

## 要約

ビデオ観測からの流星の線電子密度推定について検討した。線電子密度を観測によって直接推定するには専用のシステムが必要であり、ビデオ観測から簡単にできる線電子密度の推定と HRO により得られたエコー画像との比較を試みた。

流星体の化学組成、物理的構造等の仮定により推定方法には何通りもの方法があり、いくつかの方法を試すことによって推定には 10 倍以上の差が生じることが示された。これは電離を起こす流星体の実物をあらかじめ知る事ができない以上、やむを得ないものと考えられる。

ふたご群とオリオン群について計算した結果、ビデオと HRO で同時観測されるものは濃密痕(overdense echo)であることが分かった。HRO でしか捉えられない流星は希薄痕(underdense echo)による 3 等級から 5 等級程度のものであると推定される。

McKinley(1961)が示す限界高度(Height Ceiling)の計算式によると、65km/s 以上の高速の流星では希薄痕は検出できなくなる。McKinley の限界高度は希薄痕に対するものであるが、McKinley は濃密痕でも希薄痕とほぼ同様であると推定している。これにより、オリオン群の輻射点高度が低く発光点高度が高い時の流星数が少ないのは限界高度以上で発光しているためと説明することができる。従って、オリオン群の出現数を HRO から推定するには、限界高度の影響でエコー数が輻射点高度とともに変化することを考慮しなければならない。

## はじめに

前報でふたご群とオリオン群に対してビデオ観測と HRO の比較を試みて、「ビデオ観測でしか捉えられない、逆に HRO でしか捉えられない流星がある」ことを確認した。今回は、ビデオ観測から線電子密度を推定して HRO で観測できるのはどの程度の明るさの流星であるのかを検討する。また、オリオン群で輻射点高度が低く、発光点高度が高い時に電離層の影響があるかもしれないと指摘したが、線電子密度の計算によってそれが具体的にどのようにして生じるのか考察する。

## ビデオ観測からの線電子密度の推定

受信した電波の強度からではなく、光学観測から線電子密度を推定するにはいくつかの仮定が必要になる。ここでは古典理論に従って、破碎(fragmentation)、流星体内部への熱伝達を無視して、単純にビデオ観測で得られた絶対光度から流星体の質量を推定し、それをもとにして線電子密度の推定を試みる。

## (1)流星体の質量

Öpik(1958)は以下の 2 つの式を示している。

$$\log m = 10.97 - 1.7 \log v - 0.4M_a \quad (m < 1g)$$

$$\log m = 10.02 - \log L - \log \tau - 3 \log v - 0.4M_a$$

$m$  は質量(g)、 $v$  は流星の速度(cm/s)、 $M_a$  は流星の絶対光度、 $L$  は流星の経路長(cm)、 $\tau$  は発光効率である。Öpik 自身は発光効率を理論的に分析しているが、一般的な流星体は多孔質のダストボールと仮定すれば、

$$\tau = 2000/v$$

で表されるとしている。しかし、

$$\tau = kv$$

の形で表されることも多く、McKinley は Whipple (1943)の  $k=8.5 \times 10^{-5}$  を紹介しているが、以下では Verniani(1965)の  $k=5.25 \times 10^{-10}$ (cgs)を用いることにする。古典理論では cgs 単位系が使われることが多いが、混在することも多いので注意が必要である。また、著者により物理量を表す文字も異なり、Öpik 自身は  $v$  でなく  $w$ 、 $\tau$  でなく  $\beta$  を用いている。著者によっては線電子密度を  $\alpha$  でなく  $q$  で表し、発光効率を  $\tau_1$ 、イオン化効率を  $\tau_2$  としているものも多い。以下では、適宜、原著で使われているものではなく、一般的と思われる文字に断りなく置き換えることにする。また、今回扱う流星については、質量が 1g 程度のものが多いので、Öpik の両方の式で質量を計算する。

また、Bronshten(1981)は次の質量を求める式を示している。

$$m = \frac{9}{2} \frac{H^* I}{\tau v^3 \cos z}$$

$I$  は発光エネルギーで Öpik(1958)によると

$$\log I = 9.72 - 0.4M_a$$

であるが、これは erg/s であり、McKinley がこれを  $W(=J/s)$  に変換した式を示しており、こちらも使いやすい。

$$M_a = 6.8 - 2.5 \log I$$

$z$ は流星経路の天頂からの離角（天頂距離）であり輻射点の天頂高度の補角、 $H^*$ はスケール・ハイトと呼ばれ、McKinleyによれば、次式で与えられる。これは高度  $H$  における大気圧や大気密度を指数関数として表すために用いられる尺度である。

$$H^* = \frac{RT}{Mg}$$

ここで  $R$  は気体定数(=8.314)、 $T$  は高度  $H$  における絶対温度(K)、 $M$  は高度  $H$  における大気平均分子量、 $g$  は高度  $H$  における重力。McKinley の本に古い値だが  $T$  と  $M$  は引用されており、これより高度  $H=95(\text{km})$  で  $T=199.3$ 、 $M=27.56$  を用いることとする。 $T$ 、 $M$ 、 $g$  が高度  $H$  の関数である以上、スケール・ハイト  $H^*$  も高度の関数であるが、ここでは  $T$  と  $M$  は定数として処理する。また、 $T$  や  $M$  の値は実際には変動するものであり、得られる推定値にも不確定要素が入り込むのは止むを得ない。

## (2)線電子密度

長沢先生が訳されてご自分で製本された冊子を頂いたことを思い出したことが、この発表を後押しした。この冊子の中に Verniani(1973)が導いた式が紹介されている。

$$\alpha = 7.7 \times 10^{-10} m^{0.92} V_g^{3.91} \cos z$$

この式だけは、長沢訳のまま  $v$  ではなく  $V_g$  のまま使うことにする。 $m$  も  $V_g$  も cgs であるが、与えられる数値は electron/m の単位である。これを SI 単位にした次式を見た人は多いかもしれない。

$$\alpha = 1.57 \times 10^{13} m^{0.92} v^{3.91} \cos x$$

Bronshten は線電子密度について次のような式を与えている。

$$\alpha = \frac{4 \beta m \cos z}{9 \mu H^*}$$

$\mu$  は流星体を構成する原子の平均質量で Öpik によると  $\mu=3.8 \times 10^{-23} \text{g}$  である。 $\beta$  はイオン化効率で、これについても多くの研究者により様々な提案がなされている。 $\tau$  の推定と同様に、観測からの推計の場合、実験的に鉄であるとか流星体を構成する元素からの推定の場合、観測結果に合わせるように実験値を操作する場合等がある。Bronshten がまとめた一覧表の推定値には 1 桁以上の開きがあり、基本的に鉄の含有量が多いとする場合には高い値となる。ここではスーパーシュミットの観測から Verniani(1965)が示したものを使う。

$$\beta = 9.5 \times 10^{-29} v^4$$

この  $v$  も cgs である。Bronshten の線電子密度の式の  $m$  に同じく Bronshten による質量の式を代入して整理すると Verniani(1965)が示す次式が得られる。

$$\frac{I}{\alpha} = \frac{\tau}{\beta} v^3 \frac{\mu}{2}$$

質量を求める必要がなければ、こちらの式の方が便利である。

最後に紹介の意味も含めて、Belkovich(2006)が Tokhtasjev の  $\beta$  から誘導した式を示す。2005 年に IMO の 'Radio Meteor School' で Belkovich が講演した中にある。

$$\alpha = 4.03 \times 10^{14} \frac{m(v - 8.15)^3}{H^*}$$

以上述べてきたようにビデオ観測で得られた数値から質量や線電子密度を推定する場合には 1 桁程度の誤差が含まれる。このことを踏まえて次項では複数の推計値を示すことにする。

## ふたご群とオリオン群のビデオ観測から求めた質量と線電子密度

前項で取り上げた方法によって推定された流星体の質量と線電子密度  $\alpha$  を表 1 に示す。ふたご群の流星は前報「HRO とビデオで見たふたご群」の図 4 のエコーのうち、ビデオ観測でも捉えられたものである。また、オリオン群の流星は「オリオン群と HRO」の <表 1：顕著なエコーとそれに対応するビデオ観測> から選んだものである。Öpik については前述のように 2 通りの質量推定を示し、それに対応する線電子密度を Verniani の式(1973)から求めている。また、Bronshten と Belkovich の線電子密度は Bronshten の質量を使ったものである。

表 1：ビデオ観測の絶対等級から求めた質量と線電子密度の方法による違いと 4 等級の流星の推定値。

Time	$M_a$	IP	class	$V_g$	m(g)		$\alpha(\text{electron/m})$				
					Öpik	Öpik	Öpik	Öpik	Bronshten	Belkovich	
051251	-1.2	0.001	GEM	33.7	2.16	3.35	0.76	4.1E+16	6.1E+16	1.4E+14	8.7E+14
051425	-0.8	-0.032	GEM	33.7	1.55	1.94	0.55	3.0E+16	3.7E+16	1.0E+14	6.3E+14
051926	-0.1	-0.069	GEM	32.1	0.91	0.99	0.37	1.5E+16	1.6E+16	5.6E+13	3.4E+14
				4	33.4	0.02	0.03	0.01	5.4E+14	7.8E+14	1.3E+12
012428	-4.3	0.004	ORI	67.5	12.22	21.49	0.96	2.8E+18	4.7E+18	2.7E+15	1.4E+16
025928	-7.2	-0.144	ORI	67.7	168.90	361.51	10.32	4.0E+19	8.1E+19	3.7E+16	1.5E+17
044356	-3.4	0.279	ORI	67.4	5.11	6.90	0.31	1.6E+18	2.1E+18	1.1E+15	4.4E+15
				4	65.4	0.01	0.01	4.3E-04	2.7E+15	3.3E+15	1.3E+12

質量の推定は、ふたご群の場合にはそれほどの違いはないが、速度の大きいオリオン群では1桁の違いになっている。発光効率 $\tau$ の値を Öpik は速度に反比例するとし、Verniani(1965)は比例するとしているためである。オリオン群については Bronshten の値の方が近いと考えられる。

線電子密度は指数表示で表しており、 $4.1E+16$ は $4.1 \times 10^{16}$ electron/mの意味である。Öpik と Bronshten、Belkovich の値には2桁程度の違いがある。どちらの式でも質量による違いは線電子密度に桁が違うほど大きな差を生じないため、Öpik と Bronshten による質量の違いではなく、採用しているイオン化効率 $\beta$ の違いだと考えられる。違いは大きいですが、同時観測される流星の線電子密度は濃密痕に該当することが確かめられる。

表1には両群の4等級の流星について質量と線電子密度を推定したのもも示した。Öpik-Verniani による推定値では濃密痕になると予想されるが、Bronshten と Belkovich の推定値では希薄痕となる。大まかに3~4等級が濃密痕と希薄痕の境界となるとみてよいであろう。

表1のふたご群の流星エコーと、同じ時間帯に記録された同時観測されていないエコーを図1に示した。オリオン群の画像は025928のエコー及び同じ時間帯に観測されたビデオで同時観測が得られなかったエコーである。ふたご群で同時観測されたものはエコー画像からも濃密痕であることが確認できる。また、オリオン群の025928は絶対光度が大火球クラスであるが、観測地点からの経路距離 $D$ が723(km)と観測限界に近く、エコー強度は弱く、継続時間もはっきりしない。濃密痕を遠方で観測した様子がよく表れていると思われる。

一方でビデオ観測のないものは継続時間がほぼ1秒であり、希薄痕の特徴を表している。恐らく、これらは表1で示した4等級程度の明るさのもので、発信点・受信点を焦点とする回転楕円体面にぴったりと沿った流星であろう。この明るさではビデオ観測が得られないのは当然である。また、エコーの強度的に見て、この程度のエコーがHROで計数される下限であろうから、HROで捉えられている流星の光度は4~5等級が限界と考えられる。

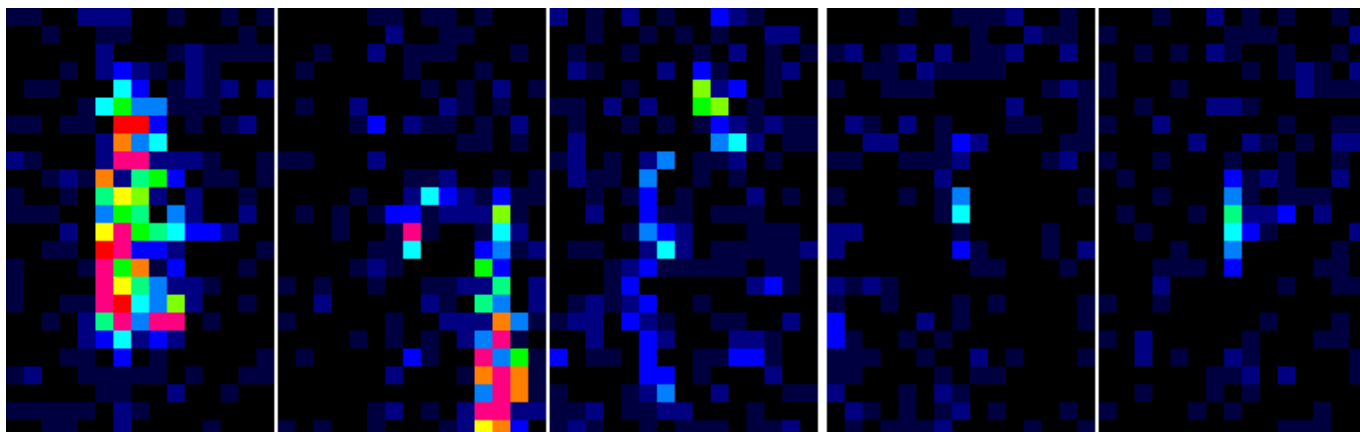


図1：12月14日05:10~20(JST)の間に捉えられたエコー。左側の3個のエコーはビデオ観測されたもの；051251、051425(中央のもの。右下は別のエコー)、051926。右側の2個はビデオ観測されていないもので時刻は051321(左)、051834(右)。

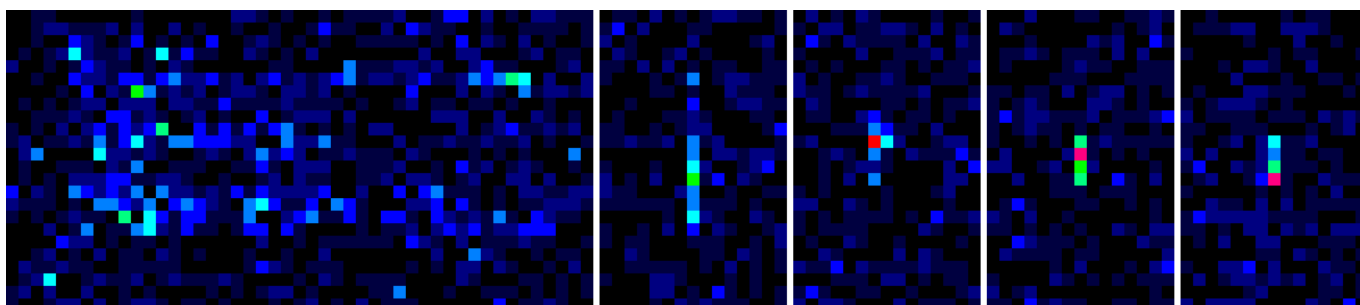


図2：10月22日02:50~03:00(JST)の間に捉えられたエコー。左側が表1の025928に対応するもの。他の4つのエコーはビデオ観測されていない。エコーが記録された時刻は左から025312、025340、025832、025906。

### 限界高度とオリオン群

Mckinleyによると、次式で表される強度減少が40dB以上になると流星からのエコーは受信されなくなる。

$$\text{Loss in dB} = 970 \frac{R_0^{1/2} D}{\lambda^{3/2} V} + 343 \left( \frac{r_0}{\lambda} \right)^2$$

ここで $R_0$ はレーダーからの距離(m)、 $D$ は痕の拡散係数で、概略、次式で与えられ、 $H$ の単位はkmである。

$$\log D = 0.067H - 5.6$$

$r_0$ は痕の初期半径で、概略、次式で与えられる。

$$\log r_0 = 0.075H - 7.9$$

この式は希薄痕の後方散乱に対するものであるが、McKinley は濃密痕の前方散乱の場合でも準用できるとしている。HRO で一般的な 50MHz の場合について  $R_0=150(\text{km})$  と  $R_0=500(\text{km})$  を代入して、流星の速度と強度減少が 40dB になる高度を求めたものが図 3 である。なお、FRO の場合に相当する 80MHz の場合も追加した。それぞれの線からは強度減少が 40dB 以上になり、流星からのエコーが受信されなくなる。これが限界高度である。50MHz の場合には  $R_0$  が小さいと限界高度が高く、 $R_0$  が大きくなると限界高度が下がる。 $R_0$  による違いはあるが、速度が大きく、発光点の高い流星は捉えにくくなることが説明される。英語では Height Ceiling と呼ばれている現象である。なお、80MHz の方が限界高度は低くなり、高速の流星（発光点高度が高い）ものを捉えにくくなる。これが流星レーダーとして運用されているものの周波数が 30MHz 程度である理由である。

これを別の視点で表したものが図 4 である。縦軸には線電子密度の対数をとっている。濃密痕と希薄痕の境界について McKinley は  $2.4 \times 10^{14} \text{electron/m}$  のほか、 $1.1 \times 10^{14} \text{electron/m}$  という値も紹介している。およその目安として  $14 (\alpha = \log 10^{14})$  のところに引いてある線からは濃密痕の領域である。この図も 50MHz については 2 通りの  $R_0$  について示している。この図では、それぞれの線の下側は強度減少が 40dB 以上になり、流星エコーを受信できなくなる。50MHz で  $R_0=150(\text{km})$  であっても、速度が 60(km/s) 以上の流星の

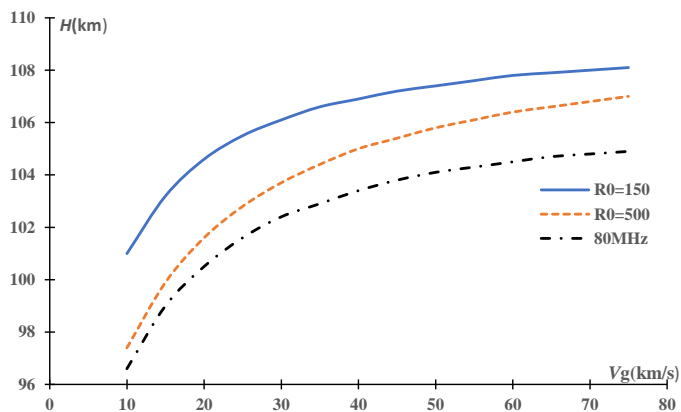


図 3 : 流星の速度と限界高度。

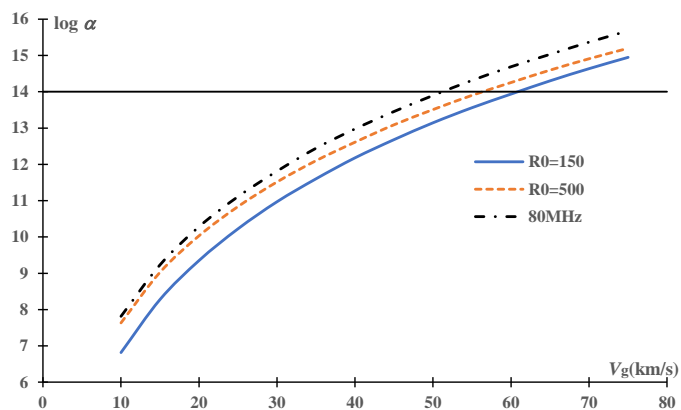


図 4 : 流星の速度と線電子密度。

希薄痕は捉えられないことがわかる。

この限界高度による受信強度の減少によってオリオン群の流星エコー数は輻射点高度が低く、発光点高度の高い時間帯ではビデオ観測されるものに比べて少ないという現象を説明できる。ふたご群の場合は速度が小さく、発光点高度が限界高度よりも低いため、HRO によるエコー数は輻射点高度に左右されないのである。

### 参考文献

- Bronshthen V. A, 1983, Physics of Meteoric Phenomena. Reidel, Dordrecht (原著はロシア語で 1981 年出版).
- Belkovich, O.I., 2006, 'The physics of meteoroid ablation and the formation of ionized meteor trails.', 21-26, in "Proceedings of the Radio Meteor School".
- Jones, W. 1997, 'Theoretical and observational determinations of the ionization coefficient of meteors', Mon. Not. R. Astron. Soc. 288, 995-1003
- McKinley, D.W.R. 1961, Meteor Science and Engineering, McGraw-Hill, New York.
- Öpik, E.J. 1958, Physics of Meteor Flight in the Atmosphere, Interscience, New York.
- Verniani, F. 1965, 'On the luminous Efficiency of Meteors', Smithsonian Contr. Astrophys., 8, 141-172.
- Verniani, F. 1973, 'An Analysis of the Physical parameters of 5759 faint radio meteors', J. Geophys. Res., 78, 8429-8462.
- Whipple, F.L., 1943, 'Meteors and the earth's upper atmosphere', Rev. Mod. Phys., 15, 246-264.

本文中で紹介した長沢先生の訳本の表紙を紹介します。天文台内の勉強会で使われたもので、海賊訳なので大っぴらにはできませんと書かれていました。

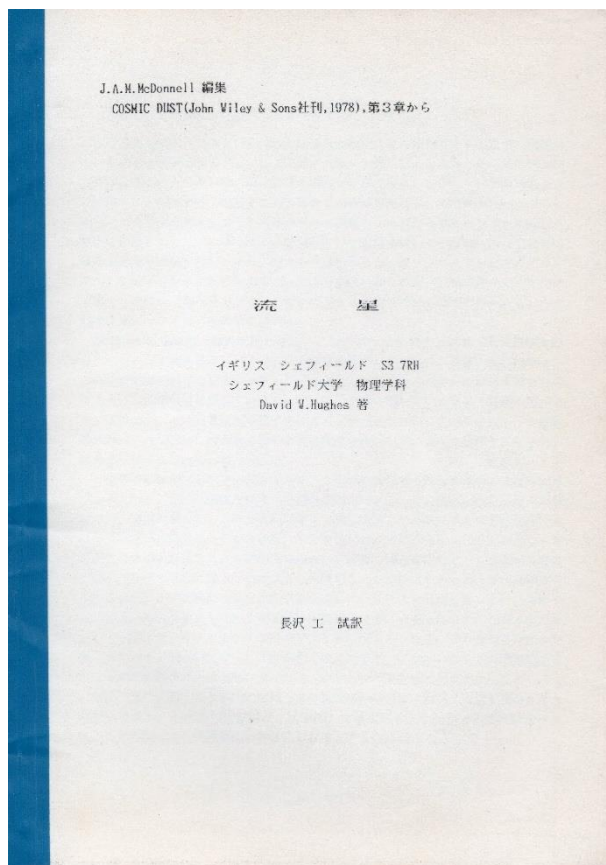


図 5 : 長沢先生による訳本。