

## 特集『地球システム変動と大量絶滅』

# 地球史における衝突現象

高田 淑子<sup>1</sup>

## 1. 衝突現象の重要性

### 1.1 斉一説と隕石衝突

18世紀終わり、ハットン<sup>1</sup>は、堆積作用など過去の地質現象は現在も地球上で起こっている諸現象と同じものであるという、'斉一説'を唱え、その後の地質学の発展に大きく寄与した。しかし、斉一説的考え方で説明できない何らかの天変地異的'事変'が、地質年代境界に関与しているという考え方を具体的に示したのが、アルバレッツ父子である。彼らは、イタリアのK/T(白亜紀・第三紀)境界(約6500万年前)の粘土層にイリジウムの濃縮を発見し[1]、恐竜等の生物種絶滅の原因が隕石衝突による急激な気候変動であると結論した。彼らは、この層に含まれるイリジウムの量から衝突した隕石の大きさを直径約10kmと予測した[詳細は本誌杉田氏・大野氏参照]。その後世界中の衝突地形調査により、メキシコのユカタン半島にあるチクスループクレーターが形成年代並びに衝突規模が合致し、この隕石衝突による隕石孔であることが明らかになった[2]。さらに、世界各地のK/T境界層から、イリジウムだけでなく、プラチナ・金などの白金元素の濃縮や、岩石が溶融・固化したガラス球のテクタイト、衝撃変成を受けた石英等、K/T境界の隕石衝突を裏付ける証拠が報告されている。以上のことは、衝突現象が地球史上、地球システム変動の引き金となりうることを示している。

### 1.2 太陽系内における衝突現象

このような衝突現象は過去の遺物でなく、実は現在

も起こりうる現象であることを、シューメーカー・レビー第9彗星(SL9)の木星衝突が、あらためて我々人類に示した[3]。直径約1kmに分裂した彗星が、60km/sの速度で木星に衝突した後に観測されたイジェクタは、数ヶ月間地球を覆うサイズに広がった。地球で同規模の衝突現象がおきると、全地球規模に塵の分散や大気の光化学変化が起こりうることを意味している。

また、太陽観測探査機SOHOの広角分光コロナグラフ(LASCO)は、約5年間で300個以上の近太陽軌道の彗星を発見している[4]。これらの彗星は、リニア彗星同様、太陽の潮汐破壊を受け太陽の熱輻射で蒸発・消滅している。彗星が太陽に吸収されていく様は、いわゆる'衝突'現象が太陽系内で今なお常時発生している現象であることを示している。

そもそも、太陽系内の原始惑星の形成には、衝突現象は不可欠であったと考えられている。原始太陽系における降着円盤内で凝縮した塵が合体成長し、直径数km―数10kmの微惑星を形成する。これらの微惑星が衝突合体を繰り返す中、いくつかの微惑星が暴走成長し原始惑星へと成長を遂げる。地球を含めた惑星の形成は、微惑星の衝突現象の産物と考えられる。

さらに、小惑星は、形が不規則なこと、また、平山ファミリー等、小惑星の中には'族'として分類できる天体群があることなどから、相互に衝突を繰り返してきたと考えられている。また、揮発性元素に乏しく、母惑星に対する直径比や角運動量が大きい月の形成については、原始地球への火星サイズの微惑星による巨大衝突説が有力である[5]。そして、水星も平均密度が5.4g/cm<sup>3</sup>と大きく、核の直径比も大きいので、微惑星

<sup>1</sup> 宮城教育大学 地学教室

の衝突によりマントル物質の掘削・放出がなされたという説もある [6]。以上のように、衝突現象は地球を含む太陽系内の天体の形成・進化において、普遍的なプロセスである。

### 1.3 地球進化における衝突現象

地球・月の形成後、地球進化の初期段階においても、衝突現象は大気の形成・進化、表層環境変遷の重要なプロセスであったと考えられている。地球集積過程ではH・He主体の1次大気が形成されるが、その後の衝突脱ガスにより、 $H_2O$ ・ $CO_2$ 等揮発性物質が供給され、いわゆる2次大気が形成される。月面クレーター数密度の観測と月サンプルの年代測定から、月は形成後約8億年間隕石重爆撃の時代を経てきたと考えられ(図1)、この時代、宇宙空間に分布する小天体の数密度が現在と比較し大きかったことを意味する。月面では、月裏側の直径2,500kmのサウスポールエイトケンクレーターをはじめ、直径300km以上の大型クレーター盆地が30個以上確認され、これらが火成活動を誘引し月表層進化を促したと考えられている。進化の初

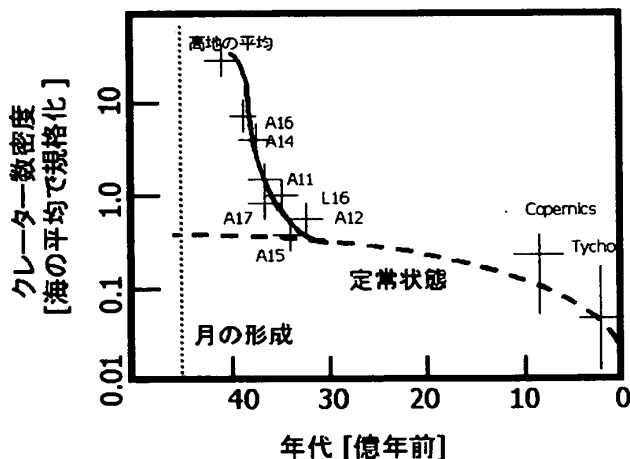


図1: 月・地球への天体の衝突頻度。横軸は年代、縦軸は月の海の平均で規格化した直径4km以上のクレーター数密度を表す。十印は、アポロのサンプル等により年代が明らかな地域のクレーター数密度と表層年代。破線は、過去の隕石衝突頻度が、現在と同様の定常状態の場合のクレーター数密度。明らかに、32億年以前は、定常状態を逸脱し衝突頻度が大きく重爆撃の時代であったことを示している。実線は、この時代のクレーター数密度と形成年代の関係を示す。実線及び破線は、ファクターで約5の不確定さがある。(図はBVSP[7]より改変)。

期段階では、地球も月と同様の隕石重爆撃時代を経たと考えられる。地球の重力が大きいことから約1桁天体衝突頻度が高いと仮定すると、地殻・マントルの成層構造形成(約44億年前以降)以後、地球では全表層においてサウスポールエイトケン級の衝突の影響を受けたと考えられる。高速衝突による原始大気の散逸も示唆される[8]一方、彗星核中に存在する有機物が、衝突後も生存し現在の生命の起源となった可能性も指摘されている [9]。

## 2. 近地球軌道天体の衝突頻度

図1によると、約32億年前には、衝突頻度が定常状態になったと考えられ、それ以後の衝突現象の規模とその頻度の関係は、現在の小天体の衝突頻度と同等と見積もることができる。現在の地球への小天体の衝突頻度は、近地球軌道天体の数分布から推定される(図2)。Shoemaker et al. [11]は、当時軌道が確定していた約100個の近地球軌道小惑星と彗星の数分布を用いて、地球と交差する可能性のある未発見天体の数

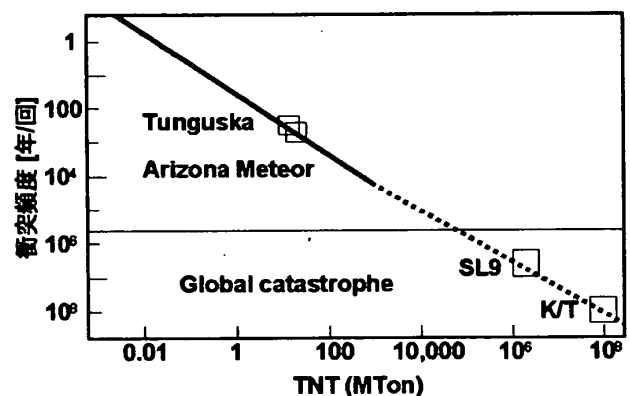


図2: 近地球軌道天体の衝突頻度。横軸は衝突エネルギーをTNT[Mton]で示している。TNT爆薬1[Mton]は、 $4.2 \times 10^{13}$ [J]。ツングースカ爆発は、10-20Mton、アリゾナの隕石孔は、直径約50 mの鉄隕石の衝突で形成した直径1.2kmの衝突クレーター。比較のためシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突も示す。実線の衝突エネルギーと衝突頻度の関係は、Chapman and Morrison [10]から引用。衝突頻度で1桁以内の不確定さがある。また、K/T衝突の衝突エネルギーと衝突頻度に、直線で外挿した関係を破線で示す。直径1.2kmの隕石衝突により(衝突エネルギーで $10^5 \cdot 10^6$ Mton)全地球規模の環境激変がおきる[10]。

も含めた累積近地球軌道天体の数分布を推定し、これらに各天体ごとに軌道から求められた衝突確率を乗じ、近地球軌道天体の衝突頻度を求めた。現在、直径1km以上の近地球軌道小惑星が約1000個存在すると推定されている [12]。図2より、地球史において、1908年シベリアで起きたツングースカ級の衝突やアリゾナ隕石孔の衝突は $10^2$ - $10^3$ 年に1度、SL9規模の衝突はおおよそ $10^3$ 万年に1回の確率で発生してきたものと推定できる。Chapman and Morrison[10]は、直径1-2kmの隕石衝突により(衝突エネルギーで $10^5$ - $10^6$ Mton)

全地球規模で大気的光学的厚さが2になると言う試算から、この衝突エネルギーを全地球規模の環境激変がおきる閾値としている。 $10^3$ 万年に1回の割合で常に地球システムはSL9規模の擾乱を受けてきたにもかかわらず、擾乱に対する気候変動のフィードバックにより安定でありつづけたと考えられる。しかし、1億年単位でKT規模の衝突があり、生態系の一掃がなされてきた。KTより大規模の衝突による擾乱は現在未発見であるが、地層の中に記録が残されている可能性も高い。約2億5千万年前の二畳紀と三畳紀の境界(P/T境界)における生物の大量絶滅も、境界層中に見つかったフラーレン分子中にHe<sup>3</sup>が多く含まれることから宇宙起源の可能性も示唆されている [13,本誌磯崎氏参照]。KTは地質学的進化においては、小さな擾乱でしかなかったが、哺乳類の台頭という意味で我々人類を含む生物進化において多大な影響を及ぼした。このような意味からも、地球システムは数億年単位で衝突による段階的進化を経てきたのではないかと考えられる。

### 3. 地球上のクレーター分布

地球には、現在、160個以上の衝突クレーターが確認されている[14](図3)。(1)火成活動の痕跡がなく、(2)円形状の地形を呈し、(3)重力異常・地震波などの地下物理探査による地下構造がクレーター構造を示し、(4)衝撃変成を受けた鉱物やテクタイトと呼ばれる

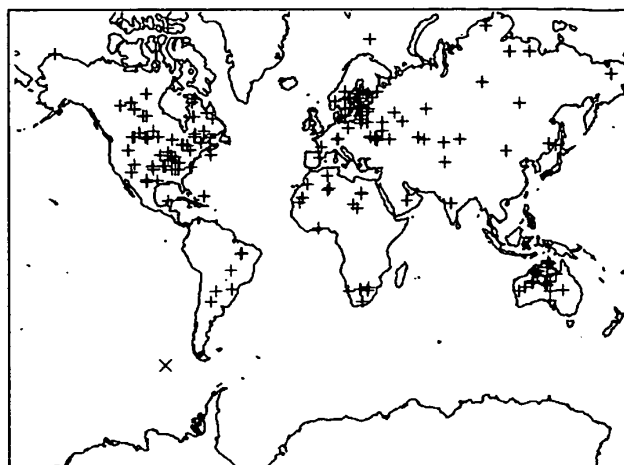


図3:地球上のクレーター分布。2000年現在確認されているクレーターは、165個、+印で示されている。クレーターの位置は、Natural Resources Canada, カナダ地質調査所 ([http://gdcinfo.agg.emr./crater/world\\_craters\\_e.html](http://gdcinfo.agg.emr./crater/world_craters_e.html)) のクレーターデータベースを活用した。深海底クレーターはXで示している。

ガラス粒が広域に分布し、(5)ボーリング調査による破碎岩石層や溶融層などの存在が確認されると、'衝突クレーター'と認められている。

現在確認されているクレーターのほとんどが古い大陸地殻上に存在する。地球はプレートテクトニクスがあり地球表面の7割を占める海洋底地殻の平均年代が0.6億年と若く、他の地球型惑星に比べクレーター数密度が小さい。また、水や植生による浸食作用があるため、円形地形を確認できるのは、比較的新しいクレーターに限られる。大陸の中でヨーロッパ・北米・オーストラリアに集中しているのは、明らかにサンプリングバイアスである。また、海洋性衝突クレーターは、現在確認されているクレーターの1割強であり、そのほとんどが、500 m以浅の大陸棚に形成された浅海性クレーターである [14]。深海底の形成年代が比較的若く、海水の影響があるとはいえ、未調査域が多いことから、現在深海の地形図・重力異常図等からクレーター地形の確認がなされている。

### 4. 地球表層における天体衝突

地球型惑星表層での衝突現象の研究は、クレータ

一形成等, 岩石の衝突体と岩石の標的という岩石同士の単純衝突システムの解明が礎である [15]. しかし, 地球における天体衝突には, 大気や海洋との相互作用が不可欠である. グローバルに循環する流体があるために, 衝突現象が衝突地点近傍の地形変化に留まらず, 地球システムに全地球規模の影響を及ぼす. これらは, K/T境界における衝突など地球史上の衝突事象においても重要な要素である. 衝突体のサイズ・強度・衝突速度によりその相互作用の影響は異なる. 大気/岩石圏への衝突では, 主に, 以下の3段階に分けることができる.

- (a) 大気への突入: 隕石や彗星等の衝突体が大気中を高速で通過中, 衝撃波が放物面状に衝突体を包み込む形で形成される. 衝突体の軌道背後のこの衝撃波面内は超真空の高温状態となる. 隕石表面は大気の抵抗を大きく受け, 高度に圧縮した高温高密度大気に接し溶融・蒸発し摩擦を受けると共に, 衝撃破壊により破碎される場合もある. 小天体(半径  $< 10^4$  m)ではこの効果が大きく, 大気中で減速, 消滅, あるいは, 爆発する. ツングースカ爆発のように, 地表におけるクレーター形成には至らないが, 広範囲に渡る爆風 ( $\sim 10^4$  km<sup>2</sup>) の影響がでる可能性はある. 直径10<sup>3</sup>km以上の衝突体であれば, 地球大気のスケールハイトが8kmなので, このような大気突入過程における影響は無視できる.
- (b) 岩石層におけるクレータリング: 衝突直前の隕石の運動エネルギーは, 地表と衝突することにより, そのほとんどが地表の運動エネルギーと熱エネルギーに変換される. 衝撃波面の動径方向への伝播と地表からの希薄波の反射により中心からイジェクタとして岩石破片や溶融物質が放出しクレーターが掘削されるとともに, それらが内部及び周辺部に堆積する.
- (c) 蒸発雲の成長: 一方, (b)の段階と前後し, 蒸発した隕石/地表岩石が大気中に上昇・拡大し, 蒸発雲の成長につながる. この蒸発雲は, 大気と熱エネルギーや物質混合という相互作用を続け, 大気

の再加熱ならびに隕石/地球表層物質の大気への供給も果たす. 大気の加熱や大気物質と岩石からの蒸発物質の化学反応が, 地球環境に影響を与える. 比較的小天体(直径  $< 10^3$  km)であれば, 蒸発雲は, SL9の衝突で観測されたように大気突入の際に形成された大気の超真空チューブに沿って進行方向と逆向きに蒸発雲が発達し, 蒸発雲の形態の非対称性, ならびに, 物質分配における非対称性が生じる. また, 衝突体の直径が大気のスケールハイトと同等以上であれば, (b)の段階で放出・蒸発した隕石/地表岩石等が弾道的に大気に再落下し, 直接地球上に再配分される. その後の大気循環によりクレーター物質がグローバルに分布すると考えられる.

海洋衝突の場合, 大気と同様に, (a)海水突入における衝突体と海水の相互作用, (b)岩石表層掘削への海水の寄与, (c)蒸発雲への海水の寄与などが考えられる. これらは, 大気の場合と同様, 水深と衝突体のサイズ比によって影響の大きさが決定する. (a)の過程では, 海水の密度は地表における大気の約10<sup>3</sup>倍であるため, 海水面衝突で急激な衝突体の圧縮がおこる. 水深と衝突体のサイズ比が1より十分大きい場合, 海水中で磨耗・減速し, 陸域での衝突に比べクレーター形成エネルギーが減少する. (b)の過程では, 高圧の海水のため, 真空下に比べイジェクタの飛距離が小さくなりクレーターが小規模化する. さらに, イジェクタが海水と混合し, 混合流体が乱流状態でクレーター周縁部へ流れ出し, 金星表層(大気圧が地球の水深約1kmに相当)のクレーター形態に相似すると考えられる. また, 浅海性衝突では炭酸塩岩の蒸発, 深海性衝突では海水の蒸発, 極域衝突では氷床の溶融・蒸発が考えられる. このような複雑な環境下での衝突現象は, 多層・多相を含む衝突シミュレーション等で研究されている[たとえば16]が, 今後, 多様な地球環境に対して系統的に数値実験する必要がある. さらに, 海水の運動が巨大津波としてグローバルに伝播する可能性もある. 地球史上, 海洋が占める面積の割合は大陸

より常に大きいため、海洋衝突が地球上での典型的な衝突環境と考えられる。次章では、特にこのような海洋性衝突の地球システムへの影響を考える。

## 5. 海洋衝突問題

海洋に天体衝突がおきると、地球システムは、岩石圏上での衝突現象と異なる応答が考えられる。

浅海性であれば、浅海性堆積物の蒸発が大気圏に与える影響が重要になる。特に炭酸塩岩・蒸発岩・海水の蒸発では、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等が大気中に放出されるため、各組成の急激な増加に対する地球大気の安定化までの応答時間を考慮せねばならない(表1)。たとえば、K/Tのチクスループクレーターの場合、大気と地殻の間に蒸発岩・炭酸塩岩・海水の層が存在していた。放出された $\text{SO}_2$ の細粒エアロゾルが大気中に浮遊するタイムスケールは年単位となり、数年にわたり冷却効果を示す。また、海洋と大気相互の応答時間は数年に渡り、数年単位で大量の水蒸気を大気が保持することが可能なため、塵やエアロゾルが消えた後も $\text{CO}_2$ や水蒸気による温室効果による大気の温度上昇がおき、地球規模の温暖化に向かった可能性もある。このように、天体の落下地域により、地球システムの応答がかなり異なると考えられる。

そのほか、海水による地球システム変動への直接的なインパクトとして、津波の発生や氷床の溶融があ

げられる。これらは、特に大陸の海岸域に影響を与える。衝突により発生する津波の伝播とそれによる被害の見積もりは、衝突計算を津波発生のソースとして線形的に重力波伝播を解く手法で数値計算がなされている[たとえば、18]。20世紀最大の1960年チリ地震では、太平洋上で20 cmの波高の津波が、日本を始めとする海岸線には10 mの巨大波として多大な被害をもたらした。これらは海岸線の地形に大きく左右されるが、テキサス州で発見されたK/T津波堆積物は、波高が50-100 mと推測されている[19]。特に海岸線地域に生息する生態系(人類も含め、浅海性動植物など)は、絶滅に瀕する可能性が高い。

## 6. まとめと今後の課題

衝突現象は、地球の形成、地球の進化、そして現在に至るまで普遍的なプロセスである。地球史における衝突現象の地質学的証拠は、今後、K/T境界以外の地質年代境界においても、様々な形態で発見される可能性を秘めている。その時、地球史は斉一説で説明づけるよりも、天変地異的現象による段階的進化を遂げたという考え方が妥当になるかもしれない。以上の観点から、今後、地質学的証拠の解明と共にキヤタストロフィックイベント後の地球のフィードバックシステムの解明が重要になると考えられる。そのためには、衝突現象という数十分単位の短いタイムスケールから気候変動

衝突過程	影響	時間スケール	規模	地質学的証拠・K/T境界
イジェクタ再突入	・太陽光の10倍の放射エネルギー ・火事	・～20分 ・～数日	全地球規模	陸域での煤層
塵の放出	・光合成の停止 ・冷却	～1ヶ月	全地球規模	細粒のイジェクタ層
蒸発岩からの $\text{SO}_2$ 放出と成層圏エアロゾル層形成	・光合成の停止 ・冷却 ・表層水の酸性化	・1-6ヶ月 ・数年 ・数日	全地球規模 全地球規模 地域的	N/A
$\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ の放出	有毒ガス	数日	地域的-全地球規模	N/A
津波・地震・衝撃波	水没・振動・爆風	数時間	地域的	津波堆積層
水、 $\text{CO}_2$ 放出	地球温暖化	数年-数十年	全地球規模	N/A

表1：衝突による地球システムへの影響（K/T衝突の場合）O'Keefe et al. [17]より抜粋。

という数年-数十年の長いタイムスケールに至るまで、  
各々のプロセスを如何に有機的に結びつけ統一的に  
解決していくかが鍵になるのではないかと考える。

## 謝辞

的確なコメントを、匿名査読者、ならびに、特集  
号編集長の田近英一氏にいただいた。ここに心より  
感謝する。

## 参考文献

- [1] Alvarez, L. W. et al., *Science*, 208, 1095, 1980.  
 [2] Hildebrand A. R., et al., *Geology*, 19, 867,  
1991.  
 [3] Hammel, H. B. et al., *Science*, 267, 1288, 1995.  
 [4] たとえば, <http://sungrazer.nascom.nasa.gov/>.  
 [5] Hartmann, W. K. and D. R. Davis, *Icarus*, 24,  
504, 1975.  
 [6] Cameron, A. G. et al., *Mercury*, U. Arizona  
Press, 692, 1988.  
 [7] BVSP, Basaltic volcanism on the terrestrial  
planets, LPI, 1288 pp., 1981.  
 [8] Ahrens, T. J., *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 21,  
525, 1993.  
 [9] Chyba, C. F. et al., *Science*, 249, 366, 1990.  
 [10] Chapman, C. R. and D. Morrison, *Nature*, 367,  
33, 1994.  
 [11] Shoemaker E. M. et al., *GSA Special paper*,  
247, 155, 1990.  
 [12] Rabinowitz et al., *Nature*, 403, 165, 2000.  
 [13] Becker, L. et al., *Science*, 291, 1530, 2001.  
 [14] Gersonde, R., *EOS*, 221, 2000., Grieve, R. A. F.  
and E. M. Shoemaker, 417, *Hazards due to  
comets and asteroids*, U. Arizona Press, eds. T.  
Gehrels, 1994.  
 [15] Schmidt, R. M. and K. R. Housen, *Int. J.  
Impact Eng*, 5, 543, 1987.  
 [16] Pierazzo, E. and H. J. Melosh, *Earth. Planet.  
Sci. Let.*, 165, 163, 1999.  
 [17] O'Keefe, J. D. et al., *Catastrophic Events &  
Mass Extinctions : Impacts and Beyond.*, LPI  
No.1053, 154, 2000.  
 [18] Hill, J. G. et al., 779, *Hazards due to comets  
and asteroids*, U. Arizona Press, eds. T.  
Gehrels, 1994.  
 [19] Bourgeois, J. T. et al., *Science*, 214, 567, 1988.