

「はやぶさ」再突入カプセルからの放射の航空機観測

弓山彬¹, 丹野英幸², 山田哲哉², 柳澤正久³

¹電通大・院, ²JAXA, ³電通大

1. はじめに

小惑星探査機「はやぶさ」の再突入カプセルは、2010年6月13日13時51分(UT)、豪州上空の高度200kmにおいて約12km/sの速度で大気へ突入した。大気突入時にカプセルは、最大で15MW/m²と見積られる過酷な空力加熱を受けて加熱され、同時に突入した探査機母船と共に豪州の夜空に明るく輝いた。

「はやぶさ」ミッションにおいては、地上からの光学観測の他に、日・豪・米・欧の国際協力による航空機観測実験が行われた。航空機による観測は、天候(曇天)に左右されない点で地上観測に比べて有効な手段であり、NASAが有する光学観測専用機に改修された航空機(DC-8 Airborne Laboratory)を用いて、高々度からカプセル再突入時の光学観測が行われた。

2. 研究の目的

大気突入時の過酷な加熱環境から機体を保護するための耐熱材料は再突入を成立させるためのキーテクノロジーである。耐熱材料の開発においては、飛行環境模擬装置を用いた地上加熱実験が行われるが、実飛行での高エンタルピー環境(はやぶさの場合で最大144MJ/kg)を完全に地上で模擬することは困難である(アーク風洞実験設備の場合最大20MJ/kg)。耐熱材料

の性能評価の指標である表面損耗は、温度と圧力の関数で表される。高エンタルピー環境下での表面温度は、地上加熱実験で取得したデータを用いて数値計算等で外挿する以外に知る手立ては無く、実飛行環境での表面温度変化をそのまま観測することの意義は非常に大きい。

本研究では、独自に製作した簡易分光器を光学観測用航空機に設置し、「はやぶさ」再突入カプセルからの放射光観測を行った。その観測データよりカプセル表面温度の時間履歴を推定・取得することが本研究の目的である。

3. 観測システムの構成

3.1. 観測システム

観測システムの概観・概略図を図1に示す。航空機上での光学機材の運用は未経験であること、また、一人でも移動・設置・取り扱いが可能であることが求められたことから、分光器は頑強性も狙って単純な構成を目指した。

分光器の構成は、高感度CCDビデオカメラ(Watec, WAT-120N+)に望遠レンズ(固定倍率, BORG 325mm 及び Celestron Reducer f/6.3)を取り付け、ビデオレコーダ(Sony, GV-D800)へ接続された形態となった。レンズとCCDビデオカメラの間には、4種類のバンドパスフィルタ(BPF, 詳細は後述する)を組み込んであり、異なる波長の強度変化(時間履歴)を30frame/secでビデオテープに記録する。なお、4台のカメラの時刻同期を取るため、航空機がGPSから受信した基準時刻(UTC)をビデオ映像へのインポーズ(KIWI-box)を行った。

3.2. 観測波長の選定

加熱率に対する放射平衡温度特性と、地上加熱試験時の表面温度の測定結果を図2に示す。図2より、放射平衡温度と地上加熱実験での表面温度との間に大きな差異は無いこと、加熱率が1~15MW/m²の範囲における放射平衡温度は2000~4000Kの範囲に収まることがわかる。この温度範囲での黒体放射を仮定し、過去の再突入機(Stardust)の光学観測結果を参考にフィルタの選択を行った。本観測では、中心波長での透過幅(FWHM)が2~4nmと狭帯域であることから、Semrock社のLaserLineフィルタ(中心波長: 514, 543, 785, 1064nm)を選択した。

しかし、観測後の校正において今回使用したフィルタは中心波長の近傍±200nm程度の帯域では非常に良い遮断特性を示すが、その外側では高次項の影響によって光の遮断特性が低下する(多くの光を透過させる)ことがわかった(図3)。そのため、当初想定していた狭帯域フィルタではなく、広帯域フィルタであることを念頭に表面温度推定へ向けて解析を進める。

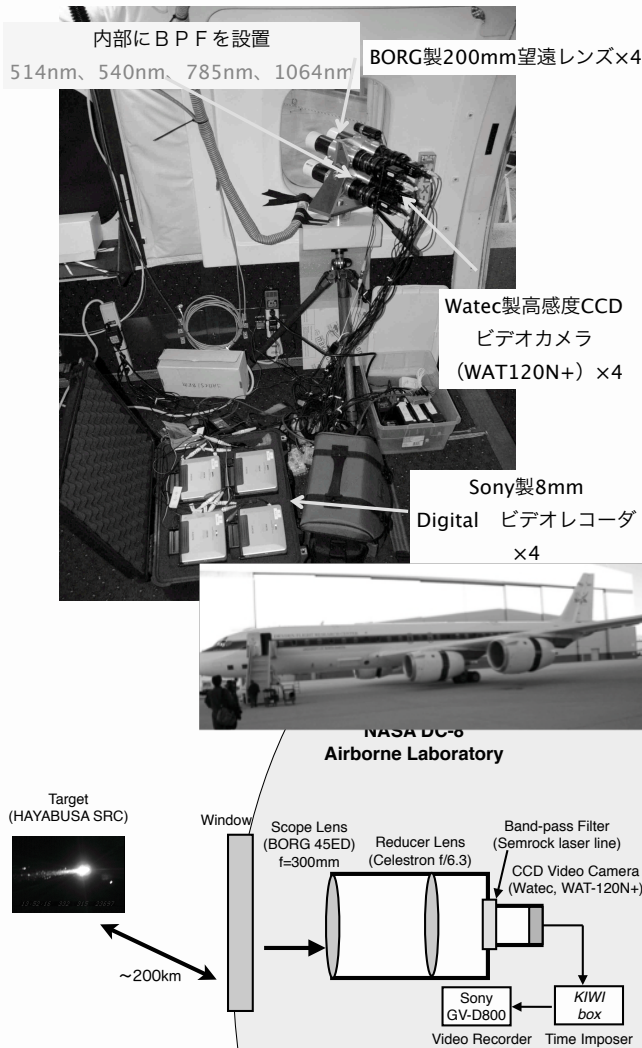


図1. 4波長分光計測システム

上: 航空機内に据え付けられた簡易分光器

下: 分光計1系統のシステム概略図

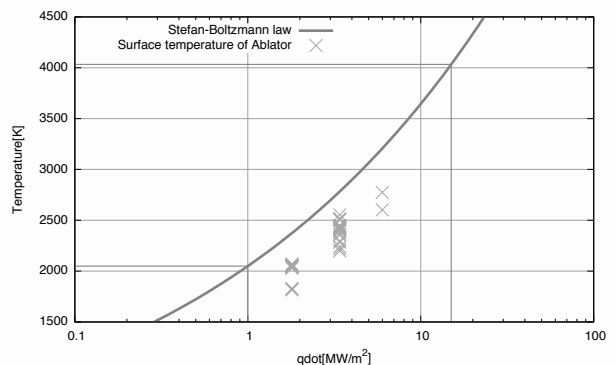


図2. 放射平衡温度、アブレータ表面温度と加熱率の関係

加熱率が1~15MW/m²の時の表面温度は2000~4000Kとなる

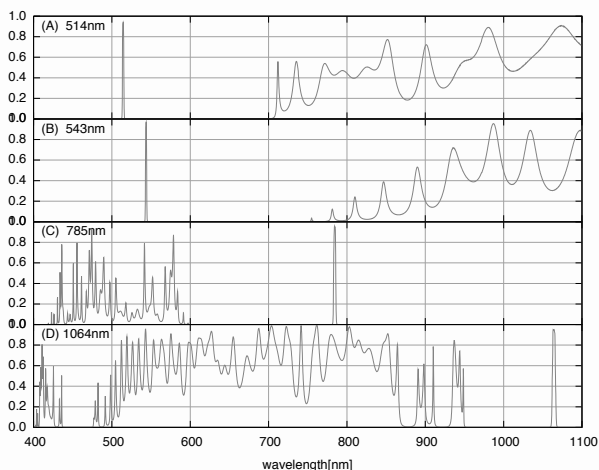


図3. 簡易分光器に使用した光学フィルタの波長透過特性

4. 計測結果の解析

簡易分光器により取得したデータは、4台のビデオテープに独立に記録されており、シャッタータイミング、取り付け角等に差異があるため、そのままでは解析を行うことはできない。よって、まずは画像中のカプセル近傍部のみを切り出す前処理を行った後に、画像中に記録されたGPS時刻を参考に同一時刻（最大で±30msecの誤差を含んでいる）のカメラ間の輝度変化から表面温度推定を目指す。

4.1. 前処理（カプセル部位の切り出し）

記録された映像(DV形式)から、カプセル再突入前後の約50秒間(約1500フレーム)をBMP形式の画像へと変換した。画像中に記録されているGPS時刻に基づいて画像間の時間を対応させた。

画像中のカプセル位置の自動検出は行わない方針としたが、処理すべき画像数は1500枚×カメラ4台=6000枚に及ぶため、カプセル位置の指定支援ツールを作成した(図4)。ある時刻における4枚の画像のうち、1枚の画像上でカプセル位置を指定することで、カメラ間の相対位置のズレから他の3枚の画像上でのカプセル位置を推定する機能他、表面温度推定に必要な機能を実装した。

4.2. 表面温度の推定

本観測で使用したフィルタの波長感度特性は、図3に示した。また、CCDの波長感度特性を図5に示す。図3、図5を掛け合わせることで、白色光を入射させたときに得られる画像の輝度を求めることができる。

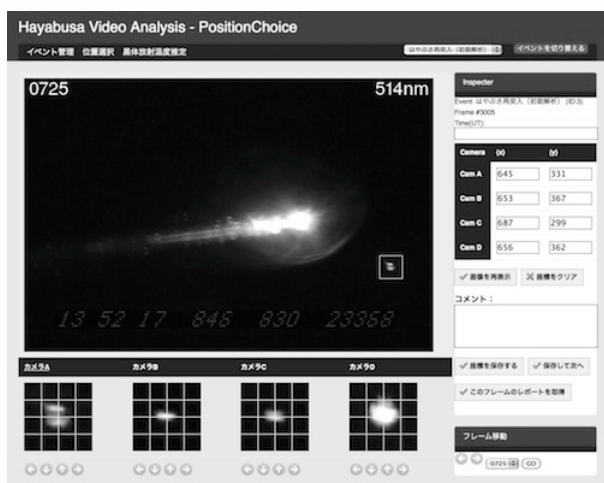


図4. 画像中のカプセル近傍部切り出しソフトウェアある時刻における1枚の画像上でカプセル位置を指定すると、他3枚の画像上の位置を推定し、輝度情報を出力する。

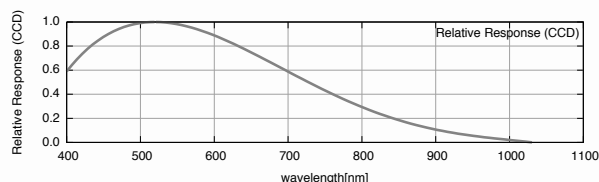


図5. CCDの波長感度特性（ピークを1とする相対感度）

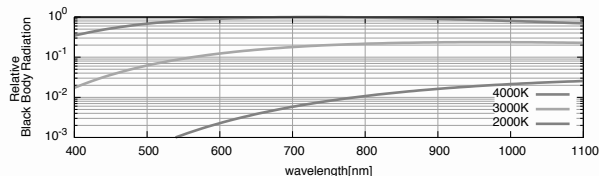


図6. 温度4000[K]の黒体放射ピークで正規化した黒体放射(表面温度4000, 3000, 2000[K]の場合について示す)

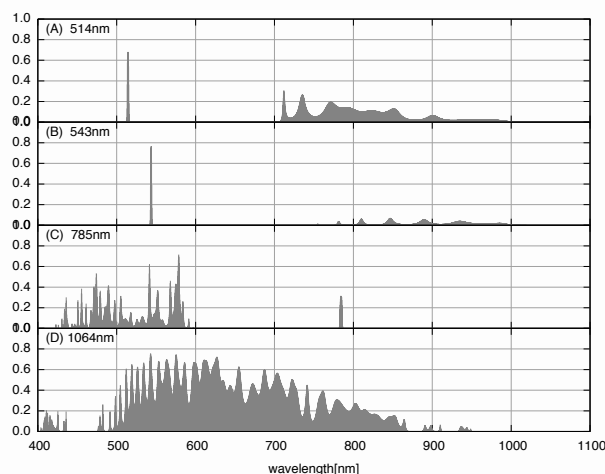


図7. 光学フィルタを取り付けた状態で黒体放射体(4000K)を観測したときに、CCDに入射・記録される光エネルギーの波長特性

本観測では、カプセルは黒体放射していることを仮定しており、表面温度によって放射強度は異なってくる。図6に、表面温度4000[K]のピーク強度を1とする相対強度で、黒体放射強度を示した。図3、図5に加えて図6を掛け合わせることで、黒体放射体を観測したときに得られる画像の輝度を計算することができる。表面温度4000[K]の黒体放射体を観測した時に得られる画像の輝度は、図7に示す塗りつぶされた面積に比例する。

黒体放射体の温度を変化させたときの、図7の塗りつぶされた面積の変化は、画像輝度の変化に比例する。4台あるカメラ画像のうち、任意の2枚の輝度の比から、表面温度を推定する。図8に、カメラD(1064nm)と、カメラA(514nm)の輝度の比と、温度との関係を示す。取得した画像の一部は、航空機の振動等による画像のブレ、明るすぎることによるサチュレーションが発生しているため、解析に適する画像のみを選択して表面温度推定を進めていく。

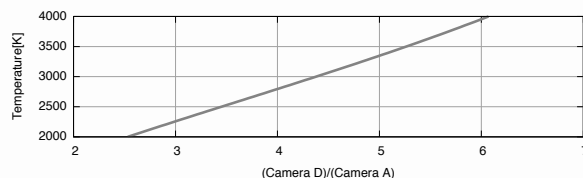


図8. カメラDとカメラAの画像輝度の比と表面温度の関係

5. 現状及び今後の課題

現在は、図8に示した画像輝度の比と表面温度の関係を4台カメラの任意の組み合わせについて取得を終え、観測データへの適用を行っている。今後は、解析支援ソフトウェアの機能拡充を進め、再突入時のカプセル表面温度の時間履歴取得を目指す。