

「はやぶさ」大気圏再突入のスペクトル観測

飯山 青海

2010年6月13日に小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰還しました。筆者はオーストラリアではやぶさ回収隊の中で、分光観測チームの一員としてその観測に携わりました。分光チームの観測成果は、日本天文学会の欧文研究報告(PASJ)に掲載されました(S. Abe et al (2011). Near-Ultraviolet and Visible Spectroscopy of HAYABUSA Spacecraft Re-Entry PASJ vol63)。このページでは、分光観測(スペクトル観測)とはどんなものであるかを解説して、はやぶさの観測結果について簡単なところをご紹介します。

スペクトルとは？

私たちが日常目にしている光は、いろいろな色の光が混ざり合っています。「分光器」という装置に光を通すことで、どのような色の光が混ざり合っているのか分解することができます。科学館のサイエンスショーで時々登場する「虹みえ〜」も分光器の一種ですし、プリズムも分光器の一種です。

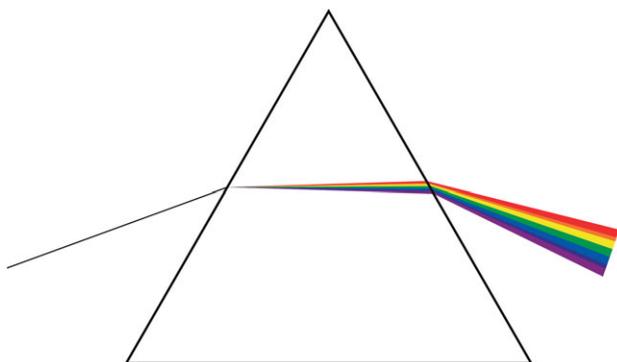


図1 プリズム(分光器)を通過した光は、さまざまな色に分かれる。

分光器を通した光を調べると、光には2種類あることが分かります。ひとつは、分光器を通したときに、すべての色が虹のようにつながって見えるものです。これは、「連続スペクトル」と呼ばれます。もうひとつは、分光器を通したときに、現れる色が飛び飛びになっていて、色の数が少ないものです。これは、「輝線スペクトル」と呼ばれます。図2は連続スペクトルの例(白熱電球の光)で、図4が輝線スペクトルの例(科学館の展示場4階に展示しているヘリウム管の光)です。

光の「色」は、「波長」という数値で表すことができます。そこで、スペクトルの写真から、色(波長)とその色の光の強さ(明るさ)の関係をグラフにすることができます。図2の連続スペクトルをグラフにすると、図3のようになり、どの波長の色もそれなりに出ているということが表されるグラフになります。一方、図4の輝線ス



図2 白熱電球のスペクトル(写真)

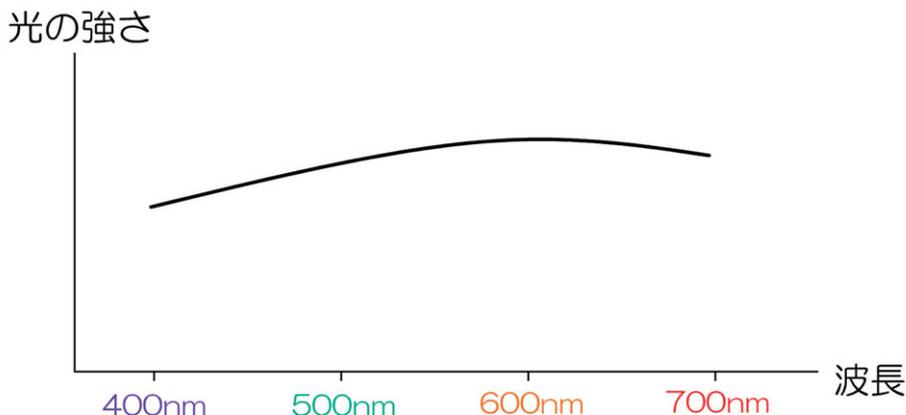


図3 白熱電球のスペクトル(グラフ)



図4 ヘリウム管のスペクトル(写真)

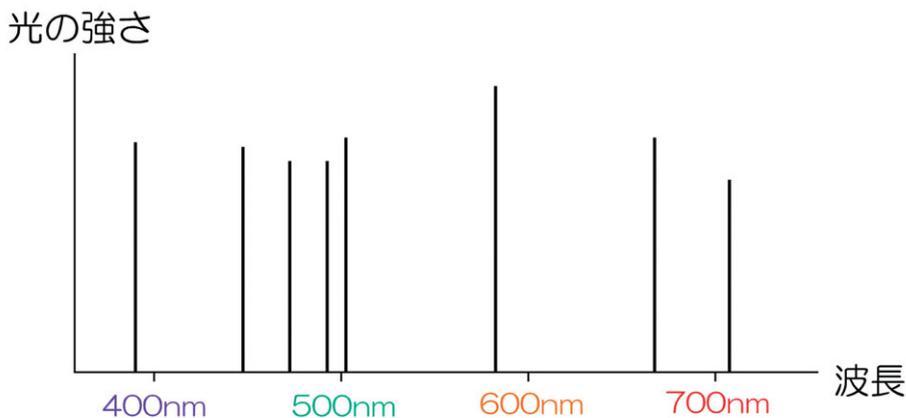


図5 ヘリウム管のスペクトル(グラフ)
特定の波長の光だけが出ている。



ペクトルをグラフにすると、図5のようになり、ある決まった色(波長)の光だけが出ていることが表されています。

輝線スペクトルの特徴は、決まった波長だけが出る、ということにあります。そして、その波長は、光っている物の元素によって決まるのです。図5の、707nm (ナノメートル)や668nm、588nm、502nmなどの波長は、ヘリウムに特有の波長です。このことを利用すると、逆に、707nm、668nm、588nm、502nm、...といった波長の光だけがたくさんやってくるのが分かれば、その光はヘリウムから発せられたものだ、ということを知ることができるのです。

天文学では、実際に星や星雲の標本を手に入れて分析器で分析することができないので、スペクトルを調べることで、星や星雲の材料がどんな元素でできているのかを研究しています。そして、流れ星も(地球に帰還した「はやぶさ」も)輝線スペクトルを出して光るので、その波長を調べることで、そこにどんな元素があるのかを知ることができるのです。

流れ星の正体が「砂粒のようなもの」と説明されるのは、流れ星から出る輝線の波長を調べることで、流れ星がどんな元素からなっているかを調べると、地球の岩石と同じような元素の組み合わせになっていることが分かるからです。

はやぶさ再突入時の色

はやぶさの再突入の写真(図6)をご覧ください。はやぶさは、写真の左側から右側へ飛んでいきました。途中、大きな爆発が2回と小さな爆発を何度か繰り返している様子が分かります。また、写真の飛跡の中央付近で、飛跡が二筋に分かれているのが分かるかと思いますが、下側の長い飛跡は帰還カプセルのもので、上側の短い飛跡が、燃え尽きた本体の飛跡です。

本体の爆発の強い光が、1回目の爆発(緑っぽい)と2回目の爆発(オレンジっぽい)とでは色が違うことにすぐに気づきます。しかし、普通の写真では、色については、「緑っぽい」とか「オレンジっぽい」というだけで、その色の原因に踏み込んで議論することは困難です。しかし、同時にスペクトルの観測を行っていれば、スペクトルの波長の分析によって、この色の違いの原因を科学的に議論することができるようになります。

Abe et al(2011)の論文に掲載された、はやぶさのスペクトルのグラフが図7です。はやぶさが大気圏に再突入してくる様子を、分光器を付けたビデオカメラで撮影し、その映像のうち、3つの時刻での画像から、スペクトルのそれぞれの色の強さを分析して、1枚のグラフにまとめています。

高度84.5kmの段階(世界時で13:52:04)は、はやぶさが光りはじめて、まだ大きな爆発を起こす前の段階です。

高度62.7kmの段階(世界時で13:52:16)は、1回目の大きな爆発を過ぎた

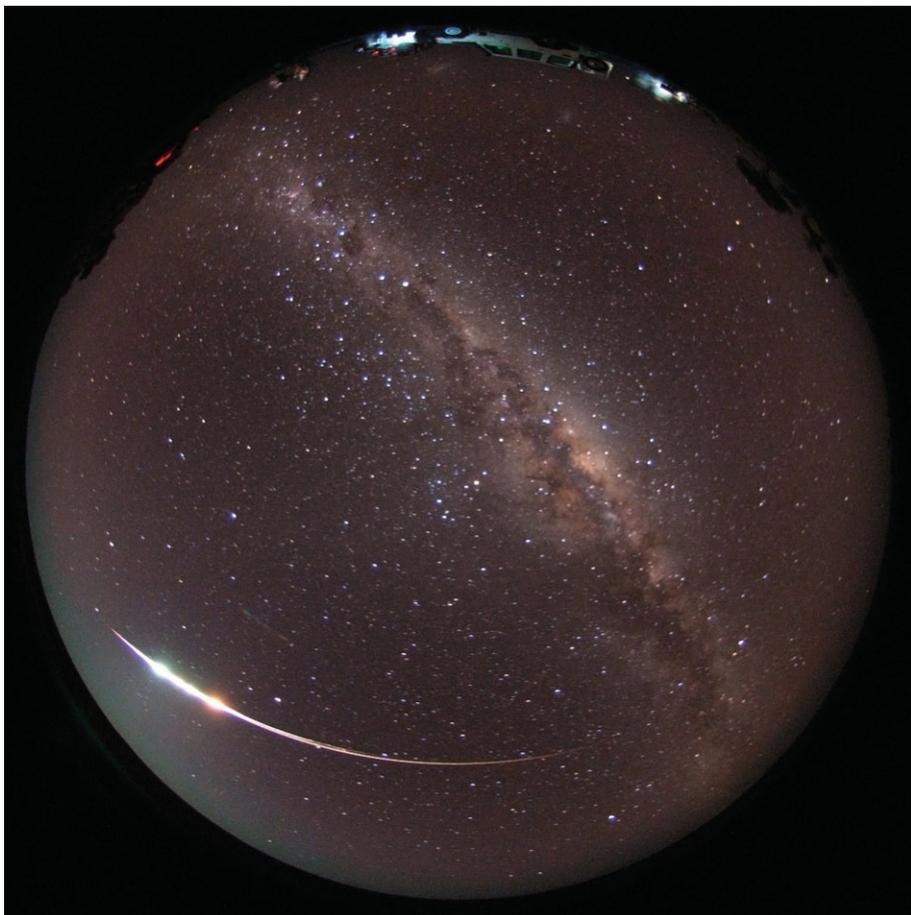


図6 はやぶさの大気圏再突入 (c)JAXA/大阪市立科学館
2010年6月13日 オーストラリアウーメラ砂漠にて、筆者撮影

後、最後の大きな爆発の前の段階です。

そして高度54.9km(世界時で13:52:21)は最後の大きな爆発が終わったあとの段階です。

84.5kmの段階では、まだ光は弱く、グラフは全体に低い高さです。ナトリウム(Na)とマグネシウム(Mg)の輝線がきれいに分かります。

62.7kmの段階では、全体に光が強いので、グラフの高さが高くなっています。そして、たくさんの輝線が写っています。目立つのは、ナトリウム、マグネシウムに加えて、銅(Cu)が強く出ています。鉄(Fe)の輝線もたくさん見つかります。ちょっと

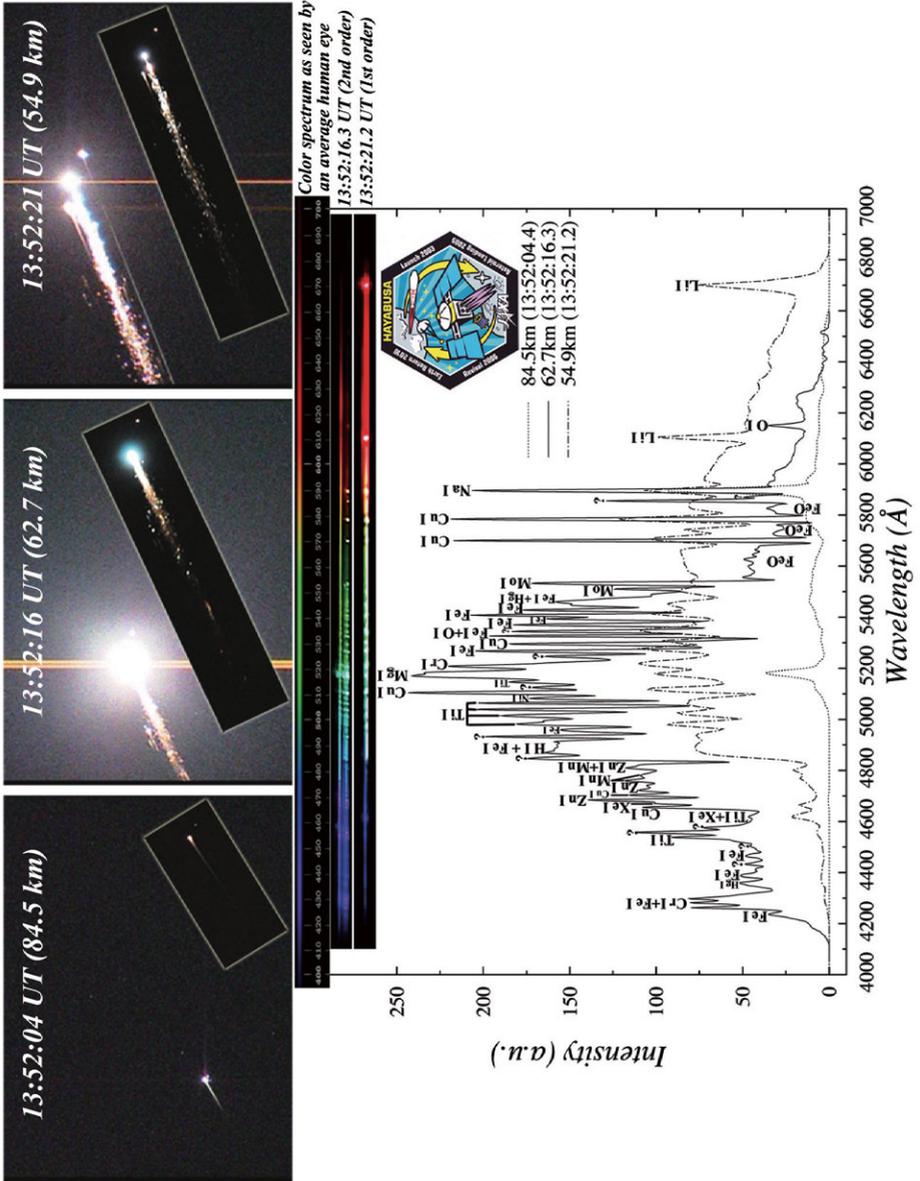


図7 はやぶさのスペクトルのグラフ。S. Abe et al (2011). Near- Ultraviolet and Visible Spectroscopy of HAYABUSA Spacecraft Re-Entry PASJ vol63 より。



珍しい元素としては、モリブデン(Mo)や水銀(Hg)、キセノン(Xe)などの輝線も識別できます。

54.9kmの段階では、それまでには見られなかった、リチウム(Li)の輝線が強く出ていることが特徴です。

これらの元素の輝線の現れ方から読み取れることはいろいろあります。例えば、62.7kmの段階でキセノン(Xe)の輝線が見えています。キセノンは、はやぶさのメインエンジンであるイオンエンジンの推進剤です。地球帰還時にはタンクの中に約10kg残っていたはずです。おそらく1回目の大きな爆発で、キセノンを積んでいたタンクが爆発して、キセノンがタンクの外に放出されたであろうことが推定できます。

また、光り初めの頃は、マグネシウムが目立っています。マグネシウムはジュラルミンに使われる元素のひとつで、ジュラルミンでできた本体の部品に由来すると考えられます。マグネシウムは3段階のすべてで良く識別できていますが、62.7km以降では、鉄(Fe)も目立つようになります。もともと、はやぶさの材料としては、マグネシウムより鉄の方が多く使われていたので、本体の爆発を機に、本体内部に収められていた鉄製の部品が飛び散ったのでしょうか。

あまり見かけない元素のモリブデン(Mo)ですが、これは、潤滑剤に使われる元素です。天然の流れ星のスペクトルでは見つかることのない元素ですから、これもはやぶさ本体に使われていたものが観測できていると考えられます。

2回目の爆発の後で目立つのがリチウム(Li)ですが、これは、はやぶさに搭載されていたリチウムイオンバッテリーに含まれていたリチウムだろうと考えられます。リチウムの輝線は赤い色です。1回目の爆発の後のスペクトルにはリチウムの輝線は見えませんが、2回目の爆発の時に、リチウムイオンバッテリーが粉々になったのだろうと考えられます。図6の写真で1回目の爆発が緑がかっているのは、マグネシウム、銅、鉄、クロム、酸素などの影響が強いのでしょうか。それが2回目の爆発では、リチウムイオンバッテリーの爆発によって、リチウムの赤い色が加わって、オレンジがかった色に写っているものと理解できます。

Abe et al(2011)の論文では、他にももっと深い考察と分析が行われています。たとえば、それぞれの元素の輝線の強さから、それぞれの元素の量の比率の推定することも可能です。ちょっと難しいですが、興味のある方は、論文を読んでみてください。

飯山 青海(科学館学芸員)