

地球外天体衝突による大量絶滅—なぜ白亜紀／古第三紀境界だけで起きたのか？—

Mass extinction caused by extraterrestrial impact: Why did it occur only at the Cretaceous/Paleogene boundary?

後藤和久* 田近英一**

Kazuhisa Goto* and Eiichi Tajika**

2010年8月23日受付.

2011年2月10日受理.

* 千葉工業大学 惑星探査研究センター
Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Chiba 277-8561, Japan

Corresponding author: K. Goto,
kgoto@perc.it-chiba.ac.jp

Abstract

In the past 30 years, many researchers have investigated the relationship between extraterrestrial impacts and mass extinction events of the Phanerozoic. Nevertheless, such a relationship has only been confirmed for the Cretaceous/Paleogene (K/Pg) boundary at 65.5 Ma. Here, we review existing geological evidence for impact events during the Phanerozoic, recent advances in studies of impact frequency, and the distribution of crater size on the Moon. We conclude that the magnitude of the K/Pg boundary impact was exceptionally large among Phanerozoic events, and may have been a once in 500–1000 Myr event. The mechanism of extinction at the K/Pg boundary, associated with extraterrestrial impact, remains poorly understood, in part because the size and formation process of the impact crater (Chicxulub Crater) are poorly constrained. The recovery of drillcore from within the crater is required to clarify the mechanism of the K/Pg mass extinction.

Keywords: extraterrestrial impact, Cretaceous/Paleogene boundary, Chicxulub Crater, mass extinction, asteroid, impact frequency

はじめに

Alvarez et al. (1980) は、約 6550 万年前の白亜紀／古第三紀（以下、K/Pg; 従来は白亜紀／第三紀 = K/T と呼ばれていたが、国際地質科学連合・国際層序委員会による地質年代の定義の改正に伴い名称が変更された）境界に堆積した粘土層中に、地球表層には極微量しか存在しない白金族元素が異常濃集していることを発見した。白金族元素は地球外天体によって持ち込まれたと考えられ、彼らは白亜紀末に直径約 10 km の小惑星が地球に衝突し、それによって K/Pg 境界の大量絶滅が引き起こされたという仮説を提唱した。その後、世界各地の K/Pg 境界層からイリジウムの異常濃集や、天体衝突によってのみ生成される衝突起源物質（衝撃変成石英や衝突ガラス、スフェリュールなど）が次々に報告された（例えば、Smit and Klaver, 1981; Smit and ten Kate, 1982; Bohor et al., 1984）。そして 1991 年には、現在のメキシコ・ユカタン半島北部に、直径約 180 km の埋没した衝突クレーター（チチュルブ (Chicxulub)・クレーター）が発見された (Fig. 1, Hildebrand et al., 1991)。チチュルブ・クレーターが衝突起源であることや、K/Pg 境界での生物の大量絶滅と衝突との同時性は、もはや疑う余地がなく、同クレーターは K/Pg 境界の衝突クレーターとして広く認知されている（例えば、後藤, 2005; Schulte et al., 2010）。

Alvarez et al. (1980) の仮説は、地球外要因により地質

学的には一瞬ともいえる短い時間で大量絶滅が起きうる、という新たな考えを地質学・古生物学界にもたらした。これは、当時としては、極めて斬新な考えであった。

さらに、Alvarez et al. (1980) は、顕生代の 5 大大量絶滅すべてが天体衝突によって引き起こされた可能性にまで言及している。その根拠は、カリフォルニア工科大学の故 E. Shoemaker 博士の私信として引用されている、「直径約 10 km の天体は、およそ 1 億年に 1 度の頻度で地球に衝突する」というものである。つまり、顕生代の約 5.4 億年の間に、K/Pg 境界での天体衝突と同規模の衝突が 5 回程度起きていても不思議ではなく、この 5 回の衝突が 5 大大量絶滅に相当するのではないかというわけである。1980 年代から 1990 年代前半にかけて、K/Pg 境界での天体衝突の証拠が次々と発見されたのに伴い、Alvarez et al. (1980) の推論は多くの研究者を惹きつけ、K/Pg 境界以外の絶滅境界でも天体衝突の痕跡がないか、盛んに探求されるようになった。そして、約 2.5 億年前のペルム紀／三畳紀 (P/T) 境界（例えば、Retallack et al., 1998; Becker et al., 2001, 2004; Kaiho et al., 2001）や約 2.0 億年前の三畳紀／ジュラ紀 (T/J) 境界（例えば、Olsen et al., 2003）などでの大量絶滅イベントが天体衝突によって引き起こされた、という可能性を指摘する論文が幾つか出されている。

しかし、K/Pg 境界以外の絶滅境界で大規模な天体衝突が起きたという説は、後述のようにいずれも証拠に乏しく、反

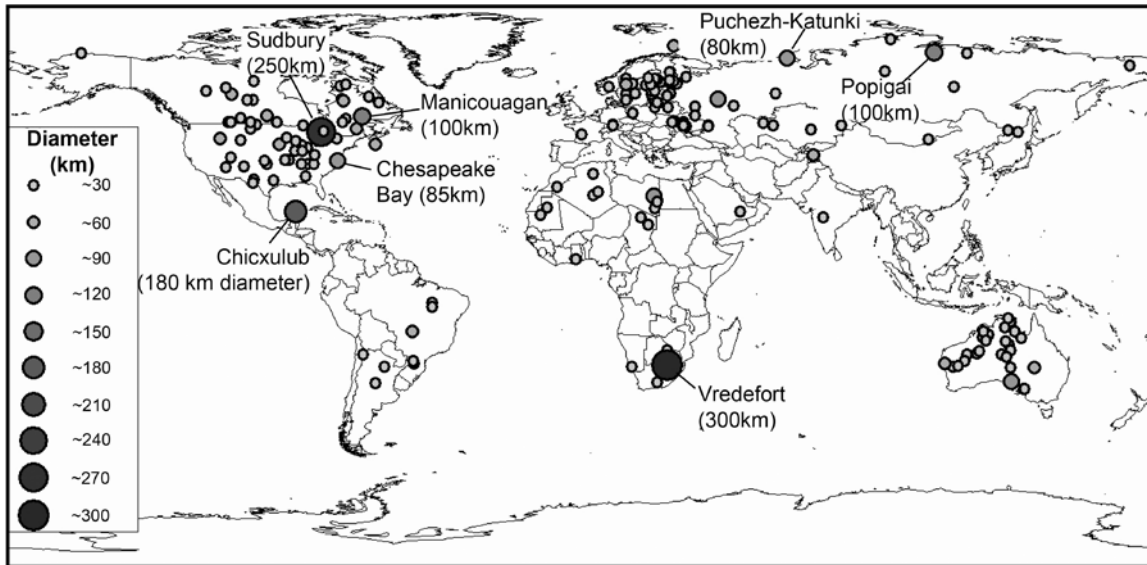


Fig. 1. Distribution of impact craters on Earth (from the Earth Impact Database: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>). Up to 175 craters have been discovered. Known impact craters are heterogeneously distributed throughout North America, Europe, and Australia.

論が相次いでいる。また、衝突クレーター形成年代と絶滅境界との相関については1980年代から多くの議論があるものの（例えば、Rampino and Stothers, 1984）、衝突クレーターの形成年代を正確に決定すると、K/Pg境界以外では同時性が認められないことがわかってきた（例えば、Jansa, 1993; Poag, 1997a; Tanner et al., 2004）。

以上のように、Alvarez et al. (1980)の報告以後、30年にもわたり多くの研究者が衝突の痕跡を探したにもかかわらず、少なくとも現時点においては、大量絶滅との同時性が確認された地質境界はK/Pg境界以外には存在しない。この結論は、顕生代において大量絶滅を引き起こすほどの大規模天体衝突はK/Pg境界でしか起きなかったことを意味し、Alvarez et al. (1980)の推論とは矛盾する。

本論文では、この問題に焦点を当て、天体衝突と大量絶滅、そして天体衝突頻度に関する最近の研究を整理し、大量絶滅における天体衝突の役割についての議論を行う。

チチュルブ・クレーターが白亜紀／古第三紀境界の衝突クレーターとして認知された理由

K/Pg境界以外の絶滅境界における天体衝突の可能性を議論する上で、どのような証拠に基づいてチチュルブ・クレーターがK/Pg境界における衝突イベントによって形成されたものであると認められたのか、そして世界各地のK/Pg境界層に含まれる衝突起源物質がチチュルブ衝突起源であると認められたのか、その理由を確認する必要がある。そこで、K/Pg境界における天体衝突説が裏付けられた経緯についてまず整理する。

K/Pg境界において、地球外物質起源であると考えられるイリジウムの異常濃集や、衝突起源物質が世界各地の地層から報告されており、2010年時点で約350ヶ所にも達する

(Claeys et al., 2002; Schulte et al., 2010)。白亜紀末から古第三紀初期にかけての地層が連続的に堆積しているほとんどの場所で、天体衝突の痕跡が見つかるといっても過言ではない。

チチュルブ・クレーター内部は、大量の衝突起源物質で埋積されており、同クレーターが衝突起源であること有力な証拠となっている（例えば、Hildebrand et al., 1991; Sharpton et al., 1996; Dressler et al., 2003; Goto et al., 2004）。また、チチュルブ・クレーターの直径から推定される衝突天体のサイズは直径10 km程度であると考えられるが(Hildebrand et al., 1991)、これはAlvarez et al. (1980)がイリジウムの濃集量から推定した衝突天体のサイズとよく一致する。さらに、ハイチで報告されたK/Pg境界層中の衝突ガラス片の微量元素組成および形成年代は、チチュルブ・クレーター内の衝突メルト片の組成および形成年代と一致する(Swisher et al., 1992; Smit, 1999)。これは、チチュルブ衝突起源の物質が、2000 km以上離れたハイチまで飛来して堆積したことを示す直接的証拠である。世界中のK/Pg境界層から報告されている衝撃変成石英のサイズや含有量は、チチュルブ・クレーターを中心に系統的に減少する(Fig. 2, Claeys et al., 2002; Morgan et al., 2006; Nakano et al., 2008)。このことは、世界中のK/Pg境界層中で見つかる衝撃変成石英が、チチュルブ・クレーターから放出されたことを強く示唆する。現在では、チチュルブ衝突は世界中に衝突起源物質を堆積させるほどの大規模衝突だったことを、多くの研究者が認めている（例えば、Schulte et al., 2010）。

一方、チチュルブ衝突がK/Pg境界の30万年前に起き、大量絶滅とは無関係である、とする説が過去に提唱されたことがあるが(Keller et al., 2004, 2007)、この仮説には多

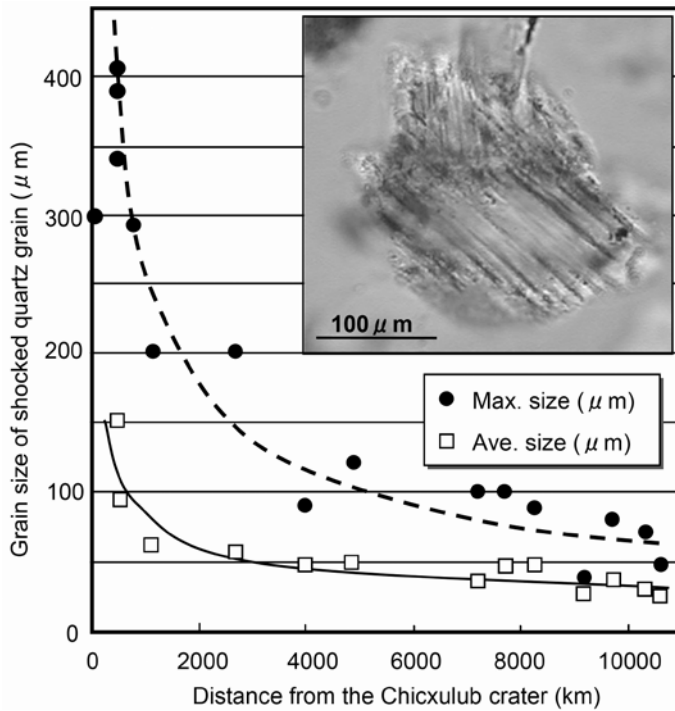


Fig. 2. Relationship between the average/maximum size of shocked quartz grains (photo: DSDP site 536) and distance from the Chicxulub Crater at the K/Pg boundary (based on Morgan et al., 2006; Nakano et al., 2008). The size of shocked quartz grains shows a systematic decrease with increasing distance from the crater, suggesting they originated from the Chicxulub impact.

くの問題点が指摘されており極めて根拠に乏しいといわざるを得ない (Arz et al., 2004; Goto et al., 2004; Smit et al., 2004; 後藤, 2005; Schulte et al., 2006, 2008, 2009, 2010). また、衝突起源物質を含む堆積層の直上で白亜紀型の浮遊生有孔虫が産出することが知られており、衝突による突発的絶滅とは矛盾すると指摘されていたが (例えば, Keller, 1988), Kaiho and Lamolda (1999) や Norris et al. (1999) の研究により、それらの浮遊生有孔虫は再堆積であり、衝突説と矛盾しないことが示されている。

チチュルブ・クレーター内部の堆積物中の衝突メルト片の年代は 65.01 ± 0.08 Ma を示し K/Pg 境界での大量絶滅のタイミングと一致すること (Swisher et al., 1992) を考慮すると、チチュルブ衝突と K/Pg 境界の大量絶滅のタイミングは一致しているとみなせる (例えば, Schulte et al., 2010). ただし、後述のように、衝突に伴う K/Pg 境界での大量絶滅のメカニズムの詳細については、未だ十分には解明されていない。

他の絶滅境界での天体衝突の可能性はなぜ認められないのか？

K/Pg 境界以外の大量絶滅境界においても、天体衝突の証拠とされるものがいくつか報告されている。ペルム紀/三畳紀 (P/T) 境界や三畳紀/ジュラ紀 (T/J) 境界がその代表例である。

海成無脊椎動物種の 80~90% が絶滅した P/T 境界では、Becker et al. (2001) が兵庫県篠山地域を含む数地点の P/T 境界層からフラレーン分子を報告し、そこに含まれるヘリウム 3 が地球外起源だとする仮説を提唱した。その後も、彼女らの研究グループは、P/T 境界における天体衝突の痕跡

だとするものを次々と報告している。2004 年には、オーストラリアのベドゥー (Bedout) 構造が天体衝突クレーターであり、その形成年代が P/T 境界での大量絶滅と一致することから、それが P/T 境界での大量絶滅を引き起こした衝突クレーターである、という論文を発表した (Becker et al., 2004)。

しかし、彼女らの一連の論文に対しては、数多くの反論が出されており、一般には受け入れられていない。その理由は、彼女らが報告したフラレーン、衝撃変成石英、衝突メルト片、衝突クレーター等が、第三者による追試をどれ一つとしてパスできないことにあり (例えば, Farley and Mukhopadhyay, 2001; Glikson, 2004; Renne et al., 2004; Wignall et al., 2004), そもそも測定された試料を採取した層準が P/T 境界層ではないという根本的な問題も指摘されている (Isozaki, 2001; 磯崎, 2002)。

また、Kaiho et al. (2001) は、中国・煤山の P/T 境界層から、硫黄同位体比の負異常と Fe-Si-Ni 微粒子を報告し、衝突起源の可能性を指摘したが、硫黄同位体比の負異常は必ずしも天体衝突が起きたことを示すわけではないこと (磯崎, 2002), Fe-Si-Ni 微粒子は必ずしも天体衝突起源ではないこと (磯崎, 2002; Koeberl et al., 2002), などの反論がある。

一方、T/J 境界では、イリジウムの異常濃集が報告されている (例えば, Olsen et al., 2003)。P/T 境界の場合とは異なり、T/J 境界では複数の研究グループによってイリジウムの異常濃集が検証されている (例えば, Tanner and Kyte, 2005; Tanner et al., 2008)。

問題は、イリジウムの濃度がいずれも 200 ppt 程度と、K/Pg 境界の 10 分の 1 程度にすぎないことである。さらに、

Table 1. Five largest impact craters during the Phanerozoic and their formation ages, based on Swisher et al. (1992) and Earth Impact Database (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>).

Crater	Size (km)	Age (Ma)	Country
Chicxulub	180	65.01±0.08	Mexico
Manicouagan	100	214±1	Canada
Popigai	100	35.7±0.2	Russia
Chesapeake Bay	85	35.5±0.6	USA
Puchezh-Katunki	80	220±10	Russia

隕石はCr/Ir比およびNi/Ir比が極めて低いことが特徴であり、K/Pg境界層中の試料におけるこれらの値は、隕石に近いことがわかっているが、これに対してT/J境界のCr/Ir比およびNi/Ir比は隕石の値から大きくずれている(White and Sanders, 2005)。この時代には、大規模な洪水玄武岩(Central Atlantic Magmatic Province: CAMP)の噴出が起きているが、T/J境界でのイリジウム異常濃集は大規模火成活動に伴う岩石(洪水玄武岩)の値のばらつき範囲内に収まり、この洪水玄武岩が起源だと考えても説明がつく(White and Sanders, 2005)。

その他の絶滅境界(例えば、デボン紀後期など)においても、全球に影響を及ぼすような大規模天体衝突を示唆する証拠は報告されていない。このように、K/Pg境界以外の大量絶滅境界で報告されている天体衝突の証拠の多くは、第三者によって確認されていないこと、わずかな数ヶ所の地層でしか確認されないこと、イリジウムや衝撃変成石英などの各種証拠が揃っていないわけではないこと、イリジウムの濃度が低くて他の要因でも説明がつくこと、など多くの問題点が挙げられる。

今後も、P/T境界やT/J境界などを中心に、天体衝突の証拠とされるものが発見されるかもしれない。しかし、こうした証拠は当然のことながら第三者による追試に耐えるものでなければならぬ。さらに、天体衝突の確かな証拠が大量絶滅と同層準から発見されたとしても、それが大量絶滅を引き起こすような規模の天体衝突の証拠としてすぐに認められるわけではない。

例えば、米国アリゾナ州のバリンジャー隕石孔は、直径1.2 kmの小さな天体衝突クレーターであり、このサイズの天体衝突はおよそ5千年に一度の頻度で起きる(Stuart and Binzel, 2004)。そして、このクレーター周辺にも衝撃変成石英が報告されている(Robertson, 1980)。このサイズの衝突クレーターの多くは、長い地球の歴史の中で風化やテク

トニックな作用によって消えてしまうが、衝撃変成石英はクレーター周辺の地層中に保存される。一方、大量絶滅境界を決める年代精度に±10万年程度の誤差があると仮定すると、この規模の衝突によって生成された衝撃変成石英はある絶滅境界付近の40地点程度で存在してもおかしくないということになる(20万年の誤差期間中に5千年に一度の頻度で衝突が起こることを仮定した)。つまり、ある絶滅境界で衝撃変成石英が見つかったとしても、数箇所で見つかる程度では、局所的な小規模衝突によって生成された可能性をまず考えるべきであろう。

K/Pg境界においては、世界各地のK/Pg境界層で見つかる衝撃変成石英のサイズや含有量が、クレーターから離れるにつれて減少する特徴を持つ(Fig. 2)。つまり、K/Pg境界の場合、世界中で見つかる衝撃変成石英はチチュルブ衝突起源だと考えることで、サイズ・空間分布が整合的に説明できる。複数の小規模衝突により衝撃変成石英が形成されたとすれば、このような系統的な分布にはならないので、その可能性を否定できるのである。

衝突の規模と大量絶滅の関係

それでは、どの程度の規模の天体衝突であれば、大量絶滅を引き起こしうるのか。これは大変難しい問題である。なぜなら、K/Pg境界でさえ、チチュルブ衝突との同時性は認められるものの、どのように絶滅が引き起こされたのか、そのメカニズムは未だに解明されていないからである(例えば、Schulte et al., 2010; 高橋・後藤, 2010)。

一方、天体衝突が起きているにもかかわらず大量絶滅が生じていないのであれば、その規模の天体衝突では大量絶滅を引き起こすには不十分だと判断できる。Table 1に、現在までに発見されている顕生代の天体衝突クレーターのうち、大きい順に5つを示した。地球上の7割を覆う海洋域での衝突クレーターの探査は十分なされていない上に、顕生代にお

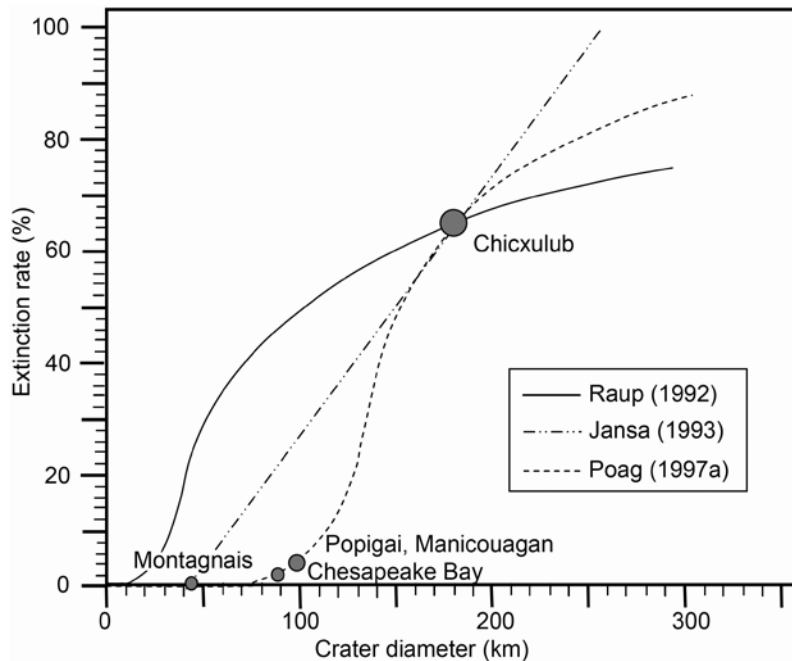


Fig. 3. Relationship between impact crater diameter (km) and mass extinction rate (%) (based on Raup, 1992; Jansa, 1993; Poag, 1997a).

いて生産された海洋底の大部分はプレートとともに沈み込んでしまっているため、海洋底で形成された衝突クレーターのはほとんどは消失してしまっている可能性が高い。いずれにせよ、顕生代では、チチュルブ・クレーターのサイズが直径180 kmと最も大きく、K/Pg境界の大量絶滅と同時期である。

三疊紀末頃には、直径100 kmのマニクアガン (Manicouagan)・クレーターおよび直径80 kmのプचेジ・カツンキ (Puchezh-Katunki)・クレーターが形成されているが、これらの形成年代はT/J境界の絶滅イベントより1千万年以上も前である (Tanner et al., 2004; Pálffy, 2004)。T/J境界以前のノリアン期末にも絶滅イベントが起きていることが知られているが、これらの衝突クレーター形成は、それより100~200万年も前のことである (Tanner et al., 2004)。ただし、プचेジ・カツンキ・クレーターの形成年代は推定の幅があるので (Pálffy, 2004)、詳細な議論には今後の研究の進展を待たなければならない。

一方、直径100 kmのポピガイ (Popigai)・クレーター、および直径85 kmのチェサピークベイ (Chesapeake Bay)・クレーターは、いずれも始新世末頃に形成されているが、やはり始新世末の絶滅イベントより100~200万年も前である (例えば、Poag, 1997b; Farley et al., 1998; Vonhof et al., 2000)。

このように、顕生代において大量絶滅との同時性を見出せる衝突クレーターはチチュルブ・クレーターのみであり、直径100 km程度のクレーターを形成する天体衝突では、大量絶滅を引き起こすには不十分であることがわかる。

Raup (1992) は、衝突クレーターのサイズと絶滅率の関係を可視化するため、有名な“キル・カーブ (Fig. 3)”を提案した。当時はチチュルブ・クレーターしかコントロール

ポイントがなかったものの、その後Jansa (1993) やPoag (1997a) によって新たなデータが加えられ、改良されている。それでも、直径100 kmを超える衝突クレーターは、いまだにチチュルブ・クレーターしか発見されておらず、どのようなカーブになるかはよくわからない。

また、衝突クレーターの規模だけで議論してよいわけでもない。例えば、Walkden and Parker (2008) は、マニクアガン・クレーターが形成された地点は、もともと生物多様性が低い上に陸上であったのに対し、チチュルブ・クレーターが形成された地点は生物多様性が高い上に、炭酸塩岩や硫酸塩岩が厚く堆積する浅海底だったため、環境への負荷が大きかったことを指摘している。そのため、天体衝突と大量絶滅の関係を議論する上で、衝突地点の岩石組成や生物の多様性も考慮した“脆弱性”を、重要なパラメータとするべきだと述べている (Walkden and Parker, 2008)。

地球外天体の衝突頻度

ここまで述べてきたように、多くの研究者が絶滅境界で天体衝突の痕跡を長年にわたって探してきたにもかかわらず、天体衝突と大量絶滅の厳密な同時性が見出せるのは、これまでのところK/Pg境界しかない。さらに、他の絶滅境界で見つかっている天体衝突の痕跡は、衝突起源物質の認定が疑わしいものが多い上に、報告例が特定のグループに偏っている。したがって、例え同時性が認定されたとしても、第三者によって確認されない限り、天体衝突が生じたということ自体、受け入れることが難しい。

一方、直径100 km程度のクレーターを形成する規模の天体衝突は大量絶滅には結びついておらず、大量絶滅を引き起こすためには、それ以上の規模の衝突でなければ不十分なのである。もちろん、100 km以上のクレーターが今後発

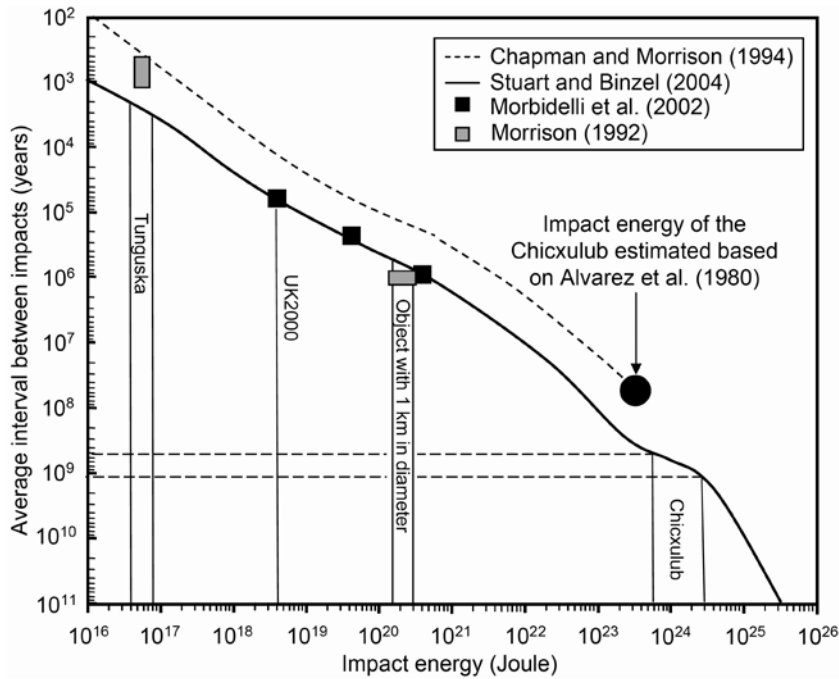


Fig. 4. Relationship between impact energy (Joule) and average impact frequency (years) (based on Chapman and Morrison, 1994; Stuart and Binzel, 2004). Black and gray squares denote the frequencies estimated by Morbidelli et al. (2002) and Morrison (1992), respectively.

見られる可能性は否定できないが、5大絶滅境界において全球的な影響を及ぼしたと考えられる天体衝突の確実な証拠が、これまでのところK/Pg境界でしか見られないことを考えると、K/Pg境界以外で大量絶滅を引き起こしうる規模の衝突があったとは考えにくい。

以上の事実は、チチュルブ衝突が大量絶滅を引き起こしうる衝突エネルギーを有する、顕生代で唯一の衝突現象だったことを暗に示唆し、Alvarez et al. (1980) が指摘した「顕生代の5大絶滅は、すべてK/Pg境界での衝突と同規模の天体衝突により引き起こされたのではないか」という推論に否定的なものである。さらに、Shoemakerのいう「チチュルブ衝突級の天体衝突は1億年に1度の頻度で起きる」という推定にも矛盾する。したがって、そもそも天体の衝突頻度がどのように推定されているのかを、もう一度検証する必要がある。

地球外天体の地球への衝突頻度は、主として地球近傍天体 (Near-Earth Object; NEO) の観測データに基づいて推定されている。1980年代から、地球に接近し軌道交差を起こす可能性のあるNEOの危険性が認識され (Shoemaker, 1983; Chapman and Morrison, 1994)、スペースガード計画などにより地球に衝突する危険性のある天体の監視が行われるようになった。2010年5月の時点で7,705個のNEOが地上から観測され、衝突頻度が推定された (例えば、Shoemaker, 1983; Chapman and Morrison, 1994; Brown et al., 2002; Stuart and Binzel, 2004などを参照のこと)。衝突エネルギーを推定するためには、衝突天体の質量と衝突速度の推定が必要である。そこで、まず地上から観測されたNEOのアルベドを仮定してサイズを決め、密度を仮定することで質量を求める。そして、モンテカルロ法を用いた軌道計算を多数行い、衝突速度および衝突確率を求め

る。こうした手法によって、衝突頻度と衝突エネルギーの関係を求めることができる。

このように、衝突頻度と衝突エネルギーの関係はいくつかの仮定を用いて推定されるものの、その関係はべき乗則として近似することができるため、自然災害としての天体衝突のリスク評価など広く利用されるようになった (Chapman and Morrison, 1994)。

Fig. 4の点線は、Chapman and Morrison (1994) が Shoemaker et al. (1990) のスケーリング則を用いて作成した、衝突頻度と衝突エネルギーの関係である。この図から、あるサイズの天体がどれくらいの頻度で地球に衝突するのかを推定できる。ただし、チチュルブ級の天体衝突がどれくらいの頻度で起きうるかを考える場合、チチュルブ衝突のエネルギーを仮定する必要がある。Fig. 4に示されている黒丸は、Alvarez et al. (1980) による衝突エネルギーの推定値 (4×10^{23} J) である。この図を見る限り、Shoemakerが指摘したように、チチュルブ級の天体衝突は、およそ1億年に1度程度の割合で生じる可能性があるということになる。

ただし、Chapman and Morrison (1994) で述べられているように、彼らはあくまでAlvarez et al. (1980) の初期の衝突エネルギーの推定値を仮定したのであり、これより衝突エネルギーが大きく、したがって衝突頻度が低い可能性は十分ある。実際、Chapman and Morrison (1994) は、チチュルブ衝突のエネルギー次第では、10億年に1度の超大規模衝突であった可能性があることも指摘している。

チチュルブ衝突は10億年に1度の大衝突だったのか？

衝突頻度を推定する上で様々な仮定が必要なことは上述の通りである。もちろん、仮定が変われば衝突頻度の推定結果

は変化する。1990年代以降、地球からのNEOsの観測技術は格段に向上し、それまでの10倍超もの個数のNEOsが発見された(例えば、Stuart, 2001)。しかし、一方でほとんどの観測はNEOsの光度(等級)に関するものであり、アルベドやサイズを直接観測した例はきわめて少ない。当然のことながら、仮定するアルベドの値によって、推定されるサイズは大きく変わってしまう。また、小惑星の密度はさまざまな値が想定されるため、質量の推定値にも大きな不確定性が存在する。

Stuart and Binzel (2004)は、NEOsのスペクトルに基づく分類とそれぞれのアルベド分布の推定によるバイアス補正を行うことで、最新の観測データを使ってNEOsのサイズ分布や衝突頻度の見直しを行った。その結果が、Fig. 4に示した実線である。Chapman and Morrison (1994)の結果と比較すると、全体的に衝突エネルギーが弱くなる方、または衝突頻度が低くなる方にシフトしていることが分かる。

この結果は、アメリカ国防総省による極小天体(1~10 mサイズ)の大気圏における爆発現象の観測データや火星の観測データなどに基づく衝突頻度の推定結果とも調和的であり、その後の研究でも支持されている(Michel and Morbidelli, 2007)。

さらに、チチュルブ衝突のエネルギーも、クレーターサイズや形成過程を考慮して、 $6.7 \times 10^{23} \sim 3.4 \times 10^{24}$ Jという推定値が提案されている(Pope et al., 1997)。衝突エネルギーに大きな推定の幅があるのは、後述のようにチチュルブ・クレーターのサイズや形状、ターゲットの組成などの正確な推定が難しく、数値計算とあわせて衝突エネルギーを推定する際に大きな誤差が生じるからである。しかし、最近の推定結果はAlvarezらの見積りよりも最大一桁も衝突エネルギーが大きいたことが示唆されているという点は重要である。

こうした衝突頻度および衝突エネルギーに関する最近の推定結果に基づけば、チチュルブ衝突規模の天体衝突は、5~10億年に1度程度であった可能性が高いということになる(図4; Stuart and Binzel, 2004)。

ちなみに、小惑星の族のひとつであり炭素質コンドライトの特徴を持つバティステーナ族の起源に関する研究によると、その母天体はいまから1億6000万年前に別の小惑星との衝突によって破壊された可能性が高い(Bottle et al., 2007)。実は、これが過去1億年間に於ける衝突フラックスの増加の原因であり、90%以上の確率でチチュルブ衝突をもたらした原因でもあるという(Bottke et al., 2007)。もしそれが本当であれば、チチュルブ衝突は、小惑星帯における偶発的な出来事によってもたらされた事象ということになる。

ところで、チチュルブ衝突の衝突地点の海域の水深は、従来200 m程度と考えられていた(Hildebrand et al., 1991)。しかし、最近の地震波探査による研究の結果、衝突地点であるユカタン・プラットフォームは北東に傾斜した斜面であり、北東部分は水深2000 m程度の深海域であった可能性が指摘されている(Gulick et al., 2008; Collins et al.,

2008)。衝突エネルギーの一部は海面および海水中で解放されるため、海に衝突する場合には、陸に衝突する場合と比べて、最終的に形成されるクレーターのサイズが小さくなる(Davison and Collins, 2007)。そして、衝突エネルギーは同じでも、水深が深いほど衝突クレーターのサイズは小さくなり、場合によっては衝突クレーターが形成されない。チチュルブ・クレーター周辺海域の水深が従来より深かったとなると、衝突エネルギーの見積もりは過小評価されている可能性がある。チチュルブ衝突規模の場合に、水深効果がどの程度あるのかを含め、数値計算に基づく今後の研究の進展を待たなければならないが、チチュルブ衝突のエネルギーは、従来の見積もりよりも大きいかもしれない。そうになると、チチュルブ衝突は、地球史(38億年前以降)上でも極めて例外的な大衝突だったかもしれない、ということになる。

太陽系固体天体表面にみられるクレーターサイズ

前章で述べたように、天体衝突頻度に関する最近の研究に基づけば、チチュルブ級の天体衝突は5~10億年に1度という、極めてまれな現象だったと思われる。これは、前述のように、顕生代では大規模衝突の痕跡はチチュルブ衝突しか見つからない、という地質学的記録とも整合的である。

一方、月や火星のクレーターに着目すると、直径数百km~数千kmの巨大衝突盆地が多数観測されている。地球には、月や火星と同じように地球外天体が衝突していただけでなく、その重力効果を考慮すると、衝突頻度も衝突エネルギーもずっと大きく、地球上でも直径数百km~数千kmの衝突盆地が形成されても良いはずである。

しかし、月面の数百km以上の衝突クレーターは、ほぼ全て後期隕石重爆撃期(40~38億年)以前に形成されている(Storm et al., 2005)。それに対して、38億年から現在までに月、火星、金星の表面で形成されたクレーターの直径は、最大でも約300 km程度である。過去5億年に限ってみると、これらの天体で形成されたクレーターの最大直径は、金星のミード・クレーター(Mead crater)の280 kmである(例えば、Koeberl et al., 2002)。月や火星での衝突クレーターサイズと地球上でのサイズは、大気や重力などの条件が異なるために単純比較はできない。地球上では、38億年前から現在までということになれば、直径300 kmのフレデフォート・クレーター(20億年前、南アフリカ)、直径250 kmのサドベリー・クレーター(18.5億年前、カナダ)、直径180 kmのチチュルブ・クレーター(6550万年前、メキシコ)のように、直径200~300 km級の天体衝突クレーターが3つ報告されている。これらのサイズは、後期隕石重爆撃以降の月、火星、金星表面の、最大級の衝突クレーターのサイズと同程度の規模である。これ以外にも、すでに消失した海洋プレート上に同規模の衝突が起きた可能性は、特に原生代や始生代においては否定できない。実際に、約26億年前ごろに形成されたスフェリユール層や津波堆積物が、オーストラリアと南アフリカで報告されており(Hasler et al., 2000; Simonson et al., 2009)、海洋への大規模衝突が起きた可能性が示唆されている。しかし、少なくとも

顕生代においては、同様の報告は見られない。

以上をまとめると、チチュルブ衝突は、顕生代のみならず地球史の中でも例外的に大きい衝突現象で、この規模の衝突はおそらく顕生代で一度とみなされる。そして、天体の衝突頻度や、太陽系固体天体表面のクレーターサイズと比較すると、チチュルブ規模の衝突が5~10億年に一度というごくまれな現象だと考えても矛盾はない。

K/Pg境界研究はどこまで進んでいるのか？

直径100 km超の衝突クレーターは、顕生代においておそらくK/Pg境界以外になく、大量絶滅を引き起こす規模の衝突として研究対象になりうるのも、いまのところチチュルブ・クレーター以外にはない。そのため、チチュルブ衝突とK/Pg境界での地球表層の環境変動、そして大量絶滅の因果関係を明らかにすることこそが、天体衝突が生物に及ぼす影響を評価する唯一の方法といえる。

では、K/Pg境界に関する研究はどこまで進んでいるのだろうか？ K/Pg境界での絶滅メカニズムとしては、太陽光の遮断により光合成の停止が起きたとする説が有名である(Alvarez et al., 1980; Toon et al., 1982)。これは、衝突により放出された塵が大気中に数年程度滞留して太陽光を遮断し、光合成生物を絶滅に追いやったというものである。しかし、塵の大気中での滞留時間は当初考えられていたよりもずっと短い(数ヶ月程度)と考えられるようになり、この仮説だけでは大量絶滅を説明できない(Pope, 2002)。また、塵ではなく硫酸エアロゾルによって同様の日傘効果が生じたことも指摘されている(例えば、Pope et al., 1994)。しかし、衝突実験によれば、生成されるSO₂/SO₃比は低く、長期間にわたる日傘効果は得られなかった可能性がある(杉田・大野, 2002; Ohno et al., 2004)。したがって、太陽光の遮断によって、大量絶滅が説明できるかどうかは不明である。

現在、多くの研究者は、衝突後の複合的な環境擾乱によって、大量絶滅が起きたと考えている(例えば、Kring, 2007; Schulte et al., 2010)。例えば、衝撃波や大規模森林火災、爆風、地震、津波、大気加熱など、衝突直後に発生する短期間の環境擾乱や、酸性雨、オゾン層の破壊、粉塵や煤、硫酸エアロゾルの大気滞留による日射の遮断、硫酸エアロゾルによる太陽光反射後の晴れ上がり時の紫外線量増加現象、有毒物質の海洋への流入、二酸化炭素の大量放出による温暖化など、中長期間持続する環境擾乱などが挙げられる(例えば、Ishida et al., 2007; Kring, 2007; Jiang et al., 2010; Schulte et al., 2010)。ただし、各擾乱過程の詳細については、これまで数多くの研究があるものの、その規模、継続期間、大量絶滅との関係など未だに定量的に明らかにされていないことが多い。

K/Pg境界における大量絶滅のメカニズムの理解が進まない最大の理由として、チチュルブ・クレーターの正確なサイズ、衝突条件、生じたメルトの量やイジェクタの量が未だに十分理解されていないことが挙げられる(後藤, 2005, 2010)。これは、チチュルブ・クレーターは現在地下約

700 m以深に埋没しているため、この深さまで地層を掘削してクレーター内部の試料を採取することが容易ではなく、クレーターの研究は地震波探査や重力異常探査などの間接的手法に頼らざるを得ないためである。

2002年には、国際陸上科学掘削計画(ICDP)によってクレーター内掘削コアが初めて科学目的で採取され、クレーター内部のメルトの量やクレーター内部堆積物の堆積プロセスなどが明らかになりつつある(例えば、Dressler et al., 2003)。しかし、直径180 kmのクレーターに対して掘削コアがまだ1本しかないため、得られる情報も限定的である。コアの掘削は、ICDPおよび統合国際深海掘削計画(IODP)のプロジェクトとして今後も複数地点で実施する計画があり、早期に実現させる必要がある。そして、コア試料から得られるデータと地震波・重力異常データを組み合わせることで、チチュルブ衝突の規模や条件をより正確に推定できるようになると考えられる。そして、チチュルブ衝突によるダストや硫黄、二酸化炭素の放出量がより詳細に推定できるようになり、地球表層環境に及ぼした影響および大量絶滅を引き起こしたメカニズムに迫ることができると期待される。また、クレーターサイズの推定精度が上がれば、衝突エネルギーの見積もりもより正確になり、この規模の衝突の頻度を精度よく推定できるようになると考えられる。

ま と め

Alvarez et al. (1980)以降、多くの研究者は、他の絶滅境界でも天体衝突の痕跡が見つかるはずだという考えのもと、研究を進めてきた。その支えになっていたのが衝突頻度の推定結果である。本稿では、衝突クレーターに関する地質学的証拠と衝突頻度の最新の知見に基づき、初期の推定には問題があったことを指摘した。

K/Pg境界での大量絶滅のシナリオは、いまだに多くが未解決だと言っても過言ではない。さらに理解を深めるためには、チチュルブ・クレーターの掘削が必要不可欠である。K/Pg境界のほか、天体衝突と生物進化を論じる上での重要な時期として、後期隕石重撃期が挙げられる(例えば、Furukawa et al., 2009)。この時期はまさに生命が誕生したと考えられ、天体衝突と生命の誕生の間に因果関係が存在したのかどうかの解明は、きわめて重要な研究課題といえる。また、チチュルブ・クレーターより規模の大きいサドベリー・クレーターやフレデフォート・クレーターは、微生物しか存在しない古い時代に形成されたため、これらの大規模天体衝突が生命の進化にどのような影響を及ぼしたのか、まったくわかっていない。しかし、バイオマーカーを用いた研究が進めば、これらの衝突が地球環境と生命に及ぼした影響を評価できるようになる可能性もある。

また、本論文では、衝突と大量絶滅の同時性が認定されているK/Pg境界のみで、両者の間の因果関係が認められると結論した。ただし、絶滅と衝突規模の関係については、このように結論づけるのはまだ早い。始新世末やデボン紀後期、三疊紀後期(ノーリアン)では、いずれも大量絶滅のおよそ100~200万年前に、直径100 km級のクレーターを形成す

る天体衝突が複数回起きていることが知られている (McGhee Jr., 2001). そのため, これらの絶滅境界では, 天体衝突によって直接的に大量絶滅が引き起こされたのではなく, 天体衝突が長期的な気候変化などに影響を及ぼすことで, 衝突より遅れて大量絶滅が生じたのではないかという意見もある (McGhee Jr., 2001). 天体衝突の生物や地球環境への間接的影響を調べることは容易ではないが, 今後の重要な研究課題といえる.

たとえ顕生代において天体衝突に伴う大量絶滅がK/Pg境界だけだったとしても, 地球史における天体衝突に関する研究の意義が薄れるわけではない.むしろ, 天体衝突に関する研究の焦点が絞られてきたともいえる. 今後の研究の進展が期待される.

謝 辞

本稿は, 2008年の日本地質学会第115年学術大会のシンポジウム「地球生命進化と外宇宙との相互作用」での講演内容に基づく. 講演の機会を与えて頂いた座長および実行委員会に謝意を表す. 本稿は, 千葉工業大学惑星探査研究センターのContribution number 13である.

引用文献

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. and Michel, H. V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: experimental results and theoretical interpretation. *Science*, **208**, 1095–1108.
- Arz, J. A., Alegret, L. and Arenillas, I., 2004, Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction at the Yaxcopoil-1 drill hole, Chicxulub crater, Yucatan Peninsula. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1099–1111.
- Becker, L., Poreda, R. J., Basu, A. R., Pope, K. O., Harrison, T. M., Nicholson, C. and Iasky, R., 2004, Bedout: A possible end-Permian impact crater offshore of northwestern Australia. *Science*, **304**, 1469–1476.
- Becker, L., Poreda, R. J., Hunt, A. G., Bunch, T. E. and Rampino, M., 2001, Impact event at Permian-Triassic boundary: Evidence from extraterrestrial noble gasses in fullerenes. *Science*, **291**, 1530–1533.
- Bohor B. F., Foord E. E., Modereski P. J. and Triplehorn D. M., 1984, Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Science*, **224**, 867–869.
- Bottke, W. F., Vokrouhlicky, D. and Nesvorny, D., 2007, An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor, *Nature*, **449**, 48–53.
- Brown, P., Spalding, R. E., Revelle, D. O., Tagliaferri, E. and Worden, S. P., 2002, The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth, *Nature*, **420**, 294–296.
- Chapman, C. R. and Morrison, D., 1994, Impacts on the earth by asteroids and comets-assessing the hazard. *Nature*, **367**, 33–40.
- Claeys Ph., Kiessling W. and Alvarez W., 2002, Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary. In Koeberl, C. and MacLeod, G. eds., *Catastrophic events and mass extinctions: Impact and beyond*, *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.*, **356**, 55–68.
- Collins, G. S., Morgan, J., Barton, P., Christeson, G. L., Gulick, S., Urrutia, J., Warner, M. and Wünnemann, K., 2008, Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **270**, 221–230.
- Davison, T. and Collins, G. S., 2007, The effect of the oceans on the terrestrial crater size-frequency distribution: Insight from numerical modeling. *Meteorit. Planet. Sci.*, **42**, 1915–1927.
- Dressler, B. O., Sharpton, V. L., Morgan, J., Buffler, R., Moran, D., Smit, J., Stöffler, D. and Urrutia-Fucugauchi, J., 2003, Investigating a 65 Ma old smoking gun: deep drilling of the Chicxulub impact structure. *EOS Transactions*, **84**, 125–130.
- Farley, K. A., Montanari, A., Shoemaker, E. M. and Shoemaker, C. S., 1998, Geochemical evidence for a comet shower in the late Eocene. *Science*, **280**, 1250–1253.
- Farley, K. A. and Mukhopadhyay, S., 2001, An extraterrestrial impact at the Permian-Triassic boundary? *Science*, **293**, 2343.
- Furukawa, Y., Sekine, T., Oba, M., Kakegawa, T. and Nakazawa, H., 2009, Biomolecule formation by oceanic impacts on early Earth. *Nature Geosci.*, **2**, 62–66.
- 後藤和久, 2005, The great Chicxulub Debate: チチュルブ衝突と白亜紀/第三紀境界の同時性をめぐる論争—地質雑, **111**, 193–205.
- 後藤和久, 2010, 白亜紀末の大量絶滅と小惑星衝突: 30年の論争に終止符—. *JGL(Japan Geosci. Lett.)*, **6**, 6–8.
- Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Bralower, T. J., Hasegawa, T. and Matsui, T., 2004, Evidence for ocean water invasion into the Chicxulub crater at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1233–1247.
- Glikson, A., 2004, Comment on “Bedout: A possible end-Permian impact crater offshore of northwestern Australia”. *Science*, **306**, 613b.
- Gulick, S. P. S., Barton, P. J., Christeson, G. L., Morgan, J. V., McDonald, M., Mendoza-Cervantes, K., Pearson, Z., Suren-dra, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Vermeesch, P. M. and Warner, M. R., 2008, Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater. *Nature Geosci.*, **1**, 131–135.
- Hassler, S. W., Robey, H. F. and Simonson, B. M., 2000, Bedforms produced by impact-generated tsunami, 2.6 Ga Hamersley basin Western Australia. *Sediment. Geol.*, **135**, 283–294.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Antonio, C. Z., Jacobsen, S. B. and Boynton, W. V., 1991, Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, **19**, 867–871.
- Ishida, H., Kaiho, K. and Asano, S., 2007, Effects of sulfate aerosols induced by a large asteroid impact on ultra-violet radiation in the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23805.
- Isozaki, Y., 2001, An extraterrestrial impact at the Permian-Triassic boundary? *Science*, **293**, U3.
- 磯崎行雄, 2002, 古生代・中生代(P/T)境界での巨大隕石衝突は本当か? 遊星人(日本惑星科学会誌), **11**, 35–41.
- Jansa, L. F., 1993, Cometary impacts into ocean: their recognition and the threshold constraint for biological extinctions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*, **104**, 271–286.
- Jiang, S., Bralower, T. J., Patzkowsky, M. E., Kump, L. R. and Schueth, J. D., 2010, Geographic controls on nanoplankton extinction across the Cretaceous/Palaeogene boundary. *Nature Geosci.*, **3**, 280–285.
- Kaiho, K., Kajiwarra, Y., Nakano, T., Miura, Y., Kawahata, H., Tazaki, K., Ueshima, M., Chen, Z. and Shi, G. R., 2001, End-Permian catastrophe by a bolide impact: evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle. *Geology*, **29**, 815–818.
- Kaiho, K. and Lamolda, M. A., 1999, Catastrophic extinction of planktonic foraminifera at the Cretaceous-Tertiary boundary evidenced by stable isotopes and foraminiferal abundance at Caravaca, Spain. *Geology*, **27**, 355–358.

- Keller, G., 1988, Extinction, survivorship and evolution of planktic foraminifera across the Cretaceous/Tertiary boundary at El kef, Tunisia, *Mar. Micropaleontol.*, **13**, 239–263.
- Keller, G., Adatte, T., Berner, Z., Harting, M., Baum, G., Prauss, M., Tantawy, A. and Stueben, D., 2007, Chicxulub impact predates K–T boundary: New evidence from Brazos, Texas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **255**, 339–356.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Kramar, U. and Stueben, D., 2004, Chicxulub impact predates the K/T boundary mass extinction. *Proc. Natn. Acad. Sci. USA.*, **101**, 3753–3758.
- Koerberl, C., Gilmour, I., Reimold, W. U., Claeys, P. and Ivanov, B., 2002, End-Permian catastrophe by bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle: Comment and Reply. *Geology*, **30**, 855–856.
- Kring, D. A., 2007, The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous–Tertiary boundary. *Palaeoogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol.*, **255**, 4–21.
- McGhee, Jr. G. R., 2001, The “multiple impacts hypothesis” for mass extinction: a comparison of the Late Devonian and the late Eocene. *Palaeoogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol.*, **176**, 47–58.
- Michel, P. and Morbidelli, A., 2007, Review of the population of impactors and the impact cratering rate in the inner solar system. *Meteorit. Planet. Sci.*, **42**, 1861–1869.
- Morbidelli, A., Jedicke, R., Bottke, W. F., Michel, P. and Tedesco, E. F., 2002, From magnitudes to diameters: the albedo distribution of near Earth objects and the Earth collision hazard. *Icarus*, **158**, 329–342.
- Morgan, J., Lana, C., Kearsley, A., Coles, B., Belcher, C., Montanari, S., Diaz-Martinez, E., Barbosa, A. and Neumann, V., 2006, Analyses of shocked quartz at the global K-P boundary indicate an origin from a single, high-angle, oblique impact at Chicxulub. *Earth Planet. Sci. Lett.* **251**, 264–279.
- Morrison, D., 1992, The Spaceguard survey: report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop. Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology.
- Nakano, Y., Goto, K., Matsui, T., Tada, R. and Tajika, E., 2008, PDF orientations in shocked quartz grains around the Chicxulub crater. *Meteorit. Planet. Sci.*, **43**, 745–760.
- Norris, R. D., Huber, B. T. and Self-Trail, J., 1999, Synchronicity of the K-T oceanic mass extinction and meteorite impact: Blake Nose, western North Atlantic. *Geology*, **27**, 419–422.
- Ohno, S., Sugita, S., Kadono, T., Hasegawa, S. and Igarashi, G., 2004, Sulfur chemistry in laser-simulated impact vapor clouds: implications for the K/T impact event. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **218**, 347–361.
- Olsen, P. E., Kent, D. V., Sues, H.-D., Koerberl, C., Huber, H., Montanari, A., Rainforth, E. C., Fowell, S. J., Szajna, M. J. and Hartline, B. W., 2003, Ascent of dinosaurs linked to an iridium anomaly at Triassic–Jurassic boundary. *Science*, **296**, 1305–1307.
- Pálfy, J., 2004, Did the Puchezh-Katunki Impact Trigger an Extinction? In Dypvik, H., Burchell, M. and Claeys, P. eds., *Cratering in Marine Environments and on Ice*. Springer, Berlin, 135–148.
- Poag, C. W., 1997a, Roadblocks on the kill curve: Testing the Raup hypothesis. *Palaeos*, **12**, 582–590.
- Poag, C. W., 1997b, The Chesapeake Bay bolide impact: a convulsive event in Atlantic Coastal Plain evolution. *Sediment. Geol.*, **108**, 45–90.
- Pope, K. O., Baines, K. H., Ocampo, A. C. and Ivanov, B. A., 1994, Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinctions: Results of a Chicxulub asteroid impact model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **128**, 719–125.
- Pope, K. O., Baines, K. H., Ocampo, A. C. and Ivanov, B. A., 1997, Energy, volatile production, and climate effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact. *J. Geophys. Res.*, **102**, 21645–21664.
- Pope, K. O., 2002, Impact dust not the cause of the Cretaceous–Tertiary mass extinction. *Geology*, **30**, 99–102.
- Rampino, M. R. and Stothers, R. B., 1984, Geological Rhythms and Cometary Impacts. *Science*, **226**, 1427–1431.
- Raup, D. M., 1992, Large-body impact and extinction in the Phanerozoic. *Paleobiology*, **18**, 80–88.
- Renne, P. R., Melosh, H. J., Farley, K., Reimold, W. U., Koerberl, C., Rampino, M. R., Kelly, S. P. and Ivanov, B., 2004, Is Bedout an impact crater? Take 2. *Science*, **306**, 610–611.
- Retallack, G. J., Seyedolali, A., Krull, E. S., Holser, W. T., Ambers, C. P. and Kyte, F. T., 1998, Search for evidence of impact at the Permian-Triassic boundary in Antarctica and Australia. *Geology*, **26**, 979–982.
- Robertson, P. B., 1980, Anomalous development of planar deformation features in shocked quartz of porous lithologies. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **11**, 938–940.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Barton, P. J., Bown, P. R., Bralower, T. J., Christeson, G. L., Claeys, P., Cockell, C. S., Collins, G. S., Deutsch, A., Goldin, T. J., Goto, K., Grajales-Nishimura, J. M., Grieve, R. A. F., Gulick, S. P. S., Johnson, K. R., Kiessling, W., Koerberl, C., Kring, D. A., MacLeod, K. G., Matsui, T., Melosh, J., Montanari, A., Morgan, J. V., Neal, C. R., Nichols, D. J., Norris, R. D., Pierazzo, E., Ravizza, G., Rebolledo-Vieyra, M., Reimold, W. U., Robin, E., Salge, T., Speijer, R. P., Sweet, A. R., Urrutia-Fucugauchi, J., Vajda, V., Whalen, M. T. and Willumsen, P. S., 2010, The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, **327**, 1214–1218.
- Schulte, P., Deutsch, A., Salge, T., Berndt, J., Kontny, A., MacLeod, K. G., Neuser, R. D. and Krumm, S., 2009, A dual-layer Chicxulub ejecta sequence with shocked carbonates from the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundary, Demerara Rise, western Atlantic. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **73**, 1180–1204.
- Schulte, P., Speijer, R. P., Brinkhuis, H., Kontny, A., Claeys, P., Galeotti, S. and Smit, J., 2008, Comment on the paper “Chicxulub impact predates K-T boundary: New evidence from Brazos, Texas” by Keller et al. (2007). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **269**, 614–620.
- Schulte, P., Speijer, R., Mai, H. and Kontny, A., 2006, The Cretaceous-Paleogene (K-P) boundary at Brazos, Texas: Sequence stratigraphy, depositional events and the Chicxulub impact. *Sediment. Geol.*, **184**, 77–109.
- Sharpton, V. L., Marin, L. E., Carney, J. L., Lee, S., Ryder, G., Schuraytz, B. C., Sikora, P. and Spudis, P. D., 1996, A model of the Chicxulub impact basin based on evolution of geophysical data, well logs, and frill core samples. In Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S. eds., *Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in earth history*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **307**, 55–74.
- Shoemaker, E. M., 1983, Asteroid and comet bombardment of the Earth, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **11**, 461–494.
- Shoemaker, E. M., Wolfe, R. F. and Shoemaker, C. S., 1990, Asteroid and comet flux in the neighborhood of Earth. *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.*, **247**, 155–170.
- Simonson, B. M., Sumner, D. Y., Beukes, N. J., Johnson, S., Gutzmer, J. 2009, Correlating multiple Neoproterozoic? Paleoproterozoic impact spherule layers between South Africa and Western Australia. *Precambrian Res.*, **169**, 100–111.
- Smit, J., 1999, The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **27**, 75–113.
- Smit, J. and Klaver, G., 1981, Sanidine spherules at the Cretaceous-Tertiary boundary indicate a large impact event. *Na-*

- ture, **292**, 47–49.
- Smit, J. and ten Kate, W. G. H. Z., 1982, Trace-element patterns at the Cretaceous–Tertiary boundary—Consequences of a large impact. *Cretaceous Res.*, **3**, 307–332.
- Smit, J., Gaast, S. V. D. and Lustenhouwer, W., 2004, Is the transition impact to post-impact rock complete? Some remarks based on XRF scanning, electron microprobe, and thin section analyses of the Yaxcopoil-1 core in the Chicxulub crater. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1113–1126.
- Storm, R. G., Malhotra, R., Ito, T., Yoshida, F. and Kring, D. A., 2005, The origin of planetary impactors in the Inner Solar System. *Science*, **309**, 1847–1850.
- Stuart, J. S., 2001, A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR survey. *Science*, **294**, 1691–1693.
- Stuart, J. S. and Binzel, R. P., 2004, Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects. *Icarus*, **170**, 295–311.
- 杉田精司・大野宗祐, 2002, K/T 絶滅事件はいかにして起こったか? 遊星人(日本惑星科学会誌), **11**, 42–52.
- Swisher, C. C., Grajales-Nishimura, J. M., Montanari, A., Margolis, S. V., Claeyes, P., Alvarez, W., Renne, P., Cedillo, P. E., Maurrasse, F. J., Curtis, G., Smit, J. and McWilliams, M., 1992, Coeval $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of 65 million years ago from Chicxulub crater melt rock and Cretaceous–Tertiary boundary tektites. *Science*, **257**, 954–958.
- 高橋昭紀・後藤和久, 2010, 恐竜絶滅論争の最前線. 科学(印刷中).
- Tanner, L. H. and Kyte, F. T., 2005, Anomalous iridium enrichment at the Triassic–Jurassic boundary, Blomidon Formation, Fundy basin, Canada. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **240**, 634–641.
- Tanner, L. H., Kyte, F. T. and Walker, A. E., 2008, Multiple Ir anomalies in uppermost Triassic to Jurassic-age strata of the Blomidon Formation, Fundy basin, eastern Canada. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **274**, 103–111.
- Tanner, L. H., Lucas, S. G. and Chapman, M. G., 2004, Assessing the record and causes of Late Triassic extinctions. *Earth Sci. Rev.*, **65**, 103–139.
- Toon, O. B., Pollack, J. B., Ackerman, T. P., Turco, R. P., McKay, C. P. and Liu, M. S., 1982, Evolution of an impact generated dust cloud and its effects on the atmosphere. In Silver, L. T. and Schultz, P. H. eds., *Geological Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth*. Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **190**, 187–200.
- Vonhof, H. B., Smit, J., Brinkhuis, H., Montanari, A., Nederbragt, A. J., 2000, Global cooling accelerated by early late Eocene impacts? *Geology*, **28**, 687–690.
- Walkden, G. and Parker, J., 2008, The biotic effects of large bolide impacts: size versus time and place. *Int. J. Astrobiology*, **7**, 209–215.
- Wignall, P., Thomas, B., Willink, R. and Watling, J., 2004, Is Bedout an impact crater? Take 1. *Science*, **306**, 609.
- White, R. V. and Saunders, A. D., 2005, Volcanism, impact and mass extinctions: incredible or credible coincidences? *Lithos*, **79**, 299–316.

(要 旨)

後藤和久・田近英一, 2011, 地球外天体衝突による大量絶滅—なぜ白亜紀/古第三紀境界だけで起きたのか?—. 地質雑, **117**, 193–203. (Goto, K. and Tajika, E., 2011, Mass extinction caused by extraterrestrial impact: Why did it occur only at the Cretaceous/Paleogene boundary?. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **117**, 193–203.)

過去 30 年にわたって、天体衝突と顕生代における大量絶滅の関係を探る研究が行われてきた。しかし、両者の明らかな関係が見出せるのは、いまだに約 6550 万年前の白亜紀/古第三紀 (K/Pg) 境界だけである。本研究では、地質学的証拠、地球近傍天体観測データに基づく天体衝突頻度の推定、および月面のクレーターサイズや形成史などの最新の研究を総合的に検討した。その結果、K/Pg 境界での天体衝突の規模は、5~10 億年に 1 度程度の頻度の超大規模衝突だった可能性があり、K/Pg 境界以外の絶滅境界で天体衝突の明らかな痕跡が見つからないという地質学的証拠とは矛盾しない。一方、K/Pg 境界での天体衝突による大量絶滅のメカニズムについては、いまだに十分解明されていない。この理由のひとつは、衝突クレーターそのものに関する地質学的研究が乏しいことである。衝突現象の実態解明のために、衝突クレーター掘削計画の早期実現が望まれる。