

## 衝突・絶滅、そして初期の地球の生命の歴史

地球の生命の形成の直接の原因の過程を見る前に、地球の初期の歴史によって強制された生命の起源の制約を理解しなければならない。地球はおよそ45.5億年前に形成された。地球の歴史の最初の5億年の歴史をさかのぼると、当時の環境を知れる地質学的証拠はあまりないが、何が起こったかを見るには月を見る必要がある。月の表面は地質学的に古く、最近30億年の間に月の初期のものを破壊する大規模な変遷が起ころなかった。アポロ計画により宇宙飛行士が月から持ち帰った石の年代測定に基づくと、暗い'seas'(ラテン語の sea や mare の複数形の marie を意味する)は最も若い地域だとわかった。月の海は約30億年~37億年前の間に形成された。一方、月の高地は一般的に39億年より前にでき、月の表面の初期の歴史からの証拠を記録している。たいていはこれらの高地は惑星形成時に残ったくずの衝突でできたクレーターで覆われている(図2.1)。

(図2.1)宇宙船から見た、非常に多くのクレーターとなった月の昔の高地

月の最も古い部分への激しい衝突の特徴は、40億年前に月の表面は常に小惑星が衝突していたことを表している。当時月は地球の周りを公転していたから、地球は同様に物体の衝突の雨を受けていたに違いない。さらに、地球は月より重く小惑星の衝突に影響を与える。結果的に、地球は実質的に月より多く衝突を受けていた。月への衝突確率と、そしておそらく地球への衝突確率は、実質的には40億年~38億年前までは下がっていなかった。明らかに地球へのこれらの衝突は表面の環境に実質的な効果を及ぼし、生命の存在可能性へも影響を与えた。これらの巨大衝突の最も劇的な気候への効果は地球表面の加熱で、世界中の海は完全に蒸発し、生きていた生命はすべて絶滅した。このように初期の地球の衝突の歴史は、生命が生まれても生き続けられない環境を与えた。

この章ではこのような巨大衝突の環境への結果を調べ、生命が生まれ絶滅することなく生き続けられる最も初期の時間を議論する。地球の歴史の地質学的記録は、生命が確かに35億年前までには存在し、ひょっとしたら39億年前までに存在したかもしれないことを示している。このことは生命が生まれてからの時間の手がかりを与え、当時の環境がどのようなものだったか、生命がどのように発生したかの理解を助けてくれる。

### 衝突と恐竜の絶滅

地球の生命に影響を与えた衝突はごく最近認識された。6500万年前に生きていた恐竜や、その他の多くの種の絶滅は10kmの小惑星の衝突により引き起こされたかもしれない。地質学的見地から見ると、この出来事は相対的に最近起こったため、衝突が環境にどのように影響を与えたかの例として使うことができる。様々な大きさの物の衝突の環境へ

の影響がどんなものか、過去において何回破壊的な衝突があったのか（現在でも衝突し続けるのか）を理解しよう。

地球の表面には約200個のクレーターが知られている（図2. 2）。これらの直径は1 km～140 km以上までである。一番小さな部類では、アリゾナのMeteorクレーターが1 kmちょっとで50000年前に作られた（図2. 3）。南アフリカのVredefortクレーターとカナダのSudburyクレーターは共に、140 km位でほぼ一致して20億才位である。

（図2. 2）地球上のクレーターの位置。海底のクレーターはわからないが陸地より多いと予想されている。

（図2. 3）アリゾナのMeteorクレーターの空撮。クレーターはおよそ1.1 kmでふちからの深さは167 mである。約50000年前に75 mの鉄隕石の衝突でできた。衝突で放出されたクレーターの周りの丘状のものがわかる。

地面にこんな大きな穴を開けることができる出来事がもしかすると顕著に気候や生命に影響を与えることは、今日明らかであるようだが、関連を示す特定の証拠が必要であった。

1970年代後半に、いくつかの調査グループが約6500万年前の、白亜紀と第三紀の地質学的境界を測定しようとした（地球の地質学的歴史を手短に議論した3章を見なさい）。K/T境界と呼ばれるこの境界では（Tは第三紀を表し、Kは白亜紀のドイツ語表記を表す）石の中の化石の突然の変化が、地球上のすべての種のかなりの割合が死に絶えたことを意味している。この絶滅の出来事は（最も有名な絶滅の）恐竜、多くの陸上動物、そして海の無脊椎動物のかなりの数を含んでいる。実際にこの突然の絶滅は2つの地質学的区分の境界を定めている。地質学的記録の中にK/T境界が見られる多くの場所で、（侵食されていない場合）場所によって数mの厚さの粘土層の出現がある（図2. 4）。

（図2. 4）南コロラド州のRaton近くの約6500万年前に堆積したK/T境界。境界を作る粘土は黒い炭の層のすぐ下の1 cmの厚さの層である。ナイフの一番上の継ぎ目がこの層の中心である。

科学者は粘土の中の'siderophile'の元素と呼ばれるものの存在度を測定した。親鉄性の元素は面白い。それらは地殻にはあまり多くないからである。鉄とニッケルが地球の歴史のはじめに核へ分離したときに、親鉄元素は鉄とニッケルの中に残る傾向があった。しかしながら、それらは核やマントルや地殻などに分化していない隕石に多い。親鉄元素の1つはイリジウムである。粘土層でのイリジウムの存在度は、隣の岩石層の存在度の10倍であった。これは地球外の物質の大量の流入でそのとき起こったとはずだと科学者が仮定するような、そのような強大な増加であった。イリジウムや他の親鉄元素に加えて、境界層の粘土は高温高压化で高密度になった石英という鉱物を微量に含んでいることがわかった。コーサイトやスチショバイトと呼ばれる高密度の石英は、大体地球表面に隕石がぶつかることによる強力な力の結果として生じる。例えばMeteorクレーターで大量に見つかったよ

うに。

過剰なイリジウムと衝撃石英の出現は、地球表面に1つの大きな隕石がぶつかったのがK/T境界のときに起こったことを示している。世界的な粘土層の分布とそれに含まれるイリジウムの量に基づくと、それは1つの10 kmサイズの物体の衝突が原因であると示している。地球表面への10 kmの物体の衝突は100 kmにもなるクレーターを作った。不幸にも6500万年前にできた100 kmのクレーターは見つかっていなかった。その時代の知られている唯一のクレーターは、アイオワのマンソンクレーターである。しかしながら、このクレーターは10 kmほどで、測定されたイリジウムの量とは程遠い。

クレーターの調査が成功する保証はなかった。クレーターがあったとしても、クレーターが侵食されてなくなってるか、海底にクレーターができて、その後6500万年の間に大陸の下に沈みこんでしまう確率も40%あった。しかしながら、仮説の驚くべきことに、クレーターが見つかり、それはChicxulubとして知られ(Chicks'-you-lubと発音する)、中央アメリカのユカタン半島の先に位置し、直径は200 kmに及び、半分を地上に、半分を海底に横たえている(図2. 5)。半分か海底で、半分か地上にあり実質的に風化しているためK/Tクレーターの前には確認できなかった。引力と地形学のデータの中に、クレーターが実際は約300 kmにもなるという暗示がある。この大きなクレーターは10~20 km程の小惑星の衝突でできた。

(図2. 5) 中央アメリカのユカタン半島のChicxulubクレーターの位置を表す地図。

円は場所を表し、リングの大きさはさしわたし200 kmで、350 kmのリングの証拠もある。

この衝突の気候への影響はどんなものだったのか?地球に衝突する物体の最小速度は1.2 km/sで、これははるかかなたから地球の重力圏へ、ただ自由落下してきたときの速度である。しかしながら、物体は太陽の周りを公転しているため速度があり、衝突速度はより大きかった。地球に当たる小惑星のより代表的な速度は、15 km~30 km/sの範囲である。比較するとライフルの弾の銃口での速度は約1 km/sである。大きな衝突にはすさまじい量のエネルギーが含まれ、このエネルギーは衝突の間、開放される。

典型的な衝突の間、衝突する小惑星の速度によるエネルギーは、熱と破片の運動エネルギーに変わる。大きな穴は衝突時に小惑星と惑星表面が搾り出されることで造られる。岩石の破片の中には溶けるのに十分加熱されたり、蒸発するまでも加熱されたりするものもある。衝突のときに巻き上げられる破片は'ejecta'と呼ばれる。典型的に放出物は衝突箇所の比較的近くに落ち、クレーターの直径の数倍の距離と同じになる。200 kmの直径のChicxulubクレーターを作ったような大きな衝突では、放出物が完全に大気を越え宇宙に達する軌道に吹き上がり、そして大気を通過して地表へと戻ってきた。海への衝突は大きな津波による大規模な海の混乱を引き起こした。加えて、衝突による海への直接の加熱は大気への水の蒸発を引き起こした。

明らかに、衝突は、衝突が起きたちょうどそこに生きていたどんな生物にも被害をもたらした。衝突時の加熱は、比較的適温だったとしても、生物の化学結合を壊し分解するには十分であった。加えて、衝突地近くの放出物は、地表の生物を埋めたかもしれない。ひょっとすると数 km の破片の下にいるのかもしれない。大気まで巻き上げられた破片は太陽光を遮り、大気と地面の温度を劇的に変化させた。そして津波の効果と大気中の破片の落下は、どんな地表もそして、かつて生物が利用していた地表に近い海を汚した。

しかしながら、気候への一番大きな効果は、宇宙に吹き上げられ、大気圏へすぐに再突入した破片が及ぼしたかもしれない。残った破片の大きな塊（例えばキロメートルサイズのもの）が邪魔されずに大気を通して戻ってきてそれ自身のクレーターを作る。これら 'secondaries' は月の大きなクレーターの周りにはいくつかある。しかしながら、より小さな破片や、粒子サイズのものには減速されて、大気に再突入することで加熱する。ちりの粒子は完全に蒸発するくらい加熱される。我々は地球大気にぶつかる惑星間塵や流星体として、今日起っているちりの粒子の蒸発を見ることができる。上層大気を通過することによる摩擦によって、夜空での流星として破片が光り輝くを見る。しかしながら、大きな衝突からの破片では、空での流星跡よりも多い。むしろ再突入したちりは、白熱した厚い毛布のような形で大気に入ってきている。もし誰かが地上で大気に再突入する放出物を見たら、空が光り輝くちりで完全に覆われていただろう。空からの加熱はすさまじく、地球の表面のほとんどを焼いた。K/T 境界の出来事のサイズの衝突では、加熱は多くの生物を絶滅させる世界的な火災を起こした。この仮説は粘土の境界層の中のすすの全世界的な層の発見と一致している。

衝突によって大気に放出されたちりは '核の冬' と呼ばれるものと同じ効果があった。それは大気の太陽光を吸収し、地表に届かなくした。その結果地表は衝突後数週間で劇的に冷え、気温は一年かそこらで氷点下まで下がった (図 2. 6)。これは食物連鎖の底辺のもの (光合成をする植物) を絶滅させ、それに頼る生物の死を引き起こし、順に植物を食べる生物を食べる生物の死を引き起こした。おそらく 1. 2 年でちりは地球大気から抜けていき、状態は元に戻るが、被害は残ったままである。

(図 2. 6) 大きな衝突後の 1 年間の陸と海の表面の気温。点は衝突直前の気温。地上では気温はすぐに氷点下に下がり、そして再び下がる前に一度戻った。

たくさんの水は衝突で大気に巻き上げられたか、放出物の熱で海から蒸発して激しい雨を作った。これがどのような効果を持つのかは正確にはわからないが、間違いなく劇的な過程で陸上の生物全てに影響を与えた。

衝突で熱せられ衝突後の放出物で加熱された大気中のガスは、異なる分子と再結合した。特に窒素に富む組成のものとして硝酸化合物ができた。これらは緑の惑星を破壊し、海を酸性にした世界的な酸性雨を作り出した。

思うに、衝突は全世界的に地球の表面に影響を与え、火山性溶岩の大量の噴出を引き起

こした。この溶岩は気候にも影響を与える二酸化炭素のようなガスを大気中に放出した。興味深いことに、大量に噴出した溶岩の中のひとつが、玄武岩が多いインドの Deccan Traps で 6500 万年前にでき、Chicxulub と Deccan Traps の距離は遠いが、時期が一致していることを示しているようだ。

K/T 境界での衝突による恐竜の絶滅の場合は、強烈であるようだが、悩む問題もある。地質学的記録が、絶滅がすぐにそして同時に起きたものではなく、多くの種が衝突の前でさえ徐々に死んでいったことを示していることが、大きな問題である。不幸にも、地質学的証拠は、この時代での周りの出来事の詳細で完全な記録を与える程細かくない。しかしながら、その時大きな衝突が起きて、そのような衝突で予測した気候への効果が世界的な広さで起こり、生物圏に重大な影響を与えたことは明らかである。思うに、衝突は、異なる仕組みによって環境へのストレスですでに弱っていた生態系へ直撃した最後の一撃だったのかもしれない。

衝突が地球の歴史で大量絶滅の全ての責任があるわけではないのも明らかである。例えば、約 2 億 5000 万年前のペルム紀の最後に起きた絶滅は、地球上の全生物の 95% を消し去った。シベリアでの火山物質の大量の放出が絶滅の原因だと最近の証拠は示している。爆発性の火山活動は気候に影響を与え、絶滅を引き起こすかもしれないガスやちりを大気中に撒き散らす。もちろん同時に衝突が起こったかもしれない。この時期に衝突したクレーターの詳細はないが、かなり長い時間が経ち小さな証拠がなくなってしまったかもしれないし、特に海底に衝突していたならなおさらである。

### 地球への衝突確率

地球の気候に影響を与える衝突はどのくらい起きるのか？地球にぶつかりうる太陽系の物体の大きさの分類は、指数法則で厳密に描かれ、大きな物体より、より小さな物体のほうが多いことを表している。100 km のサイズまでの小惑星で、10 km のサイズのは約 100 個、1 km のサイズのは 10000 個になる。言い換えると、大きさが 1/10 になるごとに、個数は 100 倍増えることに対応している (図 2. 7)。

(図 2. 7) 地球にぶつかりうる物体の存在度の指数法則による分類。図は小惑星の大きさの作用による衝突の平均間隔を表す。例えば 10 m かそれより大きい物体は 30 年ごとに一回位衝突すると予測され、10 km の物体はほぼ 1 億年ごとに起こる。

地球にぶつかるかもしれない物体は、現在、地球の軌道と交差する軌道にある。衝突するのは時間の問題である。今日、地球と交差する軌道やそれに近い軌道の 1 km かそれ以上の大きさの物体はおよそ 1000~2000 個ある。これらの物体の全てがまだ発見されていないが、物体の数は知られた物体の数と新しい物体の発見確率を使って、予測するこ

とができる。大まかに言えば、10 kmの物体の約半分と1 kmの物体の約10%が発見されている。(予測は、1 kmのサイズの物体をすべて発見しようとしている一連の半ダースのひたむきな天文台の数十年間の熱心な努力が必要だと示している。)

無作為の統計によると、1 kmサイズの物体は平均して30万年ごとに地球に衝突する。これは10 kmサイズの物体は平均3000万年ごとに衝突することを意味する。K/T境界の時期に地球にぶつかった小惑星は10~20 kmだったので、そのような衝突は平均3000万年~1億2000万年ごとに起こるはずである(図2.7)。これは6500万年前にK/T時の衝突の出来事が起きたことと一致するようだ。例えばもしこの大きな衝突が100万年ごとに起きた場合、問題は我々の論理で起こるだろう。地質学的記録には多くの巨大衝突の証拠が見つけれない。

現在、地球の近くを横切る軌道で知られている一番大きな物体は数十kmの大きさである。そのような地球に衝突する前の物体の平均寿命は一億年程度である。地球上で我々が知る生命に被害をもたらす衝突は、我々の生涯では起こっていない。しかし、そのような衝突はおそらくとても近い未来で起こるだろう(地質学上で話すと)。

これらの同じ統計的証拠は100mの物体は平均3000年ごとに地球に衝突し、10mの物体が30年ごとに衝突することを示している。1908年にシベリアのツングスカでの小さな彗星か小惑星の衝突は、これらのより小さな出来事が起こりうることを我々に知らしてくれた。げんこつや玉石サイズの物体やより小さなちりサイズの物体の衝突は毎日起こっている。

平均3000万年ごとに地球にぶつかる10 kmサイズの物体について、なぜ絶滅を起こすような衝突がもっとないのか?地球の生命の地質学的記録は、5億8000万年前からだけの大量絶滅を調べる十分な情報がある(3章、4章を見よ)。このように我々は衝突があったこの期間10~20の大量絶滅を見つけると予想するかもしれない。実際、この期間に本当に重要な意味のある5つを含め、十数個の大量絶滅があった。不幸にもこれらの出来事でのそれぞれの衝突の役割を決める十分な証拠はない。しかしながら統計上、それらのいくつかは小惑星の衝突と関係していることは予測できる。

### 衝突と地球初期の歴史

さあ地球の初期の歴史に起こった衝突の特徴へ向かいましょう。地球はより小さな物体の継続的な集積と合体で作られていると考えられている。この合体は、成長過程の惑星がフルサイズになるまで地面に物体が衝突することで起こり、宇宙のほとんどの破片が他の惑星に集積する。(この惑星形成過程は14章15章でより詳しく議論されている。)この地球の集積の大半がほぼ45億年前に完成し、それ以来衝突確率は下がった。しかしながら、これらの初期の出来事は、地球上に記録されていない。なぜなら、風や雨やその他の地質学的な動きによる浸食で、証拠が全て消し去られたからである。

月は太陽系の初期の歴史の侵食されていない衝突を記録しているので、衝突の数とタイミングの指標として月を見ることができ。月で簡単にわかる最も大きなクレーターはオリエンタル盆地で、ふちは900 kmになる。しかしながら、より大きな衝突盆地がある。南極の Aitken Basin は最も大きく、最初は形からわかり、後に月の地形の測定で確かめられた。これは2200 kmでだいたい41億年前にできた。なお、より大きな残りの盆地もある。月の海の前側を含む全ての地域を囲む月の前面に起こった巨大衝突が示す地質学的証拠もある。'Procellarum Basin'と呼ばれるこれは3200 km近くあり、月の最も古い特徴のひとつである(図2. 8)。

(図2. 8) 地球から見えるほぼ全ての月。月の1つの側での全ての海の地域の発生は、前面の巨大衝突盆地('Procellarum'盆地)の存在で説明されるかもしれない。この衝突は十分に地殻を薄くし、後の衝突がもっと薄くし、その結果マグマが地表へ進むのを容易にした。

初期の歴史の間、全ての月の新しいクレーターは、今あるクレーターのいくらかを覆い、最新の出来事だけ見ることができ。本質的に、地表はクレーターで'いっぱい'になる。この理由から、古い地域が破壊された一定の時点よりも、もっと前の情報を得るのに月の表面は使えない。月の表面の最も古い地域は44億年前にでき、より典型的な高地は41億年近く前で、最も若い高地表面は大体39億年前である。35億年前まで、衝突の確率はほとんどの高地ができる時には、ほぼ1%まで下がっていった。それ以来衝突はたまに起こる(図2. 9)。

(図2. 9) 異なる年代の月の表面にあるクレーターの数。上の図は対数グラフで数を表し、下の図は同じ数を均等な目盛りで表した。実際の月への衝突確率はこのグラフの勾配で、最初のほうは大きく、最近になると小さくなる。

地球への衝突確率は月への確率より大きい。なぜなら、地球の大きさが大きいし、重力も大きいからである。大まかに言えば、月に衝突する数より約20数倍多く初期の地球に衝突した。これが意味するのは、もし南極の Aitken Basin が約44億年前からの月の最も大きな衝突結果ならば、地球には同じような大きさの20数個の衝突があったかもしれない。客観的に見ると、月のこのような盆地の創造はほぼ200 kmの物体の衝突が必要で、これは火星と木星の間の太陽の周りを公転する小惑星帯に今ある十数個の小惑星を除く全てより大きい。そしてもちろんこれらの巨大衝突は、小さな物体の衝突の多くと同時に起きる。

これらの衝突した物体は、K/T境界での絶滅の原因となったものよりはるかに大きく、数千kmであった。気候に影響を与えた意味では小さな衝突と似ているが、この巨大衝突の環境への影響は劇的でさえある。それらは地球の歴史の初期に生きていたどんな生物にも強力な影響を与えた。

気候への最も重要な効果は衝突の間に大気に与えた熱である。熱は衝突した物体自身からと、衝突の放出物が大気に再突入することから来ている。大気は結局、この余分な熱エネルギーが全て宇宙に広がり、冷却され、同時に地球表面へも広がった。この地表への熱は陸地と海面を暖め、大気中への大量の水の蒸発を起こした。

衝突のほぼ半分のエネルギーが衝突の周辺の加熱に使われ、残りのエネルギーの半分が海面の加熱と蒸発に使われ、その残りが宇宙へと広がったと、コンピューターシミュレーションは示している。これで、どのくらいのエネルギーが海の加熱に使われたか、そしてどれくらいの水が大気に蒸発したかを見積もる。350 km~400 kmの物体の衝突は、世界中の海を蒸発するのに十分な熱を与え、また、地球表面を2000 K以上の温度に暖めるのに十分な破片を放出した。もちろん、もし海からの水が全て大気に水蒸気として存在した場合、ガスは温室効果のような働きをし、太陽からの熱を取り込むだろう。大気は熱いままだが、水蒸気は3000年かけて冷え海へ凝縮して戻った。明らかにこのような出来事は、地表に住むどんな生物にも破壊的な結果となる。

小さな衝突は全ての海を蒸発させないかもしれないが、海の上層部の200 mの水を蒸発させることができる。この深さは光の届く部分に当てはまる。それは太陽光が通り光合成ができる深さである。もし最初の生物が光合成をしたならば、海のこの地域はそれで占められ、海の光の届く部分の蒸発は彼らの絶滅を引き起こしただろう。これらの生物は食物連鎖の底辺にいるため、もしどんな上位の生物をも作っているならば、このことは同時に全ての生命を破滅させる結果となった。150~190 kmの物体の衝突は、光の届く部分を蒸発させるのに十分な熱を与えた。

海の光の届く部分を蒸発させるのに十分な20数個の衝突は、44億年前から起こり、もっと大きな衝突もいくつか起こっていることを思い出そう。月のクレーターのサイズの種類によると、44億年前から地球にぶつかった最も大きなものは1000~1700 kmの大きさだったかもしれない。このことは驚くべきことではない。地球は相対的に大きな月サイズのもので合体してできたものだと考えられているからである(1.4章を見よ)。

この議論を要約すると、最大約38億年前のときから衝突が起こっており、最も大きな衝突が完全に海を蒸発させ、2000 K以上の気温に地表を熱することで地球を不毛の地にできることは明らかである。いつ地球はずっと住めるようになったのか？これはいつ海を蒸発させたり、海の光の届く部分を蒸発させるのに十分大きな最後の衝突がいつだったのかを尋ねると同じである。

統計的に、おそらく44億年前から地球が不毛になる衝突がおおよそ5回ある。そのような最後の出来事は44億年前と同じくらい昔か、38億年前くらいの時期に起こった。しかし、小さな数を統計的に分けこれらは本質的に不確実なものだということを覚えておかなければならない。これに関連して、もし地球にぶつかったら海を蒸発させるかなり大きな物体が、まだ4つ小惑星帯にあるのを知るのは重要である。これらは、Ceres, Pallas, Vestaそして Hygiea である。小惑星帯は地球からはるかかなたに思えるが、小惑星の軌道は常に



木星の重力の影響で乱されている。小惑星のいくつかの軌道と、小惑星帯からの破片の軌道は、地球にぶつかるかもしれない地球軌道と交差する軌道へ時間がたてば変化しうる。このように最後に海を蒸発させた衝突が起きた時は確定して言えないし、未来の少し遠いときに起るかもしれないということもわからない。

海の光の届く部分（200mより上）だけ蒸発させる衝突はより小さくそしてより多くの物体によるものなので、より厳しい制約を発生におくことができる。再び統計的に話すと、最後に光の届く部分を蒸発させた出来事はおそらく38億年前くらいに起こった。そしてまだ小惑星帯に直径で150km以上の大きさの小惑星が60個以上もあり、そしてより小さいのもかなりたくさんある（図2. 10）。

（図2. 10）小惑星イーダ。木星へ行く途中でガリレオ衛星が撮ったもの。イーダは長いほうで約60kmある。

しかしながら、これらの結論は我々が好むほど確かではない。他の計算は、この期間での衝突数が実質上はより大きいという可能性を考慮する。2つの予測の差は、月で記録される衝突数に基づいて、地球での衝突フラックスを引き出そうとした点において、不確定である。より大きいが必ずしも非現実的でないフラックスを使うと、最後の海の蒸発が35億年前と位最近で起こり、実質的にその時の後で光の届く部分の最後の蒸発が起こったかもしれない。このことは状況を複雑にした。35億年前やおそらく39億年前くらい昔の生命の存在の地質学的証拠があるからである（4章を見よ）。もし陸上生物を絶滅させる衝突が35億年前より後に起きたら、地質学的記録中に記録された生物相が、今までの生命の連続的なつながりを形成しない必要がある。その代わりに、生命は地球の歴史の初期の部分で、多くの時間作られたり滅ぼされたりしなければならない。しかしながら、地質学的記録の中で、発生の証拠が消されていない場合、35億年前よりはるかに後には、最新の大きな衝突がなかったことに注意するのは重要である。

衝突フラックスと地質学的記録の不確定さによる大きな混乱はあったが、生命が存在したときの、地球表面への物体の衝突のフラックスが抑えられているのは明らかだ。例えば、海底火山の中心の周りの熱水の環境がある深海で、初期の生物が生きていたら、それらは最後の海の蒸発からずっと生きることができた。そのような出来事はどうも44億年～38億年前の間のいつかに起きていただろう。このような状況で成長した生物は今日見られる。それらは地表の下や、最近の火山の貫入（熱水系や温泉）のまわりできわめて熱い水の循環のある深いところで生きていた。5章で議論するが、これらの生物は最も古いタイプの地球上の生物を表しているかもしれない。

代わりに、もし初期の生物が海の光の届く部分で生きていたら、それは海の上層を蒸発させられる最後の出来事から始まらなければならない。この最後の出来事は約38億年前、もしかしたらもっと最近に起きたかもしれない。

## 木星と土星の役割

さて、太陽系の初期の歴史で起こった巨大衝突と、地質学的時間でいまだに起こっているより小さく重要な衝突を考える。衝突のさらなる面を考えましょう。もし木星が太陽系になかったら、地球への衝突の歴史はどうなっていたらう？そして、地球の生物圏への影響はどんなだろう？

木星や土星の現在の大きな効果は、太陽系から彗星や小惑星を重力で放出することである。彗星は太陽系から $10^5$  AU もの遠いところの軌道から出発する（しかし、彗星が太陽から離れたところからどうやってきたのかを14章で議論する）。この距離のところでは、太陽系内に入ってきた彗星のいくらかが、近くの星を通過すると軌道は摂動を受ける。軌道が重要な部分に到達し、木星や土星の軌道を横切るとき、彗星は大きな惑星によって重力で摂動を受ける。結果はたいてい、太陽系からのこれらの物体の完全な放出である。同様に、木星と土星によって摂動を受けた軌道を持つ、小惑星のかなりの部分を太陽系から放出することができる。

もし木星や土星がなかったら、もしそこに同じ重力効果のない多くの小さな惑星があったら、これらの彗星は放出されず、太陽系内に入ったらう。その点でそれらは地球型惑星の1つに結局衝突する。この場合での地球への衝突の現在の衝突確率は、実際の現在の確率の10000倍も大きい。K/T境界を作った大きさの衝突が、1億年ごとに起きる代わりに、10万年ごとに起こると予想される。このことは生物の活動に劇的な影響を与えるはずである。地球の生物圏がしばしば大きな摂動耐えることができ、まだ生き延びることができたかは明らかではない。あるいは、生き延びても最も簡単な生物だけが栄えるかもしれない。木星と土星なしでは、地球はバクテリアだけが生きていたかもしれない!!!

## 最終コメント

明らかに、時を通して地球表面への小惑星の衝突の特徴とタイミングは歴史上、重要な役割を担っている。地球の歴史の初期では、大きな衝突確率は地球のどんな生命も破壊し、生命が足がかりを作るのを妨げただらう。衝突確率が減少した40億年前～38億年前までだけは、生命は絶滅することなく絶えず生き続けることができたらう。しかし、残りの歴史では、衝突はその役割を担い続けた。小惑星の衝突はK/T境界での絶滅において確かに大きな役割を担った。そして、衝突は、最近5億年の間に記録された十数個やその他の大量絶滅の出来事において重要な役割を担った。未来に目を向けると、衝突は地球上に起こり続け、衝突がおきたとき、衝突は（いわば）相当な環境へのインパクトがあるだらうことは明らかである。