

Os 同位体から探る海洋隕石衝突イベントの証拠

野崎 達生

Nozaki Tatsuo

1. はじめに

地球上に落下する隕石は、宇宙の成立ちを知る貴重な試料となるだけでなく、約 6,600 万年前の白亜紀～古第三紀境界の恐竜絶滅に代表される生物大量絶滅とその後の生物進化のトリガーとなり得るため、多くの人々の注目を引く。2013 年 2 月にロシアのチェリャビンスク州に落下した隕石や、2020 年 7 月に千葉県に落下した習志野隕石は、多くのマスメディアによって報道された。天体軌道計算や陸上クレーター数から、直径 1 km を超える隕石（＝小惑星）は 100 万年に 1 度落下したと考えられている。しかし、隕石衝突に由来する Ir を含む白金族元素（PGE）の異常濃集、後述する Os（オスミウム）同位体比組成（ $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ）の負異常、Ni に富むスピネル粒子を含む球状粒子（スフェルール）や衝突石英の産出等の証拠を有するエジクタ層は、これまで世界各地から 30 個しか報告されていない¹⁾。更に、地球表層の約 70% を占める海洋には、陸上よりも多くの隕石が落下したはずだが、約 251 万年前に南氷洋に落下した Eltanin 隕石の 1 例しか報告されていない^{2,3)}。

2011 年に太平洋の広範囲にわたるレアアース泥⁴⁾（総レアアース濃度が 400 ppm を超える深海堆積物）の分布が報告されて以降、東京大学と（国研）海洋研究開発機構（JAMSTEC）が中心となり、南鳥島周辺に胚胎するレアアース泥の分布調査や記載、化学分析が精力的に行われてきた^{5,6)}。レアアース泥の成因や元素濃集機構の解明のため、筆者らは Os 同

位体によるレアアース泥の堆積年代決定を行っているが^{7,8)}、その過程で、Os の異常濃集と同位体比異常を示す特異層を発見した。更に、この特異層からは Ir を含む PGE の異常濃集と、NiO に富むスピネル粒子を含むスフェルールが多産するため、隕石衝突イベントに由来するエジクタ層であることが明らかになった⁷⁾。このエジクタ層の堆積年代は、Os 層序年代から約 1,100 万年前と推定され、陸上

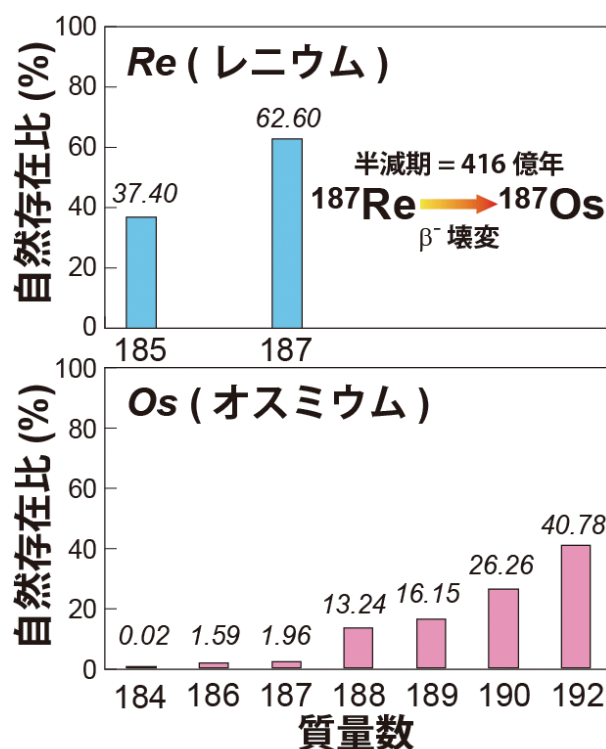


図1 Re と Os 同位体の自然存在比

に大きなクレーターが存在しないことから、世界で2例目の海洋隕石衝突イベントの可能性が高い⁷⁾。本稿では、このような地球の古環境を理解するうえで有用なツールである Os 同位体比組成、Os 層序年代の原理を平易に解説し、その応用例として中新世海洋隕石衝突イベントの発見について紹介する。

2. Os 同位体比組成とそのシステムティクス

Os は原子番号 76 番の元素であり、6 つの白金族元素 (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) の 1 つである。Os には、主に ^{184}Os , ^{186}Os , ^{187}Os , ^{188}Os , ^{189}Os , ^{190}Os , ^{192}Os の安定同位体が存在する (厳密には ^{186}Os は半減期 2×10^{15} 年で ^{182}W に α 壊変するため、安定同位体ではない) (図 1)。Os と隣接する原子番号 75 番の Re には、 ^{185}Re と ^{187}Re の 2 つの同位体が存在し (図 1), ^{187}Re は半減期 416 億年で β^- 壊変して、 ^{187}Os を生じる。この $^{187}\text{Re} \Rightarrow ^{187}\text{Os}$ の放射壊変系が、地球科学分野において大きく 2 つの用途で活用されている。

1 つ目は、鉱物のできた時間を示す『時計』の役割である。 $^{187}\text{Re} \Rightarrow ^{187}\text{Os}$ 放射壊変系は、安定同位体である ^{188}Os との比を取ることで、次式で表される。

$$\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_t = \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_i + \left(\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}\right)(e^{\lambda t} - 1) \dots (1)$$

t は年代値, i は初期値, λ は壊変定数 (1.666×10^{-11})

である。 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_t$ 及び $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ は測定で得られるので、(1) 式は一次関数 ($y = b + xa$) の式と見なせる。そして、この近似直線 (アイソクロン) の傾き a から年代値 t を求めることができる。硫化物鉱床、隕石、黒色頁岩、石油鉱床等の数値年代を決定できるが、詳細は他の解説を参照されたい⁹⁻¹¹⁾。

2 つ目の役割は、地球環境変動を読み解くための『指標 (proxy)』である。図 2 は、現世の地球表層の Os 同位体システムティクスである。Re, Os は共に親鉄・親銅元素であるため、マグマの分化作用により地球表層ほど濃度が低くなる。また、Re の方が Os に比べて液相濃集度が高い (インコンパチブルである) ため、分化作用の最終産物である大陸地殻は、Os の 6 倍強の Re (= ^{187}Os の親核種) を含む。その結果、長い年月の経過と共に大陸地殻の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ は高い (radiogenic な) 値を、火成岩やマントルの $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ は低い (unradiogenic な) 値を有する (図 2)。そして、海水の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ は河川水、熱水、宇宙塵 (cosmic dust) の 3 つのフラックスの相対的バランスに支配されるため、過去の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を地球表層の堆積物・堆積岩等から復元することで、地球環境変動を解読できる。また、地球深部の未分化な岩石に相当する隕石は、地球表層に比べて数百~数千倍の Os を含む PGE 濃度と低い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (~ 0.125) を有するため、Os は過去の地球上への隕石衝突イベントの検出にも有用である。

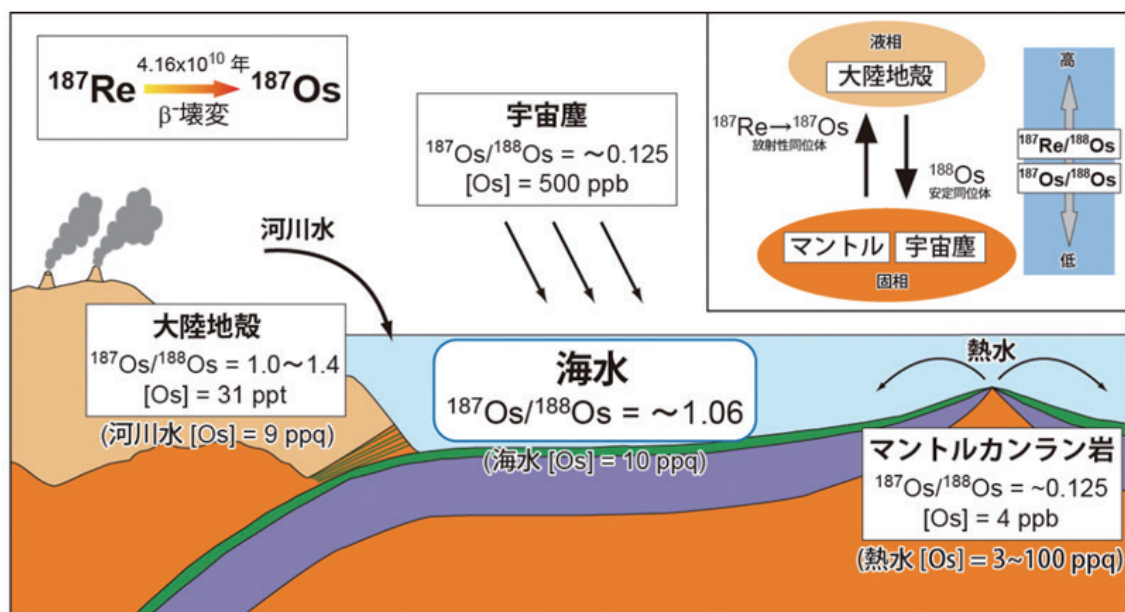


図 2 地球表層の Os 同位体比システムティクス

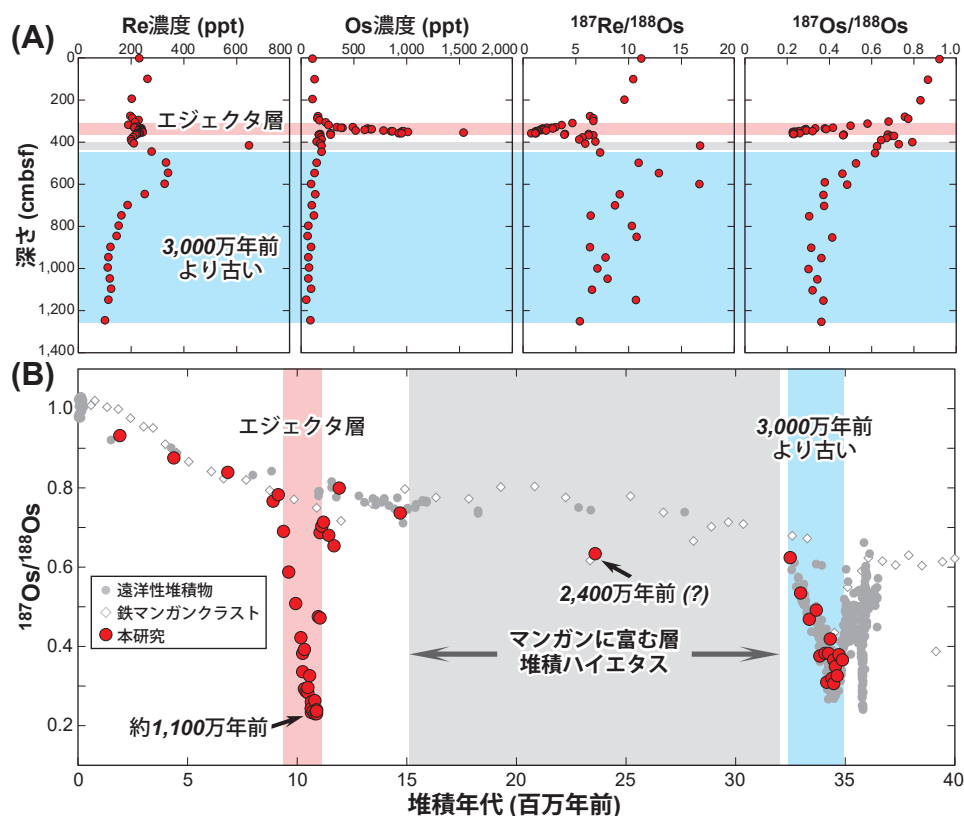


図3 MR14-E02 PC11 コア試料の Re-Os 組成及び Os 年代

Os は、上記の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を利用した『時計』としての役割も有している。地球表層の堆積物・堆積岩等から復元された古海水の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 経年変動曲線と試料中の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を比較・フィッティング（総合合わせ）することで、相対年代を決定することができ、従来は年代決定が困難であったマンガンクラストやレアアース泥等に活用されている^{7,8)}。

3. 中新世海洋隕石衝突イベントの発見

鉱床学において、その鉱床がいつできたか、生成年代を決定することは、元素の濃集機構の解明のみだけでなく今後の探査指針に繋がるため重要である。南鳥島周辺海域を含む太平洋に分布するレアアース泥についても、2 節で述べた $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を利用して、精力的な年代決定が行われている^{7,8)}。そして、総レアアース濃度が 5,000 ppm 以上のいわゆる『超高濃度レアアース泥』は、約 3,450 万年前に生成されており、当時の地球寒冷化と関連していることが明らかにされた⁸⁾。その年代決定の過程で、

レアアース濃集層とは関係のない時代（より若い上位の地層）において、Os の異常濃集と $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ の負異常を示す特異層が発見された（図 3A）。

分析に用いられた試料は、南鳥島南方約 130 km、水深 5,647 m において、海洋地球研究船「みらい」の調査航海により採取されたピストンコアである（MR14-E02 PC11；コア長 1,311.5 cm）。海底面からの深度 356.9 cm に、Os 濃度が最大で～1.5 ppb、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ が～0.229 に達する層が存在するが（図 3A）、この Os 濃度は上部大陸地殻の平均値（ $[\text{Os}] = \sim 31 \text{ ppt}$ ）の約 50 倍に達する（図 2）。また、このような ppb レベルに達する高い Os 濃度と低い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を有する地球表層物質の候補として、マントルを構成するカンラン岩か地球外に由来する隕石・宇宙塵の 2 つしか可能性が考えられない。Os の異常濃集と低い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ がカンラン岩由来だとすると、この深さのコア試料のうち約 40% がカンラン岩成分で構成されていないといけませんが、船上でのコア記載（肉眼観察やスミアスライドの顕微鏡観察）の結果、そのような岩片や構成鉱物は観察されなかった。また、

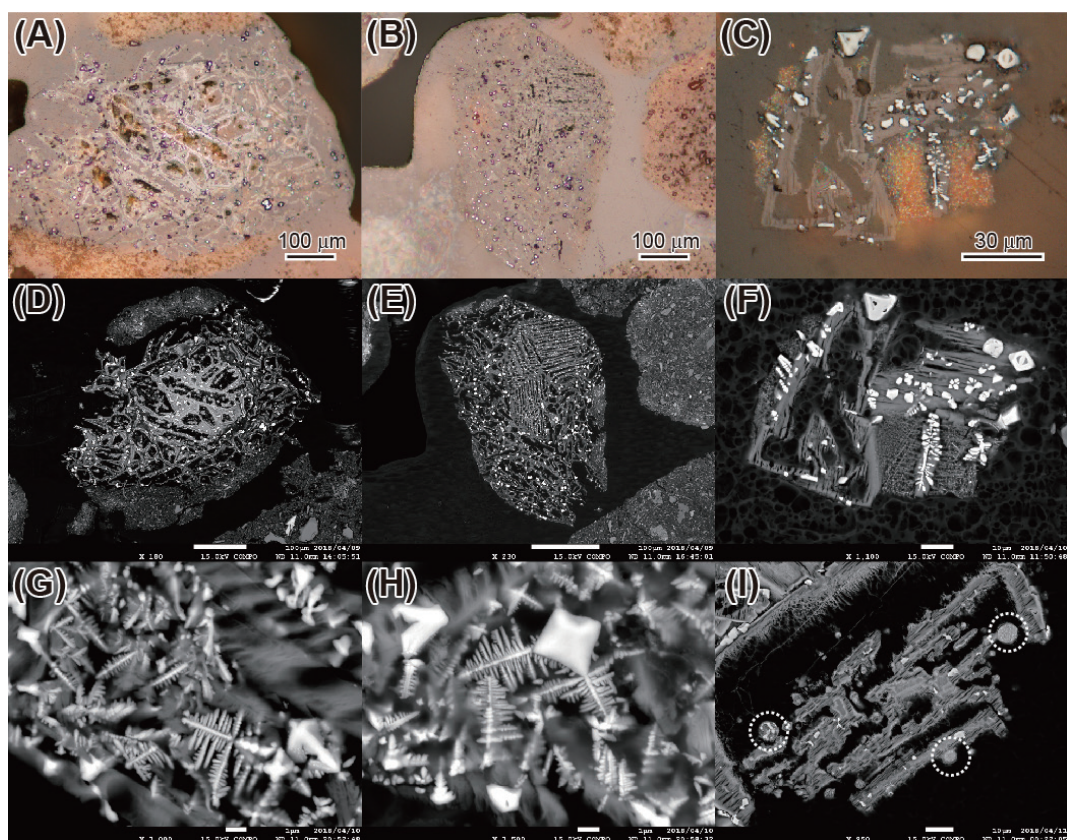


図4 スフェルールの反射顕微鏡写真 (A~C) 及び後方散乱電子画像 (D~I)

Fe や Mg 濃度を含むコア試料の化学組成も、カンラン岩片の混入を支持しない結果であった。したがって、隕石・宇宙塵に由来する可能性が高いことから、Os を含む他の PGE の濃度測定や更なる記載を行った。

海底面からの深度 356.9 cm の Os 組成に異常を示す層を挟むように、Os を含む PGE 組成を異なる分析手法で測定した結果、上記の Os 濃度が最高に達した層準で、Ir が 3.2 ppb、Os が 2.2 ppb ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.189$)、Ru が 3.1 ppb、Pt が 13.4 ppb、Pd が 4.3 ppb を示し、いずれの濃度も上部大陸地殻平均値の数十倍に達する。特に、Ir は恐竜絶滅を引き起こした白亜紀～古第三紀境界 (約 6,600 万年前) の隕石衝突イベントに伴うエジクタ層よりやや低いものの、カナダに直径 90 km のクレーターを生じさせた三畳紀後期 (約 2 億 1,500 万年前) の隕石衝突イベントのエジクタ層に匹敵する高い値を示すことが明らかとなった。そこで Os を含む PGE が異常濃集する試料について、粉末試料の粗粒部 (62 μm 以上) をふるい分けしたものをアクリル樹脂で固定し、研磨

片を作成してより詳細な記載 (電子顕微鏡観察、鉍組成測定等) を行った。

Os を含む PGE 組成に異常を示す試料の粗粒部は、生物源リン酸カルシウム (生物の歯・骨等に由来) や Fe-Mn 酸化物が多く含まれるが、しばしば数十 μm ~数百 μm 径の球状粒子 (スフェルール) が観察された (図 4A, B)。スフェルールの表面は深海底の遠洋性堆積物に覆われているが、その中身はカンラン石の変質した六角板状の粘土鉍物に多数のスピネル (尖晶石) を伴う構造を示す (図 4C~E)。更に、このスピネルは様々な組織を示し、急冷で生成される樹枝状組織や球状組織を示す (図 4F~I)。これらのスピネル粒子の化学組成を測定すると Ni や Cr が多く含まれており、最大で NiO 濃度が 23.3 wt% に達する。

以上の記載学的・地球化学的特徴は、『地球表層に隕石が衝突し、隕石と地球表層物質が混合 (部分溶融と急冷)・飛散して形成されたエジクタ層に相当する』と考えると、すべて調和的に説明される。また、ピストンコア試料が有する $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ を海底

堆積物やマンガンクラストから復元された古海水の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 経年変動曲線と比較すると、今回新たに発見されたエジエクタ層の堆積年代は約 1,100 万年前と見積もられる（図 3B）。これまで地球上で発見されている隕石やクレーターに関するデータベース（Earth Impact Database）によると、約 1,100 万年前という時代には特に大きなクレーターが陸上から報告されていない。したがって、南鳥島南方のピストンコア試料から発見されたエジエクタ層は、深海底に衝突した隕石に由来する可能性が高く、約 251 万年前に南氷洋に落下した Eltanin 隕石に次ぐ『世界で 2 例目の海洋隕石衝突イベント』の可能性が高い。

二畳紀後期から現在までに、少なくとも 11 回の生物大量絶滅が起こったことが知られているが、その中の最も新しいものが中中新世（約 1,160 万年）の大量絶滅である。この原因は長らく不明であったが、今回発見された海洋隕石衝突イベントと年代誤差の範囲でタイミングが重なることから、残された最後のピースを埋める結果となる可能性がある。今後、他海域の深海堆積物を用いて更なるエジエクタ層探索を行うことにより、中新世海洋隕石衝突イベントの全貌が明らかにされるだろう。

4. まとめと今後の展望

本稿では、Os 同位体が有する化学的特徴・用途とその応用例として中新世海洋隕石衝突イベントの発見事例について紹介した。レアアース泥のような遠洋性堆積物（遠洋性粘土）は堆積速度が遅い性質

があるが（≡ 薄い層厚に長時間の情報が集約されている）、高解像度で過去の情報を復元しにくい短所がある一方で、今回のような過去に地球上に起こった隕石衝突イベントを効率的に検出できる長所を持ち合わせている。高精度の Os 同位体分析法は 1991 年に確立されており、30 年近く経った現在では数多くの試料に応用される円熟期に差しかかっている。また、 OsO_4 分子を気体のまま質量分析装置に導入して迅速・簡便に同位体測定を行う「気化法」も普及しつつあり、地球科学分野における Os 同位体を用いた応用研究が今後も行われていくであろう。

参考文献

- 1) Glass, B. P. and Simonson, B. M., *Elements*, **8**(1), 43-48 (2012)
- 2) Gersonde, R., *et al.*, *Nature*, **390**(6658), 357-363 (1997)
- 3) Goff, J., *et al.*, *Journal of Quaternary Science*, **27**(7), 660-670 (2012)
- 4) Kato, Y., *et al.*, *Nature Geoscience*, **4**(8), 535-539 (2011)
- 5) Iijima, K., *et al.*, *Geochemical Journal*, **50**(6), 557-573 (2016)
- 6) Nakamura, K., *et al.*, *Geochemical Journal*, **50**(6), 605-619 (2016)
- 7) Nozaki, T., *et al.*, *Scientific Reports*, **9**, 16111 (2019)
- 8) Ohta, J., *et al.*, *Scientific Reports*, **10**, 9896 (2020)
- 9) 鈴木勝彦, 地球化学, **33**(2), 67-102 (1999)
- 10) 野崎達生, 他, 地球化学, **48**(4), 279-305 (2014)
- 11) 野崎達生, *Isotope News*, **733**, 13-17 (2015)

((国研)海洋研究開発機構 海洋機能利用部門 海底資源センター)