

‘あけぼの’に搭載された熱的電子およびこれにより得られた初期的結果

小山孝一郎・雨宮 宏¹⁾・K. Schlegel³⁾
阿部 琢美・奥沢 隆志²⁾・相沢 宏行⁴⁾

Electrons of 0~5eV energy range measured by means of AKEBONO Satellite

By

Koh-ichiro Oyama, Hiroshi Amemiya¹⁾, Takumi Abe²⁾, K. Schlegel³⁾, Takashi
Okuzawa²⁾, and Hiroyuki Aizawa⁴⁾

Abstract: Thermal electrons in the upper ionosphere are being studied by means of the scientific satellite “AKEBONO”. The measurements are electron temperature, electron density and the distribution of electrons in the energy range of 0~5eV. An overview of the experiment is given and preliminary results on the protonosphere and field aligned current region are presented.

概 要

「あけぼの」に搭載された熱的電子エネルギー分布測定器及び電子密度、電子温度測定器を概説しプロトノスフェア及び沿磁力線電流領域に関して初期に得られたデータを紹介する。

1. はじめに

本計器はプラズマ中の0~5eVの熱的電子の速度分布ないし温度並びに正イオン密度の計測を行うもので、その目的は主として極域中の沿磁力線下向電流を形成する低エネルギー電子及び、トラフ領域内の電子の観測、速度分布異方性の観測等を通じて、オーロラ中粒子

1) 理化学研究所

2) 電気通信大学

3) 西独マクスプランク宇宙空間研究所

4) 東海大学

加熱機構を解明する事にある。

更に地磁気異常に関連した南大西洋上の低高度降下粒子のプラズマに及ぼす効果、赤道領域のプラズマバブル中の密度非び非熱的過程の観測も行う。熱的電子は種々の現象に应答するものであるからこれらテーマは他の観測項目と密接に関連を持つ事になる。

従来の熱的電子の観測がマクスウェル分布の前提の下に電子温度という概念で把握されてきたのに対し、本計測器は速度分布の詳細を測定する事、及び磁力線の向きに対する異方性を検出することに主眼を置いている点にユニークさがある。又、分布が等方的であると分った場合にはドリベスティン法に基づきエネルギー分布がデータ解析により得られる。この他従来実績を持つ電子温度計による電子温度測定、浮動電位の時間変化の測定の他に DC 電圧電流特性の測定を行い電子密度及び正イオン密度の情報も得る。

2. 測定器

測定器はプラズマ量を異なった測定原理を用いて測るという意味から三つの部分に分ける事ができる。これらは熱的電子エネルギー分布の測定、ラングミュアプローブの電圧、電流特性をとる DC プロブ回路及び電子温度プローブ回路 (Oyama et al, 1985) である。ラングミュアプローブ電圧、電流特性を取得し、かつ熱的電子エネルギー分布を取得するための DC プロブ電流の検出は入力換算雑音電圧のできるだけ少ないアンプを使った電流アンプによって行った。機体に沿ってバドル先端まで延びた同軸ケーブルの浮遊容量を減少せしめるためプローブに印加すると同じプローブ掃引電圧をケーブルの外側シールドに印加した。電流アンプの出力と掃引電圧は差動アンプに入力された。この後、衛星の位置によってプラズマ密度が大きく変化する環境にも対応できるようにゲインの10倍づつことなる4つのアンプを使用して、それぞれの出力を観測できるようにした。

熱的電子エネルギー分布を計測するための観測器は付録に説明するように周波数 6KHz

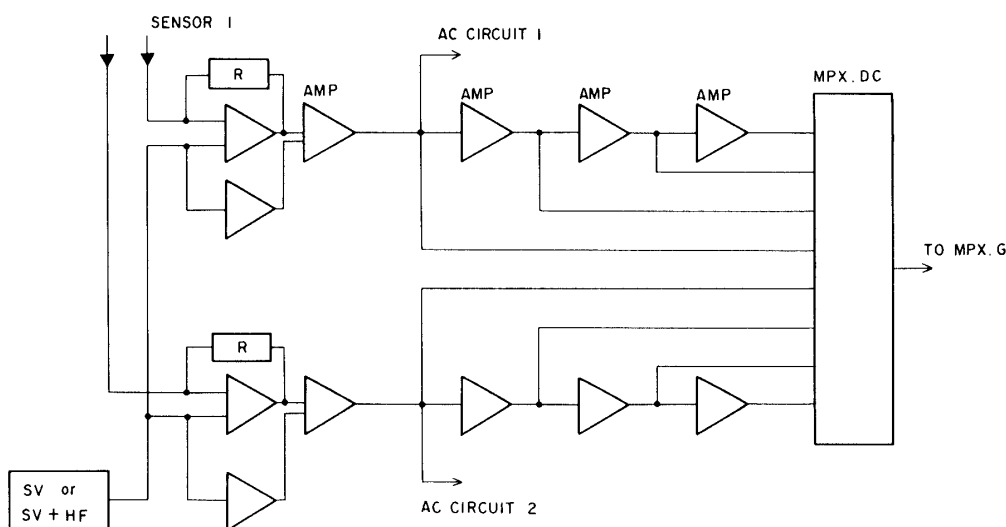


図1 DC 電圧電流特性を測定する回路のブロックダイアグラムプローブ電流検出用アンプのフィードバック抵抗 R は 20k Ω である。

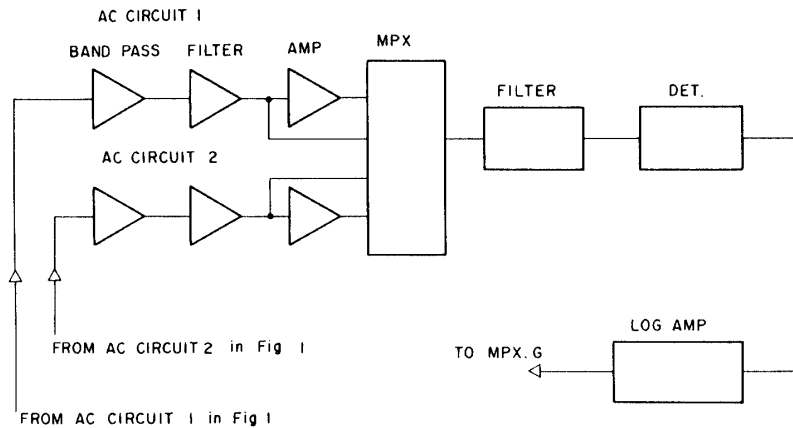


図2 熱的電子エネルギー分布測定のためプローブ電流から二次高調波成分を取り出す回路のブロックダイアグラム。この回路への入力は一におけるプローブ電流検出用アンプの出力である。

の正弦波を重畳した掃引電圧を印加した時にプローブ特性の非直線性より生じるひずみ電流の中から二次高調波である 12 KHz の電流成分を取り出すもので図2に示すように DC プローブ電流検出用アンプの出力からバンドパスフィルタを経たのち、検波器を通り、ログアンプに入力した。ログアンプを用いる事により、まわりのプラズマ密度の大きな変動に対して対応できることになる。

電子温度プローブは過去に「たいよう」、「極光」、「ひのとり」「おおぞら」に搭載されてきた標準器でその性能は十分に信頼できるものである。

プローブ特性の浮動電位において高周波電圧を印加すると浮動電位が負にシフトする。高周波電圧を印加した事によるこの浮動電位のシフト分 ΔV_f は以下の式に従う（この場合、衛星の速度はまわりのイオンの速度よりはるかに早いと仮定する。即ち、イオン電流がプローブ掃引電圧に依存しないという仮定を設ける。この仮定は多くの場合正しい）。

$$\Delta V_f = \frac{kT_e}{e} \ln I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right) \quad (1)$$

ここで a はプローブに印加した高周波電圧の振幅

I_0 は零次の変形ベッセル関数

k 及び e はそれぞれボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) 及び電子の電荷 (1.6×10^{-19} クーロン) である。

過去に衛星に搭載された測定器と同じように、電極お互いに振幅の2倍違う高周波電圧を印加して、その浮動電位のシフト分の比を取ると

$$r = \frac{\ln I_0 \left(\frac{2ea}{kT_e} \right)}{\ln I_0 \left(\frac{ea}{kT_e} \right)}$$

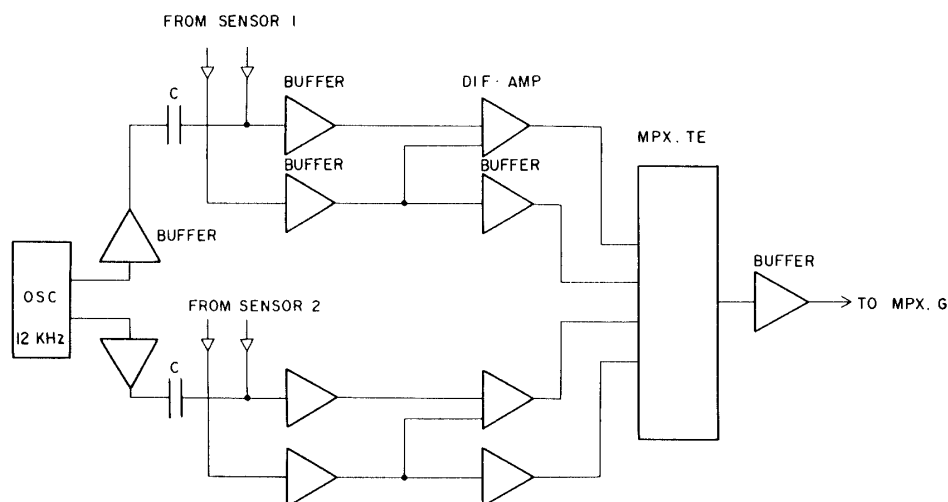


図3 電子温度プローブブロックダイアグラム。

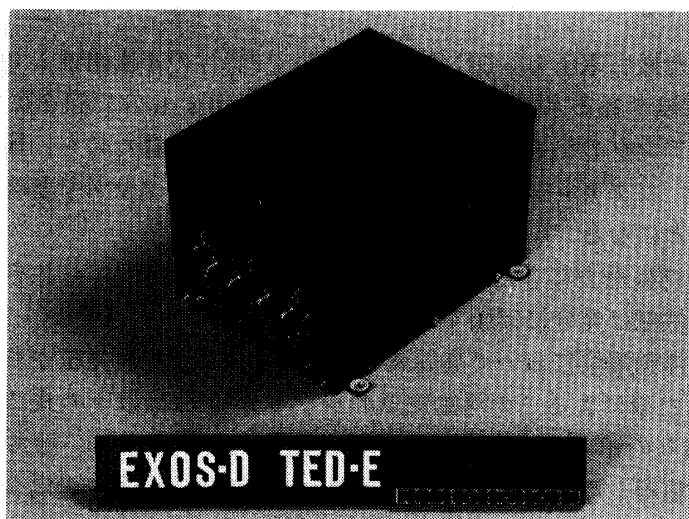


図4 「あけぼの」に搭載された熱的電子エネルギー分布観測器、DCラングミュアプローブ、電子温度プローブの電子回路部。

により γ を実測して T_e を求める事ができる。この原理に基づいて設計した回路が図3である。半円プローブ#1 (図5) にコンデンサーCを介して高周波電圧発生器OSCにより、正弦波電圧を印加し、他方の半円プローブ#2には印加しない。これによって発生する両プローブ間の直流電位差をアンプにより検出する。テレメータに送り出す信号はセンサーの一方の電極と衛星本体の浮動電位の差、高周波電圧を印加しない時の二つの電極の電位の差、振幅250 mV、500 mVの高周波電圧を印加した時の二つの電極間の電位の差である。

図4に「あけぼの」に搭載された観測器を示すが、この中には熱的電子エネルギー分布、DCラングミュアプローブ、及び電子温度プローブの回路がすべて組込まれている。

重量はセンサー2個で160 g、電子回路部1.76 Kgである。所要電力は+5 V系10 mA、

±12V系80 mAで、1.97W、バス換算の全電力は2.63Wである。観測器本体の温度のモニターはHK項目としてF_{64n+63}W₁₅に出力されている。

2. 2 センサー

センサーとしては金メッキした円板状電極からなるプローブを用い、円板を二つの半円板に分割する(図5)。円板の直径は120 mm、半円電極間の間隔は10 mmである。測定には上記円板プローブを2個使用し、互いに直交する太陽電池バドルの先端に太陽電池バドル面に垂直に取り付ける(図6)。プローブ特性及び速度分布測定時には二つの半円プローブは電氣的に相互接続されほぼ円板状プローブとして使用される。電子温度計としての動作時には一方の半円板に交流電圧が印加され、プローブ間の電位差の変化を検出する。

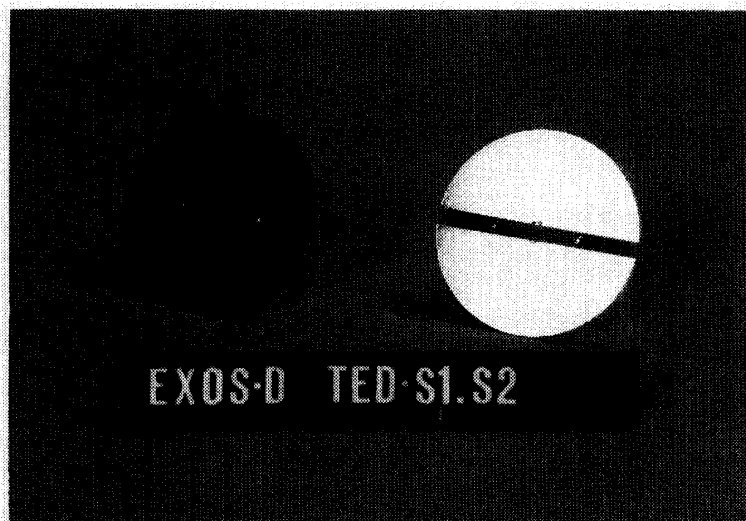


図5 熱的電子エネルギー分布、DC電流及び電子温度計測に用いられた半円状プローブ。

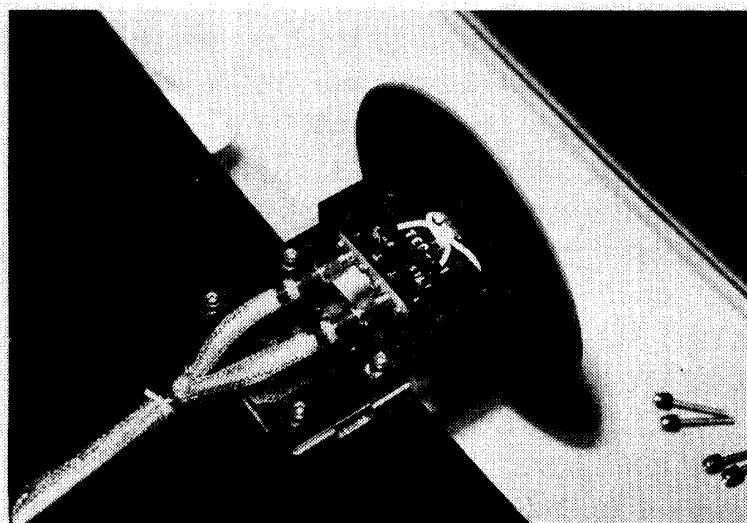


図6 太陽電池バドルの先端に取り付けられたセンサー。

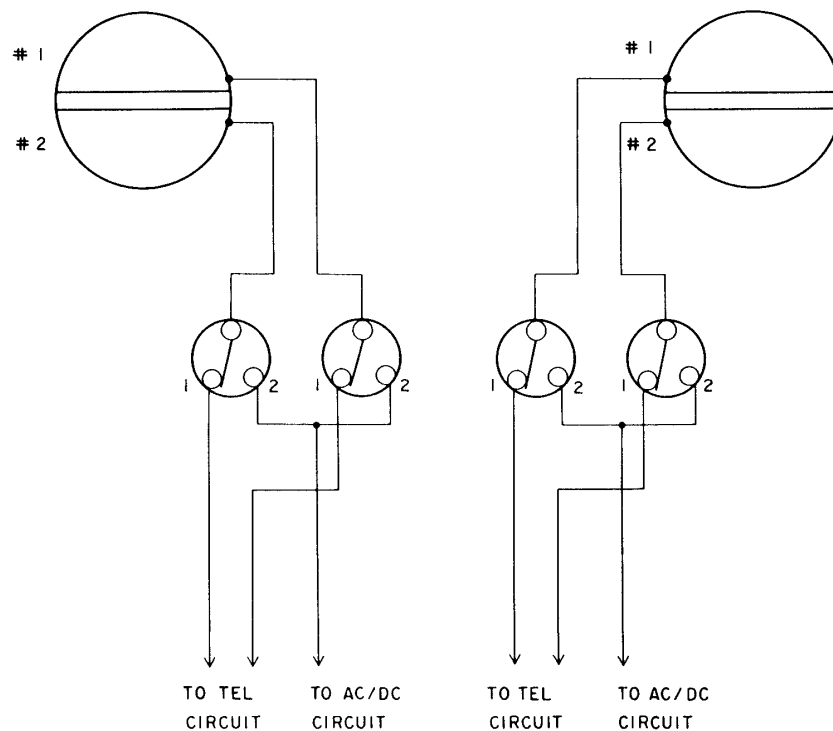


図7 熱的電子エネルギー分布, DC 電圧電流特性と電子温度を測定する時の半円状センサーの接続法.

3. データ処理

本観測器に割り当てられたデータ送信のビットレートは高ビットレートの時, 2 Kbit/秒, 即ち 8ワード(W)/2Frame である.

3. 1 DC 電圧電流特性測定及び速度分布測定

プローブに印加する掃引電圧の掃引周期は 2 秒 (L), 一秒 (H) の二種類が用意されているが, 空間分解能をできるだけ上げるために現在一秒周期のモードで運用している. データのサンプルに関しては一個のセンサーに対し 2 個の 1Kbyte RAM を使い, 一方の RAM に書き込み (WRITE) を行っている間, 他方の RAM は読み出し (READ) を行う. そのタイミングは第 8 図に示す通りである. 即ち 2 個のセンサーからの信号の書き込みは第 8b 図における斜線の掃引時間で行なわれ, Hモードでは 1 個のセンサーの 1 掃引時間 (1 秒) に対し 512W である. 従って 2 個のセンサーに対し第一番目の掃引時間では 1024W のデータを RAM に書き込む. 引き続き 4 秒間で RAM1 は上記データのテレメータの読み出しを行う. データを書き込む第 2 番目の掃引時間では RAM2 に同じ量のデータを書き込む. RAM2 は引き続き 4 秒間に読み出しを行う. 従って, 取得データはセンサ 1, 2 に合わせて $512W \times 2 = 1024W$ に対し読み出し時間はテレメータの高ビットレートの時 $(1024 W / 8 w) \cdot 2F \cdot 15.625 \text{ ms} = 4 \text{ s}$, 中ビットレートの時 16 s となる. 低ビットレートでは電子温度モードの測定のみを行う.

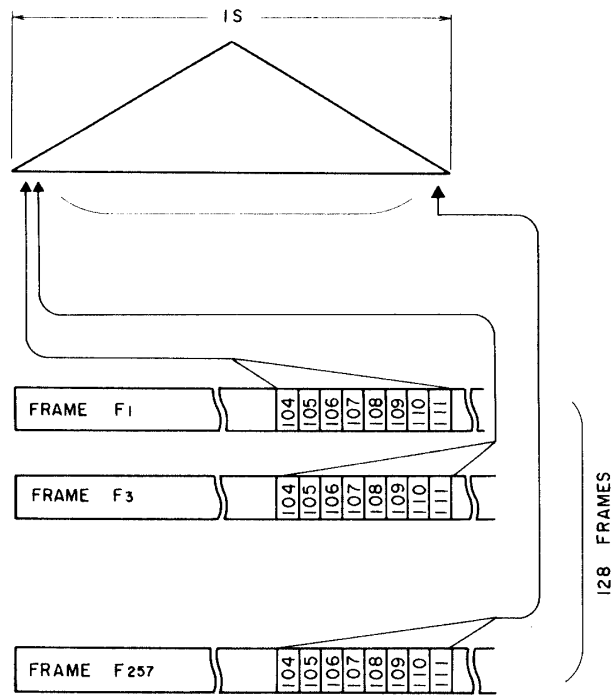


図8a 一秒間のプローブ掃引電圧期間のデータサンプル数とこれらのテレメータワードへの配置。

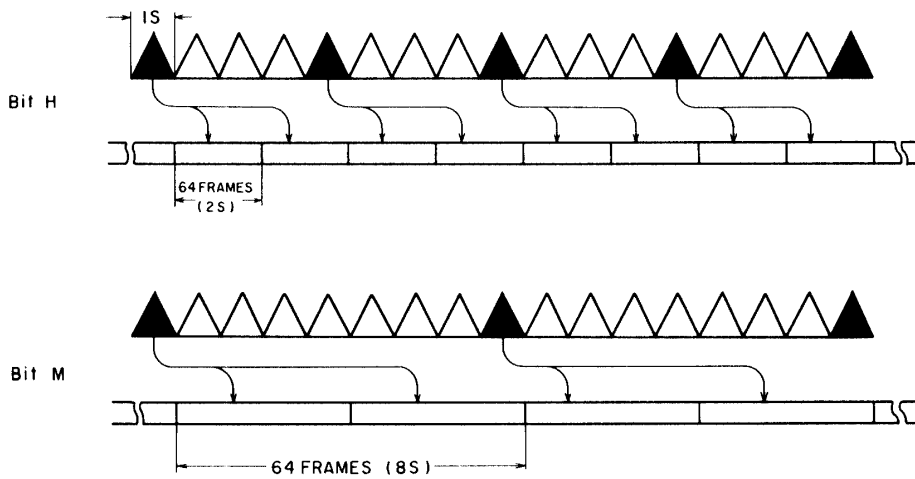


図8b 一秒間で得られた二つのセンサーからのデータがテレメータデータとしてはき出されるタイミングを示す
一秒間に得られたデータをはき出すのに高ビットレートで4秒，中ビットレートで8秒かかる。

掃引周期が2秒のLモード測定の場合は1センサ半掃引時間に対し512Wである。RAM1, 2の書き込みと読み出しは前述の1秒の場合の2倍の時間周期で同様のタイミングで測定を行う。

掃引電圧の振幅は低エネルギーモード測定0~2.5V, 高エネルギーモード測定0~5Vの通りとする。

速度分布測定の場合交流振幅はブロックコマンドにより80mV, 200mVの2通りに切り替え可能である。共に信号の増幅はLOGアンプの利得60, 80dBの2段階でおこない、ゲインの高, 低の指定はディスクリットコマンドで行う。更に, 衛星に対するプローブバイアス(掃引電圧初期レベル)はプローブデータ及び速度分布データ波形を適切な測定範囲におくためにブロックコマンドによって2, 1, -1, -2Vの四段階の切替えが可能である。

先ずエネルギー分布(SH)モードが電子温度モード(TE)かの切替をディスクリットコマンドかブロックコマンドによって行った後, プローブ特性(DC)と速度分布(AC)の選択をブロックコマンドのDC, ACの切替えで行う。信号のチェック(calibration)は非線形素子を用いて行う。その設定は先ずSHモードを選んだ後, ディスクリットコマンド“CAL”で行う。

3.2 電子温度計(TE)

TEモードではセンサ1, 2の浮動電位 $V_f-1, 2$, センサ1の交流振幅L, Hにおける浮動電位の変化信号, センサ2の同様の信号の測定を測定時間0.5sで行う。そのタイミングは第9図に示す。4種類の各データは1W(8bits)からなり, 取得データはセンサ1,

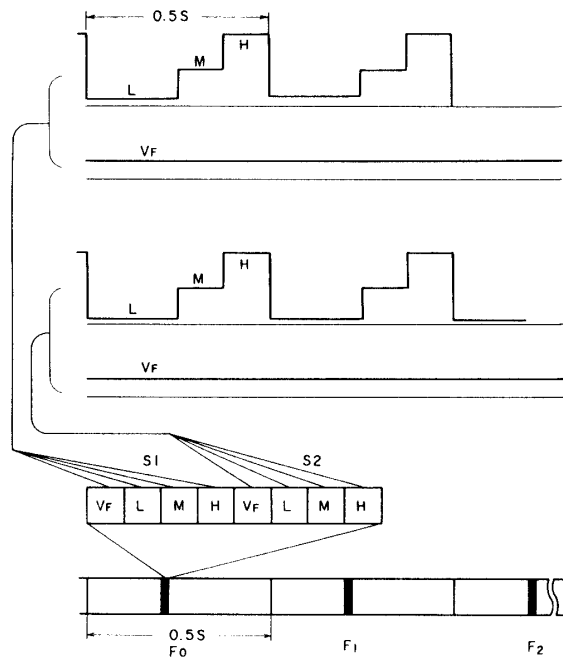


図9a 低ビットレートにおける電子温度データのテレメータワードの割当て。

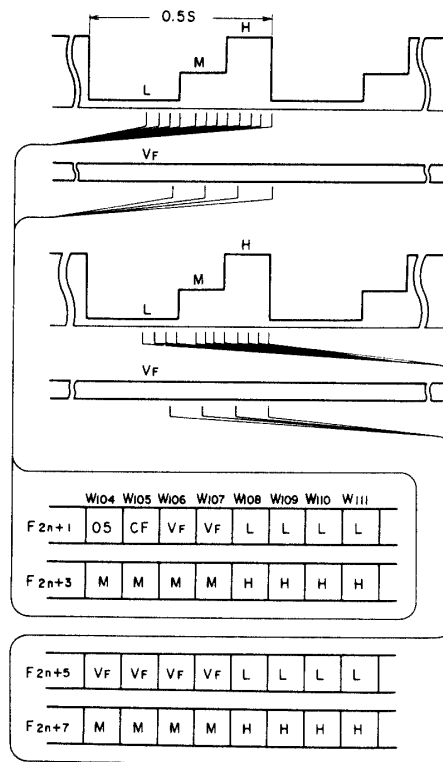


図9b 中ビットレートにおける電子温度データのテレメータワードの割当て。

2 合わせて 8w である。各データに対するサンプリング数は高ビットレートのとき 16, 中ビットレートのとき 4, 低ビットレートのとき 1 とする。交流振幅は 0, 250 mV, 500 mV の 3 段階で行い、全体のゲイン高, 低はディスクリットコマンドで行う。衛星が低ビットレートの場合は常に TE モード観測を行う。信号のチェック (calibration) は非線形素子を用いて行う。その設定は先ず TE モードを選んだ後ディスクリットコマンド “CAL” で行う。

4. 観測モード

観測モードはエネルギー分布測定と電子温度測定に大別される。グローバルモード (低ビットレート) では全て電子温度測定となる。先ず速度分布 (SH) モードが電子温度モード (TE) かの切替えをディスクリットコマンドかブロックコマンドによって行う。この時自動的に Gain Auto に設定される。利得を一定にして測定したい場合にはディスクリットコマンド Gain Fix とする。

4. 1 速度分布及び DC 電流測定モード (SH)

このモードでは二つの半円形プローブを接続し円板プローブとして動作させ、二つの直交するプローブについてプローブ特性とその二次微分測定を行う。プローブ電圧はロケット本体に対し四段階のバイアスレベル V_B を選択, 設定しこれに対し三角波掃引電圧を重畳する。

掃引周期は1秒、2秒の二種類である。掃引電圧の振幅は低エネルギーモード測定 narrow 0~2.5V、高エネルギーモード測定 wide 0~5Vの2通りとする。衛星に対するプローブバイアス（掃引電圧初期レベル）はプローブデータ及び速度分布データ波形を適切な測定範囲におくためにブロックコマンドによって2, 1, 0, -1の四段階の切替えが可能である。信号のチェック（calibration）は非線形素子を用いて行いその設定はディスクリットコマンド“CAL”で行う。

プローブ特性（DC）と速度分布（AC）の選択はブロックコマンドのDC, ACの切替えで行う。

プローブ電流は上記により設定された掃引周期、掃引電圧の振幅、バイアス電圧のもとに相対利得、1, 10, 10², 10³で検出され時分割送信を行う。利得を一定にして測定したい場合にはディスクリットコマンド Gain Fix とした後にブロックコマンドで利得を与える。

次に、二次微分信号も同様のプローブバイアス、掃引電圧幅設定において交流信号を重畳することにより測定する。速度分布測定の場合交流振幅はブロックコマンドにより高エネルギー分解測定、低エネルギー分解測定に応じて80mV, 200mVの2通りに切り替え可能である。信号の検出はLOGアンプの利得60, 80dBの2段階で行う。ゲインの高、低の指定はディスクリットコマンドで Gain Fix とした後ブロックコマンドで行う。

二つのプローブのプローブ特性、二次微分特性から電子密度、正イオン密度、速度分布とそのマクスウェル分布からのずれ、磁力線に対する速度分布の異方性が検出される。

4. 2 電子温度制御モード（TE）

このモードでは半円板プローブはリレーにより互いに電氣的に切り離し、一方の半円板に交流を印加する。二つの半円板の電位差及び衛星に対する浮遊電位を測定し、電子温度測定用データを得る。重畳交流振幅は自動的に250mV, 500mVの二段階に切替えを行い、対応する電位変化信号を時分割送信する。

5. コマンド及びデータフォーマット

5. 1 ディスクリットコマンド（DC）

第1表にディスクリットコマンドの詳細を示す。PI-identificationコードICはOEである。第2表にDCコマンドのステータスを示す。

5. 2 ブロックコマンド（BC）

第3表にブロックコマンドのステータスを示す。

ブロックコマンドは一回のコマンドの送出により8bitsの設定が可能である。）

本観測器から送り出される信号のためのフレームワードはフレームフォーマットにより違いフレームフォーマット1, 3, 4の場合 W₁₀₄-W₁₁₁, フレームフォーマット2の場合 W₁₁₂-W₁₁₉である。

6. 初期観測

衛星が定常運用にはいってからすでに半年以上経過しているが、熱的電子エネルギー分布測定器は打上げ前に山積していた難問を忘れたかのように極めて正常に動作している。ここ

では今までに得られたデータの一部を紹介する。

第 1 表

1 D	TED On	1 E	SV	Wlde
2 D	TED Off	2 E	SV	Narrow
3 D	MEAS	3 E	SV	Rate High
4 D	CAL	4 E	SV	Rate Low
5 D	GAIN SH High	5 E	OSC	Ampl High
6 D	GAIN SH Low	6 E	OSC	Ampl Low
7 D	GAIN TE High	7 E	GAIN	Fix
8 D	GAIN TE Low	8 E	OSC	Auto
9 D	SH Mode Set SH On	9 E	BC	Execute

ここで、TED On-Off はPI動作の on, off.

MEAS, CAL は測定モード, チェックモード.

GAIN TE High, Low は電子温度モードにおける利得の高低.

SH Mode set はプローブ特性/速度分布測定モードへの設定.

GAIN SH High, Low は上記モードにおける利得の高低.

SV Wide, Narrow は上記モードにおける掃引電圧幅の大小.

SV Rate High, Low は上記モードにおける周期の大小.

OSC Ampl High, Low は上記モードにおける重量交流振幅の大小.

第 2 表

B ₀	TED	1 0	On Off *
B ₁	GAIN SH	1 0	H L
B ₂	GAIN TE	1 0	H L
B ₃	SV	1 0	Wide Narrow
B ₄	SV Rate	1 0	H L
B ₅	OSC Ampl	1 0	H L
B ₆	MEAS/CAL	1 0	MEAS CAL
B ₇	GAIN	1 0	Auto Fix

* TED on で電子温度プローブモードになる。このステータスは $F_{32n+16}W_7$ である。

第 3 表

B ₀	OBS MODE	1 0	TE SH	*1
B ₁	SH MODE	1 0	AC DC	*2
B ₂	BAS SET	0 1	0 1	*3
B ₃	BIAS SET	0 1	2 3	
B ₄				
B ₅	Gain	0 1	0 1	*4
B ₆	Gain	0 1	2 3	
B ₇	SH 電源モニター	1 0	SH on TEL モードかアンプ系 off	

*1, *2 OBS MODE は、電子温度プローブ特性エネルギー分布測定モード (SH) のステータスで B₁ の SH MODE はプローブ特性が (DC), エネルギー分布測定 (AC) の区別である。

*3 B₂, B₃ を用いたバイアスセット (BIAS SET) では 2bits で右図のような四段階のプローブ電圧を作り、掃引電圧をオフセットさせる。

B ₂	B ₃	バイアス (V)
0	0	0
0	1	1
1	0	2
1	1	3

*4 B₅, B₆ では 2bits で右図のような 4 段階の DC アンプ利得の設定を行う。

B ₅	B ₆	DC アンプの利得
0	0	1 倍
0	1	10 倍
1	0	100 倍
1	1	1000 倍

6. 1 DC ラングミュアプローブモード

図 10 は Pass 9803230500 における世界時 17 時から 17 時 30 分までに得られた DC 電圧電流特性から得た電子温度とプローブ電流である。この間衛星は赤道上空から高緯度まで移動し、高度は 7200 km から 4000 km まで変化している。

電子温度はまた 17800 まで徐々に減少するが、これは高度勾配によるものか L Value の差によるものかどうか今後の検討課題の一つである。1718 より電子温度は時間と共に少しずつ上昇しはじめ 172500 から 173000 の間には電子温度が 8000K まで上昇し、電子密度が急激におち込むトラフが見られる。今後トラフでの電子密度減少が磁力線方向の平行電場による (Heikkila, 1972) ものか、また強い電流シート (Armstrong and Zmuda, 1970) とどのような関係にあるのか研究する必要がある。図 11 は図 10 に示された電子温度、電子密度を計算した DC 電圧、電流特性の 3 例である。

幸いにして衛星のスピン軸が太陽方向に固定されており、太陽電池バドルはスピン軸に直角に取付けられ、更に熱的電子エネルギー分布測定用のセンサーはバドル軸に垂直である。

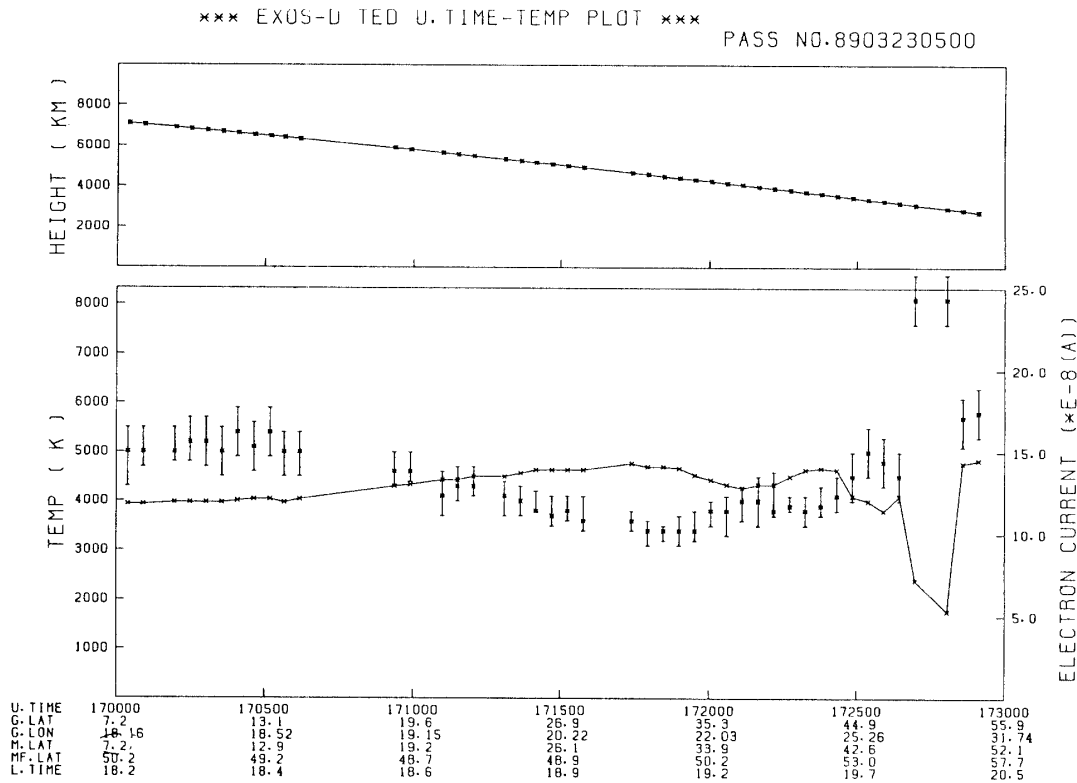


図10 DC 電圧電流モードによる観測データの一例. Pass 8903230500

即ちセンサー電極面に対し太陽光線は平行で、従って電極表面からの二次電子は考慮しなくてよい。従って「あけぼの」では高度 10000 km まで二次電子に影響されることなく測定が可能になった。過去に S3-3 衛星によって高度 4000 km 度まで電子温度は測定されているが、これにくらべてはるかに良質のまた、より高い高度までのデータが世界で初めて得られたと確信している (Burke et al., 1978; Rich et al, 1979)

6. 2 熱的電子エネルギー分布モード

図 12 は極域における沿磁力線電流が検出された領域において測定された二次高調波電流のセミログプロットから得た電子温度である。210720 より 210800 の間、電子温度はまわりに較べてやや低く、210800 より 210935 の間は電子温度は上昇している。磁場計測グループによると前者は下方に流れる沿磁力線電流、後方は上方に流れる沿磁力線電流領域に相当する。ダウンワード電流のキャリアと思われる粒子については Klumpar と Heikkila が 1400 km において ~ 100 eV の方向性を持った粒子の存在を確認している (Kumplar and Heikkila, 1982)

本測定状況における熱的電子エネルギー分布測定器の最低測定電流は 10^{-9} A である。ところがプローブの表面積は約 100 cm^2 、 $1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ の沿磁力線電流は $0.01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあたり、もしダウンワード電流の carrier が $0 \sim 5 \text{ eV}$ 領域にあるとこの値は十分に我々の持つ観測器で検出可能である。ダウンワード沿磁力線電流領域に関する電子温度の観測は過去に一例報告

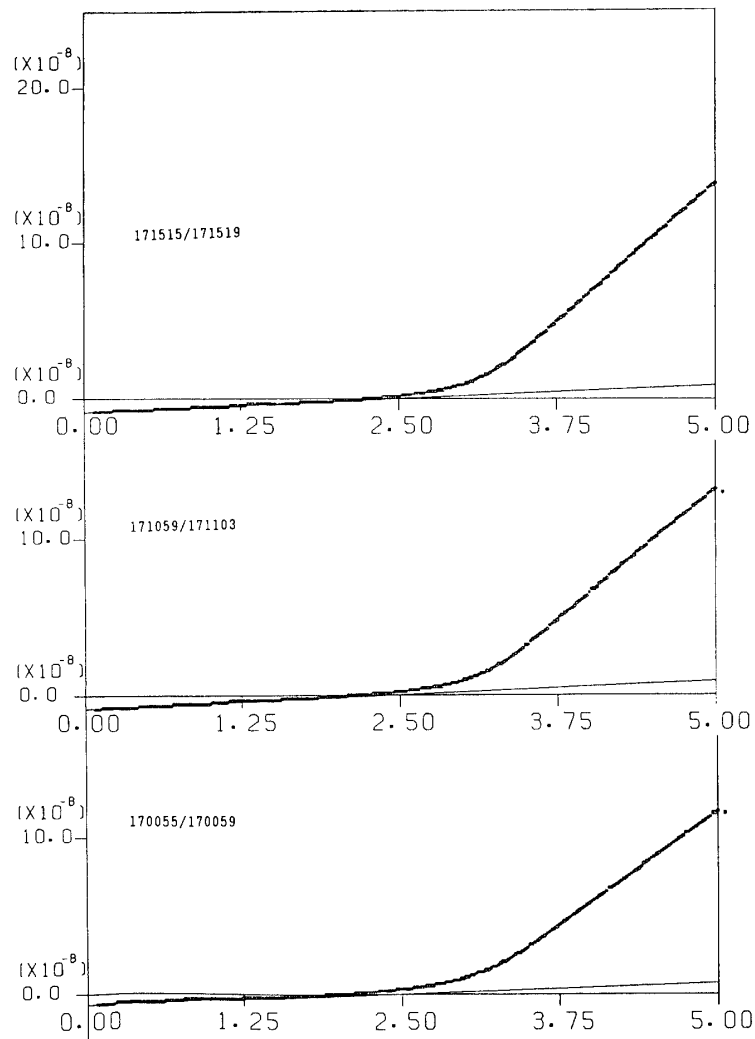


図11 DC 電圧電流特性の一例

図10でプロットされた電子温度を得た DC 電圧電流特性の 3 例。イオン電流領域においてひかれた直線は電子温度を計算するためコンピュータフィットしたものである。図中の数字 171515/171519 は、このデータが 17 時 15 分 15 秒から 17 時 15 分 19 秒までに得られた値であることを示す。横軸は衛星を基準としたプローブに印加した電圧。

されている (Primdahl et al, 1984) のみであり、「あけぼの」に搭載された本観測器によりはじめて熱電子のエネルギー分布を測定した事になる。

6. 3 電子温度プローブモード

電子温度は高度約 3000 km 以下では良好なデータを得ることができる。

図 13 は衛星が一回転する間に測定した電子温度を示す。図は衛星の進行方向のプローブの法線のなす角 (Wake angle) に対する測定された電子温度及び磁力線と電極の法線とのな

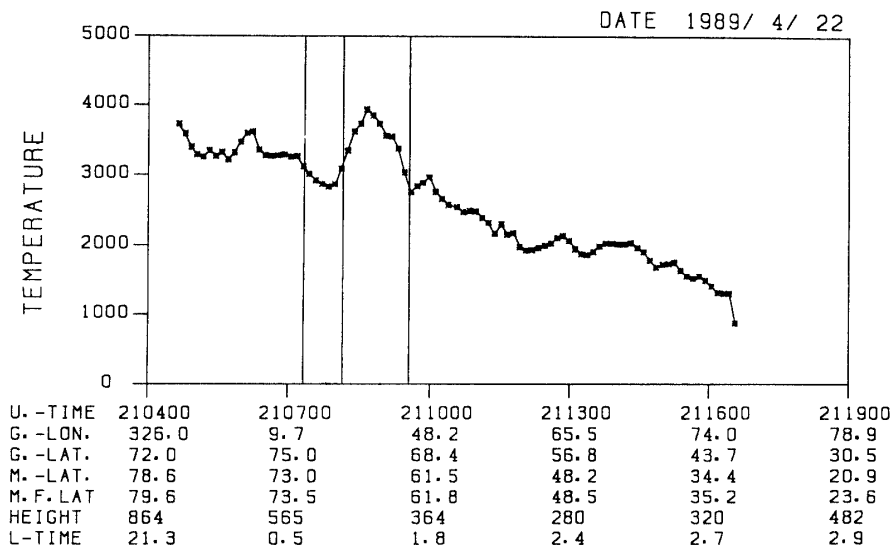


図12 沿磁力線電流が流れている付近での二次高調波特性の片対数プロットから得た電子温度 21^h07^m220^s から 21^h08^m10^s までダウンワード電流. ダウンワード電流が流れている所では電子温度が低い. アップワード電流の領域では電子温度が高い.

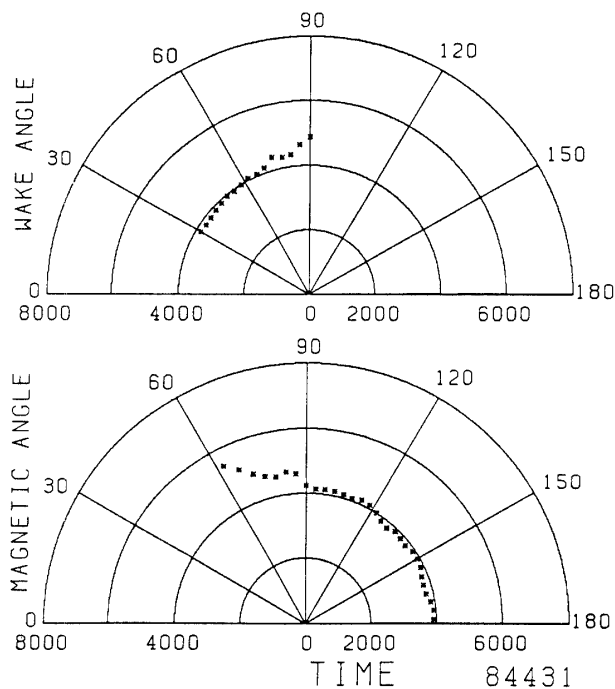


図13 電極の法線と衛星の進行方向とのなす角 (Wake angle) 及びプローブ電極の法線と地球磁場とのなす角 (Magnetic Angle) に対する電子温度プロットの一例. 1989年5月25日8時43分~8時46分に得られたデータ. この場合 Wake angle が 60° を越すと高い電子温度が観測される.

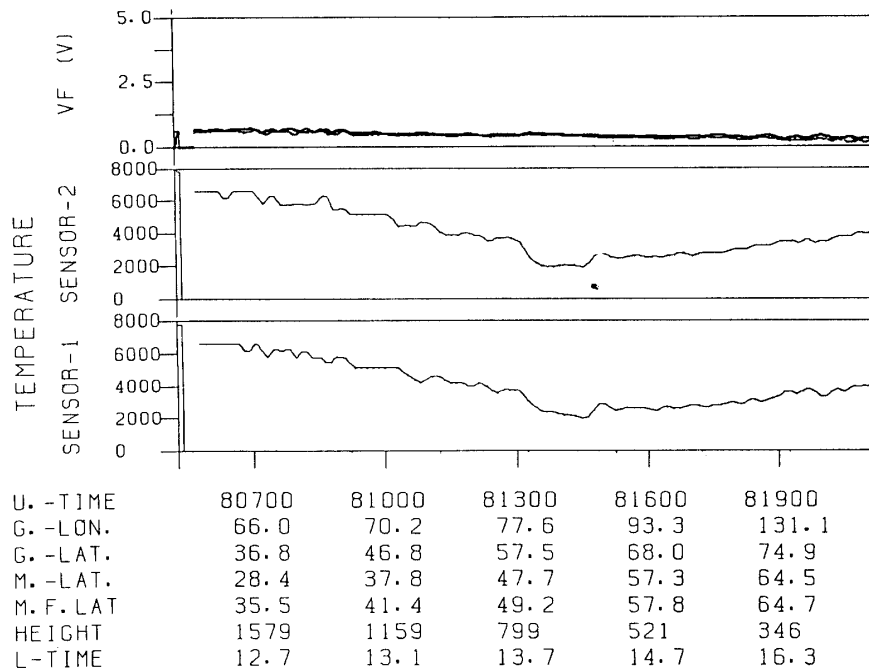


図14 電子温度プローブモードにおける電子温度の測定. Path NO 8905290000.
一番上のパネルはセンサーの一方の半円状電極と衛星の間の浮動電位,
真中及び一番下のパネルがセンサー1, 及びセンサー2により得られた
電子温度.

す角 (Magnetic angle) に対する電子温度を示している. 一般的に衛星の進行方向とセンサーの電極の法線とが 60° 以上になると測定される電子温度は高くなることが多い. 即ちこのような電子温度はウェークの影響として観測データからのぞく.

図14はウェークを考慮して Pass890529 における電子温度プローブによって得られたデータでセンサー1, センサー2で得られたデータは共に同じ振る舞い, ほぼ同じ値の電子温度を示している.

おわりに

本稿では「あけぼの」に搭載されている熱的電子エネルギー分布観測器を概説した. 今後我々が順次研究していきたい課題は

1. ダウンワード沿磁力線電流のキャリアの同定
2. 米国の衛星 S3-3 以後測定されていない 4000 km 以上での電子温度から見た熱構造
3. 中緯度トラフ付近の熱的電子エネルギー分布の構造

等である. 荷電粒子, 波動, 磁場, 電場等のデータと総合的に解析が行える事を期待している.

謝 辞

「あけぼの」計画は多くの方々の長年の苦労の後成功した科学衛星計画である。本実験に直接、間接に協力された関係省庁、機関の方々に対しここに記してその労を謝したい。

「あけぼの」に搭載された熱的電子エネルギー分布測定器は、松栄電子(株)により設計、制作されたものであり、直接担当者の池田氏にお礼を申しあげる。

付 録

熱的電子エネルギー分布の測定

電子の速度分布が非等方的である時、プローブ面に垂直方向の速度分布 $f(v)$ は平面プローブ特性 i_p の一次微係数 $i_p' = di_p/dV_p$ と次の関係にある。

$$f[(2eV/m)^{2/1}] = -\frac{m}{n_e \cdot e^2 S} i_p \quad (1)$$

ここで $V = V_s - V_p$, S はプローブ表面積である。

一次微係数はプローブ電圧 V_p に微小交流電圧 $a \sin \omega t$ を重畳する事によりプローブ電流中に発生する同一周波数成分を検出する事により得る。

次に電子の速度分布が等方的である時、その分布 $f(E)$, $E = (\frac{1}{2}) mV^2$, はプローブ特性の二次微係数 $i_p'' = d^2 i_p / dV_p^2$ と次の関係にある。

$$f(E) = \frac{4V^{1/2}}{n_e (2e/m)^{1/2} e^2 S} \cdot i_p'' \quad (2)$$

ここで $E = e(V_s - V_p)$

本測定器においては DC 電圧電流特性の一次微係数を取らずに二次微係数を得た。二次微係数はプローブに振幅 a の高周波電圧を重畳した掃引電圧を印加した時にプローブ電圧、電流特性の非直線性によって生じたひずみ電流の中から以下の関係を利用して二次高調波成分を取り出す事により得る事ができる。即ち

$$i_{2\omega} \sim a^2 / 4 i_p''$$

参考文献

- [1] Armstrong, J.D. and A.J. Zmuda, Field-Aligned Current at 1100 km in the Auroral Region Measured by Satellite, *J. Geophys. Res.*, **75**, 34, 7122–7127, 1970
- [2] Block, L.P. and Fälthammar, C.G., Effect of field aligned currents on the structure of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4807, 1968
- [3] Burke, W.J., D.D. Donatelli and R.C. Sagalyn, Injun 5 observations of low-energy plasma in the high latitude topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **83** (A5), 2047–2056, 1978 a
- [4] Druyvesteyn, M.J., Der Niedervolt Bogen, *Z. Physik*, **64**, 781–798, 1930
- [5] Klumpar, D.M. and Heikkila, W.J. Electrons in the ionospheric source cone: Evidence for runaway electrons as carriers of downward Birkeland currents, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 873, 1982
- [6] Maier, E.J., S.E. Kayser, J.R. Burrows and D.M. Klumpar, The Suprathermal electron contributions to high latitude Birkland currents, *J. Geophys. Res.*, **85**, 2003–2010, 1980
- [7] Oyama, K.I., K. Hirao and F. Yasuhara, Electron temperature probe on board Japan's 9th scientific satellite "OHZORA", *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 413–430, 1985
- [8] Primdahl, F., A. Bahnsen, M. Ejiri, P. Hoeg, G. Marklund, B.N. Maehlum, J.K. Olesen, E. Ungstrup and L.J. Zanetti, Rocket-borne and Groundbased observations of coincident field-aligned currents, electron beams, and plasma density enhancements in the afternoon auroral oval, *Planet. Space Sci.*, **32**, 5, 561–583, 1984
- [9] Rich, F.J., R.C. Sagalyn and P.L.J. Wildman, Electron temperature profiles measured up to 8,000 km by S3-3 in the late Afternoon Sector, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1328–1332, 1979