

## プラズマテイル

阿部 新助 < avell@pub.isas.ac.jp >

### (1) プラズマテイル(Plasma Tail)

彗星の尾には、プラズマテイル(イオンテイル、タイプ 1 の尾とも呼ばれる)、ダストテイル(塵の尾、タイプ 2 の尾とも呼ばれる)とナトリウムテイル(タイプ 3 の尾)の3種類の尾がある。その他、流星の元になるミリメートルサイズの塵から成るダストトレイルも彗星の尾と呼べるかもしれない。

彗星が太陽に近づき、彗星核の表面の氷( $H_2O$ )が昇華すると、核分子(ガス)と塵粒子(ダスト)がコマを形成する。核分子が電離してイオンになると、太陽と反対方向へ太陽風によって流される。こうして形成される尾がプラズマテイルである。プラズマテイルの主成分は、 $CO^+$ 、 $H_2O^+$ であり、それぞれBバンド、Rバンドで発光する。また電波では、 $CO^+$ 、 $HCO^+$ 、 $H_3O^+$  がHale-Bopp彗星で初めて観測されている。彗星プラズマは、彗星核そのものの物理化学的だけでなく、太陽風プラズマとの相互作用で発生するプラズマテイルは、様々な知見をもたらす。本章では、彗星プラズマテイルについて、太陽風とともに概説する。

Biermann は、彗星プラズマテイルの反太陽方向からのずれから太陽からの粒子の流れの存在を初めて予言し(Biermann, 1951)、Parker により定常的な太陽風が理論的に予言された(Parker, 1958)。その後、太陽風によって運ばれてきた磁力線(太陽風プラズマに凍結した惑星間空間磁場)が、彗星のコマにまとわりついて彗星の磁気圏を形成する、いわゆる field draping model がAlfven により確立された(Alfven, 1957)。イオンは磁力線に沿って進むため、プラズマテイルの形状は彗星磁気圏の構造そのものを反映しているといえる。電離したイオンが取り囲んでいる彗星本体は、地球と違いそれ自体は無磁性である。しかし、太陽風と彗星磁気圏の相互作用を理解することは、彗星だけではなく、惑星間空間磁場の構造や、太陽風が地球磁気圏に与える影響を理解するための大きな手掛かりとなる。



Fig 1. HaleBopp 彗星のプラズマテイル(上方)とダストテイル(下方)

1986年3月には、日本(宇宙科学研究所)の「さきがけ」と「すいせい」、旧ソ連(インターコスモス)の「ヴェガ1号,2号」、ヨーロッパ(ESA)の「ジオット」、アメリカ(NASA)の「アイス」の

6機の探査機群によって協力構成される「ハレー艦隊」(実際にはアイスはハレー彗星には接近せず、ジャコビニ・ツィナー彗星のプラズマテイルの観測を行った)が彗星探査を行い、“よごれた雪だるま”と呼ばれてきた彗星の素顔を明らかにするような驚くべき知見を膨大にもたらし、惑星科学・太陽系天文学を革命的に進歩させた。ハレー彗星(P/Halley)の観測で核近傍の彗星磁気圏のしくみがある程度わかるようになり(Mukai et al., 1986; Neugebauer, 1990)、ハレー彗星以降の彗星に関してもいくつか貴重なデータが得られている。例えば、第22太陽活動期の極大期にあたる1989~1990年にかけて近日点を通じたプロルセン・メトカーフ(P/Brorsen-Metcalf)、岡崎・レビー・ルデンコ(C/Okazaki-Levy-Rudenko)、オースチン(C/Austin)やレビー(C/Levy)などの彗星ではプラズマテイルが発達し、フレアやコロナホールが原因と考えられる尾の乱れ現象が度々発生した(Saito et al., 1995)。1996~1997年にかけては太陽活動は極小期であり、太陽の磁気中性面は黄道面とほぼ平行になっていた。軌道傾斜角89度のヘル・ボップ彗星(C/Hale-Bopp)は近日点付近である1997年3月から5月にかけて、太陽面緯度を高緯度から低緯度に急激に位置を変えながら南下しており、太陽活動極小期における高速・低速の異なる太陽風中における彗星プラズマの振る舞いを明らかにする格好の対象となり、プラズマテイルの様々な観測が行われた(Abe et al., 1997; Kinoshita et al., 1997)。

## (2)太陽風(Solar Wind)

太陽風は、太陽の外層大気である太陽コロナから300~1000(km/s)以上の超音速で吹き出す陽子や電子を主成分とするプラズマの流れである。これは、太陽コロナが百万度にも達する高温であるために太陽自身の重力をコロナプラズマの熱圧が上回り、その結果として太陽から外側、すなわち惑星間空間へと絶え間なく流れ出すことにより生じている。太陽風が太陽から外部へと輸送するエネルギーは、太陽の熱放射に比べて百万分の一程度に過ぎないが、地球環境に与える影響は非常に大きい。

太陽風の実在は、1958年にParkerにより理論的に予言され(Parker, 1958)、1962年にアメリカの人工飛翔体Mariner 2号の観測により観測的に確認された(Neugebauer and Snyder, 1962)。これ以後、太陽風の理論的モデルとしてParkerの提出したモデルが一般に受け入れられることになった。しかし1970年代の中頃、アメリカのスカイラブにより太陽コロナ中に低温で低密度な領域(コロナホール)が存在していることが発見されるとともに、コロナホールが太陽風中の高速な成分(~750km/s)の源であることが明らかになった(Zirker, 1977など)。Parkerの理論によれば、太陽風の速度はその源となるコロナの温度に比例することになり、「低温の領域から高速の太陽風が吹き出している」という観測事実とは矛盾している。この太陽風の加速機構は、現在でも太陽風物理学の研究上で最も重要な課題となっている。

太陽風は発見以後、30年以上に渡って様々な飛翔体によって観測されてきており、そのデータから多くの重要な知見がもたらされてきた。特に、これまでで太陽に最も接近して(~0.3 AU)観測を行ったHelios1,2のデータや、逆に地球より外側、冥王星軌道を遙かに越えて現在も太陽圏境界(Heliopause)を目指して飛行しているVoyager1,2のデータなどにより、非常に広い範囲に渡って太陽風の振る舞いが観測されている。近年では、1991年に打ち上げられ、木星によるswing byを利用して黄道面を離脱し、太陽圏高緯度での観測を実施したUlyssesや、太陽と地球の重力平衡点の一つであるラグランジュ-1(太陽と地球公転軌道との間に存在)での観測を目的として

1994年に打ち上げられた WIND や TRACE などの惑星間空間飛翔体が多く興味深いデータを提供している。これまでの観測から分かった太陽風の様子については Table 1 にまとめる。これから分かるように、太陽風は 10 万度もある高温の希薄なプラズマといえる。10 万度のプラズマ中を伝搬する密度の粗密波の速度(音速)は 50km/s 程であるので、300km/s の低速太陽風といえども超音速の流れとなる。

Table 1. 地球公転軌道付近を吹く太陽風の様子

	速度 <i>km/sec</i>	陽子の密度 <i>1/cc</i>	磁場 $\times 10^{-5}$ <i>gauss</i>	陽子温度 $\times 10^4$ <i>K</i>
平均像	468± 116	5 - 7	6.2±2.9	12.5± 9
高速太陽風	750~800	2.5	4	20
低速太陽風	300~400	9	5	4

太陽風は常に太陽コロナから吹き出しているが、その状態は非常に大きく変化しており、一様な流れとは言えない。特に、太陽面上で激しい活動現象(フレア、コロナ質量放出(CME)など)が発生した時には非定常流が吹き出す。一般に「太陽風」といったときには、こうした非定常的な成分の影響を取り除いた準定常的な流れを対象にしている。

太陽風の速度は、流源である太陽コロナ下部で 50 ~ 100 km/s であるが、その後、数太陽半径の距離までの間に数百 km/s の超音速流となる。1AU 付近(地球軌道近辺)で観測される典型的な太陽風の速度の動径成分は、300 ~ 800 km/s である。また飛翔体による観測によって、1AU 以遠では太陽風の速度は本質的にほとんど変化しないことがわかっている。しかし 1AU より内側での太陽風の動径進化については、さまざまな議論がある。特に最近では高速風に関して、その加速機構とも絡めて「どの程度の距離で加速が終了しているのか?」という点に注目した理論的・観測的研究から多くの報告がなされている。

典型的な太陽風プラズマ中の電子密度の値は、コロナ下部での  $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$  から 1AU 付近で  $\sim 5 \text{ cm}^{-3}$  まで、ほぼ太陽からの距離  $R$  の二乗に逆比例して減少する ( $1/R^2$ )。また同程度の密度でプロトンが含まれており、全体として太陽風プラズマは中性である。それ以外のものとしては 粒子がプロトンの約 5% 程度含まれており、それよりも重い重元素イオンはさらに少なく、ほぼ無視できる程度にしか含まれていない。

太陽風における電子の温度は、太陽コロナ中で  $10^6 \text{ K}$  であり、 $R$  に逆比例して ( $1/R$ ) 低下し 1AU 近辺では、 $\sim 10^5 \text{ K}$  程度である。ここで注意しなければいけない点は、太陽風プラズマ中では粒子の衝突頻度が非常に小さく、平均自由行程が  $\sim 10^9 \text{ km}$  にも達するために、イオンと電子はそれぞれ非平衡状態にあり、プロトンの温度  $T_p$  と電子の温度  $T_e$  は互いに異なっていることである。また、次に述べるように惑星間空間磁場の存在により温度が異方性を持っていて、磁場に平行な方向の温度を  $T_{\parallel}$ 、垂直方向の温度を  $T_{\perp}$  とすると、平均温度  $T$  は、 $T = 1/3 (T_{\parallel} + 2 T_{\perp})$ 、で表される [Marsch, 1990]。

太陽風中の磁場(惑星間空間磁場)は、太陽コロナ磁場が太陽風に凍結されているために惑星間空間へと引き伸ばされたものである。先に述べたように、太陽風プラズマでは粒子の平均自由行程が非常に大きいので電気伝導度が大きく、したがって惑星間空間での磁場の散逸は無視できる。太陽風はほぼ動径方向に流れているので、仮に太陽が自転していないとすると磁力線も動径方向

に伸びることになるが、実際には太陽は約 27 日周期で自転しているので、惑星間空間での磁力線はらせん状に伸びている。これは「アルキメデスのらせん」(Archimedes spiral、またはParker spiralともいう)と呼ばれている(Fig 2)。地球軌道付近でこの磁力線が動径方向と成す角度は、ほぼ 45 度である。磁場の動径成分は 1AU付近で平均的には  $\sim 5 \times 10^{-5}$  ガウス であり、5AU 辺りまでは  $R^{-2}$  に従って変化していることがわかっている。また、同様に方位角方向成分は  $\sim 5 \times 10^{-5}$  ガウスで  $R^{-1}$  で変化している。

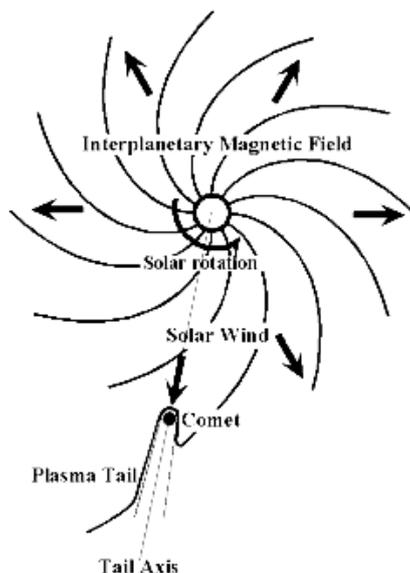


Fig 2. 黄道面上の惑星間空間磁場の様子。太陽風は動径方向に吹いており、太陽の自転のため惑星間空間磁場はアルキメデススパイラルを描く。彗星のテイル軸が反太陽方向に形成される仕組みが分かる。

#### ・太陽風の速度構造

定常的な成分の中でも、太陽風の物理的な性質は大きく変化する。これらは特にその速度に注目して「高速太陽風」と「低速太陽風」と分類でき、両者の間には明白な物理的性質の相違が存在している。高速風と低速風の分類基準は文献によっても異なっているが、一般にはプロトン速度  $V_p$  により、

$$\text{低速風: } V_p \quad 400 \text{ km/s,} \quad \text{高速風: } V_p \quad 600 \text{ km/s}$$

という基準が多く用いられている。この分類にしたがった「2成分」の相違についてまとめると、以下のようになる。

- 低速風は密度が高く、高速風は密度が低い。
- プラズマ温度は高速風の方が高く、磁場に対する方向についての異方性が大きい。
- ヘリウム:プロトンの密度比  $N_{He}/N_p$  は高速風の方が有意に大きい。
- 高速風では速度、密度、温度などの物理的性質の変化が小さくほぼ均質なに対し、低速風は変化の度合いが大きい。

このように、高速風と低速風の間には単なる速度の違いだけではなく、物理的な性質の差異が見出せる。したがって、低速風と高速風では吹き出しのメカニズムそのものが異なっていることが予想される。名古屋大学・太陽地球環境研究所(STE研)の太陽風グループは、日本で唯一、太陽風の観測的研究を行っている。STE研の惑星間空間シンチレーション観測用の

電波望遠鏡によって得られた太陽活動極小期の太陽風速度マップをFig 3 に示す(Kojima et al. 1998)。太陽風データは、以下のホームページよりダウンロード可能となっている。  
<http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/>

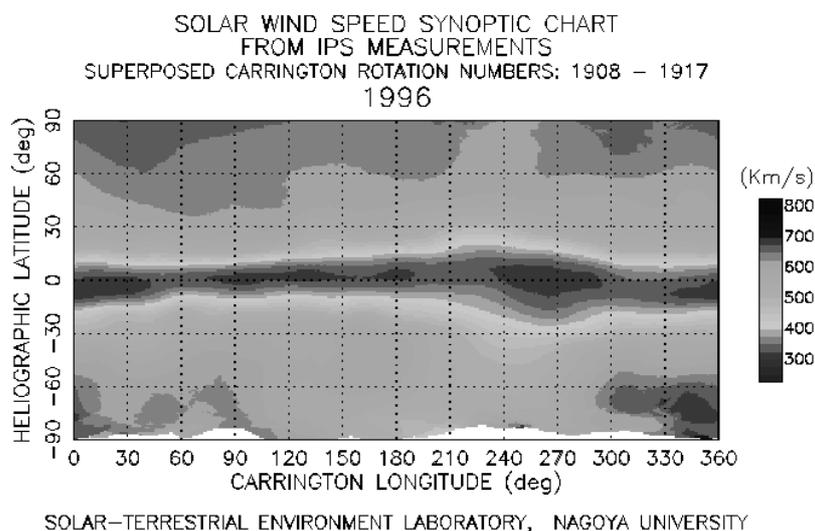


Fig 3. 太陽活動極小期の太陽風速度マップ(1996年;カリントン周期 1908-1907を使用)。低速太陽風は太陽赤道面付近に、高速太陽風は南北極付近に集中していることが分かる。2004年も同様の太陽風速度構造となると予想される。

### (3)太陽風とプラズマテイル

太陽風の存在を初めて予言したのは、Ludwing Biermann (1951)で彗星のテイルの形の研究からであった。彗星が太陽に近づくと彗星物質の蒸発が盛んになる。これは、太陽紫外線によるもので、彗星成分が大きな割合でイオン化するのである。分光観測からは、 $\text{CO}^+$ 、 $\text{H}_2\text{O}^+$ をはじめ多くのイオンの存在が確認されている(Jockers, 1991)。彗星は、約80%が水の氷からなる固体の核と反太陽方向に伸びる一続きの希薄なガスを伴っているのである。Biermannの予言以前は、彗星のテイルの存在は太陽の同径方向の放射圧に関係したものであると説明されていた。しかし、プラズマテイルは常に反太陽方向にだけ観測されており、Biermannは太陽の放射圧だけではこのようなテイルを説明できないと考え、太陽からの特別なフラックスの同径方向の流れ(太陽風)によってのみ説明できるということを提案した。

さらに厳密に調べると彗星のプラズマテイルの方向はわずかに反太陽方向からずれているのが分かる。長い紐を持って走ると、走るスピードによって地面に対する紐のたなびく角度が変わってくる。同じように考えると、プラズマテイルのたなびく角度の”ずれ”を観測から求めれば、太陽風のスピードが推測できるのである。太陽風とプラズマテイルの密接な関係から、目に見えない太陽風を目に見える彗星の尾を使って研究することが可能になるのである。

#### ・プラズマテイル形成に関するモデル(Field draping model)

Alfven (1957)は、太陽風と彗星イオンの相互作用で形成される彗星プラズマテイルについてのMHD(Magneto-hydrodynamics)モデルを提唱した。Alfvenの考えは、磁場を凍結した太陽風が彗星に衝突すると、そこで磁力線が捕まり、引きつられた磁力線がプラズマテイルを形成すると

いったものである(Fig 4)。彗星の頭にしっかり固定された磁力線が引き伸ばされて形成されたものがプラズマテイルであるということを Alfven は強調している。この Alfven の "field draping モデル" は、後述する "windsock モデル" の考えの基盤になっている。これまでに、Alfven の field draping モデルは、多くの証拠により裏付けられている：C/Kobayashi-Berger-Milon(1957 IX)彗星の観測(Brandt, 1982)、MHD シミュレーション(Ogino et al., 1986)、実験室内の実験(Minami et al., 1986)、ICE 衛星による P/Giacobini-Zinner 彗星の直接観測(Mendis et al., 1986; Slavin et al., 1986)、SUISEI 衛星による P/Halley 彗星の直接観測(Mukai et al., 1986)。

### Field draping model

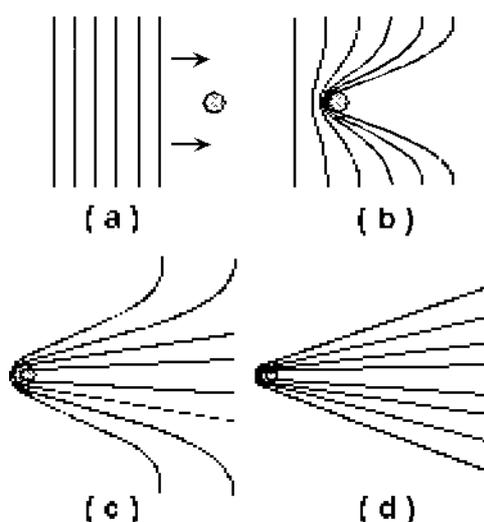


Fig 4. Field draping model[Alfven, 1957]。太陽風によって運ばれてきた磁力線(太陽風プラズマに frozen-in した IMF)が、彗星のコマにまとわりついて彗星磁気圏を形成する様子を示す。  
(a) (b) (c) (d)

#### ・テイル軸の "ずれ" に関するモデル(Windsock-model)

プラズマテイルは一般に太陽-彗星の線上からずれた位置に形成される。この "ずれ" の原因を説明する "windsock モデル" は、Brandt と Rothe (1976)によって提唱された。この windsock モデルは、プラズマテイル形成に関する Alfven の "field draping モデル" の考えに基づいている。つまり、観測者が彗星軌道運動座標系からみた場合に限りて彗星プラズマテイルが太陽風の流れの方向へ流されるという考えである。彗星プラズマテイルの方位角  $\pi$ (反太陽方向からのなす角)は、次式で与えられる。

$$T = V_{SW} - W$$

ここで  $V_{SW}$ は太陽風速度、 $W$ は彗星核の軌道運動速度である。この式で重要な点は、太陽風速度と彗星核の速度によってプラズマテイルの方位角が決定されるということである。言い換えれば、彗星のプラズマテイルの方位角と彗星の軌道運動速度が分かれば、彗星プラズマテイルを形成する太陽風速度が導出できるということである。

・形態解析から求める太陽風速度

太陽風は同径方向に流れていると考えられるので、windsock モデルを適応すると太陽風速度の変化によりプラズマテイルの方位角  $T$  は彗星軌道面内で変化する。また、太陽風および彗星の軌道運動速度が変化しなければ、プラズマテイルの太陽-彗星を結ぶ方向からのずれは常に同じであると考えられる。そこで、彗星プラズマテイルを厳密に議論するためには、プラズマテイルが形成される彗星軌道面内で解析を行う必要がある。これまで、1次元つまりテイル軸に沿った核からの距離などについては、この解析方法が用いられていたが(Kozuka et al., 1990)、Abe et al. (1997)は、太陽-彗星-地球のなす位相角および地球からの距離を用いて、プラズマテイルの2次元データを彗星軌道面へ投影するといった手法を採用して形態解析を行っている。Fig 5にプラズマテイルを彗星軌道面へ投影する方法の概念を示す。

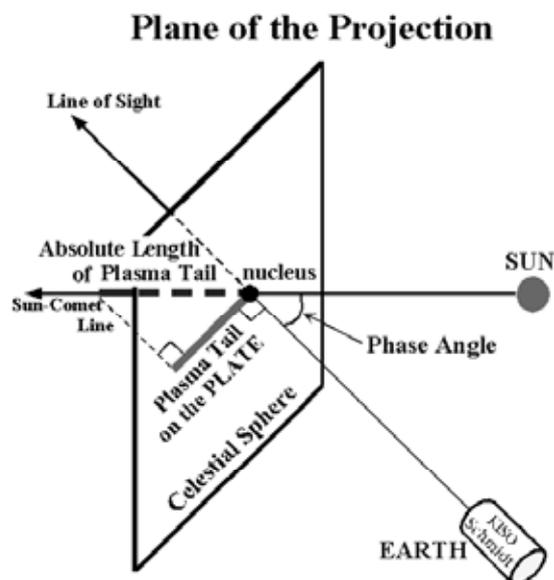


Fig 5. 彗星軌道面へのプラズマテイルの投影法。地球から観測されるデータは、天空(celestial sphere)に投影された2次元データであるので、これをもとの彗星軌道面へ戻して解析をおこなう。投影に必要なパラメータは、位相角(phase angle)と地球からの距離となる。

Fig 6は、彗星軌道面に投影した1997年4月10日10時35分-19時45分(UT)に撮影されたHale-Bopp彗星のデータである。x軸(横軸)は太陽-彗星を結ぶ方向で右側が反太陽方向、y軸(縦軸)はx軸に垂直な方向である。反太陽方向と、プラズマテイルの最も濃いテイル軸のなす角度である方向角  $T$  を求めれば、プラズマ周辺の太陽風速度が導出できる。テイル軸の方向角を計る理由は、AlfvenのField drapingモデルから、プラズマテイルが最終的に収束する軸(テイル軸)がwindsockモデルでいうところのテイルに相当するからである。最も濃いテイル軸の方向角とwindsockモデルから求まる太陽風速度は秒速200数十キロメートルとなり、明らかに低速過ぎる。このような傾向は、他の彗星プラズマテイルでも報告されており、その原因は不明である。プラズマ相互作用によるエネルギー散逸などの複雑な機構が関与している可能性もある。

またHale-Bopp彗星のプラズマテイルは、明らかにテイル軸に対して軸対象なテイルを形成していない。このプラズマテイルの非対象性は、数ヶ月間に渡って維持されている大規模構造であり、定常的なプラズマテイルの形態ということになるが、このような大規模非対称構造の形成メ

カニズムはまだよく分かっていない。

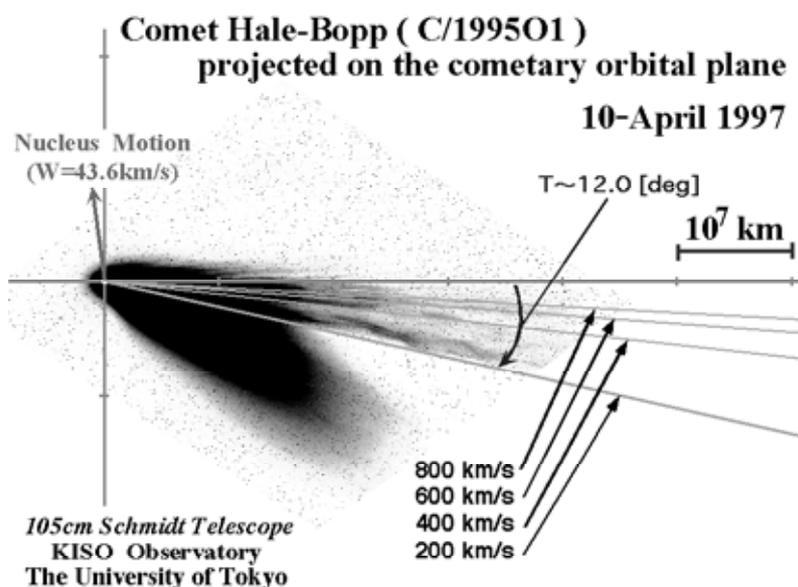


Fig 6. windsock モデルから求まる太陽風速度。太陽風速度がそれぞれ 800km/s、600km/s、400km/s、200km/s と仮定したときに形成されるテイル軸の方向を示す。

#### ・尾のちぎれ現象

彗星プラズマテイルがちぎれる現象は、Disconnection Event として、Niedner and Brandt (1978)によって提唱された。プラズマテイル中でのリコネクションは、太陽風の磁力線と彗星磁気圏の閉じた磁力線という全く異なった磁力線をつなぎ替え、新たに彗星磁気圏が形成される現象である。古い磁力線に乗っかってプラズマテイルは、反太陽方向へ流され、プラズマテイルがちぎれて彗星本体から離れて行くように観測される(Fig 7)。ハレー彗星、百武彗星、Hale-Bopp 彗星、池谷チャン彗星などで主にアマチュアによってその様子が捉えられている。

そもそも磁気リコネクションとは、磁気エネルギーを短い時間にプラズマの運動エネルギーや熱エネルギーに変えるメカニズムあることから、磁気エネルギーがちぎれて離れて行くプラズマを加速するエネルギーに使われているはずである。しかし、DEの時間変化やDE発生直後の彗星本体近傍でのプラズマの挙動の観測データの欠如などの理由で、DEによってどのようにちぎれたプラズマテイルが運動するかは明らかにされていない。短時間露出での時間変化を追った観測が望まれる。

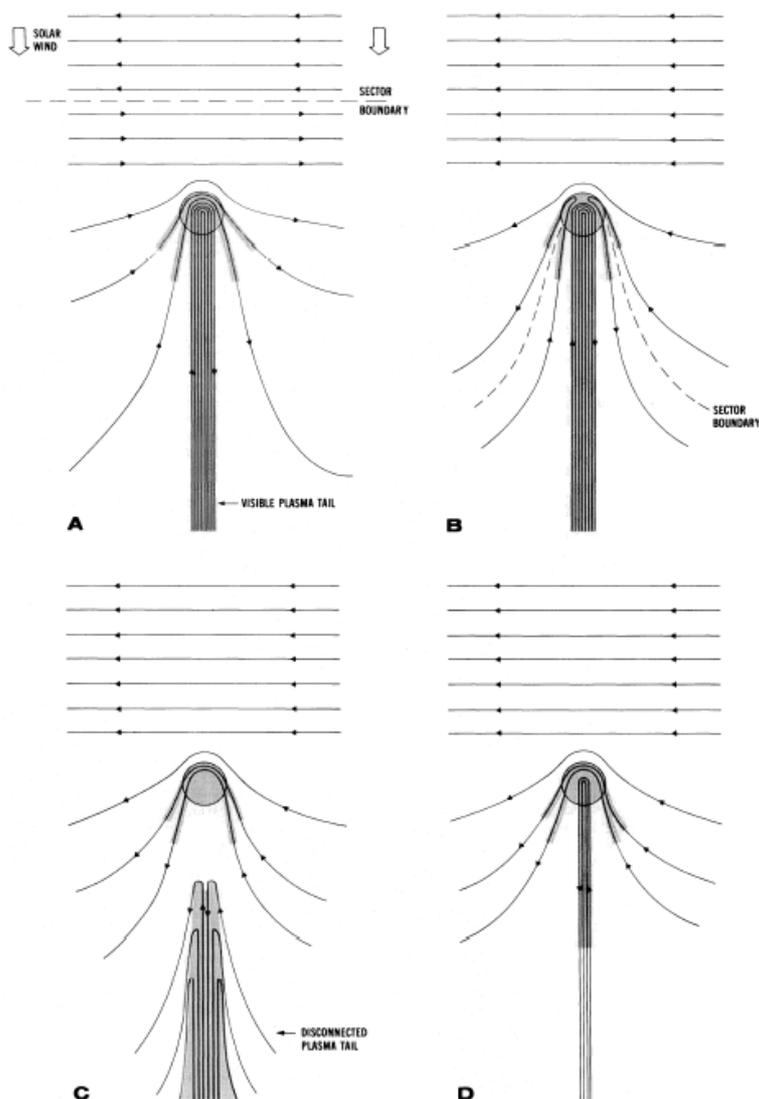


Fig 7. DE(Disconnection Event)。Niedner and Brandt model では、太陽風中に存在する磁気中性面を通過する時にDEが発生することが提唱された。一方、Saito et al.(1986)では、太陽風動圧の変化によってDEが発生することが提唱されているが決着は付いていない。

太陽風中にはセクターバウンダリーと呼ばれる磁気中性面が存在し、太陽の自転周期(27日)とともに惑星間空間を共回転している。太陽活動極大期と極小期では、太陽風速度分布も太陽風中の磁気中性面の分布も大きく異なる。大雑把に言うと、極大期では太陽のほぼ全面が低速太陽風領域となり、南北両極付近の限られた領域にも高速太陽風が存在し、磁気中性面は南北に立っている。一方極小期では、太陽赤道付近に低速太陽風と磁気中性面が存在する。2004年は太陽活動極小期にあたるため、NEAT(C/2001Q4)とLINEAR(C/2002T7)がともに太陽面緯度0度を通過する2004年4月中旬から5月中旬にかけて、DEが発生することが予想される(Fig. 3-3-9)。磁気中性面の更に詳しい情報は、直前にならないと分からないが、DE発生日をおおよそ予想できるだろう(Fig 8)。

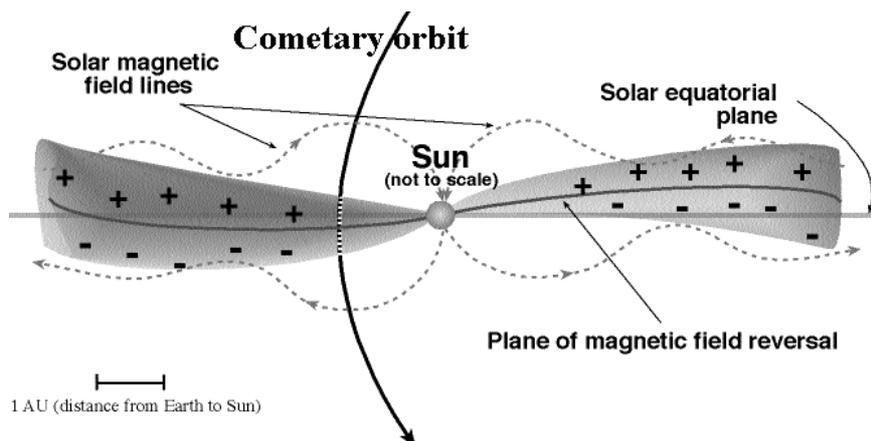


Fig 8. 磁気中性面通過に伴う DE の発生。

彗星プラズマテイルは、太陽風との相互作用により様々に形を変える。前述の DE 現象以外にも、コロナ質量放出(CME)と呼ばれる、太陽からのプラズマ放出&伝播現象がプラズマテイルを直撃した場合、テイルが大きく乱されることも考えられる。また、細かい髭のようなレイ構造や、キンク、ノット、ヘリカル、アーケードと呼ばれるプラズマ構造と太陽風との関連については明らかでない。千載一遇の2つの巨大彗星のプラズマテイルを、宇宙プラズマの天然の実験室として注目してみたら如何だろうか。

#### 【参考文献】

1. Abe, S., M. Kojima, M. Tokumaru, Y. Kozuka, K. Tarusawa, and T. Soyano, Radio and Optical Observations of Plasma Tail of Comet Hale-Bopp (1995O1), Proc. 30th ISAS Lunar Planet. Symp., 171-174, 1997.
2. Alfvén, H., On the theory of comet tails, *Tellus*, 9, 92-96, 1957.
3. Biermann, L., Kometenschweife und Solare Korpuskularstrahlung, *Z. Astrophys.*, 29, 279-286, 1951.
4. Brandt, J. C., and E. D. Rothe, The wind-sock theory of comet tails, in *The Study of Comets*,
5. Edited by B. Donn et al., NASA SP-393, 519-537, 1976.
6. Brandt, J. C., Observations and dynamics of plasma tails, in *Comets*, Edited by L. L. Wilkening, The University of Arizona Press, 519-537, 1982.
7. Jockers, K., Ion in the coma and in the tail of comets observations and theory, in *The Cometary Plasma Processes*, Edited by Alan D. Johnstone, Geophysical Monograph 61, 139-152, American Geophysical Union, 1991.
8. Kinoshita, D., Watanabe, J., Fukushima, H., Sekiguchi, T., Yamamoto, N., Abe, S., Wide Field Imaging of Ion Tail of Comet C/Hale-Bopp, *Earth, Moon, and Planets.*, 77, 3, 265-269 1997.
9. Kojima, M. M. Tokumaru, H. Watanabe, A. Yokobe, K. Asai, B. V. Jackson and P. L. Hick, Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations II -- Latitude

- and heliocentric distance dependence of solar wind structure at 0.1-1AU, *J. Geophys. Res.*, 103, 1981, 1998.
10. Kozuka, Y., T. Saito, I. Konno, and T. Oki, Disturbances of there cometary magnetospheres as explained by an MHD simulation, *Workshop on Observations of Recent Comets (1990)*, edited by W. F. Huebner, J. Rahe, P. A. Wehinger, and I. Konno, 137-141, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, 1990.
  11. Mendis, D. A., and W.-H. Ip, The ionospheres and plasma tails of comets, *Space Sci. Revs.*, 20, 145-190, 1977.
  12. Minami, S., P. J. Baum, G. Kamin, and R. S. White, Laboratory formation of a simulated comet, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 884-887, 1986.
  13. Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Ion dynamics and distribution around comet Halley: SUISEI observation, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 829-832, 1986.
  14. Niedner, Jr., M. B., and J. C. Brandt, Interplanetary gas. XXIII. Plasma tail disconnection events in comets: Evidence for magnetic field line reconnection at interplanetary sector boundaries?, *Astrophys. J.*, 223, 655-670, 1978.
  15. Neugebauer, M. and C. W. Snyder, Solar plasma experiment, *Science*, 138, 1095, 1962.
  16. Neugebauer, M., Spacecraft observations of the interaction of active comets with the solar wind, *Revs. Geophys.*, 28, 231-252, 1990.
  17. Ogino, T., R. J. Walker, and M. Ashour-Abdalla, An MHD simulation of the interaction of the solar wind with the outflowing plasma from a comet, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 929-932, 1986.
  18. Parker, E. N., Dynamic of the interplanetary gas and magnetic fields, *Astrophys. J.*, 128, 664, 1958.
  19. Readhead, A. C., Interplanetary scintillation of radio sources at meter wavelengths-II theory, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 155, 185, 1971.
  20. Saito, T., Y. Kozuka, K. Nishioka, I. Konno, M. Saito, M. Kojima, and T. Takahashi, Disturbance of cometary and Earth's magnetospheres by single solar flares ,*J. Geophys. Res.*, 100, 9549-9558, 1995.
  21. Slavin, J. A., E. J. Smith, B. T. Tsurutani, G. L. Siscoe, D. E. Jones, and D. A. Mendis, Giacobini-Zinner Magnetotail: ICE magnetic field observations, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 283-286, 1986.
  22. Zirker, J. B. (Ed.), *Coronal Holes and High Speed Solar Wind Streams*, Colorad Assoc. Univ. Press, Boulder, CO, 1977.