

## 「論文の内容の要旨」

# “Development of Lunar or Planetary Subsurface Exploration Robot Using Peristaltic Crawling”

Hayato Omori

本論文は月や惑星の地中探査を行う小型・埋没型でロボットの開発を目的とする。

2013年にISECG(International Space Exploration Coordination Ground)によって作成された国際宇宙開発ロードマップにおいて、月や火星の探査が目標に掲げられている。この中で、月や惑星の地中探査を行うことにより、科学調査機器（月震計（直径120[mm]）・熱流計プローブなど）の設置や土（レゴリス）のサンプル採取が検討されている。

現在までいくつかの地中掘削のためのロボットが開発されてきたが、ロボットの直径が大きくなると掘削穴から推進を妨げる周面摩擦の影響を受け前方の推進スペースの確保が困難となることから、十分な推進深度を確保することができないという問題があった。

そこで本論文では地中の推進ユニットとしてミミズの蠕動運動を模したメカニズムを導入し、掘削ユニットとして推進機構内蔵型アースオーガを用いることで、掘削径や重力に依存しないような小型の埋没型ロボットを開発した。

まず掘削ユニットは推進機構に内蔵するために先端部と後方部の径が変化する特殊なアースオーガを用いている。作製した掘削ユニットの掘削実験からこの径変化アースオーガにより掘削が可能であることを示した。また、将来月のような低重力環境での掘削を考慮し、本ユニットをカウンターウェイトによって軽量化した状態で掘削実験を行い、本ユニットの重量により掘削深度が変化することを示した。そして、クーロンの土圧理論を用いた掘削深度予測モデルにおいても、低重力環境実験と同様の結果を示すことができた。

次に、掘削ユニットの実験結果を基にミミズの蠕動運動を規範とした推進ユニットを作製した。蠕動運動を用いることで以下のような利点が得られる。

- ・ 広い面積で孔壁と接地することで、掘削ユニットの掘削抵抗の保持することができる。
- ・ 推進時には半径方向に収縮するため、周面摩擦の影響の低減することができる。
- ・ 蠕動運動のパターンを変化させることにより上昇することも可能である。

そこで、ステッピングモータと四節平行リンクを用いたユニットを作製した。そして、この推進ユニットと掘削ユニットを組み合わせたロボットを作製した。その結果、ロボットの重量によらず430[mm]の掘進に成功した。このことから実際の月の地中探査ミッションでの利用の可能性を示した。また、推進ユニットの推進をコントロールすることで、掘削トルクを低減することも可能であることも示した。

さらに深い掘進を可能にするため、排出機構の開発を行った。この機構はシンプルかつ低重力環境での動作を実現するため、バケットとぜんまいばねを用いた。そして、本機構と掘削・推進ユニットを組み合わせた実験により約600[mm]の掘進に成功した。

最後に、モデル化に向けた切削抵抗の基礎実験を行った。本掘削ユニットのアースオーガの切削抵抗測定実験を行い、このアースオーガの構成部における切削抵抗への影響を明らかにした。そして、Mechanical Specific Energyの観点から切削の評価も行った。この評価により、周辺土中環境やロボットの仕様の変化に対応した設計指針を示すことができた。

## 「論文審査の結果の要旨」

### I. 論文の主題

Development of Lunar and Planetary Subsurface Exploration Robot Using Peristaltic Crawling

### II. 当該研究分野における位置づけ

本研究のメインテーマは宇宙開発、特に月や惑星の地中探査ロボットの開発である。現在までに多くの国がしのぎを削り、月や惑星探査における宇宙技術を開発している。中でも地中探査技術は科学調査機器（月震計（直径 120[mm]）・熱流計プローブなど）の設置や土（レゴリス）のサンプル採取等に必要な技術である。しかし、現在のところ、小型・埋没型ロボットを用いた探査技術は、掘削径が大きくなると推進を妨げる周面摩擦の影響により掘削部の押しつけ力を十分に確保できないことから、十分な推進深度を得ることができないという問題点がある。

そこで本論文では地中の推進ユニットとしてミミズの蠕動運動を模したメカニズムを導入し、掘削ユニットとして推進機構内蔵型アースオーガを用いることで、掘削径や重力に依存しないような小型の埋没型ロボットを開発した。

### III. 論文の構成（目次と各章の概要）

“第一章：諸言”。宇宙開発について、現在までと将来の月の探査について記述しており、他の惑星や衛星の地中探査の重要性について論じている。

“第二章：既存の地中探査技術とロボット”。地球上で用いている掘削技術や宇宙での利用を目的とした小型・埋没型の既存研究とその問題点等について記述されており、本論文の目的が示されている。

“第三章：ミミズの蠕動運動”。実際のミミズ蠕動運動の特徴を示し、実験により蠕動運動を計測した。

“第四章：地中探査ロボットの構想”。ロボットの機能や地中探査時の掘進動作を詳細に示している。

“第五章：掘削ユニットの開発”。径が変化したアースオーガを用いた掘削ユニットの開発を行い、掘削実験を行った。これにより推進ユニットに求められる仕様について決定している。

“第六章：推進ユニットの開発”。他の蠕動運動型ロボットとの違いを示し、地中探査に適した、広い接地面、大きな押しつけ力を発生可能なユニットを開発した。

“第七章：地中探査ロボットの開発”。推進・掘削ユニットを組み合わせたロボットを開発した。低重力環境を模擬した実験においても、推進深度に変化はなく、実際のミッションでの利用の可能性を示した。

“第八章：排出機構の開発”。前章で用いたロボットよりも深い掘進を行うため、バケットを用いた排出機構の開発を行った。これにより、深い掘進に成功した。

“第九章：切削抵抗のモデル化に向けた基礎実験”。アースオーガの先端部に関する切削

実験を行った。これにより、回転数による切削抵抗への影響は少なく、押付け力による影響が大きいことを示した。また、掘削を比エネルギーの観点から評価した。

“第十章：結言”。本論文の要約を示し、今後の研究課題を記述した。

#### IV. 論文の独自性や成果

論文の独自性として以下の点があげられる。

- ・地中内の推進をコントロールする推進ユニットとして、ミミズの蠕動運動を規範とした推進機構を提案したこと。
- ・地中掘削を行うための前方のスペースを確保に対して、径が変化したアースオーガを用いた推進機構内蔵型掘削機構を開発したこと。
- ・アースオーガによる掘削メカニズムを解明したこと

以上よりその成果を以下に示す。

- ・ミミズの蠕動運動による推進機構と径が変化した内蔵型アースオーガにより、土圧による周面摩擦影響を低減し、さらに低重力環境での掘進の可能性を示した。また、この推進ユニットを制御することで低エネルギーでの掘削も可能であることを示した。
- ・アースオーガの掘削メカニズムを解明したことで、周辺土中環境や仕様の変化に対応した設計指針を示すことができた。

#### V. 論文の課題

今後の課題にも示されているが、ロボットの掘削では赤土のみではなくレゴリスでの評価も必要と考える。また、論文後半の切削抵抗のモデル化に向けた基礎実験においては、複数回の実験が必要であり、レゴリスでの評価も加える必要がある。

さらに改良された排出機構を用いて改めて掘削実験を行う必要がある。

#### V. 論文の評価

従来の掘削機構とは全く違う機構を採用し、これらを実験的に検証した点は評価できる。また、低重力環境を模擬した実験においても大きな成果を示しており、月や惑星での探査の可能性のみではなく、地球の地中、海底探査としての応用にも非常に期待できる。

以上より本論文は博士(工学)の学位を授与する十分な水準に達しているものと評価する。