

京都大学	博士 (工 学)	氏名	山口 皓平
論文題目	On Asteroid Deflection Techniques Exploiting Space Plasma Environment (宇宙プラズマ環境を利用した小惑星の軌道変更手法に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、地球に衝突する恐れのある小惑星の軌道変更手法について検討したものである。高い軌道変更能力を達成することを目的として、宇宙プラズマ環境を積極的に利用した効果的な手法の提案と検証に取り組み、7章構成でまとめている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景となる地球接近小惑星の現状について触れている。まず、小惑星を発見する取り組みの現状と、これまでに提案された地球衝突の回避手法を紹介した。次に、既存の手法の性能的な限界に言及しつつ、宇宙プラズマ環境を積極的に利用することの有用性についても強調している。</p> <p>第2章では、宇宙機を小惑星に衝突させる軌道変更手法である Kinetic Impactor (KI) の評価手法として、Impact Geometry Map (IGM) という概念を提案している。IGM は、宇宙機の衝突によって得られる軌道変更効果の最大値を、宇宙機を投入する軌道ごとに計算し可視化する概念である。半長径と離心率によって特徴付けられる宇宙機軌道の形状に対して、小惑星との最適な軌道交点が数値的に計算され、その効果が2次元のカラーマップとして示された。また、楕円の方程式を元にした衝突軌道の幾何的な計算にも取り組み、IGM の性質が詳細に解析されている。</p> <p>第3章では、宇宙機の推進システムに帯電セイルを仮定した KI について述べられている。帯電セイルは、太陽から吹き出す高速のプラズマ流である太陽風と、宇宙機本体から展開した高電位の導電性テザーとの相互作用によって推力を発生させるシステムである。燃料レス・高効率推進が可能な点に着目し、KI への有用性が本論文で初めて検討された。まず、複雑な形状を有する帯電セイルの姿勢と推力の関係が解析され、推力のモデルが定式化された。また、それらを3次元の運動方程式に組み込むことで、軌道計算用モデルが確立された。更に、大規模システムである帯電セイルの軌道制御手法として、その姿勢を慣性空間に対して一定としたまま、テザー電位のみを変更する手法を提案し、有効性を数値シミュレーションで確認した。また、KI に用いることの有効性についても、数値シミュレーションによって確認された。小惑星の軌道変更距離の最大化を目的関数とした宇宙機の軌道最適化を行い、有効な軌道変更が達成可能であることを明らかにした。また、帯電セイル KI が Apollo 群小惑星の軌道変更に対して効果的であることを明らかにし、その原因を推力の発生原理から説明している。</p> <p>第4章及び5章では、小惑星と宇宙機を人工的に帯電させ、両者の間に生じるクーロン力で小惑星を牽引する、クーロン力・アトラクタについて取り扱っている。まず第4章では、小惑星の人工帯電を解析するツールの開発について述べている。本論文では、小惑星の3次元形状データを導入し、メッシュの各頂点において定義した電流源によって、周辺プラズマと帯電小惑星との相互作用を表現した。各電流源における電流は、二次電子放出や光電子放出といった小惑星の構成物に依存するものも考慮し、表面電圧の非線形関数として定義されている。この非線形問題は Newton-Raphson 法を導入することで解析され、小惑星電位の人工的な変更が可能であると示された。第5章では、帯電した小惑星近傍における宇宙機のダイナミクスの定式化と、実際に達成される軌道変更距離・速度について述</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	山口 皓平
<p>べられている。まず、1機の宇宙機を小惑星から一定の距離においてホバリングさせて牽引する形態について検討した。線形化した運動方程式から軌道制御則を定式化し、非線形の運動方程式においてその有効性を確認した。次に、小惑星から一定の距離を保ちながら円運動を行う Artificial Halo Orbit に宇宙機を投入して牽引する形態についても検討した。Artificial Halo Orbit には複数の宇宙機が投入可能であることから、帯電宇宙機周囲の電位構造が計算され、宇宙機が互いの軌道を阻害しないための条件が示された。また、定式化した運動方程式を数値積分することで、クーロン力の導入による軌道変更の距離・速度の増大が可能であることも確認している。更に、複数宇宙機を用いた同時牽引により、軌道変更の効果が更に増大可能であることも示された。</p> <p>第6章では、実在する小惑星に対する帯電セイル KI 及びクーロン力・アトラクタを用いた軌道変更ミッションの設計と、数値シミュレーションによる有効性の確認が行われた。帯電セイル KI については、4つの Apollo 群小惑星に対する検証が行われ、有効な軌道変更距離が達成可能であることが示された。また、軌道制御の過程で発生する位置・速度誤差についても、既存の終端誘導技術による対応が可能であることを示している。クーロン力・アトラクタについても、3つの小惑星に対する検討が行われた。本章においては、牽引によって達成される単純な位置と速度の変化だけではなく、最終的な地球接近距離の変化が評価の指標として用いられた。結果として、クーロン力・アトラクタは、低離心率の軌道を持つ低質量の小惑星の軌道変更に特に有効であることが示された。これは、万有引力のみを用いた牽引では軌道変更の困難な小惑星であることから、クーロン力・アトラクタの有効性が強調された。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、地球に衝突する恐れのある小惑星の回避手法として、宇宙プラズマ環境を利用した効果的な軌道変更手法に関する研究結果について取りまとめたものである。本論文で得られた成果は以下の通りである。

1. 宇宙機を小惑星に衝突させる軌道変更手法である Kinetic Impactor (KI) に対して、達成可能な効果と衝突に用いる軌道との関係を可視化する Impact Geometry Map (IGM) を提案した。IGM において、宇宙機の衝突軌道は半長径と離心率の値を元に分類されるため、仮定する推進システムの種類に依らず衝突効果の評価に適用可能である。また、衝突効果を最大化する軌道交点の性質についても解析しており、論文中で詳細に解説されている。

2. 太陽風を利用して推進する帯電セイルを用いた KI について検討し、その有効性を示した。まず本論文では、複雑な形状を有する帯電セイルの姿勢と推力の関係を表すモデルを確立し、軌道制御手法の提案と検証も行っている。また、架空の小惑星に対する軌道変更ミッションを設計し、数値シミュレーションを用いることで帯電セイル KI の有効性を検証した。結果として、帯電セイル KI が Apollo 群小惑星の軌道変更の有効であることを明らかにし、その原因を推力の発生原理に基づいて説明している。

3. 小惑星と宇宙機を人工的に帯電させ、両者の間に生じるクーロン力によって牽引を行う、クーロン力・アトラクタについて検討した。まず、実際の小惑星の形状を考慮した帯電解析ツールを開発し、小惑星の表面から人工的に荷電粒子を排出することで、人工的な帯電が変更可能であることを示した。次に、帯電した小惑星近傍における宇宙機のダイナミクスを定式化した。また、数値シミュレーションを用いた検証により、クーロン力の導入によって小惑星の軌道変更距離・速度が増大することを確認している。

4. 帯電セイル KI、クーロン力・アトラクタの両手法について、実際の地球接近小惑星を対象とした場合の効果の確認にも取り組んだ。帯電セイル KI については、有効な軌道変更距離が達成可能であることが示された。また、軌道制御の過程で発生する宇宙機の位置・速度誤差に関しても、既存の技術による対応が可能であることを示している。クーロン力・アトラクタについても、達成される地球接近距離の変化が計算された。結果として、小質量かつ離心率の小さな軌道を持つ小惑星に対して、特に効果的な軌道変更が可能であると示した。

以上に示した内容から、本論文は、小惑星の地球衝突問題という重要な災害への対処手法として、宇宙プラズマ環境を利用した独創的で効果的な手法の提案と検証を行ったものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。