

氏 名 飯塚 浩二郎

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 931 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 車輪型探査ローバの走行システムに関する研究

論文審査委員 主 査 教授 橋本 樹明
教授 小松 敬治
助教授 樋口 健
助教授 久保田 孝
教授 中谷 一郎（JAXA 宇宙科学
研究本部）

論文内容の要旨

宇宙探査がもたらすものとして、太陽系の起源を解き明かすための手がかり、宇宙資源の発掘・利用、人類の活動範囲の拡大、宇宙活動を支援する科学技術の発展など様々なものがある。1970年代に米ソの競争で有人探査が行われたが、冷戦の終結後宇宙開発には低コスト化が求められている。このため現在の宇宙探査では、低コストで実現可能な無人探査が主流となっている。実際に行われた無人表面移動探査ミッションとして1997年のNASAによる火星探査ミッションが挙げられる。このミッションではマイクロローバ（小型移動探査ロボット）Sojournerが、火星表面を移動探査し、搭載観測機器による岩や土壌の分析など数々の科学探査を達成し、ローバによる移動探査の有用性を証明した。2004年にはスピリットとオポチュニティという2台のローバが火星表面探査を行った。月や惑星の探査においては、今後ますますローバによる移動探査が積極的に行われていくと考えられる。

日本でも次世代月探査ミッションとして月面への軟着陸およびマイクロローバによる月面の移動探査を検討している。また、月や惑星表面においてはクレータや崖などは地殻が露出しているため科学的関心が高く、将来のローバミッションではこのような険しい地形を広範囲に移動探査することが求められている。月表面は夜間、摂氏-170度と非常に低温となるため、ローバ搭載機器が永久故障となる可能性が高い。そのため活動期間は昼間の15日間のみ限定されると考えられ、月探査ミッションにおいては探査移動の効率化への要求が顕著となる。月や火星などの天体は地球からの距離が長いこと、ローバと地球上のオペレータ間の通信には月の場合で数秒、火星の場合で数分から数十分もの時間遅れを伴う。このためテレオペレーションによる探査は効率が悪く、また不測の事態に対する対応が難しい。そのため表面移動探査を行なうために、次世代のローバには走行性能の高いシステムが必要であり、また走行状態の正確な予測、自律性の向上などが求められる。

こういった背景において、本論文では小型・軽量であるマイクロローバに注目する。従来の移動探査において、長距離走行を遂行したローバ（旧ソ連のLunokhod、NASAのLRV、NASA/JPLのMER）は、大型であり重量も重いものであった。しかし、次世代ミッションにおいては、ミッション要求、経済性、低消費電力、運搬制限などの理由から探査ローバの小型化が求められている。一方で、小型・軽量の車輪型ローバが月表面のようなレゴリスで覆われた砂上から推進力を得て走行するには、いくつかの困難を伴う。本論文では、レゴリス上の走行を現実的に可能とし、次世代ミッションに対応できる数十kgの小型・軽量のマイクロローバを対象とし、高い走破能力を有する走行システムの構築を目的とする。本目的を達成するために以下の2つの課題を解決する必要がある。ひとつは高い砂面走行性能の構築であり、車輪と惑星表面との力学的相互作用の理論的考察と実験的解析を行い、探査ローバの車輪検討を行う。そして、理論的および実験的車輪検討に基づいて、せん断地盤走行に有効な設計指針を提案する。もうひとつは月惑星模擬環境を地上で実現することであり、地上模擬実験方法を提案し、地上試験において提案手法の有効性を確認する。

1つ目の課題である砂面上の走行について概要を述べる。砂面上を走行するマイクロローバの性能を考える上でもっとも重要な要素の一つとして、車輪と砂表面との相互作用を考慮する必要があるが、そのメカニズムには明らかになっていない点が多い。そこで車輪と砂との相互作用を力学的にモデル化し、探査ローバが斜面レゴリス上を走行する際のメ

カニズムを数値シミュレーションにより検討した。実際に砂面上を走行する探査ローバと砂表面との力学的関係からスリップ率を走行性能指標とした単輪走行実験を行った。この実験より本論文で提案したモデルの有効性を示すことができた。また、実験結果から低速走行によりスリップ率が低減することがわかった。そこで、低速走行時のスリップ率減少という砂上走行の特徴を生かし、速度可変制御手法を考案した。この走行手法は、高速度モードと低速度モードを有し、スリップ率を評価指標としてモードの切替制御を行い、スリップ率を改善しつつ、できるだけ高速に移動することを実現するものである。

車輪と砂表面との相互作用に関するモデルの検討および実験的考察から、車輪が砂地上を走行する際には、車輪の法線応力分布が重要なパラメータであり、それを考慮した車輪設計が必要であるとの知見を得た。そこで、車輪の基本寸法である車輪径やラグの形状などを検討した結果、砂との接地面積が大きいこととラグの存在が必要であることがわかった。その理由として、接地面積が大きいことで法線応力が低下し、車輪の沈下現象を低減させることができると考えられる。本論文では、多角形状を持たせることで接地面積を拡大させる剛体車輪と弾性変形を利用して接地面積を拡大させるラグ付弾性車輪の2種類の車輪を考案した。また提案した車輪の有効性を検証するために、実際に車輪を試作し走行実験を行った。走行実験の結果、その効果を確認することができた。多角形状の剛体車輪は、法線応力の低い部分で沈下現象が低減することがわかった。また、弾性車輪では法線応力を砂面上に沿って一様に分布させることができるため、斜度が大きい場合にも高い走行性能を示した。本論文では、砂地上を走行するマイクロローバに有効な車輪形状について理論的考察および実験的検証を行い、その結果に基づき車輪の設計指針を考案した。本論文で提案した設計指針を適用させることにより、砂地に限らず、一般的なせん断地盤に有効な車輪の設計を行うことが可能となる。

もうひとつの課題である月惑星模擬環境を実現する方法について概要を述べる。本論文では低重力と真空という二つの環境に着目し、地上での実験手法の有効性について検証した。低重力環境における探査ローバの走行実験は既に行われているが、走行性能に影響を与える砂のせん断強度については低重力環境になるとどのように変化するのは把握できてない。そこで本論文では砂のせん断強度を単位面積当たりのトルクとして換算できる比切削抵抗に着目した。相似則に基づく理論解析と航空機によるパラボリックフライトを利用した低重力環境実験を行い、比較検討を行った。その結果、砂のせん断強度においても、相似則が成立していることを確認した。また、真空環境の影響を調べるために、真空チャンバを用いた走行実験を行った。大気状態と真空状態における走行比較実験を行い、大気と真空ではローバの走行に大きな差はないことがわかった。これらの実験から、車輪走行性能に関する限り、地上における重力、大気圧環境でも、相似則等の適用により、月惑星表面上での性能を模擬できることがわかった。

本論文は、車輪型探査ローバの走行システムに着目し、理論的な検討及び実験的検証を行い、走破性能の高い走行システムを提案し、その有効性を示した。本研究が次世代ミッションに必要とされるマイクロローバの開発に大いに貢献することが期待される。

論文審査結果

深宇宙探査ミッションでは、月惑星に着陸し表面を移動しながら探査を行う直接探査が強く求められている。その際、月惑星表面を広範囲に柔軟に移動できる探査ローバが重要となっている。特に、コストおよび搭載の機会を考慮すると、小型軽量で走破性の高いマイクロローバが必要となっている。小型のローバは、消費電力や重量の点で車輪径を大きくすることができず、また軽量のため、レゴリスと呼ばれる細かい砂などで覆われた地域を移動することは容易ではない。本論文は、小型軽量な車輪型マイクロローバを対象とし、高い走破能力を有する走行システムの構築を目的としている。本論文の主部は、走行性能に影響を与えるパラメータに関する考察、走行性能を向上する新しい車輪形状の提案、および月惑星探査ローバの車輪に関する設計指針の示唆をまとめたものとなっている。

本論文は、砂地での走破性能に影響を与える要因を把握するために、今まであまり検討されていない斜面における砂地と車輪の力学的相互作用を数値モデル化し、単輪走行実験による解析によりその妥当性を評価している。さらにマイクロローバの砂地での走行性能をあげるために、速度可変制御と車輪形状設計の2つのアプローチを行っている。速度可変制御手法に関しては、高速走行から低速走行に切り替えることにより、スリップ率の低下に効果があることを実験により確認している。車輪形状については、法線応力とせん断応力に関係する特性を理解するために、車輪基本モデルを定義し、理論的考察と実験的検討を行っている。得られた結果から、走破性能を向上するためには、接地面積の拡大およびラグによる推進力が重要であることを確認している。また、実際に多角形車輪と弾性変形車輪の2つのタイプを提案し、その特性と有効性を実験により確認している。得られた特性をもとに、せん断特性を有する地盤において有効な車輪の設計手法を指針としてまとめている。これにより、月惑星探査ロボットが活躍する表面特性をもとに、適した車輪の設計を行うことが可能になる。

得られた知見が月惑星環境で有効であるかどうかを調べるために、重力の違いおよび大気の有無の違いについて検討を行った。特に砂の特性を理論的に把握することは難しく、航空機実験および真空環境での走行実験を行い、評価を行っている。その結果、相似則に基づいて評価できること、真空時の性能は大気がある場合よりよく、大気中での検証を行うことで十分であるという知見を得ている。

本研究は、テラメカニクス研究分野が地盤と車輪のモデル化を主眼としているのに対し、走行性能を向上するためのパラメータに着目し、実際に新しい車輪形状を提案し、実験的検討を行っている点が新しく、評価に値する。また、探査ローバの車輪に関して、いままでその設計手法が確立されていなかったが、本論文は表面のせん断特性に基づく設計指針を示唆しており、今後の月惑星探査ミッションにおいて用いる探査ローバの車輪設計に大いに寄与するものである。また宇宙分野のみならず、砂漠での走行車輪や被災地におけるレスキューロボットの設計にも多大な貢献が期待できる。

以上から、本研究は砂地などせん断特性を有する表面を走行する車輪型ローバの走行性能に関して、力学的特性に関する知見を与え、新しい車輪形状の提案と車輪形状に関する設計指針を示唆するものであり、本論文は博士学位論文としてふさわしい水準にあると判定した。