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—

The Great Chicxulub Debate -Synchronicity of the Chicxulub impact and the Cretaceous/Tertiary boundary-

Abstract

後藤和久*

Kazuhisa Goto*

2004年11月19日受付.

2005年3月3日受理.

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Science,
University of Tokyo, Science Building #5, 7-3-1
Hongo, Tokyo 113-0033, Japan
goto@eps.s.u-tokyo.ac.jp

The Chicxulub crater in the Yucatán Peninsula is now well accepted as an impact crater formed at the Cretaceous/Tertiary (K/T) boundary. Thick K/T boundary breccia and sandstone beds around the impact site are interpreted as K/T boundary tsunami and/or gravity flow deposits. It has been generally believed that the Chicxulub impact was the major cause of the K/T boundary mass extinction. However, G. Keller and others have suspected the synchronicity of the Chicxulub impact and the K/T boundary, and presence of the K/T boundary tsunami and/or gravity flow deposits. In particular, they concluded that the Chicxulub impact predated the K/T boundary by 300 ka based on studies of the K/T boundary deposits in northeastern Mexico, Haiti, and inside the crater, and that the Chicxulub impact had no relation with the K/T boundary mass extinction. The debate on this issue was heated, especially on the web site of Geological Society of London by G. Keller and J. Smit in 2003, and it was called “the Great Chicxulub Debate”. In this paper, I review all the arguments on this issue and discuss the timing of the Chicxulub impact. I further take up the recent debate on the sedimentary process of the uppermost part of the impactite in ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) Chicxulub drill core (YAX-1 core), which is considered as a conclusive evidence that the Chicxulub impact predates the K/T boundary by G. Keller and others, although other many researchers interpreted that this part was formed by reworking due to the invasion of ocean water into the crater immediately after the impact.

Key words: Cretaceous/Tertiary boundary, Chicxulub crater, mass extinction, YAX-1, K/T boundary deposit

はじめに

約 6500 万年前の白亜紀/第三紀（以下, K/T）境界に堆積した粘土層中に、地球表層物質に微量しか含まれないイリジウムが異常濃集していることが発見（Alvarez et al., 1980）されてから 25 年が経つ。Alvarez et al. (1980) は、この発見に基づいて白亜紀末に直径約 10 km の地球外天体が地球に衝突し、それによって K/T 境界の生物大量絶滅が起きたという仮説を提唱した。その後、世界各地の K/T 境界層からイリジウムの異常濃集や、スフェリユール・衝撃変成石英などの衝突起源物質が次々と報告され、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 の埋没した白亜紀末天体衝突クレーターが発見された（Fig. 1; Hildebrand et al., 1991）。この衝突クレーターはチチュルブ（Chicxulub）クレーターと呼ばれ、クレーター内に堆積した衝突ガラス片の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 64.98 ± 0.05 Ma を示し、メキシコおよびハイチの K/T 境界層に含まれる衝突ガラス片の

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代（ 65.07 ± 0.1 Ma および 65.01 ± 0.08 Ma）と良く一致すること（Swisher et al., 1992）、また、それらの組成が極めて良く類似していることから（Izett et al., 1991; Blum et al., 1993; Koeberl et al., 1994）、同クレーターは K/T 境界の衝突クレーターとして広く認知されるようになった。

このように、地球化学的研究はチチュルブクレーターを形成した天体衝突（チチュルブ衝突）がまさに K/T 境界で起きたことを示している。しかし、一部の生層序・堆積学者達は、従来からチチュルブ衝突と K/T 境界の同時性に対して疑問を投げかけてきた（Keller et al., 1993, 1997, 2001, 2002a, b, 2003, 2004a, b; Stinnesbeck et al., 2000, 2001, 2002, 2004）。2002 年に国際陸上科学掘削計画（ICDP）がメキシコ国立自治大学（UNAM）と協力して、チチュルブクレーター内でボーリングを実施し、その掘削試料が世界中の研究グループによって分析されて以来、チチュルブ衝突と K/T 境界の同時性に関して、より活発な議論が行われるよう

Fig. 1. A map showing locations of K/T boundary sections around the Chicxulub crater (modified from Tada et al., 2004, fig. 1).

になった。

特に、この天体衝突が K/T 境界より約 30 万年前に起きたとするプリンストン大学の G. Keller らと、それを否定するアムステルダム自由大学の J. Smit の間で、2003 年末に Geological Society of London (GSL) の公式ウェブサイト (<http://www.geolsoc.org.uk/template.cfm?name=NSG2345809234541>) 上で公開論争が行われた。これはインターネットを利用した新しい形式の科学論争である。今回、論争が査読付き論文誌上ではなくウェブサイト上で行われた理由は、「チチュルブクレーターの発見以降、多くの研究者は十分な理解がないままにチチュルブ衝突と K/T 境界の生物大量絶滅の同時性は“決定的証拠 (smoking gun)”に基づいていると考えており、これに反対意見を唱える研究者は、査読が通らない、研究費が得られないといった不利益を被っている」という G. Keller からの意見に対して、GSL の編集者が査読付き論文誌以外で彼女らに反論の場を与えるべきだと判断したからである。この論争は“The Great Chicxulub debate”と題され、広く注目を集めた。本論ではまず、メキシコの K/T 境界層の堆積過程を主対象としたこのウェブサイト上での論争のレビューを行う。さらに、チチュルブクレーター内掘削試料中の K/T 境界層の堆積過程についての最近の論争も紹介し、チチュルブ衝突と K/T 境界の同時性を検討する。

3 日か？ 30 万年か？

—メキシコの K/T 境界層の堆積時間をめぐる論争—

1. K/T 境界の定義

チチュルブ衝突と K/T 境界の同時性を議論するためには、まず K/T 境界の定義を知る必要がある。K/T 境界の模式地であるチュニジアのエル・ケフにおいて、上部白亜系マーストリヒチアン階最上部のマールは、境界粘土層と呼ばれる厚さ 50 ~ 60 cm の微化石がほとんど産出しない黒色粘土層に

覆われる (Fig. 2)。この粘土層の基底部約 2 mm には、衝突時に放出されたと考えられるイリジウムや衝撃変成石英、Ni に富むスピネル粒子などの細粒物質が濃集し、細粒イジェクタ層または赤色層と呼ばれている (例えば、Smit and Romein, 1985; Robin et al., 1991)。K/T 境界は、International Commission on Stratigraphy (ICS) により、エル・ケフの境界粘土層基底部 (細粒イジェクタ層基底部) と定義されている (Fig. 2; Cowie, 1989)。このように定義された K/T 境界は、同地域における浮遊性有孔虫の大量絶滅、イリジウムや衝突起源物質の濃集、炭素同位体比の負のシフトなどが見られる層準とほぼ一致するが、これらは K/T 境界の定義として用いられるものではない (例えば、Smit, 1999; Keller et al., 1997, 2001; Arenillas et al., 2000)。後述のように、この K/T 境界の定義をメキシコ湾周辺の堆積物にどのように適用するかで意見が分かれている。また、K/T 境界における天体衝突によって形成された痕跡 (イリジウムの異常濃集や衝撃変成石英、スフェリュール、Ni に富むスピネル粒子など) を含む堆積層を一般に“K/T 境界層”と呼んでおり (例えば、Smit, 1999)、エル・ケフの場合は細粒イジェクタ層が K/T 境界層に相当する。エル・ケフの境界粘土層は、第三系最下部のダニアン階 (P0 帯) の浮遊性有孔虫を含むマールに整合的に覆われる。

2. メキシコ北東部の K/T 境界層の岩相と、堆積メカニズムの従来の解釈

チチュルブクレーター近傍のメキシコ湾やカリブ海周辺には、この天体衝突によって形成された層厚数 m ~ 数百 m の K/T 境界層が数多く報告されている (Fig. 1)。エル・ケフなどチチュルブクレーターから遠い地点の K/T 境界層とは層厚や堆積構造、粒子組成が大きく異なる。この違いの原因として、衝突地点近傍でスフェリュールなどの粗粒物質が大量に降り積もったこと (例えば、Ocampo et al., 1996)、衝突に伴う巨大地震により大規模重力流が発生したこと

Fig. 2. Schematic columnar sections of the K/T boundary transition at El Kef, Tunisia and NE Mexico (modified from Smit, 1999, fig. 2). The K/T boundary is defined at the base of the boundary clay in El Kef section (Cowie, 1989). However, definition of the K/T boundary is still controversial in NE Mexico. Smit (1999) defined the K/T boundary at the base of unit 1, whereas Keller et al. (2002a) defined at the base of unit 4.

(Bohor, 1996; Bralower et al., 1998; Grajales-Nishimura et al., 2000; Klaus et al., 2000; Norris et al., 2000; Soria et al., 2001, 2002; Kiyokawa et al., 2002), 衝突地点となったメキシコ・ユカタン半島北部が当時水深 200 m 以浅の浅海域だったため (例えば, Sharpton et al., 1996; Pierazzo et al., 1998), 衝突に伴って巨大津波が発生したこと (Bougeois et al., 1988; Alvarez et al., 1992; Smit et al., 1992, 1996; Smit, 1999; Takayama et al., 2000; Matsui et al., 2002; Tada et al., 2002, 2004), などが考えられる。

メキシコ北東部では, 40 地点以上において K/T 境界層が良く露出しており, 1990 年代初頭から詳細な研究がなされてきた (Smit et al., 1992, 1996; Keller et al., 1993, 1997, 2002a, b; Smit, 1999; Soria et al., 2001). これらの地点の K/T 境界層は, いずれの地域でも層厚約 1 ~ 3 m の砂岩・泥岩層からなり, 白亜系最上部のマールを侵食面を持って覆っている (Fig. 2; Smit et al., 1992). 基底部には, スフェリュールなどを含む粗粒イジェクタ層 (ユニット 1) が産する (Fig. 2; Smit et al., 1992, 1996; Smit, 1999). 粗粒イジェクタ層は, 流れの方向が反転する斜交葉理の繰り返しによって特徴付けられる厚い砂岩層 (ユニット 2) およびシルト岩層 (ユニット 3) に整合的に覆われる (Smit et al., 1992; Smit, 1999). 粗粒イジェクタ層や厚い砂岩・シルト岩層はエル・ケフの K/T 境界層には見られず, 衝突地点近傍の K/T 境界層に特徴的な堆積岩である。ユニット 3 を整合的に覆うユニット 4 は, イリジウムに富み, 衝撃変成石英や Ni に富むスピネル粒子などの細粒物質が濃集する細粒イジェクタ層からなる。ユニット 4 上位には, 化石がほとんど産出しない粘土層が整合的に堆積する (Fig. 2; Smit et al., 1992). ユニット 4 および粘土層は, エル・ケフ地域の細粒イジェクタ層および境界粘土層に対比されと考えられる (Smit et al., 1996; Smit, 1999). メキシコの K/T 境界層のユニット 1 から 3 はエル・ケフの K/T 境界層では見られないものの, ユニット 1 から 4 はチチュルブ衝突に伴って形成された一連の

堆積物とみなしうることから, Smit (1999) は K/T 境界をユニット 1 の粗粒イジェクタ層基底部におくべきだと主張している (Fig. 2).

Smit et al. (1996) は, メキシコのラヒーヤ (Lajilla) 地域の K/T 境界層を詳細に調べ, 同層のユニット 2 および 3 において流れの方向が 180 度反転する斜交葉理が 9 回以上繰り返していることを発見した。これらの斜交葉理は, ラヒーヤとチチュルブクレーターを結ぶ線の方角を示していたことから, 彼らは天体衝突によって発生した津波の押し波と引き波の繰り返しによって形成されたものと解釈した (Smit et al., 1996; Smit, 1999). 流れの方向が 180° 反転する斜交葉理を持つ K/T 境界層は, 衝突地点東側のキューバ西部モンカダ層においても報告されており (Tada et al., 2002), 衝突に伴う津波の影響は衝突地点周辺海域の広範に及んでいたと考えられる。

3. Keller らの主張

一方, Keller et al. (2003) は, メキシコやハイチ, グアテマラおよびアメリカの K/T 境界層を調査し, Smit et al. (1992, 1996) や Smit (1999) とは相反する解釈を提唱している。彼女らの主張は以下の通りである。

1) ユニット 1 の下位約 12 m のマーストリヒチアン階最上部 CF 1 帯 (65.3 ~ 65.0 Ma: Keller et al., 2003) のマール中にもスフェリュール層 (SR1) が存在し (Fig. 3), その化学組成はチチュルブクレーター内の衝突メルト片の組成と良く類似しており, チチュルブ衝突起源であると考えられる (Keller et al., 2002a, 2003). SR1 は側方へ 100 km 以上に渡って連続する地層であるが, SR1, およびその上位の SR1 とユニット 1 との間のマール (SLL) には, 共に堆積後に海底で滑動した痕跡が見られない (Keller et al., 2002a, 2003). したがって, SR1 を堆積させたチチュルブ衝突は K/T 境界より前に起きたと考えられる (Keller et al., 2002a, 2003). 堆積速度が一定であったと仮定して SR1 の堆積年代を推定すると, 65.27 ± 0.03 Ma となる (Keller et al., 2003). 以

Fig. 3. Schematic columnar sections of NE Mexico based on different interpretations by Keller et al. (2003) and Smit (1999). *: Keller et al., 2003; *: Berggren et al., 1995.

上の特徴から、チチュルブ衝突は絶滅が起きた K/T 境界よりも約 30 万年前に起き、この衝突によって SR1 が形成されたと考えられる (Keller et al., 2003)。ユニット 1 の粗粒イジェクタ層は、SR1 の一部が再堆積したものである可能性が高い (Keller et al., 2003)。

2) チチュルブ衝突によって形成された SR1 は、メキシコ湾およびカリブ海周辺にしか確認されない。したがって、チチュルブ衝突は従来考えられていたより規模が小さく、全球的な影響を及ぼすものではなかったと考えられる (Keller et al., 2003)。

3) チチュルブ衝突が K/T 境界より約 30 万年前に起きたとすると、それは世界中で報告されている K/T 境界でのイリジウム異常濃集とは無関係であり、K/T 境界のイリジウム異常濃集は、SR1 を導いたチチュルブ衝突とは別の地球外天体衝突の結果であると考えられる (Keller et al., 2003)。

4) ユニット 1 および津波堆積物と考えられているユニット 2, 3 には、複数層準に生痕が見られることから、これらのユニットは津波によって巻き上げられた粒子が急速に堆積したのではなく、通常的环境下でゆっくりと堆積したと考えられる (Keller et al., 2002a, 2003)。また、ユニット 2, 3 の斜交葉理の古流向を測定した結果、斜面に沿った一方向の流れ

しか確認できない。ユニット 2, 3 は、海水準変動に伴うタービダイトの繰り返しだと思われ、ユニット 1 から 4 は一連の堆積物とは考えられない (Keller et al., 2002a, 2003)。

5) エル・ケフでは、K/T 境界は細粒イジェクタ層底部と定義されていることから、メキシコ湾周辺の K/T 境界層についてもユニット 4 の細粒イジェクタ層底部を K/T 境界と定義すべきである (Fig. 2; 例えば, Keller et al., 2003)。

以上の彼女らの主張に基づけば、チチュルブ衝突は生物大量絶滅が起きた K/T 境界より約 30 万年前のマーストリヒアン期後期 (CF1 帯) に起きていたということになる (Fig. 3)。そこで、K/T 境界のイリジウム異常濃集層を説明するために、彼女らは K/T 境界においてはチチュルブ衝突を上回る規模の未知の地球外天体衝突を想定し、この衝突こそが世界中に分布するイリジウム異常濃集層を形成したと主張した (例えば, Keller et al., 2003)。さらに彼女らは、メキシコ中部、ハイチ、グアテマラでは、ダニアン階の P1a 帯 (64.7 ~ 64.97 Ma: Keller et al., 2003) の層準にもイリジウム異常濃集層が見られることを示し、K/T 境界前後で少なくとも 3 回の天体衝突が起きたと主張している (Stinnesbeck et al., 2000, 2001, 2002; Stuben et al., 2002; Keller et al., 2002a, 2003)。

4. Smit の反論

このような Keller らの主張に対し, Smit は Geological Society of London のウェブサイト上で以下のような反論をした。

1) Keller et al. (2002a, 2003) が通常環境で堆積したとする SLL は, 明らかにスランプ構造が認められる。また, SLL 中にスフェリユールが含まれていることから, SLL は天体衝突に伴って発生したスランプ堆積物と考えられる。さらに, Keller らの研究グループの一人である Schulte (2003) が示した柱状図によれば, SR1 は側方の連続性に乏しい。それに対し, ユニット 1 は広範囲に渡って追跡できる。

2) 複数の層準のスフェリユール層がメキシコ湾周辺においてしか確認されないのは, 衝突地点から遠い地域では地震や津波の影響が弱く, スランプによる再堆積が顕著でなかったためと考えられる。

3) 北米に露出する K/T 境界層は層厚約 10 cm で, スフェリユールを含む下部層からイリジウム異常が見られる上部層へと連続的に変化する。上部層には衝突による衝撃を受けたジルコンが含まれており, その結晶生成年代は約 5 億年前を示す (Bohor et al., 1992)。この年代は, 衝突地点の基盤をなすパン・アフリカン火成岩期の年代と一致することから (Bohor et al., 1992), 下部層と上部層は, ともにチチュルブ衝突に関連した起源をもつと考えられる。また, イタリアのグッピオ周辺において, K/T 境界前後約 1000 万年分の堆積物のイリジウム濃度を高解像度で測定した結果, K/T 境界以外には顕著なイリジウム異常濃集は確認されない。

4) Keller et al. (2002a, 2003) が主張するユニット 1 および 2 内の生痕は, 無機的な堆積構造であるフレーム構造などを誤認している可能性がある。一方, ユニット 3 には確かに生痕が見られるが, これは衝突による津波の影響が収まった後, 生き残った底生生物によって K/T 境界層上部に作られたものと解釈される。古流向に関しては, Smit et al. (1996) および Smit (1999) の詳細な観察により, 振動性の流れがあったことに疑問の余地はない。

5) ダニアン階のマール中のイリジウム異常濃集層は, Keller らのグループしか報告しておらず, 他の研究グループの追証が得られていない。上述のように, グッピオ周辺ではイリジウムの異常濃集が K/T 境界以外に見られず, 仮にダニアン期において天体衝突が起きていたとしても, 小規模であったと考えられる。K/T 境界イリジウム異常濃集層からの再堆積の可能性を含め, 検証が必要である。

以上の点を根拠として, Smit は K/T 境界の前後において大規模な衝突は唯一チチュルブ衝突だけであり, メキシコの K/T 境界層はチチュルブ衝突に伴う津波や地震によって巻き上げられた堆積粒子が衝突後数日以内に堆積して形成されたものであると結論した。

5. Keller の主張を覆すその他の証拠

ウェブサイト上での Smit による反論以外にも, Keller らの主張を覆す証拠は従来から数多く報告されている。例えば, Swisher et al. (1992) によれば, メキシコおよびハイチの K/T 境界層のユニット 1 に含まれる衝突ガラス片の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

年代は, それぞれ 65.07 ± 0.1 Ma および 65.01 ± 0.08 Ma であり, ユニット 1 は K/T 境界よりも約 30 万年前に堆積した SR1 から再堆積したものとする Keller et al. (2003) の解釈とは矛盾する。また, クレーター内に堆積した衝突ガラス片の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は 64.98 ± 0.05 Ma を示し (Swisher et al. 1992), ユニット 1 中の衝突ガラス片の年代と良く一致する。このことから, K/T 境界より 30 万年前にチチュルブ衝突が起きたとは考えにくい。また, チチュルブクレーター内で発見された衝突天体の破片と考えられる岩片のイリジウム濃度は 13.5 ppb と極めて高い値を示すことが知られており (Sharpton et al., 1992), チチュルブ衝突を引き起こした衝突天体が世界中の K/T 境界層に含まれるイリジウムの起源である可能性が高いと考えられる。

以上の論争はメキシコやハイチの K/T 境界層のみにについて行われており, 他地域における研究結果との整合性が議論されていないことに留意する必要がある。例えば, 衝突地点東側に位置するキューバの K/T 境界層は, 日本-キューバ共同研究グループによって 1997 年以降に詳細な研究が行われ, K/T 境界層のほぼ全層準に渡って衝突起源物質が含まれること, 生物擾乱の痕跡は一切見られないことなどが明らかにされている (多田・松井, 1999; Takayama et al., 2000; Kiyokawa et al., 2002; Tada et al., 2002, 2004)。特に, キューバ西部モンカダ層は, スフェリユールや衝撃変成石英を含む津波堆積物からイリジウム異常濃集層に至る, 全体的に上方細粒化する地層からなる (Tada et al., 2002)。また, モンカダ層には生物擾乱の痕跡も一切見られないことから, 同層はチチュルブ衝突により発生した津波によって巻き上げられた碎屑性粒子と衝突起源物質とが混合した状態で堆積したものであると考えられる (Tada et al., 2002)。したがって, スフェリユールや衝撃変成石英を含む津波堆積物とイリジウム異常濃集層が別の地球外天体衝突によって堆積したとは考えにくい。

このように, チチュルブ衝突が K/T 境界より約 30 万年前に起きたとする Keller et al. (2002a, 2003) の主張は根拠が不十分であり, チチュルブ衝突は K/T 境界で起き, それによって世界中に分布する K/T 境界イリジウム異常濃集層や衝突地点周辺の K/T 境界津波・重力流堆積物が形成された可能性が高いと考えられる。

しかし, Keller et al. (2002a, 2003) が主張するような, K/T 境界頃に複数の地球外天体が衝突した可能性は完全に否定できるわけではない。小規模衝突クレーターであれば, K/T 境界前後に形成された次のような例を挙げることができる。例えば, 北海で発見されたシルバーピット (Silverpit) クレーター (直径 20 km) は 60 ~ 65 Ma に形成されたと考えられ (Stewart and Allen, 2002), またウクライナのボルティッシュ (Boltys) クレーター (直径 24 km) は 65.17 ± 0.64 Ma に形成されたと考えられる (Kelley and Gurov, 2002)。さらにオマーンにおいて, K/T 境界だけでなくマーストリヒチアン階上部にもイリジウム異常が報告されている (Ellwood et al., 2003)。ただし, これらの衝突クレーターはいずれもチチュルブクレーターに比べてはるかに規

Fig. 4. A columnar section, its subdivision into units, and nannofossil and planktonic assemblages of the Yax-1 core (modified from Goto et al., 2004a, fig. 2).

模が小さく、この規模の衝突では生物の大量絶滅につながるような全球的な地球表層環境変動を引き起こすのは難しいと考えられる。K/T 境界自体を除く境界前後の層準からスフェリウム層やイリジウム異常濃集層が報告された例はごく限られており、チチュルブ衝突以外の K/T 境界前後における天体衝突の影響は、いずれも局所的なものであったと考えられる。

チチュルブクレーター内掘削試料 (YAX-1) による検討

1. チチュルブクレーター掘削計画

Hildebrand et al. (1991) によってチチュルブクレーターが再発見されて以来、チチュルブクレーターの形成過程は多くの研究者の注目を集めてきた。ところがクレーターそのものに関する研究は、重力異常探査や地震波探査などに限られており、クレーター内にどのような堆積物が堆積しているの

か、その堆積物はどのようなプロセスで堆積したのか、ということについては良くわかっていなかった。これは、従来のクレーター内掘削コアは、メキシコの石油会社によって石油探査目的で採取されていたため、これらの試料を研究目的で利用できなかったからである。このような状況の中、2001 年末から 2002 年初頭にかけて、国際陸上科学掘削計画 (ICDP) とメキシコ国立自治大学 (UNAM) の共同計画により、初めて純粋な研究目的でクレーター内堆積物の掘削が行われた。

掘削地点は、クレーターの中心からおよそ 60 km 南方のクレーターリムの内部斜面上が選ばれた (Fig. 1)。掘削地点は YAXCOPOIL-1 (YAX-1 と略称) と呼ばれている (Dressler et al., 2003)。YAX-1 コアの掘削は、K/T 境界とチチュルブ衝突の同時性の検証、チチュルブクレーターの規模の推定、衝突メルト等の衝突起源物質の化学的性質の理

解, クレーター形成の物理過程の解明, 海洋衝突クレーターにおけるイジェクタの再堆積過程と津波発生メカニズムの理解, などを主な目的として行われた。そして, 掘削試料は20以上の研究グループに分配されて詳しい分析がなされ, その研究成果は Dressler et al. (2003) および *Meteoritics & Planetary Science* 誌の2004年6, 7月号に特集号としてまとめられた。

2. YAX-1 コア中の堆積物の岩相

YAX-1 コア中の堆積物は, 下位から順に1) 白亜系の炭酸塩岩・硫酸塩岩類, 2) インパクトイトと呼ばれる天体衝突に関連して形成されたメルト片や衝撃変成石英および衝突地点周辺に堆積していた炭酸塩岩片や基盤岩片を含む堆積物, そして3) 第三系の炭酸塩岩類に3分される (Fig. 4; Dressler et al., 2003)。白亜系の炭酸塩岩・硫酸塩岩類の層厚は約600 mで, 石灰岩, 苦灰岩, 石膏などの混在岩からなる (Fig. 4; Goto et al., 2004a)。その中には, 衝撃変成石英や衝突メルト片を含む厚さ数十 cm のイジェクタ層が複数存在すること, 地層の傾斜が繰り返し不規則に変化することなどから, 同層は衝突によって周囲の白亜系の炭酸塩岩・硫酸塩岩層が崩壊し, クレーター内に再堆積した巨大ブロックであると考えられる (Wittmann et al., 2004)。

インパクトイト層は層厚約100 mで, 含まれる衝突メルト片の種類やサイズに基づき6つのユニットに区分される。それらは, 下位よりユニット6, 5, 4, 3, 2, および1と呼ばれている (Fig. 4; Dressler et al., 2003)。ユニット6~2までは淘汰が極めて悪く, 巨礫から中粒砂サイズの衝突メルト片が混合した状態で堆積している (Dressler et al., 2003)。ユニット6~2は, 衝突によって放出されたメルト片などが, 衝突クレーター内に落下し再堆積したものと考えられる (Dressler et al., 2003, 2004)。一方, 最上位のユニット1 (層厚約13 m) は, 下位のユニットに比べて淘汰が良く, 最上部約50 cmには斜交葉理が発達する (Dressler et al., 2003; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。さらに, ユニット1のインパクトイトの基質中に, カンパニアン期後期~マーストリヒチアン期後期のナノ化石が混合した状態で含まれ, これらは衝突直後にクレーター外部から海水が流入して再堆積したものと解釈される (Goto et al., 2004a)。衝突クレーターへの海水の流入と流出は, 巨大津波発生メカニズムとして有力視されている (Matsui et al., 2002)。クレーターで発生した津波がメキシコ湾や古カリブ海全域に伝播し, K/T 境界津波堆積物を形成した可能性が推定されている (Goto et al., 2004a; 後藤ほか, 2004b)。

ユニット1のさらに上位には, 斜交葉理の発達する石灰質砂岩層が整合的に堆積しており, Goto et al. (2004a) は, これを下位のインパクトイト層と区別してユニット0と呼んだ (Figs. 4, 5)。ユニット0の層厚はおよそ50 cmで, 3つの部分からなる (Goto et al., 2004a)。ユニット0の下部 (層厚20 cm) は, インパクトイトが再堆積したと考えられる緑色砂岩層, およびクライミング葉理が発達する石灰質砂岩層と塊状石灰質シルト岩層との交互層で構成される (Figs. 5, 6.a; Goto et al., 2004a)。石灰質砂岩およびシルト岩は,

主に自形のドロマイトで置換されている。ドロマイトは, 良く円磨されたミクライト質方解石を核にもち, 続成作用によってドロマイト化したものと解釈される (Smit et al., 2004)。ユニット0の中部 (層厚約20 cm) は, 主に塊状石灰質砂岩層からなり, スケールの小さい斜交葉理が発達する石灰質砂岩層や薄い緑色砂岩層が挟在する (Figs. 5, 6.b; Goto et al., 2004a)。Fig. 6.bの右上に見られる暗灰色チューブ構造は, 生痕である可能性があるが (Keller et al., 2004a, b; Smit et al., 2004), 内部に周囲の石灰質シルト岩が角礫として取りこまれていることから, 周囲の石灰岩が固結した後に掘り込まれたものであると考えられる (Smit et al., 2004)。ユニット0の上部 (層厚約10 cm) の石灰質シルト岩は角礫化しており, クラックは暗緑色の泥で埋められている (Figs. 5, 6.c)。これは, ユニット0固結後に堆積物が破碎され角礫化したことを意味する (Smit et al., 2004)。

ユニット0は, 侵食面を介し層厚約2~3 cmの黒色泥岩層に覆われる (Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。黒色泥岩層中には, ユニット0中の石灰質砂岩を起源とする岩片が複数取り込まれており (Fig. 6.c), ユニット0中の石灰質砂岩固結後に黒色泥岩層が下位を侵食して堆積したことを示唆する (Smit et al., 2004)。黒色泥岩層上部2 cmの層準から, ダニアン期初期 (P1a 帯) の浮遊性有孔虫 *Parvularugoglobigerina eugubina* が報告されている (Keller et al., 2004a, b; Arz et al., 2004; Smit et al., 2004)。この黒色泥岩層中には, イリジウムの異常濃集が見られない (0.29 ppb 以下: Keller et al., 2004a)。

3. ユニット0の堆積プロセスをめぐる論争

K/T 境界とチチュルブ衝突の同時性については, YAX-1 コアにおいても注目を集め, 著者を含む日本のグループなど計4グループがこの問題に取り組んでいる。特に注目されるのが, インパクトイト層直上からダニアン期の化石が最初に産出する黒色泥岩層直上までの間に堆積しているユニット0の堆積プロセスである。ユニット0の堆積プロセスをいち早く議論したのが Keller et al. (2004a, b) であった。Keller et al. (2004a, b) の主張は以下の通りである。

1) ユニット6~1までは, 主に天体衝突に関連して形成された衝突メルト片が堆積しており, チチュルブ衝突によって形成された堆積物である。しかし, ユニット0には衝突起源物質が含まれず, また再堆積した痕跡は一切認められない。さらに, ユニット0にはマーストリヒチアン期後期 (CF 1 帯) の浮遊性有孔虫のみが含まれ, 古い年代の化石が混在していない (Fig. 5)。したがって, ユニット0は衝突直後に急激に再堆積したのではなく, 白亜紀最後の約30万年間にゆっくりと堆積したと考えられる。この解釈は, ユニット0の炭酸塩岩の全岩の炭素同位体比が2~3 ‰とマーストリヒチアン期後期に特徴的な値を示すことから支持される。

2) 天体衝突直後のクレーターへの海水の流入によりユニット0が急速に堆積したのであれば, 強い流れの作用を受けた堆積構造がユニット0に記録されるはずである。しかし, ユニット0下部に小規模な斜交葉理が見られるものの, 強い流れの作用を示す堆積構造は一切認められない。

Fig. 5. A core photograph of the uppermost part of unit 1, unit 0, and the overlying Paleocene carbonate in YAX-1 core (793.94-794.67 m), and observation results by Keller et al. (2004a, b) versus Goto et al. (2004a) and Smit et al. (2004). *: Rebolledo-Vieyra and Urrutia-Fucugauchi (2004).

Fig. 6. (a) Close up core photograph of lower part of unit 0. No bioturbation is observed in greenish sandstone layer, and cross lamination shows climbing structure. (b) Close up core photograph of middle part of unit 0. There is also no bioturbation in greenish sandstone layer. The tube-like structure on upper right part of the photograph may be burrow (Keller et al., 2004a, b; Smit et al., 2004), although this structure was probably formed after lithification of unit 0 (Smit et al., 2004). (c) Close up core photograph of uppermost part of unit 0 and overlying black clay layer. Black clay layer overlies unit 0 with irregular erosional surface.

3) ユニット0は、主に海緑石からなる厚さ数 mm の緑色砂岩層を4層挟む (Fig. 5)。海緑石は、水深 100 ~ 300 m の海底面付近でゆっくりと生成されることから (Hillier, 1995)、ユニット0は海緑石が生成され得る環境で長時間かけて堆積したと考えられる。また、いずれの緑色砂岩層にも生物擾乱の痕跡が見られる (Fig. 5)。これは、ユニット0の堆積が急速ではなく、生物が堆積物を乱す時間が十分あったことを意味する。

4) ユニット0にはイリジウムの異常濃集が見られない (0.29 ppb 以下)。また、黒色泥岩層においてもイリジウムの異常濃集が認められないが、同層は他地域で認められる境界粘土層に対比される可能性が高く、その基底を K/T 境界とすべきである (Fig. 5)。

5) 古地磁気測定の結果、C29R と C29N の境界 (64.745 Ma: Berggren et al., 1995) は黒色泥岩の基底から 11 cm 上位に位置するが、両層準間の層厚はグビオでの 1.5 m、スペイン・カラバカでの 5.1 m と比べると明らかに小さい (Keller et al., 2004a; Rebolledo-Vieyra and Urrutia-Fucugauchi, 2004)。また、YAX-1 コアの第三系の炭酸塩岩類からはダニアン期の P0 および P1a 帯下部に属する浮遊性有孔

虫が産出しない。以上のことから、YAX-1 コアでは境界付近に不整合が存在し、イリジウム異常濃集層を含め第三系最下部に約 25 万年間の無堆積期間があると考えられる。

Keller et al. (2004a, b) は、以上を根拠としてメキシコやハイチだけでなく、チチュルプクレーター内においてもチチュルプ衝突が K/T 境界より約 30 万年前に起きたことを確認できたとし、チチュルプ衝突は K/T 境界の生物大量絶滅とは無関係であると結論付けた。彼女らの論文は世界中のマスコミで広く取り上げられ、大きな反響を呼ぶこととなった。しかし、Keller et al. (2004a, b) の主張に対しては数多くの問題点が指摘されている (Arz et al., 2004; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004; Tuchscherer et al., 2004)。主な反論は以下の通りである。

1) Keller et al. (2004a, b) の主張するマーストリヒチアン期後期 (CF 1 帯) の浮遊性有孔虫の同定は、薄片観察のみに基づいており、かつ証拠として提示された写真が小さく極めて不鮮明であることから、疑問が残る (Smit et al., 2004)。他グループによる薄片観察では、ユニット0において浮遊性有孔虫は全く確認されていない (Arz et al., 2004; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。ユニット0には、累帯構造の

発達したドロマイト結晶が多く含まれており、マーストリヒチアン期後期の浮遊性有孔虫とよく似た大きさや形を示すことから、Keller らはドロマイト結晶を浮遊性有孔虫と誤って鑑定した可能性がある (Smit et al., 2004)。また、ユニット 0 下部には斜交葉理が発達しており、その中に含まれる砕屑粒子は明らかに再堆積したものである (Fig. 6.a; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。したがって、仮に浮遊性有孔虫が含まれていてもそれらは厳密に地層の堆積年代を示すわけではない (Smit et al., 2004)。

2) Arz et al. (2004) は、Keller et al. (2004a, b) と同層準から試料を採取し、薄片観察だけでなく、浮遊性有孔虫を抽出して電子顕微鏡で鑑定した。その結果、ユニット 0 にはアルビアン期～マーストリヒチアン期の浮遊性有孔虫が混在した状態で産出することを示し、ユニット 0 は再堆積したものであると結論付けた。Arz et al. (2004) により古い年代の化石がユニット 0 で報告されたことから、たとえ Keller et al. (2004a, b) が鑑定した浮遊性有孔虫が実際にマーストリヒチアン期後期 (CF1 帯) のものだったとしても、それらも混在群集の一つとみなされる。

3) ユニット 0 には、衝撃変成石英および変質した衝突ガラス片などの衝突起源物質が含まれる (Smit et al., 2004)。これは、ユニット 0 堆積時に落下してきた衝突起源物質が取り込まれた、または衝突直後に周辺に堆積していた衝突起源物質が再堆積したことを示唆する (Smit et al., 2004)。また、ユニット 0 下部に見られる斜交葉理はクライミング構造を示す (Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。クライミング構造は、高濃度懸濁状態からの沈降時など、高い堆積率と流れの作用が同時に生じる特殊な環境で形成されることから、ユニット 0 が静かな環境でゆっくりと堆積したとは考えられない (Goto et al., 2004a)。

4) 一般に、衝突ガラス片の組成は極めて不均質であるため、変質後に多様な粘土鉱物ができる (Smit et al., 2004)。海緑石の組成をもつ変質した衝突ガラス片は、イタリアの K/T 境界層で報告されており (Montanari, 1990)、ユニット 0 に含まれる海緑石も、衝突メルト片が変質したものである可能性が高い (Smit et al., 2004)。

5) Keller et al. (2004a, b) の主張する生物擾乱は、その大部分が確認できない、もしくはマイクロリップルやフレーム構造を誤認している可能性が考えられる (Fig. 6; Smit et al., 2004)。ユニット 0 が未固結の状態で作られた生痕は見られない (Fig. 6; Smit et al., 2004)。

6) Keller et al. (2004a, b) は、ユニット 0 の炭酸塩岩の全岩の炭素同位体比がマーストリヒチアン期後期に特徴的な値を示すことを、ユニット 0 がマーストリヒチアン期後期に堆積した根拠としているが、これはユニット 0 が主にマーストリヒチアン期後期の堆積物が再堆積したものと考えても説明可能である。

7) 以上より、ユニット 6～0 までは、天体衝突直後に連続的に堆積したと考えられ (Arz et al., 2004; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)、YAX-1 コアにおける K/T 境界は、インパクトタイト層基底部もしくは巨大ブロック基底部と定義

されるべきである (Fig. 4; Arz et al., 2004; Smit et al., 2004)。

このように、ユニット 0 には古い年代の浮遊性有孔虫が混合した状態で産出すること、衝突起源物質を含むこと、クライミング構造のように高濃度状態で流れの作用を受けて堆積した証拠が下部で見られること、海緑石の存在は衝突メルト片の変質で説明できること、ユニット 0 が固結する前に形成された生物擾乱は見られないことから、ユニット 0 は衝突直後に繰り返したクレーターへの海水の流入の影響を受けて急速に再堆積したと考えられる (Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004)。したがって、チチュルブ衝突は K/T 境界の約 30 万年前に起きたとする Keller et al. (2004a, b) らの主張は成り立たない。

YAX-1 コアにおいてイリジウムの異常濃集は現時点で報告されていないが (Keller et al., 2004a; Tagle et al., 2004)、ユニット 0 は炭酸塩鉱物が 98 % 以上を占め、それらによる希釈を考慮すると、0.29 ppb という値は決して低い値とは言えない。当初境界粘土層ではないかと疑われていたユニット 0 直上の黒色泥岩層においてもイリジウム異常がみられないが (Keller et al., 2004a)、この黒色泥岩層は、下位のユニット 0 が固結した後に、侵食を受けたユニット 0 を直接覆っており、また衝突起源物質を含まない (Smit et al., 2004)。これらの特徴から、イリジウムが最も濃集していた部分が侵食されてしまった可能性が考えられる。また、ダニアン階下部の化石帯である P0 および P1a 帯下部が全く認められないことから (Keller et al., 2004a, b; Arz et al., 2004)、YAX-1 コアでは黒色泥岩層上下に無堆積の期間が存在すると考えられる (Keller et al., 2004a, b; Arz et al., 2004; Goto et al., 2004a; Smit et al., 2004; Rebolledo-Vieyra and Urrutia-Fucugauchi, 2004)。

ま と め

Keller et al. (2002a, 2003, 2004a, b) は、メキシコやハイチ、および YAX-1 コアの K/T 境界層を対象として生層序学的、ならびに堆積学的研究を行い、チチュルブ衝突は K/T 境界よりも約 30 万年前に起き、K/T 境界における生物大量絶滅とは無関係であると主張した。しかし、上述のように彼女らの示す根拠や論理には多くの矛盾が指摘された。また、彼女らが想定しているような、チチュルブ衝突を上回る未知の地球外天体衝突が起きたことを支持する証拠もない。これに対して、1) クレーター内およびメキシコやハイチの K/T 境界層中に含まれている衝突ガラス片の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は誤差の範囲で K/T 境界の年代と一致すること、2) それらの組成が極めて良く類似していること、3) 北米の K/T 境界イリジウム異常濃集層に含まれる衝撃を受けたジルコンの年代が、チチュルブクレーター下位の基盤岩の年代と一致することなどは、チチュルブ衝突がまさに K/T 境界で起こったことを支持する。また、メキシコ湾やカリブ海周辺に堆積している K/T 境界層の多くには衝突起源物質がほぼ全層準に含まれ、さらに地震や津波の影響を受けて堆積したことを示す証拠が報告されていることから、チチュルブ衝突に伴う地震

や津波の影響を受けて急速に堆積したものと考えられる。

一方、チチュルブ衝突がどのようにして K/T 境界の生物大量絶滅を引き起こしたのかは、まだ解決していない問題である。その理由の一つとして、チチュルブクレーターの研究がこれまでほとんど進んでいなかったため、未だに衝突の規模や様式、地球表層環境に及ぼした影響がよくわかっていないことが挙げられる (例えば, Morgan et al., 2002)。YAX-1 コアの掘削成功は、こうした現状を打破する突破口となり、同コア試料によって衝突の規模や様式、チチュルブクレーターの形成過程などに関する新しい知見が数多く得られた (Meteoritics & Planetary Science 誌の 2004 年 6, 7 月号を参照)。最近、メキシコ国立自治大学がチチュルブクレーター外部で 3 本のコアを掘削し、さらにクレーター北西部の掘削提案書が統合深海掘削計画 (IODP) に提出されている。今後こうしたコア試料から得られるデータと地震波・重力異常探査データを組み合わせることで、チチュルブ衝突の規模や様式をより正確に推定できるようになると考えられ、チチュルブ衝突が地球表層環境に及ぼした影響、および生物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。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、東京大学大学院理学系研究科の多田隆治教授、田近英一助教授、高橋昭紀博士、および同大学院新領域創成科学研究科の松井孝典教授には、日頃から K/T 境界についての議論を行っていただき、粗稿の校閲をはじめ、終始懇切なるご指導とご支援を頂いた。査読者である早稲田大学の平野弘道教授および東京大学の磯崎行雄教授、編集担当である産業技術総合研究所の利光誠一氏には、本稿を改善するにあたって極めて有益なご意見を賜った。以上の方々に謝意を表する。

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.
- Alvarez, W., Smit, J., Lowrie, W., Asaro, F., Margolis, S.V., Claeys, P., Kastner, M. and Hildebrand, A.R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: a restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540. *Geology*, **20**, 697-700.
- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E. and Dupuis, C., 2000, An independent test of planktic foraminiferal turnover across the Cretaceous/Paleogene (K/P) boundary at El Kef, Tunisia: catastrophic mass extinction and possible survivorship. *Micropaleontology*, **46**, 31-49.
- 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.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Swisher, C.C. and Aubry, M.P., 1995, A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In Berggren, W.A., Kent, D.V., Aubry, M.P. and Hardenbol, J., eds., *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation*. Spec. Pub. Soc. Sed. Geol., **54**, 129-212.
- Blum, J.D., Chamberlain, C.P., Hingston, M.P., Koeberl, C., Marin, L.E., Schuraytz, B.C. and Sharpton, V.L., 1993, Isotopic comparison of K-T boundary impact glass with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures. *Nature*, **364**, 325-327.
- Bohor, B.F., 1996, A sedimentary gravity flow hypothesis for siliciclastic units at the K/T boundary, northeastern Mexico. In Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S. eds., *Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in earth history*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **307**, 183-195.
- Bohor, B.F., Krogh, T.E. and Kamo, S.R., 1992, U-Pb isotopic ages of the K/T impact event and its target rocks from shocked zircons. *Meteoritics*, **27**, 205.
- Bourgeois, J., Hansen, T.A., Wiberg, P.L. and Kauffman, E.G., 1988, A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas. *Science*, **241**, 567-570.
- Bralower, T.J., Paul, C.K. and Leckie, R.M., 1998, The Cretaceous/Tertiary boundary cocktail: Chicxulub impact triggers margin collapse and extensive sedimentary gravity flows. *Geology*, **26**, 331-334.
- Cowie, J.W., Zieger, W. and Remane, J., 1989, Stratigraphic commission accelerates progress, 1984-1989. *Episodes*, **112**, 79-83.
- Dressler, B.O., Sharpton, V.L., Morgan, J., Buffler, R., Moran, D., Smit, J., Stöfler, 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.
- Dressler, B.O., Sharpton, V.L., Schwandt, C.S. and Ames D.E., 2004, Impactites of the Yaxcopoil-1 drilling site, Chicxulub impact structure: petrography, geochemistry, and depositional environment. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 857-878.
- Ellwood, B.B., MacDonald, W.D., Wheeler, C. and Benoist, S.R., 2003, The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **206**, 529-540.
- Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Bralower, T.J., Hasegawa, T. and Matsui, T., 2004a, Evidence for ocean water invasion into the Chicxulub crater at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1233-1247.
- 後藤和久・田近英一・多田隆治・松井孝典, 2004b, 白亜紀/第三紀境界における巨大衝突クレーターの形成過程と衝突津波発生メカニズムの検証. 遊星人 (日本惑星科学会誌), **13**, 241-248.
- Grajales-Nishimura, J.M., Cedillo-Pardo, E., Rosales-Dominguez, C., Moran-Zenteno, D.J., Alvarez, W., Claeys, P., Ruiz-Morales, J., Garcia-Hernandez, J., Padilla-Avila, P. and Sanchez-Rios, A., 2000, Chicxulub impact: the origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields. *Geology*, **28**, 307-310.
- 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.
- Hillier, S., 1995, Erosion, sedimentation, and sedimentary origin of clays. In Velde, B., ed., *Origin and mineralogy of clays, clays and the environment*, Springer-Verlag, Berlin, 162-219.
- Izett, G., Dalrymple, G.B. and Snee, L.W., 1991, ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of K-T boundary tektites from Haiti. *Science*, **252**, 1539-1543.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Affolter, M., Schilli, L. and Lopez-Oliva, J.G., 2002a, Multiple spherule layers in the late Maastrichtian of northeastern Mexico. In Koeberl, C. and MacLeod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 145-161.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Kramar, U. and Stueben, D., 2004a, Chicxulub impact predates the K/T boundary mass extinction. *Proc. Natn. Acad. Sci. USA*, **101**, 3753-3758.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stueben, D. and Berner, Z., 2001, Age, chemo- and biostratigraphy of Haiti spherule-rich deposits: a multi-event K-T scenario. *Can. Jour. Earth Sci.*, **38**, 197-227.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stueben, D., Berner, Z., Kramar, U. and Harting, M., 2004b, More evidence that the Chicxulub impact predates the K/T mass extinction. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1127-1143.
- Keller, G., Lopez-Oliva, J.G., Stinnesbeck, W. and Adatte, T., 1997, Age, stratigraphy and deposition of near K/T siliciclastic deposits in Mexico: relation to bolide impact? *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **109**, 410-428.
- Keller, G., Lyons, J.B., MacLeod, N. and Officer, C.B., 1993, No evidence

- for Cretaceous-Tertiary boundary impact deposits in the Caribbean and Gulf of Mexico. *Geology*, **21**, 776-780.
- Keller, G., Stinnesbeck, W. and Adatte, T., 2002b, Slumping and a sandbar deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in the El Tecolote section (northeastern Mexico): an impact induced sediment gravity flow-comment. *Geology*, **30**, 382-383.
- Keller, G., Stinnesbeck, W., Adatte, T. and Stueben, D., 2003, Multiple impacts across the Cretaceous-Tertiary boundary. *Earth Sci. Rev.*, **62**, 327-363.
- Kelley, S.P. and Gurov, E., 2002, Boltysh, another end-Cretaceous impact. *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 1031-1043.
- Kiyokawa, S., Tada, R., Iturralde-Vinent, M.A., Tajika, E., Yamamoto, S., Oji, T., Nakano, Y., Goto, K., Takayama, H., Delgado, D.G., Otero, C.D., Rojas-Consuegra, R. and Matsui, T., 2002, Cretaceous-Tertiary boundary sequence in the Cacarajicara Formation, western Cuba: an impact-related, high-energy, gravity-flow deposit. In Koeberl, C. and Macleod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 125-144.
- Klaus, A., Norris, R.D., Kroon, D. and Smit, J., 2000, Impact-induced mass wasting at the K-T boundary: Blake Nose, western North Atlantic. *Geology*, **28**, 319-322.
- Koeberl, C., Sharpton, V.L., Schuraytz, B.C., Shirley, S.B., Blum, J.D. and Marin, L.E., 1994, Evidence for a meteoric component in impact melt rock from the Chicxulub structure. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **58**, 2113-2129.
- Matsui, T., Inamura, F., Tajika, E., Nakano, Y. and Fujisawa, Y., 2002, Generation and propagation of a tsunami from the Cretaceous-Tertiary impact event. In Koeberl, C. and Macleod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 69-77.
- Montanari, A., 1990, Authigenesis of impact spheroids in the K/T boundary clay from Italy: new constraints for high-resolution stratigraphy of terminal Cretaceous events. *Jour. Sediment. Petrol.*, **61**, 315-339.
- Morgan, J., Warner, M. and Grieve, R., 2002, Geophysical constraints on the size and structure of the Chicxulub impact crater. In Koeberl, C. and Macleod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 39-46.
- Norris, R.D., Firth, J. and Ravizza, G., 2000, Mass failure of the North Atlantic margin triggered by the Cretaceous-Paleogene bolide impact. *Geology*, **28**, 1119-1122.
- Ocampo, A.C., Pope, K.O. and Fischer, A.G., 1996, Ejecta blanket deposits of the Chicxulub crater from Albion Island, Belize. In Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S. eds., *Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in earth history*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **307**, 75-88.
- Pierazzo, E., Kring, D. A. and Melosh, H. J., 1998, Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 28607-28625.
- Rebolledo-Vieyra, M. and Urrutia-Fucugauchi, J., 2004, Magnetostratigraphy of the impact breccias and post-impact carbonates from borehole Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Yucatán, Mexico. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 821-830.
- Robin, E., Boclet, D., Bonte, P., Froget, L. and Jehanno, C., 1991, The stratigraphic distribution of Ni-rich spinel in Cretaceous-Tertiary boundary rocks at El Kef (Tunisia), Caravaca (Spain) and Hole 761C (Leg 122). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 15-21.
- Schulte, P., 2003, The Cretaceous-Paleogene transition and Chicxulub impact ejecta in the northwestern Gulf of Mexico: paleoenvironments, sequence stratigraphic setting, and target lithologies. Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany. 204p.
- Sharpton, V.L., Dalrymple, G.B., Marin, L.E., Ryder, G., Schuraytz, B.C. and Urrutia-Fucugauchi, J., 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous Tertiary boundary. *Nature*, **359**, 819-821.
- 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 drill 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.
- Smit, J., 1999, The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **27**, 75-113.
- 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.
- Smit, J., Montanari, A., Swinburne, N.H.M., Alvarez, W., Hildebrand, A.R., Margolis, S.V., Claeys, P., Lowrie, W. and Asaro, F., 1992, Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. *Geology*, **20**, 99-103.
- Smit, J., Roep, Th.B., Alvarez, W., Claeys, P., Grajales-Nishimura, J.M. and Bermudez, J., 1996, Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact? In Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S. eds., *Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in earth history*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **307**, 151-182.
- Smit, J. and Romein, A.J.T., 1985, A sequence of events across the Cretaceous-Tertiary boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **74**, 155-170.
- Soria, A.R., Liesa, C.L., Mata, M.P., Arz, J.A., Alegret, L., Arenillas, I. and Melendez, A., 2001, Slumping and a sandbar deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in the El Tecolote section (northeastern Mexico): an impact-induced sediment gravity flow. *Geology*, **29**, 231-234.
- Soria, A.R., Liesa, C.L., Mata, M.P., Arz, J.A., Alegret, L., Arenillas, I. and Melendez, A., 2002, Slumping and a sandbar deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in the El Tecolote section (northeastern Mexico): an impact-induced sediment gravity flow-Reply. *Geology*, **30**, 383-383.
- Stewart, S.A. and Allen, P. J., 2002, A 20-km-diameter multi-ringed impact structure in the North Sea. *Nature*, **418**, 520-523.
- Stinnesbeck, W., Keller, G., Adatte, T., Harting, M., Stuben, D., Istrate, G. and Kramar, U., 2004, Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact. *Int. Jour. Earth Sci.*, **93**, 1042-1065.
- Stinnesbeck, W., Keller, G., Adatte, T., Stuben, D., Kramar, U., Berner, Z., Desremaux, C. and Moliere, E., 2000, Beloc, Haiti, revisited: multiple events across the Cretaceous-Tertiary transition in the Caribbean? *Terra Nova*, **11**, 303-310.
- Stinnesbeck, W., Keller, G., Schulte, P., Stuben, D., Berner, Z., Kramar, U. and Lopez-Oliva, J.G., 2002, The Cretaceous-Tertiary (K/T) boundary transition at Coxquihui, State of Veracruz, Mexico: evidence for an early Danian impact event? *Jour. South Amer. Res.*, **15**, 497-509.
- Stinnesbeck, W., Schulte, P., Lindenmaier, F., Adatte, T., Affolter, M., Schilli, L., Keller, G., Stueben, D., Berner, Z., Kramar, U. and Lopez-Oliva, J.G., 2001, Late Maastrichtian age of spherule deposits in northeastern Mexico: implication for Chicxulub scenario. *Can. Jour. Earth Sci.*, **38**, 229-238.
- Stuben, D., Kramar, U., Berner, Z., Eckhardt, J.D., Stinnesbeck, W., Keller, G., Adatte, T. and Heide, K., 2002, Two anomalies of platinum group elements above the Cretaceous-Tertiary boundary at Beloc, Haiti: geochemical context and consequences for the impact scenario. In Koeberl, C. and Macleod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 163-188.
- Swisher, C.C., Grajales-Nishimura, J.M., Montanari, A., Margolis, S.V., Claeys, P., Alvarez, W., Renne, P., Cedillo, P.E., Maurasse, 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.
- Tada, R., Iturralde-Vinent, M. A., Matsui, T., Tajika, E., Oji, T., Goto, K., Nakano, Y., Takayama, H., Yamamoto, S., Kiyokawa, S., Toyoda, K., Garcia-Delgado, D., Diaz-Otero, C. and Rojas-Consuegra, R., 2004, K/T boundary deposit in the proto-Caribbean basin. *Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **79**, 582-604.
- 多田隆治・松井孝典, 1999, キューバ白亜紀第三紀境界の巨大津波堆積物. *科学*, **69**, 913-919.
- Tada, R., Nakano, Y., Iturralde-Vinent, M. A., Yamamoto, S., Kamata, T., Tajika, E., Toyoda, K., Kiyokawa, S., Delgado, D. G., Oji, T., Goto, K.,

- Takayama, H., Rojas-Consuegra, R. and Matsui, T., 2002, Complex tsunami waves suggested by the Cretaceous-Tertiary boundary deposit at the Moncada section, western Cuba. *In* Koeberl, C. and Macleod, G., eds., *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., **356**, 109-123.
- Tagle, R., Erzinger, J., Hecht, L., Schmitt, R.T., Stoffer, D. and Claes, P., 2004, Platinum group elements in impactites of the ICDP Chicxulub drill core Yaxcopoil-1: are there traces of the projectile? *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 1009-1019.
- Takayama, H., Tada, R., Matsui, T., Iturralde-Vinent, M.A., Oji, T., Tajika, E., Kiyokawa, S., García, D., Okada, H., Hasegawa, T. and Toyoda, K., 2000, Origin of the Peñalver Formation in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact event. *Sediment. Geol.*, **135**, 295-320.
- Tuchscherer, M.G., Reimold, W.U., Koeberl, C., Gibson, R.L. and Bruin D.D., 2004, First petrographic results on impactites from the Yaxcopoil-1 borehole, Chicxulub structure, Mexico. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 899-930.
- Wittmann, A., Kenkmann, T., Schmitt, R. T., Hecht, L. and Stoffer, D., 2004, Impact-related dike breccia lithologies in the ICDP drill core Yaxcopoil-1, Chicxulub impact structure, Mexico. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 931-954.

(要 旨)

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. (Goto, K., 2005, The Great Chicxulub Debate - Synchronicity of the Chicxulub impact and the Cretaceous/Tertiary boundary-. *Jour. Geol. Soc. Japan.* **111**, 193–205.)

今から約 6500 万年前の白亜紀/第三紀 (K/T) 境界に地球外天体が衝突したとする説は、その後のメキシコ・ユカタン半島における衝突クレーターの発見や衝撃変成石英などの衝突起源物質の発見により現在では広く認知されるようになり、この衝突こそが K/T 境界の生物大量絶滅の原因だったのではないかと考えられている。ところが、この衝突は K/T 境界より約 30 万年前に起き、K/T 境界での生物大量絶滅とは無関係だったとする説が一部の研究グループから近年報告され、K/T 境界での衝突を支持する研究者との間で論争となっている。そして、衝突が K/T 境界より約 30 万年前に起きたとする説に対して数多くの矛盾点が指摘され、この衝突はやはり K/T 境界で起きた可能性が高いことが再確認されつつある。本論では、地球外天体衝突と K/T 境界の同時性をめぐる一連の論争を紹介し、この問題を検討する。

著者付記 本稿の“Smit の反論”の論理は、Geological Society of London (GSL) のウェブサイト上の論争に基づいている。地質学雑誌の投稿規程では、学術雑誌等の電子出版形態以外の引用は原則として認められていない。しかし、1) G. Keller と J. Smit の間で行なわれたこの論争には、彼らの新しいデータやアイデアが多く含まれており、チチュルブ衝突と K/T 境界の同時性を議論する上で既に欠かせないものとなっていること、2) そのため、すでに査読付き論文誌でこの論争の引用が認められた例があること、3) 同サイトを引用しなければ、論争の最前線を総説として紹介することができなくなってしまうことから、論争の記事が削除されることはないことを GSL の編集者に確認した上で、地質学雑誌編集委員会に例外的に引用を認めていただいた。

編集委員会付記 地質学雑誌は論文中でのウェブサイトの引用を原則として認めていない。今回の事例は、学会 (GSL) の公式サイト上での学会公認の討論という、ウェブサイトに関わる投稿規定を作成する時点では想定外の公表手段をとっている。このような新しい公表手段については、規定の改訂を含めた柔軟な対応が今後必要になることをふまえつつ、編集委員会として引用を認めることとした。