

花崗岩の衝撃回収実験：石英中の Feather Features 形成機構への示唆

多田賢弘¹, 黒澤耕介², 伊佐純子², 大野遼², Christopher Hamann³, 岡本尚也², 新原隆史⁴,
松井孝典^{1,2}

¹ 千葉工業大学地球学研究センター, ² 千葉工業大学惑星探査研究センター, ³ Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, ⁴ 岡山理科大学理学部

はじめに：天体衝突が起きた証拠は、高压相やガラス、衝撃変成組織として鉱物中に残され、その鉱物学的特徴から経験衝撃圧力を推定することができる。特に石英は、地球上に普遍的に存在することや Planar deformation features (PDFs) などの特徴的な衝撃変成組織を示すことから、地球上の衝突クレーター・イジェクタ層の探索や衝撃圧力の推定に用いられてきた。

石英中の衝撃変成組織の一種である Feather features (FFs) は、石英中の平板割れ目 (Planar fractures; PFs) と、PFs から一方向に伸びる微細なラメラ (FF ラメラ) からなる組織で、天然のクレーター試料中から多く報告されている (e.g., Koeberl and Ferrier 2019)。FFs はこれまでにインパクト中からのみ発見され、衝突実験の結果 7~10 GPa 程度の衝撃圧力での形成が確認されている (Poelchau and Kenkmann, 2011)。また、天然のインパクト中で FFs の方向が揃っていることから、FFs の方向が衝撃波の伝播方向を記録している可能性も指摘されている (Poelchau and Kenkmann, 2011; Ebert et al. 2021)。これらのことから、FFs が 10 GPa 以下の比較的低い衝撃圧力範囲での衝撃変成の証拠として使えることや、衝撃波伝播方向の復元に使えることが期待されている。

しかし、実験的に FFs の形成を確認した例は Poelchau and Kenkmann (2011) の衝撃回

収実験 1 ショットのみに限られており、FFs の形成圧力範囲、形成過程、FFs が何で構成されているのかは明らかになっていない。

そこで本研究では FFs の形成圧力範囲、形成過程、何で構成されているのかを明らかにすることを目的に、花崗岩を用いた衝撃回収実験を行った。本研究では、標的に対して十分に小さい飛翔体を用いた減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験 (Kurosawa et al. 2015, 2021) を行い、0~18 GPa 程度の幅広い衝撃圧力を経験した試料を回収した。さらに実験を模した条件での数値衝突計算を実施し、試料が経験した温度圧力推定を行った。

手法：花崗岩を直径 30 mm、高さ 24 mm の円柱状に加工し、チタン製コンテナに収納した。これに、千葉工業大学惑星探査研究センターの 2 段式軽ガス銃を用いて、直径 2 mm のチタン球または 4.8 mm のポリカーボネイト球を衝突速度 5~7 km/s で衝突させた (Kurosawa et al. 2015, 2021)。回収試料の薄片を作成し、千葉工業大学の偏光顕微鏡および電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) で観察した。石英中の PDFs, PFs, FFs についてはその結晶方位を、千葉工業大学地球学研究センターのユニバーサルステージ搭載偏光顕微鏡により測定した。また、iSALE shock physics code (Amsden et al. 1980; Ivanov et al. 1997; Wünnemann et al. 2006) を用いた

数値衝突計算を実施し、試料の経験温度圧力を推定した。

結果と議論：試料中の衝突点付近において、石英中に PDFs・PFs とともに FFs が形成されているのが観察された。これまでに7 ショット(ショット#494, 505, 517–521)の衝撃回収実験を行い、21 セットの FFs を発見した。偏光顕微鏡下で FF ラメラは、長さ 10–50 μm 、間隔 1–10 μm のラメラとして観察され、PF とのなす角は 35–90°であり、50–60°が最も多い。ユニバーサルステージ顕微鏡で測定した FF ラメラの結晶方位は $\{10\bar{2}1\}$ が最も多く、他に $\{10\bar{1}3\}$ 、 $\{10\bar{1}4\}$ 、 $\{10\bar{1}0\}$ 等がみられた。FFs を構成している PFs の方位は(0001)が最も多く、他に $\{11\bar{2}2\}$ 、 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{10\bar{2}1\}$ 等がみられた。光学顕微鏡下における FF ラメラの長さ・間隔、PFs と FF ラメラの形成方位は、天然のインパクトタイト中で報告されている FFs の特徴と一致している(Poelchau and Kenkmann 2011)。

試料中で FFs が観察された領域の経験衝撃圧力を、iSALE を用いた数値計算により推定した結果、FFs の形成圧力は~4 GPa から~18 GPa であり、従来考えられていたよりも広い衝撃圧力範囲で FFs が形成されることが分かった。

およそ 4–8 GPa で形成された FF ラメラ(4 セット)と、およそ~18 GPa で形成された FF ラメラ(1 セット)について FE-SEM による観察を行ったところ、4–8 GPa で形成された FF ラメラは開口割れ目であること、~18 GPa で形成された FF ラメラは厚さ 0.1 μm 以下の非常に微細なラメラであることが分かった。今後さらに観察数を増やし、FFs の形状が形成圧力に伴って連続的に変化するのか、それとも形成条件によって複数タイプ存在するのかを確かめる。

また、ショット#517 の薄片から見つかった FFs のうち衝突点付近(~16 GPa)で形成された FF と衝突点遠方(~5 GPa)で形成された FF について、予察的に、FFs の方向と衝撃

波伝播方向との比較を行った。FFs の方向は、Ebert et al. (2020)の手法に従ってユニバーサルステージを用いて測定し、衝撃波の伝播方向は、iSALE の計算結果から、人工粘性の上昇面を衝撃波面として推定した(Ivanov et al. 1996)。その結果、衝突点遠方(~5 GPa)で形成された FF の方向は衝撃波伝播方向と概ね一致していた一方で、衝突点付近(~16 GPa)で形成された FF の方向は衝撃波伝播方向から~53°浅い方向であった。

一般に、クレーター形成時の衝撃変成過程では、圧縮過程と圧力緩和過程で主応力軸の方向が変化することが知られており、特に衝突点付近では、緩和過程における主圧縮軸の方向は、圧縮過程における主応力軸の方向から 50–60°程度浅くなることが知られている(Rae et al. 2021)。ショット#517 の薄片で予察的に測定した FFs の方向は、緩和過程における主応力軸方向の特徴と整合的である。このことは、FFs が圧力緩和過程で形成される衝撃変成組織である可能性を示唆している。

※図や参考文献など詳細はスライド(PDF ファイル)をご参照ください。