

氏 名 森本 睦子

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 936 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Artificial Equilibrium Points by Continuous Thust in
the Restricted Three Body Problem

論文審査委員 主 査 教授 吉川 真
教授 上杉 邦憲
助教授 山川 宏
教授 加藤 隆二
助教授 澤井 秀次郎
教授 上野 誠也（横浜国立大学）
教授 川口 淳一郎（JAXA 宇宙科
学研究本部）

論文内容の要旨

本研究は、宇宙探査機の連続推進による軌道制御能力を積極的に利用した人工的な停留点、およびその周りの周期的な軌道の特性を明らかにし、その設計手法を確立することを目的としている。

1772年「ラグランジュ点(L点)」が発見され、制限三体問題の研究が始まった。「制限三体問題」とは、「太陽—地球」系など主となる二天体の影響下における質点の運動であり、その運動は非線形方程式で記述され、一般的には解析的に解くことができない。制限三体問題は、二つの主要天体を座標軸に固定した回転座標系で表現されることが多い。L点は、この座標系における遠心力と主天体からの重力の平衡点であり、五つ存在する。そのうち、三つは主天体を結んだ線上に存在し(L1-L3)、残りの二つは、軌道面内において主天体を各頂点とする二つの三角形の残りの頂点の場所に存在する(L4-L5)。

1950年ごろより、探査機の軌道を考えるにあたり、このようなL点の実利用が検討されてきた。「地球—月」系では、月に対して地球と反対側にあるL2点の回りに月の直径より大きい環状の周期軌道(periodic orbits)を作ることで、常に地球と月の裏面双方と通信できる概念が示された。このようなL点回りの環状軌道はHALO軌道と呼ばれている。これ以後、「太陽—地球」系など、あらゆる系におけるL点の利用が活発に検討され、実際の科学観測にも利用されてきた。L点周りの軌道は、弾道軌道を想定して設計されており、実際のミッションでも少量の制御量でその軌道を維持することができる。

一方で、近年低推力推進の開発が進み、推進システムとして軌道調整用だけではなく、惑星間航行のメインエンジンとしても利用が実現している。間欠的に大きな推力を出す化学エンジンに比べて、低推力推進機関は、推力は小さいが連続して推力を出し続けることができ、また比推力が大きいという特徴がある。ISAS/JAXAの探査機「はやぶさ」は、2003年5月に打ち上げられ、電気推進をメインエンジンとして、惑星間を航行し小惑星「イトカワ」に到着した。また、太陽の光子を利用して推進するソーラーセイルも現実化しつつある。

複数の連続推進機関の発展により、これらの推進機関を適切に用いて軌道を多様に設計できるようになった。そこで、我々はもう一度考える必要がある。L点を利用する場合、位置が5箇所に制限されているが、これらの点は最適な場所なのか？連続した加速度を与える推進機関を用いて、L点以外の点を自由に利用することにより、より柔軟なミッション設計を行う事ができると予想される。

これまでに、弾道軌道ではL点周りの周期軌道が研究されてきた。また、連続推進機関を用いた研究では、ソーラーセイルによる平衡点を構築する研究がなされてきた。これらは、特定の推進機関による、特定の主要天体系を想定して検討されている。

これに対して、本研究では、連続推進機関を用いることにより、1)宇宙空間の任意の二天体系、三次元空間の任意の点における人工的な平衡点(Artificial Equilibrium Points)及び周期的な軌道を解析的に構築する手法を確立し、そのダイナミクスを明らかにする。2)連続推進機関を用いることで、従来の化学推進を主とした探査機の組み合わせでは実現し得なかった、新しい周期的な軌

道を提案する。ことを目的としている。このような停留点や周期軌道は、任意の二天体の系を想定しているため、「太陽—地球」系、「木星—エウロパ」系、「冥王星—カロン」系、「小天体—小天体（バイナリ）」全てに応用可能である。任意の観測点に停留することができ、また周期軌道を用いると、定期的に同じ点を通るため定点観測などに応用できる。そのため、例えば、小惑星におけるホバリングミッション（太陽—小惑星系、バイナリ小惑星系）、宇宙天気予報ミッション（太陽—地球系）に応用することができる。

任意の点を人工的に探査機の平衡点（停留点）にするためには、二天体の重力と回転座標系における遠心力の合成を打ち消す連続した加速度を探査機に適切量与える必要がある。そこで最初に、このような必要加速度の大きさと方向を三次元空間の各点において求めた。現在使用されている低推力機関を用いて探査機を停留させることができることを明らかにした。

次に、停留点において運動方程式を線形化し、停留するために必要加速度を、停留点周りの周期軌道においても連続的に一定に与えるというシンプルな手法により、任意の停留点周りの周期軌道を解析的に構築できることを示した。この手法により構築される周期軌道では、同じ停留点でも周期が異なる複数の軌道が存在する可能性があることが分かった。また、このような周期軌道を実現する周期の数を各々の点について解析した。その各々の点の周期解の数は、位置座標成分の3つのパラメータと主要2天体の系を表現する質量比の合計4つのパラメータにより決定されるが、安定性については線形運動方程式の特性方程式の係数である2つの別のパラメータで考察することができる。この2つのパラメータ平面上で、解の領域（周期解の種類）に応じて、6つに分けられることがわかった。このうち、周期が3種類存在する安定な領域があるという知見が得られた。一定の加速度に、周期軌道の位置に依存する付加加速度項をフィードバックさせることにより、周期解の数を増やすことができることを確認した。

また、構築された周期軌道において、主要二天体の運動面内・面外方向の周期特性を解析することで、面内・面外の周期が共鳴する点を求め、「HALO」型、「8の字」型や「波」型のような周期軌道を新しく構築した。L点における従来の HALO 軌道では、線形化によって導かれる面内周期と面外の周期が異なるため、その軌道はリサージュとなる。弾道による HALO 軌道を構築するためには、非線形項の影響を考慮する必要があるため、その軌道はある大きさ以上に制限されている。一方、本研究の連続加速度を用いて停留点で線形化する方法では、非線形による近似が有効である軌道の大きさの範囲内において、軌道を解析的に構築することができる。さらに非線形効果が表れる大きな振幅の周期軌道も、線形化によって求められた初期値をもとに構築することができることを示した。

このように、L点に制限されない任意の点に、連続推力を用いて停留点を構築するという本研究は、今まで考慮されていなかった領域における軌道計画を可能にするなど、新しい可能性を切り開くものであり、今後の多様なミッション計画により柔軟な設計と多くの選択肢を与えるものである。

論文の審査結果の要旨

森本睦子氏の本研究の新規な点は、制限三体問題における平衡点領域の拡張という新たな概念を導入したところにある。

よく知られているように、円制限三体問題において、重力と遠心力が釣り合う平衡点がラグランジュ点である。ラグランジュ点は、二つの主天体を結ぶ直線上に3点(L1, L2, L3)、また、二つの主天体が運動する軌道面上でこれらの主天体からの距離が等しいところに2点(L4, L5)の、合計5点存在する。太陽-地球系を考える場合、地球から太陽側と反太陽側へそれぞれ約150万kmのところにL1, L2点が存在する。太陽に対して継続的に同じような相対位置関係が保たれることや、安定した熱・重力環境等があるため、近年、これらの点には多くの人工衛星が打ち上げられている。ラグランジュ点は、宇宙ミッションにとって有用なものであるが、本研究は、近年実用化されている連続的加速が可能なイオンエンジン等の推進機関の使用を想定することで、ラグランジュ点以外の領域に人工的な平衡点を構築することを提案するものである。出願論文では、その解析手法を提示・説明し、数値解析によって、その有用性をまとめている。

森本睦子氏は、イオンエンジン等の推進機関による制御を念頭において、まず、円制限三体問題の回転座標系における運動方程式で、重力および遠心力と釣り合うような制御加速度を位置の関数として表現した。つまり、これが人工的な平衡点である。次に、任意の平衡点まわりに運動方程式を線形化することで、平衡点まわりの軌道ダイナミクスや線形方程式の適用範囲について論じた。制御加速度の大きさや方向については、人工衛星の運用の観点から、まずは平衡点周辺では一定としている。その結果、線形運動方程式の解の特性方程式が3次方程式で表されること、特性方程式の3次と2次の係数は定数であり残りの二つの係数が平衡点の位置および主天体の質量比の関数であること、平衡点まわりの周期解として最大3種類の周期を持つ可能性があることを見出している。中でも、前記の特性方程式の判別式および二つの係数値によって、平衡点の存在する3次元空間を、平衡点まわりの周期解の種類に応じて六つの領域に分類できることを明解に示したことは、本研究の重要な成果といえることができる。また、一定加速度の制限をはずして、平衡点からの位置に比例した微小なフィードバック制御加速度項を付加することにより、周期解が存在する人工的平衡点の領域をさらに拡大できることを示したことは、もう一つの重要な成果である。

さらに本研究では、制御加速度がない場合には実現できない平衡点まわりの周期解の例として、二つの主天体を結ぶ直線上の平衡点について、主天体の軌道面内と面外の周期が整数比となるような周期軌道を、数値シミュレーションにより構築した。また、具体的に、太陽系空間の観測を通して地球周辺の放射線環境の予報を行う宇宙天気予報ミッション、小惑星近傍の任意の点から定点観測を行う小惑星ホバリングミッション、彗星尾部通過時の環境計測を行う彗星尾部探査ミッション等への応用が提案されている。

本研究のように、任意の質量比の2天体系に関して、3次元空間の任意の点での人工的な平衡点の構築を提案し、解析的に軌道ダイナミクスを明らかにした研究例はなく、軌道工学、宇宙ミッション解析の観点から貴重な手法を提案・構築したものと評価できる。また、現存する推進機関で実現できる制御加速度という観点から適用範囲を明らかにしてい

る本研究は、従来では実現し得なかった宇宙探査ミッションの可能性に対して重要な示唆を与えるものとなっている。

具体的な審査についてであるが、2006年1月13日に、審査委員6名参加の下で、論文内容、関連する専門分野およびその基礎となる分野に関する知識について口述試験が行われた（審査委員1名は別途実施）。また、2006年2月9日には公開発表会が実施された。これらにおいて、森本睦子氏は論文の要点を明解に説明し、提示された質問に対する確な受け答えを行っており、軌道力学、天体力学など論文内容に関連した多岐にわたる知識と技術について十分な理解をもっていると認められた。本論文、および参考文献として提出された森本睦子氏筆頭著者の査読つき論文3編はいずれも英文で執筆されており、出願者の語学力も十分な水準にあると判断された。

以上により、森本睦子氏は学位授与にふさわしい知識と学力を有すると認められ、審査委員全員一致で試験合格と判断された。