

HALLEY 彗星の ION TAIL の擾乱とさきがけで
観測された太陽風構造

(III) DE 状 KNOT と風の息 MODEL

斎藤 尚生*・斉藤 馨児**・萩野 竜樹***

青木 勉†・平尾 邦雄‡・湯元 清文*

(1987年3月3日受理)

Ion Tail Disturbances of Comet Halley and the Solar Wind
Structure as Observed by SAKIGAKE

(III) Dynamic Pressure Model and its Application to
the De-like Knot Event

By

Takao SAITO, Keiji SAITO, Tatsuki OGINO,
Tsutomu AOKI, Kunio HIRAO, and Kiyohumi YUMOTO

Abstract: A three-dimensional static model of cometary magnetosphere is proposed. As for dynamic models, the interpretations of plasmoids by Niedner and Brandt (N-B), and Hones (H) are reviewed. A comparison of the DE-like knot event (see Part II of the present paper) with the heliospheric condition (Part I) clarified a new interpretation other than neither the N-B nor H models. The event is concluded to be interpreted by the dynamic pressure model, according to which a DE-like plasmoid was caused by a sudden increase in the dynamic pressure of the

* 東北大学理学部

** 法政大学

***名古屋大学空電研究所

† 東京天文台木曾観測所

‡ 東海大学工学部

solar wind from a coronal hole of the sun. A computer simulation is found to support this interpretation.

1. 結 言

彗星の ION TAIL は、次の4点において重要な研究対象である。

- (1) 可視域で精査し得る唯一の天体磁気圏である。
- (2) 非帯磁天体磁気圏を代表し、しかも特異性も有する。
- (3) 擾乱現象は、地球の AURORA 嵐等の研究に多くの示唆を与える。
- (4) 高緯度の太陽風構造に、貴重な情報を提供する。

そこで第2節では、一般論としての三次元的彗星磁気圏の STATIC MODEL を PROPOSE する。第3節以下では擾乱を扱い、DISCONNECTION EVENT (DE) について従来主張されていた N-B (NIEDNER AND BRANDT, 1978) MODEL と H (HONES, 1979) MODEL のふたつを紹介する。第4節では特に1985年12月31日に現われた DE 状 KNOT EVENT を採り上げる。これは従来の N-D 又は H MODEL の何れでも説明できないので、新しく DYNAMIC PRESSURE MODEL (動圧変動または通称風の息 MODEL) を PROPOSE する。第5節では動圧変動 MODEL と従来の N-B/H MODEL との相違点、新しく見出された問題点について述べる。

2. 一般的な彗星磁気圏 MODEL

彗星核は汚れた氷状物質から成り、表面は蒸発し残ったコールタール状物質で覆われているとされている。HALLEY 彗星の場合、核は 8×11 KM の PEANUT 型であり、約13個の噴出口又は噴出溝が SEKANINA 等により推定されている。そこからの噴出物質は、噴出時に既に ION 化しているものもあるが、ほとんどは電気的に中性な水系統の粒子である。噴出速度はおおよそ数10~数100 m/s 程度であり、いくら速くても熱速度の2 KM/s を越えることがないとされている。噴出した中性粒子はすぐ噴水のように拡散してほぼ球殻状に核をとり囲み、COMA を形成する。今回帰帰中にも HALLEY 彗星の COMA 内には高密度の粒子が多重 SHELL として観測されている。

中性粒子は太陽紫外線を受けて ION 化され、COMA 内部にほぼ球殻状の電離層を形成する。核表面の噴出口又は噴出溝は必ずしも一様分布をしていない。核自体もいびつであり、噴出の時間変化も一様ではない。従って瞬間ごとに見れば、COMA もその内部構造も、非対象である場合の方が多い。

帯電するとその ION は太陽風磁場に PICK UP されて風下側に吹き流されるが、PICK UP までには時間がかかると考えられている。このような過程で PICK UP された ION は太陽風によって運ばれて ION TAIL が形成され、太陽風起源の磁気圏が形成される。OGINO et al. (1986) の SIMULATION の結果(第1図)でも、その形が地球磁気圏に大変似ていることがわかる。地球の場合と異なるのは、彗星には固有の磁場がないこと、噴出 GAS がある為に INNER SHOCK (IS) が形成されることなどである。核から噴出した ION の塊と、その表面を洗い流す太陽風との間には CONTACT SURFACE と呼ばれる境

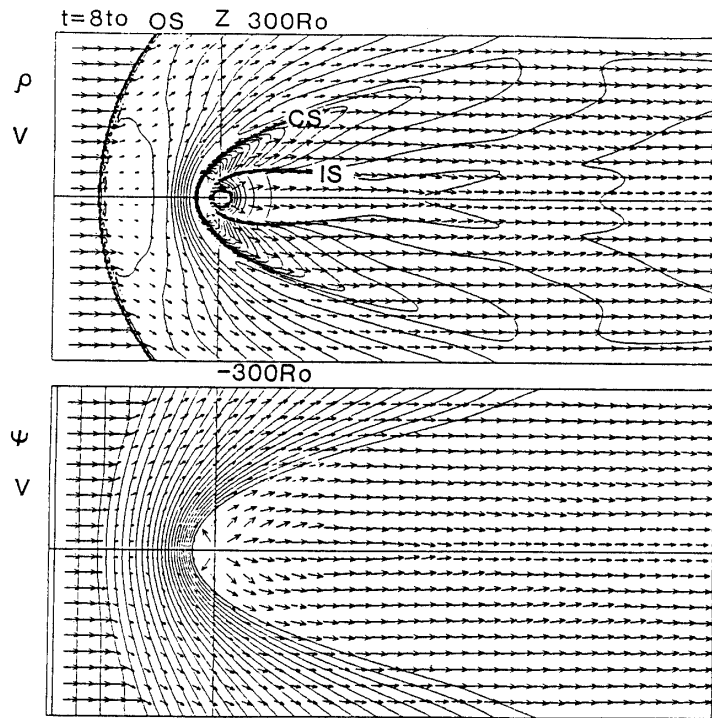


図1. 彗星磁気圏の computer simulation(荻野等による).

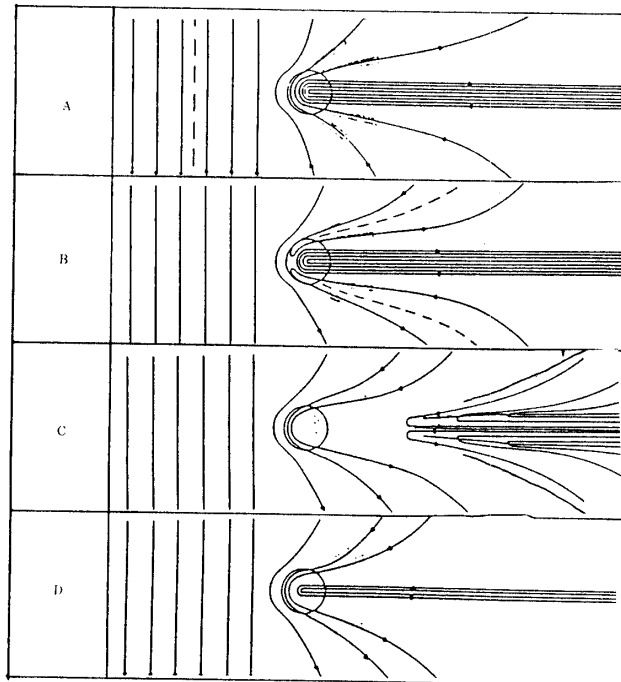


図2. Niedner & Brandt (1978)による DE の説明.

界曲面が存在する。

太陽風中は SUPERSONIC であるが、BOW SHOCK (BS) と CONTACT SURFACE (CS) の間は SUBSONIC となる。CS と IS の間も SUBSONIC であり、IS 内部は再び SUPERSONIC になる。更に TAIL の主軸を含む面内には、DRAPE された強磁場の LOBE にはさまれて、低温高密度弱磁場の CURRENT の流れる LAYER (PLASMA SHEET) が生ずる。

CS では太陽風は減速されているが、風下側に移るに従って太陽風磁場の滲みこみの為に彗星起源の PLASMA が加速されていく様子は第II-2図で見た通りである。即ち第II-3図の KNOT は、最初太陽側に ≤ 2 km/s の初速で噴出してから TAIL 側に吹き流され、TAIL 末端で終速(太陽風速)に達する(SISCOE et al., 1986 の第2図参照)までの長い道中のごく一部分を見ていることになる。その一部分での SPEED が 65 km/s として測定されたのである。

さてこの KNOT は、COMA から千切れて飛んでいくから DE のように見える。ではこれは NIEDNER や HONES の唱える、太陽磁気圏中性面通過に伴う DE 現象なのだろうか? 次節でこの問題を解いてみよう。

3. 尾のちぎれ (DE) に対する N-B および H MODELS

今回 HALLEY 彗星が出現するに際して、世界中の沢山の彗星研究者が注目して待ち構えていた現象がある。それは DISCONNECTION EVENT (略して DE) と呼ばれていて、NIEDNER AND BRANDT (1978) が称えた太陽風磁場と彗星 ION TAIL との相互作用現象である。彼等の説によれば、太陽磁気圏中性面はおよそ1週間ごとに彗星を通過し、そのたびに必ず古い ION TAIL が千切れ、新しい ION TAIL が生えてくるとされている。太陽風磁場と彗星磁気圏磁場が再結合する為だと考えられており、第2図に彼等の MODEL を引用しておく。彼等は、この MODEL の一例として、ION RICH の彗星とし

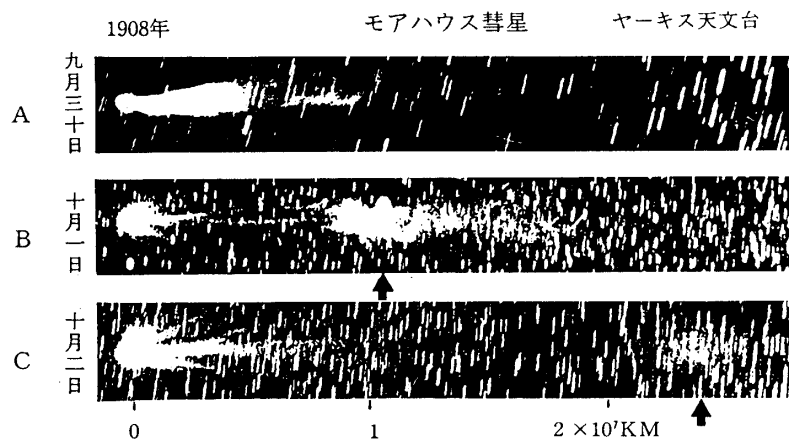


図3. Morehouse 彗星で観測された DE.

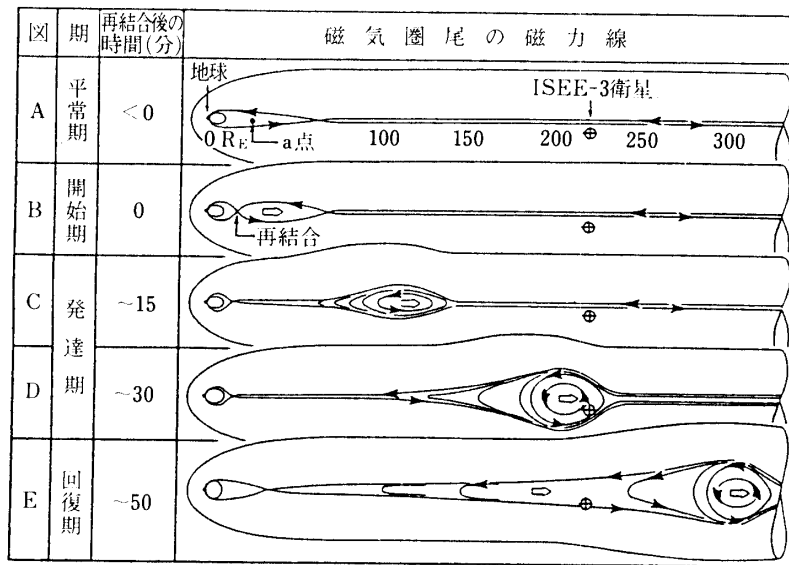


図4. Aurora 嵐の際地球磁気圏尾で発生する plasmoid に関する Honas(1979)の model.

て有名な MOREHOUSE 彗星が、1908年9-10月におこした DE 現象 (第3図) を掲げている。

ところが、全く同一のこの DE 現象を、HONES (1979) は別のモデルで解釈している。彼はもともと AURORA 嵐 (SUBSTORM) の機構を説明する為に地球の磁気圏尾におこる擾乱現象としてこの MODEL を提唱した。彼は自分の MODEL の傍証として、この MOREHOUSE 彗星でおこった DE が、AURORA 嵐と同じ機構によっておこったのだと考えている (第4図)。従って DE 現象についての解釈は、NIEDNER-BRANDT MODEL と HONES MODEL のふたつが提唱されていたと言ってよい。

HONES MODEL は、北を向いていた IMF が急に南向きになった場合を想定した MODEL なので、彗星磁気圏にあてはめるならば、太陽磁気圏中性面に彗星が衝突した CASE にあてはまる。つまり両 MODEL とも、ION TAIL 軸に「垂直に」磁気中性面が衝突した時に、ION TAIL が干切れ飛んでいくことを示唆している MODEL である。このことを念頭に入れて、今回回帰した HALLEY 彗星の ION TAIL を調べてみることにしよう。

尚、既に次の2点の指摘があったことをここで言及しておく。

(1) ION TAIL 軸に平行に近い角度で中性面が衝突した場合には、尾は千切れない。これはさきがけ最接近の CASE に該当し、その理由は、QUASI-PARALLEL MODEL として提唱された (SAITO, et al., 1986 b)。

(2) NIEDNER-BRANDT MODEL では5枚の電流面 (立体的には4個細長く繋がった電流渦) を考えなければいけないので、不自然である (Saito, et al., 1986 a)。

4. 12月31日のDE状現象に対する動圧変動MODEL

動圧MODELの検証に先立って、一般に彗星のION TAIL, 即ち彗星磁気圏の生成過程を変動考えてみよう。

ION TAILの形成機構については、ALFVEN(1957)が比較磁気圏学という新しい角度

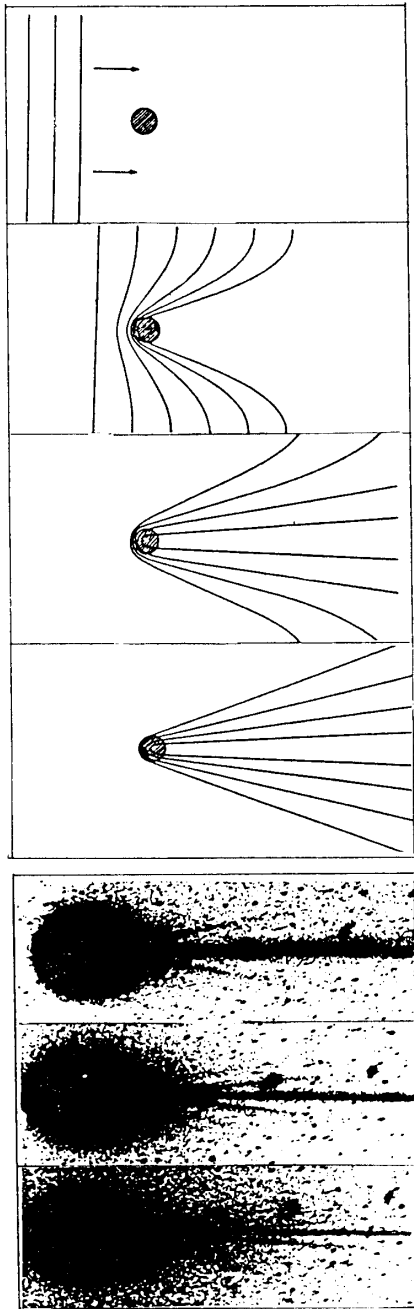


図5 A. 彗星磁気圏生成に関する Alfvén(1957)の model と、それを裏付ける Kobayashi-Berger-Millon 彗星の写真。

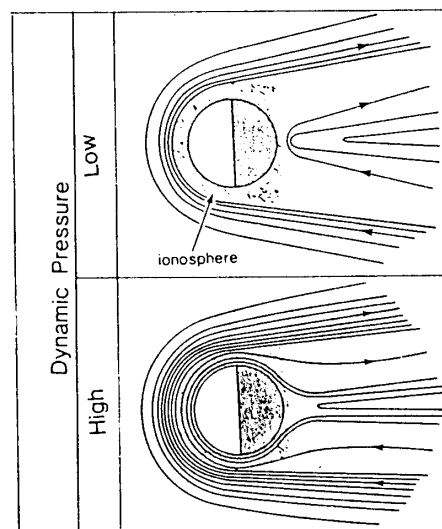


図5 B. 太陽風の動圧が低い場合(上)と高い場合(下)の金星磁気圏 model (Russell 等による)。

から第5 A 図のような MODEL を樹てたことはよく知られている。一方 RUSSELL 等 (1986) は、彗星と同じ非帯磁天体である金星の磁気圏と比較して、示唆に富む提言をしている。即ち彗星 ION TAIL と同じく金星磁気圏も、太陽風磁力線が DRAPE することによって形成されるが、太陽風動圧が大きくなると、第5 B 図のように磁力線は風下側にまわりこんで薄い SHEET を形成すると唱えた。丸橋(1986)は PIONEER-VENUS の DATA 解析をして RUSSELL 等のまわりこみ過程を確認し、かつ3次的に磁力線がすり抜けていく様子を明らかにした。

これ等の議論をふまえて SAITO, et al., (1986 c) は、第5 C 図のように三次元的な彗星磁気圏 MODEL を提唱した。この図では地球磁気圏にならって電流面を赤道面と定義し、EQUATORIAL VIEW と、それと直角方向の POLAR VIEW で表わしてある。彼等は次の3点を強調した。

(1) 従来の彗星 MODEL はほとんど全部 EQUATORIAL VIEW によるものだが、実際に地球から観測される彗星は、むしろ POLAR VIEW によるものの筈である。すなわち IMF の PARKER SPIRAL は、統計的に ECLIPTIC PLANE に平行だからである。事実 ICE による GIACOBINI-ZINNER 彗星の実測では、CURRENT SHEET 面がむしろ垂直に近かったことを示した (SLAVIN, et al., 1986) 。

(2) CURRENT SHEET の厚さは、COMA の直後 (MENDIS, et al., 1986) を除くと、金星 (丸橋, 1986) や地球でそうであるように、TAIL 主軸付近で最も薄い筈である。

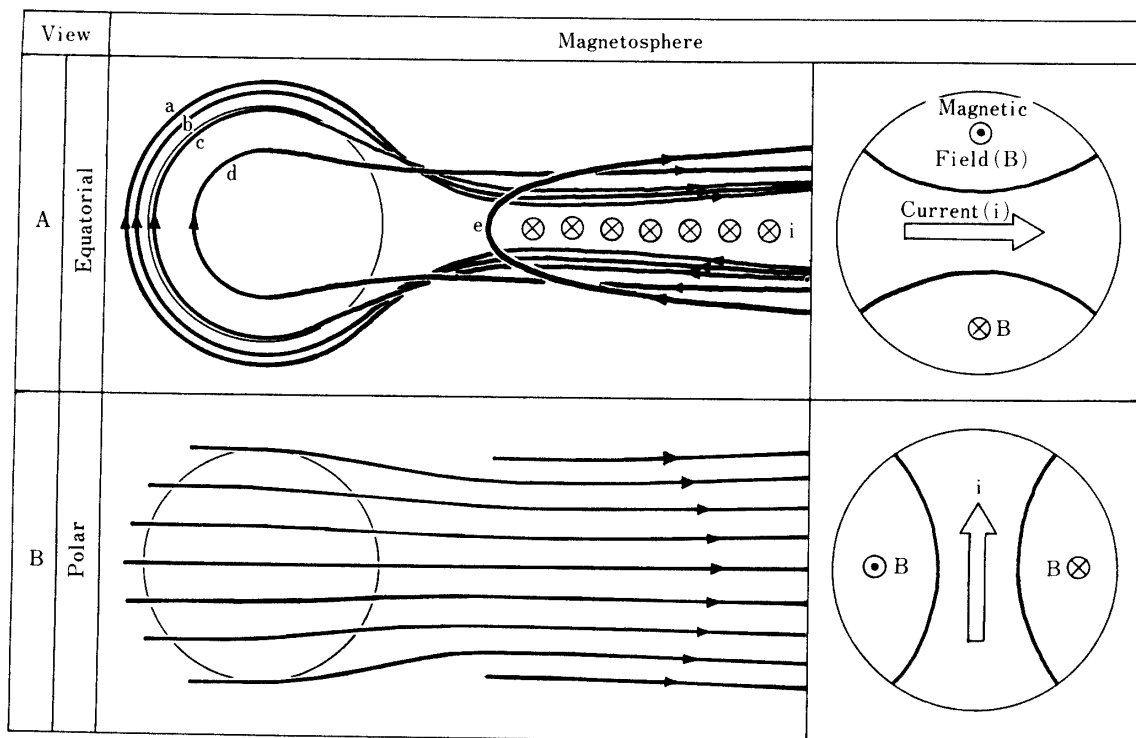


図5C. 一般的な彗星磁気圏の三次元 model (Saito, et al., 1986 c).

このことは、次の再結合機構に関連して重要である。

(3) 太陽風動圧が急に増えると、その電流面の一番薄い部分で磁力線が再結合して PLASMOID を形成し、TAIL 方向に飛んでいく。それが地球からは KNOT として観測されることが考えられる (第II部第2図)。

PLASMOID は HONES によって AURORAL SUBSTORM の発生機構との関連で論じられたが、HONES 型の PLASMOID が南向き IMF によって起こされる SUBSTORM に対応するのに対して、この動圧変動型 PLASMOID は SC-TRIGGERED SUBSTORM に対応していると言える。

HALLEY 彗星の 12 月 31 日 KNOT 現象に対するこの動圧変動 MODEL を、OGINO, et al., (1986) による彗星磁気圏 SIMULATION と比較すると、次のようにいくつかの点で我々の MODEL の正しいことがわかる。彼等の $t=8t_0$ における結果 (第1図) が従来の COMET MODEL を極めて正確に裏付けていることから、彼等の SIMULATION が正しいことがわかるが、計算を更に進めた $t=17t_0$ の結果と $t=19t_0$ の結果を、第6図に掲げておく。IMF 方向が一定に保たれているにも拘わらず、12 月 31 日現象に酷似した KNOT 状 PLASMOID で形成されて、TAIL 方向に飛んでいく様子が明瞭である。この PLASMOID は彼等の設定した初期条件によって発生していると解釈されている。即ち彗星 PLASMA

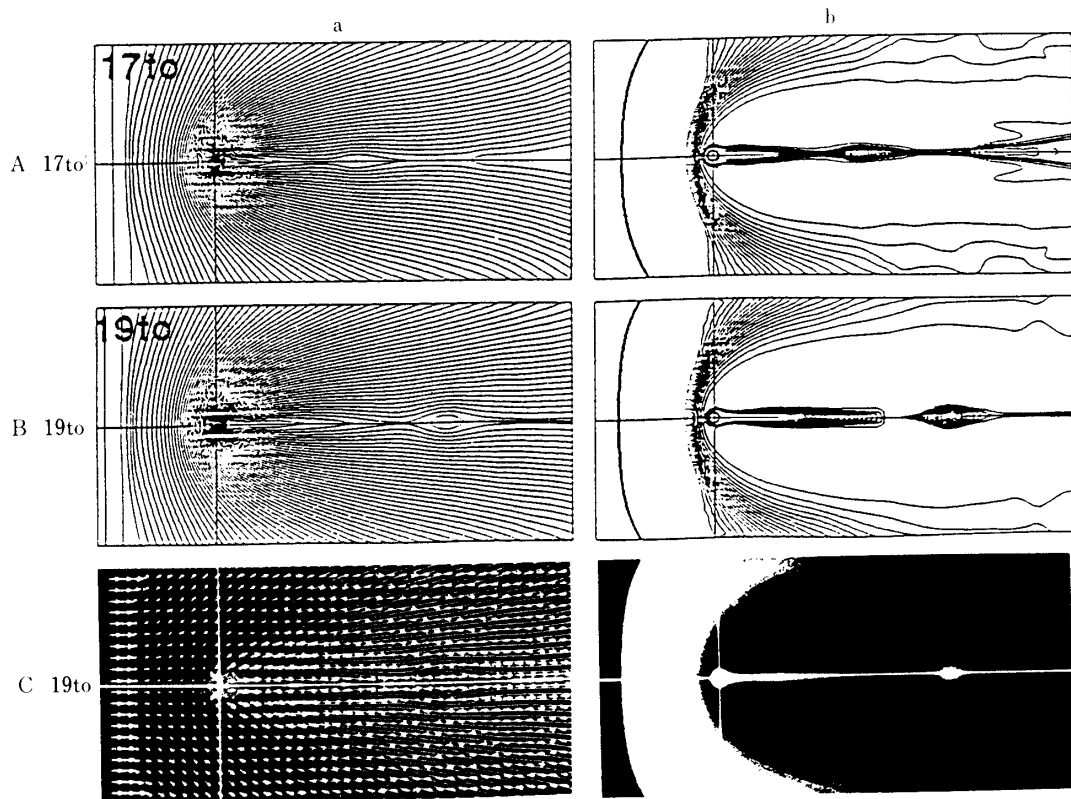


図6. 彗星磁気圏の computer simulation. IMF の極性が不変の場合. (Ogino, et al., 1986).

に向かって磁場方向一定の太陽風を $t=0$ から突然吹きつけるという MODEL なので、これは動圧の急増を伴う。我々の動圧変動 MODEL と一致するのである。第図回でも、(SAITO et al. (1986 a)の第6図で示したように)、COMET TAIL の中性面に向かって集れんするような流れが認められるが、それが更に進行すると、集れん点で再結合をおこして、PLASMOID が形成される。その様子が第6図で明瞭である。

彼等の SIMULATION は2次元 MODEL で、かつ EQUATORIAL VIEW で示されているが、物理的には当然 PLASMOID は3次元的なふくらみを持っている筈である。従ってもし12月31日現象の場合のように POLAR VIEW でこの PLASMOID を見ても、当然 KNOT 状の CONDENSATION として観測され得る筈である。濃度表示による SIMULATION 結果(第6Cb図)が、実測(第II-3図)と酷似している事実は、驚く他はない。

5. 動圧変動 MODEL と NIEDNER-BRANDT / HONES MODEL との差違

OGINO, et al. (1986)の SIMULATION 結果は、我々の動圧変動 MODEL と従来の MODEL との差違を更に明確に浮き彫りにしているので、本項で詳しく調べてみよう。

IMF 方向を変化させない(動圧変動型の)第1図や第6図と異なって、IMF 方向を急激

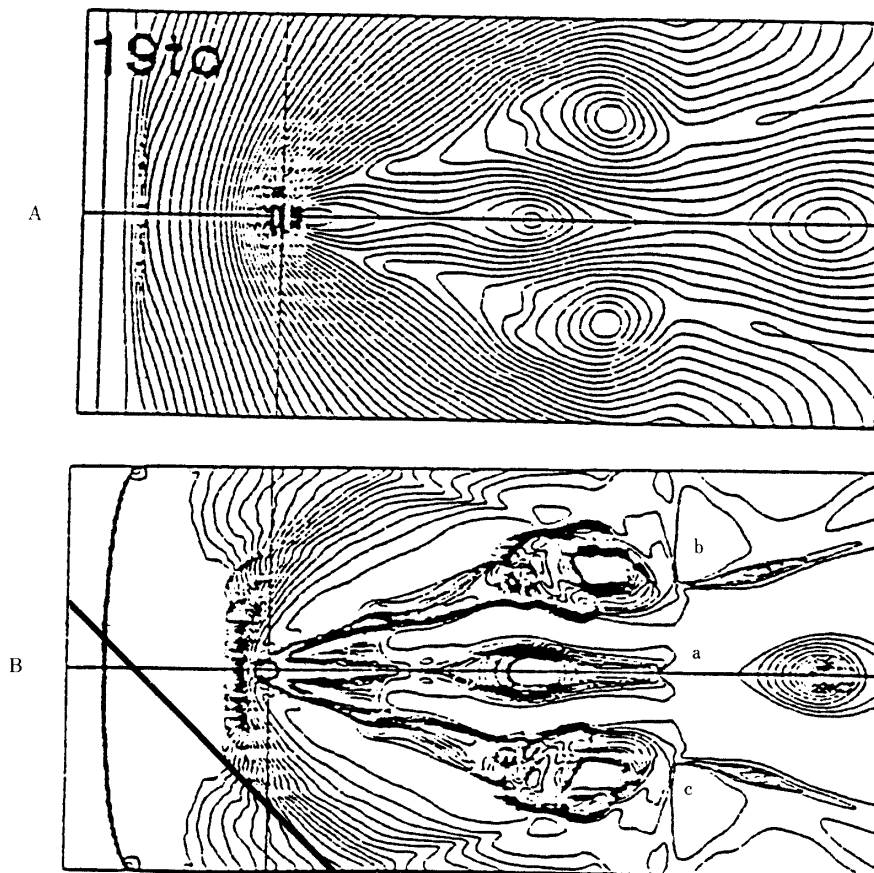


図7. 太陽圏中性面通過に伴う彗星磁気圏擾乱の computer simulation, (Ogino et al., 1986).

に 180° 変えた場合 (SECTOR 境界型) を第7図に示す. この図は次の諸点で極めて示唆に富んでいる.

(1) 動圧変化が PLASMA SHEET 内に限定した擾乱を起こす (第6図) のに対して, 中性面通過は, PLASMA SHEET 内 (第7B図 a) だけでなく, LOBE (同図 b, c) にも大きな擾乱を起こしている.

(2) 図 a の PLASMOID は HONES MODEL に対応し, b, c は NB MODEL に対応している. このことは, 彗星が SHARP な垂直 SECTOR 境界を通過すると, HONES 型と NB 型の両機構が同時におこっていることを示唆している.

(3) GEOTAIL 物理学からすると, b, c の PLASMOID は極めて重要である. なぜなら従来 IMF 南転に関連して, このような PLASMOID はほとんど全く議論も着目もされていなかったからである.

(4) ただし, これまで観測されてきた彗星のほう大な記録を SURVEY しても, 第7B図のように三本の尾を持った TAIL は皆無である. この原因は次の(5), (6)にあると思われる.

(5) さきにも主張したように, 我々は第7図のような EQUATORIAL VIEW として

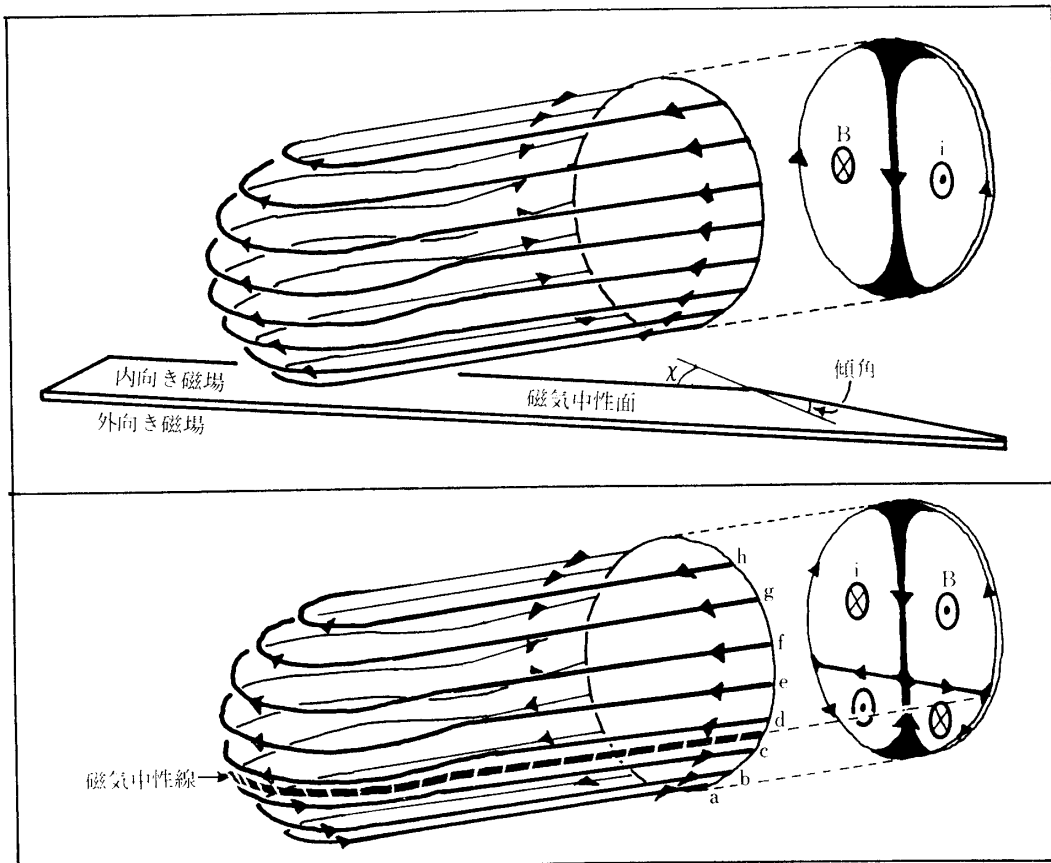


図8. Iontail 軸にほとんど平行な磁気中性面が彗星磁気圏を通過する場合の磁力線再結合の model. (Saito, et al., 1986 b).

でなく、POLAR VIEWとして地球から彗星を観測している筈である。この時は3個の PLASMOID (a, b, c) は重なって、1個の大きな CONDENSATION として観測される筈である。有名な1908年の MOREHOUSE 彗星でおこった DE (第3図参照) はこの CASE の可能性がある。地磁気擾乱の回帰性を利用 (Saito, et al., 1986 d) すると、この MOREHOUSE の大規模な DE は、SECTOR BOUNDARY の通過と、動圧急増の両効果が同時に起こったせいである可能性がある。

(6) 現実には SECTOR 境界面は彗星 TAIL 軸に対して、第7図に示すような垂直 (90°) ではなく、統計的には同図に太線で示したように、 ~ 1 AU で $\alpha \sim 45^\circ$ である。この場合、b, c の PLASMOID は均等には発生せず、c だけが a と共に発達すると考えられる。2本の PLASMOID 状 ION TAIL として有名な1903年7月24日の BORRELLY 彗星の DE 現象は、この状態であったと考えられる。今回回帰した HALLEY 彗星について言えば12月10日、3月21日等の DE 現象がこれに相当する可能性がある (第II-1図参照)。第8図に、ほとんど平行な中性面に彗星が衝突した場合の再結合の様子を示す。

参 考 文 献

- Alfven, H. (1957) ; *Tellus*, **9**, 92-96.
Hones, E. (1979) ; *Dynamics of the Magnetosphere*, D. Reidel, 545.
丸橋克英(1986) ; 第7回太陽系科学シンポジウム論文集, 35-36.
Mendis, D. A. et al (1986) ; *GRL*, **13**, 239-242.
Niedner, M. B. Jr. and J. C. Brandt (1978) ; *Ap. J.*, **223**, 655-670.
Ogino, T. et al (1986) ; *GRL*, **13**, 929-932.
Russell, C. T. et al. (1986) ; *JGR*, **91**, 1417-1423.
Saito, T. et al. (1986 a) ; *Proc. 7th Symp. Solar System Sci.*, 6-7.
Saito, T. et al. (1986 b) ; *Nature*, **321**, 6067, 303-307.
Saito, T. et al. (1986 c) ; *GRL*, **13**, 821-824.
Saito, T. et al. (1986 d) ; *Proc. 20th ESLAB Symp.*, ESA SP-250, **1**, 135-140.
Siscoe et al (1986) ; *GRL*, **13**, 287-290.
Slavin, J.A. et al. (1986) ; *GRL*, **13**, 283-286.