カッパ8型11号機による電離層中の低周波電波伝播ならびに雑音の観測

前田憲一・木村磐根・高倉達雄

§1. 緒　論

電離層およびその上層中の低周波の電波雑音は，電離層下部による遮蔽効果により，地上において観測されるものとはかなり違ったものであろうと予想される．このような観点から，ロケットにより電離層中の雑音を測定する計画が立てられ，その第1号として昭和37年12月18日，K-8-11号機に受信機が搭載された．

低周波電波の，磁界の存在するプラズマ中の伝播モードは，ホイスラ空電の研究等から，かなりはっきりしてはいるが，電離層下部の透過度，電離層中でのアンテナのインピーダンス，実効長等，不明な点が多い．またロケットや人工衛星による低周波電波の観測はアメリカなどでいくつかあるが，いずれも経験が少なく観測条件もまちまちであり，受信機の必要利得や最適アンテナの決定の資料は乏しい現状である．そこで今回の実験は初回でもあり，今後の実験の参考資料を得るということを第1目的にした．すなわち

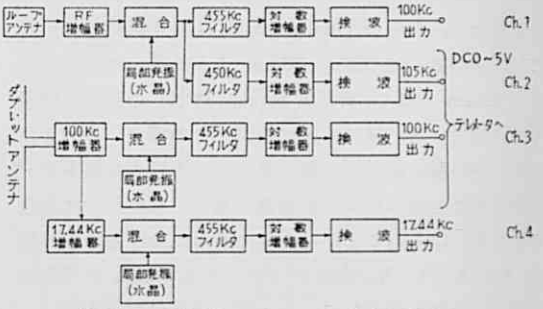
1) ループアンテナとダブレットアンテナの比較
2) ループアンテナのプラズマ中における動作の測定
3) 地上局電波の受信による伝播路，伝播損失の測定
4) 電離層中の雑音スペクトルの観測

等々である．まず 1) については 100 kc/s の雑音をループとダブレットで受信して比較，2) のためには1個の同調ループで 100 kc/s と 105 kc/s を受信，3) のためには愛知県依佐美局からの 17.44 kc/s の電信波を受信，4) は 17.44 kc/c と 100 kc/s の2周波における雑音強度から見当をつけようと考えられた．

写　真　1

第　1　表

	ch 1	ch 2	ch 3	ch 4
周波数	100 kc/s	105 kc/s	100 kc/s	17.44kc/s
帯域幅	1 kc/s			
アンテナ	ループアンテナ 直径 21 cm, 120 回巻		ダブレットアンテナ 巻尺式2本各 4.6 m	
アンテナ実効長	約 0.01 m		約 4.6 m	
dynamic range	70 db（対数的）		120 db（対数的）	
検波時定数	0.25 秒			0.025 秒
検出可能最低レベル	8×10^{-9} AT/m		4×10^{-2} μV/m	



第1図　受信機のブロックダイヤグラム

§2. 観測用受信機

搭載された受信機は四つのチャネルからなり，そのブロック図を第1図に示す．また各チャネルの特性は第1表の通りである．回路はすべてトランジスタ化されており，局部発振回路および中間周波増幅部の狭帯域沪波器として水晶を使用した．この水晶の使用はわが国におけるロケット搭載機器としては初めてであって，発射の際の衝撃に対して十分耐えうることが確かめられた．

アンテナにはループとダブレットを両用することとし，比較のため同じ周波数 100 kc/s をそれぞれ受信した．またダブレットは 17.44 kc/s と共用，ループアンテナは 105 kc/s と共用した．アンテナはロケット頭部の先端，すなわち開頭部内にもうけ，ループアンテナは巻枠をロケット胴体と同心的に配置し，開頭により外部に露出するようにした．またダブレットはスチールで巻尺状に作られ，巻き込まれて開頭部内に2個が格納され，開頭とともにそれぞれ左右に 4.6 m ずつ伸び，ロケット軸と直角方向のダブレットを形成するようにし

た．なお，このアンテナには電離層中でできるイオンシースの効果を軽減するため，表面の絶縁用としてシリコンのエナメルを塗布した．

ダブレットアンテナは全長 9.2 m であって 100 kc/s, 17.44 kc/s 両波に対してほとんど容量的で輻射インピーダンスは無視できる．しかるに電離層中では誘電率 ε が等価的に増し，容量がそれだけ増してインピーダンスが低下する．そこで受信機の入力回路は低インピーダンスで整合がとれるよう調整された．このようにした場合，地上ではミスマッチングのため 40 db ほど利得が低下した．

ループアンテナは同調型として使用し，その Q を約 30，中心周波数を 102.5 kc/s とし，同調カーブの両裾の 100 kc/s と 105 kc/s を受信する．もし電離層中で同調がずれるならばそれを検出できるはずである．

受信機の時定数は第 1 表に示したように ch 4 だけ他のチャネルより 1 桁小さいのは ch 4 は地上から送信された電信々号を受信するから，その波形を忠実に記録させるためである．地上局は愛知県刈谷市にある依佐美送信所 (137°01′11″E, 34°35′40″N) (コールサインは NDT) であって，ロケット発射点 (131°04′45″E, 31°15′0″N) の北東約 700 km にあり，出力 260 kW，周波数 17.44 kc/s である．なおロケット発射点では電界強度測定機によりこの電波を受信し，その出力を ch 4 のテレメータ出力と並べてペンレコーダで記録した．NDT の信号は地上で 1 mV/m (60 db) であった．

§ 3. 観測結果

K-8-11 号機の発射は 1962 年 12 月 18 日 1403 JST に行なわれた．飛しょう時間は約 440 秒，落下まですべての機器は正常に動作した．

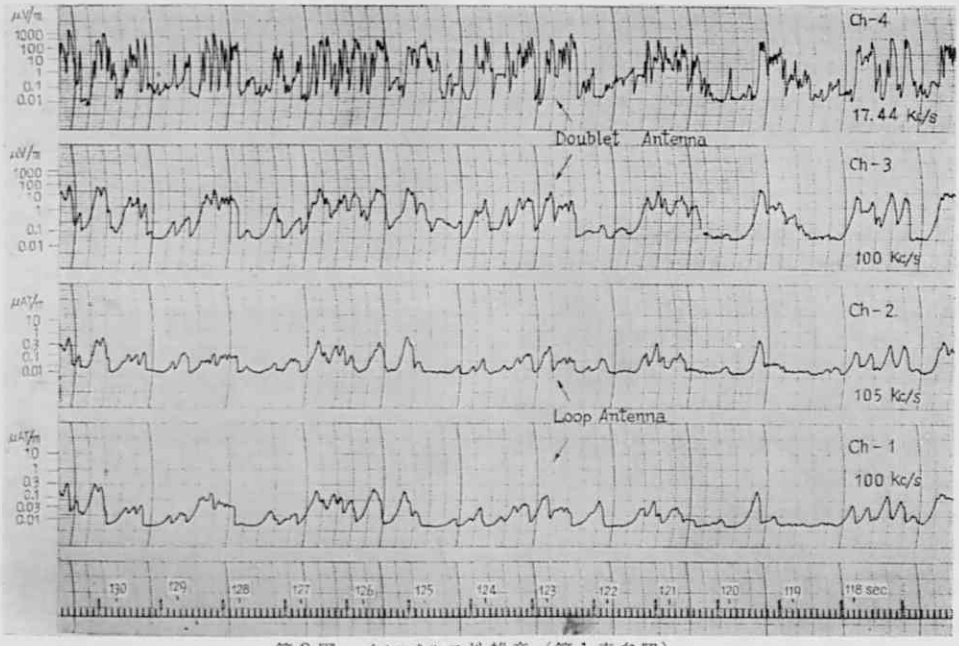
ロケットの開頭は発射後 79.6 秒，地上 95 km において行なわれ，露出したループアンテナおよび伸びたダブレットアンテナにより，各チャネルとも受信を始めた．ロケットは約 230 秒後に最高高度 202 km に達し，下降時は 421 秒以後すなわち地上約 40 km 以下でテレメータが焼失して記録がとれなくなった．この間すべてのチャネルでかなりの強度のインパルス性雑音が，また ch 4 では同時に NDT の信号が受信された．以下これらを詳述する．

(1) インパルス性雑音

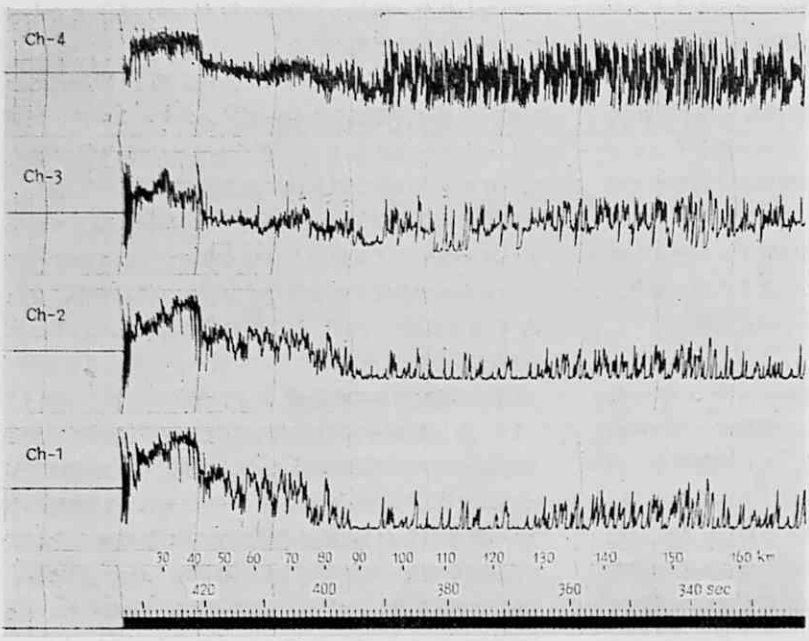
i) 地上高 95〜202 km においては，第 2 図に示すように四つのチャネルにまったく同じインパルス性雑音がはいっているのが特徴である．パルス高は，時定数の小さい ch 4 (17.44 kc/s) が最大で，せん頭値は 1.8×10^4 μV/m (ただしバンド幅 1 kc/s)，インパルスの幅は最小 0.025 秒以下であって，パルス幅の広いものは，このような細いインパルスの集積であろうと思われる．

一方 ch 3 (100 kc/s) では，インパルスの波高値は時定数が大きいため ch 4 より低くなるが，インパルスの集積が多くパルス幅が見かけ上 ch 3 の時定数 0.25 秒より広いような場合のみに着目して ch 4 と比較すると，ch 4 (17.44 kc/s) の電界強度は ch 3 (100 kc/s) より平均 8 db 程高い．周波数による屈折率の違いを考慮すると，パワーフラクスでは，約 11.5 db の違いとなる．これがこの雑音の周波数特性 (スペクトル) である．

ii) インパルス性雑音のレベルは必ずしもランダムではなく，50 秒程度の周期で変動し，またときどき 3〜5



第 2 図　インパルス性雑音 (第 1 表参照)



第3図 下降時 90 km 前後で雑音の性質が変わることを示す
(第2図，第1表参照)

秒くらいの時間，受信機自身の雑音レベル以下にまで低下する．これらはロケットの歳差運動（周期 50～60 秒)[1] と必ずしも同期していない．またスピン（周期1.5～4 秒）との相関もあまりないようである．

iii) 地上の電界強度計は 3 mV/m～0.1 mV/m の範囲が対数的に圧縮してあり，バンド幅は 300 c/s であるが，この受信機の 17.44 kc/s の出力には ch 4 と対応するインパルス性雑音は見つからなかった．

iv) 下降時，地上 92 km (391 秒) から雑音の性質がまったく変わっているようにみえる．雑音レベルはこの高さで急激に低下し，その後下降とともに徐々にレベルが上昇する（第3図)．

v) 100 kc/s と 105 kc/s では本来それほど雑音レベルに差があるはずはないが，地上でのショックテストの際に同調がずれたらしく，雑音は終始 ch 2 (105 kc/s) の方が ch 1 (100 kc/s) より高くなった（約6～10 db)．しかし，これはループアンテナが電離層中で離調したためではない．

vi) 一般にループとダブレットを比較すると，電離層中で整合がとれるようにしておけば，ダブレットの方が圧倒的に実効長が大で良い．ただダブレットは電離層の下部で全利得が高さにより変化することを考慮する必要がある．

(2) インパルス性雑音の生因

まず考えられる源は，ホイスラ空電のように南半球の雷によるもの，という仮説を立てることができる．しかしこれはつぎの理由で棄却せざるを得ない．すなわち雷放電の電波のスペクトルは，17 kc/s が 100 kc/s より約 14 db 高い[2]．またこの電波が南半球の電離層を一度通過する際の減衰は筆者らの計算によると[3]，18 kc/s 55db，100 kc/s 160 db でその差は実に 105 db となり，両周波数で計約 120 db でなければならないが，先述のようにこの差は約 12 db に過ぎない．

そこで，この雑音の生因として，まず考えられることは，

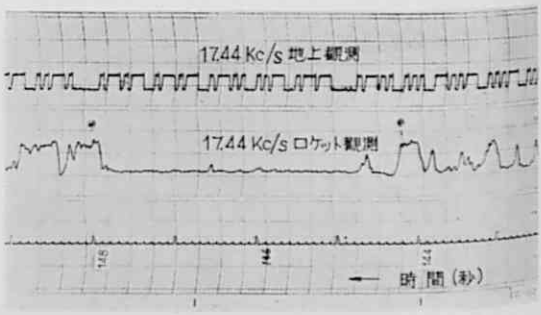
1) イオンシースの間歇的なブレイクダウンによる雑音の発生，

2) 流星による電波輻射の二つであるがいずれにも問題があり，またその機構もよくわかっていない．Mechtly および Bowhill[4] が，512 kc で，400 km 以上の高さにおいて，大きな変動を伴う強い雑音電波が受かったと報告しているが，ことによると同じような生因によるものかもしれない．

(3) 依佐美電波 (NDT) の電界強度

依佐美の電波 (NDT) が受信され出したのは地上 112.5 km からであり，下降時は 92.5 km まで検知され，それ以下ではまったく検知されなかった．受信された場合でも信号は雑音に比べ非常に弱いので，インパルス性雑音のあるときには，信号はマスクされてわからなくな

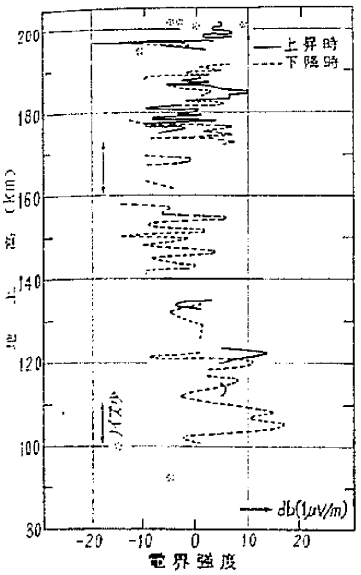
第4図 (a) 依佐美信号の記録例



第4図 (b) 低雑音レベルにもかかわらず依佐美信号不感の例

る．逆に，一般に雑音レベルが下がると，信号は非常に良好に受信された（第4図(a)）．ところが時に，雑音レベルが低いにもかかわらず信号も受信されないこともしばしばあった（第4図(b)参照）．

NDT の信号レベルは一般にかなり深いフェーディングをしており，その変動は 25 db/秒 にも達する．この原因は伝播路の相違したいくつかの波の干渉性フェーディングか，あるいはダブレットアンテナの形の不安定性によるものであるかよくわからない．ロケットのスピンとは無関係のようである．



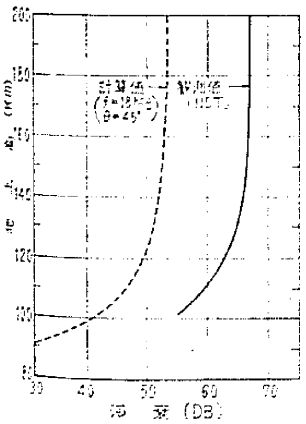
第5図　依佐美電信の信号レベル

いま NDT の信号強度の各1秒間中の最大値をとって高さ変化をみると第5図のようになる．

地上における電界強度は，先述のようにマーク時 1 mV/m (60 db) であったが，地表付近では電界が弱まるから，電離層の直下での電界は送信電力 P(W) と送受信点間距離 d(m) による下式

$$E=3\sqrt{5}\sqrt{P}/d \ \text{[V/m]}$$

を用いて計算すると $E=5$ mV/m すなわち 74 db となる．いま第5図の下降時に対して，その強度の包絡線を作り，それを高さに対する電界強度の観測値として，地上の 74 db からの差を求めると第6図の実線のようになる．これを解釈するために，Leiphart 等が用いたモデル電離層[5] に対して地上からの 18 kc/s の電波のうける減衰の高さに対する累積値を計算すると第6図破線のようになる[3]．ただし電波の波面の法線と地磁気のなす角 θ を 45° とした．$\theta=45°$ は発射場鹿児島付近では妥当な値である．第6図の両カーブを比べると一方を 12〜3 db 平行移動すれば非常に良く一致する．すなわちこの差は電波が自由空間から電離層に入射する際の分反射等で失われる部分を示していると考えられる．前田・大家の計算[6] によると，電離層下部がシャープな境界と仮定した場合にこの損失は 25〜30 db 程度である．



第6図　減衰の累積値

§4. 結　　言

ロケットによる電波の観測は，われわれにとっては初めてのことでもあり，暗中模索で，たとえわずかでも新しい結果をつかみたいと思い大分慾張った試みをしたが，幸運にもすべての装置が正常に動作し記録は 100% とることができた．ただ実験の未経験から不手際も多く，これらすべての記録から定量的な結果を出すことが無理なところも少なくなかったが，全般的に見てこの方面の実験に対する貴重な経験を得ることができ，今後の実験に大いにそれを生かしてゆきたいと考えている．

謝辞　この実験は，東京大学生産技術研究所高木教授，糸川教授を初めとし，生研ロケットグループのご協力によって初めて実現したものであり，ここに関係の方々に深甚な謝意を表する．また依佐美局の電波については，電気興業株式会社および横須賀米海軍通信隊の方々に対しご協力を深く感謝する．

搭載した受信機の製作，調整は明星電気株式会社に依頼したが，特に瓜本，田辺両氏のご協力に負うところが大きい．

観測結果の検討に際しては東大畑中教授，京大大林教授，大家寛氏，名大空電研金原教授，プラズマ研高山教授，神戸大仲上教授等々の方々から有益なご討論をいただいた．あわせて謝意を表する．(1963 年 4 月 2 日受理)

文　　献

1) 加藤・青山：生産研究 Vol. 15, No. 7, p. 127 (1963).
2) D. J. Malan: Recent Adv. Atmos. Elect., 557 (Pergamon Press, 1958).
3) 前田・木村・高倉：通信学会，電波伝播専門委資料（昭和 38 年3月 20 日）.
4) E. A. Mechtly and S. A. Bowhill, J. G. R. 65, 3501, 1960.
5) J. P. Leiphart et al: NRL Report 5721 (1961).
6) 前田・大家：通信学会　電波伝播専門委資料（昭和 38 年3月 20 日）.