

# Results of range measurement experiment using a small balloon

吉光 徹雄, 富木 敦, 齋藤 芳隆, 川原 康介, 久保田 孝 (ISAS/JAXA)

**Abstract**— The authors are engaged in the research and the development of surface exploration rover system over the small solar system bodies. We developed a tiny rover system “MINERVA-II” for “Hayabusa2” asteroid sample return mission, which was launched in 2014. Considering future surface exploration on small bodies beyond “Hayabusa 2”, precise and realtime localization is important for rover navigation. That is why we have proposed an effective localization method using a radio assistance from the mother spacecraft. It uses the range measurement between a surface probe and a mother spacecraft which delivers the probe at the vicinity of the target body. We made a range measurement experiment using a rubber balloon in September 2016. which is described in this manuscript. The used transponder was a slight modification of the one developed for MINERVA-II, to meet with the domestic ground regulations.

## 1. はじめに

筆者らは、小惑星や彗星など太陽系に点在する小天体の表面を移動探査するローバシステムの研究と開発を行なっている。

2014 年末に打ち上げられた小惑星探査機 “はやぶさ 2” には、MINERVA-II という小惑星探査ローバシステムを搭載した。このローバシステムには、筆者らが開発したローバ 2 台と、日本の大学連合が開発したローバ 1 台の合計 3 台の日本製ローバが搭載されている [1][2]。この他にも、ドイツとフランスが開発した MASCOT と呼ばれるランダもはやぶさ 2 には搭載されている [3]。

小天体表面探査ローバは、ターゲットの小天体表面に、地球から打ち上げられた探査機 (母船) によって輸送され、小天体表面着陸後は、リモートセンシングでは達成できない “その場” 観測を多地点で行なう。

MINERVA-II ローバは、移動メカニズムと自律探査の 2 つの小天体表面探査の工学実験をすることを主目的としている。小惑星表面の微小重力環境における移動方式は、ホッピングという離散的移動手法を用いている。また、自律探査手法は、小惑星表面の特定の対象に接近するのではなく、小惑星表面のなるべく多くの地点に移動するというものである。

しかし、はやぶさが探査した大きさ数 100[m] の “イトカワ” の表面に多様性があつたことからわかるように、小天体表面の特定の地形に接近して観測を行なうローバシステムが、MINERVA-II 以降の小惑星表面探査ローバでは望まれる。

特定の地形にローバを誘導するためには、ローバが小天体表面のどこにいるかという自己位置同定と、目的地の座標に自己位置を収束させるための移動方式の 2 つを考える必要がある。自己位置同定にはさまざまな方式が考えられるが、小型のローバが小型の天体表面を移動する際には、画像を用いた方法の利用が難しい。また、いびつな形をしている天体上では、ローバが取得できる情報のみを利用して得られる測地緯度・経度は、小天体を外部から見た時に指定する地心緯度・経度の間に大きなずれがある。

このような小天体の特有さを考慮し、筆者らは、電波を利用して、母船側から表面に着陸したプローブの航法誘導的な支援を行なう方法の検討を行なった [4]。

この方法では、母船から静止しているプローブまでの距離を連続的に測定し、小天体の自転運動と母船の小天体回りの運動のダイナミクスを利用して、プローブの絶対位置を地心緯度・経度で求める。

さらに、はやぶさ 2 の 4 台の表面探査ローバ・ランダで共通に使用する通信機にオプション機能として、距離を測定する機能を実装した。この距離測定機能は、打ち上げ前には、通信機内部の FPGA によって擬似遅延を作り出すことで検証したのみである。

はやぶさ 2 の 4 台の表面探査ローバ・ランダ (プローブ) の小惑星近傍での母船に対する相対運動は以下の通りである。まず最初に、プローブは母船から数 10[cm/s] 以下の速度で分離されるため、非常に低速で距離変化が起こる。その後、母船が小惑星から数 [m/s] で離れる速度変更を実施するため、母船-プローブ間の相対速度は、母船の対小惑星速度が支配的になる。母船と小惑星の最大距離は 20[km] であり、プローブが小惑星に到着した後は、小惑星の自転運動によって距離の周期的な変化が繰り返される。

本距離測定機能も、距離変化に応じて、その伝搬遅延量と伝搬ロスを模擬した検証試験が必要である。しかし、非常に近い距離から 20[km] に渡って連続的に相対速度数 m/s の運動を実現することは、地上ではかなり難しい。そこで、打ち上げ後の検証として、フェージングシミュレータによる有線試験と気球実験による無線試験を行なうこととした。

気球実験は JAXA 宇宙科学研究所の大気球実験に応募し、ゴム気球を利用した単独実験として認められたため、2016 年 9 月に放球運用を行った。以下、その実験に関して述べる。

## 2. 実験の概要

距離測定機能を有する小型のトランスポンダ (子機) を気球のペイロードとして放球し、地上からペイロードをトラッキングして、地上側のトランスポンダ (親機) から子機までの距離を連続的に測定する。

本トランスポンダは、MINERVA-II のために開発した通信機を地上実験に合わせて改造した。具体的な距離測定方法は 3.2 節で述べる。

気球実験では、親機と子機間の測距結果と、GPS データから算出した距離を比較することで、本方式の

Table 1 Specifications on communication modules

dimension	child module	80 × 50 × 15 [mm]
	parent module	160 × 100 × 35 [mm]
weight	child module	81[g]
	parent module	≤ 300[g]
multiple Access method	half duplex, TDMA (uplink:7[msec]/downlink:18[msec])	
frequency	uplink	922[MHz]
	downlink	922[MHz]
radiant power	uplink	250[mW]
	downlink	100[mW]
modulation	uplink	BPSK
	downlink	BPSK + bitabi
data rate (effective rate)	uplink	15.625[kbps]
	downlink	61.5[kbps]

★ uplink: parent module → child modules

★ downlink: child modules → parent module

有効性を実証することを目的とする。

通信機間の通信可能な距離の最大は 20[km] である。このため、放球前からトランスポンダの電源を入れて、測距を開始し、気球が地上局から 20[km] 以上離れたところで、気球を破断させ実験を終了させる。

### 3. トランスポンダ

#### 3.1 通信機

使用した通信機の緒元を Table 1 に示す。

母船側に搭載する親機と、プローブ側に搭載する子機で構成され、親機は最大 7 の子機とデータ通信を行なうことができる。

使用する周波数は、アップリンク (親機から子機への送信) とダウンリンク (子機から親機への送信) で同一である。このため、同一周波数をアップリンクとすべての子機のダウンリンクで時間的にシェアする時分割方式 (TDMA) を用いている。

#### 3.2 距離測定方式

データの通信方式が TDMA であるため、アップリンクとダウンリンクを切り替える際に、ガードタイムと呼ばれる通信を行なわない時間帯がある。

親機から子機にデータを送信した直後のガードタイムに測距を行なうための符号を入れ、その符号を受けた子機は、次のダウンリンクの最後にその符号を親機に返す。

親機は、両符号の位相差により電波の飛行時間を測定し、距離を算出する。

符号長が非常に短いため、測定できる最長距離は大きくなく、データ通信の最大可能距離より短い。このため、子機が親機のアップリンクにロックした時点からの子機と親機との相対的な距離の変化を計測することになる。

このような限定的な方式ではあるが、

- プローブが親機から放出された後の絶対距離を連続的に計測する。
- プローブが小天体表面で静止している時の両者の距離の相対的な変化から小天体の重力が母船に与える影響を導出する。

などが可能となる。

### 3.3 MINERVA-II 通信機からの改造

MINERVA-II に搭載した通信機は周波数として 950[MHz] 帯を用いており、携帯電話で用いる周波数と近接している。実際には、大樹町で用いられている携帯電話周波数とオーバーラップしていないが、周波数申請に非常に困難が伴う。

このため、使用する周波数を特定小電力無線として割り当てられた 920[MHz] 帯に変更した。また、地上側の親機の送信電力を 250[mW] と下げている。

### 4. 気球実験の構成

Fig.1 に構成を示す。

#### 4.1 ゴンドラ搭載システム

気球搭載ペイロードは、トランスポンダ (子機)、搭載コンピュータ、アンテナ、GPS 受信機、カメラおよびバッテリーで構成される。この他に、気球の管制に用いるゴンドラがあり、ペイロードとゴンドラを結合した。

##### 4.1.1 搭載アンテナ

子機には、2 本のアンテナを取り付けることが可能で、片側のアンテナによるキャリアを喪失すると、自動的にもう一方のアンテナに切り替える機能が備わっている。これは、小天体表面では重力加速度が小さいため、プローブ自体の姿勢が安定しないことを考慮したためである。

気球実験では、1 つのアンテナのみを使用した。ゴンドラは放球後に回転しながら上昇するため、水平方向に等方的に放射するスリープアンテナを下方方向に向けて取り付けた。

##### 4.1.2 搭載コンピュータ

子機の状態を搭載 CPU で収集し、子機からテレメトリデータとして送出する。この他に、カメラと GPS 受信機も搭載しており、これらから得られたデータも CPU で収集し、子機からテレメトリデータとして送出した。



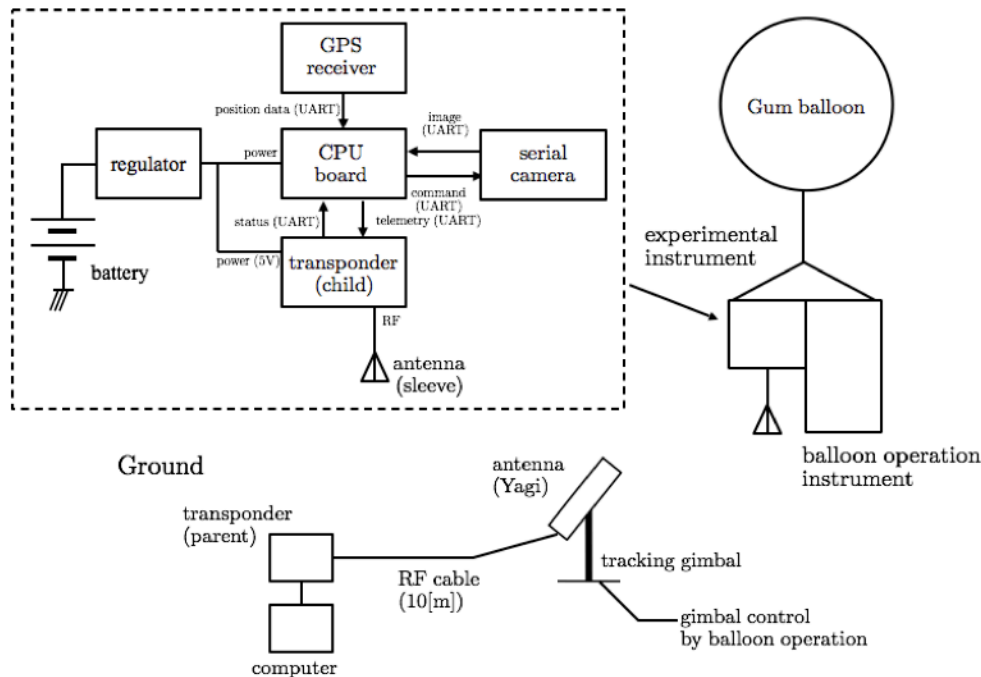


Fig.1 Experimental setup

## 4.2 地上側システム

トランスポンダ (親機), コンピュータ, アンテナで構成されている。

アンテナは, 気球の管制を行なうパラボラアンテナの横に取り付け, パラボラアンテナが気球を指向すると, 自動的に, 親機のアンテナも子機を指向するようになっている。

アンテナは八木アンテナである。距離測定自体は親機上で行なうため, そのデータを記録するためのコンピュータを接続する。

## 5. 放球結果

2016年9月にゴム気球を放球し, 放球後約1時間に渡って, 地上からトラッキングして, 子機からのテレメトリデータの収集と, 親機における距離測定を実施した。実験は距離が20[km]以上に達した後に, 地上からのコマンドにより気球を破断させて, 着水時に終了した。なお, 実験に用いたペイロードは回収していない。

距離測定は, 距離15[km]までは正常に行われたが, それ以降はS/Nが悪く, 分散が大きくなった。一方, 通信自体は距離20[km]以上に渡って正常に行われている。

## 6. おわりに

小天体まわりで母船とプローブの間の距離測定により新たな成果が挙げられることを目的として, 距離測定が可能な通信機をはやぶさ2搭載ペイロードに実装した。

その距離測定機能の打ち上げ後実証を気球を用いて実施し, 良好な結果を得た。

現在の仕様だと, 通信帯域制限から精度が荒いことや, 通信は複数子機との間で同時に可能だが, 距離測定は1機に限定されるなどの制約があるので, 今後も

改良を続けたい。

## References

- [1] Tetsuo Yoshimitsu, Atsushi Tomiki, and Takashi Kubota, "Asteroid surface exploration rovers developed for Hayabusa-2 mission," 66th International Astronautical Congress, No.IAC-15,A3,4,5, 2015.
- [2] Kenji Nagaoka, et al., "Development of MINERVA-II2, a Micro-Robot for Asteroid Surface Exploration with Innovative Mobility," 11th Low-Cost Planetary Mission Conference, 2015.
- [3] Christian Ziach, et al., "MASCOT, the small mobile asteroid landing package on its piggy-back journey to 1999 JU3: pre-launch and post-launch activities," 66th International Astronautical Congress, No.IAC-15,A3,4,6, 2015.
- [4] Tetsuo Yoshimitsu, Sayaka Higo, and Ichiro Nakatani, "Localization over Small Body Surface by Radio Assistance," Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics (WSANE), pp.145-150, 2006.
- [5] 吉光徹雄, 富木敦史, 久保田孝, "Proposal of range measurement experiment using a balloon", 大気球シンポジウム, 2015.