平成16年度日本惑星科学会最優秀発表賞受賞論文コンドリュール同時形成: ²⁶AI年代測定による炭素質コンドライトと普通コンドライトコンドリュールの形成年代 ²⁶6 映里香^{1,2}

1. コンドリュールの多様性

地球上で手にすることができる代表的な地球外物 質, 隕石. ひとえに隕石といっても, 様々な種類があ ることが知られている。中でも最も始原的といわれて いるコンドライトは、主に普通コンドライト・炭素質 コンドライト・エンスタタイトコンドライトに分類さ れている。主要な普通・炭素質コンドライトの構成物 質を見てみると、普通コンドライトにおいては難揮発 性包有物 (CAI) が0.1-1体積%, コンドリュールが 60-80%、その間を埋めるマトリックスが10-15%であ る[1], 一方, 炭素質コンドライトでは, CAIが1-13%, コンドリュールが15-60%、マトリックスが30-80%で あり、普通コンドライトに比べCAIとマトリックスが 多く,コンドリュールが少ないことが知られている[1]. コンドライトの主要構成物であるコンドリュールに 着目してみると、かんらん石や輝石中に含まれる酸化 鉄(FeO)の含有量によって、酸化鉄に乏しい「タイ プI」(Fe/(Fe+Mg)<0.1) と酸化鉄に富む「タイプII」 (Fe/(Fe+Mg)>0.1)に分けられる. 炭素質コンドライト にはタイプIが非常に多く含まれているが(90体積%以 上)、普通コンドライトにはタイプIIが比較的多く含 まれている(50-70%)[2-4]. しかしながら, コンド ライト中に含まれる金属鉄量は、炭素質コンドライト (0.1-8体積%) より普通コンドライト(2-10%) の方 が多く[1]、コンドリュールタイプの割合と逆の傾向 を示す. さらに, 両コンドライトのコンドリュールの

大きな特徴として酸素同位体組成の相違が挙げられる. 炭素質コンドライトのコンドリュールは普通コンドライトのものに比べ 16 Oに富んだ組成を持ち,その組成変動幅(δ^{17} O, δ^{18} O = ~ 10 ‰)が普通コンドライト(δ^{17} O, δ^{18} O = ~ 3 ‰)より大きいことが知られている[5]. 両コンドライトの基本的特徴を表1にまとめた. このように,コンドライトの種類によって,含まれるコンドリュール数やコンドリュールタイプの化学組成・同位体組成が異なる主な原因として,(a) 原始太陽系円盤における空間場の違いによってコンドリュール形成環境が異なったため,(b) コンドリュール形成時期の違いによってコンドリュール形成環境が異なったため,(b) コンドリュール形成時期の違いによってコンドリュール形成環境が異なったため,あるいはその両方に起因することが考えられる.

表1

コンドライトの基本的特徴		
	普通	炭素質
CAI	0.1-1%	1-13%
コンドリュール	60-80%	15-60%
タイプ I	30-50%	>90%
タイプ Ⅱ	50-70%	<10%
マトリックス	10-15%	30-80%
金属鉄	2-10%	0.1-8%

2. 過去の研究の問題点と 本研究の目的

30年以上も昔からコンドライトやコンドリュールに 関する数多くの研究がなされてきた。それにも関わらず、 それらの起源や進化は不明な点が多く、コンドリュー ル形成過程に関しては未だに決着がついていない。そ

^{1.} 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

^{2.} 産業技術総合研究所地質情報研究部門

の原因のひとつには、変成を受けた試料の情報が多く 含まれていることが挙げられる. 熱変成や水質変成を 受けると鉱物組成の変化などが起こり、初期太陽系の 情報を引き出そうとしても、変成以前の情報を得るこ とができない、また、コンドライトの構成要素を細か く分類し、それぞれの化学的関係と形成年代について の詳細なデータを得て、全体的な進化を考えるという 系統的な研究が限られていることも原因である. これ までに他の研究者が見たことのないような新発見をし たいという研究者魂ゆえに珍しいもの探しが優先され てしまいがちなことも原因といえるだろう。 上記のよ うな問題点を克服するため、筆者は、最も落下頻度の 多いコンドライトである普通コンドライトと炭素質コ ンドライトに含まれる最も普遍的なFe-Mgコンドリ ュールについて、構成鉱物、組織、全岩化学組成、酸 素同位体組成、さらに形成年代について系統的な調査 をし、初期太陽系固体物質の進化を解き明かしたいと 考えている. その第一段階として, まずコンドリュー ルの形成年代に着目した.

コンドリュールの形成年代に関しては, 高い時間分 解能で年代測定が可能な短寿命放射性核種を用いたコ ンドリュール年代測定が5,6年前から行われるように なってきた[6]. 特に, 半減期約73万年である²⁶Alを用 いた年代測定がSIMS(二次イオン質量分析計)の普 及も相まって精力的に行われ、その結果、最も始原的 な普通コンドライトに含まれるFe-Mgコンドリュー ルは、太陽系で最初に形成した固体物質と考えられて いるCAI形成後,約100-250万年で形成したことが明 らかになった[7-11]. 一方, 炭素質コンドライトに関 しては、²⁶Al年代測定に必要な Alに富んだ鉱物(斜 長石等)やガラス部がFe-Mgコンドリュール中に少 ないうえに、そのサイズがSIMS分析に必要な空間分 解能より小さいものが多いために年代測定が困難であ り、年代情報は非常に限られている。近年、タイプII コンドリュールについては²⁶Al年代測定結果の報告が あるが[12], 炭素質コンドライトに卓越しているタイ プIコンドリュールに関しての系統的な形成年代は今 までほとんど得られていなかった。そこで、本研究では、最も始原的な炭素質コンドライトのFe-Mgコンドリュールの形成年代を求め、普通コンドライトと炭素質コンドライトにおけるコンドリュール形成年代を比較し、両コンドライトの形成領域でのコンドリュール形成進化について議論する。

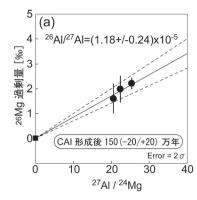
3. ²⁶AI年代測定方法

最も始原的と考えられている炭素質コンドライト CO3.0 Yamato-81020[13] に含まれる、Fe-Mgコンドリュール(タイプI:14個、タイプII:2個)について、二次イオン質量分析計(SIMS IMS-1270、産業技術総合研究所)による 26 Al年代測定を行った。複雑かつ微小な組織を示す斜長石についてはビーム径 3 μ mを用い、かんらん石・輝石についてはビーム径 5 μ mを用いた。測定方法は[7,14]に従ったが、斜長石に関しては一次イオン $^{0.02}$ -0.03 1 Aで $^{0.03}$ -8時間の測定を行うという改良を加え、約 10 -20万年の年代誤差という高精度測定を実現した。

4. コンドリュール形成年代

 26 Al形成年代を扱う際には必ず「初期太陽系において 26 Alが均質に分布していた」という仮定が必要となる。この仮定が崩れると 26 Alによる年代情報はすべて意味のないものとなる。CAIとコンドリュールについてU-Pb絶対年代測定が行われ,絶対年代でもCAIとコンドリュールの形成年代差が約250万年であることが明らかになった[15]。これにより 26 Alが初期太陽系で均質に存在し,年代測定法として有用であることが確認された[6]。このことから,以下は初期太陽系において 26 Alが均質に分布していたという仮定のもとに年代の結果を示す。

測定を行った16個のコンドリュールに含まれる斜長石のほとんどが低いAl/Mg比(20-40 [16])であったにも関わらず、すべてのコンドリュールにおいて ^{26}Al



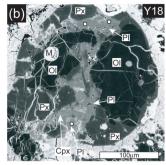


図1: タイプIコンドリュール (Y18) の AI-Mgアイソクロン図(a)と反射電 子像(b). (a)●は斜長石、■はかん らん石. (b) OI: かんらん石、Px: 輝石、Cpx: Caに富んだ輝石、PI: 斜長石、M:金属鉄、○はSIMSに よる実際の分析点を示す.

による²⁶Mgの過剰を検出した(図1). CAIの²⁶Al/²⁷Al 初生値(5×10⁵ [17]) と比較することでコンドリュー ルのCAIに対する相対形成年代が得られる [6, 14]. 結 果として、始原的炭素質コンドライトYamato-81020 のタイプIコンドリュールはCAI形成後約130-240万年, タイプIIコンドリュールはCAI形成後約200万年で形 成したことが明らかになった。炭素質コンドライトの タイプIコンドリュールについて、形成年代を系統的 に得たのは本研究が初めてである。図2に、すでに得 られている普通コンドライト(タイプI・タイプIIコ ンドリュール) および炭素質コンドライトのタイプII コンドリュールと比較した本研究の年代結果を示す. これにより、普通コンドライトと炭素質コンドライト の主要コンドリュールは原始太陽系星雲において同時 期(CAI形成後約100-250万年)に形成したことが明 らかになった。加えて、炭素質コンドライトのタイプ IIコンドリュールはタイプIに比べ、若い年代を示す 傾向があることがわかった.

一方、誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS)を用いたコンドリュール全岩化学組成の²⁶Al年代測定が最近行われ、炭素質コンドライトのコンドリュール形成はCAI形成と同時期に始まり、少なくとも約100-200万年続いたと報告されている[18]. しかしながら、この結果はコンドリュール中に融け残っているCAI等の前駆物質の情報を含んでいる可能性があり、その場合、Al-Mgアイソクロンは²⁶Mg過剰が多い物質(CAI等)と²⁶Mg過剰が乏しい物質(かんらん石等)の混

合線を示すことになり、年代情報としての意味をなさ ない、また、全岩化学組成のみから年代を求める際に は、コンドリュール形成時のMg初生同位体比を仮定 する必要があり、求めた年代はモデル年代となるため 正しい年代情報を示すとは限らない。さらに、全岩化 学組成が現在のコンドリュール形成時に決定したので はなく、それ以前のコンドリュール前駆物質形成時に 決定した可能性もあり、得られた年代の意味が不明確 である. それに対し、本研究では、コンドリュールの メソスタシス部を構成する斜長石を測定し、コンドリ ュールの最終固化年代を求めている。 本研究の結果か らは、コンドリュールがいつ形成し始めたのかについ ての情報は得られず、コンドリュールがCAIと同時期 に形成した可能性を否定することはできないが、少な くともCAI形成後約100-250万年という同時間幅で両 コンドライトのコンドリュールが存在したことを示し ている. ゆえに、前述した両コンドライト中コンドリ ュールの様々な相違が形成年代の違いによるのではな く, 原始太陽系星雲内における空間的位置の違いによ るコンドリュール形成環境の相違に起因することが強 く示唆される。

5. コンドリュール形成進化

前述のように、炭素質コンドライトにはタイプIコンドリュールが卓越しているのに対し、普通コンドライトではタイプIIコンドリュールが相対的に多く含ま

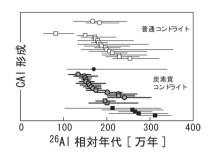


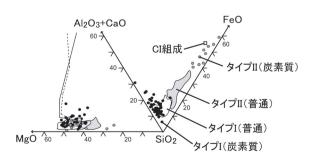
図2: 最も始原的なコンドライトにおけるコンドリュールの²⁶AI相対形成年代. 普通コンドライトの年代を白色[7-11], 炭素質コンドライトの年代データを灰色(本研究) および黒色[10, 12]で示す. ○はタイプI, □はタイプIIコンドリュール.

れている。これらのコンドリュールが同じ年代幅を示すことは、初期太陽系の空間的位置により、酸化・還元状態や温度・圧力などが異なるコンドリュール形成イベントが同時期に生じたことをも意味する。

5.1 コンドリュール全岩化学組成

両コンドライト形成領域におけるコンドリュール形成進化を調べるために、コンドリュールの全岩化学組成の比較を行った。コンドリュールの全岩化学組成は、各コンドリュールにつき約500点の定量分析(電子顕微鏡による)を行い、その平均値を求めることで得た。

図3に、普通および炭素質コンドライトのFe-Mgコンドリュール全岩化学組成をプロットした三角図を示す.炭素質コンドライトのタイプIコンドリュールは、普通コンドライトのタイプIに比べ、相対的にCaO、 Al_2O_3 に富み、FeOに乏しい組成を持つ.また、炭素質コンドライトのタイプIIコンドリュールは普通コン



ドライトのタイプIIに比べFeO含有量が明らかに多い. 図3に示すように、普通コンドライトのコンドリュー ルに関してはCI組成の蒸発凝縮実験結果の近くに平 行して分布している. しかしながら, 炭素質コンドラ イトのタイプ[コンドリュール全岩化学組成は蒸発凝 縮実験結果とは無関係の分布を示し、CI組成の単純な 蒸発・凝縮では説明できない。 コンドリュールのタイ プIとタイプIIの関係については、(a) タイプIIを蒸発 あるいは環元することでタイプIが形成[19, 20], (b) タ イプIとタイプIIでは前駆物質が異なる [19], などの 説が挙げられる. 炭素質コンドライトのコンドリュー ル全岩化学組成を考慮すると、タイプIIの蒸発あるい は還元だけではタイプIの全岩化学組成を説明するこ とはできず、(a)の可能性は低いといえる。これに対し、 炭素質コンドライトは普通コンドライトに比べ相対的 に多くのCAIを含んでいること、炭素質コンドライト に卓越するタイプIコンドリュールにCa. Alが相対的 に多く含まれることを考慮すると、 炭素質コンドライ ト形成領域ではCAIに取り込まれずに残った細粒の難 揮発性物質が普通コンドライト形成領域に比べ多く存 在し、それらがタイプIコンドリュールの前駆物質と して取り込まれたと考えると説明可能である.一方, 炭素質コンドライトのタイプ∐コンドリュールはタイ プIに比べ、相対的にCa、Alに乏しくFeに富む組成を 持つ. 炭素質コンドライトのタイプIIコンドリュール がタイプIに比べて若い形成年代を示す傾向があるこ とを考慮すると、炭素質コンドライト形成領域におい て、コンドリュール前駆物質の組成が時間と共に変化 した可能性が考えられる.

図3: 非平衡コンドライト中のコンドリュール全岩 化学組成. ●が炭素質コンドライトタイプI(本 研究), ○(灰色)が炭素質コンドライトタイプI(白 (本研究). 普通コンドライトのタイプI(白 領域) およびタイプII(灰色領域)の全岩化学 組成領域を合わせて示す[4,21]. □はCI組成. 実線は実験によるCI組成の凝縮経路[25]. 点線 は実験によるCI組成の蒸発経路(2000K)[26].

5.2 コンドリュール形成年代と全岩化学組成の関係

本研究で得られたコンドリュール形成年代と全岩化 学組成の結果を用いて、普通コンドライト・炭素質コ ンドライトのコンドリュールの26Al相対年代と全岩化 学組成(Si/Mg比)の関係を図4に示す。炭素質コンド ライトのコンドリュールでは、主要元素Mg, Si, Fe, Al, Caのすべてに対して、年代と全岩化学組成の関 係は特に見られないことが明らかになった(図4(a)). さらに、揮発性元素 (Na等) も年代との関係は見ら れなかった。一方、普通コンドライトのコンドリュー ルの全岩化学組成と26Al相対年代の関係は[21]によっ て報告されている. それによると若い年代を示すコン ドリュールほどSiO。や揮発性元素に富む傾向がみられ ることが指摘されている(図4(b))。この傾向を説明す るために、[21]ではコンドリュール形成イベントによ る加熱を受けたコンドリュールが、開放系で蒸発・再 凝縮を繰り返すことで、時間とともに全岩化学組成変 化が生じたのではないかと考察している. しかしなが ら、炭素質コンドライトのコンドリュールでは年代と

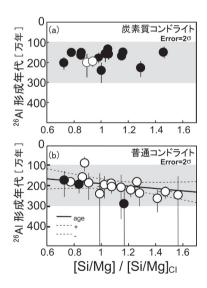


図4: コンドリュールの全岩化学組成(Si/Mg比)と²⁸Al相 対年代の関係.全岩化学組成はCl組成[27]で規格化. ●はタイプI,○はタイプIIコンドリュール.(a)炭素 質コンドライト(全岩化学組成・年代データとも本 研究),(b)普通コンドライト[21].実線は最小自乗回 帰線、点線は回帰線の95%信頼水準を示す.

全岩化学組成の関係は見られず、同様のシナリオで説明することはできない。この違いの原因として、(a) 普通コンドライトに比べ炭素質コンドライト形成領域ではコンドリュールの蒸発・再凝縮の効果が小さかった、(b) 普通コンドライトにおける年代と全岩化学組成の関係は弱く、誤差範囲を考慮すると実際には炭素質コンドライトと同様、年代と組成の関係はみられない、という可能性が挙げられる。

5.3 原始太陽系星雲における空間的位置とコンドリュール形成

ここで、両コンドライトの形成領域を考えてみる. スペクトル観測から、隕石の母天体は小惑星であると 考えられている。普通コンドライトの母天体と考えら れているS型小惑星は2AU付近に最も多く存在し、炭 素質コンドライトの母天体と考えられているC型小惑 星は3AU付近に最も多く存在することが知られてい る[22]. 原始太陽系星雲において2AUより外側の領域 で有機物が存在したと考えると[23]、炭素質コンドラ イト形成領域には普通コンドライト形成領域に比べ 多くの有機物が含まれる. これは、普通コンドライト に比べ、炭素質コンドライトに炭素が多く含まれて いる事実と一致する. さらに、普通コンドライトのタ イプ【コンドリュール組成に少量のグラファイトを加 えて瞬間加熱をした実験によると、炭素量が1-5wt% 増加するとかんらん石のFe/(Fe+Mg)比が6mol%から 0.3mol%まで減少するという結果が得られ、炭素がコ ンドリュールの還元剤として有効であることが示唆さ れている[24]. ゆえに、炭素質コンドライト形成領域 において、コンドリュール前駆物質として炭素が取り 込まれ、炭素による還元を受けたために、タイプIコ ンドリュールがより多く形成されたと考えられる.

5.4 コンドリュール形成進化の定性的モデル

最後に、上記の結果を総合的に説明するためのコンドリュール形成進化の定性的モデルを提案する.

原始太陽系星雲内において,太陽により近い空間

に普通コンドライト形成領域、それより外側に炭素 質コンドライト形成領域が存在した。CAI形成後、約 100-250万年(あるいはそれ以前から)でコンドリュ ール形成イベント(雷,衝撃波など)が発生、このとき、 炭素質コンドライト形成領域では、CAI等に取り込ま れずに残っていた細粒の難揮発性物質を含んだコンド リュール前駆物質が、コンドリュール形成イベントに よって加熱されると同時に、周囲に存在する炭素によ る環元を受けた結果、タイプ[コンドリュールが卓越 して形成される。 さらに、炭素質コンドライト形成領 域において年代とともにコンドリュール前駆物質の組 成変化,あるいはコンドリュール形成時の酸化還元状態, 温度圧力などが変化したため、タイプIよりも若い年 代を示すタイプIIコンドリュールが形成される. 一方, 普通コンドライト形成領域では、炭素質コンドライト に比べ相対的にCa, Alが乏しく, Feに富む前駆物質 がコンドリュール形成イベントによる加熱をうけ、コ ンドリュールが形成される. このとき, 炭素等による 還元の効果は炭素質コンドライトに比べ相対的に少な い、その後、それぞれのコンドライト形成領域内でコ ンドリュール等の固体物質が集積した.

普通・炭素質コンドライトとも年代とコンドリュール全岩化学組成のデータは十数個しか得られておらず、系統的な議論をするには情報が不十分であり、今後の精査を期待するところである。さらに、コンドリュール以外の初期太陽系固体物質とコンドリュールの関係、コンドリュール形成と星雲中に存在する H_2O との関係、コンドリュール形成イベントの物理的発生機構、酸素同位体組成分布などまだまだ考慮しなくてはならない問題が山積みである。初期太陽系形成時の情報を唯一握っている声なき者たちからのメッセージを少しでも多く読み取り、太陽系形成進化の解明という大きな謎に挑むことが惑星科学に携わる一員としての使命であると感じている.

謝辞

著者の共同研究者である木多紀子博士 (ウィスコン

シン大および産業技術総合研究所),永原裕子博士(東京大学理学系研究科),および森下祐一博士(産業技術総合研究所)に深く感謝いたします。年代測定については下田玄博士(産業技術総合研究所)に協力していただきました。また、橘省吾博士(東京大学理学系研究科)には日頃より議論を通し有益なコメントをいただきました。最後に、査読者である中村智樹博士には的確なコメントをいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- Hutchison R., 2004, in "Meteorites", Cambridge Univ. Press. 149
- [2] Grossman J. N. et al., 1988, in "Meteorites and the Early Solar System", Univ. Arizona Press, 619
- [3] Huang S. et al., 1996, Icarus, 122, 316
- [4] Tomomura S. et al., 2004, LPSXXXV abst. #1555
- [5] Clayton R. N., 1993, Ann. Rev. Earth. Planet. Sci., 21, 115
- [6] 木多, 2003, 遊星人, 12, 151
- [7] Kita N. T. et al. 2000, GCA, 64, 3913
- [8] Hutcheon I. D. and Huchison R., 1989, Nature, 337, 238
- [9] McKeegan K. D. et al., 2000, LPSXXXI, abst. #2009
- [10] Srinivasan G. et al., 2000, M&PS, 35, 1333
- [11] Mostefaoui S. et al., 2002, M&PS, 37, 421
- [12] Kunihiro T. et al., 2004, GCA, 68, 2947
- [13] Kojima T. et al., 1995, Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorit., 8, 79
- [14] 木多, 1999, 遊星人, 8, 256
- [15] Amerin Y. et al., 2002, Science, 297, 1678
- [16] Kurahashi E. et al., 2004, LPSXXXV abst. #1476

- [17] MacPherson G. J. et al. 1995, Meteoritics, 30, 365
- [18] Bizzarro M. et al. 2004, Nature, 431, 275
- [19] Jones R. H., 1990, GCA, 58, 5325
- [20] Sears D. W. G. et al., 1996, in "Chondrules and the Protoplanetary Disk", Cambridge Univ. Press, 221
- [21] Tachibana S. et al. 2003, M&PS, 38, 939
- [22] Bell J. F. et al., 1989, in "Asteroids II", Univ. Arizona Press, 921
- [23] 香内ほか, 2001, 遊星人, 10, 11
- [24] Connolly H. C. et al., 1994, Nature, 371, 137
- [25] Yoneda S. and Grossman L., 1995, GCA, 59, 3413
- [26] Wang et al., 2001, GCA, 65, 479
- [27] Anders E. and Grevesse N., 1989, GCA, 53, 197