

チクシュループ・クレーター内部掘削試料から抽出した 衝撃変成石英のカソードルミネッセンス： 衝撃変成と発光スペクトル

○常昱¹，鹿山雅裕²，田近英一³，西戸裕嗣⁴

¹東大・地惑，²神戸大・地惑，³東大・新領域，⁴岡山理大・自然科学研究所

1. 背景

地球上に分布する衝突クレーターは、惑星スケールでの衝突現象を理解し、物質科学的な側面から制約を与えるために重要な研究対象となる [e.g., 1]. とりわけ、衝撃時に経験した温度圧力条件を推定することは、惑星スケールでの衝突現象におけるエネルギー分配を明らかにできる可能性を持つ。しかし、従来から系統立った研究はほとんどなされてこなかった。

衝撃圧力の指標として、衝撃変成石英と呼ばれる石英内部に形成される平面変形構造 (PDFs, planar deformation features) がよく用いられるものの、その研究の多くは定性的なものに限られる [e.g., 2,3]. また、衝撃時に発生した温度を推定することはできない [e.g., 2].

一方で、物質に電子線照射したときに生じる発光現象であるカソードルミネッセンス (Cathodoluminescence; CL) は衝撃温度や衝撃圧力を反映し変化することが、最近報告された [4]. しかし、これまで衝撃圧縮実験試料や天然クレーター試料を用いたCLによる系統的な分析や解析はなされていない。

そこで私たちは、条件を考慮した一連の衝撃圧縮実験を行うとともに、回収試料と天然の衝突クレーター試料を対象にCLのスペクトル分析を行い、衝撃変成作用が石英の発光特性に与える影響を定量的に評価することを試みた。このうち、今回はクレーター試料の分析結果に基づき、CLスペクトルの衝撃変成に対する応答について検討した結果を報告する。

2. 分析試料・測定手法

分析試料は、いまから約6600万年前に形成されたチクシュループ・クレーター (直径~180 km) の内部掘削試料 (YAX-1) の2層準から抽出した石英粒子を用いる。本研究で測

定した石英粒子は、全て先行研究 [5] 及び私たちの研究でPDFsの鑑定及び方位角が測定されているものである。以後、衝撃変成石英粒子をSQ粒子、PDFsがみられない通常の石英粒子をnonSQ粒子と呼ぶことにする。

先行研究に基づき、分析を行った2層準のうち、上部試料 (UMU) は衝突後の堆積過程の最後に降り積もった堆積物 (フォールバック・イジェクタ)、下部試料 (U5) はインパクトメルトと解釈される [e.g., 5,6]. PDFs分析に基づく圧力推定により、UMU中のSQ粒子は様々な圧力を経験したもの、U5中のSQ粒子は主に高圧を経験したもので構成されている [5].

CL測定には、岡山理科大学の走査電子顕微鏡 (日本電子社製JSM-5410) に回折格子型分光器 (Oxford社製 MonoCL2) を組み合わせたSEM-CLを用いた。測定は室温条件下で、加速電圧15 kV、測定領域 $31 \times 27 \mu\text{m}$ 、照射電流1.0 nA、波長域300-800 nmを1 nm間隔で行った。得られたCLスペクトルは標準光源を用いて感度補正を行った。

3. 結果

計47粒子のCLスペクトルを測定した結果、SQ粒子及びnonSQ粒子について、共に440-445 nm付近 (青色領域) と619-624 nm付近 (赤色領域) にピークをもつブロードなスペクトルが得られた。青色領域の発光は内因性の格子欠陥に起因するものと推察される [7]. 一方、赤色領域の発光は、一般に、酸素空孔やNBOHC (非架橋酸素正孔) による発光であると考えられている [7]. これは石英に見られる典型的なCL発光であり、衝撃変成作用によって石英のスペクトルの形状や発光成分が著しくは変化しないことを示す。

しかしながら、特にSQ粒子について、青色領域における発光強度が著しい傾向がみられた。これは結晶内の欠陥密度が衝撃変成によって増減したことを示唆する。

4. 議論

発光成分数

石英には、一般に5つ以上のブロードな発光成分が存在することが知られており、これらの成分が重複した結果がCLスペクトルとして観察される [e.g., 7,8]. 横軸をエネルギーとしたスペクトルにおいて、各発光成分はガウス関数で近似することができる [7]. したがって、発光成分の検討には波形分離を用いた解析が必要である。今回得られたスペクトルはノイズが大きく、多数成分の分離についての不確実性が大きい。二成分（青色領域、赤色領域）領域のスペクトルをガウス関数によりフィッティングを行い、SQ粒子及びnonSQ粒子の各成分発光強度(積分)について解析した。その結果、残留誤差はノイズより有意に大きく、スペクトルピークの形状が非対称的であることが分かった。このことから、各波長領域のスペクトルにはより多くの発光成分が含まれると考えられる。

赤色領域の発光

2成分による波形分離解析の結果、赤色領域の発光を見ると、SQ粒子かnonSQ粒子かを問わず、U5の発光強度がUMUより低いことが明らかになった。これは、衝撃圧力あるいは温度は層準間により違いがあったことを示唆する。また、各試料層準内では、SQ粒子かnonSQ粒子かを問わず、発光強度に顕著な違いが認められない。PDFsの有無から両者が受けた衝撃圧力が異なると推察されるため、赤色領域の発光は衝撃圧力と独立に決まることが示唆される。

赤色領域の発光成分である酸素空孔などの構造欠陥は熱による再結晶化に伴って解消されることが知られる [9]. U5は10 mを超えるインパクトメルトであり、その中の粒子は放出されたイジェクタ層 (UMU) と比べて長時間高温環境下に置かれたと考えられる。したがって、U5の石英粒子に見られる微弱な赤色発光は衝撃温度、あるいはその後の温度効果

によって酸素空孔などの欠陥が解消されたことが原因である可能性が高い。

青色領域の発光

青色領域付近のCL発光強度は、衝撃温度圧力の上昇に伴って増加することが、砂岩に対する衝撃圧縮実験で報告されており、これは衝撃変成による欠陥生成が原因とされている [4]. 衝撃変成作用に関連した構造欠陥としては、1) 衝撃圧縮による結晶格子内の残留ひずみ、2) 衝撃加熱による石英の高温-低温相転移 (α 石英:三方晶, β 石英:六方晶) により生じる欠陥生成が考えられる。

U5中の石英粒子はSQとnonSQの間で顕著な違いが見られないことから、発光強度は圧力よりも温度、特に高温-低温相転移時の欠陥生成に関係する可能性が示唆される。一方、UMU中の石英では、nosSQ粒子がほぼ同様の発光強度を示すのに対して、SQ粒子は青色発光強度のばらつきが著しく大きい。同層準(UMU)のSQ粒子は様々な圧力を経験したものの集まりと推定され、経験圧力の違いが発光強度に反映されていると示唆される。

天然試料からでは、衝撃温度と衝撃圧縮の効果を区別できないため、どちらの過程が特に石英の発光特性に影響を与えるかを評価できない。このため、今後は衝撃圧縮実験を用いて人工的に生成した衝撃変成石英の分析を基に検討を行う予定である。

引用文献

- [1] Pierazzo & Osinski (2012), *Impact Cratering: Processes and products*.
- [2] Stöffler & Langenhorst (1994), *Meteoritics*, 29, 155 – 181..
- [3] Holm et al. (2011), *Meteoritics & Planetary Science*, 46, Nr 12, 1888 – 1909.
- [4] Gucsik et al. (2003), *Meteoritics & Planetary Science*, 38, Nr 8, 1187 – 1197.
- [5] Chang et al. (2014), LPSC 45th #1990.
- [6] Goto et al. (2004), *Meteoritics & Planetary Science*, 39, Nr 7, 1233 – 1247.
- [7] Stevens – Kalceff (2009), *Mineralogical Magazine*, 73, 585 - 605.
- [8] Waychunas (2014) *Rev. Mineralogy & Geochemistry*, 78, 175 - 217.
- [9] Götze et al. (2001), *Mineralogy & Petrology*, 71, 225 - 250.