

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760374

研究課題名（和文） 月面探査ローバーの走行性評価と走行最適化制御システムの開発

研究課題名（英文） Mobility Evaluation of Lunar Exploration Rover and Development of a Control System for Mobility Optimization

研究代表者

小林 泰三 (KOBAYASHI TAIZO)

九州大学 大学院工学研究院・助教

研究者番号：10380578

研究成果の概要（和文）：近い将来の実現が検討されている月・惑星探査計画では、無人で広域の探査を行う探査ローバーの開発が急務とされている。本研究では、地盤力学や地盤-車輪系力学相互作用（テラメカニクス）の観点から 1)車輪と月面地盤との相互作用に関する力学モデル（スリップ率予測モデル）を構築し、2)砂質不整地で沈下やすべりを起こしにくい走行方法を提案するとともに、3)それを実現するためのフィードバック制御を実装した 6 輪型移動ロボットを開発した。

研究成果の概要（英文）：For future lunar surface exploration missions, robotic wheeled rovers will be promising robots to perform wide-area explorations. In this research, we first developed a lunar soil-wheel interaction model from viewpoints of Soil Mechanics and Terramechanics (mechanics of soil-wheel systems). Second, we proposed a methodology that can reduce excessive wheel slip and maintain vehicle mobility in sandy rough terrain, and developed a six-wheeled robotic vehicle which employs a feedback control system having a simple algorithm of the methodology.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土質力学，テラメカニクス，月面探査，探査ローバー，移動ロボット，制御

## 1. 研究開始当初の背景

人類初の月面着陸を達成したアポロ計画から長い年月を経て、「再び月をめざそう」とする宇宙計画が世界各国で具体化してきている。将来の月面探査において、地表面を自律移動する無人探査車（ローバー）は、広

域領域を探査する上で重要な技術アイテムとなる。探査ローバーには多くの探査機器が搭載されることになり、その走行性の確保はミッション全体の生命線となる。一方で、車両-地盤系の相互作用問題は極めて複雑な問題であり、解明できていることは挙動全体の一部に過ぎないのが実情である。特に車輪

型のローバーは、その移動効率の良さなどから移動ロボットの有力な候補として考えられることが多い。一方、車輪方式はスリップしやすく、月や惑星などの砂質不整地における走破性の確保が大きな課題となる。

地盤の応答が車両の走行性に大きく影響することは想像に難しくないが、これまでの機器開発はロボット研究者単独によるものが多く、地盤の土質力学的特性が反映されることは皆無に近い状況であった。そこで、本研究では、地盤力学の観点から車輪と地盤の相互作用問題を検討し、沈下やすべりを起こしにくい車輪型ロボットの開発に貢献できないかと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、車輪方式のローバーを想定し、車輪－地盤系の相互作用を土質力学的な観点からモデル化し、沈下やすべりを起こしにくい車輪の構造と走行条件を明らかにするとともに、最終的には独立駆動方式の多輪車両における走行制御システムを構築する。本研究では、以下の二つを主たる目標とする。

(1)スリップ率評価モデル(単輪)の構築:車輪の走行性の指標となるスリップ率の評価モデルを構築する。このモデルによって、与えられた地盤条件や車輪荷重に対するスリップ率の予測や、所要のけん引力を保持しながら走行するための最適な車輪荷重やトルク配分などが逆算できるようになる。

(2)すべりに強い車輪型ロボットの開発:スリップ率を低く抑えて走行性を向上あるいは維持するための機械制御システムを構築し、これを実装したモデルローバーを作製する。

## 3. 研究の方法

(1)レゴリスの土質力学特性の把握:アポロ計画のサンプルリターンで持ち帰られたレゴリスの化学組成と物理的特性を模擬した人工模擬試料を用いて、月面を想定した超低拘束圧条件下での三軸圧縮試験を行い、その変形挙動の特異性を解明する。

(2)車輪のスリップ率のモデル化:地盤と車輪の相互作用を地盤力学の問題(土のせん断や沈下、支持力の問題等)として検討し、車輪のスリップ率予測モデルを構築する。また、模擬土を用いた単輪の模型実験や数値実験を実施し、その妥当性を検証する。

(3)スリップに強い車輪構造と走行方法の解明:(1)と(2)の基礎的研究を受け、走行しながら「状態」のセンシングをリアルタイムで行

い、その量を判断してより良い状態の走行あるいは状態維持を自律的に実現させるための走行制御方法を確立する。

(4)独立駆動式多輪ローバーの製作と制御系の実装:(3)で提案する走行制御系を実装した独立駆動式多輪ローバーのプロトタイプを設計・製作するとともに、制御実行のプログラムを開発する。

(5)フィールド実験:(4)で作製した試作ローバーを用いたフィールド実験を行い、提案する制御法の有用性を実験的に実証する。

## 4. 研究成果

### (1)月面土の基本的土質力学特性

月・惑星を覆う表層土のことを一般にレゴリス(Regolith)という。月レゴリスの個々の粒子は、地上の砂のように風や水による粒子間接触による磨耗が生じないため、非常にいびつな形状を呈している。土粒子密度(約3.0 g/cm<sup>3</sup>)が高く、シルトから細砂(平均粒径:0.04~0.13 mm)に分類される細かいレゴリス層が深いところでは数十メートルにもおよんで堆積していると言われている。

本研究では、月面土(レゴリス)の化学組成や物理特性を模擬した人工模擬土を用いて、月面を想定した超低拘束圧条件下での三軸圧縮試験等を行なった。その結果、月面土には強度定数や変形定数に強い応力依存性がみられ、また、地上の標準的な砂試料に比べて大きなダイレイタンスー挙動を示す可能性のあることなどが明らかとなった。表1および表2に本研究で得られた人工模擬土と豊浦砂の基本的土質特性と強度定数を示す。

表1 人工模擬土の基本的物理特性

Soil properties	Lunar soil simulant (FJS-1)	Toyoura sand
Soil particle density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.95	2.65
Maximum bulk density, $\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.49	1.34
Minimum bulk density, $\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.02	1.64
Maximum void ratio, $e_{max}$	0.98	0.98
Minimum void ratio, $e_{min}$	0.46	0.62
Effective grain size, $D_{10}$ (mm)	0.014	0.21
Mean grain size, $D_{50}$ (mm)	0.10	0.26
Coefficient of uniformity, $U_c$	11.43	1.33
Coefficient of curvature, $U_c'$	1.30	0.98

表1 人工模擬土の基本的物理特性

Materials	Relative density $D_r$ (%)	Bulk density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Cohesion $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle $\phi'$ (degree)
Lunar soil simulant (FJS-1)	90	1.95	7.54	50.1
	60	1.77	1.44	41.6
Toyoura sand	90	1.61	3.04	42.7
	60	1.51	3.04	38.1

②車輪のスリップ率のモデル化

①一輪の車輪走行模型実験：図1に示す一輪のテストベッドを用いて様々な地盤・車輪走行の条件のもとで走行実験を行い、車輪のスリップ率予測モデルを構築した。実験に用いた車輪は、アルミニウム製の剛性車輪（半径  $r = 75 \text{ mm}$ 、幅  $80 \text{ mm}$ ）とし、 $\omega = \pi/10 \text{ rad/s}$  ( $3.0 \text{ rpm}$ )の一定角速度で回転する。車輪表面と剛板の両表面には、サンドペーパーを貼付し、所定の摩擦特性を有するようにした。車輪は、図に示すように2箇所（車輪荷重用とけん引力用）のカウンターウェイトによって、鉛直荷重  $W$  および後方への走行抵抗  $R$  をそれぞれ任意に変化させることができる。なお、車輪荷重用のカウンターウェイトを作用させない場合の鉛直荷重は  $W = 98.1 \text{ N}$  ( $10 \text{ kgf}$ )である。また、スライドレールやボールスプラインを用いることによって、車輪は進行方向と鉛直方向に対して自由に運動することができる仕組みとなっている。土槽は、深さ  $100 \text{ mm}$ 、幅  $200 \text{ mm}$ 、長さ  $600 \text{ mm}$  であり、試料には、相対密度をそれぞれ  $50, 70 \%$  とする月面模擬土 (FJS-1) と豊浦砂を用いた。

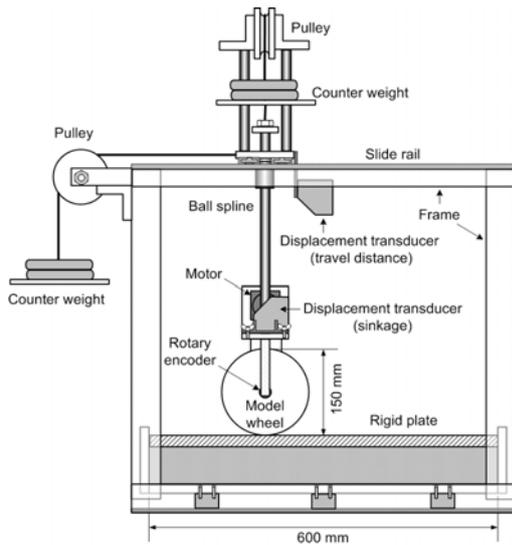


図1 一輪走行実験装置

②走行実験の結果、沈下のある走行時（滑りながら走る状態）のメカニズムを説明するために、図2に示すようなモデルを提案した。すなわち、車輪荷重  $W$  と駆動力  $T$  の組み合わせが  $T = W \tan \theta_0$  よりも下方に存在する場合には、すべり率が  $i = 0$  となり、 $T = W \tan \theta_0$  と  $T = W \tan \theta_1$  に挟まれたホーン型の領域内で「すべりながら走行する」状態 ( $0 < i < 1$ ) が実現する。そして  $T = W \tan \theta_1$  となると、 $i = 1$  となり、それより上方には  $(W, T)$  は存在しないことになる。

今、この二本の限界線に挟まれた領域内で、角度  $\theta$  を等分割するように  $i$  が分布すると仮

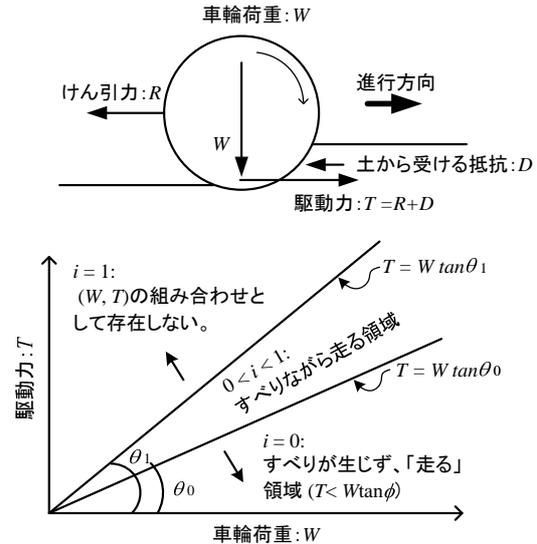


図2 沈下を伴う走行メカニズムの解釈

定すると  $W$  と  $T$  の間には、任意のスリップ率に対応する  $\theta_i$  に対して次式が成立することになる。

$$T = W \tan \theta_i \quad (1)$$

また、この領域内の  $i$  の等分割の仮定より、 $i$  と  $\theta_i$  の間に以下のような関係を導くことができる。

$$\left[ 0 \leq \theta_i \leq \theta_0 \text{ のとき} \right] \\ i = 0 \quad (2)$$

$$\left[ \theta_0 < \theta_i \leq \theta_1 \text{ のとき} \right] \\ i = \frac{\theta_i - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (3)$$

すなわち、 $W$  と  $T$  の大きさが分かれば、式(1)によって見かけの摩擦角  $\theta_i$  が求まり、それを式(3)に代入することで直ちに  $i$  が求められることになる。本モデルは、 $W$  と  $T$  の組み合わせから  $i$  を評価するだけでなく、例えば、「固定された車輪荷重に対して所定のスリップ率を確保するにはいくらの駆動力が必要となるのか」や「所要の駆動力に対して、最適な車輪荷重いくらになるのか」など問いに対する答えを容易に導くことができ、車輪設計の最適化においても利用価値を見出すことができると考えている。また、走行中の  $T$  を計測（評価）することによって、走行性のリアルタイムスリップ率評価を可能にし、トルク配分や車輪荷重配分等のフィードバック制御モデルとしても利用できる可能性があるなど、多くの利用価値が見出せる。

(3)スリップに強い6輪移動ロボットの作製

①スリップ率予測モデルを利用した走行制御：図2に示したコンセプトによれば、スリップ率  $i$  は、車輪荷重  $W$  と駆動力  $T$  に支配されることになる。このことは、 $W$  や  $T$  を制御することによって  $i$  を変化させられる可能性を示唆している。ただし駆動力は、地盤と

車輪の複雑な相互作用によって発揮される値であるから恣意的な制御は簡単ではない。一方の  $W$  については、サスペンションを上下することなどによって比較的容易に制御が可能となるだろう。図 2 のチャートにおいて、走行時の  $(W, T)$  プロットをモニタリングし、 $W$  の制御をして走行に必要な  $i$  を確保する走行制御法が有望である。現時点では、精度の高い  $T$  の計測に課題を有しており、本制御法の実現には至っていない。

②車輪荷重等分配制御を実装した 6 輪移動ロボット：探査ローバーは複数の車輪で構成されるが、走行性は車両の系全体で一義的に与えられるものであるため、各車輪のスリップ率も同一の値をとることになる。また、それぞれの車輪荷重や沈下量が異なっても、系として連動しているため各車輪に作用する駆動力  $T$  はすべて等しくなると考えられる。車輪の位置が固定されている場合には、地盤表層の凹凸性状により各車輪の荷重分担にばらつきが発生する。荷重集中が生じる車輪には大きな走行抵抗が発生し、全体系の駆動力の増加に繋がり、結果として車両の走行性の悪化を招くことになると考えられる。そこで本研究では、凹凸のある不整地においても各車輪に常に同一の荷重が分配されるような制御機構を持つ探査ローバーのモデル機を試作し、走行性の改善効果を検討することにした。

本研究では多輪型の探査ローバーの走行性の向上を評価するために、図 3 および写真 1 に示すモデルローバーを試作した。モデルローバーには前後方向に約 300 mm、左右方向に約 500 mm の間隔で合計 6 個の剛性車輪が配置されており、各車輪に取り付けられたステッピングモータによって、さらに車輪に連結されたリニアアクチュエータ（可動距離幅：200 mm）によってそれぞれ回転と上下



車輪 1 試作した 6 輪モデルローバー

運動が車輪毎に独立して行えるようになっている。車輪の半径は 75 mm、幅は 80 mm であり、車両全体質量は 44.1 kg である。また、図 3 に示すように、車輪とリニアアクチュエータ間にロードセルが配置されており、各車輪に作用する荷重が個別に計測できるようになっている。本研究では、走行に応じて変化する車輪荷重が常に等分布に分配されるようなフィードバック制御の実装を試みた。つまり、走行中の地盤の凹凸に応じて車輪が上下して常に車両重量を 6 等分する荷重 (7.33 kg) が各車輪に作用する仕組みとなっており、この荷重を目標値としてシリンダが上下に動くことによって、一部の車輪への荷重集中とそれに起因する走行性悪化を回避することができるように考えた。

提案する走行制御法の有効性を確認するために、人工的に凹凸形成した野外の砂地において走行実験を行った。その結果、制御なしの状態では、地盤凸部に遭遇した車輪に大きな沈下が発生し、結果として車両全体の走行が途中で困難になったのに対し、制御を施した場合にはスリップすることなく滑らかに走行し、提案する制御法による砂質不整地における走行性の改善効果を確認することができた。

本研究では、走行制御法の第一案として車輪荷重の平均分配化を目指した取り組みを紹介したが、本モデル機はさらに複雑で高度な制御の実装も可能である。今後は、様々な制御法の実装を試み、効果の高い走行制御法の確立に取り組んでいきたいと考えている。数多くの移動ロボットの研究開発が進められる中、土の力学に基づいたアプローチはごく限られているのが現状である。本研究が、我が国の月・惑星探査計画の技術向上の一助となれば幸いである。

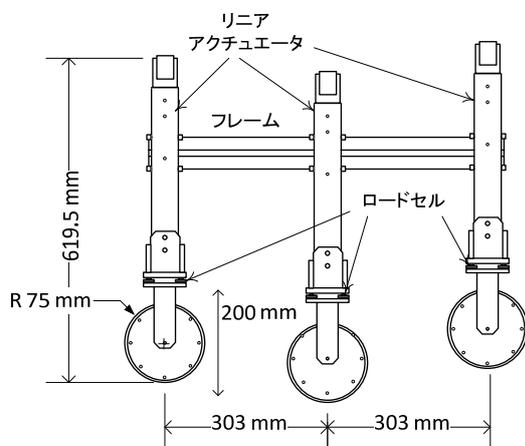


図 3 6 輪モデルローバーの側面概念図

## 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 3 件)

- ① T. Kobayashi, Y. Fujiwara, J. Yamakawa, N. yasufuku and K. Omine, Mobility performance of a rigid wheel in low gravity environment, Journal of Terramechanics, 査読有, Vol 47, 261-274, 1010
- ② 小林泰三, 藤原洋一郎, 若林幸子, 西田信一郎, 安福規之, 大嶺 聖, 砂上を走行する剛性車輪のスリップ率評価, テラメカニクス, 査読無, 第 29 号, 23-28, 2009

[学会発表] (計 3 件)

- ① 小林泰三, 石上玄也, 永谷圭司, 小柳栄次, 竹中 慶, 砂長麻美, 砂質不整地を走行する車輪型移動ロボットの荷重等分配制御に関する研究, 日本機会学会第 12 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2011 年 5 月, 長野
- ② 竹中 慶, 小林泰三, 安福規之, 大嶺 聖, テラメカニクスの基づく月・探査ローバーの走行性確保に関する研究, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 2011 年 3 月, 北九州

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林泰三 (KOBAYASHI TAIZO)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：10380578