

# アダマール電子エネルギー分析器による 帰還電子のエネルギー分布測定

伊 沢 正 陽\*・古 内 博\*\*・蟻 川 達 男\*\*  
金 子 修\*\*\*・佐々木 進 ・河 島 信 樹

Measurements of Spectra of Energetic  
Electrons in the F-layer by Means of  
an Hadamard Energy Spectrometer

By

Masaaki IZAWA, Hiroshi FURUUCHI, Tatsuo ARIKAWA,  
Osamu KANEKO, Susumu SASAKI and Nobuki KAWASHIMA

**Abstract:** Measurements of energy spectra of energetic electrons in the F-layer were carried out in the energy range from 0.13 keV up to 1.3 keV by means of an Hadamard energy spectrometer which was on board the sounding rocket K-9M-66, launched from Uchinoura Japan on January 21, 1979, at 1806 JST.

The experimental apparatus which consisted of an electron gun, five current probes and the Hadamard energy spectrometer with a counting system was successfully operated. However, the electron flux that passed through the entrance slit of the analyzer was strongly modulated with the spinning frequency of the rocket, and hence the reconstructed spectra obtained by means of the Hadamard transform were fairly distorted from those of expected. Therefore, a correction of the spectrum was made by taking account of the results of current probes. In addition to this correction the least square adjustment was attempted at some sacrifice of the altitude dependence.

The energy spectra thus obtained by these procedures showed satisfactory agreement with those of a point-by-point measurement made by scanning a narrow single slit.

## 1. 緒 言

ロケット搭載用の粒子計測装置は、小型軽量でしかも高い信頼性が要求される。この要請を満たす高性能な粒子計測器として、アダマール粒子分光法を用いた小型エネルギー分析器を新たに開発してきた。従来のエネルギー分析器とは異なり、アダマール粒子分析器では1個の検出器の位置を1点に固定したままで、しかも分析器の電場あるいは磁場の強さも掃引することなく、スペクトル全体が同時に測定できるという点に最大の特徴がある[1]。した

---

\* 東北大学科学計測研究所  
\*\*\* 名古屋大学プラズマ研究所

\*\* 東京農工大学工学部

がって、ロケット観測のように時間的に刻々と変化するスペクトルをできるだけ短時間のうちに観測するような場合には最適といえる。しかも、スペクトルをとるうえで不可欠な電場あるいは磁場の強さを変える必要がないため、電源関係の構造が簡単となり、それに伴う電気的なトラブルの心配が著しく軽減される。アダマール粒子分光に必要な操作は、巡回アダマール行列をもとにして作られるマスクで分析器からのビームをエンコードするだけでよい。得られたデータに、アダマール逆変換をほどこしてもとのスペクトルを再現する。アダマール行列の特徴として、逆変換に要する計算は非常に簡単であるため、この計算処理はマイクロコンピュータで十分である。このようにして得られたデータの $S/N$ 比が用いたマスクのスロット数の平方根に比例してよくなるのも、この測定法の特徴である。

アダマール粒子計測の原理は、これまでも計算機実験[2]や実験室における予備テスト([3]～[5])を通して、すでに実用化の段階にある。ロケット搭載用の粒子計測器としては、昭和52年8月にL-3H-9号機のCBEの一部としてその基本動作の確認を行った。これをもとにして前回のプロトタイプを改良し、スペクトルの微細構造まで測定するように高性能化をはかったものが、昭和54年1月21日のK-9M-66号機に搭載したアダマール電子エネルギー分析器である。今回のおもな目的は、電子銃を搭載して電子ビーム放射にともなうロケット電位の変化を、帰還電子のエネルギー分布を計測することにより調べることである。

## 2. 測定原理

### 2.1 理論の概要

理論の詳細については他に述べてあるので、ここでは簡単に概要について記す[1]。いま観測しようとするエネルギースペクトルを $N$ 個のスペクトル要素に分割し、それをベクトル $\mathbf{X}$ で表わす。アダマールマスクでエンコードされたベクトルを $\mathbf{Y}$ とすれば、変換は

$$\mathbf{Y} = -\frac{1}{2} \mathbf{H} \mathbf{X} \quad (2-1-1)$$

と簡単に表わせる。ここに $-\frac{1}{2}$ は便宜上の係数であり、 $\mathbf{H}$ はアダマール行列を表わす。 $\mathbf{H}$ を適当に選ぶと(2-1-1)式の逆変換は

$$\mathbf{X} = -\frac{2}{N+1} \mathbf{H} \mathbf{Y} \quad (2-1-2)$$

となり、もとのスペクトル $\mathbf{X}$ が容易に再現される。このように逆変換が容易に行える点がアダマール分光法の特徴である。ここに $N$ は用いたアダマールマスクのスロット数であり、 $N$ を大きくすればそれだけ分解能と $S/N$ 比はよくなることがわかっている。しかし、光学的な分光と異なり、粒子分光ではもとのビームが有限なエミッタンスを有するため、むやみに $N$ を大きくしても意味がなく、またスロットの製作精度にも限界がある。本実験ではアダマールマスクのスロット数として $N=19$ を採用した。

しかし、このままでは再現されたスペクトルは19個のスペクトル要素で与えられるので、スペクトルのピークが必ずしも再現された点に一致するとは限らず、その中間にきてピーク

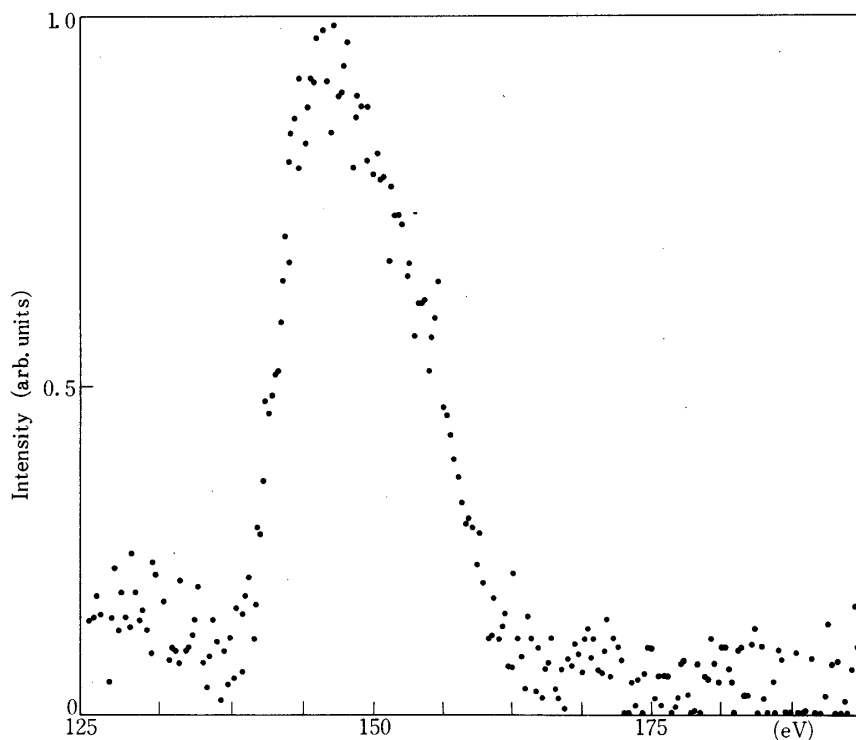


図2-1-1 準連続アダマール粒子分光の一例

フローティング電圧が150Vのときのエネルギー分布。  
アダマールマスクは19スロットで、各スロット間を20  
回サンプリングしている。測定時間は約0.5秒である。

を見落とす可能性がでてくる。そこで単位スロット幅よりも細かなステップで少しずつ位置をずらせながら上述のサンプリングを繰り返し、それぞれに対して逆変換し、それらを重ね合わせることによってスペクトルを準連続的に再現する方法をとる。この場合、スペクトルの分解能と $S/N$ 比はマスクのスロット数 $N$ で制限されるが、スペクトルは準連続的にもとまるという利点がある。前述のように変換のアルゴリズムは簡単であるから、スペクトルを準連続的に再現するのに要する全操作はマイクロコンピュータ程度で十分である。図2-1-1はスペースチェンバーと測定系との間に適当な電位差（フローティング電圧）をもうけ、測定系に入射したプラズマ電子のエネルギースペクトルを測定した結果の代表的な分布である。アダマールマスクのスロット数は19で、各スロット間を20回サンプリングして準連続的にスペクトルを再現した。データの入力からアダマール逆変換、CRTディスプレイまですべての操作はCPU 8080Aをもつマイクロコンピュータを用いてオンラインで行われた。

## 2.2 データ処理方式

アダマール粒子分光はあらかじめ数学的にプログラムされたアダマールマスクを検出器の

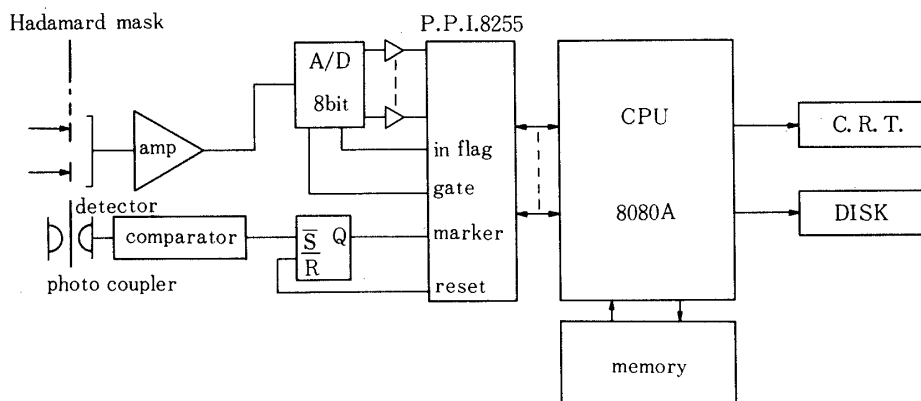


図2-2-1 データ処理のブロック図

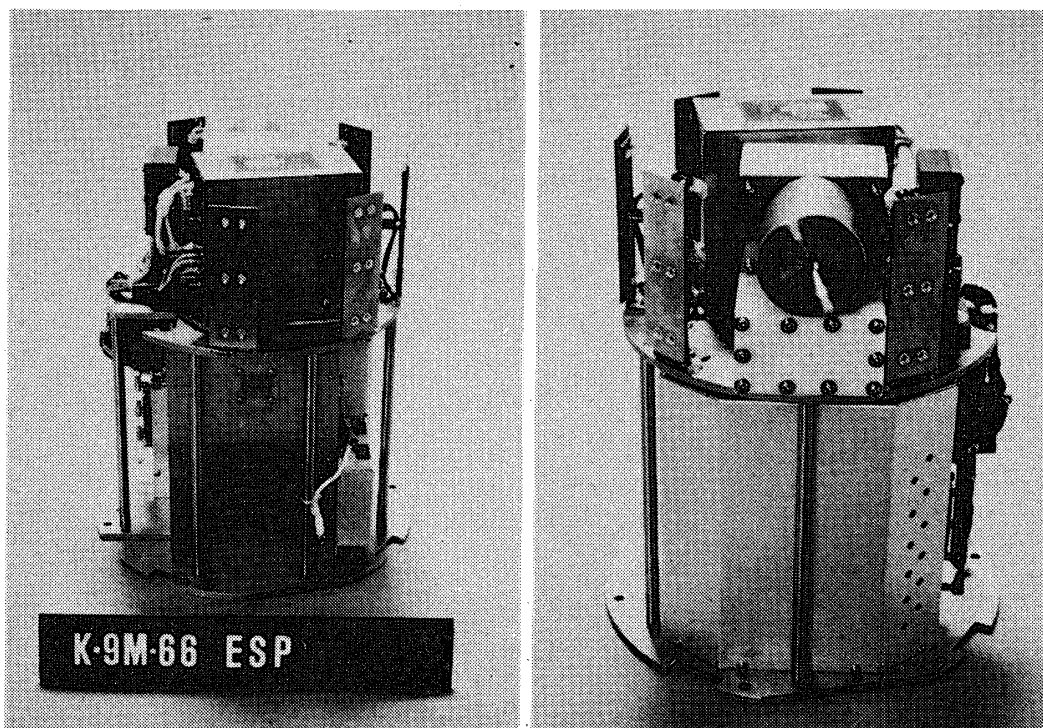
直流計測のときの代表的なデータ処理のブロック図である。ポジションを確認するためのマーカはフォトカプラーで検出される。アダマルマスクでエンコードされたビームは検出器に検出され、アナログ-デジタル変換器でデジタル信号に変換されて、マイクロコンピュータに入力される。

前に置き、粒子が「いつ」、「どこを」、「どれだけ」通過したかがわかるようにビームのエンコーディングを行い、これをアダマル逆変換してもとの分布を再現する分光法である。したがって、図2-2-1に示すようにアダマルマスクのマーカをフォトカプラーを用いて検出し、それをコンパレーターでTTLレベルの信号にしてマイクロコンピュータに入力する（「いつ」）。このマーカの順番で「どこを」通ってきたかがわかる。マイクロコンピュータはこのマーカの信号を受けとった後、ゲート信号を出力してデータを入力する（「どれだけ」）。このとき、マーカと次のマーカの時間をこのサンプリング時間で $n$ 等分して $n$ 回入力すれば、単位スロットあたり $n$ 個のデータが得られる。このようにすれば準連続的なアダマル粒子分光ができる。マーカの信号がスロット数だけ入力された後は入力を中止して、各スロットの最初のデータを取り出し、アダマル逆変換して結果をメモリーに蓄える。これを $n$ 回繰り返すすべての逆変換が終了した後に、結果をCRTにディスプレイし、ディスクに保存して後の解析に利用する。

### 3. 実験装置

実験装置は電子銃系、測定系、エレクトロニクス系からなる。電子銃系は Active 実験\*

\*) 自然界に起こる現象を待つ観測する実験 (Passive 実験) に対して、人為的に電離層の一部に擾乱を与えその反応を見ることによって電離層を調べる実験を Active 実験という。擾乱源としてはビームのほかに波動、プラズマなどがある [6]。



(a)

(b)

### 図3-0-1 電子エネルギー観測システム

φ 230 mm × 高さ 268 mm の大きさの中に、高さ 162 mm のアダマル電子エネルギー分析器システム、高さ 95 mm の電子銃システムがある。(a) はアダマル電子エネルギー分析器の正面を、(b) は電子銃の正面をそれぞれ示している。

電子銃システムの周囲についている基板 (30 mm × 90 mm) がカレントプローブである。

の擾乱源の一つで、電離層に擾乱を与えるために電子ビームを放射する装置である。本実験に用いた電子銃は最大 1 kV, 1 mA の電子ビームを放射することができる。測定系では電離層内の電子と帰還電子のエネルギー分布を、従来の測定法よりも明るいアダマル粒子分光法によるアダマル電子エネルギー分析器で測定する。また、帰還電子の強度分布をカレントプローブで測定する。エレクトロニクス系では、電子ビームのエネルギーや分析器のエネルギーレンジを制御したり、アダマル電子エネルギー分析器によって測定されたデータをパルス計数して、テレメータで正確にかつ迅速に地上に送信することなどを行う。図3-0-1 a, b に K-9M-66 号機に搭載された電子エネルギー観測システムの写真を示す。

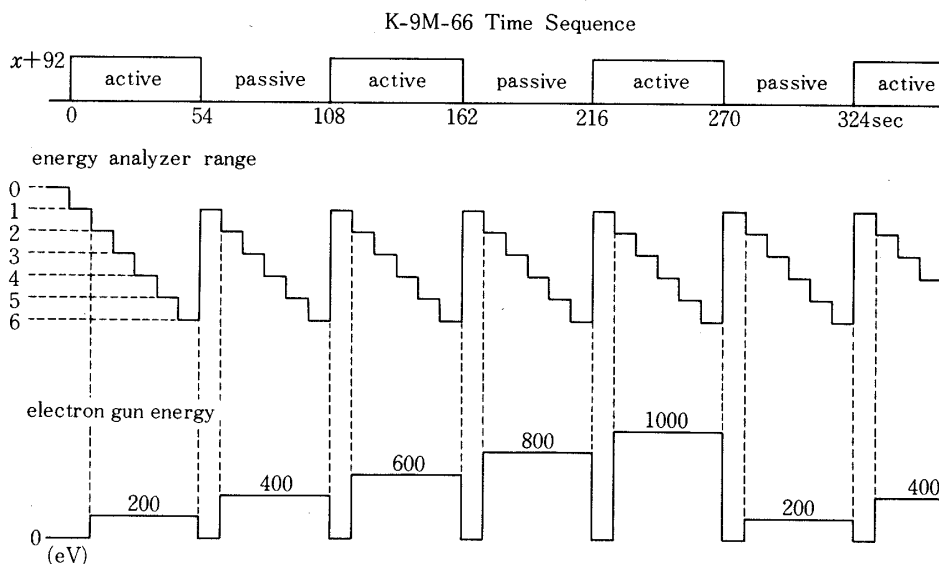


図 3-1-1 K-9M-66 タイムシーケンス

打ち上げ後 92 秒から 54 秒ごとに、電子ビームが放射される Active 実験と放射されない Passive 実験が交互に行われる。エネルギー分析器のエネルギーレンジと、電子ビームのエネルギーのタイムシーケンスは図に示すように同期している。

### 3.1 電子銃系

電子銃はピアス型軸対称平行ビーム電子銃で、本質的に二極管構成である。この型の電子銃は空間電荷制限状態で動作しているときは電流・電圧間に  $V^{3/2}$  乗則がなりたつので、パービアンズ\*が大きくなるように設計すれば所要のビーム電流を得るための電圧を低くすることができるという特徴をもっている。カソードとしてはタングステンをを用い、直熱型でカソードヒーター電力は 2.5 V, 1.5 W である。電子銃のパービアンズは実験値で 0.1 マイクロパービアンズである。図 3-1-1 に示すように 200 eV から 1000 eV の間を 200 eV ごとに 5 段階にわけて、電子ビームをロケット軸に対して直角に放射する。電流値は最大 1 mA に制御した。

\* パービアンズ：電子銃でとりだすことのできるビーム電流を  $I$  (A), 加速電圧を  $V_a$  (V) とするとき

$$P = I / V_a^{\frac{3}{2}} \quad [A / V^{\frac{3}{2}}]$$

をパービアンズという。

## 3.2 測定系

### 3.2.1 アダマール電子エネルギー分析器

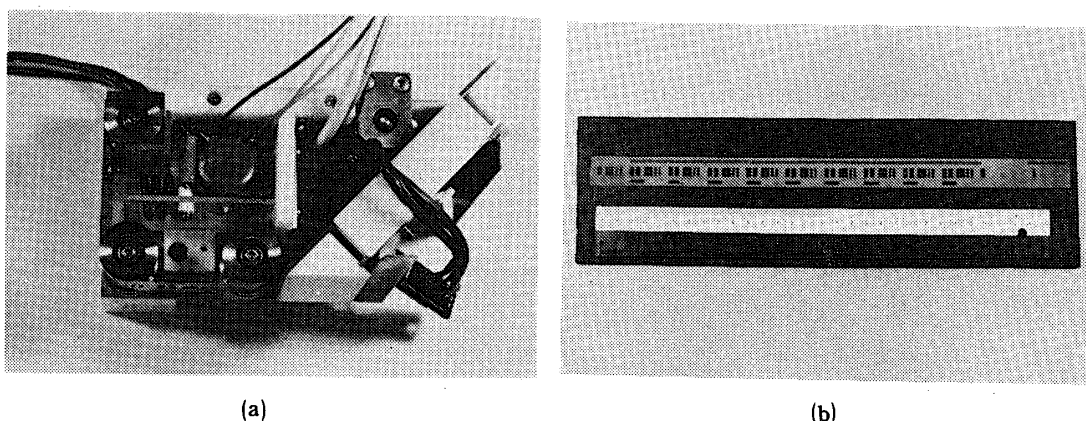
写真3-2-1aに示すようにアダマール電子エネルギー分析器は平行平板型静電エネルギー分析器、アダマールマスクとその駆動部、検出器からなる。

#### (1) 静電エネルギー分析器

平行平板型のエネルギー分析器は電子ビームが分析器に45度で入射したあと、エネルギーの違いにより電子の軌跡が異なることを利用している。この平行平板型の静電エネルギー分析器は小型化が可能でしかも分散型の分析器であるからロケット実験でのアダマール粒子光に最適といえる。本実験で用いた分析器の分解能は $1/10$  (実験値)で、Geometrical Factorは $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ ster}$ である。エネルギー分布の測定は下記のようにオーバーラップさせた6段階のエネルギーレンジに分割して行う(図3-1-1参照)。

I : 130 ~ 256 (eV)

II : 185 ~ 364



(a)

(b)

図3-2-1a アダマール電子エネルギー分析器

大きさは $160 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ で、平行平板型静電エネルギー分析器、アダマールマスクとその駆動部、検出器からなる。

アダマールマスクの回転速度は $47 \text{ mm/秒}$ である。

図3-2-1b アダマールマスク

19スロットのアダマールパターンは10周期あり、単位スロット幅は $1.4 \text{ mm}$ である。比較のために単スリット(幅 $1.4 \text{ mm}$ )も刻まれている(右端)。

アダマールパターンの上にある小さなスリットはポジションを確認するためのマーカーで、下にあるスリットはデータ処理の際に使うモードマーカーである。これらは厚さ $50 \mu\text{m}$ のステンレス板(SUS27)にフォトリソで刻まれたものである。

- Ⅲ：260～511
- Ⅳ：371～729
- Ⅴ：481～944
- Ⅵ：702～1379

### (2) アダマールマスクとその駆動部

写真3-2-1bに本実験で使用したアダマールマスクを示す。このアダマールマスクは厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス板(SUS27)にフォトエッチングでスロットを刻んだものである。1周期のスロット数は19で10周期あり、比較のために単スリットも刻まれている。このアダマールマスクの両端を連結してエンドレスとし四つのローラーで回転させる。駆動用のモーターはロケット用CL-2A-30R(オリンパス社製)を用いた。アダマールマスクの回転速度は $47\text{mm}/\text{秒}$ で、1つのエネルギーレンジに要する時間は約0.5秒である。

### (3) 検出器

エネルギー分析された電子はアダマールマスクでエンコードされた後、チャンネルトロンに検出され、パルス計数される。最大計数率は $10^7$ 電子/秒である。チャンネルトロンの前には二次電子追い返し用のタングステンメッシュ(スクリーン100)があり、測定期間中は $-55\text{V}$ に保たれている。チャンネルトロンはCEM4039CB1(Galileo Electro-Optics Corp.)を用いた。このチャンネルトロンのコーンの大きさは $10\text{mm}\times 25\text{mm}$ の角型である。

#### 3.2.2 カレントプローブによる帰還電流の強度分布測定

図4-1-1bに示すようにカレントプローブ( $30\text{mm}\times 90\text{mm}$ の大きさの金メッキされた基板)を5か所に設置し、 $-30$ 度から $+195$ 度の範囲に帰還した電流値を測定する。測定時間は1つのカレントプローブにつき $10\text{m sec}$ で、最大検出電流は約 $0.1\text{mA}$ である。測定値は交互に10倍と100倍にされFMテレメータで地上に送信する。

#### 3.3 エレクトロニクス系

前述したように、エネルギー分析された電子はアダマールマスクでエンコードされてチャンネルトロンに検出される。計数部はこれをパルス計数してシフトレジスターに送る。そのほかに電子ビームのエネルギー、エネルギー分析器のエネルギーレンジ、Active実験/Passive実験、マーカーなどをモニターしてシフトレジスターに送り、これらを30ビットにまとめてPCM(Pulse Code Modulation)方式で地上に送信する。制御部ではエネルギー分析器のエネルギーレンジの切換を図3-1-1に示すタイムシーケンスに従って行う。また、打ち上げ後92秒以降54秒ごとにActive実験/Passive実験の切換を行う。

## 4. ロケット実験および検討

K-9M-66号機は昭和54年1月21日18時06分に鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた。発射角は $76.5$ 度で打ち上げ後290秒には最高高度 $336\text{km}$ に達し、552秒後には内之浦の南東 $310\text{km}$ の海上に落下した。

アダマール電子エネルギー分析器と電子銃は打ち上げ後92秒から作動し、電離層の電子エネルギー分布および帰還電子のエネルギー分布測定とカレントプローブによる帰還電流の強度分布測定を行った。図4-0-1にK-9M-66号機の軌道とプリセッションを示す。



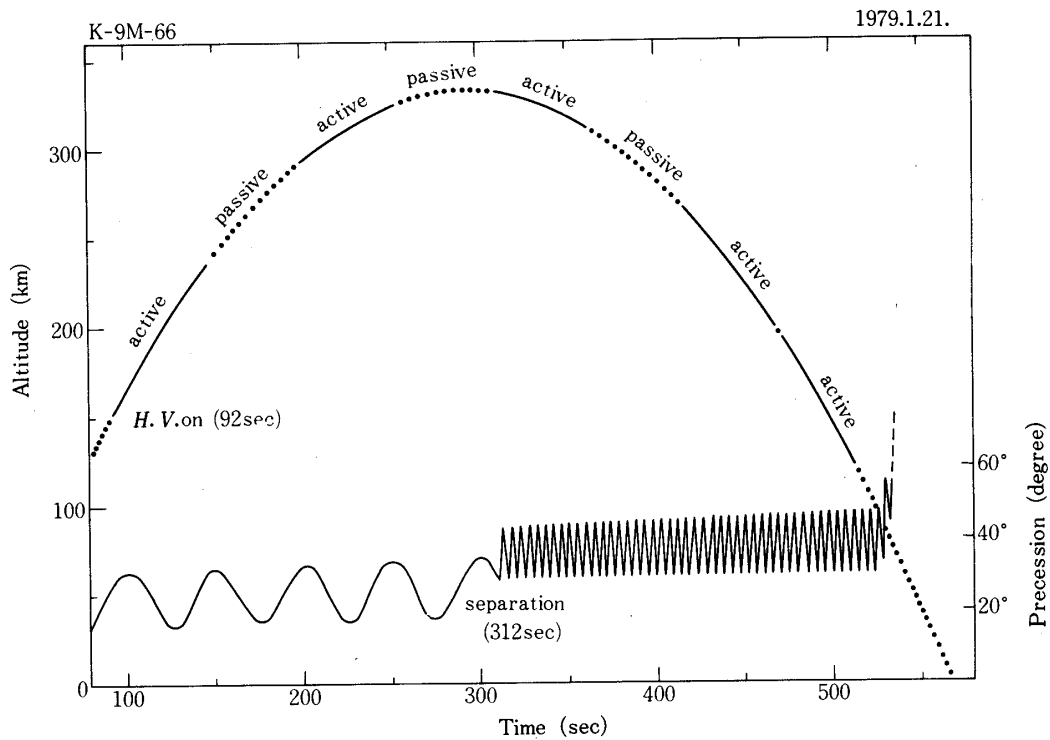


図4-0-1 K-9M-66号機の軌道とプリセッション

打ち上げ後290秒には最高高度336kmに達し、552秒後には内之浦の南東310kmの海上に落下した。打ち上げ後92秒から54秒ごとにActive実験、Passive実験を交互にくりかえして観測が行われた。312秒後にはMIC部と他の観測器との切り離しが行われ、プリセッションが大きく変化した。

また図4-0-2に電子銃の電圧-電流特性を示す。地上実験の観測値は400 eV以下において0.1マイクロパービアンスの $V^{3/2}$ 乗則に従っているのに対し、ロケット実験の場合はそれに比べて全体的に放出電流が増えてパービアンズが増加したことを示している。

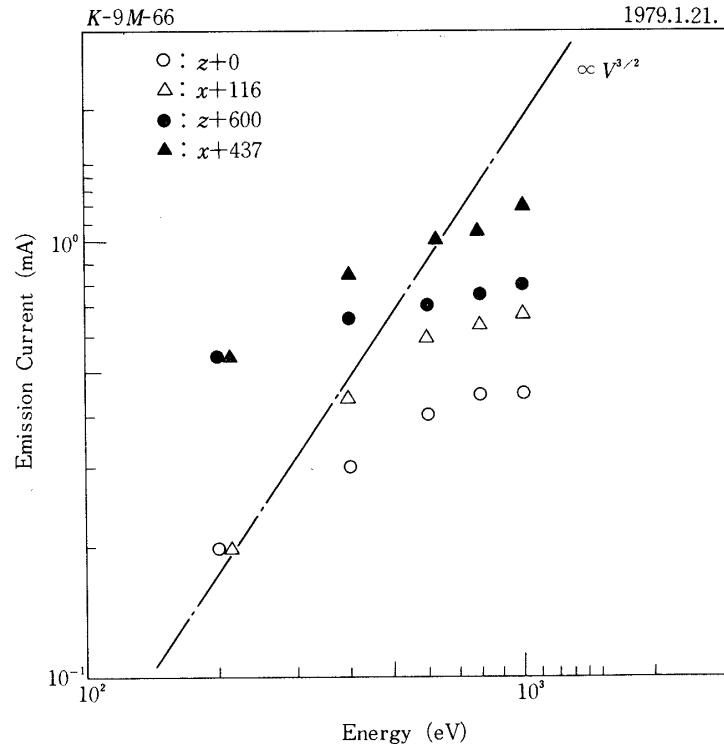


図4-0-2 電子銃の電圧-電流特性

●印はH.V. on から24秒後のとき、▲印は345秒後のときの電圧-電流特性で、○印と△印は比較のために地上実験のときの特性を示した。

一点鎖線は0.1マイクロパービアンスのときの理論値である。

#### 4.1 カレントプローブによる帰還電流の強度分布測定

図4-1-1a, bにそれぞれ電子エネルギー観測システム図, カレントプローブの配置を示す。このようにカレントプローブを使って, スピンフェイズ $\theta$ とリターン角 $\phi$ (電子銃の位置と帰還した電子の位置との角度)との関係を調べることにより, 帰還電流に対するスピンフェイズの影響がわかる。図4-1-2に代表的な分布を示す。これは高度による影響は少ないとして, 電子ビームのエネルギーが400 eVで下降時のカレントプローブの出力をまとめたものである。この図からスピンフェイズ $\theta$ が $\pm 90$ 度で, リターン角 $\phi$ が $+180$ 度

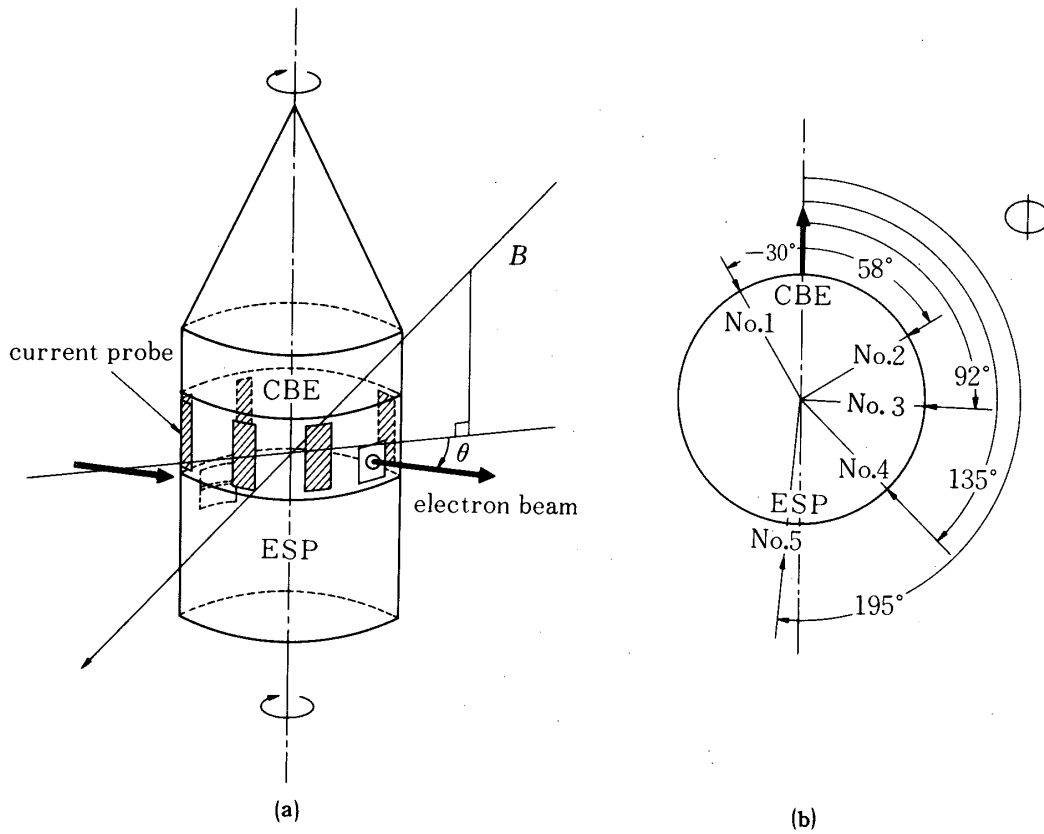


図4-1-1 a. b

(a) 電子エネルギーの観測システム

図に示すCBEの電子銃から電子ビームを放射し、ESPのアダマル電子エネルギー分析器で、電子のエネルギーを観測する。さらにカレントプローブで帰還電流の強度分布を観測する。

(b) カレントプローブの配置図

30mm×90mmの大きさの金メッキされた基板(カレントプローブ)がNo.1からNo.5の5か所に設置されている。ここでCBEは電子銃の位置を、ESPはアダマル電子エネルギー分析器の位置を示す。

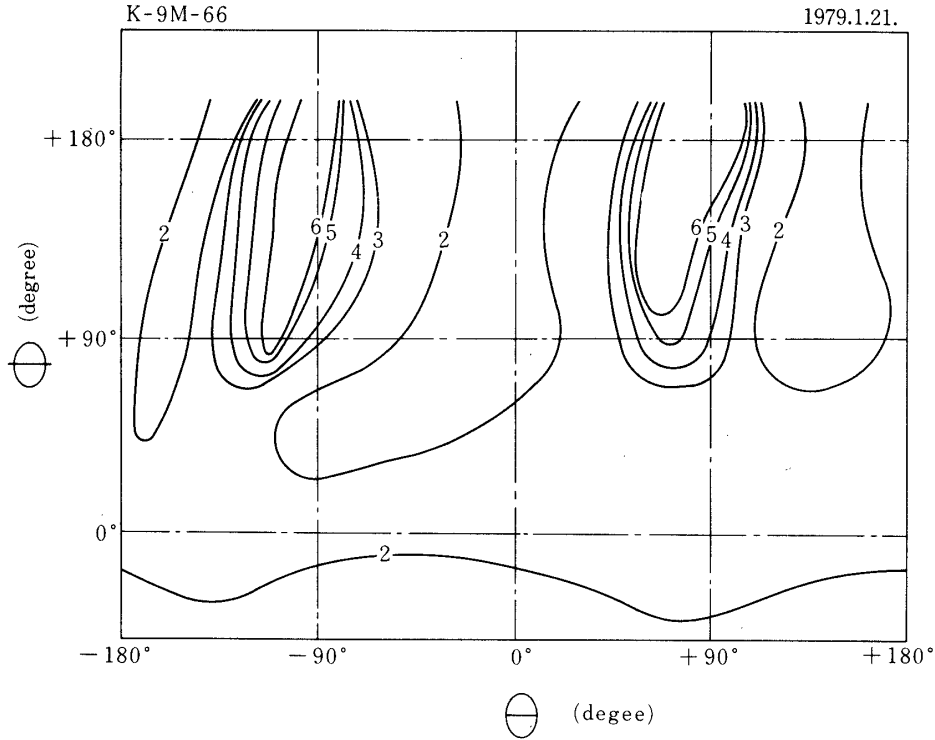


図4-1-2 カレントプローブによる帰還電流の強度分布

スピンフェイズ $\theta$ は図4-2-1aに示すように定義する。リターン角 $\phi$ は電子銃の位置と帰還した電子との角度を表わす。

1から6段階までの単位面積あたりの帰還電流値を以下に示す

1 : 0.08 $\mu A$ 以下	4 : 0.23 ~ 0.30
2 : 0.9 ~ 0.14	5 : 0.31 ~ 0.37
3 : 0.15 ~ 0.22	6 : 0.38 以上

付近は他のところに比べて電流値が極めて大きく、帰還電流がここに集中していることがわかる。この傾向は電子ビームのエネルギーが他の場合(200 eV, 600 eV, 800 eV, 1000 eV)にも共通に見られ、同じような分布が得られた。これは電子銃からある立体角をもって放射された電子ビームは磁場に対して垂直な場合に限り、ラーマー半径の円運動をして、リターン角 $\phi$ が+180度付近に帰還するためと考えられる。得られた最大の電流値は約4  $\mu A$ であった。

#### 4.2 帰還電子のエネルギー分布測定

図4-0-1に示すように、第4番目のActive実験で、Active実験とPassive実験の切り

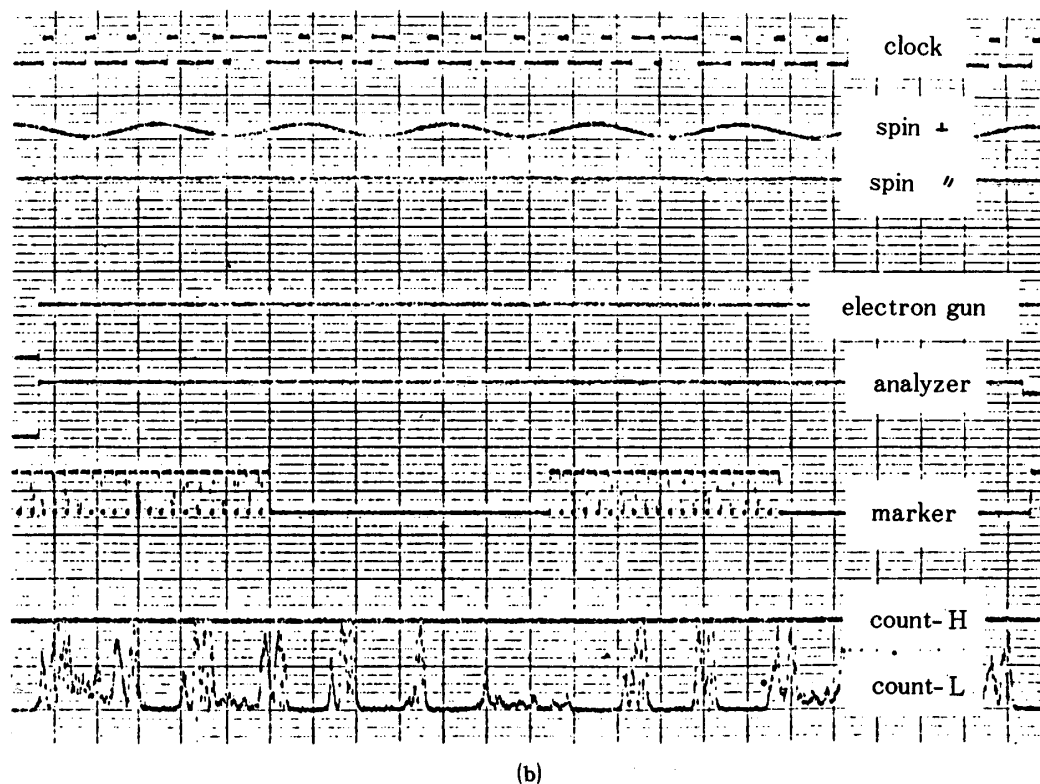
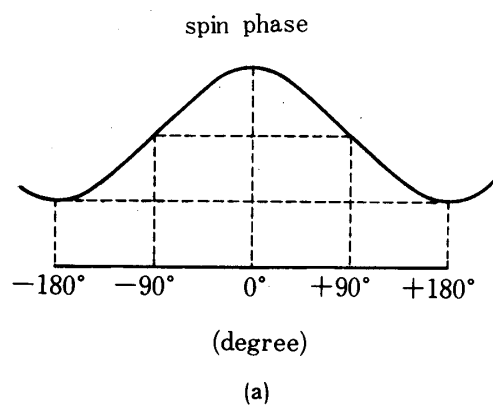


図4-2-1 観測データの一部

図(b)は打ち上げ後220～240秒の間のデータで、電子エネルギーは1000 eV、分析器のエネルギーレンジは6である。観測されたデータは図(a)で定義されたスピニフェイズ  $\pm 90$  度のところに変調されている。

換えができなかったことだけを除けば、アダマール電子エネルギー分析器による観測はすべて予定通り行われた。電子銃は図4-0-2に示す電圧-電流特性をもっており、それより電子ビームを電離層に放射した。K-9M-66号機では、電子ビームはロケット軸に対して直角に放射された。

アダマール電子エネルギー分析器は電子銃に対して180度の方向にある(図4-1-1b参照)。そのため、この分析器に入射する帰還電子はスピニフェイズ $\theta$ の影響を大きく受けた。図4-2-1bに示す $SPIN_{\perp}$ は図4-1-1aに示すスピニフェイズ $\theta$ を表わす。 $SPIN_{\perp}$ の曲線に角度を図4-2-1aに示すように定義すると、図4-2-1bのカウントは $\pm 90$ 度のところに集中しているのがわかる。同じ図の右の19個のマーカーは単スリットによるデータであることを示す。この単スリットのデータもスピニフェイズ $\theta$ が $\pm 90$ 度のところに集中している。

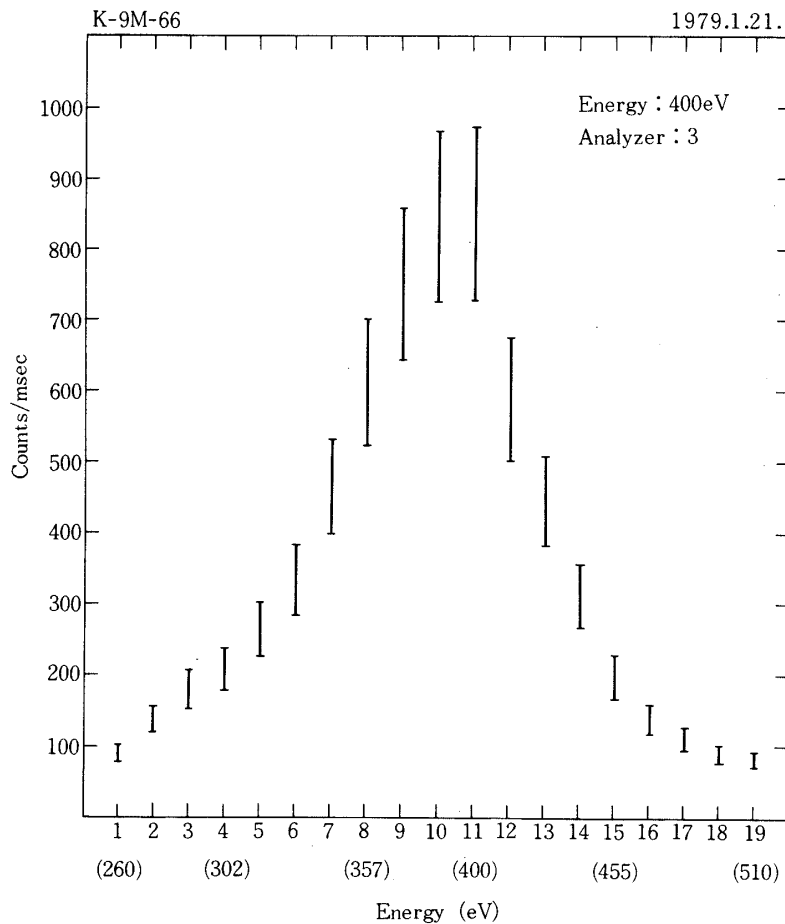


図4-2-2 帰還電子エネルギー分布の代表例

電子ビームのエネルギーが400 eVで分析器のエネルギーレンジは3である。ピークは400 eV付近にある。

これはカレントプローブによる帰還電流の分布がスピンフェイズ $\theta$ が $\pm 90$ 度、リターン角 $\phi$ が $+180$ 度のところに集中していることと一致する(図4-1-2参照)。

このスピンフェイズの影響で計画していた準連続的なアダマール粒子分光を行うことはできなかった。しかし、これまでの電子ビーム放射実験の結果([6])からロケットポテンシャルの上昇は放射するビーム電流値に大きく左右されることが確認されている。また、ビーム電流が今回の実験のように $1\text{ mA}$ 程度のときは、ロケットポテンシャルの上昇は $1\text{ V}$ 以下であることがラングミュアプローブの特性からわかっている。

したがって、帰還電子のエネルギー分布には高度による影響が少ないと考えて、次のような方法でエネルギー分布をもとめた。すなわち、電子銃のエネルギーとエネルギー分析器のエネルギーレンジが同じデータから、各チャンネルに相当するカウント数を最小自乗法で求めて観測ベクトルとし、それにアダマール逆変換を行ってエネルギー分布を求めた。その結果を図4-2-2に示す。このエネルギー分布ではあたかも放射されたビームのエネルギーよりも大きいエネルギーをもつ電子が観測されたように見える。しかし、ロケットポテンシャルの上昇はせいぜい $1\text{ V}$ 以下であるから加速されたとも考えられない。この原因は最小自乗法でエネルギー分布をもとめたことによって分解能が悪くなったと考えられる。

## 5. 結 論

アダマール電子エネルギー分析器により観測された帰還電子のエネルギー分布の中には、電子銃により打ち出されたエネルギーよりも大きいエネルギーをもつものはなかった。また、カレントプローブの観測により帰還電流の強度分布はスピンフェイズに大きく影響されることがわかった。これからの課題は、このスピンフェイズの影響をできるだけ少なくするために今回よりさらに高速化した測定を行うことである。

## 謝 辞

ロケット実験の際の組込み、発射、データ取得に際して絶大な協力をいただいたロケット実験班の方々に厚く感謝いたします。

1979年8月20日

## 参 考 文 献

- [1] 蟻川達男: 分光研究 26 (1977) 3.
- [2] T. Arikawa and S. Kaneko: Mass Spectroscopy, 26 (1978) 313.
- [3] T. Arikawa, M. Izawa and S. Kaneko; Xth ICPEAC Abstracts of Papers, 2 (1977) 1290.
- [4] T. Arikawa, M. Izawa and S. Kaneko; Prog. Rep. Atomic Collisions Res. Jpn. 4 (1978) 123.
- [5] T. Arikawa; Jpn. J. Appl. Phys. 18 (1979) 211.
- [6] O. Kaneko; Active Experiment in Space by an Electron Gun (学位論文).