

# 太陽フレア及び Neutral Sheet のモデル実験

大 薮 修 義・河 島 信 樹

## 1. 緒 言

Neutral sheet pinch は、核融合研究や宇宙物理において、重要な問題の一つである。

ここで Neutral sheet とは、たとえば  $x$ -Type の磁気中性点に電流が流れた結果、磁力線が current sheet に平行で、しかも上下では方向が逆になる磁場配位をもった Sheet plasma を意味する。

このような neutral sheet は、宇宙の自然現象にたびたび現われる。

最近の人工衛星によって、地球の背後赤道面上に厚さ、600 km 程度の非常に薄い neutral sheet が存在し、かなり遠方まで広がっていることが観測されている[1]。また neutral sheet が太陽のフレアに関連しているということが Dungey によって最初に指摘された[2]。

2つの黒点の間に出来た磁気中性点に沿って電流が流れ、sheet current pinch を作る。このような sheet pinch は非常に不安定であり、すぐに電流の方向に沿っていくつかの小さな pinch にこわれる。このときに大きなエネルギーが放出され、これがフレアと考えられている。 $\theta$ -pinch や Astron のような核融合装置においても、current sheet の安定性は重要な問題である。磁気中性線に沿う current sheet の平衡については、Chapman et al. によって理論的に議論されている[3]。そこでわれわれは、 $x$ -Type の磁気中性点にプラズマ電流を流して、neutral sheet pinch を作り、その平衡と安定性に関する実験を行なった。

## 2. 実 験

実験は二種類の装置を用いて行なわれた。

実験装置の概略図 Fig. 1 を示す。(a)の装置では、外部磁場は四本の導体に交互の向

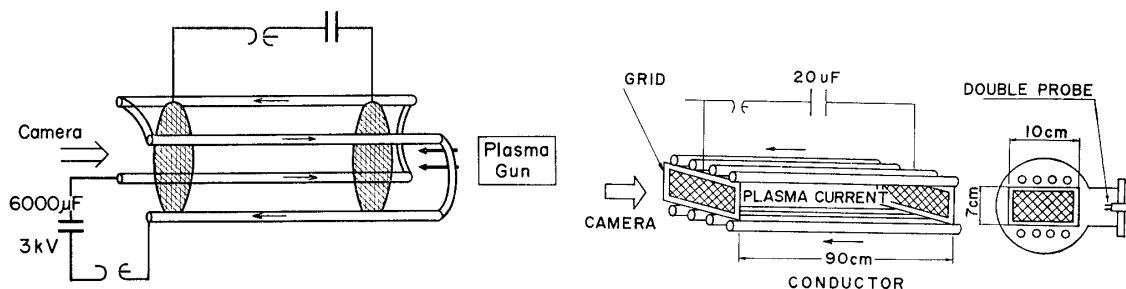


Fig. 1 Schematic layout of the experiment

きに電流を流して作られるカusp 磁場を用いた. また(b)では, 上下各四本の導体棒 (長さ 100cm, 直径 1cm, 導体棒は絶縁と真空のためにビニールチューブで覆ってある) の中を同じ方向に流れる電流によって作られる quadrupole 型磁場を用いた. (a)は地球背後の neutral sheet モデル実験に対応し, (b)は太陽 flare に対応する. 電流は(a)では, 6000  $\mu$ F, 充電電圧 3kV, (b)では 2400  $\mu$ F, 充電電圧 (2kV) のコンデンサーバンクによって励起される単定常型で, その半周期は, 240  $\mu$ sec, 一本の導体棒に流れる電流のピーク値  $I_c$  は 15kA である. この電流が最大になったとき, 20  $\mu$ F, 充電電圧 15kV のコンデンサーバンク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, その半周期は 13  $\mu$ sec で, peak 値  $I_p$  は, 50 kA まで変化させた. 使用ガスは水素, 空気, 圧力  $P_0$  は,  $5 \times 10^{-2} \text{Torr} < P_0 < 1.6 \text{Torr}$  で行なった. Fig. 2 には, それぞれの磁場配位におけるプラズマ電流のある場合の平衡配位を示した. いずれの場合にも, プラズマ電流は sheet になることが理論的に示されている.

実験では, この plasma sheet pinch の成長の時間的変化の様子を Kerr cell 及び Image converter camera を用いて, 軸方向からの時間分解写真をとった. Fig. 3, 5, 6 にその写真を示す. Fig. 3 は cusp 型磁場の場合で, 外部磁場を作る四本の導体は, 図上, 上下左右の中央にあり, プラズマ電流は上下の電流と逆向きに流れている. 上下の電流による磁気圧で, プラズマ電流はシート状になる. Magnetic probe による磁場測定からも, Fig. 4 に示したように, シートが形成されていることがわかる. Fig. 5 は, Fig. 2(b) の装置の中で作られた sheet pinch の時間分解写真を示した. プラズマ電流のピーク値  $I_p = 40 \text{kA}$  で, 8本の導体棒は, それぞれ  $I_c = 7.5 \text{kA}$  の電流が流れており, 使用ガスは空気, 圧力  $P_0$  を  $1 \times$

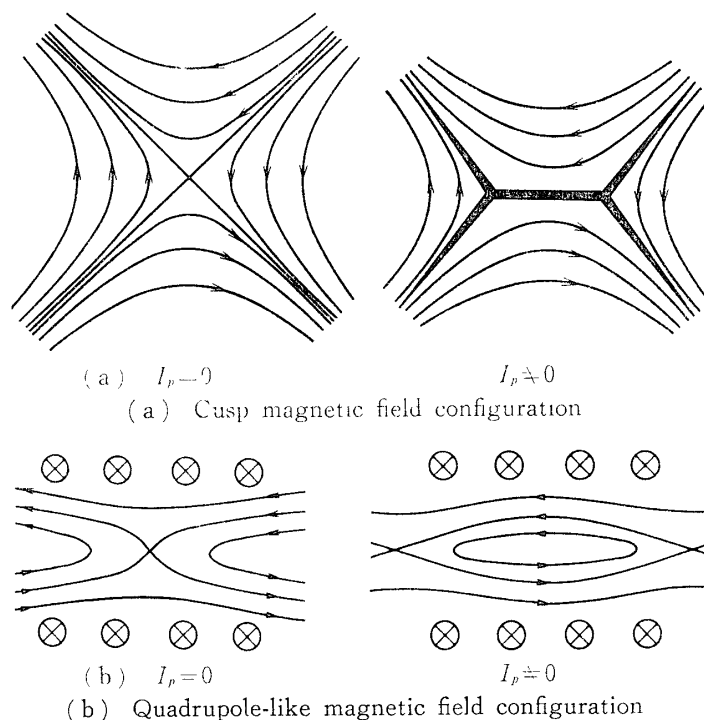


Fig. 2 Magnetic field configuration with and without the plasma current

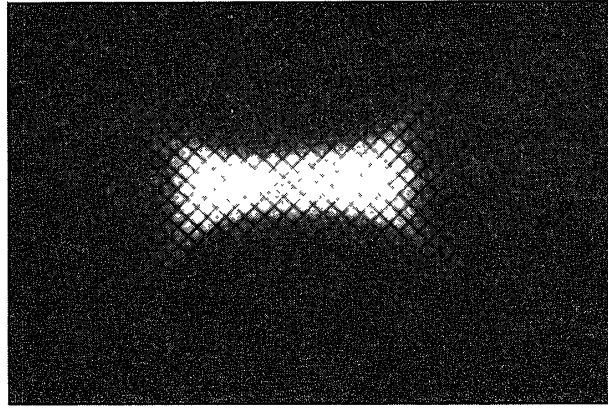


Fig. 3 Time resolved photograph of the formation of a plasma current sheet in the cusp magnetic field configuration at  $2.5 \mu\text{sec}$  after the initiation of plasma current discharge. Gas: air.

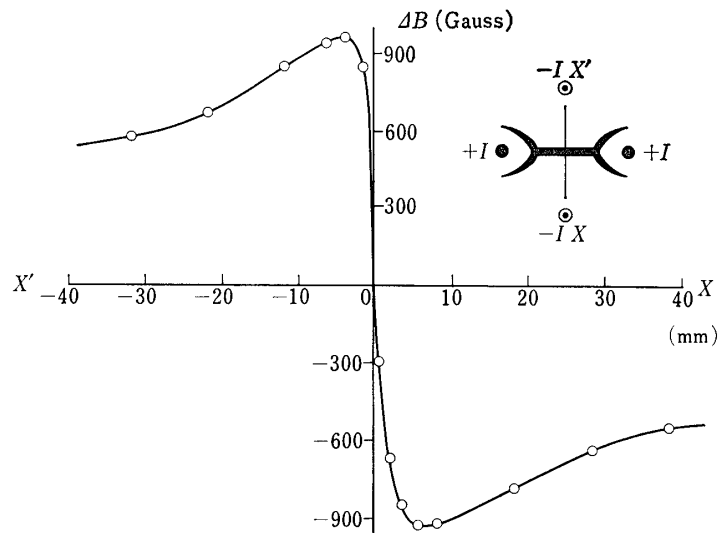


Fig. 4 Magnetic field measurement by a magnetic probe across the plasma current sheet shown in Fig. 3. The measured instant is  $2.5 \mu\text{sec}$  after the discharge.

$10^{-2}$ ,  $2 \times 10^{-2}$ ,  $5 \times 10^{-2}$  Torr と変化させたときの様子である。

$P_0 = 1 \times 10^{-2}$  Torr の場合には、シートの中に生じた小さな pinch が外に出て行く様子がよくわかる。

$P_0$  が  $2 \times 10^{-1}$  Torr になると、小さな pinch が互いに引張り合って、一つの pinch になる。

Fig. 6 の場合は、 $I_p = 25 \text{kA}$ ,  $P_0$  (空気)  $= 2 \times 10^{-2}$  Torr で  $I_c$  を 4, 7.5, 15 kA と変化させたときの様子である。

外部磁場、圧力、プラズマ電流を変化させて sheet の時間的様子を見ると、

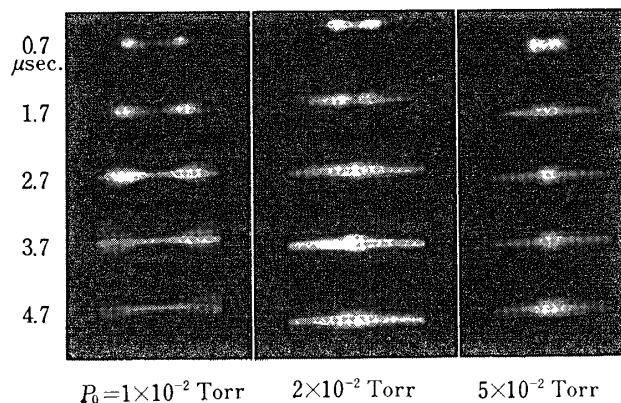


Fig. 5 A series of time resolved photographs of the formation and collapse of a plasma current sheet in the quadrupole like magnetic field configuration  
The Pressure  $P_0$  is varied ( $1 \times 10^{-2}$ ,  $2 \times 10^{-2}$ ,  $5 \times 10^{-2}$  Torr) Other Conditions are,  $I_p = 40$  kA,  $I_c = 7.5$  kA Gas : air.  
The time in microseconds after the start of the plasma current are shown on the left.

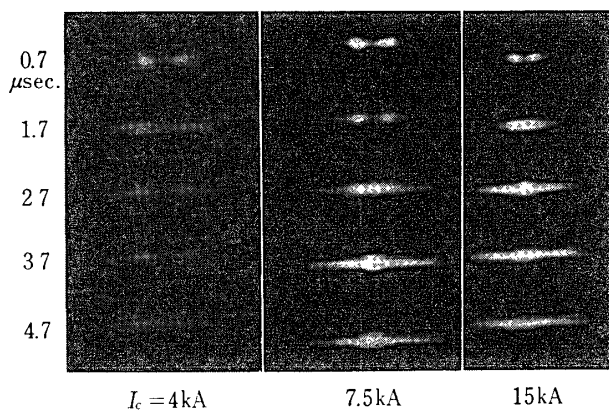


Fig. 6 A series of time resolved photographs  
 $I_c$  which produces the external quadrupole-like magnetic field is varied ( $I_c = 4, 7.5, 15$  kA).  
Other conditions are :  $I_p = 25$  kA,  $P_0 = 2 \times 10^{-2}$  Torr Gas : air.

- i) 磁場を強くする
- ii) プラズマ電流を大きくする.
- iii) 圧力を減少させると,

Fig. 5 にあるような sheet がいくつかの pinch に分かれる現象が早く現われることがわかった.

Fig. 1(b) に示したように, current sheet 方面上中心から 3~40 cm 離れたところに置かれた double probe で, sheet から飛び出して来る plasma のかたまりを測定した. probe の位置を変えることによって, プラズマのかたまりの速度を求めることができる.

Fig. 7 は,  $P_0=1 \times 10^{-2}$  Torr (空気),  $I_p=40\text{kA}$ ,  $I_c=7.5\text{kA}$  の時, probe の位置を中心から 15cm, 11cm, 7cm, 5cm 離れた時の double probe の signal である. このときプラズマのかたまりの速度は,  $2.2 \times 10^6\text{cm/sec}$  であることがわかる.

また, signal の幅と上の速度とから, かたまりの磁場方向の大きさが求まり, このときは, 3cm 程度である. これは sheet の中に生ずる小さな pinch のかたまりとほぼ一致する.

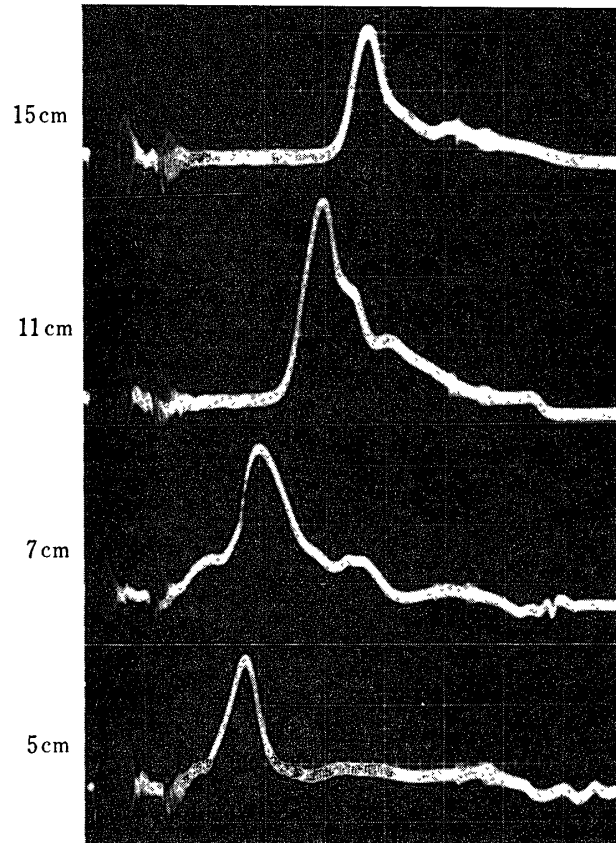


Fig. 7 Detection of a plasma blob ejected from the collapse of the plasma current sheet by a double probe.  
The probe position is varied on the plane of the sheet.  
The distance between the probe and the axis of the sheet are shown on the left.  
Sweep:  $2\mu\text{sec/div}$

放電開始からプラズマのかたまりが probe に到達するまでの時間を  $\tau$  として,  $\tau$  のパラメーター依存性を見た. このとき, probe の位置は中心軸から 40cm 離れている. まず,  $\tau$  の外部磁場依存性は, Fig. 8 に示した. 磁場を強くすると,  $\tau$  は小さくなり, current sheet が早くいくつかの pinch に分れることがわかる. 次に  $\tau$  のプラズマ電流依存性は, Fig. 9 に示した. plasma current を増すと,  $\tau$  は小さくなる. 一方  $\tau$  の圧力  $P_0$  (放電前の圧力) の依存性は (Fig. 10),  $P_0$  が増加すると  $\tau$  は大きくなり, 圧力が高くなると, current sheet がちぎれるように分れるのは起こり難くなる. これらの probe 測定の結果は, 前に示した時

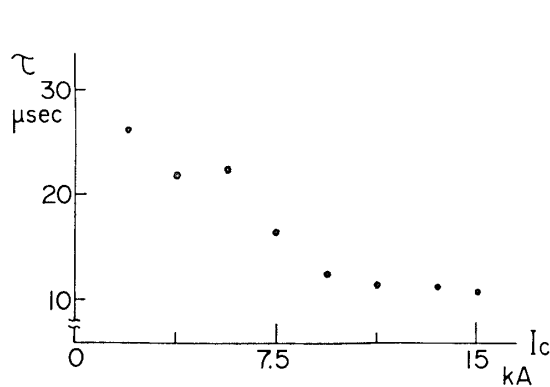


Fig. 8 Dependence of the arrival time  $\tau$  of the plasma blob to the double probe probe on the external magnetic field.

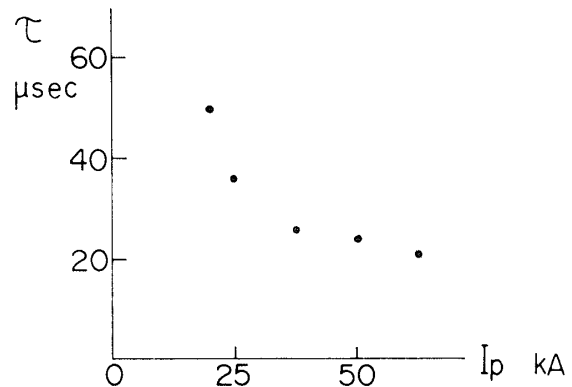


Fig. 9 Dependence of the arrival time  $\tau$  on the plasma current.

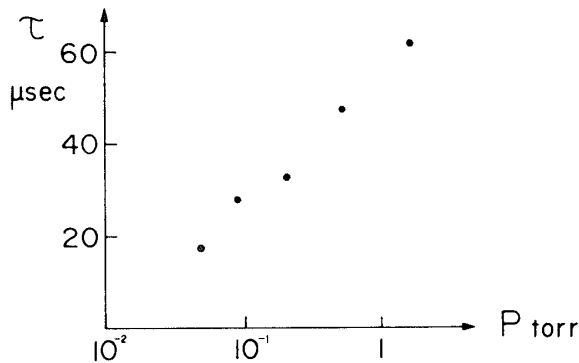


Fig. 10 Dependence of the arrival time  $\tau$  on the initial gas pressure

間分野写真において、プラズマがいくつかの pinch に分れていくのに完全に対応しており、probe で測定された速度から逆算すると、プラズマのかたまりがシートを飛び出す時刻は、プラズマシートがピンチ状にちぎれ始める時間と一致する。

### 3. Neutral sheet および Solar flare との対応

まず、この実験を地球の背後の Neutral sheet の model 実験としたときの対応関係

を論ずる。

太陽風によって作られる Geomagnetic Cavity 内では、少なくとも地球の後方  $30R_E$  ( $R_E$  · 地球半径) 以上まで tail を形成し、その磁場分布の著しい特徴は、極地方から出た磁力線がはるか後方にびき伸ばされていることである。そして赤道面より上側では、太陽方向の磁力線であり、下側で上の逆であるから、 $B=0$  の磁気中性面が存在する。衛星の観測によると、その厚さは 600km 程度、磁場の強さは数 gamma 以下になる。Cusp 型磁場の場合の Fig. 3 で示されているように、上下の電流による磁気圧でプラズマ電流はシート状になる。その一部が押し出されて、電流シートの両端にできた中性点を通して、左右の外部導体電流のまわりへはいり込んでいる。これは、地球背後の Neutral sheet のまわりのプラズマの地球上への荷電粒子の侵入に対応しているものと思われる。実験室と宇宙空間における物理量の対応関係を以下に示す。

実験室の Sheet の厚さ(2a)は、1cm 程度であり、Neutral Sheet の厚さは 600km であるから、スケーリング、パラメータ  $S$  は、 $6 \times 10^7$  となる。

速度は両方で不変でなければならない。実験室で sheet から分れた小さな pinch が外に飛び出す速度、 $2.5 \times 10^6 \text{cm/sec}$  と、観測によって得られた磁力線再結合の速度 50km/sec ( $5 \times$

	宇宙空間	実験室
長さ	$SL$	$L$
速度	$v$	$v$
時間	$st$	$t$
磁場	$S^{-1}B$	$B$

$10^6\text{cm/sec}$ ) と対応すると考えられる. 時間に関しては, 実験室の sheet が不安定性を示すおよその時間は  $1\sim 2\mu\text{sec}$  であり, これに対応するのはオーロラの際に磁気圏後部で生ずる急激な plasma の爆発現象の継続時間 ( $1\sim 3\text{min}$ ) で,  $3\times 10^7\leq S\leq 10^8$  程度になる. 磁場については  $1\text{K gauss}$  で Neutral sheet では数 gamm 程度である. このときの  $S$  は,  $1\times 10^8$  になる. 以上の議論で, 長さ, 時間, 磁場からそれぞれ求めたスケーリング・パラメータ  $S$  は, 大きな違いはなく, また速度に関しては, 両方で同じオーダーであるから, この実験はかなりよいシミュレーションとなっていることがわかる.

次に太陽のフレアのシミュレーションとして, 実験結果を議論する.

太陽においては, 二つの黒点間に出来る磁気中性線に電流が流れ, current sheet ができる. この sheet が, instability により, 不安定になり, 電磁波放射と粒子放射を伴う巨大な爆発を生ずる. このとき, 磁気エネルギーが何らかの機構で plasma の運動エネルギーに変換されると考えられている.

フレア現象のシミュレーションにおいては, Fig. 1(a)の左右の導体は現実には存在しない. また, このような電流シートの安定性を議論するには, できるだけ様なシートを作ることが望ましい. Fig. 1(b)の装置はそのような点を考慮して作られたものである.

すでに述べたように, プラズマ電流が外部導体を流れる電流と逆向きに流れると, Fig. 5に示したように, シート状プラズマ電流が形成される.

このプラズマは空間的には current sheet 方面附近に一番多く出て来て sheet 方面からはなれると少なくなる. Fig. 3 のように, プラズマ塊が飛び出す方向に磁場を作る導体がある場合には, それをよけて磁力線方向へ行くのと対比して, flare 現象のシミュレーション実験である導体がない. Fig. 1(b)のような配位では, instability によって sheet から小さく分れた pinch が pinch 間の引力よりも外部の磁場配位によって外に押し出す力がまざったとき, プラズマ塊が外に飛び出す. このことは, 太陽のフレアによって実際に地球上に粒子が飛び出して来得ることを示している.

#### 4. 議 論

Sheet pinch は有限の伝導率のために, 磁場とプラズマが剝離をおこし, sheet current がいくつかの細かいピンチに分れる. いわゆる Resistive instability の tearing mode に対して不安定であるということが, Furth et al によって議論されて来た(4). 彼らの理論によると, current sheet (厚さ  $2a$ ) は,  $ka < 1$  を満す波長  $k$  の tearing mode に対して不安定であり,  $S \gg 1$  のとき, tearing mode の  $e$ -folding time は,  $\tau_R S^{1/2}$  のオーダーである. ここで  $k$  は磁場方面の tearing mode の波数,  $S = \tau_R / \tau_H$ ,  $\tau_R = \sigma \mu a^2$  (磁場の空間的不均一さが失わ

れる時間)  $\tau_H$  は Alfvén wave が sheet pinch の厚さ  $2a$  を横切るに必要な時間である。  $S$  は sheet の厚さ  $a$ , 密度  $\rho$ , 温度  $T$  に依存しており, われわれは現時点においては, これらのパラメータを実験的に十分正確に決めていない。

しかも, instability の成長過程でパラメータは, 時間的に変化しているので, 定常磁場と  $S \gg 1$  のとき, Furth の理論結果と直接比較することは, 無理があるが定性的には興味あると考えられる。

圧力の平衡  $\rho T \sim B^2$  質量の保存  $\rho a \sim P_0$  (放電前の圧力) を用いると,  $e$ -folding time  $\propto P_0^{3/2} B^{-3} T^2$  となる。  $T$  があまり外部磁場や圧力に依存しないとすると, tearing mode が成長するまでの時間は  $B$  が強くなり,  $P$  が減少すると短くなる。

このことは, 5(c)のような sheet の中に小さな pinch が生ずるまでの時間測定 (時間分解の写真による) や, probe の  $\tau$  測定とは矛盾していないことが分る。ここで  $\tau$  は, 近似的に tearing mode の成長に要する時間と小さな pinch 状のプラズマのかたまりが probe に到達するに要する時間の和であると考えられる。今後これらのパラメータ測定を更に進めて定量的な比較をすると共に, 現在の放電領域を更に広げて, プラズマ銃を用いたプラズマ入射方式によりこの実験を進めて行く計画である。

## 5. 謝 辞

この実験に技術的協力を頂いた糸賀民夫氏に深甚なる感謝の意を表したい。

1971年1月22日 新設部(科学)

## 参 考 文 献

- [1] N.F. Ness, The earth's magnetic tail, J. Geophys. Res. **70** 2989 (1965)
- [2] J.W. Dungey, Condition for the occurrence of electric discharges in astrophysical systems, Phil. Mag. **44** 725 (1953)
- [3] S. Chapman and P.C. Kendall, Liquid instability and energy transformation near a magnetic neutral line: a soluble non-linear hydrodynamic proc. Roy. Soc. A (GB) **271** 435 (1963)
- [4] H.P. Furth, J. Killen and M.N. Rosenbluth, Finite Resistivity Instabilities of a Sheet Pinch, Phys. Fluids **4** 459 (1963)