席

- 5/19(土)の研究会に、未定ですが調整します。●懇親会に、未定ですが調整します。
欠席 欠席

ご署名_____

■次々回 2018年7月度の第121回アブダクション研究会は、

●2018年7月21日(土)に、3331 アーツ千代田1階101室にて、開催いたしますので、皆様には今からご予約いただき、積極的にご参加ください。

●2018年7月の研究会

発表者 : 坂本 牧葉 氏 (岐阜市立女子短期大学・生活デザイン学科)

テーマ : 『「生命の現象(ザ・ネイチャー・オブ・オーダー)----建築の美学と世界の本質」クリストファー・アレグザンダー著=中埜博監訳/2013・鹿島出版会=を研鑽して「生命的な環境デザインのあり方」を考える』

■ 皆様、どうぞ、ご期待ください ■

<定例アンケート調査>

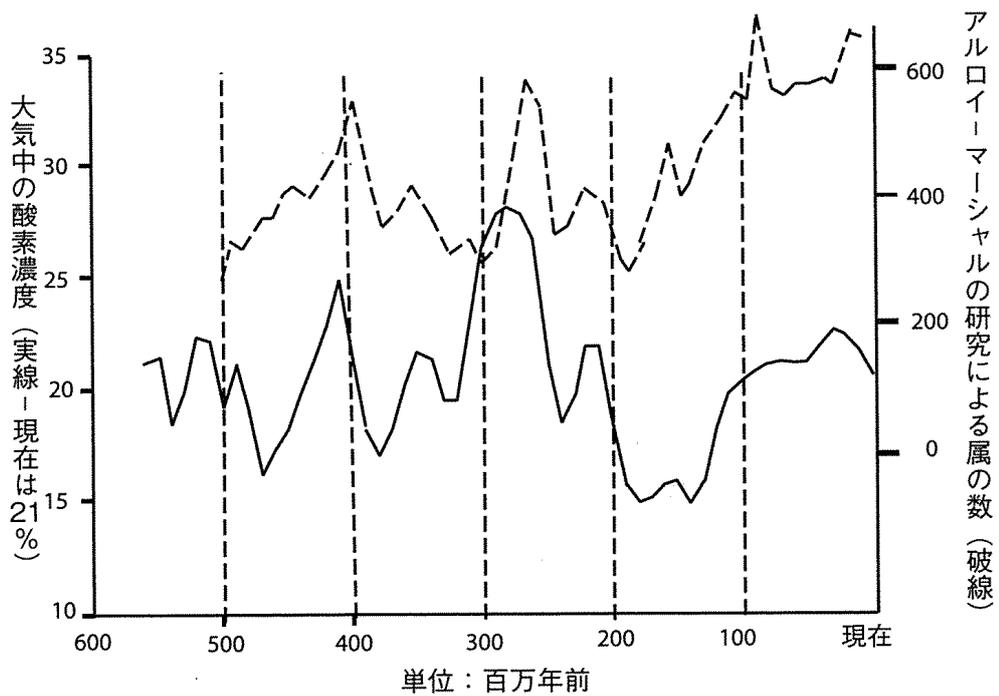
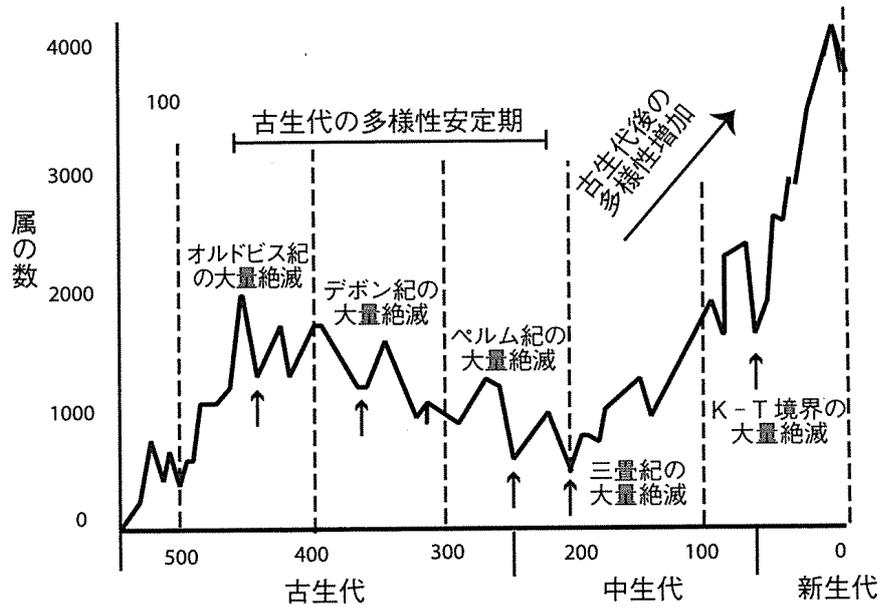
もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。

皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで(第1回~第119回)の研究発表やなされた議論(「議事録」を参照下さい)に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは?
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。

代		紀 (100 万年前)	代	紀 (100 万年前)			
顕生代	新生代	新第三紀	先カンブリア時代	新原生代	エディアカラ紀	542	
		古第三紀			クライオジェニアン紀	635	
		トニアン紀			850		
	中生代	白亜紀			中原生代	ステニアン紀	1000
						エクタシアン紀	1200
		ジュラ紀		145		カリミアン紀	1400
		三畳紀		200			1600
	古生代	ペルム紀		252	古原生代	スタテリアン紀	1800
		石炭紀		299		オロシリアン紀	2050
		デボン紀		359		リアキアン紀	2300
		シルル紀		416		シテリアン紀	2500
		オルドビス紀		444	始生代	新始生代	2800
		カンブリア紀		488		中始生代	3200
				542		古始生代	3600
				635		原始生代	未定義
	生新代原	エディアカラ紀			冥王代	4200	
						4567	

最新版の地質時代区分 (Felix M. Gradstein et al., "A New Geologic Time Scale, with Special Reference to Precambrian and Neogene," *Episodes* 27, no.2 (2004): 83-100 に最新情報を加えたもの)



上のグラフ：カンブリア紀以降の海生無脊椎動物の多様性の推移。ジャック・セブコスキーが発見したもの。この曲線は、長期にわたる膨大な数の図書館文献調査に基づくもので、古生代に属の数が急増してから安定状態になり、ペルム紀の大量絶滅で減少することを示している。以後は、現在に至るまで属数が大幅に増加したというのが彼の見解だ。下のグラフ：酸素濃度（ロバート・バーナーのモデルによる）と、ジョン・アルロイらが発表した（セブコスキーよりも）新しい属数の推定値を表したもの。酸素濃度の増減と属数の増減に強い相関関係が見られることに注目してほしい（ピーター・ワードの未発表資料より）。

はじめに

【1】

これから、私たちが現在へと至った長い道のりと、遠い祖先たちが経験した様々な試練について見ていく。

火、氷、宇宙からの強烈な一撃、毒ガス、捕食者の牙、過酷な生存競争、死を運ぶ放射線、飢餓、生息環境の激変。

そして地球上のいたるところに棲みつこうと、飽くことなく繰り広げられた数々の闘いと征服。

その一つ一つが、今この世に存在するすべてのDNAに爪痕を残している。

あらゆる**危機**が、あらゆる**勝利**が、様々な**遺伝子**を足したり引いたりすることで**ゲノム**を**変化させてきた**。

まるで鉄の塊が鍛えられるように、私たちはみな壊滅的な大厄災によって灼かれ、時間によって冷やされてきたのである。

【2】

戦争はつねに人類に大きな犠牲を強いてきた。

肉体の面でも、経済の面でも、精神の面でも。

生命の歴史を眺めてみると、そうした人間の戦いと明らかに似ている点がいくつも見つかる。

現に、捕食者の武器（鉤爪、歯、ガス攻撃、獲物を仕留める毒トゲ）が強力になれば、捕食される側も素早く対抗策を発達させてきた。

そして体を覆う鎧や、動く速度、隠れる能力などを向上させ、場合によって防御のための武器をもつに至る。

これらはすべて「生物の軍拡競争」と呼ばれるものだ。

【3】

進化の過程で起きる重要な出来事は、二度と再現できないものが多い。

たとえば現在は、すでに競争力の高く効率のいい生物が長い年月をかけて地球の生物圏を満たしてきたため、**動物の基本的な体制（体のつくり）がすべて現われた「カンブリア爆発」がもう一度訪れる見込みは低い。**

【4】

ところが、**生きて多様化することとは正反対の現象であれば、実際に何度も繰り返されるおそれがある。**

一つには**種の絶滅**。

さらにはもっと大規模な、太古の地球をたびたび襲った**大量絶滅**だ。

【5】

私たちは二酸化炭素を大気中に送り込むばかりで、重要な早期警戒サイレンに耳を貸そうとしていない。

じつは、過去に**10回以上起きた大量絶滅のときと現在とでは、二酸化炭素濃度の急速な上昇という共通点**がある。

ほとんどの**大量絶滅**は隕石の衝突が原因なのではなく、**火山活動による温室効果ガスの急増**とそれに伴う**地球温暖化**によってもたらされた。

これが今世紀に登場した恐ろしい「温室効果絶滅」説であり、過去の大量絶滅に巻き込まれた種の圧倒的大多数はそのせいで滅びたとしている。

【6】

温室効果による大量絶滅が、いつ、どこで、どのようにして起きたかについては、すでに様々なデータが得られている。

サイレンに耳を傾ける者にとって、絶滅の危機は十分に現実味を帯びたものだ。

にもかかわらず、過去の教訓に目を閉ざし、あるいは気づけずにいる者のなんと多いことか。

それが私たちの未来になるかもしれないというのに。

生命の歴史からは早期警戒のサイレンが鳴り響き、人為的な温室効果ガスの排出を減らさなければならないと告げている。

しかし、人類の歴史からは、次のような別の声が聞こえてくるのも事実だ。

おそらく人間は、**気候が原因で多数の死者が出て選択の余地がないところまで追い込まれない限り**、そんな警告など**気にも留めず**、**ダメージを回復する努力もしないだろう**、と。

【7】

一冊で生命の「全史」を綴った最後の書は、イギリスの古生物学者でサイエンスライターのリチャード・フォーティ著『生命 40 億年全史』である。

1990 年代半ばに書かれてベストセラーとなった素晴らしい本だ。

【8】

しかし科学の歩みは速い。

当時はまだ、今と比べて不明な部分が多かった。

90 年代半ばにはほとんど存在すらしていなかった研究分野も二つある。

宇宙生物学と地球生物学だ。

色々な計器類が進歩したおかげで**新たな事実が明らかになると同時に**、**未知の時代や未知の分類群に属する化石**も見つかってきている。

【9】

研究のやり方も変化した。

たとえば、地質学、天文学、古生物学、化学、遺伝学、物理学、動物学、植物学といったなじみ深い確固たる学問分野は、それぞれが独自の規則と対象範囲を備えている。

ところが、今や重要な**画期的発見**は、そうした**学問分野の境界線が交わる場所**でなされるケースが多いのだ。

【10】

著者らが選んだ歴史を三つのテーマに基づいて示していきたい。

一つは、**生命の歴史が最も強い影響を受けてきたのは環境の激変**だという立場である。

その影響力はほかの様々な力を合わせたより大きく、チャールス・ダーウィンが初めて気づいた**「時間をかけて徐々に起きる進化」**をも上回る。

【11】

ダーウィンが師事した当時主流派の教師たちは「**斉一説**」〔訳注 過去の地質現象も現在の自然現象と同じ作用の結果として生じたとする考え〕を信奉していた。

これは二世紀以上にわたって地質学の基本原理とされてきたものであり、18世紀末にスコットランドの地質学者ジェームズ・ハットンが初めて唱え、19世紀前半にやはりスコットランドの地質学者チャールズ・ライエルの著作によって広まった。やがてこの説が、ダーウィンを含む何世代もの若い自然科学者たちの科学的指針となっていく。

【12】

だが、6500万年前の隕石の衝突が恐竜を死に追いやったと判明したことは、「新・天変地異説」とも呼ばれる考え方へと大勢が大きく傾くきっかけとなった。これは、斉一説の前に優勢だった「天変地異説」の流れを汲むものである。

【13】

太古の世界や進化の速さを説明するうえで斉一説は時代遅れであり、その誤りは概ね証明されている。

実際、遠い昔の地球は、徐々にではなく突然に起きる事象に何度も見舞われた。

その理由を考えるのに、現代を物差しにしてもあまり役に立たない。

そのいい例が「全球凍結（スノーボールアース）」や「大酸化事変」であり、「カンフーワールドの海」である。

硫化水素が充満するこの海は10億年以上もの間存在し続け、複雑な動物の誕生を遅らせる原因を作った。

【14】

あるいは、恐竜を巻き込んだK-T境界（白亜紀と新生代第三紀の境目）の大量絶滅にしてもそうで、同じような事例は現代には見当たらない。

生命の誕生を可能にした大気や海も、今とは性質が異なっていた。

さらには、大気中の二酸化炭素濃度が高すぎて、地球のどこを探しても氷の一片すら見つからない時代もあった。

【15】

現代を手がかりにしても、過去の大半については読み解くことができない。

それどころか現在は、約1万年前に終わったばかりの更新世を知るための鍵にすらほとんどなれないのだ。

このことが足かせとなって、私たちは過去を十分に見通して深く理解することができずにいる。

【16】

二つ目のテーマだが、私たちは炭素を基本とした生物であり、「長鎖」の炭素分子でできている（炭素原子がつながってタンパク質を構成）。

しかし、生命の歴史に最も大きな影響を与えたものは単純な三種類の気体分子である。

酸素、二酸化炭素、硫化水素だ。

さらに踏み込むなら、地球上の生命の性質と歴史を方向づけてきた何より重要な元素は、硫黄だといっていってもいいかもしれない。

【17】

三つ目のテーマは、現存する生物が今のような顔ぶれになったことには、生物自体ではなく生態系の進化が最も大きな要因として働いているということだ。

サンゴ礁、熱帯林、深海の「熱水噴出孔」周辺など、数え上げればきりが無い。どの生態系も、役者は違えど台本が同じ芝居のようなものであり、それが気の遠くなるような年月をかけて演じられてきた。その一方で、まったく新しい生態系が現われて、それまでとは違った種類の生物がそこに暮らすようになった時代もある。たとえば空を飛べる生物や、泳いだり歩いたりできる生物の登場は、いずれも進化の大きな転換点となる新機軸であり、世界を変える結果となった。またどの場合も、新しい生物が新しい種類の生態系の誕生を促している。

第1章 時を読む

地質時代区分の歴史

【18】

地質学という研究分野が生まれて、現在のものに似た地質時代区分が使われ始めたのは19世紀前半のことである。1800年より前、地上で観察される岩石は種類ごとに別々の時代に属していると思われていた。

【19】

最も古いと見られていたのが、山や火山の中核部を形成する硬い火成岩や変成岩である。堆積岩はそれらより新しく、大規模な洪水の連続から生まれたとされた。これは「水成論」と呼ばれて主流の説となり、やがて堆積岩自体の種類によって時代も異なると考えられるまでになる。

たとえば白亜は、ヨーロッパ大陸の北限からアジアにかけて広く分布しているが、すべて同一の時代のものとみなされた。砂岩であるとか、より粒の細かい泥岩や頁岩（けつがん）などはまた別の時代である。

【20】

ところが1805年、状況を一変させる発見がなされる。イギリスの地質学者ウィリアム・スミスが、年代を決めるのは岩石の種類ではなく、岩石に含まれる化石だと初めて気づいたのだ。化石を手がかりにすれば、離れた地域の地層が同時代のものかどうか判断できる。スミスは、岩石の種類が同じでも時代は異なる場合があり得ることや、遠く離れた地域間で同じ種類の化石が同じ順番で見つかることも明らかにしていった。

この考え方は「化石による地層同定の法則」と呼ばれるようになり、近代的な地質時代区分が誕生するきっかけを作った。鍵を握っていたのは、化石に保存された生命だったのである。こうして、化石をもとに地層の年代の違いを区別できるようになった。

【21】

最も大きな地質時代区分は、化石をまったく含まない岩石が属する古い時代であり、化石がよく見つかる岩石の下に位置している。

化石のある岩石のうちで最も古いものの時代、ウェールズ地方の地名を取って「カンブリア紀」と名づけられ、それ以前のすべての岩石は「先カンブリア時代」のもものとされた。カンブリア紀以降の時代はまとめて「顕生代」（「目に見える生物が生息した時代」という意味）と命名される。

カンブリア紀より前の時代は、古い順に「冥王代」「始生代」「原生代」と呼ばれるようになった。

【22】

まもなく、化石を基準にして顕生代の中もいくつかの「紀」に区切られていくことになる。数十年にわたって科学的な手法で化石を収集・管理・記録し、特定の化石群が見つかる最も古い時代と最も新しい時代を突き合わせていった結果、顕生代の地層は大きく三つに分かれることがわかった。

最も古い区分に「古生代」、次に「中生代」、最も新しいものには「新生代」という名称が与えられる。

【23】

この三つの「代」が正式に加わる前から、現在使われている「紀」の名前はほとんど出揃っていた。

古い順に、まず古生代は「カンブリア紀」「オルドビス紀」「シルル紀」「デボン紀」「石炭紀」、および「ペルム紀」に分かれる。

中生代を構成するのは、「三畳紀」「ジュラ紀」「白亜紀」だ。

新生代の中の区分、古第三紀と新第三紀（かつてはこの二つを合わせて「第三紀」と呼んだ）、そして第四紀である。

【24】

生命の歴史という観点から見て最も大きな変化は、原生代に「クライオジェニアン紀」と「エディアカラ紀」が加わったことである。

これらは、生命が動物を誕生させるための準備を整えていた時代といえる。

だが、生命を養えるようになるために、動物の進化どころか生物自体が生まれるよりはるか昔から地球はいくつもの激変を経験しなくてはならなかった。

第2章 地球の誕生----46 億年前～45 億年前

「地球型惑星」とは何か

【25】

地球がどういう惑星であるかについてとりわけ関心を持っているのが天文学と宇宙生物学であり、この二つの研究分野では様々な定義が提案されている。

最も広い定義では、表面が岩石で核がそれより高密度であれば地球型惑星だとしている。

最も狭い定義では、「私たちが知っているような生命」が必要とする重要な条件を満たすことを求めている。

例えば、地表に液体の水が形成されるような適度な気温や大気などだ。

【26】

「地球型惑星」という言葉は、現代の地球に似た惑星という意味で用いられることが多いが、地球は誕生してから45億6700万年の間に大きく姿を変えてきた。

「地球型」でありながら生命をまったく維持できない期間も何度かあったし、動物や高等植物のような複雑な生命が誕生し得なかった時間がその歴史の大半を占める。

【27】

地球上にはほぼ全ての時代を通して水が存在してきた。

まだ形成半ばだった地球に、火星サイズの原始惑星（ティアと呼ばれる）が衝突して月が作られたが、それから1億年後の地球にはすでに液体の水があった。

原初の地球に水が存在したことは、ジルコンという砂つぶのような鉱物から明らかにされている。

このジルコンは、放射年代測定により44億年前のものであると確認されたものだ。

ジルコンに含まれる酸素の同位体を調べたところ、地殻プレートの沈み込みプロセスによって海水がマントルに吸い込まれた形跡が見つかった。

当時は太陽の活動が今よりはるかに弱かったとはいえ、大気中には十分な量の温室効果ガスが含まれていたため地球が冷えることはなかった。

だが、太陽の熱より重要だったのは火山である。

火山活動は現在より10倍活発だったと見られており、地球自体からほとぼしる大量の熱が海と陸地を温めた。

そのため、惑星形成時の高温が冷めて、最初の10億年間よりはるかに低い温度になるまで、地球は生命を育める環境になかったと指摘する宇宙生物学者もいる。

生命が火星のような別の惑星で最初に誕生したと考えたくなる理由はいくつもあるが、このこともその一つだ。

しかし、太陽系ができたばかりの頃には、地球型の惑星が他にもあった。

金星である。

初期の金星は太陽系のハビタブルゾーン（居住可能区域）に含まれていたはずだ。

現在はいわゆる暴走温室効果によって表面温度が500℃近くに達しているため、よもや生命はいないだろう（大気中に微生物が存在するという説もあるが、可能性は相当に低いと著者らは考える）。

対照的に、過去の火星には水が流れていた時期があるのは間違いない上、水的作用で石を丸くしたり扇状地を作ったりするほどの大きな川があったこともわかっている。

今ではその水は失われているか、凍っているか、きわめて薄い大気中に水蒸気としてかすかに漂うのみだ。

質量が小さいためにおそらく火星ではプレートの活動が起きず、地殻の再利用も行なわれない。

そのため、金属核の熱勾配が小さくなって対流が生じず、結果的に磁場が発生しないので大気が太陽風から守られない。

しかも太陽からの距離が地球より長いことから、永続的な「全球凍結」状態に移行しやすかった。

かつて火星に生命が誕生していたのなら、放射性崩壊熱を熱源として今も地表下に存在している可能性はある。

【28】

約 46 億年前より以前、様々な大きさの「微惑星」が衝突・合体を繰り返して原始地球が形成された。

微惑星とは、凍った気体や岩石でできた小天体のことで、黄道面（太陽系の全惑星が軌道を描く平面）に集まっていた。

45 億 6700 万年前（かなり具体的に特定されている）、火星サイズの天体が原始地球に衝突したと見られ、鉄とニッケルからなる双方の天体の核が合体した。

また、衝突後にケイ素などが蒸発してつかのま「大気」が発生し、それが凝固して月ができる。

その後数億年の間、新たに生まれた地球には隕石が激しく降り注いだ。

形成途中の地表温度は溶岩並みに高く、しかも隕石の重爆撃を受けていたのだから、この時期の地球が生命を育める環境になかったことは間違いない。

巨大な彗星や小惑星が絶えず降り注ぐことで生じるエネルギーだけでも、表面の岩石を残らず溶かすには十分で、約 44 億年前になるまで地表はつねに熔融状態にあったはずだ。液体の水が形成される見込みは皆無だっただろう。

【29】

合体後の地球は短期間で急速に変化していく。

45 億 6000 万年前頃には、内部が何層かに分かれ始めた。

一番内側は核で、主に鉄とニッケルからなり、核より低密度のマントルがその外側を取り巻くようになる。

マントルの上には、さらに密度の低い岩石の地殻が作られて、みるみる硬さを増していく。

一方、水蒸気と二酸化炭素が渦巻く非常に濃い大気が空を満たしていった。

地表には水がなかったものの、大量の水が地球内部に閉じ込められるとともに、水蒸気として大気中にも存在していたに違いない。

比較的軽い元素が地表に浮かび上がり、比較的重い元素はしずむ。

その過程で、水や揮発性化合物が地球内部から吐き出され、大気に加わっていった。

【30】

初期の太陽系では新惑星だけでなく、惑星形成に使われなかった多量のがらくたも一緒に太陽のまわりを回っていた。

とはいえ、現在の惑星のように、円に近い安定した楕円軌道を描くものばかりではない。

がらくたの多くは軌道面が大きく傾き、惑星と太陽の間を横切るものも多数あった。

このため、どの惑星も宇宙からの砲撃を浴び、それがとりわけ激しかったのが 42 億年前～38 億年前の時期である。

降り注ぐ隕石、特に彗星は、惑星に水を供給するのに一役買った可能性があるものの、この点については激しい議論を呼んでいる。

隕石の衝突を通じて初期の地球がどれくらい水を得たのかは全くわかっていない。

近年、月面で採集された鉱物のサンプルに含まれる微量の水が、地球に大量に存在する水と一致することがわかった。

このことは、火星サイズの原始惑星が衝突したいわゆる「ジャイアント・インパクト」の後に地球がマグマの海と化し、そこに地球の水圏も大気圏も融けていたことを示している。

インパクト時に仮に何らかの生命が存在していたとしても、**手痛い犠牲**を払ったに違いない。

NASA の科学者が数学モデルを作成してその種の衝突を再現してみたところ、直径 500 キロの隕石が衝突したら、地球は想像を絶する激変を被ることがわかった。

地表を作る岩石の広大な領域が蒸発し、数千度にもなる超高温の「岩石ガス」が生まれる。この岩石の蒸気が大気中に広がり、それが海全体を熱して干上がらせ、融けた塩の層が海底に残るのみとなる。

熱は宇宙空間に放射されて冷えてはいくが、雨によって新しい海が誕生するまでには少なくとも数千年を要する。

これほどの大きさの、テキサス州大の小惑星や彗星が今落ちてくれば、深さ 3000 メートル級の海洋が蒸発してもおかしくはなく、その過程で地表の生命は根絶やしにされるだろう。

【31】

38 億年ほど前になると、隕石が雨あられと降ってくる時期は過ぎていた。

それでも、もっと後の時代と比べればやはりかなりの頻度で激しい衝突があったと思われる。

当時は地球の自転速度が今より速かったので、1 日の長さも 10 時間に満たなかった。

太陽もはるかに暗く見え、地表に届く熱も少なかったはずだ。

太陽自体が現代より格段に少ないエネルギーで燃えていたせいもあるが、濁った有毒な大気に遮られていたためでもある。

このころの**大気中には二酸化炭素、硫化水素、水蒸気、およびメタン**が荒れ狂い、大気にも海にも**酸素は存在しなかった**。

空はおそらくオレンジや赤レンガ色で、地表をほぼ全面的に覆っていたはずの海も泥混じりのような茶色だっただろう。

とはいえ、生命が誕生するには、まずたくさんの「部品」を作り、それを工場で組み立てるという二つの段階が必要とされる。

少なくとも地球は、そのための気体と、液体の水と、様々な鉱物や岩石や環境を備えた地殻を持つ惑星だったことは間違いない。

生命を育む仕組みとその歴史

【32】

地球上に**生命が誕生する**上で欠かせない条件の一つは、**大気中の気体が十分に「還元」されて、生命の構成要素となる前駆物質が作られるようになることだ**。

酸化と還元という化学的なプロセスには電子がかかわっている。

電子を失う反応が「酸化」であり、電子を得る反応が「還元」である。

電子は通貨のようなもので、エネルギーと交換することができる。

酸化では、**電子を失うのと引き換えにエネルギーを得る**。

還元で電子を得ることは、銀行に金を預けるようなものだ。

そしてこの金銭は**エネルギーという形で蓄えられている**。

例えば、石油と石炭は「還元」されている。

つまり、多量のエネルギーを蓄えており、これらを燃やして参加させたときにそのエネルギーが解放されるのだ。

参加させるとエネルギーが生まれる、と言い換えてもいい。

【33】

初期の地球大気がどういう組成だったかについては様々な見解があり、盛んに研究が行なわれている。

窒素の量は現在とあまり変わらなかったと見られるのに対し、酸素はほとんどないし全く存在しなかったことについては多方面からの豊富なデータで裏づけられている。

一方、二酸化炭素圧は今の1万倍に達していたと思われる。

現在の大气は78パーセントが窒素、21パーセントが酸素で、残り1パーセント足らずが二酸化炭素とメタンだ。

この組成になったのは比較的最近のようである。

近年の研究から明らかになりつつあるように、地球の大气はかなり短期間でその組成を変える場合があり、一見小さそうな1パーセントの領域については特にそれが顕著だ。

この領域に含まれる二酸化炭素とメタンはどちらも（水蒸気と並んで）温室効果ガスと呼ばれ、大气に占める割合とは裏腹に非常に大きな影響力を持つ。

元素の循環と地球の気温

【34】

生命という奇妙な状態を育む上で、体は無数のプロセスを必要とする。

その多くにかかわっているのが炭素の移動だ。

同じように、炭素、酸素、および硫黄がどう動くかによって、生命に適した環境を地球上で維持できるかどうかが決まる。

このうち最も重要なのが炭素である。

炭素は、固体・液体・気体の状態を出たり入ったりしながら盛んに循環されている。

海、大气、および生物の間で炭素がやり取りされることを「炭素循環」という。

温室効果ガスの濃度が変化することで惑星の気温が変動するのは、この炭素の動きが大きくかかわっている。

一口に炭素循環といっても、実際には短期的循環と長期的循環という二つの異なる（ただし重なる部分もある）サイクルで成り立っている。

【35】

短期的な炭素循環を左右するのは植物の生命現象だ。

二酸化炭素が光合成の際に取り込まれ、炭素の一部が生きた植物組織として閉じ込められる。

これは還元された物質なので、後でエネルギーとして開放できる。

植物が枯れたり葉が落ちたりすると、この炭素は土に移動し、再び炭素化合物となって土壌微生物の体内に入る場合もあれば、動植物の体を作る場合もある。

この還元された炭素化合物がそれぞれの体内で酸化されると、その生物はエネルギーを得ることができる。

同時に生物は、エネルギーとして使うために別の炭素分子も還元状態にしている。

この炭素が動物の食物連鎖のはしごを登っていく間、呼吸によって酸化され、気体の二酸化炭素となって呼気とともに動物や微生物の体から出ていき、再び新たなサイクルが始まることもある。

しかし、動植物の組織内に閉じ込められたまま、ほかの生物に消費されることなく土に埋もれる場合もある。

そうすると、地殻内にある有機炭素の大きな保管庫の一部となり、短期的な炭素循環からは外れることになる。

【36】

もう一つの長期的な炭素循環には、全く異なる種類の変換がかかわってくる。

最も重要なのは、岩石から海洋または大気への炭素移動だ。

これは通常、数百万年の単位で起きる。

炭素が岩石を出入りすることで、短期的な炭素循環では成し遂げられないほど大きな変化が地球の大気にもたらされる。

というのも、海洋と生物圏（生きている生物の合計）と大気を合わせたよりも、岩石に閉じ込められている炭素の量の方が多からだ。

すべての生物を合計するだけでも膨大な量なのだから、これは意外に思えるかもしれない。だが、ロバート・バーナーの計算によれば、地球上の植物を一つ残らず一気に燃やし、その体内にあった炭素分子が大気に入り込んだとしても、この短期的な炭素循環によって大気中の二酸化炭素は25パーセントしか増加しない。

それにひきかえ、過去の長期的な炭素循環による二酸化炭素量の増減は1000パーセント以上にも達する。

【37】

地球の炭素循環にきわめて重要な役割を果たしているのが炭酸カルシウム、つまり石灰岩の主成分だ。

炭酸カルシウムは地球ではありふれた物質であり、骨格を持つ無脊椎動物のほとんどは骨格が炭酸カルシウムでできている。

円石藻類と呼ばれる微小な植物プランクトンにも炭酸カルシウムは含まれ、その骨格が沈澱して蓄積すると白亜と呼ばれる堆積岩を形成する。

円石藻類の骨格は、地球を住みやすい環境にする上で欠かせない。

長期的な気温変動を抑えるのに一役買っているからだ。

沈み込みと呼ばれるプレート運動により、この白亜の一部は最終的にプレートのコンベヤーベルトに載せられて沈み込み帯に運ばれる。

沈み込み帯は地殻にできた長い溝であり、そこで海洋プレートが別のプレートの下に沈んでいく。

海底面よりもはるかに下の、地表から何千メートルもの深さになると、高温・高圧により白亜質やケイ質の骨格はケイ酸塩のような新しい鉱物や二酸化炭素ガスへと変わる。

この鉱物と高温の二酸化炭素ガスはマグマと一緒に地表へと上昇する。

ガスを多量に含んだマグマが地表に出ると、鉱物は溶岩として押し出され、ガスは大気中へと解き放たれる。

これが炭素循環の基本的プロセスだ。

二酸化炭素が生体組織に変換され、組織が腐敗したら別の動植物の骨格を作るのを助け、その骨格がいずれは地球の奥深くで溶岩やガスト一体化し、地表に戻ってきて再びサイクルを始める。

長期的な炭素循環は大気組成に甚大な影響を及ぼし、その組成が地球の気温を大きく左右する。

炭酸塩やケイ質の生物骨格が海中で作られる量や速度は、堆積物の埋没プロセスや侵食作用や、化学的風化作用の進み方で決まる。

そして、沈み込み帯という飢えた胃袋に落ちていく鉱物の量次第で、どれくらいの二酸化炭素とメタンが火山を通じて大気に戻されるかが違ってくる。

【38】

このプロセス全体をコントロールしているのは主として生物であると同時に、そのプロセスが生物の生存を可能にしているのだ。

炭素循環は大気中の気体濃度に影響するだけに留まらず、「惑星サーモスタット」ともいえるべき自動温度調節機能の役目を果たしてもいる。

というのも、炭素循環はフィードバックを受けることで地球の長期的気温を調節しているからだ。

このサーモスタットは次のような仕組みで働く。

仮に火山から放出される二酸化炭素の量が増えて、大気中の二酸化炭素とメタンの濃度が上昇したとしよう。

この二種類の分子が高層大気に達するとその多くは、地表から逃げてくる熱エネルギー（もともとは太陽光として降り注いだもの）を地表に跳ね返す作用を持つ。

これが温室効果だ。

大気中に閉じ込められる熱エネルギーが増加するにつれて惑星全体の気温は上がり、短期的には液体の水の蒸発を促して大気中の水蒸気が増える。

水蒸気も温室効果ガスの一つだ。

ところがこの温暖化によって興味深い結果が生じる。

気温が上昇すると、化学的風化作用の進み方が早くなるのだ。

このことは特にケイ酸塩鉱物の風化にとって重要な意味を持つ。

先にも見たように、化学的風化作用は最終的に炭酸塩や新種のケイ酸塩鉱物の形成につながるだけでなく、大気から二酸化炭素を取り除く結果をもたらすからだ。

雨水に溶けた二酸化炭素が岩石中の成分と結合すると、地球の気温に一次的な影響を及ぼさない化合物を作る。

したがって、風化の速度が上がれば、大気から除去される二酸化炭素の量も増えていく。

大気中の二酸化炭素濃度が減少し始めると、温室効果が弱まって地球全体の気温も下がる。

それと同時に、気温の低下につれて風化の速度が落ち、重炭酸イオンやシリカ（二酸化ケイ素）イオンが少なくなって、それらを材料とする骨格が沈殿する量も低下する。

その結果、骨格の材料物質が地球内部に沈み込む量が少なくなり、火山から吐き出される二酸化炭素も減る。

こうなると地球は急速に寒冷化していく。

しかし、それとともにプランクトンの住む海洋表層やサンゴ礁が縮小するので、大気中の二酸化炭素は以前より必要とされなくなる [訳注 サンゴは細胞内に共生させた植物プランクトンが光合成を行なって二酸化炭素を吸収するだけでなく、サンゴ自体もそれを吸収して自身の骨格を作っている] 。

最終的には、火山が放出する二酸化炭素が生物に利用される量を上回るため、再び炭素循環のサイクルが始まる。

【39】

このように化学的風化作用の速度はきわめて重要な役割を果たしているが、これを左右するのは気温だけではない。

山系が急速に隆起した場合も、気温に関わらずケイ酸塩鉱物の侵食される度合いを高める。山の隆起はその種の鉱物の風化を加速し、結果的に大気から除去される二酸化炭素の量が増えて、地球は急激に寒冷化する。

多くの地質学者が支持する説によれば、起伏が多く巨大なヒマラヤ山系がかなり短期間に隆起したときには、大気中の二酸化炭素濃度が急落し、それが寒冷化を引き起こして（少なくともその一因となって）250 万年前からの更新世氷河期をもたらした。

【40】

化学的風化作用に影響するもう一つの要因は、どういう種類の植物がどれくらい存在するかだ。

「高等」な（多細胞の）植物は、岩石成分を物理的に浸食させる力が非常に強いため、化学的風化作用が働く表面積を広げることにつながる。

植物の数が急速に増えたり、一般的な樹木のように深い根を持つ新種の植物が誕生したりすれば、新しい山系の急激な隆起と同じ結果を生じさせる。

つまり風化の度合いが増し、地球全体の気温が低下するのだ。

逆に、大量絶滅や人間による森林伐採などで植物が失われると、大気は急速に温暖化する。

【41】

大陸の移動までもが世界規模での風化作用の速度を左右し、ひいては地球の気候を変化させる。

風化は気温が高い方が速く進むため、大きな大陸が高緯度から赤道付近に移動したら、どれほど気温の低い時期であっても世界はさらに寒冷化する。

化学的風化作用のペースは北極地方と南極地方では非常に遅く、赤道付近では速い。

大陸が赤道地方に移動すれば、地球全体の気温に影響が及ぶ。

【42】

大陸が問題になるケースはもう一つある。

大陸同士の相対的な位置だ。

どれだけ化学的風化作用が起きても、骨格作りに欠かせない溶質や鉱物種が海に届かない限り地球の気温が変わることはない。

海に運ぶには水の流れが必要だ。

ところが、約3億年前にパンゲアができた時のようにすべての大陸が合体したら、超大陸内部の広大な領域で雨が降らなくなり、海へ通じる河川もなくなる。

たとえ膨大な量の重炭酸塩や溶解カルシウムや、シリカイオンが巨大大陸の中央部で生み出されていても、その多くは海に達することがない。

雨が少なくなれば、仮に気温が高めであっても風化速度が遅くなり、フィードバックシステムは大陸が分かっていたときほどうまく働かなくなった可能性がある。

大陸の合体によって海岸線が短くなることも、世界の気候に大きな打撃を与える。

かつては海の影響を受けていたり、湿地帯だったりした地域の多くが、海からも水からも遠く離れてしまうからだ。

乾燥地帯では北極地方と同様に風化の進み方が遅いため、風化の副産物として鉱物と大気中の二酸化炭素が結びつくことも少なくなり、[地球の温暖化につながる](#)。

顕生代における二酸化炭素と酸素の変動

【43】

生命の歴史に大きな影響を与えてきたものは他にもある。

[気温以外](#)でおそらく[最も重要な物理的要因](#)は、生命の源となる[二酸化炭素](#)（植物にとって）と[酸素](#)（動物にとって）の[量](#)（分圧で表わされる）の[変化](#)だろう。

地球の大気中で二酸化炭素と酸素の濃度が時間とともにどう移り変わるかは、様々な物理学的・生物学的プロセスによって決まる。

[地質学的なスケール](#)で見るとかなり最近までどちらの気体も大きく変動してきたのだが、そう聞くとたいていの人は驚く。

だがそもそもなぜ量が増減するのだろうか。

大きな要因は、例えば[炭素](#)、[硫黄](#)、[鉄](#)など、地殻上および地殻内に豊富に含まれる[元素との化学反応](#)だ。

化学反応が起きれば、[酸化と還元](#)がともに生じる。

どちらの場合も、[炭素](#)、[硫黄](#)、あるいは[鉄を含む分子](#)と[遊離酸素](#)（ O_2 ）が[結合して新しい化合物](#)を作るため、[酸素](#)は大気から除去されて[その化合物の中に蓄えられる](#)。

化合物の[還元](#)を伴う別の反応が起きると、[酸素](#)は解き放されて[大気に戻る](#)。

これが植物の[光合成](#)で行なわれていることだ。

いくつもの複雑な反応を経て[二酸化炭素を還元](#)し、その副産物として[遊離酸素を解放](#)しているのである。

【44】

過去の[酸素と二酸化炭素の変動を推定](#)するために、幾つもの[モデルが開発](#)されてきた。

そのうち最も歴史が長く、最も精巧なものがジオカーブ（GEOCARB）である。

このモデルは炭素濃度を計算するもので、イエール大学のロバート・バーナーによって考案された。

バーナーはジオカーブ以外にも、酸素濃度を計算するモデルを学生とともに作成している。その二つのモデルを利用すると、時間とともに酸素と二酸化炭素がどう推移してきたかという大きな流れが見える。

この研究は、科学的手法によって成し遂げられた偉大なる成果の一つといえるだろう。

[地球の生命史](#)を理解する上で、[酸素と二酸化炭素の変遷に注目](#)することは最も新しく、最も[重要な考え方](#)である。

【45】

一説によれば、既に 40 億年前の時点で地球上の環境と物質は生命を宿してもおかしくない状態にあった。

しかし、生物が居住可能な環境にあるからといって、実際に居住するようになるとは限らない。

[生命を持たない物質からいかにして生命を作るか](#)。

それが次章のテーマであり、その作業は史上最も複雑な化学実験であるかに思える。

宇宙物理学者はいつも、地球に生命を誕生させるのがあたかも「簡単」だったかのような口ぶりで語るが、細かく見ていけば、それが到底事実ではないことがわかる。

【46】

地球にどういう種類の生物が生まれるか（またはそもそも生物が生まれ得るか）は、おおむね大気中の様々な気体の濃度とそれらの相互作用に左右されるといい。しかも、その生物がどういう歴史を歩むことになるかもそれで決まってくる。酸素と二酸化炭素の濃度に目を向ければ、地球上の生命がたどってきた道のりの大まかなパターンはもちろんのこと、細かい部分も浮かび上がってくるのだ。この二種類の気体がそれだけ重要な役割を担っているということは、21世紀に入って次第に広く受け入れられてきている。

これは、地球史を読み解く上での全く新しい切り口だ。やはり最近になって明らかになってきたのは、生命の歴史には別の二つの気体も重要な役割を果たしてきたということである。硫化水素（ H_2S ）とメタン（ CH_4 ）だ。この二つについての物語は岩石に刻まれているだけでなく、生と、そして死の中にも記されている。

第3章 生と死、そしてその中間に位置するもの

【47】

実に興味深い実験が行なわれていると、科学者の間でうわさが囁かれ始めたのは2006年のことだった。実験のテーマは、生と死と、その二つが混じり合った奇妙な状態についてだということから、何やら心穏やかではない。当初は内輪の話に過ぎなかったものが、徐々に発展して方々の科学会議で取り上げられるまでになり、やがて一連の見事な論文として花開いた。

論文を書いた生化学者のマーク・ロスは遠い異国に足を踏み入れた開拓者である。その国を探れば「生命」とは何かだけでなく、「生きている」とはどういうことかについても様々な点がわかるかもしれない。さらには、そのどちらかの欠けた状態が存在し得るのか、しかも現在のみならず、地球に生命が誕生した時代でもそれが起こり得たのかを教えてくれる可能性を秘めている。

ロスが発見したのは、ほぼ致死量に近い硫化水素に哺乳動物をさらすと「仮死」としかいいようのない状態にできるということだ。仮死状態というのは、この気体を吸わせた動物に起きることを実にうまく表現している。まず被験動物は、外から観察できる活動を止める。全く体を動かさず、呼吸数も心拍数も大幅に下がる。だがそれだけではなく、もっと根本的なレベルでも変化が現われ、体組織や細胞の正常な機能が著しく鈍化した。さらに驚くのは、哺乳類なのに体温調節能力を失ったことだ。

内温性を備えた恒温動物であることをやめ、もっと原始的な、外温性を持つ変温動物に先祖返りしたのである。

死んでいるとも、本当の意味で生きているとも言えず、あたかも死んだようになっている。ただしその死は一時的なものだ。

硫化水素にさらすのをやめると、動物の正常な機能はすべて回復した。

この発見は医療への応用につながるのはいまでもなく、生命とは何か、そして何でないかについても色々なことを教えてくれる。

ロスには単純な直観があった。

生と死の中間の状態が存在し、それは未開拓の領域であるとともに医学が関心を寄せる可能性を秘めているということだ。

この状態は、なぜ生物の一部が大量絶滅を免れたかを考える上でも手がかりになる。

ひょっとしたら、死は私たちが思うほど最終的な状態ではないのかもしれない。

ロスの願いは、生物をこの場所にまで連れてきて、それから元に戻せるようになることだ。

あいにく、この場所の本質を的確に捉える言葉は存在しない。

ロスが実施した一連の重要な実験の中には、次のようなものもあった。

対象となったのは扁虫である。

単純な動物ではあるが、動物に変わりはない。

もっとも、微生物と比べれば、どんな動物も単純とは言えない。

ロスは閉じた容器に水と扁虫を入れ、水中の酸素濃度を下げた。

動物の例に漏れもず、扁虫もちろん多数の酸素を必要とする。

酸素濃度が低下するにつれ、扁虫の活動は次第に鈍くなり、やがて動きを止めた。

押しても突いても何の反応も示さない。

だがロスはそこで実験をやめなかった。

水中の酸素濃度をさらに低くしていったのだ。

それでも扁虫は最終的に生き返った。

扁虫は生きているのでも死んでいるのでもない「休止状態」に入っていたわけである。

生と死は、私たちが考えているよりはるかに複雑な状態であるらしい。

ごく単純な生物の生と死

【48】

哺乳類はあらゆる動物の中で最も複雑な部類に入る。

それでも、ロスの実験で死ぬことはなかった。

鼓動が止まることはなく、血液は静脈と動脈を流れ続け、神経は発火し、生命の維持に必要なイオン輸送も行なわれていた。

ただペースが遅くなっただけである。

しかし、まだ疑問は残る。

細菌やウィルスのような格段に単純で小型の生物が、気体のない場所や低温環境に置かれた場合、生命の機能がどうなるかだ。

これは頭の中で考えただけの疑問ではない。

微生物は大嵐によって毎日のように大気圏の最上層部に飛ばされ、オゾン層（宇宙からの紫外線を防いでいる）に守ってもらえない高さまで達することがある。

そこは、生と死についての研究における第二のフロンティアだ。
地球の最高所に生きる生命の研究である。

この高層大気は最近になって発見された生態系であり、研究者からは「ハイライフ」というあまり捻り（ひねり）のない名前をもらっている。
微生物はそこで数日ないし数週間を過ごした後、地上に戻ってくる。
だが、上にいるときの微生物は生きていたのだろうか。

航空機で到達できる最も高い高度でも真菌の孢子や細菌が見つかることは、宇宙時代が幕を開けて以来知られてきた。
そこは生物の生息環境としては地球最大であり、二番目に大きい海の中（上層から海底まで）でさえ体積ではその足元にも及ばない。
一方、その環境に何種類の生物がいるのかはほとんど明らかになっていなかった。
ところが2010年にはじまった研究により、数千種もの細菌と真菌、さらには無数の分類群に及ぶウィルスが常に存在する可能性が示された。
また、ワシントン大学の研究チームがオレゴン州カスケード山脈の山頂で空気を採取して分析したところ、中国の砂塵嵐が北米の西海岸まで定期的に真菌や細菌やウィルスを運んでいることが確認されている。

微生物が大気中のそれほどの高度で見つかるというのは、そのこと自体が生物学の研究題材として興味深い。
だが、本書にとってはそれだけに留まらない意味を持っている。
地球に誕生した最初の生命が様々な場所へと広がっていったのは、大気によって運ばれたせいではないかという新しい仮説がそこから生まれるからだ。
空中を飛んで1日足らずで大陸間を移動できるのなら、わざわざ波や潮にもてあそばれながら時間をかけて海を漂っていく必要はない。
生命の歴史において高層大気がどうかかわっていたかについては、後に取り上げる。

今は、大気を介して大陸から大陸へと旅する間、微生物は常に生きていたのか、それとも休眠状態にあるのかを考えてみたい。
高層大気の生物を集めるには三つの方法がある。
現役を退いた高高度偵察機を使うか、高高度気球で採取するか、アジアを飛んで太平洋を渡った嵐がうまい具合に北米西海岸の高山をかすめてくれるときを利用するかだ。
こうして得られる空気のサンプルには多種多様な微生物がひしめいている。
非常に高度の高い大気中で採集したとき、細菌は死んでいる。
ところが地上に戻して、それがもともと進化したとみられる高度でしばらく慣れさせると、生き返るのだ。

哺乳類はもちろん、たぶん全ての動物において、死は死であるとほとんどの人が思うだろう。
しかし、もっと単純な生物の場合にはそうとは言えない。
従来の考え方に基づく生と死の間には、探求すべき広大な領域が広がっていることがわかったのだ。
新たに見つかったこの領域は、地球上の生命がどう誕生したかを考える上で重要な意味を持つ。

「死んだ」化学物質であっても、適切に組み合わせてエネルギーを与えれば命を宿せるようになるかどうかはわかるからだ。

少なくとも単純な生命は、常に生きているわけではない。

科学は今、生と死の間を探ろうとしている。

地球最初の生命は、一般に死と呼ばれる世界から来たのかもしれないし、もっと生に近い場所から来たのかもしれない。

生命の定義

【49】

「生命とは何か」という著作で、シュレーディンガーは物理学者らしく、物理学の言葉で生物について考え始めた。

「生物の最重要部分における原子の配列と、その配列同士の相互作用は、物理学者と化学者がこれまで実験研究や理論研究の対象としてきた全ての原子配列とは根本的に異なっている」。

最後の方でシュレーディンガーは物理学的に見て「生きている」とはどういうことかを考察した。

「生きている物質は、崩壊を経て平衡状態に至ることを免れて」おり、生命は「負のエントロピーを摂取している」と書いている。

それをどのようにして行なっているかといえば、代謝を通じてだ。

食べたり飲んだり、呼吸をしたり、物質を交換したりすることである(代謝 [metabolism] とはもともと「交換」を意味するギリシャ語からきている)。

これが生命の鍵を握っているのだろうか？

少なくとも生物学者にとっては多分そうだ。

しかしシュレーディンガーは物理学者なので、もっとはるかに根源的なところに目を向けた。

「物質交換が生命の本質だと考えるのは馬鹿げている。

窒素であれ酸素であれ硫黄であれ、同じ種類であれば原子はどれも変わらない。

それを交換することで何が得られるのか」。

だとすれば、食物に含まれ、私たちが生かし続ける「何か」、私たちが「生命」と呼ぶその貴重な何かとは一体何なのだろう。

シュレーディンガーはその疑問に難なく答えを出す。

「自然界で起きる全てのプロセス、全ての事象、全ての出来事は、それが進行している場所のエントロピーを増大させる。

したがって、生きている生物もそのエントロピーを絶え間なく増大させている」。

シュレーディンガーにとってこれこそが生命の秘密を解く鍵だ。

生物とはエントロピーを増大させる物質であり、そう位置づけることで、生物と無生物を新たな切り口から比較することができる。

だが生物のすることはそれだけに留まらなないとシュレーディンガーはいう。

生物は環境から「秩序」を抽出することで生命を維持していると彼は考え、それを「負のエントロピー」と呼んだ。

つまり生命とは、環境から絶えず秩序を吸い取ることで、多数の分子が自らをきわめて秩序ある状態に保てるようにする仕掛けなのである。

生物は無秩序から秩序を作り出すことも、秩序から秩序を生み出すこともできるとシュレーディンガーは考えた。

無秩序と秩序の性質を変える装置———それが生命の全てなのだろうか。

物理学的に見る生物は、いくつもの化学装置が一箇所に詰め込まれて何らかの方法で一体化し、エネルギーを消費することで秩序を維持している存在と捉えられる。

生命とは何かという問題に関しては、この見方が何十年にもわたって最も有力とされてきた。

しかし、シュレーディンガーの著作から半世紀が過ぎると、こうした見解に異を唱え、それを修正しようとする者が現われ始める。

ポール・ディヴィスやフリーマン・ダイソンのようにやはり物理学者もいれば、生粋の生物学者もいる。

【50】

ポール・ディヴィスは著書『生命の起源——地球と宇宙をめぐる最大の謎に迫る』の中で、「生命とは何か」という問題に斬り込むために別の問いを投げかけている。

「生命とは何をやるものか」だ。

生命を生命たらしめるものは「活動」であるとディヴィスは説く。

その主な活動とは以下の通りである。

生命は代謝する。

全ての生物は化学物質を処理し、その過程で自身の体にエネルギーを取り込む。

生物が物質を処理して、そこに含まれるエネルギーを解放することを代謝と呼ぶ。

それが、負のエントロピーを摂取して体内の秩序を維持するための手段だ。

このプロセスを化学反応の切り口から考えることもできる。

仮に生物が、自力で化学反応をする状態を脱してその反応が止まる状態へと移行したら、それは生物がもはや生きていないことを意味する。

地球には生命の化学反応が特に起こりやすい環境があり（日光が降り注いで温かいサンゴ礁の海面やイエローストーン国立公園の温泉など）、そういう場所は生命に満ち溢れている。

生命は複雑さと組織を持つ。

少数の原子だけで（数百個の原子からでさえ）できているような本当に単純な生命は存在しない。

全ての生命は膨大な数の原子が精緻に配列されてできている。

このように複雑に組織されていることが、生命の大きな特徴の一つだ。

複雑さは機械のようなものとは違う、生命に固有の特性である。

生命は複製する。

ディヴィスの主張によれば、生命は自分自身を複製するだけでなく、さらなる複製を可能にするメカニズムをもコピーしなければならない。

彼の言葉を借りると、複製装置のコピーも必要なのだ。

生命は発達する。

複製が作られたら、生命は変化し続ける。

これを発達と呼ぶ。

このプロセスは機械とは大きく異なる。
機械は成長しないし、成長とともに形や機能を変えることもない。

生命は進化する。

これは生命が持つきわめて基本的な属性の一つであり、生命が存在する上で欠くことのできない要素である。

ディヴィスはこの特徴を、「永続性と変化」という一見相反するものの共存、と表現している。

遺伝子は複製を作らねばならず、正しく複製できなければその生物は死ぬ。

その一方で、複製がいっさいエラーを起こさなければ多様性はなくなり、自然選択による進化が起きる余地もなくなる。

進化は適応を可能にする手段であり、適応なくして生命は存続し得ない。

生命は自律性を持つ。

自律性は、生きていけると言えるためには欠かせない条件だ。

生物には自律性があり、自主的な決断を下すことができる。

他の生物から常に物質を提供してもらわなくても生きていける。

ただし、一個の生物はいくつもの部分や機能で成り立っているのに、そこからどうやって「自律性」が生じているのかはまだ謎のままである。

生体にとって活動と構造は同じものだ。

一つの個体として適切に機能するには様々なプロセスと構成要素が必要であり、それらすべてを絶えず生成し、また再生することで生体は成り立っている（ほとんどのタンパク質は寿命が二日程度しかない）。

こういう視点で捉えると、生体を常に複製・再生することこそが生命そのものといえる。

【51】

NASA による生命の定義はもっと単純で、カール・セーガンが好んだ定義を踏まえている。

[福永注：Carl Edward Sagan（1934-1996）アメリカの天文学者・教育者。火星・金星の大気と表面の研究や、生命起源の研究で知られる。コーネル大・惑星研究所所長。著書は「コスモス」など。]

生命とは、ダーウィン進化が可能な化学的システムである、というものだ。

この定義からは三つの重要な視点が浮かび上がる。

一つ目は、私たちが相手にしているものは化学物質であって、ただのエネルギーでも電子計算機でもないということだ。

二つ目は、単なる化学物質ではなく化学的システムがかかわっているという点である。

つまり化学物質のみならず、化学物質同士の相互作用が存在する。

三つ目は、その化学的システムはダーウィン進化を経るということだ。

一つの環境の中で、利用できるエネルギーの量よりも個体数が多くなればその一部は死ぬ。生き残るものは有利な遺伝形質を持っているからであり、それが子に伝えられることによって、子孫は生存能力をさらに高める。

【52】

セーガンと NASA の定義は、生きていることと生命を混同しないところが優れている。

化学物質自体は生きていないのに、それが組み合わさると生命が宿る。
一体どうすればそんなことが起きるのだろうか。

まず初めに代謝システムが存在し、あとでそれが複製能力を獲得することで生命が誕生したのか、それともその逆なのか。

前者の場合、当然ながら細胞のような閉じた空間の中に原始的な代謝系があって、それがやがて複製能力を得て何らかの情報伝達分子を細胞内に組み入れたことになる。

後者の場合は、複製能力を備えた分子（RNA など）が、複製を助けるためにエネルギー系を利用できるようになって、後によりやく細胞で囲われた。

このように、代謝か複製かという問題は、化学分子レベルで見ると違いが際立つ。
タンパク質が先だったのか、核酸が先だったのか。

どちらも生きているのだろうか。

ただの化学反応から、生命を支える化学反応へと移行するのはどの時点なのか。

とはいえ、生きた細胞の最も重要な特徴がホメオスタシス（環境が変化しても化学物質のバランスを概ね一定の状態に保つ能力）であるなら、代謝が先でないとおかしい。

今の私たちには、生殖する前に食べるというのは自然なことに思える。

だが、生命の起源をめぐる問題にはよくあるように、それでもまだ解けない気がかりな謎は残る。

エネルギーと生命の定義

【53】

既に、代謝し、複製し、進化するものとして生命を定義してきた。

そこにエネルギーの役割を加えることもできる。

しかし、生命をエネルギーの流れという視点で眺め、秩序・無秩序の切り口から捉えることはしたくない。

エネルギーを持つだけでは、生命の基盤を得るのに十分ではないからだ。

そこにはエネルギーとの相互作用が存在しなければならず、非平衡状態の秩序を保持するにはその相互作用が必要なのである。

エネルギーがなければ生命は非生命となる。

したがって、エネルギーの獲得や廃棄と切り離して生命とは何かを考えることはできない。生命は、エネルギーを取り込むことで次第に秩序を高められるような状態をもち、それによって自らを維持している。

地球の生物は、炭素、酸素、窒素、水素（および少量のその他の元素）を比較的限られた種類に組み合わせることでそれを実現している。

やがて一定の複雑さとまとまりを備えた段階に達し、それが保たれ、私たちが生命と呼ぶものになる。

取り入れるエネルギーの量が十分でないと、体内の化学反応（すなわち生命）が平衡状態に戻ろうとするのを食い止めることができない。

そうなれば非生命となる。

【54】

生命の定義として広く受け入れられているものの一つは、生命が代謝をするというものだ。

地球の生命にとって主要なエネルギー源は地熱と太陽熱であり、どちらも太陽の核融合反応によって生じている。

生物が太陽エネルギーを利用する方法として、圧倒的に多いのは光合成だ。

このプロセスでは、太陽光のエネルギーが二酸化炭素と水を複雑な炭素化合物に変え、多数の化学結合を通じてエネルギーを蓄える。

その結合を壊すと、エネルギーが放出される。

地球の生命は多種多様な生化学反応を利用しており、その全てに電子の移動がかかわっている。

ただし、電子の移動が起きるには、電子化学勾配とでも呼ぶべきものが存在していなくてはならない。

勾配が急であればあるほど、多量のエネルギーが手に入る。

言い換えれば、生み出せるエネルギーの量には代謝の種類によってかなり開きがあるということだ。

エネルギーを多く摂取できる環境とそうでない環境があるのと同じである。

有機（すなわち炭素を含む）化合物のうちで最も多量のエネルギーを貯蔵できるのは脂質だ。

炭素原子が長くつながった構造を持つため、その化学結合中に大量のエネルギーを蓄えられる。

代謝とは、生物の体内で起きる化学反応の合計である。

【55】

ウィルスはきわめて小さく、直径 50~100 ナノメートルのものが多く（1 ナノメートルは1メートルの10億分の1）。

ウィルスの構造には主に二つのタイプがある。

タンパク質の殻に囲まれているものと、タンパク質の殻に加えてエンベロープと呼ばれる膜状の構造も持つものだ。

それらに包まれているのが最も重要なゲノムであり、その本体は核酸である。

拡散は DNA の場合もあれば、RNA のみの場合もある。

遺伝子の数もウィルスの種類によってかなり差があり、わずか3個しかないものもあれば、250 個以上の遺伝子からなるもの（天然痘ウィルスなど）もある。

そもそもウィルスの種類自体が膨大な数に上るため、ウィルスを生きているとみなすなら、いくつもの分類群に分かれることになる。

だが、ウィルスは一般に生物ではないとされている。

RNA しかないウィルスがいるということは、DNA がなくても RNA だけで情報を蓄え、DNA 分子同然の働きができることを示している。

この点は、私たちの知るような生命と DNA が誕生する前に「RNA ワールド」があったという説の有力な根拠となっている。

また、RNA ウィルスが存在することはさらに重要な意味を持っている。

ウィルスは寄生虫のようなものであり、専門的には絶対細胞内寄生生物と呼ばれる。

宿主となる細胞なしには自らを複製することができないからだ。

通常、ウィルスは生物の細胞内に侵入し、タンパク質を製造する細胞小器官を乗っ取って自分自身の複製を始め、その細胞をウィルス製造工場に変えてしまう。

ウィルスは宿主となった生物の機能にきわめて大きな影響を及ぼす。

ウィルスを「生きていない」とみなす最大の根拠は、自分で自分を複製できない点だ。生物ならばクリアすべき条件なのに、ウィルスにはそれができていないように思える。しかし、ウィルスが絶対寄生生物であることを忘れてはいけない。寄生生物というものは、得てして宿主に適應するために形態や遺伝子を大幅に変えるものだ。

それに、ウィルス以外の寄生生物が活着していると言えるのかも問う必要がある。寄生とはいわば高度に進化した捕食の一形態であり、長い進化の果てに生み出されたものだ。

寄生生物は決して原始的な生き物ではないが、ウィルスと同様に 100 パーセント活着しているとは言い難い段階を持っている。

例えば、ヒトなどの哺乳動物に寄生するクリプトスポリジウム（原虫の一種）とジアルジア（鞭毛虫の一種）には休眠期があり、その期間中は宿主の外に出たウィルスと同じくらい死んでいる。

宿主なしにはどちらも（もちろん他の何千種もの寄生生物も）生存することはできず、生命を持つという範疇に括ることすら難しいだろう。

にもかかわらず宿主の体内にいるときには、私たちが知っている生命の特徴を全て示すのだ。

つまり代謝し、複製し、ダーウィン進化を経る。

ただし、ウィルスを生物とみなすなら（最近はそのような考え方が増えてきているが）、現在広く認められている生命の系統樹を根本から見直す必要がある。

【56】

地球の生命を研究していると、二つの疑問に突き当たる。

一つは、活着しているとみなせる原子の最も単純な組み合わせは何か。

もう一つは、地球で最も単純な形態の生物とはどのようなもので、それが生き続けるためには何が必要なのか、である。

こうした問いに答えるには、本章で定義した生命特有の状態を現生生物がどのように達成し、また保っているかに目を向けなくてはならない。

そこで、地球の全生物が生命の実現と維持のために使っている物質の化学的性質を考えてみたい。

非生命の材料が生命を作る

【57】

地球の生命を形作る分子のうち、何よりも大切なのはたぶん水だろう。

しかも液体の水でなくてはならず、氷でも水蒸気（気体）でもいけない。

地球の生命は液体に浸った分子でできている。

生体内に見つかる分子の数はあきれほど多いものの、主なものは4種類しかない。

脂質、炭水化物、核酸、そしてタンパク質である。

全て液体（塩類を含んだ水）に浸っているか、壁となって他の分子と水を囲っているかのどちらかだ。

【58】

脂質は普段私たちが「脂肪」と呼ぶもののことであり、地球の生命の細胞膜には欠かせない成分である。

水素原子が豊富なために耐水性を持つが、酸素原子や窒素原子はほとんど含まない。細胞と細胞の境界や、液体の満ちた生物の内側と外界とを隔てる壁は、脂質を主成分としている。

この種の膜構造は傷つきやすいものの、細胞への物質の出入りを調節している。

【59】

地球の生命の二つ目の主要な材料が炭水化物だ。

私たちが「糖」と呼ぶものと同じである。

糖を鎖状にいくつも結合すると多糖ができる。

糖はつながった状態であれ単体であれ、糖自体だけでなく他の有機分子や無機分子とも結びついてより大きな分子を作るため、重要な構成要素といえる。

糖は核酸の成分としても重要で、その核酸が生命の三つ目の主材料だ。

核酸は全ての細胞内に存在し、遺伝情報を蓄えている。

核酸は巨大な分子であり、ヌクレオチドという1つの塩基（窒素化合物）、糖、リン酸からなる単位が次々とつながって1本の鎖のようになっている。

注目すべきは塩基で、それが遺伝暗号を記す「文字」となる。

【60】

DNA と RNA は、生命を形作る分子の中でも、とりわけ重要な一つだ。

DNA は二本の背骨（二重らせん）からなり、生命の情報貯蔵システムとして機能する。

二本のらせんは、はしご段のようなものでつながっていて、その段は4種類の塩基、アデニン・シトシン・グアニン・チミンでできている。

これらが「塩基対」と呼ばれるのは、かならず別の塩基とペアを作るからだ。

常にシトシンはグアニンと、チミンはアデニンと結びつく。

この塩基対の並び順番が、いわば生命の言語である。

それは一個の生物の全情報を記した遺伝子の暗号だ。

DNA が情報を運ぶ本体だとすれば、一本鎖の RNA は DNA に仕える分子で、情報を読み解いて内容を実行に移す仕事をしている。

具体的にはタンパク質を作ることだ。

RNA 分子も DNA と同様、らせんと塩基を持っている。

ただし、らせん（鎖ともいう）が通常は（かならずではない）一本であるところが DNA と違う。

なぜ DNA と RNA はこれほどに複雑なのだろうか。

それは、体を作るための情報だけでなく、生きるうえで必要な数々の仕事を実行するための情報も記さなければならないからだ。

DNA は設計図であり、取扱説明書であり、修理マニュアルである。

さらには自分自身をコピーし、自分に記された暗号の中身を全て複製するための指示書でもある。

コンピュータで喩えるなら DNA はソフトウェアといえる。

情報を運びはするが、その情報を自らが実行に移すことはない。

タンパク質はコンピュータのハードウェアのようなものだ。
いつどこで特定の化学反応を起こせばいいかを知り、生命の維持に必要な物質を生成するには、DNA ソフトウェアの情報がある。

RNA は面白い特徴を持っていてハードウェアにもなればソフトウェアにもなれ、ときには同時に二役をこなす。

【61】

最後の重要な材料であるタンパク質は、地球の生物の体内で四つの役割を担っている。別の大型分子を作ること、他の分子を修理すること、物質を運ぶこと、そしてエネルギーの供給を確保することだ。
また、いろいろな目的のために大小様々な分子と結合し、細胞内や細胞間の信号伝達にもかかわっている。

タンパク質には膨大な種類があり、その仕組みや働きについては説明が始まったばかりだ。近年になってわかったのは、タンパク質の空間構造、つまりどのように折りたたまれているかが、化学組成と同じくらいその機能に影響を与えているということである。

地球の生命が利用するタンパク質は、どれも 20 種類のアミノ酸を組み合わせて作られている。

21 世紀の新しいタンパク質研究では、昔ながらの疑問に取り組んでいる。

同じ 20 種類のアミノ酸を使い回しているのは、手に入る中で最も優れた材料だからなのか。

それとも、生命が初めて誕生したときにその 20 種類が豊富に存在したため、それらを使えという指示が永遠に生命に刻まれたからなのか。

どうやら答えは前者のようである。

少なくとも 2010 年の研究によれば、最良のものが使われているという。

この 20 種類は地球に固有のものであり、地球の生命を特徴づけるものと言えるかもしれない。

細胞内でタンパク質が合成されるとき、まず様々なアミノ酸が直線上に長くつながっていき、全てが結合を終えたら折りたたまれて最終的な形になる。

作られているそばから折りたたまれていくこともある。

アミノ酸が一個ずつ順番に直線的に並ぶことから、タンパク質は文章に、個々のアミノ酸は単語に喩えられることが多い。

細胞壁の内側では、棒状、球状、板状と様々な形をとった分子がひしめき、塩類を含んだゲルの中に漂っている。

約 1000 個の核酸と、3万種類を超えるタンパク質も細胞内にはある。

その全てが何らかの化学反応に勤しみ、それらが合わさって私たちが生命と呼ぶプロセスになる。

細胞という、この一部屋しかない家では、いくつもの科学的プロセスが同時に進行することができる。

【62】

細胞内にはリボソームという球状の粒子も1万個ほど存在し、かなり均等に散らばっている。

リボソームは三種類のRNAと約50種類のタンパク質からなる複合体だ。

細胞には染色体も収められている。

長いDNA鎖が特定のタンパク質と結合したものだ。

通常、細菌のDNAは細胞の決まった一箇所に位置しているが、他の細胞内物質と膜で隔てられてはいない。

一方、真核生物と呼ばれる進化の進んだ生物では、細胞内に核を持つ。

【63】

こうした多種多様な物質のうち、そのどれが「生きている」といえるだろうか。

細菌の体を作っているのは無生物の分子だ。

DNA分子もちろん生きてはいない。

理性ある人間ならきっとそう認めるだろう。

細胞自体は無数の化学作用で成り立っているものの、個別に取り出してみればどれも生命を持たない化学物質の反応に過ぎない。

生きているものは何一つなくても、細胞全体としては生きているということなのかもしれない。

【64】

最初の生命がどのように誕生したかを理解したいなら、できるだけ少ない数の分子と反応でその状態を達成できるような、最小の細胞を見つける必要がある。

厄介なのは、細胞は単純に見えて、詳しく調べると単純とは程遠いということだ。

フリーマン・ダイソンは明らかにこの点を念頭に置いて、「なぜ生命（少なくとも現在の生命）はかくも複雑なのか？」という問いを投げかけている。

ホメオスタシスが生命に欠かせない性質であり、既知の細菌の体内にはかならず数千種類の分子（DNA内の数百万個の塩基対によって符号化されている）が存在するのなら、それが最小サイズのゲノムであるように思える。

しかし現在の細菌は、30億年（ことによると40億年）あまりの進化の果てにいまの姿になった。

もしかしたら、地球で最も単純な生物は宇宙ではきわめて複雑な部類に入るのかもしれない。

第4章 生命はどこでどのように生まれたのか

----42億(?)年前~35億年前----

【65】

1976年9月3日、バイキング2号の着陸船はパラシュートを用いて無事ユートピア平原に着陸するが、バイキング1号のときと同様、新たに決定的な実験を行なっても生命が存在する証拠は確認できなかった。

バイキングの実験結果から読み取れるのは火星には生命がないということであり、NASAは火星への興味を失っていく。

バイキング計画の直後から、深海探査技術の開発に巨額の予算が流れ込むようになる。ほどなく、別の種類の探査機が異世界の表面に首尾よく降り立った。探査に用いられたのは、小型の「イエロー・サブマリン」ともいうべき潜水調査艇「アルビン」。

アルビンは初めは大西洋で、ついでガラパゴス諸島沖の深海で、その後はカリフォルニア湾に潜って何枚もの写真を撮り、[太陽光とは全く異なるエネルギー源を利用する生命の標本](#)を採取した。

深海の「熱水噴出孔」の周辺にこうして何種類もの動物が発見されたことは、地球の生命がどこでどのように生まれたかについての私たちの見方を大きく変えることになる。ただしそれは、生命が本当に地球で誕生したのなら、の話だ。

というのも、生命は別の場所で形づくられて、それから地球に運ばれたとも考えられるからである。

【66】

では、地球最古の生命は実際どれくらい古いのだろうか。そしてその最初の生命はどこで発生したのだろうか。

20年余り前から、グリーンランドの凍れる大地で見つかったものが地球上で最も古い生命の痕跡だというのが定説となってきた。

イスアという地域である。

化石が産出したわけではないものの、[リン灰石という小さな鉱物の中に炭素の二種類の同位体がごく微量ずつ含まれており、その比率が現代の生物とかなり近いことがわかったのだ。](#)

イスアの岩石は37億年前のものと同年代がすでに特定されていたが、後に改めて年代測定を行ったところ、実際にはさらに古く[38億5000万年前である可能性](#)が浮上する。

以来、この数字が教科書に記されてきた。

38億年前～37億年前というのは、地球最古の生命を探す研究者にとって大きな意味を持つ数字だ。

初期の地球に小惑星が次々に衝突し、太陽系形成に使われなかった残り物の天体も一緒に雨あられと降り注いだのは42億年前～38億年前のことである。

仮にこの時代（もしくはもっと古い時代）に生命が形成されていたとしても、「衝突による悪影響」で根絶やしにされていたはずだ。

だからイスアの岩石の年代は申し分ないのである。

それで見事に説明がつきそうだったが、あいにく[21世紀](#)に開発された新しい装置により、イスアのサンプルから見つかった[微量の炭素は生命が作ったものではない](#)ことが明らかになった。

次に古いとされる生命は35億年前のもので、こちらはただの化学的な痕跡ではなく化石が残っている。

アメリカの古生物学者ウィリアム・ショップが、約35億年前の瑪瑙（めのう）に似た岩石からフィラメント状（細長い糸状）の生物の化石を発見したのだ。

その化石が見つかったのは、西オーストラリア州の「エイペクス・チャート」と呼ばれる、かなり変形した岩石群だ。

ショップの発見は科学界を興奮の渦に巻き込んだ。

地球の歴史のごく早い段階で生命が誕生したことを示していたからである。

このオーストラリアの化石はほぼ 20 年の間、地球最古の生物化石とみなされてきた。

しかし、これにも異論が投げかけられ、古生物学者マーティン・ブレイジャーが、それらは鉱物の結晶の痕跡であって、生物の死骸でもなんでもないと主張したのだ。

2005 年頃に地球科学者ロジャー・ピュイックが、仮にエイペクス・チャートの微小な物体が本物の化石だとしても、岩石自体はショップがいうより 10 億年以上も新しいと指摘した。

その後、マーティン・ブレイジャーが 2011 年の夏に共同執筆の論文を発表する。

それは、少なくとも 34 億年前に生命が存在したことを示すものだった。

これまでで最も古い化石が見つかったという、この発見の重要性を高めたのはその化石の正体である。

どれも顕微鏡でしか見えず、大きさと形は現在の地球に生きているある種の細菌と同じだ。

ブレイジャーによれば、地球最古の生命は海に棲(す)んでいて、生きるために硫黄を必要とし、ごくわずかな酸素に触れただけでもすぐに死んでしまったと見られている。

これもまたいわゆる「炭素系の生命」ではあるものの、この論文をきっかけに、生命の起源を考える上で硫黄が大きな位置を占めるようになった。

ブレイジャーの論文に記載されている化石は、現存する微小な細菌との関連性が見られる。硫黄がなければ生きていけず、かすかな酸素にさらされただけでもすぐに命を失う細菌だ。この発見が事実なら、地球の生命は現在の環境とは全く異なる場所で誕生し、しかも酸素ではなく硫黄に頼っていたことになる。

ブレイジャーのつけた化石生物が生きていた環境は、現代よりも気温が大幅に高く、空気はメタン、二酸化炭素、アンモニアという有毒ガスでできていて、恐ろしい硫化水素も少なからずそこに含まれていた。

その頃はまだ大陸が存在しないのはもちろんのこと、陸地らしい陸地もなく、せいぜい短命な火山島が連なっている程度である。

そうした条件下で生命が誕生し（もしくは地球に到達し）、その後何十億年も繁栄を続けた。

私たちは皆、揺籃期の地球の地獄のような環境に宿ったその生物の末裔であり、多量の硫黄の中で生まれたことを物語る傷跡と遺伝子を抱え持っている。

それが大方の考え方だ。

【67】

34 億年前の生物が地球最古のものだとしたら、生命が生まれた場所として現在有望視されている候補の多くに疑問符がつくことになる。

その時点でも地球はすでに十分に年を経ていた。

天体の衝突によって地球が誕生したのは 45 億 6700 万年前なので、34 億年前に最初の生命が生まれることができたのなら、生命を形作るのは比較的容易だったという考え方もできる。

だがどれくらい簡単だったのか。
そしてどういう順番で作られていったのか。
ここで、地球に生命をもたらすには何が必要かを見ておこう。
全部で四つの段階がある。

1. アミノ酸やヌクレオチドのような小型の有機分子が生成・集積する。
リン酸塩と呼ばれる化学物質（肥料の主成分の一つ）が蓄積することも重要な条件だ。
リン酸塩は DNA や RNA の背骨部分を作るからである。
2. これらの小型分子がつながり、たんぱく質や核酸のような大型分子になる。
3. タンパク質と核酸が集まって小滴になり、それが周囲の環境とは異なる化学的性質を帯びる。
これが細胞の形成である。
4. 大型で複雑な分子を複製する能力を獲得し、遺伝の仕組みを確立する。

RNA の合成と、それよりさらに難しい DNA の生成に至るステップの中には、実験室で再現できるものもあればできないものもある。

生命の最も基本的な構成要素であるアミノ酸なら、試験管の中で難なく作れる。

それは 1950 年代野ユーリー／ミラーの実験でも示された通りだ。

DNA（あるいは RNA）のような複雑な分子の場合、ガラス瓶の中で様々な化学物質を結合させるだけでは作製できないのである。

この種の有機分子は加熱されると分解しやすい。

だとすれば、それが初めて生成された時には高温の環境ではなく、低温か中程度の温度だったと考えられる。

地球上の生命は RNA と DNA を持っている。

RNA が誕生しさえすれば、生命への道が開ける。

RNA があればいつかは DNA ができるからだ。

だが、最初の RNA はどうやってこの世に登場したのか。

そのときの地球はどのような環境で、どのような条件下にあったのか。

ダーウィンの池

【68】

生命誕生のモデルとして最初に提唱され、最も長く真実とされてきたのがチャールス・ダーウィンの説である。

ダーウィンは友人への手紙に、生命は「日光に温められた浅い池」のようなところで生まれたのではないかと記した。

真水であれ、海辺の潮溜まりであれ、とにかくその種の環境で生命が発生したとする考え方は、今日でも一部の間で唱えられ、教科書にも書かれている。

20 世紀初頭にはジョン・ホールデンやアレクサンドル・オパーリンといった科学者が、ダーウィンの考えを踏襲した上でさらに発展させた。

二人はそれぞれ独自に、初期の地球には「還元的な」大気があったのではないかとの仮説を立てた（酸化とは逆の化学反応を生じさせる大気のこと、そういう環境下では鉄が錆びない）。

当時の大気にはメタンとアンモニアが満ちて理想的な「原始スープ」を作っており、その大気のもと、どこかの浅い水の中で最初の生命が誕生したと彼らは説いた。

このため 1950 年代～60 年代頃までは、メタンとアンモニアの大気に水とエネルギーが加わりさえすれば、生命の材料であるアミノ酸がごく普通に合成できたはずだと信じられていた。

現在、初期の地球環境を研究している科学者には、この説を疑問視する向きが多い。生物の形成に必要な有機化合物は複雑である上、溶液が高温になれば簡単に分解する。しかも、この原始スープが平衡状態に陥らないように維持しておかねばならず、そのためには膨大な量のエネルギーがいる。

ダーウィンの時代には知りようのなかったことではあるが、地球（及びその他の地球型惑星）を生むに至ったメカニズムを考えると、初期の地球は有害で過酷な環境にあったはずであり、19 世紀や 20 世紀初頭に思い描いたようなのどかな池や潮溜まりとはかけ離れた場所だったに違いない。

ところが、1980 年代の初めに新たな可能性が開ける。

潜水たん査定アルビンによる発見を受けて、海洋学者のジョン・バロスが地球の生命は海底の熱水噴出孔で生まれたと主張したのだ。

新しい分子技術で噴出孔付近の微生物を分類したところ、その見解を裏づけるデータが得られた。

DNA 解析から明らかになったのは、その微生物が最初の数十億年を非常に高温の水の中で暮らしたか、または低温の場所で生まれた後で何らかの高エネルギーなプロセスにより、生命を脅かすほどの熱にさらされたかのどちらかだということである。

熱水噴出孔に棲む微生物のほとんどは、後の研究で「古細菌」という大分類（これを「ドメイン」という）に括られることがわかった。

古細菌は地球の既知の生物の中で最も古い系統に属し、中でも最も早い時期に誕生したのが好熱菌である。

その名の通り高温を好み、沸騰に近い熱湯の中でも問題なく繁殖できる。

池の中ではあり得ない環境だ。

この発見からは、噴出孔の微生物が太古の昔から存在していたことがうかがえた。

44 億年前～38 億年前には隕石が次々と地球に降り注いでいた。

一個の隕石（直径 500 キロもの彗星）が衝突するたびに、海は部分的に、場合によっては全面的に蒸発しただろう。

地表面の岩石も広い範囲で蒸発し、数千度にもなる超高温の岩石蒸気と化した。

この大気中の岩石蒸気が海全体を蒸発させ、誕生間近の生物がいたとしてもその過程で全て根絶やしにされたはずだ。

熱が宇宙空間に放射されることで地球は少しずつ冷えてはいったが、雨が降って新しい海ができるまでには少なくとも数千年を要したと見られ、その間を地球の表面で生き延びた生命がいたとは想像しにくい。

以前であれば、生命の起源を考察する際に大型隕石の衝突を踏まえる必要などなかった。

だが、そのことを知っている今となっては、**生命が生まれたとされる時期**に隕石衝突の巨大エネルギーから守られていた場所は、**深海か地殻自体の内部だと考え**たくなる。海の深部や岩石の内部だけが、隕石の爆撃から地球最初の生命を守ってくれたのではないかと。

熱水噴出孔の鉱物の表面

【69】

海底の熱水噴出孔とその**周辺**は、生命誕生の候補地として今なお支持を集めている。この環境は、**初期の地球の海や大気と同じで還元的な性質**がきわめて強い。噴出孔からは、生命進化の地にふさわしい化学物質が熱水とともに噴き出している。例えば**硫化水素、メタン、アンモニア**などだ。噴出孔で起きる化学反応は概ね大気と切り離されているため、大気の成分にかかわらず生命は進化できたかもしれない。もしそうなら、当時の地球大気の化学成分が生命に適していなかったという問題は取り除かれる。しかし、熱水噴出孔起源説にも難点はある。RNA はあれだけ不安定な分子なのに、**高温・高圧の熱水噴出孔**でどのように生成されたのだろうか？

【70】

初期の生命は**硫化鉄鉱物の表面で形成されたのではない**か。そう考えているのが、ドイツの**ギュンター・ヴェヒターズホイザー**である。彼は自らの仮説を「**硫化鉄ワールド説**」と呼んでいる。最初の生命を「**パイオニア生物**」と名づけ、それが作られたのは**海底熱水噴出孔の高温・高圧の環境**だというのが仮説の主旨だ。熱水噴出孔は海底火山の活動によってできたものである。何千キロにも及ぶ海溝に沿って岩に囲まれた孔が開いており、無機物を豊富に含む高温の液体がそこから噴き出している。その仮説によると、地表であれば水を沸騰させるような高温（100℃）の環境下で生命は誕生した（もっとも、高圧下の水は100℃では沸騰しない）。しかも、噴出孔からの水には一群の重要な元素や化合物が含まれている。ただ、**有機分子が蓄積**するためには、噴出孔からの熱水に十分な量の**一酸化炭素と二酸化炭素**、さらに**硫化水素**が溶けている必要がある。それがないと、**アミノ酸を組み立てるための炭素と硫黄**が得られず、ひいては**核酸やタンパク質、脂質**も作れなくなる。

噴出孔から熱水が噴き出すにつれ、次第に**鉄、硫黄、ニッケル**を含む**鉱物が堆積**する。これにより生まれる**小さな領域が炭素含有分子を捕らえ**、化学反応を生じさせてまず**炭素原子を解放**し、次いでそれらを**結合**して、さらに**複雑で炭素の豊富な分子**に変える。同じ場所に様々な**鉱物が誕生**し、そこに含まれる**鉄原子と有毒な硫化水素ガス**が接触すると**黄鉄鉱**（パイライトともいう）ができる。この反応からは**エネルギーを持つ分子が生じる**ため、生命にとって重要な二つの条件が揃うことになる。

つまり、生命につながる**正しい元素**と、必要な**化学反応を起こすためのエネルギー**だ。

しかし、黄鉄鉱を作る反応からのエネルギーだけでは、どんな形態の原始生命であれ燃料にするには不十分である。

ヴェヒタースホイザーは、別のガスである一酸化炭素がかかわる反応も必要だと気づいた。エネルギーはなくてはならないものである。

それが原動力となるからこそ、分子がレゴブロックのように積み重なり、徐々に全てがまとめ上げられて、個々のブロックの単純な総和とは全く異なる最終形ができ上がるのだ。

鉱物の表面で生命が誕生するという考え方は今に始まったものではない。

粘土やケイ酸塩鉱物の結晶、あるいは黄鉄鉱のような平たい鉱物の表面に、初期の有機分子が集まったのではないかという説は過去にもあった。

化学者で生物学者の A・G・ケアンズ＝スミスは数十年前、最初の生命が持っていたはずの特徴をいくつか挙げている。

進化することができ、遺伝子の数や分化の度合いが非常に少ない「ローテク」の生物であり、黄鉄鉱または硫化鉄の表面に地球内部からの化学物質が集積することで誕生した、というものだ。

しかし、初期の生命に関する研究者にはこの筋書きに疑いの目を向ける者が多い。

その一番大きな理由は、有機物が無機物に取って代わる過程に自然選択がかかわっていないからである。

一酸化炭素と硫化水素は動物を死に至らしめる気体であり、前者の中毒は故意にせよ事故にせよ無数の命を奪ってきた。

しかし、ヴェヒタースホイザーの考えが正しいなら、その二種類の猛毒ガスと黄鉄鉱の組み合わせが生命への扉を開いたことになる。

【71】

ニック・レーンはこの見解を次のようにまとめている。

「全生物の共通祖先は・・・独立した生活を営む一個の細胞ではなく、無機物の小室が迷路のように入り組んだ岩石だったことになる。

まわりを囲む鉄、硫黄、ニッケルの壁が触媒として働き、自然に生じたプロトン〔訳注 水素イオン〕濃度勾配を利用してエネルギーを得る。

最初の生命は（したがって）、タンパク質と DNA そのものが生成されるまで多孔質の岩石として分子とエネルギーを生み出していたというわけだ」。

科学者のウィリアム・マーティンとマイケル・ラッセルは、この仮説を踏まえた新たな説を 2003 年と 2007 年に発表している。

彼らは熱水噴出孔起源説をさらに先に進め、そうした環境なら必要な原材料とエネルギーが全て揃っているだけでなく、生命に欠かせない重要な特徴も備わると主張した。すなわち細胞である。

二人の考えでは、生命は硫化第一鉄と呼ばれる整然とした構造の鉱物中で誕生した。

誕生の場所は、地獄（熱すぎる）と青い深海（冷たすぎる）の間であり、この場合で言えば、硫化物に富んだ高温の液体が熱水噴出孔または湧出孔から出ている場所と、鉄を豊富に含む太古の海水との間である。

これは机上の空論ではない。

実際に化石として残っている噴出孔の近くには、立体的な骨組み構造が今でも観察できる。それが後に細胞壁へと発達したのかもしれない。

有機分子の「全生物学的合成」は、噴出孔や湧出孔付近で形成された鉱物内部のごく微細な小室の内壁で起きたに違いない。

マーティンとラッセルはそう説いた。

その後の「RNA ワールド」へと至る化学反応も、この鉱物内の小室の壁で行なわれたことになる。

【72】

21 世紀の幕が開く頃にはすでに多くの手がかりが得られていて、生命がどこで誕生したかについていくつもの候補が提案されていた。

最古の生物が熱を愛していたことは間違いない。

今も熱水噴出孔で見つかるような生物の一種である。

生命を生むための化学物質とエネルギーも全て噴出孔に存在していた（そこで進化したとは限らないが）。

しかも噴出孔は地表の厳しい環境から逃れられる場所であり、何より初期の地球に 10 億年もの間降り注いだ小惑星の破壊から守られていた。

ところが、諸手を挙げてこの仮説を受け入れるには一つ大きな障害があった。

RNA と、RNA ほどでないにせよ DNA は、熱水噴出孔のような高温のもとでは非常に不安定になることである。

いったん RNA が生成されてしまえば、RNA から DNA の移行はそれほど難しくはない。RNA を鋳型として DNA を作ればいいからだ。

しかし、小さな分子がどうやって RNA のような複雑な分子になったのかは今も謎である。

なにしろ、最も単純な構造の RNA でさえ、多数の原子が正確に配置されてできているのだ。

もっとも、謎ではあっても不可能というわけではない。

人為的に RNA を合成する研究は急速に進歩しており、詳細なステップは無理でも大まかな道筋は明らかになりつつある。

砂漠の衝突クレーター

【73】

最も新しい仮説を唱えているのが、スティーヴン・ベナーと、著者らの一人ジョゼフ・カーシュヴィンクである。

一番難しいのは RNA を作る段階だ。複雑で大型の分子であるため、非常に壊れやすいからである。

水がぶつかれば、核酸のポリマー（小さな分子のつながり）の結合が断たれるほどだ。

それだけでなく、実は RNA を生成するにはいくつものステップを要し、しかもそれぞれのステップに必要な条件が異なるようなのである。

つまり、ステップごとに違う化学的環境がなくてはならない。

生化学者のアントニオ・ラスカーノがこの問題を次のように表現している。

「RNA ワールドのモデルにはいくつか深刻な難点がある。

一つは、リボース〔訳注 RNA の糖成分〕の生成と蓄積へと至る妥当な非生物学的メカニズムを提示できないことだ」。

一つの解決策となりそうな仮説がある。

現在の気温と同じであれば、砂漠のありふれた鉱物からリボースを合成できるというものだ。

ベナーの指摘によれば、重大な問題は炭水化物（リボースを含む）をどう生成するかではなく、それが無秩序に作られ続けてしまうのをいかにして防ぐかである。

さもないと、べとべとした茶色のコールタールのようなものに成り果ててしまうからだ。ベナーは生成パターンを詳しく検討し、イオン半径表を眺めた後で、コールタールへの道を封じるにはカルシウムイオン (Ca^{+2}) とホウ酸塩イオン (BO_3^{-3}) との反応が必要だと気づく。

このカルシウムイオンとホウ酸塩イオンの結合でできる鉱物（コールマナイト、ウレキサイトなど）はよく石炭に用いられ、高温で乾燥した環境で塩水が干上がることによって生じる。

あとは、酸化モリブデンを触媒として微妙な再配置をするだけで、生理活性作用を持つリボースが誕生する。

ベナーは手がかりを求めて現存する生物にも目を向けた。

様々な細菌を対象にその安定性を調べたところ、最も古い系統の細菌は 65°C の環境で生まれたことがわかる。

これはどんな「温かく浅い池」より高温ではあるものの、数百°C にもなる熱水噴出孔よりはるかに温度が低い。

さらにいうと、65°C になるような場所は、今の地球はもちろん 37 億年前の地球であってもほとんど見当たらない——砂漠を除いては。

砂漠のような条件のもとでは環境全体がアルカリ性になり、ホウ酸カルシウムが豊富に存在する。

ホウ酸鉱物からリボースを作るのに都合のいい環境は、これ以外にない。

こうした場所には各種の粘土鉱物もよく見られる。

生命に必要な複雑な有機化合物を誕生させるには、粘土でできた土台の助けが必要らしいという見方が強まりつつある。

ホウ酸鉱物は RNA を安定させる働きを持つ。

ただしそれが生成されるためには、一つながりのステップを通して液体が流入と蒸発を繰り返すような環境が必要だ。

カーシュヴィンクは MIT のベン・ワイズとともに、ベナーが提案したかたちでホウ酸塩から RNA が作られるような自然環境を考えた。

カリフォルニアにはその好例がある。

シエラネバダ山脈の火成岩から滲み出したホウ素は、モノ湖、オーエンズ湖、チャイナ湖、サールズ湖、パナミント湖といった乾湖を次々に通ってデスバレーの底にまで達している。このうち、最後のいくつかの場所には、多量のホウ酸塩を含む堆積岩が形成されている。

こうした環境が少なくとも初期の地球で、特に 42 億年前～38 億年前という生命誕生期と見られる時代にあつたとすれば、最も可能性が高いように思えるのは砂漠の中にできた一連の衝突クレーターだろう。

そうした場所であれば、高い位置にあるクレーターから低いところのクレーターへと水が伝わり、流入と蒸発の連続が可能になる。

しかし、そんな場所が 40 億年ほど前の地球に存在していた見込みは低い。

しかも当時の地球環境は還元的な性質が強かったため、リボース合成の最終段階に必要な酸化モリブデンもなかった。

地球の最も古い岩石は水中で形成されたと見られる。

というのも、46 億年の歴史を持つこの惑星で、30 億年近く前になるまでは地上に広大な大陸が存在した証拠が十分にはないからだ。

第2章で触れたように、最古の鉱物ジルコンの分析からも少なくとも 44 億年前には海が広がっていたことがうかがえる。

今ある証拠をもとに判断するなら、生命が誕生したとされる初期の地球はほぼ全球が海に覆われていて、陸地といえばせいぜい島が連なる程度だった。

しかし、地球だけが地球型惑星ではない。

金星は地球とほぼ同じ大きさだが、太陽に近すぎるので生命が一度でも誕生した可能性はきわめて低い。。

だが、もう一つの可能性がある。

火星だ。

【74】

21 世紀に入って、火星初期の地質についてはずいぶん多くのことがわかってきた。

全球を覆うような海が火星にできたことはない。

なぜそう確信が持てるかといえば、かなり古い時代の岩石が今も地表に露出しているからだ。

もっとも。火星探査からもたらされた膨大な新しいデータを読み解くと、昔の火星には複数の大きな湖と小さな海があり、北極盆地にはかつて大洋が広がっていたと見られる。

また、地球に比べて酸化還元勾配が大きかったことを示す証拠もある。

これは、生命がエネルギーを得る上で重要な要素だ。

火星深部のマントルは非常に還元的であるため、メタンや水素 (H_2) など、生命に必要な炭素含有化合物を前生物的に合成するためのガスも存在していたはずである。

つまり原材料は揃っていた。

こうしたことから、40 億年あまり前の火星には生命が誕生しており、しかもその生命が隕石に載って地球にやって来たと考えられる研究者がいる。

著者の二人もそうだ。

とりわけカーシュヴィンクはこの説を固く信じている。

問題は、火星で生まれた初期の生命が地球に到達することが果たして可能だったかどうかだ。

パンスペルミア説と火星のケース

【75】

現在、地球の表面は比較的大きな海盆（全体の約 75 パーセントを占める）と、平均海面より高い大陸塊に分かれる。

大陸を年代測定するだけでも、あるいはそれに代わる地球化学的な手法で調べてみてもわかるように、大陸は時間とともに少しずつ広がってきた。

沈み込み帯で、大陸の縁に新しい花崗岩の基盤岩が付け足されるからだ。

沈み込み帯では、堆積物を満載した湿った岩石が数百キロの深さまで運ばれ、半ば溶かされて花崗岩となる。

大陸が次第に広がっているとすれば、地質年代を遡るにつれて陸地面積の占める割合は小さくなっていくことが予想される。

だが要因はそれだけではない。

地球物理学研究のモデルから、約 46 年前に月を誕生させたジャイアント・インパクト（天体の大衝突）の直後は地球全体が溶けていたことがわかっている。

衝突によって猛烈な熱が生み出され、ニッケルと鉄の金属が分離して沈んで中心核を作った結果、地表には巨大なマグマの海が広がった。

衝突後 5 億年あまりの間は、激しい熱流が発生するとともに、地球の最表層部が次第に地殻として固まっていく時代だった。

大陸が海底より高く突き出ているのは、その土台となる物質の密度が低いために上に向かって「浮いて」いるからに過ぎない。

熱流が大きいと、大陸の土台部分が溶ける。

それにより、高い山脈は形成されなくなる。

最後にもう一つ、地球の海の体積が少しずつ減少している可能性が地球科学の研究から指摘されている。

地球を形づくったジャイアント・インパクトの後、若い地球の表面にはおそらく大量の水蒸気が満ち、それがプレート運動を通じて徐々にマントルに引き込まれていったと見られている。

こうしたプロセスがあったことは、44 億年前のジルコンに化学の指紋としてはっきり残っている。

最も初期の海がどれくらいの大きさだったのかには諸説あり、現在と同程度というものから 3~4 倍広かったというものまで様々だ。

以上の条件を全て考え合わせると、約 35 億年前より古い時代に海面から突き出ていたものがあつたとすれば、火山の不安定な頂がせいぜいだったと思われる。

水に満ちた世界はリボースの形成にはあまり適さない。

タンパク質や核酸といった大型の分子を作るにも全く不向きである。

どちらも水分子を放出することで新たなサブユニットを結合するからだ。

そう考えると、約 35 億年前までの地球には、生命の誕生に都合のいい場所はおそらくなかっただろう。

デスバレーに見られるような一つながりの湖が存在して、生命に不可欠なリボースなどの炭水化物を安定化できる程度までホウ酸カルシウムを濃縮できるようになるのは、多分かなり先でないは無理だったはずである。

初期の生命は多数の化学的特性を持たなかったため、未熟な代謝の原動力となるほどのエネルギーを生み出すこともできなかった。

過去 10 年で徹底した実験が行われた結果、隕石が火星の表面から地球へと移動しても熱で殺菌されることがなく、従って生命を運び得ることが明確に示されている。

45 億年前から現在までに、10 億トンを超える火星の岩石が地球に飛来した。

だとすれば、生命がまず火星で生まれ、それから隕石に載って地球にやって来たという可能性は、検討に値する重要なものといえる。

火星の直径は地球の半分しかなく、質量はおよそ 10 分の 1 だ。

そのせいで重力も小さいため、隕石や気体分子などが完全に重力場から逃げ出すことが起こりやすくなっている。

例えば小型の小惑星が火星の表面に（秒速 15~20 キロで）衝突すれば、表面の物質が多量に飛び散って太陽を回る軌道に乗ってもおかしくはなく、しかも火星から放り出された岩石は生命が死滅するほどの熱や衝撃に見舞われることがない。

したがって、もしも火星に生命が誕生していたら、やはり簡単に重力場を脱出できたに違いない。

逆に地球は重力場が強いので、火星と違ってきわめて長期にわたって水圏や大気圏をそのままの状態で保持することができる。

火星の大気圧は非常に低く、液体の水が室温で沸騰して蒸発するほどだ。

2012 年の火星探査のデータからはっきりわかるように、着陸地点のゲール・クレーターにはかつて大きな湖か、ことによると海が存在し、そこに向かって水が流れていたために扇状地が作られている。

世界が火山岩でできていて、豊富な水の流れと海があって、水の循環が活発であれば、生命が存在したと考えるのが妥当だ。

少なくとも、存在し得る環境であったことは間違いない。

現時点で地球に見られる生命が最初に誕生した場所は、実は火星だったのではないかと著者らは考えている。

地球の冥王代まで遡ると、44 億年前（の火星）にはすでに海が存在していた形跡が残っている。

ベナーの説くホウ酸塩がかかわる経路を用い、その後はつながった砂漠のクレーターを歩いていけば、火星の環境で生命が誕生したはずだというのが今世紀になってカーシュヴィンクとワイスが唱えた新仮説だ。

複雑な有機分子はもちろん、休眠期にある微生物であっても、惑星間パンスペルミアと呼ばれるプロセスで火星から地球に運べるのが今や数々の実験によって裏づけられている。惑星間パンスペルミアとは、例えば 36 億年前に大型の天体が火星に衝突したとして、その衝撃で多量の火星隕石が宇宙空間に放り出されて地球に飛来したということだ。そして、それとともに火星の生命の種子を地球に植えたわけである。

生命の起源が火星にあるという説を裏づけるもう一つの証拠が、ディヴィッド・ディーマーによる新しい研究からもたらされている。

RNA が適切に機能するためにはある程度の長さが必要なのだが、長い RNA 鎖を得るのは非常に難しい。

一つには、RNA ヌクレオチドと呼ばれるサブユニット同士をつなげて「ポリマー」にするのに困難を伴うためだ。

ディーマーは実験で、ばらばらのヌクレオチドを含んだ希釈溶液を凍らせたところ、氷の結晶の縁に沿って多数が結合されることが確認された。

当時の地球に氷はない。

しかし火星なら、現在と同様に極に氷があったはずだ。

特に火星の誕生間もない頃は、太陽光が弱かったのでなおさらである。

生命をつくる-----2014 年の現状

【76】

初期の地球で非生命から生命が生まれたプロセスを解明できるかどうかは、試験管の中で生命を作れる段階に私たちがどれくらい近づいているかにかかっている部分が少なくない。わずか5年前でも、その答えは「まだまだ遠い」だった。

だが、生化学者のジャック・ショスタク（2009年のノーベル生理学・医学賞受賞）率いる研究グループのおかげで、今の私たちは世間が思っている以上に生命の合成に迫っている。

ショスタクと研究グループはほぼ20年にわたって、RNAにかかわる化学反応の実験を行ってきた。

最古の情報伝達分子はRNAだったか、もしくはそれによく似た分子が後に今のようなRNAに進化したかのどちらかと見られている。

ショスタクのグループが今世紀に入って長足の進歩を遂げたのは、このRNAの研究においてである。

秘訣は、まず溶液中のヌクレオチドを結合させて短いRNA鎖を作ることにある。

いったんそこまでできてしまえば、それをつなげて長い鎖にするのは複製させるよりも難しくない。

ところがヌクレオチドが30個程度つながると、RNAは複製を始める。

というのも、それくらいかそれ以上の長さになると、RNA分子は全く新しい性質を獲得し、触媒として機能するようになるからだ。

触媒とは化学反応の速度を速める分子のことであり、この場合に加速されるものが、ほかならぬRNA分子の複製なのである。

ヌクレオチド30個以上のRNA鎖を初期の地球上（またはその内部）で作るには、**土台となる粘土が必要**だったと思われる。

特に適しているのがモンモリロナイトという粘土鉱物の一種だ。

この仮説によれば、液体を漂っていた単体のヌクレオチドが粘土にぶつかる。

ヌクレオチドは粘土とゆるやかに結合し、その場に固定される。

こうして粘土鉱物のどこかの場所にヌクレオチド30個以上の鎖ができる。

粘土と強く結びついているわけではないので離れやすい。

もしも長いRNA鎖が何本も集まったものが存在して、それが脂質に富む液体の小さな泡（石鹸の泡のような）の中に取り込まれたとしたら、最初の原始細胞の誕生となる。

生命に必要な二つの**主な構成要素**は、**自己複製できる細胞**と、**情報伝達と触媒の両方の機能を兼ね備えた分子**である。

触媒が存在すると、その作用によって環境に変化が生じ、本来なら起き得なかった反応が起こるようになる。

RNAを作る部品が細胞内に新たに多数持ち込まれば、RNAの触媒作用によってさらなるRNAが作られる。

従来の考え方では、**細胞と情報分子**はどこかで別々に誕生し、それから**合体した**とされてきた。

今ではその二つが**一緒に生まれたように**思える。

「裸」のRNA分子がヌクレオチドのスープの中を漂い、自らを繰り返し複製する。最初の生命とはただそれだけの存在だったと捉える生物学者は多い。

しかし、細胞と RNA が一個のユニットとして誕生したという見方の方がもっと支持を集めている。

脂質でできた二重の細胞壁の中に小さな RNA ヌクレオチドが入っていて、脂質とヌクレオチドをさらに取り込むことで成長する。

個々のヌクレオチドは細胞壁の脂質の隙間を通り抜けられるはずだ。

それに対し、細胞内でヌクレオチドがつながると大きすぎて細胞壁から出られなくなる。

初期の地球に存在して、しかも原始細胞を作ることができる物質として考えられるのは、結合すると脂質分子になる化学物質だ。

さらに脂質分子同士はすぐに結びつくので、まずはシート状になり、さらに球状になった。

脂質分子は十分な量が蓄積していれば、攪拌されたときに中空の球体を作りやすい化学特性を持つ。

脂質の球体ができるとき、RNA になり得る分子（ヌクレオチド）が液体中に存在していれば一緒に中に取り込まれる。

この場合も重要なのは濃度であり、それが全生物的「スープ」という比喩がよく用いられる理由でもある。

原始細胞の球体が急に形成されたときに相当数のヌクレオチドが中に捕らえられなければ、内部で RNA が生成される見込みはない。

もちろん、新しく生まれた原始細胞が、外側にあるヌクレオチドを能動的にせよ受動的にせよ細胞壁を通して内部に取り入れることができるなら話は別だ。

細胞壁はヌクレオチドを「摂取する」だけではない。

脂質分子をさらに蓄積することで、長く伸びてソーセージ型になったはずだ。

やがてそれが二つの球体に分かれ、それぞれがおよそ半分の RNA を抱え持った。

RNA だけに留まらないのはいうまでもない。

細胞がたとえ短期間であれ正常に機能するにはエネルギーを得なくてはならず、そのためにはエネルギーを生み出す化学装置が必要だ。

その材料となるのはタンパク質である。

したがって、原始細胞の内部には様々な化学物質が存在しなくてはならないし、欲しい物質を取り込んで不要な物質を外に出す秩序立ったメカニズムも必要になる。

しかもたくさんの予備部品（多種多様な分子）があって、すぐに使える状態になっていないなくてはだめだ。

進化が始まるのはこの段階である。

内部に含まれる分子の性質の違いから、速く複製できる細胞とそうでない細胞が現われる。

自然選択が始動し、生命のエンジンがかかる。

つまり、自律性を持ち、代謝し、複製して進化する細胞の誕生だ。

ダーウィン境界

【77】

初期の細胞はモジュラーホームのようなもので、各部分が違う場所で別々の要素として組み立てられ、それから一箇所に運ばれてきたのかもしれない。

運んだのは水か空気の流れだった可能性がある。

2010年に始まった研究は、後者だったことを強力に裏づけつつある。

これは、高層大気で見つかる生物と生命の材料の量を調べるというものだ。

最古の生命を形作る細胞には多数の孔が開いた細胞壁があり、ゲノム全体を交換することも可能だったかもしれない。

これを遺伝子の水平伝搬という。

しかし、やがて細胞の仕組みが一時的なものから恒久的なものへと変わる段階に達した。

生物学者のカール・ウーズが「ダーウィン境界」と呼んだ段階である。

これを境に、現代に近い意味での「種」が区別できるようになり、自然選択（つまり進化）の支配が始まる。

前の時代に存在した単純な細胞よりも、より複雑な機能を持つ一体型の細胞を自然選択が好んだため、モジュラーホーム・タイプではなくこちらの方が繁栄した。

現代的な生命が誕生したのは、遺伝子の極端な変化がなくなったときである。

ウーズのように最初の生命の進化を研究している者たちは、この段階にまで生命が組織されたことが進化の歴史の中で最も重要な出来事だったと信じている。

とはいえ、それ以前の細胞にも仲間がいたのは間違いない。

おそらく生態系は、化学物質がありとあらゆる形に複雑に組み合わされたもので溢れ、それらは生命らしい側面を部分的なりとも備えていただろう。

生命と呼べるもの、生命に近いもの、生命に向けて進化途上のものが入り交じった、巨大な動物園のようなものが思い浮かぶ。

そこには、核酸を含む生物が何種類もいたはずだ。

RNA とタンパク質の生物、RNA と DNA の生物、DNA と RNA とタンパク質の生物、

RNA ウィルス、DNA ウィルス、脂質の原始細胞、タンパク質の原始細胞など、

化学物質が複雑に融合した数々の生命が考えられる。

こうした種々雑多の生命と、生命に近いものが、全て一つの混沌とした生態系の中で競いながらひしめいていた。

いわば生命が地球上で最も多様化した時代である。

これは 40 億年前～39 億年ほど前のこととされるが、最近では著者らはもっと遅かった見ている。

いずれにしても、自然選択が多種多様な声明をふるいにかけ、最終的には一種類が残った。

第5章 酸素の登場

----35 億年前～20 億年前----

【78】

ストロマトライトは小山のような形をした層状の岩石であり、浅い水域で形成され、潮間帯にすむ藍藻類の粘液と堆積物が積み重なってできている。

地球に生命が誕生してしばらくしてから5億年ほど前までの間は、このストロマトライトこそが最もありふれた生命だった。

生命が誕生してから、最初のスノーボールアース現象によって実質的に始生代が終わるまでには、10 億年あまりという長い歳月が経過した。

この間については、主にストロマトライトと、チャートと呼ばれる瑪瑙に似た岩石中の珍しい化石によって生命の存在が確認されている。

現存するストロマトライトのうち、地球最古の生命について最も多くの手がかりを与えてくれるのが、西オーストラリア州のノースポール地区と、南アフリカのバーバートン・グリーンストーン帯と呼ばれる地域だ。

どちらにも、非常に古い形態のストロマトライトがある。

始生代の生命と酸素への道

【79】

25 億年ほど前になると、地球と生命史の行く手を左右する大きな出来事が起きる。それはきわめて重大な変化だったため、新たな地質時代区分の始まりを告げることとなった。

最も古い時代区分は冥王代で、地球が形成された 45 億 6700 万年前から、最古の岩石が確認されている約 42 億年前までで終わる。

続く始生代はおよそ 25 億年前までで、激しい隕石衝突に見舞われた「重爆撃期」にあたる。

次の時代区分は原生代だ。

始生代から原生代への移行は、概ね酸素濃度の上昇期と一致する。

この酸素を作り出したのが、光合成を行なう生物だ。

【80】

光合成とは、不活性な二酸化炭素を変換して、細胞が必要とする物質を生み出す（つまり無機炭素を有機炭素に変える）プロセスである。

ある種の光合成生物は、生命が最初に進化を始めた始生代にはすでに存在していた証拠がある。

また、光合成は最古の生命の誕生より後に始まったことも確実とみられている。

おそらく最初の生命は、化合物中の水素を硫黄原子と化学反応させ、（生命の歴史にとって）非常に重要な硫化水素を作り出してそれをエネルギー源としていた。

水素は高いエネルギーを生む物質である。

始生代の生物は、現代の生物にとっても必須の元素をやはり使用していたと思われる。

炭素、硫黄、酸素、水素、および窒素だ。

【81】

35 億年前の海や大気がどのようなものだったかについてはある程度わかっている。

二酸化炭素の濃度はたぶん現代よりもかなり高かっただろう。

大気には多量の水蒸気とともにメタンガスも漂っていたと見られる。

この種の大気は熱を閉じ込めるので、太陽のエネルギーが今よりはるかに弱かった当時であっても地球を暖かい状態に保つことができた。

始生代にこうした温室効果ガス（水蒸気、メタン、二酸化炭素）がなかったら、この惑星に液体の水は存在しなかったに違いない。

温室効果ガスがあったからこそ大気は熱を捕らえられ、惑星を温めるメカニズムが生まれた。

ただし、この大気には酸素が含まれていなかった。

【82】

この長い始生代の中に生きた生命はどういうものだったのか。

それを知る上で大きな手がかりとなるのが、現代の似たような環境に生息する生物である。低酸素の環境は今の海洋ではあまり多くないが、比較的小さい湖ではよく見られる。それどころが、現代の湖は層状になっていることが多く、表面に薄い酸素の層（空気中から吸収したもの）があって、その下の水には酸素が全く含まれていない。こういう環境に棲む微生物を研究することで、太古の生命がどのようなものだったかも垣間見えてきた。

現在の湖の炭素循環で重要な役割を果たす微生物はメタンとかわりがあり、この種の生物は始生代の海にも生息していた可能性が高い。

先ほども触れたように、メタンガスは地表からの反射熱を捕らえて、宇宙空間に逃がさないようにしている。

ある種の細菌はメタンを分解して食料にしており、初期の生命もそうやってメタンを利用するものが多かった。

つまり、地球で生命が誕生して程なく、エネルギーの獲得方法が様々に多様化したと考えられる。

【83】

地球の初期の生命がどのような歴史をたどったかは、堆積岩を調べることでかなりわかる。例えば、始生代の堆積岩にはしばしば真っ赤な層が現われる。

これは縞状鉄鉱床と呼ばれ、過去 18 億 5000 万年の間は地表中にほとんど存在しない。先カンブリア時代の終わりに一、二度起きたスノーボールアースの最中に、例外的に見られるのみである。

鉄が沈殿して堆積したということは、還元的で緑がかった「第一鉄」が遊離酸素分子と反応し、錆びて、赤い「第二鉄」になったことを意味する。

だとすれば、初めは鉄が緑の第一鉄として水に溶けていられるほど酸素濃度が低かったのに、次の段階ではそれを錆びさせるほどの酸素が存在していたことになる。

この謎は長らく科学者を悩ませてきた。

50 年あまり前、先カンブリア時代を研究するプレイストン・クラウドは、その酸素が藍藻類からもたらされたのではないかと考えた。

藍藻類は光合成をする原始的な微生物で、現在ではシアノバクテリアともいう。

これは酸素発生型光合成と呼ばれるもので、文字通り水分子を切断して酸素原子を解放する。

いわば命を与えるプロセスであり、それを行なうことを学んだのは地球の生命の中でこの藍藻類だけである。

後にその子孫の一部が他の生物に取り込まれ、今や植物や藻類の緑色の細胞小器官として光を集めて私たち全ての役に立っている。

現存する植物が持つこの小さな「カプセル」は、どれも最初のシアノバクテリアから進化したものだ。

ただし今は独立した生物としてではなく、細胞内に「内共生」して多細胞植物の命に従っている。

最初に登場したシアノバクテリアは、「酸素のオアシス」として水中に浮かびながら一個一個がごく少量の酸素を吐き出し、それがやがて何億年もかけて生命のあり方を根

本から変えたのみならず、地球の海や大気や、地表を覆う岩石の化学的性質までをも変化させたのではないか。

クラウドはそんな筋書きを思い描いた。

始生代の海にわずかな酸素が解き放たれるたびに、微量の錆のかけらが海底に沈み、ゆっくりと、だが病むことなく蓄積して行って、あの縞状鉄鉱床を作ったのだと。

【84】

酸素分子ほど毒性の強い物質はそうない。

抗酸化剤はがんを闘う作用があるとされている。

酸素が複雑な細胞内の化学反応を、好ましからぬ場所とタイミングで酸素が乱してしまい、がんが発生するケースが多い。

酸素が実際に細胞を破壊し、細胞を変化させ、その反応性の高さによって細胞を殺すことさえできるからだ。

では、シアノバクテリアという毒を作り出す生物が、それが放出されるそばから死んでしまわなかったのはどうしてだろうか。

初期の生物は、抗酸化作用のある酵素で身を守らない限り自ら滅ぼすことになるが、大気中の酸素は全て酸素発生型の光合成によって作られるわけであるから、抗酸化酵素の誕生を促すような酸素が先に存在したはずはない。

この最初の「酸素ワクチン」は、光合成からでないとするどこから来たのか。

非生物学的な方法で酸素を生成するのは非常に難しい。

考えられる一つの方法として、紫外線がかかわる光化学反応がある。

大気中の二酸化炭素や水が紫外線をうけると、いくつかの化学物質とともに微量の酸素分子が生じる。

初期の地球には酸素がなかったのでオゾンも存在せず、紫外線がブロックされない。

ところが、紫外線には酸素分子を分解する作用もあるため、酸素が発生しても生物に影響を及ぼせるほど長く存在できる見込みは低い。

しかも当時は大量の紫外線が降り注いでいたので、生物がいたとしても（福永注：紫外線によって）DNAが傷つけられて生命を絶たれやすい環境にあった。

何らかのメカニズムによって、（福永注：酸素が）壊される前に酸素を他の生成物（特に水素と一酸化炭素）から分離する必要がある。

それを可能にするプロセスが二つ知られている。

一つは、水が高層大気中存在する場合、紫外線によって分解されて水素と酸素になり、水素は地球の脱出速度よりも速いスピードで宇宙空間に逃げて行く。

これにより、少量の酸素とオゾンと過酸化水素が残り、大気中を拡散しながら落ちてくる（重すぎて宇宙空間には逃げ出せないため）。

もっとも、この酸素は本当に微量だ。

生命活動や火山の噴火によって還元的な気体が発生すれば、酸素を含む化合物はその気体と反応し、生物圏に達するはるか手前で消されてしまう。

もう一つのプロセスは地表で起きる。

ただし氷河の表面でだ。

今日の南極では、「オゾンホール」のせいで通常よりも多様な波長の紫外線が氷の表面まで届き、そこで水分子を粉砕して水素ガスと過酸化水素を生成する。この過酸化水素は、水素ガスとは分離して氷の中に閉じ込められる。著者らが大学院生と行なった計算によれば、先カンブリア時代の氷河は最大で全体の0.1パーセントが過酸化水素でできていたと見られる。氷河が融ければ、過酸化水素は酸素分子と水に変換される。呼吸できるほどの量ではないものの、進化という強力な道具箱が仕事を始めるには十分だ。

これから説明するように、酸素を放出した最初のシアノバクテリアは先カンブリア時代の氷期に誕生し、酸素から身を守る方法を発達させたはずだと著者らは考えている。

生命と初期の地球に関する研究者、ロジャー・ビュイックは、2008年の論文の中で酸素が発生した「時期」についていくつかの選択肢を検討している。

一つ目は、酸素発生型光合成（現在の緑色植物が行なうもの）が生まれて何億年も経ってから、大気中の酸素濃度がかなり高くなったというもの。還元的な性質を持つ火山ガスや熱水や、地殻の鉱物は生産され続けていたので、それを酸化するには気の遠くなるような年月が必要だったからという理由だ。

二つ目は、光合成が24億年前までに現われ、短期間で環境の変化を引き起こしたというもの。本書ではこれを「大酸化事変」とよんでいる。

三つ目は、光合成などの何らかの方法によって酸素の生成が地球のごく初期に始まったというものだ。地質学的な記録が残っていないほど前の時代のことであり、それが始生代（25億年前より古い時代）の大気を酸素濃度の高いものにした。

どれが妥当なのかを判断するため、現時点で明らかになっていることをここで整理しておきたい。これは生命の歴史を深く理解する上で鍵を握る問題であるだけでなく、最近になって明らかになった事実が多々あるテーマでもあるからだ。

「大酸化事変」が起きるための地質学的条件

【85】

シアノバクテリアの登場が、地球の生命史における最も重要な（真核細胞や多細胞生物の誕生よりも重要な）出来事であるということは広く受け入れられている。だが、その革命的なイベントがいつ起きたかについては意外にも意見の一致を見ない。50年あまり前、地質学者がきわめて古い時代の河川の堆積岩を調べたときに、角の丸くなった黄鉄鉱（ありふれた鉱物）の粒や、微量のウランを含む鉱物（閃ウラン鉱）が見られることに気づいた。どちらも非常に酸化されやすいため（鉄と同じですぐに錆びる）、現代のように酸素濃度が高い環境にあっては、酸素から完全に遮断されていない限り海の中や開けた陸地で見つかることはない。

このことから、**始生代の終わり頃になるまで**大気にはほとんど**酸素が含まれていなかった**という考え方が生まれた。

具体的には、おそらく 25 億年前か、ことによるともっと後の時代までである。その時点になっても、大気中の酸素濃度はまだ非常に低かったため、**黄鉄鉱**や**閃ウラン鉱**は錆びることなく陸上や海中に存在できたというのが大方の地質学者の見方だ。

確かに、25 億年前に生成された岩石からは**黄鉄鉱**も**閃ウラン鉱**も豊富に確認される。つまり当時の大気中や海中の酸素濃度はゼロだったはずだ。ところが **24 億年前**になると、水中や陸上で形成された**岩石からどちらの鉱物も姿を消す**。だとすれば、**シアノバクテリア**が出現したのは 25 億年前から 24 億年前の間ということになるのだろうか。

この疑問が発端となって、生命史の理解を左右する一大論争が巻き起こった。この問題を解決する方法を見出すには何年もの研究を要した。研究者の見解が分かっていたのは、**シアノバクテリアが誕生したのが約 25 億年前なのか、それともそれより 10 億年程度早い 34 億年前に近い時代だったのか**、という点である。後者だとすると、地球に最初の生命が誕生してからほどない頃となる。

地球の大気に酸素分子が現われた時期については、別の筋書きも浮かび上がっている。これは地球の歴史を探る新しい手法によってもたらされたものだ。複数ある**硫黄同位体**の濃度を比較するのである。生命を研究する上で**炭素の同位体比**を調べるのは有効であり、地球最古の生命が誕生した年代の特定にもその方法が使われてきた。というのも、同じ元素（炭素、酸素、硫黄など）であっても、生きた細胞が特に好む同位体というものがあるからだ。通常の化学反応が起きる場合、軽い同位体の方が重い同位体よりも反応の進み方が速い。化学結合が弱く、結合が壊れやすいためだ。反応速度が速いので、植物は炭素と酸素の同位体の中では最も軽いものを好む。**ジェームズ・ファーカー**と**マーク・シーメンズ**は、共同研究者とともに 2000 年に新しい手法を考案した。年代が明らかになっている岩石中に含まれる**硫黄同位体**の数を比べることで、特定の種類の生物がいつ誕生したかを突き止めようというものである。

ファーカーと**シーメンズ**は**始生代から古生代までの岩石**を調べて、中に含まれる**硫黄同位体のパターン**を分析した。すると、およそ **24 億年前までの時代では数値の変動が非常に大きい**のに対し、**それより新しい岩石になると変動が消える**ことがわかった。これは、大気中の**二酸化硫黄分子**に当たる**紫外線の量が減少した**ためと解釈するのが最も理にかなっている。

だとすれば、今も存在する**オゾン層**が（初めて）**形成された**としか考えられない。**酸素がなければオゾン層もなく**、しかも 24 億年ほど前までにオゾン層は存在しなかったことがこうして確かめられた。この時期より後には、大気に酸素が含まれていたと思わせる手がかりが様々な堆積岩から得られている。

ということは、24 億年前までは酸素が全く存在しなかったか、少なくともオゾン層を作るほどの量はなかったことになる。

では、シアノバクテリアはどこにも生息していなかったのだろうか。

おそらくいなかったと見られる。

南アフリカで大規模なコアサンプル採掘計画が実施されたとき、初めは大酸化事変の形跡を捉えることができなかった。

そこで、やはり南アの少し新しい堆積岩から二つのコアサンプルを追加で採掘したところ、大酸化事変が起きたらしき地層を貫通した。

それは 24 億年前～22 億年前までの時代の地層で、古原生代と呼ばれる地質時代区分の最も初期にあたる。

その層で研究チームはかなり奇妙なものを見つけた。

黄鉄鉱と閃ウラン鉱、そして硫黄同位体は、酸素が「欠乏」していたことをうかがわせる有力な指標である。

一方、マンガンという元素は、通常であれば遊離酸素が「存在」していたことを示す同じくらい強力な手がかりだ。

ところが、このコアサンプルからは多量の酸化マンガンが確認されると同時に、同じ岩石から酸素の欠乏を示唆する指標も発見されたのである。

この矛盾はどうすれば解けるのだろうか。

シアノバクテリアが酸素を放出する仕組みは当時（24 億年前）はまだ発達していなかったが、そこに到達するための段階はすでにかかなり進んでいたのではないか。

著者らはそう考えている。

酸素発生型の光合成では、エネルギーを集めて水分子を分解し、酸素を解き放つ。

そのためには、マンガン原子 4 個とカルシウム原子 1 個が 5 個の酸素原子でつながった「マンガングラスタ」と呼ばれる物質の関与が必要であることが近年明らかになった。

マンガングラスタを含むタンパク質の複合体が植物の細胞内でゼロから作られるとき、マンガン原子は一度に一個ずつ複合体の中に取り込まれ、光子の力を借りて酸化される。堆積物に突如として大量の酸化マンガンが現われるのは、シアノバクテリアの祖先が水中に溶けた還元マンガンを摂取していたからではないかと、著者らのグループは論文の中で説いた。

光合成に必要な電子を得るためである。

同じことを硫化水素や、有機炭素や、第一鉄で行なう原始的な光合成細菌はいくつも知られているものの、マンガンを利用するものはまだ発見されていない。

マンガンを用いて光合成をすれば、排泄物として大量の酸化マンガンが堆積物に吐き出されながらも、酸素分子が放出されることはない。

したがって黄鉄鉱や閃ウラン鉱はそのまま残るし、オゾン層が作られて硫黄の化学的性質が変化することもない。

堆積性のマンガンが岩屑（がんせつ）性の黄鉄鉱や閃ウラン鉱の粒子と一緒に見つかることは歴史上ただ一度しかなく、その期間も 24 億年前までから 23 億 5000 万年前までと短い。光合成に関与するタンパク質の複合体が本当にこの時期に登場したのだとしたら、それ以前に酸素発生型光合成が始まっていたことを示唆する間接的な証拠は全て間違っていることになる。

これは新しい解釈であって議論を呼んでいるが、著者らは正しいと確信している。

マンガンを酸化するこの微生物は、おそらくランダム突然変異によってこの世に誕生したのだろう。

著者らのモデルでは、これが数百万年にわたって生態系を支配した後、マンガンが溶けている表層水を使い果たしてしまったと見ている。

そして、何らかの生化学的な再配置を行なうことで、この微生物は水分子から直に電子を得られるようになり、その過程で大量の酸素を放出し始めた。

これが本当の意味でのシアノバクテリアの誕生である。

水はほぼ至るところにあるため、環境内に電子を供給する物質があるかないかでその成長が左右されることはもはやなくなった。

微量の鉄とリンさえあれば成長できる。

この時期、氷河による堆積物が存在したことは地質記録にはっきり残っており、その堆積物には鉄やリンなど、新しいシアノバクテリアが利用できる栄養素がたくさん含まれていた。

さらにいえば、氷河によって加速されたシアノバクテリアの繁栄が、わずか100万年のうちに二つの重要な温室効果ガス、二酸化炭素とメタンを減らすことになる。

惑星を温めていたシステムは急速に破壊されて、回復不能となった。

その結果、全球が氷河に覆われる、いわゆる「スノーボールアース」だ。

世界はこれを境に一変したのである。

地獄から来たスノーボール

【86】

地球の歴史を全て眺めても、極地が氷結しているときに海が層状に分かれる（つまり表面は酸素を含む薄い層でその下は酸素を含まない）ことはめったにない。

冷たい水が極で沈んで海水の循環を促すからだ。

しかも、氷河自体が大陸の岩石を粉砕してそれを海に戻す作用を持っている。

このときに海に放出される酸化鉄やリンの粒子は、今の私たちが芝生や庭に使う肥料の主成分と同じだ。

氷山が融ける様子を衛星画像で見ると、融けた後に光合成活動が広がっていくのが確認でき、砕けたわずかな岩石が海の生産性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

始生代と原生代初期には、大酸化事変の前に数度の氷期が訪れた。

29億年前～27億年前の時期に大規模な氷結が3回、24億5000万年前～23億5000万年前までの時期にも何回か起きている。

簡単な計算をすればわかるように、いずれかの氷期の最中に海に流れ込んだ鉄とリンの量をもってすれば、無酸素だった表層海水をシアノバクテリア（そのときまでに誕生していればの話だが）が支配し、地球の大気と海の表層を現在のように安定して酸素の豊富な状態に変えても全くおかしくはなかった。

100万年もかからずに達成できたに違いない。

だが、実際にはそうはならなかったということが、当時はまだ酸素発生型光合成が登場していなかったと考える強力な理由の一つとなっている。

大酸化事変が遅くともいつまでに起きていたかについては、確実な根拠が南アフリカの広大なマンガン鉱床から得られている。

これは「カラハリ・マンガン鉱床」と呼ばれ、その年代は 22 億 2000 万年前に遡る。実に巨大な鉱床で、大陸棚の上に堆積し、厚さ 50 メートル、面積は 500 平方キロ近くに及ぶ。

鉱床からは、岩屑性の黄鉄鉱や閃ウラン鉱の粒子も、硫黄同位体比の異常も一切見つかっていない。

酸素を豊富に含む大気のもとで形成されたとしか考えられないため、この時点では間違いなくシアノバクテリアの世界があり、オゾン層も作られ、海中にも空気中にも酸素が存在したと考えて良い。

このマンガン鉱床と、さらに深くにある黄鉄鉱とマンガンが混在している地層との間には、風変わりな厄介なものがもうひとつ横たわっている。

強烈な寒冷化によって氷河が熱帯地方にまで進出し、おそらくは海面全体が凍りついたと見られる形跡が残っているのだ。

最古のスノーボールアース現象である。

【87】

「スノーボールアース」という名前をつけたのは、著者らの一人カーシュヴィンクだ。

この第一回目は一億年近く続いた可能性がある。

ではそもそも「スノーボールアース」とは何なのだろうか。

実は、この現象が最初に発見されたのはもっと新しい時代の岩石からだった。

その氷河堆積物が形成されたのは、7 億 1700 万年前～6 億 3500 万年前であることが今ではわかっており、ほぼ全ての大陸で確認できる。

20 世紀前半に活躍した二人の地質学者、ブライアン・ハーランドとダグラス・モーソンは、カンブリア紀の前に大規模な氷河期があり、しかもその規模が異常なまでに大きく全球に及んだと見られることに早くから気づいていた。

その堆積物には紛れもない氷河特有の痕跡（ドロップストーン、漂礫岩、堆積物の底に見られる戦場構造など）が認められたが、その一方で不可思議な特徴もいくつかあった。

まず、中に含まれる砕屑（さいせつ）岩の多くが浅い海で形成された石灰岩であり、まるでバハマにあるような炭酸塩の台地（現在では熱帯でしか作られない）の上を氷河が進んで、粉々にした岩石を運び去ったかのように見える。

さらには、10 億年近く前にすでに地球から消えていたはずの縞状鉄鉱床に似たものがなぜか現われてもいた。

しかも、その氷河堆積物はたいてい石灰岩の層で覆われていた（これもまた堆積が低緯度地方で起きたしるし）。

1964 年、発表した総説論文の中で、ハーランドはその氷河が赤道にまで達していたに違いないと主張した。

地球の自転軸がどこに逸（そ）れていようと、堆積物は低緯度で形成されたとしか思えないからである。

ただし、海も全て凍りついたという考えは明確に退けた。

気候モデルを作る研究者から、そこまでの「氷の大厄災」になれば再び温暖な気候に回復するのは不可能なはずだと聞かされていたからである。

地球物理学の中で、過去の大陸の位置を調べる研究分野を古地磁気学といい、研究者は太古の昔の地球磁場を調べている。

地磁気の向きは極で垂直方向になるが、赤道では水平方向になる。

そのため、岩石が形成された時期に（水平な）層理面に対して地磁気がどの向きにあったかを測定すれば、当時その岩石がどの緯度にあったかが推測できる。

難しいのは、測定した地磁気が本当に岩石と同じ古い時代のものであって、最近の風化や何らかの変成作用によって得られたものではないと証明しなくてはならない点だ（意味ある結論を出すためには、間違いなく岩石形成時のものであるかを確認める必要がある）。

低緯度の氷河というこの仮説を検証しようと、初めは様々な古磁気学的分析が試みられた。ところが、1966年地質学に全く新しい考え方が提唱される。

プレートテクトニクスだ。

もしそれが正しく、大陸同士的位置関係が変わることがあるのなら、カンブリア紀前の氷河堆積物は実際には全て極で形成されて、その後プレート運動によって現在の低緯度に運ばれたとしてもおかしくないことになる。

低緯度地方が氷結したという説は、これを機に研究者たちのレーダー網から外れた。

1987年に事態が進展する。

オーストラリアにある氷河由来の岩石からじかに新たなサンプルを取って詳しく調べたところ、その堆積物が泥から岩石へと変わる前の段階ですでに低緯度特有の地磁気方向であったことが確認できたのだ。

赤道地方で海面の高さに広く氷河が存在していたことが、これにより初めて確実に証明された。

赤道付近ですら凍っていたのなら、極に向かって気温はなおさら低くなっていったはずである。

これを境に科学界の見方は変わる。

太古の昔に世界を氷が覆い尽くしていたという可能性をひとたび認めると、化石の分布状況や、岩石の種類や、古地磁気データから得られる情報の意味が以前より明確になった。

しかし、データが繰り返し指し示していたのは、赤道上に大きな大陸塊が存在したということである。

高緯度から赤道まで氷河が大陸に沿って前進する（そして海を覆うことはない）という従来のモデルでは、そのデータを説明できなかった。

赤道地方に氷河堆積物が形成されるとしたらどんなメカニズムが考えられるのか。

様々な可能性を再検討した結果、少なくともこの時代を研究している科学者の一部は地球全体が実際に凍りついていたと納得した。

そのハードルをクリアしてしまえば、先はおのずと見えてくる。

流氷が海面を閉ざし、光合成を減少させ、大気と海とのガス交換を妨げ、海底を無酸素状態にした。

海底の熱水噴出孔では鉄とマンガンの海中への溶解が進み、それがのちに金属となって縞状鉄鉱床を作った。

海中に日光が届かないため、熱水噴出孔付近でかろうじて氷が割れた場所でしか光合成が行われなくなる（これは現在でも北極とアイスランドで見られる）。
光合成生物もそこでなら生き延びることができただろう。

1992年に刊行された本（執筆はその四年前）の中で、カーシュヴィンクは、この現象に「スノーボールアース」という新しい名前をつけた。
さらにカーシュヴィンクはもう一歩進んで、**原生代に一度ないし複数回のスノーボールアースが起きたことが生物の急速な進化を可能にする環境をつくったのではないかと説いた。**今ではこれが、**動物の適応放散を促す進化の原動力だったと認められている。**

では、当初の気候モデルはどこが間違っていたのだろうか。
どのモデルも、**全球がそこまで凍結したら地球はその状態から二度と回復できないという**答えを導き出していた。

問題は、長い年月の間に二酸化炭素濃度が上昇して温室効果が徐々に増すことを、条件に組み入れていなかったことにある。

気候学者（特にジェームズ・ウォーカーとジェームズ・カスティング）はそれより10年も前に、二酸化炭素によって地球は**全球凍結の状態を脱すると指摘していた。**圧力を受けると、二酸化炭素の赤外線吸収スペクトルの幅が広がるからである。

スノーボールアースという考え方が発表されてから20年の間、大勢の地質学者や地球化学者、そして気候科学者が激しい議論を繰り広げつつ仮説の検証に努め、概念を発展させたり、モデルの予測の精度を向上させたりした。

ポール・ホフマンと共同研究者は、安定同位体に関する膨大なデータを集め、大気中に高濃度で含まれていた二酸化炭素がおそらく石灰岩や炭酸塩に変換されて氷河堆積物を覆っていたことを示している。

また、高精度のウラン-鉛年代測定法〔訳注 ウランが放射崩壊して訛りの同位体になる性質を利用して岩石の年代を決定する方法〕を用いた研究からは、**新原生代における低緯度地方の大規模氷河期が一斉に終わったことが確認された。**

これはモデルが予想していた通りである。

ここでも私たちは齊一説の誤りを目の当たりにする。

地球が凍りつくと、氷が海を覆って日光を遮るために、**海洋における有機物の生産量が著しく減少する。**

全球が凍結して超温室効果が終われば、その環境を生き延びて進化できる生物は限られてくる。

先エディアカラ紀の化石記録からはほとんど手がかりが得られないものの、**アクリターク**と総称される分類不能の海の微化石（**小型プランクトン様だが間違いなく真核生物**）を調べるとその多様性が大きく変動していることがわかる。

現存する生物の多くは、環境ストレスにさらされると自らのゲノムを大幅に再構成して対応することが知られている。

そのような変化が生物の発達や進化にとってどのような意味を持つかは、分子生物学における注目の研究テーマだ。

エディアカラ紀の多種多様な化石群は、全球凍結が終わった直後に初めて現われている。この事実は、**スノーボールアースが「引き金」となって唐突な出現を促したという仮説を裏づけている。**

だが、現生生物の分子配列を比較してみると、後生動物（多細胞動物の総称）の主要な生物群はスノーボールアース現象の一部ないし全部より前に誕生したように思える。もっともこの種の「分子時計」は、遺伝子変異が一定した割合で生じることを前提としている。

全球が凍結するような気候の大変動があれば、後生動物のほとんどの系統で遺伝子置換が起きてもおかしくなく、そう考えれば分子データと化石記録のずれにも説明がつく。

【88】

とはいえ、海が氷結してしまったら、海水の表層を好む生物は生きていけない。そのため、氷が融ける兆候が現われるまでは皮肉にも大酸化事変は起こりようがなかった。スノーボールアースの最中であっても、シアノバクテリアはおそらく熱水噴出孔のある場所で生き延びることができただろう。

地球にとって幸運だったのは、太陽から遠すぎない上に、火山活動からも温室効果ガスが放出されていたことだ。

おかげで最終的には全球凍結状態を脱することができたが、そうでなければ地球は今も氷に閉ざされていて、液体の海も存在せず、温度の上昇を続ける太陽がいつの日か氷を融かすのを待つしかなかったかもしれない。

太陽からあとほんの少しでも離れていたら、二酸化炭素は極で凍ってドライアイスとなり、地球はスノーボール状態から逃れることができずに火星のような惑星と化していただろう。地表の生命は死に絶えていた可能性がある。

スノーボールアースが終わって大酸化事変が起き、地球は大気中に初めて酸素を獲得した。それは少なくとも生物にとっては奇妙な環境だった。

当然ながら酸素呼吸は、酸素が存在するようになった後にしか発達できない。

だとすれば、酸素が現われてから酸素呼吸のできる最初の生物が誕生するまでには時間差があったはずだ。

生物が酸素を利用できるようになれば、生き残る上でそれが大いに有利に働く。

なにしろ、生命活動に伴う反応を酸素以上に速く正確に行なえる分子は他になく、酸素ほど多量のエネルギーを放出できる分子もまたないからだ。

どれくらいの時間差があったかは地層を調べればわかる。

氷の世界が終わりを告げると、シアノバクテリアはたちまち全ての海の温かい表層に進出したはずだ。

22億年以上前には陸地の面積は今よりはるかに小さく、しかも海は熱水噴出孔からの栄養素をすでに何百万年もの間蓄積してきた。

シアノバクテリアは途方もなく数を増やし、酸素の量を急上昇させていったに違いない。

日光の届く海の表層部分に漂うだけでなく、わずかばかりの陸地に棲みつくものもいたかもしれない。

この微生物は猛烈な勢いで酸素分子を吐き出しながら、スノーボールアースの間に溜まった空気中の二酸化炭素をみるみる消費していった。

【89】

結果的に、海の中には多量の炭化水素が生み出されて行く。

光合成によって酸素分子が一個放出されるたびに、生物の体内には炭素原子が一個取り込まれる。

現在であれば、この種の炭化水素のうち軽量のものは酸素呼吸をする生物に食べられ、再び二酸化炭素へと変換される。

しかし、酸素呼吸する能力がまだ発達していなかったとしたら、海に漂っていた有機物はどこに行ったのかという疑問が生じる。

量が非常に多かったはずなので、地球表面の化学的性質や海や大気を大きく変化させたとしてもおかしくない。

油（炭化水素）と酸素が空気中で混ざると爆発を起こしやすい。

稲妻の火花が一個散っただけでも反応は止まらなくなる。

だが、油が小粒子として水中に分散している場合は、微生物の作用がなければ分解されない。

分解されて効率よく再利用されないと、地球の炭素循環のバランスが大きく崩れる。

当時は、大量の油が生み出されるとともに、同程度の量の酸素も大気中に送り込まれていた。

21億年前に酸素濃度の大幅な上昇があったことには裏づけもある。

世界最大級の赤鉄鉱床（ Fe_2O_3 ）が形成されたのだ（南アフリカのシシェン鉱山）。

地球の大気には酸素が充満していたに違いない。

それほど濃度になったことは以来一度もなく、生物圏の活動が本来のあり方を逸脱しない限りこの先もそこまで至ることは多分ないだろう。

もしも系外惑星が同じプロセスを経ていれば、大気中の高圧の酸素がそれとわかるスペクトルの光を放つ。

「私たちはここにいて、光合成の問題を解決したよ！」と告げているわけだ。

事実、22億年前～20億年前の期間について炭素同位体比の記録を調べてみると、あまりにバランスが乱れているものだった。

この種の現象としては、地球の歴史を通して最も長く、最も規模の大きいものだった。

火山から吐き出される炭素のほとんどは有機物として隔離され、酸素が大気中に放出されていった。

これは、地球に酸素は存在したもののそれを呼吸できる生物がいなかったことを示している。

シアノバクテリアが多量の炭素化合物を排泄しているのに、それを食べて生きる生物がいなかったため、炭素循環のバランスは大きく崩れた。

この炭素化合物の名残りは、シュンガイトと呼ばれる奇妙な岩石としてロシアのカレリア地方で見つかる。

現代であれば、酸素呼吸する微生物によってこうした油様の化合物はほとんどがすぐに分解される。

2010年に起きたメキシコ湾原油流失事故の後も、大半の原油はそういう運命をたどった。

シュンガイトは、当時の環境に炭化水素が溢れ返り、それをじかに再利用することができなかった証拠といえる。

結果的に酸素濃度は上昇を続け、ついには現在よりはるかに高い分圧で存在するまでになった。

その時代に森があったとしたら、稲妻の最初の火花が散るなり地球全体で森林火災が発生し、その熱も規模も未曾有のものとなっていただろう。

【90】

酸素が多すぎるこの不思議な時代は、効率よく酸素呼吸できる（真核）生物が登場すると唐突に終わりを告げる。

酸素呼吸を担うのは、中心に銅イオンを持つ特殊な酵素だ。

ただし、銅鉱床自体は酸素が豊富な環境でないと形成されない。

全く新しい種類の小器官が細胞内に誕生し、それは今もミトコンドリアとして存在している。

ミトコンドリアは真核細胞のエネルギーを生み出す源だ。

真核細胞とは、祖先である原核細胞（細菌など）より大きく、その（以前に比べたら）巨大な細胞の中に壁で囲まれたいくつもの「小部屋」が収まっているものをいう。

ミトコンドリアは独自の小さな DNA を持っていて、それは細菌として独立生活を営んでいた時代の名残だ。

この微生物が効率的な酸素呼吸を身につけたために、他の生物の細胞に取り込まれて、今日まで 20 億年も隷属生活を送ってきたのである。

興味深いのは、全真核生物の最後の共通祖先が生息していたのがおよそ 19 億年前と見られ、それは真核生物が進化の果てについて地球の炭素循環バランスを回復した時期と重なる可能性があるということだ。

本来は有毒である酸素にうまく対処できるようになるまでに、生物圏は 2 億年あまりの歳月を費やしたといえそうである。

第6章 動物出現までの退屈な 10 億年

----20 億年前～10 億年前----

【91】

少なくとも 23 億年前までに大酸化事変が最高潮に達してから、多細胞生物の最初の共通祖先が現われるまでの時代は、「退屈な 10 億年」と呼ばれてきた。

生物学的に見て大きな変化がほとんど起きていない（と思われる）からである。

実際、他の多くの例に漏れず、この退屈な 10 億年がそれほど退屈ではなかったことが近年に明らかになってきた。

新たな発見から見えてくるのは、生命が決して休んでいたわけではないということである。その一方で、今から 10 億年以上前に動物が存在しなかったのもまた事実だ（そうではないという説も繰り返し提唱されてはいるが）。

退屈な 10 億年が始まったのは、史上初めて大気中に高濃度の酸素が存在した時期であり、20 億年前の時点ではすでに生命の一大革命が起きていた。

私たちと同じように核のある大きな細胞を持った、真核生物の登場である。

その後の 10 億年で最も多様に進化したのは原生生物（現存するものではアメーバ、ゾウリムシ、ミドリムシなど）だったものの、もっと大型の奇妙な化石もいくつか残っている。その一つは、過去に産出した中で最も不思議な化石といえる。

【92】

22 億年前から 10 億年前までは、動物の生命活動を支えられるほどの酸素は多分なかったというのが様々な専門家の一致した見方だ。

いい機会なので、ここで動物と後生動物と原生動物の違いを簡単に説明しておこう。三つはいずれも真核生物で大きな細胞を持ち、その細胞の中には細胞核のほか、ミトコンドリアのようないろいろな小器官が含まれている。

動物と「後生動物」は同じで、どちらも受精卵のとき以外は複数の細胞で体が作られている。

原生動物の多くは動くことができる上に比較的複雑な振る舞いをするので、動物のように見える。

だが、どれもたった一つの細胞でできているところが違う。

それでも、細菌に比べれば格段に大きくて複雑である）。

【93】

もっとも、その点については一致していても、それがなぜかについては意見が分かれている。

生命が酸素発生型光合成を行なえるようになっていたのは確かだが、だとすれば様々なデータが示すよりはるかに多くの生物が存在していてもおかしくなかったはずなのだ。

動物が生きるためには大気中に少なくとも 10 パーセントの酸素を必要とするのに（現在は 21 パーセント）、光合成生物は十分に仕事をしていなかった。

なぜか。

ようやく明らかになった答えは、生命の歴史に繰り返し現われるあの硫黄だった。

特に、毒性が強いと同時に生命を与える存在でもある硫化水素だ。

生と死をともに司る分子といえる。

【94】

古生物学者アンディ・ノールと共同研究者は、2009 年の論文で、退屈な 10 億年の間に酸素濃度はもっと高まってよかったはずなのにそうならなかったことを示した。

何かが悪魔をしていたためである。

23 億年前に大酸化事変を（福永注：大酸化事変“が”の誤りか？）もたらした単細胞生物と、長い長い年月を経て現われたもっと大きい多細胞生物との間には、中間的な形態が実際に全くなかったのだ。

10 億年もの長い間、複雑と呼べるような生物は存在しなかった（とはいえ、どんなに単純な生物であっても分子や化学物質の視点から見れば信じがたいほど複雑である）。

理由は、硫黄を利用する単細胞生物が多すぎるほどにいて、酸素を放出する生物と競っていたからである。

つまり空間と栄養分という、生命に欠かせない資源を求めて全く異なる二種類の生物がしのぎを削っていた。

硫黄を必要とする微生物のうち、**緑色硫黄細菌**および**紅色硫黄細菌**と呼ばれるものは今日も生息している。

ただし、人間にとってはきわめて有毒な場所に限られる。

具体的には浅い湖や運河などで、**無酸素だが水深が浅いため**に細菌が暮らす場所まで**太陽光が届いて光合成ができる**。

問題は、**この種の光合成が水分子を分解するわけでないため**、副産物として**酸素を生成することがない**という点だ。

【95】

基本的には生命は怠惰だと思う。

水分子 (H₂O) の結合を断ち切るのは実に非常に難しい仕事であり、しかもありとあらゆる厄介で**有毒な化合物を生じさせる**。

シアノバクテリアでさえ、**選べるなら酸素発生メカニズムを停止させ、水に代わって硫化水素を使うものが多いほど**である。

退屈な 10 億年の大半を通して海は層構造となり、最上部の薄い層にのみ酸素が存在した。透明な表層水では単細胞の緑藻類が太陽光を受け、そのエネルギーを使って細胞を成長させながら酸素を吐き出し続ける。

だが、そのわずか 3~6メートル下からは全く異なる層が広がり、海底にまで達していた。その層の最も浅い（一番上の）領域は、無数の**紅色硫黄細菌**で赤紫色に染まっていたに違いない。

この細菌が棲む世界は、ほとんどの海洋生物にとって致命的な毒性を持つ。

硫化水素が充満しているからであり、まるで煮えたぎる液体硫黄の釜から硫化水素が瘴気のように沸き立っているようなものだ。

この硫黄細菌は死滅するときでさえ、世界から酸素を奪うのに手を貸す（もちろんわざとやっているわけではないのだが、微生物の専門家の中には、この種の細菌がいつの時代もずる賢い生き物だったと確信している者もいる）。

死んだ後は、微細な体が海底に沈むこともあれば、塩分濃度の高い水域や澱状（おりじょう）のものが溜まった水域に留まることもあり、腐敗しながら貴重な酸素分子をさらに奪っていく。

その酸素は、薄い表層部に棲む微生物が放出したものだ。

透明な海や大気に向かうはずの大切な酸素分子は、腐りゆく赤紫色の悪魔に使い果たされてしまった [訳注 「はじめに」にある「キャンフィールドの海」とはこの海のことである、最初に仮説を提唱した地質学者ドナルド・キャンフィールドの名を冠してそう呼ばれる] 。

こうした層構造は、数は少ないものの現代の地球にもまだ残っている。

ミクロネシアのパラオ諸島にある「クラゲの湖」では、大きな塩湖に大型のクラゲが無数に溢れ、酸素濃度の高いアクアマリン色の上層を優美に回遊している。

ところが、酸素と生命に満ちた透明な水のはるか下には、暗く深い第二の層が広がり、光と酸素を好む私たちのような生き物にはこの上なく邪悪な環境となっている。

酸素はほぼゼロで、硫化水素が充満しているからだ。

濃い紫色をしているのは、例の**紅色硫黄細菌**のせいである。

遠い昔、豊富な酸素を必要とする生物からすれば、この細菌のおかげで地球が危険で不便な場所と化していた。

紅色硫黄細菌とその世界は、最終的には有毒で不快な場所として世界の裏側に追いやられた。

しかし決して消え去ることはなく、6億年ほど前についに酸素が一段高い濃度に達してからも、失った帝国を取り戻そうと虎視眈々と狙っていた。

そして、デボン紀、ペルム紀、三畳紀、ジュラ紀、および白亜紀中期に、この悪の帝国は逆襲に打って出ることになる。

【96】

やがて、光合成をする硫黄細菌と酸素を吐き出す微生物とのバランスは、後者に有利な方向に傾く。

おそらくは、地表に露出した大陸の面積が徐々に広がったことが原因を作ったとみられる。大陸から侵食された鉄が海に流れ込み、それがたちまち硫黄と反応して、重く硬い黄鉄鉱として沈殿して隔離された。

必須の元素を一つ失っては硫黄細菌も生きていけない。

おまけに、大陸の風化と侵食によって粘土鉱物が生成されると、有機分子と強力に結合してそれを堆積物の中に埋没させた。

何物かに食べられる前に有機炭素原子が埋もれると、光合成で作られた酸素は周囲に残り、酸素濃度を上昇させて硫化水素を消滅させる。

二度のスノーボールアースは、氷が融けてから藻類の爆発的な増殖を誘発することから、どうやら酸素濃度を押し上げるのに一役買ったようだ。

その結果、地球の環境はある種の転換点を迎える。

6億3500万年前に最後のスノーボールアース現象が終わった後、大きな動物が存在していたらしき初めての痕跡が現われる。

ひとたび地球の地獄が追い払われてしまえば、動物を進化させるのにさほど時間はかからなかったわけだ。

奇妙な最古の多細胞生物

【97】

それほど退屈でもなかった10億年の間に生息していた主な生物はといえば、地球最長のロングラン・ショーともいべき生命のチャンピオン、ストロマトライトである。

微生物も、初めて登場したときと同様にまだ勢力を保っていた。

ところが22億年ほど前になると、新たに奇妙な形態の生物が現われる。

黒く細いらせん状の紐のような姿をしていて、確実に肉眼で見える。

この生物は「グリパニア」と名づけられた。

グリパニアの誕生は、生命が重要な一歩を踏み出したことを示している。

複数の細胞が膜組織で結合されて、「コロニー」として生きることができるようになったのだ。

つまり最古の多細胞生物である。

グリパニアの存在は以前から知られており、原核細胞（おそらくは細菌）のコロニーと思われる。

本当の意味で最古の動物といえる生物は、グリパニアや同類よりはるかに後の時代に現われている。

地球上に動物が誕生して現在まで、まだ10億年も経っていないのだ。

一口に多細胞生物といっても様々な種類があって、原核生物だが多細胞構造を持つものも多数存在する。

また、そうした複数の細胞を持つ生命の登場が20億年以上前に遡るのも事実だ。

だが、多細胞構造の原核生物はほとんどが二個の細胞のみでできているため、動物と混同されるようなものではない。

細胞性粘菌は多細胞であるし、ある種のシアノバクテリアや走磁性細菌の一群もそうだ。

しかし、言ってみればこれらは進化の袋小路であって、それ以上先には行かない（粘菌からは粘菌以外の生物がほとんど進化しなかった）。

これらは数十億年前から存在し、進化の観点から見るとかなり保守的なグループである。

もっと複雑なのは多細胞植物で、10億年以上前に現われた。

植物といっても、多分外見は緑藻類や紅藻類に非常に近いものだったろう。

どちらも海岸の潮間帯や、日光の届く海中でよく見られるものだ。

だが動物はそれよりさらに新しい。

生物の大きさは、大気中の酸素濃度とある程度の関連性があるようだ。

酸素が存在すると、存在しなかった時代よりも大きなサイズを発達させることが可能になる。

また、高酸素に適応するために生物の酸素獲得能力が高まると、巨大化する傾向が強い。

そのいい例が恐竜だろう。

恐竜が巨大化したのは、きわめて効率的に呼吸が行なえるように肺などの呼吸器が進化した結果である。

本物の動物の化石が豊富に見つかるのは約6億年前の地層からだ。

この頃の岩石には最初の「生痕化石」が確認できる。

これは、大昔の動物が移動したり食べたりした痕跡のことで、体自体が化石として残るのではなく、その活動の様子が化石の中に閉じ込められる。

いわば行動の記録だ。

この時代になると、すでに酸素濃度は現在のレベルに近づきつつあった（まだ達してはいない）。

遊離酸素だけでなくオゾンの濃度もかなり高くなっていて、かつては容赦なく地表に降り注いだ紫外線などの有害な放射線は弱められていた。

アクリタークと呼ばれる不思議な生物

【98】

先カンブリア時代の生命について話すときに、話題のかなりの部分を占めるのがアクリタークだ。

アクリタークは初期の地球に登場し、特に古いものは32億年ほど前に現われて、動物の時代に入っても存在し続ける。

もっとも、アクリタークというのはいわば「ゴミ箱」のような分類名であって、種の違う生物はもちろん、「界」や「ドメイン」の違う生物までがごた混ぜになってその総称のもとに括られている。

このこともまた、動物や高等植物の時代より前に行きた生命の歴史がいかに十分解明されていないかを物語っているといえよう。

現時点で**最古とされる多細胞生物の化石**が現われるのは、**20 億年前**という気の遠くなるような昔のことだ。

アクリタークはこれらの中からも見つかるが、数は比較的少ない。

ところが、**原生代の半ばを過ぎた 10 億年ほど前になると、種類もサイズも増え、形態も複雑**になってくる。

一般に、**複雑さを増したかどうかは、小さな球体の体から突き出た突起の数**でわかる。

10 億年前～8 億 5000 万年前の時代からも、やはりこの化石は**頻繁に発見**される。

やがて**クライオジェニアン (Cryogenian) 紀**が始まると、この紀の名前の由来になった地球規模の激変に見舞われる。

ギリシャ語の「cryo」の意味するもの、つまり「寒冷」だ。

またも**全球が凍りついたため、海洋だけでなく、ことによると陸上でも大量絶滅**が起きたに違いない。

この間、**地表のほぼ全てが氷か雪に覆われ、アクリタークの数**は激減する。

しかし**カンブリア爆発**でまた急増し、その**種類は古生代最多**に達した。

科学の世界でも一、二を争う重要な問いの答えは、その微化石を調べることで見えてくる。**10 億年前のアクリタークや微化石には情報が詰まっています、生命史に関するスケールの大きな謎を解き明かす力を持っている。**

事実、**10 億年前から始まる時期が実はきわめて重要であったことが、この化石のおかげ**でようやく最近になってわかってきた。

20 億年前から 10 億年前までの間、地球の微化石は単純な形態のままゆっくりと変遷してきた。

微化石のもとになった生物は、原核生物と、小さな単細胞の真核生物（現存する原生動物のような）の両方だったはずである。

ところが、おおよそ**10 億年前に奇妙なことが起きる。**

それまで簡素だった微化石に**装飾が現われ始めたのだ。**

表面を覆う**トゲの数**は**10 億年ほど前から増加**し始め、**カンブリア紀を通してその傾向**が続いた。

これにはいくつかの理由が考えられる。

まず、**小さな球体に何本もの突起が生えていれば、体積に比して表面積が大きくなるため、海中で沈むまでに時間がかかる。**

現存する多くのプランクトンも、この方法を使って水面近くに留まっている。

海底には絶え間なく沈殿物が降り積もるのが普通なので、底に落ちてしまえばその下に確実に埋もれることになる。

だがそれだけではない。

トゲは**捕食者に対する防御**としても使える。

もしかしたら 10 億年前の海に凶暴な肉食生物（厳密にいうと植物食生物かもしれないが）が現われ、次第に体の大きさを増していったのではないだろうか。

ノールらの新しい研究によると、トゲを持つ微化石は約 6 億 3500 万年前の最後のスノーボールアースが終わってすぐにその数と種類をさらに増やしたものの、約 5 億 6000 万年前には完全に姿を消した。

これは、動物の進化がかなり進んでいた時期にあたる。

次章では、トゲのある微化石の変遷をたどりながらその消滅の理由を探ることで、「エディアカラ革命」ともいべき重要なイベントが浮かび上がることを説明していく。

退屈な 10 億年の終焉

【99】

10 億年前の浅い海の底を思い浮かべてみよう。

ケルプ（大型の褐藻）のような植物と緑藻が海流に揺れ、日光の届く箇所では、虹色にきらめく微生物のマットがこの上なく柔らかいシフォン生地のように海底を覆い尽くしている。

そのマットから突き出して、上に向かって伸びているのが、大小様々なストロマトライトだ。

水の中は単細胞から多細胞まで、生命に満ち溢れている。

地球のどこを探しても動物の姿は影も形もない。

だが、遺伝子と大気の時計は着々と時を刻み、氷に閉ざされる大厄災の時代へと向かいつつあった。

【100】

10 億年前に海の中で革命の種子が育まれていた頃、陸上ではすでに多量の生物が生息していた可能性がある。

どんな環境でも常に臨機応変に対応できる微生物が、最古の池や沼に入り込み、ついには湿地帯に広がって、日の当たる場所をことごとく覆っていった。

少量とはいえ水は手に入る。

しかも、風に運ばれてくる塵に十分なリン酸塩や硝酸塩が含まれていれば、プランクトンのようだった小さな単細胞の微生物が緑色のカバーを発達させたかもしれない。

生命は精力的に陸地を開拓していき、そうすることで最終的には危うく自滅しそうになるのだった。

第 7 章 凍りついた地球と動物の進化

---- 8 億 5000 万年前～6 億 3500 万年前 ----

【101】

第二次世界大戦直後のオーストラリアのアデレードで古生物学上の大発見があった。

アデレードから内陸に入った乾燥した丘陵地帯で、**最古とされる比較的大型の動物化石が発掘されたのだ。**

エディアカラ生物群である。

エディアカラの化石を発見したレジナルド・スプリッグの後にも新世代の研究者たちが続き、動物の起源に関する研究の火が絶えることはない。
エディアカラ生物群の化石を見ると、とにかく化石の大きさと複雑さに目を見張る。
さらに驚くのは、その化石がどう解釈されているかだ。

エディアカラ生物群は奇妙な形をして概ね平たい生き物であり、固着性で動かなかったというのがつい最近までの定説だった。
まるで海底に沈んだ枕である（実際に大きな枕くらいのサイズのものもある）。
ところが、南オーストラリア博物館のジェームズ・ゲーリングの展示でアニメーションによる復元図をみると、固着性どころではない。
泳ぐものもいれば、元気盛んに動き回るものもいる。
こうした見解は新しいものであり、様々な議論を呼んでいる。
本当に正しいのだろうか。

本章で扱う時代はおよそ 10 億年前から始まって、カンブリア爆発が起きる約 5 億 4000 万年前で終わる。
この間には、単なる大変化をはるかに超えたイベントがあった。
25 億年前～24 億年前と同様、7 億 1700 万年前頃に地球が寒冷化したのである。
あまりにも気温が下がったため、始生代の終わり近くと同じように海が凍りついた。
氷結は高緯度地方を皮切りに、徐々に低緯度へと広がって行って、ついに海は極から赤道まで氷に覆われる。
地球は再びスノーボールになったのだ。

最初のスノーボールアースの後には、大気中の酸素濃度が高くなるという、生命史における一大革命が起きている。
原生代に入ってからこの二度目のスノーボールアースもまた、方向は違えど甚大な影響を及ぼした。
今回は動物の誕生につながったのである。
ただし、地球の全生物に対する危険がなかったわけではなく、生命はまたも不安定な状態にあった。
何より知りたいのは、この時代に全球が凍結したことが動物の唐突な出現を促す主要因だったのかどうかだ。
著者らはそうだと考えている。

生命とスノーボールアース現象

【102】

すでに見たように、一度目のスノーボールアース現象（23 億 5000 万年ほど前に開始）の引き金を引いたのは生物だったと見られる。
シアノバクテリアが爆発的に増えた結果、大気中のメタンと二酸化炭素が減少して温室効果が弱まったのだ。
二度目となる今回のスノーボールアースは、地球の長い歴史において現時点で最後の全球凍結である。
近年の研究により、7 億 1700 万年前～6 億 3500 万年前までの間に二回にわたって全球が凍結したらしいことがわかってきた。

この一連のスノーボールアース現象が起きたのは、**クライオジェニアン紀**である（8億年より少し前、「真の極移動」に伴って大規模な同位体の変動が二度あったが、クライオジェニアン紀はそれより前に始まっている）。

クライオジェニアン紀に二度起きたスノーボールアース現象（どちらも海が凍りついたのちに融けるという流れ）のせいで、**海における有機物の生産量は激減した**。

海面の氷が日光を遮ってしまうからである。

このため、**地球上に生息する生物の量（これをバイオマスという）は全球凍結の前後と比べてごくわずかになった**。

23億5000万年～22億2000万年前の時期と、7億1700万年前～6億3500万年前までの時期の**両方にいえることだが、全球が凍結して超温室効果が終われば、その環境を生き延びて進化できる生物は非常に限定される**。

化石記録からはほとんど手がかりが得られないものの、**アクリターク**（プランクトン様の小型生物）を調べると、**その数と多様性が変動していることがわかる**。

現生生物の多くは、環境ストレスにさらされると自らのゲノムを大幅に再構成して対応することが知られている。

スノーボールアースがストレスを与える現象だったことは、どう控えめに見ても間違いあるまい。

そうした**ゲノム変化が生物の発達や進化にとってどのような意味を持つかは、分子生物学における注目の研究テーマだ**。

全球凍結が終わった直後には、**凍結前よりも複雑な生物の多種多様な化石が現われる**。

この事実は、

スノーボールアースが「引き金」となって生命の複雑さと多様性が著しく増したという仮説を裏づけている。

スノーボールアース現象をめぐる大きな謎の一つが、その原因は何かだ。

すでに見たように、**一度目のスノーボールアースは生命自体によって引き起こされた可能性がある**。

酸素発生型光合成が始まったせいで、温室効果ガスが急速に消費されたのだ。

しかし、それから10億年以上経って起きた**二度目の、二回にわたるスノーボールアース現象**では、全く別の理由があってもおかしくない。

その候補として**考えられるのが、当時の大陸プレートの動き**である。

この二度目の全球凍結が起きたのは、**ロディニア超大陸**（全大陸が一つに合体したもの）が分裂を始めてから4000万年ほど後のことだ。

超大陸では陸地の大部分が海から遠く離れるため、乾燥した気候になりやすい。

逆に大陸が、特に**超大陸がばらばらに分かれると、かつての乾燥地域を海洋性気候が取って代わり、化学的風化作用が激しくなる可能性がある**。

ケイ酸塩鉱物が化学的に風化されると、大気中の二酸化炭素濃度が急激に低下し、それに伴って気温も下がる。

つまり、この**二度目のスノーボールアース現象**（痕跡が発見されたオーストラリアの地名にちなんで「スターティアン氷期」と呼ばれる）は、**生命活動というより無機的な化学反応が原因**と考えられるのだ。

面白いことに、スターティアン氷期の開始は、7億 1650 万年前にカナダの火山地帯で巨大噴火が起きた時期とほぼ一致する。

大火山帯からの噴火で多少の二酸化炭素が放出されたものの、それをはるかに上回るペースで二酸化炭素は減少し、地球は白い雪玉も同然になって太陽光のほとんどを宇宙に跳ね返した。

こうしてさらなる低温状態が生み出されたのである。

だが、原因はこれだけではなかったかもしれない。

仮に新種の植物が短期間で急速に数を増やして地球全体に分布したとしたら、化学的風化作用ではなく今回も光合成によって二酸化炭素が激減した可能性が出てくる。

いや、実際にそうだったかもしれない。

生命史に関する最新の知見によると、最初の陸上植物はおよそ7億 5000 万年前に現われているのだ。

植物といってもまだ単細胞ではあったが、広大な領域に広がったとしてもおかしくない。もしそうなら、氷期を引き起こす十分な理由となったはずだ。

スノーボールアースによる大量絶滅と多様な動物の誕生

【103】

海と陸地で覆われていた地球が、雪と氷と剥き出しの岩石の世界と化したら、7億 5000 万年前～6 億年あまり前の生物には何が起きただろうか。

少し考えてみただけでも、直前までの生命の数と多様性が減少したに違いないとわかる。

当時の海では、現代の海岸に見られるケルプや藻類（緑藻や紅藻）のような多細胞植物もすでにいたはずだ。

しかし、大半は単細胞の原生動物（すべて真核生物）か、海岸近くでストロマトライトやシアノバクテリアとして存在する細菌のマットか、さもなければ海に棲む膨大な量の単細胞光合成微生物だった。

陸上では、細菌マットのように、単細胞ではあるが海中よりさらに複雑な光合成生物の集合体が淡水に広がり、ことによると湿った地面にまで進出していたのではないかと著者らは考えている。

今あるような土壌はまだ生まれていないものの、岩石の表面が化学的風化作用で削られ、死んだ植物や腐敗しつつある植物がそこに取り込まれて、地表の粘土や砂には有機物が加わっていたはずだ。

ところがスノーボールアースが始まって海の表面は凍りつき、陸の表面もしばらく氷と寒さに閉ざされた。

バイオマスにしてどれくらいの量が絶滅した可能性があるかは、容易に見当がつく。

海面を厚さ 1000 メートルの氷が覆ったら、海中に届く日光は大幅に少なくなる。

氷の中にも微生物はいるし、実際には多少の日光が氷を通り抜けはするが、植物性微生物のバイオマスが一気に減少したのは間違いない。

日光が失われるのと同じくらい深刻なのが、重要な栄養素が摂取できなくなることだ。

鉄、硝酸塩、リン酸塩である。

陸地の表面が寒冷化して大部分が雪と氷に閉ざされれば、化学的風化作用は穏やかになり、それとともに陸地にいた「植物」はどんな種類であれその生命力と数が減っていく（もちろんこれは茎と葉を備えた本物の複雑な陸上植物が誕生するより何億年も前の話である）。だがもっと大きな問題は、陸地から海に流れ込む栄養分が乏しくなることだ。海の生産性は落ち込み、個体の死のみならず種全体の大量絶滅も当然起きただろう。

このシナリオからは一つの仮説が浮かび上がる。

その仮説であれば、なぜこれほど多くの種類の動物が存在するのかという問いに答えが出せるかもしれない。

当時、海全体が氷に閉ざされていたとはいえ、地球の火山活動が今よりはるかに活発だったのは確かだ。

温泉や間欠泉は数多くあっただろうし、何より活発な火山自体が海に向かって熱を噴き出していただろう。

そのせいで部分的に氷が融けて、温かい水のたまった小領域がいくつかできたに違いない。この小さな水槽は、凍った海と氷山でまわりを囲まれ、孤立した状態で世界中に点在していた。

その結果、それぞれがさらされる環境条件は場所によって異なるものとなった。

進化が最も強く作用するのは、孤立した小規模な集団に対してである。

海水や、場合によっては淡水にこうした小さな隠れ屋が何千とできたら、進化を育む恰好の場となり、いわゆる「ボトルネック効果」が働く（個体数の少ない集団が孤立していると、遺伝子の数が少ないために短期間で進化を遂げるということ）。

こうして、単細胞の真核生物だった小型の原生動物が、多種多様な後生動物へと進化を遂げたのではないだろうか。

後生動物とは、いわゆる動物のことである。

火山活動からの温室効果ガスが徐々に蓄積して、最終的にスノーボールアース状態が解除されれば、氷はみるみる消えて行き、同時に何千箇所もの進化の実験結果も急速に解放されていったはずだ。

【104】

地球が最後のスノーボールアースを脱したのは約6億3500万年前のことである。

その頃の地球は、私たちが知っている姿とは全く違っていた。

しかし、進化の力と物理的な力がともに着々と働いて、原生代後期の地球をもっと地球らしい（私たちにあってなじみがあるという意味で）惑星に変えようとしていた。

海には生命が満ち溢れている。

ほとんどは単細胞だとはいえ、主にアメーバやゾウリムシのような複雑な原生動物であり、中には多細胞のボルボックスや単細胞のミドリムシといった、半分植物で半分動物のような生物もいた。

海岸や海底には、緑藻や紅藻などの海藻類がごく普通に見られ、それらは今なお地球に広く分布している。

最初の動物が誕生する舞台は整った。

そして6億3500万年ほど前にそのプロセスが動き出したと著者らは考えている。

エディアカラ紀は、最後のスノーボールアースが終わってから、明らかに動物と呼べる最初の生物が現われるまでの時期に当たる。

この時代はまた、古生代が始まる直前でもあった。

エディアカラ紀と呼ばれるのは、**当時としては最も複雑に進化したエディアカラ生物群が生息した時代**だからである。

エディアカラ生物群の化石は、**現存する生物とはおよそかけ離れた様々な形**をしている。かつては南オーストラリア州のエディアカラ丘陵のものしか知られていなかったが、今やこの謎めいた化石は世界のいくつもの場所から見つかっている。

とはいえ、やはり最良のものが産出するのはアデレードの北にある低い丘陵地帯だ。

カナダのバージェス頁岩やドイツのゾルンホーフエン石灰岩、さらにはアメリカのヘルクリーク累層と並び、エディアカラ丘陵は世界で最も有名な化石産地の一つとっていいだろう。

この丘陵の**地層は5億6000万年前～5億4000万年前の時代**にまたがり、そこから見つかる化石が現時点での**最古の動物の体化石である**というのが、大方の古生物学者の一致した見方である。

この化石群が発見した地質学者のレジナルド・スプリックが目にしたものは、**クラゲの鋳型のような、クラゲを押し当てた跡のようなもの**だった。

だが、クラゲが化石として残ることはまずないと彼は知っていた。

その時調べていたのは非常に古い地層である。

自分が見つけた奇妙な化石は、動物が存在した記録として世界最古の部類に入るとスプリックは考え、発見から一年後にそう発表する。

また、化石群には様々な系統の動物が入り交じっているとも指摘した。

その後で、スプリックは他の研究者と一緒に調査し、さらに奇妙な化石を集める。

1949年にスプリックは発見の顛末を全てまとめた報告書を発表し、今やかなりの数に膨れ上がった化石コレクションの内容と、それらに関する初めての詳細な記述を行なった。いずれも「パウンド・クォーツァイト」と呼ばれる地層から見つかったもので、そこは納得のいく年代特定がなされたことがなかった。

もしカンブリア紀のものであれば、大きな注目を集めることはない。

しかし先カンブリア時代と確認されれば、不思議な化石群はそれまで発見された中で間違いなく最古の動物のものということになる。

当時、**カンブリア紀であるかどうかを定める指標として用いられていたのは、典型的なカンブリア化石（三葉虫）**だった（以後は別の指標が使われている）。

その後の研究により、**エディアカラ化石群の方がそれより間違いなく古いことが示される**。

詳しく見てみると、**エディアカラの化石は現存する動物とは確かに異なる**。

同じ体制（体のつくり）を持つ動物はすでに存在せず、子孫も知られていないとの説が20世紀後半にはあった。

その見方を最初に提唱したのが、古生物学者の故アドルフ・ザイラッハーである。

しかし**謎の最たるものは体制ではなかった**。

その**化石が見つかった岩石**である。

そもそも生物の体に硬い部分がなければ化石として残ることはまずない。

稀に化石になるとすれば、非常にきめの細かい泥岩や頁岩が普通だ。

つまり流れのない穏やかな水の底に積もった堆積岩である。

ところがスプリッグの化石は明らかに骨格を持たないにもかかわらず、そういった岩石ではなく砂岩に保存されていた。

エディアカラの化石と最もよく似た現生生物は、クラゲやイソギンチャク、あるいはイソギンチャクに似たウミエラである。

実際にそれらと関係があるのかを探るため、様々な実験や試験を通して、柔らかい体組織がそもそも化石化するかどうか調べられた。

世界に点在するエディアカラ生物群

【105】

今日、エディアカラ生物群は六つの大陸の約 30 箇所で確認されており、70 種に分類されている。

いずれも時代は新原生代末期に限られる（ただしカンブリア紀初期まで生き残った種もわずかにいた可能性は否定できない）。

エディアカラ生物群が進化して多様性が最大限に達したのは、およそ 5 億 7500 万年前のことである。

このイベントは「アバロン爆発」と呼ばれ、原生代最後のスノーボールアース現象が終わってから 5000 万年もの間続いた。

その後もこの生物群集全体が繁栄したと見られる。

ところが、5 億 5000 万年前～5 億 4000 万年ほど前になり、動物の移動の跡が生痕化石（動物が移動や摂食などの活動を行なった形跡が堆積物に残った化石）として初めて確認される時代になると、エディアカラ生物群はかなり唐突に姿を消す。

エディアカラ生物群が地球上の最初の動物としていきなり現れたように、多様で数も多かったその生物群がいわゆる「カンブリア爆発」の過程でいなくなってしまうのだ。

この出来事は、化石記録で確認できる最初の大量絶滅である（もちろん大量絶滅自体は以前にもあった）。

当初、エディアカラ生物群はオーストラリア大陸だけに孤立して生息していたと考えられていたが、今では世界中に広がっていたことがわかっている。

【106】

エディアカラ紀の生態系でエネルギーがどのように流れていたかについては、これまで様々な仮説が発表されており、それは今なお止まる気配を見せない。

現在の生態系では、光合成をする植物が食物連鎖の底辺にいて、それが何段階かの生物に消費されていき、今度はその消費者が何段階かにわたって食べられて行く。

各段階に存在する生物のバイオマスは、その下の「栄養段階」の 10 パーセントほどに過ぎない。

ところがエディアカラ生物群の場合は、全く異なる群衆構造を持っていたとする説がある。化石の生物から顎が見つかっておらず、捕食の形跡も一切確認できないのだ。

それでいて、エディアカラの生物に最もよく似ているのは刺胞動物門であり、そのどれもが捕食性である。

エディアカラ生物群には、現代のサンゴのように、顕微鏡でないと見えない共生藻（渦鞭毛藻類）が多数含まれていたのではないかとの見方もあるが、その存在は証明されていない。

表面的には捕食者が見当たらないことから、これをエデンの園になぞらえて「エディアカラの園」と呼ぶ者もいる。

比較的大型の生物が、捕食者のいない世界で暮らした最後の時代だ。

5億4000万年前頃にはすでにこの楽園は消滅し、這ったり泳いだりする多種多様な捕食動物（および植物食動物）がエデンの園のヘビよろしく現われる。

【107】

動き回る動物が誕生するのになぜこれほど時間がかかったのだろうか。

大気中の酸素濃度が低かったせいかもしれないし、気温と海水温が非常に高かったためかもしれない。

一つ確かなのは、約6億3500万年前～5億5000万年前の時代には全く新しい分類の生物が出現していたということである。

体腔に水分を溜めて、それを水力学的骨格に利用する生物や、筋肉、神経、特殊化した感覚細胞、生殖細胞、結合組織細胞を備え、硬い骨格になる物質を分泌できる能力を持った生物などだ。

動物かそうでないかはさておいて、骨格（石化してはいないが）を発達させたのはエディアカラ生物群が最初である。

骨格があればそこに筋肉がつくことができ、筋肉があれば移動が可能になる。

移動することによって新たなニーズが生まれ、それが原動力になってさらに複雑な体が進化して行く。

動くようになった動物は、食料や交尾相手を見つけたり、捕食者を避けたりするために感覚情報を必要とする。

感覚情報を得るには、それを処理する脳がなくてはならない。

こうした様々な器官の発達は全て絡み合っており、真核細胞を持つ後生動物による革命の成果と言える。

それこそがまさしく原生代末期に起きていたことなのだ。

【108】

現存する複雑な生物全ての共通祖先がどのようにして誕生したのか、今なら次のように考えることができる。

それはおそらく小型で、比較的少ない数の細胞で構成されていたに違いない。

内部には細胞壁がなかった。

外側は上皮で覆われて、外界の物質を通さないようになっており、内側の体腔にはコラーゲンが満たされて生物に硬さを与えている。

体の大きさと複雑さを増せるような「遺伝子の工具箱」も持っていたことだろう。

大型で、特定の生態系に適応できるように特殊化し、有性生殖を行なう多細胞の真核生物であれば、適応放散が最も起こりやすい。

結果的に、這うもの、のたくるもの、泳ぐもの、歩くもの、固着性のものといった具合に、今日の地球に見られる動物の多様性が生み出された。

現生動物では、人間のような左右相称のもの数が最も多い。

左右相称の動物は、カンブリア紀の初期にはまだ少数派だったものの、いずれ地球を支配すべく態勢を整えつつあった。

大型エディアカラ生物群の古生物学

【109】

エディアカラ生物群は、どれだけ努力を傾けても解明を拒むように見え、謎のままであり続けている。

それでも、ここ数年の新しい研究により、最大級の謎は少しずつ崩れ始めている。とりわけ重要な研究は、この数十年間あまり顧みられていなかった学問を利用したものだ。1960年代以降、古生態学は古生物学研究を鮮やかに牽引していたが、新しい一般法則を生み出すことができず、20世紀にスティーブン・ジェイ・グールドが行なった「古生物学の現状」講演の中で完膚なきまでに否定された。

しかし今世紀に入り、メアリー・ドロザーとジェームズ・ゲーリングがその古臭い謎解き手法を用いて、比較的大型のエディアカラ生物群とその世界について、これまででおそらく最も納得のいく答えにたどり着いた。

エディアカラ生物群について考えるときには、それらが生きていた環境、つまり海底を覆い尽くしていたはずの微生物マットとのかかわりの中で捉える必要がある。

それがゲーリングとドロザーの研究で最も重要なポイントだ。

おびただしい量の微生物マットが存在していたとすれば、生態系に対してはもちろん、生物群集がどう堆積するかにも圧倒的な影響力を及ぼしただろう。

現代の海であれば、海底を掘る生物がいたるところに生息しているものの、当時のごくわずか、ないしは全くいなかった。

だとすれば、エディアカラ生物群の生態系は、私たちが知っているものとはかけ離れていたに違いない。

微生物マットが存在する場合、動物には四通りの生活様式が考えられる。

一つ目は、マットの上に固着し、おそらくは消化酵素の分泌によってマットを溶かしてそこから栄養を得る。

二つ目は、能動的にマットの表面を接触する。

三つ目は、体の一部をマットに埋め、マットの厚みが増すのにしたがって上に向かって伸びていく(マットはストロマトライトと同様、太陽に向かって成長していったと思われる)。

最後は、マットの下を掘ることだ。

このうちいくつかの戦略はカンブリア紀の最初期にも残っていたと見られるが、その頃になると世界は急速に変化しつつあった。

穴を掘る大型の生物のほか、骨格や硬い顎を持つ肉食動物や植物食動物が多数登場していたからである。

トゲの生えたエディアカラの微化石

【110】

アンディ・ノールとそのグループはエディアカラ紀の大型生物ではなく、微化石について研究している。

10億年にわたって単細胞生物が世界を支配していた時代、その生物の化石はおおむね滑らかな壁に囲まれた小さな球体をしていた。

ところが、新原生代最後のスノーボールアースが終わると、現われる化石はトゲに覆われたものとなる。

トゲの生えた微化石の時代は決して長くはないものの、そこからは動物が複雑さを増していく過程について重要なことが見えてくる（この種の微化石生物が登場するのは6億年前より後の時代であり、5億6000万年前頃には姿を消す。エディアカラ紀の大型化石生物はその後2000万年の間生き続けた）。

これ以前の微化石はもっぱら単細胞生物だったが、この「トゲの生えた」微化石は実は多細胞生物だったかもしれない。

私たちが見ているのは、シストのような休眠状態なのである。

この微化石についてはいくつかの重要な研究がなされている。

古生物学者のニコラス・バターフィールドと発達生物学者のケヴィン・ピーターソンの研究もその一つだ。

二人によれば、エディアカラ紀の初めにトゲをたくさん生やした微化石が見られるのは、小型の肉食動物が登場したことへの反応である。

例えば最も初期の線虫や回虫などだ。

つまりトゲは防御のための適応構造であり、単細胞生物の骨格を強化するためのものというわけである。

ところがノールのグループは、複雑なトゲを持つ微化石は初期の動物そのものの休眠段階ではないかという説を唱えている。

だとすれば、大型のエディアカラ生物群が現われるかなり前に複雑な動物の進化が始まっていたことになる。

また、最古の動物の暮らした環境が、20世紀後半の古生物学者が想定したような「エディアカラの園」とは程遠いものだったことにもなる。

休眠の段階が必要だったのなら環境は厳しかったはずだ。

酸素の濃度が変動し、ときには水中が無酸素状態になったかもしれないし、硫化水素が発生することもあったかもしれない。

こういう視点で捉えると、初期の動物が進化した世界は困難に満ち、往々にして有害だったといえる。

トゲの生えた微化石は5億6000万年ほど前になると姿を消し、大型で典型的なエディアカラ生物群が爆発的に花開く。

それらはしばらくの間、地球最大の生物として暮らしたが、5億4000万年あまり前にカンブリア紀が始まると、別の動物群に取って代わられることになる。

「左右相称動物」を探す

【111】

トゲのある微化石が単細胞の原生生物ではなく小型動物の休眠段階だとしたら、一体どんな種類の動物だったのだろうか。

トゲつきの微化石が地質記録に現れるのとほぼ同じ頃、もう一つの大革命が起きたと見られている。

左右相称の動物が初めて登場したのだ。

これにより移動能力は格段に向上する。

左右相称動物は「前」と「後ろ」がはっきりしていて、前後に長い管のような体を持ち、その軸に対して体内の器官がおおむね左右対称に配置されている。

動物が多様な「門」に枝分かれしていくにふさわしい祖先の姿といえる。ただし、それが誕生した時期については長らく議論の対象となっていた。遺伝子研究からは、その左右相称の祖先が6億6000万年前頃～5億7000万年前頃に生息していたことが示唆されている。しかし、きわめて小さく（多分、長さ1ミリ程度）、骨格のない蠕虫（ぜんちゅう）のような生物だったと見られるため、明瞭な化石が残っていない。非常に小さいサイズで、硬い部分のない蠕虫のような生物の場合、化石になる見込みが低いのは事実なのである。

状況を救ったのは中国の化石だった。最初の左右相称生物が生息していたと見られる時代の岩石が、21世紀初めに中国南西部で発見されたのである。その後、具体的な時期をできるだけ正確に特定するため、時間をかけて慎重に岩石の年代分析が行なわれた。その上で、そこに存在するはずの化石探しが始まった。1万枚以上の岩石薄片（岩石の塊をごく薄くスライスして磨き、顕微鏡のステージに載せたときに光が透過するようにしたもの）に取り組みこと3年、ついに左右相称動物の化石が見つかる。それはきわめて小さく、人間の髪の毛の太さ程度の大きさしかない。それを詳しく調べたところ、ほぼ6億年前のものであることがわかった。その化石生物には「ベルナニマルキュラ」という名がつけられた。

欠けていた部分がここでもまた埋まったわけである。この初期の左右相称動物は、小さくて目立たないながらも真の意味で革命を起こした生物であり、のちに来るものたちへの道を開いた。ドゥシャンツァオ累層と呼ばれるこの地層からは、最古の動物の卵と胚も発見されている。それだけではなく、6億年前の世界がどのようなものだったか、また動物の登場によって地層の堆積の仕方そのものがいかに変わってしまったかも見えてくる。

動物が誕生する前の時代には「生物擾乱（じょうらん）」がなかった。つまり、新たに積もった堆積層が生物の活動によって乱されることはなかったわけである。今は生物擾乱があるのが普通なので、それが通例ではなく例外だった時代を想像するのは難しい。現在、動物登場以前のような状態で地層が残っているのは、黒海の底のような特異な環境のみである。

移動する生物によって海底が乱されるようになったことは、非常に大きな変化だった。20世紀後半になって、この現象は「カンブリア紀の農耕革命」と呼ばれるようになる。それこそがまさに、原生代と顕生代の海底と、後に残った層位記録の大きな特徴といえる。

新たに登場した左右相称生物は動いていた。それも、単に堆積物と水の境界面で分布を広げていただけではない。垂直方向に穴を掘る行為も始まった。そんなことができたとすれば、海中の酸素濃度が高くなければおかしいと著者らは考える。堆積物を掘り進みながら酸素を得るのは控えめにいっても難しく、地球全体の酸素濃度が仮に10パーセントを切っていたら間違いなく不可能だっただろう。

この新しい動物が次第にストロマトライトや微生物マットを食べるようになり、ついには原生代とカンブリア紀の境界近くでそれらを滅ぼしてしまったというのが従来の見解だった。

新しい見方によれば、左右相称動物は栄養豊富な微生物マットを食べていただけではない。マットが必要とする硬い底質がいたるところに広がっていたのに、それをほぼ存在しないまでに変えてしまったのである。

【112】

原生代末期には、世界が動物を迎える準備を終えていた。

以前より大きな体や骨格のほか、活動に必要な多種多様な組織もすでにある。

唯一足りないものが酸素だ。

6億3500万年前に最後のスノーボールアース現象が終わった後、動物は態勢を整えていたものの酸素濃度が低すぎた。

それでも、5億5000万年前くらいになるとその状況も変わっていた。

酸素濃度が上昇したのである。

酸素濃度を永続的に高めるには、石灰岩として埋もれる有機炭素ではなく、堆積物に埋没する有機炭素の割合を増やす必要がある。

有機炭素の大部分は、大陸から侵食された粘土によって隔離される。

そのため、海（特に生産性の最も高い熱帯の海）への粘土の流入量を増やすような要因は、何であれ大気中の酸素濃度を上昇させることにつながる。

何らかの陸生生物圏が誕生することにより、風化を通じた粘土の生産高が高まったとする説がある。

確かに、陸上維管束植物が深い根を張るようになってからについてはそう言えるだろう。

しかし、赤道に対して大陸がどういう位置にあったかも見逃せないポイントだ。

寒い極地方より暖かい熱帯地方の方が、物理的・化学的風化作用ははるかに進行しやすいからである。

クライオジェニアン紀の始まりが近づいた時期（ただしスノーボールアースが始まる前の今から約8億年前）には、炭素循環に段階的な変化が生じてそれがおよそ1500万年続いた。

この間、有機炭素が堆積物に埋もれる量は急落した。

この現象が発見されたのは中央オーストラリアのビタースプリングスであり、以来、世界の様々な場所で確認されている。

この現象のせいで表層水域の酸素濃度もおそらく一次的に低下しただろう。

なぜ炭素循環が乱れたのかは謎だったが、アダム・マルフの研究グループにより、その変化の終了した時期が、地球の自転軸が短期間のうちに二回にわたって60度移動した時期と重なることが明らかになった（ノルウェー・スバルバル諸島の岩石からその痕跡が確認された）。

この種の極移動を「真の極移動」と呼ぶ。

真の極移動が起きると、固体地球全体はもとより、内核とマントルに挟まれた液体金属の層に至るまでが急激に動く。

この二回の極移動を通して、ロディニア超大陸の大部分がいったん赤道付近から中緯度地方に移動し、再び元に戻った。

それに伴い、炭素の埋没と酸素生成の両方が同時に変化した。
古磁気学と地球化学のデータから、地球の実に様々な地域で同様の変動が同時期に現われたことが明らかになっている。
そのことから、惑星の仕組みについて見えてくることがある。
この場合は酸素濃度にかかわる仕組みだ。
こうした真の極移動は過去 30 億年の間に 30 回発生した可能性がある」と著者らは考えている。
しかもその多くは、カンブリア爆発のような興味深いイベントと時期が一致するのだ。

第8章 カンブリア爆発と真の極移動

-----6 億年前～5 億年前-----

【112】

ダーウィンは化石記録全般が好きではなく、特にカンブリア紀の化石を嫌った。
カンブリア紀の化石は墓に入るまでダーウィンを悩ませた。
そのことと、遺伝の仕組みを解明できなかったことは、彼にとって人生最大の後悔だったはずである。

動物の化石が突如出現するようになることは、ダーウィンより前の時代から知られていた。

イギリスの地質学者アダム・セジウィックは、カンブリア紀そのものを定義した人物であり、最初の三葉虫の化石が見つかる地層から上をカンブリア紀と定めた。

私たちは色々な地質年代をまず「時間」として捉えがちだが、実際には複数の地層の連続として存在している。

何らかの化石が最初に現われた地層を底部とし、化石の絶滅か、もっといいのは異なる種が新たに登場することをもってその最上部とする。

地層の上では短期間の間に、一見すると化石が存在しない堆積岩の上に、非常に目立つ化石を豊富に含む岩石が重なっているのにセジウィックは気づいた。

化石で一番多かったのが三葉虫である。

三葉虫は節足類なので、高度に進化した複雑な動物である。

この発見はダーウィンを悩ませた（そして彼の批判者を大いに喜ばせた）。

自らが提唱したばかりの進化論とは、真っ向から食い違うように思えたからである。

こうしてダーウィンは化石記録を呪いながら墓に入った。

自分の理論が正しいと確信してはいたものの、晩年には批判の矢面に立つこととなった。

地球で「最初」と見られる生命が非常に複雑だったために、ダーウィンが『種の起源』の中で雄弁に語ったような進化のプロセスから三葉虫のような複雑な生物が生まれるとは考えられないと指摘されたのである。

特定の地質年代を象徴する化石は色々あり、三葉虫もその一つだ。

三葉虫は地球の歴史の比較的早い段階から海の生息環境を支配していた。

だが、具体的にどれくらい早かったのか。

ダーウィンの時代には三葉虫が最古の動物だと考えられていた。

にもかかわらず、三つの体節に分かれ、複眼と多数の脚を備えた複雑な構造を持ち、しかも大きい。

最初期の三葉虫には体長が約 60 センチに達するものもあるほどだ。

最古の動物のあるべき姿ではない。

分化の進んでいない小型の生物ならまだしも、大型の複雑な動物であるはずがないと思われたのだ。

今の私たちは知っているように、三葉虫は到底最初の動物と呼べる存在ではない。

最初の動物がどう誕生したかは、生命の歴史の中でも最も興味深いテーマであると同時に、様々な意見が飛び交う領域でもある。

過去 10 年間にも新しい情報が多数得られた。

動物の「門」が最初に多様化した時期をめぐるっては全く異なる見解があって、それぞれ別々の方面からの証拠によって裏づけられている。

一つは岩石の中に動物の化石が現われるパターンであり、もう一つは現存する動物の分子時計に関する研究結果だ。

動物がいかにして急速に多様化したのかという、古生物学における最大級の謎を解く上で、どちらも重要な手がかりを与えてくれる。

【113】

カンブリア爆発に関する最初の大きな証拠は化石からもたらされた。

動物の化石が岩石中に現われるパターンには四つの波が確認できる。

最初の波が始まったのは、およそ 5 億 7500 万年前。

これを「アバロン爆発」と呼ぶ。

アバロンとは、カナダ東部のニューファンドランド島にある地名であり、そのエディアカラ紀の地層から最古の化石群が発見された。

第二の波が起きるのは、エディアカラ生物群がほぼ完全に姿を消した時期と重なり、実際の化石ではなく動物の活動の痕跡が正確に保存されている。

この膨大な数の「生痕化石」は、多細胞生物が盛んに動くことによって生み出されたとしか考えられない。

すなわち動物だ。

古いものは 5 億 6000 万年前にまで遡るが、ほとんどは 5 億 5000 万年前のものである。

当時の海底は、活発に動き回る小さな蠕虫のような生命に満ち溢れていたことだろう。

第三の波は骨格の登場だ。

5 億 5000 万年前より少し新しい地層の中に、おびただしい数の微細な骨格要素が現われる。

それらは非常に小さなトゲやウロコで、炭酸カルシウムでできており、動物の体表をタイルのように覆っていたと見られている。

最後の第四の波がもっと大型の化石動物であり、三葉虫や二枚貝のような腕足動物、トゲを持つ棘皮動物、さらには巻貝に似た多種多様な軟体動物などだ。

それらすべてが、5 億 3000 万年前より新しい地層に含まれる。

ダーウィンの時代には、第一から第三の波については全く知られておらず、カンブリア紀の始まりは堆積層に最初の三葉虫が確認できる時期とされていた。

このように波が連続して訪れた理由は、意外なほど単純なものかもしれない。
その頃までに酸素濃度が過去最高レベルに上昇していたのである。

四つの波は比較的短期間のうちに化石記録に現われている。
最新の年代測定法により、最初の複雑な化石（最古の生痕化石から 1000 万年前～2000 万年後に現われた微細な骨格の化石）が登場する時期は 5 億 4000 万年あまり前と特定され、最初の三葉虫が出現するのはその 2000 万年ほど後だったことがわかった。

【114】

化石記録に動物が登場するのは重要なイベントであり、「カンブリア爆発」と呼ばれている。

古生物学者にとってカンブリア爆発は、化石に残るほど大型な動物の主要な門のほとんどが最初に誕生したことを意味する。

分子遺伝学者にとっては、生命が進化して初めて動物になったことを示している。

その時期については 1990 年代を通して激しい議論が続いたが、今世紀の初めに高度な分析法を用いた新しい分子研究によって、古生物学者が主張していたより新しい時代に動物が現われたことがほぼ確認された。

具体的に言うと、少なくとも 6 億 3500 万年前になるまで地球上に動物が存在したことはなく、実際には 5 億 5000 万年前に近かった可能性がある。

現在では、カンブリア紀は 5 億 4200 万年前～4 億 9500 万年前までと特定されている（終了の時期についてはもう少し早かったかもしれない）。

とはいえ、動物門の圧倒的多数が初めて登場するのは、5 億 3000 万年前～5 億 2000 万年前という比較的短い期間である。

これが生命の歴史全体において 3 番目か 4 番目に重要なイベントであるというのが、あらゆる専門家の一致した見方だ。

これを超えるものは、地球に初めて生命が誕生したことと、生命が酸素に適應したこと、そして真核細胞が生まれたことしかない。

【115】

信頼性の高い最新の情報によれば、カンブリア爆発が始まってすぐの地球では大気中の酸素濃度が 13 パーセントだった（現在は 21 パーセント）。

ところがその後で変動する。

この時代、二酸化炭素の濃度は今日の数百倍にも達していた。

そこまで高ければ猛烈な温室効果が生じたはずであり、太陽エネルギーが今より 5 パーセント低かったことを差し引いてもなお余りあるほどの熱が生み出されたに違いない。

カンブリア爆発が終わる頃には二酸化炭素濃度が減少したとはいえ、動物が誕生してからのどんな時代と比べても地球の気温は高かっただろう。

高温の状態では酸素が海水に溶けにくくなるため、海の酸欠状態はさらに悪化したと思われる。

中国のチェンジャン（澄江）地方で新たに発見された化石埋蔵地には、硬い組織と柔らかい組織をともに備えた多種多様な化石が残されている。

この化石群からは、動物の門がどのように誕生したかを垣間見ることができるとともに、カナダのバージェス頁岩より前の時代の生命がどのようなものだったのかももうかがい知ることができるといえる。

チェンジャンの地層は5億 2000 万年前～5億 1500 万年前に堆積したことがわかっており、一方のバージェス頁岩は5億 500 万年前より以前に遡ることはないと今では考えられている。

およそ 1000 万年の時を隔てているので、両者を比較すると動物がどう多様化していったかが見えてくる。

チェンジャンもバージェスも、骨格だけでなく軟組織も保存されているため、どんな動物がどれくらい生息していたかがかなり正確に把握できる。

柔らかい部分が確認できないと、動物の種類に応じてどれくらいの数かいたのかを確実に掴むことはできない。

骨格を持たない蠕虫やクラゲのような動物が夥しく存在していたかもしれないからだ。

そう考えると、どちらの地域についても動物相の全容が明らかになっているというのは驚きでもある。

今のところ、バージェス頁岩からは5万点を超える化石が発掘されている（チェンジャンではそれより数が少ない）。

バージェス動物群をまとめ上げたデリク・ブリッグス、ダグラス・アーウィン、フレデリック・小リアーノ三人は、19994年の著書『バージェス頁岩化学図鑑』のなかで150種の動物を記載している。

その半数近くが節足動物か、それに似た動物だ。

だがそれ以上に興味深いのは個体数である。

化石数全体の9割以上が節足動物で、次が海綿動物と腕足動物なのだ。

もっと古い時代のチェンジャンと同じように、バージェスの海底でも節足動物が種類でも数でも他を圧倒していたことになる。

節足動物は無脊椎動物としてはきわめて複雑な構造を持っている。

にもかかわらず、最も初期の動物化石の中にも数多く存在し、種類も多い。

これは、化石記録に初めて姿を現わすより前に長い進化の歴史があったことを物語っている。

おそらく体長がせいぜい1ミリ程度の節足動物が海底にひしめき、海を泳いだり水に浮いたりするものもたくさんいたのではないだろうか。

バージェス頁岩の動物相や植物相に関する本は大抵、体が柔らかく繊細で美しい生物の紹介に多くのページを割いている。

ところが、実際にバージェスの地を訪ねてみて驚く驚くのは、一番ありふれた化石がそうした風変わりな分類群のものではなく、三葉虫だということだ。

三葉虫と、それより数は少ないものの実に多様な節足動物が、バージェス化石群の圧倒的多数を占めている。

個体数においても種の数においても、また体制の種類の数においてもそうだ。

体制の種類は「異質性」という尺度で表わされる（それに対して多様性は分類群の数を指す）。

節足動物はカンブリア紀の動物の中で最も繁栄したと言えそうだ。

その成功には、節足動物の主要な体制である「体節制」がどれくらい貢献したのだろうか。

【116】

地球上の動物の中で最も多様化が進んでいるのは体節を持つものであり、そのほとんどが節足動物である。

多種多様な昆虫も含め、どんな節足動物にも複数の体節がつながった繰り返し構造が見られ、個々の体節はそれぞれ固有の機能を果たしている。

節足動物に共通する特徴は、体全体が外骨格に包まれていることだ。

外骨格は消化管の中にまで入り込んでいる。

外骨格は成長しないので、定期的に脱皮して、少し大きいものと取り替えなければならない。

分化の進んだ頭部、胴体、後端部がどういう比率になっているかは、種によって異なる。

一般に付属肢は特殊化している。

陸生節足動物の場合は個々の付属肢が一本ずつ（非常に大きい）なのが普通だが、海生のものでは個々の付属肢が二つの枝でできている。

内側は歩脚の枝で、外側は鰓（えら）の枝であり、二枝型付属肢と呼ばれている。

外骨格は柔らかい部分を鎧兜（よろいかぶと）のように覆っており、それが主な役割だと考えられている。

つまり保護することだ。

しかし、その結果として重大な影響が生じる。

体のどの部分からも、酸素を受動的拡散によって取り込むことができないのだ。

酸素を摂取するために、最初の節足動物（全て海生）は呼吸に特化した構造か鰓を発達させるしかなかった。

こうした特徴を備えているのは節足動物だけではない。

環形動物には全て体節があるし、軟体動物の単板綱などにもある程度の体節が確認できる。

体節は動物の歴史の早い時期に現われ、それが初期の動物化石の最も一般的な特徴であることがカンブリア紀の三葉虫の化石からわかる。

【117】

生物学者のジェームズ・ヴァレンタインは2004年著者『門の起源について（On the Origin of Phyla）』の中で、進化をめぐる大きな謎の一つについて考察している。

その謎とは、カンブリア紀にはなぜこれほど節足動物の数と種類が多かったのか、である。

『初期の節足動物は、石化されないクチクラを持つものが多かったとはいえ、その体制に驚くほどの多様性があったことが明らかになっている。

種類が非常に多く、他とは明確に区別できる特徴を備えているため、系統分類学の原理が当てはまらない。

節足動物にこれほどの異質性が見られるのは、系統発生的に考えて実に不思議だ。

・・・節足動物的な体制が突如として爆発的に登場したことは、カンブリア爆発の中にあっても際立っている』。

一口に節足動物といっても体のつくりは多種多様だ。

系統の異なる複数の生物群が、収斂進化を通して似通った姿になったに過ぎないからである。

だが一つ共通点がある。

体節ごとに二枚型の付属肢を持ち、それぞれが歩脚と長い鰓を備えていることだ。

なぜ底生生物は体節性を選んだのかと思いたくなるが、そもそも体節に分かれていると捉えること自体が間違っているのかもしれない。

ヴァレンタインらによれば、少なくとも環形動物は体節ごとに体腔もおおむね区切られているのに対し、節足動物の場合はそこまでではなく、むしろ体節が「繰り返されている」といった方がいい。

この興味深い体制が誕生したのは、移動するためのニーズに応えるためだったとヴァレンタインは考えている。

「節足動物の体節性が、体を動かすメカニズム、特に移動と関連しているのは間違いなく、それを神経と血液が助けている」。

この種の体制が、移動を容易にするためのものであることは疑いようがない。

しかし、そういう体のつくりになった結果、体節ごとに鰓が繰り返される構造になった。

ここの鰓は小さいので、体節の下で最適な方向に向けることができる。

その位置であれば、羽根のような形をした鰓に能動的に水を通すことによって、鰓に当たる酸素分子の数を増やすことができる。

これは著者の一人ウォードが2006年に発表した仮説だ。

【118】

カンブリア紀の最も古い堆積物からたくさん見つかる動物はもう一種類ある。

海綿動物だ。

刺胞動物と同じく海綿動物にも呼吸のための器官がない。

それもそのはず、内側の空洞に面していくつもの袋が並んだ構造になっているのである（刺胞動物に似ているがそこまで整然としておらず、実質的な体組織を持たない）。

どの袋も体積に比して表面積が非常に大きい。

何しろ、無数の単細胞生物が集合したようなものであり、そのすべてが海水と接していると言っていい。

ところが、これだけの利点があるのを割り引いたとしても、海綿動物の酸素の取り込み方は実に効率的だ。

食物摂取の役割を主に担う襟細胞が、大量の海水を体の中に通す。

ある専門家によれば、海綿動物が一日に取り込む海水の量は自分の体積の一万倍にも及ぶという。

そのため、海綿動物は極端な低酸素の環境でも生きていける。

水中の酸素濃度がきわめて低くても、それを補うだけの大量の水を体に通すことができるからだ。

【119】

カンブリア紀の動物で硬い部分を持つ主なグループは、膨大な族（科と属の間）の節足動物と、（カンブリア紀のほとんどの海成層で）それに次ぐ数を示す腕足動物、そしてそれよりは少ないが棘皮動物と軟体動物だ。

腕足動物は今も存在するグループであり、外肛動物に近く、よく軟体動物の二枚貝に間違えられる。

確かに二枚貝と腕足類は表面的に似てはいるが、体内の構造は全く異なる。

腕足類の最も大きな特徴は、触手冠と呼ばれる摂食器官だ。

触手冠とは、輪状の触手に細長い繊毛が生えたもので、殻の中で繊細な扇のような形を作っている。

この器官が海水から食べ物を濾し取る。

触手冠は内側に体液が満ちている上に非常に細いため、精緻な呼吸器の役割も果たす。

腕足動物は、おそらくは古生代の海底に棲む生物の中で一番数が多かったとみられるのに、2億5000万年前までに起きたペルム紀の大量絶滅でほぼ根絶やしにされ、多数派に振り返ることが二度となかった。

【120】

カンブリア紀の棘皮動物は、箱のような形をした奇妙な小型生物の集まりである。最も初期の棘皮動物としては、松ぼっくりに似た形の風変わりなヘリオブラコイド類や、莖部を持つ原始的なエオクリノイド類（始棘皮類ともいう）のほか、座ヒトデ類なども堆積物から見つかる。

棘皮動物より多くの化石が残っているのが軟体動物だ。ほとんどが小型で、主要な「綱」（腹足類、二枚貝類、頭足類）がすべてカンブリア紀の地層から発見されている。ただし、軟体動物で数が一番多いのは単板綱の化石だ。

単板綱は今でこそ少数派のグループだが、カンブリア紀には多数生息していた。カサガイのような殻を持ち、巻貝のような体をして、幅の広い筋肉質の足で這って移動する。とりわけ注目すべきは、当時の軟体動物の中で単板綱のみが体節を思わせる構造を備えていたことだ。化石の殻の内側についた筋肉の跡と、現生種の構造との比較から、カンブリア紀の単板綱には複数の鰓があったと著者らは考えている。

現代の腹足類には一対の鰓か、わずか一個の鰓しかない。だが、同じく巻貝に似た生活様式だったとみられるカンブリア紀の単板綱には、複数の鰓を持つ必要性があった。単板綱は軟体動物の祖先であり、続くすべての生みの親になったと見なされている。つまり腹足類、頭足類、二枚貝類、多板綱のほか、もっと少数派の綱に属する軟体動物もである。

単板綱は長らくペルム紀末に絶滅したと考えられていたが、1950年代に深海で現生種が発見されたことで、初期の軟体動物がどういう暮らしを送っていたかが以前より随分わかってきた。最も初期の単板綱の化石に残っていた筋肉の跡が物語るように、二対以上の鰓が存在していたことが現生種によって裏づけられている。詳しくいうと、殻の内周全体に沿って複数対の筋肉が並んでいることが確認されたため、初期の単板綱には明白な体節性があったか、少なくとも鰓呼吸型循環系の繰り返し構造が備わっていたと結論づけられたのだ。繰り返しパターンを示しているのが鰓（およびそれを助ける血液とフィルター）だけであることから、節足動物の場合と同様、これが鰓の呼吸表面積を増加させるための適応であると推測できる。これに近い繰り返しが殻にまで及んでいるのが多板綱だ。現代でも海辺の潮間帯でよく見かける生物である。

棘皮動物の体もそうだが、腕足動物の殻の内部もほぼすべてが水と言っていい。肉質はごくわずかしかなく、そのわずかな部分も常に水の流れと接している。

腕足動物は触手冠を使って複数の海水の流れを生み出している。
それが殻の側面から内部に入って触手冠の上を歩いていき、最終的には殻の前部から外に送り出される。

このように絶えず新鮮な水が体内を通ると、海綿動物の場合と同じ効果が生じる。
肉質部分が少なく触手冠の表面積が非常に大きく、しかも殻の内側の体積より何倍も多い水が間断なく体内を通り抜けていることを考えると、腕足類は低酸素世界に見事に適応した例と言えるだろう。

カンブリア爆発を引き起こした物理的・化学的原因

【121】

以前は存在しなかった研究分野が大きく前進してきている。

特に宇宙生物学や、地球生物学だ。

しかし、古くからある生物学の柱の一つも近年になって復活を遂げ、新しい学問とっていいような重要な成果を生み出している。

進化発生学、通称「エボデボ」だ。

この分野は過去 10 年間で目覚ましく発展し、カンブリア爆発についても数々の研究を発表してきた。

エボデボ界の研究者の一人ショーン・キャロルは、2005 年の著書『シマウマの縞チョウの模様----エボデボ革命が解き明かす生物デザインの起源』の中で、この分野を紹介している。

この本のテーマを一言でいうなら、かつては手に負えないとされていた進化生物学上の問題が、今でははるかに理解できるようになっているということだ。

その問題とは、新奇性はどのようにして生まれるかである。

進化においては、それまで全く見られなかった形質が比較的短期間で獲得されることがあり、その現象は従来のダーウィン進化論では説明がつかなかった。

翼や脚の登場、節足動物の体節制、あるいはカンブリア爆発の特徴である体の大型化といった飛躍的な進化を考えるのに、「いくつもの突然変異が一斉に起きてどういうわけか生物を根本的に変えた」というような筋書きでは無理があるのだ。

今やエボデボはこの問題を解決したようである。

キャロルは著書の中で、進化における劇的な変化を新たな切り口からうまく解き明かす四つのポイントを挙げている。

キャロルが「革新のための秘訣」と呼ぶものの一つ目は、「すでにあるものを利用する」である。

これは「自然はよろず修繕屋だ」という考えに基づいている。

新しいものを生み出すのに、必ずしも新品の装置や道具で作る必要はない。

既存のものを使うのが一番手っ取り早い。

二つ目と三つ目はダーウィンその人も理解していた事柄だ。

多機能性と反復性である。

多機能性とは、すでに存在する形態や構造、または生理機能を使って、本来のものに加えて新たな機能を持たせることをいう。

一方の反復性とは、何かの構造が複数の部分で構成されていて、それにとって完全な機能を果たしている場合を指す。

その一つの部分に新しい仕事を与え、残りの部分が従来通りに働き続けられるなら、全く新しい構造を一から作り出すよりもはるかに簡単に革新への道が開ける。

そのいい例が頭足類の泳ぎと呼吸だ。

頭足類は常に大量の水を吸い込んで鰓に通しており、多くの無脊椎動物と同様、水を入れるのと吐き出すのとでは別々の「管」を用いている。

酸素を多く含む水を吐き出してしまうことのないようにするためだ。

だが、この管の構造をわずかに「いじって」みるだけで、新しい移動手段が手に入る。

呼吸と移動にかかるエネルギーは以前と変わらぬまま、同じ量の水を利用して呼吸と移動の両方を実行できるようになったのである。

四つ目の「秘訣」はモジュール性だ。

節足動物はもちろん、程度の差はあれ私たち脊椎動物も、体が体節に分かれているという意味ではすでにモジュール性を持っているといえる。

節足動物の体節からは付属肢が伸びており、それぞれが信じがたいほどに改造されて、摂食、交尾、移動など色々な機能に適した構造になっている。

節足動物はまるでアーミーナイフのようであり、特定の機能に特化した付属肢を個々の体節が備えているのだ。

私たち脊椎動物にもそれは当てはまる。

当初は原始的だった手足の指が、陸を歩いたり、水中を泳いだり、空を飛んだりといった実に多彩な作業ができるまでに変化してきた。

では、エボデボはどうかかわってくるのだろうか。

実は、こうした構造は柔らかいパテのように形を変えられることが明らかになっている。

その根底に遺伝子「スイッチ」のシステムがあるからだ。

そのスイッチが位置しているのは発達中の胚の中で、のちに節足動物や脊椎動物の様々な付属肢になる部分と同じ場所である。

スイッチは重要な役割を担っており、いつどこで成長すればいいかを体の各所に各所に指示している。

節足動物の体が頭部、胸部、腹部という順番になっているのは、それぞれがまずは染色体上で、次いで胚自体の中で、すでに全く同じ順番で並んでいたからである。

これは実に素晴らしい発見だ。

この仕事の大部分をこなしているのが、ホメオティック遺伝子である。

この遺伝子を持つのは節足動物だけではない。

名前は違うが同等の遺伝子が他の分類群の生物にも存在する。

エボデボが生み出した数々の新発見は、カンブリア爆発の謎を解く上でも利用されてきた。中でも最も重要な謎が、現存する多種多様な動物の門と体制がいつ、どのようにして始まったかである。

これについては長らく二つの説がある。

一つは、動物の爆発的な多様化が起きたのは化石記録に現われている通りの時期だというものだ。

だとすると、動物門が分岐したのはおよそ5億5000万~6億年ほど前までの時代のどこかということになる。

もう一つは、古い門に属する現生動物の遺伝子を比較し、先にも触れた「分子時計」に証拠を求めようとするものだ。

焦点になるのは、旧口動物と新口動物という、最も基本的な二分類に分かれたのがいつかという問題である。

この二つのグループには、胚の構造と発達過程に根本的な違いがある。

旧口動物の仲間に入るのは、節足動物、軟体動物、環形動物などだ。

いずれも初期胚に原口と呼ばれる開口部ができ、そこが成体の口へと発達して行く。

一方の新口動物（棘皮動物、脊椎動物、その他少数派の門を多数含む）の場合、口と原口は別々のまま成長する。

ただし、旧口動物と新口動物に大別される前の時代に、非常に原始的な第三のグループが主系統から枝分かれしていた。

刺胞動物と海綿動物、そしてクラゲに似たその他の生物が属する少数派の門である。

最初に登場するのは最も単純な形態である刺胞動物と海綿動物で、すでに見たようにエディアカラ生物群に含まれていたようだ。

時代は5億7000万年前にまで遡り、カンブリア紀（5億4200万年前に始まった）よりも前である。

だが、旧口動物と新口動物が明確に区別できるのは、カンブリア紀に入って少し経ってからになる。

動物が旧口動物と新口動物とに分かれたのだとしたら、分かれる直前の動物はどんな姿をしていたのだろうか。

様々な方面からの証拠により、この生物は左右相称で移動能力を持っていたと見られている。

おそらくは取り立てて特徴のない小型の蠕虫で、現代で言えばプラナリアか微小な線虫に似ていたのではないだろうか。

ところが、新発見によって明らかになったのは、分岐前の最後の祖先種には大幅な改造を可能にする遺伝子の工具箱がすでに備わっていて、それを5000万年以上経ってから実際に使ったということである。

この蠕虫は前方に口を、後方に肛門を持ち、それを管のような長い消化管がつないでいた。体の側面からは、感覚情報（触覚と化学物質の感知か？）を得るための短い突起がついていたかもしれない。

いずれにしても重要なポイントは、のちに急速な変容を起こせるような形でその全てが組み立てられていたということである。

そして実際にその変化は起きた。

これは新しい見解である。

カンブリア爆発に必要な道具と特徴が、表に出ないまま5000万年も存在していたわけだ。

カンブリア紀の始まりは今では5億4200万年前と特定されている。

地層の中でその起点となるのは、岩石の中に移動の痕跡が初めて確認される場所である。

具体的には、ある種の生痕化石により、動く動物が泥を縦に掘った跡が発見される箇所だ。

ところが、続く1500万年の間には新しい体制が誕生した様子がほとんど見られない。

少なくとも化石記録にその形跡が残っていないのである。

動物の爆発的な多様化を確実に物語る最初の手がかりは、つい最近になって中国のチェンジャン（澄江）からもたらされた。

この5億2500万年前～5億2000万年前までの時代の地層からは見事な化石群が見ついている。

体の柔らかい部分も保存されているという意味で、時代は古いもののバージェス頁岩に似ている。

チェンジャンでもバージェス頁岩でも、動物群を数で圧倒しているのが節足動物だ。種類も実に多い。

ほどなく節足動物は地球で最も多様な動物となり、以後その地位を保ち続けることになる。今では甲虫だけでも3000万種が存在すると推定されている。

エボデボはその理由を教えてくれる。

様々な体制の中で、節足動物のものほど容易かつ短期間に、しかも劇的に変化できるものはない。

キャロルが挙げた特徴をまさしく備えているからだ。

モジュラー構造の部分からなり、形態の繰り返しがあるので新しい機能を担わせやすく、体節の中の特定領域をすぐに変容させられる一連のホメオティック遺伝子を持っている。

かつては、新種の動物が誕生するからには新しい遺伝子が必要だと考えられていた。

そう思うのも無理はない。

原始的な海綿動物やクラゲは、もっと複雑な節足動物に比べたら遺伝子の数が少ないに決まっている。

だから、全節足動物の共通祖先は新しい遺伝子、つまり新しいホメオティック遺伝子をどうにかして追加したに違いないという理屈である。

何しろ、いつ、どのように発達するかを体の各所に指示するのはホメオティック遺伝子の「スイッチ」なのだ。

だがそうではなかった。

キャロルらが解明したのは、節足動物の最後の共通祖先は新しい遺伝子を進化させたわけではないということだ。

遺伝子はすでにあった。

節足動物がのちに驚くべき多様化を遂げるのは、既存の遺伝子を利用してのことだったのである。

キャロルは「形態が進化する上で問題になるのは、どんな遺伝子を持っているかではなく、それをどう使うかだ」と表現している。

10種類のホメオティック遺伝子さえあれば、節足動物をすっかり変貌させて多様化させることができる。

そのからくりが明らかになったのは、個々のホメオティック遺伝子から作られる特有のタンパク質を比較するとともに、それらが初期胚のどこに見つかるかを調べる研究からだった。

以前は、節足動物の何らかの遺伝子が脚を作る指令を携えていると考えられていたが、それは誤りである。

ホメオティック遺伝子の仕事はタンパク質を合成することだ。
そしてそのタンパク質が、初期胚の特定領域の成長を促したり止めたりする手段となる。
この種のタンパク質の中には、特殊化した付属肢を作ることにかかわるものもある。
そのタンパク質を何らかの方法で胚の別の位置に動かしたとしたら、そこから生じる産物も移動する。
その結果、本来なら体の特定の場所から生えるはずの脚が、いきなり全く新しい場所から現われることもありえる。
ただしその場合、実際に脚が形成されるよりかなり前にそのタンパク質が移動している必要がある。
ともあれこのように、ホメオティック遺伝子が生成するタンパク質の位置を胚の中で変えることが革新を生むというわけだ。

節足動物の胚の中でそれが起きたために、私たちがいま見るような多種多様な種類へと進化を遂げた。
節足動物の形態には数千種類、いや、数百万種類もが存在するのではないだろうか。
その全てが、10個の遺伝子という道具を使うことで生み出された。
体節の繰り返し構造こそが節足動物の特徴であり、各体節が適切に特殊化するためにはそれぞれが別個のホメオティック遺伝子からの指令を受ける必要がある。

グールド vs. モリス ----異質性の形

【122】

どうしてカンブリア爆発が起きたかについては、これまでに数々の仮説が提唱されてきた。
これについて、多数の動物門を作り出すのに長い時間をかけるのではなく、一見すると短期間の間に完了したのは何故なのかという疑問が湧く。
またカンブリア爆発で誕生した主な動物はどの程度多様だったのかも謎だ。

現存する動物門（資料によるが、約32個）は全てカンブリア爆発のときに現われた。
この時代より後に新たに加わった動物門は皆無だと見られている。
2億5200万年前のペルム紀大量絶滅の後ですら、新しい門が生まれることはなかった。
では、カンブリア紀には現在より門の数が多かったのだろうか。
カンブリア紀の動物は、現生動物とは根本的に異なる奇妙な生物だったのか。

グールドは著書『ワンダフル・ライフ』の中で、現存しない体制を持つものを「奇妙奇天烈動物」と呼び、それらがカンブリア紀にはひしめいていたと主張した。
グールドにとってカンブリア爆発とは、新しい体形、新しい体制、無数の種が爆発的に誕生した時期に他ならない。
しかし、大抵の「爆発」は命にかかわるものだ。
事実、新しい種類の体制（グールドはそれを新しい種類の門と考えた）の多くはカンブリア紀を生き延びることができなかった。
比喩的な意味で、爆発によって殺されたのである。
動物の種類が大幅に増えた結果、生存競争が生まれ、それに生き残れなかったものがいたわけだ。
数々の新たな体制が登場したにもかかわらず、自然選択という試練に耐えたのはその一部に過ぎなかった。

体制の多様化はピラミッド型のモデルで表現できるというのがグールドの見方だ。まず、**短期間の間に体制が大幅に多様化して体制の種類の数が増え、それらがピラミッドの広い底部を構成する。**種ではなく体制の多様性は「異質性」とも呼ばれる。ところが**時とともにその底部は消え、カンブリア紀が終わる頃には当初よりも門の数ははるかに少なくなった。**

一方、グールドとは正反対に、**異質性はむしろカンブリア紀以降に増加したと考える者も大勢いる。**

その代表格がモリスだ。

モリスに言わせれば、**奇妙奇天烈動物は新しい門に属するわけではなく、現存する既知の門の初期の構成員にすぎない。**

20世紀末に起きたこの論争は、両陣営とも見苦しいほどのレベルにまで加熱した。

以後は、**グールドが間違っていたというのが大方の見方**であり、これに関する著者らがつけ加えることはほとんどない。

ただし、この問題に関しては論争が下火になったにせよ、カンブリア爆発の別の側面は今なお最前線の研究テーマであり、大きな議論を読んでいる。

カンブリア爆発はいつ起きたのか

【123】

生命の歴史の中で、カンブリア爆発は間違いなく特筆に値する重要なイベントである。

にもかかわらず、最近になるまであまり**理解が進んでいなかった。**

その**大きな理由**は、**年代が正確に特定されていなかった**ことにある。

対象となる**岩石が古ければ古いほど、不確かさは高まる**ものだ。

地質学者のアダム・セジウィックが、最初の三葉虫の化石が見つかる地層から上をカンブリア紀と定めたのは、まだ19世紀前半のこと。

それからほぼ200年にわたって、カンブリア爆発がいつ起きたのかという問題が決着することはなかった。

ようやく国際的な合意が得られたのは1990年代初めのことである。

化石記録からは動物の登場に四つの波があることが確認でき、そのうちの第一番目をカンブリア紀から完全に外すことが決まった。

その時代は、原生代の中で「エディアカラ紀」という独自の名前を与えられることになる。

そしてカンブリア紀の始まりは、垂直に穴を掘った生痕化石が初めて現れる時期、と定義された。

これは微小硬骨格化石群よりも古く、当然ながら三葉虫の時代よりはるかに前となる。

堆積物を縦に掘り進むことができるとすれば、その動物は水力学的骨格を備えている上、その骨格をコントロールするために神経と筋肉が接合していたはずだ。

とはいえ、その生痕化石を含む地層は、実際のカンブリア爆発（化石記録から確認できるもの）よりも2000万年近く古いところに位置していた。

ただし、その地層が具体的にいつ堆積したのかは依然として不明のままだった。

1980年代の終わり、著者らの一人カーシュヴィンクはモロッコのアンティアトラス山脈の巨大な堆積層の中にある火山灰層の火山灰のサンプルを集めた。

コンプストンが開発した好感度・高分解能イオンマイクロプローブで測定した結果は思いがけない答えは、「約5億2000万年前」であり、6億年前より古いという予想を覆したのである。

だとすれば、カンブリア爆発（少なくとも最初の微小硬骨格化石群が現われたことによる動物門の大幅な多様化）は核爆発に近かったと言っていい。

以後、MITのグループをはじめ複数の研究チームが同じ結果を再現している。

三葉虫が登場した時代もついに特定され、それが予想よりかなり新しいことがわかった。時代の開始時期を決める仕事をしていた古生物学者は、カンブリア紀全体の長さがわずか1000万年になってしまうことを思って狼狽し、三葉虫の登場を目安にするのをやめ、もっと古いイベント、つまり縦に穴が掘られた生痕化石を基準にすることにした。

最終的にその時期がおよそ5億4200万年前と判明する。

カンブリア紀は他に類を見ない時代であり、劇的な進化が起きて新機軸が登場した。

しかし、それ以外にも珍しい特徴を持っていたことがその後の研究で明らかになった。

原生代とカンブリア紀の地層の境界で炭素の同位体を調べたところ、実に奇妙なことが確認されたのである。

数十万年から数百万年にわたって大幅な変動が起きていた（これを「カンブリア紀の炭素循環変動」と呼ぶ）。

その変動幅は尋常ではなく、地球上に存在するバイオマスのすべてを200万年～300万年おきに粉々にして燃やし尽くすのに相当する。

何らかの原因で、非常に軽量の炭素（メタンに含まれる）が大気中に大量に噴出し、それに伴ってありとあらゆる温室効果が現われた。

地球は短期的に過熱化に連続して見舞われたのだろうか。

軽度な過熱化であればむしろ世代時間を短くするので、生物多様性が増す可能性がある。

現代の生物相に見られるのと同じ効果だ。

だが、度が過ぎれば死を招くことはいうまでもない。

奇妙な特徴はまだある。

カンブリア紀にきわめて大規模なプレート運動が起きたことは以前から知られている（プレートとは、地表を形作る巨大な地殻の薄板のようなもので、移動したり、分離したり、ほかのプレートと衝突したりする）。

こうした運動は古地磁気を調べれば追跡が可能で、特定の岩石がかつて位置していた緯度や、プレート運動の方向も割り出せる。

当時、古地磁気に関する複数の新たな分析から、一見すると考えられないような結果が得られていた。

すべての大陸が地球表面を高速で移動したか、自転軸はそのままに地球全体が急激にずれたかのどちらかだというのである。

北極と南極は従来通りの位置にありながら、その下にある地球自体が動いたのだ。

この事実は、オーストラリアなどで採集したサンプルからもたらされた。

オーストラリアは赤道にまたがっていたのに、カンブリア紀の初期から後期の間に反時計回りにほぼ70度もその位置がずれた。

その間わずか1000万年足らずのことであり、実際にはそれよりかなり短かったかもしれない。

その頃のオーストラリアは Gondwana 超大陸の一部であり、南極大陸やインド亜大陸、マダガスカル、アフリカ大陸や南米大陸もそこに含まれていた。

したがって、当時の大陸塊の半分以上がかかわる移動だったことになる。
今では、旧 Gondwana 大陸だったほぼすべての地域から同様のデータが確認できる。
5 億 3000 万年前～5 億 2000 万年前の Cambrian 爆発のまさにその最中に、Gondwana は反時計回りに回転していたのだ。
広大な北米大陸を含む Laurasia 大陸についても似たような結果が示されており、ほぼ同じ時期に南極からはるばる赤道まで北上したことを告げていた。

ことによると個々のプレート移動が多発したのではなく、地球上の全てが一緒に働き、自転軸に対する相対的な位置を変えたのではないか。

しかし、そのためには当時の Laurasia 大陸とオーストラリアがほぼ 90 度離れていないとうまくいかない（だがオーストラリアが赤道線上にあって Laurasia が南極にあったのなら、きっとそうだったに違いない）。

このようにただ一度の回転で移動したと仮定すると、すべての大陸塊の相対的な位置と配置がきわめて正確に予測でき、太古の地理が読み解ける。

固体地球全体がたった一回回転したと考えることで、それまではばらばらに見えた古地磁気データの意味が九割がた明確になる。

何もかもが一度に起きていた。

何しろ、種の数でも体制の面でも進化の大きなうねりが訪れ、生体が作り出す鉱物の量が途方もなく増加し（様々な動物門で外骨格の数と種類が増えたため）、動物の間に捕食者と獲物の関係が初めて現われ、有機炭素の蓄えが大幅に変動し、複数の大陸の位置が劇的に変化したのである。

研究者たちは、それが偶然の一致だったのか、それとも因果関係があったのかと頭を悩ませた。

裏づけとなる古地磁気データがさらに集まるにつれ、太古のプレートの動きがただ単に意外なのではなく、全く不可能に思えるものだったことが浮かび上がってきた。

今の私たちは現状のプレートがどれくらい速く動いているのかを測定することができる。大西洋では大西洋中央海嶺に沿って新しい海洋地殻が作られていて、北米プレートとユーラシアプレートは年間わずか 1 インチ（約 2.5 センチ）程度の割合で互いから遠ざかっている。

こうした巨大プレートは海洋拡大中心で形成され、上に大陸を載せているので、プレートが向かうところへ大陸も移動する

移動の速度は場所によって異なる。

例えば、太平洋域でプレートが形成されつつある場所では、年間 3～5 インチ（約 7.5～10 センチ）というスピードだ。

考え得る最高速度は年間 10 インチ（約 25 センチ）近くに達するものの、この数値も仮説の域を出ず、異論も多い。

ところが、古地磁気データから割り出した速度は年間数フィート（1 フィートは約 30 センチ）というものだった。

プレートテクトニクスだけがかわっていたとしたら、この速さは不可能だ。

だが同様のデータは繰り返して得られていて、疑問の余地がない。

何か革命的なことが起きていたに違いない。

地表がそこまで高速で動いたというデータに接して、科学界はまずデータの信憑性を疑った。

しかし、カーシュヴィンクら少数の研究者たちは、従来の理論では追いつかない速度でプレートの位置がずれたという厳然たるデータをゆっくりではあるが発表して行った。

しかも、この高速の移動が起きた時期の大半は、動物門の多様性が爆発的に増加したときと見事に一致する。

プレートテクトニクスでないなら一体何だったのか。

それが動物の進化にどう影響したのか。

答えは驚くべきものだった。

同様のプロセスは火星や月をはじめ、いくつもの衛星や小惑星で何十億年も前から起きているからである。

これらの天体は自転軸の位置を大幅に変えることがあるのだ。

地球で同じことが起きたら、生命に計り知れないほど大きな影響が及んだのではないか。

この可能性については取り組みが始まったばかりだが、生命の歴史に対する私たちの理解に一大革命を起こそうとしている。

地球物理学者は1世紀以上前から、惑星の固体部分がかなり速いスピードで自転軸に対する相対的位置を変えることに気づいていた。

仮に惑星の質量の大きな部分が赤道から極に向かって3分の2のところにあつたとすると、自転軸は「重り」が赤道に来るように位置を動かす。

奇妙な重さが加わったことで、球体は新たな軸で回転するようになるのだ。

かつて月でも火星でもこうした変化が起きたことはよく知られている。

自転軸の位置が変わるこのプロセスは「真の極移動」と呼ばれる。

地質学的に見て、惑星上の質量が急激に変化するような出来事は色々と考えられる。

例えば大型の小惑星や彗星が衝突することもあるだろうし、地球内部のマグマが表面に噴き出すこともある。

同様に、プレート運動にかかわる構造（拡大中心や沈み込み帯）が現われたり消えたりすることによっても大幅な質量の変動は起こり得る。

増えた質量が何かに浮かんで漂っているのではなく能動的に維持されている限り、地球上で真の極移動を誘発するには十分だ。

その構造が失われる場合にも影響が生じる。

沈み込み帯や拡大中心が消滅するとすれば、一個の大陸が移動して別の大陸にぶつかるときだ。

合体する二個の大陸間の海底に拡大中心や沈み込み帯が存在すれば、衝突によって破壊される。

すると地表の質量が減少することによって（増加によってでなく）自転軸の位置が変わるわけだ。

カンブリア爆発に伴う生物学的な変化が大陸を移動させたとは考えにくい。

逆に、急激な移動が何らかの理由で進化のペースを加速させたと見るほうが納得が行く。

それを起こし得るメカニズムはいくつか発見されていて、カンブリア紀についてわかっている断片をうまくつなげて説明してくれるように思える。

一つには、大陸が高緯度に位置していると、海底や永久凍土の中に凍ったメタンを溜め込みやすい。

いわゆるメタンハイドレードだ。

その地域が赤道に向かって移動すれば、気温が徐々に上昇するにつれてときおり温室効果ガスを大気中に放出することになり、それが環境の温暖化につながる。

温暖なほうが生物の代謝が促進されるので、進化や種の多様化は速く進む傾向にある。

カーシュヴィンクラがこのメカニズムを発表したとき、論文に「カンブリア爆発を引き起こしたメタンの導火線」というタイトルをつけ、種の数が増える大きな要因の一つは熱循環だったかもしれないと論じた。

炭素同位体が異常に変動したのも、これも一因となった可能性がある。

また、赤道地方では自然に生物多様性が高くなることも明らかになっている。

ロス・ミチエルが、真の極移動が起きている最中の大陸の動きを調べたところ、この時代に新たに登場した動物群のほぼすべてが赤道へ向かう大陸の先端部分で生まれたらしきことがわかった。

一方、高緯度地方へ移動した地域では新たに誕生したものが全くいないか、ごくわずしかいなかった。

緯度が関係しているというのは呆れるほど単純な理論でありながら、多様性の増加をうまく説明してくれる。

自然がホメオティック遺伝子を介して様々な体制を実験しているときにそれが起きれば、なおさら多様化が促されただろう。

さらにこの仮説から見えてくるのは、カンブリア爆発の化石記録すべてを額面通りに受け取ってはいけないかもしれないということだ。

というのも、真の極移動の副次的な影響として、赤道に向かう地域では海進が、またそこから遠ざかる地域では海退が起きる。

堆積物は海進の間に最もよく保存され、海退時には失われる。

したがって、真の極移動の時期には、多様性の増加を記録した岩石だけが後世に残った可能性があるのだ。

生命史上のイベントの原因を真の極移動に求めるというのは、まったく新しい研究分野であり、20世紀においては前代未聞のことだった。

真の極移動はカンブリア爆発にのみ当てはまるのではなく、大量絶滅が起きるメカニズムの説明にもなる。

そうした絶滅の一つがカンブリア紀とカンブリア爆発を終わらせ、グールドとモリスが紹介したバージェス頁岩の奇妙奇天烈動物をほぼすべて消し去ってしまった。

このときの大量絶滅には「SPICE」という不思議な名前がついている。

カンブリア紀の終焉----顕生代初の大量絶滅「SPICE」

【124】

カンブリア爆発の歴史を見ると、動物体制の進化というものがいかに重要で、どれだけの影響力を持っていたかを思い知らされる。

先カンブリア時代末期に生息していた生物はといえば、動けなかったり、ただ漂っていたり、比較的大型であっても単純な作りの動物に過ぎなかったりした。

それが、カンブリア紀の終わりには世界中の海で、数も種類も豊富な動物がひしめくまでになったのである。

だが、そもそもなぜカンブリア紀に「終わり」が訪れたのだろうか。

このテーマについては、長年の定説を覆す研究結果が得られている。

【125】

大量絶滅とは、短い間に個体と種の両方が多数死滅することであり、規模の大きさはそのときによって異なる。

特に大規模だったのは「ビッグファイブ」と呼ばれる5度の大量絶滅で、いずれの場合も種の50パーセント以上が失われた。

具体的にはオルドビス紀、デボン紀、ペルム紀、三畳紀、白亜紀の末に起きたイベントを指す。

しかし、そこまで壊滅的ではないにせよ（滅びた当の生物にとっては十分に壊滅的だったわけだが）絶滅は他にも何度かあった。

中でも有名なのが、カンブリア紀を終わらせた大量絶滅である。

【126】

本書では、大規模な大量絶滅が実際には10回起きたと考えている。

いずれも、PETM（暁新世-始新世境界温暖化極大イベント）や、ジュラ紀、白亜紀に起きた小規模の絶滅とは区別されてしかるべきものだ。

10回を年代順に並べると次の通りである。

1. 大酸化事変による絶滅

死滅した種と個体数の割合から考えると、これが最も壊滅的だったかもしれない。

当時生息していたほぼすべての微生物にとって、酸素は猛毒だったはずだ。

しかも最初の全球凍結（スノーボールアース）が同じ頃に起きたため、史上初にして最悪の絶滅だった可能性がある。

外に出たら、息ができるような空気がなくなっていた----そんな状況を想像して見て欲しい。

空気はあるにはあるが、全く別物に変わっている。

これは水生生物にとっても同じだった。

酸素という名の毒ガスが海に満ちていたのだから。

2. クライオジェニアン紀の絶滅

原生代末にスノーボールアース現象が続けて2度起き、塵にまみれて黒く汚れた氷が海と陸を厚く覆った。

光合成は緩慢になり、概ね停止した。

陸と海に数多く暮らしていた多様な生物（海中の方がはるかに数が多い）が死に絶えた。

多様性だけでなく、バイオマス自体が激減した。

3. エディアカラ紀後期の絶滅

ストロマトライトや微生物マットなどのほか、原生代から古生代にかけて生息したエ

ディアカラ生物群がこのときに死滅した。

「エディアカラの園」を荒らした動物は食欲旺盛だった上、さらに重要なのは活発に動いたということである。

それらが手当たり次第にあらゆるものを食べ、動きの遅い微生物で覆われた海や陸をむさぼった。

4. カンブリア紀後期の SPICE イベントによる絶滅

三葉虫の大半と、バージェス頁岩の様々な「奇妙奇天烈動物」のほか、数多くの生物が絶滅した。

とりわけ重要なのは、これを境に三葉虫の構造が大きく変わったことである。

それまでは体節も目も原始的で、ほとんど防御の役に立たないお飾りに過ぎず、防御姿勢をとりたくても体を丸めることができなかった。

変化の理由は、何よりもまず捕食者が増えたためだろう。

頭足動物のオウムガイ類は、本当の意味で大型と呼べる最初の肉食動物であり、動きが素早く、しかも鎧を纏っていた。

化学的な変化と同様に、オウムガイ類の出現もこの絶滅に一役買っている。

5. オルビドス紀の大量絶滅

熱帯の生物が大量に絶滅した。

原因は寒さか海水面変動だったと見られる。

6. デボン紀の大量絶滅

海底および海中に棲む動物が絶滅した。

最初の温室効果絶滅か？

7. ペルム紀の大量絶滅

陸海の温室効果絶滅。

8. 三畳紀の大量絶滅

陸海の温室効果絶滅。

9. 白亜紀-古第三紀境界の絶滅

温室効果と隕石衝突による絶滅。

10. 更新世末期～完新世にかけての大量絶滅

250 万年前から現在まで。

気候変動と人間の活動による絶滅。

私たちが憂慮すべきはこの 10 番目である。

【127】

カンブリア紀末期の場合、実際にはたった1回ではなく比較的小規模な絶滅が3~4回起きており、主に三葉虫や腕足類などの海洋無脊椎動物が打撃を受けた。

従来の定説によれば、温かい低酸素水塊の増加がその原因である。

三葉虫の中でも初期に現われたオレネルスなどは、このときに完全に死に絶えた。

それだけでなく、三葉虫全体の特徴が変わった。

カンブリア紀の三葉虫は数多くの体節に分かれ、目は原始的で、明らかに防御のためと見られる構造（捕食者から身を守るためのトゲなど）は体に付属していない。

また、現代のダンゴムシが身の危険を感じたときにするように、丸まって硬い球になることもできなかった。

ところが、続くオルドビス紀に入ると新たな進化の波が訪れ、三葉虫は体制そのものを変化させる。

ほぼすべての種が体節の数を減らし（体節の数を減らして厚くした方が捕食者の攻撃によって割られにくい）、目の機能も向上し、身を守る構造を発達させ、何よりダンゴムシのように丸くなれるようになった。

【128】

高温と低酸素、そして動物相の変化。

それがカンブリア紀末の絶滅に関する従来の見方だった。

ところが、その正反対を示唆する新たなデータが次々に見つかった。

水が温かいどころか冷たかったことと、海底への有機物の大規模な埋没が起きていたことを示す証拠である。

このプロセスにより酸素濃度は急上昇した。

現在、この変化はSPICE（「後期カンブリア紀の正の炭素同位体変動」の略）と呼ばれている。

だが、この新発見には大きな矛盾がある。

証拠が最初に岩石から確認されたのは、急激に種の絶滅が起きたからだけでなく、炭素同位体の記録（したがって炭素・栄養循環）に大幅な変動が認められたからでもあるのだ。カンブリア紀末に短期的な絶滅が連続したことにより、三葉虫のかなりの割合が死滅したことについては十分な証拠がある。

他の時期の大量絶滅は、たいてい酸素濃度の低下に付随して起きている。

ところがSPICEの場合、逆に短期的な上昇に伴うものだったところが面白い。

これは、同じ頃に火山が噴火して、急激な大陸移動、つまり真の極移動を引き起こしたせいではないだろうか。

数百万年をかけて熱帯に多くの陸地が移動した結果、炭素の埋没量が増え、かつてないレベルにまで大気中の酸素濃度を押し上げた。

こうしたイベントによって、カンブリア爆発の後の大規模な適応放散へのお膳立てが整ったのかもしれない。

大量の酸素を必要とする生態系が一つある。

サンゴ礁だ。

サンゴ礁はSPICEのすぐ後に現われ、次なる地質年代であるオルドビス紀の扉を開いていく。

第2部

オルドビス紀以降における生物の進化

【D・サダヴァ他著＝石崎泰樹・斎藤成也監訳「大学生物学の教科書／第4巻進化生物学」（2014・7 講談社）から抜粋し引用させていただきました】

第1章 カンブリア紀に出現した生物群の多くは後に多様化した

地質学ではカンブリア紀以降の古生代をオルドビス紀、シルル紀、デボン紀、石炭紀、ペルム紀に分ける。

各紀は特定の生物群の多様化で特徴付けられている。

オルドビス紀、デボン紀、ペルム紀の終末は大絶滅によって区切りがつけられた。

1. オルドビス紀（4.88 億～4.44 億年前）

オルドビス紀の間、主に南半球に位置していた大陸群には、まだ多細胞の植物は存在していなかった。

オルドビス紀初期には海産生物の放散進化は劇的であり、特に動物においては、腕足動物と軟体動物という海底に住んでいて水から小さな獲物をこす生物が繁栄した。

オルドビス紀の終わりごろには、南方の大陸に巨大な氷河が形成され、海水面が50mほど低下し、海洋の温度も低下した。

おそらくこれらの主要な環境変化により、全動物種のおよそ75%が絶滅した。

2. シルル紀（4.44 億～4.16 億年前）

シルル紀の間、大陸はまとまり始めた。

海洋中の生命はオルドビス紀末の大量絶滅から回復をとげた。

開放的な水中で泳ぎ、海洋底の上で食物を見つけることができる動物がはじめて現われた。

無顎魚類が多様化し、鱭（ひれ）にそれを支持する条を持つ最初の魚類が進化した。

熱帯の海は陸にさえぎられることがなく、ほとんどの海産生物が広く分布した。

陸上では、シルル紀の終わり（およそ4.2 億年前）に最初に維管束植物が進化した。

最初の陸上節足動物----サソリ類とムカデ類----が同じころに進化した。

3. デボン紀（4.16 億～3.59 億年前）

デボン紀には、多くの生物群において進化的変化の速度が上昇した。

主要な陸塊は互いにゆっくりと集まりつつあった。

大洋では、サンゴ類と殻を持つイカに似た頭足類の軟体動物が巨大な放散進化をした。

魚類では有顎類が無顎類と置き換わり、骨性の甲冑が現代の魚類が持つより柔軟な鱗に取って代わられた。

陸上の生物界はデボン紀の間に劇的に変化した。

ヒゲノカズラ類、トクサ類、木本性シダ類が一般的になり、あるものは巨木の大きさとなった。

それらの根は岩石の破碎を促し、最初の森林土壌の発展をもたらした。

最初の種子植物はデボン紀の間に誕生した。

最初の化石ムカデ類、クモ類、ダニ類、昆虫類、さらには陸上の両生類はデボン紀に登場した。

すべての海生生物の75%の大量絶滅がデボン紀の終末となった。

その理由についてははっきりとは突き止められていないが、2個の巨大な隕石がその頃地球に（1つは現在のネバダ州に、もう1つは西オーストラリアに）衝突しているの、それらが主たる理由であるのか、あるいは少なくとも原因の1つだったかもしれないと古生物学者は考えている。

大陸が引き続き融合していき、大陸棚が減少していったこともこの大量絶滅にかかわったかもしれない。

4. 石炭紀（3.59億～2.97億年前）

石炭紀には、南の陸塊の高地帯に大きな氷河が形成されたが、熱帯地方の大陸には湖沼林が多数生育した。

これらの森林にはもっぱら木本性シダ類や小さな葉のトクサ類が生えていた。

これらが化石化して現在エネルギー源として鉱山から掘り出される石炭が生成された。

海では、ウミユリ類が多様性の頂点に達し、海底に「草地」を形成した。

石炭紀の間に、陸上動物の多様性は大きく高まった。

カタツムリ、サソリ、ムカデ、昆虫が多様かつ豊富に存在した。

昆虫は羽が進化し、飛翔する最初の動物となった。

飛翔能力によって、草食性の昆虫は高い木に簡単に近づくことができるようになった。

この時期の植物化石からは、昆虫に噛まれた証拠が見つかっている。

陸上の脊椎動物は2つの系統に分かれた。

両生類は巨大化し、陸上生活に適応していった。

一方その姉妹群は、乾燥した地域にも産むことができる、よく保護された卵を持つ羊膜類となった。

5. ペルム紀（2.97億～2.51億年前）

ペルム紀の間、大陸群はパンゲアとして知られる単一の超大陸に合一した。

ペルム紀の岩石には、今日我々が知っている昆虫の主要なグループの多くを代表する化石が含まれている。

この紀の終末までには、羊膜類は爬虫類といずれ哺乳類となる2系統に分岐した。

条鰭魚類はパンゲア内の淡水域でよく見られるようになった。

ペルム紀の終末に近づくにつれて、生活条件は悪化していった。

大規模な火山の噴火により、地球の多くの地域で溶岩が噴出した。

火山から噴出した灰やガスは太陽光をさえぎり、気候が寒冷化し、地球の歴史において最大の氷河が形成された。

大気中の酸素濃度は 30% から 15% へゆっくりと低下していった。

そのような低濃度では、高度 500m 以上では大抵の動物は生存することができなかった。したがってペルム紀の終わりには、陸地の半分は動物が生息していなかったと考えられている。

これらの変化が組み合わされて、地球の歴史において最も劇的な大量絶滅が生じた。

科学者は全多細胞生物種のうち約 96% がペルム紀末に絶滅したと推定されている。

第2章 中生代の中に地理的分化が増大した

中生代が始まった頃（2.51 億年前）、ペルム紀の大量絶滅を生き延びた少数の生物種は、比較的まばらな世界にいた。

パンゲアがゆっくりと分裂していくのに伴い、新しく分裂した大陸の生物相は多様化を始めた。

海洋の海水面が上昇し、大陸棚を水で満たして浅く巨大な内海を形成した。

大気中の酸素濃度はゆっくり上昇した。

生命は再び繁栄し多様化した。

しかしこれまでとは異なる生物群が活躍した。

現在の大洋を専有する 3 種類の浮遊する光合成生物、植物プランクトン（渦鞭毛藻、円石藻、珪藻）はその時代において生態学的に重要な存在となった。

彼らの遺骸は世界の石油堆積層の主要な源である。

また、種子植物がペルム紀を支配した樹木に取って代わった。

中生代は 3 時代に分かれる。

三畳紀、ジュラ紀、白亜紀である。

三畳紀と白亜紀はどちらも大量絶滅で終末を迎えた。

おそらく隕石の衝突によるものだと思われる。

6. 三畳紀（2.51 億～2.00 億年前）

三畳紀の間にパンゲアは分裂していった。

多くの無脊椎動物が多様化し、海底の堆積物の表面に棲んでいた生物群から多くの穴を掘る動物が進化した。

陸上では、針葉樹とソテツシダ類が優占種となった。

カエル類とカメ類が誕生した。

爬虫類の放散が始まり、ワニ類、恐竜類、鳥類が誕生していった。

三畳紀の終末は、地球上のおよそ 65% の生物種が消えた大絶滅によって区切られた。

7. ジュラ紀（2.00 億～1.45 億年前）

ジュラ紀の間に、パンゲアは完全に 2 つの大きな大陸に分かれた。

北方に移動したローラシアと南方に移動した Gondwana である。上鱈魚類は大洋で急速に多様化した。

トカゲ類が誕生し、飛翔爬虫類（プテラノドン）が進化した。

この時代におけるほとんどの大型地上性捕食者と草食者は恐竜類だった。

哺乳類のいくつかの系統が誕生し、被子植物の最初の化石がこの時代の後期の地層から発見されている。

8. 白亜紀（1.45 億～6500 万年前）

白亜紀の初めまでには、ローラシアと Gondwana の二大陸は、現在我々が知っている大陸に分裂を始めた。

1 つにつながっていた海洋は熱帯環境を豊かにした。

海水面は高く、地球は暖かく高湿だった。

生命は陸上でも海洋中でも繁栄した。

海生無脊椎動物が多様性を増大させた。

陸上では爬虫類が放散を続け、恐竜類はさらに多様化し、またヘビ類が出現した。

白亜紀のはじめ頃には、被子植物が放散を始めて、現在の陸上における彼らの占有状態につながった。

この時代の終末までには、哺乳類の多くの系統が誕生した。

新たな隕石によって引き起こされた大量絶滅が白亜紀終末に起こった。

海では多くのプランクトンと海底に棲む無脊椎動物が絶滅した。

陸上では、体重が 25kg 以上のほとんど全ての動物が絶滅した。

昆虫もその多くの種が絶滅した。

おそらく彼らの食料だった植物の成長が隕石の衝突によって激減したからだろう。

北アメリカ北部とユーラシアでは、ほとんどの低緯度地方を飲み込んだおそろべき火災に巻き込まれなかった一部の種は生き残った。

第 3 章 新生代の間に現在の生物相が進化した

新生代の初期（6500 万年前）までには、大陸の位置はほぼ現在のものに似ていた。

しかしオーストラリア大陸は依然として南極大陸にくっついており、大西洋はもっと狭かった。

新生代は哺乳類の放散によって特徴づけられるが、他の生物群も重要な変化をとげていた。被子植物は多様化し、世界の森林の優占種になった。

ただし最も寒冷な地域では、森林はもっぱら裸子植物で構成されていた。

ある植物の系統（マメ類）は、2 個の遺伝子に生じた突然変異によって、窒素を固定する何種類かのバクテリアと共生を行ない、大気中の窒素を直接使うことができるようになった。

この共生の進化は最初の「緑の革命（グリーンレボリューション）」であり、陸上植物の成長に使うことができる窒素の量を劇的に増加させた。

この共生は今日の生命システムの生態学的基礎にとって根本的なものである。

新生代は第三紀と第四紀に分かれる。

現代に近づくとつれて、化石記録も進化史に関する他の知識もどんどん多くなるので、古生物学者はこれら 2 つの時代をいくつかの「世」に細分した。

9. 第三紀（6500 万～260 万年前）

第三紀の間に、オーストラリア大陸は北の方向に移動し始めて、2000 万年前までには、ほぼ現在の位置になった。

第三紀の初期は暑く高湿な時代であり、多くの植物の分布域は緯度にしたがっていた。熱帯はおそらく降雨林植生を維持するには暑すぎたので、もっと低い植生で覆われていた。しかし第三紀の中頃になると、地球の気候はきわめて寒冷化かつ乾燥化した。被子植物の多くは草本性（木本ではない形態）に進化し、地球の多くの地域に草原が広がった。

新生代の初め頃までには、無脊椎動物相はすでに現代のものとよく似ていた。

第三紀の間に進化的変化が最も速かったのは、陸上の脊椎動物である。

カエル類、ヘビ類、トカゲ類、鳥類、そして哺乳類はすべてこの時代の間に著しい放散を遂げた。

哺乳類では、過去 5500 万年の間に大陸を時々つないできた陸橋に沿って、3つの波の拡散がアジアから北アメリカに向かって生じた。

これにより齧歯（げっし）類、有袋類、霊長類、偶蹄類が北アメリカに初めて登場した。

10. 第四紀（260 万年前～現在）

我々は第四紀にいる。

この紀は更新世と完新世（現世とも呼ぶ）という2つの世に分割される。

更新世は劇的な寒冷化と気候変動の時代である。

主要な4回と20回ほどの小規模な「氷河期」の間、巨大な氷河が各大陸に広がり、動植物集団の分布域は赤道方向にシフトした。

これらの氷期の最後のものは1万5000年前以降に温帯となる緯度から退いていった。

生物はいまだにこの変化に適応を続けている。

高緯度の生態学的群集の多くが現在の分布域を占めるようになったのは、わずか2000～3000年前のことである。

更新世の間に、哺乳類の中の1つのグループである霊長類からヒト上科の系統が進化した。それに続くヒト上科のほうさんから、最終的に *Homo sapiens* 種が誕生した。

これが現代人である。

Homo sapiens がオーストラリアとアメリカにそれぞれ4.5万年前と1.5万年前に到達すると、多くの大型鳥類や哺乳類が絶滅した。

古生物学者の多くは、これらの動物の絶滅は狩猟および *Homo sapiens* がもたらしたその他の影響の結果だと信じている。