

## 電 波 気 象 学

— 日本気象学会賞受賞記念講演 —

平 尾 邦 雄\* 田 尾 一 彦\*

## は し が き

電波気象学とは周波数 30 Mc 以上、波長にして 5 m 以下の所謂超短波及び極超短波といわれる電波の伝播の仕方が気象条件によって著しく影響される現象を取扱う境界領域の学問である。1935年から1937年にかけて米国の R. A. Hull が Weather Bureau や Harvard 大学の協力を受けて VHF (註1) 領域に於て伝播実験を行った。彼がその後不慮の死をとげた為実験は続けられなかったが1945年 A. W. Friend によって取まとめ発表された。この研究では気象との関係が radio sonde の資料等も用いて詳細にしらべられている。それ等の結果から電波の強さが昼夜又は夏冬で系統的に変ること、又このような日変化或いは更に週期の短かい fading といわれる受信電界強度の変動も極気団或いは熱帯性気団といった気団のうつりかわりによって変化すること等がわかった。この様にして第一歩をふみ出した電波気象学は第二次大戦中に長足の進歩をとげた。大戦中に SHF 帯の radar が現われて実際に使われ出して見るとその探索範囲がある場合に非常にのびる事が見出されたのである。この原因をしらべているうちにそれは下層大気中の温度の特異な分布のために屈折率分布の異常な層、所謂 radio duct が生じてその中を電波が超屈折を起して遠距離迄伝わるのが原因である事が見出されたのである。この時から電波気象学の中に大気の電波に対する屈折率の分布を測定することが導き入れられた。1950年になって microwave refractometer が作られてからは屈折率の直接測定は可能となったがそれ迄は電波気象学の研究のための特別な温度及湿度を測る装置が考案使用されていたのである。そうして得られた温度湿度と気圧の三つの要素から計算によつて屈折率を求めていたのである。

この様な方法を用いて主として極く下層の大気の屈折

(註 1) VHF: 30Mc~ 300Mc,  
UHF: 300Mc~ 3,000Mc,  
SHF: 3,000Mc~30,000Mc,  
EHF: 30,000Mc 以上

\* 電波研究所

率分布をはかってそれと電波伝播の関係をしらべる事が電波気象学の主たる研究分野であった。

しかるに電子工学の進歩によって大電力の送信、極微電界の検出の技術が進むと共に遠距離間の通信が大きくクローズアップして来た。1950年そのような遠距離伝播を説明する Booker-Gordon の散乱伝播の説が提唱された。これは大気中にある乱れによって屈折率の irregularity が生じそれにあつた電波が散乱されて遠距離に伝わるとするものである。このために遥か地球の影になるような所にでも送信受信の両アンテナのビームが交わる空間中の乱れによって電波が廻折によるより遥かによく伝わるというわけである。ここで電波気象学の研究分野は対流圏全域に広がったのである。

以下現在電波気象学の当面する問題について簡単にのべる事にする。

## 1. 大気の屈折率とその分布

真空中であれば電波は直進する。第一図に示すように大気がない場合にはアンテナから出た電波の波線は A の



第 1 図

如く直線であらわされそれが地球に接した点より先は影になる。しかし実際には大気があつてその屈折率分布が平常の場合にはやや下に凹な波線 B を描く。このために所謂影の部分はやや遠くなる。このように屈折率分布は電波の直接とどく範囲に影響をあたえる。

さて大気の電氣的特性は一般に複素誘電率であらわされるがここで問題になるのはその実数部である。大気の屈折率は

$$N = (n-1) \times 10^6 = \frac{A}{T} \left( P + \frac{Be}{T} \right)$$

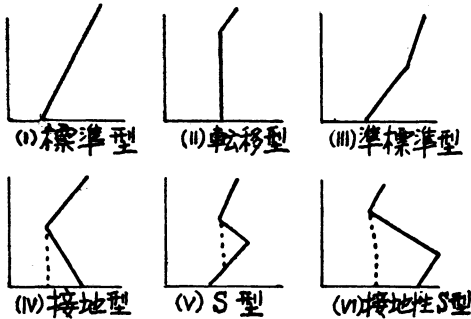
とかくことが出来る。ここに  $n$  は屈折率、 $T$  は絶対温度、 $P$  は気圧、 $e$  は水蒸気張力で  $A, B$  は共に常数である。

電波伝播を論じる時に屢々修正屈折率  $M$  という値を用いる事があるがこれは

$$M = \left( n - 1 + \frac{h}{a} \right) \times 10^6$$

で表わされる。ここで  $h$  はその点の高さを表わし  $a$  は地球の半径である。所でこれ等の値の単位として  $M$ -unit ( $M. U.$ ) を用いる。これは  $10^{-6}$  を基準とした単位である。我々が問題とするのはこの  $N$  又は  $M$  の分布 ( $N$ -曲線又は  $M$ -曲線という) であってこれが電波の波線の曲率を決めるわけである。

多くの観測を総合した結果  $M$ -曲線は凡そ第 2 図に示す 6 つの型に分類されることがわかった。(I) は単調に上に行く程増加しているものであってこれの平均傾度は 39



第 2 図

~40 MU/km である。(III) はこの標準型のみあわせと考えることができる。ところが (II) のように  $M$  の値が高さについて一定の場合は簡単な幾何光学でわかるように電波は地球の表面にそって何度でもまわることになる。そして更に (IV) (V) (VI) に見られるように  $M$  曲線の傾きが逆になると波線の曲率は地球の曲率よりも大きくなる。(IV) のような場合を考えるとアンテナから電波が超屈折を起して一度地面にあたり又そこから反射されて出てゆき又地面にかえってくるという風にして電波は遠距離迄伝わることになる (第 3 図) これが所謂 radio duct といわれる層が発生した場合であってこのような電波の伝わり方を超屈折という。第 2 図で点線で示してあ



第 3 図

る部分が radio duct である。しかし radio duct にはその強さ高さによって超屈折を起し得る電波の波長に限度がある。多くの場合にこれらの層は SHF 帯か又はせいぜい UHF 帯の電波に対してのみ有効である。VHF 帯にもなると後節でのべるように屈折率傾度のみで電波の強さを議論することは殆んど出来ない。屢々あらわれる VHF 帯の異常に高い電界強度はやや高い所に生じる屈折率の不連続層による反射として説明する事が出来る。その不連続層においては高さと共に屈折率の増す場

合もあるし又減る場合もある。そしてそのような層は時間的にも又空間的にもかなり安定に存在する事が電波観測の方から推論される。air-borne refractometer を用いた米国に於ける観測でもこのような層の存在が確かめられている。

更に最近問題にされるのは屈折率の乱れである。我々の場合に必要量はその強さとスケールであり且その分布である。上にのべた Airborne refractometer による観測によれば数軒の高さにおいてさえも普通 0.5 NU 程度の変動が見られ、時には 5 軒の高さで 2 NU に達する変動が観測された事が報告されている。しかし何といってもこれらの観測は未だ少く我々が電波伝播に結びつけるには不十分である。

このように屈折率がとにかく電波を支配するのであるがそれでは如何にして屈折率を測定するのであろうか？一つは当然前述の式に従って  $P$ ,  $T$  及び  $e$  を測定して計算する方法である。 $M$ -曲線を測る場合にはこの方法でも行えるが変動をはかる場合には事実上不可能である。1950年になって microwave を用いた屈折率計が作られた。これは 10,000 Mc 程度の電波を用いて大気を自由に通すように作られた空洞の共振周波数を測ってそれから屈折率を求めるものであるが airborne のものが出るにおよんで非常に多くの測定が米国でなされた。我々の研究所に於ても何とかして高空のデータを得たいと考えて昨年小さなビーズ型サーミスターを用いて気温、湿球温度をはかりその出力を更に電氣的に合成して屈折率変化を記録する装置をつくった。これによって繫留気球でかなり高い所迄の屈折率の分布や変動を簡単に測定できるようになった。今後これによって今迄その必要性のべてきた資料が得られるものと思われる。

## 2. Radio Duct

Radio duct は果してどのような場合に出来るのであろうか？前節の  $N$  の式を高さについて微分すると、

$$\frac{dM}{dZ} = \frac{A dp}{T dZ} - \frac{A}{T^2} \left( p + \frac{2Be}{T} \right) \frac{dT}{dZ} + \frac{AB}{T^2} \frac{de}{dt} + \frac{10^6}{a}$$

となる。屢々種々の気象条件によって気温の逆転が出来たり著しい水蒸気の濃減が生じたりすると上の式に従って時には  $\frac{dM}{dZ}$  が負となって radio duct が発生する。最も普通にある例は暖かい乾いた空気が冷たい海上を吹くときに現われる。この場合海面に接した気層は海面で冷され又水面から水蒸気の供給をうけて急激に屈折率が増加し接地性ダクトを作るようになる。その他冷くてしめった空気の上を暖かくて乾いた空気が蔽うと Radio duct の発生が見られるので移流等による duct も当然考えられるし又沈降現象等によっては時に壮大な duct が数百メートル以上の高い所に出来る事がしばしば見出される。

1951年我々電波研究所のメンバーで富山湾で一つの実験を行った。富山湾は昔から蜃気楼の現われる事で有名である。蜃気楼は気象光学的現象であり前に述べた電波

の超屈折の現象と全く同じような現象である。光の場合には屈折率は殆んど温度のみで支配されて水蒸気は殆んど関与しない。

我々が電波の実験を行った時にこのような事を考慮して電波の強さが層気楼の出現と共に強くなることを予想したのである。

実験は60Mc(波長5m)、150Mc(波長2m)及び470Mc(波長約70cm)の三波を用い魚津を受信点とし送信点を富山湾をはさんで対岸27kmの所伏木においた。又約12mの高さ迄の海面上の気象観測を両地点に於て行った。我々の観測期間中2回層気楼が現われた。そうして電波の強さは我々の予想を裏切らず層気楼の出現と相前後して高くなった。気象要素に就いては温度逆転はいうまでもなく見事に現われたが更に水蒸気量が高さが高して著しく減少していることが見出された。水面上0.9mと8.9mとの間でその差の最大は実に9g/kgにも達したのである。前にものべた通り電話に対する屈折率では水蒸気が非常に大きな役割をはたしこの場合でも duct に対する役割はこの場合の温度逆転の3倍から4倍に達している。前後の気象状態、天気図、輪島における高層観測から考えて我々は海上沖合において沈降又はそれに類似した現象が生じその暖かい乾いた空気が海上をわたってきて変質をうけその結果層気楼を生ずるようになったと考える。且同時に理想的な duct を生じて電波が異常に強く受けられたと考えるのである。

1946年から1947年にかけてやはり duct 生成の研究についての非常に大がかりな実験がニュージーランドの南東海面に於て行われた。航空機、船舶、自動車、繫留気球、radio sonde, rawin, radar と考えられる限りの装備を使い米英豪ニュージーランドの科学者が協同して観測調査の結果北西風が中央山脈を越して föhn 現象を起しそれによる暖かい乾いた空気が海面上に吹出されて著しい radio duct を生ずる過程があきらかにされた。このように海上に出来る接地性の duct についてはその生成過程がかなりよくしらべられているものが多い。しかし陸上に於ては夜間冷却等の原因も考えられるが一般にM—曲線自体の形も複雑であってその解釈が困難である事が多い。

### 3. 電界変動と気象との関係

超短波及びマイクロ波の屈折や反射は前述したように下層大気中の屈折率の分布に著しく支配される。然しながら対流圏内では大気の乱れによって屈折率はその平均値のまわりに空間的及び時間的に変動している。従って対流圏内の屈折率分布は短い時間内においては乱れのために変動する分布によって又或る適当に長い時間内を考えると平均的な屈折率分布によって与えられると考えることが出来る。超短波の電界変動は屈折率の変動によって生ずるから短時間の乱れによる屈折率変動によって短週期の電界変動所謂 fading が生じ長時間の平均的屈折

率傾度の変動によって長週期の電界変動が生ずると考えられる。従って短週期及び長週期の電界変動と気象条件との関連性を明らかにすることが電波気象学の一つの目的である。Fading については第5節で述べることにして本節では超短波の長週期電界変動と気象条件との関係を述べてみよう。

radio sonde による高層気象観測によって綜観気象学は著しく進歩したし又地面近傍における特殊な気象測器による精密測定は大気の乱れの研究に大きな貢献を与えた。然るに超短波及びマイクロ波の伝播に影響を与えると考えられる2,30米から1軒位迄の下層大気の構造に関しては今迄殆んど観測資料がないので十分に電界変動と気象との関係を調べる事が出来ないのは残念である。幸なことに1952年の秋と1953年の夏にURS Iの国内委員会の第二分科会(委員長長島久尙博士)主催の下にそれに関係している研究機関即ち電気通信研究所、気象研究所、館野高層気象台、放送技術研究所、鉄道技術研究所及び電波研究所等によって約二週間協同観測が行われた。特にこの協同観測では館野の高層気象台で繫留気球による観測が行われ約400m位迄の気温、湿度の測定がなされた。これらの資料から得た屈折率分布曲線とそのような分布を生ずる気象条件との関係が筆者の一人によって解析された。紙面の関係上ここには述べないけれどもその期間中における超短波の電界変動を綜観気象的立場から説明することが出来た。其の後下層大気中の屈折率分布を得るための気象測定は通信研究所や電波研究所によって行われており得られた気象資料と電波伝播との関係が報告されている。

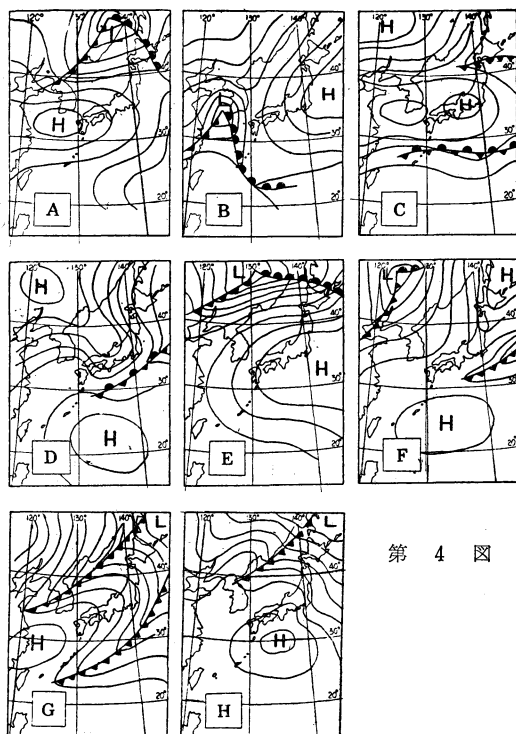
次に見透しを少しはずれた所謂回折域における超短波の著しい特性である電界強度の日変化について述べてみよう。一般的に云うと昼間の電界強度は低く夜間は昼間に較べて著しく高いことである。このような事実は諸外国の実験でも数多く報告されておりその機構について種々な原因が考えられているが伝播実験が行われた地域及びその地域を支配する気象条件によってその原因は異なるように思われる。水蒸気の分布は下層大気内の電波伝播には極めて重要であるから吾国のように特殊な気象条件及び海でかこまれた国においては夜間の高電界がどのような機構で生ずるかということ解析してみた。用いた資料は1951年から1952年にかけて電波研究所によって国分寺と平磯間125kmの距離で150Mc/gの周波数で行われた約2カ年の電界強度とそれに対応する気象の資料である。一般に電界強度が高くなるような機構として次のようなものが考えられる。

- (1) 下層大気中の平均屈折率傾度の増加による屈折及回折。
- (2) duct による超屈折。
- (3) 下層大気中に形成される屈折率の不連続層による反射。

## (4) 大気の流れによる散乱.

以上のうち(1)のモードでは殊に春の夜間に見られるような異常に高い電界強度を説明するのは困難であり又それを説明し得る1軒の高さにもわたるような異常に大きな平均屈折率傾度を生ずる気象条件が可成り頻繁に存在するとは考え難い。尙吾国では一般に夏は比較的屈折率の垂直傾度が大きくなり radio sonde の観測資料の統計的解析の結果夏季特に日本海側で大きな値をとる特徴がありこれは föhn 現象によるものと考えられる。又(4)のモードも最近吾国及び諸外国で盛に行われている実験例が示すように 200km 以上の遠距離の平均電界の説明には有効でありまた回折域でも昼間のレベルまたは fading に関しては考慮せねばならないが夜間の電界強度の説明には不充分である。残るのは(2)及び(3)であるが理論的な研究によればこれらのモードは夜間の高電界のレベルを説明するのに充分である。然しながらこのような著しい日変化特性は毎日必ず生ずるというわけではない。例えば春には5~6日の週期で高くなったり低くなったりしており調べてみると丁度移動性高気圧の週期と一致している。又夏は小笠原高気圧の盛衰と極めてよい相関があることが分った。約2カ年間の統計的解析の結果夜間の高電界の生ずるのは大体高気圧性の気象条件の時が多くそのような場合には下層大気中に気温逆転に伴う水蒸気の増加又は減少が著しくその結果屈折率の異常分布が出来て電波に対して射層として作用する sub-M層又は super-M層 (elevated duct) が可成り頻繁に存在していることが分った。即ち第4図に示すような気圧配置の場合には関東地方の超短波回線の夜間電界強度が高くなる可能性がある。そのうち二、三のものについて説明すると(A)は移動性高気圧が東支那海又は朝鮮南部にあり伝播路がその前面にある場合でこの場合には super-M層又は duct が出来易い。(B)は移動性高気圧が三陸沖に去り伝播路がその後面にあり朝鮮南部又は九州近傍に低気圧が接近している場合で sub-M層が出来易く春秋の異常に高い電界がこのような場合に多く見られる。

(E)は所謂夏型で夏の夜間異常高電界は殆んどこの小笠原高気圧による沈降現象と夜間冷却による気温逆転との結合作用による super-M層による反射効果と考えられる。(F)は梅雨末期の気圧配置であるが1953年9月上旬及び1954年7月の後半にもあらわれその場合の電界も異常に高くこの場合にもオホーツク海高気圧と南岸の定常前線とによって sub-M層が形成され易い。冬期は他の季節に較べて一般に電界強度は高くないが1951年の12月は異常で(H)に示すような気圧配置が可成り継続しこの期間中は昼夜共に電界強度は高かった。又1952年の8月も異常で夏型の気圧配置はあまりあらわれず夜間電界の出現頻度も1951年の8月に較べると可成り少い。前線が通過したような場合は非常に顕著に電界強度が高くなる場合もあるが一般的には複雑であって電波の伝播に及ぼ



第4図

す影響も不明な点が多い。以上述べたように夜間の高電界を生ぜしめるような気象状態は高気圧性の天候の場合が多くこのような場合には下層大気中に可成り定常的な反射層が存在すると考えられる。関東地方のような所では50m位の duct は可成り頻繁に形成されマイクロ波の回線には影響を与えるけれども超短波回線が duct によって異常な高電界になるためには duct の高さが 200m乃至 300m位迄発達せねばならず、稀には異常な乾燥気流が流入してくる場合に出来ることもあるがそのような duct が常に生ずるとは考え難いのでやはり超短波の電界強度の日変化特性である夜間の高電界の第一の原因は以上述べたような反射層によると考えるべきである。従って以上のような解析を行うことによって綜観気象学的立場から或る程度超短波回線の平均的な電界強度を予報する可能性があるように思われる。

## 4. 大気の流れによる散乱伝播

はしがきにも述べたように近年になって大電力の送信機及び受信技術の進歩によって従来不可能と考えられていた可視距離外数百軒の遠距離迄受信可能となりしかもその電界強度が屈折及び回折の理論からは期待出来ないような高電界が得られ現在その伝播機構について実験的並びに理論的研究と論争が集中されている。即ちこの遠距離伝播の問題の先がけになったのは1945年米海軍研究所によって行われた Caribbean Sea での実験であった。この実験の主な目的は海上に出来る低い duct の調査であったがこの実験によって duct のないような場合にも

電界強度の距離特性が従来の回折や屈折の理論では説明出来ない程ゆるやかに減少するという新事実が発見された。1949年に英国でも E. C. S. Megaw によって10cmの波長で700軒の遠距離の実験が行われその結果上述の米国での実験と同じような現象が発見され Megaw は大気の流れによる電波の散乱によってこの現象を説明しようとした。次いで1950年に H. G. Booker と W. E. Gordon とは Carribean Sea での実験を説明するため Booker-Gordon の散乱理論として有名な大気の流れによる電波の散乱理論を提唱した。

大気中の気温や水蒸気量は乱れのために絶えず変動しており従ってそれらの函数である屈折率又は誘電率も変動しており大気中には屈折率の濃淡が空間的に又時間的に生じている。Booker と Gordon は送受信点からのビームの交わる高所における容積内に含まれている周囲とは誘電率を異にする空気の微小容積を考え、そのような微小容積が入射してくる一次電界によって双極子として作用し散乱輻射を行うと考えてその散乱エネルギーを計算した。そしてそれらの微小散乱容積の集合体と考えられる散乱容積内の誘電率の変動をあらゆるのに任意の二点間の誘電率の変動の自己相関をとることに依って散乱電力の中に含まれている誘電率の変動を自己相関函数で表現するという巧妙な方法を考えた。従ってその自己相関函数が分れば散乱電力を計算することが出来るわけで彼等は乱れが等方性であるという仮定のもとに相関函数  $\rho \sim \exp(-r/l)$  を導入して次のような scattering cross-section を得た。

$$\sigma = \frac{\left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)^3 \sin^2 \chi}{\lambda \left[1 + \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}\right)^2\right]^2}$$

この式で  $\theta$  は散乱角で  $l$  は乱れのスケール、 $\epsilon$  は誘電率、 $\lambda$  は波長、 $\chi$  は入射電界と散乱方向との間の角である。Booker-Gordon の理論に刺戟されて其の後数多くの遠距離伝播の実験並びにその機構に関する理論的解析が行われた。最初 Booker と Gordon は対流圏内の乱れのスケールとして糰オーダーの小さなものを考えていたがその後 microwave refractometer の発達に伴いこれを航空機にのせたり塔につけたりして実際の測定が行われた結果乱れのスケールは数十米のオーダーであることが分って来た。そこで1955年に W. E. Gordon は乱れのスケールが波長に較べて大きい場合のみを取扱以前の論文の修正を行った。又1953年以後 K. A. Norton を始めとする C. R. P. L の研究者達によって実験並びに散乱理論の実用化への努力が行われている。又1954年に F. Villars と V. F. Weiskopf とは近代乱流論に基づく新しい散乱理論を提唱したが対流圏への応用としては未だ充分でない。何れにしても現在乱れによる散乱の考え方としては Booker-Gordon に始まる相関函数の方法と Villars

Weiskopf の乱れのエネルギーによる方法がその主流をなしているようである。最近では Booker-Gordon の指数相関函数に対して批判がなされ物理的立場から妥当な種々な相関函数が用いられている。更に又乱れの異方性を考慮したような場合も取扱われ対流圏内の乱れの大きさについては垂直方向の大きさは水平方面に較べて約半分位であろうというようなことも云われている。然しこの散乱機構に反対し吾々が屢々用いている地球の半径を4/3倍することに依って得られる標準大気の議論は厳密な取扱いの第一近似に過ぎず標準大気の場合でも従来の理論では省略されていた物理的には coherent な分子散乱と考えられる所謂内部反射波の効果によるという説をとなしている T. J. Carroll のような研究者もいる。

米国で行われた refractometer の実測結果から1軒から3軒位の間に著しい屈折率の不連続層が可成り存在することが報告され又前節で述べたように吾国でも夜間には1軒以下に頻繁に屈折率の不連続層が出現しているので遠距離の伝播モードとしても大気の流れによる散乱と屈折率の不連続層との効果を考慮する必要があるように考えられる。

## 5. Fading と気象条件との関係

Fading についての研究は電波気象学的な立場からは従来あまりなされていない。これ迄の所 fading についてはある一定時間内の最大値と最小値との巾、或いはその累積頻度分布の10%値と90%値との巾等を fading range としてその日変化或いは季節変化といったものが論ぜられた。又その細かさの目安として秒程度の fading 或いは分程度のものといった分類がなされて上述の fading range との組合せに於て平均電界強度と対応させるといった事がなされている。

例えばあまり遠距離でない見越し外伝播に於ては概ね昼間に於ては fading range は小さく細かさは細かい。反対に夜間には fading range は大きくなり fading はゆるくなる。

又あるいは fading の分布函数についての議論も盛んである。例えば到来電波の振巾が一定で位相のみ異なる波のあつまりとするならば Gauss 分布をする筈でありそのうちの一つの波が特に強勢である時は Rayleigh 分布をする筈である。一般の場合にはその中間であるがこの分布函数と気象条件との関係が求められる事が望ましいがここ迄には到っていない。

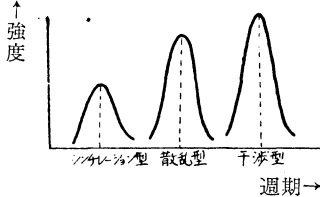
最近になって fading の発生機構に関する理論的研究がかなり行われるようになってきた。そうしてこれらの中には大気中の乱れに関する量や風速等が考慮に入れられるようになった。

筆者の一人はこの fading を解析して気象条件と対応させ Fading に関する一つの model を提唱した。それを用いて種々の伝播条件に対する fading の様式を定性的に説明する事に成功した。本節ではこの研究について

やや詳しく述べる。

Fading はその週期が非常にひろい範囲にわたっている。即ち短かいものは秒程度のものから長いものは一時間程度のもの或いは日変化等も長週期の fading として同時に観測される。特に時間程度の fading は非常に大きい場合が多いので記録された電界程度はそのままで統計的な解析をするのが困難である。そのために短週期の fading のみに著目して解析を行った。このために観測装置に特別な考慮を払い長週期の変動をとりのぞくような装置を作成した。観測された fading はその自己相関関数を求め次にそれに fourier 変換を行ってスペクトル関数を求めそのスペクトルの変化と気象条件の変化との関係を調べたのである。又このような大なる数値計算を行うために継電器を用いた計算装置も考案した。

スペクトルを計算した結果一般に週期40秒位迄に山が二つ現われることがわかった。一方 fading には所謂シンチレーション型、散乱型及び干渉型の三つが考えられるが平均的に考えてこの実験に使用した電波では大体週期の短かい方の山がシンチレーション型に属し長い方が散乱型になると考えられる。シンチレーション型の fading の週期と伝播路上の略中間の地点の風速の通路に直角な成分との関係を見ると大凡その二つの積が一定であることが見られる。この事からシンチレーション型の fading を起す大気中の屈折率の乱れの大きさを推定すると約60mという値が得られる。更に二番目の山即ち散乱型の fading の週期からその fading を起す領域内の乱流を推定する事が出来る。この乱流速度と略同じ時間に観測された高層観測の風速との比をとると凡そ50%位になる。更にこの観測に於ては測定し得なかったが干渉型の fading の週期は送受両アンテナのビームの交叉点附近の風速の伝播路に直角な成分に支配されると考えられ、これらの結果から fading のモデルとして第5図に示したようなものが考えられる。即ち60Mc帯で150軒程



第 5 図

度の距離における fading のモデルを示したものである。

気象条件がかわって風速が強くなるとスペクトルは一般的に短週期の方にずれる。特別な場合として風向が伝播路に平行になると散乱型の fading だけが短週期の方にづれることが予想される。fading の強さは殆んど屈折率の irregularity の強さに支配されると考えられる。今使用する電波の週波数を高くした場合を考えよう。その時にはシンチレーション型の週期は殆んど変わらないが散乱型は波長に比例して短くなり干渉型は波長の平方

根に比例して短くなる。実際に 3000Mc 位の電波のフェーディングについてはその最も週期の小さい Fading が散乱型になっている事が見出されている。又伝播距離によるスペクトルの変化を考えて見よう。この場合もシンチレーション型の週期は略々一定であるが散乱型は短週期の方にずれ干渉型はそれに反し長週期の方にずれる事が予想される。事実 200km 以上の伝播になると早い fading は卓越し干渉型と見られるものはその週期の伸長のために目立たなくなってくる。更に伝播路上の地形を考慮すると途中に山岳のある時には干渉型の Fading は強度が著しく弱くなり且散乱型の週期が短くなるので一見して非常に短週期のフェーディングのみになることも実際によく見られる事である。

このようにして fading のスペクトルによるモデルはかなりよく定性的に実際の fading を説明すると思われる。将来この研究を進める事によって使用周波数送受信点をきめる事によって地図及びその地方の統計的な気象要素からおおよその fading の特性をあらかじめ知る事が出来るようになると思われる。

Fading の強さについて一言すれば今 fading の振巾の二乗平均値の平方根と平均電界強度との比は距離が増すに従ってふえる。その関係は  $I \propto D^m$  で表わされる。ここに I は上に述べた比であり D は距離をあらわす。

更に I は著しい日変化を示し夜間に於ては小さな値を示すが日出と殆んど同時に増加を始め正午或は13時頃に最大に達し以後前夜半迄減りつづけて夜間の値になる。この日変化は非常に顕著であって昼間雲によって日射が遮ぎられると時をうきさず I の減少が始まる程である。この事は日中になると大気中の turbulence が強くなることと関連するものであって前述の fading range を考えるよりもっと合理的な考え方であると思われる。しかし 300km 400 km といった遠距離になるとこの変化は見られなくなる。

又観測される短週期の分布関数は殆んど Gauss 分布と見て間違いはないようである。以上が得られた結果であって今迄のいろいろな fading の取扱よりは一步その歩を進めたものとする。

#### あとがき

以上で非常に簡単に電波気象学に就いて述べた。然しながらここで述べた所はごくあらましましに過ぎず特に電波伝播の実験の結果等についての解説は殆んどなされていない。電波気象学の研究にたずさる者としては伝播試験の結果は実に多くの情報を与えてくれるし又特別な目的のために特殊な方法を用いる場合もあるので出来ればここに書き述べて諸賢のお教えを受けたかったのであるが割愛した。尙ここに述べた事は大部分我々の研究所に於てなされた事を中心にしたので他の多くの国内国外の諸研究についてはふれなかった。