防衛大学校理工学研究報告
第 64 巻　第 1 号
令和 8 年 9 月

＜論文＞

2025 年ふたご座流星群に出現したグリーンファイアボール

齋藤　拓磨 *　釜谷　秀幸 **

（令和 8 年 3 月 29 日受付：令和 8 年 5 月 27 日受理）

A green fireball spotted during the 2025 Geminids

By Takuma Saitoh * and Hideyuki KAMAYA **

Meteors are iconic astronomical phenomena that capture significant public interest. Meteor showers, in particular, allow for many sightings within a short window and are regularly forecasted in news and on social media. Exceptionally bright meteors are classified as fireballs, originating from space debris ranging from pebble to rock size. Any object shining brighter than Venus (magnitude -4 or less) is termed a fireball, whether it vaporizes in the atmosphere or lands as a meteorite. Due to their intensity, they can sometimes be seen during the day and may be accompanied by sonic booms or shock waves. A specific subset is the “green fireball” phenomenon − long-lasting, green-tinted events. Numerous reports emerged from the American Southwest in the 1950s, leading to military investigations like Project TWINKLE. While artificial origins were ruled out, their physical cause remained obscure due to a lack of photographic evidence. Today, the ubiquity of smartphones has brought renewed attention to these events. This study re-examines the luminous mechanisms of green fireballs. Our analysis suggests that their origin is not a single process, but rather altitude-dependent: High Altitude: At low atmospheric densities, excited oxygen molecules and atoms produce green emissions similar to auroras. Low Altitude: Increased atmospheric density causes significant ablation. Nickel from iron meteorites vaporizes and radiates strongly in the green spectrum. Furthermore, the recent observations of distinct flickering suggest grazing fireballs − high-rigidity iron meteorites entering at shallow angles. We conclude that green fireballs are likely grazing iron meteorites whose luminosity is driven by these dual atmospheric and metallic processes.

Keywords: Fireball, Meteor Shower

1. 序論

流星とは、宇宙空間に存在する小さな塵や岩石のかけらが地球の大気に高速で突入し、大気によって加熱され光を放ちながら燃え尽きる現象のことで、一般的には「流れ星」と呼ばれる。特に塵は、主に彗星や小惑星が放出したものであり、地球がそれらの塵の軌道を通過するときに流星が多く出現し「流星群」と呼ばれる。この流星群の出現期間は、太陽に近づいた彗星からはがれた流星体が彗星軌道上に拡散し公転を始めることから、流星体の拡散距離程度で決まる。また、地球も太陽を公転していることから、地球と流星体の衝突である流星群の発生時期と方位を適正に予測できる。流星群に属さない流星は散在流星と呼ばれ、大気中で燃え尽きる岩石である場合も多い。

流星の中でも特に明るく輝き、時には隕石として

* 防衛大学校 70 期
** 防衛大学校地球海洋学科

地上に落下する天体を「火球」と呼ぶ。また、火球の本体が非常に高温にさらされるため、本体が分裂する様子も知られている。つまり、場合によっては、地上への破壊的な影響を及ぼし被災が生じ得る[1),2)]。

以上のように、流星や火球はその正体も含めて良く理解されている[3)-5)]が、残された課題としてグリーンファイアボール問題が知られている[6),7)]。グリーンファイアボールは、通常の火球と比べて極めて強い緑色を放つものである。

グリーンファイアボールと視認される通常の隕石とは異なる軌道や色を持つ発光体が、軍事拠点の近くで何度も目撃され、プロジェクト・トゥインクルと呼ばれる活動が行われた[8),9)]。米軍に「ソ連の偵察機ではないか？」「新兵器のテストか？」という安全保障上の懸念があったためである。1940 年代後半から 50 年代にかけてのニューメキシコ州は、ロスアラモス国立研究所やサンドイア基地、ホワイトサンズ・ミサイル実験場といった、当時のアメリカにとって「最も重要な機密拠点」が密集しているエリアであった。そこで「緑色の火球」が頻発したため、単なる自然現象とは片付けられない緊迫感が生じていたのである。

この種の誤認は、安全保障体制に混乱を引き起こす可能性があるので無視できない。幸い、近年の観測技術の進歩や裾野の広がりにより、世界各地の全方位カメラ・衛星観測時のビデオにグリーンファイアボールがたまたま映り込み記録されつづけ、それは火球の一種であると分かっている。ただし、分光観測例が無いことから、無理のない説明として、緑色の光はおもに隕石中のニッケルやマグネシウムなどの金属元素の炎色反応、あるいは高層大気中の酸素イオン化によって生じるとする仮説が主流となっている。

現状では、1940 ～ 50 年代に報告されたように「低空を水平に飛ぶ」「音がしない」「残骸が見つからない」タイプの“グリーンファイアボール”を、どこまで通常の火球現象で説明できるかが再検討されている。言い換えるなら、グリーンファイアボールは現在では自然現象としての理解が進みつつある一方で、完全には説明しきれない報告も残る“部分的未解明現象”として、天文学・気象学・電磁気学の複合的な観点から研究が続けられている[10)-18)]。

さて、既存の研究では、発光現象が極めて短時間のために望遠鏡をそこに向けることができないため、分光観測さえできず、グリーンファイアボールの正体は曖昧なままである。しかし、近年のスマートフォンの普及で、アマチュア天文家からもグリーンファイアボールの写真報告が得られるようになった。2 点観測（視差）と基線距離（GPS 位置の差）により、概ねのグリーンファイアボールの高度が得られ、他の火球や流星と発光高度（大気密度）は大きく異ならない場合が多いことは確立した。しかしまだまだ事例研究が足りない現象である。そこで本研究では、グリーンファイアボールの発生条件や本体に関する現状の理解をまとめ、最近の観測事例を用いて、その正体の再検討を行う。

2. 隕石の種類と構成物質の概要

代表的な隕石を分類し、構成物質によってどの様な発光をするのかをここでまとめる。隕石を分類することで、隕石が太陽系形成のどの段階で、どのような母天体から来たのかを知るための重要な手がかりが得られることになる。その分類学は一つの学問体系を成すが、ここではごく代表的な隕石の種類を以下にまとめる。これらは、便利のため、付録として表 1 にまとめている。

隕石は主に石質隕石、鉄質隕石、石鉄隕石に分類され、その約 9 割を石質隕石（岩石）が占める。ここで、コンドルールは石質隕石のサブ分類であるコンドライトに特有の、急速に冷却した際に形成された球状の粒子である。コンドルールを持つかどうかが、原始的（コンドライト）か、分化している（エイコンドライト）か、を分ける大きな指標となって

いる。また、分化とは母天体が熱により融解し、重い成分（鉄ニッケル）が中心核に沈み、軽い成分（ケイ酸塩）がマントルや地殻を形成する過程に相当することである。この分化を経た天体から来た隕石が、鉄質隕石、石鉄隕石、エイコンドライトである。

ところで、隕石の母天体が確実に知られている例は少ない。現在では、エイコンドライトの一種であるHED隕石は（4）Vestaの衝突クレーター形成由来の破片、普通コンドライト（LLコンドライト）がS型小惑星、炭素質コンドライト（C1コンドライト）がC型小惑星から来たことが、探査機による観測やサンプルリターンの探査ミッションから明らかにされている（Jenniskens and Devillepoix（2025）のTable 9など）[19]。なお、HED隕石とは、エイコンドライト（無球粒隕石）の中でも最も代表的かつ重要なグループで、Howardite、Eucrite、そして、Diogeniteの頭文字を取った呼称である。

HED隕石の起源は探査機Dawnの観測成果[20]、普通コンドライトおよび炭素質コンドライトの起源は、HAYABUSAによるS型小惑星の（25143）Itokawaおよび HAYABUSA2によるC型小惑星の（162173）Ryuguへの探査ミッションの成果であった[21),22]。現在ではOSIRIS-RExによるB型小惑星の（101955）Bennuのサンプルリターンミッションが完了し、その分析結果が待たれる状況で、初期分析の報告では炭素質コンドライト（Clコンドライト）に近いとされている[23]。

後述する鉄質隕石の母天体はM型小惑星と考えられている。M型小感星は鉄やニッケルに富む小天体だと考えられており、M型小惑星である（16）Psycheに向けて2023年に探査機PSYCHEが打ち上げられ2029年に到達が見込まれている[24]。グリーンファイアボールが鉄質隕石と関連するならば、グリーンファイアポールの物理的特性を理解し、その軌道要素を正確に読み解くことで、その隕石がどこから来たかを議論する余地が生まれると期待される。また、隕石の母天体である小天体は分光スペクトル観測の特徴から分類分けがされる。分類はおもにTholen system[25]または、Bus-DeMeo system[26),27]が用いられることが多い。

3. グリーンファイアボールモデル

3. 1 流星体と大気加熱

まず、流星体に対する大気加熱の基本モデルを確認することにする。流星体は大気からの摩擦を被ることより、次のように運動方程式を考えることにする。

運動方程式：$m\frac{dv}{dt}=-\frac{1}{2}C_D\rho_a A v^2$ (3-1)

各記号の定義は、m：流星の質量、v：流星の速度、t：時間、C_D：抗力係数、ρ_a：大気密度、A：流星の断面積、となる。

この式によると、流星体は大気への突入とともに、減速を受ける。大気密度に比例することは重要な点である。この減速と同時に、流星体の質量が抉られていくことになり、これをアブレーションと呼ぶ。その評価式は

質量損失（アブレーション）方程式：

$$\frac{dm}{dt}=-\frac{1}{2}\frac{\Lambda\rho_a A v^3}{\zeta} \quad (3\text{-}2)$$

である。各記号の定義はΛ：熱伝達効率、ζ：蒸発・融解エネルギーである。速度の3乗に比例することが特筆に値する。

3. 2 発光量の評価

以上の評価式を考慮し、以下のように発光量を評価するし、典型的な温度が約4000度になることを示す。

発光量（発光強度）の式：

$$I=\tau\left(-\frac{1}{2}\frac{dm}{dt}v^2+mv\frac{dv}{dt}\right)\approx-\frac{1}{2}\tau\frac{dm}{dt}v^2 \quad (3\text{-}3)$$

発光量の速度・密度依存性の式：

$$I\approx\frac{1}{4}\tau\frac{\Lambda}{\zeta}\rho_a A v^5\sin\gamma \quad (3\text{-}4)$$

と整理する。ここで τ は発光効率であり天体表面付近での光学的厚さに相当する（ただし、光学的厚さは1より小さくある必要がある）。そして、γ は突入角度である。式（3-3）に入射角の効果を明示すると煩雑になるが、幸い、重要な効果を際立たせることにより、式（3-4）のように明瞭に書き下せる。

さて、特に速度の影響が大きく、角度の補正、大気密度で決まることがわかる。前の式では大気密度 ρ_a が増えるほど発光量 I が大きくなった。しかし、実際には流星表面温度は数千K程度で頭打ちとなり観測的にも約4000 K前後が上限と考えられる。つまり、加熱と冷却のエネルギーバランスを考える必要がある。

大気との衝突による加熱：$Q_{in} = \frac{1}{2}\Lambda \rho_a A v^3$ (3-5)

流星表面温度Tの黒体放射冷却（黒体近似）：

$$Q_{out} = \varepsilon \sigma A T^4 \tag{3-6}$$

ここで、σ はステファンボルツマン定数で、ε は放射効率であり、黒体放射を仮定する際には1とする。これらが等しい（$Q_{\mathrm{in}} = Q_{\mathrm{out}}$）とすると、

$$\rho_a = \frac{2\varepsilon\rho T^4}{\Lambda v^3} \tag{3-7}$$

となる。上限表面温度Tは後の節で利用するため4000 K（定常値）を仮定すると

$$\rho_a \lesssim \rho_{a,max} = \frac{2\varepsilon\sigma\,(4000\,\mathrm{K})^4}{\Lambda v^3} \tag{3-8}$$

となる。これが「発光に寄与できる上限大気密度」となる。これ以上密度が高くなると、この温度が維持される限り、大気加熱は蒸発や破砕、衝撃波形成に使われ、光には変換されにくくなる。したがって、発光量は

$$I \propto \min(\rho_a, \rho_{a,max}) \tag{3-9}$$

と表すことになる。つまり、高高度では $I \propto \rho_a$ であり、低高度ではある速度に対して発光が飽和する。

さらに、流星体の代表サイズをRとし、断面積 $A = \pi \mathrm{R}^2$ となることから

$$I \approx \frac{1}{4}\tau\frac{\Lambda}{\zeta}\rho_a(\pi R^2)v^5\sin\gamma \tag{3-10}$$

で I はRの2乗に比例する。密度に対しては（3-8）による制限があるため、速度の依存性が一番大きいことがわかる。

ここでTが4000 Kが妥当かどうかを吟味してみる。金星と同じ明るさ以上に明るい流星を火球と呼ぶことが多い。この条件を満たす条件を考えてみる。先に温度制限をうけることを前提にすると（簡単のため）、

$$\rho_{a,max} = \frac{2\varepsilon\sigma T^4}{\Lambda v^3} \tag{3-11}$$

を採用すると、このときの発光量は

$$\begin{aligned} I_{max} &\propto \rho_{a,max} R^2 v^5 (\sin\gamma) \\ &\propto \left(\frac{1}{v^3}\right) R^2 v^5 (\sin\gamma) = R^2 v^2 (\sin\gamma) \end{aligned} \tag{3-12}$$

金星の明るさに揃えるための代表的な数値のセットは

$\tau = 0.01$、$\varepsilon = 1$、$\mathrm{T} = 4000\,\mathrm{K}$、
$\zeta = 6\times10^6\,\mathrm{J\,kg^{-1}}$、$\sin\gamma = 1$

とできる。金星の地上からのフラックスを

$$F_{\mathrm{Venus}} \approx 2.5\times10^{-6}\,\mathrm{Wm^{-2}} \tag{3-13}$$

そして火球までの距離（典型的な高さ）を h とし、

$$F_{\mathrm{Venus}} = \frac{\mathrm{I_{max}}}{4\pi \mathrm{h}^2} \tag{3-14}$$

より、

$$v = \sqrt{\frac{(8\zeta F_{\mathrm{Venus}}\mathrm{h}^2)}{(\tau\varepsilon\sigma\mathrm{T}^4\mathrm{R}^2)}} \tag{3-15}$$

と表すことが出来る。試みに、火球高度100 km地点における速度 v を評価すると、半径 $R = 0.01$ m で $v \approx 3.7$ m/s、半径 $R = 0.005$ m で $v \approx 7.5$ m/s、半径 $R = 0.001$ m で $v \approx 37$ m/s となる。ここで、明るい（速度が速い）火球に着目していることから、その突入速度が約30 km/sと評価できることがわかる。

最後にTとρ_aの関係からTを概算してみる。(3-7) 式より

$$T^4 = \frac{\Lambda v^3}{2\varepsilon\rho}\rho_a \qquad (3\text{-}16)$$

で、$v = 30$ km/s、$\rho_a = 1 \times 10^{-6}$ kg m^{-3}（高度 100 km 付近での代表的な大気密度）を採用することで

$$T \approx 3.9 \times 10^3 \text{ K}$$

となり、典型的な温度を約 4000 K とすることが妥当であることが考えられる。

3. 3 オーロラとの比較

緑色に見える大気の輝線放射現象としてはオーロラが一番有名である。その特徴はカーテン状の形状に、淡い発光である。さて、仮に、グリーンファイアボールの原因が大気の輝線放射ならば、酸素分子などの大気組成量で明るさが決まることとなる。よって､高高度だけに突入するならば､グリーンファイアボールを説明することは可能である。高高度において大気の輝線放射が緑色として観測されることは、科学的に十分可能であると考える。オーロラなどで有名な緑は、主に O の禁制遷移によるものであり、放射寿命は 0.7 ～ 0.8 秒と比較的長い。そのため寿命が長い分、周囲の分子との衝突で光る前に失活する衝突脱励起（クエンチング）の影響を強く受ける。

流星が大気中に突入すると、一般に高度約 120 km 付近から発光を開始し、そこからより低高度へと進入していく。高高度領域では大気密度が低いため、酸素原子の励起準位 O は衝突によってクエンチングされにくく、557.7 nm の緑色輝線が放射されやすいという利点がある。しかしその一方で、密度が低いということは励起される酸素原子の絶対数も少ないことを意味し、発光強度そのものは小さくなりやすい。ここには明確なトレードオフが存在する。

発光量は本論文での簡略化したアブレーション支配モデルを採用するならば、高高度では大気密度ρ_aが小さい分、発光量は理論的に減少する傾向を持つ。したがって、高高度で緑色発光が目立つためには、密度の低さによる不利を補う条件が必要となる。そのためには、まず流星体が十分に高速で突入し、衝突励起や電離を効率的に引き起こすことが重要となる。速度が高いほどエネルギー供給が増し、低密度環境でも励起酸素の生成率を高めることができる。また、発光が主としてクエンチングの弱い高高度で生じることも必要条件となる。さらに、黒体的な連続光や流星体由来の金属輝線が相対的に弱く、酸素の緑色輝線がスペクトル上で優勢になる状況であれば、観測上「緑色の火球」として認識されやすくなる。このように、高高度における大気起源の緑色発光は理論的には成立し得るが、その可視的な顕在化には、速度・高度・発光成分の相対強度といった複数の条件が同時に満たされる必要があり偶然性が必要とされるかもしれない。

3. 4 炎色反応による制限

次に、隕石の炎色反応という観点から発光の持続性について考察する。一般に火球は地球大気へ突入後、空気との衝突によって連続的に加熱されるが、その加熱率は高度の低下に伴う大気密度の増加に依存するため、温度は時間とともに大きく変化する。すなわち、流星体の温度は一定ではなく、アブレーションの進行や破砕によって急激な変動を示すことが多い。このような非定常的環境下では、特定元素の「炎色反応」に相当する発光が火球の寿命全体にわたって安定的に持続することは容易ではないと考えられる。

もし緑色発光がニッケルなどの金属元素に起因する炎色反応的機構によって維持されるとすれば、流星体表面への入熱と放射冷却がある程度釣り合い、発光温度が準定常的に保たれる必要がある。この条件は、加熱率が急激に変化しない環境、すなわち大気密度が比較的一様な領域を長く飛行する場合に成

立しやすい。

その観点から考えると、グリーンファイアボールが持続的に緑色を呈するためには、急激な高度変化を伴う急角度突入よりも、比較的浅い突入角を持ち、一定高度帯を長距離にわたって飛行する軌跡を取る方が有利であると推測される。大気密度が大きく変化しない横方向に近い軌道では、アブレーション率や温度変動が緩やかとなり、特定金属の線スペクトルが優勢な状態が持続し得る。この種の火球はグレイジングファイアボールと呼ばれる。

このように、緑色発光の持続性は単なる元素組成だけでなく、突入角度や高度変化率といった軌道力学的要因とも密接に関係している。したがって、グリーンファイアボールの理解には、発光スペクトルだけでなく、その飛行軌跡および高度変化の解析を統合的に行うことが本来は重要であり、これらが今後の課題である。

3. 5 隕石モデル

グリーンファイアボールとなる流星体はマグネシウムに比べ、ニッケルの組成が多いことが期待されている。そのため炎色反応が緑となる火球の本体はニッケルを多く含む鉄質隕石であると考えられる。特にオクタヘドライトと呼ばれる隕石がニッケルの量が多いとされている。このオクタヘドライトは鉄質隕石のもっとも典型的なものであると知られている。以上より、グリーンファイアボールの本体は典型的な鉄質隕石で突入した高度があまり変わらないものと結論される。

4. 2025 年 12 月 13 日の事例

昨年暮れ（2025 年 12 月 14 日）、グリーンファイアボールの写真が SNS ネットワーク上に報告された。グリーンファイアボールは散在的と想定されてきたが、今回の現象は、ふたご座流星群の一つとして視認されている（写真）。ふたご座流星群の母彗星は小惑星（3200）Phaethon である。この軌道と地球の公転軌道が交差しているために流星群が生じる。

さて、（3200）Phaethon は C 型小惑星と似たグループである F 型小惑星に分類される。これは炭質を含む小惑星グループだが、F 型に属する（3200）Phaethon は水の吸収線がないことが知られている。これらのことから、もとは輝星で揮発性成分が豊富だったが、それらが近日点通過によりなくなったと考えられている。

興味深いことに、ふたご座流星群の流星体は一般的な彗星起源の流星体より密度が高いことが知られている。先の段落で述べたことと関連するが、この原因は母彗星がしょっちゅう太陽を公転するためその表面がどんどん太陽光や太陽風により削られて、汚れた雪は極度に失われ、そして内部の密度の高い物質が選択的に流星体になると期待されている。このことより火球の発生頻度が他の流星群の中では多い傾向がある。

写真を見ると、発光初期段階は点滅しているように見える。これは火球本体が球体から大きく外れており、その回転が反映していることと考えられる。その後増光することから、順調に地球大気により加熱されていることが分かる。そして緑色光子による放射冷却でバランスがとられているのであろう。これを可能とするためには、大気摩擦のサチュレーションが必要でありかつ、一定高度付近での現象であることを期待させる。特に、最後まで緑であることがその必要条件を要する。

さて、ふたご座流星群の母天体である（3200）Phaethon は小惑星に分類される天体であり、近日点通過時に強い太陽加熱を受ける。このような熱的作用により揮発性物質は失われやすく、比較的密度の高い岩石質あるいは金属成分を含む物質が供給されている可能性は否定できない。つまり、グリーンファイアボールは、「鉄質型隕石がほぼ一定高度を飛行する現象」であることと矛盾はしない。グレイ



図１　星座や宇宙の幻想的な世界を描き、映像としてプラネタリウムや写真で表現するクリエイターである加賀谷 穣氏提供。グリーンファイアボールの撮像写真。日時と時刻及び方位から、ふたご座流星群に属することが分る（カラー写真は防衛大学校紀要電子版サイトを参照）。

ジング火球の一種と考えることが可能である。

しかしながら、一般論として、(3200)Phaethonのような天体は未分化天体であるため、Niなどの鉄質成分の含有量比率は小さいことも予想される。つまり、今回のグリーンファイアボールは「鉄質型隕石が飛行する現象である」とは考えにくいかもしれない。そうすると、偶然にも鉄質成分が濃集したダストが突入した散在火球である可能性も残る。この場合はNiの成分濃度の閾値を示唆しているかもしれない。あるいは、ふたご座流星群のグリーンファイアボールは、酸素原子による発光が見えていた可能性も残されることになる。

(3200)Phaethonは現在開発中の深宇宙探査技術実証機DESTINY+によるフライバイ探査の対象天体でもあり、将来的に母天体の組成があきらかになれば、今回のグリーンファイアボールの母天体がどのような組成に対応した発光現象であったかを理解することも期待される。

5. 結論

本研究では、観測高度によって緑色を生じさせる主因が異なると仮定し、以下の二つの標準的モデルを現代的な代表値を用いて検討しまとめている。

• 高高度（約 80-120 km）：大気起源の酸素（O）による発光：高高度では太陽紫外線により酸素分子が解離し、酸素原子が卓越する。この低密度環境下では、流星体の突入による衝撃加熱・電離を経て、酸素原子の禁制遷移（557.7 nm）が引き起こされる。これはオーロラと同じ緑色の輝線であり、衝突による失活（消光）が少ない高高度特有の持続的な発光要因と考えらえる。

• 低高度（約 40-70 km）：隕石由来のニッケル（Ni）による炎色反応が卓越する。大気密度が高い低高度では、酸素の禁制遷移は衝突消光により消失する。代わって、隕石の主要成分である鉄・ニッケル相が加熱・破砕される過程で放出される「ニッケル原子」の許容遷移（540-560 nm 付近）が主因となる。これは人間の視覚感度が高い緑色領域に合致し、火球のフレア（急増光）に伴う瞬間的な緑色の輝きを説明し得る。

グリーンファイアボールの緑色発光は、単一の要因ではなく、「高高度における大気起源（酸素）」と「低高度における隕石物質起源（ニッケル）」という、高度に応じた異なる物理過程の重畳であることが分った。散在火球や大気中の酸素の発光である可能性は残っているが、今回の事例では後者を支持し得ることは興味深い。今後は、これらの発生条件や発光継続時間を拘束条件として整理し、組成や大気条件の整合性を検証することで、グリーンファイアボールが出現するための条件を説明する基本的な物理モデルを構築していくことが可能となるだろう。

参考文献

1) “Falling to earth: The Chelyabinsk Meteorite”, National Museums Scotland (2015)

2) “Notable Asteroid Impacts in Earth’s History”, The Planetary Society (2023)

3) Fred L. Whipple, “A Comet Model. I. The Acceleration of Comet Encke”, the Astrophysical Journal Vol.111, 375-394 (1950)

4) Fred L. Whipple, “A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors”, The Astrophysical Journal Vol.113, pp.464-474 (1951)

5) Fred L. Whipple, “A Comet Model. III. The Ice-Conglomerate Hypothesis”, The Astrophysical Journal Vol.116, pp.377-395 (1952)

6) Maclear, J. P., “A Bright Green Meteor”, Nature Vol.43, p.30 (1890)

7) Cockerell, T. D. A., “A Greenish Meteor”, Nature Vol.41, p.369 (1980)

8) “Final Report on Project Twinkle”, 米空軍ケンブリッジ研究センター (AFCRC) (1951)

9) Edward J. Ruppelt, “The Report on Unidentified Flying Objects”, (1956)

10) Ott, T., et al., “Infrasound and satellite detection of fireballs”, Astronomy & Astrophysics Vol.654, pp.A98 (2021)

11) Borovička, J., et al., “Data on 824 fireballs: trajectories and properties”, Astronomy & Astrophysics Vol.667, pp.A157 (2022)

12) Brian J., et al., “Validation of ICON MIGHTI Thermospheric Wind Observations: 2. Green Line Comparisons to Specular Meteor Radars Harding”, JGR Space Physics, Vol.126, pp.A028947

13) Teitelbaum, H., et al., “Simultaneous measurements of meteor winds and green line intensity variations: Gravity waves and planetary waves”, Journal Geophysical Research, Vol.88, pp.7767 (1981)

14) Prikryl, P., “Green corona, geomagnetic activity and radar meteor rates”, Bull. Astron. Inst. Czechosl., Vol.30, pp.321-330 (1979)

15) Baggaley, W. J., “The Velocity Dependence of Meteoric Green Line Emission”, Bull. Astron. Inst. Czechosl., Vol.28, pp.277-290 (1977)

16) Rajchl, J., “On the possible connection between the auroral green line in meteor spectra and the head-echo phenomenon”, Bull. Astron. Inst. Czechosl. Vol.16, pp.282-284 (1965)

17) Millman, Peter M., “Meteor News (The Auroral Green Line in a Leonid Spectrum)”, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Vol.54, pp.189-192 (1960)

18) Halliday, Ian “Auroral Green Line in Meteor Wakes”, The Astrophysical Journal, Vol.131, pp.25-35 (1960)

19) Jenniskens, P., Devillepoix, H. A. R., Meteoritics and Planetary “Review of asteroid, meteor, and meteorite-type links”, Science Vol.60, ppp.928-973 (2025)

20) McSween, H. Y., et al., “Dawn; the Vesta-HED connection, and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites”, Meteoritics and Planetary Science Vo.48, pp.2090-2104 (2013)

21) Nakamura, T. et al., “Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence returned from samples”, Science Vol.379, pp.8671 (2023)

22) Nakamura, T. et al., “Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites”, Science Vol.333, pp.1113-1116 (2011)

23) Lauretta, D. S. et al., “Asteroid (101955) Bennu in the laboratory: Properties of the sample collected by OSIRIS-Rex”, Meteoritics and Planetary Science, Vol.59, pp.2453-2486 (2024)

24) Elkins-Tanton, L. T. et al., “Distinguishing the Origin of Asteroid (16) Psyche”, Space Science Reviews Vol.218, article id. 17 (2022)
25) “Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry”, Tholen, D. J., Ph.D. Thesis (1984)
26) Bus, S.-J., Binzel, R.-P, “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: The Observations”, Icarus Vol.158, pp.106-145 (2002)
27) DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., Bus, S. J., “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”, Icarus Vol.202, pp.160-180 (2009)

付録　**表 1**　隕石の種類一覧

分類	サブ分類	構成物質と特徴	関連する母天体	観測される割合（落下数）
石質隕石	コンドライト	カンラン石・輝石・金属鉄（Fe-Ni）を含む。コンドルール（球状粒子）を含み、太陽系形成初期の物質組成をほぼ保持	小惑星帯（未分化天体）	約 85-90%
	炭素質コンドライト（CI, CM, CV 等）	揮発性成分・水和鉱物・有機物を多く含む。密度が低く脆い	C 型小惑星	約 3-5%
	普通コンドライト（H, L, LL）	最も一般的。金属鉄含有量により分類	S 型小惑星	約 70%（石質中）
石質隕石	エイコンドライト	コンドルールを含まず、火成岩的構造。母天体内部で分化・溶融を経験	分化小惑星・月・火星	約 7-8%
	月隕石	斜長石・輝石主体。低 Fe	月	＜ 1%
	火星隕石（SNC）	輝石・長石。ガス包有物に火星大気成分	火星	＜ 1%
鉄隕石	オクタヘドライト	Fe-Ni 合金。ウィドマンシュテッテン構造	分化小惑星の核	約 5-6%
	ヘキサヘドライト	Ni 含有量が低い鉄	同上	＜ 1%
石鉄隕石	パラサイト	カンラン石結晶が金属鉄中に分布	核 - マントル境界	約 1%
	メソシデライト	角礫状。金属と玄武岩質岩石の混合	衝突で破壊された分化天体	＜ 1%