

## 南極における宇宙物質に関する研究(IV)

### やまと隕石について

島 誠\*・岡田昭彦\*・島 正子\*\*

Study of the Extraterrestrial Materials at Antarctica, IV.  
On the Yamato Meteorites

Makoto SHIMA\*, Akihiko OKADA\* and Masako SHIMA\*\*

**Abstract:** Additional mineralogical and chemical studies of the Yamato meteorites are under way. The mode analysis and the optical properties in thin sections are examined under a microscope. Chondrites occur in all of the Yamato meteorites with the exception of Yamato (b). Yamato (a) is composed mainly of pyroxene, olivine and opaque minerals (iron phase, sulphide phase, etc.). Pyroxene occurs as enstatite ( $En_{98}$ ) and olivine as forsterite ( $Fo_{95}$ ). Yamato (b) is composed mainly of pyroxene of  $En_{74}Fs_{26}$  composition. Yamato (c) is composed of olivine and opaque minerals containing carbon compounds; olivine has the composition of  $Fo_{60}Fa_{40}$ . Yamato (d) is composed of olivine, pyroxene and opaque minerals; olivine has the composition of  $Fo_{90}Fa_{10}$  and pyroxene the composition of  $En_{85}Fs_{15}$ . Some chondrules in these meteorites are distinguished by their particular mineral composition. The chemical compositions of the Yamato meteorites were determined by the wet chemical analysis. From 0.5 g aliquots of powdered samples, several fractions were taken out by the fractional dissolution method. Yamato (a) contains much metallic iron, water-soluble calcium sulphide (oldhamite) and only acid insoluble silicates. Yamato (b) contains essentially no metallic iron or nickel, but is high in Si and Mg. Yamato (c) has an extremely small concentration of metallic iron whereas total iron is very high. This iron consists mainly of magnetite. Yamato (d) is a high iron chondrite group. The trace elements, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Bi, Th and U, were determined utilizing a spark source mass spectrograph MS7 with electrical ion detection. The abundance distribution patterns of the trace elements confirm the result of the already classi-

\* 理化学研究所. The Institute of Physical and Chemical Research, Hirosawa, Wako-shi, Saitama-ken.

\*\* Max-Planck Institut für Chemie, Mainz, West Germany.

fied reference meteorites.

The solidification ages of the Yamato meteorites were determined by the K-Ar method. Yamato (a), (b), (c) and (d) are estimated to be 2.3, 4.4, 12.2 and  $15.4 \times 10^7$  yr. respectively.

By these results, the Yamato meteorites must be classified as follows; Yamato (a) is an enstatite chondrite, Yamato (b) a Ca-poor achondrite, Yamato (c) a carbonaceous chondrite (Type III) and Yamato (d) an olivine bronzite chondrite.

### 1. ま え が き

本研究の第3報(島他, 1973b)で報告した, やまと隕石について, その後得た2, 3の結果を報告する. やまと隕石(a), (b), (c)および(d)に関する鉱物学的な結果や, 主要化学成分の系統的な分析方法と, 得られた結果を用いての議論および微量化学成分の結果を用いての検討などが, 主な討論となる. 第3報においては, 予報的な記載が多かったので, 今回は, より詳細に, やまと隕石4種の分類上に必要なデータを集め, やまと隕石(a)は, enstatite chondrite, やまと隕石(b)は, achondrite, やまと隕石(c)は, carbonaceous chondrite, そしてやまと隕石(d)については, olivine bronzite chondrite に分類できることを再確認した.

表1 やまと隕石のモード分析  
Table 1. Mode analysis of Yamato meteorites.

	Yamato (%)				
	(a)	(b)	(c)	(d)	
Ground Mass	81.3	100	95.1	99.1	
Chondrule	18.7	0	4.9	0.9	
Ground Mass	Olivine (Fo : Fa)	9.7(95 : 5)	50.3(60 : 40)	34.1(90 : 10)	
	Pyroxene (En : Fs)	23.3(98 : 2)	99.5(74 : 26)	28.5(85 : 15)	
	Plagioclase	0.2	0.4	8.3	6.8
	Glass	0.3	0.1		
	Opaque mineral	65.7		40.4	27.4
	Unknown	0.8		1.0	3.2
Chondrule	Olivine (Fo : Fa)	2.3(95 : 5)	87.4(60 : 40)	?	
	Pyroxene (En : Fs)	83.6(98 : 2)			
	Plagioclase	0.3		1.1	
	Glass	3.0			
	Opaque mineral	8.7		11.5	
	Unknown	1.6			

## 2. 鉱物組成について

やまと隕石の薄片写真は、第3報に記載してあるが、観察の結果を、より定量的に表示するために、mode analysis を行った。得た結果をまとめると、表1になる。まず、構成要素の内、コンドルールの分布をみると、やまと隕石 (b) には、全く存在せず、その他の隕石には、多少の差はあるが、確実に分布している。ここで述べたコンドルールは、顕微鏡下の観察で鑑定したもので、もちろん、コンドルールの形態、内部構造などについても、多くの知見が得られるが、これらについては、続報で報告する。

次に、存在する主要な鉱物について、mode analysis を行い、表1に表示した。各種の珪酸塩鉱物の分布の割合が示されており、例えば、やまと隕石 (a) には、主に輝石と、不透明鉱物から形成されており、やまと隕石 (b) は、主に輝石だけで、わずかに長石が見出されるにすぎない。やまと隕石 (c) は、主にかんらん石と不透明鉱物で構成されており、次いで、やまと隕石 (d) は、かんらん石と輝石および不透明鉱物で構成されていることが判る。また、含まれているコンドルールについては、やまと隕石 (a) の場合、石基の部分と同様な鉱物で構成されているが、やまと隕石 (c) では、ほとんど、かんらん石で、できており、不透明鉱物の割合が少なくなった構成成分を示している。やまと隕石 (d) のコンドルールの内部を構成する鉱物は、個々の結晶が少なすぎて、同定することが困難で、今回の報告では、ふれない。

やまと隕石を構成する主要な鉱物の内、2, 3のものは、光学的な性質の測定を行い、鉱物を同定した。やまと隕石 (a) の輝石は、 $\text{En}_{99}\text{Fs}_2$  ( $2V = +56^\circ$ 程度) の組成のものが数多く見出せる。かんらん石では、 $\text{Fo}_{99}\text{Fa}_5$  ( $2V = +86^\circ$ 程度) のものが多い。不透明鉱物では、金属鉄=ニッケル相と共に、troilite や oldhamite のような硫化物も観察できる。その割合などは未定である。輝石の中には、双晶をなすものも観察できる。やまと隕石 (b) では、輝石の成分が、 $\text{En}_{74}\text{Fs}_{26}$  ( $2V = -70^\circ$ 程度) のものが多い。やまと隕石 (c) では、不透明鉱物が多く、黒色物質 (有機物?) 以外にも、磁鉄鉱が多く観察できる。珪酸塩鉱物では、表1に示すように、ほとんどがかんらん石で、その組成は、 $\text{Fo}_{60}\text{Fa}_{40}$  ( $2V = -85^\circ$ 程度) のものが、その大部分である。やまと隕石 (d) では、輝石が  $\text{En}_{85}\text{Fs}_{15}$  ( $2V = -80^\circ$ 程度) であり、かんらん石は、 $\text{Fo}_{90}\text{Fa}_{10}$  ( $2V = -88^\circ$ 程度) である。なお、やまと隕石の詳細な鉱物学的研究は、北海道大学理学部八木教授を中心に進められており、その結果については、別の機会に報告する予定である。

表 2 やまと隕石の化学成分 (重量%)

Table 2. Chemical composition of Yamato meteorites (wt %).

	Yamato meteorites			
	(a)	(b)	(c)	(d)
SiO <sub>2</sub>	37.98	55.17	33.26	38.9
MgO	19.28	26.22	24.42	24.08
FeO	0.48	12.58	27.84	12.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.55	0.70	2.44	1.93
CaO	0.45	1.21	2.37	1.68
Na <sub>2</sub> O	0.86	0.012	0.46	0.92
K <sub>2</sub> O	0.085	0.006	0.039	0.104
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	1.38	0.56	0.65
MnO	0.25	0.52	0.17	0.30
TiO <sub>2</sub>	0.075	0.072	0.133	0.082
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.46	≤0.009	0.22	0.25
Fe	22.18	0.66	0.15	12.69
Ni	1.86	≤0.004	1.32	1.52
Co	0.089	0.003	0.075	0.081
Fe	7.20	0.85	2.30	3.38
Ca	0.72	—	—	—
S	4.71	0.49	1.32	1.94
Total Fe	29.75	11.29	24.09	25.41

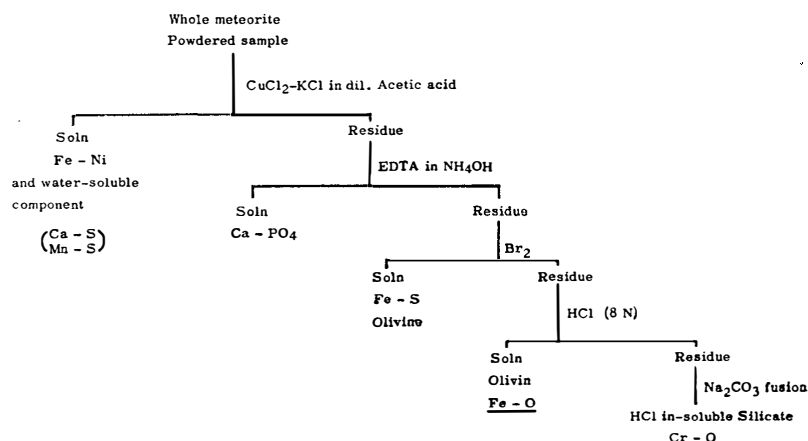


図 1 分別溶離による化学分析法の系統図

Fig. 1. The scheme of the fractional dissolution.

## 3. 主要化学成分について

試料の主要な化学成分は、珪酸塩部分と金属部分について、より詳細な検討を行った。それをまとめると、表 2 になる。この表は、第 3 報 (島他, 1973 b) に発表したものと加えて、

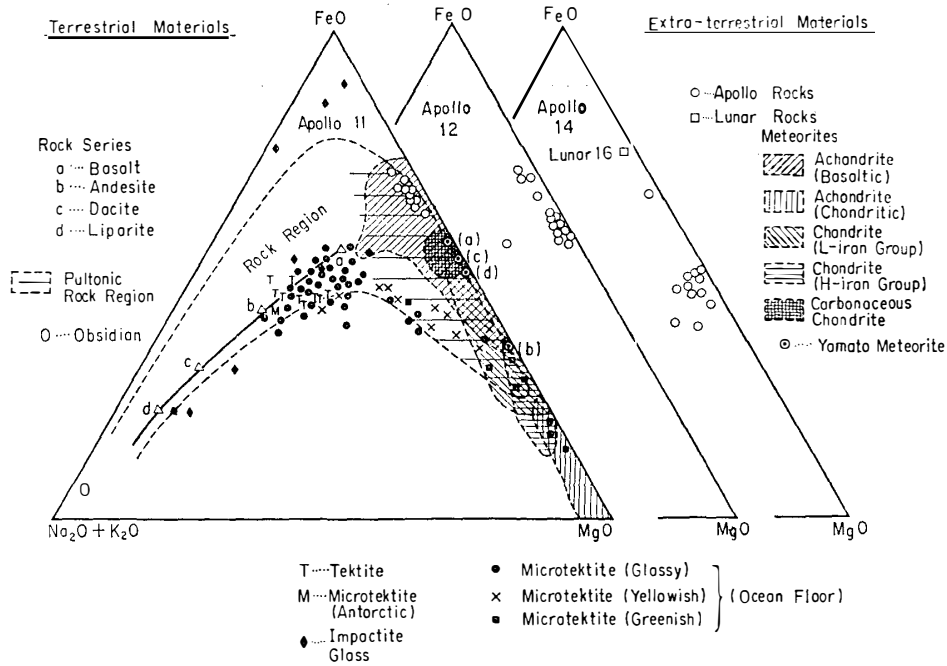


図 2 やまと隕石の MgO-FeO-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)三角座標図  
 Fig. 2. MgO-FeO-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) diagram of Yamato meteorities.

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と TiO<sub>2</sub> の含量が加えられていること、および、アルカリ元素、アルカリ土類元素の一部の補正が行われたものである。これらのことは、図 1 に示す化学分析の系統的な方法によって、元素の分配および計算が行われた結果、得られたものである。隕石を構成する各種の鉱物の化学試薬に対する溶解度の差を利用すると、図 1 に示すように、各フラクションに溶出してくる化学元素が異なってくる。例えば、Ca の量をみると、水に可溶な oldhamite (CaS) と、水に不溶の輝石の中に含まれるものとは、本系統分析によって、分離して定量できることになる。その他の元素についても個々に検討し、表 2 を作った。次に、この結果を用いて、図 2 を作製した。通常の三角座標図で、三成分は MgO-FeO-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) である。

#### 4. 微量化学成分について

やまと隕石の微量化学成分は、試料を粉末にし、スパークソース法による質量分析計 (MS7) を用いて、HINTENBERGER *et al.* (1973) によって分析された。得られた結果を引用すると、表 3 になる。定量分析された元素は、W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Bi, Th および U である。既知の隕石も同時に同様な方法で、前記の微量成分の分析を行い、これらの相互の間における元素の存在度の比較検討を行った。

表 3 微量成分の分析結果 (ppb)

Table 3. Concentration of the heavy elements in ppb.

	Yamato meteorites			
	(a)	(b)	(c)	(d)
W	320	93	250	260
Re	63	<3	68	99
Os	1400	20	1240	1620
Ir	900	4	850	1030
Pt	1820	<5	1880	2520
Au	490	<1	150	360
Hg	510	1540	1280	640
Tl	240	45	16	33
Pb	2240	190	610	94
Bi	280	5.6	38	3.7
Th	45	4.9	73	57
U	14	<0.4	18	17

(Analysis.....HINTENBERGER *et al.*, 1973)

## 5. 考 察

鉱物組成の観察の結果、やまと隕石 (a), (c) および (d) の中には、隕石に特有なコンドルールが見出せることから、これらは、全て石質隕石に属することが判る。やまと隕石 (b) には、コンドルールが見出せないで、地表の岩石の一種とも考えられるが、第3報 (島他, 1973 b) で報告したように、希ガス成分の内、cosmogenic nuclides である  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  および  $^{38}\text{Ar}$  が、他の3つのやまと隕石と同様に検出されていることから、achondrite であることが判っている。

化学成分の分析結果からは、第3報で述べたような特長ある分布であることに加えて、 $\text{MgO}-\text{FeO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  の3成分を用いた三角座標を作ると (図2参照)、やまと隕石が、既知の隕石分布内に完全に入っていることが判る。この三角座標図は、地表岩石などの分布範囲と、既知の隕石の分布範囲とを比較するために使用されてきたもの (SHIMA, 1966; 島他, 1972) で、隕石の分布区域は、 $\text{MgO}-\text{FeO}$  の辺に近く、特色ある分布を示す。従って、地表物質と、宇宙空間の物質との区別にも、ある程度利用できる。また、地表の岩石が、母岩漿から分別晶出作用によって晶出してくる途中での主要な化学元素の行動を追跡できる図でもある。このことを模式として考える。各種の隕石が、仮りに一種の母体から生成されてきたとすると、その母体を、母岩漿におきかえることも想定できる。すると、各種の隕石が生成されてくる場合の主要化学元素の行動が、追跡できることにもなる。仮定の条件

はもう一つあって、宇宙空間における分別晶出作用が、地表の岩石の場合と同様に進行したと考える必要もある。この二つの仮定が正しいとすると、主要化学成分を利用して考える限りでは、MgO に富んだ achondrite のような母岩漿または母体があって、これが温度の低下または冷却に伴い、スケアガード岩体の場合の様に、MgO-FeO 辺にそって、FeO に富む方向に移動するような組成の各種の隕石を形成してきたと考えられる。もちろん、微量成分の存在量や、特色ある鉱物の分布などを用いて考察する場合には、単純に前述のような一つの分別晶出作用だけで、従来知られているような沢山の種類の隕石が形成されたとは考え難いが、隕石の分化の傾向を知る一つの手懸りにはなると考えている。ともあれ、やまと隕石の全てが、既知の隕石の分布内に入ること、およびやまと隕石 (b) から、順次 MgO-FeO 辺にそって、大体一列に並んで、FeO に富む方向に分布していることは、大変に興味深いことである。

微量化学成分については、表 3 に示した各種の元素の存在度を、既知の隕石のそれらと比較検討するために Abee 隕石 (enstatite chondrite), Johnstown 隕石 (achondrite), Allende 隕石 (carbonaceous chondrite, Type III) および Orgueil 隕石 (carbonaceous chondrite, Type I), また Allegan 隕石 (bronzite chondrite) の微量分析を同特に行い、南極産のやまと隕石の結果と比較した。その結果、前記の隕石らと、やまと隕石 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれよく近似した値が得られた。特に、やまと隕石 (c) は、同じ carbonaceous chondrite の内でも、Allende 隕石に極めてよい近似の値が得られている。また、やまと隕石 (b) では、W, Re, Os, Ir および Pt などの siderophile elements に興味ある存在量が示されたが、これらについては、HINTENBERGER *et al.* (1973) によって、より詳細な報告が行われた。分析が終了した微量成分の中では、Au と Hg が、既知隕石とやまと隕石の間で、ほとんど一致している程に近似した存在度を示している。

鉱物学的な結果と、化学分析の結果を総合し、しかも既知の隕石の近似した組成のものとの比較検討などから、やまと隕石 (a) は、enstatite chondrite であり、やまと隕石 (b) は、achondrite、やまと隕石 (c) は、carbonaceous chondrite、そして、やまと隕石 (d) は、bronzite chondrite に相当する。この分類は、さらに細分類することも可能で、例えば、やまと隕石 (a) は、enstatite chondrite 中の A 群に入れることができるし、やまと隕石 (b) は、Ca-poor achondrite に細分類できる。やまと隕石 (c) は carbonaceous chondrite の内、Type III に属することになり、やまと隕石 (d) は high-iron group の石質隕石に細分類できる。しかし前報でも述べたように、地表の岩石分類の場合と全く同様に、隕石分類法にも、沢山の試案や名称が提案されている。しかも、いずれの分類法が最も

適当なものであるかは、各研究者の間でも一致していない。従って、筆者等は、いたずらに細分化された名称や分類を用いるよりも、大まかな分類法に準じた名称で分類をして、報告した。

次に、前報 (SHIMA *et al.*, 1973 a) で示した希ガス成分の内、 $^{40}\text{Ar}$  の量を用いて、本報の表2の K の含有量とを利用すると、通常の K-Ar 法による隕石の固化年代が計算できる。この計算には、多くの補正すべき条件が沢山あり、いずれ正確な数字を改めて示すが、今回は、ごく単純に、 $^{40}\text{Ar}$  が、隕石の中の  $^{40}\text{K}$  によってのみ生成されたと仮定して計算をした。その結果を列記すると、やまと隕石 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれ、2.3; 4.4; 12.2 および  $15.4 \times 10^7$  年となる。この固化年代と、照射年代を合せて考察すると、やまと隕石の各種のものは、やまと山脈付近に、隕石雨として、一時に落下した隕石ではないと考える方に有利なデータを提供している。いずれの隕石も、異なった時期に固化し、異なった宇宙空間での経験を経て、地表に別々に落下したものと考えられる。従って、これらの隕石が、偶然狭い区域内に別々に落下したのか、または、前報で報告したように、氷河の運動に伴い、運搬されてきて、本地域のような狭い区域に集中したものであろう。通常、氷河の運動に伴う物質の運搬の場合には、氷河の表面に乗ったままの形で、下流に運ばれる可能性もあるが、隕石のような物質は、モレーンにみられるように、氷河自体の垂直方向に対する対流運動のような移動が強力に作用し、氷河の表面の物質は、氷河の中にとり込まれてしまうことも多いし、また逆に、氷河の中の物質が、表面に運び出されてしまうことなども多いと考えられる。このような複雑な作用が混りあって、氷河全体の運動方向や流れがあるとすると、単純に、隕石が氷河の表面に浮んだ状態で、氷河の流れに伴い、本地域に集中したとする推定も、全面的に受け入れるには、難点が多すぎるようである。

落下した隕石が、氷河の表面に留まった状況だけでなく、落下による加速も加わり、氷河の内部深く飛び込んだこともあろう。このような場合には、再び氷河の表面に運び出されることもあろうし、または、そのまま氷河の内部の深い位置に存在し続け、表面の探査だけでは判らなくなっているかも知れない。

ともあれ、本報告のように、異なった種類の隕石が、ごく限定された面積内で回収された例は、未だ報告がなく、極めて希であることは事実である。しかも偶然に氷河の表面だけで見出されたものだけ回収したことになるが、或は氷河の中にも、多くの隕石が保存されていることもあろう。

氷河を中心とした隕石の探査や発見が、今後の問題であり、他の南極地方はもちろん、北極を中心とした区域でも、沢山の隕石を回収できる可能性があると考えられる。従って、今



後とも機会があれば、続々と発見されるであろう。

また、手元にあるやまと隕石についても、不透明鉱物の決定や、未測定微量元素および cosmogenic nuclides などの分析を行っているので、結果が出たら、続報で報告する予定である。

#### 文 献

- HINTENBERGER, H., K. P. JOCHUM and M. SEUFERT (1973): The concentration of the trace elements W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th and U in the four recently found Antarctic Meteorites Yamato (a), (b), (c) and (d), and in the meteorites Orgueil, Allende, Abee, Allegan and Johnstown. 36th Meteoritical Society Meeting at Davos.
- SHIMA, M. (1966): Glassy spherules (Microtektite?) found in ice at Scott Base, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3595-3597.
- 島 誠・矢吹貞代 (1972): 月岩石試料の化学岩石学. *理研報告*, **48**, 62-68.
- SHIMA, M., M. SHIMA and H. HINTENBERGER (1973a): Chemical composition and rare gas content of four new detected Antarctic Meteorites. *Earth and Planetary Sci., Letters*, **19**, 246-249.
- 島 正子・岡田昭彦・島 誠 (1973b): 南極における宇宙物質に関する研究 (III). 隕石について. *南極資料*, **47**, 86-97.

(1973年10月1日受理)