

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560825

研究課題名（和文） 月トランスファーにおけるフェージング軌道の設計プロセスの確立と軌道特性の解明

研究課題名（英文） Design Process of Translunar Phasing Orbit and its Characteristics

研究代表者

川勝 康弘（KAWAKATSU YASUHIRO）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：80373439

研究成果の概要（和文）：月トランスファーにおけるフェージング軌道の設計プロセスについて、「軌道遷移問題」と「位相調整問題」に分割することにより体系的に取り扱えることを見出した。前者については従来の軌道設計手法が適用できる見通しを得、後者については新開発のチャート「TM ダイアグラム」を用いることにより解空間の構造を明らかにできること、軌道の最適性を保持しながら位相を調整することが可能であることを示し、具体例を用いてその有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：Design process of a translunar phasing orbit is investigated. The process is divided into two problems, an orbit connecting problem and a phase shifting problem. To solve the latter problem, a chart named “TM diagram” is developed. The chart is able to visualize the problem structure, and helps us to solve the problem graphically. The validity of the chart is shown by way of a practical design example.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：飛行力学、軌道設計

1. 研究開始当初の背景

打上後、すぐに月へ向かった初期の月探査機（アポロ等）と異なり、近年の月探査機の多くは、このように地球を回る長楕円軌道を数周回した後月に到る「フェージング軌道」を採用している。フェージング軌道を用いる主たる理由は、十分な打上ウィンドウを確保できるという運用上のメリットがあるためである。その半面、月へ直接向かうダイレクト軌道と比較した場合、飛行経路が長くなり軌道制御の回数も増えるため、軌道設計が複雑になる。

ところが、フェージング軌道については、その体系的な設計法が確立されていない。一般に、実運用に供される軌道設計は、多変数多制約の非線形方程式（あるいは最適化）に帰着される。そのため、最終段では数値的な収束計算を用いるしか解を得る方法はないのだが、その前処理として解空間の構造を理解して適切な初期値を与える、という手順を踏まないと、収束が不安定になったり、望まぬ局所解に収束したり、という問題が生ずる。ところがフェージング軌道の設計については、前述の複雑さや月摂動による軌道の不安

定さのため、このような手順を踏めるほど問題の理解が進んでいない。その結果、現実的に2つの問題が生じている。まず、収束が安定しないため、どうしてもマニュアルによる試行錯誤的な工程が入ることになり、軌道設計に長時間を要する。その結果、たとえば打上時期を変更しようという時、飛行計画再立案に要する時間をプログラム上の重要な制約として考慮せざるを得ない。次に、軌道の設計条件について、「解ける範囲に限定して解く」という実戦的な対応をとらざるを得ない。これにより実行可能な解を見つけることはできるが、それは軌道特性を大局的に俯瞰して得られる最適解にはなっていない。

2. 研究の目的

まず体系的なフェージング軌道の設計プロセスを確立する。解空間の構造を解明し、それを考慮したモデルを用いて適切な初期値を与え、所望の解に確実に収束させる、という手順を確立する。

続いて、それを用いてフェージング軌道を幅広く設計・分析し軌道特性を解明する。様々な設計パラメータを変更した場合の、軌道設計結果への影響の解析（すなわち感度解析）により、フェージング軌道の特性を明らかにする。変更する設計パラメータとしては打上日・月到着日等の境界条件、許容近地点高度等の制約条件など、影響をみる設計結果としては、解の存否や、総増速量を想定する。

3. 研究の方法

研究期間の1年目（2009年度）には、「設計プロセスの確立」の検討に使用するため、軌道設計の中心となる軌道運動解析プログラムを開発した。その主たる機能は軌道伝播とターゲティングであり、これまでの軌道設計で使用してきたプログラムを基礎とした。フェージング軌道に適用するための主たる変更点は軌道制御回数増にともなる制御変数の追加と、重力場高次項の追加であった。つづいて、初期値算出用の簡易モデル構築に用いるための、摂動解析プログラムを開発した。これは、軌道周回ごとの摂動量を算出するプログラムである。

2年目（2010年度）には、「設計プロセスの確立」の検討を継続した。フェージング軌道の設計プロセスを「軌道遷移問題」と「位相調整問題」に分割することにより体系的に取り扱えることを見出した。前者については従来の軌道設計手法を適用できること、後者については新開発のチャート「TMダイアグラム」を用いることにより解空間の構造を明らかにし、設計が効率化できることの見通しを得た。

3年目（2011年度）には、「設計プロセスの確立」の検討を継続し、「軌道特性の解明」

の検討に着手した。フェージング軌道の設計プロセスを構成する「軌道遷移問題」については、従来の軌道設計手法を適用した検討を進め、「位相調整問題」についてはチャート「TMダイアグラム」の開発を完了し、それを用いることにより解空間の構造を明らかにできること、軌道の最適性を保持しながら位相を調整することが可能であることを示し、具体例を用いてその有効性を示した。成果は、国際学会 28th International Symposium on Space Technology and Science、22nd AAS Space Flight Mechanics Meeting 等で発表し、関連研究者との議論を通して、本研究の内容・有効性について重要な知見が得られた。また、この設計プロセスを元に設計したフェージング軌道について、その軌道特性の検討に着手した。

4. 研究成果

打上後、すぐに月へ向かった初期の月探査機（アポロ等）と異なり、近年の月探査機の多くは、地球を廻る長楕円軌道を数周回した後月に到る「フェージング軌道」を採用している。フェージング軌道を用いることの利点は、十分な打上ウィンドウを確保しながら、打上日にかかわらず好条件の月遷移・会合条件を実現できる点にある。

図1にフェージング軌道の概念を示す。探査機は月遷移軌道に投入される数ヶ月前に打ち上げられ、地球を回る長楕円軌道（初期軌道）に投入される。十分な幅の打上ウィンドウを確保すると、打上から月遷移軌道投入までの日数が打上日ごとに異なることになるが、途中の数周回の長楕円軌道（フェージング軌道）の周期を適切に設定することで、打上日によらず同じ日に月遷移軌道に投入することが可能になる。

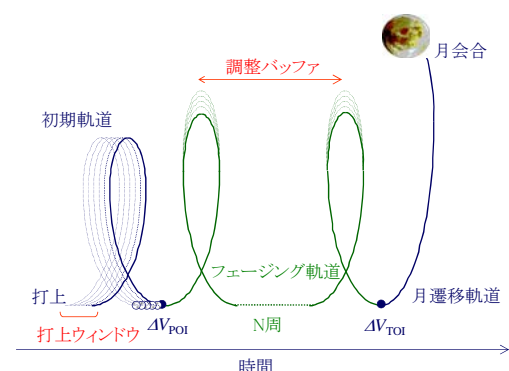


図1 フェージング軌道の概念

以上は簡略化した説明だが、実際には諸々の摂動の影響があるため、初期軌道・フェージング軌道・月遷移軌道を接続するのは必ずしも容易ではない（軌道遷移問題）。また、運用上の要求・制約があるため、それらを考

慮しながら様々な運用イベント時刻の設定・調整が必要となる場合がある（位相調整問題）（図2）。

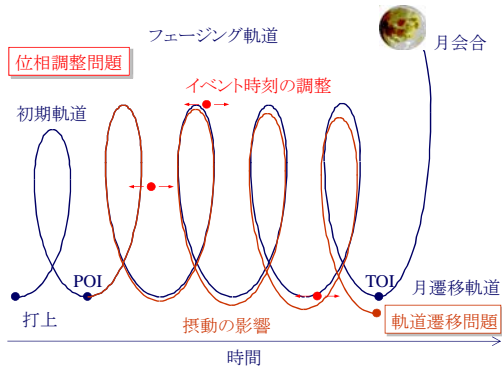


図2 実際のフェージング軌道

この位相調整問題を取り扱うため、チャート「TM ダイアグラム」を新たに開発した（図3）。TM ダイアグラムは、時刻 (t) を横軸に、平均近点離角の偏差 (ΔM) を縦軸にとったグラフで、月遷移軌道投入を原点にとる。TM ダイアグラム上では、ケプラー軌道は（平均運動が一定なので）線分で表現され、軌道制御による軌道周期の変更は折れ角となり、その角度は制御量に比例する（図3の緑線）。また様々な事象を図上に表現することが可能である（図3では近地点通過が橙線で示されている）。

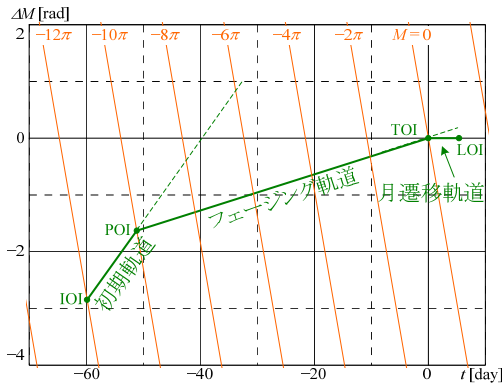


図3 TMダイアグラム

図3の緑線は一つのシーケンス例を示しているが、境界条件（初期軌道と月遷移軌道）を結ぶ折れ線を描画すれば、様々なシーケンスを表現することができる。ここで折れ角が制御量に比例することに注意すれば、初期軌道から月遷移軌道までを必要最小の制御量で結ぶシーケンス（最小制御量フェージング軌道）では、折れ線が凸凹することなく傾きが単調に減少することがわかる。このようなシーケンスは無数に考えられるが、それらは必ず図4に示す緑領域内に存在している。すなわち、これが最小制御量フェージング軌道

の設計空間ということになる。

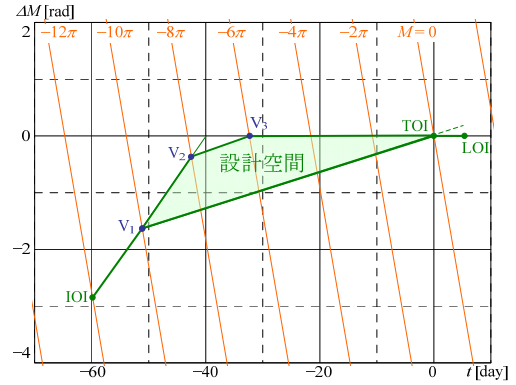


図4 最小 ΔM フェージング軌道の設計空間

シーケンスを表す折れ線がこの設計空間内にあり、かつ凸凹していなければ、その制御量は必要最小であることが保証される。折れ線がこの幾何学的条件を満たしていることを確認・担保しながら、様々な折れ線を試描すれば、制御量を増やすことなしに運用イベント時刻を調整することが可能となる。図5に具体例を示す。

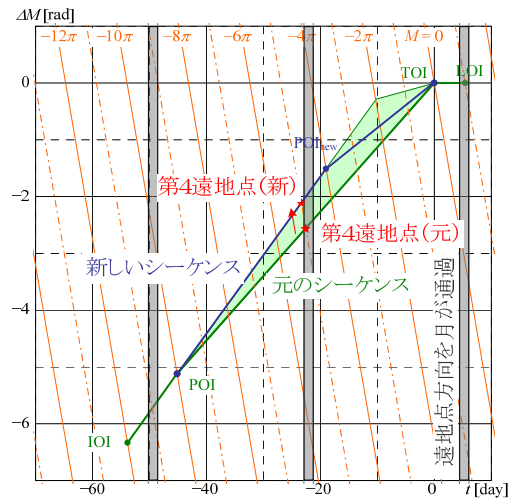


図5 月接近の回避

ここでは、フェージング軌道途中での月接近を回避する問題を例にとる。フェージング軌道途中で月に接近すると、月の摂動により軌道が大きく乱され、結果、月遷移軌道に接続するために必要な制御量が大きく増加してしまう。それを避けるため、フェージング軌道途中での月接近を回避する手立てを考える。

図5には、ある初期軌道に対する最小制御量フェージング軌道の設計空間が緑領域として示されている。また、遠地点通過が橙破線で、フェージング軌道の遠地点方向に月が近づく時間帯を灰色帯で示している。初めに、設計空間下辺にあたるシーケンス

(元のシーケンス)を構築した。この場合、第4回の遠地点通過が灰色帯内にあるので、ここで月接近が生じていることがわかる。これに対し、設計領域の上端をなぞるシーケンス(新しいシーケンス)をとれば、探査機の遠地点通過のタイミングをずらすことができ、結果、月接近を回避できることがわかる。

以上、まとめると、月トランスファーにおけるフェージング軌道の設計プロセス(図1)について検討し、「軌道遷移問題」と「位相調整問題」に分割することにより体系的に取り扱えることを見出した(図2)。後者については新開発のチャート「TMダイアグラム(図3)」を用いることにより解空間の構造を明らかにできること、軌道の最適性を保持しながら位相を調整することが可能であることを示し(図4)、具体例を用いてその有効性を示した(図5)。

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1件)

- ① Yasuhiro Kawakatsu, Practical Design of 3D Phasing Orbit in Lunar Transfer Trajectory, Advances in Astronautical Sciences, 査読無、Vol. 143、2012、pp. 1549-1560.

[学会発表] (計3件)

- ① Yasuhiro Kawakatsu, Practical Design of 3D Phasing Orbit in Lunar Transfer Trajectory, 22nd AAS Space Flight Mechanics Meeting, 2012年2月1日、米国チャールストン.
- ② Yasuhiro Kawakatsu, TM-Diagram and its Application to Translunar Phasing Orbit, 第21回アストロダイナミクスシンポジウム、2011年7月25日、神奈川県相模原市.
- ③ Yasuhiro Kawakatsu, Design of Phasing Orbit in Lunar Transfer Trajectory, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月9日、沖縄県宜野湾市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川勝康弘 (KAWAKATSU YASUHIRO)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：80373439