

## 酸素同位体比からみた分化した隕石母天体

宇宙を構成する元素のなかで、酸素は水素、ヘリウムについて3番目に多い元素である。地球型惑星を構成するケイ酸塩鉱物には普遍的に含まれるほか、水、二酸化炭素などの揮発性成分を構成し、大気や海洋に存在する主要元素でもある。酸素には質量数16、17、18の3つの同位体が存在しており、隕石の酸素同位体比は、種類によって異なっており、隕石分類や母天体復元の指標として使われてきた。宇宙化学における酸素同位体比からの知見は、1973年にCV3コンドライト中のカルシウム・アルミニウム包有物(CAI)に、質量に依存しない同位体分別作用が認められたことで、注目を集めた。近年では、**laser-assisted fluorination** を用いた酸素同位体比の分析手法が普及し、高精度の酸素同位体比の分析データが蓄積されている。イギリスのオープン大学のGreenwood et al. (2017)らは、分化した隕石(エコンドライト)の酸素同位体比のデータをレビューし、隕石の分類や隕石母天体の個数について議論している。

エコンドライトは大きく、始源的エコンドライト(**primitive achondrite**)と分化したエコンドライト(**differentiated achondrite**)に分類される。始源的エコンドライトは、かんらん石、輝石、斜長石からなるケイ酸塩鉱物と金属鉄や硫化物で構成され、その化学組成が未分化なコンドライトと同様の化学組成をもっている。始源的エコンドライトには、(1)アカプルコイト-ロドラナイトクラン、(2)ブラチナイト、(3)ウィノナイトが知られている。Greenwood et al. (2017)は、さらに(4)ユレイライトも始源的エコンドライトに含めているが、研究者によっては意見が分かれている。一方、分化したエコンドライトには、(1)アングライト、(2)オーブライト、(3)HEDs、(4)メソシデライト、(5)パラサイト、(6)鉄隕石がある。これらのほか、さらに **ungrouped achondrite** という、発見個数が少なく、分類群を構成しない、あるいは異常ともいえる特徴をもつ隕石群が知られている。

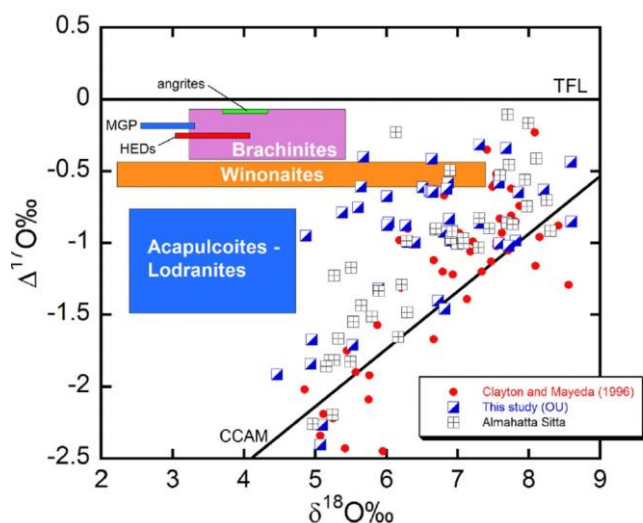


図1. 始源的エコンドライトの酸素同位体比。

### Acapulcoite-lodranite clan

かんらん石、low-Ca 輝石、high-Ca 輝石、斜長石、金属鉄、硫化物からなる隕石で、結晶サイズが 150-230  $\mu\text{m}$  のものはアカプルコアイト、540-700  $\mu\text{m}$  のものはロドラナイトに分類された。その後、中間のものが見つかって、鉱物粒径で分類する意味がなくなり、いっしょに扱われるようになった。酸素同位体比ダイアグラムでは固有の場所にプロットされるが、ばらつきが大きい。

### Brachinites

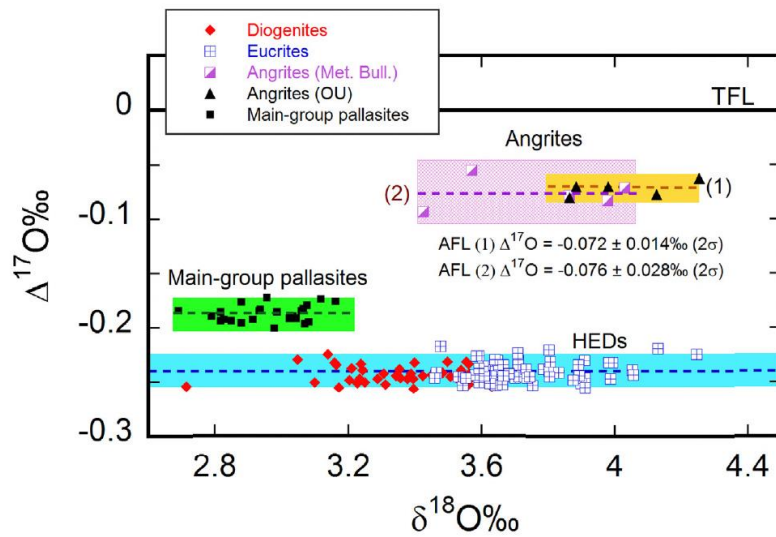
かんらん石を主成分 (80-95 vol%) とし、Ca-rich 輝石を含む (3-15 vol%)。少量の金属鉄や硫化物が存在する。酸素同位体比ダイアグラムでは、固有の領域にプロットされる。

### Winonaites and IAB-IIICD irons

アカプルコアイトと同様の鉱物組成であるが、金属鉄や硫化鉄の含有量が高い。酸素同位体比ダイアグラムでは、独立した領域にプロットされる。IAB や IIICD 鉄隕石に含まれるケイ酸塩成分は、ウィノナアイトと同様の酸素同位体比をもっており、同一母天体起源であるとみなされている。

### Ureilites

かんらん石と輝石の結晶をとりまいて、ダイヤモンドやグラファイトを含む黒色物質が存在している。発見数は HEDs について多く、Meteoritical Bull.には 431 個が登録されている。酸素同位体比ダイアグラムでは、ばらつきが大きい。炭素質コンドライトの酸素同位体比に近い領域にプロットされる。酸素-クロム同位体比ダイアグラムによると、ユレイライトは炭素質コンドライトとまったく異なる領域にプロットされるため、両者には成因的關係はないと考えられる。ユレイライト隕石の母天体については、2008 年にスーダンに落下した Almahatta sitta 隕石が示唆に富む証拠を提示している。



### Angrites

アングライトは 28 個が知られており、それらは玄武岩質のものと斑レイ岩質のものに分けられる。

### Aubrites

還元的环境で形成された隕石で、エンスタタイトを主成分とする。未分化な隕石であるエンスタタイトコンドライトと成因的な関係があるとされる。酸素同位体比でもこれらの隕石は同一の領域にプロットされる。エンスタタイトコンドライトやオーブライトは、地球や月と同じ酸素同位体比比をもっていることから、地球や月の材料物質の名残であるという説が出されていたが、最近の珪素同位体比による比較によると、この説は否定的である。

### HEDs

分化した隕石では最も発見数が多い。ユークライトは玄武岩質エコンドライトで、典型的な玄武岩質のもの、斑レイ岩質のもの、さらに、それらが衝撃変成作用を受けて、角礫岩化したものなど、岩相は多様である。ダイオジェナイトは、斜方輝石からなる集積岩で、母天体のマグマ溜まりの底に斜方輝石が沈殿してできたと考えられている。さらに、かんらん石を含むものはオリビンダイオジェナイトと呼ばれている。ホルダイトは、角礫岩質で、ユークライトとダイオジェナイトの岩片で構成されており、角礫岩質ユークライトとは、ダイオジェナイトの含有量で区別している。酸素同位体比ダイヤグラムでは、同一の領域にプロットされ、同じ母天体起源であると考えられている。隕石の反射スペクトルと小惑星の反射スペクトルの比較から、小惑星ベスタ起源であるとされる。

### Mesosiderites

メソシデライトは、金属鉄とケイ酸塩からなる角礫岩であり、石鉄隕石に分類されてきた。ケイ酸塩成分は玄武岩、斑レイ岩であり、隕石母天体の中心核を構成する金属鉄と、ケイ酸塩質の地殻物質が混ざってできたものと考えられるが、その成因は謎である。酸素同位体比の分析データからは、HEDs の領域と重なり、同じ母天体起源である可能性がある。

### Pallasites

石鉄隕石に分類されているが、ケイ酸塩成分によって、3つのサブタイプに分類されている。それらは、(1)メイングループ、(2)イーグル・ステーショングループ、(3)輝石質パラサイトである。

メイングループは、かんらん石の結晶とそれを取りまく鉄ニッケル合金からなる。分化した隕石母天体の核-マントル境界からやってきたものと解釈された。酸素同位体比ダイヤグラムでは、固有の領域にプロットされ、一つの母天体を構成していると考えられている。

イーグル・ステーショングループは、2014年に5つ目が発見され、一つのグループとして認定されるようになった。イーグル・ステーションが代表で、メイングループとの違いは、かんらん石が鉄に富んでいて、ニッケルやイリジウムの含有率が高いことである。酸素同位体比ダイヤグラムでも、メイングループとは大きくずれた領域にプロットされる。

このほかに、輝石の結晶を含むパラサイトなど、岩相の異なるものが知られており、それらの酸素同位体比を考慮すると、パラサイト隕石の母天体は少なくとも6個あったと推定されている。

### Iron meteorites

鉄隕石は、ニッケル含有量、微量元素組成に基づいて分類されている。酸素同位体比の分析は、鉄隕石中にケイ酸塩成分やリン酸塩鉱物などが含まれている場合に限られるので、鉄隕石の母天体をいくつ想定したらいいのかについては、データが不足している。Greenwood et al. (2017)では、約60個と推定されている。

分化したエコンドライトは、近年発見数が増えており、今後も増える可能性がある。鉄隕石母天体60に加え、上述の発見数の多い主な分類群に加えると、エコンドライトの母天体数は約35個、未分化なコンドライト隕石の母天体は約15個で、全部合わせても110個である。これは、現在小惑星帯に分布する小惑星の数に比べると極端に少ない数である。

Greenwood, R. C. et al. (2017) Melting and differentiation of early-formed asteroids: The perspective from high precision oxygen isotope studies. *Chemie der Erde*, in press.