

## 1.緒言

隕石の種類は大きく石質隕石・石鉄隕石・鉄隕石に大別することができ、さらに石質隕石は球粒隕石（コンドライト）・無球粒隕石（エイコンドライト）に分けることができる。その内、コンドライトは太陽系の発現に伴いできたとされ、その後、石質隕石、鉄隕石、石鉄隕石の 3 種の隕石に分化したと考えられ、隕石を分析していくことによって、隕石を構成した太陽系の始原の姿や分化した後の姿を理解することができる。また、コンドライトは、隕石全体の 85%を占め、炭素質コンドライト(C コンドライト)、普通コンドライト(O コンドライト)、 エンスタタイトコンドライト(E コンドライト) と隕石の成り立ちを考える上で分析は必要不可欠である。 このうち、C コンドライトは太陽の元素組成とほぼ同じとされ、 E コンドライトは地球の原材料と同じと考えられている。その間が O コンドライトで全隕石数の 89 %にも及んでいる<sup>(1)</sup>。

本研究では、隕石試料を実際に分析することで、隕石の成り立ちを考察することを目的とした。また、隕石の構成粒子と元素分析結果を比較することで、隕石の生成機構を検討した。

## 2.実験方法

樹脂埋めした隕石試料をカーボン蒸着により導電性試料にした。その試料を走査型電子顕微鏡（SEM）にて反射電子像を観察した。また、SEM にて観察した試料をエネルギー分散型 X 線分析装置（EDS）にて隕石試料の元素分析を行った。

## 3.結果及び考察

本試料を SEM にて 50 倍の倍率で反射電子像を観察した。その結果を図 1 に示す。明瞭なコントラストの違いが得られ、本試料は所々に鉄系成分を含むケイ酸塩鉱物だと考察できる。

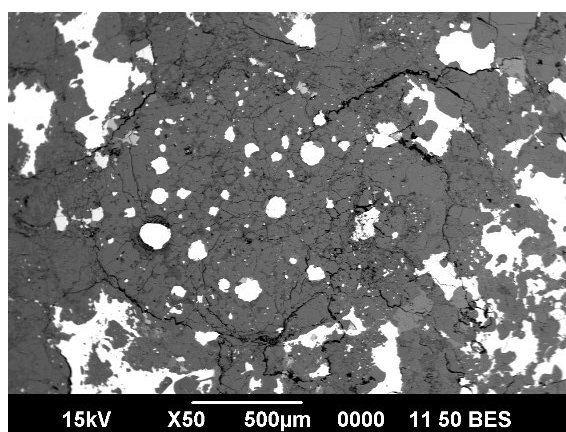


図 1 隕石試料の反射電子像  
(50 倍, 15kV)

次に本試料を 200 倍の倍率にて反射電子像を観察した結果を図 2 に示す。反射電子像では高コントラストの粒子と低コントラストの石質層に分かれていた。反射電子像にて高コントラストの粒子の主成分は鉄系化合物等の原子番号の大きい元素だと示唆できる。コンドライトは 4 つの基本構成要素からなり、コンドリュール・CAI (難揮発性包有物)・鉄-ニッケルなどの金属相・マトリクスである<sup>(2)</sup>。コンドリュールはコンドライトの大きな特徴でその名前の由来にも

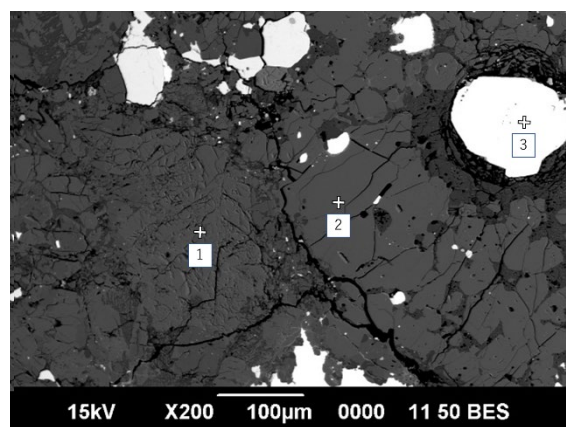


図 2 隕石試料の反射電子像  
(200 倍, 15kV)

なっている。また、一般的なコンドリュールは、直径 2mm 以下の球粒のケイ酸塩 ( $\text{SiO}_4$ ) で、かんらん石 ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) と斜方輝石 ( $\text{MgSiO}_3$ ,  $\text{FeSiO}_3$ ) が主成分である。以上の観点からも、図 2 における高コントラストの粒子は Fe 等の原子番号の大きい元素を主成分とした化合物と考えられる。また、本試料は高コントラストの粒子中や低コントラストの地質層中にケイ酸塩鉱物が含有すると考えられる。さらに高コントラストの粒子を観察すると、粒子の形状が異なっている。図 2 中の左側に存在する角ばった粒子は高温で溶融した化合物が長くても数分で急冷した科学的組織をもっている。対して、右側に存在する粒子は丸い形状であり、高温で溶融した化合物が緩やかに冷却し、凝固したと示唆できる。図 3～5 に図 2 中の各箇所 1 の元素分析結果を示す。測定箇所 1 では Fe、O、Mg、Si が見られることから、本粒子の主成分は Mg-Si-O であり少量の Fe-O が存在すると考えられ、一般的な隕石に見られる石質相と示唆できる。また、測定箇所 1 では亀裂が多く生じている地質層に対して、測定箇所 2 では滑らかな層になっている。この結果より構成成分の違いがあると示唆した。測定箇所 2 の元素分析結果を図 4 に示す。構成成分に主な違いはなく、測定箇所 1 同様の石質層だとわかる。

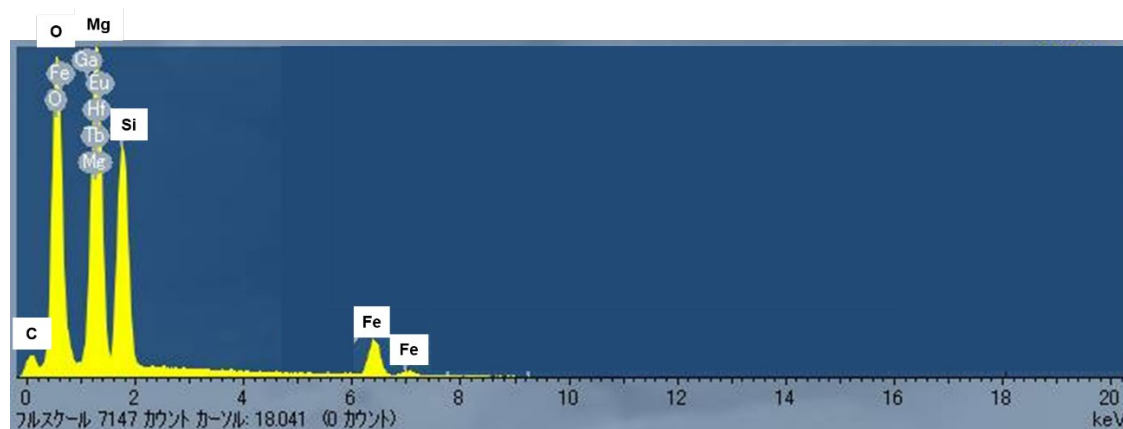


図 3 測定箇所 1 における元素分析結果

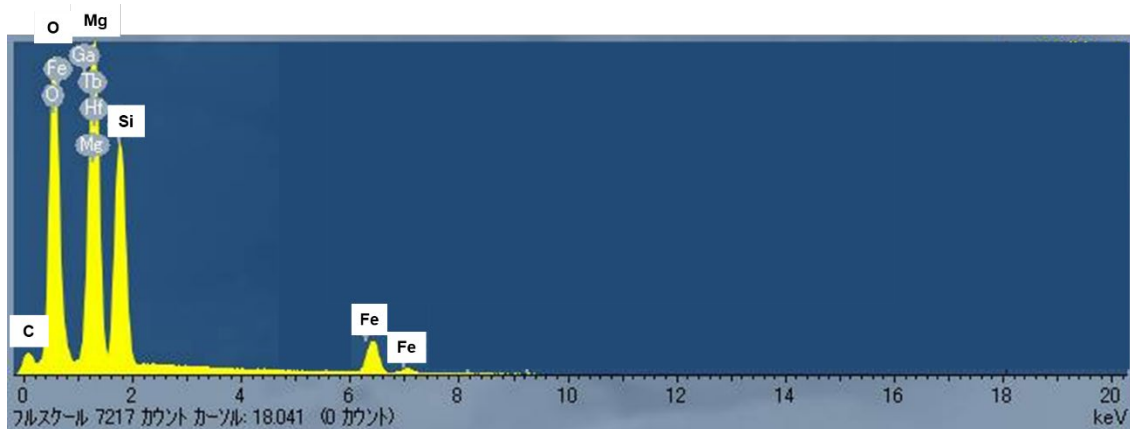


図4 測定箇所2における元素分析結果

測定箇所3では100 $\mu$ m程の球状粒子が見られた。測定箇所3における元素分析結果を図5に示す。主な構成成分はFe-O系、副成分としてFe-Ni(テーナイト、カマサイト)を有する金属相と考えられる。また、滑らかな球状粒子であることから一度溶融して、緩やかに冷却した成分だとわかる。一般的にコンドリュールは隕石中に含まれる直径0.1~2mm程度の球状の粒子である。よって、測定箇所3の粒子は上述したコンドリュールであり、本隕石試料はコンドライトと示唆できる。図1で、測定箇所3のような球状粒子が複数個所見られることから、本研究で使用した隕石は一度高温に曝され、内部成分が溶融したコンドライトであるとわかる。また、図1では隕石中央部に球状のコンドリュールが複数存在し、その周りに角ばったコンドリュールが確認できる。以上の結果より、隕石の内側と外側にあるコンドリュールでは溶融した状態から凝固点における冷却速度に違いが生じていたと考えられる。

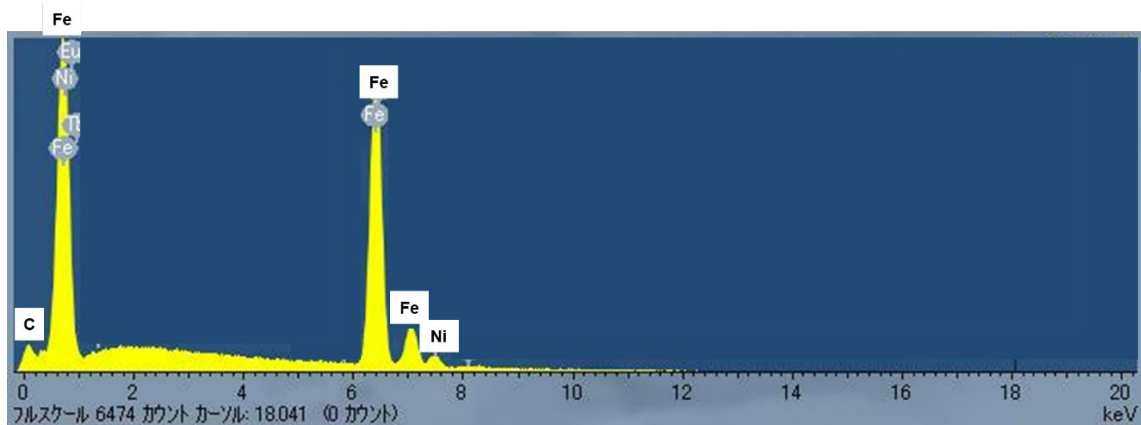


図5 測定箇所3における元素分析結果

図6に角ばった粒子の反射電子像を示す。上記で示唆したように、周りの地質とは異なり、一度溶融し、凝集してから冷却したコンドリュールだと推測できるが、図2の測定箇所

3 の球状粒子とは異なり冷却速度の違いから粒子の形状が違うものと考えられる。このような粒子形状の違いは、伝わる熱の温度が異なる可能性または、構成成分の違いから生じる凝固温度の違いが起因し、凝固点における冷却速度が生じていると考えられる。この粒子の元素分析結果を図 7 に示す。元素分析の結果、Fe、S、O から構成される、Fe-S、Fe-O、Fe-S-O 系化合物だと考えられる。測定箇所 3 の球状のコンドリュールでは Fe-O 系が主成分であったこと

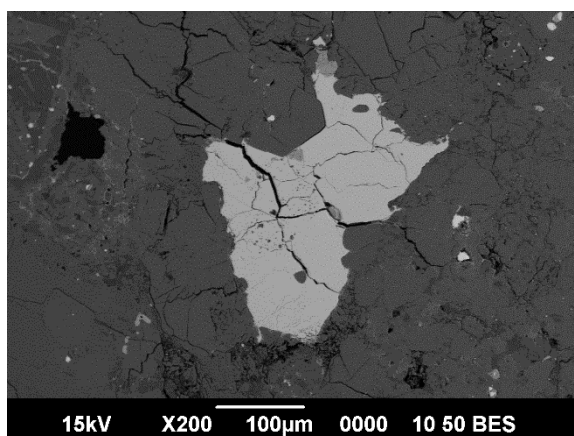


図 6 角ばった粒子の反射電子像

から、コンドリュールの粒子形状の違いは構成成分の違いから熔融温度の異なると考えられる。示唆できる構成成分として、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の凝固温度は約  $1538^\circ\text{C}$ 、FeS は約  $1190^\circ\text{C}$ 、Fe-S-O は  $1000^\circ\text{C}$  未満であり、これらには凝固点の違いが見られた。図 2 中の測定箇所 3 との比較により、粒子形状と凝固温度の関係性から、角ばった形状の粒子は Fe-S、Fe-S-O または、その混在物と予想できる。よって、隕石中央部に存在する球状の粒子は隕石表面に存在する粒子より凝固温度が高いことから、Fe-O を有するコンドライトと Fe-S または、Fe-S-O を有するコンドライトは別々の場所で生成され、それぞれ 2 種のコンドライトが衝突したことで、 $1000^\circ\text{C} \sim 1538^\circ\text{C}$  の熱が発生し、Fe-O を有するコンドライト表面に、Fe-S または Fe-S-O コンドライトが溶解し、表面に濡れが発生の後凝固した可能性が挙げられる。宇宙空間における Fe-O 系化合物は一般的に火星と木星の間にある小惑星帯に存在する石質隕石に存在する。対して Fe-S 系または Fe-S-O 系化合物は太陽系初期にガスと Fe 含有化合物が反応し、形成したと推測とできる。つまり、本試料は形成時期や場所が異なる 2 種以上の隕石が衝突し、発生したコンドライト隕石である可能性が高い。これは図 2 の SEM 画像である試料表面から内部に向けた地質層の違いからも説明できる。よって、表面部分の Fe、S、O を有するコンドライトは太陽系初期に生成したことが考えられ、地質層の粗さは経年劣化によるものと推察できる。

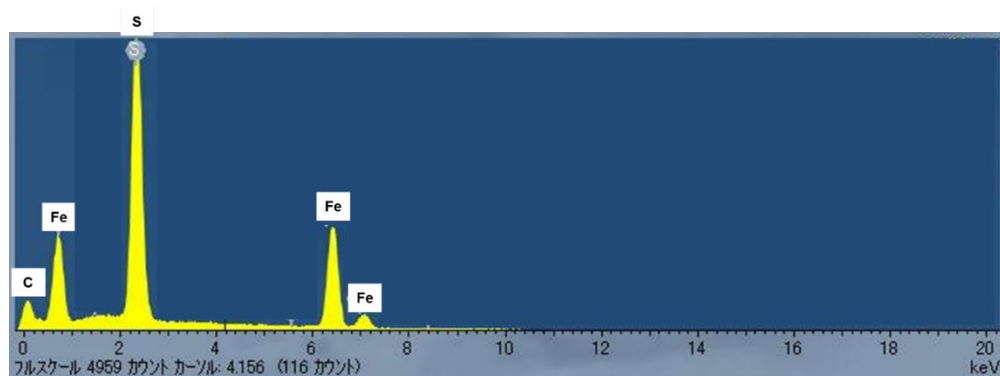


図 7 角ばったコンドリュールの元素分析結果

#### 4. 結言

本研究では、隕石試料を観察し、本隕石試料の成り立ちについて検討した。

- (1) 反射電子像結果より、本隕石は球状の粒子であるコンドリュールを有するコンドライトであるとわかった。
- (2) 元素分析の結果より、鉄系成分を有するケイ酸塩鉱物と Fe-O を主成分とし、S や Ni を有するコンドリュールから構成された隕石であるとわかった。
- (3) 本隕石の中央部はゆっくり冷却速度に冷却された金属相が集まり、外円部には急激に冷却された金属相が存在していた。

以上の結果より、本試料は形成時期や場所が異なる 2 種以上の隕石が衝突し発生した隕石である可能性が高いと推測できる。

#### 参考文献

- (1) 横山哲也,隕石分析からの宇宙化学進化  
<https://lowbg.org/ugap/ws/sn2020/slides/701yokoyama.pdf>.
- (2) 島正子著,隕石-宇宙からの贈りもの一,東京化学同人,2012.

#### 謝辞

本自主研究プロジェクトを進行するにあたり、理学部 基礎理学科 新原隆史 准教授には隕石薄片の提供、電子顕微鏡の解説と EDS の使い方、隕石の構造についての解説を丁寧にしていただき、研究・社会連携機構部 総合研究センターの松村峻汰氏には研究の方針や観察の準備、解説、その他の機器の説明まで熱心に助言、補助していただきました。厚く感謝申し上げます。