



東北大学



平成25年10月18日

報道機関各位

東北大学大学院理学研究科
東北大学金属材料研究所
一般財団法人ファインセラミックスセンター

太陽系形成期の小惑星内部における「水」の振る舞いを解明
(隕石中のナノ粒子の渦状磁区の発見と
小惑星内部の無重力環境に浮かんでいた水滴中の鉱物形成過程の解明)

東北大学大学院理学研究科の木村勇氣助教らは、一般財団法人ファインセラミックスセンターの山本和生研究員らと共同で、隕石中に存在する磁鉄鉱ナノ粒子の磁区構造をホログラフィー電子顕微鏡（日立製 HF3300-EH）を用いてナノレベルで観察した結果、天然では例のない渦状構造を持っていることを発見しました。それにより、太陽系形成期に小惑星内部の無重力空間に浮かぶ水滴の姿を世界で初めて明らかにできました。今回の発見は、水が干上がる状況を初めて捉えた成果といえ、煮詰めたスープのように化学種が濃縮した水と、鉱物、有機物との相互作用から、いかに有機物の初期進化と隕石中に見られる鉱物の形成が進んだかの解明につながります。また、磁性粒子のコロイド結晶は、未来のデバイスとしての可能性を秘めており、今回の発見は今後の合成へのきっかけにもなりません。

本研究成果は、英国科学誌 *Nature Communications* に受理され、平成25年10月22日16時（日本時間23日0時）発行（予定）のオンライン版で公開されます。

本研究成果の一部は、東北大学学際科学国際高等研究センター（現：東北大学学際科学フロンティア研究所）におけるプログラム研究「液体のように振舞う固体：ナノ領域の拡散現象と天文学」（研究代表：木村勇氣）および、独立行政法人日本学術振興会グローバルCOEにおける研究課題「変動地球惑星学の統合教育研究拠点」（拠点リーダー：大谷栄治）によって得られたものです。

(お問い合わせ先)

東北大学大学院理学研究科

助教 木村 勇氣 (きむら ゆうき)

Tel:022-795-5903 E-mail:ykimura@m.tohoku.ac.jp

<背景>

46億年昔に冷たい分子雲が収縮して太陽系が誕生する際には、宇宙物質の蒸発や凝縮、衝突合体などのプロセスを経て惑星や小惑星などの天体も同時に作られました。小惑星の欠片である隕石には、大きな惑星ではすでに失われている太陽系形成期の環境を読み解くカギが残されています。例えば、有機物の進化や鉱物の変質に大きな影響を及ぼす水が小惑星に存在していた証拠が、隕石中の熱水鉱物の岩脈や岩塩中に取り込まれた水として残っています。今回分析に用いたタギシュレイク隕石^{注1}中に含まれる磁鉄鉱も、サーペンティンやサポナイトのような含水鉱物と一緒に見つかったことから、小惑星中での水質変質によって形成されたことが分かっており、含水鉱物を含む炭素質コンドライトの進化に関していくつかのモデルが提案されています。しかしながら、隕石中にはすでに液体の水そのものは見られず、小惑星の形成後、いつどこでどのようにして枯渇したのかは分かっていません。

岩石や鉱物の残留磁化は、形成環境やその後に経験する温度履歴にとっても敏感であるため、古地磁気学的手法として古くから使われてきました。タギシュレイク隕石の塊としての磁化もこれまでに調べられており、4~9 μm の大きさの多磁区構造^{注2}の磁鉄鉱に由来し、弱い磁場環境下で生成したことが報告されています。2011年に我々を含むグループは、直径110~680 nmの磁鉄鉱粒子が三次元的に規則正しく並んだコロイド結晶がタギシュレイク隕石中に存在していることを報告しています。

<研究内容>

磁鉄鉱粒子は通常は磁石の引き付け合う力で枝状に集まりますが、隕石中には形と大きさが均一な粒子が三次元的に規則正しく並んだコロイド結晶^{注3}として存在していることがあります。今回我々は、この磁鉄鉱粒子を取り出し、電子線ホログラフィー^{注4}という手法を古地磁気学の分野に適用することで、ナノ粒子個々の残留磁化を6 nmの分解能で調べることに成功し、ナノ磁鉄鉱粒子が渦状に自らの磁力線を閉じ込める構造を有していることを天然の試料で初めて発見しました。コロイド結晶は反発力で並ぶため、その生成には閉じた空間が必要です。この渦状の磁区構造が磁石の引き付ける力を内部に閉じ込めると、水の蒸発とともに行き場を失った粒子が初めて並ぶことができます。通常の磁鉄鉱粒子の磁区構造だと、磁石の引き付け合う力で枝状に集まってしまいます。この特殊な磁石の性質とコロイド結晶生成の反発力とを考えることで、タギシュレイク隕石の母天体である小惑星内部の水が無重力下で水滴状になって蒸発してゆく様子を解明しました。

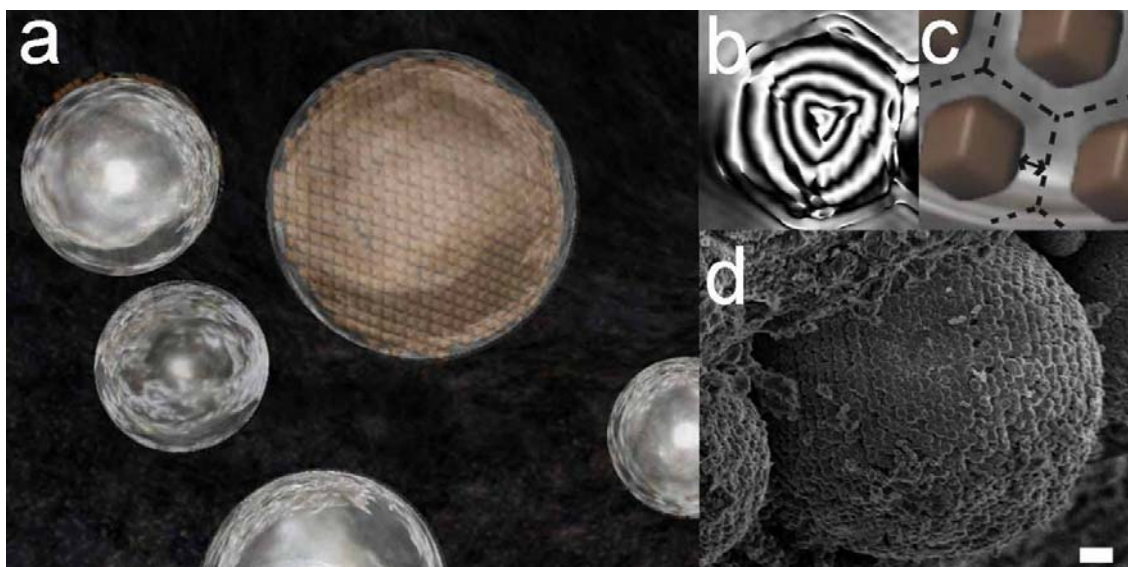


図 1. 小惑星内部の無重力中に浮かぶ水の最後の瞬間と磁鉄鉱コロイド結晶の生成モデル。(a) 小惑星に他の天体が衝突した結果、振動により内部で水滴が多量に作られ、無重力中に浮かぶ。その後、水はゆっくりと蒸発し、水中に溶け込んでいたイオンの濃度が上昇する。高過飽和になった水滴から、一度の均質核生成イベントにより、均一な形と大きさを持った磁鉄鉱ナノ粒子が形成する。渦上の内部磁区構造はこの時に作られる。(b) 電子線ホログラフィー法により得られた、直径約 180 nm の磁鉄鉱ナノ粒子の磁束分布像。同心円状の縞模様は磁力線が巻いていることを示しており、外部への漏れ磁場は無いことが分かる。(c) a の中央にある粒子形成後の水滴内部の拡大図。点線は粒子の表面電荷が作るデバイ遮蔽領域^{注5}を示す。矢印で示した長さがデバイ遮蔽長。表面電荷による反発力で分散し、水の蒸発に伴って、行き場を失った粒子同士は反発しあいながら三次元的に整列し、コロイド結晶を形成する。水がさらに蒸発した後、コロイド結晶は保存される。(d) 実際の磁鉄鉱コロイド結晶の走査電子顕微鏡像。スケールバーは 1 μm 。

<今後の展開>

今回の発見は、水が干上がる状況を初めて捉えた成果といえ、煮詰めたスープのように化学種が濃縮した水と、鉱物、有機物との相互作用から、いかに有機物の初期進化と隕石中に見られる鉱物の形成が進んだかの解明につながります。また、磁性粒子のコロイド結晶は、未来のデバイスとしての可能性を秘めており、今回の発見は今後の合成へのきっかけにもなります。

本研究は、結晶成長学、電子顕微鏡法、古地磁気学、コロイド科学、惑星科学という異なる研究分野の研究者が連携することによって行われました。

<論文名>

“Vortex Magnetic Structure in Framboidal Magnetite Reveals Existence of Water Droplets in an Ancient Asteroid”

(房状磁鉄鉱の渦状磁区構造による太古の小惑星における水滴の存在の証明)

著者名：“Yuki Kimura, Takeshi Sato, Norihiro Nakamura, Jun Nozawa, Tomoki Nakamura, Katsuo Tsukamoto & Kazuo Yamamoto” 「木村勇気（東北大学理学研究科）、佐藤岳志（(財) ファインセラミックスセンター（現：(株) 日立ハイテクノロジーズ）、中村教博（東北大学理学研究科）、野澤純（東北大学金属材料研究所）、中村智樹、塚本勝男（東北大学理学研究科）、山本和生（(財) ファインセラミックスセンター）」

<用語説明>

注1. タギシュレイク隕石

2000年1月18日にカナダに落下後、すぐに回収されたことから、地球物質による汚染や変質が極めて少ないのが特徴。D型小惑星起源で炭素質コンドライトに分類されている。

注2. 磁区

磁石は、多くの極小磁石が同じ方向を向くことで鉄を引き付ける力が生まれる。この極小磁石がそれぞれ同じ方向を向いている領域を磁区と呼ぶ。

注3. コロイド結晶

粒子サイズが $\sim\mu\text{m}$ 程度で溶液中に分散している状態（凝集や沈殿を起こさない）をコロイドと呼び、そのコロイド状態の粒子によって構成される周期的な規則配列集合体をコロイド結晶と呼ぶ。

注4. ホログラフィー電子顕微鏡

磁場や電場を直接観察することが可能な電子線ホログラフィー専用の透過型電子顕微鏡である。干渉性の良い電子源である電界放出型電子銃と電子波を干渉させる電子線バイプリズムを備えている。

注5. デバイ遮蔽領域

表面電荷によって引きつけられた反対符号のイオンが分布している領域。このイオンの雰囲気によって粒子同士は反発する。