

チェリャビンスク大火球からの熱線

柳 澤 正 久

〈電気通信大学情報理工学研究所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1〉
e-mail: yanagi@uec.ac.jp



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）近郊に現れた火球（チェリャビンスク火球）では，天体がそのまま地上に激突することはなかったが，高度約30 kmで爆発が起きた．発生した衝撃波は半径30-40 kmの範囲にわたって窓ガラスを破り，怪我で約1,500人が手当てを受け，およそ100人が入院した．また，窓枠や壁が壊れるなども含め，チェリャビンスク州の11の町で7,300棟ほどの建物が被害を受けた．爆発規模はTNT爆薬換算で500千トンであった．われわれはインターネット上に公開された動画を解析し，火球の発光強度を調べた．その結果，光エネルギーが熱線として爆発的に放射されたこと，また，その火球直下の地表での強度は，もう少し規模が大きかったら熱線火傷を引き起こしかねないレベルだったことがわかった．

1. チェリャビンスク大火球

一つのごく小さなアポロ型小惑星（以後メテオロイドと呼ぶ）が地球に近づいてきた．太陽方向からの接近だったのでスペースガード望遠鏡¹⁾の監視の目をすり抜けた．直径約20 m，隕石でいうとLL5コンドライトと分類される岩石質の組成をもっている．日本のはやぶさ探査機がサンプルをもち帰った小惑星イトカワと同じだ．地球をかすめるように進みながらカザフスタン共和国とロシアの国境付近で明け方の地球大気に浅い角度で突入した．秒速19 km，超高層大気中を青白い航跡を残しつつ進み，やがて成層圏へ．大気密度は急激に高くなっていく．減速に伴う負の加速に耐え切れず高度40 kmで分裂開始，高度30 kmで爆発的分裂を引き起こした²⁾．分裂により大気の流れを受け止める実効断面積が急増し，はじめにもっていた運動エネルギーを衝撃波や光として爆発的に解放した．この爆発による衝撃波はほぼ音速で進み約2分後，ロシア・チェリャビンスク市

とその近郊を襲った³⁾⁻⁵⁾．メテオロイドは大気中でほとんど蒸発してしまったが，ごく一部は速度を落として更に飛翔，氷ったチェバルクリ湖や雪で覆われた地表に落下した．回収された隕石は，チェリャビンスク隕石と命名された．

核実験を監視している衛星が火球からの光を捉えた．光の強度からこのような火球の爆発規模を推定する経験式をもっている⁶⁾．それによるとTNT爆薬500千トンに相当（1千トンのTNT爆薬がもつエネルギーは 4.2×10^{12} J），広島・長崎原爆の約30倍であった⁷⁾．人には聞こえない超低周波音（インフラサウンド）を観測する装置も世界中に設置され核実験を監視している．これも信号を捉え爆発規模を計算した．爆発規模は地震計測からも推定された．これらの結果はほぼ同じであった⁷⁾．100年前に起きた天体衝突が原因と考えられるロシア・シベリアのツングースカ爆発（1908年）に次ぐ規模だ．TNT爆薬1,500万トン相当の規模と見積もられているこの出来事では，半径20-30 kmほどの範囲で樹木がなぎ倒され，

中心付近では焼け焦げた⁸⁾。幸い人の住まない地域であったため犠牲者の報告はなかった。

チェリャビンスク大火球は、現代社会が遭遇した初めての天体災害であった。窓ガラスの破片による怪我という古代ではありえなかった被害があった一方、電子機器とインターネットの普及により、多くのモニターカメラがこの現象を記録し、動画がその日のうちにインターネット上に公開された。以下では、これを利用して火球のライトカーブ、つまり明るさの時間変化を調べる。

2. Webデータの解析

2.1 Google Mapの威力

まずは解析に適した動画を探し出す。アレクサンダーイワノフ (Aleksandr Ivanov) 氏が車載カメラで撮影しYouTubeで公開した動画⁹⁾ (図1, 図2) がよい。利点は、交差点での停車中に火球が記録されたことである。さらに全長2分半のこの動画には、カメラの特性や当時の天候を知るのに役立つシーンが多く含まれている。

まずは観測点を知る必要がある。動画に映った火球の動き方から目星をつけてGoogle Mapでそれと思いき町の航空写真を徹底的に見ていく。目印は図1右側にある特徴的な建築物だ。そして、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) 市の



図1 解析に使った動画の1コマ (火球が最大光度を示した瞬間)。チェリャビンスク市の北北東140 kmにあるカメンスク・ウラリスキー市からアレクサンダーイワノフ氏が撮影。

聖アレクサンドル・ネフスキー聖堂のある交差点からの撮影だと判明する。Google Mapの航空写真には、左側の2本の木、右端の信号機がハッキリと写っており、街灯のポールも識別できる。さらにGoogle Mapのストリート・ビューを使うと、火球撮影前後の運転中にどこを走っていたかがコマごとに2 mぐらいの精度でわかる。

動画の中には縦と横で縮尺が異なり、像が横方向に伸びていたりするものがある。そこで、多くのGoogle投稿写真とこの動画で聖堂の縦横比を

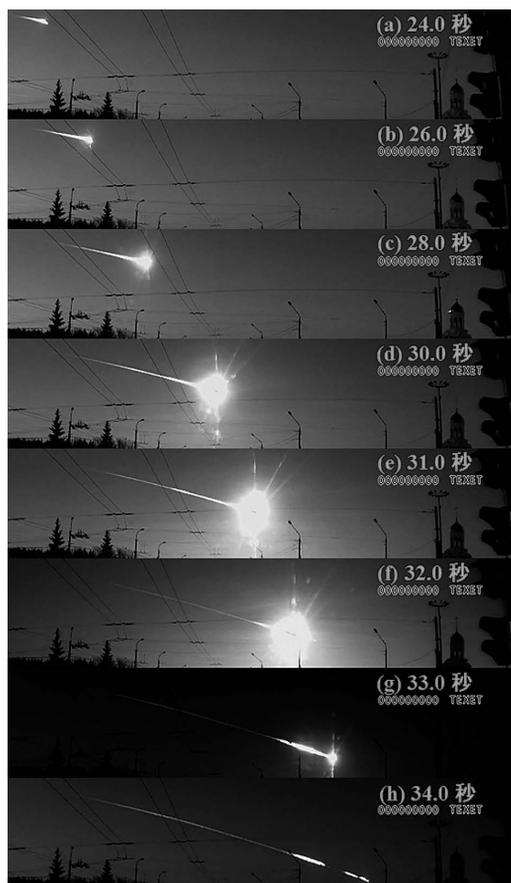


図2 チェリャビンスク大火球の時間変化。図1と同じ動画からの抜粋。カメラへの入射光量とカメラ出力値の非線形性、およびカメラ感度の時間変化に関する補正はしていない。各フレームには2013年2月15日3時20分の秒 (世界時) を示した。

比べ、縦と横で縮尺が同じであることを確認する。次にGoogle Mapと見比べ、視野の広さや観測時の視線方向を算出する。なお、標高はこの市の代表値をインターネットから取得した¹⁰⁾。正にインターネット様様である。

2.2 様々な工夫

市販のビデオカメラでは実際の明るさと記録されるデジタル値(画素値)は比例していない。ガンマ特性とって、暗いところでは僅かな明るさの違いで画素値が大きく変わり、反対に明るいところでは少々明るさが変わっても画素値はあまり変わらない。どのような特性かわからないと正確な明るさを求められない。そこで、遠くの灯りの画素値が車の接近につれてどう変化するかを調べる。実際の明るさは車からの距離の2乗に反比例するはずだから、これから特性を知ることができる。その結果、このカメラの特性は標準的な市販品と同じであることがわかった。

オート・ホワイトバランスという機能でカメラが勝手に昼間撮影されたかのように色を調整してしまうことがある。一方、この動画では2分半のそれぞれのシーンで、全体が青っぽいはずであるシーンは青っぽく、赤っぽいはずのシーンは赤っぽく映っている。この機能が働いていれば画面全体での平均的色相は同じになるはずだ。オート・ホワイトバランスなしと判断する。

オート・ゲインコントロール、これは感度を自動調整する機能で、通常デフォルトで働いている。この動画でも、火球が最も明るくなったときにはカメラが自動的に感度を下げたためにそれ以前より暗く映っている。何か明るさが一定の基準(天文学では比較星)が必要だ。これには図1で対向車線に停まっている車のヘッドライトを利用した。この基準に対して、火球の明るさがどう変化したかを測ることにする。

基準はできたが、それがいったい何ワットで光を放っているかはわからない。これでは明るさに物理的な単位(例えばワット)が付けられない。

そこで火球出現前の快晴の青空を使う(領域を図1に示す)。空が青いのは、太陽光が地球大気で青い光ほど強くレーリー散乱されるからである。この場合、青空の明るさは理論的に計算できる。これにより画素値を放射強度という物理量に換算できる。ただし、画像のR(赤)、G(緑)、B(青)各バンドを波長650, 550, 450 nm(10億分の1メートル)の単一波長で代表させた。

さて、火球の明るさを測るわけであるが、火球の像は完全に飽和している。そこで図1に示した雪面の明るさを測る。雪面は光を吸収せず、また等方散乱とって入射した光線をどの方向にも同じように散乱すると期待するのである。動画を見ると、火球が動いていく間に、ほかの部分は火球からの光を鏡のように反射する瞬間があり明らかに等方散乱していない。一方、雪面ではそのようなことはない。等方散乱でよく近似できそうである。

3. 火球からの放射

このような工夫によって、RGBそれぞれのバンドでの観測点での放射強度を得ることができ。さらに大気吸収の補正を加え、三つのバンド(それぞれ単波長で代表させている)での火球の分光発光強度のライトカーブを得る^{11), 12)}(図3(a))。縦軸は、火球がそれぞれの波長で波長1 nm当たり何ワットで四方八方に光を放っているかを対数目盛で示す。横軸は時間に換えて火球の高度を示しているが、10 kmが約1.6秒に対応する。図から、高度32 km付近の高度にして数km、時間にして1秒ほどの間に、この火球が光エネルギーの大部分を放出しているのがわかる(縦軸が対数目盛であることに注意)。爆発といってもいい急激なエネルギーの開放があったに違いない。宇宙から帰還する宇宙船のように大気の抵抗を受けつつ徐々に初期の運動エネルギーを失っていくのとは違うのである。

なお、高度40-47 kmでの変化の原因はよくわ

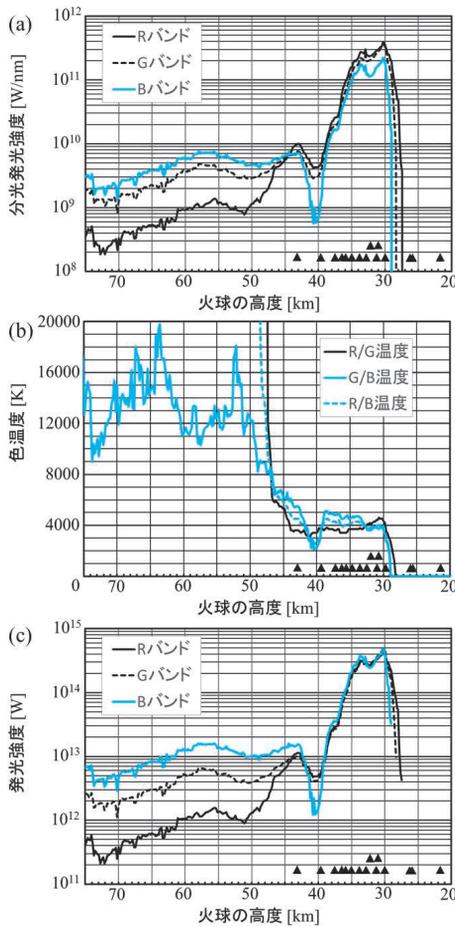


図3 発光強度と色温度の時間変化。(a) 火球が波長1 nm当たりで発した光パワー。(b) 三つの色の組み合わせから計算した色温度。(c) 4,000 K黒体放射を仮定した場合の火球の放射パワー。▲はメテオロイドが分裂した高度²⁾。

からない。特に40 kmでの極小は不思議である。この付近ではBバンドでの発光強度の誤差が60%に達している。原因不明の要素による見かけの極小である可能性が強い。高度50 km付近での極小も同様である。

さて、高密度のガスや、高温液滴、微粒子からの放射は黒体放射で近似できることが多い。そして黒体放射スペクトルは温度に対応したプランク関数で表される(太陽は約6,000 Kの黒体放射をしている)。この関数を使うと二つの波長での放

射パワーの比から温度を計算することができ、色温度と呼ばれている。黒体放射では、色温度はガスや微粒子など物体そのものの温度と一致し、どの二つの波長から計算しても同じ値を示す。そこでまず火球は黒体放射していると仮定する。そして三つのバンドを二つずつ組み合わせ三つの色温度を計算する。仮定が正しければ三つの温度は一致するはずである。結果を図3(b)に示す。高度47 km以上では、三つの温度は明らかに一致しておらず、黒体放射ではないことを示している(この場合、色温度は何の意味もない)。高度80 km前後で光る流星では、鉄、マグネシウム、ナトリウムなどの原子が発する線スペクトルが顕著であり、黒体放射をしていない。チェリャビンスク・メテオロイドも高度47 km以上では一般の流星と似たスペクトルを示していたのだろう。図3(a)から、この期間は赤が弱く、青緑色であったことがわかる。

一方、30-40 kmでは三つの温度が4,000 Kでほぼ一致している。スペクトルが黒体放射のものに似てきたに違いない。なお、図中の▲はメテオロイドが分裂した高度を示している²⁾。上段の二つは特に激しい分裂を示している。分裂に伴い大量の蒸発が起こり、高温、高密度のガス雲ができたのだろう。その中には高温の液滴や微粒子が含まれていたかもしれない。火球が残した赤黒く光る細長く巨大な雲⁵⁾は、このガス雲が冷えたものだろう。

詳細なスペクトルが観測された約2 mのメテオロイドによるベネショフ(Benesov)火球^{13), 14)}(1991年)でも、初めは線スペクトルが卓越しているが、高度が下がるにつれて連続スペクトル成分が増加している。この火球では完全な黒体放射にはならなかったようだが、チェリャビンスク火球では、高温ガス等の量かはるかに多くまた濃密だったはずで、黒体放射になったとしても不思議ではない。

火球が4,000 Kの黒体放射をしていると仮定し



図4 最大光度時の火球(図1の拡大)。中心部の暗い部分が実は最も明るい。長さは8 km。下に映っているのは街灯のポール。

て紫外から赤外までの全波長域で放射したパワーを図3(c)に示す。このグラフは高度47 km以上では意味がない。黒体では温度が決まれば1 m²当りからの紫外から赤外まで全波長域での放射パワーがシュテファン・ボルツマンの法則で決まる。それによれば、図3(c)が示す最大放射パワーを発するには、例えば直径1 km、長さ8 kmの黒体の円柱が必要になる。一方、図1の火球を拡大した図4には真中にちょうどこの大きさの暗い領域が写っている。車載カメラに多く使われるCMOSカメラには極端に明るい部分が逆に暗く映る特性をもつものがある¹⁵⁾。このカメラもそうだったとすれば、この暗い部分こそ火球の主な発光領域である。細長いのは多くの破片に分裂したためであろう。

図3(c)のピーク約 3×10^{14} ワットが高度30 kmで1秒間続いたとしよう。このとき直下の地表で受ける放射エネルギーは大気の吸収がなければ1 m²当たり3万ジュールとなる。放射は近赤外域を中心とする熱線であり、もしエネルギーがこの4倍を超えたら50%の人が軽度の熱線火傷を負う量である¹⁶⁾。チェリャビンスク火球で日焼けを

起こした市民がいるという報告がある⁵⁾。紫外線によるものではなく、熱線によるごく軽い火傷だったのかもしれない。

4. 大火球は爆発だ！

超高層大気中で燃え尽きてしまう流星やごく浅い角度で宇宙から帰還する宇宙船とは異なり、大火球のエネルギー解放過程は爆発的である。一つの理由は、大気密度が高度が下がるとともに指数関数的に増加することである。8 km下がるごとに約2.7倍になる。大気で減速されるというより、大気という固い壁に衝突するのに近い。もう一つの理由は、分裂によって実効断面積が急増することだ。大気からの抵抗力が一気に増え、火球は急ブレーキを掛けられる。そのときもっていた運動エネルギーを激しく開放する。

大気中での爆発で終わる比較的小さな天体の衝突頻度は、地表にそのまま激突してクレーターを作るような大きな天体の衝突頻度よりも高い。一方、衝突エネルギー(初期運動エネルギー)が同じ場合、大気中での爆発は、地表に衝突してクレーターを作る場合よりも大きな被害を与える可能性が指摘されている¹⁷⁾。被害を与えるのは爆風(衝撃波)と熱線だ。今回のチェリャビンスク大火球では、爆風の被害が顕著だったが、もう少し規模が大きかったら、あるいは低高度で爆発していたら熱線による被害も出ただろう。今回の研究で、衝突エネルギーの約20%が1-2秒の間に熱線として放射されたことがわかった。同じ規模の低高度での核兵器の爆発では爆発エネルギーの約40%がやはり1-2秒の間に熱線として放射され悲惨な被害を与える¹⁸⁾。天体衝突による爆発では核兵器同様に熱線も大きな脅威となる。30 kmという遠距離(高高度)での爆発だったのが幸いである。天体衝突に備える際見落としてはならない要素である。

謝 辞

当研究で使用した動画はAleksandr Ivanov氏によって撮影され公開されたものである。そのほかGoogle Mapに投稿された多くの写真も用いた。こうした方々や多くのインターネットサイト運営者に深く感謝する。

参考文献

- 1) 浦川誠太郎, 他, 2013, 遊星人22, 222
- 2) Borovicka J., et al., 2013, Nature 503, 235
- 3) 高橋典嗣, 吉川真, 2013, 遊星人22, 228
- 4) Emel'yanenko V. V., et al., 2013, Solar System Research 47, 240
- 5) Popova O. P., et al., 2013, Science 342, 1069
- 6) Brown P., et al., 2002, Nature 420, 294
- 7) Brown P. G., et al., 2013, Nature 503, 238
- 8) Vasilyev N. V., 1998, Planet. Space Sci. 46, 129
- 9) <https://www.youtube.com/watch?v=kFlpCT3v12E>
- 10) <http://dateandtime.info/citycoordinates.php?id=1504826>
- 11) 柳澤正久, 2014, 遊星人23, 82
- 12) Yanagisawa M., 2015, Planet. Space Sci. 118, 79
- 13) Borovicka J., Spurny P., 1996, Icarus 121, 484
- 14) Borovicka J., Berezhnoy A. A., 2016, Icarus 278, 248
- 15) 中村淳一, 2012, CMOSイメージセンサ, 映像情報メディア学会編 (コロナ社), 91
- 16) Glasstone S., Dolan P. J., 1977, The Effects of Nuclear Weapons, 3rd ed. (US Gov. Printing Office), 565

- 17) Boslough M. B. E., Crawford D. A., 2008, Int. J. Impact Eng. 35, 1441
- 18) Glasstone S., Dolan P. J., 1977, The Effects of Nuclear Weapons, 3rd ed. (US Gov. Printing Office), Chapter VII

Thermal Radiation from the Chelyabinsk Superbolide

Masahisa YANAGISAWA

University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

Abstract: On Feb. 15, 2013, a meteoroid with a size of about 20 m plunged into the terrestrial atmosphere at 19 km s^{-1} and burst at an altitude of about 30 km over the city of Chelyabinsk, Russia. Here we present light curves for the superbolide in R, G, and B color bands, derived from an analysis of a video that was recorded by a dashboard camera. Our results demonstrate that most of its radiation energy was released in near-infrared wavelengths within a period of about a second associated with the severe fragmentations of the meteoroid.