

## 極域電離層電子密度の計測

高橋忠利\*・大家 寛\*

### Measurements of Electron Number Density in the Polar Ionosphere

Tadatoshi TAKAHASHI\* and Hiroshi OYA\*

**Abstract:** Under the projects of the IMS, the Japanese Antarctic Research Expedition parties carried out sounding rocket observations using the S-210JA and S-310JA rockets. The swept frequency impedance probe (NEI), which is capable of making *in situ* measurement of the ionospheric electron number density, within an error  $\pm 3\%$ , was installed on the rockets co-ordinately with various other instruments.

In the polar ionosphere, ionospheric parameters such as the number density of electron and the electron and ion temperatures are highly variable in time and space. The investigation of the physical processes in this region requires, therefore, accurate *in situ* observation of the ionospheric parameters.

The electron number density profiles up to 221 km altitude were obtained by the NEI installed on the S-310JA-3 rocket, launched at 18:35 (45° EMT) on July 26, 1977. The ionospheric layer with the peak density of  $1.0\text{--}2.6 \times 10^4$  electrons/cm<sup>3</sup> and with the altitude width of about 20–30 km was observed around an altitude of 100 km.

**要旨:** IMS・南極ロケット観測の一環として、周波数掃引型インピーダンスプローブ (NEI) による極域電離層電子密度の計測が計画され、実行された。極域電離層は空間および時間的に多様に変動しており、ロケットによる総合観測の中で、電子密度を *in situ* に高精度で計測することは特に重要である。

1977年7月26日に打ち上げられた S-310JA-3 号機により高度 221 km までの電子密度プロファイルが得られた。結果は 100 km 高度にピーク電子密度  $1\text{--}2.6 \times 10^4$  個/cm<sup>3</sup>、高度幅 20–30 km の顕著な層構造を示している。また電子密度は全体として下降時により低くなっており、これは電子密度の地磁気緯度依存性を示すものである。

#### 1. はじめに

極域の電離層においては、電子密度、その他の物理量が時間および空間的に、非常に多様に変動しており、この領域の物理現象を解明していく上で電離層物理量の正確な直接計

\* 東北大学理学部. Geophysical Institute, Tohoku University, Aramaki-Aoba, Sendai 980.

表 1 NEI 搭載ロケット一覧

Table. 1 The Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) rocket experiments with the NEI.

	Rocket	Launch	Data
JARE-18	S-310JA- 2	Feb. 10, 1977	No Data
	S-310JA- 3	July 26, 1977	Data
JARE-19	S-310JA- 4	Aug. 18, 1978	Data
	S-310JA- 5	June 11, 1978	Data
	S-310JA- 6	Aug. 28, 1978	Data
	S-210JA-30	Jan. 28, 1978	Data
	S-210JA-31	Feb. 6, 1978	Data

測が必要となってくる。IMS 事業の一環として、第 17 次から第 19 次までの南極観測隊は、S-210JA および S-310JA ロケットシリーズによる極域電離層の観測を実行しつつある。この計画の中にあつて周波数掃引型のインピーダンスプローブ (NEI) は表 1 に示したロケットに搭載された。特に第 19 次隊では、S-210JA を含め、S-310JA シリーズの波動粒子相互作用総合観測のひとつとして集中的計測が行われている。

NEI による電子密度計測は、 $D$  領域から  $F$  領域下部へかけての種々の条件のもとでの電子密度プロファイルの蓄積の基本的な目的の他に、プラズマ波動観測機器 (PWH, PWL 等) のデータ解析のため、基本的なプラズマパラメータとして、電子密度、高部ハイブリッド周波数等を提供する。

この論文では、南極ロケット用の標準タイプ NEI について概説し、極域における電子密度の直接計測のねらいについて議論する。最後に第 18 次隊の S-310JA-3 号機による電子密度観測結果を速報として示す。

## 2. 観 測 機 器

周波数掃引インピーダンスプローブ (NEI) はジャイロプラズマプローブともいわれ、1964 年以来、わが国の観測ロケットにより開発されてきたもので、小型で安定した電子密度計測装置である (OYA, 1969)。磁化プラズマ中のプローブのアドミッタンスは、高部ハイブリッド周波数において極小値を示す (OYA, 1966)。NEI は、浮遊容量等の効果を取り除くよう設計されたブリッジ回路により、印加周波数の関数として、プローブの等価容量値を検出できるようになっており、出力の極小値から高部ハイブリッド周波数 ( $F_{UHR}$ ) を求めることができる。電子サイクロトロン周波数 ( $f_c$ ) を磁場強度より定めると電子密度は次式で与えられる。

$$N_e = \frac{m_e \epsilon_0 4\pi^2}{e^2} \sqrt{F_{UHR}^2 - f_c^2}$$

さらに、印加周波数の関数としてのインピーダンスのプロファイルは、電離層プラズマあるいはロケットを含むプローブ系と、プラズマの相互作用についての種々の情報を含んでいる。たとえば、低周波数 ( $< f_c$ ) でのプローブ容量値は、シース容量を与え、電子温度の情報を含んでいる。

観測に用いた NEI のブロック図を図 1 に示す。一定の掃引周期をもった鋸歯状波を VCO に印加して周波数掃引発振器としており、VCO からの出力は、一定周波数の水晶発振器からの出力と混合され、プラズマ中の基本的な特性周波数を含む周波数領域 (200 kHz-10 MHz) に変換される。この信号を、図 2 に示したプローブを含むブリッジ回路へ印加する。ブリッジからの出力は図の可変容量  $C_0$  を調節して、プローブの周波数依存容量値  $C(\omega)$  に比例するようにする。

このブリッジからの出力は local sweep 信号と混合され 50 kHz の中間周波数に変換された後増幅され、テレメータ信号として送り出される。図 1 に示したブロック図は、S-310JA-5 および 6 号機搭載のものであるが、S-210JA シリーズでは、掃引周波数モードと、200 kHz に固定したモードとを繰り返すことにより、連続的計測を加え、電子密度の微小

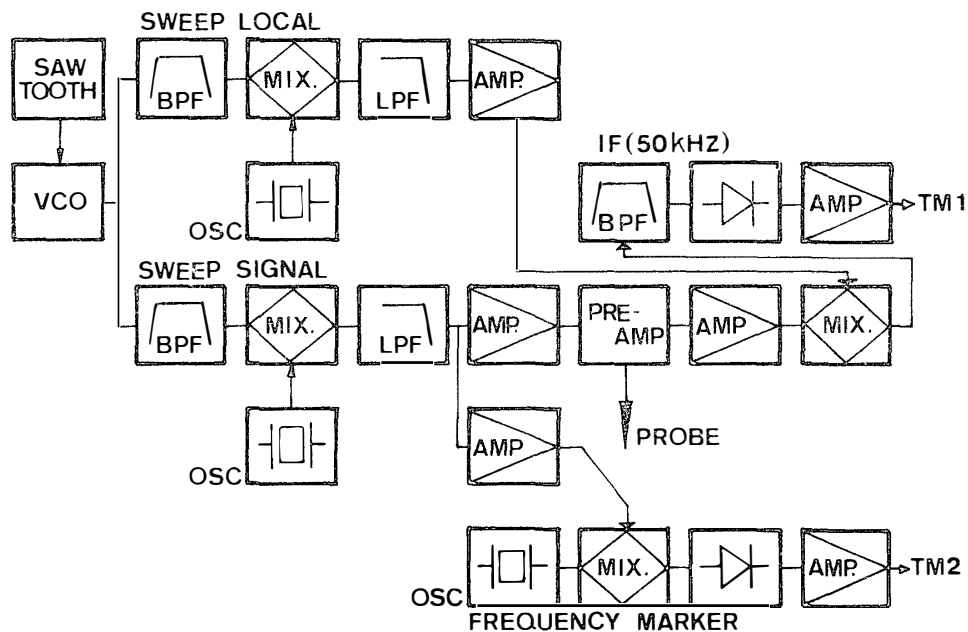


図 1 南極ロケット搭載 NEI のブロック図

Fig. 1. Block diagram of the swept frequency impedance probe (NEI) for JARE rocket experiments.

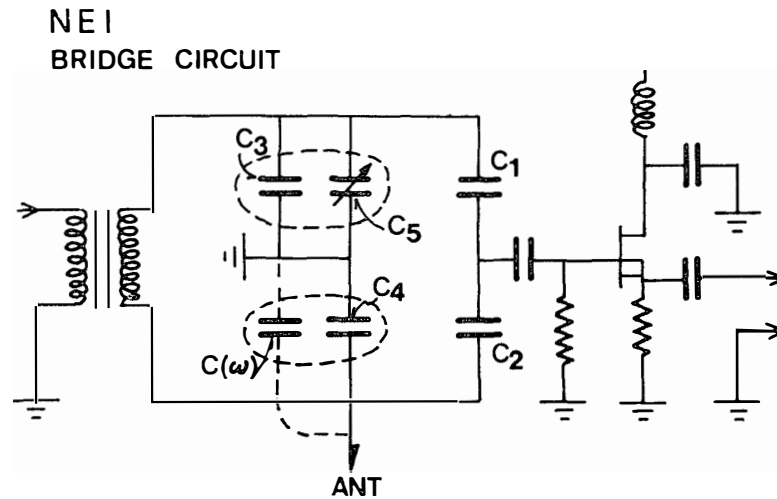


図 2 センサー部のブリッジ回路

Fig. 2. Bridge circuit as a sensor of the NEI.

表 2 NEI 主要パラメータ

Table. 2 The main parameters of the NEI.

	S-310JA-3	S-310JA-5/6	S-310JA-30/31
Probe	1.2 m whip	1.2 m whip	1.2 m whip
Sweep frequency	0.2~11 MHz	0.2~13 MHz	0.2~7 MHz
Fixed frequency	—	—	200 kHz
Sweep time	0.5 s	0.25/0.3 s	0.25 s
Fixed time	—	—	0.75 s
TM response	25 Hz	59/81 Hz	450 Hz

な変動をも計測可能にするよう設計された。表 2 に第 18 次および第 19 次隊の観測ロケット用 NEI の主要パラメータを示す。

### 3. 観測のねらい

#### 3.1. 地上観測，人工衛星観測との比較

極域電離層は複雑な時空構造をもつので，種々の方法で得られたデータの相互比較を，注意深く行うことは特に重要である。NEI により計測された電子密度はロケットのごく近傍の値であり，その電離層の構造全体の中での位置づけは，地上あるいは衛星からの sounding の結果と比較する必要がある。逆に，ロケットがオーロラアークに命中した場合等には，sounding では検出できない局所的な電子密度の enhancement を計測できるメリットを持っており，両者を補完的に用いることにより，オーロラ電離層についてのより

明確な全体像を把握できる。

### 3.2. エネルギー粒子降下との相関

ロケットに搭載されている他の観測機器の諸結果との比較が重要となるが、特に ESH, ESL 等のエネルギー粒子検出器との比較が興味深い。また後述するように、S-310JA-3 号機の結果では、ほぼ 100 km の高度にピークを持つ層が観測されている。これは夜間の電離層であることから、エネルギー粒子により生成されたものと考えられ、粒子計測結果との定量的比較をすることが課題となっている。

### 3.3. プラズマ波動実験との相互比較

波動粒子相互作用は、S-310JA シリーズの主たるテーマである。これらの観測実験では、特に *in situ* に求めた電子密度の正確な計測値がデータ解析のパラメータとして重要であるとともに、プラズマ波動の電離層構造の中での位置づけを明確にすることも、これらの波動の励起メカニズムや、伝搬特性を考察してゆく上で重要である。

## 4. S-310JA-3 号機の結果

第 18 次隊による S-310JA-3 号機は、1977 年 7 月 26 日 18 時 35 分 (45° EMT), 磁力線方向へ方位角 315° および上下角 80° で打ち上げられた。ロケットの軌道は図 3 に示したが、水平到達距離は 313 km で、ロケットの地磁気緯度はこの間約 3° 北側へ動いて

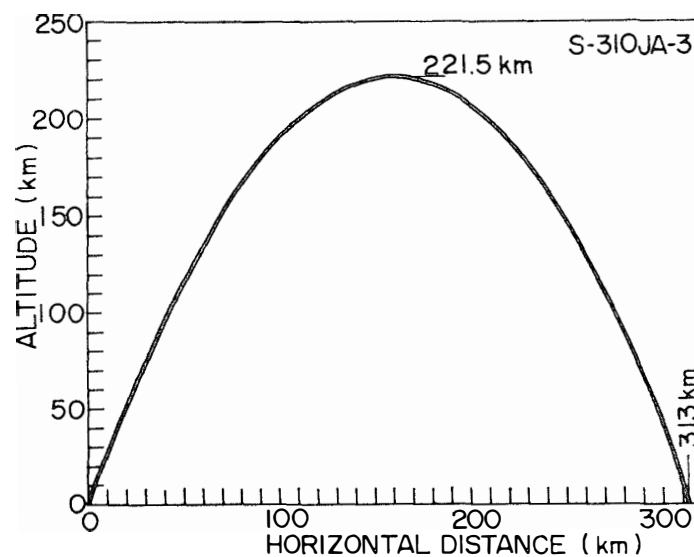


図 3 S-310JA-3 号機の軌道

Fig. 3. Flight path of the S-310JA-3 rocket.

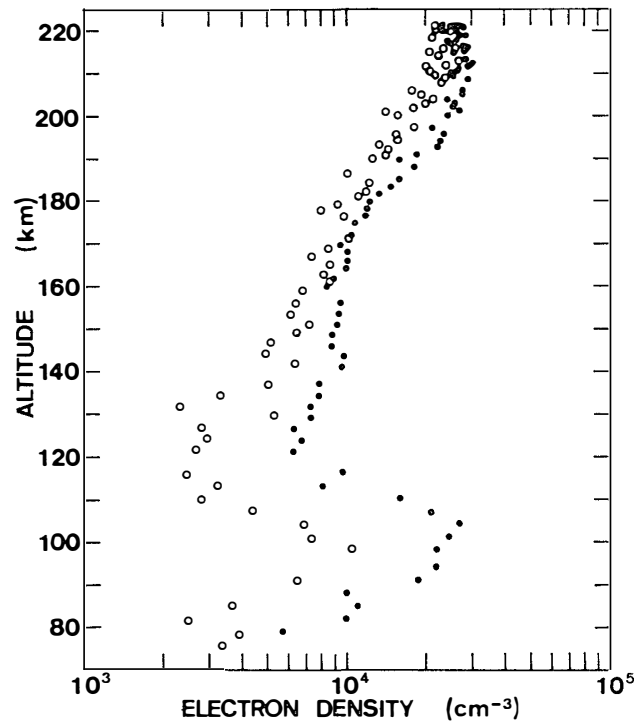


図 4 S-310JA-3 号機で得られた電子密度プロファイル。黒丸は上昇時，白丸は下降時のデータを示す。

Fig. 4. Electron number density profiles obtained by S-310JA-3 rocket experiment. Solid circles indicate the data in ascent, and open circles indicate the data in descent.

いる。ロケットの最大到達高度は 221.5 km で、電子密度の計測は高度ほぼ 75 km から開始された。観測結果は電子密度の高度プロファイルとして図 4 に示した。結果の特徴をまとめると次のようになる。

- 1) 上昇時，下降時とも 100 km 付近にピークを持つ高度幅約 20–30 km の層が顕著であり，そのピークでの電子密度は各々  $2.6 \times 10^4$ ， $1.04 \times 10^4$  個/cm<sup>3</sup> である。
- 2) 電子密度は高度約 120 km で極小値を示し，それ以上では高度とともに単調に増加しつつ F 層へとつながっている。
- 3) 高度 140–170 km に密度勾配のゆるやかな部分があり，これは上昇時において顕著である。
- 4) 電子密度は全体として上昇時よりも下降時において低い値を示しているが，これは電子密度分布の磁気緯度依存性を示すものと考えられる。
- 5) 上昇時の最大到達高度付近，および下降時の計測値には一定のばらつきが見られるが，これはその周期性から見て，ロケットのスピンによる wake の影響である。したがっ

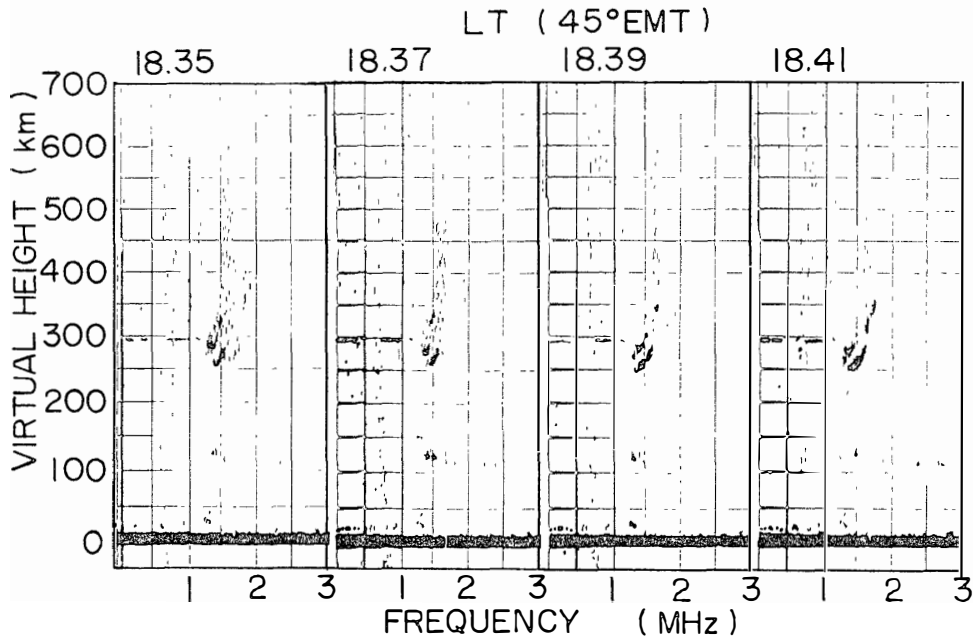


図 5 S-310JA-3 号機打ち上げ時の電離層垂直打ち上げイオノ・ファックス  
 Fig. 5. Iono-faxes at Syowa Station for the time of the S-310JA-3 rocket experiment.

て真のプロファイルは電子密度計測値の高い方の包絡線として与えられる。

ロケット発射時は、active なオーロラは観測されていず、また、磁場変動についても 3 成分とも  $20\gamma$  以下程度の非常に小さな変動を示すのみである。さらにリオメーターの記録によっても CNA の event は起こっていない。このように今回の観測は磁氣的に非常に静穏な状態で行われたにもかかわらず、100 km 付近に層状のプロファイルが得られたことは興味深い。同時に搭載した ESH の結果（今井，1978，私信）によれば、60–80 keV の電子フラックスが高度 95 km 以上で観測されている。この点については今後定量的検討を加える必要がある。

図 5 にロケット打ち上げ時の昭和基地における電離層垂直打ち上げのイオノ・ファックスを掲げた。周波数が 3 MHz 以上ではほとんどエコーが受かっていない。これから電離層のプロファイルを求めることはむずかしいが、1.5 MHz 付近で virtual height 約 120 km のエコーが受かっている、これがロケットで観測された密度プロファイルのピークに相当するものと思われるが、詳しい対応や議論は第 19 次隊での結果とあわせて行いたい。

## 5. 結 び

昭和基地での南極ロケットによる電子密度観測は、1970年2月、第11次観測隊のS-

160JA 搭載のラングミュアプローブによる観測に始まり、一連の S-210JA シリーズによって、120 km 高度までのプロファイルが蓄積されてきている (MIYAZAKI, 1975). S-310 シリーズ搭載の NEI による計測は高度領域を 220 km にまで広め、かつより高い精度で電子密度の絶対値を計測することができた。

今後、第 19 次隊の一連の成果が得られればこれまでの蓄積と合わせ、極域の電離層および関連する諸現象の解明に大きく寄与できる。

### 謝 辞

南極にあって困難なロケット実験の労をとってこられた、第 17 次、第 18 次および第 19 次観測隊のスタッフの方々のご努力と、本ロケットプログラムをアレンジされた国立極地研究所のご厚意に深く感謝の意を表したい。また、地上観測の諸結果の参照にあたっては、国立極地研究所資料系および電波研究所 WDC-C2 のお世話になった、ここに感謝の意を表したい。

### 文 献

- MIYAZAKI, S. (1975): Results of rocket observation of electron density at Syowa Station. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **52**, 128-140.
- OYA, H. (1966): Study on boundary value problems of magnetoactive plasma and thier applications to space observations. Ph. D. Thesis, Kyoto University.
- OYA, H. (1969): Development of gyro-plasma probe. *Small Rocket Instrument Techniques*, ed. by K.-I. MAEDA. Amsterdam, North-Holland, 36-47.

(1978 年 6 月 10 日受理)