

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400408

研究課題名(和文)力学系理論に基づく多体ダイナミクスの解析と宇宙機のミッションデザインへの応用

研究課題名(英文) Analysis of Multibody Dynamics Based on Dynamical Systems Theory and Its Applications to Space Mission Design

研究代表者

吉村 浩明 (Yoshimura, Hiroaki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40247234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽-地球-月-宇宙機の4体系に対して低エネルギーの宇宙探査機の軌道設計の確立を主要な目的として研究を遂行した。特に、太陽-地球-月-宇宙機の制限4体系を太陽-地球-宇宙機+月摂動及び地球-月-宇宙機+太陽摂動の2つの制限3体系+摂動の結合系と見なし、チューブと呼ばれる不変多様体の構造を利用することで地球から月への輸送軌道について、 ΔV をゼロとする軌道設計を示した。さらに、地球低軌道から月低軌道を境界条件として与えた場合の設計についても考察を行い、チューブの幾何学的性質を利用することで最も低エネルギーとなる軌道の設計手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a low energy transfer from the Earth to the Moon by using the coupled 3-body system with perturbations for modeling the planar restricted 4-body system. We have detected the tubes which correspond to the stable and unstable manifolds of the perturbed systems by numerically extracting the LCS from the FTLE field. Then, we demonstrate how the LCS separates the orbits. In particular, using the characteristics of the tube structures, we obtain the family of trajectories that depart from the LEO and the family of those that arrive into the LLO. Finally we have shown how a low energy Earth-Moon transfer can be constructed by choosing an appropriate orbit from each family such that the required Delta V can be minimized under the given conditions.

研究分野：非線形力学

キーワード：宇宙機のミッション計画 力学系理論 摂動3体系 不変多様体 有限次元リヤプノフ指数 チューブダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

太陽系の起源の研究のための惑星探査や宇宙開発を目的とした宇宙機によるミッション計画が益々重要性を増してきている。このような宇宙ミッション計画は、歴史的には、旧ソ連によって初めて無人月探査を目的として行われたルナ計画(1959年)に遡る。その後、米国 NASA の有人月探査を目的としたアポロ計画(1968年~1972年)、木星・土星探査を目的としたパイオニア計画(1972年)、火星、金星及び水星探査を目的としたマリナー計画(1962年)、さらに、木星、土星探査から太陽系外惑星探査を目的としたボイジャー計画(1977年~)など、現在まで引き継がれている。

これらの宇宙探査機のミッションでは、いわゆるフライバイ、あるいはスイングバイと呼ばれる重力アシストを用いた軌道計画が行われてきた。我が国でも、小型探査機による月探査が目ざされ、「ひてん」(ISAS/1990年)、「かぐや」(JAXA/2007年)、また、欧州宇宙機関による Smart-1 (2003年)など数々の月探査が行われ、重力アシストの実証実験も実施された。このような月探査を目的とした宇宙探査機の軌道設計では、地球周回軌道から月周回軌道への軌道遷移が問題となるが、従来、アポロ宇宙船のミッションを始めとした、いわゆるフラバイによる二体問題の枠組みでの軌道設計が主流であるが、宇宙探査機に限られた燃料で宇宙空間を航行する必要性から、より低エネルギーで輸送するための軌道設計手法の確立が必要不可欠となっている。特に、最近の力学系理論の発展によって、探査機の軌道計画への応用が現実のものとなりつつある。例えば、先に述べた「ひてん」のミッションでは、月近傍に弱安定領域 (WSB) と呼ばれる、月の重力による補足領域と月から離れていく遷移領域の概念が導入され、それを利用した低エネルギーの軌道設計が行われた (Belbruno and

Miller[1993])。また、「ひてん」ミッションと類似した低エネルギーの軌道が、二つの平面円制限3体 (PCR3B)系を組み合わせ、チューブと呼ばれる不変多様体を繋ぎ合わせることで得られている (Koon, Lo, Marsden and Ross[2008])。

このように太陽と月の両方の天体からの影響を考慮すると制限4体系の枠組みで、より高精度な宇宙探査機の軌道ミッション計画を行う必要があるが、その不変多様体の構造は極めて複雑であり、それらの構造を明らかにして宇宙探査機の軌道計画へ応用することは挑戦的な課題となっているのが現状である。

2. 研究の目的

既に述べたように、力学系理論の応用によって実際に低エネルギーの軌道設計がなされた代表例として、WSB による軌道設計が「ひてん」のミッション計画が挙げられる。WSB という4体系固有の構造的な性質を利用した点で大変興味深い。WSB 自体の数学的な定義が厳密に与えられておらず、その計算は発見的手法に基づいており、十分に合理的かつ汎用性の高いものとは言えない。一方、Koon 等 (2003) によるチューブダイナミクス設計手法は、ラグランジュ点周りに存在するリャプノフ軌道と呼ばれる周期軌道に漸近するチューブ状に広がる安定及び不安定な不変多様体の性質を利用した低エネルギー軌道設計手法である。この手法では、太陽-地球-月-宇宙機 (S/C) からなる4体系について、太陽の影響の大きい領域を太陽-地球-S/C系として、月の影響の大きい領域を地球-月-S/C系として、各々、PCR3B系としてモデル化し、月の外部領域に設定された境界にポアンカレ断面を設定し、その境界で軌道修正マヌーバ V を与えることで不変多様体の繋ぎ合わせを行い、低エネルギーの月への輸送軌道設計を行うことができ、設計手法は極

めて合理的である。しかし、太陽-地球-月-S/C からなる平面円制限 4 体 (PCR4B) 系を 2 つの PCR3B 系に分けて軌道設計しているため、それぞれの領域で無視された天体の重力の影響により、元の PCR4B 系と比べて必ずしも精度の良い軌道設計ができないという問題が発生している。

そこで本研究では、地球から月への遷移軌道を設計するために、太陽-地球-月-S/C からなる PCR4B 系を具体的に考察し、太陽や月の摂動を考慮した上で、従来のチューブダイナミクスの理論を拡張し、摂動 3 体系の繋ぎ合わせによって、低エネルギー軌道設計手法を確立することを目的として研究を遂行した。

3. 研究の方法

本研究では、地球から月周回軌道への投入のための低エネルギー軌道設計への応用を念頭に、不変多様体によるチューブダイナミクスについて考察した。特に、月と地球の間には、地球-月-S/C だけでなく、太陽からの引力の影響を無視することができず、太陽-地球-月-S/C の PCR4B 系としてモデル化する必要がある。そのような観点から、本研究では、下記の方法で研究を推進した。

- (1) Koon 等によって提案された、PCR3B 系の結合による PCR4B 系の近似モデルを用いて軌道設計を行っている。本研究では、まず、Koon 等の方法では考察されていなかった、PCR3B 系の地球低軌道 (LEO) から月低軌道 (LLO) への軌道設計について考察した。
- (2) Koon 等 (2003) の提案した PCR3B の繋ぎ合わせによるチューブダイナミクスの手法について、流体解析で用いられるラグランジュ・コヒーレント構造 (LCS) を長時間積分の計算を行うことにより、不変多様体 (チューブ) の構造を抽出した。

特に、有限次元リアプノフ指数 (FTLE) を計算し、FTLE 場のリッジとして不変多様体の構造を求める際に、積分時間をパラメータにして短時間と長時間の計算によりどのように不変多様体が変わるかを調査した。

- (3) Koon 等による PCR3B 系の結合モデルの欠点を補うために、太陽や月の摂動の影響を取り入れた PCR4B 系を直接扱う方法を提案する。すなわち、太陽の重力の影響の大きい領域については、月の重力摂動を考慮した、太陽-地球-S/C からなる PCR3B 系として、月の重力の影響が大きい領域については太陽の重力摂動を考慮した、地球-月-S/C からなる PCR3B 系として、各々、領域を 2 つに分けることで、太陽-地球-月-S/C からなる PCR4B 系について摂動を受ける PCR3B 系の結合系としてモデル化した。

- (4) (3)までに構築した手法を用いて、地球低軌道 (LEO) から月低軌道 (LLO) への軌道設計について考察した。特に、領域の切り替えに伴う、軌道修正マヌーバ V の最小化をチューブダイナミクスの手法を拡張してどのように行うかを検討した。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な研究成果について以下に述べる。

- (1) Koon 等によって提案された、PCR3B 系の結合による PCR4B 系の近似モデルを用いて軌道設計を行った。特に、Koon 等の方法では考察されていなかった、LEO から LLO への軌道設計について、LEO からの出発軌道の族として、太陽-地球-月-S/C 系のラグランジュ点 L_2 のエネルギーを下限に、 L_2 から伸びるチューブ (安定

多様体)のポアンカレ断面における外側の端点におけるエネルギーを上限として定め、LL0 を到着軌道とする軌道の族として、地球-月-S/C 系のラグランジュ点 L3 のエネルギーを上限に、地球-月-S/C 系のラグランジュ点 L2 から伸びるチューブ(不安定多様体)のポアンカレ断面における内側の端点におけるエネルギーを下限として定めた。こうして得られた2つの軌道の族のポアンカレ断面上における交わりから軌道修正マヌーバ V をゼロとする最適軌道を見出すことに成功した。

- (2) 時間依存の力学系に関するチューブを計算するために、FTLE 場とその2次導関数リッジとして定義される、ラグランジュコヒーレント構造(LCS)の導出について、FTLE 場から LCS を高精度に数値的に検出するための数値アルゴリズムを提案した。また、計算時間を長く取ることにより、ポアンカレ断面を複数回横断するチューブの構造を明らかにした。
- (3) 数学モデルを各々の座標系で記述することで、太陽-地球-月-S/C からなる PCR4B 系について摂動を受ける PCR3B 系の結合系として運動方程式を定式化することで、近似の無い PCR4B 系の正確なモデルを考案した。さらに、2つの領域を分けたことで、各々の領域で摂動 PCR3B 系として、従来の PCR3B 系のためのチューブダイナミクスの解析手法が適用できる利点があり、これにより、実際に V をゼロとする最適軌道を導出することに成功した。
- (4) LE0 から LL0 への軌道設計について、太陽や月の摂動の影響を取り入れた、結合摂動 PCR3B 系の場合で考察した。特に、

摂動を受ける PCR3B 系は時間依存系であり、LCS を幾何学的に抜き出すために、ポアンカレ断面上でチューブは円に位相同型であると仮定し、FTLE 場の innermost local maximum を抽出する手法を考案した。さらに、出発軌道としての LE0 と到着軌道としての LL0 の2点境界値問題を考え、エネルギーの上限値と下限値によって軌道の族を求めて、ポアンカレ断面上での繋ぎ合わせを考えた。最終的に、与えられた LE0 から LL0 に関する条件下で、 V が最小となる最適軌道の設計に成功した。

以上に述べたように、本研究では、太陽-地球-月-S/C に関する PCR4B モデルを用いた低エネルギーの輸送軌道の設計に対して新たな設計手法を提案し、特に、PCR4B 系について摂動 PCR3B 系の結合系としてモデル化することによって、与えられた境界条件下において V を最小化する軌道設計手法を提案した意義は大きい。また、FTLE 場の2次導関数リッジとして定義される LCS を高精度に求める数値解析アルゴリズムを提案し、PCR4B 系に対して、3体系で求められる周期的なりヤブノフ軌道と良く似た軌道が存在し、従来のチューブダイナミクスの手法を拡張して利用することで、4体系の不変多様体のチューブ構造を取り出すことが可能であることを示した。

本研究に関連して、9編の学術論文を執筆し、14件の国内外での研究発表を行った。本研究の成果が宇宙探査機の低エネルギーの軌道設計に極めて有益なものとなっていると信じる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

Kaori Onozaki, Hiroaki Yoshimura and Shane Ross, Tube dynamics and low energy Earth--Moon transfers in the 4-body system, 34 pages, accepted for publication in Advances in Space Research, May 4, 2017, 査読有.

Makoto Horikawa, Yasuhiro Kawakatsu and Hiroaki Yoshimura, Low Energy Escape Trajectory for the Mars Moon Sample Return Mission, Proc. 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS Paper 16-372, 10 pages, 2016, 査読無.

Kaori Onozaki, Hiroaki Yoshimura and Shane Ross, The Earth-Moon Low-Energy Transfer in the 4-body Problem, Proc. 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS Paper 16-405, 16 pages, 2016, 査読無.

Kaori Onozaki, Hiroaki Yoshimura and Shane Ross, Low energy transfer from the Earth to the Moon in the coupled Planar Circular 3-Body system, Proc. 6th Int. Conf. Astrodynamics Tools and Techniques(ICATT), March 14-17, 2016, Darmstadt, ICATT Paper 0307, 7 pages, 査読無.

Makoto Horikawa, Kazutoshi Takemura, Takanao Saiki, Yasuhiro Kawakatsu, Hiroaki Yoshimura, Earth Return Trajectory for Martian Moons eXplorer Combining Three and Two-Body Dynamics, 26th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS/JAXA, July 25-26, 2016, 6 pages, 査読無.

Fernando Jimenez and Hiroaki Yoshimura, Dirac structure in vakonomic mechanics, J. Geom. Phys., Vol.94, pp.158-178, 2015, 査読有.

Kaori Onozaki, Tomohiko Nakamura and Hiroaki Yoshimura, Tube Dynamics and Trajectory Design for Capturing the Lyapunov Orbit in the Coupled Restricted Three-Body Problem and Its Application to the DESTINY Mission, Proc.24th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 6 pages, 2015, 査読無.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Invariant Manifolds and Lagrangian Coherent Structures in the Planar Circular Restricted Three-Body Problem, Proc. of NCTAM- Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 62, pp.119-128, 2014, 査読有.

小野崎 香織, 吉村 浩明, 平面楕円制限3体問題における月への輸送軌道の設計, システム制御情報学会論文誌, Vol.27, No.4, pp.160-165, 2014年, 査読有.

〔学会発表〕(計14件)

Makoto Horikawa, Takanao Saiki, Yasuhiro Kawakatsu and Hiroaki Yoshimura, Escape Trajectories for Martian Moons eXplorer using Chemical and Electric Propulsion, Proc. AIAA/AAS Astrodynamics Specialists Conference, Long Beach, California September 13, AIAA2016-5209, 2016.

Hiroaki Yoshimura, Geometric Formulation and Analysis in Multibody Dynamics (Keynote lecture), The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, August 7 - 10, 2016, Kanazawa, Japan. 佐々木 章太, 中村 友彦, 堀川 真, 小野崎 香織, 吉村 浩明, チューブダイナミクスと不変トーラスによる火星への軌道設計, 第60回 システム制御情報学会研究発表講演会, 2016年5月25日~27日,

京都テルサ .

吉村 浩明, 非線形ダイナミクスと制御の最新研究動向, 三菱電機先端技術総合研究所セミナー招待講演, 2016年2月22日, 尼崎 .

小野崎 香織, 吉村 浩明, 制限4体問題に現れる不変多様体の解析と地球-月輸送軌道の設計, 数学・数理科学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会2015, 東京大学, 2015年11月14日

小野崎 香織, 吉村 浩明, 制限4体問題の不変多様体と宇宙機の軌道設計への応用, 日本応用数理学会2015年度年会, 2015年9月3-5日, 金沢大学 .

Hiroaki Yoshimura, Interconnection, Variational Structures and Lagrange-Dirac Systems, 5th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, Lyon, July 4-7, 2015.

堀川 真, 中村 友彦, 小野崎 香織, 吉村 浩明, チューブダイナミクスとホーマン軌道による火星への軌道設計, 第59回システム制御情報学会講演, 2015年5月20日, 京都テルサ .

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Invariant manifolds and space mission design in the restricted four-body problem, 2015 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, May 18, 2015.

Hiroaki Yoshimura and Francois Gay-Balmaz, Lie-Dirac reduction for nonholonomic systems on semidirect products, 2015 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, May 17, 2015.

小野崎 香織, 吉村 浩明, 力学系理論を応用した宇宙機の軌道設計, 力学系の応用研究集会, 2015年3月29日, 京都

大学 .

小野崎 香織, 中村 友彦, 吉村 浩明, チューブダイナミクスと太陽-地球系 L2点周りのリアプノフ軌道への投入計画, 日本機械学会2014年度年次大会, G1920102, 2014年9月7-10日, 東京電機大学 .

小野崎 香織, 中村 友彦, 吉村 浩明, 結合された制限3体問題に基づく宇宙機の軌道設計に関する考察, 日本応用数理学会2014年度年会ポスター講演, 2014年9月3-5日, 政策研究大学院大学 .

小野崎 香織, 中村 友彦, 吉村 浩明, チューブダイナミクスと結合された制限3体問題に基づくリアプノフ軌道の捕捉とDESTINY ミッションへの応用, アストロダイナミクスシンポジウム, 2014年7月28日, JAXA 相模原キャンパス .

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.yoshimura.mech.waseda.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉村 浩明 (YOSHIMURA, Hiroaki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号 : 40247234

(2)研究協力者

小野崎 香織 (ONOZAKI, Kaori)