

# 電離層反射型空電波形から推定したVLFに 於ける電離層の高さ

佐 尾 和 夫

## I. 緒 言

空電波形を利用して空電源の距離を算出し、又電離層の見掛けの高さを求めることは従来各研究者により発表されているが、空電波形を利用することには限界があり、実際には困難性が多いように見受けられる。当所では昨年6月の日蝕を中心として空電の観測を行ったが、6月は夜間E層の反射係数が高い時季であるので、夜間に観測された波形約600枚中殆んど全部は電離層反射型と言っても良く、従つて筆者は中でも良好な空電波形を用いて電離層の見掛けの高さを求めようと試みた。

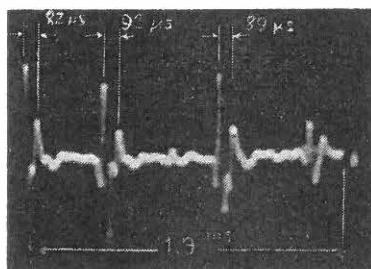
先づ昼間と夜間とに分けて述べると、昼間に就いてはこれ迄未だ発表されていない peak 性で継続時間の短い型式の波形に着目して、これが簡単な電離層反射理論に適合することを見出し、それからD層の高さを略々求めることが出来た。次いで夜間波形に対しては主に rounded long oscillatory train type 波形に着眼して、波形の一連の各 peak が夫々実際に電離層反射を繰返して到達した時間と、電離層高を仮定することにより計算上期待される反射波到達時間との差から、その値が、用いた全波形の総ての peak に就て最小なる時の電離層高を求めることにより決定したものである。以下空電波形の型式に分けて記述しよう。

## II. short duration peaked type 波形（昼間）

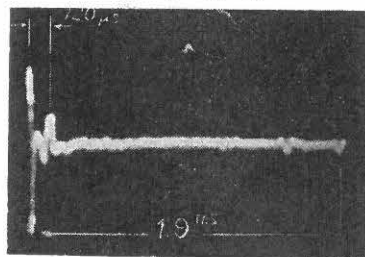
昼間に観測される波形は一般的に数個の滑らかな減幅振動からなる所謂 smooth daytime type であつて、U. R. S. I. の 1954年の会議では距離 1000km 以内に発する典型的昼間波形が、簡単な電離層反射理論に適合するかどうかを検討するよう提案されている。このことから筆者は昼間でも電離層反射理論で説明づけられる波形があるのではないかと考え、上述の典型的昼間波形とは異なるが、第1図AおよびBに示すような最初2つの peak は判然と観察出来るが、それ以後の peak は振幅が極めて減小し殆んど見られないような型式の波形に着目し、short duration peaked type

と命名した。そこで最初の peak を雷放電による pulse の地表波によつて伝播された波と考え、又第2番目の同符号の peak を電離層で2回反射して到来した空間

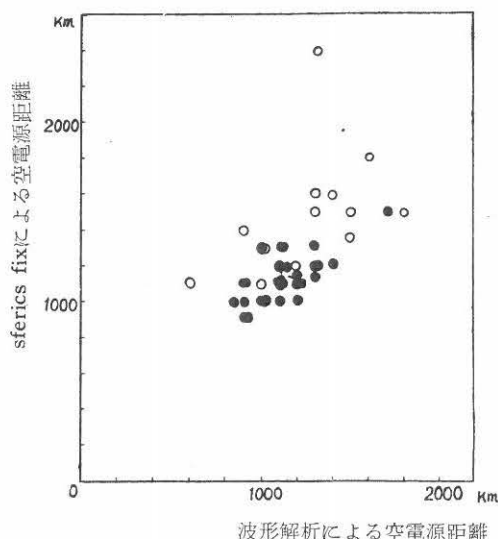
第 1 図 A



第 1 図 B



第 2 図



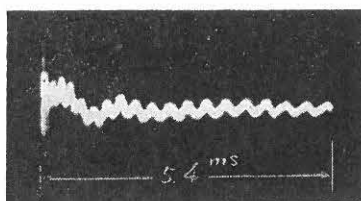
波と仮定する時、両 peak の時間差から簡単な反射理論に当てはめて空電源距離を算出することが出来る訳である。この様にして得た距離と sferics fix による空電源の距離とを比較する時、9 時より 16 時頃迄の間に観測された 42 枚の波形から、第 2 図に示したように割合一致した結果を得ることが出来た。この図で●印は特に sferics fix が相当信頼出来ると考えられる交角  $30^\circ$  以上のものである。そして若し電離層高を 70 km と仮定して波形解析による距離を求めると、全般的に約 2 割遠くなることから考えても、65 km の反射高は確からしいと言える。但しこの場合電離層で 1 回反射して到達する第 1 次反射波は地表波に接近して反対符号を持つていると考えたいのであるが、極めて接近している為に peak 間隔を正確に測定することが困難で、反射理論に適合するか否かを確かめることは出来なかつたし、又、第 3 次反射以後の波は殆んど観察出来ないで、これも確かめることが出来なかつた。昼間 D 層の反射係数は極めて小さいことから考えても、電離層反射波は次数の増加につれて振幅が急に減衰することが想像される訳である。以上の場合波形解析により空電源の距離を評価する精度は、焼付けた写真波形の読取誤差を線の太さから考えて、高々  $\pm 20 \mu s$  と見做せば充分で、従つてこれから距離を算定する時大略  $\pm 15\%$  以内に収まることが言えるので、第 2 図の結果にその程度のバラツキは見られるが信用出来ると考えて良い。そしてこの種の波形は距離に於て 1,000 km から 1,500 km の範囲内に発生していることが判る。

猶 Cambridge 大学の研究者達の長波による D 層測定結果は、continuous-wave method により反射の位相変化が  $\pi$  であるとすれば 67 km の高さとなり、反射に位相変化がないとすれば 75 km の高さになると報告しているが、筆者の結果はその前者に良く一致するものと言える。

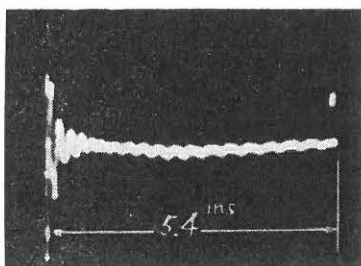
### III. long oscillatory train type 波形（夜間）

この型式の波形は一般的に遠距離に発するもので、従つて振幅も小さく従来当所では観測出来なかつたのであるが、最近測定機を改造して性能が向上した為に受信可能となつたものである。又その数は夜間でも特に 21 時よりは 0 時の観測に多く、long oscillatory train type 波形の観測された総数は rounded long oscillatory train type が 53 枚、peaked long oscillatory train type が 4 枚となつていたので、殆んど総ては rounded long oscillatory train type と考えて良く、その例は第 3 図 A および B に示されている。

第 3 図 A

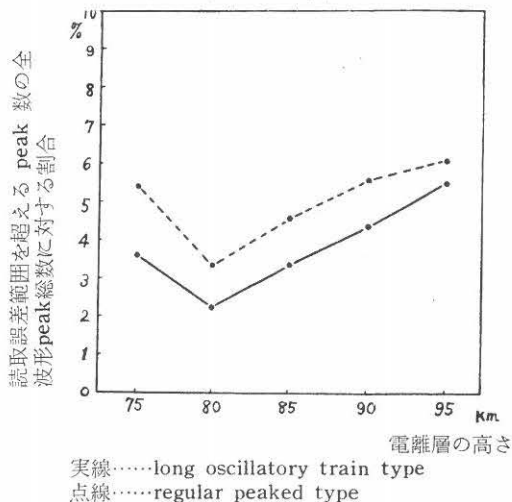


第 3 図 B



この型式の波形は通常 2 kc/s 乃至 5 kc/s とする相当に低い周波数であることは興味があつて、更に大多数は振幅の大きい slow tail が重畳していることもその特徴である。次にこの波形は、その最初の部分が極めて複雑化していて peak が読みとりにくいために、以後の高次の peak に対して反射次数を決定することに於て困難な欠点がある。従つて波形を距離決定の chart に当てがふた時適切に判断しなければならないが、一方に於て反射次数が非常に多く 20 次以上の反射波の見られる波形も稀ではないので、電離層高 80 km、又は 85 km の chart を用いれば、波形原点と数多くの各 peak 間隔とから次数を推定することは比較的容易である。

第 4 図



擬これらの波形の peak 間隔から空電源距離を求めるために、電離層の高さを 75 km から 5 km 刻みに 95 km 迄変えて画いた 5 枚の chart を用意し、夫々に 31 枚の良好な波形を当てがって空電源の距離を求めると共に、chart と peak との時間ズレの大きさから電離層の高さの妥当な値を求めることとした。勿論波形を電離層の異なる chart に当てはめる場合、波形の各 peak の反射次数を変更しないこととして取扱った。

次に焼付けた写真波形の線の太さから考えられる読取誤差は高々  $\pm 40\mu s$  と考えれば充分であるので、この型式の波形 41 枚について、波形の個々の peak と chart との時間ズレを測定し、上記誤差範囲を越える peak 数の全波形 peak 総数に対する割合を調べてみると第 4 図実線のようになる。これで見ると電離層高 80 km は中でも最も chart に適合すると言えるが、電離層高を 5 km 毎に考察したのであるから多少の幅を考えなければならない。

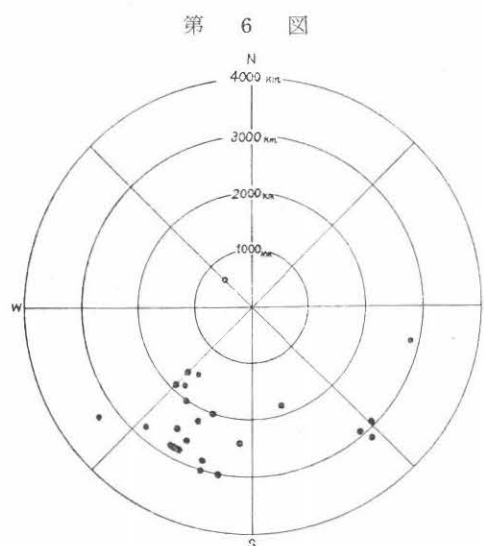
猶この型の波形は反射次数が 20 次附近迄観察されるから、低次と高次とでは電離層への入射角も相当異っているし、又各々の peak と chart との時間ズレが低次と高次とでは一般的に何か系統的な現象でもあるのではないかと考えて、総ての反射波を single hop に分解することにより電離層への入射角と peak と chart との single hop 毎の時間ズレとの関係を調べてみた。又こうすることにより、たとえ空電源の距離は異つても single hop 毎に分解されるから、この関係には総ての波形の peak を取扱うことが出来る。但し peak の読取誤差を考える時 long oscillatory train type 波形の平均距離を 2,500 km とすれば single hop の距離 500 km 即ち 5 次反射に対しては  $\pm 40\mu s/5 = \pm 8\mu s$ 、或いは single hop の距離 250 km 即ち 10 次反射に対しては  $\pm 40\mu s/10 = \pm 4\mu s$  の誤差が夫々混入することになる。従つて single hop 毎の peak と chart との時間ズレと入射角との関係を示す plot の傾向は、その距離が大きくなるにつれてバラツキが大きくなる訳である。

第 5 図 AB 乃至 E は電離層高を夫々 75 km, 80 km, 85 km, 90 km, 95 km として同じ 41 枚の波形から、横軸を電離層への入射角又は single hop の距離とし、縦軸には single hop 毎の peak と chart との時間ズレをとつて plot したものである。縦軸の符号は peak が chart の曲線より時間的に遅れている場合に正符号とした。これらの図を比較してみると、前述の plot のバラツキを考慮に入れた時、電離層高 80 km の場合は他の場合に比し、波形の各反射波が chart に割合良

く適合していることを示しており、換言すれば長波に於ては入射角の如何に拘らず電離層は略々鏡面反射と考えられることになるが、入射角の大きい場合の反射条件に就いては、はつきりした事は言えない。

以上の結果は全観測期間即ち 1 週間の結果を纏めたものであるが、日によつて異なる結果は殆んど認められなかつたので一括したものである。結局夜間 E 層の高さは約 80 km と推定することが出来る。

更に又電離層高を 80 km とした時、long oscillatory train type 波形の空電源分布図を豊川を中心として画くと第 6 図のようになり、主として 1,500 km 以遠 3,000 km 附近迄の海上伝播の場合に観察されると言えるようである。



#### IV. regular peaked type 波形 (夜間)

regular peaked type 波形は前述の rounded long oscillatory train type と異つて、周波数範囲も 5kc/s から 10kc/s 附近に分布し、又空電源の距離も主に約 1,500 km 迄に亘つて分布している。この種の波形 26 枚を用いて前節と同様な操作を試みるのであるが、掃引時間が異なるので、この場合の読取誤差は高々  $\pm 20\mu s$  と考えられ、peak と chart との時間ズレを電離層高を変えて測つた結果、読取誤差を越える peak 数の割合は第 4 図点線で示すようになり、結果としては long oscillatory train type と同様、電離層の高さは 80 km が最も確からしいことになる。又 peak と chart との single hop 毎の時間ズレを入射角を横軸として、電離層の高さを変えて画いてみると第 7 図 A 乃至 E のようになり、これも亦 long oscillatory train type

と全く同様なことが言える。

## V. 結 論

本文では空電波形を利用し、VLF に於ける上空電離層の見掛けの高さを求めることを試みたものである。1955年6月豊川で行われた一週間の空電観測に於て得られた資料に基づいて、昼間D層並びに夜間E層に対して次のような結果が得られた。

1. 昼間（午前9時から午後4時頃迄）にも電離層反射理論によつて説明することの出来る波形があり（第1図参照）。これらの波形解析の結果を *sferics fix* と比較した処、電離層の見掛けの高さを 65 km とし、反射の際位相変化  $\pi$  を伴うと言う結果が得られ、他の研究者達の見解の一つと一致した。
2. 夜間の *long oscillatory train type* 波形（周波数範囲 2 kc/s ~ 5 kc/s）31 枚を観察する時、電離層で幾回か反射して到来した、*pulse* の実測到達時刻と電離層高を仮定した計算上期待される到達時刻との差異を調べ、その値が写真上での読取誤差以上の *peak* 個数から電離層高は 80 km が確からしいと言う結論を得た。（第4図参照）

但し電離層高は 5 km 毎に考えた結果であるから 80 km 前後多少の幅を考えておかなければならない。

3. 2に於ける *peak* の実測値と計算値とのズレを *single hop*毎に考え、電離層への電波入射角との関係に就いて調べると、バラツキは相当見受けられるが電離層高 80 km の場合は、長波は入射角と関係なく電離層での鏡面反射を示している。しかし入射角の高いところでは判然としたことが言えない。（第5図参照）
4. *long oscillatory train type* 波形は主に遠距離海上伝播の場合に観測される模様である。（第6図参照）
5. 更に *regular peaked type* 波形26枚の *peak* について調査をした結果 *long oscillatory train type* の場合に導かれた結果と同一の結果が得られた。（第4図および第7図参照）

## VI. 謝 辞

金原所長の絶えざる御指導と御討論を謝し、又空電観測に当つては岩井研究室の方々の御協力、御援助に依るものであつて、厚く謝意を表する。又資料作成に当つては前田都哉子氏の御努力のお蔭であり、更に本研究の一部は昭和29年度科学研究助成補助金により行われたものであることを記して、併せて厚く御礼申上げる。