

## 極域電離層におけるプラズマ銃を用いた Controlled Active Experiment

河島信樹\*・矢守 章\*・佐々木進\*

村里幸男\*・岡村昇一\*・金子 修\*

### Controlled Active Experiment in the Polar Ionosphere using an Artificial Plasma Stream

Nobuki KAWASHIMA,\* Akira YAMORI,\* Susumu SASAKI,\*

Yukio MURASATO,\* Shoichi OKAMURA\* and Osamu KANEKO\*

**Abstract:** A controlled active experiment using an intense-pulsed plasma stream produced by a plasma gun is proposed for a rocket experiment in Antarctica. A strong interaction of the plasma stream with charged and neutral particles in the polar ionosphere is expected. Artificial aurora and VLF wave excitation may be observed.

#### 1. はじめに

南極におけるロケット観測も第二期を迎え、いよいよ本格的な研究が活発に行われる訳であるが、これからの研究の一方向として、controlled active experiment は重要な分野になると考えられる。今迄は、主として自然の観測を中心に研究が行われてきたが、今後は自然を人間の手で制御していこうという実験が大きな比重を占めてくるのである。これは、今迄の自然科学の進歩をみていけば当然であって、例えば、原子核研究の進歩における放射線の発見から加速器の発明への進歩をみれば、人間が自然を観測しているだけに満足せずに自分の手で作り出そうとした過程が良く理解できる。

宇宙観測における active experiment は表1に示したように、すでにいくつか行われている。そのある部分は、主として diagnostics の手段から発展したものであり、例えば、電離層の風や電場の観測手段としての chemical release や top side sounding から発展した大出力電波の放出がある。一方純粋に active experiment として考えられ実験されたものに electron accelerator による電磁波の励起や人工オーロラ、大気光の発光があり、す

---

\* 東京大学宇宙航空研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo.

表 1 Active experiment

Fig. 1. Active experiment

1. 強力な電波放出	3. プラズマ放出
2. 電子ビーム放出	プラズマ銃/MPD ジェット
イオンビーム放出	4. chemical release

に Boulder, Minnesota, Soviet-France のグループで行われ、将来の新しい実験手段として注目されている。また、これから発展するものとして、イオンビームやプラズマビームを用いた研究が行われていくものと思われる。ここでは大出力のプラズマビームを用いての南極における active experiment の計画について述べてみたい。

プラズマ・ビームを出すには、いろいろの方法が考えられるが、現在主として考えられているものは、プラズマ銃と MPD アークである。いずれもコンデンサーに蓄えられた電気エネルギーを大電流放電によって、プラズマエネルギーに変換するものである。従って、電子ビームや電波に比して、出力 (power) が大きいということで、後で述べるように、小型ロケットでも 1 MW~10MW クラスの出力を得ることができる。一般にロケットによって放出しうるエネルギーは、搭載重量によって制限され、その放出方法にあまり依存しない。電離層や磁気圏は広大な領域であり、そのエネルギーはロケットで放出しうるエネルギーとは比較にならないほど大きい。このような境界条件下でロケットでいくらかのエネルギーを放出して、何らかのじょう乱をひき起こす場合の一つの方向として、エネルギー放出時間を短くして出力 (power) を大きくすることは大いに重要である。例えば、コンデンサーにエネルギーを蓄えておいて、イグニトロンで放電させる場合、それをトリガーするパルスは、パルス幅がある程度以上あれば、その電圧があるレベル以上を要求され、それ以下の電圧ではどんなに長いパルス幅のパルスを入れても、放電させることができない。すなわち、一般的にいて、コンデンサーに蓄えられたエネルギーを放電させるには、あるレベル以上の power が要求されることになる。南極でプラズマの active experiment をやる最大の興味は、上記のアナロジーから、南極は磁気圏に直接つながっており、そこでは、蓄えられたエネルギーを一度に放出することができる可能性があるということであり、そのような意味で大きな power を放出することができるプラズマ加速器は、大いに魅力的である。

このようなプラズマ加速器の計画は、現在アメリカで進められている Space Shuttle 計画の最初に行われるであろうと考えられている AMPS (Atmospheric Magnetospheric and Plasma-in-Space) でも重要な部分を占めており、われわれもプラズマ銃、MPD アークを中心とした SEPAC (Space Experiment with Plasma Accelerators) (大林、河島、

表 2 プラズマ加速器特性  
*Fig. 2. Characteristics of a plasma gun.*

コンデンサー	$0.035\mu F \times 23\text{個} = 0.8\mu F$
充電電圧	8kV
充電エネルギー	25J
プラズマ流速	$5 \times 10^6 \text{ cm/s}$
// 粒子エネルギー (イオン)	200 eV
// 粒子個数	$3 \times 10^{16} \text{ particles/shot}$
// 全エネルギー	1J (4%)
電子温度	5~10 eV

栗木, 長友) 計画を立案, AMPS に提案し, Mission Definition の Working Group に参加することになっている。

また, 本年9月にわれわれは内之浦において, K-9M-46 号機に SPA (Space Plasma Accelerator) を搭載し, active experiment を行うことになっており, この計画はそのまま南極へもって行って実験が可能である。ここではこの K-9M-46 の SPA 計画を少し詳しく記述して, 南極における実験計画にかえたい。

## 2. K-9M-46 号機による電離層プラズマの Controlled Active Experiment

### 2.1. 実験目的

#### 2.1.1. 人工的プラズマ波動の励起

プラズマ銃によるパルスプラズマ塊が起こすじょう乱やプラズマ銃中に流れる大電流により, 人工的にプラズマ波動が励起され, また, 不安定性が成長することが期待される。

#### 2.1.2. 人工的 air glow (大気光) の励起

プラズマ銃から出るプラズマの性質は, 後に述べるように, 電子温度 10 eV, イオンの kinetic energy 200eV をもっており, これが磁力線に沿って大気にはいると, その原子分子と反応して, 人工 air glow の励起が起こると考えられる。

#### 2.1.3. 境界のない領域でのプラズマの振舞

実験室のプラズマは, 一般に壁にかこまれており, プラズマの振舞が, その境界条件によって左右されることが多い。電離層や磁気圏のプラズマは, そういった意味での境界のない領域での純粋なプラズマの振舞を調べることができる。

#### 2.1.4. 非線型プラズマ現象の解明 (collision-free shock wave の励起)

プラズマ銃が起こす強いじょう乱によって, collision-free の空間を伝播する非線型現象

を解明する。

## 2.2. 実験機器概要

ロケットは親子切り離し方式により、高圧放電に伴う搭載計器への危険性を避けるとともに、子ロケットからのプラズマの伝播、励起電磁波、プラズマ波動の伝播を time of flight により測定する (図1)。子ロケットにプラズマ銃およびその制御回路、高圧電源、コンデンサーバンクを搭載し、ロケットが地上 150 km に達した時に子ロケットは切り離されプラズマ銃の放電が開始される。放電は、12秒に1回行い、これを親ロケットに搭載されたラングミュアプローブやアンテナ、光検出器を用いて測定する。Telemetry は通常の FM-PM telemeter の他、wide band telemeter や transient recorder を用いて行う。

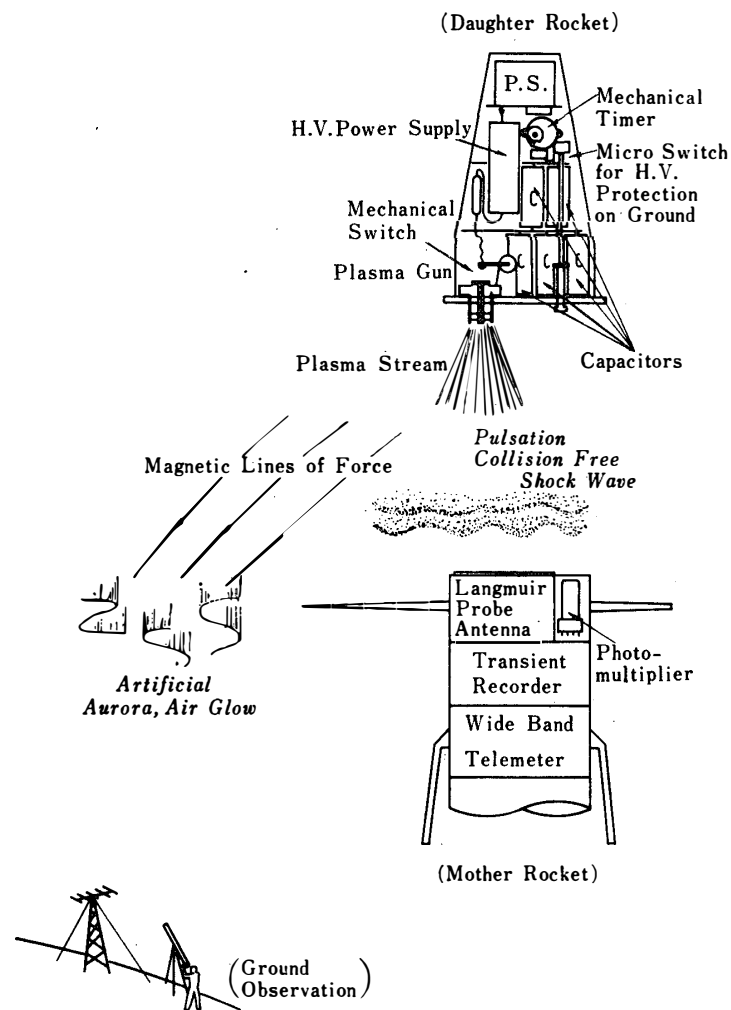


図1 ロケットによるプラズマ銃を用いた制御装置

Fig. 1. Schematic illustration of a controlled active experiment using a plasma gun.

なお計器重量は今回の場合約 10 kg である。

1. DAUGHTER ROCKET

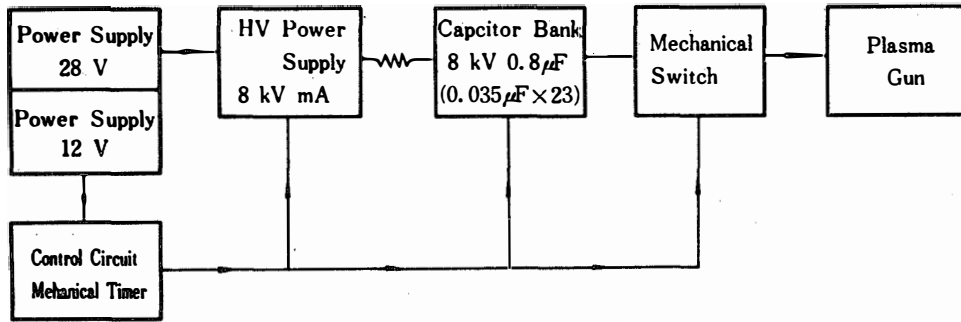


図 2 (a) 子ロケット構成のブロック図  
 Fig. 2(a). Block diagram of the daughter rocket.

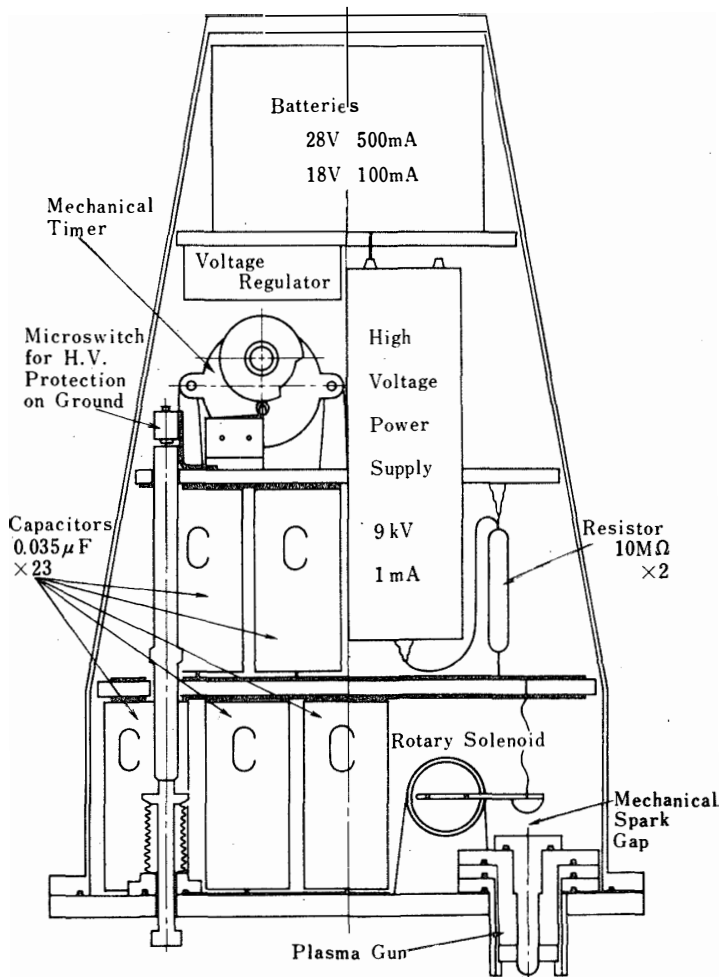


図 2 (b) 子ロケット構造図  
 Fig. 2(b). Payloads of the daughter rocket.

2.3. 構成

2.3.1. 子ロケット (図2)

- a) 電源 (乾電池): 28V 0.5A (10WH), 18V 0.1A (1.5WH)
- b) 制御装置: 12秒に1回, 図3に示した time sequence で行う. 制御方式 (タイマー):  
モーターおよびマイクロスイッチの組合せ
- c) 高圧電源 (DC-DC Converter): 9kV 1mA (CW)
- d) コンデンサーバンク (東和電気株式会社): 8kV 0.8 $\mu$ F (25 J) (0.035 $\mu$ F $\times$ 23)
- e) スイッチ部: Rotary solenoid 駆動による気中ギャップ

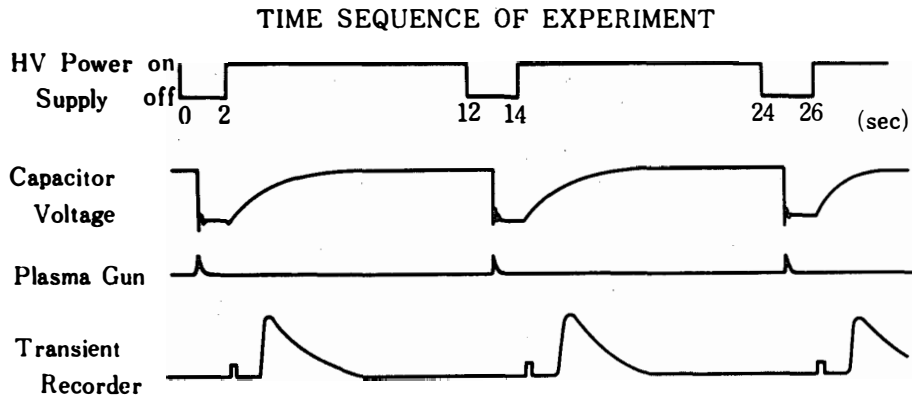


図3 実験のタイム・シーケンス

Fig. 3. Time sequence of the controlled active experiment.

2. MOTHER ROCKET

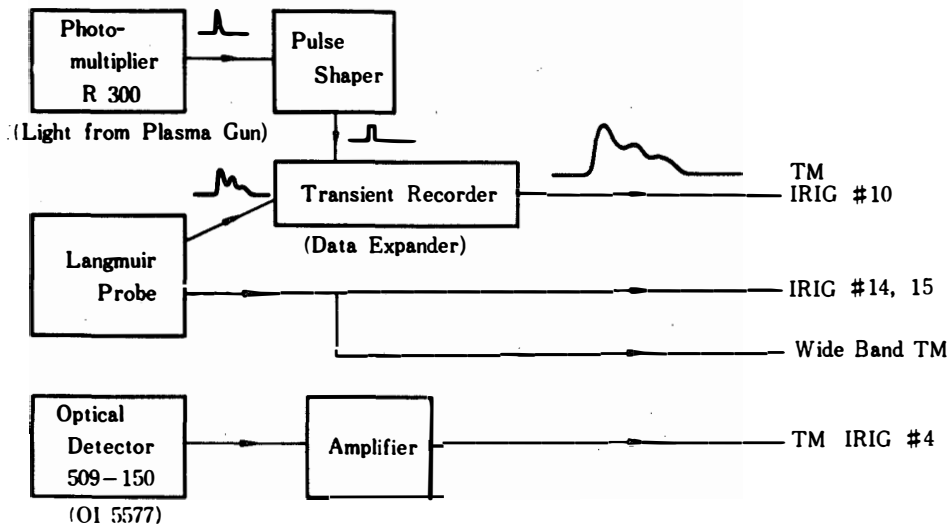


図4 親ロケット測定器部のブロック図

Fig. 4. Block diagram of the mother rocket.

f) プラズマ銃：同軸型 カarbon・ガン

### 2.3.2. 子ロケット切離部

子ロケットのロケットに対する相対速度 1 m/s

切離方式：Separation nuts +バネ

### 2.3.3. 親ロケット測定器部

親ロケット測定器部のブロック図を図4に示す。

- a) 光学測定：放電の光を検出して測定の時間の原点とする。光電子増倍管 R300 を用いる。
- b) ラングミュアプローブ：固定バイアスで時間的に速い変化を測定する。
- c) トランジユント・レコーダー：ラングミュアプローブ等で測定される信号は 10 kHz～100 kHz であり、現在のテレメーターでは直接地上へ電送することができない。従って、信号をいったんメモリーにストアした後でゆっくり出す必要がある。まず、ラングミュアプローブで得られる analog 現象を 10 $\mu$ s の sampling time で A/D 変換し、8 bit $\times$ 1024 words の shift register に記憶させ、これをゆっくりはき出して (10 s) 地上に伝送するものである。

## 2.4. 地上観測

ロケットが 150 km～200 km 高度付近にきたとき、その点を通る磁力線が地上を切る点付近で、i) 光学観測（プラズマ銃の光、OI 5577, 8446 を測定する）、ii) VLF 電波観測を観測し、親ロケットとの観測との対応を調べる。場所は、宮崎県椎葉村上椎葉ダム付近を予定している。

## 3. 結 言

以上、プラズマ銃を用いた K-9M-46 号機による電離層制御実験計画について詳述したが、現在、prototype のテストを終り、flight model のテストを行っており、9月13日～20日の間に、発射時刻 20.30～21.00 で実験が行われる予定で成果が期待される。これらの結果をもとに南極での実験計画の細かいつめをやって行きたい。

また、プラズマ銃以外にプラズマ加速器としては、MPD アークジェットも考えられ、さらに通常行われている強力な電子ビームを併用することにより、より有機的な実験を計画することができる。