

磁場中の定常プラズマにおける実験

貴 田 桂 介*

Experiment of a Stationary Plasma in a Magnetic Field

Keisuke KIDA

The diffusion of a plasma is studied in the experimental arrangement showed by fig. 1, which consists of the part of the plasma production and the region of the test plasma.

The plasma is produced by the discharge of the hot cathode, and is injected into the plasma test region. The plasma (Helium) is contained in a glass cylinder surrounded by the magnet coils. The plasma continuously drifts into a magnetic field, and the strength of the magnetic field is variable, maximum magnetic induction being about 4000 gauss.

In low pressure and high magnetic field, the radial electrical field is negative about 1 cm from the axis and between $r=1$ cm and $r=4$ cm reaches positive values.

1. 序

弱電離プラズマにおいては、中性分子（原子）の数が、電子、イオンの数に比較して圧倒的に多いので、荷電粒子の拡散は、電子—中性分子（原子）、イオン—中性分子（原子）間の衝突によって行われる。

低温弱電離プラズマにおいて支配的な衝突機構は、中性分子（原子）と荷電粒子間の弾性衝突であると考えられる。すると古典的な2体衝突理論によって、弱電離プラズマにおいて磁場に直角方向の拡散係数の大きさが、磁場の強さの2乗に逆比例することが導かれる。

ところが、弱電離プラズマにおける多くの実験で、ある臨界磁場 B_c 以上で、磁場に直角方向の拡散係数の大きさが、磁場の強さに逆比例する場合、あるいは、磁場の強さに依存しない、いわゆる“異常拡散”の現象が多くの人々によって報告されている。

磁場中でのプラズマの拡散現象についての初期の実験では、D. Bohm⁽¹⁾, A. Simon⁽²⁾, R. J. Bickerton and A. von Engel⁽³⁾. 及び Lehnert⁽⁴⁾ 等の実験がよく知られている。

Bohm は磁場中のアーク放電における実験で、強磁場でかなり大きい振動がプラズマ中に発生し、拡散係数も

増大していることを見出した。彼はこの実験を解析して、磁場に直角方向の拡散係数の大きさが B に逆比例することを示している。さらに彼は、拡散係数の大きさを実験値として $D_{\perp} \approx 2 \times 10^4 T_e / H$ と与えている。 T_e は電子温度で eV 。磁場は KG 。この結果は、古典的な拡散係数の B 依存性と相異しており、その数値の大きさも古典的に求めた場合のものと比較すると、 $10^3 \sim 10^4$ 倍の大きさになる。Bohm は、このように磁場に直角方向への拡散を異常に増大させるのは、プラズマ中に発生した振動であると説明している。

Simon は、Bohm の実験を検討し、磁場に直角方向への拡散は、イオン拡散で決定され、磁場に平行方向は、電子の拡散によって決定される拡散機構を考えた。Simon は、このような拡散機構が考えられるのは、磁力線にそって、終端の導体壁へ流れこむ電流の“短絡効果”が生じているからだと説明している。さらに、彼は、以上のことからやはり磁場中における両極性拡散は起っていないと考えている。すると、プラズマ中に発生した振動、その他の原因を考えなくても、拡散係数が増大することを説明できることを示している。

R. J. Bickerton と A. von Engel 等は磁場中の陽光極の実験で、弱い磁場のときには、拡散は古典的な拡散は古典的な拡散であると報告している。Lehnert 等は強

*本学電子工学科講師

い磁場による実験を行ない、臨界磁場が存在し、それ以上の強さの磁場では、拡散係数の大きさが磁場の強さと共に増大し、最後に飽和することを報告している。Lehnert 等による実験の結果は、Kadomtsev と Nedospasov⁽⁵⁾ によって、“current-convective instability” が生ずるためであると説明された。

ここに報告する実験の結果からは、強磁場中の低圧力のプラズマには不安定性が生じ、拡散が増加しているのではないかと考えられ、両極性拡散だけを考えて拡散の増加を説明するのは困難となる。

2. 実験装置

この装置は、高い圧力の放電領域と、低い圧力のプラズマ領域とからできている。熱陰極アーク放電によって放電領域でつくられたプラズマは、陽極の中心の直径 1 cm の穴からプラズマ領域へ噴き出される。プラズマの諸量に関する実験は、このプラズマ領域で行なわれる。放電領域が高い圧力 (≈ 7 Torr) に保たれているために、放電に原因する振動が、プラズマ測定領域へ影響を与えることは、比較的小さくおさえられている。このように

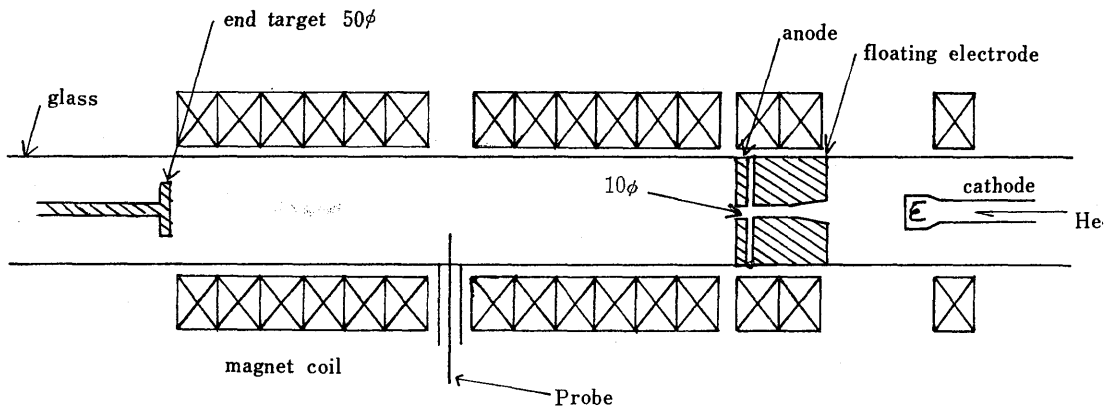


fig. 1 装置概略図

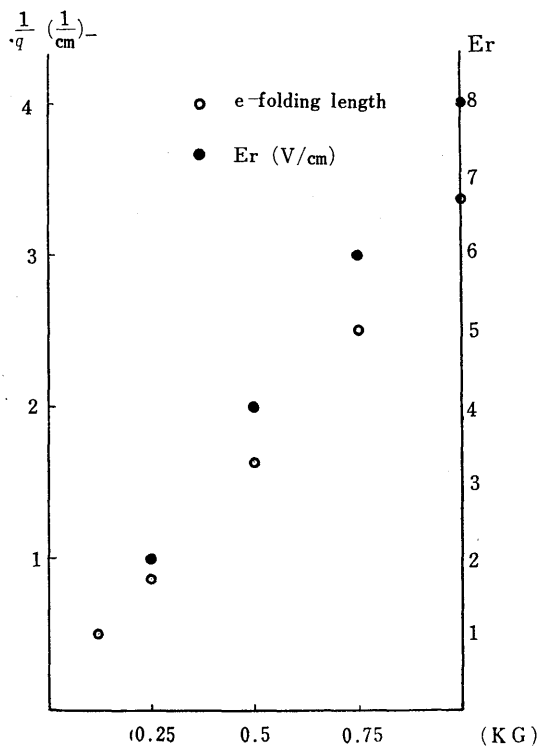


fig. 2 e-folding length 及び Er

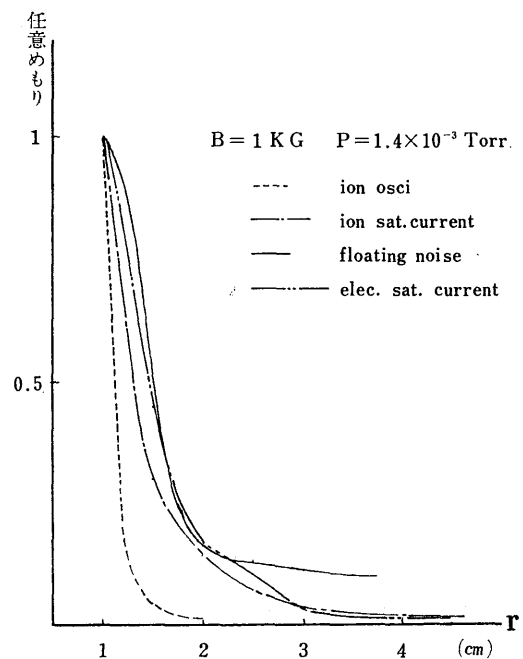


fig. 3 各種量の半径方向分布

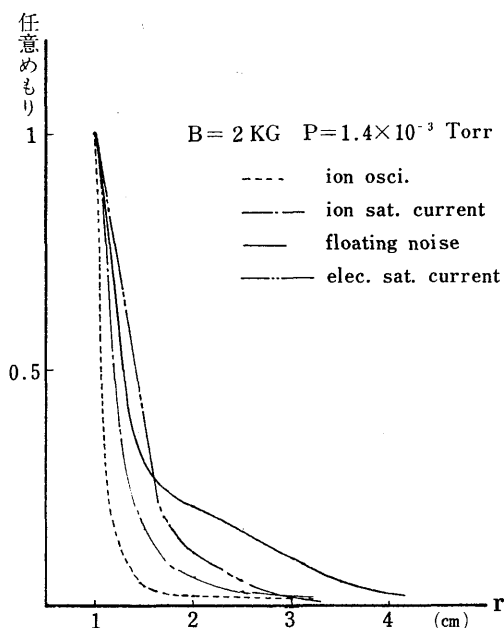


fig. 4 ion osci, etc. の半径方向分布

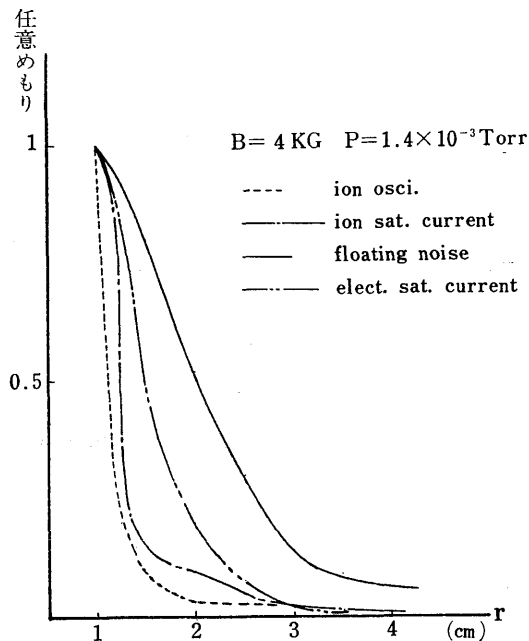


fig. 5 ion osci, etc. の半径方向分布

放電に原因する振動がプラズマ測定領域で静かであることがこの装置の特長である。

放電に使用した気体は H_e である。放電の圧力は、カソード側にあるニードバルブによって調整されている。

測定はプローブをプラズマ中に挿入することによってなされ、記録はX-Yレコーダーで自動的に行われた。装置のあらましは図1に示されている。

3. 測定結果

(3-1) 圧力が高く、弱磁場による実験の結果

圧力が高く、 $P = 7 \times 10^{-2}$ Torr、磁場が弱い、 $B \leq 1$ KG、条件で、プラズマ密度分布及び電位分布から e-folding length と、磁場に直角方向の電界の強さを、求めた結果が第2図に示される。e-folding length と電界の大きさの磁場依存性は、両極性拡散を考慮することによって与えられるものと一致し、このことから、本実験程度の圧力及び磁場では、荷電粒子の拡散は両極性拡散によって行なわれているものと考えられる。

(3-2) 圧力が低く、比較的強磁場による実験の結果

磁場が強くなって、ある強さの磁場以上では、プラズマの中心附近の電界と逆方向の電界が、プラズマの外側の部分に生ずる。圧力一定、 $P = 1.4 \times 10^{-3}$ Torr、のもとで磁場の大きさを変化させて、振動、イオン飽和電流、電子飽和電流の磁場に直角方向への分布を測定したものが図3, 4, 5である。

これらの実験結果から、イオン捕集プローブによって測定した振動の磁場へ直角方向の分布は、磁場の強さによってそれほど影響されていないことがわかる。それに対して、浮動電位にあるプローブによって測定した振動の磁場に直角方向への分布は、磁場が強くなると共に、外側の部分で相対的に増大していることを示している。

(3-3) プラズマの電子温度

電子温度の磁場に直角方向の分布を測定した結果を図に示している。この図からも明らかなように、電子温度はプラズマの外側の部分では、温度勾配が中心附近に比較してゆるやかになっていることがわかる。このような温度分布は、弾性衝突だけを考えるのでは説明できない。

4. 考察

プラズマ中の電界は、プラズマの space potential から求めなければ正確には議論できないが、floating potential と space potential は密接に関係しており、電子温度がわかれば floating potential より space potential が推定できるので、測定は floating potential について行なった。参考として V_s と V_f の関係を示したのが図6である。

イオン捕集プローブによるイオン振動の測定の結果から、プラズマ柱周辺の電界の反転に対応したイオンの振動は存在しないであろうと考えられる。このことは、イ

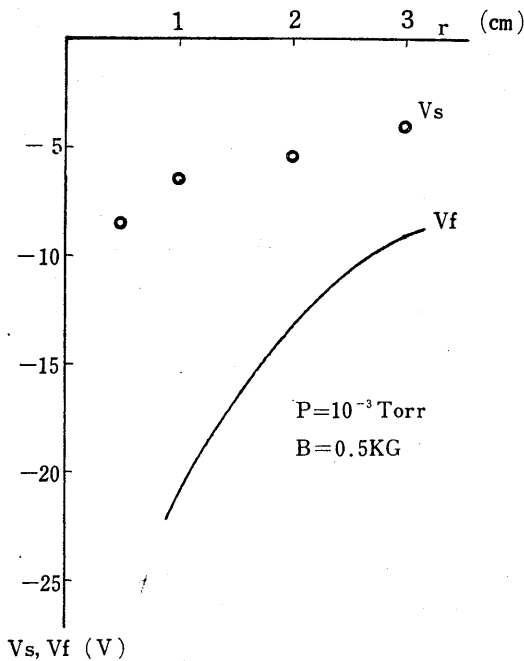


fig. 6 浮動電位と空間電位の関係

オン振動の分布は、磁場の強さによって、ほとんど変化していないことから推定される。これに対して、浮電位プローブによって観測した振動は、磁場が強くなると、プラズマの密度分布と比較して、プラズマの外側で相対的に増大している。イオン捕集プローブでの振動の変化は小さく、磁場が強くなった場合の振動の増大は、電子に原因するものであろう。これは磁場が強くなると、プラズマ極周辺の電子に不安定性が生じ、そのために電子の拡散がイオンの拡散より大きくなり、この拡散の差を打ち消すために生じたのが、プラズマ柱周辺に生ずる両極性電界と逆方向の電界であると考えられる。図7に半径方向の浮動電位分布を示す。

弾性衝突による拡散によって電子温度の分布が決定されると、 t 時間に衝突によって変位する平均的な距離は、平均自乗変位という概念を用いると、

$$r^2 = D_{\perp} e t$$

で与えられる。 $D_{\perp} e$ は電子の磁場に直角方向の拡散係数である。プラズマ端において損失がなければ、 t 時間後の温度は

$$T_e = T_{e0} \exp(-t/t_0)$$

で与えられる。非弾性衝突の効果が弾性衝突の効果に比較して小さく、無視できるならば、 $t_0 = m_i \tau_{e-n} / 2m_e$ で与えられる。 τ_{e-n} は電子と中性分子との平均衝突時間で、衝突周波数との間には、 $\tau_{e-n} = 1/\nu_{e-n}$ の関係がある。 m_e , m_i はそれぞれ電子およびイオンの質量。

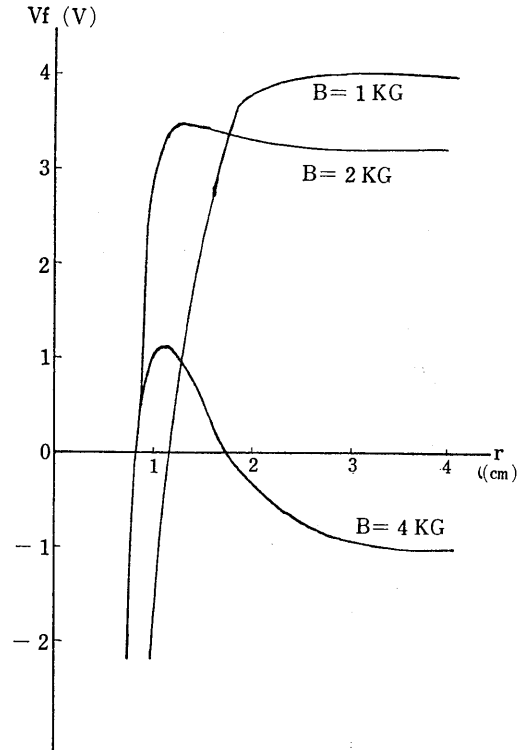


fig. 7 浮動電位の半径方向分布

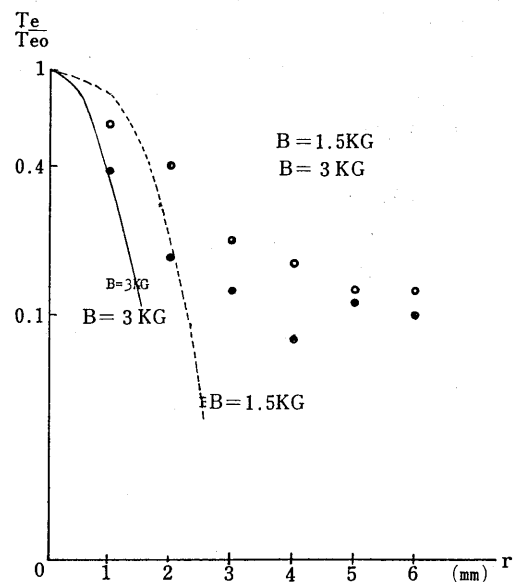


fig. 8 電子温度分布

$$D_{\perp} e = D_0 / [1 + (\omega_c \tau_{e-n})^2]$$

で与えられ、 D_0 は、磁場のない場合の両極性拡散係数である。 ω_c はサイクロトロン角周波数である。

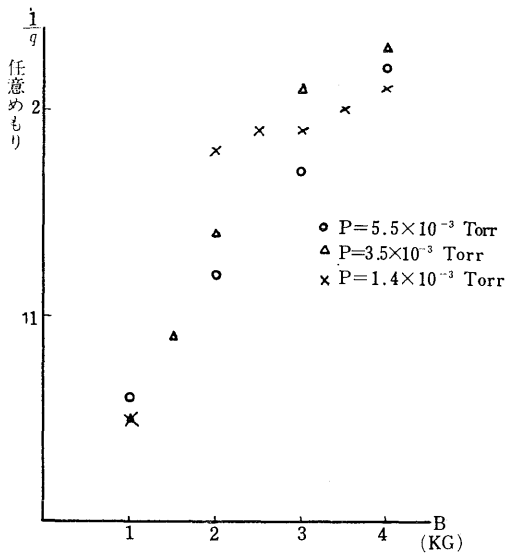


fig. 9 各気圧に対してBを変数としたe-folding length

$$\omega e \tau_e n = \lambda_{e-n} / r_e$$

r_e は電子のラーモア半径である。これらの式より

$$T_e(r) = T_{e0} \exp\left(-r^2 / r_e^2 \cdot \frac{6m_e}{m_i}\right)$$

この式は、終端損失を考慮に入れないときの、弾性衝突における電子温度の管径方向（磁場に直角）の分布を与える。 λ_{e-n} は平均自由行程。上の式から計算された値と測定値を示したものが図8である。実験値はこの計算式からは説明することはできない。このようなことより、電子の磁場に直角方向への拡散の原因として、弾性衝突によるもの以外の拡散を考える必要があると思われる。図9, 10は、e-folding length と圧力、磁場との関係を示すものである。磁場が4 KGの場合には、 q は圧力に無関係にはほぼ一定の値をとっている。圧力を一定とし、磁場を変化させて q の大きさを測定した実験において、圧力が低いときには、磁場の強さに無関係に q の値は一定の値を示すことが観測された。このような結果は、弾性衝突による拡散だけでは説明できない。以上のことから、プラズマ柱周辺の反転電界は、電子の振動に原因する異常拡散ではないかと考えられる。

5. むすび

磁場が弱く電子、イオンの平均自由行程が管径にくらべて小さくなるような圧力では、両極性拡散によって、荷電粒子の拡散が行われる。しかし、圧力が低くなり、電子、イオンの平均自由行程が管径程度になると、両極性拡散では説明できない現象が生ずる。すなわち、e-folding length と磁場の強さ、圧力との関係が両極性拡

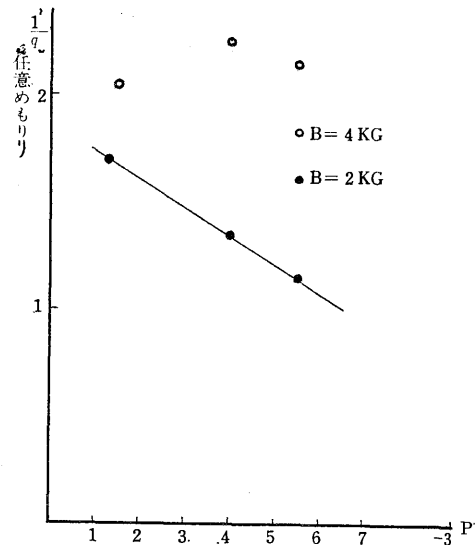


fig. 10 気圧と e-folding length の関係

散の式によって与えられるものと相異している。さらに、プラズマ柱の外側で両極性電界と逆方向の電界も生ずる。これは何らかの原因により電子の拡散が増大して、イオンの拡散より大きくなり、その結果、イオンの拡散との差を打ち消すように電界が生じたのではないかとと思われる。

6. 文献

- 1) D. Bohm, E. Burhop, E. H. S. Burhop, H. S. W. Massey and R. Willms "The Characteristic of Electrical Discharges in Magnetic Fields," (A. Guthrie and R. K. Wakerling eds.) New York, 1949.
- 2) A. Simon, phys. Rev. 98 (1955) 317.
- 3) Bickerton, R. J. and von Engel, A, Proc. Phys. Soc (London) 69B (1956) 468.
- 4) B. Lehnert, Proc. of the Second Geneva Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. 1958, 32, 349.
- 5) B. B. Kadomtsev "Plasma Turbulence" Academic Press 1965,