

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

On Precision of Winds Extracted from Earth Disk Images Taken from Geostationary Satellite

Abstract

The technique of estimating satellite wind vector has been developed using the images ingested from Applications Technology Satellite (ATS), Synchronous Meteorological Satellite (SMS) and Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Since the technique of estimating satellite winds is basically different from the acquisition of conventional balloon wind data, a lot of research on the precision of satellite winds and compatibility of satellite winds with rawin winds has been conducted for about ten years.

Technical papers on satellite winds mainly derived from ATS images showed that the causes of error included in satellite winds are mismatching of cloud pattern or manual mistracking, misregistration and improper height assignment.

Comparisons of satellite winds with rawin winds and relationship of cloud displacement to ambient wind observed by an aircraft show that satellite wind does not have any significant difference from winds observed by conventional means.

According to objective analysis performed by several authors using satellite winds, blending with rawin data, suggests that satellite winds are a valuable input to numerical weather prediction.

1 はじめに

1966年12月アメリカの応用技術衛星 ATS 1号が静止軌道にのり、いつもだいたい同じ位置から撮影した地球画像を送って来るようになった。地球の4分の1の範囲の雲分布画像を1日中送り続けることのできる静止衛星は、特に気象学の分野への利用価値が大きいものと考えられ、様々な研究開発がすすめられてきた。

シカゴ大学の藤田教授らのグループは数枚の時間的に連続した衛星画像を映画フィルムにし、エンドレスで投影することにより、雲の移動・変化を観察し測定するループレフィルムの技術を考案した。この技術はゾンデ観測データの無い広範な地域（主として海洋上）の風のデータの代用とすることにより、気象解析に貴重な資料を提

供することとなった。

さらに著しい進歩が見られつつあった電子計算機技術によって、雲移動量算出の自動化が試みられた (Leese et al., 1971)。相互相関法などのパターンマッチング技法により、ある時刻のある領域の雲画像を切り出しテンプレートとし、一定時間後の画像（サーチエリア）の中から同じパターンを見付け出し、そのパターン的一致点を雲の移動点とし雲移動ベクトルとする方法である。雲画像の切り出しは画像表示装置を使用して人間が指定する方式が一般的である。

この計算機技術による雲移動量算出は Wisconsin 大学の Suomi 教授らのグループが研究開発をすすめてきており、その成果は McIDAS システム (Man-computer Interactive Data Access System) の中に組み込まれて

いる (Smith, 1975. Smith et al., 1973B. Suomi, 1975)。McIDAS システムはアナログ方式の画像表示機能を持っており、時間的に連続した画像のムービー表示の助けを借りてより有効に雲指定が行なえる様になっている。

現業用としては、アメリカでは SMS/GOES 衛星の画像からループフィルムと計算機技術の両方で雲移動ベクトルを算出しており、数値予報の入力データとして利用する研究もすすめられている (Hubert et al., 1974)。

静止気象衛星は、世界気象監視計画 (WWW) の一環として世界で5個打上げられるもので、米国で2個、(GOES-E・GOES-W)、日本で1個 (GMS)、欧州宇宙機関 (ESA) で1個 (METEOSAT) が現業運用を行なっている。あとの1個はインド洋上にソ連が打上げることになっており、今年 (1979年) 12月までの FGGE 期間中は米国の予備衛星を移動させて運用している。

日本の静止気象衛星 GMS 1号 (ひまわり) は1977年7月14日、米国フロリダ州ケープカナベラルの射場から NASA によって打上げられ、日本の宇宙開発事業団 (NASDA) により静止軌道にのせられた。1978年4月からは正式の運用が開始されている。GMS 1号から取得された画像は、リアルタイム処理によりいくつかの種類のファクシミリ画像として送り出される一方、バッチ処理により海面水温、雲頂高度等、気象解析に必要な情報の抽出が行なわれる。そのひとつとして、風計算システム (CWES; GMS Cloud Wind Estimation System) が組み込まれている。CWES システムはフィルムループによる方式とテレビ型画像表示装置 (TVディスプレイ) により人間が追跡雲を指定し、相互相関法により雲移動ベクトルを算出する計算機方式 (マンマシン1点指定法) の2つを主体としている (Hamada et al., 1978. 浜田, 1979)。

日本以外の他の衛星からも風ベクトルの算出が行なわれる。これらのデータ相互間の質の差を明らかにする必要性が指摘され (第5回静止気象衛星調整会議, CGMS-V), SMS 画像データによるシステム間の算出風ベクトルを比較する計画がすすめられ、日本・米国・ESA それぞれのシステムでの風ベクトルの算出が行なわれた。この経過および結果は CGMS-VII, CGMS-VIII に報告した (Japan Meteorological Agency, 1977. Meteorological Satellite Center, 1977)。経過の全容と結果については本誌に投稿中である (浜田, 他1980)。

さらに高層観測風との比較、および隣り合う衛星の共通視野域での風ベクトル間の比較が持続的に行なわれることになっている (CGMS-VIII)。これらの調査あるいはその他の基礎的な調査によって、衛星から算出される風ベクトル間の相違や、ベクトルの精度の一端が明らかに

なってくるであろう。

本報告は、これまでに発表されている文献を調査して得られたものが主となっている。最近得られた GMS 1号による調査結果等は別に報告されるであろうから、ここではあえて触れず、風ベクトルの精度を決めるものは何かという観点から論ずる。これから行なわれる種々の調査の基礎的資料となるものであり、風ベクトルの実際の利用の手助けとなることを期待している。この原稿を最初にまとめて2年以上経過したため一部手直しをしたが最新の情報に欠ける部分があるが風計算の精度等を論ずる基礎的資料として読んで頂きたい。

2 風計算処理における誤差要因と品質向上

算出された風ベクトルデータの誤差としては、主としてシステムの移動量測定に関する誤差 (システム誤差) と雲移動ベクトルが風を代表していないために生ずる誤差 (気象学的誤差) に分けられる。次章以下でこれらの誤差についての分類と対策について述べるが、最終的に良い風ベクトルを得る方法としては、第1は測定精度をよくすること、第2は品質管理を行なうことによって不良ベクトルを削除すること、第3は追跡雲の選定を行なう時に良好な結果の期待できる雲を指定することが考えられ、現業用システムでは、この3つを適当に組み合わせて処理が行なわれる。

日本の衛星 GMS の風計算システムについても、品質管理の機能を持っているが、詳細については既に本誌特別号の「GMS システム総合報告, II-2」の風計算の項目を参照されたい (浜田, 1979)。

3 静止気象衛星画像から雲移動ベクトルを算出するときの誤差 (システムのもつ誤差)

静止気象衛星画像から風を推定する場合の誤差のうち雲移動ベクトル算出のときの誤差 (システムのもつ誤差) について論ずる。これらの誤差と気象学的要因による誤差とは複雑にからみあっている部分も多く明確に分離し難いが、システムの要因を含むと思われるものについてはすべてここで述べる。

3.1 システムのもつ誤差の種類

1) 指定位位置誤差

ループフィルムによるマンの指定誤差である。雲が全く変形しない場合は余り大きな指定位位置誤差は考えられないが、通常雲の輝度分布、形状等は変化するのである。その特徴点の選定の仕方によって移動ベクトルは異なってくる。Fujita et. al., (1975) は画像上の積雲セルは

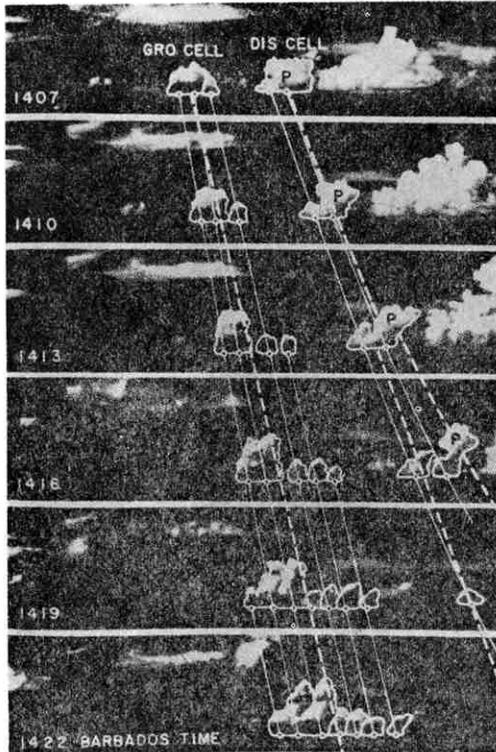


Fig. 1 Horizontal views of multi-turret cumulus cells in their stages of development and dissipation taken from Barbados at 3 min intervals facing south. 1407-1422 Barbados time, 18 July 1969 (Fujita et al., 1975).

- ① 進行方向のエッジ
- ② 進行後側のエッジ
- ③ 幾何学的中心
- ④ 明るさ

の4つで特徴づけられこれらのどれをトラッキングポイントとするかによって算出される雲の移動速度は変動する。

静止衛星からの画像の解像力は衛星直下点において、1 km から 5 km 程度であるので、通常追跡される雲の大きさは 10 km 以上のものであり単一セルから成り立っていない場合が多い。衛星写真でひとつに見えるであ

ろうセルも飛行機写真によると(第1図)いくつかの turret (小さな塔) から成立っておりいずれの特徴点を追跡しても誤差は避けられないが、後方のエッジは遅く前方のエッジは早く移動する傾向がある(第1表)。

2) マッチング誤差

計算機によるパターンマッチングのとき生ずる誤差である。全く同じパターンの場合には、正確にマッチングがとれる。しかし通常は雲の形や輝度が変化するために誤差を生ずる。人間がみて特徴点を同定できないような場合には計算機によるパターンマッチングでも良い相関が得られない。ループフィルムによる追跡雲の始終点の指定も人間によるパターンマッチングであると考えられるので、前項の指定点誤差はマニュアルマッチング誤差であるとも言える。

相互相関法によりマッチングを行なった場合には、時間的に連続した2枚の画像間の相互相関係数が1画素、1ラインずつ左右上下にずらして算出される。この相互相関係の配列を3次元的に表示した、相関曲面の形状を見ることによって、マッチングの良否の判断ができる。Smith et al., (1972) の調査によると70%の場合相関値の最大値付近が非常に尖鋭であって(第2図)簡単に雲の移動点が見出された。およそ20%が最大値付近が尖鋭でない(第3図)。現実の雲の移動を表わしていないのは7%(第4図)でこれらのうち大部分は追跡雲を指定する基準を改善することによって除去できる。全体の3%は多重ノード(節)を持ったものである(第5図)。

マッチングの良否は相関係数の大きさとしても表現されるが、浜田ら(1977, 1978)の調査によれば、ある程度以上の値を持っておれば、相関曲面の形状の方がより有力な判断材料になることを示している。これは追跡の対象となっているものが雲のパターンであり常に変化しているため、相関曲面の形状が雲パターンの変化の情報を表現している結果と考えられる。

雲が二層になっている場合で、上層雲が薄く透きとおっているか、上層雲量が少なくその間から下層雲が見える様な場合には、ループフィルムでマンが判断すれば両者の移動が測定できる。計算機によるパターンマッチン

Table 1 Variation of cloud speed in relation to the tracking point (TP) of a 2-6 mi. size growing cell in Fig. 1 (Fujita et al., 1975).

TP	Turret	Front edge	Rear edge	Geometric center	Brightness center
Relative speed	1.00	1.42	0.62	1.16	0.90
Percent speed	reference	42% fast	38% slow	16% fast	10% slow

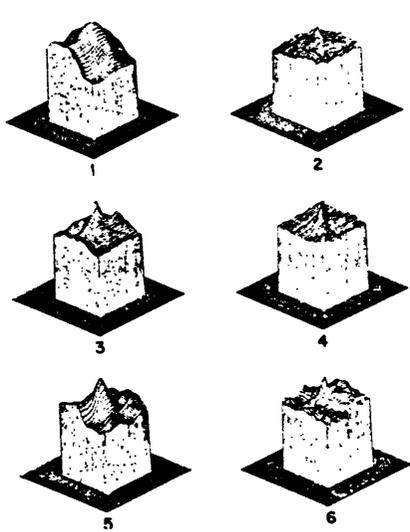


Fig. 2 Cross-correlation matrix surfaces containing a well-defined peak (Smith et al., 1972).

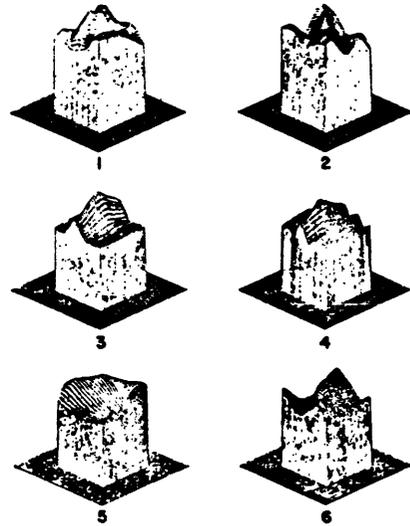


Fig. 4 Cross-correlation matrix surfaces containing no well-defined peak (Smith et al., 1972).

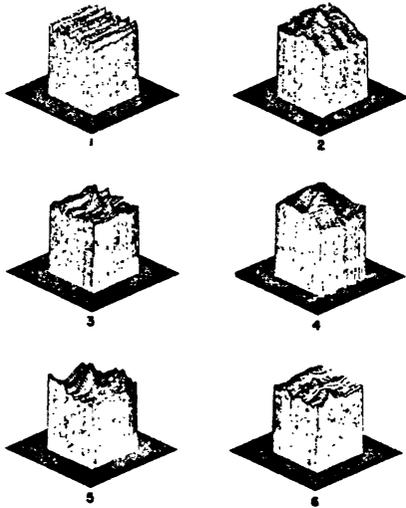


Fig. 3 Cross-correlation matrix surfaces containing a poorly defined peak (Smith et al., 1972).

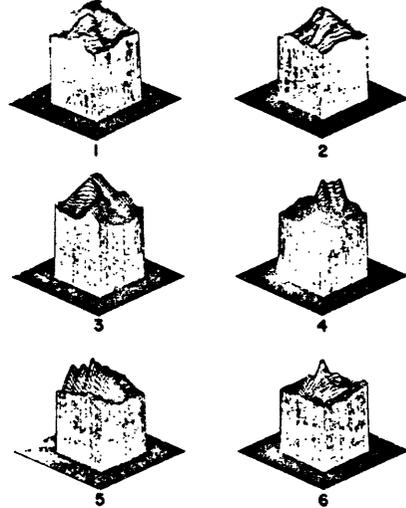


Fig. 5 Cross-correlation matrix surfaces containing multiple peaks (Smith et al., 1972).

グ法については Leese et al., (1971) が相互相関法を利用してシミュレーションを行なっており、両方の雲の移動位置に最大値が現われることを示した(第6図)。しかしながら現実の衛星画像からの観測の結果二層の雲の移動を識別できたという報告はない。第5図に示した様な多重極大値を持つような場合が二層になっている雲パターン追跡結果である可能性を持つかもしれないが、

雲の変形、発達、衰退の影響も大きく現在のところ二層の雲パターンの追跡を、計算機で行なうことは困難である。

3) ループフィルム作成のときの写真処理、投影機の光学系の誤差およびデジタル誤差

写真処理のフィルム等の伸縮誤差はランダム誤差であ

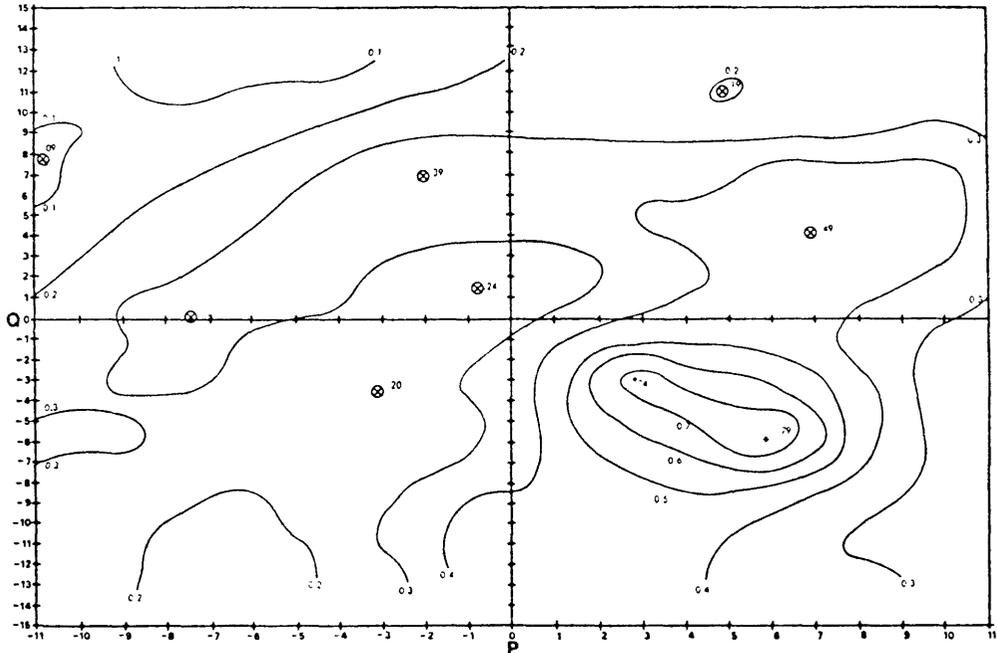


Fig. 6 Cross-correlation matrix with two layers moving at different velocities (Leese et al., 1971).

ることが多く見積りは困難である。投影機の光学系とデジタル化の誤差のうち大部分はバイアス誤差であり、それについては方眼紙を読み込む等により補正テーブルを作成して補正することができる(藤田, 1975)。

4) 画像の位置合わせ誤差

ループフィルムの場合には、一般的には写真作成のときに地形(ランドマーク)を目で合わせるにより位置合わせを行なう。しかしこの位置合わせは確実なものではなくその誤差は雲移動ベクトルの測定値に誤差をひきおこす。第7図に画像位置合わせ誤差による雲移動測定誤差についての説明図を示す(Smith et al., 1972)。この様な位置合わせ誤差は、雲移動量を測定する2枚の画像時間間隔を長くすることにより影響を少なくすることができるが、雲の変化や発達、衰退の影響が大きくなって指定点位置誤差を増加させることになる。

上に述べた事は、計算機による雲移動量の測定の場合も同じである。Wisconsin大学のMcIDASシステムに組み込まれている風計算システムであるWINDCOシステムには、ATS navigationと呼ばれる画像位置合わせのための処理が組み込まれている。これはランドマークを利用し、軌道・姿勢を考慮した座標変換処理である。時間的に連続した複数画像で処理を行ない、軌道近似と

姿勢決定を行なうので、安定した位置合わせが可能である。

ATS navigationは現在SMS/GOES衛星にも使われているが詳細についてはSmith et al., (1972)に述べられている。この処理は衛星の運動を考慮しているので安定した結果が得られ、精度は1画素以内である(第2表)。

5) 高度測定誤差

高度の測定に誤差があると、実際に雲移動に寄与している高度以外の高度の測定値とされるために実質的に誤差となってくる。ループフィルムの場合にはオペレータの気象学的判断により高度が推定され入力される。GMSの風計算システムでは赤外データによる高度算出とオペレータの判断による高度付加の両方式を持っている。

高度推定誤差が風測定値におよぼす影響を知るため、Hubert et al., (1971)はLBF(Level of Best Fit)を導入した。第8図に示した様に上層風の hodograph 上に衛星による雲移動ベクトルを書込み風速が最も一致した高度を、その雲移動ベクトルのLBFとする。オペレータ指定高度でのレーウィンと雲移動ベクトルとの差の累積度数を第9図, 第10図, LBFを真の高度と仮定して

Table 2 ATS navigation results from July 26-28, 1969 (Smith et al., 1972).

	Picture	Time	Line	Element	Latitude	Longitude	
<i>July 26</i> <i>Cabo Barbas</i> <i>on the west</i> <i>African coast</i>	12	21	M	639	5930	22.270	-16.630
			C	639.0	5930	22.270	-16.630
	12	47	M	630	5926	22.270	-16.630
			C	639.0	5926	22.269	-16.630
	13	13	M	640	5923	22.270	-16.630
			C	639.7	5923	22.267	-16.631
	13	38	M	641	5917	22.270	-16.630
			C	641.0	5917	22.271	-16.630
	14	04	M	643	5913	22.270	-16.630
			C	643.1	5913	22.273	-16.629
	14	30	M	646	5910	22.270	-16.630
			C	645.8	5910	22.273	-16.629
	14	55	M	649	5906	22.270	-16.630
			C	649.0	5906	22.270	-16.630
16	01	M	660	5893	22.270	-16.630	
		C	659.9	5893	22.267	-16.631	
<i>July 27</i> <i>Cabo Barbas</i> <i>on the west</i> <i>African coast</i>	13	15	M	640	5985	22.270	-16.630
			C	640.0	5985	22.271	-16.630
	14	06	M	644	5981	22.270	-16.630
			C	644.0	5981	22.270	-16.630
	14	55	M	649	5976	22.270	-16.630
			C	649.0	5976	22.268	-16.630
	15	33	M	653	5973	22.270	-16.630
			C	653.3	5973	22.268	-16.631
	16	24	M	660	5964	22.270	-16.630
			C	660.1	5964	22.272	-16.629
<i>July 28</i> <i>Cabo Barbas</i> <i>on the west</i> <i>African coast</i>	13	36	M	643.	5997	22.270	-16.630
			C	643.1	5997	22.273	-16.629
	14	32	M	649	5985	22.270	-16.630
			C	649.4	5985	22.267	-16.631
	14	58	M	653	5982	22.270	-16.630
			C	653.0	5982	22.268	-16.631
	15	24	M	657	5984	22.270	-16.630
			C	656.8	5984	22.271	-16.630
	16	28	M	667	5978	22.270	-16.630
			C	667.0	5978	22.271	-16.630
<i>Isla La Tortuqa</i> <i>off the north-</i> <i>ern coast of</i> <i>South America</i>	13	36	M	888	2807	10.920	-65.310
			C	887.9	2807	10.918	-65.310
	14	32	M	894	2801	10.920	-65.310
			C	894.3	2801	10.922	-65.310
	14	58	M	898	2800	10.920	-65.310
			C	898.0	2800	10.922	-65.310
	15	24	M	902	2799	10.920	-65.310
			C	902.2	2799	10.919	-65.310
	16	28	M	914	2791	10.920	-65.310
			C	914.0	2791	10.919	-65.310

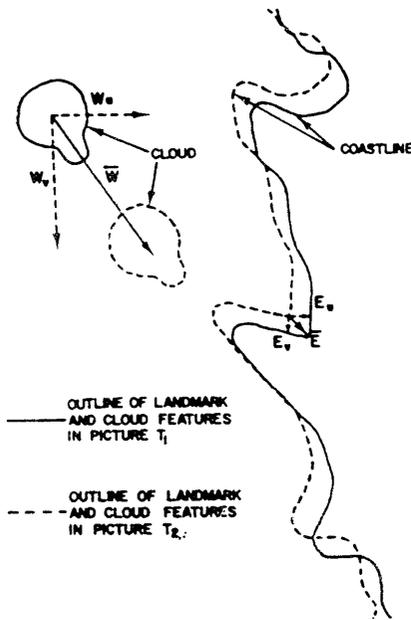


Fig. 7 Cloud-motion measurement error caused by picture misalignment.

W; Vector representing the displacement of a cloud over time interval T1-T2.

E; Vector representing the apparent displacement of a land mark due to picture misalignment.

Wu-Eu; Corrected u-component.

Wv-Ev; Corrected v-component. (Smith et al., 1972)

その高度でのレーウィンと雲移動ベクトルとの差の累積度数を第11図、第12図に示す。オペレータ指定高度では50%以上のベクトルが下層雲で9ノット以上、上層雲で18ノット以上の差を持っているのに対し、LBF高度では80%以上のベクトルがそれぞれ5ノット、9ノット以内の差しかないことがわかる。このことはオペレータによる高度指定誤差が直接風ベクトルの誤差となっていることを示している。

計算機による雲移動ベクトル測定の場合、高度の決定は赤外画像により行なう。この時算出される高度は雲頂高度であり、積雲のように鉛直に発達した雲が雲底に近い高度の風に流される (Hubert et al., 1972 Hasler et al., 1977) ことを考えるとそのまま風の高度測定誤差となり、風ベクトルの誤差となる。さらに赤外画像による雲頂高度の決定にも誤差を含んでいる。赤外画像による高度の決定は一定の領域内の、黒体放射温度 (T_{BB}) に対応した輝度レベルのヒストグラムから、最低温度

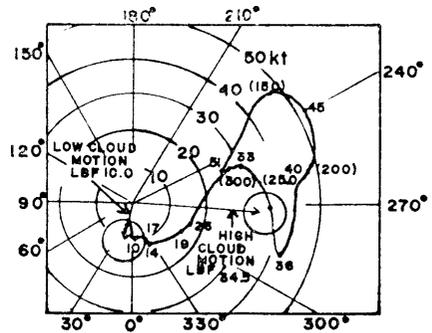


Fig. 8 Typical hodograph illustrating the method of deriving level of best fit (LBF) of target clouds from the observed winds. Heights are given in thousands of feet and, in parentheses, in constant pressure levels. Cloud velocities are represented by vector arrows with 5-kt error circles centered on their endpoints (Hubert et al., 1971).

法、最頻温度法、平均温度法のいずれかにより、 T_{BB} の観測値を決める。さらに射出率値と下層の温度から雲頂の T_{BB} を求め、大気吸収散乱の補正を行ない雲頂の温度 T_c を求める。

大気鉛直温度分布のデータから高度値(気圧またはジオポテンシャル高度)を算出する。この各処理過程において誤差を生ずるが、最も大きな誤差源となるものは測定対象の射出率の指定誤差である。特に上層の薄い雲については0.05の射出率の指定誤差が $10^{\circ}C$ 以上の雲の温度算出誤差となる(阿部ら, 1977)。雲の移動量算出の好いターゲットとなる下層雲の場合は、射出率をほぼ1.0とみて良く射出率の影響は比較的小さいであろう。

大気補正は10ミクロン帯の窓領域の場合ターゲットの放射が主として途中の水蒸気により吸収される効果を補正するものである。水蒸気量は2km程度以下の下層に集中しており、雲頂高度算出の場合は補正量も小さく、したがって誤差源としても余り重要ではない。

雲頂の温度を高度に換算する場合に鉛直温度の分布データが必要であり、このデータに誤差があると高度の誤差となる。リアルタイムのデータを使用することにより精度を良くすることができる。衛星の全視野域にわたっての現業での処理は困難である。したがって実際の処理では数値予報データを用いるか統計的なデータを用いる。

6) 解像力による誤差

画像データは空間的位置の量子化されたデータであり、サンプルナンバー、ラインナンバーで数えられる格子

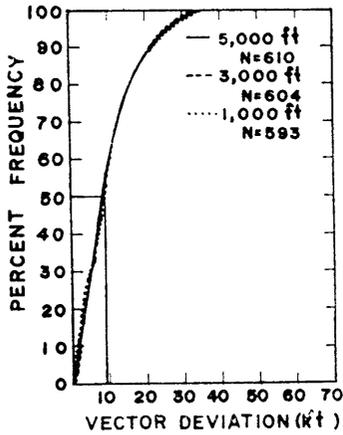


Fig. 9 Magnitude of vectorial deviations of low-level cloud velocities from observed winds at 1,000, 3,000 and 5,000 ft versus cumulative frequencies (Hubert et al., 1971).

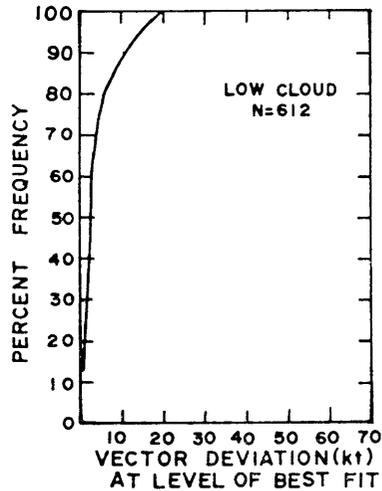


Fig. 11 Magnitude of vectorial deviations of low-level cloud velocities from observed winds at their individual LBF's, versus cumulative frequencies (Hubert et al., 1971).

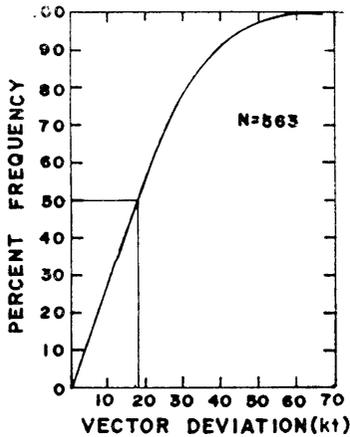


Fig. 10 Magnitude of vectorial deviations of high-level cloud velocities from observed winds at 30,000 ft versus cumulative frequency (Hubert et al., 1971).

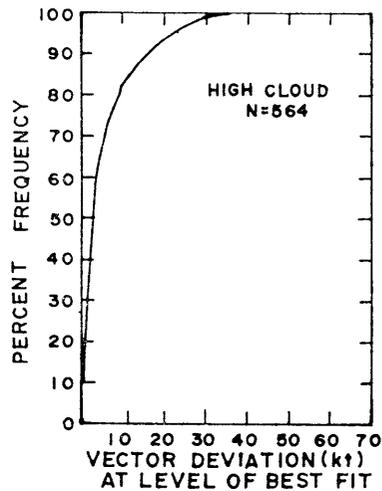


Fig. 12 Same as Figure 11 but for the high-level cloud sample.

点上でマッチング位置が求められるため算出された雲移動ベクトルに量子化の影響があらわれる。第13図に示すように1格子点しか移動しないような雲の移動方向は4方向に限られる。移動量が大きい場合にはこの量子化の効果は小さくなる。Smith et al., (1973B)はこの量子化の影響を取り除くために格子点間の相関係数の値を補間して最大マッチングの位置を補正する方式を提案している。しかしながらこの補正を行なってもマッチング位

置を量子化する傾向を完全には、取り除くことはできない。

ループフィルムの場合は、マッチング位置をオペレータの指定により求めるため量子化の効果はほとんどない。写真処理等で解像力の低下があるため雲移動ベクトル算出に影響する可能性もあるが、定量的な見積りは困難である。

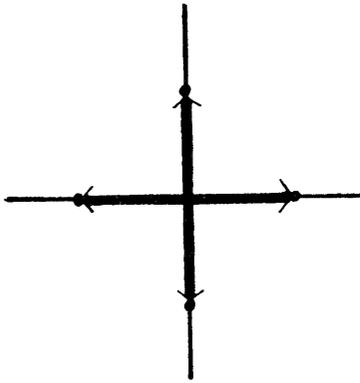


Fig. 13 Schematic of truncation error in deriving lag-position between digital images in case that the lag-value is only one pixel or line.

3.2 システム誤差についての品質管理

雲の移動ベクトル算出の過程では上に述べてきたような種々の誤差が結果の品質を低下させている。質のそろった雲移動ベクトルを得るために品質管理が行なわれるが、ここでは代表的なマッチングサーフェスに関する品質管理を McIDAS システムを例として示す。さらに GMS 風計算システムで採用した品質管理について述べ

る。

1) McIDAS システムにおける品質管理 (Smith et al., 1973 A. Suomi, 1975)

Wisconsin 大学の McIDAS システムでは、相関曲面に関する次の4つの品質管理を行なっている。

① 相関値行列の周辺にピークがある場合

相関値行列の周辺部にピークがある場合 (第14図) には実際のピークがさらに外側にある可能性があるのでエラーコードを付加する。

② 最大ピークと二次ピーク間の距離および値の差
最大ピークと二次ピークの関係は次の3つの量で表される (第15図)。

○最大ピークと二次ピークの値の差(R)

○最大ピークと二次ピーク間の距離(D)

○二次ピークより大きな値の領域の面積(S)

これらの値にある閾値を与えておき信頼性に欠けるものについてはエラーコードを付加する。

③ 相関値曲面の比較

時間的に連続した3枚以上の画像から同一の雲に対して2つのベクトルを算出した場合にその2つの相関曲面 (第16図) 間の類似性をチェックするものである。2枚

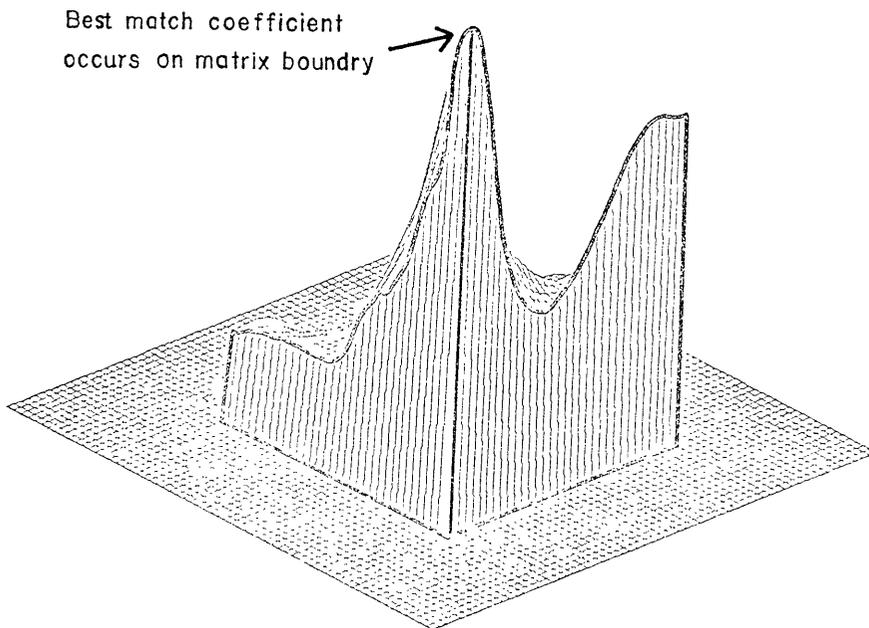


Fig. 14 Occurrence of best match coefficient on boundary (Smith et al., 1973A).

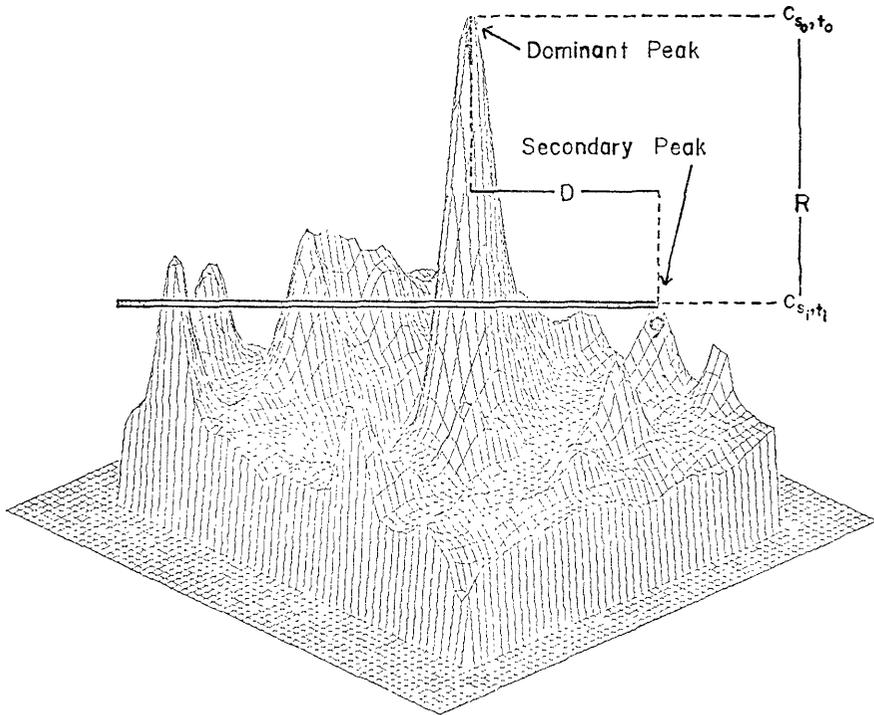


Fig. 15 Image match surface parameterizing comparison of multiple peaks (Smith et al., 1973A).

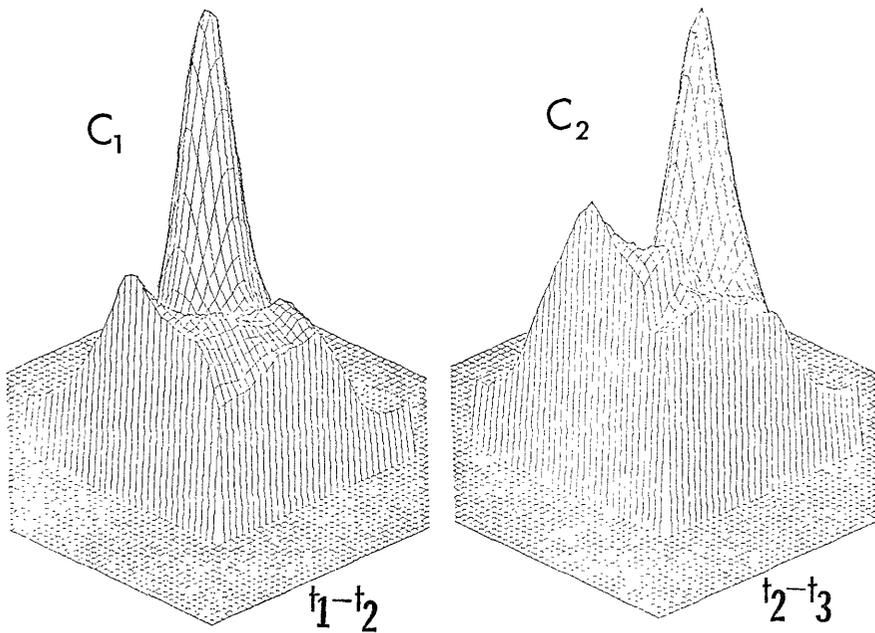


Fig. 16 Match surface arrays of same cloud target over two different time intervals (Smith et al., 1973A).

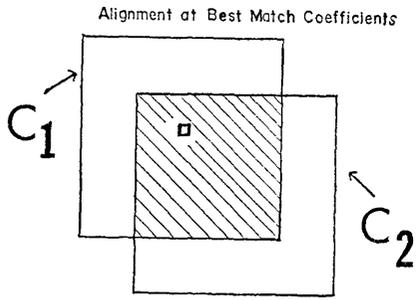


Fig. 17 Alignment of two match surfaces at coincidence of best match coefficients. Shaded area represents intersection containing sub-surfaces which can be tested for congruency (Smith et al., 1973A).

の相関値行列を重ねて重なり合った部分（第17図）について相互相関法あるいはその他の方法で類似性を見るものである。最大値に閾値を与えておき信頼性に欠けるものについてはエラーコードを付加する。

- ④ 雲移動ベクトルの加速度のチェック
特に強い気象じょう乱域以外で時間的に連続した同一

雲の加速度を求め、その各成分の値があらかじめ定められた値を越えている場合には、その測定値は捨てる。実際の各成分の差をプロットしたのが第18図である。ここにあらわれたバラツキは画像マッチングそのものの変動を表わしており、平均値からのずれは採用した navigation 法による位置合わせ誤差から生ずる加速度バイアスであると推定される。

以上は McIDAS の風計算システムに採用されている品質算理である。GMS の風計算システムにおける品質管理については別に報告がある（浜田, 1979）ので詳細は省略するが、上記の項目④、⑥および⑧については同様な方式で自動的な評価による品質管理を行なっている。⑧については相関値行列間のマッチングをとることは行なわないが、グラフィックディスプレイ上に相関曲面の表示を行ない目視による観察と評価を行なうことができる。

2) 雲頂高度の時間変化のチェック

GMS の風計算システムでは、2枚または3枚の画像から求められた同一追跡雲の雲頂高度の変動があらかじめ与えておいた閾値と比較して大きい場合に信頼性に欠けると判断し削除できるようになっている。雲頂高度の変化の激しいときは、急速な発達あるいは衰退の過程の

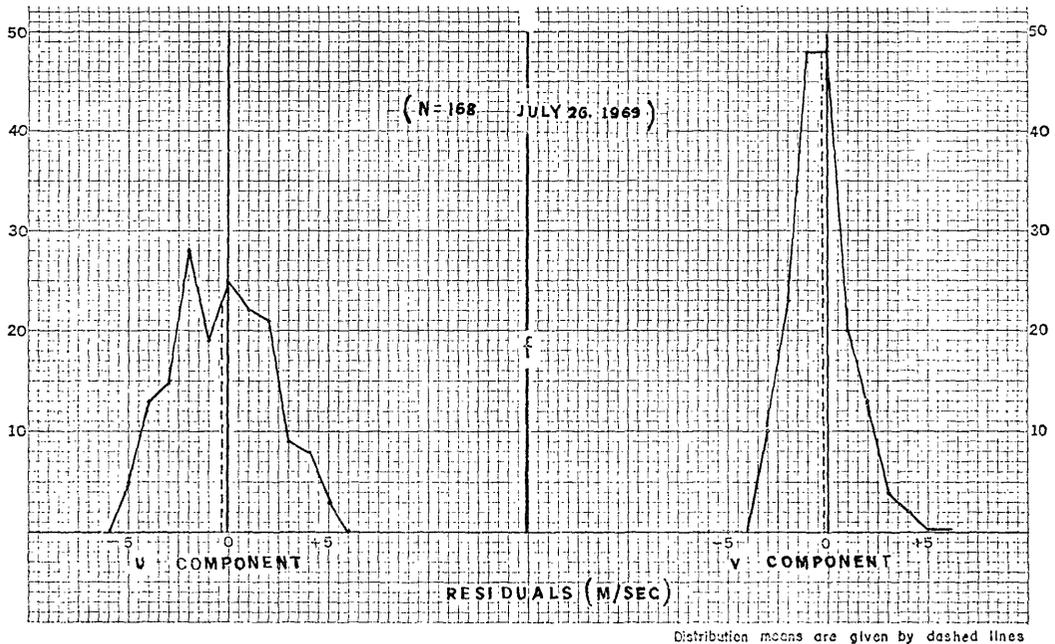


Fig. 18 U and V velocity residuals of wind sets measured over two independent time intervals (Smith et al., 1973A).

雲を追跡しているか、正しく同一の雲を追跡していないかのいずれかであると考えられる。現在のマッチングの技術ではこのいずれの場合も著しく信頼性に欠けるものと思われる。

3) ループフィルム投影による品質管理（プロジェクト法）

GMS の風計算システムではループフィルムを投影することによる品質管理を行なう。これは実際に算出された雲移動ベクトルをループフィルム画像と同じ円形グリッドの地図上にXYプロットで記入し、その上にループフィルムを投影し雲の移動と算出されたベクトルが一致するかどうかを見るものである。ループフィルム法による雲移動ベクトルについては、ディジタイザ・ベクトル算出等のシステムが正常に作動しているかどうかのチェックとして有効である。相互相関法による雲移動ベクトルについては明らかなマッチングの誤りのチェックとループフィルム法と計算機法の算出ベクトル間の相違の認識のために有効である。

4) 数値予報の結果あるいは実測値との比較

24時間あるいは36時間の数値予報の結果と比較して風向あるいは風速の差があらかじめ与えておいた閾値を越えた場合にそのベクトルを削除する。この方式は、システム誤差だけに対するチェックとは言い難く、気象学的要素も考慮して行なわれるものである。

同じ観測時刻の高層風観測データが得られその近傍で雲移動ベクトルが得られる場合比較して差の大きいときはベクトルの削除を行なう。この品質管理は高層風の観測点の分布が偏っていることから衛星での観測領域全域において比較することが困難であること、また高層風観測点が全領域に分布していれば衛星による風ベクトル算出は不要であることから矛盾しているようであるが、風ベクトルの算出システム全体の作動状況の把握には欠かせないものである。GMS の風計算システムではグラフィックディスプレイを使用した対話方式によりこの品質管理を行なっている。

4 雲移動ベクトルから風を推定するときの誤差

これまで雲移動ベクトルを算出するときの「システム誤差」について述べてきたが、この章では雲移動ベクトルを風の推定値として採用するために生ずる誤差について述べる。この誤差をここでは仮に気象学的誤差と称することにす。システム誤差については比較的誤差要因が明確で、ある程度定量化できるが、気象学的誤差については、まだ未解明である点が多い。現状ではこの誤

差については定量的に見積るという方向よりは、むしろそのような誤差が小さい雲を選定して追跡しようとするか、算出ベクトルの結果を見て、信頼性に欠けると思われるものを削除しようという方向に傾いている。

実際に雲移動ベクトルを算出した場合、まず測定の対象とした雲（あるいは雲群）としてどのようなものを選択したかが明確になりにくい。たとえそれがわかったとしても、その対象とした雲(群)が周辺の空気の移動とどのような関連性があるかは、雲(群)のメカニズムと風の場の性質に密接に関連していると考えられ、これを解くには雲の生成・発達過程等の物理的メカニズムに深く立入らずして不可能であろう。しかしながら現在この点にまで入って論ずるには余りにも大きな問題であるので将来の問題であることを述べるにとどめる。

ここでは、雲の移動量がどの程度風の値を代表しうるかを述べた文献を2, 3紹介する。次にこれらを踏まえて、逆に風の移動を代表しうる雲移動量を求めるにはどのような追跡雲を選んだら良いかという問題に触れる。

4.1 雲(群)は風と共に移動するか

この問題については、レーウィンの実測値を真値とみなして衛星による雲移動ベクトルとの比較を行なうことにより検定することが多い。レーウィンの実測風は、雲移動ベクトルと比較して、時間・空間とも小さなスケールを代表していると考えられるので結果の検討にはこの点も考慮しなければならない。また例数は少ないが航空機を利用して雲の移動と周辺の風とを同時に正確に測定することによる比較も行なわれた。

Hubert et al., (1972) は熱帯の貿易風帯における背の低い積雲あるいは積雲(群)についてどの高度のレーウィン風と一致するかを調査している。その時に対象とした積雲の雲頂および雲底の高度分布は第19図に示す。この雲底および雲頂の高度は個々の雲についてゾンデの温度と湿度のプロフィールをもとに決定された。これらの積雲の雲頂、雲底、それらの中間の高度および雲層内の平均のレーウィンベクトルの雲移動ベクトルとを比較しそのベクトル差を求めた(第20図)。それらのベクトル差の大きさの度数分布、積算度数は第21図、平均風速・平均偏差等は第3表に示すとおりである。これらによると雲の存在する層の平均レーウィン風および雲底でのレーウィン風との差が小さく、ベクトル差の大きさの平均は6.5ノット程度、50%は5ノット以内の差となっている。この値の半分くらいは風の短期変動によるものであり、レーウィン風と雲移動ベクトルが代表している空間的、時間的大きさの違いによるものであると結論づけられている。また対象とした雲が単一セルではなくて水平方向

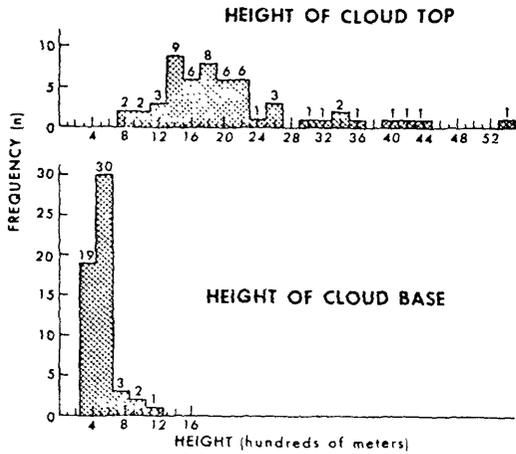


Fig. 19 Histograms of the heights of cloud bases and tops derived from ship soundings (55 cases) (Hubert et al., 1972).

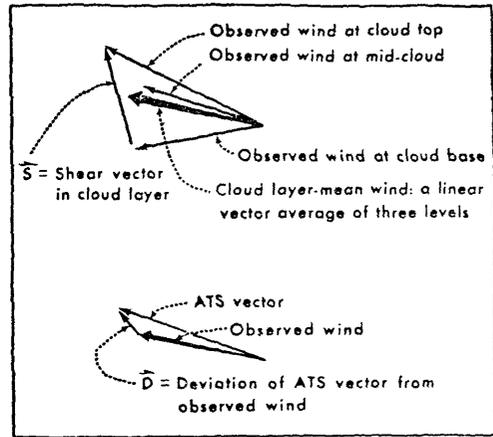


Fig. 20 Vector diagram defining the cloud layer (S), the deviation vector (D), and the layer mean wind vector (Hubert et al., 1972).

50km 程度の大きさを持つ中規模セル群であるため周辺の風とともに移動しない非移流効果が差を生み出す要因のひとつであることを指摘している。

Hasler et al., (1977) は、実際の雲の移動が周辺の風

とどの程度一致するかを航空機による観測を行ない確かめた。熱帯地方の貿易風帯の積雲を対象として、雲の移動と周辺の風の両方を、慣性航法システム (INS) を搭載した航空機で直接測定して比較した。追跡での対象と

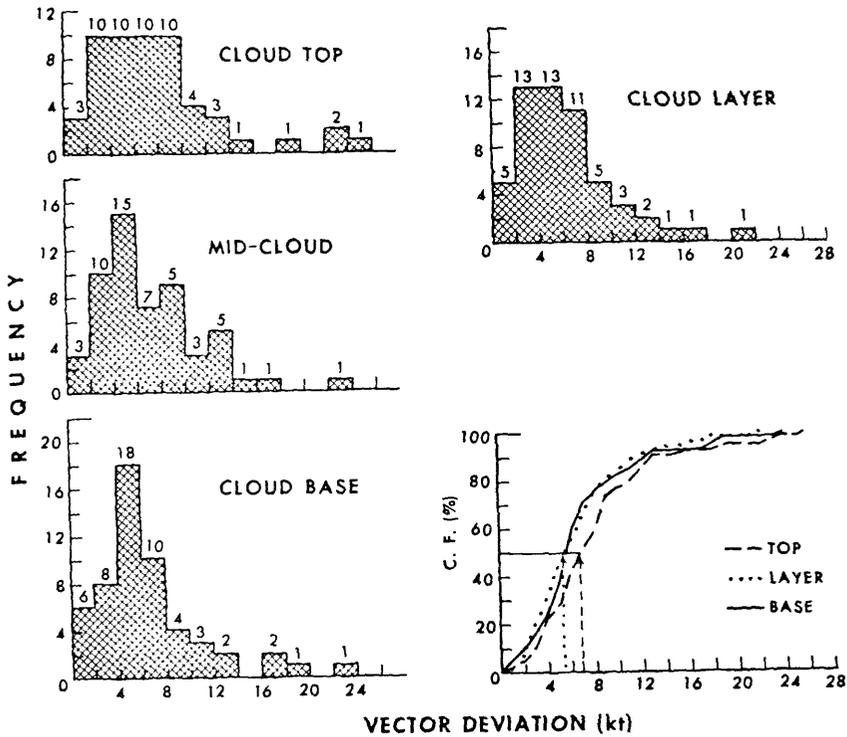


Fig. 21 Histograms and cumulative frequencies of vector deviations between ATS vectors and rawin observations (55 cases) (Hubert et al., 1972).

Table 3 Mean deviations between ATS vectors and balloon-observed wind at three levels and for cloud layer-mean and mean wind speed (55 cases).

Level	Mean wind speed (kt)	Mean absolute deviations			Algebraic mean deviations	
		Vector (kt)	Direction (deg.)	Speed (kt)	Direction (deg.)	Speed (kt)
Cloud base	16.6	6.62	17	4.23	+2	+1.38
Mid-cloud	16.8	7.15	19	4.25	-3	+1.16
Cloud top	17.8	7.96	22	4.50	-7	+0.08
Layer-mean	16.7	6.34	17	3.85	-3	+1.18
ATS vector	17.9					

なった雲は40個で水平方向のひろがり3~15 km, 雲底高度はいずれも約 960 mb, 雲頂高度は約 600~700 mb でカリブ海またはメキシコ湾で観測されたものである。このうち1時間以上の追跡を行なった21例について, 雲底高度における航空機で測定した雲の移動ベクトルと風は67%の場合 1.3m/s 以下のベクトル差であった。同様に 150m の高度, 雲の中程の高さ, 雲頂高度では, 67% の場合がそれぞれ 1.5, 3.6, 7.0 m/s 以下のベクトル差であった。ここで追跡された積雲は衛星で追跡の対象となる積雲よりやや小さめではあるが, 貿易風帯積雲が雲底付近の風に流されることを示している。

同じ実験で Hasler et al., (1977) は, 少数例であるが5個の絹雲の追跡を行なった。追跡の対象となった絹雲は, 雲頂高度 8.5km から 12.8km でメキシコ湾とカリブ海で観測されたものである。それらについて雲の層の平均風と航空機で測定した雲の移動ベクトルとの間のベクトル差の平均が約 1.6m/s であった。雲底高度, 雲の中程, 雲頂高度でのベクトル差はそれぞれ 2.2, 2.0 および 2.8m/s であった。このことは絹雲の場合は, 雲のある層全体の平均風に流されるを示している。

Fujita et al., (1975) はどの高度の風が積雲を流すかということについて興味深い調査をしている。この調査は飛行機で撮影した直径 0.1~1.2 マイルの積雲の小さなもの (plume あるいは turret) を追跡の対象としている。それらの追跡結果 (第22図) によると, その軌跡がSの字をひきのばしたようになっているものがいくつかある。一方, そのときのし層風のプロフィールは第23図のようになっており, 同じ図の中に追跡対象となった小さな雲と大きな雲の断面モデル図も与えられている。その時の小さなセルと大きなセルの移動方向と大ききの階級別度数分布表と平均値を第24図に示す。平均移動方向は小セルについては 302 度, 大セルについては 311 度である。いずれも雲底以下の積雲の根 (root) のところの影響もうけており, 大きい方のセルは 325° の風向の影響

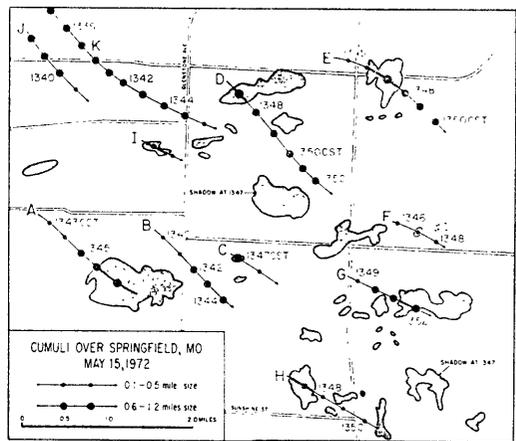


Fig. 22 Tracks of cloud shadows over Springfield. Note that some tracks curve like a stretch letter S (Fujita et al., 1975).

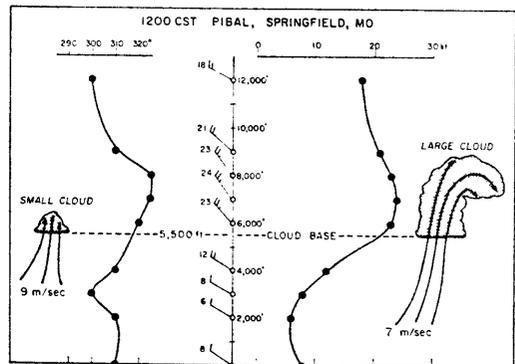


Fig. 23 A model of cumulus clouds used for tracking their shadows over Springfield on 15 May 1972 (Fujita et al., 1975).

響を受け軌跡をわずかに右に曲げる。この効果によってセルの発達衰退の過程で移動方向が変りS字型軌跡を持つようになる。

この調査は直径 0.1~1.2 マイルの大きさのセルを対象としており、静止気象衛星からの観測は困難な大きさであるため、このまま衛星画像から算出される雲移動ベクトルに適用するには問題はあるが、雲移動ベクトルの代表する高度を求めるのは簡単でないことを示唆するものであると言える。

これらの3例は風の測定値と雲の移動ベクトルを直接比較して、積雲の移動速度は雲底の風と良く一致するというを示している。これらの結果は雲の移動量の測定値を風の推定値として利用できることを示している。これに対して Hubert et al., (1974) はレーウィン風、ループフィルムによる雲移動ベクトル、計算機による雲移動ベクトルのすべてを使って最良解析 (Best analysis. 以下単に解析と言う) なるものを作り出して、それと雲移動ベクトルとを比較した。この論文は、雲移動ベクトルを実際に数値予報の入力として利用する方法を論ずるのが目的であるが、この点についての紹介は別の機会にゆずることとし、ここでは比較の結果のみ示す。

ATS 画像を使って計算機による全自動法で求めた計算機ベクトル、ループフィルムによるマニュアルベクトルおよびレーウィンによる風の3者を使って流線解析を行ない、その解析と各ベクトルを比較し、そのベクトル

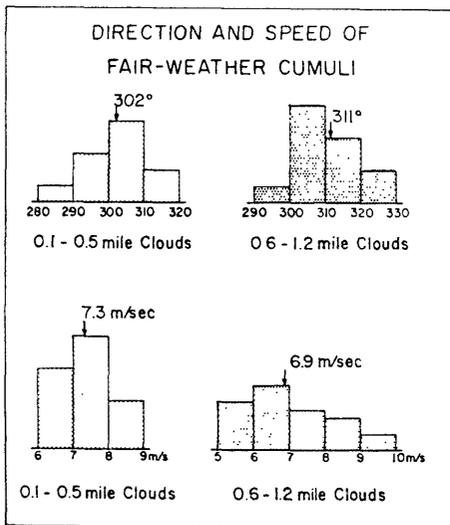


Fig. 24 Direction and speed of fair-weather cumuli over Springfield computed from cloud shadows on 15 May 1972 (Fujita et al., 1975).

差の累積度数を求めたのが第 25 図である。対象とした ATS 写真, 解析結果, 実測風と雲移動ベクトルを第 26 図に示す。

第25図によると個々のベクトルを個別に比較したときの差よりも、解析と各ベクトルの差の方が小さく、70~80%が3~4ノット以内の差である。このことは適当な編集を行ない解析した結果は、小スケールの変動は平滑化されているので雲移動ベクトルとより一致するようになったのかもしれない。しかしながら解析に使用されたデータの中には比較する雲移動ベクトルも入っているので、この影響も大きいであろう。いずれにしても数値予報への利用という立場から見て有効性を証明していると言えるし、この値(3~4ノット)は観測された雲移動ベクトルの精度の目安を示していると言える。

これまで見てきたいくつかの文献から得られる風の推定精度についてまとめて見ると以下の様になる。

- 1) 静止衛星で観測される雲(群)は雲底あるいは雲の

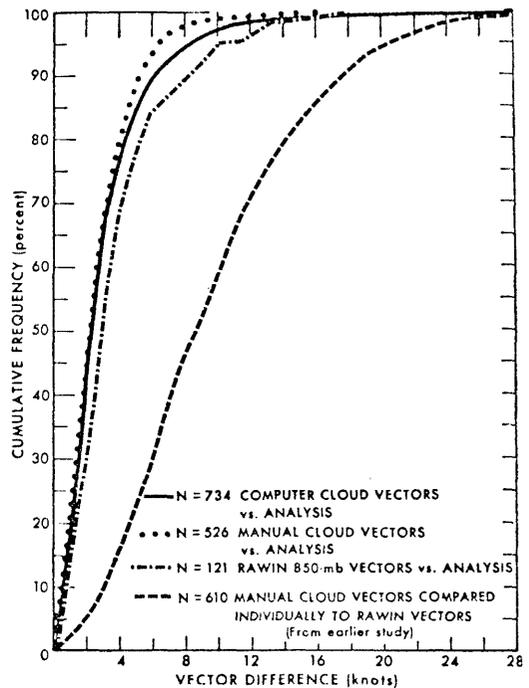


Fig. 25 Cumulative frequency of vector magnitude deviations between wind data and the best analysis and cumulative frequency of vector-magnitude deviations between individual rawins and individual cloud vectors (Hubert et al., 1974).

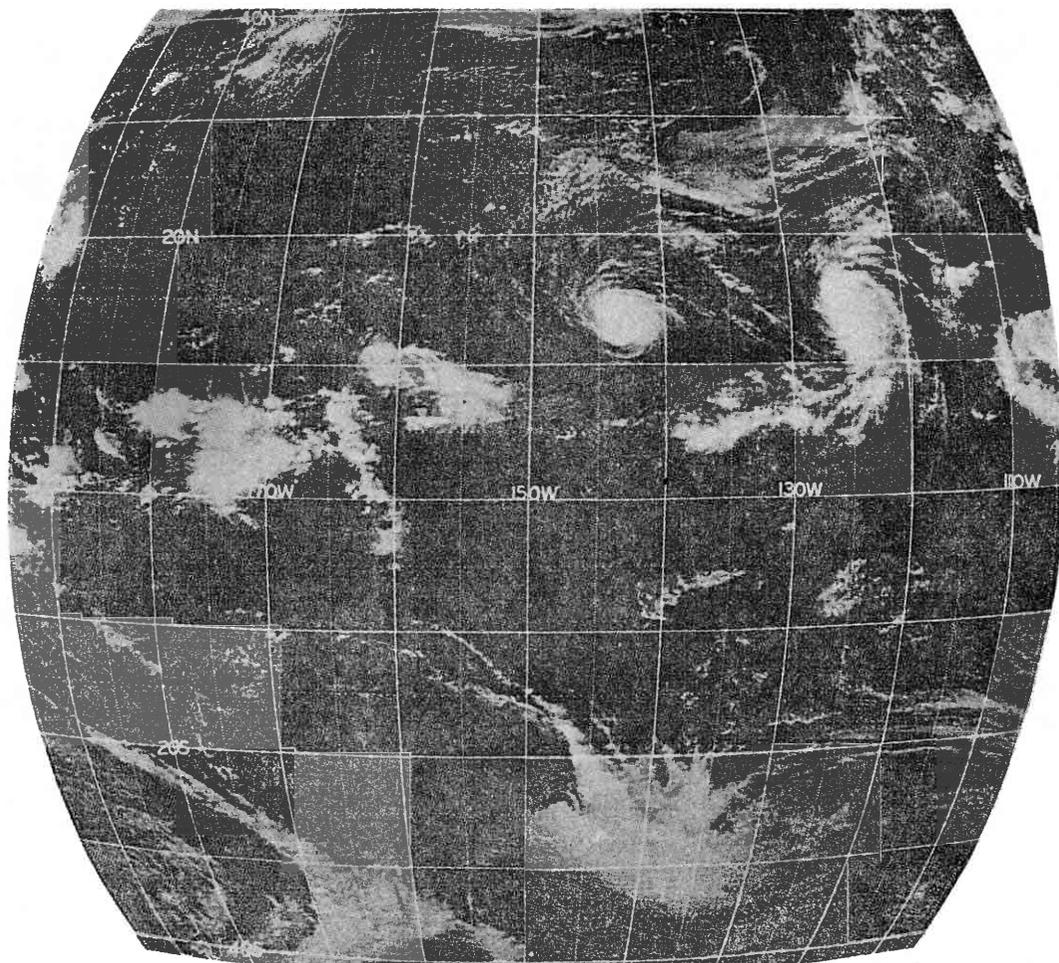


Fig. 26 (a) ATS-1 picture with a superposed geodetic grid (near 2200 GMT on Aug. 12, 1972; (b) objective streamline (solid lines) and isotach (broken lines) analysis for about 00 GMT on Aug. 13, 1972 (shaded area indicate speed of 20 kt and greater); and (c) vectors and relative vorticity. The shortest wind shafts represent computer vectors; the medium size shafts, manual vectors (for about 2200 GMT on Aug. 12, 1972; and the longest wind shafts, 850-mb rawin observations (for 00 GMT on Aug. 13, 1972). The vorticity isopleths are in units of 10^{-5} s^{-1} (zero isopleth omitted). The positive values represent counter-clockwise circulation in both hemispheres; the cross hatching, anticyclonic vorticity; and shaded areas, cyclonic vorticity (Hubert et al., 1974).

層全体の平均風に近い方向、速さで移動する。雲(群)の移動と高層観測風間のベクトル差は6~7ノット程度である。

2) レーウィン風と雲移動ベクトルは代表する時間的・空間的スケールが異なるために、両者の比較結果は必ずしも正しく雲移動ベクトルの精度を表現してはいない。

3) しかしながら小スケールの変動が除去されている

と思われる解析との比較で3~4ノットの差となっているので、雲移動ベクトルは風の値としてこの程度の精度を持っていると推定できる。

これらの結論にさらに付加えるならば、ここで調査対象としたのは ATS 衛星画像を使って算出された雲移動ベクトルであり、画像の解像力は衛星直下点で 5km 程度である。したがって中緯度における解像力が 1.5 km 程度である GMS 画像データ処理による風の推定値はこ

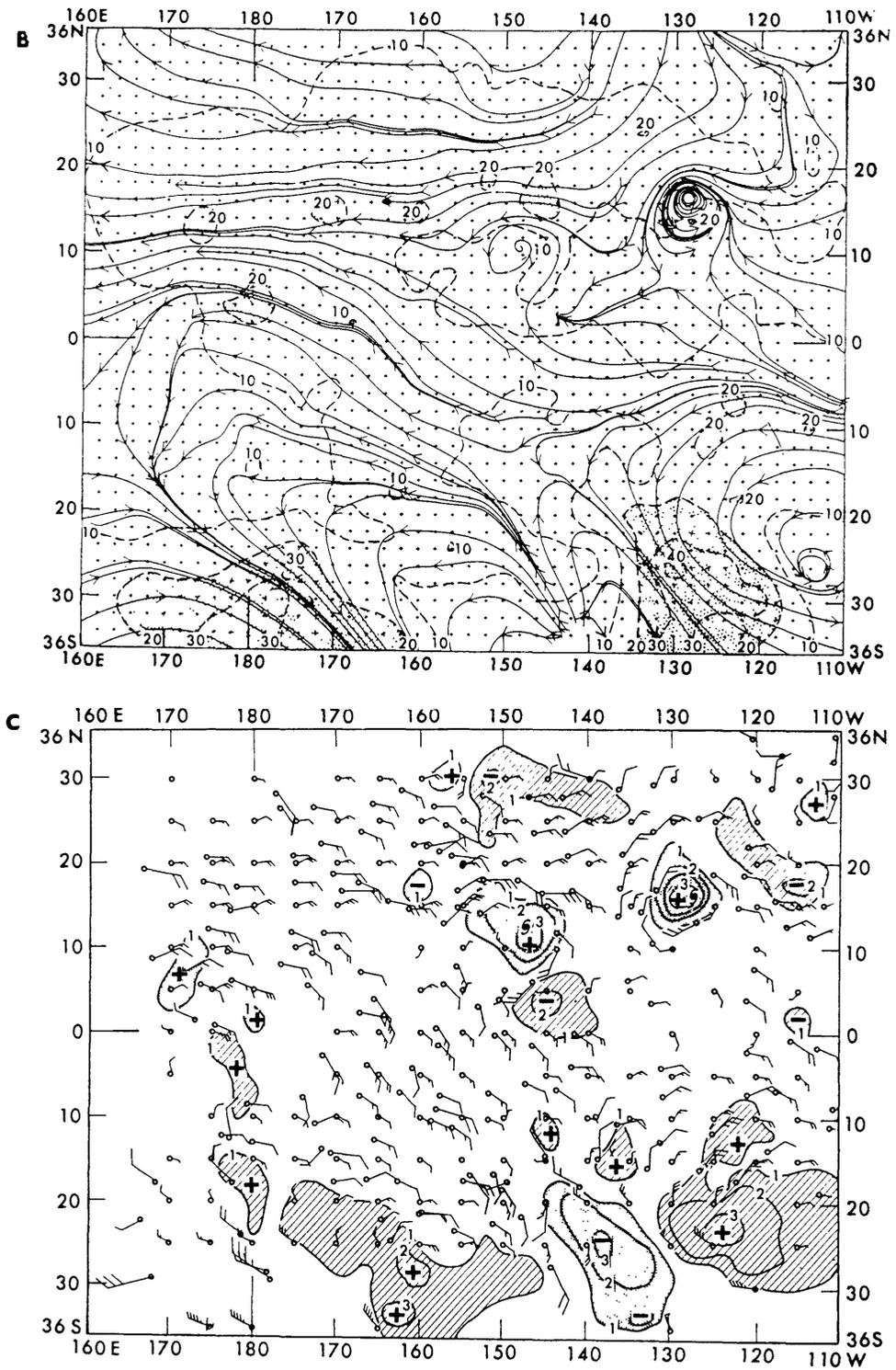


Fig. 26 (continued)

れよりも良い精度で得られることが期待できる。

4.2 追跡雲選定の基準

これまで論じてきたように雲の移動量の測定値を風の値とする場合に生ずる誤差は必然的なものである。これらの誤差をできるだけ小さくするために、3.2項で述べたシステム誤差に対する品質管理に加えて、次の様な対策が考えられる。

1) 算出されたベクトルが周辺のベクトルや予報値と比較して大きな矛盾が無いかチェックを行ない、信頼性に欠けると思われるデータを削除する。

2) 追跡雲の指定のときできるだけ良い品質のデータが得られると期待される雲を選定すること（追跡雲選定の基準の確立）。

ここで言う気象学的誤差と前に述べたシステム誤差とは複雑にかみ合っており、したがってそれらに対する品質管理の方法もいずれか一方へ分類することはできないが上記の2項目は気象学的要因に対する品質管理の色彩が強い。

第1の項目である予報値あるいは周辺の風ベクトルとの差のチェックは大きな誤りを除去する上で有効である。実際に NESS では既にこのチェックを現業でとり入れている。

第2の項目である追跡雲選定の基準を確立することは消極的な方法の様であるが、現業的処理としては非常に有効である。というのは、選定した追跡雲の数に対して有効な風ベクトルの数を増加させることになり、無駄な計算時間が節約できる、即ち計算機資源を節約できる。作業を行なう人間にとっても指定点数に対する有効ベクトル数の比率が高い程、雲指定作業に対する満足感が大きいであろう。このことはルーチン業務を安定して維持するには大切なことであると思われる。以下この項目について考察して見よう。

ループフィルム法による場合、Hubert et al., (1971) は風の動きを表わしていると考えられる追跡雲（この様な雲をこの論文では passive tracer と呼んでいる）を選定する基準として次の4つをあげている。

- 1) 均等な明るさを持った線、帯あるいは領域の追跡をするよりは雲群や雲における同一点を追跡すること。
- 2) 総観場と矛盾しない速度と振舞いで運動する雲だけをを用いること。
- 3) 時間的変化の小さな雲だけを使うこと。
- 4) 鉛直方向のシャワーを持つ層を突きさすような雲の追跡は注意すること。この様な場合は雲塊の中心よりも風上の縁を追跡すると良い。

追跡を行なうオペレータは解析者でもあって総観場を頭に入れて指定する必要性も指摘している。解析者に対する手引きについても述べられているがここでは省略する。

計算機による風ベクトル算出の場合について、Smith et al., (1972) は相関値曲面のピークが現実の雲の移動をあらわしていない場合が約7%あることを指摘した（第4図）。これらの場合の大部分は追跡雲指定の基準を改善することによって除去できると述べている。しかし具体的にその基準については触れられていない。

計算機による風ベクトル算出では、ムービー装置の無い場合、あるいはあっても解像力、表示領域の大きさ等の点でループフィルムと同等の情報を得ることはできないであろう。したがって、ループフィルムの場合の追跡雲の選定の基準の一部はそのまま採用できるとしても、指定雲の良否についてはループフィルムの場合ほど厳密に良否判断を行なうことは困難であろう。計算機ベクトルの場合には、既に述べた算出過程で得られるパラメータに対するチェック、あるいは算出結果に対するチェック等の品質管理の比重が増して来る。

SMS1 の画像データを入力画像とし、GMS 風計算システムによる風計算を行なった結果（浜田ら、1977. 浜田ら、1978. 浜田ら、1979）によると、まだ充分な資料とは言えないが、パターン認識の上からみて良好な指定雲は、

- 1) セル状で縁辺の明りょうなもので、追跡雲がテンプレートの中におさまる程度の大きさを有しているもの
- 2) 小さなセルが規則正しく繰返している様な雲パターン
- 3) ライン状でテンプレート内で明確に途切れているもの

であることを示している。また良くない指定雲は、

- 1) 長くつながったライン状の雲
 - 2) 縁辺の明瞭でない（ぼやけた）雲
- である。

5 おわりに

本報告では、主として文献調査により風計算の誤差の問題とそれに対する対策（品質管理と追跡雲選定の基準）について考察を行なった。その結果は、現在までの状況では気象学的誤差と言われるものについては不明な点が多く、その様な誤差の小さいものを追跡しようという消極的とも見える方法で解決しようとしていると言って良い。しかしながら一方では現業的に風ベクトルが算出され数値予報の入力データとして使われる様になってきて

いる。

衛星の雲の追跡による風ベクトルデータの誤差に関しては、数値予報への利用の中で克服できるという考えから Hubert et al., (1974) はその利用法について考えている。この論文については一部を引用しただけであるが、これからの問題として重要である。

GMS 風計算システム (CWES) では 1978年4月から現業的に1日2回風ベクトルが算出され、GTS回線により世界中の利用者に放送されている。現在までにすでに CWESシステムの精度についても調査が行なわれ、データが蓄積されつつある。これらの成果はまた別の機会に報告される。

本報告は1976年3月12日、気象庁衛星課第55回文献研究会で報告したものを主体とし、その後の情報も多少加えてまとめたものである。最初にまとめた時点から既に2年以上経過し、一部手直しをしたものの新しい情報に欠ける部分もあり、また GMS によりもっと新たな結果を得たものもある。新しい情報については筆者あるいはこれらに関心を持つ人達により発表されるであろうが、本稿は風計算結果の精度を論ずる基礎的事項に関する調査結果でありこれからこれらの資料を利用しようとする場合あるいは風ベクトルの算出を行なおうとする場合に有効であると考え、あえて大幅な手直しはせずに投稿した。

参考文献

- Fujita, T.T., E.W. Pearl and W.E. Shenk (1975): Satellite tracked cumulus velocities. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 407-412.
- Hamada, T and K. Watanabe(1978): Determination of Winds from Geostationary Satellite Data, Present Techniques (Lecture 8A). Paper presented at the WMO/UN Regional Training Seminar on the Interpretation, Analysis and Use of Meteorological 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. Meteor.*, **16**, 812-815.
- Hubert, L.F., and A. Timchalk (1972): Convective clouds as tracers of air motion. NOAA Tech. Memo., NESS **40**, pp 11.
- Hubert, L.F. and L.F. Whitney (1971): Wind estimation from geostationary satellite pictures. *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 665-672.
- Hubert, L.F. and L.F. Whitney (1974): Compatibility of low-clouds vectors and rawins for synoptic-scale analysis. NOAA Tech. Rep., NESS **70**, pp 26.
- Japan Meteorological Agency (1977): The Present Stage of International Comparison of Cloud Wind Vectors through SMS Imagery Data. Report presented at CGMS-VII, Jan. 1977, Genève.
- 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. Meteor.*, **10**, 118-132.
- Meteorological Satellite Center (1977): An extraction of wind vector from the SMS Tapes by using the GMS data processing system for international comparison. Meteorological Satellite Center, Tokyo, Japan, October **20**, 1977.
- Smith, E.A. (1975): The McIDAS System. *IEEE Trans. on Geoscience Electronics*, GE-**13**, 123-136.
- Smith, E.A. and D.R. Phillips (1972): Automated cloud tracking using precisely aligned digital ATS pictures. *IEEE Trans. on Computers*, **21**, 715-729.
- Smith, E.A. and D.R. Phillips (1973A): Quality control of wind vectors. Internal SSEC Report, Univ. of Wisconsin.
- Smith, E.A. and D.R. Phillips (1973B): McIDAS cloud tracking system. Internal SSEC report, University of Wisconsin.
- Suomi, V.E. (1975): Man-computer Interactive Data Access System (McIDAS). Final report, Contract NAS5-23296, SSEC, Univ. of Wisconsin.
- 阿部勝宏, 山本孝二 (1977): 衛星の赤外放射データから雲頂高度を決定する際の射出率の影響. *天気*, **24**, 539-541.
- 浜田忠昭 (1979): 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, 昭和54年3月.
- 浜田忠昭, 田崎允一, 斉藤 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一追跡に適する雲パターン一, 春季大会講演予稿集, 日本気象学会, **31**, 109.
- 浜田忠昭, 田崎允一, 斉藤 優, 野田忠彦(1978): 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(その2)ーパターンマッチングに関する自動

- 評価. 春季大会講演予稿集, 日本気象学会, **33**, 89. る。
- 浜田忠昭, 田崎允一, 斉藤 優, 野田忠彦(1980): SMS
画像データによる雲移動量の算出—風計算国際比較作
業経過報告. 気象衛星センター技術報告投稿中 L.F. Hubert & L.F. Whitney (1971): 訳者, 荒井
浄, 中垣克之, Vol. 2. No. 1. 53-69. 昭和50年1月。
- 藤田哲也(1975): 気象衛星画像の利用. 1974年9月17日
気象庁での講演と質疑から, 気象衛星技術報告, **2**,
24-31. J.A. Leese, C.S. Novak & B.B. Clark (1971): 訳者,
石川正勝, 井上豊志郎, 安東義彦, Vol. 2. No. 1.
32-52. 昭和50年1月。
- 上記参考文献のうち次の3編については, 気象衛星技
術報告 気象庁気象衛星課発行に翻訳が掲載されてい
る。 E.A. Smith & D.R. Phillips (1972): 訳者, 浜田忠昭
Vol. 2. No. 2. 39-64. 昭和50年9月。