

南極における宇宙物質に関する研究(Ⅲ) 隕石について

島 正子*・岡田昭彦**・島 誠**

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

Masako SHIMA, Akihiko OKADA and Makoto SHIMA

Abstract: Antarctica is thought to be the most suitable place for searching extraterrestrial materials. Since 1965, we have been studying microtektite and cosmic dust in Antarctica. In 1969, the Japanese Expedition Team collected stony meteorites and brought them back to Japan. Scientific study of these samples has just been started. A part of the samples was examined for mineral composition, and was also analyzed for chemical composition by means of wet chemistry. At the same time, examination of rare gas was carried out with a gas mass-spectrometer. The purpose of the study is to know whether these meteorites are extraterrestrial materials or not. As a result, they were found to be chondrites, which are classified into enstatite chondrite, achondrite, carbonaceous chondrite and bronzite chondrite. For the samples we proposed the name Yamato (a), Yamato (b), Yamato (c) and Yamato (d), following Huss method. They were found on the glacier near the Yamato Mountains (70°S, 37°E) within a small area (about 10×10km²).

It is a quite interesting phenomena that different kinds of chondrites are found within a narrow area. This may indicate one shower of meteorites. Also, it is different kinds of chondrites fell at different times in a small area. Or the meteorites, which had fallen over a wide region, have been carried to this narrow area by the glacier movement.

1. ま え が き

筆者らは、1965年以来、南極で発見または回収できる宇宙物質の研究を続けており、すでにマイクロテクトイト (SHIMA, 1966) や宇宙塵 (島他, 1968; 1969) の報告を行なった。引き続き採集研究を続けているが、宇宙空間の物質であるとの科学的な証拠に乏しい物質であった。現在入手できる物質で、最も信頼ある宇宙物質は、既に述べたように (島, 1967)

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

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

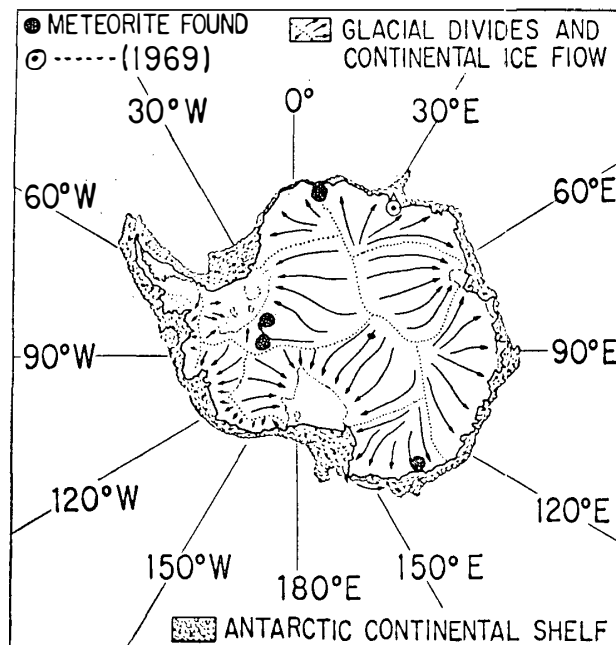


図1 南極で発見された隕石の位置

Fig. 1. The location of meteorites found in Antarctica.

隕石がある。南極地方における隕石の探査は、過去にも行なわれ、既に（島他，1968）4個の発見がある（図1参照）。2個の鉄隕石（Lazarev 隕石と Neptune Mountains 隕石）、1個の石鉄隕石（Thiel Mountains 隕石）および1個の石質隕石（Adélie Land 隕石）がそれであるが、まだそれらについての科学的な報告はない（島他，1968）。南極地方においては、隕石の発見の可能性が多いと考え、その発見を待っていた。1969年の日本南極地域観測隊が、偶然、やまと山脈東南方において、隕石らしき物質を発見し、本国に持ち帰った（YOSHIDA *et al.*, 1971）。これらの試料は、東京教育大学に保管され、定性的な研究が牛来教授により行なわれた。次いで、最近北海道大学八木教授の下に試料が移管された。これらの試料は、まだ科学的な研究が十分でないので、隕石であるとの証拠を裏付ける研究が開始された。筆者らは、主に化学組成と、希ガスの検討を行なう目的で、試料の一部を恵与された。それらについて得られた結果の一部は既に発表した（SHIMA *et al.*, 1973）が、その後の研究を加え、隕石であるとの証拠を述べる。

今回報告する隕石は、図2に示すように、わずか10km平方の区域内で9個発見されており（YOSHIDA *et al.*, 1971）、隕石の種類も、筆者らの結果から、4種類の石質隕石（enstatite chondrite, achondrite, carbonaceous chondrite および bronzite chondrite）が判別できた。従来の隕石分布の常識から考えると、この産状は大いに興味のある問題である。また発見されたり、落下を目撃されたりした隕石の名称は、通常発見された地点名が冠せら

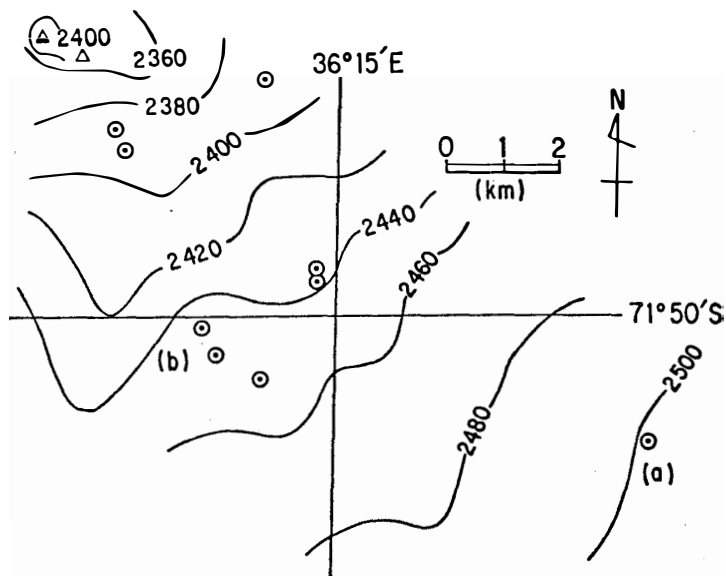


図 2 やまと隕石発見地点

Fig. 2. The location where the Yamato meteorites were found (given by YOSHIDA et al.).

れる習慣がある（島，1967）が，今回の隕石の場合，地図上の地点の名称もない区域であり，しかも異種の石質隕石が集中的に発見されているので，名称をつけるのが困難であった．一応，発見の順序に従い，No.1, No.2, …… と名付けられていたが，八木，牛来両教授と筆者らにより，Huss の提案による命名法（1971）により，発見された順序に，しかも地図上で一番近い確実な地名はやまと山脈であることから，やまと(a)，やまと(b)，やまと(c)，やまと(d) なる名称にした．この他にも，5個の試料が同一地区から持ち帰られており，これらについては，後報で報告する．

2. 試料について

やまと山脈東南方における，隕石発見地点についての分布は，吉田らによって図2のように示されている．この図の中で，確実に試料と採集地点との照合ができるものは，(a)および(b)の2個だけで，その他の試料は，採集地点は白丸印であるが，個々の照合は確かでない．表1には隕石名と，吉田らによって報告された試料の発見日時，重量などを並記してある．

試料は，既に東京教育大学で岩石薄片用に切断されており，次いで北海道大学においても一部を新しく薄片用に切断し，筆者らには，ダイヤモンド切断器にて，化学分析用の試料が切り出され，提供された．4個の試料の与えられた重量は，表1に示すように，約10gである．主要化学成分，微量化学成分ならびに希ガスの研究を行なう目的で，試料を西ドイツの

表 1 やまと隕石のリスト
 Table 1. List of Yamato (Antarctic) meteorites.

Name	Old No.*	Original* weight (g)	Used weight (g)	Description	Found date*
Yamato (a)	No. 1	715	23.8	Thick black crust (1 mm thick) metal phase, strong magnetic, chondrule	Dec. 21 1969
Yamato (b)	No. 2	138	10.3	Thin crust, No chondrule	Dec. 21 1969
Yamato (c)	No. 3	150	8.6	Thick black crust (1mm thick) chondrules and black materials	Dec. 21-26 1969
Yamato (d)	No. 4	62	8.5	Thin crust, chondrules	Dec. 21-26 1969

*Reported by YOSHIDA *et al.* (1971).

Max-Planck Institut für Chemie に運び、多くの協力者を得て、以下にのべる結果が得られた。また、一部の試料は、理化学研究所において、定性的な検鏡試験と、X線回析などを行なった。

スライスに切った試料の周囲に付着している黒色の殻は、メノー乳鉢の上で注意深くはずして除去し、中心部の新鮮な部分を粗粒に砕いた。次いで、ダイヤモンドモーターで細粒に砕き、これを再びメノー乳鉢に入れて、磨鉢しながら細粉化を行ない、分析試料に使用した。一部粗粒に砕いた段階で、固まりのまま約20か所より粒を捨て上げ、混合して、希ガス用と微量化学成分分析用に利用した。粉砕化の段階で、やまと (a) には金属粒が入っていること、やまと (c) では硫黄臭を発することが認められた。

3. 鉱物組成について

薄片の顕微鏡下の観察と、X線回析法との結果を総合すると、ほぼ次のような結果となる。なお、鉱物学的な詳細な研究は、別に八木教授らによって報告される予定なので、ここでは予報的な定性的結果を報告する。図3には隕石の顕微鏡写真を示し、図4にはそれらのX線回析のチャートを示してある。

やまと (a): 主要鉱物は、enstatite で、副成分鉱物としては、taenite-kamacite, troilite, pyroxene, plagioclase が認められる。また、コンドルールの大粒のものが肉眼でも認められる。

やまと (b): 主に pyroxene から構成され、金属鉄やコンドルールは見出されない。

やまと (c): olivine が多く、plagioclase, Fe-mineral も認められる。コンドルールも

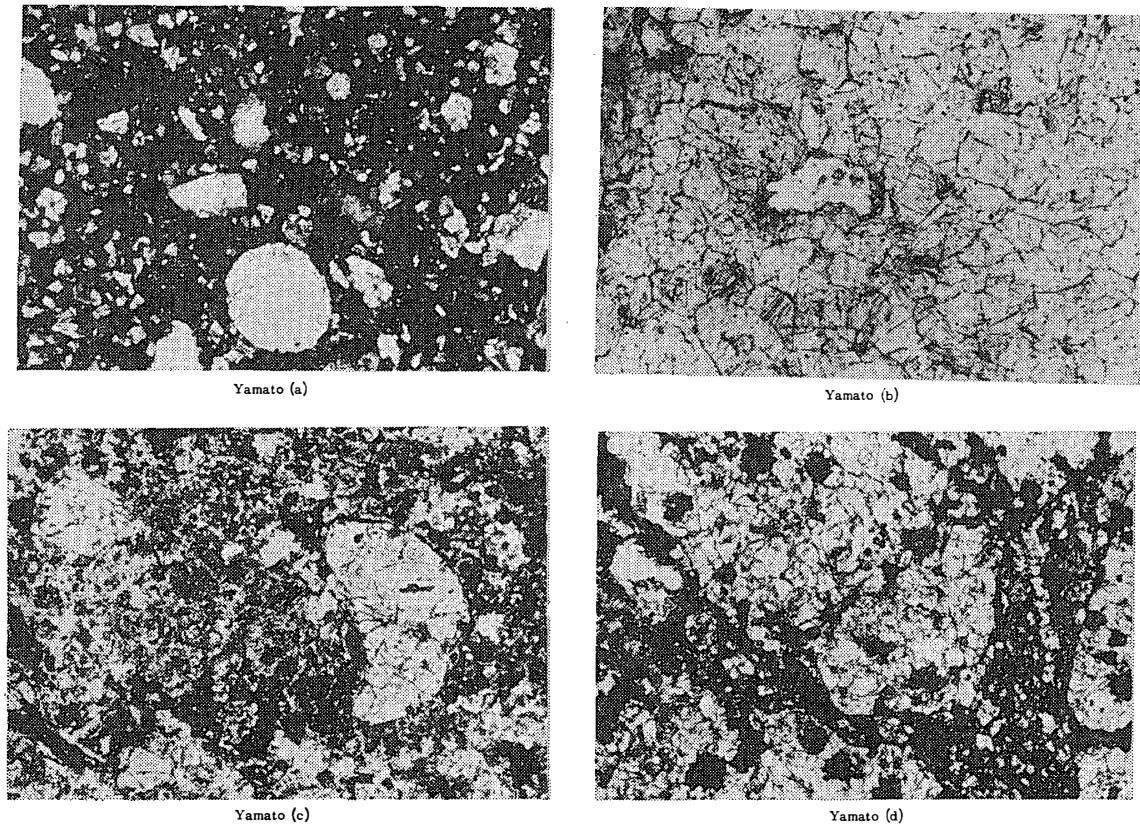


図 3 やまと隕石の顕微鏡写真（長辺が大体 3.5cmの大きさ）
 Fig. 3. Photomicrographs of thin sections of the Yamato meteorites.

数多く見出され、これは主に olivine で構成されている。石基部分には、黒色の有機物(?)らしき物質が細脈状に混在している。

やまと (d): 主に pyroxene, olivine で構成されており, plagioclase, Fe-mineral もまれに認められる。

これらのことを裏付ける方法の一つとして、メスバウアースペクトルの測定を試みた。実験方法は、粉末試料を用い、室温で Fe^{57} のメスバウアー効果を測定した。使用した実験装置は、Elon Electronic Industries Co. Ltd. 製のスペクトロメーターで、 γ 線源は、金属銅に Co^{57} を電着させたものを使用した。得たスペクトルを図5に示す。この結果から、アイソマーシフト、四極子分裂、内部磁場を計算し、その結果を表2にまとめて示した。なお、アイソマーシフトは、金属鉄を基準にし、物質の推定は、SPRENKEL-SEGEL *et al.* (1964, 1970) の文献を参考にして定めた。やまと (a) では、6本に分裂した吸収が顕著に認められ、表2に示す計算結果から、金属鉄に相当する吸収のあることが認められる。この他に、

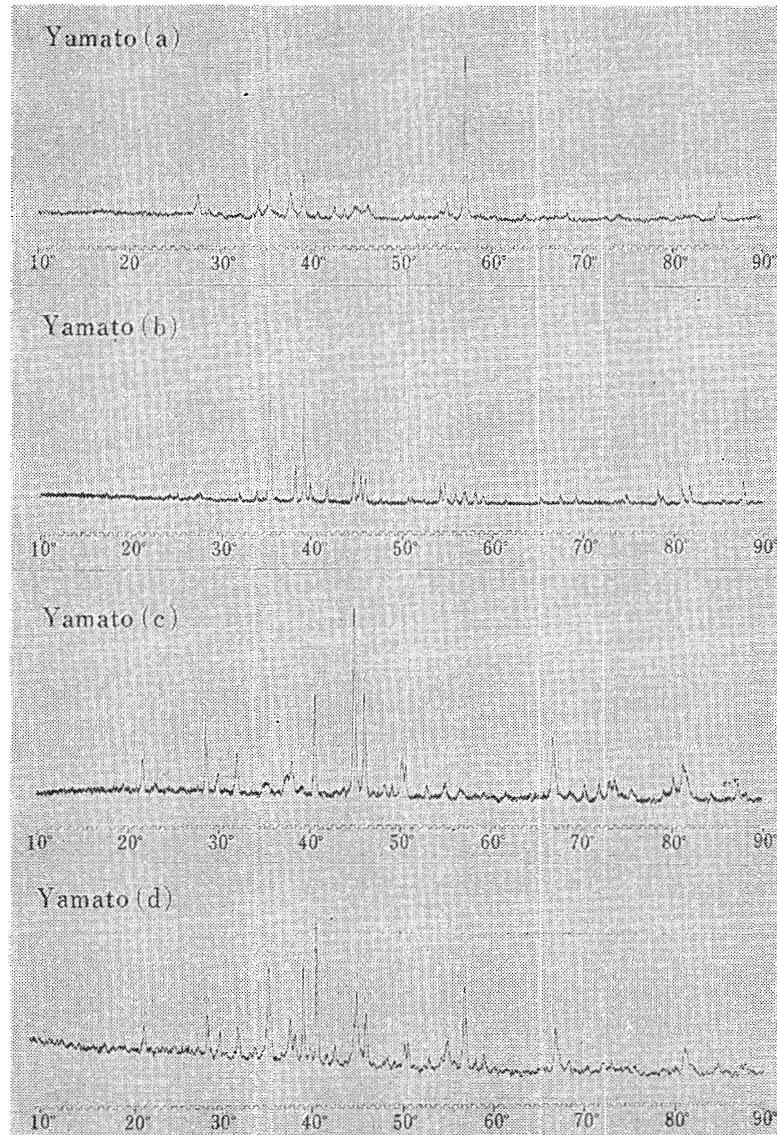


図 4 やまと隕石の X線回析図

Fig. 4. X-ray powder patterns of the Yamato meteorites measured by means of Fe K α radiation with 30 kV and 10 mA (using Mn Filter).

3本の吸収が観察されるが、金属鉄による吸収と重なっていることが考えられ、メスバウアー一定数の計算はできなかった。やまと (b) からは、4極子分裂によるダブルットの吸収が顕著に認められ、メスバウアー一定数から、輝石に相当することがわかる。やまと (c) では、ダブルットの吸収が一つと、二種類のゼーマン分離した吸収が観察され、ダブルットの吸収から得た定数では、かんらん石を同定できる。ゼーマン分離を示す吸収からは、2つのメスバウアー一定数が計算でき、吸収の位置などを考えると、磁鉄鉱と同定できるが、強度比の点からみると、不確かで、今後の検討を必要としている。やまと (d) のスペクトルは複雑で

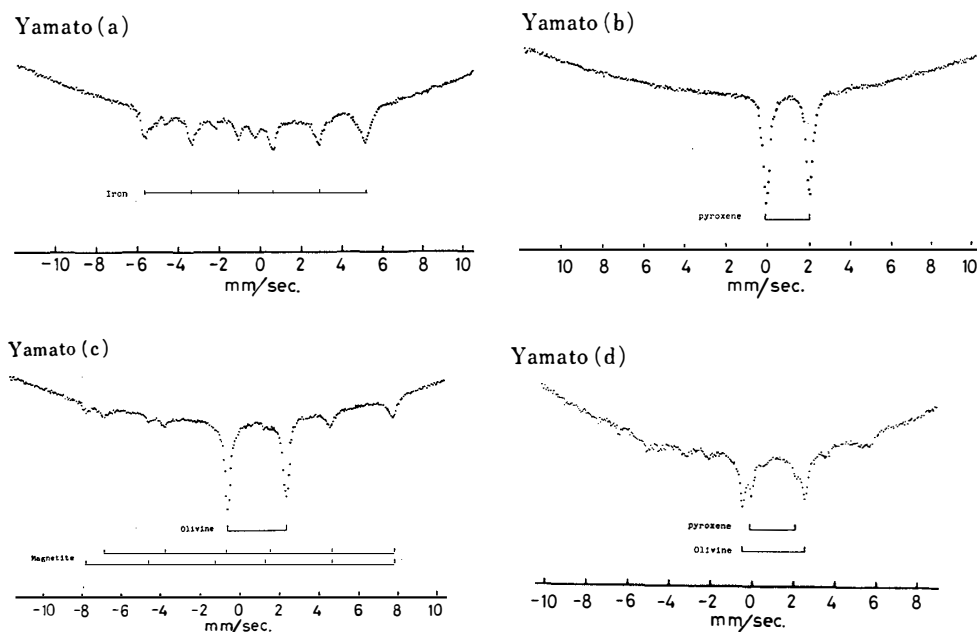


図 5 やまと隕石のメスバウアースペクトル図

Fig. 5. Mössbauer spectra of the Yamato meteorites at room temperature.

表 2 やまと隕石のメスバウアーの結果

Table 2. Mössbauer data of Yamato meteorites.

Meteorite	Mineral	Isomer shift* (δ mm/s)	Quadrupole splitting (ϵ mm/s)	Internal magnetic field (H KOe)
Yamato (a)	Iron	0	0	334
Yamato (b)	Pyroxene	1.10	1.09	0
Yamato (c)	Olivine	1.12	1.49	0
	Magnetite(?)	0.24	0	485
		0.72	0.04	455
Yamato (d)	Pyroxene	1.10	1.09	0
	Olivine	1.12	1.49	0
	Troilite (?)			
	Iron (?)			

*The isomer shift is relative to that of metallic iron.

二種のダブルットと、少なくとも二種のゼーマン分離した吸収が認められる。ダブルットの吸収から計算した定数からは、かんらん石と輝石が別々に同定できるが、ゼーマン分離した吸収の強度は弱いために、メスバウアー定数の計算はできないので、根拠は少ないが、吸収の位置からみて、troilite と金属鉄の同定はできそうである。

4. 主要化学成分について

隕石は、通常の硅酸塩分析法で、主要化学成分を定量分析することは困難である。理由としては、金属鉄や、硫化鉄などの混在した試料であるために、通常分析法では、それらの区別が困難となる。したがって、2, 3の異なる試料処理を組み合わせ、総合的に結果を検討する必要がある。

本報では、主要な化学成分の分析法を、既に述べてあるように、処理法として、次の3つの方法を併用した (SHIMA *et al.*, 1973). すなわち、(1)Na₂CO₃-KNO₃ 熔融法、(2)HF-HClO₄ 分解法、および、(3)Br₂-qua-regia 分解法で試料を処理し、得られた溶液は、イオン交換樹脂などを用いて、各元素を分離し、既報に述べたように、重量法、滴定法、原子吸光法などを組み合わせて、各元素を定量分析した (SHIMA *et al.*, 1973). 各分析に使用した試料は 0.5~1g である。

得られた結果を、酸化物の形で表示すると、表3になる。鉄の表示法としては、通常の隕石分析に使用されているように、全鉄量を求め、硫化物や金属鉄量を差引く形式を用いて、表示してある。

やまと (a) にて目立つことは、全鉄量の多い点や、Sの多いことである。また、Ca の存

表 3 やまと隕石の化学組成
Table 3. Chemical compositions of Yamato meteorites (wt %).

		Yamato meteorites			
		Y-(a)	Y-(b)	Y-(c)	Y-(d)
Silicate phase	SiO ₂	37.98	55.17	33.26	38.9
	MgO	19.28	26.22	24.42	24.08
	FeO	0.47	12.58	28.03	12.02
	Al ₂ O ₃	1.55	0.70	2.44	1.93
	CaO	0.45	1.21	2.37	1.68
	Na ₂ O	0.86 ₄	0.012 ₄	0.46	0.92
	K ₂ O	0.09 ₆	0.008 ₄	0.039	0.11
	MnO	0.24 ₇	0.51 ₅	0.17 ₈	0.30 ₂
Total	Fe	29.75	11.29	24.09	25.41
Metal phase	Fe	21.18	0.66	0.15	12.69
	Ni	1.86 ₁	≤0.004	1.32	1.52
	Co	0.08 ₉	0.003	0.075	0.081
	Fe	7.20	0.85	2.30	3.38
	Ca	0.72	—	—	—
	S	4.71	0.48 ₉	1.32	1.94

在状態を化学分析法から推定すると、その大部分が oldhamite (CaS) であると考えられた。やまと (b) では、Si, Mg の高含量、低含量の Ca が目立ち、Fe や Ni および S が極めて低い値である点が興味ある。化学成分による従来の隕石分類法によれば、これは、Ca-poor achondrite に相当するものと思われる。やまと (c) は、低含量の Si, 高含量の Fe の値が目立つ。高含量の Fe がある割には、金属鉄が少ない点、Ni と Co の含量の点などを考慮すると、従来の carbonaceous chondrite の分類から、第Ⅲ族に相当する。いずれ、有機物の含量を定量分析して、確定するが、現在は、第Ⅲ族であろうと推定している。やまと (d) は、特殊な特長もなく、ごく一般的な、high-iron chondrite に分類できる化学組成を有していると考えている。

5. 希ガス成分について

試料が、宇宙空間物質であるか否かを、的確に判定できる方法として、希ガスの同位体組成を検討する方法が、現在の所では最も優れたものである。入手した4個の試料について、超真空希ガス用質量分析計を用い試料中に含有される希ガスの分析を行なった。本装置の概要は、既に述べてあり (HINTENBERGER *et al.*, 1968), 特に隕石用に設計されたもので、数多くの分析が行なわれてきた。

得られた結果を表4に示す。分析した4つの試料にスパークレーションによって生成した³He, ²¹Ne, および ³⁸Ar を検出している。このことは、4つの試料とも、宇宙空間において、宇宙線の照射をうけていたことを証明し、宇宙空間物質であって、地表の物質でないことになる。また、希ガスの含有量が多く、このことから、4つの試料が宇宙空間物質、すなわち隕石であることを証明できる。

次に、本隕石が宇宙空間で照射をうけていた年代(島, 1967), すなわち照射年代を、表3と表4を用いて計算すると、表3の下方に表示する結果が得られる。4個の隕石の照射年代は、全て異なることになり、隕石母体の異なりを指示している結果となる。したがって、隕石分布の状況からの推定で、隕石雨の可能性も考えられるが、このことは、否定的な結論となろう。なお、希ガス同位体の取り扱いについては、既報で詳しく述べてあるので参照されたい (SHIMA *et al.*, 1973)。

6. 微量化学成分について

本試料中に存在する微量化学成分は、スパークソース法による質量分析法を利用し、各種

表 4 やまと隕石の希ガス成分

Table 4. Rare gas in Yamato meteorites (Concentrations in cm^3 STP/g).

Meteorites	Y-(a)	Y-(b)	Y-(c)	Y-(d)
^3He	$2.62 \cdot 10^{-8}$	$7.13 \cdot 10^{-7}$	$4.61 \cdot 10^{-7}$	$1.056 \cdot 10^{-7}$
^4He	$4.74 \cdot 10^{-6}$	$6.65 \cdot 10^{-6}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$	$1.069 \cdot 10^{-5}$
^{20}Ne	$3.63 \cdot 10^{-8}$	$1.90 \cdot 10^{-7}$	$1.15 \cdot 10^{-7}$	$2.10 \cdot 10^{-8}$
^{21}Ne	$7.89 \cdot 10^{-9}$	$1.91 \cdot 10^{-7}$	$1.20 \cdot 10^{-7}$	$2.26 \cdot 10^{-8}$
^{22}Ne	$11.60 \cdot 10^{-9}$	$2.04 \cdot 10^{-7}$	$1.27 \cdot 10^{-7}$	$2.45 \cdot 10^{-8}$
^{36}Ar	$3.69 \cdot 10^{-7}$	$1.12 \cdot 10^{-8}$	$2.77 \cdot 10^{-8}$	$7.13 \cdot 10^{-9}$
^{38}Ar	$6.97 \cdot 10^{-8}$	$1.19 \cdot 10^{-8}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$	$4.10 \cdot 10^{-9}$
^{40}Ar	$7.22 \cdot 10^{-6}$	$1.00 \cdot 10^{-6}$	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$6.08 \cdot 10^{-5}$
$^{21}\text{Ne sp}$	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$1.91 \cdot 10^{-7}$	$1.20 \cdot 10^{-7}$	$2.26 \cdot 10^{-8}$
P_{21} (Production rate)	0.46	0.62	0.48	0.52
T_{21} (Exposure age m.y.)	1.7	31	25	4.3
T_3 (Exposure age m.y.)	1.3	35	23	5.5

Productions rates P_{21} in $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP } ^{21}\text{Ne per/g. } 10^6 \text{ y}$; $P_3=2.0 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP } ^3\text{He/g. } 10^6 \text{ y}$.

の元素, たとえば, Ru, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Mo, Nb, Ta, Bi, Pb, Tl などのおおよその結果を得ているが, 半定量的に考えて, それらの元素の存在度からも, 隕石のパターンを示している. また, 同時に, 測定できる鉛の同位体比について, ごく定性的に検討しても, 本試料は, それぞれ原始鉛の値を示している. これらの結果のより詳細な報告は, HINTENBERGER *et al.* によって, 別に報告される予定である. 微量成分の存在比のパターンや, 鉛の同位体比の観点からも, 4 個の試料が隕石であることを証拠づけている.

7. 考 察

希ガスの分析結果から, スーパーレシジョンプロダクトの存在が, いずれの試料からも認められる. これは, 4 つの試料とも, 宇宙空間に存在していたことを有力に支持するもので, 地表の物質では, このような希ガスの組成は認められない. したがって, 宇宙空間から落下した時期は不明であるにしても, 地表に降下した隕石であることを証拠づけている.

次に, 主な鉱物組成と, 化学成分の検討から, やまと(a)は, enstatite chondrite に分類できる. やまと(b)は, Ca-poor achondrite, やまと(c)は carbonaceous chondrite, やまと(d)は bronzite chondrite となる. 隕石の分類法は, 数多く提案されているが, 通常は, 上記に示したような程度で十分に利用できる. もちろん, ここで分類した carbonaceous

chondrite にしても、Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ などと、さらに細分化される分類法もあり、強いて分類すれば、化学成分の結果からは、Ⅲ族になる。

本隕石が、限られた 10km 平方以内の区域で発見されたことについては、種々の原因が考えられる。たとえば、隕石雨として、一時に多数の隕石が降下する場合があるので、この種の原因が考えられる。しかし、隕石雨の場合には、大体同一種類の隕石が分布しているのが通常であって、4つの異なった種類の隕石が、本報のように分布していたことは、今迄に報告がない。もし、隕石雨として一時に落下したとすると、4つの種類の隕石の分布を説明するのに、次のようなことも考えねばならない。隕石母体から、各種の隕石に分化しつつ本地域に落下したことになり、隕石の晶出分化作用の時間が問題となる。また、固化年代や照射年代の異なりなどから、同一母体から分化したと考えることは困難であり、隕石雨としての落下は、ほとんど可能性がないと考えることが妥当であろう。むしろ、4つの異なった種類の隕石が、別々に、本地域内に落下し、偶然 10km 平方以内に分布したと考える方が常識的であろう。この場合でも、落下した時には、発見された 10km 平方区域外にあって、相当に遠い距離があったが図 1 にみられるように、氷河の運動が、高地より海岸に向かって動いている観測結果があるように、氷河の運動に伴って本地域に運ばれたとも考えられよう。

落下年代の測定ができれば、より精密な議論もできるが、現在の所では、氷河の運動に伴って、狭い本地域内に運ばれたと考えることが、最も有力な考え方である。

次に、偶然やまど山脈付近で見出されたこれらの産状から、他の南極氷原地方でも、同様な隕石の分布が考えられるので、より詳しい調査が必要となろう。

8. 終 り に

考察の項で述べたように、偶然入手した試料が、各種の隕石であったことを証明したが隕石の分布の状況から、氷河の流れの集中する区域を対象に、探査網を広げると、より沢山の隕石が発見できる可能性がある。したがって、今後の南極研究には、この種のテーマを加える必要を痛感している。

終りに、本試料の入手にご協力下された、北海道大学理学部八木健三教授、ならびに東京教育大学理学部牛来正夫教授に感謝する。また、顕微鏡写真を恵与された北海道大学理学部大沼晃助博士に感謝すると共に、本研究の機会を与えて下さった Max-Planck Institut の Prof. H. HINTENBERGER に感謝する。

文 献

- HINTENBERGER, H., L. SCHULTZ and H. WEBER (1968): Rare gases in the iron and in the inclusions of the Campo del Cielo Meteorite, El Taco. *Meteorite Research*, I. A. E. A. Wien.
- HUSS, G. I. (1971): Mounting problems in the naming of meteorite discoveries. *Meteoritics*, **6**, 21-25.
- SHIMA, M. (1966): Glassy spherules (Microtektite?) found in ice at Scott Base, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3595-3597.
- 島 誠 (1967) : 宇宙塵・隕石. 紀伊国屋書店.
- 島 誠・矢吹英雄 (1968) : 南極における宇宙物質に関する研究(I). *南極資料*, **33**, 53-64.
- 島 誠・矢吹英雄・岡田昭彦 (1969) : 南極における宇宙物質に関する研究 (II). *南極資料*, **34**, 1-13.
- SHIMA, M., M. SHIMA and H. HINTENBERGER (1973): Chemical composition and rare gas content of four new detected Antarctic meteorites. *Earth and Planetary Sci. Letters*, **19**, 246-249.
- SPRENKEL-SEGEL, E. L. and S. S. HANNA (1964): Mössbauer analysis of iron in stone meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**, 1813-1931.
- SPRENKEL-SEGEL, E. L. (1970): Recoilless resonance spectroscopy of meteoritic iron oxides. *J. Geophys. Res.*, **75**, 6618-6630.
- YOSHIDA, M., H. ANDO, K. OMOTO, R. NARUSE and Y. AGETA (1971): Discovery of meteorites near Yamato Mountains, East Antarctica. *Antarctic Rec.*, **39**, 62-65.

(1973年5月19日受理)