

## 特集 『地球システム変動と大量絶滅』

# 古生代・中生代 (P/T) 境界での巨大隕石衝突は本当か？

磯崎 行雄<sup>1</sup>

## 1. 生物大量絶滅と原因論

過去に生存した多様な化石生物の多くが、極めて短期間にかつ汎世界的スケールで絶滅したことが地層記録に残されており、このような事件は大量絶滅 (mass extinction) と呼ばれる。化石記録が豊富な顕生代 (約5億4300万年前から現在まで) において、最大規模の生物大量絶滅が古生代・中生代境界 (約2億5300万年前) におきた。この境界は、古生代最後のペルム紀 (Permian) と中生代最初のトリアス紀 (Triassic) の頭文字をとってP/T境界と呼ばれる。P/T境界事件は、中生代・新生代 (K/T) 境界事件を含む顕生代の主要な5回の大量絶滅事件 (ビッグ5) の中でも最大の規模でおきており、同時にこの事件は中生代以降の現代型生物群の発展の始まりであった。しかし、100年以上に及ぶ研究にもかかわらず、この未曾有の大量絶滅事件の原因はまだ特定できていない。

これまでの議論は、生物圏擾乱の原因を地球内部に想定する立場と外部に求める立場に大きく二分される。1980年代にはAlvarez父子によるK/T境界での隕石衝突説やRaup達の衝突周期説に促されるように、世界各地の主要な大量絶滅境界について隕石衝突の証拠探しを試みられた。しかし、実際に衝突の可能性を示唆する証拠がみつかった例は、ビッグ5の残り4つの中でもデボン紀後期とトリアス紀末の絶滅事件のみであった。P/T境界については、隕石衝突を断言できる説得力のある測定結果は得られず、1990年代になると大量絶滅の原因として隕石起源説のみを唱えるものは少数派となった。

一方で、固体地球内部に大量絶滅の原因を探る研究者達は、グローバルな寒冷化 (例: 先カンブリア時代末の全球凍結事件)、超海洋の成層と長期酸素欠乏、大規模な火山活動 (例: P/T境界) など、様々なオーダーおよび種類の環境変化要因を提案しているが、まだ統一見解はえられていない。ちなみに筆者はマントルブルームの活動とそれに随伴する異常火山活動を重要視する「ブルームの冬」仮説を提案しているが、それについて述べることは本稿の目的ではないので拙著 (磯崎, 1997) を参照されたい。

そのような状況の中、最近になって、再びP/T境界での隕石衝突説がリバイバルしつつある。その評価はいずれ定まるとしても、一旦消えたかに見えた隕石衝突説が今になって再登場したことは、科学史研究の上で大変興味深い対象となる可能性があるように筆者には思われる。本稿では、最近のP/T境界研究の話題について、隕石衝突説を中心に整理し、それに対する筆者の評価を述べるとともに、このような動向の背景事情を考察する。

## 2. P/T境界事件

世界中の化石産出報告のコンパイルによると、P/T境界直前まで繁栄していた海棲無脊椎動物種の少なくとも80-90%がP/T境界で死滅したとされる。その代表は古生代の示準化石とされる三葉虫、四射サンゴ、フズリナなどであった。いずれも世界中の海に広範に生息していたが古生代ペルム末に同時に姿を消した。その他にも海域・陸域の様々な動植物も絶滅し、ある

<sup>1</sup> 東大・総合文化研究科

いは多様性を大きく減じた。詳しく研究された南中国の煤山 (Meishan) に露出するP/T境界層では150種を越える多様な生物がほぼ同時に絶滅したことが解明されており (Jin et al., 2000 など), 絶滅の直接原因となった環境変化のストレスの強烈さがうかがえる。

特に被害が大きかったのが (古生代型) サングヤウミユリなどの海底で固着生活をしていた動物及び放散虫のようなプランクトン動物であった。それらは強力な体内循環系や遊泳・移動能力をもった動物とは異なり, 生息環境の急激な変化に迅速に対応できなかったと判断される。さらに陸上の植物および昆虫も絶滅を被り, 石炭紀以来栄えた維管束植物の森林もほぼ消失して, P/T境界前後に菌類の短期的な大繁栄がおきた。P/T境界をはさんで, 生物生産の量やパターンがグローバルに変化したことは, 炭素の安定同位体比の急激な変化からも推定されている。このように, 顕生代の中で最大規模の大量絶滅と新しいタイプの生物群の入れ替わりがおきた点で, P/T境界事件は40億年に及ぶ生物進化史の中でも特筆すべき重大事件の一つとして近年改めて注目されるようになった。なおP/T境界事件に関するこれまでの研究のレビューは磯崎 (2002) を参照されたい。

### 3. 隕石衝突説の系譜

P/T境界での大量絶滅事件の研究において, 地球外にその要因を想定するという視点は決してポスト Alvarezの時代に限られたものではない。例えば, 太陽系近傍での超新星爆発あるいは太陽系が銀河系円盤を周期的に横切る時の有害宇宙線照射や彗星爆撃が原因で大規模な絶滅がおきたという解釈は, すでに1950年代から提案されてきた。しかし, これらの解釈はいわば思考実験であって, その当時に具体的な検証方法を示せなかったために, 有効な科学作業仮説とはなりえなかった。

1980年にAlvarez父子の研究グループが, イリジウム他の白金族元素の異常濃集をK/T境界層から発見し,

それを巨大隕石衝突の証拠とみなす説明を試みたことが, 地球科学者コミュニティーに改めて地球外の事象についての考察という意識改革をもたらした。興味深い話題が出てくると, いつの時代にも必ず反対の事を言う人が現れる。K/T境界問題についても, 白金族元素の起源は隕石に限るわけではなく, むしろ地球深部の核に由来するという解釈が対抗案として出された。この地球外起源vs.地球内起源という論争は1990年にメキシコ東部ユカタン半島で衝突クレーター (チクシュループ・クレーター) が発見されるまで続いた。その後, メキシコ湾やカリブ海沿岸で大規模津波堆積物や衝突起源のスフェリユール層が, またハワイ沖で吹き飛ばされた隕石そのものの破片が発見され, K/T境界事件についてはほぼ全貌が明らかにされた観があることは周知のとおりである。

ただし, クレーター発見以前の1980年代において, 特に隕石衝突説が注目を集めた理由は, 相前後して発表された巨大隕石落下が2600万年に一度の頻度で周期的におきるというRaupたちの説明がたいへん魅力的だったからだと考えられる。なぜなら, 同様な機構によって他の大量絶滅事件の原因がすべて説明できる可能性があるだけでなく, 将来おきる衝突事件と環境激変の予測可能性が, その中に含意されていたからである。

このようなK/T境界事件の研究を契機として1980年代に始められたP/T境界層からの隕石衝突の証拠探しは, イリジウム濃集の検出の他にも, 衝撃変成鉱物, テクタイト, 衝突クレーターなどなど, 多様なものに及んだ。一旦は勇み足的にイリジウム濃集が報告されたこともあったが, 最終的にこの試みはことごとく否定的な結果のみが確認された。一方で, 特異な軌道をもつ小天体の周期的到来が天文学的に困難であることがわかったために, 隕石衝突周期説も一気に下火になった。それでも中には長期間成層した (海洋無酸素事件を導く) 海洋構造を壊す機構として海洋への巨大隕石落下を想定したり, あるいは境界層での炭素の安定同位体異常を説明するために隕石ならぬ彗星の衝突の

可能性を示唆した研究者もいた。しかし、いずれも大量絶滅を導きうる可能なシナリオの一つとして衝突を想定しただけで、隕石の関与を直接示す証拠を見つけた例はなかった。

## 4. 隕石衝突の証拠2001

ところが2001年に、直接的な証拠が見つけたという報告が相次いでなされた。一つは、境界層から原始太陽系起源物質としての $^3\text{He}$ の異常濃集を確認したという報告で (Becker et al., 2001a), もう一つは境界層から隕石衝突を示唆するFe-Si-Ni粒子を発見したというものである (Kaiho et al., 2001)。ともに形式論理としてイリジウムの異常濃集以外の具体的証拠を初めて提示してみせたという形をとっているため、これまでの指摘とは異なるというよい。以下に、それらの概要を紹介し、その後に評価を試みる。

### 4.1 $^3\text{He}$ の異常濃集

Becker et al. (2001a)は中国の煤山、日本の篠山およびハンガリーのP/T境界層から採取した岩石試料を分析した結果、煤山および篠山の試料から $\text{C}_{60}$ および $\text{C}_{70}$ フラレーンを見出し、さらにその籠状構造中に捕獲された $^3\text{He}$ の異常濃集を同定したと報告した。 $^3\text{He}$ は太陽系形成時の産物であり、地球周辺にあったものはすでに宇宙空間に散逸したと考えられているため、地球形成後40億年以上が経過した顕生代の地層中には通常のプロセスでは含まれない物質とみなされる。Becker et al. (2001a)は、P/T境界層中の $^3\text{He}$ の異常濃集は地球外から落下した隕石あるいは彗星に由来したと考え、これが大量絶滅の原因であったと結論した。

### 4.2 Fe-Si-Ni粒子

Kaiho (海保邦夫) et al. (2001)は、煤山のP/T境界層から微小なFe-Si-Ni粒子の集積と異常な硫黄同位体比を報告した。とくに前者は他の隕石衝突クレーターから発見された粒子と類似するもので、通常の火山

活動で生じるマグマの温度よりはるかに高温でできた特徴をもつことを強調した。また硫黄の同位体比異常については、地球深部のマントル物質に由来するが、それらは隕石衝突に誘起された火山活動によって大量に地表へともたらされたと解釈した。さらに、軽い硫黄同位体の量からの推定をもとに、P/T境界で直径30-60kmの巨大隕石が落下・衝突し、大量絶滅がおきたと海保たちは主張した。

## 5. 評価

相前後して公表された上記2つのP/T境界隕石衝突説は、互いに引用しあって、彼らの主張を強めようとしているが、本来互いに独立した研究なので、以下では個別に評価を試みる。

### 5.1 $^3\text{He}$ 異常検出への批判

Beckerらの論文がScience誌に公表された後、すぐに出された討論の一つはCalTechの地球化学者Ken Farleyたちによるもので、もう一つは筆者によるものである (Farley & Mukhopadhyay, 2001; Isozaki, 2001)。それらの論点は試料採取層準の誤りと $^3\text{He}$ の分析方法自体に関する疑問という2点に集約される。

まず筆者が指摘した試料採取層準の誤りの問題とは、Becker et al. (2001a)が同一層準から $^3\text{He}$ を含んだフラレーンを同定したという2試料(煤山と篠山)の年代の不一致をさす。煤山セクションはP/T境界の世界標準模式地に指定されているとおり、その年代的な位置付けは自明である。一方、日本の篠山セクションはペルム紀末とトリアス紀の遠洋深海チャートからなるが、ペルム系とトリアス系とは断層によって地層の連続性が途切れており、このセクションにはP/T境界層準は含まれない。Beckerらの論文中には明らかにペルム系最上部からの試料採取位置が示されている。実際のP/T境界はそれより少なくとも80 cm以上上位にあったはずで、それも今は欠落している。したがって、上述の煤山のP/T境界層準とは明らかに異なった層準(す

なわち年代)の試料であることは明白で、彼らが主張する $^3\text{He}$ 異常の同時性は全く事実と反している。そもそも、なぜBeckerたちがP/T境界層を含まない篠山セクションでこのような目的の試料を採取したのかは、筆者には大きな謎である。

一方、Farley & Mukhopadhyay (2001)は $^3\text{He}$ の分析方法・結果に疑問があることを指摘した。彼らはBeckerたちが $^3\text{He}$ の異常濃集を検出したとする煤山の同一試料(厚さ3 cmの地層番号25の火山灰層)を、Beckerたちへの試料提供者でもあるMITのS. Bowringから譲り受け、それを20の部分に分けて $^3\text{He}$ の異常濃集の検出を試みた。しかし、そのどれからも $^3\text{He}$ 異常を示すシグナルは得られなかった。研究室ごとに分析技術の違いはあるとしても、含有量が少ない測定対象についての微妙な分析の場合には複数の研究室でのクロスチェックが不可欠となる。このような場合、しばしば無記名試料によるブラインド・テストがなされるが、Farleyからの私信によればBeckerらはそれを拒否しているという。Science誌上での上記2つのdiscussionに対するBecker et al. (2001b)のreplyの内容は以下のようであった。

- (1)  $^3\text{He}$ の分析はBeckerたちがもつ特殊なテクニックでのみ可能である。また同じ煤山の試料(地層25)といっても $^3\text{He}$ の濃集があるのは底部の一部に限られ、Farleyたちが $^3\text{He}$ の濃集を検出できなかったのは、それ以外の部分を測定したからであろう。
- (2) 篠山のセクションそのものからは正確な年代を示す化石を産しないので、我々はチャートと珪質泥岩との境界をP/T境界と信じる。

このBeckerたちのreplyは、申し込まれた議論に対して正面から答えているようには受け取れない。K/T境界層のイリジウム濃集の問題でなされたように、このような微量物質の分析においては、当然、測定結果の再現性が要求される。しかし、同一地点の厚さ5 cmの地層から採取した20試料を再測定したにもかかわらず、その結果が未検出であったという事実を単なる試料選択の偶然性で説明するには、かなり無理がある。やはり他の研究室での再確認が是非とも必要であろう。

また篠山のサンプルの年代については、日本のP/T境界層のチャートや珪質泥岩から産する化石のデータおよび生層序学的対比を完全に無視して、任意にP/T境界の位置を推定していたことが明白となった。大量絶滅の原因を議論する上で実際の化石の絶滅層準をチェックしないことなど、通常の研究感覚では考えられない。

さらに最近、Renne et al. (2001)は、煤山の地層25が炭質物をほとんど含まない火山灰であることを強調し、その様な地層からフラーレンが産出したこと自体を疑問視した。そもそもP/T境界層準付近からフラーレンを最初に定量的に検出したのは名古屋大学の篠原久典らの研究グループで(Chijiwa et al., 1999)、かれらは愛知/岐阜県境の犬山地域に産するトリアス紀最前期の黒色有機炭素質泥岩から $\text{C}_{60}$  および $\text{C}_{70}$ を同定した。篠原氏の私信によれば、Beckerたちが検出したフラーレンは特徴的なレーザー脱離・イオン化質量(いわゆる、LD-TOF MS)スペクトルをもっており、それから判断すると、そのフラーレンはもともと分析試料中に含まれていた天然のものではなく、分析中に(つまり、レーザー脱離・イオン化時)に測定機械(この場合LD-TOF MS中で)合成されたものである可能性が高い。通常はこのような混乱をさけるために、微量のフラーレンの同定においては、高速液体クロマトグラフィー(HPLC)で厳密かつ定量的にフラーレンの同定を行うのが常識であるが、彼女らはそのチェックを行っていない。Beckerから犬山地域のP/T境界試料の提供を乞うメールをもらった篠原氏は、その問題点を指摘したうえで、試料のクロスチェックを申し出たが、その後返事はないという。この点についても測定結果の再現性のチェックが不可欠であることは明らかである。

以上のように、Beckerたちの報告には、その結論にとって致命的な3つの欠陥(試料の年代、 $^3\text{He}$ の同定、フラーレンの同定)があると考えられる。これらの状況から判断する限り、彼女たちが主張する小天体衝突説は説得力に欠ける。

## 5. 2 地球外起源粒子への疑問

Kaiho et al. (2001)に対する議論は公表後まだ問もないこともあってか、まだ発表されていない。ここでは筆者による評価のみを述べることにする。

海保たちが扱った試料は上述の煤山セクションから採取されたもので、正確にP/T境界層準であることは疑いがない。彼らが地球外天体の衝突を主張する論拠を整理すると、以下の2点に集約される。すなわち、P/T境界で硫黄の安定同位体比が大きく負の方向へシフトすることと、Fe-Si-Ni粒子が境界直下の石灰岩の上部に産することである。

まず硫黄の同位体比が負シフトすることについては、大量の軽い硫黄同位体が地表にもたらされたことを意味するが、これは必ずしも直接地球外物質の供給があったことを示すわけではない。それゆえに彼らも、小天体が地球に衝突し、それによって地球のマントルから軽い硫黄が大量に地表にもたらされたという、アド・ホックな仮定を加えた議論を展開している。小天体の衝突により地殻のみならずマントルまで熔融して異常な火山活動がおきるという解釈は、K/T境界問題以来さまざまな形で議論されてきたが、惑星科学者による衝突エネルギー総量の計算結果は、そのようなマグマ発生機構の現実性をほぼ完全に否定している(Melosh, 2001)。したがって硫黄の同位体比異常は別の要因で導かれたと判断せざるを得ない。

すると、海保たちが天体衝突を主張する上での最重要の根拠は、2-50  $\mu\text{m}$  径のFe-Si-Ni粒子の同定ということになる。彼らは、煤山の試料から得られたFe-Si-Ni粒子が他の隕石衝突クレーターから発見されたもの(Miura et al., 1999)と酷似することを強調した上で、地表においてこのような粒子が形成される機構としては巨大隕石の衝突しかないと論じている。しかし、このFe-Si-Ni粒子の形態や組織については記述がなく、金属(FeとNi)が75-95%を占めるという化学組成のみが記載されている。彼等はこの粒子を隕石衝突由来とみなすゆえに、衝突時に隕石自体が一旦は気化したはずと考え、Feの沸点である2890 $^{\circ}\text{C}$ 以上という通常

のマグマの温度(1200 $^{\circ}\text{C}$ 前後)よりはるかな高温条件での産物であると結論した。

しかし、このFe-Si-Ni粒子については次のような疑問がある。まず、この粒子が本当に隕石衝突起源の物質か否かが地表付近に存在しない他の成分や難揮発性成分の存在比などに基づいて厳密に議論されておらず、いわばア・プリオリ的にそのように断定している点である。上述の気化温度の議論もその仮定の上でなされているので、地球表層のマグマより高温だから隕石衝突起源であると導く論理が循環していることは明らかである。また、たとえ地層中とはいえ地表付近の酸化的環境において、ほぼ90%近く金属(FeとNi)から構成される還元的な微小粒子が、長期間(この場合約2億5千万年間)安定に存在するとは考えられない(永原裕子氏の御教示による)。さらに不可思議な点は、今回同定されたものと同種のFe-Si-Ni粒子が日本の高松から報告されているという記述(Miura et al., 1999)である。今から約10年前に高松平野の地下に埋没した凹地形が発見され、それが過去の隕石衝突クレーターではないかという議論がなされたことがあった。しかし、その後の詳しい地質調査および物理探査によって、それが火山起源のコールドロンであることが確認され、衝突クレーターである可能性はほぼ完全に否定された(長谷川ほか, 2001)。今回、煤山から、その高松の埋没地下凹地から産するものと同種の粒子が産するというは何を意味するのであろうか。煤山産のFe-Si-Ni粒子の評価についてはさらに慎重な検討が必要と考えられる。

このように海保たちが示した複数の根拠は、現時点で直接的な証拠とは考えられない、あるいは疑問点を含むことから、これらについて改めて他者による再チェックが必要と考えられる。ちなみに、彼らは衝撃変成鉱物の未検出およびクレーターの未発見の理由は、巨大隕石が海洋に落下したからだとしているが、これはいわば検証不能の苦しい弁明なので、そのことについてはこれ以上議論する必要はないだろう。

筆者は現時点では小天体衝突説を受け入れるのは

まだ難しいと考えている。Becker et al. (2001b)およびKaiho et al. (2001)はお互い同士が引用しあって、彼らの推定の正当性を主張しようとしているが、一部のマスメディアを除けば、当事者以外の研究者たちからは今のところ積極的な支持は得られていないようである。その最大の理由は、測定結果の両義性、および再現性の欠如にあるのではないかと筆者は考えている。

## 6. 衝突説の裏に

「P/T境界での隕石衝突」説の可否は、今回公表された内容の再測定や確認を通していずれ明らかになるであろう。ただ、その結果とは無関係に、今回の一連の報告および議論から、我々は学ぶべきものがあるように思われる。筆者の感想を一言で述べると、「ああ、例の火星隕石からの生物化石発見騒ぎの再来だな」というところであろうか。この場合の類似点とは、成果公表の時点で列挙された証拠はいずれも両義的なものばかりで、一つとして結論に直結するクリティカルなものがないこと、また極めてマスコミ受けがよいことの2点である。

第一の点については、すべての分野の科学論文はクリティカルな証拠を最低一つ必要とすることは論を待たないので、基本的には著者らの研究姿勢の問題といえる。むしろ、掲載した専門誌の査読プロセスの公平さとも無関係ではない。

しかし今回のBeckerたちの場合は、事実を押し曲げてまでもといった態度が見え隠れするので、むしろ第二の点の方が重要かもしれないという印象を受けた。地球科学の分野においては、「恐竜」、「隕石衝突」、「絶滅」、「地球外生命」などのマスコミ受けするキーワードが少なからずある。本来自然科学の研究は、そのような世情とは無関係に進むべきものだが、なかにはマスコミ受けという魔力に誘惑される研究者もいるようである。一方で、マスコミ側の報道内容にもしばしば批判能力の欠如が感じられ、さまざまな研究者の発言

を無批判に垂れ流している弊害がなきにしもあらずとかがえる。内外の科学ジャーナリズムのさらなる成熟に期待したい。

最後にもう一点指摘しておきたいことがある。Beckerたちが試料採取した篠山セクションは兵庫県篠山町の山間の小さな農道沿いに露出するもので、合衆国の研究者が単独に試料採取したとは思われない場所にある。またその詳細な位置を記述した論文は引用されていないことから、彼等は論文を手で独自に出かけたのではなく、おそらく誰か日本の研究者が現地へ案内したのだと思われる。しかし、その論文の謝辞には明記されていない。誰が、なぜ「そこにP/T境界層がある」という事実無根の、またどの論文にも記述されていない内容を彼等に説明したのかを筆者は知る由もないが、結果としてBecker et al. (2001a)のような誤った認識で日本の試料が用いられたことは極めて残念といわざるを得ない。P/T境界当時の超海洋中央部の遠洋深海で堆積した地層は世界中で唯一日本から報告されており、いわば日本の学術的財産といえる。外国の野心的な研究者がこのように貴重な試料に興味をもつのは当然であり、我々も彼らと共同研究をするのに吝かであってはならない。ただし、その場合にはあくまでも正確な知識を提供することが前提となろう。以上述べてきたように、今回の「P/T境界隕石衝突」騒ぎはいろいろな意味で我々が目指すべき良質のサイエンスとは何かを考え直すためのよい機会になるのではないだろうか。

## 謝辞

本報告の内容について議論して下さった名古屋大学の篠原久典、CalTechのJoe Kirschvink、Ken Farley、および東京大学の永原裕子、田近英一の各氏に感謝する。

## 主要参考文献

- Becker, L. et al., 2001a, *Science* 291, 1530-1533.
- Becker, L. et al., 2001b, *Science* 293, 2343a.
- Chijiwa, T. et al., 1999, *Geophys. Res. Lett.* 26, 767-770.
- Farley, K.A. & Mukhopadhyay, S., 2001, *Science* 293, 2343a.
- Isozaki, Y., 2001, *Science* 293, 2343a.
- Jin, Y.G. et al., 2000, *Science* 289, 432-436.
- Kaiho, K. et al., 2001, *Geology* 29, 815-818.
- Melosh, 2001: *Geol. Soc. Amer. Abst. & Program* 33-6, A433.
- Miura, M. et al., 1999, *Jour. Mat. Proc. Tech.* 85, 188-191.
- Renne, P. et al., 2001, *Earth Planet. Sci. Lett.* 193, 539-547.
- 長谷川修一ほか, 2001, 地球惑星科学関連合同学会要旨, Ag-004.
- 磯崎行雄, 1997, 岩波「科学」67, 543-549.
- 磯崎行雄, 2002, 熊沢峰夫ほか編「全地球史解説」第6章 東大出版会 (印刷中).