

# テーマ名：月面の傾斜地移動に特化したローバの提案

## 月面探査ローバ Lunar Turtle

信州大学 機械・ロボット学系 機能機械学課程

学部4年 渡邊智洋

学部3年 榊枝裕太 坂田雅志 近藤晃弘

指導教員 飯塚浩二郎

### 1. 背景

月は地球に近い成り立ちを持ち、大気や地殻変動がないため、その進化・形成の痕跡が残っている。地球や太陽系の誕生と進化を解明するために月は重要な探査対象である。現在、月面を移動して行う探査に期待が高まってきている。これまでの月面探査では、ローバの活躍により、大きく前進した。しかし、現在のローバには移動性能に関して課題が存在し、性能の向上が求められている。まず、1つ目はレゴリスによる軟弱地盤に関するものである。月の地表はレゴリスで覆われ、軟弱地盤となっている。軟弱地盤ではローバの機構部分が沈下し、移動不能になる可能性が高い[1]。2つ目は、クレータなどの月面の傾斜地についてである。クレータは月の内部物質が露出していると考えられており、調査の有用性は高い。しかし、傾斜地は地面に対する抗力が小さく、支持力となる摩擦力が小さくなるため、移動が困難である。既存のローバでは移動不能になる可能性が高いため、クレータなどを回避している。

本稿では上記の課題を解決するため、月面の傾斜地の移動に特化したローバを提案する。今回は、我々が考案した図1のようなウミガメを模倣し、応用したローバ Lunar Turtle と月面のクレータについて探査を行うミッションを提案する。

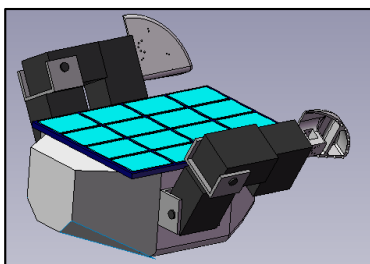


Fig. 1 Lunar Turtle

### 2. ウミガメの移動方法の有効性について

#### 2.1. ウミガメとローバの類似点について

ウミガメは陸上の移動には適さないイメージが一般的に連想されるが、ウミガメとローバの間には移動環境や強いられる条件などで類似点が多く、進化の過程でローバに適した移動方法を身に着けているのではないかと我々は考えた。類似点については大きく以下の3つがある。

まず、1つ目は移動する地形についてである。ウミガメは砂質の海岸、ローバはレゴリスで覆われた月面と、どちらも細かい砂による軟弱地盤を移動するという点が共通する。

次に、移動機能のシンプル化を図っている点である。ウミガメは主に海で生活しており、陸上を移動するのは産卵時のみである。このことから、陸上の移動機能は最低限に抑えた体の作りが進化してきたと考えられる。対して、探査ローバも故障を防ぐためにアクチュエータが少なく、単純な機構を用いた移動方法が望まれる。

最後に、移動不能に関して対策が求められる点である。ウミガメは陸上で長時間の活動はできない。移動不能に陥った場合、再起に時間を多く消費し、死亡のリスクを高めてしまう。よって、ウミガメはそれらを事前に防ぐ対策が求められる。ローバに関してもスタックや転倒などは探査不能のリスクを高めるため、対策は必須である。

#### 2.2. ウミガメの移動方法に関する技術検討

次に、我々はウミガメの移動は具体的にどのような点が優れているのか技術的な面から考察を行なった。考察より具体例を3つほど述べる。

1つ目は、ウミガメは腹部を広く接地させて移動する点である。接地面積を広くする移動方法は

軟弱地盤に対して有効であり、急な傾斜角を持った地形でも走行を可能にする。また、接地面圧を小さくし、スタックするのを防ぐ対策にもなる。

2 つ目は、シンプルな移動機構である。ウミガメの前脚は3つの自由度を持ち、両前脚の動きを6個のアクチュエータで再現できる。アクチュエータ数は信頼性や消費エネルギー量に大きく関係する。このアクチュエータ数は月面や惑星で活動した既存ローバと比較しても少なく、信頼性を上げ、エネルギー消費量を抑えているといえる。

3 つ目は、安定した移動を行う体の構造である。ウミガメは転倒からの復帰が困難であり、対策として平らな形状で重心を低くしている。よって、傾斜地でも姿勢の安定する位置に重心を取ることができる。また、移動時は重心の移動が小さく抑えられており、これも重要なポイントとなる。

上記より、ウミガメの移動方法は優れていることが確認できた。よって、我々はウミガメを参考に探査ローバを作製することにした。

### 2.3. ウミガメの移動メカニズム

ウミガメの移動動作を説明する(図3参照)。

- ①前脚を前方に出す
- ②前脚を地面に挿し、体を浮かせる
- ③前脚を後方に移動させ、腹を滑らせて前進する
  - ①では前脚は接地させず、前方に移動させる。
  - ②では前脚の角度を図3のように地面に対して付け、挿す。地面から受ける抗力により、体を浮かせる。

次に③である。②で体を浮かせることで前方から来る砂のブルドーzingを回避する。前脚の地面に挿した部分が受ける土圧を支持力とし、前脚を直線的軌道で後方に移動させることで腹を滑らせて前進する。

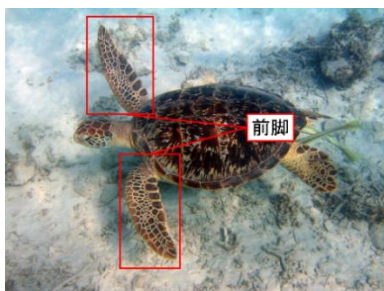


Fig. 2 ウミガメの前脚[2]

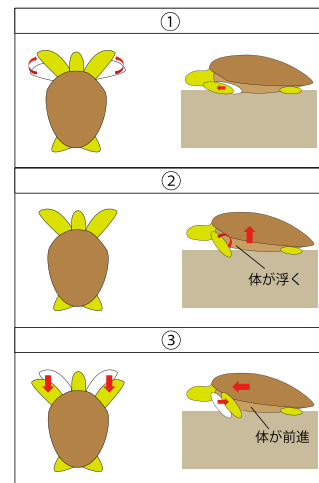


Fig. 3 ウミガメの移動シーケンス

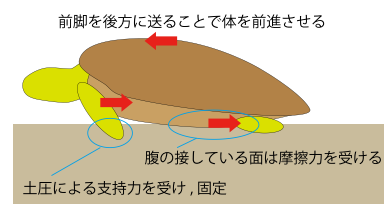


Fig.4 ②から③の移動時にウミガメが受ける力

## 3. ミッション概要

### 3.1. ミッション内容

現在の探査ではクレータを避けているため、調査はあまり進められていない。しかし、クレータは背景で述べたように重要な調査エリアである。本ミッションではウミガメ型ローバを用いて、クレータと、その付近を移動し、地質調査を行う。

### 3.2. ミッションシーケンス

本ミッションでは月へ向かう手段、月面への着陸、探査準備シーケンスをメインとし、月に向かい、対象軌道に入るまでのシーケンスは省略する。

本ミッションは H2-A ロケットを使用する。ロケット切り離し後はローバを搭載した探査機で月へ向かい、着陸を行う。探査機が着陸してからは太陽光により発電を行う。電力が十分に蓄えられた後はローバを送り出し、移動して探査を行う。

## 4. 実験

### 4.1 実験内容

ウミガメ型ローバの移動性能について検証するため、傾斜移動性能評価実験を行った。次にフ

インについて適した形状を決定するために、作製した複数のフィンで性能を評価する実験を行った。最後に月面での走行の可能性、ウミガメ型ローバの総合的評価のため、フィールド試験を行った。本章では各実験について詳細を述べる。

#### 4.2.1 傾斜移動性能評価実験

使用した小型モデルは図5のように機体側面にロボットフィンを取り付けている。ロボットフィンについてはサーボモータを3つ使用し、関節を作製した。関節の先端にはフィンを取り付ける。フィンの形状は図6の2種類を用意した。底面はウミガメと同様に設置面積の広い形状にした(図5参照)。次に動作シーケンスについて述べ、図7に示す。

- ①フィンを初期位置に移動させる準備を行う
- ②フィンを初期位置に移動する
- ③フィンを機体前方に押し出す
- ④フィンを下げて砂に押し当てる
- ⑤フィンを支点にし、機体の前方に押し出す

実行されると1度だけ①、②を行い、初期位置に移動する。その後、③、④、⑤、の動作を繰り返す。

モデル機体を、珪砂5号を敷いた実験容器内で進行方向を傾斜の上部として駆動させ、実験を行う。実験環境については図8に示す。

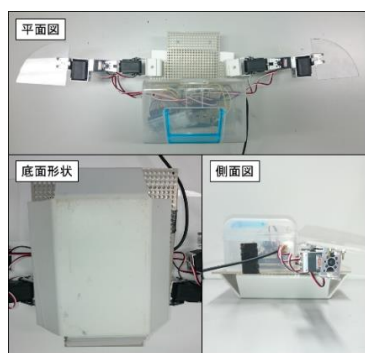


Fig. 5 小型モデル

Table 1 小型モデル諸元

寸法	210.0mm(Length) ×344.0mm(Width) ×124.0mm(Depth)
重量	580.0g

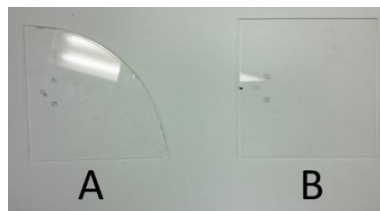


Fig. 6 フィン A, B の形状

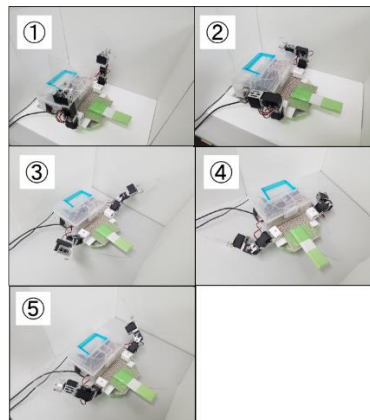


Fig. 7 ロボットフィン動作シーケンス

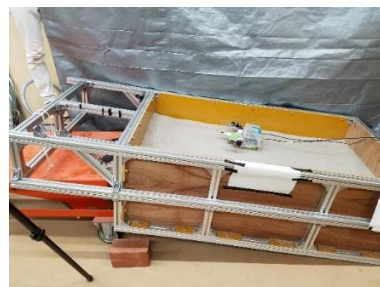


Fig. 8 実験環境

#### 4.2.2. 実験手順

移動データは、モーションキャプチャシステムを用いて取得する。実験はフィン A, B の2パターンで1分間の移動距離を計測する。角度は0°から20°までで5°ずつ変化させ、各条件で3回実験を行う。実験中に小型モデルが移動不能になり、変化が見られない場合は次の角度のみ実験を行う。その後の角度では実験を行わないこととする。

#### 4.2.3. 実験結果

実験結果を図9、図10に示す。

フィン形状 A、傾斜角度 0° の場合、走行距離が測定限界を超えるため、移動時間を記録した。傾斜角度 0° での走行距離と測定時間については表2に示す。Aタイプでは斜度が上がるほど移動

距離は短くなっているが、傾斜角度  $20^\circ$  まで移動不能に陥ることなく、移動することを確認した。

B タイプでも同様に、斜度が上がるほど移動距離は短くなっていった。移動距離に関しては、多くの斜度で A タイプの 2 分の 1 以下になっている。また、斜度  $10^\circ$  の実験では一定の距離を進むと前進しなくなった。これを移動不能と判断し、 $15^\circ$  までの計測で実験を終了した。

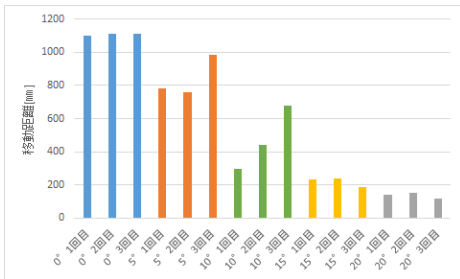


Fig. 9 フィン形状 A の実験結果

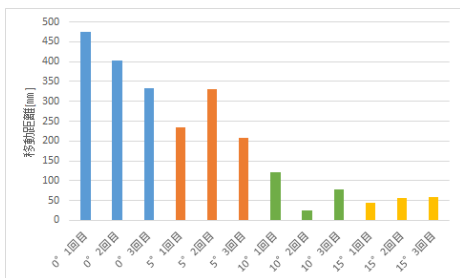


Fig. 10 フィン形状 B の実験結果

Table 2 フィン形状 A, 傾斜角  $0^\circ$  時の走行時間

回数	走行距離[mm]	計測時間[s]
1 回目	1098.0	45.06
2 回目	1109.7	45.20
3 回目	1111.6	51.68

#### 4.2.4. 考察

実験結果より、傾斜地の移動は、フィン形状 A で斜度  $20^\circ$  まで移動が可能であることが確認できた。現在の車輪型ローバは斜度  $20^\circ$  程度の走行が限界である点から、ウミガメの移動を採用したローバは傾斜地移動に有効であると言える。

フィン形状 A, B の性能について述べる。実験結果から A タイプの形状の方が優れていると言える。この性能の差の要因はフィンのエッジの形状によるものと考えられる。A タイプはエッジに曲線を

持つことで地面に広く、浅く刺さる。一方で、B タイプでは一部の箇所で深く刺さる。この場合、フィンが土圧により固定されてしまい、上手く動けなくなる。これらが要因となり、A タイプは効率よく砂を掻けていると考察する。

次に、実験で確認した移動距離の減少、移動不能などの問題について原因の考察と解決策の提案をする。実験では以下の 2 点が確認できた。

1 つ目は、底面部分が進行方向の逆向きに滑り、移動不能になる点である。これは傾斜角度が上がるほど斜面に対して後方にかかる力が大きくなり、機体が斜面後方に滑っていることが要因として考えられる。この問題については、機体の底面部分の形状を改良することで対策を考える。

2 つ目は、機体の位置が変化しないことでロボットフィンの砂を掻く位置も同じになり、掻ける砂が無くなっていく問題である。砂が無くなれば支持力を得られず、完全な移動不能に陥る。この問題については、ロボットフィンのモーションを砂の状況に応じて掘る深さを変化させることで解決を検討する。

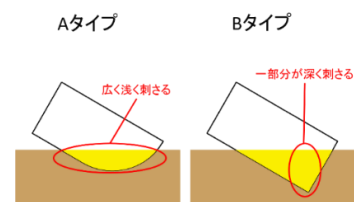


Fig. 11 各フィンの地面に対しての刺さり方

#### 4.3.1 フィン形状評価実験

性能の良いフィン形状を選択するために、3D プリンタを使用し、図 12 のような 8 種類のフィンを作製し、評価する試験を行った。今回は機体により推進力を得るためには、フィンが砂地に対して大きい支持力を生む必要があると考え、支持力を計測し、性能として比較を行った。

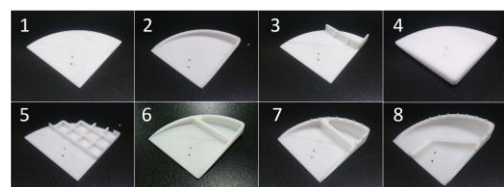


Fig. 12 製作したフィン一覧

### 4.3.2. 実験手順

実験環境を図 13 に示す。まず、フィンを砂地に対して  $45^\circ$  傾けて固定具に取り付ける。次に砂地に対して平行方向に荷重をかけていく。フィンが開始時より、5.0cm 動いた状態で試験終了とし、その時の荷重をフィンの砂地に対しての支持力とし、記録する。実験は各フィンで 3 回ずつ行う。



Fig. 13 実験環境

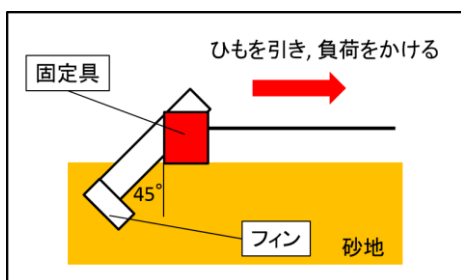


Fig. 14 実験解説図

### 4.3.3. 実験結果

結果を表 3 に示す。結果からフィン 7 が最も荷重に耐えた。傾斜移動性能評価実験の結果より、フィンの形状が平らであるため砂がフィンに対して横方向に逃げる事が確認できた。フィン 7 はこれを改善するために縁と砂に埋る部分に囲いを作り、砂を保持するように設計した。

Table 3 フィン形状評価実験結果

	一回目 [g]	二回目 [g]	三回目 [g]	平均 [g]
フィン1	1181	1238	1190	1203
フィン2	1428	1425	1434	1429
フィン3	1402	1354	1355	1370
フィン4	1442	1407	1377	1409
フィン5	1441	1359	1416	1405
フィン6	1439	1367	1491	1432
フィン7	1838	1704	1788	1777
フィン8	1859	1735	1681	1758

### 4.3.4. 考察

フィンに囲いを付けたものは比較的に大きな支持力を生むことが確認できた。砂を保持するた

めに囲いを付けることは支持力を大きくするのに有効だということが分かる。また、囲いの位置についてはフィン 7 から見て分かるように縁部分が有効であることが今回の実験で分かった。

### 4.4.1. フィールド試験

小型モデルの改良を行い、静岡県浜松市の中田島砂丘にてフィールド試験を行った。

フィンの形状は形状評価実験により図 13 のフィン 7 を選択した。底面は図 16 のように突起を取り付け、後退を防ぐように対策した。モーションは地面を掘る深さを複数用意して、掻く砂が無くなってしまふ問題の解決策とし、地面の形状に合わせた移動が出来るようにした。また、左右の旋回動作も用意し、詳細に操作出来るようにした。



Fig. 15 フィールド試験風景

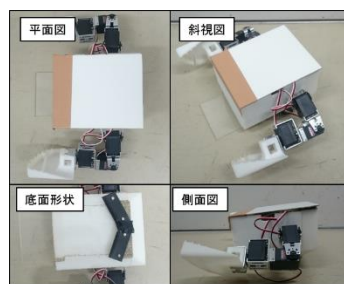


Fig. 16 改良した小型モデル

### 4.4.2. 実験手順

フィールド試験では複数の傾斜地で直線 5m または 10m を走行ルートとし、6 回ほど走行を行った。走行ルートは 1m 間隔で斜度の計測を行った。試験中にローバが停滞し移動が見られなくなった場合、移動不能と判断し、走行を終了とした。

### 4.4.3. 実験結果

各ルートの斜度と走行結果を表 4 にまとめる。走行可能な斜度は  $20^\circ$  程度であり、それ以上になると移動不能に陥りやすくなることが分かった。

次に移動不能になる状態について述べる。0° から 16° 程度の斜面では移動不能は見られなかった。20° 近辺の斜度では前進するにつれて、速度が低下し、最終的に移動不能となった。地面の掘る深さを変化させたり、左右の旋回を繰り返すことで多少は移動不能を回避できることが分かった。原因としては前方から来る砂をブルドーzingしていること、底面形状が機能せず、機体が後退してしまっていることなどが挙げられる。

最後に、ローバの操作性について述べる。0° から 16° 程度の斜面での移動速度は月面探査ローバとしては遅すぎず十分な速度であり、安定した移動が確認できた。旋回については超信地旋回に近い動作を見せ、操作性は良好である。20° 近辺の斜度では移動速度が大きく低下することが確認できた。旋回については 0° から 16° 程度の斜面と同様に操作性は良好である。

Table 4 フィールド試験結果

	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	移動距離	速度	備考
1回目	0°	1°	2°	5°	3°						5m	0.0055m/s	完走
2回目	16°	21°	20°	15°	13°						1m	0.0022m/s	移動不能
3回目	16°	21°	20°	15°	13°						1.5m	0.0063m/s	移動不能
4回目	3°	5°	11°	13°	14°						5m	0.0143m/s	完走
5回目	16°	21°	21°	14°	9°						2m	0.0052m/s	移動不能
6回目	5°	5°	4°	5°	3°	2°	0°	0°	-2°	0°	10m	0.0152m/s	完走

#### 4.4.4. 考察

月面の最大傾斜角は 25°とされており、走行可能な斜度については、検討し、さらに大きな傾斜角度でも走行できるように工夫を行っていく必要がある。しかし、改善、工夫を加えられる点は多々あり、傾斜走行などの性能の向上は十分に見込むことができるだろう。課題としては、移動不能を回避するために有効な底面形状や砂のブルドーzingを防ぐ機体前方の形状などの考案が挙げられる。

次に、車輪型ローバと比較して走行性能を評価する。まず、0° 付近の平地の走行の操作性について述べる。ウミガメ型の移動速度については車輪型と同等であり、旋回性能については超信地旋回に近い動作が可能であり、車輪型より優れていると言える。次に、傾斜地の走行の操作性についてであるが、現在の車輪型は 20°程度の傾斜走行が

限度であることから、両型の移動可能傾斜角度はほぼ同等である。旋回性能については、車輪型は斜度が急になるにつれて旋回が難しくなるのに対して、ウミガメ型は平地と同様に旋回出来る点からウミガメ型の方が優れている。最後に移動不能の状態について比較する。ウミガメ型は移動不能時の脱出対策を持ち、試験結果から機能の確認ができており、車輪型より優れているといえる。

Table 5 走行性能評価表

	Lunar Turtle	車輪型ローバ
移動速度(平地)	◎	◎
操作性(平地)	◎	◎
移動不能回避能力(平地)	◎	○
移動速度(傾斜地)	○	×
操作性(傾斜地)	◎	×
移動不能回避能力(傾斜地)	○	×

◎：非常に優れている  
 ○：優れている  
 △：あまり優れていない  
 ×：優れていない

## 5. 月面探査ローバ Lunar Turtle

我々は実験結果からウミガメ型ローバの有効性と改善すべき点を確認し、本ミッションで使用する月面探査ローバ Lunar Turtle の設計を行った。

### 5.1. 機体構成

形状を図 17 に示す。機体の両側についているロボットフィンとは関節部分が 3 つあり、3 つの自由度を持つ。ロボットフィンの動作は図 7 のモーションに改良を加えた。改良部分を図 18 に示す。機体の底面は図 19 のような形状を採用した。底面の上部に複数の突起した滑り止めがついており、後退することを防ぐ。電力は上部についているソーラーパネルによって発電を行う。

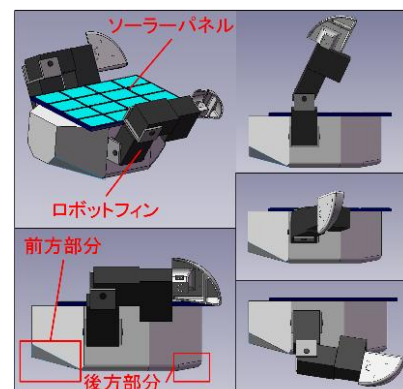


Fig. 17 Lunar Turtle 詳細図

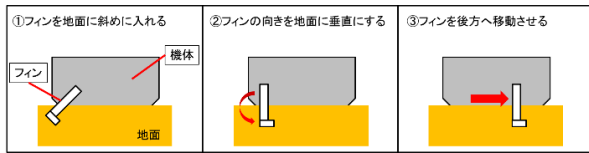


Fig. 18 モーションの改良点

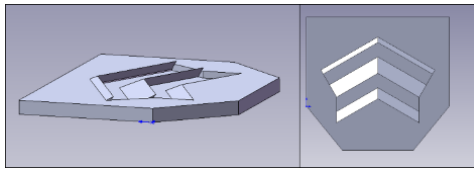


Fig. 19 底面形状

## 5.2. 熱制御について

機体内部の温度制御はヒートパイプ熱制御器によって行う。関節部分は図 20 のようにサーマルブランケットで覆う。さらに、その内側をアルミニウムなどの熱伝導性が高い金属でメッキした柔軟性のある素材で覆い(図 20 では伝熱用ブランケットと呼ぶ)、機体内部のヒートパイプ部分に接地させる。これによってサーマルブランケット内部の温度を金属の熱伝導により、機体内部の温度に合わせることができ、アクチュエータ部分の温度制御を可能にする。

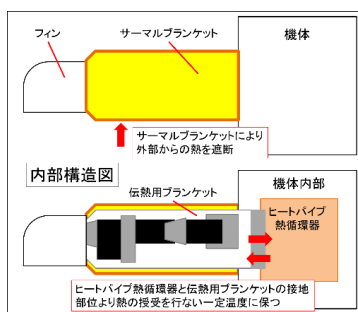


Fig. 20 関節部分の熱制御に関する構造

## 5.3. 車輪型ローバとの比較

車輪型ローバと比較を行い、総合的に Lunar Turtle を評価し表 6 にまとめる。走行性能と安定性(移動不能や転倒について)はすでに述べているので説明を省略する。信頼性、耐久性については Lunar Turtle はアクチュエータの角度制御を行う必要があり、機構や制御が若干複雑になる。対して車輪型は、基本移動は車輪の回転であり、機構、

制御共にシンプルなものとなる。よって、車輪型の方が優れている。次に、エネルギー効率についてである。この点については比較が難しく、移動時に生じる負荷の大きさについての観点から述べる。Lunar Turtle は底面を引きずることで移動するため、平地では車輪型に比べて大きな負荷がかかり、エネルギー効率は良くない。しかし、傾斜地では車輪型は車輪が地面に埋まり、大きな抵抗が生じる。このことから接地面積の広い Lunar Turtle の方がエネルギー効率は良いと考えられる。

Table 6 総合性能評価表

	Lunar Turtle	車輪型ローバ	
走行性能(平地)	◎	◎	◎: 非常に優れている
走行性能(傾斜地)	○	×	○: 優れている
安定性	◎	○	△: あまり優れていない
信頼性、耐久性	△	◎	×: 優れていない
エネルギー効率(平地)	△	◎	
エネルギー効率(傾斜地)	○	×	

## 6. まとめ

本稿では傾斜地移動に特化したローバの提案というテーマで、ウミガメの移動方法の有効性を示し、ウミガメ型ローバを使用した月面のクレータを探索するミッションについて述べた。次に、提案するローバの実現可能性を確認するため複数の実験を行った。そして、実験結果を参考に月面探索ローバ, Lunar Turtle を提案し詳細を述べた。

今後の課題としては、機体の形状、モーションについて改善を行っていく。また、熱制御については詳細が十分でないため検討をしていく。

月面のクレータは未開拓の地である。このエリアの探索が進めば、月面の解析を大きく前進させることが出来るだろう。そして、Lunar Turtle により月において新たな発見が得られることを願う。

## 参考文献

- [1] 飯塚, 久保田, “軟弱地盤走行のための月面探索ローバ用走行系検証”, 科学・技術研究, Vol.1, No.1, (2012) PP.49-55.
- [2] 日本ウミガメ協議会ホームページ  
[http://www.umigame.org/J1/umigame\\_photo\\_sea.html](http://www.umigame.org/J1/umigame_photo_sea.html) (2016年7月4日閲覧)