

“たいよう” IMP による 低緯度電離層の観測結果*

高橋 忠利**・森岡 昭**・大家 寛**

Observation of the low latitude ionosphere by the gyro-plasma
probe (IMP) installed in TAIYO satellite

By

T. TAKAHASHI, A. MORIOKA and H. OYA

Abstract: Observation of the low latitude ionosphere have been carried out by the gyro-plasma probe (IMP) installed on the third Japanese scientific satellite TAIYO since the launch of the satellite on Feb. 24, 1975. The frequency of the upper hybrid resonance and the impedance value, of the spherical probe with radius of 6 cm, at 406 KHz are automatically detected in this instrumental system. The results of the measurement are summarized in forms of the data tables and the data plots, after the calculation of the ionospheric parameters, namely, electron number density and the sheath capacitance of the probe.

The data obtained for about 160 full path coverage reveal various aspects of the low latitude ionosphere and protonosphere. Preliminary results of the data analysis give informations on the local time dependency of the ionospheric structure. In the nighttime observation of the ionosphere, peculiarly distributed irregularities are often observed; the irregular structures are prevailed over about several hundreds of kilometer or more along the satellite path. Sometimes rarefaction events arises in the electron number density. The rarefaction seems to be limited in the neighborhood of the satellite. The possible mechanism for the rarefaction is the charging of the satellite surface and the probe being caused by the high energy particle precipitation related to the south atlantic anomaly of the magnetic field, and the magnetic equator.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北大学理学部

概 要

科学衛星“たいよう”に搭載された高周波インピーダンスプローブ (IMP) は、低緯度電離圏において、Upper Hybrid Resonance (UHR) 周波数、及び 406 kHz での等価シース容量値の計測を続け、多くのデータを蓄積して来ている。UHR 周波数からは電離層の電子密度を求める。またシース容量値は電離層プラズマと衛星プローブ系の接触にともなう多くの情報を含んでいて、プラズマ温度や衛星の電位を求めることが出来る。現在 160 余の軌道にわたる観測データの処理も併行して進められ、種々のディスプレイにより、計測結果の全貌を把握出来るようになった。本論ではこれらの整理されたデータに対して考察を加えたが、以下の点が明らかにされつつある。すなわち

i) 電離層の電子密度プロファイルについては地方時 (LT) への依存性が明らかになるとともに、夜側電離層に特有の不規則な構造が見出された。

ii) 電子密度計測値が一定領域で大幅に減少する現象が発見された。これは高エネルギー粒子降下に伴う衛星 (プローブを含む) の帯電効果によっている

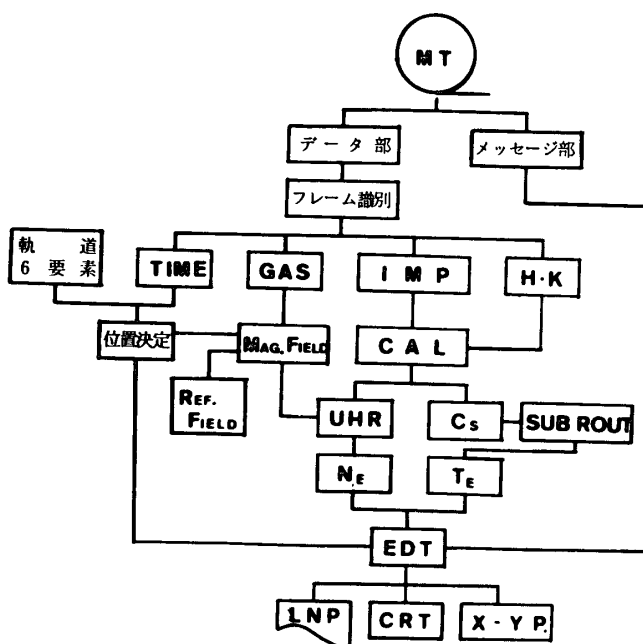
なお、ii) の現象は、既に発表したブラジル地磁気異常帯上空でのシース容量値異常現象とある程度類似しているが特に磁気赤道をはさむ低緯度帯における荷電粒子フラックスの存在を示唆するものである

1. 緒 言

“たいよう”は1975年2月の打上げ以来順調な計測を続け、多くの貴重なデータをもたらしたが、高周波インピーダンスプローブ (IMP) についても、160 Orbits 余にわたるデータが得られ、その結果は太陽活動度極小期における低緯度電離層のF領域、下部プロトノスフェアの多様な断面を示している。IMP 機器の仕様及び Instrumental な構造については既に詳しく報告したが [1], 観測結果の理解のために IMP 機器の主要なパラメータを“たいよう”衛星の軌道の諸元とともに第1表にまとめておく。本論文の目的は IMP の観測によって得られた結果を整理し、これらの諸結果から得られる低緯度の電離層及びプロトノスフェアの様相、またプラズマ中のプローブへの帯電効果と考えられる諸現象につき、その特徴と問題点を明らかにすることである。2. では IMP データ処理の概要を示し、問題点を議論する、またデータ処理の現段階についてまとめを行う。3. では IMP によって得られた低緯度電離層の構造を主として 500 km 以下のF領域に着目して議論する。4. ではシース容量値及び電子密度に見られる異常変動現象をとり上げ、それとプローブの帯電現象等との関連を議論する。最後に全体のまとめを行い、今後の観測及び研究計画について付言する。

2. IMP データ処理

IMP データは“たいよう”衛星の PCM データに収録されているが、この多量のデータを読み取り必要な物理量を計算して結果をディスプレイするまでの流れ図を第1図に示した。解析の対象とするデータは W 12, 及び W 16 であり夫々 406 kHz におけるプローブ容量値、および検出された共鳴周波数 (UHR) を示す。プローブ容量値は周波数がサイクロトロン周波数 (f_H) に比して充分低い所ではイオンシースの容量を与えることになる。“たいよう”の軌道では f_H がほぼ、406 kHz になるのは 2000~2500 km の高度である。UHR周波数



第1図 PCM データ処理の流れ図

第1表

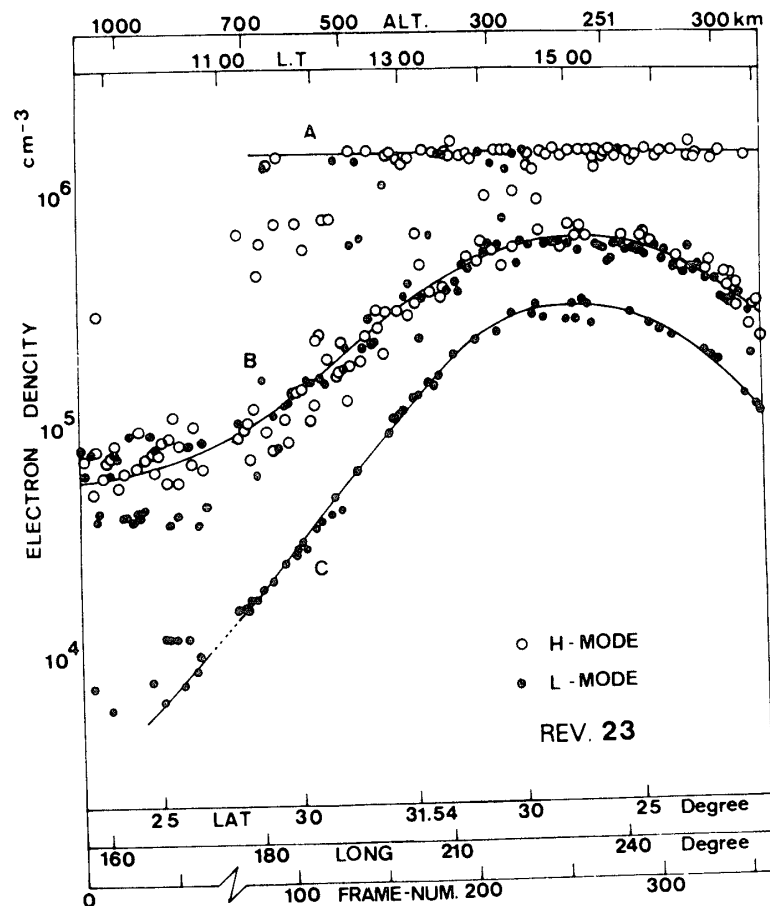
TAIYO (1975-014 A)

Launch	1975. 2. 24
Perigee	255.2 km
Apogee	3135.2 km
Inclination	31.5 deg

IMP

Probe	Sphere (r = 6 cm)
Sweep Rate	1 data / 4 sec
Sweep Frequency	300 KHz ~ 13 MHz
Data W 12	Capacitance (at 406 KHz)
W 16	UHR Frequency
Two Modes Observation	
L - Mode	Cut off 40 Hz
H - Mode	Cut off 150 Hz

からは衛星の位置と磁場データから磁場の絶対値を計算して、電子密度を求める。電子密度を求めるデータ処理のプロセスにおいて問題となってくるのは UHR 周波数を自動検出するにさいして、ノイズ、或は UHR 以外の共鳴現象が混入されてくることである。このことによるデータ解析の困難を解消するために、IMP 機器では、2つの異なる遮断周波数を持つノイズ除去フィルターを交互に通して計測を行っている。(第1表参照)。第2図にこの LPF のモード切換が計測結果へどのように現れるかを示した。図は Rev. 23 の場合であるが、黒丸がLモード、白丸がHモードである。計測結果には図の3つの実線で代表されるような系列が見られる。系列Aは高い検出周波数を示すもので、非常にノイズの多い時に、プローブに印加している掃引周波数繰り返し点への回帰と同時に自動的にゲートが開いて、検出周波数がカウントされている、この系列は殆どがHモードである。系列Bはその検出周波数が系統的に変化するもので、HモードとLモードが相半ばしている。この系列については今後詳しい解析を加えていく必要があるが衛星高度の高い所では f_H の2倍の値をとることが多くサイクロトロン周波数の高調波で生じる静電的波動の共鳴が受っているものと思われる。系列Cは UHR の検出であり、真の電子密度を与えるものでLモードの時にのみ受っている。



第2図 電子密度計測値のモード特性

以上総合するとLモードが効果的にノイズを除去していることになる。ところで系列Bとして検出されている現象は、Lモードのフィルターにより除去されたり、されなかったりであり、このことはその共鳴現象の鋭さ（したがって周波数特性）の一面を示唆するものである。このように、IMP 機器による UHR 周波数の自動検出は種々の情報を含んでおり、その多面的活用が期待される。

さて、IMP による膨大なデータを活用するためには、その処理データを適当な方法でディスプレイする必要があるが、現在以下の2通りの形でのデータ整理がなされている。

(A) 観測データ表—フレームナンバー、時刻、地方時、計測値、 f_H 、HK データ等とともに、算出された電子密度、シース容量値を LP 出力したもの。

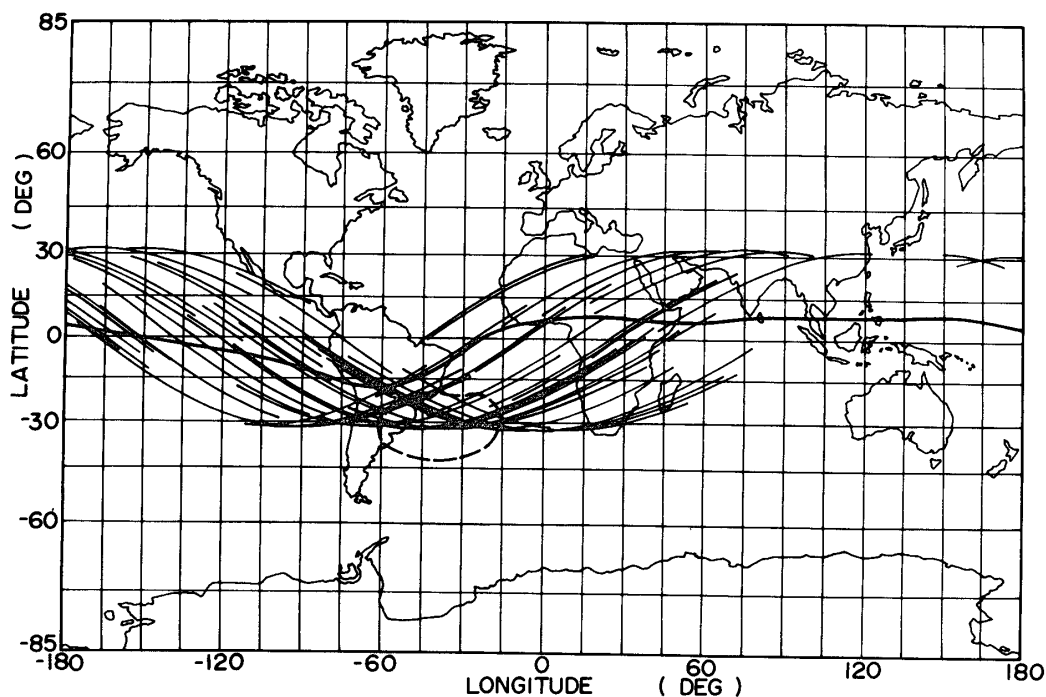
(B) 観測値プロット—XY プロッターによる、1周回毎の電子密度、シース容量値の軌道に沿うプロファイル。

(A) は観測により得られたすべての情報を含んでおり、Case Study の場合に詳細な検討をすることが可能である。既に、ブラジル地磁気異常帯における、シース容量値および電子密度に見られた異常変動現象は、このデータに基づいて詳しく調べられた [2, 3]。

(B) は観測結果の Global な把握に適しており、衛星の軌道に沿う電離層の構造等を調べる上で有用である。

3. IMP 観測による低緯度電離層構造

多量のデータ処理が進み、正確なデータに基づいて観測結果を議論出来るようになったが、ここでは主としてF領域での電子密度分布についてのまとめを行う。



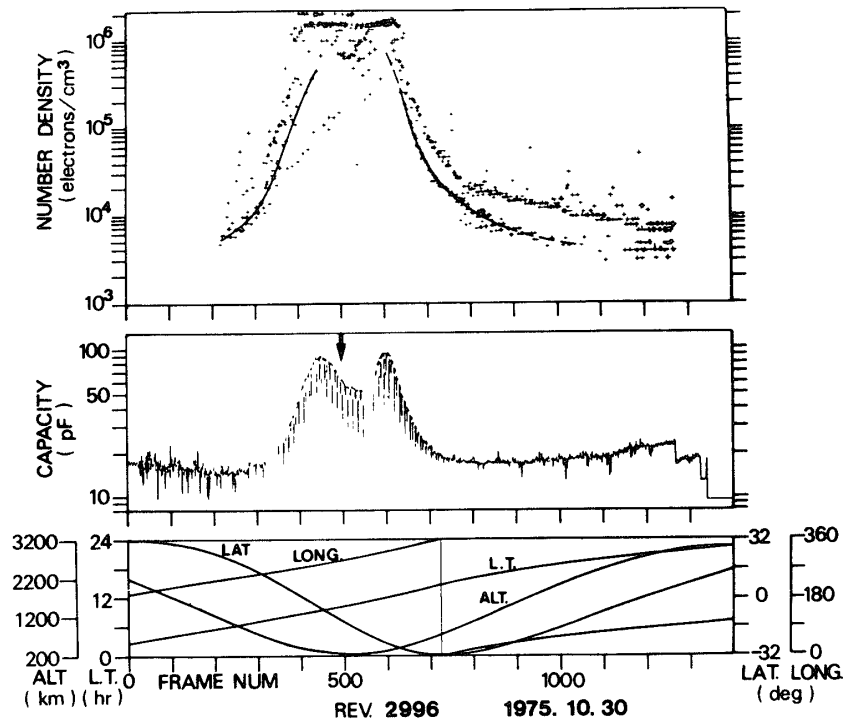
第3図 電離層高度 ($h \leq 500$ km) での“たいよう”の軌道

3.1. データの分布

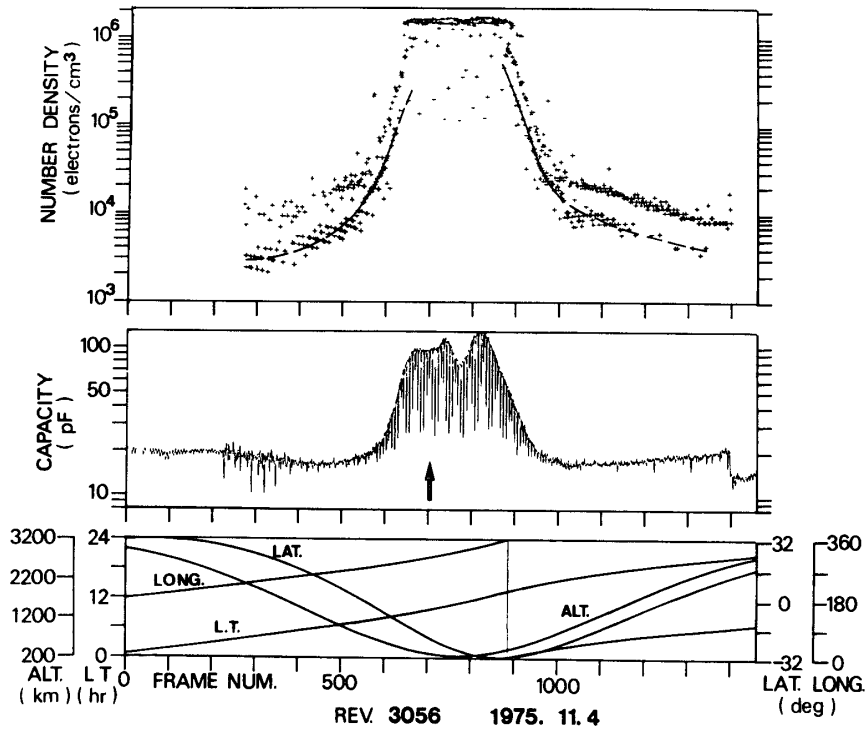
第3図は、観測プロットに基いて電離層構造を調べた軌道について、“たいよう”が高度500 km以下の軌道をとっている場合のマップであり、今回、電離層を調べた位置の分布状態を示すものである。解析の対象としているデータは Stored Data (データレコーダーへの記録) であるので、日本近辺データを記入していないが、低緯度で広い領域にわたって分布していることが知れる。また、電離層高度で地磁気赤道を横切る軌道も数多く見受けられ、いわゆる Equatorial Anomaly についても調べることが可能となっている。図中には示されていないが、衛星が軌道上にある時の地方時はこの電離層高度で、全 Local Time をほぼ一様にカバーしており、電離層構造の LT 依存性等についても明らかにすることができた。

3.2. 昼側の電離層構造

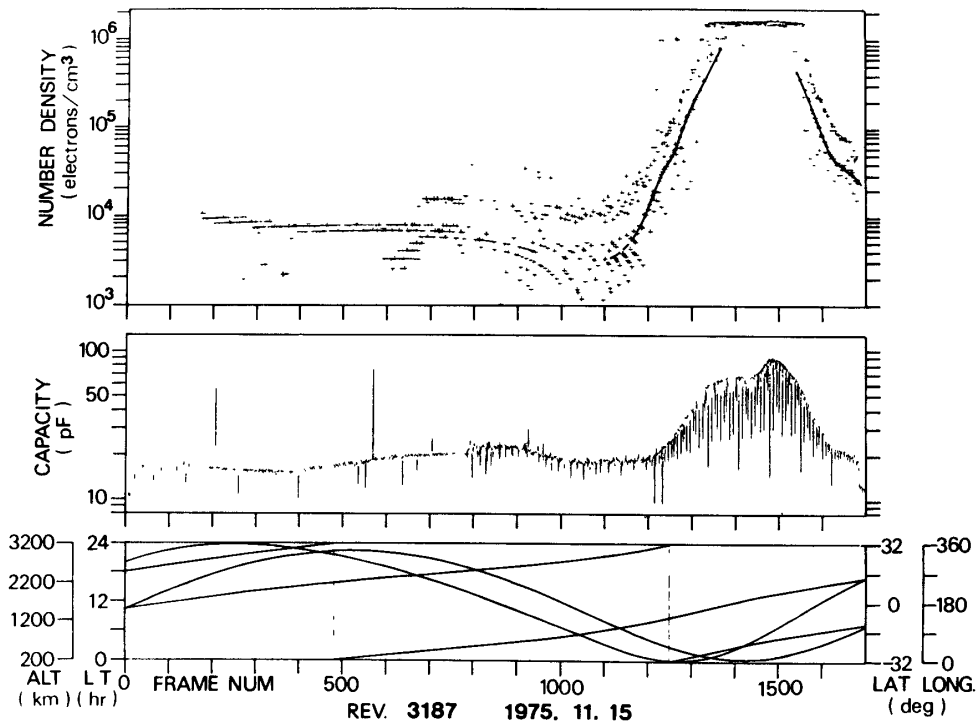
第4図に1例として Revolution Number 2996の観測プロット図を示した。電離層高度での衛星の LT がほぼ真昼にあたる場合である。この観測プロット図には、上段に電子密度値、中段にシース容量値、下段に衛星位置(高度, LT, 緯度及び経度)が示してあり、一周回の観測結果を俯瞰することが出来る。電子密度のプロットには前章に述べた、系列の異なるデータも描れているが、電子密度を示す系列は実線で強調している。シース容量値は電離層高度で電子密度によく対応した変動を示している。これはシース容量値がデバイ長を含むパラメータにより決められるためである。また、シース容量値のプロファイルには周期約48秒でシース容量値が急激に落ち込む現象が見られる。この時の“たいよう”のスピンの周期は6.857秒と求められることから、4秒おきの計測が Wake の影響を受ける周期が計測とスピンのビー



第4図 観測プロット図 (Rev. 2996)



第5図 観測プロット図 (Rev. 3056)



第6図 観測プロット図 (Rev. 3187)

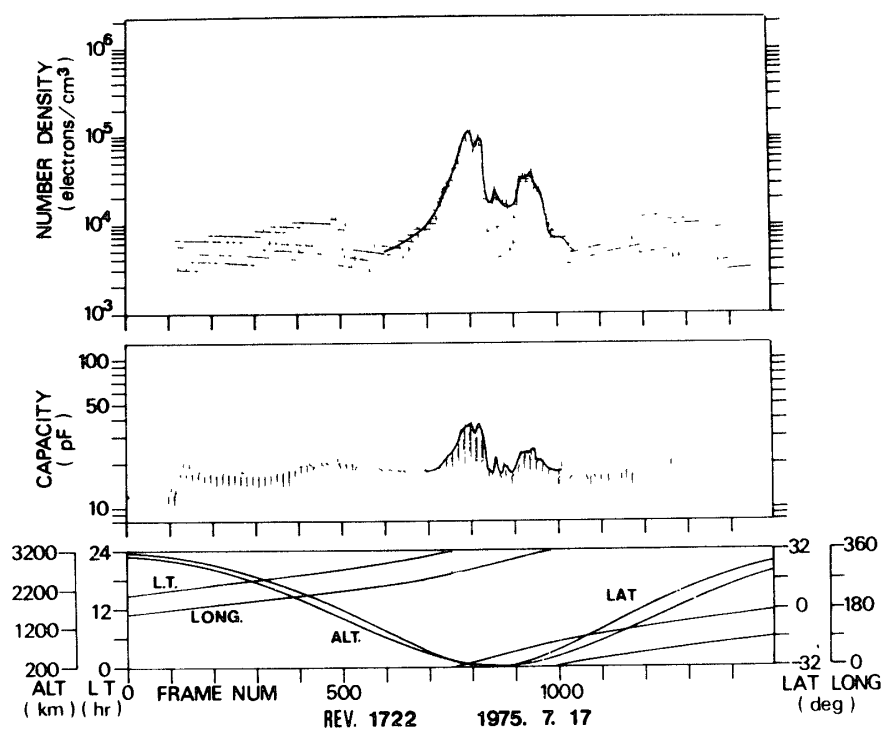
トとして出ているものである (ちなみに $48/6.857$ の値は 7.00015 である). このようなシース容量値の落ち込みは初期の計測では目立たないが, Rev. 96以降の計測には, すべてに見られる. Wake の構造を反映して, このビートはさらに変調されていることがあり, 系統的に調べると Wake の構造を知る手懸りとなり興味深いものである.

第3図より, 高度約 300 km 付近にピークをもつ電離層構造が見られるが, 電子密度の計測結果は, その値が 10^6 ケ/cm³ に近くなると周波数測定範囲の設定上, 正確な計測の限界になっている. したがって電離層の電子密度ピーク付近での正確なプロファイルは得られないが, 一方シース容量値を用いて, 外挿法により, 電子密度を決定することが出来る. 球プローブの場合, この関係式は次のようになる.

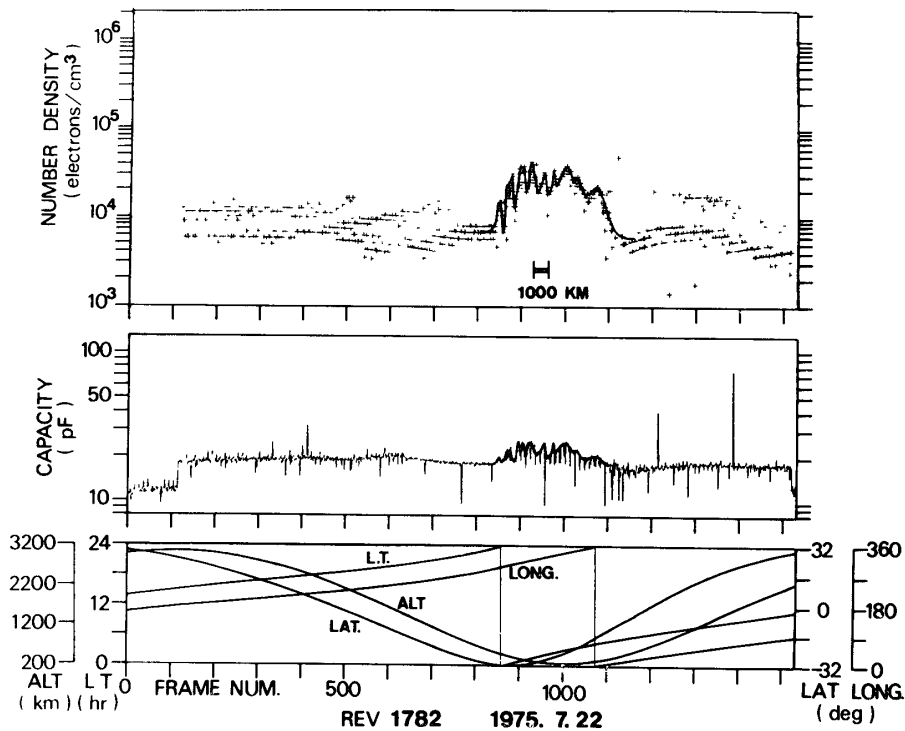
$$N_e = \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{e^2} \right) \left(\frac{C_m - 6}{6} \right)^2 \frac{\xi^2}{R^2} \quad (1)$$

ここに K はボルツマン定数, C_m は計測されたシース容量値, ξ はシースの構造に関する量で, $2.5 < \xi < 3.0$ の値をもつ, R は球プローブ半径である. いま外挿を行う範囲で電子温度がほぼ一定と考えて, ピークの電子密度を求めると, この場合ではほぼ 9×10^5 ケ/cm³ の値になる. 図には, 磁気赤道との交叉の位置を矢印で示してある.

第5, 6図にはさらに衛星が昼間, 電離層高度を横切った例として, Rev. 3056及びRev. 3187の2例を示した. これらの場合も電離層構造は衛星の近地点で極小を示し, 電離層の



第7図 観測プロット図 (Rev 1722)



第8図 観測プロット図 (Rev. 1782)

ピーク高度がそれより上にあることを示している。興味あることは、第5図に見られるように磁気赤道の位置にも電子密度の極小が見られることである。また、磁気赤道と近地点の位置がほぼ一致する。第3図の Rev. 2996 と電離層高度ではこの交叉がない、Rev. 3187 を較べると近地点での密度の落ち込みが前者で著しく現れていることが知れる。同様の傾向は他のデータにも見られこのことは、いわゆる電離層での Equatorial Anomaly を示すものである。電子密度のピーク値はシース容量値から推定すると、Rev. 3056, Rev. 3187 の場合で、夫々、 2.1×10^6 ケ/cm³, 1.02×10^6 ケ/cm³ であり、ピーク値がかなりの幅で変動していることを示している。昼間の場合、電離層に見られる構造は比較的単純な構造を示している。

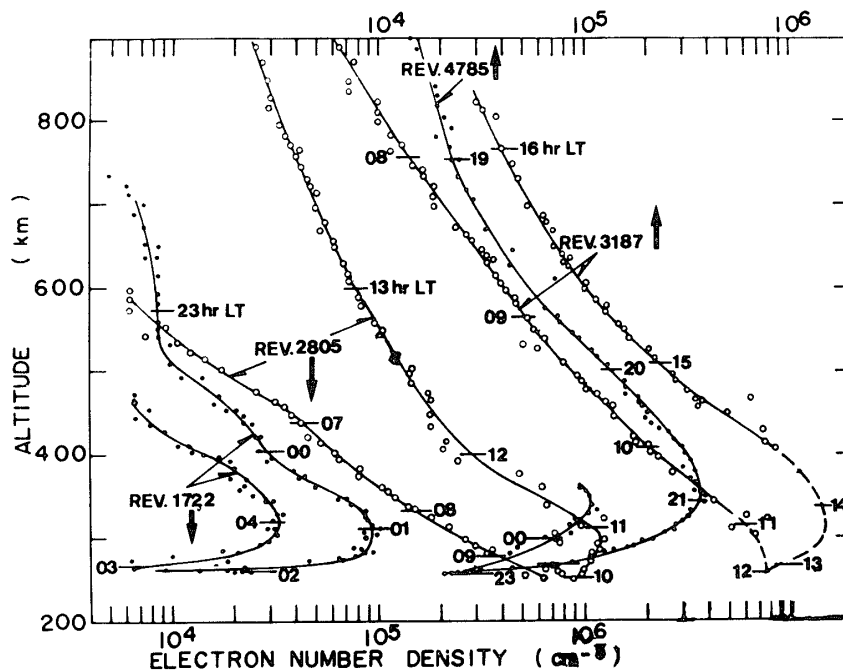
3.3. 夜側の電離層構造

第7, 8図に典型的な夜間電離層の観測例として、Rev. 1722 及び Rev. 1782 の観測プロットを示した。Rev. 1722 の場合は電離層の電子密度は、高度 350 km にて 1.1×10^5 ケ/cm³, 及び高度 385 km で 4.0×10^4 ケ/cm³ のピーク値を示すが昼間の値に較べかなり低いレベルに落ち込んでいる。一方衛星軌道の近地点(高度 255 km)付近では、電子密度は 1.35×10^4 ケ/cm³ 付近まで落ち込んでおり、夜間の電離層の一断面となっている。Rev. 1782 の場合には電子密度の高度分布は、Rev. 1722 の場合とは様子が異っている。ピークの電子密度はほぼ 4.1×10^4 ケ/cm³ で、Rev. 1722 の場合の第2のピークに近い値であるが、近地点付近では電子密度の構造的な落ち込みは見られない反面、不規則な変動を示しつつ、電離

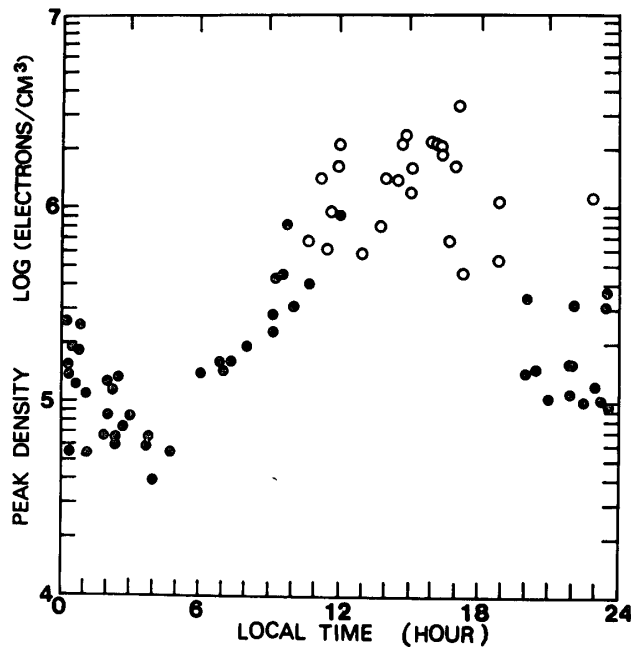
層高度で、ほぼ一定のレベルを保っている。以上は夜間電離層を観測した典型的な2例であるが、興味あることは、いずれの場合にも電離層の構造的な変動の上に、さらに不規則な密度分布の変動のパターンが見えることである。この変動はシース容量値にも電子密度変動と対応するかたちで現われており、衛星のスピントともなう Wake の効果（ビートをともなって現われる）とは異なるものである。この密度分布の irregularity は数 100 km から 1000 km にわたる範囲の空間的スケールをもっていて、その現われ方もかなり多様で、波動型、谷状、あるいは局所的な増加といった種々の現われ方をしている。これらの変動が電離層のいかなるプロセスによって生じているかは、現在のところ未だ結論できないが、その characteristic scale は TID のそれと同じ Order である。またその変動の幅は 50% を越えることが多く、空間的スケールを考えるならば、非常に大きな値であるといえる。

3.4. 電離層構造の Local Time 依存性

第9図は観測された電子密度の高度プロファイルを夫々異なる Local Time の電離層について示したものである。横軸は電子密度を示すが、Rev. 1772, Rev. 2805 の場合は下側、Rev. 3187, Rev. 4785 の場合は上側のスケールを参照されたい。図中各 Rev. の密度プロファイルには横線で Local Time を示してある。Rev. 3187 の場合で点線で示した部分は(1)式によりシース容量値より電子密度を求めたものである。これらのプロファイルから電離層の Local Time による消長を以下のようにみることができる。まず Rev. 2805 及び Rev. 3187 の場合は、朝方から真昼を過ぎて午後に至るまでの Local Time を示しているが、朝方の電子密度の低いレベルから電離層が成長していく様子をそのまま示している。また、Rev. 4785 は Sunset 後から Midnight まで、Rev. 1722 はほぼ Midnight から Predawn までの



第9図 電子密度の高度プロファイル



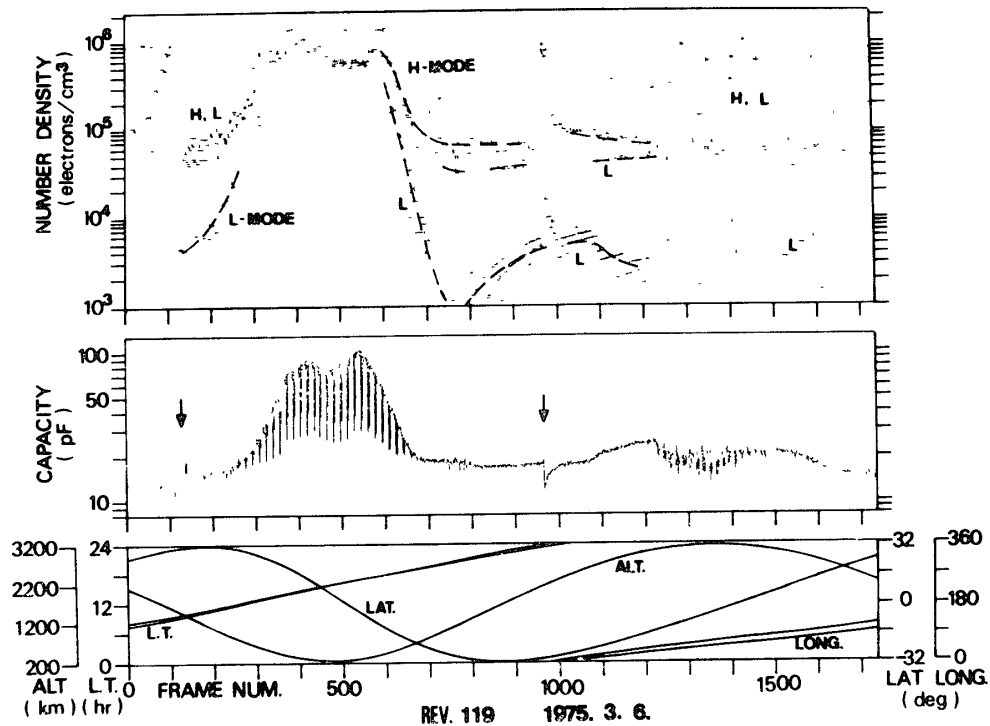
第10図 電離層ピーク密度の Local Time 依存性

軌道で、電離層が減衰していく様子が示されている。衛星により得られた電子密度の高度プロファイルは Local Time による変化を含んでいるので、正確な拡散平衡の分布は示さないが、Rev. 1722 の場合 540 km, Rev. 4785 の場合 700 km の付近で密度プロファイルの勾配に急変する点が存在する。この付近の電子密度の Local Time による消長を考えると、この急変点はイオン組成の変動による。いわゆる、Transition Height を示すものである。これは“たいよう” RPA による夜間の Ion Transition Height の結果ともほぼ一致している。[4].

第10図は今回調べたすべての軌道について、電子密度のピーク値をそれが得られた、Local Time に対してプロットしたものである。図で黒丸は UHR 周波数より求められた値、白丸はシース容量値から求めた値である。ピーク値はかなりのばらつきをもっているがこれは、観測軌道が季節的、磁気緯度的に広く分布しているためである。図に見られるように電子密度のピーク値は 0400 LT 頃最小になり、夜明けから昼にかけて急増し、1400 LT 頃最大値を示しており、これまでに得られている日変化と一致している。

4. 異常変動現象とプローブの帯電現象

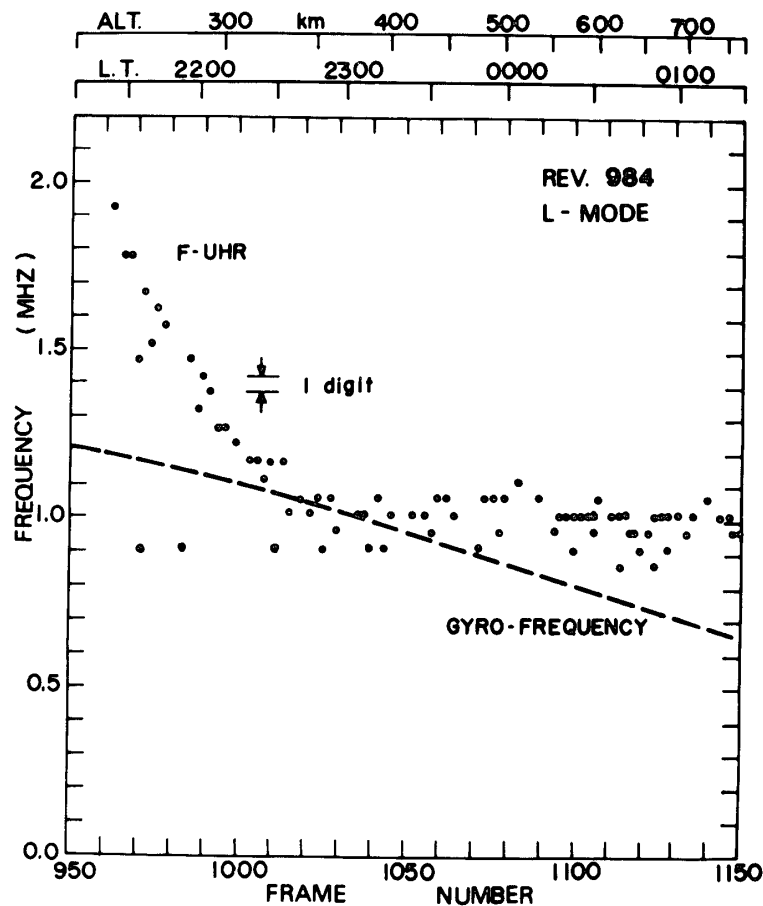
IMP による電子密度及びシース容量値の計測には、しばしばプローブの帯電現象に起因するものと思われる異常変動現象が見られる。第11図に Rev. 119 の観測プロット図を例として掲げた。この例では2つのタイプの異常現象が見られる。すなわち Frame Number で130と970の付近での容量値の急激な変動と、それに伴う電子密度計測値の乱れ、及び Frame Number 780の付近に見られる電子密度計測値のおち込みである。前者については、この



第11図 観測プロット図 (Rev. 119)

現象がブラジル地磁気異常帯近くに集中して起ること、又増減の変動が引続いて起ることから、Differential Precipitation のモデルを提唱して説明しており [2]、その Morphology についても既にくわしく報告している [3]。後者の現象は、上部電離層において計測される電子密度が時に 10^3 ケ/cm³ 以下にも落ち込んでいる、しかしこの時点に対応するシース容量値に大きな変動は見られない。この観測結果に現われる現象は、検出される共鳴周波数がジャイロ周波数に一致するようなしかたで現われる。すなわち、第12図にその様子の一例 (Rev. 984) を示したが、黒丸で示した検出共鳴周波数の trend が点線で示したジャイロ周波数に接するかたちになっている。この結果を見ると一見、観測器の都合で、低い周波数での自動検出が一定の値を示しているようにもとれるが、その後の詳細な検討の結果、この高度では UHR 共鳴点はまだ十分の Q 値 (共鳴の鋭さ) をもっていて、機器の誤判断でないことが確認され、観測対象となる電子密度そのものが急激に低下していることが結論される。そこで、この急激な密度低下は、自然の電離層の状態というよりは、衛星およびプローブの周辺に生じる Rarefaction の結果によると断定できる。

第13図は、第3のタイプの異常現象を示している Rev. 1951 の観測プロット図を示す。このタイプの異常現象は、夜側の F 領域電離層に現われ、観測位置が Perigee 付近で電子密度およびシース容量値の相方に急激な落ち込みを示している。この例では電子密度の落ち込みの様相は軌道に沿って比較的単純な変化を示しているが、場合には2重構造をとった複雑なこともある。Rev. 1951 では落ち込んだ電子密度は 2.5×10^3 ケ/cm³ 程度で、このよ

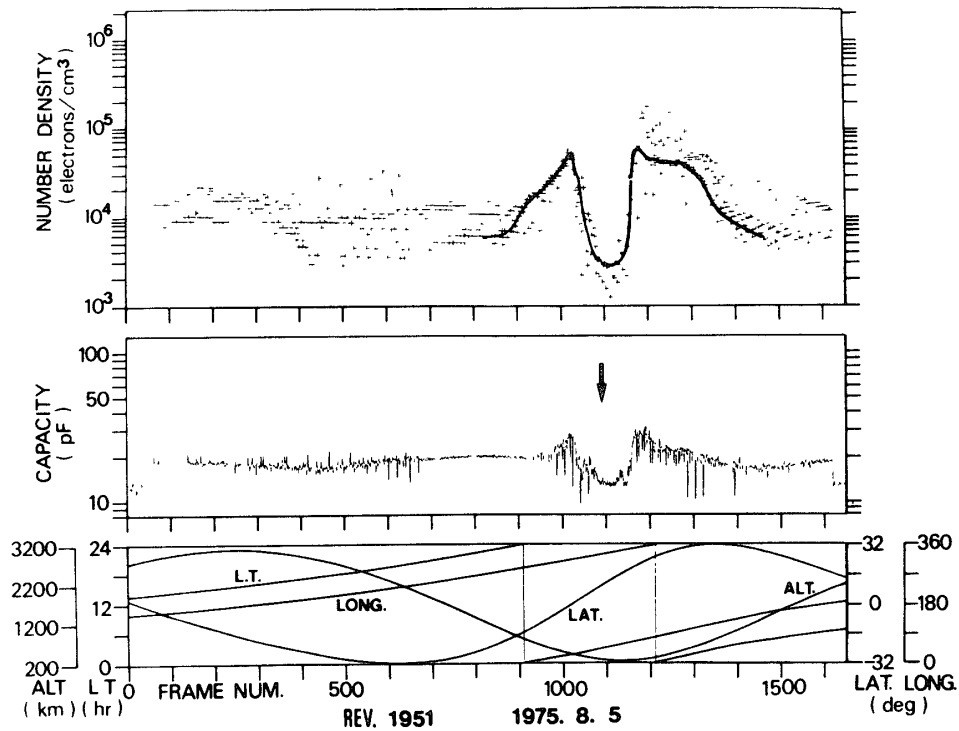


第12図 電子密度異常現象付近での検出共鳴周波数

うな低い電子密度の値は夜間でもこの高度では異常に低く、Rev. 119に見られた現象と同様、衛星、プローブ周辺にのみかぎられた Rarefaction 現象である。これらの現象は観測プロット図の各個ケースについて調べた結果判明したもので、その出現の頻度や分布状態については検討中であるが、地磁気赤道をはさむ低緯度において、プローブや衛星を帯電するエネルギー粒子降下現象の機構があることを示唆している。これらの現象はブラジル地磁気異常帯でのシース容量値に現れる異常現象と合わせ考えるとき興味深い。また、プローブの帯電効果の結果高周波インピーダンス等に及ぼす影響は理論的にも興味ある問題を含んでおり、この方面からのアプローチをすることも重要である。

5. む す び

“たいよう”衛星に搭載されたインピーダンスプローブの観測結果について、そのデータ処理方式について述べ、蓄積されたデータに基づき電離層構造を概観した。これらは太陽活動度極小期の低緯度電離層のモデルを考えてゆく上でも貴重なデータとなろう。また夜側の電離層に見出された不規則な構造は、低緯度での電離層ダイナミクスを研究してゆく上で興



第13図 観測プロット図 (Rev. 1951)

味深い。シース容量値の計測値には衛星のスピンのより、プローブが Wake を横断する周期と観測サンプリング (4 秒に 1 回) との間のビート効果が見られる。これは逆に Wake 構造の情報を含むものであり、今後系統的に調べることにより、Wake 構造を知る手懸りとなる。さらに時折見られる電子密度の急減現象は、衛星-プローブ系の帯電現象によるものであり、低緯度における荷電エネルギー粒子フラックスの存在を示唆している。インピーダンスプローブは ASTRO-A 衛星にも搭載され、“たいよう” と類似する軌道を飛ぶ、この衛星による観測結果は、“たいよう” の IMP で得られた諸現象をさらに詳しく検討する上で重要で、その成果が期待される。

インピーダンスプローブのデータ処理にさいしては、東大宇宙研 SA 12 班の決定を得て、多大な計算時間を設定していただいている。ここに厚く感謝の意を表したい。

1977年8月20日

参 考 文 献

- [1] Oya, H. and A. Morioka, J. Geomag. Geoelectr., **27** 331 (1975)
- [2] 森岡昭, 大家寛, 宇宙航空研究所報告, 第11巻, 613頁 (1975)
- [3] 高橋忠利, 森岡昭, 大家寛, 昭和51年度電離圏研究会記事, 128頁 (1976)
- [4] 宮崎茂, 昭和51年度電離圏研究会記事, 135頁 (1976)