

衝突溶融隕石 Y-793533 コンドライトの化学組成と Rb-Sr 系

Chemical and Rb-Sr isotopic features of the shock-melted chondrite Yamato-793533

岡野 修 (Osamu OKANO)¹

片山 博子 (Hiroko KATAYAMA)²

中村 昇 (Noboru NAKAMURA)³

The Sr isotopic compositions and Rb and Sr abundances, as well as major element abundances in olivine, pyroxenes and glass, were determined for a chip and 21 fractions separated from a shock-melted chondrite Yamato-793533, a dark-colored, porous stone with glassy texture. Two lithologies were recognized for the 1.5g specimen studied (Yamato-793533, 67); L (Main portion) and L to LL (Dark portion) chondritic in terms of chemical compositions of olivine and pyroxenes. The chemical compositions of glass are relatively homogeneous ($\text{SiO}_2=67-77\%$) compared to those of other ordinary chondrites, suggesting a moderate cooling rate after shock-melting. The data points for fractions do not form any isochron in a $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram. However, it is noted that six out of nine points for the dark portion plot around a 1.2 Ga line, while most of points for the main portion plot around a 4.55 Ga chondrite isochron. The observed difference could be responsible for difference in melting degrees between the two portions. Similar Rb-Sr features have been found among shock-melted Yamato-79 LL-chondrites which are considered to be paired stones experienced the same shock-melting event at 1.2 Ga. Consequently, the Rb-Sr systematics as well as petrologic features strongly suggest that Yamato-793533 is a member of a series of the shock-melted Yamato-79 LL-chondrites.

Keywords: LL-chondrite, Shock-melting, Sr isotope

1. はじめに

普通コンドライトが示す化学的、岩石学的特性は、一般に3段階の過程、即ち、1) コンドリュールの形成からコンドライト母天体形成に至る集積過程、2) 母天体内部の熱源による変成作用、3) 母天体上で起きた衝突過程、を経て形成されたと考えられている。このようなモデルはコンドライトの特徴を一般的に説明するには、大変明快で便利なものであるが、それぞれの過程の詳細が解明されているわけではない以上、あくまで現時点での作業仮説に過ぎない。例えば、3番目に挙げられた衝突過程は、なにも母天体形成後に始まったわけではなく、集積

過程から実質的に重要な役割を演じていたかも知れない。例えば月の角礫岩から衝突に伴って形成されたと考えられるコンドリュール様物質が見つかり、コンドリュールが衝突過程によってできる可能性が示されている (e. g. King et al., 1972)。衝突に伴う現象は不規則かつ複雑なものと予想されるので、コンドライトが持つ特性との因果関係を明らかにすることは困難なことであるが、コンドライトの履歴を明らかにする上で重要な問題である。衝突過程に伴う物理化学的挙動の詳細を明らかにするためには、衝突の形跡が明瞭に保持されている隕石を扱う必要がある。その点で、集積・変成作用が終了したとされる 4.4Ga 以降に顕著な衝突を受けた隕石は、衝突過程での化学的挙動を調べるのに有用な研究材料である。

Okano et al. (1990) は、いくつかの衝突溶融し

1) 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

2) 岡山大学理学部地球科学科 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
現在：川崎炉材(株) 〒678-02 赤穂市中広字東沖 1576-17

3) 神戸大学理学部地球惑星科学科 〒657-8501 神戸市灘区
六甲台町 1-1

た南極産 LLコンドライトの Rb-Sr 系、希ガス同位体などを調べて、それらが共通して 1.2Ga に起きた衝突溶融を経験したもともと一つの隕石であったことをつきとめるとともに、衝突に伴う化学的挙動の複雑さを明らかにした。その後同様の手法を用いたいくつかの研究 (Nakamura et al., 1990; Fujimaki et al., 1992; 1993) によって、コンドライト隕石における衝突の履歴と特徴が少しずつ明らかになってきた。しかし、このような研究例は未だ少なく、今後さらに研究が必要な分野である。本研究では、南極産の衝突溶融隕石の一つである Yamato-793533 について、その衝突溶融年代と他の衝突溶融した Yamato-79 LLコンドライトとの関連を明らかにすることを目的として、その構成鉱物の化学組成と Rb-Sr 系の分析を行った。

II. 試料および分析方法

Yamato-793533 隕石は、南極のやまと山脈から採集された重量 510.32g の LLコンドライトで、肉眼的特徴として、暗灰色、多孔質で長石質の白いインクルージョンを多数含む (Yanai and Kojima., 1987; 1995)。これと似た暗灰色を呈し多孔質な LLコンドライトは Yamato-79 南極隕石の中にいくつも見つかっており、こうした特徴は衝突溶融によって形成されたと考えられている (Yanai et al., 1981; Sato et al., 1982; Okano et al., 1990)。本研究に用いた試料は、国立極地研究所から提供された約 1.5g の岩片 Yamato-793533, 67 と研磨薄片 Yamato-793533, 64-1 である。

試料 Y-793533,67 は実際には 4 個の岩片からなり、このうちの約 1.4 g の岩片について、EPMA による化学組成分析と Rb-Sr 同位体分析を行った。この岩片中には周囲の主岩相 (Main portion) よりもさらに黒っぽい色を呈する部分 (Dark portion) が

含まれており、この部分が Main portion 中に取り込まれた、よりガラス質ないしは衝突溶融の程度が強い岩相であることを示している。まず岩片を粗く砕いてこの部分を取り出して両者を分けた後、それぞれ一部の破片を残して大部分をメノウ乳鉢で粉末にした。粉末は 200 メッシュと 300 メッシュのナイロン製ふるいを用いて粒度分けし、300 メッシュより細粒の粉末はさらに水ひによって、より細粒のフラクションと粗粒のフラクションに分離した。このうち 200 メッシュ $>\phi >$ 300 メッシュと 300 メッシュ $>\phi$ の粗粒粉末から磁石で Fe-Ni 金属の多い部分を取り除いた粉末に対して、クレリチ溶液を用いて重液分離を行った。こうして得られた計 21 個の各フラクション (表 1) と Main portion からあらかじめ取り分けておいた小岩片 (MWR, 65.8mg) について、Sr 同位体比分析と同位体希釈法による Rb と Sr の定量分析を、岡山大学地球内部研究センター (現在は固体地球研究センター) の表面電離型質量分析計 Finnigan MAT 261 を用いて行った。この期間中計 9 回測定した標準物質 NBS987 の Sr 同位体比の平均値は、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710227\pm 0.000030$ (2σ -mean) であった。また MWR から取り分けた破片と各フラクションの粉末の一部を Epofix 樹脂で固めて研磨薄片にし、岡山大学理学部の EPMA (日本電子 JXA-733) を用いてガラス、カンラン石、輝石の化学組成分析を行った。これらの機器分析方法および条件は基本的に Okano et al. (1994) と同様である。

III. 結果および考察

1. 記載岩石学的特徴

研磨薄片 (Y-793533, 64-1) の顕微鏡観察によると、この隕石試料は扁平な形をした無数の小さな空隙を有し、大部分はおそらく衝突加熱の際形成され

表 1 分析に用いた重液フラクション.

Density (g/cm ³)	Main portion		Dark portion	
	$\phi < \#300$	$\#300 < \phi < \#200$	$\phi < \#300$	$\#300 < \phi < \#200$
$\rho < 3.30$	Mf1	Mm1	Df1	Dm1
$3.30 < \rho < 3.32$	Mf2	Mm2	Df2	Dm2
$3.32 < \rho < 3.35$	Mf3	Mm3	(3.30 $< \rho < 3.35$)	Dm3
$3.35 < \rho < 3.40$	Mf4	Mm4	Df3	Dm4
$3.40 < \rho < 3.46$	Mf5	Mm5	(3.35 $< \rho < 3.46$)	(3.35 $< \rho < 3.46$)
$3.46 < \rho$	Mf6	Mm6	Df4	Dm6

表2 ガラスの化学組成.

	Y-793533		Y-790964	
	Main (22) *	Dark (24) *	1 (6) *	2
SiO ₂	70.82	72.60	60.55	66.46
TiO ₂	.58	.55	.43	.66
Al ₂ O ₃	19.79	18.59	26.61	16.69
FeO	1.34	1.27	2.34	3.59
MnO	-	-	.03	.07
MgO	.63	.54	.73	1.23
CaO	2.04	2.06	2.60	2.99
Na ₂ O	3.12	2.53	6.59	8.18
K ₂ O	.91	1.03	.13	.12
P ₂ O ₅	.78	.82	-	-

Values are adjusted to the total=100%.

* the numbers of points analyzed.

Data for the Y-790964 are cited from 1, Okano et al. (1990) and 2, Takeda et al. (1983).

たメルトから晶出した自形性の強い細粒 (≦10μm) のカンラン石と単斜輝石、およびそれらの結晶の間を埋めるガラス (容積にして10%前後) からなる。その中に、より粗粒 (≧30μm) なカンラン石の斑状結晶が至る所に点在する。この粗粒カンラン石は破片状に不規則な輪郭と、不規則な消光を示すモザイク組織を示すことから、衝突溶融をまぬがれた

残存結晶であることがわかる。ときに粗粒カンラン石結晶が密集していることがあるが、これは斑状カンラン石コンドリュールのの名残りと思われる。また、丸い形をした Fe-Ni 合金とその周りを囲うように伴うトロイライトが、特にガラス中に多く見られる。斜長石結晶はいずれの部分にも認められない。もともとあったとしても衝突溶融の際には完全に溶けてしまったであろうし、その後メルトから晶出するには冷却速度が速すぎたのであろう。また無数の空隙は衝突加熱の際に気化したガスが抜けた後と考えられるが、これらの概して扁平な空隙の伸長方向はきわめて不規則で傾向が認められない。このことは、メルトが重力の影響をそれほど受けずに冷却固化したことを示唆しており、母天体表層において冷却固化したとするならこの母天体はさほど大きなものではなかったのかもしれない。Yamamoto-793533 におけるこれらの鏡下での特徴は、その肉眼的特徴とともに、Yamato-790964 をはじめとする衝突溶融を経験したとされる他の多孔質な Yamato-79 LL (ないし L) コンドライトと共通しており、これらの LL コンドライト物質が母天体表層を覆うレゴリスであったと考えられる。

2. ガラス質石基、カンラン石、輝石の化学組成

A) ガラス質石基

Yamato-793533 中のガラス質石基の主成分化学

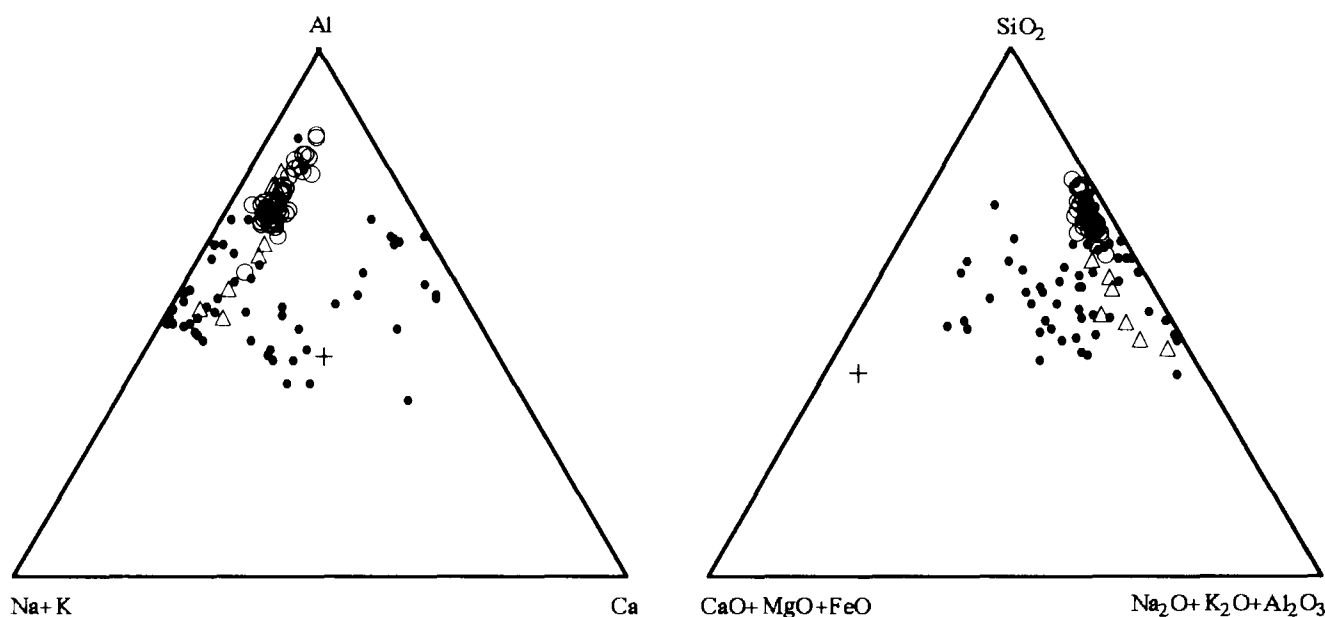


図1 ガラスの組成. 丸, Yamato-793533 ; 三角, Yamato-790964 (Okano et al., 1990); 黒点, 他のコンドライト ; 十字, LLコンドライト全岩

組成は、Main portion ($\text{SiO}_2=68-76\%$) と Dark portion ($\text{SiO}_2=67-78\%$) の両岩相間で特に差はなく全体にかなり均質である (表2)。しいて言うなら平均値で Dark portion の方がやや Na_2O が少ないと言えるくらいである。一方、Yamato-793533 と同様の衝突溶融 LL コンドライト Yamato-79964 のガラス質石基と比べると、Yamato-793533 では明らかに SiO_2 、 K_2O が高く、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O が少ない (表2)。このような組成の違いはあるものの、 $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\text{Al} - (\text{Na} + \text{K}) - \text{Ca}$ の3成分プロットで見ると、他の多くのコンドライト質隕石中のガラスがかなり大きな組成変化を示すのに対し、両者の Yamato-79 コンドライトは同程度に低く一定な Ca ないし $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}$ 成分を示すという顕著な類似性がある (図1)。即ち、両者はともに斜長石成分に富み、全岩組成に近いガラスは見られない。全岩組成がどちらも共通した LL コンドライト組成であることから、両者のガラス組成の類似した均一性は、良く似た溶融・冷却環境下、つまり同程度の到達加熱温度と冷却速度を反映しているはずである。ガラスは一般に変成作用の影響をほとんど受けていない非平衡コンドライトのコンドリュール中に見られるものである。コンドリュールは無重力またはそれに近い条件の宇宙空間において、コンド

ライト質メルトの液滴から急冷したものと考えられているので、たとえ個々のコンドリュールの化学組成が似通っていたとしても、コンドリュールのサイズや初期加熱温度の違いに起因する冷却速度の違いが急冷ガラスの組成に多様性を与えるであろう。一方、Yamato-790964 をはじめとする衝突溶融した一連の Yamato-79 LL コンドライトは、いずれも LL 母天体上で約 12 億年前に起きたある衝突事件の際に生じたメルトが、溶融をまぬがれたコンドライト物質の破片と混ざり合いながら母天体表面に降り積もって冷却固化した LL コンドライト質角礫岩と考えられており、さらに宇宙線照射年代がよく一致すること、南極での採集地点が近いことから、それらが地球に落下する直前にはもともと一つの隕石であったと推定されている (Okano et al., 1990)。これらのことを踏まえて考えると、図1に示されている Y-793533 と Yamato-790964 の間のガラス組成の類似性は、Yamato-793533 もまた Yamato-790964 と同じ隕石から由来した可能性を強く支持していると言える。

B) カンラン石と輝石

カンラン石と輝石については、 $\text{Mg}-\text{Fe}-\text{Ca}$ の3成分の EPMA 分析結果から化学組成を計算し、合計が 95~102wt% の範囲のものをデータとして使用

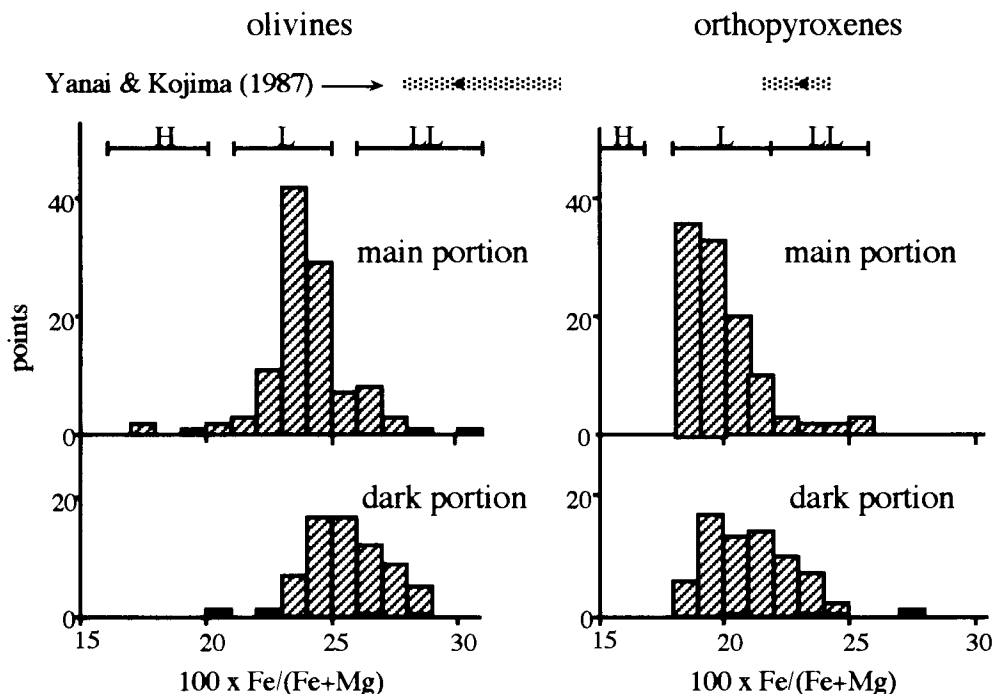


図2 カンラン石および斜方輝石の組成。

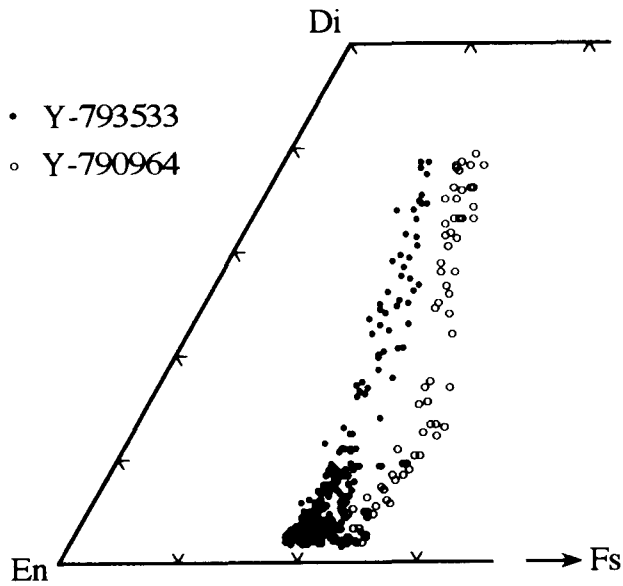


図3 Caに富む輝石の組成.
Y-790964はOkano et al. (1990) から引用

した。カンラン石と斜方輝石の結果については、Main portionとDark portionを区別して図2に示した。単斜輝石については両岩相を区別せずにとめて図3に示した。

カンラン石、斜方輝石の組成はいずれも、変成度4に相当する程度のややばらついた組成変化を示しながら、ほぼLからLLコンドライトの範囲にわたっている。岩相ごとに見ると、Main portionのカンラン石、斜方輝石ともに、大半がLの組成範囲に含まれるが、Dark portionの斜方輝石ではおよそ2:1の割合でLの範囲に含まれるものが多く、カンラン石では半々程度である。この結果は、同じ隕石についてこれまで報告されているカンラン石、斜方輝石および全岩の化学組成分析値が明瞭にLL組成を示すという結果 (Yanai and Kojima, 1987; 1995) とは一致しない。

単斜輝石の組成についても同様のことが言える。Yamato-7903533に大量に含まれる自形で細粒の

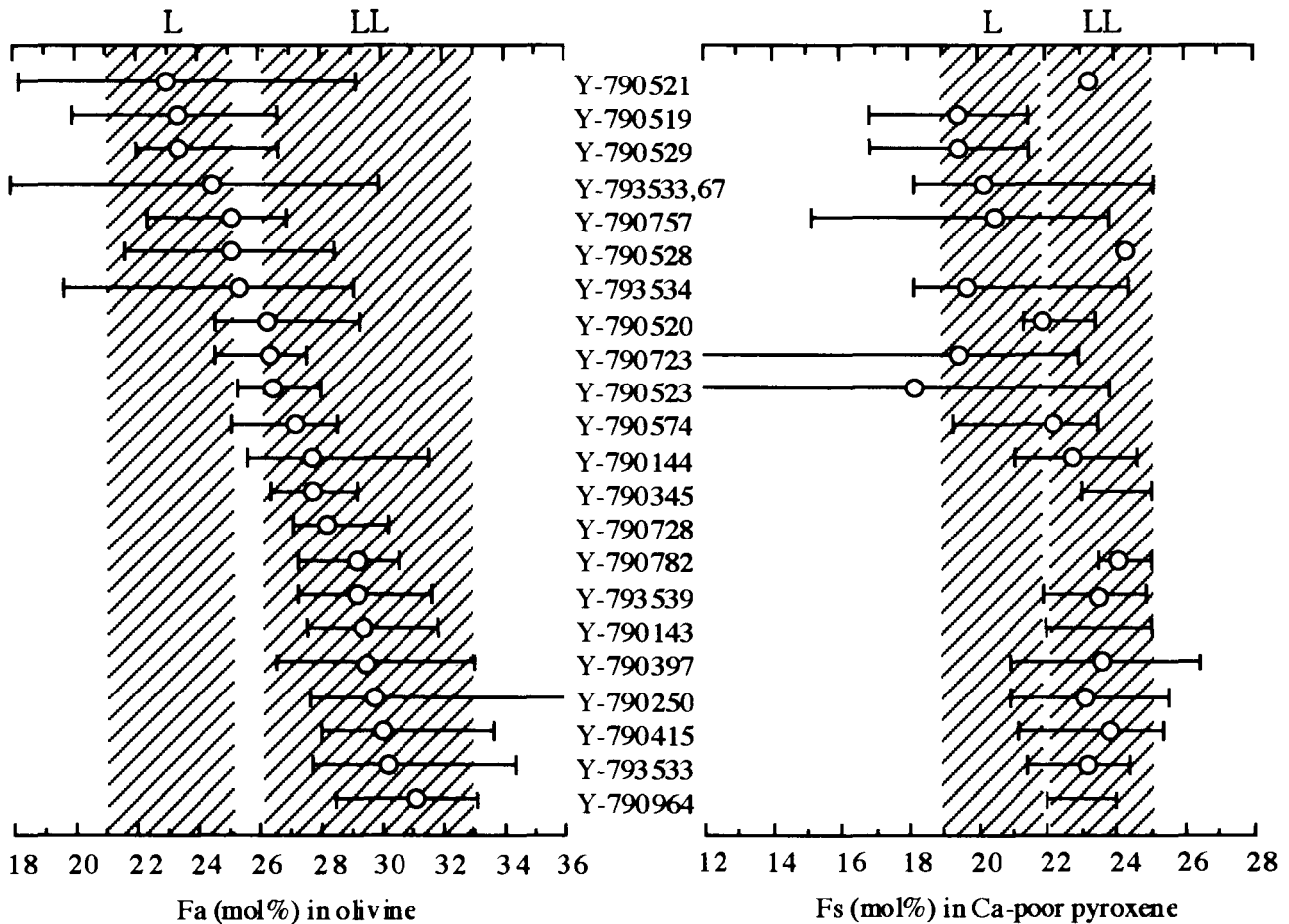


図4 衝突溶融したYamato-79 LLコンドライトのカンラン石と斜方輝石の組成.
線の長さは組成範囲、白丸は平均組成、斜線部はLおよびLLコンドライトの範囲を示す
Yamato-793533,67以外のデータはYanai and Kojima (1995) および岡野 (未公表データ) による

単斜輝石は Yamato-790964 中のものと同様にコアからリムに向かって Ca に富む累帯構造を示すという特徴を持つが、Yamato-790964 の単斜輝石が LL 組成を示すのに対し、Yamato-793533 中のものはこれより Fe/(Fe+Mg) 比が低い L 組成を示す (図 3)。一方、Yanai and Kojima (1987) の分析結果 ($\text{En}_{52.5-69.7}\text{Fs}_{17.4-24.7}\text{Wo}_{6.1-30.1}$) は Yamato-790964 とほぼ同様の LL 組成を示す。同じ隕石でありながらこのような組成の違いがあるということは、Yamato-793533 隕石が実際には LL 物質と L 物質が混ざりあった不均一なコンドライト質角礫岩であることを物語っている。角礫岩質隕石では一つの隕石中に異なった岩石学的タイプの岩相が混在する例が、例えば Bholá (LL4-7, Fredriksson et al., 1974)、Hedjaz (L3-6, Fredriksson et al., 1986) など、これまでもいくつも報告されており、それほど珍しいことではない。また、さきに述べた一連の衝突溶融隕石 Yamato-79 LL コンドライトの中にも、LL 組成と L 組成の岩相が混在しているものが見つかっている (Yanai, 1981; Okano et al., 1990)。

南極隕石カタログ (Yanai, 1981; Yanai and Kojima, 1987; 1995) に記載されている Yamato-79 LL および L コンドライトの中から、衝突溶融の特徴を持つ隕石を選び出して、そのカンラン石と斜

方輝石の組成範囲を、カンラン石中のファヤライト含有量の高いものから順に並べて図 4 に示した。全岩化学組成にもとづいた分類によると、Yamato-790723 のみが L グループで、他は全て LL グループに属する (Yanai and Kojima, 1995)。なお、ここに挙げた隕石のうち、Yamato-790519, -790723, -790345, -790143, -790397, -790964 は、その Rb-Sr 年代、K-Ar 年代、希ガス組成などから、約 12 億年前の衝突溶融を経験した、地表落下以前には一つの隕石だったものと考えられている (Okano et al., 1990)。LL 組成の全岩化学組成を持つにも関わらず、これら隕石中のカンラン石は全体として、L から LL の範囲にわたりほぼ連続的に組成変化していることがわかる。斜方輝石の組成も、平均値で見ると、やはり L から LL の広い範囲にわたっている。但しここで示されたカンラン石と斜方輝石の間には、必ずしも化学組成の明確な相関があるとは限らない。カンラン石組成が L を示しながら斜方輝石は LL 組成を示すものもあれば、その逆の場合もある。全岩、カンラン石、斜方輝石の組成におけるこのような不一致と不規則は、おそらくこれらの隕石が L および LL 物質の不均質な混合物であることを示しているのであろう。この推定は Yamato-793533 が L および LL 組成のコンドライト物質が混在する角礫岩であるとした先の結論と良

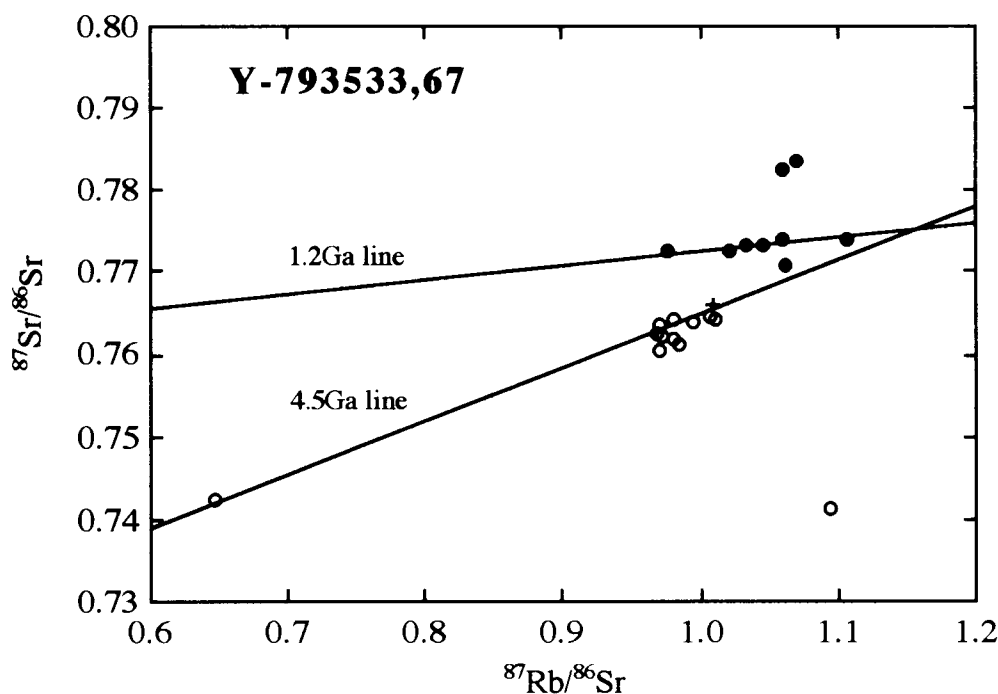


図 5 Yamato-793533 コンドライトの Rb-Sr 進化図。白丸、Main portion のフラクション；黒丸、Dark portion のフラクション；十字、Main portion 全岩試料

く調和しており、Yamato-793533 が図 4 に挙げた他の Yamato-79 衝突溶融コンドライトの間であることを強く示唆している。

3. Rb-Sr 同位体系

図 5 は、Main portion から取り出した 1 岩片 (MWR) と重液フラクション、Dark portion から取り出した重液フラクションを $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 進化図にプロットしたものである。全体として各点はいかなる一直線上にも並ぶことなくかなり大きく分散している。しかしながら、Main portion の試料は、一点を除くと 4.5Ga の年代を示す直線上ないしその周辺にプロットされる。このことは、Main portion は 4.5Ga の隕石形成時以降において、その Rb-Sr 系が完全にリセットされることは無かったものの、ある程度までは攪乱されたことを示している。一方、岩片 MWR のモデル年代を計算すると 4.56Ga を示すことから、この 65mg ほどの小岩片に関しては隕石形成時の Rb-Sr 系を現在までほぼ保持していることがわかる。Dark portion の各点はいずれも、Main portion のものとは異なって、4.5Ga 年代線の左側に大きくはずれている。今回分析を行った 9 試料は Dark portion から取り出したフラクションの一部でしかないので、これら 9 試料の結果を必ずしも Dark portion 全体にあてはめることはできないが、おそらく Dark portion は全体

として 4.5Ga 年代線の左側にシフトしていると思われる。4.5Ga 年代線からはずれる傾向は強いショックを経験した隕石ではよく見られることである (Gopalan and Wetherill, 1971; Okano et al., 1984; 1990)。Okano et al. (1990) は、1.2Ga の衝突溶融を経験した Yamato-79 LL コンドライトの中で、高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を持ち 4.5Ga 年代線の左側にはずれてプロットされる試料は、もともとアルカリに富む岩片を少量含んでいた LL コンドライト物質から、強烈な衝突溶融の際に Rb が気化し失われたものであると結論した。図 5 に示された Yamato-793533 隕石の Rb-Sr 系は 1.2Ga 衝突溶融隕石 (Nakamura and Okano, 1985; Okano et al., 1990) と共通する特徴を示しており、その特徴的な Rb-Sr 系の挙動について上述の同様の解釈が可能である。また、Y-793533 の Dark portion からの 9 試料のうち 6 試料が 1.2Ga 年代線の周囲にプロットされていることから (図 5)、Dark portion は 1.2Ga の衝突によって形成されたメルトであり、不完全ながら部分的に Rb-Sr 系がリセットされたと考えられる。

そこで、この隕石の Rb-Sr 系の挙動を、1.2Ga における $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 図 (図 6) 上で考えてみる。Dark portion は Main portion に比べて Rb/Sr 比の高い LL コンドライト物質で、1.2Ga の衝突以前はおそらく、Main portion と同様に 4.55Ga 年

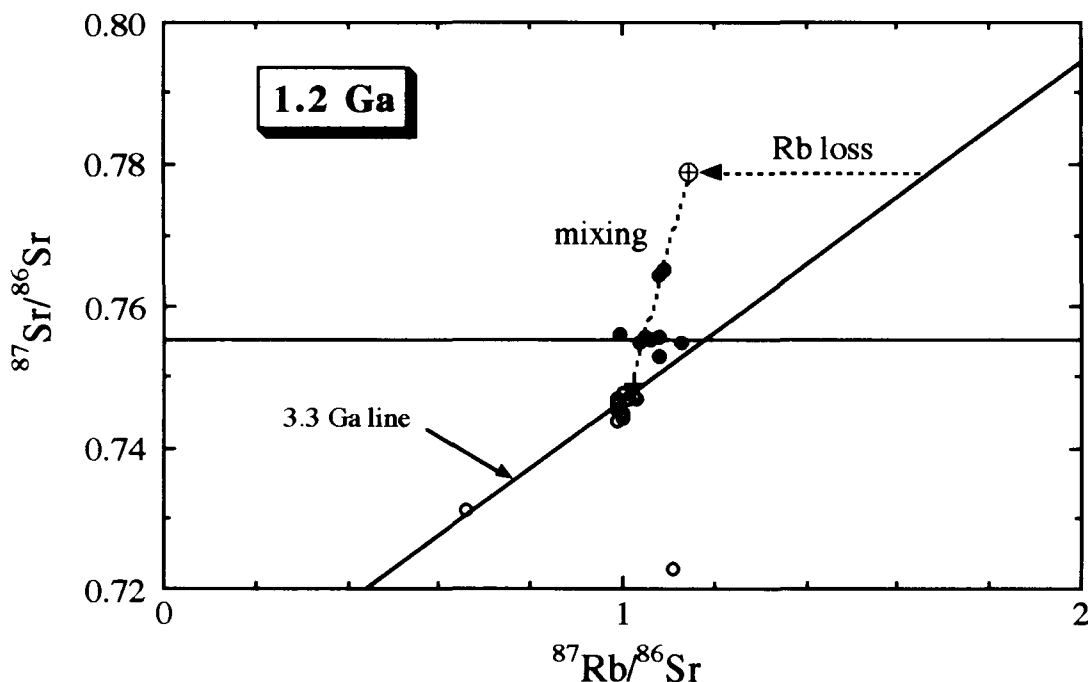


図 6 1.2Ga の衝突時における Yamato-793533,67 隕石の Rb-Sr 系の挙動。

代線上にあったと考えられる。1.2Gaの強烈な衝突加熱により両者はともにかなりの部分が熔融したが、熔融の程度はDark portionの方が激しかったはずである。この際Dark portion中のRbの一部は衝突加熱によって気化しDark portionから失われる(少なくとも20%以上)と同時に、溶けたDark portionはMain portion組成のメルトを一部取り込んで混ざりあった(Fig. 6のRb-lossとmixing line)後、おそらく母天体表層で急冷、固化したのであろう。

IV. まとめ

Yamato-793533 (67) は、衝突の際生じたメルトと熔融をまめがれた岩片、鉱物片が混ざりあって固化したコンドライト質隕石である。カンラン石、斜方輝石の組成から見ると、Lコンドライト質物質とLLコンドライト質物質のものが混じりあったものと考えられる。確定的なRb-Srアイソクロン年代を求めることはできなかったものの、比較的良く溶けた部分についてのRb-Sr同位体データと岩石学的特徴の類似性を考え合わせると、この隕石がYamato-790964をはじめとする一連の衝突熔融したYamato-79 LLコンドライトと同じ約12億年前の衝突熔融過程を経験したことを示唆している。おそらく、両者は落下以前は一つの隕石であったと推定される。

謝辞

本研究を行うにあたり、当時岡山大学地球内部研究センターの本間弘次教授(現在、中国鉱物資源探查研究中心)と加々美寛雄助教授(現在、新潟大学大学院自然科学研究科教授)には質量分析計使用の便宜をはかって頂いた。理学部地球科学教室の野坂俊夫博士には、EPMA分析の御指導を頂いた。斎藤俊明技官、大学院生の西殿泰子氏には、薄片の作成及びEPMA測定に際してお世話になった。山本雅弘教授、松田敏彦助教授、西谷七代氏をはじめとする当時地球化学講座の大学院生諸氏には、本研究期間中いろいろな面での御教示を頂いた。当時国立極地研究所の矢内桂三博士には貴重な隕石試料を提供して頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

引用文献

- Fredriksson, K., Noonan, A. F. and Nelen, J. A. (1974): The Bhola stone - a true polymict breccia? *Meteoritics*, **9**, 338-339.
- Fredriksson, K., Fredriksson, B. J., and Kraut, F. (1986): The Hedjaz meteorite. *Meteoritics*, **21**, 159-168.
- Fujimaki, H., Ishikawa, K. and Aoki, K. (1992): Rb-Sr features of the impact-melted LL-chondrites from Antarctica: Yamato-790723 and Yamato-791528. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites*, **5**, 290-297.
- Fujimaki, H., Ishikawa, K., Kojima, K., Yanai, K. and Aoki, K. (1993): Rb-Sr age of an impact event recorded in Yamato-791088 H chondrite. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteoritics*, **6**, 364-373.
- Gopalan, K. and Wetherill, G. W. (1971): Rubidium-strontium studies on black hypersthene chondrites: effects of shock and heating. *J. Geophys. Res.* **76**, 8484-8492.
- King, E. A. Jr., Carman, M. F. and Butler, J. C. (1972): Chondrules in Apollo 14 samples: implications for the origin of chondritic meteorites. *Science*, **175**, 59-60.
- Nakamura, N. and Okano, O. (1985): 1,200-Myr impact-melting age and trace-element chemical features of the Yamato-790964 chondrite. *Nature*, **315**, 563-566.
- Nakamura, N., Fujiwara, T. and Nohda, S. (1990): Young asteroid melting event indicated by Rb-Sr dating of the Points of Rocks meteorite. *Nature*, **345**, 51-52.
- Okano, O., Misawa, K., Nakamura, N., Honma, H. and Goto, H. (1984): A preliminary study of Rb-Sr systematics and trace element abundances on impact-melted LL-chondrites from Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **35**, 285-297.
- Okano, O., Nakamura, N. and Nagao, K. (1990): Thermal history of the shock-melting Antarctic LL-chondrites from the Yamato-79 collection. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 3509-3523.
- Okano, O., Nishiya, N. and Kagami, H. (1994):

Determination of Rb-Sr age for separated chondrules from the Allegan chondrite.

Okayama Univ. Earth Science Report, **1**, 27-36.

Sato, G., Takeda, H., Yanai, K. and Kojima, H. (1982): Electron microprobe study of impact-melted regolith breccias. *Lunar Planet. Inst. Tech. Rep.*, **82-02**, 120-122.

Yanai, K. (1981): Photographic catalog of the selected Antarctic Meteorites. *Natl. Inst. Polar Res.*, Tokyo, pp.104.

Yanai, K. and Kojima, H. (1987): Photographic catalog of the Antarctic Meteorites. *Natl. Inst. Polar Res.*, Tokyo, pp. 298.

Yanai, K. and Kojima, H. (1995): Catalog of the Antarctic Meteorites. *Natl. Inst. Polar Res.*, Tokyo, pp. 230.