

[18010]

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

Palaeoclimatic Reconstruction of East Asia Deduced from Provenance Changes and Thermal History of Detrital Material based on ESR Signal Intensity of Quartz

多田賢弘^{A)}, 多田隆治^{A, B, C)}, Paul Carling^{D)}, Songtham Wickanet^{E)}, 田近英一^{A)}

Toshihiro Tada^{A)}, Ryuji Tada^{A, B, C)}, Paul A. Carling^{D)}, Wickanet Songtham^{E)}, Eiichi Tajika^{A)}

A) Graduate School of Science, The University of Tokyo, B) Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, C) Research Center for Earth System Science, Yunnan University, D) Geography and Environment, University of Southampton, E) Northeastern Research Institute of Petrified Wood and Mineral Resources, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

Abstract

The Australasian Tektite Event occurred in South Eastern Asia (ca. 0.79Ma) is the youngest among large impact events on the Earth. Although it is estimated that the impact took place somewhere in eastern part of Indochina, the impact crater has never been found. Distribution of the ejecta layer in the expected source area would be crucial for more precise estimation of the location and magnitude of the impact. However, the ejecta layer of the Australasian tektite impact has never been identified on land in Indochina. There are a few sites where the tektites are reported from strata in northeastern Thailand. However, it has long been debated whether these tektites are deposited in situ or reworked, owing to the lack of the sedimentological description of the tektite-bearing deposits. There is no reports of the evidence of shock metamorphism except for the tektites. To test the possibility that the tektite-bearing deposit is the ejecta layer, we investigated thermal annealing of lattice defects (oxygen vacancies) in quartz grains as evidence of heating by the impact, using Electron Spin Resonance (ESR) signal intensity of the E_1' center of quartz. As a result, we succeeded to identify the ejecta layer of the Australasian tektite impact event. By examining the sediments immediately below and above the ejecta layer, it will be possible to evaluate the effect of the impact event on the paleoenvironment of Southeast Asia.

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

1. はじめに

およそ 79 万年前に東南アジアで起きたとされる天体衝突イベント（オーストラリア・アジアテクトイト・イベント）は、衝突天体の直径が数 km に達するような大規模な衝突イベントの中では最も新しいイベントである^[1]。年代が新しいことから、衝突クレーターや、クレーターから放出された物質が堆積して形成されるイジェクタ層、同時代の古環境記録、といった初生的な情報が多く残されていることが期待でき、天体衝突による地球環境擾乱を調べるうえで重要な研究対象である。

テクトイトとは、衝突により地殻の岩石が溶融して形成されるガラス質物質である。地球上では限られた 4 地域に分布している。オーストラリア・アジアテクトイトは、そのうち最も広い分布域を持ち、その分布は東南アジアから南極に及ぶ。テクトイトの分布から、インドシナ半島東部に衝突し、直径 40–100 km ほどのクレーターを形成したと推定されているが、未だに衝突クレーターが見つかっておらず、正確な衝突地点や規模が分かっていない^{[1][2]}。

イジェクタ層は衝突地点に近いほど、衝突規模が大きいほど層厚が厚くなる^[3]。そのため、より正確な衝突地点や衝突規模の制約のためにはイジェクタ層が重要となる。

これまで、タイ東北部の複数地点において、地層中からのテクトイトの産出が報告されていた。例えば、Fiske et al. (1996) は、タイ・ラオス国境南部付近の Huai Om セクションにおいて、“ラテライト”層と呼ばれる二次的に鉄が濃集した層準とそれを覆う塊状砂層との境界部からテクトイトを発見した。しかし、テクトイト以外の衝突の証拠が見られなかったことなどから、Fiske らは、そのテクトイトは若い地層中に再堆積したものであると解釈した^[4]。

したがって、この衝突イベントのイジェクタ層は、インドシナ半島陸上では未だに特定されておらず、衝突地点や衝突規模の制約ができない状況にある。

2. 目的

本研究では、タイ東北部に見られるテクトイトを含む堆積物がイジェクタ層である可能性を検証することを目的に、堆積物中の石英粒子について、電子スピン共鳴 (ESR) 信号強度を用いて格子欠陥量（酸素空孔量）を測定し、衝突による加熱の痕跡の有無を調べた。加熱の痕跡が確認できれば、イジェクタ層の認定の強い根拠になる。またイジェクタ層の認定ができれば、その直上、直下の堆積物中の花粉や有機物などを調べることにより、小天体衝突が東南アジアの環境に与えた影響を評価することができる。

[18010]

3. 手法

イジェクタ層は様々な温度圧力を経験した粒子から構成される。天体衝突により、標的岩石は最大数千度に達する加熱を受けることになるため、イジェクタ層に含まれる石英粒子は、上下の層準の石英粒子に比べて酸素空孔量が小さいことが予想される。

石英の電子スピン共鳴 (ESR) 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ため、ESR 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^[5]。酸素空孔は背景放射線により形成されるため、石英の酸素空孔量は母岩の形成年代を反映する。一方で、Toyoda and Ikeyama (1991) は、加熱実験に基づき、石英中の酸素空孔量が 430 度以上の加熱で減少することを示した^[6]。したがって、酸素空孔量の測定により、430 度以上の加熱を経験した可能性の有無を調べることができる。そこで、石英の ESR 強度を測定した。

タイ東北部 Huai Om セクション (14°34'45.0"N 105°16'31.3"E) において野外調査を行い、テクタイトを含む堆積物の岩層層序の記載、試料採取を行なった。試料は堆積物を通じて 10–50 cm 間隔で各層準についておよそ 20 g ずつ採取した。

各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 以下の画分のうちおよそ 1 g を分析に用いた。まず、ESR 測定に影響する有機物、炭酸塩、鉄マンガン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) の方法に従った^[7]。まず有機物は、10%過酸化水素水 50 ml を試料に加え、60 °C で 10 時間、2 時間おきにかき混ぜて反応させ、除去した。次に炭酸塩は、20%酢酸 40 ml を試料に加え、40 °C で 2 時間反応させ除去した。それぞれの薬品処理の後、試料はイオン交換水で洗浄した。続いて鉄マンガン酸化物処理を、Mehra and Jackson (1960) の方法に従って行った^[8]。試料に 0.3 mol/L のクエン酸ナトリウム 40 ml と、1.0 mol/L の重炭酸ナトリウムを加え、80 °C で 30 分加熱したのち、1 g の亜ジチオン酸ナトリウムを加え、80 °C でさらに 15 分加熱した。その後試料を 0.3 mol/L の sodium citrate 40 ml で洗浄し、さらにイオン交換水で洗浄した。ESR 測定は Toyoda and Ikeya (1991) の手法に従った^[5]。石英中に不対電子を生成するため、薬品処理済みの試料に、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所において ⁶⁰Co を線源とする総線量 2.5 kGy の γ 線を照射した。その後、不対電子を酸素空孔に捕獲させ全ての酸素空孔を常磁性格子欠陥である E1' 中心に変換するため、照射済み試料を 300 °C で 15 分加熱した。その後、東京大学大学院理学系研究科の X-band ESR spectrometer (JEOL, JES-FA100) を用い ESR 信号強度測定を行なった。測定条件は、マイクロ波: 0.01 mW、磁場強度: 0.1 mT、磁場変調: 100 kHz、測定範囲: 5 mT、測定時間: 2 min、時定数: 0.03 秒、捜査回数: 20 回である。試料 HO10 を 3 つのサブサンプルに分けて測定し、得られた測定

誤差 (± 1.8 spin units ($\pm 1 \sigma$)) ($1 \text{ spinunit} = 1.3 \times 10^{15}$) をすべての試料に適用した。

得られた ESR 信号強度を石英の含有量で規格化するため、石英含有量を 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) 分析によって求めた。またその際、石英の結晶性によるピーク高への影響を補正するため、石英の結晶化度 (CI)^[9]も XRD 分析により求めた。まず ESR 強度測定後の各試料におよそ 10 wt.% のシリコン粉末を加え、メノウ乳鉢で粉末化した。XRD 分析には東京大学大学院理学系研究科の PANalytical X'Pert PRO X-ray diffractometer を使用して CuK α 特性 X 線を用いて行った。測定条件は、電圧: 45 kV、電流: 40 mA、divergence slit: 1°、anti-scatter slit: 2°、測定範囲: 3–80° 2 θ (石英含有量)、66–71° 2 θ (CI) である。各試料は 3 つのサブサンプルに分けて測定し、平均値と誤差 ($\pm 1 \sigma$) を求めた。

4. 結果

4.1 岩相・層序

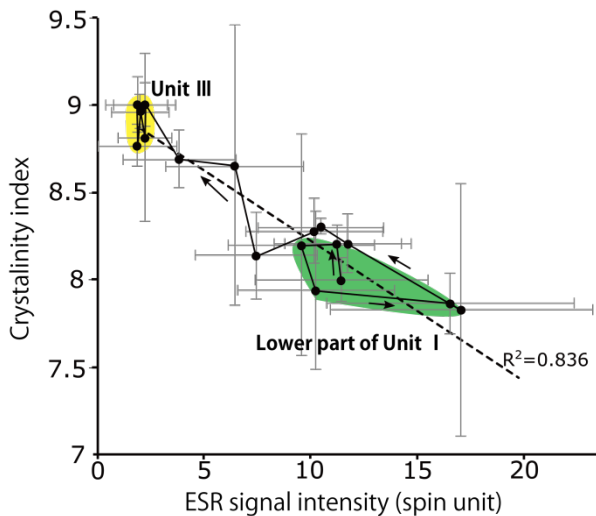
本研究で調査を行った Huai Om セクションは、タイ東北部 Ubol Ratchatani の南西およそ 80 km に位置し、Huai Om ダムの放水路沿いに白亜系基盤砂岩とそれを覆う第四系堆積物が観察される。基盤岩を覆う堆積物について、露頭において、堆積構造、色、粒径、構成粒子、固結度を観察し、3 つの岩相層序ユニット、ユニット I、II、および III に区分した。

基盤岩は、赤紫色砂岩及び赤色泥岩からなる。赤紫色砂岩が水路沿いに広く分布する一方、赤色泥岩は砂岩上に層厚 10 cm で局所的に累重しているのが観察される。ユニット I は、赤色泥岩の同時礫を含む淘汰の悪いシルト～細粒砂からなる。層厚はおよそ 1.5 m で、基盤岩を不整合に覆う。同時礫はユニット I を通じて含まれている。ユニット II は、非常に淘汰の悪い砂質細礫～中礫の単層からなる。層厚はおよそ 50 cm でユニット I との境界はシャープで直線的である。礫は主に石英岩の円礫～亜角礫からなる。ユニット III は比較的淘汰の良い細粒砂の単層からなる。層厚は上限が地表面で切られているため不明だが最低 3 m はある。下位のユニット II との境界はシャープで波状であるが、下位を侵食した明確な証拠は見られない。塊状で明確な堆積構造を持たない。Fiske et al. (1996) でテクタイトが発見された層準は、ユニット II と III の境界に対応する。

4.2 石英の結晶化度・ESR 信号強度

石英の結晶化度は、ユニット I–III を通じて 7.5–9 程度の値である。ユニット I 下部ではおよそ 7.5 程度の値を示し、ユニット I 上部からユニット II にかけて増加し、ユニット III ではほぼ一定で 9 程度の値を示す。石英の酸素空孔量を表す ESR 信号強度は、ユニット I–III を通じて 2–15 spin unit 程度の値を示す。ユニット I 下部ではおよそ 10–15 spin unit で、ユニット I 上部からユニット II にかけて減少し、ユニット III ではほぼ一定でおよそ 2 spin unit の低い値を

[18010]



示す(Figure 1)。

Figure 1. ESR signal intensity versus Crystallinity index of quartz from Huai Om section.

5. 考察

ユニット I は淘汰が悪いことや基盤岩由来の同時礫を含むことからある程度強い流れによって基盤岩を侵食しながら堆積したと考えられる。その上位のユニット II は、淘汰が悪いことや、破碎された角礫を含むことから運搬堆積過程で円磨や淘汰を受けていない。これらの特徴から、ユニット I、II は短期間で急激に堆積したことが示唆される。

石英の結晶化度及び ESR 信号強度は、ユニット I 下部で結晶化度が低く ESR 信号強度が大きい、ユニット III で結晶化度が高く ESR 信号強度が低いという特徴がある。各層準の石英の結晶化度と ESR 信号強度を Figure 1 に図示した。ユニット I 上部からユニット II にかけての値は、ユニット I 下部とユニット III の混合線上に位置する。このことから、ユニット I-III の石英の結晶化度・ESR 信号強度の変動は、ユニット I 下部に含まれる低結晶化度・高 ESR 信号強度の石英と、ユニット III の高結晶化度・低 ESR 信号強度の石英の混合で説明することができる。

石英の結晶化度は、晶出温度・速度を反映するが、その後の変成によっても変化することが知られ、高温を経験すると結晶化度が高くなる^[10]。したがって、ユニット III の石英の結晶化度が高く ESR 信号強度が低いという特徴は、いずれも石英粒子が高温にさらされたことを示唆する。

ユニット I 及び II の岩相及びテクタイトの産出と、ユニット I 上部からユニット III にかけての ESR 信号強度の低下・結晶化度の増加は、Huai Om セクションのユニット I-III がイジェクタ層である可能性を強く示唆するものである。

イジェクタ層を東南アジア陸域で初めて特定できたことにより、衝突地点及び衝突規模の特定ができる可能性が高まるとともに、衝突に伴う気候・環境

変動を調べることも可能となった。今後、小天体衝突が東南アジアの環境にどのような影響を与えたのかを解明できることが期待される。

参考文献

- [1] Glass, Billy P., and Bruce M. Simonson., 2012. Distal Impact Ejecta Layers: Spherules and More, *ELEMENTS*, Vol.8, pp. 43-48
- [2] Folco, L., Bigazzi, G., D'Orazio, M. and Balestrieri, M. L., 2011. Fission track age of Transantarctic Mountain microtektites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 2356-2360.
- [3] McGetchin, T. R., Settle, M. and Head, J. W., 1973. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 20, 226-236.
- [4] Fiske, P. S., Putthapiban, P., and Wasson, J. T., 1996. Excavation and analysis of layered tektites from northeast Thailand: Results of 1994 field expedition. *Meteor. Planet. Sci.*, 31, 36-41.
- [5] Toyoda, S. and Ikeya, M., 1991. ESR dating of quartz and plagioclase from volcanic ashes using E'1, Al and Ti centers. *Int. Jour. Radiat. App. Instrum.. Part D. Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 18, 179-184.
- [6] Toyoda, S. and Ikeya, M., 1991. Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: Basis for ESR dating of thermal history. *Geochemical Journal*, Vol. 25, pp.437-445
- [7] Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Toyoda, S., 2007, Contribution of aeolian dust in Japan Sea sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2).
- [8] Mehra, O. P. and Jackson, M. L., 1958. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Nat. Conf. Clays Clay Min.*, 7, 317-327.
- [9] Murata, K. J., and M. B. Norman. "An index of crystallinity for quartz." *American Journal of Science* 276.9 (1976): 1120-1130.
- [10] Domanski, M., Webb, J.A., 1992. Effect of heat treatment on siliceous rocks used in prehistoric lithic technology. *J. Archaeol. Sci.* 19, 601-614.