

2.2 磁気圏・スペースプラズマ研究

A) 磁気圏研究の展望

大 林 辰 蔵

地球磁気圏は地上100 kmから始まる電離圏の上部より、惑星間空間にいたる地球外圏大気の領域をさす。ここは稀薄なプラズマ・ガスに満たされ、地球磁場が広がっている空間である。宇宙飛翔体（ロケット、科学衛星）の出現によって、はじめて本格的な探査が行なわれるようになった新しい研究分野で、過去十余年の間にめざましい発展をとげた。

国際的な研究動向は、1950年代後半における放射線帯や太陽風などといった新発見のあとをうけて、多数の科学衛星、ロケットなどを使った宇宙観測と、従来からの各種地上観測を総合的に組み合わせた研究が、IQSY（1964-65）、IASY（1968-70）など国際観測事業を契機にして展開された。この間、磁気圏ならびにスペースプラズマに関する新しい研究展開としては、磁気圏内の放射線帯分布、プラズマ圏の発見、大規模対流現象、オーロラに関連する磁気圏嵐、プラズマ波動現象などの研究に関して、重要な進歩がみられた。

わが国では、宇宙航空研究所における大型観測ロケットの開発が順調に進み、K-9M、K-10型ロケットによる電離圏内観測、L-3H型ロケットによる磁気圏観測が本格的に行なわれ、立派な成果を挙げるとともに、それによって培われた観測技術は、1970年以降に始まった科学衛星観測に生かされて、充実した宇宙研究が展開されるようになった。

過去10年間にわたるわが国の磁気圏研究の成果は、以下に取まとめられているように、きわめて多岐にわたっているが、そのハイライトを列記すれば次のようなものが挙げられよう。

- 電磁圏プラズマの探測
 - ジャイロ・プラズマ・プローブの開発
 - 電子密度の高度分布、世界分布観測
- 放射線帯粒子
 - 放射線帯下部の降下粒子群
 - 亜熱帯ベルト、南大西洋磁気異常帯現象
 - 磁気圏グロー、オーロラ現象（南極観測）
- 電磁波・プラズマ波観測
 - VLFホイスラー波の電離圏内伝搬
 - プラズマ波動励起実験
 - 電子・プラズマのビーム放射実験
- スペースプラズマのシミュレーション実験
 - 太陽風と地球磁場の相互作用実験
 - 太陽風と彗星の相互作用実験
 - 磁気中性面での加速現象実験

- 磁気圏理論研究

- プラズマ対流，電場分布理論

- 波動・粒子相互作用

- オーロラ・フレアー理論

- 惑星磁気圏・粒子，波動理論

磁気圏，スペースプラズマ研究の今後の展望については，現在，実施されている国際磁気圏観測計画：IMS 1976-79 が，当面する研究課題である．これにはEXOS-A, B という2つの科学衛星によって磁気圏全域にわたる探査が行なわれる．南極地域ではロケット観測，各種地上観測が強化されている．

将来の1980年代をめざしたスペースプラズマ研究には，スペースシャトルによる実験(A-MPS計画)がある．わが国からは粒子加速器を用いた宇宙実験(SEPAC計画)が提案されている．また，惑星探査計画(木星，金星など)も国際的な協力事業のもとに実施したい考えであり，現在それらの計画立案，予備実験などが実施されつつある．

B) 電磁圏プラズマ

大 家 寛

電磁圏プラズマ域の計測は，わが国ではこの10年間に大きな成果を納めた分野の一つである．プラズマ圏観測の対象となった主要パラメータは，密度，温度及び組成であるが，現在，観測領域はプラズマ圏の内外に拡大されつつあり，数eV～数keVにわたるエネルギーの粒子フラックス分布に関する新しい観測手段や，計測機器の開発が行なわれている．この章では，電磁圏プラズマ計測の歩みを，ロケット観測を通じて得られた成果，ならびに衛星時代に入った最近の状況を合わせて報告したい．

(B-i) ロケットによるプラズマ密度測定

ちょうど10年前，1966年7月23日にL-3H-2ロケットの実験が行なわれた(R63)．これには当時，開発が進められつつあった電離層域のプラズマ計測上画期的な機器の一つであったジャイロ・プラズマプローブが搭載されていた．

すでにその前年，K-9M-14及びK-8-5によって，基礎実験は行なわれていたが(R39)，従来，自然到来電波を受信することが主体であった電波観測の分野に，精度の高い広帯域インピーダンス計測の手段が持ちこまれたわけである．

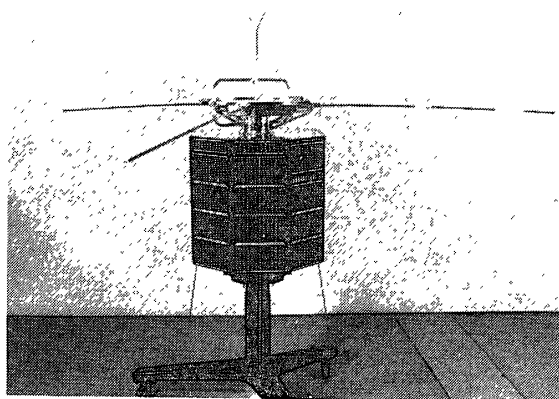


図2-1 第2号科学衛星REXS-DENPAは1972年8月19日に打ち上げられ磁気圏内のプラズマや波動観測を行なった

表 2 - 1 電子密度観測ロケット

Years	Date	Rocket	Experimenters	Height (km)	Launching Time (JST)	Publications
1965		K-9M-13	H. Oya & T. Obayashi			(2)
1966	July 23	L-3H-2	H. Oya & T. Obayashi	100-1800	15:35	(1)(5)
1966	Oct. 20	K-9M-20	H. Oya & T. Obayashi	90-350	17:25	(6)(7)
1966	Dec. 5	K-9M-21	H. Oya & T. Obayashi	100-360	11:00	(4)(7)
1969	Jan. 8	K-9M-25	H. Oya & T. Aso	85-180	11:00	(8)(9)
1969	Jan. 9	K-8-15	T. Obayashi, H. Oya & M. Ejiri	90-190	16:40	(10)
1969	Jan. 19	K-9M-24	H. Oya & T. Aso	100-330	21:00	(8)(9)
1969	Aug. 7	K-9M-27	H. Oya, T. Aso, T. Ogawa & H. Sakurai	200-325	21:15	(11)
1970	Jan. 21	L-3H-6	T. Obayashi & M. Ejiri	350-1700	11:10	(12)
1970	Sept. 19	L-3H-5	T. Obayashi, H. Oya & M. Ejiri et al.	300-2000	20:30	(13)
1971	Jan. 16	K-9M-30	S. Miyazaki & H. Mori	110-350	16:15	To Wire probe (13)
1972	Jan. 21	S-210-6	T. Obayashi & M. Ejiri	75-110	11:24	(13)
1972	Jan. 23	K-9M-35	T. Obayashi & M. Ejiri	200-340	20:20	(13)
1972	Feb. 22	K-9M-38	T. Obayashi & M. Ejiri	90-360	15:00	(13)
1972	Aug. 19	REXS-DENPA (satellite)	H. Oya, T. Obayashi & M. Ejiri et al.	260-6500	(10 orbits)	(14)
1973	Jan. 16	S-210-8	T. Obayashi, Y. Watanabe & M. Ejiri	80-122	08:40	(13)
1973	Jan. 19	K-9M-41	H. Oya, A. Morioka & T. Ono	100-330	18:00	Time shared with (13) Stimulated Plasma Experiment
1973	Aug. 19	S-210-9	M. Ejiri	80-115	18:55	(13)
1973	Aug. 21	K-9M-43	T. Obayashi & M. Ejiri	90-350	16:00	(13)
1974	Aug. 20	S-210-10	M. Ejiri & Y. Watanabe	80-112	18:55	(13)
1974	Sept. 15	K-9M-46	Y. Watanabe & M. Ejiri	100-340	20:40	(13)
1974	Sept. 19	K-9M-47	M. Ejiri	90-340	11:00	(13)
1975	Jan. 17	K-9M-49	H. Oya, A. Morioka et al.	100-360	18:35	(16)
1975	Feb. 24	SRATS-TAIYO (satellite)	H. Oya, A. Morioka & M. Kondo	260-3160	(140 orbits)	(15)
1975	Aug. 27	K-9M-53	H. Oya, A. Morioka & T. Ono	110-355	19:40	(13)

このL-3H-2に搭載されたジャイロ・プラズマプローブにより、高度150kmから1800kmにわたる電離層から、磁気圏下部までのプラズマ密度の観測が行なわれた。この機器の特徴は、プラズマ周波数、高部ハイブリッド共鳴(UHR)、電子サイクロトロン共鳴といった特徴的な周波数がカバーされている広い高周波帯域で、プラズマ中に突出されたプローブのインピーダンスを計測するものである(R63)

その当時、すでに数多くの関連した理論的研究が海外および国内で行なわれていたが、日本のロケット実験によって、はじめてUHRの存在が実証された。

L-3H-2実験にひき続き、表2-1に示すように多くの観測データが得られている。なかでも、電子密度の絶対値が±3%以内の精度で測定されるという特徴を生かして、電離層の日没後の時間変化を追跡する実験が可能になった。つまり、1966年10月20日に行なわれたK-9M-20の観測データを使って、高度200km以下で、紫外線が遮断された後の電子密度変動をロケットの上昇時と下降時の時間差を利用して正確にキャッチし、これから、等価的な電子再結合係数が求められた(R62)。

K-9M-21の実験は、また、新たな成果を加えた。そのころ、スプラディックE層の成因に関しては、二つの機構が提案されていた。一つは風のシアーによる電子密

度のドリフトから、100～130kmの領域に高密度層が現われることを主張するものであり、いま一つは、プラズマの大きいスケールで生ずる不安定に基づく密度のゆらぎによるものである(R64, R79)。K-9M-21実験は、後者の現象が存在することを実証した(R92)。

1967～68年の間は、わが国のロケット観測は、発射条件が地域社会に受け入れられず、不幸な停滞を余儀なくされた。プラズマ計測も、表2-1に見られるように、その期間は中断され、1969年になってはじめて、打ち上げが再開されている。しかしながら、インピーダンスプローブの研究は、その間に機器開発の時代を終わり、電離層データ取得を目的とする観測が確実に行なわれるようになった(R79, R92, R81, R113)。

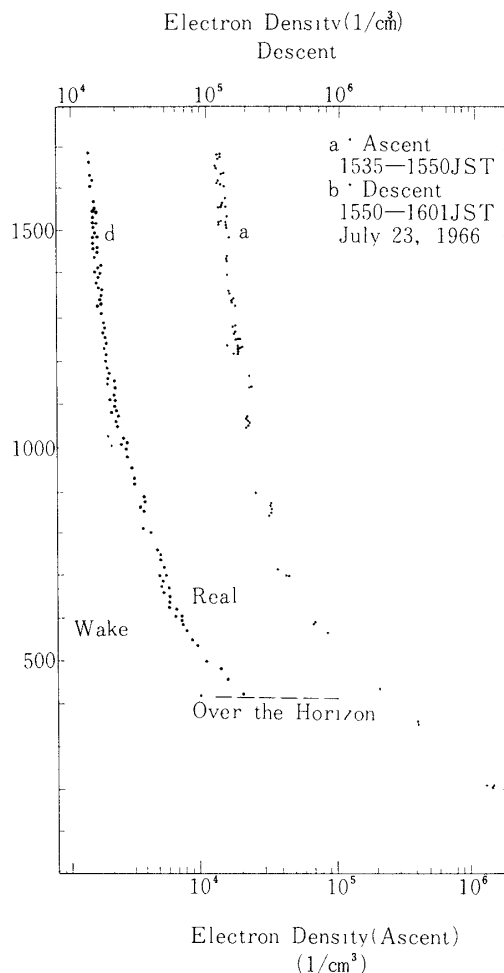


図2-2 ジャイロ・プラズマ・プローブにより観測された上部電離層電子密度分布(大家・大林1967)

(B-ii) ロケットによるプラズマ温度計測

プラズマの温度計測については、気体粒子のエネルギー分布を測定することがオーソドックスな方法であって、ラングミュアプローブ、ファラデーカップ等が初期のアプローチであった。その後、我が国独自のラングミュアプローブ法に交番電界を加えて電子温度を測定する方式 (R 119) が開発され、電離層プラズマの温度計測は画期的に進歩した。この温度計測法の結果については電離層圏の研究項のところに譲ることにし、ここでは、インピーダンスプローブによって温度計測が行なわれた点について述べておく。すでに L-3H-2 実験のインピーダンス計測では、電子サイクロトロン周波数よりずっと低い周波数で、プローブの周囲をとりまくイオンシース容量を計測したが、このシース容量は、周辺のプラズマのエネルギー分布と関連をもっていて、このシース容量値から、プラズマ中の電子温度が求められる (R 78)。この方法は、単に電子温度計測という点からはむしろ、特殊な測定法ということになるが、これはその後科学衛星観測の南大西洋磁気異常域における結果から、その場所でのエネルギーの高い粒子群を測定することができるという貴重な事実が判明した。

(B-iii) 衛星によるインピーダンス観測

磁気圏衛星計画の最初をきったものは、REX S-DENPA 衛星であった (R 136) この衛星は 1972 年 8 月 19 日近地点 240 km、遠地点 6500 km の軌道に打ち上げられ、全領域にわたって電子密度分布を観測した。Topside 領域では拡散平衡状態にあるプラズマ分布の他、6000 km の遠距離までホイッスラー波の伝播等から予測されていた密度分布に対して、直接観測の結果を与えることができた (図 2-3)。この衛星は不運にも搭載計器の高圧放電事故のため、データー取得は 3 日間で終了し、地磁気嵐に伴うプラズマ圏の各種パラメータの時間的空間的変動といった事柄は明らかにすることができなかった。しかし、その後の衛星観測を成功させる基礎となる重要な機器開発上のデーターを提供する役割は果たしたと考えている。

衛星による磁気圏プラズマ観測の 2 番手は、続いて 1975 年 2 月 24 日に打ち上げられた SRATS-TAIYO によるものである。この衛星はすでに 1 年半にわたってデーターを伝送し続けているが、現在、汎世界的な電子密度と電子温度分布のデーターが解析されつつある (R 136)。TAIYO 衛星に搭載されたインピーダンス・プローブによるシース容量の計測は、電子温度測定のために計画されたものだが、このデーターから、注目すべき事実が発

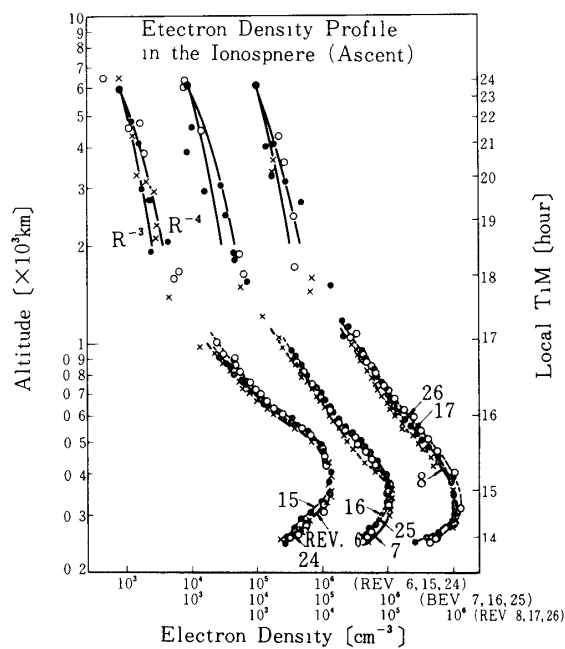


図 2-3 REX S-DENPA 衛星により観測された高度 6000 km に到る電子密度分布 (江尻, 大家, 大林他 1973)

見された．すなわち，南大西洋磁気異常帯を中心にして，多数のイオン及び電子が比較的せまい領域にそれぞれ分かれて降り注いでいることで，これは放射線帯粒子群の振舞とも関連して，きわめて興味深い現象である（R 199）．

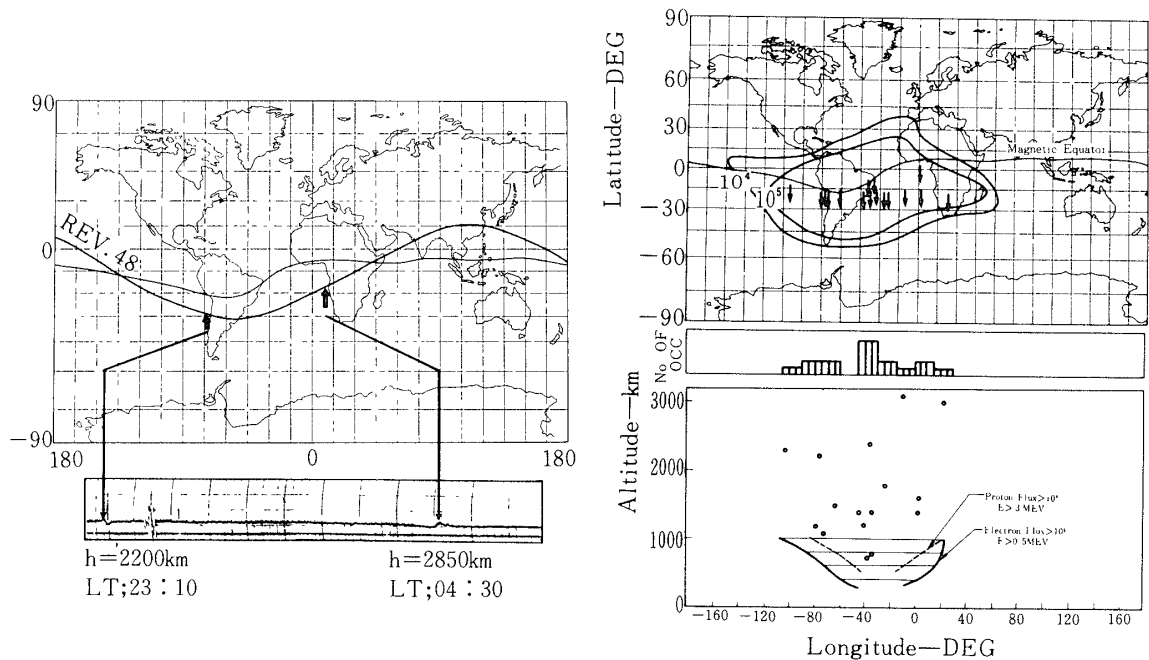


図2-4(a) SRATS-TAIYO衛星によって 図2-4(b) 粒子降下域の分布（矢印），出現頻度
観測されたシースイーパーダンス記録
に現われた粒子降下の影響
・高度分布（大家，森岡 1976）

(B-iv) EXOS-B衛星計画

磁気圏の本格的な探査実験が1978年に打ち上げられるEXOS-A,B衛星で行なわれる。このうちEXOS-A衛星は電離圏およびオーロラ現象を対象としている。EXOS-B衛星は遠地点が30,000 kmの長楕円軌道を取り，磁気圏内のプラズマ，高速粒子，電磁場，波動観測などが，主ミッションである。ここでは，10年間のロケット実験のあゆみが，この計画の実行に，いかにつながっているかを述べておこう。

a) プラズマ波励起実験：SPW

この実験では領域の電子密度および，磁場強度が，電子サイクロトロン共鳴，プラズマ共鳴，および高部ハイブリッド共鳴より計測されるが，計測方法の基礎は，すでに電磁波およびプラズマ波の項でのべられているように，K-9M-41号，49号および53号機などの実験成果を蓄積したものが利用されている（R 197）。

b) VLF波ドップラー計測：DPL

ドップラー効果を，プラズマ圏内を伝播するVLF電波について測定し，電子密度を求め，これによりとくにプラズマ圏内に生じた電子密度ダクトの存在とその動きが解明される。電離圏の項でのべられているように，比較的広い領域の電子密度分布の平均的な値を出す特

徴を発揮して、ロケット実験が行なわれ成果を挙げてきた観測項目である (R 58)。

c) インピーダンス及び電場計測: I E F

プラズマ内におかれたアンテナを利用したインピーダンスプローブにより電子密度観測を行なうほか、プラズマ内の電場分布を観測する。電場計測については一対のプローブ間を超高インピーダンスに保って、電圧を計測する手法が開発され、K-10-12などによって予備実験が行なわれている。

d) 粒子スペクトル分析: E S P

磁気圏内のプラズマ計測には、粒子エネルギー・スペクトル計測の手段が、プラズマ密度と温度を与えることになる。最近粒子線計測機器では高性能のものが開発されつつある。

C) 放射線帯粒子

竹 内 一・槇 野 文 命

磁気圏粒子線の観測はロケット、科学衛星で行なわれている。初期には放射線帯下部の降下粒子群の観測に成果をあげた。磁気圏グロー、亜熱帯ベルトの研究、南極でのオーロラ粒子の観測が活発に行なわれるようになった。

(C-i) 高エネルギー放射線帯粒子

1958 年バンアレンによって放射線帯が発見された当初、低緯度地方では放射線帯下縁の約 1000 km 以下の高度では、「宇宙線」のほかは高エネルギー粒子線は存在しないと考えられていた。ところが当時、わが国で取得された衛星テレメータのデータでは、少なくとも日本付近では、放射線帯以下のところでも、粒子フラックスが宇宙線強度から推定された値よりも一桁大きいこと、およびそれらの時間変化も、地上の宇宙線強度の変動とは異なるものがあるということが指摘されていた。

低高度における降下電子線フラックスの存在は、その後、L-3 型ロケット観測によって、検証された。最初の実験は、1964 年 7 月に行なわれた L-3-1 で、Cs I シンチレータにより、高度 300 km 以上で方向性の強い放射線が観測された。L-3-2 号機では変形フォススイッチ検出器により、この放射線が電子であることが確かめられている (R 23)。さらに L-3-3 では半導体検出器 (R 28)、X 線用 Na I シンチレータ (R 4) によっても観測され、高エネルギー電子フラックスが 1000 km 以下の高度でも存在することは、確実なものとなった。

1966 年以降には、到達高度 2000 km を越える L-3 H 型ロケットの観測が可能となり、放射線帯ならびにその下部の粒子フラックス高度分布、ならびに経度効果なども測定できるようになった。その結果、電子フラックスの微分エネルギー・スペクトルは $E^{-2.75}$ ($E = 100 - 500$ keV) 程度、ピッチ角分布は高々度のところでは捕捉モードであることが判明している (R 109)。

第 1 号科学衛星「しんせい」には電子放射線計測装置が搭載され、これによって、低緯度地方における放射線帯の空間分布が観測され、また放射線帯以下の領域での降下電子フラッ

科学衛星「しんせい」がとらえた新しい現象
New Results from Satellite Data

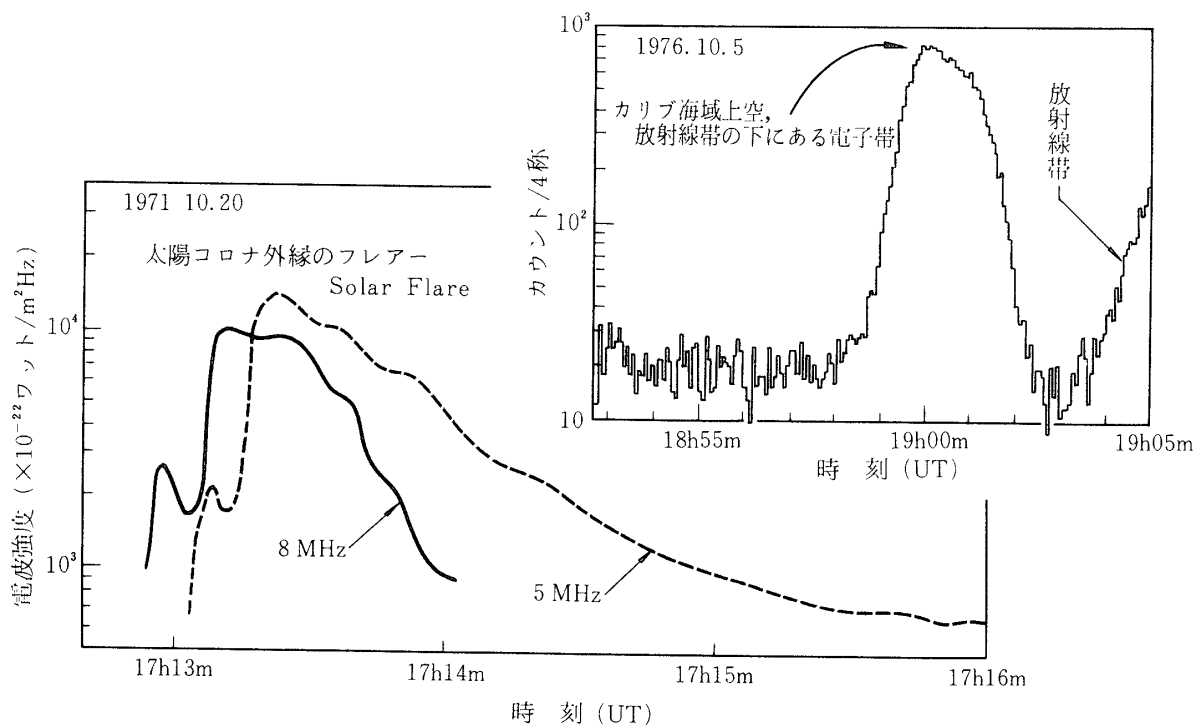


図2-5 第1号科学衛星「しんせい」で観測された放射線帯下部での降下電子群, および太陽Ⅲ型電波バースト

クスの急増も, 数例とらえることができた (R 169)。

(C-ii) 放射線帯下部の準熱的降下電子群

低緯度地方において, 放射線帯以下の高度のところで, 準熱的電子フラックス ($E < 1000$ keV) が存在することが前述のように理研グループの観測によって発見された (R 23)。しかし, これらはGM管やシンチレータによって計測されたもので, 感度等は十分なものでなかった。名古屋大学グループでは, ポリプロピレン膜比例計数管を用いた一連の観測 (L-3 H-7, 8, K-9 M-40, 48) から, 精度のよいフラックス強度, ピッチ角分布, スペクトルなどを測定し, この現象に関して次のような結果を得ている (R 4, R 139, R 142)。

観測された準熱的電子線は E^{-2} のスペクトルをもち, ピッチ角分布は大きな高度変化を示す捕捉成分と, 一様な方向の降下成分があること, 太陽, 地磁気活動とは関連があり, とくに磁気嵐のときには大きな粒子フラックスの増加があることなどを明らかにしている。

又同じくK-9 M-48号機では宇宙研グループが静電型電子スペクトロメーターにより $E \leq 4.8$ keV の電子フラックスを観測し, スペクトルの形として $E^{-1.87}$ を得ている。これは名古屋大学グループが得たスペクトルを外挿した値と一致する。またこのスペクトルには plateau や shoulder が現れており, 大気との相互作用によるスペクトル形の変化がみられる (R 186)。

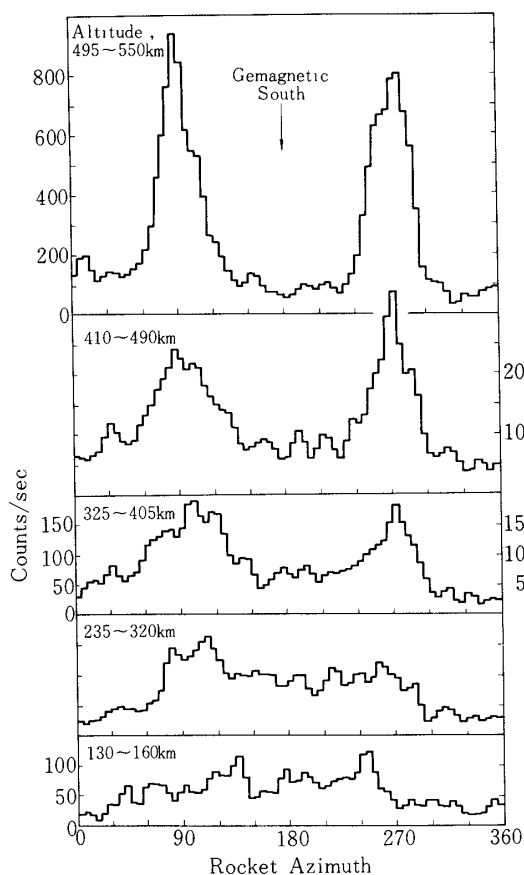


図2-6 L-3H-7による電子線フラックスの
各高度における方向分布

D) 電磁波・プラズマ波

木村 磐根

電磁波・プラズマ波に関するわが国のロケット実験は1962年に始まった。初期の実験はごく簡単な雑音測定と、地上のVLF局信号の伝搬特性測定であったが、最近では複雑な能動実験も行なわれ実験目的も多岐にわたっている。過去14年間、この分野で用いられたロケットは極地研の南極ロケットも含め、K-8型1機、K-9M型26機、L-2型1機、L-3型3機、L-3H型7機、K-10型1機、S-210JA型4機、S-310JA型1機（JAは南極観測）である。科学衛星としては、「しんせい」、「でんぱ」が打ち上げられた。

(D-i) 電波雑音（電磁波、プラズマ波）の測定

宇宙雑音

電離層上部に出ることができるロケット観測では、臨界周波数以上の太陽電波、銀河電波が検出される。L-3H-1では3MHz帯において、高度700km以上で銀河雑音電波が観

測されている(R 41)。また、科学衛星「しんせい」の観測から、5 MHz と 8 MHz 帯のところで、太陽電波のⅢ型バーストが検出された。

a) ホイスラー

わが国ではL-3-2, K-9M-6により、初めてホイッスラー波のロケット観測に成功し、同時に実施された地上観測からその対応が調べられた(R 224)。1969年にはK-9M-26により親子の電波専用ロケットが初めて試みられた。子ロケットは失敗したが、親ロケット直下の雷放電からのホイッスラー分散値の高さ変化から電離層電子密度分布の推定が行なわれている(R 85)。

ホイッスラーの伝搬ベクトルあるいはポインティングベクトルの測定は、K-9M-41により、3次元直交ループを用いて行なわれた。観測は日没時で、受信されたホイッスラーの伝搬ベクトル方向と、地上観測データとの比較から、これらがダクト伝搬をして来たものと結論している(R 205)。ポインティングベクトルの測定から、電離層中での全反射を行なうホイッスラーがあることも検出された。

K-8-11では100, 105 kHzの固定周波数でE, Bが測定された。Eで数 $10\mu\text{V}/\text{m}$, Bで0.5 mV程度のインパルス性雑音が観測された。周波数掃引形のVLF帯電界雑音の観測はK-9M-19などによって行なわれたが、電離層中では20 kHz以上の強度は急激に減少し、30 kHz以上では殆んど受信されなかった(R 225)。この雑音源は地上の空電がホイッスラーモードで伝搬して来たものと考えられる。

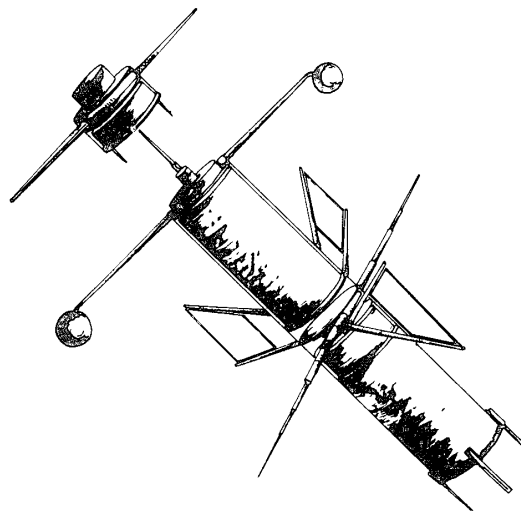


図2-7 K-9M-26号機の親子ロケット電波実験

b) プラズマ波

VLF帯の雑音電界(E)の測定がL-2-2, L-3-2により行なわれたが、0.5~3.5

k Hz 帯の電界強度が高度と共に増し、高度 400 km 附近で $80 \mu\text{V}/\text{m}$ 程度に達した (R 223)。またスピン変調をうける包絡線がプレセッションで大きく変動する現象も 150 km 以上の高度で観測された。その強度は 1 k Hz で $100 \mu\text{V}/\text{m}$ に達した。この現象はホイスラーモードでなく、外部磁界に平行な電界成分をもつ静電的な波でなければならない (R 224)。

その後この静電波を調べようという試みが数回行なわれた。L-3 H-3 のメインとブースタでの観測では 0.5 ~ 15 k Hz の範囲で低周波程強い E が観測されたが、高度の上昇と共に減少し、600 ~ 800 km で急激な減少がみられた。また科学衛星「でんぱ」についても 0.3 ~ 21 k Hz 帯で 15 の固定周波数で E , B が観測された (R 226)。電界強度は 800 km 以下で $30 \mu\text{V}/\text{m}$ のオーダーであり、800 km 以上では $2 \sim 3 \mu\text{V}/\text{m}$ でいずれも Scarf らの報告に比し桁違いに小さい。また K-9 M-20, K-9 M-24, K-9 M-27 では積極的に静電的な波の存在を確かめることはできていない。

一方最近 K-9 M-35, K-9 M-41, K-9 M-49, K-9 M-53, K-9 M-51, K-10-2 などでは VLF の広帯域の電界ノイズをモニタしているが、スペクトルとしては L-H R 雑音的なバンド構造のものや、スピンにより周波数、強度の変化する discrete なものもある。特に K-9 M-41, 53 などでは hot cathode から電子ビームが出ているときにスピン変調をうけたノイズが出ているが (R 158, R 188, R 187), ビームに依存しないものもあった (R 188)。これらは L-3-2, L-3 H-3 と同様、自然のイオン音波か、ロケット自体の wake で発生する静電的な波ではないかと考えられている。

南極昭和基地では、特にオーロラ粒子の降り込みによって励起される電磁波、プラズマ波を観測しているが、S-210 JA-2, JA-19 ではオーロラ中の高度 100 km 近辺で強いヒスの電磁界雑音が観測され、また S-310 JA-1 ではオーロラのないときのコーラスや静電波を観測した。これらのデータは VLF 放射および静電波の発生機構研究の上に重要な資料を提供するものと考えられる。

(D-ii) 電波伝搬特性の観測

地上の送信局から出された電波をロケットで観測すれば、電離層による減衰や偏波など伝搬の特性がわかるから、これから逆に電離層の特性 (密度分布など) を知ることができる。特にドップラーシフト測定は電子密度測定に役立ち、K-9 M-2 により初めて 700 k Hz の放送波のドップラーシフトが測られた (R 58)。しかしその後 VLF 波を用いたドップラー観測が行なわれてから、この方法がプローブ法に比し、ロケット自体のポテンシャルの沈みなどの影響を受けない電子密度の直接測定法として大いに威力を発揮することになった (R 56, R 58)。実際この目的の実験は L-2-2 以来 K-9 M-53 まで NDT (17.4 k Hz), NWC (22.3 k Hz), JG2AS (40 k Hz) の信号を用いて 8 回の実験で電子密度が求められている (R 58, R 103, R 141, R 140, R 159)。

電波伝搬実験の成果を要約すると K-8-11, K-9 M-38 (R 140), 53 では NDT 信号の電界強度 (E) 分布が、K-9 M-2 により磁界強度 (B) 分布が測定された。K-9 M-29 (R 102), 53 では JG2AS の磁界強度分布が測定された。これらの電磁界強度分布は、Full wave の方法で理論的に計算されたものとの比較から、通常測定しにくい下部電離層の電子密度分布や衝突回数の推定に大いに役立つことがわかった (R 234)。

一方K-9M-29, 35ではNWC信号が受信されたが、この場合電波は南半球から電離層一地表間を導波管モードで伝搬しながら少しづつホイスラーモードで電離層へ洩れ出て行くモードと、直接南半球から電離層へ入射して磁力線に沿って上から北半球のロケットに到達するモードがあり、この両者はそのドップラーシフトの極性が逆であることから容易に分離検出できる。また上からやつて来たモードの伝搬ベクトル方向の推定が行なわれたがダクトは必ずしも存在しなかったと結論される(R 141, R 126)。

このほか伝搬実験としては、親子ロケット間のものがあり、VLF帯の掃引信号の伝搬がK-9M-29の親子間で行なわれた。約100m程度の伝搬が確認されているが、送信アンテナ長が短く電力も小さいので有効な電磁波の放射は行なわれなかったと思われる。HF帯ではK-9M-29, 35号機で実験された。前者では子ロケットから出された0.5～5MHzの掃引信号を親ロケットで受信したが、受信スペクトルに電離層プラズマの特性周波数における吸収が観測されこれから電子密度分布が導かれた(R 227)。

(D-iii) 非線形波動、能動実験

電離層を含め宇宙空間は、電磁波、プラズマ波に対して比較的均一な境界のないプラズマとみなされる。この空間でロケットから電磁波や電子ビームを放射して波動一粒子相互作用や、非線形なプラズマの挙動を調べる実験が行なわれた。

最初のものはCyclotron Instability Experiment (CIE)と名付けられ、ロケット、衛星からLF帯の電磁波を放射し、磁気圏内で波と逆向きに走る電子流とサイクロトロン相互作用を起し、二次的に電磁波を発生させようというもので、VLF放射のシミュレーション

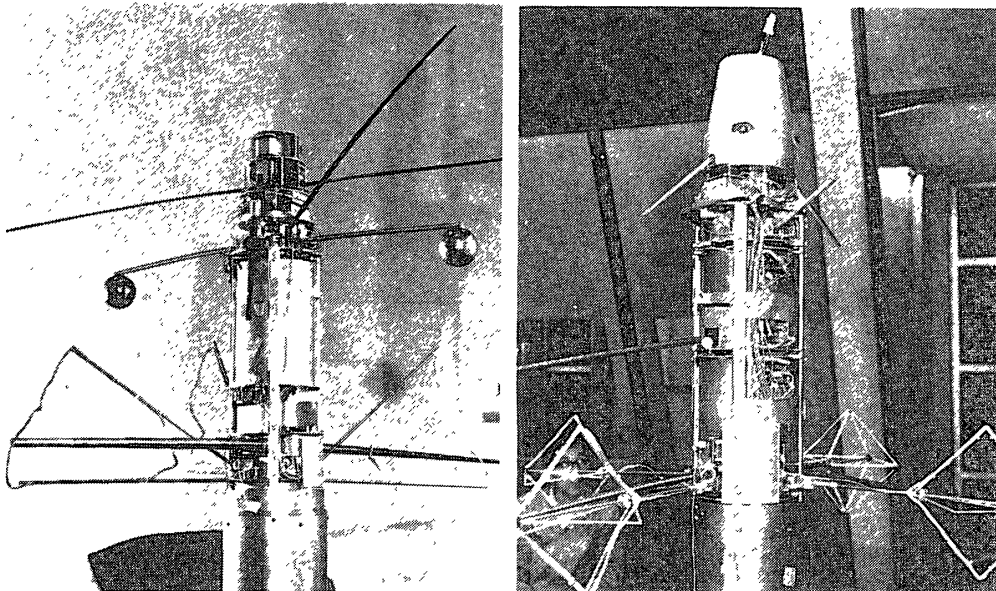


図2-8 電離層内の電波エミッション等を測定する測定器群

実験として計画された。しかしその実験は十分な成果が得られなかった。科学衛星“でんば”では装置は順調に動作したが、観測時間がわずかで終わったため十分なデータが得られなかったが、印加した周波数のごく近傍（約 200 Hz 下方）に 2 次的な波の励起がみられた。

非線形波動の実験としては、電子プラズマ波とイオン音波の間の非線形三波結合（パラメトリック不安定）の実験が K-9 M-35, 41, 46, 51 等で行なわれた。35 号機（R 127）では 2, 4.5, 9.8 MHz の高周波電界が平行メッシュ間に印加され、メッシュ間におかれた球プローブでパラメトリック不安定による低周波のイオン音波の励起を確認した。その後 K-9 M-41 では子ロケットで三波結合により励起した V L F のイオン音波を親ロケットで受信し、伝搬特性を確認しようとしたが、親子連絡が故障し失敗した。K-9 M-46 では励起されたイオン音波の波長測定を FM 法で行ないイオン音波であることが確認されている。

非線形波動実験の 1 つとして、アンテナの周囲にできるイオンシースの非線形特性を調べる実験がある。すなわち振巾変調波がこのアンテナで受信されると、シースの非線形で変調波が検波されることが知られているので地上のイオンゾンデやロケットから発射される 1 kHz で変調されたインピーダンスプローブの信号を別のアンテナで受信し、変調信号を検出しようと試みられた（K-9 M-32）。他機器からの干渉のため地上からの電波は検出できなかったが、ロケットからの信号から 1 kHz が検出され、高度依存性がみつけられた。

ロケットから低エネルギーの電子ビームを出し、周囲にプラズマ波を励起しようとする実験がある。これらは K-9 M-41 に始まり L-3 H-8, K-9 M-49, 53, 51 などの実験がある。ロケットに熱陰極を搭載し、ホイップアンテナに正の電圧を加えることによりロケット本体の電位を沈め熱陰極から周囲のプラズマ中に数 eV の電子ビームを放出するものである。K-10-12 では電子銃をのせ 50~200 eV の電子ビームを放出した。K-9 M-41, 53 では熱陰極がオンしている期間のみスピン変調をうける U 字形 V L F に放射が観測された（R 158, R 188, R 187）。

R F パルス電波を電離層内に放射し、各種のプラズマ共鳴現象を起こさせる実験は K-9 M-41, L-3 H-8, K-9 M-49, 53 によって行なわれた（R 197）。観測されたプラズマ共鳴現象はロケットの電位の沈みが深い程出易い。しかし電子ビームがあるときのみ出る現象もあり、これはその周波数から、電子ビームと電子バーンスタイン波の交点付近で起る不安定により励起される静電的電子サイクロトロンハーモニック波であるらしい。またビームとの相互作用の結果、サイクロトロン高調波の少し下に遅延エミッションが発生した（R 197）。

E) 磁気圏理論研究

西 田 篤 弘

物理学の研究者にとって、磁気圏が持つ魅力は、そのダイナミズムにある、といって良いであろう。プラズマが大規模な対流運動を行ない、極光粒子の加速が行なわれ、放射線帯やプラズマ圏が作られ、様々な電磁波動が励起される磁気圏では、太陽風から与えられたエネルギーが次々に多彩な現象をおこしてゆく。

各種の観測手段を駆使して得られたデータの解析と理論的検討によって、磁気圏のダイナ

ミックスは、図2-9にまとめたように、「磁力線再結合」の機構を軸として統一的に理解されるようになった。以下、わが国の理論研究者の寄与を中心として、簡単に紹介する。

(引用文献表は省略する。)

(E-i) 太陽風エネルギーの磁気圏流入は、昼間側の磁気圏境界面上で、太陽風内の磁力線と磁気圏の磁力線が結合することによって行なわれる。このモデルの検証は、極冠域の地磁気変動と、太陽風磁場変動の相関解析によって行なわれた。磁力線の結合の結果太陽風エネルギーが流入して、電離層に電流をつくり、地表の磁場に擾乱をおこすことを利用するのである。わが国の研究者の解析によって、上記のモデルの妥当性が認められた(西田, 1968)だけでなく、磁力線結合によるエネルギー流入のモードが、太陽風磁場の極性によって異なることがわかり(岩崎, 1971: 前沢, 1976), さらにこれらの相関関係の詳細な解析から、太陽風速に赤緯依存性があることも検出された(村山・袴田, 1975)。

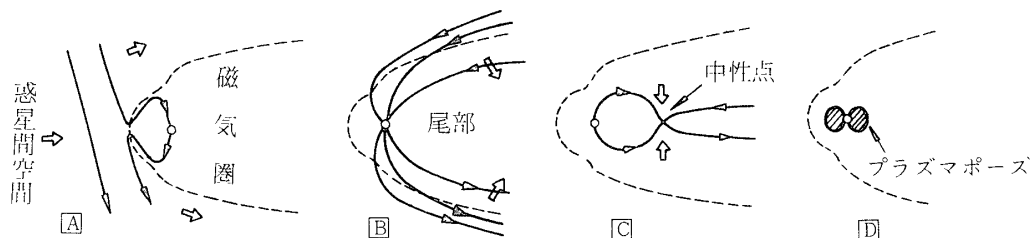


図2-9 太陽風のエネルギーが地球磁気圏内に侵入し、オーロラ嵐などを起すプロセス(A)-(D)

(E-ii) 磁気圏に流入したエネルギーは、尾部の磁場エネルギーとして蓄積される(飯島, 1972: 前沢, 1975)。

(E-iii) 尾部磁場エネルギーの解放も、引き伸ばされ圧縮された磁力線が、地心距離約 $15 R_E$ (R_E は地球半径) の位置で、再び結合することによって行なわれる(西田・長山, 1973)。この時放出されるエネルギーによって、極磁気嵐が爆発相に入る。極磁気嵐の爆発相と成長相(尾部エネルギー蓄積の時期)の区別は、論争点の一つであったが、汎世界的な地磁気変動の解析によって明らかにされた(飯島・永田, 1972)。加速された尾部プラズマは、極光粒子として落下するだけでなく、磁気圏深くに侵入して、放射線帯粒子となる。この時に生ずる密度分布の不均一から、磁気圏の赤道域から電離層へと、磁力線に沿って電流がつけられ(佐藤, 1975), 極磁気嵐に伴う地磁気変動の重要な部分をもたらす(上出・福島, 1972)。また、磁力線が再結合して地球側に引き戻されるとき衝撃で、電磁流体波動の共鳴振動が磁気圏に発生する(斎藤・桜井, 1970)。なお磁力線再結合過程の詳細については、計算機による実験が行なわれ、発達の有様が刻明に調べられている(津田・深尾, 1973)。

(E-iv) 一方、太陽風との相互作用も、尾部での磁力線再結合も、磁気圏の巾で大規模な電場と対流をつくりだす。尾部から昼間側の磁気圏境界面に向うこの対流運動と、地球の

自転に伴う回転運動を重ね合わせると、地球から数 R_E 以内の領域では、電離層から供給されるプラズマが地球のまわりを回転しながら長く留るのに対して、これより外の領域では、対流に乗って流出してしまうことがわかる。この原因によって作られるプラズマ密度の不連続が、プラズマポーズであると考えられる（西田，1966）。プラズマポーズの外では、電離層プラズマは大変低い密度の領域に流出することになるので、超音速のいわゆる極風となる（丸橋，1970）。また、高エネルギーの粒子に対しては、電場の時間的変動と粒子の軌道運動の共鳴によって生ずる拡散が、粒子供給の主要なメカニズムを提供するが、特に第二断熱不変量も破壊されるような、短い時間スケールの電磁場変動による拡散が、検討されている（玉尾・石原，1975；西田，1976）。

（E - v） 図 2 - 9 には含まれているが、磁気圏物理の主要課題の一つに、プラズマ波動の発生機構の解明がある。プラズマ波動は大別して電磁流体波動、電磁波、静電波に分類される。電磁流体波動については、モード結合による共鳴振動の励起が検討され（玉尾，1969）、汎世界的な地磁気脈動分布と共鳴理論の比較が行なわれた（斉藤，1969；平沢，1970）。電磁波動については、サイクロトロン波動と粒子の相互作用が種々の角度から検討された（松本・宮武・木村，1970）が、特にバーンスタインモードの静電波動が、プラズマ密度の不均一を媒介として、電磁波に移る過程が提唱された（大家，1975）、その他静電波動については、磁気圏尾部で観測されたジャイロ周波数の $3/2$ 倍の周波数をもつ静電波動の解明や、乱流成長プロセスの検討がすすめられている（南部，1975）。

（なお、地上観測については、汎世界的な規模のデータ解析が行なわれたもののみを含めた）

F) スペースプラズマのシミュレーション実験

河 島 信 樹

磁気圏、あるいは宇宙空間でのプラズマ現象を、地上の実験室内で再現し、これを研究する手段をシミュレーション実験と呼んでいる。わが国では宇宙航空研究所を中心とした、スペースプラズマ研究のグループがあり、各種のシミュレーション実験が活発に行なわれている。現在までに行なわれた各種実験のうち主なものは、太陽風と地球磁場や彗星の相互作用を模擬する実験研究、磁気中性面における加速現象実験、電波やレーザビームとプラズマの相互作用実験、粒子ビーム（電子、プラズマ）による波動励起実験などがある。（文献リストは省く。）

（F - i） 太陽風と地球磁場の相互作用実験

プラズマ銃から打ち出されるプラズマ流（密度 $10^{14} \sim 10^{15} / \text{cm}^3$ ，速度 $10 \sim 100 \text{ km/s}$ ）をモデル地球磁場に照射して、その相互作用を調べるシミュレーション実験が 1963 年以降続けられている（河島，1965）。

双極子磁場のまわりのプラズマ流の様子は図 2 - 10によく示されているように、磁気圏の形成、磁気カuspからのプラズマ侵入、後部につくられるプラズマ・シート、赤道環電流などの存在が、各種プローブ探針によって確認され、自然界で生起している現象とはよく対応することが明らかになった。とくに磁気圏前面のカuspから後部の磁気中性面にぬけるプラズマの流れは、きわめて示唆にとむ結果であると考えられる。

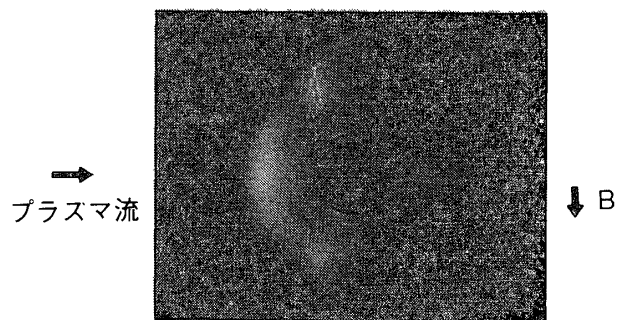


図2-10 ダイポール磁場にプラズマ流を照射した場合の磁気圏プラズマ流の相互作用パターン (河島, 1970)

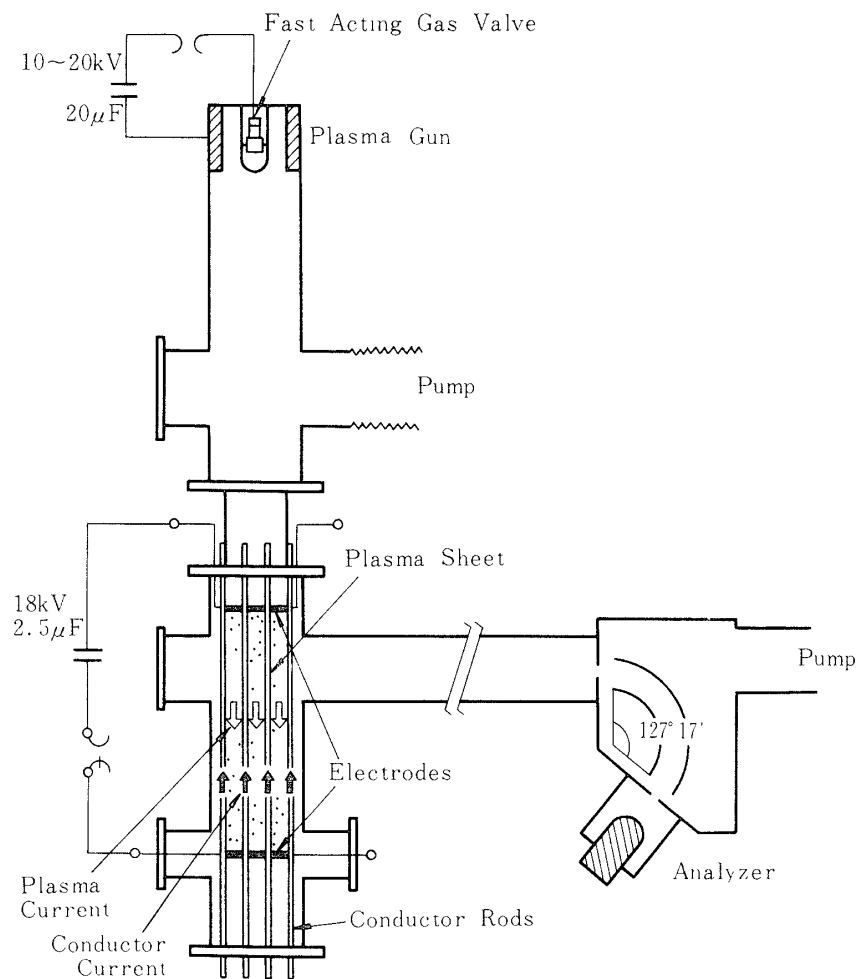


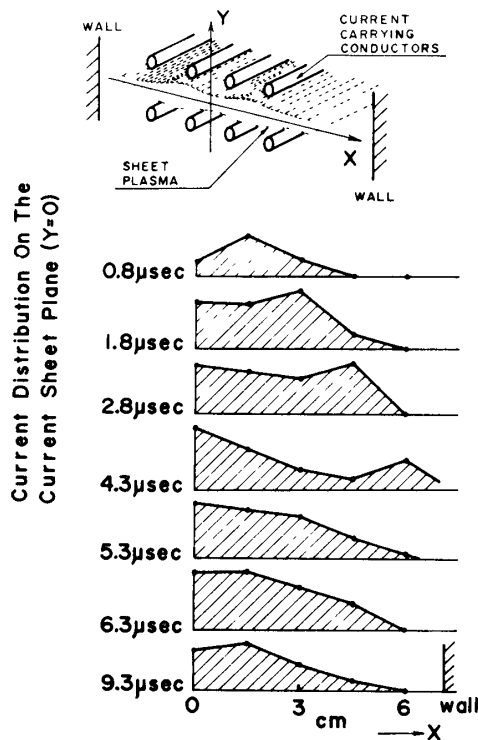
図2-11 ニュートラシートでの粒子加速実験
(a) 磁場中性点放電実験装置

(F - ii) ニュートラルシートの粒子加速実験

磁気圏尾部や太陽フレア域の磁気中性面付近で生起していると考えられる粒子加速現象を模擬するプラズマ実験が行なわれている(大藪, 1972). 図2-11に示されるような装置を使って磁気中性面を作り, それに沿って大電流を流した結果 i) 電流値が多くなるとプラズマの低抗が異常に増大して, ニュートラルシートは崩壊する. ii) そのとき, 電流エネルギーはプラズマを加熱することに使われ, 電子エネルギー 10 keV, イオン・エネルギー 6 keV 程度の粒子群がニュートラルシートから放出されることが分かった. 加熱の機構は Current-driven Instability による波動励起に原因する乱流加熱であると推定されている.

(F - iii) 電波パルスとプラズマの相互作用

定常プラズマ発生装置で生成した磁化プラズマコラム(密度 $10^{12}/\text{cm}^3$, 電子温度～数 eV, 直径 10mm) に大出力のマイクロ波パルス (9.36 GHz, 10 kW, 10 μs) を打ち込み, その相互作用を調べた. 入射周波数が, サイクロトロン周波数の整数倍で, かつプラズマ周波数にほぼ等しいという条件の下で, マイクロ波を入射すると, 波動と粒子との強い相互作用が起きて, 15 keV 程度の高エネルギー電子の発生が認められる. また, この条件のとき, パルス波が終ったあとでも, プラズマからサイクロトロン高調波にスペクトルをもつエミッション (Delayed Emission) が放射されていることを確かめた. この現象は, 科学衛星からの RF 放射実験で観測された共鳴現象や VLF エミッションの ASE ともよく似ていて, これらのスペースプラズマ現象を, 再現させることに成功している(佐々木, 1976).



(b) ニュートラルシートの形成

1976 年10月28日 新設部 (科学)