



## 第2章 マイクロ波を使った放射計/ 散乱計/高度計/映像レーダの仕組み

### マイクロ波リモート・センシングの 測定原理

古濱 洋治  
Yoji Furuhami

#### マイクロ波放射計

#### ■ 電磁波と動物

人間には、表1に示す電磁波スペクルのうち、可視光しか見えません。しかしながら、魚類、トカゲ、鳥類、昆虫の中には、紫外線を感知できる種がいくつかあります。例えば、モンシロチョウはオス・メスとも白い羽をもっており、人間には両者の識別は容易ではありません。しかし、紫外線領域まで見えてしまうモンシロチョウにとっては、オスとメスとで周波数が違うので、識別は朝飯前です。

次に、ハブ、マムシ、ガラガラヘビなどのマムシ亜科のヘビには、ピット器官という赤外線を感知する器官が目と鼻の間にある窪みにあります。この器官によって、ねずみなどの温血動物の捕獲が容易になっています。

また、電界や磁界を感ずる動物もいます。ヨシキリ

〈表1〉電磁波スペクトルとマイクロ波の波長、エネルギーまたは周波数など

名称	エネルギーまたは周波数	波長
γ線	10 k ~ 10 EeV	-
X線	0.12 k ~ 100 keV	(1.2 pm ~ 10 nm)
紫外線	750 T ~ 30 PHz	10 n ~ 400 nm
可視光	375 T ~ 750 THz	0.4 μ ~ 0.8 μm
赤外線	1 T ~ 375 THz	0.8 μ ~ 300 μm
サブミリ波	0.3 T ~ 3 THz	100 μ ~ 1 mm
EHF	30 G ~ 300 GHz	1 ~ 10 mm
SHF	3 G ~ 30 GHz	0.01 ~ 0.1 m
UHF	300 M ~ 3 GHz	0.1 ~ 1 m
VHF	30 M ~ 300 MHz	1 ~ 10 m
HF	3 M ~ 30 MHz	10 ~ 100 m
MF	300 k ~ 3 MHz	100 m ~ 1 km
LF	30 k ~ 300 kHz	1 km ~ 10 km
VLF	3 k ~ 30 kHz	10 km ~ 100 km
-	3 kHz 以下	100 km 以上

注▶ THz：テラヘルツ，PHz：ペタヘルツ，EeV：エクサ・エレクトロン・ボルト

ザメは、口の周りに高感度の電界受信機(感度：1 μV/m)をもっており、1m近くにいるエサを正確に捕食すると報告<sup>(4)</sup>されています。渡り鳥は地磁気を感じる何らかの感覚器官を持ち、その生体磁石を使って飛行方向を知ると推測されています。

マイクロ波帯電波を検知できる動物の存在については承知しませんが、マイクロ波も電磁波ですから、受信機さえあれば、紫外・可視・赤外の周波数帯と同じように検知可能です。以下、マイクロ波放射の受信原理について述べます。

#### ■ 黒体とプランクの熱放射則

黒体の表面から、プランクの熱放射則にしたがって、いろいろな周波数の電磁波が放射されています。

黒体(black body, 完全放射体)とは、外部から入射する熱放射など(光や電磁波による)をあらゆる波長に渡って完全に吸収し、また放出できる物体のことです。太陽は黒体に近いといわれていますが、完全な意味での黒体(完全黒体)は現実には存在しません。

#### ● 黒体の電力スペクトル輝度

さて、特定温度の黒体表面から、単位面積、単位周波数帯域幅、単位立体角あたりに放射される電磁波の電力を「輝度」(電力スペクトル輝度)といいます。このとき、黒体の電力スペクトル輝度  $B_{bf}(f, T)$  は、

$$B_{bf}(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $B_{bf}(f, T)$ の単位は  $[Wm^{-2}Hz^{-1}Sr^{-1}]$ 、 $h$ ：プランク定数  $(6.626 \times 10^{-34} [Js])$ 、 $k$ ：ボルツマン定数  $(1.308 \times 10^{-23} [J/K])$ 、 $T$ ：温度  $[K]$ 、 $f$ ：中心周波数  $[Hz]$ 、 $\lambda$ ：波長  $[m]$ 、 $\Delta f$ ：周波数帯域幅  $[Hz]$

で与えられます。また  $1 eV = 1.60217646 \times 10^{-19} J$  です。

中心周波数  $f$ 、狭い周波数帯域  $\Delta f$  における黒体の輝度  $B_b$  は、

$$B_b = B_{bf} \Delta f \dots\dots\dots(2)$$

で与えられます。

マイクロ波帯では、 $hf/kT \ll 1$ と書けるので、次のレイリー・ジーンズの放射則が成立します。

$$B_b = 2kT \frac{\Delta f}{\lambda^2} \dots\dots\dots (3)$$

このように、黒体の輝度  $B_b$  は、温度に比例し、波長の2乗に逆比例しています。

### ● プランクの放射則曲線

図1にプランクの放射則曲線を示します。黒体放射スペクトルのピーク波長は、太陽表面の温度  $T = 6000\text{ K}$  では、 $\lambda = 483\text{ nm}$  となり、これは可視光に対応します。この値は、太陽光スペクトルのピーク波長にほぼ一致しています。また、地表温度に近い  $T = 300\text{ K}$  では  $\lambda = 9.66\text{ }\mu\text{m}$  となり、これは赤外線に対応します。

すなわち、地球が完全黒体であるとすれば、地球は赤外域にピークをもつエネルギー放射をしていると考えられます。

## ■ 灰色体と輝度温度

### ● 輝度温度 $T_B$

上述の地球を含めて、通常の物体は黒体と異なり、完全な放射の吸収体ではないので、灰色体 (gray body) と呼びます。このため特定の周波数について、物体の熱放射の輝度と等しい輝度で熱放射する黒体の温度をその物体の輝度温度  $T_B$  と定義し、輝度の代わ

りに使います。

$$B = 2kT_B \frac{\Delta f}{\lambda^2} \dots\dots\dots (4)$$

また、特定の周波数について、物体の輝度と物体の温度に等しい温度の黒体の輝度の比を物体の放射率  $\varepsilon$  と呼びます。

$$\varepsilon = B/B_b \dots\dots\dots (5)$$

このとき、式(3)、式(4)、式(5)から

$$T_B = \varepsilon T \dots\dots\dots (6)$$

が成立します。

### ● 特定の周波数で輝度温度 $T_B$ を測ることによって、物体の温度 $T$ を知ることができる

式(6)を使って、マイクロ波帯の特定の周波数で輝度温度  $T_B$  を測ることによって、物体の放射率  $\varepsilon$  がわかれば、物体の温度  $T$  を知ることができます。例えば、海面の温度はCバンド(4~8 GHz帯)で輝度温度を測ることによって導出しています。

また、温度  $T$  がわかれば、放射率  $\varepsilon$  の違いによって、物体をほかから識別できます。土壌水分は、Cバンドで輝度温度を測ることによって、この特性を利用して識別しています。

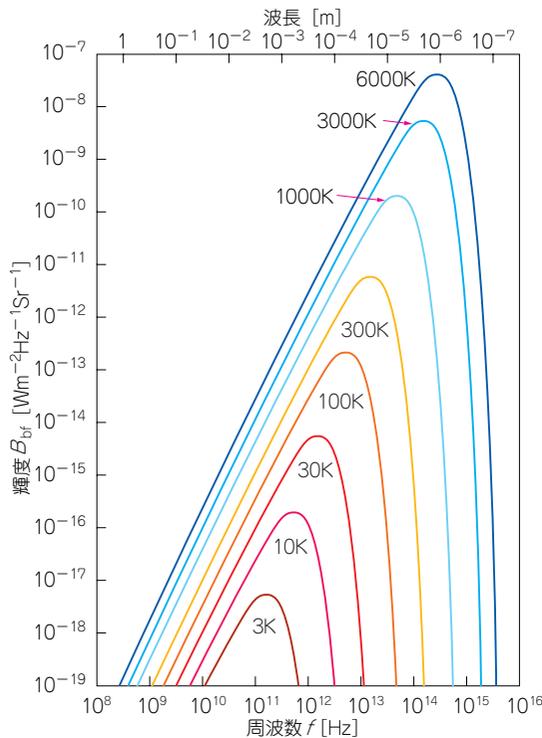
しかし、大気中の諸量(雨、水蒸気、雲または温室効果ガスなどの微量ガス成分)の観測や、気温や水蒸気の高高度分布などの観測の場合には、輝度温度が従う放射伝達の式を解く必要があります。ここでは、放射伝達の式<sup>(5)</sup>についての説明は省略します。

マイクロ波放射計は、このように観測対象からの放射エネルギーを測定することによって観測対象物を識別します。また観測対象物のさまざまな物理量の導出を可能とします。

## ■ 大気の影響と代表的な物体の放射率

地球大気密度は、高度が高くなるに従い、ほぼ指数関数的に減少するので、マイクロ波帯におけるリモート・センシングでは、特別な場合を除いて、地表に近い対流圏の影響を考慮すれば十分な場合が多いのです。対流圏では、酸素や水蒸気による吸収、降雨などの気象粒子による散乱・吸収、および大気屈折率の変動による影響があります。大気ガスによる影響には著しい周波数特性があり、気象粒子による影響は、およそ5 GHz以上の周波数帯において無視できなくなります。大気屈折率変動の影響は、低仰角の観測や特別な気象条件の場合を除いて無視できます。

図2は、1~300 GHz帯の電波の大気減衰特性の計算値<sup>(6)</sup>です。この周波数帯で、大気の減衰特性を大きく支配しているのは、酸素ガスと水蒸気です。酸素ガスは、60 GHz帯と118.75 GHzに、水蒸気は22.235 GHz、183.31 GHz、325.15 GHzに中心周波数を持つ吸収線があります。水蒸気量の変動によって、吸



〈図1〉プランクの放射則曲線