

# 火星隕石中カンラン石の黒色化： 衝撃変成作用による鉄ナノ粒子の形成とその存在意義

三河内 岳・栗原 大地  
(東大・理・地球惑星科学)

## 1. はじめに

火星隕石はこれまでに約50個が見つかっており、いずれも火成岩であるため、火星のマグマ活動・組成やマントルについての情報を得るための重要な試料となっている。2000年に発見されたNWA2737(シャシナイト)はカンラン石であるが外見が真っ黒であり、薄片上ではカンラン石が茶色を呈している。この着色の原因はカンラン石中に含まれる直径約10-20 nmのFe-Ni金属粒子であるとの報告が近年なされている[1, 2]。実は、このような黒色化したカンラン石はシャゴッタイトには普遍的に存在していることから、我々はこれらのナノ粒子がこれらの火星隕石中カンラン石にも存在しているかを透過型電子顕微鏡(TEM)で観察し、さらにこれらの鉄ナノ粒子の形成過程について衝撃実験を通して考察を行った。また、これらの鉄ナノ粒子が含まれることは、その他の多くの物質科学的性質に影響を与えるために、その効果についても議論を行った。

## 2. 試料と分析手法

今回、研究した火星隕石は、ALH77005、LEW88516、NWA1950、Y000097、LAR06319、Dhofar 019の6つのシャゴッタイトである。これらのうち前者4つはレールゾライト質シャゴッタイトに分類され、後者2つはカンラン石フィリック質シャゴッタイトに分類される。試料は、NWA1950以外は粉末試料を用い、これらをTEM(JEOL JEM-2010:東大・理)で観察・分析した。また、NWA1950は日本電子研究開発部の集束イオンビーム(FIB)装置(JEOL JIB-4600F)を用いて、カンラン石の黒色筋状部分の極薄片試料を作成し、JEOL JEM-2100を用いて観察・分析を行った。

## 3. 観察・分析結果

TEM観察の結果、分析した試料すべてに直径約10-20 nmのナノ粒子が含まれていることが分かった。しかし、ALH77005とY000097では、NWA2737と同様に、ナノ粒子はFe-Ni金属であったが、LEW88516、NWA1950、LAR06319、Dhofar 019では、ナノ粒子はマグネタイトであることが明らかになった。NWA1950のFIB試料観察から、マグネタイ

ト粒子はカンラン石の黒色筋状部分にのみ観察されたことから、Fe-Ni金属粒子と同様にマグネタイトがカンラン石の着色の原因になっていることが示唆された(図1)。また、これらの鉄ナノ粒子の周辺はカンラン石がSiに富んでおり、カンラン石から鉄ナノ粒子が析出した際に、同時に形成されたと考えられる。ただし、これらのSiに富む部分に存在するのが、シリカ鉱物なのか、もしくは輝石なのか、アモルファス相なのかを同定することはできなかった。

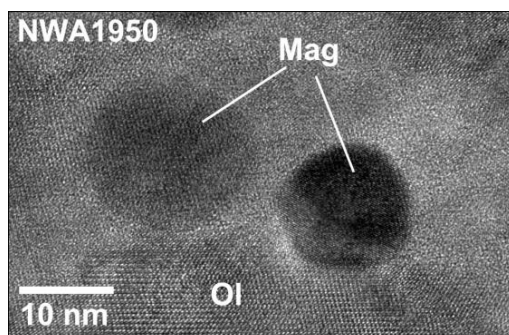


図1：NWA1950火星隕石中カンラン石の高分解能TEM写真。カンラン石(Ol)中にマグネタイト(Mag)のナノ粒子が存在している。

## 4. 鉄ナノ粒子の形成過程

NWA2737中のカンラン石に含まれるFe-Ni金属粒子の成因については、強い衝撃によるカンラン石中の鉄の還元によるものであるとされている[2]。今回、我々の研究により、マグネタイトのナノ粒子が見つかったことから、カンラン石の還元だけでなく、酸化も起きていることが明らかになった。実際に、NWA2737や他の茶色カンラン石を含む火星隕石の多くは40 GPa以上の高い衝撃圧を受けており、衝撃による金属粒子の形成は考えられるプロセスである。それぞれ、カンラン石が還元もしくは酸化されて鉄パーティクルが形成される際には、同時にSiに富んだ相も形成されるが、TEM観察により、ナノ粒子周辺に見出されたSiに富んだ相がこれに当たると考えられる。

## 5. 衝撃実験

衝撃によるナノ粒子の形成過程を検証するために物質材料研究機構・超高压カステーションで

カンラン石の衝撃実験を行った。実験にはアメリカ・San Carlos 産のカンラン石( $\text{Fe}_{90}$ )を用い、これを粉末にして一段式火薬銃による衝撃加圧を行った。衝撃圧は、20、30、40、46 GPa であった。回収試料を TEM で観察した結果、40 GPa 以上で加圧したカンラン石には、10-20 nm のマグネタイト粒子が確認された。いずれの試料でも、30 GPa 以下のものには、これらの微粒子は見つからなかった。また、グラファイト粉末を混ぜて実験を行った試料では、40 GPa 以上の衝撃圧で Fe-Ni 金属のナノ粒子が形成された。着色カンラン石を含む火星隕石に対して見積もられている衝撃圧は、いずれも 40 GPa 以上であり [3]、衝撃実験結果とよく対応している。

#### 6. ナノ粒子：金属鉄とマグネタイト

また衝撃実験より、カンラン石を酸化的条件で衝撃加圧するとマグネタイト粒子が、還元条件で加圧すると Fe-Ni 金属粒子が形成されることが示された。レールゾライト質シャーゴットは火星の同じ岩体を起源とすると考えられているが [4]、ナノ粒子に Fe-Ni 金属を含むものとマグネタイトを含むものが存在している。衝撃時の酸化条件を支配する主要因は周囲の酸素雰囲気と考えられるが、レールゾライト質シャーゴットでは衝撃時の酸素雰囲気はどれも同じだったと考えられるために、同じ酸素雰囲気であっても衝撃時の温度上昇の違いによって形成された粒子が異なる可能性がある。つまり、同じ酸素分圧でも、衝撃時によってより高温になった隕石には Fe-Ni 金属粒子が形成され、あまり高温にならなかった隕石ではマグネタイト粒子が形成されたと考えられる。実際に 400 度、800 度で加熱しているカンラン石試料を 40 GPa で衝撃加圧したところ、マグネタイトではなく Fe-Ni 金属のナノ粒子が形成された。

#### 7. 鉄ナノ粒子存在の重要性

以上のように火星隕石中の黒色化したカンラン石中には直径 10-20 nm の鉄ナノ粒子が存在することが明らかになった。これらのナノ粒子が存在することは、カンラン石の物質科学的特徴を変化させ、惑星科学的に見て非常に重要な implication を含んでいる。

例えば、NWA2737 では、カンラン石の反射スペクトルにおいて約 1 ミクロンの吸収が消失することが明らかになっている [5]。カンラン石は惑星物質として広く分布する鉱物であることから、火星表面で大規模な衝撃変成作用により鉄ナノ粒子が形成されカンラン石の反射スペクトルが変化した場合には、上空からのリモートセンシングによる検出が困難になる可能性が考えら

れる。そのために、衝撃変成を強く受けた天体でカンラン石の存在をカンラン石の 1 ミクロンの吸収を用いて行う際には注意が必要と言える。

また、鉄ナノ粒子の形成は、岩石の磁化率にも大きな影響を与える。Fe-Ni 金属、マグネタイトのいずれも磁化鉱物であり、これらの鉄ナノ粒子が形成されることで、岩石の磁化率の値が大きくなる。例えば、火星の南半球はクレーターが多く太古の地殻を持っているとされるが、この地域は大きな磁気異常を持つことでも知られている。この磁気異常の原因が、カンラン石の衝撃変成作用による鉄ナノ粒子の形成だとすると、それが特にクレーターが多く、衝撃変成作用が大きかった南半球に存在することと調和的である。また、現在の火星表面には風化物のヘマタイトが広く分布しているが、これらの起源としても鉄ナノ粒子が大きな寄与をしている可能性がある。

それでは、カンラン石中のナノ粒子は、火星隕石にだけ見られる特異なものなのであろうか？火星だけでなく、その他の大きな天体での大規模衝撃変成作用では、カンラン石中にナノ粒子が普遍的に形成されてもよいはずである。例えば、月隕石では、カンラン石は主要構成鉱物のひとつであるが、着色したカンラン石はほとんど見つかっていない。Dhofar 308 隕石中にトラクトロライトの岩片が含まれており、この中には赤く着色したカンラン石が存在している。このカンラン石を TEM で観察した結果、ヘマタイトのナノ粒子が見つかった。これは、おそらく、元々金属鉄だったナノ粒子が地球落下後の変質により、ヘマタイトになったものと考えられる。しかし、この試料（ベア隕石を含む）以外には着色したカンラン石は見つかっておらず、なぜ、月試料中にほとんど存在しないのかはよく分かっていない。もしも火星試料のみに存在するのであれば、例えば、ナノ粒子の形成に水の関与などが考えられるが、その詳細は明らかになっていない。今後、これらの考慮を加えた上で、カンラン石中の鉄ナノ粒子の研究を進めていく必要があると言える。

謝辞：今回の研究会に招いて下さった千葉工大の和田浩二博士、衝撃実験に協力頂いた広島大の関根利守先生、TEM 観察に協力頂いた日本電子の大西市朗博士（日本電子）に感謝致します。

文献：[1] Van de Moortele B, et al. *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 262, 37-49, 2007. [2] Treiman A, et al. *Jour. Geophys. Res.*, 112, E4, E04002, 2007. [3] Fritz J, et al. *Meteorit. & Planet. Sci.*, 40, 1393-1411, 2005. [4] Mikouchi T. *Meteorit. & Planet. Sci.*, 40, 1621-1634, 2005. [5] Pieters C, et al. *Jour. Geophys. Res.*, 113, E06004, 2008.