

自動算出法の現業用上層風算出システムへの適用と 算出ベクトルの特性

Application of Automatic Method to Estimating High-level Cloud Motion Wind in Operational System and the Characteristics of the Resultant Wind Vectors.

大島 隆*
Takashi Ohshima

Abstract

In order to apply the automatic method for calculating the high-level cloud motion winds to operational system at Meteorological Satellite Center (MSC), the improvement of the algorithm for calculating the high-level wind was carried out and the characteristics of the resultant winds derived automatically were investigated.

Since the cloud motion wind calculation began routinely at MSC in April 1978, the high-level clouds such as cirrus had been manually selected and tracked on a digitizer board by projecting repeatedly four images taken at 30-minute intervals, which are contained in a loop-film. In spite of making many efforts to increase the number of the winds and to improve the quality of the wind, it remained the following problems to be solved. The first is the variation of the quality and the quantity of resultant winds caused by the degree of skillfulness of an analyst. The second is that the number of the resultant wind vectors is insufficient for the request.

It was needed that an automatic method was adopted to solve these problems. To calculate the high-level wind automatically in this investigation, an Automatic target cloud Selection (AS) method was used to select the target of the high-level cloud, and cross-correlation technique was used to track the moving cloud target. These method is used to calculate the low-level wind operationally, and was applied to calculate the high-level wind by modifying the algorithm and the parameter for cirrus level cloud target.

The high-level winds from automatic method was compared with those from Loop-Film (LF) method in order to investigate the characteristics of the automatic calculated wind.

The tracked winds from cross-correlation technique had almost the same characteristics as those from LF method, though there were a few cases in which the cloud motion wind was not calculated when the target cloud moved very fast especially in the middle latitude. The horizontal density of the AS winds was more than that of the LF winds. The mean vector difference between the AS winds and the radiosonde winds was a little bigger than that between LF winds and the radiosonde winds, because the AS winds were compared without rejecting

*気象衛星センターシステム管理課
Meteorological Satellite Center

erroneous winds by an analyst.

It was found that the automatic method could be used routinely adding the manual calculated winds and checking the quality of winds by an analyst.

MSC adopted the automatic method in place of the LF method from March 1, 1987, and this method has been used operationally in combination with man-machine interactive method on image processing console. The resultant high-level winds have increased in number by about 30 percent since then.

1. はじめに

気象衛星センター (MSC) では、第一回地球大気開発計画全球実験 (FGGE, 1978年12月～1979年11月) を契機として、1978年4月に風ベクトル算出業務を開始した。この時以来、上層風と下層風の2層のベクトルを算出し、気象庁の数値予報課や、GTS回線を用いて世界各国に配信している。当初は9時と21時の1日2回の処理を行っていたが、1987年3月の新計算機システムの導入を機会に、3時と15時を加えて1日4回の処理を行っている。ただし、3時と15時は、当面北半球のみの処理である。

MSCにおける下層風の算出は、運用開始当初には、画像処理装置上で解析者が撮像時刻の異なる画像を見ながら下層雲 (積雲等) を指定することにより移動の始点を決定し、計算機によって相互相関法を用いたマッチングによる雲の移動の追跡を行っていた。しかし、この方法では解析者が移動の始点を指定するのにかなりの時間を必要とするため風ベクトルの算出数も限られ、また、解析者の個人差によって算出されるベクトルの性質の違いが出ていた。そこで赤外ヒストグラム解析を基本とした指定雲の選択方法 (自動雲指定法、ASA法と称する) を開発 (浜田他、1984) し、1982年4月に下層風算出のための雲指定から追跡までの処理の自動化を行った。これにより、算出数が大幅に増加するとともに、算出ベクトルの個人差の問題も解消した。

上層風の算出については、30分間隔で撮像した4枚連続のVISSR画像を用いてエンドレスの35mmループレフィルムを作成し、これを数値化座標装置上に投影し、解析者が投影画像を見ながら上層雲 (巻雲) の移動の始点と終点を指定することにより行っていた。運用開始以来の経験の蓄積と種々の改善 (小花、1979)、(Hamada, 1982a, and, 1982b)、(市沢、1983)、(井石他、1985) によって、精度の向上と算出数の増加が図られてきたが、下層風と同様に上層風の場合も、解

析者の個人差によって算出されるベクトルの性質の違い (井石他、1985) があり、特にベクトルの算出数が限られることが課題となっていた。従って、上層風の算出にどの程度、計算機の自動化が図れるかの調査が急がれていた。

雲移動風の算出を計算機で自動的に行う方法は、下層風算出に関しては、各衛星運用機関で既に現業化されている。NESDISでは、下層風算出については早くから自動化を図り、赤外画像のヒストグラムを使用した雲指定と相互相関法によるマッチングを用いて現業的に算出している (Whitney, 1983)。ESAでは、FGGEの当初から赤外と可視データ、または赤外と水蒸気データによる2次元ヒストグラム解析を用いた雲の高度の決定、及び相互相関法による追跡を現業的に行っている (Bowen, 他、1979)。これらの自動で算出されたベクトルは、対話型画像処理装置やベクトルプロット図などを使って、解析者が不良ベクトルを削除するような品質管理を行った上でGTS回線に出力されている。

これに対して、上層風の自動算出については、これまで現業的には、ESAが下層風と同じアルゴリズムを使用して自動的に行っているだけであった。ESAの風ベクトル算出システムは、MSCやNESDISのように上層風と下層風で別々の異なった算出方法を用いているのではなく、雲の移動の追跡はその高度に関係なくセグメント (32ピクセル×32ライン) と呼ばれる画像単位で行い、これとは別に行われるセグメント処理で風ベクトルの高度が決定され、その高度の結果として、上、中、下層風として分類される方式である。NESDISは、当初はMSCと同じようなループレフィルム法を使用していたが、1982年7月からはMCIDASを用いて、解析者が上層雲の移動を追跡する方法を採用し現在に至っている (Whitney, 1983)。

雲移動風を算出する際の雲指定を自動的に行う方法として、これまでにヒストグラム法、クラスタリング法、雲形判別法が調査されてきた。これらの方法のう

ち、ヒストグラム法は、輝度レベルから得られる種々の情報（最低温度、標準偏差等）を用いて人間の直観的な判断に訴えやすく、最も多く現業で使用されている。一方、他の方法については、現業化という点でいくつかの難しさが指摘されており、これらについては、加藤（1983）や浜田、他（1984）によって簡潔にまとめられている。即ち、現業化する際の問題点として、まずクラスタリング法については、個々の雲ではなくグループの輝度レベルの中心を追跡するため、結果の良否について視覚的な評価が難しいこと、次に、雲形判別法については、雲指定のための雲形判別処理に計算時間がかかること、その精度が可視データから得られる雲特徴パラメータの太陽天頂角による正規化の方法に依存し、この正規化のための処理にさらに時間を要することなどである。

また、指定された雲の追跡を自動で行う方法に関して、上層風を対象とした調査を Endlich 他（1981）が行っている。この調査によると、42例について同じ上層雲を、クラスタリング法と相互相関法を用いて追跡して両ベクトルを比較し、これらの差が非常に小さいという結果（風速差の平均 1.3m/s 、風向差の平均 3° ）を得ている。

今回の開発調査では、1987年3月1日の計算機更新から現業での使用が可能なこと、そのためには夜間も使用できるように赤外画像だけで処理が可能なることを前提とした。従って、開発調査期間に限られているため、

全く新しい手法の導入は避け、上層風の雲指定には、既下層風算出に使用している赤外ヒストグラム解析による自動雲指定の手法を一部改良して適用し、また、指定雲の追跡には、相互相関法のマッチングパラメータを上層風用に調整した手法を採用することとし、それらがどの程度現業に使用できるかの調査を行うことにした。そのために、まず雲指定アルゴリズムの一部改良の検討と、ヒストグラム解析やマッチングに使用するパラメータの調整のための予備調査を行った。次に、自動算出された上層風ベクトルの性質を調査し、現業にどのように導入するかを決定するための本調査を行った。これらの調査のうち、主として本調査についてまとめたものが本稿である。なお、これらの調査は、主に旧計算機（F230-75）を用いて行ったが、本稿をまとめるにあたり、新計算機（M380S）を使用して、データの再作成などを行った。

2. 上層風算出の自動化

2.1. 自動雲指定の上層風算出への適用

下層風の算出のために開発された自動雲指定法については、浜田、他（1984）に述べられており、また、新計算機で現在用いている自動雲指定法については、気象衛星センター（1988）に記述されているので、詳細はこれらの文献にゆずる。ここでは、与えられた雲指定候補点が上層風の追跡に適しているかどうかを判断するための赤外ヒストグラム解析についてのみ述べ

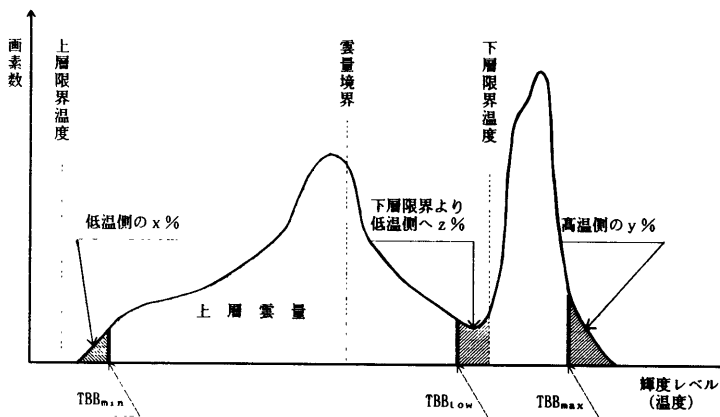


Fig. 1 Parameters for histogram analysis of Infra-red brightness temperature.

Table 1 赤外ヒストグラム解析に用いる雲指定点選択パラメータ

あらかじめ設定するパラメータ		下 層 風	上 層 風
衛星天頂角 (風ベクトル算出領域の設定)		60度	
太陽天頂角 (風ベクトル算出領域の設定)		85度	
解析領域 (ヒストグラム解析を行う領域)	可視	17ピクセル X9ライン	—
	赤外	32ピクセル X32ライン	32ピクセル X32ライン
上層限界温度決定気圧面* (選択雲の上層限界値)	50°N~25°N 25°N~25°S 25°S~50°S	600mb / 650mb	150mb 圏界面 150mb
下層限界温度決定気圧面 (選択雲の下層限界値)	50°N~25°N 25°N~25°S 25°S~50°S	950mb	500mb 450mb 500mb
雲量境界温度決定気圧面* (雲量算出の境界)	50°N~25°N 25°N~25°S 25°S~50°S	850mb	500mb 450mb 500mb
x (TBBmin を決定するパラメータ)		0.1%	
y (TBBmax を決定するパラメータ)		99.9%	
z (TBBlow を決定するパラメータ)		1.0%	
T ₁ (雲の存在する温度範囲の最少幅)		2°C	2°C
T ₂ (雲の存在する温度範囲の最大幅)		35°C	60°C
Cmin (解析領域の雲量の最少値)*		1%	5%
Cmax (解析領域の雲量の最大値)*		100%	99%

赤外ヒストグラムから算出するパラメータ	
TBBmin	: 低温側から累積してx%に達する温度 (最低温度)
TBBmax	: 高温側から累積してy%に達する温度 (最高温度)
TBBlow	: 下層限界から低温側に累積してz%に達する温度 (雲最低温度に相当)
Camt	: 雲量境界より上層の雲量*

る。

ヒストグラム解析に用いるパラメータの概念図を Fig. 1 に、またその一覧を Table 1 に示す。Table 1 のうち、*印を付したパラメータが上層風用に新たに追加もしくは修正を加えたもので、それ以外は下層風用に用いていたものである。追加もしくは修正を加えた項目の主な内容は次のとおりである。

(1) 上層限界温度

ヒストグラム解析で上層雲と判断する一番大きな要因は、その雲頂温度が設定された範囲内 (上層限界温度と下層限界温度) に存在することである。ただし、今回対象としている追跡雲は巻雲であり、射出率を考えると、薄い巻雲の雲頂温度を正確に求めることが困難なので、ある程度の余裕をもってこれらの限界温度を設定する必要がある。

また、上層限界温度として圏界面の温度も利用できるようにした。ここで用いる圏界面の温度は、数値予報課から送られて来る鉛直温度分布の格子点値 (12時間予報値) を基に、鉛直方向の温度勾配の違いから算出するものである。雲頂高度が圏界面より高いか否か

というのは、巻雲 (特に濃密な巻雲) と積乱雲とを区別する最も簡便な方法である。ただし、圏界面の温度を12時間予報値から算出する点、及び雲頂高度の精度 (特に射出率の不確定性) を考えると常に有効とは限らない。

(2) 上層雲量

追跡雲の上層雲量のチェック機能を追加した。これは、雲指定エリア内全てに雲が一樣に分布している場合を避けるためと、ある程度の上層雲量が存在している必要性のために、エリア内の上層雲量 (Camt) が上限 (Cmax) と下限 (Cmin) の範囲内にあるか否か、次式のようにチェックするものである。

$$Cmin \leq Camt \leq Cmax$$

(3) 緯度帯別の解析パラメータの設定

1987年3月の計算機更新以前は、50°N~50°Sの全算出エリアで同一のヒストグラム解析用パラメータしか設定できなかったが、今回追加したパラメータも含めて殆どについて、50°N~25°N、25°N~25°S、25°S~50°Sの3つの緯度帯別にパラメータを設定できるようにした。これによって、赤道付近の積乱雲の活発

Table 2 マッチングに用いる主なパラメータ

マッチング条件設定用パラメータ		本調査で使用した値
マッチング段数	A B画像間	2段
	B C画像間	0段
画像サイズ	テンプレートエリア	32ピクセル×32ライン
	サーチエリア	64ピクセル×64ライン
画像サンプリング率 (粗マッチング)	ライン	1
	ピクセル	3

マッチングサーフェス判定用パラメータ	粗マッチング	精マッチング
ピーク値（最大相関係数値）の下限	0.6	0.5
ピーク付近の尖鋭度の下限	1E-5	1E-6
ピーク位置の移動限界の上限	16.0	6.0
ピーク値と2次ピーク値の差の下限	3E-3	3E-3
ピーク値と2次ピーク位置間の距離の下限	3.0	3.0
2次ピーク値決定の下限	0.2	0.2
2次ピーク決定距離の境界	2.2	2.2

なエリアの選択パラメータや、中緯度帯のジェット気流による風速の大きなエリアの選択パラメータなど、雲分布の特徴に応じたパラメータによる処理が可能である。

2. 2. 相互相関法によるマッチング

マッチングのアルゴリズムは下層風と同じであり、修正を加えていない。その詳細は、浜田（1979）に述べられている。また、予備調査において、上層風用のパラメータ値を調査して設定した。その一覧を Table 2 に示す。

3. 自動算出法による上層風ベクトルの特性

自動算出された風ベクトルの性質を調べるために、現業で算出しているLFベクトルと、これと同じ日時の画像データを用いて自動算出した風ベクトルとの比較を行った。上層風の自動算出に最も重要なものは、どの雲を追跡雲とするか（雲指定）ということと、その追跡雲をどのように追跡するか（マッチング）ということである。そのために、まず上層風のマッチングのみを自動で行う場合を調べた上で、自動雲指定も含めた全算出過程を自動としたときの上層風ベクトルの性質を調査した。

3. 1. 使用したデータ

比較の対象としたのは、1986年3月～1987年2月の1年間である。月毎に9時と21時の各3回、合計72回分の処理のデータセットを以下のように作成した。これ

らは、当時の現業処理回数（1日2回）の約10%に相当する。なお、雲指定及びマッチングに使用したのは、いずれも赤外画像のみである。

(1) 比較の基準データ（LFデータ）

旧計算機システムで現業的に算出されたLFデータを、上記の72回分抽出して使用した。

(2) マッチング評価用データ（M1データ）

(1)のLFデータをもとにして、このLFと同じ追跡雲を相互相関法を使って追跡した場合のベクトルを新たに算出した。旧計算機システムでは、上層風の算出は、30分間隔の4枚の画像（各々順にZ、A、B、C画像と呼ぶ）から作成したループフィルムを使用していた。即ち、解析者がZ画像で始点の雲指定を行い、C画像で追跡結果の終点を指定していた。この時の追跡時間の間隔は90分であった。この調査では、雲指定点がLFベクトルと同じ雲になるように、Z画像におけるLFベクトルの位置（始点）が30分後のA画像のどの位置（終点）に移動したかを、相互相関法によるマッチングを使って算出した。追跡時間を30分としたのは、巻雲の寿命を考えると、LFの90分が長すぎる（浜田、1983）と思われるためである。筆者はZ画像とC画像を用いた90分間隔での追跡も試みたが、マッチングによる追跡が難しく、比較に使用できるだけのベクトル数を算出できなかった。

(3) 自動雲指定を用いた比較用データ（ASデータ）

これは、自動雲指定とそれに続くマッチング処理に

より新たに作成した自動算出データであり、最終的に現業に組み入れる予定の算出方法で作成されたものである。用いた画像（Z及び、A画像）や使用したマッチングパラメータなどは前項(2)と同じである。また、自動雲指定のヒストグラム解析に用いたパラメータの値は、Table 1 に示してある。

3. 2. 相互相関法によるマッチングとLFとの比較

現在、下層風に対しては、現業的には相互相関法が最も多くマッチングに使用されている。しかし、追跡雲が巻雲のような上層風に対しては、追跡が困難な場合があると言われている。それは、特に薄い巻雲の場合、下からの放射が透けて見えるため、巻雲だけでなく、下層の雲や陸地を合わせて追跡してしまうからである。そこで、上層雲の追跡に、相互相関法がどの程度利用できるかを検証した。

(1) 風ベクトルの分布特性と算出数

調査は、新たに作成したM1データとLFデータとを比較することにより行った。図には示していないが、それらの分布を比較すると、全般的に算出ベクトルは非常によく似ている。定性的に、両者のベクトルを比較すると、2.5~5 m/sの違いがあるものもあるが、同じ程度の風速の場合が多い。ただし、中緯度で、風速が25~30 m/s以上のLFベクトルに対して、M1

ベクトルが算出できなかった場合がいくつか見られる。また、中、低緯度を問わず、LFとは全く異なったM1を算出しているものが見られる。この場合はもとのLFの風速の大きさには関係なく起きており、反対に、得られたM1の風速はそのほとんどが2.5~5 m/s以下となっている。これは、完全なミスマッチングである。

算出ベクトルの総数は、LFの16719個に対して、M1が13852個であり、M1がLFの82.9%となっている。これは、実質的なマッチング率であり、かなりの確率でマッチングが成功していることを示している。即ち多くの場合、LFが専門家の指定による理想的な雲指定点を表していることを考えると、たとえ上層風であっても、適切な追跡雲を指定すれば、かなりの確率でマッチングが可能であると言える。Fig. 2に、風速2.5 m/s間隔あたりの算出ベクトル数のヒストグラムを示す。これは、72データセットの全てを集めて、LFと、それと同じ指定雲を持つM1とのペアを作成して比較したものである。Fig. 2において、12.5 m/s以下の風速の範囲では、M1がLFより多くなっており、逆に風速の大きな範囲ではLFの方がやや多くなっている。これは、風速の大きなLFベクトルの追跡雲を、M1で十分に追跡できない場合があることを示している。

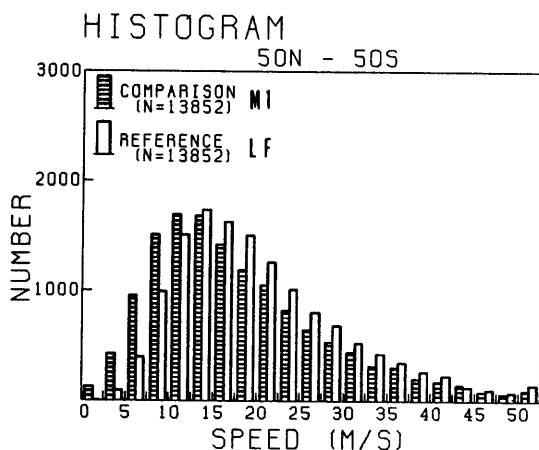


Fig. 2 Number of the calculated high-level winds at wind speed of every 2.5 m/s.

"Comparison" is M1 wind and "Reference" is LF wind. This histogram is drawn with M1-LF pairs which are made from M1 vectors and LF vectors calculated by using the same target cloud.

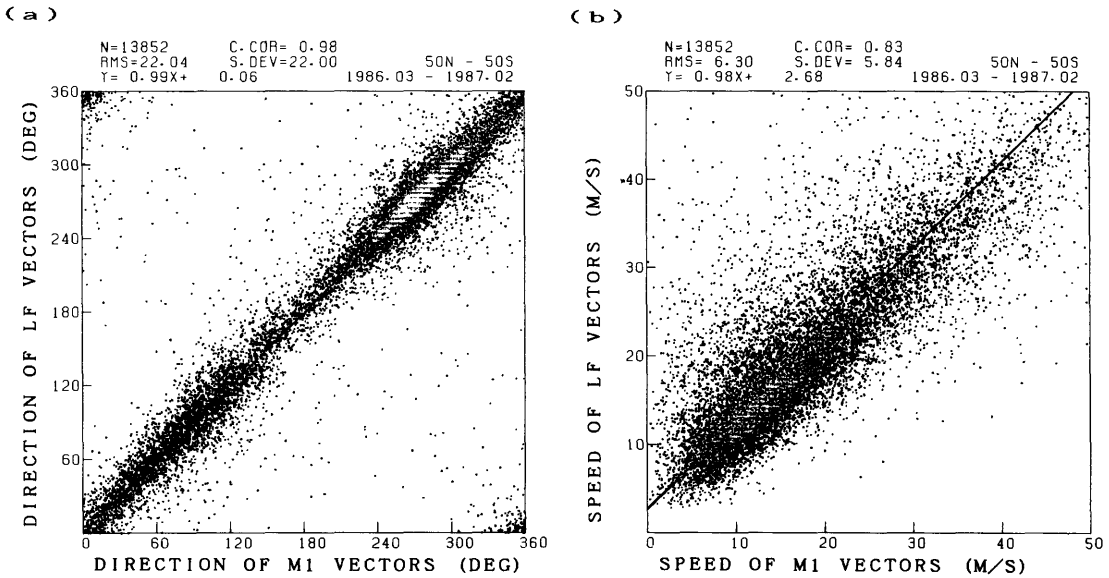


Fig. 3 Correlation of wind direction and speed between M1 vectors and LF vectors.

(a) shows that of wind direction and (b) shows that of wind speed. These figures are plotted with M1-LF pairs which are made from M1 vectors and LF vectors calculated by using the same target cloud.

(2) 風向と風速の特性

さらに詳細に、M1の傾向を調べるために、上記のペアを使って風向と風速の相関係数と回帰式を計算し、散布図を作成した。Fig. 3 (a)、(b)にその結果を示す。風向については、そのほとんどが回帰直線の近傍に分布しており、相関係数も0.98とほぼ1.0に近い。これにより、風向については、LFとM1がほぼ同じ特性を示していると思われる。

次に風速について見ると、回帰直線の近傍に最も多く分布しているが、左上方にもいくらか散らばっている。さらに、全エリアを25°Nと25°Sの緯度で3分割して、風速比の分布を示したのが、Fig. 4 (a)、(b)、(c)である。これは、LFとM1の風速比 (V_{M1} / V_{LF}) を V_{LF} の風速別にプロットしたもので、両者の風速が等しい値 (1.0) を破線で示している。また、図中の横線は、5 m/s 毎の比の平均を表している。中緯度帯の (a) と (c) では、これらの比の平均は0.9~1.0に分布していて、M1の風速はLFよりわずかに小さめで、風速が大きくなるほど風速比が小さくなるのがわかる。即ち、中緯度帯の特に雲の移動が大きい時にマッチングがとれない場合があり得る

とともに、マッチングがとれた場合でもLFと比べて風速がわずかに小さくなる傾向が見られる。

これに対して、低緯度帯 (25°N~25°S) では、風速比の平均が0.8~0.9となっており、中緯度帯と比べてもかなりM1の風速がLFよりも小さくなっている。この要因として、以下のいくつかが考えられる。第一に、マッチングの側では追跡雲の消散によって終点が不明瞭になったり、巻雲ではなく積乱雲を追跡することなど、全く違う雲を追跡してしまう場合である。また、LFの側にもオペレーショナルエラーに関する調査 (井石他、1985) で示されたように、特に低緯度帯に対してこれが言える。第二に、風速が小さな場合にはマッチングが取りやすく、移動位置の算出も風速に関係なく正確であるが、逆にLFでは解析者が指定する際の位置の誤差が発生する場合である。これは、低緯度帯で多く算出される風速の小さなベクトルの場合に、影響が大きくなる。

(3) 高層観測風との比較

低緯度帯において、LFに比べてM1の風速が小さくなるという傾向の原因は明確ではないが、LFとM1のどちらがより妥当な風場を表しているかを見る

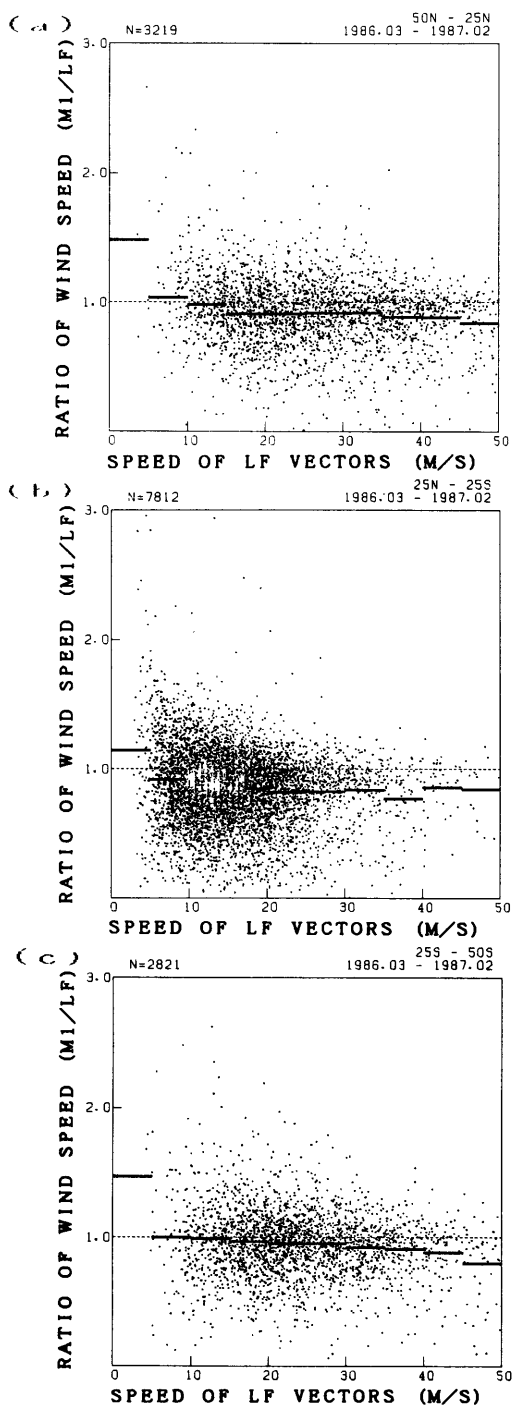


Fig. 4 Speed ratios of M1 winds to LF winds in each latitudinal zone. (a) 50°N~25°N, (b) 25°N~25°S, (c) 25°S~50°S.

Table 3 高層観測風とのベクトル差 (単位は m/s)

		M 1	L F
50°N~25°N	平均	11.3	10.9
	rms	14.6	13.1
25°N~25°S	平均	8.1	8.9
	rms	10.4	11.0
25°S~50°S	平均	11.4	11.7
	rms	14.7	14.8

ために、近傍の高層データとの比較を行った。比較は、衛星センターで定期的に精度モニターを行っているのと同じ方法、即ち、CGMSの取り決めによる風計算国際比較の方法(浜田、1981)で行った。高層観測風とM1ベクトル、及びLFベクトルとのベクトル差を各緯度帯についてTable 3に示した。これによると、北半球の中緯度帯では、M1の方がLFよりもベクトル差が大きく、低緯度帯では、逆にM1の方がLFよりもベクトル差が小さくなっていることが分かる。また、M1については、解析者による不良ベクトルの削除を行っていないため、最終製品として出力されたLFとの単純な比較はできないが、次のことが言える。まず、低緯度帯では風速はM1の方が小さくなったが、マッチングの採用によりベクトル差が小さくなり精度の向上が期待できることを示している。次に、中緯度帯では、完全なミスマッチングによる不良ベクトルを削除すればLFと同程度のベクトル差になると思われる。もっとも、風速の大きな場合にM1の風速がLFよりもわずかに小さくなる問題が関係しているかもしれないが、明確には分からない。

(4) その他

(1)~(3)の比較で用いたM1データは、2段マッチング(詳細は気象衛星センター、1988)の際の粗マッチングの画像サンプリング率(ピクセル×ライン)を、 3×1 として作成されたものである。このデータの他に、風速の大きなベクトルを算出できるようサンプリング率を大きくしたデータ(3×2 と 4×2 の場合)も作成して上記の比較を行ったが、今まで述べてきた傾向はほぼ同じであった。また、必ずしも風速の大きなベクトルが算出できるとは限らなかった。

その他、季節によってマッチングの特徴がどのように異なるかの調査も実施したが、顕著な差は見られなかった。

3. 3. 自動雲指定によるベクトルとLFベクトルとの比較

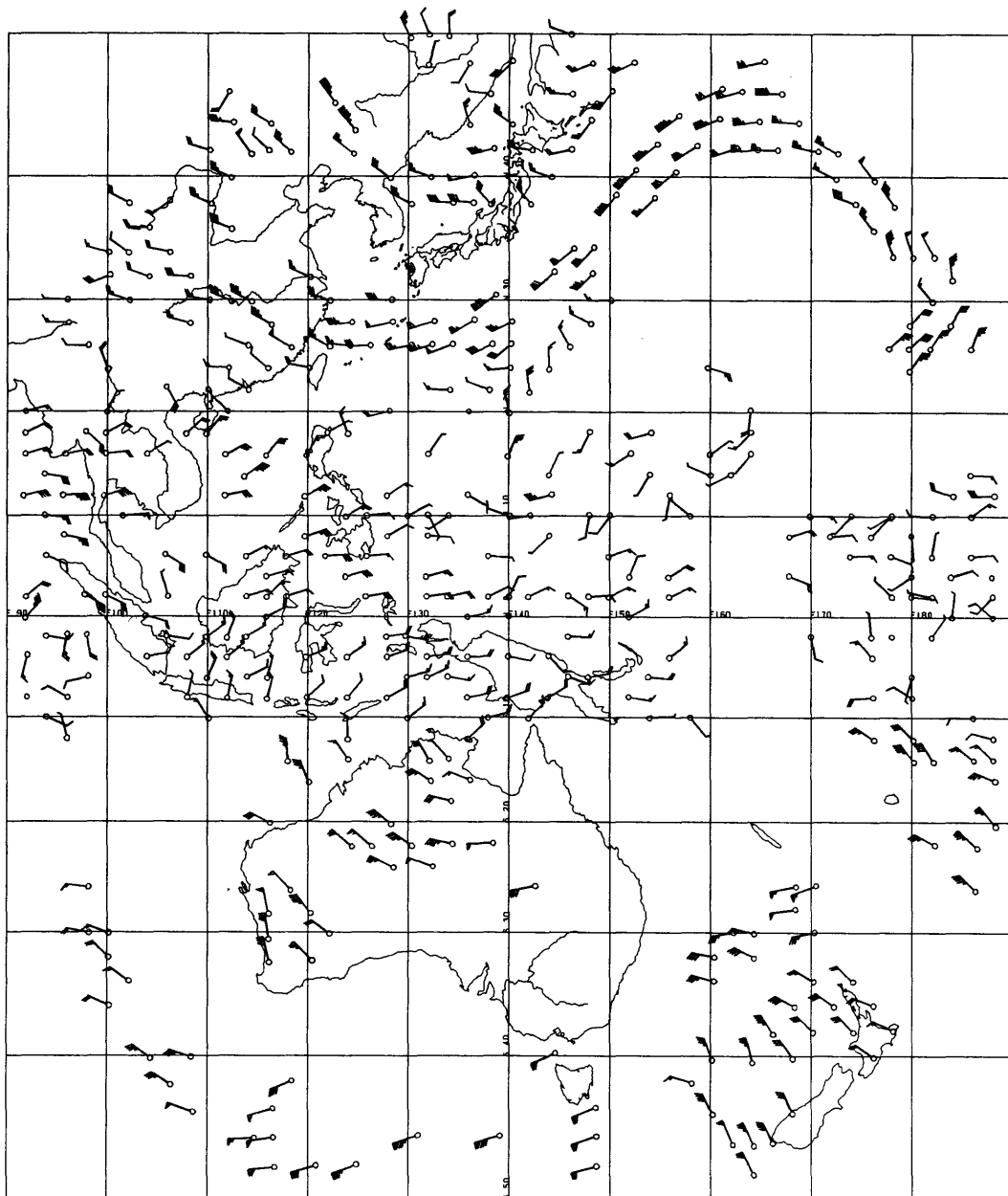


Fig. 5 Satellite winds (AS) using automatic method. 12UT June 8, 1988.

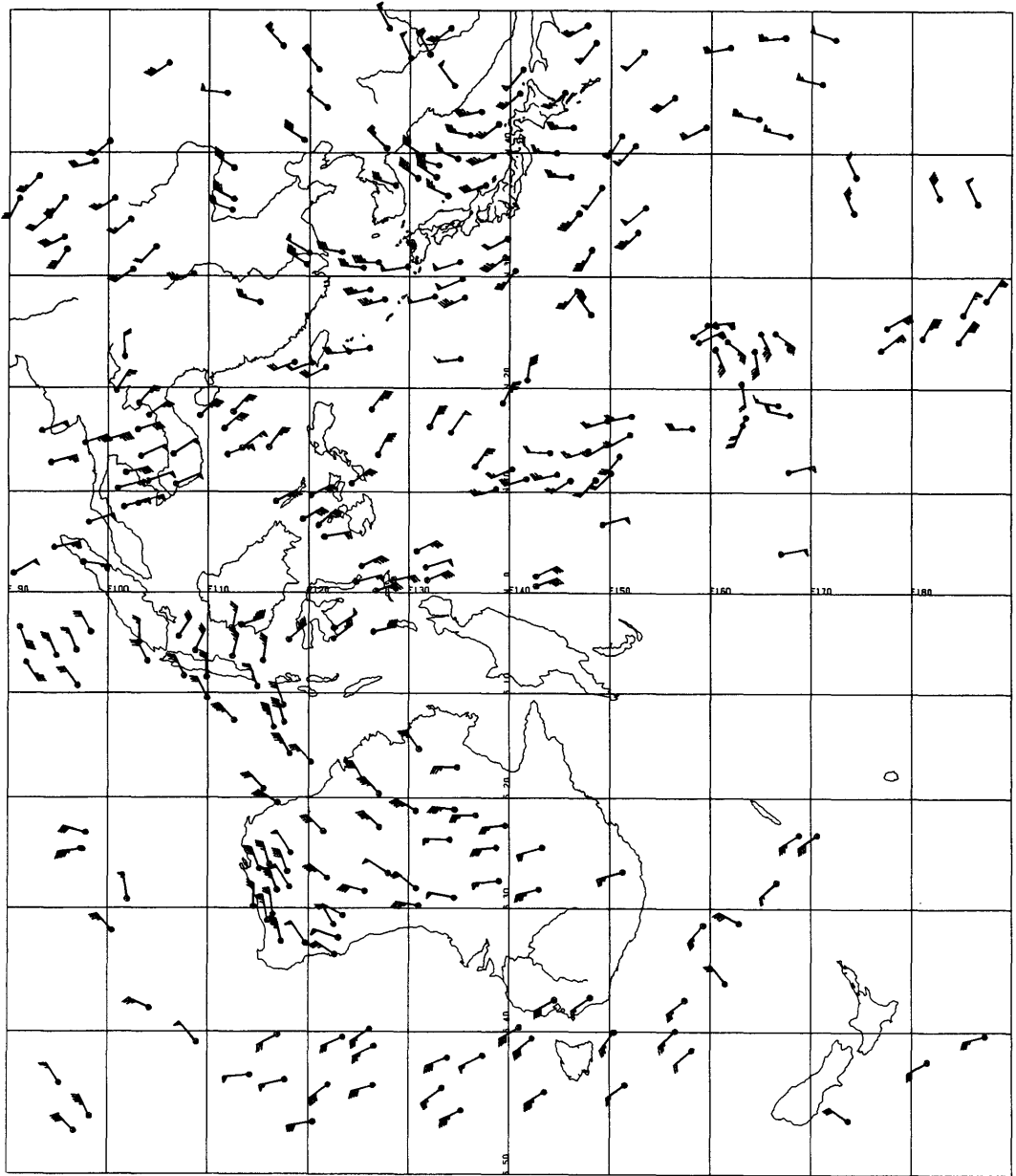


Fig. 6 Satellite winds (LF) using loop-film method (Routine operation).
12UT June 8, 1988.

Table 4 自動雲指定法による1処理あたりの平均算出数

	AS	LF	現業 (新システム)
処理回数 (合計)	72	72	729
雲指定点数	500	232	500
マッチング完了数	384	—	287
ADESS出力数	(384)	—	249
自動算出	—	232	54
マニュアル			
削除数 (不良ベクトル)	—	—	38

(注) マッチング完了数でASと現業 (新システム) に差があるのは、ASがAB画像間をのみマッチングであるのに対して、現業 (新システム) では、AB画像、及びBC画像間で2つのベクトルを算出しそれらのチェックを行っているためである。

前項では、M1の算出の際、移動の始点が予め与えられていたが、ここでは、追跡する雲をどれにするかという雲指定の問題である。上層風計算のための追跡雲の選択に、ヒストグラム解析による自動雲指定がどの程度利用できるかを検証した。

(1) 風ベクトルの分布特性と算出数

調査は、新たに作成したASデータとLFデータとを比較することにより行った。その結果の一例をFig. 5とFig. 6に示す。これらの図を全体的にながめると、大規模な流れ、特に中緯度地帯のパターンは、LFよりもむしろASの方がよく表されている。ここでの対応するベクトルを比較すると、風速も5m/s程度のバラツキはあるが両者はよく似ている。ただし、AS (Fig. 5) では、オーストラリアの南側でベクトルが算出できない地域が一部あることと、赤道付近で mismatchingと思われる風速の小さなベクトルを算出していることが分かる。また、逆に、LF (Fig. 6) では、明らかに現業における作業時間がたりなくて算出できなかったと思われる地域がある。ここでは示さないが、他の日の例でも、これらの特徴が表れる地域は異なっているがほぼ同様の傾向となっている。

ASデータの1処理あたりの平均算出ベクトル数をTable 4に示す。比較のために、同じ日時のLFの72

回の平均と、期間は異なるが新計算機システムによる運用開始後の1年間の平均 (1987年7月~1988年6月) を合わせて示す。これによると、調査期間のAS出力個数は、384個と非常に大きな数である。これは、2枚の画像 (ここでは、W1、W2と呼ぶ) の間のベクトル V_{W1-W2} を算出した結果で、現業の場合にはこれとは状況が異なってくる。即ち、実際に現業でASを使用する場合は、3枚の画像 (ここではW1、W2、W3と呼ぶ) を使って、W1-W2間、及びW2-W3間で追跡を行い、2つのベクトルを算出している。計算機処理でこれらを比較し、差の大きすぎるベクトルを取り除くことによって、算出ベクトルの精度向上を図っているのである。また、現業的にはマンマシンによる品質管理を行って不良ベクトルを削除しており、ASによる実際の最終出力数はこれよりもかなり減少する。今回は、計算機資源、特に画像処理装置の使用できる時間が限られている点と、マンパワーの関係で、これらの統計データを作成するための画像処理装置によるASに対する品質管理は行わなかった。従って、調査期間のASとLFの合計数を単純には比較できないため、新システム導入後の平均算出ベクトル数 (09時帯と21時帯の処理のみ) を検討した。Table 4から、この場合のマッチング数は287個であり、調査期間のA

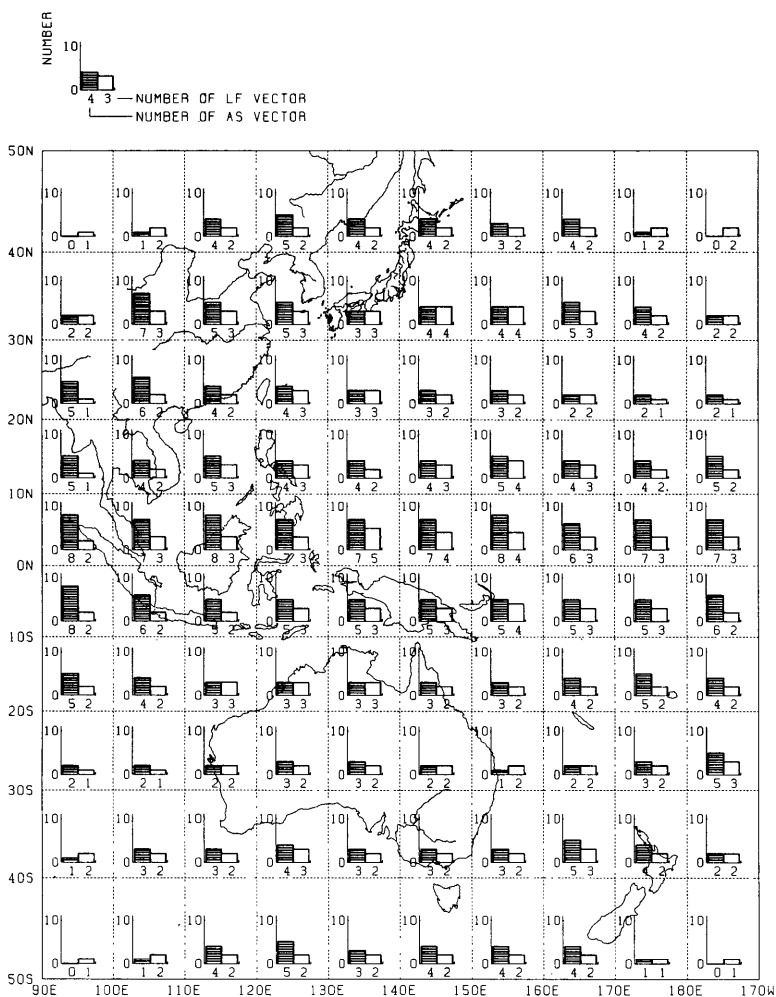


Fig. 7 Mean number of the calculated high-level winds in 10° latitude and 10° longitude area.

Sと比べてかなり少なくなっている。これからさらにマンマシンによる不良ベクトルの削除を行って、ASのみによる最終的なADESS出力数は249個となる。これは、LFよりやや多い程度の出力数と言える。

次に、算出数の地域的な分布を調べるために、調査期間のASとLFについて、緯度経度10°格子毎の1処理あたりの平均算出数の分布図 (Fig. 7) を作成した。全体としてかなりの地域で、ASの方がLFよりも算

Table 5 自動雲指定法による1処理あたりの緯度帯別雲指定点数

	平均数	10°格子あたりの数
50°N~25°N	121	4.8
25°N~25°S	292	5.8
25°S~50°S	85	3.4

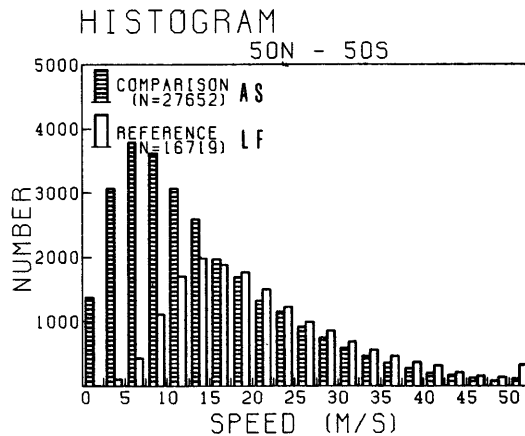


Fig. 8 Number of the calculated high-level winds at wind speed of every 2.5 m/s. "Comparison" is AS wind and "Reference" is LF wind.

出数が多い。また、AS、LFともに、ある程度一様に分布しているが、赤道付近でややその数が多くなっている。特にASでこの傾向が強い。全エリアを25°Nと25°Sで3分割し、各緯度帯で10°格子に換算した1処理あたりの雲指定点数を、Table 5に示す。これを見ると、低緯度帯が平均5.8個で最も多く、南半球中緯度帯で最も少なくなっている。低緯度帯では、積乱雲やそれから派生した巻雲が多いため、雲指定点数が多くなっていると思われる。また、これらの積乱雲や巻雲は移動距離の小さいものが多く、マッチングも取りやすいために、最終的な算出数がこの地域で多くなったと言える。今回の自動雲指定の処理に使用した赤外ヒストグラム解析では、圏界面温度と比較して積乱雲と思われる雲を雲指定点から除外しているが、それでもやはり巻雲と積乱雲の判別は難しい。数例について、実際に画像処理装置の雲画像上でこれらの自動雲指定点を調べると、誤って積乱雲を指定する場合もある程度存在している。

(2) 風ベクトルの特性

算出された風ベクトルの特性を調べるために、ASとLFの全てのデータを用いて2.5m/s毎の風速別のヒストグラム (Fig. 8) を作成した。これによると、15m/s以上ではASもLFもほぼ同じ傾向を示しているが、15m/s以下ではASの数が極端に多い。この理由として、第一に、LFでは移動のあまり小さな雲は、解析者が追跡するのが困難であったこと、第二

に、ASでは移動の大小を問わず雲指定を行うこと、第三に、移動の小さな雲はマッチングがとりやすく、その結果風速の小さなベクトルが多く算出されること、第四に、ミスマッチングを含むこと、が考えられる。いずれにしても、風速別に見た算出数のピークがLFでは15m/s付近、ASでは7.5m/s付近であることは注目しておいた方がよい。さらに、その場を代表する風ということを考えるために、ASとLFの近接ベクトルの対で比較した。その結果を、Fig. 9に示す。これは、両者の距離が100km以内の場合に對を作り、各々の算出数を風速別に表したものである。Fig. 8と比べて、風速の小さなベクトル数はかなり減少するが、LFよりもやや多い傾向になっている。また、Fig. 9は、マッチングの項で触れたFig. 2と同様の傾向となっており、マッチングの特性がここにも表れていることが分かる。

次に、風向、風速の特性を見るために、上記の近接ベクトルの対を用いてASとLFの相関係数と回帰式を計算し、散布図を作成した (Fig. 10)。風向、風速の相関係数は、各々0.97、0.79となっており、前項のM1とLFの場合とほぼ同じ程度の相関となっている。また、散布図を見ると回帰直線のまわりはかなり集まって分布しており、ASとLFがよく似た性質であることを示している。このような近接対による比較をした場合には、比較の対象となるASは全て、LF (良質な雲指定点と言ってよい) の近くにあるので、自動

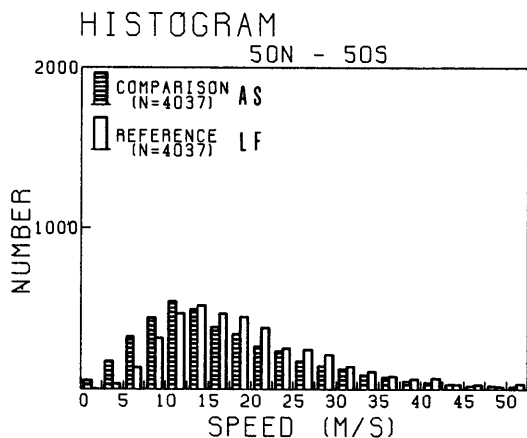


Fig. 9 Number of the calculated high-level winds at wind speed of every 2.5 m/s in co-located pairs of AS winds (comparison) and LF winds (reference).

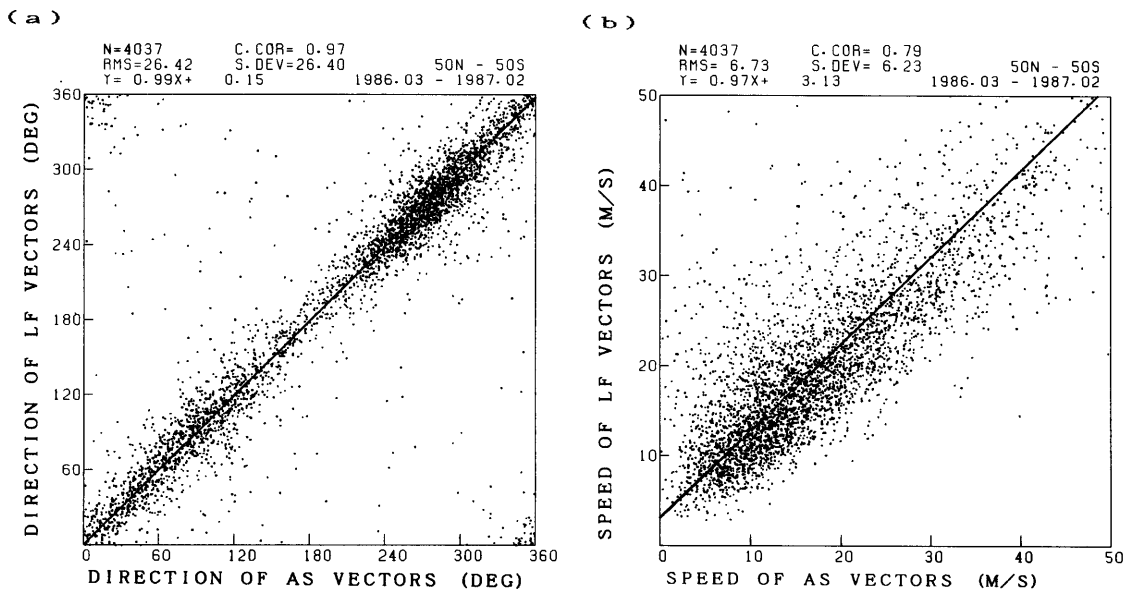


Fig. 10 Correlation of wind direction and speed between AS vectors and LF vectors.

(a) shows that of wind direction and (b) shows that of wind speed. These figures are plotted with co-located pair within the distance of 100 km between AS vector and LF vector.

雲指定の結果の良否による影響があらわれずに、マッチングの結果の評価になってしまう。Fig.10と Fig. 3の傾向が非常によく似ていることから、これが分かる。

(3) 高層観測風との比較

最後に、自動雲指定を含めた自動算出法による風計算結果の精度評価を行うために、高層観測風との比較を行った。高層観測風と調査期間のASとの比較結果

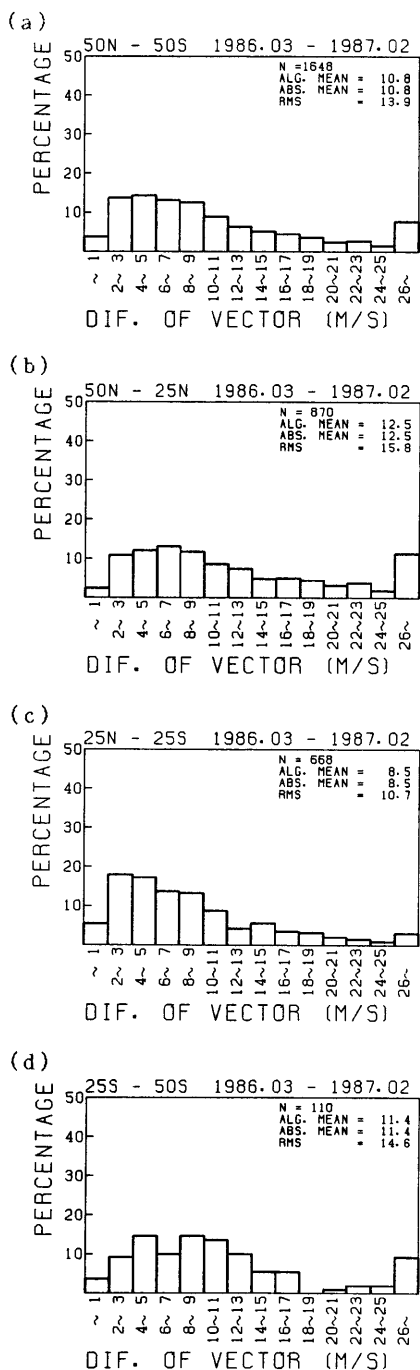


Fig. 11 Vector differences between AS winds and radiosonde winds.
 (a) 50°N~50°S, (b) 50°N~25°N,
 (c) 25°N~25°S, (d) 25°S~50°S.

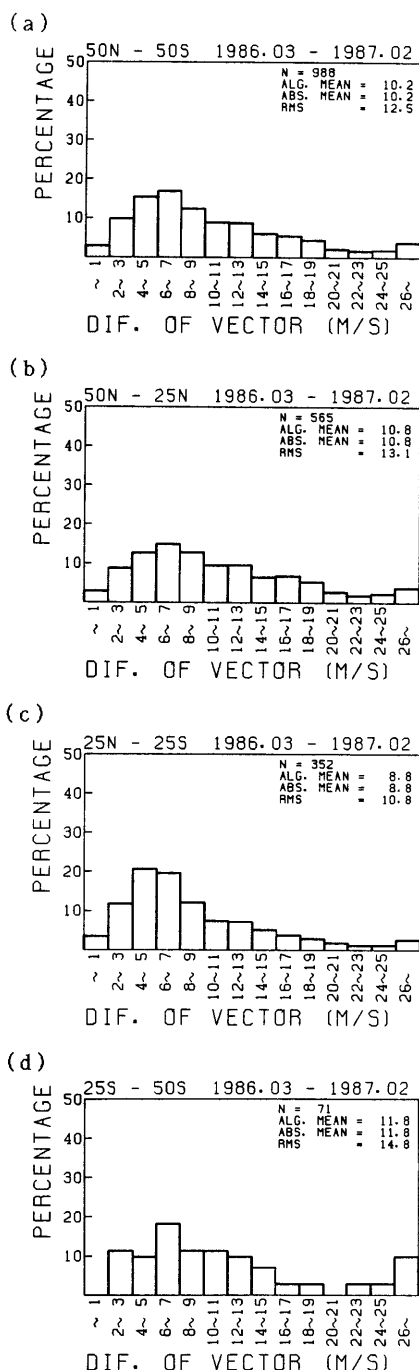


Fig. 12 Vector differences between LF winds and radiosonde winds.
 (a) 50°N~50°S, (b) 50°N~25°N,
 (c) 25°N~25°S, (d) 25°S~50°S.

を Fig.11に、また LF との比較結果を Fig.12に示す。この時用いた比較方法は、前項と同じである。Fig.11及び Fig.12で、(a)が全てのエリアにおける高層観測風と衛星風とのベクトル差を表している。ベクトル差の平均、RMSともに、ASのほうがLFよりも大きくなっている。この差は、ASデータに対してマンマシンによる品質管理を行わなかったためと思われる。25°Nと25°Sで分割した緯度帯別に比較した結果(ベクトル差)を、(b)、(c)、(d)に示す。これらの図のうち、北半球中緯度帯では、ベクトル差の平均、RMSともに、ASのほうがLFよりも1~2m/s程度大きくなっている。各々の(b)図のヒストグラムを詳細に見ると、ASで26m/s以上の差の頻度がかなり大きいのが顕著な違いである。これは、前項のM1と同じ傾向(図は省略)を示しており、ASベクトル算出の際のミスマッチングが影響していると思われる。これに対して、(c)、(d)図で見られるように、低緯度帯や南半球中緯度帯におけるベクトル差は、ASがLFと同程度かやや小さくなっている。特に、低緯度帯では、ASはヒストグラムのピークがベクトル差2~3m/sにあり、LFの場合のピークよりは小さなベクトル差に位置している。ここでは、マッチングの採用により、精度が向上するという効果が表われている。

3. 4. 結果と考察

これまで見てきたことによると、全体としては、ASの方がLFよりも算出数が多くなっており、ほとんどの地域でASの方が多く分布している。ASの風向は、LFと非常に良く一致している。また雲の追跡時間が30分になり、LFよりも短くなったことで、これまでより短い寿命の雲の移動を算出できることが期待される。ASの風速は、全体としては、LFよりやや小さくなる傾向になっている。この風速と精度について、緯度帯別に見てみる。

まず、低緯度帯では、ASの風速の小さなベクトルが数多く算出された。ここは、現業において解析者がLFベクトルを算出する際に判断に迷う雲が多く(井石他、1985)、積乱雲を巻雲と見間違ったり、大規模場の風を表していない積乱雲のそばの巻雲を指定してしまいやすい地帯である。自動雲指定の場合、圏界面温度を用いて簡便に積乱雲と巻雲を区別する方法を用いているが必ずしも有効でない場合もあり、算出ベクトルが多いかわりに、ミスマッチングによる不良ベクトルの算出も多くなる結果となっている。雲指定につ

いては、赤外のヒストグラム解析だけでなく、他の方法、例えば昼間の処理には、可視画像も使用してテクスチャ解析を行うなどの方法を開発する必要があると思われる。また、高層観測風との比較では、低緯度帯においては、風速の小さなベクトルが多いこともあって、ASのベクトル差の方がLFよりやや小さくなっており、精度の向上につながっている。ただし、これは高層観測風の近くの雲移動風に限った比較結果であることを考慮しておいたほうが良いであろう。

次に、中緯度帯については、風速の大きなベクトルの場合に、LFよりもやや風速が小さくなる傾向がある。調査の前には、LFの90分からAS(またはM1)の30分へ雲の追跡時間の間隔を短くすることで、高速の風ベクトルが算出できるのではないかと想定していた(Johnson 他、1980)(浜田、1983)が、結果は逆になった。従って、この結果の理由は、追跡時間の問題ではなく、追跡方法が全く異なることによると考えたほうがよい。それは、実際に90分間隔画像を使ってM1ベクトルを算出すると、その数が非常に少なかったことから言える。自動追跡に用いたマッチングのパラメータ値は、予備調査の際に種々の場合を調べて最終的に決定したが、高速のベクトルが多い中緯度帯と、反対に低速のベクトルが多い低緯度帯を区別した設定ができず、全算出エリアで単一の値を使わざるを得なくなっている。自動雲指定のように、低緯度帯とそれ以外で異なった値を設定できるようにシステムを改造するのも一方法であるが、これだけでは顕著なまでの改善には至らないと思われる。

また、高層観測風との比較では、ASの方がLFよりもややベクトル差が大きくなっている。これは、完全なミスマッチングによる不良ベクトルを削除していないことが最も大きな要因として考えられるが、北半球中緯度帯で特に風速の大きなベクトルのマッチングが取りにくい問題も残されている。さて、上層風ベクトルの風速が高層観測風より小さくなる傾向は、GMSに限らずMETEOSATやGOESの風ベクトルについて以前から言われている。これに対する試みはいくつか行われている。Schmetz 他(1987)は、雲指定点を含むセグメント(画像の切出しエリア)の全てをマッチングに使用するのではなく、そのエリアの内で上層雲域のみを取り出してマッチングに使用するWINDOW法を用いて上層風ベクトルを算出し、従来の方法よりは高速の風ベクトルを得ている。Johnson 他(1980)は、画像の撮像時間間隔を変えて上層風を

算出し、時間間隔が短くなるほど平均風速が増加することを示した。また、使用する画像の時間間隔を30分から15分にすることを浜田(1983)が提案している。現業として行う場合には、全球処理をする必要性や他の現業算出機関(NESDISやESAなど)とのデータの共通性などを考慮することが必要であるが、算出ベクトルがどのような特徴を持つのが今後の検討課題である。

なお、今回はLFとASを直接比較することを目的としていたため、上層風の高度設定方法については、調査の対象から除いた。現在MSCでは、季節と緯度帯によって、200~400mbの一定値を上層風の高度として設定している。これは、高層観測風との統計的比較調査に基づいて決定したもので、1981年12月21日から現業で使用している。その後の別の調査によれば、必ずしもこの値に合わない季節や緯度帯もでており、高度設定方法の改善も含めて現在調査を進めている。

4. まとめ

以上、上層風の自動算出ベクトルとLFベクトルとの比較を見てきたが、風速の大きなベクトルが算出できない場合があることと、精度としては、不良ベクトルのため全体的に自動算出ベクトルの方がやや悪くなっていることが言える。しかし、これは解析者によるサポート、即ち、特に低緯度帯での不良ベクトルの削除と中緯度帯での風速の早いベクトルの付加的な算出を行えば、充分現業で使用でき、少なくともLFと同じかそれ以上の質と量のベクトルを算出できると思われる。

気象衛星センターでは、1987年3月計算機更新に合わせて、上層風の自動算出をシステムに組み入れた。LFを用いた上層風の算出ベクトル数が、現業としては1処理あたり220~230個であったのに対して、新システムでは処理時間が30分短くなったにもかかわらず、解析者による算出も含めて平均303個(Table 5)となっており、30%以上増加している。このように、自動算出法を組み入れたことにより、短い時間でより多くの上層風ベクトルが算出できるようになった。

謝辞

この調査を進めるにあたり、特に予備調査の段階で有益な助言をいただいた気象庁予報部通報課の加藤一靖課長と予報課の市沢成介予報官に深く感謝します。

本調査及び現業への組み入れに際して、システム管理課浜田忠昭課長、解析課中村和信先任技術専門官をはじめ気象衛星センターの多くの方に、有益な助言をいただき協力していただきましたことを、深く感謝します。

参考文献

- Bowen, R.A., L. Fusco, J. Morgan and K.O. Roska, 1979 : Operational production of cloud motion vectors (satellite winds) from METEOSAT image data, Use of Data from Meteorological Satellites, ESA SP-143, 65-75
- Endlich, R.M. and D.E. Wolf, 1981 : Automatic cloud tracking applied to GOES and METEOSAT observation, J. Appl. Meteor., 20, 309-319.
- Hamada, T., 1982a : New procedure of height assignment to GMS satellite winds. Met. Sat. Center Tech. Note, No 5, 91-95
- Hamada, T., 1982b : Representative heights of GMS satellite winds. Met. Sat. Center Tech. Note, No 6, 35-47
- Johnson, G.L. and D. Suchman, 1980 : Inter-comparisons of SMS wind sets. A study using rapid-scan imagery, Monthly Weather Review, 108, 1672-1688.
- Schmetz, J., M. Nuret, O. Turpeinen and B. Mason, 1987 : Recent improvements of cloud track winds. Report of the Proceedings 6th METEOSAT Scientific User's meeting, Amsterdam, The Netherlands, 25-27 November 1986, vol. 1.
- Whitney, L.F., 1983 : Satellite derived products, winds, NESDIS. WP-9, Prepared for CGMS-XIII
- 井石宏明、河野一正、1985 : LF法による上層風算出におけるオペレショナル・エラー。気象衛星センター技術報告、第12号、15-22.
- 市沢成介、1983 : 風計算業務の経緯と最近の衛星風の精度。気象衛星センター技術報告、第8号、85-100.
- 小花隆司、1979 : LF風計算に伴う誤差。研究時報、31巻、No11-12、313-326.
- 加藤一靖、1983 : 静止気象衛星の画像データによる気象要素の抽出。気象研究ノート、第148号、685-786.
- 気象衛星センター、1988 : 気象衛星資料利用の手引。

69-84.

浜田忠昭、1979：風計算。GMSシステム総合報告、データ処理解説編(その2)、気象衛星センター技術報告(特別号II-2)、15-42.

浜田忠昭、1981：風計算国際比較の概要。気象衛星センター技術報告、第4号、117-132.

浜田忠昭、1983：静止気象衛星画像からの風計算処理における最適画像取得時間間隔について。気象衛星センター技術報告、第7号、79-87.

浜田忠昭、加藤一靖、1984：GMS風計算システムにおける客観的雲指定法と算出ベクトルの精度。気象衛星センター技術報告、第9号、27-38.

略語表

CGMS Coordination of Geostationary Meteorological satellites. 静止気象衛星調整会議

ESA European Space Agency. 欧州宇宙機関

FGGE First GARP Global Experiment. 第一次地球大気開発計画

GTS Global Telecommunication System.

McIDAS Man-computer Interactive Data Access System ウィスコンシン大学のSSECにある対話型画像処理システム

MSC Meteorological Satellite Center 気象衛星センター

NESDIS National Environment Satellite, Data and Information Service. 国家環境衛星資料情報局