

空電波形の周波数分析研究 (第 1 報)

佐 尾 和 夫

I. 緒 言

空電波形は言うまでもなく過渡的な電磁波の信号であり、これを空電源、即ち雷放電における輻射波形と、長波の伝播理論とに結びつけて詳細に説明づけるには、波形を周波数スペクトルに変換して考察することが、最も早道であると考えられる。換言すれば、受信波形から求めた周波数スペクトルの結果を、理論上の電界強度表式と、雷放電輻射波のスペクトルとに関連づけて考究することが望ましい。

また一方において、遠距離伝播による長波の減衰特性を利用すれば、受信空電の周波数スペクトルを求めることによつて、一部の波形に対しては、その空電の伝播距離を知る可能性も生ずるわけである。この方面における研究は主として F.W. Chapman¹⁾ であり、彼は昼間の典型的な準正弦減幅振動波形 (smooth daytime type 波形) を利用して、陸上伝播の場合に長波の減衰が、周波数によつてどの様に変化するかを求めている。その方法は空電を一旦磁気録音機に録音しておき、後に 100 c/s から 12.5 kc/s までを 19 段階に分けた狭帯域同調回路に対する再生空電のレスポ

$$S(\omega) = \sqrt{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt \right]^2 + \left[\int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \sin \omega t \cdot dt \right]^2} \quad (2)$$

ンスを求めることによつて周波数スペクトルを得た。この場合、たいしようとなる空電波形は、距離 4,000 km 以内の落雷から発するものであつて、得られた周波数スペクトルから、各周波数ごとに伝播距離とレスポンスとの関係を描いて、長波の遠距離伝播における減衰係数の周波数特性を求めている。

一方筆者は空電波形を周波数分析するに当り、一旦フィルムに記録された波形を数学的にフーリエ変換を行つて分析する方法を用いているから、通常得られる振幅の周波数スペクトルと共に、位相の周波数スペクトルも得られる利点がある。茲には昼間に観測される空電波形を取上げ、これを周波数分析した結果を述べるのであるが、受信空電波形を考える場合に問題となるのは、空電源における雷放電々流波形と、伝播路の電気的特性とである。前者の雷放電々流に対しては

Norinder²⁾ の測定結果を用いて分析を試みた。また後者は受信空電波形の分析結果から論ずることになるが、この分析に当つては、本文では典型的な所謂 smooth daytime type 波形に限らず、一般的な複雑な波形にも言及している。しかしまだ適当な観測資料が充分でないので、伝播路の電気的特性乃至はそれによる受信波形の説明については、今回は触れないで、主として昼間の空電波形の周波数スペクトルについて報告した。なお分析に用いた周波数分析機についても、簡単な説明が加えてある。

II. 空電波形の周波数分析

空電波形のように過渡的非周期性信号波形の周波数スペクトルは、連続スペクトルであつて、換言すれば周波数を異にする無数の定常状態の振動に分析されるものである。波形と周波数スペクトルとの関連は、数学的には、相互にフーリエ変換であつて、波形を $G(t)$ 、分析すべき角周波数を ω とすれば、周波数スペクトルは次式で表わされる。

$$G(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega \quad (1)$$

$$\tan \phi(\omega) = - \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \sin \omega t \cdot dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \cos \omega t \cdot dt} \quad (3)$$

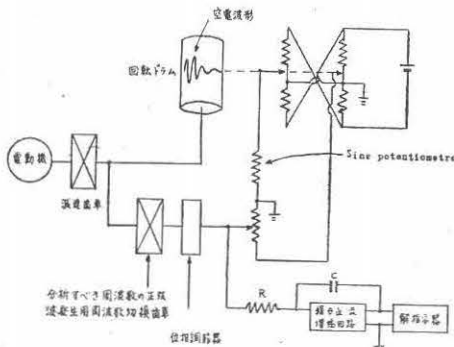
そこで (2) 式の $S(\omega)$ を ω の函数として plot したものは、波数 $G(t)$ の振幅周波数スペクトル (amplitude-frequency spectrum) であり、(3) 式の $\phi(\omega)$ を ω の函数として plot したものは、その位相周波数スペクトル (phase-frequency spectrum) であるから、結局 (2) 式と (3) の式を計算すれば、空電波形 $G(t)$ から、周波数スペクトルを求めることが出来るのである。

そこで多くの波形に対して、手早く分析をするためには、電気演算機によるのが便利であり、筆者は前式の計算に適するよう設計された、アナログ式計算機を

試作した。本機の概略を説明すると、フィルムに撮影された空電波形を、適当な寸法に紙上へ引伸し、これを筒に巻付けて、自動的に一定の速さで廻転させることにより、波形をその時間軸に沿って一定の送りを与えて置き、一方手動で波形をトレースすることにより、波形の各時刻での振幅に比例する電圧をとり出すようにしてある。別に分析すべき角周波数 ω で変化する $\sin \omega t$ または $\cos \omega t$ の電圧を sine potentiometer で発生させ、電気演算回路で両電圧を乗じて、時間で積分すれば、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \cdot \frac{\cos \omega t \cdot dt}{\sin \omega t}$$

が計算され、これから $S(\omega)$ と $\phi(\omega)$ とを別々に求めることが出来る。分析すべき角周波数は sine potentiometer の回転数で変えられるから、回転の歯車比をクラッチで切り換える操作で簡単に行われる。第1図は本機のブロックダイアグラムを示している。抵抗が複雑な結線となっているのは、空電波形も $\sin \omega t$ (もしくは $\cos \omega t$) も共に、正負に値が変動するので、その積の符号を考慮したからである。写真1は本機的全貌であり、左側は電源部、中央は積分並びに直流増幅等の電気演算部、右側手前は分析すべき周波数を定めて、波形をトレースするトレーサー部で、その後方



第1図 空電波形用周波分析機のブロックダイアグラム

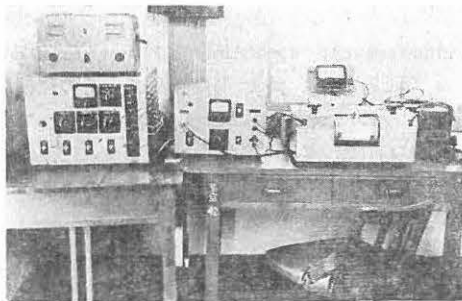


写真1 空電波形用周波数の分析機

は解が電圧計で読みとれるようになった指示器である。分析すべき周波数は、2 kc/s から 30 kc/s までを 40 段階に分けて選び出すことが出来るが、波形の引伸し寸法によつて、この周波数はその都度校正されねばならないので、周波数範囲は更に高くも低くも変えることが出来る。

擬実際の計算に当つては、 ω を切換え、更に \sin と \cos とを切換えて、その都度波形をトレースするのであるから、その手数から考えて、決して理想的な計算機とは言えないのである。

III. 空電源の周波数スペクトル

3.1 一般

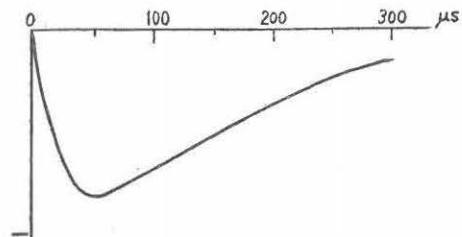
空電波形を周波数スペクトルに変換して、各周波数ごとに成分の大いさを考察する時、前述のように2つの問題があり、その一つは、輻射源としての空電源における周波数スペクトルである。そこで輻射源である雷放電を考える時、雲と大地間の落雷による放電を近似的に垂直アンテナと仮定すれば、放電点より遠距離における受信電界強度は、アンテナ電流に比例することは衆知の通りである。

そこで必要となるのは落雷電流波形を知ることであり、まず Morrison の実験式による、雷撃電流曲線について検討したが、実際の放電では、帰閃が上部へ進むにつれ、分枝した放電路の負電荷を中和したり、あるいは雲中の負電荷の不均一分布による電流のため、可成り複雑な波形をしている。従つてこれについては Norinder 等の報告にある雷撃電流の実測結果を周波数分析して求めることとした。

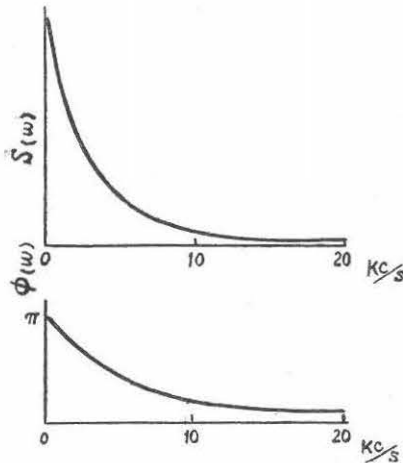
当所で観測出来る空電波形は、一般的には南方諸地域で発生したものが多く、Norinder の観測した雷撃電流は北緯 60° の Uppsala での結果であるから、必ずしも電氣的特性が類似しているかどうかは疑わしいが、とに角参考にはなるので、これを用いたのである。

3.2 Morrison の実験式による空電源の周波数スペクトル

落雷による雷撃電流の時間変化は、Morrison によ



第2図 Morrison による雷放電々流波形



第3図 周波数分析結果

れば、その大きな変化だけに着目して、実験的に $-(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ を与えている。茲に α, β は定数で、 $\alpha = 0.7 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$ 、 $\beta = 4 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$ を用いて、この曲線を図示すれば、第2図のようになる。従つて空電源における輻射波の周波数スペクトルは、

$$\begin{aligned}
 & -\int_0^{\infty} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \cdot e^{-j\omega t} dt \\
 & = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2}\right)^2 + \omega^2 \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{1}{\beta^2 + \omega^2}\right)^2} \cdot e^{j\left\{\pi - \tan^{-1} \left[\frac{(\alpha + \beta)\omega}{\alpha\beta - \omega^2}\right]\right\}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

として得られる。(4)式は第3図のようになり、一つは振幅周波数スペクトル、他は位相周波数スペクトルである。これによると雷放電で発する輻射波の周波数成分は、その振幅周波数スペクトルにおいて、低周波程、極度にその成分が多く、周波数が高くなるにつれて、単調に減少し、また位相周波数スペクトルは、高々 π の変化であることが判る。

3.3 Norinder 等の実測雷撃電流波形による空電源の周波数スペクトル

Norinder 等の報告にある、数多くの雷撃電流曲線の中から 19 箇所を選んで、周波数分析を試みた。

言うまでもなく、その周波数スペクトルは大雑づばに言つて、3.2の所論と変る筈はないが、実際の雷撃電流には、それぞれ細かい脈動が重畳しているために、スペクトルでは、様々の変化がみられる訳である。茲にはその中から 5 例を図示してみると第4図(a), (b), (c), (d), (e)のようになる。(a), (b), (c), (d)の何れも振幅並びに位相の周波数スペクトルにおいて異なる変化をしており、空電源における周波数スペクトルは、この例のように、決して一定したものではないことがわかる。空電源における周波数スペクトル

ルが、この様に異なっているから、受信空電波形も様々に歪んだものが観察されることは当然であろう。

これから共通に言えることは、その振幅周波数スペクトルにおいて、3.2に示したよう、1 kc/s 附近に極めて成分が多く含まれることの外、5 kc/s 以上の領域で、往々極大値が現われていることである。この様々の極大値が、受信空電スペクトルに当然影響することが考えられるので、各種の受信空電波形を分析した時に得られる、振幅周波数スペクトルの極大値の一部は、これに起因していると解釈しても良いのではないかと思われる。

なお(e)図に示したものは、多重雷の場合で、後続雷撃の放電には、電流が最初の時間は微小な値で継続する場合があります、その振幅周波数スペクトルは、他に比して目立つた相異はないけれども、位相周波数スペクトルにおいて、著るしい変化の起きることは、注目に値する。このように位相周波数スペクトルで変化の多い雷放電から発した空電波形が、受信点でどの程度に歪んだ波形になるかは興味のある処である。

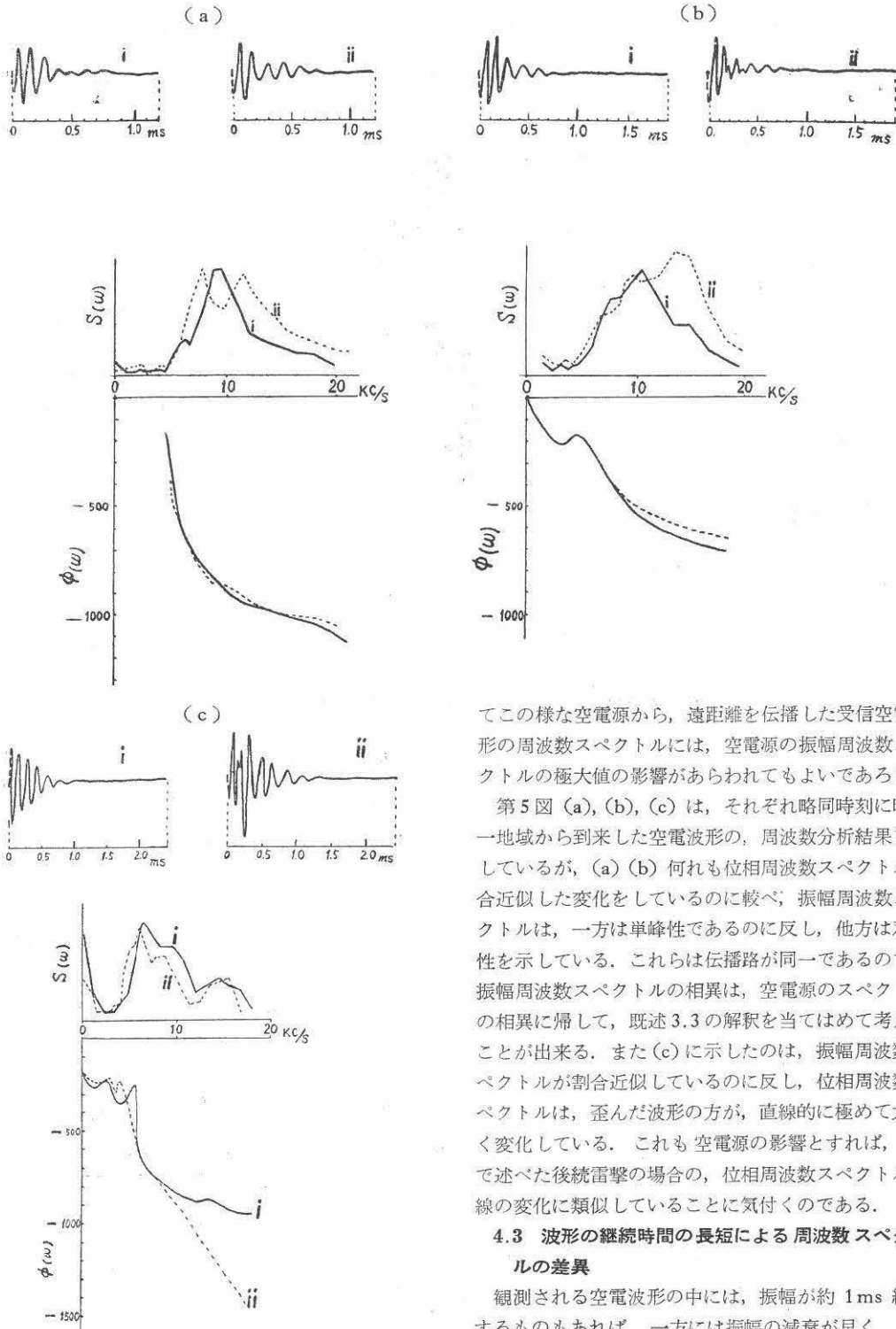
IV. 受信空電の周波数スペクトル

4.1 一般

受信された空電波形の周波数スペクトルを考察するに当り、まず略同時刻に略同一地域より到来した空電波形、即ち伝播路の影響は全く等しいと考えられる波形を分析して、両スペクトルの相異を、空電源における雷撃電流スペクトルの相異に帰して考えることとした。次に比較的継続時間の長い波形と、これに反して継続時間の短い波形とを周波数分析し、対照的に振幅並びに位相の周波数スペクトルの相異点を明らかにした。また更に進んで、相当複雑な波形の周波数スペクトルについて、1例が示してある。

4.2 略同時刻に略同一地域から到来した空電波形の周波数スペクトル

空電源としての雷撃電流波形を、周波数分析した結果は、第4図において述べてある。結局振幅スペクトルが、1 kc/s 乃至はそれ以下の周波数で最大値を示すことは、何れの場合も認められるが、一方周波数の増加につれて、その成分が単調に減少する型式は稀であつて、寧ろ略 5 kc/s 以上の様々な周波数で、1箇所



第5図 略同時刻に略同一地域より到来した空電波形とその周波数スペクトル

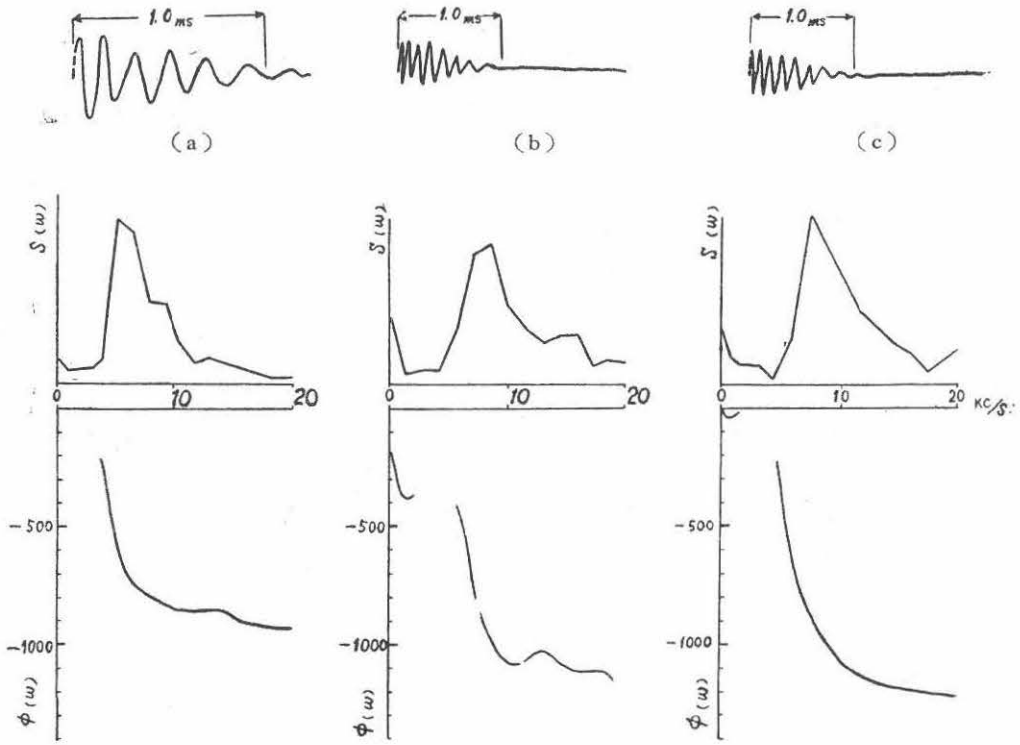
てこの様な空電源から、遠距離を伝播した受信空電波形の周波数スペクトルには、空電源の振幅周波数スペクトルの極大値の影響があらわれてもよいであろう。

第5図 (a), (b), (c) は、それぞれ略同時刻に略同一地域から到来した空電波形の、周波数分析結果を示しているが、(a) (b) 何れも位相周波数スペクトル割合近似した変化をしているのに較べ、振幅周波数スペクトルは、一方は単峰性であるのに反し、他方は双峰性を示している。これらは伝播路が同一であるので、振幅周波数スペクトルの相異は、空電源のスペクトルの相異に帰して、既述3.3の解釈を当てはめて考えることが出来る。また(c)に示したのは、振幅周波数スペクトルが割合近似しているのに反し、位相周波数スペクトルは、歪んだ波形の方が、直線的に極めて大きく変化している。これも空電源の影響とすれば、3.3で述べた後続雷撃の場合の、位相周波数スペクトル曲線の変化に類似していることに気付くのである。

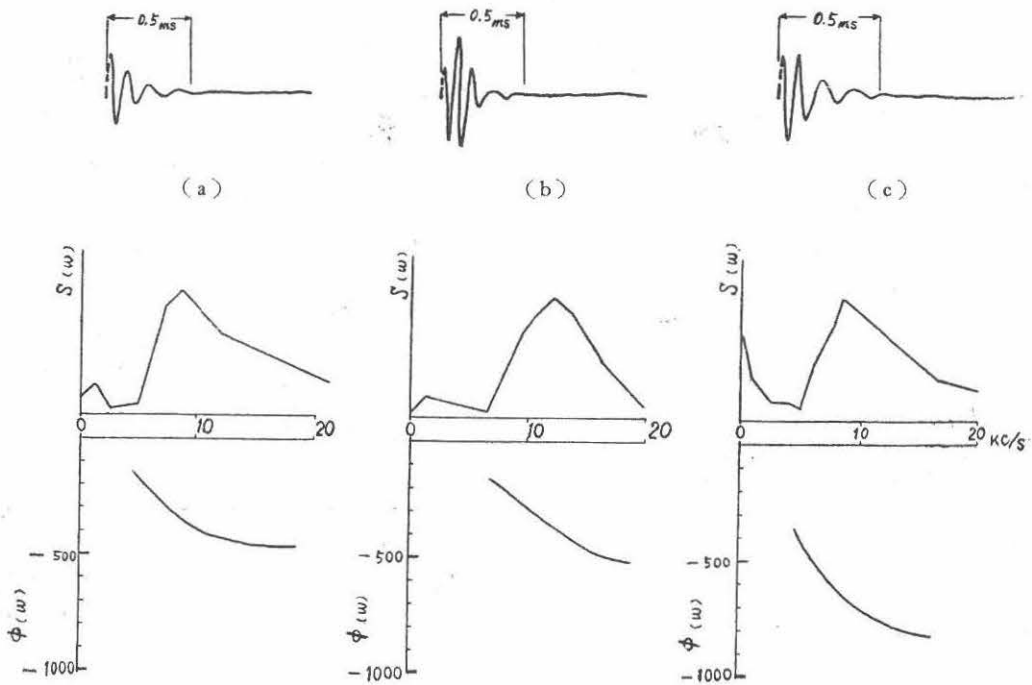
4.3 波形の継続時間の長短による周波数スペクトルの差異

観測される空電波形の中には、振幅が約 1ms 継続するものもあれば、一方には振幅の減衰が早く、0.5 ms 程度しか継続しないものもあるので、これ等を比較するため、周波数スペクトルにおける差異を調べてみた。

上の極大値を示している場合の方が普通である。従つ



第6図 継続時間の長い空電波形とその周波数スペクトル

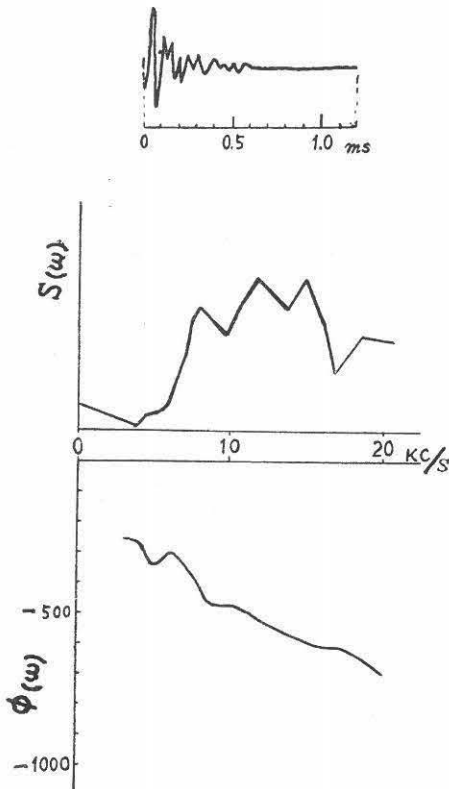


第7図 継続時間の短い波形とその周波数スペクトル

第6図 (a), (b), (c) に示した継続時間の長い波形についてみると、その振幅周波数スペクトル成分の大きい周波数領域において、位相周波数スペクトル曲線の傾斜が急であり、かつ振幅周波数スペクトルがある周波数に集中する傾向が見られる。これに反し、継続時間の短い波形、第7図 (a), (b), (c) では、その振幅周波数スペクトル成分の大きい周波数領域における位相周波数スペクトル曲線の傾斜は、緩やかであつて、また振幅周波数スペクトルは、その成分が割合広汎に分布していることが、前者と全く対照的である。以上は空電波形の継続時間の長短と、その周波数スペクトルの差異について調べたものである。

4.4 複雑な波形の周波数スペクトル

第8図はやや複雑な波形と、それを周波数分析した結果である。この例では位相周波数スペクトルにおい



第8図 複雑な空雷波形とその周波数スペクトル

ては、格別異なつた変化はみられないが、振幅周波数スペクトルの成分が、広い周波数帯に亘つて分布していることが特徴である。なお位相周波数スペクトル曲線の傾斜が、緩やかなのは、この波形が継続時間の短い部類に属していることにもよるのである。

V. 結 言

以上の考察は、空電源における雷撃電流波形並びに受信空電波形の周波数スペクトルの特性について調べたものであつて、このような周波数スペクトルから、遠距離伝播路の長波伝播特性等に結びつけて考察することには触れなかつた。結局以上のような、周波数スペクトルの基本的結果を土台として、今後は sferics fix の正確で、而も歪みの少い典型的波形に対して、伝播特性の決定や、雷放電機構と関連づけた波形の解釈等に研究を進めて行き度いと考へている。

VI. 謝 辞

本研究に関しては、金原所長から絶えざる御激励と御批判をいただき、感謝申し上げている。空電観測に当つては、岩井助教授を始め、その協力者達と、更に当研究室の方々の御援助によるものであつて、厚く御礼を申し上げる。また周波数分析に当つては、主として伊藤みつゑ嬢により行われたものであり、資料の取纏めに当つては、前田都哉子嬢が経験を活かし、考察を働かせて努力されたものであつて、併せて厚く御礼申し上げる。

なお、空電の観測は、緯度観測所並びに九州電波監理局の御厚意によつて為されたものであり、更に昭和31年度科学研究助成補助金は、本研究の資料を得るのに、大いに寄与していることを附け加えて、共に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- 1) F.W. Chapman, R.C.V. Macario: Nature May 19, 177 (1956).
- 2) H. Norinder, O. Dahle: Arkiv Mat. Ast. Fys. 32A, No. 5, 1 (1945).
- 3) S. Goldman: Frequency Analysis, Modulation and Noise, Mc Graw-Hill Book Company (1948).