

K-9M-49号機によるプラズマ 計測、及びプラズマ波動励起実験*

大家 寛**・森岡 昭**・小野 高幸**・近藤 実**

概 要

K-9M-49号機は昭和50年1月17日、18時35分、仰角77.5度、方位角140度で打上げられ、予定した全ての項目で実験を成功させる事ができた。

この実験は、宇宙空間プラズマを人工的にコントロールして、プラズマの物理的基本特性の一つである、電波伝播特性、加熱機構あるいは電子ビームによる不安定現象ならびに波動粒子相互作用の研究を目的とするもので過去にK-9M-41、L-3H-8といった一連の実験で、プラズマの研究素材としては理想的な、宇宙空間プラズマを利用して、プラズマの物理的基本特性の研究を進めて来た。

今回、K-9M-49機で

- 1) 人工的にコントロールされた、Harris型及びBeam型プラズマ不安定を作り、プラズマ波動励起実験を行う。
- 2) 高周波インピーダンスプローブにより周囲のプラズマの諸パラメータを計測する。

といった2つの目的に従って実験を行ない、それぞれに重要なデータを得る事ができたがこのうち本論では、プラズマ波動励起実験の報告をする。高周波インピーダンスプローブの実験結果は一部引用しているが、さらに重要な結果が得られていて、別の論文に報告される。

今回のプラズマ波動励起実験では、1mアンテナに印加して10Vのポテンシャルが重要な役割を持っているBeam型不安定による波動励起が観測されている点が重要で、この点に主点が置かれている。

1. 実験の背景と基盤

「宇宙空間という理想的なプラズマ実験室で、大電力高周波を放射し、あるいはBeamを人工的に作って、プラズマの不安定現象や波動粒子の相互作用をさぐり、プラズマの物理像を明らかにしてゆく」という方針から、K-9M-41、L-3H-8、およびK-9M-49とロケットによる実験を推進し、重要なデータを得てきた。これらの実験は発射前のテストをかねて、スペースチャンバーによるシミュレーションを行い、プラズマの基本的特性をつかむほか、機器ならびに実験方法の改良を重ねてきた。第1表に、K-9M-41号機に始まり現在に至るロケット実験の特徴がまとめられている。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 東北大学理学部

第1表 K-9M-41号機より現在に致るまでのロケットによるプラズマ波動励起
実験の特徴のまとめ

実験	特徴	備考	成否	
			スペース チェンバー	フライト
K-9M-41	第一回機器開発	出力が低い Beam-ONのみ 受信感度が低い	○	○
L-3H-8	41号機の問題点の改良	出力が低い Beam-ON-OFF 受信機の高感度化	○	
K-9M-49	同上 (L-3H-8のやり直し)	出力が低い Beam-ON-OFF (Potential Cathode を各 独立にコントロール 受信機の高感度化)	○	○

機器開発として誕生したK-9M-41号機は、高周波電波の出力不足、受信機の感度不足という困難があったが、後述するようにそのデータの中には、今回の実験で確認された、Beam型不安定による波動励起現象を見る事ができる。しかしながら41号機は、電子ビームの走行状態のみで実験を行い、観測された現象がBeamによって作られた波動であると言いかける事はむづかしかった。

L-3H-8でのロケット実験は、K-9M-41号機の場合が持っていた問題点を改良したもので、高周波電波出力が尚不足ではあったが、受信機の最高感度は $10\mu V$ に向上し、チェンバーテストでな様々な現象をとらえる事ができた。しかしフライト時に、回路系の温度特性の不安定を起して、データは得られなかった。

今回のK-9M-49ロケットでの実験は従来の経験をふまえて、受信機の感度の上昇、電子機器の高安定化のほか、オペレーション時のパラメータを多様化する事によって、プラズマの不安定を作る原因を、より明確につかめるようになっている。つまり高周波電波出力の変化を行ったり、Beamの発生をコントロールする他、Hot Cathode や 1 m アンテナに印加するポテンシャルのON-OFFを行っている。

2. 実験システムの概要

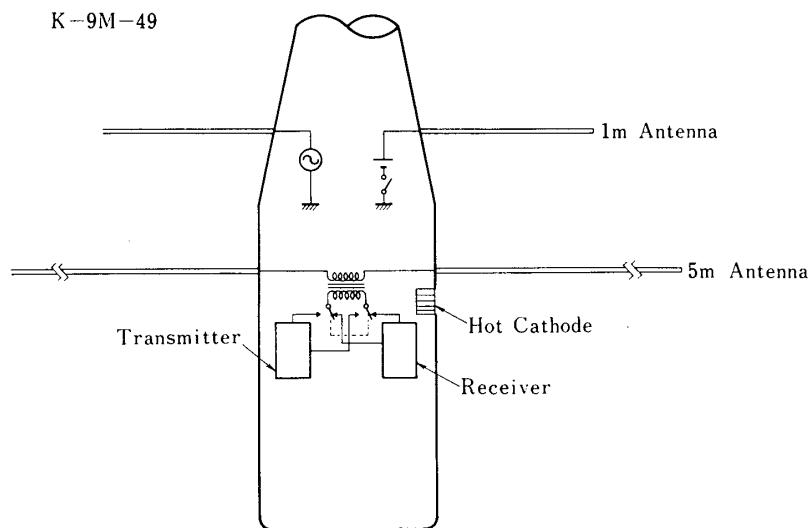
この実験 (K-9M-49号ロケットを用いたもの) では、すでに述べたような目的を果すため以下の部分から成り立っている。

- 1) アンテナ及びプローブ部 (ジャイロプラズマプローブ)
- 2) 波動励起実験モードの選定部
- 3) 波動励起実験電子機器部

4) 地上データ処理装置

1) アンテナ及びプローブ部

第1図に示すように、ロケット本体からは、1m アンテナおよび5m アンテナが各2本と Hot Cathode がプラズマ中に突出される。

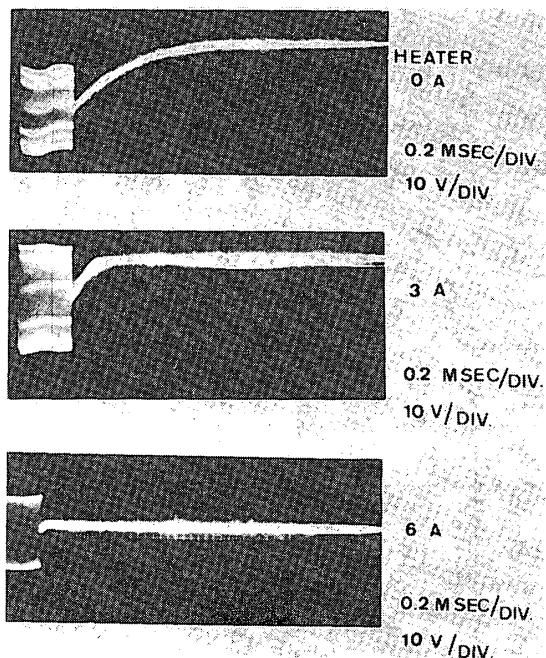


第1図 K-9M-49号機のアンテナ及びプローブ部の配置図。1m アンテナの1本は高周波インピーダンスプローブ、もう一本は10Vのポテンシャルの印加に用いる。5m アンテナは電波の送、受信アンテナとして、Hot Cathode は 5m アンテナのポテンシャル保持のために用いられる。

1m アンテナはその1本が高周波インピーダンスプローブとして使用され、他の1本はロケット本体に対し10Vのポテンシャルを加えて電子を加速する。なおこの電源出力インピーダンスは設計仕様で約 500Ω である。

5m アンテナは、2本を平衡型で使用し、大電力高周波の放射及びプラズマ波の受信アンテナとして使用する。高周波電波は繰り返し $10\text{m}\cdot\text{sec}$ 、巾 $100\mu\text{sec}$ のパルス状に放射し、高周波電波が放射される前後 $200\mu\text{sec}$ の間は、受信機系はダイオードスイッチによって切斷され、保護される。残りの $9.8\text{m}\cdot\text{sec}$ の間に、5m アンテナは受信機と接続され、波動の受信を行う。

Hot Cathode は、50mm 長のタングステンフィラメントに約 6A の電流を流し、電子ビームの放射ならびに、5m アンテナのポテンシャルのプラズマに対する沈下をふせぐ。5m アンテナのポテンシャルが Hot Cathode によってプラズマ電位に対する沈下を防がれることは、スペースチェンバーによるシミュレーションによって確認されている。第2図は K-9M-41号機のシミュレーションのデータである。Hot Cathode による電子放出のない場合、パルスの発射とともに電位は急激に沈下し、パルス停止とともにイオンの注入によって徐々に回復する。



第2図 K-9M-41号機搭載機器のスペースチャンバーテストにおける、5 mアンテナの中点の電圧。上の図は Hot Cathode に電流を流さないときのもの。中の図は電流を 3 A に設定したときのもので、ポテンシャル保持の効果が現われている。下の図は電流を 6 A に設定したときのものでアンテナの電位はほぼ完全に保持されている

復するが、Hot Cathode が電子を放出している場合、パルス発射があっても、電位の急激な沈下を起さず、かつパルスの停止とともに一挙に電位回復を起す。これはアンテナへの電子の吸入を、Hot Cathode により停止するためである。

2) 実験モードの選択部

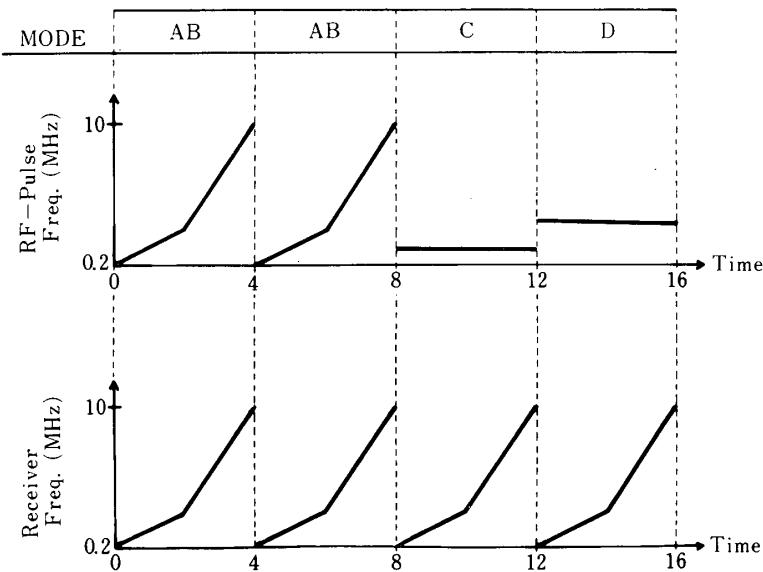
ロケット発射後79秒に、高度約130kmから高周波発射のモードがスタートするが、各機器の動作はタイマーで集中的にコントロールされる。第2表は横軸が時間でモードの選択の様相を示している。まず高周波パルスのパワーは High 状態と Low 状態が24秒毎に切換られ、1mアンテナに印加される10Vのポテンシャルは48秒毎に、Hot Cathode は 96 秒毎にスイッチングされる。つまり 192 秒で全てのモードの組合せが実験できて、各オペレーションの効果を独立に検証することができる。また上記のパワー、ポテンシャル、Hot Cathode の各組合せに対して、周波数掃引のモードが 5 つありそれぞれ AB, C, D, A₁A₁, A₂B₂ と各 4 秒づつ存在する。

- (a) AB モードは、放射する電波の周波数と受信する周波数とが一致していて、それぞれ
 - A: 2秒間で 0.2 ~ 2.5 MHz を掃引する
 - B: 引き続き次の 2 秒間で 2.5 ~ 10 MHz を掃引するように設計されている。従って AB

第2表 オペレーションのモード切換の表。

送、受信の周波数の切換に関するモード(AB, C, D, A₁ B₂)、放射する電波の強度に関するモード、1mアンテナに加えるポテンシャルのON-OFF、及びホットカソードに流す電流のON-OFFの各モードの組合せより成っている

Sweep Mode		AB	AB	C	D	A ₁ B ₁	A ₂ B ₂
Time (sec)		4	4	4	4	4	4
Freq.	Transmit	Swept		Fixed		Off	
	Receive	Swept		Swept		Probe Mode	Swept
Transmitter Power		High / Low			Off		
Potential (10V)		ON / OFF					
Cathode		ON / OFF					



第3図 AB, C, D のモード切換による、放射される高周波電波と、受信されるプラズマ波の周波数関係。横軸は時間、縦軸は周波数を示す

モードでは4秒間で全周波数をカバーするモードとなる。

- (b) Cモードでは、放射する電波の周波数を1MHzに固定し、受信の周波数のみABモードと同様の掃引をする。
- (c) Dモードでは、放射する電波の周波数を3MHzに固定して、Cモードと同様のオペレーションをする。
- (d) A₁ B₁モードは、高周波インピーダンスプローブを動作させるモードである。

(e) A_2B_2 モードは、電波を放射せずに、自然のプラズマ波動を受信する。なお、(d)及び(e)のいずれも AB の全周波数帯を掃引する。さらに AB, C, D のモードの周波数関係は第3図に示すとくになっている。

3) 波動励起実験電子機器

第1図にも示されているように、電子機器構成は送信系と受信系に分割される。第4図に全体ブロックダイヤグラムが示される。

1. 送信系には

(a) 周波数合成部

ここでは送信器の源として供される、掃引及び固定周波数、および第一中間周波増幅部の局部発振周波数を作る。掃引周波数信号は VCO を Saw Tooth 電圧で制御して作られる。

(b) パルス状電力発生部

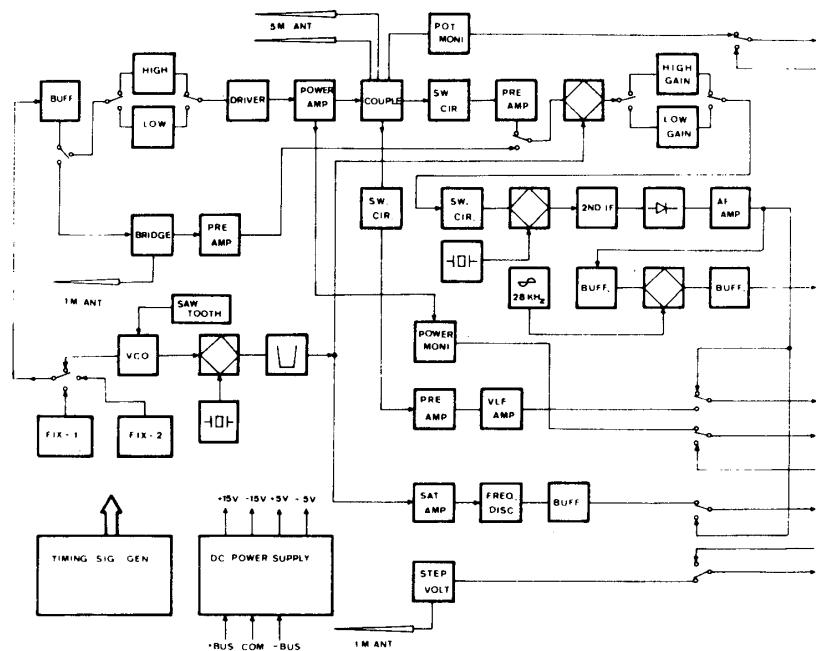
周波数合成部で作られた信号をパルス状に変調したのち増幅し、5m アンテナに給電する。

(c) 高周波インピーダンスプローブ部

波動励起実験には直接関係しないが、ジャイロプラズマプローブ[1]として、プラズマのパラメーターの計測を行う。

(d) Hot Cathode 部

カソードから電子放出を行うため、カソードに特に大電流を通電する点に注意が必



第4図 搭載電子機器部のブロックダイヤグラム

要である。

- (e) 1m アンテナの10V ポテンシャル印加部.

2. 受信系には

- (f) 入力部

5m アンテナで受信された信号は、受信機保護用のダイオードスイッチを通り、プリアンプに送られる。プリアンプはしきい値 $10\mu V$ を得られるように設計されている。

- (g) 中間周波増巾部

プリアンプを通過した信号はミキサー部で局部発振信号と混合され、まず第一中間周波数 $10.7MHz$ に変換されて増巾される。また高周波インピーダンスプローブからの信号もここでゲインを落して増巾されている。続いて混合回路を経て第二中間周波数 $455kHz$ に変換され増巾される。

- (h) 低周波データ処理部

中間周波増巾部を通過した信号は、まず対数圧縮され、検波されて増巾される。この信号はAB, C, Dのモードにおいて、受信機がしゃ断されている間タイミングパルスを加えられ、Ring変調器で $28kHz$ で変調された後、フィルターで上側帯波のみを取り出し、テレメータへ送られる。

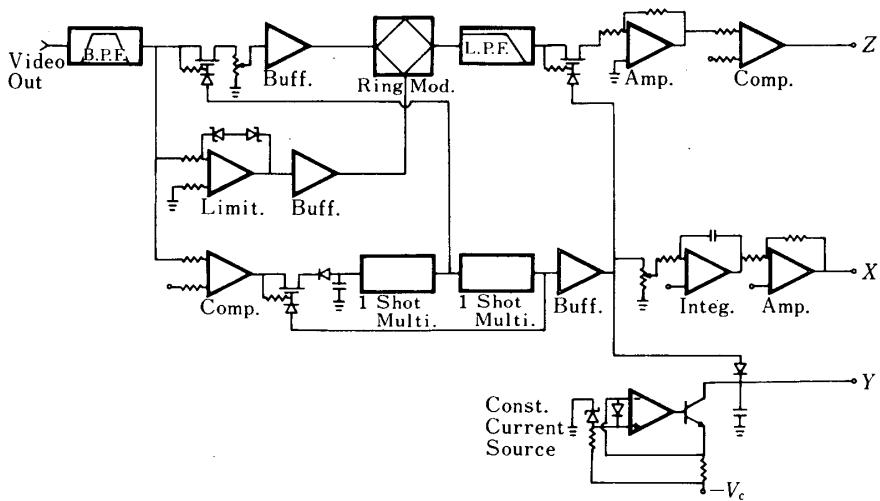
3. 送信系及び受信系は共通の回路として

- (i) 5m アンテナ部

を持っている。さらに

- (j) タイミングコントロール部

によってタイマーのクロック信号から、ロジック回路を経て全てのモードの組合せ及



第5図 地上データ処理装置回路図。AB, C, Dモードでの信号に加えられているタイミングパルスに従って横軸(X)と縦軸(Y)を掃引し、またプラズマ波が受信されると輝度変調(Z)がかかるように設定しイオノグラムの形でデータを表示する

び保護回路の開閉を制御する信号を作り出す。最後にすべての回路に共通のものとして

(k) 電源部

を持っている。

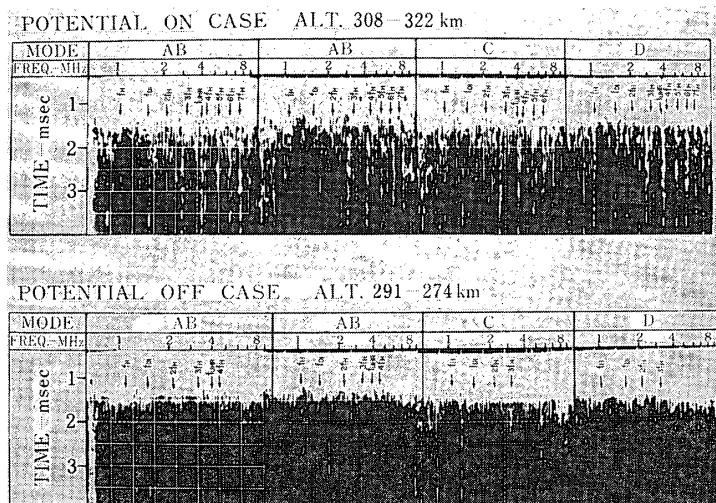
なお5mアンテナで受けたVLF帯の信号は増幅器を経て、テレメータへ直接送られる。また高周波電波の放射あるいは電子ビームによって生じたHF帯のプラズマ波動の信号は上記の受信系を通って、信号の振幅が対数圧縮され、SSB変調を行ったのちテレメータを経て地上に伝送するといった回路構成になっている。

4) 地上データ処理部

AB, C, Dのモードの観測では、イオノグラムを作ってデータを二次元のパターンに整理する。これは横軸に観測されている周波数を、そして縦軸にパルス発射以後の現象の持続時間をプロットするもので、持続時間軸は受信機をダイオードスイッテによってしゃ断している間に生じる波形を選別することによって掃引させ、プラズマ波動が受信されたときに輝度変調がかかるように設定されている。第5図にこの装置の回路図を示している。

3. 観測結果

5mアンテナで受信されたプラズマ波動はデータ処理されて、第6図に示すイオノグラムにまとめられる。



第6図 縦軸に高周波パルスが放射された後の時間、横軸に受信周波数をとっている。白く現われた部分で信号の受信を示す

上の図は 発射後194秒、高度308km、ポテンシャルON、Hot Cathode ON、High Powerのモード

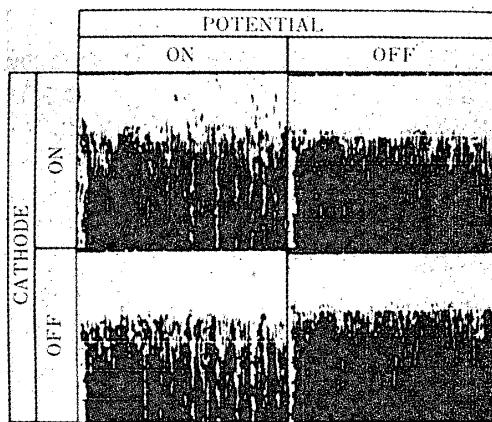
下の図は 発射後434秒、高度291km、ポテンシャルOFF、Hot Cathode OFF、High Powerのモード

すなわち第6図は縦軸に高周波電波がパルス状に放射された後の時間を $m \cdot sec$ の単位でとり、横軸には掃引されてゆく受信機の周波数を MHz の単位でとてある。また信号が入った所が白く表示されている。

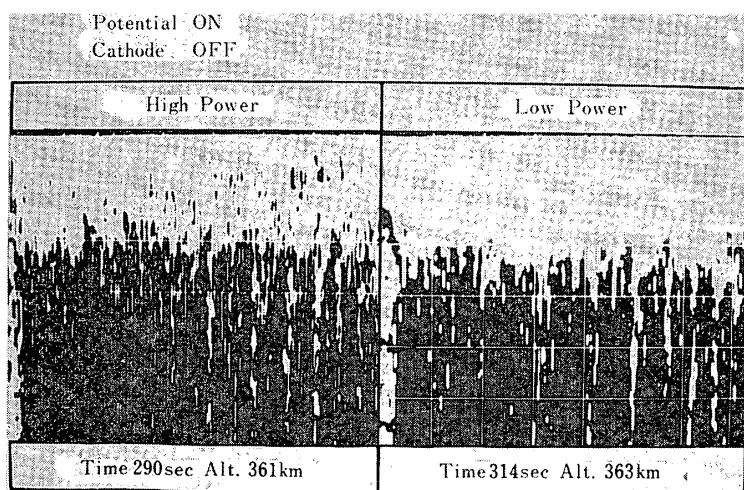
上のデータはロケット発射後の時間が194秒、高度 308 km の上昇時に始まり、A, B, C, D の一連のモードについて観測したもので、1 m アンテナのポテンシャルおよび Hot Cathode 共に ON のとき、放射される電波が高いパワー (40W) で、下のデータは、ロケット発射後 434 秒、高度 291 km の下降時に観測したもので、このときポテンシャル、Hot Cathode は共に OFF となっていて、同じく電波の発射パワーは高い状態のときのものである。それぞれのデータについて nf_H 及び高周波インピーダンスプローブによって計測されたプラズマパラメータに対応する f_{D1} , f_{UHR} の位置が示されている。上のノオノグラムに示されるように 1 m アンテナのポテンシャルと Hot Cathode が共に ON 状態となっているときエミッションが長く現われている。またこのエミッションがサイクロトロン周波数のハーモニクスの近くに現われている事から、電子ビームによって励起されたプラズマのビーム型不安定によるものであることが考えられている。

第7図は High Power 状態での AB モードについて 1 m アンテナに加えるポテンシャルの ON-OFF と Hot Cathode の ON-OFF のすべての組合せについて観測結果を並べている。結果はエミッションが 1 m アンテナに印加するポテンシャルの ON-OFF に制御されており、Hot Cathode の ON-OFF の効果とは無関係であることを示している。

第8図は、印加する高周波電波の電力の高 (約 40W)、低 (約 4 W) の切換によるエミッションの状況を調べたものである。結果は電力の高低にはかかわらずエミッションが現われている。また放射電力が高いときにはさらに、電波が放射された直後にプラズマ加熱の効果により励起されたプラズマ波が現われている。この効果は観測した高度が高い場合には顕著であるが、高度が低い場合にはあまりはっきりとは現われてこない。しかし電子ビームによっ



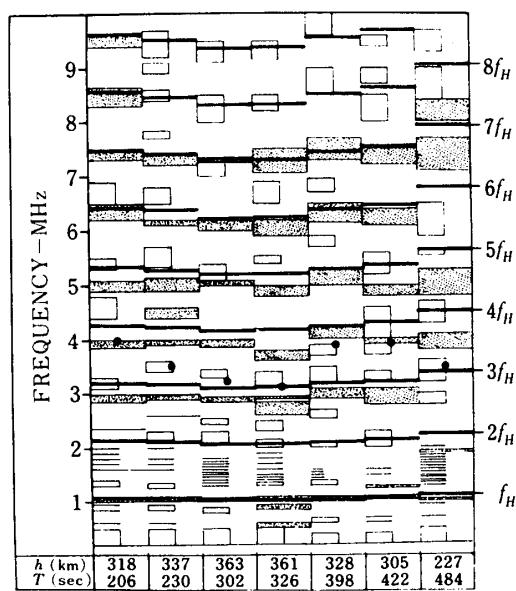
第7図 ポテンシャルと Hot Cathode の ON 及び OFF の組合せのモードによるイオノグラム。ビームによるエミッションがポテンシャルによって励起されることを示している



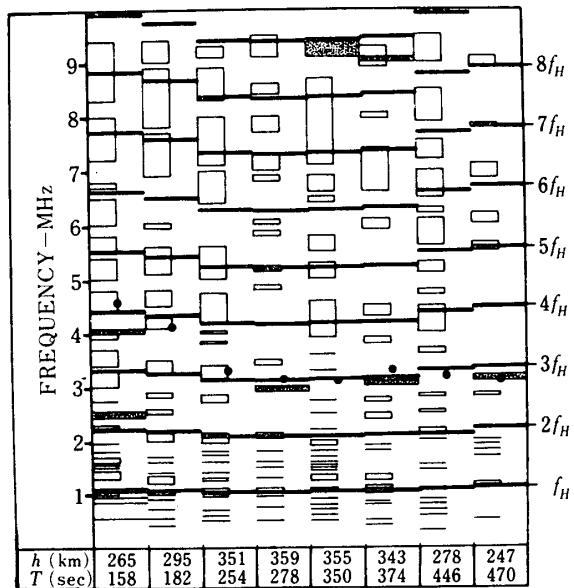
第8図 ポテンシャルON, Hot Cathode OFFのモードでの高周波電波の電力の高低についての比較。エミッションはどちらのモードについても見られるが、電力が高い状態の方にはプラズマの加熱による効果が見られる

第3表 持続時間の長いエミッションの出現したモードのまとめ。エミッションの出現したものについて丸印を印してある

Time (sec)	Altitude (km)	Potential	Cathode	Power	Emission(○)			f_N / f_H
					AB	C	D	
146～	250～		ON	High				4.1
170	282		ON	Low				4.2
194	308	ON	ON	H	○	○	○	3.7
218	328	ON	ON	L	○	○	○	3.6
242	344			H				2.8
266	356			L				3.0
290	361	ON		H	○	○	○	2.8
314	363	ON		L	○	○	○	2.6
338	359		ON	H				2.6
362	350		ON	L				2.9
386	336	ON	ON	H	○	○	○	3.1
410	316	ON	ON	L	○	○	○	3.6
434	291			H				3.2
458	263			L				2.5
482	230	ON		H	○	○	○	2.9



第9図 縦軸に周波数、横軸にイオノグラムに得られた時刻と高度を示し、
ポテンシャルがONのイオノグラムに現われたエミッションを整理したもの。
長く持続するエミッションは中に黒点を印してある。また
 nf_H , f_{UHR} の周波数を、それぞれ黒い棒と黒丸で示している



第10図 第9図と同様の図で、ポテンシャルOFFの場合をまとめたものである

て励起されたエミッションは高度に依らず観測されている [2] [3].

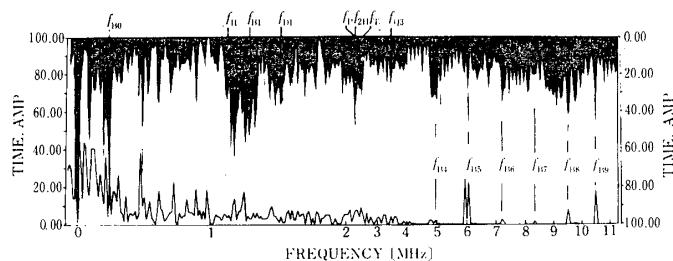
以上のデータについて、長時間にわたるエミッションが出現したオペレーションのモードについて整理したものが第3表である。なお表には同時に、それぞれオペレーションの始まった時間、高度、及び高周波インピーダンスプローブによって計測された、周囲のプラズマのプラズマパラメーター (f_N/f_H) が記してある。

エミッションの出現する周波数を第9図及び第10図に整理している。図は、長時間持続するものは横長の長方形で（中に点を打っている）、一方持続時間の短いものは短い長方形で中を白ぬきで、それぞれ信号の現われた周波数はんいを表わしたものである。またサイクロトロン周波数のハーモニクス (nf_H) は黒い棒で、ハイブリット共鳴周波数 (f_{UHR}) は黒丸で示している。

第9図は、ポテンシャルONの場合の全てのケースであり、第10図はポテンシャルOFFの場合のものである。

第9図では、各オペレーションについてエミッションはサイクロトロン周波数のハーモニクスの近くに現われていることがわかる。第10図では、ポテンシャルONの場合のようなエミッションはほとんど見当らない。

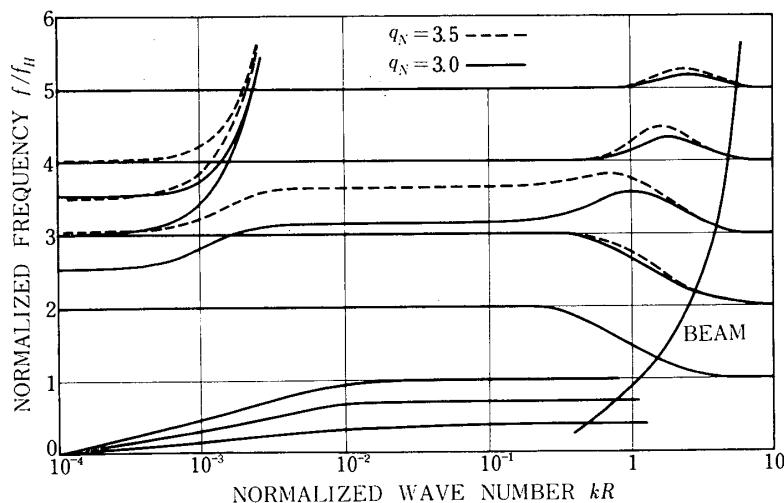
ここで得られた、電子ビームによるエミッションと思われる現象は、K-9M-41号機での実験においても観測されている。第11図はこの実験の結果で、同じく横軸に周波数、縦軸に持続時間が示されている。この図で f_{Bn} と示されたものが電子ビームによるエミッションと推定されるが、このK-9M-41号機での実験は、電子ビームがONのモードでのみ観測したので、ビームによる励起か否かを断定するのは後に残されていたものである。



第11図 K-9M-41号機による実験でのイオノグラム。今回の実験と同様、電子ビームによって励起されたエミッションが現われている。
($f_{B0} \sim f_{B9}$)

4. 検討

Beam型不安定による波動励起の理論は、今のところ線形理論によって展開されている。すなわち、波動の位相速度とビーム粒子の速度とが一致したところで、波動粒子相互作用により、波動が励起されるというものである [4]。今回の実験結果を証明する条件について $k-\omega$ 図とビームの速度との関係を表わしたもののが第12図である [5]。図にも表わされているようにビームと相互作用を起すプラズマ波の周波数はサイクロトロン周波数のハーモニク



第12図 プラズマ波動と電子ビームとの相互作用を示す図。波動の $k - \omega$ 図
との交点の周波数で波動が励起される

スから少しずれた所に存在する。またその周波数のずれ方はプラズマパラメータ及び波動ベクトルと磁力線とのなす角度によって決定される [6]。これらの事は、今回の実験で見られたエミッションが nf_H に近いけれども一致はしていない事実と一致する。

むすび

K-9M-49号機ロケット実験のプラズマ波動励起実験では、Beam型不安定によって励起されたエミッションが観測された。このエミッションは1mアンテナに印加した10Vのポテンシャルのみに依存し、Hot Cathodeからの電子の放出や、高周波電波によるプラズマ加熱にはほとんど変化を示さないことが見出された。このエミッションはプラズマ波動の位相速度とビームの速度とが一致する周波数において起こるもので、電子のサイクロotron周波数とはずれる事も確認された。

K-9M-49号機の後には、K-9M-53, L-3H-9, さらにEXOS-B, といった実験計画が進められている。これらの実験を通じて、さらに詳細なプラズマの物理像が探られることを期待したい。

参考文献

- [1] 大家寛, 大林辰蔵: 宇宙航空研究所報告, 第2号(1966)959
- [2] E.G. Harris, Phys. Rev. Lett. 2, 34 (1959)
- [3] H. Oya, J. Geophys. Res. 75, 4279 (1970)
- [4] T.H. Stix, The Theory of Plasma Waves (McGraw-Hill, New York, 1962)
- [5] H. Oya, Radio Sci., 6, (1971) 1131
- [6] H. Oya, Phys. Fluids 14, 2487 (1971)