カusp磁界中でのプラズマ塊の衝突*

入沢寿逸，大谷昌弘，平野克己

中野義映（東京工業大学）**

（1966年5月13日受理）

Abstract

Possibilities of plasma confinement in cusped geometry are investigated. The plasmas are made by two coaxial guns mounted so as to fire simultaneously against one another into opposite ends of an evacuated drift tube. The cusp coil is located at the center of the drift tube. Behaviors of plasmas are mainly observed with magnetic probes.

As the ordered motion of plasmas can be stopped, $\beta = 1$ region appears instantaneously in the neighborhood of the midplane of the cusped geometry. It is also confirmed that a condition of $\beta = 1$ occurs in center region of the cusped magnetic bottle notwithstanding β is less than unity at point cusps.

* The collision of two plasmas in a cusped magnetic field

** J. Irisawa, M. Ohtani, K. Hirano and Y. Nakano
(Tokyo institute of technology)

§ 1. はしがき

向い合って置かれた2基の同軸型プラズマ銃でプラズマを生成し、両側の点カスプから同時にカスプ磁界中に入射させると、カスプ容器中心付近で軸方向の運動が両プラズマ塊の衝突で止められ、停滞したプラズマの閉じ込めの可能性が期待される。本研究はこの現象を調べることを目的としている。そのために、片側の点カスプからプラズマを入射させた場合と両側の点カスプから同時に入射させた場合について、カスプ磁界中のプラズマの振舞いを主として磁気探針を用いて、プラズマ入射にともなう磁束密度の時間的空間的变化として調べ両者を比較した。

その結果、プラズマの軸方向の運動は止められ、約 $5\mu s$ の間ではあるがカスプ容器中心付近に $\beta = 1$ なる領域が形成され、入射時に点カスプにおいて $\beta < 1$ であっても、カスプ容器中心付近では $\beta = 1$ 領域が形成されることがわかった。

§ 2. 実験装置

2・1 プラズマ銃

使用したプラズマ銃は同軸型で、表1に概要を示す。電極材質は銅で、銃底での絶縁物はデルリンである。中性気体を電極間に噴出する高速電磁弁は内部電極内にあり、噴出孔は銃底から3cmの位置にある。1回の弁開放に際してヘリウムが約0.05cc噴出される。弁開放から銃動作までの遅延時間は $145\mu s$ で、このとき銃放電々圧15KVにおいて得られるプラズマ塊の速度は、 $1.3 \times 10^7 \text{ cm / SEC}$ である。

表1 プラズマ銃

電 極 長	190 mm
外 部 電 極 内 径	95 mm
内 部 電 極 外 径	50 mm
ガスポート(銃底からの距離)	30 mm
コンデンサ充電々圧	0 ~ 30 KV
コンデンサ容量	10 μF
放電々流周波数	130 KC

カスプ磁界中でのプラズマ塊の衝突

2.2 カスプ磁界発生用コイル

カスプ磁界は対称型で、表2に概要を示す。コイルは平均巻半径10 cmで3巻からなっている。点カスプはカスプ中心から7.5 cm, リングカスプは8.5 cmの位置で、リングカスプは放電管壁の内側に入っている。カスプ磁界はコイルに流れる電流の $\frac{1}{4}$ 周期でクランプL, プラズマが存在している間は直流的にした。

表2 カスプ磁界

コイル平均半径	100 mm
コイル間隔	140 mm
コンデンサ容量	30 μ F
ポイントカスプ磁界強度	0 ~ 10 K Gauss
ポイントカスプ間隔	150 mm

2.3 磁気探針

カスプ磁界中でのプラズマの振舞いを調べるための磁気探針を第1図に示す。磁気探針は0.05 mm ϕ のポリウレタン線を100回巻いたコイルを外径8 mm ϕ , 内径5 mm ϕ の硬質ガラスパイプの中に8 mm間隔に10個ならべた。

2.4 実験方法

実験装置の概念図を第2図に示す。実験に際して、初気圧は 4×10^{-6} mmHgである。動作順序は、1) 同時に二つの銃の高速電磁弁を開放する。2) 高速電磁弁開放後115 μ sでカスプ磁界を形成する。カスプ磁界はさらに18 μ s後にコイルに流れる電流をクランプして直流的にする。3) 高速電磁弁開放後145 μ sで二つのプラズマ銃を同時に動作させ、プラズマ塊を生成する。プラズマ塊はプラズマ銃動作後、銃駆動電圧により異なるが5 μ s ~ 7.5 μ sで点カスプに到達する。カスプ磁界中でのプラズマの振舞いは磁気探針で、プラズマ入射にともなう磁束密度の時間的空間的变化として調べる。測定点は第1図に示すようにz軸方向には、0.8 cm間隔に10点とし、r軸方向には中心から1 cm間隔に5点とした。カスプ容器中心において、光電子増倍管でプラズマからの光の時間的空間的变化を調べ、磁気探針出力波形と比較する。なお2基のプラズマ銃から発射されるプラズマ塊は、速度、密度、形状が等しいことが要求される。両プラズマ銃の銃口からそれぞれ

第1図 磁気探針

圖 2 第 2 章 實驗裝置概要

れ 14 cm の位置に置かれた搜索線輪による観測では、得られた波形に殆んど差異が認められなかった。

§ 3 実験結果

プラズマ入射にともなう磁束密度 B_z の時間変化を示す代表的な磁気探針出力波形を第 3 図に示す。実験条件は、プラズマ銃放電電圧 15 KV，点カスプでの磁界の強さ 3.5 K ガウス，磁気探針の位置は z 軸上で軸方向距離 + 6.8 cm である。測定点を z 軸方向および r 軸方向に動かすことにより，軸方向磁束密度 B_z の z 方向および r 方向分布が描ける。 z 方向分布を第 4 図(A)(B)， r 方向分布を第 5 図に示す。第 4 図(A)は，片側の点カスプから入射した場合で，第 4 図(B)は，両側の点カスプから入射させた場合である。両者に見られる顕著な差は，(A)ではプラズマがあるときに，真空磁界よりもかえって磁界が強くなる領域が現れるが，(B)ではそのような現象が見られないことである。 r 方向分布は，プラズマがカスプ磁界中に入射して行くときの入射半径を示す。プラズマは点カスプ付近での入射半径 4 cm を維持してカスプ容器中心へ向い，点カスプ付近では $\beta = 0.7$ であるが中心付近では $\beta = 1$ となっている。光電子増倍管によるプラズマからの光の時間的变化を第 6 図に示

第 3 図 磁気探針出力波形

上；プラズマ銃放電電流

下；磁気探針

掃引：10 μ s / div

カスプ磁界中でのプラズマ塊の衝突

第4図 磁束密度 B_z 空間分布

プラズマ銃放電電圧 10 KV

銃放電開始後 12.5 μ s

第5図 プラズマ半径

銃放電圧 10 KV

ポイント・カスプ 2.8 K Gauss

実線：プラズマなし

点線：プラズマあり

カスプ磁界中でのプラズマ塊の衝突

第 6 図 光電子増倍管出力波形

す。光の山が三つあるが、時間の経過とともに山の高さは高くなり、一見プラズマが中心付近にたまってくると見えるが、磁気探針による測定と関連して考えられるのは第 1 ピークのみで、第 2, 第 3 ピークにあたる時刻には磁気探針には顕著な信号は現れない。第 1 ピークにあたる時間で、 β を $(B_{z0}^2 - B_z^2) / B_z^2$ として各点で β を計算して β の空間分布を求めたのが第 7 図(A)(B)である。(A)は点カスプにおいて $\beta = 1$ のとき、点カスプがプラズマによりカスプ中心方向に持ち込まれることを示す。(B)は点カスプにおいて $\beta < 1$ でも、カスプ中心付近では $\beta = 1$ 領域が形成されることを示す。

第7図 β 分布 (図中の各数値は β の存在領域を示す)

§4 検 討

カスプ磁界中でプラズマを閉じ込める際、i) 片側の点カスプからプラズマを入射させると、磁束密度の空間分布は第4図(A)に示してあるように、カスプ容器中心付近では、磁束密度がプラズマのない場合に比べて増加している。従って、中心付近で $\beta = 1$ なる領域を形成してプラズマを閉じ込めることはできていない。ii) しかし、両側の点カスプからプラズマを入射させると、磁束密度の空間分布は第4図(B)のようになり、これをもとにして β の空間分布を描いた第7図からわかるように、中心付近で $\beta = 1$ なる領域が形成されている。これらの定性的な説明は次のようなものと思われる。

プラズマが磁界中に存在しているときに、プラズマ中に誘起される電流として、磁界と垂直方向のプラズマの拡散と磁界との相互作用によるホール電流⁽¹⁾がある。これは常に磁界を弱める傾向である。またプラズマが z 軸方向の速度を持っていると、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ に比例した起電力を生じ、これによる誘導電流が生ずる。これによる磁界の方向は、点カスプ通過以前では真空磁界を弱める方向であり、点カスプ通過後は反対に強める方向である。磁気探針による測定結果からは、ホール電流による磁界のじょう乱は少なく、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ による誘導電流の効果が支配的であると考えられるので、以下この電流のみを主に考慮する。プラズマは点カスプ通過以前の電流を保持しながらカスプ中心に向うが、点カスプ通過後は、新たに逆方向の誘導電流が流れ始める。後者が前者より大きくなると、プラズマが存在していても磁界が真空磁界より強くなると考えられる。i) の場合がこれにあてはまる。一方、ii) の場合には、推定されるプラズマの密度 $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、温度 $\sim 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$ に対する緩和時間⁽²⁾(粒子軌道が $\frac{\pi}{2}$ 曲げられるまでの時間)は、イオンの方が長く、 $\sim 5 \times 10^{-9} \text{ sec}$ である。この間に進む距離は $\sim 10^{-2} \text{ cm}$ であるから、軸方向の運動は止められていると考えられる。従って、中心付近ではホール電流による反磁性効果のみが現れ、 $\beta = 1$ なる領域が形成されたと考えられる。しかし $\beta = 1$ なる領域の存在時間は $\sim 5 \mu\text{s}$ であり、このように早く消滅してしまう理由は今のところ不明である。このように考えると、入射時に点カスプにおいて、 $\beta < 1$ であってもカスプ容器中心付近では $\beta = 1$ 領域が作られることが予想されるが、実験結果である第7図が示しているように、実際にそのようなことが実現されている。

§ 5 あとがき

プラズマ銃を2個用いて、両側の点カスプからプラズマを同時に入射させ、カスプ容器中心付近で衝突によりプラズマの軸方向の運動を止めることによって、 $\beta = 1$ 領域を作り得たが、その存在時間は非常に短く、約 $5 \mu s$ である。このように早く $\beta = 1$ 領域が消滅してしまう理由は今のところ不明であるが、解決の糸口として、磁界中に停滞したプラズマが存在するとき、その都度、温度と磁気探針の信号との定量的な関係を明らかにする必要がある。

参 考 文 献

- (1) H. Alfven ; Cosmical Electrodynamics.
- (2) L. Spitzer ; Physics of Fully Ionized Gases.