

南大西洋磁気異常帯にともなう ディファレンシャル粒子降下*

森 岡 昭**・大 家 寛**

概 要

TAIYOに搭載された高周波インピーダンスプローブ (IMP) によって南大西洋磁気異常帯にともなう内放射線帯からの粒子降下現象が観測された。さらにこの粒子降下は電子とイオンとでは降下領域が空間的に異なっていることが明らかになり、これをディファレンシャル粒子降下と称することにした。降下粒子エネルギーはプローブのシース容量値から10~100eVと求められる。ディファレンシャル粒子降下の観測される領域は西経100~東経30°の範囲にあり高度は500km以上の衛星高度において出現する。このディファレンシャル粒子降下の領域は赤道帯ヒスおよびスプレッド F の発生と関連している。

1. 序

TAIYO衛星には観測機器の一つとして高周波インピーダンスプローブが搭載され1975年2月24日 軌道傾斜角31°, 初期近地点高度255km, 遠地点高度3135kmの軌道に投入された。

高周波インピーダンスプローブ (IMP) は熱圏及び磁気圏基部のプラズマ計測, すなわち電子密度および電子温度の計測を目的としている。打上げ以来機器は良好に動作しており長期にわたる観測が可能となった。

電離層プラズマの測定手段としての高周波インピーダンスプローブは1965年[1]に開発されて以来多くのロケット実験を積み重ねて改良が加えられた後, REXS-DENPA衛星[2]に続いてTAIYO衛星に搭載された。衛星搭載にあたってはPCMテレメータ方式にあわせてデータ処理部が新たに付け加えられている。

搭載IMP機器による観測は衛星の電力事情により現在80周回分のデータとなっているが初期の目的であった電子密度および電子温度の計測の他に南大西洋磁気異常帯にともなう新しいプラズマ現象がみいだされた。すなわち南米および南大西洋にまたがる地球磁場強度の異常帯上空において内放射線帯からの降下粒子が存在し, さらに電子とイオンとでは降下領域が異なるというディファレンシャル粒子降下現象が発見された。本論文はこのディファレンシャル粒子降下現象に重点を置き, その形態的特性を明らかにした後, モデルを提唱して現象の説明を試みる。またディファレンシャル粒子降下域と密接な関係にある赤道帯ヒス及びスプレッド F についても言及しメカニズムを検討する。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 東北大学理学部

2. TAIYO 搭載高周波インピーダンスプローブ

観測には高周波インピーダンスプローブが用いられた。ジャイロ周波数及びプラズマ周波数を含む周波数範囲でプラズマインピーダンスを周波数掃引しながら測定するための高周波インピーダンスプローブの理論の確立とその実用化 [1, 3] は1965年にはじまり現在では電離層及び磁気圏基部のプラズマ計測を高い精度で行う有力な機器として確立されている [2]。

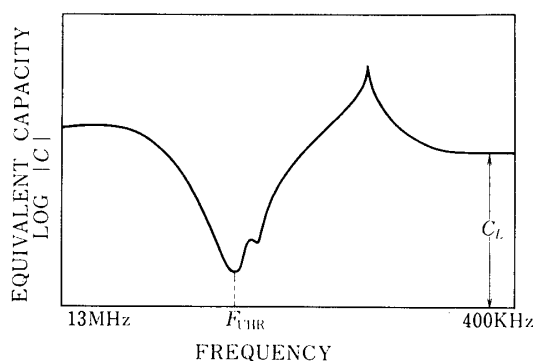
プローブには120mmφの球形プローブが用いられ衛星本体より465mm, スピン軸に直交する方向に展開された。第1図にプローブのプラズマ中容量一周波数特性を概念的に示す。 F_{UHR} は高域ハイブリッド共鳴周波数 (UHR), C_L は400kHzにおける等価容量である。UHR共鳴周波数はプローブの形態に無関係に, またプローブの周辺をとりまいて存在するイオンシースにも無関係に決定され

$$F_{\text{UHR}} = \sqrt{f_p^2 + f_c^2} \quad (1)$$

となる。これにより

$$N_e = \left(\frac{m \epsilon_0}{e^2} \right) (F_{\text{UHR}}^2 - f_c^2) \quad (2)$$

の関係で電子密度 N_e が求められる。ここで m, ϵ_0, e, f_c はそれぞれ電子質量, 真空中誘電率, 電子電荷及び電子サイクロトロン共鳴周波数をあらわす。



第1図 プローブのプラズマ中での容量対周波数特性を示す概念図

周波数が充分低い場合のプローブ容量値はプローブの周囲に形成されるイオンシースの容量を与えることになる。すなわち電子サイクロトロン周波数により低い高周波電界に対して外界プラズマは導体として働き, プローブによって計測される容量値はシース等価容量のみを与えることになり, そこからシースの構造が決定される。シースの厚みは電離層レベルでは電子温度の情報を与え, 上部電離層およびプラズマ圏においては粒子流入の寄与を反映する。

電離層レベルにおいてはイオンシースの厚みはデバイ長 λ_D に近い値をもち、

$$l = \left(\frac{6}{C_m - 6} \right) R \tag{3}$$

$$\lambda_D = l / \xi \tag{4}$$

の関係をもつ。ここで R はプローブの半径 (6cm), C_m は計測されたシース容量値である。 ξ の値はシース構造を理論的に厳密に求めるか、実験的に較正して求めねばならないが、およそ $2.5 < \xi < 3.0$ の範囲をもつ。電子温度は(3)および(4)式より

$$T = \left(\frac{N_0 e^2}{\epsilon_0 \kappa} \right) \left(\frac{6}{C_m - 6} \right)^2 \frac{R^2}{\xi^2} \tag{5}$$

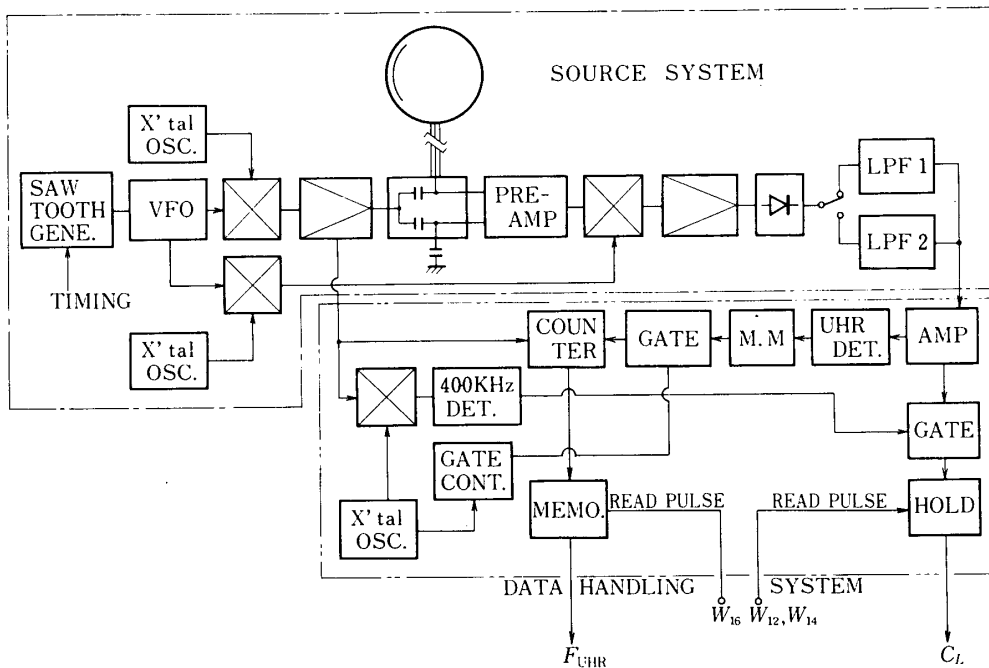
とあらわされる。ここで N_0 は電子密度, κ はボルツマン定数である。

一方上部電離層およびプラズマ圏においては高エネルギー粒子の流入があるとプローブの電位は負に深く沈みイオンシースは大きくなる。この状況では球プローブのポテンシャルは

$$\psi = -\frac{\kappa T}{e} \left(\frac{R}{\lambda_D} \right)^2 \left\{ \frac{X^2 (2X^2 + 5X + 3)}{6(1+X)} \right\} \tag{6}$$

と表現される。ここで $X = l/R$ である。

TAIYO に搭載された高周波インピーダンスプローブ (IMP) は UHR 共鳴周波数検出と 400kHz でのプローブインピーダンス値の計測に本質的に必要な部分 (Source System) と



第2図 IMP 機器回路構成図。球はプローブを示す

テレメータの伝送方式にあわせるための情報処理部(Data Handling System)とから構成される。第2図にIMPの回路構成を示す。衛星に搭載されている符号化装置(ENC)より供給されるタイミングパルス(W_7)により鋸歯状波発生器が動作し、周波数13MHz~400kHzが1秒で掃引されつつプローブを含むブリッジ回路に印加される。プローブによって生じる振巾対周波数特性は広帯域高入力インピーダンスのプリアンプで増巾されミキサーを経て100kHzに固定された中間周波数に変換増巾された後検波される。検波出力はプラズマ中に発生する雑音電波の重畳を防止する目的から2種のLPF(遮断周波数 $f_{c1}=40\text{Hz}$, $f_{c2}=150\text{Hz}$ で1フレーム毎に自動切換)により雑音成分を除去しUHR周波数検出及び400kHzにおけるプローブインピーダンス値のサンプリング回路へ送られる。UHR周波数の検出ではIF検波出力の微分値と一定のレベル以下にあることを示すコンパレータ出力とのAND回路でパルスを作りカウンターのゲイトを開く。これにより周波数カウンターはUHR周波数に一致する掃引周波数を計数する。その値は一旦メモリーに入り、読み出し指令(W_{16})を受けてテレメータ系へ送られる。

一方400kHzにおけるイオンシースインピーダンス値の計測は掃引周波数が400kHz(正確には13MHzの水晶発振器の出力を1/32に分周した406kHz)に達した時点でゲイトを開きこの周波数におけるアナログIF出力電圧すなわちプローブ容量をホールドする。これは読み出し指令を得てテレメータのAD変換部へ送られる。なお搭載機器の詳細な報告は別稿にゆずる[4]。

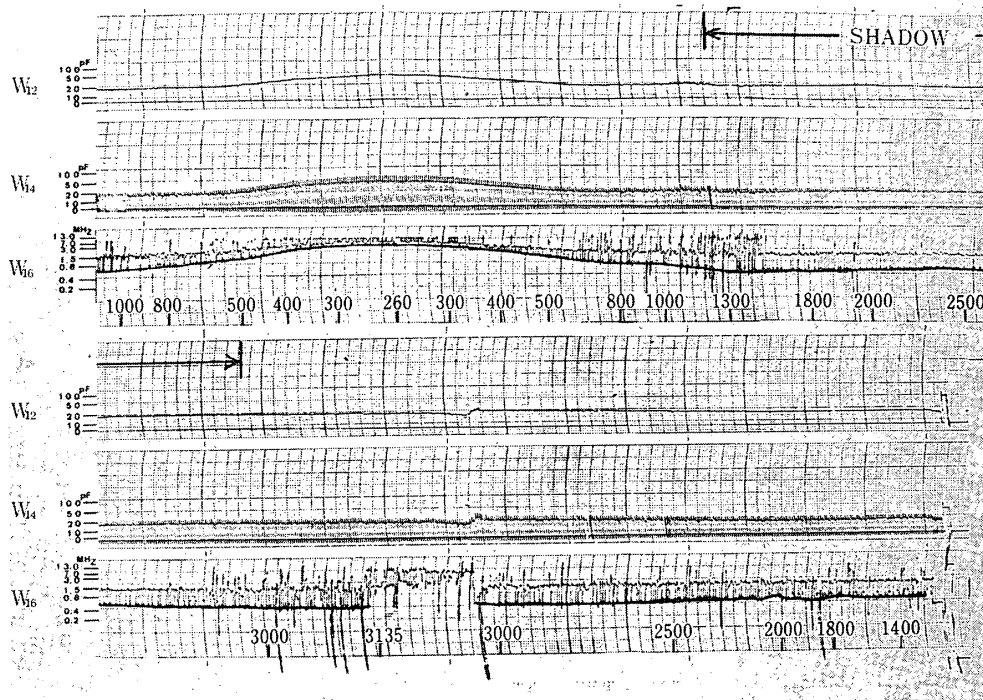
3. 観測結果

1975年2月24日TAIYO衛星は傾斜角 31° 、近地点高度255km、遠地点高度3135kmの軌道に投入された。打上げ後IMPの動作は良好であるが衛星の電源事情による制限のために高周波インピーダンスプローブのデータ取得率は低く5ヶ月間に80周回分のデータが得られている。

第3図にRev.22(1975,2月26日,0808-1013JST)のクイックルックデータを示す。 W_{12} は C_L すなわち406kHzにおけるプローブ容量値, W_{14} は雑音除去フィルターのモードの判別に使われLPF1(遮断周波数40Hz)のとき0,LPF2(遮断周波数150Hz)のとき W_{12} の値を示す。 W_{16} は共鳴検出周波数値である。およその衛星高度が下段に示されている。 W_{16} の太線がUHR共鳴周波数(F_{UHR})を示しているが、これとは別に高度と共に系統的に変化する共鳴の検出が得られている。この第2の共鳴検出は衛星周辺に励起された静電プラズマ波のサイクロトロン高調波周波数における共鳴によるものである[5]。 W_{12} と W_{14} (W_{14} の場合はその包絡線)においては低い高度でシース容量値は大きく、高い高度で容量値は小さくなり一定の値に近づく。

このRev.22において高度約3000km付近でUHR共鳴周波数検出が急に擾乱を受け、またシース容量計測においても急激な変化を示している。この現象はすべての周回においてみられ、その領域は西経 100° ~東経 30° の南大西洋磁気異常帯に一致する。この現象に関する詳しい解析は次章でおこなう。

第4図にRev.22におけるクイックルックデータから求められた電子密度及びシース容



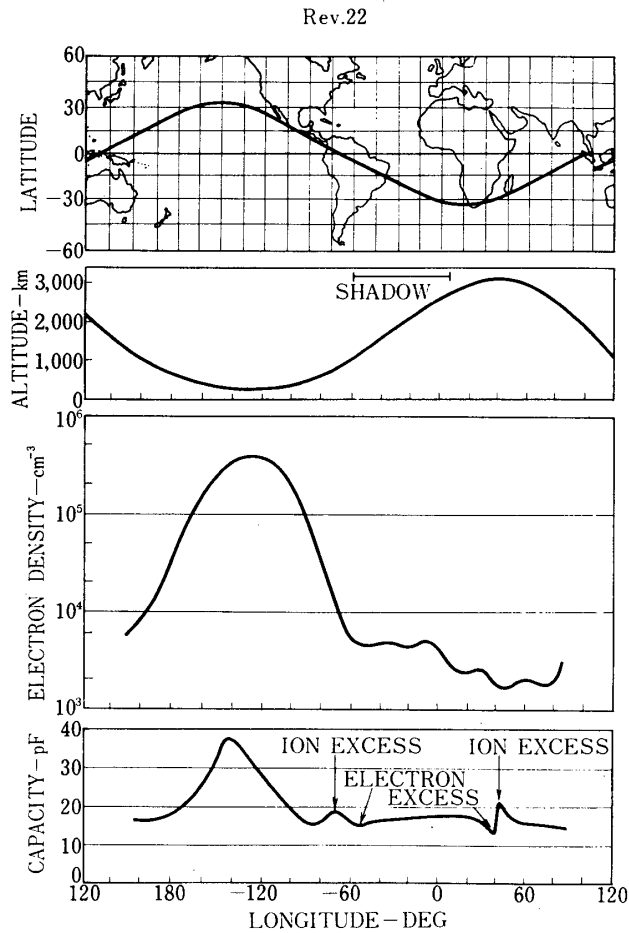
第3図 Rev. 22 (1975年2月26日, 0808-1013 JST)のクウィックルックデータ.
 W_{12} 及び W_{14} の包絡線は400kHzにおけるプローブの容量. W_{16} の太線トレースが F_{UHR} を示す

量値が衛星の軌道とともに示してある. 電子密度は近地点で最大値をとりその値は $3.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 遠地点で $1.8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となり衛星の緯度高度変化にともなう電離層電子密度の変化を明瞭に示している.

4. 南大西洋地磁気異常帯にともなうディファレンシャル粒子降下

前章で指摘した南大西洋地磁気異常帯でのシース容量の急激な変化はさらに第5図に Rev. 48の例をとって軌道の投影図とともに示してある. 西経75°の点でシース容量は急に大きくなり次に小さくなり次第に回復する. 一方磁気異常帯を出る東経10°付近では全く対称にはじめ次第にシース容量値が減少し次に急に大きくなった後もとの値にもどるといふ経過を示す. この現象は衛星打上げ後60日間のデータに関するかぎりすべての周回で出現しているが, ここで示した例のごとく磁気異常帯へ衛星が入る場合と出る場合で対称になって観測される例は全体の20%となる. このことは後述するごとく衛星の軌道に依存するものと考えられる.

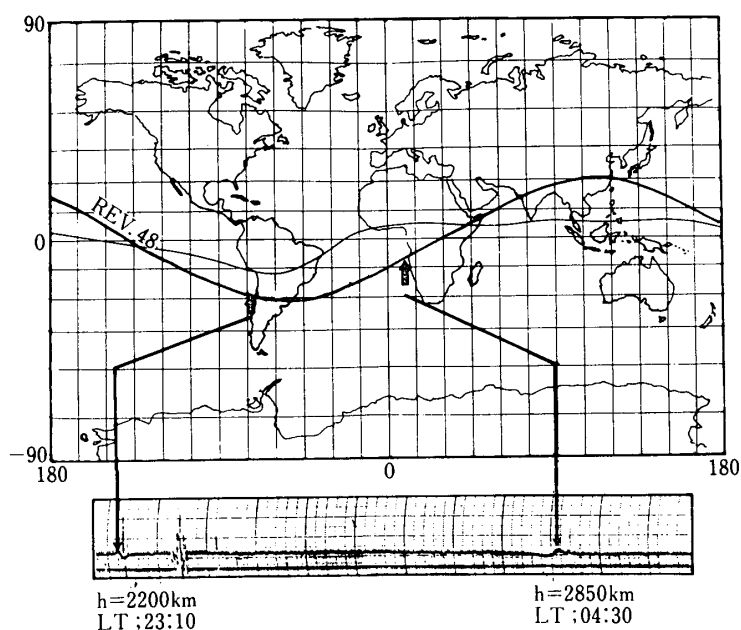
1) 地理的分布 シース容量の急な変化の観測される地点の地理的な分布をとるとすべての現象はブラジルを中心とした南大西洋磁気異常帯内にあることがわかる(第6図上段). 図中のコンターは1000kmの高度における500keV以上のエネルギーをもつ電子のフラックスを示す. 経度に対する出現頻度は第6図中段に示されるが, すべての現象が西経100°~東経30°の中でのみ観測されている.



第4図 Rev.22における電子密度プロファイル及び
シー ス容量プロファイル

2) 高度分布 この現象の生ずる高度の分布を第6図下段に示す。現象の発生する高度が低い程、出現領域の経度的ひろがり狭く、高度が高くなるにしたがって空間的には広く分散しており磁気異常帯を中心としたロート状の高度分布を示す。なお同図の実線と点線は南緯 30° における $E > 500\text{keV}$ 電子のフラックスと $E > 3\text{MeV}$ プロトンのフラックスの計算された高度変化を参考のためにあらわしている。高度分布に主点をおいたデータのプロットを第7図に示す。まずシー ス容量がはじめに大きくなり次に減少する(黒丸)現象は南大西洋磁気異常帯の西側で多くみられ、高度分布は一様である。一方シー ス容量が最初減少し次に大きくなる現象(白丸)は観測例は比較的少ないが磁気異常帯の東側の高度の高いところで観測される。

3) 経度的ひろがり 問題としている現象の継続しているひろがりを経度に対してプロットすると第8図のごとくなる。この磁気異常領域へ衛星の侵入するときみられる現象についてみると、シー ス容量が最初増大している領域の経度方向へのひろがり高度に対して無関係に $200\sim 500\text{km}$ のひろがりをもっている。一方シー ス容量が減少している領域のひろがり現象を観測している高度が上る程広がる傾向をもち、 $500\sim 1000\text{km}$ のレンジをもつ。

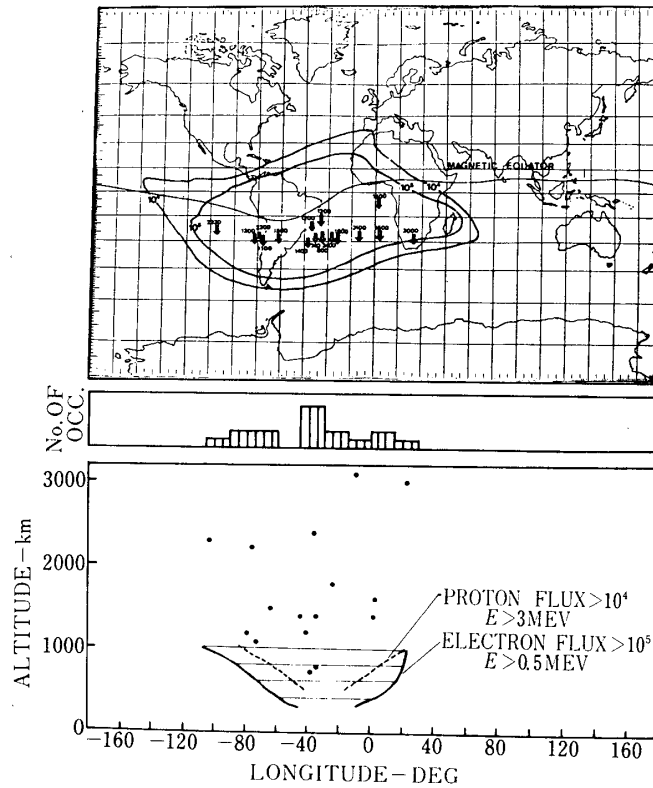


第5図 南大西洋磁気異常帯でのシース容量の変化 シース容量の急変する点は磁気異常帯の中心に対して対称な位置に出現する

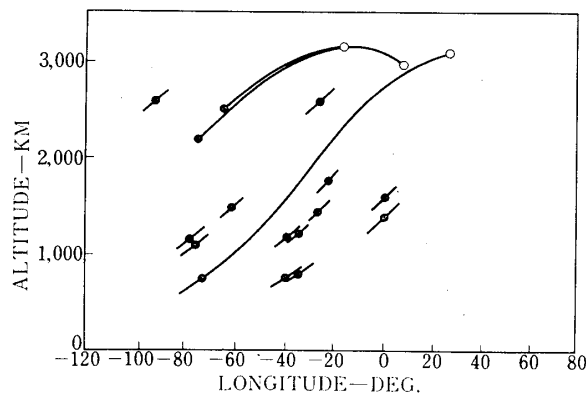
衛星が磁気異常帯から出る軌道で観測される現象については、現象を観測する高度の高い場合の例しか得られていないが問題のシース容量が減少している領域のひろがりは広く1500kmにも及ぶ。ただしシース容量が増大している場合にはその状態のひろがり500km程度となっている。

4) シース構造の変化 シース容量からシースの厚みが求められるが、ここでは厚み l をプローブの半径で規格化し、 $X=l/R$ を用いてシース構造をあらわすことにする。第9図はRev. 22の周回についてシース構造の変化をみたものである。衛星は高度700kmで南大西洋磁気異常帯へ入り高度3000kmで磁気異常帯を出ているがこの異常帯へ入ったり出たりする時点でシース構造の急激でかつ明瞭な変化が観測される。このシース構造の大きな変化は単に周囲プラズマの温度の急変ということでは説明され得ないもので、プローブに向かって高エネルギー粒子が流入していてプローブ電位が急激な変化を受けたことを示している。すなわちシース容量が増大するところでは非熱的なイオンのフラックスが卓越し、プローブのポテンシャルを浅くする。逆にシース容量が小さくなるところでは非熱的な電子のフラックスが卓越しプローブのポテンシャルを深めけている。この入射粒子のエネルギーは第6式よりshifted Maxwellian分布を仮定すると10~100eVの値を得る。

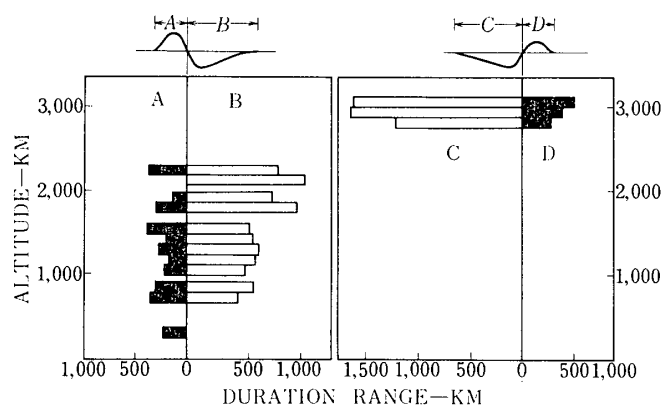
5) ディフェレンシャル粒子降下 以上(1)~(4)において南大西洋磁気異常領域でのシース容量の変動の形態的特徴を明らかにした。これらの特性からまず結論出来ることは磁気異常帯の東西の端においてはイオンのフラックスの卓越する領域($N_i V_i > N_e V_e$)と電子のフラックスの卓越する領域($N_e V_e > N_i V_i$)とが存在し、衛星が磁気異常帯へ入るとまずイオンの卓越したフラックスを観測し次に電子の卓越したフラックスを観測する。磁気異常帯の東端



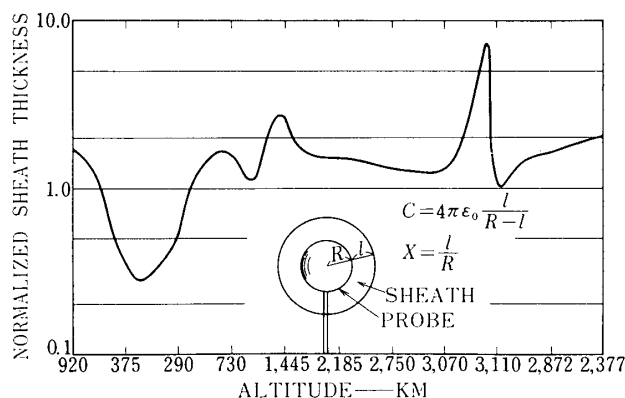
第6図 シース容量急変域と南大西洋磁気異常帯(上段). 等強度線は電子フラックスが 10^5 及び 10^4 ($E > 500\text{keV}$)を示す. 中段はシース容量急変の経度に対する出現頻度. 下段はシース容量急変の高度対経度分布(黒丸)を示す. 実線及び点線は南緯 30° における電子フラックス $> 10^5$ ($E > 500\text{keV}$)及びプロトンフラックス $> 10^4$ ($E > 3\text{MeV}$)



第7図 シース容量急変が観測された点の高度対経度分布. 黒丸は最初シース容量が増加してつづいて減少する現象, 白丸はシース容量が最初減少しつづいて増加する現象を示す. 実線は衛星の軌道を示す



第8図 シース容量急変領域の経度的ひろがり。A, Bは磁気異常域へ衛星が侵入する時の現象で容量値が最初に増加しつづいて減少している現象の経度的ひろがりを示し, C, Dは衛星が磁気異常域を出ていくとき観測された場合で容量値が最初減少しつづいて増加している状態についてそれぞれの経度的ひろがりを示している

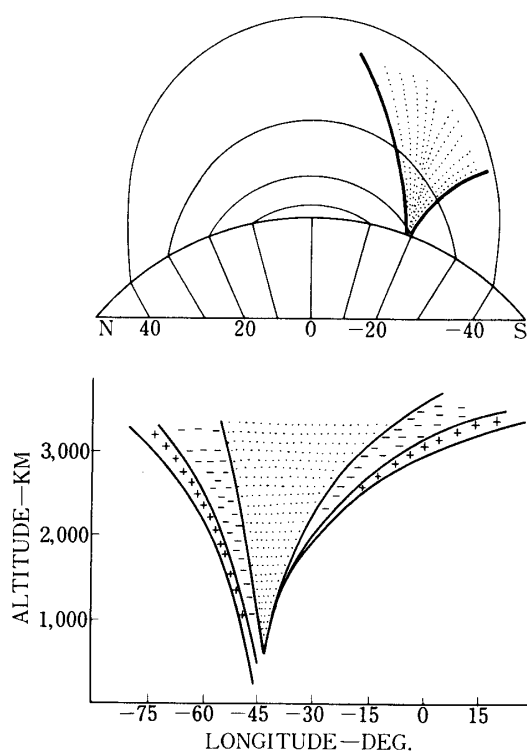


第9図 Rev. 22におけるシース構造の変化 南大西洋磁気異常帯へ高度700kmで衛星が侵入し, 高度3000kmの地点で脱出している

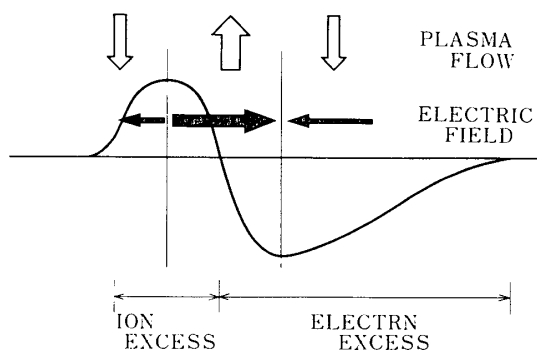
においてはこれと全く対称にまず電子の卓越したフラックスを検出し次にイオンの卓越したフラックスを観測する(第4図下段参照)。ここでは上述した様なイオンと電子のフラックスの卓越している領域が空間的に異なっていることから『ディファレンシャル粒子降下』と称する。

5. ディファレンシャル粒子降下のモデルと関連現象

まずディファレンシャル粒子降下のモデルを考察する。第10図上段に示すごとく内放射線帯の基部からの粒子降下が磁場強度の異常帯である南大西洋磁気異常帯において生ずる。これを経度対高度のセクションで見ると(第10図下段)磁気異常域の西側ではイオンの降下が



第10図 ディファレンシャル粒子降下のモデル



第11図 ディファレンシャル粒子降下域の局所的構造

卓越する領域がありそのとなりに電子の降下が卓越する領域が広くひろがって存在する。磁気異常帯の中心部ではイオンおよび電子とも同じフラックスで入射しており、東端では内側に電子フラックスの卓越、外側にイオンフラックスの卓越する領域が存在する。このディファレンシャル粒子降下の高度に対する傾きは東西で非対称であるため衛星の軌道によっては西側のディファレンシャル粒子降下しか検出しない場合もあるであろう。

西側のディファレンシャル粒子降下領域についてさらに局所的な構造を考察してみる。第11図に示すごとくイオンフラックス卓越と電子フラックス卓越の領域がとなりあって存在す

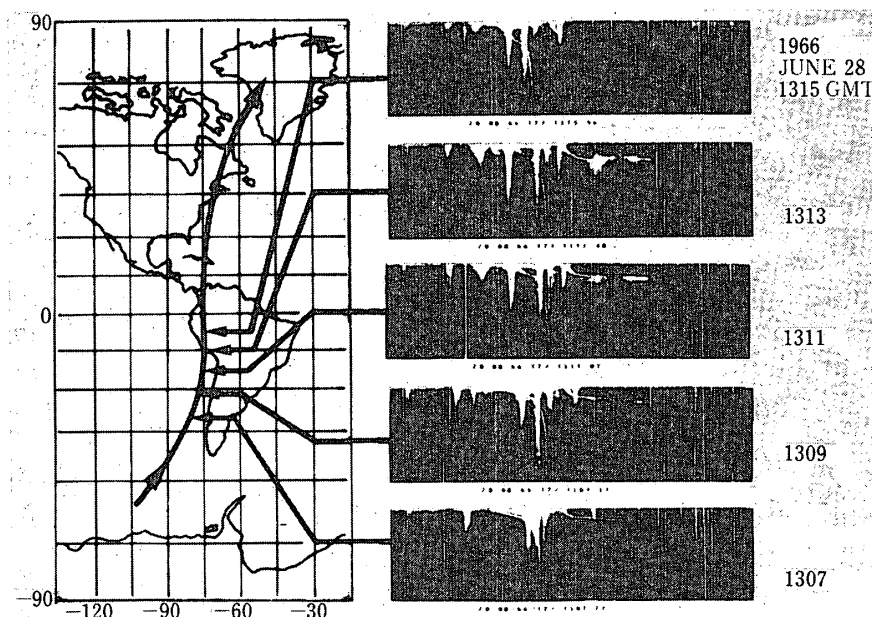
るために局所的な電場が矢印の向きにできる。この電場はイオンと電子の分布を考慮すると中心部で東向き強く生じ、その両側では西向きの弱い電場となる。この電場によってプラズマのドリフトは中心で上向きに、両側で下向きに誘起されることになり、流れの境界域においては二流性不安定が発生することが充分考えられる。

Knudsen等〔6〕はリターディングポテンシャルアナライザーによって南大西洋磁気異常帯で、電離層のF層レベルにおいて、 $10^{10}/\text{cm}^2\text{sec}$ を越す電子フラックスを計測し内放射線帯からの降下粒子の寄与であると結論した。しかし磁気異常帯の端での現象については報告されていない。

Hikkila〔7〕はISIS 1衛星によって赤道帯において $10^{10}/\text{cm}^2\text{sec}$ におよぶ低エネルギー粒子が観測された例を報告している。この事例についてみると観測が行なわれた場所は南米の西海岸上空でありしかもこの場合電子フラックスがプロトンより1桁も大きいことは我々の観測によるディフェンシャル粒子降下と同一の現象であると考えられる。

Gurnett〔8〕はInjun 3による低周波自然電波観測で、赤道帯に非常に強いVLFヒスを観測した。磁気緯度 $\pm 30^\circ$ に分布し極域VLFヒスにおとらない強度をもつこの赤道帯ヒスの発生域をプロットしてみるとすべての観測例が南大西洋磁気異常帯の中の南米西海岸及びアフリカ大陸上であることがわかる。この赤道帯ヒスは高エネルギーで大フラックスのディフェンシャル粒子降下と密接な関連があり、発生機構を考える上で重要である。

本論の解析結果によるとサンチャゴ局で受信されるAlouette IIのトップサイドイオノグラムには非常に頻りに磁気異常帯上においてスプレッドFが観測される。第12図にAlouette IIの軌道に沿ってイオノグラムをならべてあるが、南大西洋磁気異常帯に衛星が入るとスプレッドFが急に出現し、南緯 15° より北では再びスプレッドFは観測されなくなるという顕著



第12図 Alouette II によって得られたイオノグラムの1例。南大西洋磁気異常域で局所的にスプレッドFが出現している

な例である。この磁気異常帯で頻発するスプレッド F はディファレンシャル粒子降下の電離層における二次的効果と考えられる。すなわち前述したごとくディファレンシャル粒子降下にもなって誘起されるプラズマドリフトによって二流性不安定性現象が発生し電離層内に電子密度のゆらぎを生じせしめる機構があることが考えられるが今後定量的な議論を進める必要がある。

6. 結 論

TAIYO衛星に搭載された高周波インピーダンスプローブによって南米から南大西洋にわたる地球磁場異常帯上空において新しいプラズマ現象が発見された。すなわちこの地域において内放射線帯からの粒子降下があり磁気異常帯の東西の端においては電子とイオンの降下領域が空間的に異なり、ディファレンシャル粒子降下と名付けられた。ディファレンシャル粒子降下の観測される領域は西経 100° ～東経 30° の範囲にあり高度は500km以上の衛星高度においてブラジル上空を中心としたロート状分布を示す。降下粒子のエネルギーはプローブの周囲に形成されるイオンシースの容量計測データから求められ $10\sim 100\text{eV}$ という値をもつことが判明した。

観測されたディファレンシャル粒子降下の出現特性からその空間的分布に関するモデルを提唱した。特にディファレンシャル粒子降下が二流性不安定を惹起することは注目すべきことで、赤道帯VLFヒスおよびスプレッド F はこの現象と密接な関係にあることが指摘できる。

おわりにあたってこのTAIYO衛星主任をされた平尾教授の御協力と有役な助言に対し深く感謝する。さらに衛星打上げを推進された東京大学宇宙航空研究所のスタッフの方々、観測装置の製作を担当した明星電気株式会社、八巻敬行氏に深く感謝いたします。また困難な観測業務を担当した東北大・近藤実技官はじめ観測陣の方々に深く感謝する次第です。

1975年9月29日

参 考 文 献

- [1] H. Oya.: Rep. Ionos. Space Res. Japan, 19 (1965) 243.
- [2] M. Ejiri, H. Oya, T. Aso, C. Morita, T. Obayashi, S. Urimoto and H. Yamaki,: Inst. Space and Aeronautical Sci., Univ. of Tokyo., Report No.495, (1973).
- [3] H. Oya and T. Obayashi,: Rep. Ionos. Space Res. Japan, 20, (1966) 199.
- [4] H. Oya and A. Morioka,: J. Geomag. Geoelectr., in press.
- [5] 大家寛, 森岡昭, 近藤実: 昭和50年度科学衛星シンポジウム, 10頁.
- [6] W.C. Knudsen and G.W. Sharp,: J. Geophys. Res., 73, (1968) 6275.
- [7] W.J. Heikkila,: J. Geophys. Res., 76, (1971) 1076.
- [8] D.A. Gurnett,: J. Geophys. Res., 73, (1968) 1096.