

Graduate School of Fundamental Science and Engineering
Waseda University

博士論文概要

Doctoral Thesis Synopsis

論文題目

Thesis Theme

Analysis and Design of Chaotic Transfer
Trajectories in the Restricted Three- and
Four-Body Problems

制限三体・四体問題における
カオスの遷移軌道の解析と設計

申請者
(Applicant Name)

Kenta	OSHIMA
大島	健太

Department of Applied Mechanics, Research on Applied Mathematics

November, 2017

複数天体の重力の影響を記述する基本的なモデルの一つとして、円制限三体問題が挙げられる。円制限三体問題の平衡点 L_1 , L_2 周辺のダイナミクスは宇宙機の燃料消費量を抑えた低エネルギー軌道の設計に利用されてきた。 L_1 , L_2 周りの不安定周期軌道に漸近する不変多様体が構成する tube 構造内部の軌道のみが、平衡点で隔てられた異なる領域間を遷移する性質に基づいて、低エネルギー軌道の体系的な解析や設計が可能である (Koon 等, 2011)。しかしながら、低エネルギー軌道に関する研究の課題として、 L_1 , L_2 近傍以外の領域のダイナミクスに関する研究が少ない点、複数の天体重力の摂動を受けることで初期条件に鋭敏に依存するため、燃料消費量に関する最適化が難しい点、遷移時間が長くなる場合が多い点が挙げられる。そこで本論文では、上述の課題の重要性を端的に示す軌道力学の問題に対して、解決方策となる手法を構築および応用することを目的とした。以下に、本論文の構成と得られた成果の概要を述べる。

第一章では、本論文の背景を述べた。第二章では、制限三体・四体問題のモデルを導入し、平衡点、周期軌道、不変多様体の基本的な性質をまとめた。

第三章では、トロヤ群小惑星が安定な平衡点 L_4 , L_5 近傍間を遷移する jumping Trojan 現象の力学的機構を明らかにした。Tsiganis 等 (2000) と Connors 等 (2011) はそれぞれ太陽-木星系、太陽-地球系のトロヤ群小惑星の軌道データを数値積分することで、 L_4 , L_5 の一方の周りに捕捉されていたトロヤ群小惑星が、不安定平衡点 L_3 近傍を経由して L_4 , L_5 のもう一方の周りに捕捉される jumping Trojan 現象を発見した。本論文では、軌道が有する多数のループ構造から一点ずつを切り取る loop map と呼ぶ手法を導入し、太陽-木星系の平面円制限三体問題における L_3 周りの周期軌道に漸近する不変多様体がつれ合うことで発生する lobe 構造を可視化した。さらに、lobe 構造間の遷移メカニズム (Wiggins, 1991) に基づき、 L_4 , L_5 周辺の lobe 構造の交差領域に設定した初期条件が jumping Trojan 現象を示すことを見出した。太陽-地球系においては、金星の摂動を含めた平面円制限四体問題を用いてはじめて lobe 構造が生じることを示し、lobe 構造の交差領域に設定した初期条件が jumping Trojan 現象を示すことを明らかにした。

第四章では、quasi-satellite orbit (QSO) と呼ばれる軌道の様々な種類 (ファミリー) を明らかにし、得られた不安定周期 QSO の応用を提案した。MMX をはじめとする様々なミッションが QSO の利用を検討している状況下において、三次元の QSO に付随する遷移・捕捉現象を司ると考えられる不安定周期 QSO (3D 不安定周期 QSO) のファミリーはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、地球-月系および火星-フォボス系の円制限三体問題において、2D 不安定周期 QSO を分岐解析することで新たに分岐解として 3D 不安定周期 QSO の様々なファミリーを明らかにした。得られた 3D 不安定周期 QSO の一つ目の応用として、3D 不安定周期 QSO に付随する不変多様体の相空間構造に基づいて長期安定な 3D 準周期 QSO を求める手法を提案した。長期安定な 3D 準周期 QSO は、月やフォボス等の

天体の高緯度領域の長期間の観測や探査に有用と考えられる。二つ目の応用として、不安定性の弱い 3D 不安定周期 QS0 の不安定多様体によるフォボスへの着陸を提案し、その初期解析を行うことでミッションへの有用性を示唆した。

第五章では、化学推進を想定した高推力かつインパルス的な推進を用いる地球-月間低エネルギー遷移軌道の大域的な探索を、太陽-地球-月系の平面円制限四体問題において行った。近年 Topputo(2013)は、遷移時間 100 日以下の地球-月間遷移軌道を大域的に探索することで、遷移時間-燃料消費量の解空間構造を明らかにした。しかしながら、燃料消費量を低減できる可能性がある遷移時間がより長い遷移軌道に関しては、少数の先行研究の解が散見されるのみであり解空間における大域的な構造は明らかになっていない。そこで本研究では、まず設計変数空間において網羅的な格子探索を行うことで、初期予想軌道で大域的に探索した。さらに、目的関数と拘束条件の解析的勾配および並列計算を実装することで、得られた初期予想軌道を multiple shooting 法 (Enright 等, 1992) により効率的に最適化した。その結果、地球-月間低エネルギー遷移軌道の解空間構造を、遷移時間が 200 日程度までの範囲に渡って明らかにした。本研究で得られた燃料消費量最小解は、従来知られていた燃料消費量最小解よりも 15m/s (燃料消費による速度変化) 程度ではあるが燃料消費量が少ない解となった。また、得られた解をデータベースとして利用することで、将来の月探査ミッションの遷移軌道を効率的に設計できる可能性があると考えられる。さらに、様々なファミリーの遷移軌道を解析した結果、月軌道の外側で太陽重力の摂動を利用するとともに、月軌道の内側における月との軌道共鳴に基づく複数回の月フライバイや、月捕捉前に地球重力の摂動を利用することで、燃料消費量を低減できることを示した。

第六章では、第五章で化学推進を想定した場合に、地球-月間の遷移時間を 200 日程度まで考慮しても先行研究の結果と比較して燃料消費量が大きく減少しなかったことを受け、化学推進よりも比推力が 10 倍程度大きい電気推進を想定した低推力かつ連続的な推進を用いる地球-月間遷移軌道の大域的探索を効率的に行う手法を提案した。様々な先行研究が地球近傍から月近傍への低推力遷移軌道を求めてきたが、ほとんどは局所最適解の計算にとどまっており、工学的な観点からは局所最適解を厳密に求めるよりも、大域的な探索を行うことで燃料消費量がミッション要求より小さい解や、遷移時間と燃料消費量のトレードオフの議論が重要となる場合が多いと考えられる。一方、解空間の大域的構造を調べた先行研究では、設計変数が多いことから問題設定の大幅な単純化やスーパーコンピュータの利用がなされている (Russell(2007))。そこで本研究では、ポントリャーギンの原理 (Pontryagin, 1987) から得られる最適性の必要条件、静止軌道高度近傍に設定した初期軌道のダイナミクス、初期推力方向の仮定に基づき設計変数次元を低減することで、計算コストを抑えて地球近傍-月近傍間の低推力遷移軌道が大域的に探索する手法を提案した。その結果、先行研究において十分調べられ

ていなかった遷移時間が長く燃料消費量の少ない解を含む様々なファミリーの低推力月遷移軌道を見出し、遷移時間と燃料消費量のトレードオフの議論を可能にした。また、低推力推進とともに月との軌道共鳴に基づく高高度月フライバイを利用することで、燃料消費量を低減できることを示した。得られた軌道データを解析した結果、低推力月遷移軌道をより効率的な探索するために有用と考えられる、設計変数次元をさらに低減できる新たな経験則を見出した。

第七章では、JAXAと東京大学が共同で開発中の超小型衛星 EQUULEUS の遷移軌道を設計する手法を構築した。EQUULEUS は、地球近傍から地球-月系の L_2 周りの準周期軌道に燃料消費量を抑えて遷移する予定である。本研究では、地球近傍から遠地点まで軌道を時間前方に積分し、 L_2 周りの準周期軌道から遠地点まで時間後方に積分し、遠地点における状態変数および時刻のずれが小さい組み合わせを、インパルスのな推進を仮定して燃料消費量に関して最適化することで、地球近傍から L_2 周りの準周期軌道まで遷移する軌道を大域的に探索する手法を構築した。提案手法を用いた結果、月フライバイおよび太陽重力の摂動を利用する燃料消費量が十分小さい解を含む、複数の低エネルギー遷移軌道を得ることができた。

第八章では、高推力かつインパルスのな推進を用いて地球から月に遷移する場合に、遷移時間および燃料消費量に関して高エネルギー軌道と低エネルギー軌道の中庸の値を示す軌道の設計手法を、太陽-地球-月系の平面円制限四体問題のモデルにおいて提案した。二体問題に基づく高エネルギー軌道よりも燃料消費量を抑えるために、 L_1 、 L_2 周りのダイナミクスに基づく低エネルギー軌道 (Koon 等, 2001, Ross 等, 2003) が近年注目を集めてきたが、遷移時間が長くなることが欠点であった。近年 Topputo (2013) は、遷移時間および燃料消費量に関して高エネルギー軌道と低エネルギー軌道の中庸となる月遷移軌道を網羅的探索により発見した。しかしながら、そのような「中エネルギー」の領域においては L_1 、 L_2 周りの不変多様体が月近傍を通過することで tube 構造が壊れてしまうため、従来の低エネルギー遷移軌道の設計手法を適用することが困難となる。そこで本研究では、Levi-Civita 正則化 (Lega 等, 2011) によって求めた月中心に衝突する特異的な軌道に基づいて、中エネルギー月遷移軌道を設計した。まず、線形安定性解析により正則化座標の原点が中・高エネルギーにおいて不安定平衡点となることを示し、月衝突軌道は月周りの角運動量の符号を分け隔てることを明らかにした。さらに、月衝突軌道の相空間構造の近傍領域は月に近づく軌道であることに注目し、太陽重力の摂動を利用できる領域と月衝突軌道の交差領域に探索領域を限定することで、効率的に地球-月間中エネルギー遷移軌道を設計する手法を提案した。提案手法により、Topputo (2013) によって発見された月周りの角運動量が負となる中エネルギー月遷移軌道とともに、月周りの角運動量が正となる新たな中エネルギー月遷移軌道を見出すことができた。

第九章では、本論文で得られた成果と今後の展望をまとめた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 大島 健太 印

(2018年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○ (査読付)	<u>Kenta Oshima</u> , Stefano Campagnola, Tomohiro Yanao, Global Search for Low-Thrust Transfers to the Moon in the Planar Circular Restricted Three-Body Problem, <i>Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy</i> , vol. 128, pp. 303-322, 2017年6月.
論文○ (査読付)	<u>Kenta Oshima</u> , Francesco Topputo, Stefano Campagnola, Tomohiro Yanao, Analysis of Medium-Energy Transfers to the Moon, <i>Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy</i> , vol. 127, pp. 285-300, 2017年3月.
論文○ (査読付)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Jumping Mechanisms of Trojan Asteroids in the Planar Restricted Three- and Four-Body Problems, <i>Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy</i> , vol. 122, pp. 53-74, 2015年5月.
講演○ (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Families of Unstable Quasi-Satellite Orbits in the Spatial Circular Restricted Three-Body Problem, 28th AIAA/AAS Space Flight Mechanics Meeting, Kissimmee, 2018年1月.
講演 (口頭)	大島健太, 柳尾朋洋, 空間円制限三体問題における Quasi-Satellite Orbit の分岐解析, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017年10月.
講演 (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Transport Dynamics of Co-Orbital Asteroids via Invariant Manifolds for Space Mission Trajectories, 68th International Astronautical Congress, Adelaide, 2017年9月.
講演 (口頭)	大島健太, 柳尾朋洋, Quasi-Satellite Orbit の分岐解析と Co-Orbital Orbit 間の遷移現象, 2017年度アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2017年7月.
講演○ (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Stefano Campagnola, Chit Hong Yam, Yuki Kayama, Yasuhiro Kawakatsu, Naoya Ozaki, Quentin Verspieren, Kota Kakihara, Kenshiro Oguri, Ryu Funase, EQUULEUS Mission Analysis: Design of the Transfer Phase, 31st International Symposium on Space Technology and Science, 松山, 2017年6月.
講演○ (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Francesco Topputo, Tomohiro Yanao, Global Search for Low-Energy Transfers to the Moon with Long Transfer Time, 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, San Antonio, 2017年2月.
講演 (口頭)	大島健太, Francesco Topputo, 柳尾朋洋, インパルス推進を用いた低エネルギー型月遷移軌道のパレート最適解, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016年9月.
講演 (口頭)	大島健太, Francesco Topputo, 柳尾朋洋, インパルス ΔV を用いた低エネルギー型月遷移軌道のパレート最適解, 2016年度アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2016年7月.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Francesco Topputo, Stefano Campagnola, Tomohiro Yanao, Medium-Energy, Retrograde, Ballistic Transfer to the Moon, 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa, 2016年2月.
講演 (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Stefano Campagnola, Tomohiro Yanao, Global Search for Low-Thrust Transfers to the Moon in the Planar Circular Restricted Three-Body Problem, 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa, 2016年2月.
講演 (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Dynamical Boundaries for the Transport of Co-Orbital Asteroids in the Circular Restricted Three-Body Problem, 34th JSST International Conference on Simulation Technology, 富山, 2015年10月.
講演 (口頭)	<u>大島健太</u> , Stefano Campagnola, 柳尾朋洋, 平面円制限三体問題における月への低推力最適軌道の大域的探索, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015年10月.
講演 (口頭)	<u>大島健太</u> , Stefano Campagnola, 柳尾朋洋, 月への低推力遷移における燃料消費最小解の大域的探索, 2015年度アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2015年7月.
講演 (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Application of the Jumping Mechanism of Trojan Asteroids to the Design of a Tour Trajectory through the Collinear and Triangular Lagrange Points, 25th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Williamsburg, 2015年1月.
講演 (口頭)	<u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, トロヤ群小惑星の遷移機構に基づくラグランジュ点間周回軌道の設計, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, 2014年11月.
講演 (口頭)	<u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, トロヤ群小惑星のL4-L5間遷移現象の力学的機構, 2014年度日本惑星科学会秋季講演会, 仙台, 2014年9月.
講演 (口頭)	<u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, トロヤ群小惑星の遷移機構に基づくラグランジュ点L ₄ -L ₅ 間探査軌道の設計, 2014年度アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2014年7月.
講演 (口頭)	Tomohiro Yanao, <u>Kenta Oshima</u> , Chaotic State Transitions in Molecular and Astronomical Systems, Workshop on Lagrangian Coherent Structures and Dynamical Systems, 札幌, 2014年3月.
その他 (講演) (ポスター)	小田島英, <u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, 共鳴重力アシストの力学的機構に基づく月への遷移軌道設計, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017年10月.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (講演) (口頭)	Stefano Campagnola, Naoya Ozaki, Javier Hernando-Ayuso, <u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yamaguchi, Kenshiro Oguri, Yusuke Ozawa, Toshinori Ikenaga, Kota Kakihara, Shota Takahashi, Ryu Funase, Yasuhiro Kawakatsu, Tatsuaki Hashimoto, Mission Analysis for EQUULEUS and OMOTENASHI, 31st International Symposium on Space Technology and Science, 松山, 2017年6月.
その他 (講演) (口頭)	Kenshiro Oguri, Kota Kakihara, Stefano Campagnola, Naoya Ozaki, <u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yamaguchi, Ryu Funase, EQUULEUS Mission Analysis: Design of the Science Orbit Phase, 1st International Symposium on Space Technology and Science, 松山, 2017年6月.
その他 (講演) (ポスター)	小田島英, <u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, 複数回の共鳴重力アシストおよび不変多様体 tube を用いた月遷移軌道の設計, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016年9月.
その他 (講演) (ポスター)	渡邊達行, <u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, 楕円制限四体問題における地球-月遷移軌道の確率的最適化, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 2016年9月.
その他 (講演) (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Optimal Transfers between Sun-Earth Libration Point Orbits Utilizing Lunar Gravity Assists, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 神戸, 2015年6月.
その他 (講演) (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Applications of Gravity Assists in the Bicircular and Bielliptic Restricted Four-Body Problem, 24th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Santa Fe, 2014年1月.
その他 (講演) (ポスター)	<u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, 太陽-地球-月-宇宙機系における重力アシストとその応用, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 米子, 2013年10月.
その他 (講演) (口頭)	<u>Kenta Oshima</u> , Tomohiro Yanao, Gravity Assist in the Sun-Earth-Moon-Spacecraft 4-Body System, 32nd JSST International Conference on Simulation Technology, 東京, 2013年9月.
その他 (講演) (口頭)	<u>大島健太</u> , 柳尾朋洋, 重力アシストを用いた太陽-地球-月-宇宙機の四体問題における Capture と Escape, 2013年度アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2013年7月.