

12. 地表のアクティブマイクロ波センシング

岡本 謙一*

(昭和52年1月6日受理)

ACTIVE MICROWAVE SENSING OF THE EARTH'S SURFACE

By

Ken'ichi OKAMOTO

A short review concering the remote sensing of the earth by active microwave sensors is made. Results of observations by scatterometers and altimeters which were flown on board the NASA Skylab spacecraft are shown. Principles and applications of the side looking air-borne radar(SLAR) are explained. Results of some observations of the earth surfaces by the SLAR are also shown.

1. 序

マイクロ波リモートセンサは、マイクロ波帯の波長(0.1~100 cm)の電磁波を用いて地球をリモートセンシングするセンサである。マイクロ波リモートセンサは、可視、赤外のリモートセンサと比較して、同一地域を昼夜の区別なく、又天候にあまり左右されることなく観測できるという長所を持ったセンサである。世界の大多数の地域は通常雲に覆われているので、多少の雲をも透過して地表面を観測する能力を有するマイクロ波センサは、航空機や人工衛星に搭載して地球環境のリモートセンシングを行なう時に他のセンサにみられない大きな威力を発揮する。マイクロ波リモートセンサにも大別して地球表面や大気から自然に放射されるマイクロ波を受信する受動的センサと自分自身でマイクロ波帯の電磁波を送出し、地表面から散乱され戻って来る電磁波を受信する能動的なセンサがある。受動的なセンサはマイクロ波ラジオメータに代表されるし、又能動的なセンサはレーダに代表される。第1表でレーダによく用いられる周波数帯の呼称を示す。能動的なセンサと比較した時、受動的なセンサは、元来対象物から放射される輻射エネルギーが強くないため、受信信号が弱いこと、受信信号の中から、混在している必要情報を分離して解析することが困難なこと、航空機や人工衛星に搭載する時、アンテナ

第1表 レーダによく使われる周波数(波長)帯と呼称

呼 称	周 波 数	波 長
UHF	300~ 1000 MHz	1m~30cm
L	1000~ 2000 "	30cm~15cm
S	2000~ 4000 "	15cm~7.5cm
C	4000~ 8000 "	7.5cm~3.75cm
X	8000~12500 "	3.75cm~2.4cm
Ku	12.5~ 18 GHz	2.4cm~1.67cm
K	18~26.5 "	1.67cm~1.13cm
Ka	26.5~40 "	1.13cm~0.75cm
ミリ波	>40 GHz	<0.75cm

のサイズ、使用波長の制限から地上分解能の精度を上げることが困難なこと等の短所はあるものの、送信機を必要としないので、重量、使用電力の点で能動的なセンサよりも負担が少なく、すでにニムバス等の衛星に搭載されて、実験的に使用されている。受動的なセンサについては、文献²⁹で解説されているので、本解説は能動的なセンサであるレーダによる地球のリモートセンシングについて解説する。能動的なセンサは、レーダ技術の応用であるが、レーダ散乱計 (radar scatterometer)、レーダ高度計 (radar altimeter) 及び映像レーダ (imaging radar) の3つに大別できる。レーダ散乱計は地表面に電波を発射し、起伏した対象物表面から散乱されて戻っ

* 衛星研究部 衛星管制研究室

て来るものを受信し、送信電力と受信電力の比から散乱断面積を計測するものである。レーダ散乱計は航空機に搭載されて海洋の波浪状況、海面の風速、海水の状況、土壌の含水率、地表面の種々の物質の散乱係数の測定等に広く用いられている。又宇宙船スカイラブの有人の地球資源探査実験 EREP (Earth Resources Experiment Package) のセンサ S193 においてもレーダ散乱計は組みこまれており、やはり S193 に組みこまれたマイクロ波ラジオメータと組になって動作し海面のリモートセンシングを行なっている。レーダ高度計は、衛星や航空機から直下点の地表面にパルスを発射し、反射電波の受信されるまでの時間間隔を計測して、その高度を計るために使用されるが、やはりスカイラブのセンサ S193 に組みこまれ、地球のジオイドの観測データを提供している。映像データの代表は、SLAR (Side Looking Airborne Radar) であるが、SLAR は地表面 (特に大地) を観測する上で最も有用なマイクロ波センサである。SLAR の分解能は、合成開口アンテナを用いれば、原理的にはセンサと観測点までの距離には依存せず人工衛星に搭載されても、ラジオメータやレーダ散乱計の持つ数 km 程度の分解能よりもはるかに優れ、可視領域のセンサによる写真映像と同程度の分解能を有する。SLAR は現在の所、航空機に搭載されて、水文学、地質学、地形学、地理学、海洋学、地図作成、植生地図作成、農業等の多方面において有効なデータを提供している。人工衛星搭載については、1978 年の第 2 四半期に打ち上げが予告されている SEASAT-A に合成開口方式のレーダを搭載し、海面の状況や海水のレーダ映像を得る計画がある。使用する電波は L-band で波長は 22 cm である。アンテナの大きさは、14m × 2m で、地上分解能は、25m の予定である。ESA でも、1980 年の打ち上げを目指して、合成開口レーダを搭載した人工衛星 SAR-SAT のシステム設計を行なっている⁽³¹⁾。

本解説では、これらの能動的センサーについて記述するが、レーダ散乱計、レーダ高度計については、文献⁽³⁰⁾で紹介されているので、第 2 章及び第 3 章で、それぞれ簡単に紹介するとどめる。現在までに打ち上げられた人工衛星で能動的なセンサを搭載したものは、前述した宇宙船スカイラブ等わずかである。しかし、電波領域の能動的なセンサは、その有用さが認識されるにつれ、今後共、益々多くの衛星に搭載されるであろう。このため、本解説では、第 4 章で、とくにスカイラブ搭載のセンサ S193 を取り上げて、S193 を構成する、レーダ散乱計及びレーダ高度計について詳しく紹介する。

第 5 章では最も有用なマイクロ波センサである SLAR の原理を説明し、第 6 章で SLAR による地表面のリモ

ートセンシングの観測例について紹介する。

2. レーダ散乱計による観測

2.1 散乱に影響を与えるパラメータ

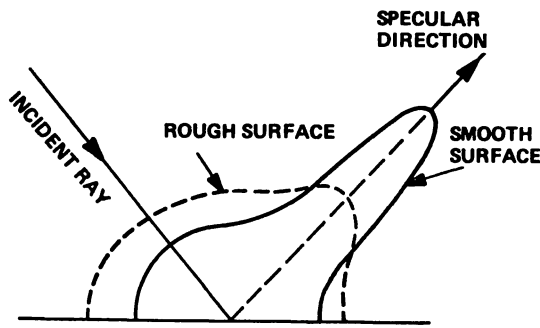
レーダの散乱に影響を与える地表面の諸パラメータについて議論するために、我々は受信電力と直接関係するレーダの散乱断面積 σ 、あるいは単位面積あたりの散乱断面積 (以下散乱係数と呼ぶ) σ_0 を調べる必要がある。レーダ方程式に用いて、 σ_0 は近似的に

$$\sigma_0 = \frac{(4\pi)^2 P_r}{P_t \lambda^2 \int_S \frac{G_t^2}{R^4} dA} \quad \dots\dots(1)$$

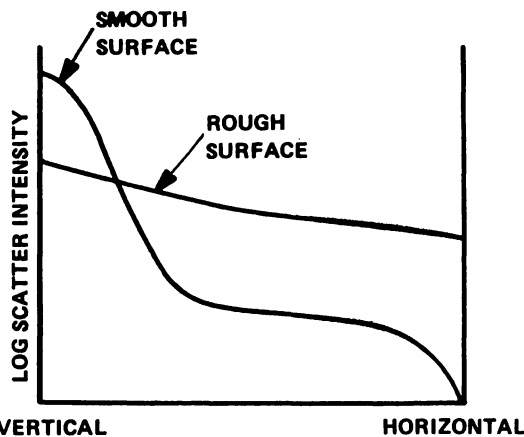
と表わされる。面積分はビームが照射されている地表の領域 S に対して行なわれる。 P_t は送信電力、 P_r は受信電力、 G_t はアンテナ利得である。式(1)は、領域 S に対して σ_0 が一定であるとの仮定の下に成立する。この仮定は、アンテナのビーム幅が十分狭くかつ照射されている領域の地表面の性質が一様である時に成立する。 σ_0 を求めるためには、受信電力 P_r と送信電力 P_t の比を求める必要がある。 σ_0 は無次元の量で、 σ_0 に影響を及ぼすパラメータは大別すると (i) レーダの設計者や実験者が調節することのできるレーダ装置の特性や観測条件と、(ii) 解測対象の地表面自身の性質に分類される。(i) としては、(1)アンテナの開口径、(2)波長、(3)偏波成分、(4)入射角、(5)入射波の方位角等を列挙できる。又(ii) としては、(1)地表面の粗さの度合い (波長との相対的關係で決る)、(2)信号が侵入することができる程度の深さの地表面下の粗さ及び粒状の度合い、(3)表面及び表面下の誘電的性質等を列挙できる。 σ_0 はこれらのパラメータの関数で、一般的には、

$$\sigma_0 = \sigma_0(\lambda, P, \theta, \phi, D, \epsilon, \Gamma, \dots\dots) \quad \dots\dots(2)$$

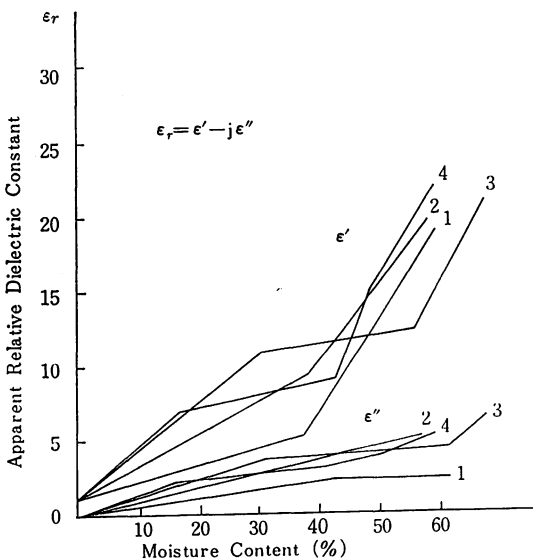
のように表現される。ここで、 λ : 波長、 P : 入射波の偏波、 θ : 入射角、 ϕ : 入射波の方位角、 D : アンテナ開口径、 ϵ : 複素誘電率、 Γ : 地表面の粗さ である。しかし σ_0 の解析的表現は、かなり大胆な仮定をしない限り単純化されないし、観測地域の特徴をよく表わすためにはどのような仮定をすればよいかについても大いに議論のある所である。又これらの特性パラメータも相互に依存している。例えば ϵ は λ に依存するし、 Γ も λ との相対的關係で決まる量である。これらの σ_0 に影響を及ぼす各パラメータの相互関係についてもまだ充分には解明されていない。 σ_0 に影響を及ぼすパラメータの内、地表面の粗さ Γ と複素誘電率 ϵ について考察する。第 1 図はなめらかな表面及び粗い表面における電磁波の反射特性を示した定性的な図である⁽³²⁾。完全になめらかな表面は入射電磁波を鏡面反射するであろう。第 1 図の矢



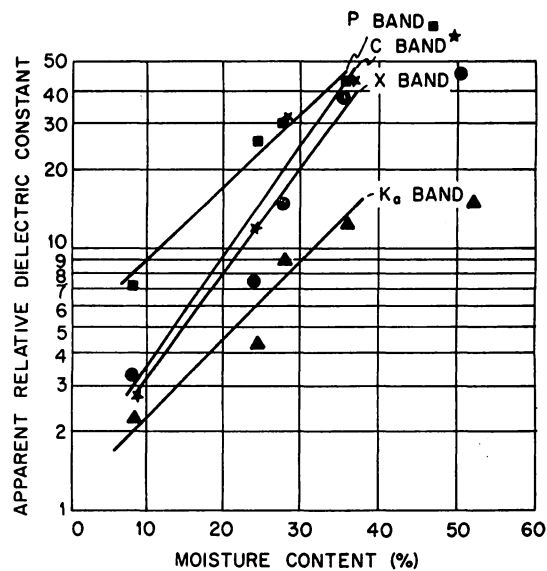
第1図 斜め入射電磁波の散乱強度



第2図 後方散乱強度と入射角の関係

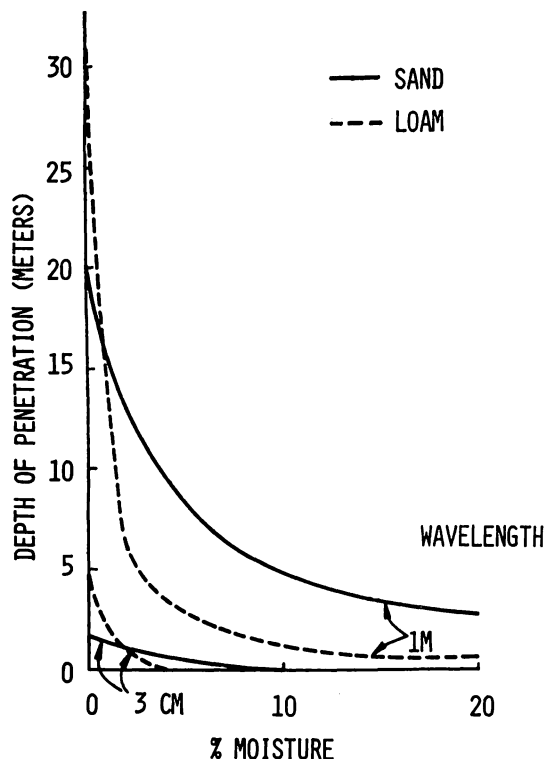


第3図 とうもろこしの葉の複素誘電率と含水率の関係



第4図 Richfield 泥炭ローム土における誘電率と含水率の関係

線で示すように波長に比べて比較的なめらかな表面は大部分の電磁波を鏡面反射の方向に散乱するが、同時に後方散乱も含めて、あらゆる方向にわずかな量の電磁波を散乱するであろう。さらに粗い表面は第1図の破線で示すように、鏡面反射の方向にやはり一番強く散乱するであろうが、ほぼ一様にあらゆる方向に電磁波を散乱する。レーダ散乱計は、散乱電磁波の内、入射方向にそった方向に後方散乱される電磁波のみを受信する。第2図は後方散乱の強度の変化を入射角の関数として示した定性的な図である⁽¹⁾。なめらかな面の時には、最も強い後方散乱は、垂直方向の入射の時に生じ、入射角の増加と共に急激に減少する。粗い面の時にも、やはり垂直方向に入射される電磁波は、他の入射角の時よりも強く後方散乱されるが、なめらかな面の時ほどは多くはない。地表面の誘電的性質も表面の粗さと共に散乱特性に影響を与える。自然の物質の誘電的性質を決定する最も重要な因子は水分である。乾燥した状態では大多数の自然の岩石等の物質の誘電率は10以下である。一方、文献⁽²⁾の第2図に示すように、水の複素誘電率はマイクロ波帯では大きい値を示す。従って土壌の含水率が増加したり、又植物が成熟してみずみずしい時には、その誘電率は含水率と共に急激に増加する。第3図はとうもろこしの葉の複素誘電率と含水率の関係を示す⁽²⁾。周波数は、8.5GHzである。2～4の曲線は同一のとうもろこしから取られた葉を示している。第4図は、Richfield 泥炭ロームの土壌における誘電率と含水率の関係をいくつかの波長帯について示している⁽²⁾。いずれの図も含水率の増加と共

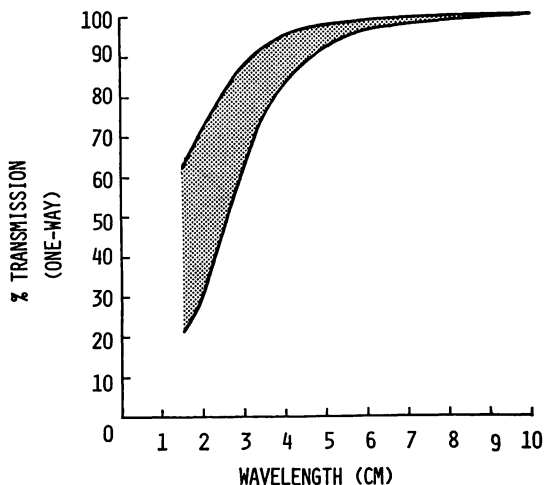


第5図 土壌中への電磁波の侵入距離と含水率の関係

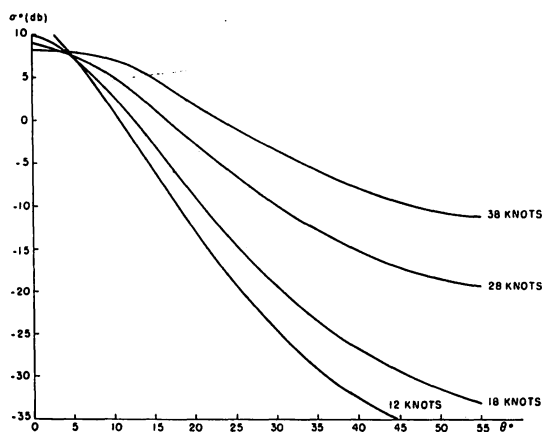
に誘電率が増加していることを示す。レーダの送信電磁波の土壌中への侵入の程度は、波長、土壌の含水率及び土壌の種類に依存する。第5図では砂とロームの場合について1mと3cmの波長の時の侵入距離を含水率の関数として示す⁽¹⁾。侵入距離はここでは電力の値が表面における電力の値の15%となる距離と定義している。含水率が増加すると急激に侵入距離は減少する。

2.2 観測に影響を与える気象条件

航空機又は人工衛星にレーダを搭載して地上をリモートセンシングする時、送受信電波共、可視光や赤外の場合に比べてはわずかであるが、大気又は雲の影響を受ける。これについては文献(29)の第4図及び第5図を参照のこと。レーダの送受信信号に最も大きな影響を与えるのは降雨である。第6図では激しい降雨が3cm以下の短い波長に大きな影響を与えることを示している。レーダの送受信に影響を与える程度の降雨は、世界中の大多数の地域で年間を通して100時間以下であるので、降雨の影響は稀な現象である。しかし雲は降雨に比べて頻繁にみられる現象ゆえ、リモートセンシングにとって重要な影響を与える。マイクロ波センサは多少の雲があっても観測可能である。例えばカナダ空軍による Prince Edward 島付近の氷の地図作成プログラムにおいては、飛行高度 8,000ft. で翼下に広がる雲の厚さ 5~6,000ft. と



第6図 降雨により影響を受ける電磁波の波長と透過率の関係



第7図 風速をパラメータとした海面上の入射電磁波の入射角(横軸)と後方散乱断面積(縦軸)との関係

いう可視、赤外のセンサでは全くお手上げの状態の下で地表面の SLAR によるレーダ映像が得られている。雲のある時でも観測可能なことにより夜間でも観測可能なこととあわせて、レーダによるリモートセンシングの観測可能な時間帯が、可視、赤外のセンサと比較してはるかに多くなる。

2.3 観測例

(i) 海面の散乱計によるリモートセンシング

航空機又は人工衛星搭載のレーダ散乱計から海面に電波を発射し、散乱されて戻って来る電波を受信し、散乱断面積を測定することにより海面の波浪状況をリモートセンシングすることができる。海面が穏やかで鏡面に近い時、平坦な海面に向って鉛直に(入射角が零度)電波を発射すると、その反射電波の受信電力は最大で、入射

第2表 航空写真にもとづく海水の分類

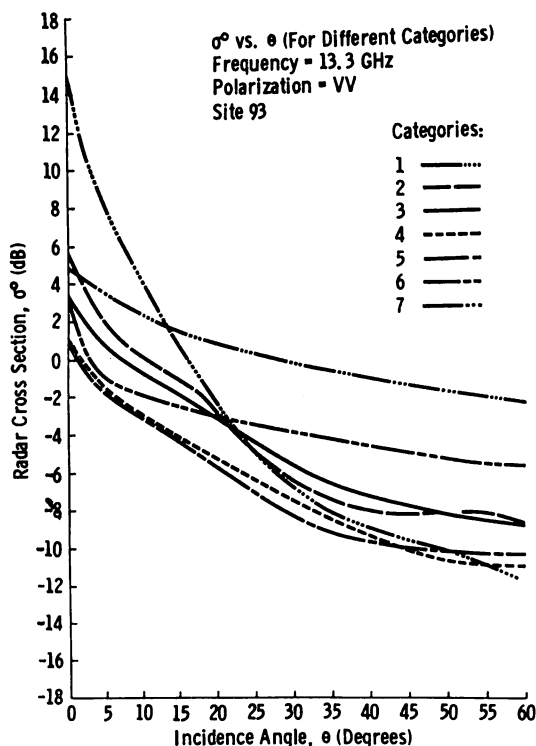
区分	水の区分と厚み	表面塩分
1	open water (無氷海面)	
2	新しい氷 (0~5cm)	19 ‰
3	薄い若い氷 (5~18cm)	13 ‰
4	厚い若い氷 (18~30cm)	10.8 ‰
5	薄い1年氷 (30~90cm)	7.42 ‰
6	厚い1年氷 (90~180cm)	5 ‰
7	多年氷 (180~360cm)	1 ‰

角が増加するにつれて急激に受信電力は減少する。海面が荒れており表面に毛細管波や波長の短い重力波が生じ、表面に凸凹があると、鉛直に発射した時でも受信電波は、波のない場合に比べてはるかに弱くなり、逆に鉛直から傾いて一定の入射角で発射した場合の受信電波は波のない場合に比べて増大し、波浪状況に応じた強さの散乱電波が戻って来る。第7図はこの様子を示している^{(3), (26)}。海面を油膜が覆っている所では風によって発生した毛細管波や波長の短い重力波が減衰して、周囲の海面に比べて海面が平滑になる。このため油膜で覆われた海面は、周囲の海面と異なる散乱特性を示し、散乱計を用いて油膜域を明瞭に識別できる。

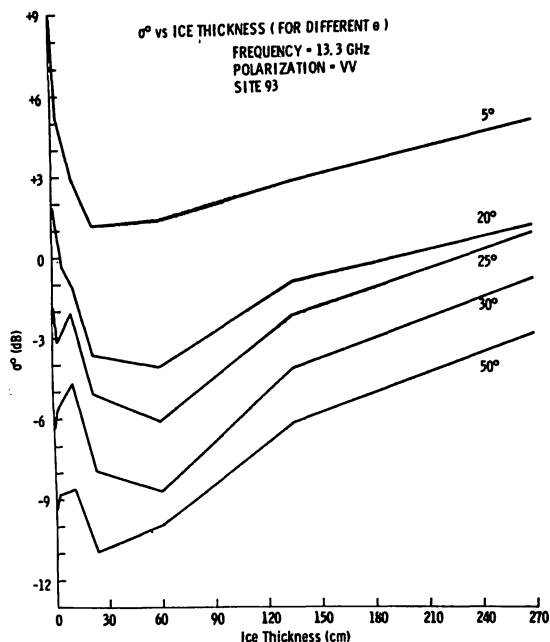
(ii) 海水の散乱計によるリモートセンシング⁽⁴⁾

散乱計を用いて北極海の氷の識別(主として厚さによる)を行なった例を示す。北極地方の石油資源の開発に伴い、北極海を航海の目的のために現在以上に利用するという新しい興味が北極海に集中している。このために北極海の最新の海水のデータ(位置、厚さ、広がり具合、解氷情況)が必要となり、海水の広範囲な地図が必要とされている。北極地方ではほぼ一年中、天候が不安定であり、又年間を通して十分な光量が得られないため、ほぼ全天候又昼夜の区別なく観測可能なレーダシステムが有効となる。測定は、1970年4月にNASA Earth Resources Aircraft Program Mission 126においてアラスカのバロー岬北西40kmの30km平方の海洋上の試験場所を選んで行なわれた。散乱形は2種類で、1つは13.3GHzで垂直偏波のみが利用できるもので、アンテナビームは航空機の進行方向には $\pm 60^\circ$ 、これに直交する方向は 3° の扇形ビームである。もう1つは400MHzの散乱計で垂直、水平の両偏波の送受信が可能で、like-polarization(送信と受信の偏波成分が等しいもの)及びcross-polarization(送信と受信の偏波成分が異なるもの)の両方の測定が可能である。アンテナビームは航空機の進行方向に対して $\pm 60^\circ$ 、これに垂直方向に 7.5° の扇形

ビームである。散乱計の実験を行なう主要な目的は、後方散乱データから、種々の厚さの海水を識別することである。このためには、海水の厚さによる区分と、レーダの後方散乱データとの間に対応がつくことが不可欠である。このミッション126では、ground truthは行なわれなかった。従って試験地域の海水の厚さによる区分についての情報は航空写真を解析することにより行なわれた。航空写真のデータをもとにして、海水の厚さ、年齢、構造等を考慮して第2表の7つの区分による分類がなされた。第2表の塩分の濃度はこれまでの測定から得られたそれぞれの区分にあてはまる値が用いられている。表面温度は、すべての区分に対して同一の -10°C を仮定している。13.3GHzの測定の解析においては、実験区域内のすべての散乱観測データは、海水の区分と入射角の両方により分類され、平均された。第8図で示されるように、区分1は、ほぼ鉛直方向からの入射角の時には最大の σ_0 を与える。鉛直方向から離れた入射角に対しては、区分7の多年氷が他の区分の氷よりも大きい σ_0 を与える。区分2, 3は区分4, 5よりも大きい σ_0 を与える。 σ_0 と厚さの関係は、入射角をパラメータにして第9図に示されている。氷の厚さには各区分の中

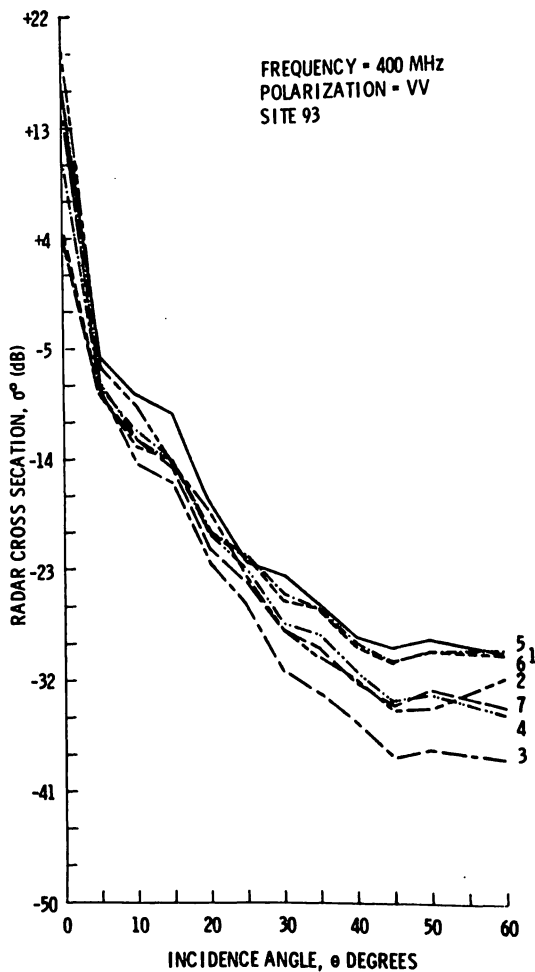


第8図 北極海の氷における入射角と散乱断面積の関係 (13.3GHz, VV 測定の時) 氷は1~7に分類されている(第2表参照)



第9図 入射角をパラメータとした時の、北極海の氷の厚さと散乱断面積との関係 (13.3GHz, VV測定の時)

央の値が用いられている。 σ_0 と厚さ の 関 係 を 示 す 曲 線 の 形 は、入射角に大きく依存している。18 cm以下の薄い氷の方が比較的厚い18~90 cmの氷よりも大きい σ_0 を与える。400MHzの散乱形のデータに対しても同様の解析が実行された。400 MHz のデータは4つの偏波に関する組合せのデータ (VV, VH, HH, HV; 前の記号が送信偏波成分, 後の記号が受信偏波成分を示す, Vは垂直偏波成分, Hは水平偏波成分を示す。) が得られる。全試験領域について、各々の偏波の組合せ毎に13.3 GHz の時と同様海氷の区分と入射角による分類を行ないデータが平均された。VVとVHによる測定の時 σ_0 と入射角の関係が第10図、第11図に示されている。VVについては、ほぼすべての入射角に対して、区分1が最大の σ_0 を与える。区分3の5~18 cm以下の厚さの氷は全入射角について最小の σ_0 を与える。区分5, 6 (氷の厚さ, 30~180 cm) は区分7 (氷の厚さ, 180~270 cm) よりも大きい σ_0 を与えるが区分1よりは小さい。cross-polarization (VH) に対しては、区分1はやはりほぼ全入射角に対して最大の σ_0 を与える。この場合についても区分2, 3は最小の σ_0 を与える。cross-polarization (HV) のデータもほぼ同様の結果を与える。 σ_0 と氷の厚さの関係は第12図と第13図に VVとVHの場合についてそれぞれ示されている。VV, VH共に入射角が30°及

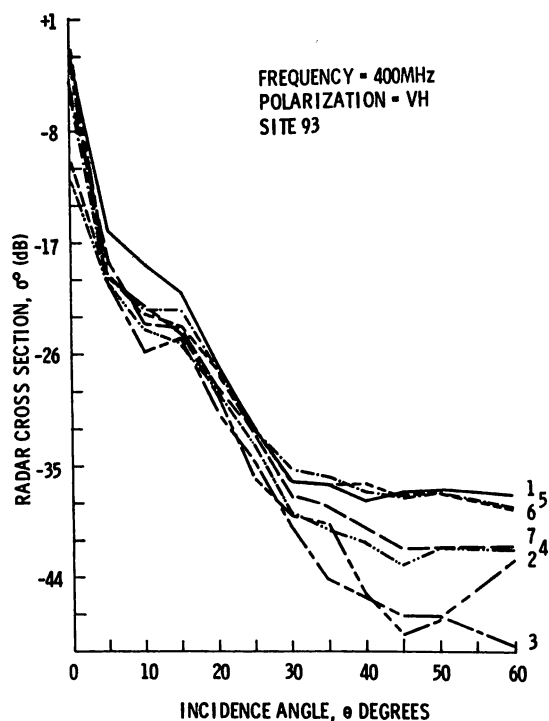


第10図 北極海の氷における入射角と散乱断面積の関係 (400MHz, VV の時), 氷は1~7に分類されている。

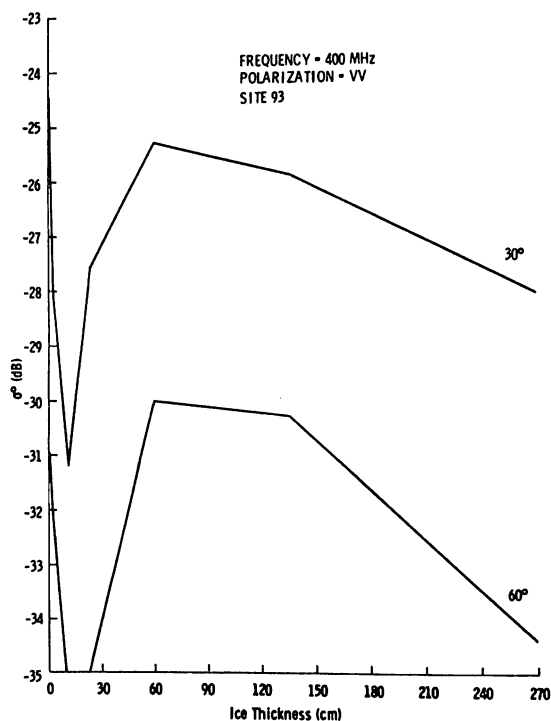
び60°の時には、5~18 cm以下の海氷は最小の σ_0 を、60~150 cmの氷は最大の σ_0 を与える。cross-polarization (VH) の方が、like-polarization (VV) よりも5~18 cmの厚さの氷と50~180 cmの厚さの氷の σ_0 の差が大きい。このようなデータを積み重ねることにより、レーダ散乱計は、海氷の識別及び海氷の厚さについての情報を与える有用なセンサとなり得るであろう。

(iii) 土壌のリモートセンシング

土壌中に含まれる水分がレーダの散乱断面積に重要な影響を及ぼすことは前に指摘したが、これを示唆する実験例を示す⁽⁴⁾。NASAの航空機に搭載させられた散乱計を用いてカンサス州 Garden City 近傍の試験地域で行なわれた実験である。同試験地域は、矩形に区切られ



第11図 入射角をパラメータとした時の、北極海の氷の厚さと散乱断面積との関係 (400MHz, VV の時)



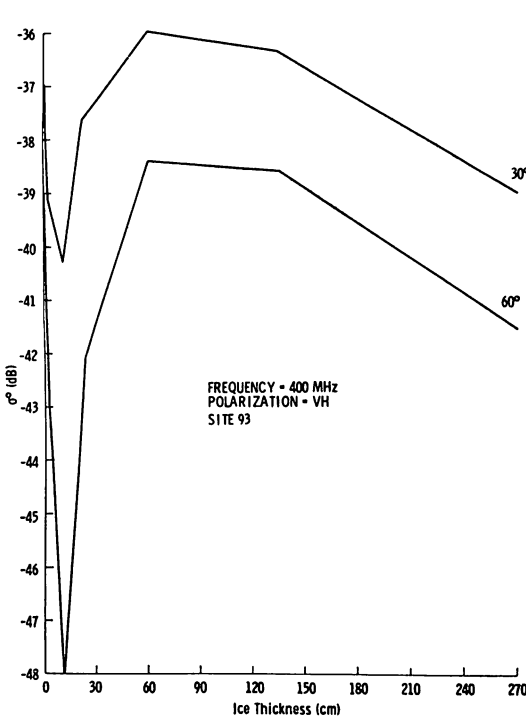
第12図 北極海の氷における入射角と散乱断面積の関係 (400 MHz, VV の時)、氷は1～7に分類されている。

た700個程度の農場からなっており、アルファルファ、とうもろこし、こうりゃん類、てんさい、干し草等が栽培されている。同一の農場の中にも、灌漑された部分(湿った部分)と灌漑されていない部分(乾燥した部分)が混在している。送受信周波数は13.3 GHzの垂直偏波であり、アンテナビームは扇形で、航空機の進行方向に測って広いビーム(±60°)が、又これに垂直方向に狭いビームがある。広いビームの中の入射角の大きさは、受信電波の適当なドップラシフト成分をろ波することによって決定される。進行方向に垂直方向のビーム幅は2.5°であり、3000 ft.の高度からの測定ではアンテナパターンの電力3 dBの地上軌跡の幅は131 ft.である。第14図では入射角が10°、30°及び50°において測定されたが σ_0 航空機の地上軌跡に沿っての距離の関数として示されている。この例で示されるように13.3 GHzの垂直に偏波した信号の σ_0 は、入射角が10°や30°のように小さい時には、灌漑された湿った部分から乾燥した部分に移ると急激に減少する。入射角が10°及び30°の時、とうもろこし畑の灌漑された部分の σ_0 は乾燥した部分に比べて5～7 dBも大きい値を示すが、入射角が50°の時は1 dB程度大きい値をとるに過ぎない。第15図は、

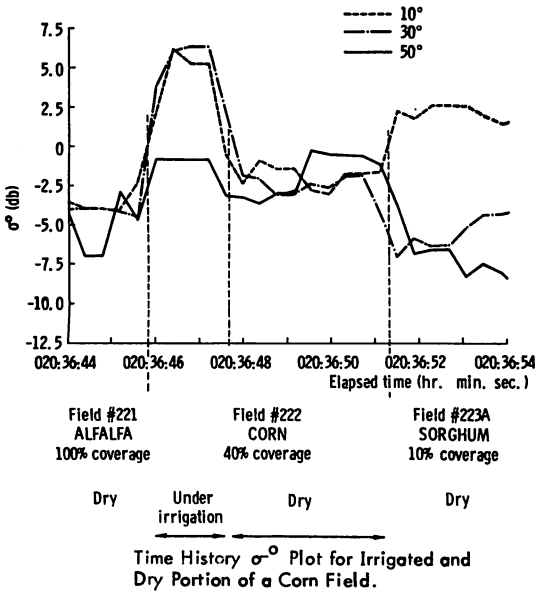
とうもろこし農場中における灌漑された部分(湿った部分)と灌漑されていない部分(乾燥している部分)の σ_0 の平均値を入射角の関数として示した典型的な例である。この図で見られるように、一般的傾向として、入射角が40°以下の時には農場の灌漑された部分の方が灌漑されていない部分よりも7 dB程度大きい σ_0 の値を示す。しかし入射角が40°以上の時は両者は近づく。400 MHzの垂直、水平の両偏波を用いた実験も同時に行なわれたが、13.3 GHzの時と似た傾向を示す。レーダを用いて農業地域のリモートセンシングを行なう時、土壌中の水分について測定したい時には、入射角が40°以下の測定を行えばよいし、又土壌中の水分の影響を無視したい時には、40°以上の入射角で測定すればよい。

3. レーダ高度計とジオイド測定

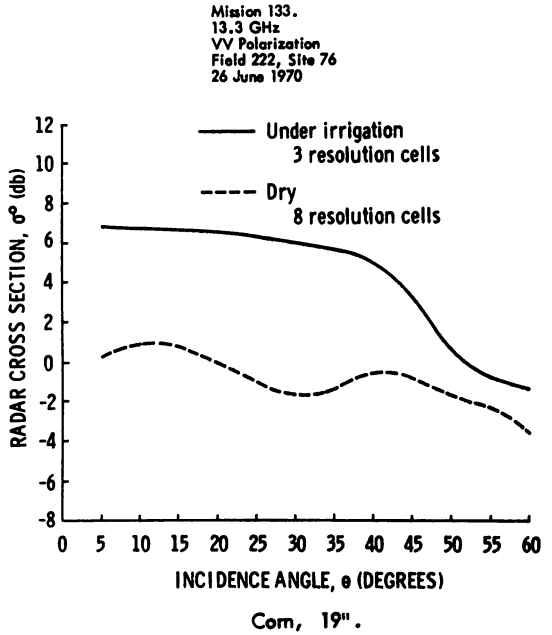
航空機又は衛星に搭載されたレーダより鉛直方向にパルスを送射し、反射されたパルスが戻って来るまでの時間間隔を測定して高度を求めるのがレーダ高度計である。人工衛星搭載のレーダ高度計によって海面上の衛星の高度を正確に測ることができるならば、今まで全く不可能であった外洋における津波や高潮の高さを全地球的



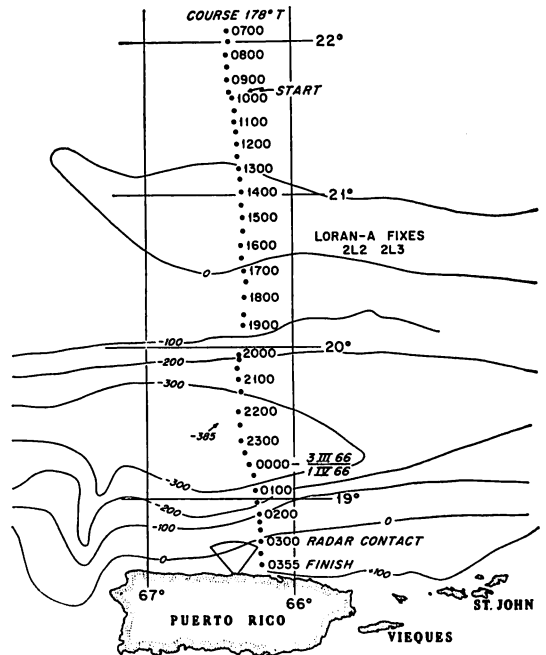
第13図 入射角をパラメータとした時の、北極海の氷の厚さと散乱断面積との関係 (400MHz, VH の時)



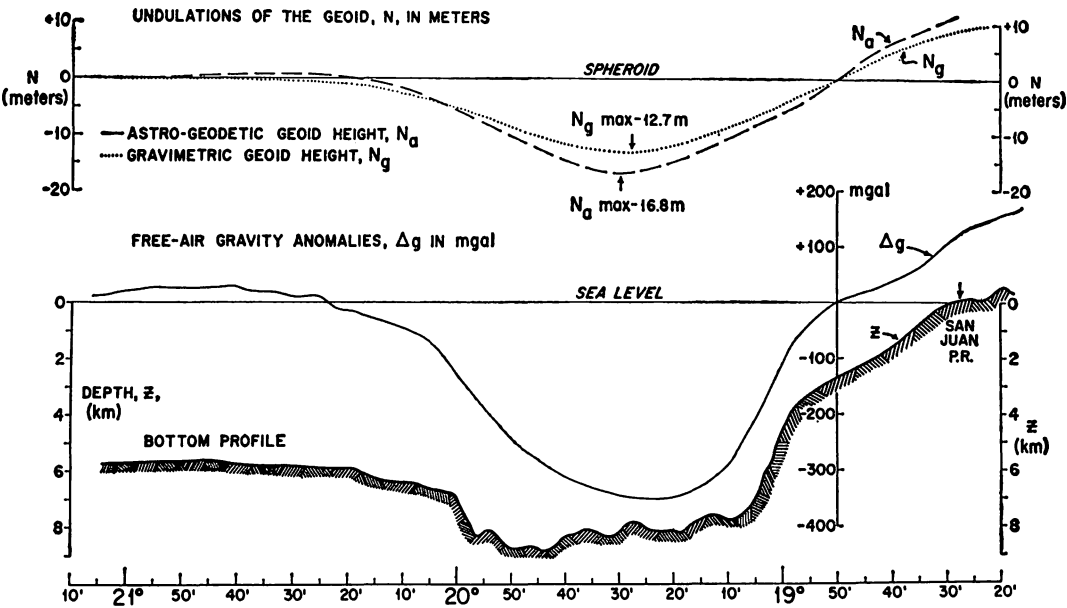
第14図 とうもろこし農場における灌漑された部分 (湿っている部分) と乾燥している部分の散乱断面積の比較、入射角をパラメータとする。



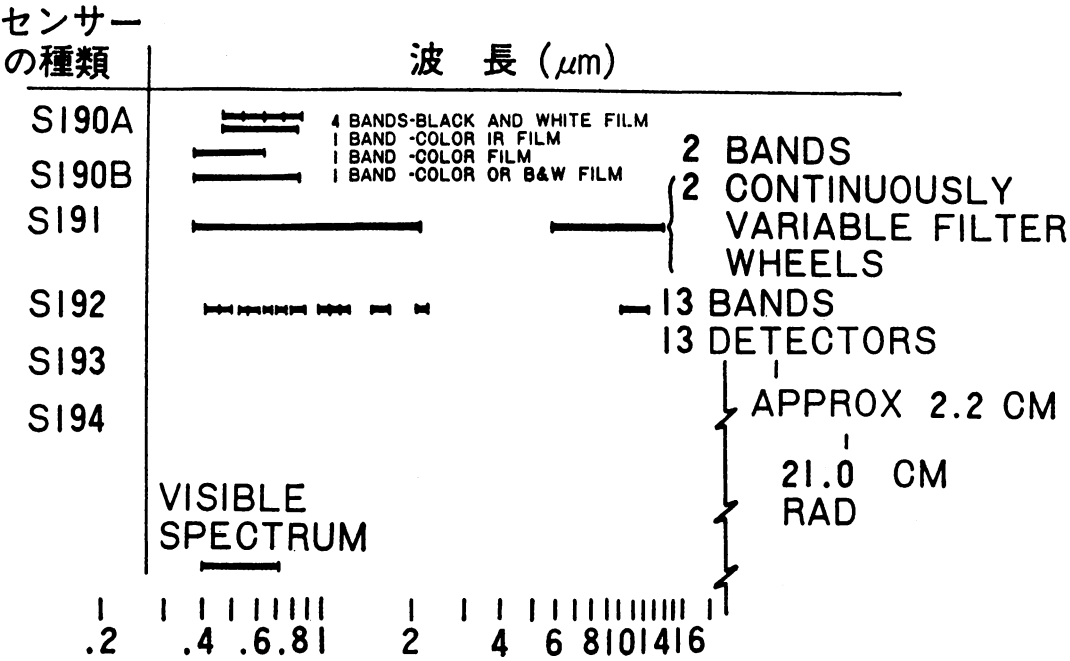
第15図 とうもろこし農場における、灌漑された部分 (湿っている部分) と乾燥している部分の σ_0 の平均値を入射角の関数として示す。



第16図 プエルトリコ海溝の重力異常地域の船からの観測航路 (図中黒丸、数字は時刻) と重力異常値の等高線 (単位はミリガル)



第17図 上図：第16図の観測航路におて天文学的測定によるジオイド高度 (N_a) 及び重力異常の測定によるジオイド高度 (N_g)、準拠楕円体を基準とする。横軸は緯度を示す。
下図：第16図の観測航路における水深 (z) と重力異常値 (Δg) 横軸は緯度を示す。



第18図 スカイラプのセンサ群と対応する波長域

な規模で監視することができる。さらに地球のジオイドを求めることができる。ジオイドは、地球の重力場の等ポテンシャル面のうち海洋上において平均海面に一致するものをいう。ジオイドは地上の観測点において観測された重力異常をもとにして積分して求めたり、天文学的

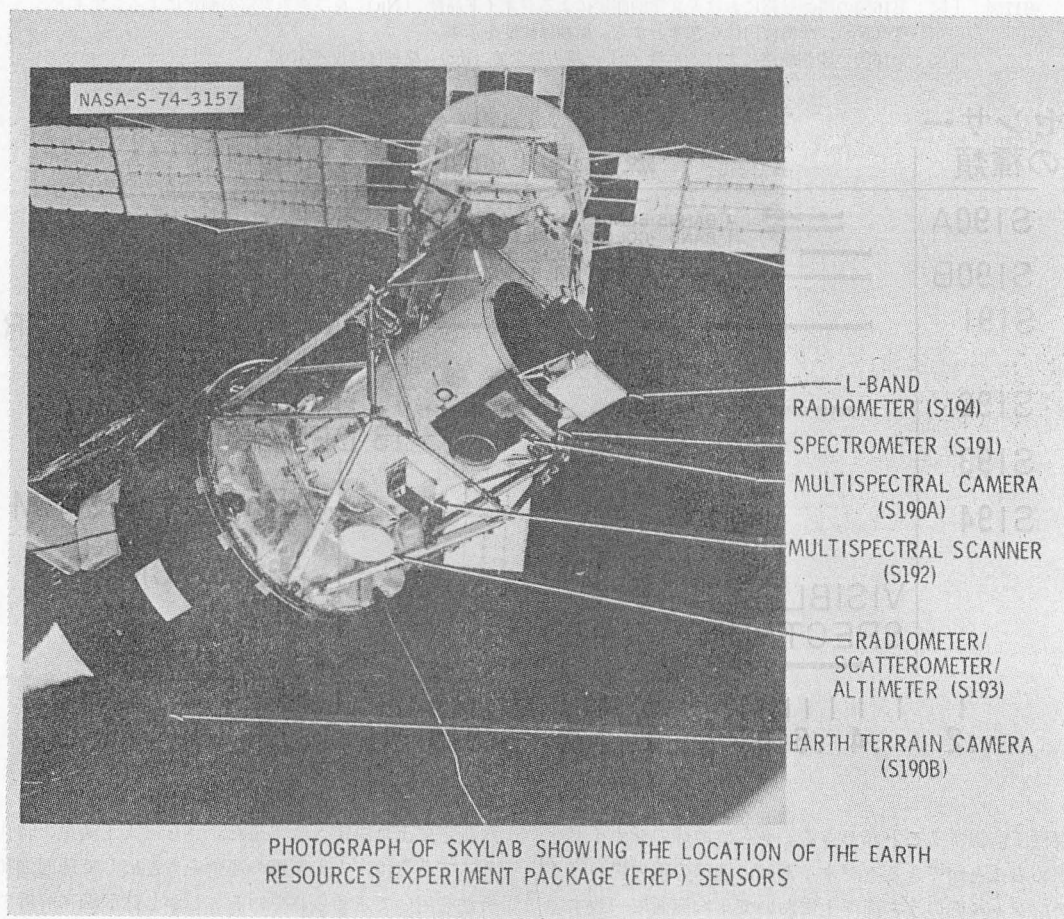
な測定により決定されて来た。さらに人工衛星の時代に入ってから、人工衛星の運動をもとにして球面調和解析法を用いて求められている。しかし球面調和解析の技術によっては、決定できない小さいスケールのジオイドのゆがみがある。世界中には、20余りの深い海溝がある

が、これらの海溝は局所的な重力異常の原因となる。Von Arx は船舶からの天文学的測定（直接的方法）及び重力異常の測定に基づく間接的な方法を用いてプエルトリコ海溝付近の重力異常地域の垂直線偏倚を求め、ジオイドを決定した⁽⁶⁾。観測は第16図中の黒丸（数字は時刻）のようにほぼ西経 66.3 度の子午線に沿って、北緯 21.6 度の（10：00）の出発地点からプエルトリコの San Juan（北緯 18.3 度）近傍の点（3：55）まで北から南に向って時速 10 ノットで行なわれた。第16図中には -100, -200 等の重力異常値を示す等高線が描かれている。最大は図中矢印で示された -385 で単位はミリガル（1ガル $\equiv 1 \text{ cm/sec}^2$ ）である。等高線は東西に広がっている。第17図中の下図は、観測線に沿っての断面図であり、水深 Z と重力異常値 dg を緯度の関数として示している⁽⁶⁾。プエルトリコ海溝が重力異常の原因となっていることがよくわかる。第17図中の上図は、求められたジオイドを示す。縦軸（N）は、ジオイドと準拠地球楕円体（地球の形として、ジオイドに最も近い回転楕円体

で近似したもの）との差を m 単位で示している。重力異常測定により決定されたジオイドの方が天文学的な観測により決定されたジオイドより 20~30% 小さい。重要なことは、両者の差異ではなく、図に示されているように海溝の深い部分に対応した緯度幅 1.5 度位の範囲で 15m 程度のジオイドの降下が見られることである。人工衛星にレーダ高度計を搭載して海溝付近の高度測定を行なうことによって海溝付近のジオイドを決定することができるであろう。この目的のためには、レーダ高度計の精度を上げると共に、人工衛星の地心距離を精度よく求める必要がある。

4. スカイラブ EREP (Earth Resources Experiment Package)* のセンサ S 193^{(8), (9)}

1973 年 5 月より 1974 年 2 月まで NASA の宇宙船スカイラブから 6 種類のセンサを用いた地球資源のリモートセンシングが行なわれた。実際のセンサの操作は、ミッ



第19図 スカイラブ EREP センサ群の取付け位置

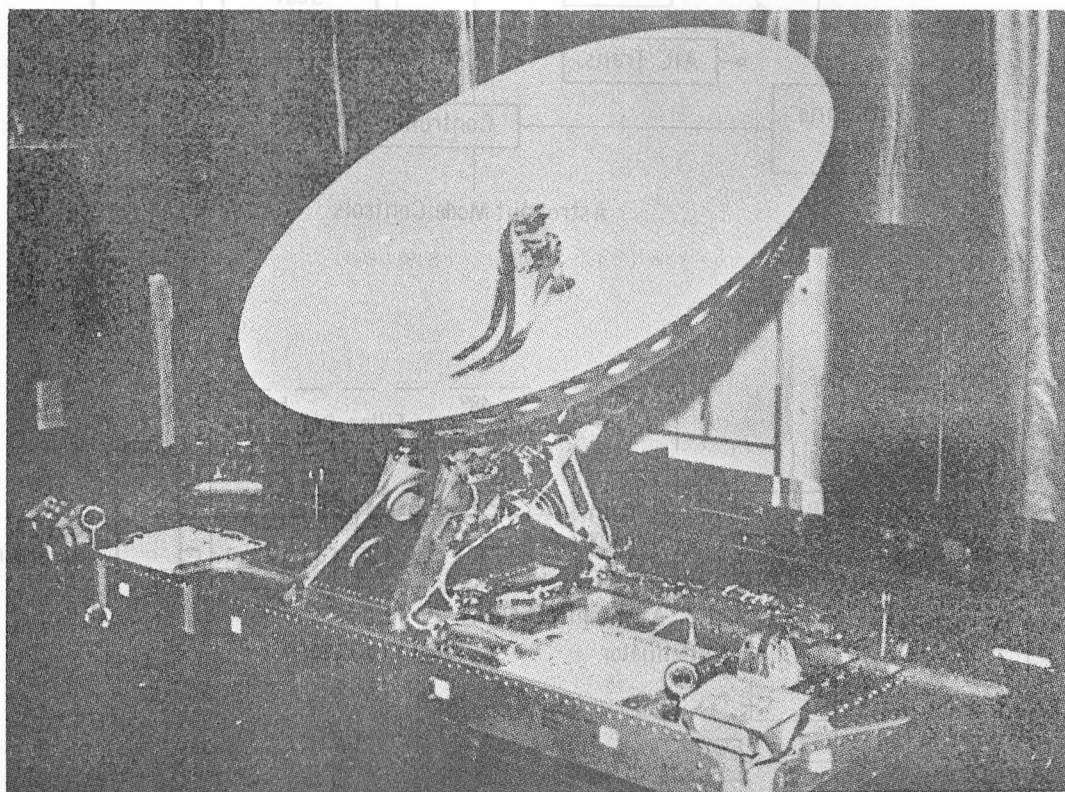
* 文献 (28) を参照のこと。

ション期間の内、有人飛行の期間中に限り行なわれた。
使用されたセンサ群は、EREP と呼ばれており、

- S190A; Multispectral camera,
- S190B; Earth terrain camera,
- S191; Spectrometer,
- S192; Multi-spectral scanner,
- S193; K_u -band radiometer/scatterometer/
altimeter,
- S194; L-band radiometer

から構成されている。センサ及びセンサの感じる波長領域については第18図で示す⁽⁷⁾。又各センサの取付け位置は第19図で示されている⁽⁸⁾。EREP のセンサ群は、それらの視野が宇宙船の $(-z)$ 軸に沿うように宇宙船にとりつけられている。データ取得の期間の間、原則として宇宙船は、 $(-z)$ 軸が地心の方角、X軸が飛行の方角を指し示すように姿勢制御されている。S193 は、受動的なマイクロ波 ラジオメータ、能動的なレーダ散乱形、レーダ高度計の3個の独立したマイクロ波センサからなっているが、すべては共通の 13.9 GHz で動作する。アンテナ及びアンテナ走査システム、トンネルダイオードの増幅器 (TDA) 等の電子機器の数個の主要な部分は、衛星重量、所用電力の要求を最小にするため、3

個のマイクロ波センサで共用されている。第20図は、S193 の概観を示す⁽⁹⁾。アンテナは直径 111 cm の機械的走査型パラボラアンテナで、ビーム幅は 1.6° である。瞬時のデータセル (地上での距離分解能) は、衛星直下点で直径 11km の円である。ラジオメータと散乱計は独立して動作可能であるが、共通の実験目的を持ち、通常は同じ時間帯に動作される。以下、この2つのセンサをまとめて1つのセンサシステムとみなしラジオメータ/散乱計と記述する。ラジオメータも散乱計も高度計と同時に動作することはできない。散乱計と高度計は、独立した送信機を持っている。S193 の総合的な実験目的は、これらの受動的及び能動的なマイクロ波センサの人工衛星軌道上からの海上及び陸上の地球資源のリモートセンシングに対する適応性を確認することであった。実験データの解析にはまだ多年を要すると言われているが、予備的な解析結果によると、ラジオメータ/散乱計は、宇宙空間からの海面の状態及び海面上の風の場合についてのリモートセンシング技術の可能性を立証したと報告されている。陸上のデータについては、土壌の水分の調査に有効であることが報告されている。以下ラジオメータ/散乱計システム及び高度計の2つに大別して、各センサの実験目的、測定装置、操作方法、具体的な観測結果につ



第20図 スカイラプセンサ S193 の概観

いて解説する。

4.1 ラジオメータ／散乱計

(i) 実験目的

ラジオメータ／散乱計による実験目的を個条書にする。

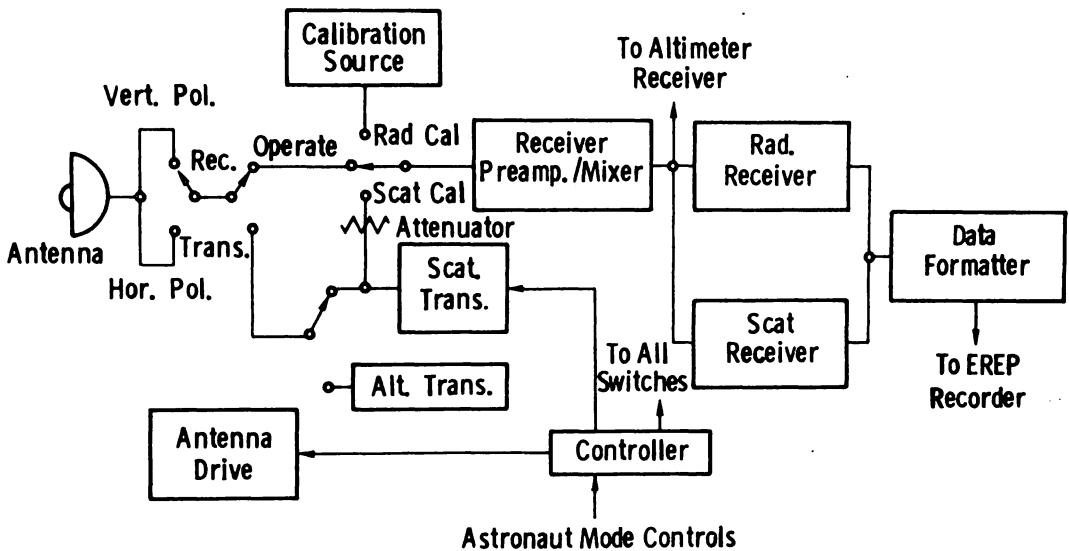
- (a) 全地球的規模での海洋上の表面の粗さ、波の状態、表面の風の状態を決定することの実現性の確立
- (b) 地球の表面上の海水及び湖水地域の同定
- (c) 海洋上の雲とか雨の地域を同定し、数値的な天気予報のために境界層上の大気に関するデータを取得する。
- (d) 根雪 (snow cover) の地図作成の実現性の確立及

びその季節的変動（前進及び後退）の調査、凍結土と非凍結土間の境界の変動の調査、多草木地帯の同定及びその季節的変動の調査、最近、降雨や洪水のあった地域の調査

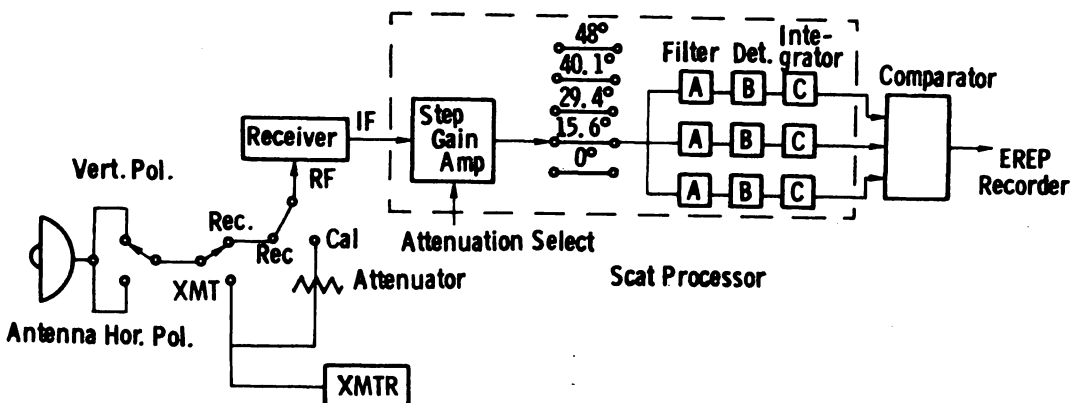
- (e) 土壌のタイプ及び岩石構造の識別、広い地域における土壌含水率の平均値の決定
- (f) 種々の地表面におけるレーダの散乱係数と、マイクロ波放射率のカatalogを作成し、将来のマイクロ波システムの設計に利用する。

(ii) 測定装置

第21図でラジオメータ／散乱計を中心としたセンサS193の概観的なブロック図を示す⁽⁹⁾。アンテナはスイッ



第21図 ラジオメータ／散乱計を中心とするセンサS193の概観的なブロック図



第22図 S193 散乱計のブロック図

第3表 S193 ラジオメータ／散乱計の諸元

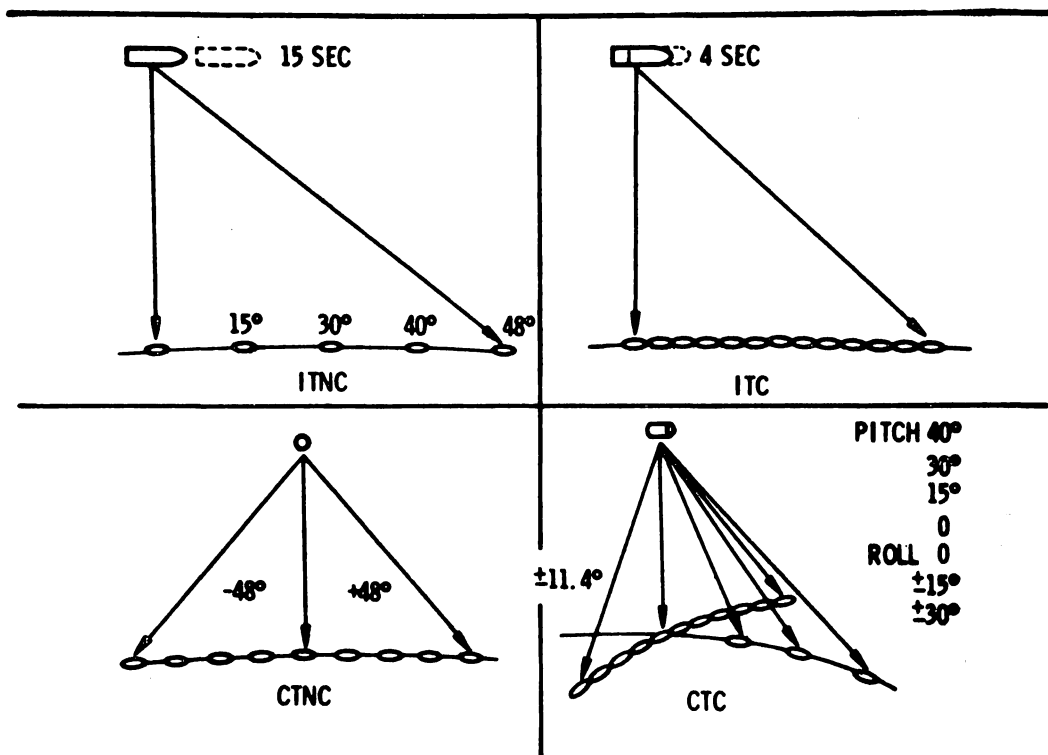
SCATTEROMETER	
Transmitter	
Frequency:	13.9 GHz
Peak Power of Tube:	20 w
Power to Antenna:	12.7 w
Pulse Width:	5.05 milliseconds for all scan angles in all modes
Pulse Repetition Frequency:	125 pps for all scan angles in all modes
Receiver	
First IF:	500 MHz
Second IF:	50 MHz
System Noise:	1195°K
2nd IF Bandwidth:	Function of in-track command angle
Pitch Angle (deg)	IF Bandwidth (kHz)
0.0	72.5
15.6	70.8
29.4	65.1
40.1	58.7
48.0	51.6
Number of IF Filters Per Pitch Angle:	3
Signal Plus Noise Integration Times (milliseconds):	170.2, 147.2, 126.5, 85.1, 48.3, 36.8, 32.2, 18.4
Noise Integration Times (milliseconds):	125.532, 61.532, 27.063, 26.582, 16.735, 6.813
Precision of Measurement:	3-7% for $\sigma = -30$ dB for different angles for non-contiguous modes. 7-13% for different angles for CTC mode. 7-12% for different angles for ITC mode.
Integration Gate:	2.3 milliseconds wide, turned on 5.17 milliseconds after start of transmit pulse for all scan angles except 48°, for which turned on 5.66 milliseconds after start of transmit pulse.
Detection:	Square Law Device
Dynamic Range:	-80.8 dBm to -135.8 dBm, measured at antenna output terminals.
RADIOMETER RECEIVER	
Center Frequency:	13.9 GHz
Receiver Noise Temperature:	1195°K
Temperature Resolution:	1°K
Dynamic Range:	50°K to 350°K
Calibration:	Δ temperature of hot references, receiver scale factor adjusted automatically in flight.
Integration Times (milliseconds):	256, 128, 58, 32
ANTENNA	
Antenna Scan Operating Modes (all angles in degrees)	
In-Track Non-Contiguous:	
Pitch Angle =	48.0, 40.1, 29.4, 15.6, 0.0
Roll Angle =	0.0 in all cases
Cross-Track Non-Contiguous:	
Pitch Angle =	0.0 in all cases
Roll Angle =	48.0, 40.1, 29.4, 15.6, 0.0
In-Track Contiguous:	
Pitch Angle =	48.0, 40.1, 29.4, 15.6, 2.3287
Roll Angle =	0.0 in all cases
Cross-Track Contiguous:	
Offset Pitch Angle =	0.0, 15.6, 29.4, 40.1
Offset Roll Angle =	0.0, 15.6, 29.4
Scan Pitch Angle =	-1 to +1 about offset
Scan Roll Angle =	-11.375 to +11.375 from roll offset
Antenna Parameters:	
Measured Gain:	
Vertical =	41.1 dB
Horizontal =	41.3 dB
3 dB Beamwidth Vertical =	1.6°
3 dB Beamwidth Horizontal =	1.588°
Maximum Sidelobe Level:	
Vertical =	20.5 dB
Horizontal =	22.8 dB
Cross-Polarized Measurements:	
Vertical =	16.3 dB
Horizontal =	16.3 dB

チにより切替えることによって、垂直、水平のいずれの偏波をも送受信することができる。従って送信偏波と同一の偏波成分を受信することも可能であるし、直交する偏波成分を受信することも可能である。受信信号は TD A で前置増幅され受信機のミキサの部分を通り IF に落とされ増幅された後パワースプリッターを経由してラジオメータ又は散乱計の受信機に送信される。検波され積分された後、出力はデジタルデータ形式でデータフォーマットに移され、EREP のテープレコーダに記録される。アンテナ駆動部はアンテナコントローラからの指示に従い、各種のモードに従った操作を行なう。第22図はさらに詳細な散乱計のブロック図を示す⁽⁹⁾。操作の最

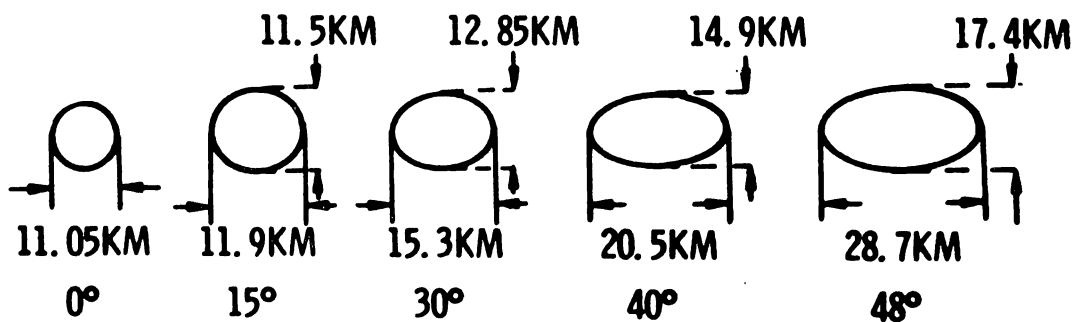
初には、校正目的のために送信信号のサンプルがスイッチにより切替えられて受信機に入力される。地上からの散乱波とこの較正用信号を比較することによって、送信電力と受信電力の比が求められる。この比にもとづいて、散乱断面積が求められる。第3表でラジオメータ／散乱計の仕様及びアンテナの仕様を示す。

(iii) 操作方法

ラジオメータ／散乱計には4個の異った走査モードがありそれぞれ ITNC (In-Track Non-Contiguous) モード, CTNC (Cross-Track Non-Contiguous) モード ITC (In-Track Contiguous) モード及び CTC (Cross-Track Contiguous) モードと呼ばれている。各モード



第23図 S193 ラジオメータ/散乱計の4つの走査モード

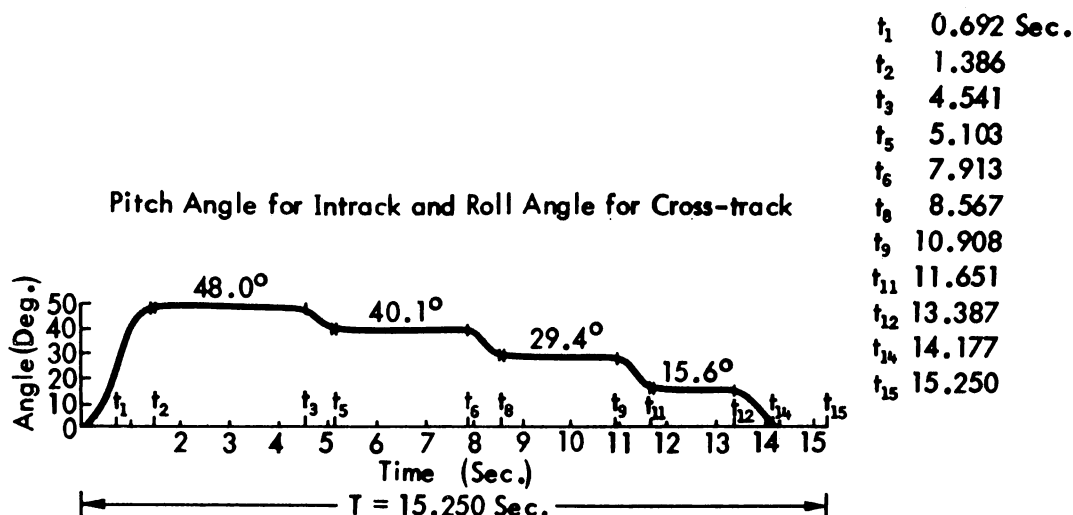


Ground Footprints for the Half-power Point
on Round-trip Antenna Pattern for S-193 at
Different Command Angles.

第24図 ピッチ角が 0°, 15°, 30°, 40°, 48° における S193 のアンテナの half-power gain-squared pattern

については第23図で示す⁽⁹⁾。ITNC モードは第23図に示されるように衛星の地上軌跡上の5個の観測セルに対して各々ピッチ角48.0°, 40.1°, 29.4°, 15.6°, 0°で不連続的に観測するモードである。ピッチ角は、衛星の速度ベクトルと衛星より地心方向（衛星直下点方向）に向

うベクトルの作る平面で定義され、送信電波の地表面への入射方向と、衛星直下点方向のなす角度で定義する。各観測セルの間隔は約100kmである。第24図は各々の走査角度における half-power gain-squared pattern の地上での軌跡である⁽⁹⁾。第25図で ITCN 及び CTNC



At each angle the following order of measurements takes place

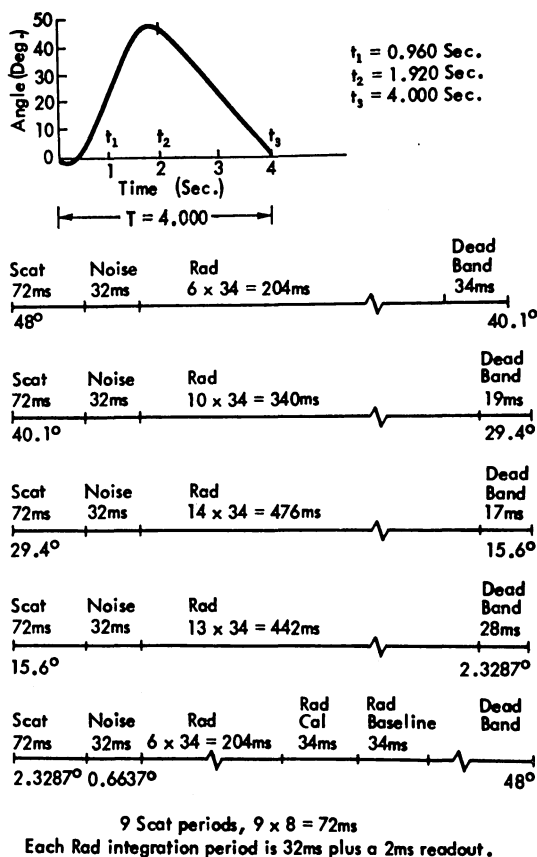
Scat (VV)	Scat (HV)	Rad & Scat Noise (V)	Scat (HH)	Scat (VH)	Rad & Scat Noise (H)	Rad Cali- brate	Rad Base- line
m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8

Timing and scan angles for S-193 radscat CTNC and ITNC modes

第25図 ITNC と CTNC モードの一走査サイクルの詳細

モードの一走査サイクルにおける測定の詳細（各々の角度の測定順序と測定時間の長さ及び測定偏波）を示す⁽⁹⁾ VV とか VH とかの記号は前の文字が送信された偏波成分、後の文字が受信された偏波成分を意味し、like-polarization 及び cross-polarization のいずれの測定も可能である。Vは垂直偏波成分、Hは水平偏波成分を意味する。送信又は受信電波の電界の偏波面が、電波の進行方向を向くベクトルと衛星直下点方向を向くベクトルの2個のベクトルにより作られる平面内にある時、これを垂直偏波Vと定義し、電界の偏波面がこの平面に垂直の時には水平偏波Hと定義する。CTNC モードは第23図に示されるように、人工衛星の地上軌跡にほぼ直交する直線の中の9点についてITNCと同様な角度について測定を行なう。これらの観測点はやはり約100 km 離れており、このモードの主要な観測対象は、ITNC 同様に海洋である。このモードは地上軌跡の右側あるいは左側のどちらか一方のみの走査、あるいは左右両側の走査が可能である。ITC モードについては第23図に示すよ

うに衛星の地上軌跡にそってピッチ角が48°の方向から衛星直下点まで連続的に走査される。散乱計のデータは、ピッチ角が48°、40.1°、29.4°、15.6°及び2.3°の場合について各々72ミリ秒間観測される。第26図で見られるように、一走査サイクルは4秒で、散乱計のデータ収集の間に、散乱計のノイズ及びラジオメータのデータが取得され、衛星の地上軌跡方向に沿ったほぼ連続的な測定がなされる⁽⁹⁾。ラジオメータによる観測時間の方が散乱計による観測時間よりもはるかに長い。CTC モードは第23図に示されるように、衛星の地上軌跡にほぼ直角に連続的に走査するモードであり、1サイクルの周期は4.24秒である。全走査角は22.7°（直下点より±11.4°）である。走査は通常は衛星直下点を中心として行なわれるが地上軌跡の前方ピッチ角15.6°、29.4°、40.1°の地上点を中心としたり（ピッチバイアス）、直下点より地上軌跡と直交する方向に、直下点方向より計って ±15.6°及び ±29.4°をなす方向の地上点を中心としたり（ロールバイアス）することもできる。



Timing and scan angles for S-193 radscat ITC mode

第26図 ITC モードの一走査サイクルの詳細

(iv) 具体的な観測例

第27図はメキシコの海岸沖の台風 Ava 通過時のラジオメータ／散乱計による予備的な観測結果である⁽⁸⁾。観測時点における台風の目近傍の最大風速は、160km/時を越えていた。S 193 は、台風の目近傍を通過しなかった。S 193 が最も台風の目に近づいた時の風速は、88km/時であった。後方散乱波の内の水平偏波成分は、台風の目に近づくにつれ受信信号が増大し、離れるにつれ減少している。これに対して、後方散乱波の垂直偏波成分は、台風の目に近づくにつれほんのわずかな増加するだけである。この測定は、宇宙船の $-z$ 軸が地心方向を指向する通常の姿勢とは異り、 $-z$ 軸が地心方向からピッチ角で数度ずれた状態で行なわれている。このため後方散乱波は散乱計のバンド幅を越えたドップラー周波数変移を持つようになり、第27図の左から11番目の観測セルを越えたデータは信頼できないものになるため同図から除外されている。ラジオメータは、水平、垂直の両偏波成

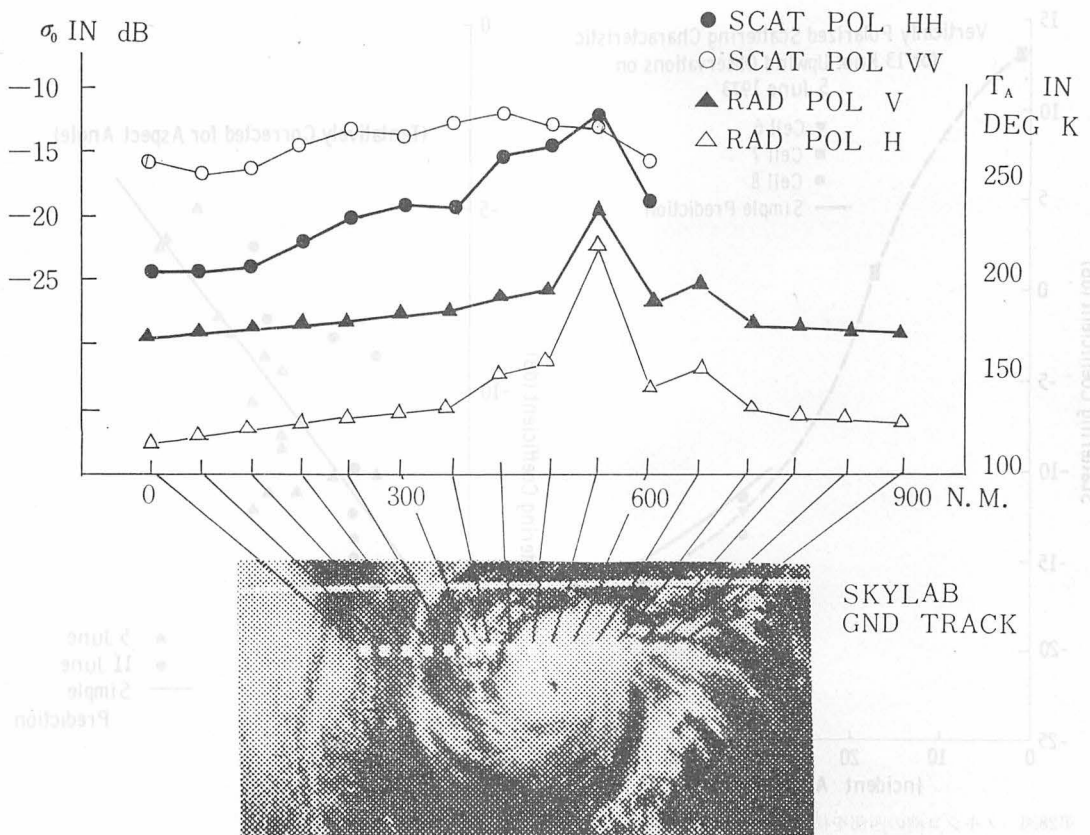
分とも台風の目の近傍における輝度温度の増加を示している。散乱計、ラジオメータの両方による同時観測により信頼のできるデータが取得される。メキシコ湾の西部を横切った時の海面からの垂直偏波成分の後方散乱係数の実測値が入射角の関数として第28図に示されている⁽⁹⁾。第29図及び第30図では垂直偏波成分の海洋からの実測値が入射角 30° 及び 50° の条件の下に風速の関数として示されている⁽⁹⁾。

4.2 高度計^{(8), (10)}

(i) 実験目的

高度計による実験目的を個条書にする。

- 海の波浪状況、海面の風の場の測定のために短いパルスのレーダシステムを利用することの実現性の確立
- 科学研究のためのジオイドの形に関する情報の提供
- 将来のレーダ高度計の設計のための工学情報の提供で、具体的には
- 戻ってくるパルス間に完全に相関のないために必



第27図 メキシコの海岸沖の台風 Ava 通過時の S193 ラジオメータ/散乱計による観測

要な最小のパルス間隔

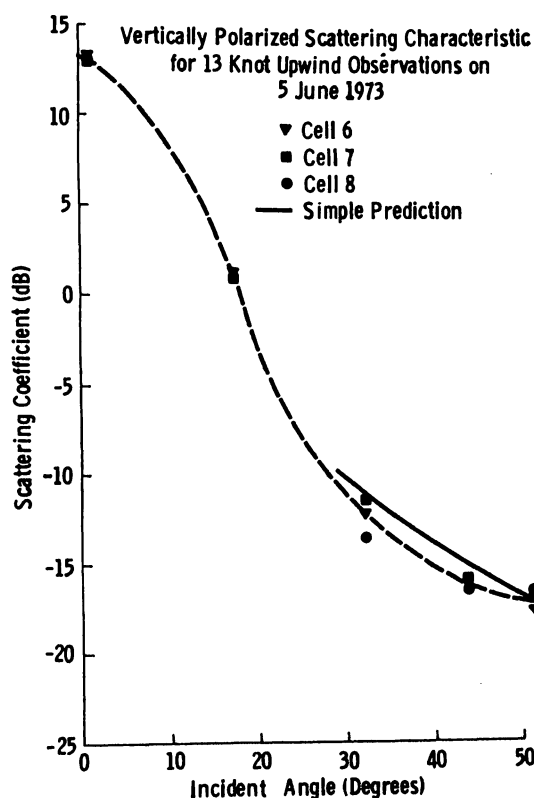
- (i) パルス圧縮法により S/N 比を高めること
- (ii) 戻って来たパルスの波形の解析から直下点方向を決定することの可能性
- (iii) 最適なパルス幅, パワー, バンド幅
- (iv) 表面の状況, 入射角, 送信パルス特性と戻って来たパルスの波形及び振幅との関係
- (v) 測定装置

高度計は狭いパルス幅のパルスレーダシステムで、海洋及び陸上において衛星から衛星直下の地上点までの高度の測定及び後方散乱波の波形の入射角の関数としての測定を行なうように設計されている。レーダシステムは、パルス幅が130ナノ秒、100ナノ秒又は10ナノ秒のパルスを毎秒250個のパルス繰返し率で送出する。ピーク出力は2kWである。システムのバンド幅は10又は100MHzで動作する。高度計にはさらにパルス圧縮モードがあり、13ビットの Barker code 技法によって符号化され

た130ナノ秒の送信パルスを受信機の中で10ナノ秒のパルスに圧縮する。波形のサンプリングは、sample and hold gate によって実行される。高度計は自動的に衛星直下点を0.5°の精度で指向する直下点搜索システムを持っている。第31図で高度計のシステムブロック図を示す。又第4表で高度計システムの仕様を示す⁽¹⁰⁾。

(iii) 操作方法

高度計も数個のモードで動作する。モード1は、戻って来たパルスの波形の観測である。アンテナを直下点及びピッチ角0.43°だけ直下点よりずれた方向に向けて観測する。パルス幅は100ナノ秒である。sample and hold gate の間隔は25ナノ秒である。IFフィルタのバンド幅は、10MHzと100MHzの両方である。モード2の目的はレーダの後方散乱係数 σ_0 の測定である。アンテナは直下点及び直下点よりピッチ角0.4°, 1.3°, 2.65°, 7.56°, 15.6°の方向に向けて測定された。パルス幅は100ナノ秒 IF フィルタのバンド幅は10MHzである。sample and

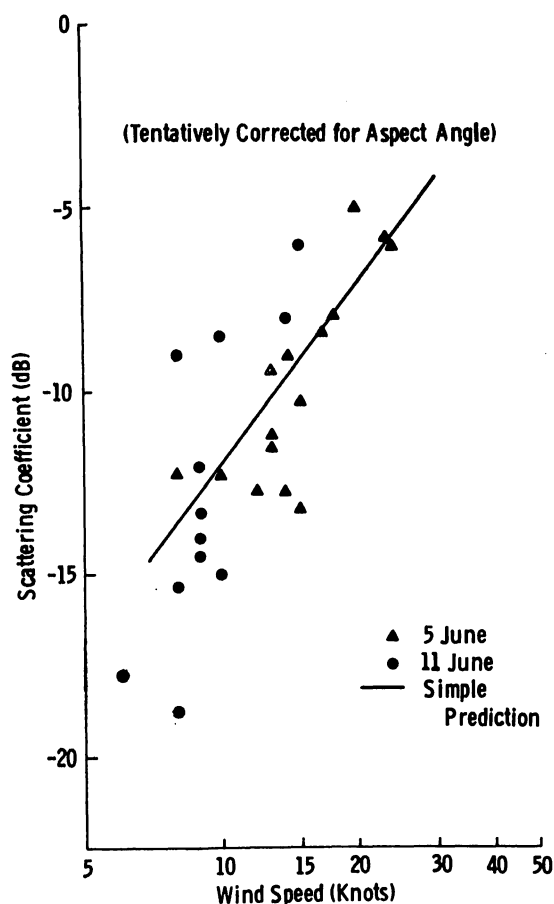


第28図 メキシコ湾の西部を横切った時の海面からの垂直偏波成分の後方散乱係数と入射角の関係

第4表 S193 レーダ高度計の諸元

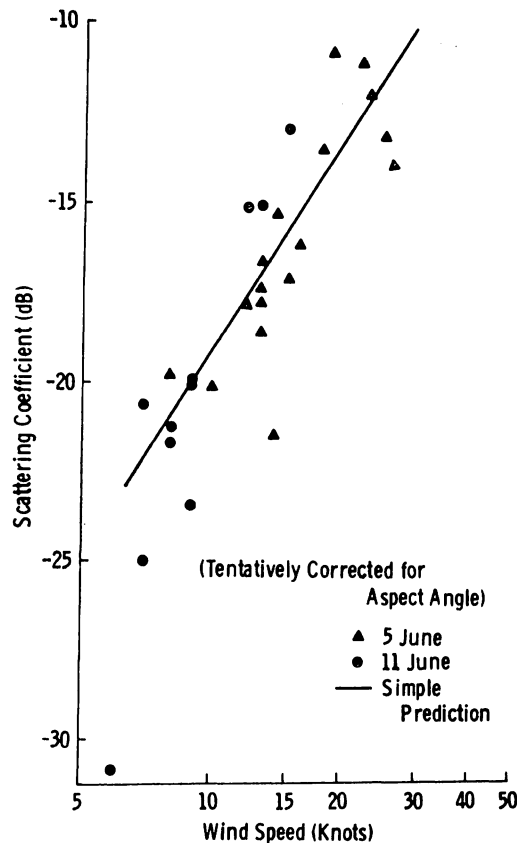
Transmitter	
TWT power output	2 kW (min)
Frequency	13.9 GHz
Pulsewidth	10, 100, and 130 ns *
Pulse mode	Single or dual pulse
Pulse rep. frequency	250 pps.
Receiver	
IF center frequency	350 MHz
Bandwidth	10 and 100 MHz
Preamplifier	tunnel diode
Pulse Compression (Selectable)	
Type	Binary phase code
Uncompressed pulsewidth	130 ns
Compressed pulsewidth	10 ns
Code	13-bit Barker code
Signal Processing	
Altitude tracking loop type	Digital, 200-MHz logic
Loop bandwidth	2 Hz
Altitude output	32 pulse average of 2-way delay
Altitude granularity	1.25 ft
Acquisition time	Less than 6 s with initial altitude set to within ± 4000 yd
Wavelength Sampling	
Number of sample and hold gates	8
Sampling gate width	10 to 25 ns
Gate spacing	10 and 25 ns
Experiment Data Rate	10,000 bits/s (max)
Antenna	44-in. diam paraboloid

* Actual 3-dB pulsewidths for the 10- and 100-ns pulses are 18 and 72 ns, respectively.



第29図 入射角が30°における垂直偏波成分の海面からの後方散乱係数と風速との関係

hold gate の間隔は25ナノ秒である。モード3は、時刻(信号)相関の実験で、いろんな表面の状況の下で、戻って来るパルス間に完全に相関のないため必要な最小のパルス間隔の決定を行なう。実験はアンテナを直下点に向けて種々の時間間隔(1.05, 19.25, 76.85, 153.65, 409.65, 819.25; 単位はマイクロ秒)を持つパルスの組が1秒間につき250個送出される。パルス幅は10ナノ秒及び100ナノ秒である。IFフィルタのバンド幅は、10 MHzと100 MHzである。モード4は、周波数相関の実験であったが、高度計の設計段階で削除されている。モード5はパルス圧縮についての実験である。パルス幅10ナノ秒の圧縮されていない非符号化パルス反射信号特性と、符号化された130ナノ秒の送信パルスを受信機の中で圧縮して10ナノ秒にしたものの反射信号特性を海面を対象にして比較することを目的とする。sample and hold gate の間隔は10ナノ秒である。モード6は、S193



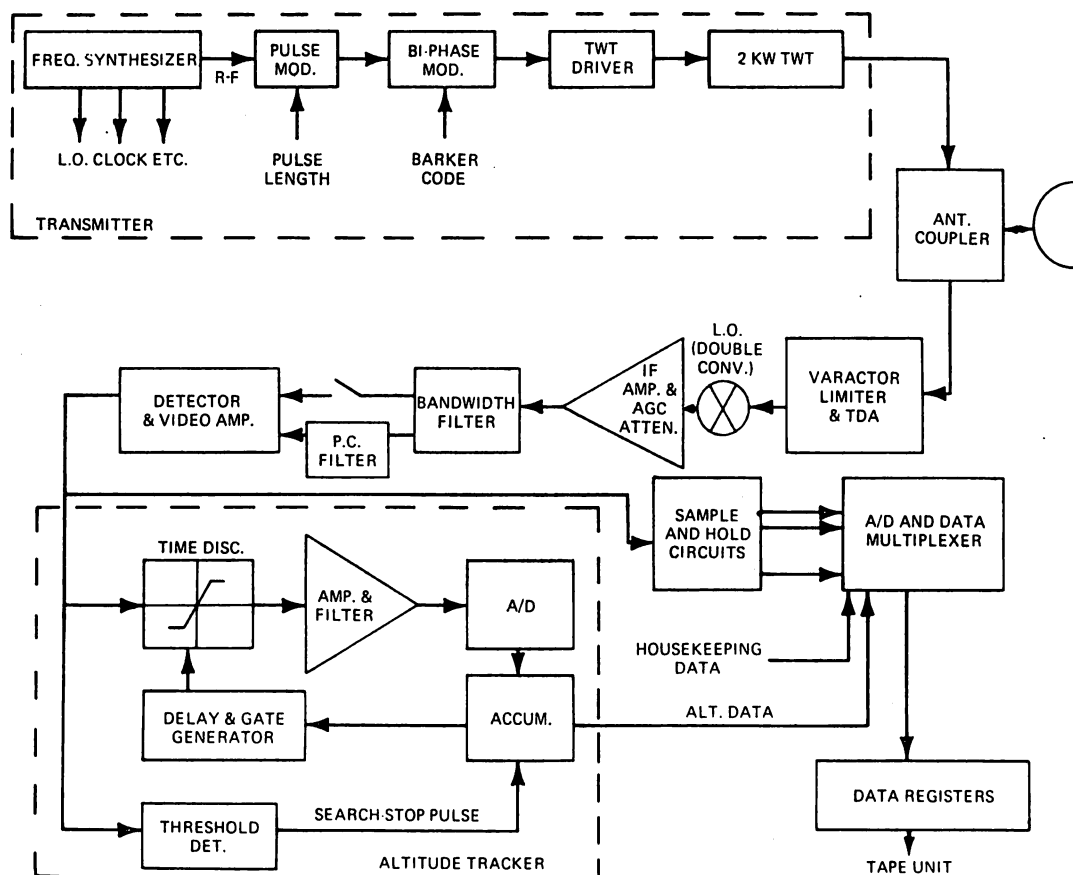
第30図 入射角が 50° における垂直偏波成分の海面からの後方散乱係数と風速との関係

のアンテナを衛星直下点に向けて自動的に指向させることを目的とする。実験は高度計からの AGC 電圧を用いることにより実行される。アンテナは、AGC 電圧が最大となる方向に向けて自動的に動き、直下点を決める。送信されたパルス幅は100ナノ秒、IF バンド幅は 10 MHz である。

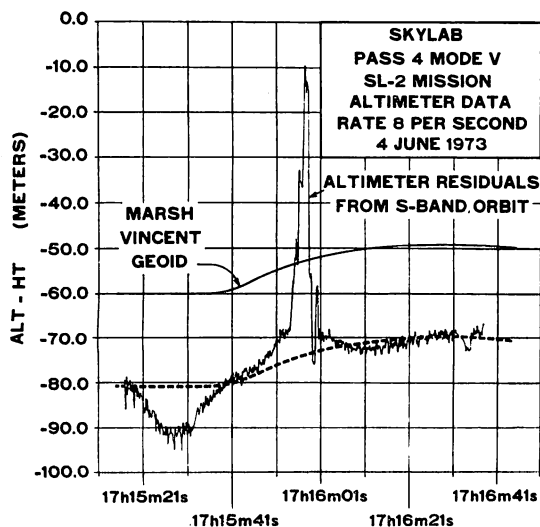
(iv) 具体的な観測例

高度計は分解能が悪い、複雑に起伏する地上点の高度測定のためには必ずしも有効ではないが、広範な海洋上のジオイドを測定するためには極めて有効であろう。第32図は前述した重力異常を示すプエルトリコ海溝近傍の海洋地域における S 193 高度計による pass #4 の時の測定結果を示す⁽¹⁰⁾。同図の縦軸は、高度計で測定された局所的なジオイドと基準となる地球楕円体との距離の差を示した距離残差である。これは図中で、altimeter residual として示されている。人工衛星の軌道データは S バンドの追跡システムを用いて測定されている。図中で比較のため Vincent と Marsh⁽²⁷⁾ によって求められているジオイドが示されている。第32図の観測

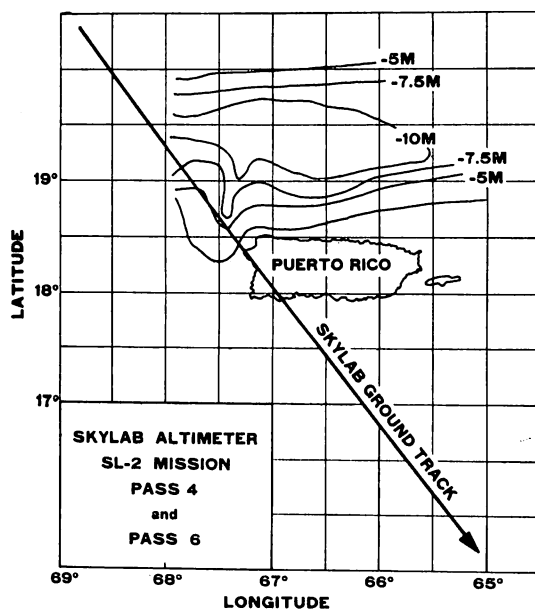
に対応した人工衛星の地上軌跡を第33図に示す⁽¹⁰⁾。第32図においてプエルトリコ海溝における重力異常は図の最初の20秒程度における10m程度の海面の低下で明らかにされている。図の左から40秒程度に現われる大きな距離残差は、プエルトリコ島自身からの反射による。第32図の測定は第33図に示すように、Von Arx の船舶からの測定が行なわれた地域よりやや西寄りの海上で行なわれたものであるが、両測定は相対的によく一致した傾向を示す。絶対値の差は、基準となる地球楕円体の差によるものと思われる。5日程後に、ほぼ同一の地上点に対して高度測定が行なわれたが (pass #6)、第34図に示すように、pass #4 と pass #6 における両者の測定結果はよく一致している⁽¹⁰⁾。最近の NASA 等における高度計データの解析結果から、プエルトリコ海溝の例にみられるように重力異常に由来すると考えられる、今まで未知であった海面異常がいくつか明らかになっている。



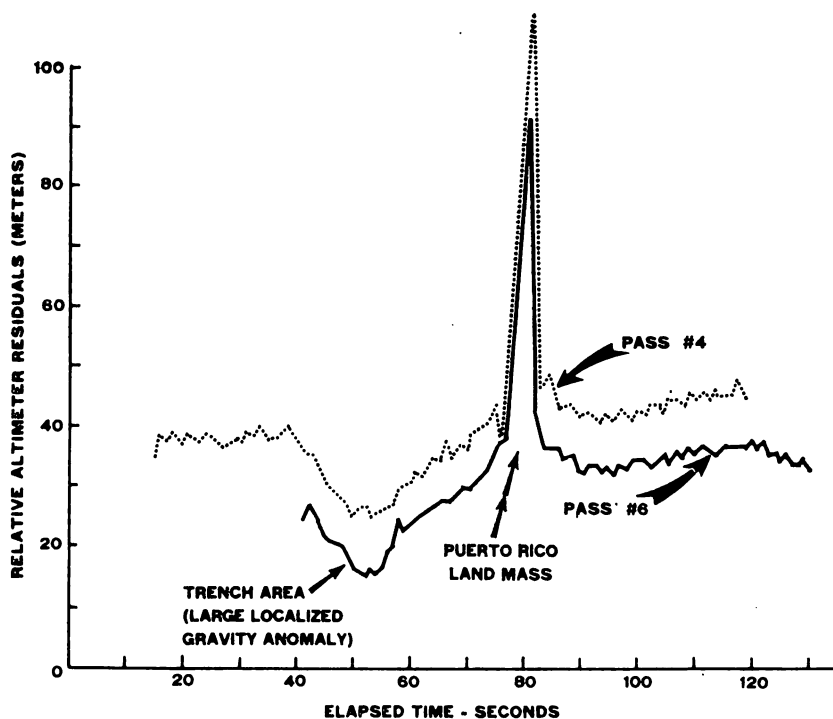
第31図 スカイラブ S193 の高度計のシステムブロック図



第32図 プエルトリコ海溝近傍の海域における S193 高度計によるジオイド測定 (pass #4 に於ける altimeter residual) 比較のため Marsh と Vincent によるジオイドを示す。



第33図 第32図の観測に対応した人工衛星の地上軌跡



第34図 同一地上軌跡を通過する pass #4 と pass #6 におけるジオイド測定の比較

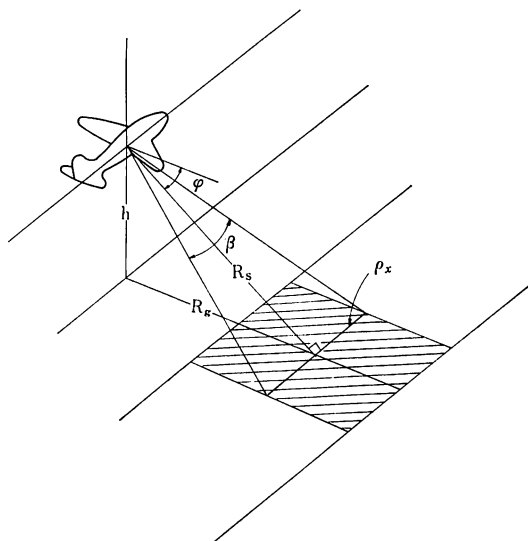
5. SLAR(Side Looking Airborne Radar)

の原理

SLARは地球環境のリモートセンシングのために最も有力なレーダシステムである。SLARによるリモートセンシングはアメリカではすでに20年程前から行なわれているが、我が国においては、いまだに調査研究の段階にあるにすぎない。SLARに関して、邦文誌に紹介されたものはかなりの数にのぼっているが^{(11)~(14), (19), (20)}, ユーザサイドから見た詳細な総合報告が駒井氏^{(11)~(14)}によりなされているので、適宜引用させていただくことにする。

5.1 実開口方式のSLAR

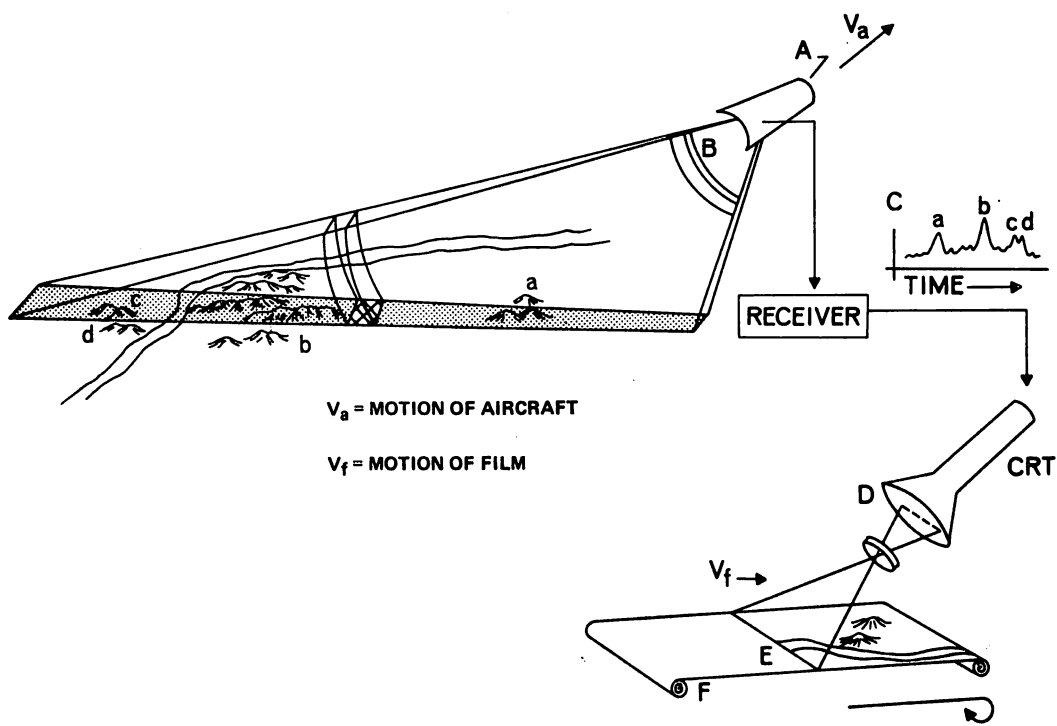
実開口方式 (real aperture system) は後に述べる合成開口方式 (synthetic aperture system) と対立する概念であり、航空機の進行方向 (azimuth 方向ともいう) の分解能 (方位分解能ということもある) がアンテナの物理的寸法そのままにより決まるので実開口方式と呼ばれるのである。実開口方式の SLAR は、第35図に示すように通常機軸方向に沿って固定されたレーダから航空機の進行方向と直交して片側又は両側に、扇状のビームを断続的に照射し地上の観測対象物により散乱された信号を受信する。第35図には以下の説明に必要な記号が示されている。航空機の進行方向の走査は、航空機自



第35図 実開口 SLAR (Side Looking Airborne Radar) の走査概観図

h ; 高度, φ ; 伏角, β ; ビーム幅, R_s ; 斜距離
 R_g ; 地上距離, ρ_x ; 方位分解能

身の前進運動を利用して、一定の走査幅を持って地表面の一定区域を面積的に走査して行く。又発射されたパルスがアンテナと対象物間の距離の差に応じて異なる伝搬時間で戻って来るので、進行方向と直角方向 (range axis) 方向ともいう) の走査は、マイクロ波ラジオメータのような特別な掃引装置は必要としない。反射信号の伝搬時



第36図 実開口 SLAR の撮像の原理

第5表 現在商業的に利用できる SLAR システム特性の概要

システム名 (製作会社)	波 長 (帯)	開口方式 (R : 実開口 S : 合成式)	距離分解能 (m)	方位分解能 (m)	最大 SWATH 幅 (km)	映 像 縮 尺	偏 波 方 式	アンテナ 長	常用飛行高度 (m)	重 量 (kg)	容(を アン テナ 積 (m ³)	所要電力 (kW)
APQ 102 (Goodyear)	X (3.1 cm)	S	16	16	37	1 : 400,000	HH	4 ft	6,000 12,500	232	0.28	2.95
APQ 97 (Westing- house)	Ka (0.89 cm)	R	11	10 (近距離) 22 (遠距離)	21	1 : 250,000	HH HV	4.26m	6,000	—	—	3.7
APS 94D (Motorola)	X (2.5 cm)	R	30	48 (近距離) 116 (遠距離)	100	1 : 500,000	HH	5.8m	3,500	346	0.41	1.94
P 391 (EMI)	Ka (0.86 cm)	R	15	52 (距離 15km)	28	—	HH	—	—	195	0.44	0.9

間はアンテナと対象物間の距離に、又受信信号強度は対象物の散乱特性に対応するので、これを受信して適当な処理を施せば、空中写真にほぼ類似したひとつづきの帯状映像が得られる。第36図は実開口 SLAR の撮像の原理を示す⁽¹⁾。アンテナ (A) の長軸は、航空機の進行方向と一致しており、航空機の進行方向と直交するように地上に向かって斜め下向にビーム (B) が照射される。ビ

ームは航空機の進行方向に沿っては、できるだけ細く絞ったビームでありビーム幅 β (rad) は、送信波長 λ 、アンテナの開口径 D を用いて

$$\beta \approx 1.22 \times \frac{\lambda}{D}$$

.....(3)

で与えられる。航空機の進行方向の分解能(方位分解能) ρ_x は、ビーム幅 β と斜距離 R_s の積であり、

$$\rho_x \approx 1.22 \times \frac{\lambda}{D} \times R_s \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。斜距離 R_s は航空機の高度を h , 伏角を φ とすれば,

$$R_s = h \operatorname{cosec} \varphi \quad \dots\dots(5)$$

である。航空機の進行方向に直交する方向のビームは扇形ビームである。今航空機のアンテナ利得 G_t が

$$G_t = k(h \operatorname{cosec} \varphi)^2; \quad k \text{ は定数} \quad \dots\dots(6)$$

で与えられるいわゆる「cosec 自乗」型の扇形ビームと仮定する。この時ある地上の一観測点に対するレーダ方程式

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R_s^4} \quad \dots\dots(7)$$

P_r : 受信電力, P_t : 送信電力, λ : 送信波長

R_s : アンテナと観測点間の斜距離, G_t : アンテナ利得

σ : 観測点の散乱断面積

の R_s , G_t に各々(5)及び(6)を代入すれば, 受信電力 P_r は, 伏角 φ には依存しないので, 扇形ビーム内のターゲットは伏角 φ には依存しない信号強度を持って受信される。扇形ビーム中の個々のターゲットはアンテナとターゲット間のパルスの伝搬時間の差によって識別される。スーパーヘテロダイン方式の受信機の出力のビデオ信号は, オシロスコープに表示すれば (C) のように表示される。地上のターゲット a, b, c, d に対応してオシロスコープ上に航空機との距離の順に a, b, c, d と表示される。このビデオ信号は輝度変調されて CRT (D) 上に一本の線として表示される。航空機の移動と共に次々と受信される信号は, CRT 上の同じ場所に表示され, 航空機の数 V_a に同期した速度 V_f で捲取られるフィルム (F) 上の感光乳剤 (E) を逐次感光させ記録され, 一連の映像が得られる。進行方向の分解能 ρ_x は(4)で与えられたが, 斜距離 R_s の分解能 ΔR_s は, 送信パルスのパルス幅 τ と関係して

$$\Delta R_s \approx \frac{1}{2} C \tau \quad \dots\dots(8)$$

で与えられる。C は光の伝搬速度である。この斜距離 R_s に対応する地上距離 R_g の分解能 ΔR_g は, 伏角 φ を用いて

$$\Delta R_g = \Delta R_s \times \sec \varphi = \frac{1}{2} C \tau \times \sec \varphi \quad \dots\dots(9)$$

で与えられる。

従って送信出力が許す限り, パルス幅を細くすれば, 距離分解能は改善されるが, この信号を歪みなく伝送, 再生するために必要な送受信機, ディスプレイの所要帯域 W は,

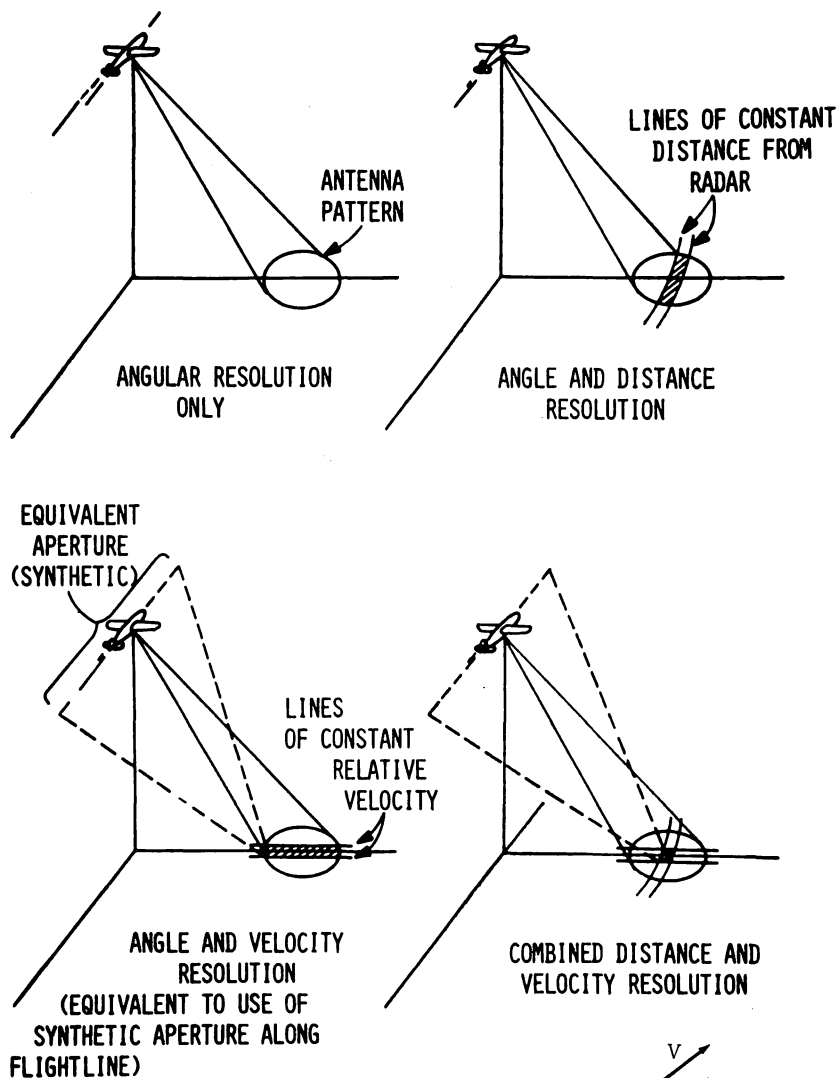
$$W \approx \frac{1}{\tau} \quad \dots\dots(10)$$

で与えられる。例えば ΔR_s を 15cm とするためには, パ

ルス幅 τ は 1 ナノ秒, 所要帯域 W は 1 GHz となる。この広帯域に一樣に平坦な伝送特性をもたせることは簡単なことではなく, パルス圧縮法等の技術が利用される。しかし通常の SLAR の距離分解能は比較的満足すべき値が得られている。問題なのは, (4)で与えられる航空機の進行方向の分解能 ρ_x である。例えば波長 λ が 1 cm, アンテナの開口径 D が 5 m の時のビーム幅 β は 2 ミリラジアン, 斜距離 R_s が 5 km に対して ρ_x は 10m となる。 ρ_x についての分解能を高めるためにはアンテナの開口径を大きくすればよいわけであるが, これは航空機や人工衛星に搭載される事を考慮すれば限度がある。 ρ_x を小さくするために用いられるのが合成開口方式 (synthetic aperture system) である。第 5 表は駒井氏の論文よりそのまま引用したもので, 現在商業的に利用できる SLAR システム特性の概要をまとめたものである。

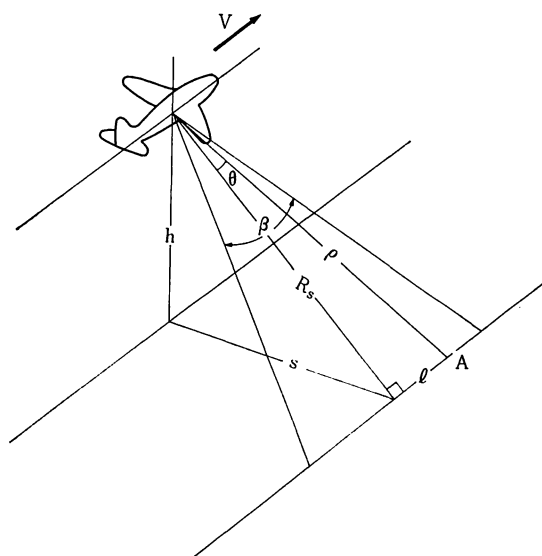
5.2 レーダの分解能について

合成開口方式を説明する前にレーダの方位分解能及び距離分解能について考察する。第 37 図 (1~4) は, これらの分解能について定性的に説明する¹¹⁾。第 37-1 図 (上段左) に示すように航空機が自分の進行方向と直交するような方向に地表面に向って, 斜下向に電波を発射したとする。この時の円錐形のアンテナパターンの地上軌跡は, 第 37-1 図で示されているように楕円形を示し, 分解能は, アンテナのビーム幅 (角度分解能) により決まり図の楕円形とはほぼ一致する。マイクロ波ラジオメータの分解能はこの場合に相当する。第 37-2 図 (上段右) は, 測距を行なうことにより距離分解能を上げることを示す。第 37-2 図の斜線の細い帯状の部分が航空機との距離が一定の領域を示す。短いパルスを照射し, 測距を行なえば異なった距離からの受信信号を分離識別することが可能となる。この場合は第 37-1 図のアンテナパターンの地上軌跡の楕円形の部分に対応する分解能は, 第 37-2 図の斜線で示された細い帯状の部分のように減少する。航空機とターゲットとの距離が無限に大きいと航空機とターゲットの距離一定の地上軌跡は, アンテナパターンの地上軌跡の楕円形の部分内において航空機の進路に平行な直線となる。これは実開口アンテナの扇形ビーム内のターゲットがアンテナとターゲット間の信号の往復の伝搬時間の差により分離識別されたことに対応する。第 37-3 図 (下段左) で示すように, ドップラシフトを測定し, 距離変化率を求めることにより方位方向の分解能を上げることができる。第 37-3 図の斜線の細い帯状の部分が航空機との距離変化率一定の領域を示す。距離変化率の測定を行なえば, 図の楕円形の部分より, 一定の距離変化率の地域からの信号を分離識別す



第37図 レーダと分解能

ることが可能となり、分解能を上げることができる。航空機とターゲットとの距離が無限に大きいと航空機とターゲット間の距離変化率一定の地上軌跡は、アンテナパターンの地上軌跡の楕円形の部分内において航空機の地上軌跡に直角な直線となり、距離一定の地上軌跡と直交する。ドップラシフトを測定し方位分解能を上げるとは、合成開口方式と実質的には同一である。第37-4図（下図右）にみられるように、距離変化率の測定データ（合成開口方式と実質的には同じ）と測距データが同時に用いられるならば、両者の交叉した第37-4図の小領域のように、アンテナパターンの地上軌跡の楕円形の部分と比較すると分解能を著しく高めることが可能となる。合成開口方式のSLARはこの場合に相当する。第37-3図のドップラシフトを測定する場合の方位分解能



第38図 ドップラシフトを測定する時の方位分解能を求めるための図

について第38図で示す。地上のA点と航空機の距離 ρ は

$$\rho = \sqrt{l^2 + s^2 + h^2} \quad \cdots \cdots (11)$$

で与えられる。航空機が図のように x 軸と平行に速さ V で飛んでおり、A点の距離 ρ の変数の内、 s , h が一定で l のみ変化すると仮定する。 l の時間的変化率 $\dot{l}$ は V と等しい。この時、距離変化率 $\dot{\rho}$ は、

$$\dot{\rho} = \frac{l}{\rho} \dot{l} = \frac{l}{\rho} V = V \sin \theta \quad \cdots \cdots (12)$$

で与えられる。従ってドップラシフト $\Delta\nu_D$ は、

$$\Delta\nu_D = \frac{2}{\lambda} \times \dot{\rho} = \frac{2}{\lambda} \times \frac{l}{\rho} V = \frac{2}{\lambda} V \sin \theta \quad \cdots \cdots (13)$$

で与えられる。距離 R_s が l に比べて十分大きい時は、

$$\Delta\nu_D \approx -\frac{2}{\lambda} \frac{V}{R_s} \times l \quad \cdots \cdots (14)$$

となり、ドップラシフト $\Delta\nu_D$ は l のみに比例して変化するので、ドップラシフト $\Delta\nu_D$ を解析することによって、異った l を識別することができる。つまりドップラシフトを測定することにより第37-3図で示したように方位分解能を上げることが可能となる。ドップラバンド幅 B_d は $\theta = \beta/2$ の時の $\Delta\nu_D$ の2倍ゆえ

$$B_d = \frac{4}{\lambda} V \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad \cdots \cdots (15)$$

で与えられる。そのようなバンド幅のデータは、 $\Delta t \approx B_d^{-1}$ 程度の時間的な分解能を有する。従って航空機の進行方向の分解能（方位分解能） ρ_x は、

$$\rho_x = V \times \Delta t = \frac{\lambda}{4 \sin \left(\frac{\beta}{2} \right)} \quad \cdots \cdots (16)$$

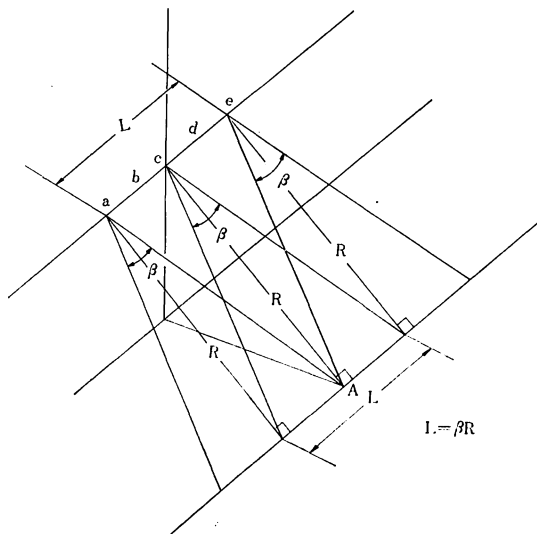
で与えられる。 β が小さい時には、

$$\rho_x \approx \frac{\lambda}{2\beta} \quad \cdots \cdots (17)$$

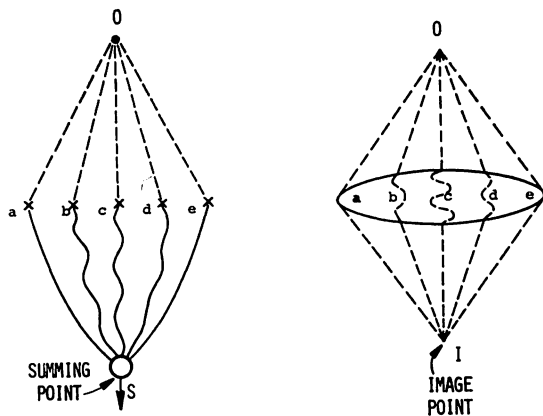
で与えられる。航空機搭載のアンテナの実開口径を D 、送信波長を λ とすると、 $\beta \approx \lambda/D$ で与えられるゆえ、

$$\rho_x \approx \frac{\lambda}{2} \times \frac{D}{\lambda} \approx \frac{D}{2} \quad \cdots \cdots (18)$$

となる。つまりドップラシフトを測定することによって得られる方位分解能は、(18)で与えられるように、航空機搭載のアンテナの実開口径 D の程度となる。これは合成開口方式で得られる方位分解能と一致する。第39図に示すように、航空機搭載のレーダから斜距離 R にあるターゲットA点は、レーダが a から e まで距離 $L \approx \beta R$ だけ移動する間、レーダによって照射される。もしも航空機に搭載されている現実のアンテナが航空機の進行方向に伸びている長さ L の仮想的な一次元のアレイアンテナ（アレイエレメントは、 $a \sim e$ に位置していると仮想する）の一つのアレイエレメントであり、航空機の移動に伴い、航空機に搭載されている現実のアンテナが、時間的に次々と仮想的な一次元アレイのアレイエレメン



第39図 航空機搭載のレーダから斜距離 R にあるターゲットA点はレーダが距離 L だけ移動する間に照射される。

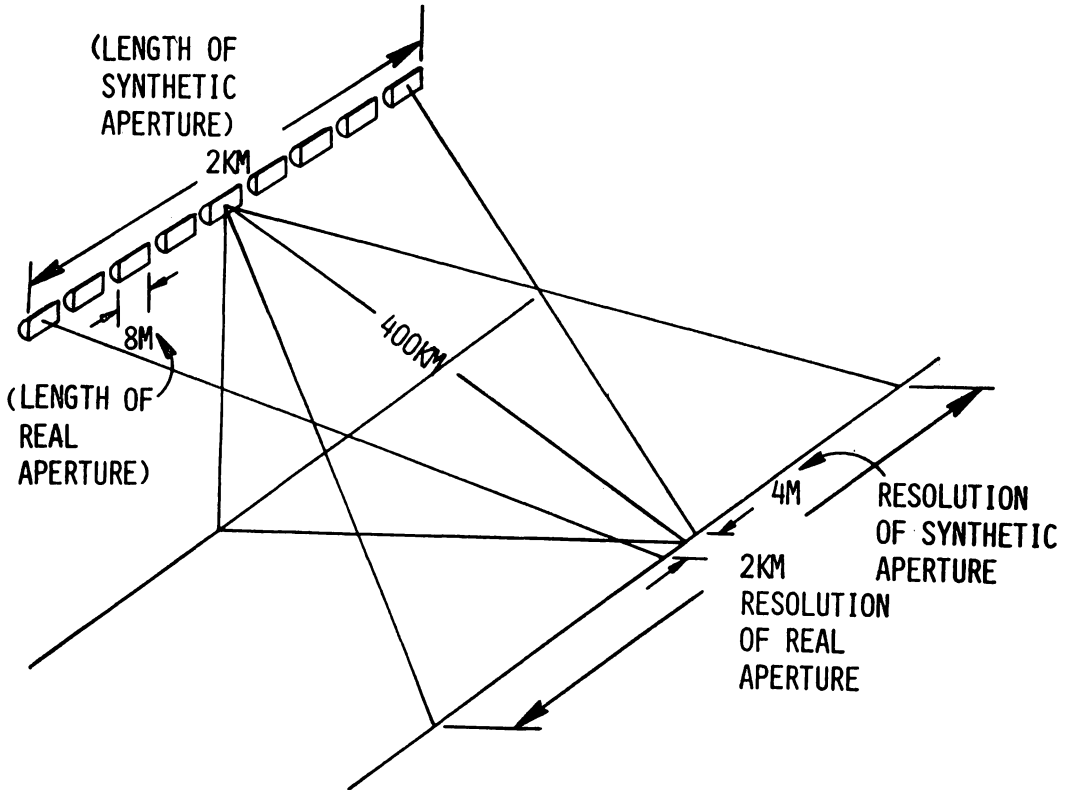


第40図 レンズによる結像と実又は合成開口アンテナアレイによる結像の比較

トの位置 ($a \sim e$) を占めて行くこととみなすことができるならば、現実のアンテナが仮想的なアンテナの開口径上を a より e まで移動して行くにつれ、各点で受信された信号の振幅と位相を一旦蓄えておき、適当に工（光）学的に処理することによって、実質的には大きさ L の大開口径を持つアンテナと同等の能力を持つアンテナを合成することができるであろう。このようにして信号処理することにより合成される仮想的なアンテナのことを合成開口アンテナ（synthetic aperture antenna）と呼ぶ。この合成開口アンテナのビーム幅 β' は、

$$\beta' \approx \frac{\lambda}{L} = \frac{\lambda}{\beta R} \quad \cdots \cdots (19)$$

と期待される。 $\beta \approx \lambda/D$ ゆえ



第41図 合成開口アンテナ（長さ 2 km）と実開口アンテナ（開口径 8 m）の方位分解能の比較，波長は，4 cm

$$\beta' \approx \frac{D}{R} \quad \dots\dots(20)$$

となりこの合成開口アンテナの対応する方位分解能 ρ_x は

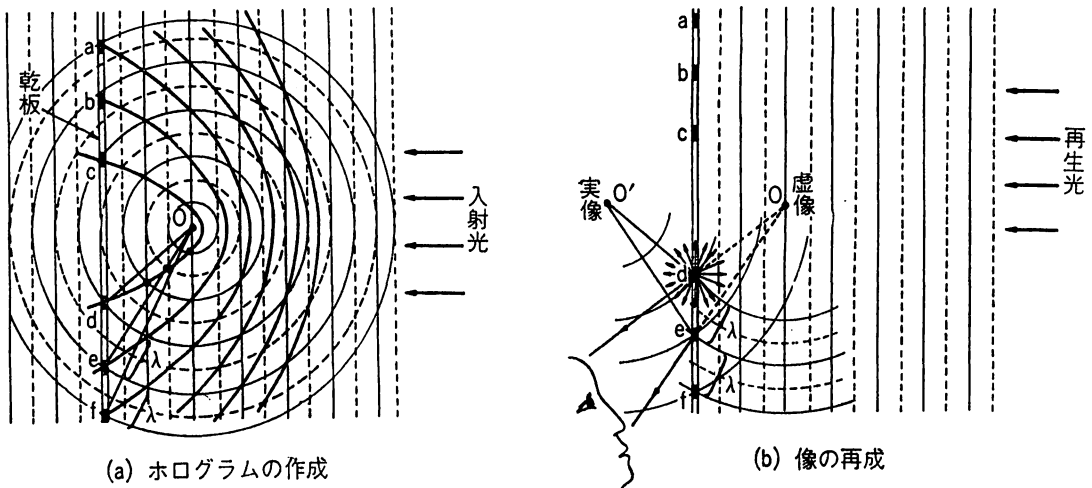
$$\rho_x \approx \beta' R = D \quad \dots\dots(21)$$

となる。厳密な計算によると， ρ_x はほぼ $D/2$ に等しく，ドップラシフトを観測することにより期待される方位分解能と同じ値となる。合成開口の技術は光学的なレンズの作用と比較することによって理解される。第40図の左図は実のアンテナアレイ（アレイエレメントは，a～eにある）を，又右図は光学的レンズを示す⁽¹⁾。両図共にO点を対象物の位置とし，I点を結像された像の位置（結像点と）する。右図のレンズにおいては，OからIに達するどの経路を取ってみても，光の伝搬時間は同一である。例えば，経路OaIと経路OcIの光の伝搬時間を比較する。レンズのガラス部分の光の伝搬速度は遅いため，直線距離ではOaIよりも短いOcIの経路もガラスの部分の厚みがOaIよりも厚いため，OaIの経路と同じだけ時間がかかるのである。左図の実開口アレイにおいても右図のレンズと同じように，O点から発射される電磁波をS点に結像するためには，伝送路の長さを調節する必要がある。そのためにはcS間の伝送路

の長さをaS間やeS間の伝送路の長さよりも長くして，O点の像をうまくS点に結像するように工夫すればよい。合成開口アレイにおいては，航空機はその飛行航路上にあるa～e点（実開口アレイのエレメントの占める位置に対応する）をそれぞれ異った時刻に通過する。a～e点において送信され，戻って来た信号は，位相を含めて記録される。記録は通常フィルム上にホログラムの形式で記録される。航空機がe点を通過した後に記録された信号は処理される。フィルムの処理は通常レーザー光をフィルムに照射し光学系を用いて光学的に処理され，実開口系と同様にS点に像が結像される。第41図は衛星に搭載された実開口径8 mのアンテナから次々と電波を送出することによって作られた長さ2 kmの合成開口アンテナを示す⁽¹⁾。電波の波長を4 cm，距離Rを400 kmとすると，実開口アンテナによる分解能は2 km，合成開口アンテナの分解能は4 mとなる。遠距離からこのように分解能を達成するためには，実際の所，送受信機システム，搭載機の姿勢等に高度の安定性が要求される。

5.3 マイクロ波ホログラフィと合成開口方式のSLAR

合成開口方式では，合成開口アンテナの各々のアレイ



第42図 ホログラムの原理

エレメントから送信され戻って来た信号を位相を含めてフィルム上に記録する。このフィルムはマイクロ波ホログラムと考えられ、ホログラフィ的に光学系を用いて処理され、結像され、解像度の高いレーダ画像が得られる。マイクロ波ホログラフィの応用の中でも、この SLAR への応用は最も有効なものであり、邦文の解説もいくつかあるが、飯塚氏の解説がわかりやすいので引用させていただく^{(17), (18)}。

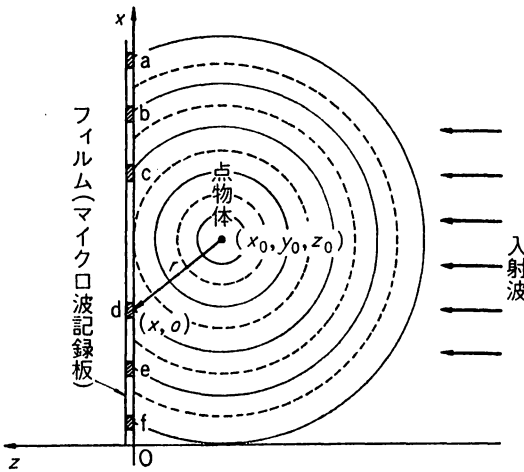
(i) ホログラムの原理の平易な解説

最初に光のホログラムについて解説する。普通の写真はレンズを使って実像を乾板の上に作り像を記録するわけであるが、ホログラムによる記録は、実像を記録するのではなく、物体からの散乱光の分布を乾板上に記録する。物体の形と散乱光の分布とは1対1の関係があるので、散乱光の分布状態が記録できれば、物体の形状に関する情報は全部集録できたことになる。物体からの散乱光の分布の記録はX線解析で行なうように、物体の近傍に乾板をおいて露出すればできそうであるが、この方法では位相の記録ができないので情報が一部脱落し、完全な像を再生することはできない。ホログラムでは位相の情報も含めて乾板に記録する。そのために物体から散乱された散乱光、すなわち物体波 (object wave) の他に参照波 (reference wave) を同時に乾板に照射し、両者の干渉パターンを記録する。第42図の左図で示すように、右から左に向けて平面波が入射して来たとする⁽¹⁷⁾。実線は波の山、破線は波の谷を意味する。この波が点物体Oを照射すると、散乱を起し、点物体を中心として球面波が広がって行く。この球面波 (物体波) と元の平面波 (参照波) との間に干渉が起り、その振幅は実線と点線の交わる点で零となり、実線と実線、または点線と点

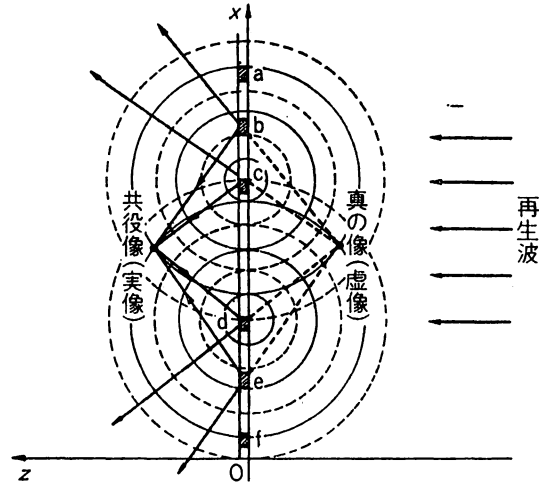
線の交わる点で振幅は最大となる。この空間中に同図に示すように、写真の乾板をおいて露出し現像すれば、光が強かった a, b, …… f 点では暗く、その中間の点では透明である干渉縞が記録される。これがフレネルゾーンプレートであり、点物体のホログラムである。このホログラムの再生は、第42図の右図に示すように、再生平面波を照射することにより行なわれる。この再生光は黒点 a ~ f によって散乱を起す。第42図の右図の d 点で示すように散乱はあらゆる方向に向って一様に生ずる。その散乱光の内でも O 点に向って散乱するものについて注目する。又 e 点においても d 点同様全方向に散乱する波についてのみに注目する。第42図の左図から明らかなように、光路 dO と光路 eO の光路差は丁度一波长であり、O 点では d 点からの波と e 点からの波は同位相になる。同様にして a ~ f 点から散乱された全ての波は O 点で同位相となる。従って O 点是他の点に比べて明るくなり、点物体の像が O 点に再生される。乾板に対して対称にある点 O' においても散乱光の位相は同位相となり、明るくなり点物体の像の再生ができる。O' 点、O 点共に実像であるが、第42図の右図のように目を乾板を通して覗き込む様な位置において O 点を観測すれば O 点を虚像として明るく見ることができる。このホログラムを覗けば、観測者に立体感を与える像が得られる。

(ii) マイクロ波ホログラフィ

原理は光の場合と全く同じであり、光のかわりにマイクロ波を使ってホログラムを作る。第43図⁽¹⁷⁾ に示すように、座標系 (x, y, z) をとる。簡単のために点物体を点 O ($x_0, y_0=0, z_0$) におき、波長 λ のマイクロ波を右から左に向けて入射する時、この点物体からの散乱波をフィルム (マイクロ波記録板) 上に記録した場合、



第43図 点物体から出た散乱光のフィルム上の分布



第44図 ホログラムからの像の再生

そのフィルム上の散乱分布を表わす式を求める。散乱波は点 $O(x_0, 0, z_0)$ を中心にして一様に広がる球面波と考える。この球面波、すなわち物体波は、フィルム上の点 $d(x, 0, 0)$ で、

$$\left. \begin{aligned} \theta(x, 0, 0) &= \frac{A}{r} e^{jk'r} \\ r &= \sqrt{(x-x_0)^2 + z_0^2}, \quad k' = \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \right\} \dots\dots(22)$$

で与えられる。 r は O 点と d 点の二点間の距離であり、 $z_0^2 \gg (x-x_0)^2$ の条件が満たされる時には、

$$r \approx |z_0| \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2}{z_0^2} \right) \dots\dots(23)$$

と近似される。この時、散乱光、すなわち点 $O(x_0, 0, z_0)$ から発射した球面波の点 $(x, 0, 0)$ における値は、

$$\theta(x, 0, 0) \propto \exp \left[-\frac{1}{2} j k' \frac{(x-x_0)^2}{z_0} \right] \dots\dots(24)$$

となる。この物体波と共にフィルムに垂直に振幅 1 の参照波（平面波）が入射されるわけであるが、この時フィルム上の両波の合成電界のエネルギー分布は、

$$|1 + \theta(x, 0, 0)|^2 \dots\dots(25)$$

となる。このフィルムを露出後処理してできたホログラムの透過度は、電界のエネルギー分布に比例するものとする。次にできたホログラムを $1/M$ に縮尺すると、その透過度の分布 t は、

$$\begin{aligned} t(x) &\propto 1 + |\theta(Mx, 0, 0)|^2 + \theta(Mx, 0, 0) \\ &\quad + \theta^*(Mx, 0, 0) \end{aligned} \dots\dots(26)$$

となる。 $t(x)$ の透過分布を持つこのホログラムに波長 λ のレーザ光の再生光を照射すれば、ホログラム上にある黒点がそれぞれ散乱の中心となり、第44図のように、たくさんの球面波が発生する⁽¹⁷⁾。点 $(x_i, 0, z_i)$ における散乱波の電界 $E(x_i, 0, z_i)$ はこれらの球面波を全

部合成したものであり、

$$\left. \begin{aligned} E(x_i, 0, z_i) &\propto \int_{-\infty}^{\infty} dx t(x) \exp \left[j k \frac{(x-x_i)^2}{2|z_i|} \right] \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

となる。像の再生にあたり26の第1項と第2項は雑音となり、第3項と第4項のみが像に関係するので、これらの項だけに注目すると、24, 26, 27より、

$$\begin{aligned} E(x_i, 0, z_i) &\propto \int_{-\infty}^{\infty} dx \exp \left[\frac{j k}{2} \left\{ \frac{1}{|z_i|} + \frac{M^2}{m z_0} \right\} x^2 \right] \\ &\quad \times e^{-j^2 \pi f x} \end{aligned} \dots\dots(28)$$

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{x_i}{|z_i|} + \frac{M x_0}{m z_0} \right) \\ m &= \frac{k}{k'} = \frac{\lambda}{\lambda} \end{aligned} \right\} \dots\dots(29)$$

式28, 29の符号干の内一は26の第3項に又+は第4項に対応し、複号は同順である。

もし

$$\frac{1}{|z_i|} + \frac{M^2}{m z_0} = 0 \dots\dots(30)$$

の条件を満たす面上で観測すれば、

$$E(x_i, 0, z_i) \propto \delta(f) = \delta \left(\frac{1}{\lambda} \left(\frac{x_i}{|z_i|} + \frac{M x_0}{m z_0} \right) \right) \dots\dots(31)$$

となり、

$$x_i = \pm \frac{M x_0}{m z_0} \times |z_i| \dots\dots(32)$$

の点で $E(x_i, 0, z_i)$ の値は急激に大きくなり、他の点では零となる。すなわち、この点に点物体の像が再生される。式30と32より再生像は、

$$x_i = \frac{x_0}{M}, \quad z_i = \pm \frac{m z_0}{M^2} \dots\dots(33)$$

の点に真の像(虚像)及び共役像(実像)が再生される。次に合成開口方式の SLAR の場合であるが、第45図で示されるように⁽¹⁸⁾、合成開口方式の SLAR は進行方向に直角方向の分解能をパルス方式で得、進行方向の分解能を上述の合成開口アンテナの方式で得ようとするものである。今簡単のため、ターゲットが1個しかなく、第45図の座標系の $(x_0, y_0, 0)$ に存在しているとす。今航空機は時刻 t に、 $(x, 0, h)$ の位置にあるとする。航空機からターゲットまでの直線距離を r とすると、

$$r_0 = \sqrt{y_0^2 + h^2} \quad \text{とおくと, } r_0 \gg |x - x_0| \quad \text{の時,}$$

$$r = \sqrt{r_0^2 + (x - x_0)^2} \approx r_0 + \frac{1}{2r_0}(x - x_0)^2 \quad \dots\dots 34$$

となる。今、航空機から発射される波を

$$S(t) = ae^{-j\omega t} \quad \dots\dots 35$$

で表わせば、ターゲットから散乱して返って来た電波 $R(t)$ は、

$$R(t) = a'S\left(t - \frac{2r}{c}\right) \quad \dots\dots 36$$

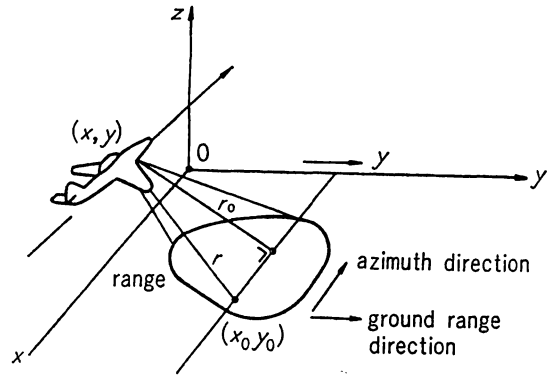
となる。この散乱波を増幅した後に発射波と合成すると、航空機の位置 $(x, 0, h)$ における合成電力 $I(x)$ は、

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{1}{2}(S(t) + R(t))(S(t) + R(t))^* \\ &= |a|^2 \left(1 + \frac{1}{2}e^{j2kr} + \frac{1}{2}e^{-j2kr} \right), \quad k = \frac{\omega}{c} \end{aligned} \quad \dots\dots 37$$

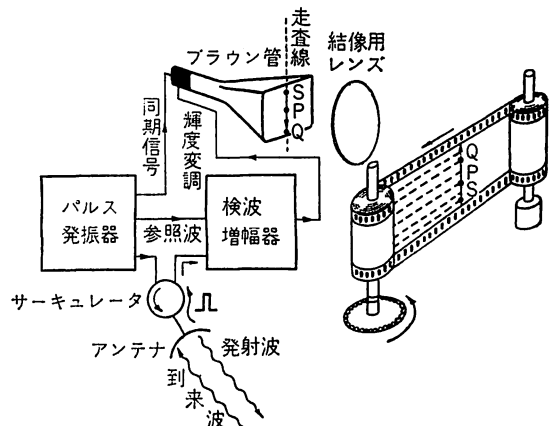
となる。ここで a' の値が a となるように増幅されたとする。式37に34を代入すると、

$$\begin{aligned} I(x) &= |a|^2 \left(1 + \frac{1}{2} \exp \left[j \left\{ \frac{k}{r_0} (x - x_0)^2 + \phi \right\} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \exp \left[-j \left\{ \frac{k}{r_0} (x - x_0)^2 + \phi \right\} \right] \right), \\ \phi &= 2kr_0 \end{aligned} \quad \dots\dots 38$$

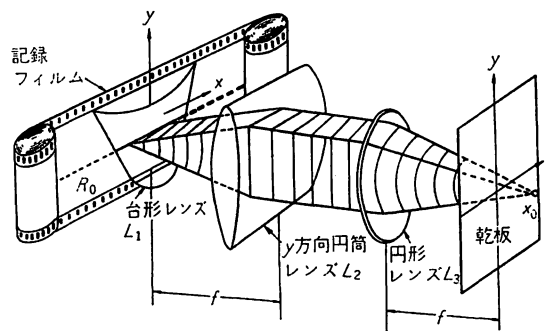
となり、 $r_0 = 2z_0$ とおけば38を36に代入したものと一致する。従って38は、 $x = x_0$ に中心を持つ1次元ゾーンプレートを表しており、地上のターゲットのホログラムと考えられる。航空機が第45図のように x 軸に平行に (r_0 は一定)、 x_0 を中心として合成開口アンテナの開口径に等しい距離を動くにつれて、送信波と散乱波の干渉を次々と記録することにより、地上ターゲットの1次元ホログラムが得られるのである。従ってフィルムの上に透過度の分布が38の値に比例するような一本の線を描き、これに平行な光線をあてると、光は集光して点物体の存在がわかる。次にターゲットが一個ではなく無数にある場合には、到来波の内で航空機の航路から最も近距離にある航路に平行な直線上にある形体から出たものを最初に選別する。第46図は、その方法を示す⁽¹⁸⁾。発振器から



第45図 合成開口方式 (synthetic aperture system) のSLAR



第46図 SLAR 記録装置



第47図 合成開口方式 SLAR の記録フィルムからレンズ系を使って像を求める方法

でたマイクロ波のパルスはアンテナから発射される。到来波は、サーキュレータを通じて検波、増幅器に入り、その出力がブラウン管のラスタの輝度を変調する。ラスタは一本の走査線のみ走査され、ラスタの像が走査線と直角方向に流れているフィルム上に作られる。マイク

ロ波パルスの発射と同時にブラウン管の走査は始まり、ラスタはSからQまで直線上を進む。ターゲットから波が返って来た時点において、ラスタの輝度が上がる。例えばラスタがP点で明るくなったとすると、ブラウン管面上のSPの長さは、電波がターゲットまで行って帰って来るに要する時間をあらわし、遠いターゲットから帰って来た波程、SPの長さは長く、又ターゲットの反射係数が大きい程P点の輝度は大きくなる。このようにしてフィルム上に地上の各々のターゲットに対応した一次元ゾーンプレート列ができることになる。このフィルムは地表面のホログラムであるから第47図に示されているようなレンズの組合わせを用いて再生光を照射することによって地上のレーダ映像が乾板上に結像されることになる。

6. SLAR による観測

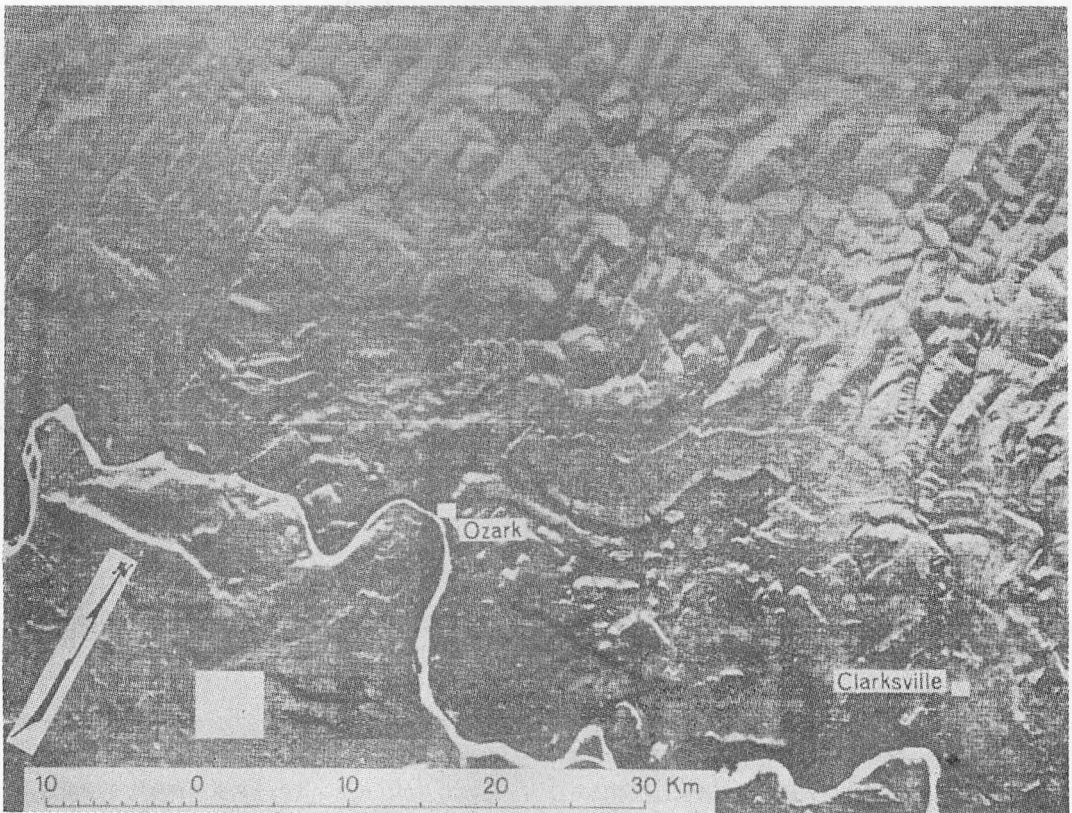
6.1 SLAR の特長

SLAR の特長のいくつかを箇条書にして示す。

- (i) 昼夜の区別なく用いられる。日照時間の短い冬の極地方の観測に用いて効果がある。
- (ii) 積乱雲や雨雲が厚く覆っているような場合以外

は、雲の影響をうけることなく撮影可能である。

- (iii) (i), (ii) の特長から、他の波長のセンサよりも観測可能な時間を多く取ることができる。例えば、航空写真の撮影において必要とされている気象条件である雲量2以下の快晴日は、我国の全国平均で年間せいぜい40日程度である。
- (iv) ほとんど唯一の能動的センサである。従って、太陽光線や物質の輻射等の天然の電磁波エネルギーを利用する受動的センサに宿命的な観測条件の時間的、季節的変動を免れることができ、同一の観測条件の下で繰り返しデータを取得できる。
- (v) 分解能は、航空写真に比べれば若干劣るが、合成開口法を用いれば分解能を上げることも可能である。
- (vi) 多波長（マルチスペクトル）や多偏波（垂直偏波と水平偏波の区別、like-polarization と cross-polarization の区別）を用いることによって、多くの情報を含む、異なった映像が得られる。
- (vii) レーダは、植生や乾燥土壌中をある程度突き抜けるので、表層被覆下の地質・構造に関する知見を得ることもできる。
- (viii) 地表面の散乱係数は、含水率によって大きく変化



第48図 実開口 SLAR AN/APQ-69 によるアーカンソー州 Ozark Clarksville 地域及び Boston 山脈の南の部分を示すレーダ映像

するので、農林、土木等の分野でとりわけ重要な土壌中の水分について知見を得ることができる。

- (ix) レーダ映像では、水系が黒く明瞭に表現されるために、全体的、または局所的な水系の配列、水系パターンの変化と分布の状況、水系密度の変化、水系の深さ等が容易に判別される。
- (x) 航空機の側を一定の伏角で地面を照射して得られる SLAR の映像は、低い太陽角度によって撮影される LSAP (Low Sun Angle Photography) と似た効果を画像に与える。このため陰影部の情報は失われる反面、地形に表わされた断層や褶曲を反映した地質構造が一段と強調されて、映像上に記録される特性も認められる。
- (xi) 航空写真に比べて短時間に広い領域の映像を得ることが可能である。例えば、1971年に行なわれたニカラグアの全土 119,000km² の調査は、78.6時間の飛行時間でくまなくカバーされたという。作業能率は 1,500 km²/時間 である。又コストも具体的な一例を示すと、0.6~1 ドル/km² で、6 ドル~10ドル/km² の航空写真よりは安価である。航空写真においては、天候の好転を待つ待ち時間のコストが全経費の50%にのぼることもしばしばである。
- (xii) 非写真映像方式で、データが最初から電気信号で与えられるので、リモートセンシングデータとしての最も重要な性質のテレメトリーに適している。又データは磁気テープに記録できるので計算機による画像処理も可能である。

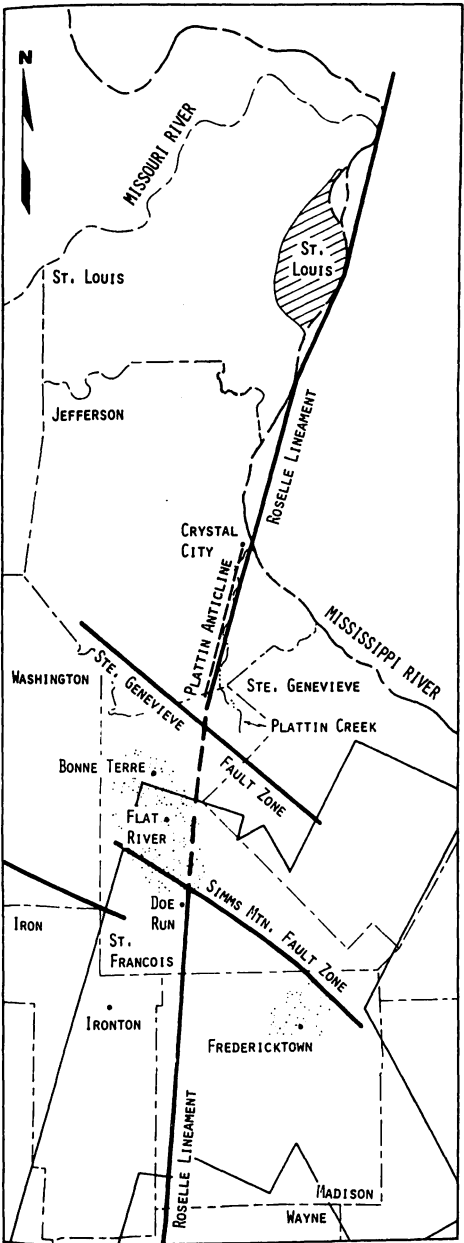
6.2 SLAR による観測例

SLAR は、地質学、地形学、地理学、水理学、農業、海洋学等の多くの分野において有効に利用されている。以下でいくつかの観測例を示す。

(i) 地質学への応用

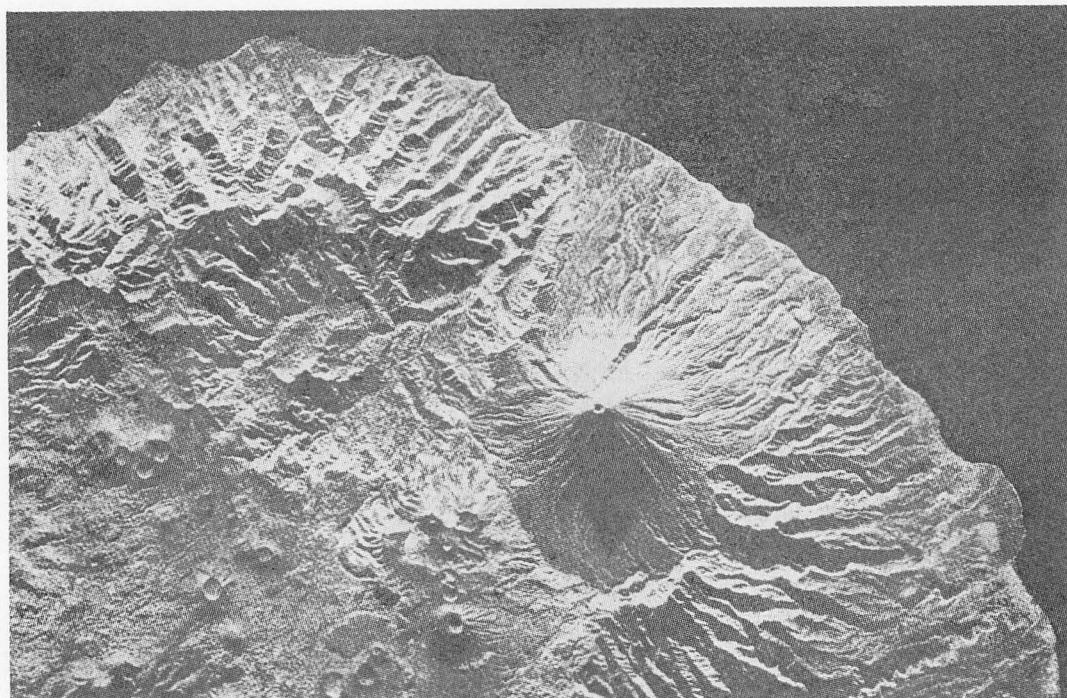
第6表 SLAR AN/APQ-69 システム概要

レーダ周波数	Xバンド (波長は 3.2cm)
アジマス方向ビーム幅	0°.125
パルス幅	0.1μsec
パルス繰り返し周波数	1000~2000 パルス/秒
パワーピーク値	180~250kW
タイプ	実開口系
アンテナ	長さ15m (航空機の下にとりつける) ±4.5° の安定性
作図範囲	航空機の左右 2.8~90km
距離分解能	15m
アジマス方向分解能	280m (一番遠距離の90kmの時)

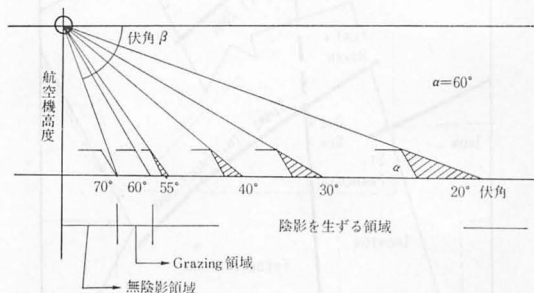


第49図 東部ミズーリ地区の Roselle lineament と鉛、亜鉛鉱床

レーダ画像は地質学において広範に利用されつつある。SLAR の地質調査における最もめざましい効果は、断層や節理系等のリニアメント (線状構造) に対するすぐれた検出能力にある。第 48 図は、第 6 表で示す実開口 SLAR AN/APQ-69 によるアーカンソー州 Ozark, Clarksville 地域及び Boston 山脈の南の部分を示すレーダ画像である⁽²²⁾。高度は、12,195 m である。図の右側上の部分の Boston 山脈の南端に沿って



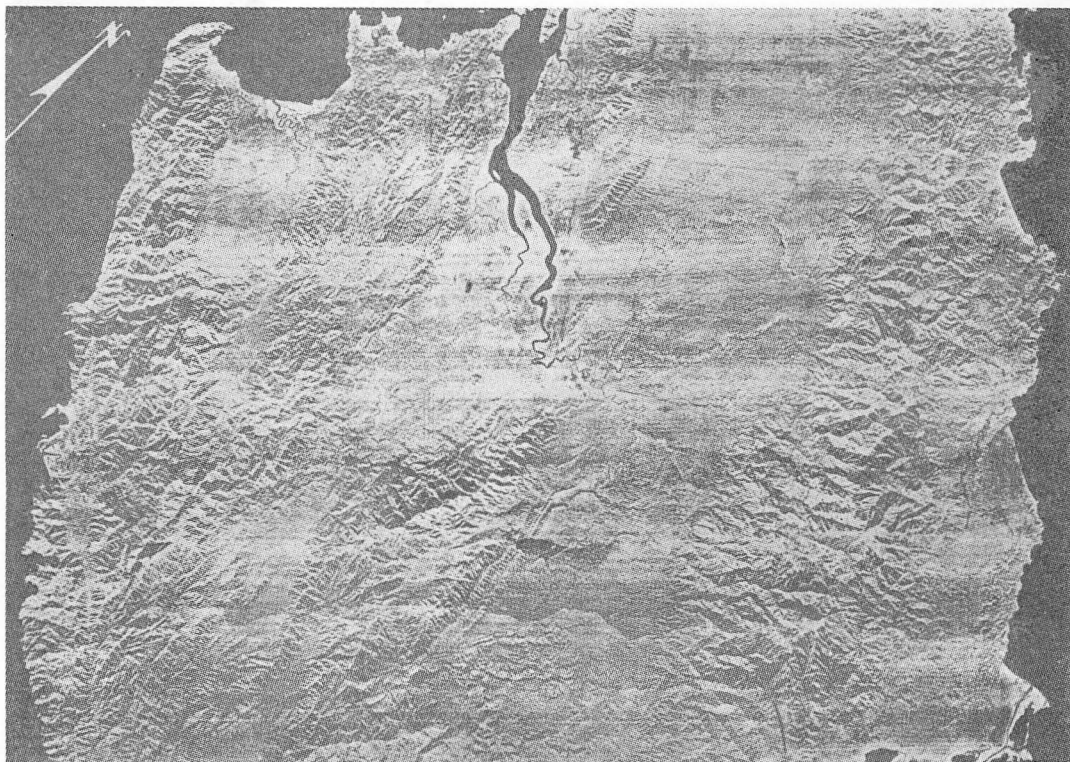
第50図 実開口 SLAR AN/APQ-102 によるバリ島の火山地域のレーダ映像



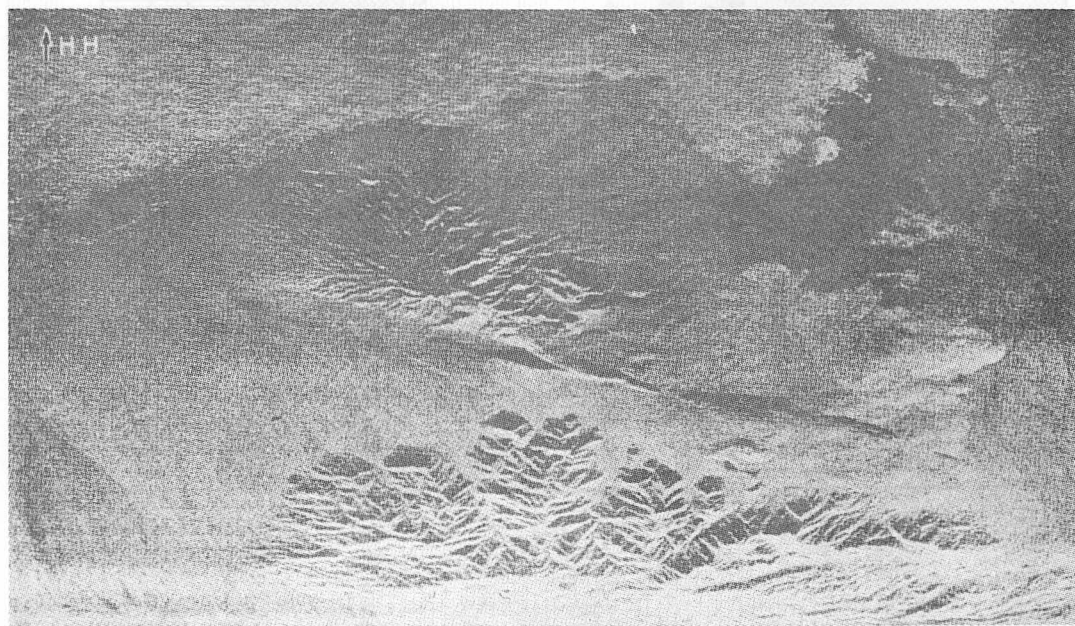
第51図 二次元的地形による SLAR の陰影効果

はっきりと北に向うリニアメントが何本もみられる。東部ミズーリ地区の Roselle lineament もレーダ画像によって明らかにされたものである。第49図ではレーダ画像と地上からの観測によって明らかにされた部分の両方が示されている⁽¹⁾。又、リニアメントに交わる断層の部分も示されている。影をつけられた部分は広範な鉛と亜鉛の鉱床を示す。レーダ画像は新しい鉱床を発見するためにも有効であろう。SLAR による地質調査において重要な意義を持つのが地物による陰影効果である。陰影効果は、レーダ画像の判読に際しても、立体感を浮き上がらせる上において有効である。第50図は、バリ島の火山地域のレーダ画像であるが陰影効果を示すよい実例である。波長は3.1cmで第5表の AN/APQ-102 のレーダシステムによる測定である⁽¹⁰⁾。SLAR では撮影高度、

伏角、距離等の組み合わせによって地物の陰影長を変えることができる。SLAP の航空写真が太陽からの平行線で観察するのに対し、SLAR は低い位置にある点光源からの照射で観測している点で異なる。従って第51図で示すように、陰影は近い部分から遠い部分に向って増大する⁽¹³⁾。この時、地物の背面の傾斜角 (α) が伏角 (β) より小さいと陰影は生じない。伏角は小さい方がわずかな傾斜地を強調するから熱帯林のような起伏に乏しい地域の調査には一般に有用と言える。しかし山岳地帯では事情は異り伏角が小さいと陰影が長すぎて多くの情報が失われる。SLAR による広範な地域の地図作成において最も有名なのはパナマの Darien 地区及びこれに隣接した北西コロンビアの一部分の地域の例であり、今まで邦文誌でも度々紹介されている^{(11), (12)}。第52図は1967年の1月下旬と2月上旬に、米軍とパナマ政府の共同で作成されたこの地域のレーダ画像である^{(20), (11)}。地上の各点に対し、4つの異なる方向からの測定が行われた。航空写真を用いてこの地域の地図を作成する試みは約四分の一世紀もの長い間試みられて来たが、この地域は一年中の殆んどが雲に覆われているので、ほんのわずかな部分が今まで地図になっていたにすぎない。レーダ映像と ground truth をもとにしてこの地域の地質図、地形図、植生図、水系図が得られている⁽¹¹⁾。第53図、第54図は、Dellwig と Moore により得られた NASA のリ



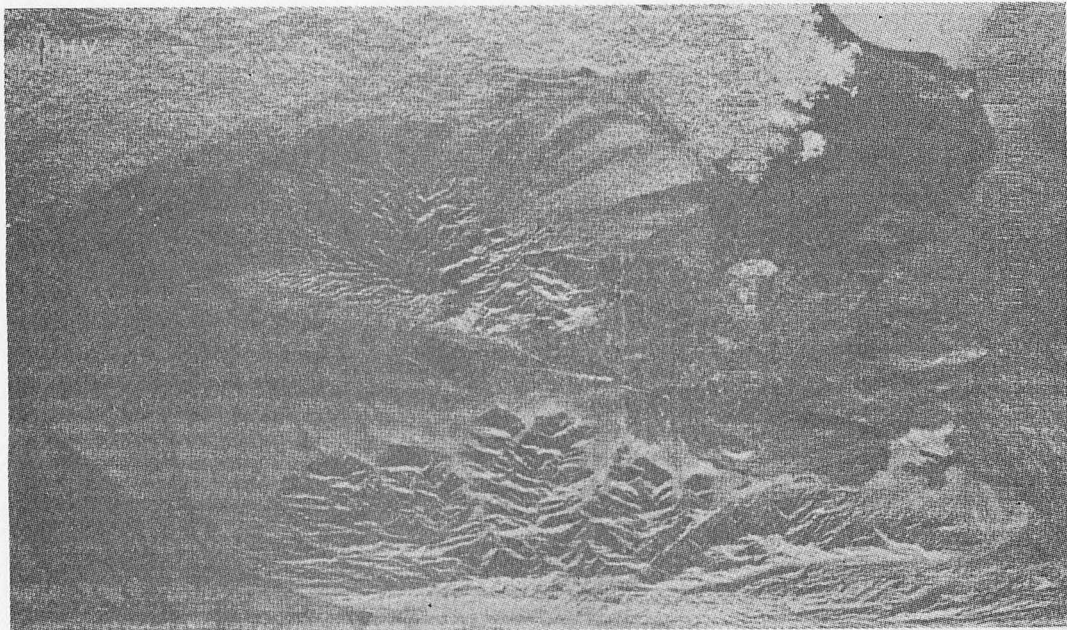
第52図 パナマの Darien 地区及びこれに隣接した北西コロンビアのレーダ映像



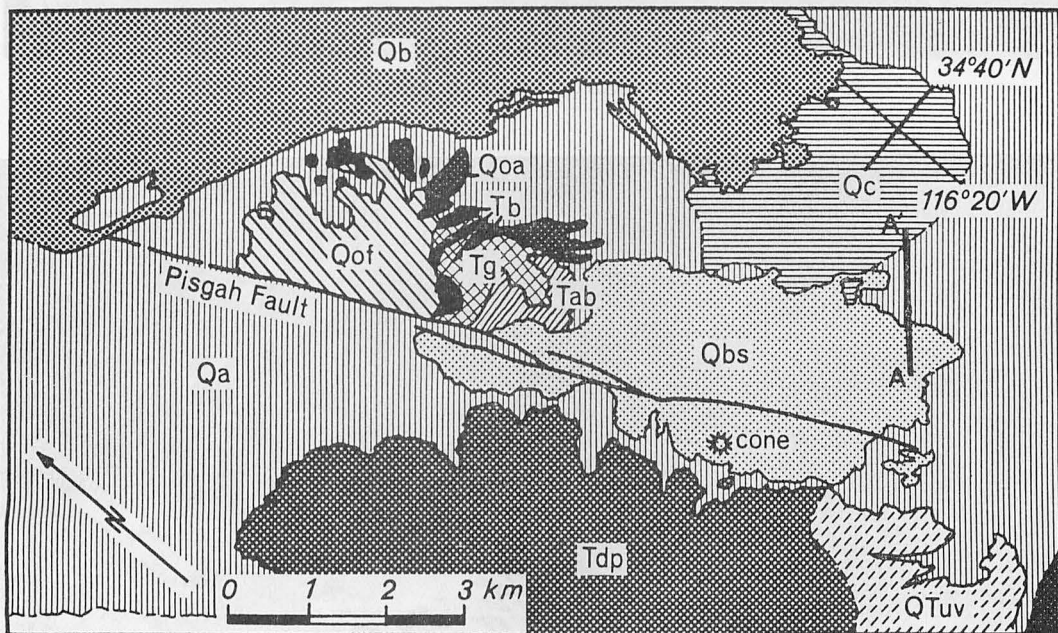
第53図 カリフォルニア州，モハーヴェ砂漠の Pisgah クレータ付近のレーダ映像（使用センサは，Westing house 社の APQ-97 で第5表を参照のこと）like-polarization (HH) 画像

モートセンシングの試験地域のひとつで，カリフォルニア州のモハーヴェ砂漠にある Pisgah クレータ付近のレ

ーダ映像である⁽²³⁾。使用センサは，Westing house 社の APQ-97 である。第5表を参照のこと。これらの映



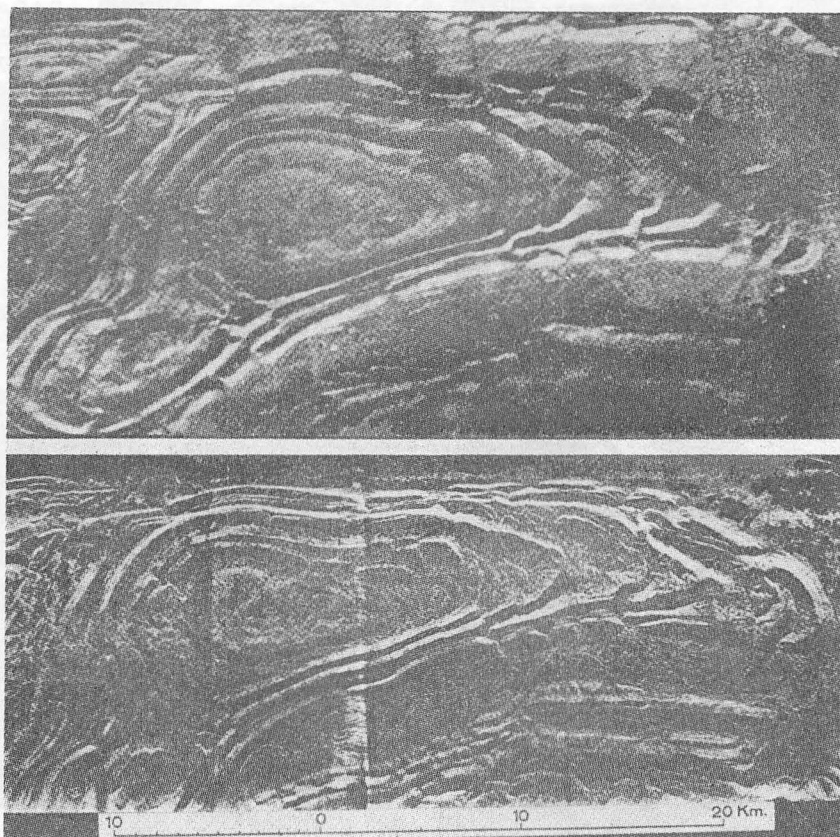
第54図 第53図と同じ条件の下での cross-polarization (HV) 映像



第55図 カリフォルニア州, モハーヴェ砂漠の Pisgah クレータ付近の地質図
Qa, 沖積層; Qc, 粘土層; Qb, Pisgah 溶岩流 (洪積世); Qoa, 古い沖積期の砂礫層
Qbs; Sunshine 溶岩流, Qof; 古い fanglomerate (第3紀又は第4紀), QTuv; 火成
岩 (漸新世又は中新世), Tb; 玄武岩, Tab; 角礫岩, Tg; 砂礫岩, Tdp; 貫入火山岩,
Pisgah 断層

像は, like-polarization (HH, 第53図) と cross-polarization (HV, 第54図) による同一地域のレーダ映像であり, 偏波効果の有用性を初めて指摘したものと

して有名である。第55図はこのレーダ映像に対応した地域の地質図を示す。同地域は沖積層 (Qa) と溶岩流 (Pisgah 溶岩流 (Qb), Sunshine 溶岩流 (Qbs) が広



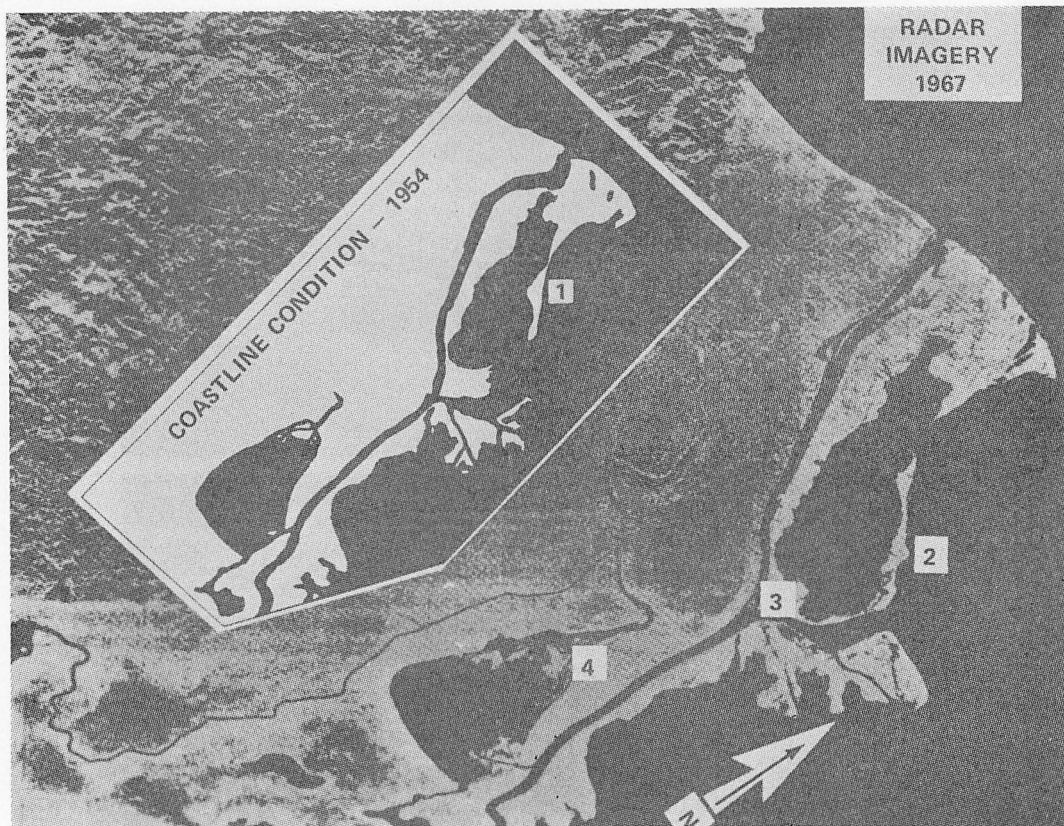
第56図 オクラホマ州 Tuskahoma 向斜地帯における実開口 SLAR による X band (上図) と K band (下図) のレーダ映像の比較

く分布し中央に Pisgah 断層がみられる。又 Q_e の粘土層はプラヤ（砂漠のくぼ地の平原。雨期には浅い湖になるが、蒸発すれば底に沈澱物を残す。米国西部に多い）であり、Lavic 湖と呼ばれる。飛行は 1965 年 11 月 4 日に北西コース（SLAR は北東方向に照射する）及び南東コース（SLAR は南西方向に照射する）の 2 コースについて行なわれた。実験中の飛行高度はほぼ一定に保たれている。第 53 図、第 54 図の矢印で照射方向（北東）が示されている。この外に南西方向に照射されたレーダ画像が得られている。実験は HH 及び HV の偏波測定を行なっている。映像データの示すところによると、(i) 南西方向及び北東方向の照射方向の差によって、局所的な反射信号の差異がみられること、(ii) しかしそれ以上に like-polarization と cross-polarization の受信信号には大きな差がみられることが指摘される。like-polarization 映像（第 53 図）においては不鮮明であった岩石境界の内、cross-polarization 映像（第 54 図）において明瞭になったものとして、(a) Pisgah 断層の南西部で、Sunshine 溶岩流と沖積層の境界部分、(b) Lavic

湖の西岸で、沖積扇状地と Sunshine 溶岩流の境界部分、(c) Pisgah 断層の西部（Sunshine 溶岩流の北部）等があげられる。この Pisgah クレータ領域の例に示されたように like-polarization 映像と cross-polarization 映像を同時に利用することによって地質学者は、今までの like-polarization 映像のみでは得られなかった新しい情報を発見するであろう。第 56 図は、Dellwig⁽²²⁾ によるオクラホマ州の Tuskahoma 向斜地帯における実開口 SLAR による X band (上図) と K band (下図) のレーダ映像の比較である。K band の方が短波長で分解能がよいから K band 映像は X band 映像よりも詳細である。ただし Dellwig は地質学上重要なリニアメントは、低分解能画像の積分効果の結果あらわれるものであるからリニアメントを調べるためには、X band 映像の方が K band 映像にあらわれる細かい地形上の変化や曲りくねった川に惑わされずにすむためによりよいと指摘している。

(ii) 海岸付近のレーダ映像

水と陸地の散乱特性は強いコントラストをなすため、



第57図 パナマのある海岸のレーダ映像（1967）と、1954年の同地域の地図の比較

海岸線で代表されるような、水と陸との境界はレーダ映像では、はっきり区別される。第57図は、1967年におけるパナマのある海岸のレーダ映像の一例⁽⁴⁾である。比較のために同図中に1954年の地図が示されている。海岸線の変化の様子がレーダ映像上にはっきり示されているのがわかる。1954年の地図で示されている1の砂嘴は、1967年のレーダ映像では2のように変化している。又1967年のレーダ映像中の4では、湖が堆積物の沈澱により埋められているのがわかる。第58図はテキサス州のGalveston 湾の西側の Clear Lake 地域の200平方マイルの海岸平野の K band の実開口 SLAR によるレーダ映像である⁽²⁴⁾。海岸線は明瞭である。さらに Johnson 宇宙センター、Ellington 空軍基地、高圧鉄塔等の人工の構造物も識別されうる。

(iii) 植生のリモートセンシング

第59図は、1966年のオレゴン州の Horsefly 山における植生地図であり、レーダ映像といくつかの野外の実測に基づいて作られたものである⁽⁴⁾。結果は、1962年に、U. S. F. S. (U. S. Forest Service) による広範な地域の野外実測に基づいて作成された地図とよく一致している。土壌の種類の識別にもレーダ映像が用いられてい

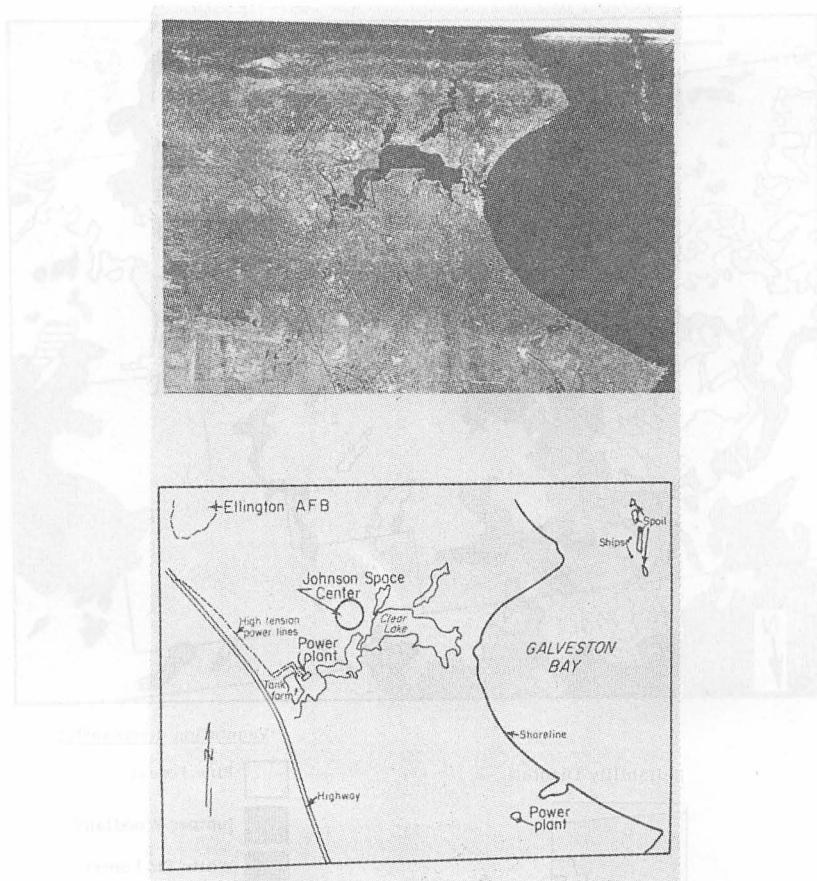
る。

(iv) 都市のレーダ映像

第60図は実開口 SLAR によるテキサス州の大都市オースチンの中心部のレーダ映像である⁽²⁴⁾。映像の中心部の明るい散乱の多い所は、オースチンの下町の大きなビルディング、州会議事堂、テキサス大学からのものである。空港、公園等も識別される。

(v) 海水のリモートセンシング

第2章のレーダ散乱計による観測の項で紹介したアラスカバロー岬沖の海水の観測は、同時に SLAR によっても行なわれている⁽⁴⁾。送信周波数は 16.5 GHz である。垂直偏波成分 (V) 及び水平偏波成分 (H) の両方共に送受信に使用可能であり、like-polarization, cross-polarization のいずれの測定も可能である。実開口アンテナの分解能は、航空機の地上軌跡に沿っては、17m~130m である。地上軌跡に直交する方向の ground range の分解能は、伏角とパルス幅に依存するが15m~29mである。第61図と第62図は、like-polarization(VV) と cross-polarization(VH) の実開口レーダ映像モザイクである⁽⁴⁾。映像からわかるように浮氷の数とその大きさを知ることが可能である。しかし航空写真とレーダ散



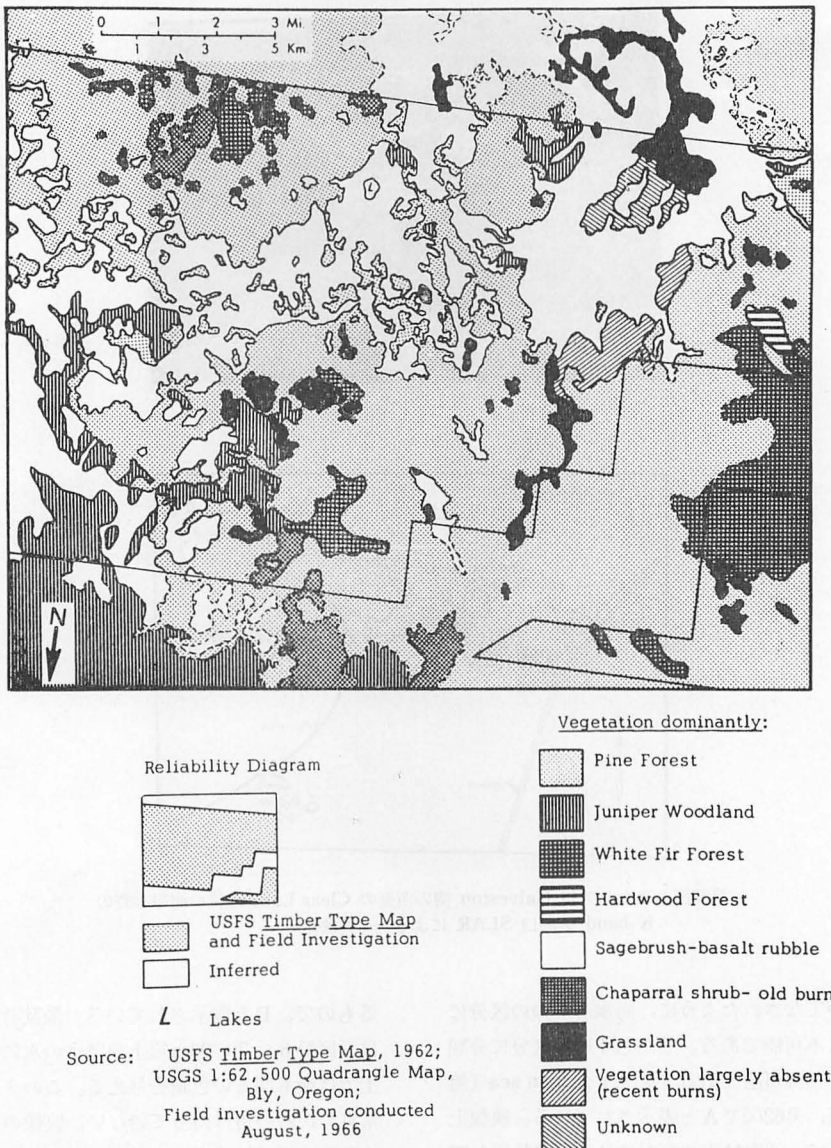
第58図 テキサス州 Galveston 湾の西側の Clear Lake 地域の海岸平野の K band 実開口 SLAR によるレーダ映像

乱計にもとづいてなされたように、海水を7つの区分に分類することは不可能である。しかし4つの区分に分類して識別することは可能である。区分1; open sea (無氷海面) 第61図, 第62図でAと表示されている。映像上の黒い色調の所で、通常は氷のかたまりの間に位置している。区分2; 薄い若い氷, この種類の氷は第61図, 第62図でBと表示されている。散乱計による区分では、区分2, 3の18cm以下の氷に対応する。Bの領域の氷は、はっきりした形や、鋭い境界を持っていないので、薄い氷と考えられる。第61図の like-polarization の時にはBの領域は明るい色調を示すが第62図の cross-polarization の時にはBの領域は黒い色調を示して対照的である。区分3; 薄い一年氷, この種類の氷は、第61図, 第62図でCと表示されている。散乱計による区分では、区分4, 5の18cm~90cmの厚さの氷に対応する。Cで示す浮氷は大きさと形とから識別される。一般にこの区分の氷は鋭い角を持っている。区分4; 多年性又は厚い一年氷, この種類の氷は、第61図, 第62図の大多数を占め

るもので、Dと表示されている。散乱計による区分では、区分6, 7の90cm以上の厚さの氷に対応する。映像上では最も明るい色調を与える。このタイプの浮氷は通常丸く、鋭い角は持っていない。映像の質が必ずしもよくないので、結論を出すには至らないが、cross-polarization の時には氷の厚さに比例して映像の色調が明るくなっている傾向がみられる。このことは、cross-polarization による氷の厚さの識別の可能性を示唆している。日照時間が極端に短く、濃霧にさえぎられることの多い極地方においては、SLARによる海水の分布状況、移動状況等の調査は、他のセンサの追従を許さないものであり、今後も益々、重要になるであろう。その他の応用例として、熱帯、亜熱帯で毎年のように大きな被害を及ぼす台風の際の洪水監視、oil slick の監視、氷河の調査、河川の調査等が挙げられる。

7. 終りに

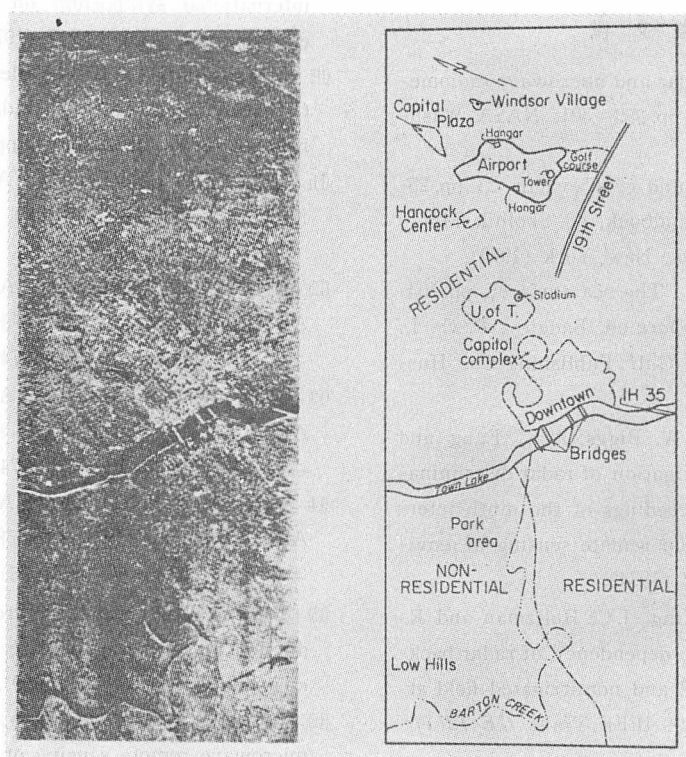
以上、SLARを中心にして、レーダによるリモートセ



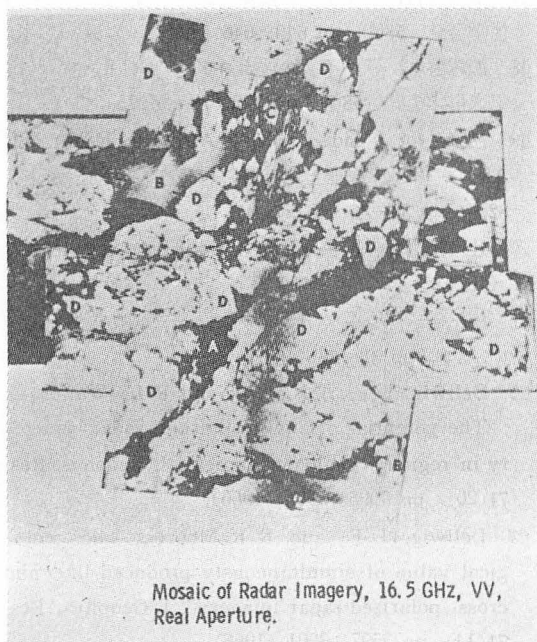
第59図 オレゴン州 Horsefly 山における植生地図（レーダ映像といくつかの野外実測に基づく）

ンシングについて解説した。我国においては、電波によるリモートセンシングは、能動的、受動的の如何を問わず、殆んど何もなされていないと言っても過言ではないであろう。しかし、本解説の中でも度々触れたように、電波領域のリモートセンサーは、独自性を持つセンサーであり、我国においても大いに研究すべき分野であると思われる。特に本解説で述べた合成開口方式の SLAR

は、可視、赤外領域のセンサーと比較しても、遜色のない、時間、全天候型のセンサーであり、最終的には、人工衛星に搭載することを目指して、ぜひ積極的に研究すべき対象であろう。電波研究所が、衛星搭載用の合成開口方式の SLAR の開発及びそれによる地球環境のリモートセンシングの問題に取り組むことを強く提案したい。

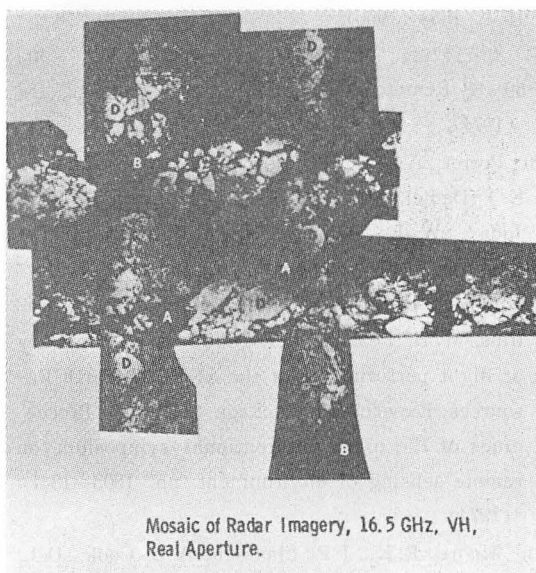


第60図 実開口 SLAR によるテキサス州の大都市オースティンの中心部のレーダ映像



Mosaic of Radar Imagery, 16.5 GHz, VV, Real Aperture.

第61図 第8図～第13図の散乱計による観測と同時観測における北極海の氷の実開口レーダ映像モザイク, 16.5 GHz で like-polarization (VV) の場合



Mosaic of Radar Imagery, 16.5 GHz, VH, Real Aperture.

第62図 第61図と同様の北極海の実開口レーダ映像モザイク, 16.5 GHz で cross-polarization (VH) の場合

参 考 文 献

- (1) Moore, R. K. ; "Radar and microwave radiometry", NASA SP-283, pp.283—301, NASA Washington, D.C.(1972).
- (2) Moore, R. K. ; "Ground echo", chap. 25 pp.25-1—25-48 in Radar Handbook, ed. Skolnik, M. I., McGraw-Hill Book Co., New York (1970).
- (3) Pierson, W. J. Jr. ; "The sea surface", pp.104-130 in *Ocean From Space* ed. Badgley, P. C., L. Miloy and L. Childs, Gulf Publishing Co. Houston, Texas (1969).
- (4) Parashar, S. K., A. W. Biggs, A. K. Fung and R. K. Moore ; "Investigation of radar discrimination of sea ice", Proceedings of the ninth international symposium on remote sensing of environment, pp.323—332 (1974).
- (5) Dickey, F. M., C. King, J. C. Holtzman and R. K. Moore ; "Moisture dependency of radar backscatter from irrigated and non-irrigated field at 400MHz and 13.3GHz", IEEE Trans. *GE-12*(1), pp.19—22 (1974).
- (6) Von Arx, W. S. ; "Level-surface profile across the Puerto Rico Trench", *Science* **154** (3757), pp.1651—1654 (1966).
- (7) 丸安隆和 ; "宇宙からのリモートセンシング" pp.69—88 *Remote Sensing* キヤノンイメージ編集室編 (1974).
- (8) Potter, A. E., C. K. Williams, A. L. Granfield, K. J. Demel, M. C. Trichel, T. L. Barnett, R. D. Juday, W. E. Hensley, N. M. Hatcher, W. E. Mcallum, J. T. Mcgoogan, J. C. Jones, O. N. Brandt, J. G. Braithwaite, R. H. McLaughlin, R. Collins, W. H. Peake and R. K. Moore ; "Summary of flight performance of the SKYLAB Earth Resources Experiment Package (EREP)", Proceedings of the ninth international symposium on remote sensing of environment, pp. 1803—1841 (1974).
- (9) Moore, R. K., J. P. Claassen, A. C. Cook, D. L. Fayman, J. C. Holtzman, A. Sobti, W. E. Spencer, F. T. Ulaby, J. D. Young, W. J. Pierson, V. J. Cardone, J. Hayes, W. Spring, R. J. Kern and N. M. Hatcher ; "Simultaneous active and passive microwave response of the earth—the SKYLAB RADSCAT experiment", Proceedings of the ninth international symposium on remote sensing of environment, pp.189—217 (1974).
- (10) Mcgoogan, J. T., L. S. Miller, G. S. Brown and G. S. Hayne ; "The S-193 radar altimeter experiment", *Proc. IEEE* **62**(6), pp.793—803 (1974).
- (11) 駒井二郎 ; "Side Looking Airborne Radar——地質調査への利用" *応用物理* **44** (3) pp.277—290 (1975).
- (12) 駒井二郎 ; "Side Looking Airborne Radar (SLAR)" 24時間全天候型のリモートセンシング ①地質ニュース **235** pp.18—35 (1974).
- (13) 駒井二郎 ; "Side Looking Airborne Radar (SLAR)" 24時間全天候型のリモートセンシング ②地質ニュース **238** pp.18—27 (1974).
- (14) 駒井二郎 ; "Side Looking Airborne Radar (SLAR)" 24時間全天候型のリモートセンシング ③地質ニュース **249** pp.6—16 (1975).
- (15) Brown, W. M. and L. J. Procello ; "An introduction to synthetic-aperture radar", *IEEE Spectrum* **6**(9), pp.52—62 (1969).
- (16) Rouse, J. W. Jr. and M. W. Molly ; "Active microwave remote sensing of earth/land", NASA SP-376 pp.41—156 NASA Washington, D. C. (1975).
- (17) 飯塚啓吾 ; "マイクロ波ホログラフィ〔I〕" *電気通信学会誌* **58**(6), pp.640—646 (1975).
- (18) 飯塚啓吾 ; "マイクロ波ホログラフィ〔II・完〕" *電気通信学会誌* **58**(7), pp.772—780 (1975).
- (19) 松野久也 ; "Side Looking Airborne Radar (SLAR) ——その原理と地質調査への応用" *地学雑誌* **82**(3), pp.39—45 (1973).
- (20) 辻内順平, 村田和美 ; *光学情報処理* 朝倉書店 (1974).
- (21) 松尾優 ; "レーダホログラフィとその動向" *画像技術* **3**(4), pp.43—54 (1972).
- (22) Dellwig, L. F., J. N. Kirk and R. L. Walters ; "The potential of low-resolution radar imagery in regional geologic studies", *J. Geophys. Res.* **71**(20), pp.4995—4998 (1966).
- (23) Dellwig, L. F. and R. K. Moore ; "The geological value of simultaneously produced like- and cross-polarized radar imagery", *J. Geophys. Res.* **71**(14), pp.3597—3601 (1966).
- (24) J. P. Cannon ; "Application of radar image to environmental geologic mapping of Texas", Proceedings of the ninth international symposium

- on remote sensing of environment, pp. 1981—1988 (1974).
- 25 渡辺貫太郎; “人工衛星による海洋環境の観測” 気象研究ノート 第113号, pp. 141—180 (1972).
- 26 Rouse, J. W. Jr., H. C. Macdonald and W. P. Waite; “Geoscience application of radar sensors”, IEEE Trans. **GE**—7(1), pp. 2—19 (1967).
- 27 Vincent, S. and J. G. Marsh; “Global detailed gravimetric geoid “NASA GSFC, Rep. X-592-73 -266 (1973).
- 28 岡本謙一; “人工衛星によるリモートセンシング” 電波研究所季報 **22**(121), pp. 457—482 (1976).
- 29 岡本謙一; “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” 電波研究所季報 **22**(121), pp. 483—499 (1976).
- 30 石川嘉彦, 三浦秀一; “海面のアクティブマイクロ波センシング” 電波研究所季報 **22** (121), pp. 555—569 (1976).
- 31 Skenderoff, C., J. P. Guignard, J. R. Coldrick, H. Mooney and J. Noel; “A preliminary feasibility study on a synthetic aperture radar (SAR SAT) for earth resources surveys”, Proceedings of the ninth international symposium on remote sensing of environment, pp. 1517—1540 (1974).

