

# Side Looking Airborne Radar (SLAR)

## — 24時間全天候型のリモートセンシング③ —

駒井 二郎

メータのひとつになっている。これら一連の経過は第1回(1962年)以降の「環境のリモートセンシングシンポジウム」論文集を逐年たどってみても判然と刻み込まれているのである(たとえば VIVIAN 1962, KENNEDY et al. 1966)。

これらの例はいずれも自然の電磁波放射を利用する受動系に属するが、能動方式のリモートセンシングについても月・惑星の地図作成上に大きな比重を占めていることはよく知られている通りであり、さらに固体地球科学からは離れるけれども、上層大気研究への貢献なども著名な応用例の筆頭といえよう(電離層観測におけるファラデー効果)。

一方工学的観点からも電波伝播に関する理論・実験の両面にわたるこの方面のぼう大な蓄積があらゆる分野の土台を築いてきたことはいまでもなく、実際レーダー自体のみに限ってもこの偏波現象は巧みな応用面が見出されている。たとえば送信波として円または楕円偏波を使用すれば単純な球形とみなせる雨の中の水滴からの乱反射は偏波の旋回方向が逆転するため受信機のサーキュライザを通過できなくなるがこれに対して航空機や船舶のように入り組んだ形状の目標からの反射信号は複雑な偏波面の組み合わせから成っているので一種のフィルタ効果がえられることとなりGCAや一部の船用レーダーなど特殊な用途に適用されてきたのである。

このようにしてみるとSLARにおいても偏波の利用が考えられたのはむしろ自然な成り行きであったといってもよいのかも知れない。事実放射電磁波の偏波面を自在に制御できる能動方式の方が情報をより豊富に取得する上において種々の点で有利なことは容易に想像されるところでありしたがってSLARにとってもっとも血縁関係の濃いレーダー天文学の分野では能動・受動の双方とも偏波特性の測定はとくに地形の起伏の程度や誘電率を見積る上に重要な一環をなしてきたのである。それだけにSLARが民需用に解放されたごく初期の頃から他の各種リモートセンサに伍してこの偏波効果の非軍事的利用法が諸機関により積極的に進められてきたのであった。

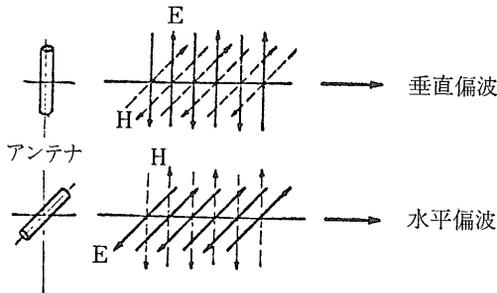
### VI. SLARの特性(II)(続)

#### 偏波効果

#### まえがき

電磁波の偏波面による地物の反射特性の差異もSLARの多彩な機能を象徴するよい一例である。偏波(光)現象それ自体の応用はきわめて広汎であってたとえばサングラスや自動車の日除け板のように日常生活にもかなりとけ込んでいるものであるが多くの地学関係者にとっては光弾性実験や偏光顕微鏡などを通じて一層密接な結びつきが感じられるものであろう。

しかし当面われわれが関心をもつのはこれらとは異なっているかにスケールの大きい地球(宇宙)科学観測の手段としてであり広義のリモートセンシングの範ちゅうに含められる技術としては昔からの分光天文学あるいは第二次大戦後めざましい発展をとげた電波天文学などの諸分野で果たしてきた役割を第一にあげない訳にはいかない。リモートセンシングという新鮮な響きをもつ用語が急速に人口に膾炙するようになってからもこの偏波効果は多くの先覚者によって活発な利用が当初より図られてきた。たとえば可視光の範囲では反射光の偏光度によって芝生や砂地、土壌などの区別が可能ながいはやく指摘されているしまたSLARよりもやや短波長の0.1mm~3cm帯を利用するパッシブレーダー(microwave radiometer)の領域でもとくに海面の波浪観測などへの応用が注目され対象物の時間的および空間的な輻射特性とならんで重要なパラ



第1図 電磁波の偏波方向

### 基礎的側面

さて電磁波の偏波（光）とは周知の通り 鉛直面における電界ベクトルの方向によって定義される(第1図)。理論的には楕円偏波がもっとも一般的な形で 円偏波も直線偏波もすべてその特殊な場合に相当するが レーダー天文学と異なり SLAR では今のところ 実用的には直線偏波だけに限られている。

送信エネルギーの偏波方向は アンテナ系の設計できまり たとえばもっとも簡単な直線状アンテナでは偏波面はこの直線と平行か 少なくともこの直線を通る平面内に局限される。見通し内距離を原則として行われる通常のマイクロ波通信においては 伝播中に偏波方向が変化することがないので 受信系は送信波と同一の偏波成分を対象として構成するのが原則とされる。身近かな例ではテレビ放送がそれで わが国では水平偏波が採用され 林立する受信アンテナの素子がすべて水平軸上に配列している模様は日常 よく目につくところである。

到来波の偏波面と異なった向きのアンテナでは感度が非常に悪く 逆にこの性質を利用してある種のマイクロ波通信では 隣接回線と偏波を故意に不同とし 干渉を防いで限りある周波数帯域の有効活用が図られているほどである。ところが 何らかの物体によって反射してくる波を受信するような場合には 事情が若干 異なってくる。さきほどのファラデー効果は 磁場中を通過する際に偏波面が旋回を受ける例であったが 目標物のいろいろな物理的性質（あるいは状態）の組み合わせにより 反射（散乱）波が 常に送信波と同じ偏波方向の成分だけを含んでいるとは限らない。

すなわち光学的な言葉を借りれば 入射光がかりに「完全偏光」していたとしても 反射光は「部分偏光」となってしまう。レーダー天文学ではこの現象は“depolarization”と呼ばれ 理想反射体の場合をのぞきむしる 多かれ少なかれ普遍的に認められるものである。解析的な取り扱いとしては通常 四コのストークスパラメータを用いたマトリクス表示がしばしば行なわれるが ここではその種の基礎理論面には一切 立ち入らず もっぱら応用面に焦点をしばってゆく。とにかく入射した全パワーの一部が直交成分に転化され その度合が対象物の“内容”を何らかの形で反映していることに留意したい。

余談ながら地表～電離層間の反復反射に依存する短波帯以下の無線通信では 偏波は送信時における原方向から大きくズレるのが常であり ラジオ放送にしても出す時には普通 垂直偏波として送るけれども 伝播途中で偏波面は甚だしく崩れ 指向性の問題はもちろん残って

いるが偏波面に関する限り とくにアンテナの姿勢について顧慮する必要はない—というよりは意味がない。

ただこのへんの関係をうまく利用した「偏波ダイバーシティ」なるフェーディングの防止法が提案されているのは 別の工学的応用の一例である。

したがって送受をどうしても1コのアンテナで共用したい場合は別として SLARでは 受信アンテナは送信用のそれとまったく独立に構成することができるから 送信波と同一成分のみ応答するよう製作しうると同様 他の成分を受信するように設計するゆき方も考えられ その出力信号は別種の情報源となるだろう。SLAR 関連の用語では 前者を“like (-polarized)” または“direct”方式と称し 後者のうち送信波と直交する偏波成分に応答するよう組み立てたシステムを“cross (-polarized)” または“orthogonal”方式と呼ぶ。

cross の場合 送信波をかりに水平偏波とすれば受信波は垂直偏波となるから このようにして撮像された映像を **HV** と記し 逆の場合（送信：垂直偏波 受信：水平偏波）を **VH** と書く。同様にして like については 送信波の種類に応じて **HH** または **VV** として区別するのが通例である。

like の方はいわば“普通”の使い方であるが この場合といえども反射体の応答特性は **HH** と **VV** 間にある程度の差異が認められるので システムの構成に際しこの選択をゆるがせにすることは許されない。そしてこの方は cross に比し割合 明確な概念の把握が容易なので 多少 具体例について説明を試みてみよう。

反射信号に影響をおよぼす因子については これまでも再三 ふれてきたが 今 もっとも簡単な半無限体に対する水平偏波と 垂直偏波の反射係数を考えると これらはそれぞれ次式で与えられる。

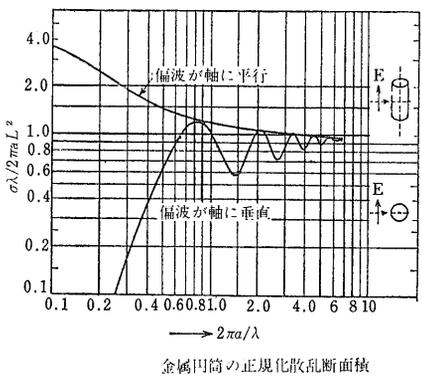
$$\dot{R}_H = \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon_0 - \gamma}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_0 - \gamma}} \quad \dot{R}_V = \frac{\epsilon_0 \sin \theta - \sqrt{\epsilon_0 - \gamma}}{\epsilon_0 \sin \theta + \sqrt{\epsilon_0 - \gamma}}$$

$$\gamma = \cos^2 \theta$$

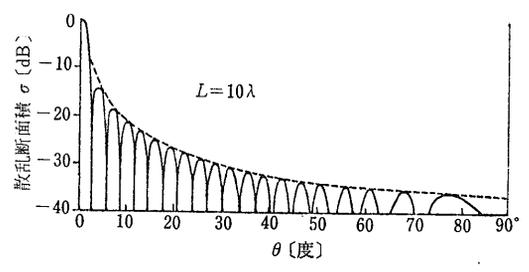
ここに  $\theta$  は電波ビームの照射角  $\epsilon_0$  は複素誘電率と呼ばれる量で 導電率  $\sigma$  ならびに波長  $\lambda$  の関数である：

$$\epsilon_0 = \epsilon - j60\sigma\lambda$$

SLAR の周波数帯では よほど  $\sigma$  の大きい場合をのぞき 上式の虚数分は無視してさしつかえないが このように水平偏波と垂直偏波では反射係数が異なり それは  $\theta$  と  $\epsilon$  によって支配されている。このうち前者は センサと対象物間の相対的な位置関係によって定まる幾何



第2図 入射波の偏波方向による金属円筒の散乱断面積(垂直入射)



第3図 同じく斜め入射の場合  
円筒ターゲットの反射パターン

学的関係であるのに反し 後者は対象物みの固有の特性一たとえば温度 含有鉱物の密度 屈折率 あるいは水分のような不純物によって大幅な変動を示す。

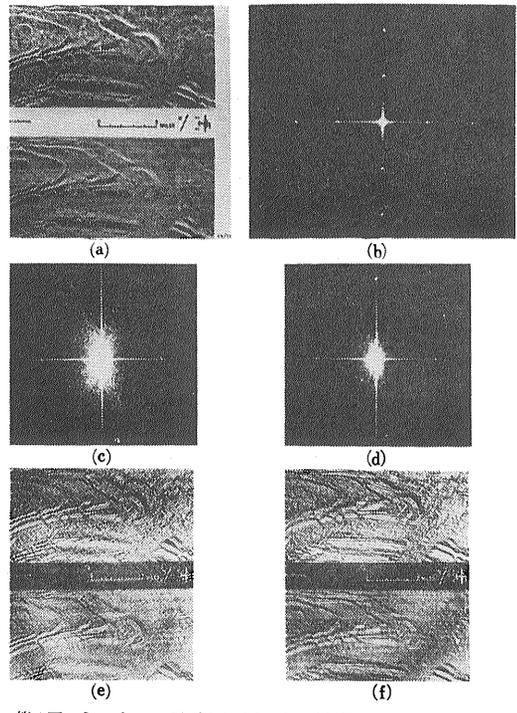
第2図は金属円筒の(正規化)散乱断面積が その直径(a)や長さ(L) 入射波の波長(lambda)によって変化する有様を示しているが SLARがおもに準拠する数センチメートルの波長域では 多くの対象物はいわゆる“レーレー散乱”の領域に入り 円筒軸に対する偏波方向によってかくも異なった応答を呈示することとなるのである。なお同図は両偏波とも円筒軸に垂直な向きに進行してくる場合であるが これが角度thetaをなして入射する一般的な場合にはさらに複雑となり 第3図のように

反射パターンは thetaの変化とともに数多くのサイドローブを生じてゆく。

このようにしてlike方式においても 採用した偏波の種類によって 対象物を判読する鍵となるべき応答特性は変化に富み 実際 これを利用した研究もいくつか発表されている。しかし偏波作用の効果という意味ではそのポイントはやはり cross の方に見出されよう。追って順次 考察を進めてゆくが like と併用・比較することによって 地質調査を含めた各方面への有効な活用が考えられている訳である。

この種の機能を有する SLAR によって撮像された HH HV 映像の典型的な実例(PINCUS, 1969)を 第4図(a)として示す。これは前々回(本誌235号)にも波長による分解能の差が表われている好例として引用した オクラホマ州の Ouachita 山系であって 両映像のちがいは肉眼でも明らかであるが 同図(c)(d)のようにレーザー回折により 二次元フーリエ変換した空間周波数分析の結果に一層 明瞭であり HV における高周波成分のいちじるしい消失がうかがわれる。なお当面 本項とは関係ないが 同図(b)は修正用の規準映像で両軸上の輝点は ミリメートル単位で目盛った次数を表わし (e)(f)は 方向性フィルタをかけた結果を示している。

ただこの cross 成分は通常 like より 10db ほど信号レベルが低下するので 映像上の濃淡をほぼ同程度とするためには装置のゲインについて正確な較正を要する。この較正が不充分だと判読の定量性が低下し 各映像間の厳密な比較が困難になるが それはそれとして定性的な範囲に限っても これまでにえられた成果は充分 注目に値するものと考えられるので ここに一章を費すこととした次第である。もっともこの偏波効果は 実は次回に取り扱う予定の地形の起伏の影響と 密接不可分の関係にあるのだが 便宜上 ここでは前者だけを抽出して現況のあらましを展望することとしたい。このシリーズの冒頭においても言及した通り 冗長度の付加に



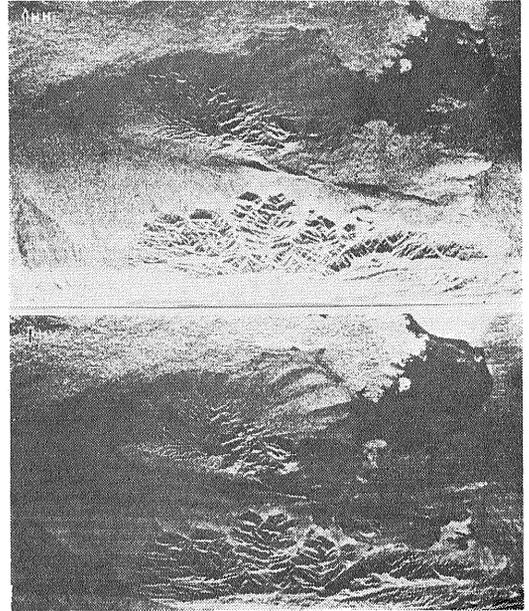
第4図 Ouachita 山系(オクラホマ)の例(PINCUSによる)  
(a) HH(上) HV(下)の映像  
(b) 修正用規準映像  
(c)(d) レーザー回折によるそれぞれの二次元フーリエ変換像  
(e)(f) 方向性フィルタをかけた結果

よる S/N 比の向上は SLAR にかぎらず かかる探査技術の全般にわたって共通した近年の一般的動向である。波長とともに偏波の多重化(といっても現在ではせいぜい二重にすぎないが)もこの線に沿うものであって この種の機能を有する SLAR システムは とくに試験段階のものまで含めれば 少なくないようであるが 調査した範囲内では 実用的な意味で公表されているデータのほとんどは Westinghouse の APQ-97 によるものであった。したがって本節の内容も 大部分はそれを軸として展開してゆくこととなるが この広大な裾野を形成している分野は到底 限られた紙面で描破しつくせるものではなく それはごく断片的な紹介にとどまらざるをえない。ただ本稿によってその足掛りなりとも多少残るところがあれば幸いである。

地質調査における役割

まず当面の関心である地質調査への直接的な効用からながめてゆくこととしよう。最初に SLAR への偏波効果の応用を盛り上げたのは リモートセンシングの研究を大規模に推進している中心的機関のひとつであるカンサス大学の DELLWIG と MOORE で 1966 年の Journal of Geophysical Research (Vol. 71 No. 14)に短報として寄稿したのが端緒になったとみられる。事実 “first geologic evaluation of simultaneously produced like-and cross-polarized images” と主張しているが 一方 同じカンサス大学の別のグループである ELLERMEIER FUNG and SIMONETTらが3カ月ほどおくれて「第4回環境のリモートセンシングシンポジウム」にきわめて詳細な報告を発表しており このへんの事情は不明である。

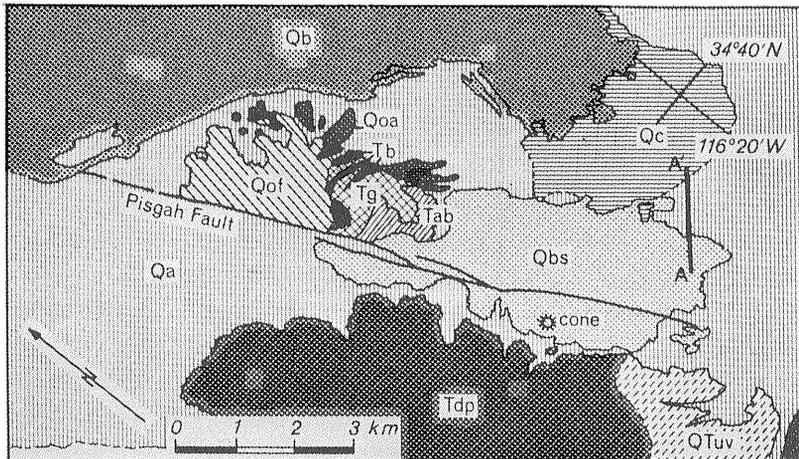
ともあれ第5図はこのときの試験地域のひとつで カ



第5図 Pisgah クレータ(カリフォルニア)の両映像(DELLWIG による)  
(上) HH (下) HV

リフォルニア州の Mohave 砂漠にある Pisgah クレータで撮像された HH と HV の両映像を示す。ここはもともと月のクレータとの相似性を買われて NASA から実験場に選定された場所であったが 沖積層と第三紀・第四紀の溶岩流が広汎に分布し これら溶岩の噴出と生成時期を同じくする Pisgah 断層が 支配的な構造要素となっている(第6図)。実験が行われたのは65年11月で 北東と南西に二本の照射方向をとり 飛行高度は可能なかぎり均一に保たれた。

これらの結果にもとづいて 彼らの行なった考察を要約すれば 次の通りとなる：



第6図 同上地域の地質図(DELLWIG et al. による)  
Qa: 沖積層  
Qc: 粘土層  
Qb: Pisgah 溶岩流  
Qbs: Sunshine 溶岩流  
Tdb: 貫入火山岩

- (1) 照射方向により 局地的な反射信号の性質には相当の差異が認められた
- (2) 偏波のちがいによる両映像には (1)以上に顕著な差異が存在する

このうち(1)に関しては前回に詳述した通りであるが (2)の効果はこれとまったく独立のものともみなしてよい。(原論文には照射方向を180°変えた別の映像もかかげられているが ここでは省略する)。

判読対象としての的をしぼったのは 溶岩と沖積層による応答であった。一般に溶岩の方の信号強度が強くなっているが 一部ではこれも前回に検討した傾斜面の関係で弱まっているところがあり 照射方向によっては境界部の弁別は困難となっている。しかしここで注目されるのは 同一照射方向の場合といえども like では不鮮明だったいくつかの岩石境界が cross 映像上には判然とその姿を現わしてきたことで たとえば

- (1) Sunshine 溶岩流と沖積層との間の Pisgah 断層
- (2) 沖積扇状地と溶岩流間の Lavic 湖西縁
- (3) Pisgah 断層の西部 (Sunshine溶岩流の北部)ならびに沖積層中の河川分流群間の Sunshine 溶岩流南西部

などを指摘することができる。

これらのうち (1)の cross 映像上にあらわれた沖積層と溶岩との間のコントラストは 地表の起伏によってもたらされたものと考えられ また Lavic 湖中でも湖底層と分流路群間のコントラストは like の方がかえって強く出ているなど 偏波効果の便益を必ずしも全面的には支持しない点も散見された。しかしながら cross はもちろん like の価値を減じたり いわんや代替するものでは決してなく これを補足する性質のものであることを思えば 以上の結果は充分 encouraging と評価しうるところであろう。

Pisgah 溶岩流の cross 上の信号強度は 断層の南西でやや微弱になっているのにひきかえ 沖積層ではむしろ増感する傾向が認められる。現地踏査の結果 Pisgah 溶岩流より Sunshine 溶岩流の方がはるかに風化が進んでおり なめらかな地表となっていることが判明したが これは粗い砂礫層の表面が cross 成分をより多量に反射することを示唆するものであった。蛇足ながら Lavic 湖は米国西部でよくみられるところの“Playa”であって 雨期には浅い湖となるが 乾期には蒸発して粘土 塩 石膏などを沈澱させるものである。

同様にして(2)の Lavic 湖南西縁では 粗面の砂礫層から成る沖積扇状地が 隣接した Sunshine 溶岩流の風化

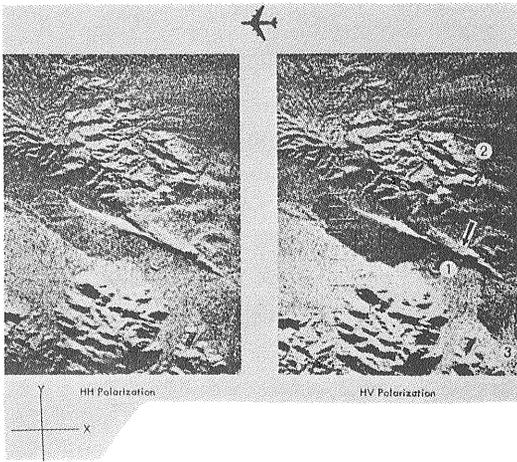
層よりも強度の cross 信号を反射しており さらにこれと類似のコントラストが 扇状地の北方—Sunshine 溶岩流と沖積層東部との間でも観察された。

また(3)の場合も like~cross 間には明確なコントラスト差があり 空中写真とも併せて仔細に吟味すれば これらの現象は 岩相の変化に対応しているとみられるフシもあるが その反面 単なる地表面の粗さのちがいで起因するおそれもなしとはしない。なお上記の諸地域とは対照的に 南方から湖中に向かって広がってゆく粗粒の堆積物と湖成堆積物との間には like 映像でもかなり強いコントラストを生じており cross との間にとりわけ目立った特色ある徴候は認められなかった。

以上の観察を踏まえて DELLWIG らは cross の併用により like 単独では 見落されかねなかった別種の地質情報がえられる可能性があり とくに沖積物質の源岩やみかけ上 同じように見える岩石種類の識別あるいはコントラスト差にもとづく岩石の絶対的同定などが 期待できると推論した。

これが事実ならば 偏波効果は地質調査における SLAR の効能を飛躍的に拡大するものといえよう。たびたびくり返してきた通り SLAR は 断層帯のような線状構造の検出には すばらしい成果をおさめてはきたが 反射特性を左右する要因があまりに多岐にわたっているため 表層物質の区別は 少なくとも直接的な意味ではあまり得手でなく むしろこの点に関しては赤外線に一步をゆずる気味があった。レーダーによる月面探査では 表層物質を偏波測定により軽石や火山灰などに分類しているが 高度に乾燥した月面と異って水分の圧倒的に多い地球上では 類似の手法の SLAR への適用は必ずしも容易とはいいきれないのである。なおここでもすでに彼らが粗面の影響を重視している点が注意をひく。

この DELLWIG らと相前後して 前記のように ELLERMEIER らの研究が公けにされたが こちらはとくに理論的推察の実証に重点がおかれた。詳細は省くが彼らの展開した理論式によれば 単一周波数の後方散乱波の like 成分は第一近似として 目標に固有のフレネル反射係数と 入射面中の地形断面に沿って測った傾斜角関数と 入射角の余弦の和との積に比例し 同じく cross 成分は2コのフレネル反射係数の和と 入射面に鉛直な断面についてとった勾配項によって与えられる。60年代前半にいたるまで 多くの人々によって開拓された散乱理論では 用いた仮定と近似の内容にもよるが 少なくとも標準偏差の大きい(起伏のはげしい)地表モデルに対



第7図 Pisgah 断層付近の拡大図 (ELLERMEIERらによる)  
(左) HH (右) HV

しては depolarization の発生は明らかにしえなかった。一方においては ほとんどすべてのレーダー観測において この現象の实在が経験的に知られており Fung を中心としたこのグループの仕事は この矛盾の解明に成功した訳である。

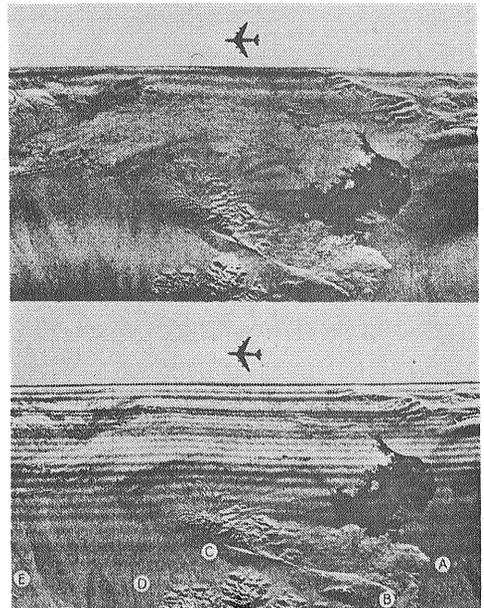
このグループもまた DELLWIG らと同じ NASA との契約のもとに実験を重ね 対象地域もさきほどのPisgah クレータをえらんだが これは HH HV のほかに VV と VH が含まれた数少ない資料のひとつである。ただこのときのシステムは 二つの偏波方向を同時には放射できないので H と V のそれぞれについて 2 回の撮像飛行を必要とし 折角の理論計算にもかかわらず飛行高度の変動などのため 検討はごく定性的な比較にとどまった。

Fung の理論は他のすべての要因が変らないかぎりもし X 方向 (入射面と直角) 中で傾斜面の勾配が顕著に変れば cross 成分は like の成分よりも多量に変動することを予言している。またこの勾配が増加すると同時に 入射角が grazing の条件に近づいていけば これまた cross が増大するのに反し like は同程度 もしくは消滅していかねばならない。もちろんこの逆も正しく X 方向中の相対的変化を伴わない入射面中の勾配変化は like に大きな変動を生ずるのに対し cross では僅少な筈である。

第7図は例の Pisgah 断層近辺の拡大図であるが 両映像の間には 明暗の局所的な逆転がみられ cross は X 軸方向の急峻な地形部—入射面と 直交する勾配が最大となるような地域でもっとも強いのに反し like ではこ

れが反対となっている。 またここには示さないが機首方向を同図の場合より8°ほど振った別の映像では Fung の予測通り円丘の内・外縁上で入射角が 地表とほぼ直角から地表面にまで減少していくにつれて cross の明らかな増感が確かめられ かつ近傍の Lava Bed Mtns. では HH が最大値に達したのは 勾配が入射面に直角に転ずるあたりであった。 しかも HV の最大値は X 方向においてもっとも急峻な地点で起っている。 これらの結果は Fung の推論を厳密に立証するところにはまではいたらなかったが 少なくとも“compatible”でこれを支持する線上にあることだけは異議のないところであろう。

一方 Fung が設定した仮説のひとつに可逆性がありこれは完全に較正されたシステムを用いるならば HV と VH の両映像は まったく同一の内容を示すことを意味する。 このテストは前述したようにその条件を満たしてはなかったが それでも大略の傾向は把握できる見込みがなくなるはない。 第8図は第9図との対比のため like 同士の HH と VV を並置したものであるが A ~ E の各点において 濃淡レベルやパターンには明瞭な差異が読みとれる。 そして第9図が問題の HV と VH であるが 第8図でみられた差がほとんど失われてしまった。 わずかに④の部分で微妙な変化が存在するかのように見えるが この程度は飛行方向や照射角度の変動によって容易に説明されるものであり したがって可



第8図 Pisgah 溶岩流地帯の like 映像 (ELLERMEIERらによる)  
(上) HH (下) VV

逆性は一応 成立しているものとみなしてもよいであろう。 故に装置としての技術（経済）的余裕がかりに許されたとしても HV と VH の双方を同時記録する意義は希薄と考えてよい。

ELLERMEIER らは 同地域の地質的考察を DELLWIG らにゆだねたが 両者に共通して強調されたのは地表面の粗さの影響である。 これは SLAR 信号が単なる“反射”ではなくして“散乱”であることを思えば 直観的にもうなずけることではあるが この問題のもう少し掘り下げた検討は 次回にゆずることとし ここではこのような geometric effects を material change から分離しようとする試みは SLAR もさることながら 月や惑星のレーダー観測に際しての中心的課題となっており たとえば BENTIS (1968) が Kirchhoff 積分を用いて解いた月面モデルの結果によれば ある特定の波長帯では 片方の効果だけを浮き立たせる一種のフィルタ効果が期待できる事実がみちびかれて ここでも多波長域レーダーの必要性が 声を大にして説かれていることをつけ加えるにとどめておく。

さきほどのDELLWIGはそのあと MacDONALD KIRK とコンビを組んでさらにこの新しい可能性を鋭意 追求した(1968)。 彼らは偏波効果の活用により SLAR がリアメントの判読のみにとどまらず 岩相の微妙な変化の検出にも有効 とふたび主張する。 すなわち概査的な意味合いにおいては 岩石組成のコントラストはときには SLAR 映像上に直接 異常部の分離・抽出を

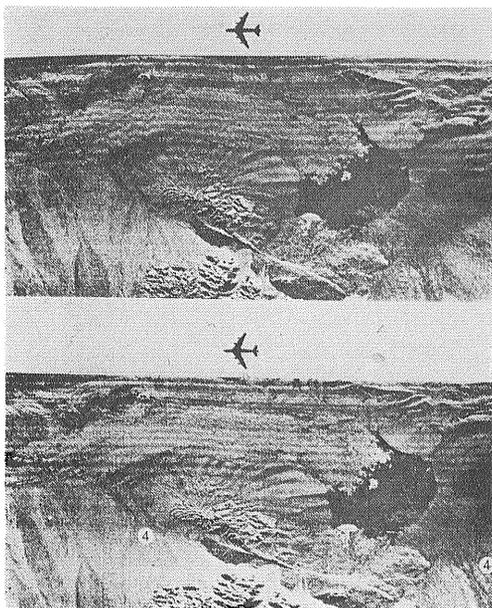
可能ならしめ 間接的には地形・植生の反映としての土壌や風化パタンが信号強度を支配することとなろう。

彼らのあげたいいくつかの実例のうち もっとも明瞭にこの dual polarization 効果が認められたのは アリゾナの有名な Twin Buttes の南東部で 微弱ながら明らかに判別のつく部分として cross 映像上に表われた2コの流紋石英安山岩の露頭を提示した(第10図)。

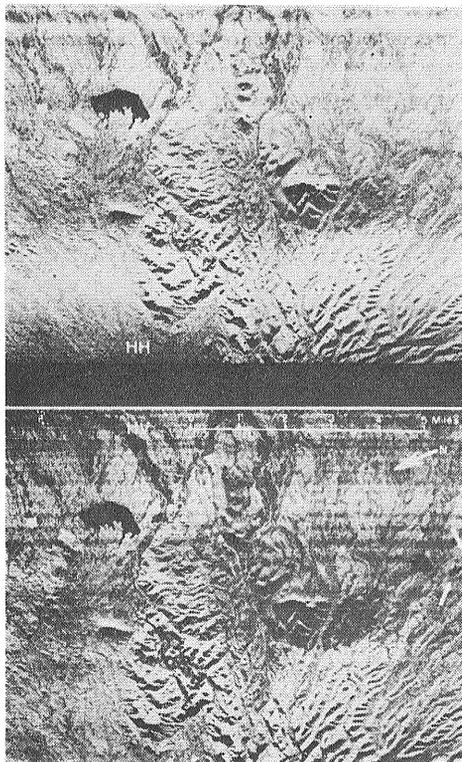
これらの存在は like はもとより 空中写真でも検出することができなかったもので COOPER (1966) は 野外検証によりその実在を確かめたが いずれも軽度に関析された沖積平原にあり 地形上の示徴は一切 見出しえなかった。 この辺の経緯は偏波の問題のみにとどまらず SLAR 信号の本質を理解する上において有益と考えられるので やや冗長となるが 以下に多少詳しく引用してみよう。 まず COOPER はこの部分の反射信号が一般に弱い原因を次のように解釈する：

“……流紋石英安山岩の露岩ならびにそれから生じたとみられる中・大礫状の碎片や残留土壌が観察された。 地表面の粗さは周辺の沖積層と大差ないが 組成は非常に異っており 沖積層は流紋石英安山岩を欠いた古い時代の火成岩 堆積岩 変成岩地帯より運搬された碎屑岩より成っている。

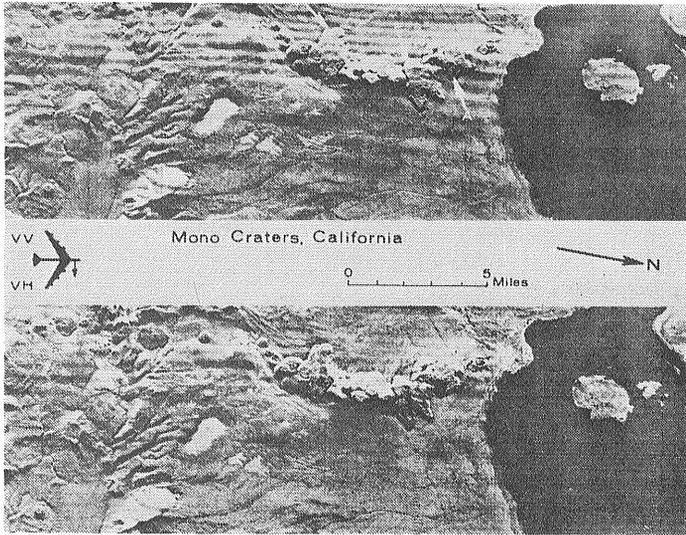
レーダー応答を地形や表面の粗さ あるいは含有水分の影響に帰せしめるのはいささか苦しく これはおそらく新鮮なガラス質の輝石安山岩の高い含有量によるものと考えられる……”



第9図 Pisgah 溶岩流地帯の cross 映像 (ELLERMEIER らによる) (上) HV (下) VH



第10図 Twin Buttes 南東部 (アリゾナ-DELLWIG らによる) (上) HH (下) HV



第11図 Mono クレータ (カリフォルニア—DELLWIG らによる)  
(上) VV (下) VH

一方 このあとを追うようにして再度 この地域を踏査した GILLERMAN (1967) は 次のように述べている：

“……流紋石英安山岩と隣接する沖積層との間に 植生の変化が認められた。このうちもっともきわ立っているのは 前者が地表に露出しているあたりに成長している ocotilla (トゲの多い多脂性の樹木) の茂みであるが 他のいくつかの背の低い樹木や草花もその分布は この周辺に限定されている。この植生の相異が直接・間接のいずれにせよレーダー信号に影響を及ぼしているものと思われるが 土壌中の金属成分の差による可能性も強い。このように cross 信号を減衰させた原因は 岩石中のガラス成分以外にもいくつか考えられるものである。……”

もうひとつ カリフォルニア北部の Mono クレータ地域の例を第11図としてかかげる。これも送信波に垂直偏波を採用した珍しい例であるが この地域には 南北方向に連なる新期火山岩の chain が分布している。溶岩とその側面を覆う火山灰 噴石等のコントラストに関するかぎり VV と VH 間にはほとんど差がみられないが クレータ(A) 溶岩円頂丘(B・C・D) および斜壁谷(E・F)の部分では VH の方が弱くなっており 映像上の暗色部にはすべて植生が認められない。換言すれば珪長岩または黒曜石として地質図幅に記載されている部分は 偏波方向による差があまりみられないけれども これはなだらかな地形を生ぜしめている植生や土壌に覆われた古い時代の噴出岩や溶岩流に相当するものと思われる。これらの古い溶岩の表面は若い時代のものにくらべ きわめてなめらかになっている。

以上のようにしてレーダー信号に影響を与える要素と

しては 岩石のガラス状性質とともに一層重要なのがその表面の起伏の度合 植生そしておそらくは組成や風化の程度に関連してその生成年代等を列挙することができよう。映像上の暗色部は比較的新しい時代の噴出岩であり 土壌や植生が新鮮な岩石をまだ覆っていないものと考えてよい。LYON の行った IR 分析によれば (A) 部の異常な信号強度は火山灰の欠如に起因するものであり 丹念な地上調査を以ってしても解明できなかったものであるが この種の区別は年代関係の推定にも役立つと考えられている。

### 限界と反省

さて上記のあたりまでは比較的順調な進展がつづき 「二重偏波式SLAR」の明るい将来が予見されたのであるが 70年代に

入ると 直接的な地質調査への効果に関する発表は急速に下火となっただけでなく かえって否定的な意見もきかれるようになってきた。たとえば NASA USGS ミネソタ大学ならびに同州地質調査所などにより 数年がかりで Mesabi Iron Range で実施された共同実験は高々度パナクロ写真(RC-8) 赤外線(Recon IV) 紫外線(AAS-5) などを動員した各種リモートセンサの総合テストであったが SLARそれ自身(HH方式)は 岩石単元のマッピングならびに広域的断層帯の検出能力において最優秀との高い評価を受けたにもかかわらず HV映像(第12図)は HHほどには階調のコントラストとくに低地湿地帯と乾燥した高地部との差が明確に表われず 地質調査の目的にはあまり役に立たないときめつけられている(WALKER 1972)。

またそこまで明言はされていないまでも ヌタ州南部の Table Cliff Plateau~Big Brown Mesa 地域で行なわれたかなり早い時期(1965)での実験でも “No significant differences believed to have geologic significance were observed between the two” (HACKMAN 1967)とあって 地質判読に際し cross のデータは一切無視されてしまった。同じく WISE (1967)も人工物ならいいが地質には無用と指摘している。

別にこの時点で結論を急ぐべき必要はないと思われるが このように地質調査への “直接的な” 道具としての SLAR の効用に関しては 賛否こもごもといった状態に陥っている現況は否定できないようである。たしかにこれまであげてきたいくつかの positive な方の事例にし

ても もちろん主観性の強いものではあるが 実感としてはもうひとつ迫力を欠いているのが 偽らざるところではあるまいか。少なくとも cross の効果が全然認められなかった事例の存在することが この種の批判を招いている最大の かつ単純な理由であるが しかし反面 前掲の第4図をはじめ like と cross の間には明らかな差異が 最終表示としての映像上の質感に表われている場合の少なくないことも事実であり 要はどれだけの信頼度を以って地表物質との対応がつけられるかという SLARに限らず他のすべてのリモートセンサにも共通した要求に対する答への評価に帰着する。

地質調査というものの範囲をどこまで含めるかという考え方にもよるが DELLWIGらの期待した岩相弁別への寄与がかりに不十分であっても 起伏の程度や 土壌・植生類に関連した知識も また立派に広義の地質調査の一翼をになうものといえよう。対象が複雑になるほどひとつの計測技術が有効な場合と そうでない場合が生ずるのはやむをえないことであって それは大部分の物理探査法が歩んできた そして今も歩みつつある長い道のりであり またそれなればこそ 多面的な探査方法を打って一丸とする integrated system の必要性が叫ばれている所以でもある。SLARではまだそこまでいたっていないが前記のように規模の大小こそあれ月面探査などでは レーダー信号の偏波特性やプリユスタ角を利用した解析によって 地表面の平均的な粗さとともに 誘電率(みかけ温度)などをも算出しており いずれは磁気・放射能・比抵抗等の空中物理探査と 同列の物性図幅への道が開かれるものとの期待もあながち夢ではない。

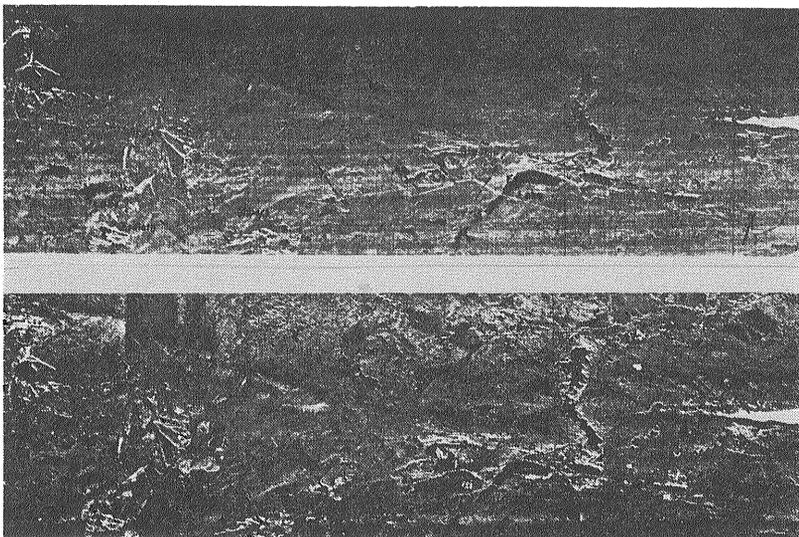
現に可視光の分野では 偏波特性は物質識別の“key”とまでいわれているほどである(EGAN and HALLOCK 1966)。

現時点での SLAR の技術体系のなかに占めている比重の割には 偏波効果にやや過重なほどに紙数を割いたのも将来への発展を意識したからでもあった。したがって“地質”との関連は漸次 弱まってゆくけれども次節以下にもしばらくこの偏波効果の応用面をながめてゆくこととしよう。

### 他分野への応用

まずやや疑問視されてきた地質調査への直接的効用にひきかえ 絶大な威力の発揮がほぼ確実とみられている分野に 農林技術—植生の識別がある。SLARによるこの方面の研究は Scatterometer のような非映像系のレーダーによる方法よりも大分おくれで 1965年頃から開始されたにすぎないが 翌66年には早くも Morain and Simonett が非常に有望な成果を公表するにいたった。

これは植生別の肌理の変化や 確率密度関数のような分析手法と偏波特性を組み合わせ 多角度からのデータ総合による判読精度の向上を目指したものであり 乾燥した半砂漠地帯 植生の密生した山岳部および極地方という はなはだしく異なった成育環境を代表させる試験地域としてユタ州南西部 オレゴン州中央部およびアラスカの永久凍土帯をえらんだのである。これら諸地域のなかで 偏波効果をもっとも顕著に表われたのは 太平洋岸の中湿性の針葉樹地帯のモデル地域として選定された オレゴン州の Horsefly Mountain であった(第13図)。



第12図  
Mesabi Iron Range(モニターWALKERによる)  
(上)HV (下)HH(縮尺1:147,000)

森林部の境界は HV 映像上に肌理 コントラストともに強調されて鮮明に表われており またヨモギ類の雑草である sagebrush からの反射は 明らかに HH のそれよりも微弱で 隣接した針葉樹林や草地との区別はきわめて明確である。 誘電率のちがいはしばらくおくとしても この理由として考えられるのは 両者の間における葉片の配列や長さの相異で おそらく後者は sagebrush よりもこのスケールでは電波的になめらかでなくなるため depolarization の傾向が強いのではないかと解釈された。

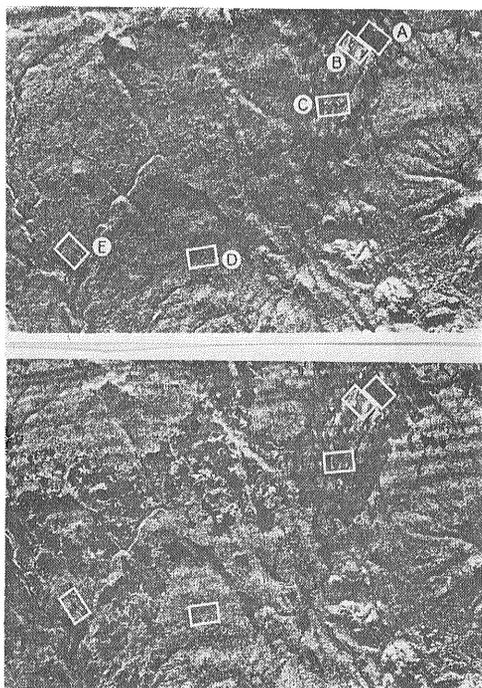
このほかにも HH では 暗灰色を呈する低反射信号域が HV では沼沢地と判読されて 既存データとの良好な一致を示すなど とにかく対比は HV のおかげできわめてスムーズに かつ正確に運んだという。

次に最近では ULABY et al. (1972) の行なった農作物の弁別に関する基礎的研究が興味深い。 一般的な植生や表面の粗さはまだしも 地質との関係は一段と薄くなってゆくが SLAR の能力の一端を知る意味において 必ずしも無用ではあるまい。 実際 “Zinc pansy” やザイルにおける著名な例にみるごとく 鉍化帯における植生の変化が資源探査に結びつく可能性も強いだけに この方向からの検討も一応 注意を払っておく価値がある。 ただしこれは cross 成分は除外し like のなかでの水平・垂直偏波による応答差の吟味である。

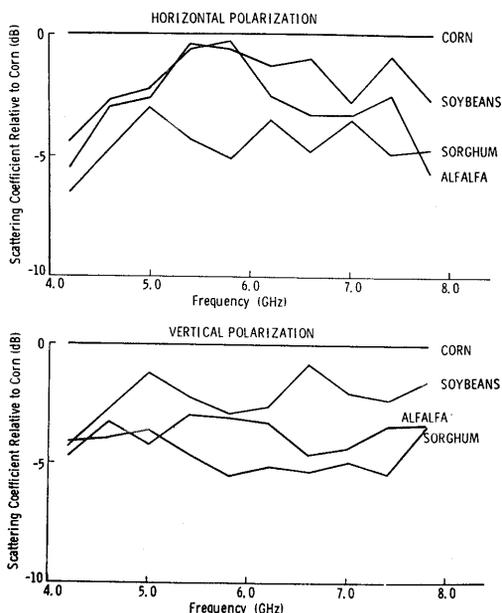
実験方法はトラック上に張り出した 長さ40~75ft のブームに 3ft の皿型レーダーアンテナ (4~8GHz) を装備し 6種類の照射角 (0°~70°) についてトウモロコシ とうりゃん 大豆 ムラサキウマゴヤシによる反射スペクトルを測定した。 わずか一年の限られた成育シーズン中に83カ所のフィールドを回り データポイントは 50,000に達したというから徹底している。 各地でこの装置は 10コの周波数点における後方散乱波スペクトルを帯域 400MHz で測定しつつ 平行して土壌や植物サンプルを採取して 含有水分や誘電率特性をくまなく調べ上げた。 第14図はトウモロコシを参照基準とした場合の各作物の応答特性の一例 (照射角 30°) であるが H と V との間には予想通り相当の差が認められる。

作物種類の弁別には BAYES の決定理論を応用しており 要約して次の結果をえた。 すなわち水平偏波のデータのみから解析すると 両偏波を用いた場合に比し正しい解を与える確率は 86%から68%へと急激な低落がみられた。 観測値ベクトルのディメンションは たとえば (10周波数×6照射角×2偏波)=120コとなり これだけのデータが フルに利用できれば誤りを出さない確率は 94%にも達するけれども 実際的なエアボン調査では 有効な照射角は多くともせいぜい2コと考えられるから 精度の低下を防ぐためには ここでも周波数や偏波の多重化しかないことをこの結果は教えている。

最後に実用上の判読技法に対する偏波効果を扱った点で やや特殊な統計的実験 (LEWIS MacDONALD SIMO-



第13図 Horsefly Mt. (オレゴン—MORAIN らによる) (上) HH (下) HV



第14図 各種農作物の周波数特性 (ULABY et al. による)

NETT 1969) を紹介しておきたい。それにこれは 電力線 鉄道 橋梁あるいは水路標識のような線(点)状の人工建造物を対象として行われたものだけに これらに見合った規模と形状の地質的目標についての拡張を期待するのは不自然ではない。よく知られているようにリモートセンシングの応用分野には 地域開発や都市交通状況の inventory などが含まれているが 空中写真よりもむしろ強い目標~背景間のコントラストを有するにもかかわらず 分解能の低さが災いして従来 この種の用途に対する SLAR の実績は 不満足なものがあつた(MOORE 1968 SIMPSON 1969)。分解能自体の改善によらずしてこの事態を解決するためには やはりここでも 偏波を含む測定量の多重化がかねてより要望されていたのである。

彼らの採用した実験は きわめて経験的なアプローチで レーダー映像の判読経歴については ほとんど白紙のカンサス大学の地理専攻学生68人を動員し 各人にそれぞれ異なる測線上における 2枚づつの HH HV 映像を解析させた。その結果のF検定による克明な分析が各種の判読対象について試みられたが 長すぎるので結論のみを摘記するにとどめる。まず一般的には やはり like の方が cross よりも良好な成績となつた。もっとも cross の方は like と足並みをそろえるため 信号レベル ダイナミックレンジともに 10db ほどゲインを上げなければならないので 雑音も増えて映像は全体として grainy となる傾向が強く これが cross が敬

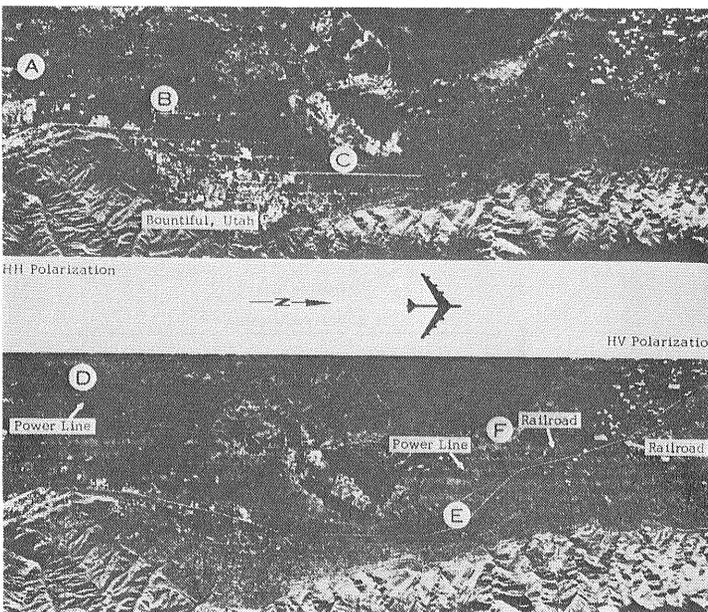
遠される一因でもあろう。ただ自然物よりは人工的建造物の方が depolarization の気味が強い とのことであるが この理由は明らかにされていない。

分析結果は信頼度99.9%を以って

- (1) like は以下の判読対象の検出に有効と考えられる
  - (イ) 測線方向と平行に走る鉄道 電力線
  - (ロ) 測線方向の如何にかかわらず 水面のような無反射域に敷設されて強い反射信号を生ずる橋梁 水路標識など
- (2) 測線とある角度をなしているような場合の鉄道 電力線に対しては cross の方がすぐれた成績をおさめた

もちろん このテストでは他の要素—映像の画質 地域差 各判読者の熟練度などは考慮に入れておらず あくまでも限定された範囲内での結論にすぎない。しかし上にみたように 少なくともある種の場合には cross の併用は有益と考えられるし 異なった照射方向をうるための(不経済な)重複測線をとるよりははるかに簡易でもあるどころか 場合によっては cross 単独でも充分とまで言い切っている。

第15図は ユタ州の Bountiful 近傍の HH HV 映像で これでは判りにくいかとも思われるが原版をみれば 両映像間の差異ははっきりと認識できる。“線状”という点では 断層破砕帯などの表われ方にもこれらの人工建造物と一脈相通ずる面がある管で 無条件にはこの結果を転用できないとしても この研究は間接的に偏波効果の地質調査への適応性を裏書きしたとみなすこともできるだろう。



第15図  
Bountiful 周辺(ユター-Lewis による)  
(上) HH (下) HV

以上 文献の単なる羅列に終始した感も残るが SLAR のこの特色ある一断面を素描したと同時に 今後の動向についても一応の展望を試みたつもりではある。

(つづく)

(筆者は 物理探査部)