

気象衛星センター技術報告

特別号

気象衛星システムの概説

気象衛星センター

昭和61年3月

気象衛星センター技術報告 特別号

気象衛星システムの概況

目 次

	頁
1 章 序にかえて	1
2 章 放射と宇宙からの観測	6
3 章 ひまわりと VISSR 観測	15
4 章 衛星の軌道	23
5 章 観測データの処理	31
6 章 衛星通信の概要	41
7 章 気象衛星通信システムの運用	49
編集 後 記	57

1 章 序 に か え て

1.1 宇宙開発

静止気象衛星ひまわり（又は GMS）は昭和 52 年 7 月に第 1 号が打上げられて以来、今日の 3 号に至るまではほぼ 10 年に達しようとしている。この間の経過をたどてみると、大よそ次の表のようになっている。

1.1 表 静止気象衛星関連事項の経過

年	
昭45年以前	39 年，ロケットによる高層観測 41 年，TIROS 衛星の自動画像（APT）受信実験 43 年，同上実用化
46	WMO 執行委員会で GMS 運用の方針を表明
47	気象衛星準備室発足
48	組織，システム検討，職員研修の開始
51	清瀬，鳩山の施設建設
52	気象衛星センター発足 7 月，ケープカナベラルから，ソーデルタロケットによりひまわり 1 号打上げ。 9 月，最初の画像取得 11 月，NASA から気象庁へひまわりの移管
53	4 月，ビサ観測等，ルーチン業務開始
56	8 月，種子島宇宙センターから N-II ロケットによりひまわり 2 号打上げ 12 月，正式運用
59	1 月，ひまわり 2 号故障のため，1 号が暫定業務代行 8 月，ひまわり 3 号の打上げ 9 月，正式運用

気象衛星の歴史をみると，1959 年に VANGARD 2 号によってはじめて雲分布の写真が得られたのを皮切りに，米ソ二大国を中心に宇宙からの気象観測へのぶ厚い研究開発がすすめられてきた。米国では 1960 年以来 65 年まで 10 個の TIROS を打上げ赤外放射計による気象観測技術をほぼ確立した。つづいて ESSA 型衛星シリーズによって太陽同期，つまり世界各地で毎日同じ地方時で衛星からのデータを取ることができるシステムが実用化され 9 号までが打上げられた。引つづいて NIMBUS 型が 6 号まで実験され，マイクロ波帯を含む広範な波長

帯の観測が試みられた。これらの開発実績を背景として，軌道衛星として最も実用性の高い NOAA 型衛星のシリーズが今日の NOAA 9 号にまで引つがれてきている。ソ連においても 60 年代はじめの COSMOS 系気象衛星によって気象研究の目的で雲写真フィルムが回収されて以来この方向での実験が行われ，70 年に入って NIMBUS 級の衛星として METEOR I 型シリーズがほぼ 10 年の間に 30 個打上げられた。1976 年からは大重量の METEOR II 型シリーズに切かえ，現在までに 10 個をこえる運用がつづけられている。

これらはいずれも極軌道の周回型衛星であるが，静止衛星としては 1966 年をはじめの静止気象衛星 ATS 1 号が打上げられて以来，米国では 72 年からはじまる 8 個の GOES 衛星が運用されてきた。一方ヨーロッパではフランス，英国，西独などが夫々国のレベルでの宇宙機関をもって活動している反面では，準加盟国を含めてヨーロッパ 15 カ国が参加する強力な欧州宇宙機関（ESA）を創立している。ESA は，通信放送，地球探査，宇宙天文研究，海洋観測，航行援助など広範な目的をもつ多くの衛星を開発してきた。静止気象衛星もその活動の一環として，1977 年に METEOSAT 1 号を，82 年には 2 号を東経 0 度の赤道上に打上げ運用を続けている。

次節でもう少し詳しくのべることになるが，現在の静止気象衛星のグローバルな配置は 1979 年に実施された FGGE に原点がある。この計画では，更にインド洋上東経 70 度附近にもう 1 個の静止気象衛星を打上げることによって完結する姿になっていた。その衛星はソ連が担当することになっていたが，多分高緯度にあるソ連の立場からの判断と推定されるが，今日まで実行されることなく経過してきた。その代りにインドが自国の宇宙開発方針に則り，通信・放送および気象観測の 3 つの目的をもつ多目的衛星 INSAT-1A および IB を打上げ，制限つき（画像の国外への提供は行わない）ながらその穴をうめるという形をとっている。

そのほかにも，宇宙開発の能力に優れた中国をはじめ，ブラジルその他の国も気象衛星に対する将来計画を表明しつつある段階である。また特にヨーロッパ各国は東欧諸国を含めて自国の得意とする技術の成果を，NOAA や METEOR などの搭載機器として提案し，米国やソ連もこれら共同開発への参加を歓迎するという姿勢をとっている。

ここで日本の場合について簡単に紹介しておきたい。

わが国の宇宙開発の原則は、1967年に人類共通の利益に貢献する科学・技術・経済の発展をめざす宇宙開発と宇宙空間の利用をうたった国連の決議に沿う、宇宙開発大綱によって示されている。これを促進するために、内閣直属の宇宙開発委員会が設置され科学技術庁長官が委員長となって、重要な政策、開発経費、総合調整、研究体制の運営などの方針が審議され内閣に答申される。

委員会の下部機関として、学識経験者や国と民間の宇宙関係部局の責任者から成る専門部会がおかれる。部会は年度ごとに提出される宇宙開発方針の具体的な中味を細部にわたって検討し、必要な変更や勧告を行うことになっている。

一方実施機関として、主に政府出資による法人である宇宙開発事業団(NASDA)が設立されている。事業団は衛星本体や打上げロケットのシステム開発、製造契約、種子島発射場、筑波の宇宙研究所と追跡センターなどの運営に当たっている。気象衛星についても、その開発や打上げ制御など管制の一部はNASDAと気象庁との契約によって行われる。

そのほかに、文部省宇宙科学研究所が地球環境、天文宇宙研究用などさまざまな型の衛星を開発し、独自のロケットにより鹿児島県内之浦から打上げるなど、科学研究所の分野で長年の実績がある。

また、通信や放送などの公共の実用衛星の管理を主な任務とする、通信放送衛星機構の設立が法令によって定められている。最近民間でも自ら通信衛星を運用したいという計画もあり、宇宙や航空に関する経済諸団体の動きも活発である。

気象庁は宇宙利用に関しては先輩格の位置にあるが、最近各省庁での宇宙利用とその研究開発への意欲は高く、相当の熱意をもって臨んでいる様子が強く感じられる。

宇宙開発の手続きからいえば、まず研究の段階、ついで開発の段階、そして打上げと運用の段階に至るまで、一段階づつ格上げの提案を行い、宇宙開発委員会の承認をとりつけてゆくことが必要である。現在静止衛星は実態としては殆んど米国の製品といってよいが、次世代の衛星を目ざして自主開発する場合には、上記の段階をふむ手続きが必要になってくる。

宇宙開発はそのプロジェクトの巨大さから、どうしても国家レベルの計画ということになる。月に一番乗りするために国の威信をかけるという場合もあるように、国により時代によって宇宙開発の位置づけは変わってくる。次の表には、気象衛星に関連する宇宙開発を実施している代表的な国と主な担当の機関とを一覧しておいた。

1.2表 各国の宇宙機構

	国 家 機 構	気象衛星機構
米 国	航空宇宙局 (NASA)	商務省(DOC) 海洋大気庁
ソ 連	国家宇宙探査 委員会	水理気象委員会
欧 州	欧州宇宙機関 (ESA)	欧州宇宙運営局 気象部(ESOC)
フランス	産業技術開発省*	国家宇宙開発局 (CNES)
イ ン ド	宇宙省 宇宙研究機関 (ISRO)	気象省(IMD) 衛星気象部
中 国	宇宙空間技術 研究院	国家気象局 気象衛星中心

* 英国、西ドイツ、イタリアなどはほぼ同様の機構をもつ。

1.2 グローバルな衛星観測

1950年代のはじめ頃は近代気象学が確立したという点で重要な意味をもつ時代といわれている。この頃はじめて高気圧や低気圧の物理的な本質が解明され、今日にまで及ぶ気象学研究の方法論が生み出された。それと同時に、この物理的な方法による大気運動の予測が、計算機による数値解法の発展をうながし、やがては予報の基礎科学として定着するまでに発展してきた。

気象学と電子技術の両面からの発達は気象業務にも多大な影響をもたらした。60年代から70年代にかけては、このような気象業務あるいは気象研究の根幹にかかわる方法が、どこまで有効でありうるかを実証し、更に将来の発展への方向づけを行う必要があると感じられるようになった。あたかもこの頃から人工衛星による気象観測の可能性も急速に展望されるようになった時期とも重なる。

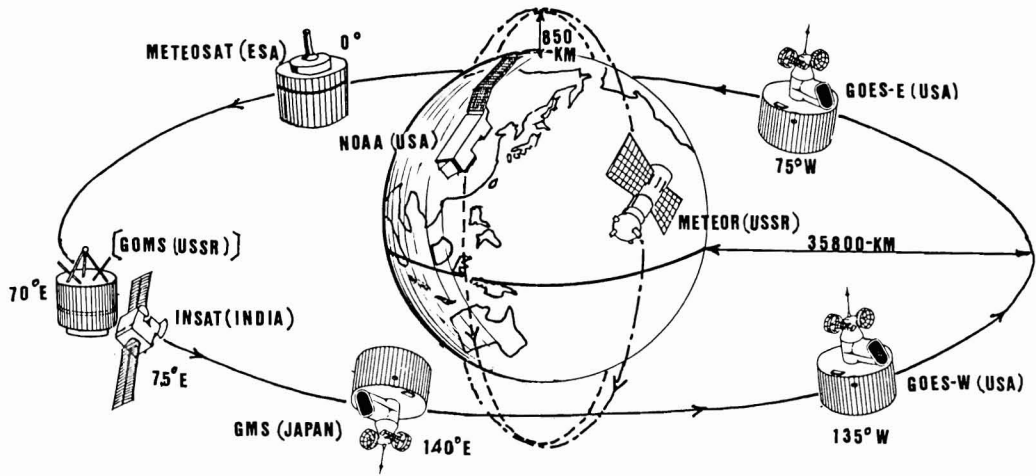
このような情勢を背景に、WMOは国際学術連合(I-CUS)の協力のもとに、新しい技術を動員して全世界をくまなく観測し、そのデータを集め、これらのデータによる解析と予測の可能性について実現可能な最高の技術をもって検証するというGARP計画を立案した。

GARP 計画の実施は1年の予備実験において1979年の1年間をあてるという第1回 GARP 実行計画(FGGE)が承認された。

この壮大な計画の中で重要なひとつの課題が、静止及び極軌道衛星による宇宙からのグローバルな観測という、従来には無かった新しい分野の開拓であった。昭和46年にはこの国際計画に対して、わが国も気象衛星運用の一翼を担うという重要な決定を行った。この意志をWMO 執行委員会で表明すると共に、気象衛星準備室をもう

け、その実現に歩み出すことになった。その後昭和52年に気象衛星センターを創立してひまわり1号を打上げるまで、組織の編成、予算、建築、システム設計から職員教育に至るまで気象庁の全力をあげての取組みがなされたことは記憶に新しいところである。

ところでFGGE計画の中での気象衛星の位置づけは大略以下のようなものであったといえるだろう。1.1図に衛星の配置の模様が示されている。



1.1図 静止気象衛星、極軌道気象衛星配置図

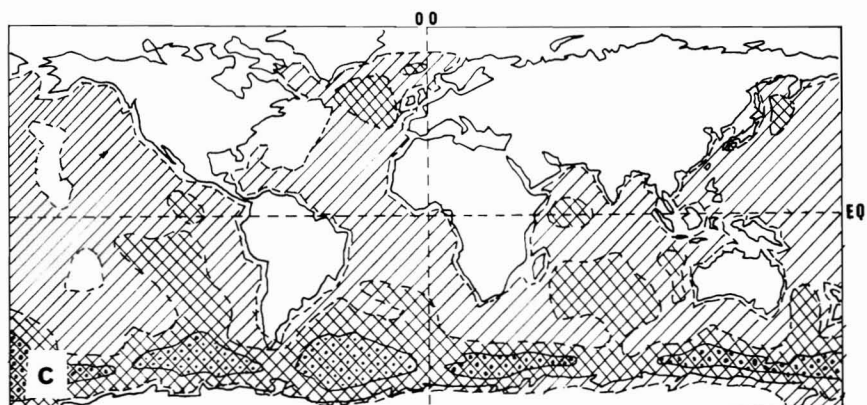
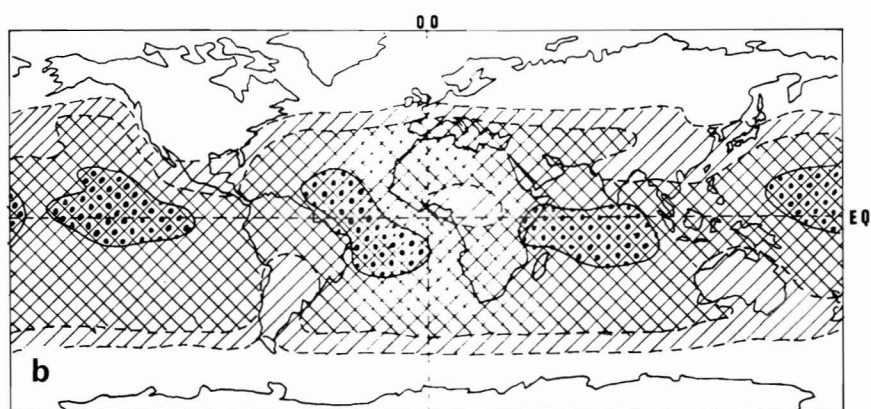
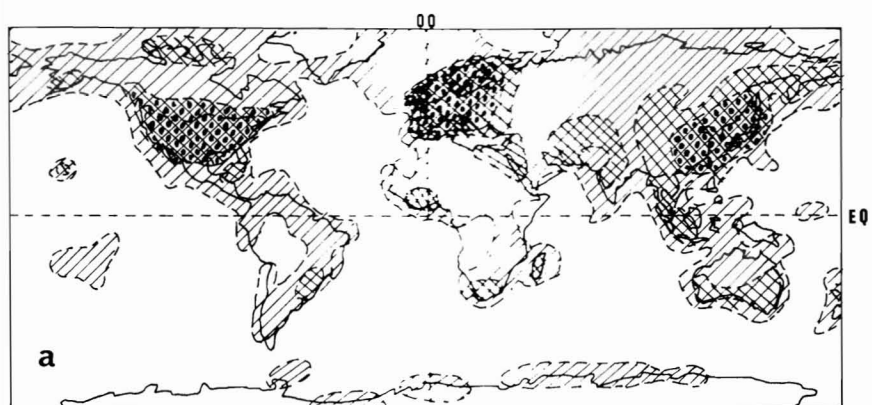
これらの衛星が分担する項目は、静止衛星による大気運動(雲移動ベクトル)の観測と自動観測データの収集、軌道衛星による大気鉛直構造の観測と漂流ブイからのデータの収集などであった。このことによって気象の定量データがどの程度期待されるかは1.2図に示したようなものであった。

この中で、(a)はラジオゾンデ観測の分布で当然海洋や南半球では広い空白地帯が存在している。(b)は静止衛星によって大気の流れが観測されるであろう密度、(c)は極軌道衛星による鉛直構造観測分布の目標値である。この3枚の図を重ねてみればわかるように、データの種類や精度の差はあれ、とにかく全地球をくまなく均一にカバーする可能性に期待がかけられた。

これらのFGGE観測の成果がどうであったかという評価が重要な点になってくるが、この評価を客観的に実証する研究が各国の予報センターや研究所で今なお続けられている。さまざまな観測システムに対する個別的な

あるいは総合的な立場からの役割を分析する国際的な評価検討会も何回となく開催されてきた。FGGEでは雲の分布をデータとして集めることは目標にならなかったが、雲の画像情報による天気監視が、日々の予報と防災サービスに重要な役割をもつことも認識されてきた。

これらの状況をふまえて、WMOは衛星による気象観測とデータの提供はFGGEという限られた実験で終るものではなく、常設的な世界気象観測網として将来とも継続されるべきものであるという主旨の決議を行い、衛星運用国に対してこの事業の継続に努力すべきことを要請した。静止気象衛星の運用にかかわっている日本、米国、ヨーロッパ宇宙機構、インド、ソ連とWMOは、全球的な立場からの衛星運営の実務に関する打合せを行う会議を毎年開催している。WMOにおいても、執行理事会の要請によって衛星問題を検討するための特別専門部会が常設されているほか、近年の気候問題にかかわる衛星の役割が多方面から見直されつつある状況にある。



1.2 図 観測密度

a: ラジオゾンデ, b: 静止衛星による風観測,
c: 軌道衛星による鉛直構造観測

1.3 この解説書の発行目的

ひまわりのシステムは気象庁が持つ大きな観測施設であるから、われわれの共有資産として有効に活用することを考えるべきものであろう。ひまわりのことをよく知れば、その利用に対しても新しい発想が生れるかも知れないし、少くとももっと親近感が生れるはずである。このことが、今あらためてこのような入門解説書を発行しようとするひとつの目的である。

今までも、衛星について解説を目的とする印刷物がなかったわけではない。しかしこれらは、どちらかという専門家間の情報交換に主眼があったように見える。いま多くの職員にとって望ましいことは、気象衛星について全体のイメージが浮んでくるような通読できる文献ではないかと考えられる。この顕在的または潜在的要請になるべく近づこうということを、刊行の第二の目標としている。

現在では、ひまわりの画像は割合簡単な施設によって誰でもが受けられるようになっている。大学や地方団体、民間会社あるいは個人でも利用者は増加している。そのような状況では、時には外部から気象衛星についての質問をうけたり、あるいは講演を依頼されることもある。このような知識の普及ということも気象業務にとって大切な仕事である。そのようなときに、少しでも役立つ素材を提供しておきたいということも発行の動機である。

この解説書には雲画像の見方という項目はない。大部分の利用者が接する衛星観測の結果は画像であるから、これをどう使えばよいかのコツみたいなものを知りたいという要望も強いだろうと思う。たしかに雲画像は直観的でわかりやすいという点もあるかも知れないが、よく考えてみるとこれは大層むづかしい気象の問題を含んでいると見ざるを得ない。要するに雲画像の問題は、ここで目標としている「気象衛星システムの理解」とは別の次元の課題である。この方面のことは画像の見方を主にした研修資料として既刊のものにゆずる方がよいと思うし、むしろ雲画像については、気象学そのものが最良のテキストであると断言しても過言ではないだろう。

以下に本文を読む場合の若干の留意事項をのべておきたい。

このテキストでは、衛星が何をどのように観測し、そのデータがどう処理され伝えられるか、衛星の動きや観測のための管理などが記述されている。先にものべたように、通読した結果、気象衛星の全体像が浮んでくれば

よいとしている。したがって扱っている問題の性質上若干の数字的表現を借りざるを得なかった部分(2章など)もあるが、その物理的な内容はそれほどむづかしい点はないから、話の筋道さえ理解できる程度にとばし読みしても一向に支障がないと考えている。

またこのテキストでは正確な学術用語にあまりとらわれなかった。宇宙工学系の用語には耳慣れないものもあり、用語でとまどうことは経済的ではない。同じような意味で、気象衛星センターの中だけに限られるような作業の詳細についても、全体の理解の助けになるものでない限りはむしろ記述すべきではないと考えた。

この解説を通じて、なるべく単位は統一することを心がけたつもりである。即ち

温度	= 絶対温度(°K)
長さ	= メートル(m)
時間	= 秒(sec 又は s)
角度	= ラジアン(rad)又は(度)
立体角	= ステラジアン(Sr)
振動(周波)数	= ヘルツ(Hz, 1/sec)
エネルギー	= ジュール(J)
エネルギー/時間	= ワット(W) = J/sec

などである。また上記の単位の1000倍をキロ(k)、更に1000倍をメガ(M)、更に1000倍をギガ(G)とする。一方1/1000をミリ(m)、更に1/1000をマイクロ(μ)としている。

念のために立体角とは、Rという距離からみて面積がSであるときに S/R^2 で定義される。例えば半球(表面積は $2\pi R^2$)を中心から望んだときの立体角は 2π (Sr)である。またlogは常用対数を表しており、その他の数学記号は慣用に従った。

なお本文中で使っている略号はその章または節で説明しているが、割合によく使った略号をあげておくと以下のようなになる。

CDAS	……	気象衛星通信所、衛星との交信の窓口にあたる。
MDUS	……	中規模利用局、HR-FAX(高解像度FAX)の受信局。
SDUS	……	小規模利用局、LR-FAX(低解像度FAX)の受信局。
VISSR	……	可視赤外走査放射計、ひまわりの観測機器で、本文では「ピサ」と記している。

2 章 放射と宇宙からの観測

2.1 はじめに

地球上のあらゆる生物は水と空気と太陽のめぐみによって生きている。そして水と空気の動きもその源をただせば太陽からの放射エネルギーをうけた結果として起っているとしてよいであろう。一方地表面と大気の温度を四季を通して地球上で平均すれば 280 度前後になり、この温度に相当するエネルギーを放出しながら冷却しようとする。いいかえれば、太陽光の正味の入射エネルギーと、地球大気系から宇宙空間へ放出されるエネルギーが釣り合ったところで、ほぼ 280 度に保たれていると考えてよいであろう。

ところで、電磁波は波長によってさまざまな呼び方がなされている。その慣例の名付け方を 2.1 図にあげておく。そのようなわけで、この解説書でもあるときは電(磁)波といたり、光といたり、あるいは放射と呼んだりするが、その実体は同じものと考えてほしい。一般に電磁波の波長は、電場(又は磁場)の一番強い山から次の山までの長さで表すが、可視や赤外の領域では $\mu\text{m}(\text{mm})$ の千分の 1、マイクロメートル)の単位で表わすのが通例である。また波数は 1 cm の中に波が何個入るかということであるから、波数 n と波長 λ との関には

$$n = \frac{1}{\lambda}$$

で表される関係がある。さらに波の振動数(周波数)は、ある点を 1 秒間に何個の波が通るかということであるから、波の速さ C を波長で割ればこの振動数 f が求まる。

$$f = \frac{C}{\lambda}$$

ひまわりと地上局との通信に使われる 2 GHz (1 GHz は 1 秒間に 10^9 回の振動)の周波数の電波の波長は 15 cm, $10 \mu\text{m}$ の赤外放射の周波数は 3 万 GHz ということになる(光の速さは 30 万 km / 秒)。

気象衛星で観測しているのは、宇宙空間を自由に伝わるのできる電磁波であり、中でも太陽や地球からの放射に関わりの深い可視から赤外の波長範囲のものが主な対象となる。この章では、衛星からの観測の基礎となる点に限って、放射の概念をまとめておくことが目的である。

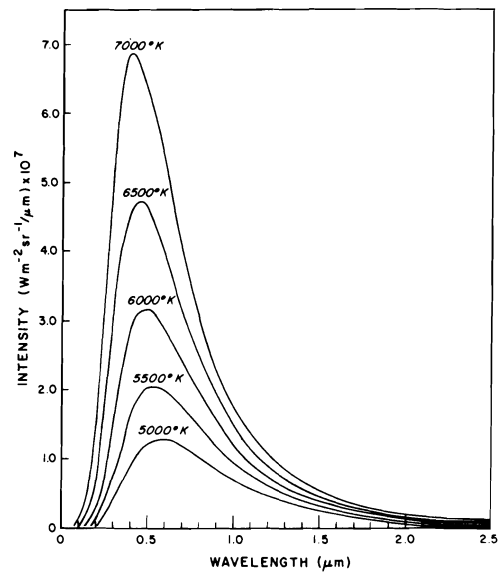
2.2 黒体放射

いまある物体を考え、これに熱を加えて温度を上昇さ

せたときに、その温度に対して最大限に電磁波エネルギーを放射しうる物体であるものとする。このような仮想的な物体を黒体と呼ぶことにする。黒体が放射する電磁波の放射エネルギーは物理学の理論から導くことができ、これがよく知られた Planck の放射に関する法則として次のような式で表わされる。

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hC^2}{\lambda^5 [\exp(hc/k\lambda T) - 1]} \quad (2.1)$$

ここで左辺は波長 λ を中心とした単位波長帯当り、単位立体角内に、単位時間のエネルギー量(放射の強さ)を表わす。 h はプランク常数、 k はボルツマン常数、 C は光の速さ、 T は絶対温度である。(2.1) 式の関係を、横軸に波長をとり、たて軸に放射の強さをとって画いたのが 2.2 図である。



2.2 図 黒体放射曲線

この図から明らかなように、物体の温度が高いほど放射エネルギーは強く、かつ最大放射エネルギーは短い波長の側に動く。太陽の表面温度は約 6000 度といわれているから、波長が $0.5 \mu\text{m}$ 附近の、人間の目に感ずるいわゆる可視領域にピークがくる。逆に人間の目の感度は、太陽の放射スペクトルに合うようになっているというべきかも知れない。

一方地表や大気や海洋の平均温度は 280 度くらいであるから $15 \mu\text{m}$ 附近に中心をもつ赤外波長域の放射である。

	Name of region	Wavelength (cm)	Frequency (cps)
	ガンマ線	10^{-9}	3×10^{19}
	X 線	10^{-8}	3×10^{18}
	紫外線	3×10^{-8}	10^{15}
Violet Purple Blue Green Yellow Orange Red	可視光線		
	赤外線	10^{-4} 10^{-1}	3×10^{11}
	マイクロ波	1	3×10^{10}
	Spacecraft	10^2	3×10^8
	Television & FM	10^3	3×10^7
	Shortwave	10^4	3×10^6
	AM	10^5	3×10^5
	Radio waves		

電 波

2.1 図 光（電磁波）の名称

このように、太陽放射と地球からの放射が著しく違った波長領域に分離されているということが、ある意味では気象の問題に放射を考慮する場合に都合のよい点でもある。

黒体放射の全エネルギーを見積るには、この Planck 関数をすべての波長について、全方向に積分すればよい。黒体放射は等方的（無指向性）であるから、この計算は割合簡単で

$$E = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

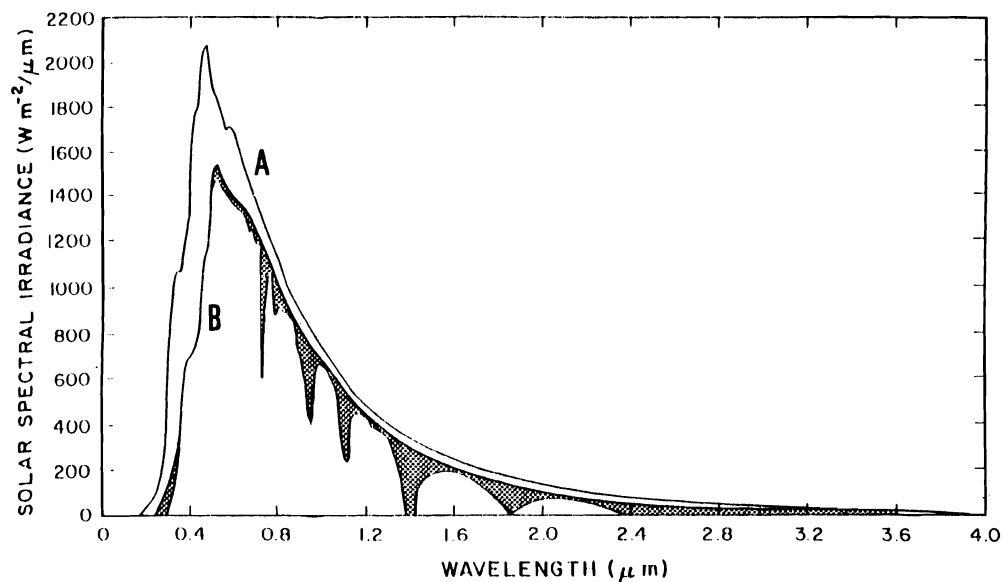
のような結果が得られる。 σ は常数であり、絶対温度 T の黒体が放出する全エネルギーは T の 4 乗に比例するという、よく知られた法則が得られたことになる。

以上は黒体という仮想的な物体に成立つ法則であるから、実在する物体への適用性は吟味しておく必要がある。し

かし多くの現実の物体は黒体に近い性質をもっており、そうでないものでも黒体を基準とすることで論理の筋道を立てることができる。太陽から放射される光、地球表面から放射される赤外域のスペクトル分布などは殆んど黒体放射と見てよい。例えば地面につもった新雪が純白な輝きをもっているのは太陽光を効率よく反射しているからで、雪が自分で放出する波長帯で見るとは殆んど完全な黒体である。

2.3 太陽放射と地球放射

太陽も地球もほぼ黒体に近いことをのべたが、実際にそうになっているかどうかをまず太陽の場合について観測されたスペクトルで見ることにする。



2.3 図 太陽放射

よこ軸：波長

たて軸：放射の強さ、下向き成分を積分した値

A：宇宙での測定

B：地上での測定

2.3 図の中で、曲線 A は太陽の光が地球大気の影響をうけない宇宙空間で測定したものである。A 曲線を Planck 曲線に合わせてみると、約 6000 度の黒体放射曲線とほぼ一致している。一方 B 曲線は、よく晴れた日を選んで地上から太陽のスペクトルを測定した結果である。

この二本の線を比べてみると、まず A と B との間に全体として差があり、その差の程度は可視域から紫外部にかけての短い波長帯に著しく現れているのに気付く。その原因は、空気分子や大気中に浮いている微粒子によって

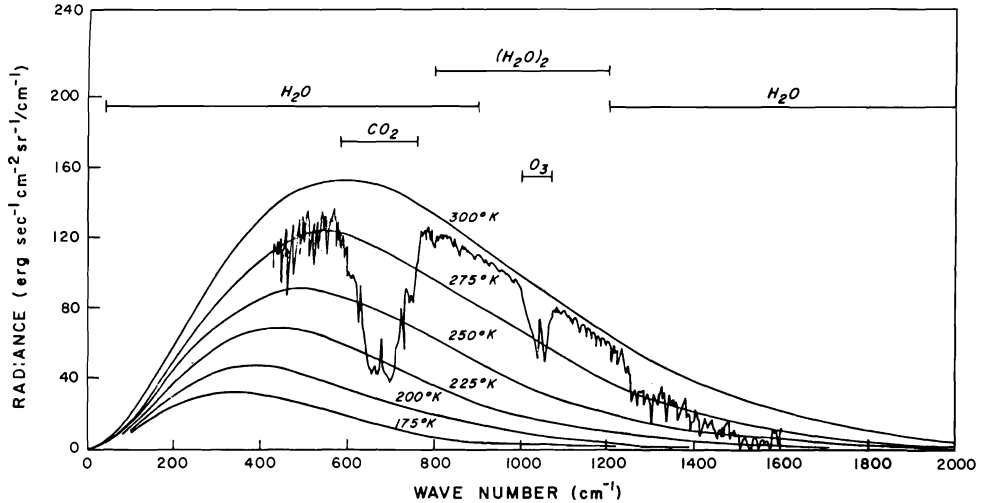
太陽光が散乱され、地上にとどく前に宇宙に帰ってしまうからである。次に B 曲線を見ると、所々に斜線でぬりつぶしたような波長帯の光は地表に達するまでに何らかの障害にあっていない様子を示している。この欠損部分は、大気中含まれている水蒸気やオゾン、炭酸ガス、酸素によって吸収された結果であると考えられる。

ひまわりに搭載されている可視検知器は、 $0.5 \sim 0.75 \mu\text{m}$ の波長範囲に感ずるように設計されている。この波長帯は、B 曲線でみると大気によって吸収される割合はごく

少いが大きな散乱をうける部分である点に注目しておく必要がある。

次に、人工衛星によって宇宙から地球の方を見ながら、地球・大気系からの放射を測定してみる。2.4図は、軌

道衛星 NIMBUS によってなされた赤外放射測定の1例である。この図の横軸は波数で目成っているから、2.3図とは逆に右側ほど波長が短くなっていることに注意して頂きたい。



2.4図 地球大気系の赤外放射

この図を見ると、放射の強さはいかにも不規則ではあるが、全体としては温度 295 度の黒体放射曲線で包まれたような形をしている。この衛星観測は、衛星が北緯 15 度の海上を通過し雲がないような場所での測定結果であるから、295 度というのはその場所での海面の温度が現れていると見てよい。

不規則な部分に着目すると、波数が 1 cm 当り 600 から 800 (波長では 15 μm 前後)の間では地球から宇宙に向けての放射が少なくなっていることがわかる。一方波数 800 から 1000 (12.5 μm から 10 μm) にかけては、地球表面の温度に相当する放射が大気を素通りして宇宙に達している様子がみられる。前者の大きくくぼんだところは、大気中に含まれる炭酸ガスによって放射が吸収された結果であり、後者の放射が殆んど素通りする波長帯は、大気の窓と呼ばれる領域である。大気の窓の波長で外から地球を見れば、大気に妨害されずに奥深く地表面や雲の状態を知ることができるということになる。雲も殆んど黒体に近いから、雲の下にある地表面からの上向きの放射は全部吸収する反面では、雲の表面からその温度に相当する黒体放射を出している。

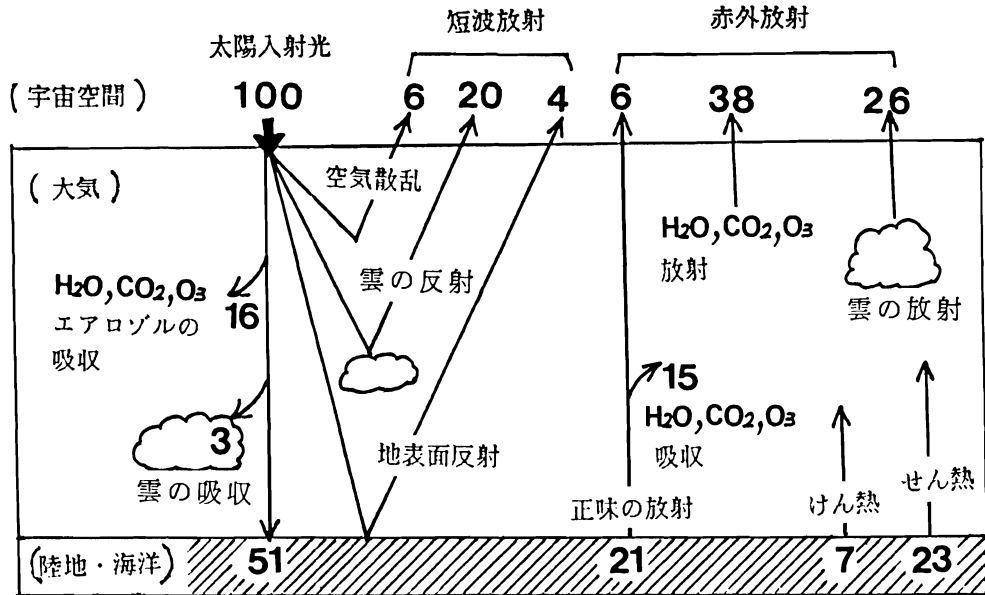
宇宙から地球・大気系により放射されるスペクトルの観測結果を示す 2.4 図については、オゾンによる帯域巾は狭いが鋭い吸収帯のあることや、ほぼ全波長帯にわたっ

て多少なりとも水蒸気による吸収の影響を受けていることなど、放射の収支問題を考える場合には重要ないくつかの特長が見られる。ひまわりの赤外感知器は、大気の窓の波長帯にだけ感ずるような設計になっている。

以上のべたような太陽放射 (可視光を中心とする波長の短い放射が主体であるから短波放射ともいう) と、地球大気系が放射するずっと波長の長い赤外放射 (長波放射) とが、地球上ではどのような役割を分担しているかを見ておくことも予備知識として必要だろうと思われる。そこで 2.5 図にこのことを示しておいた。

まず太陽からの短波放射エネルギーが大気の上端に 100 の単位で入ってきたとする。そのうち 6 単位は空気分子や微粒子によって散らされて宇宙に戻ってしまう。2.2 図の A 曲線と B 曲線の差の面積が A 曲線の面積に対する比率が約 6 % であることに相当する。さらに 20 単位は雲により、4 単位は地表面で反射されて宇宙に帰る。これら地球圏外に去る合計 30 % が地球大気系全体の太陽光反射率で総アルベドと呼ばれる量である。

残り 70 単位のうち 51 単位は海や陸で吸収され、大気中で吸収される 2.3 図の斜線部分の割合は 16、雲も 3 % ほど吸収する。吸収されたエネルギーは地表面や大気を暖め温度を上昇させるが、実際にはそのために一方的に温度上昇が起るということはない。それは次のような理



2.5 図 地球大気系の熱収支

由のためである。

2.5 図の右半分には、地球や大気からの赤外放射の様子を示している。まず地表面に着目すると、地表面は黒体に近いからその温度の4乗に比例する赤外エネルギーを放出している。一方大気も地表に向かって放射しているので地表から上向きには正味の値として21単位放出されると評価される。さらに大気中にはいつでも小さな乱れが起っているために、地表面から熱や水分をうばって大気の方に移動させている。蒸発した水分はやがて凝結して凝結熱を大気にあたえるからこれも熱のひとつの移動の形である。ただしこの乱流による熱の移動過程だけは電磁波の放射とは違う種類の物理過程である。とにかく乱流による地表面から大気への熱移動はそれぞれ7単位と23単位と見積られる。以上の合計51単位は太陽入射光のうち地表面で吸収される量と釣り合っている。

一方大気の方をみると、地表面を出た放射は途中で水蒸気や炭酸ガスなどの吸収を15単位受け、残りの6単位が宇宙方向に通過する。これらの大気成分は吸収すると同時に放射も行っており、大気から外へ向う量は38単位と見積られる。以上のように赤外放射のうち宇宙に向う70単位は、太陽放射の総アルベド30単位と合わせて、入射する太陽放射エネルギーと釣り合い、地球大気系全体が熱的にバランスを保つことになる。

同じような収支計算は大気の中でも行うことができ、ここでも損得は釣り合っている。つまり地球大気系全体も、地表面だけをとってみても、大気だけを見ても熱エネルギーのバランスは保たれているということである。

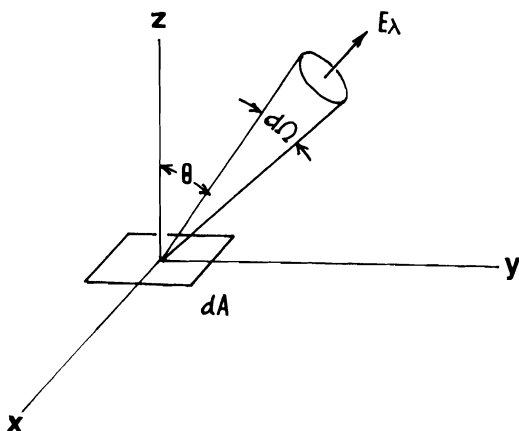
以上のべたことは、年間を通じて地球全体についての平均で見た場合のことであって、特定の場所での瞬間では、このようなバランスが成立していないのがむしろ普通である。例えば極地方ではここで考えた過程だけでは獲得するエネルギーよりも出てゆくエネルギーの方が多く、赤道地方では逆になっている。それでも極地方が一方向的に冷たくなり低緯度地方が限りなく暑くならないのは、大気や海の大規模な運動によって、南北に大量の熱が運ばれているからなのである。これらの事柄は大気大循環の問題であり、目下の課題からは外れてしまうので、これ以上は触れないでおきたい。

これらの図から、ひまわりが地球の方向を向いて観測している可視や赤外放射のおおよその位置づけが理解されるものと思われる。大気や海洋、陸面などの熱収支にかかわる基本的な物理過程である放射の問題は、宇宙からの地球観測の基礎でもあるので、放射の定量的な取扱いについてのごく概要のところを次節以下でのべてみたい。

2.4 放射伝達と衛星からの観測

目的を衛星観測に関係する放射の概要を知るということに限るならば、気象放射学の予備知識はそれほど必要ではない。説明の都合上簡単な数式による表現は避けたいが、物理的な内容はむづかしいものではないので、大筋のところが理解されれば十分であるという考え方で議論をすすめてみたい。

2.6図のように、ある面 dA を通って S 方向（面に立てた垂線と θ の角をなす）に放射される電磁波エネルギーを、立体角 $d\Omega$ の範囲で測るものとする。測定時間は dt 、光の波長 λ を中心にして $\Delta\lambda$ の帯域中に限るものとする（2.6図）。



2.6図 放射エネルギー伝達

このとき、測定された光のエネルギーを E_λ とし、次のような量を定義する。

$$I_\lambda = \frac{E_\lambda}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \cdot dt \cdot \Delta\lambda} \quad (2.3)$$

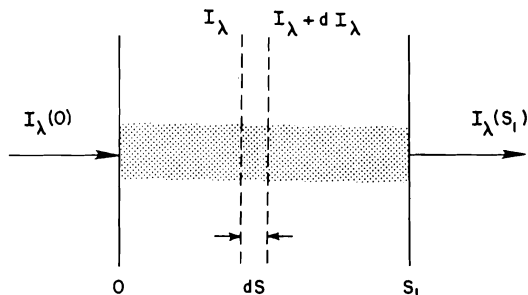
I_λ は放射の強さと呼ばれる量であり、直感的にも強さという感じと矛盾しない。 I_λ は例えばエネルギー/時間/ワットで表わすとする。

$$[I_\lambda] = \text{Watt}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{帯域幅}) \quad (2.4)$$

のような単位をもつことになる。ただし Sr は立体角の単位（ステラジアン）である。

いま、 S の方向に I_λ の強さの放射が入り、物質（大気）中を dS 通過したあとで測定した結果が $I_\lambda + dI_\lambda$ になっていたとする。

この変化分は、光がこの物質の中を通る間に吸収されたり別の方向に散らされたためと考え、この両者を合わせた消散量は入射光の強さと、吸収や散乱に関わった物質



2.7図 物質による放射の消散

の密度 ρ に比例するものとする。つまり、

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2.5)$$

とする。比例係数 K_λ は消散係数と呼ばれるものである。しかし、光の径路上の物質は自分でも放射を行う。また S 方向以外の光が空気分子などによって散乱され、散乱された光が S 方向に向かうということもありうる。これらは S 方向の光を増加する効果があるから、これらの増加分を

$$dI_\lambda = +j_\lambda \rho ds \quad (2.6)$$

と表わすことにしよう。結局、光が S 方向に dS だけ通る間の光の増減はこの2つを加えて

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds \quad (2.7)$$

の形式で表しうる。消散係数 k_λ の次元は簡単に調べることができ、面積/質量となるから、質量当りの消散断面積とも呼ばれる。

この式をもう少し単純な形に表わすために

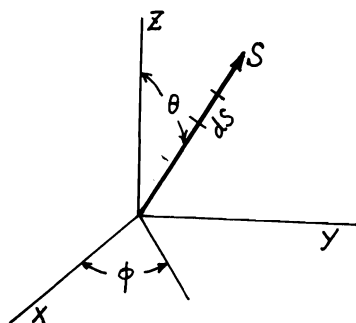
$$J_\lambda = j_\lambda / k_\lambda \quad (2.8)$$

という量（放射源関数）を定義する。 J_λ は I_λ と同じ次元をもつ。そうすれば（2.7）式は、

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (2.9)$$

の形で表わすことができる。これが放射伝達を一般的に表した方程式で、以下はこの基本関係式を少しずつ具体化してゆこうという段取りになる。

われわれの関心のあるのは、大気中での光の伝達である。普通の光の経路を考える場合は、地球の丸みを考えず、水平方向に性質が一樣な空気層の重なりというように考えてよいであろう。この大気モデルは、長距離の水平方向の電波伝播や、極端な斜方向の衛星観測にはよい近似とはいえないが、局所的に扱う場合には大気の水平層モデルでも十分に合う。



2.8 図 水平層モデル

x y 面は地球表面と平行な面

Z は垂直上方向

S は光の方向

2.8 図によって、S 方向を地球表面に立てた垂直線から θ だけ傾き、適当な基準線、たとえば南北方向、から測って方位角が ϕ であるとし、 θ と ϕ とで光の方向を表すことにする。そのとき、光路上の長さ dS は高度差 dZ に対して $dS = dZ / \cos \theta$ であるから、(2.9) 式は

$$\cos \theta \frac{dI(Z, \theta, \phi)}{k \rho dZ} = -I(Z, \theta, \phi) + J(Z, \theta, \phi)$$

となる。ただし手間を省くために波長を特定する λ なる添字は省略したが、考えている方向を明示するために、I や J は θ や ϕ の関数でもあることを表しておいた。

ここでもうひとつ大切な量を定義しておく。光が通る長さは、障害物が何もない所を通るだけならばあまり意味がない。吸収物質や散乱物質の中をどれだけ通ったかの方が大切である。大気中に含まれるこれら障害物質の密度を ρ とする。いま

$$\ell = \int_z^\infty k \rho dZ' \quad (2.10)$$

とおくと、 ℓ は大気の上端 ($Z = \infty$) では 0 である。 ℓ は大気の上端からある高さ Z までの間に存在する光に対する障害物質の量を表すもので、光学的長さ又は光学的厚さなどと呼ばれる無次元の量である。

(2.10) 式から、微小光学的長さ $d\ell$ は実際の高さの微小変化 dZ と

$$d\ell = k \rho dZ$$

という関係がある。

この ℓ を使うと、前の式は、

$$\mu = \frac{dI(\ell, \mu, \phi)}{d\ell} = I(\ell, \mu, \phi) - J(\ell, \mu, \phi) \quad (2.11)$$

のような表わし方になる。ただし簡単にかくために $\cos \theta = \mu$ とおき、 θ 、 ϕ 方向を μ 、 ϕ 方向という形にし、高さ Z の代りに ℓ を用いることにした。

(2.11) 式は積分することができる。両辺に $\exp(-\ell/\mu)$ をかけて ℓ について地表面 ℓ_s からある高さ ℓ まで積分する。その結果は

$$I(\ell, \mu, \phi) = I(\ell_s, \mu, \phi) \cdot \exp\left[-\frac{\ell_s - \ell}{\mu}\right] + \int_{\ell}^{\ell_s} J(\ell', \mu, \phi) \cdot \exp\left[-\frac{\ell' - \ell}{\mu}\right] \cdot \frac{d\ell'}{\mu} \quad (2.12)$$

となる。ただし ℓ_s は

$$\ell_s = \int_0^\infty k \rho dZ'$$

で、大気の上端から地表面までの全気層に対する光学的な長さである。

(2.11) 式を導くまでの上のような計算手順はとも角として、その意味はごく簡単である。つまり、大気中のある高さ ℓ での放射の強さは、地表面から出る放射 $I(\ell_s)$ が減衰して到達する分と、地表面からこの高さまでの大気層が射出し、射出しながら減衰して到達する分の和であるということである。

地表面から放出する放射 $I(\ell_s)$ は、赤外の場合は黒体放射でよく、赤外域では散乱はほとんど考えなくてもよく、消散の効果は光の吸収だけによるので k は吸収係数と考えてよい。一方太陽短波放射の場合 $I(\ell_s)$ は地表面での太陽光の反射であり、大気中では散乱や吸収が起るのでこれらによる光の消散を併せて考える必要がある。

衛星観測の立場で見れば、ランドサットのようにほぼ直下だけを見ている場合には $\mu = 1$ としてよく、また赤外観測の場合には赤外放射は方位角に関係しないから ϕ も省略できる。これから先は赤外放射の観測に限っておきたいが、その議論に入る前にもう少し補足しておかなければならないことがある。

一般に物質が熱力学的にほぼ平衡しているような条件の下では、この物質による放射の吸収とこの物質から出る放射にはある関係がなくはない。(2.7) 式でいえば $k\lambda$ と $j\lambda$ との間には一定の関係があって、その比 $J\lambda$ ((2.8) 式) は実は Planck の黒体放射関数そのものになるということである。

実際の気では熱力学的平衡にはないので $J\lambda$ を厳密に決めることはかなりむづかしい問題である。そこで、放射を考えているその場所では局所的に熱力学的平衡にあるという実用的な仮定をすることが多い。分子のレベル

でみれば、分子が互に衝突し合っていることによって状態が決まっているような対流圏では、この局所熱力学的平衡という仮定は成立つ。しかし空気が稀薄な成層圏から上ではその仮定は少しあやしくなってくるが、当面は $J\lambda$ は Planck 関数そのものとしておく。

衛星から観測するという事は、空気のない大気の上から測るということであるから光学距離でみれば衛星の高さは $\ell = 0$ に相当する。さらに次式のように表される τ なる量を定義しておこう。

$$\tau(\ell', \mu) = \exp\left(-\frac{\ell'}{\mu}\right) \quad (2.13)$$

τ は透過関数と呼ばれるもので、 ℓ と同様に光が大気の上端から測ってどれだけの障害物の中を通り抜けてきたかを指数関数の形で表現したものである。 τ を用いて (2.12) 式をかき直せば、

$$I(\mu) = \varepsilon B(T_s) \tau(\ell_s, \mu) + \int_0^{\ell_s} B[T(\ell')] \tau(\ell' \mu) \frac{d\ell'}{\mu} \quad (2.14)$$

のような形になる。左辺は衛星が受ける天頂角 μ 方向からの赤外放射の強さ、右辺第 1 項は地表から出た放射が大気全層を通して減衰しながら宇宙に通過する分、第 2 項は大気層からの放射の総和を表わす。なお ε は地表面がどれだけ黒体に近いかを示す係数（射出率）である。もし光学的長さ ℓ よりも普通の気圧座標の方が判りよいならば、水平層モデルによって簡単なおきかえを行い、 τ を ℓ の代りに気圧 p で表わし、

$$I(\mu) = \varepsilon B(T_s) \tau(p_s, \mu) + \int_{p_s}^0 B[T(p')] \frac{\partial \tau(p' \mu)}{\partial p'} dp' \quad (2.15)$$

としてもよい。説明がやや理屈っぽくなったが、これらの式のもつ物理的な意味は極めて簡単なものであり、衛星による赤外観測の基本関係としてデータの処理(5章)にも利用される重要な関係式である。

以上の説明はやや形式的なものであって、むしろ問題は、大気の透明さを表わす τ を具体的にどのように求めるかという点にある。そのためには光学的長さ、さらに遡っていえば (2.10) 式で明らかなように、大気中の吸収物質の分布 ρ と、その波長での光の吸収係数 k を知ることに帰着する。大気中の吸収物質、例えば水蒸気はラジオゾンデなどの観測から得られるが、衛星が観測している時点でいつでもこの分布がわかっているとは限らない点にひとつの問題点がある。

大気中に含まれている分子は、2.2 図をみてもわかるように赤外波長領域の所々にそれぞれの分子特有の、かなり不規則な放射エネルギー吸収バンドをもっている。2.

2 図のような測定をもっと細かく行えば、吸収バンドの構造は非常に多数の吸収線スペクトルの集合から成っていることがわかる。これらの線スペクトルの集合を物理的にモデル化して吸収バンドのもつ透過関数 τ を理論的に求めるということが行われている。

これらの事柄は、衛星による赤外放射観測を理論的にシミュレートしたり、予報モデルに放射の効果をとり入れたりする場合に必要なことである。しかしこれらに関わることは気象放射学の専門書にゆづることにしたい。

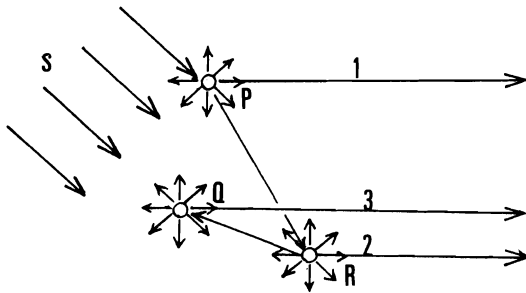
2.5 可視領域の観測

可視波長帯での観測は、太陽の光をうけた物体を人間の目で見ることが観測するということであるから、赤外観測よりもよほどイメージがはっきりして判りやすいような気がする。ところが測定した結果を気象の目的に則して意味づけようとすると、案外むづかしい面が出てくる。可視波長帯を更に細かく分けて、各波長毎の放射強度を観測する「色」の観測ならば、それなりに目標が明確化することも考えられる。しかし可視域のある帯域をひとまとめにして、いわば白黒写真のような観測をするとなると、観測対象はこの特定波長帯についての地表面または雲などの反射率の推定というあたりに限定されてくる。

前にのべたように、ひまわりの可視波長帯は大気による吸収は少いが散乱を強く受ける部分である。この散乱部分を (2.11) 式のような観測方程式といえる理論式にどのようにとり入れるかはかなりむづかしい問題であるので、その考え方だけを定性的にのべておきたい。

散乱の場合には、 k は空気分子や微粒子による散乱断面積であることは前にのべた。すなわち、光の進路上にこれらの障害物があれば、これによって光が散らされ別の方向に散逸してしまう割合を示すものである。また放射源関数 J は、光の方向に光が増量することを意味しているが、散乱の過程では別の方向から来た光が分子などによって散乱され、今考えている方向に向う成分となる部分と考えてよいであろう。一般に散乱の場合には、散乱された光が更に次の分子によって散乱をうけるという多重の過程も考えなくてはならない。散乱の場合の光路上の光の増減を模式的に示したのが 2.9 図である。

レーダーの電磁波が雨滴によって散乱され、そのなかでレーダー方向に向う成分が検知されてブラウン管に表示されるというのがレーダー観測の原理である。光の空気分子などによる散乱の場合もほぼ同様である。レーダー波の散乱のときには、レーダー電磁波によって雨滴がこ



2.9 図 散乱の過程

入射光 S が粒子 P, Q, R によって,
x 方向へ散乱される場合。

数字, 1, 2, 3 はそれぞれ 1 重, 2 重, 3 重の散乱を表す。

の電磁波と同じ周期で分極を起し、これが一種の 2 極アンテナとなって電磁波を四方に再放射するという等価的なモデルでの取扱いがなされる。このとき分極の効率は雨滴のもっている誘電率などの電磁氣的性質によって決まるというものであった。光の場合も同様であり、散乱は散乱物質に固有の性質によって決まった強さをもつ。光の場合でもレーダー電波の場合でも反射という表現を使うことがあるが、反射は大きなひとかたまりの物体からの電磁波のはね返りというマクロの意味で使うことが通例である。一方散乱は電磁波の波長と同程度もしくはそれ以下の孤立した粒子による波の曲げられ方を指して言う場合が多い。しかし物理的にはこの両者は同じものと考えるべきであるから、ここでは散乱とはいわゆる反射も含むものとした。

草原が緑色に見えるということは、植物が太陽光スペクトルのうち、混合すれば緑になる成分を散乱し、その他の成分は吸収しているからである。その緑も太陽の光の方向から見ると鮮やかに輝き、別の方向から見ればややくすんだ色に見えるというのは、植物の散乱強度は全体として植物固有の値であるが、散乱光は等方的ではなく入射光に対してある方向性をもって分布するからである。ひまわりで観測しているのは、地表面のさまざまな物体や雲が太陽光を散乱したものの中で、ひまわりの方向に散乱された成分の強度を測定していることになる。気象学では入射エネルギーに対する、物体の散乱エネルギーの比をもってアルベドという値を定義しているから、アルベドは総反射比率というべき値である。衛星観測では衛星方向に入射する太陽散乱光量を慣習的にアルベドと呼んでいることが多い。

ひまわりの可視領域の定量観測から気象学上重要などの

ような種類の情報をいかにして引き出すべきかは今後の課題である。しかしこれを画像という空間分布の形で表すと雲や地表の状態が鮮明に見えるということがある。赤外画像すなわち温度の水平分布では、低層の雲や霧は地表面との温度差が小さいのでうすくしか見えないのに、雲や霧による可視光の散乱は強いから、両者を比較することで認定することなどもその 1 例である。ただし前にもお断りしたように、画像の見方という課題は今回の主旨から離れてしまうのでこれ以上は触れないでおきたい。

3 章 ひまわりと VISSR 観測

3.1 はじめに

人工衛星は衛星全体を回転させて姿勢を保つか、あるいは衛星にはづみ車をもたせたりなどした上で、ジェット噴射で微調整しながら姿勢を安定させるかのいずれかの方法をとっている。回転型は姿勢制御の点では簡単ではあるが、自転軸のまわりに均等な重量配分をしたり、太陽電池の並べ方に制限が出たり、アンテナをいつも地球に向ける機構を持たせる必要が生じたりする。一方の三軸安定型と呼ばれるタイプのものでは、衛星にのせる利用機器（ミッション機器）は常に望ましい方向に向けてるようにでき、大きな羽根を広げて太陽電池や測器を配列できるなどの利点がある。しかし一方では、姿勢制御の機構とその運用が複雑で高度になってしまうのは避けがたい。回転型の例としては大型通信衛星や静止気象衛星、三軸安定型の代表としては放送衛星とか NOAA のような極軌道気象衛星があげられる。

ミッション機器は衛星打上げ目的のものといっしょから、科学探査にはその探査に適する測器、通信や放送衛星にはそれらの目的に合う通信機など千差万別といっしょ。この章ではひまわりの観測系ミッション機器である VISSR（可視赤外走査放射計の略称、以下あまり適当ではないが記述を簡単にするために、「ビサ」と呼ぶことにする）による観測について説明することを目的としている。

これらの目的機能とは別に、飛行物体としての人工衛星に共通する広い技術分野がある。例えば構造体そのものとか、太陽電池や補助バッテリー、制御のための 2 次噴射システム、あるいは宇宙空間での衛星内部の熱コントロールなどである。これらの技術は、打上げ用ロケットの研究開発と並んで、こゝ 20 年ほどの間に急速に進歩している分野である。しかしこれらの衛星の共通技術といった面からは、本来のわれわれの専門とは別の分野に属することなので、一切割愛することにしたい。

ビサの構造はひまわりの 1 号から 3 号に至るまで（そして多分 4 号でも）殆んど変わっていない。遠隔放射測定器としては、完成度の高い優秀な製品であるという一般の評価は高いようである。しかし残念ながらこの宇宙用測器は米国で開発されたものであり、われわれの中でもその実物に触れたり、実験をしてみたという経験者はごく少い。したがってこれからの説明も、現場において実

際に使ってみた経験が下敷きになっている部分が多いことは、予めお断りしておかななくてはならない。

3.2 構造と動作

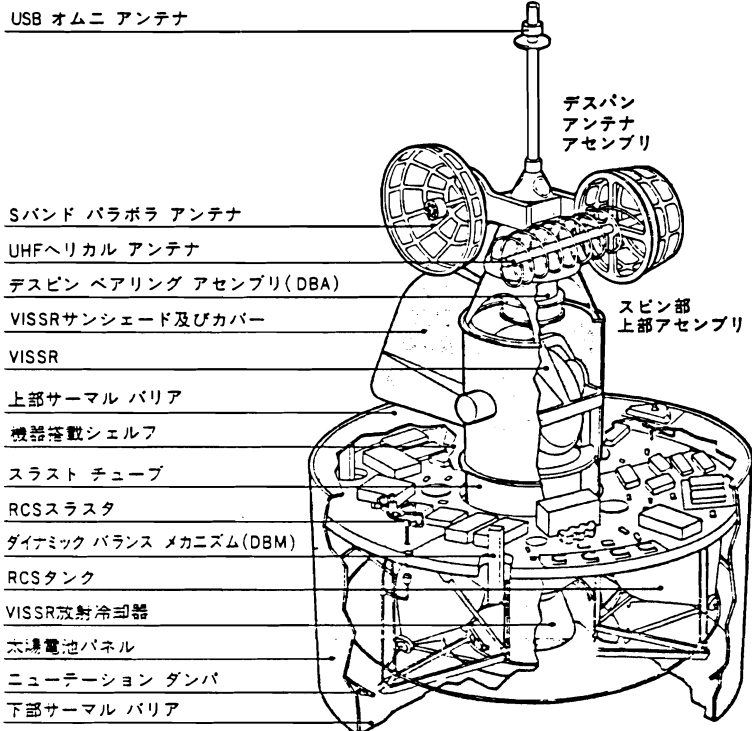
ビサは一口で言ってしまうと、天体観測用の反射望遠鏡である。これはかなり精密な光学機械であるから、衛星の自転によって遠心力がかゝらないように、自転軸と光学軸とが一致する衛星の中心部におかれている。その配置の様子は 3.1 図のようになっている。

ビサだけを取り出してその断面を模図式に示したのが 3.2 図である。この図からわかるように、可視や赤外の光は光学軸とは直角な方向から取り込まれるのが特長といえるかも知れない。光の径路をたどってみると、まず平らな反射鏡に入った光は、ほぼ直角に曲げられて 1 次凹面鏡に送られる。こゝである程度絞られた光の束は 2 次凸面鏡で反射して 1 次凹面鏡の中央部の穴を通り、その奥で焦点を結ぶ。このような光学系はカセグレン型反射望遠鏡と呼ばれる代表的な天体望遠鏡の系統に属している。たゞ鏡面構造が少々違っているために別の名前がつけられており、カセグレンに比べて精密になっただけ、焦点面の形成がむづかしくなっているともいわれている。

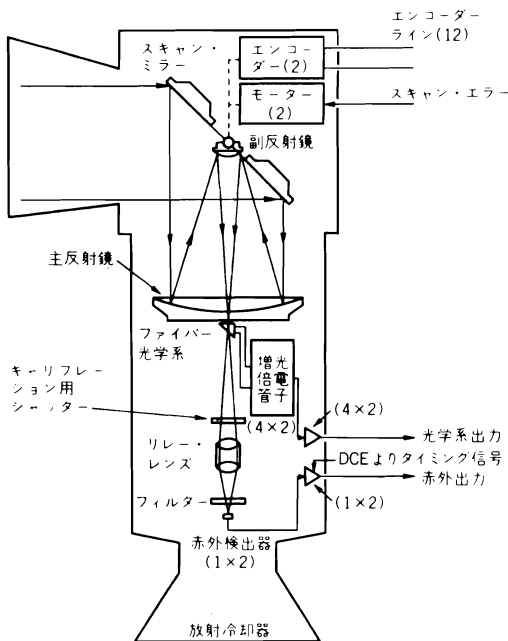
焦点にはプリズムがおかれ、そこで直角に曲げられた可視光は光ファイバーを通して可視検知器に導かれる。赤外域の光はプリズムを素通りした後もう一度レンズで絞られ、大気窓波長帯だけを通すフィルターを経由して、赤外検知器に入るといふしくみになっている。

ところでひまわりは回転安定型の衛星であるから、ビサもひまわりと一緒に回転していることになる。ひまわりの場合には、その自転軸の方向はほぼ正確に南北の方向、つまり地球の赤道面に直角な方向を向いている。自軸の速度は 1 分間に 100 回転、北からみて時計廻りに回転している。

ひまわりの高さ（36000 km）からみると、地球は縦横 20 度の視界の中にすっぽり入ってしまう。ということは、ビサは 1 回転している間の約 20 度の間だけ地球を観測し、そのほかの 340 度の間は宇宙の彼方を向いていることになる。これを時間に換算してみれば、1 回転 600 ミリ秒の間に地球を見ているのは高々 30 ミリ秒程度にすぎないということになる。



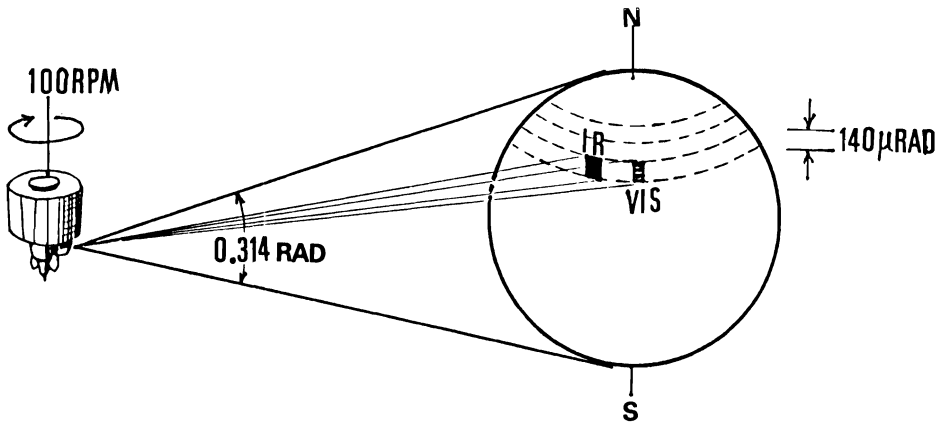
3.1 図 ひまわりの構造



3.2 図 ビサ光学系とセンサー

衛星は各回転ごとのこの観測空き時間を利用して、つぎに地球を走査観測するための準備をする。まず、光が入射する第1段階にある平面反射鏡の角度を、70 マイクロラジアン ($70 \mu\text{rad}$ は $4/1000$ 度にひとしい) だけ傾ける。傾けた鏡は、傾ける前の回転走査のときよりも $140 \mu\text{rad}$ 違った方向からの光を受けることになる。このようにして、一回転するごとにごく僅か鏡の傾き角度をかえながら、地球の北寄りの端から南の端に至るまでの20度の視界をすべて走査する。したがってこの全走査を完了するためには、南北の視界20度を $140 \mu\text{rad}$ ($8/1000$ 度) で割った数だけの走査、2500回転が必要になる。自転速度は毎分100回転であったから、円形の全画像を撮り終るには25分かかるとことになる。以上のべたビサによる走査観測を説明図風に画いたのが3.3図である。

なぜ回転走査ごとに光の入射方向を $140 \mu\text{rad}$ ずつ移動させるかということ、もともとビサはあらゆる瞬間に $140 \mu\text{rad}$ の広がり度で光を採り入れるような光学的設計になっているからである。赤外の観測では、ビサの視界



3.3 図 ひまわりによる回転走査観測

から入る放射を縦横 $140\mu\text{rad}$ の大きさの 1 個のセンサーで受けるようになっている。一方可視光の観測の場合は、この視野で見える範囲を南北に 4 等分し、東西方向にも赤外に比べて $1/4$ の大きさの 4 個のセンサーで測定する。これらの赤外と可視センサーの配列と、視野角度で計った寸法とを 3.4 図に示しておいた。

この寸法からいえることは、衛星から地球の直下点(赤道上 140°E)をみたとき、例えば赤外の場合には、あらゆる瞬間に

$$140(\mu\text{rad}) \times 35800(\text{km}) \approx 5(\text{km})$$

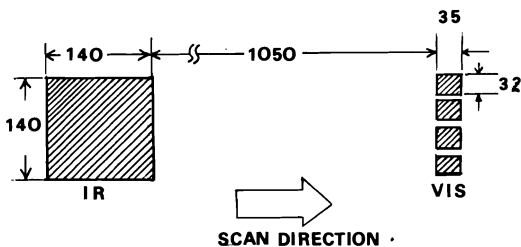
の辺をもつ領域からの赤外放射量を受けるということになる。可視ではその大きさが赤外の $1/4$ 、約 1.25km となり、これがそれぞれ赤外と可視との最大の分解能ということになる。衛星直下点以外のところでは多少なりとも斜方向から地表を見ることになるから、直下点から遠

ざかるに従って地上の面積に換算した分解能は急速に低下する。

このようにひまわりは赤外で 2500 本、可視では $2500 \times 4 = 10000$ 本の走査線を作りながら、東西方向には衛星自転による連続走査観測を行なうという姿になっている。しかしこの可視や赤外の東西方向の放射観測は連続のアナログ値としてではなく、次にのべるような数値化の操作によって、デジタル定量値で求められる。

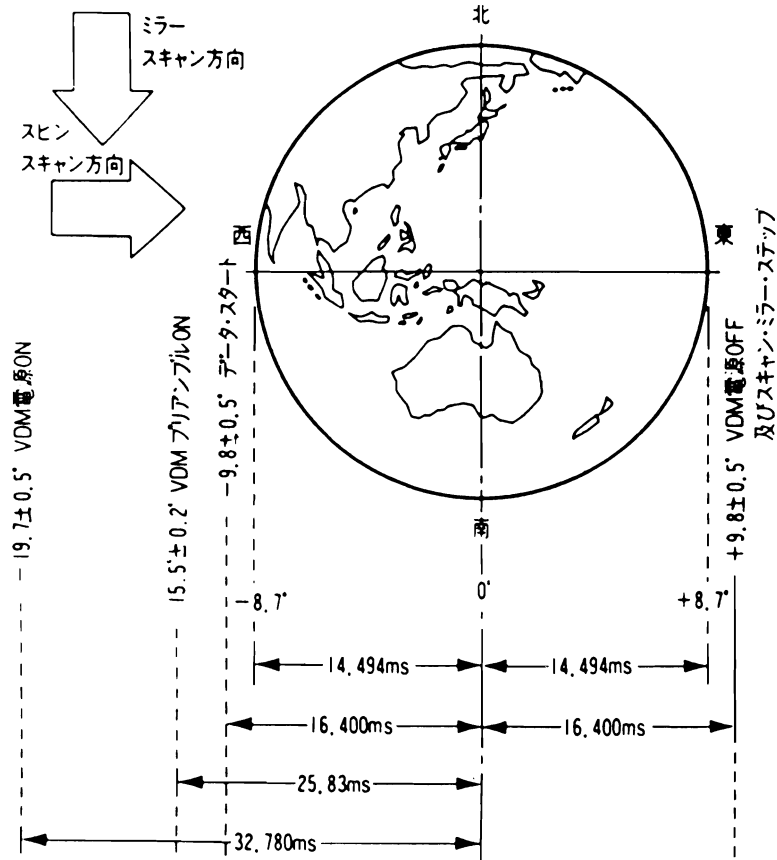
まずセンサーで発生した電圧は、赤外の場合には直線状に、可視の場合は平方根状に増幅する。これらの増幅された電圧を赤外については 8 ビット(256 階調)、可視では 6 ビット(64 階調)で読み取り、そのデジタル値が衛星から地上に伝送されている。

このような放射量データの数値化は、赤外については $9.14\mu\text{s}$ (マイクロ秒) ごとに、可視ではその $1/4$ の時間間隔で行われる。このことから、東西方向の 1 走査時間の約 30ms の間に、赤外では約 3350 個の観測値が、可視ならば 1 走査ラインでその 4 倍の数のデータが得られることになる。 $9\mu\text{s}$ の間に衛星が自転する角度は $90\mu\text{rad}$ 程度であるから、この値は赤外観測の瞬間視野角 $140\mu\text{rad}$ よりも小さい。ということは東西方向には互に重った領域からの赤外放射量が測られていることに相当する。可視についてもセンサーの東西方向の瞬間視野角が狭くなっている代りに、データサンプリングの時間間隔も短いのであるから、赤外と同じ比率で地球上の探索面積に重なりが生じる。ピサ観測をタイミングの面から説明した図を参考までにあげておいた。



3.4 図 センサーの配置と寸法

数値の単位は μrad



3.5 図 ビサ観測のタイミング

は、あくまでも放射観測を定量値として求めることに目的をおいていることである。もっともこのことによって6章でのべるような通信上の有利な点も派生してくる。

以上のようなデータサンプリングの方法により、衛星が1回転したときにどの程度のデータ量となるかをおおまかに見積ってみよう。東西方向には赤外では約3350画素となり、これを8ビットで表わし、可視ではその4倍の13400画素を6ビットで表わす。更に可視は4個のセンサーで4本の走査線を作るから上記の4倍量となる。なお赤外のデータは念のために2回送るようにしている。これらを総計し、更に走査の開始と終了とを告げる同期信号をも付け加えると、衛星が1回転するごとに約40万ビットのデータが発生する。このデータをサンプリング毎に直ちに送り込むので、地球向けのビサデータの伝送速度は每秒14メガビットという超高速伝送になってし

まう。

3.3 ビサの性能とセンサー

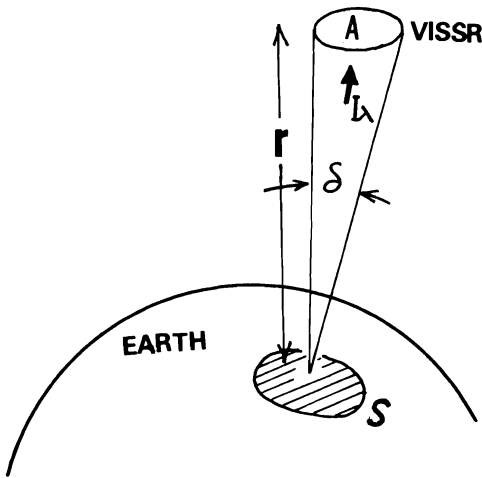
赤外放射観測の場合を例にとると、前節でのべたように、その観測値は256段階で求められている。このような細かい階調づけがどのような根拠によるものかを探ってみたい。

取扱いを簡単にするために衛星直下点で考えることにする。ビサに入る光の総量はほぼ1次凹面鏡の大きさで決まる。実際には光学系の中で光のもれる部分もあるので、実効的な大きさということになる。その開口面積をAとする。Aはセンサーの前におかれるフィルターの性質などを含めて考えると、波長によっても違ってくるべきであろう。

次にビサの瞬間視野角（赤外の場合 $140\mu\text{rad}$ ） β で見る地球面上の面積を S とする。地表面から衛星までの高さを r とすれば、この面積は

$$S = (\beta r)^2$$

と見積られる。一方地表面の各点からは赤外放射または太陽反射光が放出しているが、その放射量を単位面積、単位立体角、単位帯域幅当り I_λ ワットとする。 I_λ の内容については2章でのべたとおりのものである。



3.6 図 ビサに入射する地球からの放射エネルギー

3.6 図で示しているように、 S の上からビサの受光面 A を見たとするとその立体角 δ は

$$\delta = \frac{A}{r^2}$$

である。したがって S からの放射が受光面 A に入る波長 λ_1 と λ_2 の間のエネルギー量 E は

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta \cdot S \cdot I_\lambda \cdot d\lambda \approx A \beta^2 I_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (3.1)$$

であるとしてよい。ただし観測している波長帯の幅 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ はあまり広いものではなく、この幅の中では I_λ も A も一定値をとるものと仮定している。

赤外觀測の場合を考える。大気の窓波長帯のように、大気からの放射は少ないものとしてこれを省略すれば、 I_λ は地表面（又は雲）の温度 T_s によって決まる黒体放射 $B_\lambda(T_s)$ に全大気層の透過率 τ_λ を乗じたものにほゞ

等しい。したがって ϵ を地表の射出率として、

$$I_\lambda = \epsilon B_\lambda(T_s) \tau_\lambda \quad (3.2)$$

と近似される。この関係は（2.14）式で大気放射の影響を省略した簡略式でもある。こゝでの問題は、（3.1）式で表されるエネルギー E がビサに入りその入力に比例したデータが出力されることになるが、この出力値が地表の温度の違いをどの程度識別しうるかということである。その見積りを行ってみる。

A 、 β 、 $\Delta\lambda$ は測器によって定まる定数であるから、（3.1）式によって入射エネルギーの変化率は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta I_\lambda}{I_\lambda}$$

である。 I_λ に（3.2）式を代入し、（2.1）式で示した Planck 関数 $B_\lambda(T)$ の対数をとって微分し若干の近似を行えば、途中の計算は省略し結果だけを示すと次のようになる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} + \frac{\Delta \tau_s}{\tau_s} + \frac{a}{\lambda} \frac{\Delta T_s}{T_s^2} \quad (3.3)$$

ただし a はいろいろな物理常数からなる一定値である。射出率 ϵ は地表面では植生や地面状態で違いがあり、また雲の種類によっても異なるが、いずれにしても 1 に近い値であるからその変化は無視できる。また同一大気条件の下での観測であるとして τ の変化もないものとしてよいだろう。そうすれば（3.3）式は、例えば、 ΔE を 256 等分したときに、これに対する温度分解能 ΔT_s を与える関係を表している。あるいは、観測の必要上ある温度分解能 ΔT_s を要求したときに、センサーの識別能力 ΔE はどうあるべきかの関係を与えるものといってもよい。

センサーの出力を ΔE で区切る限度は、センサーがもつ雑音のレベルで決まる。雑音レベルを低くするために一般にとられる手段は、センサー自身の温度を観測対象物の温度よりもかなり低く保っておくことである。ひまわりの赤外センサーは宇宙空間に向って開いたコーンによって放射冷却し、またヒーターで調節しながら大体 95°K に冷却された金属容器に収められている。しかし、雑音はセンサーからばかりではなく、ビサに関係する電子機器系からも発生するので、これらを総合したシステムでの雑音対策をとる必要がある。次の表には、ひまわり搭載のビサについて、その光学系の諸元や、雑音に対比して保証される温度分解能（表中の雑音等価微分温度 NEDT）などを示しておいた。

3.1 ビサ諸元表

東 西 方 向 走 査	衛星スピン	
南 北 方 向 走 査	走査鏡の傾きステップ	
走 査 角 精 度	1 μ r 以下	
光 学 系 名 称	Ritchy-Chretien 型	
焦 点 距 離	291.3 cm	
主 反 射 鏡 直 径	40.6 cm	
走 査 鏡 の 径	65.4 \times 42.1 cm	
検 出 器	光電子増倍管(可視)	HgCdTe (赤外)
検 出 波 長 域	0.5~0.75 μ m	10.5~12.5 μ m
検 出 器 個 数	4 個(+ 4 個予備)	1 個(+ 1 個予備)
瞬 間 視 野 角	35 \times 31 μ r	140 \times 140 μ r
走 査 線 数	2500 \times 4	2500
NEDT (300度)	—	0.5 $^{\circ}$ K 以下
NEDT (200度)	—	1.5 $^{\circ}$ K 以下
形 状	152.4 (長さ) \times 64.8 (直径)cm	
総 重 量	68.1 kg	
消 費 電 力	24.0 W	

3.4 光センサーについて

こゝで光センサーのことについてごく簡単に触れておきたい。

半導体、たとえばシリコンの結晶の中での電子の状態は、自由に電子が動けるレベルよりも一段と低いエネルギーレベルに充滿していると考えられている。これを電子が自由に動ける伝導レベルに引き上げるには、充滿レベルから伝導レベルまでのエネルギー差に相当するエネルギーを外から加える必要がある。外界からあたえるエネルギーは、電場であったり熱であったり光であったりする。充滿レベルから伝導レベルに電子が移ったときには、伝導レベルは負に帯電し、充滿レベルは正（電子の抜け穴が残る。正孔という）に帯電する。

光子のエネルギーはその光の振動数を n としたときに nh (h はプランク常数) で与えられる。このエネルギーがある種の半導体に吸収されたとして、その値が充滿レベルと伝導レベル間のエネルギー差をこえるような場合には、この半導体の電気抵抗は急激に減少する（光導電効果）。光のエネルギーは n が多い（波長が短い）ほど大きいから、半導体によってそれが導電状態になりうる光の波長に限界が生じることになる。当然、充滿・伝導エネルギー差が小さい物質ほど長い波長の光にまで感応し

やすい。

現在ひまわりの赤外センサーには、水銀・カドミウム・テルルの 3 元素による結晶が用いられている。その他にも光電素子としてさまざまな半導体が使われているが、代表的な結晶について、エネルギー差と光の限界波長との関係を示したのが次の表である。

3.2 表 赤外検知素子

半 導 体	エネルギーギャップ (eV)	検知最長波長 (μ m)
CdS	2.4	0.52
Si	1.12	1.1
Ge	0.67	1.8
PbS	0.42	2.9
InSb	0.23	5.4
PbSnTe	0.10	12.0
HgCdTe	0.09	12.5

In・Sb や Hg・Cd・Te は気象衛星の赤外放射観測によく用いられる素子であるが、これらの構成原子の含有率を変えることによって、ある程度までは光感知特性をかわることができるともいわれている。

充滿・伝導エネルギー差の小さい固体結晶素子で、高い精度の放射量測定しようとする、結晶格子に配列された原子の熱振動によって生じるノイズ部分が無視できなくなってくる。格子振動のエネルギーは、その結晶の温度を T 、ボルツマン常数を k とすると kT の程度である。前節でのべたように、特に赤外測定の場合には、この熱振動エネルギーの割合を下げるためにセンサー自身の温度を低くしておくのはこのような理由による。

センサーに要求されるもうひとつの大切な要素は、入射エネルギーに対して、短い時間内に定格の出力に達する、すばやい反応を示す性質をもつことである。ビサの赤外センサーの場合では、このセンサー時定数はデータサンプリング間隔 9 μ s を十分に下廻るものであることが望ましい。このように、必要とする光検知能力や低い熱雑音性、検知時定数もさることながら、衛星搭載用のセンサーとしては厳しい宇宙環境の下で長期にわたってこれらの性質が保たれるということが、もっとも必要な条件といえるであろう。

最近は光通信、大容量光ディスク、工場の生産管理やロボット、理化学研究から家庭用品に至るまで、光と電

気の変換デバイスに関する工学上の進歩は著しく、将来はどんなものが実用化されるか予測がつかない面もある。たゞ最近検討されているひとつの例だけを紹介しておこう。

画像を再現する目的の機器には F A X の送受画機とかビデオ撮影機などが身近にある。これらの機器には、しばしば C C D（電荷結合素子）と呼ばれるものが利用されることがある。代表的な例としては、光を感知する半導体を 1 列に並べ、それぞれに入射した光量に比例する電荷を蓄え、これをシフトゲート回路により順次とり出す集積素子である。衛星からの画像取得のために、各種の C C D がそれに適する光学系、走査系と共に研究されており、海洋観測衛星などに試みられようとしている段階である。

現在ひまわりの可視センサーには、光電子増倍管が使われている。受光面（陰極）に突入した光子はこゝから電子を放出させ、これを陽極に引きつけて電流を生じさせるという光電管は古くからあったものである。陽極を何段階かに分け、第 1 段の陽極に衝突した電子はこゝから更に多くの電子をたゞき出して第 2 段の陽極に向わせこのくり返しによってねずみ算式に大きな出力を得るといのが増倍管である。この起源も決して新しいものではないが、安定した性能の製品を作る技術に問題があると思われていた時期もあった。しかし米国では天体やオーロラの微細な光とその変動測定など研究に多く用いられ、優れた製品が開発されるようになった。気象衛星にいわば古典的ともいえる真空管型の可視光検知器が使われているということは、このような長年の実績にもとづく技術上の確信があつてのことであろう。欧州の静止気象衛星には固体型の可視センサーが用いられている。

極軌道衛星や海洋観測衛星、資源探査衛星に、どの波長帯の観測にはどのようなセンサーが用いられているかに興味があるならば、他の文献たとえば衛星センター技術報告などを参照して頂ければよいと思う。将来静止気象衛星の業務をいかに発展させるべきかは、地球大気系における放射特性からの要請と、それを感知測定しうる観測系のシステムの両面から研究開発が必要になってくことはいうまでもない。

3.5 ビサ観測のための制御

以上のべたような観測機能を上手に利用し管理しながら、しっかりした観測をつづけてゆくためには、衛星の内部状況をよくモニターし、時には地上から衛星に指令を発して適切な運用に導く措置をとらなくてはならない。

直接ビサに関する指令項目としては約 60 種類のものがある。

光学系に対しては観測をスタートさせるために平面反射鏡を駆動させる項目、焦点ぼけを生じないよう焦点を合わせる微調整に関する指令などもある。検知器に対しては、可視赤外それぞれに置かれている正副センサーの切かえ指示やセンサーの出力利得の変更、あるいは検定を行うための指令がある。赤外センサーを一定温度に保つために、センサー部におかれた温度計をモニターしながら、自動的にヒーターを作動させる指令を発することもある。

ビサ観測の実行に対しては、例えば台風接近時には、その周辺の緯度帯だけの観測をすばやく入手したいという要請をうける機会も多い。そのような時には、反射鏡の傾きを指定した観測領域に早くもってゆき、そこから走査をスタートさせて指定領域の南限に達して終らせるような、観測のモードに対する一連の指令の組合せも必要である。しかしこれらの事は主として衛星センター内の作業のみに関係することであるから、詳細については説明の必要はないと思われる。

こゝで、ビサ観測のタイミングのとり方について簡単にのべてみる。ビサが回転しながら地球をとらえる直前に、走査観測に入ることを決定する必要がある。このタイミングをとるために、衛星には太陽の方向を高い精度で検知する太陽センサーが配置されている。太陽センサーの視線方向は、ビサの視線方向とは違う角度をもっている。更に衛星の体内には精度の高い時計がおかれており、地上からはその日の長さ（季節により 24 時間を僅かに前後する）をデータとして与える。太陽センサーによるパルス発生時刻と、この時間データを用いて、衛星の内部では自らの動作タイミングが決定されるようになっている。

衛星の自転速度の標準値は毎分 100 回転であった。しかし上にのべたタイミング決定の過程で、衛星のそのときの自転速度を知ることができる。実際には静止気象衛星の自転速度はほぼ 1 % の許容範囲内で長期的に変る。この自転速度に合わせて、アンテナを地球方向に正対させるためのサーボ機構が働く。

回転速度が僅かでも変れば、当然ビサが地球方向を向いている時間の長さも微小に変化する。前にのべたように、可視や赤外のデータサンプリングは一定の時間々隔で行っているのであるから、回転速度の変化によってサンプリングの総数に変動が起ってしまう。このようなデータ総数の変動は、データ処理の立場からみるとあまり好ましいことではない。そのために、データ数を一定化

するような微調整は地上の施設で行うようにしているが7章でその微調整のためのデータ処理の詳細を説明することにしたい。

今までのべたように、ビサは平面鏡の角度を精密に変えながら走査を行う機構を基本としている。この角度制御には、光源からの光を角度検知器で受けることで行う方式が採用されている。一般にこれらの機械的駆動部分とか光源ランプとかは、長期間の使用によって摩耗することは避けがたい。また太陽電池や補助蓄電池なども徐々に劣化を起し、衛星の位置や姿勢制御のための噴射推進用燃料も減小する一方である。強い太陽微粒子の突入や急冷急暖する宇宙の中では、電子機器の故障もありうる。ひとつの欠陥が他に波及しないような信頼性設計や大切な部分は二重化するなどの対策はとっていても、衛星にはどうしても寿命の限度がある。実用衛星として中断させないためには、衛星の寿命はできるだけ長くあってほしい。通信衛星、放送衛星などと共に、この衛星寿命延長問題は宇宙開発を検討するさまざまな委員会で常に問題になることであり、実用衛星がかゝえる共通の最重要課題のひとつといってもよいだろう。

4 章 衛 星 の 軌 道

4.1 はじめに

いうまでもなく静止衛星は文字通り静止しているわけではなく、地球が自転する速さと方向と、全く同じ角速度で飛行しているために、地球の上から見れば静止しているように見えるのである。人工衛星は宇宙に向かって打上げられ、ロケットが切り離された後は慣性で動いてゆく。もしどうしても速さや方向を変えなくてはならないときにだけ、自分が持っている推進力を使う。衛星はこのような慣性（慣性）運動をしているからこそ永続性のある飛行物体でありうる。

地球の引力圏を離れて、遥かに他の惑星を訪れるような人工衛星を除いて、地球のまわりを周回する衛星の場合の慣性運動は、衛星と地球との間に働く引力と衛星が円弧状の運動をするときの遠心力とが釣り合ったところで決まってくる。この釣り合いが保たれている間は衛星の経路が変化することはない。しかし実際には軌道を乱すようなさまざまな外力が衛星にかかってくるために、少しずつ軌道を変化させるということが起る。静止衛星の場合は静止位置からのずれとなって現れる。この位置ずれがある程度以上に大きくなると観測や通信のためには支障を来すし、ほかの衛星にも影響を与えかねないから、なるべく定められた静止位置を保つような措置を講ずる必要がある。

ひまわりの現在位置を知るために位置測量を行うが、この測量結果からひまわりの軌道や速度を求めたり予測して運用に備えるという作業が行われる。この章では衛星の一般的な運動の問題を中心にし、特に静止軌道とその上にある静止衛星の運用に必要な飛行管制のことなどを説明することが主な目的である。

4.2 衛星の軌道

人工衛星も目的によっては地球の引力圏を離れて金星や土星などを観測する深宇宙探査用のものもある。しかしここでは地球を周回する衛星に限って考えることにしたい。

地球と衛星の間の万有引力のような単一の求心力の下での慣性運動に対しては、いわゆる Kepler の天体運動に関する法則が適用される。もともと Kepler の法則というのは、太陽のまわりを廻る惑星の運動について発見

されたものであったから、次のような表現のしかたになる。

- (1) 太陽系の惑星は太陽をひとつの焦点とする楕円軌道を画く。
- (2) 太陽と惑星を結んだ線が単位時間内に通過する面積は常に一定である（等面積の法則）。
- (3) 惑星が太陽を一周するに要する時間は太陽からその惑星までの平均距離（又は軌道の長半径）の $3/2$ 乗に比例する。

以上は Kepler の三法則として古来から有名な法則であるが、いまこゝでこれらの物理則をニュートン力学にさかのぼって証明する必要もないように思われる。たゞひとつ補足しておく、これらの法則は太陽の重さを M とし、太陽の中心から r だけ離れた所にある重さ m の惑星との間に

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (4.1)$$

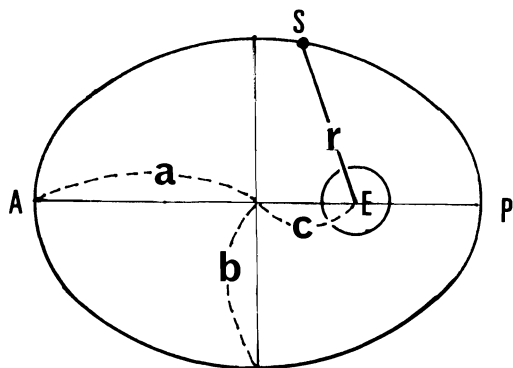
で表されるような万有引力が働いているときに得られる一般的な結論であるということである。こゝで G は万有引力常数である。したがって三法則の中で太陽を地球におきかえ、惑星を人工衛星と読みかえれば、地球の引力のみで運動する人工衛星に対してそのまま成立する。以下この法則を出発点にして衛星の軌道問題を取扱ってみたい。

まず第1法則によれば、衛星は地球の（重さの）中心をひとつの焦点とする楕円軌道をとるということであるから、衛星の軌道は地球の中心を含む平面内になくはない。例えば北緯40度の緯度線に沿って、その上だけを通る衛星などはあり得ないということになる。そのような軌道面には地球の中心点が乗らないからである。4.1図は地球の中心を通る平面上で、衛星は楕円に沿って動き、地球中心はこの楕円の焦点（のひとつ）にあるものとして画いている。ところで楕円に対する幾何学の公式を思出して頂くと次のようになっている。

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cdot \cos \theta} \quad (4.2)$$

たゞし r は焦点（地球）から楕円上に引いた直線の長さ、 e は離心率、 θ は楕円の長軸と r との角度である。

離心率 e は $e = c/a$ で定義され、4.1図に記入されているように a は長半径、 c は楕円の中心から焦点までの長さ（半焦点距離）である。なお楕円の面積は短半径を



4.1 図 楕円軌道

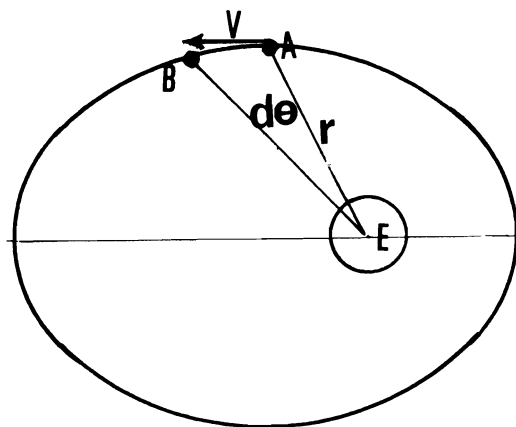
A : 遠地点, p : 近地点, a : 長半径, b : 短半径
c : 半焦点距離, E : 地球, s : 衛星, r : 動径

bとすれば $ab\pi$ で求められる。楕円の特別な場合である円については $a = b$, $e = 0$, 面積は $a^2\pi$ である。

次に第2法則や第3法則に関係したことを見ることにする。4.2図に示したように、微小時間 dt の間に衛星はAからBに動いたものとする。その間に動径ベクトル r が過ぎる面積を斜線で塗りつぶしている。ABの長さは $rd\theta$ であるからこの斜線部分の三角形の面積は $1/2 \cdot r \cdot rd\theta$ で求められる。第2法則は単位時間当りのこの面積はいつでも一定であることをのべているから、その一定値を h であるとすれば

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = h = \text{一定} \quad (4.3)$$

というのがひとつの表わし方である。



4.2 図 衛星の運動

一方衛星はAB間を dt 時間で飛行したのであるから衛星の速度 V は, r をこの微小時間内は一定だとして,

$$V = r \frac{d\theta}{dt} \quad (4.4)$$

でなくてはならない。これを(4.3)式に代入すれば

$$V = \frac{h}{r} \quad (4.5)$$

という簡単な結果が得られる。つまり第2法則からいえることは、ある軌道上での衛星の速度は、地球からの距離 r に逆比例するというのである。楕円軌道上で衛星が地球に一番近い点(近地点)を通る時が最も速く、遠地点付近では遅くなる。

しかしこの h は今考えている衛星に対して一定値であるということであって、別の軌道に対しては違った値をとる。どんな軌道に対しても適用できる速度公式を得るには少し違った角度から求める方がよい。万有引力のような保存力の場の中では運動エネルギーと位置エネルギーの和は一定であるという原理がある。これを衛星運動に適用すれば簡単に衛星の速度公式を求めることができる。その結果は地球の重さを M としたときに次のような関係として表わすことができる。

$$V = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

(4.5) 式を楕円の動径 r について平均すれば平均速度が求められるが、それは $r = a$ としたときと同じ結果になる。この平均速度を V_m とすると V_m は

$$V_m = \sqrt{\frac{GM}{a}} \quad (4.6)$$

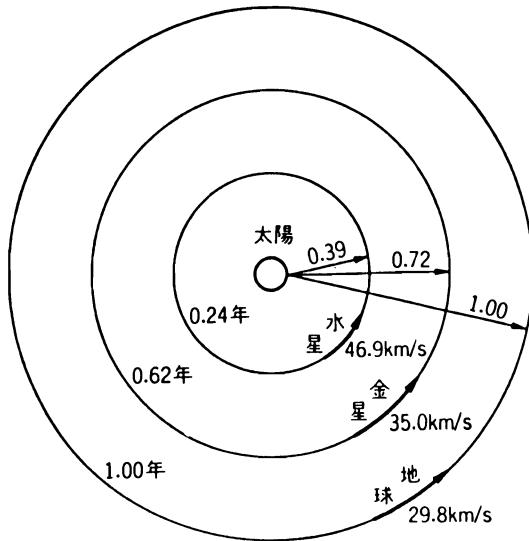
である。衛星が軌道をひと廻りして元の位置に戻る時間(周期)は、軌道の長さをこの V で割れば求まるが、簡単に考えたいときには円軌道の場合について計算してもよい。円軌道のときは速度 V は場所によらず一定で V_m にひとしい。したがって周期 T は半径 a の円周を V_m で割って求められる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} \quad (4.7)$$

(4.7) 式は公転周期 T は長半径 a の $3/2$ 乗に比例するという第3法則そのものである。

軌道が決まれば、この上の各点での速さや周期がすべて決まってくるから、同じ軌道の上を違った速さで廻る衛星を打上げたいなどといっても、それは無理な注文であると答えるしかない。一方違った軌道の衛星同志を比較すると、低高度の衛星ほど速く周期も短い、高い高度の衛星は遅く周期も長びく。このことに関連してよく引かれる例は、太陽のまわりの惑星の場合である。4.3

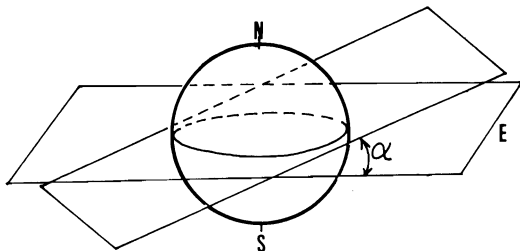
図では太陽から地球までの平均半径を1としたときの金星や水星の半径と、それぞれの星にとっての1年の長さと速さが記入されている。



4.3 図 惑星の速さと周期

このようにひとたび軌道が決まれば、衛星の運動は簡単な法則で一義的に決定する。しかし簡単だというのは地球に固定した平面上のことであって、衛星を地球の上から眺めるときには地球自転の効果が入ってくるから単純ではなくなる。衛星から地球の中心に向って直線を引いて、その直線が地球の表面に画く軌跡（直下点軌跡）がどのように画かれるかということを見ることにしよう。

軌道面が地球の赤道を含む面となす角を軌道傾斜面と



4.4 図 軌道傾斜角 α のたすきかけ軌道

いう。軌道傾斜角が α であるような衛星が画く直下点軌跡は、北緯 α 度と南緯 α 度との間にある。このことは 4.4 図から直観的に理解できると思う。

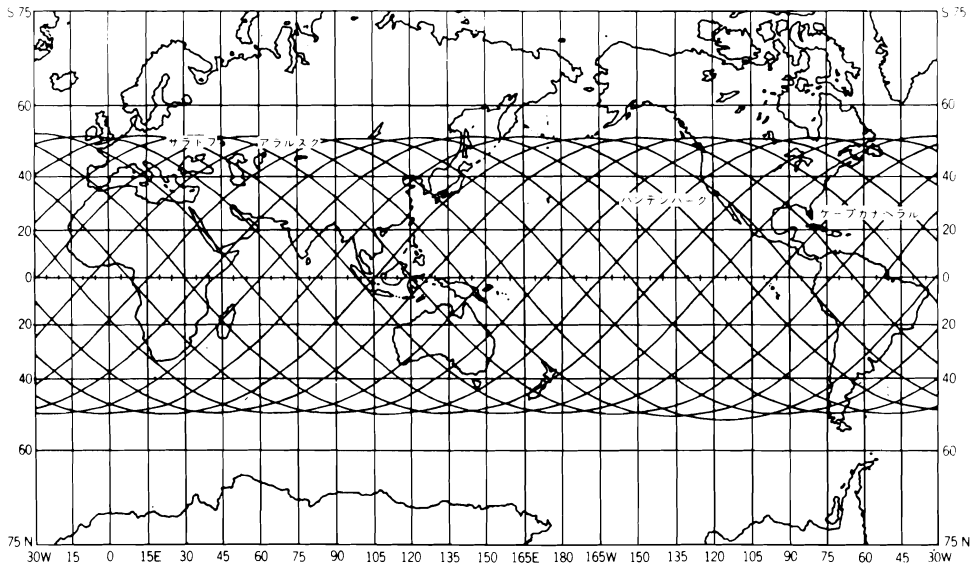
衛星は軌道の半径で速さと周期が違ってくるが、例えば高度 300 km を東向きに円軌道に沿って飛ぶ衛星の速度は (4.5) 式によって 7.73 km/sec となる。高度 300 km、つまり地球中心からの半径約 6670 km の円周は 42000 km ほどになるから、衛星の周期は 90 分ということになる。ところが一方では地球は 1 日に 360 度、1 時間に約 15 度の割合で東向きに廻っているから、衛星が 1 時間半後に元の位置に戻ったときにはその直下点の地理上の位置は 22.5 度ほど西にづれた位置にくることになる。衛星が楕円軌道をとるときには軌道上の速度が変わるからやゝむづかしくなるが、円軌道の場合には 4.5 図のように赤道をはさんで南北に対象的な網目状の直下点軌跡図が画かれる。

極軌道気象衛星 NOAA の場合には軌道傾斜角は直角に近いから、北極から南極までほぼ地球をたて割りに動く。その高さは平均 850 km のほぼ円軌道を取り、平均速度は 7.45 km/sec、周期は 102 分という程度である。NOAA は軌道上を 14 周した丁度 1 日後には殆んど同じ地図上の点を通過する。日本周辺で NOAA のデータを取るためには、毎日同じ時刻に東の方から第 1 回目の軌道をとらえ、1 時間 40 分ほど待った後に約 25 度西に寄った第 2 回目の軌道を追尾するという手順になる。

4.3 静止衛星

地球の中心から 6700 km（地表面からの高さが約 300 km）の人工衛星の周期は約 90 分であった。地球の中心から 38 万 km 彼方にある自然の衛星である月の場合にはその周期は 27 日の程度である。そうすると 300 km と 38 万 km の間のある高さでは、周期が丁度 1 日になるところがあってもよさそうである。この高さを求めたいのであるが、そのときに少し注意しなくてはならないのは 1 日の長さという点についてである。

地球上の 1 日は、太陽を真南に見たときから次の日に再び太陽を真南に見る時間間隔で測っている。ところがもし仮りに地球が全く自転しないで、宇宙空間の同じ方向をじっと見たまま、太陽のまわりを廻ったとする。このときでも太陽を 1 周すれば地球の上にはその周期で昼と夜が訪れる。このように自転して太陽に正対する時間間隔 24 時間（平均太陽日）と、自転して無限遠方の星に正対する時間々隔には、地球が太陽の周りを公転する分の差が出てくる。後者の目で見た地球の自転周期（平均恒



4.5 図 衛星の直下点軌跡，軌道傾斜角 50 度の場合

星日) は 23 時間 56 分 4 秒となる。

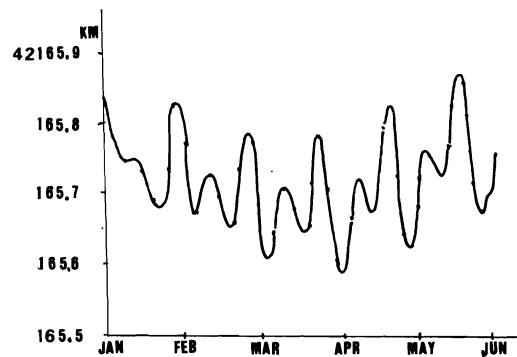
ところで人工衛星は，地球がどのように動こうが地球中心を通り宇宙の一方方向に固定された面内で楕円運動をしているのであるから，太陽の存在とは関係がない。したがって静止円軌道の地球中心からの距離は (4.6) 式から，

$$1 \text{ 恒星日} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{(R_0 + H)^3}{GM}} \quad (4.8)$$

から求めるのが正しい。ここで a は地球中心から衛星までの距離， R_0 は地球半径で H は地表面から測った高度である。このようにして求めた衛星の軌道半径 a は 42165.7km，高さ H は 35788 km (約 36000km) ということになる。ついでに静止衛星の速度は (4.6) 式から 3.07 km/sec と求まる。ひまわりの場合に実際測定された高さを 4.6 図にあげておいたが，この図でみるように実際には毎日僅かながら変化している様子がみられる。

地球上からみて衛星が静止しているためには，まず上にのべたような高度，あるいは同じことであるが周期，をもつ円形の軌道上になくてはならないことが前提になる。もうひとつは，いうまでもなく軌道面は地球の自転軸に直角，つまり赤道面と一致していなくてはならない。軌道傾斜角 α がゼロでなければ南北の緯度 α の間で地図上に図形を画いてしまうことはすでにのべた通りである。

いままでの議論は，地球と衛星との 2 点間で理想的な



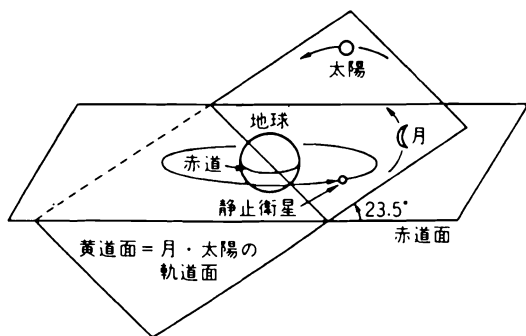
4.6 図 静止衛星の高度（地球中心からの距離）実測図

万有引力が働く場合，つまり地球や衛星の重さがそれぞれの中心点に集まった質点同志の運動として扱ってきた。衛星の運動の特性は大部分この仮定の下で説明される。

しかし実際にはこのような理想的な条件を乱すいろいろな力が衛星に加わってくる。そのような力として考えられるものには，(a)大気の摩擦，(b)地球磁場によって衛星に渦電流を生じる効果，(c)太陽から吹き出す微粒子風とか太陽光の放射圧力による抵抗，(d)太陽と月からの引

力、(e)地球の重力が場所によって異なる効果などがあげられる。静止衛星は地球の半径の6倍もの高さにあるから低軌道衛星には一番重要と思える(a)の効果は殆んど考える必要はない。(b)も高々度では地磁気の磁束密度が低いので考慮しなくてもよさそうである。一方(c)は衛星の高さが高いほど考慮しなくてはならない効果であるが、太陽面爆発による荷電粒子の大量放出などは、軌道を乱すというよりは通信障害の原因になるかも知れないという点に関係が深いように見られる。結局は、静止衛星たる軌道に抵触するような影響を与える力としては、(d)と(e)とが主な効果だとしてよいだろう。

太陽と地球の重さの比は33万倍、月の重さは地球の0.012倍である。地球中心と静止衛星の距離に対して、太陽と衛星の距離及び月と衛星の距離の比はそれぞれ35500倍と9.14倍であるから、(4.1)式によって衛星に働く太陽の引力は地球の引力の約2.6%程度、月の引力は0.015%くらいになり無視できない値となる。太陽は地球からみると、赤道面に対して23度26分傾いた面(黄道面)上を動いているように見える。月は黄道面から更に5度8分ほど傾いた面上を動くが、いずれにしろ静止衛星に対しては太陽と月とはほぼ同じ方向から引力を及ぼすと考えてよい。

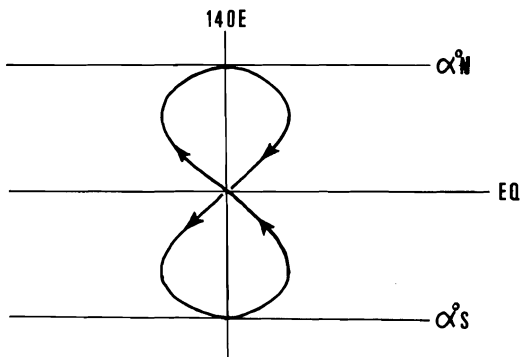


4.7 図 太陽と月の引力が衛星に及ぼす影響

衛星に加わるこれらの力は、地球の引力に比べればかなり小さいので、純粋な Kepler 運動に対して修正を加える摂動として扱い、衛星の軌道予測が行われる。ともかく、これらの力は静止衛星の軌道が赤道面と一致してはならないことに逆らうので、放置しておけば軌道面は赤道面から次第に傾いてくる。摂動としては太陽の引力が大きいのでこれだけを考えても、この傾きはやがて黄道面の傾きまで行きそうであるがそうはならない。

太陽は1年で黄道を回るから、衛星の軌道を傾ける力の方向が1年を周期に変化し結果的には数10年の周期で最大13度くらい傾いてから再び小さくなるという性質がある。

赤道面から α だけ傾いた軌道の直下点軌跡は、ある特有の図形を画くことは前にのべた。しかし、たとえ α だけ傾いても1恒星日という周期は変わらないから、そのときの直下点軌跡は4.5図のときとは大分様子が違い、48図のような8字型を1日周期で画くようになる。



4.8 図 静止衛星直下点の変動
軌道傾斜角 α 度の場合

このような軌道面の傾きを本来の赤道面に戻すには、数ヶ月に1度くらいジェットを吹かして南北方向の制御を行い、決められた範囲内に収めるというようなことをする。

つぎに円軌道をもつ衛星を運動方向に加速させた場合を考える。円軌道の半径を r_p とすれば、衛星の速度 V_p は(4.6)式によって $V_p = \sqrt{GM/r_p}$ である。ある瞬間にこの V_p に対して ΔV_p の速度を加えたとすると衛星の軌道は r_p を地球から近地点までの距離とし、近地点速度が $V_p + \Delta V_p$ であるような楕円軌道に変る。このとき ΔV_p と遠地点までの距離 r_a との間では、(4.5)式によって次のような関係が求められる。

$$\Delta V_p = \sqrt{\frac{GM}{r_p}} \left[\sqrt{\frac{2(r_a/r_p)}{1+(r_a/r_p)}} - 1 \right]$$

この楕円軌道の長半径 a は

$$a = \frac{1}{2}(r_a + r_p)$$

であるから、 a は加速する前の円軌道半径 r_p より大きくなることは自明であり、したがってその周期は第3法則(4.7)式によって、のびてしまうことになる。衛星

を加速したために衛星の軌道がふくらみ、軌道を周回する周期がのびてしまうという大へん皮肉な結果になってしまう。

遠地点に達したときの衛星の速度 V_a は、(4.4) 式の関係によって $r_p V_p = r_a V_a$ であるから、

$$\frac{r_a V_a^2}{GM} = \frac{2}{(1+r_a/r_p)} \quad (4.9)$$

である。右辺は1よりも小さい。4.9図に示したように衛星を遠地点距離 r_a を半径とするような円軌道に乗り移らせようとする、この円軌道上での速度 V_0 は

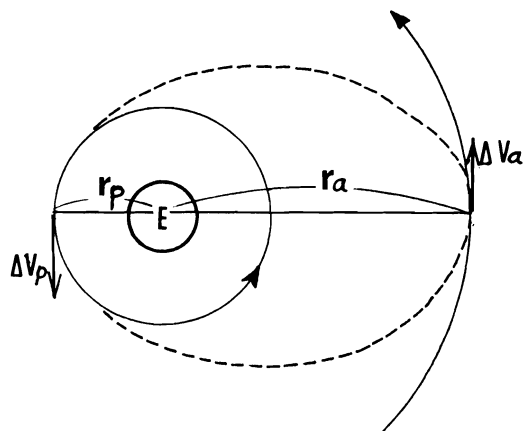
$$V_0 = \sqrt{\frac{GM}{r_a}}$$

でなくてはならない。したがって (4.9) 式から

$$\frac{V_a^2}{V_0^2} < 1 \quad (4.10)$$

となる。つまり大きな円軌道にのせるためには、 V_a を更に加速して V_0 まで速度をあげてやらなくてはならない。

このように二段階の加速によって大きな円軌道に衛星を乗り移らせることができるが、この軌道をかえるやり方は、衛星を打上げて静止軌道に最小のエネルギーで乗せる方法として応用される。このような二段階加速した結果として衛星を外側円軌道に移せば、地球から見た衛星の角速度は減少する。この事実は(e)の問題、すなわち地球の重力場が完全な球対象でないことによる影響と、この影響をうけたときの衛星に対する措置とに関係して

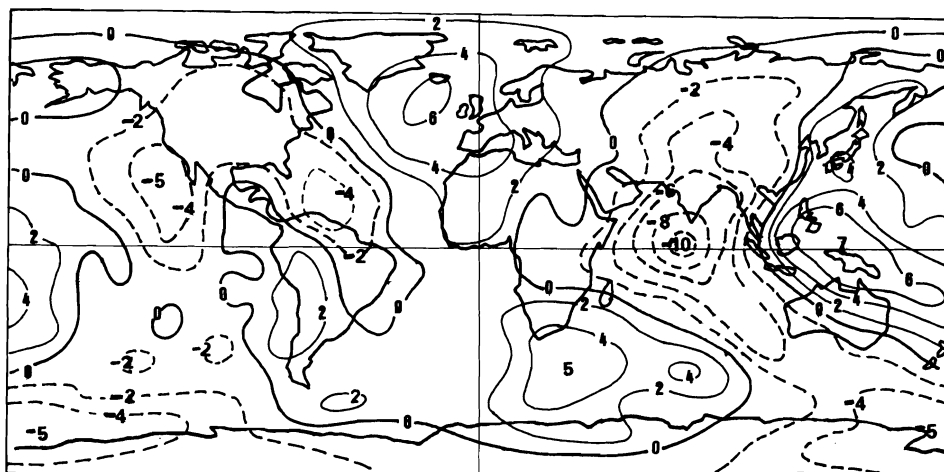


4.9 図 衛星の加速と打上げ

くる。

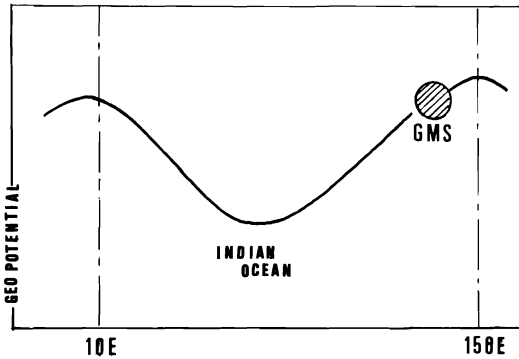
地球の重力の場に凹凸があるというのは多分地球の内部にある地殻の構造のためだと思われるが、もし地球が全面海におゝわれていれば、この重力場に沿って海面の凹凸が生じるはずである。完全に幾何学的な回転楕円体からみて、凹凸がどれ位かを表わす等高線を示したのが4.10図である。

インド洋中央部には 100 m くらいのくぼみがあり、ニューギニアのあたりにふくらみの中心があり引力の最大



4.10 図 地球の等重力ポテンシャル面
回転楕円体からの偏差(×10m)
実線は正偏差、破線は負偏差

値となっている。この引力ポテンシャルの等高線を赤道面で切ってみると4.11図のようになり、東経140度に静止した衛星は常に東向きの力をうけ加速される傾向をもつことがわかる。



4.11 図 ひまわりの位置と赤道軌道上の等重力ポテンシャル面

もし東向きに加速されると、前にのべたような理由によって静止高度よりも高い軌道に移る。その結果として周期がのび、1日たっても元に戻らないということになる。自転する地球の上から見ると衛星は東向きに加速されたはずなのに西の方に動いてゆく。衛星を定位置に保つための東西方向制御は、衛星が西向きに動いたからといって、あわてて西向きにジェットを吹かしたりなどしてはいけない。衛星が静止位置から西向きに偏向するのは、東向きに加速されたことが原因であったのだから、この加速を阻止するように処置しなくてはならない。

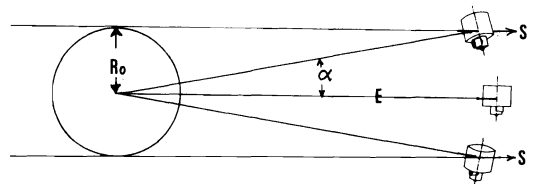
地球の引力場が均一でないことから、もし衛星の軌道修正用の燃料が切れたような場合にはどうなるかを考えておく必要もあろう。

東経140度にある衛星は、まず南北制御も効かないのであるから8字型を描きながら次第に西の方に漂流する。インド洋をすぎると、こんどは西向きの力をうけるようになりながらも、直下点はなお西の方に進み、東経2.5度附近まで達する。ここからは逆の進路をとり、東経140度近くまで東向きに静止高度より低い高度で動き、結局はインド洋を中心にして、3.5年くらいの周期ではば永久運動をするのではないかと推定されている。永久運動というのは、静止高度では空気抵抗はほとんどないからであるが、もし摩擦などの抵抗要因があればインド洋は静止衛星の墓場になるのではないかという説もある。

現在赤道軌道上には数え方によっては100個近い衛星があり、その数も増える一方である。そしてそろそろ制御が効かない脳死に近い衛星も出つつある。赤道上空はもはや大切な資源と考えるべき時代であるから、できるだけ有効に活用すべきであるが、あまり過密状態にしておくと、その中を命脈のつきた衛星が東西にさまようという何とも不気味なことが起る。ある人の計算では、たとえそのようになっても衝突の確率は低いのだそうであるが、それにしても万一衝突したり不用であるからといって爆破してしまったりするとかえって困ったことになる。破片が静止軌道の附近にばらまかれるだけのことからである。寿命のつきた衛星は残存燃料を吹かせて別の軌道に移すのがよいが、少なくともその機能だけは生きているという条件がつく。遠い将来のことかも知れないが、頻死の衛星は静止軌道上から回収することが最善の策であろうというのが大方の一致した見解となっている。

4.4 蝕、姿勢制御など

ひまわりから見れば、地球の視直径は20度ほどの大きさであるのに対し、太陽は0.5度程度にしか見えない。したがってもし、太陽と地球とひまわりとがほぼ一直線上に列ぶような時期があれば、ひまわりから見て太陽が地球の背後に完全に入ってしまうことが起る。このような地球による日蝕の現象は、太陽と地球とひまわりが同じ平面（赤道面）上にある春分や秋分の前後に発生する。



4.12 図 春分、秋分前後の蝕の起りうる期間

E : 春分、秋分時の軌道面

S : 太陽光の入射方向

R_0 : 地球半径

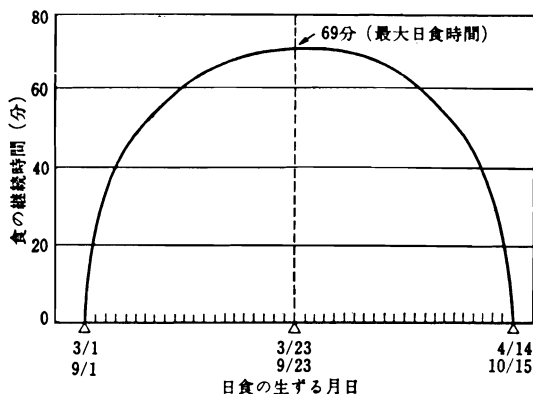
この前後の期間というのは、4.12図にみられるように、春分や秋分を中心として太陽の方向と衛星の軌道面との角が $\pm \alpha$ の範囲である。軌道の半径を a 、地球の半径を R_0 とすれば、 α は

$$\sin \alpha = \frac{R_0}{a} \quad (4.11)$$

では α が決定される。太陽の光は無限遠方からの平行光線と仮定している。軌道の半径は地球の半径の約 7 倍、また α は小さいものとして $\sin \alpha = \alpha$ で近似すると、(4.11) 式の粗い近似として

$$\alpha \approx \frac{1}{7} (\text{rad}) = 8.5 (\text{度})$$

が求まる。3 月 20 日の春分を起点とした場合には太陽と赤道面のなす角（太陽の赤緯）が 8.5 度以内ということになる。秋分の場合も同様で、9 月 23 日をはさんで前後 50 日間は日蝕の起りうる期間である。なおこの算定は大へん粗い近似によっているから、もう少し正確な日蝕時間表を 4.13 図にあげておきたい。



4.13 図 静止衛星から見た地球による日食の起時と経続時間

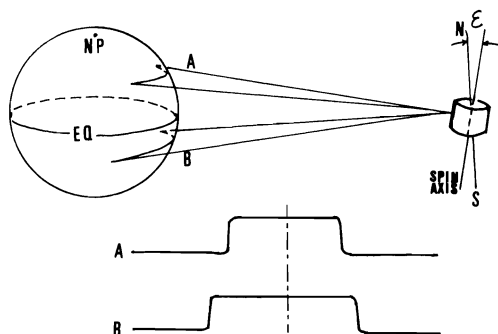
もち論この期間でひまわりから見て日蝕の時間が一番長いのは、春分又は秋分の当日である。このときには 4.12 図から類推されるように、蝕の継続時間は衛星が軌道上を 17 度経過する時間、つまり 70 分くらいの間ということになる。東経 140 度が夜中の 0 時になった頃を中心にして、前後 1 時間以上は衛星には太陽の光が当たらない。

たとえ僅かな時間であっても太陽光が当たなくなると太陽電池からの電力供給は一切無くなるし、衛星は宇宙空間の中で凄く勢いで冷却する。まずは蝕時間内は、何をさし置いても衛星の機能を保持することに努める必要がある。蝕前後には、その準備や後処置を含めて衛星の特別運用期間としており、通常時とは若干違うルーチンになる点を了解願いたい。

こゝで衛星の姿勢について簡単にふれておきたい。衛星の自転軸は軌道面に対して直角に南北の方向を正確に

向いているのが正常な姿である。この自転軸の方向が変わるとピサの視線方向が変わる結果、観測対象物の地理上の位置が標準の場合とは違ってくる。このようなことから衛星の自転軸の角度をモニターしておく必要がある。

自軸角を知るために、衛星には二つの異った角度から太陽を見るようなセンサーを取りつけている。ひとつは衛星の自転軸と平行に、他のひとつは衛星の自転軸とある角度を持つた長の間隔をもうけ、この 2 つの間隔から入る太陽光の入射角の差から太陽方向に対する自転軸の角度を求めている。また同じ目的のための装置としては、下図のように赤道をはさんで地球の南と北を望むような位置に地球を検知する赤外センサーを置いておく。この 2 個のセンサーが地球を検知する時間の長さを比較することによって、4.14 図から容易に想像されるように、自転軸の傾きを知ることが可能になる。



4.14 図 地球センサー A, B による衛星自転軸の傾き検知

これらのセンサーで検知するよりも、もっと正確に軸の傾きを知ろうと思えば、衛星で撮影した地形が標準の地形とどれくらい偏っているかを調べればよい。衛星の姿勢を詳しくモニターするために、画像のずれから傾き角を逆算する方法が実際に用いられている。

衛星は最終段のロケットを切りはなす前にすでに自転させられている。静止円軌道に乗るためには衛星自身もつ推進用ロケットに点火するが、この状態で首ふり運動を防止しながらゆっくりと静止軌道に投入される。静止軌道に入ってから自転速度を規定の値にあげながら自転軸方向を正確に南北に合わせる。

衛星内には自転軸の首ふり運動を防止する巧妙なしかけがあるが、それでも前節にのべたようなさまざまな外力の影響によって、衛星の位置のみならず軸が徐々に傾くということが起る。軸の傾きを 0.5 度以内におさえるために、姿勢制御のジェットを噴射して、軸おこしを行うということも衛星の管制には大切な仕事になっている。

5 章 観測データの処理

5.1 はじめに

ひまわりによって観測されるものは、ピサが見た瞬間の視野角に入ってくる放射のエネルギーである。すなわち、地球大気系が自ら放射する赤外放射と、地球大気系によって反射された太陽光のうちピサの方向に向う成分とである。これらの赤外や可視の光は、赤外については大気の窓の波長帯（10.5～12.5 μm ）、可視については太陽光の最強部分の波長帯（0.5～0.75 μm ）について測られていることはすでに説明したとおりである。

放射エネルギー全体の出入は大気運動の原動力であるから気象の問題には重要な関わりがある。もしこの収支の全体像を知ろうと思えば、広い波長帯を多数の帯域幅に分けて観測しなくてはならないから、かなり大がかりな衛星システムになることが考えられる。しかしピサの場合は上にのべた二種の波長帯に一括した放射観測であるために、そのデータを利用する場合にもピサ観測の特性に合う範囲内で考えなくてはならない。その点からみると、特に大気の窓の波長帯を観測する赤外測定から推定される気象学的な量として、観測対象物の温度を求めるということがさし当っての目標になる。

可視や赤外の走査観測データを空間的に並べて地図の上に画いてみると、雲や地形の分布状況が見えてくる。もともと人間の目には感じないはずの赤外データから、雲などが見えるというのはいかにもおかしな話であるがこれは赤外放射の量を黒や灰色や白に対応させ、人工的に可視化させることを意味している。このことから夜でも雲分布がわかるという大きなメリットが生れる。したがって画像作成、あるいはFAX原図の作成、が次の放射データ処理の目的においてよいだろう。

第三に、このような画像を何枚か並べて見れば雲の変化の様子が見えてくる。この変化の中から風を抽出しようということであるが、これは上記の2つのデータ処理とはまた違ったカテゴリーに属する作業になる。

要約すると、観測データ処理は目下のところ赤外データから観測対象物の温度を算出する部類に属するもの、可視と赤外の画像を作るという部類のもの、及び大気の流れを抽出することの3つに分類できる。当然衛星観測からはもっと多様で有効な気象情報を求める可能性を追及すべきであろう。例えば雨の強さ、雪氷分布、各種気候統計的な諸量などが考えられる。こうなると、衛星デ

ータ処理は殆んど研究の分野との境目に置かれるようになる。気象衛星業務の進歩は、今までもそうであったように将来もまた、これらのデータ活用のための研究開発なしではあり得ないものと考えるべきであろう。

この章では現在のデータ処理のやり方を概観しようということであるが、上にものべたようにそれが決して最終的な姿ではない。実務上のデータ処理作業は衛星センターの仕事に限られているので概要の紹介に止めるが、衛星データ処理の割合典型な1例として見て頂ければよい。利用者の立場からすれば、何はともあれ良質のデータさえ提供されればよいという割り切り方も当然ありうる。反面では夫々の経験から、より優れたデータ処理についての方法に思い当ることもあるかと思われる。衛星センターとしてもそのような新しい提案を期待し歓迎したいと思っている。

5.2 データの校正検定

衛星からは、ある1地点の赤外観測では8ビット（256階級）、可視では6ビット（64階級）の数値が送られてくる。この数値と放射エネルギーとの対応を求めなければデータとしての価値は半減するであろう。

ある観測時刻が近づいて衛星に観測の指令を発して、走査観測がスタートすると、衛星は自らが搭載しているピサとピサ関係の電子回路を検定する動作を開始する。この一連の動作によって送り出されるデータを解析することによって、上にのべた送信データと放射量との対応づけが可能になる。この作業は当然それ以降のデータ処理の基礎となるので、まずこの件についての手順をや、詳しく説明しておきたい。

第1の手順として、衛星は衛星内部の数値（量子）化電子回路の検定を行う。この回路入力側に電圧 V_i を与えたときの出力側のカウント数、例えば赤外の場合には8ビットで表わされる数値、を C_i とする。赤外放射をセンサーで受けたときその感知量（電圧）は直線的に増巾し数値化している。可視の場合は平方根状に数値化しているから、入力側の電圧と出力カウント数との関係は、

$$\left. \begin{array}{l} \text{赤外} \quad C_i = \beta_0 + \beta_1 V_i \\ \text{可視} \quad C_i = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{V_i} \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

の形になる。そこでまずセンサーからの入力を一端切っ

において、その代りに 0.1, ..., 5 ボルトの電圧を入力側に加えたとする。そのときの出力 C_i をプロットしてみると、赤外の場合にはほぼ直線上に、可視の場合には平方根曲線上に並ぶはずである。ほぼ直線、ほぼ平方根といったのは、そのときのシステムの状態によっては完全に直線（平方根）増増と量子化が行われていないかも知れないからである。このような階段状 1 次入力電圧 0 ~ 5 ボルトに対応した C の値が、1 ラインの中に数回くり返して送られてくる。その結果をグラフにプロットして最小自乗法によって直線（又は平方根曲線）を引けば、この観測時における一番もっともらしい入力-出力関係が求められたことになる。グラフにプロットする代りに (5.1) 式の α , β の値を最適に決定するといってもよい。

第 2 の手順は、出力電圧とセンサーに入った放射エネルギーとの関係を求めることである。いまセンサーへの入射エネルギーを N として、その出力電圧を V とすれば

$$V = GN + V_0 \quad (5.2)$$

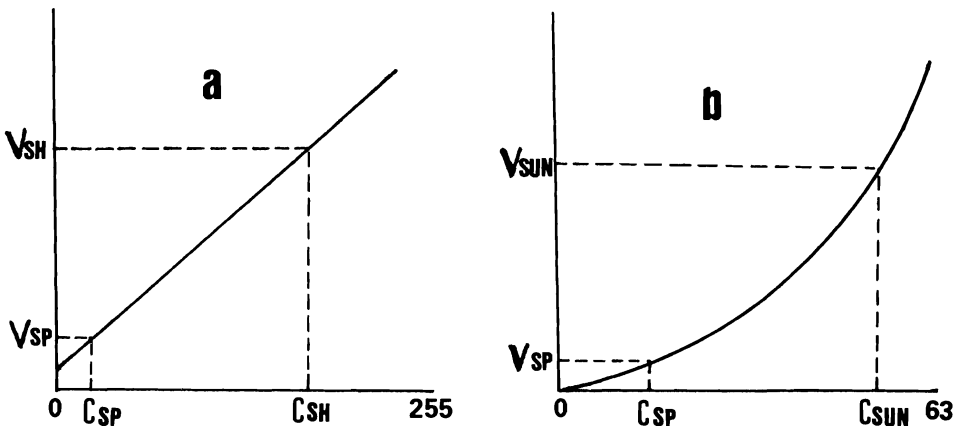
の関係があるものとする。比例係数 G を求めるために、赤外放射計に対しては次のような検定を行う。ピサが宇宙空間を見ているときには、入射エネルギー N はゼロ（実際は 3 ~ 4 度の放射があるといわれている）である。このときでもセンサーには微小な電圧が発生（暗電流）するが、その値は V_0 である。次に赤外センサーを黒い物体で閉じ込めたとする。このとき、この黒体遮閉体の温度が何らかの手段でわかるならば、赤外センサーには遮

閉体から放出される黒体放射エネルギーが検知されるはずである。黒体放射エネルギーは Planck の公式 (2.1) 式から容易に求められる。そのときのセンサー出力電圧を V_1 とすれば、(5.2) 式は V_0 と V_1 を結んだ直線を表わし、 G はその傾きになる。

可視検知器の場合のエネルギー / 出力関係の検定は次のような方法によって行っている。ピサの横に、太陽光エネルギーを 50 % に減衰させる 5 角形プリズムがおかれている。ピサが宇宙方向を見ているときの出力が V_0 （地上からは、電圧はカウント値 C から換算して求める）であり、プリズムからの入射光だけを受けたときの出力が V_1 であるから、この 2 点を結んだ直線が可視センサーに対する (5.2) 式の関係を与える。赤外と可視に関する N/V 関係はこのようにして求められる (5.2 図)。

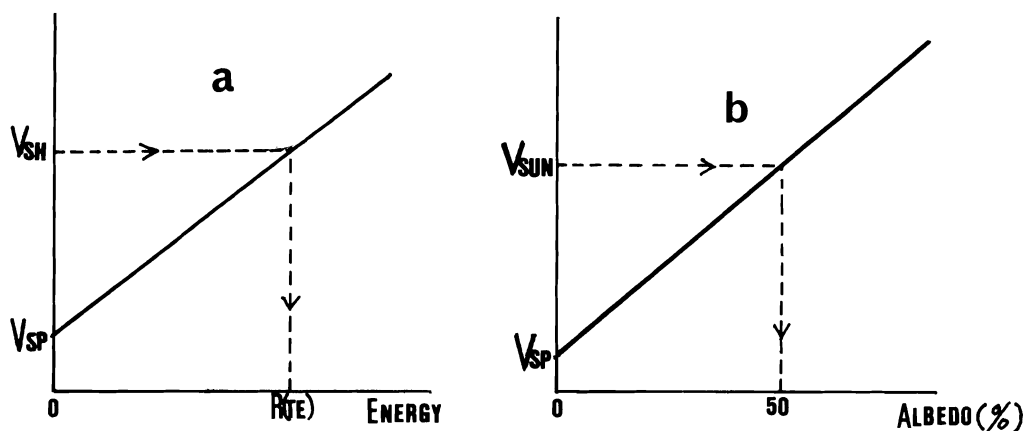
これらの検定作業を行っている間の検定データ、すなわち電子回路データ、 V_0 、黒体シッターの温度などは、衛星が走査をはじめると直ちに検定データとして送られる。 V_1 は夜中の観測のときに測定される。

ピサによる地球の可視光放射測定は、要するに、地球大気系による太陽光の反射量（アルベド）を見ているのであるから、第 2 段階の検定作業で終了したことになる。たゞし、可視光を検知する光電子増倍管は 4 個並列におかれているので、それぞれの感度を比較して、もし特に感度のばらつきがある場合には増増の利得を変える指令を発するか、あるいはデータ処理の過程で調整するかの手段をとる。



5.1 図 校正検定曲線 (1)

- a : 赤外, sh は黒体で遮閉したときのカウント数と出力電圧,
sp は宇宙空間を向いたときのカウント数と出力電圧。
- b : 可視, SUN は太陽光を 50 % とり入れたときのカウント数と出力電圧。



5.2 図 校正検定曲線 (2)

- a: 赤外, 黒体で遮閉したときの出力電圧は, 黒体遮閉体の温度 TE に対する放射エネルギーによる検定直線
- b: 可視, アルベド 50 % と太陽光を 50 % とり入れたときの出力電圧, アルベド 0 % と宇宙空間を向いたときの出力電圧から得られる検定直線

赤外放射の場合には, 放射量から観測対象物の温度を推定する第 3 段階が残っている。赤外放射の観測波長帯は大気窓の部分であり, その波長幅を λ_1 から λ_2 までとする。更に大気窓であるから, 途中の大気層によって吸収されることも大気層からエネルギーが放射されることもなく, 黒体と考えられる観測対象物 (陸地, 海面, 雲) からの放射がストレートにビサに到達するものとする。この仮定は, (2.15) 式において透過関数 τ と射出率 ϵ を共に 1 におくことに相当する。したがって, この仮定のもとでの放射エネルギーは

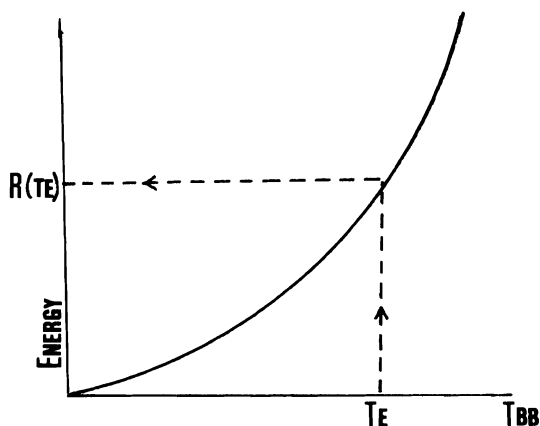
$$I_\lambda(\mu) = B_\lambda(T_{BB})$$

となり, 等価的には T_{BB} という温度をもつ黒体から放射エネルギーが入射することに相当する。ビサはこの放射の λ_1 と λ_2 の帯域幅の部分を感じし測定する。そのように波長帯を切り出すフィルターの特性を $\phi(\lambda)$ (0 と 1 の間の値をとる) とすると, (5.2) 式の N に相当する入射エネルギーは次式のように表すことができる。

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) I_\lambda(\mu) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) T_{BB}(\lambda) d\lambda \quad (5.3)$$

第 2 段階までで赤外の N と V との関係が求められたので, 次の段階として (5.3) 式により N と T_{BB} の対応づけが可能になる。以上のことから C と V, V と N, N

と T_{BB} の検定関係をたどってゆけば, 衛星から送られてくる赤外放射の 8 ビット表示 C から, 観測対象物の温度 T_{BB} が求められることになる。(5.3) 式の関係は Planck 曲線に相当するものであるが, この N と T_{BB} 関係を 5.3 図にあげておく。



5.3 図 校正検定曲線 (3)

温度と放射エネルギーの関係

T_{BB} は、前にのべたような仮定の下での等価的な温度というべきものである。すなわち T_{BB} は観測赤外放射量を温度の単位で読むことに相当するから、放射輝度温度とも呼ばれる。対象物の真の温度を求めたいときには放射が伝わる経路の影響を考慮することが必要になってくるがこの問題は次節に廻す。

以上のべた検定校正法にはいくつかの問題がある。可視については太陽光をある一定の割合でカットするプリズム機構が十分ではないと感ぜられる点である。光量カット率がかなり変動するために、絶対校正には事実上役立っていないという問題がある。赤外については、黒体シャッター温度の測定とその最適値の評価に若干の不確かさを伴う。そしてエネルギー / 出力関係 (5.2) 式の直線性の保証も打上げ前の地上試験の域を出ない。

検定の方法上の発展は将来の一課題であり、衛星から月を観測したり、砂漠地方の射出を測定して理論値と照合するなど種々の模索が試みられている。しかし目下のところ現行に代るより信頼性のあるハード機構とその解析方法がいまだに確定していない状況にあるといわざるを得ない。

5.3 赤外観測データの利用

放射観測から必要とする対象物を識別することがリモートセンシングのデータ処理のひとつの目的である。静止気象衛星からは、気象や海洋の業務に役立つ物理量として前節にのべたように海面（あるいは陸面）、雲（温度

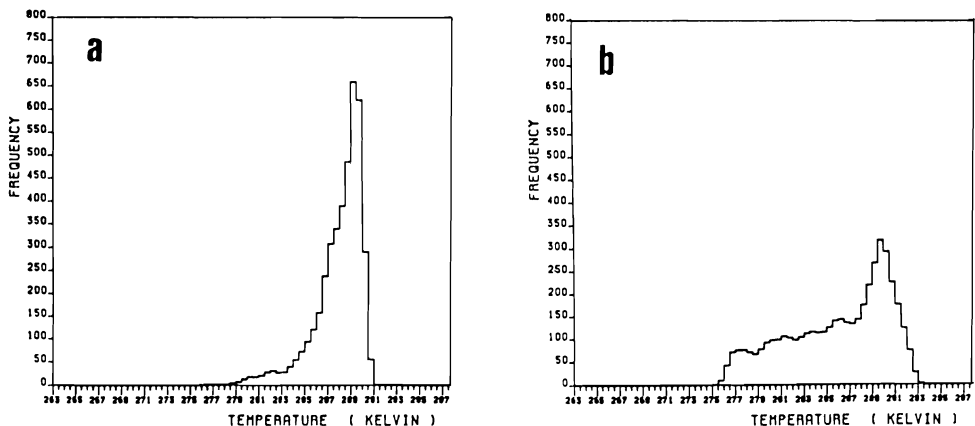
から高さが推定できる）の温度が求められる。一般に気象や海洋の目的には必ずしも 1 点 1 点の値が必要ではない。ある広がりを代表する物理量の空間的分布が有効な場合が多い。静止気象衛星は、高い位置から観測するから解像力にはどうしても限りがあり、地表上ごく狭い地点の精密測定に向かない反面、広い範囲を同時刻に観測できるという有利な面がある。

このような特性は、ある広がりの中の代表的温度とその空間分布を求めるという総観的観測に適するものといえよう。この節ではそのようなデータ処理目的に対して共通的に行われている現行の方法を簡単に紹介することを主眼におきたい。

(1) ヒストグラム

いま地表面で 100 km の格子をとりこの中の代表的な海水温を測定することを考える。衛星直下点での解像力は 5 km であり、データサンプリングの結果東西方向の画素は約 2/3 重なり合うことを考慮して、100 km 四方の格子をおく全画素数は 20 ライン × 50 画素となる。この個数の赤外データは前節の検定曲線を用いてそれぞれ T_{BB} に換算される。合計 1000 個のデータを見れば、同じ T_{BB} の値を示すデータは何個もあるだろう。そこで横軸に T_{BB} 、たて軸にその T_{BB} の値をもつデータの個数をプロットしてみると 5.4 図のように分布するであろうことは想像できる。

(a)の図は、この100 km 四方の領域の中で雲が殆んどない場合であり、この領域の海面水温に相当する T_{BB} の



5.4 図 ヒストグラムの例

a : 雲のない場合

b : 部分的に雲におゝわれている場合

所にデータが集中し、裾野の広がり狭い。裾野の部分はこの領域の中で海水温が僅かに変化していることを反映しているかも知れないし、少量の雲やキリがあったためかも知れないし、原因不明のランダムなノイズが含まれていることもありうる。

一方(b)の場合はこの領域の1部が雲におゝわれているときのヒストグラムである。たまたま瞬間視野の中に雲がないときには放射は海面からのものであるが、雲の部分を見たときの放射量は、温度の低い物体（中、低層の雲は黒体に近い）からの値となるだろう。またほぼ一般的な雲頂高度をもつ雲に一面におゝわれている場合のヒストグラムは(a)に近く、高低のはげしい分布をしている雲の領域では(b)形でしかも裾野がもっと広い分布になるに違いない。静止衛星の特性を考慮した気象、海洋目的のデータ処理のためには、このようなヒストグラムを作り物理的に意味が与えられるような統計処理をすることが出発点になる。

(2) 大気補正

T_{BB} は5.2節でのべたように観測している物体の温度ではない。2.4図に見られるように、ビサの赤外検知範囲 $\lambda_1 = 10.5 \mu\text{m}$ (波数 $950/\text{cm}$) と $\lambda_2 = 12.5 \mu\text{m}$ (波数 $800/\text{cm}$) の間には少量ながらも水蒸気分子等による吸収があり、水蒸気圧の大きい場合にはその影響は無視できないからである。

(2.15) 式に、赤外観測のフィルター関数 ϕ_λ を乗じ、帯域幅で積分した値が赤外検知器に入射し感知されるエネルギー量である。この値を M とする。

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_\lambda \epsilon_\lambda B_\lambda(T_s) \tau_\lambda(p_s, \mu) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{p_s}^0 \phi_\lambda B_\lambda[T(p')] \frac{\partial \tau_\lambda(p', \mu)}{\partial p'} dp' d\lambda \quad (5.4)$$

T_s は物体の真の温度であり、 $T(p)$ は気圧面 p での大気温度である。この式を解いて、観測された M から T_s を求めるためには、大気中の温度分布、各波長ごとの透過関数と、それを知るための水蒸気量分布などがわかっていなくてはならない。これらの量のその時点での分布は、客観解析または予報の格子点値を用いるのも一方法であろうが、現在のところは温度と可降水量の月平均値を予め用意しておいてこれを利用するようにしている。

大気補正を実際に行うときには(5.4)式を直接解かずに、船舶観測から既に得られた海面水温と衛星観測による T_{BB} とのサンプルから、(5.4)式に内在する物理関係と考慮した経験式を作り、係数は統計的に決定する

という方法をとっている。

例えば、(5.4)式はビサの視線方向、地上からみれば衛星の天頂角 μ 、に關係している。そこで真の温度 T_s と T_{BB} との差を ΔT としたとき、 ΔT の μ に対する依存のしかたを

$$\Delta T \sim (ax^2 + bx + c)F_1(T_{BB}), \quad x = 1/\mu$$

とおき、 a , b , c を統計的に求めるということを行う。透過関数への依存の程度は、光路中に含まれる水蒸気量による。この水蒸気量を月平均可降水量から求めて W とし、 W に対する ΔT の関係を

$$\Delta T \sim (dw^2 + ew)(ax^2 + bx + c)F_2(T_{BB}) \quad (5.5)$$

とおき、 d , e を統計的に決めるなどである。もし観測対象物が地表面上ではなく、雲のようにある高さに浮いている場合には、 ΔT は物体の高さ h にも依存する。特に W は h によって急激に変わるから W は h の統計的関数でもある。

大気存在による赤外の放射とその吸収による補正の計算結果をみると、中緯度の夏の場合で2~3度、冬では0.5~1度、熱帯では4~5度に達する。独立資料によって、補正した T_{BB} と観測された海面温度 T_s を比べてみると、ほぼ妥当な補正であると見える。雲に対しても同じ補正式を準用するが、その妥当性の検証はその場所です実際に測られた雲頂温度データが蓄積されない限りは何ともいえない。たゞ航空機観測などの若干のデータによる予備的な検証によれば、観測対象物の地上からの高さを考慮した(5.5)式の補正式をそのまま用いてもよさそうに思える。

後の節でのべる NOAA データによる鉛直温度分布算出のプロセスを参照したり、放射伝達をより理論的に取扱う研究開発をすすめる必要がある。このことが、大気補正の問題を含めて、衛星観測データ処理を一步進んだ水準で考える基礎となるだろう。

(3) 観測対象物の温度

海面水温については、5.4図(a)型の場合は比較的明瞭にヒストグラムのピークが決定できる。その値(モード値)を観測領域の代表 T_{BB} としてよいであろう。極めて強い逆転層の上部が層雲になっているようなごく特殊な状況も考えられるが、一般に領域内で最大の黒体放射をするのは海面である。したがって、(b)型の場合でも最高温側のピークを選定して海面水温としてよい。

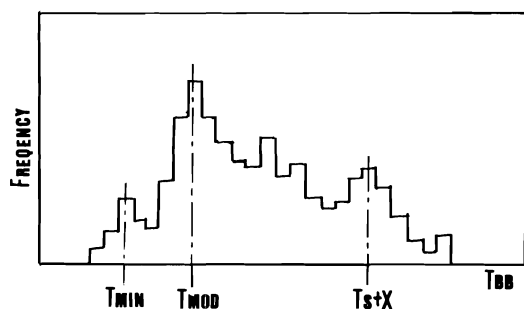
ピーク近傍のスペクトルの形は、ランダムなノイズによって裾野が広がっているものとして、正規分布を仮定

する。この正規分布モデルをヒストグラムの高温側に適用することによって、モード値とそれに対応する T_{BB} とが数値的に求められる。 T_{BB} に前節でのべた大気補正をほどこせば、海面水温が得られることになる。

雲は黒体に近いから、雲から下にある物体からの上向き赤外放射を殆んど吸収してしまう。また雲はその上面から自らの温度に相当する放射を放出する。雲の存在する場所では海水温の測定はできないことになるが、幸いシノプティックな海水温の時間変動は極めてゆるやかである。したがって赤外放射観測による晴天（又は部分晴天）域の海面水温測定データを何日間か蓄積すると、かなり広い範囲の海面水温分布が画かれる。現在は10日平均の海面水温分布図を作成しているが、同じ場所が長期間厚い雲におおわれているような領域では海面水温データは得られない。

雲の温度を求めることを考えよう。瞬間視野の大きさは、一般に雲の代表的スケールよりも広い。さまざまな高さの雲が混在しているときの瞬間視野角に入射する赤外エネルギーは、混在する雲の放射エネルギー平均値であろう。雲におおわれた領域でのヒストグラムは、このような雲のマイクロスケールな分布のほかにメソスケールの分布の影響も加わるから、晴天域の海面を見たときのようなシャープなモードは現れず、通常かなり広がった形になる。

雲の放射に対しては当然ヒストグラムの低温側に着目する。広がりのあるヒストグラムに対しては、モード値、平均値、分散などのほかに、ノイズではなくて意味があると考えられる最低値などが求められる。これらの値はそれぞれ、領域内でもっとも多く分布している雲の雲頂温度、平均雲頂温度、その広がり方、及び一番高い雲の雲頂温度には対応すると解される。



5.5 図 雲層のヒストグラム

雲は黒体に近いのであるが、水晶から成る薄い絹雲の場合には射出率 ϵ は1よりもかなり小さな値をとる。雲

の形 (S_c , C_i など) によって ϵ の値を与えておくこともできるが、雲の形を画像データからどのように判定すべきかの大きな問題が残る。

雲の真の温度を求めるためには大気補正を必要とする。大気補正は雲頂から大気上端までの補正であるべきであるから、雲の高さと温度との2つの未知量を同時に求めなくてはならない。その方法として、まず雲は大気の上端にあるものとして T_{BB} と大気温度との差を算出する。一般にこの差は大きいので、次に雲の高さを少し低めて大気補正を行い、再度雲頂温度と大気温度を比較する。このくり返しによって雲頂温度と大気温度の差が最小となる高度を見出し、同時にそのときの雲頂温度をもって真の値とするというのが現行方式の骨子である。

雲頂高度導出問題にはもっと改善すべきことが多い。台風のように、平均大気から著しく隔った温度構造をもつ場合など、一般に雲頂高度情報の価値は、平均状態とは異なるじょう乱周辺において大きい。これらのことを含め、高度算出のアルゴリズム、解析システムとの整合性およびマッピング等の操作方法を検討することも今後の課題になるだろう。

5.4 FAX 原図の作成

FAX の画像情報はアナログの信号により、衛星を中継して送られる。FAX 情報は受信側の仕様に合うように作られる。衛星雲画像の受信システムは次表に示す2種類に分けられる。

5.1 表 FAX 受信機

	高解像度 FAX	低解像度 FAX
1 画面当り ライン数	4562	800
画周波数	21 kHz	1.68 kHz
階調	32	16
mm 当り 出力本線	10.42	3.83
通常の 出力形式	レーザー光による 写真現像	静電記録紙, ブラウン管表示
協同指数	2000	268

ある周波数の波で何個のデジタルなデータが表しうるかがわかっている（標本化定理）。その結果、LR-FAX では1線あたり約1700個、HR-FAX のときには約10000個のデータが必要になる。またFAX受画機によって一定の大きさの図が受画されることになるが、LR-FAXの場合についてFAX図のレイアウトを5.6図に示しておく。

画面の中での尺度表示や文字などは、一応図のようにしておけば利用者にとって使いよいだろうと考えてのデザインによっている。画像情報が送られる正味の大きさは、たて方向に742本、よこ方向に1710画素であるが、地図の縮尺と中心の緯経度をどうするかによって全体がカバーする範囲が異なる。その縮尺も天気状況の監視にほぼ適合するであろうと見られる範囲を分割して送画することになっている。

一方ビサのデータは、ビサの全走査線上の一定のサンプル数のデータとして得られている。これは上のようにして決められたFAXの走査線や1走査線上のFAX画素データの個数とは違ってくる。またFAX図の線密度や画素数は、赤外の場合でも可視の画像に対しても一定である。更に目視によって階調が識別できる限度も、LR受信システムの場合は16階調くらいが限度であろう。この階調も元になるビサの階調とは異なる。FAX原図の作成は、まずこのようなビサ観測をFAX仕様へ合わせることである。

さらに、FAX図には地図や緯経線、そして日付けなどの付加情報も有用である。これらを含めFAX原図作成の作業工程は次のような順序に要約できる。

(1) 緯経線、地図データのそう入

あらかじめ円形全画像に入れておく。

(2) 画面の切出し、拡大と縮小

各FAX図により、また可視か赤外かによって拡大（ビサの1画素がFAXの数画素に使われるとき、補間操作）、或いは縮小（ビサの数画素がFAXの1画素になるとき、再サンプル）を行い、必要な範囲を切り出す。

(3) 階調づけ

ビサ観測の階調を目視による識別に適する階調に変換する。気象上冬と夏とでは注目する雲に違いがあるが、概して放射量の弱い側の階調を強調し強い側をまとめるようなFAX用階調とする。

(4) 尺度表、文字等付加情報

FAX図ごとに予め準備されているデータを付加する。たゞし日付けや時刻はその都度さしかえる。

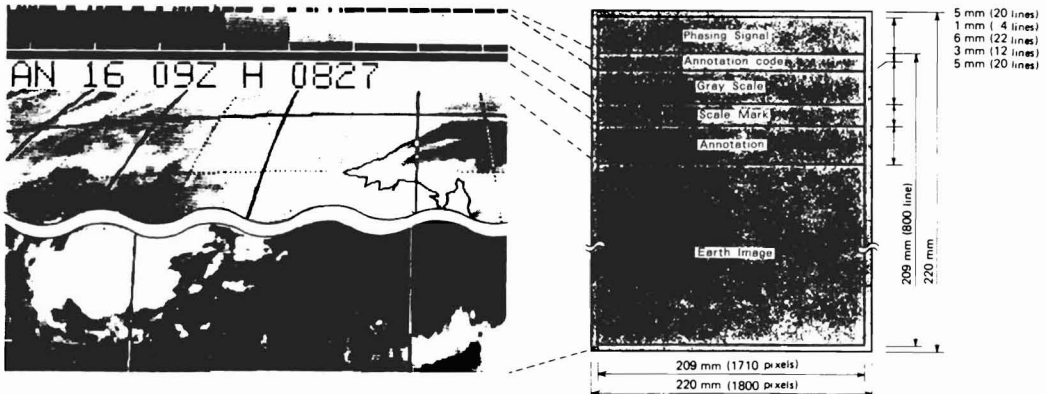
これらのデジタルデータは衛星に送り出す前にデジタルからアナログに変換し、それを変調することが必要である（7章）。

現在HR-FAXの利用者は殆んど国外の気象中枢に限られており、国際的には大切なサービスである。一方気象官署向けや一般公共サービスにはLR-FAXが主体となっている現実を考慮すれば、このFAXを多様な目的に適合させるための多面的な検討を再度行う時期に来ているように考えている。目下のところは、LR-FAXはなるべく早くユーザーの手元にとどけることを第一義的な目標として、データ処理の運用スケジュールを組んでいる。

5.5 雲移動ベクトル

静止衛星は、同じ領域を広範囲にしかも比較的短い時

LR-FAX Image Format



5.6図 LR-FAXの形式

間々隔で観測できるという点では軌道衛星とは違った特長がある。この特長を生かせば、大気の変化の経過を雲を通して見るができるということになる。このことから、雲の移動を追跡して大気の流れを求めようという発想がFGGE計画以来世界的に試みられ、今日も静止気象衛星業務のひとつの大切な分野になっている。

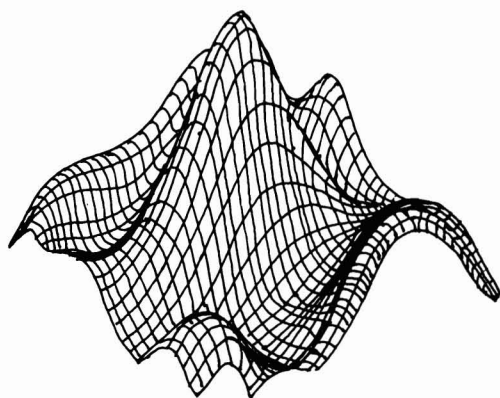
最近ではテレビなどでも雲の連続写真を見せることが多くなり、いかにも大気の移りかわりが感ぜられるようになった。しかし、この画面で印象的なのは、大気の流れそのものではなく気象じょう乱の位相変化の場合が多い。台風や前線の移動がよく見えるのはこれらのじょう乱の移動にともなう雲域全体の動きであって、台風や前線附近の風そのものが見えているわけではない。ひとつにはこれらの画面の密度が粗いことと、大きな時間々隔で画面がつけられているということにもよっている。

雲の動きから風を求めるときには、上にのべたこととは逆に、細かな雲を個々に識別できる程度の高解像度の画面を用い、短い時間々隔で雲を追跡することが必要である。さらに対象となるべき雲は、力学的又は熱力学的に強制されて発生するじょう乱に伴う雲ではなく、単に浮いているだけの半ば死にかかっている雲の方が適しているといえるだろう。

この性質の雲をピサデータの中から客観的にひろい出すアルゴリズムはかなりむづかしい問題である。目標とすべき雲の選択は熟練した気象技術者の目を通して行った方が確実といえるかも知れない。そのようなわけで、雲の選択は人手による場合（上層風）と、自動的に行う場合（下層風）とが試みわれている。自動で行う場合は雲頂高度によって追跡に適する下層雲かどうかの判定を行う。

同様に雲の追跡に対しても2通りあり、ひとつは雲を選択したついでに、追跡も人手によって行うという方法と、選択した以後は雲を何らかの方法で追うプログラムによるやり方とである。前者の方法では30分毎の雲画像ループフィルムを作成してこれを投影板に投射し、雲の始点と終点の座標を計算機に入力することで雲の移動量を求める。

後者の方法では、目標とする雲が選択されると、計算機は次の時刻の画面上の指定された雲の近傍で、前の画像にもっともよく似た雲の分布を探し出す。探し出す方法は、二つの画像を1画素づつずらしながら重ねて、雲の分布の相関係数を計算し、最も相関係数が高いづらし方を見出すという原理によっている。 x 、 y 方向に1画素づつ移動させて相関をとった1例を5.7図にあげておいた。



5.7図 2枚の雲画像間の相関
山の高さは相関の高さを表わす

この図の中で、もっとも高い相関を示す地点が、雲の移動方向を示すものとする。

前者の方法にしる後者のやり方にせよ、画面上での雲の始点と30分又は1時間後の雲の到達点がわかったとする。これから風速ベクトルを求めるためには、この画面上の座標から地球面上の座標にかえて、実移動距離と方向とを求める必要がある。画面から地表への変換に、もし1画素程度の誤差があっても風速の誤差は2~3m/sくらいに達してしまう。画像上の位置と地表面上の位置関係は精密な衛星の位置と姿勢の算出によって行なう必要がでてくる。風速精度の向上のための地図上への画像合わせの問題には、円形画像の外縁を精密に合致させるなど種々の試みによって、当初からみればかなり改善されてきた。

一方風ベクトルがどの高度のものであるかという高さの算定にはなお問題が残っているものと見られる。雲の高さは前節の方法で求められるが、なお種々の原因による誤差を伴う。風ベクトルの高さの同定は各国とも夫々の方法に悩みを持っており、より一般的なロジックの提言が待たれる状況にある。

人手による方法、又は自動法のいずれによるにせよ、求められた結果を地図上にプロットして、著しく偏ったベクトルは除去するという品質管理を行う。一般に観測には、観測された結果から新たな発見をもたらすという独立性がなくてはならない。一方観測方法に多少なりとも誤差がまぎれ込むのは止むを得ないにしろ、誤差が入り込みやすい方法ということも問題がある。雲の移動による風の測定には気象学的なあるいはシステム上の問題が依然として内在すると見るべきであろう。

気象じょう乱の存在に著しく左右されず、しかも雲のない所でも風を求める方法として、水蒸気の分布が感知できるセンサーによる画像の利用がある。空間的には均一な分布で、大気の流れを求めたいいくつかの例が報告されている。

5.6 大気鉛直構造

衛星観測によって気象や海洋の総観的状况を見る場合には、水平方向にはかなり密度の細かい分布を知ることができる。一方高々 10 キロくらいの中での大気の鉛直構造を衛星の観測から求めようとする、衛星リモートセンシングの解析技術として一段進んだ考え方による必要がある。

この試みはすでに TIROS 型軌道衛星のときから始まり、多くの改良が重ねられて、今日の NOAA 型衛星の搭載機器及びそのデータ処理方法に引かれてきた。衛星センターでも極軌道衛星の放射観測を受信し、日本の周辺での大気鉛直構造を求める仕事を行っている、その原理的な面についてごく大筋だけを紹介しておく。

2.4 図には地球大気系から宇宙空間へ向う赤外放射の様子が示されていた。その中で放射がかなり強い 15 μm (波数 700) 附近に強い炭酸ガスによる吸収帯が現れていた。吸収が強いということは、その物質が存在する高さよりも低い場所からの上向き放射を殆んど吸収し、上向きには自らがもつ温度に相当するエネルギーを放出することである。炭酸ガス吸収帯の中央部は、したがって大気の極めて高い場所からの放出であり、中央からずれ吸収率が弱まるにつれて、比較的低い層からの放射が現れるはずである。2.4 図に黒体放射曲線を重ねて画いているが、この曲線と吸収曲線の交点は、この吸収帯は何度の大気からの放射であるかを表している。一方大気の窓とは、上からみて大気が一番深い層、地表、を見ていることに相当する。

大気鉛直温度構造を求める時には、このガス体による赤外線吸収の性質を利用する。この際に、大気放射スペクトルの中で著しい吸収帯があり、その吸収は大気中には均一な密度で分布する物質によるものである必要がある。水蒸気あるいはオゾンによる吸収も著しいが、これらの成分量は場所と時間により大幅に変動し、ひとつの未知量となる点で適さない。大気中の成分量が一定とみなせるような CO_2 とか O_2 などの吸収帯の解析が大気鉛直温度構造を求める対象として適する。

衛星からは、この吸収帯の傾斜部分の波長をいくつか

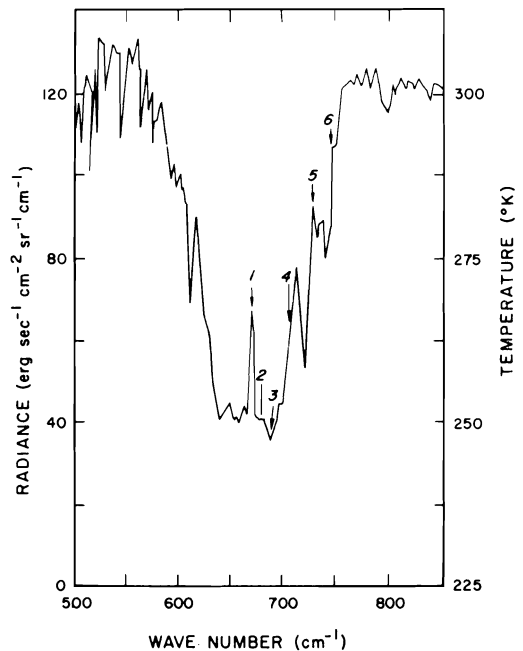
選択して放射を測定する。2.4 図の炭酸ガス吸収帯の部分拡大して、放射測定点を示したのが 5.8 図である。

炭酸ガスの濃度は既知であり、それぞれの測定波長についての吸収率は予め求めておくことができるから、炭酸ガスの透過率 τ はほぼ決定済み (温度による変化分は除いて) の値が用いられる。問題は、(2.15) 式を

$$I = \epsilon B(T_s) \tau(p_s) + \int_{p_s}^0 B[T(p')] \frac{\partial \tau(p')}{\partial p'} dp' \quad (5.6)$$

としたときに、 I を指定波長の点で測定した結果から、大気鉛直温度分布 $T(p')$ がどのように求められるかという問題に帰着する。

この数学的な問題 (積分方程式の解法) のために、(5.6) 式を代数方程式で表わし数値解を求めるのであるがこの代数方程式系は非線型であるために、数値解法上の工夫が必要になる。数学的な議論の詳細は省略しておきたいが、このようにして求められた結果は、ラジオゾンデデータの少い海洋上や成層圏の天気図解析には、有効な資料として用いられていることは周知のとおりである。



5.8 図 赤外領域の炭酸ガス吸収帯と鉛直構造推算のための放射測定点

以上の説明では、海面温度 T_s は既知であるものとしての大気構造の決定をのべた。しかし実際の計算過程では、 T_s の初期値を与え、これを修正する繰返し計算することで最終的な値が $T(p)$ と共に求まる。これが NOAA 衛星データによる海面水温の測定である。

6 章 衛星通信の概要

6.1 はじめに

本来人工衛星は地球を周回するか、あるいは他国の上空に静止していたりするのが普通である。したがって少なくとも公共の目的に供する衛星と地上との通信は、特定の国の都合だけで決めるというわけにはゆかない。国際的なとり決めや合意された勧告に従うのが筋道というものであろう。

衛星との通信は一般に電離層を突き抜ける周波数以上の高周波による通信ということになるが、ここではこのようなマイクロ波工学そのものを解説することが目的ではない。この方面の基礎的な知識は、それにふさわしい専門書によって得ることの方がはるかに適当であると思われるからである。この解説で目標としていることは、静止気象衛星の仕事の中で通信の役割とかシステムの姿について、どちらかといえば通信を専門としていない多くの職員を念頭において概説してみようという所におきたい。

ところで、ひまわりと地上との通信を目的別に分類すれば、おおよそ以下のようにまとめることができる(6.1図参照)。

- (a) ビサ観測データの地上向け送信と、受信された信号の取扱い(VISSR系)。
- (b) 衛星の状態を示すデータの受信と、状況に応じて

の地上から衛星への指令(テレメトリ/コマンド系)。

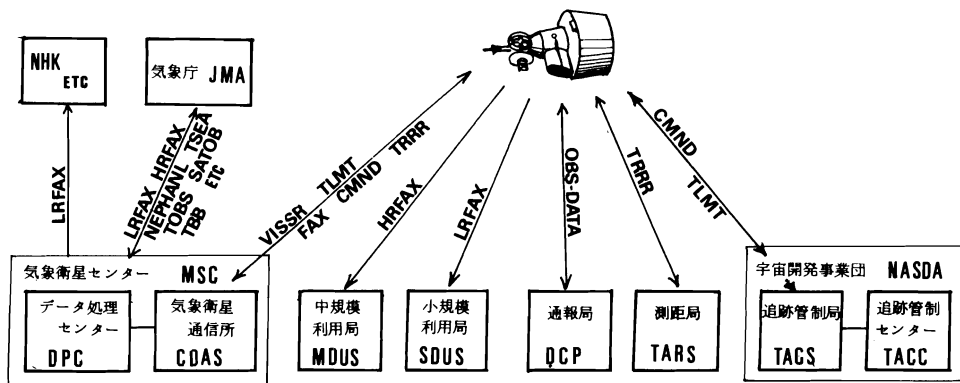
- (c) 雲の画像情報を配布するためのFAX画像の放送(FAX系)。

- (d) 地上の自動観測データを衛星向けに送り、衛星を中継して受信すること(DCP系)。

- (e) 衛星の位置測定のための信号の送受信(測距系)。

これらの機能を個々に見てゆく前に、衛星通信に関する技術上の問題をまとめておいた方がよいと思われるので、6章ではいわば衛星通信の共通の特性を中心にして、予備的な概説をすることにし、実際のシステムについては7章を参照して頂くことにする。

なお、ひまわりの通信の窓口になっているのは埼玉県鳩山町にある気象衛星通信所(以下CDASと略称)である。衛星からの微弱な電波を確実に受信するためには、電波雑音のなるべく少い立地条件(都市から離れた小高い丘の上の窪地のような所がよいとされている)が必要とされる。CDASは気象衛星センター(清瀬市)の北西30kmにあるから、当然CDASで受信されたデータの清瀬への中継や衛星に送り込むデータは、清瀬とCDAS間の通信系によらなくてはならない。また処理されたデータを本庁に送るときも、筑波山経由のマイクロ回線を利用するといったことがある。これらの地上系通信はたまたま施設の立地条件のためにそうせざるを得なかつ



6.1図 衛星と地上との通信系

たということもあって、本来の衛星通信には殆んど関係ないことである。したがって特に必要でない限りは、これら地上系通信の説明は省略しておいた方がよいだろう。

6.2 衛星からの電波

電波は周波数によって慣用の呼び名がつけられているので、2.1表と同じように後々の便誼のためにその呼び名表をあげておく。

前節であげた(d)のためには UHF が用いられる以外には SHF (S バンド)での通信が中核になって構成されている。

空間を電波が伝わるときには、一般に周波数が高いほど障害をうけやすい。したがって強い出力で送信することのできる地上から衛星向けの通信 (uplink) には高い方の周波数を使い、衛星から下向き (down link) にはそれよりも低い周波数を使うのが通例である。ひまわりの S バンドの上り下り周波数は、それぞれ 2 GHz 帯と 1.7 GHz 帯を用い、通信衛星では 6GHz と 4GHz といった工合である。

衛星からは大きな電力を消費し強力な電波を発射することはむづかしく、ひまわりの場合も S バンド送信器の最大出力は 20 W 程度である。そこでいま、ひまわりが 10

W の出力で四方八方に全く指向性のない電波を放出したものとして、ひまわりから

$$d = 37500 \text{ km} = 3.75 \times 10^7 \text{ m}$$

離れた CDAS ではどの程度の電力が受信されるかという問題から出発してみよう。

衛星を中心にして上記の d を半径とする球面の面積は $4\pi d^2 = 1.77 \times 10^{16} \text{ m}^2$ である。この面積に対して均等に 10 W が配分されるのであるから、出力 $P_s = 10 \text{ W}$ 、CDAS での単位面積当りの電力を P_0 とすれば、

$$P_0 = P_s / 4\pi d^2 = 5.65 \times 10^{-16} (\text{W} / \text{m}^2)$$

のような極めて弱い電力になってしまう。

CDAS には直径 18 m のカセグレン型アンテナが備えられており、このアンテナで受信するものとすれば、アンテナ開口面積 A は 254.5 m^2 であるから受信電力 P_r は次のような値になる。

$$P_r = A \cdot \eta \cdot P_0 = 1.0 \times 10^{-13} (\text{W}) \quad (6.1)$$

たゞし η はアンテナ効率といわれるものであり、こゝではその値を 0.7 としている。

ところが一方では、3.2 図で見られるように衛星の S バンドアンテナも直径が 57 cm のパラボラ型をしている。

この衛星搭載のアンテナを送信に使うときには、利得が 18.5 dBi であると公表されている。デシベル (dB) はよく知られているように、

6.1 表 電波の周波数分割表
国際電気通信条約による呼び名

周波数帯の周波数の範囲	周波数帯の番号	周波数帯の名称 [略称]	メートルによる区分
3 kHz をこえ, 30 kHz 以下	4	very low frequency [VLF]	myriameter wave ミリアメートル波
30 kHz をこえ, 300 kHz 以下	5	low frequency [LF]	kilometer wave キロメートル波
300 kHz をこえ, 3 000 kHz 以下	6	medium frequency [MF]	hectometer wave ヘクトメートル波
3 MHz をこえ, 30 MHz 以下	7	high frequency [HF]	decameter wave デカメートル波
30 MHz をこえ, 300 MHz 以下	8	very high frequency [VHF]	meter wave メートル波
300 MHz をこえ, 3 000 MHz 以下	9	ultra high frequency [UHF]	decimeter wave デシメートル波
3 GHz をこえ, 30 GHz 以下	10	super high frequency [SHF]	centimeter wave センチメートル波
30 GHz をこえ, 300 GHz 以下	11	extremely high frequency [EHF]	millimillimeter wave ミリメートル波
300 GHz をこえ, 3 000 GHz 以下	12		decimillimeter wave デシミリメートル波

$$dB = 10 \log \frac{P_B}{P_s} \quad (6.2)$$

で定義されている。したがって、ひまわり搭載の発振器出力端での出力 P_s は、このアンテナを使えば、あたかも

$$P_B = P_s \times (10^{1.85}) = 70.8 P_s = G_s P_s$$

の電力が放射されたことに相当する。つまり指向性のないアンテナに比べ、パラボラによってビームを絞った結果、ビーム方向では約 70 倍の利益が得られることを意味している。dBi の添字 i は無指向性 (isotropic) アンテナに比べての利得であることを示す記号である。このようなビーム状電波が CDAS で受信されれば、その受信電力 P_R は G_s の効果によって以下のように増加する。

$$P_R = P_r \cdot G_s = A \eta G_s P_0 = 7.1 \times 10^{-12} (W) \quad (6.3)$$

土星探査衛星ボイジャーの場合は、送信器出力 30 W を 35.3 dBi のアンテナで送り、地上ではこれを 64 m の巨大なアンテナで受けたといわれている。土星と地球の間の距離を 1.42×10^{12} m とすれば、上と同じような計算によって、受信電力は

$$P_R = 8.5 \times 10^{-18} (W)$$

程度ではなかったかと推定される。それにしてもこれは大変に微小な電力である。このように、衛星通信には遠距離なるが故の微弱電波を扱わなくてはならないという宿命が常につきまとう。

(6.3) 式は通常次のような表現をする場合が多いので補足しておきたい。

$$\begin{aligned} P_R &= A \eta P_0 G_s = P_s G_s \left(\frac{4\pi A \eta}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \\ &= P_s G_s G_r D \end{aligned} \quad (6.4)$$

G_r は受信アンテナの利得、 D は距離によって電波が薄まる効果を表している。なお λ は電波の波長であり、 λ によってアンテナ効率 η が変ることがあるからこのような表し方にしている。またこのように λ によって G_r や D を無次元化しておく、すぐ対数がとれるから、dB にするときにも便利である。距離による減衰 D を dB 単位で表したとき、その値を L_s とすると

$$L_s [dB] = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (6.5)$$

とすればよいであろう。ひまわりの下向き電波についていえば、1.7 GHz の波長は 17.6 cm であることから $L_s = 188.5$ dB と求められる。

以上は主にアンテナの効果だけ見てきたが、アンテナの背後におかれる送信器や受信器を含めて考える必要があろう。電波はこれらの送信器から導波管などの給電線

路を經由してアンテナと結ばれる。したがって例えば送信の場合でいえば、発振器の出力端での出力 P_a は給電系統を通る間に損失をうけ最終的にアンテナからは次のような電力が射出されると考えてよい。

$$P_s' = P_a / R ; R > 1$$

あるいはこれらの関係をすべて dB 単位で次のようにも表しうる。

$$P_s = P_a - L_A + G_s \quad (dB) \quad (6.6)$$

ただし

$$P_s = 10 \log P_s'$$

$$P_a = 10 \log P_a$$

$$L_A = 10 \log R$$

である。なお衛星通信の場合は電力の単位を mW にとり、電力の dB 値を 1 mW を基準にしたという意味で dB_m という添字を付けて表す場合が多い。

以上のことは受信の場合でも同様であり、電波が地球局内の線路損失 L_B (dB) を経て増幅器に入るとすれば、増幅器入力端での正味の受信電力 P_r (dB_m) は

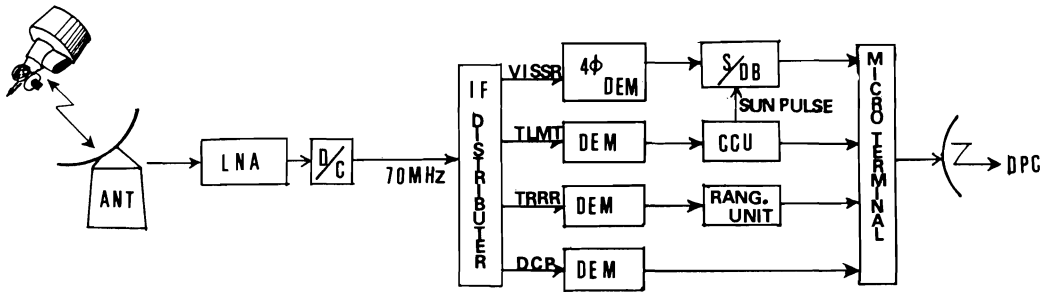
$$P_r = (P_a - L_A + G_s) + (G_r - L_B) - L_s \quad (6.7)$$

であるとしてよい。(6.7) 式は (6.4) 式の中味をやゝ具体化した上で dB 単位で表現し直したものである。なお衛星からの又は衛星への電波は、電離層や対流層を通り抜ける。このとき大気による障害をうけるから、(6.7) 式には更に大気減衰の分もつけ加えて考えるべきであるがこゝでは省略しておいた。

衛星と地上の間の通信では、よほど低い高度角での通信でない限り、地上附近で多いとされる人工雑音の影響をうけることは割合少ない。しかし受信される電波のエネルギーは大変に弱いものであるから、僅かな雑音でもそれによって信号が乱されることが大きな問題になることがある。この点を考慮して、次節で雑音の問題について簡単にふれておくことにしたい。なお CDAS での受信系統図を参考としてあげておいた。

6.3 雑音の問題

アンテナを通して入ってくる電波には、信号以外に雨とか大気中の吸収物質など大気の変動にともなって乱される成分、銀河や太陽からの放射、そして地上の多様な発振源からの電波などさまざまな外因による雑音が混在してくる。一方アンテナから内側での内部雑音としては、波の混り合いに起因するもの、機器内での波の歪や給電路内での反射が原因となる雑音などさまざまなものである。これらの雑音を統一的に考える場合には、抵抗体のような



6.2 図 CDAS における受信系統図

LNA：低雑音増幅器

DEM：復調器，4φは四相位相変調を表わす。

D/C：周波数でい減装置

その他は通例の略記法による。

固体結晶が熱によって振動し，抵抗値がランダムに変化するという形でおきかえることが便利である。

この熱振動雑音はすでに 3.3 節でピサの赤外検知器の例で説明したように，単位波長帯当り kT の程度であった。 k はボルツマン常数で次の値をとる。

$$k = 1.381 \times 10^{-23} (\text{W} \cdot \text{sec} / ^\circ \text{K})$$

したがってもし考えている受信系が B (MHz) の周波数帯域の信号を受信するものとし，受信系の雑音を N (mW) とすれば，

$$N = kTB \quad (6.8)$$

とするか，あるいは上式を dBm で表してもよい。とにかくある電子系システムが発生する内部雑音のエネルギーは，(6.8) 式によって，相当する温度 T に換算することができることを示している。

いま (6.8) 式で表される雑音をもつ受信システムで (6.4) 式のような電力を受信したとすると，雑音と信号電力の比は

$$P_r / N = (P_s G_s G_r D) / N$$

あるいはこれを dB で表したときの数値を (C/N) とすると，それは次のように表しうる。

$$(C/N) = P_s + G_s - L_s + G_r - N_r \quad (6.9)$$

ただし N_r は N を dB 単位で求めたものであり， P_s ， G_s ， G_r も dB 値をとっている。(6.9) 式は搬送波対雑音比と呼ばれ，雑音混入の程度を示す尺度として広く用いられる量である。雑音レベルを表すものとしては S/N もよく用いられるが，通常の場合は S/N と C/N とは比例関係にあるのではば同等に扱ってよい。

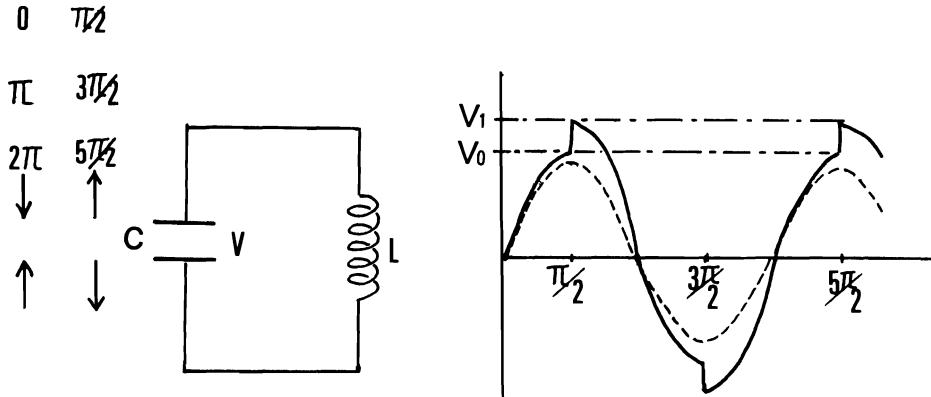
ところで P_s ， G_s ， L_s は衛星の設計や打上げ高度で決まってしまう量である。したがって衛星電波の受信や衛星に電波を送る地上局，例えば CDAS や MDUS あるいは地上観測機器 (DCP) のためには，それぞれが必要とする C/N を考慮してアンテナの大きさや性能，受信器の低雑音化の程度，送信器の出力などが決められなくてはならない。これら地上局の特に受信システムについて，参考までにおよその標準値を 6.2 表にまとめておいた。

6.4 増幅と変調

今までは，衛星通信のいくつかの特徴として，遠距離通信にともなう電波の微細さや低雑音性への要求などについて見てきた。その限度は衛星のミッション目的や地

6.2 表

	周波数(GHz)	帯域巾(MHz)	アンテナ直径 / 利得	プリアンプ利得	同雑音温度
CDAS	1.7 (受信) 2.0 (送信)	20	18 m / 50 dB	40 dB	40 °K
MDUS	1.7	1	4 / 35	35	150 °
SDUS	1.7	0.26	2.5 / 30	30	350 °



6.3 図 パラメトリック増幅器の原理

球局の規模によって異なるが、技術的な立場からみると微小電力をいかに増巾するかとか、電波にどのように信号を乗せるかという問題にも関係してくる。こゝで現在ひまわりとの間の通信で用いられている増幅とか変調のごく要点について説明しておきたい。

まず、ひまわりの弱い電波をうけたなら、それを最初に増幅するときにどのような手段によっているかを簡単に紹介してみたい。今6.3図(a)のようにコンデンサとコイルから成る回路があるものとする。

この回路に(b)の破線で示したような正弦波電流が流れているものとする。もし時間が $\pi/2$ になった瞬間にコンデンサの極板を急に引き離し、静電容量を C_0 から C_1 に减小させたとする。このときコンデンサ極板上に蓄積された電荷 Q は何も変化する理由がないから一定である。つまり極板の両側の電圧を V とすると極板を引き離した瞬間の前後では

$$Q = C_0 V_0 = C_1 V_1$$

である。 $C_1 < C_0$ であるから $V_1 > V_0$ ではなくてはならず、電圧は C_0/C_1 倍に増加したことになる。このように静電容量を半周期ごとに变化させてやると、全体の結果としては元の電圧に比べて $(C_0/C_1)^2$ 倍に電力（エネルギーは電圧の2乗に比例するから）が増加する。このコンデンサの役目は、静電容量（一般にリアクタンス）を变化させるという意味でバリアブルリアクタ、略してバラクタ、と呼ぶ一種のダイオードによって行われる。

ところで、この回路のエネルギーは自動的に増加することはあり得ない。極板を離したり戻したりする分のエネルギーは外から加えられていなくてはならない。このためにはバラクターをあらかじめ励起しておいてそのエネルギーを高い水準（水を高所に吸み上げること に似ているからポンピング励起と呼ぶ）におくようにする。

そしてこゝから静電容量を变化させるエネルギーを引き出すというわけである。

静電容量を变化させるのは、このトランジスタを構成する固体内部の電子や正孔が電波の周波数に同期して移動することによる。この場合にも熱による結晶格子上の原子のゆらぎに起因する雑音をおさえるよう、バラクタを低温に保つ処置をした方がよい。

この種の原理による増幅器を一般にパラメトリック増幅器といふ、低い雑音性に優れていることから衛星電波の第一段増幅に適し、CDAS や MDUS あるいは最近のレーダなどにも広く用いられている。もっとも先にのべたような土星探査衛星からのごく微小な信号を増巾するには、例えばメーザ増幅器のようにもう少し高級な低雑音アンプを用いることもある。逆にSDUS受信器の場合にはLR-FAXの帯域幅は狭いので、もっと簡便な装置でも十分間に合う。

ひとたび低雑音増幅によって信号電力を大きくしておけば、第二段目以降は原理的には通常のスーパーヘテロダイン増幅によればよい。このときCDASでは中間周波数として70 MHzを用いることにしている。

今までの議論では、主として電波を強さの面から見てきた。しかしこの電波には、例えば放射観測の結果などのような、意味のある情報が乗っていないてはならない。このように、電波（搬送波）に情報を乗せる方法を変調と呼び、電波から情報を取り出すことを復調ということは周知のとおりである。

いま搬送波が次式で示されるような正弦波であるとする。

$$F_c = A_c \sin(\omega_c t + \phi_c) \quad (6.10)$$

変調の方法としては、情報を A_c を变化させることで表す方法（振幅変調、AM）、角周波数 ω_c （ f を周波数

とすれば $\omega = 2\pi f$) を変化させて表す方法 (周波数変調, FM), および位相角 ϕ_c を変化させる方法 (位相変調, PM) に大別できる。ひまわりに関する情報伝送についていえば, ビサデータは PM によって送られ, HR-FAX 画像は FM で, LR-FAX 画像は AM によって変調されている。

3.2 節では, 放射観測の結果は赤外の場合を例にとると 8 ビットの数値で求められることを説明した。無線通信の立場でいえば, この 8 ビットの情報を電波の上にとのように表現して送り出すかが当面の問題となる。

そこで赤外放射の 1 画素 8 ビットのデータが, 例えば 1 0 1 1 0 1 0 0 という値であったものとする。このデータを 6.4 図でみられるように 2 ビットずつ組合せ, 4 個の組を作るものとする。

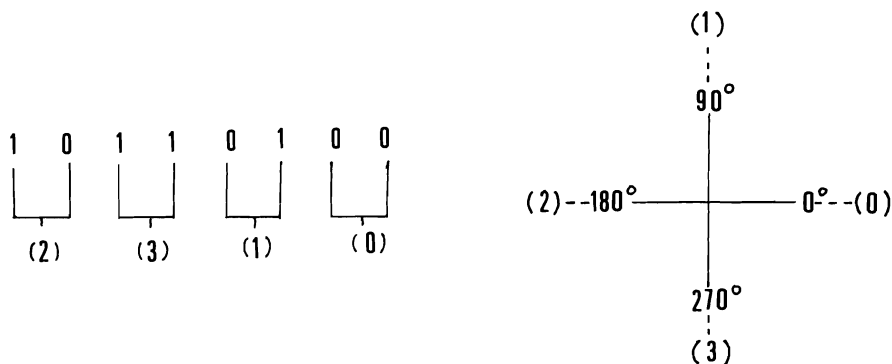
2 ビットの 1 と 0 とから成る組合せは 4 通りしかない。したがって 8 ビットの数列はこの 4 通りの状態の組合せで必ず表すことができる。もしこの 4 つの状態を, (6.10) 式の ϕ_c に対応させて, 6.4 図右に示すような夫々 90 度ちがった位相角に割当てたとする。(6.10) 式の ϕ_c に対し, このような規則で変調させる方法を 4 相位相変調といふ, 赤外や可視のデータを送るときにこの変調が採用されている。位相変調された電波を受信してデータを引き出すときには, 何らかの電子回路によって位相が検出されるような手段を取ればよいことになる。PM 変調は種々の点で優れた面もあるのでデータ通信の目的に多く用いられており, 4 相位相変調は 2400 bps のデータ伝送に利用されている。またもし 3 ビットをまとめて組を作れば, 8 通りの状態ができるから, 夫々の状態を互に 45 度違った位相に対応させるものとするれば 8 相位相変調が行われることになる。8 相 PM は 4800 bps 回線で実用されており, 4800 用モデムは 8 相の変調や復調を行う端子機器であることはよく知られているとおりである。

そのほかにひまわりとの通信では, 目的に応じて AM, FM あるいは PCM などの変調が行われているが, 特に説明するまでもないと思われるので, 変・復調のことはこれ位にしておきたい。たゞ一般にデータを伝送するときには時間に対して連続なアナログデータとして送るよりは, これを適当にサンプリングしディジタル化して送る方が雑音に対して安定で確実な伝送が可能となる。またこの方が多重通信に有利な点もあるが, 一方ではディジタル伝送には一般に高速度のビット伝送が必要になるという問題も派生する。アナログかディジタルかの選択は結局はデータ伝送の目的やコストなどの面から決められるべきものであろう。

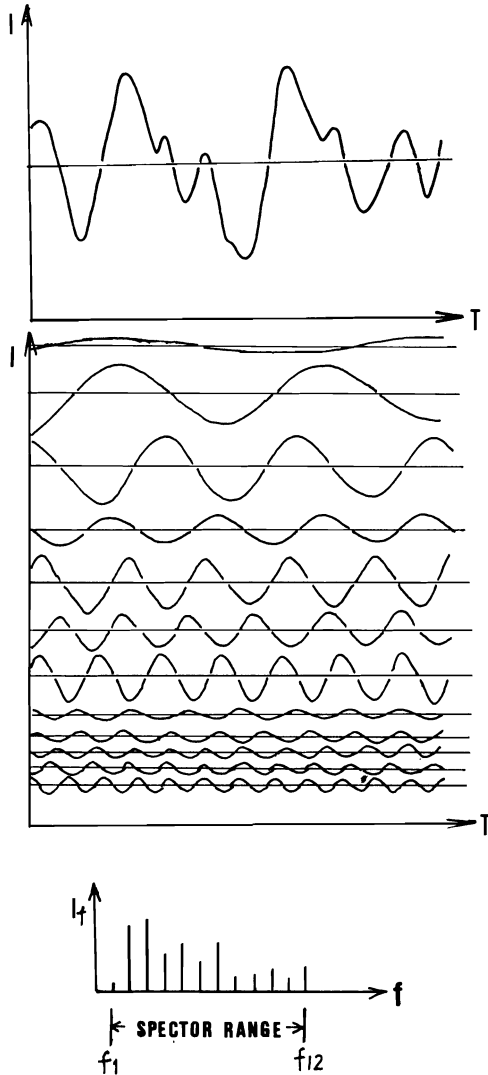
今までのべてきたことの中で, 帯域幅に関係した事柄が詳しい説明なしで所々にでてきた。したがって帯域幅のことについてはもう少し説明しておいた方がよいと思われるので, 次の節で若干の補足を加えておきたい。

6.5 帯域幅と伝送速度

6.5 図の中で (a) は信号の波形であるとする。一見すればこの形はかなり複雑であるといつてよいかも知れない。しかし (a) は (b) のように, いくつかの (この場合 12 個) の純粋な正弦波に分解することができる。一般に連続関数 (連続でなくてもある一定の数学的条件を満たせば) は必ずこのような正弦波の組合せによって表すことができる。この例の場合には複雑な波形信号は, 周波数が一定の割合で増加する 12 個のサイン関数の組合せであることがわかる。このように任意の波形を正弦波の級数で表すことをフーリエ級数で展開するという。このとき, 各正弦波の周波数と振幅とを表示したものがスペクトル分布図 (c) である。(c) 図は太陽のスペクトルや地球大気系の赤外放射スペクトルを表す 2.3 図や 2.4 図と全く同じ意味



6.4 図 4 相位変調



6.5 図 複雑波形のフーリエ分解
 T : 時間, I : 強度, f : 周波数

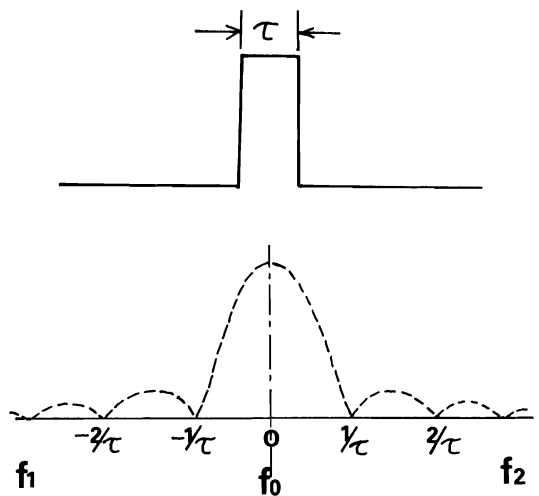
のものである。また 6.5 図の場合には、信号(a)は f_1 から f_{12} までの周波数スペクトル帯域幅 $\Delta f = f_{12} - f_1$ をもつということになる。

この例で、(a)は不規則な曲線であるとはいってもかなりなだらかに変動しているともいえるだろう。人間の音声などの情報は一般にはもっと複雑な波形をしているというのが通例である。信号の波形が複雑になればなるほど、これを構成する正弦波の数は多くなくてはならず、したがって帯域幅も広がる。例えば個人のくせまでが識別できる程度に人間の声をフーリエ展開すると、そのス

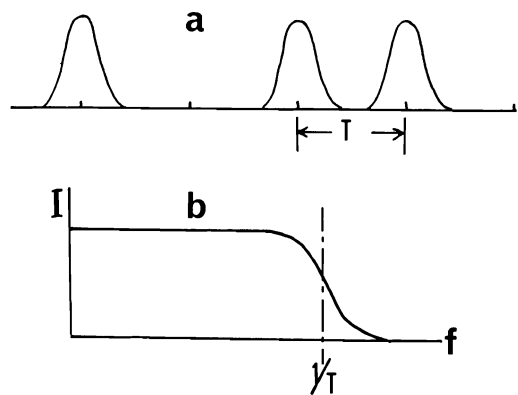
ペクトル帯域幅 Δf は少くとも 3 kHz は必要であるといわれている。電話によって音声を伝えるためには、増幅や変調・復調をこの帯域幅の範囲で、音声入力に近い形で忠実に行う必要がある。

前の図と同じように、6.6 図では 1 個のパルス型信号を正弦波の合成としたときのスペクトル分布図が示されている。

したがってこの短形パルスの形を忠実に伝えようとする、はゞ 6.6 図に示した許容範囲の広帯域の伝送が必要になるであろう。しかし、パルスが単に信号のあり・なし(1 か 0 か)を伝えるだけの目的のものであるならば、



6.6 図 短形パルスのスペクトル分布



6.7 図 パルス並びのスペクトル確率分布
 a: ランダムなパルスの並び
 b: そのスペクトル分布

パルスの形までを忠実に再現する必要は全くない。このようなデジタル情報はもち論 1 個のパルスではなく、0 と 1 のパルスが種々雑多な順序で並んだ姿となるのが普通である。このような不規則なパルスの並びに対するスペクトルは、途中の数学的な取扱いは省略して結果だけを示すと、6.7 図のような分布として求められる。この図からわかるように、周波数帯域はパルスとパルスの間の時間々隔 T に相当する周波数（パルス繰返し周波数； $1/T$ ）よりも高い周波数帯にまで及んでいる。このことからいえば 2400 bps でデジタル信号を送る伝送系では、2.4 KHz を上廻る周波数帯域に対して忠実な波形伝送ができる品質のものでなくてはならないということになる。

3 章ではピサの放射観測を 14 Mbps の速度でデジタル伝送していることがのべられた。この伝送速度に対応して、衛星から地上向け 1.7 GHz の搬送波は 20 MHz 程度の周波数帯域幅で歪のない波形伝送を保証するものでなくてはならない。以上の説明では、何となく 0 と 1 とを波の振幅で表わすというイメージで扱っているから、FM や PM 変調の場合は違うのではないかという疑問も起るかも知れない。しかしこれらの場合でも理論上の結果は同じことで、今までの結論を特に変える必要はない。

5 章では、雲の分布を再現する目的で FAX 画像情報が作られることをのべたが、この情報は CDAS を経由し、更に衛星を中継局として放送される。FAX は HR の場合も LR の場合も、画の濃淡に応じた連続的なアナログ信号になっている。この画像信号のスペクトルでは、もっとも細かい成分（最高画周波数）として HR の場合は 20 KHz、LR の場合には 1.7 KHz の程度になっている。そうであるとすれば、HR と LR の伝送系の帯域幅はこの最高画周波数の程度でよさそうであるが、実際にはそうはならない。元来 FAX は 1 ラインずつ走査させて画像を再現するというメカニズムによっているから、そのラインの始めと終りを示す同期信号が必要である。この信号のほかにも、この図が何であるかを表す文字とか濃淡の尺度など、かなり明確な輪郭をもった図形も合わせて送る必要がある。これらの要求項目をすべて満足させるためには、6.6 図からも想像されるように最高画周波数よりもかなり広い帯域が必要とされる。更に宇宙通信に関しては、単位帯域幅あたりの地上での電界強度に限度が課されている。このような規則上のこともあって、現在 HR-FAX では 1 MHz、LR-FAX では 260 KHz の帯域幅をとっている。

このテキストでは、雲画像の FAX 放送という表現を使っているが、規則上はいわゆる放送ではない。1 対多

数の対向通信という枠内にあることをお断りしておきたい。

以上は、衛星通信というよりは、データ伝送を含めてやゝ基礎的と思える二三のことを概括的にのべてきた。これらの予備知識は一般に通信システムを理解する上で役立つと考えたからである。そこで次の章で、現在の衛星通信の業務について、もう少し具体的に紹介してみることしたい。

7章 気象衛星通信システムの運用

7.1 はじめに

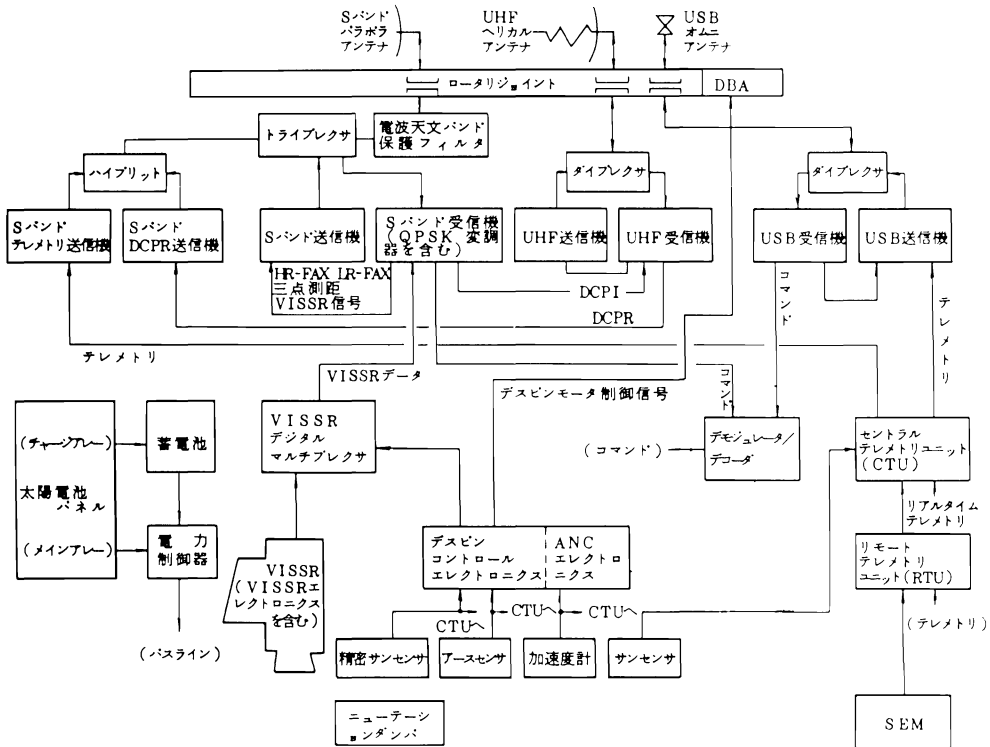
通信専用の人工衛星では、できるだけ多数の回線チャネルを中継し、どのようにして有効な送受信が可能になるかを目標にしたシステムの開発が盛んに検討されている。気象衛星では、地球大気系の放射観測という主要なミッション目的があるが、通信の機能という目でみれば簡易な通信衛星といってもよいような気象観測データの集信とか情報の放送などの機能をもっている。静止気象衛星の通信システムの能力からみると、かなり広範な気象業務への活用の可能性を含んでいる。

前章でものべたように、宇宙通信は高度な無線通信技術によっている。しかしこの章では、これらの無線通信に関連するハード機器の特長を記述することは考えていない。気象衛星の通信システムが、気象業務に密接に関

わっていると見られる機能的な面を中心にして説明することを主なねらいとしている。

通信の機能を含めて、衛星を最適な状態に保っておくことは、業務を長い期間継続する上に大切なことである。このような衛星管理のために、衛星の状態を示すテレメトリデータを受信し分析し、衛星に適切な指令を与え、その実行をうながすような作業が行われている。この衛星運用は基本的に重要な部分であるが、こゝではすべての機能が十分発揮できるように保たれているものとして衛星管理のための情報操作問題には触れないことにする。ただし、話題として興味のあるような衛星の測距のことは、今まで各章で説明したこととの関係も深いので、その方法についてひと通り説明しておいても無駄ではないと思っている。

以上のことを要約すれば、この章でとりあげる事項は



7.1図 静止気象衛星ひまわり内部のシステム図

6.1 節の分類でいえば(b)項以外のすべての項目にわたることになる。ひまわりの通信機器については、システムの点からさまざまな興味深い特長がみられる。こゝではひまわり搭載の通信系統から見たブロック図をあげておいたので、この図をみながらあれこれ想像してみることも面白いと思う。

7.2 S/DB のこと

このシステムは同期化とデータ保持装置とでも訳してよいのか、適当な言葉が見当らない。シスクロナイザ・データバッファ装置とそのまゝ呼んでいる。

この装置は静止気象衛星の性質に由来する独得なもので、実体的には通信制御つきミニコンである。3 章でのべたように、可視と赤外の放射観測のデータサンプリングは 14 Mbps の伝送速度に相当する頻度で行われる。このデータはディジタル化され伝送形式に整えられ、直ちにこの速度で送られてくる。一般の計算機は普通のデータ伝送サービスである Kbps 級の制御は行いが、Mbps 級的高速制御をソフトで行うことは従来はあまりなかった。S/DB はひまわりから送られる超高速伝送の仕様に適合する、ハード化された通信制御装置を内装するミニコンである点に第一の特長がある。

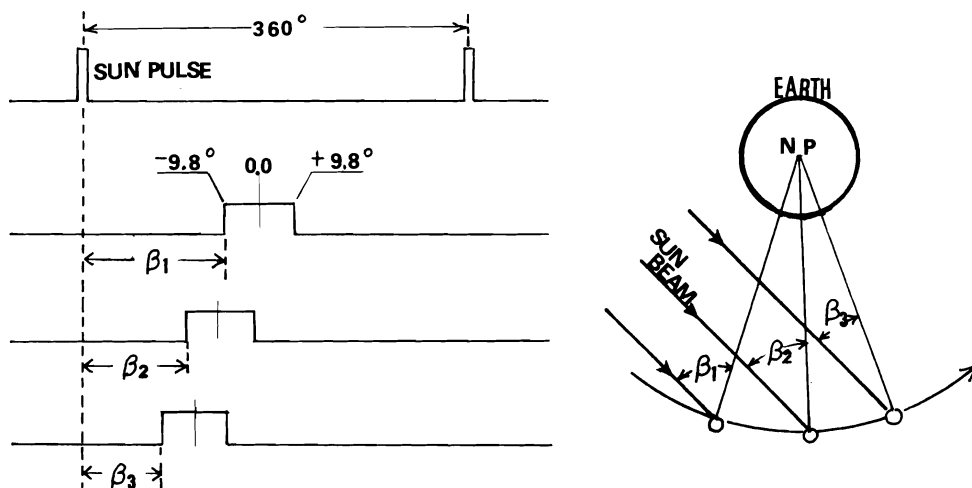
ひまわりは回転しながら地球を観測し、観測し終ると鏡の角度を微小に変えて次の走査観測に備える。また衛

星には、太陽光が入射する方向を検知するセンサーが積まれていることも 3 章でのべたとおりである。走査観測は 3.5 図に示したように、ピサから地球中心に引いた直線に対し 9.8 度西側からはじまる。衛星からみて、太陽光の入射方向とこの走査観測の開始の方向とのなす角を β とする。もしある観測時に β 角がわかっているれば、衛星は太陽光が入射してから、 β 角に相当する角度まで回転したところからピサの観測を開始し、 β 角から更に 19.6 度東に回転した個所で観測を終了すればよいことになる。

衛星は 1 恒星日で地球を 1 周するが、 β 角は 1 太陽日の間に 360 度変化する。したがって衛星の中に正確な 24 時間時計があれば β 角の推算が可能である。しかし実際には太陽日の長さは季節によって僅か変化するから、 β 角を決めるためにはその日の長さの偏差を前もって衛星に教えておく必要がある。

走査観測を完了するまでには 25 分間を要するから、この間にも β 角は少しずつ違ってくるはずである。走査線ごとの β 角は一定の時間々隔(約 $293 \mu s$)を単位にして求めるようになっている。3.5 図と内容的には重複する点もあるが、衛星の中で決められるピサの走査タイミングのとり方を 7.2 図に示しておいた。

このデータを受信してそのまま円形画像を作ったとすると、上述した衛星内部での走査のタイミング決定方法がやゝ粗いために、きれいに揃った円にはならず、周辺が



7.2 図 ピサ観測のタイミング

ギザギザした円形画像になるおそれがある。そこで、衛星とは独立な地上施設であるS/DBでは、走査線ごとの微小な東西方向の不揃いを無くするような、もう少し精度のよいタイミングを設定し直す。この目的のために、衛星センターの天文計算プログラムによって求めた β 角をS/DBに入力し、 β 角の走査ごとの変化を更に細かな単位（約 $1\mu\text{rad}$ ）で表して、走査線の東西方向の位置づけを行うようにしている。

可視や赤外のデータサンプリングの時間々隔は一定であるから、衛星の自転速度によっては サンプルされたデータ総数が変りうることは、すでに3章でのべたとおりである。そこでS/DBでは、1走査線毎の赤外や可視のデータをミニコンのメモリー上に並べ、簡単な補間計算によってもう一度サンプルし直すという作業をする。これらの作業によって、1走査線当りのデータ数を赤外では6688個、可視では13376個の一定の数になるように調整して出力する。

衛星センター計算機とCDASの間はマイクロ回線につながっている。このようにS/DBでタイミングやデータ数が調整されたデータは、マイクロ回線経由で衛星センターに送り込まれる。この送り方は以下のような方法によっている。

衛星が地球を見ているのは、衛星が1回転する0.6秒の1/18程度の間にすぎない。この短い間に観測データはどっと入ってくるのであるが、S/DBはこれを受信して上記のような処理をする。それと同時に、処理したデータは一時貯留しておく。この蓄積データを衛星が1回転する0.6秒の間に清瀬に向けて送ろうというわけである。14Mbpsのデータを約18倍に引きのばして送るのであるから、CDASと衛星センターとの間のマイクロ回線による伝送速度は0.8Mbps程度でよいことになる。

衛星センター計算機からS/DBをみれば、観測データは間断なくゆっくりと（とはいっても1Mbpsに近いスピードで）送られてくることになる。データバッファという名前はこの機能に由来している。なお衛星の回転軸が傾いたときのデータ再サンプリングのプログラムもS/DBに組み込まれているが、そのときの処理方法の説明は省略しておきたい。

こゝまでの話で、何故にS/DBのような中間段階の処理が必要なのか、衛星の観測データを直接大型計算機に入力しないのはどうしてか、という疑問は当然出てきてもよい。その理由を以下にのべてみたい。

CDASと清瀬の間のマイクロ伝送では、波が地上すれすれの所を通るためにフェージングと呼ばれる障害をうけることがある。高速広帯域の伝送はフェージングの障

害をうけやすいので好ましいことではない。また清瀬に直接衛星受信施設を置くことも環境立地条件その他の理由で適当ではない。これらの条件をS/DBは緩和し、気象衛星システム全体の経済的適合性に一定の役割を果しているものといつてよい。

しかしこれは主に立地条件に起因する理由であって、必須のS/DBの役割というには当たらないかも知れない。そこで、S/DBがデータを揃えてゆっくり送り出す機能を有するものであるならば、S/DBからの出力を衛星に送り衛星から再放送してはどうかという考え方が出てくる。たゞしその場合には、走査観測している時間を避けて、いわばビサが後側を向いている間に、直前の走査観測値を送りうる程度のデータの引きのばし方がよいだろう。

現在MDUS局では、緯経線などの付加情報をつけたアナログ画像信号を受信し、レーザ光による焼付けなどの写真処理を行っている。その代りにS/DBディジタル出力が直接受信できるならば、衛星センターが行っていると同様の、自らの目的に応じた衛星データの処理が自由に行えるはずである。たゞしディジタルデータを復調検波して、これを計算機などに入力できるようにするMDUS内の改装はどうしても必要になってくる。

S/DBでデータ伝送を引きのばし、あまり特殊な通信制御システムでなくても受信できるように調整したデータを、引きのばし型ビサデータ（stretched VISSR data）と呼んでいる。米国の静止衛星の場合はストレッチビサの衛星中継放送を行い、MDUS相当の地上局でも衛星データの処理が行えるように提供している。更にヨーロッパの衛星の場合には、S/DBそのものを衛星に搭載して、地上から折り返すことなくストレッチビサが送り出されるシステムになっている。

ひまわりの場合にも、現用のMDUS設置機関（主に外国の気象中枢）の合意が得られるならば、HR-FAXをストレッチビサ信号にかえるべきであるという考えをもっている。またこのときにこそ、S/DBのより積極的な意義が生じてくるといってもよいだろう。

7.3 データ通報局（DCP）

気象や海洋などの観測では、観測結果をその場所で数値化し形式化して伝送回線に送り出すマイクロプロセッサ技術の急速な進展によって、自動化される傾向にある。またそうしなくては必要な場所のデータを入手することもできない。アメダスはその代表的な例で、防災サービスや予報作業に暫々威力を発揮していることは日常経験

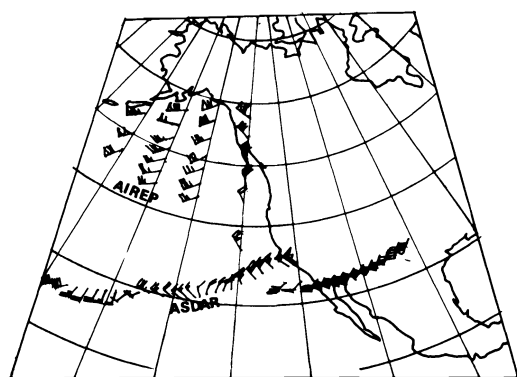
されることである。

しかしアメダスのようなシステムは、電話や電力の回線が高い密度で分布し、公共のデータサービスが行われている日本のような民度の高い国ではじめて実現しうるものであろう。一般には人跡未踏の地をかゝる国、あるいは広大な海上や高地での観測とデータの伝送は、どうしても遠隔の自動観測を無線によって送る方式でなくてはならない。その上、これらのデータは広い領域をカバーしうる点で、気象・海洋の業務や研究にとって特に貴重な資料でもある。

最近の商業用大型航空機には、気温気圧風向風速を測定する自動測器とデータ記録器が積まれているが、その記録紙を見ると精度の高い気象観測が行われている様子がわかる。航空気象通報のとり決めによって、航空機からは一定区間毎のデータが、計器のよみ取りによって手送りされている。もしこれら機上で記録されている気象データを、乗組員に負担をかけることなく入手できるならば、気象業務への利用価値も高まるだろう。このような目的をもって開発されたのがASDARと呼ばれるシステムである。

ASDARは精密な時計制御によって一定時間ごとの気象データを、そのときの飛行緯経度や高度と共にとり込み、航空機の識別記号などをつけた一定の伝送形式にととのえる。そしてこのデータを、日米欧のどの衛星でも受けることのできる共通周波数（400 MHz 帯）に乗せて送り出そうというものである。ASDAR データの入電状況の1例を7.3図に示しておいた。

全く同じような発想は船舶に対しても適用され、船舶



7.3図 ASDARデータの例

1982年9月29日12Z 前後6時間内のAIREP
(経度線を横切ったときの通報) ASDAR (航空路
に沿うちよう密なデータ) 入電状況

アメダスともいべきSEASと呼ばれるシステムが運用をはじめた。SEASの場合、ある特定の船舶に対しては海水温や海流のXBT測定をも依頼し、そのデータを自動的にとり出すことも試みている。

最近では、船舶にラジオゾンデの半自動放球装置をおき、ゾンデデータを衛星経由で集めるASAPというかなり大がかりなシステムが検討されている。米国とカナダが協力し、フランスも独自に開発をすすめ、一部成果の報告もなされているが、まだ実験の段階にある。

これらのシステムに共通する点は、いずれも地球上の広い範囲を移動する自動観測であるから、そのデータの受信や中継は日米欧の衛星運用国の国際共同業務の位置にあることである。そのような意味で、これらのシステムは国際DCPと呼ばれる。

国際DCPのもうひとつの特徴は、測器はすべて民間の輸送機関の協力を得て運用するという点にある。WMOはこのような国際DCPを搭載する篤志民間法人に協力を依頼する広範な活動を開始した。WMOからの中間的な報告によれば、その理解はかなりの程度得られる見通しがあり、各気象衛星が共通して準備していた国際DCP回線（電話級33チャンネル）は、近い将来にはあふれてしまうことも懸念されると分析している。

一方、それぞれの衛星が受信できる範囲内に固定自動観測システムを配置して、そこからのデータを集めることが考えられる。このやり方には2通りあって、国際DCPと同じように、一定時間ごとにタイマーによって測器を起動させる方法と、衛星を経由して測定点に観測の指令を発し、その時のデータを集める方法とである。

いずれにしろ、これらの固定点においた自動観測システムを地域DCPと呼ぶ。ひまわりの場合はこの地域DCPに対して100回線ほど用意されている。最近中国やオーストラリアが国内の水理気象データをひまわりの地域DCP回線を通じて集めるための協力を要請し、目下その協議がすすめられている段階にある。いうまでもなく、地域DCPは日本国内の山間僻地の気象データ、ブイによる観測などの収集に有効に利用できるものである。

米国の静止衛星の場合には、自国と周辺の国の水理気象データを4000箇所から集めているともいわれ、そのためのチャンネル割当はかなり厳しいDCPの機能評価を通じて行っているように見える。欧州の静止衛星の地域DCP活用は、ひまわりをやゝ上廻る程度であり、DCPの有効利用に関する欧州圏の会議などを通じて、拡大の方向づけを協議しつつある。

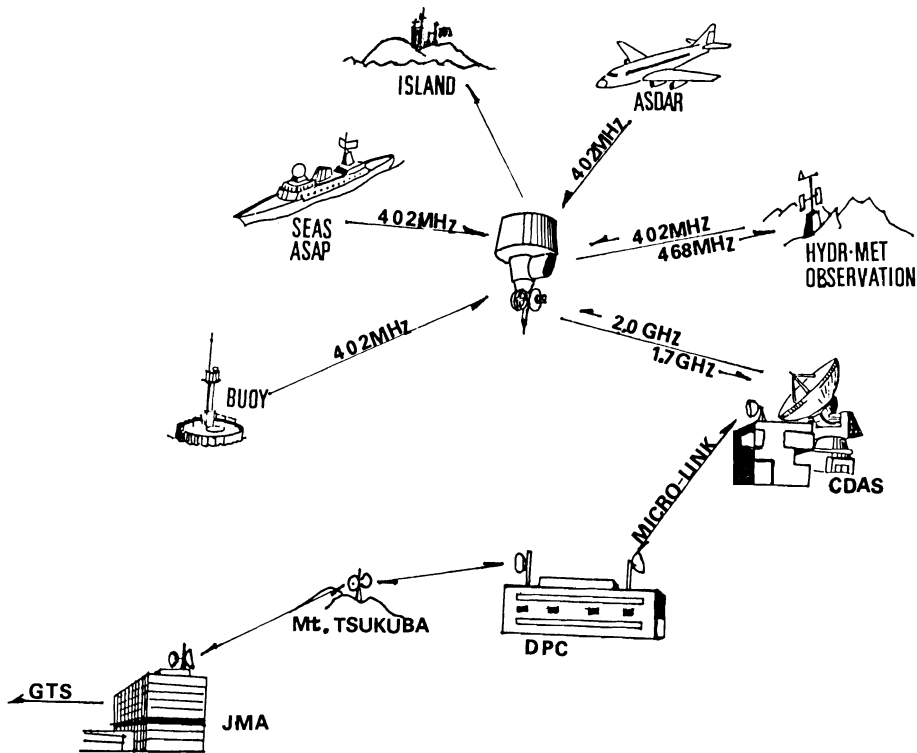
静止気象衛星がDCPをサポートする範囲は広い。気象

や海洋の広域的業務目的の立場から DCP のあるべき姿を包括的に検討し、測器やシステムの開発構想を立てるのが筋道であろう。これらには、技術的経済的な可能性が見込まれなくてはならないが、この点での困難性もあって、目標の設定と現実性のあるシステムの検討は未着手のまゝ残されている。

このことに関連して、ASDAR、SEAS 等は DCP の実現可能なひとつのあり方を示している。これらは欧米を中心に開発されたものであるが、気象衛星システム開発という場合には、単に衛星自体の開発に限られるものではないことを示唆している点で重要な意味がある。ところで通信の立場からいえば、DCP 回線はその先端部分が自動観測器であれ何であれ、ひとつのデータ伝送

路であることに変わりはない。たゞ現在の伝送システムでは、地上から衛星に向けこの情報は 400 MHz 帯の UHF で送られ、これを衛星で中継するときには 1.7 GHz に変換されて送られるという形になっている。したがって、DCP などから発信したデータは、衛星を経由して気象衛星センターが受け、このデータを必要とする機関に更に GTS などを通じて送り出すという第 2 段の中継手続きが必要になってくる。

なお DCP とは、data collection platform の略称である。この名前は衛星側のデータ中継機能をいうのではなく、地上（又は海上や航空）の観測とデータ通報の側に冠せられた名称である。以上のべたような DCP システムについてのイラスト図をあげておいた。



7.4 図 衛星によって中継される自動観測システム (DCP)

7.4 FAX 放送

一般に、天気図のような画面は、白と黒の 2 段調で表現でき、しかも多くの場合は白の占める面積の方がはる

かに広い。このような図は、例えば白を 0、黒を 1 で表わし、更に白のつづく個数と黒の個数とを示すコードを適当に定めて形式化すれば、かなり効果的な伝送が可能になる。

しかし雲分布の画像のような場合には、模様に広がりがあり、中間調の情報も重要になってくる。雲画像のFAXの場合は、これらの特徴がうまく再現できるような伝送の方式をとる必要があるが、そうすると結局は黒白テレビに似たものになるだろう。中枢官署や放送機関などが受けている雲画像はLR-FAXであるから、以下はこの例を中心にのべることにする。HR-FAXは仕様に違いがあるが、類推で補って頂けばよいと思う。

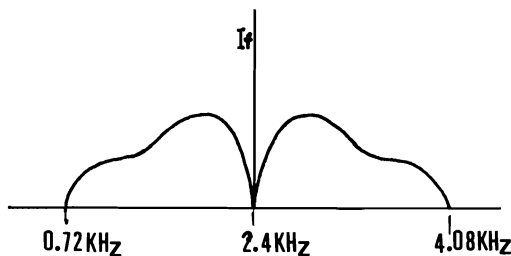
衛星で観測された可視や赤外の放射データから、FAX用の画像情報に組上げる方法の要点については、すでに5.4節でのべたとおりである。このFAX用データは、目視に適するように階調を再調整し、地図や緯経線を入れた上で、FAX受信機の仕様に合うようにしたディジタルデータの並びであった。

以上はまだ中間の段階であって、実際にHRまたはLRのFAXとして伝送するために、更に次のような操作を加える。まずこのデータの並びをアナログの信号にかえる。このとき、例えばLR-FAXの場合には、雲や海陸などの分布を0から1.68 KHzの画像周波数で表現するようにする。HR-FAXの場合には、もっと細かい空間分布を表現するために、画像の最高周波数は21 KHzまで取れるようにする。

一方階調の方は、完全な黒は0ボルト、純白は1ボルトになるように電圧の変化で表現する。すなわち雲の画像は、振幅が1ボルト以内で、最高の周波数が1.68 KHzであるような複雑な波形となって表されたことになる。

まずこのようなアナログ画像信号によって2.4 KHzの波（副搬送波）を振幅変調する。一般に角周波数bの信号（いま信号は正弦波とする）によって、角周波数aの搬送正弦波を振幅変調したとすると、その波形は

$$\begin{aligned} F &= A \sin at \cdot \sin bt \\ &= \frac{1}{2} A [\cos (a+b)t + \cos (a-b)t] \end{aligned}$$



7.5 図 LR-FAXの画信号スペクトル分布

となる。つまりaの上下にbだけ離れた2つの波が生じる。2.4 KHzの搬送波を、1.68 KHzの画信号で変調したときには、変調された波のスペクトル分布は、2.4 KHzを中心にして±1.68 KHzに広がる帯域幅の中に分布する（7.5図）。

LR-FAXの場合には、このように一度振幅変調した波を信号とみなして、更に71 MHzの搬送波を周波数変調する。このときには当然のことながら、入力信号電圧の変化に比例して、搬送波の周波数に変化（周波数偏数）をさせるような回路を通すことになる。この70 MHz帯の波はアンテナから放射する直前に、周波数を一定の割合で増加させる装置によって、標準の上り回線周波数に上げる。最終段階の増幅は大きな出力をもつクライストロンによって行われる。

FAXを受信する側では、上にのべた変調方式をほぼ逆にたどって復調すれば、最終的な画像信号を取り出すことができる。このときに注意しておかなくてはならないことは、副搬送波のスペクトル帯域は、2.4 KHzを中心にして0.72 KHzから4.08 KHzまで分布していることである。この分布は、もとの画像スペクトルである直流成分から1.68 KHzの帯域と一部重なる。したがってAM検波の際には、一度副搬送波の中心周波数を上げておいて、入力波と復調した波が混り合わないよう引き離しておかなくてはならない。以上のことがLR-FAXの受信側の特徴といえはえる。

なおFAXやテレビの場合に重要なことは、受信側で画面を再構成するときに、水平方向と垂直方向との同期をきちんと取らなくてはならないことである。このような同期をとらせるための信号は、水平垂直それぞれについて特有のパルス型波形の信号を用いている。これらの同期信号の並びは、白黒テレビの場合と似た形のものになっている。

LR-FAXについて、受信側の特性を7.1表にまとめておいたので参照して頂きたい。

7.5 測距

静止衛星は、地球中心から42165 kmの半径をもつ赤道軌道上に円軌道を描きながら、毎秒3.07 kmの速度で廻っている。このとき地球から見れば1点に静止しているように見える。完全に静止させておきたいならば、衛星の速度（あるいは高度）を常に微調整しなくてはならない。しかしそれほどのをしなくても、ある限度（東西0.5度、南北1度程度）以内ならば、たとえ衛星の位置が動いたとしても、観測に支障を来さないような処

7.1表 LR-FAX特性表

受信周波数	1691.0 MHz
変調方式	AM-FM
帯域幅	260 kHz
周波数偏倚	126 kHz
副搬送波周波数	2.4 kHz
最大画周波数	1.68 kHz
協同係数	2.68
走査線密度	3.83 本/mm
走査線数	800 本
ドラム回転速度	240 回転/分
一画面送画時間	約 3.5 分

置は予めとられている。

ということは、一定の限度内であるならば、衛星の位置に応じて観測データを地図上の位置に對置させることができるが、そのためにも衛星の現在位置のデータが必要とされることを意味する。ひまわりの位置測定は1日に4回、6時間ごとに行うことにしている。

衛星測距の方法としては、レーザー光による方法、宇宙用レーダー、あるいは特殊カメラによる撮影などが行われるが、電波による三点測距が簡便であり正確でもあるために広く用いられている。

3個所の測距局は、CDAS、石垣島地方気象台およびオーストラリアの協力事業としてメルボルン市郊外のクリーブポイントに設置されている。これらの測距局の緯経度は最新の測量により求められた正確な値を用いる。測距のための信号の経路は、すべてCDASを起点にして次の3つのルートを取る。

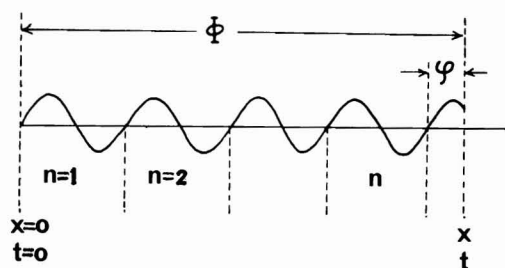
- (a) CDAS—衛星—CDAS
 - (b) CDAS—衛星—石垣島—衛星—CDAS
 - (c) CDAS—衛星—オーストラリア—衛星—CDAS
- いま、伝播速度CでX方向に伝わる正弦波Fを考える。

$$F = A \sin k(x - ct) \quad (7.1)$$

電波の波長をLとすれば $R = 2\pi/L$ である。この電波は、7.6図で見られるように時刻tに波面はXに到達するが、このときの全位相角 Φ は

$$\Phi = kct = \frac{2\pi c}{L}t = 2\pi ft \quad (7.2)$$

でなくてはならない。ただし $f = C/L$ は電波の周波数を表わす。



7.6図 測距のための位相角測定

またこの全位相角は、 $X = 0$ と X 点での波の位相の差 φ を用いれば

$$\Phi = 2\pi n + \varphi \quad (7.3)$$

でもある。 n は x なる距離の中に含まれる波の個数（整数）である。上の2つの式から、もし φ が測定され n がわかれば Φ が求められ、周波数がわかっているから最終的に電波が衛星に到達する時間 t が求められる。距離はこの時間に光速を乗ずればよい。実際には X なる距離、すなわち衛星の存在する場所、での φ は測定できないので、衛星から戻ってきた電波と発射した電波との位相差を測るようにしている。

測距信号には次の5種の周波数を順次使い、 φ はCDASにおいて測定する。

$$f_1 = 200 \text{ KHz}, f_2 = 27.8 \text{ KHz}, f_3 = 3.97 \text{ KHz}$$

$$f_4 = 283 \text{ Hz}, f_5 = 35.4 \text{ Hz}$$

まず f_5 の電波の波長は

$$L_5 = \frac{C}{f_5} \approx 8475 \text{ (km)}$$

であるから、CDASと衛星の往復距離約75000 kmの間には f_5 の波は8個入り、残りの端数分が位相差 φ として測定される。電波が衛星との間を往復する時間を t_5 とすれば

$$t_5 = \frac{1}{2\pi f_5} (2\pi n_5 + \varphi_5) \quad (7.4)$$

であるから、 φ_5 の測定し $n_5 = 8$ として t_5 が得られる。波長の長い（周波数の低い）電波の位相差 φ の測定には精度上の限界がある。そこで次には f_4 の電波を用いてより正確に φ_4 を測定する。このとき f_4 は f_5 の8倍の周波数であるから n_4 も簡単に推定でき、したがって t_4 が求められる。このようにして順次使用周波をあげ最終的には、もっとも精度よく測定しうる φ_1 から電波の往復時間 t_1 が得られることになる。

このように周波数を変化させながら位相を測定し、(a),

(b), (c)の3つのルートについて1秒ごとに6分間の測距を行う。つまり各ルートについて360個の距離データが得られることになる。この距離データは、最小自乗法によって大きな偏差をもつデータは測定誤差として除去する。さらに大気中を斜めに電波が通ることにより、大気層の屈折率の変化による光距の湾曲する分を補正する。このように補正したルート毎の距離から、三点測量の要領によって衛星の緯度、経度、高さを決定するというのがこの原理である。位置決定の精度は水平方向に数十m高さで数mの程度と見られる。

f_1 から f_5 までの測距信号は上り下りのSバンドの搬送波を振幅位相変調したものである。この信号電波はCDASを基点として、衛星や各測距局を折返し中継していることになる。このようなときに注意しなくてはならないのは、変調をうけた波を増幅するようになると、変調波に位相のおくれを生じる現象をとまなうことである。この現象を群位相おくれといっている。したがって上にのべたようなルートでの測距の場合でも、それぞれの測距局がもっている群位相おくれを予め求めておいて、その分の補正を加えてやる必要がある。

測距による位置の決定は、衛星の機能保持の目的にも、データ処理のためにも必要な基本的なパラメータである。このような点から、もし石垣島やオーストラリアの測距局に何らかの障害が起ったとしても、ある精度の範囲内で2点測距で代行できるような手だては用意しておく必要がある。

編集後記

この解説テキストを編集するに際しては、次のような方針をとることにした。

- (1) 1章でのべた発行目的に沿う記述とするために、前後の関連づけに留意しながら全体をまとめるように心がける。このためには分担執筆は必ずしも適当ではないので、編集責任者が全篇を通じて原稿を書き下すことにした。
- (2) 出来上がった原稿は章ごとあるいは節ごとに、その分野の専門担当者が詳細に検討し、内容の誤まりを修正し必要な付記を行い、記述の重点に対して意見をのべる。
- (3) 修正された原稿は更に専門外の比較的若い職員に読んでもらい、わかりにくさを平明化したり表現をかえたりすることによって、概念的な理解がゆきとどくように修正する。

以上のような手続きによって完成された結果をみると、なおはじめの期待に達しない多くの点に気がかざるを得ない。これらの点については、当然次の改訂の時期には加筆修正されるべきものと考える。

やゝ通俗に堕ることを覚悟しながらも、気象衛星システムの全体像を平易にイメージアップする目的の入門テキストを発行する今回の試みに対して、建設的な御意見が数多く寄せられることを期待している。

終りに、資料の準備、図表の作成、原稿の検討や意見の調整などの役割を熱心にやって下さった気象衛星センターの多くの職員に、深い感謝の意を表したい。

編集責任者 吉田 泰治
昭和 60 年 11 月