

氏 名 富 山 隆 将

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第759号

学位授与の日付 平成16年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 極域科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Lコンドライト母天体の熱変成過程に関する

物質科学的研究

論 文 審 査 委 員	主 査 教授	森脇 喜一
	教授	白石 和行
	教授	本吉 洋一
	助教授	三澤 啓司
	教授	木村 眞 (茨城大学)
	教授	宮本 正道 (東京大学)

論文内容の要旨

本論では、L コンドライトの熱変成過程を解明するために(1)角礫岩コンドライト ALH77252 の岩石、鉱物学的研究、(2)地質学的温度計、冷却速度計による L コンドライト熱史の研究、(3) ^{53}Mn - ^{53}Cr 系を用いた L コンドライトの年代学的研究を行い、L コンドライト母天体の構造と形成過程を推定した。

ALH77252 は L3-L6 の岩石学的タイプの岩片を含む角礫岩コンドライトである。角礫化した後は熱変成をほとんど受けていない。ALH77252 では、熱変成を受けて平衡化した岩片と強い熱変成を逃れた非平衡な岩片とでは、低 Ca 輝石の副成分元素組成の Ti/Al 比、Ti/Cr 比が異なっている。輝石中での副成分元素の拡散は遅い過程であるため、平衡化した岩片に含まれる低 Ca 輝石の化学組成は、高温で長期間の熱変成によって変化したか、熱変成を受ける前の化学組成を保持しているものと考えられる。

強い衝撃を受けていない 13 個の L コンドライト(A9043 L3.0, ALH78041 L3.4, ALH78119 L3.5, Y82055 L3.6, Y790770 L3.7, Y86706 L3.8, Y8014 L3.9, A87029 L4, Y790036 L4, Y790117 L5, Y86753 L5, Y74452 L6, Y82088 L6)、および強い衝撃を受けた 3 個の L コンドライト(Y790787 L3, Y793424 L6, Y793597 L6)に、カンラン石-スピネル温度計、輝石温度計、Fe-Ni 合金を用いた冷却速度計を適用し、個々の隕石の熱史を明らかにした。カンラン石-スピネル温度計を適用した結果からは、岩石学的サブタイプの低い L3 コンドライトを含む全ての試料中で、併存するカンラン石-スピネルが数 100°C の熱過程によって化学平衡に達していること、岩石学的タイプとカンラン石-スピネル温度計の平衡温度に相関が無いこと、カンラン石-スピネル温度計が強い衝撃による加熱、急冷に大きく影響されることがわかった。輝石温度計を適用した結果からは、岩石学的タイプ 5 以上の L コンドライト中で低 Ca 輝石と普通輝石が ~900 °C で化学平衡に達していることと、輝石温度計で見積られる平衡温度が強い衝撃でわずかに上昇することが確認された。Fe-Ni 合金を用いた冷却速度計の結果では、岩石学的タイプと Fe-Ni 合金の冷却速度に相関は見られなかった。カンラン石-スピネル温度計で与えられる平衡温度を冷却時の閉鎖温度と解釈すると、カンラン石-スピネル温度計の結果と Fe-Ni 合金を用いた冷却速度計の結果は調和的である。カンラン石-スピネル温度計と Fe-Ni 合金を用いた冷却速度計により、急速に冷却された熱史を持つことが見出された Y86753 は、S2 程度の弱い衝撃しか受けていない。本論では、Y86753 が経験した急冷過程は、衝撃による加熱後に起こったものではなく、熱変成中に母天体深部から掘り起こされたことによって起こったものと結論した。

^{53}Mn - ^{53}Cr 系による L コンドライトの年代学的研究を行い、二次イオン質量分析計を用いたカンラン石の ^{53}Mn - ^{53}Cr 系の同位体分析法を確立した。この手法を Y86753 および角礫岩コンドライト Bjurböle に適用した結果、Y86753 では有意な ^{53}Cr 過剰が得られず、Bjurböle では、測定したカンラン石の一部にわずかな ^{53}Cr 過剰が得られた。得られた ^{53}Mn - ^{53}Cr 系の同位体組成から、それぞれのコンドライトの ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代の上限を推定すると、Y86753 の ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代は $\leq 4563\text{Ma}$ 、Bjurböle の ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代は $\leq 4567\text{Ma}$ であった。

個々の L コンドライトの熱史に見られる多様性は、L コンドライトの母天体が複雑な熱構造を持っていたことを示唆する。L コンドライトの母天体の進化はオニオンシェルモデルのように静的な過程ではなく、熱変成の途中にも母天体の破壊を伴う動的な過程であったと考えられる。しかし、特異な熱履歴を経たと思われる少数の L コンドライトを除けば、地質学的温度計や冷却速度計で見積られる L コンドライトの変成温度や冷却速度は、岩石学的タイプによらず類似していることが多い。岩石学的タイプと変成温度、冷却速度の相関

関係が得られないことは、地質学的温度計や冷却速度計の測定誤差の大きさに起因すると考えられるため、必ずしもオニオンシェルモデルに反するとは言えない。母天体の破壊の規模が、母天体全体の熱構造を壊すほどではなく、ある程度限定された領域で掘り起こしや物質の混合を起こす程度のものであったものとしても、地質学的温度計や冷却速度計の結果を説明することが出来る。

強い衝撃を受けて加熱、急冷された L コンドライトは、母天体表層で衝突を受けたものである。岩石学的タイプ 3 だけでなく、岩石学的タイプ 6 の L コンドライトにもこのようなものが見られることは、母天体表層に岩石学的タイプの異なる領域が混在していたことを示唆している。ALH77252 のように、岩石学的タイプの異なる岩片からなる角礫岩コンドライトは、複雑な構造を持った母天体の表層で、繰り返し衝突を受けることによって形成されたものと考えられる。これらのことは、母天体深部から掘り起こされた岩石が、その後も母天体表層において衝突による衝撃変成や角礫化の影響を受けたことを示している。

熱変成中のカンラン石は Cr に関して開放系であるため、カンラン石の ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代は、そのカンラン石を含むコンドライトや礫が、熱変成中に掘り起こしを受けて冷却した年代や、母天体全体で熱変成が終わることによって冷却した年代を表している。Y86753 のカンラン石の ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代は、Y86753 が母天体深部から掘り起こされた年代が 4563Ma 以後であり、L コンドライトの母天体では、Y86753 の掘り起こしがあった年代以後まで熱変成が続いていたことを示す。また、Bjurböle は、一部に ^{53}Cr 過剰を示すカンラン石が見られるため、Y86753 より早い年代に掘り起こされた礫を含んでいるものと考えられる。

論文審査結果の要旨

惑星の初期進化過程の記録を残す未分化隕石（コンドライト）は、H コンドライトと L コンドライトに大別され、それぞれ熱変成の程度に応じた岩石学タイプ 3, 4, 5, 6 という指標で分類される。H コンドライトの母天体は、熱変成が中心部ほど高く表層ほど低いオニオンシェル構造をなすとされている。しかし、L コンドライトについては、その特徴を説明できる母天体構造は規定できていなかった。

富山君は、母天体の熱変成過程において重要な指標となる到達温度、冷却速度、変成年代に着目し、L コンドライトが経た熱履歴の解明を試み、L コンドライト母天体の内部構造と進化過程に制約を与えることに成功した。

まず、熱変成度や衝撃変成度の異なる 16 個の L コンドライトに輝石温度計を適用して熱変成の到達温度を求め、岩石学タイプ 5, 6 コンドライト中の輝石は $\sim 900^{\circ}\text{C}$ で化学平衡に達していること、その中で衝撃変成を受けたコンドライト中の輝石は衝撃変成を受けていないコンドライト中の輝石より高い平衡温度($\sim 950^{\circ}\text{C}$)を示すこと、岩石学タイプ 4 コンドライト中の輝石はカルシウム、マグネシウム、鉄に関して化学平衡に達していないこと、を明らかにした。

続いて岩石学タイプ 4, 5, 6 のコンドライトについて、鉄ニッケル合金の化学組成をもとに 500°C 付近での冷却速度を見積もり、 $0.1\text{--}100^{\circ}\text{C}/100$ 万年で冷却したこと、岩石学タイプが異なっても冷却速度に違いはないが、タイプ 4 の Yamato 86753 は、他のコンドライトと比較して 2 桁以上速い冷却を経験したことを明らかにした。

さらに、カンラン石 - スピネル温度計を適用し、冷却速度に対応する閉鎖温度を見積もり、熱変成時の到達温度は少なくとも 600°C であったと結論した。また、ここでも Yamato 86753 が他のコンドライトよりも 2-3 桁速い冷却速度を示すことを明らかにした。

次に、Yamato 86753 コンドライトの母天体でおきた熱変成の継続時間を規定するために、半減期 370 万年の消滅核種 ^{53}Mn に着目し、主要構成鉱物であるカンラン石中で生じた ^{53}Mn から ^{53}Cr への壊変を時計として用いることを試みた。二次イオン質量分析計 (SHRIMP II) を用いて新たに同位体分析法を開発し、カンラン石のクロム同位体分析において 2σ 誤差が $\leq 0.1\%$ という高精度の分析法を確立した。Yamato 86753 コンドライトの微小領域マンガニウム-クロム同位体分析を行った結果、マンガニウム/クロム比と関連した ^{53}Cr の過剰が認められないことから、速く冷却した Yamato 86753 においても熱変成が 45 億 6300 万年よりも若い時代まで（つまり太陽系形成後 500 万年以上）継続したと結論した。

以上により、「L コンドライトの母天体についてもオニオンシェル構造を仮定することに矛盾はないが、母天体の熱変成は太陽系形成後 500 万年以上続き、熱変成継続中に微惑星の衝突があつて、母天体の表層部で衝撃変成や角礫岩化が起きた」という動的モデルを構築した。

本論文において、L コンドライト母天体の初期進化過程に新たな知見を与えたことは評価に値する。また、本研究において確立されたマンガニウム-クロム同位体分析法は、今後別のタイプのコンドライトや分化した隕石に応用され、成果が期待できる手法である。口頭試問の結果も、富山君は惑星物質科学に関する広範な知識を有しており、理解力も優れていると判定でき、提出論文共々、博士の学位を授与するにふさわしいと判定された。