

太陽フレアおよび Neutral Sheet のモデル実験

大藪 修義・河島 信樹・横田 俊昭*

Neutral Point Discharge as Simulation Experiment of Solar flare and Neutral Sheet II

By

Nobuyoshi OHYABU, Nobuki KAWASHIMA and Toshiaki YOKOTA

Abstract: The behavior of plasma current through a magnetic neutral point is investigated experimentally. A quasi-steady magnetic field is created by a slow capacitor discharge, and the plasma sheet current is excited by a fast capacitor discharge. The plasma current sheet thus formed is collapsed into small filamentary pinches, and they are ejected outward on the current sheet plane along the magnetic field lines. This seems to correspond to the ejection of plasma and energetic particles associated with solar flares and the neutral sheet behind the earth. The visual observation together with double probe and Rogowskii coil measurements shows that the collapse of the plasma current occurs earlier as the plasma current and the external magnetic field is increased and as the initial gas pressure is decreased, and this is explained qualitatively by the resistive tearing mode instability. The electron temperature rises abruptly at a certain time only when the current sheet collapses violently.

1. 緒 言

磁場がゼロの線に沿って plasma current が流れたときに生ずる plasma pinch の平衡安定性またその内部の plasma dynamics は宇宙物理や核融合研究において、重要な問題である。たとえば、太陽のフレア、地球の背後の Neutral sheet ではこの問題は本質的である。[1][2][3]

われわれはこの問題を実験的に解明しようとしている。昨年の報告では、sheet pinch の中に生ずる小さな pinch の運動、生ずるまでの時間を主に写真測定と、ダブル・プローブ測定によってパラメータ（初期ガス圧 plasma current 外部磁場）依存性を報告した[4]。

今回の報告では、小さなロゴスキーコイルによる current 分布、分光器測定による電子温度およびイオン温度測定について報告する。

* 広島大・理学部

2. 実 験

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す. まず上下各四本の導体棒 (長さ 100 cm, 直径 1cm) の中を同じ方向に流れる電流 (半同期 320 μ sec) によって quadrupole 型の準定常的な外部磁場を作る. この電流が最大になったとき, 容量 20 μ F 充電電圧 15 kV のコンデンサで装置両端に置かれた二つの金鋼電極間にプラズマ電流を励起する. このプラズマ電流は, 導体棒を流れる電流とは逆方向に流し, その半同期は 13 μ sec peak 値 I_p は 50 kA まで変化させた. 使用ガスは空気, He で初期圧 P_0 は 5×10^{-2} Torr $< P_0 < 1.6$ Torr で行なった. Fig. 2 には, 外部磁場に plasma current を流したときの磁場配位を示した.

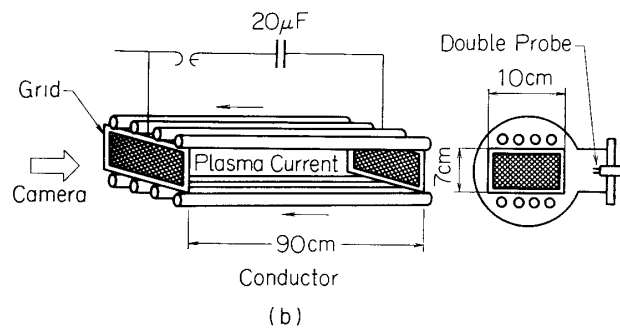


Fig. 1 Schematic layout of the experiment

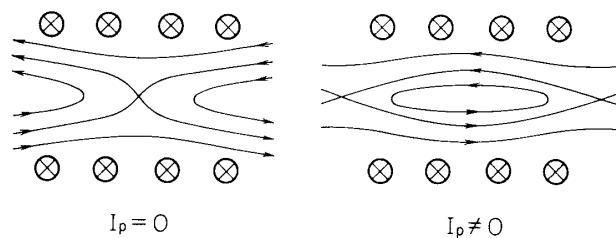


Fig. 2 Magnetic field configuration with and without plasma current

Fig. 3 の写真は sheet pinch の中に小さな pinch が生じ時間とともに外に飛び出していく様子を示している. 昨年の報告では, (I) 外部磁場を強くすると, (II) plasma current を増大させると, (III) 初期圧 P_0 を減少させると sheet pinch が早く小さな pinch にこわれるという結論を写真測定, ダブル・プローブ測定によって出し, 報告した [4].

今年度の実験では, 小さなロゴスキー・コイルによって電流分布を求め, その結果を Fig. 4 に示す. 確かに電流は写真およびダブル・プローブ測定と同じ結果を示し, sheet pinch の中に左右に生じた二つの電流の peak は外に飛び出していく様子がよくわかる.

Fig. 5 はロゴスキー・コイルとダブル・プローブを中心軸から 5 cm の所に固定して, 飛び出してくるプラズマのかたまりの密度 $\times \sqrt{\text{温度}}$ および電流密度を測定した結果である. P_0 が高くなると, プローブに plasma のかたまりの到達する時間が遅れる. また $P_0 = 2 \times 10^{-1}$ Torr 程度になると, plasma のかたまり signal が小さくなる. これは thermal が kinetic energy density (nkT) が大きくなったため外部の磁場の影響が相対的に小さくなってきて,

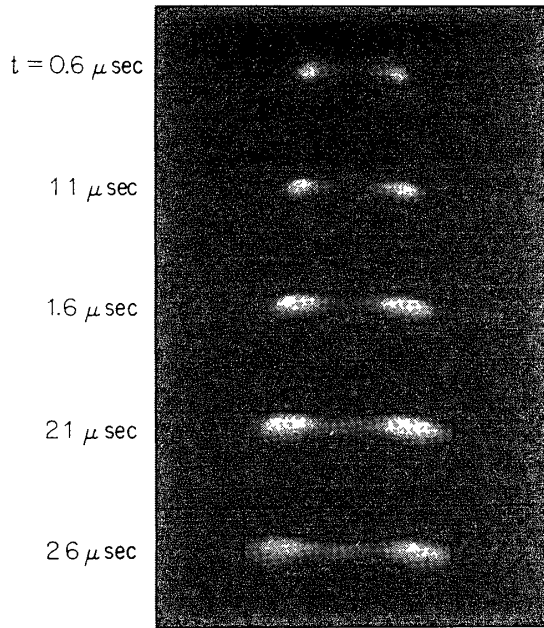


Fig 3 A series of time resolved photographs of the formation and collapse of a plasma current sheet into small filamentary pinches. The time in microseconds after the start of the plasma current are shown on the left. The conditions are: $P_0 = 2 \times 10^{-2}$ Torr Gas: air $I_p = 50$ kA, $I_c = 7$ kA/rod

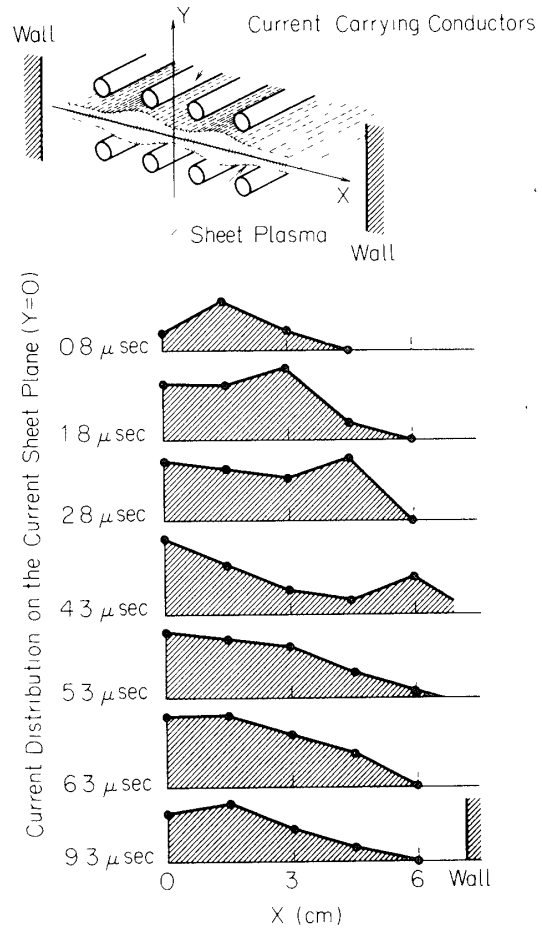


Fig 4 Current distribution measurement by a small rogowski coil $P_0 = 1.4 \times 10^{-2}$, Gas: air $I_p = 50$ kA $I_c = 10$ kA/rod

普通の Z-pinch に近づいたためと考えられる。

次に分光測定の結果を述べる。sheet pinch の中心軸の近くで軸に沿って出てくる光を集光レンズで集めて分光器に入れて測定を行なった。(使用ガスは He) まず HeI 5015 と HeII 4686 を同時測定した。Fig 6 はパラメータを変化させたときの、両 line の signal である。HeI 5015 の line の signal はパラメータを変化させてもたいした変化はなく、しかも最初から立ち上る。一方、HeII 4686 の signal の立ち上りはパラメータに依存して遅れる。

HeII 4686/HeI 5015 が大きいほど、Te が高くなるということは、よく知られた事実である。

この事から、HeII 4686 の強度は、Te の単調増加関数になっていると考えてよい。Fig. 7 のグラフは HeII 4686 の立ち上り時間(すなわち、Te の立ち上り時間)のパラメータ依存性を示している。初期圧 P_0 が高くなると、また外部磁場を作る I_c が小さくなると Te の立ち上り時間は遅れることがわかる。また I_p の依存性は他の parameter の依存性に比較して弱い。

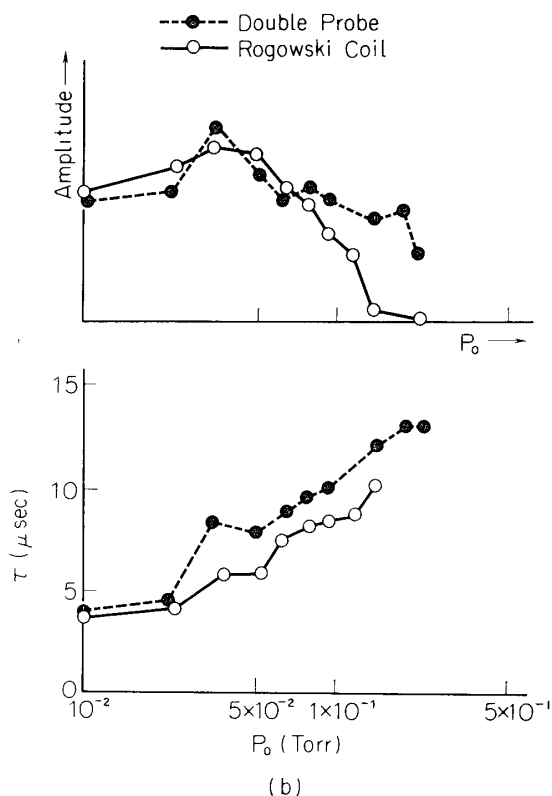


Fig. 5 Dependence of the arrival time and the amount of the ejected plasma blob on the initial gas pressure P_0 . Location of the probe: 5 cm from the center
 $I_p=50$ kA $I_c=10$ kA/rod

ということを考慮しなければならない。 H_β の stark 幅を求めることによって、電子密度を求め、その電子密度が HeII 4686 に与える stark 幅は、 0.1 \AA 以下であり装置の幅の 0.9

次に HeI 4713 と HeI 5047 の Intensity, ratio から求めた Te の時間的変化を見る。 [5][6]

Fig. 8(a)には初期圧 P_0 を変化させたとき、Te の時間的変化である。 $P_0=7 \times 10^{-2}$ のとき、 $4.6 \mu\text{sec}$ から急激に Te が上昇し始めて、 $\text{Te} \approx 10 \text{ eV}$ 程度になる。 P_0 が高くなるとともに、Te の立ち上り時間が遅くなり、しかも Te が上がらなくなる。

Te の I_p の依存性は、 Fig. 8(b)に示されている。

$I_p=75$ kA, 60 kA のときは、 $5 \mu\text{sec}$ で急激に Te が立ち上り始め、 9 eV 程度まで上昇する。しかし $I_p=50$ kA のときは、Te は放電中ずっと 1 eV 以下で Te の上昇は見られない。Te が上昇して 10 eV 程度になるのは sheet の中に急激な変化が生じて、小さな二つの pinch に分れる現象が生ずるときに起る。

次に HeII 4686 の line 幅を測定することによって Doppler 幅を求め、Ti を求める。

しかし装置幅や stark 幅が line の幅を広げ

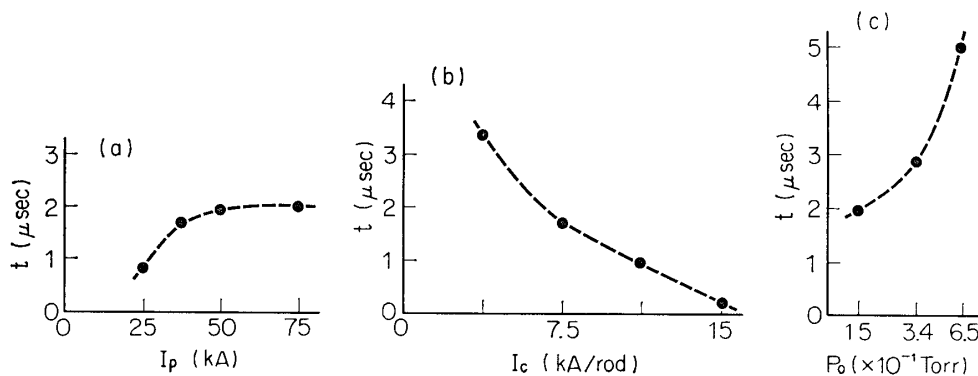


Fig. 7 Dependence of the rising of the intensity of the spectral line HeII 4686
 (a) Dependence on the plasma current
 (b) Dependence on the external magnetic field
 (c) Dependence on the initial gas pressure
 The conditions are the same as Fig. 6 respectively

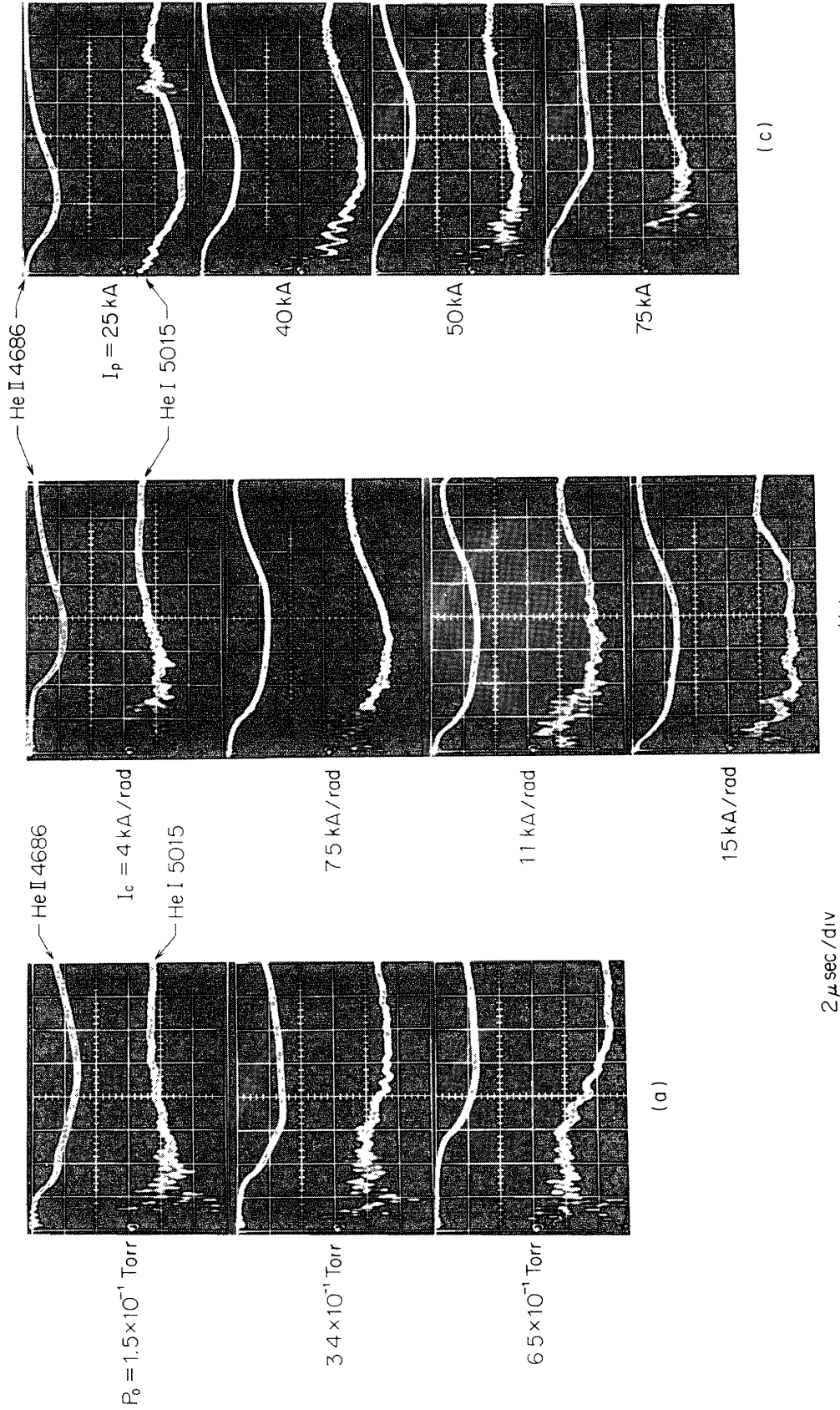


Fig 6 Oscilloscopes showing the intensity of the spectral line HeI 5015 and HeII 4686
 (a) Dependence on the initial gas pressure P_0 Gas He $I_p = 75$ kA $I_e = 15$ kA/rod
 (b) Dependence on the external magnetic field Gas: He $I_p = 50$ kA $P_0 = 8.5 \times 10^{-2}$ Torr
 (c) Dependence on the plasma current Gas: He $I_e = 7.5$ kA/rod $P_0 = 9.4 \times 10^{-2}$ Torr

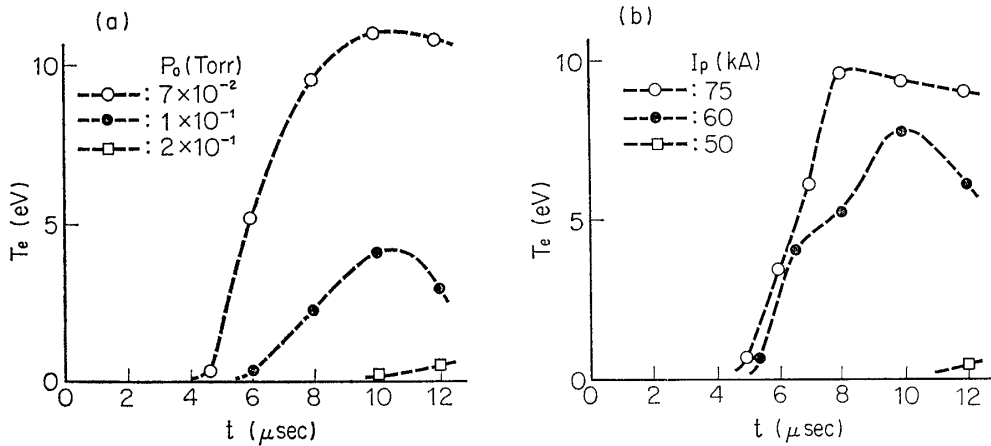


Fig. 8 Dependence of plasma electron temperature
 (a) dependence on the initial gas pressure P_0 Gas: He
 $I_p=60$ kA $I_c=10$ kA/rod
 (b) dependence on the plasma current Gas: He
 $P_0=1 \times 10^{-1}$ Torr $I_c=10$ kA/rod

Å である。

I_p が 50 kA 以下では、line 幅は装置幅と同程度になって測定できなかったが、 $I_p=75$ kA のとき、 T_i は 60 eV 程度まで上昇することがわかった。 T_e は P_0 が高くなると急激に減少するが、 T_i は大して変化せずに 60 eV 程度である。

T_i の初期圧 P_0 、外部磁場を作る電流 I_c の依存性は shot-shot の再現性が悪いため、また装置幅が大きいため明確にできなかった。

3. 議 論

内部に磁気中性面を持った sheet pinch では、有限の伝導率のために磁場とプラズマのはく離が生じて resistive tearing instability が現われる。 current sheet が小さな pinches に分かれてこわれていくのがこの instability の特徴である。

Furth et al の理論によると、tearing mode は $KA < 1$ のときにのみ生じ、 $S = \tau_r / \tau_h \gg 1$ のときは、その成長率は $(\tau_r \tau_h)^{-2/3}$ のオーダーである。ここで K は磁場に平行な波数 A は、plasma layer の厚さ、 $\tau_r = \sigma \mu A^2$ は resistive diffusion time $\tau_h = A / V_A$ は hydromagnetic time σ , μ , V_A は conductivity, magnetic permeability, Alfvén velocity である。

現段階では十分正確に plasma parameters を決定していないし、instability の成長の過程で parameters は時間的変化しているけれども、理論結果と実験結果を定性的に比較することは意味があると考えられる。 current sheet における tearing mode の開始は、 $\tau_0 \sim \tau_h^* = \sqrt{\tau_r \tau_h}$ …… (1) という条件で決められる。 [7] そしてこのときの current sheet の厚さは $A \sim L \left(\frac{\tau_h^*}{\tau_r^*} \right)^{1/3}$ …… (2) である。

$$\left(\begin{array}{l} \tau_h^* = L / V_A, \tau_r^* = \sigma \mu L^2 \\ L \text{ は current sheet の幅である} \end{array} \right)$$

pressure balance mass conservation から $\rho T \propto B^2$ (3)

$\rho \wedge \propto P_0$ (4)である

(ρ は density, T は temperature, P_0 は initial pressure)

また $V_A \propto \frac{B}{\sqrt{\rho}}$, $\rho \propto T^{2/3}$ であるから,

(1)(2)(3)(4)より ρ , T , I を除くと current sheet がこわれる時間 τ_0 は

$$\tau_0 \propto \frac{P_0^{3/10}}{B^{3/5}}$$

この結果は, pressure が減少するとまた外部磁場, プラズマ電流が増大すると current sheet が小さな pinches により早くこわれるという実験結果と矛盾していないことがわかる. ここで τ (plasma の到達した時間) は近似的に tearing mode の成長に要する時間と小さな pinch 状の plasma のかたまりが probe に到達に要する時間の和であると考えられる. 分光測定によって得られた plasma temperature について結果をまとめると, 電子温度の立ち上り時間は, 初期・ P_0 が高くなると, また外部磁場の I_c が小さくなると遅れる.

電子温度上昇には, プラズマ電流 I_p に critical な値が存在して, それ以上の値でないと温度上昇はみられない. 初期圧 P_0 についても同様で critical な初期圧以下でないと電子温度の上昇はない. 電子温度上昇が見られるのは, sheet の中に急激な変化が生じて小さな二つの pinch に分かれる現象が起るときである.

また電子温度の立ち上り時間のパラメータの依存性は sheet がこわれて小さな二つの pinch になっていくに要する時間のパラメータ依存性と同じであることがわかった. これは sheet の中に tearing mode が生じてそれに付随して電子温度が上昇したと考えられるがその詳しい mechanism は未解決である.

イオン温度は $I_p=50$ kA 以下では分光器の装置幅のために測定できなかったが, $I_p=75$ kA のときは 60 eV 程度まで上昇する.

イオン温度が電子温度 ($T_e \sim 10$ eV) よりも何ゆえに 6 倍も大きいかという問題は未解決であり, 目下検討中である.

今後の課題として, これら未解決の問題の解明とともに, gun で plasma を生成して低密度 ($10^{12} \sim 10^{13}/\text{cc}$) 領域での実験が残されていると考える.

1972 年 1 月 14 日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] J.W. Dungey: Condition for the occurrence of electric discharges in astrophysical systems, Phil. Mag. **44**, 725 (1953)
- [2] N.F. Ness: The earth's magnetic tail, J. Geophys. Res. **70**, 2989 (1965)
- [3] H.P. Furth, J. Killen and M.N. Rosenbluth: Finite-Resistivity Instabilities of a Sheet Pinch, Phys. Fluids **4**, 459 (1963)
- [4] 宇宙科学特集号 p.217 3月 (1971)
- [5] 分光研究 第20巻第2号 p.54 (1971)

- [6] D. Latimer, J. I. Mills and R. A. Dacy: *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 10, 629 (1970)
- [7] P. A. Sweet: *Intern. Astron. Union Symposium* 6 (1958) 123, 134. *Nuovo Cimento Suppl.* 8, N₂ 188 (1958)