

# チチュルブ衝突後の生態系回復を支えた熱水活動 —海洋オスミウム同位体比が示す長期的影響—

佐藤 峰南  
Sato Honami

## 1. はじめに

地球史において、巨大天体衝突イベントは地球表面環境や生物進化、物質循環に大きな影響を与える現象として注目されてきた。その代表例として、約6600万年前の白亜紀末に発生した巨大天体衝突は、恐竜をはじめとする生物の大量絶滅と関連付けられている。この衝突により、メキシコ・ユカタン半島沖に直径約200 kmのチチュルブ・クレーターが形成され、大気・海洋・岩石圏を巻き込む地球規模の環境変動が引き起こされた<sup>1)</sup>。従来の研究の多くは、この衝突イベントがどのように大量絶滅をもたらしたのか、そのメカニズムの解明に焦点を当ててきた。一方で近年は、衝突後の生態系の回復過程に関する研究も注目を集めている。特に、チチュルブ・クレーター内部では、数十万年規模で熱水活動が持続した可能性が示され、これが衝突後の生態系回復に寄与したという新たな視点が提案されている<sup>2,3)</sup>。

衝突後に生じた環境変化や生態系の回復過程を検討する上で、海洋中のオスミウム同位体比( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比)は有効な地球化学的指標となる。この指標は、衝突直後の隕石物質の供給だけでなく、クレーター内部での熱水活動等、長期かつ局所的な物質供給プロセスの痕跡も追跡できる。本稿では、同位体地球化学、特にレニウム(Re)-オスミウム(Os)同位体システムの原理と地球化学的意義を述べる。更に、チチュルブ・クレーター掘削コア試料及びメキシコ東部の堆積物から得られた高解像度Os同位体比データを紹介し(図1)、巨大天体衝突後の熱水活動と生態系回復との関連性を解説する。



図1 高解像度のOs同位体比記録が復元されたメキシコ湾内の地域

## 2. Re-Os 同位体システム

オスミウム(Os)は、強親鉄性元素(Highly siderophile elements: HSE)の1つであり、地球形成初期において、その大部分が金属鉄と共に核へ分配されたと考えられる。そのため、現在の地球表面(地殻・海洋)に存在するOs量は極めて少ない(大陸地殻中で約30 ppt)。一方、炭素質コンドライト等の隕石中にはOsが高濃度(約500 ppb)で含まれており、地球表面へのOs供給源として重要な役割を果たす。

Osには複数の安定同位体が存在するが、地球化学研究において特に重要なのが $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比であ

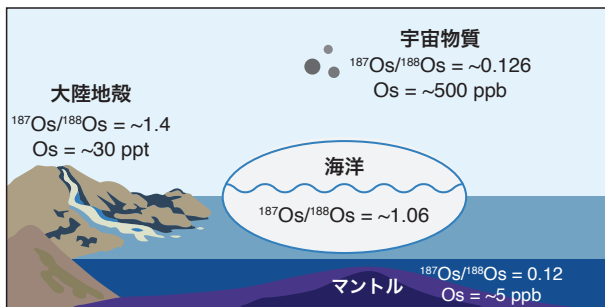


図2 Osの供給源及び海洋中の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比の模式図  
文献5)をもとに作成

る。 $^{187}\text{Os}$ は、 $^{187}\text{Re}$ の $\beta$ 壊変(半減期416億年)によって生成される放射起源同位体であり、時間と共に増加する。そのため、 $\text{Re}/\text{Os}$ 比の高い物質は、時間の経過と共に $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が増加する。一般に、大陸地殻は $\text{Re}$ に富み $\text{Re}/\text{Os}$ 比が高いため、風化や侵食作用によって海洋に供給される $\text{Os}$ は高い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比(約1.4)を示す。一方、マントル由来物質や隕石は $\text{Re}/\text{Os}$ 比が低く、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比も低い値を持つ(約0.12)。この明瞭なコントラストにより、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比は供給物質の起源を示す有効な地球化学的トレーサとして利用されてきた。

海洋は、大陸地殻、マントル物質、宇宙物質(隕石や宇宙塵)が混合する場であり、海洋中つまり海底堆積物中の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比の変化は、これら3つの供給源の流入量変化を鋭敏に反映する(図2)。また、海洋中の $\text{Os}$ の滞留時間は約1~4万年と見積もられている<sup>4)</sup>。海洋大循環に比べてこの滞留時間は十分に長いので、海洋中の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比は比較的均質であり、全球平均的な地球表層環境の変化を反映する指標として機能すると考えられている<sup>5)</sup>。

### 3. メキシコ湾内の堆積物に記録されたOs同位体比異常と熱水活動

中生代と新生代の境にあたるK/Pg(白亜紀/古第三紀)境界層で観測される $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比の急激な低下は、巨大天体衝突に伴う隕石物質の地球表層への大量供給を示す、最も信頼性の高い地球化学的証拠の1つである。イリジウム(Ir)の濃集と連動したこのOs同位体比異常は、世界各地の遠洋性堆積物でも確認されており、衝突イベントが全球規模で海洋化学に影響を及ぼしたことを示している。

従来の研究では、大西洋や南極海等、衝突地点か

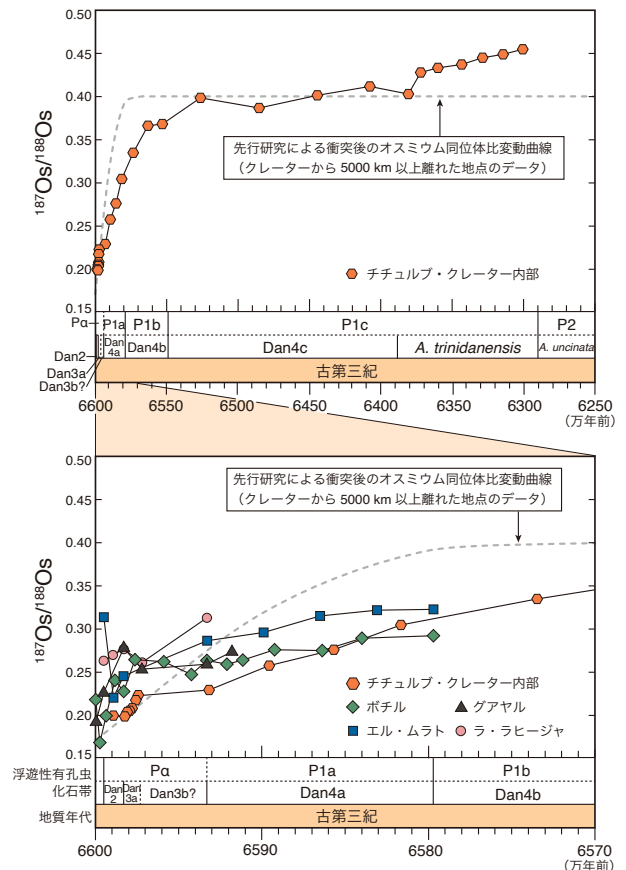


図3 メキシコ湾内の堆積物から得られた天体衝突後の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比変動記録

文献3)より一部改変

ら5000 km以上離れた遠洋性堆積物において、衝突直後に $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が急激に低下(0.17~0.20)した後、約20万年で衝突前の値(0.4)へ回復することが示されてきた<sup>6)</sup>。この回復時間は、海洋中の $\text{Os}$ の滞留時間と整合的であり、隕石由来の $\text{Os}$ の一時的供給と、大陸風化由来 $\text{Os}$ の寄与によって説明される。

しかし、チチュルブ・クレーター内部の掘削コア試料に記録されたOs同位体比は、こうした全球平均的なOs循環モデルでは説明できない挙動を示す。衝突後の堆積物の最上位層において $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が約0.19まで低下する点は他地域と共通するものの、その後も低い同位体比が約70万年にわたり持続する(図3)。この持続時間は、隕石物質の直接的な沈降や再懸濁といった短期プロセスでは説明できず、衝突後も継続的に低い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比を持つOsの供給源が存在したことを示唆する。

この長期的なOs同位体比低下の最も有力な要因

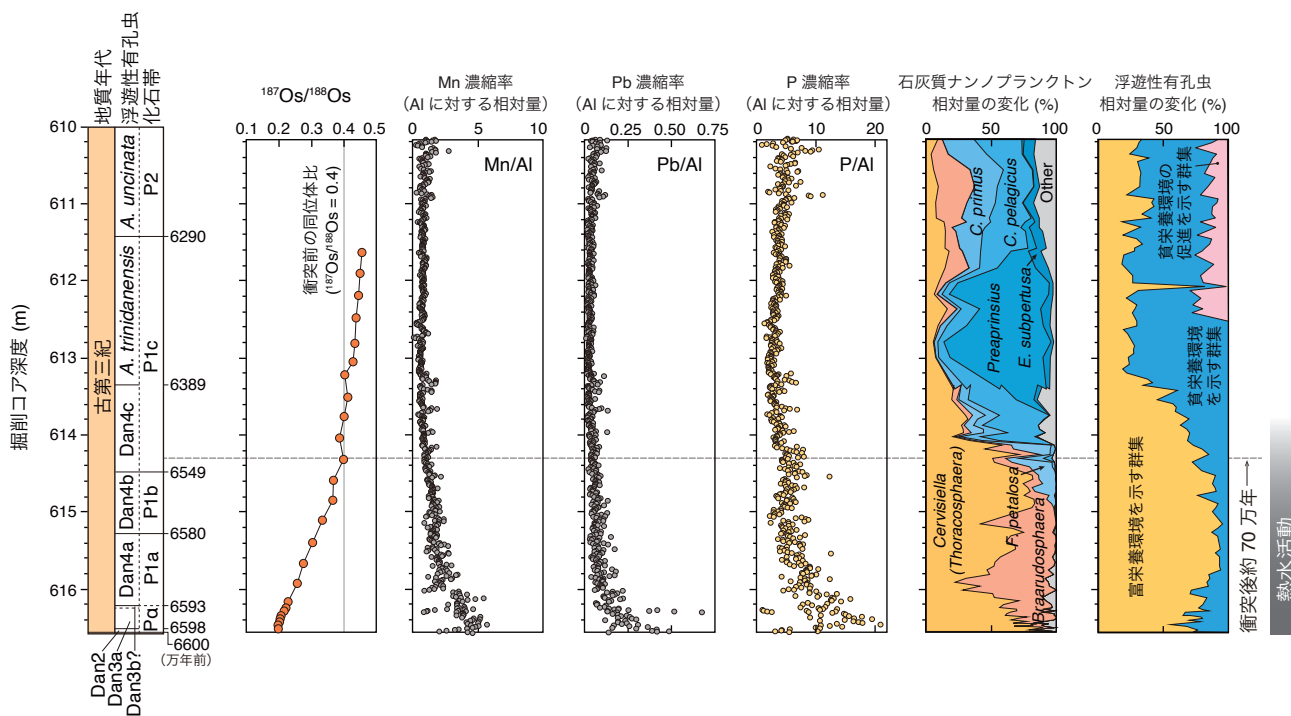


図4 チチュルブ・クレーター内部掘削コア試料から得られた天体衝突後の化学層序及び化石群集の変化

文献 3, 9) より一部改変

として、衝突によって誘発されたクレーター内部の熱水活動が提案されている<sup>3)</sup>。巨大天体衝突は、地殻を広範囲に破碎する。また、衝突に伴い溶融岩体や高温岩石がクレーター下の地殻に残存したと考えられる<sup>7)</sup>。このような条件下では、海水が地下深部へ浸透して高温の岩石と反応することで、長期間にわたる熱水循環系の形成が想定されている。数値モデルや掘削試料の岩石学的解析からも、チチュルブ・クレーター内部では数十万年規模で熱水活動が持続された可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。Os 同位体比の観点から重要なのは、この熱水系が低い<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os比を持つ供給源として機能する点にある。衝突地点周辺には隕石物質が集積しており、それらはRe/Os比が低く、同位体的に非放射起源的な、すなわち低い<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os比を持つOsを豊富に含む。このような隕石由来のOsは、クレーター下での熱水活動により溶脱・輸送され、海洋へ継続的に供給された可能性が高い<sup>3)</sup>。

実際に、Os 同位体比の低下が継続する期間と一致して、マンガン (Mn) や鉛 (Pb) といった典型的な熱水性元素の顕著な濃集が観測された (図4)。これらの元素は、熱水プルームを通じて海水に供給

され、堆積物中に酸化物として沈殿することが知られている。Os 同位体比異常と熱水の供給を示唆する重金属元素の地球化学シグナルが同時に記録されていることは、Os 同位体比の長期的な低下が、堆積物中に残された熱水活動の記録であることを裏付けている。

#### 4. 熱水活動と結びついた衝突地点での生態系回復

チチュルブ衝突直後の海洋環境は、粉塵やエアロゾルによる日射遮蔽の影響を受け、光合成に依存する一次生産が著しく制限されたと考えられる。その結果、浮遊性有孔虫を含むプランクトン群集は壊滅的な打撃を受け、K/Pg境界直後には生物多様性と個体数が急激に低下した<sup>8)</sup>。しかし、チチュルブ・クレーター内部及び周辺堆積物の化石記録は、こうした崩壊期を経た後、比較的早期に生物活動の回復が始まっていたことを示している。注目すべきは、Os 同位体比が低い状態で安定している期間に、生物基礎生産の指標となる石灰質ナノプランクトン化石や、海洋環境の指標となる浮遊性有孔虫化石の

増加と化石群集の変化がみられる点である (図4)。天体衝突直後のクレーター内では、石灰質ナノプランクトン及び浮遊性有孔虫の化石が急速に増加する<sup>9)</sup>。その後、Os 同位体比が衝突前の値に回復する約70万年を境に、富栄養環境を示す化石群集から貧栄養環境を示す群集への顕著な移り変わりがみられる (図4)。このような生物活動の回復過程において重要な役割を果たしたと考えられるのが、衝突後に持続した熱水活動による栄養塩の供給である。

熱水流体は、Mn や Pb に加え、リン (P) 等の主要栄養塩を海洋に供給する。特に P は海洋生態系における一次生産を律速する元素であり、その供給量の増加は、クレーター内部で特徴的にみられる衝突直後の生物生産の再開に直結した (図4)。光合成が制限された環境下においても、化学合成微生物や、栄養塩に依存した初期のプランクトン群集は、こうした熱水起源の物質供給によって維持・拡大された可能性がある。

堆積物中に低い  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比が長期間安定して記録されていたことは、熱水活動が少なくとも70万年にわたり比較的安定的に継続していたことを示している。この安定した熱水供給は、衝突後の不安定な海洋環境において、局所的ではあるものの、生態系回復の条件を整える役割を果たした可能性がある。このように、Os 同位体比や元素組成の変動、化石群集の変化を統合することで、衝突後の海洋における破壊から回復までのプロセスを、時間軸に沿って具体的に描き出すことが可能となった。

## 5. 地球化学的意義と今後の展望

本稿で紹介した Os 同位体研究は、巨大天体衝突の影響が、衝突直後の瞬間的な化学異常にとどまらず、数十万年規模で海洋化学と生態系に影響を及ぼし得ることを示している。また、Os 同位体比は全球平均的な海洋の物質循環だけでなく、衝突後の熱水活動のような局所的プロセスを反映して変動することが明らかになった。これにより、同位体地球化学の解釈において、空間スケールや局所的プロセスの重要性が改めて認識される。

Os 同位体は、天体衝突に限らず、火山活動や大陸風化といった地球上のプロセスを解読する強力なツールである。本稿で紹介した研究は、衝突後に生じた地球内部プロセスや生態系再編の長期的影響を、Os 同位体という明確な地球化学的シグナルを通じて描き出した一例である。本稿が、Os 同位体研究の可能性と情報量の豊かさを再認識する一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) Alvarez, L.W., *et al.*, *Sci.*, **208**, 1095-1108 (1980)
- 2) Kring, D.A., *et al.*, *Sci. Adv.*, **6**, eaaz3053 (2020)
- 3) Sato, H., *et al.*, *Nat. Commun.*, **16**, 2901 (2025)
- 4) Oxburgh, R., *Geochem. Geophys. Geosys.*, **2**, 2000GC000104 (2001)
- 5) Peucker-Ehrenbrink, B., *et al.*, *Terra Nova*, **12**, 205-219 (2000)
- 6) Ravizza, G., *et al.*, *Paleocean.*, **27**, PA3219 (2012)
- 7) Mogan, J.V., *et al.*, *Sci.*, **354**, 878-882 (2016)
- 8) Schulte, P., *et al.*, *Sci.*, **327**, 1214-1218 (2010)
- 9) Jones, H.L., *et al.*, *Geology*, **47**, 753-756 (2019)

(九州大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門)