

特別講演 「はやぶさ」 火球のスペクトルをマカリで解析する

Kouji Ohnishi 大西浩次 (長野工業高等専門学校)

21世紀もすでに10分の1が過ぎた。この10年間の宇宙開発史のトップを飾るのは、小惑星探査機「はやぶさ」の地球帰還であろう。2003年5月9日に打ち上げられた「はやぶさ」は、2005年11月、2度にわたる小惑星「イトカワ」への着陸、そして、その直後のトラブルを克服して、2010年6月13日、小惑星探査機「はやぶさ」のリエントリー・カプセルと本体が大気圏再突入した。国立天文台はやぶさ観測隊は、「はやぶさ」の大気圏再突入の時の“人工流星”の観測を行った。流星とは、地球大気圏に飛び込んできた高速度の流星体が、上空で大気分子と衝突して発光する現象だ。しかし、流星体がプラズマ発光すると同時に周りの大気もプラズマ発光する。このため、流星発光における両者の寄与の詳細は、いまだに良く判っていない。その意味で、「はやぶさ」は、その成分やサイズ、突入速度や時刻が決まった“人工流星”の観測として恰好の対象であった。著者は、この「はやぶさ」最期の光のスペクトル観測を担当した。分光観測データの解析にはマカリを使った。解析の結果、「はやぶさ」は流れ星として地球に帰還した」ということが判った。

1. 「はやぶさ」分光観測

「はやぶさ」は、秒速12.2 km、突入角12度で大気圏に突入するため、大気による空力加熱(注1)はスペースシャトルの30倍以上と過去最大になる。この際、どのように発光するのだろうか。この手がかりとして、NASAの「スターダスト」カプセルの観測例がある(注2)。「スターダスト」カプセルの大気圏再突入の際、そのスペクトルは、ほぼ2800K(約2500°C)の熱放射として近似出来、ほぼ事前の予測に近い温度変化を示したことが判っている。

2010年6月13日、22時52分(JST)、西の空に3等星ほどで光り始めた「はやぶさ」本体は、10秒後には満月より明るく増光し、わずか20秒ほどで大気圏に散っていった。そのわずか手前を金星ほどに明るくなったカプセルが東の空へ飛んでいた。写真1は、この時に撮影した全体の画像と、分光データである。「はやぶさ」は右端(高度100 km)より大気圏に突入し、本体は4度の爆発的発光(高度70 kmから60 km)で消滅した。カプセルはその少し前を飛び続け、左端でダークフライト領域(高度40 km以下)に入った。この後半(中央囲み部分)約10秒間のスペクトルの軌跡を下の赤枠内に示した。

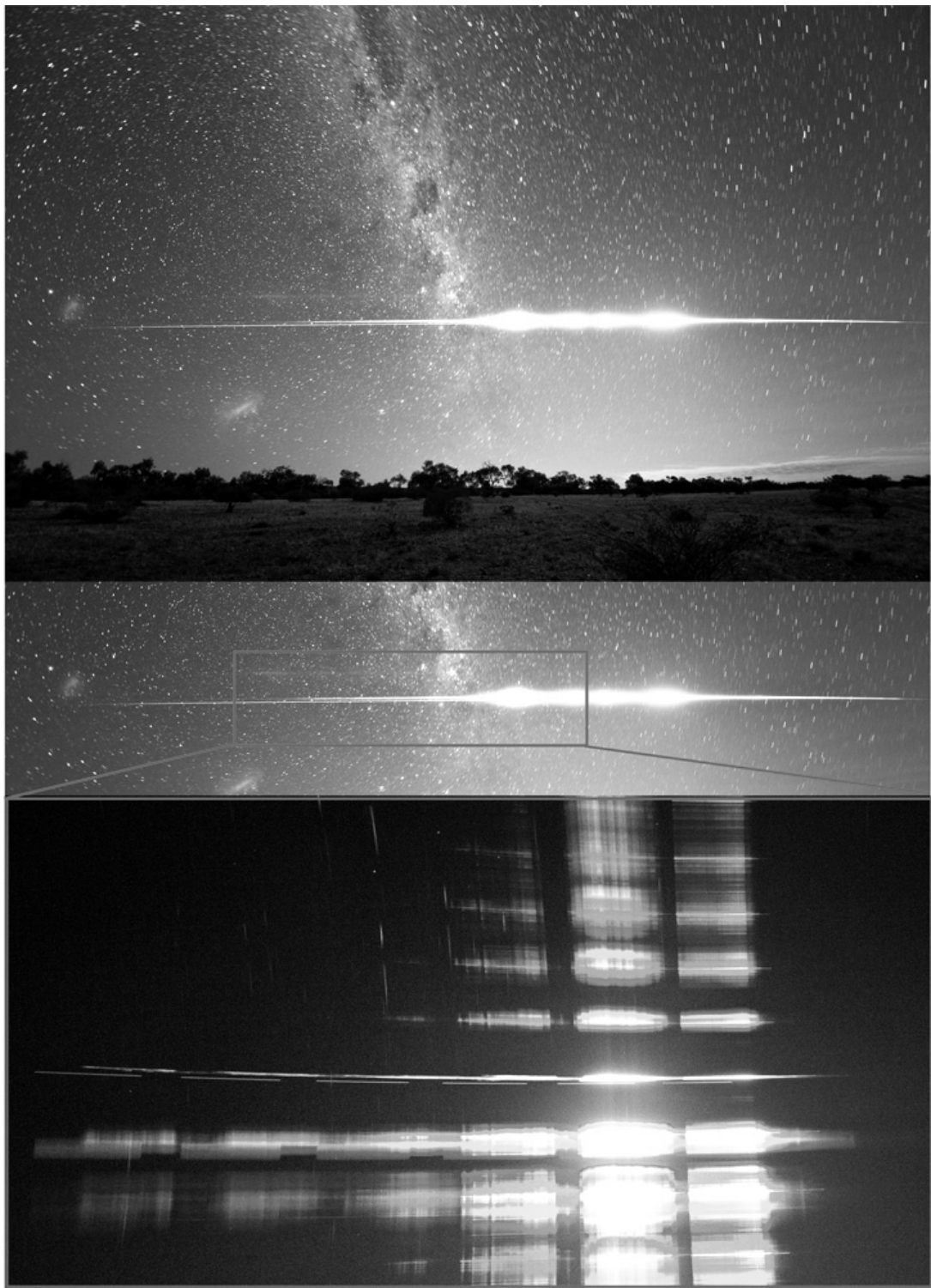


写真1 「はやぶさ」最期の光とそのスペクトル

撮影:(上)2010年6月13日22時50分(LST)より3分間の固定撮影。Canon EOS5DmkII, AF-S NIKKOR 14-24mm f/2.8G ED (14mm, F=2.8)。 (下)2010年6月13日23時52分18秒(LST)より10秒間のデータを合成。Canon EOS5DmkII, 24mm (F=2.8)+グリズム
撮影地:南オーストラリア州、クーバービディ西部20km

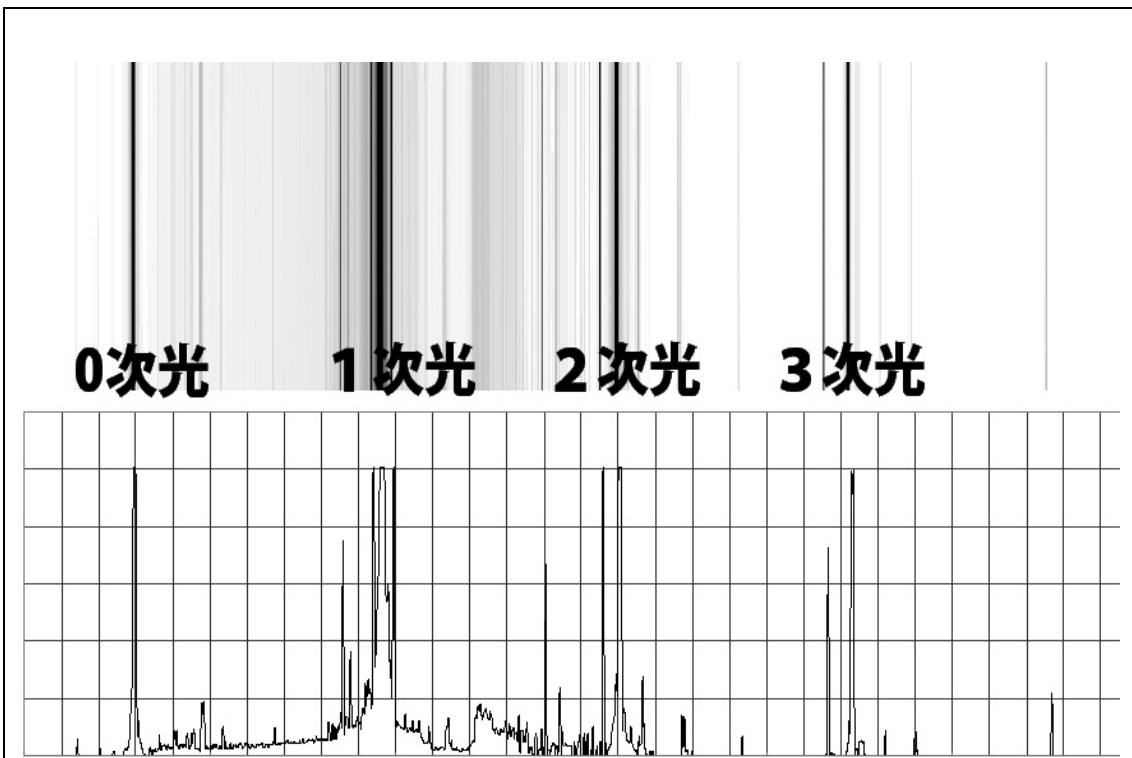


写真2 Naの分光による波長校正

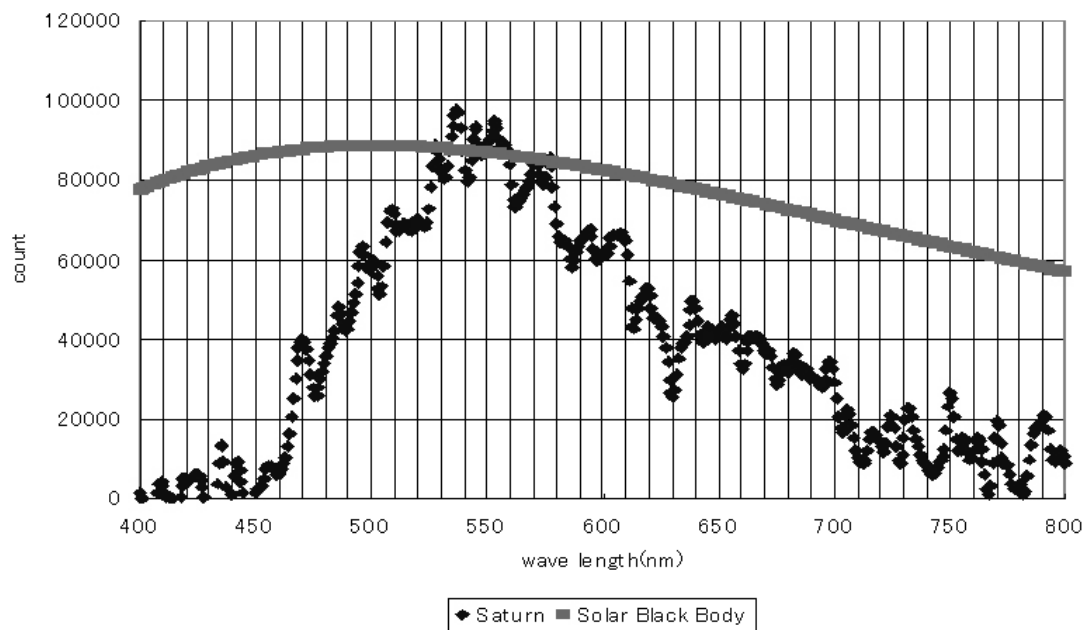


図1 土星のスペクトル

2. 解析手順

1. デジタルカメラの RAW データを FITS データに変換する
2. ダークデータより、補正用ダークフレームを作る
3. フラットデータより、補正用フラットフレームを作る
4. 分光観測したデータを 1 次処理する。
5. レファレンスには、「はやぶさ」と同じフレームに入っている土星（30 フレーム）の加算平均を使う
6. $((1 \text{ 次処理データ}) \div (\text{土星のスペクトル})) \times (\text{土星の基準スペクトル} \sim \text{太陽黒体放射})$
7. 波長校正には、実験室で Na,Cd,Hg ランプで観測システムで分光したデータを使う。

図 1 は土星のスペクトル(2 次光)である。このデータを使って、強度補正を行った。

3. 解析結果

図 2 は、高度 60 k m 以降のカプセルのスペクトル変化を示す。この図を見ると、短波長の方が長波長より強く見えている。実は、このスペクトルを見た瞬間、「解析を間違えた」と思ってしまった。なぜなら、このスペクトル分布を熱放射の温度と見なすと、2 万度という高温になるからだ。これでは、カプセルが溶けてしまう。そこで、カプセルが見えなくなる直前のノイズの多いデータも解析してみた。すると、カプセルが光らなくなる高度 40 k m 付近で、スペクトルが右側に傾き、図 3 のように約 3000K の熱放射が見えてきた。この結果を見た瞬間、「はやぶさ」最期の光の秘密を理解した。すなわち、「はやぶさ」カプセルの発光は、普通の流星と同様に、ほとんどが大気（窒素分子）の励起による発光だったのだ。高度が下がるにつれ、大気が発光が弱くなって（注 3）、カプセルの熱放射が見えてきたわけだ。しかしながら、なぜ「スターダスト」の結果と異なったのだろうか。それは、「はやぶさ」カプセルサイズが、直径わずか 40cm と「スターダスト」の半分以下だったからだ。このため、カプセル表面からの熱放射が小さかったのだ。

このように、「はやぶさ」のリエントリー・カプセルは、まさに“流れ星”として地球に帰ってきたのであった。

(注1) 空力加熱とは、物体が空気中を運動すると、圧縮され高温になった空気から物体が受ける加熱のことである。

(注2) 「スターダスト」は、彗星のサンプルリターン計画として、2004 年 1 月、ヴィルト第 2 彗星の尾の中に突入し、2006 年 1 月、カプセルが地球に帰還した。

(注3) 空気抵抗による減速のため、空力加熱が弱まり発光出来なくなる。その後、発光しないダークフライト状態となって落下する。

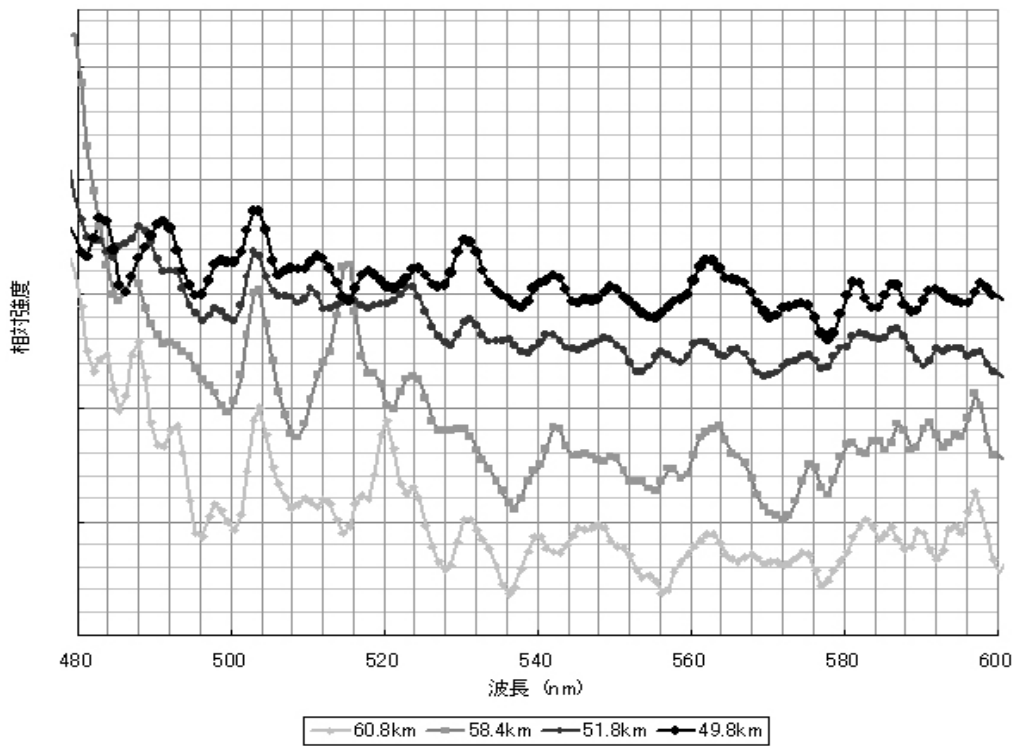


図 2 : 「はやぶさ」カプセルの高度によるスペクトル変化
 横軸は波長、縦軸は相対強度をそれぞれのグラフが重ならないようにずらして表示している。

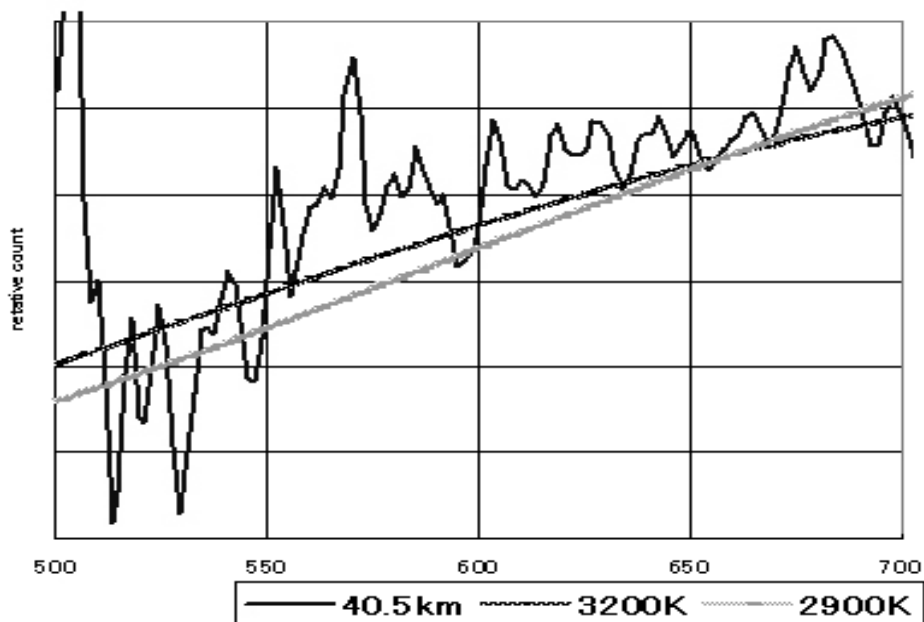


図 3 : 「はやぶさ」カプセル、40 km でのスペクトルと熱放射曲線
 (灰色は 2900K, 黒は 3200K の熱 (黒体) 放射曲線)