

## プラズマテイルの観測

木下 大輔 < daisuke@naoj.org >

### ( 1 ) 観測

明るい彗星のプラズマテイルは、比較的安価な観測装置でも、意味のある観測を行うことができる機会をもたらしてくれる。ここでは、観測や解析で困難にぶつかることもあるであろう測光をしなくても、幾何学的な議論だけで研究対象となりうる観測手法および解析を紹介する。彗星のプラズマテイルには擾乱現象が見られることがよくある。Brandt (1985)は、プラズマテイルの特徴的な構造として以下のものを挙げている。

- ray (すじ)
- streamer (ストリーマ)
- knot (こぶ)
- kink (折れ曲がり)
- helix (螺旋)
- condensation (塊)
- ちぎれ現象(DE = Disconnection Event)

これらの構造は一般に大きな広がりを持つ。見かけの角度で数十分角から、なかには数度に及ぶような非常に広がった構造を示す場合もある。したがって、このようなプラズマテイルの擾乱現象を捉える場合は、広い視野を確保できる観測装置で観測する必要がある。CCD チップの受光面積はそれほど大きくないので、焦点距離の長い望遠鏡で観測すると広い視野を得ることは難しい。例えば、国立天文台の三鷹キャンパスに設置されている口径50cm の望遠鏡の焦点距離は6メートルである。これに1 ピクセルが22.5 ミクロンで、1152 ピクセル\_ 770 ピクセルのCCD チップを持つカメラを取り付けて観測する場合、1 ピクセルは0.77秒角に相当するので、視野は14.9 分角 × 9.9 分角となる。プラズマテイルを観測するには、このような焦点距離の長い望遠鏡ではなく、広視野を得るために焦点距離が数十ミリから数百ミリ程度のカメラレンズを用いて観測するのがよい。特徴的な構造を見つけ、その位置を追いかけて、運動を調べる場合には、写真による観測でもCCD カメラによる観測でもどちらでも構わない。ただし、写真による観測では観測時刻が自動的に記録されないため、露出の開始時間や露出時間などを別に記録しておく必要がある。

彗星のプラズマテイルは短時間で変化する。露出時間を長くしすぎると、尾のプラズマが流れていき、ぼやけて写ってしまうため、注意が必要である。例えば、プラズマが秒速100 km/s で移動しているとすると、1 分間で6000 km 動くことになる。地球から1 天文単位離れている現象を見ている場合、これは最大で天球面上の8 秒角に相当する。観測前に使っている機材の分解能がどれくらいかを調べておき、それを観測時の地球と彗星の位置関係と比べ、適切な露出時間がどのくらいかを見積もっておいた方がよい。

### ( 2 ) 尾のなかの特徴的な構造を追いかける

ここでは実際にプラズマテイルに特徴的な構造が見つかった場合に、彗星プラズマテイルのなかでの流速を求めることを考える。図1 は国立天文台の福島と東北大(当時) の木下による百武彗

星のプラズマテイルの観測である。彗星核から10°程度離れたところに、こぶのような構造が見られ、この構造は時間とともに彗星核から離れていくことが認められた。このように、異なる時間での多数のデータがある場合、特徴的な構造の運動を追いかけることができる。

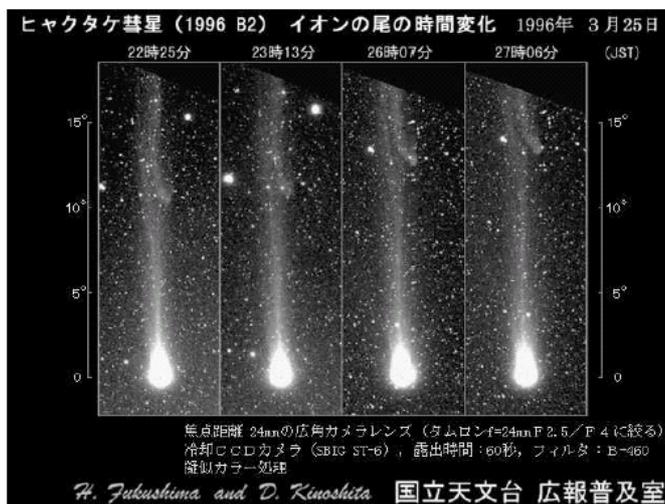


図 1: 百武彗星(C/1996 B2) で観測されたこぶ状の構造。時間とともに彗星核から遠ざかっているのが分かる。観測は1996年3月25日に山梨県の金山高原にて行った。用いた装置はSBIGのCCDカメラST-6と焦点距離24ミリのカメラレンズである。また、B-バンドのフィルターを用いた。露出時間は60秒。画像は国立天文台提供。

まず、見つけた特徴的な構造の位置を測定する必要がある。位置測定については本書の第二部のII-1の「位置観測」を参照のこと。また、本書の第三部のIII-1に「位置推算表」があるので、この表から彗星核の位置を調べることができる。また、観測時間も分かっているので、以下のような表が書けるはずである。

時刻1	彗星核の赤経	彗星核の赤緯	構造の赤経	構造の赤緯
時刻2	彗星核の赤経	彗星核の赤緯	構造の赤経	構造の赤緯
時刻3	彗星核の赤経	彗星核の赤緯	構造の赤経	構造の赤緯
		...		
		...		
		...		
時刻n	彗星核の赤経	彗星核の赤緯	構造の赤経	構造の赤緯

ここで、彗星核の赤経赤緯とプラズマテイルの特徴的な構造の赤経赤緯から、その間の角距離を求める。球面三角についての記述のある教科書(例えば、長谷川1996など)を見れば、赤経と赤緯がそれぞれ $(\alpha_1, \delta_1)$ と $(\alpha_2, \delta_2)$ である二点の、二点間の距離 $d$ と天の北極を通る大円と二点を通る大円のなす角 $\theta$ は次のように表されることが分かる。

$$\begin{aligned} \sin d \sin \theta &= \cos \delta_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \\ \sin d \cos \theta &= \cos \delta_1 \sin \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \\ \cos d &= \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \end{aligned}$$

これを用いて、彗星核と尾のなかの特徴的な構造の間の距離を角度で求める。次に、位相角を調べる。これもやはり本書の位置推算表を見ればよい。観測していた期間で位相角がほぼ一定であれば、同じ値を使えばよい。もしも、位相角が観測していた期間内で大きく変わるようであれば、それぞれの時間ごとに位相角を調べておく。地心距離も同様に調べておく。ここまで作業すると、以下のような表ができている。

時刻1	彗星核と構造との角距離	地心距離	位相角
時刻2	彗星核と構造との角距離	地心距離	位相角
時刻3	彗星核と構造との角距離	地心距離	位相角
	...		
	...		
	...		
時刻n	彗星核と構造との角距離	地心距離	位相角

ここで、彗星核と尾のなかの特徴的な構造の間の実距離を求めることを考える。太陽と彗星と地球の位置関係は図2のように描ける。地心距離と位相角は位置推算表からすでに調べてある。彗星核と尾のなかの特徴的な構造との間の角距離も計算してある。彗星核と尾のなかの特徴的な構造の実距離は、

$$D = \frac{\sin s}{\sin(\alpha - s)} \Delta$$

と簡単な式で書き表すことができる。これで、各時刻における彗星核と特徴的な構造の距離が求まったので、これをプロットしてみる。図3 は木下らが測定した百武彗星のこぶ状構造の運動である(Kinoshita et al., 1996)。以上のように、明るい彗星のプラズマテイルの異なる時刻での数多くの観測データがあると、そのなかから特徴的な構造を見つけて、運動を追いかけて、プラズマの流れを求めることができる。一晩だけでなく、異なる観測日でのデータがあれば、彗星が低緯度の低速太陽風にさらされているときと、高緯度の高速太陽風にさらされているときで、プラズマテイルの流速に違いがあるかどうかなどといったことも調べることができるだろう。

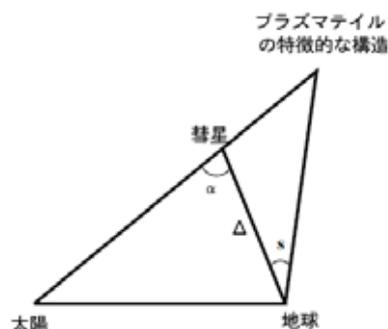


図2: 太陽、彗星、地球の位置関係を表した図。  $\Delta$  は地心距離、 $\alpha$  は位相角(太陽-彗星-地球のなす角度)で、 $s$  が彗星核-地球-プラズマテイル中の特徴的な構造のなす角。

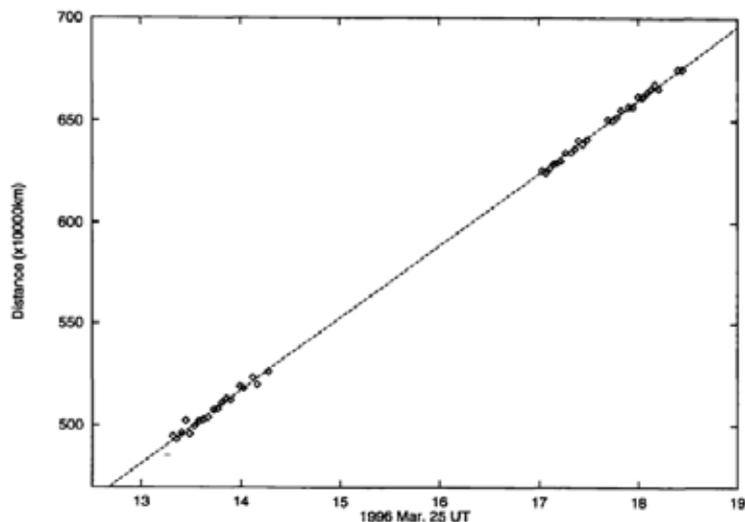


図3: 1996年3月25日に百武彗星の彗星核から $10^\circ$ 程度離れたところに見つかったこぶ状の構造の運動。観測していた5時間程度の時間内では構造は約100 km/sの等速で運動していた。

### (3) その他のテーマ

他にプラズマテイルの観測データを用いて研究できるテーマとしては以下のようなものが考えられる。

- 尾のちぎれ現象のメカニズム
- すじ状の構造の変化から太陽風速度を求める

尾のちぎれ現象(DE)がどのようなメカニズムにより発生するのはいまだに明らかになっていない。ここでは、これまでに提唱されている2つのモデルを紹介する。一つは、磁気中性面モデル(Niedner & Brandt, 1978)である。ニードナーとブランドは、太陽風磁場の向きが変わる磁気中性面(セクター境界面とも言う)を彗星が横切るときに磁力線のつなぎかえ(磁気リコネクション、あるいは磁気再結合と呼ぶ)が起こり、尾がちぎれてプラズモイド(プラズマの塊)が流されていくと主張した(図4)。二つ目のモデルは風の息モデル(Saito et al., 1987)である。斎藤らは局所的な太陽風速度の変化が尾のちぎれ現象と関係しているとした。つまり、太陽風速度が急激に大きくなると、磁力線が密になり、磁力線のつなぎかえがおけると説明したのである。興味深い点は、磁気中性面モデルが正しいとすると、彗星の尾のちぎれ現象は磁気中性面付近で見られないことである。つまり、磁気中性面から遠い場所で尾のちぎれ現象が確認されれば、それは風の息モデルが正しいことを支持する有力な観測結果となる。渡部はすじ状の構造(レイ構造)の変化から、太陽風の速度を推定している(Watanabe, 1991)。尾の主軸と尾のすじ状の構造のなす角とその時間変化を調べることで局所的な太陽風速度を評価することができる。通常、高緯度地域での太陽風速度の測定は困難なため、彗星の尾を用いた太陽風速度の測定は意味がある。

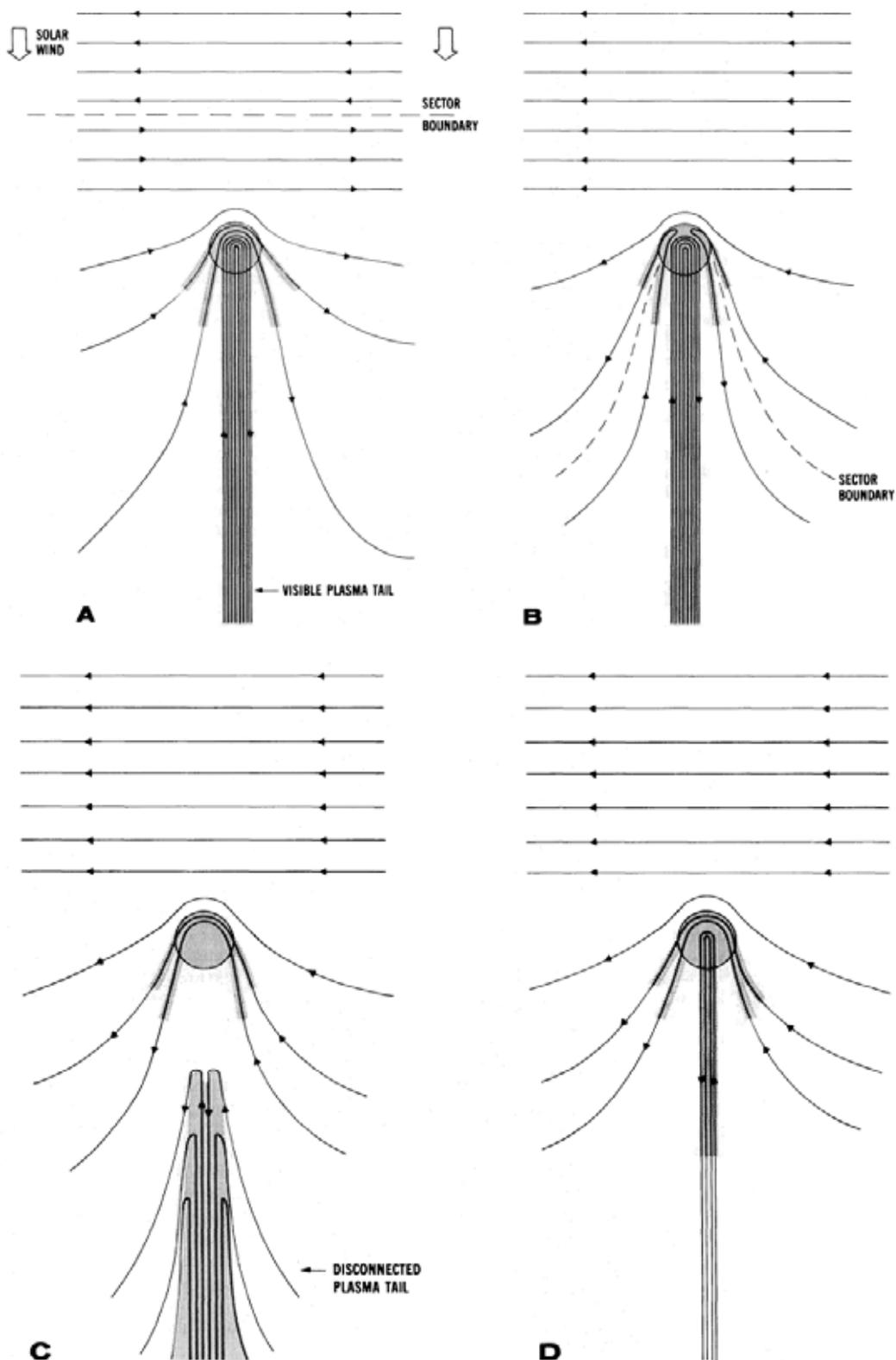


図 4: 尾のちぎれ現象を説明するニードナーとブランドの磁気中性面モデルを模式的に示した図。彗星が磁気中性面を横切る際に DE が発生するとする。図は Niedner & Brandt より。

## 参考文献

- [1] Brandt, J. C., 1985, Observations and Dynamics of Plasma Tails, in Comets, ed. Wilkening, L. L., 519, The University of Arizona Press.
- [2] Kinoshita, D., Fukushima, H., Watanabe, J., Yamamoto, N., 1996, Ion Tail Disturbance of Comet C/Hyakutake 1996B2 Observed around the Closest Approach to the Earth, PASJ, 48, L83.
- [3] Niedner, M. B. Jr., Brandt, J. C., 1978, Interplanetary gas. XXII - Plasma tail disconnection events in comets - Evidence for magnetic field line reconnection at interplanetary sector boundaries, ApJ, 223, 655.
- [4] Saito, T., Yumoto, K., Hirao, K., Minami, S., Saito, K., Smith, E., 1985, Structure and dynamics of the plasma tail of comet P/Halley I. Knot event on December 31, 1985", A&Ap, 187, 209.
- [5] Watanabe, J., 1991, Measurement of the Solar Wind Velocity with Cometary Tail Rays, Solar Physics, 132, 395.
- [6] 木下大輔, 1997, 「出家のススメ」, 宇宙Now (西はりま天文台発行),  
<http://chiron.mtk.nao.ac.jp/swat/doc/shukke.html>.
- [7] 長谷川一郎, 1996, 「天文計算入門: 球面三角から軌道計算まで」, 恒星社厚生閣,  
ISBN 4769908180