

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 菊地 翔太

修士（工学）菊地翔太提出の論文は「Coupled Orbit-Attitude Dynamics of Spacecraft around Small Celestial Bodies（小天体近傍における宇宙機の軌道-姿勢カップリング運動）」と題し、英文で記述され、本文 11 章および付録から成っている。

小惑星や彗星などの小天体の周りでは、不均一な重力場と太陽光圧によって宇宙機の軌道・姿勢運動は強く乱される。加えて、重力によるトルクは軌道に依存し、太陽光圧の力は姿勢に依存するため、宇宙機の軌道運動と姿勢運動は互いにカップリングする現象が見られる。実際のミッションではこれらの影響を相殺するために頻繁に制御を加える必要があり、このことが燃料重量の増加やミッションの短命化につながるものが問題であった。

そこで本研究では、小天体近傍の複雑な軌道-姿勢カップリング運動を解析し、長期間自然に安定となるようなダイナミクスを見出している。更に、運動モデルを拡張することで、小天体周りの電場を利用して静電気力を誘起することで、運動を制御する手法を合わせて研究している。本研究では、小天体周りに特異な軌道-姿勢カップリング運動の構造を解明するため、解析的な理論構築と、数値シミュレーションの両面から研究を行っている。

第 1 章の序論では、本研究の背景と貢献範囲を述べている。以降では、第 2 ～6 章を第 1 部として自然な軌道・姿勢カップリング運動を扱い、第 7～10 章を第 2 部として静電気を利用したダイナミクスの解析を行っている。

第 1 部では、まず第 2 章で宇宙機と小天体のモデルを導入している。第 3 章では、軌道運動のみを扱い、ラグランジュの惑星方程式を用いて、重力高次項と太陽光圧の摂動を受ける軌道運動をモデル化している。その上で、このモデルに基づいて太陽に対する幾何関係が常に一定となるような太陽同期軌道の解を解析的なアプローチで導出している。これにより、不均一な重力と太陽光圧の影響下であっても、長期間安定となるような軌道運動が得られることが示された。第 4 章では、第 3 章で得た太陽同期軌道上を周回する宇宙機の姿勢運動を解析している。ここでは、線形化されたオイラー方程式で運動をモデル化し、

同じく解析的なアプローチで太陽追尾運動を達成する条件を導出することに成功している．このような運動を利用することで，自然に宇宙機が太陽方向を指向する運動の実現可能性が示された．第 5 章では，より厳密な軌道-姿勢カップリング運動の方程式を用いて，ダイナミクスを数値的にシミュレートすることで，第 3, 4 章の解析的な理論の妥当性を示した．本章ではさらにそのような軌道-姿勢カップリング運動の安定性指標として，有限時間リアプノフ指数を定義することで，複雑なダイナミクス安定性の定量的な評価を行った．第 6 章では，ここまでの理論を補強するアイデアとして，姿勢制御による軌道修正と角運動量手法を提案し，長期間安定な自然運動と組み合わせることで，燃料フリーの運動安定化の可能性を明らかにした．

第 2 部では，第 7 章で宇宙機と小天体のモデルに加えて，小天体周りのプラズマのモデルを導入している．第 8 章では，宇宙機の運動を解析するための準備として，プラズマダイナミクスの解析を行った．理論と解析モデルに基づくシミュレーションを行うことで，小天体周りでの電場を計算した．第 9 章では，小天体重力と太陽光圧に加えて，静電気力の影響を受ける宇宙機の軌道運動の解析が成されている．前章で計算した電場を利用して静電気力を誘起することで，太陽側（昼側）に大きくオフセットするような光学観測に適した軌道解を見出した．第 10 章では，前章で見出した静電気力を利用した軌道上での姿勢運動の解析を行っている．宇宙機に働く静電トルクをモデル化し，重力傾斜トルクとの類似性から解析的なアプローチで姿勢運動の安定性を定式化した．また，数値シミュレーションを合わせて行うことで，確かに軌道上で安定となるような姿勢運動が達成されることを明らかにした．

第 11 章では，結論として本研究で明らかにされたこととその意義を述べている．

以上を要するに，本論文は小天体周りの軌道-姿勢カップリング運動について，自然運動と静電気力を利用した運動の解析を行い，長期間安定で観測に有用な軌道・姿勢運動を見出すことに成功した．このようなダイナミクスを利用することで，小天体探査ミッションにおいて燃料の節約やミッションの長寿命化に貢献することが可能となる．また，単に実用的なだけでなく，古典的な軌道・姿勢力学では深く扱われていなかった軌道と姿勢が強くカップリングする現象のモデル化と解析を行うことで，その様々な特異性を明らかにしており，宇宙工学上，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。