

「習志野隕石」の落下

司馬 康生(SonotaCo ネットワーク)

火球と隕石の関係

2020年7月2日2時32分、関東地方を中心に大変明るい火球が出現した。火球とは流星の中でも特に明るく輝くものをいう。これが地上に落ちると隕石となる。さて、この火球の出現後、首都圏を中心に広い地域で衝撃音が響いた。これは、物体が超音速飛行することで発生する「衝撃波」の到達である。衝撃波は音速で伝わるため、火球の光が地上を照らしてから数分遅れて地上に到達する。火球(流星)の明るさは、その運動エネルギーの大きさを反映する。運動エネルギーは流星物質の大きさより速度の影響が大きく、小さな物質でも高速で大気に入ると明るく輝く。さらにその場合、大気との激しい衝突で流星物質はすみやかに破碎や蒸発が進んでしまう。つまり、明るい火球は必ずしも隕石落下を示唆しないのである。一方、衝撃波の到達は、隕石落下を期待させる。衝撃波のエネルギー発生量は、流星物質の断面積と飛行速度とその周りの大気密度に依存する。このうち大気密度は地上高度に対して指数関数的、つまり高度に対して急激に減少する。結果として、地上まで衝撃波が到達したことは、隕石物質が大きなまま高速を維持して低空まで飛行した証明である。2013年、ロシアにて、とりわけ大きな600kgといわれるチェラピンスク隕石落下で発生した衝撃波は、建物の破壊や、けが人も発生する大規模なものだった。

さらに隕石が落下したかの推定には、消滅点高度と発光継続時間を使っている。落下する流星物質が大気と衝突し、破碎や蒸発をすると共に、速度を落とすことで発光できなくなる地上高度が消滅点高度である。消滅点高度の10kmの違いが地上落下質量で1000倍程度、寸法で10倍程度の差を生むことが、モデル計算や観測から認められる。荒い推定で、石質隕石に対して、消滅点高度が20kmなら、10kg程度の隕石を期待するが、30kmなら10g程度、つまり、親指の爪よりは少々大きいサイズまで小さくなる。ただ、残念ながら消滅点高度は複数の地点で撮影が成立し、飛行経路が計算できた後に判断可能で、単点の映像からは判断できない。1地点の動画で隕石落下の可能性を急ぎ見積もる時には発光継続時間を確認する。5秒を超えていないなら隕石落下の可能性はごく低く、隕石落下検討の候補からほとんどの場合に外すことになる。ちなみに習志野隕石の消滅点高度は22km台、継続時間は7.8秒程度だった。

隕石となって落ちたのか？

さて、7月2日朝、出勤前に衝撃波を伴う火球のTVニュースに接し、取り急ぎ自宅の自動カメラの映像を確認した。すると、該当する時刻に我が家(兵庫県明石市)から東に向けたカメラのごく低空に速度の遅い火球映像が記録されていた。この自動カメラ(図1)は、2011年から稼働する高感度の小型白黒TVカメラである。映像信号は、パソコンに入力され、「動体認識ソフトウェア」である“UFOCapture”によって、画面の一部に何らかの動く物体を認めた時だけ、その前後の映像が記録される(図2)。



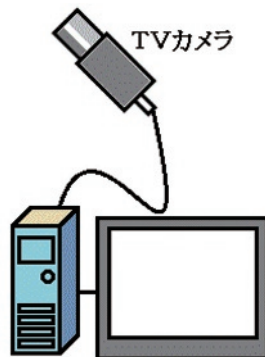
図1. 自動カメラ

この仕様のシステムで夜空を撮影する人達が、日本全国で20人(団体)以上おり、その観測者が集うサイトが“SonotaCo(ソノタコ)ネットワーク”である。そこでは、流星のみならず雷雲と宇宙空間との間で起きる放電現象「スプライト」の観測者、研究者が情報交換、議論し、アマチュア中心に運営される組織でありながら、世界のトップレベルで観測、研究を牽引している。

確認した映像と、ニュース情報から総合判断し、取り急ぎ、ネットワークサイトに映像を上げ、急ぎ隕石落下の検討をすることが望ましいかも、という期待を付した。

もし隕石が落下したなら、地球物質の付着を避けるため至急発見回収することがその分析、研究に大きな価値をもたらす可能性が高いからである。習志野隕石については、およそ半日後、SonotaCo氏によって消滅点高度から隕石落下の可能性が高いと報告され、SonotaCoネットワーク内での隕石落下検討のスイッチにONが点灯した。

隕石が落ちたかどうかを検討するためには、まず火球が地球に突入した正確な経路、速度を調べることが必要である。幸いにもこれらの諸元は直ちに宇宙空間のどこから飛んできたかも教えてくれる。図3は習志野隕石の軌道である(SonotaCo 2020)。太陽から一番離れた地点で火星の外側、すなわち多くの小惑星が周回するあたりまで離れる軌道である。この特徴は隕石の軌道としては一般的なものである。なお、この軌道は暫定的で、今後改良の微修正が加わる可能性がある。



パソコン
図2. 撮影システム

さて、かねてより私は隕石落下を検討するとき、上田昌良氏(羽曳野市)によって決定される軌道に頼ってきた。上田氏はネットワークの観測者の映像を収集し、慎重な精度検討の上で、対地経路(地球上の飛行位置)を求めてこられた。私は全幅の信頼を置く上田氏のデータを元に、隕石落下の検討を行うのである。つまり、「落下した」のか「発見が期待できる質量

は残っていないのか」の判断、さらに「落下」ならその位置と質量の見積もりを出すことである。この種の計算はこれまで世界で数十例の隕石発見を導いてきたが、日本では成果としての隕石発見に未だ届かなかった試みである。これは、我々の技術不足では無く、発見回収が可能な捜索しやすい平地がごく狭い国土のためと信じる。そのため、習志野隕石火球は、東京湾を越えて千葉県に達したならば、またとないだろう絶好の地域への落下を期待させた。

Heliocentric Orbit form (KNB,SZ2,TK8)

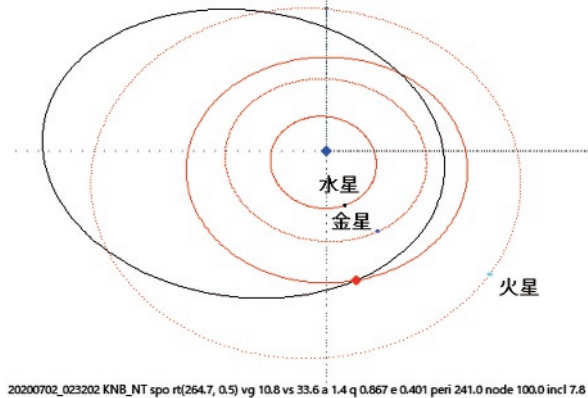


図3. 習志野隕石の軌道

大気突入速度を求める

隕石落下検討計算を私は次のような流れで進める。まず頂いた上田氏のデータは、観測者(カメラ)別に、フレームナンバー、緯度、経度、高度、速度、観測点からの距離、光度のデータセットである。測定不能や信頼できない場合は削除されている場合もある。ここからまず経路直線を最小二乗法で決定すると共に、突入速度を求める。頂いた測定点データは図4の地図(上)と経度-地上高度(下)にプロットしている。地上に投影したプロットの分布は良く収束している反面、高度方向はばらつきが大きい(図4下)。これは撮影地点が東西に偏って分布したために生じた誤差である。ただし、消滅点側のばらつきが小さいことは、隕石落下検討には幸いである。一方、突入速度の決定が難題である。流星(火球)は地球に突入した後、重力加速をする一方、空気抵抗によって大気減速をする。前者の重力加速は観測から求めることは困難な程度の小さな影響だが、後者の大気減速は隕石落下をもたらす火球では経路の末端近く、大気の濃い所では顕著に現れる。これに対応して広く用いられるのが「指数関数近似」である。大気密度が指数関数的に濃くなるために、速度の低下が指数関数的、急激に増加すると推定するのである。この推定は多くの火球で経

路のごく末端を除いて妥当な近似を得る。ただし、火球が破碎し、個々の破片が急激に小さくなる場合には、不連続な急減速によって近似は困難になる。また、映像品質や天候などによっては位置測定が困難になることもある。習志野隕石火球では、経路途中から流星物質の段階的な破碎、“準連続破碎”によって火球本体の後に尾を曳く光が続き、それが薄雲を通して滲んだ映像も含まれている。この結果、火球映像の光輝中心が、先頭を飛行する破片よりは後方位置となり、正確な減速を現さない区間が生じたと推察する。

また、経路末端では、数個の破片に分かれたことが映像から読み取られた。このときの分裂破片の飛行は、破片の大きさによって前後に分かれる。すなわち最大の破片を先頭に、空気抵抗の効果を強く受ける小さいものが後に続いて飛行する。

火球の対地突入速度は破碎による映像の滲みが効いていると推察する中間区間を除外し、指数関数近似を当てはめた。その結果、この隕石の大気突入初速は16.64km/sと決定した。隕石落下としてはごく標準的な数値である。

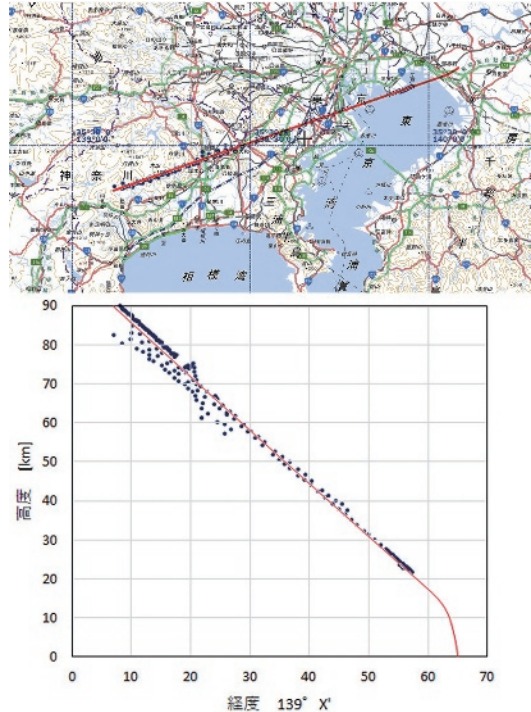


図4. 習志野隕石火球の対地軌道

物理的諸数値推定へ

初速が決定できると、コンピュータ上で隕石落下を条件を変えながら計算し、観測結果を再現できる諸元を探る。計算の軸は、運動方程式を解くことである。これに隕石と大気との衝突エネルギーの一部が蒸発に供される計算式が加わる。この計算は、複数の変数が互いに影響し合う非線形の方程式のため、数値積分という微小な足し算を繰り返す手法で処理する。それでも計算の初期条件で不定な数値が多いため、工夫が必要である。私の場合は、落下した隕石は最も普通の球粒隕石の密度であり、球形であると仮定して計算を開始する。逆に、突入時の質量と、「熱輸達係数」と呼ぶ蒸発に供されるエネルギー比の2値を自由に加減できる数値とする。観

測結果を最も再現できる2値の組み合わせを探るプローブ(探針)として図5に示した時間-地上高度の関係図を使う。図5でプロット(点)は観測で、線は計算であり、これらの一致を目指す。約7.8秒の発光時間のごく初期は、プロット点と線がうまく重ならず、図4と同じ理由である観測誤差が影響している。また、経路中盤を過ぎて両者は大きく乖離する。この不一致は、破碎と薄雲が作る光跡の伸びによる誤差と見られる。そこで、経路末端部分の最大破片を確実に測定していると見られる部分のみで観測-計算の一致を目指した。これは、落下質量や位置を求める最善の道でもある。経路末端を延長

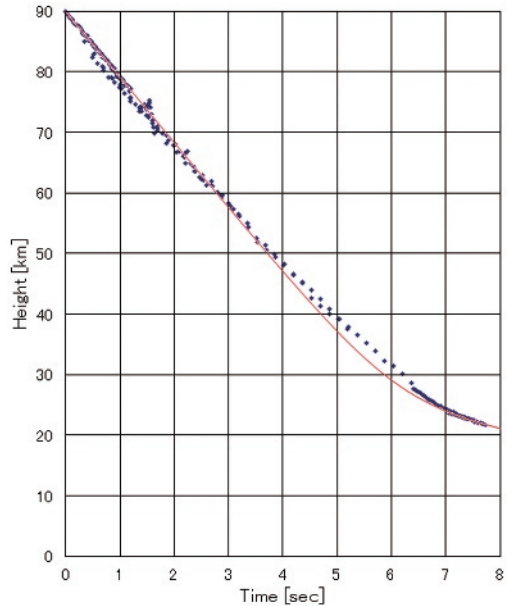


図5. 飛行時間と地上高度の関係

すると落下地点に至るからである。そして、この条件で計算を延長し地上まで続ける。発光が失われた後は「ダークフライト」として数分掛けてゆっくりと地上まで落下する。ほぼ直線的に飛行していた隕石は、空気抵抗を受けて速度を失うと共に重力に従って落下する。しかし、真下には落下しない。日本の上空10km前後では偏西風が落下する隕石を東に押す。厳冬期では秒速100mに達することもあるが夏の習志野隕石落下時点では秒速30-40mと穏やかだった。やや弱いながらもこの東北東に押し出す偏西風は幸運の風だった。もし無風だったなら、習志野隕石の1号は東京湾へ落下していたかもしれないからである。

物理的諸数値推定へ

計算諸元の基本数値が決まると、初期条件の数値を前後させて計算し、落下推定域の広がりを探る。初期質量だけは、小さい方に幅広く変化させて計算する。これは飛行途中に破碎した複数の破片が何処に落下しているかを知るためである。このように50例以上の条件の落下計算で得られた落下点分布を図6に示す。赤い小さい円が個々の計算に対する落下位置を示す。東寄りの集中した地域は最大破片と見積もる落下質量1.5kg程度に該当する。反対の西側4点は140g程度の破片の落下例である。実際に落下した2個の落下位置もおおよそ併せて示した。しかし、計算より北に1-3km程度ずれている。一方で、約150gの1号、約180gの2号の東西

位置は良く一致している。従って、最も大きな破片として約1.5kg程度の隕石が1号、2号より東側に落下していることは間違いないと信じる。一方、南北の差が何に因るかは今後の課題である。考えられる理由は、決定した経路が南にずれる誤差があった、計算に使った風データより実際の風が北を向いていた、最大破片から分離したときに、南北に分かれて飛び、小さな2破片が北に飛んだ、などが考えられる。



図6. 落下推定地域

成果と課題

まだ、最も大きな隕石が未発見で残っているだろうが、日本で火球の観測によって隕石の宇宙空間での軌道が決まったこと、また、落下位置の推定計算と実落下位置の比較が可能になったという大きな成果を得た。落下推定位置に残るキロメートルの桁の誤差を小さくすることができれば、隕石捜索にいつそう期待が持てるのだがこれを小さくすることは大変困難な壁に感じている。空気力学は昨今の「マスク周りの空気流れ」とも共通する困難な課題でもある。

他にも落ちていますー未発見隕石

ところで、近畿周辺でもこれまで隕石落下の推定計算を行ってきたので紹介する。小さい隕石が多いが、心当たりがあれば教えてください。

- (1)2010年3月30日23時41分17秒、鈴鹿峠付近に50g程度の落下。
- (2)2019年8月3日00時06分09秒、岐阜県山県市古城山付近に100g程度の落下。
- (3)2019年12月15日18時09分04秒、神戸市中央区、都心部に10g程度の落下。
- (4)2019年12月23日21時46分22秒、和歌山県橋本市、紀見峠近郊に20g内外の落下。

【参考資料】SonotaCo Network : <http://sonotaco.jp/>

著者紹介 司馬 康生(しば やすお)



1961年生まれ、聴覚特別支援学校、工業科教諭。
日本流星研究会火球観測担当幹事。
流星の観測の中でも特に火球、隕石落下に関心がある。