

氏 名 小野寺 圭祐

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2304 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Subsurface structure of the Moon and Mars deduced from 3D  
seismic wave propagation simulation and analysis of Apollo  
and InSight seismic data

論文審査委員 主 査 竝木 則行

天文科学専攻 教授

安部 正真

宇宙科学専攻 准教授

松本 晃治

天文科学専攻 准教授

田中 智

宇宙科学専攻 教授

西田 究

東京大学地震研究所 准教授

Anne MANGENEY

Université de Paris, Institut de Physique du Globe  
de Paris, Professor

Florent BRENGUIER

Université Grenoble Alpes, Institut des Sciences  
de la Terre, Professor

Philippe LOGNONNE

Université de Paris, Institut de Physique du Globe de  
Paris, Professor

本学位論文研究は総合研究大学院大学と Université Paris Cité(フランス共和国)とのデュアル・ディグリー・プログラムに関する協定に基づく国際共同指導により実施されたものである。

<sup>1</sup>コチュテル(デュアル・ディグリー)

海外の大学との協定に基づき本学に在籍する学生が、同時に相手大学に正規生として在籍し、両大学の教員から共同で学位論文指導を受けるもの。論文完成後、両大学による共同の論文審査に合格した場合は、両大学から単一の学位が授与され、各大学からそれぞれ両大学の共同論文指導によるものである旨を付記した学位記を交付する。

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 小野寺 圭祐

論文題目 Subsurface structure of the Moon and Mars deduced from 3D seismic wave propagation simulation and analysis of Apollo and InSight seismic data

### 背景

惑星天体の内部構造は、その起源や進化を探る上で重要な情報源を与えることから、惑星科学におけるトップサイエンスの一つとして位置付けられている。例えば、惑星の全球的な化学組成および揮発性・難揮発性元素の割合は、形成初期の温度環境を制約する上で重要であり、惑星の形成史を議論する際の境界条件を与える。一方、惑星表層環境は、形成後の地質学的活動を大きく反映しており、その構造を理解することは惑星の進化史を議論する上で必要不可欠である。このように様々なスケール感で内部構造を調査することは大切であり、惑星形成史をより多角的に考察することを可能にする。

惑星の内部構造を探查する上で最も有効な手法の一つとして地震波観測が挙げられる。地球では、1880年代後半に初めて遠地地震の科学的観測が行われ、それを皮切りに地球の一次元地震波速度構造が推定されてきた。現在では、観測技術の向上・高密度かつグローバルな観測ネットワークにより、地球内部の詳細な三次元不均質構造が明らかになってきている。このように地震波観測の有用性が地球で十分に実証されていることから、他の惑星天体の内部構造探查にも応用が為されてきた。例えば、1969年～1970年代後半にかけて実施されたNASAのアポロ計画では、月の表側に地震観測ネットワークを構築し、月の地震（月震）の観測に成功している。また、2018年から火星にて地震観測を行っているNASAのインサイト計画では、火星探査史上初めて地震波の検出に成功し、着実に火星内部構造の解明に貢献している。

### 研究目的

本研究では、特に月・火星の表層構造に焦点を当てる。先述の通り、各天体の表層構造の違いは、過去の地質活動や衝突史を強く反映しており、その影響は地震波形の特徴に色濃く現れる。実際に、月・火星・地球で観測された地震波の特徴は大きく異なっており、その違いを理解することは、各天体の表層進化の違いを議論する上で大切であり、延いては世の中に存在する多様な惑星天体の形成進化過程を解明するためのマイルストーンになることが期待される。本論文では、特に「月地殻の散乱構造」と「火星表層の弾性的特性」について扱う。前者は、「なぜ地球と月では地震波形が大きく異なるのか？」という月震観測以来の疑問への解を提示する類のトピックであり、本研究では特に月震波形を本質的に特徴づける月地殻上部の不均質構造を定量的に評価することを目的とする。後者は、火星地震探査が始まったばかりであることを鑑み、まずは一次元的な弾性構造を構築することが優先課題となる。過去の火星探査の画像データなどから、インサイトの着陸地点は過去に大規模な地質学的活動（火山活動・流水による堆積・浸食など）を複数回経験したことが示唆されており、本研究は当該領域の表層構造から火星の地質活動史を読み解く上での

第一歩となる。

### 月地殻の散乱特性評価

地下の不均質構造は地震波の伝搬に影響を及ぼし、特に振幅・波形・継続時間などに変化をもたらすことが地球の地震波観測から示唆されている。アポロ計画で取得された月の地震データは地球のそれとは大きく異なり、エネルギーが強く散乱された紡錘形状を示し、典型的な継続時間が1～2時間と異様に長い。先述の通り、地震波形の違いは内部の不均質構造を反映しているため、月における散乱環境を理解することは、不均質構造の成因すなわち表層進化史への制約を与える点で重要である。加えて、散乱特性を異なる天体間で比較することにより、表層進化の観点から比較惑星学を行うことが可能になり、多様な惑星環境への理解を深めることに繋がるのが期待される。月の散乱特性（散乱減衰・内部減衰・拡散率など）は、地球の地震学で用いられている輻射伝達理論に基づき、観測された地震波形を理論式でフィッティングさせ、逆問題的に推定が行われてきた。この手法では、内部減衰や拡散の影響が現れやすい地震波の減衰コーダ（最大振幅からノイズフロアまでの減衰部）は十分に説明できるものの、散乱の影響が支配的であるエネルギーの立ち上がり部分については形状を合致させることができず、特に散乱減衰については不確定性が大きい。そこで本研究では、月の地震波形を本質的に特徴付けるパラメータである「散乱減衰」をより直接的に評価することを目的として、輻射伝達理論の枠を抜け出し、不均質構造を伴う三次元地震波伝搬シミュレーションを行った。具体的には、様々な条件下で理論波形を計算し、観測データを説明できる散乱特性を順問題的に推定する。このアプローチ自体は、一昔前から考案されていたものの、計算資源の観点から実施が困難であった。しかしながら、近年のスーパーコンピュータの発展に伴い、上記のような複雑で計算コストのかかるアプローチが可能になってきた。本研究では、地球で用いられている地震波伝搬シミュレーションコードを月に応用し、世界で初めてアポロ月震データと理論波形の直接比較を可能にした。結果として、現実的な物理パラメータの範囲で、アポロ月震データを再現することができ、今までは不確定であった散乱減衰の定量評価に成功した。本成果により「散乱」という新しい軸で惑星間の定量比較が可能になった。今後、多様な天体での地震探査が期待されている中で、比較時の評価指標を提示できた事は将来探査においても有用であると考えられる。また、本研究成果の最大の意義として、限られた量質のデータであっても、精度の高い数値計算技術を駆使して天体の地下の情報を抽出できることを実証した点である。これはデータ解析が主流であった惑星地震学において革新的な成果であると言える。

### 火星浅部の弾性パラメータの推定

インサイトによる火星での地震観測は、地球や月とは異なり観測点が一点しかないため、内部構造推定に必要な情報である震源位置や発震時の決定が極めて困難である。このような状況下で火星表層構造の推定に大きく貢献しているのが「Compliance（気圧変動に対する地面の応答）」である。基本的には、観測地点における気圧変化と地面の変動を測定できれば良いため、一般的な内部構造推定手法（走時解析）で求められる震源位置や発震時、高精度な地震波フェーズ(PやSなど)の読み取りを必要としない。インサイトは、単一の観測点ではあるが、地震動だけではなく気象観測（気圧・大気温度・風速・風向など）も同時に実施しているため、Complianceを解析することで表層の弾性特性（ヤング率

や地震波速度) を評価することができる。実際に、インサイトの初期成果においては、**Compliance**を利用して深さ10~20 mまでの構造推定に成功している。しかしながら、インサイトの初期運用段階では、データのサンプリングレートが低く、また使用できるイベント数も限られていた。本研究では、インサイトが1火星年(~2地球年)観測したデータを活用し、より多くのイベントを用いて**Compliance**の解析を行い、新しい地下構造モデルを作成することを目的とする。使用するイベント数以外にも、初期成果の段階からの大きなアップデートとして、(I)高サンプリングレートのデータの使用に伴う解析周波数の拡大、(II)バックグラウンドの風速を考慮した**Compliance**の解析が挙げられる。(I)は深さ方向の分解能の向上に貢献し、(II)については圧力変動の移流速度(バックグラウンドの風速に対応)が波長と関係があるため、様々な風速のイベントを解析することで異なる深さの情報を取り出すことが可能となる。本研究では、これらの新規要素を**Compliance**の解析に組み込むことで、過去の研究では分解することが叶わなかった深さ1 mの不連続構造の検出や深さ75 m程度までの力学的特性を制約することに成功し、火星表層構造の新しいモデルを構築した。得られた結果は、インサイト計画の中で最も信頼性の高い人工地震探査の結果と整合的であり、今後の火星表層構造探査ならびに火星表層進化史を解明する上で大きな足掛かりになることが期待される。

## Results of the doctoral thesis defense

Name in Full: ONODERA Keisuke

Title: Subsurface structure of the Moon and Mars deduced from 3D seismic wave propagation simulation and analysis of Apollo and InSight seismic data

Planetary seismology has been considered a powerful tool to investigate the interior of solar system bodies and, therefore, their origin and evolution. The first observation was made in the Apollo era. However, the progress was limited until InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) mission started on Mars recently. There are several essential issues in planetary seismology, and perhaps the most crucial one is the dominance of scattering of the seismic observation on the Moon. The scattering property of the lunar regolith is qualitatively evaluated, yet many observations remain to be explained quantitatively and reasonably. The second and equally crucial issue is the scarcity of seismic activity on planets and satellites. On Earth, particularly in Japan, we are accustomed to the frequent occurrence of earthquakes. However, without plate tectonics, seismic events are likely few. And we don't even know how few they are. We need to develop a new seismological method to study the subsurface structure without quakes.

In chapter 1, the applicant introduces a brief history of the seismological research of the Moon and Mars to point out that the subsurface structure holds information accumulated through geological evolution from its formation. The applicant argues that comparing the subsurface structures among different planets is the key to understanding the formations and evolutions.

In chapter 2, a full 3-D wavefield simulation is developed and examined to reveal the scattering property of the lunar crust. Such simulation has been considered for a long time. However, it became feasible only recently by the high-performance computer. The applicant succeeded in computing the wave propagation stably up to 2.0 Hz, which not only covers the frequency band of the Apollo long-period seismometer but also reaches the highest computation

frequency in this field.

Using the new technology, scattering features of moonquake records were successfully reproduced. And scattering parameters such as scattering coefficient and scattering attenuation factor are constrained down to 10 km depth. These new results imply a dry and highly heterogeneous subsurface structure of the Moon which is likely caused by the continuous impacts on the lunar surface.

In chapter 3, the applicant explores the subsurface structure of Mars by measuring a seismic response to the Martian atmosphere, namely a convective vortex or dust devil. This method does not require precise determination of the source location but seismic data with simultaneous atmospheric pressure measurements. Thus, it has a great potential for planetary missions like InSight which consists of a single station.

While this method has already been applied for the InSight data, the applicant uses the updated datasets to find a larger number of events than before. The novelties of this study are (i) to extend the frequency range up to 2.0 Hz using high-sampling data and (ii) to consider the ambient wind speeds. Higher frequencies help improve the resolution of the most surficial layer. The faster wind speed is related to the longer wavelength and allows resolving deeper structure. Consequently, the applicant detected a 1-m structural discontinuity at the surface, which was not resolved before. This layer is interpreted as a regolith layer developed at the landing site. Also, the elastic strength of the Martian crust, compliance, is determined down to 75 m. This is a significant extension from 10-20 m of previous work.

In chapter 4, studies of the subsurface structures of the Moon and Mars are brought together. Using the best of the recent computational capability, the applicant made significant progress in understanding the scattering structure of the Moon and the elastic properties on Mars, respectively. Considering the above, the committee members evaluate this doctoral dissertation worth giving a doctoral degree of the Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI.