

# 人工衛星による放射観測, 使命とその将来\*

関原 彊\*\*

## 1. 放射の一般論

放射(ふく射又は Radiation)といっても領域は広い。波長でいえば、 $10^{-14}$ cm, 電子ボルトでいえば $10^{10}$ のエネルギーの宇宙線から始まり、波長数10km の電波に到るまでさまざまである。その辺の事情を先づ第1表<sup>1)</sup>に示しておく。この放射エネルギーが我々の問題にどのようなかわり合いになるのかについて概観するならば、先づ宇宙線は概してその名の如く太陽系外のはるか彼方からほぼ一様な方向からやってくるが太陽系にやってくるとその磁場の影響をうけてその約1,000分の1程度が若干の影響をうける。非常に波長の長い電波は雷等地球大気現象に伴って起るものとして研究の対象となっている。

これらの極端のものはしかしエネルギー的には太陽放射, 地球放射ともにその主要部分からはるかに外れた微弱な部分であり今の所地球からの放射を観測してその大気と表面の物理状態をしらべようとする目的のためには Goody の教科書<sup>2)</sup>などでよく知られているように太陽からの紫外, 可視, 近赤外線の反射光, 地球からの中赤外, 遠赤外, マイクロ波等の熱射出の測定に力点がしぼられるとよい。(第1図)

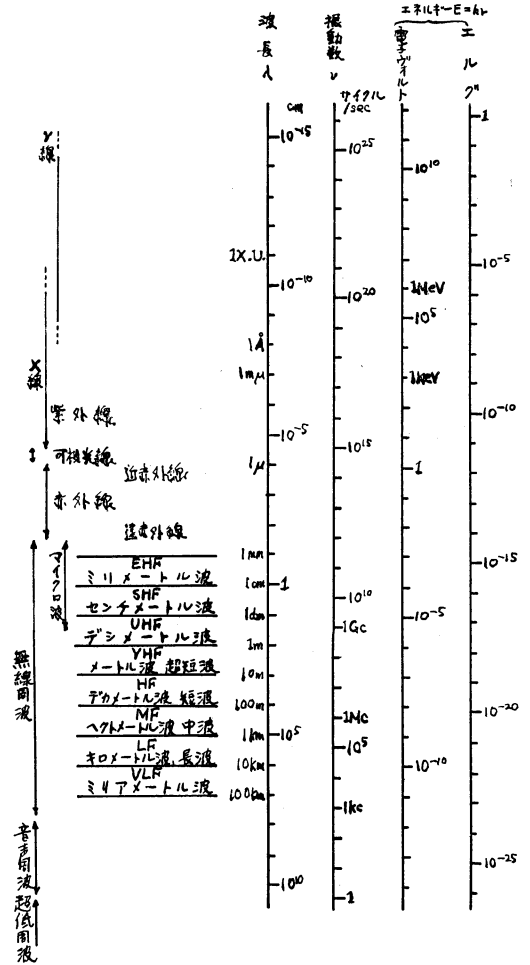
## 2. 気象要素の観測

第1図は夫々太陽と地球のふく射, 地上からの大気の上端までの大気中の吸収物質, 地上11km から大気の上端までの大気中の吸収物質につき夫々の吸収帯の様子が示されているがこれにより以下に示す各項目についての観測の原理が簡単に示されている。

### 2.1 雲の映像

気象衛星の起源は丁度1960年にアメリカで始められたタイロス衛星のシリーズにより代表されるといってよいがその主要な成果が地球上の雲のパターンを地面に送りとどけたことにあったことはよく知られていることであるがこの機能は現在でもやはり第一の重要課題であることに変わりはないであろう。これにより前線, 台風, 集

第1表 電磁波エネルギー量子に関する諸換算図表

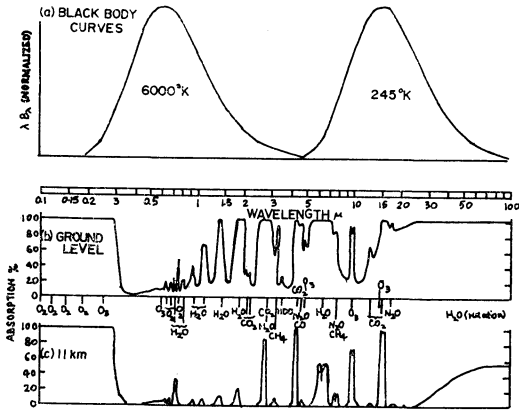


中豪雨, たつ巻の位置が確実につかめるということは何にも勝る大きな利益を我々に与えるであろう。

ところでこの機能は主として日射の反射光を利用した可視光線によるものが従来用いられて来たがこれだけでは観測は昼間のみに限られ, 夜間は別の方法によらねばならない。それは赤外線における地球からの射出光を用いるのである。地球及び地球大気はその温度に相当する赤外ふく射を射出していることは第1図から分ることで

\* Remote Sounding from Meteorological and Earth-survey Satellite, Mission and its Future

\*\* K. Sekihara: 気象研究所高層物理研究部



第1図 太陽と地球の相当温度輻(放)射及び地球大気の吸収帯分布図(上は大気上端から地上までのもの, 下は地上11kmまでのもの)

あるが、今雲の映像という目的を考えた場合、雲は非常に厚い水滴の層であることを考えればこれは大体黒体と考えてよいであろう。そうすれば第1図中段又は下段の図から推してなるべく大気の吸収のない波長域を用いることが鮮明な画像を求めるための好条件となるであろう。

その領域は水蒸気、炭酸ガス等の強い吸収を避けたいいわゆる窓領域と称され、 $3 \sim 4 \mu$  又は  $10 \sim 12 \mu$  付近に見出される。当初は検知器の技術的發展段階等の理由でその短い方が用いられていたがこの領域は日射の影響を受けるために昼間は使用出来ず更に地球大気の主要射出域からはむしろ外れていて都合が悪い。最近ではこの技術的問題も解決されたのでこの測定のためにはもっぱら長い方の  $10 \sim 12 \mu$  が窓領域として用いられている。

2.2 地表面と雲頂の温度

前節の窓領域赤外観測は黒体からの温度ふく射とすればその物体の温度を知ることが出来る点で可視光線より一段と深い知識を我々に与えることになる。つまり雲頂からの温度ふく射は海面からのそれよりも低温であるためにエネルギーは少ないであろうしそれによりもしあらかじめ検知器を校正しておけば夫々の温度が分り又大気の温度減率が分っていれば雲頂高度についての知識も得られることになる。我々が集中豪雨に関する観測手段として期待するのはこの背の高い雲の検出にある。

2.3 気温の測定とインバージョン法<sup>3)</sup>

2.3.1 炭酸ガス吸収帯によるもの

これは第1図で  $15 \mu$  の炭酸ガスの射出域を主として用いるものである。この吸収帯の強さは非常に強い。更に炭

酸ガスの混合比は全地球を通じ大体一定(空気の0.03%程度)であることが保証されていると仮定すればこれは大気の温度に関する知識を与えるであろう。この観測を波長的に精密化して吸収率(従って射出率)の強い所、弱い所を区別してはかれれば大気の高さにおける温度に関する知識が得られるであろう。但しこの場合測定されるのはあくまでも大気の垂直全域の積算エネルギーであるからこれら何箇かの波長別の測定値から逆に大気の温度垂直分布に関する知識を得るためには厳密には積分方程式という厄介な問題となる。実際にはラジオゾンデ、ロケット等の経験を組合せて最近では非常に有効な方法が開発されて実用に供されているのであるがこの辺の記述は別にあるのでここではこれだけにとどめる。

2.3.2 マイクロ波による方法

ここで一言追加したいのはこの種の赤外観測は雲を通過出来ないという制約条件があるために雲の下の気温測定が出来ないということである。ここで登場するのが  $0.5 \text{cm}$  付近のマイクロ波の測定である。ここには酸素分子の射出帯があり、前と全く同じ原理の温度ふく射の測定ということで大気の気温測定が出来る。この領域は大気の黒体ふく射域としてははるかに中心から外れて弱いのであるが検知方法として電波の検知の技術が用いられることにより有効な観測が出来る。しかもこの波長ではうすい雲ならば通過してその下の気温の知識を与える点で有望視されている。

更に  $1 \text{cm}$  程度のマイクロ波は地表面の湿度についての知識、海面の状態、海水の状態についての知識も与えるものとして期待されている。

2.4 水蒸気

水蒸気の観測は重要な気象観測の一つであるが現在ではこれは  $6.3 \mu$  の中赤外射出、又は  $25 \mu$  以遠の遠赤外域(これは前者が分子の振動に基づくのに対し分子の回転に基づく射出であるとされている)を用いる事が考えられ、エンパス等の実験気象衛星に試みられている。何れにしてもこれだけの単独の測定というわけには行かず前記の気温測定とかね合わせなければならない。

2.5 オゾン

オゾン測定は二種類の方法が考えられる。一つは日射の紫外線反射を用いるもので他は  $9.6 \mu$  の中赤外線射出を用いるものである。オゾンは  $0.3 \mu$  より短い波長域に強い吸収帯がありそのために紫外線が地上にとどかないことはよく知られていることであるが、人工衛星によりこの波長の太陽反射光を測ることはオゾンの垂直分布

に関する知識を与える。但しこの場合波長をかなり短かくして大気の上層のみの測定にすればよいが或る程度波長を長くしてオゾン極大値より低い所の知識を得ようとする場合、塵埃の散乱を含めた多重散乱という大変面倒な問題に出会うことになる。一方 9.6 $\mu$  帯についてはこれがそれ程強い吸収帯でないために常に地上からのふく射と共に測定することになりその校正をしなければならぬ。もっともこれは窓領域の測定により既知とすれば全オゾン量の測定にはむいてる。

### 3. 大気・海洋汚染の観測<sup>4),5)</sup>

#### 3.1 一般的背景

今まで述べて来たのは正常の状態の気象観測に関するものでかなりの部分は既に実現して実用の段階にあり 1975~6 年頃の GARP 計画にも主要な武器としてとり入れられているものであるが、現在及びさしせまった将来の問題として大きく浮び上がっているのがこの汚染の問題でありしかもこれが全世界的な規模で人類生存の環境を脅かしている現在、人工衛星による観測の主要課題として COSPAR 第 6 作業班 (宇宙研究を気象と地球観測に応用する技術を担当している国際的作業班) でも主要なテーマとして真剣にとりくんでいるところである。そこでこの問題について若干述べて見る。

この種の問題が最近に到り急激に具体的課題としてとりあげられて来た第一歩は何といても 1969 年秋から 1970 年春にかけて MIT が準備しその結果 1970 年 7 月一箇月間開催された SCEP (Study of Critical Environmental Problem) の会議である。その結果は一冊の本として出版された<sup>6)</sup>。1971 年これを受けて更に大がかりな会議 SMIC (Study of Man Impact on Climate) がスウェーデンで開かれこれが 1972 年の国連の決議にもちこまれるべく予定されていることはその大きな社会的重要性の表われといえる。ところでここで問題にしたいのはその科学的問題点と衛星観測が果し得る役割であるからその観点から話のあらすじを辿って見よう。

先ず第一に SCEP の問題とするのは汚染が直接に人間に作用するということよりも間接に世界の気候の変化とか海洋とか地球全体の生物形態の変化を通じてどの様な影響があるといった問題である。人工衛星はこの種の測観手段として我々の命題からも正に合致したことであるがこれまでの所この問題がとり上げられる理由はこの目的のために機能すべき機関が他に見あたらないという理由もあり WMO を含めた気象機関及びその気象衛星は当然その主要な役割を果すべき運命と期待される。こ

こでとり上げられた問題を列記すると次の様になる。

1. 大気中の CO<sub>2</sub> 量の増加の気候への影響。
2. 成層圏にばらまかれた微粒子の気候への影響。
3. 対流圏、成層圏への超音速、及び超高速ジェット機からの排出物の気候への影響。
4. DDT その他の有毒成分排出の生物圏への影響。
5. 水銀その他の有毒重金属の生物圏への影響。
6. 石油の海洋生物圏への影響。
7. 有機排出物の入江、湖水、河川への流入の生物圏への影響。

#### 3.2 問題となる事象

汚染一般について詳述するつもりはないが事柄を列記してみると第 2 表の様になる。

その微粒子について分類及び一般的特性を表にすると第 3 表のようになる。

又代表的な清澄な空気と汚染された空気についての各成分の表は第 4 表の様になる。

第 2 表 汚染の項目

#### I 大気

##### 1. 気体物質

a	CO, CO <sub>2</sub>
b	硫黄化合物, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
c	窒素化合物, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub>
d	その他, (PAN, CH <sub>4</sub> , O <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> )

##### 2. 微粒子

a	火山灰
b	風で巻上がる塵埃
c	水溶性微粒子

#### II 海洋

##### 1. 熱汚染

##### 2. 水中に運ばれる汚染質

a	粘土
b	下水関係有機質
c	化学物質

##### 3. 海 (水面) に流される汚染質

a	油
b	泡

第3表 大気中の通常の粒子と汚染子の大きさと粒種類ならびにその性質

大きさ ミクロン	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001
通常粒子	雨 細雨	濃霧	雲 及び霧			スモッグ		
粒子の種類		灰 炭塵 セメント塵		油煙 煙草の煙				ガス分子
		石炭末 毛髪	金属塵 及び噴煙	硫黄系 粉末	炭の粉			
特性	一眼に見える 速やかに 沈降		緩やかに 沈降	肺に 悪影響のある粉	光散乱		沈降しない	
制禦法		重力で沈降 させる 遠心分離		エアフィルター		布フィルター 固めて固型にする		液体で洗滌 電氣的に除去

第4表 大気中の汚染物質の存在量

汚染質	清浄究気	汚染空気	
SO <sub>4</sub>	10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-2</sup>	0.02—2	ppm
CO	1	5—200	〃
CO <sub>2</sub>	310—330	350—700	〃
NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>	10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> —10 <sup>-1</sup>	〃
炭化水素	1	1—20	〃
エアロゾル	0.02—0.02	0.07—0.7	mg/m <sup>3</sup>

3.3 汚染の遠隔探測の物理.

実際問題として大気又は地表面の汚染物質を遠隔探測する場合大気そのものが元来持っている放射特性は必ずその影響となって入ってくるしその有様は第1図で大体明らかであるがその辺の事情をもう少し布延して述べて見る。

3.3.1 吸収と発光

(1) 紫外域 0.25μm~0.40μm

この領域はオゾン分子の強い吸収があることは前述の図でも分かるがこれとやや重複して SO<sub>2</sub> の吸収も存在する。これについてはそのバンド構造の差まで識別出来るような最近の Correlation Spectroscopy の技術を用いれば探測が可能である。また最近の SST 運行に関連した

オゾンそれ自体の変化も一種の汚染現象と考えられるがこの意味で紫外線によるオゾン観測もこの部類の問題である。

(2) 可視域 0.4~0.7μm

ここで問題となる吸収物質は殆んど NO<sub>2</sub> のみといってよい。写真観測で煙が見えることは勿論である。

(3) 0.7~2.5μm

この領域は多くの物質の振動スペクトルの陪振動が現われる所であるが通常陪振動は基準振動の100分の1程度の強度でこの領域の利用価値はあまり多くない。

(4) 中赤外域 2.5~25μm

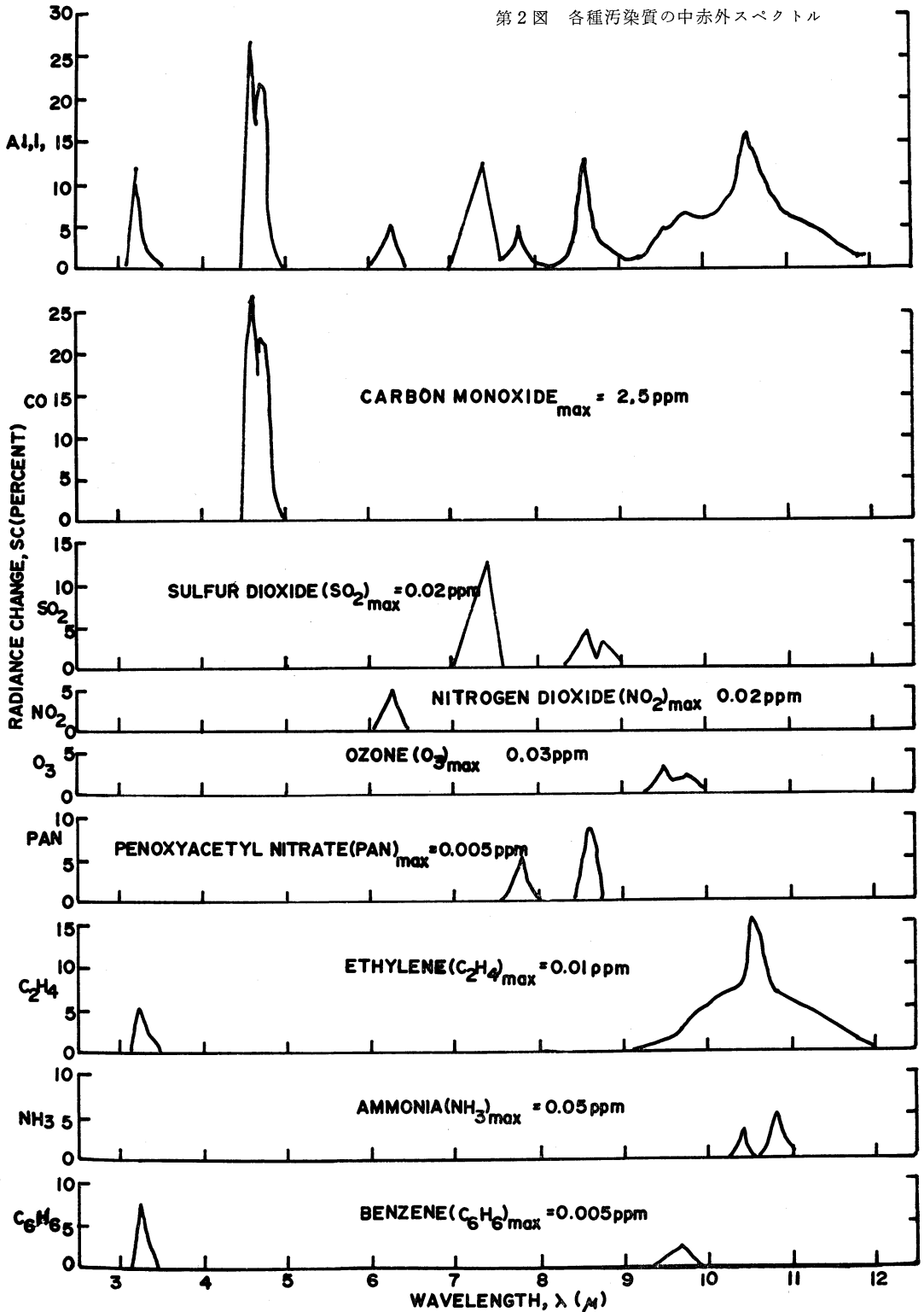
この領域は通常多原子分子がすべて基準振動をこの中に有するという点で汚染観測には最も注目すべき指示域 (Finger print region) 等とも呼ばれているし又多くの化学分析はこの領域で行なわれている。代表的汚染物質 CO, NO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> 等もその振動スペクトルをこの領域に有している。第2図にその実例を示す。最上段が各汚染物質の合成スペクトルである。

(5) 遠赤外域 25~500μm

多くの分子の回転帯スペクトル (時には振動スペクトルも) がこの領域にあるのであるが残念ながらこの領域には水蒸気の強い回転スペクトルが連続してあるので汚染観測の意味では使えない。

(6) ミリ波及びマイクロ波

第2図 各種汚染質の中赤外スペクトル



この領域には分子の回転スペクトルが現われ原理的には有効な分子測定が出来るのであるが通常この領域の測定は非常に低圧でなされなければならないので今問題にしている気圧程度ではその意味の分子検出は分子衝突の影響のために非常に困難である。

### 3.3.2 散乱

光散乱の形式として4つ考えられる。すなわち Rayleigh 散乱, Mie 散乱, Resonance (共鳴) 散乱, Raman (ラマン) 散乱である。散乱光とは入射光を夫々の散乱の種類に従ってその方向, 強度, 波長を変えて再配分された光をいう。

#### (1) Rayleigh 散乱

これは散乱物質が光の波長に比し小さい時に起るもので散乱光強度は入射光の前後方で夫々等しく対称であり又波長変化も連続である。物質が小さいのでその熱運動の影響を受ける。すべてのガス物質はその散乱能力があるわけであるが特定のガス物質を区別することはこの効果によってはむずかしい。

#### (2) Mie 散乱

散乱物質が入射光の波長と同等又はそれより大きい時に起る。この散乱の特長は入射前方に強度が集中することである。これは比較的重い粒子に起因することにより熱運動による Doppler 効果は少なく従ってレーザー光線を用いた散乱現象を利用し易くし、この意味でエアロゾルの検出には有望な方法の一つである。

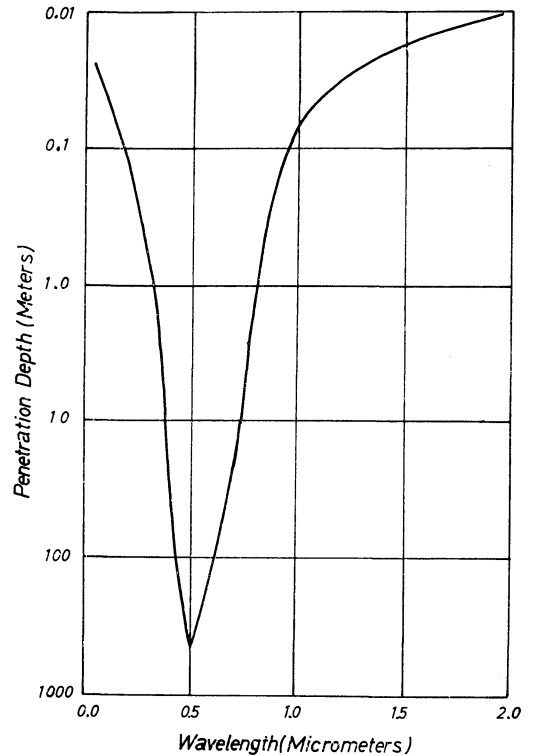
#### (3) Resonance (共鳴) 散乱

この散乱は光の波長(従って光子のエネルギー)が物質の励起状態と基底状態との差に丁度等しい時に起る。

この強度は非常に強く散乱の前後方共に強度は強い。散乱光の波長幅は気圧, 気温, 散乱物質の特性に依存する。共鳴散乱ではあらかじめ散乱物質が分っていなければならない。レーザーのうち特に色素を用い波長を任意に調節し得るものはこのために有望な光源となり得よう。著しい応用例はナトリウム雲を大気上層に放出して太陽光の共鳴散乱を測定する実験であろう。

#### (4) Raman (ラマン) 散乱

この場合共鳴散乱と異なる点は入射光の波長が必ずしも共鳴帯でないことである。この場合ラマン効果は入射波長と多少ずれた波長の非常に弱い散乱光として現われそのずれが散乱分子構造に関する情報を与えることになる。この場合にはレーザー等で非常に強い光源を必要とする。しかしこの原理は汚染質の検出には非常に有望



第3図 入射光に比し強度が5%減少する清澄な水の深さ

なものである。

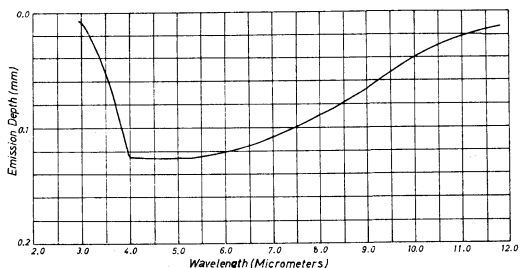
### 3.3.3 水の反射と射出

はじめに太陽光の反射域(従って  $3.5\mu\text{m}$  以下)を考える。第3図は光が清澄な水を透過する割合を波長別に示したものである。この曲線は強度がはじめの5%に減少する深さで示してある。この図で分るように  $0.4\mu\text{m}$  以下の紫外線と  $0.7\mu\text{m}$  以上の赤外線では光の減衰は非常に著しく  $2\sim 3\text{cm}$  又はそれ以下であるということである。 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$  の可視域においてのみ光はある程度深い所まで達する。従って数 cm 以上の深さの汚染の検出には可視光のみが有効と考えられる。

$3.5\mu\text{m}$  以上の長波長では反射より射出が大きくなる。従ってこの射出層の厚さが問題となる。この模様は第4図で分るように非常に薄くわづか10分の1ミリメートルの程度である。この特性はマイクロ波でも変わらない。

これを要するに水中の汚染観測には遠隔探測は可視部をのぞけばわづかな表面の問題のみにつき有効であることが分る。

### 3.4 当面の目標



第4図 清澄な水面から上方に射出される輻射エネルギーが95%含まれる深さ

前節で述べた背景のもとに現在人工衛星から観測すべきものとして検討されている問題点を列記すると次の様になる。

- (1) 全地球的放射収支
- (2) 雲
  - (i) 全地球的分布
  - (ii) 光学的特性
  - (iii) 特に絹雲（ジェット機に関連して）
- (3) 微粒子
  - (i) 光学的特性
  - (ii) 分光又は全波長域の測定による垂直分布測定
- (4) 汚染質の発生源と消失点
- (5) 気体状汚染
  - (i) CO<sub>2</sub>
  - (ii) H<sub>2</sub>O, HO, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 及び炭化水素
  - (iii) オゾン
- (6) 特に気候との関連における地表面の性質
- (7) 水面の汚染

4. 技術的問題点

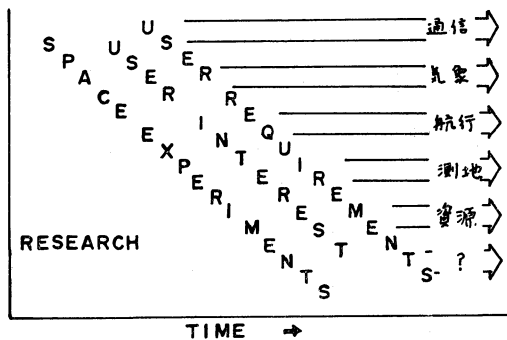
今まで述べたのは現在及び近い将来に期待されている人工衛星の遠隔探測の果たすべき使命であるがこのような目的のために現在開発中の人工衛星の技術的段階を概観して見たい。

4.1 一般的背景

代表的な例としてアメリカの状態について述べる。これは一面我々がもっている問題との関連からいっても実際のであろう。周知のようにアメリカの宇宙開発は NASA(航空宇宙局, National Aeronautics Space Administration) がその機構, 予算, 人員等あらゆる面で指導的役割を果たしている。

そのプロジェクトはアポロ計画, 惑星観測等多岐にわ

1972年 1 月



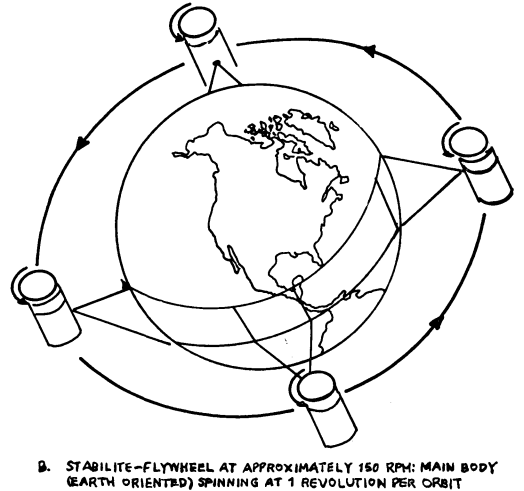
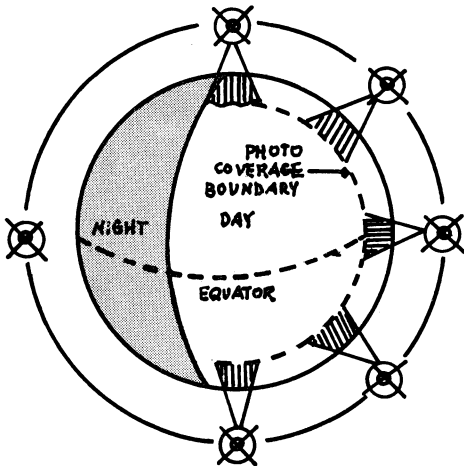
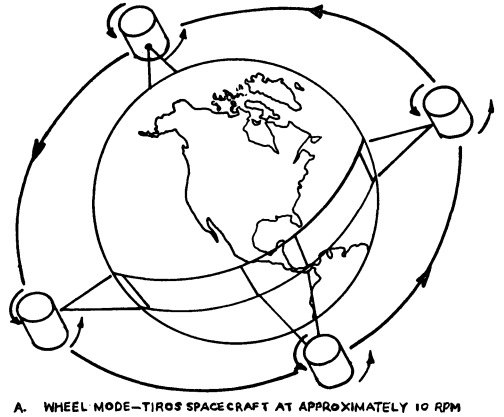
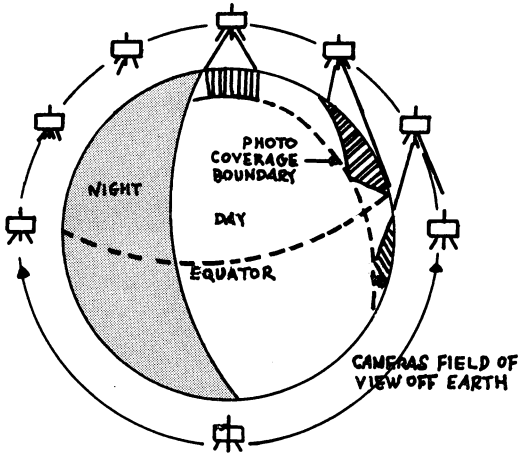
第5図 実用衛星開発のパターン

たるものであるが当面の我々の問題である実用衛星については現在一応第5図のような目的別パターンが考えられている。この図で分るようにその開発は造られた衛星を利用する側と NASA との話し合い又は協同作業の繰返しにより最終の実用的段階に入っている。ここで時間的に一番早くから始まっているのは通信, 次に気象, 航行, 測地, 資源という順序になっているがこれはどちらかといえば1960年代に考えられ実現したパターンを画いているもので筆者がこれまで述べた問題はそれの中の気象と資源の部分に重点が置かれているわけである。

この図でも分るように真の実用衛星としてその機能を果たしているのはそのうちの通信と気象である。そして現在の実用人工衛星の技術的背景もこの二つの面とそれらの相互関連が主要な基盤をなしている。

4.2 気象衛星における三つの流れ

1960年にはじまるタイロス (TIROS) シリーズは気象衛星の開拓期であり今日の実用軌道衛星アイトス (ITOS) として実を結んでいるのは気象にたづさわるものならば誰でも知っていることであるがこの間にあげられた衛星は20個に達しその一個一個が新技術の開発と関連している。大きくいって1965年までの段階は試験期間であった。この段階の大きな問題点はその姿勢の問題にあったといえる。全世界の雲のパターンが得られるならば気象学としては革命的な発展が見込まれるであろうことは誰の眼にもうつった。そしてタイロスのデータ解析に一齐にかかって見た所が初期のタイロスでは絶対空間に対してはスピン安定をしても地球に対しては絶えずその相対位置が変わりそのために得られた画像を気象学者の常識的なパターンまで持ち来たすのに半年もかかるというので一時に燃え上った気象衛星熱が一旦冷却した時代もあったという。



第6図 タイロス衛星(上)からエッサ衛星(下)への姿勢の変化

第7図 エッサ衛星(上)からアイトス衛星(下)への姿勢の変化

この時代に得られた大きな収穫は実際に衛星をあげて見ると通常我々が気がつかない地磁気とか太陽ふく射圧の影響が姿勢に影響を与えるということであった。それでは衛星の中に逆にコイルをつくり電流を流して地磁気との相互作用で衛星の姿勢を制御出来ないかということになった。そしてこれを実行したのがタイロスの次に来た最初の実用気象衛星エッサ(ESSA)シリーズである。これは地球を回る際の回転軸の向きが異なり車輪がころがるようにまわるために地球の各部分につき同様の性質の写真をとることが出来るようになり、その進歩が格段のものであることは第6図の様で一見して分るであろう。これが1966年～1970年の話である。

次の段階の発展を記述するのはややむづかしい。その基礎となった技術はこれまでのすべての衛星につき打

上げから最終軌道に入るまでに必要とされる姿勢制御のうちその回転率の制御機構の開発とベアリング等の機械的部分の開発技術に関連する。これらの開発された技術の上に立てば我々は次にエッサの車輪型衛星を更に手直しして姿勢安定のための角運動量をもたせる回転部分と気象観測のミッション機器をのせる部分を分離し、後者は地球に対し絶えず一定方向を見ながら動く衛星を開発することが出来る。絶えず地球の中心を見るためには地球を一回転する毎に向きも一回転しなければならないがこれは前の角運動量保存部分に地球像とその縁辺を検出する装置を組み合わせるとその回転率を加減して目的を達成するような機構になる。はじめにのべた地磁気との相互作用は太陽ふく射圧による姿勢擾乱を制御する役目に用いられる。これが1970年から始まったアイトス(IT

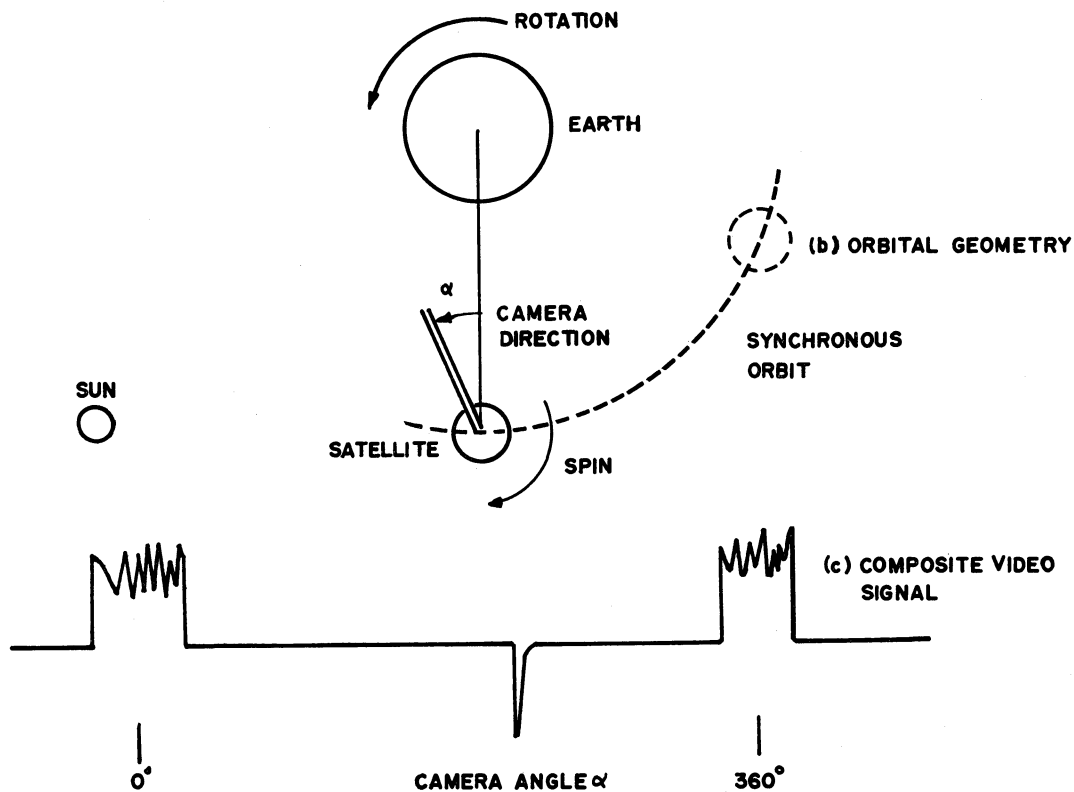


OS) である。この概念図は第7図に見られエッサとの相異が分るであろう。

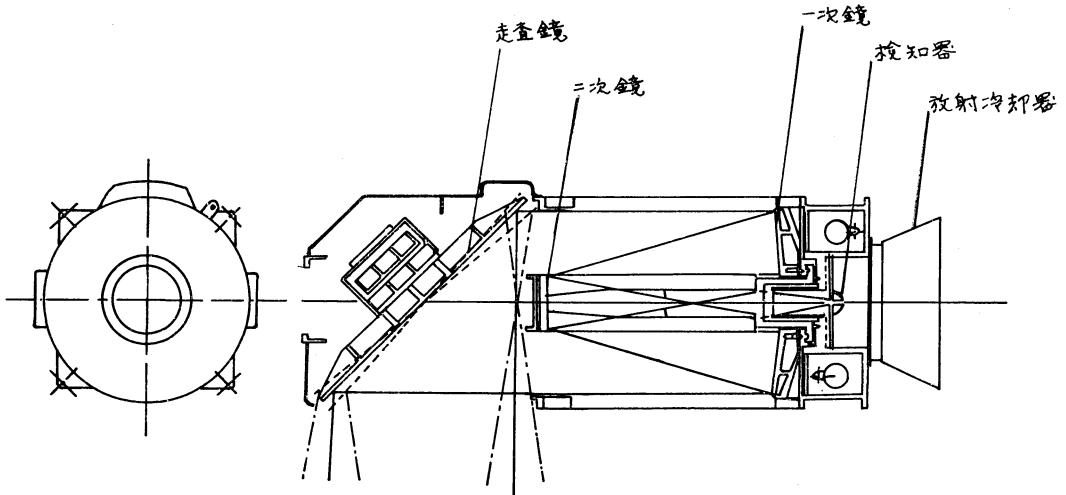
第2の流れは1964年頃に始まったニンバス(NIMBUS)シリーズである。これは気象のミッションがその姿勢制御により大きく左右される経験により一挙に前記の三軸安定型軌道衛星を試作しこれに種々の観測ミッションをあげようという実験である。その姿勢制御の原理は単純で単に小さなロケット噴射装置を各方向にとりつけこれにより姿勢を微調整しながら地球を回るのである。これはその単刀直入の原理から分るようになりかなり大変な装置になりしかもガス噴射によりすべてをまかなうことにより衛星も大きく又寿命も制限がきびしく従って実用というよりは実験衛星の色彩が強い。しかしこの衛星の功績は種々の観測ミッションを実際に乗せて試験したことにより新技術の開発に著々と貢献しつつあることである。大気温度の垂直分布の観測の成功はこのシリーズの成果により近い将来実用衛星に乗せられる運びとなっており、オゾン観測、干渉分光計観測、マイクロ波観測等、

新しい観測技術はすべてこの衛星シリーズでテストされつつある。又最近の資源衛星、本稿で主題とした各種大気汚染の観測等も実験段階ではこの衛星シリーズが主役を果たすであろう。

第3の流れはむしろ通信衛星の流れにそったものである。この衛星はその使命の性質上はじめから静止軌道(地球の自転周期と一致して24時間で1週し、これが赤道にあれば地球に対しては静止することになる。高さは約36,000kmとなる)の衛星を目指して開発されエコー、リレー、テルスター等を経て有名なATS(Application Technology Satellite)シリーズとなるわけである。このシリーズは1号から5号までの計画で1964年に計画が開始され1966年に1号があげられた。又その続編ともいべきATS-F, Gが1974年頃あげられるべき計画になっている。このシリーズで試みられた姿勢安定方式は1, 3, 5, がスピン安定, 2, 4が重力傾度方式であったが, 2, 4はその方式自体失敗, 5号は最終段階で静止軌道に入れるべきアポジモーターを切り離す試み



第8図 スピンスキャンカメラ作動概念図，上は地球と太陽と衛星との相対位置，下は伝送電波の概念図， $0^\circ$ 及び $360^\circ$ 付近のものが地球画像信号，中間に太陽センサーの信号(サンパルス)がある



第9図 SMS 及び GOES の中心ミッションとなる可視及び赤外スピンスキャン放射計 (VISSR) 設計図

を行なってここに失敗した。

所でこの1, 3号における大きな収穫はヴィスコンシン大学のスオミ教授の創意になるスピンスキャンカメラというのを成功させたことである。この衛星は前記のように地球から36,000kmという遠距離にあるために通常のカメラでは到底充分な解像力が得られない。そこでスオミ教授が考えたのは口径5インチの反射望遠鏡を衛星に搭載しこれで地球面を走査(スキャン)して画像を得ようというものである。これについて根拠となっているのは衛星のspin安定というのが非常に精度がよくこの回転軸を地球の回転軸の方向と一致させれば東西走査は衛星自身の回転によって行なわれあとは南北にわづかづつ望遠鏡を動かせばよいことである。その技術的根幹はこの様にして衛星の自転と望遠鏡の南北駆動と共に送られてくる一連の信号を正確に復元して画像にすることである。因みに衛星の自転周期は毎分100回、走査線は約2,000本、地球の見込まれる角約18°で約20分で一画面が形成されることになる。一本一本の走査線を合わせるためにはタイミングの基準が必要となるがこれは太陽センサーを別に衛星にとりつけてこれを行なう。この辺の概念図は第8図に示す。

この実験は大成功であった。これにより地球の緯度60°以内の雲のパターンは気象学的には殆んど連続に観視することが出来るようになり低緯度での台風は勿論、中規模の現象などに飛躍的な観測武器を与えるようになった。因みに得られた距離分解能は約3kmである。

#### 4.3 SMS 及び GOES プロジェクトとその問題点

この静止衛星からの連続写真撮影の成功はその後のアメリカのみならず世界の気象観測計画に大きな影響をもたらした。すなわちスオミカメラの原理はこれを窓領域の赤外望遠鏡にすれば夜間の雲の映像ばかりでなく、雲の高さ、海面、地表面の温度も分るであろう。雲の連続映像からは風が分るであろう。これらの同種衛星を4個程配置すれば殆ど全世界のこの種の気象観測が出来るであろう。こういった考えのもとにアメリカではただちに(1966年)SMS (Synchronous Meteorological Satellite) 及びその実用段階のGOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) の計画をたてこれを1972~3年にあげるべく計画がすすめられ、同時に1967年ストックホルムで発足したGARP計画に対する観測面の一つの大きな骨幹とし、現在アジア地区では日本、ヨーロッパ地区ではフランスが主としてこの種の静止衛星をあげるべく計画がすすめられているのは周知の通りである。第9図<sup>9)</sup>にSMSのカメラ部分の初期のデザインの図を示す。本質は現在も変わらず衛星全体としてはこのカメラを中心軸としてまわりに電子部品一番外側に太陽電池をはった直径約2m高さ約1.8mの円筒形となる。このSMSプロジェクトはNASAが数年がかりで設計しているもので多分成功するであろうと思われるがここで筆者が気がついた2~3の技術的問題点を指摘しておきたい。

先づ第1にカメラはATS 1, 3号と異なり10 $\mu$ m付近の赤外域を含むこととなったことであり且つそこで解像力の要求と赤外検知器の感度の限界とによりカメラ口径は5インチから一挙に16インチに大きくされ、それで

も尚且つ解像力は約9 kmと5インチの可視カメラよりはおちる。これはカメラ（望遠鏡及び駆動装置その他付属品）の重さを10kgから1 挙に75kgにあげることになった。これは衛星全体の重さが250~300kgであることから考えて重さのバランスをとることかなりの負担をあたえることになる。前述の如く衛星が一樣に望遠鏡の光学軸のまわりに回ることは正しい画像をとるための必要条件であるがこの問題は光学系という別のきびしい要求条件をもったものと力学的にバランスさせねばならぬという一段とむづかしい技術を要求することになる。

次は熱制御の問題である。前述のスオミカメラでは光電管を用いこれに関連した電子機器が作動すればよいし又カメラも小さいということによりその熱的要求条件は $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 程度のかかなりゆるやかなものでありこれは従来の通信衛星に課せられたものと大差はない。しかし赤外機器はこの点が数段きびしくなることは我々実験室内でも赤外分光器を通常は恒温室又は恒温槽の条件の下になるべくおくことから想像される。実際にはカメラの内部の温度差を軸方向に $4^{\circ}\text{C}$ 以内経方向に $2^{\circ}\text{C}$ 以内におさめるといふきびしい要求になっている。これらの問題を含めたきびしい設計は現在行なわれているものである。

さて問題はそれでも残る。これは実はスオミカメラ一般の問題であるが前述の走査線を揃える問題の基準は太陽センサーであったが太陽そのものの見込まれる角度は約9 ミリラジアンでこれに対し太陽センサーの角度分解能は途中でかなりな統計的平滑化をほどこして精度を高めても高々1 ミリラジアンであるという。これは地上になおすと約30kmである。これは走査線の一つ一つが一度に30kmもずれることを意味するわけではないが、太陽センサーと太陽との位置関係等で線の歪みが生じその最大がその程度になり得るということで現在のスオミカメラの画像の雲の位置から風速を出す問題等の定量的問題に関連して一つの問題点となっている。

#### 4.4 あるべきものを求めて

我々はこれまで気象衛星の使命とその将来について考えて来た。そして現在何が行なわれつつあるかについても若干述べた。然らば結局の問題点は何であろうか。ここでレーザー等によるActiveな観測についてはむしろあまり述べなかつたが、これを別にすれば（これはエアロゾル観測では重要となろう）最重要な課題はやはり中赤外領域（ $2.5\sim 25\mu\text{m}$ ）に現在も将来も重要な問題があると思われる。それは本質的に第1図で見た通り太陽の

温度が $6,000^{\circ}\text{K}$ であるからその研究の主要手段が可視にあるのに全く対応して地球の有効温度が $10\sim 20\mu\text{m}$ にエネルギー極大があることに関連している。

前にSMSの説明に関連して赤外検知器の感度が一つの制限因子となっていることをのべた。この辺のことに關しては本誌でも山香氏<sup>10)</sup>が述べているのであるが現在の半導体技術はその発展が目覚ましいものがあるがその検知器の感度自体は理論的極限に近づいておりこれに關し拮違いの飛躍は望み薄である。

更にSMSにおける問題はその姿勢安定から要求される毎分100回の回転のために視界約 $18^{\circ}$ の地球を見る時間が一走査線あたりわづかに0.03秒しかないということでありこのために16インチという大型望遠鏡により光量をかせぐ必要が出ていることである。一般に通信目的のスピニング衛星については一つの力学的限界が考えられている。それは回転に伴う遠心力のための衛星内各部品への悪影響及びその力学的歪みが回転率の擾乱へのはね返りである。電子部品は一種の頭脳とみなされるがこれが受けるべき力には限界は当然予想され現在の大きさは丁度その限界にあり来たるべきATS-F, Gはその理由のためにスピニング安定を放棄して地球方向に対して固定（すなわち三軸安定）したものを採用しようとしている。筆者の強調したいのは電子部品が頭脳ならば赤外光学系は心臓にも比すべき繊細な部分であり、力学的熱的なわづかな歪みでも極力さげねばならないということである。

更にこれまで述べた赤外線関係の使命からいってその分光学的に益々精密な観測が要求されるに到ってはスピニング安定のための回転を光学系自体に及ぼすことの不利はあまりにも明らかである。

ここでもし静止衛星で前述のスピニング衛星でなく常に地球方向をむくいわゆる三軸安定の衛星が得られるとすれば走査時間を前述の一走査あたり0.03秒から1秒にしても全画面の走査時間は同じく20分、これによる感度の利得は概略に計算しても口径8インチでも空間分解能を16インチスピニング衛星の約2倍（すなわち約5 km ならず）にあげることが出来る。

この性能向上は集中豪雨等の通常のスケールが5~10 kmであることから考えると我が国の気象衛星としても重大な意味を有すると思われる。そこで眼につくのが前節で述べたはじめのタイロスシリーズの発展段階である。これは元来赤外を含んだ気象衛星として出発しているためにその熱設計については最初から考慮が充分に払われている<sup>11)</sup>。問題は姿勢制御にあった。この10年間の

努力は一つ一つ三軸安定の達成に向ってなされて来ている。そして ITOS に於いてその実用化に成功した。これを一步進めて静止軌道に持って行くこと。これは実は現在タイロス, シリーズの発展に専念して来た米国 R 社が ITOS の延長として一案を提出しているが注目すべきものと思われる。

この衛星の利点は今まで述べた放射観測上の問題を解決するばかりでなくアンテナ, 太陽電池パネルの指向性向上のため電源容量の増大とこれに伴う運用面の利点, 更に ATS—5 号の失敗の原因となった 遷移軌道上の姿勢不安定の解消, アメリカで目下計画中の ATS-F, G の如き巨大衛星でなく現在の SMS と同程度のロケットで打上げ可能なこと等日本の今後の実用衛星として真に望ましい要素をそなえているものといえる。しかしその実現のためには更に進んだ精密設計と調査が必要であることは云うまでもない。

気象衛星の使命の将来が赤外域の三軸安定姿勢方式にかかっていることから考へて現在日本が計画している衛星計画にこれが考慮され, もしかりに NASA 及び日本の宇宙開発事業団等の協力を得てこれに成功するならばこれは日本の国民に対して利益があるばかりでなく世界の気象衛星史上に一期を画する貢献となることにならう

## 5. あとがき

この稿は著者が1968年このかた COSPAR 第6作業班メンバーとして GARP の衛星関係の計画に参加する機会を与えられた上, 最近の日本の気象衛星開発計画における放射観測部門を受け持っている経験を基として述べた解説と意見であるが, 特に3節の大気汚染観測の関係については最近の COSPAR, WG 6, Panel B. Report 1971年シヤトル<sup>4),5)</sup>, からとったものでここにあげられた図や表の出所について一つ一つ述べないがまとめて各著者に対して謝意をのべたい。

## 参考文献

1) 岩波書店: 理化学辞典の補足表より。

- 2) Goody R.M.: Atmospheric Radiation I, Theoretical Basis, OXFORD (1964) p. 4.
- 3) この関係については嘉納宗靖, 放射測定及びそれによる気象測定, 気象研究ノート(印刷中)に詳述されている。
- 4) Panel, B. COSPAR WORKING GROUP 6, SEATTLE, JUNE 1971, The Feasibility of Observing Pollutants and their Effect on the Global Environment with Satellites.
- 5) Panel B. COSPAR WG-6, Possible Observation of Pollution from Space, edited by T.H. Vonder Hoar, Draft document submitted to WG-6 June (1971).
- 6) Wilson, Carroll, L.: Mans Impact on the global Environment, Assessment and Recommendations for Action, MIT Press (1970).
- 7) Rogers, D.G. NASA'S Developing Strategy of Space Applications, TRW Space Log, Fall (1968) p. 5.
- 8) Schnapf, A. ITOS-I (TIROS-M), Design and Orbital Performance (2nd Generation Operational Meteorological Satellite), 21st Congress of the International Astronautical Federation, Constance, (German Federal Republic) October 4-10, (1970).
- 9) Synchronous Meteorological Satellite, Phase B study Report, January 1970, Goddard Space Flight Center, V-5.
- 10) 山香英三, 土屋清, 焦電型検出素子による気象衛星搭載用赤外放射計, 天気 第18巻2号, (1971年2月) 15-20頁。
- 11) 例へば最近のものとして SCOTT, R.R. Thermal Design and Evaluation of the ITOS-1 Spacecraft, ASME Publication 71-AV-23, contributed by the Program Committee of the SAE/ASME/AIAA Life Support and Environmental Control Conference, July 12-14 (1971).
- 12) この計算の根拠は 9) の V 章にも記述されているが他に Richard D, Hudson: Infrared System Engineering John Wiley (1966) 等通常の赤外線工学の教科書で明らかである。