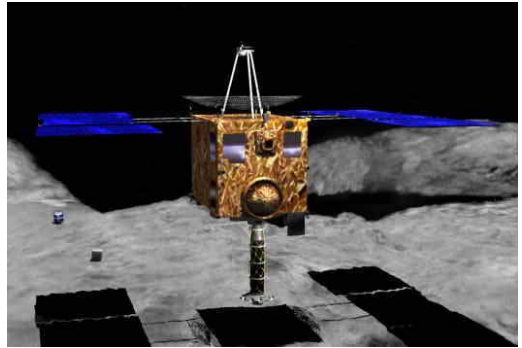


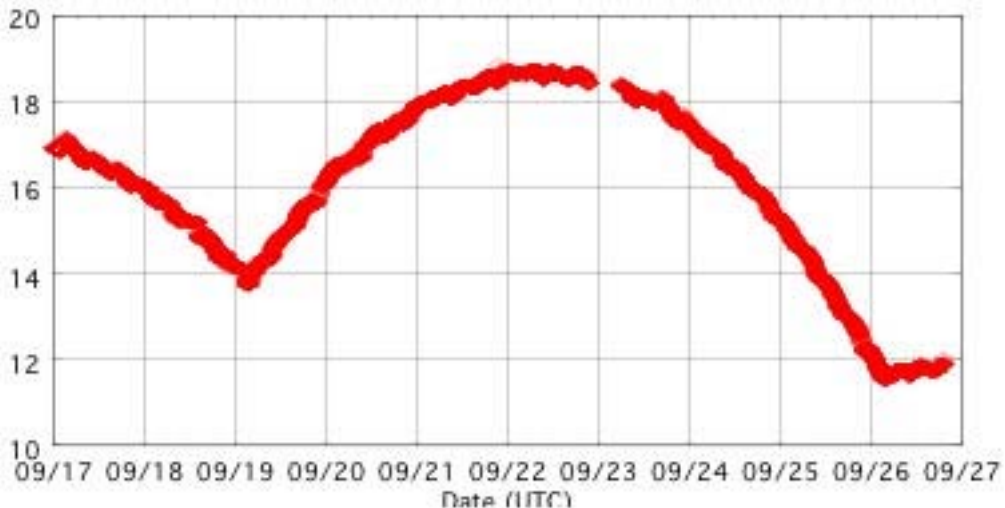
## はやぶさの運動から光圧を求める

神奈川県立柏陽高校 山本明利

2003年5月に打ち上げられた日本の小惑星探査機「はやぶさ」は、2005年11月12日現在、目標天体「イトカワ」の近傍にあって、19日と25日のタッチダウン・試料採取に向けて、表面付近へのリハーサル降下を実施中です。「はやぶさ」は同日午後、小型探査ロボット「ミネルヴァ」をリリースしました。探査本番に向けて期待が高まります。



ところで、ISAS/JAXA の「はやぶさ」のWebページにこんなデータが載っていました。9月中旬に「はやぶさ」が「イトカワ」とランデブーして、上空でホバリングしているときの高度の変化を示すグラフです。縦軸は「イトカワ」表面からの相対距離（単位：km）で、横軸は日付（世界時）です。



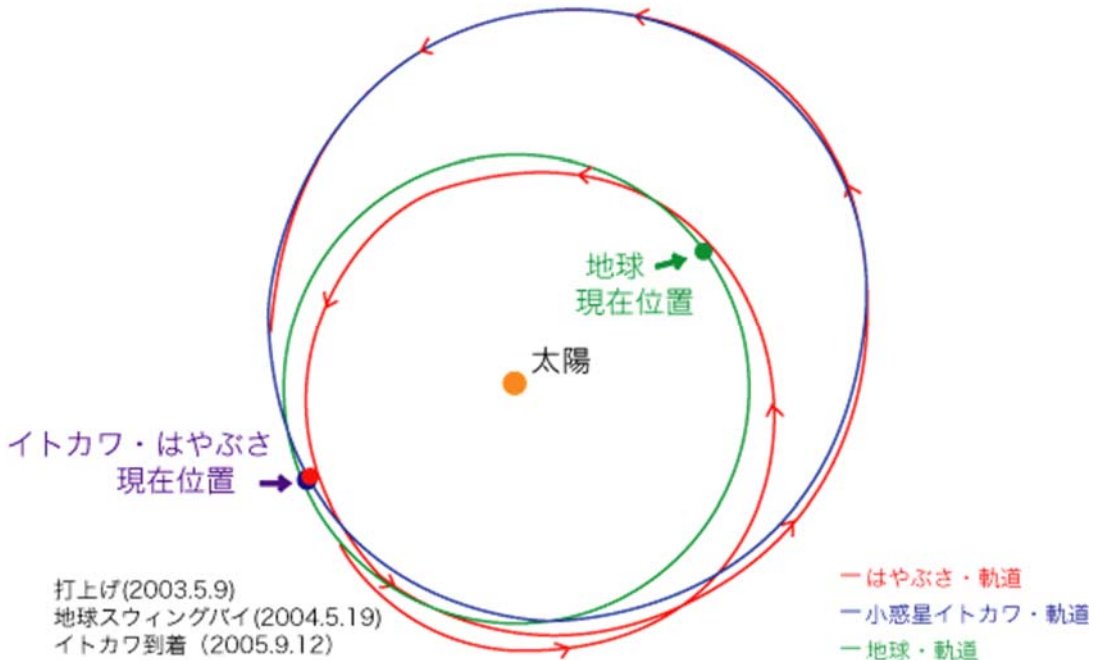
ISAS/JAXA のWebページ：<http://www.isas.jaxa.jp/j/snews/2005/1025.shtml> より

グラフはきれいな放物線を描いていて、「はやぶさ」が「イトカワ」の方に向かってほぼ一定の力を受けながら運動していることがわかります。「はやぶさ」は9月19日と26日に、「イトカワ」から飛び上がる方向にガスジェットをちょっと噴射して距離を調節していますが、その間は推力を使っていません。真空の宇宙空間で「はやぶさ」に放物運動をさせる一定の力とは何でしょうか。

すぐに思いつくのは、そばにいる小惑星「イトカワ」からの重力ですが、「イトカワ」はさしわたし500mほどの小さな小惑星で、Webページの記事によれば、その重力は「はやぶさ」にはたらく力の10分の1ぐらいとのこと。残りの大半は実は太陽の光線による光圧（太陽輻射圧）だということです。

光の粒子・光子は、その振動数  $\nu$  に応じたエネルギー  $E=h\nu$  と運動量  $p=h\nu/c$  を持ちます。 $h$  はプランク定数です。運動量を持つということはそれが衝突すると、相手に力積を及ぼすということで、その結果、光に照らされた面は圧力を受けることになります。これが光圧（輻射圧または放射圧ともいう）と呼ばれる圧力です。

光圧は大変わずかな作用のためほとんど意識されませんが、真空中で無重力の宇宙空間では他の力が存在しないためその効果が現れてきます。彗星の尾が太陽と反対方向にたなびくのも、太陽風と光圧のためです。



ISAS/JAXA の Web ページ : <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/today.shtml> より

現在、「はやぶさ」は、上図のように太陽をはさんで地球と反対側にいます。この位置は、「はやぶさ」の太陽電池パドルを太陽に向けてると同時に、高利得のパラボラアンテナを地球の方に向けられるので好都合です。「はやぶさ」は背中に太陽光線をいっぱい浴びながら、太陽に明るく照らされた「イトカワ」の日向側を観測しているわけです。

この位置関係だと、太陽光線の光圧は「はやぶさ」を「イトカワ」の方に押しつけるように働きます。「イトカワ」の重力と合わさって、「はやぶさ」を「落下」させることになります。その様子が前のグラフに示されています。落下の加速度を求めてみましょう。

グラフから代表的な高さを読み取ります。放物線の両端と頂点を選びましょう。このうち 9/19 の位置を原点として鉛直上方に  $y$  軸をとることにし、データを下の表のように整理します。

日(UT)	高度(km)	$t$ (s)	$y$ (m)
9/19.13	14.0	0	0
9/22.30	18.7	$t_1 = 2.74 \times 10^5$	$y_1 = 4.7 \times 10^3$
9/26.13	11.7	$t_2 = 6.05 \times 10^5$	$y_2 = -2.3 \times 10^3$

等加速度運動の位置の式から次の関係が成り立ちます。ここに  $a$  は落下の加速度、 $v_0$  は  $t=0$  すなわち 9/19 の上昇速度を初速度と見たものです。

$$y_1 = v_0 t_1 - \frac{1}{2} a t_1^2 \quad y_2 = v_0 t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2$$

これらを  $a$  と  $v_0$  について解くと、次式が得られます。

$$a = \frac{2(y_1 t_2 - y_2 t_1)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} \quad v_0 = \frac{y_1 t_2^2 - y_2 t_1^2}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)}$$

表の数値を代入して計算すると、以下の数値が求まります。

$$a = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2 \quad v_0 = 3.4 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

この結果から、「はやぶさ」が宇宙空間で受けている力は、地球の重力（重力加速度は  $9.8 \text{ m/s}^2$ ）の約 8 億分の 1 程度の微弱な力であること、「イトカワ」に対して、秒速数  $\text{cm}$  程度の極めてゆっくりした相対速度で運動していることがわかります。

「はやぶさ」の質量は約  $500 \text{ kg}$  ですから、運動方程式  $F=ma$  を使って力  $F$  を求めると、約  $6.5 \times 10^{-5} \text{ N}$  すなわち、 $6.5$  ミリグラム重という微弱な力です。一粒の砂を持ち上げるほどの力ではありません。これでは地球上の普通の生活の中では意識できるはずがありません。しかし、私たちにとっては無視できる力でも、宇宙の「はやぶさ」にとっては意味のあるものになります。真空・無重力の世界では長時間この力を受け続けているうちにじわじわと速度や軌道が変わっていくのです。「はやぶさ」はこの力を「イトカワ」への接近に利用し、推進剤を節約しています。

上で求めた力の 1 割は「イトカワ」の重力によるものとして割り引いた上で、受光面積  $1 \text{ m}^2$  あたりの光圧を求めておきましょう。「はやぶさ」の太陽電池パドルの面積は  $12 \text{ m}^2$  です。本体部分の受光面積を約  $2 \text{ m}^2$  とすると、光圧は  $4.2 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$  となります。地球の大気圧の実に 200 億分の 1 というわずかな圧力です。

それでも、宇宙ではこの力を「はやぶさ」のように有効に活用できる可能性があります。宇宙の帆掛け船・ソーラーセイル計画です。広大な「帆」を展開し、太陽の光をいっぱいを受けてその力で宇宙船を推進しようというアイデアです。わずかずつとはいえただで無限に手に入る推進力です。

上のデータから見積もると  $1000 \text{ m}^2$  ぐらいの面積を持つ帆なら、 $0.5$  グラム重ぐらいの力を生み出せるはずで、光の反射率を上げれば 2 倍程度の増加も見込めます。この話は荒唐無稽なものではなく、実現をめざしてすでに基礎実験がはじまっているのです。

(2005/11/12)

### 【参考になるサイト】

はやぶさ計画のページ <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/index.shtml>

今日のはやぶさ <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/today.shtml>

JAXA のソーラーセイル実験の解説・報告

[http://www.isas.ac.jp/j/snews/2004/0809\\_s31034.shtml](http://www.isas.ac.jp/j/snews/2004/0809_s31034.shtml)

(※以下は 2022/06/17 加筆)

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」

[https://www.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/index\\_j.html](https://www.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/index_j.html)