

## 速度変化から推定する低速火球の破碎 Fireball Fragmentation Estimation by Deceleration

司馬康生

### 要旨

自動TV観測網で得られた低速で、低空まで達した火球の速度変化を詳細に調べた。その結果、いくつかの火球では破碎の兆候が速度変化から読み取ることができた。また、流星速度決定のためには指数関数近似より優れた速度近似法も必要かもしれない。なお、指数関数近似から決定される定数“k”が経路仰角との相関があることがわかった。

### 1. 基礎的なデータ

本研究では、SonotaCo Network による観測データのみを使った。SonotaCo Network では高感度 TV カメラによる映像を、自動検出ソフトウェア"UFOCapture"を使い検出、記録し、それを各観測者が解析ソフトウェア"UFOAnalyzer"を使い整約を行っている。さらに、これらのデータを、上田昌良氏が収集し軌道計算をされた。この数値をいただき、改めて計算処理を行った。

最初に、飛行距離に基づく流星速度の指数観測近似を使った。これは、流星の速度変化を次の式で近似する方法である。(Babadzhanov et al 1980)

$$v = v_{\infty} + c \exp(kt) \quad (1)$$

ここで、 $c, k$  は定数、 $t$  は発光点を 0 としたときの時間である。 $v_{\infty}$  は大気突入前の推定速度である。なお、 $t=0$  の時の速度は、 $v_0$  (突入初速) である。(1) 式を時間積分した次の式、

$$L = \Delta l + v_{\infty} t + c \exp(kt) / k \quad (2)$$

に基づき、仮定した定数を使って飛行距離  $L$  を算出し、観測と比較した。このとき、2つの定数  $c, k$  と  $v_{\infty}$  は試行錯誤で観測値に近くなるよう決定した。ここで  $\Delta l$  は時間 0 での観測位置誤差である。

このときの飛行距離  $L$  の観測と計算の差 (O-C) を表す図が、精度の高い  $v_{\infty}$  を決定するために有用であることは (司馬、上田 2010) で紹介した。ここでは、同じ図を火球の微妙な速度変化を読み取るために使った。

次に、隕石物質の大気内落下のモデル計算 (長沢 1980) をコンピュータ上で行い、観測と比較した。モデルでは多くの仮定値を使う。初速は、指数関数近似による得られた値を使っている。とりわけ熱輸達係数 (heat transfer coefficient)、超音速飛行における抵抗係数 (drag coefficient)、大気突入時の質量に着目し、観測値を再現できる組み合わせを探った。熱輸達係数と抵抗係数は、飛行中に定数では無く変数として振る舞っているはずの数値だが、計算の都合上定数としている。熱輸達係数は、隕石物質と大気との衝突エネルギーのうち、質量欠損に振り向けられる割合で、0 から 1 の間の値を取る。質量欠損の理由は 2 つで、アブレーションによる蒸発と、破碎である。蒸発熱は成分物資が多少変わっても大差は生じない。従って、多数の例から求められる熱輸達係数の最低値を示す例が、アブレーションのみが起きている例で、破碎がほとんど関与しない状態を示していると推定できる。表 1 における最低値は 0.05 付近らしい (0.002 もあるが) ことから、それに近い熱輸達係数であれば破碎はほとんど無かったと思われ、それ以上の数値を採る例では質量欠損に破碎が関与していると推定する。ただ、この計算では推定困難な数値推定を含むため、定量的な評価は難しい。抵抗係数は、大気減速程度を決定する数値で、超音速下における球形物体では理論値 1.0 となる。この数値が大きくなると減速が効くため、アブレーションが抑えられ質量欠損が小さくなる。

この計算の結果から時間-地上高度の関係に着目し、観測と計算の比較図を作ることで、観測をうまく表現できているか検証しやすい。つまり、速度変化の一致、不一致がこの図に良く現れる。

## 2. 個々の火球データ

調査対象は、突入速度が遅く消滅点が高い火球である。これらは、映像から破砕を読み取ったり、速度変化から破砕を推定することが比較的容易である。また、隕石落下を研究する上で、特に重要である。手元のデータから表1の18例を選んだ。これらの各数値の多くは、本研究のために再計算した結果であり、これまでに公表した値と違う数値も含まれている。

それぞれの火球で2つずつの図を付けたが、それぞれの「計算」は上記の通り違う計算であることに注意を払って欲しい。

表1 評価に使った低速火球

表の項目は次のとおり。YMD\_hms：年月日\_時分秒、発光点,消滅点：記録された光跡の発光消滅点の高度、経路仰角：全経路の平均仰角、破砕映像：映像の中に破砕を認められるかどうか、 $v_{\infty}$ , c, k：流星速度を指数関数近似したときの各定数、熱輸達係数, Cd2, Mi, Mt：隕石落下シミュレーションを行ったときに採用した数値。それぞれ、熱輸達係数、超音速飛行下の抵抗係数、突入時の質量、結果としても落下質量（予報）

YMD_hms (JST)	発光点 [km]	消滅点 [km]	経路 仰角	破砕 映像	$v_{\infty}$ [km/s]	c	k	熱輸達 係数	Cd2	Mi [kg]	Mt [kg]
20080302_040502	91.16	25.79	55.8°	Yes	19.55	-0.029	1.40	0.15	1.0	0.62	0.01
20091106_202901	84.76	24.94	50.8°	Yes	13.26	-0.0175	0.93	0.05	1.0	2.4	1.45
20091204_190947	75.69	33.37	74.4°	Yes	16.80	-0.045	1.83	0.09	1.0	0.07	0.02
20100122_210837	75.77	29.85	70.6°	No	17.33	-0.097	1.40	0.13	1.0	0.25	non
20100124_040304	100.64	31.34	45.3°	Yes	22.91	-0.044	1.25	0.06	1.0	0.065	0.008
20100330_234117	82.79	29.94	35.0°	Yes	16.343	-0.089	0.748	0.09	1.0	0.25	0.06
20110226_002033	73.43	24.21	63.4°	No?	14.74	-0.07	1.13	0.09	1.0	0.8	0.26
20110726_013304	91.90	33.06	39.9°	Yes	16.448	-0.0705	0.721	0.03	1.3	0.4	0.10
20111204_203555	89.03	32.91	62.1°	No	14.8	-0.007	1.57	0.20	0.6	0.12	0.01
20120802_035156	71.5	36.59	11.1°	Yes	14.59	-0.065	0.358	0.45	1.0	3.8	0.02
20121226_215914	90.34	30.56	70.3°	Yes	20.63	-0.011	2.18	0.15	1.2	0.17	0.01
20130120_024204	106.00	28.81	30.7°	Yes	19.70	-0.0235	0.755	0.08	1.0	0.6	0.09
20130214_010435	101.77	32.19	43.6°	Yes	16.00	-0.003	1.21	0.3	1.0	0.6	0.01
20131011_214739	78.79	33.40	68.3°	?	14.15	-0.116	1.10	0.08	1.5	0.06	0.03
20131030_202238	85.11	43.32>	30.5°	No?	18.76	-0.002	1.5	0.24	1.1	1.45	0.01
20131213_183647	67.25	30.41	32.0°	No	14.71	-0.325	0.60	0.07	1.44	0.55	0.26
20140308_011427	77.52	30.18	81.7°	No	21.04	-0.094	2.03	0.35	3.3	2.2	0.13
20140318_200612	73.07	33.55	54.5°	No	13.987	-0.210	0.88	0.002	1.5	0.10	0.06

## ◆ 20080302\_040502 (牧丘火球)

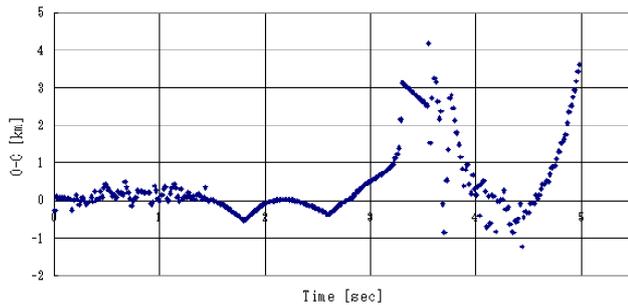


図1 20080302\_040502 の発光点からの  
飛行距離の O-C

約 1.5 秒後から増光し、3.5 秒後に大きな爆発をした。爆発後、数個の破片が遅れて飛行しすぐ消えた。

飛行距離の O-C の図は、爆発前後を中心に大きな誤差が現れている。爆発前に、0.8 秒前後の周期で加速、減速が 2, 3 度見られるが、破碎によるものだろうか、あるいは回転によるものだろうか。

時間-地上高度の関係でも爆発付近は誤差が読み取れる。しかしその後はシミュレーションで良く再現できている。この計算値の組み合わせでは、低空まで光っていたにもかかわらず、ほとんど燃えつき、隕石落下の期待は小さい。



図2 20080302\_040502 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20091106\_202901

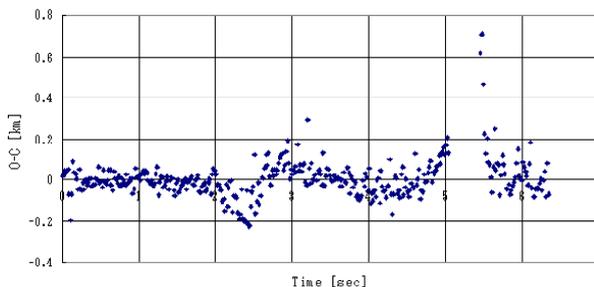


図3 20091106\_202901 の発光点からの  
飛行距離の O-C

この火球は経路の後半で顕著な爆破が見られる。また、3 秒付近で飛行距離の図が減少に向かっているが、光の塊を置いて行くような分裂があった位置である。経路末端では、発光形状が前後に伸びたような写りである。

時間-飛行距離の O-C における 5 秒過ぎの途切れ前後で別観測のデータが使われている。データの連続性が良くないのはこのためなのか、この位置が爆発点であるか判然としない。

時間-高度の図では爆発前後がうまく一致しない。

計算された落下質量は十分大きい、能登沖の海中である。

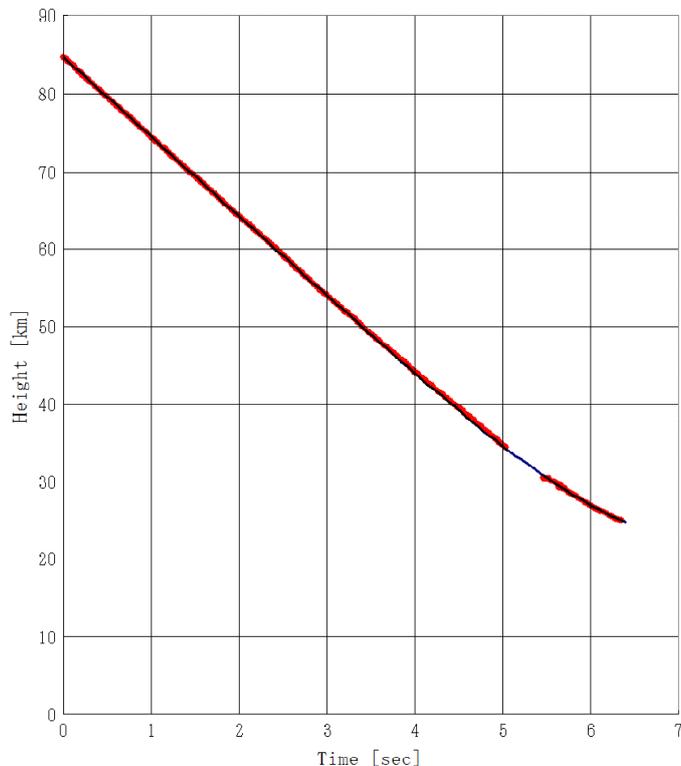


図4 20091106\_202901 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20091204\_190947

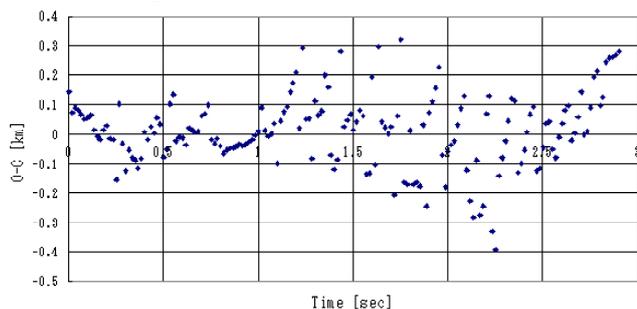


図5 20091204\_190947 の発光点からの  
飛行距離の O-C

映像では平坦な光度変化だが、経路後半で小破片が一つ剥離している。ただし、飛行距離の O-C を表す図では、該当する位置を読み取ることができない。

この火球は 2.5 秒地点まで明確な速度変化は無い。2.5 秒を超えた経路末端で速度がなかなか落ちない。アブレーションで角の取れた隕石物質が穏やかにダークフライトに移行したのだろうか。

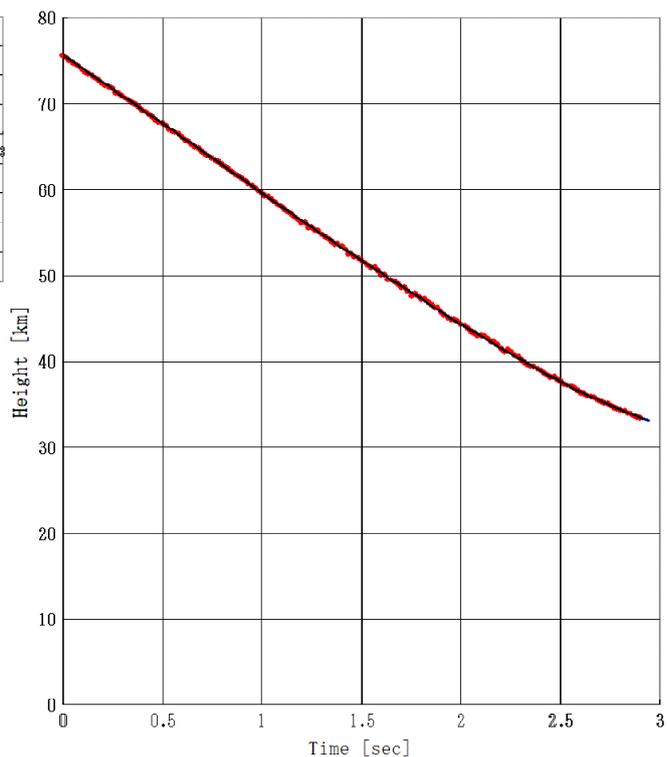


図6 20091204\_190947 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20100122\_210837

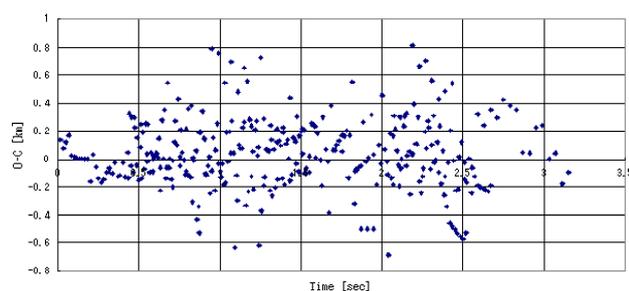


図7 20100122\_210837 の発光点からの  
飛行距離の O-C

映像は火球から遠距離で撮られている。このため位置精度でやや劣る。また、映像から破碎を読み取ることができないが、近距離から撮影していたら写っただろうか。

時間-飛行距離の O-C でも誤差に埋もれて傾向を読み取りづらい。

穏やかな光度変化の割に、やや大きい目の熱輸達係数を使い時間-高度の関係を近似できている。しかし経路の最後での急減速は計算とずれが見られる。経路最後で急速に隕石物質サイズが小さくなったのかもしれない。つまり末端まで破碎が続いたのでは無いか。

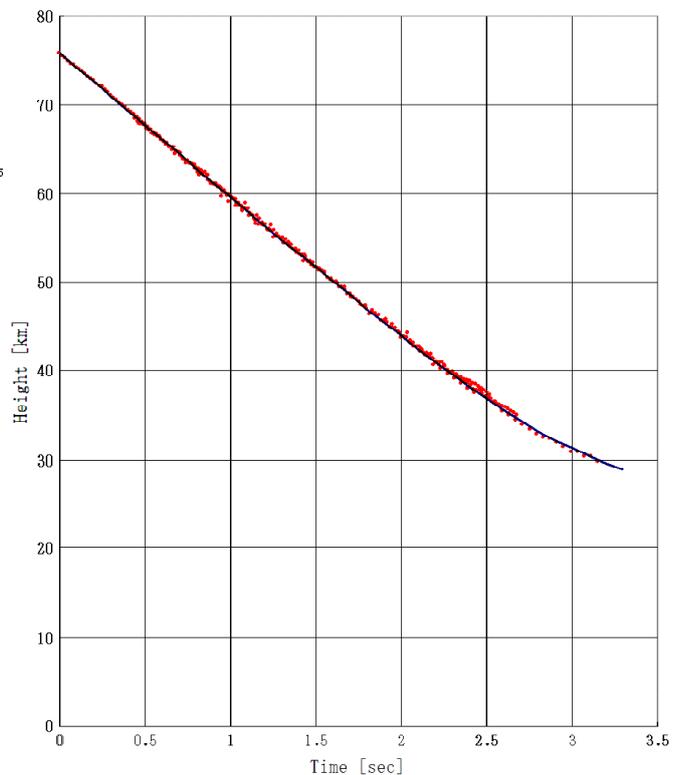


図8 20100122\_210837 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20100124\_040304

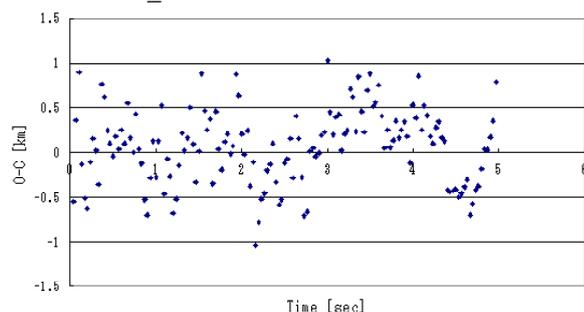


図9 20100124\_040304 の発光点からの  
飛行距離の O-C

光度変化は、3秒付近でやや増光し、4.5秒付近で急激に減光に向かう。時間－飛行距離のO-Cでは3.5秒後付近をピークに、速度の減少が見られる。これは破碎によるものだろう。時間－高度の図でも観測値は、4秒後を過ぎた付近で折れ曲がる。その後、計算値と比べて直線的な降下になるのは、時々見られる傾向だが、破碎で凹凸の激しい形状だった隕石物質がアブレーションによって角が取れ、空気抵抗が効きにくくなるという形状変化が起きるためと推定する。

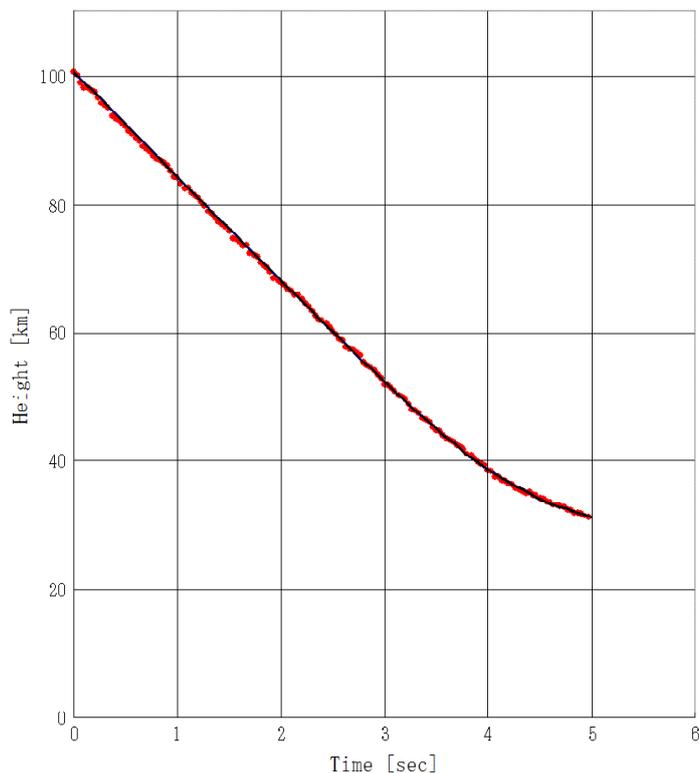


図10 20100124\_040304 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20100330\_234117(鈴鹿火球)

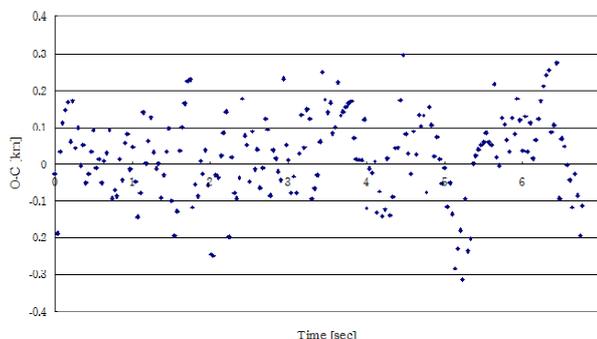


図11 20100330\_234117 の発光点からの  
飛行距離の O-C

経路末端近くで、前後に伸びるような破碎が映像に記録されている。3映像の観測位置はややずれが有り、誤差が含まれているらしい。しかし、時間－飛行経路のO-Cの図で、4.8秒付近の速度低下は、破碎によるものだろう。

時間－高度の関係図では、経路末端で観測がより減速が効いている。引き続き表面から小破片が落ちて行くような破碎が続いたのかもしれない。そうすると、落下質量は、計算よりやや小さく見積もらなければならない。

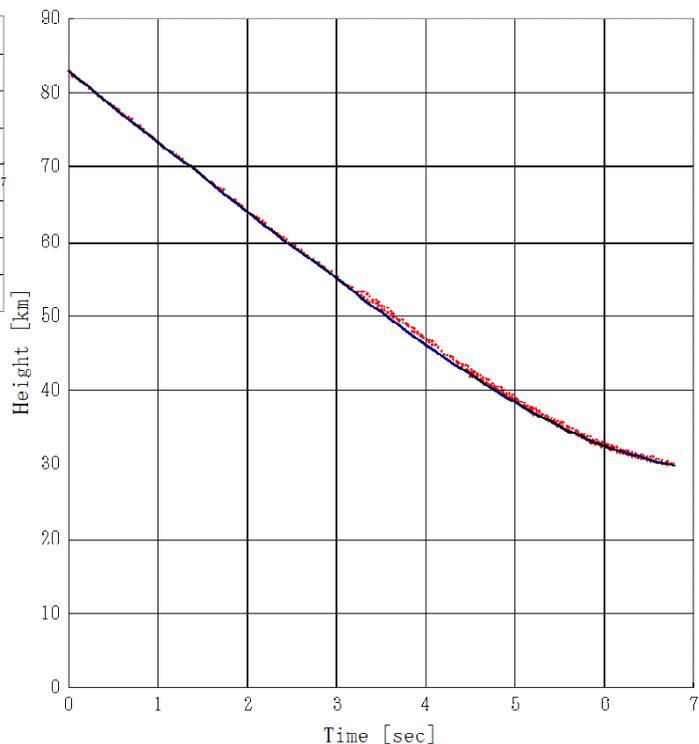


図12 20100330\_234117 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20110226\_002033 (福生火球)

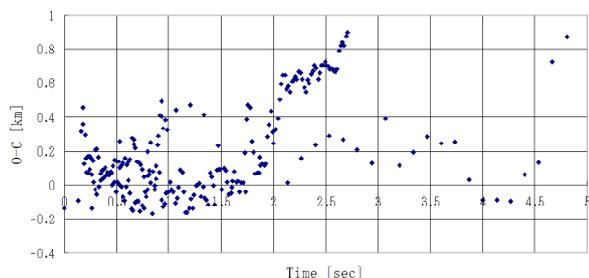


図 13 20110226\_002033 の発光点からの  
飛行距離の O-C

状態の良い映像がやや少ない。このため経路誤差もやや大きい。時間－飛行距離の図でも、誤差の影響が見える。

時間－高度の関係は、シミュレーションで良く再現できている。この図を見る限り、明確な分裂の証拠は見られない。しかし、表面からごく小さい破片が連続的に剥離したような分裂はあったらと思う。

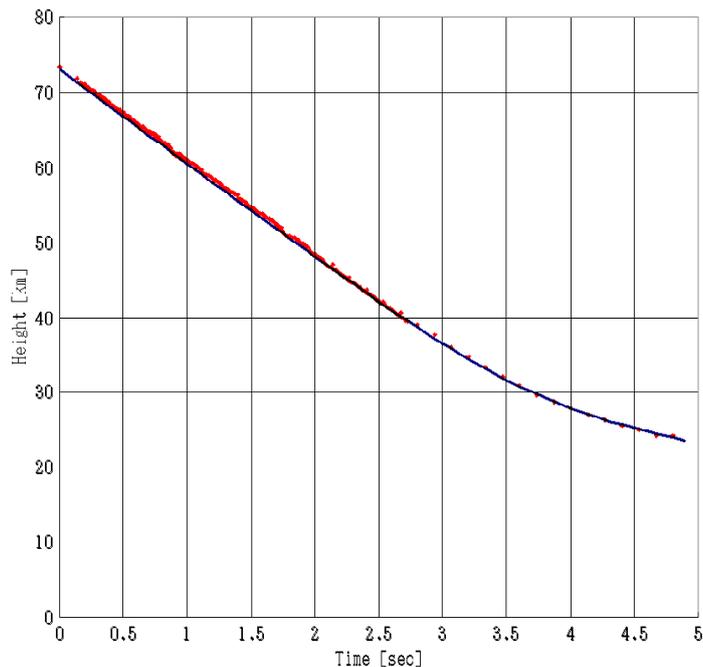


図 14 20110226\_002033 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20110726\_013304 (土佐山田火球)

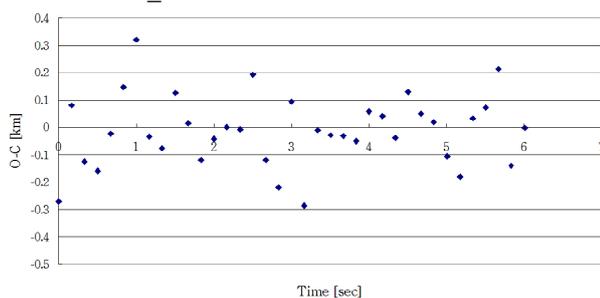


図 15 20110726\_013304 の発光点からの  
飛行距離の O-C

動画映像では、消滅点は捉えられていない。それでも経路の最後近くで、複数の小破片が剥がれている。

この火球では、指数関数近似で得られた初速を使ったシミュレーションでは観測より早く高度を下げている。これは重力加速の影響が現れているためだろう。

2つの図からは、分裂を読み取ることが困難な、なめらかな飛行である。

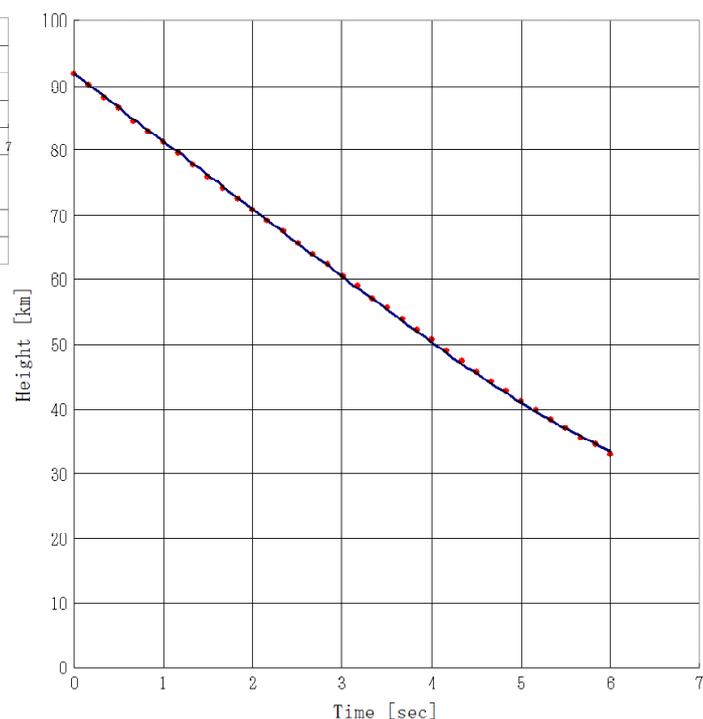


図 16 20110726\_013304 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20111204\_203555

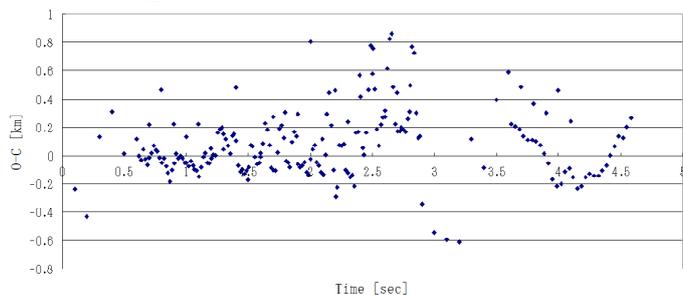


図 17 20111204\_203555 の発光点からの  
飛行距離の O-C

光跡は激しく爆発を繰り返す。飛行距離の O-C を表す図では、爆発部分での測定が欠損している。爆発前後でのばらつきは、誤差によるものだろう。

熱輸達係数はやや大きな数値で時間-高度の関係を再現できる。ここから、比較的連続した破碎によって、急速に隕石物質が縮小したと推定する。

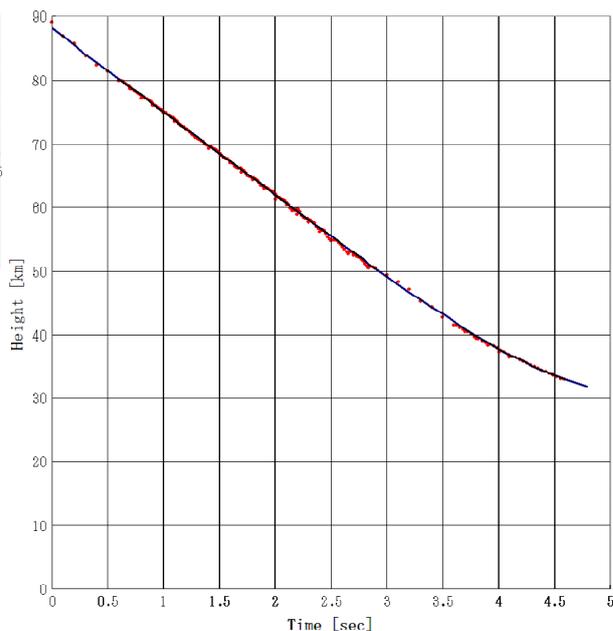


図 18 20111204\_203555 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20120802\_035156 (榛名山火球)

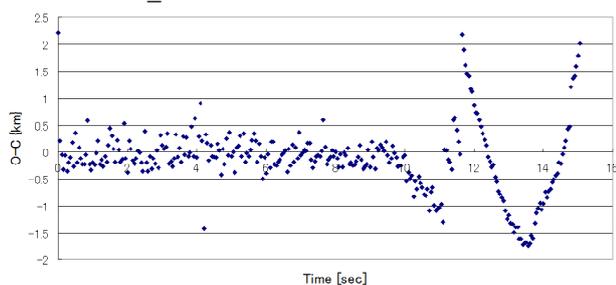


図 19 20120802\_035156 の発光点からの  
飛行距離の O-C

上田昌良氏によると、映像は 5 個に分裂とのこと。大変浅い角度で突入し、長時間飛行した。

飛行距離の O-C は、経路後半で観測誤差が目立っている。10 秒頃、高度低下が穏やかになり、この地点が最初の分裂点だろう。11.5 秒頃、再び大分裂による速度低下が見られる。大きな熱輸達係数をあてはめることで、時間-高度の関係を良く再現できている。これは大きな分裂があったことと整合する。13 秒付近からは高度低下が安定し、アブレーションで角が取れた破片が飛行しているという描像が当てはまるのでは無いだろうか。

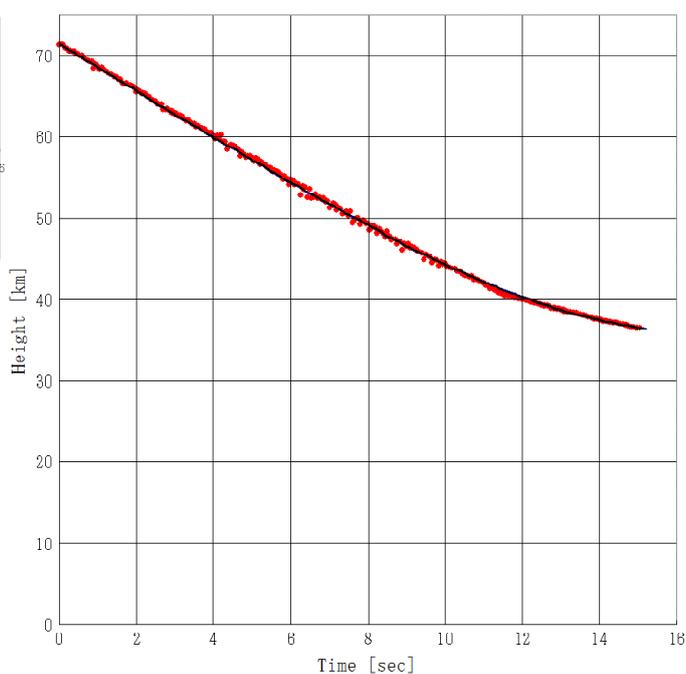


図 20 20120802\_035156 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20121226\_215914

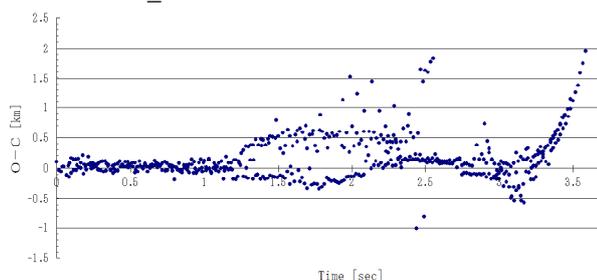


図 21 20121226\_215914 の発光点からの  
飛行距離の O-C

映像では、2.8 秒付近で小破片が 1 つ剥離。

飛行距離の O-C は誤差がやや大きいことを示している。2.8 秒付近で下向きに曲がった後、経路末端で加速する側に跳ね上がっている。

時間-高度の関係では、分裂が起きた 2.8 秒付近でやや線が折れて、急減速している。それでも、全体的な傾向はやや大きな熱輸達係数で良く近似できている。この「やや大きな数値」から、小分裂が続いて起きていたことを推定する。

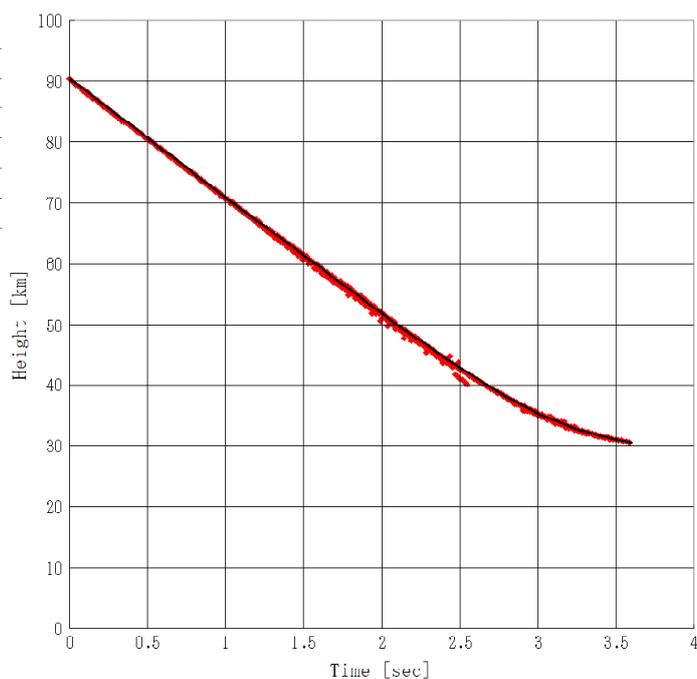


図 22 20121226\_215914 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20130120\_0243 (鹿島灘火球)

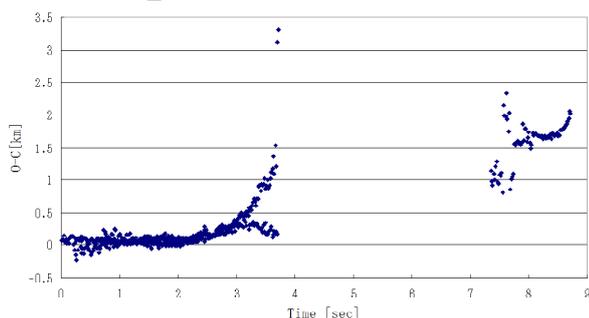


図 23 20130120\_0243 の発光点からの  
飛行距離の O-C

火球は 3 回程度爆発をしている。爆発後の経路後半で、火球は前後に多数の破片に分裂している。

動画は明るすぎる爆発で途中で測定不能になる。飛行距離を表す図は高度 67.2km までと、後半映像の時間間隔は指数関数近似が繋がるよう推定したが、間隔は怪しい。前半映像の末端で飛行距離の O-C が急増するのは、爆発によって正確な測定ができなかったためだろう。観測の途切れがあることからこれらの図から分裂の様子を読み取することは困難である。

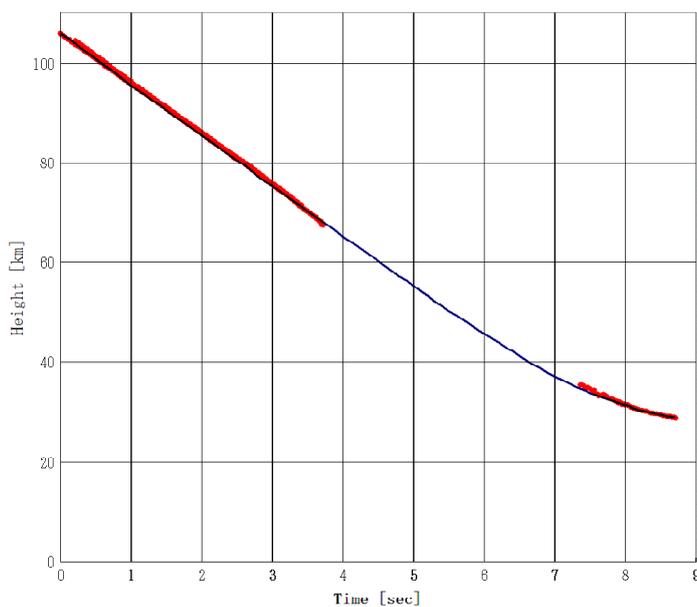


図 24 20130120\_0243 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20130214\_010435(市貝町火球)

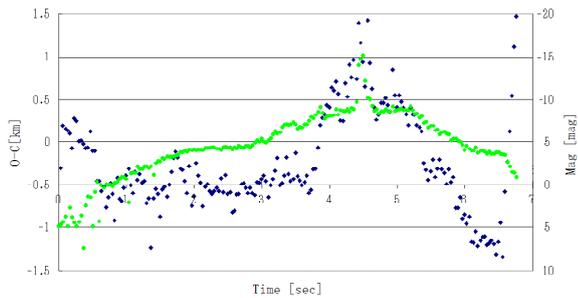


図25 20130214\_010435 の発光点からの飛行距離の O-C (青) と光度変化(緑)

顕著な爆発が見られた火球である。5.25 秒付近が爆発点で速度が急減した。その後、前後に広がるように多数の破片に分裂した。経路末端でグラフが折れ曲がるのは、分裂し光跡が伸びた影響で正確な位置が測定できなかったことも関与しているだろう。

時間－高度の関係を計算で再現するのは困難である。爆発や分裂による測定誤差がある事に加え、顕著な分裂に伴う測定誤差によってモデル計算は観測値と合致しない。

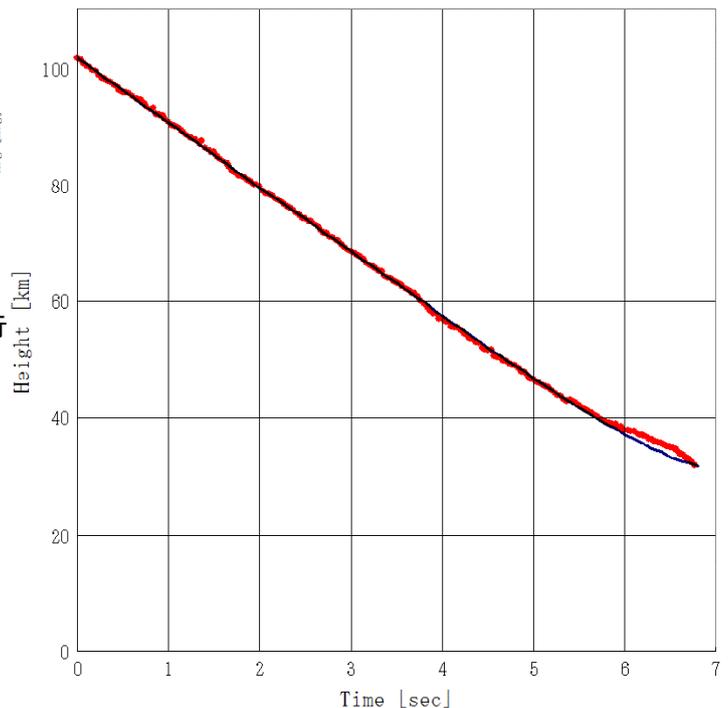


図26 20130214\_010435 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20131011\_214739(天龍村火球)

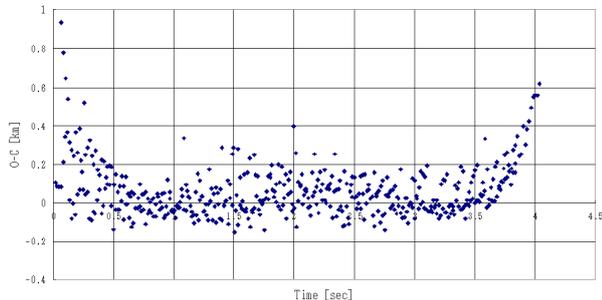


図27 20131011\_214739 の発光点からの飛行距離の O-C

動画を確認できていないので映像上の分裂は不明である。

飛行距離の O-C で発光点側が跳ね上がっているのは、経路初期値の観測誤差による。また経路末端では加速側に曲がっているが、これも誤差の可能性が高い。それ以外に急激な速度変化を示す特徴は無い。

熱輸達係数は小さく、抵抗係数は大きくしなければ時間－高度の関係を再現しにくい。これはいくつかの低速火球で見られる、分裂のほとんど見られない火球の特徴である。指数関数近似による時間－高度の関係で、観測より計算がわずかに速く低下する傾向がこの例を含めいくつかの火球で見られる。これは、指数関数近似では重力加速の影響が考慮されていないための誤差と思われる。真の初速は、指数関数近似の解より少し遅いと見るべきだ。

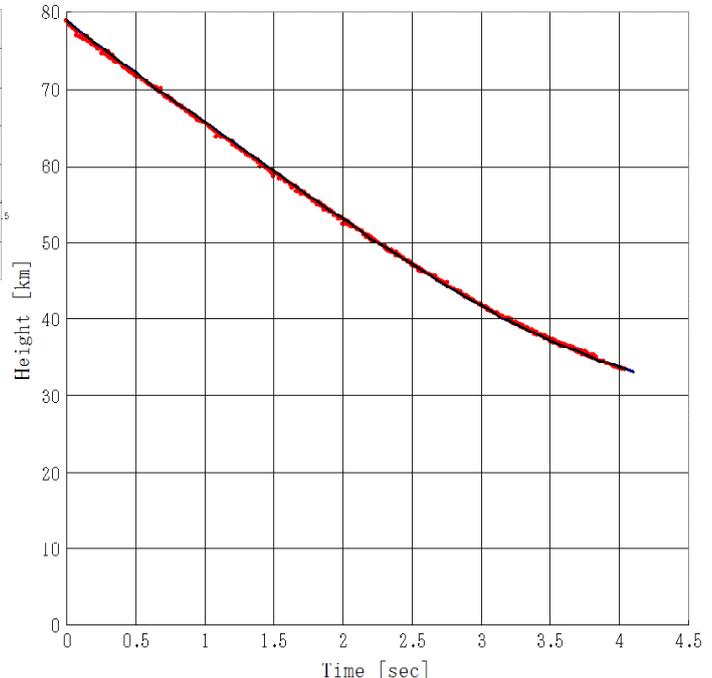


図28 20131011\_214739 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20131030\_202238(会津美里火球)

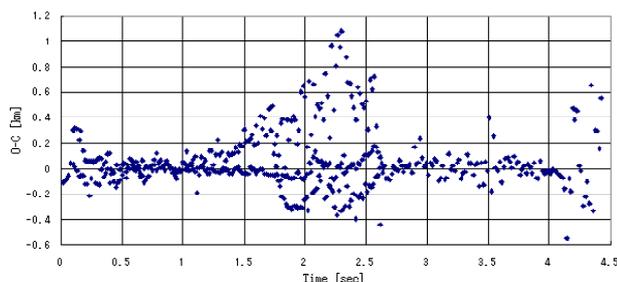


図 29 20131030\_202238 の発光点からの  
飛行距離の O-C

この火球の動画は経路途中までで、さらに観測精度も良くない。時間—高度の関係で観測が複数の線となっているのは、3点での観測結果の不一致である。経路末端が不明なため、外挿による精度不足で隕石落下予報の精度はあまりに低い。また、破碎についても推定困難である。観測末端での奇妙な挙動も誤差の可能性が高い。

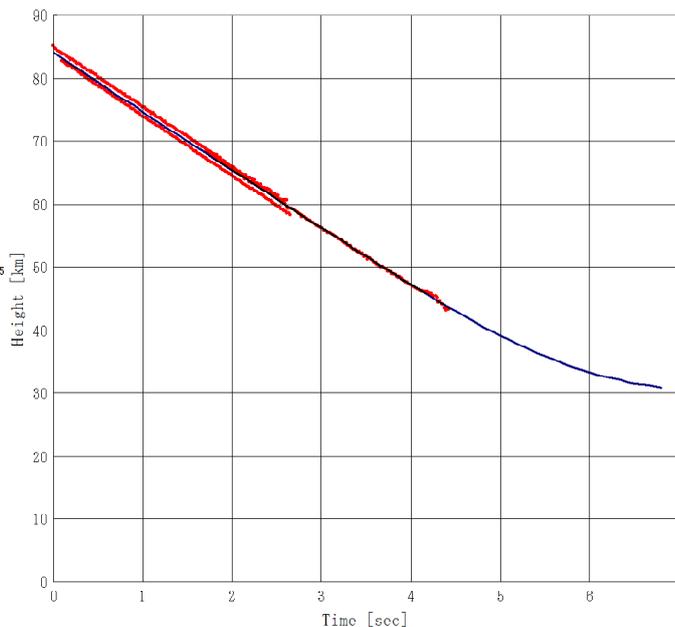


図 30 20131030\_202238 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20131213\_183647(甲斐南部火球)

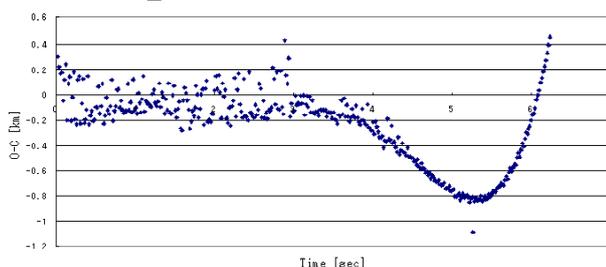


図 31 20131213\_183647 の発光点からの  
飛行距離の O-C

速度を指数関数でうまく近似できない。しかし、時間—高度の関係は、観測とシミュレーション計算が良く一致する。この計算ではやや大きな抵抗係数を使っている。能率良く大気減速が効き、経路後半でのアブレーションが抑えられたと思われる。光度変化も、経路後半は穏やかに減光している。

経路前半では、小破片が剥離するような分裂がいくらか生じていたかもしれないが、経路後半は穏やかな飛行で、小隕石が落下したと思われる。

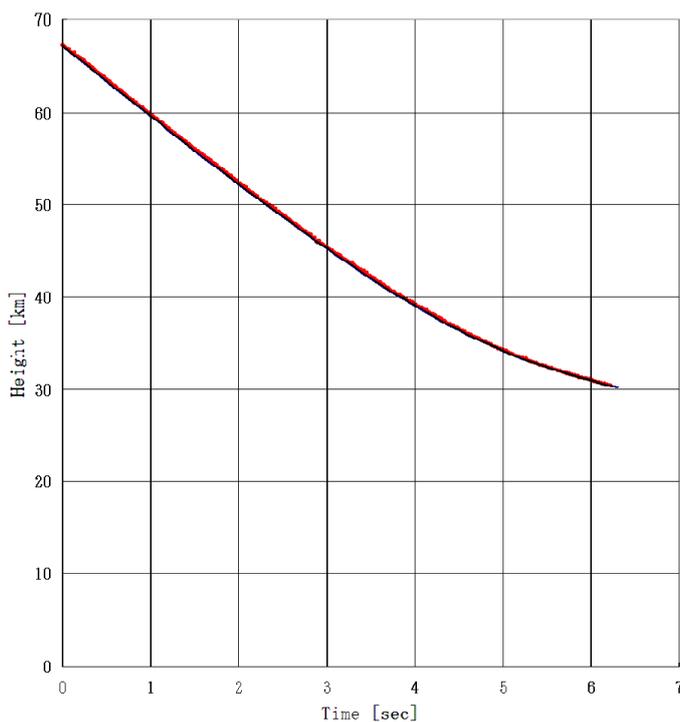


図 32 20131213\_183647 の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20140308\_011427

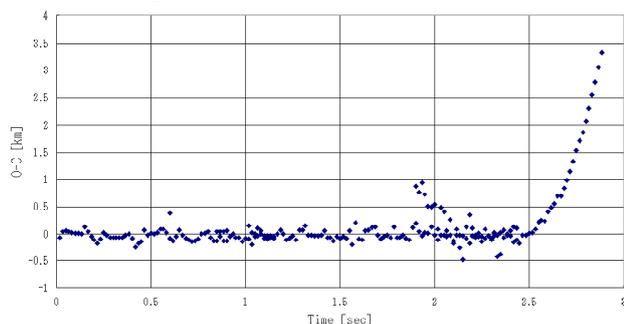


図33 20140308\_011427の発光点からの  
飛行距離のO-C

光跡は分裂を認めないが、急増光が維持されたような光度変化である。

速度はうまく指数関数近似できず、2.5秒後(高度32km)付近でO-Cの図上では加速したように見える。この見かけの加速は指数関数近似の理論的限界による不適合である。

時間-高度の図では、1.9秒付近で変化の傾向が変わっている。この付近でやや多量の質量が放出された可能性もある。ただし、増光付近で精度良い位置測定が困難になった可能性も排除できない。なお、シミュレーションでは抵抗係数が1.0ではうまく近似できず、かなり大きな値を採った。これは、経路末端で空気抵抗が急減したためと推定する。急減の原因はアブレーションによるのか、飛行姿勢の変化だろう。

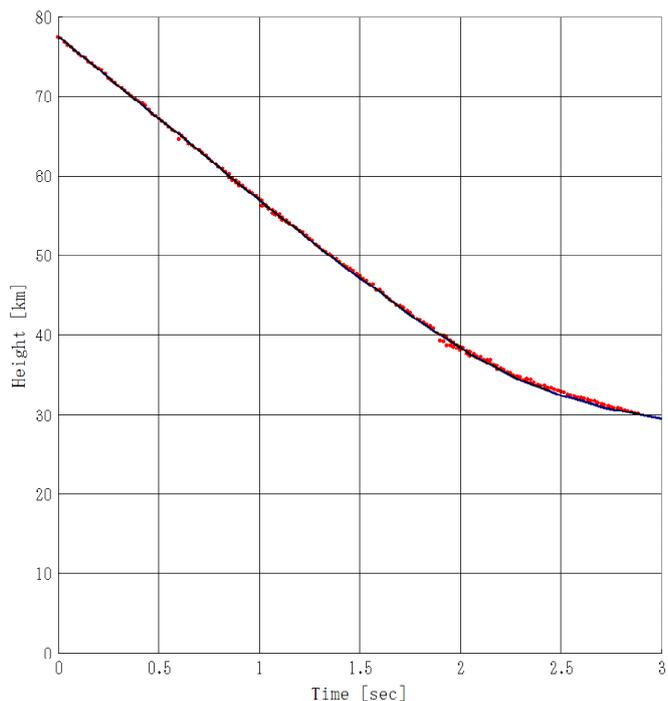


図34 20140308\_011427の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

## ◆ 20140318\_200612

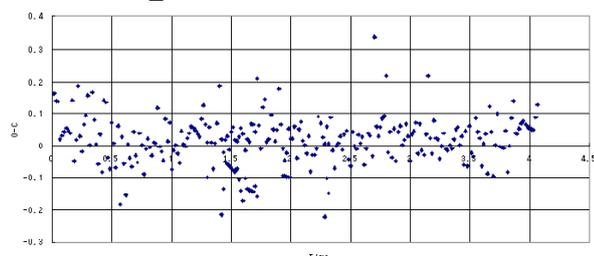


図35 20140318\_200612の発光点からの  
飛行距離のO-C

飛行距離のO-Cは観測精度が良かったことを示唆すると共に、急激な速度変化は認められない。

観測された時間-高度の関係は、あまりにも小さい熱輸達係数を使っても再現できない。つまり、突入質量より落下質量が大きくなければならないという関係である。これを合理的に説明できるのは、経路末端近くで抵抗係数が減少したため、減速が効かなくなったというシナリオである。抵抗係数の減少はアブレーションによるか、隕石物質の飛行姿勢の変化のどちらかである。

総合的に見て、この火球に明確な破碎を認める証拠は無い。

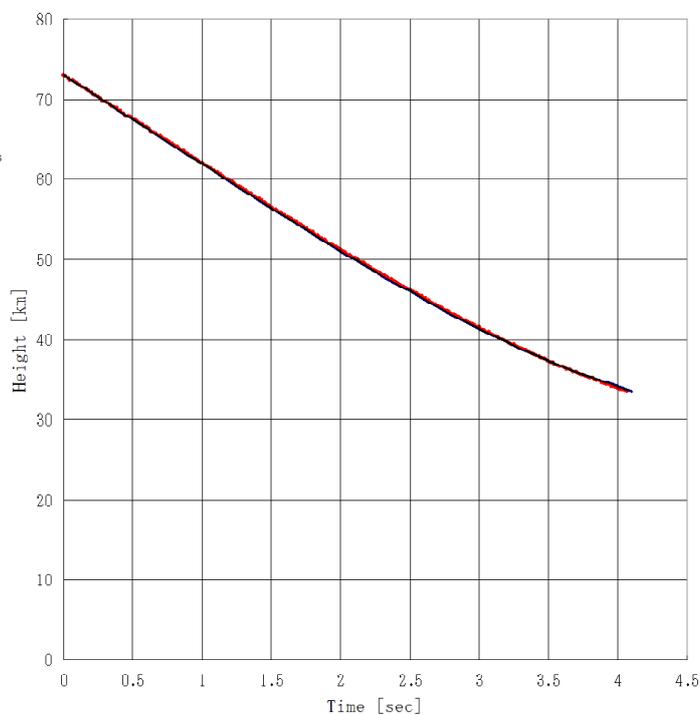


図36 20140318\_200612の時間と地上高度の関係  
赤が観測、青が計算

### 3. 議論

飛行距離のO-Cの図、時間-地上高度の図から、特徴的な速度変化を読み取って破碎の起きた時間や破碎の様子を推定できる例を認めた。しかし、小型高感度TVカメラによる観測では観測誤差レベルに近く、良質の観測できた場合に限定される。また、破碎による増光は、測定をより困難にし、誤差は拡大する。今後、ハイビジョン観測など観測の高精度化が普及するなら、相当多くの例で破碎による速度変化を読み取る解析が可能になるだろう。それでも、大気減速が現れない経路前半では、速度変化から破碎を読み取ることはできない。

多くの火球では消滅点に近い部分でほとんど破碎をしていないと思われる。それまでの速度変化の延長で試算するとどうしても観測との差が生まれる。この合理的な説明が、経路末端で質量が減少しないか、抵抗係数が減少するかである。

流星速度の指数関数近似は、高精度の流星速度決定のためによく使われる優秀な方法だが、次の2点で課題を残す。一つは特に低空まで達し、終端速度が遅い火球ではその末端での速度が再現できない(図37)。もう一つは、重力による加速である。ここで計算したいくつかの例で、指数関数近似による初速を採用してシミュレーションしたところ、観測よりやや速く落下する傾向が見られる。その速度変化は重力加速による差である。ただし、この差はごく少なく、現在の小型TVカメラの観測では検出限界に近い。しかし、今後解像度の高い観測が普及すると、それに対応した改良された近似式が必要になるだろう。

ところで、流星速度の指数関数近似を行ったとき、流星経路仰角 $h$ と定数 $k$ の間に相関があることがわかった。図38のような比例の関係である。比例定数は次の通りである。

$$k=0.023 h \quad (h : \text{deg})$$

なお、経路仰角と定数 $c$ には相関は全く見られない。

#### 【謝辞】

この研究は、SonotaCo Networkによる観測データを基礎としている。日々観測を続け、解析の手間を取るネットワークメンバーの努力の結果を使わせていただいている。また、観測、解析ソフトの提供やネットワーク運営を続けておられるSonotaCo氏の努力も背景にある。これら諸氏へ感謝する。また、上田昌良氏の軌道計算の結果が無ければ、詳細な速度検討ができなかった。特に上田氏には感謝する。

#### 【文献】

Babadzhanov, P. B.; Obrubov, Iu. V. Komety, i Meteory, no. 27, 1980, p. 51-56. In Russian, "Computer-aided determination of meteor velocities and drags from photographic observations"

司馬康生、上田昌良、2010.7.31 富山流星会議 「新しい流星の速度決定法」

長沢工、星の手帳、1980 冬号 p.118-

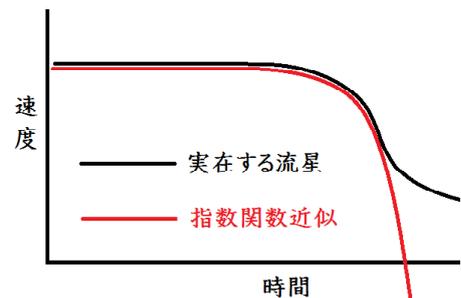


図37 指数関数近似の問題

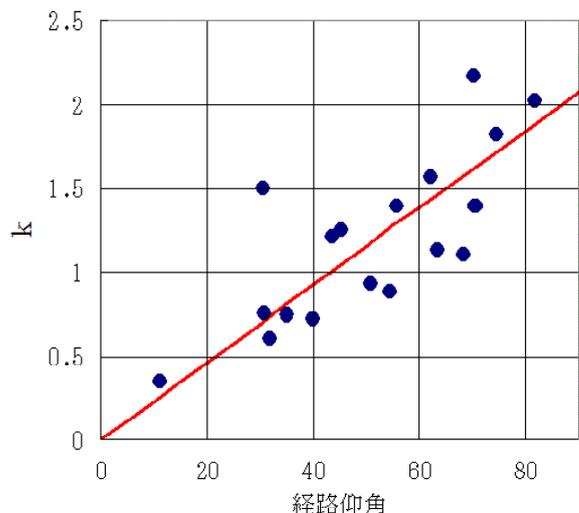


図38 流星速度の指数関数近似定数“k”と経路仰角の相関