

## 論文の内容の要旨

### Formation process of magmatic inclusion in martian meteorites: Implication for water in parent magma

(火星隕石中のマグマティックインクルージョンの形成過程: 火星マグマ中の水)

紋川 亮

火星起源と考えられている隕石は、角閃石、雲母および粘土鉱物などの含水鉱物が含まれており、その存在は、火星の内部も地球とよく似た環境であったことを予見させる。特に Ti に富む kaersutite(図 1)と呼ばれる角閃石は、地球と火星の両方の岩石に含まれており、火星マグマも地球のマグマと同様に一定量の水を含んでいることを強く示唆している。しかし、火星隕石中の kaersutite は、Watson et al. (1994)による H の定量分析の結果、低 H 含有量

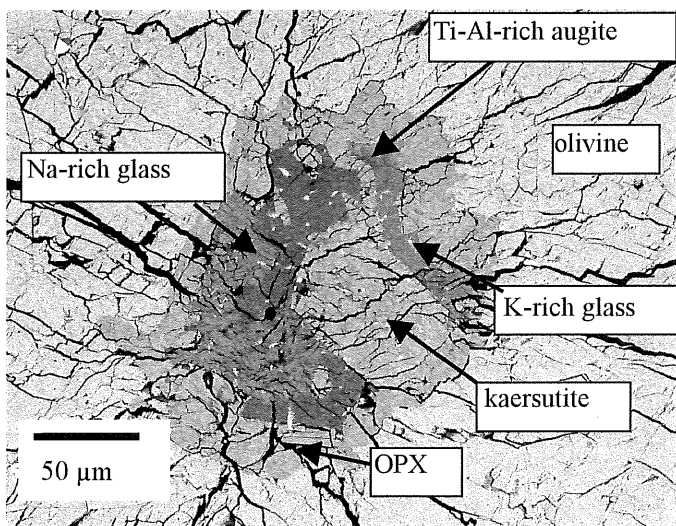


図 1 kaersutite を含む Chassigny 中の magmatic inclusion.

( $H_2O=0.1-0.2$  wt%)であり、地球上の kaersutite とは、著しく異なることが明らかになった。この結果を用いて見積もられた火星マグマの含水量は、非常に乏しく、これまで報告されている火星の水の存在を示す観察結果と矛盾する。そこで本研究では、火星隕石中の kaersutite の結晶化のメカニズムを明らかにし、kaersutite の含水量と火星マグマとの関係を議論した。

火星隕石中の kaersutite が低 H 含有量である理由は、① $Fe^{2+}$

の酸化に伴う脱水素反応の発生②角閃石構造中への  $Ti^{4+}$  の濃集という 2 つの可能性が考えられる。

### $Fe^{2+}$ の酸化脱水素反応

酸化脱水素反応( $Fe^{2+} + OH^- = Fe^{3+} + O^{2-} + 1/2H_2$ )は、Fe の酸化により電荷バランスを保つために H を放出するために起こる反応である。この反応は、角閃石が酸化環境下で加熱された時に起こると考えられている。火星隕石中の kaersutite も、火星表層部への噴出や火星脱出時に起こったと考えられている衝突イベントにより、酸化環境下で加熱されたことにより脱水素化したと考えられている(Popp et al. 1995、King et al. 1999)。この仮説の検証のために、長崎県壱岐島産の酸化 kaersutite を用いて酸化脱水素反応が起こる温度・酸素分圧を推定した。この結果、kaersutite は酸素分圧 HW (hematite-wüstite) buffer 以上で 700-1060°C の温度範囲で加熱された際に酸化脱水素反応を起すことがわかった。

次に、kaersutite を含む火星隕石(Zagami)の噴出時の温度・酸素分圧を FeTi 酸化物による地質温度計から見積もった。この結果、Zagami は、780°C、 $\log(fO_2) = QFM-1.2$  で平衡に達したことが明らかになった。この酸素分圧は、kaersutite が酸化を起すのに必要な酸素分圧の値と比較して低いため酸化脱水素反応は起こらない。つまり、Zagami 中の kaersutite が低 H 含有量である原因は、結晶化後の酸化脱水素反応によるものではないと考えられる。また、衝撃実験結果から、衝撃イベントの際に発生したと考えられていた脱水素が、発生しないことが確認されている(Minitti et al. 1998)。

### 角閃石構造中への $Ti^{4+}$ の濃集

火星隕石中の kaersutite が低 H 含有量であるもう 1 つの理由は、kaersutite が結晶するとき、価数の大きい元素である Ti をその構造中に取り込むことにより、電荷バランスを保つために H 原子を構造中に取り込まなかったためと考えられている。これまでの研究により、角閃石中の Ti 含有量の増加と H 含有量の減少には相関関係があることが報告されている(Tieplo et al. 1999)。本研究でも、地球産の累帯構造を持つ kaersutite の H 含有量、 $Fe^{3+}/全 Fe$  比、主要元素分析から Ti と H の間に負の相関を観察した (図 2)。この結果から、火星隕石中の kaersutite が地球産 kaersutite より低 H 含有量である原因は、火星隕石中の kaersutite ( $TiO_2 = \sim 10 \text{ wt\%}$ ) が、地球産 kaersutite ( $TiO_2 = 5-6 \text{ wt\%}$ ) よりも  $TiO_2$  含有量に富むためであると推定した。Ti に富む kaersutite の結晶化条件は、2 つある。ひとつは Ti に富むメルトからの結晶化である。これまで報告されている結晶化実験の結果、火星隕石中の Ti に富む kaersutite は、Ti に富むメルト( $TiO_2 = \sim 8 \text{ wt\%}$ ) から結晶化すると予想される。しかしながら、火星隕石中の magmatic inclusion 全体の Ti 含有量は非常に乏しく( $TiO_2 = 0.5-1.5 \text{ wt\%}$ )、このメルトから火星隕石中の Ti に富む kaersutite を結晶化させることは難しい。もうひとつの条件は、0.2 GPa 以上の圧力下での結晶化である。この条件は、他の Ti に富む鉱物(ilmenite 等)の結晶化を妨げ、角閃石のみが結晶化する条件から見積もった。この条件は、Ti に富む kaersutite の結晶化にとって非常に重要な条件であるため、kaersutite を含む火星隕石中の magmatic inclusion がどの程度の圧力下で結晶化したのかを明らかにする必要がある。本研究では、olivine の

Ca の化学的ゾーニングと輝石の離溶ラメラの幅から冷却速度を見積もることにより、火星隕石中の magmatic inclusion が結晶化している間の圧力を推定した。その結果、これまで、深部で形成したと考えられてきた kaersutite を含む火星隕石が、火星表面付近のごく浅い場所で形成したことが明らかになった。これは、kaersutite を含む magmatic inclusion が非常に低圧(約 0.1MPa=1bar)で結晶化したことを示している。この条件では、Ti に富む kaersutite の結晶化は起こらないと考えられる。

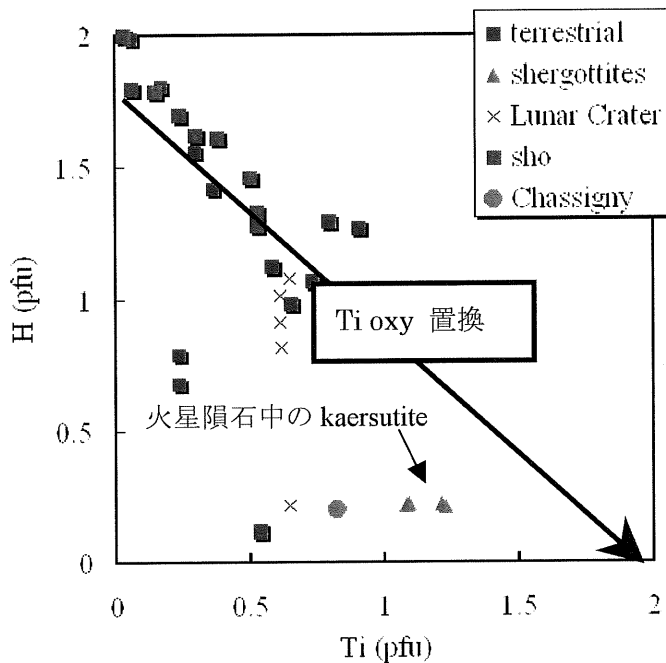


図 2 地球産および火星隕石中の kaersutite の H と Ti の相関関係。

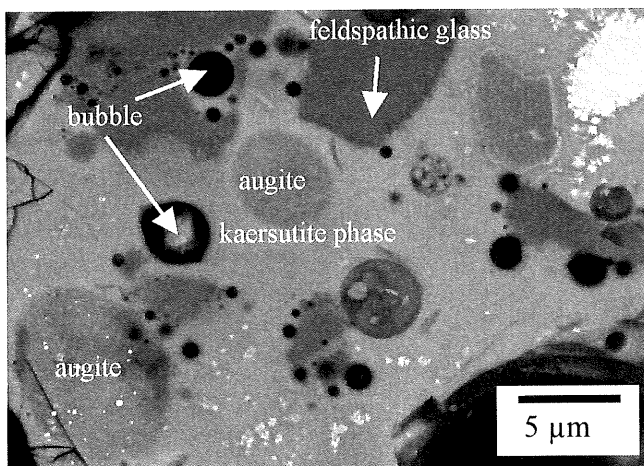


図 3 50 GPa.での衝撃回収実験の回収サンプル。

kaersutite の結晶化条件を考慮に入れた結果、本研究は、火星隕石が受けている強い衝撃による magmatic inclusion の部分的な溶融により、火星隕石中の Ti に富む kaersutite が生成されたことを提案した。このモデルは、本研究の中で明らかになった Ti に富む kaersutite の結晶化に必要な条件をすべて満たす。まず、Ti に富むメルトは、magmatic inclusion 中に元々含まれていた鉱物(輝石、FeTi 酸化物、長石質ガラス)の溶融により形成されると考えられる。またもうひとつの条件である高圧下での kaersutite の結晶化は、火星隕石が経験している強い衝撃により説明することが可能である。さらに、本研究では、この説を検証するために、火星 magmatic inclusion 中に含まれている鉱物とよく似た組成を持つ鉱物を用いて衝撃実験を行った。この結果、火星隕石が受けたと見積もられている衝撃圧(30~45GPa)で、出発物質(輝石、長石、FeTi 酸化物)の接している箇所部分溶融が観察された(図 3)。これは、これら 3 種類の鉱物が

これまで、kaersutite を含む火星隕石は、kaersutite が高圧下で安定であるということから、火星深部で結晶化したと信じられてきた。このため kaersutite の H 含有量は、火星深部のマグマの含水量を反映していると考えられてきた。しかしながら、本研究の結果から、火星隕石中の kaersutite の H 含有量が、火星深部のマグマの含水量を示すものではなく、火星表層部でのマグマの含水量を示していることが明らかになった。

本研究は、火星表層部におけるマグマの含水量の情報を示した初めての研究である。この結果は、火星深部における水の存在を期待させるものであり、これまで行われてきた火星観測の結果とも調和的である。