

衛星画像から求めた上層風の精度向上 — 推定高度の見直し —

Revised Height Assignment for High-level Cloud Motion Winds Derived from Satellite Imagery

土井 恵治* 内田 裕之** 内藤 成規*
Keiji DOI, Hiroyuki UCHIDA, Shigenori NAITO

Abstract

In order to improve the accuracy of “high-level” cloud motion wind (CMW) vectors derived from GMS imagery, two kinds of height assignment method are examined. One is to calculate height for each tracer cloud using mean TBB of pixels above 400mb. The height by means of this method is called Cloud Height by Temperature (CHT) in this report. The other is to revise the height assignment table currently in use in routine operations. The revised height table is statistically determined in every tens of degrees of latitudinal belt zones for every month, using vertical profiles of mean vector difference between CMW and RAWIN sonde data. The height from the revised table is called Wind Height from Table 90 (WHT90), and also the height from the old one is called WHT80 in this report.

The results are as follows:

- I) The accuracy of CMW vectors both at CHT and at WHT90 is better than at WHT80, and is remarkably improved in 20°S zone.
- II) At CHT, however, CMW vectors are poorer in accuracy than at WHT80 where CMW vectors are in 10°N zone and in the equatorial zone and their speed are greater than 40m/s.
- III) Some vectors at CHT have less accuracy than at WHT80 because of height estimation error caused by ambiguity of cloud emissivity.

Taking into account these results mentioned above, it is concluded that WHT90 would be adopted as “high-level” CMW height assignment at MSC. This wind height assignment will be in operation on April 1, 1990.

1. はじめに

衛星画像から算出される風のデータ(衛星風)は海洋上などの通常の観測データの乏しい場所で広範囲にわたって数多く求めることができる。しかし、他の風の観測とは異なり雲の移動ベクトルを風ベクトルとみなしていることを、衛星風データを利用するに当たって認識しておく必要がある。

巻雲を追跡して求める上層の衛星風(以下、単に上層風)の算出は1987年3月の計算機システムの更新を契機に自動化されている。更新以前のLF法(Loop Film法)で算出された上層風の精度に関する調査は小花(1979, 1981)、加藤(1980)、Hamada(1982a, 1982

b)、市沢(1983)、井石・河野(1985)に詳しい。また、更新後の自動算出法による上層風の精度に関しては大島(1988)の調査がある。これらの調査によれば、上層風と高層風観測データ(以下、RAWIN風)とのベクトル差の絶対値(以下、単にベクトル差)のRMS(Root Mean Square)は10~15m/sである。また、柏木(1986)は、上層風とRAWIN風との差は風の数値予報値とRAWIN風との差よりも大きいと指摘している。

上層風の精度を左右する要因としてベクトル算出そのものの精度と推定高度の妥当性のふたつを挙げることができる。まず、上層風の算出について、雲が周辺の風と同速度で流されているかどうかという代表性の

* 気象衛星センター解析課

** 気象衛星センターシステム管理課

問題があるが、この問題については適当な調査方法がないので本稿では言及しない。算出方法については、現在の相互相関法は以前の LF 法と比較して顕著な差はないことが確かめられている (大島 (1988))。

一方、現在用いている推定高度については1980~1981年の季節ごとの1ヶ月間の北半球のデータから統計的手法で求めた最適値であり (Hamada (1982b)), これらの推定高度が年数を経た現在でも妥当であるかどうかを検証する必要がある。さらに、南半球の推定高度は北半球の値を半年ずらして使用しているため、実際に南半球のデータを用いて推定高度を見直す必要がある。

上述のように、上層風の精度の向上には現在用いている推定高度を見直すことが必要である。そこで筆者らは上層風の精度の向上を目的とした推定高度の検討を行った。本稿ではこの結果について報告する。

なお、本調査で用いた上層風のデータは特に断りがないければ1988年の1年間の00UTと12UTのものである。その他に1987年3月から1989年8月までの00UTと12UTの上層風も必要に応じて参考として使用した。

2. 上層風精度の現状

最初に、現在の推定高度での上層風の精度を調査した。

まず、現在用いている推定高度を Table 1 に示す。本稿ではこのテーブルによる推定高度を WHT80 (Wind Height from Table 80) とする。また、衛星風の精度は RAWIN 風と比較して論じられるのが一般的である。他に利用できる客観データがない

Table 1 Wind Height Table 80 (WHT80) now in routine use (in mb)

	winter					spring			
	12/15	3/15	6/15	9/15		12/15	3/15	6/15	9/15
35°N	400	300	250	300	35°N				
25°N					25°N				
	200	200	200	200					
EQ					EQ				
	200	200	200	200					
25°S					25°S				
35°S					35°S				
	250	300	400	300					
	summer	autumn	winter	spring					

ので本調査でも上層風と RAWIN 風を比較することにした (Appendix 参照)。

Fig. 1に上層風と RAWIN 風の風速の対応を示す。RAWIN 風速に比べて上層風速はいくぶん小さく算出される傾向にある。特に30m/s以下の衛星風については、この傾向がはっきり現れている。

次に、推定高度別のベクトル差の RMS を Table 2 (a) に示す。200mb ではそのほかの高度よりも RMS が小さい。200mb は緯度25°(夏季には35°)よりも低緯度地方の上層風の推定高度であり、低緯度では一般に風速が小さいため上層風と RAWIN 風の間大きな差が出なかったと考えられる。そのほかの高度については特徴的な差はみられない。

上層風の精度をさらに詳しく把握するために領域を緯度帯に分けて調査した。領域は北緯5°から南緯5°を赤道帯(EQ)とし、南北に10°ごとに分けて、10°N帯(5°N~15°N), 20°N帯(15°N~25°N)などとした。領域別の上層風と RAWIN 風とのベクトル差の RMS の月変化を Fig. 2 に示す。RMS は10°帯より低緯度では5~10m/sであるのに対して、20°帯よりも高緯度では10m/s以上である。また、30°S帯を除いて冬季の RMS は他の季節よりも大きくなっている。

参考のために BFL (Best Fit Level) でのベクトル差の RMS を Fig. 2 に点線で示した (BFL の定義については Appendix を参照)。この値は現在の算出法での上層風の算出精度の限界を表していると言える。また、BFL と WHT80 の RMS との差は精度の向上の余地を示している。BFL での精度は先に述べた WHT80 の場合と同様で、低緯度帯の精度のほうが中

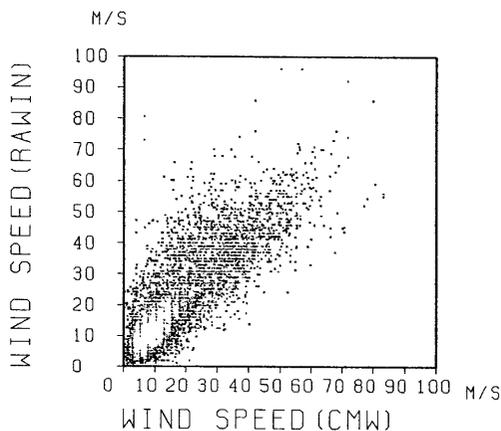


Fig. 1 Correlation between "high-level" Cloud Motion Winds(CMW) and RAWIN sonde winds, at estimated height of WHT80 (see Table 1)

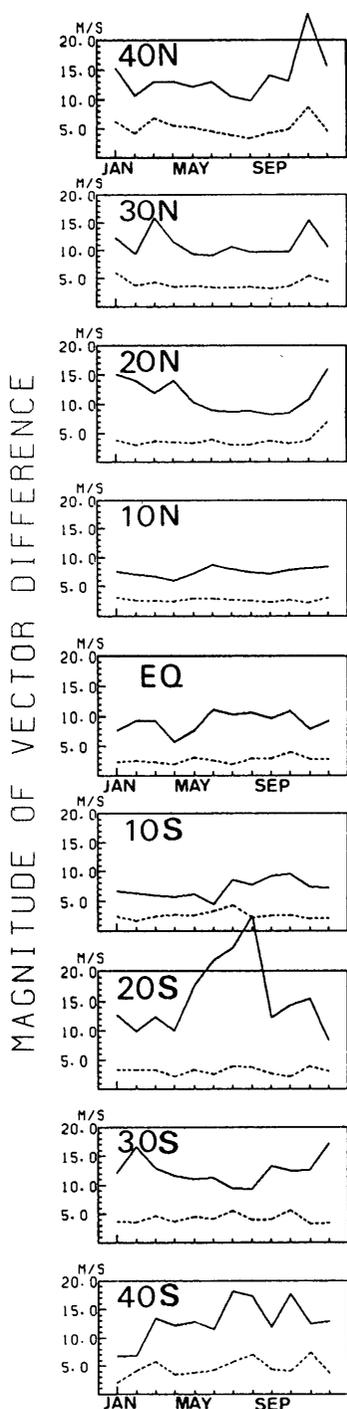


Fig. 2 Monthly mean of Root Mean Square (RMS) of magnitude of vector difference between CMW and RAWIN in zonal region
 solid line : at WHT80
 dashed line: at the Best Fit Level (BFL)

緯度帯よりも良い傾向にある。

一般に、中緯度の平均風速は低緯度の平均風速よりも大きく、また冬季の平均風速は他の季節の平均風速よりも大きいことから、RMSは風速に応じた大きさを持つことが予想される。確かに、後述のように風速の大きな上層風についてのベクトル差のRMSは風速の小さいものに比べて大きな値を取るようである。しかし、Fig. 3に示すように、風速に比例してベクトル差が大きくなるというはっきりとした関係は認められない。この問題については別途調査中であるので本稿ではこれ以上触れない。

3. 上層風の高度設定法

上層風の精度の向上を図るためWHT80に替わる推定高度として以下の2通りの方法で求める高度を考えた。

- ① 追跡雲の輝度温度情報から高度を計算する
- ② 過去のデータから緯度帯ごと、月ごとの高度の最適値を統計的に決める。

ここではこれらの高度算出方法について述べる。

3. 1 追跡雲の高度の算出

第一は、算出された上層風に対し、追跡雲の輝度温度から個々に高度を計算する方法である。追跡雲の温度を画像データから直接求めることも十分可能であるが、現業業務への導入を想定して、計算時間の節約およびプログラムの簡素化という観点から、ここでは気象衛星センターのプロダクトである基本雲格子点データ(気象衛星資料利用の手引き(1988)参照)の温度情報を用いた。また、温度-高度変換には数値予報課

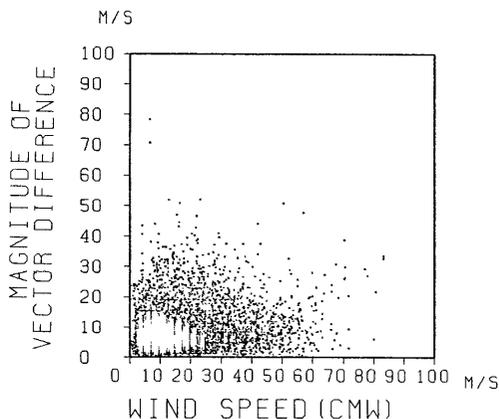


Fig. 3 Scattered diagram of CMW and magnitude of vector difference between CMW and RAWIN

の5°格子の鉛直温度分布の対象時刻に対応する12時間予報値を各格子に内挿した値を用いた。

まず追跡雲を中心として緯経度0.25°×0.25°の格子データを7×7個、すなわち1.75°四方の高度計算領域を切り出す。次に、この領域内の各格子の400mbより上層の画素の平均温度から各格子の高度を計算する(400mb以上の温度情報は基本雲格子点データに記述されている)。最後に高度計算領域内の各格子の高度の平均値を計算してこの領域の代表の高度とする。以下、この方法で算出した高度をCHT (Cloud Height by Temperature) とする。CHTは300~400mbの範囲の値となっている。

この方法により、観測時におけるその地点での気象状況を反映した高度が各上層風に付加されることが期待できる。しかし、巻雲の赤外線に関する射出率を100%と仮定しているため、薄い巻雲については算出された高度は実際の高度よりも低く算出される。現在の赤外1チャンネルの観測システムでは正確に射出率を見積ることは不可能であるため、算出された高度にある程度の誤差が含まれることは避けられない。

3. 2 統計的手法による高度の推定

第二は、現在使用しているWHT80を定めた方法に

Table 2 RMS of vector difference between CMW and RAWIN at estimated height in 1988

Height m b	(a)W H T 80		(b)C H T		(c)W H T 90	
	RMS m/s	number of data	RMS m/s	number of data	RMS m/s	number of data
2 0 0	9.52	5428	9.41	96		
2 5 0	11.13	1126	8.28	1018	7.81	4721
3 0 0	12.36	2205	9.43	4829	10.36	3558
4 0 0	12.03	456	10.46	3272	11.94	936

Table 3 Revised Wind Height (WHT90) determined statistically using 1988 data (in mb)

latitude	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUNE	JULY	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.
40N	400	400	400	300	300	300	300	300	300	300	400	400
30N	400	400	400	300	300	250	250	250	250	300	400	400
20N	300	300	300	300	300	250	250	250	250	300	300	300
10N	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
EQ.	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
10S	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
20S	250	250	300	300	300	300	400	400	400	300	300	250
30S	300	300	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400
40S	300	300	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400

ならない、新たに推定高度のテーブルを作り直す方法である。Hamada(1982b)の方法に若干の修正を加えた方法により、月ごと緯度帯ごとに高度を定めた。まず10mb ごとの上層風と RAWIN 風とのベクトル差の鉛直プロファイルを求める。得られたプロファイルを用いて緯度帯ごとに平均して平均ベクトル差プロファイルを計算する。このプロファイルからベクトル差が最も小さくなる高度を高層気象観測の指定面高度単位で視察により求めて推定高度の最適値とする。

南半球のデータを含む1988年の上層風と RAWIN 風のデータを用いて決定した高度を WHT90とし、Table 3 に示す。WHT90は低緯度では WHT80の200mb より低い250mb となり、また中緯度帯では400mb の領域が広がるなど、全体に現在よりも高度は低くなる。

この方法では平均的な最適高度が与えられ、緯度帯ごとに一律に高度が与えられるため、風ベクトルの算出された場所の気象状況に応じた高度を与えることができない。さらに、高度を決定する際に使用した年の気象状況が高度の値に反映されるため、WHT90が異なる年にも妥当であるかどうかの保証はない。

4. 新しい高度での上層風の精度

前節で定義した2通りの高度推定方法により得られた推定高度での上層風の精度を2. と同様にして調べた。新しい高度でのベクトル差の RMS が WHT80で

の RMS よりも小さければ精度が向上したと考えてよい。

まず、概略を把握するために指定高度面別にベクトル差の RMS を求めた結果を Table2(b), (c)に示す。なお、CHT については計算された高度に最も近い指定面の RAWIN 風と比較した。WHT90の400mb ではあまり改善がみられないが、250mb, 300mb では大きく改善されている。CHT についてもほぼ同様のことが言えるが、400mb については WHT90より改善されている。200mb では CHT については改善されていない。また WHT90については該当するデータがないため比較できない。

次に、緯度帯ごとのベクトル差の RMS を Fig. 4 に示す。Fig. 4 によれば CHT, WHT90いずれの高度によっても冬期間の20°S 帯、春期間の20°N 帯には大幅な改善となったことが分かる。これとは逆に1~5月の10°N 帯、3~6月期間の10°S 帯では新しい高度でのベクトル差の RMS 値が大きくなっている。しかしながら、この緯度帯の他の月での精度と比べて著しく劣るものではない。

Table 4 には1年間の緯度帯ごとの RMS を示す。CHT と WHT90それぞれの RMS を比較すると、30°S 帯を除けば、ほぼ同程度か WHT90のほうが値がやや小さい。

上述の CHT, WHT90いずれの推定高度を用いてもある程度の向上は達成されることが分かった。

ところで、上層風の精度は特に風速の大きなデータについてその誤差が大きいと指摘されている(数値予報課 柏木氏私信)。そこで、風速で分類した上層風の精度を調査した。風速を10m/s, 25m/s で分けた時のベクトル差の RMS の一部を Fig. 5 に示す。

これによれば、CHT では40°N 帯、30°N 帯の40m/s 以上、および赤道帯、10°N 帯の10~25m/s で、全ての月にわたって WHT80より精度が落ちている。一方、WHT90では40m/s 以上の風速のベクトルについては一部 RMS が大きくなる月もあるが WHT80と比較して大きな差はない。40°N 帯・30°N 帯は高度の見直しによる修正が小さかった領域であることによると考えている。また、赤道帯・10°N 帯についても CHT のような精度の低下は現れていない。

以上のように、推定高度の修正による上層風の精度の向上の効果は、推定高度別にみれば CHT の方が優れているのに対し、緯度帯別にみれば WHT90の方が優れている。さらに風速別にみると CHT では一部精度を低下させるような結果となった。

Table 4 Zonal RMS of vector difference between CWV and RAWIN in 1988

Latitude	(a)WHT80 RMS (m/s)	(b)CHT RMS (m/s)	(c)WHT90 RMS (m/s)	number of data
40N	12.51	11.23	11.31	2016
30N	10.63	9.66	9.57	2658
20N	10.36	9.44	8.77	1463
10N	7.49	8.63	6.98	1530
EQ.	8.93	8.08	7.25	521
10S	7.38	7.19	6.34	365
20S	14.03	9.92	9.99	217
30S	12.60	9.96	10.49	303
40S	13.00	11.53	11.42	142

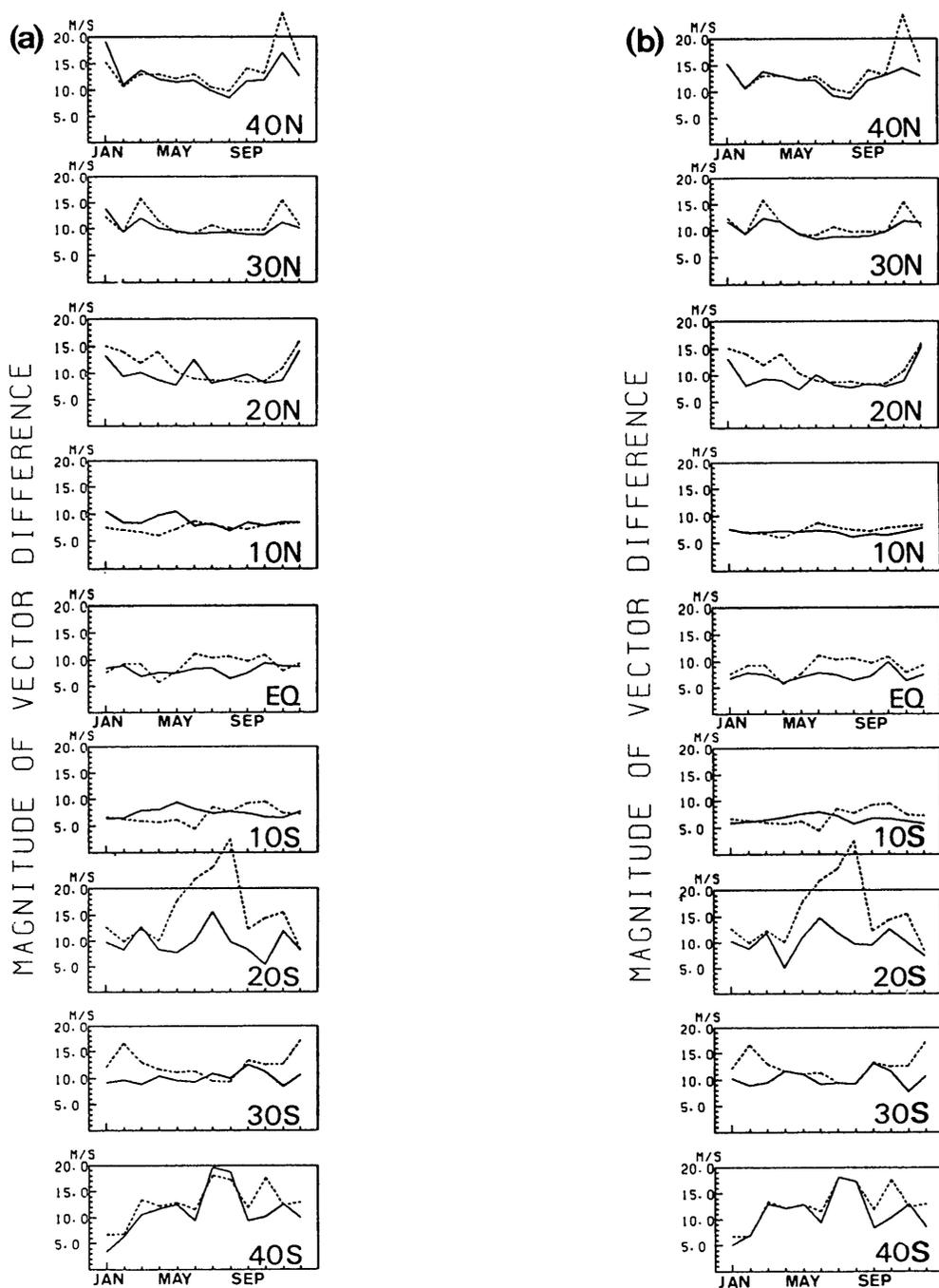


Fig. 4 Same as Fig.2

but for (a) solid line: at CHT; dashed line: at WHT80

(b) solid line: at WHT90; dashed line : at WHT80

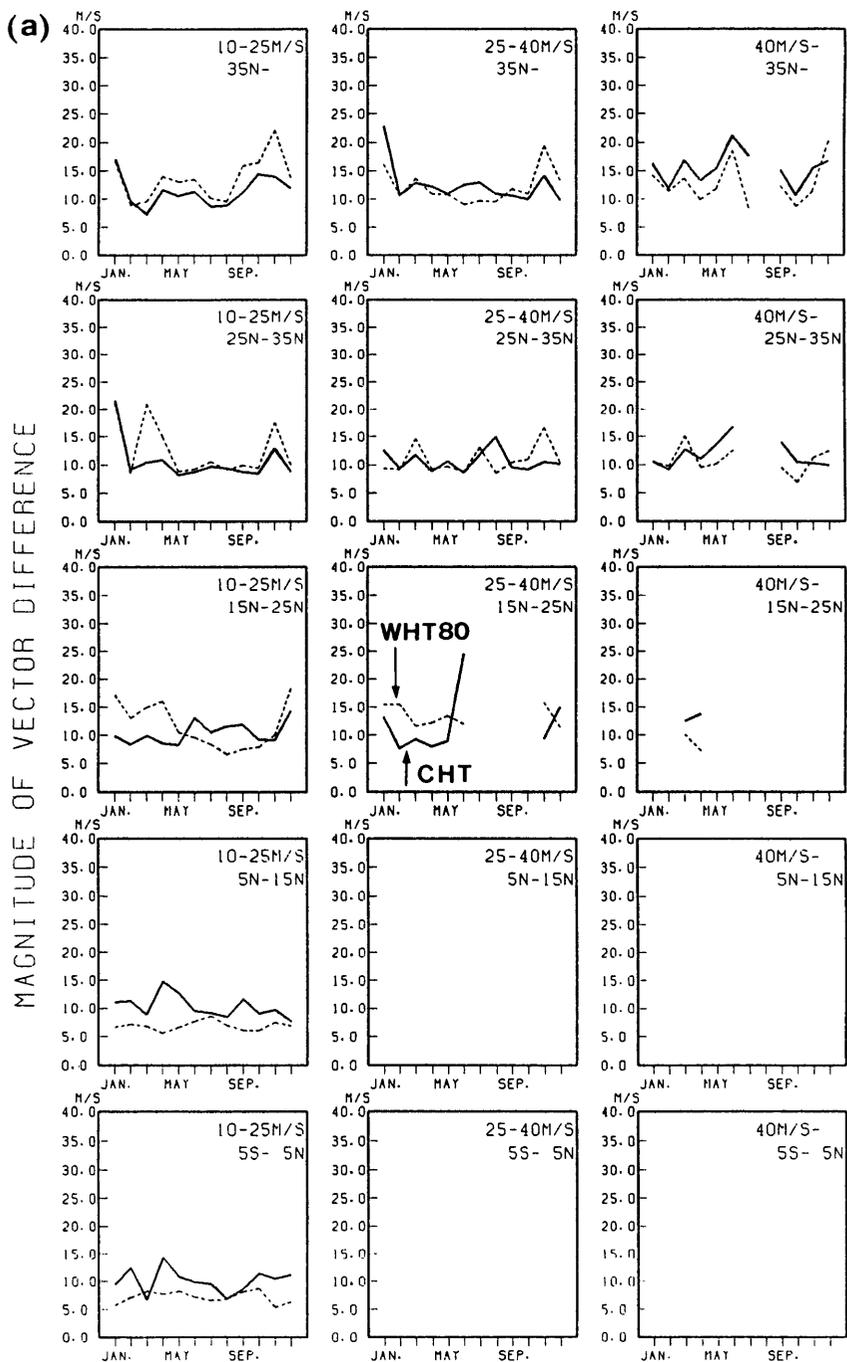


Fig. 5 RMS of magnitude of vector difference between CMW and RAWIN in the northern hemisphere, in the case of 10-25m/s, 25-40m/s and over 40m/s

(a) solid line: at CHT; dashed line: at WHT80

5. 結論と考察

上層風ベクトルの精度の向上を目的とした上層風推定高度の見直しに関する調査の結果は以下のようにまとめることができる。

- ① 上層風の推定高度として CHT・WHT90を試みた。CHTは個々の上層風について追跡雲の輝度温度情報から計算した高度であり、WHT90は南半球を含む1988年のデータを用いて緯度帯ごと月ごとに決定した統計的な最適高度である。
- ② CHT・WHT90いずれの高度によっても概ね現在の推定高度よりも上層風の精度が向上する。特に20°S帯において顕著な精度の改善が見られる。
- ③ CHTでは風速40m/s以上の上層風や低緯度の一部の上層風についてはむしろ精度を低下させる結果となった。
- ④ WHT90では③のような精度の低下は認められない。

推定高度の修正により上層風の精度を低下させるべきではないという見地から、現在用いている推定高度 WHT80を推定高度 WHT90に替えることにした。

この推定高度 WHT90を用い、1988年を除いた1987年3月から1989年8月までの独立データにより上層風の精度を調査した。この結果を Fig. 6 に示す。独立した期間においても概ね WHT90が有効である。しかし、すでに述べたように高度テーブルが長期にわたって有効であるという保証はないので、今後適宜テーブルを見直す必要がある。

上層風の推定高度を追跡雲の輝度温度から計算する場合、かえって上層風の精度を低下させることがあり実用的ではないことが分かった。この原因を調査するために個々の上層風について RAWIN 風のプロファイル、上層風速、CHT を比較した。Fig. 7 には CHT での精度が現行高度での精度よりも悪くなった風速40 m/s以上のベクトルの比較の元になったデータをいくつか示す。これらの風ベクトルはジェット気流に対応した風ベクトルである。ジェット気流に伴う巻雲はジェットコアよりも低い高度に表れることが多いと言われている。このことは、上層風はジェットコアである RAWIN 風の極大値レベルより下層の風速の小さいベクトルとして算出されると予想させる。しかし、個々のベクトルについてみれば、あるものは RAWIN 風の極大値に等しい風速として算出されていたり (Fig. 7a, d)あるものは著しく小さい風速として算出されていたり (Fig. 7b) で、必ずしも期待通りに高度

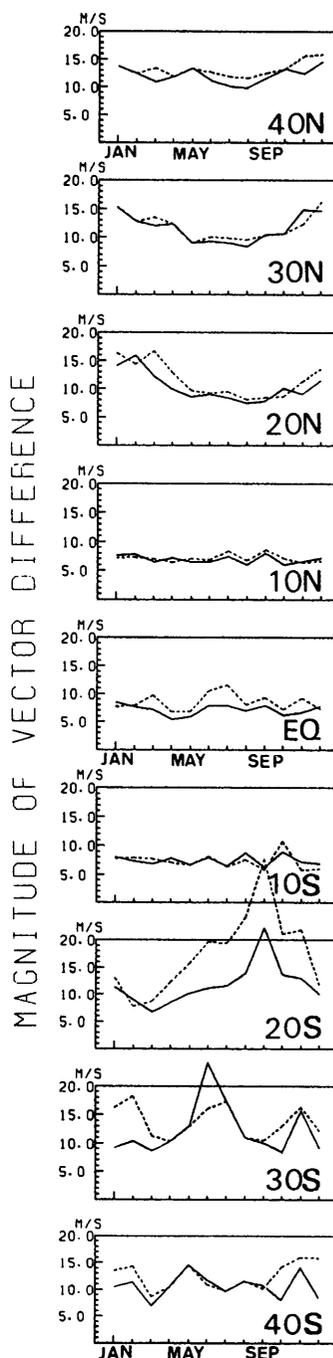


Fig. 6 Same as Fig. 2, but in 1987 and 1989; solid line: at WHT90; dashed line: at WHT80

が算出されない。また、CHT についてもここで問題にしているようなジェット気流に伴う巻雲よりかなり低い高度を算出している場合もある (Fig. 7b, c, d)。

衛星風の精度はベクトル算出と高度推定のという二つの側面から決定されるものである。今回の調査はベクトルの算出精度には問題がなく、上層風の推定高度に問題があるという仮定のもとに行った。実際にはベクトル算出自身の誤差がときには無視できないほどで、ここで試みた CHT がより良い精度の向上を達成できなかった一つの原因であると考えられる。ベクトル算出の方法を見直すことも考えなければならない。

6. まとめ—将来の展望—

衛星画像から求められた上層風の精度向上のために適正な推定高度をするという観点から、1988年のデータを用いて、新しい推定高度 (WHT90) を定めた。WHT90での風ベクトルの精度を RAWIN 風とのベクトル差の RMS を指標として現在の精度と相互に比

較を行った。その結果、北半球では大幅な改善がみられないが、南半球では高度の見直しの効果が顕著であった。

また、追跡雲の TBB 値から個々の風ベクトルの高度を算出する方法も試みたが、検討すべき課題が残されており現業での利用には至らなかった。

現在の衛星システムでは赤外 1 チャンネルのみの放射強度測定により高度推定を行っている。赤外画像データから個々の上層風の高度を推定する方法を必ずしも上層風の精度の向上を果たせなかったのはここに原因の一端がある。また、ベクトル算出自身の精度が不十分であることも考えられる。将来、複数の赤外チャンネルでの観測が計画されており、現在よりよい精度で追跡雲の高度が算出されることが期待される。個々の上層風の推定高度の精度が良くなれば、風実況の把握に大きな貢献が期待できる。

新しい推定高度 WHT90による上層の衛星風への高度付加は、1990年 4月から実施される予定である。

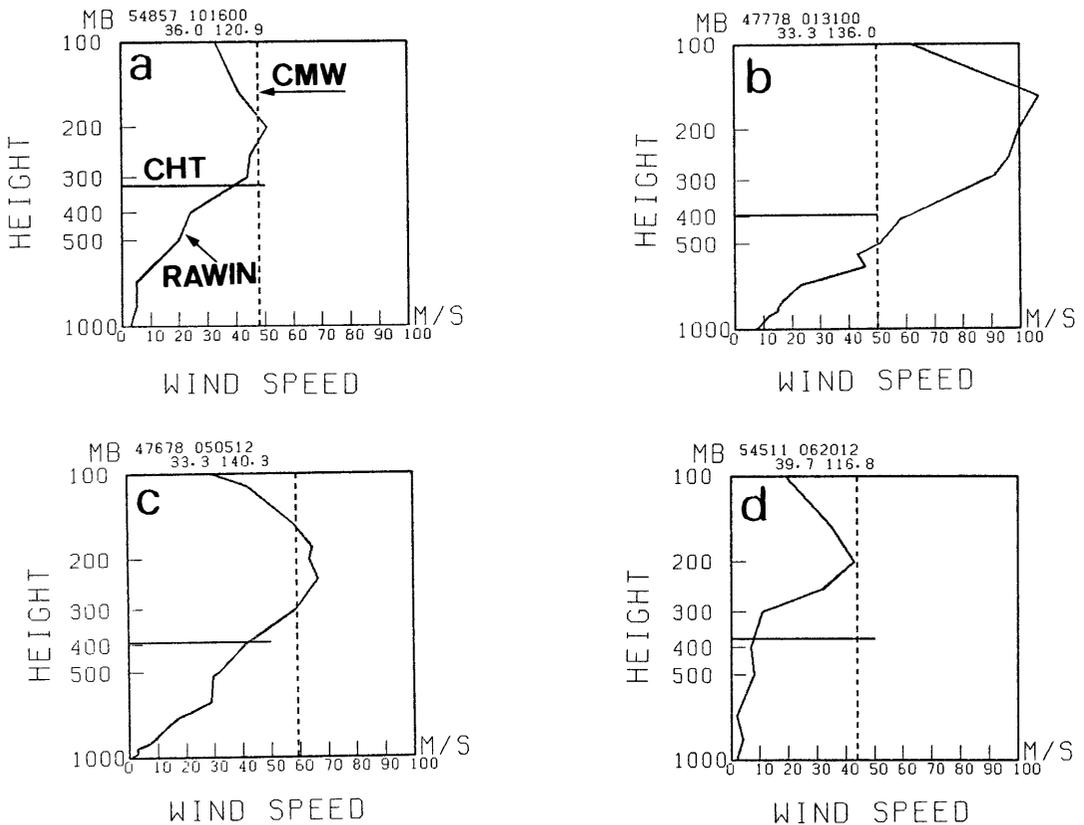


Fig. 7 Some examples of comparison between RAWIN sonde data, CMW and CHT

謝辞

追跡雲の高度算出の方法・検定に関する指導に対して長期予報課中村和信氏，運輸省大島隆氏に。またCHTの計算に対しては解析課牧野義久氏，山本一英両氏に。まとめにあたり萩原武士解析課長，浜田忠昭システム管理課長に，感謝の意を表します。

なお，調査全般にわたって気象衛星センターの計算機システムを利用した。また，スプライン補間はFACOM 科学用サブルーチンライブラリー (SSL II) を使用した。

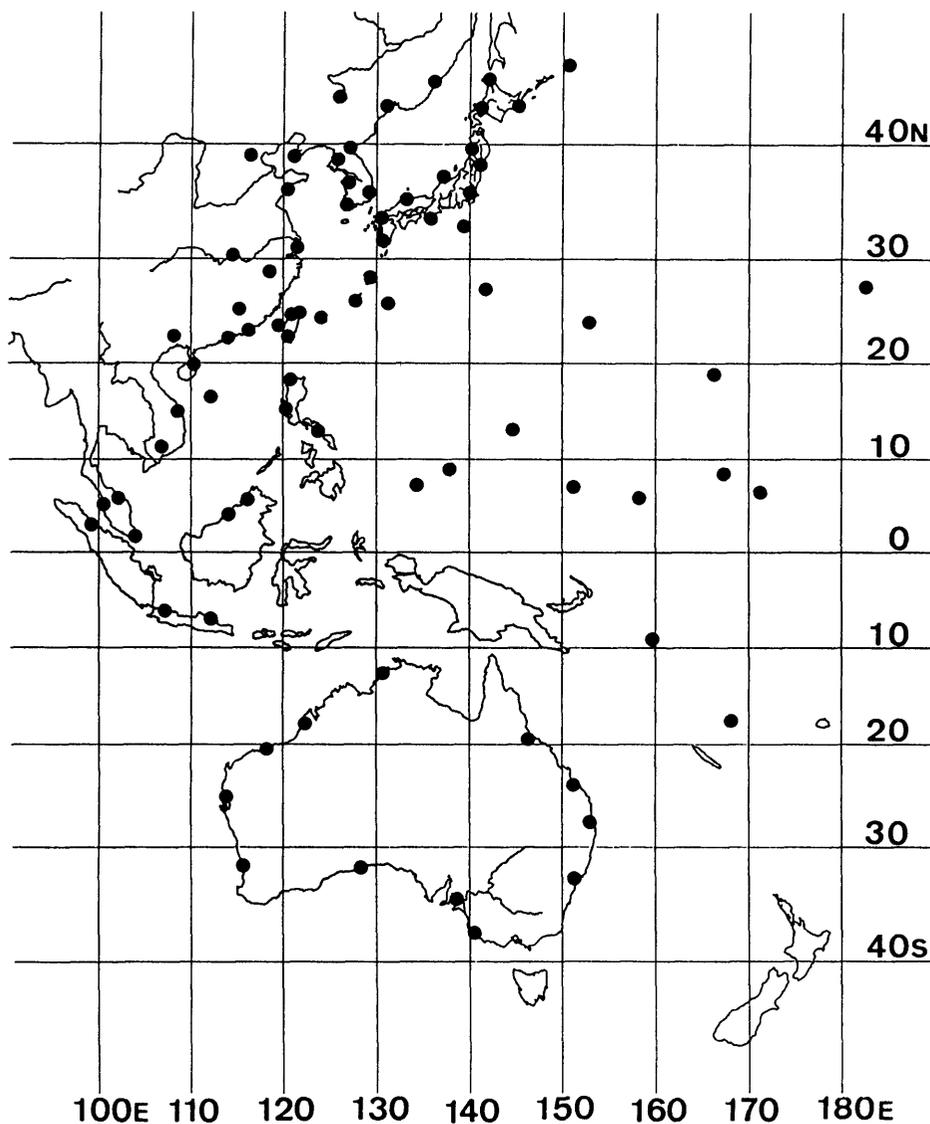


Fig. A Distribution of RAWIN sonde observation station

Appendix

A1. 上層風と比較する RAWIN 風の選定

衛星風の客観的な精度は通常 RAWIN 観測点のデータ (RAWIN 風) と比較して論じられる。CGMS の Type II レポート (RAWIN 風と衛星風との比較) のフォーマットに従い、本調査でも Table A に与えられている大きさの楕円領域内に存在する全ての RAWIN 風を上層風との比較の対象として選んだ。ここで用いた RAWIN 観測点の分布を Fig. A に示す。

A 2. RAWIN 風データの取扱い

与えられた RAWIN 風データのうち次に示すような基準に合ったデータを比較に用いた。

- ① 少なくとも 100~500mb の間のデータがある
- ② 指定面、特異面のデータ間で矛盾がない
- ③ 飛び抜けた値がない

また、3 次のスプライン補間を用いて 10mb ごとの RAWIN 風のベクトルを求めた。

A 3. 衛星風の精度の定義

本調査では上層風と与えられている推定高度を 10 mb 単位で四捨五入した高度での RAWIN 風と比較する。上層風の RAWIN 風に対する精度は、両者のベクトル差の絶対値の RMS (Root Mean Square) と定義する。

A 4. BFL (Best Fit Level) は、従来、RAWIN 風の指定面・特異面のデータのうち衛星風とのベクトル差が最も小さい高度を指していた。本調査ではこれを拡張して 10mb ごとにベクトル差をとりその絶対値が最も小さい高度を BFL とした。

Table A The size of elliptical co-location area

Satellite Wind Speed (m/s)	Major axis (km)	Minor axis (km)
0 - 10	225	175
10 - 25	250	140
25 -	300	100

The major axis must be oriented along the satellite wind direction.

A 5. 略語表

BFL	Bess Fit Level
CGMS	Coordination of Geostationary Meteorological Satellites 静止気象衛星調整会議
CMW	Cloud Motion Wind
LF 法	Loop Film 法

参考文献

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

Maddox, P. A., and T. H. Vonder Haar, 1979: Covariance analyses of satellite-derived mesoscale wind fields, J. Appl. Meteor., 18, 1327-1334

Menzel, W. P., W. L. Smith and T. R. Stewart, 1982: Improved cloud motion vector and altitude assignment using VAS, J. Appl. Meteor., 22, 377-384

Reiter, E. R., 1963: Jet-stream meteorology, The Univ. Chicago Press, 360-365, (translated from Meteorologie der Strahlströme, 1961, Springer-Verlag)

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ーショナル・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.

小花隆司, 1981: 続・LF 風計算に伴う誤差. 研究時報, 32 巻, No1-2, 63-67.

大島 隆, 1988: 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, 気象衛星センター技術報告, 第17号, 45-62.

柏木啓一, 1986: 観測データと客観解析, 数値予報課報告, 別冊第32号, 23-33.

加藤政勝, 1980: GMS による雲移動ベクトルの検討—レーウィンソンデとの比較—, 気象衛星センター技術報告, 第2号, 61-76

気象衛星センター, 1988: 気象衛星資料利用の手引き.

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, 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.