

静止気象衛星「ひまわり」の画像からの風計算*

浜田 忠昭**

1. はじめに

1966年12月にアメリカの応用技術衛星 ATS 1号が赤道上空約 36,000 km の静止軌道に載り、全地球のほぼ4分の1の、いつもだいたい同じ位置から見た雲の分布の写真を得ることができるようになった。気象観測点の少ない、海洋上、山岳部、砂ぼく地帯などの雲分布の情報は気象学の分野へのはかり知れない寄与が期待される画期的なものであった。時間的に連続した数枚の写真からは、その雲の移動を追跡・測定することによって高層観測点の無い広範な領域から風のデータが得られるようになった。はじめに、1967年にシカゴ大学の藤田教授のグループにより時間的に連続した雲分布写真を動画フィルムにし、雲の移動を測定するフィルムループ(ループフィルムともいう)の技術が考案された。さらに、当時著しい進歩が見られつつあった計算機技術により、パターンマッチングの技法を使って、自動的に雲を追跡することが試みられた (Leese *et al.*, 1971)。この計算機による方法は、大量に均質な雲移動ベクトルを算出できる可能性を示したもので、その後アメリカの NESS¹⁾での現業化の礎となった。また、その後赤外画像が取得できるようになり、地球表面の温度分布あるいは雲頂の高度が得られ、風ベクトルに高度の情報が付加されるようになった。

衛星の画像から算出された風ベクトル(以下、衛星風あるいは衛星風ベクトル、特に区別する必要のないとき

は単に風ベクトルという)は、日本(GMS; ひまわり)、アメリカの NESS (GOES-EAST, GOES-WEST) および欧州宇宙機関(ESA²⁾) (METEOSAT) から、それぞれ1日2回(アメリカは3回)気象回線(GTS³⁾)を通じて世界中の利用者に放送されている。一方、これらの衛星風データは現在進行中である FGGE (第1回 GARP 全地球実験)の Level II-b データセット(研究用のデータセット;新田(1977), 新田(1979)を参照のこと)の一部として、スウェーデンの Level II-b Space-based and Special Observing Data Center に送付されている。SSEC⁴⁾は、FGGEの期間中1日1回 GOES-WEST と GOES-EAST の二つの衛星から熱帯地方(15°N-15°S)の風のデータを、さらに、インド洋上の GOES-IO (Indian Ocean)の画像からは1日2回全領域の風のデータを算出し同センターに送付している。この他に西欧の DFVLR⁵⁾とフランスのLMD⁶⁾が GOES-IO の画像から、風ベクトルの算出を行なっている。これらのデータは、同センターで品質管理を行ない各データに品質を表わす指標を付けて他の種類のデータと共に再編集される。これらのデータは、ソ連にある Level II-b Surface-based Observing System Data Center とデータの相互交換を行なうとともに、二つの

1) NESS; National Environmental Satellite Service

2) ESA; European Space Agency

3) GTS; Global Telecommunication System

4) SSEC; Space Science and Engineering Center, 米国ウィスコンシン大学の研究所

5) DFVLR; Deutsche Forschungs-und Versuchsanstalt für Luft-und Raumfahrt

6) LMD; Laboratoire de Météorologie Dynamique

* Wind Estimation from images ingested from Geostationary Meteorological Satellite "HIMAWARI".

** Tadaaki Hamada, 気象衛星センターシステム管理課

第1表 風計算処理方式の分類

項目 方法	追跡雲 の選定	雲の追跡	採用している機関
全自動法	自動	自動	NESS (下層雲) ESA
マンマシン法	マンマシン法	自動	日本 (下層; MM-1*) SSEC
	マンマシン法		日本 (下層雲; MM-2*)
フィルムループ法	オフラインでの 人間による追跡		日本 (上層雲) NESS (上層雲) ESA

* MM-1, MM-2; 日本の風計算システムのベクトル算出法 (第2.2節参照)。

世界データセンター, WDC-A (アメリカ, Asheville) と WDC-B (ソ連, Moscow) に保存される。これらの WDC から誰でも実費でデータを購入することができる。

このように、衛星風ベクトルは毎日の気象予報へのデータの利用からも、事後の研究のためにも大きな期待になっているが、今まで一般に使用されてきたレーウィンゾンデ等で観測された風のデータとはその算出方法が異なっており、これらのデータを利用する場合にはそのことに起因する種々の制約を認識することが必要である。以前に小平ら (1978) により運用に入る前の段階で GMS システムについて全般的な紹介が行なわれたが、その後1年半を経過して資料も蓄積されてきた。そこで本稿では、衛星風を今までの風のデータと混ぜ合わせ、特にレーウィンゾンデデータの空白域のデータとして利用することを前提として、衛星風の代表性、算出方法の簡単な説明、算出風ベクトルの精度について、主として「ひまわり」の風計算システムから得られた結果を主体として記述する。なお、次の節では静止気象衛星からの風計算について主としてシステムのことについて述べ、精度についての記述は第3節にまとめた。

2. 静止気象衛星画像からの風計算

2.1. 雲の追跡の方法

雲の追跡の方法としては、すべてを計算機で行なう全自動法、追跡雲の選定等を人間と計算機の対話方式で行なうマンマシン法、雲写真をムービーにして投影して追

跡を行なうフィルムループの方法の3種類に分けることができる。第1表に示すように、現業の風計算の方法として日本ではマンマシン法とフィルムループ法、ESA および NESS では全自動法とフィルムループ法、研究開発用として SSEC の McIDAS* ではマンマシン法を採用している。

全自動法では、すべての処理を計算機で行なうため安定して多量のデータが得られるが、良好な追跡雲をどのようにして選定するかが問題である。NESS では、赤外画像を使用し、ある温度以下の部分を除いて機械的に下層の風ベクトルを算出する。算出結果は、NMC** の 850 mb 予測値と比較して風速で 30 kt 以上差のあるものは削除するなど、いくつかの信頼性のチェックを自動的に行なっている。さらに、結果を矢羽根で表示したものをフィルムループのオペレータが視察して最終的に不良ベクトルの削除を行なっている。

マンマシン法では、オペレータの高度なパターン認識能力により良好な追跡雲の選定が行なえるが、人間の作業能力に限界があってルーチ的に算出される風ベクトルの数が制限される。

フィルムループの方法は、先にも述べたように静止気象衛星データからはじめて風計算を行なう方法として考え出されたものであるが、計算機による追跡の困難な薄い網雲を熟練したオペレータが追跡することによって上層の衛星風を得ることができ、また網雲と重なっている下層の積雲を追跡することにより下層の衛星風を得ることができる。

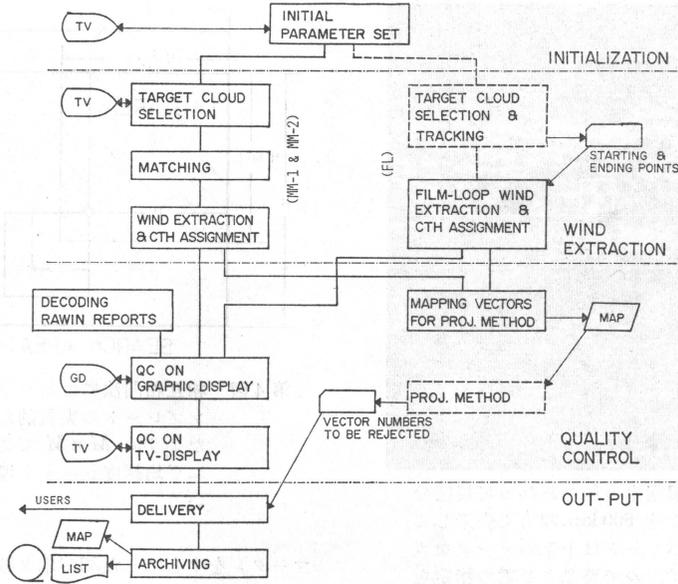
2.2. 「ひまわり」の風計算システム

ひまわりの風計算システムは、CWES*** と呼ばれている。テレビ型ディスプレイによる計算機と人間の対話方式により追跡雲の選定 (雲指定) を行ない、計算機によりパターンマッチングの技法で追跡するマンマシン1点指定法 (MM-1 法) と、フィルムループを投影して人間が雲の追跡を行なうフィルムループ法 (FL 法) を主体としている。この他に、TV ディスプレイを使用して雲の移動の始終点とも人間が指定する MM-2 法があるが、補助的機能であって現業ではほとんど使用しないので、本稿では省略する。CWES では、算出結果のチ

* McIDAS; Man-computer Interactive Data Access System, SSEC で開発された画像処理用システム

** NMC; National Meteorological Center, 米国。

*** CWES; Cloud Wind Estimation System



第1図 ひまわりの風計算システム (CWES) の概略流れ図. 図中の CTH は雲頂高度.

エックにもグラフィックディスプレイ等を使用した計算機との対話方式を取り入れている。計算機と人間が相補い合いながら確実に良好な雲を選定し衛星風ベクトルを算出しようとするシステムである。

FL 法は、フィルムループ作成のための写真処理、オフラインでの人間による追跡を行なわずらわしさがあるが、自動的に追跡することが困難である、薄い絹雲、中下層雲と重なり合っている絹雲の追跡を、人間の高度な熟練したパターン認識能力により追跡でき、主として上層の風を得るのに適している。

CWES の概略の処理の流れを第1図に示す。処理方式について本章で簡単に述べるが、詳細については浜田 (1979A), Hamada *et al.*, (1978) を参照されたい。

2.2.1. マンマシン法による風ベクトルの算出

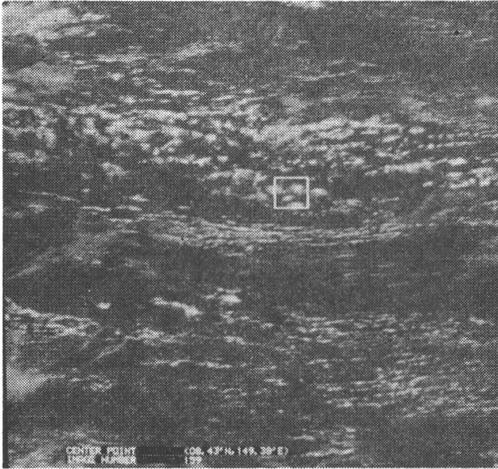
追跡雲の選定は、第2図に示すような画像処理コンソール (IPC*) の TV 型ディスプレイを使用して行なう。三つのディスプレイを使用し、全球画像または全球の1/16の範囲の16分割画像および可視画像でオリジナルの解像度をもつ区分画像を表示できる。オペレータは、全球あるいは16分割画像で全体の雲パターンを参考にしたがら、区分画像上で追跡に適する雲パターンを画面上の



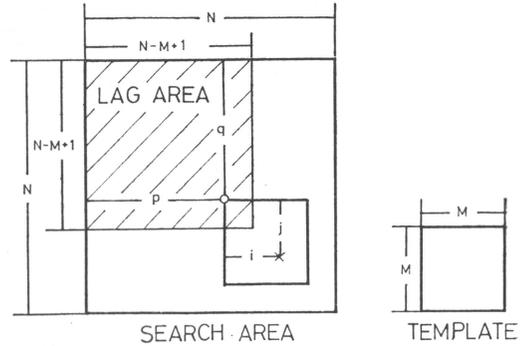
第2図 画像処理コンソールによる風計算の雲指定作業. 通常左側の3台の TV ディスプレイが使用される。

クロスマーク (第3図) を操作しながら指定する。この雲の指定と次に述べる追跡は、可視・赤外いずれの画像でも行なうことができる。現業では、00 Z, 12 Z それぞれ可視と赤外画像を使用している。雲パターンの指定のときに、後で赤外画像により雲頂高度を算出するために雲の射出率値を入力しておく。オペレータは全体の雲パターン、個々の雲の形状等を判断して追跡雲の指定を行なうが、形状による良好な追跡雲は、浜田ら (1977) によると、形状が明瞭な孤立したセル状の雲、ライン状

* IPC; Image Processing Console



第3図 風計算の雲指定の行なわれる可視区分画像。およそ 600 km 四方を表示している。オペレータは十字のマークをカーソルダイヤルで移動させ雲の指定を行なう。白い枠はマッチングのときのテンプレートの大きさを32画素×32ライン(約 50 km 四方)。十字のマークは白ワクのあるがこの写真では表示されていない。



第4図 相互相関法によるマッチングの説明図。テンプレートの実質的な大きさは、図に示したように $M \times M$ であるが、計算上は周辺に平均輝度レベルを埋めて $N \times N$ としている。

の雲でとぎれているもの、規則正しく並んだセル状雲である。追跡雲として良くないものは、明瞭な輪郭を持たない(ぼやけた)雲、長くつながったライン状の雲である。

オペレータの雲指定は、現実的には1観測について200~250点行なわれる。指定が終了すると、それらの各指定点について雲の移動量算出(マッチング)の処理が計算機の自動処理で行なわれる。MM-1法では、通常30分間隔の3枚の画像(時刻順にA, B, C画像)を使用している。上記の雲指定はB画像で行なわれ、BC間とBA間でそれぞれパターンマッチングにより雲の移動量を算出する。

CWESのMM-1法では、相互相関法により2枚の画像間の画像輝度レベル間の相関係数を求め、雲パターンの画像上の移動位置を求める。原理的には、2枚の画像を重ね合わせて対応する輝度レベル間の相関係数値を、画像相互の位置を1画素ずつずらして求め、最大相関係数値の位置を雲パターンの移動位置(lag-position)とする方法である。

今、第4図に示すように2枚の画像(B画像とC画像とする)からテンプレートとサーチエリアを切り出す。

マーク)を中心にした32画素×32ライン(可視画像)または16×16(赤外画像)の輝度レベルのデータから成っている。前者はSSP*で約400km四方、後者は約400km(東西)×800km(南北)に相当している。サーチエリアは、いずれの場合も64画素×64ラインの大きさで、C画像から切り出された輝度レベルのデータから成っている。中心位置はB画像の雲指定点と同じ(緯経度の)位置である。テンプレートエリアの周辺にはその中の平均輝度レベルが埋め込まれてサーチエリアと同一の大きさとした上で、次の式により相関係数値の配列(相関値配列)が算出される。

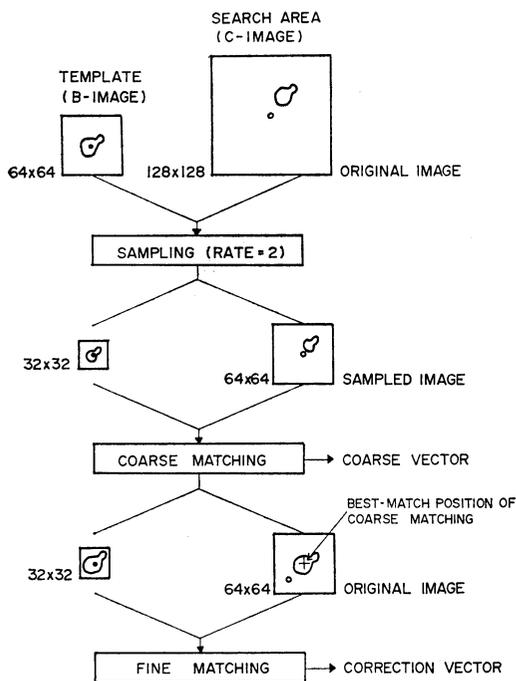
$$C(p, q) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T(i, j) - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T(i, j) - \bar{T})^2}} \times \frac{(S(i+p, j+q) - \bar{S}(p, q))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (S(i+p, j+q) - \bar{S}(p, q))^2}}$$

$T(i, j)$: テンプレートエリアの輝度レベル
 $i, j = 1, 2, 3, \dots, N$

$S(i+p, j+q)$: サーチエリアの輝度レベル
 $i, j = 1, 2, 3, \dots, N$

$$p, q = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \frac{N}{2}$$

* SSP; Sub-Satellite Point, 衛星直下点, 「ひまわり」の場合はおおよそ 140°E, 赤道線上。



第5図 2段マッチングの説明図。

$$\bar{T} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T(i, j)$$

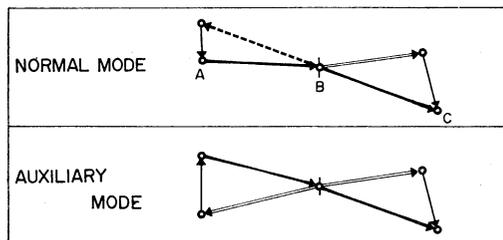
$$\bar{S}(p, q) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S(i+p, j+q)$$

このようにして算出された相関値配列の最大値の位置 (p_0, q_0) が、マッチングの位置 (lag-position) となる。この相関係数の計算は、

$$h(p, q) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x(i, j)y(i+p, j+q)$$

の形の演算、すなわち、「たたみ込み」の演算が主になっている。この演算は N が増加するに従って処理時間が急速に増大する。ここでは詳細な記述を省略するが、この処理時間の節約のため高速フーリエ変換 (fFT*) を導入して配列の計算を行なっている (Cooley et al., 1965)。

サーチエリア内でのテンプレート画像の移動限界が算出できる最大風速に対応することになる。処理時間の節約のため、1度サンプリング画像で粗いマッチング (coarse matching) を行ない、その移動位置を中心にサ



第6図 現業におけるマッチングモード。通常は画像BC間では2段マッチングを行なうが、画像BA間ではBC間の結果の逆ベクトルを粗マッチングの代用とする (normal mode)。

ンプリングしない (オリジナル解像度) 画像を使用して補正マッチング (fine matching) を行ない最終的な移動ベクトルを求める、2段マッチング (double matching) 法を採用している (第5図)。現業では、B画像上での指定点からBC間とBA間のベクトルを求めるが、BC間の最終ベクトルをBA間の粗マッチングの代用とする2段/1段マッチング法 (第6図の normal mode) が採用されている。

マッチング処理により画像上の移動量が求められ、次に座標変換を行なうことにより地球上の移動ベクトル (風向・風速等) が算出される。この座標変換は、各画像上の雲パターンの位置 (雲指定点あるいはマッチング位置) をその画像取得時の衛星の軌道および姿勢の予測データを使って、画像座標から地球上の緯経度値に変換する。

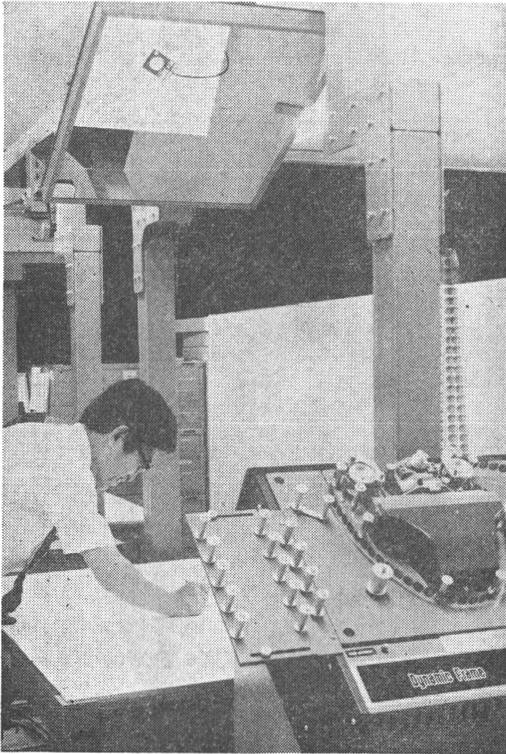
座標変換を行なうと同時に赤外画像から雲頂の温度が算出される。衛星から取得された赤外データは、輝度温度 (等価黒体温度; T_{BB}) を表わしている。これは衛星で観測した放射量を表わしており、雲を観測した場合には雲自身の放射の他にもその下方から雲を透過してきた放射も観測されている。雲の射出率を ϵ 、雲頂温度を T_c 、下層表面温度を T_s とすると、

$$B(T_{BB}) = \epsilon B(T_c) + (1 - \epsilon) B(T_s)$$

$B(T)$: 温度 T のプランクの黒体放射

から T_c を決定することができる。 T_{BB} は、ある領域 (可視・赤外による風計算の場合それぞれ赤外画像の17画素×9ライン、17×17であって、それぞれ補正マッチングのテンプレートサイズとほとんど同じ) についてヒストグラム解析を行ない決定される。風計算では雲頂の温度を得るため最低温度法で求めている。 ϵ は、容観的に評価することは困難であるが風計算で対象となってい

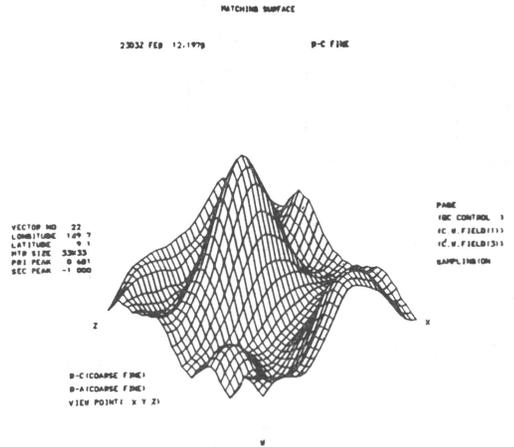
* fFT; fast Fourier Transform



第7図 フィルムループ投影装置と座標数値化装置(ディジタイザ)。右下に写っている映写機から上方の鏡に反射させた映像を下方のディジタイザボード上に映写する。オペレータはこのボードで雲の追跡を行なう。カーソル(上方の鏡に写っている)を使用しディジタイザボード上の座標値をカードにパンチする。

る積雲系の雲はほとんど射出率1.0と見なしている。 T_s は10日毎に現業的に算出している広域放射海面水温値を使用する(阿部ら, 1979 参照のこと)。このようにして算出された雲頂温度は、鉛直温度分布データの気候値(月平均値)により雲頂高度に変換される。雲頂高度の算出法は別に本誌に掲載される予定の解説(鈴木, 1980 および 加藤, 1979)を参照されたい。なお、風計算では雲頂高度算出処理のうち一部の機能を有するのみで、マンマシン処理の部分は持っていない。

以上述べたように、MM-1法では1雲指定点に対して時間的に連続する二つの風ベクトル V_{AB} と V_{BC} 、三つの雲頂高度 P_A, P_B, P_C が算出され、 V_{BC} と P_C が最終結果として採用され、他は2.2.3節で述べる自動評価のために使用される。



第8図 グラフィックディスプレイに表示されたマッチングサーフェス。 W から X へ向かう軸が南の方へ、 W から Z へ向かう軸が東の方への移動量、鉛直方向が相関係数値で、水平面から 45° の俯角で見た図になっている。

2.2.2. フィルムループ法による風ベクトルの算出
MM-1法では、雲の指定からベクトルが算出されるまで大型計算機によるデジタル処理が行なわれるが、フィルムループ(FL)法ではフィルムループ作成のための写真処理、オフラインの雲の追跡処理を経てから大型計算機に入力される。

FL法では、MM-1法で使用される3枚の画像(A, B, C)の他にA画像の30分前に取得される画像(Z画像とする)を使用する。4枚の全球画像の写真から、フィルムループを作成する。始・終点の画像にあたるZとC画像を35駒、A・B両画像をそれぞれ3駒、時刻順に35mmフィルム上に撮影しエンドレスにつなぎ合わせる。このフィルムループを投影機にセットし、上方の鏡に反射させテーブル上の座標数値化装置(ディジタイザボード)上に連続映写する(第7図)。ボード上にはワークシート(白紙)をはりつけておいて、オペレータはベンチマーク(全球画像に挿入されている十字のマーク)の測定と雲の移動の測定を行なう。これらの測定値は、カードパンチされ大型計算機に入力される。大型計算機では、ベンチマーク座標を基準として画像上の雲の移動量を算出する。次に、MM-1法におけるマッチング処理を終了したものと全く同様に座標変換を行なうことによって地球上の移動ベクトル(風向・風速)を算出し、同時に高度値(気圧等)の付加が行なわれる。FL法の場合は、MM-1法と同じく赤外画像から雲頂高度

第2表 主な品質管理項目

評価の種類	評価項目	評価内容	使用する表示用機器
自動評価	マッチングサーフェスの形状のパラメータ化による評価	マッチングサーフェスの特徴をパラメータ化して人間の判断と同等のチェックを計算機で行なう。	—
	算出風ベクトルの時間変化	3枚画像で一つの追跡雲について二つの連続した風ベクトルが算出される場合にその速度差をチェックする。	—
	追跡雲の高度変化	一つの追跡雲の画像毎に算出される雲頂高度の変化の大きさのチェックを行なう。	—
マンマシン法による評価	空間的一貫性のチェック	算出風ベクトルを矢羽根で表示し目視によりチェックする。	グラフィックディスプレイ
	高層観測データとの比較チェック	ADESS 経由で入電する高層風観測データと衛星算出風ベクトルの矢羽根表示を行なう。オペレーターの指示により指定された二つのベクトルが比較されその差が表示される。	グラフィックディスプレイ
	マッチングサーフェスの形状のチェック	マッチングサーフェスの3次元表示(第8図)を視察しマッチングが良好にとれているか否かのチェックを行なう。自動評価の第1項目はこれの自動処理である。	グラフィックディスプレイ
	算出風ベクトルのマッチング結果のチェック	カラー画面に異なる色で2枚の時系列画像を表示し、それに重ねて算出風ベクトルを表示してマッチングが良好にとれているか否かのチェックを行なう。	TV ディスプレイ
	フィルムループ投影によるチェック(プロジェクション法; PM 法)	全球画像と同じグリディング上に算出された雲の移動を矢印で表示し、その上に FL 法の雲の追跡に使用したフィルムループを投影し、系統的に一貫してベクトルが算出されているかどうかをチェックする。	フィルムループ映写機

を算出する方法の他に、オペレータが指定する高度(一定高度)を付加する方法と、鉛直温度分布データの気候値(月平均値)から作成された圏界面高度を付加する方法である。いずれにしても、絹雲を追跡した場合に、それらの高度を現業的に正確に求めることは困難である。この点については後で検討する。

このようにして算出された FL 風ベクトルは MM-1 風ベクトルとともに次の品質管理の処理へ送られる。

2.2.3. 品質管理

算出された風ベクトルのうち不良ベクトルの削除のために、各種のチェックが行なわれる。計算機内部で自動的に行なわれる自動評価と、TV ディスプレイあるいはグラフィックディスプレイを使用してマンマシンで行なう評価がある。これらについて第2表に示す。現業における雲指定技術の向上に伴い不良ベクトルの数が減少してきており、自動評価のうちの大部分についてはチェッ

クを行っていない。自動評価を通過したものについてマンマシン法による評価が行なわれ、不良ベクトルはオペレータの判断で削除される。

2.2.4. 出力とデータの保存

前節で述べた品質管理を通過したすべての風ベクトルが、国際気象通報式 SATOB (FM 88-VI Ext.) の形式に編集されオンライン系計算機を經由して気象庁の ADESS* へ送信される。ADESS からさらに気象専用回線 (GTS) を通じ世界中のユーザーに配信される。「ひまわり」の風のデータは、観測正時 (00Z, 12Z) から4時間以内に配信されることになっている。

この他、磁気テープ、ラインプリンタ、XY プロッタに出力されそれぞれ気象衛星センター内に保存され、

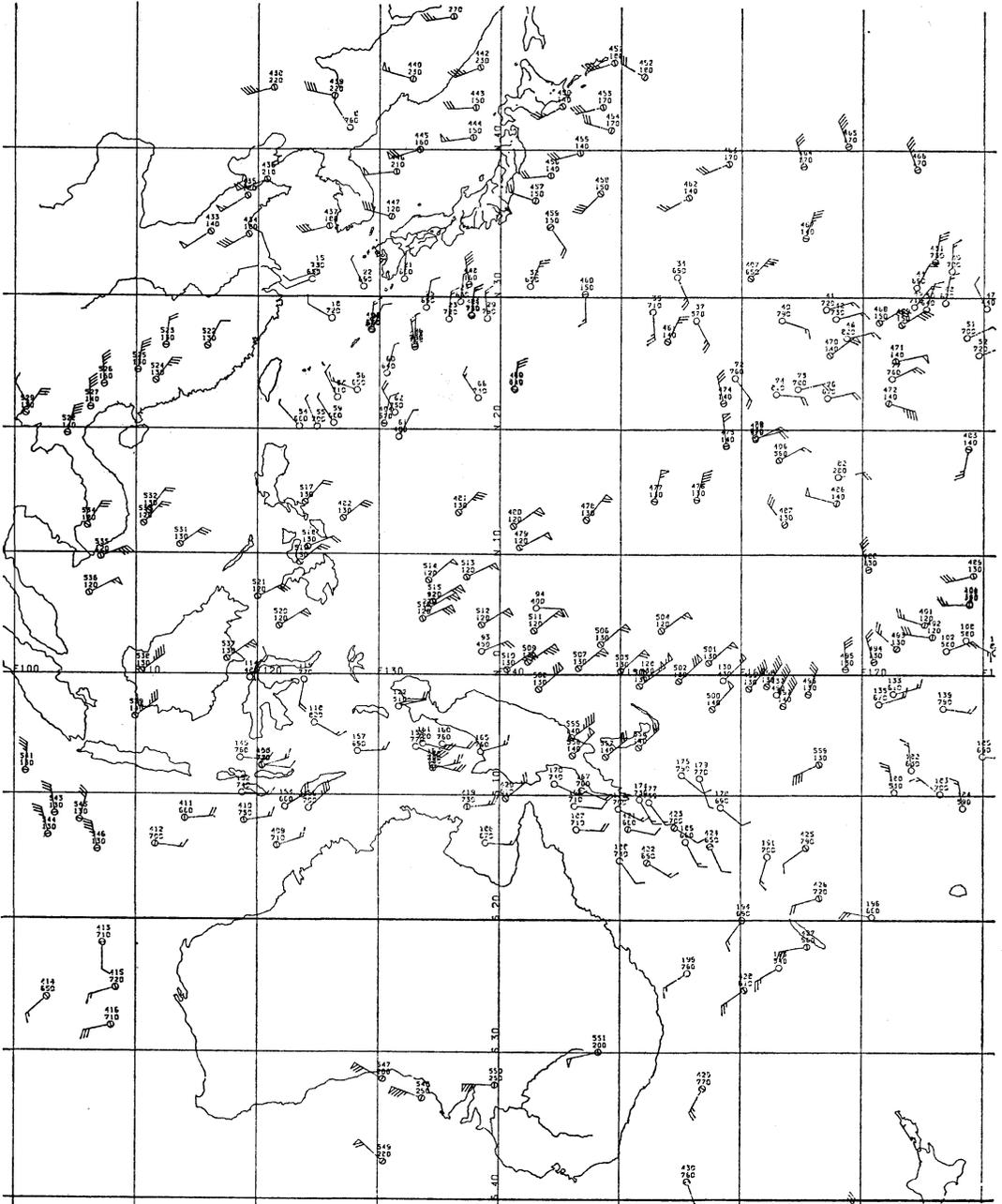
* ADESS: Automatic Data Editing and Switching System, 気象資料自動編集系継装置。

第3表 観測月報に掲載された風計算結果

CLOUD WIND VECTORS

MAY 1979

DAY GMT	LAT DEG	LONG DEG	DIR DEG	SPD M/S	P MB	T DEG	EM %	MTD	IMG	DAY GMT	LAT DEG	LONG DEG	DIR DEG	SPD M/S	P MB	T DEG	EM %	MTD	IMG
22 12	13.75N	146.99E	213	14.1	110T	-	-	FL	IR	22 12	11.01N	145.75E	186	12.3	110T	-	-	FL	IR
22 12	12.72N	147.81E	209	12.1	110T	-	-	FL	IR	22 12	10.53N	147.52E	186	9.8	110T	-	-	FL	IR
22 12	8.20N	147.66E	162	10.8	110T	-	-	FL	IR	22 12	12.37N	151.13E	198	16.4	110T	-	-	FL	IR
22 12	12.88N	152.29E	195	13.0	110T	-	-	FL	IR	22 12	13.15N	153.68E	206	14.3	110T	-	-	FL	IR
22 12	11.00N	153.80E	184	11.8	110T	-	-	FL	IR	22 12	10.04N	155.69E	201	10.8	110T	-	-	FL	IR
22 12	9.72N	156.97E	203	7.5	110T	-	-	FL	IR	22 12	10.42N	157.02E	203	7.9	110T	-	-	FL	IR
22 12	18.99N	155.50E	252	21.4	120T	-	-	FL	IR	22 12	2.44N	156.50E	52	15.3	110T	-	-	FL	IR
22 12	0.07N	156.73E	51	19.6	110T	-	-	FL	IR	22 12	1.03S	155.07E	53	17.9	110T	-	-	FL	IR
22 12	12.61S	100.48E	339	17.0	110T	-	-	FL	IR	22 12	13.75S	102.17E	310	24.3	110T	-	-	FL	IR
22 12	14.49S	106.99E	301	21.6	110T	-	-	FL	IR	22 12	12.38S	107.94E	313	19.1	90T	-	-	FL	IR
22 12	14.42S	112.05E	294	25.4	110T	-	-	FL	IR	22 12	0.22S	172.39E	164	7.4	110T	-	-	FL	IR
22 12	1.11S	175.04E	136	10.0	110T	-	-	FL	IR	22 12	4.56S	155.27E	42	16.5	110T	-	-	FL	IR
22 12	5.56S	156.31E	54	14.2	110T	-	-	FL	IR	22 12	6.53S	154.05E	55	17.0	110T	-	-	FL	IR
22 12	10.84S	134.44E	29	19.6	90T	-	-	FL	IR	22 12	12.08S	155.17E	25	15.3	90T	-	-	FL	IR
22 12	13.66S	154.91E	14	18.5	110T	-	-	FL	IR	22 12	9.01S	157.63E	54	12.6	90T	-	-	FL	IR
22 12	10.80S	157.81E	41	15.3	90T	-	-	FL	IR	22 12	10.62S	160.99E	52	15.2	90T	-	-	FL	IR
22 12	11.15S	162.03E	43	15.9	90T	-	-	FL	IR	22 12	12.40S	160.19E	27	16.4	90T	-	-	FL	IR
22 12	11.87S	158.78E	23	17.9	90T	-	-	FL	IR	22 12	13.24S	155.02E	15	21.9	110T	-	-	FL	IR
22 12	14.37S	159.06E	358	22.8	110T	-	-	FL	IR	22 12	14.34S	157.07E	2	20.2	110T	-	-	FL	IR
22 12	15.32S	158.04E	358	22.2	110T	-	-	FL	IR	22 12	15.79S	159.24E	347	22.0	110T	-	-	FL	IR
22 12	15.42S	161.01E	348	20.7	110T	-	-	FL	IR	22 12	19.47S	156.05E	266	20.1	110T	-	-	FL	IR
22 12	14.31S	164.09E	4	18.3	110T	-	-	FL	IR	22 12	14.68S	164.75E	359	9.0	110T	-	-	FL	IR
22 12	15.80S	167.11E	350	16.2	110T	-	-	FL	IR	22 12	17.02S	168.69E	333	20.0	110T	-	-	FL	IR
22 12	18.03S	171.69E	317	22.5	110T	-	-	FL	IR	22 12	18.24S	164.08E	318	27.8	110T	-	-	FL	IR
22 12	19.06S	186.72E	315	31.4	110T	-	-	FL	IR	22 12	37.23S	127.16E	244	18.3	640	-6.0	100	MM2	IR
22 12	34.55S	134.96E	299	21.3	90T	-13.2	100	MM2	IR										
23 00	34.60S	130.07E	293	13.1	940	-15.2	100	MM1	VIS	23 00	35.06S	131.84E	304	16.5	680	-3.1	100	MM1	VIS
23 00	37.32S	129.58E	276	16.6	730	-0.7	100	MM1	VIS	23 00	34.47S	134.04E	302	16.1	680	-3.7	100	MM1	VIS
23 00	36.81S	127.10E	210	16.5	730	-2.2	100	MM1	VIS	23 00	36.55S	134.61E	298	20.0	700	-1.8	100	MM1	VIS
23 00	34.85S	132.76E	301	14.5	670	-4.5	100	MM1	VIS	23 00	34.76N	149.37E	134	16.0	740	6.7	100	MM1	VIS
23 00	27.01N	152.84E	209	7.8	810	13.2	100	MM1	VIS	23 00	26.66N	150.87E	209	7.9	850	15.3	100	MM1	VIS
23 00	24.38N	152.65E	137	4.5	860	15.5	100	MM1	VIS	23 00	29.07N	156.10E	209	8.4	780	10.0	100	MM1	VIS
23 00	24.25N	156.10E	137	4.5	860	15.5	100	MM1	VIS	23 00	27.07N	170.02E	324	2.3	760	10.1	100	MM1	VIS
23 00	26.23N	168.40E	13	2.2	870	15.1	100	MM1	VIS	23 00	27.51N	175.61E	294	3.3	780	9.8	100	MM1	VIS
23 00	27.79N	177.69E	240	4.6	740	-13.9	100	MM1	VIS	23 00	16.25S	146.06E	102	9.9	640	4.9	100	MM1	VIS
23 00	22.03S	147.25E	86	9.9	780	13.0	100	MM1	VIS	23 00	12.35S	145.80E	95	11.3	710	9.5	100	MM1	VIS
23 00	16.41S	150.59E	118	11.2	650	6.0	100	MM1	VIS	23 00	14.98S	151.84E	126	9.4	700	9.1	100	MM1	VIS
23 00	15.53S	149.17E	104	11.1	700	9.2	100	MM1	VIS	23 00	12.31S	153.57E	141	7.6	540	-1.9	100	MM1	VIS
23 00	14.71S	154.40E	134	9.1	670	7.1	100	MM1	VIS	23 00	17.11S	155.11E	144	10.6	660	6.1	100	MM1	VIS
23 00	14.45S	156.88E	147	7.2	740	10.7	100	MM1	VIS	23 00	17.26S	158.32E	162	9.4	600	2.5	100	MM1	VIS
23 00	17.29S	160.63E	150	11.1	620	4.5	100	MM1	VIS	23 00	6.14S	160.29E	134	9.1	670	7.9	100	MM1	VIS
23 00	12.23S	160.74E	162	9.9	410	-14.6	100	MM1	VIS	23 00	13.93S	164.13E	162	6.7	700	10.2	100	MM1	VIS
23 00	15.01S	162.41E	145	7.6	680	8.4	100	MM1	VIS	23 00	17.73S	168.43E	324	3.2	700	8.1	100	MM1	VIS
23 00	22.42S	153.63E	172	10.6	620	4.0	100	MM1	VIS	23 00	22.39S	155.25E	159	10.0	640	3.4	100	MM1	VIS
23 00	23.25S	157.68E	182	10.6	750	6.1	100	MM1	VIS	23 00	18.50S	161.87E	148	9.9	620	1.7	100	MM1	VIS
23 00	19.62S	155.01E	154	9.9	540	-3.8	100	MM1	VIS	23 00	20.68S	156.68E	171	9.5	650	3.8	100	MM1	VIS
23 00	19.77S	155.81E	149	9.9	640	3.5	100	MM1	VIS	23 00	23.34S	159.08E	192	9.9	720	5.0	100	MM1	VIS
23 00	23.95S	160.41E	205	10.9	710	4.5	100	MM1	VIS	23 00	22.27S	161.62E	204	8.5	670	6.4	100	MM1	VIS
23 00	21.62S	160.61E	195	9.8	650	4.5	100	MM1	VIS	23 00	21.24S	159.44E	188	9.5	540	-3.3	100	MM1	VIS
23 00	18.69S	160.63E	167	7.1	630	3.4	100	MM1	VIS	23 00	21.71S	158.02E	183	10.9	780	10.8	100	MM1	VIS
23 00	18.16S	161.60E	172	8.5	650	4.8	100	MM1	VIS	23 00	18.87S	162.85E	183	7.1	680	6.5	100	MM1	VIS
23 00	20.01S	163.44E	167	7.8	670	6.1	100	MM1	VIS	23 00	23.31S	164.39E	230	6.3	650	0.8	100	MM1	VIS
23 00	22.76S	162.36E	215	7.9	720	5.0	100	MM1	VIS	23 00	23.56S	167.28E	241	7.5	710	4.5	100	MM1	VIS
23 00	26.89S	156.19E	180	14.6	700	4.0	100	MM1	VIS	23 00	27.84S	157.94E	174	13.9	690	-0.7	100	MM1	VIS
23 00	28.65S	156.47E	164	14.5	750	2.7	100	MM1	VIS	23 00	29.69S	155.27E	165	13.8	850	8.3	100	MM1	VIS
23 00	30.18S	157.42E	153	15.7	650	-3.3	100	MM1	VIS	23 00	26.42S	161.87E	219	9.9	620	1.7	100	MM1	VIS
23 00	26.97S	160.14E	196	9.0	740	5.7	100	MM1	VIS	23 00	27.81S	159.77E	175	10.1	800	5.3	100	MM1	VIS
23 00	30.25S	159.56E	161	12.9	730	1.8	100	MM1	VIS	23 00	29.31S	160.88E	177	10.6	730	2.0	100	MM1	VIS
23 00	30.35S	162.73E	204	8.6	740	3.1	100	MM1	VIS	23 00	28.44S	161.88E	190	10.8	740	2.3	100	MM1	VIS
23 00	29.88S	163.93E	234	6.6	750	3.4	100	MM1	VIS	23 00	27.44S	162.81E	202	7.3	820	8.8	100	MM1	VIS
23 00	25.94S	164.12E	247	8.5	810	8.4	100	MM1	VIS	23 00	27.36S	164.21E	222	7.1	580	-4.1	100	MM1	VIS
23 00	29.39S	166.47E	186	14.5	750	-2.0	100	MM1	VIS	23 00	30.84S	166.95E	313	5.4	420	-23.4	100	MM1	VIS
23 00	30.78S	168.51E	296	6.2	660	-1.9	100	MM1	VIS	23 00	29.78S	164.39E	232	5.2	850	8.1	100	MM1	VIS
23 00	27.72S	168.36E	262	6.5	900	11.6	100	MM1	VIS	23 00	25.32S	167.98E	254	7.3	750	6.4	100	MM1	VIS
23 00	34.77S	153.65E	75	2.5	700	-1.8	100	MM1	VIS	23 00	36.09S	153.16E	47	6.1	850	5.8	100	MM1	VIS
23 00	32.24S	152.94E	86	2.3	860	-1.4	100	MM1	VIS	23 00	37.24S	153.70E	55	8.2	750	1.0	100	MM1	VIS
23 00	33.71S	155.80E	123	6.4	760	1.2	100	MM1	VIS	23 00	39.78S	156.01E	87	6.1	750	0.7	100	MM1	VIS
23 00	37.56S	156.28E	65	8.4	790	1.1	100	MM1	VIS	23 00	33.02S	160.20E	128	17.9	780	2.3	100	MM1	VIS
23 00	38.92S	162.62E	114	9.7	740	-11.9	100	MM1	VIS	23 00	39.55S	166.40E	137	5.3	810	1.9	100	MM1	VIS
23 00	34.58S	161.40E	119																



第9図 CWES による風ベクトルの出力例. 1978年7月19日 00 Z.

あるいは雲解析用資料として使用されている。第9図に出力例を示す。

月毎にまとめて、気象衛星センター観測月報(Monthly Report of Meteorological Satellite Center)に掲載

1980年3月

される(第3表に例を示す)。

1978年4月6日から1979年11月30日までのデータは、FGGE用 Level II-b データとして世界データセンター(WDC-A と WDC-B, 第1節で述べた)に保存され

第4表 飛行機で測定した熱帯の海洋性積雲の移動と周辺の風との比較結果(Hasler *et al.*, 1975).

	雲の移動速度	V _{CLOUD} -V _{WIND}			
		150m	雲底	中間	雲頂
例数*	40	13	21	18	17
平均	8.7 m/sec	1.3	1.2	3.1	6.1
標準偏差	3.6 m/sec	0.6	0.6	1.4	2.5
67%の場合が含まれる差の大きさ	—	1.5	1.3	3.6	7.0

* 40個の積雲について追跡が行なわれたが、そのうち1時間以上追跡あるいは周辺の風の測定を行なったものについて差を示したので、例数が場合によって異なっている。
本表は原論文の第1表から筆者が必要なデータのみ抽出して再編成した。

第5表 飛行機で測定した絹雲の移動と周辺の風との比較結果 (Hasler *et al.*, 1975).

	雲の移動速度	V _{CLOUD} -V _{WIND}			
		雲の層の平均	雲底	中間	雲頂
例数	5	5	5	5	5
平均 (最大-最小)	11.0 m/sec (20.5-8.1)	1.6	2.2	2.0	2.8
標準偏差	5.4	0.9	1.8	1.0	1.1

本表は原論文の第2表から筆者が必要なデータのみ抽出して再編成した。

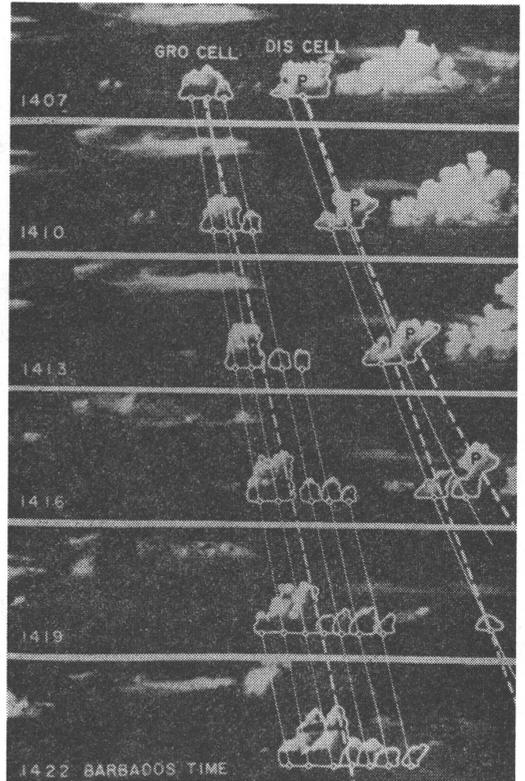
る。

3. 衛星画像から得られた風ベクトルの性質と精度

3.1. 雲の移動は風を表現しているか

衛星の画像から算出された雲の移動量を風の値として使用しようとするのであるが、それでは雲の移動が風をどの程度表現しているのでしょうか。本節では、まず静止衛星画像からの風計算という立場を離れて、雲の移動と周辺の風との関連について調査した興味ある論文を2編紹介することにより、後で風と雲の移動を考える際の参考としたい。次に、CWES で算出された衛星風とレーウィン風を直接比較した結果を示す。

Hasler *et al.* (1977) は、赤道貿易風帯の背の低い積雲について飛行機観測による雲の移動量の測定と風の測定を同時に行なって、その両者の関係を確かめた。この

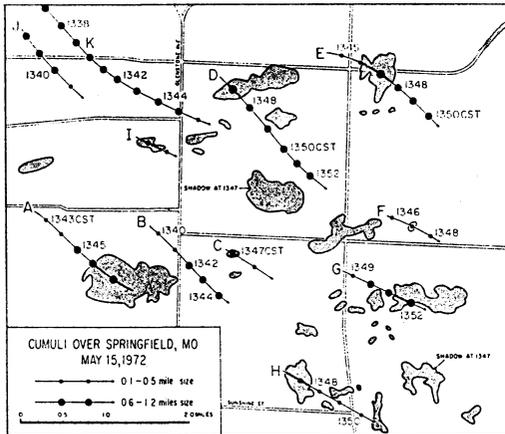


第10図 3分間隔で水平方向から撮影された複数の小積雲群 (multi-turret cumulus cells) の発達と消滅の過程。1969年7月18日、1407-1422に南に向けて撮影された (Fujita *et al.*, 1975).

両者の測定は、位置測定精度の良い慣性航法システム (INS*) を搭載した同一航空機により同時に行なわれた。追跡された積雲の大きさは水平方向には3ないし15 km のひろがりを持ったもので、雲底高度は約 960 mb、雲頂高度は大部分が 600~700 mb であった。風の測定は、150 m の高度、雲底高度、雲の中程の高度および雲頂高度で行なわれた。その結果は、第4表に示すように1時間以上追跡した例では、67%が上記のそれぞれの高度で両者の差が1.5, 1.3, 3.6および 7.0 m/sec 以下であった。ここで測定の対象となった積雲の大きさは、衛星での測定対象となる積雲よりやや小さめではあるが、雲の移動は雲底付近の風とよく一致していることを示している。

Hasler *et al.* (1977) は同じ実験で絹雲の追跡比較を

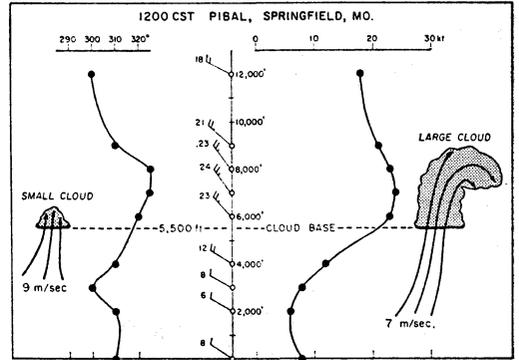
* INS; Inertial Navigation System



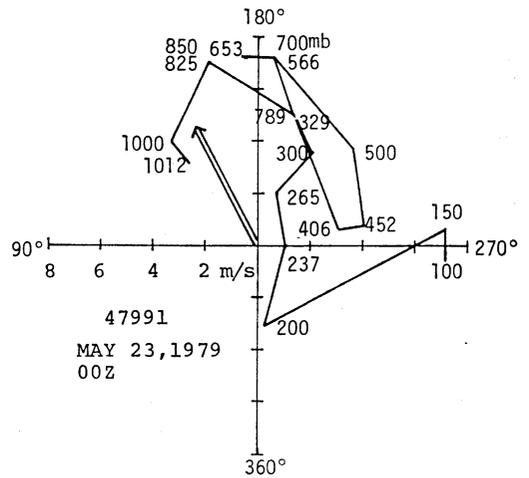
第11図 Springfield 上空の雲の軌跡。いくつかの軌跡はSの字をひきのばしたように彎曲している (Fujita et al., 1975).

行なっている (第5表). 雲頂高度 8.5 ないし 12.8km の5個の絹雲が東メキシコ湾とパナマ北東のカリブ海上で追跡された. 第5表に示すように, 雲の層の平均風とのベクトル差の大きさが約 1.6 m/sec であった. 雲の層のどの部分とよく一致するかという有意な情報は得られていない.

Fujita et al. (1975) は, 15秒毎の航空写真により散在した小さな積雲の追跡を Springfield で行なった. 第10図にその時の雲の航空写真, 第11図に地表に投影した雲の軌跡を示す. 1分毎の雲の幾何学的中心が, 雲の大きさによって大きな点あるいは小さな点によって示されている. 雲の軌跡は何かSの字をひきのばした様に見える. 雲が成長するに従って北西成分を持った運動をしていることがわかった. このS型の軌跡は, Springfield での Pibal 観測と比べることにより説明できる. 第12図に示すように, 雲底の高さ 5,500 ft の下方では風向は 310°, 上方では325°である. このような風の鉛直シアが高い雲の軌跡をわずかに右に曲げる. 上昇気流が弱まって雲頂高度が低くなった時には雲底の下方の上昇気流の部分 (原文では root) の流れに影響され左に偏り, この結果S字型の雲の軌跡を形成する. この論文の著者 (Fujita et al., 1975) は, 雲の速度は単純には周辺の風とは見なし得ないが, 雲力学, 雲の高さ, 雲の型などの雲のパラメータに関する基礎的知識があれば風の推定における誤差を小さくできる, と述べている. この例は, 静止衛星画像からの風計算で対象とする追跡雲よりはかなり小さい積雲についてであり, このままで衛星の雲移



第12図 1972年5月15日に Springfield 上空で追跡された積雲のモデル (Fujita et al., 1975).

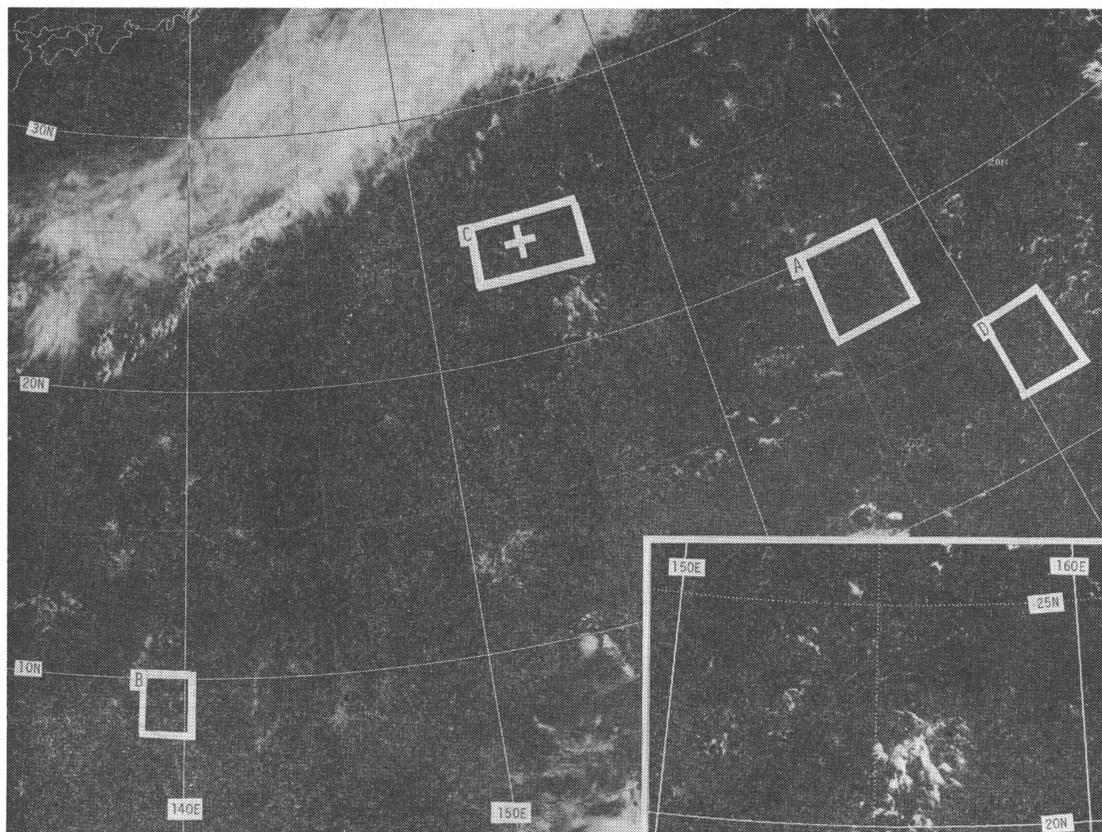


第13図 南鳥島で観測された高層風 hod グラフと, その周辺で MM-1 法で算出された衛星風 24個の平均風 (矢印). 1,000 mb と 850mb の間の高層風と一致している. 第14図の C で示した付近. 1979年5月23日 00Z

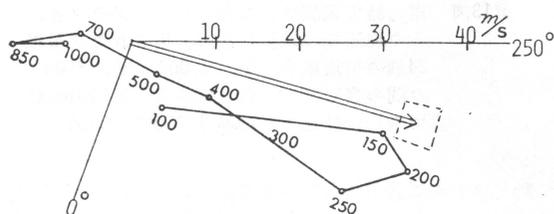
動ベクトルに適用できるかどうかはわからないが, 周辺の風との関係の複雑さを示唆しているものである.

ここで示した二つの例は, 単純ではないが雲の移動は何らかの形で周辺の風を表現していることを示している.

次に, CWES で算出された衛星風と高層観測風とを直接比較した結果を示す. まず, 第13図に, 南鳥島の周辺 (200 km 以内) で24個の背の低い積雲の追跡の結果得られた衛星風の平均値 (矢印) と同時刻の南鳥島の高層風の hod グラフを示す. 観測された積雲は, 第14図の C の符号で示されている積雲群であり雲頂高度は 800



第14図 小領域で多数の雲の追跡を行なった時の衛星写真, A, B, CおよびDの符号で示した領域は第6表の各符号に対応している. 十字のマークは高層観測点南鳥島. 右下は C で示した領域付近の拡大写真. 1979年5月23日 00Z 可視画像.



第15図 グアム島で観測された高層風 hodograph と, FL 法で追跡された40個の高層風の平均値. 150~200 mb 高層観測風とおおむね一致している. 1978年5月11日 00Z (小花, 1979による).

mb 程度である. 南鳥島のレーウィン風の 1,000~850 mb の風とおおむね一致していることがわかる. 第14図 ABでもそれぞれ多数の衛星風の算出が行なわれ, 同様の結果が得られている.

次に, 第14図ABCおよびDで算出した多数の MM-1 算出風についてそれらのバラツキを調べたのが第6表である. 別の日の4例についても示されているが, いずれの場合も, 標準偏差で風向は 10° 前後, 風速は 1 m/sec 程度のバラツキを持っている. 第6表の項番4および8 (図中の符号Dに対応) は, 対応するレーウィン風は無いが特に一様な風の領域を特に集中して衛星風の算出を行なったものであり, バラツキは他のものよりかなり小さくなっている. これらの結果は, CWES の風計算結果が, 下層風の場合 1 m/sec, 10° 程度のバラツキで安定して算出されていることを示すものである. 系統的な誤差については別に 3.2.2 節で述べる.

上層風 (FL 算出風) について, 上層風の hodograph と衛星風 (40個の平均風) の比較図を第15図に示す (小花, 1979による). この結果も両者は 150~200 mb の風とおおむね一致している. 小花 (1979) は, FL の雲追

第6表 小領域で多数の雲を追跡した結果

観測日時	1979年5月17日 00 Z				1979年5月23日 00 z			
項番	1	2	3	4	5	6	7	8
例数	17	8	23	18	14	17	24	34
追跡雲のおよその位置 (第14図の符号)	22°(N) 153°(E)	20° 165°	13° 144°	15° 173°	19° 166° (A)	9° 139° (B)	24° 154° (C)	14° 171° (D)
風向* (度)	92 9.4	73 8.5	64 10.7	68 3.0	94 10.3	63 11.5	153 12.1	69 6.0
風速* (m/sec)	10.1 0.92	10.4 1.03	6.4 0.63	12.8 0.70	5.1 0.47	2.9 0.84	5.1 1.27	7.0 0.39
u 成分* (m/sec)	-9.9 1.04	-9.8 1.28	-5.6 0.58	-11.8 0.76	-5.0 0.46	-2.5 0.64	-2.2 1.02	-6.5 0.43
v 成分* (m/sec)	0.3 1.49	-2.9 1.32	-2.8 1.20	-4.7 0.60	0.3 0.93	-1.3 0.82	4.5 1.34	-2.6 0.73
雲頂高度* (mb)	818 48	862 14	806 42	836 16	811 42	742 41	813 40	831 19
近傍の高層観測点	南鳥島	Wake	Guam	—	Wake	Yap	南鳥島	—

* 印の各項目の上段は平均値，下段は標準偏差値を表す。

跡時に生ずるパーソナルエラーの調査の中で標準偏差の値で、1.1~4.8 m/sec, 3.9~7.6° のバラツキを持っていることを示している。この結果も、上層風はかなり小さいバラツキで安定して算出されていることを示している。

CWES による算出風ベクトルがレーウィン風とよく合っていることはいくつかの例で示したが、現業で算出されている多くの風ベクトルについてはどのような信頼性があるか以下検討する。

なお、精度に関する総合的な文献調査の結果は気象衛星センター技術報告に掲載される予定である（浜田, 1979 B）。

3.2. 誤差を生ずる原因

前節で述べたように、雲の移動は風を表現しており、また高層観測風とよく一致している。しかしながら、一定の誤差を持っていることも確かであろう。誤差を生ずる原因は複雑で単純ではないが、現在までの調査結果といくつかの文献から次の三つが誤差源として重要なものである。

- (1) 追跡雲の選定が不適当である場合の誤差
 - (2) 観測システムが持っている誤差
 - (3) 測定された雲移動ベクトルに不適当な高度を付加した場合
- (3) はベクトル算出の場合の誤差ではないが、ある高度の風として見れば実質的には誤差となる。後述するように、これが風計算結果の中で最も大きな誤差要因となっている。

3.2.1. 追跡雲の選定が不適当である場合の誤差

Hubert *et al.* (1971) は、追跡する雲の選定に際し非移流的 (nonadvective) メカニズムにより移動している雲と非活動的追跡雲 (passive tracers) をよく見極めて、後者を選定しなければならないことを強調している。鉛直方向への発達の大い積乱雲、地形性の雲、重力波による雲など周辺の風と雲の移動が一致しないものは、追跡雲として選定しないようにする必要がある。総観場と矛盾しない雲の移動を追跡することが大切であるが、CWES の MM-1 法では雲の移動をムービーにより直接見る機能が無いことと、直接雲の選定を行なう画面が

小領域(約 600 km 四方)であるため、雲の形状と雲の高度についてのオペレータの高度な判断能力によるところが大きい。

MM-1 法では、下層雲のみの追跡を行なっている。FL 法では、1 時間30分の 4 枚の雲写真を投影し全体の流れを把握して、主として絹雲の追跡を行なっている。いずれの場合も、オペレータの熟練によって追跡雲の選定は均質化されてきている。

3.2.2. 観測システムが持っている誤差.

この誤差は、系統的誤差として表われることが多く、原因が判明すればシステムの改良により誤差を取り除くことができる。この誤差は、画像間の位置合わせの誤差と、パターンマッチングの誤差 (FL 法の場合はオペレータの追跡の誤差) が主なものである。

(1) 画像間の位置合わせの誤差

風計算処理では、時系列の複数の画像を使用し移動ベクトルを算出するため、それらの画像間の位置合わせが良くないとベクトルの誤差となる。CWES の場合、実際の位置合わせは各画像毎に独立に衛星の軌道と姿勢の予測情報に基づいて画像上の位置を地球上の位置(緯経度値)に変換することにより行なわれている。したがって、この時に生じる画面上の位置誤差の大部分は、使用する衛星の軌道と姿勢の誤差に起因するものである。衛星の軌道(すなわち位置)の誤差は単に画面上の平行移動の誤差となるが、衛星の姿勢の誤差は衛星から地球を見る方向(視線方向)の誤差となるため大きな平行移動と回転の誤差となる。衛星の姿勢を正確に決定予測するために、可視画像上のランドマーク(島、海岸線、湖などの地形)の位置を正確に決めるランドマークマッチング処理が別に行なわれている。これらの公称誤差は、総合して可視画像で 4 画素(視線の角度で 0.008 度、SSP で 5 km の長さに相当)以内である。

上記の誤差を風ベクトル算出の場合について考えてみると、30分間隔の画像間に可視画像で 4 画素の誤差があると、SSP で風速にして 2.8 m/sec の誤差となる。しかしながら、風ベクトルの算出は画像間の移動量として表現されるので、軌道・姿勢(とりわけ姿勢)の変化傾向が良好に予測されていれば、位置合わせの誤差をさらに小さくできる。

前田ら(1979)によると、MM-1 法で使用している 30分間隔の 2 枚のひまわりの画像(B, C 画像)間に、可視画像で 2 ラインの相対的画像位置合わせ誤差があることがわかった。この位置合わせ誤差は、SSP で風速に

して 1.4 m/sec に相当する。この誤差は、あとで示すレーウィン風と衛星風との比較の結果に明瞭に現われている。赤外全球画像により地球縁辺を検出することによって、これらの位置合わせ誤差を修正することが可能であって、現在気象衛星センターではこの修正を自動的に計算機処理で行なうようにシステムの改良を検討中である。

(2) パターンマッチングによる誤差

MM-1 法におけるパターンマッチングの誤差は、追跡雲の選定が良くないためにうまく追跡できなかったり、別の雲とマッチングがとれる場合、水平方向の画素間隔によるマッチング位置の量子化の誤差が考えられる。前者は、良好な雲の選定と事後のチェックにより避けられるので大きな問題ではない。後者の量子化の誤差は、マッチング位置を画素間で補間することにより補正されている。

FL 法においては追跡の誤差がこれに対応する。これについては小花(1979)が詳細に調査検討しており、いくつかの型の雲パターンについて 20 名のオペレータの追跡結果のバラツキを計算した。それによると、絹雲を追跡した場合のバラツキを標準偏差で見ると、1.1~4.8 m/sec の間に分布しているが大部分は 2 m/sec 前後以下である。4.8 m/sec のものは特に追跡困難なもので、追跡雲として不適当なので、通常現業では指定しない雲であったようだ。FL 法の場合は、追跡が人間の手で行なわれるためこのようなバラツキを生ずることになるが、絹雲の移動速度(平均 35 m/sec 程度)から見ても大きな値ではない。

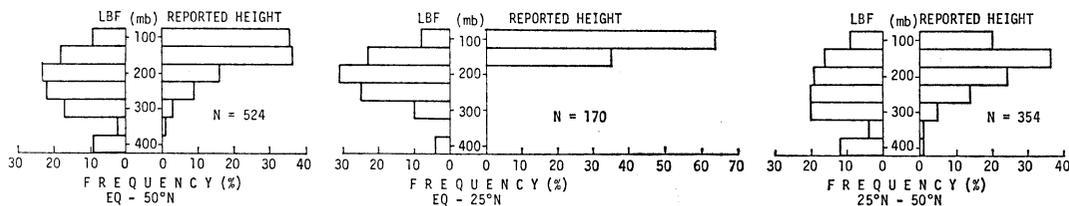
3.2.3. 測定された雲移動ベクトルに不適当な高度を付加した場合に生ずる誤差

衛星の画像を使用して測定した風ベクトルは、第 6 節のはじめでも述べたようにそのトレーサが雲という大きなものであるために、どのレベルの風を代表しているかが大きな問題である。現実には風のデータとして使用するためには、その高度を誤まって使用すれば、雲の移動ベクトルそのものに測定誤差がたとえ無くとも実質的に風ベクトルの誤差となる。

CWES で得られた風ベクトルの報じられた高度の分布を第 16 図の中に示す。上層風については、FL 法による絹雲追跡結果で付加された高度(Reported Height)は 150 mb をモードとして分布している。下層風については、大部分が MM-1 法による積雲追跡結果で付加された高度(Cloud Top Height)は 800 mb 前後に多く分

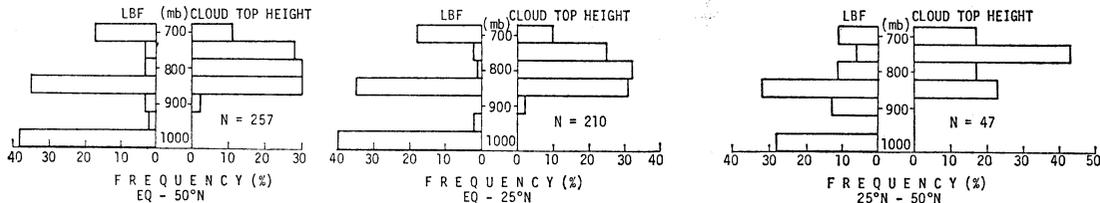
HIGH-LEVEL WINDS

MAY 21 - JUNE 8, 1979

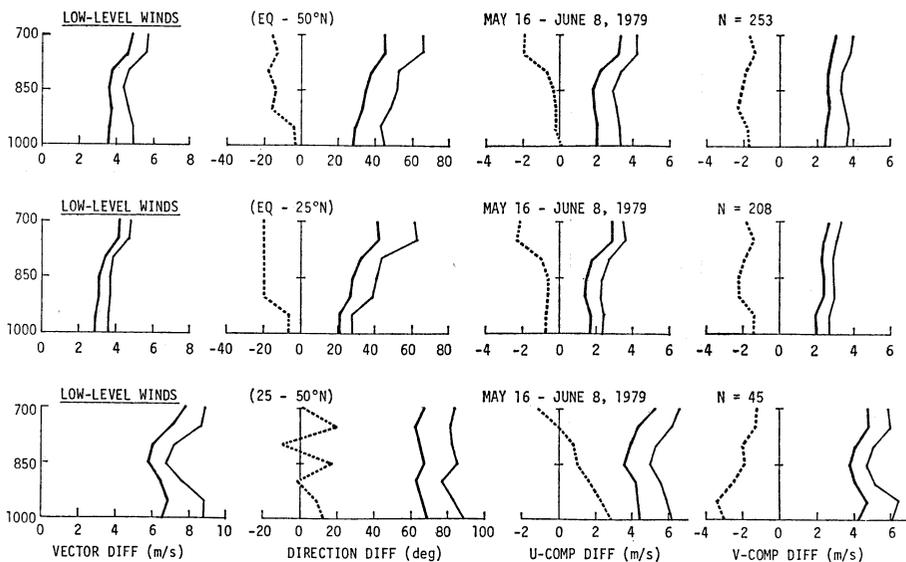


LOW-LEVEL WINDS

MAY 16 - JUNE 8, 1979



第16図 CWES で風ベクトルに付加された高度と、近く (220 km 以内) の高層観測風との比較により算出された LBF 高度の分布。高層観測風で特異点情報の得られないもののがかなりあったので、上層風では 350 mb の LBF がほとんど得られず、下層風では 700, 850, 1,000 mb 以外の LBF がほとんど得られなかった。

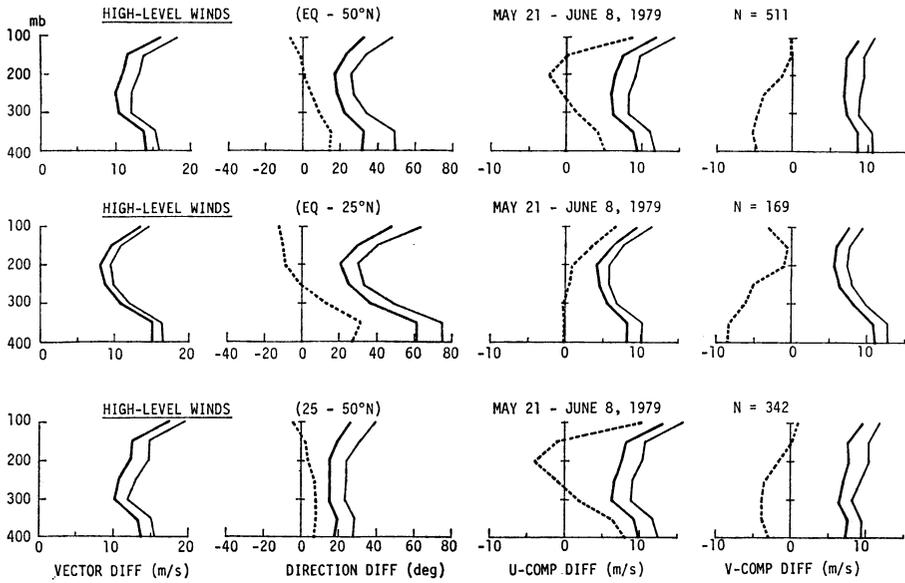


第17図 衛星風と 50 mb 毎の高層観測風との差。太線は差の絶対値の平均値、細線は差の RMS、破線は代数平均値。衛星風は雲頂高度 700 mb 以下のもののみ。比較したベクトル間の距離は 220 km 以内。

布している。この統計は雲頂高度 700 mb 以上のものについてのみ行なわれており、この他に 700 mb 以下 (高さが 700 mb より高い) の追跡雲も一部あるが、MM-1

では多くの追跡雲が 700 mb 以下である。

さて、このような高度が付加されて報じられた衛星風ベクトルは、現実にとどの高度の風を表わしているのであ



第18図 第17図と同様であるが、衛星風に付加された高度が400 mb 以下、FL 法で算出された衛星風。

第7表 レーウィン風との比較から推定した衛星風の精度

追跡雲	領域	例数	代表高度	ベクトル差 (平均)	
				7層での比較の最小値 (高度)	LBFでの比較
積雲 (Cu)	熱帯	93	850~950	2.7(1,000)	1.8
	中緯度	19	850	5.9 (850)	4.3
絹雲 (Ci)	熱帯	69	200	7.3 (200)	4.4
	中緯度	131	300	9.4 (300)	4.6

領域；熱帯 (0°~25°N), 中緯度 (25°N~50°N).

代表高度；過去の調査文献 (第2節で一部示した) と本稿に記述した CWES による結果を総合的に判断して決定した。

ベクトル差；比較ベクトル間の距離 139 km 以内のものについて示した。したがって7層での比較の最小値は第17図, 第18図の値と比べて多少小さい値になっている。

ろうか。その目安としての資料を得るため、レーウィン風と衛星風間の最適高度 (LBF)* の分布を第16図の

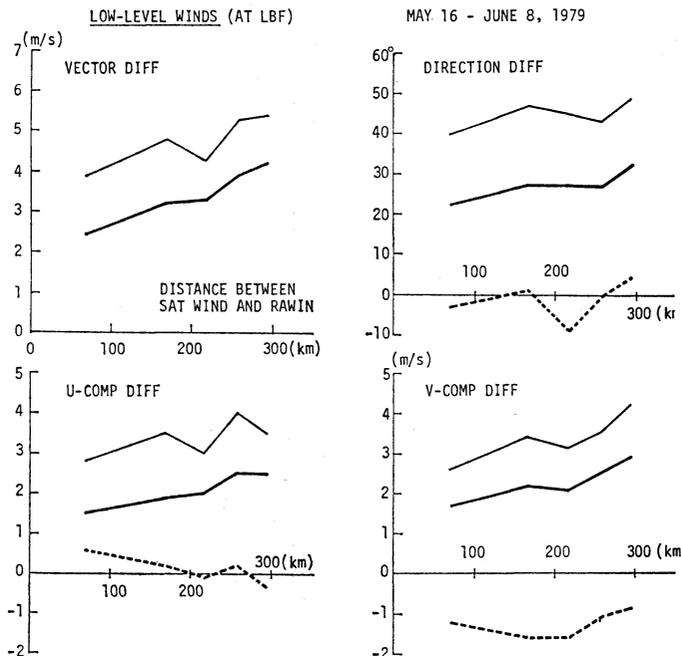
LBF のグラフで示した。ここでは、簡単のために 50mb 毎の7層で最も良く適合している高度を算出したが、上層では 350 mb のデータが、下層では 700, 850 および 1,000 mb 以外のデータが得られないことが多いので、LBF もそれ以外のところに集中している。観測された衛星風の緯度により熱帯地方と中緯度に分けたが、25°N という値は便宜的なものである。LBF がいつも正しい高度を示しているとは言いきれないが、報じられた高度をそのまま使用するよりは、目的に応じて上下層それぞれ一定の高度を与えた方が良いと思われる。

次に、各一定の高度で比較した場合を第17図と第18図に示す**。下層での比較 (第17図) では、熱帯地方では 850 mb から下層の部分、中緯度地方では 850 mb でベクトル差が小さくなっている。上層での比較 (第18図) では、熱帯地方、中緯度地方でそれぞれ 200 mb, 300 mb でベクトル差が最小となっている。

3.3. CWES により算出された衛星風の精度の推定

* LBF; Level of Best Fit. Hubert *et al.* (1971) による。高度の推定の方法がないため衛星風ベクトルと近傍のレーウィン風とベクトル差の最小となる高度を求め LBF とした。

** 本稿における衛星風とレーウィン風の比較結果における差は、すべて衛星風からレーウィン風を差し引いたものである。



第19図 下層衛星風と高層観測風との差。LBF高度での差を比較するベクトル相互間の距離の関数としてプロットした。距離帯と例数は右の表。太線は差の絶対値の平均値、細い線は差のRMS、破線は代数平均値。衛星風は雲頂高度700 mb以下のもののみ。

距離	例数
0~139 km	116
139~196	122
196~240	121
240~277	103
277~310	99
計	561

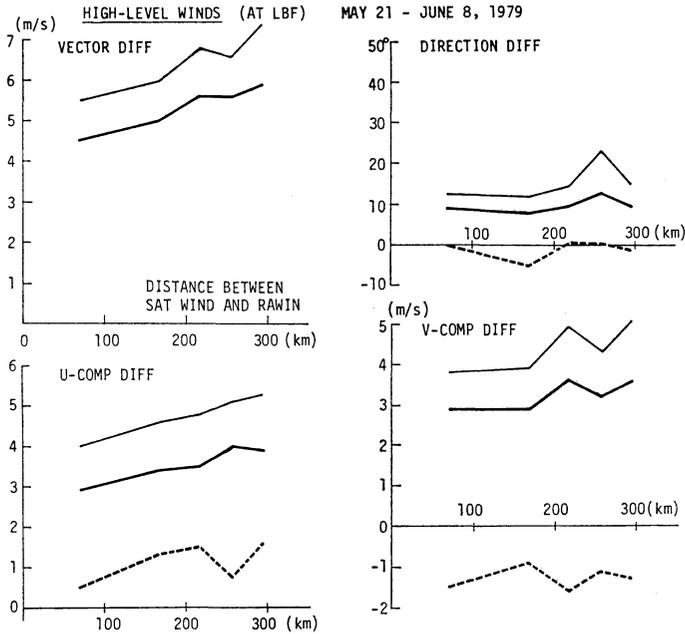
前節までに誤差要因の検討を行ってきたが、ここでCWESで得られた風ベクトルの精度を見積もってみたい。

第19図と第20図に、LBF高度におけるレーウィン風との比較結果を、比較ベクトル間(衛星風とレーウィン風間)の距離の関数として示した。それぞれ、下層風、上層風に関するものである。いずれの場合も、ベクトル差は比較ベクトル間の距離が大きくなるにつれ単調増加関数となっている。距離が小さくなるにつれて風ベクトル場の水平シアの影響が小さくなっている結果である。

第19図、第20図における大部分の比較のグラフが距離に対する単調増加関数であるが、 v 成分の代数平均が上層とも $-1.0 \sim -1.5$ m/sec付近で顕著な変化が見ら

れないが、これは第6.3節で述べた画像の位置合わせの誤差によるものであると考えられる。

次にこれまでの調査結果をまとめ、CWESにより算出された衛星風の精度を推定して、第7表に示す。風ベクトルの算出という立場からは、LBF高度での精度推定値1.8 m/sec(下層風、熱帯)および約4.5 m/sec(下層風の中緯度および上層風)を採用できる。実際に使用する場合にはLBF高度は不明であり、ある一定の高度の値として使用することになるので、7層での比較結果による差の最小値が精度の目安となる。しかしながらこれらの比較結果は、先に述べた位置合わせの系統的誤差、両観測法の相違による差、風の場の水平シア・鉛直シアの影響などを含んでおり、それぞれの利用目的に応じてさらに良い精度のデータとして利用できる。そ



第20図 第19図と同様であるが、FL法により算出された上層衛星風に関するグラフ。距離帯と例数は右の表。

距離	例数
km	
0~139	184
139~196	195
196~240	212
240~277	170
277~310	182
計	943

のための注意事項などを次節に述べる。

3.4. 衛星風ベクトルの限界と使用上の注意

これまでの考察で衛星風の性質とその精度の一端が明らかになった。ここで、これらのデータを利用することを前提として衛星風の限界と、それを踏まえた上で利用する場合の注意を述べる。

衛星風ベクトルは、今まで使用されてきている気球を飛揚することによって風の測定を行なうのとは全く異なる方法でベクトルの算出を行なっている。まず、トレーサの大きさと追跡時間が、気球の場合は数 m と数分に対して衛星風の場合は数 10 km と 30 分ないし 1 時間 30 分であり、時間的・空間的スケールが異なっている。また、自然に存在するターゲットである雲または雲のパターンを追跡するのであるから、広範な海上での風のデータが得られるとは言っても雲の存在しない地域では算出は不可能である。以下に衛星風ベクトルの限界といった

ものを挙げておく。これらの限界をよく認識した上で衛星風ベクトルを利用する必要があり、このことは、現在ある高層観測を衛星の風ベクトルで置き換えることにはできないことを示しており、むしろ既存の高層観測風と衛星風は相補い合って今まで以上に密な風データを利用者に提供するものである。

(1) データの算出個数

限られた時間内に算出するための人間の処理能力、計算時間等の制約から、データの算出個数が限られてくる。CWES では観測正時 (00 Z, 12 Z) から 4 時間以内に配信することになっており、MM-1 法、FL 法合わせて 360 ベクトル程度が観測毎に配信されている。

(2) 算出領域

雲の無い地域では算出することは不可能である。じょう乱の近傍では鉛直方向に発達した雲が多く下層風は得られない。このため下層の風の解析を衛星風のみで行な

うと、じょう乱を弱く見積もってしまう可能性がある。上層雲の場合でも下層雲と重なって追跡の困難な場合がある。一般的に言って、気圧変化の大きい場所では衛星風を得ることは困難である。

(3) 得られる風ベクトルの高度分解能

追跡に適する雲は余り厚くない積雲と絹雲であり、既に表示したように前者は下層風 (850~950 mb) を、後者は上層風 (200~300 mb) を表わしている。中層雲で追跡に適する雲を見出すことは現在のところ困難であって、中層の風を得ることはほとんどできない。

衛星風のこれらの限界を認識した上で、利用する上での留意事項を以下に示す。

(1) ある特定の日時や領域の衛星風を使用する場合には、レーウィン観測風など他の手段で得られた風のデータを併用して比較のチェックや高度の推定を行なうなどすれば、高度の差による誤差を小さくすることができる。

(2) 大量に計算機で処理するとき、下層風で報じられている高度は雲頂高度、上層風で報じられている高度は鉛直温度分布データ (気候値) から算出した圏界面高度であるので、第7表を参考にしてある一定の高度として使用する。

(3) 雲頂高度が 400~600 mb 程度である風は、鉛直に発達した雲かあるいは薄い絹雲の下にある積雲を追跡した可能性があるため、それらを使用する場合特に注意した方がよい。

(4) 現在 CWES では数値予報値や解析値との比較チェックなどは行っていないので、場合によってはそのようなチェックも考慮する。

(5) 画像の位置合わせ誤差による南北成分 (v 成分) に関する系統的な誤差は約 -1.4 m/sec (SSP) である。この値は、緯経度値の関数 (正確には衛星の位置なども効いてくる) であり東西成分にも多少影響があるが、簡易的には v 成分に $+1.4$ m/sec とするだけで使用できる。近い将来システムの改良が行なわれこの系統的な誤差は解消される予定である。

4. おわりに

CWES が現業的に風のデータの算出・配信を行なうようになり1年半以上が経過し、かなりのデータが蓄積されてきた。その間、ある時は試行錯誤を行ないながらベクトル評価用のパラメータの検討・変更を行ない、また、現業のオペレーションも何度かその方法を変更して

きた。当初1日500個程度しか配信されなかった風ベクトルも、現業用のプログラムの修正とオペレーターの努力のおかげで750個まで増加している。

一方、利用という点では気象庁電子計算室で数値予報の入力データとしての使用を検討してきたが、10月からはいよいよルーチンのデータとして使われ始めた。この他、オーストラリアや西ドイツからも利用しているという情報を入手している。本稿ではレーウィンとの比較結果を中心に述べ、実際に利用した例は示さなかったが、オーストラリアでの解析では、上層風は200 mb の入力データとして有効であることを示している。今後、現業の数値予報だけでなく多くの研究者の方々の使用を願うものである。

謝辞

本稿をまとめるにあたって、気象衛星センター小平所長はじめ職員の皆様の有益な助言を頂きました。解析課嶋村克主任技術専門官には本稿の構成について貴重な御意見を頂き、解析課小花隆司主任技術専門官には FL 算出風の精度に関し資料を提供し助言を頂いたことを付記し、深く感謝致します。

文献

- 阿部勝宏, 山本孝二, 1979: 静止気象衛星“ひまわり”の赤外放射データによる海面水温の算出, 天気, 26, 493-507.
- Cooley, J.W. and J.W. Tukey, 1965: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Mathematics of computation, 19, 297-301.
- Fujita, T.T., E.W. Pearl and W.E. Shenk, 1975: Satellite tracked cumulus velocities, J. Appl. Met., 14, 407-413.
- 浜田忠昭, 1979 A: 風計算, GMS システム総合報告 II データ処理解説編第3章, 気象衛星センター技術報告, 特別号 II-2, 15-42, 昭和54年3月.
- , 1979 B: 静止衛星画像から雲移動量を求め風を推定する場合の精度について, 気象衛星センター技術報告投稿中.
- , 田崎允一, 齊藤 優, 1977: 静止気象衛星画像から有効な雲移動量を算出するための基礎調査—追跡に適する雲パターン—, 日本気象学会春季大会講演予稿集, 31, 109.
- Hamada, T. and K. Watanabe, 1978: Determination of winds from geostationary satellite data, Present technique (Lecture 8 A), Presented at the WMO/UN Regional Training Seminar on the Interpretation, Analysis and Use of Meteor-

- logical Satellite Data, Tokyo, Japan, 23 October to 2 November 1978.
- Hasler, A.F., W.E. Shenk and W.C. Skillman, 1977: Wind estimates from cloud motions: Results from Phases I, II and III of an In Situ aircraft verification experiment, *J. Appl. Met.*, 16, 812-815.
- Habert, L. F. and L. F. Whitney, 1971: Wind Estimation from Geostationary Satellite Pictures, *mon, Wea. Rev.*, 99, 665-672.
- 加藤一靖, 1979: 雲頂高度, GMS システム総合報告Ⅱ データ処理解説編第4章, 気象衛星センター技術報告, 特別号, II-2, 43-57, 昭和54年3月.
- 小平信彦, 村山信彦, 山下 洋, 河野 毅, 1978: 静止気象衛星 GMS (ひまわり), *天気*, 25, 245-268.
- Leese, J.A., C.S. Novak and B.B. Clark, 1971: An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, *J. Appl. Met.*, 10, 118-132.
- 前田紀彦, 高橋大知, 1979: GMS 画像の蝕オペレーション等に関連して発生する画像ズレの量について (仮題), 気象衛星センター技術報告投稿予定.
- 新田 尚, 1977: FGGE 観測体系と研究計画の現状, *天気*, 24, 751-768.
- , 1979: 最近の気象資料, II, 特別観測資料・国際協力事業の資料, *天気*, 26, 463-466.
- 小花隆司, 1979: LF 法風計算に伴なう誤差について, 研究時報投稿中.
- 鈴木一雄, 1980: 静止気象衛星「ひまわり」の赤外放射データによる雲頂高度の計算, *天気* 掲載予定.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
日本気象学会昭和55年総会・春季大会	昭和55年5月21日～23日	日本気象学会	日本教育会館
第24回山の気象シンポジウム	昭和55年6月28日		気象庁第1会議室
第17回理工学における同位元素研究発表会	昭和55年6月30日～7月2日		国立教育会館