

流星に生命の起源を求めて

阿 部 新 助

〈宇宙科学研究所惑星研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: avell@planeta.sci.isas.ac.jp

矢 野 創

〈宇宙科学研究所惑星研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: yano@planeta.sci.isas.ac.jp

海 老 塚 昇

〈理化学研究所 VCAD 用高速計算デバイス開発チーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: ebizuka@riken.go.jp

春 日 敏 測

〈名古屋大学環境学研究科地球環境科学 〒464-0814 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: kasuga@eps.nagoya-u.ac.jp

杉 本 雅 俊

〈日本流星研究会／理化学研究所 協力研究員 〒560-0001 大阪府豊中市北緑丘豊中 3-1-1-302〉

e-mail: jmasa_sugimoto@gem.hi-ho.ne.jp

渡 部 潤 一

〈国立天文台情報公開センター広報普及室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: jun.watanabe@nao.ac.jp

彗星からもたらされる彗星塵は、原始地球の有機物の起源の候補として考えられているが、観測的な証拠はない。我々は、流星発光の中から彗星起源の有機物を見つけるために、紫外一可視超高感度ハイビジョン分光カメラを開発した。2001 年しし座流星雨の観測では、波長 300 nm 付近までの紫外領域を観測するために、大気散乱を抑えた高山観測をすばるサイトに展開し、波長 310 nm の OH の観測に初めて成功した。本論文では、流星発光としし座流星群を通した流星スペクトル観測について紹介し、OH A-X (0, 0) バンドの起源について議論する。



図1. しし座流星嵐映像。NHK が開発した超高感度ハイビジョンカメラ ($f = 28 \text{ mm}/F1.4$ レンズ, 視野 $59.7^\circ \times 33.5^\circ$) を用い、筆者らが参加した NASA 国際航空機観測ミッションで撮影した人類初の流星嵐。1 分間の合成画像で約 200 個の流星が乱舞している様子が分かる。

画像提供：NHK、矢野創（宇宙科学研究所）、
画像処理：中西昭雄（天文ガイド・誠文堂新光社）。

1. しし座流星群

～流星天文学の幕開け～

1998年2月28日、直径 $3.6\text{ km}^{1)}$ のテンペル・タットル彗星(55P/Tempel-Tuttle)は、その楕円軌道航行中で最も太陽に近づき、自転周期15時間20分²⁾で自転しながら33年振りにガスとダストを激しく放出していた。3月8日には、月までの距離のおよそ3倍にあたる地球軌道から 0.008 AU (120 万 km)のところを通過した。地球からは、約8等級の彗星コマと数分角に伸びる尾が観測されていた。このごくありふれた彗星が、過去200年間で最も流星をたくさん降らせた「しし座流星群」の母天体である。1833年11月13日未明には北米で1時間当たり1万個、1966年11月17日未明には同じく北米で1時間当たり15万個もの流星が降り注いだ。特に1833年の流星嵐では、オルムステッドらによって初めて科学的な観測が行われた³⁾。その結果、流星群が天空の一角から放射状に飛来するように見えるのは、お互いに平行飛行している微粒子の軌道の射影効果であることが突き止められ、放射点がしし座に留まっている観測結果から、流星の起源は宇宙空間にあることが明らかにされた。そして過去の文献データなどから1866年の再来が予想され、その前年に発見された55P/Tempel-Tuttleとの関連性も指摘されて、初めて流星の起源が彗星であることが認識された。ギリシア語で大気現象を意味する流星(meteor)は、紀元前340年のアリストテレスの教え以降、気象学(meteorology)として2千年以上も誤って解釈されてきた。しかし、1833年の流星嵐との遭遇で、流星も重要な天体現象の一つであると理解されたのである。「流星天文学」の幕開けである。

母彗星から放出されたダストは、母彗星が数～数十公転する間にダスト・トレイルと呼

ばれる公転軌道上に分布するダストのチューブを形成する⁴⁾。流星群、特に流星雨や流星嵐と呼ばれる現象は、地球がダスト・トレイル中の空間密度の濃い部分を横切る時に発生する現象であり、彗星軌道の外側、彗星の後方で濃いダスト・トレイルに遭遇しやすいことが経験的に知られている。一般に流星群は、地球とダスト・トレイル中心との距離がおおよそ 0.01 AU よりも近づかなければ発生しないと考えられているが⁵⁾、55P/Tempel-Tuttleがもたらすダスト・トレイルは、地球軌道に十分に接近あるいは直撃しており、毎年流星活動が見られる。特に母彗星が33.2年ごとに回帰する前後数年間は、過去の回帰に放出された濃いダスト・トレイルに遭遇することで流星の出現数は爆発的に増える。さらに、55P/Tempel-Tuttleは、軌道傾斜角 162° の逆行軌道で、正面衝突に近い形で地球に突入することから、秒速 72 km と地球軌道付近では太陽系起源で最も速いダストとして観測される。そのため、微小サイズのダストも明るく発光し、しばしば1時間に数千から数万の流星嵐を引き起こす。1999年11月18日2時(世界時)には、1866年の回帰で形成されたダスト・トレイルの中心と地球軌道との距離は約 10 万 km となり⁶⁾、西アジア、ヨーロッパ、アフリカ地域で1時間換算で約4千個の流星嵐が観測された⁷⁾。これは、1966年にアメリカで観測されて以来の流星嵐であった。近年の高感度カメラの進歩により、これまで版画や写真でしか記録されてこなかった流星嵐という稀少な現象を、このとき我々は初めて映像として残すことができたのである(図1)⁸⁾。そして、2001年11月19日18時(世界時)過ぎには、1866年に形成されたダスト・トレイルの中心に約 3 万 km まで接近し⁶⁾、日本では1時間あたり約3,000個の流星嵐が吹き荒れた⁹⁾。更に2002年11月19日には、同トレイルから 1 万 km

表1. 2002年11月19日(世界時)しし座流星雨予報

ダスト放出年代 (公転回数)	マクノート & アッシャー	ライティネンら	イエニスキンズ	観測適地
1766年(7公転前)	03:55 ZHR=1,000-3,000	04:03 ZHR=3,500	04:07 ZHR=4,900	ヨーロッパ西部
1866年(4公転前)	10:30 ZHR=3,500	10:40 ZHR=2,600	10:13 ZHR=5,700	北アメリカ

3つの研究グループによる2002年しし座流星雨のピーク予報時刻(世界時)と出現数(ZHR)。ZHR(Zenithal Hourly Rate)とは、可視で6.5等級の恒星が見える快晴の条件下で、放射点为天頂にあった場合に肉眼で観測される1時間あたりの理想流星数のこと。実際に見ることができる流星はこの数より少ない。

足らずの所を地球が通過することにより、ヨーロッパ、北米地域でやはり流星嵐が予報されている(表1)。

2. 流星スペクトル ～地球大気を検出器にした観測～

2-1. 流星発光

サイズが $1\mu\text{g}$ から数g程度の惑星間空間ダストが、秒速数10kmの高速で惑星間空間から地球大気に突入すると、地球大気との衝突で次第に加熱され、構成粒子の昇華温度に従って蒸発する。この過程をアブレーション(ablation)と呼ぶ。流星発光は、アブレーションにより、流星物質を含むガスと地球大気に含まれる原子・分子の双方が衝突によって励起されてプラズマ状態になり発光する現象である。しし座流星群の場合の平均的な発光高度は、約80～120kmの電離圏(中間圏、熱圏)である。図2の発光モデルを使って発光の様子を簡単に説明する。流星まわりの流入熱には、大きく分けて対流と輻射が存在するが、流星発光は輻射が卓越している。流星本体がアブレーションしない場合の対流モデル(図2上)では、流星本体の極近傍からの発光の寄与しか見られないが、流星本体がアブレーションする場合(図2下)では、アブレーションにより流星本体の大きさの約10倍まで

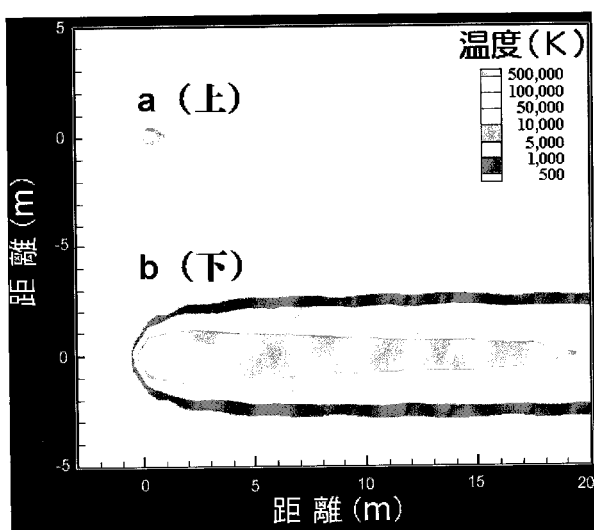


図2. 流星発光モデル^{10), 11)}. 直径1cm, 突入速度72km/秒, 発光高度95kmでのマグネシウムの発光モデル。クヌーセン数(代表長さに対する平均自由行程の比)は5, マッハ数は270で計算を行っている。ウェイクの大部分を占める青色部は、励起温度～5千度の領域であることが分かる。

広がったガス雲が形成され、接触面で地球大気と激しく衝突し、ガス内部へ運動量輸送を行う結果、ウェイク(wake)と呼ばれるプラズマの尾を流星本体後方に形成する。普段、私たちが目にする流星発光は、流星本体からの発光ではなく、ウェイクからの輻射なのである。

次に代表的なしし座流星群のスペクトルを

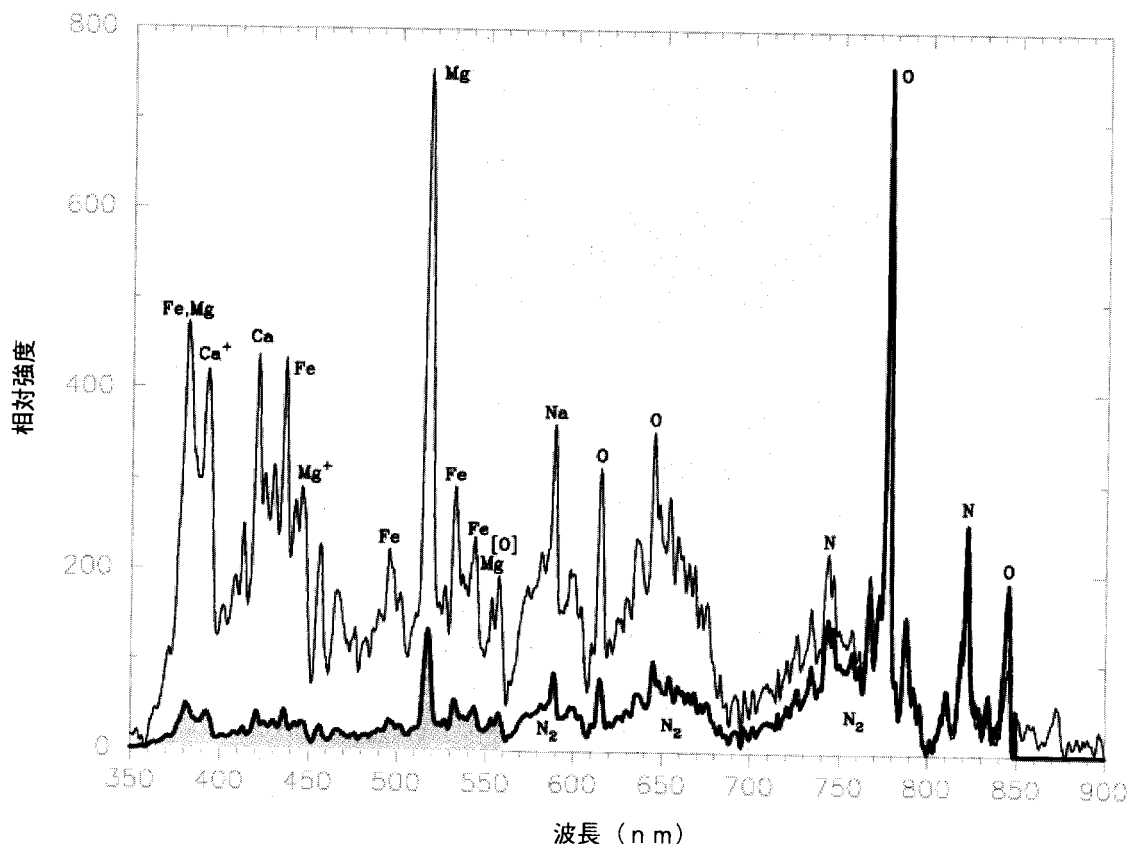


図3. 1999年しし座流星群スペクトル。1999年国際航空機観測ミッションにて、NHK 超高感度ハイビジョンカメラと透過型回折格子（格子密度；600/mm）¹⁴⁾を用いて観測した。感度補正前（上）と補正後（下）のスペクトル。短波長領域（水色）の流星起源物質の発光と、長波長領域の地球大気起源物質の発光とに大きく分けることができる。

示す（図3）⁸⁾。近紫外から可視領域での流星スペクトル中に見られる主な輝線は、波長370-600 nm領域に見られる鉄（Fe）、マグネシウム（Mg）、ナトリウム（Na）、カルシウム（Ca）、アルミニウム（Al）などの原子輝線と、560-900 nm領域に現れる窒素（N）、酸素（O）輝線と窒素分子（N₂）バンドなどであるが、前者は固体フェーズからアブレーションした流星起源物質、後者は地球大気起源物質と考えられる。超高層大気中の大気密度は、太陽活動や昼夜、地理緯度によってばらつきはあるものの、高度100 km付近の1 cm³当たりの酸素や窒素はお

よそ、 2×10^{12} 個（酸素分子）、 5×10^{12} 個（酸素原子）、 9×10^{12} 個（窒素分子）、 6×10^5 個（窒素原子）と豊富に存在することから¹²⁾、流星発光には地球大気起源の発光も含まれている。また、地球大気への突入速度の速い「しし座流星群」などで特徴的な地球大気発光は、波長557.7 nmの酸素原子や、波長600-900 nmでバンド発光する窒素分子である。前者は地球大気に豊富に存在する酸素原子の禁制線として、後者は14.5 eVと励起エネルギーの高い窒素分子が、高速流星と地球大気による衝撃波で励起されて発光する。99年に我々が使

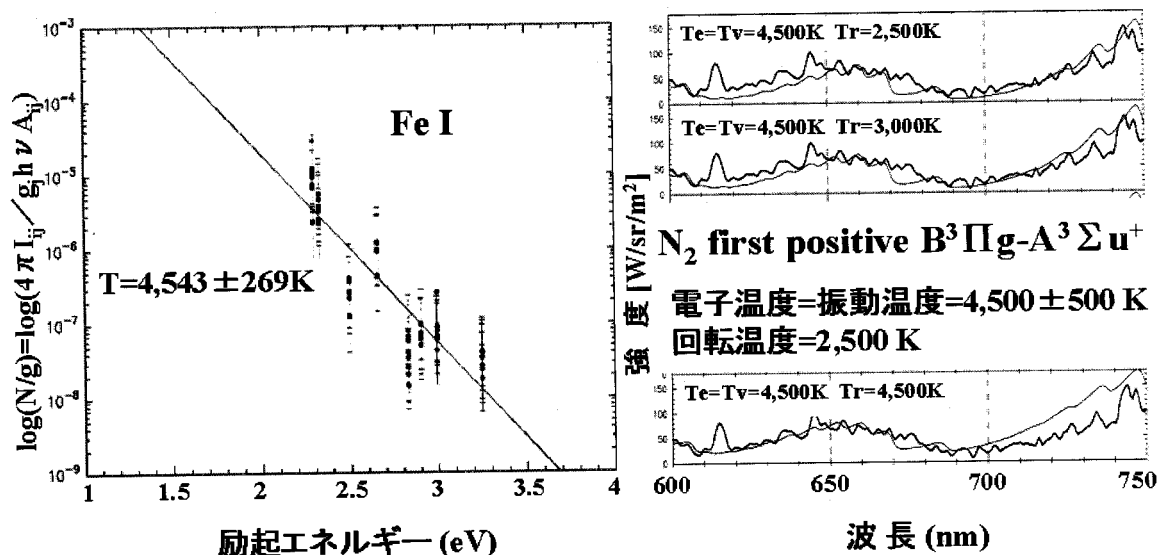


図4. 流星の励起温度. (左) ; 横軸は鉄原子 (Fe) の励起エネルギー, 縦軸は発光強度に関する物理量, (右) ; 横軸は波長, 縦軸は窒素分子 (N_2) の発光強度. Fe および N_2 ($\text{B}^3\Pi_g \rightarrow \text{A}^3\Sigma_u^+$) から導出された励起温度は 4,500 K で, 流星起源の原子と大気起源の分子からの励起温度が一致することが確認された.

用したハイビジョン観測システムは, 400 nm 付近にピーク効率を持ち 900 nm 付近まで感度を持つため, これまで研究されていた短波長側の鉄などの金属原子輝線だけでなく, 長波長側の窒素分子 (ファーストポジティブ・バンド) も同時に用いて, 流星発光プラズマの励起温度の推定を精密に行うことができた. 流星プラズマは完全電離プラズマにはほど遠く (実際, 観測されるほとんどの輝線は中性原子), 電子衝突が支配的でないため, 励起準位における原子密度は熱平衡状態を仮定したボルツマン分布に等しいと考える. 従って, 原子輝線を用いた励起温度の導出はボルツマン・プロットから行い (図4左), 窒素分子バンドからの温度の導出は窒素分子のモデル計算との比較 (図4右) からそれぞれ行った. その結果, 原子と分子で求めた両温度ともに 4,500 K でよい一致を示した¹³⁾. この結果は, 図2の流星発光モデルとも矛盾しないことが

確かめられた.

また, 「しし座流星群」と同時期に活発な出現を示した「おうし座流星群」のスペクトルも得られたが, しし座流星群の鉄・マグネシウムの平均アバンダンス $[\text{Fe}/\text{Mg}] = 0.36$ に対して, おうし座流星群は $[\text{Fe}/\text{Mg}] = 0.63$ と約2倍の値を示した¹³⁾. この理由としては, (a) 母天体の組成の違い, (b) 対地速度や地球大気への突入角度の違い, (c) 惑星間空間での変成の違いなどが考えられる. 確かに, おうし座流星群の母天体であるエンケ彗星は, 全表面積に対する活動領域が 0.44 % と, ハレー彗星の 13 % に比較して異常に低い不活発な彗星である. 公転周期が 3.3 年と短く, 太陽熱による表層物質の変成が進んだ小惑星遷移天体であることが起因しているのかもしれない. このように流星観測は, “地球大気を巨大なダスト検出器” に見たてた, 地球に居ながらにしての彗星探査ともいえる.

表2. 発光メカニズムの違いによる流星から永続痕へ至る分類

発光フェーズ	発光の特徴 (発光高度、発光温度、発光物質など)
高々度流星 (High altitude meteor)	高度 130-200km での発光 ^{(16),(17)} 。低温での破碎、発光?
流星 (Meteor)	高度 120-70km での発光。励起温度 ~ 5 千度 ^{(8),(13),(18),(19),(20)} 。
バースト (Burst)	最大発光点での発光。励起温度 ~ 5 千, 1 万度が共存 ⁽²¹⁾
アフターグロー (After glow)	数秒間の発光。原子輝線と酸素禁制線の発光 ^{(19),(22)} 。再結合線?
短痕 (Short duration train)	高度 80-90km での発光。流星消滅後30秒までの流星痕。 原子(Fe,Mg,Na), 分子(O ₂ ,OH)発光 ^{(15),(22),(23)}
永続痕 (Long duration train)	高度 80-90km での発光。流星消滅後30秒以上の流星痕。分子バンド? (FeO,NaO,MgO,CaO,TiO,NO ₂ ,FeS,OH,CN) ^{(15),(19),(24),(25),(26),(27)}

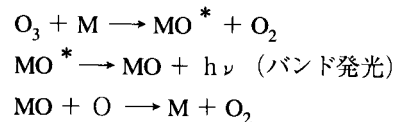
薄青色；完全に解明されていない発光。濃青色；未解明の発光。

2-2. 流星痕

火球と呼ばれる非常に明るい流星が流れた跡に雲状のようなものが残り、数分から数十分、時には1時間以上も明るく輝き続ける現象がある。この発光体を流星痕^{りゅうせいこん}とか永続痕^{えいぞくこん}と呼ぶ。常に宇宙空間からエネルギーの供給を受けて輝いているオーロラなどと異なり、永続痕は一度だけの流星の衝突エネルギーだけで長時間輝き続ける。流星痕は発生予測のつかない非常に希な現象であるがゆえに、長時間発光する物質や発光メカニズムはこれまで不明であった。しかし、アマチュア観測家の村山秀幸氏、大塚勝仁氏と筆者ら（海老塚・阿部）のグループは、1998年しし座流星群の際に現れた永続痕の分光観測に成功し、発光後30秒の流星痕の発光物質を突き止めることに成功した⁽¹⁵⁾。図5に流星痕のスペクトル画像と解析スペクトルを示す。また、これまでに明らかになった流星から永続痕へ至る発光の分類と特徴を表2にまとめる。

流星痕スペクトルの解析結果からは、数秒～数十秒で励起温度が千Kから数百Kへ急激に冷却することが分かった。一方、時間経過に対する流星痕からの光量の減少は小さいことから、熱エネルギーが光エネルギーに何ら関与しない化学発光 (chemiluminescence) など

の放射過程が効いていることが推察できる。流星起源の鉄 (Fe)、マグネシウム (Mg)、ナトリウム (Na) と、高度 100 km 付近の地球大気に含まれる反応性に富むオゾン (O₃) との反応で、励起状態の分子 (FeO, MgO, NaO など) が生成される次のような化学サイクル (チャップマン・サイクル⁽²⁸⁾) が長時間の発光に関与していることが考えられる。



*；励起状態

また、流星痕が発光する高度 90 km 付近には、秒速数 10 ~ 100 m の高速の超高層大気風が定期的に存在している。中間圏と熱圏にまたがる流星や流星痕の発光領域は、大気抵抗が大きい観測衛星の滞在も困難で直接観測データが殆んどない領域である。永続痕の観測は未解明である中間圏界面付近の化学だけでなく、刻々と姿を変える流星痕を多地点から観測することにより、未解明の高層大気風の速度構造などを調べることも可能となる。気まぐれに現れる「天空の龍」ともいふべき流星痕は、超高層大気の天然のトレーサーなのである。

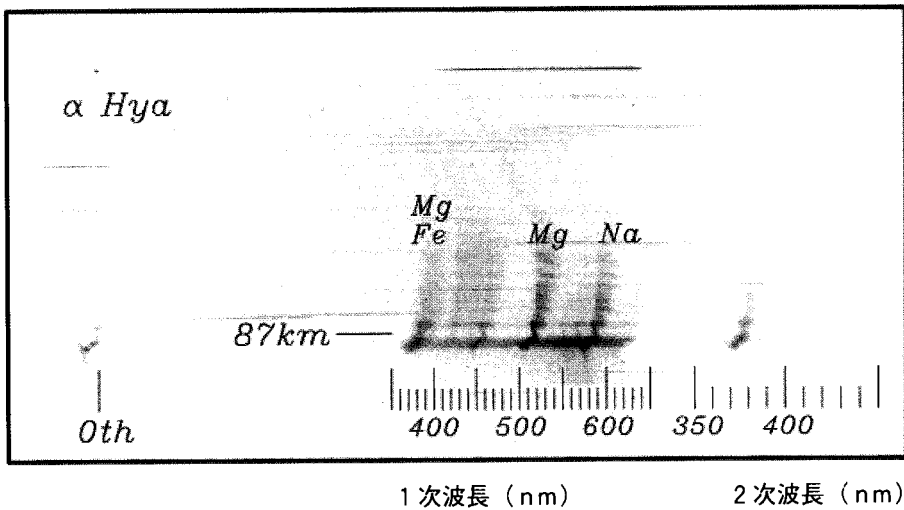


図 5-1

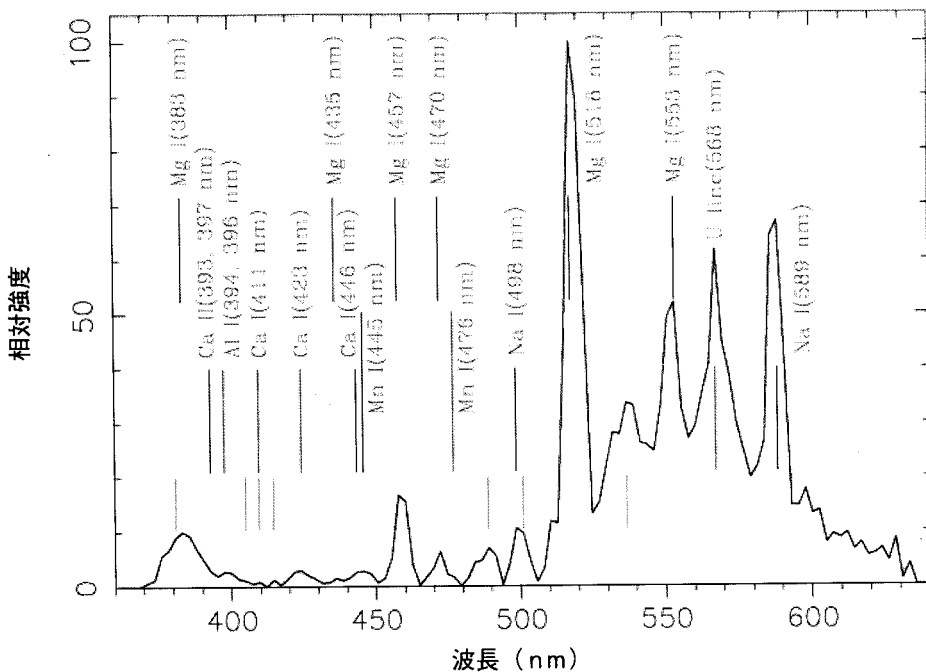


図 5-2

流星痕スペクトル画像と解析した流星痕スペクトル。1998年11月18日4時13分（日本時）に関東上空に現れたしし座流星群大火球に伴う流星痕の分光写真（図 5-1）。対物部に透過型グレーティング（格子密度；300/mm）を装着した 35 mm 版カメラとレンズ（ $f=85\text{mm}/F1.2$ ）を用い、流星消滅後 12 秒後から積分時間 10 秒で撮影した。分散方向は右方向で、1 次、2 次の分光像が撮影されている。スケールは 0 次像からの距離で換算した波長で、370–640 nm 領域をカバーしている。上下方向は発光高度の違いを表し、高度 87 km 付近の解析したスペクトルを図 5-2 に示す。同定した青色で記した輝線は、全て鉄原子 (Fe I) によるものである。

3. 彗星起源物質探査

～生命の起源を求めて～

約 46 億年前²⁹⁾に原始太陽系円盤から地球が形成され、38 億年前には原始生命が誕生した^{30), 31), 32)}。当時は小天体との衝突の確率も高く、水や C, H, O, N, S, P といった生命起源成分は地球外の天体である彗星からもたらされたという説が有力だ³³⁾。彗星の衝突説は原始太陽系類似型星である「がが座 β 星」の星周円盤の観測からも示唆されている³⁴⁾。しかし、直径数百メートル以上の天体は、空中で破壊されずに直接地表へ到達し、衝撃波加熱によって揮発性成分や有機物は破壊されてしまう³⁵⁾。一方、原始地球において、彗星から放出される膨大なダストは昼夜を問わず毎日のように激しい流星雨を原始地球へ降らせており、その年間総質量は現在の 100 倍も多く、当時の彗星・小惑星などのジャイアント・インパクトの約 10 倍の $\sim 10^9 \text{ kg}$ 程度と考えられている^{20), 36)}。このように流星は、有機物に富む彗星から原始地球へ生命の起源を直接運んだと考えられるが、その観測的な証拠はない。我々は、33 年振りに訪れた「しし座流星嵐」の分光学的研究から、有機物の証拠をつかみかけている。

3-1. CN 分子探査

しし座流星群は、テンペル・タットル彗星を母天体とする彗星塵がもたらす現象である。彗星本体の主成分は H_2O であり、H や OH は彗星コマ中で最も多く存在する分子種である。また、ハレー彗星探査からは、彗星塵の約 25 % が C, H, O, N といった軽元素を多量に含むことが明らかにされており³⁷⁾、流星には彗星スペクトルに見られるような有機物炭素化合物 (CN, CH, C_2 など) が豊富に含まれていると考えられる。これまでカメラの感度が低

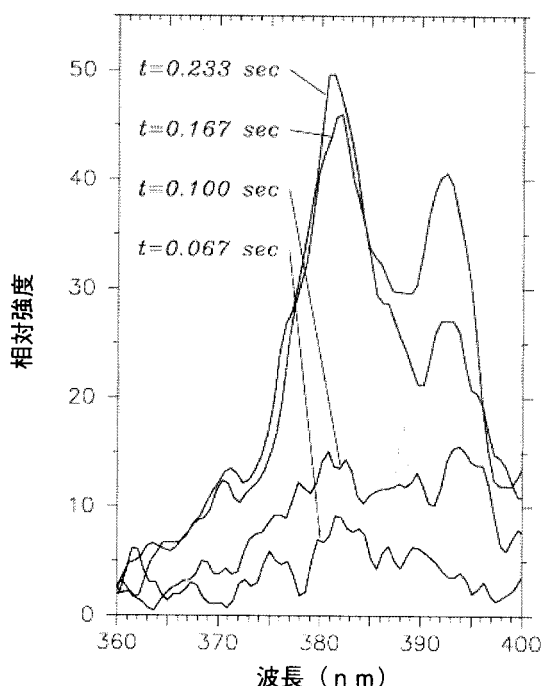


図6. 近紫外領域 (波長 370–400 nm) における彗星起源の有機物探査. 横軸は波長, 縦軸は発光強度を示し, 流星発光開始からの 1/30 秒おきの時系列スペクトルを重ねて表示している. 青色線は, 観測で見えると仮定した場合の CN 分子 ($\text{B}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Sigma$) のモデル計算. CN 分子の B-X バンドは, 多数の金属原子輝線に埋もれて検出が困難であるため, さらに高い分解能が必要とされる.

く観測が難しかった近紫外領域 (波長 400 nm 付近) を, 高感度, 高分解能 ($R \sim 200$) で観測できた 99 年の我々の観測結果は, 近紫外領域で発光する彗星起源の CN 分子バンドを検出できる可能性があった。しかし, CN 分子のバンドヘッド波長である 388 nm 付近には, 鉄やマグネシウム原子が多数存在しており, これまでの我々の観測分解能では未だ有意な CN 分子は検出できていない (図 6)。一方, 2001 年の他の研究グループの観測結果によると, 上限値として $[\text{CN}/\text{Fe}] < 0.03$ が報告されている³⁸⁾。

3-2. Leonid MAC

しし座流星群国際航空機観測ミッション、通称「Leonid MAC (Multi-Instrument Aircraft Campaign)」は、1997年に米国・宇宙生物学研究所(SETI)のピーター・イエニスキンズ博士が提唱した1998～2002年の国際流星観測プロジェクトである^{39), 40)}。その目的は、しし群ピークが予測される地域の雲の上へ世界中の研究者と最新の計測機器を運び、(a) 計数観測、(b) 複数の波長域での分光観測、(c) 立体観測による軌道決定、(d) 光度変化、(e) 大気光観測など様々な角度から流星群を多角的に観測することであり、日本チームも矢野を責任者としてミッションに積極的に参加した。98年は日本の沖縄上空、99年には中東～ヨーロッパ～大西洋上空にて、主に米国空軍の観測機をチャーターして実施され、流星の同時立体観測を行うために二機の航空機による平行飛行観測が行われた。特に99年は、7カ国からの科学者、アマチュア、軍関係者、報道陣、延べ78人が共同生活をしながら流れ星を追いかける「8日間世界半周の旅」が施行され、地中海上空12 kmにて予報通りの流星嵐に遭遇した。一方、2001年は、米国内情勢の急変化によって当初の予定が変更され、北米上空で米国国籍を持つ研究者のみを乗せた一機の航空機での観測が行われた。さらに今年は、最後の流星嵐を確実に観測する目的で、ヨーロッパから北米まで大西洋を横断する観測ミッションが計画されており、我々も参加する予定である。主催であるNASAでは本ミッションを、「NASAが行う初めての宇宙生物探査ミッション」と位置付けている。これは、“彗星に含まれる有機物や水などが流星として直接地球へ降り注いでいる可能性を探る”という意味合いからである。

3-3. 紫外線ハイビジョンカメラの開発

ハイビジョンテレビ(High Definition TV)は、通常のテレビが3:4の画面サイズなのに対し、9:16のワイドな画面サイズを持ち、走査線は通常のテレビの525本の約2倍の1125本、水平解像度が約3倍、ダイナミックレンジが10 bit(通常ビデオは8 bit)という高精細な画像が最大の特徴である。すなわち通常のデジタルビデオに比べ、約6倍の画質と4倍のダイナミックレンジを持つことになる。我々が1999年に使用したハイビジョンカメラは、マイクロチャンネルプレートを2枚有する光電子増倍管(I.I.)を装備したHDTVで、NHKが開発したものである⁴¹⁾。このシステムでは、1/30秒のビデオレートで11等級(V等級)の恒星($f = 58 \text{ mm/F1.2}$ レンズ使用時)までの撮像観測が可能であった。1998年10月に突発したジャコビニ流星群をターゲットに、筆者ら(渡部・阿部)で使用したのが世界で初めてのHDTVを用いた流星観測であった⁴²⁾。

さて、CH, CO, H₂Oなどの彗星起源の有機物は、近赤外から中間赤外の波長領域での流星発光から探査が行われているが、我々のグループでは、現在他では観測が行われていない、波長350 nm以下の紫外線領域の未知輝線に注目した。2001年には、波長250-約1,000 nmを透過し、250-450 nmに最適化された焦点距離30 mm, F 1.2のレンズを独自に開発し、波長200-800 nmに感度を持つI.I.と、HDTV(SONY, XCH-1125)を組み合わせた紫外・可視超高感度ハイビジョンシステム(UV-VIS-II-HDTV)を製作した。そして、このUV-VIS-II-HDTVの対物部に、新たに製作した反射型回折格子分光器を装着した分光システムを完成させた。図7に紫外線ハイビジョン分光カメラの概観を示す。

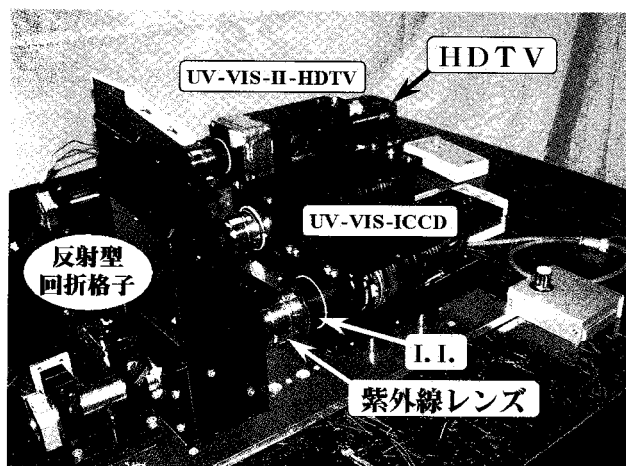


図7. 紫外・可視超感度ハイビジョンカメラ (UV-VIS-II-HDTV). 独自開発の紫外線レンズを装着した II-HDTV および ICCD システム。(国立天文台・天文機器開発実験センター・オプトショップにて)

3-4. OH 分子の検出と最後の流星雨 へ向けた課題

2001 年 11 月 16 ~ 19 日, しし座流星群をターゲットに我々は, オゾン吸収と主にエアロゾルのレーラー散乱により地上観測が困難であった 300–350 nm 波長領域を観測する目的で, 標高を稼いだ日米のステーションと, 好天が期待できるオーストラリアの 3 カ所に観測を展開した. 国外ではマウナケア山頂 (すばる望遠鏡サイト; 標高 4,139 m) とオーストラリア・マウントアイザで, 一方, 国内では国立天文台野辺山観測所 (標高 1,340 m) でそれぞれ観測を遂行した. 途中, マウナケア山頂に展開した HDTV システムの内蔵ヒューズが静電気により破損し, 受光器を汎用高感度 CCD へ変更することを余儀なくされたが, 3 カ所ともに素晴らしい天候と流星雨の出現に恵まれて, ハワイと野辺山では 300 nm 付近までの紫外域分光観測に成功した.

これまでの解析の結果, ハワイ, 野辺山の

双方の流星と流星痕スペクトルの波長 310 nm 付近に, OH A-X (0, 0) バンド輝線に似た構造が存在することが分かった⁴³⁾. 一般的な彗星ガスの分光観測を見ると, 310 nm 紫外領域で強い発光を示す分子種に OH ラジカルがある. 彗星中の OH の生成率は, 彗星コマ中で最も多く観測される H の生成率と同程度であることから, その親分子は H₂O と考えられている. このことは, 彗星核は水氷が約 80 % を占めるという事からも自然に理解できる. また, 彗星の OH 分子は回転遷移による波長 18 cm の電波でも検出される. 図 8 に今回得られた「しし座流星群火球」のスペクトル画像と時系列スペクトルを示す. また, 流星消滅後, 約 10 秒後の流星痕中に検出された 310 nm バンドと OH A-X (0, 0)

のモデル計算との比較を図 9 に示す. 流星痕中の 310 nm 構造は, OH A-X (0, 0) バンドのモデル計算の振動バンド構造と一致していることから, OH 分子による発光であると考えられる. 一方で, 流星本体の発光では 310 nm 構造は存在するものの, 短痕中の OH のようにバンド構造が明白に分離されていない. 問題は, 今回流星や流星痕から初めて検出された OH が, 流星 (宇宙) 起源か, 地球起源かという事である. 以下に OH の起源について考え得る可能性を示す.

- ① OH の親分子が H₂O であると仮定した場合, その発光強度から推定される H₂O 存在量はおよそ数十 ppm であるが, 高度 100 km の大気中に存在する H₂O 量は 1 ppm 以下⁴⁴⁾であることから地球大気中の H₂O 起源とは考え難い.
- ② 高度 100 km 以上では, 地球大気には観測を説明しうる OH は存在しないことから, 高々度からの流星本体の 310 nm 発光が OH によるものであるならば, 宇宙起源である可能性が高い. あるいは流星発光エネルギーによる,

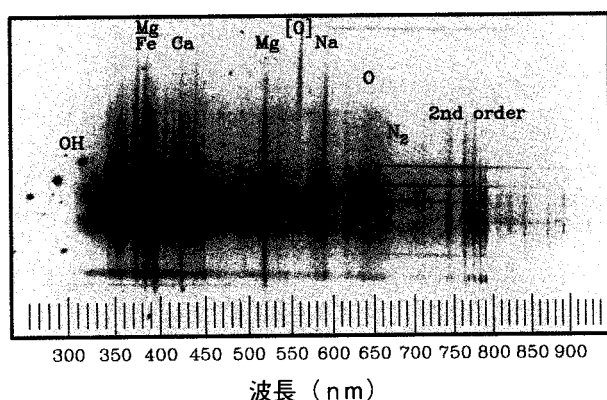


図 8-1 (左), 図 8-2 (下)

反射型回折格子 (格子密度; 500/mm, ブレーズ波長; 300nm) を装着した HDTV で観測した「しし座流星群火球」の紫外-可視スペクトル (図 8-1). 1/60 秒積分画像を 32 枚コンポジットしており, 流星本体 (0 次像) は, 画面の左外側を上から下へ移動している. スケールは波長を表しており, 300 nm 付近まで輝線が観測されている. 流星発光後に再度増光しているアフター・グロー/短痕も見られる.

図 8-2 は, 感度補正前の 1/60 秒おきの時系列スペクトルである. 流星がバーストして飽和しているスペクトルは削除し, 流星の最大発光 (バースト) 後のスペクトルは青色で示した.

$O_3 + H \rightarrow OH^* + O_2$ のような大気反応なども考えられる.

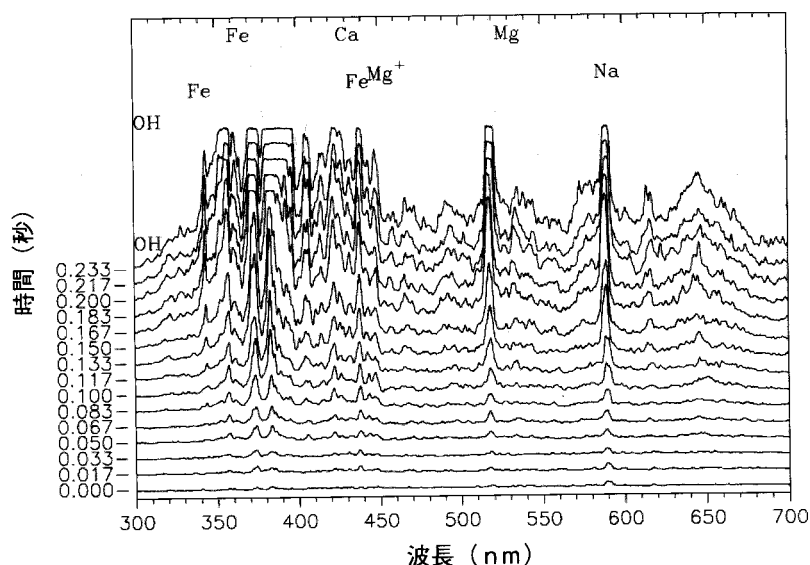
③ 流星中の OH が宇宙起源だと考えると, 母彗星から放出された彗星塵中で水氷 (water ice) が生き残っていたとは考え難いことから, 水和鉱物中で含水珪酸塩鉱物が濃縮していたと考えられる.

④ サポナイトやサーペنتينなどの含水鉱物が炭素質コンドライト隕石に含まれているように⁴⁴⁾, 結晶水の形で OH が保持されていれば, 宇宙空間でも OH は

失われずに地球に運ばれる可能性がある. あるいは彗星塵には, OH が保持されるような何らかの別のメカニズムが存在している.

⑤ CRISTA-SPAS 衛星からの地球のリムの分光観測によると, OH 密度の高度分布は高度 70 km 付近にピークを持ち, 高度 80 km で $10^6/\text{cm}^3$ 程度であることから⁴⁵⁾, 流星発光後の流星痕中に見られた OH は, 流星発光で励起された地球起源の OH による共鳴発光である可能性がある.

ハーベイらは, フォトメーターを使った紫外



線観測で, 1976 年ペルセウス座流星群とやぎ座流星群から 310 nm 発光を報告しているが, その起源は明らかにされていない⁴⁶⁾. いずれにしても, 流星の分光学的手法を通して, 今回我々が初めて検出した OH の起源を明らかにするためには, 310 nm 付近の OH の振動バンドを分離することが可能な, さらに分解能を上げた観測が望まれる. 高分解能で狭視野の観測にかかる確率を考えると, 今年 11 月 19 日 (世界時) にヨーロッパとアメリカで 1 時間あたり数千と予報されている「しし座流星

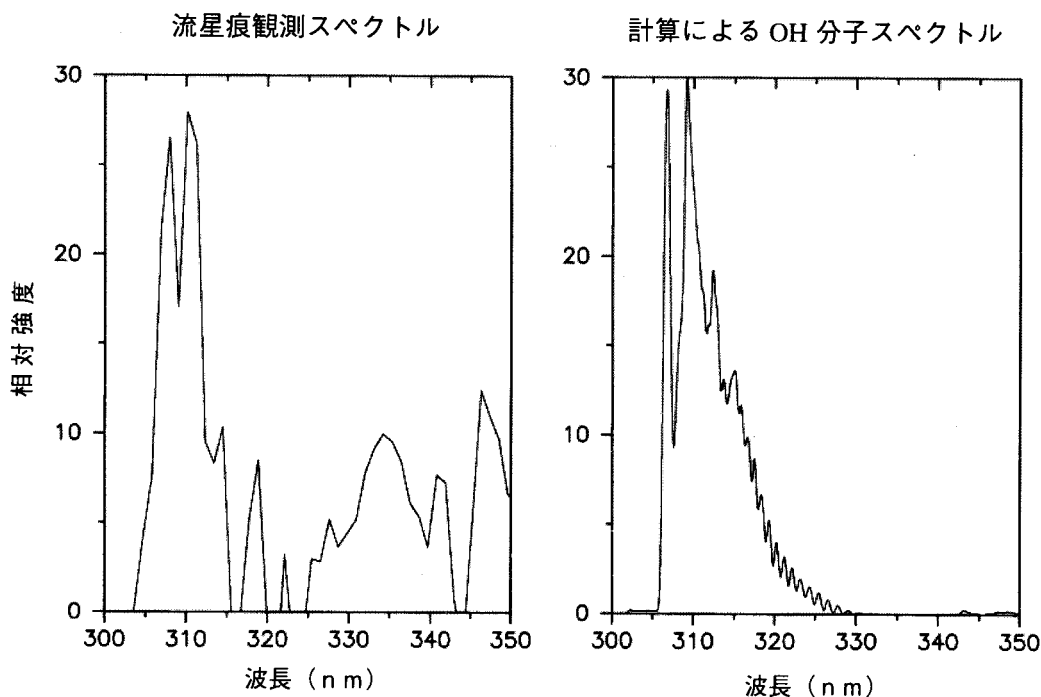


図9. HDTVで観測した流星痕の紫外スペクトルとOHモデル計算の比較. 流星痕スペクトルの発光高度は, 流星本体の軌道計算から約90kmと推定される. OHのモデル計算は, 流星痕中の金属輝線から求めた励起温度 $\sim 1,000$ Kと観測分解能(1 nm)でコンボリューションして計算している. 振動バンドの構造がよく一致していることが分かる.

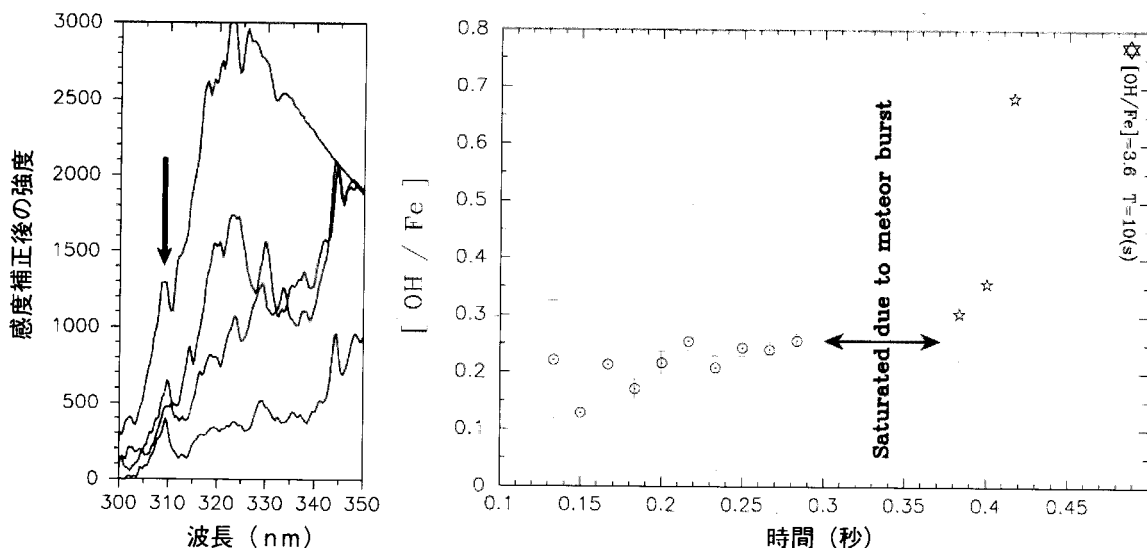


図10-1 (左), 図10-2 (右)

紫外領域(300–350 nm)の感度補正後の流星発光後半(バースト後)のスペクトルの時間変化(図10-1). 矢印で示した位置が, 今回発見したOH(0, 0)バンド発光の時間変化である. 滑らかなカーブは, 飽和したスペクトルを感度曲線で除算した為に生じた. 図10-2は, 最大発光前後の鉄(Fe)に対するOHの存在比の時間変化である. 最大発光前の流星発光中の $[\text{OH}/\text{Fe}]$ 比は, ほぼ一定の値(0.2)で推移しているが, 最大発光後の $[\text{OH}/\text{Fe}]$ 比は0.7まで増加している. また, 図9に示した流星消滅10秒後の流星痕中の $[\text{OH}/\text{Fe}]$ 比は3.6である. 流星発光前半に比べ流星発光後半や流星痕中の $[\text{OH}/\text{Fe}]$ 比が時間と共に増加しているが, これは地球大気のOHが励起されて発光したと考えられる.

嵐」が最後のチャンスとなるであろう。

原始太陽系円盤で微惑星が形成され、Tタウリ期後半から散乱された微惑星が彗星として地球軌道近辺へ飛来して原始地球の表層部へ有機物や水を運んだとされるが、最終的なキャリアーは“流星”を含む、サイズがミクロンからセンチ程度の“彗星塵”である可能性が高い。また、OHの宇宙起源説が明らかになれば、年間2～6万トン⁴⁷⁾もの宇宙物質が現在の地球へもたらされている事実を鑑みると、例え微量であれ膨大な彗星起源のOHを含む揮発性物質や有機物が今なお地球へ降り注いでいることも証明される。『流星は生命起源のメッセンジャーかもしれない。』

謝 辞

国立天文台ハワイ観測所の小笠原隆亮氏、布施哲治氏には、3日間に渡る過酷な状況下での観測のサポートを行って頂きました。

ハワイ観測所のスタッフの皆様も含め心より感謝致します。同年オーストラリアで観測を行って頂いた東京理科大学4年の藤野宣知氏、ハワイでのバックアップ機材を提供して下さった日本流星研究会の薮保男氏にも心よりお礼申し上げます。また、国内での試験観測等においては、国立天文台野辺山観測所、乗鞍コロナ観測所、東大宇宙線研究所および福島県・浄土平天文台にご協力を頂きました。さらに、機器開発においては、(株)トプコン、(株)レンズ屋の永田信一氏、(株)昭和機械、(株)大井光機のメーカーの皆様、国立天文台・天文機器開発実験センター・マシンショップのスタッフの皆様の多大なる協力を得ました。本研究は、財団法人・日本宇宙フォーラム(2件採択、代表；渡部、海老塚)、国立天文台・研究推進経費(代表；渡部)、および通信総合研究所、理化学研究所、宇宙科学研究所の支援を頂いて実施されております。

Sowing the Seeds of Life: Spectroscopic observations of possible prebiotic components in the Leonid meteor storm

Shinsuke ABE

Planetary Science Division, The Institute of Space and Astronautical Science, JAPAN

Hajime YANO

Planetary Science Division, The Institute of Space and Astronautical Science, JAPAN

Noboru EBIZUKA

The Institute of Physical and Chemical Research, JAPAN

Toshihiro KASUGA

Division of Earth and Environment Science, Nagoya University, JAPAN

Masatoshi SUGIMOTO

The Nippon Meteor Society, JAPAN

Jun-ichi WATANABE

National Astronomical Observatory, JAPAN

Abstract: Cometary meteoroids are considered as one of the best candidates to have supplied organic compounds to the Earth in the early stage of its history. However, there had been no observational evidence to support this hypothesis until recently. Thus we conducted spectroscopic observations of the 2001 Leonid meteor shower by using intensified HDTV cameras equipped with a reflective grating optics which covers 300-800 nm wavelength range. In order to minimize the effect of air extinction near 300 nm, the observations were performed at a high elevation, i.e., the Subaru Telescope site of 4,100 m above the sea level. Spectral features of hydroxyl radicals in the cometary meteoroids were clearly observed. In this paper, we present the meteor emission and spectroscopic observations of the Leonids and discuss on the origin of the discovered OH A-X (0,0) band.

参考文献

- 1) Hainaut O. R., et al., 1998, A&A 333, 746
- 2) Jorda L., et al., 1998, IAUC 6816
- 3) Olmsted D., 1834, American Journal of Sci. and Arts 25, 363
- 4) Sykes M. V., Walker R.G., 1992, ICARUS 95, 180
- 5) Yeomans D. K., et al., 1996, ICARUS 124, 407
- 6) McNaught R. H., Asher D. J., 1999, WGN, Journal of the International Meteor Organization 27, 85
- 7) Arlt R., et al., 1999, WGN, Journal of the International Meteor Organization 27, 286
- 8) Abe S., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 369
- 9) Arlt R., et al., 2001, WGN, Journal of the International Meteor Organization 29, 187
- 10) Boyd I., et al., 2000, EMP 82/83, 93
- 11) Popova O., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 109
- 12) Hedin A. E., 1991, JGR 96, 1159
- 13) Abe S., 2001, PhD thesis, Grad. Univ. Advanced Studies
- 14) Ebizuka N., et al., 1998, Appl. Opt. 37, 1236
- 15) Abe S., et al., 2002, Meteorit. Planet. Sci., in press
- 16) Fujiwara Y., et al., 1998, GRL 25, 285
- 17) Spurny P., et al., 2000, Meteorit. Planet. Sci. 35, 1109
- 18) Ceplecha Z., 1973, Bull. Astron. Inst. Czech 24, 232
- 19) Borovicka J., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 399
- 20) Jenniskens P., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 57
- 21) Borovicka J., 1994, Planetary and Space Sci. 42, 145
- 22) Abe S., et al., 2002, ISAS Proc. of Leonid MAC Workshop, in press
- 23) Suzuki S., 2002, ISAS Proc. of Leonid MAC Workshop, in press
- 24) Rajchl J., 1975, Bull. Astron. nsts. Czech. 26, 282
- 25) Jenniskens P., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 429
- 26) Chu X., et al., 2000, GRL 27, 1815
- 27) Murad E., 2001, Meteorit. Planet. Sci. 36, 1217
- 28) Chapman S., 1959, JGR 64, 2064
- 29) Cameron A. G. W., 1988, Annu. Rev. A&A 26, 441
- 30) Murette M., et al., 2000, Planet. Space Sci. 48, 1117
- 31) Morbidelli A., et al., 2000, Meteorit. Planet. Sci. 36, 371
- 32) Robert F., et al., 2000, Space Sci. Rev. 92, 201
- 33) Chyba C. F., Sagan C., 1996, NATURE 355, 125
- 34) Beust H., et al., 2000, ICARUS 143, 170
- 35) Chyba C. F., 1993, NATURE 363, 701
- 36) Chyba C. F., Sagan C., 1998, in Comets and the Origin and Evolution of Life, eds. Thomas P. J., Chyba C. F., McKay C.P., (Springer-Verlag) p.147
- 37) Jessberger K., et al., 1988, NATURE 332, 691
- 38) Rairden R., et al., 2002, Astrobiology, submitted
- 39) Jenniskens P., et al., 1999, Meteorit. Planet. Sci. 34, 933
- 40) Jenniskens P., et al., 2000, Earth Moon and Planets 82/83, 1
- 41) Sunasaki S., et al., 1997, ITE Technical Report 21, 7
- 42) Watanabe J., et al., 1999, GRL 26, 1117
- 43) Abe S., et al., 2002, Astrobiology, in press
- 44) Rietmeijer F. J. M., 2002, Earth Moon and Planets 88, 35
- 45) Conway R., et al., 1999, JGR 104, 16327
- 46) Harvey G., 1977, ApJ 217, 688
- 47) Love S. G., Brownlee D. E., 1993, Science 262, 550