

[2023202020]

ESR 信号強度を利用した石英の供給源、熱履歴の推定

Estimation of Quartz Provenance and Thermal History using ESR Signal Intensity

多田賢弘^{A)}, 多田隆治^{A, B)}, Paul A. Carling^{C)}, Wickanet Songtham^{D)}
Toshihiro Tada^{A)}, Ryuji Tada^{A, B)}, Paul A. Carling^{C)}, Wickanet Songtham^{D)}

^{A)} Institute for Geo-Cosmology, Chiba Institute of Technology

^{B)} Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo,

^{C)} Geography and Environment, University of Southampton,

^{D)} Northeastern Research Institute of Petrified Wood and Mineral Resources, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

Abstract

The Australasian tektite event, which occurred approximately 790,000 years ago in Southeast Asia, is the most recent large-scale extraterrestrial impact event on Earth. Although the impact crater has yet to be discovered, recent studies have identified ejecta deposits from this event in northeastern Thailand, and reported their extensive distribution across Thailand, Laos, Cambodia, and Vietnam. Due to its relatively recent occurrence, the ejecta deposit from this impact event is less affected by weathering and erosion, potentially retaining significant information about the dispersion and deposition processes of ejecta from impacts on Earth. In this study, we investigated the thermal annealing of lattice defects of quartz by examining the ESR signal intensity and crystallinity of quartz in the ejecta deposits from two sites in northeastern Thailand, aiming to estimate the experienced temperature of the ejecta deposits. The results indicate that the upper parts of the ejecta deposits have low ESR signal intensities and high crystallinity index of quartz, suggesting that they experienced heating above 430°C. This implies that the materials in the upper part of the ejecta deposits were from a closer area to the center of the impact site compared to those in the lower part of the ejecta deposits.

Keyword: Extraterrestrial impact event, Australasian Tektite, Electron Spin Resonance

1. はじめに

天体衝突は固体天体の表層における基本的な地質現象であり、衝突による物質の飛散堆積過程を理解することは地球を含む固体天体の表層環境進化を考えるうえで必要不可欠である。衝突によって放出された物質はイジェクタと呼ばれ、堆積して地層(イジェクタ層)を形成する。

イジェクタの飛散堆積過程として、放物軌道に沿って飛散するモデルや、重力流として移動・堆積するモデルが考えられているほか、月・火星の高解像度衛星画像の解析や地球上のイジェクタ層の野外観察から、特徴の異なる複数の層によってイジェクタ層が構成されている例が知られ、連続する複数段階のプロセスによってイジェクタが運搬され堆積するモデルも提案されている^[1]。

地球上のイジェクタ層の野外地質調査・試料分析は、惑星科学分野で多く行われている衛星画像解析、衝突シミュレーションや室内衝突実験と相補的な手法であり、物質科学的な証拠を手に行うことができるという大きな利点がある。しかし、室内実験や計算と比べ研究例が乏しいのが現状である。それは、地球上のイジェクタ層の多くが形成後の風化変質、浸食、埋没を被っており、試料の採取や、試料から初生的な情報を得ることが難しいためである。

およそ 79 万年前の天体衝突イベント(オーストラリア・アジアテクトイトイベント)は、地球への大規模な天体衝突としては最も新しく、初生的な情報が多く残されていることが期待される。衝突クレータ

ーは見つかっておらず、正確な衝突地点は明らかになっていないが、テクトイト(衝突により形成されたガラス物質)の分布などから、ラオス南西部 Bolaven Plateau 付近に衝突したと考えられている^{[2],[3],[4],[5]}。

近年この天体衝突イベント由来のイジェクタ層がタイ東北部で同定され、タイ・ラオス・カンボジア・ベトナムにわたる広範囲にわたって分布していることが報告された^{[3],[4],[5],[6],[7]}。Tada et al. (2020, 2022) は、詳細な野外観察に基づいてイジェクタ層を 3 つの岩相層序ユニット(下位からユニット 1-3)に区分した^{[6],[7]}。ユニット 1 は基盤岩の破片を含む礫質砂層であり、衝突により引き起こされた風による堆積物、ユニット 2 はテクトイトを含む淘汰の悪い礫層であり、衝突により破碎・放出された礫の堆積物、ユニット 3 は塊状の細粒砂層であり、衝突によって巻き上げられた塵が降下した堆積物であると解釈されている^{[6],[7]}。

本研究では、タイ東北部の 2 地点(Huai Om セクション及び Yasothon セクション)のイジェクタ堆積物について、石英の電子スピン共鳴(ESR)信号強度及び結晶化度を利用してイジェクタが経験した温度を推定し、堆積過程に新たな制約を与えることを目的とした。本稿ではその予察的な結果を報告する。なお、Huai Om セクションにおける測定結果の一部は多田ほか(2019)において部分的に報告されている^[8]。

2. 手法

石英の ESR 信号強度は、石英中の不対電子の量を反映する。石英中の不対電子は格子欠陥に存在する

[2023202020]

ため、ESR 信号強度を用いて格子欠陥量(酸素空孔量)を間接的に測定することができる^[9]。石英中の酸素空孔は自然放射線により形成されるが、430 度以上の加熱で減少することが知られている^[10]。また、石英の結晶化度は晶出温度と晶出速度を反映する指標であるが、その後の変成によっても変化し、高温を経験することで結晶化度が増加することが知られている^{[11],[12],[13]}。したがって、石英の酸素空孔量や結晶化度を測定することで、試料が高温を経験したかどうかを調べることができる。

調査地点はタイ東北部 Huai Om セクションおよび Yasothon セクションであり、推定衝突地点(ラオス南西部 Bolaven Plateau)からの距離はそれぞれおよそ 130 km, 250 km である。

試料は水中でほぐしたのち 2 mm メッシュの篩でふるい分けた。各試料の 2 mm 以下の画分について、ESR 測定に影響する有機物、炭酸塩、鉄マンガ酸化物を薬品処理により除去した。有機物処理と炭酸塩処理は Nagashima et al. (2007) の方法に従い、鉄マンガ酸化物処理は Mehra and Jackson (1960) の方法に従った^{[14],[15]}。

ESR 測定は Toyoda and Ikeya (1991) の手法に従った^[9]。国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所において⁶⁰Co を線源とする総線量 2.5 kGy の γ 線を試料に照射した後、300 度で 15 分加熱した。その後、X-band ESR spectrometer (JEOL, JES-FA100)を用いて ESR 信号強度測定を行

なった。Isozaki (2009)の方法に従って、シリコンを内標準とした粉末 X 線回折 (XRD) 分析により各試料の石英含有量を求め、ESR 信号強度を石英含有量で規格化した^[16]。また、Murata and Norman (1972)の方法に従い石英の結晶化度を XRD 分析により求めた^[11]。

3. 結果と考察

Huai Om セクション及び Yasothon セクションにおいて測定した石英の ESR 信号強度と結晶化度を Figure 1 に示す。推定衝突地点からおよそ 130 km に位置する Huai Om セクションでは、石英の ESR 信号強度はユニット 1 下部でおよそ 10–15 spin unit であり、ユニット 2 にかけて減少し、ユニット 3 でおよそ 2 spin unit の低い値を示す。石英の結晶化度はユニット 1 下部で 7.5 程度の値を示し、ユニット 2 にかけて増加し、ユニット 3 では 9 程度の高い値を示す。

Huai Om セクションよりも推定衝突地点から離れた場所に位置する Yasothon セクションにおいては、ユニット 2 及び 3 で石英の ESR 信号強度は 1.5–2 spin unit の低い値を示し、結晶化度は 8.5–9 程度の高い値を示す (Fig. 1)。

Yasothon セクションのユニット 2 及び 3 における石英の ESR 信号強度と結晶化度の値は、Huai Om セクションのユニット 2 最上部からユニット 3 における値と同程度である。これらの層準では石英の ESR

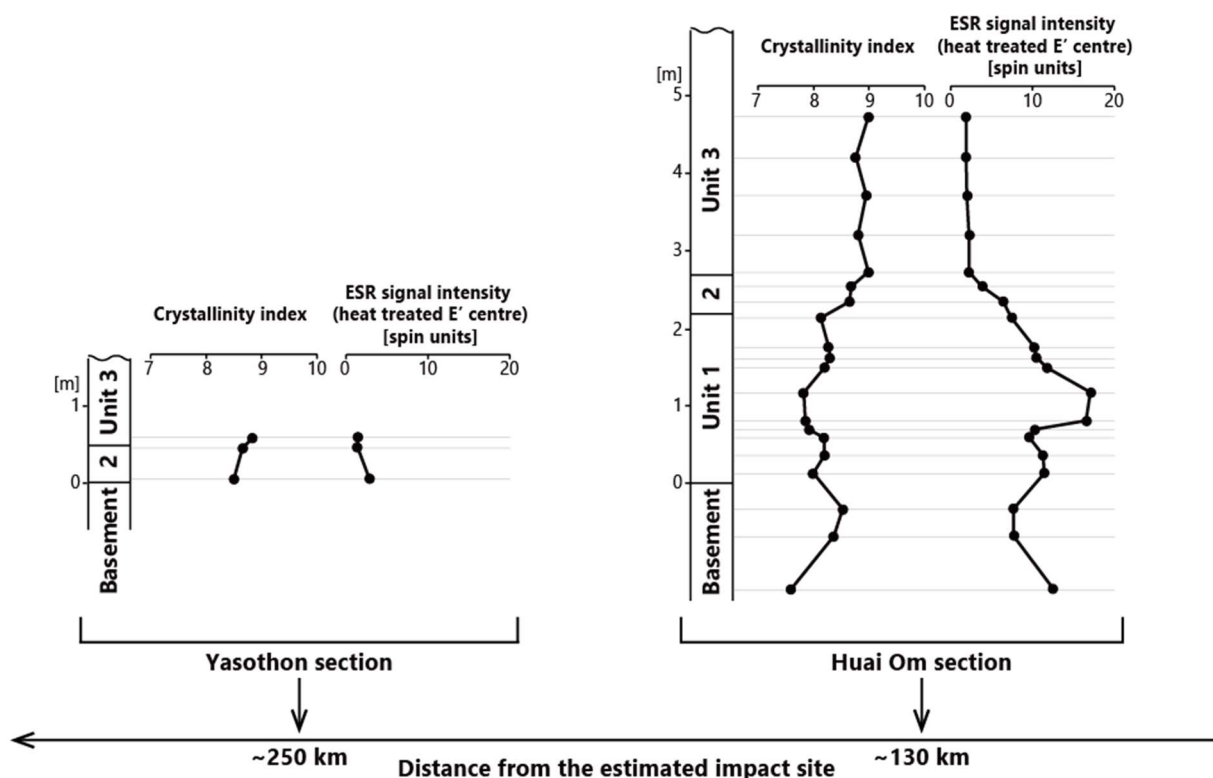


Figure 1. ESR signal intensity and crystallinity index of quartz from the ejecta deposits at Huai Om section and Yasothon section in northeastern Thailand.

[2023202020]

信号強度が低く結晶化度が高いことから、石英粒子が 430 度を超える高温にさらされたことが示唆される。

一般に、よりクレーター中心近くから放出されるイジェクタほど高い温度圧力を経験し、より大きな初速度を持つため速くまで飛散し、高角度で放出されるため層序としては上位に堆積すると考えられている^{[17],[18]}。

Huai Om セクション及び Yasothon セクションにおけるイジェクタ堆積物中の石英の予察的な ESR 信号強度・結晶化度の測定結果は上記のモデルを裏付ける結果であると考えられる。衝突点中心付近から放出され高温・高圧を経験したイジェクタ粒子は、少なくとも~250 km 離れた Yasothon セクションまで飛散しており、衝突地点に近い Huai Om セクションにおいては比較的低い温度圧力を経験したイジェクタ粒子の上位に堆積したと考えることができる。今後さらに測定地点数を増やし、イジェクタ層中の石英の ESR 信号強度・結晶化度の層序変化と地理変化を明らかにするとともに、熱的安定性の異なる複数種の ESR 信号強度^[10]を測定することによりイジェクタの経験温度をより詳細に制約する予定である。

参考文献

- [1] G. R. Osinski, et al., “Impact ejecta emplacement on terrestrial planets”, *Earth and Planetary Science Letters*, 310 167–181, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.08.012>
- [2] K. Sieh, et al., “Australasian impact crater buried under the Bolaven volcanic field, Southern Laos”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(3), 1346–1353, 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.19043681>
- [3] K. Sieh, et al., “Proximal ejecta of the Bolaven extraterrestrial impact, southern Laos”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(3), 120(50), e2310351120, 2023. <https://doi.org/10.1073/pnas.2310351120>
- [4] T. Tada, “Australasian Tektite Event: Identification of the On-land Ejecta Deposit and its Distribution across Eastern Indochina”, *Doctoral dissertation*, The University of Tokyo, 2021. <https://doi.org/10.15083/0002006686>
- [5] T. Tada et al., “Location of the Australasian tektite impact event based on distribution of the ejecta deposits in the eastern Indochina (LPI Contribution 2806)” in *54th Lunar and Planetary Science Conference 2023*, 2023. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/2606.pdf>
- [6] T. Tada, et al., “In situ occurrence of Muong Nong-type Australasian tektite fragments from the Quaternary deposits near Huai Om, northeastern Thailand”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00378-4>
- [7] T. Tada, et al., “Identification of the ejecta deposit formed by the Australasian Tektite Event at Huai Om, northeastern Thailand”, *Meteoritics & Planetary Science*, 57(10), 1879–1901, 2022. <https://doi.org/10.1111/maps.13908>
- [8] 多田賢弘, 他, “石英の ESR 信号強度を利用した砕屑物の供給源・熱履歴推定と東アジアの古気候復元”, 平成 30 年度原子力機構施設利用共同研究 一般共同研究成果報告書, 18010, 2019. https://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/kaihoken/wp-content/uploads/2018/seika/ippan/18010_tajika_.pdf
- [9] S. Toyoda and M. Ikeya, “ESR dating of quartz and plagioclase from volcanic ashes using E’1, Al and Ti centers”, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18, 179–184, 1991. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(91\)90110-4](https://doi.org/10.1016/1359-0189(91)90110-4)
- [10] S. Toyoda and M. Ikeya, “Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: Basis for ESR dating of thermal history”, *Geochemical Journal*, 25, 437–445, 1991. <https://doi.org/10.2343/geochemj.25.437>
- [11] K. J. Murata and M. B. Norman, “An index of crystallinity for quartz”, *American Journal of Science*, 279(6), 1120–1130, 1976. <https://doi.org/10.2475/ajs.276.9.1120>
- [12] M. Domanski and A. Webb, “Effect of Heat Treatment on Siliceous Rocks Used in Prehistoric Lithic Technology”, *Journal of Archaeological Science*, 19(6), 601–614, 1992. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(92\)90031-W](https://doi.org/10.1016/0305-4403(92)90031-W)
- [13] M. Umeda, “Crystallinity index (CI) of quartz in chert and provenance of chert clast”, *Bulletin of The Fukui City Museum of Natural History*, 54, 45–52 (in Japanese), 2007. <https://www.nature.museum.city.fukui.fukui.jp/shuppan/kenpou/54/54-45-52.pdf>
- [14] K. Nagashima, et al., “Contribution of aeolian dust in Japan Sea sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(2), 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GC001364>
- [15] O. P. Mehra and M. L. Jackson, “Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate”, *Clays and Clay Minerals*, 7, 317–327, 1958. <https://link.springer.com/article/10.1346/CCMN.1958.0070122>
- [16] Y. Isozaki, “Characterization of eolian dust and its sources in the Tarim Basin and their temporal changes during Plio-Pleistocene based on the ESR signal intensity and crystallinity index of quartz”, *Doctoral dissertation*, The University of Tokyo, 2009.
- [17] H. J. Melosh, “Impact cratering: A geological process”, Oxford University Press, 1989.
- [18] Y. Nakano et al., “PDF orientations in shocked quartz grains around the Chicxulub crater”, *Meteoritics & Planetary Science*, 43(4), 745–760, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00682.x>