

## 人工衛星による気象観測の問題点

藤 本 文 彦\*

### 1. 序

1977年7月14日に日本の静止衛星（ひまわり）が打ち上げられ、東経140度の赤道上空約3万6千キロメートルの静止点に到達した。計画段階から5年以上の年月と約300億円の国費とそれにつき込んだ人力は日本の気象界にとって空前の大事業である。この衛星によって、東アジア、西太平洋、大洋洲の広い領域の気象を3時間間隔で（必要ならば1時間おきに）継続的に監視することは驚くべきことである。マリアナ諸島付近の擾乱が台風に成長してゆく過程や、日本の南の海上で前線が強まったり、弱まったりする様が衛星による画像に写し出されるであろう。また、静止衛星の観測結果を搬送信号から複雑な処理の後に得られる風ベクトルなどの量的資料が、観測のない大洋上の値として、数値予報に用いられることになっている。

1978年ごろ米国が打ち上げを予定している極軌道衛星タイロス-Nは、静止衛星の持たぬ機能と極めて豊富な情報を提供するものであるから、気象庁でもその利用を考慮している。気象衛星の実用化の進展に伴い従来の気象観測との関連が話題になる。「運営に多額の費用と大きな労力を要する海上観測や高層観測は現在の規模を維持する必要があるか、合理化や縮小はできないか」などということである。そこで、衛星資料の特性、その問題点、従来の観測との関連を考えてみたい。

### 2. 人工衛星による観測値の特性

衛星から得た原始資料に適切な処理を行なって、大気鉛直温度分布、海面温度、風ベクトルなど気象学や業務に必要な気象要素を得ることができる。これらの資料は、観測所を容易に設置できぬ海洋や人口過疎地帯においても入手できるという点で画期的なものである。

しかし、これらの資料は海面温度の場合でいえば観測点間の相対的大小関係はかなり信頼し得るが、観測手段の違いから従来の観測と比べると両者の間に差がある。

**投稿募集** この欄は気象学ないしその関連分野の学問上の問題や将来展望、学会活動への提案など、会員の建設的意見を自由に発表し合う場です（長さ；400字×10枚以内）。

海面温度、大気鉛直温度分布と水蒸気分布などを衛星から観測する場合地球大気を透して、可視光、赤外放射、あるいは電波を測る。このような遠隔測定は、炭酸ガス、水蒸気のような大気中の放射吸収物質や浮遊粒子などの吸収・散乱によって影響を受けるので補正を行わねばならないが、浮遊粒子や水蒸気の重合（dimer）のような光学的性質の明らかでないものが含まれるので、完全な補正は難しい。大気に関する知識が将来もっと進めば遠隔測定により生ずる差の性質も明らかになるであろうが、従来の気象観測との間に次のような相違があることに注目すべきである。

#### 2-1. 風ベクトル

既存の高層風観測では風に流されながら上昇してゆく気球を追跡し、水平経路図を画いて気圧計高度断続器から高度を求めてある気圧面に対する風向、風速を出す。いっぽう、衛星から風ベクトルを求めるには、静止衛星により30分程度の間を置いて撮影した時系列画像からその時間内の雲の動きを測り、ベクトルを求めてそれに対応する地球座標に変換する。このようにして風ベクトルを求めることは雲頂が風によって動くという仮定に基づく。しかし、重力波の作る運動のように風によらない雲の動きがあるし、雲それ自身が生成、発達、衰弱、消滅の過程を持ち、30分以下の寿命しかない場合もある。

このような理由で、雲の動きから風ベクトルを求めるということはそれほど簡単ではなく、数種の方法による厳密な品質管理が必要である。求めた風ベクトルの高さを決めるには、追跡する雲の雲頂放射温度を赤外放射資料によって求める一方、気温と高度の関係から雲移動ベクトルに相当する高さを推定する。

大気は規模の違う複雑な乱流構造をしているので、小さな気球と追跡雲では風の影響が異なりそれらの動きに差があるのは当然である。

雲の動きから風ベクトルを求めるとき問題になるもう一つは、画像に写る雲頂の動きが、雲頂高度面の風をあらわすであろうかということである。風の鉛直シアのある場合、このような方法は疑問がある。

\* F. Fujimoto, 気象庁企画課

また、雲頂高度を決めるとき、赤外放射計で測った雲頂温度を自由大気と同じ温度に相当する高さで指定してよいかも問題である。米国の NESS の比較観測によれば、気球と雲による風の差の少なからざる部分が雲頂高度決定誤差によることは良く知られている。

衛星によって風ベクトルを求めることは雲のない場合は言うまでもなく、存在しても移流性でない雲の場合は実行不可能である。

## 2-2. 鉛直温度分布

高層観測は、気球に温度計、湿度計、気圧計を付けて飛揚させるが、衛星による遠隔測定では炭酸ガス  $15\ \mu\text{m}$  吸収帯において吸収の強さの異なる7つの波長と赤外放射の「窓」波長の1つ ( $11\ \mu\text{m}$ ) を測ることにより、1,000 mb から 15 mb までの15層の温度を算出する。すなわち、大気外で吸収強度の違ういくつかの波長について放射を測ると、波長ごとに、ある高度の気層温度との間に相関の大小がある。

炭酸ガスは大気中の混合比が一定と見られるので、これら8波長の放射量の変動は各気層の温度の違いによると考えられ、いわゆるインバース・プロブレムにより温度を気圧(高度)の関数として求めることになる。しかし、衛星の放射資料のみにより物理学的に問題を解くことは基本的方程式の性質上難点があり、高層観測の資料を部分的に導入した結果を観測のない領域に適用する実際的方法も、大気中に存在する雲の妨害により制約を受ける。

雲の影響を完全に除去するには、その影響を受けることの少ないマイクロ波 ( $\text{O}_2$  の吸収帯にあたる  $0.5\ \text{cm}$  波長) による他はないが、空間的分解能はかなり悪くなる。

鉛直温度分布を衛星による遠隔測定で求める場合地表温度を知る必要があるが、温度の日変化が大きく、代表性も小さい陸上の場合には複雑すぎてそれを決めにくいので、NOAA 衛星で、海面上空のみについてこの作業を行なっているのはそれ相当の理由がある。

また、衛星によるこの種の資料では従来の観測で得られる特異点のような細かい構造は、わからない。

## 2-3. 海面温度

現在海洋観測で行なわれている方法はバケツで採水し温度計で測るのであるが、衛星の赤外放射計による海面温度はミリ以下の表面層の放射強度を温度に変換したものである。

したがって、両者の間には大きな相関があろうが、測

定原理は異なるので以下の点を考慮する必要がある。

(1) 衛星によって求めた温度は、ある時空間的広がり(たとえば緯経度1度、10日)の平均温度である。これは、海面がしばしば雲に覆われ観測ができないことを考慮しての処理である、海水温度はかなり保存性があり、いっぽう、雲は海面に比べ低温で梅雨前線のようなものを除いては同一地点に滞留することは少ないという事実に基づく。前述の時空間領域を取れば雲のない海面の放射を衛星から捕える確率がかなりある。したがって、このような衛星資料のヒストグラム分析など適当な処理により海面温度を抽出できる。

(2) 海面の出射放射が海面と衛星との間の大気層で吸収を受け減衰するので補正が必要である。しかし、前に述べた理由から補正は完全にはゆかない。

(3) 衛星に対する仰角が小さくなる海面では、衛星に対する射出率が小さくなり求めた温度が実際より小さくなる。仰角が30度以下では急激にこの効果が顕著になるのでこの補正も必要である。

(1) では海面上空にごく薄い雲があったとき処理過程で雲の存在を識別できず誤差の原因となり得る。

## 3. 地表基準観測点の重要性

### 3-1. 基準点の意味

上述のように、衛星による気象観測は、大気の乱流構造による不規則性や衛星から得た原始資料を使って必要な気象要素を抽出する過程で生ずる誤差により従来行なわれて来た観測と差がでることは明らかである。

既存の観測も、測器の特性と大気の乱流構造の相互関係を考慮して詳細に問題を追究すれば絶対的なものとは言いきれないが、現在の気象学と気象技術の理論や経験則は衛星によらない観測を基にしているもので、今のところはそれを基準にするのが妥当と思われる。たとえば、熱帯低気圧発生時の海面の臨界温度が  $28^\circ\text{C}$  であることが経験的に知られているが、衛星の観測した異なった海面温度が公表されると、混乱を起こすかも知れない。

前述のように、衛星から得た気象要素は相対値としてはかなり信頼できるので、広範囲に渡る多くの衛星観測値の中のいくつかの点に近接した基準点があれば、それらの差によって更生を行なうことができる。このようにして、衛星の観測値は相対的な関係のみでなく真の物理量として気象学のいろいろの関係式に適用して有用な結果を得ることができる。

たとえば、数値予報では予報域の格子点ごとに等圧面高度を与えるが、衛星から鉛直温度を測り質量を得よう

としても衛星によって気圧を直接正確に測る方法はないから、何らかの方法で正確な基準面を知り、静力学の式によって質量に変換することになる。観測のごく少ない大洋上ではブイ観測船が基準面を決定することになる。

### 3-2. 海面温度に関して

海面の温度分布を求める際にもこのような基準になる海面温度観測は本質的な重要性がある。2-3節(2)で述べた大気中の水蒸気による放射吸収の補正を行わなければならないが、放射伝達式の解に基づく処理はその中の透過関数の不確定さや計算量の関係から業務的には行わず簡単な実験公式による。

この公式は海面温度や衛星に対する仰角を変数として含むが、公式に含まれる係数は海面温度の実測値と比較して決定されねばならぬ。

決定された係数は緯度や季節によって変わると想像されるので、十分な設備を持った観測船によって適宜移動観測を行なう必要がある。また、衛星によって求めた海面温度の最終結果を観測船やブイの基準観測値と比べて、系統的誤差が分かれば海洋観測の値と併用できる。

### 3-3. 風に関して

衛星の時系列画像から抽出した風ベクトルには、追跡雲選択の誤まり、雲頂高度決定の不良というような大きな誤差の要因がある。

資料の品質管理の一部として高層観測との比較が行なわれるが、高層風観測点から離れると比較ができなくなるので大洋上に1,2の観測点が必要であろう。BOMEXなどの経験によれば、下層雲は雲底の風に流されることが多く、洋上の下層雲は積雲ないし層積雲でその動きは雲底に相当する900 mb高度に決めるのが良いと言われている。日本の近海でこのような経験則を確立するため、衛星と観測船の共同観測を行なう必要がある。

### 3-4. 鉛直温度分布に関して

この問題を解く実用的方法がいろいろ考え出された

が、高層観測の実測値、あるいはそれを基にした統計値や予報値を何らかの形で使用する点は共通している。

回帰法と呼ばれるものは、高層観測資料の多い領域で波長別放射量を高さ別の実測値に変換する行列を作り、観測のない範囲に適用して資料を得ようというものである。

逆行行列法と呼ばれるいくつかの方法は、実測値の代わりに統計値を代用できる利点がある。

放射伝達方程式の解を適当に変形して第1推定値を入れ、逐次近似的に解を求める直接法と言われるものは、理論的基礎は最も明瞭だが第1推定値の与え方によって結果が異なる。

このような処理方式には万能のものではなく、資料の密度や精度のほか大気透過関数について得られる情報の大小により適当な方法を選ぶことになる。精度のよい高層観測が多いほど衛星資料から得た結果も良いということである。

## 4. 結 び

衛星から求める気象要素は、程度の差はあっても既存の観測と結びついている。将来、衛星に載せる測器の改善や気象要素を抽出する処理法の改良により既存の観測値に依存する度合は少なくなるであろうが、現段階では、衛星を主とすることはできないので現在の気象観測網は当分維持されるべきである。

また、衛星による気象資料が安定して得られるようになったときは、従来の観測との系統的差とか代表性などの比較研究は十分になされるべきで、「ひまわり」の観測値の信頼度の唯一のよりどころがBOMEXの結果であったりしては困るのである。

注. 規定の2ページを超過しましたが、本文は気象衛星による観測上の諸問題点を具体的にまとめて論じてあるので、とくにそのまま掲載致しました(編集委員会)。