

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：平成22年度～平成24年度

課題番号：22540442

研究課題名（和文）日印リモート蛍光X線探査による月面元素組成の決定：「粗さ効果」補正の適用

研究課題名（英文）Lunar X-ray elemental mapping with roughness effect correction

研究代表者

岡田 達明 (OKADA TATSUAKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：30321566

研究成果の概要（和文）：月面の主要元素組成の分布図作成を日本・インドの月探査蛍光X線分光チームが協力して進めた。太陽活動極小期で月蛍光X線強度が低く、機器不具合も重なったため調査領域は月全球の20%であるが、アポロ月探査以来の主要元素分布(Mg/Al/Siの存在比)の調査領域を倍増させ、一部地域でCa、Ti、Feの存在度を決定した。複数の太陽角で観測できた地域がないため、粗さ効果の補正は将来の課題として残された。

研究成果の概要（英文）：Lunar major elements were mapped in cooperation of the X-ray Fluorescence Spectrometer teams from Japanese and Indian lunar orbiter missions. In spite of a dimmed solar activity which excites lunar X-rays much fainter than expected as well as troubles in instrumentation, mapped area of major elements (Mg-Al-Si ratios) has doubled from that by Apollo missions and heavier elements such as Ca, Ti and Fe were locally observed. Roughness effect correction could not be done because no regions were observed from multiple solar angles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：固体惑星探査

1. 研究開始当初の背景

(1) 1970年代初頭までに行われたアポロ計画以来の蛍光X線分光による月面元素組成探査が日本の「かぐや」とインドの「チャンドラヤーン1号」の2機の月周回探査機によって2007年から2009年にかけて実施された。(2) 蛍光X線定量分析に必須な前処理をリモートセンシングでは実施できない。そこで試料表面の粗さと観測角度条件による蛍光X線強度やエネルギー毎の強度比の依存性を定量的に調べる実験的研究を、研究代表者が10数年にわたって実施してきた。

2. 研究の目的

(1) 日本とインドの月周回衛星「かぐや」と「チャンドラヤーン1号」に搭載した月面リモート蛍光X線分光計XRSとC1XSによる観測データを解析し、史上初めて月面の広域な主要元素組成分布マップを作成する。(2) リモート蛍光X線観測データの定量的解釈には「粗さ効果」の補正が必要である。室内実験によって得られた補正式を両探査機の観測条件に合わせて適用することにより、月面元素組成マップの定量化、高信頼化をはかる。

3. 研究の方法

- (1) 日本の月周回衛星「かぐや」搭載 XRS と、インドの月周回衛星「チャンドラヤーン1号」搭載 C1XS という2台の蛍光X線分光計による観測データの解析を進め、元素分布図を作成する。
- (2) 室内実験によって得られた蛍光X線「粗さ効果」の定量化と補正式の定式化を進める。
- (3) 観測で得た元素分布図に対し、「粗さ効果」の補正を行い、元素分布図を改定する。以上について、英国を中心とした C1XS 国際科学チーム（代表：Ian Crawford (UCL)）の会合に定期的に参加し、解析方法や科学研究のための議論を行う。
- (4) 得られた結果から月の地質活動、地殻変動など月の進化過程について議論する。
- (5) 今回の結果を基に、次期月探査における元素組成探査の目標設定や観測方法について検討する。

4. 研究成果

- (1) 月周回探査機からの月面蛍光X線分光観測の結果を用いて、月面の元素組成分布を調べた。
 - ① チョクレータ東側の高地地殻の分析結果
この高地地殻はアポロ16号着陸地点から比較的近く、ルナープロスペクタによるガンマ線観測とも比較できる地域である。観測結果から、Mg/Al の小さい高地地殻を示す。より詳細には Al 存在度が高く、Ca 存在度が低い。また高い Al/Si に対して、Mg/Si も既知の地球・月の岩石に比べて高い。該当する元素組成をもつ岩石は知られておらず、解析上に問題があり、補正が必要かもしれない。解析に用いた太陽X線モニタの低エネルギー域の精度が低いことにより、Mg や Al を高濃度に見積もった可能性が考えられる。

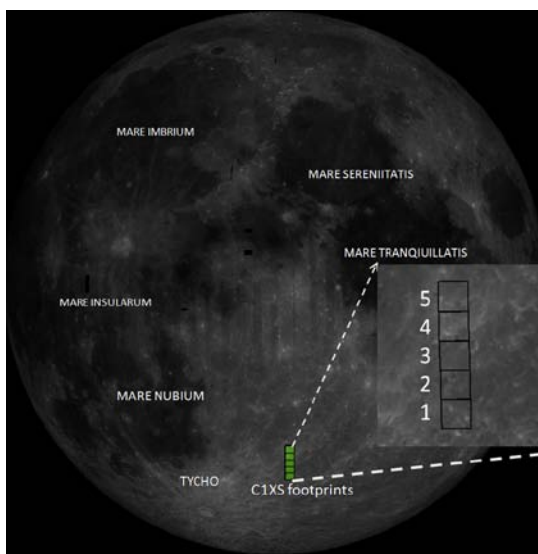


図1 チョクレータ近傍の解析領域

表1 元素組成の地域別比較 (wt%)

	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Mg#
#1	5	17	20	8	6	45
#2	6	17	19	8	6	50
#3	6	16	21	8	5	54
#4	6	15	20	9	6	50
#5	4	18	17	6	11	27
隕石	3.3	14.9	20.9	11.7	3.4	55
L20	5.8	12.0	21.1	10.5	5.8	56
A16	3.6	14.4	21.0	10.4	3.9	55
LP	5.4	10.8	20.6	11.6	4.7	56
		-14.4			-5.5	-59

隕石：月高地隕石の平均、L20:Lunar20号帰還試料の平均、A16：Apollo16号帰還試料の平均、LP：ルナープロスペクタのガンマ線観測結果

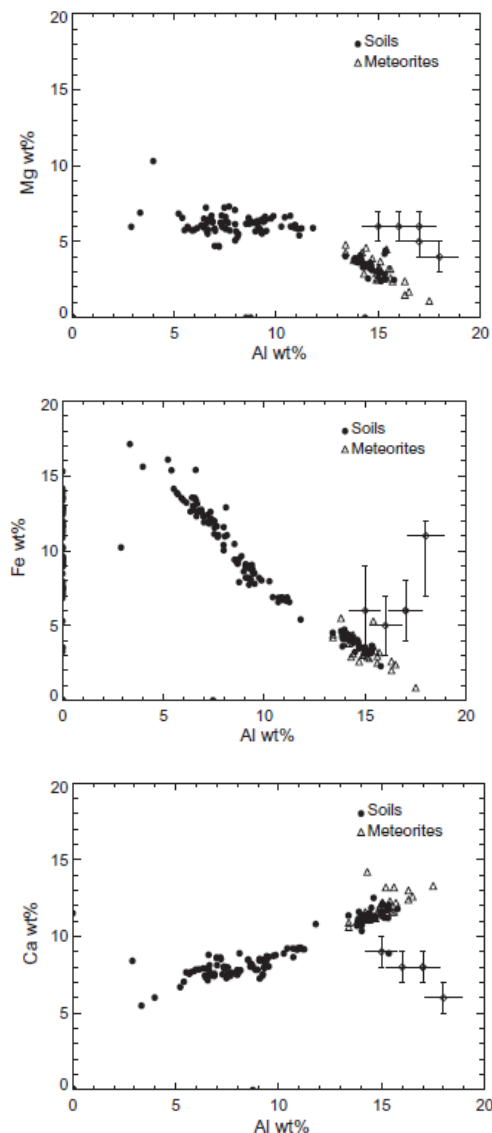


図2 Mg-Al 存在度プロット。月の石、隕石に比べて Al、Mg ともに高濃度を示す。Fe は高め、Ca が低めである。解析上の問題の可能性が残される。

これらの結果は初期成果研究発表として、Narendranath et al. (2011)で出版された。補正を含めて再解析を要する状態のままである。

②海地域、高地地域での元素分布

月周回機の軌道に沿って、晴の海とその周辺、曇りの海周辺、フラマウロ高原 (KREEP 地域)、などについて、蛍光X線分光観測のデータを解析した。月全域ではなく部分毎なのは、S/N が十分なのが太陽活動が活発な時期に限定されたためである。

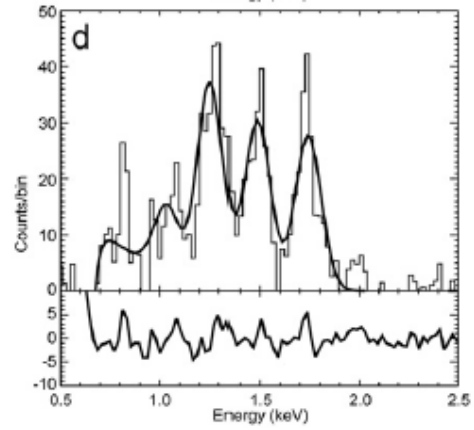
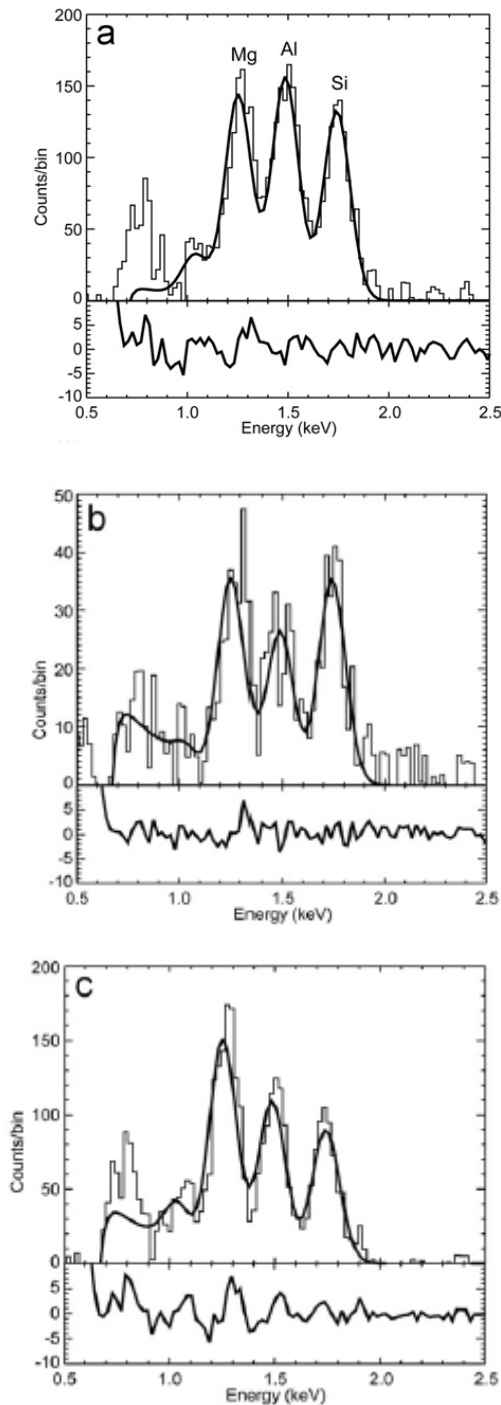


図3 各地域の Mg、Al、Si の X線輝線スペクトルと特徴。a:晴れの海周辺、b:晴れの海、c:曇りの海周辺、d:フラマウロ地域

基本的な岩石タイプは、この3元素のパターンで判別可能である。b)はMgとSiに比べてAlが弱いもので、苦鉄質岩石(玄武岩など海物質)に近いことが分かる。a)はAlが相対的に強く、高地地殻の物質が多めであることが分かる。c)とd)はその中間的組成であるが、グラフ全体の傾きは太陽X線のスペクトルに依存するのでこのグラフのみでの分類は困難である。月岩石等と一緒に解析結果をプロットしたグラフを示す。

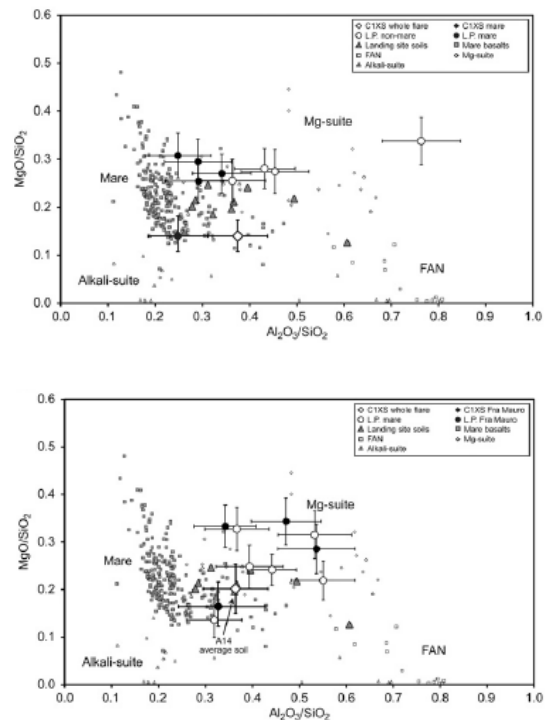


図4 海地域(上)とフラマウロ(下)の組成プロット。誤差範囲で矛盾しないがAl/Siが全体に高めの傾向を示している

これらの解析結果は、岩石タイプの違いをX線スペクトルから分類識別が可能なことを示す。定量的にはAlが多めに見える点が解決すべき課題である。前述のように太陽X線モニタの精度による影響、鉱物粒子効果の影響、表面粗さ効果などが考慮されていない点が挙げられる。

③月面元素分布図の作成

今回の結果から元素分布図の作成を進めている。現状は①②の課題に挙げたように、全体にAlが高めに出るなど解析精度の評価が未完の状態であり、公式な元素マップは作成されていない。但し観測し評価した地域はアポロ蛍光X線観測(図5の青線)に比べて倍増している。全球をカバーできていないのは、太陽活動度が低く蛍光X線の励起が低いことと、探査機や観測装置自体の不具合が発生したことによる。

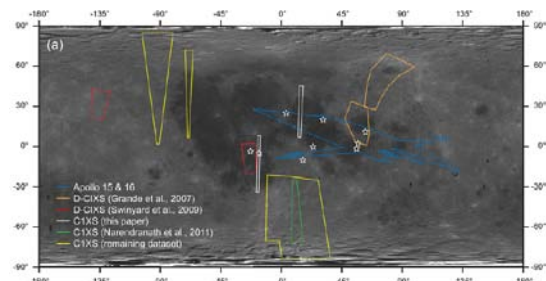


図5 月面蛍光X線観測のカバー領域。青線がアポロ時代、その他が以後の観測による。

(2)粗さ効果による蛍光X線強度の変化とエネルギー依存性

表面粗さによる蛍光X線強度の変化、特にエネルギー依存性が生じることについては、Okada (2010)、あるいは英国チームの学生による研究(Weider et al., PSS, 59, 1393-1407, (2011))でも、改めて実験によって確認され、精度向上を目指している。

図6に、異なる岩石であるエトナ産玄武岩、アイスランド産ホットスポット玄武岩、カンラン岩について、粒径(表面粗さ)による蛍光X線強度の比を示した。平面平板で規格化してある。いずれの場合も粒径が大きいくほど強度が低下、また同じ粒径だとエネルギーの大きい重い元素ほど影響が小さいことが改めて確認された。これは、以前より研究代表者らの研究結果と一致する結果であり、複数の研究設備で同様な結果が得られたことは重要である。但し、今回の結果は誤差幅が大きく、補正項を改良するには至らなかった。なお、本実験では粒子サイズのみ扱い、表面粗さの定式化までは関係付けられていないため、例えば月レゴリスとの圧密程度による比較をすることができない。これらは今後の課題である。

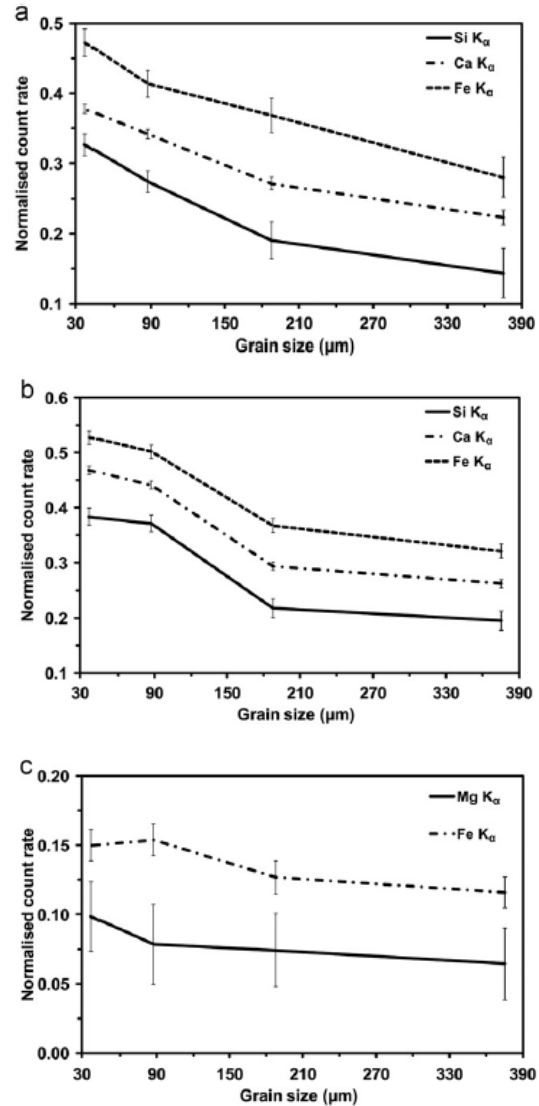


図6 粒径と蛍光X線強度の比。a)エトナ山産の玄武岩、b)アイスランド産ホットスポット起源の玄武岩、c)カンラン岩ガラス板をそれぞれ粉碎後にサンプルホルダに圧密したもの(ホルダを横向きに設置するため)

(3)元素分布図への粗さ効果の適用

本件については元素分布図の源泉情報における課題(特に太陽X線モニタによる補正)を詰める段階である。また、既存の粗さ効果補正方法は、異なる複数の太陽角条件での観測を必要とする。太陽活動が活発で十分なS/Nが得られる時期が極めて限定された関係で、複数の太陽角で観測できた地域はない。従って、今回は粗さ効果の補正については実施することができなかった。将来の月探査の結果と合わせて行う必要がある。

(4)月の地質活動、地殻変動

今回得られた結果から重要な点は、過去の

アポロ試料採取地域から十分遠方においても海地域が玄武岩質、高地地域が斜長岩質であるという性質は変わらないこと、海地域の中でも元素組成の変動をみることができた点である。また、アポロ 14 号地点のフラマウロ地域は、ガンマ線観測でみるとトリウムやカリウムなど放射性同位元素の濃度の高い地域である特殊な玄武岩 (KREEP 玄武岩) とされてきた。今回、初めて主要元素分析が行われた結果、アポロ 14 号帰還試料から示唆されていた KREEP 玄武岩質の岩石が広域にわたって分布することが確認された。

但し、全体的にみれば定性的な分布の議論に留まっており、定量的解釈を進めるには課題を克服してゆく必要がある。

(5) 次期月探査における元素組成探査の目標設定や観測方法

次期月探査において、着陸機はローバによる探査を実施する場合、表層元素組成を定量的に測定することが望まれる。その精度として、Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe の各主要元素を全て測定するには蛍光 X 線法が最も定量性がある。そこで、小型励起源と X 線検出器を備えた装置を搭載することで岩石分類が可能になる。リモート観測で得た地域の平均的元素組成に対し、個別の岩石が土壌に対して分類を行うことができる。

AXS と呼ぶ、小型 X 線管球とシリコン・ドリフト検出器を組み合わせた小型分析装置を検討している。火星探査で使用されてきた APXS と同様のものであるが、取扱上に問題のある α 線源を使わず、電気的に励起源を発生させる仕組みである。本研究は次期月探査機搭載を目指して開発を進めているが、測定対象となる岩石表面や土壌について、やはり粗さ効果の検討をする必要がある。岩石研磨面についても、研磨の程度による粗さ効果について研究をしており (Kusano et al., 2013、AOGS2013 発表予定)、影響の定量化について検討を進めている。

将来の小型月周回衛星による元素組成分布の決定についても検討している。現在日本で開発中のエプシロンロケットを用い、小型衛星バスを基本とした小型衛星の開発が検討されている。その中で、SLIM とよぶ月着陸実証機の検討が進められている。SLIM と同じ技術で月周回後に着陸せず、高度 100km から 200km で周回し続ける周回機とすることで、着陸に必要な推進剤や着陸センサ類を、観測センサ類に変えることにより、長期間の月周回衛星にすることが可能である。2 ヶ月以上の期間があれば、月面全球元素マップを作成することができる。月探査「かぐや」や「チャンドラヤーン 1 号」は太陽活動の極小期の実施であったが、今回は極大期の実現を目指す必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Tatsuaki Okada, Laboratory Experiments of Surface roughness effect in X-ray fluorescence at planetary regolith, ESA Proc. X-ray spectroscopy in planetary remote sensing science working group workshop, 査読有、2010、1401-1406
- ② Tatsuaki Okada, CCD-based X-ray Spectrometer onboard Hayabusa and Kaguya, ESA Proc. X-ray spectroscopy in planetary remote sensing science working group workshop, 査読有、2010、0301-0306
- ③ Kazunori Ogawa and Tatsuaki Okada, NT-field emitter based compact X-ray tube for space mission, Advances in Geosciences, 査読有、2010、15 巻、343-354
- ④ S. Narendranath 他 30 名 (50 音順 29 番目)、Lunar X-ray fluorescence observations by the Chandrayaan-1 X-ray Spectrometer (C1XS): Results from the nearside southern highlands, Icarus, 査読有、2011 年、214 巻、53-66、
doi:10.1016/j.icarus.2011.04.010
- ⑤ Shoshana Z. Weider 他 32 名 (50 音順 27 番目)、The Chandrayaan-1 X-ray Spectrometer: First Results, Planetary and Space Science, 査読有、60 巻、2012、217-228、
doi:10.1016/j.pss.2011.08.014
- ⑥ 岡田達明、蛍光 X 線分析法による太陽系天体のその場元素組成分析、「ぶんせき」、査読有、2012-10、2012、554-557

[学会発表] (計 7 件)

- ① Tatsuaki Okada, Importance of Solar X-ray Calibrator with Standard Sample for Lunar X-ray Spectrometry, 7th Asia-Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010 Annual Meeting, 2010年7月、Hyderabad, India
- ② Tatsuaki Okada, Calibration method using a solar X-ray monitor with a standard sample for planetary remote X-ray spectroscopy, 42nd Lunar and Planetary Science Conference 2011, March 2011, Houston, USA
- ③ Tatsuaki Okada, A Simple Analytical Method for Rock Classification by X-Ray Spectrometry, 8th Asia-Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting, August 2011, Taipei
- ④ Tatsuaki Okada, Reanalysis of Possible Degraded XRS and Remote X-Ray Spectroscopy in the Future Missions, 43rd Lunar and Planetary Science Conference,

March 2012, Houston, USA

- ⑤ Tatsuaki Okada, Lunar Small Orbiter for Geochemical Mapping, Joint meeting of AOGS-AGU(WPGM) 2012, August 2012, Singapore
- ⑥ T. Okada, Remote X-ray spectroscopy of the Moon in the future missions, COSPAR 2012 Scientific Assembly, 2012年7月、Mysor, India
- ⑦ 天野嘉春、他18名(7番目)、SELENE-2用月面探査車搭載に向けた化学分析装置AXSの開発、第13回宇宙科学シンポジウム、2013年1月、宇宙科学研究所(相模原市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://hidra.sci.isas.jaxa.jp/okada>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 達明 (OKADA TATSUAKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：30321566