

科学衛星 JIKIKEN における電子ビーム放出実験

赤井 和憲・河島 信樹

(1984年12月15日受理)

Electron Beam Emission Experiment in JIKIKEN (EXOS-B)

By

K. AKAI and N. KAWASHIMA

Abstract: Beam-plasma interaction experiment in the magnetosphere by emitting controlled electron beam has been performed by JIKIKEN (EXOS-B). Several types of waves in both ranges of VLF and LF/HF were strongly excited by the electron beam. In LF/HF range in low altitude region (height 10000km) several types of plasma waves are clearly identified such as the plasma frequency, the upper hybrid frequency, the electron cyclotron frequency and its harmonics, the half-cyclotron frequency and f_{Q2} . It is observed that the amplitude of these waves strongly depends on f_{pe}/f_{ce} of the ambient plasma. In VLF range the spectrum changes clearly when the satellite goes through the plasmopause. Inside the plasmopause the excited wave has a broad spectrum up to several kHz, whereas outside the plasmopause the excited wave has narrow band width and the frequency changes rapidly. The effect of beam modulation is strong especially far into the magnetosphere. The nonlinear coupling of the beam modulation and the plasma wave is also observed. Furthermore the density profile of the magnetospheric plasma is obtained by the electron beam experiment.

1. 序 論

科学衛星 JIKIKEN (EXOS-B) は磁気圏プラズマにおける粒子-波動相互作用の解明を目的として1978年9月16日に打ち上げられ、遠地点30,000 km、近地点227 km、傾斜角31°の楕円軌道に投入された。JIKIKEN は約5年にわたって観測が行われ、膨大な量のデータが得られてきた。また、現在においてもバッテリー及び一部の観測機器は使用可能な状態にある。

宇宙空間電磁現象の研究にあたっては、波動-粒子相互作用の解明が根源的な意義を持

つものであるが、その研究方法として、自然に生起する現象を観測する受動的観測と、制御された波動や粒子束を衛星から放射し、プラズマの応答を調べる能動的観測の2つに大別される。このうち後者は、現象の最も本質的な部分を抽出し、制御された既知のパラメータを用いて再現性のある実験が行なえる利点がある。

JIKIKENにおける電子ビーム放出実験 (Controlled Beam Experiment ; CBE) の目的は第一にこの能動的実験として、電子ビーム (最大 200 eV, 1 mA) を衛星から放出し、磁気圏プラズマと電子ビームの相互作用を研究することにある。第二に衛星の帯電現象の研究である。ATS-5, 6 の静止衛星で、真夜中～夜明けの領域でかなり高いエネルギーを持った粒子束が存在し、それが衛星を $-10 \sim -20$ keV の高電位に帯電させていることが報告されて以来、多数の衛星で、帯電現象とその弊害が観測されてきた (Sharp et al., 1970[1]; Deforest and McIlwain, 1971[2]; Deforest, 1972[3]; Rosen, 1976[4])。衛星の帯電現象は衛星の運用面とも関わる重要な問題であり、このメカニズム解明と帯電防止という実用上の目的のために、電子ビーム放出による電位制御実験が重要な意義を持つ。本報告では JIKIKEN 衛星における電子ビーム放出実験の観測データ解析の結果についてまとめた。

2. 装 置

JIKIKEN に搭載された電子ビーム放出装置 (CBE) については、既に報告されてきたので (Kawashima et al. 1979) [5] ここでは概略だけにとどめる。CBE の電子銃本体概形及び制御回路を第1図に示す。電子ビームは直熱型タングステンから放出される。ビーム電

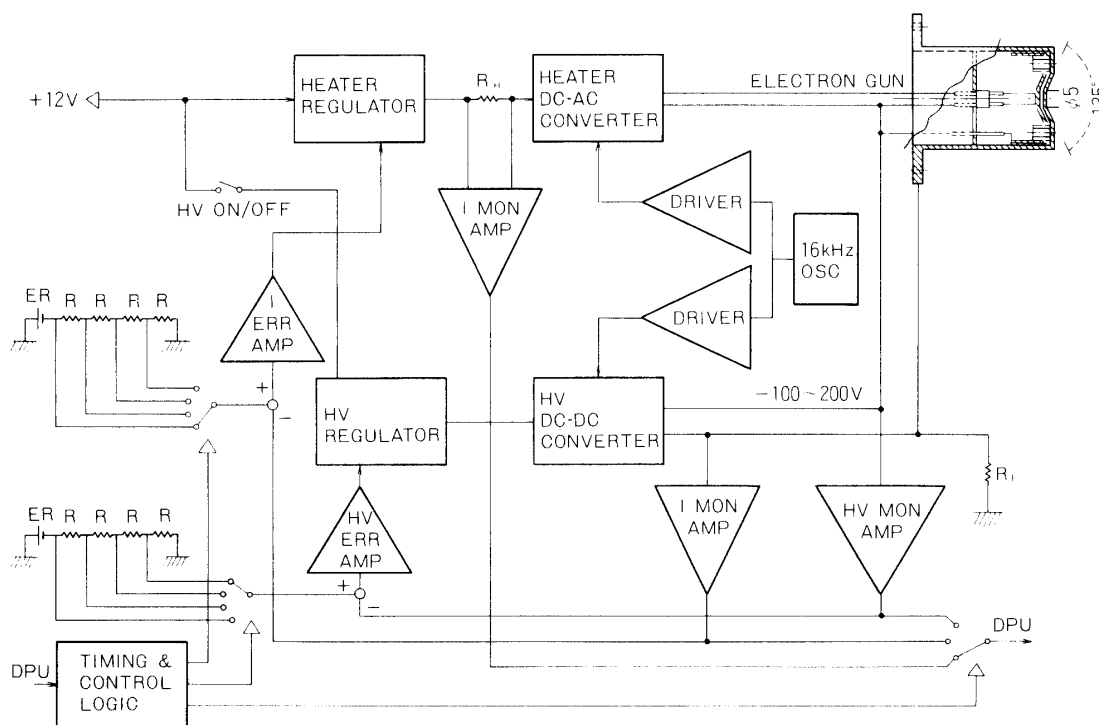


図1 電子ビーム放射装置と制御回路 block diagram

流は $I_B=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ mA, ビーム電圧は $V_B=100, 125, 150, 200$ V の条件を各4段階に可変である。ビーム電流の制御はカソードヒーターに印加する 16 kHz 矩形波電流の duty を変化させることにより行っている。16 kHz はカソード電極の温度変化時定数よりも速く、また、電子銃の温度制限領域での動作のためビーム電流は影響をうけないが、ヒーター両端の電位差 (3 V) のため電子ビームに 16 kHz の速度変調がかかる。このため後述のように 16 kHz の高調波が受信される。

観測装置としては、110 m tip to tip ダイホールアンテナ、VLF/HF 帯波動受信機、電子/イオンエネルギーアナライザを用いた。

3. 観測結果

3-1 HF 帯プラズマ波動

電子ビーム放出により種々のプラズマ波動が励起されるが、とりわけ高度の低くプラズマ密度の高い場所 (Height $\leq 10,000$ km) においては、その傾向が著しい。典型的な例として、Rev. 5447 での HF 帯波動の f - t スペクトルを図2に示す。衛星は近地点を過ぎ、低高度 ($L=1\sim 2$) にあって地球から遠ざかって飛んでおり、電子ビームは 23:20 UT から 23:30 UT まで連続的に放出されている。この観測が行われた時 (1983年6月) 波動受信機の利得がかなり低下しており、自然に生起する波動は観測不可能であったが、電子ビームにより図2のように種々の波動が励起されている。衛星のスピンにより波動スペクトルが 80 秒周期で modulation を受けている。

衛星は既に磁場測定能力を失っていたが、衛星の軌道位置から dipole field model を用いて計算した電子サイクロトロン周波数 (f_{ce}) の値を図中 Δ で示した。軌道データは予報値のため多少の誤差があるが、観測された波動の中に、 f_{ce} に identify できるものがある。

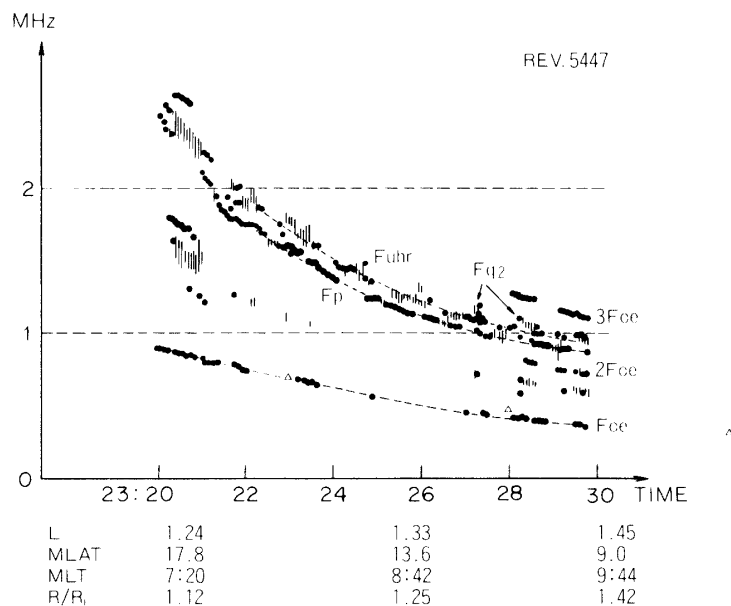


図2 HF 帯励起波動 f - t diagram (Rev 5447)

さらに $2f_{ce}$, $3f_{ce}$ の波動の励起も明らかである。 $2f_{ce}$ と $3f_{ce}$ の間にある波動は f_{pe} と f_{UHR} である。 f_{pe} 及び f_{UHR} は他のプラズマ波動に比べて最も強く励起されている。 図中点線で示したのは $f_{UHR} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2}$ の関係をみだす周波数であり、観測された波動と良い一致をみている。 この他、23:26:00, 23:27:20, 23:28:40 及び 23:30:00 の時刻には f_{UHR} より少し周波数の高い波が励起されているが、これは Birnstein mode の ω - k diagram において波動 k_1 の大きい所 ($k_1 R \sim 1$) で $\partial\omega/\partial k \cong 0$ となる周波数と考えられる。 これは RF パルス放射実験において観測されている f_{Qn} レゾナンスと同じものである。 衛星のスピンの伴い電子ビームの pitch angle が変化するが、この時ビーム波とプラズマ波の coupling point が f_{Qn} に一致したものと思われる。 さらに $\frac{3}{2}f_{ce} \leq f \leq 2f_{ce}$ の範囲に波動が励起されている(半整数電子サイクロトロン波)。 電子ビームとプラズマとの相互作用による半整数電子サイクロトロン波については、実験室内実験において観測されている (Bernstein, et, al., 1975[6])。 JIKIKEN での本実験によって、磁気圏プラズマ中においても、密度が比較的高い場所 (height $\leq 10,000$ km) で半整数サイクロトロン波が励起されることが明らかとなった。

図3に Rev 5447 で励起された電子サイクロトロン高調波及び f_{Q2} の強度を示す。 衛星の spin による強度変化の他に、特徴的なことは f_{ce} と $3f_{ce}$ が 23:20 から 23:24 までと 23:28 から 23:30 まで現われているが 23:24 から 23:28 の間は励起されていないのに対し、 $2f_{ce}$ は 23:20 から 23:30 まで継続的に現われ、しかもむしろ 23:24 から 23:28 までの間は長く続いていることである。 このことは周囲のプラズマにおける f_{pe}/f_{ce} の値に対する依存性として理解できる。 図3(b)に示すように、 $f_p/f_{ce} \geq 2.3$ において f_{ce} と $3f_{ce}$ が強く励起され、 $f_p/f_{ce} \leq 2.3$ では $3f_{ce}$ が殆んど現われなくなる。 他の観測データも、同じ傾向を示している。 Rev 4518 (1982年9月17日) における f - t diagram を図4に示す。

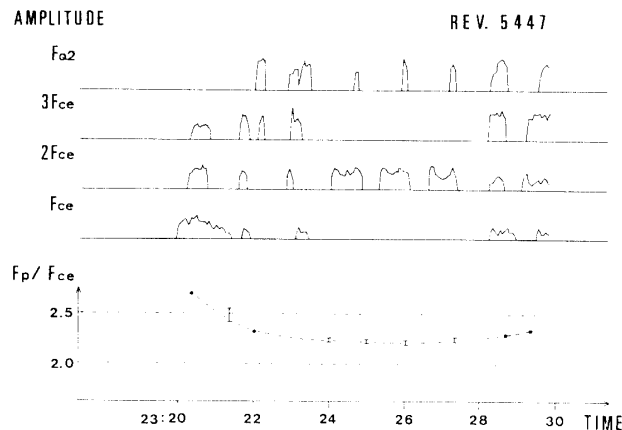


図3 (a)電子ビームで励起された電子サイクロトロン高調波と f_{Q2} の強度(b)及びその時の f_p/f_{ce} の値

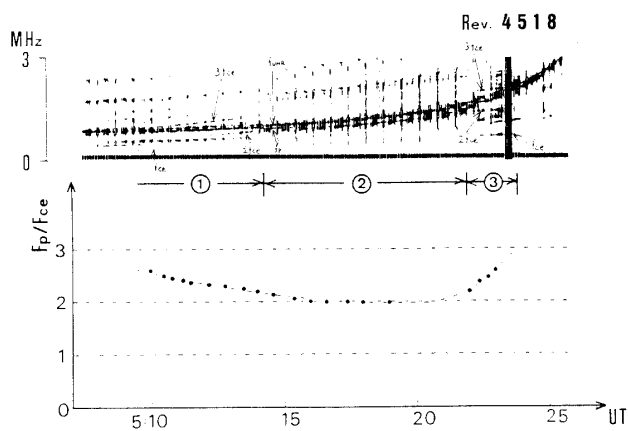


図4 (a) HF帯励起波動 $f-t$ diagram (Rev 4518) (b) 及びその時の f_p/f_{ce} の値

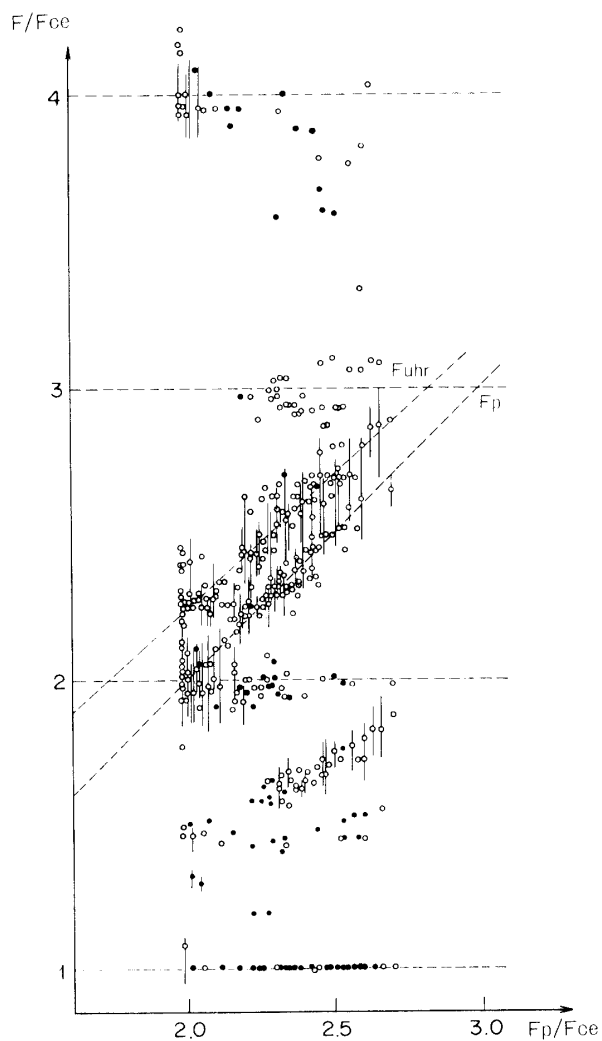


図5 HF帯励起波動の f_p/f_{ce} への依存性 (Rev 4518)

この時衛星のスピンは40秒であった。 $f_p/f_{ce} \geq 2.3$ において f_{ce} と $3f_{ce}$ が励起されており、 $2f_{ce}$ は実験時間を通じて継続的に励起されており、Rev 5447と共通性がある。図5に電子ビームで励起された波動の周波数と f_{ce} の比を縦軸に、周囲のプラズマの f_{pe}/f_{ce} の値を横軸にとり示す。Rev 4518において電子ビーム放出中の衛星の軌道上でのプラズマの f_{pe}/f_{ce} の値が1.98~3.0の範囲に限定されてはいるが、図3(a)と合わせて次のような特徴が現われている。

- (1) f_p と f_{UHR} は f_{pe}/f_{ce} の値によらず強く励起されている。
- (2) f_{ce} は主として $f_{pe}/f_{ce} \geq 2.3$ で現われているが、その強度は $2f_{ce}$ 、 $3f_{ce}$ に比べて小さい。
- (3) $2f_{ce}$ と $3f_{ce}$ が強く励起されるが、 $3f_{ce}$ は $f_{pe}/f_{ce} \geq 2.3$ の時に限り現われている。
- (4) $1.5f_{ce} \leq f \leq 2.0f_{ce}$ の波動(半整数電子サイクロトロン波)がかなり強く励起され、その周波数 f/f_{ce} は f_{pe}/f_{ce} の値の増加につれ特徴的な増加を示す。

低高度(height $\leq 10,000$ km)における他の観測データが約20 Revあるが、上に挙げたプラズマ波動が大体共通して現われている。このように、電子ビーム放射により種々の特徴的プラズマ波動の励起が観測された。このことは後に述べるように、磁気圏プラズマ計測手段として電子ビーム放射実験が有効であることを示している。

3-2 VLF帯波動

JIKIKENにおいて電子ビーム放射に伴ないVLF帯においても種々の波動が励起されていることが観測された。励起されたVLF帯波動のスペクトルは衛星の位置によって非常に顕著な変化を示している。図6及び図7に電子ビーム放射時の観測データを示す。図中上部には電子エネルギーアナライザによって測定された電子エネルギー分布を示す。Rev 2585(図6)では21:53 UTを境としてその前後で電子エネルギー分布が特徴のある変化を現わしている。すなわち200 eV付近の電子が21:53付近で急激に増加し、それ以降も継続して200 eVのピークが現われている。衛星は地球からしだいに遠ざかっており、

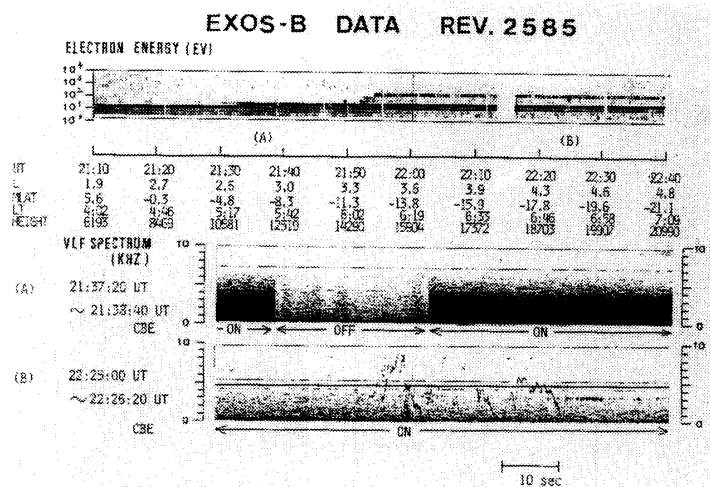


図6 電子ビーム放射時の電子エネルギー分布とプラズマポーズ内外でのVLF帯波動スペクトル (Rev 2585)

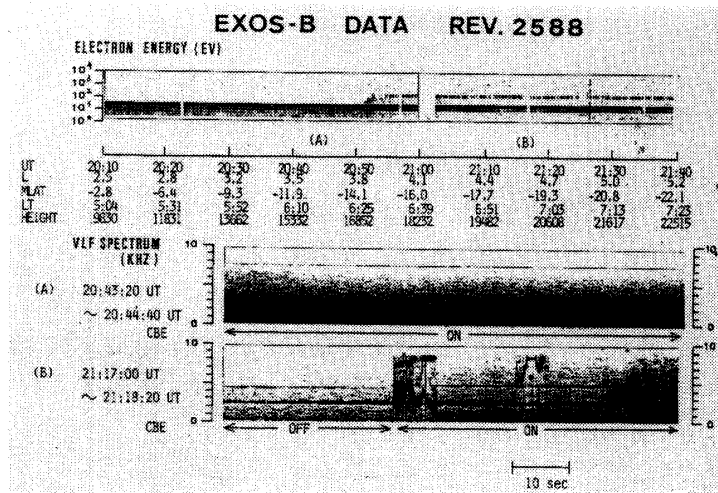


図7 電子ビーム放射時の電子エネルギー分布とプラズマポーズ内外でのVLF帯波動スペクトル (Rev 2588)

周囲のプラズマ密度の減少に伴い電子ビーム放射による衛星の帯電はしだいに増加する傾向にあるが、21:53の急激な変化は、その時の衛星の位置(height \sim 15000 km, $L T = 6^h$)からみて、ちょうどこの時プラズマポーズを通過したためプラズマ密度が激減したと考えられ、その為衛星が電子ビームの加速電圧(200 V)程度まで帯電し、周囲からの帰還電子が200 Vの加速を受けたことを表わしている。励起されたVLF帯波動も、プラズマポーズ通過の前で非常に興味深く変化していることが観測された。21:53 UT以前においては、VLF帯励起波動は0から5 kHz程度までのbroadな周波数スペクトルを持っているのが特徴的であるが、21:53 UT以降はbroadな波は弱まり、かわりにband幅が狭く、周波数が0から10 kHz以上にわたって非常に速く変化する波動が現われるのが特徴的である。それぞれの代表的な時刻のデータを図6の下部に示す。各々途中でスペクトルの消えている部分があるが、この時電子ビーム放射はOFFとなっている。ビームOFFの間もVLF帯受信機は観測モードになっており、このことからこれらの波動は電子ビーム放出によって励起された波動であることが確認される。図7は別の観測データ(Rev 2588)であり、Rev 2585(図6)と全く同じ特徴を表わしている。

Rev 2585, 2588で観測されたband幅が狭く周波数変動の著しい波動(以後、lightning emissionと名づける)は、他のRevにおいても電子ビーム放出時に限って現われている。データ量が膨大な為統計的処理を行い、衛星の位置(高度, Local Time)に対する出現頻度を調べてみた。図8は衛星の高度に対して、図9は衛星のLocal Timeに対してそれぞれlightning emissionの出現頻度を表わしたものである。ここで出現頻度とは横軸の一区内において、電子ビーム放出実験の行なわれた時間の総和に対して、lightning emissionの観測された総時間の比を百分率で表わしたものである。図8の結果から高度の高い場所(height \geq 15000 km)でのみ励起されており、これはplasma pause外でのみ励起されたRev 2585, 2588の結果と一致している。図9からは夜から朝にかけて頻度が高い傾向がう

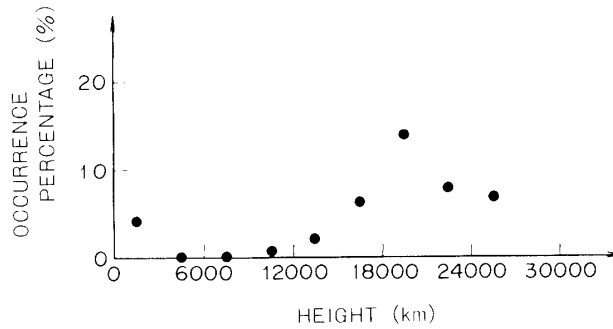


図8 電子ビームによって VLF 帯に励起された band 幅が狭く周波数変化の激しい波動の HEIGHT に対する出現頻度

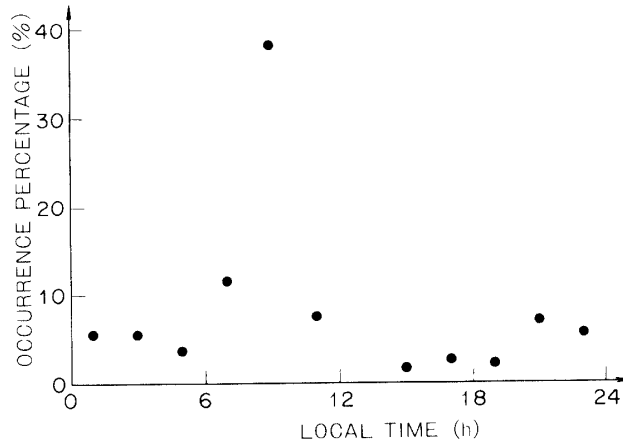


図9 電子ビームによって VLF 帯に励起された band 幅が狭く周波数変化の激しい波動の LOCAL TIME に対する出現頻度

かがえる。但し昼側のデータ量が充分ではないため、Local Time 依存性については誤差が少くない。

以上観測結果をまとめると、電子ビーム放出により励起される波動はプラズマポーズ内側では 0~5 kHz の broad なスペクトルも持つのに対し、プラズマポーズの外側で衛星の帯電の大きい時は band 幅が狭く周波数変動の激しい波動の励起されることが多い。

3-3 電子ビームの速度変調の効果

装置の項で述べたように電子ビームにはヒーター電源による 16 kHz の速度変調がかかっている。その結果 HF 帯に 16 kHz に関道する波動が受信された。図 10 は Rev 1447 での電子エネルギー分布と HF 帯波動スペクトルを示す。衛星は地球に向かって近づいてきており、22:50 UT を境として電子エネルギー分布において 200 eV の成分が変化している。これは前節で述べた通りプラズマ密度の変化に伴い衛星の帯電電圧が変化していることを表わしている。HF 帯スペクトルで 22:58 以降に 200 kHz 以上の周波数帯に強く現われ

EXOS-B DATA REV.1447 80/01/27

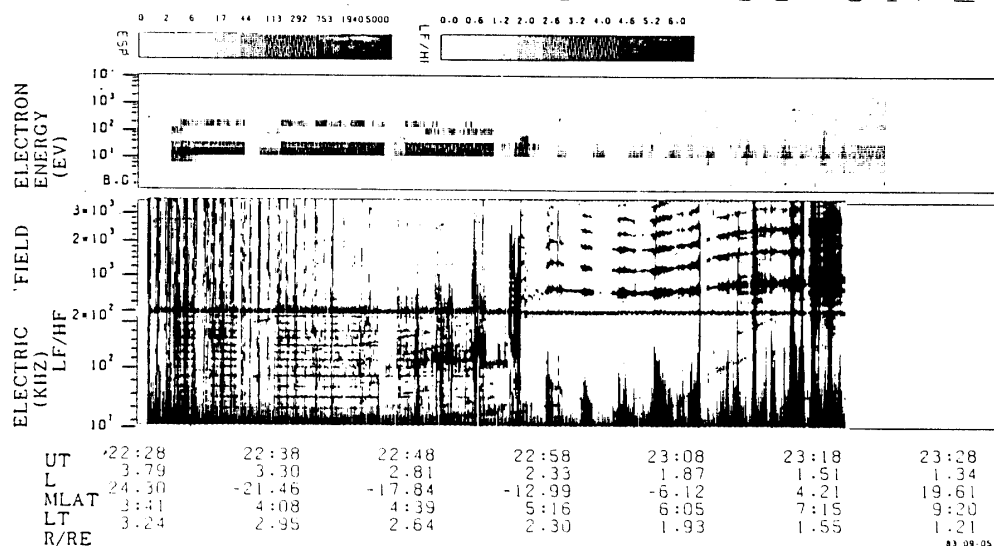


図10 電子ビームの速度変調に起因する 16 kHz harmonics

ているのは f_{UHR} 及びその高調波であるが、この高調波については f_{UHR} の強度が大きい為受信機内部で生じたものとの見方が強い。注目すべきことは、22:50 UT 以前は 16 kHz 及びその高調波が強く受信されているのに対し、22:50 UT 以降はそれが受信されていない点である。この 16 kHz の受信レベルは内部で高調波を生じる大きさではない。多くの観測データから 16 kHz の高調波は地球から遠い程、また電子ビームの電流が多い程、さらに加速電圧が小さい程強く受信されている。その理由として考えられることは変調の幅は常にヒーター両端の電位差からくる 3V で一定であるから加速電圧が小さい程変調度が大きく、また地球から遠くなるにつれて帯電が大きい為、シースから外に出る時の電子ビームの速度が小さくなる為やはり変調度が大きくなることが挙げられる。

次に 16 kHz の変調が周囲のプラズマ波動と couple した興味深い観測例を示す。図 11 に電子ビーム放射時の LF 帯 (10~200 kHz) の波動スペクトルを示す。図中最も高いピークは $f=85$ kHz であり、これは f_{pe} もしくは f_{UHR} である。 $f_{pe} \sim f_{UHR}$ が 10~200 kHz の範囲外の時 16 kHz の高調波 ($f=n \times 16$ kHz) は $n=1, 3$ が強く n が大きくなるにつれ強度は小さい。しかし図 11 の例は $f_{pe} \sim f_{UHR}=85$ kHz であり、この時 16 kHz の高調波のうち $f_{pe} \sim f_{UHR}$ に近い周波数の波 ($n=5, 7$) が最も強い。さらに、 $f_{pe} \pm 16$ kHz のビート波 ($f=69$ kHz, 101 kHz) も明らかに受信されている。これは instrumental に起因するビートでは決してない。何故ならこの時 $n=1$ ($f=16$ kHz) は殆んど現われておらず $n=3$ ($f=48$ kHz), $n=5$ ($f=80$ kHz) などが強いので、もし instrumental なビートならそれらと couple するはずであるが観測データはそれを否定している。以上のことから、16 kHz の密度変調が周囲のプラズマと couple して、16 kHz の高調波のうち周囲のプラズマの分散に合致するものが強く励起されること、またプラズマ波動 ($f_{pe} \sim f_{UHR}$) と非線型 coupling して

いることが明らかとなった。

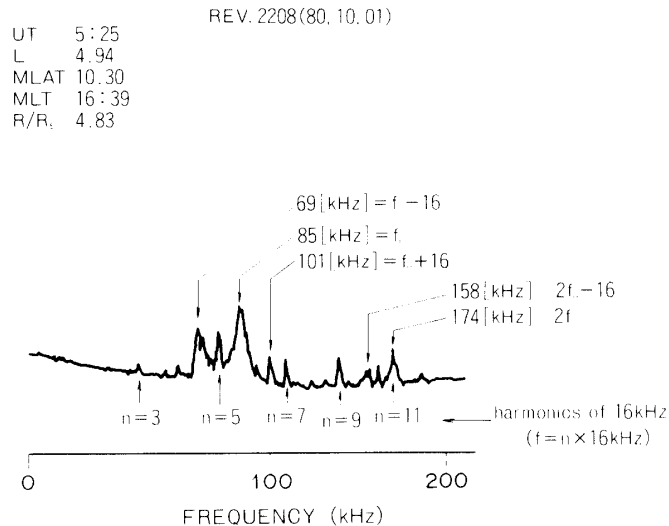


図11 プラズマ周波数 ($f_0 = 85$ kHz) と 16 kHz との Coupling によるビート波及び $f_0, 2f_0$ に近い 16 kHz 高調波の励起

3-4 磁気圏プラズマの計測手段としての電子ビーム実験の有効性

前述 (3-1) の通りビーム放射によって f_{pe} , f_{UHR} , f_{ce} 等が再現性良く励起されるので、観測された波動から周囲のプラズマ密度や磁場強度を知ることができる。これまでに行われた電子ビーム放射実験によって多くのデータが得られてきたが、励起された f_{pe} から求められたプラズマ密度分布を図12に示す。夜側の部分については十分な量のデータが得られていないが、重要なことは磁気圏のかなり遠い場所 ($n \sim 30/\text{cm}^3$) までの低密度においても計測可能であることである。また、3-2節で示したように、プラズマポーズ内外において波動のスペクトルが急激に変化するので、プラズマポーズの検出ができる点である。JIKIKENに搭載された電子ビーム放射装置はパワーも小さく (200 V, 1 mA) 小型で軽量 (1.39 kg) である。励起された波動はかなり強いので波動受信機はあまり感度の高くないもので十分受信可能である。このように、電子ビーム放射実験は磁気圏プラズマにおいて、また将来の惑星間深査において有効な計測手段であることが JIKIKEN の観測から示された。

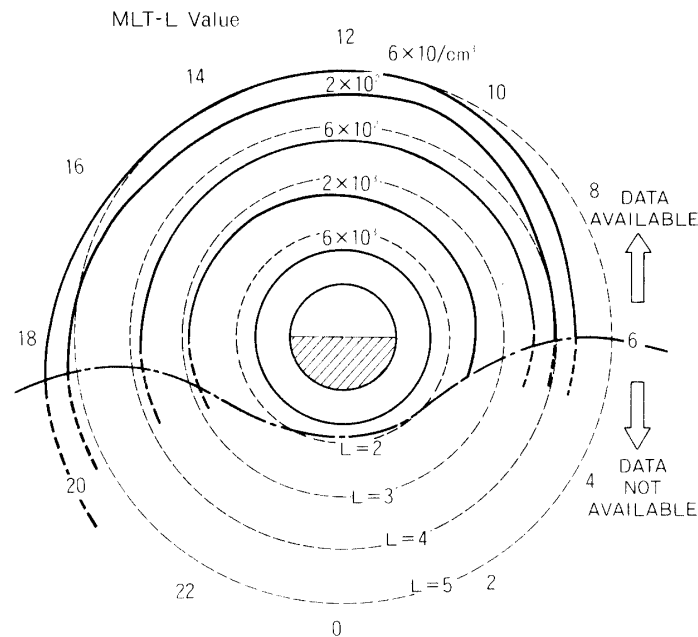


図12 電子ビーム放射実験によって得られた磁気圏プラズマ密度分布

4. 結 論

科学衛星 JIKIKEN における電子ビーム放出実験のデータ解析により次のような成果を収めた。

1. 電子ビーム放射により LF/HF 帯にプラズマ周波数 (f_{pe})、upper hybrid 周波数 (f_{UHR})、電子サイクロトロン周波数 (f_{ce}) 及びその高調波、半整数電子サイクロトロン波などのプラズマ波動が励起された。これらの波動の強度は周辺のプラズマの f_{pe}/f_{ce} の値に強く依存していることが明らかとなった。
2. 電子ビーム放射により VLF 帯に励起される波動はプラズマポーズより内側では 0~5 kHz の broad なスペクトルを持っているが、プラズマポーズより外側では、band 幅が狭く周波数が 0~10 kHz 以上にわたって激しく、秒オーダーで変動する特徴的なスペクトルを持っている。これは衛星の帯電状態との関連性があると思われる。
3. 電子ビームには 16 kHz の速度変調に起因する密度変調がかかっており、これに起因する 16 kHz の高調波及び 16 kHz と $f_{pe} \sim f_{UHR}$ とのビート周波数が受信された。観測データから 16 kHz の空間密度波と周囲のプラズマとが非線型的 coupling を起こしていることが明らかになった。
4. 電子ビーム放射により励起された f_{pe} の測定から磁気圏のプラズマ密度が $n \sim 30(\text{cm}^3)$ の低密度に至るまで測定された。また、プラズマポーズの位置も検出された。搭載された装置は小型かつ軽量であり、波動受信機も高感度を必要としないため、電子ビーム放出実験が宇宙空間におけるプラズマ計測手段として有効であることが示

された。

謝 辞

大林辰蔵教授，木村磐根教授，大家寛教授はじめ，EXOS-B プロジェクト・スタッフ及び JIKIKEN 追跡性の諸氏に感謝の意を表す。また，電気通信大学宮武貞夫氏には有効な議論を頂いた。さらにデータ処理に良期間尽力された牛越淳雄氏，卒業研究としてデータ処理に従事された武蔵工大長田栄治氏に，感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] Sharp, R. D., R. G. Johnson, and G. Paschmann; J. Geophys. Res., 75, 6092 (1970)
- [2] Deforest, S. E. and C. E. McIlwain; J. Geophys. Res., 76, 3587 (1971)
- [3] Deforest, S. E.; dbid, 77, 651 (1972)
- [4] Resen, A., Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas, MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1976)
- [5] 河島信樹，他；東京大学宇宙研究所報告 第15巻 767 (1979)
- [6] Bernstein, W., et. al; J. Geophys. Res., 80, 4375 (1975)
- [7] Seidl, M.; Rhys. Fluids, 13, 966 (1970)