



Title	Improvements in VIS-NIR Spectroscopy Techniques for Future Lunar Landing Exploration: Global Pyroclastic Mapping and Polar Water Ice Detection
Author(s)	荒木, 亮太郎
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/103105
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (荒 木 亮 太 郎)

論文題名

Improvements in VIS-NIR Spectroscopy Techniques for Future Lunar Landing Exploration: Global Pyroclastic Mapping and Polar Water Ice Detection
(将来の月着陸探査のための近赤外分光手法の改良：全球火砕物マッピングと月極域の水氷検出)

論文内容の要旨

アポロ計画によって得られた情報から、地球に惑星サイズの天体が衝突し月が形成されたという巨大衝突説が月形成理論の主流となっている。しかし今世紀に入ってから進展した研究は、この月形成モデルから予想される、揮発性成分が失われた月のバルク組成という描像と必ずしも整合しておらず、むしろ月マントルに地球マントルと同程度の H_2O が含まれることが示唆されてきた。たとえば、Saal et al. (2008) の分析ではアポロで持ち帰られた火山ガラス中の包有物に数 ppm の H_2O が検出されたことから、噴火時のソースマグマに ~ 1000 ppm の H_2O が含まれていたと推定し、その結果からマグマを生成する前の月マントルには地球と大差ない程度にボラタイルが含まれていたと予想した。アポロ試料のみならず、月面に100か所以上存在する火砕堆積物 (Lunar Pyroclastic Deposit; LPD) と一致するさまざまな領域に水の吸収スペクトルの証拠が見つかった (Milliken & Li, 2017)。このように、 H_2O をはじめとするボラタイルに富んだマグマの噴火によって、ボラタイルが月面に供給されたはずであり、月面に供給された物質を詳しく知ることが、地球-月系の成因を理解することに貢献する。過去に火山活動によって月面に供給された水の、少なくとも一部は何らかのプロセス（たとえば、日照により加熱された水分子の揮発と影面でcold trapされることを繰り返すなど）によって極域に移動して集積した可能性もある。過去四半世紀の間、複数の観測で多様な手法に基づいたリモートセンシング探査によって、月極域の永久影に数%程度以下の水氷が分布する証拠が複数提示されてきた。月の極域永久影に存在する可能性がある水氷の探査は、月の過去の火成活動を推測するもうひとつの手掛かりである。ただし月内部から火山活動で極域に移動した水の量の推定は容易ではない。火山活動に由来しない起源の水（例えば太陽風プロトンによる岩石の還元、彗星による外部からの供給など）が含まれている可能性がある。しかし極域の水氷について軌道上からの観測以上の空間分解能の情報がなく、鉛直分布なども分かっていない。これらの理解を進めるには陸探査が必要である。これまでの観測結果から、極域の水氷は将来の月面活動における資源という観点でも注目されており、月南極の有人着陸を目指すArtemis missionが策定されるなど探査の機運が高まっている。日本でも、ISROと共同で月南極域に着陸して水氷を探索するLUPEXなどの計画が進められている。

本研究は将来月着陸探査計画を見据え、月のLPDを分光学的手法によって識別する手法の開発と、レゴリスに数%混合した水氷の絶対量を決定する検量モデルの構築を行った。

1. LPDを構成する火山ガラスがスペクトルの1 μm 吸収帯形状に及ぼす影響に注目し、過去提案された手法より多様な地質を対象により高い精度でガラス質なLPDを決定できる基準を構築した。月全球の分光データからガラス質な地質を可視化することで、新たなLPDの分布を80か所以上発見した。従来の理解とは異なり、面積数百 km^2 程度以下の既知のLPDのうち、過半数が破碎された基盤岩ではなくマグマが急冷されたガラス質の組成であることがわかった。さらにその分布も月の表側および裏の地殻厚が30km以下の領域に幅広く分布していることが確認された。これはこれまでの理解より多様な領域でボラタイルに富むマグマの発泡噴火現象が発生し、水を含むボラタイル物質が月面に供給されたことを示唆する。

2. 永久影の凍土を想定して、数%の水氷が付着した粉体試料を作成し、分光観測を行った。着氷粉体試料には波長1.5 μm に吸収帯が現れる。着氷率に対する1.5 μm 吸収深さ検量線の傾きは、粉体の粒径と構成鉱物の反射率に大きな影響を受けることが分かり、その関係を粉体光散乱モデルを用いて数式化した。この関係式はレゴリス反射率と粒径情報があれば観測された吸収帯を用いて絶対含水量が決定できることを意味する。将来の極域着陸探査における水氷の定量に大きく貢献する。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (荒 木 亮 太 郎)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 寺田健太郎
	副 査	名誉教授 佐々木晶
	副 査	教授 近藤忠
	副 査	准教授 山中千博
	副 査	准教授 大高理

論文審査の結果の要旨

アポロ計画によって得られた情報から、地球に惑星サイズの天体が衝突し月が形成されたという巨大衝突説が月形成理論の主流となっている。しかし今世紀に入ってから進展した研究は、この月形成モデルから予想される、揮発性成分が失われた月のバルク組成という描像と必ずしも整合しておらず、むしろ月マントルに地球マントルと同程度の H_2O が含まれることが示唆されてきた。たとえば、Saal et al. (2008) の分析ではアポロで持ち帰られた火山ガラス中の包有物に数十 ppm の H_2O が検出されたことから、噴火時のソースマグマに～1000ppm の H_2O が含まれていたと推定し、その結果からマグマを生成する前の月マントルには地球と大差ない程度にボラタイルが含まれていたと予想した。アポロ試料のみならず、月面に 100 か所以上存在する火砕堆積物 (Lunar Pyroclastic Deposit; LPD) と一致するさまざまな領域に水の吸収スペクトルの証拠が見つかった (Milliken & Li, 2017)。このように、 H_2O をはじめとするボラタイルに富んだマグマの噴火によって、ボラタイルが月面に供給されたはずであり、月面に供給された物質を詳しく知ることが、地球-月系の成因を理解することに貢献する。過去に火山活動によって月面に供給された水の、少なくとも一部は何らかのプロセス (たとえば、日照により加熱された水分子の揮発と影面で cold trap されることを繰り返すなど) によって極域に移動して集積した可能性もある。過去四半世紀の間、複数の観測で多様な手法に基づいたリモートセンシング探査によって、月極域の永久影に数%程度以下の水氷が分布する証拠が複数提示されてきた。月の極域永久影に存在する可能性がある水氷の探査は、月の過去の火成活動を推測するもうひとつの手掛かりである。ただし月内部から火山活動で極域に移動した水の量の推定は容易ではない。火山活動に由来しない起源の水 (例えば太陽風プロトンによる岩石の還元、彗星による外部からの供給など) が含まれている可能性がある。しかし極域の水氷について軌道上からの観測以上の空間分解能の情報がなく、鉛直分布なども分かっていない。これらの理解を進めるには陸探査が必要である。これまでの観測結果から、極域の水氷は将来の月面活動における資源という観点でも注目されており、月南極の有人着陸を目指す Artemis mission が策定されるなど探査の機運が高まっている。日本でも、ISRO と共同で月南極域に着陸して水氷を探索する LUPEX などの計画が進められている。

本研究は将来月着陸探査計画を見据え、月の LPD を分光学的手法によって識別する手法の開発と、レゴリスに数%混合した水氷の絶対量を決定する検量モデルの構築を行った。

1. LPD を構成する火山ガラスがスペクトルの 1 μm 吸収帯形状に及ぼす影響に注目し、過去提案された手法より多様な地質を対象により高い精度でガラス質な LPD を決定できる基準を構築した。月全球の分光データからガラス質な地質を可視化することで、新たな LPD の分布を 80 か所以上発見した。従来の理解とは異なり、面積数百 km^2 程度以下の既知の LPD のうち、過半数が破碎された基盤岩ではなくマグマが急冷されたガラス質の組成であることがわかった。さらにその分布も月の表側および裏の地殻厚が 30km 以下の領域に幅広く分布していることが確認された。これはこれまでの理解より多様な領域でボラタイルに富むマグマの発泡噴火現象が発生し、水を含むボラタイル物質が月面に供給されたことを示唆する。

2. 永久影の凍土を想定して、数%の水氷が付着した粉体試料を作成し、分光観測を行った。着氷粉体試料には波長 1.5 μm に吸収帯が現れる。着氷率に対する 1.5 μm 吸収深さ検量線の傾きは、粉体の粒径と構成鉱物の反射率に大きな影響を受けることが分かり、その関係を粉体光散乱モデルを用いて数式化した。この関係式はレゴリス反射率と粒径情報があれば観測された吸収帯を用いて絶対含水量が決定できることを意味する。将来の極

域着陸探査における水氷の定量に大きく貢献する。

これら一連の研究は、月面環境の理解に重要な知見を与えるものである。よって、本論文は博士（理学）の授与に値する。