中性子放射化分析法を用いた南極隕石の元素組成に関する研究 Elemental composition of Antarctic meteorites studied by neutron activation analysis

海老原充^{#,A)}, 白井直樹 ^{A)}, 山口亮 ^{B)}, 大澤崇人 ^{B)}, Mitsuru Ebihara ^{#,A)}, Naoki Shirai ^{B)}, Akira Yamaguchi ^{c)}, Takahito Osawa ^{D)} ^{A)} Tokyo Metropolitan University ^{B)} Kanagawa University ^{C)} National Institute of Polara Research ^{D)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The 15 elements including most major elements of 12 carbonaceous chondrites collected in Antarctica were quantified using neutron-induced prompt gamma-ray analysis. While some of these samples were observed to share affinities with CI or CM chondrites, they do not exhibit the same characteristics as the known CI or CM chondrites. As a result, a new group named "CY" has been proposed for these meteorites. Common among the 12 meteorites is the depletion of volatile elements H and chlorine, showing a correlation and being depleted compared to non-Antarctic CI levels. This depletion is attributed to thermal metamorphism on the parent body before falling to Antarctica, suggesting that all 12 meteorites analyzed in this study are classified in the same chemical group CY. Based on the abundance of moderately volatile elements Mn and S, the 12 meteorites can be divided into two groups: one with levels similar to non-Antarctic CI and the other with intermediate levels between CI and CM. These results suggest that CY chondrites originate from distinct parent bodies (materials), and considering two different parent bodies (materials) is necessary. To facilitate further discussions on CY chondrites, we propose naming the groups with compositions close to CI and CM as CYi and CYm, respectively.

Keyword: Antarctic meteorites, Carbonaceous chondrites, Neutron-induced prompt gamma-ray analysis, Major element composition, CY

1はじめに

惑星科学の研究を物質科学的に展開するために, 隕石は最も重要な研究試料であることは言うを俟た ない。隕石の中でもコンドライト質隕石、とりわけ 炭素質コンドライトはその始原的特徴から、太陽系 の初期環境や、太陽系形成過程を研究するための必 須試料と言える。隕石の全岩試料中の水素や硫黄の 含有量については報告値が少なく、信頼できる値と なるとさらに少ないのが現状である。隕石を含めた 岩石試料の全試料分析法としては,湿式化学分析 (wet-chem) 法が標準分析法として常用されてきた。 湿式分析には分析者に相応の経験が必要で、経験者 の分析値には高い信頼性が寄せられてきた。通常, g オーダーの試料を利用し、分析によって試料を損失 するので,隕石試料,特に回収量の少ない希少隕石 試料への適用においては、その適用に対して慎重な 判断が必要とされる。本研究で利用する即発ガンマ 線分析 (PGA) 法は中性子放射化分析法の一手法で, wet-chem 法と同等の元素定量機能をもつことから, wet-chem 法に代わりうる元素定量方法として機能し うる手法である。PGA ではケイ素,鉄,マグネシウ ムを始め、ほとんどの主成分元素が定量可能であり、 水素や硫黄, 塩素など, INAA では実質的に定量でき ない元素も定量できることから, INAA と相補的で あり, wet-chem と同等の分析法であると言える。本 研究では日本の南極観測隊が南極大陸で発見・回収 し、国立極地研究所に保管されている南極隕石試料

コレクションのなかで、炭素質コンドライトと分類 される試料から 12 試料を選んで PGA 法で全試料元 素分析を行った。本研究で取り上げる 12 隕石のいく つかに対しては酸素同位体組成の特異性から CY と いうグループ名が与えられている。本研究では、こ れまでの研究で CY と分類された隕石に加え、潜在 的に CY と分類される可能性のある隕石を対象に、 その主成分元素組成の特徴を明らかにすることを目 的とした。

2. 実験

2.1 試料

6試料については粉末に調整した試料の一部を利用 し,残りの6試料についてはチップ状の試料を分析 に用いた。分析に用いた試料量は0.1~0.5gであった。 本研究で用いた南極隕石を表1に示す。

2.2 PGA

PGA 実験は JAEA の研究用原子炉 JRR-3 の PGA 測 定装置を用いて実施した。同装置は JRR-3 の炉心か ら約 50m の位置に設置されている。炉心から中性子 導管で引き出された熱中性子を試料に照射し,放出 される即発ガンマ線分析をゲルマニウム半導体検出 器で測定する。試料位置での熱中性子束は約1 x 10⁷ n/cm2/s である。測定は二酸化炭素雰囲気下で行い, 試料の交換はロボットによって自動化されている。 測定装置系に関しては[1]を参照のこと。

chunk 状の隕石試料(質量は表1参照)を1.5 cm x

1.5 cm の FEP 製フィルムでつくった袋に溶封した。 試料をテフロン製糸で試料フレームに固定し, PGA 測定装置にセットした。フレームや測定装置の内壁 はすべてテフロン製である。1 試料あたりの測定時 間は 6000~15000 秒に設定した。元素の定量は比較法 で行った。比較標準試料には化学試薬と岩石・隕石 標準試料を用いた。化学試薬を用いて定量した元素 は H, Mg, Si, S, Cl, Ca, Cr, Co, Ni であり, それ以外の 元素(B, Al, Ti, Mn, Gd)の定量には玄武岩標準試料 (JB-1;GSJ)と Allende 隕石粉末試料(スミソニアン 博物館)を利用した。比較標準試料の測定時間は 600 ~6000 秒に設定した。

3. 結果と考察

本研究で研究対象とした南極炭素質コンドライト12 試料に対して, PGA によって H, B, Mg, Al, Si, S, Cl, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Gd の合計 15 元素の定量値 を得た。

図1は今回分析した南極炭素質コンドライトのう ち, CI1 と分類されている 4 隕石, および C1/2-ung と分類されている Y-82162 について, PGA で求めた 13 元素の存在度を示す。示されている値は非南極 CI (Orgueil で代表) での存在度[2]との相対存在度を示 したもので, さらにケイ素の値で規格化されている。 元素の配列は元素の凝縮温度の高いものから順に並 べられている。図に示されている 13 元素のうち、Cl とHを除く9元素については南極 CI1 コンドライト と非南極 CI との間に大きな値は認められない。これ ら11元素の中でCl,S,Hは他の元素に比べて凝縮温 度が低く、揮発性元素に分類される。この3元素の 中で,Sの存在度は他の10元素同様, 南極 CI1 隕石 での存在度は非 CI 隕石の値とほぼ等しい。対照的に、 Cl,Hの南極 CI1 隕石中の存在度は非南極隕石の値に 比べて欠乏しており、その欠損の程度は隕石ごとで 大きく異なる。図1には C1/2-ung に分類される Y-82162 のデータも示されている。図1 に示されてい る 11 元素に関しては、Y-82162 の組成は CI1 に分類 される 4 南極隕石と差が認められない。Y-82162 隕 石は鉱物学的にはタイプ1と2の中間の特徴を示す ものの、化学的には南極 CI1 と等しい組成を示す。 ただし, Cl, H の含有量は南極 CI1 隕石の値に比べ て相対的に低く, 特に Cl の含有量はどの CI1 隕石よ りも小さい。この Cl 含有量に見られる特徴は Y-82162 が岩石学的に C1/2 と分類されることと整合す るのかもしれない。

図 2 は C2-ung に分類される 3 隕石の元素存在度 を non-Antarctic CI 隕石の値に対する相対値で示す。 図 1 同様, 各隕石の Si 含有量で規格された値である。 これら 3 隕石に加えて, Y-82162 隕石 (C1/2-ung)の 存在度も比較のために示した。図 3 に, Meteoritical Bulletin に"C"と分類されている 4 つの南極隕石 (Y-86770, -86771, -86772, -86773; 以下 Y-86770 family と 総称する)の, non-Antarctic CI に対する元素存在度 を示した。図 1, 2 同様, Si で規格化した値を比較し たものである。参考のために, C2-ung の 4 隕石の存 在度も示した。図で明らかなように, Y-86770 family の元素存在度は C2-ung のそれとはほぼ一致する。こ のことから, Y-86770 family は C2-ung と同じ化学的 グループに分類されうるものと示唆される。

本研究で分析した12隕石について、化学的、岩石 学的特徴を表4にまとめた。化学的特徴として、本 研究でPGA によって求めた Mn と S の non-Antarctic CIとSiで規格化した相対存在度,および酸素同位体 組成[3,4],岩石学的特徴として水質変成後の熱変成 の程度[5]を示した。本研究で分析した 12 隕石は Mn と S の存在度で、CI1 + C1/2-ung に属する 5 隕石と C2-ung + C に属する 7 隕石の 2 つのグループに分 かれる。これまでのコンドライト隕石の主成分元素 組成の研究から、各コンドライトグループは固有の 元素組成を持つことが知られており[e.g., 6], 各コン ドライト母天体の組成に対応すると考えられてきた。 従って,表4のMnとSのデータは、本研究で分析 した12隕石が同一母天体由来でなく、2つの母天体 を起源とすることを示唆する。酸素同位体比に見ら れる特徴もこのことを支持する。表4 で示されるよ うに moderately volatile elements である Mn, S の存在 度は CI から CO-CV に段階的に減少する。前者のグ ループの Mn, S存在度はともに non-Antarctic CI の値 にほぼ等しい。一方,後者の C2-ung + C グループ 隕石の Mn, S の存在度 non-Antarctic CI1 レベルより も低く, はともに CI と CM の値の間に入る。 同グル ープに属する7隕石の Mn とSの存在度の平均値の RSD(1s)は 5.3%, 8.6%であることを考慮すると, 同グループの値は明らかに CI, CM の値と統計的に 異なる。このことから、CI1+C1/2-ungに属する5隕 石の母天体は化学組成上, CI 母天体に近く, C2-ung + C グループの7 隕石の母天体は化学組成上, CI と CM に近い,と考えられる。以上のことから, CY グ ループを2つのグループに分けることが妥当だと考 え, Mn, S存在度の高いグループをCYI, 相対的に低 いグループを CYM と名付けることを提案したい。 heating stage を考慮して, CY を CY1, CY2 と分類す ることが提案された(e.g., Suttle et al., 2023)が, 1,2 という数字が酸素同位体組成の特徴とも関連させな がら議論されている印象をもつ。本来、母天体組成 に基づく化学的特徴と母天体が受けた変成に基づく 岩石学的特徴は別の基準に基づき、お互い分離して 考えるべきである。そこで、岩石学的特徴を反映し た分類として, Stage I~IV に応じて 1~4の数字を付 すことを提案したい。このスキームに従えば、Y-86029 は CYI3, Y-82162 は CYI3 (or CYI2), Y-86702, Y-86789, B-7904 はいずれも CYM4 と分類される。

参考文献

- Osawa T. (2015) Development of an automatic prompt gamma-ray activation analysis system. J. Radioanal. Nucl. Chem. 303, 1141-1146.
- [2] Anders E. and Grevesse N. (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar. Geochim. Cosmochim. Acta 53, 197-214.
- [3] Clayton R.N. and Mayeda T. K. (1999) Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. Geochim. Cosmochim. Acta 63, 2089-2104.

[2023104108]

- [4] Greenwood R. C., Franchi I. A., Findlay R. et al. (2023) Oxygen isotope evidence from Ryugu samples for early water delivery to Earth by CI chondrites. Nature Astronomy 7, 29-38.
- [5] Nakamura T. (2005) Post-hydration thermal metamorphism of carbonaceous chondrites. J. Mineral. Petrol. Sci. 100. 260-272.
- [6] Wasson J. T. and Chou C. -L. (1974) Fractionation of moderately volatile elements in ordinary chondrites. Meteoritics 9, 69-84.

Name	Classification	Recovered	Mass for PGA	
		mass (g)	(g)	
Y-86029	CI	11.8	0.1470	
Y-86737	CI	2.81	0.1562	
Y 980115	CI	777	0.1967	
Y 980134	CI	12.2	0.1729	
Y-82162	dehyd. CI	41.7	0.2350	
Y-86720	dehyd. CM	859	0.4288	
Y-86789	dehyd. CM	340	0.2386	
B-7904	dehyd. CM	1234	0.4894	
Y-86770	С	94.9	0.3514	
Y-86771	С	38.3	0.3624	
Y-86772	С	81	0.4364	
Y-86773	С	28.4	0.3258	

Table 5

Table 5. Chemical and petrological characteristics of the 12 meteorites analyzed in this study

Name	Classification	Chemical		Oxygen isotope		Petrologic	
		composition				observation	
		(Mn)si,CI	(S) _{Si,CI}	$\Delta^{17}O$	$\Delta^{17}O$	Heating stage	
Y-86029	CI	1.05	1.00	0.21		III	
Y-86737	CI	1.11	0.99				
Y 980115	CI	1.68 ^f	0.97				
Y 980134	CI	1.20	0.97				
Y-82162	dehyd. CI	1.14	0.99	0.38	0.46	III (or II)	
Y-86720	dehyd. CM	0.72	0.62	-0.01		IV	
Y-86789	dehyd. CM	0.81	0.53	-0.06		IV	
B-7904	dehyd. CM	0.81	0.62	-0.05	-0.03	IV	
Y-86770	С	0.80	0.50				
Y-86771	С	0.82	0.58				
Y-86772	С	0.86	0.65				
Y-86773	С	0.85	0.62				

^b This work.

° Clayton and Mayeda (1999); Tonui et al.(2014) (citing data for Y-86029 from Clayton as personal communication)





Figure 1. Abundances of 13 elements in four meteorites classified as CI and the Y-82162 meteorite classified as dehydrated CI. The elements on the horizontal axis are arranged in the order of condensation temperature, with the condensation temperature decreasing from Al to H. The vertical axis shows the relative abundance of each element normalized to its Si content and non-Antarctic CI value. In common with the five meteorites, chlorine and H depletion and large inter-meteorite variations are observed.



Figure 2. Abundances of 13 elements in three meteorites classified as dehydrated CM. Horizontal and vertical axes are the same as in Figure 1. For reference, values for the Y-82162 meteorite (dehydrated CI) are also shown. In addition to large depletions of chlorine and H, small depletions of Mn and S are observed. The Y-82162 meteorite has higher abundances of Mn, chlorine, S, and H than the dehydrated CM meteorites, except for chlorine in B-7904.



Figure 3. Abundances of 13 elements in four meteorites classified as C. Horizontal and vertical axes are the same as in Figure 1. For reference, values for three meteorites classified as dehydrated CM are also shown. The four meteorites classified as C and the three meteorites classified as dehydrated CM have approximately equal abundances of elements.