

南極ロケット S-210JA-29 号機による 静穏時下部電離層電場の観測

小川俊雄*・岩上直幹**・鮎川 勝***

Measurement of Quiet-Time Electric Field in the Lower Ionosphere by the Antarctic Sounding Rocket S-210JA-29

TOSHIO OGAWA*, NAOMOTO IWAGAMI** and MASARU AYUKAWA***

Abstract: Quiet-time DC and AC (18–220 Hz) electric fields were observed in the lower ionosphere up to 118 km by means of spherical double probes on board the sounding rocket S-210JA-29 which was launched from Syowa Station at 16.15 UT on July 12, 1977. The DC electric field intensity was ~ 10 mV/m in the lower E region where the electron density was $2\text{--}3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, while it increased sharply up to ~ 130 mV/m above the altitude of ~ 110 km with a good correlation with the decrease in the electron density. Only weak AC noise was observed in the whole altitude range.

要旨: 1977年7月12日16時15分に、昭和基地から発射された観測ロケット S-210JA-29 号機に搭載した球ダブルプローブを用いて、118 km までの下部電離層中で、地磁気静穏時の静電場と AC (18–220 Hz) 電場を観測した。電子密度が $2\text{--}3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ の E 層下部で観測した静電場は約 10 mV/m であったが、一方、約 110 km より上の高度で電場は急激に増大して約 130 mV/m に達し、電子密度の減少によく対応した。また全高度でごく弱い AC ノイズが観測された。

1. 序

過去に昭和基地から打ち上げられた観測ロケットによる電場の観測は、すべてオーロラ中またはその付近のじょう乱電離層中において行われた。これに対し今回の観測は、ほぼ完全静穏と思われる状態の下部 E 層において行われ、準静電場と 18–220 Hz の AC 電場を観測した。S-210JA-29 号機によるこれらの電場観測結果を、同時に観測された電子密度分布 (宮

* 京都大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606

** 東京大学理学部地球物理研究施設. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113

*** 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173

崎, 1979, 私信) と比較して報告する.

2. 測定装置

観測に用いたダブルプローブは, 直径 4 cm の中空導体球で, 金メッキの上にアクアダックでコーティングした. この空洞プローブの中にインピーダンス変換器をそう入し, 入力抵抗には $5 \times 10^8 \Omega$ と $2 \times 10^6 \Omega$ の 2 種類を交互に切り換えて用いた. ダブルプローブはロケットの先端に取り付け, 球プローブ間距離は 88.5 cm とした. インピーダンス変換器からの出力は DC 成分と AC 成分に分けて, それぞれ 31 dB と 52 dB の増幅を行った. AC 成分の増幅には, しゃ断周波数 18 Hz のハイパスフィルタを用いた. テレメータの周波数応答の上限は, DC 成分で 35 Hz, AC 成分で 220 Hz であった. 以上の電場測定器のほかには, 地磁気センサーと電子密度測定用ファラティカップ, およびロケット姿勢検出のための GA センサーと月センサーが搭載された.

3. 観測

電磁場観測用ロケット S-210JA-29 号機は, 1977 年 7 月 12 日 16 時 15 分 00 秒 (UT) に, 昭和基地 (地理座標 69.00°S , 39.58°E ; 地磁気座標 69.81°S , 78.51°E ; L 値 6.1) から, 上下角

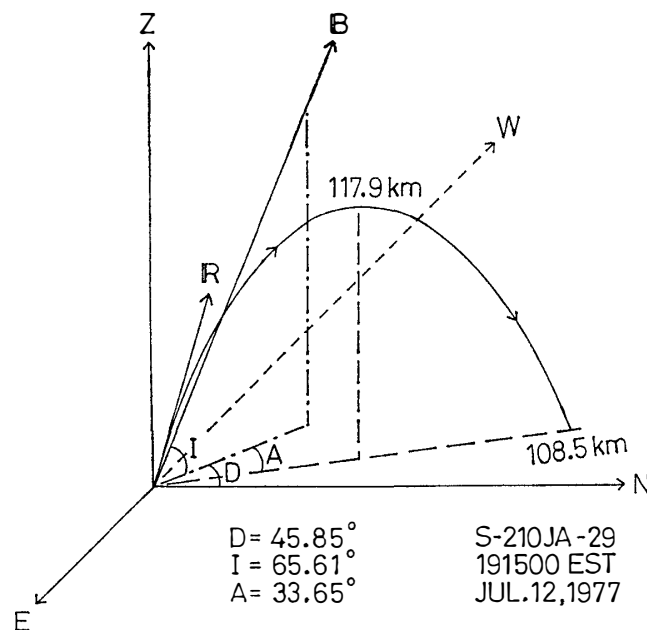


図 1 昭和基地から打ち上げられた観測ロケット S-210JA-29 号機の航跡図

Fig 1. Trajectory of the Antarctic sounding rocket S-210JA-29 which was launched from Syowa Station.

82°, 方位角 315° で磁力線方向に打ち上げられ, 165 秒後に最高到達高度 117.9 km に達した. その後, 全飛しょう時間 326 秒で, 347.8° の方位で水平到達距離 108.5 km の地点に落下した. これらのロケット飛しょう状況を図 1 に示す. 当時の天候は快晴で, ロケット発射時の地上の風速・風向は 0.4 m/s NE であった.

このロケットは科学衛星 ISIS-2 および GEOS-1 との同時観測を優先して打ち上げることになったため, 打ち上げ日時がはじめの計画から変わり, 月の出ていないときに打ち上げられたため, 同時搭載の月センサーのデータを得ることはできなかった. したがって, ロケットの姿勢を正確に求めることはできなかった.

4. 観 測 結 果

観測された DC 成分の電場 ($|E + V \times B|$) を, ロケット飛しょう時間と高度に対してプロットしたものが図 2 である. ここで E は静電場, $V \times B$ は飛しょう速度 V のロケットが磁束密度 B の中で受ける誘導電場である. 飛しょう時間 120 秒から 190 秒の間に, 70–140

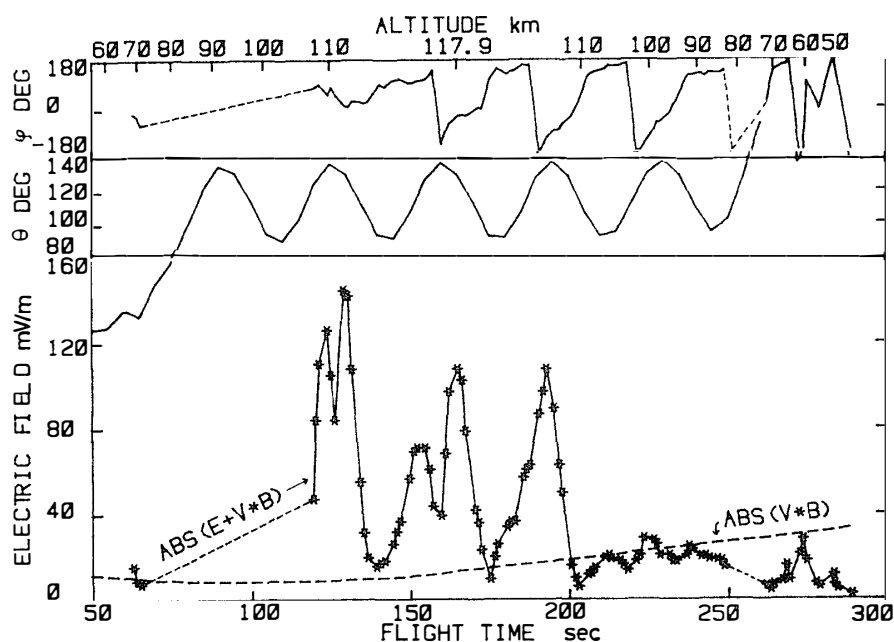


図 2 観測された電場 ($|E + V \times B|$) と計算された誘導電場 ($|V \times B|$) の時間変化. 高度目盛も入れている. θ はロケット軸と磁力線のなす角, φ はロケットスピンによるプローブの方向と電場の方向との相対位相差を示す.

Fig. 2. Observed electric field ($|E + V \times B|$) and calculated induced electric field ($|V \times B|$) plotted as a function of flight time. Rocket altitude is also plotted. θ is the angle between the rocket axis and the earth's magnetic field, and φ is the relative phase difference between the probe direction and the electric field direction.

mV/m の 5 つのピークがある。

つぎに、図 1 に示したロケット飛しょう航跡と、昭和基地における地磁気の値から計算したそれぞれの高度における誘導電場 ($|V \times B|$) を図 2 に示した。ロケットはほぼ磁力線に沿って打ち上げられたので、誘導電場の値は小さく 10–30 mV/m である。

図 2 にはまた、ロケット軸と磁力線のなす角 θ と、ロケットのスピンによるプローブの方向と電場の方向との相対位相差 φ を示した。 θ の値は 90° – 140° であるから、ロケット軸はむしろ水平面内にあり、磁力線を取り囲んで、磁力線の周りを回転したものと思われる。したがって電場測定用プローブは、むしろ垂直面内でスピン周期で回転しながら、さらに磁力線の周りを回転したものと思われる。観測された電場 ($|E + V \times B|$) の 3 つの主なピークと、 θ および φ との位相の関係がほぼ一定であることが、上の推定を裏づけている。

図 2 に示した電場を、高さについてプロットしなおしたものが図 3 である。観測された電場は、108 km 以上で 140 mV/m におよぶ値を示しているが、それ以下の高度では、誘導電場以上の電場は観測されていないことがわかる。

つぎに観測された AC 成分の、500 Hz までのダイナミックスペクトルを図 4 に示す。た

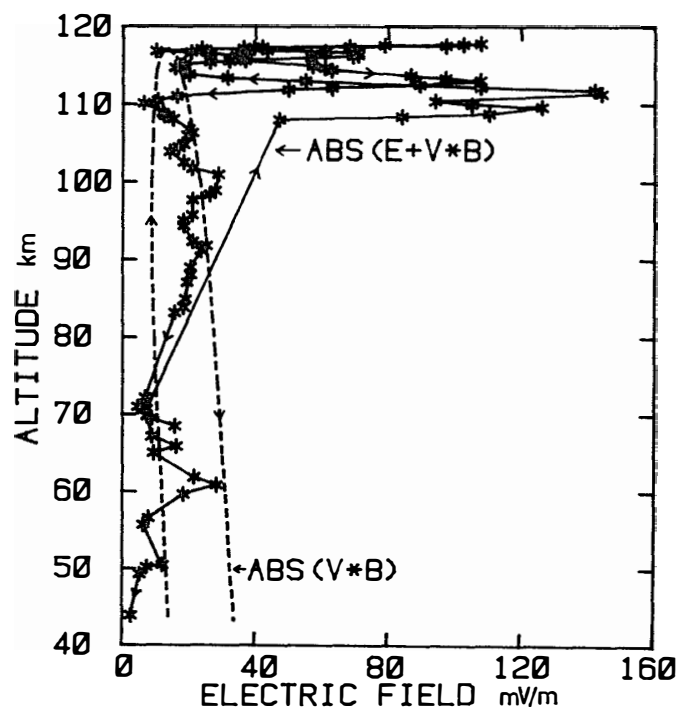


図 3 観測された電場 ($|E + V \times B|$) と計算された誘導電場 ($|V \times B|$) の高度分布

Fig. 3. Altitude profile of the observed electric field ($|E + V \times B|$) and the calculated induced electric field ($|V \times B|$)

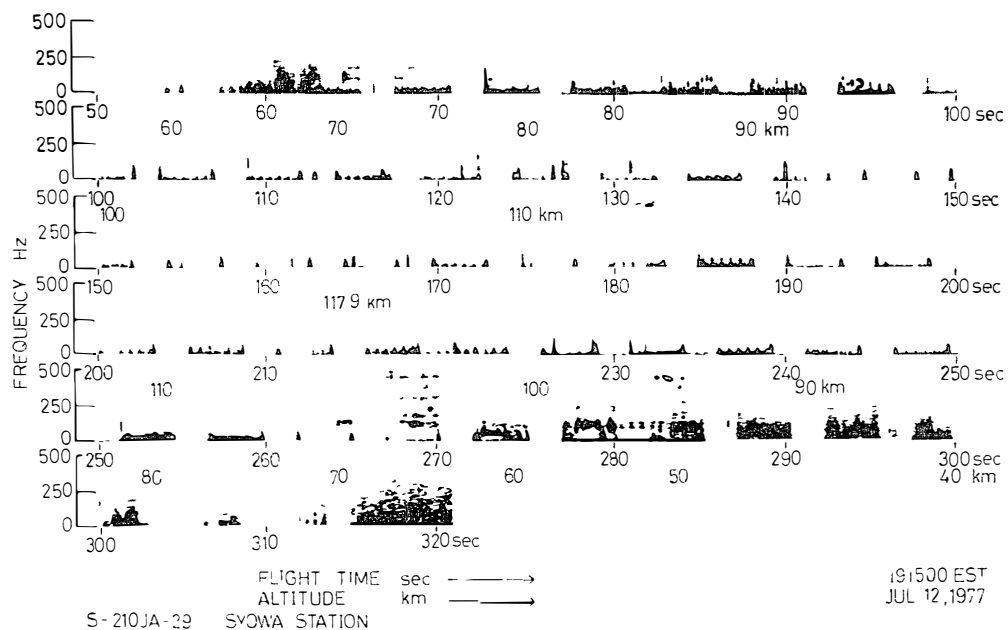


図 4 観測された AC 電場ノイズのダイナミックスpekトル 高度目盛も入れてある。用いたテレメータ系の周波数応答は 220 Hz。増幅器には、シャ断周波数 18 Hz のハイパスフィルタを用いた

Fig 4 Dynamic spectrum of the observed AC electric field noise Rocket altitudes are also presented Frequency response of the telemeter system used was 220 Hz A high pass filter with the cut-off frequency of 18 Hz was used in the amplifier

たし、テレメータの周波数応答は 220 Hz であった。図 4 の横軸にはロケット飛しょう時間と高度を示した。ロケット発射後 60 秒で脱頭、62 秒でプローフを展開したので、約 67 秒(高度 73 km)以後に有効な観測が行われた。

球プローフ内に組み込まれた入力抵抗には、 $5 \times 10^8 \Omega$ を 3 秒間、 $2 \times 10^6 \Omega$ を 2 秒間用いたが、AC ノイズは前者のときにのみ観測された。ロケット上昇時の 80 秒 (83 km) から 96 秒 (95 km) に 100 Hz 以下の超低周波ノイズがあり、ノイズの出現はスピン周波数に対応している。ロケット降下時には 264 秒 (71 km) 以後に、比較的周波数が高く、やはりスピに変調されたノイズがある。285 秒 (50 km) 以後のノイズについては、プローフと大気との摩擦による発生が考えられる。

5. 議 論

観測時の地磁気および電離層の状態はきわめて静穏であった。昭和基地における観測時頃の地磁気 3 成分の記録を図 5 に示す。地磁気 3 成分ともに何らの変化も見られない。

つぎに、ファラディカップの固定電圧プローフを用いて同時に観測された電子密度の高度

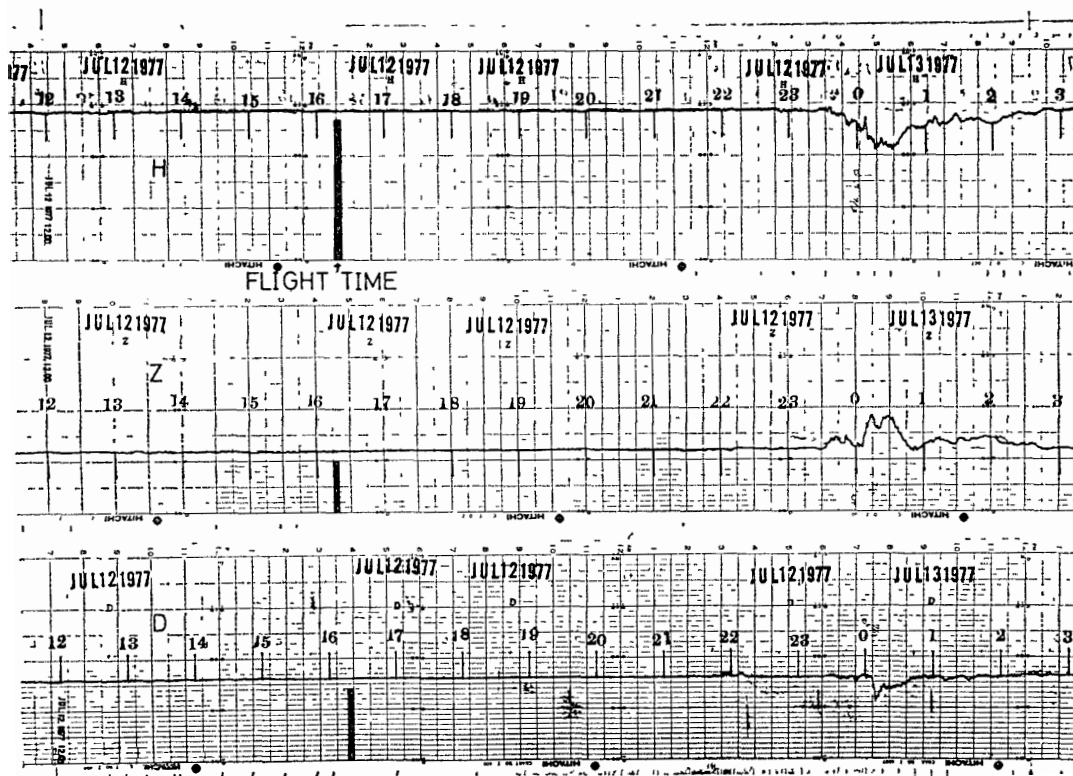


図 5 1977 年 7 月 12-13 日の昭和基地における地磁気 3 成分の記録

Fig 5 Three components of the magnetogram at Syowa Station on July 12, 1977

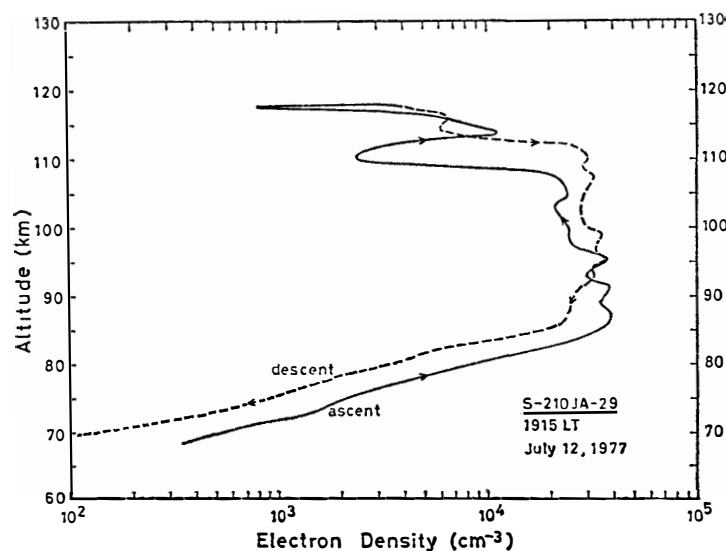


図 6 同時に観測された電子密度の高度分布 (宮崎 (1979, 私信) による)

Fig 6. Altitude profile of the electron density observed simultaneously (after MIYAZAKI, 1979; private communication).

分布 (宮崎, 1979, 私信) を図 6 に示す. 電子密度は 85–107 km の領域で $2\text{--}4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ である. この値は, 過去の同様のロケット観測結果 (OGAWA, *et al.*, 1978) に比べて最も小さい. 電子密度 (N_e) と地磁気水平成分の変化値 ($y = \Delta H/\gamma$) との関係を与える実験式 $\log_{10} N_e = -1.3 \times 10^{-3} y + 4.74$ (OGAWA *et al.*, 1978) を用いて, 今回の場合の電子密度を求めると, 図 5 から地磁気変化はほぼ零であるから, $N_e = 5.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ となる. 今回実際に観測された電子密度はこれよりさらに小さい値であるから, ロケット打ち上げ時の電離層は, オーロラ粒子等による影響は皆無であったと判断される.

図 2 および図 3 の電場の観測値を図 6 の電子密度分布と比べると, 電子密度が大きい 85–108 km の領域の電場は 20 mV/m のオーダーで, この値は $V \times B$ の大きさとほぼ同じである. 一方, 電子密度が急激に減少する 108 km より上で, 140 mV/m の電場が観測されたことがわかる. この高度での $V \times B$ の大きさは約 10 mV/m であるから, 求める静電場の値は, 小さくとも 130 mV/m の大きさである. ロケット降下時についても同様の傾向が見られる. 降下時の電子密度は 112 km まで小さいが, その高度より上で観測された電場は 110 mV/m である.

以上をまとめると, 電子密度が $2\text{--}4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ の E 層下部, およびそれより下の高度では顕著な電場は存在せず, せいぜい 10 mV/m のオーダーのものである. その高度より上の, 電子密度の小さい領域では 130 mV/m の電場が存在したことになる.

オーロラアーク中での降下粒子と電場との関係が, “correlation” か “anti-correlation” については多くの相反する結果が発表されている (KAMIDE, 1979, 小川他, 1979a) が, 今回の観測では, 静穏時の電子密度と電場の関係は明らかに “anti-correlation” であることがわかった.

今回の観測では, 観測日時の変更のため月センサーのデータを得ることができなかったため, ロケットの姿勢を正確に求めることができなかった. したがって観測された電場の向きについて詳しく議論することはできない. しかし前述のように, ロケット軸は水平面近くであり, したがって電場ベクトルは垂直に近い面内で回転したものと推定される. また電場はプリセッションの周期に対応して観測されたので, 水平成分と考えられる. いまこの電場の源が磁気圏にあったとし, 磁気圏と電離層を結ぶ電流回路を考える. 電場は高度 100 km で 10 mV/m, 110 km で 130 mV/m であった. ロケット上昇時と下降時の両方で同様の電場が観測され, この間の水平距離は約 40 km であったので, 観測した電場の水平方向のスケールが 10 km と 100 km の 2 つの場合について考えてみると, 高度 100 km ではそれぞれの

スケールに対応して 10^2 V または、 10^3 V の電位差、また高度 110 km では 1.3×10^3 V または 1.3×10^4 V の電位差が水平方向にあったことになる。このことから高度 100 km と 110 km の間の垂直方向には 6×10^2 V または 6×10^3 V の電位差があったことになり、これらはそれぞれ 60 mV/m または 600 mV/m の電場に対応する。このモデルで水平・垂直方向の電場の比は、磁力線方向の電気伝導度 (σ_0) と Pedersen 伝導度 (σ_1) の比に対応する。すなわち $\sigma_0/\sigma_1 \approx 1/6$ または $\sigma_0/\sigma_1 \approx 1/60$ となる。一般に σ_1 が σ_0 より大きくなることはないので、電場のスケールが 1 km のオーダーとならない限り、このモデルで観測事実を説明することはできない。

AC 成分については、ロケット上昇時の高度 83–95 km に約 100 Hz までの超低周波ノイズと、ロケット降下時の 70–50 km に 250 Hz 以上のノイズが観測された。これらはいずれもスピンに変調されているが、強度は弱い。これは、S-210JA-24, 25 号機で観測されたオーロラ中またはその付近のノイズとは対称的である。後者の場合には、96–112 km の電流層中に強いノイズが観測され、背景となる DC 電場と直交する方向に偏波していた。このためそのノイズはプラズマ不安定に原因するものと解釈された(小川他, 1979b)。今回の観測では、電離層の電子密度が極端に小さく、したがって電気伝導度も小さく、地磁気変化を起こすような電流も流れなかった。このような状態から、プラズマ不安定現象は起こらなかったものと思われる。

6. 結 論

完全静穏と思われる E 層下部の電子密度のピーク中で観測された電場は、10 mV/m のオーダーで、それより上部では 130 mV/m の電場が観測された。この電場の原因が磁気圏にあったとすると、そこでの電場の大きさは約 4 mV/m に相当する。この電場の電離層中での減衰については、今までのところ合理的な解釈を得るに至らなかった。しかし、種々の複雑なオーロラじょう乱現象を研究する背景として、今回の観測例のような完全静穏状態を研究しておくことも必要であると考えられる。今後機会があれば同様の観測をしてデータを蓄積することが望ましい。

謝 辞

昭和基地における観測ロケット発射とテレメータ受信等に多大のご援助をいただいた、第 18 次南極地域観測隊の楠宏越冬隊長および隊員の方々に深く感謝します。

文 献

KAMIDE, Y (1979) Recent progress in observational studies of electric fields and currents in the polar ionosphere A review Nankyoku Shiryô (Antarct Rec), **63**, 61-231

OGAWA, T, MORI, H and MIYAZAKI, S (1978) . Electron density and temperature profiles in the Antarctic auroral ionosphere observed by sounding rockets J Radio Res. Lab , **25**, 73-94.

小川俊雄・小玉正弘・福西 浩・松尾敏郎・芳野赳夫 (1979a)・ 南極気球による 電場とオーロラ X 線の観測. 南極資料, **63**, 276-290.

小川俊雄・森田 護・福西 浩・松尾敏郎・芳野赳夫 (1979b) 南極ロケット S-210JA-24, 25 号機による電離層電場の観測 南極資料, **63**, 252-275

(1979 年 5 月 4 日受理)