

# S-310-3号機に搭載されたインピーダンス プローブによる電離中間層の観測結果

渡辺 勇三・大林 辰蔵

The intermediate layer observed by the impedance probe on board the  
S-310-3 sounding rocket

By

YUZO WATANABE and Tatsuzo OBAYASHI

**Abstract:** The intermediate layer (or M layer) was detected at the height of 150–170 km in the nighttime ionospheric electron density profile measured by impedance probe on board the S-310-3 sounding rocket. This M layer was interpreted to be generated by the convergence effect of the ionization due to the west-east component of the solar tidal wind as suggested by K.Fujitaka. The altitude variation of the M layer during the course of a night is studied at three other locations with different latitudes. At Boulder (40°N, 105°W) and Wallops Island (38°N, 75°W) which have higher latitude than that of KSC (31°N, 131°E), the altitude of the observed M layers seems to be determined by the north-south component of the wind above about 150 km, by the west-east component of the wind below about 130 km in agreement with the drift theory. The altitude of the observed M layers at Arecibo (19°N, 67°W) located at lower latitude than that of KSC also coincides with the theoretical estimate when the direction of the north-south wind is assumed to be opposite to that prevailing in middle latitudes. Thus, M layer observations at these stations are consistent with the view that around the latitude range of KSC the north-south wind reverses direction and the west-east component of the wind has the dominant effect on the formation of the M layer.

## 概 要

S-310-3号機ロケットに搭載されたインピーダンスプローブによって夜間の電離層電子密度の高度分布が測定され、高度150 km～170 kmにM層が観測された。今回観測されたM層はFujitakaのモデル潮汐風の東西成分によって生成されたと考えられる。KSCでこれまでに観測されたM層の

特性から KSC が朝夕風の南北成分の反転する緯度的境界地点に近いことが調べられた。Boulder と Wallops 島で観測された M 層は、150 km 以上では南北風によって生じ、130 km 以下では東西風によって生成されることがわかった。Arecibo の M 層がモデル南北風を反転させた風系によって生じていることから、低緯度では南北風の風向きが反転していることが明らかになった。

## 1. 緒 言

インピーダンスプローブはプラズマ中に置かれた金属製プローブの等価容量値の周波数依存性が電子密度によって変化することを利用したプラズマ測定装置である。測定された周波数特性には種々のプラズマ共鳴現象が現われる。特に高域ハイブリッド共鳴の周波数からはプラズマ中の電子密度が高精度で求められる [1] S-310-3 号機に搭載されたインピーダンスプローブは正常に動作して、電離層の電子密度の高度分布の観測に成功した。電子密度の測定は高度 94 km から 194 km の範囲で行なわれ、夜間の電離 EF 領域の特異な構造が観測された。今回の実験ではインピーダンスプローブの使用によって夜間に特有な低電子密度で微細な電離構造を測定することができた。この実験で測定された電離層の特徴は次のようなものである。

- (1) E 層最大電子密度は約  $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  で、その高度は 103 km である。
- (2) 高度 120 km~145 km のいわゆる E-F vally が観測され、最小電子密度は約  $8.2 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$  で、その高度は 126 km である。
- (3) 高度 150 km~170 km には、いわゆる中間層 (intermediate layer あるいは M layer と呼ばれる。以下 M 層と称する。) が出現し、その密度は  $1.2 \sim 3.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  で、その高度はロケット飛翔中にみかけ上 8 km 低下している。

今回観測された M 層の特性、すなわちその出現高度及び時間帯は、従来から提唱されている超高層の風系を考慮した M 層理論 [7] を適用することによって説明することができると考えられる。本報告では、今回観測された M 層、及びこれまでに各地で観測された M 層の特性について、M 層理論を用いて検討しようとするものである。

## 2. 測定装置と原理

電子密度測定用インピーダンスプローブで測定される量は次に記述される五つのものである。

- (1) 最も基本的な高域ハイブリッド共鳴周波数 ( $f_{\text{UHR}}$ ) は衝突周波数 ( $f_p$ ) が 0 のとき、次の理論式で表わされる [1]。

$$f_{\text{UHR}}^2 = f_p^2 + f_H^2$$

ここで、 $f_p$  : プラズマ周波数  $f_H$  : ジャイロ周波数

$f_H$  は International Geomagnetic Reference Field の磁場の値を用いて決められるので、 $f_{\text{UHR}}$  を検出することにより電子密度が求められる。実験では、ロケット発射後の秒数を  $t$  として、 $t = 72 \sim 369$  の区間で測定された。

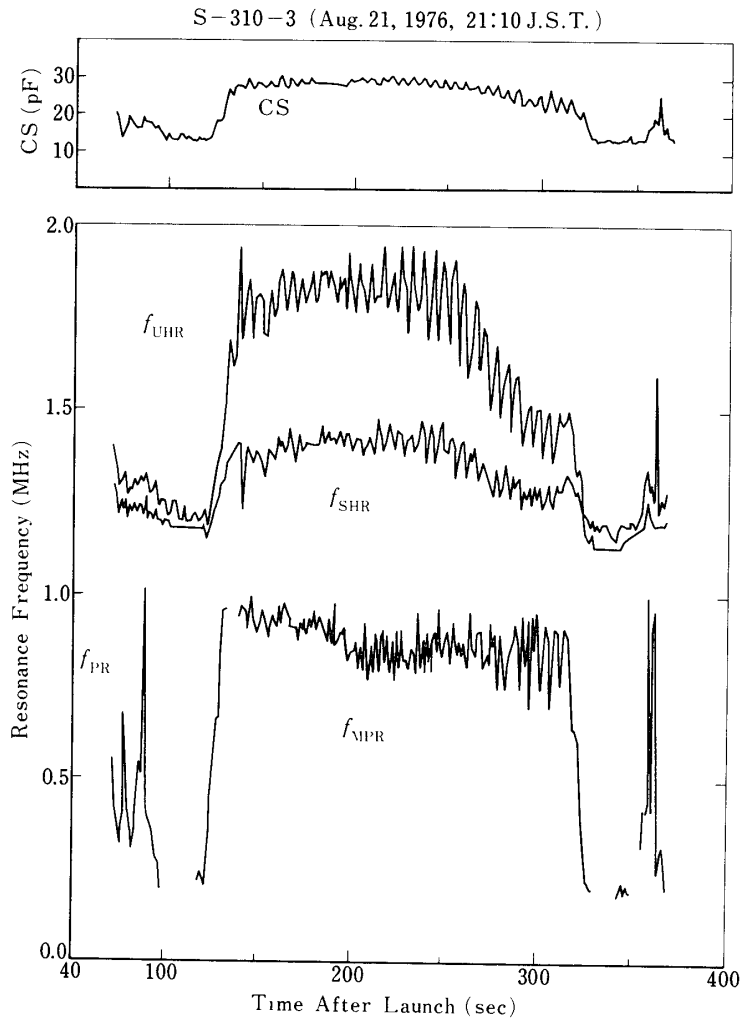
- (2) 棒プローブと地球磁場のなす角度 ( $\alpha$ ) 及び  $f_H$  に依存しないプラズマ共鳴周波数

( $f_{PR}$ ) は  $f_H > f_P$  のときに共鳴の尖鋭度が高く,  $f_{PR} = f_P$  の周波数で現われることが理論的に明らかにされている [2]. 実験では,  $f_H > f_P$  となる領域, すなわち,  $t = 72 \sim 134$  及び  $t = 277 \sim 369$  の区間で検出された.

(3)  $\alpha$  に依存して現われる変形プラズマ共鳴周波数( $f_{MPR}$ )は  $\alpha$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで変化すると, 理論上,  $f_H > f_P$  ( $f_H < f_P$ ) の場合,  $0 \rightarrow f_P$  ( $0 \rightarrow f_H$ ) と変化して現われる [2]. 実験では,  $f_H < f_P$  となる領域,  $t = 135 \sim 276$  の間で検出された.

(4) シース共鳴周波数 ( $f_{SHR}$ ) はプローブの囲りに形成されるイオンシースとプラズマの共鳴現象で, 理論的には,  $f_P$  と  $f_H$  とシース容量値 (CS) によって定まる [3]. 実験では,  $t = 72 \sim 369$  の間で測定された.

+ (5)  $f_H$  に比べて十分小さい周波数でのプローブの等価容量値は, ほぼシース容量値



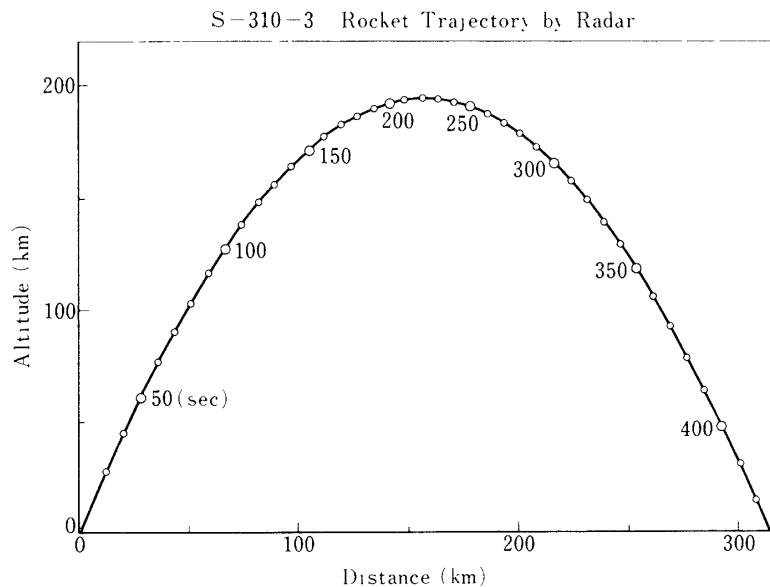
第1図

(CS) を与えることが調べられている。CS は電子密度と電子温度によって決まる [4]。実験では、0.1 MHz でのプローブ容量値が測定され、 $t=72\sim 369$  の領域で測定された。

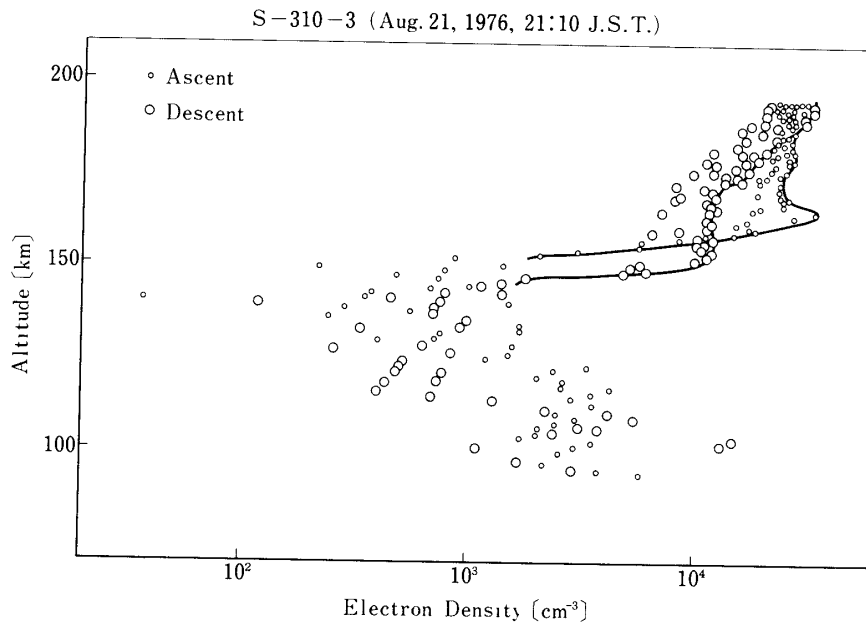
第1図に飛行時刻対各種共鳴周波数及びシース容量値をプロットしたものを示す。ロケットの航跡とスピンに基づいて、各量とも5秒間隔の波状変化をしている。これらの測定量の特性及び相互の理論的關係については、1977年度の宇宙観測シンポジウムと宇宙航空研究所報告の宇宙科学特集号に投稿が計画されている。電子密度の測定精度の評価及び各種共鳴周波数の特性に関しては上記の報告も参照されたい。次節では、 $f_{UHR}$  から計算された電子密度の高度分布の観測結果について記述する。

### 3. 観測結果

S-310-3号機ロケットは1976年8月21日21時10分(J.S.T. 135° EMT)にKagoshima Space Center (31° 15' N, 131° 05' E 以下, K S C と称する。)で発射された。第2図はロケットの飛跡を表わす。発射時の方位角は138°, 仰角は76.5°であった。インピーダンスプローブの観測は72秒から369秒までの間行なわれた。第3図に電子密度の測定結果を掲げる。94 km から194 km の高度領域で測定されている。この高度範囲では、 $f_v$  が  $f_{UHR}$  に及ばず影響は無視されるので  $f_{UHR}$  を補正する必要はない。ロケットの航跡による影響で電子密度にバラツキが生じているが、第3図の測定結果において大きい方の envelope が実際の電離層の電子密度を表わしている [5]。高度分解能は160 km 高度で4 km, 180 km 高度で2.5 km であった。最大電子密度は  $3.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  で165 km にあり、最小電子密度は



第2図



第3図

$8.2 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$  で 126 km で測定された。全体的な特徴として、ロケットの降下時において、E 層部分を除いて全領域で、電子密度の減少と層高の降下が生じている。高度 170 km ~ 180 km 領域の電子密度の時間的な減少率から計算された夜間の有効再結合係数に関しては後日別のところで報告する予定である。層高降下の現象は、夜間の電離 EF 領域に力学的に作用している中性大気風の性質と関連があることが考えられる。次節では領域の風系によって M 層の特性が定まるとするいわゆる M 層理論について記述する。

#### 4. M 層理論の概要

夜間の電離 EF 領域の電子は太陽紫外線の多重散乱によって作られる。従って、領域の電子密度は日没後の時間とともに小さくなっていき、太陽黒点数が大きい時期には大きくなる [6]。

電子密度の鉛直構造は中性大気風に基づく荷電粒子のドリフトによって決定される。特に、M 層が中性大気風によるイオンの集積作用によって生成していることに関しては、ロケット実験と理論的研究の両面から明らかにされている [7]。その場合、M 層は風向きの変わる高度、いわゆる nodal point で生じる。さらに、ドリフト理論によると、約 130 km 以上では南北風が有効に作用し、約 130 km 以下では東西風が有効に作用する [8]。

M 層の生成の原因と考えられている中性大気風のモデルとして、Wallops 島 ( $38^\circ \text{ N}, 75^\circ \text{ W}$ ) 及び Yuma Proving Ground ( $33^\circ \text{ N}, 114^\circ \text{ W}$ ) の風の観測結果を用いた風系が報告されている [9]。この風系は大気潮汐風の 2-4 モードの風系に良く似ているのが特徴である。実際、Wallops 島で観測された M 層は 2-4 モードの風の nodal point の近くに現われていたことが

調べられている [8]. 理論的に2-4モードの風は地理的な緯度特性を有する. すなわち, 緯度  $30^\circ$  を境目にして南北風のパターンが反転し, 又, 風の振幅が緯度によって変化する. 前者については, Barbados ( $13^\circ \text{N}, 58^\circ \text{W}$ )での風の観測結果がモデル風の逆のパターンになっているのが調べられている [9]. 後者については, 各緯度でのM層の最大電子密度数が2-4モードの風の振幅と良く似た対応を示すことが調べられている [8].

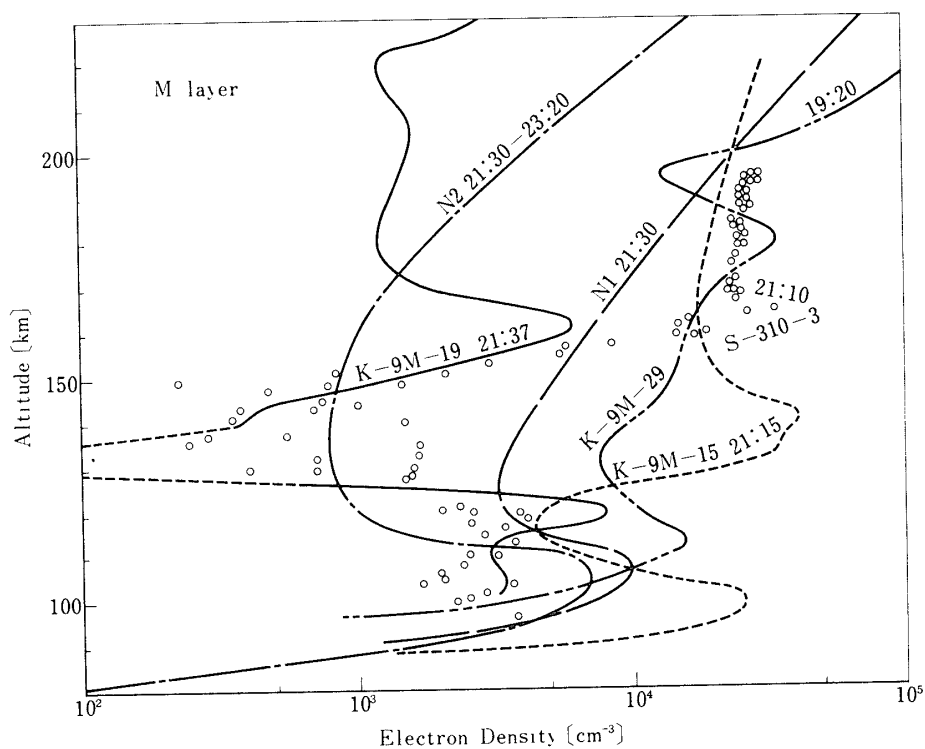
M層の生成する高度と時間について, 低緯度地域では次に記述することが興味を持たれると考えられる.

- (1) 緯度  $30^\circ$  以下の地域でのM層がモデル潮汐風の反転風に従って現われるかどうか
- (2) 緯度  $30^\circ$  付近のM層が東西風に従って現われるかどうか.

以下の節では, 上記の(1)に関して Arecibo ( $19^\circ \text{N}, 67^\circ \text{W}$ ) [10]で観測されたM層を用いて検討される. 又, (2)に関してはKSCのM層観測次節では, KSCで観測されたM層について記述する.

### 5. KSCにおけるM層の観測結果

KSCで行なわれた日没後のロケット実験で, 高度  $130 \text{ km} \sim 180 \text{ km}$  領域で電子密度の分布が観測されているものを調べ [11], そのうち, スピンの影響, 観測の空間的分解能のあらさのために微細な構造が得られていないものを除いて第4図に掲げる. いずれも, E-F間高度に電子密度の極大部分が観測されており, これらはM層であると考えられる. 図には前田



第4図

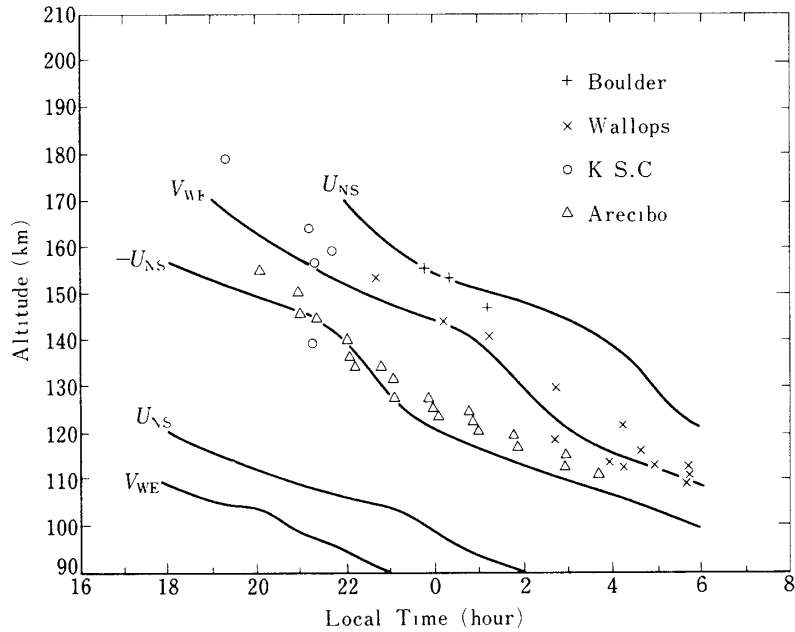
第1表

ロケット	実験月日	時刻(J.S.T)	観測者	観測方法	M層高(km)	電子密度( $\text{cm}^{-3}$ )	$K_p$	R
K-9 M-15	Mar. 20, 1966	21 h 15 m	平尾・宮崎	Largmuir 法	140 km	$4.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$	2 <sup>-</sup>	54
K-9 M-19	Aug. 10, 1966	21 h 37 m	木村	VLF Doppler	160 km	$6.1 \times 10^3$	3 <sup>o</sup>	0
K-9 M-29	Jan. 27, 1970	19 h 20 m	木村	VLF Doppler	180 km	$3.5 \times 10^4$	1 <sup>+</sup>	132
S-310-3	Aug. 21, 1976	21 h 10 m	渡辺・大林	Impedance probe 法	165 km	$3.4 \times 10^4$	1 <sup>-</sup>	17
					157 km	$1.2 \times 10^4$		

第2表

観測地	地理的位置	方 法	観測者	観測年月日	観測時刻 (L. T.)	$K_p$	R	
Boulder	40° N, 105° W	アイオノグラム	若井	Feb 20, 1958	00 h 00 m 00 h 30 m 01 h 30 m	3 <sup>o</sup>	165	
Wallops Island, VA, USA	38° N, 75° W	Largmuir Rocket	Langmaire probe, Rocket	Smith	Oct. 27, 1961	4 h 35 m	4 <sup>-</sup>	51
					Nov. 7, 1962	5 h 25 m	1 <sup>-</sup>	30
					Nov. 30, 1962	5 h 57 m	5 <sup>-</sup>	30
	38° N, 75° W	Largmuir Rocket	Langmaire probe, Rocket	Smith	Apr. 12, 1963	0 h 30 m	1 <sup>o</sup>	29
					July. 15, 1964	3 h 00 m 4 h 20 m 5 h 25 m	0 <sup>+</sup>	10
					Jan. 22, 1965	23 h 00 m	0 <sup>+</sup>	22
Feb. 22, 1966	0 h 9 m 1 h 30 m 3 h 00 m 4 h 30 m 6 h 02 m	3	50					
KSC	31° N, 131° E	Largmuir Rocket	Langmaire	平尾・宮崎	Mar. 20, 1966	21 h 15 m	2 <sup>-</sup>	54
					Aug. 10, 1966	21 h 37 m	3 <sup>o</sup>	0
		Largmuir Rocket	VLF Doppler	木村	Jan. 27, 1970	19 h 20 m	1 <sup>+</sup>	132
					Impedance	渡辺・大林	Aug. 10, 1976	21 h
Arecibo	19° N, 67° W	IS レーダー	Sher	Apr. 6, 1974	20 h~3 h	4	23	
				Apr. 18, 1974	20 h~3 h	3 <sup>+</sup>	64	

の夜間の平均的電子密度分布曲線 [12] も同時に描いてある。その E-F valley 領域に M 層が現われている。これらの観測の日時, 方法, ロケット名, 観測者, 及び, 電離層条件を第 1 表に示す。KSC で観測された M 層は高度 140 km~180 km に現われ, その密度は  $6.1 \times 10^3 (\text{cm}^{-3} \sim 4.1 \times 10^4) \text{ cm}^{-3}$  であった。次節では, ロケット及び地上からの観測によって得られた内外の M 層の特性に関して検討される。



第5図

### 6. M層の特性に関する考察

各種の方法で観測された各緯度地帯でのM層に関して、その出現する高度と時刻を考察する。観測地点の地理的緯度及び経度、観測方法、観測者、観測年月日、並びに、電離層条件を第2表にまとめて示す。これらのM層の高度と時間を緯度別にまとめて第5図に掲げる。M層の特性がモデル潮汐風[8]のnodal pointにどのように対応しているかを調べる為に、南北風と東西風、及び南北風と逆位相の風のnodal pointの曲線を $U_{NS}$ 、 $V_{WE}$ 、及び $-U_{NS}$ で表わして図の中に描いてある。これから次のようなことがわかる。

- (1) 緯度が約 $40^\circ$ のBoulder ( $40^\circ N, 105^\circ W$ )とWallops島のM層は、150 km以上では南北風に、130 km以下では東西風に従って現われている。これはドリフト理論[8]に一致した現われかたである。Wallops島のM層が2-4モードの風のnodal pointの近くに現われることはこれまでに調べられていたが[8]、ここでは、BoulderのM層も用いられて検討された結果、モデル潮汐風に従って生じることがわかった。
- (2) 緯度が約 $20^\circ$ のAreciboのM層は南北風の逆位相風のnodal pointに従って現われている。Barbadosの風の観測からこの緯度地帯での南北風の反転の検証はなされていたが[9]、ここでは、電子密度の観測の面から傍証が得られた。
- (3) 緯度が約 $30^\circ$ のKSCのM層は高度140 km以上に5つ観測されている。そのうちの4つは南北風のnodal pointと東西風のnodal pointの間にあり、どちらかという、東西風のnodal pointの近くに生じている。もう1つのM層は南北風の反転風



の nodal point の近くに現われている。これを単純に考察すると次のようなことが考えられる。

- (a) 理論的、実験的に、約150 km 以上の M 層は、緯度が $40^{\circ}$ と $20^{\circ}$ のいずれの場合にも、南北風によって生じていると考えられるが、KSC の M 層は東西風の nodal point に近いものが多い。これは、KSC の緯度が南北風の風向の反転する境目に近いために、南北風の振幅が零に近いことに対応するのではないかと考えられる。
- (b) モデル潮汐風が2-4モードの風系に似ていること、及び、緯度が $20^{\circ}$ と $40^{\circ}$ の風のパターンが逆になっていること、並びに、 $30^{\circ}$ 近くの M 層が東西風の nodal point の近くに生じていることの三点から、KSC の緯度の近くで南北風の風向きの反転が生じていることが考えられる。一点のみ南北風の逆風の nodal point の近くに M 層が生じているが、これは、たまたま、その日に、南北風が反転していたこと、すなわち、反転する緯度が KSC より北であったこと、に対応するのではないかと考えられる。

## 7. 結 言

S-310-3号機に搭載されたインピーダンスプローブは正確に動作して夜間の電離層の電子密度分布の測定に成功した。その結果、ロケットの昇降時に M 層が観測された。M 層の生じる時刻と高度は領域の大気潮汐風に従うことが知られている。今回観測された M 層もモデル潮汐風 [9] の東西成分によって生成されたものと解釈された。同時に、KSC の緯度領域が南北風の風向きの反転する境目に近いことが考えられた。Boulder, Wallops 島、及び Arecibo の M 層の観測結果が用いられて、緯度特性が検討された。いずれの場合にも、上述のモデル潮汐風が有効に作用して M 層が生成することが確かめられた。特に、低緯度の Arecibo では大気風の南北成分の風向きが逆になっていることが M 層の観測結果から確かめられた。南北風の位相の反転する境界地点に近いと考えられる KSC でも、日によっては、反転のおこる緯度が KSC よりも北に移ることによって、反転した南北風に支配されて M 層が出現することが指摘された。この反転の生じる緯度がどのような条件で定まるかについては今後の検討が必要である。

最後に、S-310-3号機ロケットの実験主任、伊藤富造教授、及び、KSC で打ち上げ業務に携われた実験班の各位に謝意を表します。搭載用インピーダンスプローブの製作、調整にあられた明星電気株式会社、阿部誠氏、井坂信二氏に深く感謝します。又、M 層理論に関して御指導下さいました、東京大学理学部、等松隆夫教授、東京大学宇宙航空研究所、西田篤弘助教授、江尻全機博士に心より感謝致します。

1977年5月31日 新設部(科学)

## 参 考 文 献

- [1] H.Oya and T.Obayashi; A rocket experiment by a new impedance probe, Rept.

- Ionos. Space Res. Japan **20**, 199–213 (1966).
- [ 2 ] Y. Watanabe, M.Ejiri and T.Obayashi; Plasma resonance characteristics of impedance probe data obtained by sounding rocket experiments, Bull. ISAS. Vol. 12, No. 2 (A) (1976).
  - [ 3 ] T. Aso; A sheath resonance observed by a high frequency impedance probe, J.Geophys. Res., **25**, 325–330 (1973).
  - [ 4 ] M.Ejiri and T.Obayashi; Measurement of ionosphere by the gyro-plasma probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, **24**, No. 1, 1–12 (1970).
  - [ 5 ] H.Oya; Ionospheric plasma disturbances due to a moving space vehicle, Planet. Space Science, **18**, 793–902 (1970).
  - [ 6 ] N.Wakai; Quiet and disturbed structure and variations of the nighttime E region, J.Geophys. Res., **72**, No. 17, 4507–4517 (1967).
  - [ 7 ] K.Fujitaka, T.Ogawa and T.Tohmatsu; A numerical computation of the ionization redistribution effect of the wind in the nighttime ionosphere, J.A.T.P., **33**, 687–700 (1971).
  - [ 8 ] K.Fujitaka and T.Tohmatsu; A tidal theory of the ionospheric intermediate layer, J.A.T.P., **35**, 425–438 (1973).
  - [ 9 ] K.Fujitaka; Modeling of the wind-perturbed middle ionosphere, J.A.T.P., **36**, 1883–1889 (1974).
  - [10] J.S. Shen, W.E. Swartz, D.T. Farley and R.M. Harper; Ionization layers in the nighttime E region valley above Arecibo, J.Geophys. Res., **81**, No. 31, 5517–5526 (1976).
  - [11] T.Nagata; Sounding rocket data in Japan, 1 and 2, ISAS, Univ. Tokyo (1972), (1975).
  - [12] K.Maeda; Mid-latitude electron density profile as revealed by rocket experiments, J.G.G., **21**, No. 2, 557–567 (1969).