

Web 動画の解析によるチェリャビンスク火球の光度曲線

柳澤正久(電気通信大学)

2013年2月15日3時20分(世界時, 地方時では9時20分)にロシア南西部の都市チェリャビンスク(Chelyabinsk)近郊で観測されたチェリャビンスク火球は, 地上への激突はなかったが, 高度20~30 kmで爆発し, 発生した衝撃波が半径30~40 kmの範囲にわたって窓ガラスを破り, 1500人程の怪我人を出した[1]. 爆発規模はTNT爆薬400-500 kton相当で(1 kton = 4.2×10^{12} J), 1908年のツングースカ爆発に次ぐ大きさだった[2]. これに伴い多数のLL5コンドライトが回収された[3]. また, 火球は車載カメラを含む多くのモニターカメラによって撮影され, その画像がインターネット上に公開された. これらの解析から衝突天体の軌道がアポロ型小惑星のものであったことも報告されている[4]. 我々は動画の一つを解析し, 明るさと色の時間変化を調べた. 結果は, 大気への突入から爆発までを高い時間分解能で調べることのできる貴重な基礎データとなる.

解析した動画はアレクサンダー・イワノフ(Aleksandr Ivanov)氏がチェリャビンスク市の北北東140 kmにあるカメンスク・ウラリスキー(Kamensk-Uralsky)市から車載カメラで撮影しYouTubeで公開したものである(図1)[5]. 交差点での停車中に記録されたものであり, 動画のサイズは640×360画素(横×縦), 時間分解能は30フレーム/秒である. また, 天気は快晴だったことが分かる. 火球が最も明るくなった時刻は, NASAの発表では2013年2月15日3時20分33秒(世界時)[2], 動画に記録された時刻では31.5秒である. 本解析ではNASA発表の時刻が正しいとし, 以後は動画の時刻に1.5秒を加えた時刻を使う.

解析は以下の手順で行った. なお, カラーのRGBに対応する波長は650 nm, 550 nm, 450 nmであるとした.

(1) 観測地点をGoogle地図, 航空写真, 散策画像から決定する.

(2) 図1に下向き矢印で示す聖堂像の縦横比を他の写真での比とくらべ, 画像の縦横比に歪みがないことを確認する.

(3) 図1に示す地平線の位置を仮定し, 下向き矢印で示す聖堂と2本の木の位置とこれらのGoogle航空写真での位置から, 視線方向と視野を決定する.

(4) 各フレームでの火球の方向から, 地表への投影がコルキノ(Korkino)市とチェバルクリ(Chebarkul)湖を通る[4]として, また地表は平面であると仮定して火球の位置を決定する.

(5) イワノフ氏の車が, 火球出現前に, 前で停車中の別の車の尾灯に接近していくのを利用



図1. 動画の3フレーム(3時20分25, 29, 33秒)の合成. 明るさとコントラストは調整されている.

して、カメラへの入射光量とカメラ出力の関係を求める(後者は前者に比例しない)。

(6) カメラのオートゲインコントロールあるいはオートアイリス機能によるカメラの感度の時間変化を、図 1 に上向き矢印で示した反対車線に停車している車のヘッドライトの光度は一定であるとして RGB の各バンドについて求める。

(7) 火球像は画素値が著しく飽和しているので、火球光は雪面で 100 % 等方散乱されると仮定して、図 1 に示した雪面の明るさを測定する。

(8) レイリー散乱と大気吸収を考慮して図 1 に示す空の領域の明るさを理論的に計算する。一方、火球出現前のフレームで、空と雪面の明るさの比を測り、出現前の雪面の明るさの絶対値を得て、明るさの基準とする。

(9) 火球から観測点までの大気吸収を補正し(地表は平面と仮定)、火球の光度を求める。

図 2 に、火球の高度、カメラの感度、大気による吸収(滑らかな曲線)、光度をまとめて示す。光度最大の前後は RGB で光度比は 3500 K の黒体放射と矛盾しない。そこで、この放射を仮定した場合の全波長での積分値を図 2(c)の右縦軸で示す(破線を読むこと)。

光エネルギーの殆どは 31.5~33.5 秒の約 2 秒間に放射されている。ピーク前後の 1 秒間では、3500 K の黒体放射を仮定した場合の光度は 2×10^{14} W になる。この時の高度は約 30 km である。距離による減衰と大気吸収を考えると直下点でのフラックスは約 1×10^4 W m⁻²

となるが、これは大気吸収を受けた太陽光フラックスの約 13 倍である。

また、3500 K の黒体放射を仮定した場合の全放射エネルギーは 99 kton となり、これから経験式[6]を使って推定される衝突エネルギーは 480 kton となる。

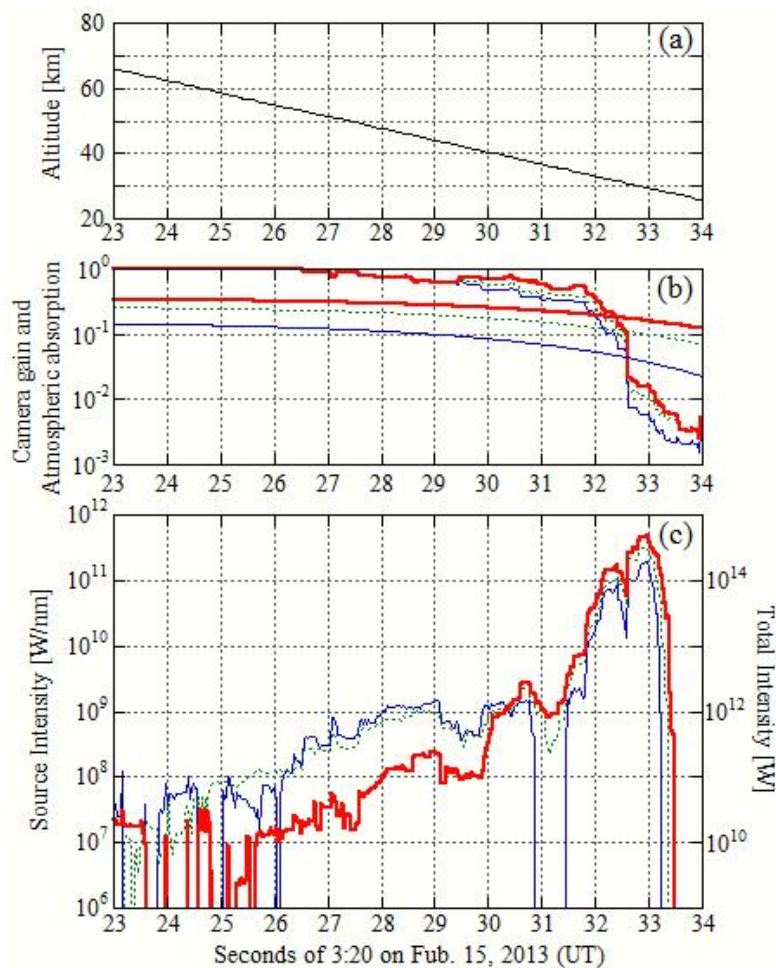


図 2. 火球の高度(a), カメラゲインと大気吸収(b), 光度(c)の時間変化. 太線, 破線, 細線は RGB に対応する.

参考文献: [1] Emel'yanenko, V. V. et al., 2013. Solar System Research, 47, 240. [2] Yeomans, D., 2013, http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html (last browsing: Dec. 2013). [3] Galimov, E. M., 2013. Solar System Research, 47, 255. [4] Zuluaga, J. I. and Ferrin, I., 2013, <http://arxiv.org/abs/1302.5377> (last browsing: Dec. 2013). [5] Ivanov, A., <https://www.youtube.com/watch?v=iCawTYPtehk> (last browsing: Dec. 2013). (YouTube からの直接取得はできなかったため、次のサイトにある同一の動画を取得し解析した) http://www.youtube.com/watch?v=Uol9hOU_TvI&list=PLn0x41FIfwXJy9gN50UDy0K1Q50gyWOtk. [6] Brown, P. G. et al., 2002, Nature, 420, 294.

(追記) 本研究の詳細を日本惑星科学会誌「遊星人」に投稿中。