

## 4. 地球の地質学的記録と最古の生命

地球の生命史に関して我々が持っている重要な手掛かりのほとんどは、各時代の岩石から読み取ることができるように、地質学的記録から得られている。この記録は、現代よりも少なくとも 35 億年前までさかのぼる生命の歴史を含んでいる。例えば、最古の細胞の小ささ、単純さ、及びそれらの細胞がより複雑な細胞へと進化した記録、最古の生命が繁殖した環境の性質、及び各時代を通して起こったその環境の性質の変化の記録、約 6 億年前の多くの種における劇的なサイズの増大、複雑化の記録、そしてそれらの記録に続く、現代に至るまでの生命の歴史と進化の記録である。生命の起源について、これらの手掛かりが持つ制約条件を理解するためには、過去に起こった地質学的過程の記録の性質、及び岩石内に存在する生命の記録の性質を理解しなければならない。

我々が身近で岩石を発見し観察するとき、大概異なる種類の岩石が層になっているのを見ることができる。これらの層は例えば、渓谷の壁面で容易に観察することができる。そういう場所では川が岩の合間を曲がりくねりながら流れ下っていくため、新たな地層が露出する。これらの地層を観察することにより、地表を形作った地質学的過程を垣間見ることが可能になる。地層に含まれる岩石からは、その岩石が形成された当時の気候、環境がわかったり、その当時に起きた地質学的過程がわかる。地層から発見される化石からは、その岩石が形成されたときにどのような生命が存在していたかわかる。

大概、堆積物はそれより前から存在する岩石の上に積み重なり、その後岩石となる。これは新しい層は水平に堆積することを意味している。地層を深く掘り下げるほど、我々はより古い岩石を得ることが出来る。そして我々はより古い時代に起きた地質学的過程について知ることが出来る。例えば、アメリカ南西部のグランドキャニオン (Grand Canyon) の壁面では、20 億年以上前に堆積した地層を見ることができる。その地層の上部の岩石は、底部の岩石よりも 20 億年若いのである。(岩石の年代を特定する方法については後で述べる。) 地球上のある場所から(あるいは他の場所からも)、約 40 億年前より始まる地球の歴史の各時代の岩石を我々はみつけることができる。これにより、地球表面の基本的な歴史を全て再構築することができる地球が形成されたのは約 45 億年前であるが、40 億年前より前の岩石は発見されていない。そしてその地球初期の 5 億年は未だ謎のままである。しかしながら、2 章での地球初期における巨大隕石の衝突率に関する議論、および惑星の活動状態についての議論を思い返せば、この時代の岩石がみつからないこともさほど驚くべきことではない。

生命史がわかるような岩石の大部分は堆積岩である。堆積岩は、砂やシルトのよ

うな堆積物が圧縮，固化されることにより形成される．それらの堆積物は大概水中で沈殿する．例えば，堆積物は流れの速い川によって湖や海に運ばれる．そこで，流れは減速し，堆積物は沈殿し，湖底，あるいは海底に堆積するだろう．これが長期にわたると，次々に層が形成される．ひとたび圧縮により固化されると，これらの地層が露出するのは地殻変動による隆起，あるいは河川によるさらなる侵食を受けたときである．地層上部は明らかに地層底部よりもあとに堆積した．このことによって異なる堆積物の相対年代を推察することができる（すなわち，どの地層が最も新しいか，最も古いかわかるということである．）

堆積層が形成される過程で，それらの地層は堆積した当時に存在したあらゆる生命体を取り込むことができる．これらの生命体は死んだあと堆積層に沈んだのかもしれない．あるいは急速に沈殿した堆積物の場合，生命体がその場から離れるほどの速さで動くことが出来なかったのかもしれない．動物の肉体は大概急速に腐敗するが，骨格や殻は残る．これらは化石化し，侵食によって露出するまでは岩石に捕らわれたままである．当然のことながら，異なる地層には異なる種の化石が含まれるだろう．実際，特定の地層内で発見される種のパターンは，ある地域と別の地域でよく一致する．異なる地層に異なる化石が存在するということによって，かつて地球上に存在した種が，時間と共にどう変化したかがわかる．そして，地球の生命史を再構築することが可能になるのである．この歴史はある場所と他の場所で非常によく一致している．そしてこのことは全地球上で言えることである (Fig 4.1 参照) ．

図 4.1: 地球の地質学的記録における各種の生命体の登場を示す年表．

時代と共に地球上に生息する種が変化したことについて，地質学的記録は明瞭且つ説得力のある証拠をもたらす．このことは，強調し過ぎても足りないほど，とても重要なことである．種の変遷は，それぞれの時代に岩石内に取り込まれた化石として記録されている．そして，岩石年代により，これらの種がそれぞれいつの時代に生息していたかがわかる．我々は決してかつて存在した全ての種についてのカタログを作り，説明してきたわけではない．しかし，例えば近縁種について調べることはできるし，それらの種がどのように進化したか予想することができる．

地層から読み取れる種の変遷は，しばしばとても顕著であるので，地球の歴史年代を定義するのに使われる．例えば，恐竜の化石は 2 億 4000 万年前から，6500

万年前に堆積した岩石からしか発見されない。この期間は地球の歴史上、中生代 (Mesozoic era) と呼ばれる。6500 万年前の恐竜 (および地球上の多数の種) の絶滅は、地質学的記録上、その年代よりもあとの岩石内からは恐竜の化石が発見されないことからわかる。6500 万年前の岩石から発見される化石の種類の変化はとても際立っている。中生代の終わり、及び中生代の中の一区分である、白亜紀 (Cretaceous period) の終わりを定義するのに使われる (2 章参照)。

約 5 億 7000 万年前よりも前の岩石からは、骨格や殻のような硬いパーツをもった種の化石は発見されていない。5 億 7000 万年前から現代までは顕生代 (Phanerozoic era: ギリシャ語で文字通り「肉眼で見える生命体の時代」の意) と呼ばれる。また、この年顕生代の内、最も古い時代はカンブリア紀 (Cambrian period) と呼ばれる。5 億 7000 万年前よりも古い岩石は、顕微鏡を使わずに観察できるような化石をほとんど含まない。実際、かつてこの先カンブリア代 (pre-Cambrian time period) にはいかなる生命も存在しなかったと考えられていた。しかしながら、これから見るように、35 億年前の岩石からかつての生命体の化石がみついている。

野外地質学の手法により、異なる岩石の相対年代についての情報がわかる。この手法は相対層位 (どの岩石の上にどの岩石がのっかっているかという、地層の順序のこと) について調査すること、また、地層全体の化石の遷移についての調査することを必要とする。そして、この手法により、岩石が形成された順序を断定することが可能になる。しかしながら、岩石が形成された実際の年代を断定することはできない。それにも関わらず、前世紀の地質学者は個々の地質学的過程が起こった間隔について、ある程度 of 感覚を持っていた。この感覚は彼らの観察に基づいていた。その観察とは、それら地質学的過程が現在ではどのように起こるかについての観察、および、それらの過程が現在露出している地層、あるいは地質学的特徴を形成するのにどのくらいの時間がかかったについての観察であった。あらゆる推測は地球が何億年も前から存在していたことを示唆していたが、その推測は人によって何億年も差があった。ある程度の正確さで絶対年代を特定するためには別の手法が必要である。今日では、絶対年代は放射性元素を用いて測定される。

放射性原子は様々な原子核崩壊プロセスによって、ある元素から別の元素へと変化する。このプロセスは微量の熱を放出し、地球内部の熱機関を駆動しているので、3 章で簡単に議論した。ここで、注目したいのは原子核崩壊が一定の割合で起こり、研究室内で測定することができるということである。つまり、岩石試料内の放射性元素の原子数、及び、崩壊し変化したあとの元素の原子数を測定すれば、岩石の年代を見積もることができるのである。例えば、放射性カリウム原子は電子を吸収して非放射性ガスであるアルゴン原子に変化する (Fig 4.2 参照)。この場合、岩石内のアルゴンが増えるほど、放射性カリウムは減っていき、岩石が形成されてからの時間が経過したことになる。

図 4.2: K-40 が電子を吸収し放射性崩壊して Ar-40 に変化することを示す概略図

この手法が上手くいくのは、鉱物粒子が形成されるときに微量のカリウムが混入されるからである。また一方で、カリウムの崩壊によって作られるアルゴンの同位体 (Ar-40) がそれ以外の方法では天然には生成されず、鉱物粒子が形成される以前に崩壊によって生成されたアルゴン分子は鉱物が形成されるときには混入しないことも重要である。ひとたび鉱物が形成されると、鉱物内でカリウムの崩壊によって生成されたアルゴンは全て鉱物内に捕らわれ続ける。それゆえ、カリウムとアルゴンの相対量によって、鉱物粒子が形成されて以来、どのくらいの時間が経過したかがわかる。大概の場合、この方法で特定できる経過時間とは、溶岩から鉱物が固化し、最初に鉱物内にアルゴンを抱えることが可能になってからの時間である。この方法は火成岩の年代を測定する優れた方法である。なぜなら火成岩は溶岩が固化して形成されるからである。堆積岩の場合、この方法は火成岩の場合ほど有用ではない。なぜならば、堆積物は堆積する以前に形成された個々の鉱物粒子によって形成されているからである。

様々な放射性元素「時計」によって、岩石年代を測定することが可能である。上述したカリウム-アルゴン法の他にも、ルビジウムが原子核崩壊によってストロンチウムに変化することを利用して年代を測定することができるし、ウランウムが鉛に変化することも同様である。これらの「親娘」同位体の組み合わせは、それぞれの手法の制約を忘れない限りは、ある特定の場合においてその他の組み合わせよりも上手く機能する。

これらの絶対年代測定法を用いることで、様々な地質学的事件の年代を特定することができる。今まで発見された最も古い岩石は 40 億年前のものであり、もっとも若い岩石は 0 才のものである (例えばハワイにあるような噴火口において、溶岩流内で溶岩が固化して岩石が形成されるのをみることができるので、後者は当然のことである)。岩石層の野外調査によって決まる相対層位と、実験室での岩石年代測定の結果を併せることで、地質学的過程の歴史と生命の進化の歴史を構築することができる。(また、地球自体の年齢は 45 億年だということがわかっている。これは地球全体を一つの単位としてとらえて、いつ隕石から分化したか調査することでわかる。)

## 地球上の生命と気候の歴史

これまでの地球の生命史についての標準的な議論は、地質学的記録からわかる証拠を用い、最古に生命が登場したときより現在に至るまでの生命史を辿った。このような議論は地史学と呼ばれる学問によって成り立っている。しかしながら、ここでの我々の関心は最古の地球上の生命が存在した痕跡を知ることである。それゆえ、ひとまず最も現代に近い出来事から始めようと思う。なぜならば、それらの出来事は我々に馴染み深く、理解しやすいと思われるからである。その後過去に遡ろう。2章では、対照的に、地球の誕生から初め、現在に向かって話を進めた。これら2つのアプローチは両方とも、約40～35億年前の時代に我々を導く。この時代に生命は誕生したに違いない。この先の議論で、生命の起源についての直接的な証拠はないことが判明すると思われるが、これらのアプローチのどちらからも、生命の起源の過程とタイミングに関する重要な制約条件が得られる。

地球の歴史は大概3つの累代に分けられる (Fig 4.3 参照)。太古代 (Archaean) は最古の岩石が誕生した40億年前から25億年前、原生代 (Proterozoic) は25億年前から5億7000万年前、顕生代 (Phanerozoic) は5億7000万年前から現在までである。地球が誕生してから現在知られている最古の岩石が誕生するまでは「地獄のような (hellish)」状態だったという理由から、大概、冥王代 (Hadean) と呼ばれる。

図 4.3:

顕生代の初め、5億7000万年前を特徴付ける出来事は、地質学的記録に大量の異なる化石が出現することである。この前の時代では、生命が存在したという地質学的な証拠は比較的稀であり、その証拠もここ数十年でようやく認識された。カンブリア紀と称される顕生代の初めには、非常に多くの異なった形態の生命が化石から見られる (Fig 4.3 参照)。それ以前の生命の形態とは無関係に発生したように見えるこれらの化石には、その後続く生命の基本的な多様性と形式が見られる。今日我々が目にするあらゆる基本的な生命の形式が動物化石の多様性に見られる。例えば、昆虫類、甲殻類、脊椎動物 (脊髄を持った動物。人間もこれに含まれる。) である。その時代にあらゆる種が登場したわけではないし、全ての科が登場してさえいない。例えば、魚類はそれより数千年後にならないと地質学的記録には登場しないし、最古の植物はそれより1億年も後にならないと登場しない。

カンブリア紀の初めに様々な形式の種が突然登場したこと，及び生命が異なる生態学的地位や種に急速に広がったことは，5 億 7000 万年前に始まった生命の「爆発 (explosion)」と呼ばれてきた．新しい種は急速に形成され，これらの種の進化は広範囲に及んだ．

さらに，当然のことながら既存種は時間をかけてゆっくりと絶滅していった．もちろん全ての種が絶滅したわけではないが，それまで地球上に存在していた種のほとんどがやがて絶滅した．

実際過去数億年の間，何度も大量の種が突然絶滅することがあった (Fig 4.4 参照)．これらのいわゆる「大量絶滅 (mass extinction)」と呼ばれている出来事については，2 章で述べた．これらの絶滅の原因は気候の突然変動かもしれない．気候変動の根本にある原因は火山活動の活発化かもしれないし，場合によっては，地球表面への巨大な小惑星や彗星の衝突かもしれない．2 億 5 千万年前の二畳紀の終わりにあった最も大きな絶滅では，全ての種の 95 % 近くが消えた！「進化論の (evolutionary)」観点から，これらの絶滅は，多くの生態学的地位が突然空いたという点で重要である．それまでその地位を占有していた種がもはや生存することができなくなり，その地位を利用することが出来た新たな種が進化することができた．例えばもし，ある動物にとって食物連鎖の関係から見て優位な環境があるとしたら，その種は優位になるように急速に進化することが出来るだろう．

図 4.4: 顕生代 (約 6 億年前～現在) の各年代において絶滅した属の比率．5 つの大きい絶滅がある．最近の 2 つの絶滅は衝突と関係があり，それより前の 2 つの絶滅は衝突との関係が考えられている．地質学的記録は不完全であり，絶滅を引き起こすほどの衝突が他にもあったかもしれない．(Rampino and Haggerty, 1988.)

これらの新しい生物学的地位を利用するために進化した種の具体的な例が白亜紀の末期には出現した．白亜紀は恐竜が絶滅した時代である．恐竜の絶滅する前は，哺乳類は決して地上を支配していたわけではなく，比較的小さい種だった．しかしながら，その後この小さい哺乳類はより大きな種へと進化し，恐竜が居なくなったあとの穴を埋めることが可能になった．それ以来哺乳類は地球上の主要な生命種の一つとなった．最終的に哺乳類の中でもさらに特定の種が 6500 万年後に人間に進化するようなきっかけをつくったのは，多くの観点から，この特異且つ予測不可能な出来事，つまり恐竜の絶滅であった．

過去数十年にわたって、生命が発生したのはカンブリア紀初期、あるいはその前後ではないという認識がある。具体的には、カンブリア紀が始まる前の数千年間、肉眼で見える多種多様な種が存在した、というものである。最も興味深いのは、カナダのブリティッシュコロンビア (British Columbia) で頁岩と呼ばれるある特定の岩石の層から化石化しているのが発見された種である。この「バージェス頁岩 (Burgess shale)」はカンブリア紀の硬体動物の前より存在した軟体動物の珍しい化石を含んでいる。バージェス頁岩に含まれる動物の最も重要な点は、カンブリア紀やその後の生命に見られる肉体構造とはかけ離れた様々な構造を持っていることかもしれない。つまり、肉体構造がより一層多様だったのである。しかしながら、後に肉眼で見えるあらゆる種に進化していったわずかな種以外はほとんどの種が絶滅した。生き残った種に、はっきりとわかる明白な進化論的優位性は見られない。そこで、生き残る種の選択は少々ランダムで、気まぐれなものであると考えられた。ハーバード大学の古生物学者、Stephen Jay Gould は、もしある人が生命というテープを巻き戻してもう一度再生し、最初のときに近くなるようにランダムに出来事が発生させたとしても、生命が同じ進化の道を進むと信じる根拠はどこにもないと指摘している。生命は進化するだろう。しかし、進化の道は異なったものになると考えられる。この話題については 17 章の、宇宙人は存在しそうか否かについての議論で立ち戻るだろう。

生命の起源は先カンブリア時代の末期頃ではない。多細胞生物の起源も当時ではない。多細胞生物の最古の証拠は炭素を含み、葉状の構造をしているように思われる化石である。この化石年代は 17 億年前まで遡る。

25 億年前から、約 5 億 7000 万年前の先カンブリア時代の末期の期間は原生代と呼ばれる (ギリシャ語で「初期生命の時代 (era of earlier life)」の意) (Fig 4.3 参照)。原生代と太古代初期の境界は少し曖昧であるが、2 つの時代区分は環境の性質の変化を反映している。太古代の間、大気中の  $\text{CO}_2$  は豊富に存在し、 $\text{O}_2$  は少なかった。原生代になると、 $\text{CO}_2$  は大幅に減少し、 $\text{O}_2$  はかなりの割合を占めた。加えて、境界の年代の前後では、大陸地殻の生成は劇的に増加した。現在存在する世界の大陸のほとんどがこの時代に遡る。

酸素レベルの変化は地球の歴史の中期の重要な特徴の一つである。なぜならば、これにより酸素を生成する光合成生物の進化がわかるからである。酸素レベルの変化の証拠は、地質学的記録における酸素に富む岩石 と酸素が欠乏している岩石 (酸化した岩石とそうでない岩石) の相対存在量に見られる (Fig 4.5 参照)。

例えば、「縞状鉄鉱層 (banded-iron formations)」と呼ばれる層について考えよう。これらの岩石群は少なくとも 15 %の酸化鉄 (酸素と結合した鉄) からなる層を含んでいる。縞状の特徴は鉄が豊富な岩石の層と鉄が欠乏している岩石の層が混ざっ

図 4.5: 地球大気における  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  の存在度の歴史．値はそれまでの大気レベルと比べて相対的に表されている．初期の頃についてはおそらく傾向はおおよそ正しいが，値については大きな未確定領域が存在する．(Schopf, 1992.)

て存在していることによる．典型的な層はほんの数センチの厚さしかないだろう．しかし，この一続きの層全体は最大で数百メートルの厚さにもなりうる．縞状鉄鉱層のほとんどは，25 ~ 20 億年前に堆積した．採掘可能な場所ではこれらの層は大概鉄を得るために採掘される．縞状鉄鉱層が形成されるための重要なプロセスは，酸素が海洋に溶解している鉄と結合することであると考えられた．十分に酸化していない鉄は海水に容易に溶けることができる．鉄の供給源は大陸の侵食か，あるいは中央海嶺での火山噴火のどちらかだろう．溶けた鉄が酸素と結合すると，水に溶けにくくなる．そこで，それらの酸化鉄は固化沈殿し，海洋底に積もる．地球初期では，海洋に溶けている鉄は豊富だったに違いない．酸素が大気中に存在し始めたらずくに鉄と同様に海洋に溶け，そこで鉄と結合して堆積物を形成しただろう．約 20 億年前の鉄生成が盛んな時期は必然的に，大気中の酸素が増加した時期に一致する．恐らく，酸素の欠乏よりは，むしろ非酸化鉄の欠乏が理由で，この時代より後に縞状鉄鉱層はほとんど形成されていない．

大気中の酸素存在度が変化したことを示す他の証拠は，黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) と閃ウラン鉱 ( $\text{UO}_2$ ) の堆積である．この 2 つの鉱物はどちらも酸素が存在すると容易に結合し，別の鉱物になる．20 ~ 30 億年前に形成されたこれらの鉱物の堆積物は非酸化鉱物を含んでいる．個々の粒子は丸く，川底のような侵食が起こる場所を移動したことが示唆される．酸素がずっと存在したならば，水に溶け，鉱物粒子と接触して科学的に結合し，その結果酸化するだろう．この場合もやはり，酸素レベルが増加したことを意味するこれらの堆積の途切れが，より最近の時代に起きている．

酸素レベルの上昇は，一般的にバクテリアと植物の光合成による酸素の生産によって生じると考えられている．(例えば今日の金星や火星の大気のように) 大気に  $\text{CO}_2$  が存在すれば，酸素は光化学作用によって少量発生しうるが，非生物学的作用によって生産された酸素の総量は相対的に少ないと考えられてきた．約 20 億年前の酸素の増加は，おそらく光合成の始まりを意味するのではなく，むしろ酸素を化学的に受け入れる，あらゆる有効なシステムが飽和し始めたことを示唆している．これらのシステムの中に，例えば海洋中の鉄やその他の鉱物の酸化が含ま

れていた。

地球大気中の酸素レベルが上昇すると同時に、二酸化炭素レベルは下降していった (Fig 4.5 参照)。CO<sub>2</sub> は火山噴火を通して、継続的に地球内部より大気に供給されている。実際、今日の大気中の CO<sub>2</sub> の総量はほんの 40 万年で供給することができる。明らかに、CO<sub>2</sub> が現在のレベル付近であるためには大気から定期的に取り除かれなければならない。そして、大気中の二酸化炭素の総量は、大気への供給とロスのバランスの元にななければならない。生物活動はこの二酸化炭素循環の中で重要な役割 (二酸化炭素を利用する光合成と、それに続く動物による植物の消費、そして二酸化炭素を生産するそれら動物の細胞の酸化) を担っているが、このバランスの主役は海洋における化学反応であるように思われる。大気中の二酸化炭素は海洋に溶ける。そこでは二酸化炭素は他の鉱物と反応し、炭酸塩鉱物の堆積物を形成する。炭酸塩堆積物は海洋底にたまり、最終的には沈み込み帯でマントル内に運び戻される。沈み込む岩石がマントルに押し込まれるにつれて、それらのうちのいくらかは溶解して沈み込み帯に付随した火山活動を生み出す。この火山活動は大気に再び二酸化炭素を供給し、循環が完成する (Fig 4.6 参照)。

図 4.6: 地球の二酸化炭素循環の模式図。二酸化炭素は火山活動を通して大気に放出される。その後海に溶け、沈殿して堆積物となる。これらの堆積物はマントルに沈み込み、火山活動で大気に再び放出される。気温と二酸化炭素レベルの様々なフィードバックが、大気中の二酸化炭素量を調整し、地表面温度を温和に保つ役目を果たしているのだろう。

大気中の二酸化炭素量を決めるのは、炭酸塩の生成速度である。例えば炭酸塩の生成速度が速いと、大気中からより多くのガスが引き抜かれ、海洋底に鉱物として堆積する。これは大気中に存在する二酸化炭素の量を減少させる。逆に炭酸塩の生成速度が遅いと、より多くの二酸化炭素が火山活動により大気中に溜まることになる。炭酸塩が生成される速度は海洋温度にとっても敏感なため、単純なフィードバック機構を打ち立てることが出来る。もし、炭酸塩生成による二酸化炭素の除去量よりも火山活動による供給量のほうが多かったら、大気中の二酸化炭素量は増加する。大気中の二酸化炭素量の増加は、温室効果による気温の上昇を引き起こし、結果として、炭酸塩形成が増加するだろう。これは過度の二酸化炭素を大気中から取り除き、気温を通常に引き戻す効果を持っている。一方で、もし二酸化炭素が供給されるのよりも速く大気から取り除かれたら、大気中の二酸化炭素レベルは下降するだろう。二酸化炭素が減少し、大気の温室効果が弱まること

によって、気温は下降し、炭酸塩生成も遅くなるだろう。これらのプロセスが競合した結果、気温、大気中の二酸化炭素レベル、炭酸塩生成のバランスを生み出すだろう。これら 3 つのうちのどれか 1 つが平衡値からはずれたとしても、他の 2 つがシステム全体を平衡状態に戻すように応答するだろう。

今日の大気中の二酸化炭素存在量は約 350 ppm (換言すれば、1 %のさらに約 3.5/100) である。これは地球上に存在する二酸化炭素の全量に比べれば非常に小さな比である。そのほとんどは炭酸塩として存在している。もし全ての炭酸塩が二酸化炭素に変換され、大気に放出されたとしたら、60 bar (1 bar は全大気によりかかる大気圧であるので、これは今日の大気中の二酸化炭素量の 17 万倍に相当する) の大気圧に相当する。二酸化炭素の滞留時間は 40 万年であるので、この時間スケールを持ついかなる変化に対しても大気と気候は応答するだろう。例えば、もし火山活動の速さが変化したとして、新しい平衡状態が確立するまではこのくらい長い期間かかるだろう。

地質学的記録の中には、その時々二酸化炭素レベルの指標となるものはほとんどない。記録上最古の岩石は変成岩であるが、40 億年前の堆積岩で出来ていた。その堆積物は水中で沈殿することが可能でなければならない。液体の水が存在したということは、気温は水の氷点である摂氏 0 度よりも上でなければならない。地球の歴史の初期では、太陽活動の強度は今日の値の 70 %程度しかなかったので、地球の気温は温室効果ガスがなければ、氷点以下になるほど劇的に低かっただろう。温室効果ガスとしては、二酸化炭素が最もありそうである (そして、メタンやアンモニアのようなガスは安定していなかったと思われるので、恐らく有効な唯一のガスである)。実際、気温を氷点より上に上昇させるためには二酸化炭素量は今日のレベルの数百倍にまで達しなければならなかっただろう。二酸化炭素圧は 10 bar 程度だったかもしれない。興味深いことに、もし二酸化炭素圧がこのような高圧にまで上昇したら、表面温度は 85 °C にも達しただろう。これはホットコーヒーのような温度である。

氷河があったという地質学的な証拠があるので、25 億年前までには、気温は少なくとも時々氷河作用が起きるほどに低くなったに違いない。ただし、全球が凍るほどではない。5 ~ 20 °C の範囲に気温があることが標準的であるはずだ。これは二酸化炭素量にすると、現在の 50 ~ 500 倍のレベルに相当する (Fig 4.5 参照)。太陽光度は現在の値に向かって上昇し続けていたので、二酸化炭素レベルは減り続けた。気温に応答する大気中及び炭酸塩中の二酸化炭素の特徴と組み合わせさせて、時間と共に増加する太陽活動の強度によって、結果的に気温は地球史中期からはるばる現代まで、ほぼ一定の水準を維持したのかもしれない。

## 地球上の生命の最古の記録

ここまでで、時系列で見た地球の気候と生命の歴史についての実感が得られたので、ようやく太古代における生命の最古の記録について議論することができる。これから見るように、35 億年前に生命が存在したという説得力のある証拠は存在する。また、説得力は劣るが、それでももっともらしく、興味深い証拠がある。それによれば 38 億 5 千万年前というかなり前に生命が存在したかもしれない。

地質学的証拠により、知られている最古の生命が存在した古環境がどのようなものであったかがわかる。具体的には、40 億年前に遡る最古の岩石は、堆積物として沈殿したものを含んでいることがわかっている。これにより、当時海洋が存在し、気温が水の氷点よりも上にあっただことがわかる。酸素は有意量存在しなかったが、炭酸塩鉱物堆積物の存在は、二酸化炭素が存在したことを示している。しかしながら大陸地殻はほとんど形成されなかった。海面上にはまったく陸が突き出ていなかったかもしれない。ただし、巨大衝突のクレーターの外縁が突き出ていた可能性がある。

記録上の最古の生命が存在した証拠は 3 つある。1 つめは、今日見られるバクテリアのコロニーとよく似たものからなり、明らかに生物学的な起源であるストロマトライトのような構造の存在である。2 つめは、堆積岩に含まれる、今日の単細胞生物とまったく同じ構造をもった微化石の存在である。そして 3 つめは、38 億 5 千万年前というかなり前に生命が存在したことを示唆する炭素同位体の存在である。我々が議論する証拠というのは記録上の最古の生命の証拠であるということ。頭の隅で覚えておくのは重要なことである。その証拠は必ずしもこの惑星に存在した一番初めの生命と関係があるような証拠で無くてもよく、実際生命の起源そのものについて何も情報は得られない。恐らく、これらの最古の化石を形成した生命は、実質的には最初の生命から進化したものだろう。そして、これらの手掛かりが地質学的記録に保存される頃には、すでにより洗練されたものになっていたのだろう。また、我々が手掛かりを探している地質学的記録にはたくさんの穴があることを知っておくことが重要である。そのようなものであるから、完全に明白な生命の証拠を期待することはできない。

最古の生命についての最初の手掛かりは、今日のストロマトライトに類似していると考えられている太古の堆積物からわかる。ストロマトライトはバクテリアの増殖によって積み重なった肉眼で見える構造体である。ストロマトライトは、浅水域でその上に沈殿した堆積物を取り込むため、結果として層状構造を持っている。今日では生きているストロマトライトは稀である。主な原因はバクテリアのコロニーがある特定の動物のエサになっているからである。例えば、ストロマトライトは西オーストラリアのシャーク湾 (Shark's bay) に見られる。

ストロマトライト構造体は異なる種類のバクテリアの層から成り立っている。上層のバクテリアは大気中の酸素に触れる（そして活用する）ことができ、これらのバクテリアは光合成をするのに太陽光を用いることができる。これらの真下には、もし酸素があれば活用し、なくても発酵によってエネルギーを生み出すこともできるバクテリアがいる。上部のバクテリアが死なない限り酸素が届かない水底には、酸素がある場所では生きていけないバクテリアがいる。上側の 2 層はほんの 1, 2 mm の厚さだろう。一方で、最低層は相当厚くなりうる。堆積物がストロマトライトの上部に堆積すると、適度な深度を保持するために、バクテリアは堆積物の上に移住する。このように、堆積物は個々の層に取り残され、層の上に層が積み重なっていくことが可能になる。取り残される典型的な構造体は数十センチの高さに達する。

ストロマトライトと大きさ、形、内部構造が同じように見える化石構造体は地球の歴史上至るところに見られる (Fig 4.7 参照)。しかしながら、生きたストロマトライトが発見されるまで、当初は生物学的過程によって形成されたか否かという点で意見の相違があった。しかしながら、構造の一部については、非生物学的な過程によって形成された可能性がある。例えば、層状の堆積物が沈殿し、その後側面が落下することに伴って生じるかもしれない。結果として、ストロマトライト構造体それのみでは生命の存在の証明にはならなかった。しかし、それは非常に示唆に富んでいる。最古のストロマトライト構造体はスワジランド、南アフリカ共和国、そして西オーストラリアのピルバラ地塊で見つかった。これらの堆積物は全て、33 ~ 35 億年前のものである。

図 4.7: ドーム状 (上写真), 及び薄板状 (下写真) ストロマトライト状構造物。西オーストラリアのワラウーナ層群 (Warrawoona Group) の 35 億年前の岩石から発見された。ドーム状構造は直径で約 30 cm であり、薄板状構造は直径約 10 cm である。(写真提供 J.W. Schoph)

2 つめの証拠は 35 億年前まで遡る化石化した個々の細胞からなる最古の生命に関するものである。これらの細胞はその当時沈殿した堆積岩の中で石化した。顕微鏡で検査すると、それらの細胞は岩石を薄く切った「薄片 (thin section)」に豊富に見られる。個々の細胞構造は有機体炭素を含み、今日生息している様々なタイプのバクテリアととてもよく似た外見を持っていることがわかった (Fig 4.8 参照)。化石細胞の一部は、細胞壁や、化石化した DNA 分子の残骸のように見えるものを持っている。これらの細胞の代表的な大きさは直径 50  $\mu\text{m}$  (1 mm = 1000  $\mu\text{m}$ )

よりも小さく、外見的に一致する生きた細胞と似たような大きさを持つ。化石細胞の一部は、球状をしており、その他はより複雑な構造を持っている。この場合もやはり生きた細胞と似ている。生物学的な起源について最も説得力のある化石はフィラメント状の形をしていて、ストロマトライト化石によって生じる。

図 4.8: バクテリア化石。西オーストラリアで 35 億年前のチャートの中に発見された。並べて描いてあるのは構造を示した絵である。D, E, I, J は E に示されている縮尺と同じである。その他は全て A と同じ縮尺である。(図提供 J.W. Schopf)

これらの化石の一部は現代のシアノバクテリアに最もよく似ている。これらのバクテリアには光合成を駆動するクロロフィルのような化学物質が存在し、青緑色である。光合成とは、有効なエネルギーを太陽より生成することである。もし、化石細胞が実際に光合成を行っていたら、(生化学的な観点から) 相対的に進化した生命が、早くも 35 億年前に存在したと主張することが可能だろう。もちろん、バクテリアが 35 億年前より前に存在していた可能性はある。しかしながら、これらの地球初期の地質学的記録は極めて少ない。

最後の証拠は、堆積岩内の異なる炭素同位体の比率に基づいている。炭素は 2 つの安定同位体を持っている。もっとも一般的な C-12 は原子核に 6 つの陽子と 6 つの中性子を持っている。そして、C-13 は原子核に 6 つの陽子と 7 つの中性子を持っている。したがって少しだけ重い。両方の同位体はどちらも同じ化学反応に使われるが、C-12 のほうが軽いので生物内で起こる化学反応においてわずかに優先される。結果として、植物とバクテリアではわずかに C-12 が豊かになる。この C-12 の濃集は今日の生物にも、あらゆる時代の生物化石に含まれる炭素原子にも見られる。35 億年前のストロマトライト化石やバクテリア化石でさえ、この濃集の特徴を持っている。そしてこれはそれらが生物学的に形成されたことを確認するものである (Fig 4.9 参照)。

35 億年より前の数少ない堆積岩は、しかしながら、残存する化石を見るにはあまりに変成している。それらは、最初は堆積岩だったものが、元の構造が壊れるほどの加圧と加熱の過程を経て変成岩となったものである。しかしながら、それにも関わらず、それらの変成岩は中に含まれていた有機堆積物を起源とするいくらかの炭素同位体痕跡を残している。そして、実際、これらの岩石の一部には、生物相やより若い化石に見られるのと同じような C-12 の濃集が見られる。この炭素同位体痕跡が見られる最古の岩石が形成されたのは 38 億 5 千万年前よりも後で

図 4.9: 地球の炭素同位体の歴史。値は  $\delta^{13}\text{C}$  表記である。は  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  と標準試料の偏差の千分率を表している。無機炭素岩石と有機炭素の 2 つ場合の値を示している。どちらも、実線は近似移動平均値を表しており、破線は各時代における最高値と最低値を示している。37 億年前と 38 億 5 千万年前にかなりの分別をしめしている有機炭素のほうの点は当時生命が存在した証拠として解釈される。

はない。この痕跡を持っているので、これらの岩石は恐らく生物活動の名残である有機炭素を含んでいたと考えられる。しかしながら、この議論は絶対的なものではない。なぜなら、恐らく非生物学的な化学反応も似たような C-12 の濃集を作り出すことができたからである。しかしながら、示唆に富んではいる。

## 章末コメント

我々は絶対的ではないが興味深い証拠を持っている。その証拠によると 38 億 5 千万年前には生命が存在したことになる。確実に、発見された 35 億年前まで遡る化石はその当時生命が存在したことを支持する唯一の、信憑性の高い証拠を示している。

この証拠が生命の起源と地球初期の生命史について示していることでさらに 2 つ重要な事がある。1 つめは、衝突が絶え間なく地球を不毛にし続け、いかなる生命も足がかりを得ることが不可能であった時代から生命が明らかに存在した時代に至るまでは、ほんの少しの時間しかかからなかったということである。地球上で生命が発生したであろうこの時代は、恐らく約 5, 6 億年しかなかったであろう。1 億年か、もしくはそれより短かったかもしれない。明らかに、地球が生命が生息可能な惑星になってから、比較的急速に生命は誕生した。

2 つめは、生命が誕生してから、地球上いっばいに広がり、比較的複雑な組織で構成されるようになるまで、それほど長い時間がかからなかったということである。35 億年前に存在したバクテリアは、繁殖をコントロールするために DNA 分子を基にした非常に複雑な化学物質を持っていた。そして一部のバクテリアは光合成を行っていたかもしれない。これらの種はかるうじて生きのびたのではなく、利用できる生態学的地位に進出する強い生命であった。