

## 審査の結果の要旨

氏名 元岡 範純

修士(工学), 元岡範純提出の論文は「重力モデルを介した小惑星形成に関わる一考察」と題し, 本文 7 章及び付録から成っている.

小惑星探査において, 特に表面への降下・着陸時には探査機に高精度な誘導が要求される. しかし, 多くの小惑星はその内部に空隙が存在する. 例えば, 小惑星探査機「はやぶさ」が降下・着陸した小惑星「イトカワ」の内部には約 40%の空隙が存在すると推定されている. 空隙や内部の密度の分布によって, 表面上および上空における重力加速度の分布は大きく異なる. このため, 高精度な誘導を実現するためには事前に重力場, 言い換えれば, 重力ポテンシャルを推定しておく必要がある. 重力ポテンシャルを推定することが, 結果として内部構造を解く手がかりを与え, 小惑星形成の理解を深めることにつながる. 重力ポテンシャルを推定する一般的な方法として, 探査機を周回軌道に投入し, 探査機が実際に受けた加速度履歴からこれを推定する方法があるが, 滞在期間の制約や周回軌道への投入に関わるリスクの観点から, 必ずしもこのような推定に特化した周回運用を実施できるとは限らない. 実際に, 「はやぶさ」では周回運用を行わず, イトカワの内部構造を均一と仮定して, 降下・着陸にかかわる探査機の誘導を行った.

以上を背景に, 本論文は, 周回を含む探査機の運動計測を実施しなくても重力ポテンシャルを推定できる手法を確立し, 探査機の誘導精度の向上に大きく貢献させることを目的に, ひいては小惑星の内部構造を推定する手法を提案している. 本論文では, 誕生から長い年月が経過した小惑星では表面形状がジオイド形状 (ゼロ速度曲面) に沿うべきであるという考え方にに基づき, 画像にて構築された小惑星表面上でのゼロ速度曲面値の分散を推定指標とし, 指標が最小となる内部構造を推定している. 推定結果には, 実際に撮影された「イトカワ」表面の特徴や, 「はやぶさ」の飛翔データからの検証と考察を加え, さらに, この推定手法を探査機の精密誘導へ利用する方法について論じている.

第 1 章は序論であり, 本研究の目的と意義を述べている. 空隙分布が異なることに起因する誘導誤差についての具体的な計算例を示し, 空隙を有する小惑星においては, 重力加速度分布の推定が探査機の精密誘導の観点で重要であることを説明している.

第 2 章は, 小惑星の形状から推定指標を計算する具体的な方法について述べている. また, 重力ポテンシャルが高い精度で推定されている小惑星「エロス」に対して本推定手法を適用し, 推定結果と実際の重力加速度の分布がよく一致していることを確認し, 方法の妥当性を証明している.

第 3 章は, 本論文を構成する主たる章であり, 本論文が提案する独自の手法によって「イトカワ」の内部構造を推定することに成功している. 5 種類の典型的な内部構造の密度に関する分布モデルを提案し, 各モデルについて推定指標を計算して, 「イトカワ」の頭部と胴

体部の内部にそれぞれ高い密度の領域（コア）をもつモデルが最も尤度が高いと推定している。推定された内部構造のモデルから計算される小惑星表面上の重力加速度分布は、「イトカワ」表面に観測される二分化の様相や土砂の流動方向を整合性良く説明している。また、「イトカワ」内部を均一密度と仮定した場合には、これまでは、粒子間摩擦だけでは物理的な説明が困難であった「イトカワ」表面の急勾配の領域の存在も良く説明できると結論している。本章は、推定された結果が示唆する「イトカワ」の形成過程を議論・考察し、新たな結果を得ることに成功している。

第4章は、「イトカワ」の内部を多数の領域に細分化し、網羅的に密度分布を推定して、より客観的な密度分布モデルを提供することによって、前章までで得られた推定結果を支持することに成功している。

第5章は、第3章で得られた推定結果と、「はやぶさ」の飛翔データとの整合性を検証している。「はやぶさ」が1回目の着陸時に「イトカワ」表面に向けて自由落下した際の加速度履歴が、当該地域内部の密度が相対的に低いことを示唆しており、これが第3章で得られた推定結果と整合していることを述べている。

第6章は、推定結果の実際の探査機の運用面への利用方法を述べている。とくに、子機を小天体の表面に投下する場合の、内部の密度分布のモデルの違いによって生じる着地点の誤差面積について言及している。

第7章は結論であり、本研究の成果を要約している。

以上要するに、本論文は、形状から、空隙をもつ小惑星の内部構造を推定する手法を提案し、実際に「イトカワ」の内部構造を推定し、推定結果は表面に見られる地形的特徴や「はやぶさ」の飛翔データと整合しており、また、提案された推定手法は重力ポテンシャルを、探査機運用にかかるリスクを排除して推定できるものになっていて、精密な探査機の誘導にも応用できることから、宇宙工学、特に宇宙探査分野において貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。