

小惑星探査ローバー MINERVA-II の開発に携わって

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 教授

大須賀 公一

1. はじめに

2003年5月9日に地球を出発した「はやぶさ」は2005年9月に小惑星「イトカワ」に到着しサンプル採集を試みた後、2010年6月13日帰還したことは記憶に新しい [1]。その後、あらたな小惑星「1999JU3」に向かい地下のサンプルを採集すべく、「はやぶさ2 (図1)」が2014年12月3日に打ち上げられ、現在宇宙を旅している [2]。

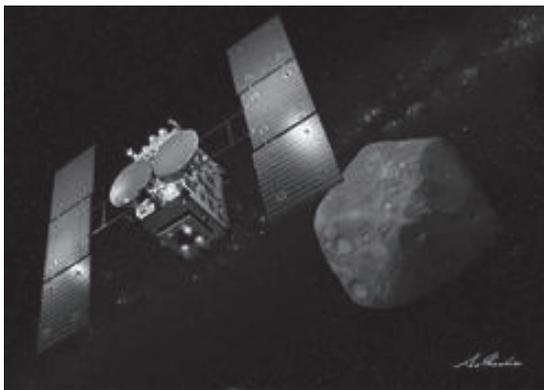


図1 はやぶさ2のイメージ[3]

「はやぶさ2」には微小重力小惑星探査ローバーが複数台搭載されているが、その中の一つに大学コンソーシアム（東北大、山形大、東京電機大、東京理科大、大阪大学の各チームの共同体）が開発したMINERVA-II-2がある。筆者は、そのコンソーシアムに阪大チーム〔大須賀公一（阪大）、望山洋（筑波大）、多田隈建二郎（阪大、元東北大）、坂東麻衣（九大）、大方圭介（阪大）〕として参加し、駆動系の一つを開発した。本稿ではその開発を紹介する。

2. 「はやぶさ2」と「小惑星探査ローバー」

今回「はやぶさ2」が向かっている小惑星は「1999JU3」と呼ばれ、図2に示すように、「イトカワ」とほぼ同様、地球に接近する楕円軌道を描いて運動している。その特性は、おおよそ以下のようなものである。まず、地球から観測されたデータから

- ・大きさ : ほぼ球形で直径約 920 [m]
 - ・自転周期 : 約 7.6 時間
 - ・タイプ : C 型
- 程度の情報はわかっている。特に、C型ということ、この小惑星には有機物や水（含水鉱物）が含まれている可能性があり、太陽系誕生時の新たな情報が得られると期待されている。一方、小惑星上を移動するローバーの設計に必要な以下の諸元は現在の所未知であり、確かな状況は現場に接近しないとわからない。
- ・重力加速度 : 未知 ($10^3 \sim 10^5 g$ と推定)
 - ・表面状態 : 未知

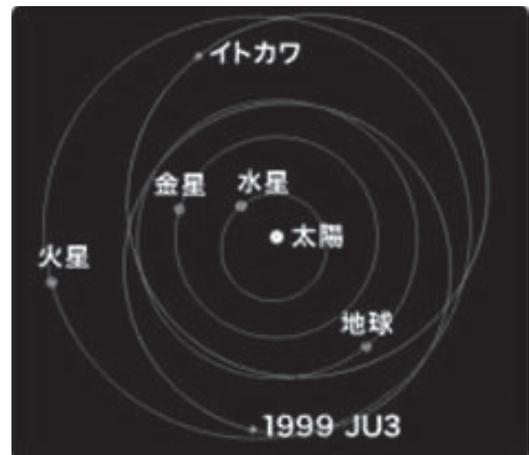


図2 1999JU34の軌道[4]

「はやぶさ2」は「H-IIA ロケット」で打ち上げられ、その運用スケジュールは下のようになっている。

- ・2014年7月 地球出発
- ・2018年6月 小惑星到着
- ・2019年12月 小惑星出発
- ・2020年12月 地球帰還

そして小惑星到着後、「はやぶさ2」には「はやぶさ」の成果を受けて次のようなミッションが計画されている。

- ・サンプル採取（複数の方式を計画）
- ・探査ローバー派遣（3台のローバーを搭載）

3台の小惑星探査ローバーは次のとおりである [5]。

- ・MINERVA-II-1 : JAXA
- ・MINERVA-II-2 : MINERVA-II コンソーシアム
- ・MASCOT : DLR (ドイツ航空宇宙センター) [6]

このうち、MINERVA-II-1 は「はやぶさ」に搭載されていたローバー「MINERVA」の後継機であり、MINERVA-II-2 は、新しい工学的試みを試行することが主な目的とされており、本機が本稿に係るローバーである。図 3 参照。



図 3 MINERVA-II-2

3. MINERVA-II-2 の設計

本章では、(i) MINERVA-II-2 の駆動方式を検討する時に考慮すべき点を述べ、(ii) その結果を受けて立てた設計指針を示し、(iii) その指針に沿って阪大チームが開発した駆動ユニットの提案を示す。

3.1 考慮すべき点

詳細は省略するが、MINERVA-II-2 には以下のようなセンサや駆動系が内在されている。

センサ系

- ・温度センサ：小惑星表面温度の計測
- ・フォトダイオード：太陽方向検出用
- ・可視光カメラ：小惑星地形の撮像
- ・3軸加速度センサ：ローバーの移動加速度を計測
- ・可視光、紫外 LED：浮遊ダストへの照射・検出用

駆動系

- ・飛び移り座屈機構 (後述)
- ・永久磁石を用いた内部撃力型機構 (東京電機大学)
- ・バイメタルを用いた環境駆動型機構 (山形大学)
- ・偏心モータおよび弾性突起を用いたマイクロホップ (東北大学)

そして前章から、設計するには次のポイントを考

慮しなくてはならないことがわかる。

- P1) 小惑星の環境はほとんど未知である (重力加速度、地面状態、温度など)。
- P2) 微小重力場であることは確かである (小惑星のサイズから推定)
- P3) サイズ制限がある (直径 15cm、長さ 15cm 以下、全重量 1kg 以下)。
- P4) 4 大学の駆動ユニットに許されるサイズに制限がある (3cm × 3cm × 6cm、重量 30g)
- P5) 電力制限がある (本体表面に貼られた太陽電池パネルのみが電力源。2W 程度)。

阪大チームはこれらの厳しい要求を満足する一つの方法として飛び移り座屈方式を提案した。

3.2 駆動ユニットの設計指針

一般的に駆動系の構成は図 4 のようになる。すなわち、エネルギー源、動力源、駆動機構、制御則が MINERVA-II-2 本体に内蔵され、本体と (場合によっては) 駆動機構が小惑星 (場) と相互作用する。

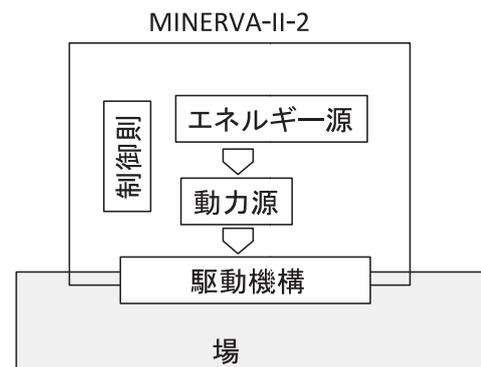


図 4 駆動システム(1)

上節 (P1 ~ P5) から、ここで設計する駆動ユニットの設計指針をまとめると次のようになる。

- S1) 駆動機構として車輪・クローラ・脚構造は採用しない。

理由: 微小重力環境なので、摩擦力に頼って地面を蹴って移動する方式は無効である。また、路面状況が未知なので最適な構造が決められない。

- S2) できるだけエネルギーは消費しない。

理由: エネルギー源 (電力) が大きくなく、移動以外にミッションがあるのでそちらにエネルギーをまわす必要がある。

- S3) 動力源と駆動機構との関係はできるだけ独立にする。

理由: エネルギー源 (電力) が豊富ではないので、駆

動機構で大きな駆動力を出すことが動力源の出力を大きくすることと直結しないようにする必要があります。

S4) 制御しない。

理由：現状における小惑星の情報が不足しており、詳細な制御方を構築しても有効に働く保証がない。また省エネルギーの観点からも重要になる。

3.3 受動的駆動ユニットの提案

上述の設計指針を鑑み、種々の検討を行った結果、次のような要素で構成される駆動ユニットを提案した(前述のように MINERVA-II-2 には他に 3 種類の駆動方式を内蔵するがそれらについての説明はここでは省略する)。

U1) 駆動機構：飛び移り座屈

地面の状況が未知なので、摩擦依存の方式ではなく、運動量の受け渡しによるホッピング方式を採用する。その際、瞬発力の発生しやすい「飛び移り座屈現象」を利用する。これは図 5 に示すように、(例えば)図右端を固定された板バネの左端を上下に移動させると発生するジャンプ現象である。普通機械工学分野では機械や構造物の破壊を意味することから発生しないようにする。ここでは逆にその現象を利用しようというのである。



図 5 飛び移り座屈現象

飛び移り座屈現象を用いた移動の原理を図 6 で説明する。今、図 6 (a) のような状態を考える(無重力とする)。すなわち、総重量 M の本体の中にバネが両端設置されており、その中心に質量 m の錘が設置されているとする。そして、このバネが上方向に飛び移り座屈し、 $t=t^-$ の時刻で限界点に達したときの錘の上向きの速度を $v=v^-$ とするとこの時刻における本システムがもっている運動量は $D^- = mv^-$ となる。この状況はバネの限界姿勢なのでこの瞬間錘の本体に対する相対速度は 0 になる。そのときこれまで錘が持っていた運動量は、本体全体に受け渡される。すなわち、

$$MV^+ = mv^- \tag{1}$$

となるので

$$V^+ = mv^- / M \tag{2}$$

を得る。これが本体の打ち出し速度である。

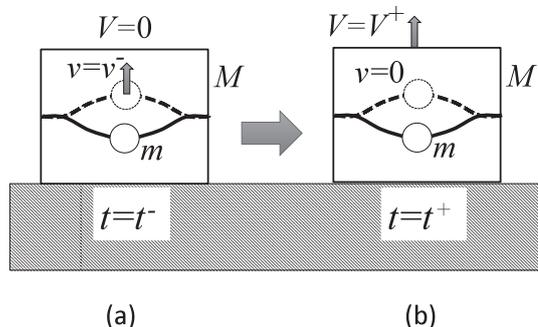


図 6 駆動の原理

U2) 制御則：陰的制御則

そもそも小惑星表面の様子は未知なので、駆動ユニットの詳細な制御を考えても巧く働くとは限らない。また、MINERVA-II-2 の目的が移動による探査なので、決められた軌道にそって制御する必要はない。逆にできるだけランダムに移動するほうが目的になっている。そこでここでは、能動的な制御則を組み込む事はやめ、地面と MINERVA-II-2 の相互作用によって不規則にホップする事を期待する。すなわち、これは陰的制御則 [8] による制御を行っていると思わせる。

U3) エネルギー源：無し

U1、U2 を考えるとモータや能動的制御器などを用いる事はないので、エネルギーを必要としなくなる。

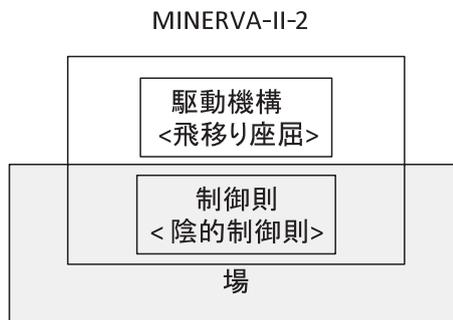


図 7 駆動システム(2)

以上、U1 ~ U3 をまとめると図 4 は図 7 のようになり、これが本報告で提案する受動的駆動ユニット構成である。図 4 からエネルギー源、駆動源がなくなったシンプルなものになっている。

4. MINERVA-II-2 の実現

3章のような設計指針をもとに阪大チームでは、飛び移り座屈方式を採用することにしたが、今回はその第一ステップということで、最も単純な駆動装置を開発することにした。

図8に最終的に制作した「飛び移り座屈ユニット」を示す。

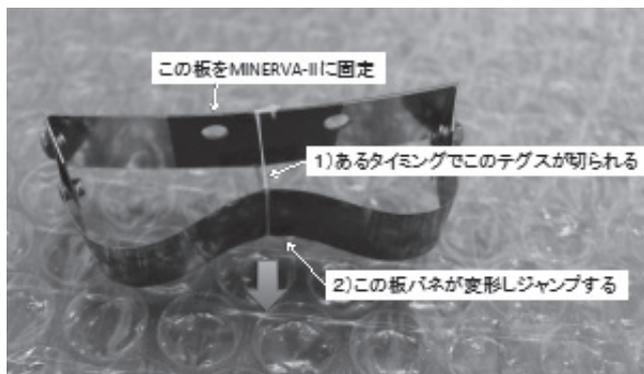


図8 駆動ユニット

この図の下面のW字型をしている部分が飛び移り座屈部で、写真はテグス（糸）で押さえられている。この状態で目的の小惑星までいき、あるタイミングでテグスを熱で切る。そうすると座屈現象が発生しジャンプするようになっている。

このユニットを2セットMINERVA-II-2に搭載した。その様子を図9に示す。

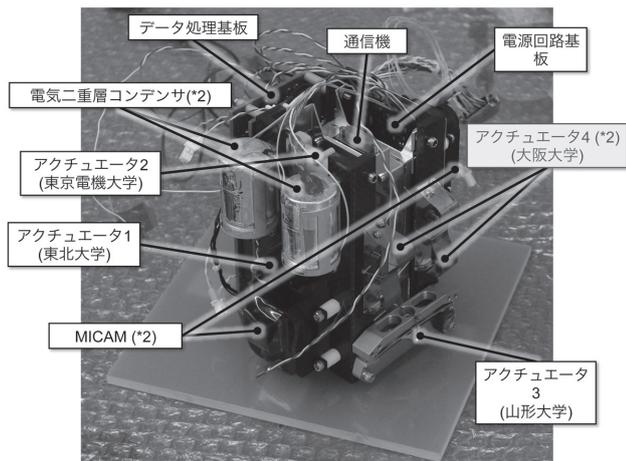


図9 MINERVA-II-2内部

図9のように、MINERVA-II-2は東北大学・東京電機大学・山形大学・大阪大学が提案した駆動方式をそれぞれ搭載している。

5. おわりに

本原稿では、大学コンソーシアムで開発したMINERVA-II-2と、阪大チームとして開発した飛び移り座屈ユニットの概要を紹介した。このローバーはすでに打ち上げられており、いまから約4年かけてターゲット小惑星に到着して、それからしばらくして駆動される。それまで我々にはどうしようもない。さらに今回の開発で興味をひいたのが

- ・ターゲットの小惑星の情報がほとんど無い。
- ・開発する駆動ユニットのサイズが極端に制限されるという無理難題である。エンジニアは要求される仕様が厳しければ厳しいほどアドレナリンが出てやる気が大きくなっていく。

今回阪大チーム(大須賀・望山・多田隈・坂東・大方)は、おそらく世界でもっとも単純な駆動方式を開発した。最終的に製作したものはおもちゃのように単純であるが、極限までそぎ落とした結果であると考えている。

今回貴重な経験ができたと思っている。JAXAの関係者の皆様に感謝いたします。

<参考文献>

- [1] http://www.jaxa.jp/projects/sat/muses_c/topics_j.html
- [2] <http://b612.jspec.jaxa.jp/hayabusa2/index.html>
- [3] <http://b612.jspec.jaxa.jp/hayabusa2/gallery.html>
- [4] http://b612.jspec.jaxa.jp/hayabusa2/hayabusa2_target.html
- [5] 岡田他:はやぶさ2着陸探査による小惑星表面の科学観測, 第11回宇宙科学シンポジウム講演集, P3-045 (2011)
- [6] <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10002/>
- [7] <http://www.tokeizanmai.com/escapement.html>
- [8] 大須賀他: 制御系に埋め込まれた陰的制御則が適応機能の鍵を握る!?, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, pp.123-134, 2010.

(基礎工制御、昭和59修士)