



第5章 MUレーダ、ウィンド・プロファイラ などの仕組みと観測例

大気を測るレーダ

山本 衛
Mamoru Yamamoto

はじめに

電波を利用したリモート・センシングは、観測対象が発する電波(または光)を受信して相手の性質を測る受動的なリモート・センシングと、観測装置が電波や光を観測対象に当てて観測をする能動的なリモート・センシングに分けられます。

レーダは、電波パルスを観測対象に当てて跳ね返ってくるエコーを調べる装置であり、能動的なリモート・センシング装置です。図1にレーダの原理図を示します。送信機と受信機が一つのアンテナを共用しています。送受切り替えスイッチを送信側にしてパルス変調波を標的に向かって短時間送信します。そのあとスイッチを受信側に切り替えて、反射波の到来を待ちます。送信からエコー受信までの時間差によって、レーダから標的までの距離がわかります。標的が動いていれば、エコー波の周波数がドップラー・シフトしているので、速度がわかります。

飛行機や船だけではなく、大気中のさまざまな現象

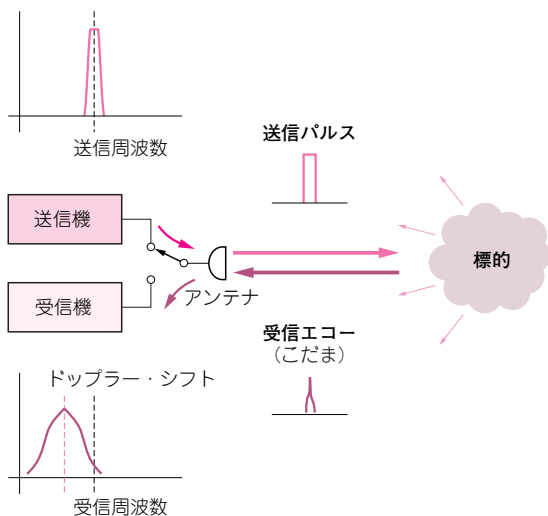
を標的とするレーダが実用されています。本稿では、大気を観測するレーダについて、その基礎技術、装置の概要と実際の観測成果について紹介します。

大気構造とレーダの種類

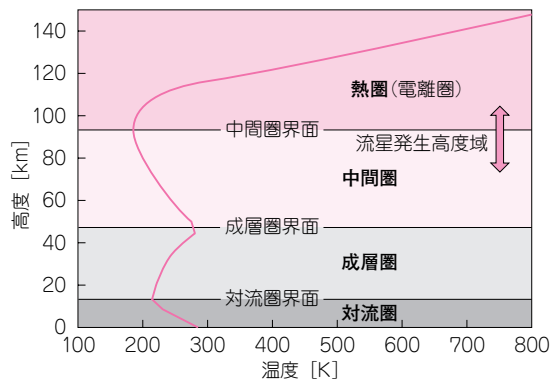
■ 大気構造

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度とともに指数関数的に減少します。

図2に標準的な大気温度の高度分布を示します。気温は地表面から高度10 kmを過ぎるあたりまでは1 km当たり約6.5°の割合で高度とともに低下して行きます。ここを「対流圏」と呼びます。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象です。高度約11 kmに対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約50 kmまでは高度とともに温度が上昇していく「成層圏」です。その上部は再び温度が下がる「中間圏」、高度80 km以上は温度が飛躍的に高くなっていく「熱圏」となっています。例えば高度100 kmの熱圏の大気密度は地表の 2×10^{-7} 程度しかありません。高度300 km以上は更に希薄で人工衛星が飛翔しうる領域です。この上部は太陽系空間に徐々に繋がって



〈図1〉レーダの原理図



〈図2〉標準的な大気温度の高度分布

〈表1〉 大気観測用レーダの分類

周波数帯	名称	エコーの成因	観測量
2～3 MHz	MF(中波)レーダ	電離層の成層構造からの反射	風速や電子密度
HF帯	イオノゾンデ	電離層からの全反射	電離層の高さと電子密度
VHF帯	流星レーダ	流星飛跡	風速など
VHF～UHF帯	大気レーダ*1	大気密度や水蒸気の変動	風速や大気乱流強度
UHF帯	ISレーダ*2	電離層の個々の電子	電子密度や温度など
マイクロ波～ミリ波	気象レーダ	雨滴, 雲粒, 霧粒	雨域や雲・霧の位置と運動

注 ▶ *1: ST(成層圏・対流圏)レーダ, MST(中間圏・成層圏・対流圏)レーダ, あるいはウインド・プロファイラとも呼ばれる。*2: ISは Incoherent Scatter(非干渉散乱)の略で, 電子1個1個からの微弱な散乱を指す。

いきます。

宇宙空間から地球に飛び込んでくる微小な塵は、高度70～110 kmにおいて燃えて流星となります。また熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線やX線によって電離して「電離圏」を形成しています。電離圏は高度100～120 kmに広がるE層、高度200 km～400 kmを中心とするF層と呼ばれる層からなる構造をしています。

■ 大気を測るレーダ

表1に示すように、大気を測るレーダには数多くの種類があります。

● 周波数による分類

周波数の低い方から紹介すると、まず数MHzの中波帯を使うMFレーダは、電離層D層からの反射を観測し、高度60～100 kmの風速測定に使われます。

次に、短波帯全域の電波を利用するイオノゾンデがあります。周波数を徐々に変化しながら電離層に放射し、全反射するようすを捉えてその高さや電子密度を測定するものです。

VHF帯では流星飛跡からのエコーを使って風速を調べる流星レーダというものもあります。

UHF帯から数GHzの周波数の大型レーダに、IS(Incoherent Scatter; 非干渉散乱)レーダがあります。これは電離層に含まれる電子1個1個からの微弱なエコーを捉える装置で、世界でも数台が稼働するだけであり、電離圏の電子密度・温度などを測定します。

マイクロ波からミリ波は雨粒、雲粒などからのエコーを観測する気象レーダに使われ、台風や前線などに伴う雨域の分布や移動の観測が行われます。

以上はかなり大雑把な分類であって、同様の周波数を利用するレーダであっても、発射する電波の変調方式やアンテナ・ビームの形状、信号処理の違いなどから違う種類のレーダとされることがあります。

● 観測高度による分類

周波数50 MHz付近から数GHzの電波を利用するレーダとしてウインド・プロファイラやST(成層圏・対流圏)レーダ, MST(中間圏・成層圏・対流圏)レーダ

などと呼ばれるグループがあります。これらは大気中の密度変動や水蒸気分布などからのエコーを利用して風速を観測する点に特徴があります。

観測高度範囲は、小型のものでは高度数km, STレーダと呼ばれるタイプで高度10～20 kmまで、大型のMSTレーダではこれらに加えて高度60～80 kmの観測も可能となります。これらのレーダはまとめて「大気レーダ」と名づけられます。

京都大学生存圏研究所では大気レーダを中心として多様な装置を開発し、大気研究に利用してきました。以下では大気レーダを中心として紹介していきます。

レーダの基礎

■ レンジ、距離分解能、占有帯域幅

レーダから標的までの距離 r は「レンジ」とも呼ばれ、送受信間の時間差 t および光速 c と、

$$r = \frac{ct}{2} \dots\dots\dots (1)$$

の関係にあります。また距離分解能(レンジ分解能) Δr は送信パルスの幅 τ によって決まり、

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \dots\dots\dots (2)$$

と表現されます。送信パルスの長さや送信波のスペクトル幅には反比例の関係がありますから、距離分解能を向上するため短いパルスを送信するためには、使用する電波の占有帯域幅を広く取る必要があります。

■ レーダ方程式

● ハード・ターゲットの場合

レーダで観測されるエコー強度は「レーダ方程式」で求められます。まずレーダの標的が「点」である場合のレーダ方程式(船や飛行機を標的とするレーダに対応している)は、次のようになります。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma = \frac{P_t G_t A_e}{(4\pi)^2 r^4} \sigma \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 r : 距離 [m], λ : 電波の波長 [m],