

K-9M-61号機による電子束の観測*

松本治弥**・賀谷信幸**・藤沢好孝**

Rocket Observation of Electron Fluxes by K-9M-61

By

Haruya MATSUMOTO, Nobuyuki KAYA and Yoshitaka FUJISAWA

Abstract: Electron fluxes having energy between 0.1 and 3 keV during a quiet period at midlatitude and energetic electrons triggered by the controlled electron beam emissions from a rocket were measured by a pair of electron spectrometers aboard the sounding rocket, K-9M-61, launched from Uchinoura, Japan, on January 27, 1978, 2000 JST. The experiment was successful. Natural electron fluxes were not at all detected. It means that the electron flux is below 10^2 particles/cm² sec str keV for the 1 keV electrons. Energetic electrons above the electron beam energy were not detected and the received flux intensity was affected by the relative direction of the collimator axis and the geomagnetic field line.

概 要

1978年1月27日20時に打ち上げられた観測ロケット K-9M-61号機に搭載された電子スペクトロメータは、冬の夜間の降下電子束の観測と、相乗り観測器の放出する電子ビームに伴うロケットへの帰還電流を測定した。地磁気は静穏で ($K_p=2$)、降下電子束は100 eV~3keVを観測し、1 count も計数されなかった。これは1 keV 電子の flux で、 10^2 particles/cm² sec str keV以下であることを示している。帰還電流測定において、電子銃の加速電圧以上のエネルギーで、電子の増加は測定されず、電子銃の同方向、反対方向の測定で pitch 角 90° の依存性が明らかとなった。

1. 緒 言

電子スペクトロメータを K-9M 型観測ロケットに搭載して観測を行った。この観測は二つの目的をもって行われた。第1の目的は中緯度地方に降下する 100 eV~数 keV の電子束の観測であり (Passive 実験と称す)、第2の目的は相乗り観測器からの電子ビーム放出に伴うロケットへの帰還電流の測定である (Active 実験と称す)。

高緯度地方に降下する低エネルギー電子束は、オーロラや電離層の電離過程に重要な役割を

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 神戸大工学部

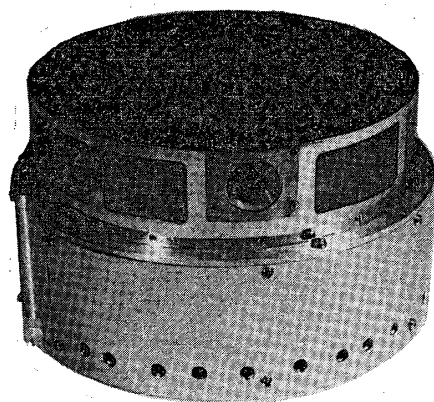
すると言われている。それらは中緯度においても考慮されねばならない。中緯度地方の降下電子束の観測は、過去数回試みられている。内之浦における観測では Hayakawa et al. [1], [2] は21時 JST に Proportional Counter で7 keV 電子を観測し、高度200 km 以上で $300 \text{ electrons/cm}^2 \text{ sec str keV}$ を得た。久保ら [3] は、K-9M-45号機で11時 JST に高度130~360 km で100 eV~10 keV の電子を観測し、地磁気が少し乱れた状態の下で、約 $1200 \text{ electrons/cm}^2 \text{ sec str}$ を得た。K-9M-48号機 [4] では、20時32分 JST に $1.4\sim 2.1 \times 10^3 \text{ electrons/cm}^2 \text{ sec str keV}$ と、かなり多い flux を観測している。これは、前日の地磁気擾乱によるものと報告している。この様に観測時刻、地磁気等の要因によりかなり値が異なる。従って、その値を種々の条件下で確立する事が重要である。

電子ビーム放出実験において、ロケットへの帰還電流測定は放出した一次電子のふるまい、周囲のプラズマからの捕集電流の実態、電子ビームにより引き起こされる Plasma Heating や非線形波動現象の解明への基礎的測定である。K-10-12号機の実験では、電子放出加速エネルギー以上の電子の増加が測定されている [5]。今回の実験は K-10-12号機の実験に比し、加速電圧 (最大2 kV)、Emission (最大50 mA) とも大きい実験で、種々の現象が現われることが期待された。

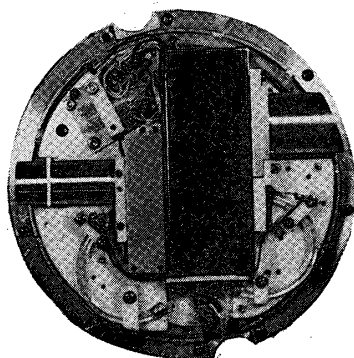
2. 観測器

2.1. エネルギー分析器

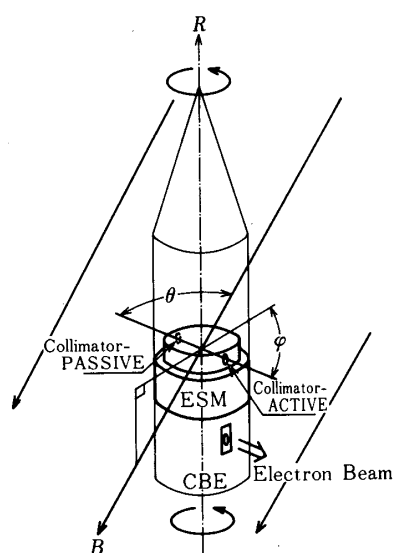
観測器は二組の検出部 (円筒型コリメータ、エネルギー分析器、二次電子増倍管) と電子回路部より構成される。観測器全体の写真を第1図に示す。上部のメッシュで囲まれた部分が検出部で、下部が電子回路部である。検出部内部を上方から見た写真を第2図に示す。二組のエネルギー分析器はそれぞれ観測目的の異なるもので、一組 (大型) は夜間の降下電子束観測用に Geometrical factor をできるだけ大きく ($3.67 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$)、他 (小型) は電子ビーム放出実験用に Geometrical factor を小さく ($1.59 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ str}$) 設計した。これは予想電子束が数桁異なるためである。電子銃との位置関係は、Active 実験用アナライザと同一方向で、母線上27 cm 離して設置した (第3図参照)。



第1図 観測器全体の写真：200 mmφ×120 mm



第2図 検出器内部の写真：小型検出器は電子ビーム放出実験用検出器，大型検出器は降下電子観測用検出器



第3図 ロケットでの電子銃と検出器の位置関係：スピニフェイズ φ ，ピッチ角 θ

分析器としては電磁石を用いた 180° 偏向磁界型アナライザを採用した。 180° 偏向磁界型アナライザの Transmission 特性は、ラーマ半径のみにより決まり良い収斂を示す。エネルギー分解能は入射粒子が平行ビームの場合

$$\Delta E/E \approx r/R \quad (1)$$

ただし、 r ：アナライザ出口の直径

R ：アナライザ入口と出口の距離

で近似することができる。しかしながら、Passive 実験用アナライザの場合、Geometrical

factor を大きくとるため、コリメータの開き角を 36° と広くしたので (1) 式の近似式は用いる事ができない。また Geometrical factor も厳密に考慮しなければならない。

得られるカウント数 C [Counts/sec] は一般的に次式で表わされる。

$$C = \epsilon F \int dS d\Omega dE = \epsilon F \cdot G \cdot \Delta E \quad (2)$$

ただし G : Geometrical factor [$\text{cm}^2 \text{ str}$]

ϵ : 二次電子増倍管の計数効率

F : 電子フラックス [$\text{particle}/\text{cm}^2 \text{ sec str eV}$]

S : 入射口の面積 [cm^2]

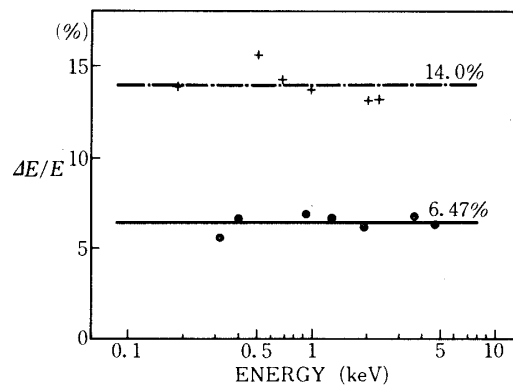
Ω : 入射立体角 [str]

E : 入射粒子エネルギー [eV]

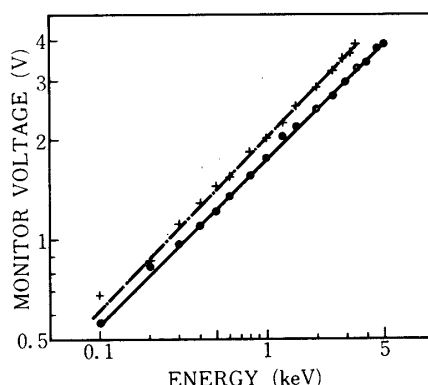
粒子軌道から入射エネルギー、入射方向、入射位置の拘束条件が求まり、拘束条件より (2) 式の積分範囲が決まる。(2) 式を計算機により有効数字 3 ケタまで求めた。この計算により $\Delta E/E$ も求めることができる。

エネルギー掃引は電磁石電流を変化させることにより可能であり、磁極間の磁界分布はかなり均一なものが得られた。掃引方式は Passive 実験では階段状に 1 step/sec の速さで、190, 260, 510, 700, 1020, 2060, 2730 eV の 7 種のエネルギーを測定し、1 秒間電磁石電流を止め、Background Noise を測定する。Active 実験では三角状に 100 eV ~ 5 keV までを電子銃に同期し、0.5 Hz で掃引する。

実験室での校正は、二枚のグリッドで加速した電子銃を用いた。第 4 図にエネルギー分解能の実験値を示す。理論値は、Active 用分析器で 9.35%、Passive 用分析器で 21.3% で実験値より大きい結果を示している。これは、理論計算において磁場の fringing field や入口、出口の厚みによるコリメーション等を考慮しなかったためと思われる。Data 処理としては実験値を用いる。Geometrical factor の絶対値は実験的に求めることが困難であるため計算値を使用した。第 5 図に測定エネルギーと観測器の測定エネルギー・モニタ出力の実験値を示す。



第 4 図 エネルギー分解能の実験値：十字が Passive 実験用検出器，黒丸が Active 実験用検出器の分解能



第5図 測定エネルギーと観測器の測定エネルギー・モニタ出力の実験値：十字がPassive 実験用検出器，黒丸が Active 実験用検出器の測定エネルギー

黒丸が Active 用分析器，十字が Passive 用分析器を示す。それぞれ実験式

$$E = 275V^{1.94} \quad (\text{Passive}) \quad (3)$$

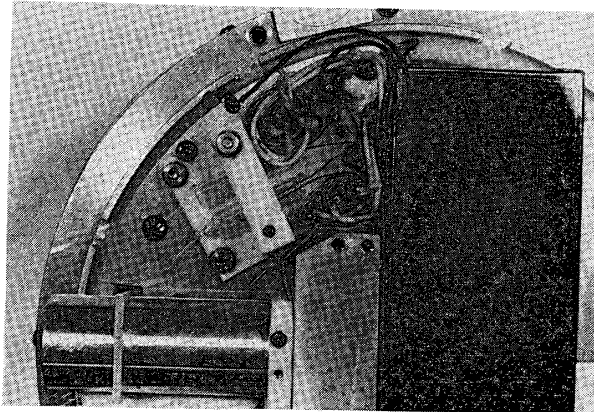
$$E = 328V^2 \quad (\text{Active}) \quad (4)$$

を得た。なお，電磁石の磁界の漏れをホール素子磁力計で測定した結果，観測器周囲で地磁気以下であることを確認した。

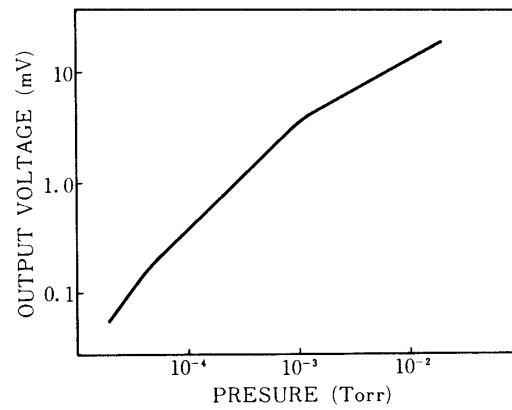
2.2. 放電防止対策

二次電子増倍管に印加する3kVの放電を防止するために，検出部の周囲をメッシュで囲い開放型とし，検出部内部の排気効率の向上をはかった。この開放型は真空封じに比して，はるかに小型で取り扱いが簡易になる。周囲のプラズマの侵入を防ぐためと，二次電子増倍管に印加する3kVの電界漏れを防ぐためメッシュを二重とし外側のメッシュにはロケットBody電位，内側には-20Vを印加した。

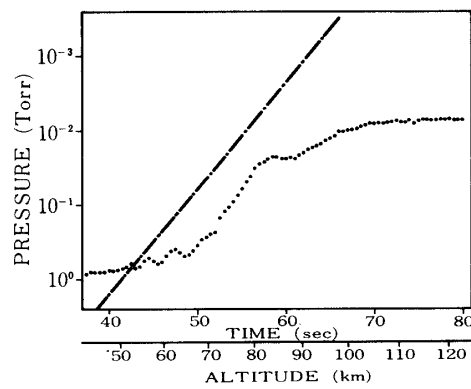
開放型による排気効率は，計算および実験室におけるシミュレーションによりロケット上昇中に十分な排気速度で排気できることを確認した。実験方法は，検出部内部と外部にシュルツ型真空計（応答速度1msec以下）を配し，ロケット上昇時の背圧変化（K-9M型ロケットで時定数4secの背圧変化）を真空槽で実現し，内外部の真空計により真空度の変化を測定するもので，実験の結果両真空計に应答の差が現われない事を確認した。しかしながら，周辺機器等からのOutgasなど不確定要素があるため，万全をはかって簡易な薄膜型サーミスタ真空計を搭載し，排気状態をモニタした。サーミスタ真空計の写真を第6図に示す。一本が検出用サーミスタで，他の一本は真空封じされた温度補償用のサーミスタである。薄膜型サーミスタは熱容量が小さいため応答速度が速く，時定数は1.2~1.4secでロケット上昇時の排気状態を十分モニタできると判断した。感度は第7図に示す。図により本真空計は $8 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4}$ Torrの範囲で十分な感度があることを示し，放電の危険性のある $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Torrを十分カバーしていることが明らかである。実際の飛翔時の測定結果は第8図に示すように， 10^{-2} Torrで飽和しているが，これはブリッジ回路の零点のずれによるもので，実際には高圧放電はおこらず， 10^{-5} Torr以下に排気していたものと思われる。この点



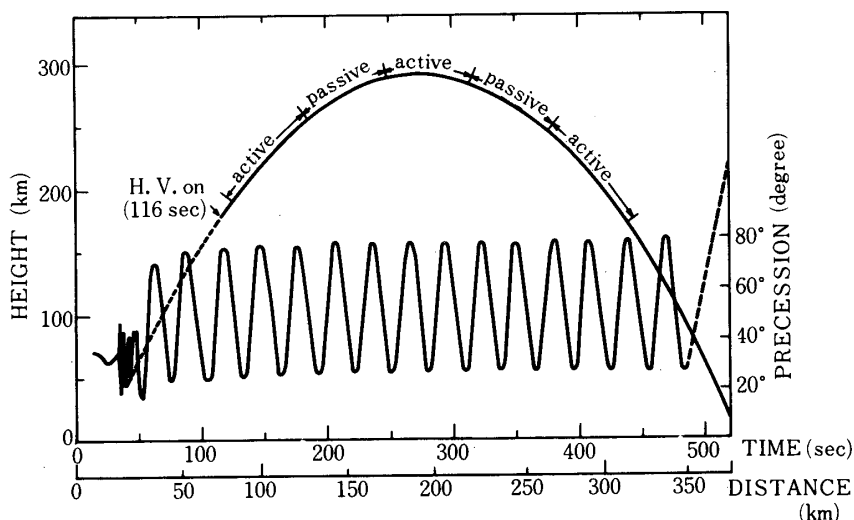
第6図 薄膜型サーミスタ真空計：一本が検出用サーミスタ，
他の一本が真空封じされた温度補償用サーミスタ



第7図 薄膜型サーミスタの感度：感度 $8 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4}$ Torr
応答速度 1.2~1.4 sec



第8図 ロケット上昇時のサーミスタ真空計のデータ：
一点鎖線が予想データ



第9図 ロケット軌道とプリセッション：打ち上げ116秒後高圧印加，Active と Passive を交互に63秒間実験を行った。

を改良すれば，今後この真空計は十分搭載用として用いる事ができると考えられる。

3. 観測結果と検討

K-9M-61号機は内之浦から1978年1月27日20時JSTに打ち上げられた。ロケットの軌道，軌道上での実験位置，プリセッションの状態を第9図に示す。ロケットのプリセッションは非常に大きく，広範囲のpitch角分布を測定することができた。装置は順調に作動し，打ち上げ116秒後（高度180 km）に高圧を印加し，123秒からActive実験が開始された。以後63秒ごとにActive, Passive実験を交互に行った。Apogeeは291 km（275 sec）であった。

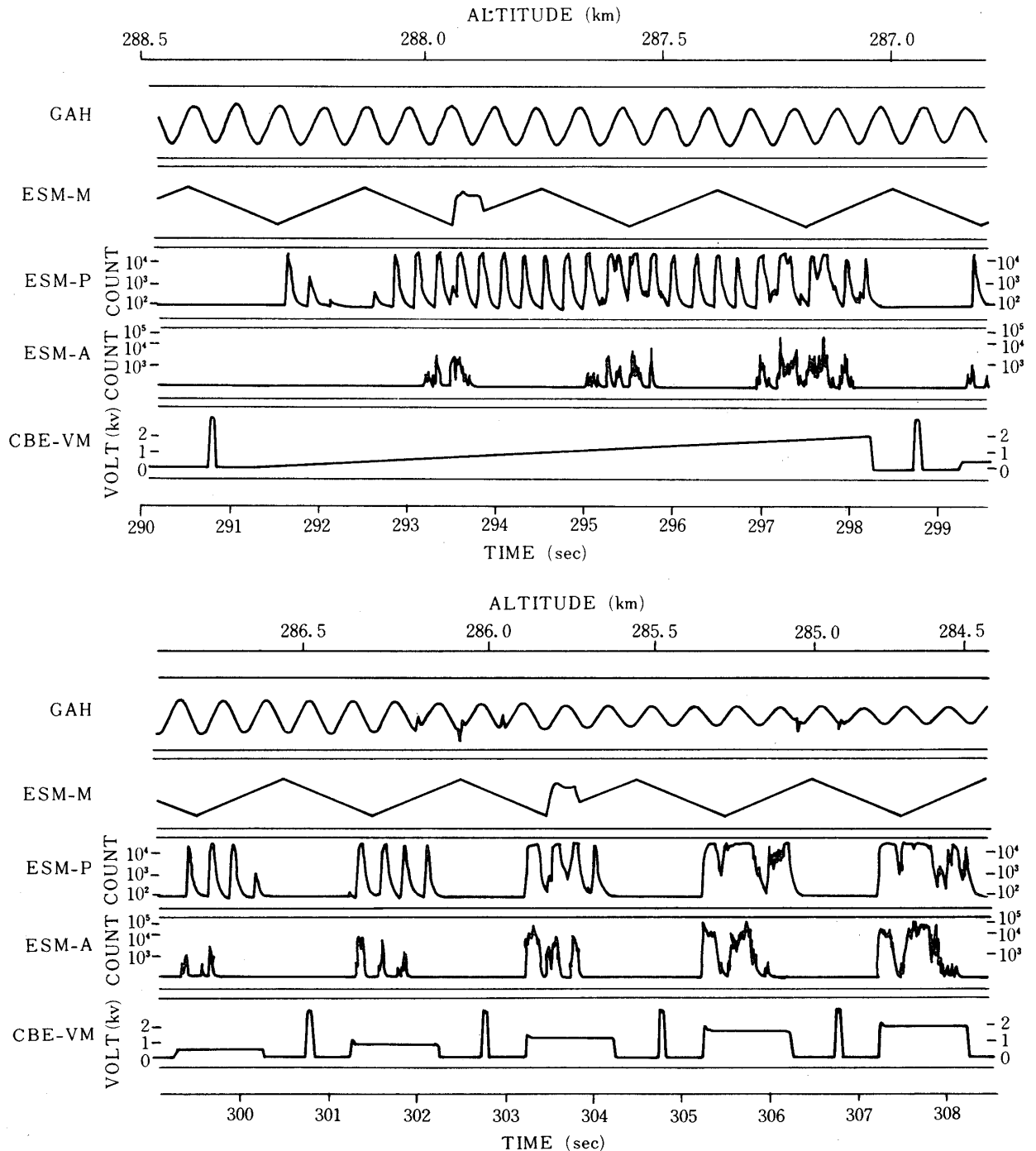
3.1. 中緯度地方の夜間の降下電子束の観測結果

降下電子束の観測は，ロケット打ち上げ後186～241秒と312～367秒間，計110秒間，高度で260～290 kmで観測し1カウントも計数されなかった。1エネルギー・レンジは16秒観測されたので，1カウントは1 keVの電子束で 10^2 particle/cm² sec str keVに相当する。これが電子束の上限値となる。この時 K_p Indexは2で静穏であり，放射線帯からの降下電子がほとんど無い事が明らかである。この結果は他の観測に比し最も少ない値を示している。

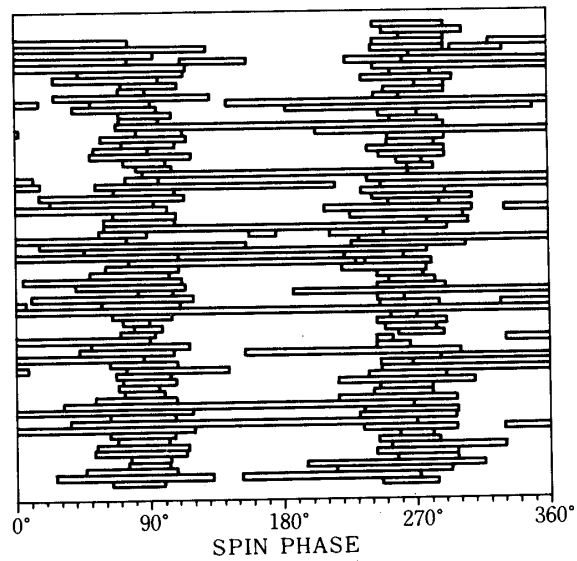
3.2. 電子ビーム放出実験に伴う帰還電流の測定結果

Active実験は，1 Sequence 17秒で計9回実験が行われた。1 Sequenceの生データを第10図のCBE-VMに示す様に，0～2 kVを7秒間の電圧掃引モードと1秒間のステップ電圧モードの組合せで印加して加速する。帰還電流の測定は，ESM-A（Active用検出器出力）と共にESM-P（Passive用検出器出力）でもなされ，測定エネルギーはESM-Mでモニタされている。

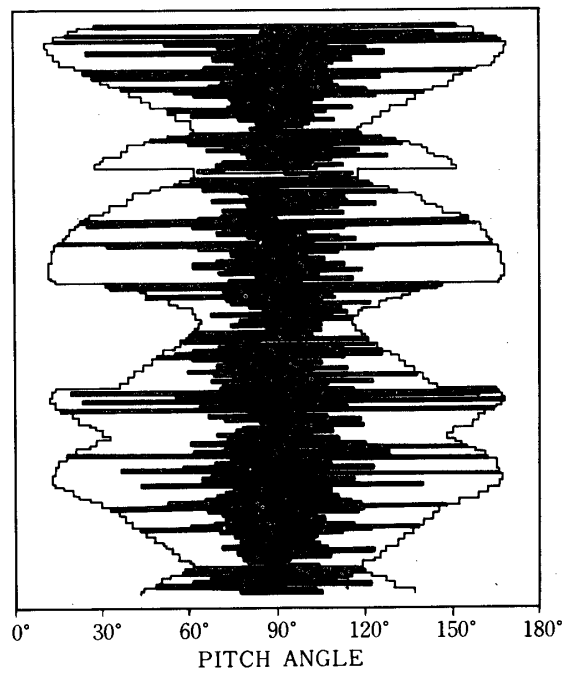
Passive 実験用検出器のデータ (ESM-P) は GAH の二倍の周期で大きく変調を受け、また、計数值も飽和している。Passive 実験用検出器は Geometrical factor が大きいいため



第10図 Active 実験の1 Sequence の生データ: ESM-M: 測定エネルギー・モニタ, ESM-P: Passive 実験用検出器のデータ, ESM-A: Active 実験用検出器のデータ, CBE-VM: 電子銃の加速電圧 (細かいパルスは他のデータ)



第11図 Active 実験において Passive 実験用検出器
で検出された飽和部分のスピニフェイズ分布



第12図 Active 実験において Passive 実験用検出器
で検出された飽和部分の Pitch 角分布: 外枠は
電子銃から電子が放出された間の Pitch角Scan
の範囲を示す.

に飽和し、エネルギー分析も意味をなさない。飽和部分とそうでない部分は数桁の flux の違いがあるものとする。この飽和部分をスピンプレイズ ϕ でプロットしたものが第11図である。スピンプレイズ ϕ は第3図に示すように、コリメータが磁力線とロケット軸のなす面にある時が 0° 、反対方向にある時を 180° と定義したものである。縦軸は飽和部分を積み重ねたもので、時間軸に相当するものである。飽和部分は 90° と 270° 方向を向いた時を中心とする部分に集中する。第12図は横軸を Pitch 角 θ でプロットしたものである。Pitch 角 90° 方向で飽和がおこることが明らかである。Gyrofrequency は約 1.2 MHz であり、衝突周波数が約 1 kHz であるから、放出された一次電子が衝突せずに旋回し、ロケット背面の Passive 用検出器に入射したものと考えられる。飽和部分が Pitch 角 90° を中心に $\pm 20^\circ$ 以下の広がりを持っていると考えられる。

Active 実験用検出器のデータ (ESM-A) の代表的 (加速電圧 2 kV の場合) エネルギー分布を第13(a)図に、Pitch 角分布を第13(b)図に示す。第13(a)図で加速電圧 (一点鎖線) 以上の電子は計数されず、500 eV 近傍に Peak が現われていることがわかる。この特徴はすべてのデータに言える事で、すなわち加速電圧以上のエネルギー電子の増加は測定されず、エネルギー分布は必ず複数の Peak を有する。この複数の Peak は Pitch 角 90° 近傍で現われている。同一の加速電圧のデータを三次元で重ね合せて表示したものが第14(a)図 (加速電圧 2 kV)、第14(b)図 (1.63 kV)、第14(c)図 (1.16 kV) で横軸に測定エネルギー縦軸に Pitch 角をとり、flux を円内の黒い部分の多少で表示し、電子銃が fire されているが計数されない部分を曲線で示した。I-1~I-3 が高度 190~250 km、II-1~II-3 が高度 280 km のデータである。図より Pitch 角 90° で集中的に計数されていることが明らかである。測定エネルギーが低い程 Pitch 角分布も広がり、高度変化がほとんど無く (各 Scan の交点での flux がほぼ一致)、加速エネルギーによる変化は flux の増減だけである。Active 用検出器に計数された電子はエネルギー及び電子銃と検出器の位置関係を考慮すると、放出された一次電子でなく、衝突により生じた低エネルギー電子と周囲のプラズマからの電子と考えられる。Pitch 角 90° 依存性は磁力線に直角に放出した電子はロケット周囲から離散しないため、flux intensity の増加をもたらすものと考えられる。

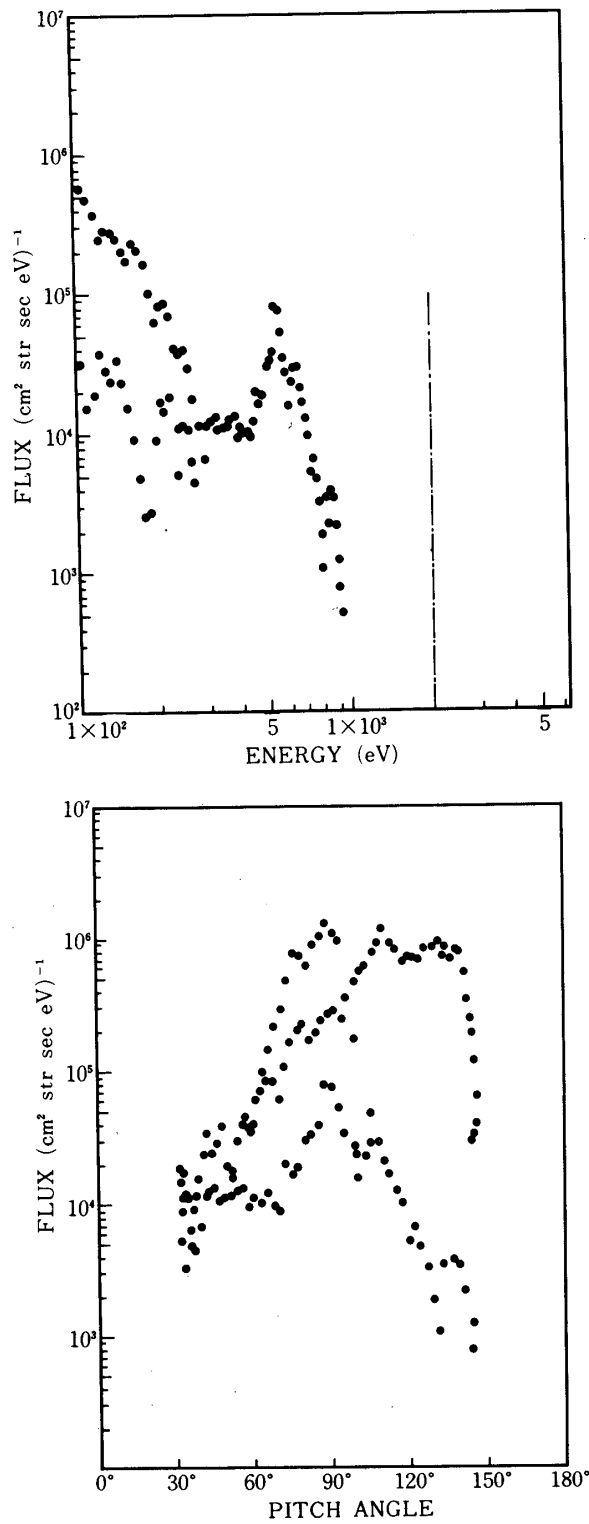
4. 結論と今後の問題

夜間の降下電子測定は検出器の Geometrical factor が十分大きくないため計数されず、今後更に Geometrical factor の大きい検出器を開発する必要がある。中緯度の降下電子束測定は種々の地磁気、時刻の条件でデータの集積をすることが重要である。

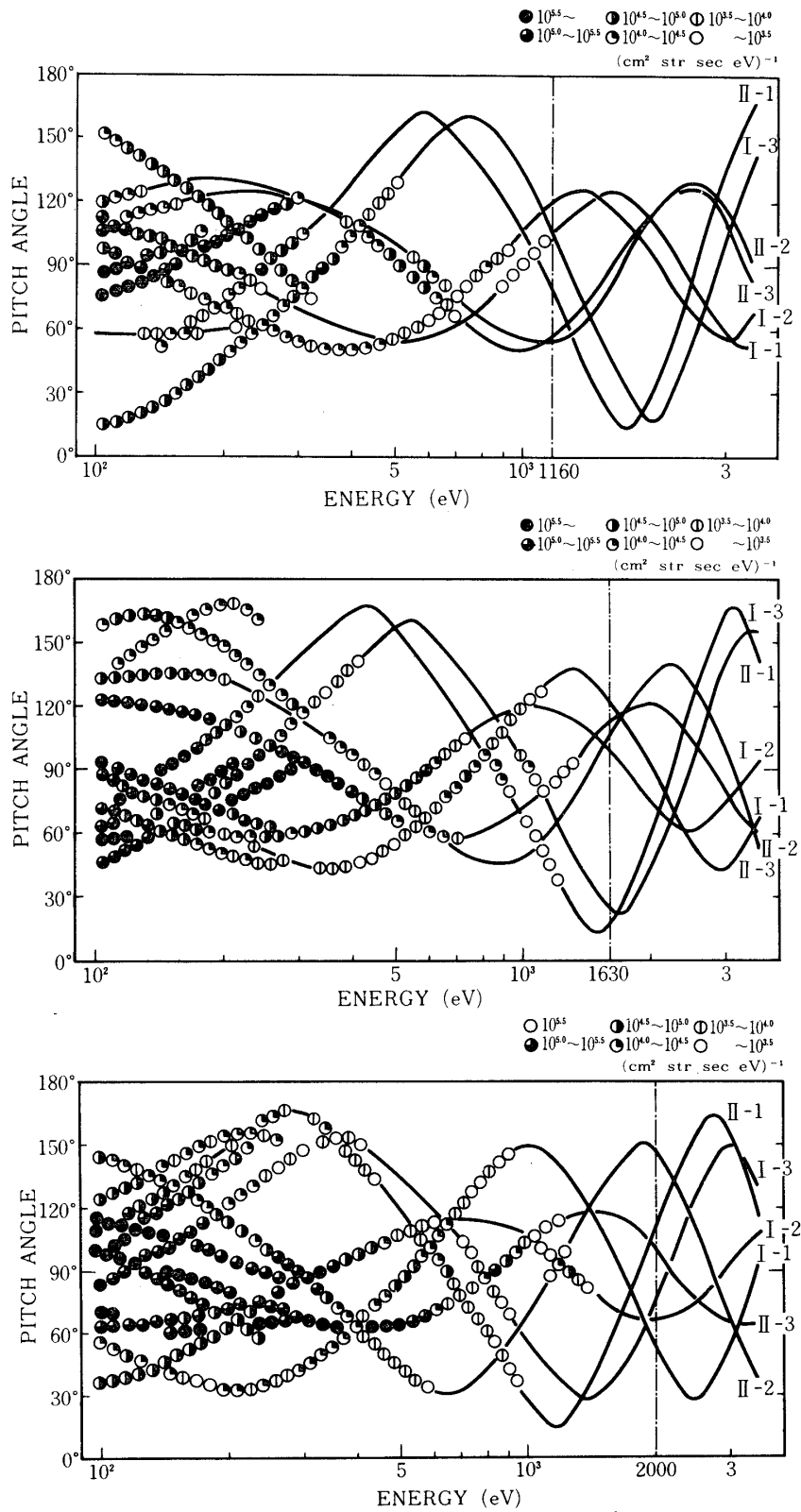
電子ビーム放出実験では、ロケットへの帰還電流は加速電圧以下のエネルギーを持ち、Pitch 角依存性が顕著に現われた。今後室内実験で放出電子の挙動を研究することが重要である。

謝 辞

本ロケット実験に際し御援助、御協力を頂いた実験主任の河島助教授を始めとするロケット実験班の方々に深く感謝致します。



第13図 Active 実験の Active 実験用検出器の代表的エネルギー分布 (a) と Pitch 角分布 (b):
 加速電圧 (Step 状) 2 kV (一点鎖線), 二次電子増倍管の絶対計数効率 ϵ を 10% とした。



第14図 Active実験におけるActive実験用検出器の測定結果:(a)加速電圧2kV(Step状),(b)加速電圧1.63kV,(c)加速電圧1.16kV,I-1~I-3が高度190~250km,II-1~II-3が高度280kmのデータ。

電子ビーム放出実験を担当され、有益な議論をして頂いた東大宇宙研の金子修氏に謝意を表します。

1978年11月2日

参 考 文 献

- [1] S. Hayakawa, T. Kato, T. Murakami, F. Nagase, K. Nishimura and Y. Tanaka, J. Geophys. Res., **78**, 2341, 1973.
- [2] S. Hayakawa, T. Kato, T. Kohno, T. Murakami, F. Nagase, K. Nishimura and Y. Tanaka, J. Geomag. Geoelectr. **25**, 113, 1973.
- [3] 久保, 伊藤, 東京大学宇宙航空研究所報告, **10**, 689, 1974.
- [4] 久保, 向井, 伊藤, 平尾, 東京大学宇宙航空研究所報告, **11**, 605, 1975.
- [5] S. Sasaki, O. Kaneko, Y. Nakamura, H. Kubo, Y. Murasato, N. Kawashima and S. Miyatake. 宇宙観測シンポジウム, 昭和51年度, 207.
- [6] 賀谷, 藤沢, 松本, 宇宙観測シンポジウム, 昭和52年度, 112.