

## 気象観測の新しい方法

### 大気のリモートセンシングについて\*

門 脇 俊 一 郎\*\*

#### 1. はじめに

ここ2, 30年の間に、我々の大気に関する情報は、それまでに比べて格段に増え、この傾向はますます加速されつつある。この多量の情報取得を可能にしたのは、気象衛星による放射測定やマイクロ波レーダのような、リモートセンシングと総称される自然認識の新手法の発展である。その内容は、多岐にわたっているが、水銀温度計や風車型風速計、ラジオゾンデといった在来の観測とは異質な特徴を共通に持っている。

リモートセンシングは、既に、天気予報や大気科学の研究の必須の手段となったばかりか、電子計算機の発展と共に、多くの新分野を拓く原動力の一つとなっている。また、今後の重要課題である大気環境の監視にも大きな役割りを果たそう。リモートセンシングを気象技術や大気科学の研究にどう発展させるかは今後の重要課題の一つであろう。この解説では、個々の技術内容というよりは、全体像と共通の特質という点からリモートセンシングの解説を試みよう。

#### 2. リモートセンシングとは?

リモートセンシング (Remote Sensing, 訳語は遠隔探査など) に共通の基本原則を考えよう。

我々は、生得の感覚器官=五感によって外界を感知認識するが、リモートセンシングはこのうち、主に視・聴覚を人工装置を使って極度に高め拡張させるものと言える。たとえば、我々自身の外にある事物は、それぞれに固有の仕方で太陽その他の光源からの光線を反射する。反射光は眼で検知され、波長別強度や空間分布形=パターンが即座に脳へ伝えられる。脳では、記憶してある種

々な事物の反射光パターンと比べられ、事物の識別、状態の判定がなされる。2個1組の検知器=眼を使い、光線の直進性に基づいて事物の位置(方向、距離)を得る。そこで我々は、光という外界の事物に関する情報を担い伝える媒体、眼という検知器、脳という自動即時情報処理機能によって、「外界を直接そのものに触れることなく、遠方から (Remote) 感知・認識 (Sensing) している」。聴覚と音波の関係も同じである。

眼-脳系での検出は、殆ど波長0.4~0.7 $\mu$ mの可視光に限られる。得られる情報は、対象の個々の点の定量的なものというよりは、形・色分布の特徴といった相対的、総合的なものである。認識の深さや確実性は、もっぱらそれまでに脳に蓄えられていた参照パターンの質に依存するから、個体差が大きい。時々刻々の変化を記録・再現する能力も乏しい。

つぎに、我々の外界認識のもう一つの主要手段である触覚をみよう。物の大きさ、重さ、温冷、硬軟など定量的個別的な認識の多くはこれによる。この場合必要なのは、知ろうとするものに直接接触すること、換言すると、対象の位置に自らを置くことである。定量情報は、同時に存在する他のもの(標準)との比較によって得る。ある量の空間あるいは平面分布の即時把握はできない。

先にあげた、在来の観測や最近の AMeDAS なども全てこのような触覚による情報取得に基づいており、測定対象の位置に検知器を置き、対象と直接接触させることによって情報を得ている。この意味で、直接測定とか現地観測 (In situ Observation) と呼ぶ。

以上によって、リモートセンシングの意味と在来の直接測定との差異は明らかであろう。なお、隔測 (Telemetry) とは遠方で得た情報の伝達に関する言い方で、リモートセンシングそのものではない。

リモートセンシングで直接に測られるのは、物体の電

\* A new concept in meteorological observation—  
an introduction to the remote sensing of the  
atmosphere

\*\* S. Kadowaki, 気象大学校

波反射能力とか赤外放射の強さとかである。我々は、それらと気象要素との間に成り立つ物理法則や統計的關係によって気象要素を知る。この意味で、リモートセンシングは間接測定 (Indirect Probing) とも呼ばれる。

### 3. リモートセンシング小史

リモートセンシングの歴史は、1826年と言われる写真術の発明に始まるといえる。写真により、事物の詳細かつ客観的再現が容易に行なえるようになった。各種のフィルム、フィルター、こま撮り装置などの開発によって、眼一脳系では行なえない特定波長の光での観察や記録、種々な時間スケールでの再現能力が実現された。

今世紀始めにマルコニーが無線通信に成功し、大気上層に電離層が存在することが予見されたが、1925年アップルトンとバレットは地上から打ち上げた電波の反射によってそれを実証した。人工装置による自然認識能力の空間への拡張の先き駆けといえる。

第2次大戦中の急激な技術的進歩を契機として、大戦後リモートセンシングの爆発的発展が始まる。1940年代前半には、偶発的に雷雨やハリケーンがマイクロ波レーダで追跡され、その悪天候の監視手段としての価値が認められて、中小規模の降水系の実態把握手段として急速に発展した。

1960年には、初めての気象観測専用の人工衛星TIROS I が打ち上げられ、我々の視野は格段に広がり、大気と地表の全球的観測が初めて可能となった。我々が、リモートセンシングによって得る情報のうち、衛星によるものの比重はきわめて大きい。

この年は、リモートセンシングにとってもう一つの意味で重要な年であった。ルビーレーザー (Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) という光波の発振器の成功である。その後今日まで、レーザーを光源とするレーダであるライダーなど、各種のレーザー応用リモートセンサーが発展しつつある。その探知対象は、エアロゾルや大気分子、気象要素の微小スケールの急変化域である。1960年代後半に開発に着手された音波によるリモートセンサーと共に、これらは、空間スケールの小さい現象、境界層の構造の解明に威力を加えるもので、大気品質管理にも重要な役割りを果たすものと期待されている。

1977年7月の静止気象衛星GMS-1ひまわりの打ち上げ成功は、我国における大気のリモートセンシングにとって一つの時代を画すものとなるだろう。

これらの技術の発展は、基本的に、a. 可視光～マイ

クロ波に至る電磁波の制御・検出技術 b. 人工衛星に代表される広視野の測定架台の実現 c. 電子計算機とその周辺機器による高速度自動情報処理、の3本の柱の上に立っているとさえいう。リモートセンシングはこれらの総合的技術であり、しかも、種々な専門分野の一部をなす、いわゆる学際的性格を持っている。

### 4. リモートセンシングの方法

さきに第2節で、リモートセンシングとは人間が生来持っている視・聴覚を補完、増強、拡大するための人工装置であると述べた。大気探測を目的とするこのような装置の備えるべき要件は次のようなものである。

(1) 大気状態をより広範囲かつ選択的に探知しうること (2) 観測結果とくに分布パターンの恒久的記録能力 (3) 記録されたものを種々な速度で再現できること (微速度撮影、高速度撮影とその映写のように) (4) 自動的客観的解析能力

以上の要件を充たすため、リモートセンシング装置＝リモートセンサーがどのような方法と構成に基づいているかを簡単に説明しよう。

第1図は、大気のリモートセンサーの二つの基本型の構成の模図である。各部について説明する。

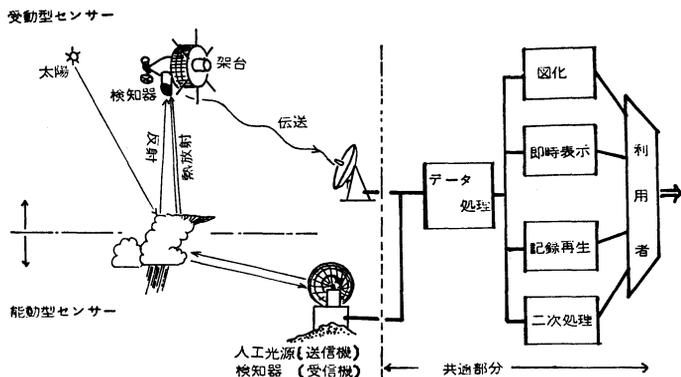
#### (1) 媒体、能動型および受動型センシング

リモートセンシングで遠方にある事物の情報を担い伝える媒体としては、電磁波、音波その他の弾性波動、力の場合(重力・地磁気)がある。大気の場合は大部分の場合電磁波で、一部音波が使われる。

観測対象が自ら発するもの一熱放射など一や天然に存在するもの一太陽光の反射などを媒体とするものを受動型 (passive) センシング、レーザー光やマイクロ波など人工的な装置でつくったものを対象にぶつけて反響の仕方を調べるやり方を能動型 (active) センシングという。

電磁波は、真空を通じてエネルギー (あるいは信号) を伝達できる唯一の形式であり、リモートセンシングの最重要な情報媒体である。紫外線から可視、赤外、マイクロ波、短波 (たとえば空電による雷活動の探知) に至る広いスペクトルの各部が使われている。能動型は、短波→マイクロ波→可視光の順に開発され、受動型は、可視光→赤外→マイクロ波放射へと広がりつつある。

音波は、海洋底の観測手段として確立されているが、大気観測への利用はまだ始まったばかりである。能動型としては、1000 Hz 程度の音波を使う音波レーダがあり、受動型は、周期数秒～数十秒、振幅  $1 \mu b$  程度の可聴周波以下の音波 (Infrasound) を微気圧計により検知



第1図 リモートセンシング装置の基本構成。システム全体としては、この他に、利用(解釈)技術が必須のものである。

し、トーンードの探知に使用するなどが試みられている。

(2) 信号の発生・検知器

受動型センサーでは、対象の情報を担った赤外放射などの媒体、すなわち、信号の検知器(受信機)が、能動型センサーでは、その他に信号を発生させる物(送信機)が必要である。また、信号を集め、送り出すための装置(アンテナ、望遠鏡)が、能動型・受動型ともに必要である。信号の検知には、光電効果や熱電効果を利用する。

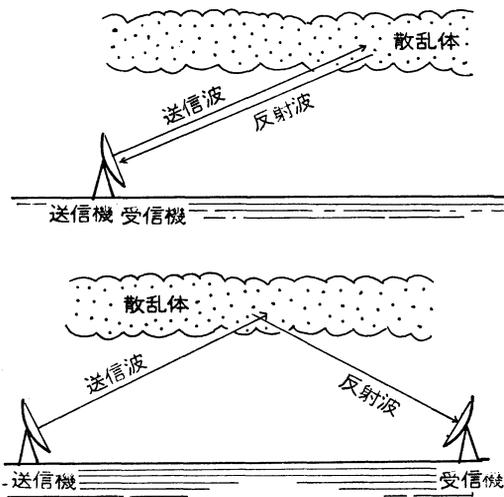
能動型は、さらに、第2図に示すように monostatic 方式と bistatic 方式に分かれる。前者は、送信機と受信機を同一の場所に置く。後者は、異なった場所におき、送一受間に介在するものを探知対象とする。透過率計やシーロメータ(レーザーパルスによる monostatic もある)が bistatic の例である。

(3) 架台

リモートセンシングでは、一般に光やマイクロ波などの直進性に基づいて対象の位置決めを行なう。したがって、装置の周囲の地形起伏、建造物などにより観測可能域が制約される。これを避けるため、架台(platform)に載せて移動可能にしたり高所へ運びあげる(多くのレーダは富士山のような山頂に設置されている)。移動架台の究極的なものが人工衛星である。移動式架台を使用した場合、視野の拡大と引き換えに、データの測定された場所の決定にいろいろ厄介な問題が入ってくる。

(4) 架台としての衛星

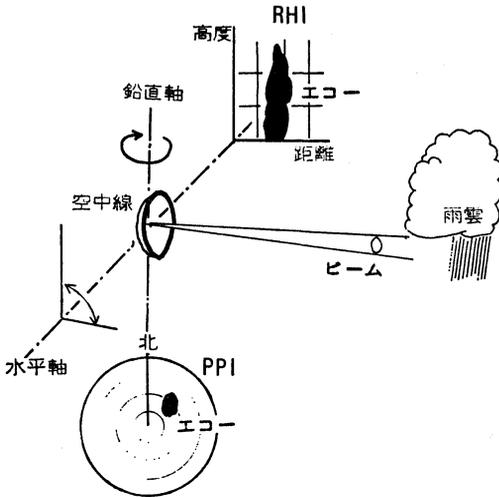
気象衛星の軌道は二つのものが確立されてきた。一つは、いわゆる軌道気象衛星で、米国の、NOAA, ESSA,



第2図 モノスタティック方式(上)とバイスタティック方式(下)。

DMSP, ソ連の COSMOS, METEOR などがそれで、赤道と大きな角度(80~100°)をなし、同一地方時に赤道上空を通過する太陽同期軌道である。地上高度 800~1,500km の円軌道で周期 100~110 分位、昼夜各 1 回同一地点上を飛行する。有効な観測範囲は、NOAA型(地上高約 1,450 km)では衛星直下点の両側各 1,600 km 位(衛星の天頂角 65° までの範囲)である。約 12 時間の飛行で殆ど全地表を観測できる。低高度のため、高解像度の分光測定に適している。

もう一つの類型は、ごく最近我国初の気象衛星となった GMS “ひまわり” のような、赤道上を地球の自転と



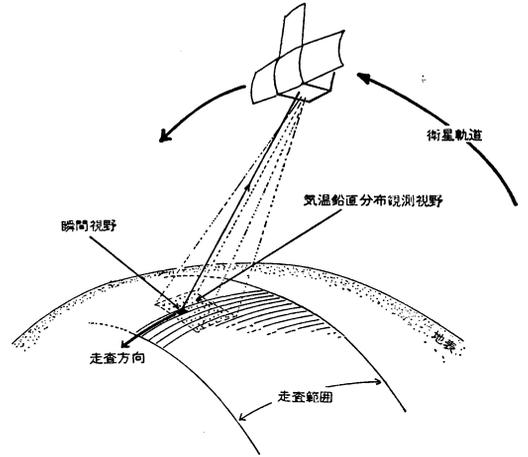
第3図 能動型センサーの極座標走査・表示。  
PPI=Plan Position Indicator (平面表示)。  
RHI=Range Height Indicator (鉛直断面表示)。

同速で飛行し同一地点上に留まる静止気象衛星で、地上高度は約 35,800 km, 直下点を中心に半径約 6,000 km, 地表の約  $1/4$  を 20~30 分以内に観測できる。地表の解像度は軌道衛星に劣るが、短時間々隔で観測できることが大きな利点である。米国では、シビアストームの監視専用の静止衛星打ち上げの計画 (Storm Sat.) もあるようだ。なお、定量的観測範囲は赤道を中心に南北約  $40^\circ$  位と言われている。

また、天気予報などの現業利用を目的とする現業衛星 (ESSA, NOAA, DMSP, GOES, METEOR) と新しいセンサーの開発などの実験用衛星 (TIROS, NIMBUS, COSMOS) などの使い分けがなされている。なお、米国の場合、同一衛星でも NASA (航空宇宙局) で開発中と NOAA (海洋大気庁) で現業に使用する段階となったものとは名称が変更される (ITOS→NOAA, SMS→GOES)。

### (5) 走査

観測対象の平面、空間分布を得る最も簡便な方法は、写真やテレビカメラによる撮像だが、これでは電磁スペクトルのごく一部しか使えない。電磁波によるリモートセンシングでは、アンテナ (マイクロ波) や望遠鏡 (可視・赤外) で、ごく小さな視野角内のみに入ってくる信号を検出すると共に、それら集束装置の視線方向を一定順序で連続的に変えていくことによって、必要な面、空



第4図 軌道衛星の線走査。黒い小四辺形が走査型放射計の瞬間視野。

間の情報を集める。このやり方が走査 (Scanning) である。能動型センサーでは、第3図に示すような極座標走査がふつうである。衛星による受動型センサーでは、第4図に示すような線走査 (複写電送装置のような) が使われる。衛星による狭い波長帯の分光測定 (気温の鉛直分布の測定など) や音波レーダなどでは、一定方向のみを観測対象とするものが殆どである。

なお、このような写真→走査方式への変更に伴って、衛星資料の呼び方も最近では Imagery という用語 (Infrared Cloud Imagery など) が使われている。地表を主対象とするリモートセンシングでは、画像という呼び方が一般的となりつつあるようだ。

### (6) 処理・図化・表示

リモートセンシングでは、同時に得られる情報量がきわめて多い、時間的にも連続して情報が得られる場合が多い、気象量への解釈あるいは翻訳が必要などが特徴である。このような情報をその有効時間内に処理・伝達するには、高速の自動処理機能と効果的な (実時間のものを含んだ) 図化・表示・記憶・検索機能が不可欠である。

情報処理や表示は、大まかにいって二つの機能のものに分けられる。一つは、生の観測資料に含まれる各種の歪の除去・補正に関するものである。レーダで雨域を観測する際、レーダ・ビームが距離と共に広がるため、遠方の雨雲ほど受信機に送り返すエネルギーは小さくなる。雨雲とレーダとの間の距離による反射エネルギーの

差異を補正するものが、気象庁のレーダに付属されている等エコー装置であり、このような処理機能をはたす。

他の一つは、生の資料に含まれる不用あるいは有害な情報を除去したり、気象解析などの利用に便利のように生資料を加工するものである。最近、気象庁の弥彦山や仙台のレーダで試験されてかなりの成功を取めたグランドエコー除去装置（雨雲の観測を妨げる地物の反射をそれに重なる雨雲からの反射波を損うことなく除去する）や、NOAA, GMS などの雲画像を常用の天気図の投影法・縮尺に投影変換する、などが例である。特定対象の識別を容易にするための写真の焼き込み（赤外画像で高緯度の雲と雪氷面との分離など、一般には強調処理 Enhancement という）、濃度→色分け表示（擬似カラー表示）、前述の等エコーなどもこの機能を持つ。この処理は、測定値の時間、空間積分、2次誘導導の実時間で算出・表示（ドップラレーダにおける風のシャー、収束・発散分布など）より高級な2次処理へと向かっている。このような処理（伝送も含めて）を行なうには、生資料のデジタル化が前提条件となる場合が多い。米国の次期現業衛星 TIROS-N では、衛星上でデジタル化する計画となっており、また、気象庁ではレーダ資料のデジタル化計画が推進されている。

(7) 記憶・検索・再現

前項にも述べたように、記憶・検索・再現はリモートセンシングに重要な位置を占めるが、現状は実時間処理の点で不満足なものである。気象現象のように、領域的広がりを持つ変動現象の解析には、過去の状態を高速度で再現・プレイバックして試みるのがきわめて有益だが、まだ見るべきものが殆どない。

通常の記憶方法は、フィルム・印画紙、磁気テープである。前者は情報の質が低下するし、後者は経費、保管スペース、再生設備が難点である。安価で、小スペースに多量の情報が詰め込めることから、最近では写真が見なおされる傾向もある。

気象業務への利用にあたっては、前述のように過去、現在の変動状況を即時に再現（プレイバック、動画を含む）する能力が有益であるが、僅かに静止衛星資料処理としてループフィルム法が行なわれているにすぎない。レーダでは、生資料の収集は極座標方式であるため、利用可能なビデオプレイバック装置（テレビなど）との間に走査変換が必要な点が実現を阻んでいた。最近、電子計算機の発達・低価格化などにより、この点はほぼ解決したようだ。英国で試験されているデジタル化レーダ

観測網では、過去2時間以内位の情報の即時プレイバックが重要な機能の一つとなっているし、気象庁で推進されているレーダエコーのデジタル化計画もこのような機能の実現をも目的の一つとしている。

(8) スペクトルから見た情報媒体

スペクトルから見ると、情報媒体は次のように大別される。

a. 連続した広い波長帯にわたるもの b. 狭い波長帯のもの c. 単一波長のもの

aは、太陽光可視部や赤外放射の大気の窓領域（大気による吸収がごく小さい波長帯）による観測がそれで、空間分解能をよくするなどの目的で広い波長帯から多くのエネルギーを集めようとするもの。bは、主に赤外の大気吸収帯での分光測定であって、気温の鉛直分布の観測などに使われる。cは、十分な大きさのエネルギー送出源を作ることができ、また、媒体の運ぶエネルギーのみでなく、位相特性をも情報源として利用するレーダやライダ、音波レーダ（ソナー）の場合である。

5. リモートセンシングの物理

リモートセンシングは、物理的には電磁波や音波などのエネルギー流と探知目標の相互作用、すなわち、吸収、散乱、（再）射出である。これらは、目標の物理的性質、入射エネルギーの特徴に応じた目標固有の仕方でききる。エネルギー送出源と探知目標および検知器の中間に介在するものによっても相互作用が存在するから、検知器に到着した目標からの信号は、途中の状態による情報が付加され変質されている。

この変質は、衛星から大気を通して地表を調べる場合は有害な誤差源となるが、見方を変えると大気の鉛直構造の情報が含まれており、大気の観測にはきわめて有益なものである。

したがって、大気のリモートセンシングでは、降水粒子やエアロゾルなどと共に大気を構成する成分気体の分布や電磁波・音波との相互作用の知識が技術の基礎をなす。

物理法則としてのこれらの波動の吸収、散乱、射出などはすでに確立されているが、現実の大気の構成はきわめて複雑であり、時間的空間的変動も激しい。以下に相互作用の主なものをあげる。

(1) 波動の特性とリモートセンシング

電磁波や音波は波源から十分遠い所ではふつう平面波として記述される。探知目標から検知器に到着した平面波は、

伝播方向・速度、周波数、振巾、位相、波長、偏波面で表わされる。これがリモートセンシングで直接測定される量である。これらの量は、目標についてつぎのような情報を持つ。

- 伝播方向・速度……位置、途中の屈折率（考えている状態での波動の伝播位相速度と標準状態のそれとの比）分布。
- 周波数（波長）……色、組成。
- 振巾……大きさ、形、温度、誘電率、含水量、空間密度、表面粗度など。これがもっとも広く使われている。
- 偏波面……形、表面粗度、相対位置（目標-検知器、波源）。
- 位相……距離、視線速度。

## (2) 散乱

大気分子から雨滴に至る種々の粒子による電磁波の散乱は、三つのタイプに分かれる。

一つは、Rayleigh 散乱と呼ばれるもので散乱粒子の大きさが波動の波長の約  $1/10$  より小さいときのものである。このとき、散乱の強さは方向性が少なく、入射波長の4乗に逆比例し、散乱粒子の体積の2乗に比例する。レーダやライダーで探知するのは、大部分このような関係が成り立つ場合で、入射波と逆方向に向かう散乱エネルギー、すなわち後方散乱を検知する。

粒子が波長の  $1/10$  より大きくなると、散乱エネルギーの方向性が顕著になる。これが、Mie の理論により説明される状態で、Mie 散乱と呼ばれる。さきの Rayleigh 散乱は、波長が粒子より十分大きい場合の近似としてこの中に含まれる。レーダの目標に大きな電が含まれてい

る場合がこれに相当する（第1表参照）。

三番目のものは、Rayleigh 散乱に伴うが、前二者と異なり、入射波と異なる周波数の散乱波が現われる。Raman 散乱と呼ばれているものである。周波数のずれの大きさは分子の種類によって決まり、散乱波の強さは分子の濃度による。これを利用して、レーザー光を光源とし、大気中の特定物質の濃度を探ろうというのがラマンライダーである。

なお、分子の吸収周波数の電磁波を入射波として使用すると、通常よりずっと強い散乱、共鳴散乱が起きる。レーザー応用技術のうちにはこれを使用するものもある。

大気中には、散乱を起こす粒子が多数存在するから、それらによる多重散乱も考慮する必要がある。

## (3) 熱放射の射出

白熱電灯のように、高温の物体が電磁エネルギーを射出することは、ふつうに観測される。低温でも、絶対零度以上であれば、物体はその温度に応じて広い波長域にわたる電磁波を射出し、熱放射と呼ばれる。熱放射は、物体が自然状態で射出し空間を等速直進する電磁波として伝播して行くから、その有効な検出方法さえあれば、リモートセンシングの好都合な情報媒体である。

物体に熱放射が入射すると、そのいくばくかを吸収し、残りを反射する。入射するもの全てを吸収する仮想的な物体が黒体（吸収能=1）である。物体が熱的平衡にあるとすれば、吸収した熱放射エネルギーは全て再放射されねばならぬ。黒体は、その吸収したエネルギーの全てをその温度に応じた波長帯での熱放射として射出する。

黒体の単位表面積から、毎秒、単位波長当たり射出されるエネルギー  $W_\lambda$  は、プランクの式で与えられる。

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \text{ watt/m}^2/\text{\AA}$$

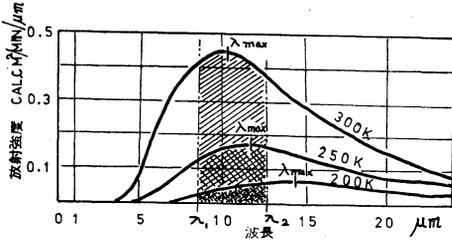
ここで、 $\lambda$  は波長、 $h$  はプランクの定数、 $c$  は真空中の光速である。この式から、 $W_\lambda$  は波長が、

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T} \quad a = 0.29 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

のところで最大となる。これは、ウィーンの法則で、 $W_\lambda$ 、 $\lambda_{max}$  の実例を、大気や地表によく見られる温度について示したのが第5図である。図から判るように、温度が上昇すると最大放射強度の波長が短い方へ移り、強度の絶対値も大きくなる。そこで、目標の発する熱放射の特定波長帯、たとえば、第5図の  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  間に含まれるエネルギー（図の斜線域や点影域）や、全波長にわた

第1表 大気中の散乱に関する粒子と能動型センサーの使用波長 ( $\mu\text{m}$ )。

種類	半径 ( $\mu\text{m}$ )	濃度 ( $\text{cm}^{-3}$ )
大気分子	$10^{-4}$	$10^{19}$
エアロソール核	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^4 \sim 10^2$
煙霧粒子	$10^{-2} \sim 1$	$10^3 \sim 10$
霧粒	$1 \sim 10$	$100 \sim 10$
雲粒	$1 \sim 10$	$300 \sim 10$
雨粒	$10^2 \sim 10^4$	$10^{-2} \sim 10^{-5}$
ひょう	$10^3 \sim 10^5$	
ライダー	$0.32 \sim 10.6$	
レーダ	$10^4 \sim 10^5$	



第5図 地球一大気系によく見られる温度の黒体放射の波長別強度。

る総エネルギーを測れば、その目標が黒体放射を行なうとしたときの温度（相当黒体温度）を知ることができ、これが、衛星その他を架台とする熱放射の受動型センサーによる地表や雲頂等の温度測定の原理である。

実際の物体の放射は、黒体放射から多少ともずれており、途中での吸収などもあるから、測定波長域によって示す温度は異なる点に注意しなければならない。有効放射温度（全波長域）、色温度（せまい波長帯）などの言葉で区別されている。

現実の物体が射出するものと同温度の黒体のその比を射出率というが、厚い雲や地表は赤外域についてはほぼ黒体としてよい。赤外域では、射出されるエネルギー

はほぼ温度のみで決まるが、マイクロ波域になると、表面の状態（凹凸）や誘電率によって射出率が変化する。これを使って海面状態などのリモートセンシングが可能である。

(4) 吸収

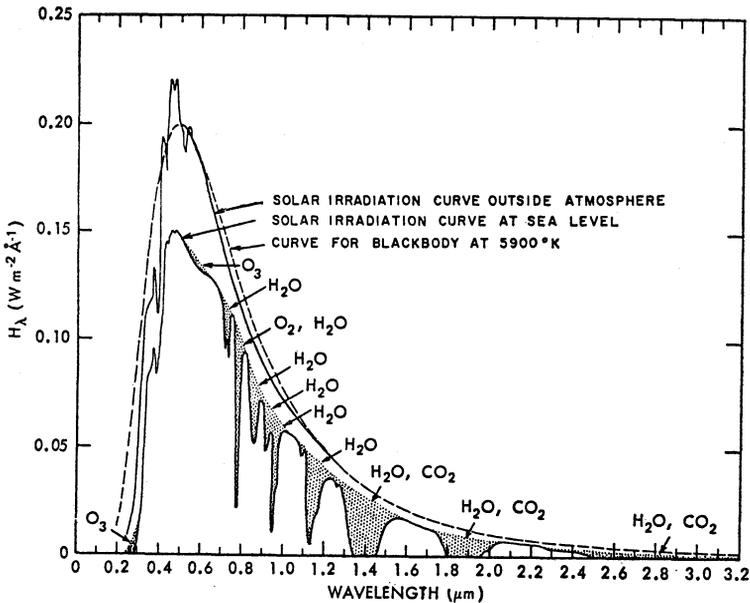
物体が、それに入射する放射エネルギーのいくばくかを捉え、その一部が熱になり、残りがより波長の長い放射として再射出される過程が吸収である。

気体の吸収は選択的で、広いスペクトルを持つ電磁波が気体を通過する時は、気体の種類に応じて特定の波長の部分が強い吸収を受ける。また、吸収の強さは、気体の圧力と温度による。気体が、このような熱放射の吸収特性を持つことが、後に第6節(2)で述べるように、大気の鉛直構造のリモートセンシングの基礎をなす。

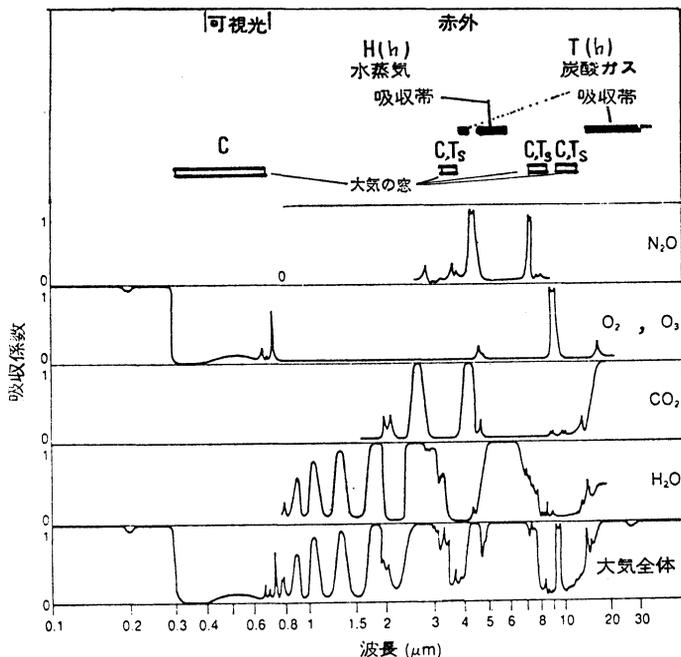
(5) 太陽および地球一大気系の放射

第6図は、太陽放射の波長別強度で、大気外および海面（直達日射）値ならびに 5900°K の黒体放射が示してある。図中の点影域でわかるように、海面に到達したものは大気によってところどころ強い吸収を受けている。

地球一大気系の熱放射は、第6図に示した温度のものの中に入り、太陽のそれに比べ、ずっと長波長側（中心 10μm 付近）にある。大気による吸収もあって、両者



第6図 太陽放射（大気外、海面）と 5900°K の黒体放射との波長別強度。点影域は大気構成気体により吸収された部分。縦軸：放射強度、横軸：波長（Valley, 1965による）。



第7図 大気構成気体の波長別吸収係数 (1:100%吸収, 0:100%透過). 図の上部は大気のリモートセンシングに使用される主な窓(二重線)吸収帯(黒太線), 吸収気体, 測定要素(C:雲分布,  $T_s$ :表面温度,  $T(h)$ ,  $H(h)$ ):気温, 水蒸気の鉛直分布).

のオーバーラップはごく僅かである。適当な検光器を使えば、昼夜、太陽光に関係なく地表や大気をリモートセンシングできる。

第7図は、大気構成気体の主なものと大気全体(鉛直入射時)の波長別の吸収の度合を示す。吸収係数1は100%吸収, 0は完全透過である。この図は、熱放射による大気受動センシングを考える基礎となる。吸収の少ない波長帯が“大気窓”, 多いところが吸収帯である。

図には、リモートセンシングに使われる主な波長帯と、測定される気象要素のあらましも示してある。前述したように、衛星から地表や雲頂の状態を観測するには、途中の影響の少ない波長, すなわち窓領域が適している。大気窓の主なものは、可視光域, 波長3.5~4  $\mu\text{m}$  および8~12  $\mu\text{m}$  の赤外域である。cm波以上の長波長の電波は、一般に透明である。このうち現業用衛星に主用されているのは、可視光および赤外10.5~12  $\mu\text{m}$  である。

途中の状態つまり気象要素の鉛直分布の探測には、吸収帯を主用する。主な吸収帯は、気温測定用として、炭

酸ガスによる波長4.3  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  付近の赤外域, 5 mm 付近のマイクロ波, 水蒸気量の測定に6  $\mu\text{m}$  付近の水蒸気による吸収帯が使われる。

なお、オゾンの鉛直分布の観測には紫外部の後方散乱が利用される。

#### (7) グラントルース (Ground Truth)

この言葉はいろいろな意味で使われているが、“リモートセンサーで検知された信号を実際に作り出している実体, 状態”である。リモートセンシングによって有用な情報を引き出すには、グラウンドトルースが不可欠である。これには、目標のみでなく、途中の大気の状態, 光源の位置なども含まれることはもちろんである。

観測船, 航空機, 各種の有人無人の地表観測点は、大気のリモートセンシングのグラウンドトルースのためにもますます重要となる。

#### 6. 大気のリモートセンサーと測定要素

前節までに、大気のリモートセンシングに共通な概念のあらましを述べた。次に、現在実用中または開発中のリモートセンシング装置とそれらから得られる大気の情報概観しよう。

## (1) 能動センサー

能動センサーは、使用する情報媒体により、レーダ (Radar = Radio Detection And Ranging, マイクロ波)、ライダ (Lidar = Light, レーザによる光波)、ソーダ (Sodar = Sound, 音波) がある。いずれも、呼称はレーダになっている。目標物からの散乱エネルギーの大きさ (受信々号の振幅) のみを検出する非コヒーレント型と、送信波-受信波の位相差を検出できるコヒーレント型がある。

最近では、パルス状音波の伝播速度をマイクロ波レーダで観測し、境界層内の気温、風の鉛直分布を観測しようとする RASS (Radio Acoustic Sounding System) の試みもある。

これらは、その名前から推察されるように、共通の測定原理に基づく。第3図に示したように、人工源からのエネルギー波を細いビームに集束、発射し、観測域を走査する。走査速度は、毎分数回〜数十回 (360°) である。目標からの散乱エネルギーを検出し、その帰来方向と往復時間から目標の位置を、検出信号振幅から散乱能力 (大きさ、空間密度等の関数、反射係数という) を測る。種々な知識によってこれを気象量に翻訳する。目標の距離を得るには、送信-受信の時間を測定する必要があるが、この時間目盛は、送信波を断続 (パルス) するか、周波数を変調 (CWレーダ) する。視線方向の距離分解能は、パルスの長さによって決まる。気象レーダでは数十〜数百m、ライダでは数mmの程度で、空間分解能はライダが格段に優れている。探知可能域の半径は、レーダが数百km、ライダが100km程度までである。また、ソーダの距離分解能は数m、観測範囲は数kmである。

レーダは降水粒子、ライダはエアロゾルや大気分子からの散乱を検出するが、このような物体が存在しなくても、反射波がある。これは、屈折率の急変動する場所で波動の散乱が起きるためである。大気屈折率の急変動は、気温、湿度、風速などの乱れによる。晴天乱流や気温逆転層など、境界層内の諸現象のレーダやライダによる観測は、この散乱機構によるものであり、ソーダやRASSによる観測もこれに基づく。

コヒーレント型では、送信波と受信波の位相差を検出する。これは、目標までの往復距離を送信波長 $\lambda$ で除したものに等しいから、目標が送出源に対し視線方向に $v_s$ の速さで動いていると、それからの受信波の位相は、周波数 $f = 2v_s/\lambda$ で周期変化する。すなわち、受信波の周波数は、送信波に比べ $f$ だけ増える。これを、ドップラ

周波数偏倚と呼ぶ。この原理により、降水粒子やエアロゾルがその場所の風と共に動くとして風をリモートセンシングするのが、ドップラ測風装置である。ドップラ装置は、レーダによるものが最も進んでおり、英国や米国では中小規模現象の研究の必須手段となった感があるが、我国ではまだ殆ど行なわれていないのは残念である。なお、1台のドップラレーダでは、視線方向成分しか測定できない。そこで、2〜3台のレーダを用いて、同一場所を同時に走査させ (Dual Beam とか Triradar System)、風の水平、鉛直成分を得るものが開発されている。これらは、風速のみでなく、シャー、発散、うず度などの分布の即時出力、表示ができる。

レーダによる降水強度の観測には、降水粒子の粒径分布や落下速度の仮定など種々なあいまいさが入るので、絶対値の精度は余り期待できない点に注意する必要がある。

能動センサーの架台は、いろいろなものが使われるが、衛星はまだ使われていない。必要な電源を得るのが難しいからである。

## (2) 受動センサー

大気を受動リモートセンサーは、殆どが衛星に積まれ、大気上端から出る電磁放射を検知する。それらは、使用波長によって、衛星に対する表面 (地表とか雲頂) の状態を観測するものと、その中間に介在する大気 (鉛直) 構造の探査を目的とするものに分かれる。

## a. 表面の状態の観測

これは、窓領域波長を使い、検知器の視線方向にある雲、地表の反射または射出する電磁エネルギーの強さを測定し、雲や地表の諸特徴や表面温度を観測する。また、短時間々隔 (30分以内位) の雲の動きを主観的客観的方法により追跡、雲層の風を推定する。

可視光では、上空からの写真に似た資料が得られる。赤外外部では、普通雲頂気温は地表より低いから、放射計の低入力=低温部→白、高入力=高温→黒のように写真に焼付けると雲分布図が得られる。大気擾乱に伴う特徴的な雲分布—たとえば台風のらせん状雲—がわかれば、それを昼夜、地域の別なく監視できる。

赤外や可視光と異なり、マイクロ波が雲を透過することを利用して雲を通してのマイクロ波での観測も試みられている。赤外域の放射射出強度がほぼ温度によって決まるに対し、マイクロ波の射出率は、物体の物理特性、すなわち複素誘電率や表面の粗さ、入射波の波長、入射角、偏波面などが関係する。したがって、同じ海面で

も、静かな時と波立った時とでは放射強度が異なる。これによって、海面状態のリモートセンシングの可能性がある。

これらの観測は、狭視野の望遠鏡を回転させて地表を線走査し(第4図)、高い地表分解能を得る(NOAA型では約6700kmの地表を1.25秒で走査し、衛星直下点の地表分解能約0.9km)。このような放射計を走査型放射計と呼ぶ。マイクロ波では、集光(東)装置にアンテナを使う。アンテナ電気軸を電磁的に変えていく走査方式もある。アンテナ開口径が制約されるため、マイクロ波によるリモートセンシングの分解能は良くない(地表分解能数十km)。

表面温度の測定精度は、NOAAの例では $300^{\circ}\text{K}$ で $\pm 2^{\circ}\text{K}$ 、 $185^{\circ}\text{K}$ で $\pm 8^{\circ}\text{K}$ という。もちろんセンサーの温度分解能は、これよりずっと良い。

地表分解能は、衛星直下点で最も良く、外側ほど低下する。また、衛星一目標一光源の相対位置や、少ないけれども途中の大気による吸収の効果もある。これらから、衛星による個々の点の測定値相互間には、多少とも内容の差異が存在する。つまり、絶対値の測定にはいろいろの不確かさが入っている。

この測定方法では、鉛直方向(正確には検知器の視線方向)の分解能は無い。

#### b. 吸収帯の分光測定による大気鉛直構造の観測

大気の特成構成気体のみにより吸収が起きると見なせる吸収帯があるとする。この吸収帯の中央からその外側の窓へかけての波長区間をいくつかの短波長区間に分け、それぞれに含まれる放射エネルギーを、大気上端で測定するとしよう。吸収気体が鉛直方向に様に分布していれば、吸収帯の中央の波長区間で観測されたエネルギーの大部分は、大気上部から射出されたものである。大気下層で射出されたものは、上部まで達する間に完全に吸収されてしまうからである。いっぽう、吸収帯の外側(窓に近い部分)の波長区間での測定値は、大部分大気下層で射出されたものによる。大気上層は、気温が低いため、そこで射出される放射のこの波長区間のものはごく僅かだからである。

このように、吸収気体の濃度の鉛直分布と波長別の吸収係数(分光吸収係数)がわかっていれば、その吸収帯を数個の小波長区間に分割し、それぞれの区間内の放射エネルギーを測定(分光測定)することによって、気温の鉛直分布形を知ることができる。

大気構成気体でこれに適したものは、約70kmまで

殆ど様な混合比を示す炭酸ガス  $\text{CO}_2$  である。使用される吸収帯は、波長  $4.3\mu\text{m}$  付近、 $15\mu\text{m}$  付近の赤外域と  $5\text{mm}$  のマイクロ波である。

この吸収帯の分光測定による気温鉛直分布の観測は、Nimbus 実験衛星によって SIRS (Satellite Infrared Spectrometer) としてテストされ、1972年10月以降 NOAA 衛星に搭載された VTPR (Vertical Temperature Profile Radiometer,  $15\mu\text{m}$  吸収帯を使用) によって現業化された。

この方法は、狭い波長区間の測定を行なうため空間分解能は窓領域の測定に比べ悪く(瞬間視野数十km)、また、視野を衛星直下方向に固定したものが多い。

分光測定から気温分布を求めるには、連立積分方程式を解析的に解く方法と、あらかじめ求めておいた波長別強度測定値と各層気温との間の統計的關係による方法があり、現業的には後者が使われているようだ。

この方法は、大気気温鉛直分布がノーマルな変動を示す場合はかなり良い結果を与えるが、鉛直分解能はせいぜい数 km という。実測には、より微細な気温分布が見られるが、これは、もっぱら気温算出過程で用いたイニシャルゲスの反映であるという。単一吸収帯で測定区間数を増しても、透過係数の決定に大気中のエアロゾルや稀ガスの詳細な分布と放射特性を観測のたびごとに知る必要があり、鉛直分解能は改善できない。また、雲の表面から下方のことは原理的に何もわからない。とは言うものの、この方法は、海洋上等の資料欠除域を補なう上で極めて貴重なものである。

複数の吸収帯の分光測定を組み合わせ使用すれば、分解能の改善に役立つ可能性がある。それぞれの吸収帯は射出エネルギーの絶対値、検知器の感度、雲の透過能力など、一長一短があり、組み合わせによって互いの欠点を補なう。たとえば、Nimbus 5 の HRIS (High Resolution Infrared Sounder) では、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$  の併用によって大気下層の鉛直分解能の改善を試みた。また、1978年打ち上げ予定の米国の次期現業衛星では、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$  およびマイクロ波の三つを併用することが計画されている。また、 $6\mu\text{m}$  付近の水蒸気吸収帯を使って対流圏中層の水蒸気量の分布を探る試みもある。吸収帯の分光測定には、観測対象高度や分光方法によって種々な試みがあるが、ここでは省略する。

これら分光測定の架台は軌道衛星が使われ、したがって、観測の時刻が観測点ごとに異なる。これらを他の定時観測資料と共に使うため、4次元解析と呼ぶ特別な解

析方法が研究されている。

窓領域・吸収帯ともに、衛星による測定は多重チャンネル化の傾向が強い。また、静止衛星では、短時間々隔の監視能力（SMS では5分間隔の観測結果が幾つか報告されている）も重視されてきているようだ。

なお、吸収帯の分光測定を地上で行なう試みもある。

## 7. リモートセンシングの気象技術と大気科学に果たす役割

2～6で、大気のリモートセンシングのあらましを説明した。ここで、これまでのまとめとして、リモートセンシングの特徴を要約し、それが天気予報などの気象サービスや大気科学の研究にどのような役割を果たすものかを考えてみよう。

### (1) リモートセンシングの特徴

リモートセンシングの特徴をあげるとおよそ次のようになる。

#### a. 広範囲を連続・即時観測できること

在来の観測では、測定感部の置かれた“点”の状態しか知ることができないが、リモートセンシングでは、ただ一組の装置で広い範囲（全地表まで）の平面・空間分布状況を即時に知ることができる。多くのリモートセンサーでは、時間的にも連続的に観測できる。もちろん、ここで、空間的、時間的に連続なとか、即時的というのは、我々が必要とするものと同じかより小さい空間、時間々隔で情報を入手できるという意味である。

#### b. 観測対象に対する非干渉性

リモートセンシングでは、測定しようとする場所に測器を置いたり、標本を直接採集する必要が無いので、それらによって測定しようとするものの状態が乱されるようなことがない。このことと、aによって、地域的・時間的に均質な観測を行なうことができる。

#### c. 観測値の自動高速処理が可能である

リモートセンサーで時々刻々入手される観測資料は膨大な量だが、全て同一の型式・内容で、一定の順序（選ばれた走査方式によって決められる）で連続的に入ってくる。これは、電子計算機による情報処理に適した型式である。そこで、観測値に種々の演算操作を加えた、微積分値、相関、スペクトルといった、より高度な形の情報として（即時に）出力させることが容易である。

#### d. 間接測定であること＝解釈技術の必要性

リモートセンサーの検知器で直接計量されるものは、普通我々が必要としている量ではない。目的とする量を得るには、種々な物理的統計的關係を使って直接に計量

されたものを解釈することが必要である。リモートセンシングのシステムには、当然このような解釈技術が含まれる。

#### e. 相対値のパターン情報

dにあげたように、物理的・統計的關係を介することによって、直接測定される量と必要な量との間の関係は、ただ一つに決まらない。したがって、解釈結果には多少とも曖昧さが含まれる。しかし、この対応関係はでたらめなものではなく、時刻、地域、測定対象の形成機構などの条件が同一であれば、ほぼ同一の関係が成り立つと期待できる（対応関係の細部を知ることは実際には難しい場合が多いが）。

したがって、リモートセンシングは、一般に、知ろうとする量の個々の点の絶対値よりも、広範囲についての相対値の分布形＝パターンの情報を得るのに適している。

リモートセンサーは、高度な技術とかなりの経費を必要とするものだが、上に述べた事から、適当な架台と方式を選べば、in situ 観測によっては技術的、経済的、社会的な理由で行なえないような対象と範囲の観測を実行できる。

### (2) リモートセンシングの気象技術と大気科学に果たす役割

大気は、我々の直接的な認識能力や行動能力に比べ、はるかに広大であり、また、その中に我々が住んでいるため、大気環境の保全がきわめて大切である。それゆえ、前項で述べたリモートセンシングの特徴は、大気に関する情報の入手手段としてまことに好適なものである。リモートセンシングの気象技術や大気科学にもたらず情報とその役割をみよう。

#### a. 全球規模からミクロスケールにわたる種々な規模の気象要素の分布の観測

大気現象を、必要な時間・空間分解能で知ることができる、または、可能性がある。これによって、いままで観測の得難かった場所（海洋上、両極その他無人またはそれに近い所、高空など）の観測が可能となり、現象のサンプリングが均質化される。

それと共に、新しい現象、新側面の発見、従来の知識の確認、現象の理解が進む。

たとえば、全球の雲量、雪水域、アルベドなど、地球一大気系の熱収支に関係した情報の入手によって、大規模な大気の大気循環や気候のメカニズムの理解が進む。対流圏、成層圏の全球的気温分布パターンの観測によって

も、大循環の理解が増進されよう。

我々の日々の活動に直接大きな影響を及ぼす、種々の規模の大気擾乱—温帯低気圧や台風から雷雨、集中豪雨など—の発生とふるまいを時々刻々に捉えることができ、これら擾乱の予測技術の改善に大きな力を与える。

気象要素の分布パターンとその時間的変化を種々の規模について入手できることによって、大気現象のモデルによるシミュレーションの結果を(定性的に)検証することができる。ローカルな天気予報に、簡単なメソモデルによるシミュレーションを使う場合、その初期値の入手手段としても有望であろう。これは、気象衛星や気象レーダによる、時々刻々の雲・降水粒子の分布と運動、地表温度などの利用の方向として重要だろう。

生活環境としての大気の特長、とくに汚染物質の排出、移動、拡散、大気中の蓄積などの、監視、メカニズムの究明などが重要な問題となってきた。これらの問題にも、リモートセンシングの広域連続監視能力が、非干渉性(汚染源のモニターなどに有利)と共に大きな能力を発揮するだろう。

#### b. 観測点の最適配置に果たす役割

リモートセンシングの情報によって、既存あるいは計画中の直接観測(In situ Observation)点の代表性の検討や、最適配置を考える資料を得ることができよう。

c. 情報処理の自動化、2次導出量の即時出力が可能であることによって、リモートセンシング情報自体の新しい利用方法が生まれるだろうことは、言うまでもなからう。

リモートセンシングは、一般的に言って、在来の観測—現地における点の情報の直接測定—にとって代わるものではない。技術的、経済的、あるいは人間活動に与える妨害などの点から、リモートセンシングが実現可能な唯一の手段である場合もありうる。しかし、リモートセンシングは、基本的に現地直接測定を補完し、我々の理解を深めるものであり、両者は相補的關係にある。

#### (3) 我国における大気のリモートセンシング技術の発展のための問題点

筆者には、大気のリモートセンシングの全ての分野に

わたって、今後の発展の問題点を指摘する資格はないが、現在までに職務上の経験を持つ、マイクロ波レーダと気象衛星に関し若干気付いた点をあげておく。

これらの2分野は、設備と運用に多額の経費とかなりの人員を要するゆえか、我国では気象庁が殆ど独占している。現業設備は、情報処理・伝達の部分を除けばかなり充実しているが、新しい測定方式の研究開発、現業化、情報利用技術の組織の開発などの面は、この面の先進国である、英・米などに比べまことに貧弱である。その顕著な例は、シビアストームなど中小規模系の殆ど常用の研究観測手段となった感があり、また、境界層の有力な観測手段として発展しつつある、ドップラレーダに見られる。

リモートセンシング情報の利用(解釈)技術の開発、大気科学研究への活用を図るには、技術者・研究者が、生資料から種々の2次資料までを、容易に入手できるシステムを早急に確立することが必要である。

#### 参考図書

筆者が見ることができた範囲内で、適当な参考図書と考えられるものをあげる。

リモートセンシング一般の入門書としては、

- 日本リモートセンシング研究会編, 昭和50年: リモートセンシング・ノート, 技報堂
- E. C. Barrett and L. F. Curtis, 1976: Introduction to Environmental Remote Sensing, Science Paper Backs, Chapman and Hall Ltd.

前者は、電磁波による受動センシングが主であり、後者は、ずっと広範囲についてバランスのとれた記述がなされている。

レーダ、衛星、ライダ、ソーダの専門的解説としては、気象研究ノート第112, 113, 116号がある。外国語の本では、

- L. J. Battan, 1973: Radar Observation of the Atmosphere, Chicago Univ. Press.
  - E. D. Hinkley 編, 1976: Laser Monitoring of the Atmosphere, Springer-Verlag.
- などがある。