

隕石重爆撃期の地球表層環境

杉田 精司¹

月のクレーター年代学から、地球上に生命が誕生したと考えられる冥王代には多数の巨大な隕石の衝突（隕石重爆撃）があり、それが地球表層環境に極めて大きな影響を与えたことが明らかになっている。ここでは、巨大高速衝突現象における物理諸過程、及び、隕石重爆撃の地球表層環境への影響を解説し、隕石重爆撃の研究からの生命の起源における重要性を検討する。

1. 隕石重爆撃

1.1. 隕石重爆撃の重要性

現在までに知られている最古の化石の年齢が35億年、また、生命由来とされる同位体比を持つ炭素が38億年前まで遡れること [1] から、地球上に生命が誕生したのは地球形成後10億年以内であったと考えられる。ところが、この時代は地質学的な情報の全く残されていない時代（冥王代）でもある。そのため、生命誕生当時の地球表層環境を推定することは極めて困難である。このように情報量の乏しい冥王代において、隕石重爆撃はその存在及び重要性のはっきりしている数少ない出来事の一つである。この意味で、当時の地球環境を論ずるとき隕石重爆撃は避けて通れない問題である。その一方で、生命の前駆物質の生成にはエネルギーを一気に与えて合成を行ない、その後急冷して固定するといクエンチ反応が重要であることが指摘されている。このようなクエンチ反応を大規模に生み出すのに、高速衝突現象は非常に効果的である。このことは、巨大高速衝突現象が生命の起源に直接大きな影響を与えた可能性を示唆している。

1.2. 隕石重爆撃の証拠

1960年代に始まった惑星探査により、多数のクレーターが太陽系にある固体表面を持つ全ての惑星およびほとんど全ての衛星に存在すること、また、クレーターが火山性地形でなく巨大隕石の衝突によってできたことが明らかになった。また、惑星の形成そのものが微惑星の衝突合体によってなされること、地球付近を巡る小惑星の軌道計算と地球のクレーター年代学から、現在も10万年に1個程度ずつ直径10km以上のクレーターが生成されていること、恐竜絶滅が巨大隕石の衝突によって引き起こされたらしいことなどが分かり、衝突現象が極めて普遍的なプロセスであることが明らかになってきた。

一方、月から持ち帰った岩石の年代決定によりクレーターの形成年代が推定できるようになった。それによると、月面上のクレーターの大部分は38億から44億年前のたいへん古い時代にできていること、その時代は、現在に比べて数100から数1000倍もの隕石が月面に降り注いでいたことが明らかになった [2] 非常に激しい隕石の衝突のあったこの時代は後期隕石重爆撃期と呼ばれている。隕石重爆撃の跡は地球には残っていないが、地球と月が天体力学的に非常に近い位置にあることから考えて、地球にも同時代に月と同様の隕石重爆撃があり、地表に数1000kmもの直径を持つクレーターがいくつも形成されたことは確実である。

2. 巨大衝突現象の物理過程

冥王代に地球上に起こった巨大衝突の地質学的、地球化学的証拠は見つかっていない。したがって、当時の地球に起きた巨大衝突の影響を考えると、巨大高速衝突現象の物理過程の理解が何よりも重

¹東京大学理学部地球惑星物理学教室

要になる。この節では、後の議論で必要となる巨大高速衝突現象の物理過程(図1参照)をまとめた。

2.1. 超高温高圧状態の形成

隕石が超高速で惑星表面に衝突すると、巨大な

運動量が瞬時のうちに隕石から惑星に輸送されるため、隕石と惑星表面の接触点に超高压の領域が形成される。この運動量の伝達は、衝撃波の発生と伝播という複雑な形をとって行なわれる。しか

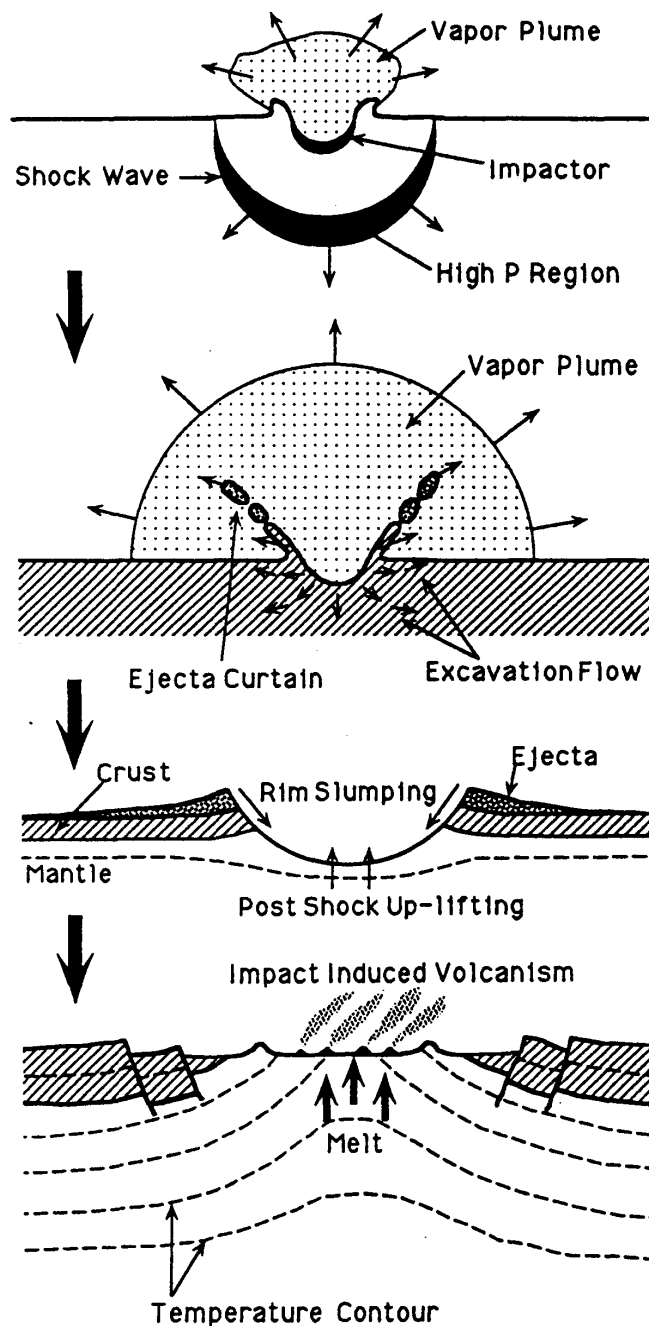


図1 クレーター形成過程の模式図

し、このとき発生する圧力は、運動量保存則から導かれる簡単な式を用いて見積もることができる。

$$P = \rho v_1^2$$

ただし、 P は発生圧力、 ρ は隕石の密度、 v_1 は衝突速度である。隕石の密度 3000 kg/m^3 、衝突速度を 15 km/s とすると、発生圧力は 600 GPa にも及ぶ。これは地球の中心核内の圧力に相当する。実際、地球中心核の研究に高速衝突実験で作られる衝撃波が利用されている。

衝撃波の通過による昇圧に伴い、インパクト地点付近の物質はユゴニオの状態方程式に沿って昇温する。巨視的に見れば、このことは隕石の持っていた巨大な運動エネルギーの解放による昇温と解釈できる。衝突速度 15 km/s の隕石の持つ質量当りのエネルギーは TNT 火薬の 20 倍にもなる。そのため、1 万度から 2 万度の高温状態が発生する [3]。

この圧縮過程は、衝突隕石の前面（衝突面）で発生した衝撃波が隕石全体を通過し、隕石の後部に到達するまで続く。

2.2. 高温蒸発プルーム

衝撃波面が、隕石の後部の自由表面にまで達すると、衝撃波の反射波として下向きに進行する膨張波が形成される。膨張波が通過するとそれまで高压にあった物質は、その圧力から解放される。しかし、温度は元の値には戻らず、衝撃波が捨てた熱の分だけ昇温している。特にインパクト地点直下では、岩石が蒸発するほどのエネルギーが残される。そのため膨張波通過後には、インパクト地点から岩石の蒸気が封圧を解かれて外側へ一気に膨張をはじめ、高温の蒸発プルームが形成される [3]。蒸発プルームは与えられた熱エネルギーをもとにして膨張を続け、ほぼ半球上に広がっていく。真空中では熱エネルギーを使い尽くすまで加速を続けることができるので、最終到達速度 v_∞ は次のように書ける。

$$v_\infty = (E - H_{\text{vap}})^{1/2}$$

ただし、 E は衝突により岩石に与えられた熱エネ

ルギーで、およそ $(1/8)v_1^2$ に等しい。 H_{vap} は岩石の蒸発に必要なエンタルピーで 13 MJ/kg 程度である。 v_1 は衝突速度でそれが 15 km/s とした場合、 v_∞ はおよそ 5.5 km/s となる。この蒸発プルームの速度は月、水星、火星の脱出速度を超えている。このことは、蒸発プルームによってこれらの惑星の大気が吹き飛ばされるということの意味している。その一方、蒸発プルームの速度が地球や金星の脱出速度を超えるにはかなり大きな衝突速度が必要である。加えて、これらの惑星の厚い大気は蒸発プルームの自由な膨張を阻害し、 v_∞ を低く抑える。したがって、これらの惑星では、インパクトによる大気の剥ぎとりの効果は比較的小さかったと考えられている [4]。

2.3. 地表の掘削と碎屑物の放出

インパクト地点から離れるにしたがって、衝撃波の残留熱は急激に減少し、蒸発や融解はおこらなくなる。しかし、衝撃波と膨張波の伝播によってかなり広範囲にわたって運動エネルギーが分配される。まず、隕石の衝突によって発生した高温高压領域は高速の衝撃波として惑星内部に半球上に伝播していく。衝撃波が通過すると、そこにある物質は運動量を得て、衝撃波の進行方向（放射状）に運動を始める。次に、自由表面に達した衝撃波からは反射波として上向きの圧力勾配を持つ膨張波が形成される。膨張波が通過すると、その物質は上向きの加速度を与えられるので、最終的に物質には外向き且つ上向きの速度が与えられることになり、クレーターの外に放出される。

ここで一つ注意しておかなければならないことは、クレーターの掘削過程でクレーター内の全ての物質が外側に投げ出されるというわけではないということである。インパクト地点側方の浅い部分ではたしかに斜め上向きの速度場ができて物質をクレーターの外側に投げ飛ばすが、インパクト地点下方の深い部分には下向きの速度場ができるため、その物質は周囲の物質を押しつけてめり込むように下方に移動し、クレーターの穴を作る。

したがって、クレーターの周囲の放出物はクレーターの深さの半分ないし3分の1程度までの比較的浅いところから来たものばかりである。実際、月にある直径1000kmもの巨大なクレーターである雨の海の放出物層からは月のマントル物質は見つかっていない。放出物層は全て深さ約70kmまでの物質に由来している。

クレーターから放出された掘削物質は放物線軌道を描いて飛び、クレーターの周囲の広大な地域にばら撒かれる。放出物層の分布は大気のあるなしによって異なってくる。地球の場合、放出物層の厚さ δ は、

$$\delta(m) = 0.14R^{0.74}(r/R)^{-3.5}$$

と見積もられている [3]。ただし、 $R(m)$ はクレーターの半径、 $r(m)$ はクレーターの中心からの距離である。この式に従えば、放出物層が10mの厚さになる地点のクレーター中心からの距離は、クレーター直径が100kmのとき、340km、1000kmのとき、5500kmにも及ぶ。

2.4. クレーターの変形

以上のような掘削過程を経てできたクレーターは浅いおわんのような形になるためおわん型クレーターと呼ばれる。小さいクレーターの場合はこれがそのまま最終的な形となって残るが、この形は重力的に不安定であるため、大きなクレーター（地球の場合はおよそ直径3km以上）になると崩壊して平底型クレーターやピークリングクレーターになる [3]。崩壊の過程は大きく分けて2つある。一つはクレーターのリムの崩落である。これによりクレーターは何割か直径を増し、また浅くなる。リムの崩落はクレーターの側壁の角度が安定角以上であるために起きるものと考えられているが、クレーターの壁は通常の摩擦法則から予想される安定角よりずっと浅い角度で立っているため、それだけで全て説明されたわけではない。クレーター形成時の強震動条件下における摩擦法則あるいは紛流体的過程の解明が重要と考えられている。

もう一つは、衝突後隆起である。これはおわん型クレーターの底がアイソスタシーを回復するために隆起することを指す。アイソスタシーという非常にゆっくりした過程を連想してしまうが、この場合は、クレーターの掘削とほとんど同時進行的に起きる極めて高速の現象である。そのため、上向きの速度を得たクレーターの底部はその大きな慣性力のために重力の平衡の位置より上にまで戻り、クレーター中央丘やピークリングを作るものと考えられている。しかし、中央丘やピークリングの形成過程についての研究はあまり進んでおらず、定量的なことはわかっていない。

3. 表層環境の受ける影響

3.1. 物質供給

(1) 揮発性物質の持ち込み

原始太陽系星雲中の温度は太陽から離れるほど低くなる。そのため、内側では気体でしか存在しなかった揮発性物質が、外側では固体として微惑星に取り込まれるようになる。特に、 H_2O は木星軌道付近から氷として微惑星に取り込まれ、木星型惑星の巨大な固体核に大量の H_2O を供給したと考えられている。一方、惑星の集積理論から、重力散乱によって内側と外側の微惑星が混合すること、および内側の惑星ほど早く集積が終ることが知られている。したがって、内側の地球型惑星は、自分の近くにある微惑星を食い尽くして集積をほとんど終えた段階で、集積途上にある外側の太陽系から揮発性物質に富んだ微惑星の衝突を受けることになる。ちなみに月の表面に残るクレーターの数から後期隕石重爆撃期に地球に降った天体の量を推定すると現在の海の質量の4倍になるという報告がある [5]。これらの25%が H_2O であれば、現在の海水の量は賄えてしまう。

(2) 有機物質の持ち込みと合成

シアン化水素 (HCN) やホルムアルデヒド (H_2CO) などの単純な構造で、且つ活性の強い有機分子は生命の出発物質として期待されている。これ

らの物質の形成過程としては、雷放電、太陽紫外線による合成などのほかに、宇宙からの直接持ち込み、巨大隕石の大気突入時の衝撃波中や高温蒸発プルーム中での合成など隕石重爆撃に関係した可能性が考えられている [6].

まず、宇宙からの有機物の持ち込みは、隕石、彗星、惑星塵の落下によってなされると考えられる。惑星間塵とは、直径100mm程度の微小な粒子で、彗星や小惑星の破片であると考えられているが、その組成を分析すると10wt%程度の有機炭素を含んでいることから、宇宙からの有力な有機物の運び屋といえよう。実際、現在では宇宙からの有機物の供給の中では惑星間塵による寄与が最も大きく、 $3.2 \times 10^8 \text{ kg/yr}$ の割合で有機炭素が地球にもたらされている。彗星や隕石による寄与はそれに比べると3~4桁小さいと見積もられている。彗星は有機炭素の含有量（ハレーで14%）も地球に衝突する数量も多いが、大きいもの（直径>100m）は大気で十分に減速されず、地表に高速衝突して有機物を分解してしまうため輸送効率が悪い。もし、惑星間塵が彗星や隕石の破片であって、彗星や隕石のフラックスに比例して地球に降るものと仮定し、さらに、40億年前の彗星と隕石のフラックスを現在の200倍であると仮定すれば、当時の惑星間塵による有機物の持ち込み量は $6 \times 10^7 \text{ kg/yr}$ となる。これは1000万年で現在のバイオマスの総量 $6 \times 10^{14} \text{ kg}$ を賄う量である。

次に、衝撃波や蒸発プルーム中での有機物の合成率は、大気の酸化還元状態に大きく左右される。還元的な環境であればあるほど合成の効率は良くなる。還元大気 (CH_4 , N_2 , H_2O) 中では蒸発プルーム中での合成が上に挙げた惑星間塵による持ち込み量のおよそ数100倍にもなると推定されている。ただし、太陽紫外線による合成の効率も同時に良くなるので、長期間の平均ではこれを上回ることはない。しかし、衝突による合成には一瞬のうちにしかも局所的に集中して有機物を合成するという利点がある。

一方、アミノ酸などの高分子化合物は検出が難しいが、地球上での汚染の極めて小さいと考えられる一部の隕石の化学分析により、炭素質コンドライト中に数十種類のアミノ酸が存在していることが明かにされている。しかし、その量は、数100 nmol/g と大変微量である。また、彗星中のアミノ酸の存在は未知であり、サンプルリターンなど今後の観測が期待される。

3.2. 生命発生環境の破壊

生命前駆物質の合成実験などの結果から、生命は海洋や陸上のあらゆる所で同時多発的に発生できるものではなく、生命発生に非常に適した特殊な環境下である程度の時間をかけて発生したと考えられている。しかし、激しい隕石爆撃の下では、地表は絶えず高速衝突により高温高压状態に曝され、あるいは分厚い放出物層に埋め立てられるため、生命の発生に必要な安定な環境はできにくい [7]。また、地表の直接破壊以外にも巨大衝突によって大気の急加熱、海水の沸騰が全地球的規模でおき [8]、生命の発生を阻害したと考えられる。ここで重要なのは、これらの影響は陸上や浅海で大きく、大量の海水に守られている深海では比較的小さいということである。

3.3. 衝突誘発型火成活動

巨大クレーターの形成に伴う衝突後隆起は、惑星表面だけでなく内部の物質も持ち上げる。すると、持ち上げられた物質は、減圧にともなって多少断熱降温するが、地球のマントル物質の場合は融解温度の降下率の方が優るので融解してマグマを形成する。このマグマの噴出により、クレーターの底部には火成活動が起こる [9]。このマントル物質の上昇に伴う火成活動の機構は、現在の大洋底海嶺における火成活動について考えられているものと同じである。ただし、海嶺での火成活動が線的に行なわれているのに対して、衝突に誘発された火成活動は面的な広がりを持つ大規模なものであったと予想される。さらに、この火成活動は地形的に低いクレーターの底でおこるわけで、

必然的に海底での活動となる。したがって、火成活動に伴って熱水循環系が大規模に形成することが予想される。熱水循環系は生命発生の場所の非常に有力な候補であり、衝突誘発型火成活動は生命の起源を考える上での重要な要素であろう。しかし、衝突誘起型火成活動の例は今のところ見つかっておらず、未知の部分が多いことも事実である。

4. 生命の起源論への制約

生命が地球上に誕生したとき、地球上に激しい隕石爆撃が存在していたことは確実である。これらの巨大衝突が生命の誕生と進化に与えた影響は様々であるが、地球上でどんな現象が起きたのか定性的なことはかなり分かってきたと言える。それゆえ、隕石重爆撃のこれまでの研究から生命の起源について幾つかの示唆を与えることは可能である。まず、隕石重爆撃によっておよそ38億年前までは地球の表層、特に陸上や浅海は破壊されたり高温高压に曝されたりし続け、生命の誕生と進化は著しく阻害されたと考えられる。その点、深海は隕石重爆撃による破壊の影響を受けにくかったと考えられる。さらに、当時の深海には衝突誘発型火成活動に伴う広域の熱水循環系が存在していた可能性が強い。その一方で、生命の材料物質が惑星間塵や彗星によって大量に持ち込まれたこと、大気中の衝撃波や蒸発プルーム中で大量の有機物が合成され得たという点も重要な要素であろう。

最後になったが、隕石重爆撃の影響の大小を決めるためには、これまで紹介してきたような高速衝突現象の物理過程の理解のほかに、地球に衝突した天体の大きさ、数、衝突速度、組成などのパラメーター（広い意味のインパクトフラックス）を知ることが必要である。ここではくわしく触れなかつたけれども、後期隕石重爆撃期のインパクトフラックスの推定には大きな不確定性があり、定量的な議論をする上での大きな足かせとなって

いる。したがって、今後、後期隕石重爆撃期の地球の姿を明かにしていくためには、このインパクトフラックスの推定を徹底する必要があると言える。

参考文献

- [1] Schidlowski, M., 1988: A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks, *Nature*, 333, 313-318.
- [2] BVSP, 1981: Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets, pp. 1280, Pergamon Press, New York.
- [3] Melosh, H. J., 1989: Impact Cratering, pp. 245, Oxford Univ. Press, New York.
- [4] Melosh, H. J. and A. M. Vickery, 1989: Impact erosion of the primordial atmosphere of mars, *Nature*, 338, 487-489.
- [5] Chyba, C. F., 1990: Impact delivery and erosion of planetary oceans in the early inner Solar System, *Nature*, 343, 129-133.
- [6] Chyba, C. F. and C. Sagan, 1992: Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecule; an inventory for the origin of life, *Nature*, 355, 125-132.
- [7] Maher, K. A. and D. J. Stevenson, 1988: Impact Frustration of the origin of life, *Nature*, 331, 612-614.
- [8] Sleep, N. H., K. J. Zahnle, J. F. Kasting, and H. J. Morowitz, 1989: Annihilation of ecosystems by large asteroid impacts on the early Earth, *Nature*, 342, 139-142.
- [9] Grieve, R. A. F., 1980: Impact bombardment and its role in proto-continental growth on the early earth, *Precambrian Res.* 10, 217-247.