

2.3 飛翔体による電離圏の観測

A 序

宮 崎 茂

電離層を直接観測するために開発された最初のテストロケットK-8-1は1960年7月11日13時24分に秋田県道川海岸から発射され高度150 kmに到達した。これは当時日本における最高記録であった。かくしてK-8ロケットによって電離層の観測の可能性が実証され、我が国における超高層物理研究の新時代が到来した。1961年には3段ロケットK-9 Lが開発され、350 kmの高度に到達した。このロケットの出現により発射場は秋田の道川から現在の鹿児島県内之浦に移った。1962年の末、新しい2段ロケットK-9 Mが開発され、85 kgのペイロードを350 kmの高度に到達させることが可能になった。このロケットは中高度観測用として非常に高い信頼性をもっている。1963年には直径73.5 cm、推力50トンのLロケットが開発された。L-3 H型ロケットは、メインステージにおいてペイロード重量100 kgを高度2100 km、セカンドステージにおいてペイロード重量170 kgを高度430 kmに到達させることが出来る能力をもつ。

一方1970年2月11日、L-4 S-5によって我が国最初の人工衛星「OHSUMI」が出現し、次いで最初のAeronomy衛星「SHINSEI」がM-4 S-3によって1971年9月28日に打ち上げられた。また1975年2月24日にはM-3 C-2によって総合的なAeronomy観測衛星「TAIYO」が打ち上げられた。

さて昭和50年度末迄に発射された観測ロケットは計126機とテストロケット若干である（気象ロケットは除く）。このうちで電離層電子、イオンの密度、温度関係の搭載観測器が乗ったのは計84機である。この中で約10機はロケット自身の故障で観測は全く出来なかった。平均して年に数機のロケットによって上記物理量の高度プロファイルが観測されたことになる。

B 電子密度, 温度

宮 崎 茂・伊 藤 富 造・向 井 利 典

(B-i) 観測の概要

1960年から1965年頃まではK-8型及びK-9M型ロケットによって、ラングミュア・プローブ及びレゾナンス・プローブが用いられてイオン密度, 電子密度が測定された。

1965年にはアンテナ・インピーダンス・プローブ法(ジヤイロプラズマ・プローブ)が開発され, 電子密度分布の測定に現在まで数多くのロケットに搭載され, 多くのデータを得ている(R95)。

L-3H型ロケットによって高度2000 kmまでの電離層・磁気圏の電子密度観測も行なわれ, 垂直分布の構造が明らかにされた。またL-3H型ロケットには平面型のグリッド付き電極をもつRetarding Potential Analyzerが搭載され, 電子密度のみならずイオン温度の測定も試みられた。

1967年迄はL-3H型ロケットを除いてPIの相乗り搭載機器は比較的少なかったが, 1969年からは総合実験という目的が重点的になったので, それにつれて必然的にPIの数が多くなっている。また1965年からベネット型質量分析器によってイオン組成の測定が試みられた。引き続き四重極型質量分析器のロケット搭載用も開発された。1963年からVLFドップラー法による電子密度が計10回なされている。特に1975年にはVLFの偏波および強度観測によって数個/cm³迄の低電子密度分布が観測された。S-210-6, 8, 9号機によってキャパシタンスプローブを用いて高度70~90 km間のD領域の電子密度が観測された。K-9M-35, 38, S-310-2号機によって各種電子密度測定用プローブの詳細な比較実験がなされた。

電子温度の観測は高周波整流型プローブによって, 精度の高いデータが1961年以来, 得られている。またガラス真空封じ型のラングミュアプローブによって1971年から電子密度電子温度の高度分布が測定されている。またK-10-10, -11号機によって超音速で飛しようする特性を利用して中性大気温度およびイオン温度の観測がなされた。最後に1973-1975年にはE領域におけるPlasma instabilityの直接観測も行なわれ, プラズマ物理の分野にとっても興味ある結果を得ている。

(B-ii) 正イオン密度観測 (平尾, 宮崎)

E層より上では電子密度は正イオン密度と同じと考えられる。よってK-8-3及び-4の正イオン密度の観測から次のことが判った。これによるとE層最大電子密度の高さ(約110 km)からF層(下部は約200 km)にいたる中間領域では, 昼間は電子密度の減少は殆ど見られず単調に増加すること, 夜間は一旦減少して後増加することが明らかになった。特に夜間のこのような電子密度分布はいわゆるE-F Valleyと呼ばれるものである。これらの様子を図3-1に示す。

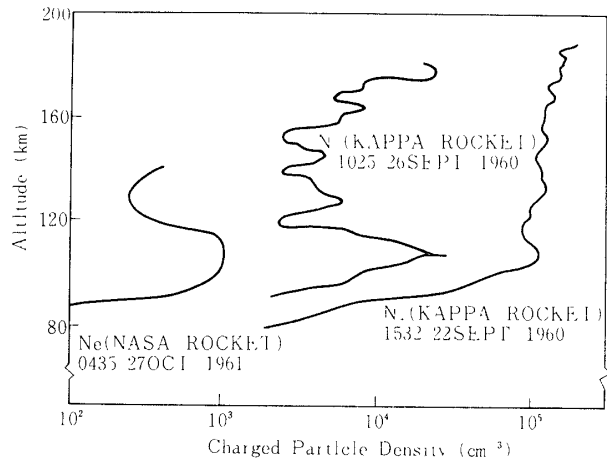


図3-1 E領域のイオン1電子密度の日変化

(B-iii) ジャイロプラズマプローブ (アンテナ・インピーダンスプローブ) による電子密度の観測 (大林, 大家, 麻生, 江尻, 渡辺)

これはプラズマ中のアンテナ・インピーダンスの周波数スペクトルを測定する方法である。原理的には, f_p (プラズマ周波数, したがって電子密度), f_R (シースレゾナンス周波数, したがってシースに関する情報), f_H (電子のジャイロ周波数, したがって地球磁場の強さ) の3種の値を決定し得るもので, 精度よく測定出来ることが実証され, 標準測定法の一つとして確立された。このプローブの高周波特性からプラズマ物理的にも興味ある磁場との角度に依存する変形プラズマ共鳴, nf_H (n は整数) 共鳴及び磁場中のバーンシュタインモードに関連したサイクロトロン高調波近傍の周波数での共鳴現象を検出しプラズマプローブへの縦波の寄与の evidenceが見出されている。

(B-iv) 高度2000 kmまで電子密度高度分布(大家, 江尻, 麻生ほか)(R78, R79, R93)

L-3H-5 ロケットは1970年9月19日20時30分(JST)に打ち上げられ, それまでの最高高度2017 kmを記録した。そしてインピーダンスプローブによって電子密度の観測が行なわれた。図3-2はその観測結果を示す。上昇時の F_2 層のピークは内之浦で同時に地上で観測された f_oF_2 より求めた最大電子密度($\sim 5.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$)に極めてよく一致しており, このピークから高度2000 kmに至るトップサイドの電子密度分布が得られた。ラムダ型ロケットによるトップサイドの観測結果はL-3H-2及びL-3H-6の計3回となるが季節及び太陽活動度の違いはあるが500 km以上では昼夜の差が余りないことが見出される。これは500 km以上では電離層が層状であるとすればイオンの拡散平衡によって説明することが出来る。またこの分布よりスケールハイトを求めることにより, 適当な仮定をすればイオンの組成比も求めることができる。

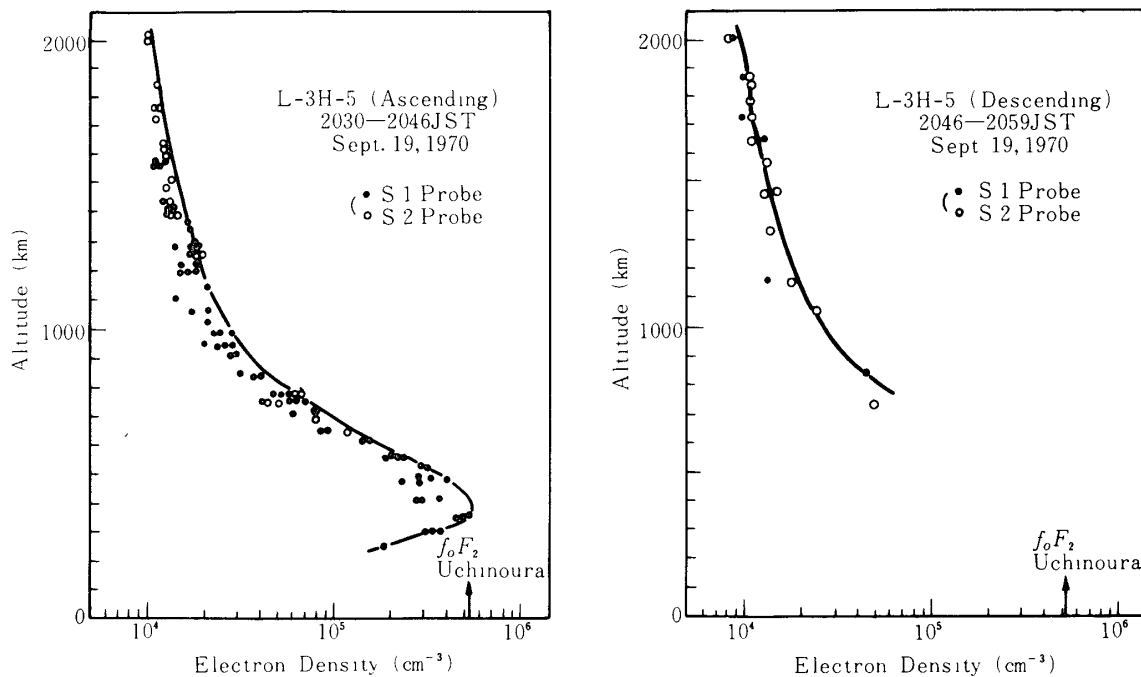


図3-2 L-3H-5による電子密度測定結果

(B-v) VLFドップラー法による電子密度測定(木村)

わが国におけるVLF信号のドップラー効果を用いた電離層電子密度のロケット観測1963年12月以来で10回の実験中8回成功している。ドップラー法はわが国では1963年5月、中波帯の放送波(700 KHz)を用いた実験(K-9M-2)が成功しているが、中波では電離層のごく下部(90km以下)で反射してしまい、上部電離層の観測に使えない。これに対しVLF電波では電離層を小さな減衰で突き抜けることと、電離層中の電波の通路についてあまり考えなくてよい点、又測定される電子密度がロケットの付近の局所的なものでなく、波長オーダ(~数100 m)の平均的密度を与えるなど、電子密度測定法として大きなメリットをもっている。

今までに行われた実験で明らかになったことは

(a) K-9M-29, -35号機の例のようにこの方法で得られる電子密度は受信される信号周波数、発射点に依存しない(南半球オーストラリアの局でもよい)(R 103)。

(b) 電離層の傾斜が電子密度測定結果に及ぼす効果は小さい(R 140)。

(c) 同時に搭載した直接プローブ法(IP, LPなど)との相互比較の結果、プローブ法で得られた電子密度 N_{probe} とVLFドップラー法で得られたもの N_{DP} の間には

$$N_{probe} \leq N_{DP}$$

の関係がある。すなわち他の相乗りの機器の影響でロケットのポテンシャルが沈むことが多く、その時にはシースが広がってプローブ法ではロケットのごく近傍の小さな電子密度を測定する結果である。逆にVLFドップラー法では受信する波の波長が電離層中で数百mの程度なのでロケット近傍の擾乱の影響をうけずに常に電離層の真の電子密度の測定ができる。

(B-vi) 地上局VLF偏波および強度測定による低電子密度分布の観測 (満保, 長野)
(R 234)

1975年8月26日打ち上げられたK-9M-53号機によって、検見川局(40kHz)電波を左右両偏波に分離し、それぞれの強度分布を観測した。cold plasma理論によるfull wave解析により観測した左右両偏波強度分布に一致するような低電子密度分布を求めた(図3-3)。観測時の天頂角は約 104° であり、D層は認められなかった。なお、この観測原理による電子密度の解析範囲は数個/cm³から 10^3 個/cm³である。

(B-vii) インピーダンスプローブとレゾナンスプローブによる電子密度比較実験 (竹屋, 南)(R 235)

レゾナンスプローブは従来シースレゾナンスからシースの構造による理論計算を経て電子密度を算定していたが、改良を加えた差動レゾナンスプローブとインピーダンスプローブによる電子密度の比較がS-310-2号機によってなされた。その結果相対誤差 $\pm 3\%$ で両者が一致することが判った。図3-4は両プローブによる上下降時のデータから得た電子密度を比較したものである。なお高度140kmから190kmにおいて略一様な電子密度分布を示し、約300個のデータから $2.2 \times 10^5 \pm 7 \sim 8 \times 10^3$ cm⁻³の値が得られた。

(B-viii) 電子温度の観測 (平尾, 小山)(R 236)

電子温度の観測は高周波整流型プローブ(旧レゾナンスプローブ)の低周波領域におけるプローブの電位変化から温度が算出されるようになって精度の著しい向上が見られるようになった。その後もひきつづき改良が加えられ、2つの電極(測定電極と参照電極)を用いるようになってからプラズマ電位あるいはロケット電位の少しの変動に対しても影響をうけなくなった。又測定器はその後プローブと電子部とが一体となった低消費電力小型の標準測定器が設計され、更に高入力抵抗化と相俟って 10^3 個/cm³の低電子密度領域迄の電子温度測定が可能となった。

一方ラングミュアプローブ法でもプローブ表面のよごれの影響の機構が解明されると共に

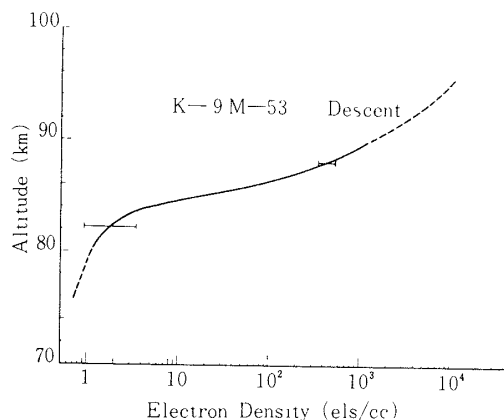


図3-3 電子密度測定結果

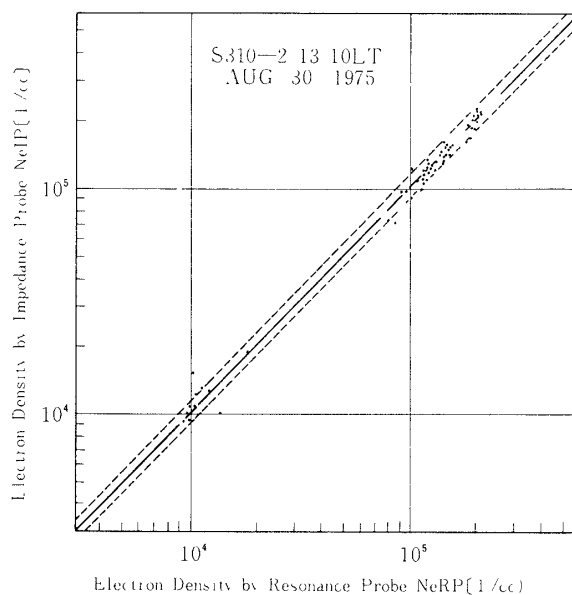
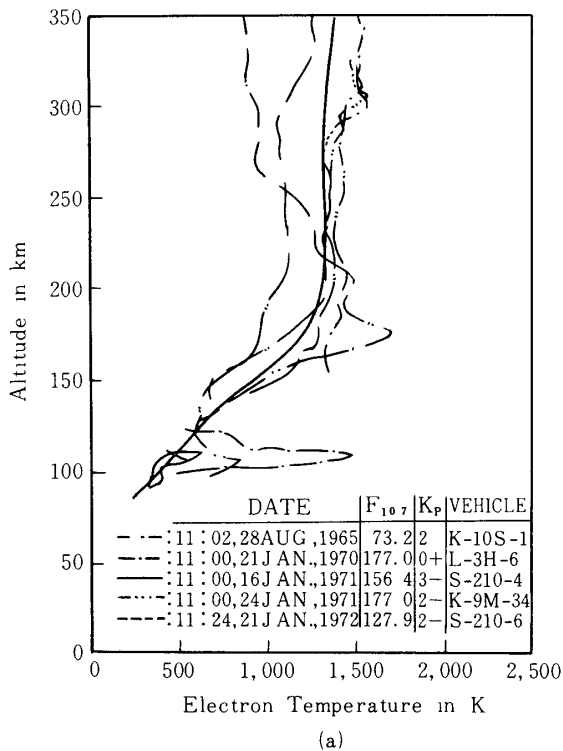


図3-4 電子密度の比較

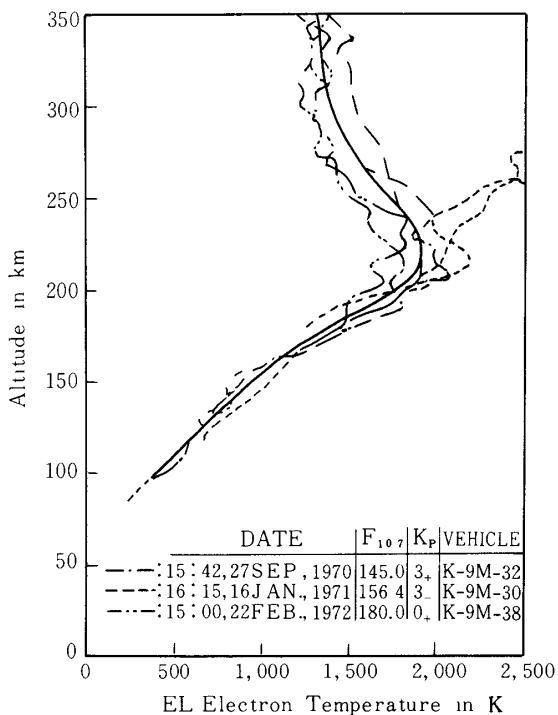
その対策として、ガラス封入型の清浄化プローブがつくられて電子温度、電子密度の測定精度が非常に高くなった。

このような測定法の改良と併行して、ロケット観測も続けられ、内之浦における標準的な電子温度分布が決定され、更に11時頃の地磁気日変化電流系の中心に存在すると思われる電子温度の高温領域を発見している。又略10年にわたる観測結果から太陽活動依存性もかなりはっきり理解できるようになった。図3-5(a), (b), (c)は電子温度の測定結果をまとめたものである。

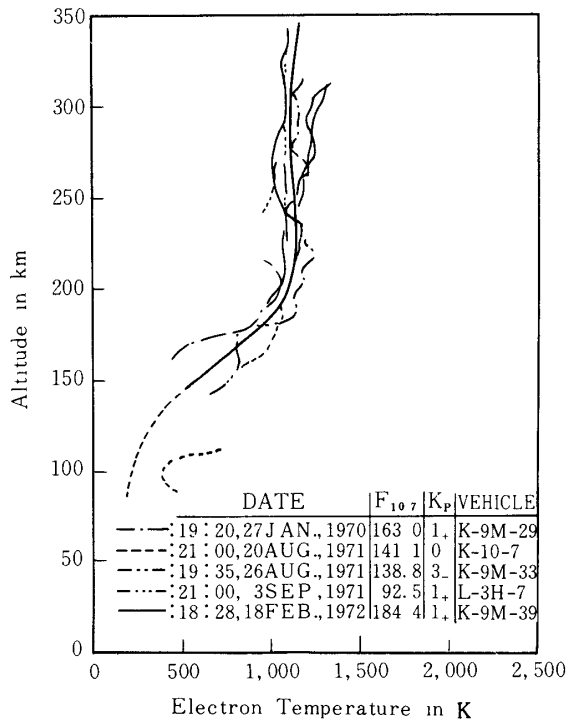
更に国際協力実験を通じ、印度、南米等における電子温度観測も行なわれた。



(a)



(b)



(c)

図3-5 中緯度で観測された電子温度高度分布
(a) morningtime (b) afternoon (c) nighttime
実線は平均値を示す。

(B-ix) 電子密度ゆらぎの観測 (伊藤, 中村; 小川, 森, 宮崎)

K-9M-44, K-9M-50, K-9M-53号機で夜間下部電離層の電子密度ゆらぎが観測された。ゆらぎは20~500Hzの範囲で最も強く、波数スペクトルには $k^{-(2-3)}$, $\delta n/n = 0.05 \sim 0.08$ 程度であり、観測された高度は90~130km附近の電子密度勾配の急な領域であった。

また昼間の電離層中の電子密度ゆらぎがS-310-2号機によって、高度80kmから190kmにわたって観測された。図3-6はロケットの上昇時に観測された20~400Hzの各周波数範囲における電子密度ゆらぎの平均的な振巾の高度プロファイルを示す。100km附近に弱い E_s 層が出現しており、そこで数Hz~300Hzの強いゆらぎが観測された。このゆらぎの相対的振巾は10%程度で周波数スペクトルは f^{-3} (f : 周波数)である。さらに振巾1%以下のゆらぎが160kmの高度まで連続的に存在していた。

これら昼間および夜間の下部電離層中の電子密度ゆらぎの発生原因はクロスフィールド型のプラズマ不安定であると考えられるが、これより高々度のゆらぎの発生原因は不明である。

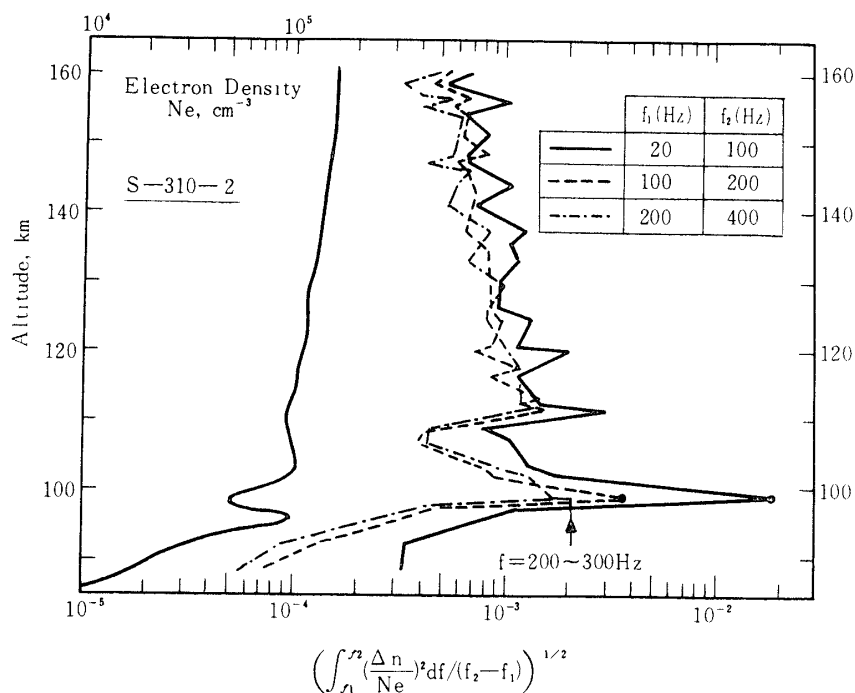


図3-6 電子密度と平均的電子密度ゆらぎ高度分布
(S-310-2, 1975年8月30日13時10分)

(B-x) 電離層電子のエネルギー分布

電離層電子のエネルギー分布の観測はK-9M型のロケットを用いて行われた。観測器としては、熱的エネルギー領域ではglass-sealed probeを用いた二次高調波法、非熱的エネルギー領域では半球形静電分析器とチャンネルトロンが用いられた。その詳細は各文献にあるが、以下にその主な成果をまとめる。

(a) K-9M-40号機

3~30eVの光電子の測定が行なわれ、その主な成果は20~30eVにおいて微細構造(太陽

の He II 304 Å 放射によって酸素原子および窒素分子が光電離される際に生成される一次光電子を示すピーク)が発見されたことである (R 144, R 145).

(b) K-9M-45号機

2~48eV の光電子の測定が行なわれ、その主な成果は、K-9M-40号機で見い出された20~30eV の微細構造の確認および2~3 eV で dip (窒素分子の共鳴振動励起によると考えられる)を検出したことである (R 161)。

また、このロケットでは熱的電子のエネルギー分布も観測された。105 km付近では明らかな high-energy tail が見出され、この高度で11時頃に限って見出される高い電子温度の層を説明する手掛りが得られた (R 237)。

(c) K-9M-47号機

1~58eV の光電子の測定が行われ、過去の2回の実験の成果の確認および新たに55eV 付近での急激なフラックスの減少が見出された (R 191)。

3回のロケット実験で得られた昼間光電子のエネルギー分布の特徴をまとめると、

① 約20eV 以下のエネルギー領域では、光電子のエネルギー緩和過程を反映した特徴を有する。その最たる特徴は2~3 eV に存在するくぼみ (dip) である。

② 約20eV より高いエネルギー領域では光電子の生成過程を反映した構造が見い出される。すなわち、20~30eV に存在する幾つかのピークおよび55eV 以上でのフラックスの急激な減少である。

③ 高度が高くなるとエネルギー分布はなめらかになる。

④ 角分布はほぼ等方的である。

⑤ 最大フラックスの高度は180~220 km (エネルギーに依存) である。

なお、このロケットでも熱的電子のエネルギー分布の観測が行われた。このときは磁気嵐時であって、105 km付近の高い電子温度が存在せず、エネルギー分布においてもMaxwell 分布からのずれが見出されなかった。

(d) K-9M-48号機

夜間の4.5eV ~ 4.8 KeV の電子の観測が行なわれた。このときは磁気嵐の recovery phase であって興味ある結果が得られた。主な成果は、以下の通りである (R 186, R 206)。

① 数 KeV の電子は静穏時に比してはるかに多かった。

② 数~数10eV の電子も Geocorona による光電子と考えられるものより多く、降下電子起源がかなり含まれていることを示した。

③ 種々の高度におけるエネルギースペクトルは、約1 KeV までは冪法則 $E^{-1.87}$ に従う。数 KeV におけるピーク或は平坦な部分および数10eVの肩は、オーロラ電子に対して計算されたスペクトルの形の中に存在するものに似ている。

(e) K-9M-54号機

冬の夜明前のロケット実験において磁気共役点光電子の観測が行なわれた。光電子のエネルギー分布は昼間の観測で見出された形及び特徴を有している。また、観測された光電子フラックスから計算された6300 Å 大気光の量は、同時に観測された6300 Å 強度をよく説明している。

(B-xi) 中性大気温度の観測 (河島他)

Shadow method を用いた中性大気温度測定装置は、K-10-10号機に搭載された。観測は90kmから170kmまで行なわれ、得られた電子・イオン及び中性大気温度はCIRA 1972年のモデル大気とほぼ一致していると考えられるが、Es layer の近くおよび中間層の附近では幾分モデル温度からの deviation がある様に思われる。高度100km附近では電子は中性大気分子との衝突によって夜間昼間の別なく中性大気とほぼ等温になることが理論的に予想されるが、電子温度プローブによる観測結果から昼間においては100km附近の電子温度は中性ガス温度より100°Kほど高く、夜間においては中性大気温度とほぼ等しくなることが示されている。

(B-xii) 「たいよう」衛星による観測 (平尾他)

第3号科学衛星「たいよう」は1975年2月24日に打ち上げられた。7つの観測機器(太陽X線, 太陽紫外線, 電子密度, 電子温度, 正イオン密度温度, 正イオン質量, 地球コロナ-中間紫外光)が搭載されており、一部を除いて1976年8月現在において正常に観測を行なっている。観測した期間は丁度太陽活動極小期に当たると共に、ASHY (Antarctic and Southern Hemisphere Year) にも当たり、静穏状態のデータが得られると共に興味ある観測も行える。いままでの解析で得られた顕著な現象は、South Atlantic geomagnetic regional anomaly における異常現象である。即ち荷電粒子の differential precipitation, 電子温度の異常増加および $O^+ - H^+$ transition height の低高度現象が見出されている。現在なお観測中なので今後の解析が待たれる。又西独のAEROS-B衛星とデータの協同解析が進められているのは注目すべきことである。

C 磁場測定

青山 巖・小川 徹

我国におけるロケットでの電離層内電流による磁場測定は主として二つのグループによって実施されて来た。これはそれぞれの機関で開発された磁力計の違いによるもので目的とする所は変わらない。本稿ではここ10年間における成果をグループ別に述べてみる。

(C-i) Flux-gate magnetometer による測定

この磁力計による測定はロケット観測の初期の頃からプロトン磁力計と共に使用され技術的にもほぼ完成している。しかし、測定原理から明らかな様に本質的にはアナログの成分測定であるため、ロケットの様な運動する飛しょう体上では高精度の測定には多くの難点がある。

初期のK-9M-7号機に搭載したものはバイアス磁場を利用してdynamic range を広げ、K-9M-18号機ではdigital方式を採用して精度を上げて測定に成功した。より高い精度を目的としたhybrid digital方式のflux-gate 磁力計をK-9M-34, 39, 43号機及び

南極でのS-210JA-7, 18号機に搭載した実験ではK-9M-34とS-210JA-7, 18号機においてはほぼ完全なデータを得る事が出来た。しかしK-9M-39, 43号機ではほとんどデータを得る事が出来なかった。これは電離層の風系を同時に観測する目的で搭載されたBa, Na 弾放出に際して、ロケットの姿勢が予想以上に、ほとんどタンブリング状態となったためであった。総合的な電離層観測を目指したものであったが実験は裏目と出た苦い経験となった。

図3-7にはK-9M-34号機による二成分の磁場測定の結果を示す。これから高度約110kmを中心とする水平なcurrent sheet (13.5 Amp/km) を仮定すれば、この高度と共に変化する磁場を説明出来る。尚、この時の電流の方向は西向きである。電流層の下限は102km, 上限は115kmで比較的薄い層であった。他の観測例ではK-9M-7号機で、電流層の中心は105km, 9M-18号機で102kmである事を付記する。

この様な fluxgate 磁力計によるロケット観測では磁場の成分測定には比較的有利であるが1γの精度が限界である。一方、この磁力計はロケット及び科学衛星の姿勢測定にも使用され現在ではロケット搭載の基本計器の一つとして組み込まれすでに百回越す観測が行なわれて来た。

(C-ii) Cesium magnetometer

京都大学の小川グループによりアルカリ金属をもちいた光ポンピング磁力計の開発研究がつづけられ、ロケット搭載用として0.1γの高精度測定が可能となった。又バイアス磁場を利用した磁場成分測定的方式も試みられている。しかし、いずれの場合でもロケットが大きく姿勢変化する場合とか残留磁気モーメントが無視出来ない場合には精度は著しく落ちる事になる。この磁力計による電離層Sq電流層の観測例を図3-8に示す。この結果から電流層の中心は約105km, 電流密度は15 Amp/km² と与え

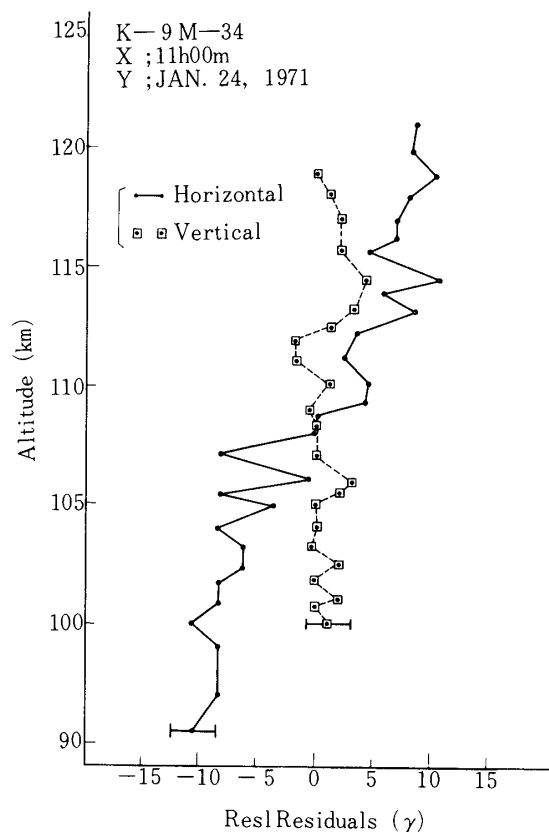


図3-7

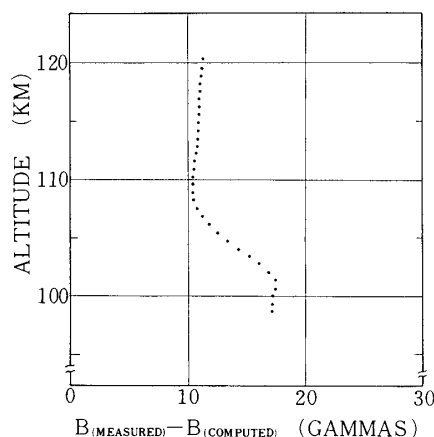


図3-8

られ、又高度115kmのところにも第2の電流層が存在する事が明らかにされた。この電流層の主なる部分の厚さは約10km程度で上述の flux-gate 磁力計と大差はなく予想外に薄いものであった。

(C-iii) 結 言

中緯度での電離層電流の観測例は外国においても他の観測に較べて少ない。更に有機的な組み合わせによる観測例もほとんど無く、最近では auroral zone を中心とする測定が中心となっている。しかし、中緯度で電場等と組み合わせた観測は重要である。これまで述べた様に磁場の測定技術自体は一応確立したものと考えられ、今後はそれぞれの特長を生かし有機的な組み合わせによる総合的観測を要望してこの稿を結ぶ。

D 電離層のダイナミクス、電界、電流

加 藤 進

この分野の中心は人工雲の実験である。これはロケットからの chemical release によって超高層に人工雲をつくり、この動きを光学的に、電波的にとらえて、超高層の風、電界を求めるものである。1964年7月26日に打ち上げられたK-8L-5ロケットは高度90-150kmの薄暮の空にNaの人工雲を作った(図3-9)。この雲は高さと共に右回りの“らせん”状になって、風に流されていった。この人工雲を、星を背景にして、地上の四観測点で同時写真撮影を15秒毎に約7分行った。そして、高度90kmでほぼ南向きの風が95kmから急速に方向を西方に変え始め、100kmで北向きに、さらに110kmで再び南向きになることを明らかにした。さらに上では、方向の変化はずっとゆるやかになることも分った。大きさは90

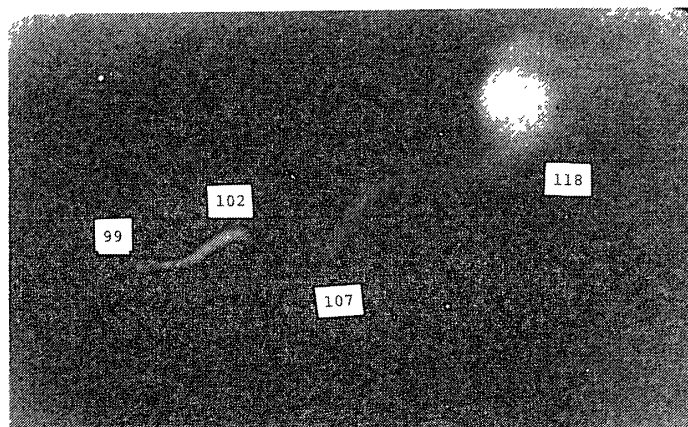


図3-9 Na雲(K-8L-5の実験, 1964年7月26日, ガス放出後30-50秒後) 図中の数字は高度(km)を示す。

- 110 kmでは約50 m/s で110 kmから増加し, 115 kmで150 m/sとなり120 kmより上では100 m/s に減少する. 注目すべきは95-105 kmの辺りで, 速度の方向が急速に変化していること, つまり, ここに大きな wind shear が存在することである.

shear は sporadic E の発生原因になるという説が当時認められつつあったので, もし, なんらかの方法でこのロケット実験と同時に電子密度測定が行われていたならば, この人工雲実験の価値はもっとずっと大きかったであろう. 同じ年の11月2日, K-8 L-7 ロケットを用いて同様な Na 雲実験が行われたが, この時も100-105 kmで大きな wind shear が認められた. 今度はこの辺りで, 高さと共に東向きから西向きに風が変っていた. これは sporadic E の発生に理論上好都合である. つまり, 東向きの風は正イオンを(北半球の磁界の状況では)上向きに移動させ, 西向きの風では下向きに正イオンを移動させる結果, 風の東西成分が零の点にイオンは集積し, sporadic E が形成するはずである. しかし, 残念ながらこの時も電子密度の測定は行われていない. 高度105 km以上では乱流拡散が消えることが雲の変形の様子から分り, turbopause の存在が明らかになった.

Na 雲が発光に太陽光を必要とするため, 実験が薄明, 薄暮に限られるのに反し, TMA (トリメチール, アルミニウム) 雲は自ら発光するので夜間全域で実験に用いることができる. 1966年4月20日, K-8-13ロケットを用い, また同年8月11日, K-8 L-10ロケットを用い, いずれも夜9時頃実験は行われた. 超高層中の酸素原子と反応して発生したTMA雲をNa雲と同様に地上で写真撮影した. 特に, K-8 L-10ロケットは二個のTMA弾を塔乗させ, 上昇時, 下降時に発光雲を作ったが, その水平距離は約100 kmであった. こうして, 風の空間的変動も知ることができるはずであるが, 詳しい結果は未公表になっている.

1966年12月, 中間圏・電離圏大気力学研究グループがその第一回会合を京都で開いた. そこで人工雲ロケット実験の学問的意義, 将来の方向がいろいろと議論され, この実験は新しい段階に入った. 電離圏のダイナミクスを調べる上では中性粒子の運動である風だけでなく, 荷電粒子の運動を知ることにも重要であり, このため人工プラズマ雲を作ることが必要だと主張された. すでにドイツのマックス・プランク研究所ではBa (バリウム) イオン雲を超高層につくることに成功していた. 私達も早くこの実験に着手したい強い希望を持った.

また, プラズマ雲を電波レーダーで追尾するならば昼間でも実験を行うことができることになる. この電波追尾の上からは, 電子発生率の良いCs雲が望ましいという説も出て来た.

さらに, 特殊フィルターを用いて, 昼間のNa雲が検出できる可能性についてもこの会で議論されている. また, 電子密度, 電子温度, 磁界の同時測定の必要性も議論され, 人工雲実験は超高層ダイナミクスの総合実験として計画される様になって来た. 総合性の無い実験は学問上, 最早殆ど意味を持たないものになりつつあった.

しかし, 現実とは大変厳しいものである. 私達が多くの夢と希望で描いた計画が実現するには, その後二ケ年の年月が必要であった. その頃新たに開発されたS-300ロケットは打ち上げに失敗し, 私達を悲しませた.

K-8-16ロケットを用いて, 人工雲の実験が1970年9月2日に行われた. 薄暮の空に, 美しいオレンジ色の雲の生成するのを眺めた時の喜びは大きかった. 残念ながらBa雲の発

光は不十分であった。電子密度の測定は相乗りの gyroplasma プローブと Langmuir プローブで行われた。このプローブが Na, Ba の噴出ガスによって掩われ、働かなくなるかも知

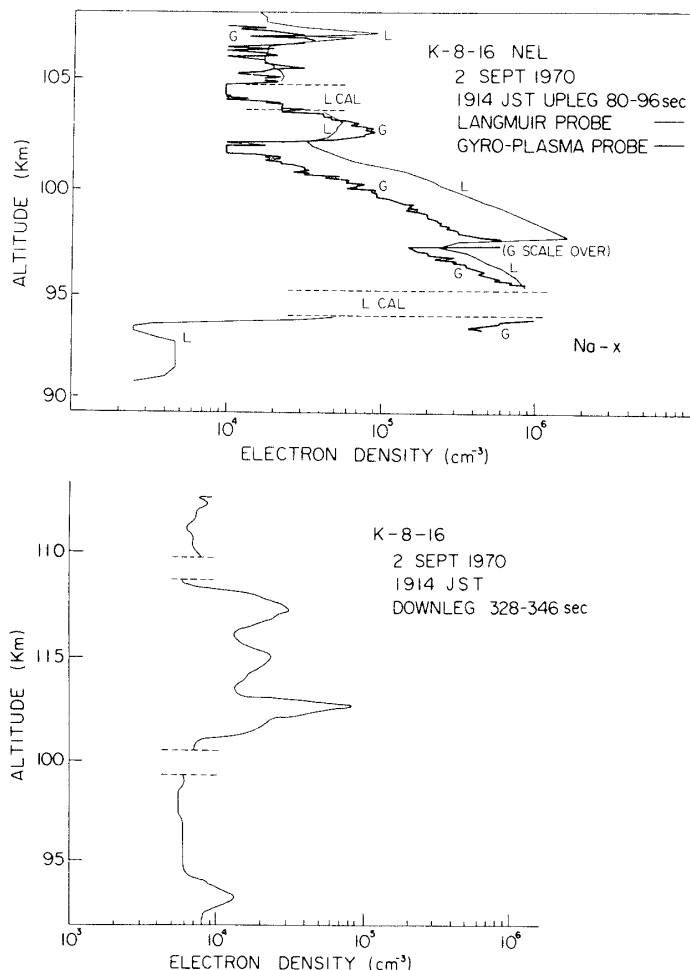
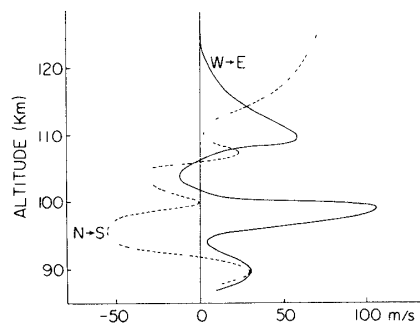


図3-10(a) 電子密度分布, 上図は上昇時, 下図は下降時の測定結果. 上図中でG, Lはそれぞれジャイロプラズマプローブ, ラングミュアプローブの測定を表わす. 下降時にはジャイロプラズマプローブは故障. CALは Calibration 中を示す.

れないという秘かな恐れは消えた. Na, Ba ガスの噴出に伴って, 多量の電子が瞬間的に発生することもプローブ測定から分った. 図3-10にその時の電子密度, 風速の測定結果を示しておく. 降下の折得られた電子密度分布には sporadic E とみられる電子密度の極大がいくつかみられる. そこで果して wind shear がこれらの電子密度に強い影響を与えているかどうかを調べるために, 次の様な計算を行った. 図の示されている風によって荷電粒子が受ける速度変動 V を計算し, その V を



(b) 風速の分布, 上昇点の測定結果であることに注意

用いて

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q - \alpha n_e^2 - \frac{\partial}{\partial z} (n_e \mathbf{V})$$

を解く．ここで時刻 $t = 0$ で電子密度 n_e は高さ z について $n_e \propto z$ という簡単な分布をしていると仮定する．但し，イオン生成率 q ，再結合係数 α とは， $n_e = 1.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3} t = 0$ ， $z = 150 \text{ km}$ である様な関係を持つとする．図3-11が，かくして計算された n_e の分布である．これと実測で得られた図3-10のものを比べると，かなり合っている．特に93kmの極大，101kmの極大はよく一致している．

この場合， n_e を測った点と風を測った点（つまり人工雲の位置）が数十キロメートルも距っていること，計算に用いた $t = 0$ での n_e のモデルが大変単純であることを考慮すると，この一致は注目すべき結果で，wind shear が sporadic E の様な n_e 分布を形成する原因になることは明らかである．

さて，いよいよ電離雲放出の総合実験が成功する時がやって来た．この実験は K-9 M-33，K-9 M-39，K-9 M-42を用いて，それぞれ1971年8月26日，1972年2月18日，1973年2月23

日に行われた．いずれも太陽高度がマイナス 10° に近い薄暮であり，夕暮の地上から，青紫の雲 (Cs)，ピンクと緑の雲 (Ba^+ ，Sr) が超高層に出現するのが見られた．K-9 M-39，42ロケットでは，これにオレンジ色の Na 雲が加わっていた．

Ba 雲については K-9 M-33の実験は完全に成功であった．他の二つの実験では雲の発生法等に多少問題があり，データ解析は困難になっている．図3-12にそのスケッチを示しておく．Ba 雲はプラズマ雲であるので主として地球磁界に沿って，時間と共に伸びてゆくのに反し，Sr 雲は中性雲であるので一様に拡散により増大してゆくのが見られる．この両者の動きを写真測光によって知ることができれば電界と風の両者が分る．プラズマ雲は磁界に直角な面内で高度 150 km 以上では殆んど正確に電界 E と磁界 B の両者に直角に $\frac{E \times B}{B^2}$ の速度で動く．しかし，磁界方向では風と重力の影響を受ける．これらのことから E は大きさ 1.2 mv/m ，ほぼ東南に向いていることが分ったが，これはサハラで1964年；1965年の11月に行われた外国の実験結果に近い．昼間の Sq 電界が薄明時まで広がっていることを示しているのかも知れない．

Cs の実験の中心は内之浦，山川，西之表におかれた Ionosonde を用いた電子雲の追尾である．図3-13にその一例を示しておく，図中のエコー跡は時間と共に移動し，距離を増していった．他の観測点からの距離変化も考慮すると速度が求められる．K-9 M-33の実験では 73 m/s ，東南向きである．この時の高度は約 120 km であり，電子雲もこの高度では風と

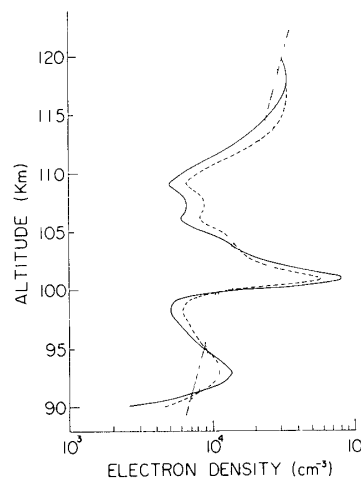


図3-11

計算による電子密度分布，図中直線は $t = 0$ での初期分布． $\alpha = 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ と仮定した場合 $t = 10$ 分（点線）， $t = 30$ 分（破線）， $t = 90$ 分（実線）の値を示す． $t = 0$ で突然図3-10(b)の風が印加したと仮定している．

K-9M-33 AUG 26 1971

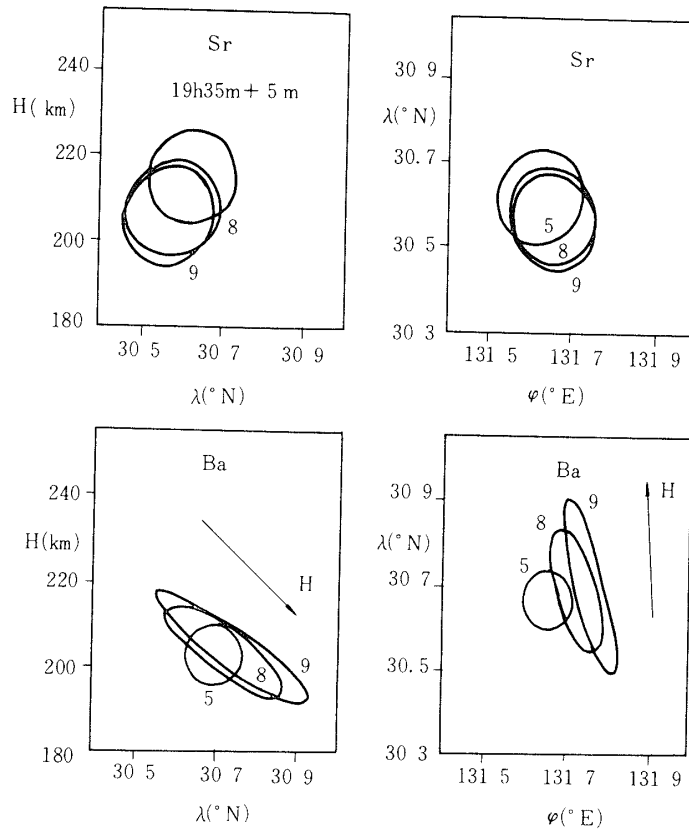


図3-12 Sr, Ba 雲の変形と運動 λは緯度, φは経度, Hは高さ, 図中の数字は放出後の時間を分で表わしたもの.
図中のHは地球磁界

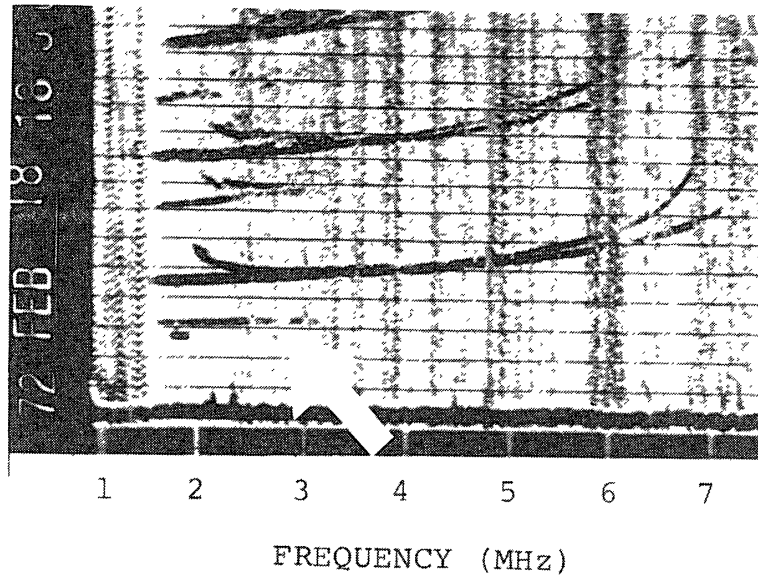


図3-13 Ionogram 上のCs 雲 (白矢印の示すtrace) この他Cs 雲による2回, 3回反射らしいものもみられる。K-9M-39の実験で放出後約20分山川の状況.

共に移動しているはずである。電波でCs 電離雲を追跡できることは、将来昼間の風を測る方法が一つ開発されたことを意味している。

昼間の風についてはNa ガス槽に強い磁界を加えるとZeeman効果によって入射するD線の吸収が変化し、その変化する様子が太陽フランフォファー線と人工Na 雲線とは異なっていることを利用して、昼間の超高層中の人工Na 雲を検出する方法が考案された。この為の実験がK-9 M-43ロケットを用いて1973年8月21日に、またK-10-12ロケットを用いて1976年1月18日行われ、現在結果が検討されている。これもCs 雲法と共に一つの方法であろう。

電離層の風と電界によって荷電粒子が運動する結果、電流が発生する。この電流は微少な磁界をつくっている。この測定には高精度の磁界の測定が必要である。K-9 M-42ロケットに搭載されたオプティカルポンピング磁力計は1970年9月27日、地方時15.42 hrs の電流分布を検出するのに成功した。そして、101-113 kmに主な電流が流れている他、弱い電流が115 km附近にも存在することを明らかにしている。

以上1964-1976年にわたるロケット実験の成果を簡単に説明した。これより以前、ロケットより放出した小型爆弾の発する音波を地上の観測器で検出し、上層の温度と風(100 km以下)を知る実験も行われたが、この説明は割愛した。また、人工雲実験では“葉弾”の開発に多くの努力が払われたが、その説明もここでは割愛した。

E 超高層大気の光学的探査

等 松 隆 夫

(E-i) ま え が き

東京大学の観測ロケット基地が鹿児島県内之浦町に設置されて以来、光学あるいは分光学的手法をもちいたロケット実験が続けられている。ここでは、東京大学理学部(GRL)、東京天文台(TAO)、東京教育大学理学部(TUE)、大阪市大原子力研・工学部(OCU)、立教大学理学部(SPU)による成果について述べる。化学雲実験については本特集号加藤進氏の論文を参照されたい。

(E-ii) 大 気 光

大気光の層高あるいは高度分布を決定することは、大気光学探査のもっとも基本的な研究手段である。1960年代にはTAO、GRLなどによって、主として可視部における熱圏大気光、 $O\ 6300\ \text{\AA}$ 、 $O\ 5577\ \text{\AA}$ 、 $N_2^+\ 3914\ \text{\AA}$ などの高度分布が観測された(R53)。これらの実験結果は同時測定された、電子密度、電子温度などとの測定結果と比較する事によって、熱圏の電離プロセス、イオン化学反応などについての同定がおこなわれた。これらの実験の延長として、1976年1月17日早朝におこなわれた、日加共同による磁気共役点光電子実験があり、遠くオーストラリア地方から磁力線に沿って飛来した光電子による $6300\ \text{\AA}$ 大気光

を測定する一方、光電子エネルギースペクトルなどの関連データの同時取得に成功した。

中間圏大気光は、 O_2 atmospheric bands, OH Meinel bandsなど近赤外域領域についてTUD, CPUの観測があり、中間圏O-H大気モデリングに関して貴重な資料が得られている(R156)。

(E-iii) 地球コロナUV放射

地球コロナ研究は、夜間Eの電離源探査の立場からやや理論先行のかたちで進展した。特にヘリウム584Åの実測は世界にさきがけておこなわれ、理論予測が見事に立証された(R115)。水素ライマンアルファグローの観測はOCUが開発したNOイオンチェンバによっておこなわれている。これらの一連のロケット実験で開発された技術は、1975年に打上げられたTAIYO衛星での惑星間グローおよび地球コロナ観測計画として結実した。

(E-iv) 大気微量成分の研究

大気微量成分検出のために吸光法または発光法をもちいることは O_3 およびNOについて着実に成果が得られている。 O_3 の場合はGRL-TUEの共同で1965年以来たびたび繰返されている。測定技術としてはMUV領域での太陽吸光法である。図3-14は過去の8回の観測結果のまとめであり、成層圏から中間圏にかけての季節変化が始めて確認されたのは興味がある(R238)。

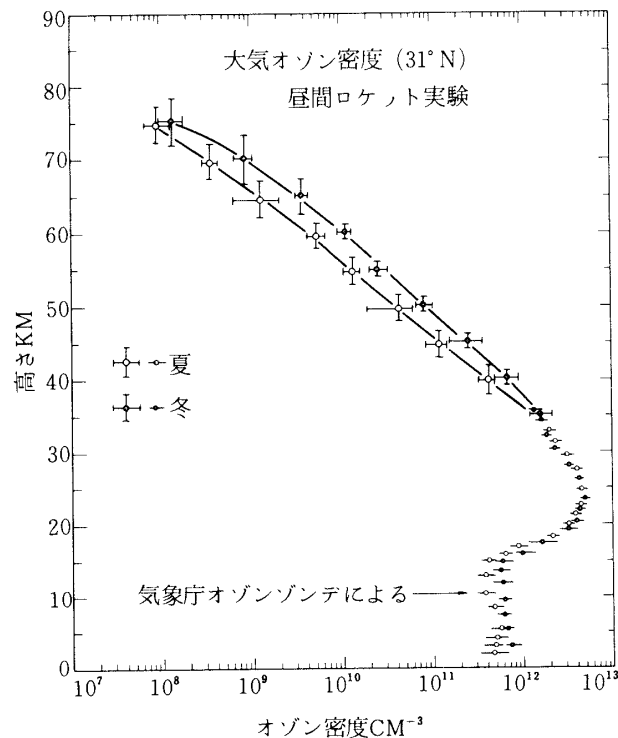


図3-14 内之浦における大気オゾン密度の高度分布、オゾンゾンデ資料は気象庁鹿児島市の資料による。

大気光（共鳴ケイ光）の解析による組成決定は N_2^+ について、 3914 \AA 観測からおこなわれたのが最初であるが、最近の結果では γ -band によるNOの定量が、内之浦、ツンバおよび南極地域において続けられている（R 239）。これらの結果は、熱圏から中間圏にかけてのodd nitrogen の生成、消滅に関する知見を与えるとともに、D領域電離生成源としてのLy- α 観測結果（OCU）と相俟って電離圏物理の解明に役立っている。

(E-v) エロソル

O_3 吸光法観測の副産物として、太陽 4500 \AA 放射の大気水平入射観測からユンゲ層領域でのエロソル分布が求められている。火山活動との相関についての論議がおこなわれている。

(E-vi) むすび

大気の光学的探査はこの10年の歩みを見ると、電離層プロセスの研究から一歩進んで、大気全体についての広義の大気環境研究の立場へと移行している事が明らかである。研究費と技術上の実力不足から、測定法の開発は必ずしも満足すべきものとは言えない。1980年代にはスペースシャトル時代が予想され、大気探査、対象も地球以外の惑星にも領域が広がっていくことであろう。その意味で、地道な技術開発がおこなえる組織づくりが必要であろう。

F 電離圏に関する理論的な研究

松浦延夫

ここ約10年間の電離圏研究の歩みは、電離圏はもとより大気圏・磁気圏についての知識が急速に増えたことにより、これらを含めた総合的な研究が進められた点で特徴づけられる。

（文献リストは省略する。）

(F-i) 電離圏構造

電離圏モデルに関しては、下部電離圏（前田（憲）・深尾，1971，1972；若井，1967，1968），F領域（米沢1971，1972；田中（高）・平尾，1972），上部電離圏（松浦・思藤，1969；丸橋，1970），プラズマポーズ（西田，1966）についての研究がなされた。

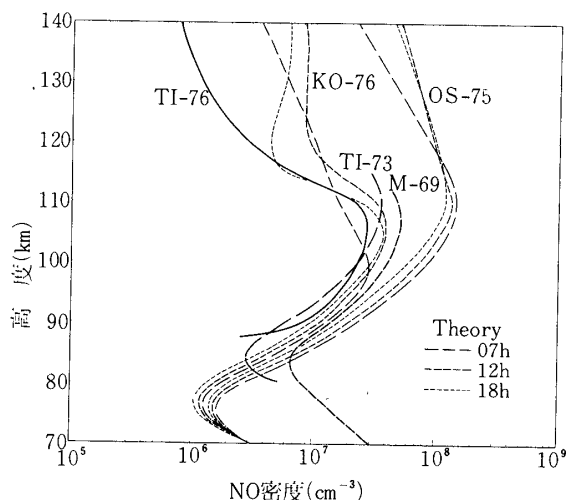


図3-15 NO密度の高さ分布，M69：Meira，1969 実測，TI 73：内之浦における実測(1973)，TI 76：ツンバにおける実測（1976），OS-75：小川・島崎による理論（Oによる消光なし），KO76：近藤・小川による理論（Oの消光あり）。

電離圏プラズマの生成・消滅機構に関する研究（大塩・前田（力）・板上，1966；等松・若井，1973；上山，1967；岩坂，1973；米沢，1970；松浦，1966）および電離圏構造に及ぼす力学的輸送効果に関しては，E_s層（加藤進，1966；津田・佐藤・前田（憲）1966；加藤進他，1972），中間層（藤高・等松，1974），F領域（田中（高）・平尾，1973；松浦，1974）および上部電離圏プラズマ流（米沢1965；丸橋1970）についての研究がなされた。

電離圏における基本物理過程に関する研究（小川利・等松，1966；上山，1966；高柳・市川，1970；足原・高柳，1974）がなされた。

(F - ii) 電離圏擾乱

S I Dに関する研究（小川徹，1968；佐尾他，1970；大塩，1971；佐藤（輝）1975），極域電離圏擾乱に関する研究（小口・丸橋1966；羽倉・永井，1967；丸橋，1972），下部電離圏電波吸収に関する研究（新野・東村1969；若井他1973, 1974），電離層嵐に関する研究（羽倉・永井1966；大林，松浦1972）がなされた。August Event 1972についての総合研究がなされた（1974）。

(F - iii) 電波伝搬

電離層伝搬に関する研究（若井，1971；満保・長野1973；早川1973；栗城他1974），ホイッスラ波の電離層伝搬に関する研究（荒木他1972；鶴田1973；早川・大津1973；上滝他1974），I S I S電波現象に関する研究（松浦・西崎1969；大家1970；北條・西崎1971；飯田他1973, 渡辺・思藤1975）がなされた。

(F - iv) 超高層大気

下部熱圏・中間圏の大気微量成分に関する研究（岩坂1973；福山1974；広野他1973；等松他1974；上山他1973）および大気力学に関する研究（加藤進1966, 1971；前田坦1972, 1975；石嶺1972；村田1974；田中浩1975；松浦1974）がなされた。