振動伝播による軟弱地盤の締め固め効果を利用した小型軽量月・惑星脚型探査
ローバのスリップ抑制歩行の提案渡邊 智洋^{*1}, 飯塚 浩二郎^{*2}Proposal of walking to reduce slipping behavior using compaction effect of loose soil caused by
a propagation of vibration for small light lunar planetary exploration rovers with legsTomohiro WATANABE^{*1} and Kojiro IIZUKA^{*2}^{*1} Graduate School of Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology
307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama 337-8570, Japan^{*2} Department of Systems and Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology
307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama 337-8570, Japan

Received: 1 July 2019; Revised: 9 November 2019; Accepted: 27 May 2020

Abstract

Purpose of our research is to improve the movement performance of small leg typed rovers using effects caused by vibration propagation. When the loose ground is given vibration, there are two effects. One is to increase density of the loose ground, and the other is to increase sinkage of legs. If the density of the ground is increased by vibration/stop, the rovers are not easy to slip. This means that the shearing strength becomes large since the loose ground is given effect of vibration/stop. Moreover, when the sinkage of legs are increased, the supporting force becomes large. The difference of ground before and after vibrating are confirmed by implemented some experiments such as measurement of shearing strength, sinkage and earth pressure. As results, the value of shearing strength and sinkage of leg were increased after vibration. Also, the value of earth pressure was increased after vibration. Furthermore, these effects given by vibration/stop are confirmed using multi-legged rover. In experimental results, walking distance of proposed rovers with vibration was longer than one without vibration. From these experimental results, we could get knowledge that the method using vibration/stop was very effective for the leg typed rovers.

Keywords : Loose soil, Vibration, Terramechanics, Leg typed robot, Passive earth pressure

1. 緒 言

月や火星などの天体は探査対象として非常に魅力的であり、探査するために様々な方法が検討されている。その一つとして車両型の移動探査ロボット（ローバ）を用いて地表面を移動する方法があり、ローバの研究および開発が盛んに行われ、多くの成果を残している（Chhaniyara et al., 2012）（上野, 2014）。近年のローバの開発では小型軽量化に力を入れている。ローバの小型軽量化はコストやペイロードの削減に繋がる。例として、NASA は小型軽量ローバである Sojourner を用いて火星探査計画を実施し、大きな探査成果を上げ、小型軽量ローバの有用性を証明した（NASA et al., 2019）。また、Google Lunar XPRIZE に参加した日本の民間チームである HAKUTO はコスト削減の観点から小型軽量のローバである SORATO や Moonraker の開発を行っていた（HAKUTO, 2019）（Mitsubishi electric, 2019）。さらに、小型軽量であればサブミッションとして他の探査機に相乗りすることも可能

である。実際に小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載された小型軽量ローバである MINERVA-II1 は小惑星リュウグウの表面に降り立ち、世界初の小惑星上での移動探査を実現した（はやぶさ 2 プロジェクト, 2019）。今後は小型月着陸実証機 SLIM への小型軽量ローバ（1.5kg 程度）の搭載が計画されている（吉光他, 2011）。SLIM は月面の目標地点へピンポイント着陸を計画しており、着陸後に小型軽量ローバを放出して移動探査を行う予定である。このミッションが成功すれば小型軽量ローバを用いた特定地点での探査が可能となり、探査が十分に行われていなかったクレータ内部や月面孔などの極地での探査も検討できる。

上記より、小型軽量ローバを用いた極地での探査に期待が高まっているが、現状の小型軽量ローバについては極地の移動に関してまだ技術的に問題点が見られる。そこで極地での地形に対する移動機構の走行性能について述べ、問題点について議論する。極地で想定される地形については以下の 2 つが考えられる。一つ目は岩石や崖などの障害物である。月や火星の地表は岩石や崖などで構成される障害物が多く存在する。火星で実際に調査を行った探査機である viking は障害物の少ないエリアを選択し着陸を行ったが、着陸箇所周辺では 30cm 以上の径の岩石が複数確認された（久保田, 2001）。このため、高い不整地走破性能および段差乗り上げ性能がローバには求められる。2 つ目は軟弱地盤である。月や火星の表面にはレゴリスと呼ばれる微粒子が堆積している。そのため、車輪が回転することで路面を掘ってしまい、移動不能の状態に陥りやすい（久保田, 1999）。また、クレータや月面孔などは斜面となっている。よって、小型軽量ローバには斜度を持つ軟弱地盤上での移動性能も重要となってくる。

これらの地形に対して、ローバの移動機構として一般的に用いられている車輪を小型軽量化した場合の走行性能を考える。まず岩や崖などの障害物についてである。ローバが小型化された場合、合わせて車輪の径も小さくなる。障害物の乗り上げ性能は車輪径に大きく依存するため、これらの地形に対して移動性能は極めて低い。次に軟弱地盤についてである。軟弱地盤上での車輪の牽引力モデルより考えると車輪の径および幅をパラメータとして扱っており、これらのパラメータは値が小さくなると、牽引力も合わせて減少する関係にある。ローバを小型化した場合、車輪の形状も小さくなるため、これらのパラメータ値も合わせて小さくなる。よって、牽引力の減少から軟弱地盤においても移動性能が低下する。ローバが小型であることによって重量が軽量となり、移動性能が改善されることも考えられる。しかし、重量が軽くなると車輪の牽引力は低下してしまい、これらはトレードオフの関係にある。よって、積極的に軽量化をして移動性能を向上させるのは困難と考えられる。

以上から、小型軽量ローバの移動性能を向上させるために、車輪に代わる走破性の高い移動機構が必要であり、開発が進められている。それらの 1 つとして脚機構に注目が集まり、研究が進められている（Komizunai et al., 2010）（Yeomans and Saaj, 2014）。岩や崖などの障害物に関しては脚機構では自由度の高さや足場の選択ができる点から優れた段差乗り上げ性能を有している。一方で脚機構は冗長性が高く、アクチュエータが増えることによって重量の増加や制御の複雑化などの課題が挙げられるが、近年ではこれらの課題に取り組む研究が多くあり、解決に向かっている（Simmons and Krotkov, 1990）（Spennenberg et al., 2004）（Wilcox, 2012）。対して軟弱地盤では脚部の底面と地盤の間に働くせん断力や側面に働く地盤から受ける抵抗力などが牽引力となるが、小型化した際には脚部も小さくなるため牽引力も低下する。よって、軟弱地盤上においてスリップが生じやすい。小型化した場合、歩幅が小さくなるため、スリップが移動性能の低下に与える影響は大きい。よって、小型軽量ローバに脚機構を用いるためには移動時に生じるスリップを抑える対策が必要である。

上記より、脚機構を用いた小型軽量ローバのためのスリップを抑制する歩行を提案し、実験より有効性を検証する。脚部が地盤から受ける受働土圧に注目し、受働土圧を増加させることでスリップを抑制する方法を検討する。本研究では、受働土圧を増加させる手段として地盤に振動を与える方法に注目する。軟弱地盤に振動を与えることで地盤構成粒子の流動による沈下、粒子の再配置による締固め効果が生じ、受働土圧の増加に繋がると考えられる（栗津他, 2014）。よって、傾斜のある軟弱地盤において脚部から地盤に振動を与えることで脚型ローバに高い移動性能を持たせる方法を検討する。また、受働土圧のモデルとしてランキンの受働土圧を取り上げ、値を上昇させる要素としてロッドの地盤への沈下量および地盤の密度に注目する。次に地盤に振動を与えた際の締固め効果、脚部の沈下量および受働土圧の変化について実験より確認を行う。最後に振動を与えた際に生じる特徴から傾斜のある軟弱地盤の登坂に効果的な歩行を提案し、脚を有した小型のテストベッドを用いて実験より有効性の検証を行う。

2. スリップ抑制方法の検討

斜面では図1のように脚型ローバの脚部は地盤に対して斜面下方向にせん断力を与えており、斜度が上がるほどに地盤に与えるせん断力は大きくなる。地盤がせん断力を受けた時、土壌が崩れる直前の力を受働土圧と呼ぶ(図2参照)。図3に示すように地盤が受けるせん断力が受働土圧の値を超えるとスリップが発生すると考えられる。つまり、軟弱地盤上でローバがスリップしやすい理由を考えると、受働土圧の値が低いためにせん断力によって地盤が崩れやすいことが挙げられる。よって、斜面でスリップせずに歩行する方法として、地盤がローバから受けるせん断力に耐えられるように受働土圧を増加させるという対策が考えられる。そこで、脚型ローバの牽引力の主成分を受働土圧として考え、本章では既存の受働土圧モデルを取り上げ、値を上昇させる要素を検討する。そして、それらの要素について受働土圧が増加するように変化させる方法を検討する。

2.1 ランキンの受働土圧モデル

受働土圧のモデルとして代表的な土圧理論であるランキンの土圧理論を取り上げて紹介する。ランキンの受働土圧 P は式(1)より求めることができる(栗津他, 2014)。また、図4にランキンの受働土圧を図によって説明する。

$$P = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (1)$$

r は地盤の単位体積質量である。 H はロッドの地盤への沈下量、 ϕ は地盤の内部摩擦角である。また、単位体積質量 r は式(2)より求められる。

$$r = \rho g \quad (2)$$

ρ は地盤の密度、 g は重力加速度である。

上記の式より、ロッドの地盤への沈下量および地盤の密度は上昇させることによって受働土圧を増加させ、変化させることが可能な要素と考えられる。

Fig. 1 Force that leg gives to ground on slope.

Fig. 2 Pressure vs shear displacement.

Fig. 3 Overview of leg's slip.

Fig. 4 Rankin's passive earth pressure model.

$$P = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

P : Rankin's passive earth pressure
 H : Sinkage
 r : Unit volume weight
 ϕ : Internal friction angle

2.2 振動による受働土圧の変化

地盤の密度を高める方法として、土木施工の転圧という方法がある。転圧とは、地盤に振動などの力を加えて締め固めを行い、粒子同士の接触を密にして密度を高める施工方法である。地盤は密な状態の方が強度が高いため、人工的な地盤の形成手段として実施される（菊本他, 2015）。また、振動と軟弱地盤に関係する現象として沈下現象がある。沈下現象とは、地震などの振動により、ゆるく堆積した砂の地盤が液体状になる現象のことである。流動が生じ、地盤が緩くなることで建築物の沈下が確認されている（國生, 2005）。沈下現象が確認されている地盤は水分を含んでおり、月や火星の地盤とは異なるため、同様の現象が起こるとは言えないが、振動を地盤に与えることにより脚部の沈下量の増加が予測される。以上から、振動によって地盤の単位体積質量 ρ やロッドの地盤への沈下量 H の増加が見込まれる。

3. 振動による地盤変化の実験的検証

前章では脚部のスリップを抑制するために受働土圧を増加させる方法を検討し、振動を地盤に与えて地盤の密度および脚部の沈下量を増加させる方法を提案した。本章では振動による締め固め効果により実際に地盤の密度および受働土圧が変化することを確認する。また、振動による沈下現象より脚型ローバの脚部の沈下量が変化することを確認する。

3.1 地盤に振動を与えた際の密度の測定

3.1.1 測定方法

地盤の密度の測定法については以下のように考える。一面せん断試験やベーンせん断試験などのせん断試験では図 5 に示すように、せん断強度にピークとなる部分が見られる（川尻他, 2017）（菊本他, 2015）。このピーク値はピーク強度と呼ばれ、地盤が密詰めの状態か、ゆる詰め状態かで値が変化する。密詰めの状態とは地盤構成粒子の詰め方が密であり、相対密度が高い状態である。一方で、ゆる詰め状態とは地盤構成粒子の詰め方がゆるく、相対密度が低い状態である。図 5 に示すように、ゆる詰め状態（Low density）と比較して、密詰めの状態（High density）の方がピーク強度は高くなるということがわかる。つまり、地盤の密度が上がるほど、せん断試験で求められるピーク強度は高くなるということである。実際に地盤密度の異なる環境（珪砂 5 号を使用）を用意してベーンせん断試験よりピーク強度を測定し、式（3）の相関性を確認した。測定した試験の詳細については付録 A に記載する。

$$\rho = 0.16\sigma + 1.34 \quad (3)$$

$\rho[\text{g}/\text{cm}^3]$ は地盤の密度、 $\sigma[\text{cN} \cdot \text{m}]$ は地盤のせん断強度である。以上から、振動を与えた際の地盤の密度変化をベーンせん断試験器を用いてピーク強度を測定することで確認する。

測定環境の構成を図 6 に示す。測定環境は主に土槽、ロッドおよびベーンせん断試験器で構成される。次に具体的な測定手順について述べる。最初に土槽内の地盤を攪拌し、表面が平らになるように整える。次にロッドを地盤に埋めて固定する。ロッドの構造および寸法を図 7 に示す。振動を発生させる偏心モータはロッド内に組み込まれており、先端から 30mm の区間に配置されている。偏心モータはスリーピース社の TP-2528C-24 を使用する。本測定では偏心モータから地盤に振動を与えるためロッドを 30mm 地盤に沈下させる。そして、振動を脚部から地盤に与える。短時間の振動で効果を得られなければ、ローバの移動性能の低下に繋がってしまう。よって、測定では短時間で変化が生じることを確認するため、振動を与える時間を 30 秒とした。振動の種類については偏心モータに供給する電圧を変化させることで回転数を変化させ、周波数と起振力が 3 段階で異なる振動を用意した。表 1 に用意した振動の種類を示す。また、図 8 にロッドによる振動の強度を起振力で表す際の起振力の発生方向と偏心モータの回転方向を示す。振動停止後、ピーク強度の測定を行う。測定は振動を与えてから停止させた場合と振動を与え続けた場合の 2 パターンで行う。ピーク強度の測定にはベーンせん断試験器を用い、地盤にベーンせん断試験器を 20mm 差し込み測定を行う。トライアル回数はそれぞれの測定条件で 30 回とする。測定条件をまとめたものを表 2 に示す。測定は図 9 に示す振動部の円周上 36 箇所において行う。

Fig. 5 Shear displacement vs shear strength.

Fig. 6 Environment of density measurement experiment.

Fig. 7 Overview of rod.

Table 1 Parameters table of vibration.

Kind of vibration	Frequency	Vibratory force	Supply voltage
Strong vib.	2.36Hz	4.15N	35V
Middle vib.	1.68Hz	2.12N	25V
Weak vib.	0.97Hz	0.71N	15V

Fig. 8 Measurement direction about vibration.

Table 2 Experimental conditions for measuring density.

Item	Condition (value)
Number of trials	30
Measurement contents	Measuring peak value
Kinds of sand	Silica No.5
Vibration motor	TP-2528C-24

Fig. 9 Measurement points of density.

3.1.2 結果および考察

測定結果では図 9 に示す 4 つの列において同様の傾向が見られたため、代表して列 2 において測定したピーク強度の平均値を式 (3) より地盤密度に変換し、図 10 と図 11 に示す。グラフは各振動を与えて停止させた場合と各振動を与え続けた場合の測定結果をそれぞれ表示している。

図 10 では、Strong vib. を用いた場合で密度の上昇が確認でき、最も値が大きかった 2cm の測定箇所では振動を与えない場合での測定結果と比較すると約 12%増加した。Middle vib. でも上昇は確認できたが、こちらも最も値が大きかった 2cm の測定箇所では振動を与えない場合と比較すると約 2%の増加となり、Strong vib. 程ではなかった。Weak vib. では 2cm の測定箇所では振動を与えない場合での密度の値とほぼ等しく、Weak vib. を用いた場合では密度の上昇はあまり見られなかった。このことから、振動の周波数が上がるほど密度も上昇していることがわかる。密度の上昇については円周上のどの角度でも起きており、地盤は振動の影響を円周上に等しく受けていると考えられる。密度は振動部に近いほど上がっており、振動の影響を大きく受けると考えられる。また、振動体から離れるほど密度の値が下がっていき、ある距離で振動を与えない場合での密度と同等の値に収束している。それぞれの振動で振動を与えない場合との差が 2%以内に収まるまでの距離は、Strong vib. では 16cm、Middle vib. では 4cm、Weak vib. では 2cm となっている。よって、収束するまでの距離についても周波数が高い方が長くなっている。

図 11 では、Strong vib., Middle vib. について振動中の密度の低下が確認できたが、Weak vib. ではあまり変化が見られなかった。よって、振動中では振動の周波数が上がるほど密度が低下している。それぞれの振動で振動を与えない場合との差が 2%以内に収まるまでの距離は、Strong vib. では 10cm、Middle vib. では 6cm、Weak vib. では 2cm となっており、収束するまでの距離も周波数が高いほどに長くなっていることが確認できる。

Fig. 10 Distance vs density on line 2 (After vibration).

Fig. 11 Distance vs density on line 2 (Vibrating).

3.2 地盤に振動を与えた際の受働土圧の測定

上記の地盤の密度の測定結果より、振動後に地盤の密度が上がっていることから理論的には受働土圧の値が上昇していると予想される。そのため、地盤に振動を与えることで生じている受働土圧の変化を実験にて確認する。

3.2.1 測定方法

測定方法および測定環境は地盤から受ける抵抗力の測定を実施している先行研究を参考にした (King et al., 2011) (Yeomans et al., 2013)。測定機を図 12 に示し、測定環境を図 13 に示す。測定環境は主に土槽、ロッドおよび力覚センサで構成される。次に測定方法を図 14 に示す。最初に土槽内の地盤を攪拌し、表面が平らになるように整える。次にロッドを先端が地盤に 30mm 埋まるところまで下げ、上下運動を固定する。振動を与えない場合と与えた場合で比較を行い、振動を与える場合では、表 1 に示すものと同様とし、各試験で 3 種類の振動を 30 秒間与える。振動の停止後、力覚センサを用いてロッドが地盤から受ける抵抗力の測定を開始し、ロッドの牽引を始める。ロッドは移動速度 0.13mm/s で 65mm ほど牽引する。土層の大きさは横幅 354mm、縦幅 609mm、深さ 300mm の直方体となっており、ロッドの牽引方向は土層の長辺と平行である。図 12 に測定機上での実際のロッドの牽引方向を示す。トライアルは各条件で 30 回ずつ行う。表 3 に測定条件をまとめた表を示す。

Fig. 12 Measuring machine of passive earth pressure.

Fig. 13 Environment of measuring passive earth pressure experiment.

Fig. 14 Flow of measuring passive earth pressure experiment.

Table 3 Experimental conditions for measuring passive earth pressure.

Item	Condition (value)
Number of trials	30
Sensor	Force sensor (PFS055YA251U6, Leprino)
Sinkage	30mm
Vibration time	30 s
Traction speed	0.13 mm/s
Traction amount	65 mm
Kinds of sand	Silica No.5

3.2.2 結果および考察

各振動を与えた場合で牽引した時の地盤から受ける抵抗力の変化を表すグラフの一例を図 15 から図 18 に示す。それぞれのグラフの共通の特徴として、牽引開始時は急激に値が上昇していき、ピークを迎えると値が減少し、最終的に値が収束して定常状態になることがわかる。初期に見られるピーク値はロッドが土壌を押す際の土壌が滑り出す直前の力であり、これが受働土圧となる。ピーク値については振動を与えない場合と与えた場合で比較すると、振動を与えた場合の方が値が上昇していることが確認でき、振動の種類によって大きく異なっている。

各トライアルでの地盤から受ける受働土圧の平均と標準誤差を図 19 に示す。図 19 を見ると、最も周波数が高い振動である **Strong vib.** を用いた結果については受働土圧が大きく上昇していることが確認できる。**Strong vib.** を用いた場合の受働土圧の値は振動を与えない場合での受働土圧の約 1.5 倍であった。**Middle vib.**, **Weak vib.** では受働土圧の上昇は確認できず、振動を与えない場合と同程度の値となっている。このことから、受働土圧の増加は振動の周波数に関係しており、周波数が高い方が受働土圧が増加すると考えられる。

Fig. 15 Traction amount vs traction force (Strong vib.: Frequency [2.36Hz], Centrifugal force [4.15N]).

Fig. 16 Traction amount vs traction force (Middle vib.: Frequency [1.68Hz], Centrifugal force [2.12N]).

Fig. 17 Traction amount vs traction force (Middle vib.: Frequency [0.97Hz], Centrifugal force [0.71N]).

Fig. 18 Traction amount vs traction force (No vib.).

Fig. 19 Vibration vs peak value.

3.3 地盤に振動を与えた際の脚部の地盤への沈下量の測定

3.3.1 測定方法

本測定では、脚部から地盤に振動を与えた場合の沈下量の変化を確認するために、テストベッドを用いて振動を与えた時の地盤への沈下量を測定する。測定環境を図 20 に示す。測定環境は珪砂 5 号を敷き詰めた土槽とテストベッドで構成される。テストベッドの詳細については次の節で記載する。測定手順については、最初に土槽内の地盤を攪拌し、表面が平らになるように整え、その土槽の地盤にテストベッドを設置する。この時の沈下量を 0mm としてモーションキャプチャより沈下量の測定を開始する。使用したモーションキャプチャは光学式でマーカを使用するものであり、テストベッド上に図 21 のようにマーカを配置した。そして、テストベッドに取り付けられた偏心モータを 30 秒間振動させる。振動は表 1 に示す 3 種類を用いる。振動終了後の沈下量を最終的な沈下量とする。トライアルは各条件で 10 回ずつ行う。表 4 に測定条件を示す。

Fig. 20 Environment to measure sinkage using testbed.

Fig. 21 Position of markers on testbed.

Table 4 Experimental conditions for sinkage measurement.

Item	Condition (value)
Number of trials	10
Vibration time	30 s
Kinds of sand	Silica No.5
Motion capture	OptiTrack Prime13

3.3.2 使用するテストベッドの詳細

テストベッドの諸元を表 5 に示す。テストベッドの質量は SLIM によるミッションを参考にし、質量は 1.9kg とした。また、寸法については緒言で紹介した小型軽量ローバの寸法（表 6 参照）を参考にし、同程度になるように設定した。本研究で使用するテストベッドの外観および各関節の構造を図 22 に示す。テストベッドの脚部は 2 つの関節で構成されており、上下動作および前進、後進を可能とする。脚の本数については重心移動の動作を特に行わずに静的歩行を行える最小脚数である 6 脚を選定した。脚部の形状については図 7 に示すロッドと同様であり、図 23 に示すように振動モータが脚部の中に搭載されている。

Table 5 Specifications of testbed.

Item	Condition (value)
Weight	1.9kg
Size	H:180mm × W:336mm × L:160mm
Servo motor	KRS-2572HV ICS
Vibration motor	TP-2528C-24

Table 6 Size and weight of small light rovers.

Rover	Size	Weight	Developer	References
Sojourner	H:300mm × W:480mm × L:650mm	10.6kg	NASA, JPL	(NASA et al., 2019)
SORATO	H:358mm × W:536mm × L:580mm	4.0kg	HAKUTO	(AU-HAKUTO, 2019)
Moonraker	H:540mm × W:480mm × L:600mm	8.0kg	HAKUTO	(Mitsubishi electric, 2019)
MINERVA-III	H:70mm × W:180mm × L:180mm	1.1kg	JAXA	(HAYABUSA2 PROJECT, 2019)

Fig. 22 Overview and structure of small leg typed testbed.

Fig. 23 Structure of leg.

3.3.3 結果および考察

測定結果を図 24 に示す。測定の結果、図 21 に示すマーカ全てにおいて同程度の沈下が確認できたため、図 24 では Marker1 のデータを使用し、脚部の沈下量の平均値を示している。図 24 より、振動の種類によって沈下量の変化が確認できる。Strong vib. を用いた場合では 46mm 沈下しており、1 番沈下量が大きかった。次に Middle vib. を用いた場合で 32mm 沈下し、Weak vib. を用いた場合では一番沈下量が小さく、13mm であった。以上の結果より、振動の周波数が大きいほど沈下量が増える傾向が確認できる。

Fig. 24 Measurement results; Sinkage.

4. 振動を用いた移動方法の提案および実験的検証

本章では、確認できた振動による地盤変化を利用して脚型ローバのためのスリップを抑制する歩行を提案する。そして、小型軽量探査ローバとして想定したテストベッドを用いて提案した歩行の有効性を検証する。実験では、製作したテストベッドを用いて軟弱な砂を敷き詰めた斜面上を歩行させ、歩行した移動量から提案する歩行の有効性を確認する。

4.1 スリップを抑制する歩行方法の提案

本節では振動を与えた際の地盤変化を利用してスリップを抑制する歩行を提案する。下記に想定される地盤変化の特徴をまとめる。

- (1) 地盤に振動を与えてから停止することで地盤の密度と脚部が受ける受働土圧が高まる
- (2) 地盤に振動を与えることで脚部の地盤への沈下量が増加する
- (3) 振動中は地盤構成粒子が流動を起こし、地盤の密度が低下する

次に上記の特徴から歩行時に振動を発生させるタイミングについて検討する。提案する振動を発生させるタイミングについて脚部1本に注目し、図25と下記より詳細を述べる。まず図25(b)より、脚を上げて前方に移動させる。次に図25(c)より、脚を下げるタイミングで振動を開始する。この動作によって特徴(2)より、地盤への脚部の沈下量を増やすことを狙う。そして図25(d)より、脚を下げる動作が終わったタイミングで振動を停止する。この動作によって特徴(1)より、地盤の密度と受働土圧の上昇を狙う。

上記の一脚当たりの振動のタイミングを利用し、遊脚運動が後方に向かって進行する後方ウェーブ歩容を参考にして図26に示す歩容をテストベッドの歩容として設定した。特徴(3)より、振動している脚周辺の地盤は密度が低下するため受ける受働土圧は低下するが、後方ウェーブ歩容を用いることで振動していない残りの5本の脚で機体を支持できる。まず、歩行の最初に全ての脚を10秒間振動させ、地盤の締固めと脚部の沈下を発生させる(図26(a)参照)。次にテストベッドのボディを前方へ31mm移動させる(図26(b)参照)。その後、脚を遊脚させて前方へ31mm移動させる。そして、地盤に接地させて振動を4.7秒間与える(図26(c)から(n)を参照)。この動作を1脚ずつ行い、全ての脚の動作が終了した時点で歩容の1サイクルを終了し、再び図26(b)から動作を開始する。1サイクルあたりの時間は36.5秒、歩幅は31mmとなっている。歩容の諸元を表7に示す。

Fig. 25 Vibration timing when walking.

Fig. 26 Sequence of proposed walking.

Table 7 Specifications of proposed walking.

Item	Condition (value)
Straide	31mm
Walking cycle	36.5s
Walking speed	0.85mm/s

4.2 斜度を持つ軟弱地盤上での歩行実験

4.2.1 実験方法

実験方法の詳細について述べる。振動は表 1 に示す 3 種類を用いる。テストベッドを用いて軟弱な砂（珪砂 5 号）を敷き詰めた斜面上を歩行させ、移動量を測定する。移動量の測定にはモーションキャプチャを用いる。テストベッドへのマーカの配置は図 21 と同様である。斜面の斜度は 0° から 15° の間で 5° 刻みで用意し、各斜度で 5 回のトライアルを行う。実験環境を図 27 に示す。各振動の種類で実験条件を合わせるため、実験でのテストベッドの歩行するサイクル数は 30 回とする。実験の条件を表 8 に示す。

Fig. 27 Overview of walking experiment on loose ground with slope using testbed.

Table 8 Conditions of walking experiment using testbed on loose ground with slope.

Item	Condition (value)
Slope angle [$^\circ$]	0, 5, 10, 15
Number of trials	5
Number of walking cycle	30 cycles
Kind of sand	Silica No.5

4.2.2 結果および考察

図 28 に各振動での移動量の平均値を比較した結果を示す。振動を与えない場合では斜度が上がるほどにテストベッドの移動量が減少している。斜度 15° では前方に移動せず、後方に下がっている。振動を与えない場合と振動を与えた場合を比較すると振動を与えた方が移動量が増えている。振動を与えない場合では後退してしまっていた斜度 15° についても、振動を与えた場合ではスリップを抑制し、斜面の登坂を可能としている。振動を与えた場合で最も移動量が小さい Strong vib. を用いた歩行でも 164mm ほど前進できている。振動の種類については斜度 5° までは移動量に変化があまり見られないが、斜度 10° 以降では Middle vib. を用いた歩行が他の 2 種類より前進している。Middle vib. を用いた歩行の移動量は他の 2 種類の振動を用いた場合と比較して斜度 10° では約 1.2 倍、斜度 15° では約 1.5 倍となっている。振動の種類による移動量の変化は以下の 2 つが原因であると考えられる。1 つ目は図 26 に示す歩容の動作 (a) による後退である。実験では図 26(a) の動作によってテストベッドが後退していることが確認できた。図 29 に各斜度、各振動での図 26(a) の動作による後退した量を示す。斜度 0° 、 5° では振動の種類によって後退した量にあまり変化は見られない。対して、斜度 10° 、 15° では振動の周波数が大きくなるほどに後退している。これは振動による地盤の密度低下により、テストベッドが斜面後方にスリップしたためである。振動の周波数が大きいほどに地盤の密度低下は発生するため、周波数が大きいほどに後退した量が増加したと考えられる。2 つ目は斜度と振動の条件による歩行 1 サイクル当たりの移動量の変化についてである。図 30 に各斜度、各振動での歩行 1 サイクル当たりの移動量を示す。歩行の 1 サイクルとは図 26 の (b) から (n) までの動作のことである。斜度 10° 、 15° では歩行 1 サイクル当たりの移動量が Middle vib. の条件では他の振動条件より若干大きい。振動中の地盤の密度低下は Strong vib. の方が Middle vib. より広い範囲かつ低下した時の値が小さいことが前章の実験より確認できている。よって、Strong vib. を用いた条件での移動量より Middle vib. を用いた条件での移動量が多いのは、図 26 の (b) から (n) までの動作での脚部の振動で生じる地盤の密度低下によって斜面後方にスリップした量が Strong vib. を用いた場合の方が大きいためと考えられる。Weak vib. では周波数が小さかったために振動による効果を十分に得られず、1 サイクル当たりの移動量が若干小さくなってしまったと考えられる。

Fig. 28 Amount of movement in each vibration and each slope conditions.

Fig. 29 Back amount by initial motion of walking.

Fig. 30 Movement distance on one step in each vibration and each slope condition.

5. 結 言

本研究では、月や火星などの極地における小型軽量ローバを用いた探査の重要性から移動機構として脚機構を提案し、移動が想定される地形から問題点を検討した。軟弱地盤上では、小型化によって脚部が得られる牽引力が減少し、スリップしてしまうことが考えられ、本研究ではこの問題の解決に取り組んだ。ローバがスリップしてしまう理由として地盤から受ける受働土圧の値が低いことがあげられる。そこで、受働土圧を高めることでスリップを抑えられると考え、小型軽量ローバの脚部に振動発生機を取り付け、振動を与えて受働土圧を高めてスリップを抑制する方法を提案した。脚部から軟弱地盤に振動を与えることで地盤の密度と脚部の地盤への沈下量の増加が期待でき、これらが増加することで受働土圧が上昇すると考えた。実際に実験を行い、振動を与えることによって以下の地盤変化を確認することができた。

- (A) 地盤の密度は振動を与えることで低下し、振動を停止することで増加することを確認した
- (B) 地盤に振動を与え、停止することで受働土圧が上昇することを確認した
- (C) 地盤に振動を与えることで脚部の地盤への沈下量が増加することを確認した

振動の種類と地盤の変化の関係性については、振動の周波数が大きくなるほど地盤は大きく影響を受けることを確認した。次に、振動を与えた際の地盤変化を利用してスリップを抑制する歩行を提案した。そして、テストベッドを使用して提案歩行を用いた歩行実験を行い、脚部から地盤に振動を与えることによって、通常の歩行ではスリップして移動できない斜度の地盤においても歩行することを可能にした。以上の結果より、振動による地盤の変化を利用した歩行によって歩行時のスリップを抑制することができ、脚機構を用いた小型軽量ローバの移動性能が向上することを確認した。

本稿で行った歩行実験では地盤に振動を与えることによる地盤の密度低下が移動量を減少させる要因となることも確認した。今後はこの結果を元に機体の脚間の距離および振動の選定や歩容の検討などに取り組んでいく。

謝 辞

本研究は公益財団法人 JKA 平成 30 年度機械振興補助事業 競輪の支援をうけて実施された。ここに記して謝意を表する。

文 献

- AU-HAKUTO, Rover Naming, available from (https://au-hakuto.jp/rover_naming/), (参照日 2019 年 11 月 6 日).
- 栗津清蔵, 安川郁夫, 今西清志, 立石義孝, 絵とき土質力学 改訂 3 版, 株式会社オーム社 (2014), pp.26-27, 164-165.
- Chhaniyara, S., Brunskill, C., Yeomans, B., Matthews, M.C., Saaj, C., Ransom, S. and Richter, L., Terrain trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey, *Journal of Terramechanics*, Vol.49 (2012), pp.115-128.
- HAKUTO, available from (<https://ispace-inc.com/team-hakuto/>), (参照日 2019 年 11 月 6 日).
- はやぶさ 2 プロジェクト, 小型探査ローバ MINERVA-II1 (2018), available from (<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180919/>), (参照日 2019 年 11 月 6 日).
- 川尻峻三, 田中政典, 川口貴之, 猶原有希子, 平林弘, 中村大, 山下聡, X 線 CT スキャンによるベーンせん断試験時のせん断機構の解釈, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 12, No. 1 (2017), pp.79-90.
- 菊本統, 西村聡, 早野公敏, 図解 わかる土質力学, 株式会社学芸出版社 (2015), pp.22, 31, 94.
- King, R. H., van Susante, P. and Gefreh, M. A., Analytical models and laboratory measurements of the soil-tool interaction force to push a narrow tool through JSC-1A lunar, *Journal of Terramechanics*, Vol.48 (2011), pp.85-95.
- 國生剛治, 液状化現象 巨大地震を読み解くキーワード, 株式会社山海堂 (2005), pp.2-5.
- Komizunai, S., Konno, A., Abiko, S. and Uchiyama, M., Development of a static sinkage model for a biped robot on loose soil, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2010).
- 久保田考, 月・惑星環境における探査ロボットの設計, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 5 (1999), pp.609-614.

- 久保田考, 月・惑星における移動探査ロボット (ローバ), 日本機械学会誌, Vol. 104, No. 987 (2001), pp.71-74.
- 三菱電機, 読む宇宙旅行 (2014), available from http://www.mitsubishielectric.co.jp/me/dspace/column/c1412_2.html, (参照日 2019 年 11 月 6 日).
- 室達郎, テラメカニクス-走行力学-, 技報堂出版 (1993), pp.43-46.
- NASA, JPL, California Institute of Technology Pasadena, Mars Pathfinder, NASA Facts, available from <https://www.jpl.nasa.gov/news/fact.sheets/mpf.pdf>, (参照日 2019 年 11 月 6 日).
- Simmons, R. and Krotkov, E., An integrated walking system for the ambler planetary rover, IEEE International Conference on Robotics and Automation (1990), pp.2086-2091.
- Spennenberg, D., Kirchner, F. and de Gea, J., Ambulating robots for exploration in rough terrain on future extraterrestrial missions, Proceedings of 7th International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (2004).
- 上野浩史, 宇宙機関における探査ロボットの国際動向, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 5 (2014), pp.431-434.
- Wilcox, B. H., ATHLETE: A limbed vehicle for solar system exploration, 2012 IEEE Aerospace Conference (2012).
- Yeomans, B. and Saaj, C. M., Towards terrain interaction prediction for bioinspired planetary exploration rovers, Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 9, No. 1 (2014), pp.1-15.
- Yeomans, B., Saaj, C. M. and van Winnendael, M., Walking planetary rovers – Experimental analysis and modelling of leg thrust in loose granular soils, Journal of Terramechanics, Vol.50 (2013), pp.107-120.
- 吉光徹雄, 春山純一, 澤井秀次郎, 角田博明, 倉富剛, 渡辺和樹, 月面孔をめざす小型ローバシステムの提案, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011).

References

- AU-HAKUTO, Rover Naming, available from https://au-hakuto.jp/rover_naming/, (accessed on 6 November, 2019) (in Japanese).
- Awazu, S., Yasukawa, I., Imanishi, K. and Tateishi, Y., Etokidoshitirikigaku revision 3 edition, Ohmsha (2014), pp.26-27, 164-165 (in Japanese).
- Chhaniyara, S., Brunskill, C., Yeomans, B., Matthews, M.C., Saaj, C., Ransom, S. and Richter, L., Terrain trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey, Journal of Terramechanics, Vol.49 (2012), pp.115-128.
- HAKUTO, available from <https://ispace-inc.com/team-hakuto/>, (accessed on 25 May, 2019) (in Japanese).
- HAYABUSA2 PROJECT, The small exploration rovers, MINERVAIII (2018), available from <http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180919/>, (accessed on 6 November, 2019) (in Japanese).
- Kawajiri, S., Tanaka, M., Kawaguchi, T., Naohara, Y., Hirabayashi, H., Nakamura, D. and Yamashita, S., Interpretation of shear mode on vane shear test by X-ray CT scan, Japanese Geotechnical Journal, Vol. 12, No. 1 (2017), pp.79-90 (in Japanese).
- Kikumoto, M., Nishimura, S. and Hayano, K., Zukai wakarudoshitirikigaku, Gakugei Publishers (2015), pp.22, 31, 94 (in Japanese).
- King, R. H., van Susante, P. and Gefreh, M. A., Analytical models and laboratory measurements of the soil-tool interaction force to push a narrow tool through JSC-1A lunar, Journal of Terramechanics, Vol.48 (2011), pp.85-95.
- Kokusho, T., Ekizyokagenshou kyodaizisinwoyomitokukeyword, Sankaidou Publishers (2005), pp.2-5 (in Japanese).
- Komizunai, S., Konno, A., Abiko, S. and Uchiyama, M., Development of a static sinkage model for a biped robot on loose soil, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2010).
- Kubota, T., Rover design for lunar or planetary exploration, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 17, No. 5 (1999), pp.609-614 (in Japanese).
- Kubota, T., Mobile explorer robot (rover) for lunar or planetary exploration, Journal of the Society of Mechanical Engineers, Vol. 104, No. 987 (2001), pp.71-74 (in Japanese).
- Mitsubishielectric, Yomuutyuuryokou (2014), available from http://www.mitsubishielectric.co.jp/me/dspace/column/c1412_2.html, (accessed on 6 November, 2019) (in Japanese).

- Muro, T., Terramechanics-soukourikigaku-, Gihoudoushuppan (1993), pp.43-46 (in Japanese).
- NASA, JPL, California institute of technology pasadena, Mars pathfinder, NASA Facts, available from <https://www.jpl.nasa.gov/news/fact.sheets/mpf.pdf>, (accessed on 6 November, 2019) (in Japanese).
- Simmons, R. and Krotkov, E., An integrated walking system for the ambler planetary rover, IEEE International Conference on Robotics and Automation (1990), pp.2086-2091.
- Spennberg, D., Kirchner, F. and de Gea, J., Ambulating robots for exploration in rough terrain on future extraterrestrial missions, Proceedings of 7th International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (2004).
- Ueno, H., State of art for planetary robotics on space agencies, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 32, No. 5 (2014), pp.431-434 (in Japanese).
- Wilcox, B. H., ATHLETE: A limbed vehicle for solar system exploration, 2012 IEEE Aerospace Conference (2012).
- Yeomans, B. and Saaj, C. M., Towards terrain interaction prediction for bioinspired planetary exploration rovers, Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 9, No. 1 (2014), pp.1-15.
- Yeomans, B., Saaj, C. M. and van Winnendael, M., Walking planetary rovers – experimental analysis and modelling of leg thrust in loose granular soils, Journal of Terramechanics, Vol.50 (2013), pp.107-120.
- Yoshimitsu, T., Haruyama, J., Sawai, S., Tsunoda, H., Kuratomi, T. and Watanabe, K., Proposal on micro rover system exploring for lunar hole, Proceedings of 11th Space Science Symposium (2011) (in Japanese).

付録 A-地盤の密度とベーンせん断試験によるピーク強度の関連性の確認

3.3.1 節にて測定試験によって求めたベーンせん断試験器で測定したピーク強度と密度の関係性を記載したが、付録では測定試験の内容および結果について述べる。

地盤の密度の変更は最大密度・最小密度試験を参考にした。測定試験では図 A1 に示すモールド、ハンマおよびナイフを用いる。まず空のモールドに珪砂 5 号を 10 層に分けて入れる。モールドを回転させながら、モールドの側面をハンマで各層ごとに打撃して資料を締固める。モールドの上端面の縁に直にナイフをのせ、素早く滑らせて砂の余り部分を取り除く。その後、ベーンせん断試験器を用いてせん断強度の測定を行う。測定箇所はモールドの中心とし、ベーンせん断試験器を 20mm 地盤に埋めて測定する。各層ごとの打撃数を変更して異なる地盤の密度状態を用意する。各層の打撃回数は 100 回、20 回、10 回、8 回、6 回、4 回、2 回、0 回とし、それぞれで 10 回試験を行う。打撃回数 0 回では最小密度試験を参考にし、漏斗を使用して砂をモールドに入れていく。そして、上端面から砂をあふれさせ、モールドの上端面の縁に直にナイフをのせ、素早く滑らせて砂の余り部分を取り除く。

測定結果を図 A2 に示す。図 A2 では地盤のせん断強度に対する密度のプロットおよび最小二乗法より導出した一次方程式が示されている。式 (A1) に導出した数式を示す。

$$\rho = 0.16\sigma + 1.34 \quad (A1)$$

$\rho[g/cm^3]$ は地盤の密度、 $\sigma[cN \cdot m]$ は地盤のせん断強度である。この一次方程式の相関係数は 0.91 となっており、高い相関性が確認できる。以上より測定試験から密度が増加することによってベーンせん断試験で測定したピーク強度も線形に対応して増加するという関係性を確認した。

Fig. A1 Overview of using experimental tools.

Fig. A2 Shear strength vs density.