

氏 名 中宮 賢樹

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1227 号

学位授与の日付 平成 21 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 Escape and Capture on Halo Orbit Manifolds using
Impulsive Maneuvers for Interplanetary Transfers:
Applications to an Interplanetary Transportation
System

論文審査委員 主 査 准教授 澤井 秀次郎
准教授 吉川 真
准教授 加藤 隆二
教授 山川 宏（京都大学）
教授 Daniel J. Scheeres
(The University of Colorado
at Boulder)
准教授 川勝 康弘（宇宙航空研究開発機構）

本研究では、太陽－地球系と太陽－火星系のラグランジュ点（L1、L2）まわりのハロー軌道から派生する軌道群（マニフォールド）を用いた、ハロー軌道を起点・終点とするエスケープ・キャプチャー軌道の解析を行った。そして、地球・火星表面近傍の近点でインパルス軌道変換を行なうことで、低コストなハロー軌道間の惑星間移行の実現可能性を検討した。また、これらの軌道を利用し、地球・火星のハロー軌道上に配置した宇宙港を経由して惑星間を往復する輸送システムを提案し、その有効性を示した。

太陽－地球系のラグランジュ点は、太陽と地球それぞれの重力と宇宙機に作用する遠心力が釣り合う平衡点である。特に太陽と地球を結ぶ線上にあり、地球からおよそ 150 万 km 離れた地球重力圏境界に位置する L1、L2 は、重力ポテンシャルの観点から内・外惑星への移動が容易であり、また太陽・地球に対する相対位置が変わらず安定した熱・重力環境を得られるので、太陽系探査の中継拠点に適している。また、同様に太陽－目標惑星系の L1、L2 も将来の惑星探査の拠点として考えられ、これらの L1、L2 近傍に中継点となる宇宙港を配置し、惑星往復探査の地球帰還分の燃料を目標惑星まで運ばずにそれらの宇宙港に置いていくことで、地球出発時の宇宙機重量の大幅な低減が期待できる。

これまで、Farquhar (2004) や松本 (2005) らが太陽－地球系や太陽－火星系の L1、L2 を起点・終点とする、地球圏脱出・火星圏到着軌道について検討している。しかし、地球・火星から見て L1 は太陽と同一方向にあるので通信が難しく、また L2 は地球・火星により蝕となる位置にあるので、L1、L2 に宇宙港を建設することは実用的ではない。よって、L1、L2 近傍の周期軌道（ハロー軌道）上に宇宙港を建設し、それらを起点・終点とした方が合理的である。しかし、ハロー軌道を起点・終点とする惑星間移行はこれまでほとんど解析されていない。Alonso ら (2006) は、ほぼ増速ゼロで地球ハロー軌道から離脱する軌道群（不安定マニフォールド）を利用してそのまま地球圏を脱出し、深宇宙で軌道変換を行なって火星のハロー軌道へ収束する軌道群（安定マニフォールド）に接続する軌道解析を行なっているが、その場合の飛行時間は非常に長くなる。そこで本研究では、不安定・安定マニフォールドを利用して宇宙機が惑星表面近傍を通過するようにし、エネルギー増加が効果的な惑星表面近傍の近点でインパルスの速度増分を行うことを想定した、ハロー軌道を起点・終点とする新たな惑星間移行軌道を解析し、さらに地球－火星間の往還型輸送システムへの適用性を検討した。

まず初めに、安定・不安定マニフォールドのダイナミクス、特に地球や火星に接近時の近点位置・高度・速度について解析を行なった。その結果、出発・投入するハロー軌道の大きさを調整することにより不安定・安定マニフォールドの近点高度は地球・火星の表面近くまでになり、ほぼ速度増分ゼロで宇宙機をハロー軌道から地球・火星の表面に近づけることができると分かった。

次に、一般的に不安定・安定マニフォールドを利用したハロー軌道を起点・終点とするエスケープ・キャプチャー軌道は、L1、L2 回りを周回するので飛行時間は長くなる（例えば、近火点から火星ハロー軌道投入までで約 1.5 年かかる）。よって、近点とハロー軌道上で速度増分を行なうことで L1、L2 回りを周回しないようにし、飛行時間の低減をはかった。その結果、わずかな速度増分でかなりの飛行時間の低減が見込めると分かった（例えば $\Delta V = 60 \text{ m/s}$ で約 0.3 年になる）。

地球・火星ハロー軌道を起点・終点とするエスケープ・キャプチャー軌道の接続の際に、L1 ハロー軌道と L2 ハロー軌道のそれぞれの不安定・安定マニフォールドの近点の位置や

速度方向の特性から、地球では L1 ハロー軌道上に宇宙港を配置し、火星では L2 ハロー軌道上に配置するのが適切であると分かった。また、地球圏出発日時や火星圏到着日時、地球・火星ハロー軌道の大きさを調整することで、Alonso らの結果に比べて約三分の一の軌道制御量と飛行時間で、地球ハロー軌道を起点とするエスケープ軌道と火星ハロー軌道を終点とするキャプチャー軌道とが接続できることを明らかにした ($\Delta V =$ 約 2.0 km/s で飛行時間は約 800 日となる)。

さらに、本研究で検討した地球・火星ハロー軌道を起点・終点とする惑星間移行軌道を利用した、地球-火星間の輸送システムについて考察を行った。ここでは、地球低軌道と火星低軌道間の移行について、地球・火星ハロー軌道を経由する場合と直接移行する場合に必要な速度増分と飛行時間の比較を行なった。その結果、地球・火星低軌道間の片道移行に必要な燃料は、ハロー軌道経由の方が直接移行の場合より少し多くなった。しかし、往復移行の場合、火星低軌道に向かう際に地球と火星のハロー軌道を経由して、そこに配置した宇宙港に地球帰還分の燃料を置いていくことで、飛行時間は直接往復移行より約 4 倍になるが地球低軌道出発時の宇宙機の重量は約二分の一に低減できると判明した。

結論として、本研究ではまず初めに、ハロー軌道を起点・終点とする、マニフォールドを利用したエスケープ・キャプチャー軌道の近点位置や速度の特性について明らかにした。そして、それらの近点でインパルス速度増減を想定することにより、実用的な速度増減量と飛行時間で、地球ハロー軌道と火星ハロー軌道の間を移行する惑星間軌道が存在することを確認した。さらに、これらの軌道を利用した惑星間の往還型輸送システムを提案し、その有効性、特に宇宙機質量の低減可能性を示した。

本論文は、太陽－地球、あるいは太陽－火星を結ぶ線上のラグランジュ点まわりのハロー軌道を起点・終点とする不安定・安定多様体を利用した惑星脱出・キャプチャー軌道のダイナミクスを明らかにし、これらを利用した地球－火星間の惑星間輸送システムへの適用の有用性を示している。

太陽－惑星（地球・火星）系のラグランジュ点は、宇宙機に作用する太陽と惑星のそれぞれの重力、および、遠心力が釣り合う平衡点である。そのうち、太陽－惑星を結ぶ線上にある L1（惑星から見て太陽側）、L2 点（惑星から見て反太陽側）は、重力ポテンシャルの観点から、内外惑星へ宇宙機を送り込むのに適しており、また、太陽・地球に対する相対位置が一定であるために、安定した熱や重力環境が得られる場所でもある。そのために、宇宙観測のための観測地点や、惑星探査のための中継地点として適当である。しかし、L1、L2 点自体は、通信や日陰の観点から問題があり、実際は、L1、L2 点近傍の周期軌道（ハロー軌道）を使用することが望ましい。本論文では、ハロー軌道が惑星間移行のための燃料の保管地点となる機能に着目し、軌道工学、および、宇宙ミッション策定の観点から検討を行っている。

論文の前半では、一旦惑星表面近くまで近づいてから惑星重力圏から脱出あるいはキャプチャーする軌道に注目し、多様体軌道の特性として惑星表面近傍まで近づくための軌道制御量、飛行時間、そして、近点の位置等の条件を明らかにしている。また、僅かな速度制御により、ハロー軌道と近点の間の飛行時間を大幅に減少させることができること、および、その定量的な関係を明らかにしている。

後半では、惑星表面近傍に設定された近点でインパルス状の速度制御を想定することによって、地球脱出軌道（地球ハロー軌道－近地点－脱出）、地球から火星までの惑星間軌道、そして、火星キャプチャー軌道（接近－近火点－火星ハロー軌道）が接続できることを示した。火星から地球への帰還軌道についても同様の結果が得られており、軌道制御量や飛行時間の観点から、ハロー軌道を経由した惑星間往復軌道の実現可能性を示している。

最後に、地球と火星のハロー軌道上に燃料を備蓄しておく宇宙港を想定することで、惑星間輸送系のシステム重量を大幅に低減可能なことを示している。

以上より、本論文は、太陽－地球系や太陽－火星系のハロー軌道を起点・終点として、地球あるいは火星の表面近傍の近点において軌道制御を行うことで、惑星間移行が飛行時間および軌道制御量の観点から実現可能であること、そして、その惑星間輸送システムへの適用が有効であることを示しており、宇宙工学に大きな貢献をしたと認められる。