

低周波パルスサウンダーによる下部電離層観測の 基 礎 実 験

宮 崎 茂*

Preliminary Experiment on Lower Ionospheric Observation
with a Low-Frequency Pulse Sounder

Shigeru MIYAZAKI*

Abstract: In order to obtain basic data on the lower ionosphere in the Antarctic region, the usual ionosonde was remodeled into a portable type of low-frequency pulse sounder equipped with all solid state circuits except the final stages, which was suitable to field experiment. Three experiments were carried out. The first experiment was carried out at point F16 in the Antarctic Continent about 20 km apart from Syowa Station by using a couple of doublet antennas on the snow surface and the total length of each antenna was 475 m. The second experiment was carried out at Skjegget Peak, Skarvs Nes about 50 km apart from Syowa Station by using a couple of 360 m high vertical delta antennas terminated by 600 ohms and the length of each element was 500 m. The third experiment was carried out at point F18 near F16 in the Antarctic Continent by using a couple of doublet antennas on the snow surface and the total lengths of the antennas were 1600 m and 1000 m. In the experiments reflected echoes from the lower ionosphere were observed clearly, and time variations of the lower ionosphere in quiet and disturbed conditions were also observed with a comparatively low power (less than 1 kW) by using a couple of doublet antennas which lay on the snow surface.

1. 緒 言

高度数 10 km から数 1000 km 以上に広がって存在する地球上の中性大気は、主として、太陽から放射される遠紫外線、および X 線によって電離され、いわゆる電離層を形成している。極地域においては、この他に荷電粒子も重要な電離源である。電離層は無線通信、および電波伝搬の問題に関連して、重要であるばかりでなく、超高層物理の研究にとって重要である。すなわち電離層物理はもとより、地磁気、空電、宇宙線、大気光、極光、太陽電

*郵政省電波研究所. Radio Research Laboratories, Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo.

波，宇宙電波雑音などの上層大気物理学の研究には，電離層の物理的状态を正確に把握することが必要である。

特に高度約 100 km 以下のいわゆる下部電離層は原子分子反応過程の重要な領域であり，外部からのエネルギー授受機構が複雑な領域である。さらに，極地域においては，極光活動と重要な関連をもち，そして，磁気圏と密接な関係をもっている。それ故，現在，観測および研究が最も望まれている分野の一つである。

しかるに，以上の重要性にも拘らず，下部電離層については従来観測がほとんど行われていないのが実状である。この理由としては，下部電離層においては，電子密度が小さいこと，中性分子との衝突周波数が大きいこと，また観測に使用する周波数が低いために従来のアンテナ系では電波の輻射効率が非常に悪いこと等が挙げられる。

ここでは著者が第13次越冬隊（1972年2月—1973年2月）に参加して，昭和基地周辺において，pulse sounder によって空中線系を可能な限り大きくし，低周波電波の輻射効率を良くして，種々の条件のもとで基礎実験を行った。その結果比較的小電力で下部電離層の観測が充分出来るという確認を得たので，その概要，経過，および結果について述べる。

2. 観測方法および観測機

従来から行われている vertical pulse sounding 法で，パルス変調された電波を地上から発射して，電離層で反射した電波を発射点で受信して，電離層を観測する方法を用いた。すなわち反射波の周波数から電子密度，反射の往復の時間から高さが求められる。観測機の主要な電氣的諸元は次の通りである。

周波数範囲	50~2,150 kHz（手動）
送信尖頭出力	約 1 kW（推定値）
送信パルス幅	40~400 μ s（可変）
パルス繰返し周波数	40~250 Hz（可変）

野外で実験を行うため，重量および発電機電源容量の関係から励振段および終段を除いて，すべて半導体による回路を用いた結果，重量約 100 kg，所要電力は約 100 V \times 8 A にすることができた。今回製作した送信部は従来の回路内容とかなり異なるので，これについて述べる。

図 1 は周波数範囲 50~110 kHz の正弦波発振部である。まず uni-junction transistor で基準パルスを作り，次の mono-multi vibrator により送信パルス幅を制御している。最

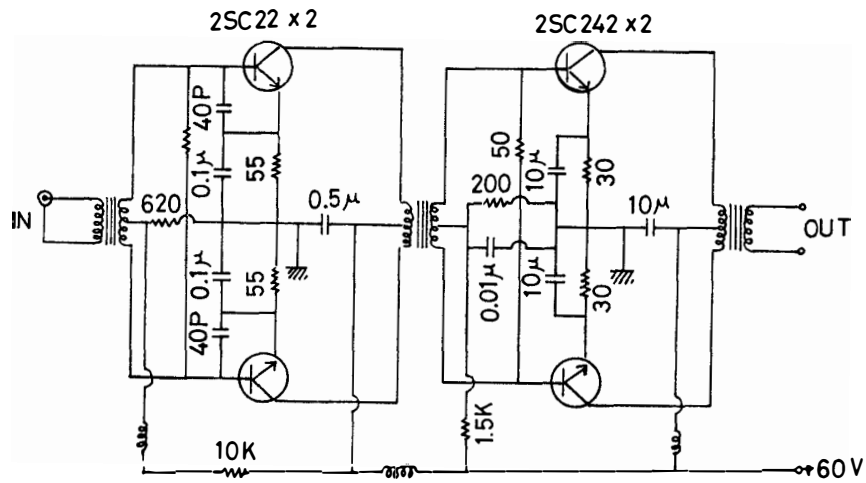


図 3 電圧増幅部
Fig. 3. Voltage amplifier.

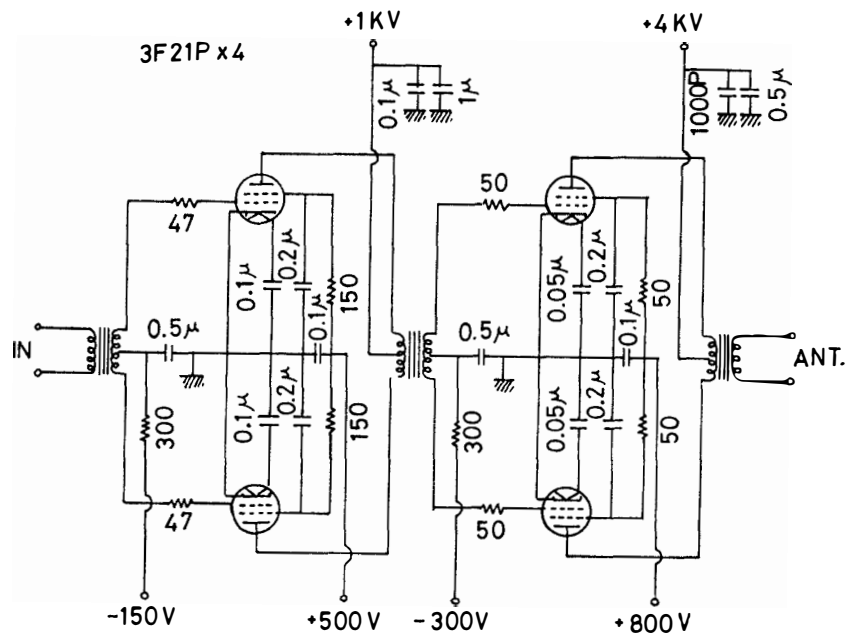


図 4 電力増幅部
Fig. 4. Power amplifier.

3. 実験経過

越冬期間中に行われた LF 観測機の送信部関係の制作，アンテナの建設，下部電離層の観測の経過について述べる。

47.2.12~3.9：図 8 に示すごとく，アンテナ島ビーコン柱（高さ 20 m）から，RT 室前の岩山のレーダーターゲット柱（10 m），昭和基地最高点（標高 43 m）に建てた鋼管柱（5

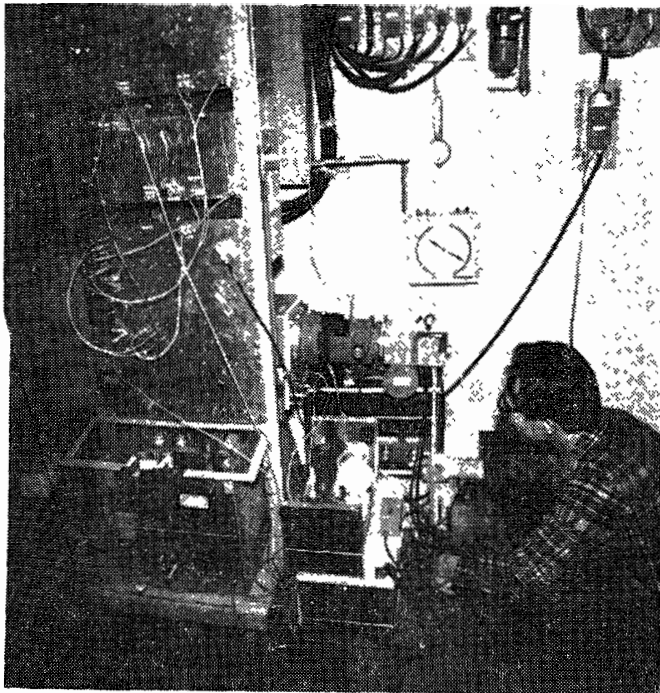
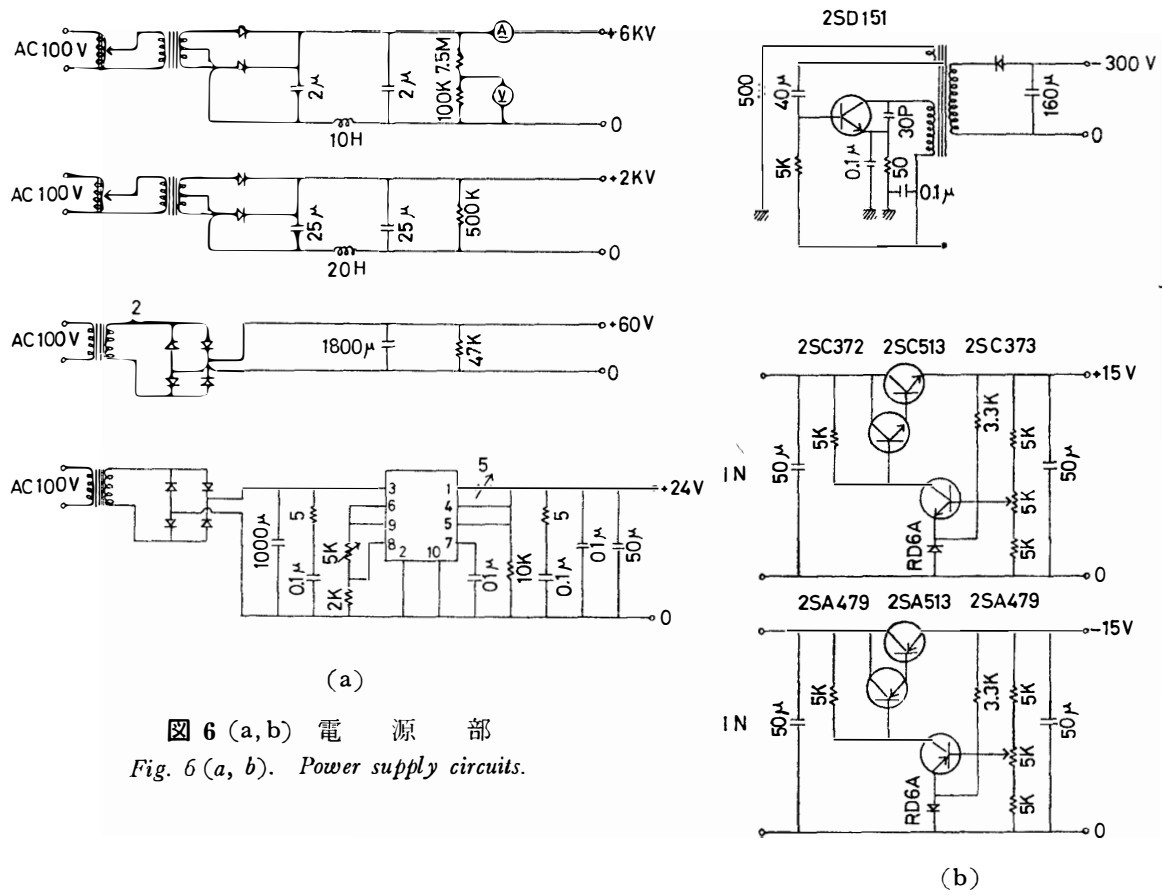


図 7 LF 観 測 機

Fig. 7. Low-frequency pulse sounder.

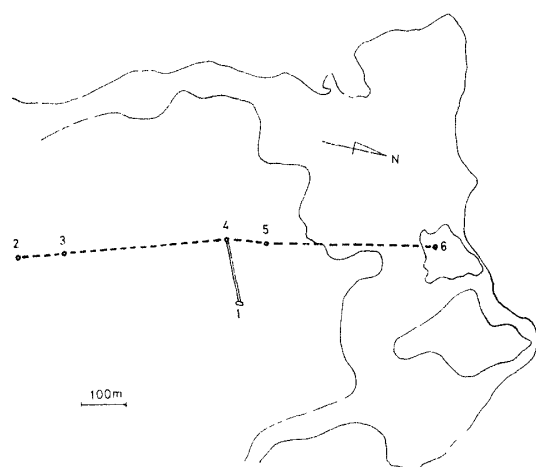


図 8 昭和基地内に張ったダブルットアンテナ
(1. 電離棟, 2. 最高点の南 100 m の地点,
3. 最高点, 4. レーダーターゲット柱, 5. 30m
デルタ型アンテナ引留柱, 6. ビーコンアンテナ柱)

Fig. 8. Doublet antenna at Syowa Station

m) を通って、さらに南へ 100 m の地点に建てた鋼管柱 (5 m) の間に全長約 900 m のダブルットアンテナを張った。レーダーターゲット柱をアンテナの中心として、そこから電離棟まで 600 Ω 系のフィーダーを張った。

3.18: 中心から北半分のアンテナは、銅芯入りのカップパーウェルド線を用いたが、南半分は材料の関係上、硬銅撚線を使用したため、強度的に前者より多少弱く、この部分がブリザードによって切断されてしまった。

3.24: 切断されたアンテナを再び張った。ロケット実験スケジュールの関係上、LF 観測機からの電波発射は、10月の予定であったが、アンテナについては、降雪のためあとでは出来なくなる恐れが予想されたので、建設期間の終りに設置したが、その後のブリザードの再切断および、LF 電波の他の観測への干渉が大きいので、テスト以外昭和基地内での実験は、やめることにして、基地外で行うことにした。

7.14~10.12: 今回持参した LF 観測機は、昭和38年製のもので、かなり老朽化しており、ほとんど全面的に改造する必要があった。また野外実験に運搬するためには、重量があり過ぎ、かつ電力もかなり必要なので、全面的にトランジスター化して、電力および重量を極力軽減する必要があった。それ故、ロケット関係のスケジュールの合間をぬって、LF 観測機の送信部を製作した。

9.29~30: LF アンテナ設置場所調査旅行をした。地図(図9)を参照して、検討した結果、候補地およびアンテナの形式として、東オングル島および西オングル島内に張るダブルットアンテナ、ラングホブデの長頭山と両隣りの山頂間に張るダブルットアンテナ、双子山間に張るダブルットアンテナ、中の谷をはさんで双子山の南の山頂と青氷湾の南の山頂に張

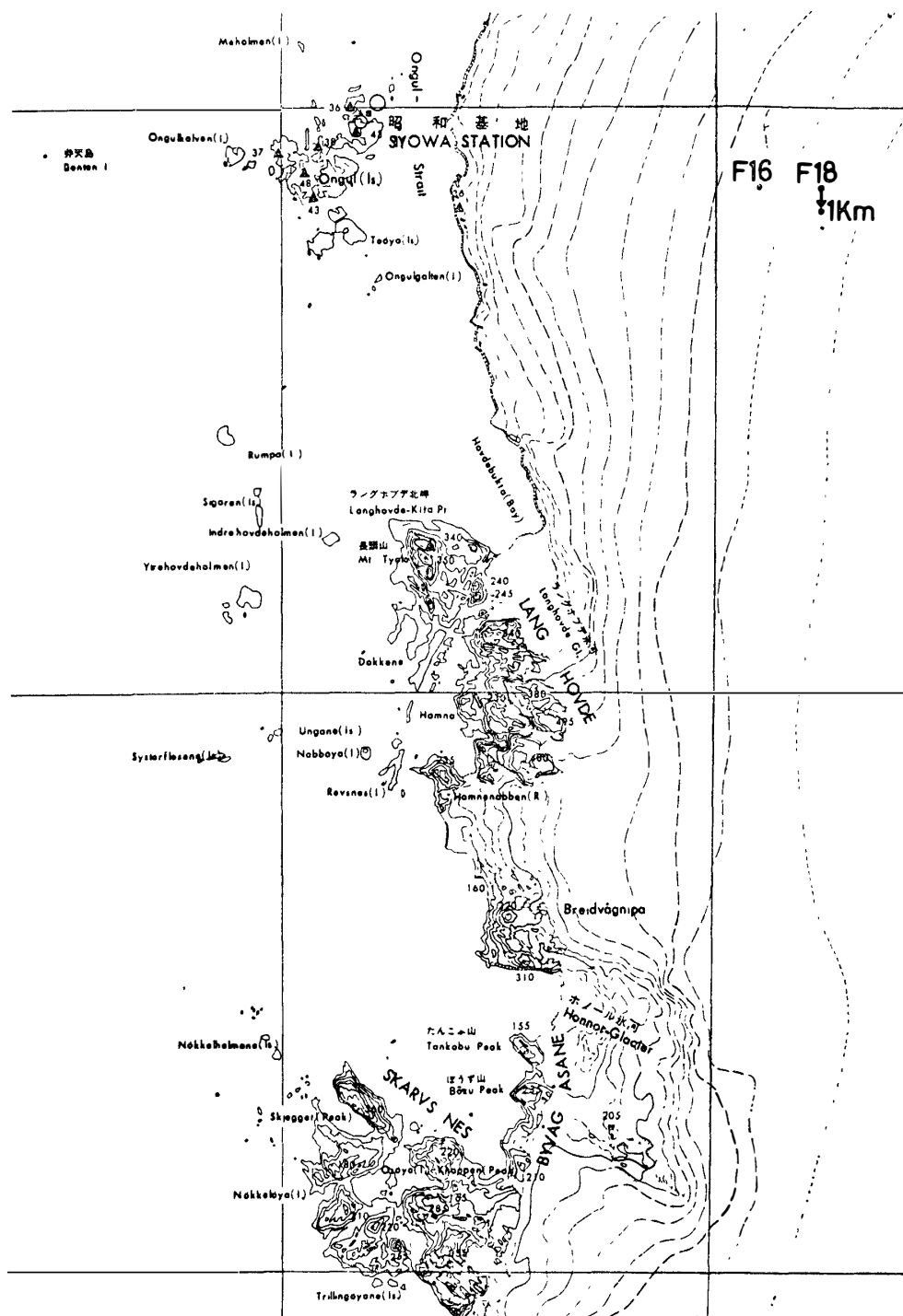


図 9 昭和基地付近の地図

Fig. 9. Map of the neighborhood of Syowa Station.

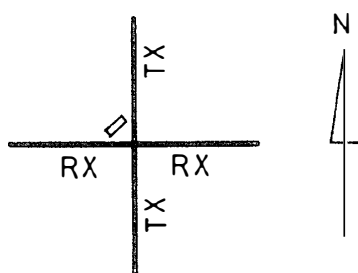


図 10 F 16 に張ったダブルットアンテナ (図の小さな長方形は実験カブースを示す)

Fig. 10. Doublet antennas at point F 16.

るダブルットアンテナ，下釜のU字谷に張るダブルットアンテナ，ハムナ氷瀑の前面に張るダブルットアンテナ，さらにラングホブデ長頭山北絶壁に張るデルタ型アンテナ，ホノール氷河付近のブレイドボグニッパの絶壁に張るデルタ型アンテナ，スカルブスネス・シェツゲの絶壁に張るデルタ型アンテナを考えた．現地調査の結果，ダブ

レットアンテナを山頂間に小人数，短期間に張るのは，地形の関係上困難であること，観測機の運搬も大変なこと等の理由で，ダブルットアンテナの場合は，大陸雪面上で行うことにした．デルタ型アンテナについては，スカルブスネス・シェツゲの絶壁に張るのが，高さが取れること，建設が比較的容易であると判断されたので，この案に決定した．

10.15～23：大陸の F 16 地点付近に，図 10 に示すごとく，全長 475 m の 2 組のダブルットアンテナを雪面上に敷設した．材料はビニール線を使用し，送信を南北方向に，受信を東西方向にした．観測機は居住カブース内にセットした．最初 1 MHz 電波テストのため，1 エLEMENTの長さが，37.5 m のダブルットアンテナを雪面上に敷設し，テストを行い良好な結果を得たので，さらに各ELEMENTを 200 m 伸ばして，全長 475 m のアンテナを用いた．10月19日 0 時より21日12時迄，5 周波 (250, 750, 1200, 1850, 2100 kHz) で 15 分間隔の連続観測を行った．

F 16 において，約 1 週間の実験の結果，カブース内における観測機および発電機の動作および観測可能の確認を得たこと，雪面上アンテナの有効性の資料を得たこと等により，次はデルタ型アンテナの実験に移った．

10.28～30：スカルブスネス・シェツゲにおいて，デルタ型アンテナの建設を行ったが，絶壁の高さが 360 m とかなり高いこと，アンテナ線材料がかなり重いこと等で建設にかなり困難をきたし，アンテナELEMENTが相互にからまってしまったので，次回，直さざるを得なかった．

11.5～19：アンテナの手直しと，実験のため，再びスカルブスネス・シェツゲに出かけた．最初にアンテナ線を引き降ろし，続いて 4 本別々にアンテナ線を引き上げ，それぞれ別々にアンテナ線を固定した．さらに水平部アンテナの設置を行った．アンテナ諸元は，図 11 に示す．11月 9 日から装置の調整に入ったが，受信機および周波数掃引部の故障，人員の交代の

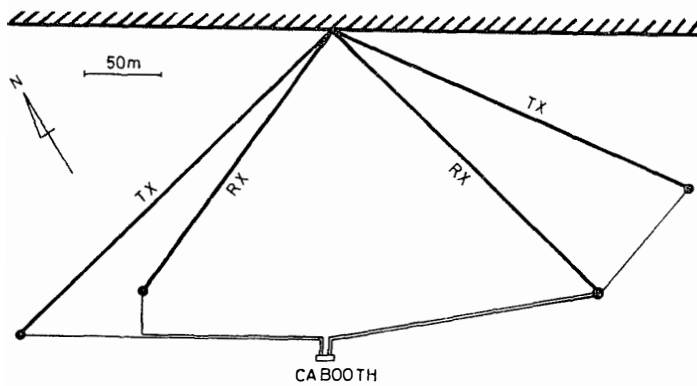


図 11 スカルプスネス・シェツゲに張ったデルタ型アンテナ

Fig. 11. Delta antennas at Skjegget Peak, Skarvs Nes.

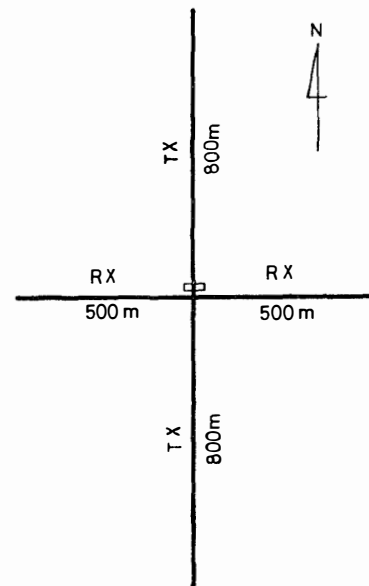


図 12 F 18 に張ったダブルット型アンテナ

Fig. 12. Doublet antennas at point F 18.

ため、観測はかなり遅れてしまい、かつ悪天候が続いたので、充分な観測は残念ながら出来なかった。

12. 18～48. 1. 13：定時観測用駒撮りカメラ機構を修理して LF 用に使った。そのための制御回路系を製作し、電離棟内で各種のテストを行った。

12. 4：きたる夏季オペレーション時の F 18 地点における LF 観測のため、居住カブース、発電機、ガソリン等を運搬した。

48. 1. 29～2. 12：最後の LF 観測として F 18 地点において、9 日間の観測を行った。まずヘリコプターで観測器材と共に F 16 に向かい、F 16 から観測地点 F 18 へは雪上車で行った。続いて早速実験準備にとりかかり、図 12 に示すごとく、全長 1600 m の送信用ダブルットアンテナ、全長 1000 m の受信用ダブルットアンテナを雪面上に敷設した。2 月 1 日 0 時 23 分から 1 分間隔連続観測を開始し、9 日 24 時まで観測を行った。この間、3 日 03 時 30 分から 5 日の 23 時 05 分まで、強いブリザードのため、発電機が雪に埋もれて停電し、欠測になった。そして 2 月 12 日昭和基地に帰り、すべての LF 観測の実験を終了した。

4. 観測結果およびまとめ

図 13 は 1972 年 10 月 19 日 0 時から 21 日 12 時 (LT) の間、F 16 地点で行った観測結果を示す。

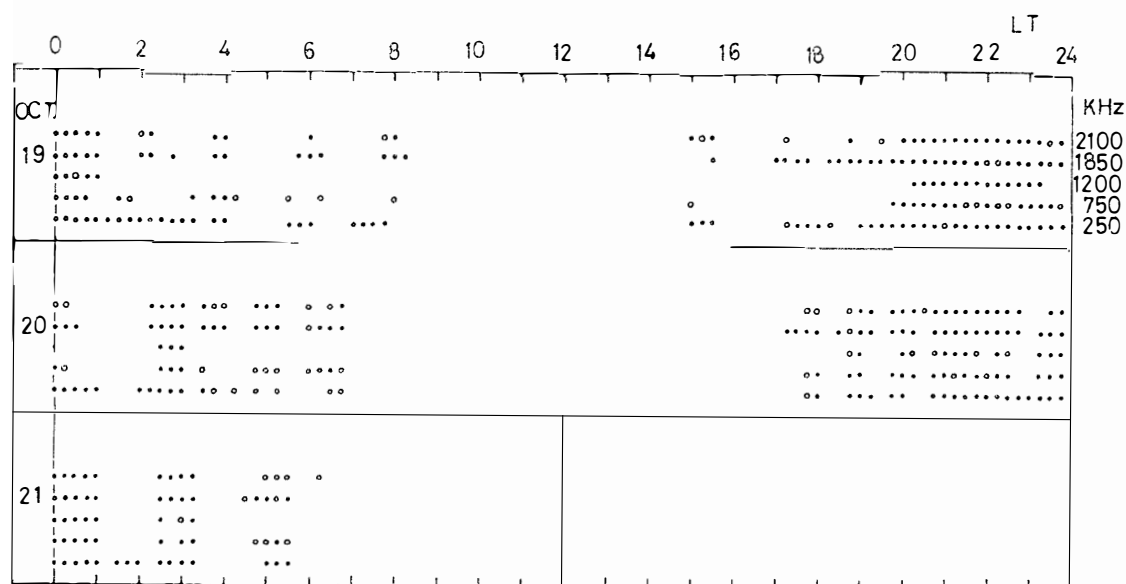


図 13 F 16 における観測結果

Fig. 13 Observational results at point F 16.

カメラ部が完成していなかったもので、ブラウン管上の Λ スコープを読みとった。観測周波数は 250, 750, 1200, 1850, 2100 kHz の 5 周波である。図13には反射波が存在し、強い場合には黒丸、弱い場合には白丸で示した。この期間は日中正午前後は blackout を示しており、定時観測と完全に一致している。特徴的なことは、250 kHz のみ反射波がある場合が存在することである。昼間では太陽紫外線によって、電離層下部に吸収層が生じ、反射波がなくなるが、夜間においては、かなり低い周波数の反射波が観測できることを示している。反射高に関しては、受信部に対する発射電波の直接波の影響が非常に大きく、正確に読みとることが困難であったが、2100 kHz に関しては、見掛け高さが 140~180 km の範囲で変化しており、250 kHz の反射波は、見掛け高さが約 105 km 一定で、あまり変動は観測されなかった。

実験条件は、パルス幅 $40 \mu\text{s}$ 、パルス間隔 4.5 ms、終段陽極電圧約 3 kV、同電流 30 mA であり、尖頭出力の推定値は約 1 kW 程度である。この時、使用したアンテナの特性として、陽極電流極大の周波数は、235, 780, 1230, 1800 kHz であり、極小は、500, 1000, 1500 kHz であった。また F 16 地点における雪の深さは 470 m である。

第 2 回目の実験を行ったスカルブスネス・シェツゲにおいては、アンテナの建設に非常に手間どったのと、受信機の故障およびブリザード等の悪天候のために、連続的、系統的な観測は出来なかったが、1 エLEMENT の長さが約 500 m の大きなデルタ型アンテナによって、

図 14 観測波形 (A スコープ), 1973年 2 月 7 日
03時37分

Fig. 14. Observing wave form (A-scope)

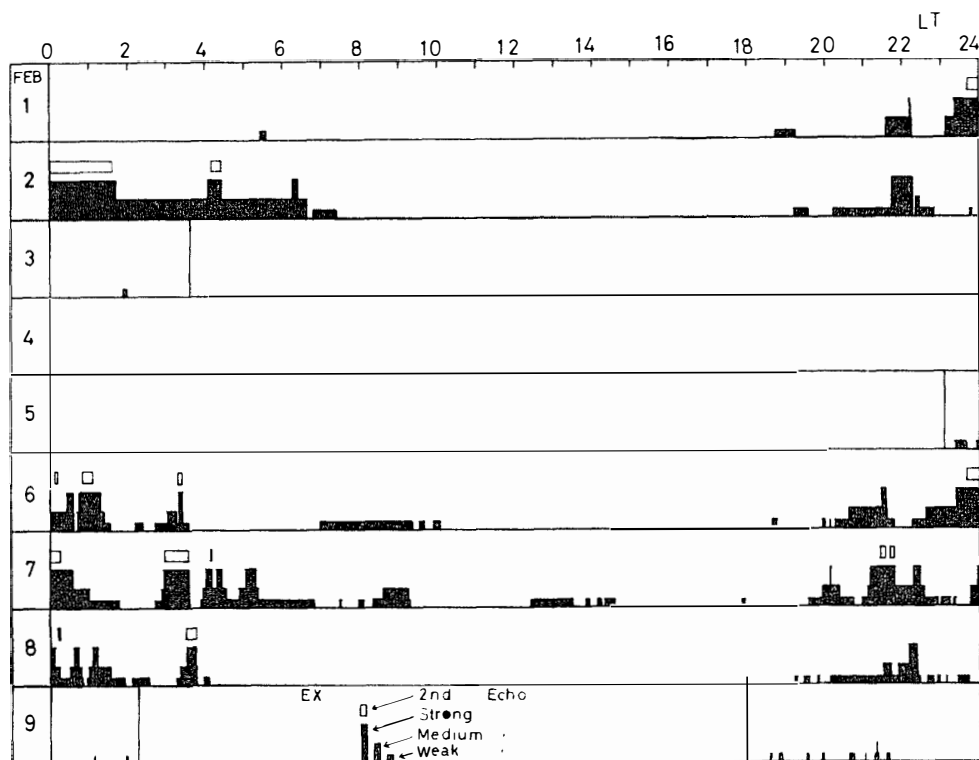
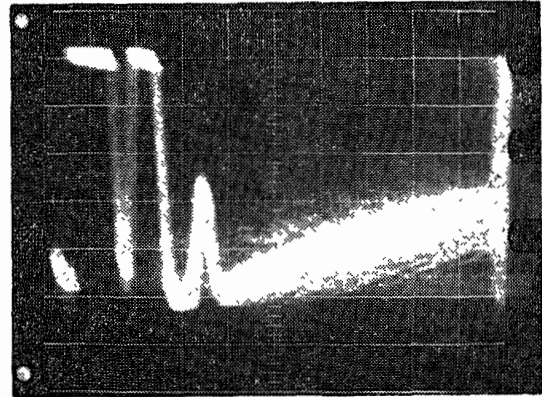


図 15 F 18における観測結果

Fig. 15. Observational results at point F 18.

周波数 150 kHz までの反射波を観測し、これによって下部電離層観測の可能性が確認できた。

次に第3回目の実験について述べる。場所は F 18 地点で、観測期間は1973年 2 月 1 日から 9 日までであったが、途中、3 日 03時36分から 5 日 23時05分まで、ブリザードのため欠測になった。この時は前 2 回の実験と異なって、フィルムに撮影する機構を整備したので、1 分間隔の連続観測を行った。実験条件はパルス幅 200 μ s, パルス間隔 5 ms, 終段陽極電圧

3 kV, 同電流 34 mA, 空中線電流 300 mA であった. 図14に A スコープの 1 例を示す. この例において, 左端に送信直接波があり, その右に第 1 回反射波が存在し, そして右端に第 2 回反射波が存在している. 縦軸は強度, 横軸は時間を示し, 1 目盛 $500 \mu\text{s}$ である. 図 15 は F 18 地点において, 200kHz の固定周波数で観測した結果である. 反射波の A スコープの波形において, 強中弱の 3 段階の区別を行った.

さて 2 月 1 日は 05 時 30 分前後を除いて, 18 時 45 分までほとんど blackout で反射波は全くなかった. その後反射波が出はじめ, 21 時頃から翌 2 日の 07 時 30 分頃まで, 割合強い反射波および 2 回反射波が存在した. そして昼間は blackout で反射波はなく, 19 時頃から弱い反射波が現われた. 6 日の午前はかなり強い反射波が存在し, 03 時 30 分頃まで続き, その後弱い反射波が 10 時頃まで存在した. その後再び反射波がなくなって, 19 時頃から反射波が出はじめ, 翌 7 日 09 時過ぎまで強い反射波が出はじめ, 翌 7 日 09 時過ぎまで強い反射波が存在した. この日は昼間にも, 弱い反射波があり, 19 時 30 分頃から再び強い反射波が現われてきた. そして翌 8 日 04 時まで存在し, 昼間は blackout になり, 19 時頃から再び反射波が現われた. 反射高に関しては, 約 105 km とほぼ一定であり, わずかな変動が認められるにすぎなかった. この結果は F 16 の場合と同じである. 9 日は 02 時 15 分~18 時 00 分迄は, 主として 50kHz の電波の発射テストおよび各種のテストを行った. 反射波の出現特性は, 昭和基地における 112 MHz のオーロラレーダーによる反射波出現特性にかなり類似しているのは興味がある (長谷川他, 1970; 城・坂元, 1973). またこの時のアンテナの特性として, 空中線電流の極大は, 230, 380, 540, 700, 840, 1000 kHz であった. また F 18 地点における雪の深さは, 752 m である. 9 日のテストにおいて 50 kHz における反射波が存在することが確認できた. 実験条件はパルス幅 $200 \mu\text{s}$, パルス間隔 4 ms, 終段陽極電圧 4 kV, 同電流 10 mA, 空中線電流 230 mA であった.

観測期間が短かいので詳細な議論は不可能であるが, ほぼ初期的段階の成果が得られたので箇条書きにすると,

- (a) 比較的小電力 (1 kW 以下) で下部電離層からの反射波が周波数 50~2150 kHz において明瞭に観測され, 静穏時およびじょう乱時の日変化が観測できた.
- (b) 雪面上ダブルレットアンテナの有効性の基礎的資料が得られた.
- (c) 大型デルタ型アンテナ (1 エレメント 500 m) の有効性についても調べることが出来た.
- (d) 極域下部電離層の変動は, 極めて活動的であることが推定された.

(e) 観測機および発電機の低温時における動作および観測可能の確認が得られた。

最後に通常、低周波サウンダーは、文献によれば出力 200 kW とか 1 MW の大出力で、外国において観測が行われているが (WAKAI, 1971; 電波研究所, 1966), 今回の雪面上のアンテナが充分有効であること, および比較的小電力で電離層が観測できることから, 多地点において, アンテナ系列を設置することによって, 電離層の微細構造, 電離雲の移動等の観測も可能になってくる. Byrd substation において, 長さ 21 mile の long wire antenna によって, 3~30 kHz, 出力 20 kW のサウンダーによって, D 領域の観測が行われているが, わが国でもオーロラ現象の関連と共に, 下部電離層を組織的, 系統的に観測できる設備を作ることが肝要である。

謝 辞

LF 観測計画および野外実験に関して, 川口貞男越冬隊長には非常に無理なお願いを何回もしたにもかかわらず, 常に適切なご指導, ご協力を頂いたことに対して感謝の意を表します. また送信部製作および野外実験においてご助力頂いた比留間徳久, 平山昭英, 山崎茂雄, 上滝実の各隊員に感謝します. さらに実験中, 色々ご援助頂いた磯崎進隊員に感謝します. そしてシュツゲにおけるアンテナ建設に関しての13次越冬隊ほとんど全員のご協力に対して深謝の意を表します.

最後に LF 観測計画にご支援頂いた電波研究所の関係者に謝意を表します.

文 献

- 電波研究所 (1966): 下部電離層物理学特集号. 電波研究所季報, 12 (63), 327-550.
長谷川貞雄・城 功・大瀬正美・竹内鉄雄・西牟田一三 (1970): オーロラ観測用レーダー装置および昭和基地におけるレーダオーロラの出現特性. 南極資料, 37, 1-16.
城 功・坂元敏朗 (1973): 昭和基地における電波オーロラの出現特性. 南極資料, 47, 46-61.
WAKAI, N. (1971): Study on the nighttime E region and its effects on the radio wave propagation. J. Radio Res. Labs., 18, 245-348.

(1973年10月1日受理, 1973年12月28日改訂稿受理)