

(別紙様式-2)

太陽系年代学の進展と放射線環境変動研究との融合
Advances in Solar System Chronology and Integration with Studies of the Radiation
Environmental Changes

(代表者) 渡邊 誠一郎、東海国立大学機構名古屋大学・大学院環境学研究所

【研究メンバー】 渡邊の他、加藤 丈典 (宇宙地球環境研究所) , 城野信一 (環境学研究所) , 橋口未奈子 (環境学研究所)

【研究目的】 太陽系年代学と太陽系放射線環境の変動研究を融合させ、太陽系進化を理解することを大目的とする。はやぶさ2が持ち帰った小惑星試料の分析から、太陽系年代学には、いくつか検討すべき課題があることがわかった。太陽系の初期同位体比の空間分布、母天体の水質変成年代の相互矛盾、事後の年代擾乱の可能性、銀河宇宙線生成核種の深度依存性などである。これらの課題は同位体計測の高精度化によって顕在化してきた側面があり、太陽系進化の各種年代をより精密に決定していくためにはその解明が求められる。よって、これらの問題を解決するための新たな年代測定法、年代較正法、年代をリセットする過程などを検討をすることを今年度の目的とした。さらに、宇宙線生成核種を使った宇宙線照射年代の精確な理解についても検討することで、太陽系における放射線環境の変動などについても検討することを来年度の目標とし、その準備も今年度に進めた。

【研究方法】 今年度は11月21日、12月27日、3月8日に3回の研究会を開催し、既存の太陽系の年代測定法を整理・比較し、その問題点や誤差を再検討するとともに新たな年代測定法の適用の可能性や宇宙試料での放射線環境変動の検出を議論した。一方で、探査帰還試料や隕石などの各種年代データの吟味し、初生値の時空間的変動の可能性や、事後プロセスによる年代の不完全なリセットの兆候 (購入ソフトウェアを利用) 等を調べ、消滅核種の娘核種による相対年代と鉛-鉛法による精密絶対年代との較正法について再検討することは来年度に継続することとした。また、初期同位体比を仮定できない元素や単核種元素について、地質学で用いられてきた化学年代測定法の応用を検討した。日本惑星科学会やJAXA宇宙科学研究所 (ISAS) での会合、Lunar and Planetary Science Conferenceなどの場を通じて、情報収集や意見聴取を行った。さらにISAS次期戦略の中型探査候補「次世代小天体サンプルリターン」の検討にも参画し、年代学の側面から彗星物質の試料の科学的価値や採取法について議論した。

【研究結果】 「はやぶさ2」が持ち帰った試料から得られた小惑星リュウグウの同位体情報と年代学、宇宙線照射環境について整理した。リュウグウ粒子中の炭酸塩鉱物から得られた ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代は、母天体中の水質変成が進行した時期の年代を示すはずだが、複数得られている二次イオン質量分析法 (SIMS) で得られた年代には相互に誤差範囲を超える差異があり、炭酸塩の標準試料の違いによる可能性が指摘されている (Yokoyama et al. 2022; E. Nakamura et al. 2022; McCain et al. 2023)。最近、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) による ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代が測定され、太陽系最初期のCaとAlに富む包有物 (CAI) の形成後3.8-7.0 Myrとの値が得られている (Yokoyama et al. 2023)。SIMSによる炭素質コンドライトの水質変成年代は多く報告されているので標準物質の選択の問題は更なる検討を要する。

始原的隕石の同位体比が、従来の非炭素質隕石 (NC) と炭素質隕石 (CC) の二分性に加えて、CIコンドライトを第三成分とする三分性を示すことが、CIコンドライトに酷似するリュウグウ試料の同位体分析によって確立された (例えば、Hopp et al. 2022)。また、炭酸塩を豊富に含む等からリュウグウ母天体は CO_2 スノーラインより外側で形成された可能性が高い (T. Nakamura et al. 2022)。リュウグウや隕石の同位体情報を整合的に説明するため、同位体比の異なる複数の《成分》を組み込んだ惑星形成統一シミュレーションの重要性が認識され、渡邊は科研費 (基盤B) の申請を行った (採択の内示があった)。次頁の図には太陽系形成の時空間図にこの惑星形成統一シミュレーションが扱う範囲 (天体とプロセス) を楕円で囲んでいる。特にダスト落下¹の時間スケールとCAIとコンドリユール²の年代差の不整

¹ 原始惑星系円盤のガスとダストは公転速度差があるため、ガス抵抗を受け角運動量を失ったダストが螺旋を描き太陽方向へ落下する。直径 1 mm の緻密粉体粒子が 1 au 落下する時間は~1 Myr である。

² 始原隕石中の熔融固化した球粒。 ^{26}Al が β 崩壊した ^{26}Mg の過剰量の比較からCAIより数Myr遅れての形成が示唆され、その間、>1 mm 大のCAIがいかに太陽に落ちずに円盤に保持されていたかが未解決。

合問題やダスト落下に打ち勝って微惑星が形成できる範囲を明らかにすることなどを目指したい。

上記の不整合問題解決の1つのアイディアは、惑星形成時の微惑星衝突の副産物としてコンドリュールが生成されたとするモデルである。この場合、まずCAIが太陽系最初期にできて、第一世代の微惑星に保持され、その後の惑星成長期にコンドリュールが生成され、それが第二世代の微惑星にCAIとともに取り込まれたとすれば、CAIとコンドリュールの生成年代差を説明できる可能性がある。

隕石有機物の直接的な年代測定は困難であり、現状では周囲の変質鉱物（含水珪酸塩や炭酸塩）からの推定するなどの間接的な方法しかない。今すぐでなくとも将来的に実現の可能性のある隕石有機物の年代測定法を検討していく。また、隕石の有機物構成元素（H, C, N, O, Sなど）の同位体比から読み出せる先太陽系時代および太陽系形成時の情報を整理していく。

隕石の鉱物粒子に対してX線マイクロアナライザ（EPMA）を用いてU, Th, Pbの量を正確に測定することでその年代を決めるCHIME法が適用できないか検討を進める。地球物質のように $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ の初生比を仮定できないため、宇宙物質ではTh ≫ Uである鉱物を見つける必要があるなど制約が厳しい。

放射線環境変動研究においては、自転進化に伴う太陽活動の超長期変動（1 Gyrスケール）によって銀河宇宙線フラックス変化を宇宙試料から検出できないか、軌道傾斜角の違う太陽系小天体の表層物質から太陽風変動の3次元構造を制約できないかなどの可能性を探究する。

【2024年度に向けて】来年度は、現メンバーに加えて、今年度の研究会で講演いただいた環境学研究科の日高洋教授と齊藤天晴博士（来年度PD）および宇宙地球環境研究所の三好由純教授と岩井一正准教授に加わっていただき、太陽系年代学と放射線環境変動研究の融合をさらに進めていく予定である。

【引用文献】（渡邊誠一郎は以下のすべての論文の共著者である）

- Hopp, T. et al. 2022, *Science Adv.* **8**, add8141
- McCain, K. A., et al. 2023, *Nature Astron.* **7**, 309–317
- Nakamura, E., et al. 2022, *Proc. Japan Acad. Ser. B* **98**, 227–282
- Nakamura, T., et al. 2022, *Science* **379**, abn8671
- Yokoyama, T., et al. 2022, *Science* **379**, abn7850
- Yokoyama, T., et al. 2023, *Science Adv.* **9**, adi7048

【成果発表】

渡邊誠一郎、はやぶさ2から見てきた太陽系形成過程の制約、日本惑星科学会秋季講演会、広島市、2023.10.11

