

特集1

習志野隕石火球の話

～さらに小惑星リュウグウ・ふたご座流星群まで～

佐藤幹哉（国立天文台／日本流星研究会）

1. はじめに

本内容は、2020年12月5日に開催された関東支部会にて講演した内容の概要をまとめたものです。

なお、当日ご覧いただいた画像や動画の全てをご紹介することはできませんので、ご了承ください。

2. 2020年7月2日未明に出現した大火球

その大火球は、2020年7月2日2時32分過ぎ、南関東上空に出現しました。この火球は映像クリエイターのKAGAYA氏によって撮影されており、当日の朝の報道から多くの人の目に止まりました。

また、この火球に伴う轟音が各地で聴かれたことでも話題となりました（後述）。



図1 KAGAYA氏が撮影した火球[1]

画像は、KAGAYA氏が公開されたYouTubeサイトより筆者が比較明合成にて作成。

その後、この火球が各地で観測されていることが徐々に判明しました。まずはその経路が求まっていく過程を報告します。

2.1 SonotaCo ネットワークによる自動観測

現在、日本国内では「SonotaCo（ソノタコ）

ネットワーク」というグループによって、毎夜、常時流星が観測されています。2004年頃より始まり、2007年から安定運用がなされています。詳しい仕組みは省略しますが、動体検出手法を応用し、SonotaCo氏が制作されたパソコンのソフト「UFOCapture」により流星が自動で検出され、各自が分析のもと、SonotaCo ネットワークのサイト[2]へデータをアップロードする、という作業が日々行われているのです。このデータは公開されており、誰でも閲覧・解析することが可能です。データの集まり次第ではありますが、前日の夜に流れた流星の経路や速度、そして太陽系内の軌道まで翌日には判明する仕組みです。これらの観測は、ほぼアマチュアによってボランティアに行われており、観測機材も自費にて設置されています。

2.2 火球経路の推定

7月2日の火球については、実際の自動観測はあまり多くありませんでした。これは当日に雲が広がっていて、晴れ始めた瞬間に出現したことも影響しています。東京・世田谷のSonotaCo氏による観測はすぐに公開されましたが、その後は宇陀市・明石市からの観測があるという情報のみで、実際の測定データが集まりませんでした。

一方で常時報告されていないものの、SonotaCo ネットワークのフォーマットにて観測している藤井大地氏（平塚市科学館）もこの火球を捉えていることが判明しました。藤井氏が火球の前半、SonotaCo氏が火球の最後と観測された部分は全く異なるものの、経路面を重ねる経路の解析により、概ね神奈

川～東京湾上空を飛来したことが判明します。ただし経路の精度には不安が残っていました。

この頃から、先の KAGAYA 氏の他の地点でも、測定しうる観測が存在することが判明します。SonotaCo ネットワーク及び日本流星研究会のメンバーにて測定が行われ、ネットワークに報告された観測地点は、非公開を含め 9 カ所にのぼりました (図 2)。一方多数のデータが集まると測定誤差も増えてしまいます。筆者の推定では、東御、平塚、東京 (非公開) の 3 カ所による測定からの経路が、誤差を小さく推測できるようでした。これは計算者によって判断が分かれることでしょう。

このようにして求めた推定経路では、神奈川県松田町上空約 85km で光り始め、その後は厚木市、横浜市、川崎市上空を通過、羽田空港付近で大田区、江東区の湾岸地域、さらに千葉県の浦安市をかすめて、東京湾上空 21km で消滅 (光らなくなる) したと計算されました (図 3)。

2.3 隕石落下の推測

火球経路が推測されることの意義は、主に二つあります。一つは地上へと延長することで、隕石落下の可能性や、落下した場合の地点を推測しうることです。もう一つは、宇宙へと延長することで、太陽系内の軌道が確定し、ひいては火球の元となった母天体も推測しうることです。

まずは隕石落下の可能性です。一般的には、非常に明るい火球で、消滅点が 20km 台であると隕石落下の可能性が高くなります。今回の火球における等級は、絶対等級 (距離 100km と仮定した等級) 最大時でマイナス 9.9 等と推測されています [3]。

また残存質量については、速度変化から空気抵抗を計算し、密度を仮定することで推測されますが、実際には誤差がかなり生じます。今回のケースでは、1.5kg と見積もられ [4]、

隕石落下の可能性が非常に高いと考えられました。

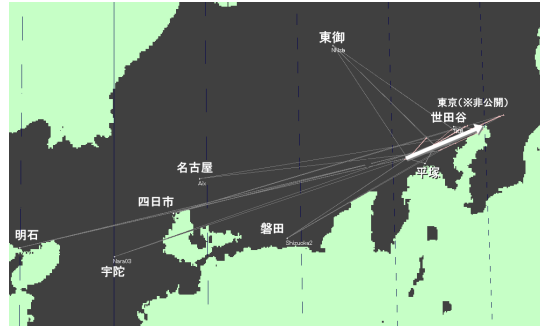


図 2 火球が観測された地点と計算上の経路

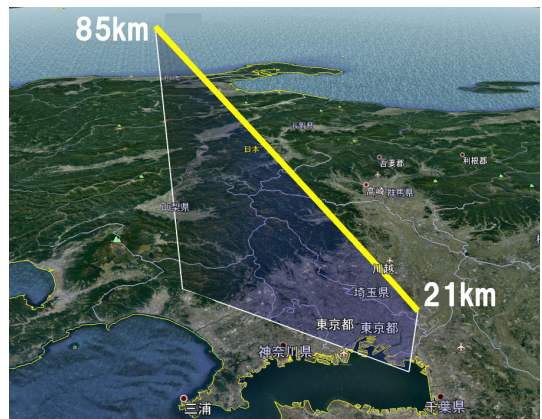


図 3 経路推定図

神奈川県上空 85km で光り始め、千葉県の東京湾上空 21km で消滅した。

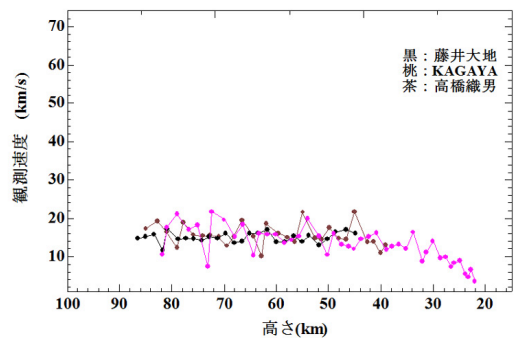


図 4 火球の速度変化 [5]

上田昌良氏による。高度 40km 以下で大きな減速が見られる。



図 5 落下予測地点の図 [6]

火球の質量や風速の仮定により、範囲が広がる。また最終速度や微妙な経路の誤差によっても、範囲が異なってしまう。

なお隕石落下地点は、残存質量を仮定し、また当時の風速を加味して推測されます。初期には、SonotaCo 氏によって千葉市北部から四街道市や佐倉市といった内陸が推測され、速度が詳しく判明してからは司馬氏によって習志野市周辺が推測されました(図 5)。

ちなみに、隕石の落下は、年代毎に偶然性からの偏りが見られます(図 6)。特に SonotaCo ネットワークによる自動観測が稼働した後は、2018 年 9 月の小牧隕石しか落下実績がありません。この時は不幸にも悪天候で、捉えられませんでした。今回もし隕石落下が確認されれば、国内では初めて火球経路が詳細に観測された隕石となる状況でした。

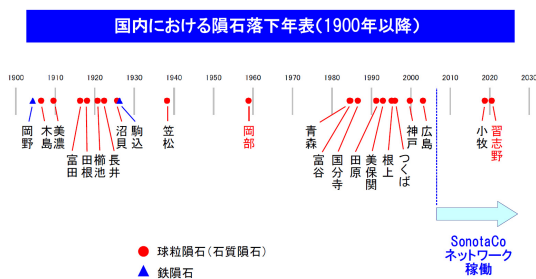


図 6 国内の隕石落下年表



図 7 習志野隕石 1 号 [7]

左が先に発見されたもの(63g)。右が後に発見されたもの(70g)。後のものは雨に当たってしまったため、錆によって赤く色づいている。

2.4 習志野隕石の発見

観測から経路が推測され、隕石落下の可能性が高まっていくのと同時間進行的に、実際に隕石の発見が報告されました。

習志野市のマンションにて 7 月 2 日未明、大きな音(おそらく落下音)が生じたことで気になった住人は、黒っぽい 63g の物体を発見。その 2 日後は同様の破片 70g を発見し、同日(7 月 4 日)、千葉県立中央博物館に電話連絡されました(図 7)。同館の研究員が現地に出向き、隕石であろうとすぐに認識されています。その後、国立科学博物館に持ち込まれで分析が行われ、宇宙線生成核種が出すガンマ線が検出されたことで、最近落下した隕石であることが判明。火球経路による落下予測地点にもほど近いという状況も合わせて、7 月 2 日に飛来した火球による隕石であると断定、このことが 7 月 13 日に発表されました[7]。

その後隕石は、さらに船橋市内の 2 カ所で発見されました。これらの隕石は、国際隕石学会に申請され、習志野隕石と命名されました。なお船橋市内で発見された隕石も、便宜上、習志野隕石 2 号・3 号と呼ばれることに

なります(図8、図9)。これらは、離れた複数地点で隕石落下が確認されたことになり「隕石雨(隕石シャワー)」の現象であったこととなりました。

習志野隕石は、石質隕石(普通球粒隕石)のH5コンドライトに分類されました(1958年に落下した岡部隕石も同じ種類です)。これらの隕石の重量は、細かい破片まで合わせると、1号が総重量156g(14個の破片)[8]、



図8 習志野隕石2号[8]

船橋市内にて7月22日に発見された。1号と同様に大きな破片が2つあり(95gと73g)、合わせられる。



図9 習志野隕石3号[9]

船橋市内にて10月22日に発見された(14.67g)。なお講演当時には、詳細不明で発見情報を口頭にて話ただけであったが、その後2021年1月12日にリリースされて写真も公開された。

2号が総重量183g(8個の破片)[8]、3号が1個で約15g[9]ですので、全て合わせても350g程にしかありません。火球の観測からは、残存質量が1.5kgと予想されたので、まだメインの本体隕石がどこかに眠っている可能性があります。

2.5 太陽系内軌道と母天体候補

火球経路について、地上へと伸ばすことで隕石落下が推測され、実際に発見へと繋がりました。今度は宇宙へと伸ばしていきます。すると、火球が太陽系内で描いてきた軌道が判明することになります。このことはとても重要で、すなわち母天体の小惑星の類推にも繋がることを意味します。

隕石の多くは地球との相対速度が小さいため、地球引力によって、経路自体の変化と速度の変化が大きく影響を受けます。したがって地球の引力を受ける前の軌道を推測するためには、飛来方向(放射点)と、飛来速度を正確に求めることがとても重要になります(図10)。

観測速度(初速)について、各観測からの測定値からは、当初15.5km/sが求められていましたが、少し過小評価している可能性があると考え、筆者は16.5km/sと仮定した軌道要素も発表していました[6]。

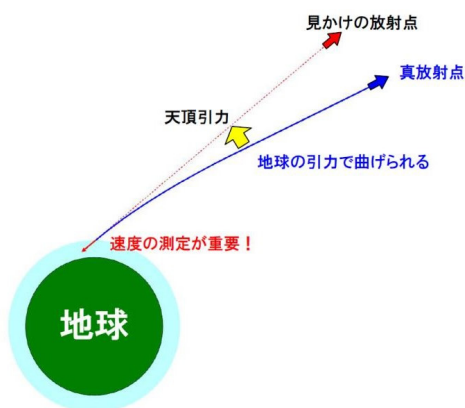


図10 地球引力で変化する火球の経路

実際に詳細な測定値が出てきた段階で、上田昌良氏は 16.3km/s と計算されており[3]、この見込みはやはり、ある程度正しかったと考えています(表 1)。一方で、今回のような長径路でかつ明るい火球の場合の軌道類推の難しさも実感することになりました。

なお放射点は、観測からの見かけの放射点が赤経 274.4°、赤緯+8.3°、真の放射点が赤経 266.9°、赤緯+2.8° と求められています[3]。位置はへびつかい座です。

軌道を類推した結果、近日点側は地球軌道の内側で金星軌道のやや外側(0.834 au)、遠日点側は火星軌道より外側でメインベルト(小惑星帯)の最内側付近(2.18 au)となる楕円軌道が求められました。地球軌道とは、降交点で交差したことになります(図 11)。

表 1 推測された火球の太陽系内軌道要素

	佐藤 1	佐藤 2	上田氏
観測初速(km/s)	15.5	16.5	16.3
地心速度 Vg (km/s)	11.1	12.5	12.3
離心率 e	0.403	0.449	0.443
長半径 a (au)	1.44	1.52	1.51
近日点距離 q (au)	0.859	0.841	0.843
近日点引数 ω (°)	242.54	243.87	243.66
昇交点黄経 Ω (°)	100.05	100.05	100.06
軌道傾斜角 i (°)	8.54	9.91	9.66

上田昌良氏のデータは[3]による。

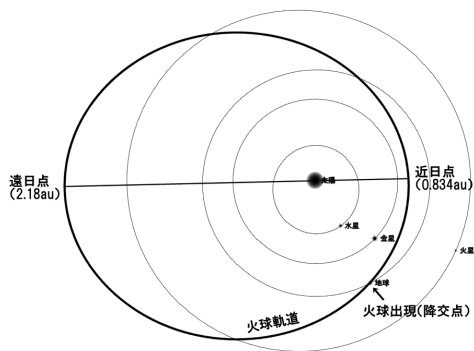


図 11 太陽系内の類推軌道

表 2 母天体候補との軌道比較

	火球軌道	2019 NP1
離心率 e	0.443	0.3991
長半径 a (au)	1.51	1.3976
近日点距離 q (au)	0.843	0.8398
近日点引数 ω (°)	243.66	244.5361
昇交点黄経 Ω (°)	100.06	105.3022
軌道傾斜角 i (°)	9.66	13.5609
D 判定	0.094	
D'判定	0.059	
D-acs 判定	0.090	

太陽系内の軌道が類推されたことで、習志野隕石の母天体候補としていくつかの小惑星が挙げられました。上田氏が計算した軌道に最も近いものは、今のところ「小惑星 2019 NP1」です。一般的に軌道の類似性については、D 判定(及び D'判定、D-acs 判定)の数値によって判断し、どの値も 0.1 以下で類似性ありとされます(表 2)。

2019 NP1 は、3項目すべて 0.1 以下ですが、値としてはさほど小さい訳では無く、決定的ではないと考えています。まだ発見されていない他の小惑星が母天体なのかもしれません。母天体がもし確定すれば、小惑星探査なしにサンプル(隕石)を得られることになり、さらに意義の高い事象となったことでしょう。今のところそこまでは達しておらず、少々残念です。

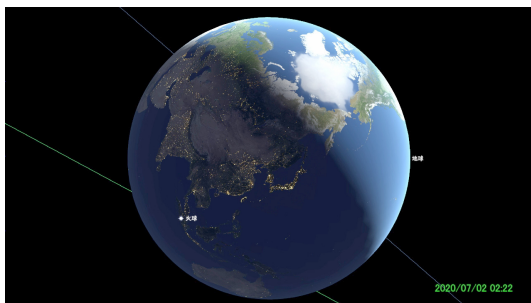


図 12 火球の軌道・経路の解説動画 [10]

なお講演では、火球の元の物質が地球に接近していく様子と、地上で観測された経路の様子を動画にてご覧いただきました(図12)。

この動画は、前半はステラナビテータ(アストローツ)のスク립ト機能を使い、画面キャプチャ機能で動画にしました。また後半はGoogle Earthプロ(Google)の機能にて動画ファイルを作成したものです(動画は筆者のYouTubeサイト[10]でご覧になれます)。

2.6 轟音(ソニックブーム)の発生

冒頭でも述べましたが、この火球では各地で火球出現に伴う轟音が聴かれました。これは衝撃波に伴って生じるソニックブーム(衝撃波音)と呼ばれるもので、音速を超えて移動するものの周りで生じます。火球や流星はそもそも超音速で突入してきますから、常に生じていますが、高層の薄い大気では非常に速く減衰してしまい、普段は地上まで届きません。一方で高度の低い部分まで移動してきた場合には、減衰せずに地上に達し、音として認識されるようになります。逆に考えると、この音が聞かれた場合には、かなり低高度まで移動体が存在したことになり、隕石落下の可能性が高まることとなります(図13)。

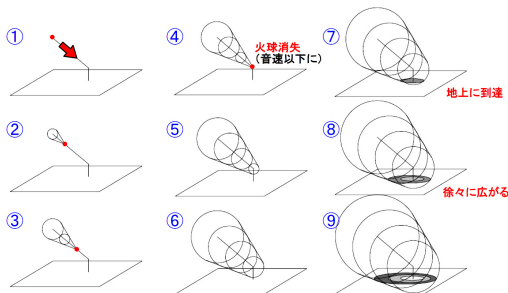


図13 衝撃波の広がる様子(模式図)
三角錐状に伝わるが、地上では経路方向に歪んだ楕円状に広がっていくように見える。

ちなみにソニックブームは音速で伝わりますので、火球出現の後、数十秒から数分程遅れて到達します。流星と同時に聞こえる音とは別のものです。筆者は、就寝途中でトイレに入った時に、偶然この音を聞きました。「ターン」という軽い音で、当時は二階で妻が作業して何か物を落としたのだろう、くらいに考えていたのですが、後で考えると何か耳の鼓膜で圧の変化を感じたような変な感じだったことを思い出しました。自宅の府中は経路から離れていましたが、一方、経路直下に近い場所では雷が轟くような音が聞かれたようで、詳細は不明ですが、場所によって聞こえた音の性質も少々異なっていたようです。

この現象は各地の地震計でも捉えられていました。山田真澄氏(京都大学防災研究所)はいち早くこれを集計し、火球の経路を推定しています(図14)[11]。

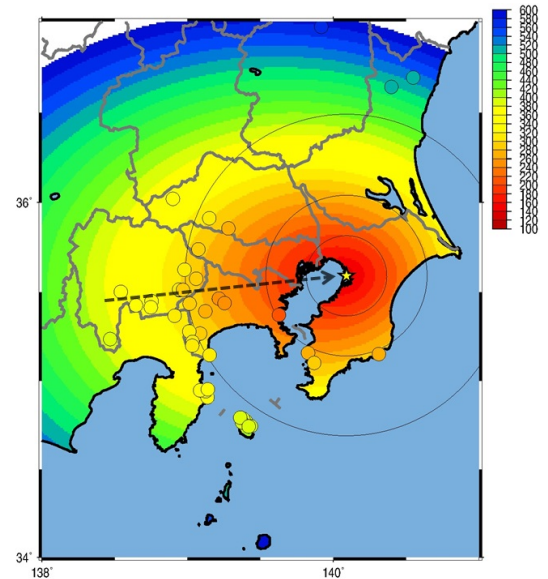


図14 地震計から推定された衝撃波伝搬の様子と経路[11]

凡例の数字は2時30分からの秒数。神奈川県西部で南北に広がる観測があり、ここで衝撃波が生じたと推測されている。

この経路は、観測から推測されたものとは若干異なるものの、速報値としてはよい傾向を示していました。悪天候で火球が観測できない場合には、大変有効な手法です。

2.7 習志野隕石火球のまとめ

2020年7月2日2時32分に出現した火球は、SonotaCo ネットワークをはじめとする各地でビデオ観測が行われており、精密な経路測定が行われました。また隕石落下が推測され、実際に3カ所で隕石（習志野隕石と命名）が発見されました。隕石落下に伴う火球が精密に測定され、かなりの精度をもって太陽系内軌道が推定されたのは、国内で初めての事象となりました。今回の経験は、今後の観測・解析・研究等にさらに活用されていくものとなるでしょう。

3. 小惑星リュウグウとはやぶさ2

講演当日は、はやぶさ2のリエントリーカプセルが帰還する当日でもありました。そこで、関連する当方の研究を簡単に紹介いたしました。

3.1 リュウグウ由来の流星出現について

はやぶさ2 ミッションの一つとして、2019年4月5日にインパクトを小惑星リュウグウに衝突させるミッションが実施された。

この時のエジェクタ（噴出物）が地球に到達する可能性についてシミュレーションにより解析したところ、2020年と2033年にその可能性があることが判明しました。しかしながら2020年のケースでは、高速で放出した小さいダストの到達が予想され、例えば流星が出現した場合でも相当暗いものであることが予想される状況でした。

そこで筆者らは、2020年11月21～24日に東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡（図15）にトモエゴゼンカメラ（図16）を



図15 木曾のシュミット望遠鏡

1974年（昭和49年）完成の古い望遠鏡であるが、近代的な撮影装置（トモエゴゼンカメラ）により大進化を遂げている。

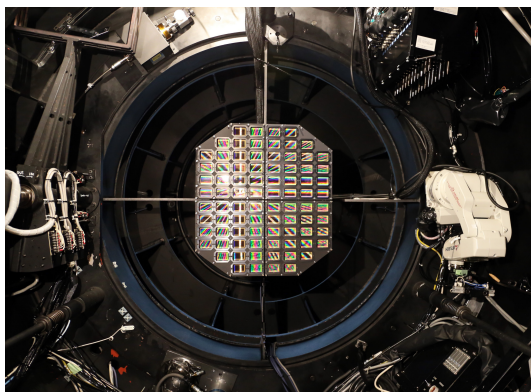


図16 トモエゴゼンカメラのチップ [12]

84枚のCMOSチップにより広範囲を撮影する。

取り付けられたシステムにて、放射点方向を撮影し、この流星を捉えていないかどうかを探ることにしました。トモエゴゼンのシステムは、直径9°の範囲を0.5秒露出で撮影し続けるシステムで、12等級までの流星撮影実績があります。観測は、晴天だった2夜合計3時間で実施され、トータル100万コマ以上の画像が得られています。現在、解析作業を実施中です。

4. ふたご座流星群

講演日は、ふたご座流星群の極大日（12月

13～14日)に近かったため、この情報提供も行いました。

4.1 ふたご座流星群の出現予報

ふたご座流星群の母天体は、小惑星フェートンです。巨大な流星群を生み出しているため、この天体は過去に彗星活動がみられたものの、現在は揮発成分のほとんどを放出し尽くし、小惑星で観測されていると一説には考えられています。このため、流星物質が放出された時期は少なくとも数千年以上前と推測され、ダスト・トレイルによる予報は大変困難な状況です。そこで毎年の流星観測データの結果から、各年の状況（極大時刻、放射点の高度、観測地の空の状況）により、出現を予報しています。なお観測データは、内山茂男氏（日本流星研究会）による集計データ[13]を用いています。

予報データは、筆者のウェブ[14]で公開しています。参考として東京の予報値を紹介します（表3）。

表3 2020年のふたご座流星群予報 [14]

時刻	良好な観測地 (5.5等まで 見える空)	郊外 (4等まで 見える空)	市街地 (2等まで 見える空)
12月12日夜～13日朝			
12日21時頃	約10個 (8～12個)	約4個 (3～4個)	約1個 (1～1個)
13日0時頃	約19個 (15～22個)	約7個 (6～8個)	約2個 (2～2個)
13日3時頃	約22個 (18～25個)	約8個 (7～10個)	約2個 (2～3個)
12月13日夜～14日朝			
13日21時頃	約28個 (23～32個)	約11個 (9～12個)	約3個 (2～3個)
14日0時頃	約53個 (43～61個)	約20個 (16～23個)	約6個 (5～6個)
14日3時頃	約59個 (47～67個)	約23個 (18～26個)	約6個 (5～7個)
12月14日夜～15日朝			
14日21時頃	約23個 (19～27個)	約9個 (7～10個)	約2個 (2～3個)
15日0時頃	約30個 (24～34個)	約12個 (9～13個)	約3個(3～ 4個)
15日3時頃	約24個 (19～27個)	約9個 (7～10個)	約3個 (2～3個)

東京付近での予報値。

4.2 ふたご座流星群からの隕石は生じるか

一般的に、流星群の母天体は彗星であることが多く、流星の元となる流星物質は、ゆるく結合した中が「スカスカ」なダストだと推測されています。このため「(彗星由来の)流星群からの隕石落下は無い」とまで言われてきました。

一方でふたご座流星群の場合は、流星物質の密度が大きいという過去の研究も存在します。このため、フェートンは過去においても小惑星で、小惑星のまま何らかの原因でふたご座流星群の元となるダストの大放出が起きたと考える研究者も存在します。

SonotaCo ネットワークで実際に観測されたふたご座流星群の流星で調べてみると、2017年12月14日0時22分に出現した流星で、高度37kmまで光っていたという実績があります(図17)。30km以下まで光っていると、隕石落下の可能性が高まりますので、まだあと一歩というところですが、流星群の流星の中では相当低い高度と言えます。今後、ふたご座流星群からの隕石落下はあるのか、という視点も大変興味深いです。

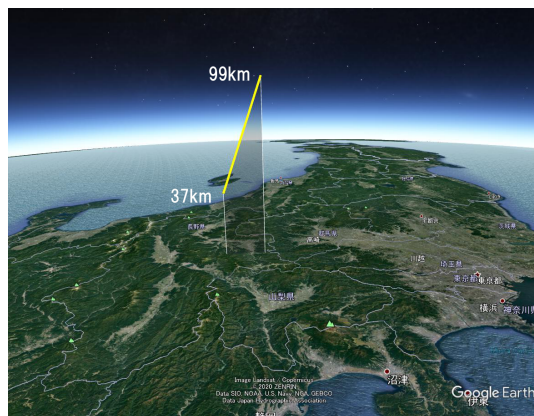


図17 低い消滅点のふたご座流星群流星
2017年12月14日0時22分53秒に出現したふたご座流星群に属する流星。

文 献

- [1] KAGAYA (2020), Youtube サイト.
https://www.youtube.com/watch?v=Muk_XjDiNew
- [2] SonotaCo ネットワーク.
<https://sonotaco.jp/>
- [3] 上田昌良 (2020), パーソナルコミュニケーション.
- [4] 司馬康生 (2020), 「習志野隕石(仮称)の落下」, 天文回報, **938**: pp.19-22.
- [5] 上田昌良 (2020), SonotaCo ネットワークウェブ「流星談話室／習志野隕石火球(2020年7月2日南関東衝撃波火球)」.
<https://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=4610>
- [6] 佐藤幹哉 (2020), 「大火球の経路解析と隕石発見」, 月刊星ナビ 2020年9月号, pp24-29.
- [7] プレスリリース「各地で観測された火球が隕石であることを確認」, 令和2年7月13日, 独立行政法人 国立科学博物館.
- [8] プレスリリース「【国立科学博物館】続報!!あの火球由来の隕石の2つ目を千葉県船橋市で発見!」, 2020年8月3日14時16分, PR TIMES のウェブ.
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000120.000047048.html>
- [9] プレスリリース「【国立科学博物館】習志野隕石の新たな破片(習志野隕石3号)が発見されました」, 2021年1月12日14時00分, PR TIMES のウェブ.
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000195.000047048.html>
- [10] 佐藤幹哉 (2020), Youtube サイト.
<https://www.youtube.com/watch?v=OG4O1bcqidE>
- [11] 山田真澄 (2020), 「2020年7月2日の火球の軌道の推定」.
<http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/fireball2020/index.htm>
- [12] 「Tomo-e Gozen フルモデル ファーストライト」, 東京大学木曾観測所,
http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/tomoe_fm_firstlight.html
- [13] 内山茂男 (2020), 「ふたご座流星群出現状況」.
<http://s-uchiyama.na.coocan.jp/meteor/shwr-act/12gem-act.html>
- [14] 佐藤幹哉 (2020), 「2020年のふたご座流星群の情報」.
<http://meteor.kaicho.net/gem2020.html>



佐藤 幹哉

* * * * *