

大型レーダーを用いた流星ヘッド・エコー観測 Meteor head echo observations using larger aperture radar

○笠げやき¹, 小山亮¹, 阿部新助²*Keyaki Kasa¹, Ryo Koyama¹, Shinsuke Abe²

Abstract: A meteor head echoes is caused by radio waves scattered from the intense region of the plasma surrounding and co-moving with a meteoroid during atmospheric entry at about 70-130 km altitude. Meteor head echo observations were carried out using the high-power large-aperture Kyoto university Shigaraki middle and upper atmosphere (MU) radar in Japan. The 46.5 MHz MU radar consisting of 475 crossed Yagi antennas has a nominal transmitter peak power of 1MW and comprises a circular, phased-array antenna with a diameter of 103 m. More than 140,000 atmospheric trajectories and interplanetary orbital elements have been derived by the MU radar observed between 2009 and 2014. Here, we focused on trajectories of meteoroids to investigate their origins and material structures especially for extremely slow and rapid meteoroids.

1. はじめに

流星とは、彗星や小惑星から放出された直径数ミリから数センチのメテオロイド(=塵)のことである。このメテオロイドは超高速で惑星大気に突入する際、構成粒子は空力加熱により昇華する。この過程をアブレーションと呼ぶ。流星の発光は、流星物質を含むガスと上層大気を構成している原子・分子の双方が、衝突によって励起されて発生するプラズマ現象である。^[1]

流星の軌道解析を行う観測方法は、多点観測法やレーダー観測など様々な方法がある。近年では新手法としてヘッド・エコー観測が行われている。流星ヘッド・エコーとは、大気中で流星と共に動き、流星の周りを取り囲んでいるプラズマの散乱した電波のことである。^[2]流星ヘッド・エコー観測とは強力なレーダー波を流星から発生したプラズマに照射し、ドップラー速度の時間変化から流星の速度、距離、軌道を取得できる観測方法である。今回使用したデータは 141,531 個であり、すべて京都大学生存圏研究所が所有する MU レーダーで観測したものである。ただし、観測期間は 2009 年から 2014 年の限られた月の数日間である。

2. MU レーダーとは

滋賀県信楽町に位置する MU レーダー(Middle and Upper Atmosphere Radar)は、最大出力 1MW, 3.12 ミリ秒の時間分解能を有している「中層・超高層および下層大気観測用 VHF 帯大型レーダー」である。また、MU レーダーは高度 500km までの領域を観測することがで

き、さらに流星ヘッド・エコーモードにおいては、上空約 100km, 直径 20km の集中的に狭い範囲に固定して待ち受け観測を行っている。

3. 解析結果

MU レーダーで捉えた流星には観測バイアスがかかっているため、実際の流星の個数を求めるには突入速度の 3~4 乗で補正する必要がある。以下の Fig. 1 に結果を示す。図中の、青線と赤丸はそれぞれ観測値と補正值を示している。また、緑線は D-criterion^[3]を用いてふたご座流星群、ペルセウス座流星群、オリオン座流星群の要素を取り除いたデータである。D-criterion とは式(1)によって求められる、2つの軌道の類似性を示す基準値である。この値が 0.2 より小さいと互いに似た軌道を持つことが分かる。

$$[D_{SH}]^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + \left(2 \sin \frac{I_{21}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_1 + e_2}{2}\right)^2 \left(2 \sin \frac{\Pi_{21}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

ただし、

$$I_{21} = \arccos[\cos i_1 \cos i_2 + \sin i_1 \sin i_2 \cos(\Omega_2 - \Omega_1)]$$

$$\Pi_{21} = \omega_2 - \omega_1 + 2\Gamma \arcsin\left(\cos \frac{i_2 + i_1}{2} \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sec \frac{I_{21}}{2}\right)$$

$$\Gamma = \begin{cases} +1 & |\Omega_2 - \Omega_1| \leq 180^\circ \\ -1 & |\Omega_2 - \Omega_1| > 180^\circ \end{cases}$$

e は離心率, q は近日点距離(AU), i は軌道傾斜角(rad), Ω は昇交点黄経(rad), ω は近日点引数(rad)で示される.

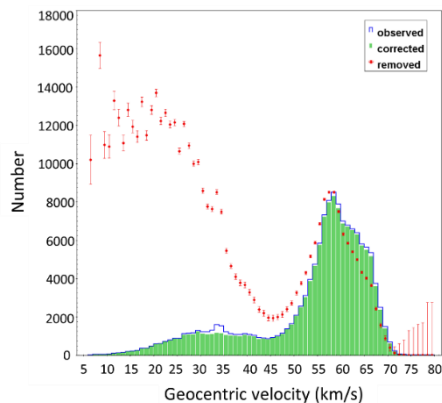


Figure. 1 The distribution of geocentric velocity after taking into account of the observation bias.

これにより, 実際には低速な(=暗い)流星の方が, 高速な(=明るい)流星に比べて多く突入していることが分かる. また, 35km/s 付近の観測値のピークはふたご座流星群によるものであることが分かった. その一方で, 60km/s・66km/s 付近の観測値のピークはペルセウス座流星群・オリオン座流星群のデータを除いても変化が見られないため, 散在流星の速度のピーク値であると考えられる.

また, 流星の発光開始高度(赤)と消滅高度(青)の分布は以下の Fig. 2 で示される.

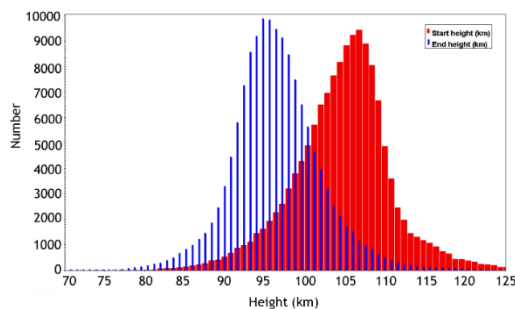


Figure. 2 The histogram of start and end heights of meteors.

このようにある一定の高さで発光・消滅する流星が多いことが分かる. また, 他に比べて低高度・高高度で発光を開始し始める流星も少なからず出現している.

これは K_B パラメータ(Ceplecha classification) [4] を用いることで考察できる. K_B パラメータは式(2)で示され, この値によって流星物質の強度・組成を分類分けすることができる. Fig. 3 は, 対地速度と流星の発光開始高度の関係に K_B パラメータの解析結果を合わせたものである.

$$K_B = \log Q_B + 2.5 \log V_\infty - 0.5 \log \cos z_R \quad (2)$$

ここで, Q_B は発光開始高度における大気密度(g/cm^3),

V_∞ は対地速度(cm/s), Z_R は発光開始点の天頂角(rad)をそれぞれ示している. K_B パラメータの値が大きいほど岩石質な物質(硬い), 小さいほど炭素質な物質(脆い)であることを示している [5].

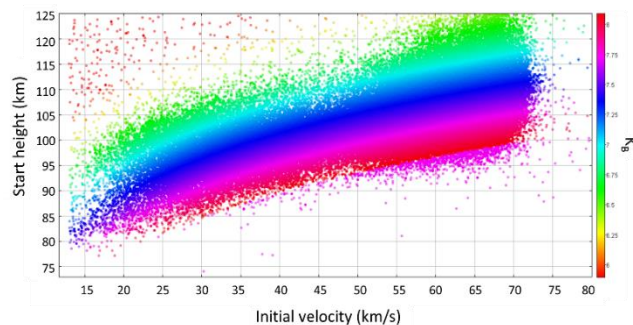


Figure. 3 Start height vs initial velocity with K_B parameter.

以上より, 硬い物質(あるいは難揮発性物質)で構成された流星は高度の低い所まで突入してから発光し始め, 逆に脆い物質で構成された流星は高度の高い所から発光し始めていることが分かった. 以上より, MU レーダーのデータを解析することで物質科学的なことも考察することができる.

4. 今後の課題

現時点では, 速度が非常に高速・低速な流星, あるいは極端に硬い・脆い流星の起源についての解析が行われていないため, このような流星に関して個々に解析を進めていく必要がある. また, 地球大気に突入してくるメテオロイドは太陽系内起源だけでなく, 太陽系外起源のものや, スペースデブリなどの人工物質, さらには地球の重力にトラップされた物体が突入している可能性も否めない. 今後の課題は, 軌道から流星物質の分類を行うことである.

5. 参考文献

- [1] 阿部新助:「流星に生命の起源を求めて」, Vol.95, No.11, pp.3, 2009.
- [2] J.Kero, C.Szasz, T.Nakamura, T. Terasawa, H. Miyamoto, and K. Nishimura: 「A meteor head echo analysis algorithm for the lower VHF band」, pp.639, 2012.
- [3] Southworth, R. B., & Hawkins, G. S. 1963.
- [4] Zdenek Ceplecha: "EARTH'S INFLUX OF IFFERENT POPULATIONS OF SPORAIDIC METEOROIDS FROM PHOTOGRAPHIC AND TELEVISION DATA", Vol.39, No.4, pp222-223, 1988.
- [5] Abe, S. et al., "Orbital Evolution of Geminids and Quadrantids by MU Radar Observations", Proc. Asteroids, Comets, Meteors, Jun 30-Jul 4, Helsinki, 2014