

受賞者氏名：富岡 尚敬 会員（海洋研究開発機構高知コア研究所）

受賞題目：「高温高压下における惑星物質の相転移と変形の挙動解明」



授賞理由

富岡尚敬会員は北海道大学大学院にて鉱物学・結晶学を学び、それ以来、透過電子顕微鏡（TEM）を主軸とする微小領域分析法を駆使して、鉱物の相転移と変形の挙動に関する研究を推進してきた。同会員の研究のユニークな点は、惑星物質科学と高圧地球科学にまたがるバックグラウンドにもとづく点にある。このような研究者は世界的にも稀有で、両分野を横断しながら独自性の高い研究成果を上げてきた。特に、太陽系天体の相互衝突における高圧鉱物形成の研究は、世界的に高い評価を得ている。

富岡会員の第一の重要な業績は隕石中の高圧鉱物の発見に関わる研究である。母天体上で強い衝撃変成を受けた石質隕石には、ケイ酸塩や酸化物などの高圧鉱物が形成される。これらの多くは、地球マントル深部にも存在すると考えられている。隕石中の高圧鉱物粒子はサブミクロンサイズであることがほとんどで、それらのキャラクタリゼーションには困難を伴う。富岡会員は、TEM法をコンドライト隕石の衝撃変成組織の分析に取り入れ、 $MgSiO_3$ イルメナイト、 $MgSiO_3$ ペロブスカイトをはじめとした、天然で未報告の高圧鉱物を次々に発見した。その一部は、アキモトアイト、ポワリエライトとして新鉱物種の命名に至った。さらに、これらの産状と熱力学的安定条件に基づき、コンドライト隕石の衝撃温度・圧力に新たな制約を与えた。天然高圧鉱物の研究は、アキモトアイトが報告された1990年代末以降、欧米や中国で急速に進展しており、富岡会員はこの分野の世界的なパイオニアの一人となっている。また、自身の研究成果のみならず、最新の天然高圧鉱物の研究情報を網羅した"High-pressure Mineral Database"を十数年にわたってオンライン公開し、世界の研究コミュニティに還元している。

富岡会員の第二の重要な業績は、動的・静的な高圧実験に基づくコンドライト隕石の衝撃変成条件の推定に関わる研究である。隕石の衝撃変成履歴を読み解くためには、天然試料の記載だけでなく、高温高压下の隕石構成鉱物の挙動を実験的に理解する必要がある。過去の研究では、無水の天然試料と衝撃回収実験試料の比較が行われ、約70GPaまでの組織・構造変化が7つの衝撃ステージとしてまとめられた。しかしこの分類では、（1）無水ケイ酸塩鉱物に乏しい炭素質コンドライト隕石には適用が困難、（2）衝突体のサイズの違いから、衝撃回収実験の圧力持続時間は実際の天体衝突と比べて4桁以上も小さく、固相間相転移の様に速度論的影響を受けやすい現象の圧力評価が困難、など課題が多い。そこで富岡会員は（1）の問題について、一段式火薬銃を用いて、含水炭素質コンドライトの水質変成鉱物（カルサイト・含水層状鉱物）の衝撃回収実験を行い、塑性変形と衝撃加熱効果をTEMにより精査した。その結果から、圧力ごとのカルサイトの転位組織、および、含水層状鉱物の非晶質化・分解・脱ガス・再結晶化を系統化し、含水炭素質コンドライトのための新しい圧力指標を構築した。（2）の問題について、圧力を長く保持できる外熱式ダイヤモンドアンビルセルにより、隕石中の斜長石に見られる圧力誘起非晶質化を再現し、その条件を回収試料のラマン分光・TEMにより検討した。その結果、非晶質化プロセスは有意な時間依存性を持ち、衝撃回収実験のみに基づく従来のコンドライトの衝撃ステージ分類は、実際の圧力を過大評価している可能性を指摘した。その他にも、輝石高圧相のメジャライトの相転移微細組織に基づき、衝撃メルトの急冷速度を制約する等、高圧発生手法ごとの特性をいかした実験的研究により、衝撃変成履歴の理解を前進させた。

富岡会員の第三の重要な業績は、太陽系小天体帰還試料の衝撃変成履歴の解読に関する研究である。

富岡会員は小惑星探査機「はやぶさ2」プロジェクトの「フェーズ2キュレーション高知」および「初期分析チーム 砂分析班」の中核メンバーとして、小惑星リュウグウ粒子の輸送容器や分析ホルダー群の開発と、これらを活用した試料の鉱物学的分析を行った。同会員が中心に進めた衝撃変成の研究では、(1) 地球外物質の微小断層組織の解析に初めて断層力学の手法を導入、(2) 小惑星帰還試料から初めて発見した高圧鉱物(硫化鉱物)の安定条件、(3) カルサイト粒子のマイクロクレーターと転位組織の解析、等をもとに、リュウグウ粒子が経験した衝撃圧力を定量的に見積もることに成功した。また、富岡会員はNASAの彗星探査機「スターダスト」計画にも参画し、ヴィルト2彗星から回収された塵のオリビン粒子に高密度の転位組織を見出した。これにより、彗星核表面に確認されたクレーターの少なくとも一部は、衝突変形イベントにより形成された可能性を示した。

富岡会員の第四の重要な業績は、ケイ酸塩鉱物の無拡散型高圧相転移の研究である。富岡会員は、隕石中に発見した、輝石とその高圧相のアキモトアイト間、オリビン高圧相のワズレアイト-リングウツダイト-ポワリエライト間の微細組織と結晶方位関係をTEMにより解析した結果、これらの多型間の相転移は「核形成と成長」とは異なり、単位格子サイズを越える拡散を伴わない原子のわずかな協同的変位で達成できることを明らかにした。さらに、共同研究者と進めたレーザー衝撃圧縮下その場X線回折実験では、オリビン-リングウツダイト高圧転移が、無拡散型メカニズムにより、わずか数ナノ秒という超高速で起こり得ることを実証した。これらの知見から、無拡散型相転移は、(1) 圧力持続時間(天体サイズ)に依存しない隕石の衝撃圧力指標となる可能性、(2) 地球マントル深部に沈み込む低温スラブ物質の高密度を促進する役割を果たす可能性、を提案した。

上記のように、富岡会員は天然試料と静的・動的な高圧実験試料の分析を通じて、太陽系小天体衝突や地球深部条件下での鉱物の挙動の研究を精力的に積み重ね、優れた成果を挙げてきた。また、電顕鉱物学についての幅広い経験と知識を活かし、地質学・岩石学・生体鉱物学・資源鉱物学・材料科学など、多岐にわたる分野にて、国内外の研究者と共同研究を展開し、多くの成果を創出している。さらに、これらの共同研究を通じて、後進へのTEM技術の継承にも長年貢献している。こうした一連の研究・教育活動は世界的に高く評価され、富岡会員はアメリカ鉱物学会のフェローに選出されている。日本鉱物科学会ではこれらの成果を認め、富岡尚敬会員に2024年度日本鉱物科学会賞を授与するものである。

富岡 尚敬 会員の主要論文

1. Tomioka, N., Kurosawa, K., Miyake, A., Igami, Y., Nagaya, T., Noguchi, T., Matsumoto, T., Miyahara, M., and Seto, Y. (2025) Progressive change in dislocation microstructures in shocked calcite with pressure: Characterization of micrometeoroid bombardment on asteroid Ryugu, *American Mineralogist*, 110, 945–955.
2. Tomioka, N., Yamaguchi, A., Ito, M., Uesugi, M., Imae, N., Shirai, N., Ohigashi, T., Kimura, M., Liu, M.-C., Greenwood, R. C., Uesugi, K., Nakato, A., Yogata, K., Yuzawa, H., Kodama, Y., Hirahara, K., Sakurai, I., Okada, I., Karouji, Y., Okazaki, K., Kurosawa, K., Noguchi, T., Miyake, A., Miyahara, M., Seto, Y., Matsumoto, T., Igami, Y., Nakazawa, S., Okada, T., Saiki, T., Tanaka, S., Terui, F., Yoshikawa, M., Miyazaki, A., Nishimura, M., Yada, T., Abe, M., Usui, T., Watanabe, S., and Tsuda, Y. (2023) A history of mild shocks experienced by the regolith particles on hydrated asteroid Ryugu. *Nature Astronomy*, 7, 669–677.
3. Tomioka, N., Bindi, L., Okuchi, T., Miyahara, M., Iitaka, T., Li, Z., Kawatsu, T., Xie, X., Purevjav, N., Tani, R., and Kodama, Y. (2021) Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites. *Communications Earth & Environment*, 2, 16.

4. Tomioka, N., Miyahara, M., and Ito, M. (2016) Discovery of natural MgSiO₃ tetragonal garnet in a shocked chondritic meteorite. *Science Advances* 2, e1501725.
5. Tomioka, N., Kondo, H., Kunikata, A., and Nagai, T. (2010) Pressure-induced amorphization of albitic plagioclase in an externally heated diamond anvil cell. *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL044221.
6. Tomioka, N., Tomeoka, K., Nakamura-Messenger, K., and Sekine, T. (2007) Heating effects of the matrix of experimentally shocked Murchison CM chondrite: Comparison to micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 42, 19–30.
7. Tomioka, N. (2007) A model for the shear mechanism in the enstatite-akimotoite phase transition. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102, 226–232.
8. Tomioka, N. and Kimura, M. (2003) The breakdown of diopside to Ca-rich majorite and glass in a shocked H chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, 208, 271–278.
9. Tomioka, N., Fujino, K., Ito, E., Katsura, T., Sharp, T., and Kato, T. (2002) Microstructures and structural phase transition in (Mg,Fe)SiO₃ majorite. *European Journal of Mineralogy*, 14, 7–14.
10. Tomioka, N. and Fujino, K. (1997) Natural (Mg,Fe)SiO₃-ilmenite and -perovskite in the Tenham meteorite. *Science*, 277, 1084–1086.

富岡 尚敬 会員の略歴

1994年3月 北海道大学理学部地質学鉱物学科卒業
 1996年3月 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士前期課程修了
 1999年3月 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了
 1999年3月 博士（理学）を取得
 1999年4月 日本学術振興会 特別研究員（PD）（受入機関：北海道大学）
 2001年2月 神戸大学理学部地球惑星科学科 助手
 2007年4月 神戸大学理学部地球惑星科学科 助教
 2007年12月 岡山大学地球物質科学研究センター 准教授
 2014年7月 海洋研究開発機構高知コア研究所 主任技術研究員
 2020年4月 海洋研究開発機構高知コア研究所 主任研究員
 2024年10月 海洋研究開発機構高知コア研究所 上席研究員
 現在に至る