

定常プラズマ流と双極子磁場との相互作用

河野 汀*・岡村 良・久保治也・河島信樹

Interaction of a Stationary Plasma Flow with a Dipole Magnetic Field

By

Migiwa KONO, Ryo OKAMURA, Haruya KUBO and Nobuki KAWASHIMA

Abstract: Interaction of a stationary plasma flow with a dipole magnetic field is investigated for studying the details of the geophysical phenomena in the upper atmosphere, such as the formation of magnetosphere, collision free shock wave and plasmaphase, the excitation of aurora and so on. As the result of the experiment, formation of a spherical shell of plasma is observed around the magnetic dipole in the presence of a radial electric field.

1. はじめに

地球上層大気中で、荷電粒子と地球の双極子磁場とが相互作用する結果、磁気圏の形成、無衝突衝撃波の発生、プラズマポーズの形成、あるいはオーロラの発光など、種々の物理的に興味ある現象が起ることが知られている。これらの諸現象については、近年数多くの衛星観測などによりその詳細が定量的にも明らかにされつつあり、また一方、実験室規模でのシミュレーションに関しても、過渡的な高密度プラズマによる実験(プラズマガンなどを使用)が行なわれ、磁気圏の形成に対応する現象などが時間分解写真で観測されている。[1]~[7]ここに報告する実験は、定常的なプラズマ流の中で、上に述べたような地球物理的諸現象をシミュレートすることをこころみたものである。実験の結果、磁気双極子のまわりに一様な弱い磁界があり、また双極子の磁軸に関して対称な電場が存在するとき、興味ある現象が観測された。

2. 実験装置

装置全体の概要は第1図に示してある。定常プラズマ発生源としては TP-D を用いた。[8] 第1図の左方がそれで、直流アーク放電によって生じたプラズマが、陽極中心の小孔(7mm ϕ)より右方の実験領域に導入される。プラズマを効率よくみちびくため、管軸方向に一様な磁界(1~3 kG)がかけてある。放電用のガスは放電領域より注入し(図の左端)実験領域で排気する。このように、一種の differential pumping を行なうことにより、放電領域と実験領域との圧力比は約 10^2 に保たれる。この TP-D 型プラズマ源の特徴は、実験

* 相模工業大学

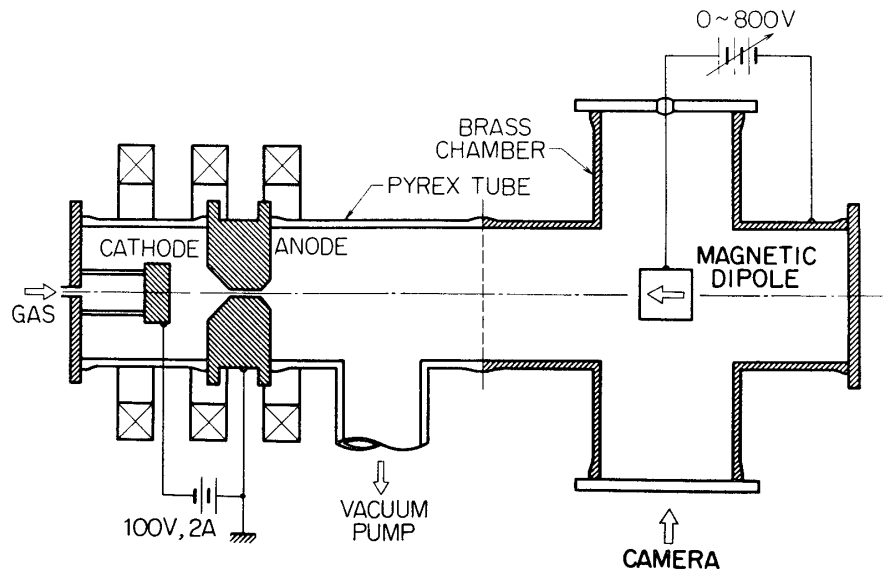


図 1 実験装置の概要

領域のプラズマには実質電流が存在せず、静かで安定なプラズマが得られること、実験領域と放電領域とが、陽極部分で分離されて互いにほぼ独立しているため、実験領域での条件の変化(気圧の変化、不純物の混入など)がプラズマ源そのものにじょう乱を与えないことなどである。磁気双極子としては、直径 13mm ϕ 、長さ 13mm の円筒形永久磁石で、磁界の強さが磁極の表面で約 800 ガウスのものを、第 1 図の右方にハッチで示した金属の十字形管(内径 10cm ϕ 、長さ 35cm)の中心に、磁軸の向きが一樣磁界の方向に対して反平行になるように設置した。陽極出口から磁気双極子までの距離は約 100cm である。この実験の目的からして、双極子のまわりでのプラズマ流は、一樣な拡がりをもっていることがのぞましいので、前述の、プラズマをみちびくための一樣磁界をつくるコイルは、陽極付近だけに設置し、右方では磁力線が拡がってゆくようにしてある。このため双極子付近での一樣磁界の強さは約 10%に減少し、金属管内をほぼ一樣に満たすプラズマ流が得られる。

放電に用いたガスはヘリウムで、この場合の標準的な実験条件は第 1 表の通りであった。

表 1 実験条件

	一樣磁界の強さ (G)	気圧 (Torr)	プラズマ密度 (cm^{-3})	電子温度 (eV)
放電領域	1K	~ 0.1	放電電流 2A	—
実験領域 (金属管内)	100	$8\sim 9 \times 10^{-4}$	$\sim 10^{10}$ *	15

* プラズマ密度は、ほぼ放電電流 I_d に比例して変化する。

磁気双極子のまわりに電場を生ぜしめるため、金属管と磁気双極子との間に、 $0\sim \pm 800$ V の電圧を印加できるようになっている。

十字形金属管の下方は透明なフランジでシールし、観測はここから写真撮影によって行なった。

3. 実験結果

パラメータとして、プラズマ源の放電電流 I_d (ほぼプラズマ密度に対応する)、一様磁界の強さ B 、および磁気双極子と金属管壁との間に印加する電圧 E を選んだ。なお実験においては、磁気双極子の方向は水平であるが、一般に磁石としての地球を図示する場合、 NS 極が上下になるように書くのが慣例であるので、以下に示す実験結果の写真はそれにならって双極子の向きが上下方向となるように示してある。

(1) 放電電流、および一様磁界の強さをそれぞれ、 $I_d=2.0\text{ A}$ 、 $B=100\text{ G}$ に固定し、双極子と金属壁間の電圧 E を変化させた場合に磁気双極子の周囲に見られる現象の変化を第 2 図に模式的に示した。同図(a)は、一様磁界と双極子の磁界との合成を磁力線で示したもので、両磁界のつり合う点は球面上に分布し、双極子の磁軸上に二つの磁気中性点ができる。外部より電場を与えない場合、すなわち金属管と双極子とを同電位においたときは、図の(b)に示すように、プラズマは(a)の磁力線に沿った流れを形成し、双極子の近傍にプラズマの入ってこない禁止領域が見られる。

次に、双極子の電位を金属壁に対して上げていった場合、まず禁止領域内部の両極近傍に、輝きの強い部分が表われ、電圧の上昇とともに両極から中心部に向かって成長してゆき、

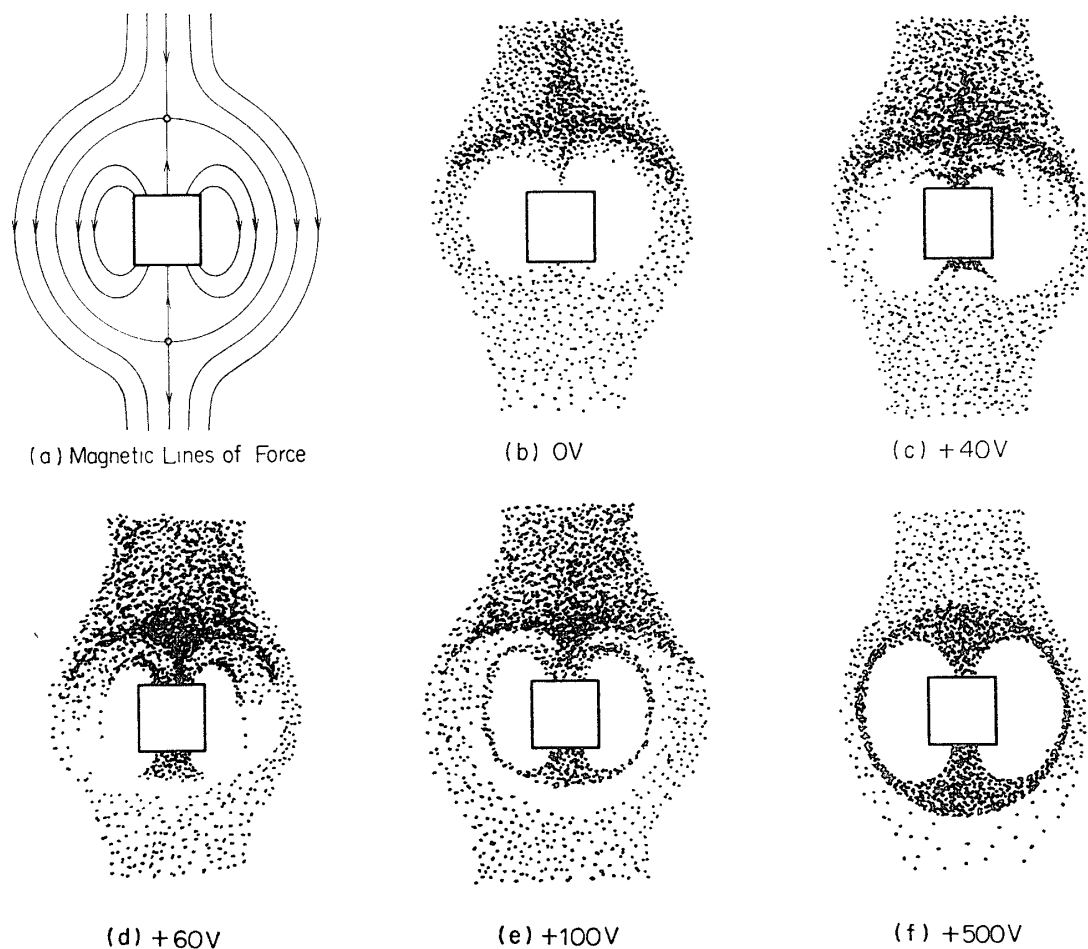
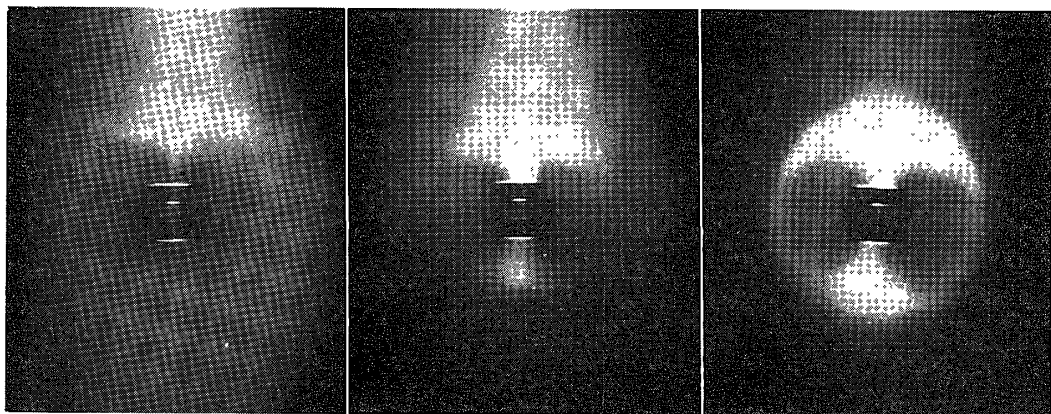


図 2 磁気双極子の電圧(正)の変化に対する球状プラズマの成長過程

$E=100\text{ V}$ ではほぼ球殻状を呈する。これは完全な球ではなく、磁軸方向に圧縮された楕円体をなしている。電圧をさらに上げてゆくと、この球状プラズマは大きくなってゆくが、拡大は主として磁軸方向で起り、 $E=+500\text{ V}$ のときほぼ完全な球状となる。また境界もこのとき最も鮮明となる。以上の変化が第2図の(c)~(f)に示してある。電圧を $+500\text{ V}$ を越えてさらに上昇させると、球は磁軸方向に伸びた楕円体状になってゆき、同時に境界は鮮明さを失なって、球殻の厚さが増してゆくのがみとめられる。実際の写真観測の結果を図3に示す。

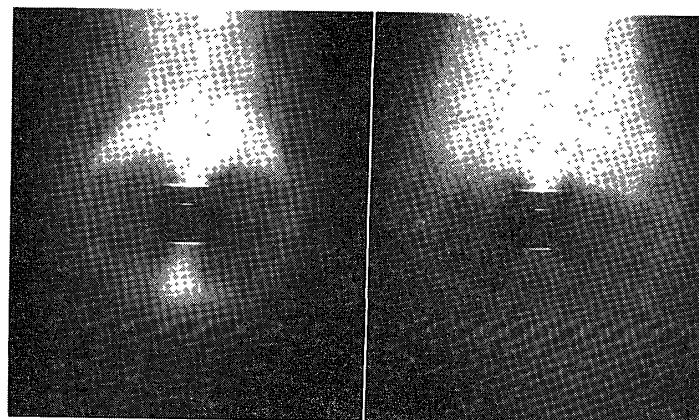
(ii) 一様磁界の強さ、および電圧をそれぞれ、 $B=100\text{ G}$ 、 $E=+500\text{ V}$ に固定し、放電電流 I_a を変化させた場合、図4に示すように I_a の増加(プラズマ密度の増加)とともに、上述の球状プラズマは双極子の磁軸方向に圧縮された形となってゆく。

(iii) 放電電流、双極子の電圧をそれぞれ、 $I_a=2.0\text{ A}$ 、 $E=+500\text{ V}$ に固定し、一様磁界の強さ B を変化させた場合は、図5に示すように球状プラズマは一様に圧縮されて小さくなるのがみとめられる。



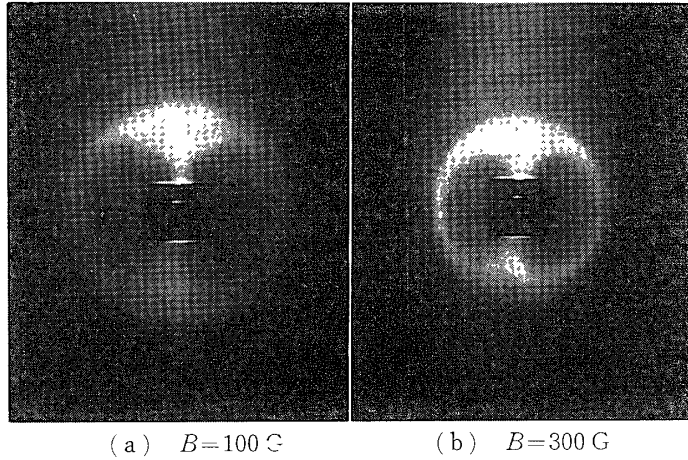
(a) $E=0\text{ V}$ (b) $E=+200\text{ V}$ (c) $E=+500\text{ V}$

図3 磁気双極子の電圧(正)の増加に対する球状プラズマの形の変化
 $I_a=2.0\text{ A}$, $B=100\text{ G}$



(a) $I_a=2.0\text{ A}$ (b) $I_a=5.0\text{ A}$

図4 プラズマ密度の増加に対する
球状プラズマの形の変化 $B=100\text{ G}$, $E=+500\text{ V}$



(a) $B=100\text{ G}$ (b) $B=300\text{ G}$
 図 5 一様磁界の強さの増加に対する
 球状プラズマの形の変化 $E=+500\text{ V}$, $I_d=2.0\text{ A}$

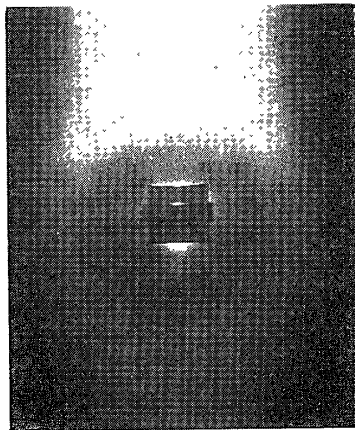


図 6 磁気双極子の電圧を負に
 した場合 $I_d=2.0\text{ A}$
 $B=100\text{ G}$, $E=-500\text{ V}$

次に、双極子の電位を金属壁に対して負にした場合、すなわち電場の向きを逆にすると、図6のように双極子の周囲に球状の暗部ができる。この球状暗部の、各パラメータに対する変化は、電圧が正の場合のようにはっきりとはしていないが、電圧の増加とともに拡大すること、プラズマ密度の増加に対して一様に縮少すること、および一様磁界の強さをかえてもほとんど変化しないことなどがみとめられる。

以上の結果は、磁気双極子の向きが一様磁界の方向に対して反平行の場合についてであったが、双極子の向きを一様磁界に対して、垂直および平行した場合には、単に合成磁界の磁力線の形が観測されるにすぎず、電場プラズマ密度、あるいは一様磁場などのパラメータに対する変化も明瞭にはみとめられない。

4. 検 討

以上の実験結果を整理してみると、

- (A) 双極子に正の電圧をかけると、球殻状のプラズマができる。
- (Ⅰ) 電圧を増加させると球状プラズマは双極子の磁軸方向に拡大する。
 - (Ⅱ) プラズマ密度を増大させると、球状プラズマは磁軸方向に縮少する。
 - (Ⅲ) 一様磁界を強くすると球状プラズマは等方的に小さくなる。
- (B) 双極子に負の電圧をかけると球状の暗部ができる。
- (Ⅰ) 電圧を増すと球状暗部は大きくなる
 - (Ⅱ) プラズマ密度を増すと球状暗部は小さくなる。
 - (Ⅲ) 一様磁界の強さを変えても球状暗部の大きさはかわらない。

まず(A)の場合に、なぜこのような球殻状プラズマが形成されるかということであるが、

考えられることは加速電子によるヘリウムの励起である。電場の方向は、双極子に電子の流れこむ向きであるから、ある磁力線に着目すると、電子はその磁力線を双極子の軸のまわりに回転してできる面に沿って双極子に流れこむことになる。しかしながら写真のように鮮明な境界が形成されることについては説明が困難である。また(A)の(Ⅰ)と(Ⅱ)とは相関関係があつて、電圧の増加が密度の減少と対応しているかのようなようであるが、磁力線の形は真空磁場とは異なっているはずであるから、(Ⅰ)、(Ⅱ)のような形状変化についても今の段階では、はっきりした解釈をすることは困難である。

(Ⅲ) の変化については、一様磁界の強さが増すと、双極子磁場とのつり合いの球面は当然小さくなることから明らかである。

(B) の電場の方向が逆の場合にできる球状暗部は、イオンシースと考えられ、このことは、電圧プラズマ密度の変化に対する大きさの変化とも矛盾しない。

以上述べたように、この実験結果については未解決の点が多く、今後の検討にまたなければならぬ。またこの実験結果が、自然界のどのような現象と対応しているかについても目下考察をすすめているところである。

1972年1月14日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] H. Alfvén, Symposium on Plasma Space Science, Catholic University, June 11—14 (1963)
- [2] W.H. Bostick, H. Byfield and M. Brettschneider: J. Geophys. Res. **68**, 5315—17 (1963)
- [3] J.B. Cladis, T.D. Miller and J.R. Baskett: J. Geophys. Res. **69**, 2257—72 (1964)
- [4] N. Kawashima and H. Ishizuka: J. Phys. Soc. Japan **18**, 736—37 (1964)
- [5] N. Kawashima and N. Fukushima: Planetary Space Sci. **12**, 1187—1201 (1964)
- [6] N. Kawashima: Cosmic Electrodynamics **1**, 415—427 (1971)
- [7] F.J.F. Osborne, I.P. Shkarofsky and J.V. Gore: Canadian J. Phys. **41**, 1747—52 (1963)
- [8] Annual Review: Institute of Plasma Physics, Nagoya University, April 1963—March 1964, 26, April 1967—March 1968, 61