

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	不整地での高速移動のためのはね付きクローラ 登坂性能の実験的検証
Title(English)	Blade-Type Crawler for High-speed Rough-terrain -- Experimental Verification of the Hill-climbing performance--
著者(和文)	山田 泰之, 遠藤 玄, 中村 太郎
Authors(English)	Yasuyuki Yamada, Gen Endo, Taro Nakamura
出典(和文)	第21回ロボティクスシンポジア, , , 6C4
Citation(English)	, , , 6C4
発行日 / Pub. date	2016, 3
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

不整地での高速移動のためのはね付きクローラ － 登坂性能の実験的検証 －

山田 泰之^{*1}, 遠藤 玄^{*2}, 中村 太郎^{*3}

Blade-Type Crawler for High-speed Rough-terrain -- Experimental verification of the hill-climbing performance --

Yasuyuki YAMADA^{*1}, Gen ENDO^{*2} and Taro NAKAMURA^{*3}

^{*1} Research and Development Initiative, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

^{*3} Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

Various unmanned exploration robots such as volcano exploration robot and rescue robot have developed. These robots require high traveling performance on rough terrain in order to move on unknown field. From the point of effective observation, the moving speed and low cost are one of important ability of these. Therefore we developed “Blade-Type crawler”, which have high traveling performance on rough terrain keeping fast moving and simple mechanism. We conducted the field test on various rough terrains in volcanic field at Izu-Oshima. In the result, it is confirmed qualitatively that this has high traveling performance. In this research, in order to provide the design method of this mechanism, the tests in the traveling performance and climbing performance were tested with various parameters such as the blade length, wheel rotation speed and velocity of the vehicle. In addition, by blade length same as wheel diameter, high rotational wheel speed, tendency is clarified that the slip rate is decreased. Hence, it is confirmed that this system is possible to perform robustness system which can travel at a constant velocity without affected road surface irregularities.

Key Words : Crawler, Vehicle, Rough terrain

1. はじめに

観測やレスキューのため情報収集や作業を行う不整地移動ロボットが多数開発されている⁽¹⁾。これらの移動機構には不整地における走破性、移動速度、機構のシンプルさ(低価格)、操縦の容易さなど用途に応じた特性が要求される。現在開発されているこれらロボットは宇宙用ローバや原子力発電所内などでの精確な作業を担うことを目的に開発されたロボットの延長上にあり、不整地走破性を向上させるために、特に移動速度低下を考慮し

ない場合が多かった。一方で、モータやセンサ、無線など電子機器の小型かつ低価格化に伴って、これらの不整地移動ロボットが安価に製作可能になり、様々な分野、例えば自然観測などで応用が期待できる。これら観測目的の情報や作業目的の状態が時々刻々と変化するもの、例えば火山噴火時の調査などでは情報収集の速さ、目的地への到達速さが重要である。さらに、日本で利用可能なロボットの規模にも課題がある。消防・警察等の自治体機関が装備導入する場合の予算は年間数十万円であり⁽²⁾、高額なロボットを自然災害に備えて広く配備することも、緊急時に現場判断で運用することも現実的ではない。また、小規模な研究組織で運用することも難しい。

そこで、著者らはこれまでに低価格かつ不整地走破性と移動速度を両立する図1のようなはね付

^{*1} 中央大学 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) yamada156@2009.jukuin.keio.ac.jp

^{*2} 東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) gendo@mes.titech.ac.jp

^{*3} 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) nakamura@mech.chuo-u.ac.jp

きクローラを提案³⁾し、不整地移動ロボットの普及・応用を試みている。これまで、提案機構を搭載した不整地移動ロボットを作製して運用想定したフィールド試験を伊豆大島裏砂漠等で繰り返し、その走破性能と移動性能の定性的に評価した。本報告でははね付クローラの各パラメータ変化による高速走行および登坂性能を定量的に把握するため、はね長と走行速度および坂傾斜度をパラメータとした登坂検証実験を実施した。

2. はね付クローラ機構

火山観測などの運用の柔軟性と迅速性が必要な場合の不整地移動ロボットの移動機構に求められる項目として、著者らは不整地走破性、移動速度、機構のシンプルさ(低コスト)を設定した。例えば、凹凸不整地の走行では移動ロボットがより大きな地面の凹凸に対応して走行するためには、クローラ面やタイヤを地面に適切に接地させるサスペンションが重要となる。クローラタイプを例に説明すると、特に脆弱地走行のためのラグがサスペンションのないクローラ型移動ロボットに装着されると、凹凸不整地で一部のラグだけで接地してしまい推進力を得られない。そのため、凹凸不整地と脆弱地不整地を双方走行するクローラ型移動ロボットを構成する場合、パッシブにクローラを地面に接地させるサスペンションかアクティブに地面との接地面を増加させるサブクローラ機構等が必要となる。しかし、これは機構の複雑化と高価格化を招く。そこで、このような機構を有せずとも同等以上の効果を得られる移動機構として、はね付クローラを開発している³⁾。これは、図2のようにクローラベルトに受動的に屈曲するラグを取付けることで、低速時には図2(b)のように通常のクローラと同様に広い接地面を確保して走行し、高速走行時にはラグが図2(b)のように開いてホイール径が疑似的に拡大して、不整地走破性能が向上する移動機構である。これは、ラグの展開により、ロボット車体と地表との間に空間が作られ疑似的なサスペンション機能を発揮することで、地面の凹凸の影響を受けにくくなるためである。



Fig. 1 Blade-Type Crawler Vehicle

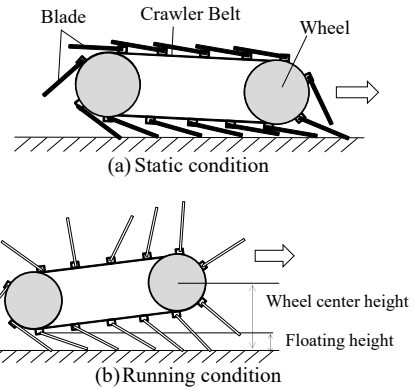


Fig.2 Blade-Type Crawler Mechanism

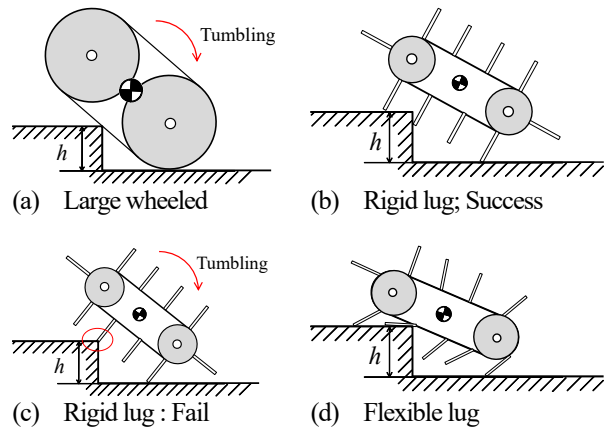


Fig. 3 Comparison of the traveling on the step

2・1 段差乗り越え時の動作原理 はね付クローラが車体サイズに比べて大きな岩などの凹凸を乗り越える不整地踏破能力を有することを、ステップ状の段差乗り越えに置き換えて以下に説明する。サスペンションやサブクローラ機構を用いずにクローラ型移動ロボットが高い段差を乗り越えるためには、クローラホイール径を増大させる方法が一般的であるが、この場合は同時にホイールベースも延長しないと、図3(a)のように転倒しやすくなりロボットの大型化を招く。次に、固定式の長いラグを有するクローラ型移動ロボットが段差を乗り越える場合、図3(b)のようにラグ間に段差がはまれば、転倒しないが、図3(c)のようにラグ先端が段差にあたれば、図3(a)の車輪径を拡大した場合と同様に車両は転倒する。一方で、長いラグが弾性支持されている場合は、図3(d)のように、ラグが段差に引っかかる効果と車両後端のラグが車両を押し上げる効果によって、高い段差踏破性が期待できる。以上の理由から、長い弾性ラグを有するはね付クローラは同様のホイール径とホイールベースでも、安定して高い段差を踏破できると言える。

2・2 段差乗り越え時の動作の検証 はね付クローラは図3(d)のように、後端のはねがロボットを持ち上げることで段差の乗り越えを行う。この効果について詳しく検証する。一般的にクローラロボットの段差乗り越え条件は、車体の重心が段差の垂直壁の延長線上を越えることである。図4のようなモデルを考える。はねはクローラホイールに対して接線方向まで屈曲する。ここで h は段差高、 L_G は重心から後クローラホイール中心までの距離、 r は後クローラホイール半径、 H_G は重心高、 α はロボット傾斜角、 l ははね長である。この時のはねによる最大持ち上げ高さ h_b は式(1)ようになる。

$$h_b = \sqrt{r^2 + l^2} - r \quad (1)$$

また重心の x 座標 x_G は式(2)のように表される。

$$x_G = \frac{h - \sqrt{r^2 + l^2} + r}{\tan \alpha} - L_G \cos \alpha - r \tan \frac{\alpha}{2} \cos \alpha + H_G \sin \alpha \quad (2)$$

段差を越えるための条件は重心の x 座標が負になることであるから $x_G = 0$ として式(3)のように変形できる。

$$h = L_G \sin \alpha + r \tan \frac{\alpha}{2} \sin \alpha - H_G \sin \alpha \tan \alpha + \sqrt{r^2 + l^2} - r \quad (3)$$

これより乗り越え可能な段差高さを求められる。式(1)からはねを長くするに従ってはねによる持ち上げ高さがほぼ線形的に高くできることが確認できる。しかし、はねを長くなりすぎると、はねどうしが干渉せずに動くためのはねの取り付けスパンも広くなり、はねの枚数が減少して、走行時に上下動する振動的な動きや、脆弱地での接地面圧の分散効果が低下することによる走行性能の低下などが予想されるため、単純に長くすればよいとは言えない。一方で長さの下限は、持ち上げ高さが線形領域になるはね長、今回のパラメータで言えば少なくともはね長は約50 mm前後が効果的であると言える。次に、式(3)を用いて、クローラとはね付クローラの踏破可能段差高およびそのときのロボット傾斜角の関係を図8に示す。なお、双方ロボットのパラメータは表1に示した値を用いており、クローラの場合 $l=0$ としている。

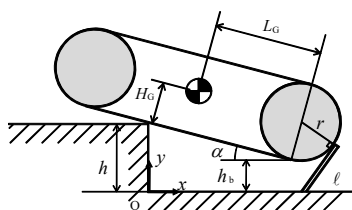


Fig.4 Parameter of Blade-type crawler vehicle

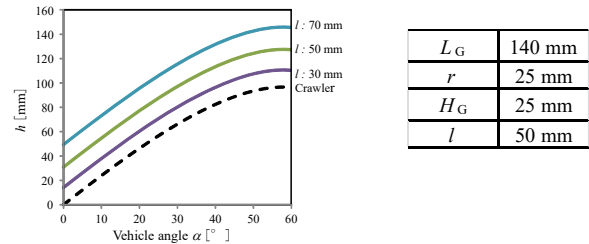
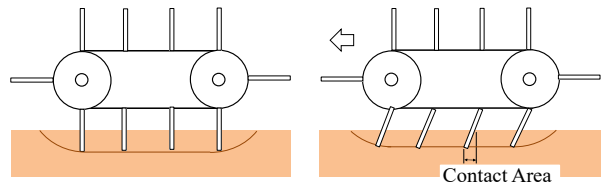


Fig.5 Relationship between the step height and angle of vehicle Table 1 Parameters



(a) long rigid lugs (b) long flexible lugs Fig.6 Comparison with rigid lug and flexible lug

図5から、はね付クローラによって踏破可能段差高が高くなり、また同じ段差を踏破する場合にもロボット傾斜角度を小さくできることが確認できる。それぞれの場合の段差乗り越えの限界高は、クローラホイール半径の約86%にあたる長さ50 mmのはね長 l で約135 mm、 $l=0$ にあたる従来のクローラで105 mmであり、踏破高さは約29%の増加である。以上より本移動機構が、従来のホイックローラ機構に比べて、より高い段差踏破性を有することが確認できた。

2・3 脆弱地の動作原理 クローラ機構で脆弱地を走行する場合の提案機構の特徴を説明する。一般的に脆弱地を走行する方法は、地面を踏み固めることで、適切な接地面をつくりながら摩擦力を得て走行する方法と、砂を掻き出して推進力を得る方法、もしくはその双方を利用する方法がある。ここで、小型の車両は大型の車両に比べて、2乗3乗法則により、面積当たりの荷重が相対的に小さくなる。そのため、小型の移動ロボットは、地面を踏み固めて走行することで、脆弱地を走行する方法は有効であるとは考えにくい。そのため、後者の砂を掻き出して推進力を得る方法の例を示して比較する。次に、はね付クローラが、この推進方法を用いることで、従来のクローラよりも移動速度が高くなる原理について説明する。

まず、図6(a)のように、従来のようにクローラベルトに固いラグが固定されている場合、ラグは地面に対して垂直な方向にはほとんど接地面を持っておらず、クローラ面が地面に接地するまでラグは地面を掘り進めることとなる。大きな推進力を

得ることは可能となるが、深く埋まったラグを移動させることは大きな抵抗となり高速移動には向かない。特に大きなロボットとなるにつれて顕著になる。一方で、提案機構(図6(b))のように、ラグに柔軟性がある場合は、ラグが斜めに地面に接触するため、ラグのみである程度接地面を得ることが可能となり、脆弱地においても、クローラベルト本体が接地するまでロボットが地面に沈み込まない。そのため、地面との間に大きな抵抗を生まざり、比較的高速に移動することが可能となると考えられる。

4. 走行性能確認実験

4・1 実験用車両および走行試験 はね付きクローラの有効性検証のため、図7のような実験用不整地移ロボットを製作した。ロボットの質量は2.5 kgで全長310 mm全幅220 mmである。車両上下面は突起がなく、路面凹凸に引っかからないようになっている。クローラホイール直径(およびロボットの厚み)は60 mmである。ブレードは幅15 mmで厚さ2 mmのポリプロピレン製である。傾斜のない不整地にて走行試験を図8のように実施し、走行性能を確認した。また、走行速度の計測の結果2.78 m/sの走行速度を確認した。

4・2 登坂実験

4・2・1 実験条件 一般的に、斜面登坂時は傾斜角の増加に伴う牽引負荷増加によるスリップで走行性能が低下し、登坂できない場合がある。タスク遂行に必要な登坂傾斜角度は目的によって様々であるが、例えば火山観測を実現するには30°が一つの基準である⁽⁵⁾。前述のように、提案するはね付きクローラにおいては、伊豆大島での走行実験によって、凹凸地や脆弱地での高速移動に加えて、約30 deg程度の登坂性能が定性的に確認できている。本節ではさらに高速に不整地登坂を可能とするため、登坂性能をより定量的に確認する。この登坂能力を評価する1つの尺度としてスリップ率を用いた。スリップ率とは車輪あるいはクローラ回転から得る理想走行距離と実際の移動距離の比である。車輪回転角速度 ω [rad/s]、車輪半径(はね付きクローラでははねを含めて) R [m]、車体速度 V [m/s]を用いて次式のように定義される⁽⁶⁾。

$$\lambda = \frac{R\omega - V}{R\omega} = 1 - \frac{V}{R\omega} \quad (4)$$

本実験では、このスリップ率 λ が小さいほど、走行性能が高いと評価する。実験フィールドは伊豆

大島裏砂漠を一例として想定し、軟弱フィールドを再現するため、図9(a)のように全寸法2000 mm×1000 mm×800 mmのスコリア傾斜地を製作した。このスコリアは図9(a)のように粒径10~40 mm程度、密度0.88 g/cm³安息角40 degの土壌性質である。実験では、図9(b)のように斜面1 mを一定速度で走行した際の区間タイムと、その時の車両のホイールスピードを計測する。

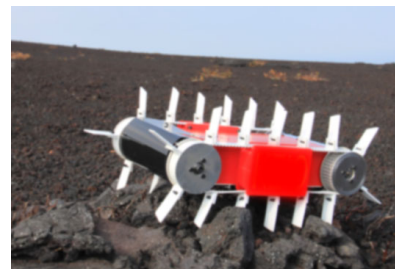
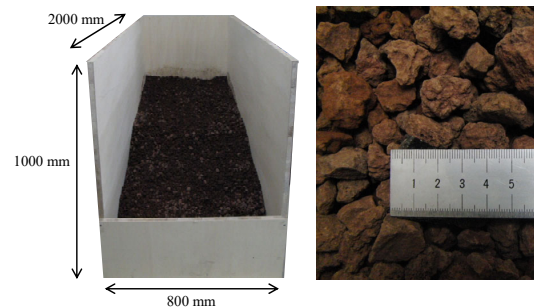


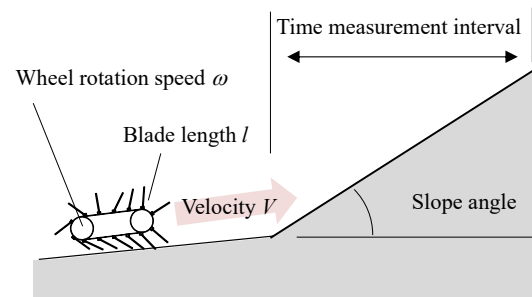
Fig.7 Test model of Blade type crawler



Fig.8 Field test on the desert



(a) Experiment device of climbing test



(b) Experimental parameters of climbing test

Fig.9 Climbing test

計測した区間タイムを移動速度に換算して、式(4)を利用してスリップ率とした。実験でははね長 l とクローラホイール回転速度 ω および傾斜角度が変化時のスリップ率を計測した。なお、各条件で3回実験を行った。図10に実験の様子を示す。

条件 A : はね長 l 変更実験 一定の入力条件下でははね長の走行性能への影響を確認することを目的として、ホイール回転数を 200 rpm に固定した上で、はね長を 10 mm, 30 mm, 50 mm の3パターンで、それぞれについて斜度 10 deg と 20 deg, 30 deg で実験した。なお、これまでの検討で、隣り合うはねの干渉が走行性能を低下させることが分かっているため、走破性を保つためには、最大はね長を 50mm とした。

条件 B : クローラ回転速度 ω 変化実験 任意の負荷(斜度)でははね長と入力変化(ホイール回転数)の変化による走行性能への影響を確認することを目的とした。走行路の斜度を 30 deg に固定し、はね長を 10 mm と 30 mm, 50 mm のそれぞれにおいて、クローラ回転数を 200 rpm と 300 rpm, 400 rpm の3パターンで実験した。

4・2・2 実験結果

条件 A の結果 : はねの長 l 変化実験 各はね長ごと測定した区間タイムから式(4)を用いて求めたスリップ率を図11に示し、斜度とスリップ率の関係について考察する。はね長 10 mm の場合は斜度 10 deg, 20 deg においてスリップ率は低く、高い走行性能を発揮しているが、30 deg ではスリップ率 1 へと急激に上昇し、走行不能となった。これは、はね長が短いのはね付クローラによるサスペンション効果が低いため、傾斜の増加に伴い、車体後方部のみしか地面に適切な接点を設けられず推進力を得ることができなかつたためと予想される。一方で、はね長 30 mm と 50 mm の場合はどの斜度でもスリップ率が高く斜度の増加に伴いスリップ率も増加するが、登坂は可能であった。しかし、傾斜に伴うスリップ率の変化率を比較すると、はね長が 10 mm の場合が最も高く、50 mm の場合が最も低い。つまり、長いのはねの場合、傾斜角度が低い場合でもスリップはしているが、地面の傾斜変化にあまり影響されず一定したスリップ率を保つことが分かった。一方で、短いのはねの場合、傾斜度の増加にともないスリップ率が急激に上がり、同傾斜時の長いのはねよりもスリップ率が低下する。

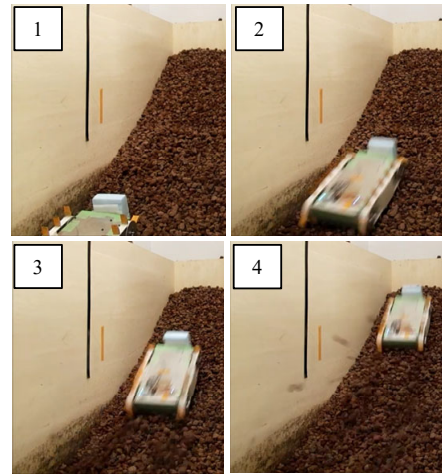


Fig. 10 Traveling state of the climbing test

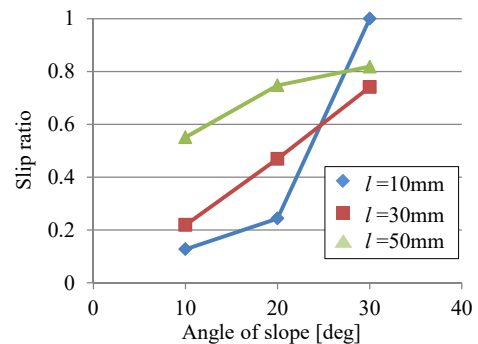


Fig. 11 Relationship between slip ratio and angle of slope

また斜度 30 deg の場合ははね長 30 mm と 50 mm の結果を比較すると、ほとんどスリップ率に差はない。これらの計測結果から、はね長が 50 mm の場合が、路面の傾斜変化という外乱に対して、一定の速度を保つロバスト性が高いといえ、遠隔操作を考えた場合、最も有利であると考えられる。また、本実験でははね長を変化させても同一のモータと同減速比であるため、効率の面は考慮されていないが、これは上記で得られたスリップ率等から最適な組み合わせを設定すれば、改善が期待できる。今後は、モータの回転数のみでなく消費エネルギーについても比較を行い、高速移動かつ地面起伏の外乱に強く、かつ移動エネルギー効率が高いパラメータを検討する

条件 B の結果 : クローラ回転速度の変化実験

各はね長ごとに計測した区間タイムを式(4)を用いてスリップ率を求め、図12に示した。10 mm のはねについては、条件 A での実験において斜度 30 deg が走行不能であったため、30 mm と 50 mm についてのみ実験を行った。なお回転数 200 rpm で

の 30 mm と 50 mm の走行実験は条件 A における斜度 30 deg での実験と重複するため、条件 A の結果を用いた。図を見ると、3 パターンの回転数の全てにおいて長さ 30 mm のはねが 50 mm に比べてスリップ率が小さく、高い走行性能であった。

これは条件 A における、同じはね長の実験結果と同様に、ある一定以上のはね長かつ低速走行になると、土壌と締固めと歪みに関与し、その結果車両の走行抵抗が増加したためと予想される。一方で 30 mm、50 mm の両条件ともにクローラホイール回転速度の増加に伴いスリップ率が小さくなって高い走行性能となることが分かる。これは回転数の増加に伴って地面を踏み固めて進む従来のクローラ方式から、はね先端付近のみが地面と接地する多足歩行のようなはね付クローラ特有の推進方法に変化するために走行抵抗が減ったこと、およびスリップ現象の進行速度と比べ、クローラ回転速度が十分に速いために、スリップ現象の影響を受けにくくなったことが要因と予想される。

4・2・3 考察 斜面走行実験により、はねの長は一般的なラグ長 10mm 程度のもので、伊豆大島で使用した 50mm の中間値である 30mm が最も高い走行性能を持つことが確認できた。また、走行性能の差は、30 mm と 50 mm との場合は小さく、10mm と 30mm の場合は大きかった。図 6 に示したように、はね長さを短くするにつれてロボットの凹凸地での踏破性能は減少する。30 mm の場合に 100 mm の段差、50 mm の場合に約 120 mm の段差を踏破できることから、フィールドに存在する大きな岩等の大きさに伴って、はね長さを 30 mm や 50 mm 等々、クローラホイール直径以下の長さで調整することで不整地踏破性能と走行性能を調整できると言える。一方で、50mm は 30mm に比べて、傾斜角度変化にともなうスリップ率変化が小さく、サスペンション機能が大きい。以上のように移動効率は今後の検討事項とすれば、現状の特性では総合的に 30 mm のはねが最も不整地移動機構に適していると考えられる。今後は、30 mm と 50mm の間のはね長において、条件をより細かく調整して実験検証を継続し、その効果とメカニズムを明らかとする予定である。

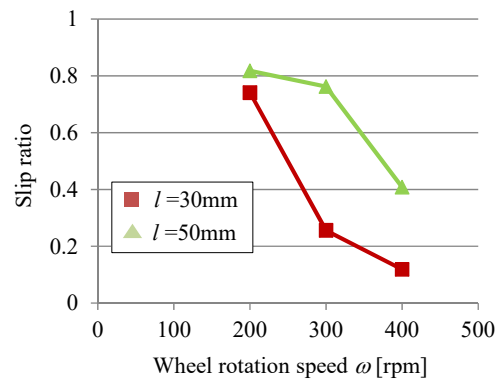


Fig. 12 Relationship between slip ratio and wheel rotation speed

5. おわりに

無人不整地移動ロボットの更なる利用拡大を狙い、著者らが提案する移動速度の向上と廉価化を実現するはね付きクローラ機構について、本報告特に登坂について検証した。具体的には、スリップ率を一つの指標とした登坂試験を実施した。双方の試験において、従来のクローラよりも高い性能であることを確認すると同時に、はね付クローラ機構特有のはね長の変化によって、走行性能と走行の安定性が調整できることも確認できた。今後は、登坂性能の検証に加えて移動の消費エネルギーを含めた移動効率についても検討を進めていく。

参考文献

- (1) S. Odedra, S. D. Prior, and M. Karamanoglu, Investigating the Mobility of Unmanned Ground Vehicles, Proceedings of Inter-national Conference on Manufacturing and Engineering Systems, pp.380-385, (2009).
- (2) Saiki, K., Selection and management of a test site for volcano-observation robots, Journal of the Japanese Society for Planetary Science, Vol., 21(2), pp. 94-102, (2012).
- (3) Yasuyuki Yamada, Miyagawa Yutaka, Ryota Yokoto and Gen Endo, Blade-type Crawler Vehicle for Fast Deployment Task to Observe Eruptions at Mt. Mihara, *Journal of Field Robotics*, (2015).
- (4) 永谷圭司ら, “小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—浅間山での走行試験—”, 第 11 回計測制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.555-558, (2010).
- (5) 室達也, テラメカニクス-走行力学, 技報堂出版, (1993).