

【記念講演】(要約)

演題『イトカワまであと何キロメートル？
—レーザーで距離をはかる、探査機「はやぶさ」のライダー開発—』

講師 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
宇宙科学研究所 准教授 水野貴秀先生



【プロフィール】

1964年、岡山市生まれ。

1995年から探査機「はやぶさ」プロジェクトに参加し、「はやぶさ」が小惑星イトカワとの距離を測るために必要なレーザー高度計の開発を担当(レーザー高度計は着陸のための重要なセンサーで、イトカワの2回の着陸を成功させるために貢献し、イトカワの表面の地形や質量の測定にも使用され大きな科学成果を生んでいる)。

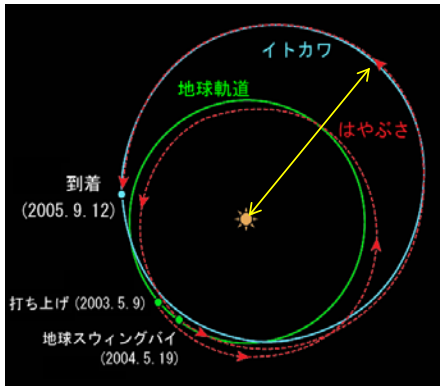
また、「はやぶさ」が地球に帰還した際には、ヘリコプターによる搜索を担当した。

1. イトカワってどこにあるの？

イトカワは火星と木星の間にあるアステロイドベルト(小惑星帯)と地球の近くを通る楕円軌道を回っています。目標天体としてイトカワが選ばれた理由には、イトカワが科学的に興味深い天体ということに加えて、軌道が地球の軌道と重なっているので、「はやぶさ」をイトカワの軌道に乗せやすかったことが挙げられます。

イトカワは直径550m程のジャガイモ型

- ・公転周期：1.5年(地球の1年の1.5倍)
- ・自転の周期：12時間(地球の半日がイトカワの一日)
- ・質量：約3,500トン(中型のタンカー一艘の排水量)
- ・寸法：535×294×209m
- ・体積：東京ドーム15個相当



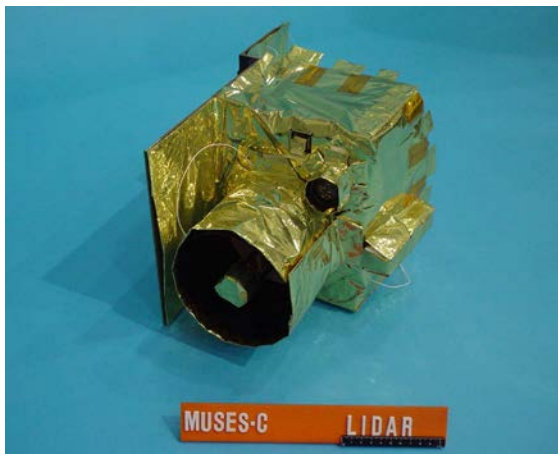
イトカワへのアプローチ

2. ライダーについて

「はやぶさ」の下側 (-Z 面) には、ONC (航法カメラ)、LRF (近距離用レーザー距離計)、LIDAR(レーザー高度計)、NIRS (近赤外センサー) など、いくつかのセンサーが付いています。今日お話しするライダー(LIDAR)は、この中のレーザー高度計です。ライダー (LIDAR) とは、

<p>LI ght : D etection A nd R anging</p>	}	<p>光を見つけて距離を測る装置</p>
--	---	----------------------

で、レーザーを発射して、その光が目標天体に当たって帰ってくる、光の往復間を測定して距離を測ります。ライダーがやっていることは単純に「出す」、「数える」、「受け止める」の3つだけです。



ライダー(LIDAR)フライトモデル

出す →レーザーを発射する

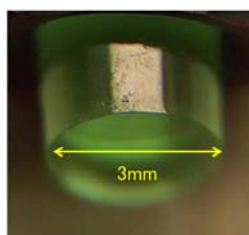
レーザーは YAG (ヤグ) と呼ばれる結晶から出ます。このレーザーから出る波長は $1.064 \mu\text{m}$ で近赤外といわれる波長帯で、目には見えない光です。ライダーはこの光を 1MW (メガワット) 近くの強さで 15ns (ナノ秒) という短時間で発

射します。ところで、YAGの結晶構造はパワーストーンであるガーネットと同じです。ですから、ライダーのYAGレーザーは「はやぶさ」のパワーストーンともいえるかもしれません。ガーネットが持つ意味は、『実りの象徴』（目標に向かって積み上げてきた努力を成功へと導いてくれる）、『絆（きずな）』（再開の誓い、一途な愛）と聞きますので、これがあったから「はやぶさ」は成功して帰ってこられたのでは？とライダー担当者としては思いたくなってしまいます。（笑）

YAGレーザー: 1.064 μ m

ネオジウム
イットリウム
アルミニウム
ガーネット
クロム

Nd : Y A G - Cr



YAG 結晶

数える →ストップウォッチで時間を計る

レーザーを発射してから、目標天体で反射してライダーまで戻ってくるまでの時間をストップウォッチで正確に測ることで距離を測定します。

光の速さは1秒間で30万km（地球7周半）ですから、

1ns（ナノ秒）	→	0.3m
10ns	→	3m
100ns	→	30m
1000ns	→	300m

という具合です。

受け止める →光を受けてストップウォッチを止めます

目標天体で反射（散乱）した光は半球状に広がって、ライダーのところへ帰ってきたときにはとてもわずかな光になってしまいます。このわずかな光を、放物線（中学校の数学で習いますね）を利用したパラボラ型のカセグレン望遠鏡で光センサーに集めて、光が帰ってきたタイミングを知って、ストップウォッチを止めます。

このように、ライダーは**出す**、**数える**、**受け止める**の3つの動作で距離を測定しています。

3. 打ち上げ前のテスト

宇宙には特殊な環境があるので、その環境に合わせた試験が必要になります。

放射線環境試験

これは主に、電子機器や光学機器に対して行われますが、人工衛星や探査機を挙げる軌道にどの程度の放射線があるかを調べた上で、あらかじめ地上でその影

響を試験しておく必要があります。たとえば、地上で使用しているパソコンは、軌道上では放射線で計算ミスを頻発した上にすぐに壊れてしまいます。

機械環境試験

人工衛星や探査機は軌道に乗った後は非常に静かだけれど、軌道に乗せるためにロケットで打ち上げるので、そのロケットの非常に大きな振動に耐えないといけません。そのために、打ち上げのときの振動と探査機をロケットから分離するときの衝撃を加えて、壊れないことを確かめる機械試験をする必要があります。

熱真空環境試験

宇宙の熱環境というのは、太陽からの強い熱が一方からきて、もう一方で深宇宙のすごく冷たい空間に冷やされます。地上のように対流がないので、放っておくと太陽面は+100°C、反対側は-100°Cで、その差は200°Cという状況になります。それを熱設計でバランスがよくなるように考え、熱真空環境試験はその熱設計が上手くいっているかを試験します。

4. LIDAR の開発

探査機やそれに載せる装置（FM：フライトモデル）の開発は JAXA だけでなく、実際のものづくりはメーカーの力が必要です。ライダーの場合、装置全体を NTS(NEC 東芝スペースシステム)、レーザー部を東芝が担当しました。また、ライダーの開発には、レーザーの技術の他に、望遠鏡などの光学技術、センサーや時間測定回路などの電気回路技術が必要になります。これら設計技術に加えて、製造する技術、できたものを試験する技術、設計から製造までを管理するための技術（品質管理、文書管理等）が必要で、全てに関わる方が力を合わせて初めてできあがります。こうして1つ1つの搭載品ができあがり、それらを集めて衛星システムとして設計、組み立て（ここでも、設計・製造・試験・品質・文書の管理があります）で、ようやく探査機ができあがります。

ライダーの開発で最も苦労したのが熱真空試験でした。「はやぶさ」はイトカワまでの巡航中はイオンエンジンにできるだけ多くの電力を回すために、衛星の搭載機器の多くは温度管理を最小限に抑えた冷温保管を要求されます。太陽電池パネルの反対側についているライダーも-30°Cの低温での保管が求められていました。そのため、地上での試験でも-30°Cの環境に耐えられるかどうか、2002年にFM（フライトモデル）の熱真空試験をしました。しかし、10°C以下に冷やすとレーザーが出なくなり、温度を室温まで上げてもレーザーの出力が戻らなくなっていました。これでは、巡航中に冷温保管して、イトカワに到着後に距離測定しようとしても、レーザーが出ずに、測定できないということになってしまいます。焦りました。

この現象を何とか解決しようと2002年の冬から2003年の春まで、ライダー関

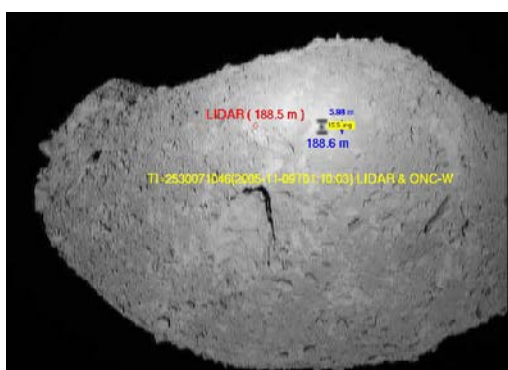
係者は必死に努力して、原因はほぼこれだろうというところまで絞り込んだのですが、解決には至りませんでした。打上まであと 51 日となった 2003 年 3 月 17 日、「ライダーは温存する」（すなわち、巡航中も常温保管する）と川口マネージャーから方針を示されました。ライダー開発の担当者としては、「はやぶさ」に負担をかけるようなセンサーを出したくなかったのですが、探査機の打ち上げ可能な期間は限られていますので、間に合わなければ計画全体の足を引っ張ることになります。解決のための作業は止めて、組み立て・試験の工程に入りました。鹿児島（内之浦）の射場にいる「はやぶさ」のもとに工場から LIDAR を出荷したのは 4 月 12 日、打上まであと 26 日に迫っていました。

開発メーカーの方々は最後まで解決しようがんばってください、そのことには今でも頭が下がる思いでいっぱいです。

5. イトカワへの着陸

9 月 10 日に「はやぶさ」はイトカワに到着し、ライダーは距離測定を始めました。2 ヶ月間測定して着陸点を決めたり、自由落下の速度（ライダーの距離測定から）を測って重力を計算したり、地形を測定したりしました。また、打ち上げ前には誰も注目しなかったのですが、イトカワにはやぶさの影が写っていて、カメラに写った影の大きさから距離を計算すると、ライダーでの測定とほとんど一致していて、測定が正しいことがわかりました。

ライダーの動作は完璧で、2 回の着陸成功に大きな貢献をただけでなく、重力の測定、さらにその結果から密度の測定、表面の凸凹具合の測定といった科学成果にも大きく貢献しました。



「はやぶさ」の影

6. 「はやぶさ」の帰還

さて、無事に着陸してサンプルの取得をした「はやぶさ」ですが、その後みなさんがよくご存じのように行方不明になって再度見つかったり、途中でイオンエンジンが壊れたりと満身創痍で、それでも地球に帰ってきました。今日はあまり知られていない、帰還してきたカプセルをどのように捜索したかという話しをしたいと思います。

カプセル追跡と搜索の手順はこんな感じです。カプセルは予測軌道を通して大気圏に再突入すると発光、それを光学観測班が観測してどこに落ちるか予測軌道を修正します。そして、高度 5km ぐらいに達したとき、パラシュートが開き断熱材（ヒートシールド）を分離します。パラシュートが開くとビーコンという VHF の電波が出るので、地上 4 箇所に配置した電波方探（レーダー）班でビーコンを見つけて、カプセルが着地するまで追跡します。着地した後はやはりレーダーを持ったヘリコプターで搜索して発見するという手はずでした。私はヘリコプターでの搜索を担当していました。



「はやぶさ」カプセルの追跡と搜索

搜索用ヘリコプターはシコルスキーS76 という機種で、搜索時には 2 名のパイロットを含めて計 6 人が搭乗し、地上の本部に連絡係が 1 名おりました。ヘリの中は、狭くて動けませんし、会話も自由にできません。また、夜間の搜索ですから手元がやっとな搭乗員同士のアイコンタクトも十分にはできません。さらに当たり前ですが飛んでいるだけで燃料はじゃんじゃん減っていきますので、飛べる時間は 2 時間半と限られています。こんな状況の中で、目的を達成するには、全員が目的を共有して、互いに信頼できる関係にあることがたいへん重要になります。これはカプセルの搜索に限らず、ヘリを使った搜索すべてに共通にいえることです。

2010 年 6 月 13 日、「はやぶさ」は帰ってきました。私は地上でアイドリング運転するヘリの中で火球発見の報告（私はきれいな火球は見られませんでした）、電波方探班がロックオンする報告を聞き、「次が出番だ」と緊迫していました。そして、本部からの離陸許可が出て離陸、約 30 分でカプセルを発見しました。真っ暗な砂漠の中で、サーチライトで照らされたパラシュートが真っ白くまぶしくてすごくきれいだったのが頭に焼き付いています。



ヘリコプターから発見時のカプセル

7. 「はやぶさ」から学んだこと

最後に、私が「はやぶさ」から学んだことを少しだけ申し上げます。

① どうすればできるのかを考える。

当たり前かも知れないですが、何か問題に当たったときに、どうやったらできるか、解決方法を考える。+の方向で！ 何をすると失敗するとか、あれはダメとか、そんなことを考えるとどんどんダメな方向に志向がいつてできることもできなくなる。

② やってみよう

誰かがやってくれないのではなく自分ができることを率先してやってみよう。専門がどうのとか（もちろん専門家の意見は重要ですが）こだわらず、自分で考えて、自分ができることを先ずやろう。誰かが・・・ではなく自分から。

③ あきらめずにがんばる

自分で考えて（良く考えなくっちゃいけないですが）、やってみようと始めたら、あきらめずにがんばる。

ご清聴ありがとうございました。