

# インピーダンスプローブによる電離層の 有効再結合係数の観測

渡辺勇三・大林辰蔵

The effective recombination coefficient of the  
ionosphere measured by the impedance probe

By

YUZO WATANABE and TATSUZO OBAYASHI

**Abstract:** The effective recombination coefficient ( $\alpha$  eff) of the nighttime ionosphere has been deduced from the decay of the electron density measured by the impedance probe on board the S-310-3 rocket.  $\alpha$  eff were  $0.77 \sim 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  in the height range of 170 km to 180 km and  $1.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  at the height of 130 km. These value were in agreement with the result measured by the laboratory experiment taking account of the electron temperature. Since the ionospheric charged particle are drifted downward by the neutral atmospheric wind above the height of the intermediate layer,  $\alpha$  eff should be corrected to be larger value than that estimated without the consideration of the effect of the dynamical transportation. The ionospheric  $\alpha$  eff were examined being compared with the characteristics obtained by M.A. Biondi as a function of the electron temperature.

## 概 要

S-310-3号機ロケットに搭載された電子密度観測用インピーダンスプローブによって夜間の電離層における有効再結合係数 ( $\alpha$  eff)が測定され次のような結果が得られた。

- i  $\alpha$  eff =  $0.77 \sim 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  (170 ~ 180 km)  
 $\alpha$  eff =  $1.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  (130 km)であった。
- ii この値は、Biondiの実験式に今回測定された電子温度の値を代入して得られた値にほぼ一致していた。
- iii 風に基づくイオンの力学的な輸送効果が考察されてM層上方での  $\alpha$  eff がより大きい目に補正された。
- iv  $\alpha$  eff の電子温度依存性が調べられ、Biondiの結果と似たような傾向を推察することができた。

## 1. 緒 言

電離層における有効再結合係数 ( $\alpha_{\text{eff}}$ ) の測定は、日食時か日没後の電子密度の時間的な減少率から求められたり、あるいは、午前0時から正午附近の電子密度の時間的な変化率から求められている [1] [2] [3] [4].

本報告では、S-310-3号機に搭載されたインピーダンスプローブによって測定された夜間電離層の電子密度の時間的な減少率から、高度170km~180km、及び、E-F Valley 領域の有効再結合係数が求められ、次のようなことが検討される。

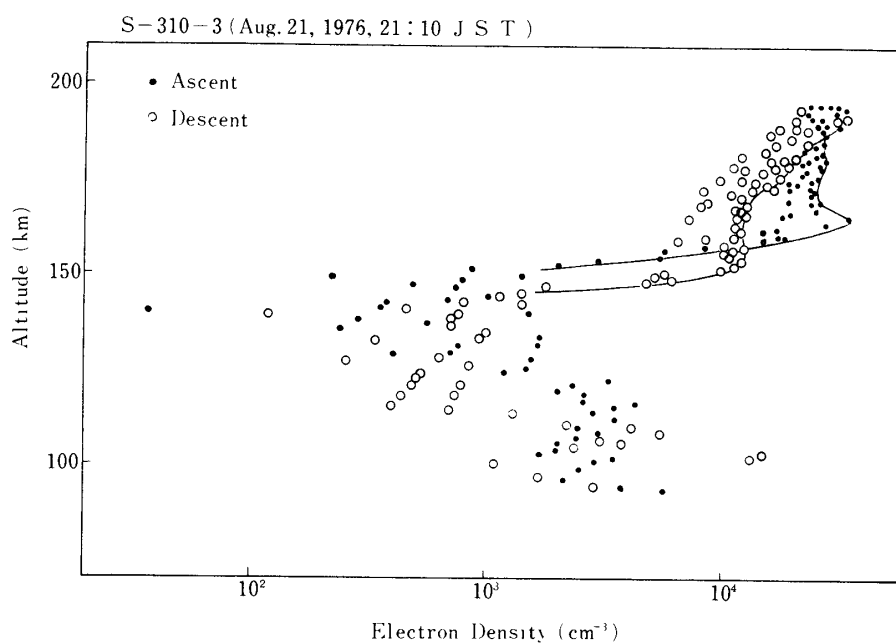
- (i) Biondi の室内実験の結果 [5] [6] と比較される。
- (ii) 大気潮汐風による荷電粒子の集積発散効果が、 $\alpha_{\text{eff}}$  の測定に対して及ぼす影響について調べられる。
- (iii)  $\alpha_{\text{eff}}$  の電子温度依存性について吟味される。

今回の報告のあらまは1977年度の宇宙観測シンポジウムに発表されているので参照されたい。

## 2. 電子密度の観測結果

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特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。測定された高域ハイブリッド共鳴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 [7] [8]. 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を行なった。S-310-3号機は1976年8月21日21時10分(J.S.T. 135° EMT) に、Kagoshima Space Center (131° 05' E, 31° 15' N) で発射され最高々度は195km、水平到達距離は309kmで、着水地点は、132° 53' E, 28° 57' Nであった。ロケットの飛行姿勢は地磁気姿勢計、及び、地平線センサーにより決定されるが、インピーダンスプローブの測定には支障がなかったことが確かめられている。インピーダンスプローブの測定は、発射後72秒から369秒の区間で行なわれた。第1図に、高域ハイブリッド共鳴周波数から求められた電子密度の測定結果を掲げる。94kmから195kmの高度領域で測定されている。ロケットのwakeとspinによる影響で電子密度にバラツキが生じているが、図の測定結果において、大きい側の envelope が実際の電離層の電子密度を表わすものと考えられる [9]. 高度分解能は160km高度で4km、180km高度で2.5kmであった。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った。

- (i) 103kmにE層が観測され、最大電子密度は約  $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  であった。
- (ii) 120km~145kmの領域に、いわゆる、E-F Valley 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126kmであった。
- (iii) ロケットの上昇時の165kmと下降時の157kmに、いわゆる中間層 (intermediate layer,あるいは、M layer と呼ばれる。以後、M層と称する。)が観測され、電子密度は  $1.2 \sim 3.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  で、その高度はロケット飛行中に約8km低下している。
- (iv) 170km~180km、及び、E-F Valley 領域で、ロケットの下降時の電子密



第1図 電子密度の観測結果

度は上昇時に比べて減少している。

インピーダンスプローブによる電子密度の測定方法及び、解析手順については1977年度の宇宙観測シンポジウムで詳しく報告されている。また、M層の特性及び、領域の大気潮汐風との関係に関しては、上述のシンポジウムのプロシーディング、及び、東京大学宇宙航空研究所報告1977年度8月号に掲載されている。ここでは、(iv)で記述されている電子密度の時間的な減少が、領域のイオンとの解離性再結合に基づく消滅現象であると解釈して、その高度での有効再結合係数が求められる。

### 3. 有効再結合係数の測定

電子の連続の方程式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = Q - L - T$$

$Q$ 、 $L$ 、及び、 $T$  はそれぞれ、電子の生成率、消滅率、及び、力学的な輸送率を表わす。 $N_e$  は電子密度を表わす。電子の化学的消滅率がイオンとの再結合によるものとすれば、 $L$  は次のように表わされる。

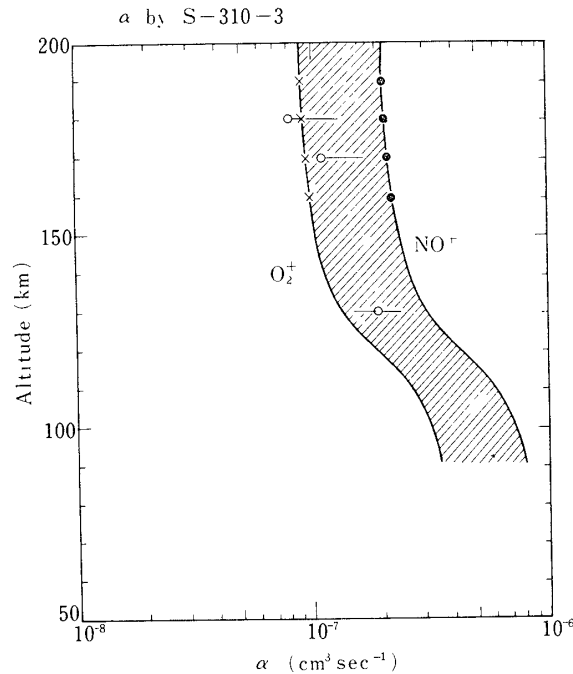
$$L = \alpha_{\text{eff}} \cdot N_e^2$$

また、電子の平均ドリフト速度を $W$ とすると、 $T$  は次の式で表わされる。

$$T = \text{div}(W \cdot N_e)$$

観測ロケットによる場合には、経度方向の電子密度の構造は一様とし、夜側への飛翔距離は同一場所での時間経過に換算される。今回の観測では緯度方向の電子密度の変化は無視しても良いことが Ionogram によって確かめられている。

本節では、 $Q = 0$ 、 $T = 0$  として電子密度の時間的減少率から求めた  $\alpha_{\text{eff}}$  について記述し、 $Q - T$  の項が0でない場合については次節で述べる。第2図は、側定された  $\alpha_{\text{eff}}$  の高度分布を表わしたものである。丸印は  $Q = 0$ 、 $T = 0$  の時の値である。これから次のようなことがわかる。



第2図 有効再結合係数の測定結果

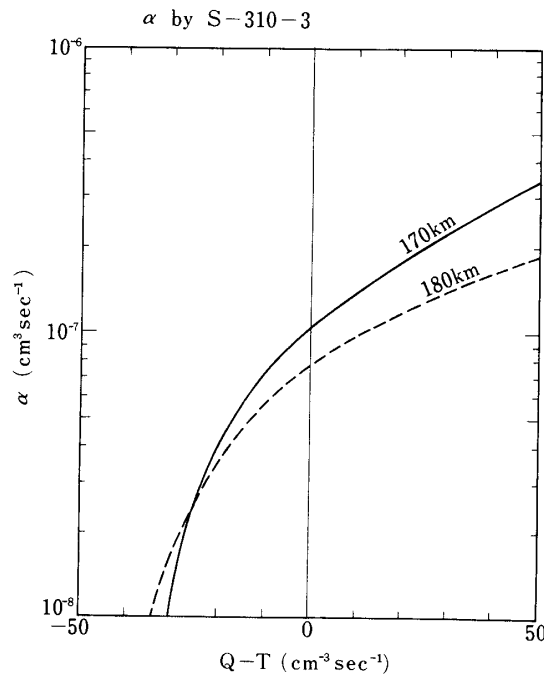
〔1〕  $\alpha_{\text{eff}}$  は 170 km ~ 180 km で、 $0.77 \sim 11 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  であり、130 km で、 $19 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$  である。これらの値は従来報告されてきた値よりやや大き目であるが、良く似た高度分布をしている。

〔ii〕 観測によると、この高度領域での主要イオンは  $\text{O}_2^+$  と  $\text{NO}^+$  である。第2図に描かれている実曲線は、Biondi による室内実験の結果 [5] [6] で、 $\text{NO}^+$  と  $\text{O}_2^+$  の値を表わしたものである。この値は電子温度の関数として与えられているが、ここでは、同時搭載の電子温度プローブ [10] による実測値が用いられ、図の中では、 $\times$  印と黒丸印で示されている。90 km ~ 150 km 領域の電子温度は観測を基にしたモデル値が用いられている。S-310-3号機による測定値は室内実験の値と良く一致していることがわかる。

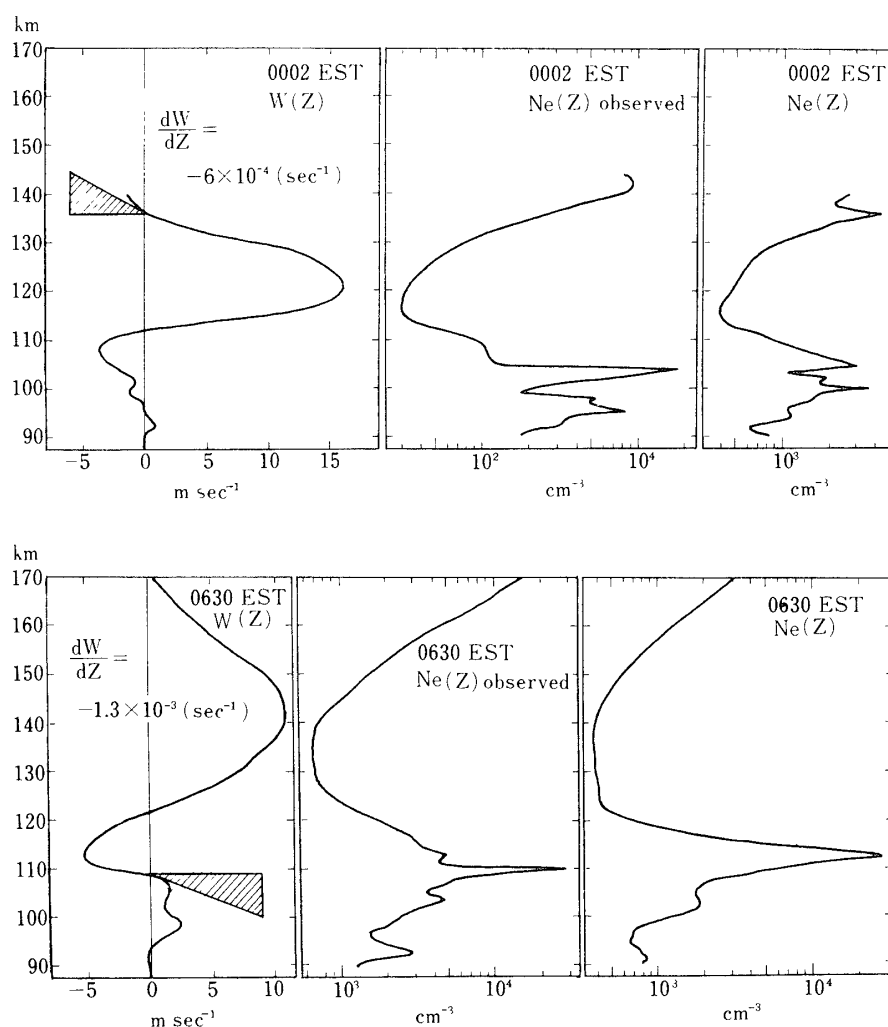
#### 4. $Q - T \neq 0$ の場合の $\alpha_{\text{eff}}$

$Q$  は厳密には0ではなく, geocoronal E U V, interplanetary E U V, 降下粒子, 及び, 磁気共役点光電子などが夜間の電離源として考えられている. これらは, 時間帯, 高度, 緯度, 太陽活動度, 及び, 地磁気活動度により, 変わる量である. 低緯度地帯では,  $Q = 1 \sim 0.5 \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$  であると報告されているが, 今回の場合には他の項に比べて小さいと考えて省略する.

$T$  は夜間の場合, 特に重要であるにもかかわらず, その見積りが困難なものであった. ところが, 今機の実験ではM層が観測されていることを利用して,  $T$  の estimation が試みられる. すなわち, M層, 及びその附近の電子密度の垂直構造が領域の中性大気風による荷電粒子のドリフトによって決定されるとする, いわゆるM層理論 [11] [12] [13] [14] を適用して,  $T$  の量的な estimate がなされる. 第3図は,  $Q - T$  の項が  $\alpha_{\text{eff}}$  の測定に及ぼす影響を調べたものである.  $\alpha_{\text{eff}} / (Q - T) > 0$  の特性曲線が得られている. 第4図は,  $T$  の estimation を試みる為に引用されたもので, 1968年2月22日に Wallops 島 ( $75^\circ \text{ W}$ ,  $38^\circ \text{ N}$ ) で行なわれたロケット実験の結果図である. ロケットの上昇時にラングミュアプローブ法で電子密度が測定され, 下降時にナトリウム弾を用いて風の観測がなされた. 第4図の左側は, 風の観測結果から求められたイオンの垂直方向のドリフト速度の高度分布である. 中央の図は, 観測された電子密度の高度分布である. 右側の図は, 左端の図の風の観測結果を用いて計算された電子密度の高度分布である [11]. 計算結果と観測結果は美事に一致している. これから次のようなことがわかる.



第3図  $\alpha_{\text{eff}}$  の  $(Q - T)$  特性



第4図 風と電子密度の同時観測の結果 [11]

- (i) 夜間の電子密度の高度分布は中性大気風に基づく力学的な効果によって決定される。
- (ii) M層は, nodal point, すなわち, 風向きの変わる高度でのイオンの集積作用によって形成される。
- (iii) M層より上空では, イオンのドリフト速度は負の高度変化をしている。

大気潮汐風は上空になるほどその波長が長くなるので, S-310-3号機で観測されたM層の高度領域では, イオンのドリフト速度は負の勾配の高度特性をしていると考えたいと思われる。従って, M層高度を基準として5 km~15 km だけ上空では,  $T$  は負の値となり,  $Q-T > 0$  と考えられるので, 第3図より明らかなように  $\alpha_{\text{eff}}$  はより大きい値に補正されることになる。第2図の中の丸印に付いている横棒は  $T$  による分を量的に補正したものである。これから次のようなことがわかる。

- (1) E-F Valley 領域では,  $T$  の値は  $\geq 0$  の場合が考えられるため, 横棒は右左に付

いている。

- (ii) M層より上空では $\alpha_{\text{eff}}$ は $\alpha_{\text{NO}^+}$ に近づくように補正されている。領域の主要イオンとして $\text{NO}^+$ と $\text{O}_2^+$ を考えた時、 $\alpha_{\text{eff}}$ は次のように表わされる。

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{\text{NO}^+} \frac{n(\text{NO}^+)}{N_e} + \alpha_{\text{O}_2^+} \frac{n(\text{O}_2^+)}{N_e}$$

すなわち、 $\text{NO}^+$ と $\text{O}_2^+$ の組成比によって $\alpha_{\text{eff}}$ が決まる。観測によると夜間では、 $\text{NO}^+$ の方が多いたことが調べられている。従って、ここで行った $\alpha_{\text{eff}}$ の補正が定性的には正しかったことがわかる。

### 5. $\alpha_{\text{eff}}$ の電子温度依存性

電子とイオンの解離性再結合係数の電子温度特性に関する詳細な室内実験の結果、Biondiは次のような実験値を報告している[5][6]。電子温度を $T_e$ として、

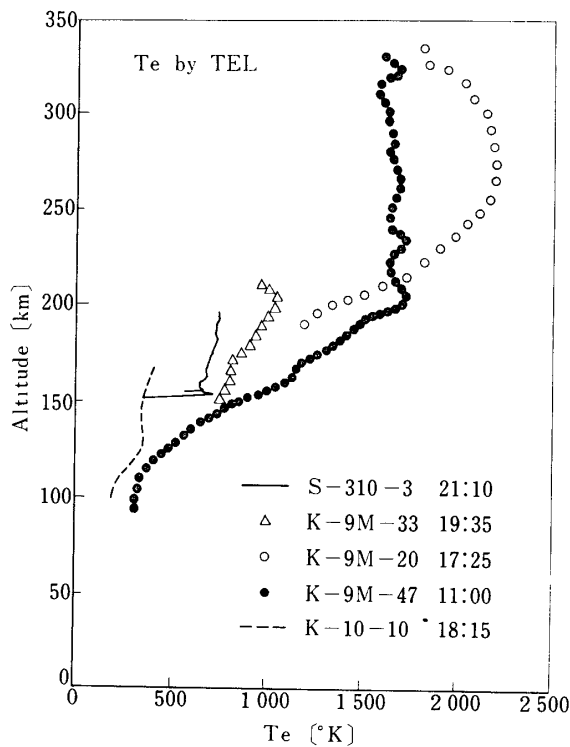
$\text{NO}^+ + e = \text{N} + \text{O}$  の場合

$$\alpha_{\text{NO}^+} = 5.0 \times 10^{-7} \times (300/T_e) \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$$

$\text{O}_2^+ + e = \text{O} + \text{O}$  の場合

$$\alpha_{\text{O}_2^+} = 2.2 \times 10^{-7} \times (300/T_e) \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$$

電離層における $\alpha_{\text{eff}}$ の電子温度特性を調べる為に今までに Kagoshima Space Center



第5図 電子温度の観測結果

において電子温度プローブによって測定された電子温度の高度分布の一部を第5図に掲げる。それぞれの時間帯、高度領域での電子温度の概略値を与えていると考えられる。

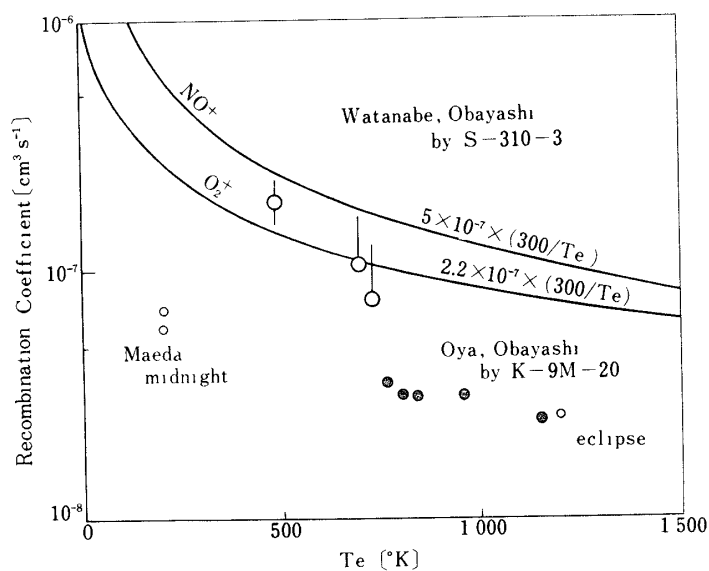
電離層における  $\alpha_{\text{eff}}$  の測定結果を第1表にまとめて示す。電子温度特性を調べる為に、真夜中と昼間と日没時の  $\alpha_{\text{eff}}$  が用いられる。

第1表

高度 (km)	時刻	$\alpha_{\text{eff}}$ ( $\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ )	測定方法	観測者	$N_e$ 測定方法	year	Reference
108	mid-night	$6 \sim 7 \times 10^{-8}$	$N_e$ の日変化	Maeda	Ionogram Doppler	1971	[3]
170	day	$2.6 \times 10^{-8}$	日食	Merian, Rauer	Ionogram ( $f_0 F_1$ )	1954	[2]
130 ~ 180	17:25	$3.4 \times 10^{-8}$	日没直後	Oya, Obayashi	Impedance probe	1966	[2]
130 ~ 180	21:10	$0.77 \sim 1.9 \times 10^{-7}$	日没後	Watanabe	Impedance probe	1976	

第6図は、上述の Biondi の実験式と第1表の  $\alpha_{\text{eff}}$  を縦軸に表わし、横軸に第5図を参考にして得られたそれぞれの電子温度を表わしたものである。これから次のようなことがわかる。

- (i) 電離層における  $\alpha_{\text{eff}}$  を連ねると、Biondi の実験式と良く似た電子温度特性をしている。
- (ii) 電離層における  $\alpha_{\text{eff}}$  は、Biondi の値より小さくなっている

第6図  $\alpha_{\text{eff}}$  の電子温度依存性



(ii)の理由として次のようなことが考えられる。

- (1) 電子温度の値が今回の場合を除いて同時測定の実測値でなく、第5図から求められた推定値である。
- (2)  $Q = 0$ として測定されているが、 $Q$ の効果を入れると第3図より明らかなように、 $\alpha_{\text{eff}}$ はより大きく補正されてBiondiの値に近づく。
- (3) 今回はじめて $T$ の効果が見積りされたが、他の $\alpha_{\text{eff}}$ は $T = 0$ として得られている。 $T$ の値は、高度、時刻、緯度、及び、電子密度分布によって異なるので、その見積りは困難であるが、重要である。
- (4)  $\text{NO}^+$ と $\text{O}_2^+$ の組成比が明確にわかっていない。

## 6. 結 言

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、上昇時と下降時の電子密度の時間的減少率がイオンとの再結合による消滅率を表わしていると解釈されて、各高度で有効再結合係数が求められ、次のようなことが明らかになった。

- (1)  $\alpha_{\text{eff}}$ は170km~180kmで $0.77 \sim 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ 、130kmで $1.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ であった。
  - (2) 同時測定 of 電子温度の値が用いられ、Biondiの室内実験の結果と比較されて良い一致を見た。
  - (3) 大気潮汐風によるイオンのドリフト作用を考慮に入れると、M層より上では $\alpha_{\text{eff}}$ はより大きく補正されることがわかった。
  - (4) これまでに電離層で測定された $\alpha_{\text{eff}}$ の電子温度依存性が検討された結果、Biondiの実験値より小さい値で、かつ、同様の電子温度特性を持つことがわかった。
- 今回測定された $\alpha_{\text{eff}}$ の特徴は次のようである。

- (i) 日没後約2時間経過している21時台の測定で前例の少ない時間帯での値である。
- (ii) 電子密度の時間的減少率の大きい時間帯での実験で、かつ、インピーダンスプローブによって電子密度が高精度で測定されたので、 $\alpha_{\text{eff}}$ は測定精度の良い値である。

さらに厳密な $\alpha_{\text{eff}}$ の測定の為には、電子密度、電子温度の高精度測定に加えて、 $Q$ 、及び、 $T$ の実測、並びに、 $\text{NO}^+$ と $\text{O}_2^+$ の組成比の測定を同時に行なうことが重要と考えられる。

## 謝 辞

S-310-3号機の実験主任、及び、観測ロケット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を製作された明星電気株式会社の特器課の各位に感謝します。電子温度の測定結果は平尾研究室のお世話になりました。

1977年8月20日 新設部(科学)

## 参考文献

- [ 1 ] J.S. Belrose, D.B. Ross and A.G. McNamara; Ionization changes in the lower ionosphere during the solar eclipse of 7 March 1970, J.A.T.P., 34, 627-640 (1972).
- [ 2 ] H. Oya and T. Obayashi; Recombination coefficient of the upper-E and F1 regions deduced from the electron density profile at sunset measured by rocket borne gyeo-plasma probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, 21, No. 9, 9-16 (1967).
- [ 3 ] K. Maeda; Study on electron density profile in the lower ionosphere, J.G.G., 23, No. 2, 133-157 (1971).
- [ 4 ] A.P. Mitra and R.E. Jones; Recombination in the lower ionosphere, J.G.R., 59, No. 3, 391-406 (1954).
- [ 5 ] M.A. Biondi; Atmospheric electron-ion and ion-ion recombination processes, Canadian Journal of Chemistry, Vol. 47, 1711-1719 (1969).
- [ 6 ] F.J. Mehr and M.A. Biondi; Electron temperature dependence of recombination of  $O_2^+$  and  $N_2^+$  ions with electrons, Physical Review, Vol. 181, No. 1, 264-271 (1969).
- [ 7 ] H. Oya and T. Obayashi; A rocket experiment by a new impedance probe, Rept. Ionos. Space Res. Japan, 20, 199-213 (1966).
- [ 8 ] Y. Watanabe, M. Ejiri and T. Obayashi; Plasma resonance characteristics of impedance probe data obtained by sounding rocket experiment, Bull. I.S.A.S., Vol. 12, No. 2 (A) (1976).
- [ 9 ] H. Oya; Ionospheric plasma disturbances due to a moving space vehicle, Planet. Space Sci., 18, 793-902 (1970).
- [ 10 ] K. Hirao and K. Oyama; An improved type of electron temperature probe, J.G.G., 22, 393-402 (1970).
- [ 11 ] 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).
- [ 12 ] K. Fujitaka and T. Tohmatsu; A tidal theory of the ionospheric intermediate layer, J.A.T.P., 35, 425-438 (1973).
- [ 13 ] K. Fujitaka; Modeling of the wind-perturbed middle ionosphere, J.A.T.P., 36, 1883-1889 (1974).
- [ 14 ] Y. Watanabe and T. Obayashi; 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, 東京大学宇宙航空研究所報告 8月号 (1977)