

宇宙と地球の謎を解く 流れ星の科学

日本の民間スタートアップ企業が2019年12月、宇宙から金属球を放出して人工的に流れ星を光らせるための人工衛星の打ち上げに成功した。流れ星は一体どのような原理で発光しているのか。人工的に発生させて流れ星を観測することで何が解明できるのか。夜空に輝く流れ星の科学に迫る。

2020年中に世界初の人工流れ星の実現を目指して、日本の民間スタートアップ企業がプロジェクトを進めている。
写真提供：(株) ALE

流れ星の素は彗星の塵

「星はすばる。ひこぼし。ゆふづつ。よばひぼし、すこしおかし。尾だになからましかば、まいて。」

これは平安時代中期、清少納言による随筆『枕草子』の一節で、現代語に訳すと「星といえは、すばる(プレアデス星団)。そして彦星(アルタイル)。宵の明星(金星)も良い。流れ星もそれなりに趣きがあって美しい。でも尾がなければもったいない」となる。「よばひぼし」の「よばふ」は平安時代の風習である「夜這い」の掛詞にもなっている。恋しいと思いつけた末、好きな人のところへ会いに行くことを、流れ星で例え、流れ星の尾(流星痕)は人目についてしまうので、尾がなければよかったのにと心情を表現している。

流れ星は人類が夜空を見上げたときから、多くの人々の心を魅了してきた。天文学として研究が本格化したのは19世紀前半からで、英語で流れ星は「meteor」と記すが、これは「meteorology(気象学)」に由来している。流れ星は気象現象の1つと考えられていたからである。こうした中、1833年、何十万個にのぼる流星嵐が北米東部地域で発生した。このとき米国の天文学者デニソン・オルムステッ

ドによって、流れ星が天空のしし座の1点(放射点)からシャワーのように流れ落ちて見えることが突き止められ、流れ星は気象現象ではなく宇宙空間を起源としていることが発見された。しし座流星群の流れ星は、33.2年周期で太陽の近くに回帰するテンペル・タトル彗星から放出された塵によって形成されたダスト・トレイル(塵のチューブ)の軌道が、地球の軌道と交差することで引き起こされる。交差付近ではダスト・トレイルの向こう側にしし座が見えるため、流れ星がしし座から飛び出してくるように見えていたのだ。

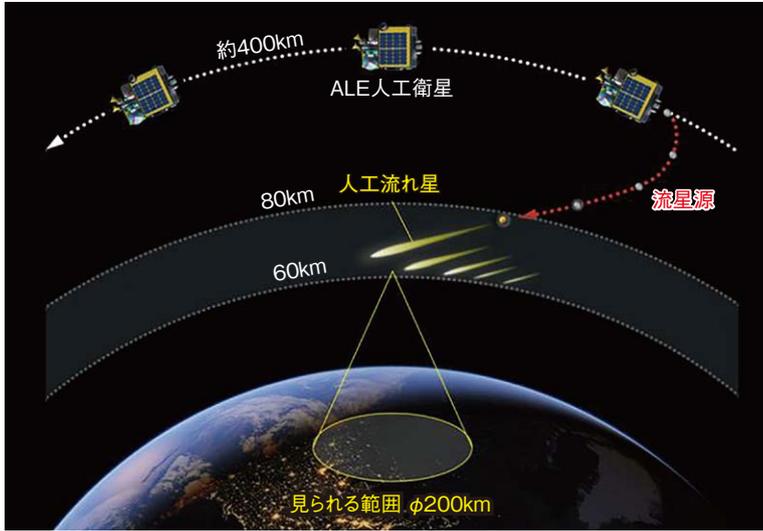
プラズマ状態で原子が発光する

流れ星とは、彗星や小惑星の母天体を起源とする「メテオロイド」と呼ばれる塵が、秒速12~72km(マッハ40~240)の超高速で、上空約100kmの大気圏に突入する時に発生する現象である。

高度100kmは真空ではなく、酸素や窒素が存在している。そこに塵が超高速で飛び込んでくると、空気の流れが塵前面で堰き止められて圧縮され、加熱される(図1)。この空力加熱や衝撃波加熱によって温度は数万℃に達し、塵から溶解した成分と、もともとある地

● 人工流れ星が発生する仕組み(図3)

流れ星の素となる粒(流星源)を搭載した人工衛星を、ロケットにより宇宙空間に打ち上げる。人工衛星が周回軌道に乗ったあと、内部に搭載した装置から流星源を正確な条件(位置・方向・速度)で放出する。流星源は約15分程度かけて地球の大気圏に突入し、天然の流れ星のように発光する。上空約60~80kmで輝く人工流れ星を、地上では直径約200kmのエリアから鑑賞することができるという。(資料提供：(株)ALE)



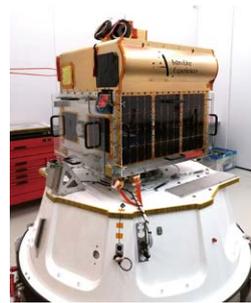
● ALE人工衛星初号機(図4)



ALEの人工流れ星衛星は東北大学と共同で開発された。2019年1月18日、JAXAイプシロンロケット4号機に搭載され、打ち上げに成功。初号機は2号機に反映するためのデータ集積や技術検証を行い、2号機の打ち上げから運用開始までの期間を最短化した。

(写真提供：(株)ALE)

● ALE人工衛星2号機(図5)



2019年12月6日、Rocket Lab社エレクトロンロケットに搭載され、打ち上げに成功した。2号機にはホワイト、グリーン、ピンク、オレンジ、ブルーの5色の流星源が400粒搭載された。運用試験などを経て2020年中に人工流れ星の実現を目指している。

(写真提供：(株)ALE)

● アーク風洞実験の様子(図6)

人工流れ星プロジェクトでは流星源をつくるため、JAXA宇宙科学研究所のアーク風洞装置で、シミュレーション実験が行われた。真空中にした装置内で、流れ星を発生させる粒子を模したサンプルに、高圧・高エネルギーのジェットを噴射させ、大気圏突入と同じ状況を再現したところ、シリウスに匹敵するマイナス0.86等星の明るさの発光を確認した。(写真提供：(株)ALE)



らと自動観測ソフトウェアを利用した夜間常時流星観測網などが発達し、流星群の活動や軌道についての新たな知見が次々と得られているものの、そのため、物理量を全て精度良く求めることができるのは稀で、決して手に取って答え合わせができないものを観測して組成や大きさ、軌道を推定しているというジレンマがあるという。

こうした中、日本の民間スタートアップ企業である(株)ALEが進めている人工流れ星プロジェクトが注目を集めている。人工衛星を打ち上げ、そこから流れ星の素となる流星源(金属球)を放出し、人工的に流れ星の現象を引き起こそうというものだ(図3~6)。流星源の組成や質量、大気圏への突入速度や突入角などはあらかじめ設定(あるいは調整)されているため、出現日時、場所と出現位置が明確となる。人工流れ星の現象が起こったとき、どのような挙動を示すのか、周到に準備された高精度の科学観測が可能となる。実際の観測データからモデル計算などによって導き出された推定値と答え合わせし、理論モデルに改良を加えていくことができるようになる。人工流れ星は、さまざまな物理パラメーターが不明の天然の流れ星を詳しく知るためのモノサシとなるのである。

期待される気象分野や宇宙産業への応用展開

流れ星の発光メカニズムを知ることで、さらに中層大気データの解析が可能となる。人工流れ星の発光する高さは、中間圏(60~80 km)と呼ばれ、地球と宇宙をつなぐエネルギーのやり取りが行われている。それが地球の気象にも大きな影響を及ぼしていることが最近分かってきている。中間圏の様子が詳しく分らないと、気象予報の精度を高めることができないとまで言われている。人工流れ星を発光させることで、中間圏の大気の密度が明るさによって推定できるとともに、人工流れ星の跡に長時間残る流星痕を発生させることで、大気の風速を推定することも可能になる。中層大気の密度や動きについてのデータが得られると、中長期的な地球規模での気候変動メカニズムを解明できるようになる。

古のころから、夜空に輝く流れ星に願いを託し、その美しさに魅了されてきた流れ星は今、科学の探求によって、宇宙と地球をつなぐ大きな謎を解く手がかりとなって夜空に瞬いているのである。

身近なところで行われる発光現象の利用

夜空を鮮やかに彩る花火や、鋼材を研削したときに飛び散る火花から鋼材を識別する火花試験など、身近なところでも発光現象が利用されている。

■ 炎色反応を利用した美しい花火

人工流れ星は、金属の炎色反応を利用して多彩な流れ星をつくり出しているが、この金属の炎色反応は、夜空を鮮やかに彩る花火などにも利用されている。

光と色は花火の演出効果において重要な要素である。夜空を彩る打ち上げ花火も小さな手持ちの閃光花火も、火薬にさまざまな金属を混ぜ、その炎色反応によって色とりどりの炎をつくり出している

金属を含む火薬が燃焼すると、炎が持つ熱エネルギーの影響で、金属の原子や分子が気体となって舞い上がる。このとき原子や分子の周りを回る電子が励起し、外側の軌道に移動する。しかしエネルギーが高い状態は炎がなくなれば、元の安定した基底状態に戻る。このときのエネルギーが光として放出される。元素によって電子配置が異なるため、それぞれの元素が特有の光を放つのである。

一般的な花火では、大きな花火玉の中に、2種類の火薬が入っている。1つは上空で花火玉を割るための火薬、もう1つは丸い粒状の「星」と呼ばれる小さな火薬でさまざまな色を生み出している。星には炎色反応を起こす金属が含まれている。黄色はNa、紅色はSr、緑色はBa、青色をつくるのはCu、この4つの金属元素を利用することで、多彩な色と濃淡をつくり出している。またMg、Al、Tiなどは、光の効果等に利用されている。上空で広がってから、色が美しく変化する花火は、星の真ん中にある芯に向かって、異なる色の火薬を重ね塗りしていく方法でつくられている。日本の花火は美を追求する花火師たちの職人技によって、金属の炎色反応から比類なき美しさを誇る芸術を手に入れたのである。



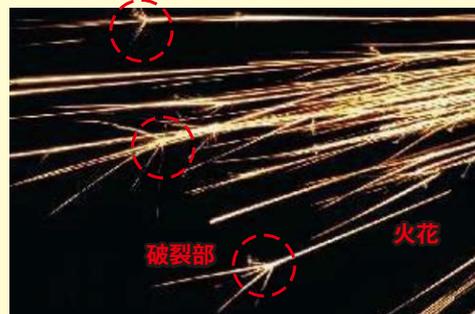
■ 鋼の発光現象を利用した 火花試験の自動識別システムの開発

金属の発光現象は身近なところでも利用されているが、とくに鉄鋼材料については、従来より火花試験等で利用されてきた。

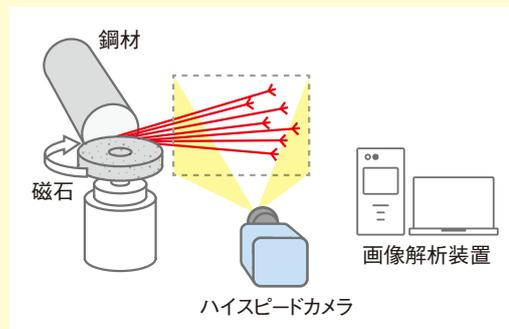
火花試験とは鋼材の種類が管理情報と一致していることを確認する試験工程の一つとして行われている。回転する砥石(研削機)を鋼材にあて、研削中に飛散する火花を観察し、その火花の形状や色などの特徴から鋼材に含まれる成分および含有量を識別している。火花は鋼材中の炭素含有量が多くなると、発生する火花の量および破裂(図7)が多くなる特徴を持つため、この特徴を人間が目で見えることで識別を行ってきた。しかし火花の特徴を識別するためには、高度な熟練技能が必要で、短期間での習得が困難なことや試験のさらなる安定化などの理由から自動化が求められている。

こうした中、火花を撮影し、画像解析によって火花の特徴を捉えることで鋼材の種類を識別できるシステムが開発された(図8)。人が目で見て捉えている火花の特徴を機器で捉えるため、ハイスピードカメラを用いて火花を撮影する条件を見出した。画像処理装置部に搭載された新しい画像解析プログラムは、従来のプログラムの課題であった画像解析精度および速度が改善され、画像解析により火花の量や破裂の数を算出し、それらの割合を評価することで鋼材に含まれる炭素含有量を±0.05%での識別を可能にしている。火花試験の機器試験化による精度向上や安定化に期待が寄せられている。

● 火花および破裂部の例(図7)



● 鋼材識別システム(図8)



資料提供：山陽特殊製鋼(株)