

第32回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

1. 作品情報・応募者情報

作品名(20文字以内) 月面衝突閃光を用いた月震観測ネットワーク
副題(自由記入) 月震波の観測と月内部構造の推定
学校名 日本大学

2. ミッションの概要(プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。)

月面衝突閃光を用いた月震観測ネットワーク(SIMNet)は、月面に複数の月震計を設置すると共に、人工衛星からメテオロイドの衝突による月面衝突閃光を観測することで、観測した月震波の正確な震源位置を把握し、月震波の伝播の様子を高精度に解析する。これにより、アポロ計画によって取得された月震データのみでは不可能であった、より詳細な月内部構造の推定をすることができる。

3. ミッションの目的と意義(目的・重要性・技術的/社会的意義等)

(a) 目的

月震計を搭載したペネトレータを設置し、メテオロイドの衝突による月震から、月内部構造を高精度に推定することが目的である。メテオロイドが衝突する際に発生する月面衝突閃光は、人工衛星や地球から観測を行うことで、正確な衝突位置、すなわち月震の正確な震源位置を把握することが可能である。正確な震源位置を把握し、月震計によるデータと照合することで、月震波が月内部を伝搬する様子を正確に推定し、より高い精度で月内部構造を推定することが可能になる。

(b) 重要性・技術的、社会的意義等

アポロ計画では月震計の設置数や観測期間が限られており、月内部構造の推定には限界があった。SIMNetでは、月面衝突閃光を発生するメテオロイドの衝突に起因する月震波を観測する。閃光を観測することで月震の正確な震源位置を特定することができ、月震波の伝搬を高精度に推定し、より詳細な月内部構造を把握することが可能となる。月内部構造を把握することは、将来の宇宙探査や資源利用のためにも重要であり、地球型惑星の形成と進化の理解に貢献すると考える。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

本ミッションでは、月震計を槍型の観測ケース(ペネトレータ)に収め、月周回衛星を用いて月面全域に複数投下設置することで月震波を観測する。さらに、メテオロイドの衝突による月面衝突閃光を人工衛星から観測することで正確な月震位置を観測する。このデータをもとに月震波の伝搬経路を解析し、月の内部構造をより詳細に把握する。

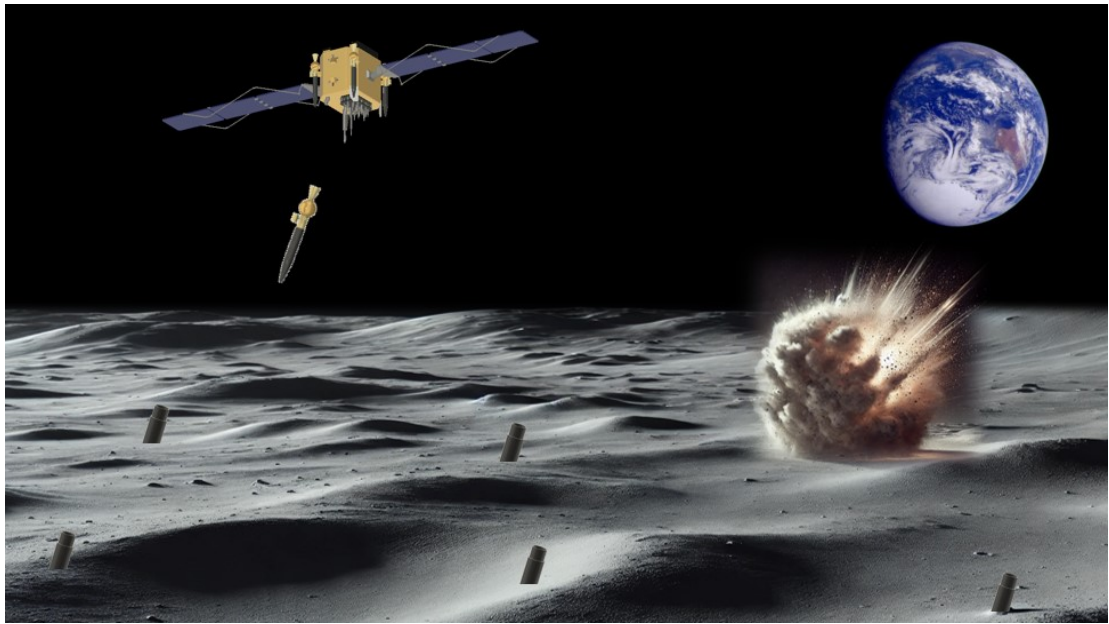


図1 SIMNet 構想図

月震計の設置には、「ペネトレータ」を用いる。ペネトレータは、月周回衛星から分離後、軌道離脱モータにより静止、ガスジェットを用いて月面に対して垂直に姿勢を変更後、自由落下によって月面に貫入、地下約1~3mに埋没する。以下にペネトレータの構造を示す。

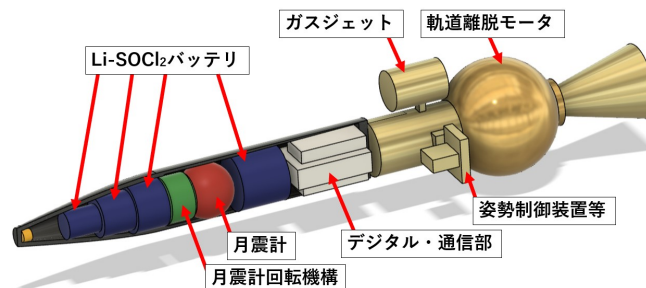


図2 ペネトレータの構造

ペネトレータは、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 構体であり、先端部はチタン合金製、アンテナ部はガラス繊維強化樹脂 (GFRP) 製である。また、周回衛星から分離後、月上空に静止するための「軌道離脱モータ」を後部に、その後向きを真下に変更するための「姿勢制御装置」を両脇に抱えている。先端部には加速度計、中央に月震計を水平にするための月震回転機構と月震計、後部にはデジタル・通信部が占められている。

内蔵された「塩化チオニルリチウム一次電池 (Li-SOCl₂)」により約1年間に渡って観測を行う予定であり、観測期間中は月周回衛星を経由してデータを地上局に送信する。

搭載する月震計は、LUNAR-A 計画に搭載予定であった短周期電磁気式-速度検出型地震計をモデルにする。1台のセンサでアポロ月震計全てを超える周波数領域をカバーするようにし、振り子の固有周期を2sec、感度を10V/kine(20Hz)に設定した。長周期地震計も搭載し、アポロ月震計と比較して高感度かつ広帯域に対応したデータ取得を行う。また、月表面衝突時の約10,000Gの衝撃に耐える設計となっており、月震観測時には消費電力を抑えるため、閾値以上の信号を記録する。なお、月震計は垂直成分と水平成分を観測するために図3のように月震計を2台搭載し、月震計回転機構により水平に保つ。



図3 月震計外観

月面衝突閃光の観測は地球からの他に衛星からも行う。衛星は、地球照が誘発する背景光の影響を受けない、地球-月系ラグランジュ L2 ハロー軌道に停留する。なお、月面衝突閃光は、2000K から 3000K の黒体放射が支配的であることから、観測には近赤外線 (SWIR) カメラを用いる。

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

月内部構造把握のためには多くの月震データが必要であり、観測期間が非常に重要である。本ミッションではペネトレータの動作期間を 1 年としており、電力源として、Li-SOCl₂ 電池を用いている。Li-SOCl₂ 電池は電力密度が 430Wh/kg と高く、動作温度範囲も -55°C ~ +85°C と幅広いという特徴がある。また、月面の温度は、昼は 110°C、夜は -170°C と過酷であり、長期にわたって観測を行うためには越夜が必須である。本ミッションでは、ペネトレータが熱伝導率約 0.01W/(m・K) と、断熱性に優れたレゴリスに約 1~3m 埋没するが、この付近は年間を通して、約 -20°C と定温であることが知られており、長期にわたって観測器を過酷な熱環境から保護することに寄与している。

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

本ミッションの独創性は、月震計を搭載したペネトレータを投下し、月震波を観測するとともに、メテオロイドの衝突による月面衝突閃光を人工衛星から観測することで、観測された月震波の正確な震源位置を特定する点である。これにより、月震波の伝播経路を高精度に推定し、月内部構造の詳細な解析が可能となる。また、ペネトレータを用いることは月着陸機を用いて月震計を設置するのと比較して、技術的難易度と費用の観点から優れており、広範囲に複数設置する必要のある本ミッションに適している。このペネトレータは、月の裏側を含め複数箇所に投下するため、大規模な月震計ネットワークを構築することが可能である。これにより、月震計の設置数や観測期間の点において、従来のアポロ計画による月震観測と比較して高精度で月内部構造を推定することが可能となる。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

月内部構造を把握することで、月資源の埋蔵位置や溶岩チューブなどの月基地建設に適した場所を確認することができ、将来の月資源開発や有人宇宙探査に貢献できると考える。また、月震計を月の裏側にも設置するため、アポロ計画の月震計では観測できなかった、月の裏側の地質構造を把握できることも大きな成果であると考えられる。大規模月震ネットワークによる新たな月震データの取得が、地球型惑星の形成過程や進化の理解にもつながり、惑星形成学の発展に寄与することを期待する。

以上

第 32 回 衛星設計コンテスト アイデアの部

ゲツメンショウトツセンコウ モチ ゲツシンカンソク シム ネット 月面衝突閃光を用いた月震観測ネットワーク SIMNet

日本大学理工学部 航空宇宙工学科 未来博士工房衛星開発工房 NUPPs

3年: マスダナギ, ミワソウタ, イシカワナルミ, アオノリラ, キタハラショウマ
増田なぎ, 三輪聡太, 石川成美, 青野りら, 北原匠真

2年: イズミコトキ, カキウチサキヤ, フジワラアサキ, イチハシサミ
泉理穂, 垣内沙耶, 藤原彩音, 市橋沙美

1 ミッション背景

近年、日本の月探査機 SLIM による月面着陸やアルテミス計画など国際的な月探査計画や技術開発が進み、月への関心がさらに高まりを見せており、月面活動は今後さらに活発になると予想される。

月内部構造を把握することは将来の宇宙探査や資源利用のためにも重要である。また、地球型惑星の形成と進化の理解に貢献すると考えられており、これまでも様々な内部構造調査が行われた。現在でも分析が続いている方法に、アポロ計画で設置された地震計 PSEP で観測された地震波データを用いた地震波解析がある。アポロ計画による調査では、地下構造における地質の密度の違いから地震波伝搬速度が異なることを利用した「地震波トモグラフィ」が用いられた。その観測結果は解析が重ねられ、内部構造モデルの推定において重要な役割を果たしている。しかし、PSEP の設置数や観測期間が十分ではなく、地震波の発生位置の推定が困難であった。またアポロ計画以降約 50 年間月震データが更新されておらず、解析の精度にも限界がある。

そこで、我々は「月面衝突閃光を利用した月震観測ネットワーク (Seismic Monitoring Network:SIMNet)」を提案する。これは月に複数の地震計を設置し、月面衝突閃光を発生するメテオロイドの衝突に起因する月震波を観測するものである。発生された月面衝突閃光を衛星等から観

測することで、正確な衝突位置、すなわち、月震の正確な震源位置を把握することが可能である。正確な震源位置を把握することは、月震波が月内部を通過する経路を正確に推定することにつながり、より高い精度で月内部構造を推定することが可能になる。

2 ミッション概要

本ミッション(SIMNet)は、月周回衛星から地震計を搭載した観測機器「ペネトレータ」を月面に投下、地中に貫入させて設置し、月震波の伝搬の様子から月内部構造を把握するものである。SIMNet においては月面に衝突する際に、月面衝突閃光を発生するメテオロイド由来の月震に焦点をあてる。これは、地球や衛星から衝突閃光を観測することで、メテオロイドの衝突位置、すなわち月震の発生位置(震源)を正確に把握することが可能であるからである。なお、当初は月軟着陸を行い、縦孔に地震計を設置する方法を検討していた。しかし、地盤の粘着力が地域や温度環境によって変化する可能性があるため、ケーブル設置に困難が伴うという技術的難易度や、多額の費用がかかることが見込まれることから、月周回軌道上から広範囲に地震計を設置できるペネトレータ方式を採用した。以下図 1 に SIMNet 構想図を示す。ペネトレータを月面全域に複数箇所投下し、大規模な地震計ネットワークを構築する。

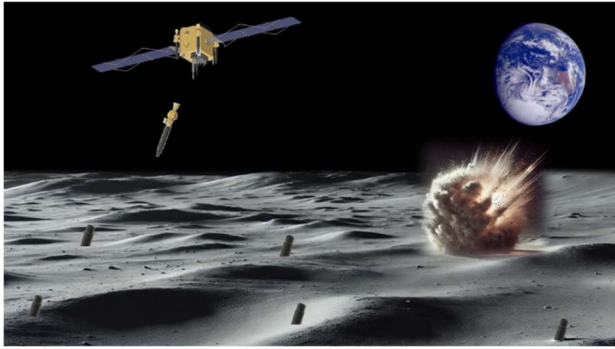


図1 SIMNet 構想図

2.1 ミッション内容

ペネトレータ投下から月内部構造の推定までの手順を以下の図2に示す。



図2 ミッション手順

2.2 サクセスクライテリア

表1 サクセスクライテリア

ミニマムサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ペネトレータの設置 月面衝突閃光の観測
フルサクセス	<ul style="list-style-type: none"> メテオロイド由来の地震波の観測 月面衝突閃光を利用した震源の推定
エクストラサクセス	<ul style="list-style-type: none"> 月内部構造の推定

3 ペネトレータの詳細

ペネトレータとは、槍型の観測装置ケースで

あり、月周回衛星から分離後、月面に貫入させることで設置可能である。本ミッションでは、JAXAのLUNAR-Aミッションにおいて開発されたペネトレータを参考にした。

3.1 構造

ペネトレータは図3のように、長さ945mm、直径134mmの炭素繊維強化プラスチック(CFRP)構体でできており、先端部はチタン合金製、アンテナ部はガラス繊維強化樹脂(GFRP)製である。また、周回衛星から分離後、月上空に静止するための「軌道離脱モータ」を後部に、その後向きを真下に変更するための「姿勢制御装置」を両脇に抱えている。なお、姿勢制御装置や軌道離脱モータは、月面貫入前に分離され、観測部のみが貫入・埋没する。

内部構造を図3に示す。先端部には加速度計、中央に月震計を水平にするための月震計回転機構と月震計、後部にはデジタル・通信部が占めている。

また、質量約14kgのペネトレータの最終衝突速度は約250m/s^[8]であり、その運動エネルギーは約438kJとなる。ペネトレータ先端のチタン合金は円錐形で、その底面径は45mm、高さ約50mmである。このチタン合金の最大ひずみエネルギーは735kJであり、ペネトレータは月衝突時の衝撃に耐荷できる。なお、搭載される機器はそれ自身に耐衝撃性能を期待できないため、これらをポッティング材に埋め込むことで貫入時の衝撃により壊れないようになっている。

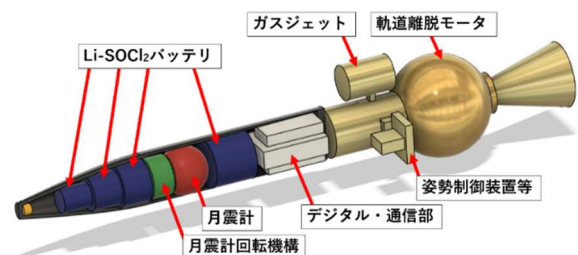


図3 内部構造

3.2 電力

月内部構造を把握するためには、多くの月震データが必要であり、本ミッションではペネトレータの動作期間を1年としている。そのため、バッテリーには電力密度が高い、「塩化チオニルリチウム一次電池(Li-SOCl₂)」を用いる。Li-SOCl₂電池の動作可能温度範囲は-55°C~+85°Cであり、地中1~3m付近では年間を通して約-20°Cであり、この環境は電池の動作可能範囲内であるため、使用に問題はない。また、省電力のために、地震計の動作はアナログ回路を利用したイベントトリガー法を採用し、地震におけるP波着震を感知すると、トリガー信号が発生して初めてCPUを動かし、データのチェックと取得を行う。

表2 バッテリー性能

	値
電力密度	430Wh/kg
動作温度範囲	-55°C~+85°C
自己放電率	1%/年
公称電圧	3.6V

3.3 通信

収集したデータは、ペネトレータ内の記録装置に一時的に保存される。その後、各ペネトレータの上空を通過する月周回衛星(ペネトレータ投下衛星)を通じて地球に送信される。ペネトレータと周回衛星の間の通信には、UHF(400MHz)を、周回衛星と地上局の通信にはSバンド(2GHz)を使用する。ペネトレータには、指向性の厳しくないオムニアンテナを採用し、周回衛星は多数のペネトレータからの情報を、オムニアンテナを用いて一度に収集することを可能とする。なお、ペネトレータは貫入後地中に埋没するが、月のレゴリスの主成分はSiO₂, Al₂O₃, FeO, CaOであり、それぞれの構成比は47%, 18%, 11%, 11%である。これら

は非導電性物質であるので、電波を通すと考えられている。以下表3に周波数帯域を示す。

表3 周波数帯域

	周波数帯域
ペネトレータ-衛星間	UHF (400MHz)
衛星-地上局間	Sバンド(2GHz)

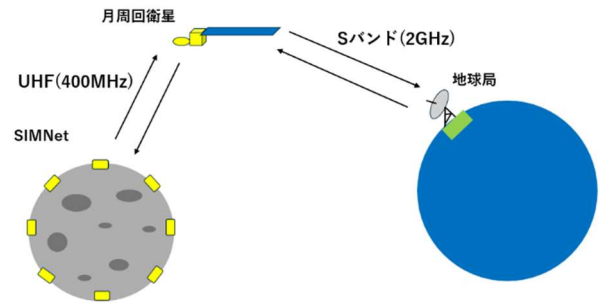


図4 通信方法

また、ペネトレータは、周回衛星からの電波を受信すると、通信機の電源を入れ通信を行うが、この衛星は高度200km、軌道傾斜角90度の月極軌道に投入される。以下にSTKによる軌道解析結果を示す。

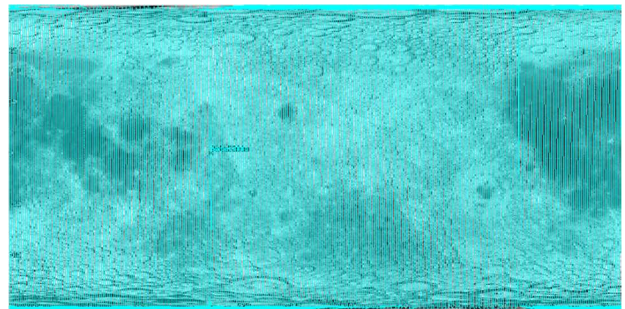


図5 月周回衛星の軌道解析結果

図5の解析から、約2週間で月全域を通過することが分かった。さらに、1周期の所要時間が約120分であることから、1パスあたりの通信可能時間はエレベータ角度5度の場合、約868秒である。また、アポロ月震計において、メテороイド由来の月震が7年間で1743回観測されて

おり、一定の確率で衝突が起こると仮定すれば、周回衛星が通過する2週間の間に10回の月震を観測する。ここで、JAXA ペネトレータのデータ記録形式^[8]を採用すれば、1秒当たりのデータ量は10bitsである。また、サンプリング周波数とサンプリング時間について、最初256秒は16Hzであり、これが終了するまでに、その後計測を継続するか判断する。継続する場合は、2048秒または4096秒が追加され、サンプリング周波数は4Hzとなる。これは、継続時間が長い深発月震のデータを確実に取得するためである。したがって、2週間分のデータ量は最大で2048000 bitsである。ここで、GMSK 変調9600bpsを用いると

$$\frac{\text{データ量[bit]}}{\text{ビットレート[bps]}} = \frac{2048000}{9600} \approx 213[\text{sec}] \quad (1)$$

となり、1パス内でデータを送信することが可能である。また、GMSK 変調9600bpsを採用し、ペネトレータ側の送信アンテナ利得を5dBのオムニアンテナ、月周回衛星の受信アンテナを利得5dBのオムニアンテナとすると、マージンは約20.7であり回線が成立することが分かる。

3.4 熱

ペネトレータは周回衛星から分離後月面に衝突、深さ1~3mの地中に貫入する^[8]。月面を覆っているレゴリスの熱伝導率は約0.01W/(m・K)であり、地中1~3m付近では年間を通して-20°Cと一定であることが知られている。さらに、ペネトレータからは月震観測や通信機器の動作により発熱しており、越夜することに問題はない。なお、3.2で既述のとおりバッテリーの動作温度範囲についても問題はない。ただし、月面貫入時にはペネトレータの温度はレゴリスよりも数十度高いと予想されていることから、貫入後2週間程度は通信や月震観測は行わず、内部

発熱を極力抑える。

4 月震計詳細

4.1 月震計構造

月内部構造の把握にあたって深部300km以深を明らかにすることが課題である。このため、月震計において重要なポイントは「高感度」、「広帯域」、「広域ネットワーク」の3つである。核からの反射波・屈折波の観測のために、 10^{-11}m という微小な振動を高精度で検出する必要がある。さらに、月では、レゴリス層の散乱によるコーダ波により月震波の判別が困難となる。実際、アポロ月震観測ではコーダ波が30分から1時間続き^[6]、内部構造解析を阻害した。この問題解決には様々な振動をそれぞれ判別するための広い周波数帯域の測定が重要となる。これらのことから、弱い振動を高い感度で計ることができ、かつ広い周波数範囲の月震動を記録できる高感度・広帯域の月震計を用いる。

本ミッションではLUNAR-A計画に搭載予定だった月震計をモデル^[8]にしている(図6)。アポロ月震計は、固有周期15secの長周期地震計と固有周期1secの短周期地震計から構成されており、月震計は不動点となる振り子と、その不動点を基準として地震を電圧に変換する部分から構成されていた。なお、固有周期とはこの振り子の周期のことである。今回用いる月震計は短周期電磁気式-速度検出型地震計と長周期地震計で構成されている。アポロ計画で得られた月震のパワースペクトルから、すべての月震のピーク値が1Hz付近にあることが知られているため、この付近の周波数帯域において特に感度や周波数特性の向上を図る。今回、1台のセンサでアポロ月震計全ての周波数領域を上回ることを目標とした。そのため、振り子の固有周期を2sec、感度を約10倍の10V/kine(20Hz)に設定し、最小分解能 $U[\text{cm}]$ は $2 \times 10^{-9}\text{cm}$ 必要である^[8]。地動速度(速度分解能) $V[\text{cm/s}]$ に換算すると

以下の式で表される^[8].

$$V = 2\pi fU = 2\pi \cdot (1\text{Hz}) \cdot (2 \times 10^{-9}\text{cm}) = 1.2 \times 10^{-8}[\text{cm/sec}] \quad (2)$$

また、月震計にはペネトレータ月面貫入時の約10000Gに対する耐衝撃性が要求される。なお、消費電力を抑えるために、月震観測時は、閾値以上の月震波信号に対して記録を行う。



図6 月震計外観

4.2 月面衝突閃光観測と月震

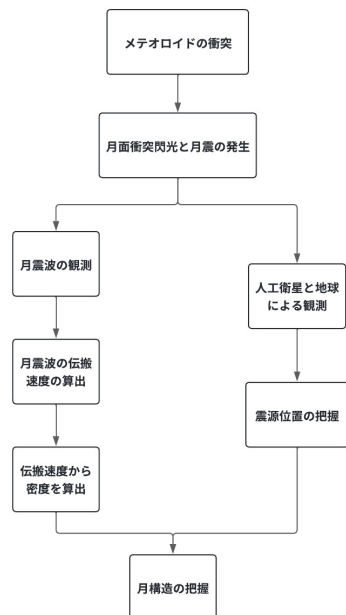


図7 観測から解析までの流れ

地球からの観測により小天体が月面に衝突した際に発光する現象が検出されている。これを月

面衝突閃光と呼ぶ。月面衝突閃光は月の軌道上の衛星から観測することができる。この現象は既に小天体の衝突頻度分布の推定などに用いられている。

1969-77年に実施されたNASAのアポロ計画では4台の月震計から成る月震観測網を構築し、約1700個の衝突起源の地震を観測したが、正確なメテオロイドの衝突位置の情報は無かった^[2]。

本ミッションでは月面衝突閃光を用いて地震の発生地を観測、正確な震源位置を推定し、より詳細な月の内部構造解析を行う。具体的には、月面衝突閃光を観測した際の発光位置から震源を決定し、同時に地震波を計測することで月の内部構造測定を行う(図7)。なお、メテオロイド由来の月震においては震央と震源が一致するものとして考える。内部構造測定原理について次項に述べる。今後の目標としてペネトレータを複数箇所に設置し、観測範囲の拡大と解析精度の向上を目指す。

4.3 内部構造測定原理

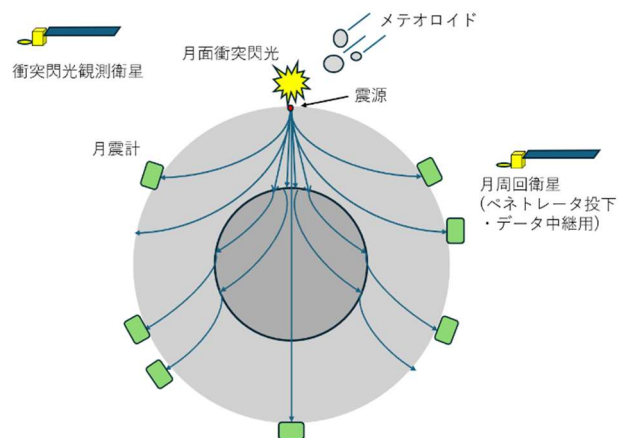


図8 内部構造測定の様式図

地震波を用いた内部構造測定は、地球の構造測定で既に使用されている。本ミッションではこの原理を月に応用し、図8に示した様式図のように月の内部構造を測定する。

測定には、地震波を元に作成する走時曲線を用いる方法がある。地震ごとに観測した地震波について、震源からの距離に応じて到達時刻を並べることで走時曲線が作成できる。

地球の内部が一様な物質である場合には、地震波は球体全体に一様に届くが、実際には屈折の影響で地震波の伝わらないシャドーズーンと呼ばれる範囲が存在する(地球の場合 $103^{\circ} \sim 143^{\circ}$)。地震波が屈折する原因が内部構造の違いであり、地震波を観測することで内部構造の解析を行うことができる。地球における観測では、既に複数の不連続面が発見されている。代表的なものとして、モホロビッチ不連続面やグーテンベルク不連続面が挙げられる。例えばモホロビッチ不連続面は地殻とマントルの境界面であり、この不連続面を元に地球内部の構造境界が分かる。^[3]

以上に述べた原理を用いて月でも同様に観測と解析を行う。また、このような観測を複数箇所の月震計で行い、複数のデータを照合することで、月の内部構造を正確に測定する。

5 月面衝突閃光観測衛星

月面衝突閃光は地球からの観測の他に衛星からも観測される。衛星の概要を以下に述べる。

5.1 軌道

月面衝突閃光を観測する衛星は深宇宙超小型探査機「EQUULEUS」^[4]を参照した。EQUULEUS は地球-月系ラグランジュ L2 ハロー軌道を停留する。地球からの観測では地球に反射した太陽光による地球照が誘発する背景光の影響があるが、この軌道の月の裏側からの観測であれば無視できる。また、宇宙では地球の自転や天候の影響を受けなため、長時間連続観測が可能となる。以下表 4 に衛星の軌道と観測条件を示す。

表 4 衛星の軌道と観測条件

軌道	地球-月系ラグランジュ L2 ハロー軌道
衛星-月面距離	2 万 km~6 万 km
太陽離角	45 度以上
地球離角	45 度以上
衛星から見た月面夜型領域	月全体の 25%

5.2 月面衝突閃光観測装置

月面衝突閃光と小惑星の観測を行う可視光カメラシステム「DELPHINUS」^[4]を参考にした。DELPHINUS は EQUULEUS に搭載されており、月に直接太陽が当たらない夜型領域で観測を実施する。380-750nm の設計波長であるが、850nm まで感度のある高感度 CCD を採用している。しかし月面衝突閃光は、NIR(J バンド)にピークを持つ 2000K~3000K の黒体放射由来のものが多い。そのため、本ミッションにおいては近赤外線(SWIR)カメラを用いる。また、直射光をブロックし、迷光を観測に影響のない程度まで十分に除去することで、地球に送るデータ転送量をできるだけ小さくする。月面衝突閃光とは関係のないカメラのノイズや、宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子による誤検出を防ぐため、カメラシステムを 2 台搭載する。2 台での同時観測を行うことで、誤検出の確率を低下させることが可能になる。なお、地球からの観測にも、大気の散乱の影響を受けにくい近赤外線カメラを用いる。

6 独創性・波及効果

本ミッションでは、月震計を搭載したペネトレータを設置し、地震波を観測するとともに、メテオロイドの衝突による月面衝突閃光を人工衛星から観測する。これにより、月震計で観測された月震波の正確な震源位置を特定すること

ができ、月震波の伝搬の様子を高精度に推定、高い精度で月内部構造を把握することに独創性がある。

本ミッションが実現されれば、月震波伝搬の様子を高精度に推定し、月内部構造の詳細な解析が可能となる。月内部構造を把握することは、月資源の埋蔵位置や溶岩チューブなど月基地建設に適した場所を確認することにもつながるため、将来の有人宇宙探査に大きく貢献できると考えられる。さらには、地球型惑星の形成過程や進化の理解にもつながり、惑星形成学の発展に寄与できると考えられる。

7 まとめ

SIMNet は、月面衝突閃光の観測データと月震波観測データを照合することで、月内部構造を詳細に把握することを目的としたミッションである。月震波の観測と月内部構造の推定は、アポロ計画で設置された月震計を用いて実施されてきた。しかし、限られたデータによる推定には限界があり、数値シミュレーションによる内部構造の推定も正確性に欠ける点があった。

SIMNet を用いて月内部構造の一部でも把握できれば、これまで数値シミュレーションでは仮定数であった数値が定数となり、解析の信頼度が飛躍的に向上することが期待される。

8 参考文献

- [1] 茂原正道・鳥山芳夫共編，衛星設計入門，衛星設計コンテスト実行委員会，2002
- [2] 山田竜平他，二国間での月面衝突発光観測と将来月地震探査への応用，JpGU2018，2018/05/23，閲覧日 2024/07/02
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/subject/PPS05-09/detail?lang=ja>
- [3] 東京大学地震研究所，地震波で地球内部を覗く，2001/05/15，閲覧日 2024/07/03
[Asakura1.pdf \(u-tokyo.ac.jp\)](Asakura1.pdf)
- [4] 阿部 新助他，超小型 6 U 深宇宙探査機 EQUULEUS 搭載カメラ DELPHINUS の開発，2017/03/22 閲覧日 2024/07/03，
<SA6000060067.pdf>
- [5] 田中智他，LUNAR-A・ペネトレータによる月熱流量計測システムと開発の現状，2001
- [6] 佐々木晶，土山明，笠羽康正，大竹真紀子，太陽・惑星系と地球，共立出版株式会社，2019
- [7] 田中智他，月震計ネットワークによる月内部構造探査と開発の現状，2024
- [8] 荒木博志，月震発生様式の解明とその LUNAR-A 計画における月震観測への応用，1994