

# ELF 帯 空 電 の 受 信

佐尾和夫 神藤英彦 山下享子

## 1. ま え が き

ELF 帯とは 3 kc/s 以下約 1 c/s までの周波数を指すようであるが、まだはっきりした定義は示されていない。上の定義に従ったとき、この周波数帯にはいわゆる空電波形の slow tail と呼ばれる数 100c/s の成分が先づ考えられる。従って雷放電にはこの周波数帯信号の発生源は非常に多いことになるが、周波数を順次下げて考えてゆくと、果して雷放電からどの程度の低い周波数まで放射するものであろうか、あるいはまたそれらはどんな伝はん様式に従って受信されるものであろうかと言う疑問が生じてくる。そこで従来当所で研究を継続して来た VLF 帯空電波形の研究を拡張する必要性を感じた。ところで ELF 帯は VLF 帯にくらべて著しくその測定技術も異なるので、2 年ほど前から先づ測定方法の検討、測定機の試作を始めその後改良を続けて一日も早く ELF 帯空電を受信することを目標に鋭意測定機の準備に没頭して来た。ところで、この周波数帯域では後述のように雷放電双極子放射のとき、極めて波長の長い成分は電離層と大地で作られる球殻による空洞共振の可能性があり、我々としても一応この共振周波数附近から着手することとした。これは約 10c/s を基本次数とするものであり、高次振動も考え、かつ 60c/s の電力線周波数による妨害も考慮して、1 c/s~40c/s の周波数範囲で波形を測定することを目標とした。波形を測定することの意義は従来の VLF 帯空電波形の研究を拡張する意味もあったが、一層重要な理由は、局地的な人工雑音と区別して真に ELF 帯空電受信の確認を得るためには波形で判定することが最も確実であろうと考えたからである。

さて次に緊要不可欠の問題は ELF 帯空電観測に適した地点を見つけることである。VLF 帯空電に比して著しく電界強度が低いので、測定機の感度を上昇させると同時に局地的な人工雑音や電力線の誘導による雑音を極力避けなければ満足な受信はできない。そこで既に約 1 ヶ年測定機の改良と併行して測定地点の選定に意を用いた。愛知県北設楽郡の本学農学部附属演習林、愛知、静岡県両県境の太平洋岸、三河湾内の無人島等人里離れた

地点を選んでは本測定機を持ち歩いて測定したが、予想外に雑音の多いのが常であった。本年(1962年)8月になって漸く静岡県小笠郡大浜町千浜の砂丘が我々の現在の要求を充している地点として選定され、更に鳥取県鳥取の砂丘もこれに次いで観測に好適な地点として決めることができた。以上は我々が ELF 帯空電の研究を開始した目的と研究開始以来の経過の大筋を述べたものである。

## 2. ELF 帯空電研究の概観

ここで ELF 帯空電研究に対する世界の現状を概観してみよう。前述のように ELF 帯の中には空電波形のいわゆる slow tail も含まれているのであるが、本文では特に 40c/s 以下の周波数帯域を研究の対象としている関係上、ここでは slow tail を割愛してそれより低い周波数領域について簡単に眺めてみることにする。

ところで、本周波数帯の特徴をかかざると、先ず第一に波長が極めて長いために相当遠距離でも放射界より誘導界あるいは静電界が卓越していることが考えられる点であり、第二に電離層の高さが VLF 帯より高いことであって昼夜とも E 層で反射すると考えてよい<sup>(1)</sup> ことである。

そこでまず観測結果に着目して発生源別に分類してみると、A) 空中電気現象として、B) 雷放電に伴う電離層大地間空洞共振現象として、C) ハイドロマグネチック放射としての 3 種類になる。このうち A) 空中電気現象と言うのは大気中の空間電荷(雨滴、尖端放電々荷、地中放射能による電離された大気イオン)の不均一な移動に基づく静電的な空中電位傾度の細い脈動に起因すると考えられる電界である。この方面の研究には、電離層大地間の空洞共振現象の存在を主張した Schumann<sup>(2)</sup> 門下の König<sup>(3)(4)</sup> 等の研究があるが Schumann の予言した周波数の振動波形を確認する目的で研究を開始したものであった。ところが観測結果は 10c/s 前後あるいは 3 c/s 前後の振動波形は得られたが、8~9 s/s の正弦波的な信号は天候の良いときには強度が強い性質があり、また 2~6 c/s の不規則的波形の信号も同様に天候

と関係があって、低い雲に蔽われたときに特に受信され、また気温とも関係している点が指摘されている。あるいはまた、日出時から約1時間に観測される9c/sの不規則的波形も年間を通じて半年以上みられると言うような事実は局地点な空中電気の要素を含んでいるものと考えられ、気象と密接な関係のある空中電場のELF帯における空間電荷の移動に基づく脈動を強く受信した結果ではないかと推察される。次にB)雷放電に伴う電離層大地間空洞共振現象としてのELF帯信号については測定結果が果してこの共振々動を受信したものかどうかについて疑問がないではない。まずLargeとWormell<sup>6)</sup>によれば20c/s同調受信機でELF帯空電の電界強度を受信したとき、その積分電界強度の日変化曲線は全世界雷活動の日変化曲線と概略類似しており、すなわちこの周波数では世界的な落雷をほぼ受信していると言えるのであるから、この分類に入るものであろう。更に組織的な研究はBalslerとWagner<sup>6)</sup>によって行なわれた。雷雨等気象擾乱のない日だけ測定がなされ、信号は磁気録音され、これを計算機にかけて電力周波数スペクトルを求めた。このように周波数分析したとき、共振の1次振動は地方時の02時、08~10時、14~16時の3回に極大値を持つが、これらの時間はその月に世界中で最も雷活動の激しかった南米、アフリカ州、フィリピン南方の3地帯の地方時午後4時頃に概当すること、しかしその中で観測地点から地球中心において挟む角90°の大円上は1次振動の共振々幅が0になるので、広汎な前記3地帯からそれに該当する区域を除いたものが1日3回の前記の極大値と時間的に完全に一致しているのである。同様な考え方で電力周波数スペクトルにおける各高次の振動強度の時間的変化も説明づけている。またPolkとFitchen<sup>7)</sup>も同様の目的でELF帯磁界の測定を行ない、地磁気擾乱時に8~10c/sが多く観測され磁気嵐との相関性は著るしい。そこでこの結果は空電源を雷活動に求めるよりはむしろ何等かの理由により発生した磁気嵐時の励振が空洞共振を起したものと解した方がよいかも知れないし、また次のC)に關聯するものであろう。C)ハイドロマグネチック放射によるものについての研究はTepley<sup>8)</sup>によって行なわれた。磁気嵐や太陽活動の激しかった時期の観測結果であって太陽の静かなときに較べて振幅が大きく、従って異常な太陽活動によるものであることが明白であること、またこの種の波動が認められるときはF層の電子密度最少の時期であり、更に電子密度の低い夜間にだけ観測される事実から、電離層の上で発生したものがハイドロマグネチックに下方へ伝ばんしたものであると仮定して説明できるわけである。この

振動は雷放電パルスが源ではないから数時間にわたって連続する波形であり、周波数は1~5c/s程度のものようである。

さて理論面の研究は言うまでもなく、電離層大地間の空洞共振現象についてはSchumann<sup>2)</sup>の論文があるが、近時VLF帯電磁波の伝ばん理論を拡張してELF帯に適合するように誘導されたWait<sup>9)10)</sup>の理論が相ついて発表されている。しかし何れもこれらの理論に対する合理性については今後の正確な実験的研究にまたなければならぬ。

なおこのような極めて低い周波数の工学的応用については比較的遠距離に発する空電を垂直ループアンテナで受信してその偏波状況を測定することにより、地中の鉱脈その他の探査に応用しようとする試みである。要するに探査のエネルギー源として雷放電に発する空電を用い、飛行機上あるいは地上で移動しつつ偏波を測定してその急変から地下探査を行うのであるが、空電は言うまでもなく一日の間にも強弱の日変化があり、また一年の間にも年変化があつて決して一定ではなく測定は容易ではないであろう。ELF帯のような低周波数を用いる理由は第一に空電発生源の距離が遠くなり従って受信箇數も多いので電界強度も割合安定する傾向を持つこと、第二に周波数が低い程地下深部に電波が到達し、深部の探査に有利な点があげられる。しかし何れにしても測定地点の近くに雷放電がないことが条件であり、測定は地理的、季節的、時間的に制約を受けることになる。古くはWait<sup>11)</sup>がまた近くはWard<sup>12)</sup>がこの方面の研究を行い、Audio Frequency Electromagnetic Method (自然変動磁界法)すなわちAFMAG法と称している。米国では商品化されている模様であるが、まだ将来の問題であろう。

### 3. 測定技術と予備的観測結果

前述のように、当所としては先ず数10c/s以下の周波数に着目することとした。

先ずアンテナ系としては垂直アンテナ、棒型アンテナ等が考えられるが、垂直アンテナは大気中の空中静電界の脈動も共に受信する可能性があり、またこのように低い周波数ではアンテナ出力の結合回路で、高湿度の我が国では高抵抗値に限度があり、そのため利得を著るしく低下させることになり好ましくない。更にアンテナ系の振動により容量変化のため出力が変動することもあって不利である。次に棒型アンテナは同時に地球磁界の脈動も受信することになり、我々の第一目標とする雷放電に

発する ELF 帯空電の受信には一応あともわしとした。ところで本文で用いたものは Erdantenne<sup>3)</sup> であって、電極には直径約 10mm、長さ約 50cm の真鍮棒を用い、これを 100m 以上離して地中に埋め、この両端の電圧を同軸ケーブルで受信機の入力端子に接続するものである。この際両電極に生ずる電位差は、もし垂直偏波で伝ばした電磁波であるならば、有限の導電率大地に起因する forward tilt の水平成分による電位差が受信され、また空洞共振による電磁振動なら、共振電磁界による大地表面の電流を測定するものと考えられる。兎も角も ELF 帯においては Erdantenne は地中に存在するために入カインピーダンスが低いので増幅回路の信号対雑音比を上げるのに有利であり、また垂直アンテナの場合のように利得を低下させることもなく、微弱な電界強度の信号の受信には極めて有利である。ただしこのアンテナではいわゆる地電流（この周波数帯域に地電流の成分が

どの程度含まれるかについては不明である）を同時に受信するものと考えられこの点は注意を必要とする。

次に測定機については野外の任意の土地で測定できるようにするため電池とトランジスタ回路による受信機と携帯用録音器で ELF 信号を録音する形式とした。図 1 のブロックダイアグラムはこれを示している。先ずあらかじめいわゆる VLF 帯空電を遮断するための 300c/s の低域ろ波器を通して適当に増幅し、一方はそのままオシログラフで目視あるいは写真撮影ができるようになっている。また他方信号を録音する回路では 500c/s の一定周波数で ELF 信号をパルス幅変調して録音することにした。従って変調後の信号の波形歪みを避ける意味で 40c/s の低域ろ波器を用いている。録音器は市販の最も小型の携帯用（リール直径 3 吋）の一部を改造したものである。第一チャンネルに ELF 信号を、第 2 チャンネルに JJY 信号と VLF 帯空電の検波出力の音をマイク

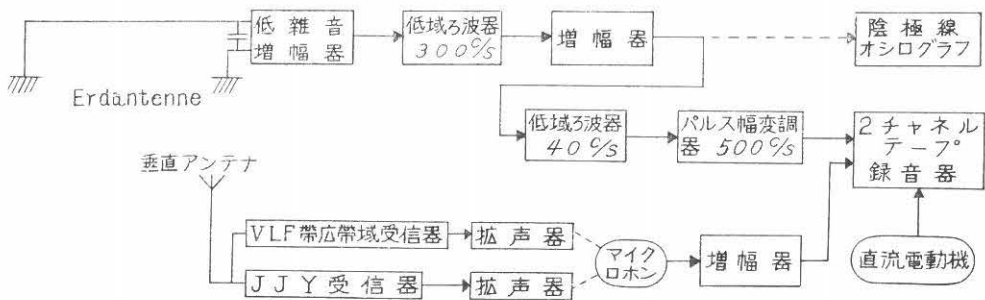


図 1 携帯用 ELF 帯空電波形記録装置ブロックダイアグラム

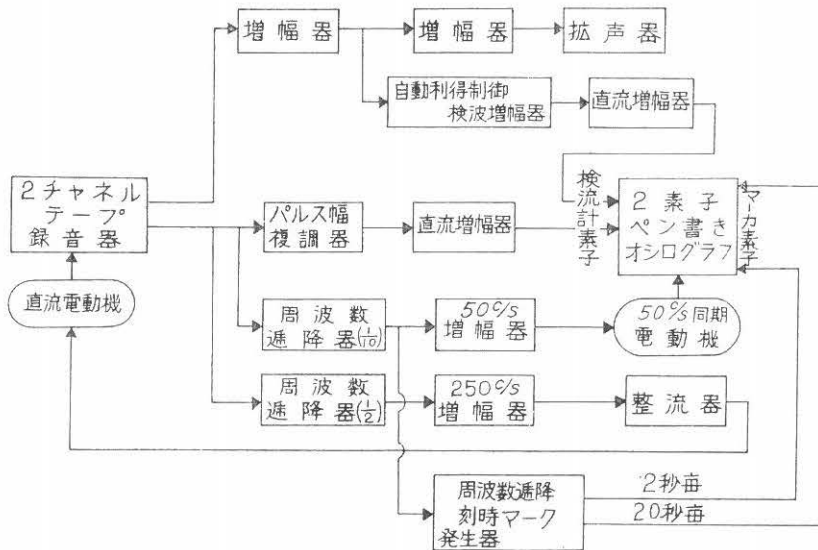


図 2 ELF 帯空電波形再生装置ブロックダイアグラム

ロホンを通して録音することにした。次に実験室内に置く波形再生装置であるが、図2のブロックダイヤグラムはこの系統図である。再生された500c/sパルス位置変調波は当然復調回路を経て直流増幅をしたのち、ペン書きオシログラフに接続されELF信号波形を再現させるのである。ところでELF信号を測定するとき、電池の消耗その他機械的な原因により録音器の直流電動機の回転数は一定ではない。それ故録音時と同じ回転速度で再生されるための自動制御回路を必要とする。すなわち再生された500c/sのパルス連は周波数通降器を経て250c/sとなし、次の増幅器に入る。この増幅器の入力周波数対出力直流電圧との関係は負の勾配の特性を持っており、もし再生時の回転数が録音時の回転数より早く、再生時の周波数が250c/sより高くなれば、出力電圧を減じ直流電動機の電源電圧が低下して回転を落とし、この逆の場合は直流電動機の回転数を上げるように働き、正確な500c/sの再生を確保できるよう自動制御するようになっている。しかしまだ録音器の細かい回転むらが存在し、この補正をするために更にもう一つの回路がある。それは500c/sの再生電圧は1/10に周波数を通降させ、ここで50c/sとなし、これを電力増幅して50c/sの同期電動機でペン書きオシログラフの記録紙の送り速さを制御するものである。このようにすれば録音器の録音時における時々刻々の回転数に比例した記録紙送りをあたえることが出来て、記録紙上にあらわれた記録の時間々隔は一定に保つことができる。このようにして録音された波形は実験室内で再生後も記録紙上では正しい波形を再現させることができるわけである。

一方、ペン書きオシログラフの第2検流計素子には、録音テープのもう一つのチャンネルに録音されているVLF帯空電受信のパルス音ならびにJJY受信音が再現されるが、この両者は幸いにも夫々反対符号に振れるので重畳して同一のペンで書かせても間違えることはない。図に示すようにこのチャンネルは一旦増幅後、拡声器を鳴らすと同時に、また一方は利得自動制御を施した1,000c/s増幅器を経て直流増幅後ペン書きオシログラフの第2検流計素子に導びくことになる。これにより記録紙の上では第1検流計素子のELF信号波形と並行にJJYによる1秒毎の時刻のパルスとVLF帯空電の受信

を知らせるパルスを第2検流計素子により画かせるわけである。

なお、ペン書きオシログラフには更にマーカ素子が2箇附属されており、記録紙の最外縁両端に簡単なマークを打つことができる。そこで500c/sを $1/10^3$ と $1/10^4$ 倍に周波数通降して夫々2秒、20秒毎に一回ずつパルスを発生させ、これにより記録紙上でELF波形の位置(時刻)を明確にするようになっている。そして特に着目すべき波形に対しては後刻改めて再生する場合の便宜のために再生装置の見やすい位置に計数放電管の指示により再生中の録音テープの刻々の位置を明示できるようになっている。

以上は測定機の回路構成並びに動作機構について述べ

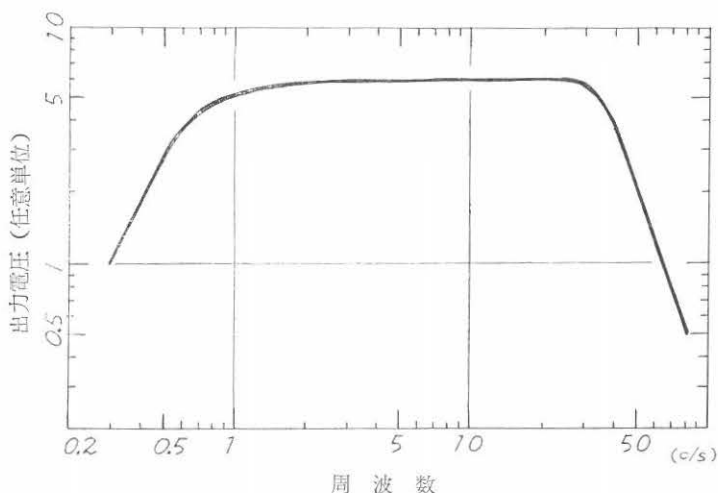


図3 ELF帯空電波形測定系の総合周波数特性

たものであるが、最後に録音ならびに再生全回路に対し、すなわち第1検流計素子出力までの総合周波数特性を示すと図3のようになる。これで見ると3dB低下までの通過帯域はほぼ0.5c/s~40c/sと言うことができELF帯波形測定の所期の目的を達成していると言える。

最後に予備的観測結果として1962年9月12日~13日、延べ時間にして約40分間にわたり干浜、鳥取両砂丘にて同時観測された波形を挙げておく。図4はこの数例を示したものであって、ここに掲げたものは個別的な波形である。一方ELF帯空電は非常に広汎な世界各地から受信されるものと仮定すれば、それらは極めて数が多いので時間的には相継いで不規則的に受信される一種のランダム雑音波形を形成すると考えられる。その場合若し雷撃主放電から発する空電だけが受信の対象であるとすれば、世界中での毎秒の落雷数は平均して10個であると考

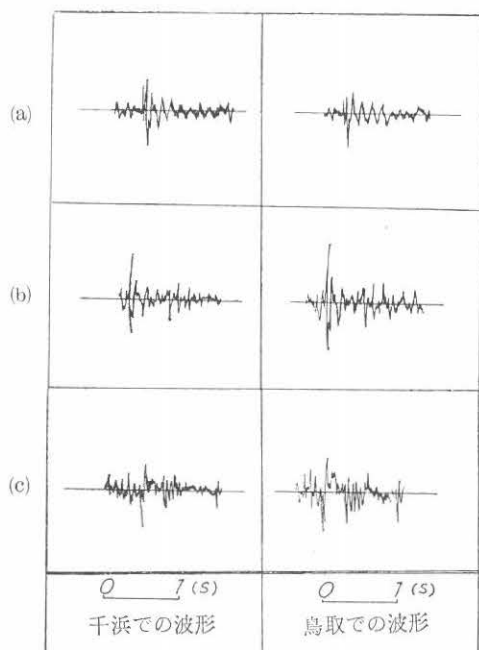


図4 代表的ELF帯空電波形

えてよく、換言すれば10c/s程度のランダム雑音波形を形成すると考えられるかも知れない。従って当所の観測結果もこのようなランダム雑音波形の中に上記図4に示した個別的な波形を見出した訳である。図4(a)は割合円滑なもので8~9c/s、(b)もほぼ類似の周波数であるが稍複雑化している。(c)は約20c/sを含んでいるものであるが、これらはどれも当然のことではあるが、千浜、鳥取両地点の波形は極めて相似の形態であり、興味深い。

#### 4. あとがき

本研究は当所の空電波形研究の一環として開始したものであり、まず如何にしたらELF帯空電を受信出来るかと言う点に主眼点をおいて鋭意測定機の試作研究とその改良にまい進して来た。一方において観測に適当な土地を選定する必要があり、この両者の目的は並行して達成しなければならないので、現在の段階に達するまでに

相当の月日を費したわけである。しかし現状は本格的ELF帯空電研究の全くの序の口であり、今後得られる観測事実や、また観測方法の改良などを順次試みて新しい研究成果を期待しつつ着実に前進したい。

本研究開始以来終始御激励と御指導をいただいた当所所長金原教授に厚く感謝の意を表したい。また観測その他に対して援助された林光子嬢の努力も感謝している。猶観測にあたっては鳥取大学砂丘研究実験所の御好意により円滑に実施できたことも感謝の外はない。最後に本研究に対して昭和35年度、36年度ならびに昭和37年度において東海学術奨励会の御援助を受けたことも併せて記して厚く御礼申し上げる。

#### 文 献

- (1) Pierce, E. T.: Proc. IRE, **48**, 3, (1960)
- (2) Schumann, W. O.: Z. für Naturforschung, **7a**, Feb., (1952)
- (3) König, H. L.: Z. für angew. Physik, **11**, 7, (1959)
- (4) König, H. L. et al: Z. für angew. Physik, **13**, 8, (1961)
- (5) Large, M. I. and Wormell, T. W.: Rec. Adv. Atmos. Elect. (Pergamon Press) (1958)
- (6) Balsler, M. and Wagner, C. A.: J. G. R., **67**, 2, (1962)
- (7) Polk, C. and Fitchen, F.: J. Research NBS, **66D**, 3, (1962)
- (8) Tepley, L. R.: J. G. R., **66**, 6, (1961)
- (9) Wait, J. R.: J. Research NBS, **64D**, 2, (1960)
- (10) Wait, J. R.: J. Research NBS, **64D**, 4, (1960)
- (11) Wait, J. R.: Overvoltage Research and Geophysical Applications (Pergamon Press), (1959)
- (12) Ward, S. H.: Geophysics, **24**, 4, (1959)
- (13) Grosskopf, J.: NTZ, **9**, 6, (1956)

