

磁気圏尾部に注入したプラズマのふるまいに ついてのシュミレーション実験*

南 繁行**・広瀬義晃† 竹屋芳夫**

Twined Plasma Produced by Powered Double Probe in the Tail Region
—Simulation Experiment of the Magnetosphere—

By

Sigeyuki MINAMI, Yoshiaki HIROSE and Yoshio TAKEYA

Abstract: Simulation experiments have been operated by some workers in order to make clear the behavior of plasma in the magnetosphere.

The large-scales surveys of the upper atmosphere with the use of satellite were not done in those days, so this simulated magnetospheric experiments in the laboratory was watched.

These early experiments were done in order to know the structure of the shock front and its time variation at the front of the earth which was generated by the interaction of the high speed plasma flow and magnetic dipole, and also to know the magnetic field distribution in the solar cusp near the shock front.

At this paper, the results obtained by optical method for the behavior and the structures in the region at tail of the magnetosphere are dealt. In order to know the tail region, active power source of named powered double probe is used.

概 説

磁気圏におけるプラズマの様子を解明するために、かつて幾人かの研究者によって地上でのシュミレーション実験がなされ[1][2][3][4]。当時、未だ人工衛星による大がかりな上層大気の探査が行なわれていなかったため、この実験室におけるモデル磁気圏は、多くの未知の部分を知る上で人々に注目された。初期の実験は主に高速プラズマ流と磁気ダイポールの相互作用で形成される、地球前面での衝撃波面の構造と、その時間的变化を知る

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪市大工学部

† 川崎重工K・K.

ためになされた [5]. また衝撃波面に伴う, ソーラーカusp及びその近傍の磁場分布について知るための実験も行なわれた.

その後, 夜間の磁気圏に相当する領域の磁場の分布, 及び昼側のカuspを通して太陽風プラズマが夜側に侵入することがモデル実験で知られた [6]. しかしその当時は, 夜間の磁気圏に相当する領域の構造については, このモデル実験からは殆んど得られなかった. その後衛星観測の進展に伴って, 磁気圏のイメージが次々と描かれるようになったため, シュミレーション実験はあまり進まなかった. しかし例えば, オーロラの発生機構を理解するためには, 太陽を含めた地球近傍の電磁力学的なあらゆる情報が必要とされ, 広い時間的空間的なスケールの議論には現在の人工衛星等による知識では不十分である.

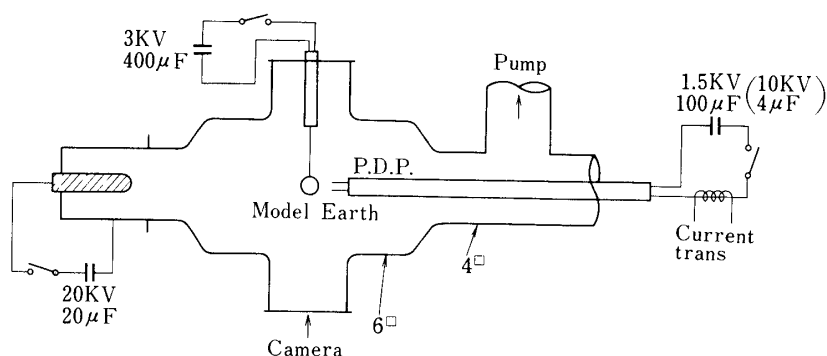
シュミレーション実験を利用する利点は, 実験室で磁気圏のグローバルな様子を直接目で観測し研究出来る上に, 実際の地球太陽系では知ることのできない「パラメータの操作」の可能なことである. 例えば, 地球の午前中の部分のみ太陽風から遮蔽する, 太陽風の強さに変調をかけるといった時間的空間的な操作の効果を調べることができる. さらに惑星間空間を探索する衛星の出現により, 近年注目を浴びている木星, 土星の磁気圏の様子について, その形状や惑星オーロラの存在の可能性等をさぐる知見を与えることが出来る. また実際の天体に存在する惑星を抽象化した比較惑星学といった新しい学問や, 例えば連星のように二つ以上のダイポール磁場が存在した時の磁気圏の様子など, 純粋学問的興味に対する情報を提供することができる.

上述のような観点に立ってモデル実験を行ない, 磁気圏尾部の磁力線の分布, 特に磁気中性線の分布, 特に磁気中性線の存否とその効果について調べた.

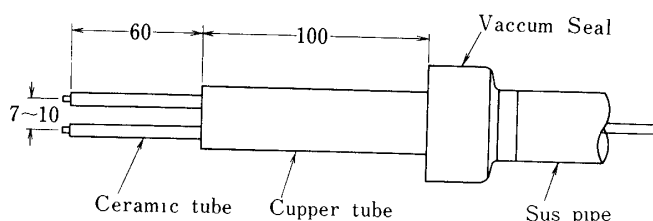
この実験が今迄のモデル実験と異なる点は, 磁気圏尾部にエネルギーを蓄積した Powered double probe (以下 P. D. P) と称する電極を設け, その放電による電気的特性及び発光の分布から, より能動的に磁気圏の様子を知ろうとした点にある. 特にこの P. D. P. による電場エネルギーの注入効果, 注入エネルギーの散逸過程を放電の位置に対応させて電気的, 光学的に測定した. この方法の目的は磁気中性線とオーロラ粒子の発生, 加速機構との関連について調べることにある. ここでは次章以下, 磁気圏尾部の磁力線分布と P. D. P. の放電によるプラズマ発光の様子について述べる.

2. 実験方法

実験に用いた装置はこの種のシュミレーション実験にはよく用いられるのもので, その構成を第1図に示す. モデル地球は約 10 K ガウスの赤道表面磁場を発生させる直径 25 mm の球体であり, 図の左側には同軸プラズマ銃がある. この電源のエネルギーは最大 4 [kJ] で 20 [kV], 20 [μ F] のコンデンサを用いている. 射出されるプラズマの密度は約 10^{14} [1/cc] プラズマの速度は約 5×10^6 [cm/s] である. 今回の実験に用いたプラズマは空気より生成した. 図中右側には磁気圏尾部に相当する位置に, 先に述べた可動のダブルプローブ (P. D. P.) を取り付けられているのが特徴である. なおこの P. D. P. の形状, 寸法を第2図に示す. この P. D. P. により生成されるプラズマのエネルギーは, 効率を 100% として, 約 10 [J] で, その電子温度は数 [eV] 程度である.



第1図 実験装置の概要



第2図 パワードダブルプローブ (P. D. P.) の概要 (単位 mm)

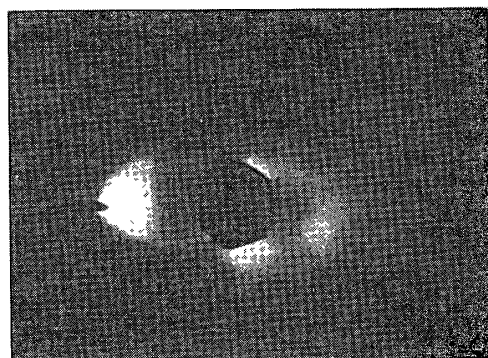
この実験にはいくつかの遅延回路が用いられている。今回の実験ではメインプラズマ銃の放電後の P. D. P. の放電の遅延はプラズマの intrusion による自己着火に任せた [6]。この点火時期については強制トリガによる方法も行なったが、この実験に関しては大きな差異は認められず、発光はほぼ準定常的であった。発光の様子は子午面上と赤道面上より光学的に調べた。

3. 実験結果

このモデル実験により得られた磁気圏の様子を Time exposure camera で光学的に撮影した結果を示す。第3図に P. D. P. の位置を変化させた時の典型的な発光の様子を示した。この発光は左側からやってくる高速プラズマ流とダイポール磁場により生じたショック面の明るさとの比較、及び発光の形状によりこの図に示した4つのタイプに分類できる。個々の性質については後でべるがこれらの写真から夜側磁気圏において P. D. P. により注入されたプラズマエネルギーが地球ダイポールの磁力線にまきつきながら地球に向かって降下していくことがわかる。第3図の発光の部分を P. D. P. の位置を含めて、第4図にイラスト的に示した。なお第4図に示したうち地球中心からの距離が 45 ~ 55mm の位置に P. D. P. がある時三ヶ月状の幅広い強い発光が見られた。なお第4図における発光の様子は、次の第1表に示すように4つに分類することができた。

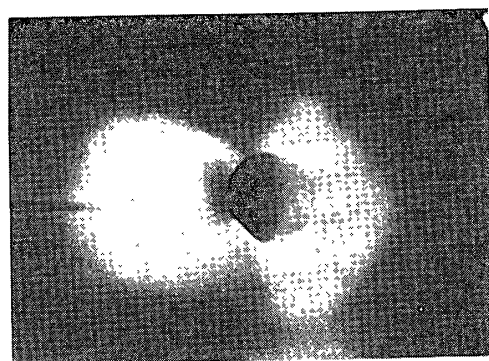
ここで Type A, B, C はモデル磁気圏の磁力線が閉じていることを示している。そして、Type D においては個々の磁力線に沿ったプラズマが観測されないで磁気圏の夜側の境界面が明瞭に写し出されている。Type B の領域は磁場の分布を含めて重要な部分であり後で論

→
P. D. P. Fire

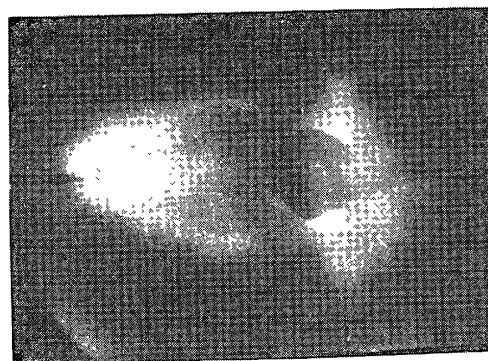


(A)

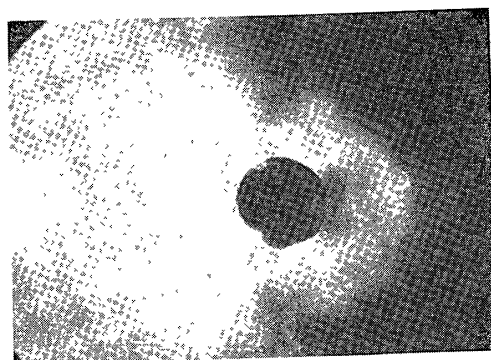
← Plasma stream



(B)

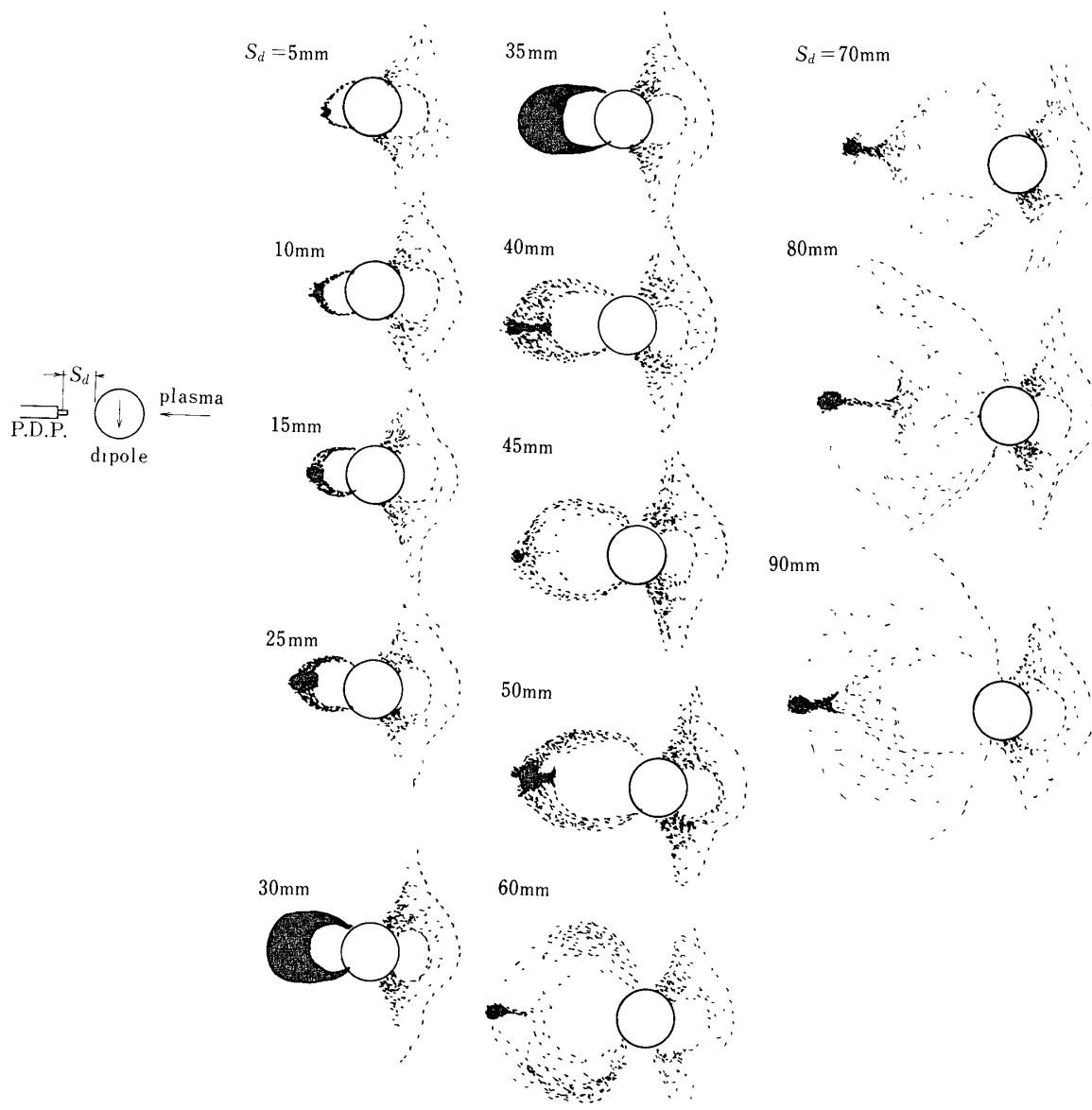


(C)



(D)

第3図 P. D. Pによる放電と磁気圏の形状の例



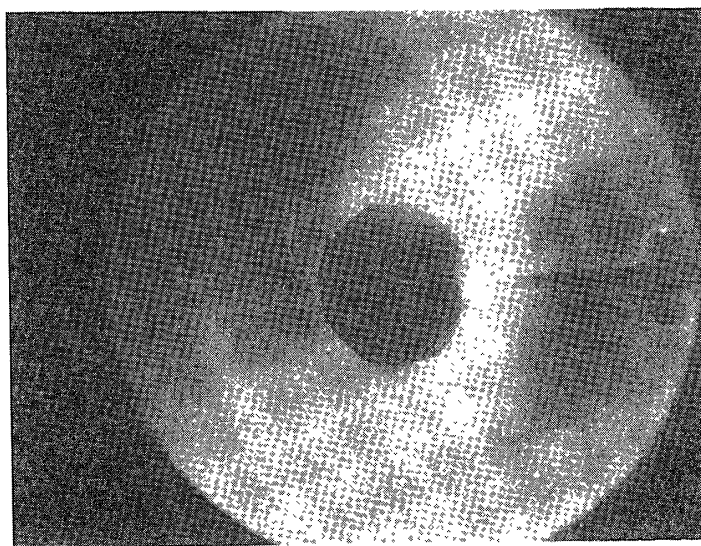
第4図 P.D.P.の位置による尾部の発光の変化

第1表 放電発光の子午面から見た分類

Type	Magnetic field	Thickness of illumination	Intensity	P. D. P. position [mm]
A	closed	filamented	+	20 ~ 40
B	closed	wide with sharp boundary	++	45 ~ 55
C	closed	filamented	+	60 ~ 70
D	conjectured open field	sharp boundary		80 ~ 110

じることとする。

なお第3図の子午面から見た夜側のプラズマの降下は赤道面上北極から眺めると第5図のように非対称になっていることがわかる。この実験に用いた P. D. P の電極の間隔が夜側磁気圏の大きさ (プラズマシートの幅) に比べ小さかったため粒子がすべての極に根をもつ磁力線に均等に降下していない。従って地球に向う磁力線全体への降下を示してはいない。これはあとで同じく検討する。



第5図 赤道面からみたプラズマ発光の様子

検 討

この実験で得られた P. D. P による発光の軌跡は、地球の磁力線の形状に対応している。すなわち P. D. P により生じたプラズマの電子温度は約 5 eV であり、磁力線を横切ることが出来る幅は制限されているためである。この電子温度の値は P. D. P の電極間電圧 (1.5 kV ~ 6 kV) にもほとんど依存しない。まずここでは P. D. P により注入されたプラズマ粒子のエネルギー Q_p と磁気圏の磁場エネルギー Q_M の関係を検討する。いま P. D. P によるプラズマの電子温度を 1 eV, 密度 10^{12} [1/cc] とし, P. D. P の放電位置付近の磁場の値を 100 [ガウス] として考えると,

$$Q_p/Q_M = 2NkT/(B^2/8\pi) = 1$$

となる。従って P. D. P によるプラズマはほとんどもとの磁力線にまきついて運動し、地球に降下すると考えられる。

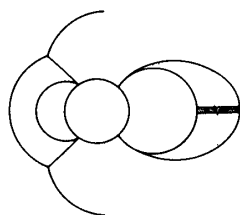
ここで実験に用いた系のシュミレーション則とパラメータを第2表に示す。

次に夜側に設けた P. D. R. による各タイプの発光について第4図と対応させて検討する。Type A は強力な地球磁気ダイポールによって補そくされた電子の発光と考えられ磁力線は1本の弧状に閉じているのがわかる。Type B に P. D. P. が位置する時は特徴ある三ヶ月

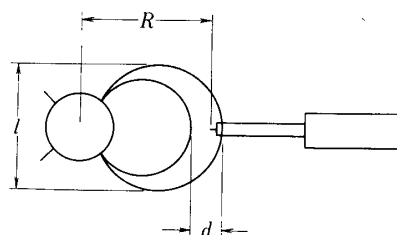
第2表

項目	単位	相似値	自然	相似則	本実験	
速度	V	cm/s	1	3×10^7	3×10^7	5×10^6
磁気空洞半径	R_M	cm	kl	6×10^9	5	5
磁場	r	kl^{-1}	10	10	1.2×10^5 ガウス	10^4
プラズマ密度	N	$1/cm^3$	kl^{-2}	10	1.4×10^{19}	10^{14}
電子温度	T_e	eV	1	7-10	7-10	5
イオンジャイロ半径	Ω_i	cm	kl	3×10^7	2.5×10^{-2}	0.8
比	Ω_i/R_M		1	5×10^{-3}	5×10^{-3}	0.16
イオンジャイロ周波数	f_{Hi}	s^{-1}	kl^{-1}	1.0	1.2×10^9	1.02×10^6
P. D. P. の電子密度	N_P	$1/cm^3$	kl^{-2}			$< 10^{12}$
温度	T_{eP}	eV	1			< 5
イオンへの自由行程	λ_i	cm	kl	2×10^{14}	1.5×10^5	5×10^{-1}

状の幅をもった発光が見られ、その境界ははっきりとしている。この特徴的な形状の発光がなぜ生じるかについてさらに詳しく検討する。一つの解釈は図中の Point 1, 2, 3 では電子のエネルギーが極めて高くなったために磁力線を横切ったことが考えられる。さらに鋭い発光の境界を考えると、この際に作られた粒子のエネルギーが単色に近くなければならぬ。この強力な電子エネルギーの増加は他のタイプと較べて著しい発光強度の大きさをも説明することができる。この機構としてこの Point 1, 2, 3 の領域が磁気中性線の存在する所に一致したためにプラズマの放電により効果的に大きな異常抵抗が生じたことが考えられる。もしそうであれば、生成される電子エネルギーは当然高くなるし、発光は幅をもつものになると考えられる。それはオーロラ粒子の加速機構のシュミレーションとして魅力のある解説であるが、実際に中性線が生じているかどうかの確認と、その存在機構が明らかにならねばならない。もう一つの考え方は、ダイポール磁界の勾配がこの領域で平坦であった場合で、この場合は粒子のエネルギーが特に大きくならなくても幅をもった発光の広がりも説明がつく。しかし発光強度の異常な強さの説明がつかないし、この領域のみ磁場が平坦だということも理解しにくいであろう。この点は今後マグネチックプローブの利用により解明せねばならない。なお第4図(b)をより詳しく見ると、第6図の斜線部のようなより強い発光の部分が



第6図 タイプCの放電の詳細図



第7図 発光の形状図

見られ、これは電子エネルギーの増加によりプラズマが磁場を横切って広がってくることを示していると思われる。

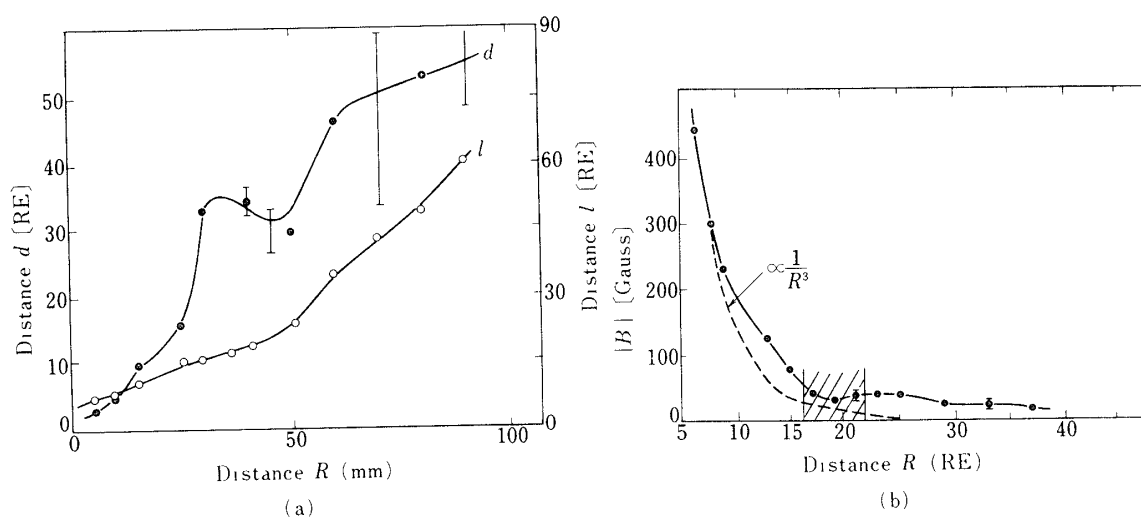
次に Type C は、発光は Type B 程ではないがある程度の幅をもった閉じた磁力線の存在を示している。Type D は P. D. P. が十分地球から離れた時に対応し、P. D. P. による電子は一部円弧状に地球に降下すると共に一様な拡散を起こし磁気圏尾部の境界に沿った発光領域を形づくっている。この形状を観察すると地球の夜側に開いた磁力線があることを示唆していることがわかる。

ところで第4図を更に詳しく見ると Type C においても発光は薄いながらも Type B に似た幅の領域が存在しているのである。この発光のサイズを第7図のようになる時、発光の子午面での幅 d [mm] から逆に P. D. P. により放電を行なった点の磁場の強さを概算することができる。発光部分ではプラズマは準定常的に存在してその温度は一定と考えられるからである。今、その電子温度を放電位置によらずに 5 [eV] とした時、放電点の磁場の強さ B [ガウス] はこの発光の幅 d をラーモア半径の2倍とすることにより、次式で与えられる。

$$B = 2mv_e / ed = 620/d \text{ [ガウス]}$$

ここで m 及び v_e は電子の質量及び熱速度である。

得られた尾部真夜中子午面上の磁場の分布を第8図に示した。ここで斜線で囲んだ所が発光の著しく強かった所である。また同図(b)の点線は計算によるダイポール磁場の形を表わしている。但しこのモデル地球は大きさが実際の地球の5倍に当る半径をもつため絶対値でのダイポール磁場を表わしてはいない。



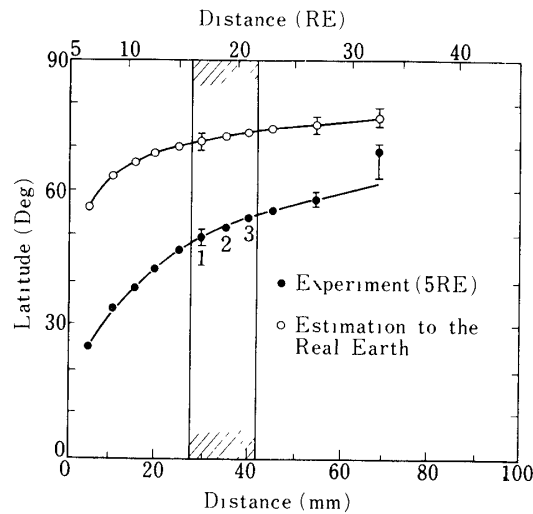
第8図 (a) ミラー磁場のスケール

(b) 夜側の磁力線分布の計算結果

同図(a)は第7図の l に対応する長さを同じく P. D. P. の位置に対してとったものである。この図(a)(b)からわかることは斜線の分布が殆んど平坦になり始める位置に対応す

ることであり、Type Bの形成は先に述べた両者がからんで元の磁力線を変形したと解釈できる。

次に、P. D. P.による放電とその粒子の地球への降下緯度の関係を調べた。第9図は横軸にモデル地球からの距離をとった。図中の○印はモデル地球(直径 25 [mm])への降下緯度で、これを実際の地球(10 [mm] 直径に相当)の大きさに外挿した時の降下緯度を○印で示した。図中の横軸は地球半径 R_e で目盛られている。この値はモデル地球の中心から磁気空



第9図 降下するプラズマの緯度とP. D. P.の放電位置の関係

洞端までの距離を測って実際の地球とのスケージングにより求めたものである。また図中の数字1, 2, 3は第4図(b)の三点に対応している。この三点にP. D. P.がある時、粒子は緯度約70°に降下し、実際のオーロラ粒子の降下緯度と良い対応がある。この時のP. D. P.の位置は17~22 R_e に相当する。この報告に掲載した写真は全て開放露光にて撮ったものであり、どの様にプラズマが時間的な変動がしているかについては知ることができない。したがって発光の形状が準定常時に立ち上がって形成されたものなのか、あるいはフィラメント状の発光が重なってあのように幅をもって写ったものかわからないために、これ以上の議論は時間分解の手法を用いなければならない。この実験ではP. D. P.の放電を太陽風プラズマの尾部へのintrusionによりトリガしていたが任意の時刻で行なうことをもう一度考慮する必要がある。もともと太陽風プラズマが来る前はダイポール磁場は変形されずに存在している。これが太陽風プラズマが到達した後、圧縮される訳であるからその前後とP. D. P.の放電との時刻の問題は、この実験の意味を決定的に変えてしまう。この緩和時間は約3 μ s程度と云われている[5]。

なおP. D. P.によるエネルギー注入効率については、P. D. P.のV-I特性を得ることによりその有効電力を求める手法を行えばよいと考えている。P. D. P.によるプラズマの基礎量の測定も必要な要素である。

時間分解した写真としては Time Resolved Camera による方法がある他, ある一点の光の時間的变化を調べる Position Resolved Camera による方法が有効と考えられる.

またプラズマ銃による太陽風プラズマの生成については, 特にその duration をもう少し長くするために (現在約 $50 \mu\text{S}$) P. F. N. を組んで矩形波に近いプラズマの流れを作ることが, よりこの実験をわかり易くさせると考えている.

その他 P. D. P. としては電極間隔が約数 mm の極小さいものを用いたため, その方向による発光の依存性がなかった. 逆にこの間隔を尾部磁気圏の幅に近い 50 mm 程度のものにすることにより地球表面磁場がより広い範囲で結ばれる磁気圏の磁力線に対し, 電場及び粒子を注入することができると考えている. また電極を赤道面に対し角度をもたせることにより磁力線の形状を知る一つの手段とすることが出来る.

結 論

磁気ダイポールと高速プラズマ流の相互作用により作られるモデル磁気圏において, 夜間尾部子午面上にエネルギーを蓄積した Powered Loubé Probe と称する電極を設けた際に現われる諸現象について提出し, 検討を加えた. この P. D. P. によるプラズマは磁力線にまきついて発光し, モデル磁気圏尾部の磁場構造を知り手がかりを与えたほか, 特定の位置に P. D. P. がある時, 特に強い発光帯が生じ, この現象がオーロラ粒子の加速発光機構の説明に利用できる可能性のあることを見出した.

この研究は東大宇宙研の共同利用研究としてなされた. 同所の河島助教授並びに御助言御協力頂いた東北大理学部桜井亭氏に謝意を表します. 1977年8月20日

参 考 文 献

- [1] N. Kawashima; Interaction of a plasma stream with a three dimensional magnetic dipole J. phys. Soc. Japan 18 (1963) 736.
- [2] W.H. Bosticketal; Plasma flow around a three-dimensional dipole J. Geophys. Res. 68 (1963) 5315.
- [3] J.B. Cladis, J.D. Miller and J.R. Baskett; Interaction of a supersonic plasma stream with a dipole magnetic field J. Geophys. Res. 69 (1964) 2257.
- [4] F.J.F. Osborne, M.P. Bachynski and J.V. Gore; Laboratory studies of the variation of the magnetosphere with solar wind properties J. Geophys. Res. 69 (1964) 4441.
- [5] N. Fukushima and N. Kawashima; Model experiment and natural phenomenon of interaction of solar plasma stream with geomagnetic field. Rept. of Ionos. Space Res. in Japan 18. No. 4 (1964).
- [6] N. Kawashima and S. Mori, Laboratory experiments on the intrusion of plasma in a simulated magnetic cavity (II)-Path of intruding plasma JAERI-memo No. 2513 Dec. 1966.