

特集「惑星物質から見る衝突現象研究の新展開」

火星隕石中の黒色カンラン石：衝撃変成作用による鉄ナノ粒子の形成

三河内 岳¹，栗原 大地¹，笠間 丈史²

2011年4月13日受領，2011年4月28日受理。

(要旨) 火星隕石中のカンラン石には黒色化したものが多く見られる。透過型電子顕微鏡によりこれらの試料を観察したところ、直径10-20ナノメートルの金属鉄またはマグネタイトのナノ粒子が存在することが分かり、これらが黒色化の原因になっていることが明らかになった。これらのナノ粒子はカンラン石の衝撃実験で40 GPa以上の衝撃圧の際に形成されることが示され、黒色カンラン石を含む火星隕石の推定衝撃圧とよく一致している。2種類のナノ粒子が存在することは衝撃時の温度上昇の違いによって説明できる。これらのナノ粒子の存在は、カンラン石の反射スペクトルや磁化率を変化させるために、惑星探査でリモートセンシングを行う際にはその影響を考慮する必要があると言える。

1. はじめに

火星隕石はこれまでに約50個が見つかった[1]。これらは、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[2]。火星隕石の主要構成鉱物はカンラン石、輝石、斜長石であり、地球で見られる超塩基性の火山岩とよく似ているものが多い。ただし、地球の岩石とは決定的に異なる点が存在する。それは強い衝撃変成作用を受けていることである。火星隕石は、火星表面近くに存在していた岩石が、隕石などの衝突により宇宙空間に放出され、それが後に地球に落下してきたものである。火星からの脱出速度は秒速約5キロメートルであるために、この速度で岩石が加速されるためには強い衝撃が必要となる。実際、ほとんどの火星隕石には強い衝撃の痕跡が残っている。例えば、衝撃によって生じたメルトやガラス化した斜長石(マスケリナイト)は火星隕石に普遍的に見られる。火星隕石の火星起源を直接的に関係付けるガス成分が見つかったのも、このような衝撃溶融メルトにトラップされた火星大気によるものである[3]。

実はこのような強い衝撃変成作用が火星隕石に別の大きな影響を与えていることが最近明らかになって来ている。それはカンラン石の黒色化である。通常、カンラン石は緑色をしており、薄片試料を偏光顕微鏡で観察するとほとんど無色である。ところが、火星隕石の中、特に最大のグループであるシャーゴットイトに含まれるカンラン石は黒色をしていることが多く、これらのカンラン石は薄片上では茶色をしている。しかし、このような黒色化したカンラン石の存在は、カンラン石中の鉄の酸化であると考えられていただけで、あまり詳細な研究は行われていなかった[4]。このような状況に変化を与える契機になったのが、2000年に発見されNWA 2737と名付けられた火星隕石である。

NWA 2737はシャシナイトに分類されるカンラン岩の火星隕石で、このグループの隕石としては2番目のものであった[5]。それまで唯一知られていたシャシナイトのChassignyは地球のカンラン岩と同じく緑色っぽい岩石であったが、NWA 2737はChassignyと組織や鉱物組成はよく似ているにもかかわらず、外見が真っ黒だったのである(図1)。NWA 2737は、Chassignyよりも強い衝撃を受けた証拠があり、その結果、カンラン石が黒色化したと考えられたのである。そのような特異性から、NWA2737を詳細に調べた結果、この着色の原因はカンラン石に含まれる直径

1. 東京大学大学院 理学系研究科

2. デンマーク工科大 電子顕微鏡センター
mikouchi@eps.s.u-tokyo.ac.jp



図1：NWA 2737シャシナイトの外観写真。カンラン岩にもかかわらず真っ黒な外観を示している。画面中央付近の白黒の紙片がスケール=横幅5センチメートル。画像提供：Bruno Fectay, Carine Bidaut



図2：LAR 06319(カンラン石フィリック質シャーゴット)の薄片写真(オープンニコル)。黒っぽく着色しているのがカンラン石である。写真横幅=約1.5ミリメートル。

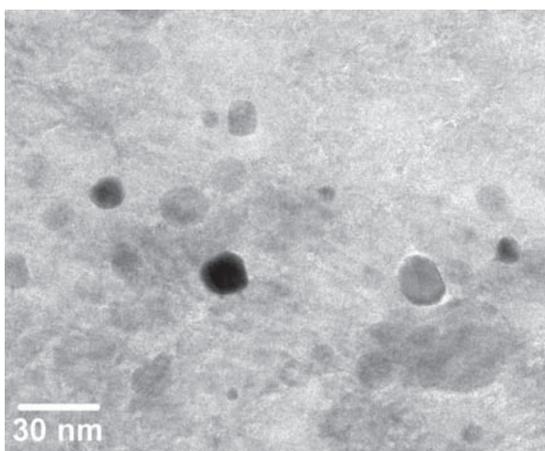


図3：NWA 1950(レールゾライト質シャーゴット)中カンラン石のTEM写真。10-20ナノメートルの大きさのナノ粒子が存在していることが分かる。

約10-20ナノメートルの金属鉄のナノ粒子であることが分かった[6,7]。先述したように、このような黒色化したカンラン石はシャーゴットには普遍的に存在している。では、これらのカンラン石中にも同じようなナノ粒子が存在するのか？と言うことが大きな疑問である。

そこで、我々は黒色化したカンラン石を含む火星隕石を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察し、実際にNWA 2737と同じようなナノ粒子が存在するかどうかを調べた。さらに、これらの鉄ナノ粒子は衝撃変成により形成されたと考えられるために、その形成過程

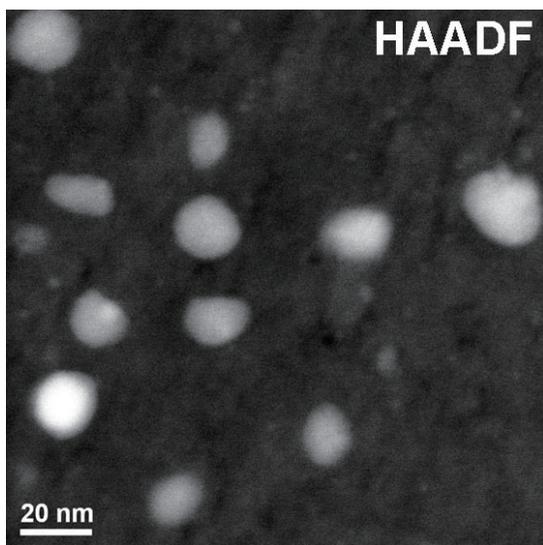


図4：NWA 1950中カンラン石の走査TEM-高角度散乱暗視野像(STEM-HAADF像)写真。HAADF像では原子番号の高い元素を多く含む領域が明るくなるため、明るい部分が鉄を含んだナノ粒子に相当する。1ナノメートルほどの大きさのナノ粒子も存在していることが分かる。

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、火星隕石の物質科学的性質に多くの変化を与えるために、その影響についても議論を行った。

2. 試料と分析手法

これまでに分析した火星隕石は、ALHA77005、

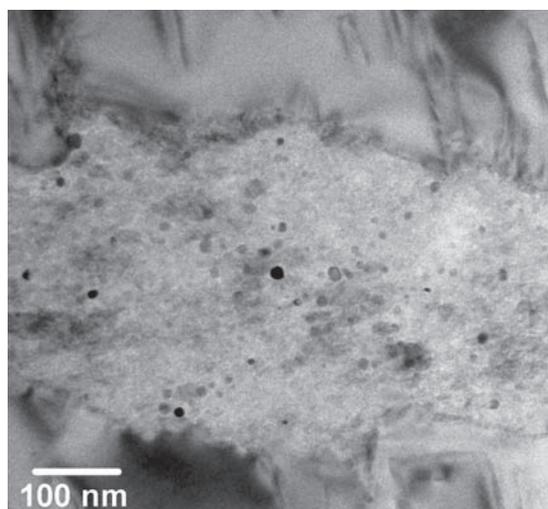


図5：NWA 1950中カンラン石のTEM写真。写真の真ん中を左右に横切っている部分が薄片上で黒い脈に相当する。この部分にのみナノ粒子が存在していることが分かる。

Y 000097, LEW 88516, NWA 1950, LAR 06319, Dhofar 019の6つのシャーゴットイトである。これらのうちで、前者4つはレールズライト質シャーゴットイトに分類され、後者2つはカンラン石フィリック質シャーゴットイトに分類される。いずれも着色の度合いは異なるが、黒色カンラン石を含んでいる(図2)。

試料は、NWA 1950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、NWA 1950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、カンラン石の黒色脈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。また、別のNWA 1950試料については、デンマーク工科大のFIB装置(FEI Helios Nanolab)を用いて同様の極薄片試料を作成し、最新のTEMであるFEI Titan 80-400で分析した。

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ナノメートルのナノ粒子が含まれていることが分かった(図3)。ナノ粒子の存在量について定量的な解析はできていないが、定性的には着色の度合いの強い試料ほどナノ粒子の量が多く存在する傾向が見られた。また、小さなナノ粒子は割れ目に沿って形成されているものが見られ、詳細に観察すると粒子サイズは1ナノメートル程度のものであることが分かった(図4)。後述するようにナノ粒子の形成は衝撃変成作用によると考えられるために、衝撃によりできた割れ

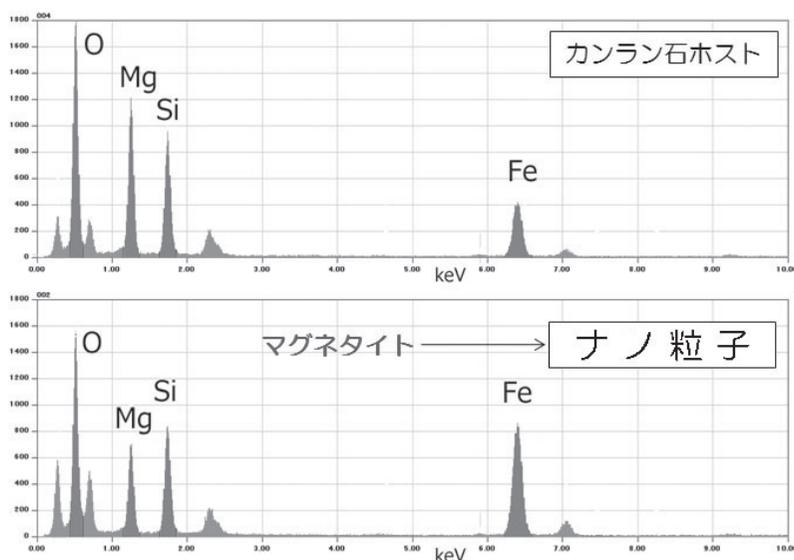


図6：TEMのエネルギー分散型スペクトル(EDS)によるNWA 1950中カンラン石とナノ粒子の元素組成(粉末試料)。カンラン石ホストに比べ、ナノ粒子の方が鉄に富んでいることが分かる。ただし、ナノ粒子のサイズが小さいために周りのカンラン石の組成がオーバーラップしている。また、ナノ粒子の方がカンラン石よりもシリコンのピークがマグネシウムより高く、シリコンに富んだ相の存在を示唆している。

表1：火星隕石中のカンラン石に見られるナノ粒子

隕石名	分類	ナノ粒子種類
ALHA77005	レールズライト質シャーゴッタイト	Fe-Ni金属 ^[8]
Y 000097	レールズライト質シャーゴッタイト	Fe-Ni金属 ^[8]
LEW 88516	レールズライト質シャーゴッタイト	マグネタイト ^[8]
NWA 1950	レールズライト質シャーゴッタイト	金属鉄 ^[6] , マグネタイト ^[9] , ヘマタイト ^[10]
LAR 06319	カンラン石フィリク質シャーゴッタイト	マグネタイト ^[9]
Dhofar 019	カンラン石フィリク質シャーゴッタイト	マグネタイト ^[9]
NWA 2737	シャシナイト	Fe-Ni金属 ^[6,7]

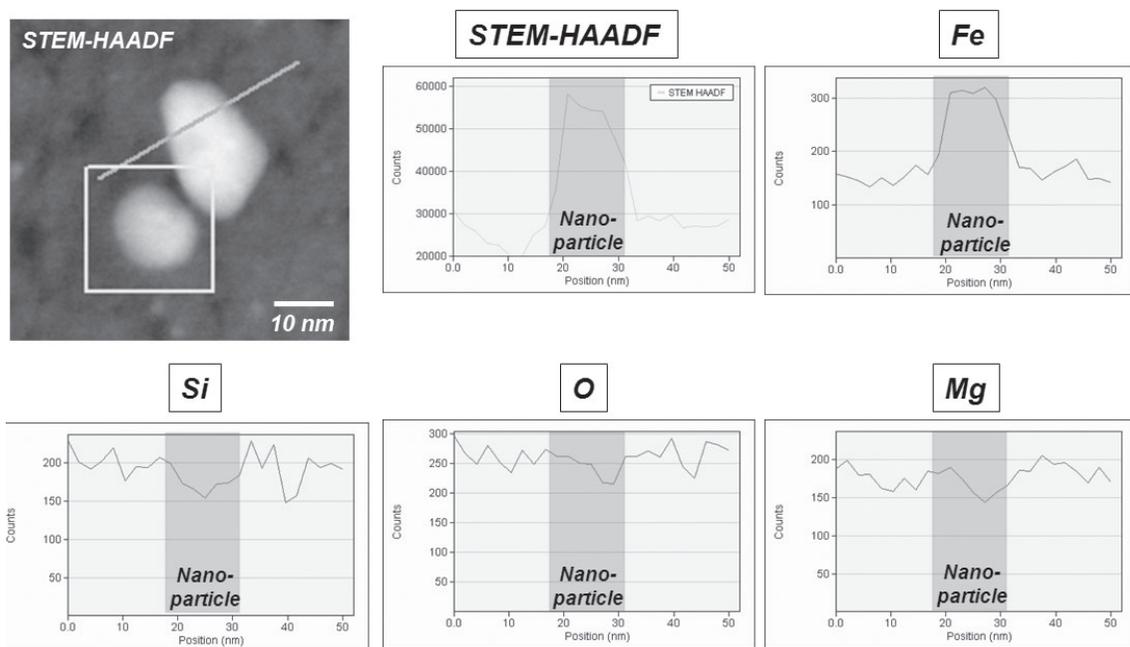


図7：NWA 1950中ナノ粒子(金属鉄)のライン分析プロファイル。STEM-HAADF像上のラインに沿っての元素組成(鉄, シリコン, 酸素, マグネシウム)が示されている。ナノ粒子の周囲に顕著なシリコンの組成差は見られない。

目に沿ってナノ粒子が存在していることと調和的である。

また、NWA 1950のFIB試料観察の結果、ナノ粒子はカンラン石の黒色脈状部分にのみ存在することが明らかになった(図5)。これまでに、NWA 2737に関して、カンラン石の黒色化した部分にナノ粒子が存在することが指摘されていたことから^[6,7]、その他の火星隕石中のカンラン石についても、着色の原因がナノ粒子の存在によるものと考えられる。

見つかったナノ粒子の鉱物種については興味深い結果が得られた。電子線回折の結果、ALHA77005とY 000097では、NWA 2737と同様にナノ粒子はニッ

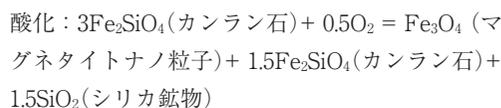
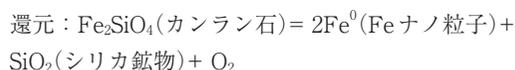
ケルを含んだ金属鉄であったが、LEW 88516、LAR 06319、Dhofar 019では、ナノ粒子はマグネタイトであることが明らかになった(表1)。これらのナノ粒子では金属鉄と異なり、ニッケルが含まれていなかった。NWA1950のナノ粒子に関しては、粉末で観察した試料ではマグネタイトが、FIBで作成した試料では金属鉄とヘマタイトであることが分かった。ヘマタイトに関しては、金属鉄と共存しているものが見られたので、FIBによる試料作製時にナノ粒子の酸化が起きて二次的に形成されたものだと考えられる。実際にFIB試料ではナノ粒子のまわりにあるカンラン石にはモアレ縞と呼ばれる干渉縞が見られる。このような干

渉縞は、複数の周期性を持った結晶が重なることで生じることから、カンラン石が試料作製時に再結晶化し、細かい多結晶になっていたために生じた可能性がある。

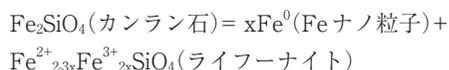
粉末試料の分析では、ナノ粒子の周辺はカンラン石がややシリコンに富んでおり（図6）、カンラン石からナノ粒子が析出した際に、同時に形成された可能性が考えられる。ただし、領域が非常に小さいために、これらのシリコンに富む部分に存在するのがシリカ鉱物なのか、もしくは輝石なのかアモルファス相なのかを同定することはできなかった。また、FIBで作成した試料では、ナノ粒子の周囲に明確なシリコンの濃集は見られなかった（図7）。これもFIB試料作製時にカンラン石が再結晶化し、存在していたシリコンに富んだ相が消失したためかもしれない。いずれにせよ、ナノ粒子の観察の際には、FIB試料作製による二次的な変成の効果を考慮する必要があると言える。

4. 鉄ナノ粒子の形成過程

NWA2737中のカンラン石に含まれる金属鉄粒子の成因は、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[6,7]。実際に、NWA2737や他の黒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いる[11]。また、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、衝撃変成時にカンラン石の還元だけでなく、酸化も起きていることが示唆された。それぞれ、カンラン石が還元もしくは酸化されてナノ粒子が形成される際には、同時にシリコンに富んだ相も形成されるはずである（次式）。



実際に、粉末試料を用いたTEM観察では、ナノ粒子周辺にシリコンに富んだ相があることが示唆されており、この相がナノ粒子形成に伴うものの可能性がある。別の可能性としては、形成されるナノ粒子の量はカンラン石全体のボリュームからするとごくわずかであるために、まわりのカンラン石の中で組成のわずかな変化が相殺されていることも考えられる。これらのうちどちらが正しいのかは、より詳細なTEM観察を行い、ナノ粒子の周囲でのシリコン濃集相の存在有無と同定をより正確に行う必要がある。また、カンラン石の自己酸化還元反応（電荷不均化反応）でも金属鉄のナノ粒子を作ることができる。



この反応では、カンラン石は原子空孔を含む超構造（ライフーナイト）になり、電子線回折で超格子反射が出現する[12]。今回、我々が観察した限りでは、黒色カンラン石の電子線回折像からライフーナイトに相当する超格子起源の回折点は見出されなかった。

5. 衝撃実験によるナノ粒子形成

衝撃によるナノ粒子の形成過程を検証するために、

表2：カンラン石（アメリカ・サンカルロス産）の衝撃実験結果

試料	衝撃圧	加熱温度	ナノ粒子
カンラン石	20 GPa	室温	なし
カンラン石	30 GPa	室温	なし
カンラン石	40 GPa	室温	マグネタイト
カンラン石	46 GPa	室温	マグネタイト
カンラン石+グラファイト	20 GPa	室温	なし
カンラン石+グラファイト	30 GPa	室温	なし
カンラン石+グラファイト	40 GPa	室温	Fe-Ni金属
カンラン石+グラファイト	46 GPa	室温	Fe-Ni金属
カンラン石	40 GPa	400 °C	Fe-Ni金属
カンラン石	40 GPa	800 °C	Fe-Ni金属

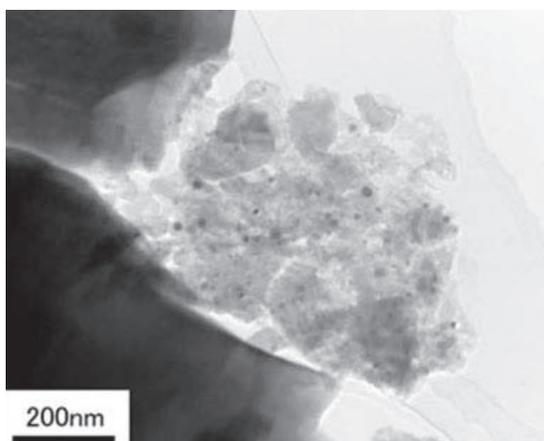


図8：カンラン石(アメリカ・サンカルロス産)を40 GPaで衝撃加圧した試料のTEM写真。火星隕石に見られるものと同じサイズ(約10-20ナノメートル)のナノ粒子ができていことが分かる。

物質材料研究機構・超高压力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・サンカルロス産のカンラン石(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、隕石中に見つかったものとはほぼ同じサイズである10-20ナノメートルのマグネタイトナノ粒子が確認された(図8)。いずれの試料でも、30 GPa以下のものには、これらのナノ粒子は見つけることができなかった(表2)。

また、還元環境下での衝撃変成を検証するために、カンラン石と同量のグラファイト粉末を混ぜて同様の実験を行った。回収試料の観察の結果、40 GPa以上の衝撃圧で金属鉄のナノ粒子が形成された。形成されたナノ粒子は、最大で100ナノメートルに達していたが、多くのものは10-20ナノメートルのサイズであった。

このように、酸化還元状態の違いにより、マグネタイトと金属鉄のナノ粒子が衝撃変成作用によってそれぞれ形成されることが実験的にも明らかになった。また、黒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[11]、今回の衝撃実験の結果とよく対応している。ただし、衝撃実験では、実際の天体での衝撃イベント比べて、圧力保持時間がはるかに短く、圧力推定の根拠には問

題があることが指摘されている[13]。そのため、実際の火星隕石が受けた衝撃圧力は40 GPaよりも低い可能性があるが、いずれにせよ、火星隕石が受けたとされる衝撃に相当する圧力でナノ粒子が形成されることが実験的に証明された意義は大きい。

6. なぜナノ粒子に2種類あるのか？

火星隕石中の黒色したカンラン石をTEMで分析した結果、金属鉄とマグネタイトの2種類のナノ粒子が存在することが明らかになった。なぜ、このように2種類のナノ粒子が存在するのであろうか？ 今回分析した試料の中で、レールズライト質シャーゴットは、どの試料もよく似た鉱物学的特徴を持ち、結晶化・宇宙線照射年代が共通なことから、火星の同じ岩体を起源とすると考えられている[14]。しかし、レールズライト質シャーゴット中のナノ粒子には金属鉄のものとはマグネタイトのものがある。

前章で示した通り、衝撃実験により、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ナノ粒子が、還元的条件で加圧すると金属鉄ナノ粒子が形成されることが明らかになっている。つまり、衝撃時の酸化還元条件が異なると異なった相のナノ粒子が形成されるわけである。レールズライト質シャーゴットは同じ岩体を起源とするために、周囲の酸素分圧はどの試料でも同じくらいと考えられる。そのため、単純に異なった酸素分圧で別種のナノ粒子が形成されたとは考えにくい。

もう一つの考えとしては、同じ酸素分圧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ナノ粒子の種類が異なる可能性である。同じ酸素分圧でも、衝撃時により高温になれば酸化還元状態はより還元的になる。そのため、同じ酸素分圧でも衝撃時に高温になった試料では金属鉄粒子が形成され、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る可能性が考えられるわけである。

この可能性を検証するために、加熱中のカンラン石に対しての衝撃加圧実験も行った。400℃および800℃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金属鉄のナノ粒子が形成された。このことから、衝撃時の温度上昇の差で同じ酸素分圧でも異なる相のナノ粒子が形成され

ることが示された。この結果から、同じ隕石の中でも温度上昇の違いがあれば、ある部分では金属鉄のナノ粒子が見られ、別の部分ではマグネタイトのナノ粒子が見られるはずである。NWA1950では、マグネタイトと金属鉄の両方が見つかっていることから、まさにこのような試料と考えられる。また、他の試料でもいくつかの場所を調べると2種類の異なった相のナノ粒子が見つかる可能性があると言えるだろう。

7. 火星隕石以外の黒色カンラン石

これまでに黒色化したカンラン石は火星隕石以外からも見つかっている。例えば、CKコンドライト中のカンラン石には、数マイクロメートル以下の空隙や不透明鉱物によって黒色化しているものがあることが知られている[15]。この黒色化も衝撃変成作用によるものであるが、火星隕石と異なり、衝撃時の温度が高く(600℃以上)、衝撃圧の低い(25 GPa未満)条件下で形成されたと指摘されている。この場合は、衝撃圧の効果よりも温度の効果が高く、カンラン石の溶融が起こったことが主要因とされ、ナノ粒子の形成とはメカニズムが明確に異なる。

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一つであるが、黒色化したカンラン石はほとんど見つかっていない[16]。唯一知られている例外は、黒色化しているわけではないが、Dhofar 489とそのペア隕石中のトラクトロライト岩片に見られる赤く着色したカンラン石である[17]。Dhofar 489とペアであるDhofar 308中トラクトロライト岩片のカンラン石をTEMで観察した結果、10-20ナノメートルサイズのヘマタイトナノ粒子が見つかっている[8]。月環境下でヘマタイトのナノ粒子が形成されることは考えづらいので、おそらく、元々金属鉄として形成されたナノ粒子が地球落下後の変質により、二次的にヘマタイトになったものと考えられる。

しかし、これらの試料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はっきりしない。一つには、火星隕石に

比べて月隕石は衝撃の度合いがやや低いためにナノ粒子が形成されている試料そのものが少ない可能性である。もしくは、ナノ粒子の形成に水や大気が例えば触媒のような役割で関与しており、極真空下では、ナノ粒子は形成されない可能性である。そのため、火星隕石中と地球での衝撃実験試料中にはナノ粒子が見つかっているが、月試料中にはほとんど形成されないのかもしれない。いずれにせよ、今後は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形成過程をより詳細に理解していく必要があると言える。

8. 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には衝撃変成作用により形成された直径10-20ナノメートル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、ただ単に強い衝撃変成作用を示すだけではなく、カンラン石の物質科学的性質を変化させ、惑星科学的に見て非常に重要な問題を含んでいる。

8.1 反射スペクトルの変化

NWA2737シャシナイトではカンラン石の反射スペクトルにおいて約1マイクロメートルの吸収が消失することが明らかになっている[18,19]。カンラン石は惑星物質として最も広く分布する鉱物であることから、天体表面で衝撃変成作用により鉄ナノ粒子が形成された場合には、カンラン石の反射スペクトルが変化し、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。

火星の南半球にはクレーターが多く、太古の地殻を持っているとされる。これらの地域では、大規模な衝撃変成作用があったと考えられることから、カンラン石の検出を1マイクロメートルの吸収を用いて行う際には注意が必要と言える。また、月においてもカンラン石は主要構成鉱物であり、これまでに黒色化したカンラン石は月試料中からはほとんど見つかっていないものの、月表面に存在している可能性を念頭に置いておく必要があるだろう。

8.2 磁氣的性質の変化

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。金属鉄、マグネタイトのいずれも磁性鉱物であり、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増大する[20]。例えば、火星の南半球は大きな磁気異常を持つことでも知られている[21]。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、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[22]、これらの主要な供給源としても鉄ナノ粒子が寄与している可能性がある。隕石の古地磁気を研究する際には、このように衝撃によって鉄ナノ粒子が二次的に形成されている影響を考慮する必要もあると言えるだろう。

謝 辞

今回、執筆の機会を与えて下さった千葉工大の和田浩二博士と岡山大の富岡尚敬博士、衝撃実験に協力頂いた広島大の関根利守博士、TEM試料作製・観察に協力頂いた日本電子の大西市朗博士と鈴木俊明博士に深く感謝致します。また、富岡博士と茨城大の木村眞博士には原稿の査読により有益なコメントを頂きましたので併せてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Meyer, C., 2009, Mars Meteorite Compendium, <http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>.
- [2] McSween, H. Y. Jr., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 7.
- [3] Bogard, D. D. and Johnson, P., 1983, *Science* 221, 651.
- [4] Ostertag, R. et al., 1984, *Earth Planet. Sci. Lett.* 67, 162.
- [5] Beck, P. et al., 2006, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2127.
- [6] Van de Moortèle, B. et al., 2007, *Earth Planet. Sci. Lett.* 262, 37.
- [7] Treiman, A. et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, E04002, doi:10.1029/2006JE002777.
- [8] Kurihara, T. et al., 2008, *Lunar Planet. Sci.* XXXIX, #2478.
- [9] Kurihara, T. et al., 2009, *Lunar Planet. Sci.* XL, #1049.
- [10] Kurihara, T. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, Suppl., A112.
- [11] Fritz, J. et al., 2005, *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 1393.
- [12] Kondoh, S. et al., 1985, *Am. Mineral.* 70, 737.
- [13] 富岡尚敬, 木村眞, 2011, *日本結晶学会誌* 53, 760.
- [14] Mikouchi, T., 2005, *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 1621.
- [15] Tomeoka, K. et al., 2001, *Meteorit. Planet. Sci.* 36, 1535.
- [16] Righter, K., 2010, *The Lunar Meteorite Compendium*, <http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/lmc/index.cfm>.
- [17] Takeda, H. et al., 2006, *Earth Planet. Sci. Lett.* 247, 171.
- [18] Pieters, C. M. et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, E06004, doi:10.1029/2007JE002939.
- [19] Noble, S. et al., 2007, *Icarus* 192, 629.
- [20] Hoffmann, V. H. et al., 2009, *Lunar Planet. Sci.* XL, #2194.
- [21] Langlais, B. et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E02008, doi:10.1029/2003JE002048.
- [22] Christensen, P. R. et al., 2001, *J. Geophys. Res.* 106, E10, 23873.