

## 第23回衛星設計コンテスト

### ミッション概要説明書

事務局使用欄

受付番号

2718

年 月 日

応募区分 アイデアの部

#### 1. 作品情報・応募者情報

作品名（20文字以内）			
ミュオグラフィによる小惑星の3次元透視			
作品名 副題（これは公式文書では省略する場合があります）			
ミュオグラフィのコンピュータ断層撮影法の応用			
	氏名(フリガナ)	所属学校<大学>等、学部、学科(研究室)	学年
代表者(正)	長原翔伍(ナガハラショウゴ)	東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻	修士1年
代表者(副)			
メンバ1			
メンバ2			
メンバ3			
メンバ4			
メンバ5			
メンバ6			
メンバ7			
メンバ8			

#### 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。）

小惑星内部の密度分布を3次元的高解像度で観測するため、素粒子ミュオンを用いたイメージングを行う。これは銀河系内で生成される陽子が小惑星と反応して生成されるミュオンを用いることで、小惑星内部の密度分布を高解像度で得るものである。観測は小惑星の周りを周回することで行う。この結果を用いて、コンピュータ断層撮影法（CT法）による3次元密度構造の再構成を行う。本ミッションの達成により、従来得られなかった小惑星深部の情報が得られ、また宇宙空間でのミュオグラフィ観測を実証することで、新しい観測手法を提示できる。

#### 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

理学的目的：小惑星内部密度分布を高解像度で得ること

小惑星内部構造の解明により、小惑星の形成過程の理解を目指す。

工学的目的：小惑星に対するミュオグラフィ技術の確立

ミュオグラフィ技術の宇宙利用を実証することにより、惑星観測に新たな選択肢を提示する。

##### (b) 重要性・技術的／社会的意義等

小惑星内部構造の解明は、この小惑星の形成過程を知る上で重要な知見を与える。太陽系の形成を知る上で、小惑星の形成過程を知ることは、惑星形成の初期段階を理解するという意味で重要である。よって本ミッションは単に小惑星の理解というだけでなく、太陽系全体の形成過程に対する理解を深めるきっかけとなりうるものである。

また、ミュオンを用いた物体内部の密度観測技術であるミュオグラフィは、これまで地球上でしか行われていない。本ミッションではこれを宇宙空間への応用を実証するという、大きな技術的意義がある。

これにより、惑星探査において新しい選択肢が示されるとともに、ミュオグラフィ技術そのものも新しい活用方法が実証されることでさらなる発展が促されると期待される。また、近年、宇宙資源の活用が検討されており、こうした資源探査ビジネスの発展への貢献にも期待される。

#### 4. ミッションの具体的な内容

##### (a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

探査機ははやぶさ2を流用し、そこに本ミッションで用いるミュオグラフィ観測装置を搭載する。そのため、電源系、通信系、姿勢制御系、軌道制御系を含むバス系をすべて流用する。

ミュオンの観測装置にはプラスチックシンチレータを用いる。装置は1ユニット約24kgであり、これはユニット内の平面内のどこにミュオンが到達したかを観測する。これを最低2ユニット使うことでミュオンの到来方向を決定する。

観測は小惑星を回る円軌道で行う。探査機の姿勢は観測装置の空間分解能の半分である $2.5^\circ$ 以内で制御する。得られたデータを元に地上でコンピュータ断層撮影法(GT法)による3次元再構成を行う。GT法は本来、コーンビームによる同一平面上での周回観測では厳密解が得られないが、ここではFeldkampの近似解法を用いることで対応する。この近似計算では仰角が大きくなると近似精度が悪くなるため、仰角が $30^\circ$ を超えないよう小惑星との距離に注意する。

##### (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

##### ◎小惑星で生成されるミュオン強度の検証

数値シミュレーションにより、小惑星内部で生成されるミュオン強度と天体の厚さの関係を推定した。シミュレーションにはGeant4を用い、運動エネルギー100TeVまでの1次宇宙線の陽子を合計9300発、密度 $2.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ のSiO<sub>2</sub>に打ち込み、生成されるミュオン数を推定した。

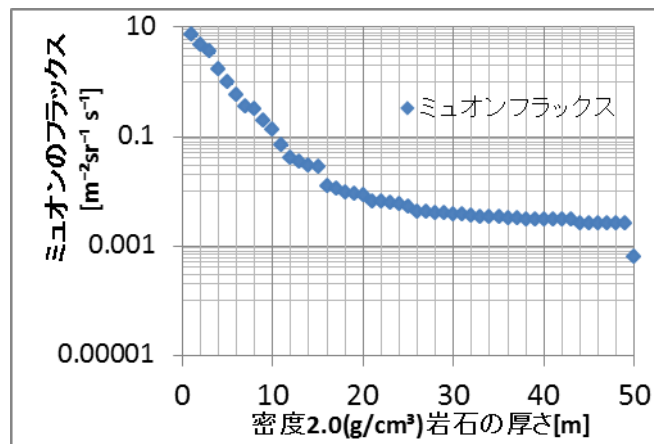


図1 宇宙空間における岩石の厚さとミュオン強度の関係

これは、もっともミュオンが少ない厚さ50mの部分でも、1辺80cmの観測装置を用いて1日当たり17個のミュオンが観測できることを表している。

一方、1次宇宙線陽子の強度は、運動エネルギー1TeV以下のものを総合すると $10^4(\text{m}^{-2}\text{sr}^{-2}\text{s}^{-1})$ 程度であるから、そのまま観測したのではミュオンを捉えることはできない。しかしこれらの陽子は探査機内部でシャワーを発生するため、同時に複数の場所で反応を起こす。一方でミュオンは同時に1つずつしか検出されないと期待されるので、これを利用してミュオンか1次宇宙線かを判別することができる。このシャワーによる識別がどの程度可能か見積もるため、Geant4によるシミュレーションで1次宇宙線の強度曲線に従って合計6000発の陽子を打ち込んで検討した結果、探査機内に500kgの質量がある場合では100TeV以下の陽子の内99%以上がシャワーを形成することが確認された。ミュオン強度と1次宇宙線強度は $10^4$ 倍程度差があるので、今後はこれをさらに試行回数を少なくとも $10^5$ 回以上まで増やし、ミュオンと区別するためにはどれだけの物質が必要かをさらに詳細に検討する必要がある。

### ◎観測可能性の検証

ミュオグラフィ観測の誤差は、ノイズによるものを除けばミュオン数がポアソン分布をとることによる統計誤差が存在する。これは観測されるミュオン数と相関があるため、有意な観測を行うにはある程度の観測期間をとりミュオン数を稼ぐ必要がある。

そこで数値シミュレーションにより、小惑星内部で生成されるミュオンを推定し、その推定値から内部の3次元密度分布を再構成するシミュレーションを行なった。

ここでは、小惑星の全質量が等しくなる2つのパターンを判別できるかどうかを検証した。1つは直径50mの小惑星内部に、核となる直径31.5mの2.2(g/cm<sup>3</sup>)の高密度部分があり、外側は破砕物の集合による空隙により密度が1.8(g/cm<sup>3</sup>)となっている場合、もう一つは全体が均質に密度1.9(g/cm<sup>3</sup>)となっている場合である。これは、例えば小惑星全体が等しく集積しているのか、あるいは特定の高密度天体を核として集積したのかを判別できるか、という観測に対応する。

シミュレーションは、以下の2段階に分けて行った。

①図1に示したミュオン強度をもとにミュオン観測のシミュレーションを行い、探査機軌道上の各点で小惑星の密度投影を作成する。

②得られた密度投影を用いて、重畳積分法を用いて3次元再構成を行う。

また、観測条件として天体から半径100mの円周上を回る軌道を想定し、観測期間は十分なミュオン数が得られる期間として1年とした。

シミュレーションの結果を図2に示す。図2、図3ともに1マスは10m四方である。探査機は3つ示した断面の内、真ん中の断面と同じ平面上を周回している。2つのシミュレーション結果には明らかな違いがあり、小惑星内部の状態を区別することが可能であることが確認された。

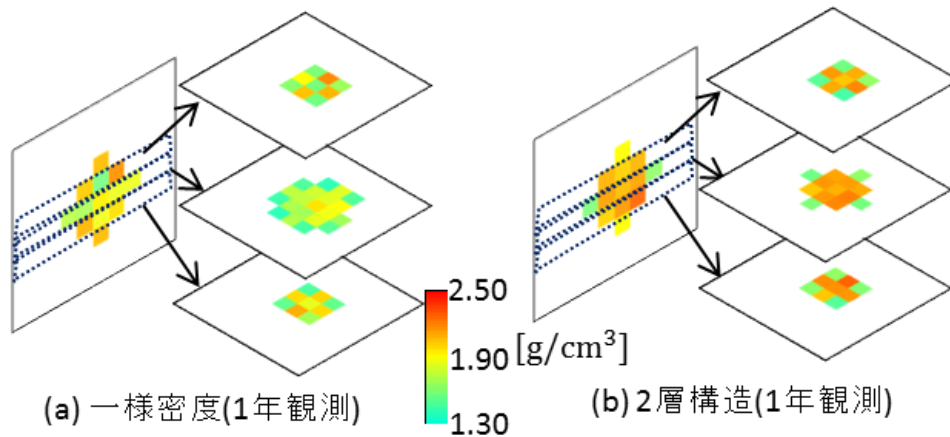


図2 直径50mの球形天体の観測を想定したシミュレーション結果

### 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

本ミッションでは、これまで火山観測を中心に用いられてきたミュオグラフィを、宇宙空間での小惑星観測に応用するという点で独創的である。これは従来の光学観測と全く異なり、小惑星内部の情報をえることができる。

#### (b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

従来の手法では得られなかった小惑星深部の密度情報が得られる。これにより、小惑星の形成過程、物理的、化学的性質の理解が進むと考えられる。これは最終的には小惑星の成り立ち、ひいては太陽系の成り立ちに迫るものになると考えられる。

また、ミュオグラフィ技術の宇宙利用が実証されれば、惑星探査において新しい選択肢を得ることができ、惑星科学分野の発展に貢献すると考えられる。

ミュオグラフィ分野においても、技術の新しい運用方法が確立されることでさらなる活発な利用が促進されると考えられる。また、宇宙資源探査への応用により社会的にも大きな影響を与えるものと期待される。

以上

## ミュオグラフィによる小惑星の 3 次元透視

東京大学地震研究所高エネルギー素粒子地球物理学研究センター

修士課程 1 年 長原 翔伍

指導教員：田中 宏幸

### 1. はじめに

天体の形成過程を理解するうえで、小惑星の内部構造を調べることは有用である。例えば、小惑星探査機「はやぶさ」が探査した小惑星イトカワは、ラブルパイル天体であることがわかった。ラブルパイル天体は、一度衝突破壊された小惑星の破片が再び寄り集まってできたものである。この内部構造を知ることは、天体の破壊、集積がどのような過程で行なわれたのかを知る上で重要となる<sup>[1]</sup>。

従来の惑星内部を観測する手法としては、レーダーを用いた手法がある。例えば、月周回衛星「かぐや」は月レーダーサウンダー (LRS) により、月の深さ数百 m までの反射断面を観測した<sup>[2]</sup>。しかしこれは探査機自らが電磁波を観測対象に放射するアクティブな観測装置となる。

一方、近年、ミュオグラフィと呼ばれる、宇宙線素粒子ミュオンを用いた物体内部の密度を高解像度で観測する手法が発展してきている。これは現在、主に火山観測に用いられている。図 1 にその例を示す<sup>[3]</sup>。ミュオグラフィでは自然に存在している宇宙線を利用するというパッシブな手法であるため、低電力での観測が可能である。

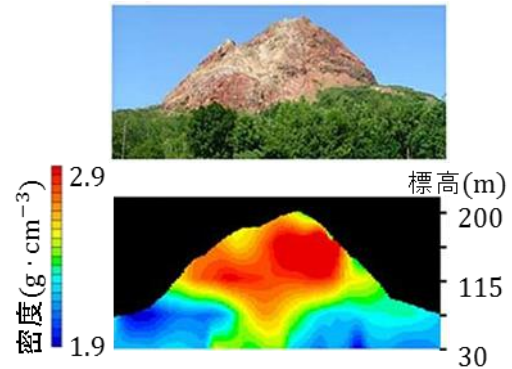


図 1 ミュオグラフィによる火山の透視<sup>[3]</sup>

そこで、我々はミュオグラフィを用いた小惑星の 3 次元透視を提案する。得られた観測データは、コンピュータ断層撮影法 (CT 法) により 3 次的に再構成する。

本ミッションでは「小惑星に対しミュオグラフィを応用する」という点に新規性がある。本ミッションの実現によって、小惑星内部の 3 次元密度構造の解明、及び宇宙空間におけるミュオグラフィ技術の実証がなされるものと期待される。またその結果として、近年検討されている宇宙資源探査にも寄与することが期待される。よって、本ミッションの目的は以下とする。

理学的目的：小惑星内部密度分布を高解像度で得ること

工学的目的：小惑星に対するミュオグラフィ技術の確立

## 2. 小惑星透視の原理

### 2.1 ミュオグラフィの原理

ミュオグラフィは、宇宙線ミュオンが火山などの物体を透過する際、その減衰がミュオンの通過した質量にのみ依存することを利用し、物体内部の密度を観測する技術である。このときミュオンが通過した質量を密度長 $[g/cm^2]$ という。地上でのミュオグラフィの概念図を図 2 に、小惑星でのミュオグラフィの概念図を図 3 にそれぞれ示す。地上では、ミュオンは 1 次宇宙線の陽子から大気との相互作用で予め生成され、物体内では減衰のみを考えればよい。一方、小惑星ではミュオンの生成、減衰の両方が小惑星内で生じる。しかし後述する数値シミュレーションによる検討の結果、ミュオンの生成は小惑星表面の 10m 以内で起こり、また生成途中の 10m 以内でも生成よりも減衰の方が大きくミュオン強度は小惑星の大きさに対して単調減少するので、地上と同様の観測が可能である。

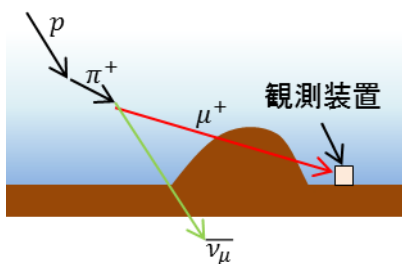


図 2 地上でのミュオグラフィの概念図

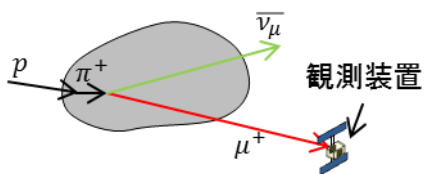


図 3 小惑星でのミュオグラフィの概念図

ミュオグラフィでは、ミュオンの到来方向のみがわかればよい。地上では図 4 に示したようなプラスチックシンチレータを用いた装置が用いられている。これはミュオンが通過すると発光するプラスチックシンチレータを縦横に並べ、さらにそれを 2 枚、距離を離しておいたものである。ミュオンが通過すると、縦のシンチレータと横のシンチレータが同時に発光するので、その交点からミュオンの通過位置を割り出す。これを 2 枚の観測装置で行い、通過点を結ぶことでミュオンの到来方向を決定する<sup>[4]</sup>。

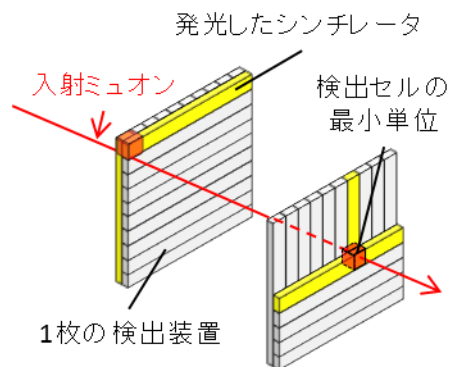


図 4 観測装置の例

### 2.3 コンピュータ断層撮影法 (CT 法) による 3 次元画像再構成

地上でのミュオグラフィでは、観測装置を容易に移動できないため、対象物体に対して観測点を増やすことが難しい。しかし小惑星観測では、観測装置をのせた探査機を小惑星の周回軌道に入れることで、容易に小惑星を様々な方向から観測することができる。これを利用すれば、コンピュータ断層撮影法 (CT 法) を用いた 3 次元密度分布の解析が可能である。これは X 線 CT ですでに実用化されている解析手法である。X 線 CT とミュオグラフィの比較を図 5 に示す。図 5 のように、ミュオグラフィの観測

は観測方位が 1 点から放射状に広がる。この場合は同一円周上での観測では厳密な再構成はできないことが知られている。この場合を近似的に解く方法として Feldkamp の近似解法がある<sup>[6]</sup>。これは 3 次元ラドン変換を 2 次元ラドン変換で近似する手法で、完全な 3 次元ラドン変換に比べ計算時間が短いという特徴がある。この近似は最大仰角が約 20°以下であればよい近似となる。

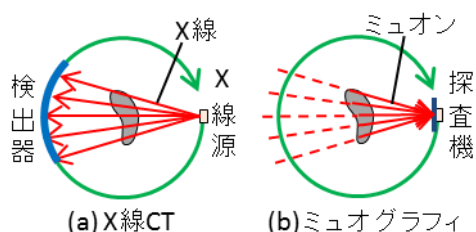


図 5 X 線 CT をミュオグラフィの比較

### 3. ミッション概要

#### 3.1 ミッション内容

本ミッションでは観測対象を小惑星とする。まず、衛星打ち上げ後、小惑星へ向けて飛行を行う。小惑星到着後、小惑星の周回軌道へ投入する。軌道上では、探査機を常に惑星に向け、小惑星から飛来するミュオンを観測する。そして、観測データを地上で再構成することにより、小惑星内部の密度構造を推定する。

#### 3.2 対象とする小惑星

本ミッションでは後述するミュオン強度の関係から、直径 50m 以下の天体を対象とする。

### 3.3 ミッション・シーケンス

本ミッションのミッション・シーケンスは以下である。

- ① 観測対象の小惑星への飛行軌道投入
- ② 小惑星周回軌道への投入
- ③ 初期観測  
小惑星形状の撮影、1 次宇宙線量の測定。
- ④ ミュオグラフィ観測  
小惑星から飛来するミュオンを観測。
- ⑤ 地上へのデータ送信  
得られたデータは随時地球へ送信。  
送信されたデータは地上で CT 法を用いて解析する。

### 3.4 サクセスレベル

本ミッションのサクセスレベルを表 1 に示す。

表 1 ミッションサクセスレベル

Minimum	小惑星とのランデブー
Middle	小惑星に対するミュオグラフィの実証
Full	小惑星の 3 次元密度分布の推定

## 4. ミッション実現方法

#### 4.1 ミュオグラフィ観測装置

本ミッションではプラスチックシンチレータを用いた観測装置を提案する。プラスチックシンチレータは、ミュオンを検知がすぐに電気信号へ変換されるので、通常の方法でデータ通信で観測結果を容易に地上へ送信できる。またプラスチックシンチレータは必要な電力が小さいことも特徴である。例

例えば、シンチレーション光の増幅にフォトマルを使用した場合、すべての観測装置を稼働させるのに必要な消費電力は 10W 以下に抑えられる<sup>[9][10]</sup>。ここでは空間分解能と後述するミュオン強度の関係から、1 枚の検出装置を 8×8 のセルに分割したものを探査機の両端に 1m 離して設置するものを提案する。概観を図 6 に示す。この装置の空間分解能が 5.7°、解像度は 15×15=225、装置全体の重量も 50kg 程度となる。

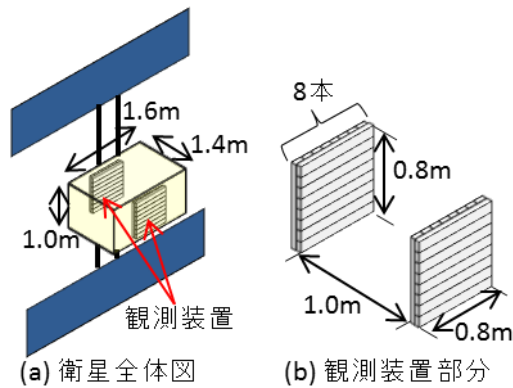


図 6 探査機と観測装置の設置位置

## 4.2 観測軌道

探査機の軌道半径は、Feldkamp の近似解法を用いるために小惑星全体が衛星から見て仰角 20°以下となり、かつ空間分解能の要件を満たす必要がある。直径 50m の小惑星の場合、仰角 20°以下となるには軌道半径 73m 以上、空間分解能 10m 以下とするには軌道半径 100m 以下が必要である。よって軌道半径は 73m~100m の間で制御する。またこのとき、姿勢制御は少なくとも観測装置の空間分解能以下で制御する必要がある。図 6(b)で示した観測装置の空間分解能は 5.7°であるから、少なくともこれ以下の変動で探査機の姿勢を制御することが求められる。

## 4.3 送信データ容量

観測データは、周回軌道上のある区間ごとのミュオン数である。この区間数は CT 法を行うのに十分な数があればよいが、これは装置の解像度、対象の形状により変化するため、正確な判断は困難である。そこで、仮に小惑星直径 50m、軌道半径 100m、128 分割の場合を考えると、約 7 分ごとに 225 個のミュオン数データが生成される。ミュオン数は整数であり、後述するミュオン強度から 8bit で十分であるから、この間に 225(B)，1 周観測する約 100 分間に 28(kB)程度である。

## 5. 数値シミュレーションによる

### 観測可能性の検証

#### 5.1 シミュレーション概要

本ミッションの実現可能性及び最適な観測対象、装置条件について評価するため、小惑星内で生じるミュオン強度の推定とその推定値を用いた観測のシミュレーションを行なった。

#### 5.2 小惑星におけるミュオン強度

1 次宇宙線から小惑星内部で生成されるミュオン強度を推定するため、Geant4 を用いた数値シミュレーションを行なった。物体は密度 2.0(g/cm<sup>3</sup>)の SiO<sub>2</sub> とし、運動エネルギー 0.22GeV~100TeV 陽子を 31 のエネルギー帯に分けて 300 発ずつ、合計 9300 発打ち込み、1 次宇宙線のエネルギーフラックス<sup>[11][12]</sup>による重みづけを行なった。結果を図 7 に示す。

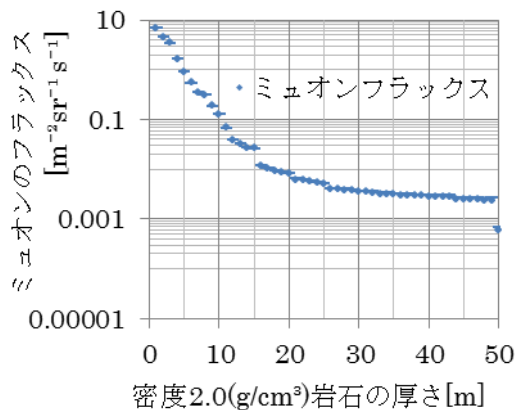


図7 宇宙空間における岩石の厚さとミュオン強度の関係

ミュオン強度は深さ 1m から単調減少しており、地上でのミュオングラフィと同様の観測が可能であることがわかる。また、直径 50m の小惑星を観測した場合、1辺 80cm の観測装置を用いれば 1日当たり 17個、年間で 6170 個のミュオンが観測可能である。この統計誤差の評価は観測シミュレーション部分で述べる。

図4のミュオン強度をもとに、観測可能な条件について検討する。

#### (1) 観測対象

今回ミュオン強度が得られたのは厚さ 50m までであるから、これを観測対象とする最大の大きさとする。

#### (2) バックグラウンドノイズの検証

バックグラウンドノイズで主要なものと考えられるのは、1次宇宙線である。1次宇宙線の強度は、運動エネルギー1TeV 以下のものを総合すると  $10^4(\text{m}^{-2}\text{sr}^{-2}\text{s}^{-1})$ 程度である。よって、そのまま観測したのではミュオンは小惑星と反対方向から飛来する1次宇宙線に埋もれてしまう。これには以下の2つの方法でミュオンとそれ以外を区別す

ることができる。

1つ目は、1次宇宙線が探査機に当たった場合に生じるシャワーを利用する方法である。1次宇宙線は、探査機内部でシャワーを発生させ、同時に複数の場所で反応を起こす。一方でミュオンは同時に1つずつしか検出されないと期待されるので、これを利用してミュオンか1次宇宙線かを判別することができる。このシャワーによる識別がどの程度可能か見積もるため、Geant4によるシミュレーションで1次宇宙線の強度曲線に従って合計 6000 発の陽子を打ち込んで検討した結果、探査機内に 500kg の質量がある場合、100TeV 以下の陽子の内 99%以上はミュオンと識別できること確認された。ミュオン強度と1次宇宙線強度は  $10^4$  倍程度差があるので、今後はこれをさらに試行回数を少なくとも  $10^5$  回以上まで増やし、ミュオンと区別するためにはどれだけの物質質量が必要かをさらに詳細に検討する必要がある。

2つ目は、図4で示した2枚の検出装置に反応した順番から、粒子の飛来方向を決定する方法である。これにより、小惑星の反対側から飛来する陽子を識別することができる。これを実現するには、検出装置の間隔が 1m の場合で 1ns の時間分解能が必要となる。シンチレータの応答は ns オーダーなので、読み出しの時間分解能をあげればこれによる判定は可能である。

### 5.3 観測のシミュレーション

ミュオングラフィ観測の誤差は、ノイズによるものの他にミュオン数がポアソン分布をとることによる統計誤差が存在する。そのため、有意な観測を行うにはミュオン数



がたまるまで観測期間をとる必要がある。

そこで、小惑星内部で生成されるミュオンを図 7 から推定し、その推定値から内部の 3 次元密度分布を再構成するシミュレーションを行なった。ここでは、総質量及び半径が等しい表 2 の 2 種類の球形小惑星を判別可能かどうか、検証した。

表 2 シミュレーションを行なった小惑星

	一様構造	2 層構造
内層(0~15.75m)	1.9(g/cm <sup>3</sup> )	2.2(g/cm <sup>3</sup> )
外層(15.75-25m)	1.9(g/cm <sup>3</sup> )	1.8(g/cm <sup>3</sup> )

これは、例えば小惑星全体が等しく集積しているのか、あるいは特定の高密度天体を核として集積したのかを判別できるか、という観測に対応する。

観測条件は天体から半径 100m の円周上を回る軌道を想定し、観測期間は十分なミュオン数が得られる期間として 1 年とした。

シミュレーションは、以下の 2 段階に分けて行った。

①図 7 のミュオン強度をもとにミュオン観測のシミュレーションを行い、探査機軌道上の各点で小惑星の密度投影を作成

②得られた密度投影を用いて、重畳積分法を用いて 3 次元密度分布を作成

なお、①においてミュオン数にポアソン分布に従うノイズを発生させた。①のシミュレーション結果の一例を図 8 に示す。ミュオン数は一様型で 30~200 程度、2 層型で 20~200 程度である。なお、ミュオン数の差は密度長以外に観測装置の感度が周辺部ほど低いことも影響している。密度の違いを最も顕著に受ける中心部分ではミュオ

ン数の差は 10 個程度である。

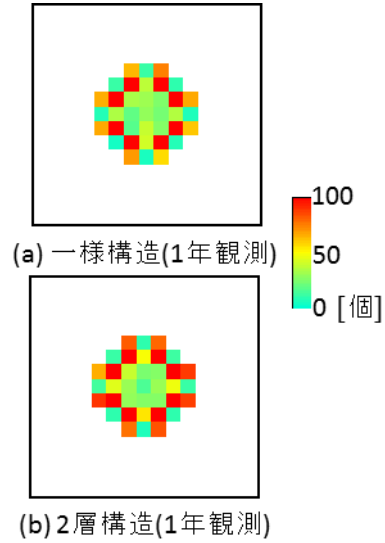


図 8 ミュオン観測のシミュレーション結果

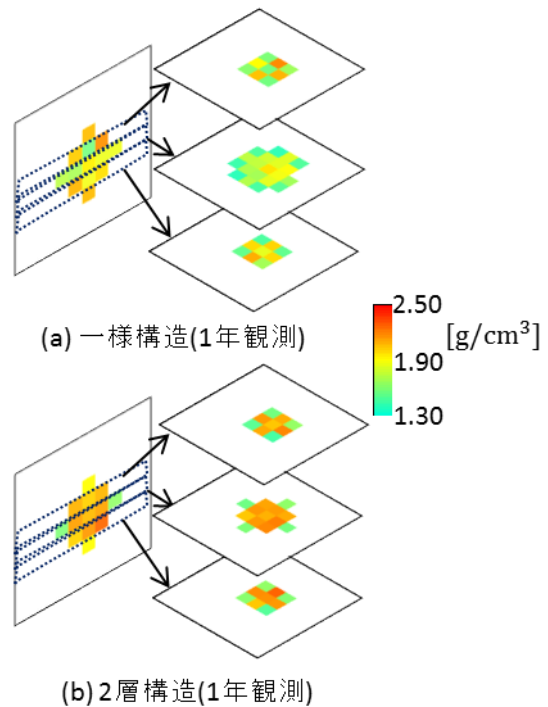


図 9 密度解析のシミュレーション結果

②の解析結果を図 9 に示す。図中の 1 マスは 10m 四方である。探査機は 3 つ示した断面の内、真ん中の断面と同じ平面上を周回している。2 つのシミュレーション結果

には明らかな違いがあり、小惑星内部の状態を区別することが可能であることが確認された。

## 6. まとめ

我々は、小惑星内部の新しい観測手法として、ミュオグラフィによる観測を提案した。本手法では、宇宙線ミュオンを用いることで小惑星の3次元密度分布を高解像度で求めることができる。本ミッションの遂行により、小惑星形成過程において新たな知見が得られること、及びミュオグラフィ観測の新しい可能性が示されることが期待される。

<参考文献>

- [1] 中村昭子, イトカワ探査機でみた衝突再集積天体と小天体の衝突過程
- [2] 熊本篤志 他, 「かぐや」搭載月レーダーサウンダー (LRS) による月地下探査及び自然波動観測
- [3] Tanaka, H. K. M., *et al* (2007b), Imaging the conduit size of the dome with cosmic - ray muons: The structure beneath Showa - Shinzan Lava Dome, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22311, doi:10.1029/2007GL031389.
- [4] 田中宏幸, 竹内薫, 素粒子で地球を視る 高エネルギー地球科学入門
- [5] T.H.Prettyman., *et al.*, (2014) Deep Mapping of small solar system bodies with galactic cosmic ray secondary particle showers, *2013 NASA INNOVATIVE ADVANCED CONCEPTS*

*PHASE I PROJECT*, grant number NNX13AQ94G

- [6] 篠原広行 他, コーンビーム CT 画像再構成の基礎
- [7] 黒田大介 他, 次期小惑星探査機はやぶさ 2 の探査候補天体の観測
- [8] はやぶさ 2 特設サイト <http://fanfun.jaxa.jp/countdown/hayabusa2/>
- [9] Hideaki Taira, et al., (2010) A potential space-and power-effective muon sensor module for imaging a volcano, *Earth Planets Space*, 62, 179–186, 2010
- [10] Uchida, T., et al., Development of a muonradiographic imaging electronic board system for a stable solar power operation, *Earth Planets Space*, 62, this issue, 167–172, 2010.
- [11] AMS Collaboration, Cosmic protons, *Physics Letters B* 490 (2007) 27-35.
- [12] Cosmic rays and gamma rays in the Galaxy  
<http://www.mpe.mpg.de/~aws/propagate.html>