

10. マイクロ波ラジオメータによる地球の リモートセンシング

岡本 謙一*

(昭和51年9月11日受理)

REMOTE SENSING OF THE EARTH BY MICROWAVE RADIOMETERS

By

Ken'ichi OKAMOTO

Remote sensing of the earth by the microwave radiometer is reviewed. Basic principles of microwave radiometry and the devices used are explained. Some examples of measurements which have been made with microwave radiometers located on towers, and on board the aircrafts and the latest satellites are shown.

1. 序

物質の表面からは、プランクの熱輻射則に従って色々な波長の電磁波が放射される。マイクロ波ラジオメータを用いたリモートセンシングにおいて受信されるマイクロ波帯の電磁波（周波数 1～30 GHz）に対しては、観測対象物である地球表面や大気の温度が十分高いので、レーリー・ジーンズの古典的な輻射の近似式が成立し、温度 T の物質表面より表面に垂直方向に、単位面積、単位時間、単位立体角、単位周波数あたりに放射される波長 λ の電磁波のエネルギーは、

$$B(\lambda, T) = \frac{2kT}{\lambda^2} \text{Joul } m^{-2} \text{sec}^{-1} \text{Sr}^{-1} \text{Hz}^{-1} \quad \dots\dots(1)$$

で与えられる^{(7),(9)}。 k はボルツマン定数である。式(1)では、2つの偏波成分の寄与を同時に考慮している。又(1)では物質を完全黒体（完全な輻射の吸収体であり、又放射体である。）と仮定している。しかし通常物質は黒体とは異なり、完全な輻射の吸収体（又は放射体）ではないので、物質の表面から放射されるエネルギーは、(1)に物質固有の放射率 ϵ をかけたものとなる。

物質が輻射熱平衡にある時、物質から放射される輻射エネルギーと物質により吸収される輻射エネルギーとは等しいゆえ、放射率 ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$) は、吸放率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) に等しい。通常の物質では、輻射が物質表面に入射する時、完全黒体とは異なり、全部が吸収されるのではなく、一部分は物質に吸収されるが、一部分は物質表面により反射される**。反射率 ρ は、 $\rho \equiv 1 - \alpha$ と定義されるので、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \epsilon \\ \rho &= 1 - \epsilon \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

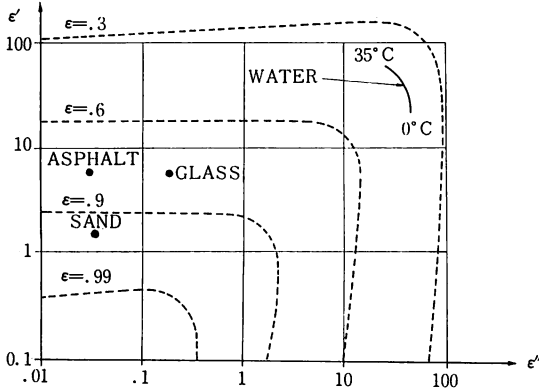
の関係が成立する⁽⁹⁾。例えばなめらかな水の表面の放射率は、0.3～0.5位であり、粗い土壌の放射率は、ほぼ1に等しい。物質の表面より放射されるエネルギーは、物質の表面温度 T と物質固有の放射率 ϵ の積に比例するので

$$T_B = \epsilon T \quad \dots\dots(3)$$

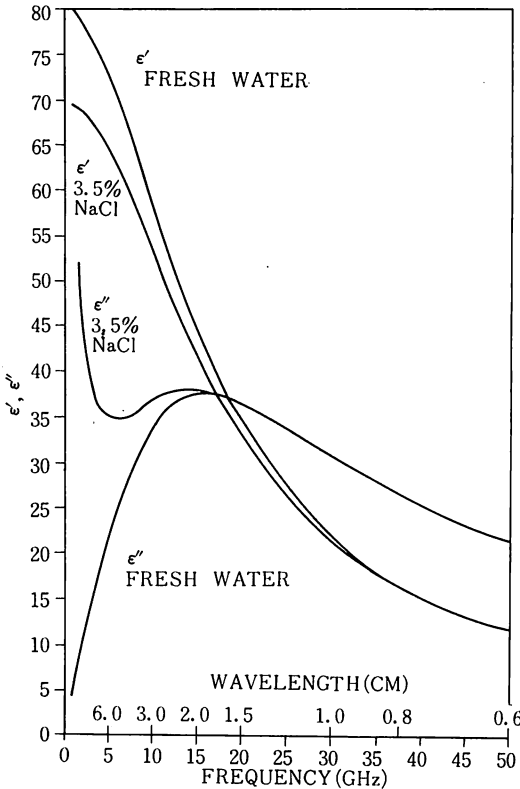
という温度を定義すると便利である。 T_B は輝度温度と呼ばれ、温度 T の物質の放射する輻射エネルギーと等しい輻射エネルギーを放射する黒体の温度と定義される。マイクロ波ラジオメータは、物質の表面より放射されるマイクロ波帯の電磁波を受信し、受信電力に比例する物質固有の輝度温度を測定することにより、測定対象物質の種々の物理的性質を観測する受動的なリモートセンサーである。放射率 ϵ は、一般には物質の種々の物

* 衛星研究部 衛星管制研究室

** 物質を透過するエネルギーについては小さいので考慮していない。



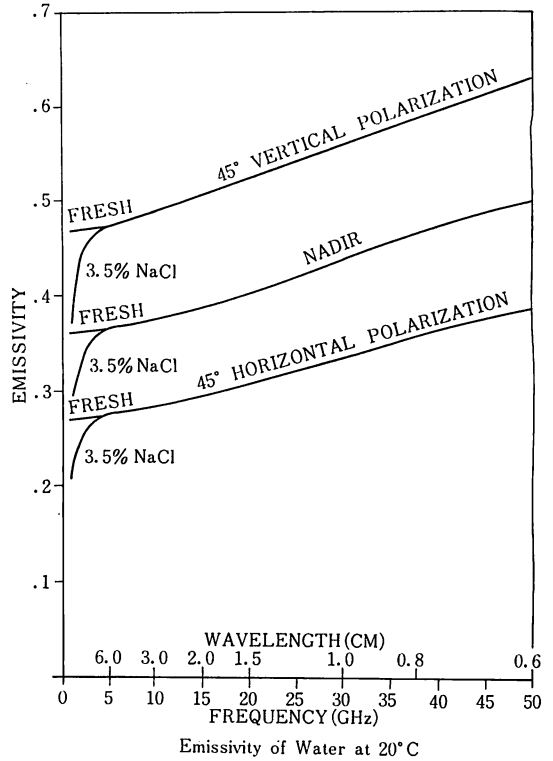
第1図 入射角零度の時の放射率 ϵ と複素誘電率 $\epsilon_c(\epsilon' - j\epsilon'')$ の関係



Dielectric Constant of Water $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$ at 20°C

第2図 真水及び塩水（濃度3.5%）の誘電率と周波数の関係

理的性質や測定条件に応じて変化する。放射率に影響を及ぼす物質の物理的性質としては、表面温度、表面の粗さ（海面の場合には風速により変化する海面の波浪状況）、含水率、成分組成、又大気の場合には、気温及び水蒸気の垂直分布等がある。測定条件としては、受信周波数、入射角、偏波成分等がある。なめらかな誘電物質表面からの入射角零度の時の放射率 ϵ は、



第3図 真水及び塩水（濃度3.5%）の放射率と周波数の関係

$$\epsilon = 1 - \frac{1 - \sqrt{\epsilon_c}}{1 + \sqrt{\epsilon_c}} \quad \dots(4)$$

で与えられる^{(9), (24)}。ここで ϵ_c は複素誘電率で

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$$

で与えられる。第1図で放射率 ϵ と ϵ' 、 ϵ'' との関係を示す⁽⁹⁾。又いくつかの物質の平均的な ϵ' 、 ϵ'' を示す。

一般になめらかな誘電物質表面より、大気中に入射角 ϕ で放射される電磁波の垂直偏波成分の放射率 ϵ_v 及び水平偏波成分の放射率 ϵ_h は、各々

$$\epsilon_v = 1 - \frac{\epsilon_c \cos \phi - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \phi}}{\epsilon_c \cos \phi + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \phi}} \quad \dots(5)$$

$$\epsilon_h = 1 - \frac{\cos \phi - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \phi}}{\cos \phi + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \phi}}$$

で与えられる^{(9), (31)}。第2図は、水温が20°Cの時の真水及び3.5%の濃度の塩水の誘電率の周波数依存性を示す計算値である⁽¹¹⁾。第3図は、第2図の値及び(5)をもとにして計算した水温が20°Cの場合の真水及び3.5%の濃度の塩水の入射角 ϕ が45°の時の垂直偏波成分及び水平偏波成分の放射率を示す⁽¹¹⁾。又入射角が零度の時（直下点観測）の放射率も同時に示す。

人工衛星又は航空機にマイクロ波ラジオメータを搭載して、地表面のリモートセンシングを行う時、受信される輻射には、観測対象物質の表面より放射される輻射以

外に、大気自身の輻射の内、ラジオメータに向う上向きの輻射も受信される。さらに大気自身の輻射の内、地表面に向う下向き輻射と天空から地表面に向う輻射が、観測対象物質表面で反射され受信される。これらの輻射は、観測対象物質とラジオメータ間にある大気により減衰され受信される。それゆえこれらの影響をすべて考慮すると、ラジオメータで受信される輝度温度は、

$$T_B = \{\epsilon T + (1-\epsilon) T_r\} \exp\left[-\int_0^H \alpha(z) \sec \theta dz\right] + T_u \quad \dots\dots(6)$$

で与えられる^{(6),(7),(3)}。ここで H はアンテナの高度、 $\alpha(z)$ は、高度 z における大気（水蒸気、酸素等）や雲による吸収係数である。 θ は入射角である。 T_u は大気自身のラジオメータに向う上向き輻射からの寄与、 T_r は大気自身の地表面に向う下向き輻射からの寄与と大気により減衰された天空からの輻射の寄与の和で各々、

$$T_u = \int_0^H T_s(z) \alpha(z) \exp\left[-\int_z^H \alpha(z') \sec \theta dz'\right] \sec \theta dz$$

$$T_r = T_{sky} \exp\left[-\int_0^\infty \alpha(z) \sec \theta dz\right] + \int_0^\infty T_s(z) \alpha(z) \times \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') \sec \theta dz'\right] \sec \theta dz \quad \dots\dots(7)$$

で与えられる。 T_{sky} は天空温度、 $T_s(z)$ は、高度 z における大気温度である。

マイクロ波ラジオメータの受信アンテナには、そのビームの覆う立体角方向からの輻射が入射するので、実際にアンテナにより受信されるのは、ビームの覆う立体角（アンテナに固定された座標系における天頂角 θ と方位角 φ で特徴づけられる）の範囲にわたって、アンテナパターン関数 $F(\theta, \varphi)$ の重み付けを行い平均された輝度温度 $T_B(\theta, \varphi)$ であり、アンテナ温度 T_A と呼ばれ

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \iint_{4\pi} T_B(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} F(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{4\pi}{G} \quad \dots\dots(8)$$

で与えられる⁽⁷⁾。 G はアンテナ利得である。アンテナ温度 T_A は受信電力 P と、

$$P = k T_A B \quad \dots\dots(9)$$

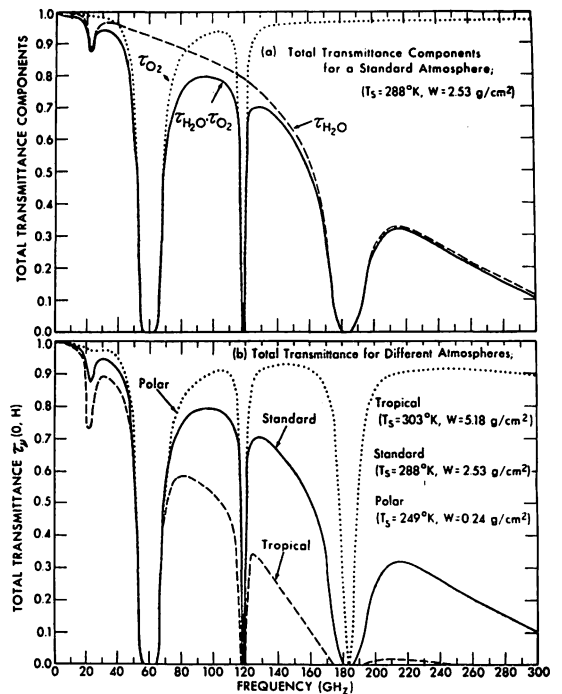
の関係にある。 k はボルツマン定数、 B は受信 RF バンド幅である。衛星あるいは航空機搭載のマイクロ波ラジオメータにより測定されるのは、受信電力 P と(9)の関係で結びつけられているアンテナ温度 T_A である。

T_A を測定することにより、ビーム幅の範囲内の観測対象物の平均的な輝度温度を知ることができる。受信輝度温度を解析し、輝度温度に影響を及ぼす種々の要因パラメータの影響度を決定することにより、測定対象物質の種々の物理的性質が決定される。

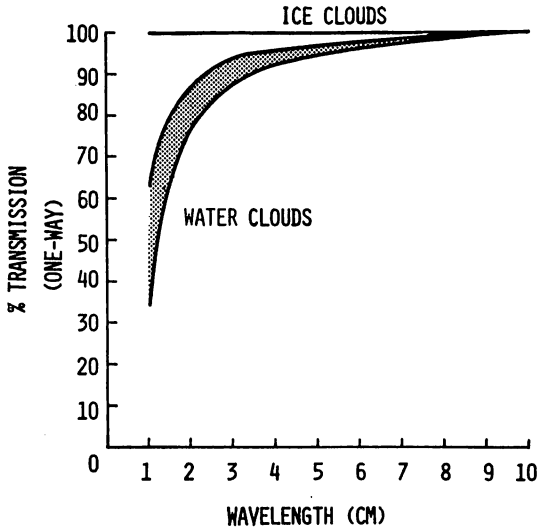
2. 大気・雲の影響

マイクロ波ラジオメータの受信輝度温度は、(6)、(7)でわかるように、大気や雲の影響を受け減衰する。第4図で大気に対するマイクロ波帯電磁波の透過率の計算値を示す⁽¹⁹⁾。第4図の(a)では、大気温度が 288°K、水蒸気の密度が 2.53 g/cm² の標準大気の場合の水蒸気に対する透過率（破線）、酸素分子に対する透過率（点線）及び両者の積（実線）を示す。水蒸気については、22.2 GHz に弱い吸収帯が、又 183 GHz を中心として幅の広い強い吸収帯がみられる。酸素分子に関しては、60 GHz に幅の広い強い吸収帯が、又 118.75 GHz に鋭い吸収線がみられる。第4図の(b)は、3つの異なる大気（極地方、赤道地方、標準大気）についての透過率を示す。

第5図は雲に対するマイクロ波帯電磁波の透過率を示す。地球はその大部分が常に雲に覆われているので、雲のマイクロ波透過特性の調査は重要である。第5図でみられるように、15 GHz 以下の比較的長いマイクロ波は雲をよく透過する⁽²⁰⁾。又氷粒からなる雲は、マイクロ波に対して殆んど透明である。可視・赤外領域の電磁波が殆んど雲を透過することができないことに比べ、雲に対する透過率の大きいことは、マイクロ波帯電磁波の持つ大きな長所である。地球表面のリモートセンシングを行う時には、大気及び雲による影響を比較的受けにくい15

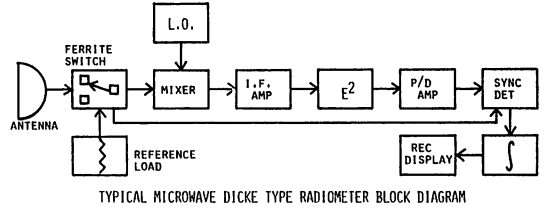


第4図 大気に対するマイクロ波帯電磁波の透過率



第5図 雲に対するマイクロ波帯電磁波の透過率

GHz 以下の周波数のマイクロ波を受信すればよい。又 60 GHz 帯の酸素分子による吸収, 22.2 GHz の水蒸気による吸収を利用して, 大気自身の輻射を測定し, 大気中

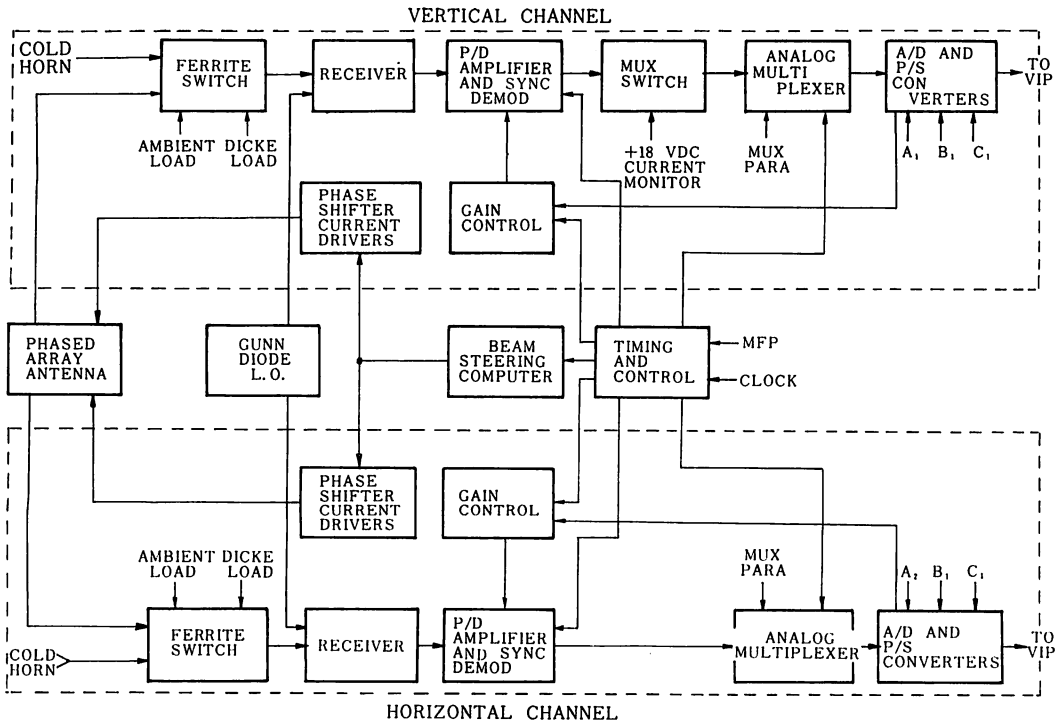


第6図 ディッケ型ラジオメータの簡単なブロック図

の水蒸気密度, 大気の温度の垂直分布を測定することも可能である。

3. マイクロ波ラジオメータ

簡単なディッケ型マイクロ波ラジオメータ⁽¹⁸⁾のブロック図を第6図に示す。アンテナから入力された受信未知ノイズと一定温度の標準ノイズ源(ディッケ・ロード)からのデータが交互にフェライトスイッチにより切り替えられて受信機に入力される。振幅変調を受けた形で入力されたノイズは, ローカルオシレータを用いて, 受信機のミキサー部分で中間周波数に落とされた後増幅される。次に二乗検波され, さらに増幅され, フェライ



Simplified Block Diagram of the ESMR Instrument

第7図 人工衛星ニムバス6号搭載の ESMR のブロック図

トスイッチからの信号を用いて同期検波される。得られた信号は適当な観測時間にわたり積分され、受信未知ノイズの輝度温度と標準ノイズソースの温度差に比例した平均された信号が得られる。受信機は可能な限り低い雑音温度を持つように設計されている。又衛星に搭載する場合には観測時間（積分時間にほぼ等しい）は限られているので、感度を上げるため可能な限り広いバンド幅（ニムバス5号搭載のマイクロ波ラジオメータESMRは300 MHzのバンド幅を持つ）ように設計されている。受信機の感度 $\Delta T(^{\circ}\text{K})$ は、検波前のバンド幅を $B(\text{Hz})$ 、積分時間を $\tau(\text{sec})$ とすると、

$$\Delta T = \delta \frac{(T_A + T_R)}{\sqrt{B\tau}} \quad \dots\dots(10)$$

で与えられる^{(7),(9)}。 δ は1~3の定数である。 T_R は受信機のシステム雑音温度、又 T_A はアンテナ温度である。衛星搭載用の典型的なラジオメータの感度 ΔT は $0.1^{\circ}\text{K} \sim 2^{\circ}\text{K}$ である。又パラボラアンテナの角度分解能 $\theta(\text{rad})$ はパラボラアンテナの直径を d 、受信波長を λ とすると、近似的に

$$\theta = \frac{\lambda}{d} \quad \dots\dots(11)$$

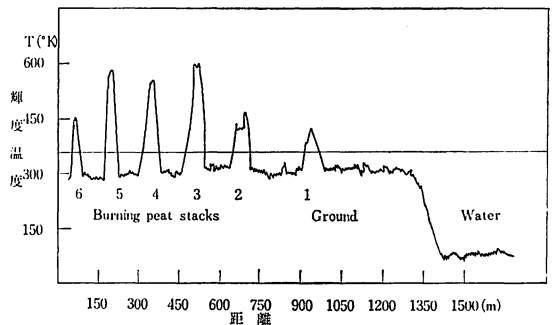
で与えられる。第7図でニムバス6号(1975年6月12日打上げ)に搭載されているESMR(Electrically Scanning Microwave Radiometer)のブロック図を示す⁽¹⁰⁾。中間周波数は37 GHz(0.81cm)であり、垂直及び水平偏波の独立したチャンネルを持つ。最初に、各々の偏りを持った波が電氣的にビームを走査するフェイズドアレイアンテナを経由して受信され、各々のチャンネルに入る。入力された未知ノイズと一定温度の標準ノイズ源からのノイズは、交互にフェライトスイッチで切り替えられて、受信機に入力される。入力信号はガン発振器からの37 GHzの信号を用いて中間周波数におとされる。次にバンドパスフィルタを用いて、10~125 MHzの中間周波数のみが選択増幅される。受信機は、中心周波数37 GHzの中心部の20 MHzを除いた36.875~37.125 GHzに対して感度を持つ。中間周波数の信号は、同期検波され、アナログマルチプレクサにより選択識別され、A/Dコンバータでデジタル化され、衛星搭載のテープレコーダに蓄えられる。

4. マイクロ波ラジオメータの特徴

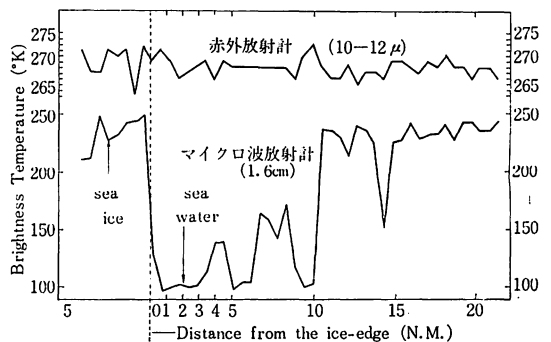
第1表で他の波長領域の受動的センサーと比較したマイクロ波ラジオメータの特徴を示す⁽³⁾。マイクロ波ラジオメータは、昼夜の区別なく、又雲に影響されずに地表面をリモートセンシングすることが可能であるという可視、赤外領域のセンサーにない大きな長所を有する。反

面距離分解能は、可視、赤外領域のセンサーと比較すると波長が長いので、アンテナの直径にも依存するが、1~2桁程度おちる。ほぼ同高度(約1,000 km)の衛星アーツとニムバスを比較すると、アーツ搭載の可視、近赤外領域のMSSの分解能は約100m、ニムバス搭載のマイクロ波ラジオメータESMRの分解能は約25 kmである。分解能が悪いということは、一般的に言って雑な測定しかできないという意味において短所であるが、逆にいうと、ある物理量の広い領域にわたる平均値を観測することができ観測対象物の性質を大局的に測定できる長所ともなりうる。可視、赤外領域のセンサーと比較した時、マイクロ波ラジオメータによる測定が有効であった具体的な観測例を次に示す。

第8図はソビエトの研究者による森林地帯及び泥炭採掘地帯の山火事のマイクロ波ラジオメータによる観測結果を示す⁽²¹⁾。測定は煙のたちこめる条件の下で、航空機を利用して、50mの高度より行われた。受信波長は0.8cm及び3.4cmである。縦軸は受信輝度温度、横軸は距離を示す。目には見えないが煙を通して泥炭の堆積が燃えている様子(第8図の1~6の番号)がよくわかる。



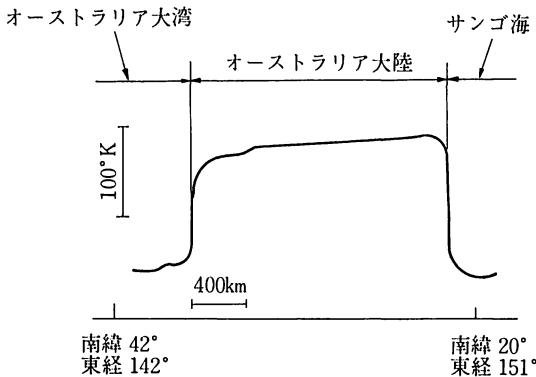
第8図 泥炭地帯の山火事の輝度温度測定、横軸は、距離(m)、縦軸は輝度温度(°K)、高度50mからの測定



第9図 北極海の氷の輝度温度、赤外放射計とマイクロ波放射計による測定の比較、横軸は氷の端よりの距離で単位は海里(N.M.)

第1表 可視, 赤外, マイクロ波帯の受動的センサーの比較
COMPARISON OF REMOTE SENSING IN VARIOUS SPECTRAL BANDS

SPECTRAL BAND	CLOUD PENETRATION	DAY-NIGHT CAPABILITY	SPATIAL RESOLUTION	EASE OF DATA INTERPRETATION
VISUAL	NO	NO	HIGH	EASY
INFRARED	NO	YES	HIGH	COMPLEX
MICROWAVE	YES	YES	LOW LIMITED BY ANTENNA SIZE	COMPLEX



第10図 人工衛星コスモス 243 によるオーストラリア大陸の輝度温度測定, オーストラリア大湾 (東経142°, 南緯 42°) よりオーストラリア大陸を横切ってサンゴ海 (東経151°, 南緯20°) に至る。

第9図は, アメリカの研究者による航空機からの北極海の氷のリモートセンシングの結果である^{(23), (4), (5)}。1.6 cm の波長のマイクロ波ラジオメータと 10.5 μ ~12.5 μ 帯の熱赤外放射計の同時測定の結果で, 破線が海水と氷の境界を示しており, 境界の右が海水, 左が氷である。第9図は, 氷と海水の温度がほぼ等しい結氷期あるいは融氷期の時期に対応しており, 境界面あたりで, 氷と海水の温度がほぼ等しい。赤外領域では, 海水及び氷の放射率はほぼ1に等しく, 直接氷及び海水の温度を測定することになり, その境界面を識別することはできない。しかしマイクロ波領域では入射角が零度の時, 海水の放射率 (0.35~0.38) に比べて氷の放射率は0.9~0.95と2~2.5倍も高いので輝度温度の差は100°K~150°Kもあり (氷の方が輝度温度が高い), 両者の識別は容易である。結氷期あるいは融氷期においては, 北極海は一日中夜でありテレビカメラによる氷の観測は不可能である。

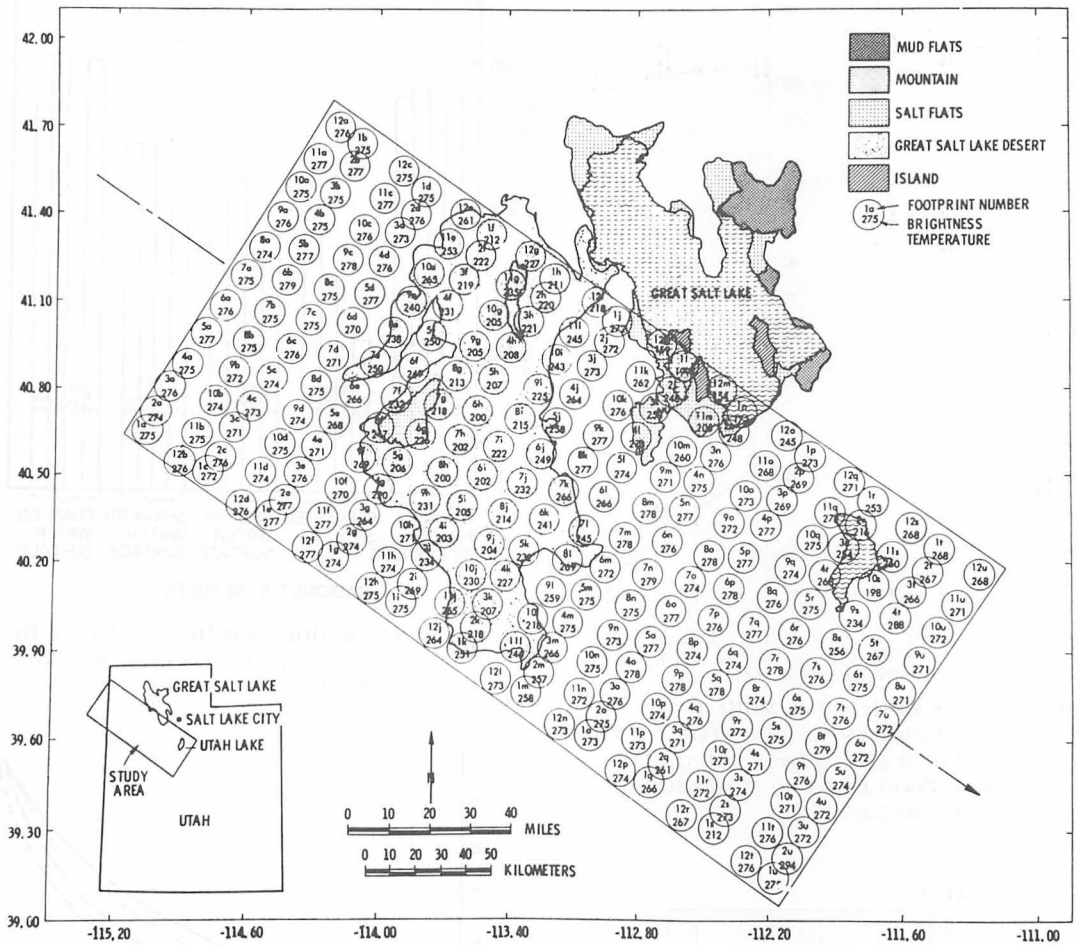
海面と陸地も各々の放射率が大きく異なる (海面は, 0.3~0.5, 陸地は0.7~0.9) ので輝度温度差が100°K位にもなり, その境界面は明瞭に区別できる。

第10図は, ソビエトの衛星コスモス 243 による 8.5cm の波長を用いた測定で, オーストラリア大陸をオーストラリア大湾からさんご海の方へ横切った時の輝度温度を示している⁽²²⁾。海面と大陸の境界面が明瞭にあらわれている。

第11図は, 人工衛星スカイラブに搭載された走査型のラジオメータ S193 による 高度 438 km からのグレートソルトレイク 砂漠近傍のリモートセンシング結果である⁽²⁴⁾。受信周波数は, 13.9 GHz, 受信アンテナの直径は1.21 m, 距離分解能は約15.5 kmである。測定は衛星の進行方向 (図中矢印で示されている北西方向より南東方向に行く) と直角方向にアンテナを衛星直下点より $\pm 10.5^\circ$ の範囲で機械的に走査して行っている⁽¹⁷⁾。第11図中の小円の中の記号は, 上の方の 3 a, 10 d 等の数字とアルファベットのペアが小円で囲まれた地域の番号を示す。衛星の進行方向に対しては a~u のアルファベットが, 又進行方向と直角方向の走査に対しては, 1~12 の数字が用いられている。又下の方の数字は小円で囲まれた地域の輝度温度を示している。例えば 3 a の輝度温度は276°Kであり, 10 d の輝度温度は275°Kである。砂漠の外側の a~d の山岳地帯の走査においては, 輝度温度は270°K~279°K の値を示す。衛星がさらに南東方向に進み砂漠地帯に入ると共に輝度温度は減少し, 6 h, 8 h で200°K という最低の値を示している。又 3 g, 4 g, 5 g と砂漠の端を横切る走査に対し, 輝度温度は 3 g (264°K), 4 g (220°K), 5 g (206°K) と急激に減少している。

周囲の山岳地帯に比べて低い砂漠地帯の輝度温度は, 砂漠表面下の塩水を含んだ堆積物の層からの輻射の寄与によるものと推定されている。マイクロ波は, 可視赤外の電磁波よりも深く地面をもぐる事ができる。

従って逆に地面下からの輻射を受信し, 可視, 赤外では不可能な表面下の情報についても知ることができる。測定可能な深さは, 土壌の含水率に大きく依存する。文献⁽³²⁾の第5図を参照のこと⁽³²⁾。その他, 雪の含水率(雪



第11図 人工衛星スカイラブによるグレートソルトレイク砂漠の輝度温度測定，図中の縦軸，横軸の数字は北緯及び西経を示す。

中の融解した水分の量)等マイクロ波ラジオメータ以外のセンサーではリモートセンシングできない観測対象物もある。

5. 観測例

人工衛星にマイクロ波ラジオメータを搭載して地球環境のリモートセンシングを行う時，マイクロ波ラジオメータの観測は，測定対象物とその分解能に比べて広い範囲にわたりほぼ一様に分布していることが望ましい。地表面を観測する時，その陸地の部分の放射率は比較的狭い範囲で大幅に変動するので，マイクロ波ラジオメータによる最も有効な測定対象物は海洋である。

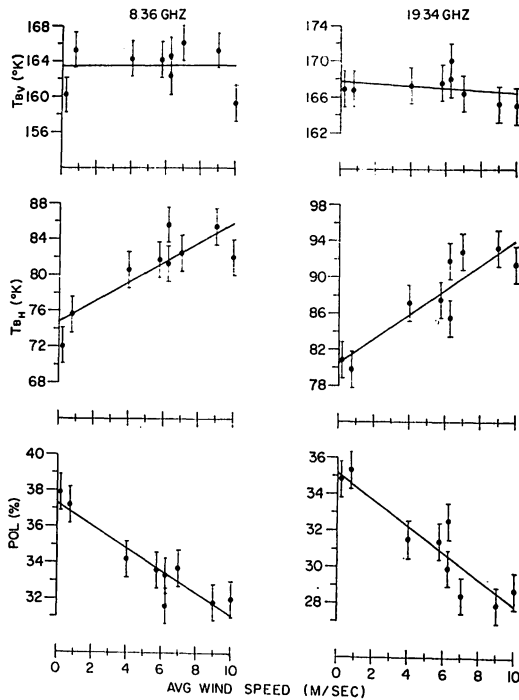
5.1 海洋に関するいくつかの測定結果

5.1.1 海面上の風速と輝度温度の関係

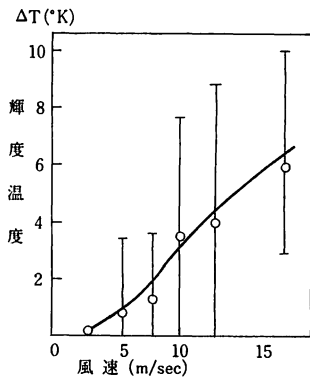
風速が約 15m/sec 以下の遅い時には，海面には風波がたち，粗くなり，輝度温度も風速と共に増加する。

第12図は，風速が 0~10m/sec の条件の下で，地上の塔上から行われた実験である⁽²⁵⁾。海面の温度は測定期間の間， $291 \pm 0.5^\circ\text{K}$ であった。受信周波数は，8.36及び 19.34 GHz であり，各々の周波数に対して垂直及び水平の両偏波成分が測定された。ラジオメータは通常のディッケ型のもので感度は 0.25°K (8.36 GHz) 及び 0.5°K (19.34GHz)，距離分解能は共に約 1 m である。第12図は，入射角が 55° の時の垂直偏波の輝度温度 (T_{BV})，水平偏波の輝度温度 (T_{BH})，及び $\text{POL} \equiv (T_{BV} - T_{BH}) / (T_{BV} + T_{BH})$ を2つの周波数に対して風速の関数として示している。垂直偏波の輝度温度は風速に依存しないが，水平偏波の輝度温度は風速に比例して増加する。

第13図は人工衛星コスモスから行われた衛星直下点の海面の輝度温度の測定結果である⁽²²⁾。受信波長は 8.5cm であり，分散は大きい風速と共に輝度温度が増加していることがわかる。風速一定の条件の下に入射角を変化

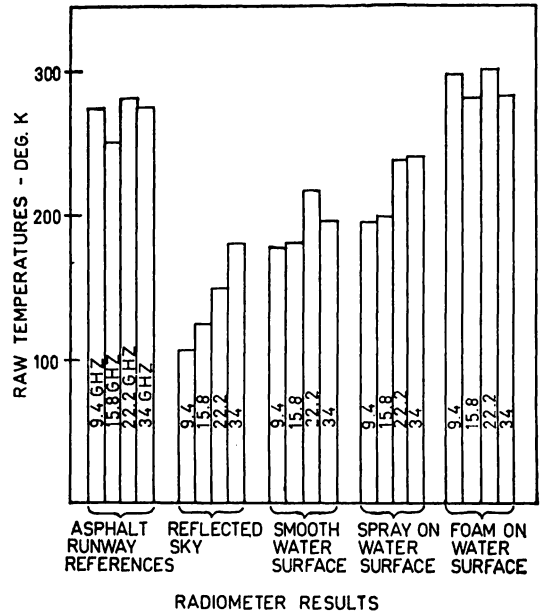


第12図 周波数 8.36GHz 及び 19.34GHz における輝度温度の水平偏波成分による測定 (T_{BH}) 及び垂直偏波成分による測定 (T_{BV}), POL は, $POL = (T_{BV} - T_{BH}) / (T_{BV} + T_{BH})$ で定義されている。入射角は 55° である。

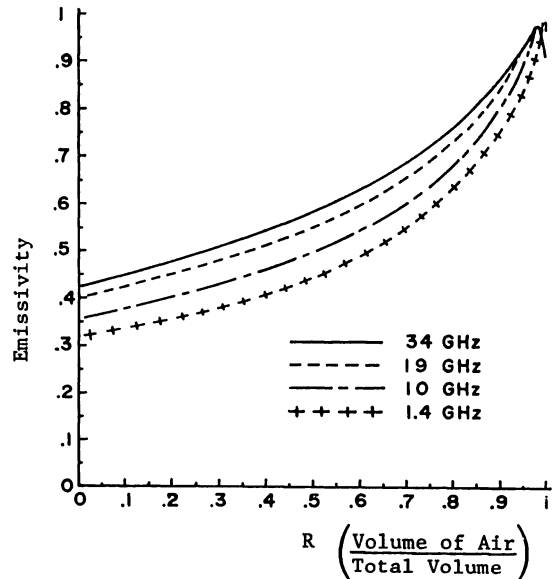


第13図 人工衛星コスモスによる海洋上の風速と輝度温度の関係を示す測定、横軸は風速 (m/sec), 縦軸は輝度温度 (°K)

させて行われた測定では、入射角が増加すると共に垂直偏波成分の輝度温度は増加し、水平偏波成分の輝度温度は減少する結果が得られている。以上は風速が比較的遅い (15m/sec 以下) 場合の測定結果であったが、風速が 15m/sec 以上になると海面には白波や泡が顕著になり輝度温度は急激に増大する。白波や泡の放射率は大きくてほぼ 1 に等しいことが確かめられている。風速が増

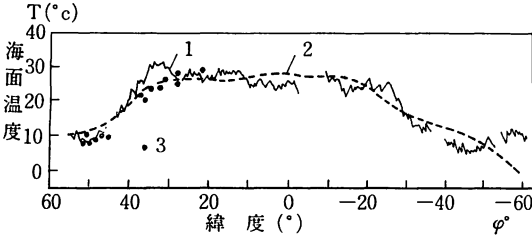


第14図 周波数, 9.4GHz, 15.8GHz, 22.2GHz, 34GHz におけるいろんな条件の下での水面の輝度温度測定、縦軸は輝度温度 (°K) を示す。

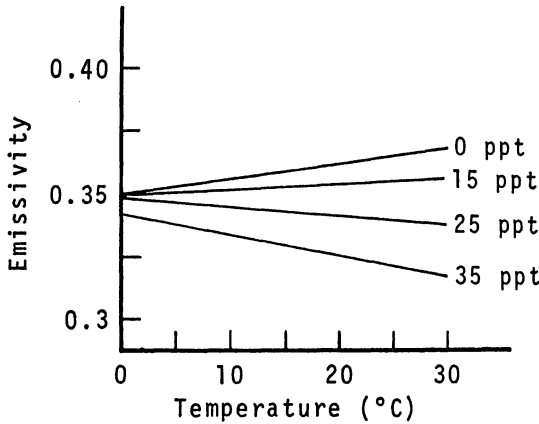


第15図 海水中に含まれる気泡の割合 (R) と放射率の関係

大すると、白波や泡の占める領域が増大し、その結果マイクロ波輝度温度も増大し海面の温度に近づく。第14図は航空機 (NASA 926) のレーダードームにおかれたラジオメータによる地上におかれた水槽からの放射を測定したもので受信周波数は 9.3, 15.8, 22.2, 34 GHz である⁽²⁷⁾。水槽に洗剤を投入し高圧ジェットを噴射して泡だて、人為的に泡、白波を作って放射を測定した所、



第16図 人工衛星コスモスによる太平洋の表面温度の測定 ($T(^{\circ}\text{C})$) 横軸は緯度 ($\varphi(^{\circ})$), 測定波長は, 3.4cm 及び8.5 cm 曲線 1 は, 人工衛星からの測定輝度温度をもとにして換算された海面の表面温度, 曲線 2 は, 海面上の平均気温, 黒丸 3 は, 人工衛星と時期を同じくして船により実測された海面の表面温度



第17図 塩分濃度 (ppt) をパラメータとした放射率と温度 ($^{\circ}\text{C}$) の関係, 測定周波数は, 1.42GHz

第14図のように高い輝度温度を示した。水の放射率は泡だてる前は約0.4であったが、泡だった後は約1に急増した。

第15図は海面より測って波長程度の深さの層の中における空気含有率 (空気の体積を全体積で割ったもの) と放射率の関係を示す計算結果であり、入射角は零度と仮定している⁽²⁶⁾。気泡の層の誘電率は、層が多孔質物体であると仮定して計算している。第15図でわかるように、空気含有率が増加するにつれて、放射率が増大し、1に近づくことがわかる。

航空機にマイクロ波ラジオメータを搭載し、海面の輝度温度を測定し、輝度温度をもとにして海面上の風速の分布図を作る試みがすでになされている⁽²⁸⁾。

又近い将来、人工衛星にマイクロ波ラジオメータを搭載し、海面上の風速の世界的な分布図を作る試みも計画されている。

5.1.2 海面の温度

第16図の曲線 1 は, 人工衛星コスモス搭載の 3.4cm 及

び 8.5cm の波長のラジオメータ測定から得られた太平洋の表面温度の緯度に対する変化を示す⁽²²⁾。比較のために平均気温 (曲線 2) 及び人工衛星による測定と時期をほぼ同じくして行われた船からの測定結果 (ground truth) を示す。船からの測定と人工衛星からの測定は、よい相関を示す。

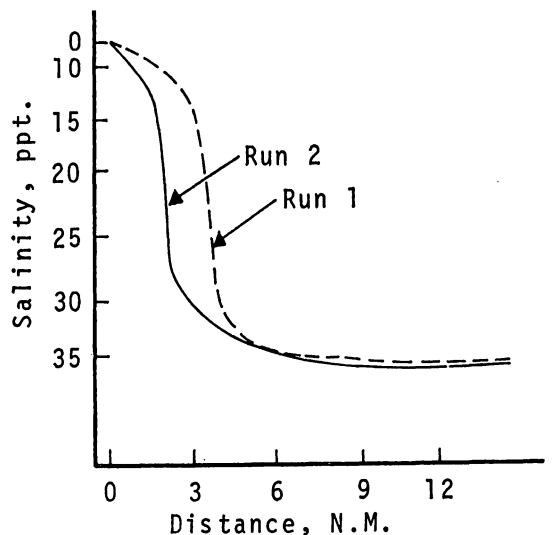
5.1.3 海水の塩分の濃度の測定

第3図からわかるように、5 GHz 以上の周波数に対しては、真水と 3.5% の濃度の塩水の放射率はほぼ等しく区別がつかない⁽¹¹⁾。しかし 5 GHz 以下の周波数に対しては、両者の差は明瞭であり塩分濃度の測定に利用できる。第17図は、周波数 1.42 GHz の時の塩分濃度をパラメータとした放射率の温度変化の計算値を示しており、水温がわかっているならば、受信された放射率をもとにして塩分濃度が測定できる⁽²⁹⁾。

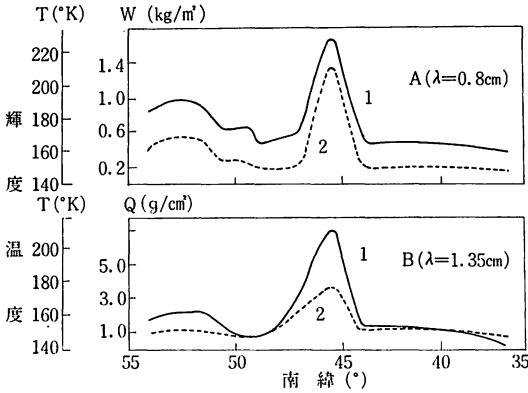
第18図はミシシッピー川河口付近で行われた航空機搭載のマイクロ波ラジオメータによる塩分測定結果を示す⁽²⁹⁾。受信周波数は 1.42 GHz, ラジオメータの感度は 1°K である。測定は河口と沖合の水温がほぼ等しい条件の下で波浪の影響をとり除くため、海面が静かな時を選んで行われている。

5.1.4 海洋上の大気中の水蒸気量と雲中の水滴量の測定

第19図はコスモスによるインド洋上の寒冷前線を横切った時の輝度温度の測定結果及びそれをもとにして評価された大気中の水蒸気及び雲中の水滴の面密度を示す⁽²²⁾。横軸は緯度 (南緯) を示す。水蒸気量 $Q(\text{g}/\text{cm}^2)$ の評価には 1.35 cm (22.2 GHz) 又水滴量 $W(\text{kg}/\text{m}^2)$ の評



第18図 航空機によるミシシッピー川河口沖の測定輝度温度をもとにして見積られた塩分濃度 (ppt) 横軸は、河口からの距離 (N.M.), 測定周波数は1.42GHz



第19図 人工衛星コスモスにより測定されたインド洋上の輝度温度及びそれをもとにして見積られた大気中の水分の量、横軸は南緯
 A図；曲線1は、波長0.8cmにおける輝度温度(°K), 曲線2は、見積られた雲中の水分 W(kg/m³),
 B図；曲線1は、波長1.35cmにおける輝度温度(°K), 曲線2は、見積られた大気中の水蒸気 Q(g/cm³)

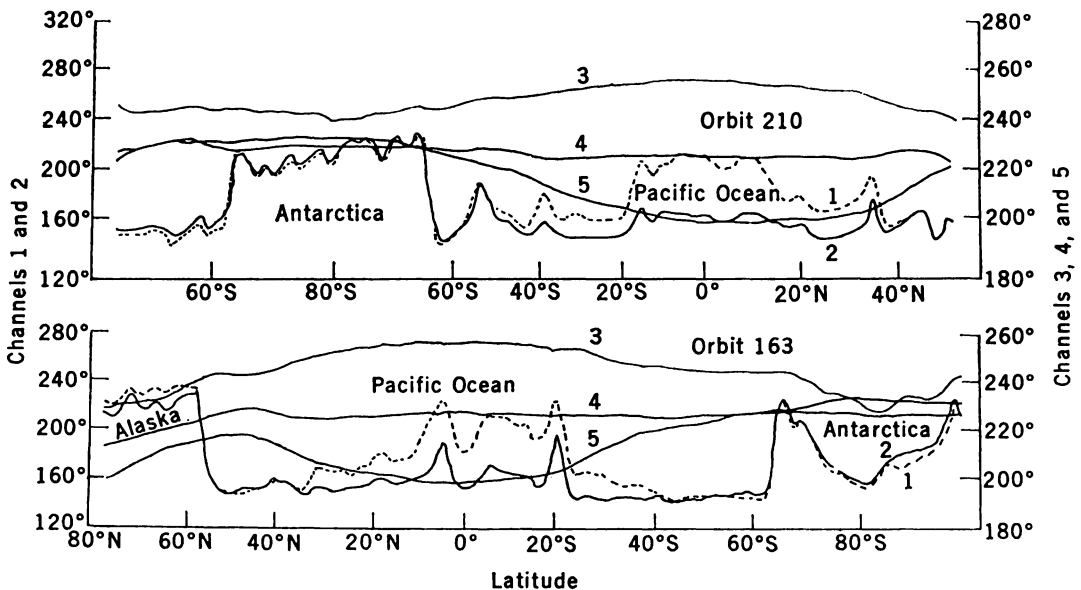
価には0.8cm(37.5GHz)のマイクロ波が用いられている。人工衛星を用いることにより陸地のようにデータを取得することのできない広い海洋上の水滴及び水蒸気量の評価をすることができ、天気予報のための資料とすることができる。

以上では海洋に関する測定結果を示したが、次にニムバス5号に搭載されているマイクロ波ラジオメータNEMS⁽¹²⁾(Nimbus E Microwave Spectrometer)による

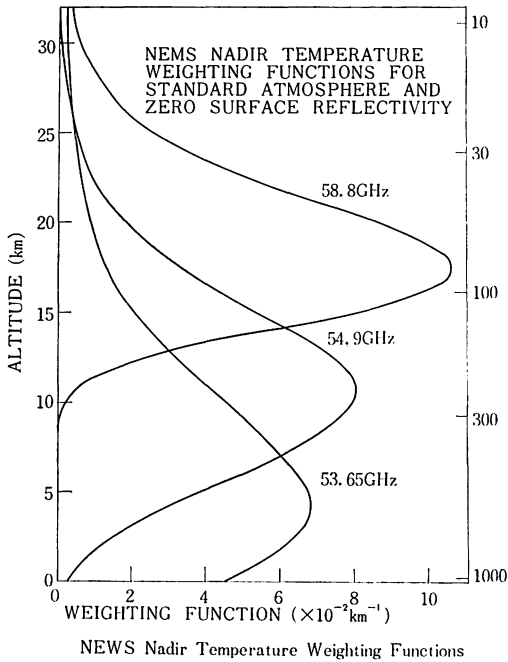
主に大気についてのリモートセンシングの結果を示す。

5.2 NEMSによる大気のリモートセンシング

第20図はNEMSによるアラスカから太平洋を經由して南極大陸に至る広い領域の観測結果を示す⁽³⁰⁾。NEMSは、5チャンネル(22.2, 31.4, 53.65, 54.9, 58.8GHz)の受信周波数を持ち小さい順にチャンネル1~5と呼ばれる。第4図でわかるようにチャンネル1は水蒸気の吸収帯に位置し、チャンネル3~5は、酸素の吸収帯の近くに位置する。NEMSは衛星直下点を10°のビーム幅で観測し、距離分解能は200km、感度は0.2°K~0.3°Kである。チャンネル1, 2は海洋上の大気中の水蒸気量及び雲中の水滴量の測定及び地表面の測定のために用いられる。海洋上では、背後の海面の輝度温度150°Kと比較して、大気中の水分の輝度温度が十分高いので海面上の大気中の水分からの輻射は目立って観測できる。一方高い輝度温度の陸地が背後にある時は、大気中の水分からの輻射はあいまいになる。水蒸気は、チャンネル1ではチャンネル2よりも2~3倍大きい輻射を示す。又水滴は、チャンネル2ではチャンネル1よりも2倍程大きい輻射を示す。従って海洋上では水蒸気及び水滴からの輝度温度への寄与は分離して見積ることができる。水蒸気の推定誤差は、0.1gr/cm²位である。又雲中の水滴の推定誤差は0.04gr/cm²位である。重要な誤差源としては、海面が非常に荒れている時に生ずる気泡や飛沫の影響、赤道近くの強い太陽反射光等がある。第20図で見られるようにチャンネル1, 2は熱帯地方の海



第20図 人工衛星ニムバス5号搭載マイクロ波ラジオメータNEMSによる多周波(チャンネル1~5)を用いた軌道周回数163及び210における輝度温度測定、縦軸は輝度温度(°K)、横軸は緯度



第21図 NEMS の重み関数

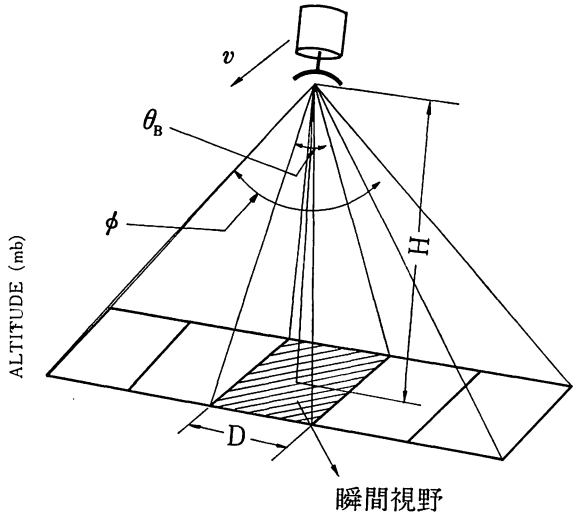
洋上の高湿度地域を明瞭に示している。又海と陸との境界面を明瞭に区別し、南極地方のバックアイスからの輻射も受信している。同じ海水からの輻射でも、新しくできた海水の場合と古い海水の場合ではその放射率が異なるので両者を識別することができる。古い海水は、塩分の濃いかたまりが流出し、無数の気泡を内蔵した多孔質状になっており、その放射率は新しくできた水と比較すると低い。周回数 163 の時には、南極大陸の中央部からの放射が得られ、その低い輝度温度は、古い多冬氷からの放射によると推測されている。周回数 210 の時には、衛星が南極大陸の縁を通過しており、新しい氷による高い輝度温度の値を示すと推測されている。

チャンネル 3 ~ 5 は大気温度プロファイル（温度の垂直分布）を測定するのに用いられる。60 GHz 近傍の酸素の吸収帯の周波数に対して、大気は不透明であり、受信された輻射は高高度の大気の層からの輻射に由来する。大気温度プロファイルは、受信される各々の周波数の輻射が、各々特定の厚さ 10km 程度の大気の層から生ずることがわかっているゆえ求められる。チャンネル 3, 4, 5 で測定された輻射は、各々高さが 4, 11, 18 km を中心を持つ層からの輻射に由来する。

受信輝度温度は、

$$T_B(\nu) = \epsilon T_s e^{-\tau(\nu)} + \int_0^{\infty} T(h) w(h, \nu) dh \quad \dots\dots(12)$$

の形になると仮定されている^{(12), (13), (14)}。ν はチャンネル 3 ~ 5 の周波数、T_s は地表面温度、ε は地表面の放



第22図 人工衛星搭載走査型ラジオメータ

射率、 $e^{-\tau(\nu)}$ は周波数 ν に対する大気の透過率を意味する。T(h) は高度 h の大気温度、w は周波数 ν のチャンネルの重み付き関数である。w は第21図に示されているように各々チャンネル 3, 4, 5 に対応して 4, 11, 18km で最大である⁽¹²⁾。第20図で大気温度の全地球的なパターンの概観を見ることができる。チャンネル 3 の輝度温度は、対流圏の大気温度に対応しており、極に近づく程温度が下がる。一方成層圏気温に対応しているチャンネル 5 は、アラスカ近傍の低温領域を除外すれば、赤道近くで低い気温を示す。チャンネル 3 ~ 5 の測定結果より予期しなかった重要な結果として、これらのチャンネルが雲の影響を受けていないことが指摘されている。受信輝度温度の精度は校正後、約 1°K 位であり推定された温度プロファイルの精度は 1° ~ 3°K である。これは赤外のセンサーによって決定された晴天時の温度プロファイルに匹敵する。

6. 人工衛星搭載用マイクロ波ラジオメータ

第22図に示されているように、人工衛星に搭載され、地表面を進行方向と直角方向に走査するタイプのマイクロ波ラジオメータに関する主要パラメータについて検討する⁽¹⁰⁾。主要パラメータを便宜的にユーザーの観点から見て重要なユーザーパラメータと衛星搭載の条件より生ずるプラットフォームパラメータに分けて考える。ユーザーパラメータの内の主要なものには、

- (i) 角度分解能 θ 又は距離分解能 D
- (ii) ラジオメータの感度 ΔT
- (iii) 瞬間視野の観測時間 τ₀

又はマッピングレート $m_r \equiv D^2 / \tau_0$ がある。

第2表 マイクロ波ラジオメータを搭載した人工衛星

衛星名	打上げ日	高度(km) 傾角	センサー名	周波数 GHz	アンテナ ビーム幅	ビーム 走査法	走査角	地上分解 能(km)	感度 (K ²)	絶対精度 (°K)	RFバンド 幅(MHz)	偏波
KOSMOS -243	1968 Sept.	210~320 71°		3.53 8.82	8.6°			37.2	0.7 0.5			
KOSMOS -384	1970 Dec.	212~314 73°		22.2 37.5	3.6° 4.0°			15.6 17.4	0.9 1.3			
NIMBUS -5	1972 Dec.	1100 100°	ESMR	19.35	1.4°×1.4° ~ 2.2°×1.4°	電氣的	衛星直下点 より±50°	25×25 ~ 45×160	1.5		300	直線偏波
			NEMS	22.235 31.4 53.65 54.9 58.8	10°	走査しない。 衛星直下 点のみ		200	0.24 0.23 0.29 0.29 0.24	1~3	220	
SKYLAB -1~4	1973 May~ 1974 Feb.	438 50°	S 193	13.9	1.6°	機械的		11				直線偏波
			S 194	1.4	15.2°	走査しない。		117	0.5	1~2	27	
NIMBUS -6	1975 June	1100 100°	ESMR	37	0.7°×0.95°	電氣的	円錐型走 査±35°	40~50 ×20	1	2	250	垂直及び 水平偏波
			SCAMS	22.235 31.65 52.85 53.85 55.43	7.5°				1~1.5		220	
NIMBUS -G	1978		SMMR	6.6, 10.69 18.0, 21.5 37.0			円錐型走 査±25°	19×33 ~ 142×247	0.9~1.5		250	
TIROS -N	1978		TOVS-M	50.3, 53.74 54.96, 57.95					0.3		200	
SEASAT -A	1978		SMMR	6.6, 10.7, 18.0 21.0, 37.0				87×144 ~ 16×25		2	250	
SHUTTLE	1980		SIMS	0.061, 1.4 2.7, 6.0 10.7, 20.0 22.2, 37.0 53.0, 94.0 118.7					0.3~3		10~2000	

ユーザーの観点からすると、 θ , D , ΔT , m_r は小さい測定精度がよく望ましい。一方人工衛星に搭載することから生ずるいくつかの制限条件があり、それらをプラットフォームパラメータと呼ぶと、主要なものは、

- (i) 人工衛星の高度 H
- (ii) 地表面に投影された人工衛星の軌跡の移動速度 v
- (iii) 人工衛星の走査する範囲 ϕ

が考えられる。

ユーザーパラメータとプラットフォームパラメータ間には相互に関係がある。角度分解能は(11)で与えられるので、距離分解能は角度分解能に衛星の高度をかけて

$$D = \frac{\lambda}{d} H \quad \dots\dots(13)$$

で与えられる。ラジオメータを衛星に搭載して、地表面を隙間なくラインスキャンを行う時、一本のラインを走査する間に衛星の地上軌跡の移動する距離とラインの幅が一致せねばならない。従って走査角度 ϕ , アンテナビーム幅 θ , 高度 H , 地上に投影された衛星の軌跡の移動速度 v , 瞬時視野の観測時間 τ_0 を用いると、一本のラインを走査する時の地上に投影された衛星軌跡の移動距離は、

離は、

$$v \times \frac{\phi}{\theta} \times \tau_0 \times 2$$

となり、これがライン幅と一致すればよい。ライン幅は空間分解能 D と等しくおけばよいので、

$$D = 2v \frac{\phi}{\theta} \tau_0 \quad \dots\dots(14)$$

が成立する。式(11), (13)を用いて(14)を変形すると

$$\tau_0 = \left(\frac{\lambda}{d}\right)^2 \frac{H}{2v\phi} \quad \dots\dots(15)$$

が成立する。積分時間 τ は、瞬間視野の観測時間と等しいことが望ましいので

$$\tau = \tau_0 \quad \dots\dots(16)$$

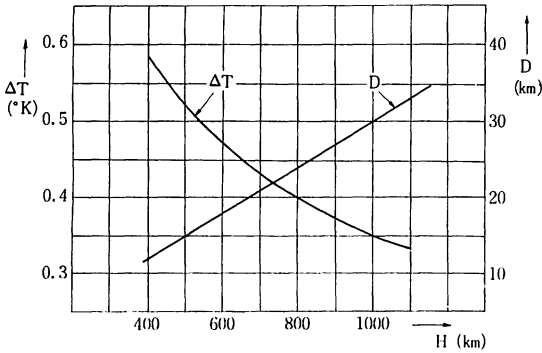
とおくと、ラジオメータの感度 ΔT は、(15), (16)を用いて

$$\Delta T = \delta \frac{(T_A + T_R)}{\sqrt{B\tau}} = C \times \left(\frac{d}{\lambda}\right) \times \sqrt{\frac{2\phi v}{H}} \quad \dots\dots(17)$$

となる。ここで C は

$$C = \delta \times \frac{(T_A + T_R)}{\sqrt{B}}$$

で定義される量でラジオメータの figure of merit と呼ばれる量である。又マッピングレートは、(13), (15)より



第23図 距離分解能 D 、感度 ΔT と衛星高度 H の関係

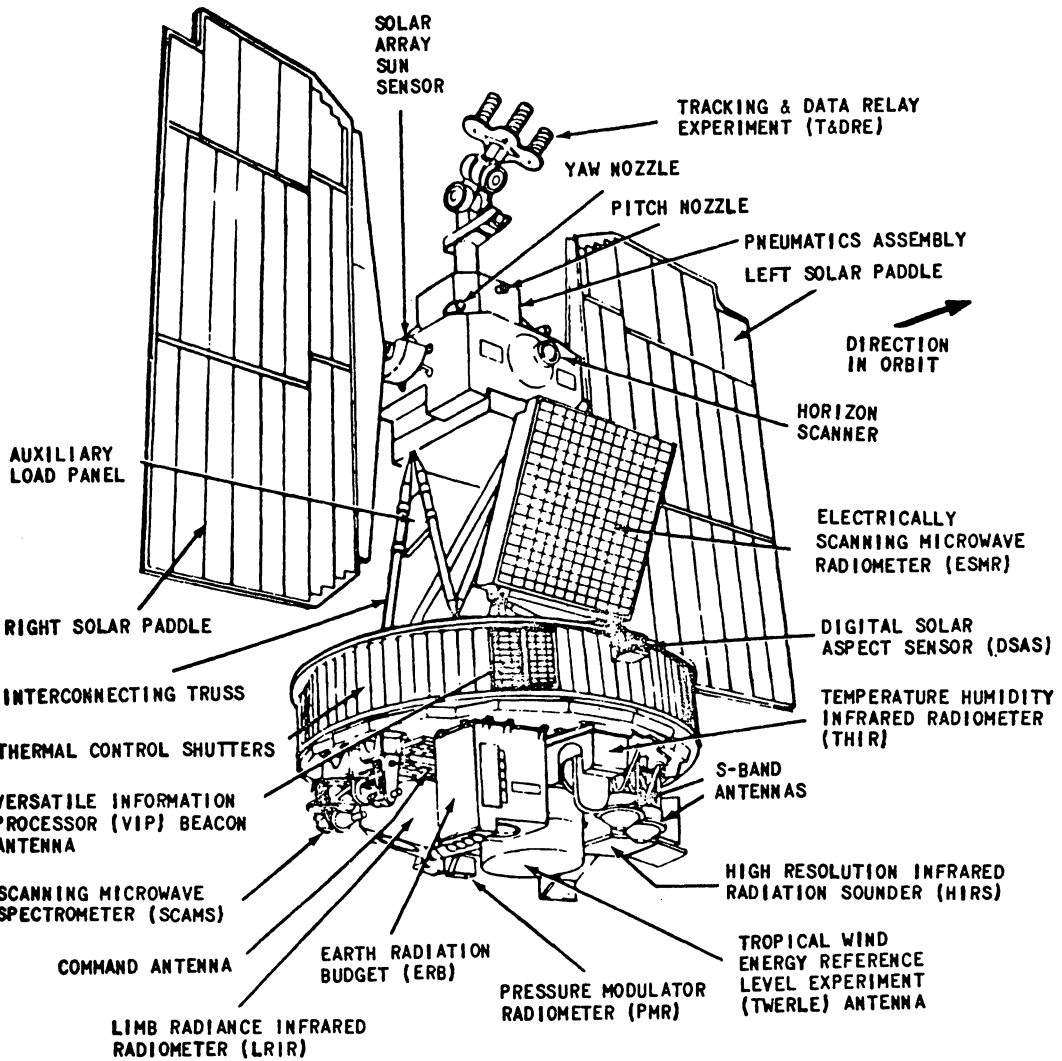
$$m_r = \frac{D^2}{\tau_0} = 2v\phi H \quad \dots\dots(18)$$

となる。従ってユーザーパラメータ D 、 ΔT 、 τ_0 とプラットフォームパラメータ H 、 v 、 ϕ を関係づける(13)、(17)、(15)が得られた。衛星の軌道が円軌道の時、地球の半径を R とおくと、衛星の速度は、

$$R \times \sqrt{\frac{GM}{(R+H)^3}} \quad \dots\dots(19)$$

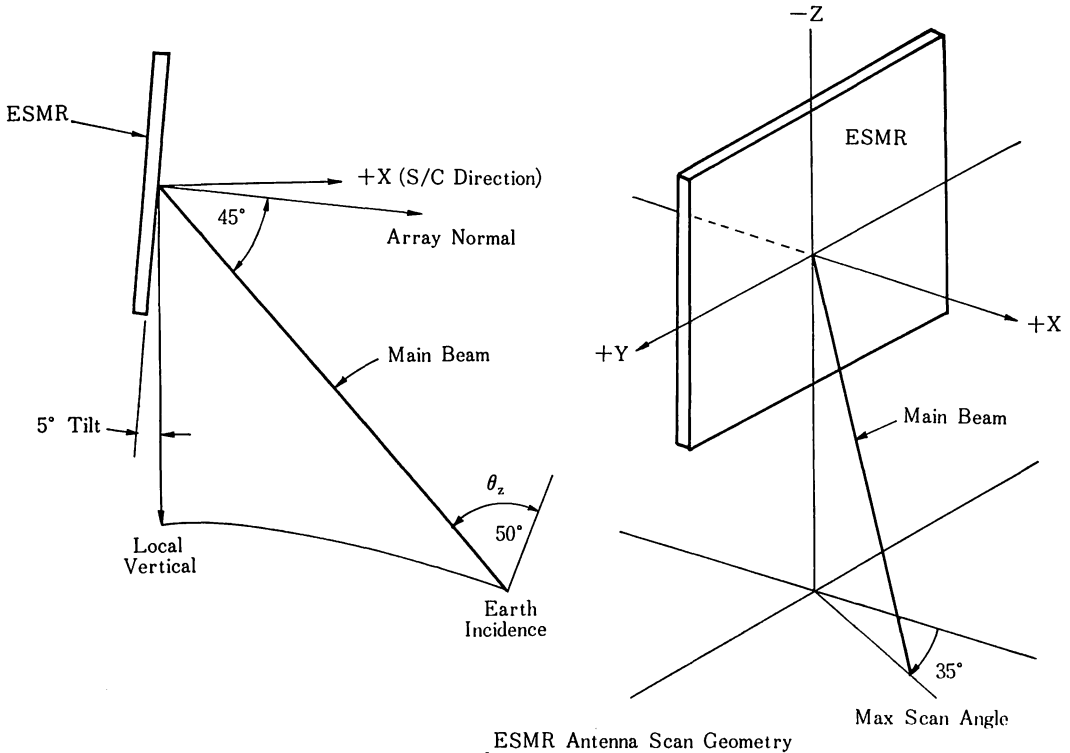
で与えられるので、この値を地表面に投影された人工衛星の移動速度 v のかわりに用いた時(13)、(17)より得られる D 、 ΔT の値を第23図で示す。用いたパラメータは、

$$C=0.1^\circ\text{K}, d=100\text{cm}, \lambda=3\text{cm}, \phi=50^\circ$$



Nimbus 6 Satellite

第24図 人工衛星ニムバス6号の概観図



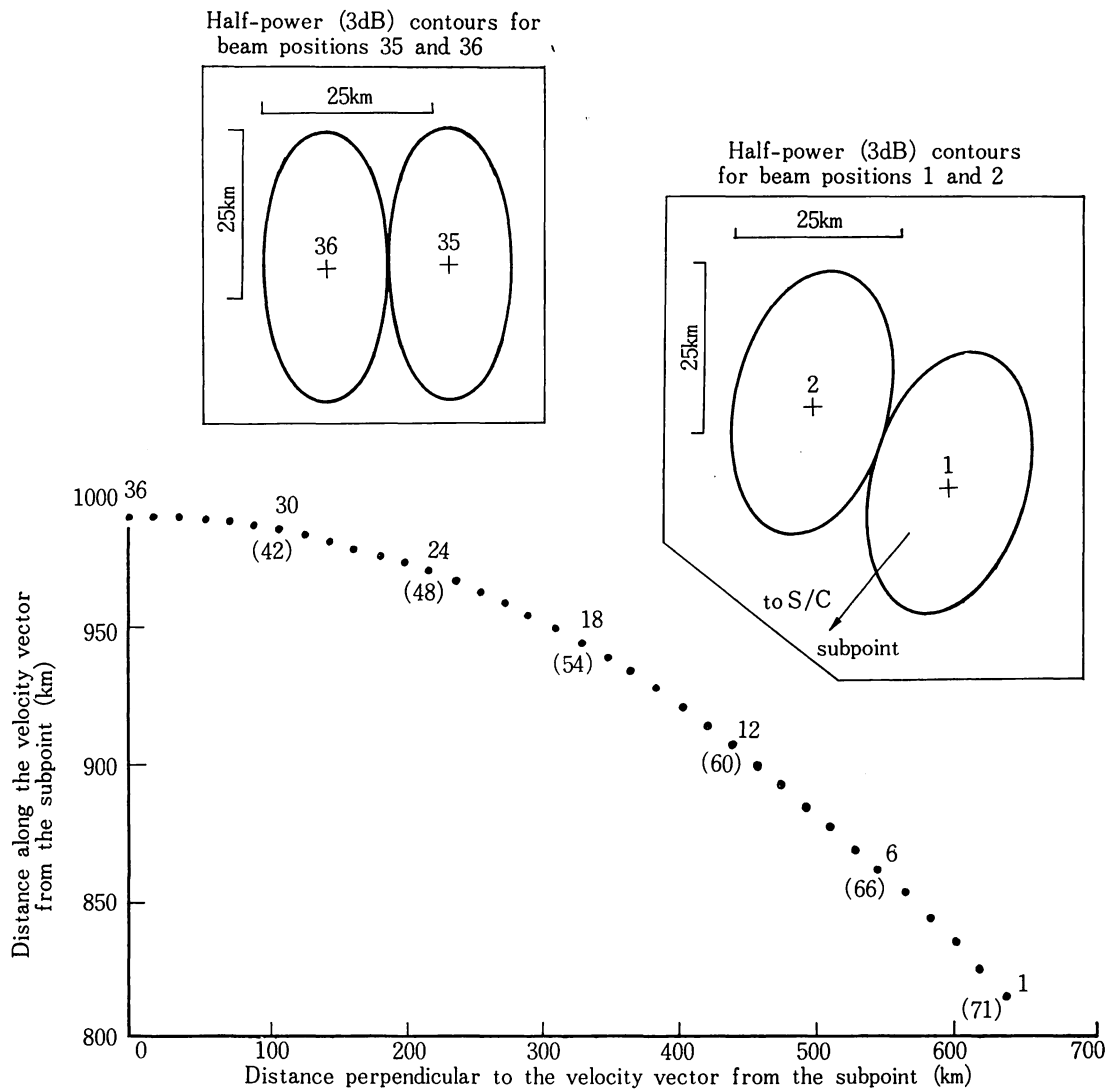
第25図 人工衛星ニムバス6号搭載のマイクロ波ラジオメータ ESMR の走査法の概観図

である。

第2表でマイクロ波ラジオメータを搭載し、現在すでに打ち上げられた衛星及び今後打ち上げが予定されている衛星をまとめて示す。マイクロ波ラジオメータを搭載し、すでに打ち上げられた衛星には、コスモス243号、384号、ニムバス5号、6号、スカイラブ1号がある。コスモス243号は1968年9月に打ち上げられ2週間程の間、又コスモス384号は1970年12月に打ち上げられて2日間観測を行った。各々衛星直下点を3.5GHz、8.8GHz、22.235GHz及び37.5GHzで観測し、大気中の水蒸気及び雲中の水滴の面密度、海面の温度、暴風の目、陸地及び氷のマイクロ波放射特性を測定した。ニムバス5号は1972年12月に、軌道傾斜角110°の太陽同期軌道に打ち上げられ、連続的に3年以上にわたって観測を行っている。ニムバス5号は前述した衛星直上点を観測する5チャンネルのマイクロ波ラジオメータNEMSと、電気的に地表面を走査する周波数19.35GHzの走査型マイクロ波ラジオメータESMRを搭載している。スカイラブ1号は、1973年5月に打ち上げられ、高度計、散乱計と選択的に切りかえて用いられる13.9GHzの機械的走査型のラジオメータと1.4GHzの衛星直下点を観測するラジオメータを搭載している。ニムバス6号は、1975年6月12日に軌道傾斜角99°の太陽同期軌道に打ち上げられ

た。軌道上で太陽電池パネルを展開した時の概観図を第24図に示す⁽¹⁵⁾。ニムバス6号には、ニムバス5号のNEMSを走査型に改良した走査型の多周波マイクロ波ラジオメータSCAMS (Scanning Microwave Spectrometer) 及びニムバス5号のESMRを改良して2つの偏波成分を受信するようにした周波数37GHzのESMRが搭載されている⁽¹⁶⁾。ニムバス6号搭載のESMRのアンテナビームの走査法の概観を第25図に示す⁽¹⁶⁾。アンテナビームは、アンテナ軸を回転軸として45°の頂角を持った円錐面上を走査する。ビームは地表面を衛星の進行方向(X軸方向)に対して、±35°の方位角の範囲を71個の点にわけて走査する。

-35°のビームの位置をNo.1とし、+35°の位置をNo.71とする。衛星の進行方向、つまり方位角が0°の時はNo.36となる。71個の点は方位角を ϕ とすると、 $\sin \phi$ の増加の割合が一定となるように選択されている。アンテナの面は、衛星の鉛直軸に対して衛星と5°かたむいており、アンテナビームの地表面への入射角 θ_z がほぼ一定(約50°)になるように設計されている。第26図で地球表面上のビームの位置及び4つのビーム(No.1, No.2, No.35, No.36)に対して受信電力3dBの等高線を示す⁽¹⁶⁾。これらの等高線は、楕円形をしていて、長軸方向が近似的に衛星の進行方向と一



Great Circle Distances of ESMR Beam Positions from the Subpoint and the Projection of the Half-power Contours for Four Beam Positions. Beam positions 37 through 71 are Located at mirror image positions of 35 through 71, respectively.

第26図 ESMR の地表面上におけるビームの位置

致する。長軸方向（衛星の進行方向）の距離分解能は、40~50 km、短軸方向（近似的に走査する方向を示す）の距離分解能は約20 kmである。

ESMRは極地方の海氷の分布、海洋上の雲中の水分の量等の測定を目的としている。今後もアメリカでは、ニムバス-G、タイロス-N、シーサット-A等のマイクロ波ラジオメータを搭載した多くの衛星が計画されている。

7. 結 び

以上で、マイクロ波ラジオメータの原理、特長及び地球環境のリモートセンシングへの応用について簡単な解説を行なった。地球環境のリモートセンシングの手段としての、マイクロ波ラジオメータの持つ能力、可能性の検討は、アメリカ、ソビエトを中心にして航空機や人工衛星からの測定をもとにして、十数年来活発になされて来た。しかし測定された輝度温度の中に含まれる多くの情報から必要な物理情報を抽出するためのデータ解析の

技術の開発等、未解決な問題点が多い。分解能の問題も現在のままでは、可視、赤外のセンサーと比べて1桁、2桁劣るので、リモートセンシングの対象が海洋現象や、海洋上の気象のように、広い範囲にわたりほぼ一様に分布しているものに限定されるのはいたしかたない。

しかし可視、赤外のセンサーと比較した時、昼夜の区別なく、ほぼ全天候に対して測定できるという、測定可能な時間帯の多いセンサーであることは大きな長所である。マイクロ波ラジオメータがリモートセンシングにおいて単独で重要な役割を果すことは数多くはないかも知れないが、同一対象物を他の波長領域のセンサーと同時に測定する時、対象物の物理的性質を解明する上で、大きな情報を提供することは明らかである。現在、ESAでも航空機に搭載したラジオメータによる地表面のリモートセンシングの研究が活発になされている。我国における研究は、まだやっと始ったばかりの段階であるが、人工衛星に搭載し広範囲な地球環境のリモートセンシングを行なうことを目指した活発な研究が必要であろう。

参 考 文 献

- (1) 荒木喬; “マイクロ波による地球の遠隔探査”, 日本航空宇宙学会誌, 24(264), pp. 29—37 (1976)
- (2) 杉森康宏; “マイクロ波部リモートセンシング”, 海洋科学, 8(2), pp. 41—46 (1976)
- (3) Tomiyasu, K.; “Remote sensing of the earth by microwaves”, Proc. IEEE, 62 (1), pp. 86—92 (1974)
- (4) 渡辺貫太郎; “海洋環境のリモートセンシング” Remote Sensing pp. 181—204 キャノンイメージ編集室編 (1974)
- (5) 渡辺貫太郎; “海洋環境のリモートセンシング”, 宇宙科学技術調査第8号, pp. 149—172 (1972) 科学技術庁研究調査局
- (6) 小平信彦; “気象衛星の一般的性質”, 気象研究ノート第111号 気象衛星特集号 (1972)
- (7) King, D. D. “Passive Detection” Radar Hand-booked Skolnik. M. I. Chap. 39 McGraw-HILL Book Co. New York (1970)
- (8) Gaut, N. E., E. C. Reifstein III, D. T. Chang and J. C. Blinn III; “Analysis of microwave sounding systems” ERT Project P-553 (1973)
- (9) Ohlsson, E.; “Passive microwave radiometry and its potential application to earth resources surveys, Part 1. Basic Physics and Technology” Eldo-Cecles/Esro-Cers Scient and Tech Rev. 5, pp. 301—335 (1973)
- (10) Hoppe, G.; “Passive microwave radiometry and its potential application to earth resources surveys, Part 2. Earth science applications” Eldo-Cecles/Esro-Cers Scient and Tech Rev 5, pp. 337—351 (1973)
- (11) Wilheit, T.; “The electrically scanning microwave radiometer (ESMR) experiment” The NIMBUS 5 User’s Guide GSFC pp. 59—105 (1972)
- (12) Staelin, D. H., F. T. Barath, J. C. Blinn III and E. J. Johnston; “The NIMBUS E microwave spectrometer (NEMS) experiment” The NIMBUS 5 User’s Guide GSFC, pp. 141—157 (1972)
- (13) 土屋清; “最近の気象衛星搭載用測器について” 天気 20(11), pp. 15—22 (1973)
- (14) 土屋清; “気象のリモートセンシング” Remote Sensing pp. 261—294 キャノンイメージ編集室編 (1974)
- (15) Staff Members, LANDSAT/NIMBUS Project; “The NIMBUS 6 space craft system” The NIMBUS 6 User’s Guide GSFC, pp. 1—10 (1975)
- (16) Wilheit, T.; “The electrically scanning microwave radiometer (ESMR) experiment” The NIMBUS 6 User’s Guide GSFC, pp. 87—108 (1975)
- (17) 落合弘明; “海洋のリモートセンシング, ラインスキャナーによる” Remote Sensing pp. 205—228 キャノンイメージ編集室編 (1974)
- (18) Dicke, R. H.; “The measurement of thermal radiation at microwave frequencies” Rev. Sic. Instr. 17, pp. 268—275 (1946)
- (19) Grody, N. C.; “Remote sensing of atmosphere water content from satellite using microwave radiometry” Trans. IEEE. AP—24(2), pp. 155—162 (1976)
- (20) Moore, R. K.; “Radar and microwave radiometry” NASA SP—283, pp. 283—301 (1971)
- (21) Armand, N. A., A. E. Basharinov, L. F. Borodin, A. M. Shootko, S. P. Rozinov and M. A. Kolosov; “The earth covers radiophysical exploration and its future development” 日ソエレクトロニクスシンポジウム資料, 東海大学技術情報センター (1975)
- (22) Basharinov, A. E., A. S. Goorvich, S. T. Egorov and M. A. Kolosov; “The earth emittance research using the Soviet spacecrafts” 日ソエレクトロニクスシンポジウム資料, 東海大学技術情報センター

- (1975)
- ②3 Strong, A. E. and M. H. Fleming; "Aircraft Microwave Measurements of the Arctic Ice Pack" ESSA Technical Memorandum NESCTM 25, p. 16
- ②4 Ulaby, F. T., L. F. Dellwig and T. Schmugge; "Satellite microwave observations of the Utah Great Salt Lake dessert" *Radio Science*, 10(11), pp. 947—963 (1975)
- ②5 Hollinger, J. P.; "Passive microwave measurements of the sea surface" *J. Geophys. Res.*, 75 (27), pp. 5209—5213 (1970)
- ②6 Droppleman, J. D.; "Apparent microwave emissivity of sea foam" *J. Geophys. Res.*, 75(3), pp. 696—698 (1970)
- ②7 Williams, G. F. Jr.; "Microwave radiometry of the ocean and the possibility of marine wind velocity determination from satellite observations" *J. Geophys. Res.*, 74(18), pp. 4591—4594 (1961)
- ②8 Strong, A. E.; "Mapping sea surface roughness using microwave radiometry" *J. Geophys. Res.*, 76(36), pp. 8641—8648 (1971)
- ②9 Droppleman, J. D., R. A. Mennella and D. E. Evans; "An airborne measurement of the salinity variations of the Mississippi river outflow" *J. Geophys. Res.*, 75(30), pp. 5909—5931 (1970)
- ③0 Staelin, D. H.; "Microwave spectrometer on the NIMBUS 5 satellite; meteorological and geophysical data" *Science* 182(4119), pp. 1339—1341 (1973)
- ③1 Siegel, R and J. R., Howell; "Thermal radiation heat transfer" NASA SP—164 p. 110 (1968)
- ③2 岡本謙一; "地表のアクティブマイクロ波センシング" *電波研究所* 22(121) pp. 513—553 (1976)

