

シリカ高压相から探る月の天体衝突史

宮原 正明

Miyahara Masaaki

1. 隕石に残された天体衝突の痕跡

天体同士の衝突現象は惑星進化過程の基本的な要素の1つである。人類が手にすることができる地球外物質としては隕石が最も一般的で、その数も多い(2015年11月時点で約52,600個)。ある種の隕石には過去に起きた天体同士の衝突の痕跡が様々な形で残されている。巨大な天体同士が高速で衝突すると、天体表層では衝撃波によってギガ・パスカル(GPa)オーダーの超高压力状態が瞬間的に発生する。この超高压力状態に加えて、岩石中の亀裂や割れ目に

沿った摩擦や応力の集中で岩石の一部が脈状あるいはポケット状に溶融することがあり、これらはそれぞれ衝撃溶融脈(図1(a))、メルトポケット(図1(b))と呼ばれている。天体の岩石はカンラン石、輝石、長石、シリカ、金属鉄、硫化鉄、リン酸塩鉱物、酸化物といった物質で構成されており、これらの物質が超高压力・高温状態におかれると、より安定な高密度相(高压相)に相転移する。衝撃溶融脈やメルトポケットには様々な高压相が生成しており、高压相の存在は天体衝突現象の明確な証拠の1つであ

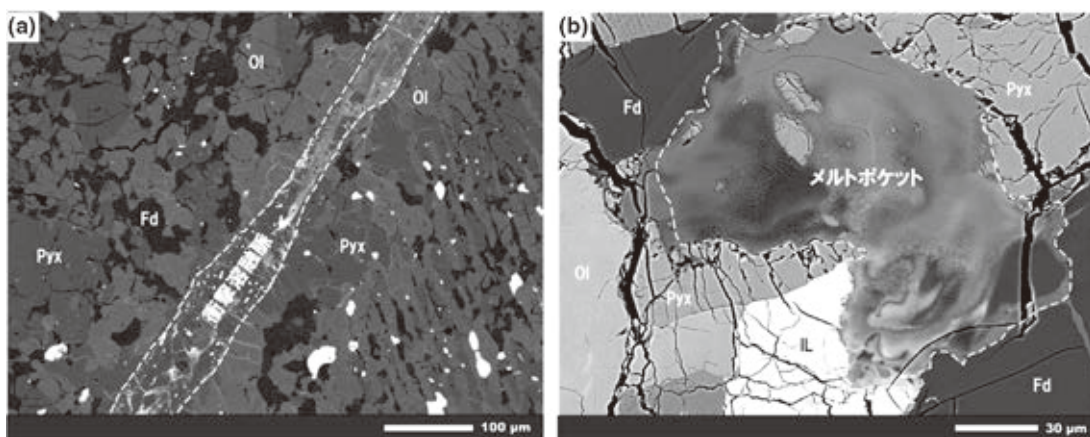


図1 強い衝撃変成を経験した隕石中に見られる (a) 衝撃溶融脈と (b) メルトポケットの反射電子顕微鏡像
溶融脈・メルトポケットにはメルトからの急冷結晶である細粒結晶やガラス、溶融を免れた岩石片が含まれる。
Ol: カンラン石, Pyx: 輝石, Fd: 長石, Il: チタンの酸化物

る。隕石は大まかにはコンドルールと呼ばれる丸い粒を含むコンドライトと、それを含まないエコンドライトに分けられる。コンドルールは原始太陽系星雲内で生成した物質であり、つまりコンドライトは原始太陽系ができた当時の情報を保持している。一方、エコンドライトは形成後に熱変成作用等による分化が起き、初期の情報は失っている。コンドライトは更に普通コンドライト、炭素質コンドライト、エンスタイトコンドライトに分けられる。地球に落下する隕石の約8割は普通コンドライトである。普通コンドライトは火星と木星軌道の間にある小惑星帯内の小惑星に由来する。探査機“ハヤブサ”が試料を地球に持ち帰った小惑星“イトカワ”も普通コンドライトでできている天体である¹⁾。“イトカワ”の観測からも明らかのように、普通コンドライトの母天体も衝突、破壊と再集積を繰り返して進化してきた天体である。普通コンドライトには衝撃溶融脈がしばしば見られ、その脈の内部と周囲ではカンラン石、輝石、長石の高圧相が発見されている^{2,3)}。ところで、カンラン石、輝石、長石は地球の地殻を構成する主要な物質でもある。地殻がプレートの移動に伴って地球深部に沈み込むに従って温度と圧力が上昇しこれらの物質が高圧相に相転移する。すなわち、高圧相は地球深部の構成物質でもある。隕石中の高圧相の研究は、地球深部物質のアナログ物質として60年代に研究が始まったものである。しかし、隕石中の高圧相は衝撃溶融脈（幅：数百 μm >）の中に非常に小さな粒子（粒径：数 μm >）として存在するため、その同定は容易ではなく、産状や生成メカニズムの理解はなかなか進まなかった。2000年代にはいって隕石の研究に透過型電子顕微鏡、集束イオンビーム加工装置、そして放射光X線回折法といった局所分析技術が積極的に利用されるようになった。そうすると様々な隕石中に高圧相が次々と発見され、その産状や生成メカニズムが活発に議論されるようになった。高圧相の核形成と粒成長は圧力・温度条件とそれら

の持続時間に依存する。普通コンドライトの衝撃溶融脈に存在する高圧相の種類や組み合わせ、粒子サイズからこれらの条件を制約し、簡単な1次元モデルを構築して天体衝突（衝突速度や天体のサイズ等）の規模を推定する試みも始まった^{4,5)}。

2. 月に残る衝突の痕跡

月には数多くのクレーターと呼ばれる凹状の地形が存在する。月の表層は粉々に粉砕された岩石の層が厚く覆っている。こうしたクレーターや厚い粉砕された岩石層の存在はいずれも激しい天体衝突の名残と考えられている。また、月には海や盆地と呼ばれる広大な平坦地があり、その成因には巨大衝突現象が関わっている可能性がある。隕石の中には小天体が月に衝突した際に、月の表層から弾き飛ばされて地球に落下した月の岩石、月起源隕石がある。月起源隕石はエコンドライトに属する隕石である。ほかに、我々が手にすることができる月表層の物質としては米国のアポロ計画と旧ソ連のルナ計画で回収されたアポロ試料とルナ試料がある。2000年代以降に火星や小惑星帯由来の天体の隕石から次々と高圧相が発見されるようになってからも、意外なことに月起源隕石や回収試料からは高圧相は見いだされていなかった。月表層を覆う岩石の主要な構成物質は普通コンドライト同様にカンラン石、輝石、長石などであるが、少量のシリカ（ SiO_2 ）もしばしば含まれている。天然で発見されているシリカの高圧相としてはコーサイト（coesite）、ルチル型のステイショバイト（stishovite）、 $\alpha\text{-PbO}_2$ 型のザイフェルタイト（seifertite）がある（図2）。ほかに、 CaCl_2 型とPyriteが超高圧・高温合成実験で合成されているが、これらは天然ではまだ発見されていないため鉱物名は与えられていない。コーサイトとステイショバイトはともに地球のクレーター近傍の岩石中から発見されている。一方、ザイフェルタイトは天然物としては地球上では見付かっておらず、火星から飛来した火星

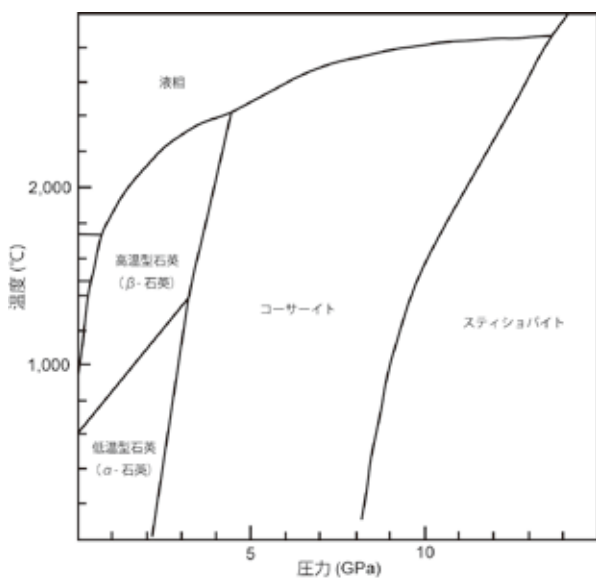


図2 シリカ (SiO₂) の相平衡図

地球表層で天然に産するシリカはほとんどが低温型石英である。
 ※ザイフェルタイトの安定な圧力・温度条件は未解明な部分がありこの図には示していない

表層の岩石、火星起源隕石中のみに見いだされている。筆者らはこのシリカに特に注目し、月の小天体衝突史を解き明かすためにシリカ高压相の探索を行った。

筆者らはまず月の海に由来する月起源隕石 Asuka 881757 を走査型電子顕微鏡とラマン分光装置を用いて調べた。Asuka 881757 には複数のメルトポケットが存在し、その大部分は岩石が衝突イベントで引き起こされた超高压・高温条件下で融解し、後に急冷されてできたガラスであった。メルトポケットには複数の融け残りの岩片が残されており、その1つであるシリカ粒子を詳細に調べると僅かなコーサイトとスティショバイトが存在していた⁶⁾。コーサイトとスティショバイトが生成する圧力条件を考慮すると、Asuka 881757 が8~30 GPa の衝撃圧力を経験したことが分かった。隕石中に記録された衝突イベントの年代推定には K-Ar、Ar-Ar、U-Pb 系の放射年代がよく用いられている。しかし、シリカ粒子に含まれる K や U 濃度は低

く年代を直接的に求めることは困難である。一方、ガラスの ⁴⁰Ar-³⁹Ar 系放射年代として約 38 億年が先行研究で報告されていた⁷⁾。このガラスはメルトポケット内部に存在するシリカ粒子と同等の温度履歴を持つと見なし、コーサイトとスティショバイトが生成した衝突イベントは約 38 億年前に起きたと解釈した。月に残されたクレーターの数密度に基づくクレーター年代学によれば、月では約 38~41 億年前の時期に多量の小天体が集中的に衝突していたとする説がある。これは後期隕石重爆撃期と呼ばれており、Asuka 881757 が記録していた衝突イベントはこの時期に一致し、月で起きた大災厄 (カタクリズム) を解き明かす手掛かりとなった。

筆者らは更に月の海に由来する別の月起源隕石 NWA 4734 も調べた (図3)。NWA 4734 にも多くのメルトポケットや衝撃溶融脈があり、融け残ったシリカ粒子が数多く見いだされた。その一部を集束イオンビーム加工装置で切り出し、SPRING-8 の強力な光を用いた X 線回折実験でザイフェルタイトを見いだすことに成功した⁸⁾。ほかにコーサイトとスティショバイトも生成していた。ザイフェルタイトが安定に生成できる温度・圧力条件から、NWA 4734 は 40 GPa 以上の衝撃圧力を記録していたことが分かった。また、シリカ高压相のカイネテイクスと透過型電子顕微鏡で測定したそれらの粒径を基に、衝突の規模を大雑把に見積もったところ、月に衝突した天体サイズは約 400 m 以上、その天体の衝突で月には直径約 7 km 以上のクレーターができたことが分かった。NWA 4734 では先行研究により長石の ⁴⁰Ar-³⁹Ar 系放射年代が約 27 億年前を示していた⁹⁾。この放射年代は月起源隕石の中では最も若い部類に入るものである。NWA 4734 の長石は衝撃イベントに伴って完全にガラス化していた。長石のガラス化には高压力に加えて高温が加わる必要があり、長石の ⁴⁰Ar-³⁹Ar 系放射年

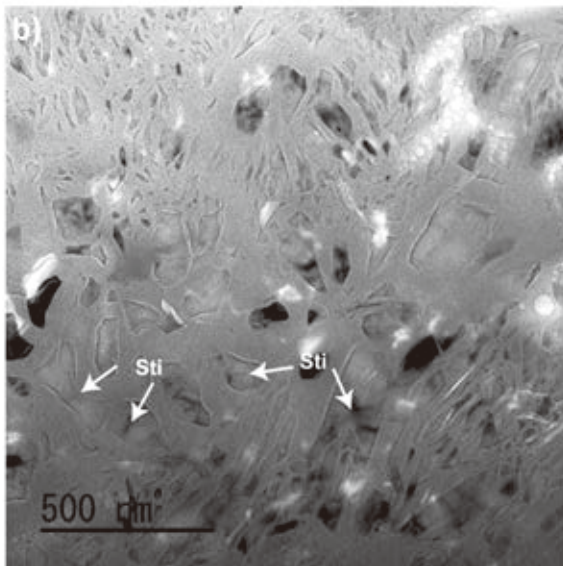
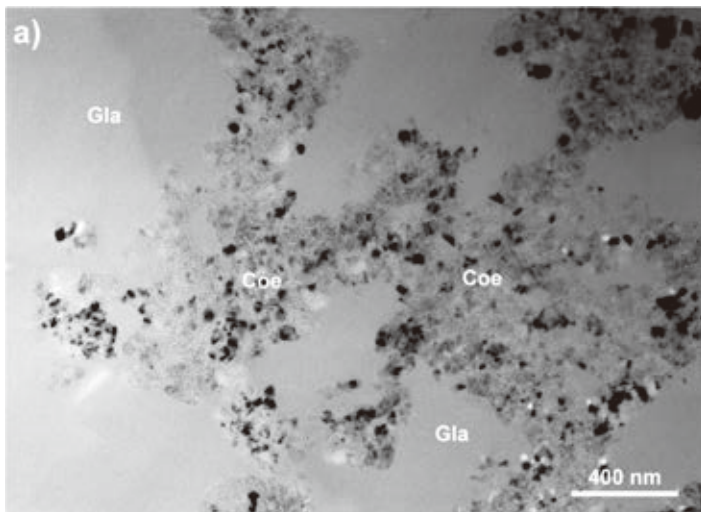


図3 シリカ高圧相の透過型電子顕微鏡像。a) 月起源隕石 NWA 4734 で発見されたコーサイト、粒径 100 nm 以下のコーサイト結晶が集合体をなしている。b) アポロ試料で発見されたスティショバイト
Coe : コーサイト, Sti : スティショバイト, Gla : シリカガラス

代はシリカ高圧相を生成した衝突イベントと密接に関連していると解釈した。NWA 4734 の研究では先に述べた後期隕石重爆撃期が 38~41 億年の間だけでなく、もう少し若い時代まで続いていた可能性を指摘することとなった。

月起源隕石で様々な知見と経験を得た筆者ら

はアポロ計画で回収された月表層試料の研究にも着手した。筆者らはアポロ 15 号が雨の海の淵に位置するハドレー谷近くで回収した試料 (Apollo 15299) を借用した。Apollo 15299 は破壊された岩石片が再度集積した角レキ岩と呼ばれる岩石である。岩石片の中には細粒のシリカ粒子の破片も含まれており、その一部を集束イオンビーム加工装置で切り出し、SPring-8 で X 線構造解析を行った。その結果、Apollo 15299 がスティショバイトを含むことが明らかとなった¹⁰⁾。Apollo 15299 は様々な起源を持つ岩石片が集合した角レキ岩であるため、スティショバイトを生成した衝突イベントを推定するのは困難である。それでも、Apollo 15299 に含まれる物資の種類や化学組成から、このスティショバイトは月の巨大な海の一つである嵐の大洋 (プロセルム盆地) の形成に関与した無数の天体衝突の一つに伴い生成したと推定した。

3. おわりに

隕石中の高圧相を用いた天体衝突現象の解明は普通コンドライトで始まり、徐々に月や火星などほかの天体へ応用されつつある。隕石中の高圧相の研究は地球深部物質のアナログ物質として位置付けられていたため、かつては産状や生成メカニズムの議論が中心であった。しかし、最近になって高圧相のカイネティクスを用いた天体衝突現象の定量化も試みられるようになってきた。天体衝突が起きた年代の推定、すなわち時間軸も重

要である。高圧相が存在する衝撃溶融脈やメルトポケットとそれ以外の部分では温度履歴が著しく異なる。放射年代の解釈には温度履歴が重要な要素の1つであるが、残念ながら、これまでは高圧相の研究と放射年代学の研究は互いに交わることなく別々に行われてきた。同位体比を測定すれば何らかの年代は得られる。しかし、その得られた放射年代がどのようなイベント（例えば、結晶化年代、熱変成年代など）に関連するのかを理解するのは容易ではない¹¹⁾。高圧相を用いた衝突現象の解明は始まったばかりであるが、高圧科学と放射年代学が結びつくことで、太陽系内で起きた天体衝突史の解明が加速度的に進むであろう。

参考文献

- 1) Nakamura, T., *et al.*, *Science*, **333**, 1113–1116 (2011)
- 2) Miyahara, M., *et al.*, *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences U.S.A.*, **105**, 8542–8547 (2008)
- 3) Ozawa, S., *et al.*, *Scientific Reports*, **4**, 5033, doi: 10.1038/srep05033 (2014)
- 4) Ohtani, E., *et al.*, *Earth and Planetary Science Letters*, **227**, 505–515 (2004)
- 5) Xie, Z., Sharp, T.G., and DeCarli, P.S., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 504–515 (2006)
- 6) Ohtani, E., *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **108**, 463–466 (2011)
- 7) Misawa, K., *et al.*, *Geochim Cosmochim Acta*, **57**, 4687–4702 (1993)
- 8) Miyahara, M., *et al.*, *Nature Communications*, doi: 10.1038/ncomms2733 (2013)
- 9) Fernandes, V.A., *et al.*, 40th Lunar and Planetary Science Conference 1045pdf (2009)
- 10) Kaneko, S., *et al.*, *American Mineralogist*, **100**, 1308–1311 (2015)
- 11) El Goresy, A., *et al.*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **101**, 233–262 (2013)

(広島大学大学院 理学研究科)