

## 電 波 気 象 (1)

内 藤 恵 吉\*

は し が き

電波気象 (radio meteorology) は広い意味でいえば、レーダー気象 (radar meteorology), 極超短波の対流けん伝播 (tropospheric propagation), 空電およびラジオゾンデなど無線気象観測を含んでいるが、ここでははじめの2つのみについて述べる。

狭い意味での電波気象は、レーダーの発達と共に生れた。すなわち、ストームが探知出来ることから、レーダー気象の発展となり、ダクトなどによるレーダー波の異常伝播の発見から、極超短波の対流けん伝播の問題があらわれてきた。

レーダー気象において、ストームの探知は予報の現業面だけでなく、いわゆる mesoanalysis にとっても大きな役割を演じてきたが、他に譲ってここでは触れない。レーダー・スコープ上にあらわれる precipitation の水平面および垂直面の pattern は、降雨機構の研究に非常な貢献をなし、雲物理にとってもレーダーは不可欠の測器となった。Pattern の研究だけでなく、受信電力の大きさや降雨強度との関係から、雨量とくに面積雨量を推定しうることは、レーダーの実用的価値を一段と増すこととなった。すなわち、レーダーは、あまり良い精度は望めないにしても、雨量観測網の代用となりうるものが、わかっている\*\*。さらに、受信電力の変動はターゲット (target) の変動によるので、われわれの場合、大気乱流についての情報もある程度知りうる可能性がある\*\*\*。

\* 気象研究所測器研究部

\*\* これについては、今まで多くの紹介があったので、本文では触れない。

\*\*\* なほ、clear sky において Bénard Cell 状の echo pattern を得た例もある (たとえば、D. Atlas は波長 3cm の CPS-9 気象レーダーを用いて、1956年9月10日米国カンサス州サリナ市附近で、この種のものを得た)。

対流けん伝播においては、ダクトなどによる超屈折現象が、レーダー探知距離をいちじるしく増すことから、大気成層と地平線を越えての極超短波伝播との関連を研究することが盛んとなった。実測によると、見通し外はるか遠くまで (たとえば 600km 以上も) かなりの界強度が得られることが知られている。この問題について、初めは、適当に大気成層 (stratified atmosphere) を仮定して波動方程式を解き、得られた回折界によって議論が進められてきた。この解は、見通し外あまり遠くない所では良く実測を説明するものであるが、かなり遠くなると、実測値より非常に小さなものとなり、また距離による減衰特性が実測と合わない。そこで、かなり遠距離にわたる見通し外伝播を説明するため、大気の乱れによる電波の散乱がとり上げられてきた。この散乱伝播 (scatter propagation) は、種々の実測事実を説明し、また説明の可能性があるため、回折による伝播よりも、現在、一般に受け入れられている。しかし、今までの回折界を得た方法に疑問を持ち、別の見地からの計算によって、回折のみでも十分実測の界強度を得ると主張するものもある。もちろん、見通し外でも、山岳が回折端 (diffraction edge) として働きうるときは、回折界が散乱界よりも大であることも多い。

本文では、以上述べた事柄の基本的な面を解説する。

## 1. レーダー気象

## 1.1 レーダーの式 (Radar Equation)

一般に、レーダーの受信電力は次式で表わされる。

$$(1.1.1) \quad \bar{P}_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \cdot G \cdot \frac{\sigma \cdot V}{r^2} A_e$$

ここで、 $\bar{P}_r$  は受信電力の時間平均、 $P_t$  は送信電力、 $G$  はアンテナの利得、 $\sigma$  は単位の散乱体積毎のレーダー散乱断面積 (radar scattering cross section)、 $V$  は散乱体積 (scattering volume)、 $A_e$  はアンテナの受信有効面積、 $r$  はターゲットの距離である。上式からわかる

ように、 $\sigma$  とは、単位の散乱体積毎に、単位の立体角当りに、散乱体からレーダー方向へ散乱するエネルギー流と、散乱体に入射するエネルギー流密度との比である。 $A_e$  は実際の幾何学的面積の50~70%であり、波長を  $\lambda$  とすると、利得  $G$  との間に次の関係がある。

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

レーダーのパルスの長さを  $h$  とすると、レーダー・スコープ上の距離  $r$  よりの反射は、レーダー・ビームの立体角は  $\lambda^2/A_e$  であるから、領域  $r^2 \cdot (\lambda^2/A_e) \cdot (h/2)$  内の散乱体から来たものである。いま、雲、雨等の散乱体がこの領域を満たしているとするれば、(1.1.1) 式に以上の関係を入れて、

$$(1.1.2) \quad \bar{P}_r = \frac{P_t h A_e}{2r^2} F k \sigma$$

となる\*。領域を満たさぬときは、(1.1.1) 式にもどって考えねばならぬ。 $F$  および  $k$  は、前式にはないが、実際上必要な因子である。すなわち、 $F$  は理論的には説明されていないが、経験上挿入されている因子で、Austin と Williams<sup>2)</sup> の測定によると、SCR-15 10cmレーダーに対して約 0.2の値である。これについてはまた後で説明を加える。 $k$  は、レーダーとターゲット間の大気分子、雲、雨による減衰効果を示す因子である。

雨粒等の粒子からの散乱は、Rayleigh 散乱で近似されるが、粒子が球であつて水であるならば、Lowan<sup>3)</sup> の計算を用いると、波長  $\lambda=0.9\text{cm}$  のとき球の直径  $D$  が 1 mm 位まで、 $\lambda=3\text{cm}$  のときは 2 mm 位まで、 $\lambda=10\text{cm}$  のときは 5 mm 位まで、この近似は有効である。雪と氷に対しては、更に大きな粒子にまでこの近似は有効である。さてレーレー散乱で1ヶの粒子の後方への散乱断面積は

$$(1.1.3) \quad \frac{\pi^4}{4\lambda^4} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} \right)^2 D^6$$

である。ここで  $\varepsilon$  は水の、 $\varepsilon'$  は空気の誘電率である。

氷の小球に水の皮膜がある場合は、たとえ薄くても、氷だけの場合に比べて非常に散乱が強くなり、殆んど球が水のみである場合に近くなる<sup>4)</sup>。これは減衰効果についてもいえることである。一方、氷のみの場合減衰効果は非常に微小であることは<sup>5)</sup>、記憶すべきことである。

\* この式は諸文献<sup>1)</sup>に表われているものとは表現が異なるが、本質的には同じである。

\*\* 円偏波レーダーは、また雨のなかから航空機等を見出すのにも用いられる。

さて、雨粒等の粒子の集合体からの散乱を考える。各粒子よりの散乱が統計的に独立であるならば、集合体よりの平均的の散乱は、各粒子からの散乱エネルギー流の和に等しいから、(1.1.3) 式を用いて  $\sigma$  は次の如くかける。

$$(1.1.4) \quad \sigma = \frac{\pi^4}{4\lambda^4} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} \right)^2 \sum n_i D_i^6$$

ここで  $\sum$  は単位散乱体積内で行うものであり、 $n_i$  は  $D_i$  なる径の粒子の数である。

Radar cross section  $\sigma$  における特徴的な量  $\sum n_i D_i^6$  は通常  $Z$  なる記号で表わされ、 $Z$  を知るためには粒子の大きさについての分布、および単位体積中の平均粒子数が知られなければならない。これについて、多少その一般性について疑問があるにしても、依然として Laws and Parsons<sup>7)</sup> の研究が礎となっている。これを用いて雨量強度  $R$  ( $\text{mm hr}^{-1}$ ) と  $Z$  ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ) との関係を導くことが出来る。

$$(1.1.5) \quad Z = 200 R^{1.6} \text{ (mm}^6 \text{m}^{-3}\text{)}^{8)}$$

この  $Z-R$  の関係で、文献によって種々常数の値が異なるが、実際にプロットしてみると、ほとんど大同小異である。

また Laws and Parsons の分布を用いて radar cross section を計算してみると、レーレー近似は波長 3cm 以上について有効であるといわれている<sup>9)</sup>。雲の場合、雲粒の径は 100 ミクロン以下であるので、この近似は常に正しい。また Atlas and Boucher<sup>10)</sup> は雲中の雲水量 (liquid water content)  $M$  ( $\text{gm m}^{-3}$ ) と  $Z$  との関係を求めた。

$$(1.1.6) \quad Z = 0.0292 M^{1.82} \text{ (mm}^6 \text{m}^{-3}\text{)}$$

ここで  $M$  の標準誤差は約50%であった。

雲、降水の粒子は一般に完全な球形ではないので、散乱に及ぼす形の影響が問題である。今まで種々な形について、軸の方向、(氷粒子については)水の皮膜の有無を考慮して計算がなされた<sup>11),12)</sup>。その結果、形が非球状であると、どの場合も同じ体積の球形のものに比し、散乱及び減衰効果を増すことがわかった。粒子の非球状への変形率は、送信ビームに直角に偏波しているレーダー・エコーの偏波成分を測定することによって推定出来る<sup>13)</sup>。Hunter は円偏波のレーダーを用いて、エコーの楕円偏波率を測定した<sup>14)\*\*</sup>。これによると、降水強度(雨、雪)を“Gentle”, “Normal”, “Heavy”の三段階に分けた場合、gentle rain の場合以外、非球状性は幾分かは感知されるものであった。また melting level (ま

たは bright band) では、それが heavy rain よりも大であったことは注目すべきである。かくして得られた変形率と上述の計算結果とから考えると、実際の場合、散乱および減衰効果の球形の場合からの差異は、通常あまり問題にならない。しかし、melting level では考慮すべきであろうという結論になっている。乾いた雪(表面に水皮膜のない)の場合形が殆んど問題にならないことは、実用面の計算で非常に便利であり、Marshall 等は、雪の場合でも、水に換算すれば、(1.1.5) 式が成立することを見出した<sup>15),16)</sup>。しかし、同じ降水強度でも、誘電率の違いのため、雪の場合は雨のときの約  $1/5$  の Cross Section となる。

レーダーとターゲット間にある雲、雨は電波の減衰を引き起し、これは、粒子による電波の吸収、散乱によるものである。空気分子による減衰は、現用の波長ではほとんど問題にならない。氷または雪についても同様である。(1.1.2) 式のレーダーの式で、減衰効果を表わす  $k$  は次式で示される。

$$(1.1.7) \quad 10 \log k = 2 \int_0^r (c+p) dr$$

$r$  はレーダーとターゲット間の距離であり、 $c$  と  $p$  はそれぞれ雲、雨によるものである。上式右辺の 2 は、往路、復路による。多くの計算がなされているが<sup>17),18),19),20)</sup>、雲水量  $M$  ( $\text{gm m}^{-3}$ )、雨量強度  $R$  ( $\text{mm hr}^{-1}$ ) とすると、

$$(1.1.8) \quad \begin{aligned} c &= K'M \\ p &= KR\alpha \end{aligned}$$

と表わせる。減衰効果は波長に関係し、上式の定数は次表の如くである。(ただし、減衰の単位は db/mil)

減衰効果についての定数

波長 (cm)	0.9	3.2	5.7	10
定数				
$K'$	1.6	0.137	0.041	0.0144
$K$	0.25	0.0144	0.0047 (0.0025)*	0.00049
$\alpha$	1.0	1.3	1.1	1.0

\* Imai による<sup>20)</sup>

上表から考えると、波長 10cm のときは減衰は考える必要がない。5.7cm のときは問題となる。3cm, 1cm のときは非常に重要な因子となる。そこで、(1.1.4) 式によれば、レーダーの探知能力は波長の 4 乗に逆比例するが、減衰を考えると必ずしもそういえない。事実短い波長を用いると、レーダー・スコープ上の雨域は甚

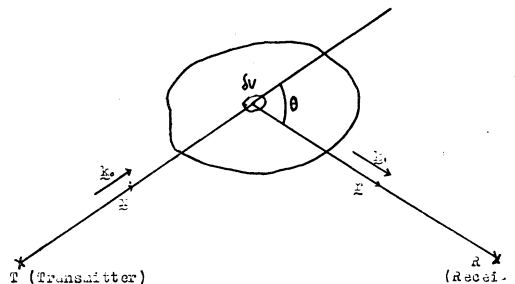
だしく変形されるし<sup>21)</sup>、また melting level より上の echo pattern は非常に歪曲されたものを示す可能性がある<sup>22)</sup>。この減衰効果を補正して雨量を推定することは、非常に誤差の入りやすいものであって、短波長は雨量測定には不適であることが示されている<sup>17)</sup>。

## 1.2 実測とレーダーの式

減衰がないならば、(1.1.2), (1.1.4), (1.1.5) の各式を用いて、

$$(1.2.1) \quad \bar{P}_r = \frac{A}{\lambda^{4r^2}} FR^{1.6}$$

となる。ここで  $A$  は常数。これによって降水強度と受信電力とを比較できるわけであるが、粒子の大きさ分布が変わるため、多少の不確かさは免かれぬことは明らかである。しかし、今まで上式を実測により確かめようとする努力がなされて来た。すなわち、Langille and Thain<sup>15)</sup> によると、未知の因子  $F$  は 0.6 (-4 db) と取るべきであるし、Hooper and Kiopax<sup>23)</sup> は、波長 9.1cm, 3.2cm, 1.25cm について  $F=1$  としている\*。Hood<sup>25)</sup> によると、波長 10cm で  $F$  は 0.37(-4.5db), 3cm で 0.1(-10db) であり、Austin and Williams<sup>2)</sup> によると、10cm で 0.2 (-7 db) であった。また霧に対して、波長 1.25cm で  $F=0.1$  (-10db) が得られた<sup>6)</sup>。以上のように、得られた  $F$  の値は種々様々であって、今までの所、満足すべき説明は与えられていない。粒子の大きさ分布にも問題があるが、他の可能性は radar cross section を導く過程にあるかも知れない。以下これについて述べる<sup>27)</sup>。



第1図 scattering cross section を求める図

\* Marshall, et al.<sup>24)</sup>によると、Hooper 等は実例により  $F=1$  を得たとしている。筆者の手に彼等の原論文がないので、Marshall 等に従ったが、数年前筆者がその論文を読んだときのノートが正しいならば、実測についての記述はあまりなく、また  $F=1$  であると明らかに主張しているとも思えない。(1.2.1) 式の実例による確かめが非常に難しいことに、注意すべきであらう。

いま一般的に第1図の如き場合を考える。図の  $V$  は scattering volume で、内部に雨粒のような散乱粒子を含み、その大きさは次の関係

$$\lambda \ll V^{1/3} \ll |\underline{x}|, |\underline{r}|$$

を満すとする。  $\underline{x}$ ,  $\underline{r}$  は微小体積素片  $\delta V (\ll \lambda^3)$  の位置を示すベクトルである。  $\underline{k}_0$  は入射波の波数ベクトル、  $\underline{k}_1$  は受信アンテナ方向への散乱波の波数ベクトルである。さて平面波  $E_0 e^{i(\omega t - \underline{k}_0 \cdot \underline{x})}$  ( $\omega$  は角周波数、 $t$  は時間) が入射するとき、1ケの粒子 (直径を  $D$  とし、  $D \ll \lambda$ ) からの散乱波は  $R$  点で

$$\underline{k}_1 \times (\underline{k}_1 \times \underline{E}_0) \frac{1}{r} \left( \frac{D}{2} \right)^3 \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} e^{i(\omega t - \underline{k}_0 \cdot \underline{x}) - i \underline{k}_1 \cdot \underline{r}}$$

で表わせる (レーレーの近似)。ここで  $\varepsilon$  は粒子の、  $\varepsilon'$  は空気の誘電率である。そこで  $\delta V$  よりの寄与は

$$\underline{k}_1 \times (\underline{k}_1 \times \underline{E}_0) \frac{1}{r} \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} e^{i(\omega t - \underline{k}_0 \cdot \underline{x}) - i \underline{k}_1 \cdot \underline{r}} \sum_{\delta V} n_D \left( \frac{D}{2} \right)^3$$

となる。  $n_D$  は  $D$  なる直径を持つ粒子の  $\delta V$  内の数。  $\delta V$  点における単位体積当りの粒子の総体積 (すなわち、雨の場合は liquid water content) を  $q$  とすると、で

$$\sum_{\delta V} n_D \left( \frac{D}{2} \right)^3 = \frac{3}{4\pi} q \delta V$$

ある。したがって  $V$  全体よりの寄与は、結局、

$$(1.2.2) \quad \underline{E} = \underline{k}_1 \times (\underline{k}_1 \times \underline{E}_0) \frac{3}{4\pi r} \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} e^{i(\omega t - \underline{k}_1 \cdot \underline{r}} \int_V q(\underline{x}, t) e^{-i \underline{k} \cdot \underline{x}} dV(\underline{x})$$

となる。ここで

$$(1.2.3) \quad \underline{k} = (\underline{k}_0 - \underline{k}_1), \\ |\underline{k}| = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}.$$

今

$$(1.2.4) \quad q(\underline{x}, t) = \overline{q(\underline{x})} + \delta q(\underline{x}, t) \\ \overline{\delta q(\underline{x}, t) \delta q(\underline{x}', t)} = \overline{\delta q^2} \rho(\underline{y}), \underline{y} = \underline{x} - \underline{x}'$$

とすると、(1.2.2) 式を用いて

$$(1.2.5) \quad \overline{\underline{E} \cdot \underline{E}^*} = \frac{\pi^2}{\lambda^4} \frac{\sin^2 \chi}{r^2} \underline{E}_0 \cdot \underline{E}_0^* \left( 3 \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} \right)^2 \\ \times \left[ \left| \int_V \overline{q(\underline{x})} e^{-i \underline{k} \cdot \underline{x}} dV \right|^2 + V \overline{\delta q^2} \int_V \rho(\underline{y}) e^{-i \underline{k} \cdot \underline{y}} d\underline{y} \right]$$

をうる。  $\underline{x}$  は  $\underline{E}_0$  と  $\underline{k}_1$  となす角、  $\rho(\underline{y})$  は  $\delta q$  の相関関数である。

明らかに (1.2.5) 式の第一項は coherent 部を、第二項は Incoherent 部を示す。何れの部分が卓越するか

は、いろいろの問題を含んでおり、とくにレーダーではパルスの形が問題である。ここでは変動分の第二項のみを考えて、第一項には触れない。レーダーの場合、  $x = \pi/2$ ,  $\theta = \pi$  で、第二項から radar cross section (とくに  $\sigma_B$  とかく) は、

$$(1.2.6) \quad \sigma_B = \frac{\pi^4}{4\lambda^4} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} \right)^2 [\langle n \rangle \langle D^6 \rangle + \langle n \rangle^2 \langle D^6 \rangle - \langle D^3 \rangle^2] \times \int_V \rho(\underline{y}) e^{-i \underline{k} \cdot \underline{y}} d\underline{y}$$

となる。ここで  $n$  は単位体積中の粒子総数、また時間平均と集合平均を等しいとして、

$$(1.2.7) \quad \langle \delta q^2 \rangle = \left( \frac{\pi}{6} \right)^2 [\langle n \rangle \langle D^6 \rangle + \langle n \rangle^2 \langle D^6 \rangle - \langle D^3 \rangle^2]$$

なる関係を用いた。

$\delta q$  の相関の Fourier transform は、よく知られているように、  $\delta q$  なる乱れのエネルギー・スペクトラム、  $S(\underline{k})$ , である。レーダーの場合 (1.2.3) 式より

$$(1.2.7) \quad |\underline{k}| = \frac{2\pi}{\lambda/2}$$

であるから、この波数に対する乱れのエネルギー密度  $S(\underline{k})$  は、(明らかに波長の函数である。したがって

$$(1.2.8) \quad \sigma_B = \frac{\pi^4}{4\lambda^4} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon + 2\varepsilon'} \right)^2 [\langle n \rangle \langle D^6 \rangle + \langle n \rangle^2 \langle D^6 \rangle - \langle D^3 \rangle^2] \times S(\underline{k})$$

から、radar cross section の波長特性は一般には  $\lambda^{-4}$  ではなく、  $\lambda^{-4}$  となる場合は  $S(\underline{k}) = \text{const}$  の場合、すなわち、  $\delta q$  の相関のない場合である。そこで、今までの理論式 (1.1.4) 式と (1.2.8) 式との大きな差違は、  $\delta q$  の相関、いいかえれば、liquid water content の乱れの状態を考慮するかどうかにある。

さて、実際この乱れはどのようにになっているだろうか。今までこの種の考察はほとんどなかった。しかし、雲、雨等を観察すると、明らかに細胞状のかたまりが見られる。一つの雲にも濃い部分と薄い部分、雨では強い強度の部分と弱い部分がある。この細胞が、乱流論という "Energy Containing Eddies" (又は最大乱子) に対応すると考えられ、この大きさが相関関数の曲線の巾に関係する。目視によれば、この細胞の大きさは数 10m から 100m の程度と考えられる。したがって、一般には、かなりの範囲にわたって相関があると考えるのが自然であろう。

換言すれば、各粒子の時間的変化、すなわち運動は、

あまり離れていないもの同志は互に関連しており、ある小範囲の粒子群はほぼ集団として運動し変化すると考えられるのである。そこでその範囲内の各粒子よりの散乱には互に関連があって、一般には相関を無視することは出来ないであろう。しかし、(1.1.4)式を導く過程には、この事実が全く考えられていないのである。

なお、ここで次の事も注意すべきであろう。ある瞬間の各粒子の位置は、全く at random と考えられる。いまそれがそのまま固定されて時間的に変化しないとすれば、受信電力(の時間平均)は、(1.2.5)式を導く過程からわかるように、coherent 部のみで incoherent 部は存在しない。すなわち、時間的変化があって、はじめて incoherent 部があらわれるのである。

雲粒等の粒子がある場所には濃く、ある場所には淡く集まるといった状態が、大気乱流によって起されるならば、大気乱流論の知識が大いに役立つと思われる。(1.2.7)式からわかるように、われわれの場合、レーダー波長の  $\frac{1}{2}$  の程度の scale を持つ乱れが問題である。したがって、乱流論の "Inertial Subrange"<sup>28)</sup> の乱れが対象となる。そこで大きな scale の乱れがどうであろうとも、 $\overline{S(k)}$  は  $k$  の絶対値のみに依存するであろう(局所的等方性)。また当然ではあるが、 $|k|$  が大きくなると(レーダー波長が短くなると)、 $\overline{S(k)}$  は小となる\*。

以上散乱の incoherent 部についてやや細かく述べたが、ここでは触れなかつた(1.2.5)式の第一項(coherent 部)も、必ずしも無視出来るとは限らぬことに注意すべきであろう。

とにかく、絶対測定は非常に難かしいが、いま後の測定が待たれる次第である。その際使用波長を変えて測定することは勿論であるが、同じ雲、雨域を、同じビーム角、同じパルス巾で観測するといった、いわば Scaled Experiments が望ましい。

### 1.3 レーダー受信電力の変動

ターゲットの粒子はたえず運動して、レーダー・エコ

一の変動を引き起す。したがって雨などのパターンを見るとき、瞬間的に受けられたエコーのみでは十分でなく、いくつかの統計的に独立なエコーを受けて平均する必要がある。いわゆる time diversity が必要である。 $\tau$  時間間隔のエコーが統計的に互に独立であるとすれば、この  $\tau$  は、レーダー・ビームを一方方向に向けて(A-scope)一点からのエコー変動を測定し、その自己相関を求めることによって得られる。ある観測では、3cmのレーダーで  $\tau$  は 20msec の程度<sup>29)</sup>、また他の観測では 1.25cm で 4 msec の程度<sup>30)</sup>であった。

エコー平均化は、レーダー・ビームの回転がそれ程速くないこと、ブラウン管螢光膜に残像性があることによって、ある程度は行われているが、通常はそれだけでは不十分である。そこで写真をとる時には、露出時間を長くして、ビームを何回転もさせて撮影する。この種の平均化を更に正確に行うものとして考えられたものが、pulse integrator である<sup>31)</sup>。

さて、受信電力の変動は如何なる分布を持つであろうか。今までのレーダーの式は、全く coherent な部分を考えず、incoherent 部のみを考えた。したがって、変動は当然レーレー分布となる<sup>32)</sup>。これは実験的にもほぼ確かめられている<sup>30)</sup>。しかしながら、受信電力には、(1.2.5)式からわかるように、coherent 部も存在する。そこで理論的にいえることは、もし incoherent 部が卓越すればレーレー分布、coherent 部が卓越すればガウス分布、一般にはレーレー分布とガウス分布の間ということになる。実験データから分布を求めるとき、一般に点は滑らかな曲線上にのることはなく、散在するということが、また今までは先入主的にレーレー分布を予想していたことなどから、真の分布がレーレーとガウスの中間である場合、これをレーレー分布としてしまう可能性も極めて多いのである。そこで今後のより精密なデータ解析が望まれる。またこれが coherent 部がどの程度考慮すべきかをきめる1つの方法ともなるであろう。

先に述べた time diversity の  $\tau$  は変動の速さと関係がある。この変動は、最も簡単には、ターゲット粒子群の Doppler 効果によると考えられる。そこで、容易にわかるように、変動の速さは波長に逆比例する。したがって、使用波長が短くなると、当然  $\tau$  が小さくなるであろう。これは、先に述べた  $\tau$  の観測結果の傾向を、定性的に説明するものと思われる。しかし、いうまでもなく、波長以外に種々の因子、たとえば風速等が入ってくることも注意すべきである。またこのことから、

\* 乱流論と類似に考えても、いろいろな(?)結論が出るかも知れない。たとへば、ある考え方は  $k^2 S(k) \sim k^{-5/3}$  となり、また別の考え方は  $k^2 S(k) \sim k^{-7/3}$  となるが、詳細は略す。

なほ、この  $S(k)$  が  $|k|$  の増大と共に小さくなる傾向は、本節の始めに述べた  $F$  の実測値の傾向、すなわち、波長が短くなると  $F$  値が小となる傾向に、合うようにみえる。しかし、 $S(k)$  のみが  $F$  の原因でないことも考えねばならない。

受信電力変動を解析することによって、風の乱れに対する情報を得る可能性も生ずるのである。

“Rasaph” (radar signal spectrograph) と称するものは、エコー変動の周波数スペクトラムをうる装置である<sup>33)</sup>。

今まではすべて受信電力の時間的変動について考えた。しかし、2ヶの受信アンテナを用いての受信電力の空間的変動(これからすぐ得られるものは空間的相関)、異なる周波数を用いたときの相関等も考えられ、これらはいずれも、ターゲットの存在する領域での乱れの状態について、情報を提供しうるものである。

#### 1-4 レーダーによる種々の表示

A-Scope, PPI (Plane Position Indicator), RHI (Range/Height Indicator) は、レーダー表示の中でとくに知られているものである。このほか最近発達してきたものとして、Height/Time Display, DAPI (Constant Altitude Plane Indicator), 等強度エコー線 (Iso-Echo Contour) 表示等がある。

Height/Time Display は、レーダーを天頂に向けて固定し、その方向のエコー・パターンの時間的変化を示すものであって、RHI と同じ様な役割を演ずるが、RHI よりも解析に便利なおことがある。

CAPI は一定高度の水平面上のエコー・パターンを示すものである。PPI ではビームに巾があるため、ある高度範囲内のエコーはすべてスコープ上に表われるが、CAPI では、仰角を少しづつ変えて得られる幾つかのPPI 像から一定高度の部分抜き出して、一定高度のエコー平面図を作るのである。

PPI で受信機の利得を次第に減ずることにより、等強度エコー線が得られそうであるが、先に述べたように実際はエコーが絶えず変動するので、この方法では望ましい等エコー線が得られにくい。そこで、いくつかの互に独立なエコーをとって平均する必要がある。そのためには種々の等強度エコー線表示が考えられる。その一つの方法として、遅延回路を用いてエコーを貯蔵、平均化するものがある<sup>34)</sup>。この種の装置は特に面積雨量測定に役立つものである。(次号につづく)

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば Marshall, J.S., Langille, R.C., and Palmer, W. Mck., 1947: The measurement of rainfall by radar. *J. Meteorol.* **4**, 186-192.
- 2) Austin, P.M., and Williams, E.L., 1951: Comparison of radar signal intensity with precipitation rate. MIT, Weather Radar Research, Tech. Rep., No. 14, 43pp.
- 3) Lowan, A., 1949: Tables of Scattering Functions for Spherical Particles. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 4) Kerker, M., Langleben, P., and Gun, K.L.S., 1951: Scattering of microwaves by a melting spherical ice particle. *J. Meteorol.* **8**, 424.
- 5) Langleben, M.P., and Gunn, K.L.S., 1952: Scattering and absorption of microwaves by a melting ice sphere. McGill University, Stormy Weather Group, Scientific Report MW-5, 33.
- 6) Labrum, N.R., 1952: Some experiments on centimetre wavelength scattering by small obstacles, *J. Appl. Phys.* **23**, 1320-1323.
- 7) Laws, J.O., and Parsons, D.A., 1943: The relation of raindrop-size to intensity. *Trans. Am. Geophys. Un.* **24**, part II, 452.
- 8) Marshall, J.S., and Palmer, W. Mck., 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.* **5**, 165-166.
- 9) Haddock, F.T., 1948: Scattering and attenuation of microwave radiation through rain. Naval Research Laboratory, Washington, D. C. (unpublished manuscript).
- 10) Atlas, D., and Boucher, R.J., 1952: The relation of cloud reflectivity to drop size distribution. Proceedings of the Third Radar Weather Conference, Sept. 15-17, 1952, McGill University, Montreal, p. B-1.
- 11) Atlas, D., Kerker, M., and Hitschfeld, W., 1953: Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric particles. *J. Atm. and Terrest. Phys.* **3**, 108-119.
- 12) Labrum, N.R., 1952: The scattering of radio waves by meteorological particles. *J. Appl. Phys.* **23**, 1324-1330.
- 13) Browne, I.C., and Robinson, N.P., 1952: Cross-polarization of the radar melting band. *Nature* **170**, 1078.
- 14) Hunter, I.M. 1954. Polarization of radar echoes from meteorological precipitation. *Nature* **173**, 165-166.
- 15) Langille, R.C., and Thain, R.S., 1951: Some quantitative measurements of three-centimeter radar echoes from falling snow. *Can. J. Phys.* **29**, 482-490.
- 16) Marshall, J.S., and Gunn, K.L.S., 1952: Measurement of snow parameters by radar. *J. Meteorol.* **9**, 322-327.
- 17) Hitschfeld, W., and Bordan, J., 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteorol.* **11**, 58-67.

- 18) Hitschfeld, W., and Marshall, J.S., 1954: Effect of attenuation on the choice of wavelength for weather detection by radar. Proc. I.R.E. **42**, 1165-1168.
- 19) Gunn, K.L.S., and East, T.W.R., 1954: Microwave properties of precipitation particles. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. **80**, 522-547.
- 20) Imai, I., 1957: Attenuation of microwaves through rain for various drop-size distributions. J. Meteorol. Soc. of Japan **75**, 65.
- 21) Atlas, D., and Banks, H.C., 1951: The interpretation of microwave reflections from rainfall. J. Meteorol. **8**, 271-282.
- 22) Atlas, D., and Banks, H.C., 1950: A virtual echo-layer above the bright band. J. Meteorol. **7**, 402-403.
- 23) Hooper, J.E.N., and Kippax, A.A., 1950: Radar echoes from meteorological precipitation. Proc. Inst. of Elec. Eng. (London), Part 1, **97**, 89-97.
- 24) Marshall, J.S., Hitschfeld, W., and Gunn, L.S., 1955: Advances in Geophysics, II, Academic Press, New York.
- 25) Hood, A. D., 1950: Quantitative measurements at 3 and 10 cm of radar echo intensities from precipitation. National Research Council of Canada, Report, No. 2155, 15.
- 26) Donaldson, R.J., Atlas, D., Paulsen, W.H., Cunningham, R.M., and Chmela, A.C., 1953: Quantitative 1.25 cm observations of rain and fog. Proc. Conference on Radio Meteorology, Nov. 9-12, 1953. The Univ. of Texas, Austin, Tex., p. VII-6.
- 27) Naito, K., 1958: Radio scattering by rain. Paper presented at the Spring Meeting of Meteorol. Soc. of Japan.
- 28) Batchelor, G.K., 1953: The Theory of Homogeneous Turbulence, Cambridge University Press, London, Chap. VI.
- 29) Fleisher, A., 1953, 1954: Information contained in weather noise. MIT, Weather Radar Research, Tech. Rep., No. 22 A, B, C.
- 30) Bartnoff, S., Paulsen, W.H., and Atals, D., 1952: Experimental statistics in cloud anechoes. Proceedings of the Third Radar Weather Conference, September 15-17, 1952, McGill Univ., Montreal, P. G-1.
- 31) Williams, E.L., 1949: The pulse integrator, Part A. MIT, Weather Radar Research, Tech. Rep., No. 8A, p.35. Ligda, M.G.H. 1951. The pulse integrator, Part B. Tech. Rep., No. 8 B.
- 32) Marshall, J.S. and Hitschfeld, W., 1953: The interpretation of the fluctuating echo from randomly distributed scatterers, Part I, Can. J. Phys. **31**, 962-994. Wallace, P.R., 1953: The interpretation of the fluctuating echo from randomly distributed scatterers, Part II, Can. J. Phys. **31**, 995-1009.
- 33) Williams, E.L., 1950: Radar signal spectrograph (Rasaph). MIT, Weather Radar Research, Tech. Rep., No. 9B, 24 pp.
- 34) Kodaira N., 1957: An iso-echo contouring device., Proceedings of the Sixth Weather Radar Conference, 1957, p. 307-314.

### 月例会分科会予定

- 11月 風 (詳細は表紙4頁)
- 12月 気象電気
- 1月 太陽活動と気象,
- 2月 数値予報, 長期予報, 観測と測器
- 3月 航空気象