

## 特集『地球システム変動と大量絶滅』

# K/T巨大隕石衝突はいかに大量絶滅を引き起こしたのか？

杉田 精司<sup>1</sup>, 大野 宗祐<sup>1</sup>

## 1. K/T衝突事件

生物化石が地層中に発見される時代(最近約6億年)は顕生代と呼ばれ,それは大きく古生代,中生代,新生代に分けられる。これら3つの地質区分は,2つの非常に大きな大量絶滅事件(P/T事件, K/T事件)で画されている。このような大量絶滅事件がなぜ起こったのかは長い間謎とされてきたが, K/T絶滅事件についてはこの20年間で飛躍的な理解の進歩が見られた。

まず1980年に, Alvarez et al. [1]がK/T境界層において, 地球の地殻やマントルにはほとんど含まれず, 隕石中に大量に含まれるIrをはじめとする白金族元素の濃集層が全球的に広がっていることを発見し, 巨大隕石衝突がK/T絶滅事件をもたらしたとの説をうち立てた。しかし, 白金族元素は地球深部の金属核にも大量に存在する。核マントル境界層付近で巨大プルームが作られて地表に至れば, Irなどを地表に撒き散らすような火成活動が起きることも全く不可能ではない。また, K/T絶滅が起きた約6500万年前にはデカン高原で巨大火成活動が起きていたとされていたことなどから, K/T絶滅の巨大火山噴火説も根強く支持された。しかしその後, 火山噴火では作られない衝撃変成石英が世界各地のK/T境界層で発見され[e.g., 2], さらに, 1990年代初頭に直径170kmを越す巨大クレーター(Chicxulub Crater)がユカタン半島に埋没していることが発見され[e.g., 3], そこに産するインパクトメルトの生成年代および安定同位体比がK/T境界層のインパクトガラスのそれと一致することが判明するにいたって[e.g., 4, 5], K/T絶滅事件の巨大衝突説は確

定的となった。

このような巨大隕石衝突説の確立と並行して, K/T事件前後での生物相の調査や巨大衝突がもたらす地球環境変動の物理モデル計算などが精力的に行われ, 巨大隕石衝突による大量絶滅の機構に対するモデルが数々提案されてきた。しかし, それらのどのモデルにも一長一短があり, どれがK/Tの大量絶滅の主たる機構であったのかについては, コンセンサスは得られていない状況にある。そこで本稿では, K/T境界での生物の絶滅パターンを簡単にレビューし, それに照らし合わせてこれまでに提案されている大量絶滅機構の評価を行う。さらに, その中で今後のK/T研究の鍵を握ると考えられる2つのプロセスを特に取り上げ, より詳細に議論する。

## 2. 生物の絶滅パターン

### 2.1 生息環境・生物種による絶滅率の違い

K/T事件では全生物種の6割が絶滅したなどという表現がよく使われるが, 絶滅率は生物の種類や生息環境によってこのような平均の値からかなり大きく外れていることが分かっている。例えば, 北米での陸上脊椎動物では, 90%が絶滅しているのに対し, 同じ地域の淡水に棲む脊椎動物の絶滅率はたった12%でしかない[6]。このような大きな差が生じたのは, この2つの環境に於ける食物ピラミッドの構造の違いに起因されることが考えられる。陸上の食物ピラミッドの底辺には通常光合成植物が位置するが, 淡水の食物ピラミッドの底辺は必ずしも光合成植物ばかりではなく, 周

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

辺の陸上から流れ込む堆肥や生物死骸も大きな割合を占めている[6]。したがって、淡水中の食物ピラミッドは日射によるエネルギー供給が途絶えても直ちには崩壊しない。

このような観点で様々な環境での生物の絶滅パターンを調べると、海洋中でも陸上でも、光合成植物の上に成り立った食物ピラミッド中の動物（例えば、草食動物およびそれを主食とする肉食動物）は高い頻度で絶滅しているのに対し、堆肥や生物死骸の上に成り立っている食物ピラミッド中の動物（総じて広い意味の分解者、例えば、土壌中の栄養分によって生活する軟体類や昆虫を主食とする食虫動物など）の絶滅率は低い[7]。さらに、同じ分類群に属する個々の種について、その摂餌形態とK/T境界での絶滅率を比べると、草食、雑食性のものの方が食虫類など分解者の系列に属する種に比べ圧倒的に絶滅率が高いことも明らかにされている[7]。このような絶滅のパターンは、K/T事件において光合成が停止して食物ピラミッドが崩壊し、生物の大絶滅が起きたとする考え方を強く支持するものである。

その一方、海洋堆積物の炭素同位体比の変動からは、海洋の有機物生産率が推定できる。Zachos et al. [8]は、海洋堆積物中の石灰質の微小化石を、海面近くに生息する浮遊性有孔虫と海底に棲む底生有孔虫に分けて $\delta^{13}\text{C}$ を測った。測定の結果は、白亜紀末期には浮遊性有孔虫が底生有孔虫より、2~3%も高い $\delta^{13}\text{C}$ を常に保っていたことが分かった。これは、海面から海底にかけて高い有機物生産により $\delta^{13}\text{C}$ が大きく減少していたことを示している。これに対し、K/T境界から上の地層からはこの $\delta^{13}\text{C}$ の差がほとんど消滅してしまっていた。これは、海洋中での一次生産が停止したことを示唆するものである。ここで特筆すべきは、海面・海底間の $\delta^{13}\text{C}$ の差が激減するにはデータの分解能（約1万年）以下の時間しかかかっていないのに対し、回復するにはほぼ50万年もかかっていることである。

以上の証拠は、いずれも日射の遮断や極度の寒冷

化などによって光合成が長期間にわたり停止したことを示唆している。しかし、詳しく化石の記録を調べると、それとはまた違ったシグナルが得られることも知られている。例えば、白亜紀末期の浮遊性有孔虫（石灰質の殻をもっている）のほぼ全てと、石灰質ナノプランクトンの数種は、K/T境界の数cm以内で絶滅していることが確認されている。その一方、有機質の殻を持つ渦鞭毛虫は、たった11%の絶滅であり、ケイ酸塩の殻を持つ放射虫は一つも絶滅していないという報告が、それぞれチュニジアとニュージーランドでの調査からなされている[9]。このパターンは、耐酸性度の弱い種ほど高率で絶滅したと解釈することが出来る。

## 2. 2 絶滅の地域一様性

恐竜のように地球全体で絶滅したことがはっきりしているものは議論が比較的単純だが、全ての生物が全球的に生き残ったり絶滅したりしたわけではない。また、調査をする立場に立って考えると、地球上のある一地域である種の生物が絶滅したという結果を得ても、それが全球的な広がりを持った絶滅であったと結論づけることは出来ない。実際この点に関しては、K/T境界においてもいろいろ議論が分かれている。

北アメリカ西部については、かなりK/T境界付近の化石の地質調査が進んでいる。例えば、白亜紀末期には多様性を持っていた植生がK/T境界を境に突然シダ類を中心とした植生に変化したことを示す地質記録が得られている[10]。このシダ類の急激な繁栄は、その植生が一時的に壊滅的な打撃を受けたことを示すものと解釈されている[e.g., 10]。しかし、K/T境界層におけるシダ類の急激な繁殖の証拠は、北米を除くと日本の北海道の海底地層の記録[11]に見られる以外長い間発見の報告がなかった。ところが最近、ユカタン半島から見て地球の裏側に位置するニュージーランドにもはっきりとしたシダ類の急激な繁殖の証拠が見つかり[12]、植生への打撃が全球的な広がりを持っていたことがより確実になってきた。その一方、全般的な陸上植物の絶滅率を調べると、北米での絶滅率

はその他の地域に比べ高い傾向を示す[e.g., 10]. また別の調査では, 北半球の方が南半球より高い植物種の絶滅率を示している[13].

このような植生変化のデータから現段階で絶滅の一樣性について言えることは, K/T 事件においては全球的に植物相への大打撃があったことはほぼ確実であるが, その打撃の程度は必ずしも一樣ではなかった可能性が高いということである. 後述するように, 全球一様な影響であったか全球非一様な影響であったかでは, それに必要な大量絶滅機構がかなり大きく異なるので, これは地質学的に非常に重要な情報であり, 今後の調査研究の発展がさらに望まれる.

### 3. 生物の絶滅機構

以下では, 上に述べた生物の絶滅パターンに照らし合わせて, これまでに提案されてきたK/T境界における主な絶滅機構の比較をしていく.

#### 3.1 イジェクタによる日射の遮断

このプロセスは, Alvarez et al. [1]が最初に巨大隕石衝突説を唱えたときに提出した説で, クレーター形成時に巻き上げられたイジェクタのうち, 微小な粉塵が成層圏に長期間留まり, 太陽の放射を遮って光合成の停止と気候の極端な寒冷化(いわゆる衝突の冬)を招いたというものである. この説は, 光合成生産の上に成り立つ食物ピラミッド中の生物種が絶滅したという地質記録とも定性的に良く一致する.

しかし, その後の大気モデル計算の結果[e.g., 14]は, この粉塵による太陽光の遮断が高々数ヶ月しか続かなかった可能性が高いことを示した. 一方, 地球上の生物がどの程度の寒冷化やどのくらい長期間の光合成停止に耐えられるかは, 正確に見積もることはなかなか難しい. だが, 海洋プランクトンのように繁殖率と死滅率のデータがある程度得られているものについては, モデル計算をすることが出来る. Milne and McKay [15]はモデル計算によって, 海洋プランクトンの

餓死は代謝速度の速い夏の方が早く寒い冬には遅くなるために衝突の冬の影響は夏の方が大きくなること, 南北両半球での同時絶滅を起こすには南北両半球どちらも冬でない4月や9月が最も効果的であること, さらにその場合プランクトンが初期値の1/1000になるのにかかる時間は約3ヶ月であることなどの結果を得た. この3ヶ月という時間は粉塵による衝突の冬の継続時間と同程度であるので, これで海洋プランクトンの絶滅は可能であるという見方も可能である. しかし, 気候の寒冷化に対応してプランクトンが休眠状態にはいる可能性がこのモデルには考慮されていないこと, 初期値の1/1000の生息数になることでプランクトンが種として絶滅するかどうか不明であることなどを考えると, 海洋プランクトンの大量絶滅がこのイジェクタによる衝突の冬だけで説明できると結論づけるのは危険であろう.

また, イジェクタのサイズ分布則に従うと, K/T 衝突事件で想定されるような直径10kmもの巨大隕石の衝突であっても, 成層圏に長期間留まっていられるような微小なイジェクタの量はかなり小さくなり, 十分日射を遮断できないという指摘もある[e.g., 16]. 実際, K/T境界層中の同定された衝突起源物質(衝撃変成石英やガラス球など)は直径100  $\mu$ m以上の比較的大きなもののばかりである. これもこの説を弱める一因となっている. このような事情のため, Alvarez et al. [1]以後も様々な絶滅プロセスが提案されることとなった.

#### 3.2 森林火災説

ダスト説に引き続いて提出されたのが, 森林火災説である[e.g., 17]. Wolback et al. [17]は, 世界各地のK/T境界層に大量のススが堆積していることを発見した. このススの起源が何であるかを地球化学的証拠から一意に特定するのは難しい. しかし, 希ガス分析および鉱物分析がススが隕石から直接もたらされた可能性が非常に低いことと示していることや, 針葉樹の燃焼によって出来る特徴的な縮合芳香環化合物が見つまっていること, ススの $\delta^{13}\text{C}$ が現代の森林火災のそ

れと一致していることなどから，森林火災が起源であるだろうと考えられている[17]．地層から得られたススの量は非常に大きく，全球総計にすると約 $7 \times 10^{13}$ kgにもなる[17]．これは，現在の陸上生物の全バイオマスの約10%にもなる．もし，白亜紀末期が全ての大陸において現在の熱帯と同様の高いバイオマス密度を持っていたとしても，このスス量は全バイオマスの3%という値となる．通常の森林火災で出るススは，燃烧したバイオマスの0.1～2%でしかない．ただし，K/T事件でもし全球的な森林火災が同時に起きたとすると，火災への酸素供給が追いつかなくなりススの生成率が高まった可能性はある[17]．しかし，その場合でもK/T境界のススの量を生産するには，陸上のバイオマスの大きな割合が燃烧しなければならないことになる．したがって，もしこのススが本当にバイオマス起源であれば，白亜紀末期の広範囲にわたる植生が焼かれ，生態系全体が甚大な打撃を受けたことの直接的な証拠となる．また，ススが全球的に分布していることは，ススのかなりの部分がいったん成層圏に舞い上がって地球の周りを巡ったことを示唆する．このような事態になれば，ススも日射の遮断さらには衝突の冬に大きく寄与したであろう[e.g., 17]．ただ，ススの粒子も岩石の粒子と同等かそれ以上効率的に合体成長し，大気中を沈降するものと予想されるので，ススによる日射の遮断の継続時間も上記のイジェクタによる衝突の冬の継続時間とさほど変わらなかったと考えられる．しかし，このススは実際に全球的な大量の分布が地質的証拠として確認されている点で，イジェクタ説より強い説得力を持っていると言える．

だが，この森林火災説にも問題がないわけではない．まず問題とされるのは，その着火機構である．乾燥していない木は簡単には燃烧しないので，それをどうやって燃やすかという問題である[e.g., 17]．当初は，イジェクタによる衝突の冬により森林が枯死乾燥し，衝突の冬の晴れ上がり以降に着火するというシナリオも考えられた[17]．しかし，地層中のススの分布は，Ir濃集の最初のシグナルが現れると同時に急速に

立ち上がっており，また滞空時間の短い(< 0.5年)粗粒の粒子ともよく混じっているため，火災は衝突発生直後に始まったと考えなければならない[17]．

この問題に関して提案されているのが，上層大気や大気圏外からの強力な熱放射過程である．この熱放射は，衝突蒸発物の凝縮物が大気に再突入したとき[16]や，巨大衝突蒸気雲が被害地域の上空を通るとき[18]に生じる．Melosh et al. [16]の見積によれば，衝突蒸発物の凝縮物の大気再突入による熱放射量は太陽光の50から150倍程度とかなり高く，放射継続時間も1～数時間である．ただし，この放射の多くは宇宙空間に散逸したり大気層で吸収されたりするので，地上にまで達するのは全体の約1/3になり，木々を直接燃烧させられるギリギリ程度の強度に落ちてしまう．それでも継続時間が長いので木々はいわば蒸し焼き状態になり，可燃ガスが木々から発生してそれが着火するという可能性がある．これに必要な放射強度は太陽放射の10倍程度と見積もられているので，かなりの確率で着火したであろう[16]．また，もし着火まで至らなかったとしても，全球的に森林は非常に乾燥したり炭化したりとかなり燃えやすい状態にまではなったはずである．もう一方の巨大衝突蒸気雲からの直接熱放射は，全球的な被害を与えることは難しいが，それでも数千km四方の領域に太陽光の数百倍の熱放射を与えることが出来る[18]．これは，森林の自然発火に必要な放射強度を1桁以上超えている．したがって，このプロセスだけでもかなりの森林火災が起き，観測されるような大量のススを生み出す可能性はかなり高いと言える．

森林火災説について出てきたもう一つの問題は，地層中のススの堆積が非常に長期にわたっていることである．地層中のスス密度の立ち上がりは，データの時間分解能程度であるのに対し，衝突以前のレベルに減少するには10万年のオーダーの時間がかかっている[e.g., 17]．全球的な森林火災がこのような長期間続くはずはなく，何が原因であるか未解決の問題となっている．ただ，幾つかの手掛かりはある．まず，このス

スは、Irの濃集とかなり良い相関を持っていて、Irの濃集も10万年程度続いている[e.g., 17]。また、前述の海洋プランクトン中の $\delta^{13}\text{C}$ の擾乱の継続時間も $10^5$ 年のオーダーであること[8]や、K/T直後のシダ類の突然繁栄も約3万年程度という長期間続いたこと[11, 12]は、非常に示唆的である。ただし、海洋中の長期間にわたる $\delta^{13}\text{C}$ の擾乱は、海洋の炭素循環システムが安定状態に回復するために必要な固有のタイムスケールが非常に長いことによるものであり、光合成の休止期間が比較的短くても海洋システム全体の擾乱は長期にわたるといえる考え方も有力である[e.g., 19]。

### 3.3 硫酸エアロゾル説

以上2つの絶滅機構は、K/T大絶滅をもたらした巨大衝突が地球上のどこで起きたのかまだはっきりしない時期に提案されたものである。1990年代に入って、そのクレーターがメキシコのユカタン半島にあることがはっきりすると[e.g., 3]、クレーターおよびその周囲の地質調査が盛んに行われるようになった。その中で特に注目されるようになったことは、このクレーターの付近には、白亜紀末期当時から大量の炭酸塩岩と硫酸塩岩が堆積していたことである。この場所に巨大隕石衝突が起これば、大量の硫黄酸化物や二酸化炭素のガスが発生するはずである。実際、ハイチにK/T事件と同じ形成年代を示し、Caと $\text{SO}_3$ に富む大量のインパクトガラスが見つかり、K/T衝突事件によって硫酸塩岩の大規模な脱ガスが起きたことが明らかとなった[e.g., 20]。硫酸塩岩の衝突脱ガスの結果発生する硫黄酸化物は、岩石の蒸発物や水蒸気その他の揮発性成分と共に巨大な衝突蒸気雲となって一旦大気圏を飛び出し、地球の広い範囲にわたって撒き散らされる。このようにして地球の上層大気に投入された硫黄酸化物は、大気中の水分と反応して硫酸を作り、さらにそれが硫酸エアロゾルを形成する[e.g., 20, 21, 22]。K/T衝突事件の場合、生成される硫酸エアロゾルは非常に大量になるため、日射をほぼ完全に遮って衝突の冬をもたらすと見積もられている[21, 22]。

ここで重要な点は、硫酸エアロゾルによる衝突の冬の継続時間は衝突脱ガスで生じる硫黄酸化物の酸化還元状態によって非常に大きく変化することである[21, 23]。もし、衝突生成ガスが $\text{SO}_2$ であった場合には、直ちに $\text{H}_2\text{O}$ と反応して $\text{H}_2\text{SO}_4$ になってしまうので、硫酸エアロゾルの生成は非常に素早く起こる。K/T衝突の爆心地付近は当時遠浅の海であったので、大量の水蒸気も成層圏に運ばれたはずである[21, 22]。そのため、K/T衝突で発生した $\text{SO}_2$ は非常に短時間の内に微小エアロゾルになってしまったはずである。いったんエアロゾルになってしまえば、その後の進化は上述のイジェクタやススのケースとほぼ同じで、数ヶ月で成層圏から沈降してしまい衝突の冬は終わってしまう[21]。その一方、衝突生成ガスが $\text{SO}_2$ であった場合には、硫酸エアロゾルになる前に酸化過程を経て $\text{SO}_3$ にならなければならない。しかし、この反応には太陽紫外線による活性化や酸化剤の供給などが必要のため、かなりの時間がかかる。したがって硫酸エアロゾルはより長い時間にわたって供給され続け、衝突の冬の継続時間は長期化する。この場合、単位時間あたりに供給されるエアロゾルの量は減るが、K/T事件の場合、全体の量が膨大であるために日射の遮断が破れることはない。過去の火山噴火で大気中に大量の $\text{SO}_2$ が放出されたケースをもとにK/T事件の場合の衝突の冬の長さを見積もると、数年間から数十年間という長さになる[21, 22]。

### 3.4 酸性雨説

上述の硫酸エアロゾルは、太陽光の遮蔽材として働くだけではない。対流圏に入れば、酸性雨となって地上へ落ち、新たな絶滅をもたらす機構として働く可能性がある[e.g., 20]。また、巨大隕石衝突時には硫酸以外にも強酸の生産がなされる。例えば、隕石衝突によって生じた強い衝撃波が $\text{N}_2\text{O}_2$ 大気を通過すれば、 $\text{NO}_x$ が発生する。そして、 $\text{NO}_x$ は水と反応すれば、硝酸や亜硝酸となる。巨大衝突による大気中での衝撃波形成プロセスとしては、巨大隕石自身の大気の通過、

衝突蒸気雲の高速膨張，高速イジェクタや衝突蒸発物の凝縮物の大気圏への再突入など様々ある[e.g., 24]. 実際，モンタナ州のK/T境界層の粘土の化学分析からは，酸性雨による化学風化作用を示唆するCa, Mg, Na, Kなど陽イオン元素の欠乏が見られるという報告がなされている[25].

陸上の生物を酸性雨がどの程度絶滅させたかを推定するのは難しい。ただ，地質記録に見られるような食物ピラミッド中の位置による選択的な絶滅パターンとは非調和的であるということは言える。その一方，先に触れた海洋中の生物種の絶滅パターンとは整合的であると言える。D' Hondt et al.[9]は，海洋のpHが炭酸イオンによる緩衝系で守られているため， $10^{16}$  mole程度の酸の流入では，深さ100m程度の表層水のpHは8 からほとんど変化しないことを指摘している。この量は，衝撃波による硝酸・亜硝酸の推定生成量よりかなり多い。したがって，海洋のpH変化は起こせない。しかし，硫酸塩岩の衝突脱ガスに起因する硫酸の場合には， $10^{17}$  mol程度生成された可能性があり，この場合は海洋表層水のpHも3～4程度まで急激に減少する[9]。これだけ大きなpHの変化があれば，有孔虫などの石灰質の殻が溶解するため，生物種の選択的な絶滅が生じ，地質記録に残っているような絶滅パターンを作り出すことになるかも知れない。

## 4. 残された問題

以上，K/T境界における生物の絶滅の地質記録と絶滅機構のモデルの主なものを見てきた。ここで一つ注意しておきたいことは，これらの絶滅機構は必ずしも互いに排他的ではないことである。複数のものが同時に起こっても差し支えない(実際に絶滅した種については，それを絶滅させる機構が幾つ重複していても問題ない)。しかし問題は，現在提案されているモデルだけで絶滅すべき種を絶滅させられるか，また，生き延びるべき生物種まで絶滅させることになってしまわないかということである。

イジェクタ，スス，硫酸エアロゾルによる衝突の冬は，K/T境界における生物の絶滅の大きな特徴である光合成植物に食物供給を依存している生物種が選択的に絶滅させられるという点で非常に都合がよい。また，こうした生物の高い絶滅率を達成する他には十分長い衝突の冬の継続時間が必要であるが，この面では硫酸エアロゾル説が他の2説より優れていると言える。また，全球的森林火災説は，この生物の食物ピラミッド中の位置による選択的な絶滅パターンと整合的ではないので，硫酸エアロゾル説は森林火災説に対しても優位であるとも言える。さらに，硫酸エアロゾルはその後酸性雨をもたらし，海洋プランクトンの耐酸性度に従った絶滅パターンをつくりだせるかもしれないというメリットもある。しかし，この硫酸エアロゾル説の優位は，硫酸塩岩の衝突脱ガスで生成するガスの大部分が $\text{SO}_2$ である必要があるという重大な問題点をはらんでいる。

一方，植物種の絶滅率の分布に地域的な偏りがあるというデータに関しては，衝突蒸気雲からの熱輻射モデルが有効である可能性が高い。しかし，植物種の絶滅率の分布は，必ずしもユカタン半島を中心に同心円形になっているわけではなく，むしろ北アメリカで非常に高い絶滅率を示すデータが得られている[18]。モデルの有効性を唱えるには，このような地域的な分布をうまく説明できる必要がある。

以下では，これらの問題点，すなわち，硫酸塩岩の衝突脱ガス過程における酸化還元反応と，衝突蒸気雲からの熱輻射の空間分布の問題について最近の実験結果などを併せ詳しく議論をする。

## 5. 硫酸塩岩の衝突脱ガス過程

硫酸塩岩(ここでは硬石膏:  $\text{CaSO}_4$ )の天体の高速衝突時に発生する衝撃波による衝突脱ガス過程における酸化還元の基本反応は以下のように書き表すことができる。



上の反応式において、CaOは非常に高温で凝結してしまうため、実質的には反応系内に入れる必要はないと考えられる。その場合の反応式は、



となる。

この反応に関して、いくつかの典型的な衝突条件を仮定した場合の化学平衡計算の結果[23]を、図1に示した。この計算結果によると、断熱曲線に沿って膨張する衝突蒸気雲内では、初期の高温な状態では $\text{SO}_2$ 、膨張して低温になると $\text{SO}_3$ が安定である。また、衝突速度、衝突天体が小惑星か彗星かなどの与える初期条件によっても結果は多少異なるが、どの衝突条件を仮定した場合も温度が600Kから1000Kにかけての領域で $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ の割合が大きく変化するということがわかる。

実際の蒸気雲では、膨張の途中でクエンチを起し、膨張の途中のある点で反応は止まる。化学平衡計算の結果によると、K/T境界の衝突蒸気雲においてはクエンチ温度によって $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比は大きく変化する。前節でも述べたように、硫酸エアロゾルによる衝突の冬の継続時間は衝突蒸気雲内の $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比に大きく左右される。つまり、衝突蒸気雲内の硫黄酸化物の酸化還元反応がクエンチする温度を決定すること

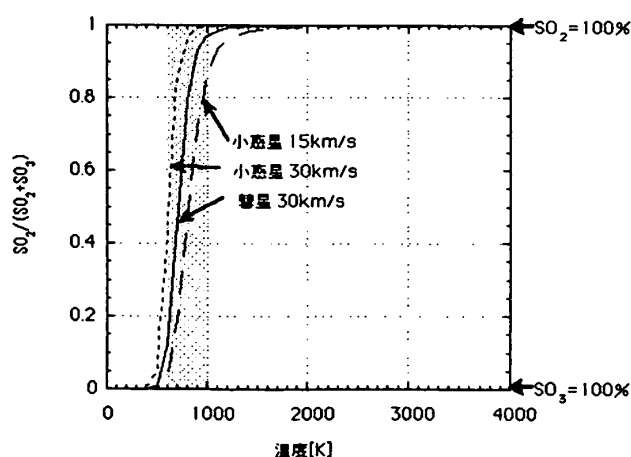


図1: 化学平衡計算の結果。いくつかの典型的な衝突条件を仮定し、それぞれ断熱膨張曲線に沿って $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比を計算したもの。高温領域では $\text{SO}_2$ 、低温領域では $\text{SO}_3$ が安定であることがわかる。また、硫黄酸化物の酸化還元状態は600~1000Kで急激に変化する。

が、硫酸エアロゾルがK/T境界の大量絶滅に与えた影響を見積る上で鍵となる。

ところが、このような化学反応過程に関する実験データは従来ほとんどなく、火山ガス中の硫黄酸化物の酸化還元状態などからの類推で、衝突蒸気雲中の硫黄酸化物も大部分が $\text{SO}_2$ であろうと半ば天下り的に仮定されてきた[21, 22]。このようなクエンチ過程の観察をするため、Ohno et al. [23]はレーザーの照射を行い、 $\text{SO}_2$ や $\text{SO}_3$ の高温蒸気雲中での化学的振る舞いの観察をした。図2は、レーザー実験で得られた $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比が蒸気雲の大きさにどのように依存しているかを示している。それによると、蒸気雲内の $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比は蒸気雲の質量の約-0.3乗に比例して小さくなっている。これは、より大きな蒸気雲では冷却速度がより遅くなるために、より低温までクエンチせずに硫黄酸化物の酸化還元反応が進み $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比がより小さくなった結果と考えられる。この $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比のサイズ依存則を、実際の衝突蒸気雲サイズにまで適応できると仮定してみた場合、K/T衝突蒸気雲内の $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比は $10^6$ 程度という値が得られる。もしこの外挿値が3, 4桁程度という大きな誤差の範囲で正しければ、Pope et al. [21, 22]の仮定に反し、硫酸塩岩からの脱ガス生成物は $\text{SO}_3$ が主成分であり、硫酸エアロゾルによる衝突の冬の継続時

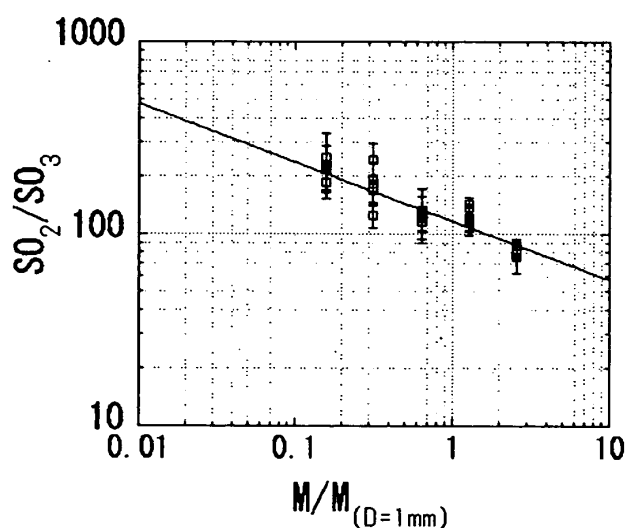


図2: レーザー照射実験の結果。横軸は規格化された蒸気雲の質量、縦軸は $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比である。図内の直線は、実験結果をべき乗でフィットしたもので、 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 比は蒸気雲質量の約-0.3乗に比例している。

間は他のモデル(イジェクタあるいはススによる太陽光遮蔽)と同程度であったということになる。今後は、この実験で示された硫酸エアロゾルによる衝突の冬が短寿命であったかもしれないという可能性について、より詳細な研究が望まれる。つまり、ここで行われているような大幅な外挿による推論の危険性を回避するために、より物理的意味づけのはっきりしたモデルの構築が期待される。具体的には、硫酸酸化物の酸化還元反応について反応速度則を決定し、それに基づいた化学反応モデルを作る必要がある。

## 6. 巨大衝突蒸気雲からの熱輻射

6.1 クレーター地形の読み方 惑星の地形図や表面画像を見ると、ほとんど全ての衝突クレーターが円形をしている。しかし、クレーター中央丘(central peak)・環状丘(peak ring)などのクレーター内側構造やイジェクタ、さらに金星に見られるクレーター流出物をよく観察すると、軸対称からかなり異なった形状をしていることが多いことが分かる。例えば、図3に示す月面のKing Craterの例を取ると、中央環状丘は一方が破れた形をしている。また、その反対方向にはクレーター壁の段丘(terrace)が大きく崩れていて、



図3：月面の裏側にあるKing Crater(直径77km、北緯5°、東経121°)。NASA提供の写真を改変。

不完全な中央環状丘の端に達している。全体として蟹のハサミのような形になっている。また、このような非軸対称の地形は、主に2次元空間でのみ行われる流体数値計算では原理的に再現が不可能である。このような理由のため、非軸対称地形の成因は、クレーターができる以前に元々あった地形の不均一性など偶然の要因に押しつけられたりして、真剣に議論されることは少なかった。

だが、この蟹のハサミに似ているという点に惑わされず、地形的特徴を一つ一つ丁寧に見ていくと、室内衝突実験の結果と調和的な事実が見えてくる。まず、図3の左上に見える衝突メルト溜まり(Impact melt pool)である。斜め衝突に際しては、衝突メルトが衝突点下流に多く放出されることが衝突実験から分かっている。King craterでは、北北西方向に大きなメルト溜まりがあるほか、東北東方向にも小さなメルト溜まりが頻見される。しかし、南南東方向にはほとんど見られない。これは衝突の方向が南南東より北北西向きであったこと考えると整合的である。

次に、クレーター段丘域の幅に注意して欲しい。西北西方向は影で見にくいだが、南南東方向が最も幅が広く、次に東北東方向、そして北北西方向は非常に狭くなっている。室内実験ではこのような段丘構造そのものを直接再現することは難しいが、実験結果はクレーターの形が段丘の幅と調和的である。具体的には、クレーターの上流側の壁は非常に急坂で崩れやすい構造になり、下流側の壁はなだらかで崩れにくい構造になるのである。したがって、この地形的特徴も衝突の方向が南南東よりの北北西向きであることを示唆している。特に、南南東の壁面が大きく崩れて、蟹のハサミの「腕」を作っているのは、この衝突方向と非常に調和的である。

さらに、中央環状丘の「破れ」の方向からも衝突方向を推定することができる。中央環状丘の生成機構は未だはっきりしていないので、ある程度経験的な知識に頼る必要がある。ここで経験的知識とは、クレーター放出物の分布パターンから予測される衝突下流の



方向と、破れの方が一致しているという観測である[26, 27]。また、クレーター放出物の分布と衝突方向の関係は、室内実験で詳しく調べられている。この経験則を用いると、中央環状丘が北北西方向に破れていることは、インパクトメルトやクレーター段丘の形態と同様に、北北西向きの衝突がこのクレーターを作ったことを示唆している。

## 6.2. 衝突蒸気雲の運動

衝突蒸気雲の形成は衝突の非常に初期に起こるため、衝撃波の遠方場近似がほとんど効かない。したがって非常に非対称な運動を起こしうる[28]。そのことを具体的な例で詳しく見てみよう。図4は、水平から30度の角度に於ける衝突の際に生じた蒸気雲の運動の様子を撮影した高速写真である。この衝突角では、最終的なクレーターのリムの形は円形から激しくズレはしな

い。しかし、この衝突角に於ける衝突蒸気雲は、衝突下流方向に向かって、ほぼ水平に並進運動しつつ膨張している。これは、クレーターの中心を対称軸とする軸対称な成分をほとんど含まないと言って良いほどの非軸対称性である。

## 6.3 K/Tインパクトへの応用

Schultz and D' Hondt [26]は、以上の知見をK/Tインパクトに適用して全球非一様な絶滅パターンの説明を試みている。図5は、K/Tインパクトで作られた Chicxulub Crater のあるユカタン半島付近のフリーエア重力異常の地図である。まずこれは、典型的な多重リング構造であるが、その最内側リングは北北西に向けて破れていることに注意して欲しい。また、重力異常の振幅が南南東から北北東にかけて減少する傾向を持っている点も重要である。

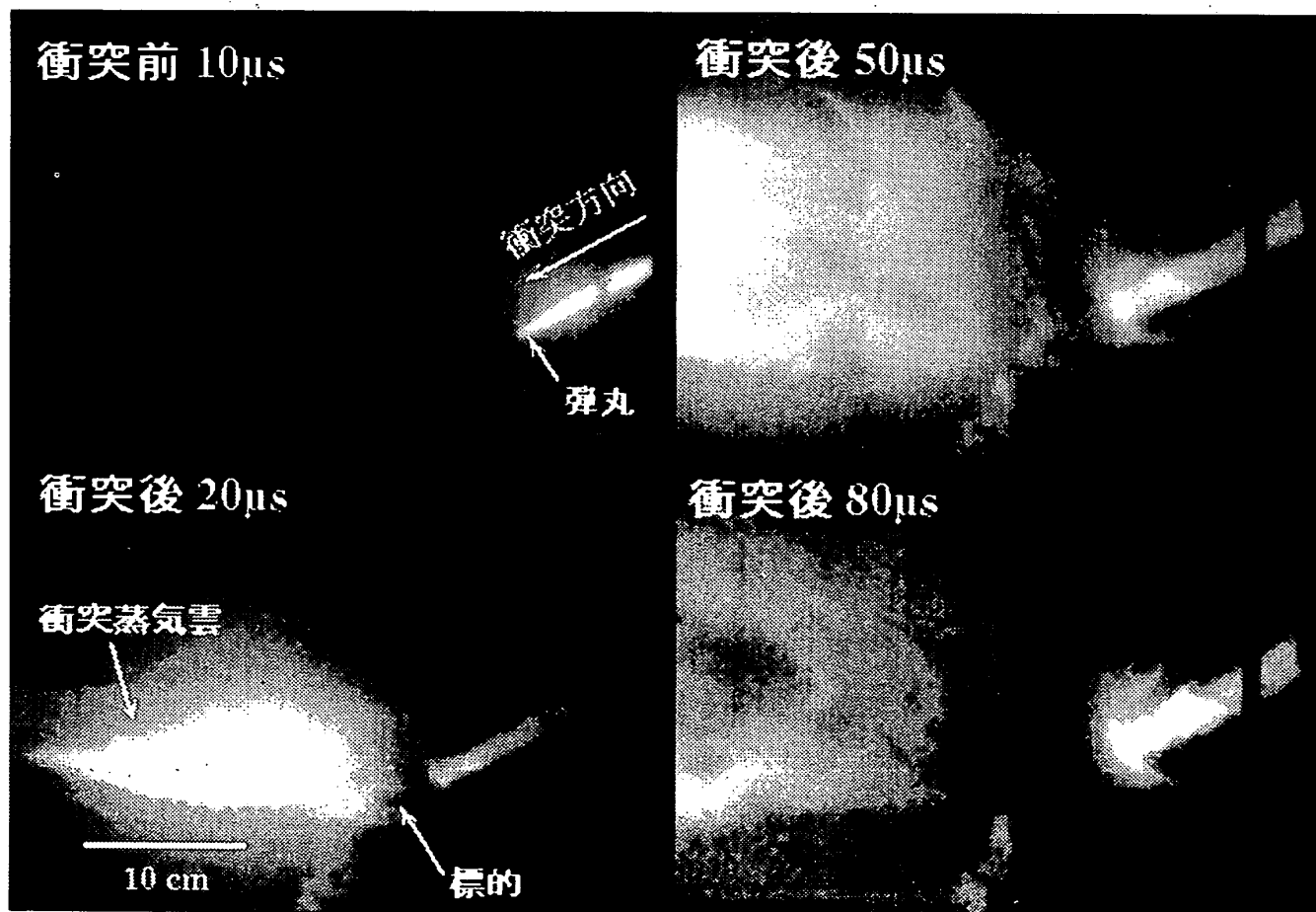


図4: 実験室内での高速衝突現象の高速写真。衝突後、衝突蒸気雲が激しい発光を伴って膨張しつつ飛び去っていくのが見える。この例では、直径7.7mmのポリカーボネートの弾丸を速度6.1km/sで101torrのアルゴン大気の中に置いた液体の水の標的に衝突させている。衝突の瞬間を基点とした時間 $t$ が図中に表示してある。

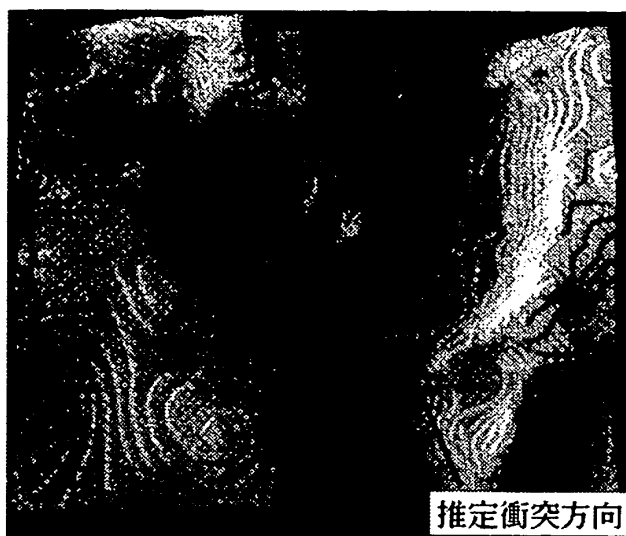


図5:メキシコユカタン半島北部のChicxulub Crater周辺のフリーエア重力異常図。図は[18]のものを改編。

King Craterで観察した地形的特徴とChicxulub Craterの地形的特徴には非常に大きな共通点がある。まず、中央環状丘が一方方向に破れている。さらにクレーターの一方方向が急坂で深く掘れていて、反対方向は浅くなだらかな傾斜となっている。これは、Chicxulub Craterを作った衝突が南南東より北北西向きであったことを強く示唆するものである。さらに、このような明らかな非軸対称性が現れるのは、衝突角が水平からおおよそ40度以下においてである[27]。したがって、Chicxulubの衝突は衝突角度30度程度のかかなり斜めの衝突であった可能性が高い。

この場合、K/T衝突はどのような蒸気雲を作り、地球の表層環境にどんな影響を与えたのであろうか？まず、衝突天体の飛来方向が南南東よりであったとすると、図4のような衝突下流向きの衝突蒸気雲は、メキシコ湾の上空を通過し、北アメリカに達する。イリジウムの全球分布量やChicxulub Craterの直径などから、衝突天体の大きさはおよそ10km程度であったと予想されている[e.g., 1, 3]。したがって、生成する衝突蒸気雲の膨張後の大きさは数百から数千kmであったであろうと予想される。このような巨大な火球が北アメリカ上空を飛ばせば、強力な熱輻射などによって地上の生物に甚大な打撃が与えられたことは必至である[9]。逆にこの火球の影響が直接届かない南半球で

は、被害の程度が比較的小さくなるはずである。これは上記の地質学的記録と調和的である。

## 7. おわりに

以上、K/T絶滅事件についての研究の概観をしてきた。K/T絶滅事件には、まだまだ未解決の事象も非常に多く残されている。しかし同時に、様々な新しい知見も得られてきたことも事実である。ここで特に重要なことは、この20年間の研究成果のおかげで、我々は具体的な物理モデルを地質記録と一対一に比較検討できるようになったことである。今後は、このような一対一の直接比較により、K/T絶滅事件の描像をより正確に描いていくことが可能になっていくものと考えられる。

## 謝辞

本稿の完成は、執筆を勧めて下さり、また多くの詳細なコメントを戴いた田近英一さんに負うところが大変大きい。また、査読者の方および門野敏彦さんからも貴重なコメントを戴いた。ここに感謝の意を表したい。

## 参考文献

- [1] Alvarez, L.W., et al., 1980: Science, 208, 1095-1108.
- [2] Bohor, B.F., et al., 1992: Geochim., Cosmochim. Acta. 56, 3603-3606.
- [3] Hildebrand, A.R. et al., 1991: Geology, 19, 867-871.
- [4] Swisher, C.C. et al., 1992: Science, 257, 954-958.
- [5] Blum, J.D. et al., 1993: Nature, 364, 325-327.
- [6] Sheehan, P.M. and D.E. Fastovsky, 1992: Geology, 20, 556-560.
- [7] Sheehan, P.M. and T.A. Hansen, 1986: Geology, 14, 868-870.

- [8] Zachos, J.C. et al., 1989: *Nature*, 337, 61-64.
- [9] D'Hondt, S. et al., 1994: *Geology*, 22, 983-986.
- [10] Tschudy, R.H. et al., 1984: *Science*, 225, 1030-1032.
- [11] Saito, T., et al., 1986: *Nature*, 323, 397-417.
- [12] Vajda, V. et al., 2001: 294, 1700-1702.
- [13] Johnson, K.R., 1993: *Nature*, 366, 511-512.
- [14] Toon, O.B. et al., 1982: *GSA Spec. Pap.*, 190, 187-200.
- [15] Milne, D.H. and McKay, 1982 C.P., *GSA Spec. Pap.*, 190, 297-303.
- [16] Melosh, H.J. et al., 1990: *Nature*, 343, 251-254.
- [17] Wolbach, W.S. et al., 1988: *Nature*, 334, 665-669.
- [18] Schultz, P. H. and S. D'Hondt, 1996 *Geology*, 24, 963-967
- [19] Caldeira, K. and M.R. Rampino, 1993: *Paleoceanography*, 8, 515-525.
- [20] Sigurdsson, H. et al., 1986: *Science*, 232, 629-633.
- [21] Pope, K.O. et al., 1997: *J. Geophys. Res.*, 102, 21,645-21, 664.
- [22] Pope, K.O. et al., 1994: *Earth Plant. Sci. Lett.*, 128, 719-725.
- [23] Ohno, S., et al., 2002: *LPSC. XXXIII*, #1634.
- [24] Zahnle, K.J., 1990: *GSA Spec. Pap.*., 247, 271-288.
- [25] Retallack, G.J., 1996: *GSA Today*, 6, 1-8.
- [26] Gault, D.E. and J.A. Wedekind, 1978: *Proc. Lunar Sci. Conf.* 9, 3843-3875.
- [27] Schultz, P.H., and D.E. Gault, 1990: *GSA Spec. Pap.*, 247, 239-261.
- [28] Schultz, P.H., 1996: *J. Geophys. Res.*, 101, 21,117-21, 136.