5章 分散ターゲット

レーダーを気象目標に向けると、レーダービーム内には多数の雨滴や雲粒が同時に存在する。嵐や雲は通常、レーダービームを完全に埋め尽くすほど大きい。これが当てはまらない唯一の場所は、レーダービームがエコーなしからエコーありへ、またはその逆へと移動する嵐の境界沿いである。同様に、暴風雨の頂上や底付近では、ビームが部分的にエコーに入ったり入らなかったりすることがある。そうでなければ、ビームが完全に満たされたとき、レーダーに戻るパワーは、レーダービームによって照らされている個々のターゲットすべてから来る。

パルス体積内の粒子数を少し考えてみよう。大陸の雲には200個/cm^3以上の雲粒が含まれている。これは2×10^8 /m^3に相当する。アンテナのビーム幅が1°のレーダーの場合、57 kmの距離でビームは直径1 kmになる。レーダーのパルス長が1 μsの場合、空間上の有効サンプル体積は150 mとなる（訳者注：そもそも単位がmなので体積ではなく長さのような気がするが，光速3×10^5 km/s×10^{-6} s = 0.3 kmで，その片側の面にビームが当たるから半分…ということ？）。するとレーダーパルスの体積は同時に2×10^{16}個（訳者注：2×10^8 /$m^3\times500^2\pi$ $m^2\times150$ m = 2.35×10^{16}）の雲粒を照らすことになる。

降水サイズの粒子の数はこれより少ない。典型的な雨は、1立方メートルあたり数個から数百個の雨粒のオーダーである。したがって、1つのレーダーサンプル体積には10^9から10^{12}個の雨粒があることになる。これでも非常に多くの粒子である。気象目標からのリターンは、何十億ものリターンを平均化したものである。

数学的には、気象ターゲットの後方散乱断面積の合計は、個々の後方散乱断面積の合計である、と言うことによって、これを非常に簡単に表現することができる：

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i \tag{5.1}$$

ここで、総和はサンプル体積内のすべてのn個の粒子にわたって行われる。

独立までの時間

注意しなければならないことの一つは、雨滴の体積をどれだけ早くサンプリングするかということである。嵐の中にレーダーエネルギーのパルスを送り、エコーが返ってきた後、最初のパルスの直後に嵐の中に2番目のパルスを送ると、雨粒が互いに対して、あるいはレーダーに対して相対的に位置を変える時間はほとんどない。パルスをほぼ同時に送れば、レーダーが測定するリターンはほとんど同じになる。一方、空間の同じ地点に2回目のパルスを送信する前に適当な時間待った場合、レーダーによってサンプリングされる粒子の配列は全く異なるかもしれない。この2つの限界の間が、レーダーにとって興味深く重要な領域である。

したがって、レーダーで雨滴やその他の流体粒子をサンプリングする場合、粒子が十分に再シャッフルされ、真に異なる粒子に到達できるようになるまで十分待つ必要がある。そうでなければ、同じ初期

配置を複数回測定しているだけで、新しい情報は得られない。このようなことをしたい理由の一つは、真の信号振幅の良い平均を得るためである。気象エコーは常に変化している。1 回の瞬間的な測定では、真の信号強度を正しく測定できない可能性がある。いくつかのサンプルをまとめて平均化することで、嵐の強さをより正確に測ることができる。

測定値が互いに独立するように水象粒子（訳者注：雲や霧、雨粒、霧雨、雪やあられ、雹(ひょう)、凍雨、細氷など）が再配列する時間は、"独立までの時間"または"非相関時間"と呼ばれる。数学的には、ターゲットのサンプルが完全相関から 0.01 の値までデコリレーションするのにかかる時間と定義される（訳者注：出したビームの波形と返ってきたビームの波形の相関かな？）。完全相関は相関係数が 1.0（逆相関がある場合は-1.0）であり、相関係数が 0.00 は相関が全くないことを意味するため、信号が 0.01 まで非相関になるのを待つということは、最新のサンプルが元のサンプルとほとんど完全に異なるほど十分に待ったことを意味する。

サンプルの非相関時間は 3 つの要因に依存する。1 つは使用するレーダーの波長、2 つ目は水象粒子そのもの、3 つ目はサンプル体積内の乱流である。波長が短い場合、粒子はレーダーに対して大きく位置を変えるためにそれほど遠くまで移動する必要がないため、短波長レーダーでは非相関時間が短くなる。

粒度分布はこれらに次ぐ要因である。すべての粒子が同じ大きさであれば、すべて同じ終端速度で落下し、一緒に落下する。このため、サンプルの非相関化が遅くなる傾向がある。暴風雨の中に様々な大きさの粒子が含まれている場合、同じ体積の中に多くの異なる大きさの粒子が落下することになる。このため、サンプルの非相関化は速くなる傾向がある。非相関時間が最も短くなるのは、ひょうと雨が同じ体積の試料に含まれる場合である。

自己相関関数が 0.01 の値まで下がるのに必要な時間である $t_{0.01}$ は、およそ 2λ から 3λ であることが、非相関時間の研究から分かっている。測定された非相関時間は、嵐やレーダーによって 3.5 ミリ秒から 30 ミリ秒近くまで幅がある。

できるだけ近い時間帯でサンプリングしたいが、独立したサンプリングが必要な場合、およそ $10t_{0.1}$（訳者注：$t_{0.01}$ の誤植なのか，相関係数が 0.01 になるまで待たず 0.1 で打ち切るということなのか。）で与えられるレートでサンプリングしたい。これは、1 秒間に 3～30 回（3～30Hz）のオーダーでサンプリングすべきことを示唆している。ほとんどのレーダーはこれよりはるかに高いレートでサンプリングしている。現代のドップラーレーダーは、1000Hz に近いパルス繰り返し周波数（PRF）を使用することが多い。1000Hz の PRF では、サンプリング時間が近すぎて真に独立したサンプルが得られないため、数個の独立したサンプルに相当するものを得るためには、多くの連続したパルスを一緒に平均化する必要がある。

詳細は省くが、レーダーによる連続サンプルの独立時間を短くする要因は他にもある。その要因には、

レンジ平均を行うこと、データ収集中にアンテナを方位角方向に移動させること（これはいずれにせよほとんど常に行われる）、サンプルボリューム内のウィンドシア、乱気流など。

サンプル量

前述したように、レーダーは空間内のある体積をサンプリングする。このサンプル体積は次式で与えられる。

$$V = \pi \frac{r\theta}{2}\frac{r\phi}{2}\frac{h}{2} \tag{5.2}$$

ここで、θとϕはそれぞれ水平ビーム幅と垂直ビーム幅、r はレーダーからサンプル体積までの距離、h はパルス長である。θ とϕは通常、度単位で測定または引用されるが、この式やこれらを使用する他の式ではラジアン単位でなければならない。V、r、h は、どのような単位でもよい。

パルス長 h は、送信パルスの継続時間に対応する空間内の長さである（注意：レーダーのパルス継続時間をパルス長と呼ぶことがある）。つまり、h＝cτ であり、c は光速である。上のサンプル量の式で（h/2）としたのは、正確に同じ時刻にレーダーに戻ってくる信号だけに興味があるからである。レーダーパルスの前縁は後縁より τ 秒前に始まり、後縁と同じ瞬間にレーダーに戻ってくるようにしたいので、後縁より短い距離しか進むことができない。そうでなければ、後縁からのエコーと同時にレーダーに戻ってくることはない。

我々は、レーダーサンプル体積内のターゲットの全後方散乱断面積を知りたい。これを行う便利な方法は、単位体積の後方散乱断面積を求め、これに総サンプル体積を掛けることである。したがって

$$\sigma_t = V\sum_{vol}\sigma_i \tag{5.3}$$

ここで、$\sum_{vol}\sigma_i$は、単位体積にわたる個々の後方散乱断面積の総和である。

サンプル体積についての(5.2)式において，我々は水平・鉛直ビーム幅θ，ϕを用いた。これは、レーダーの送信パルスに含まれるすべてのエネルギーが、上記で使用したハーフパワービーム幅内に含まれると仮定したものである。しかし、前述したように、実際のレーダーアンテナは、このようなきれいなビームパターンを持たない。Probert-Jones (1962) はこのことを最初に認識し、ほとんどの気象レーダーで使用されている円形パラボラアンテナから発生するアンテナビームのメインローブ内のパワー分布を正しく説明するレーダー方程式を導いた。ビームパターンにガウシアン形状を用い、Probert-Jones はレーダーパルスの体積が以下のようになることを発見した：

$$V = \frac{\pi r^2\theta\phi h}{16\ln 2} \tag{5.4}$$

ここで、分母に 2 ln(2)の係数を追加することで、式 5.2 の導出に使用した仮定よりも実際のビーム形状をうまく説明している。ln(2)は、2 の自然対数（e を底とする対数）である。

σ_iのレーダー方程式

ここで、全後方散乱断面積σ(式 5.3)とサンプル体積(式 5.4)の式を、先に導出した点ターゲットの式(式 4.7)に代入して、ビーム充填気象ターゲットのレーダー方程式を得ることができる。これにより

$$p_r = \frac{p_t g^2 \lambda^2 \theta \phi h \Sigma \sigma_i}{1024 \ln 2\, \pi^2 r^2} \tag{5.5}$$

ここで、すべての数値項は結合されている。

レーダー反射率 η

気象目標へのレーダー応用の歴史の初期に、全後方散乱断面積$\Sigma\sigma$に関係するパラメータが定義された。定義されたパラメータはレーダー反射率と名付けられ、ηという記号が与えられた。レーダ反射率は次のように定義された：

$$\eta = \sum_{UnitVolume} \sigma_i \tag{5.6}$$

ここで、和は空間の単位体積にわたって行われる。後方散乱断面積の単位は面積（たとえば，cm^2）であり、体積の単位は体積であるため、レーダー反射率 η の単位は通常 1/cm または cm^{-1} である。レーダー反射率は、広範なパラメータではなく、集中的なパラメータである。$\Sigma\sigma_i$はサンプル体積内の個々のターゲットの合計だが、η は単位体積に正規化される。レーダー反射率についてはすぐに戻るが、まず、今日ほとんどの気象学者が一般的に使用しているレーダー方程式の導出を完成させよう。

ターゲットの大きさのもう一つの側面は、後方散乱断面積に関連している。複雑な問題の一つは、レーダーの波長と比較したターゲットの相対的な大きさである。粒子が波長に比べて小さい場合は、レイリー近似が適用される。波長に比べて粒子が大きければ、ターゲットは光学領域に入る。また、粒子が中間の場合、ミー散乱体となる。ほとんどの気象レーダー（すなわち波長 3cm 以上）では、ほとんどすべての雨滴は波長に比べて小さいと考えられるので、レイリー近似が適用される。式 4.9 を想起すると

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \tag{5.7}$$

ここで、σ_iは i 番目の球の後方散乱断面積、λ は波長、D は直径である。|K|は複素屈折率に関係するパラメータの大きさで，次の式で与えられる：

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \tag{5.8}$$

複素屈折率 m は次式で与えられる。

$$m = n + ik \tag{5.9}$$

n は球の屈折率、$i = \sqrt{-1}$、k は球の吸収係数である。

$|K|^2$ の値は材料、温度、レーダーの波長に依存する。温度と波長の依存性はそれほど大きくないが、精密な作業では説明する必要があるかもしれない*6。しかし、材料の種類による依存性は大きい。最も一般的に使用されるレーダー周波数と妥当な温度では、水の$|K|^2$ は通常 0.93 とされる。氷の場合、$|K|^2 = 0.197$。この 2 つの値は 5 倍、つまり約 7dB（訳者注：dB は B(ベル)の 10 分の 1。電磁波の減衰量

についてのデシベルは，減衰前の電磁波の電力の減衰後の電磁波に対する比の常用対数の 10 倍と定義される。$\log_{10}5=0.699$ なので 7dB。）異なる。レーダーでスキャンされる暴風雨のあらゆる部分がすべて水でできていると仮定するのはかなり一般的な方法であるため、レーダー・リターンの計算には水の$|K|^2$の値が使われる。嵐の氷の領域から測定していることが確実にわかっている場合は、代わりに氷に対する$|K|^2$の値を使う必要がある。

*6: Battan (1973)は、様々な温度と 0.62、1.24、3.21、10cm の波長における水と氷の$|K|^2$の適切な値をリストアップした 2 つのテーブルを提供している。

D^6とｚのレーダー方程式

σ_iについての式 5.7 を式 5.5 に代入すると、次のようになる。

$$p_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta\phi h |K|^2 \Sigma D_i^6}{1024 \ln 2\, \lambda^2 r^2} \tag{5.10}$$

この式は、単位体積内のすべての雨滴の直径がわかっていれば、雨滴のサンプルからの受信電力を計算するのにまったく問題ない。もちろん、ほとんどの場合、このようなことは起こらない。そこで、この問題を回避するために、レーダー反射因子と呼ばれる最後のパラメータを定義する。

$$z = \sum_{vol} D^6 \tag{5.11}$$

ここでも、総和はレーダーの全サンプル体積ではなく、単位体積に対して行われる。この置換を行うと、レーダー方程式の有用なバージョンが得られる：

$$p_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta\phi h |K|^2 z}{1024 \ln 2\, \lambda^2 r^2} \tag{5.12}$$

この式は非常に一般的であり、粒子がレイリー仮定を満たしていれば、どのようなレーダーにも適用できる。

式 5.6、5.7、5.11 を調べると、η と z は次の関係式で表されることがわかる。

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2 z}{\lambda^4} \tag{5.13}$$

z の次元は L^3（L は「長さ」）であるのに対し、λ^4 の次元は L^4 なので、η の次元は L^{-1} であることに注意。

なぜ気象目標を記述するのに、2 つのパラメータが必要なのだろうか？どちらか 1 つで十分ではないか？2 つ目の質問に対する答えは「イエス」である。実際、どちらも異なる目的で使用されている。レーダー反射率が最初に定義され、多くの初期の気象学的研究に用いられた。しかし、これには重大な欠点がある。嵐からのレーダー反射率 η は、測定を行うレーダーの波長に依存する。レーダー反射因子 z にはこのような制約はない。その結果、嵐のレーダー反射因子 z はレーダーに依存せず、まさに嵐の特性なのである。このことは、式 5.11 で与えられる z の定義から明らかであろう。そこでは，z は暴風雨の雨滴の数と大きさにのみ依存することが明らかである。

2 つの反射率パラメータを持つことの欠点の 1 つは、最も単純な名前が最初に使われてしまうことで

ある。現在ではレーダー反射因子 z が最も頻繁に使われているが、「レーダー反射率」という単純な名称はすでに使われていた。それから 30～40 年経った今、私たちの多くは、本来のレーダー反射率 η を無視して z をレーダー反射因子と呼ぶことで、この問題を都合よく解決している。なぜなら、私たちが「反射率」と呼んでいる用語は、本当は「レーダー反射率係数」であることを知っているからである。私たちは怠慢なのだろうが、自分たちが何を言っているのかが分かっている限り、深刻な問題は生じないはずだ。

さて、ビーム充填気象レーダー方程式の導出を続けよう。式 5.12 にはまだ 1 つ足りない項がある。減衰を考慮していないのである。第 8 章で説明するように、レーダーに戻されるパワーは多くの要因によって減少する。大気、雲、雨、雪、ひょう、あるいは導波管やレドーム（訳者注：レーダーとドームを組み合わせた言葉。自然環境からアンテナを保護したり、人間がアンテナと接触することを防いだりするためのレーダーのカバー）などの媒質を通過する際のパワーの損失は減衰と呼ばれ、レーダーが受信する電力を常に減少させる。後述するように、特定の音源からの減衰の大きさは、かなり簡単に定量化できる場合がある。減衰の定量的な側面については後述する。しかし、レーダー方程式の議論を完結させるために、すべての減衰による全損失を考慮する最後の項を追加することができる。減衰項 I は常に 0 から 1 の間であり、通常は 0 よりも 1 に近い値である（そうでなければ、関心のあるターゲットの多くを検出することはできない）。したがって、最終的なレーダー方程式は次のようになる：

$$p_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta \phi h |K|^2 I z}{1024 \ln 2\, \lambda^2 r^2} \tag{5.14}$$

（訳者注：5.12 式の右辺に I をかけたのみ。）減衰は、ある状況において未知であるか、あるいは無視することが多いので、減衰を特に考慮して計算しない限り、減衰項は省略されることが多い。この文章では、減衰について説明するとき以外は省略する。

レーダーが正常に動作している場合、レーダー方程式を大幅に簡略化することができる。特定のレーダーに関連するパラメータはすべて定数としてまとめることができる。これには、$p_t, g, \theta, \varphi, h, \lambda$が含まれる。さらに、数値定数（$\pi$、1024、ln(2)）を組み合わせることもできる。これらをすべて行えば、レーダー方程式は次のように書ける。

$$p_r = \frac{c_1 |K|^2 z}{r^2} \tag{5.15}$$

次に、主に氷ではなく液体の水象粒子を見ることに興味があると指定すれば、$|K|^2$ に適切な値を代入することができる。そうするとレーダー方程式は次のようになる。

$$p_r = \frac{c_2 z}{r^2} \tag{5.16}$$

ここで、この定数c_2は上記のものとは異なる。

式 5.16 は、ビームフィリング気象目標に対する作業方程式である。これは、あるレーダーが受信するパワーは嵐のレーダー反射因子に比例し、レンジの 2 乗に反比例するというものである。暴風雨が強ければ強いほど、その反射因子は高くなり、レーダーが受信するパワーも高くなる。

レンジの変化も大きい。物理を学んだ人なら、これがレーダー波にも光にも適用されるおなじみの「逆二乗の法則」であることがわかるだろう。嵐がレーダーから遠くなるにつれて、レーダーに返ってくるパワーはさらに急速に減少する。反射因子が等しい 2 つの嵐が等しいパワーを返すのは、それらが同じ距離にある場合だけである。

われわれが主に関心を持っているのはレーダー反射因子 z なので、この方程式を再配列して、次のような方程式を得ることができる。

$$z = c_3 p_r r^2 \tag{5.17}$$

（訳者注：$c_3 = 1/c_1|K|^2$ ということになる。）この式は、「レーダー定数」と呼ぶことのできる定数c_3を含んでいる。c_3の単位は $mm/m^3\ mW^{-1}\ km^2$ である。

しばらくの間、レーダー反射因子 z について考えてみよう。反射因子は、サンプル体積に存在する粒子の数と大きさによって決まる気象学的パラメータである。霧の中の非常に小さな値（おそらく 0.001 mm^6/m^3）から、非常に大きなひょうの中の非常に大きな値まで、その範囲は様々である。私がこれまでに見たレーダー反射因子の最高値は、ソフトボールほどの大きさのひょうが降ってきたモンタナ州のひょう嵐（1981 年）で 36,000,000 mm^6/m^3 であった。z が持ちうる値の範囲は非常に広いため、これをより小さな数値範囲に圧縮するのが便利である。これを行う 1 つの方法は、線形値の代わりに対数値を使用することである。したがって、対数レーダー反射因子 Z を次のように定義することができる。

$$Z = 10 \log_{10} \frac{z}{1\ mm^6/m^3} \tag{5.18}$$

ここで，Z は dBZ（すなわち，1 mm/m^3 の反射率に対するデシベル）の単位で測定される対数レーダー反射率係数であり，z は mm/m^3 の単位で測定される線形レーダー反射率係数である。

対数反射率を使用すると、上記の極値範囲をより便利な数値に圧縮できるという利点がある。例として挙げたものは、霧の場合は-30 dBZ、大ひょうの場合は対数スケールで+76.5 dBZ となる。これらは、対応する線形値のずっと小さい値やずっと大きい値よりもずっと使いやすい（と私は信じている）。

レーダー反射因子は対数単位で測定するのが一般的なので，式 5.17 を対数形式に変換すると，次のようになる。

$$Z = C_3 + P_r + 20 \log_{10} r \tag{5.19}$$

ここで、レーダ反射率因子は dBZ 単位で測定され、受信電力P_rは dBm 単位で測定され、r は km 単位であり、定数$C_3 = 10 \log_{10} c_3$である。付録 D に、多くの異なる気象レーダーの対数レーダー定数を示す。付録 A では、対数単位、dBm 単位の出力、dBZ 単位の反射因子についてより詳しく説明している。

実効レーダー反射因子 z_σ

すでに述べたように、私たちはしばしば怠慢になり、このパラメータを単に"反射率"と呼ぶ。これによって混乱が生じない限り、通常は許容される。しかし、z と後方散乱断面積 σ を関係づける式 5.7 を導入する際に、ターゲットは球でなければならず、この球は波長に比べて小さくなければならないと規

定した。レーダーで嵐をスキャンするとき、常にこれが真実であると確信することはできない。また、それが真実でないことを知っているか、強く疑っている場合もある。レーダーで反射率を測定するときは、z や Z の代わりに等価レーダー反射率を使うことを考える。

粒子サイズスペクトルからの Z

この議論では、レーダーで反射因子を測定することを暗黙の前提としてきた。しかし、z を計算するもう一つの方法がある。つまり、式 5.11 を使ってレーダー反射因子を計算することができる。

粒子サイズ分布は、サンプル体積中に各サイズの粒子がいくつ存在するかを教えてくれる。粒度分布の測定には、さまざまな方法がある。最も簡単な方法のひとつは、吸水性のある紙を用意し、水に溶けると変色する化学物質をまぶした後、測定時間雨にさらす方法である。雨滴が紙に当たると色のついた斑点ができ、それを測定することができる。使用する紙を校正することで、スポットの直径をスポットを形成した雨滴の直径に変換することができる。露光時間を測定し、特定の大きさの雨滴がどのくらいの速さで落下するかを知ることで、与えられた直径ごとにサンプル量を計算することができる。

液滴の大きさの分布を作成する際、個々の液滴を無限に細かい精度で測定することは不可能である。その代わり、通常は測定値を小さな直径間隔に量子化する。例えば、雨滴の直径は 1mm の端から 5mm 程度までなので、0.2mm や 0.5mm 単位で直径を測定し、有用な測定値を得ることができる。

次に、雨のサンプルからの滴の大きさの分布が与えられれば、レーダー反射率係数 z を次のようにして計算することができる。

$$z = \Sigma N_i D_i^6 \tag{5.20}$$

この場合、直径D_iから$D_i + \delta D$までの滴の数であるN_iという項が含まれる（δD は測定に使用した直径間隔)。

付録 E では、液滴サイズ分布測定のためのろ紙技術の校正と使用方法について説明する。また、校正を決定するために使用したのと同じ種類の紙を使用すれば、雨滴を測定するために使用できるテンプレートも含まれている。