

## 熱帯上層に於ける衛星風利用

### A usage of wind data derived from GMS in the upper tropics

多田 一正\*  
Kazumasa Tada

#### Abstract

A usage of wind data derived from satellite pictures is proposed to improve the objective analysis of the wind in the upper tropical troposphere.

The vertical wind profile observed by RAWIN sonde is expanded by the 16 eigen functions which had been used in the JMA initialization scheme of the global spectral model. In our paper, the first and second vertical modes are removed from the observed wind profile and the new wind profile is composed by the remaining 14 eigen functions. The resultant wind data are compared with the satellite wind data located within 150km of the station. The Root Mean Square between the new wind data and satellite wind data is less than that in a conventional way.

The accuracy of the proposed way does not depend on the level assignment of satellite wind, i.e. at 200mb or 250mb. It follows that a proposed way to use the satellite wind data leads to better assessment. A proposed way includes an idea that it is a possible technique to take advantage of the numerical prediction not only in quality control, but also in the process of derivation for higher assessment of satellite wind.

#### 1. まえがき

気象衛星センターでは、通常、一日に四回、衛星画像から風のデータを算出している。これらのデータは、ADESS 回線を経由して本庁に送られ、数値予報モデル等に利用されている。また、GTS 回線を通して世界各国にも配信されている。衛星データの精度と数値予報への利用については、各数値予報センター等で活発に調査されている（例えば、Pailleux, et al., 1988）。問題点はあるが、衛星風（衛星画像から算出された風ベクトル）は、既存の観測データが希薄な海洋上で必要であると言われている。本文では、衛星風の役割が大きい熱帯上層で、従来と異なった方法で衛星風利用について議論する。

衛星センターでの衛星風の算出方法は、LF 法から自動雲指定法に変わってきた。これらは、衛星風の利用価値が高まるにつれて、衛星風の数量増加を望む利用者からの要請に答えるためであった。これに伴った、LF 法と自動雲指定法の精度比較は大島(1988)に

詳しく説明されている。大島の報告によれば、算出方法の変化に伴う精度低下は見られず、むしろ算出個数の増加による利点が指摘されている。

衛星風の精度を議論するためには、算出方法と共に風の高度推定が重要な要素である。まず第一に、推定高度について言えば、熱帯領域では季節に係わらず、現在200mb に設定されている。これは、浜田(1982)の調査に基づき、衛星風とゾンデ観測で得られた上層風（レーウィン風とする）を比較し、各気圧面で両者の差 RMS が最小になるよう定められた。最近、推定高度に対する再調査が行われ、結果は、土井他(1990)によって報告されている。彼らは、指定雲領域の黒体輝度温度を利用した高度推定と、同時に、統計的に衛星風とレーウィン風の差 RMS が最小になる高度を調査している。両者の比較から、安定した精度を考えると、黒体輝度温度を利用する方法よりも統計的に求めた高度の方が、現業化の目的に叶うと指摘している。熱帯域で彼らの提案した高度は、250mb である。但し、この調査の過程では、異なった観測手法によるデ

\* 気象衛星センター・データ処理課

ータ間の比較方法については触れられていない。

次に、衛星風の精度を論ずる時、観測方法を考察する必要がある。精度は、ゾンデ観測による上層風と衛星風を比較することが一般的である。しかし、衛星風とレーウィン風では観測方法が異なっている。衛星風は、直接観測ではなく、異なった時間に目標とした雲の水平移動から計算される。現方式では、30分間隔の3枚の画像から風ベクトルが自動的に算出されているが、上層風算出の過程では追跡している巻雲が同一であることを仮定している。大気中では、雲のパターンは刻々と変化するので、必ずしも30分後の雲が出発点の雲と同じであるとは限らない。このため、衛星風は、画像解像力に起因する観測誤差と共に雲追跡過程に誤差の要因を含んでいる。一方、レーウィン風は、地上観測点から上げられた測器から得られたデータであり、移動距離と経過時間から風を計算する方法は衛星風に類似しても、その時間間隔が異なっている。レーウィン風も観測誤差を含んでいるが、より直接の観測であるため、他の観測データを検証する場合に基準データとする事が出来る。衛星風は、算出過程と高度設定に起因する誤差を含んでいるが、本稿では、精度の議論は行わない。

衛星風は、観測手法の異なったデータと同様に数値予報モデルの客観解析に利用されている。客観解析の主な風データは、ゾンデ観測データである。一般に他の上層風の観測データはゾンデ観測データとの比較により、その精度が評価される。衛星風の評価の一例として、柏木(1990)の調査がある。低緯度での衛星風と数値モデルの6時間予報値をゾンデ観測データと比較した結果によれば、両者の精度はほぼ等しい。現在の観測方法では、衛星風をゾンデ観測データと同一に扱うことは出来ない。従って、数値モデルへの衛星風の利用を高めるためには、むしろゾンデデータのどの部分と衛星風は一致しているかを調査して、数値予報値よりも精度を上げる事が必要である。

本調査では、その試みの一つとして、衛星風算出に数値予報結果を利用するために、直交関数による展開を使用した調査を行った(以後、この方法を関数展開法と呼ぶ)。衛星を単一気圧面のレーウィン風に対応させる方式は、代表性の問題を含んでいる。これは、雲の風に対する代表性の問題であるが、これまで余り議論されていない。関数の利用は、単一気圧面の一点を眺めているのではなく、プロファイル全体から、より多くの情報を得ようとする考えである。部分的ではあ

るが、上記の問題の一解決策と思われる。関数は、前気象庁の数値予報モデル(杉他、1990)で使用されていた16個の鉛直固有関数である。レーウィン風の鉛直分布をこれらの関数で分解して、衛星風とそれらの関係を統計的に調査した。本稿では、その統計結果を検討し、熱帯上層での衛星風利用の一方法を提案する。

第2節は、使用データと関数の説明を行う。第3節では、関数使用法を述べる。第4節は、熱帯域(20N-20S)での統計結果と風の誤差が関数に与える影響、第5節では調査結果のまとめと将来の課題を述べる。

## 2. 風データと直交関数系

調査のために基本データIと基本データIIと呼ぶ2種類のデータ群を準備した。直交関数系と衛星風との関係を求めるために必要なデータ群が基本データIである。

基本データIは、1988年3月1日から同年8月31日までの期間中、衛星風とレーウィン風観測所が100キロメートル以内にある事を条件に、国際風比較累積データから選択したデータであり、対で収集したものである。レーウィン風については、主観的な品質管理を行った。つまり、1000mbから100mbまで指定気圧面でのデータが存在する事を採用の条件とした。但し、100mbより上層のデータは考慮しない。図1は、基本データIのレーウィン風の観測所と総計220個の標本数を示している。図2は、基本データIにおける衛星風の東西及び南北成分の頻度分布である。図1から判断すると、資料が地域的に偏っているように思えるが、図2

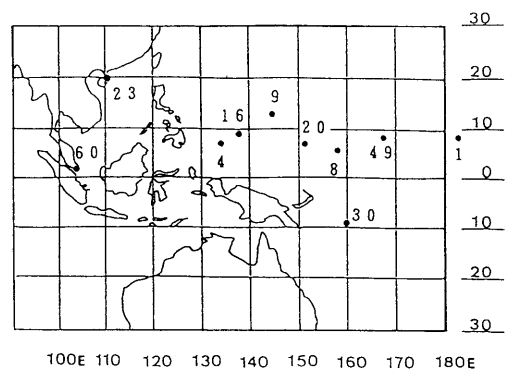


Figure 1 Regional distribution of data in the Data Group I. ● Shows observatory and digits mean the number of sample in the observatory.

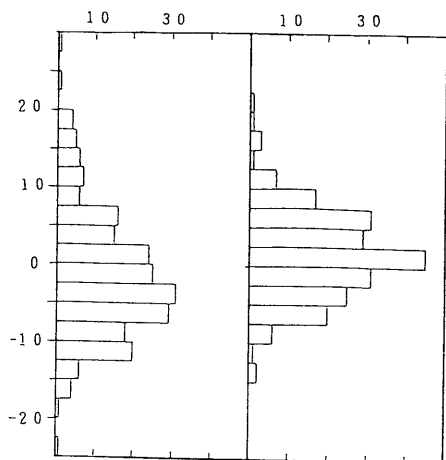


Figure 2 Frequency distribution of satellite-derived wind in Data Group I. The rank of the wind is divided by 2.5m/sec. The right and left figures indicate the zonal and meridional wind, respectively.

から風の強さの分布は平均的な形をしており、基本データ I はデータとして一般性を失っていない。

基本データ II は、提案された方法の検証として準備したデータ群である。図 3 はレーウィン風の観測所と標本数を示している。1987年1月1日から1989年12月31日までの期間に、最下層の気圧が980mb よりも高く、衛星風とレーウィン風の距離が150キロメートル以内にある対は、3495個であった。ここでも、基本デー

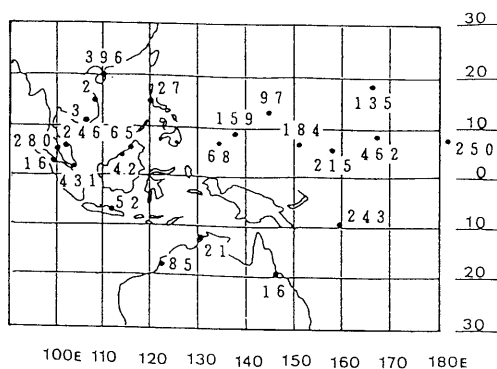


Figure 3 Regional distribution of data in the data Group II. ● shows the observatory, and figures represent the number of sample.

タ I と同様に100mb より上層のデータは含んでいない。

衛星風は、30分間隔で撮像された連続した3枚の衛星画像から算出されるが、結果として連続した2枚の画像から計算処理された衛星画と見なす事が出来る。導出方法の説明は、大島 (1989) を参照して載きたい。従って、衛星風は30分間の平均風を表現していると考えられる。

本調査で表現する RMS は、

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (U_n^{sat.} - U_n^{obs.})^2} \quad (1)$$

で定義する。但し、N は標本数、 $U_n^{sat.}$ 、 $U_n^{obs.}$  は対の気象衛星風とレーウィン風を意味する。本稿で以後使用する RMS の単位は、m/sec である。

次に、直交関数系の選択について述べる。鉛直方向にはシグマ座標を取る。該当する直交関数系は、複数個存在する。しかし、関数系が物理的意味を含み、数値モデルとの一貫性を考慮して、前全球16層スペクトラルモデルの16個の鉛直固有関数(以後、関数と省略)を採用する。これらの関数は、数値モデルのイニシャリゼーションスキームで使用されていた。関数は、数値モデルの鉛直差分に対応して行列表現である。関数は、数値モデルの鉛直差分に対応して行列表現である。関数とイニシャリゼーションの詳しい説明は、重久・工藤 (1984) を参照して載きたい。

図 4 は、本調査の中で用いられた関数の内、例として5個の関数を示している。鉛直座標上の節の個数でモード番号を示している。節が無い関数を第1モード、1個の節を持つ関数を第2モード、以下、(N-1)個の節を持つ関数を第Nモードと呼ぶ。横軸は、適当にスケーリングされた値を示し、縦軸はシグマ座標の対数目盛りを示す。最上端がシグマ値で、0.015を示し、以下、0.045、0.075、0.110、0.155、0.210、0.280、0.360、0.450、0.565、0.690、0.800、0.890、0.950、0.980、0.995、の順に短い横棒で示している。この関数系を選んだ理由は、風の鉛直分布から衛星風算出の時間間隔より高い振動数を持った成分を抽出し、それを適当に処理するためである。イニシャリゼーションでは、鉛直方向にこの関数系で展開し、それぞれの関数に対して水平方向に球面関数系で展開する。球面関数系は、高い振動数を持った波と比較的ゆっくりした波を含んでいる。衛星風に比べ、高い振動数の波を除去し、残りの部分と気象衛星風と比較する事が目的で

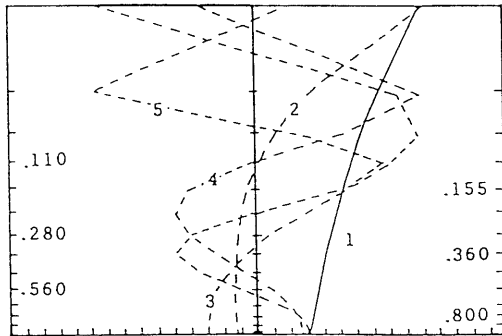


Figure 4 Vertical profile of functions used. Digits near the line correspond to the vertical modes in the paper. Horizontal axis includes a factor with the thickness of layer in which functions are defined. Logarithm of sigma level are used in the vertical axis. Digits in the right and left side show the sigma value.

ある。併し、鉛直方向の一次元で水平方向の波の成分を求める事は出来ないので、除去する比率を統計的に求める方法を取る。鉛直方向には、第1モードに近いほど高い振動の波を含んでいる。鉛直モードの固有値、約50m/secを主観的な判断基準として、第5モードまでの関数を統計的に取り扱う。

関数値はシグマ面で定義されているので、レーウィン風と衛星風の比較のために気圧面からシグマ面へ内挿する場合、またその逆の過程では、気圧の自然対数をとって線型内挿を行う。関数係数を計算するために、シグマ面最上の3層層でのデータが必要である。すでに述べたように、100mbより上層のデータは収集していない。従って、モデル上端から第4層目の値を問題の3層に与える。本調査でのデータ変換手順は、以下の通りである。

- ① 観測されたレーウィン風の鉛直分布を収集する。
- ② シグマ面に内挿された値を計算する。
- ③ 関数展開を行う。
- ④ 関数係数に適切な処理を加える。
- ⑤ 関数係数からシグマ面のレーウィン風に戻す。
- ⑥ 衛星風の気圧面にレーウィン風に戻す。

### 3. 関数使用法

この節では、選択した関数系の使用方法について述べる。

今回の調査では、レーウィン風の鉛直分布を16個の

関数で展開する。それらの関数の中で不必要と思われる関数を除去し、残りの関数を合成して、問題とする気圧面の衛星風と比較する。ある関数について必要域いは不必要の判断は、統計的に決定する。

風の東西成分(U)と南北成分(V)の鉛直分布をU(P)、V(P)とする。関数系 $E_k(p)$ を使って、U(P)、V(P)は以下の様に表現される。

$$U(P) = \sum_{k=1}^{16} \alpha_k \cdot C_k \cdot E_k(P) \quad (2)$$

$$V(P) = \sum_{k=1}^{16} \beta_k \cdot D_k \cdot E_k(P) \quad (3)$$

但し、 $C_k$ と $D_k$ は係数である。 $\alpha_k$ と $\beta_k$ を求める手順は、

- ① 基本データIのU(P)、V(P)を使って方程式(2)、(3)から $C_k$ と $D_k$ を計算する。
- ②  $k=6$ から16までの係数は変更せず、 $k=1\sim5$ までの係数にそれぞれの比率 $\alpha_k$ 、 $\beta_k$ を掛けて、衛星風の気圧面に(2)式、(3)式を使って戻す。
- ③ ②で求めた風と衛星風のRMSが最小になるように、基本データIで $\alpha_k$ 、 $\beta_k$ を求める。

$\alpha_k$ 、 $\beta_k$ が2節で説明した水平方向の必要な波と不必要な波の比率と考える。上記の手順を行うにあたって、まず第1に、仮定した成層圏の影響を見積もった。表1のU成分とV成分は、基本データIから得られた $C_k$ 、 $D_k$ の統計である。成層圏の風のデータは、すでに述べた様に0.11のシグマ面データと等しくした。この影響を見積もる為に2例のテストを行った。テスト1と2に使用した風の鉛直分布は、夏場の平均的な分布(Newell et.al., 1972)と比較して、不自然ではない。テスト1と2から判断すると、鉛直モード1から5までは、成層圏データに強く影響される。従って、基本データIを使った標準偏差は、この影響を含んでいる。このことから、最小二乗法で $\alpha_k$ 、 $\beta_k$ を決定することは、難しい。このため、第5モードまでの $\alpha_k$ 、 $\beta_k$ は0と1の二値のみ取ると更に仮定を行った。 $\alpha_k=0$ は、鉛直kモードは、水平モードと無関係に全て取り除くべき波であり、 $\alpha_k=1$ は、鉛直・水平モード共に必要な波である。実際には、表2で示す5例の実験を行った。

表2は、基本データIを使って、統計的に何れの鉛直モードを消去するかを示したものである。誤差のRMSのから東西成分の第1、第2の鉛直モード、南北

Table 1 The coefficients of expanded functions in Data Group I.

Test-1 shows the variation of coefficient with the wind error of 4.5 m/sec at 14th, 15th and 16th sigma levels.

Test-2 shows the same as Test 1, except for with the wind error of 4.5m/sec at 14th sigma level, 9.0m/sec at 15th sigma level and 13.5 m/sec at 16th sigma level.

鉛直 モード	U-成分		V-成分		Test-1	Test-2
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
1	-31.8	89.8	-12.5	56.1	65.7	139.5
2	21.4	88.7	7.8	36.9	-16.7	64.1
3	11.3	41.0	3.7	17.3	-13.1	-8.8
4	-6.8	37.1	-2.2	16.9	2.3	3.8
5	-3.9	10.6	1.8	7.8	5.7	0.0
6	-4.1	23.4	0.8	13.0	-2.6	-1.4
7	-3.9	21.7	-1.9	8.4	2.6	1.7
8	14.3	20.5	2.4	11.5	-3.2	-2.2
9	4.0	17.4	-5.2	12.3	3.2	2.3
10	-0.9	25.3	0.5	14.1	-2.4	-1.8
11	5.2	14.8	-1.4	10.1	2.2	1.6
12	17.7	34.9	-3.5	16.0	-1.6	-1.2
13	-36.6	34.8	4.2	20.3	1.1	0.8
14	-41.8	49.4	-0.7	28.3	-0.6	-0.5
15	3.5	19.8	-2.2	18.1	0.1	0.1
16	-13.2	13.6	-3.0	11.6	0.0	0.0

Table 2 Root Mean Squares between satellite-derived wind and observations. The second and third columns represent RMS of zonal and meridional wind components in five experiments. The last column indicates the vertical mode of removed function. Lowest line shows RMS in the present way.

	RMS of U-wind error	RMS of V-wind error	係数を零にする 鉛直固有関数 の鉛直モード
EXP-1	5.7	4.4	1
EXP-2	4.3	4.0	1, 2
EXP-3	4.5	3.9	1, 2, 3
EXP-4	5.3	4.0	1, 2, 3, 4
EXP-5	5.8	4.2	1, 2, 3, 4, 4
現在の方法	5.4	4.3	

成分は第1、第2と第3鉛直モードを取り除く事が調査の主旨に会うと判断した。

一方、風の東西成分 (U)、南北成分 (V) と流線関数 ( $\Psi$ )、速度ポテンシャル関数 ( $x$ ) との関係は、

$$U = -\frac{c \cos \phi}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \Psi + \frac{\partial x}{a \partial \lambda} \quad (4)$$

$$V = \frac{\partial}{a \partial \lambda} \Psi - \frac{c \cos \phi}{a} \frac{\partial x}{\partial \phi} \quad (5)$$

である。ただし、 $a$  は地球半径、 $\phi$  は緯度、 $\lambda$  は経度を示す。もともと、数値モデルでは風の東西、南北成分が変数でなく、流線関数と速度ポテンシャル関数が変数である。それらの変数を鉛直関数・球面関数で展開していた。本来は、 $\Psi$  と  $x$  で除去する波の議論を行うべきである。そうすれば、方程式(4)と(5)からUとVで除去する鉛直モードは等しいはずである。東西、南北成分の除去する鉛直モードが異なるのは、二値の仮定に原因があると思われる。表2に主観的な判断を加え、最終的にはUとVの第1と第2鉛直モードを取り除く事にした。

#### 4. 統計結果

表3は、衛星風を200mb及び250mbに指定した時、レーウィン風との差のRMSである。同時に、レーウィン風の鉛直分布から鉛直モード1と2を取り除いた時、衛星風との差のRMSも示している。関数展開法では、気圧面の間で風データを内挿するため、その内挿誤差を見積もった。その結果は、表3の比較2の欄に示した。

た。

表3の比較1によれば、衛星風の東西成分は、高度を250mbに指定した時の方が、200mbに指定した時よりもレーウィン風に近いことを示している。絶対値についても同様な事が言え、これはすでに土井他(1990)によって示された結果と一致する。南北風については、2気圧面でのRMSは、200mb或いは250mbでも比較1のRMSよりも小さく成っている。これは、気圧面の内挿を繰り返すことによって(第2節のデータ取扱手順を参照)、複数の気圧面の影響を受けたように見えるレーウィン風と衛星風を比較したためである。これは、風の高度設定の困難さを示している。1例として、東西成分を考える。内挿後(2節の手順⑥)の200mb、250mbの風をU'200、U'250、地上気圧を1000mbとする。U'200、U'250は、

$$U'200 = 0.14 * U150 + 0.67 * U200 + 0.19 * U250 \quad (6)$$

$$U'250 = 0.31 * U200 + 0.32 * U250 + 0.37 * U300 \quad (7)$$

となる。但し、U150、U200、U250、U300は、それぞれ150、200、250、300mbで観測されたレーウィン風の値である。内挿過程を経た250mbでは、隣接した2気圧面の風の寄与がほぼ等しい。衛星風は現象に依存する代表高度の不確定のために、固定した単一気圧面のレーウィン風よりも、むしろ結果としてある平均的な流れを表現していると考えられる。

表3の比較3は、レーウィン風から第1及び第2モードの関数の影響を取り除いた時、衛星風との比較で

Table 3 Root Mean Squares between satellite-derived wind and observations in Data Group II at 200mb and 250mb.

	衛星風指定 200mb			衛星風指定 250mb		
	東西成分	南北成分	絶対値	東西成分	南北成分	絶対値
比較-1	5.78	5.07	7.69	4.86	5.08	7.03
比較-2	5.45	4.68	7.19	4.49	4.70	6.50
比較-3	4.54	4.44	6.34	4.51	4.69	6.50

絶対値 : Resultant wind of zonal and meridional components.

比較-1 : Comparison of satellite-derived wind with observations in a conventional way.

比較-2 : Comparison of satellite-derived wind with observations which are through the vertical interpolation, i.e pressure to sigma and then sigma to pressure.

比較-3 : Comparison of satellite-derived wind with observations in the proposed way.

ある。衛星風の東西成分を200mb、250mbのいずれの気圧面に指定しても、比較1よりもレーウィン風に近く、RMS値はほぼ等しい。この事は、衛星風の数値予報モデルへの利用に関数展開法を試みた場合、衛星風の気圧面指定(200mbまたは250mb)は、それほど注意を払う必要が無いことを示唆している。衛星風が単一気圧面の風を代表していると仮定すると、表3の結果の様に、精度は設定気圧面に強く依存する。熱帯域においては、様々な気象現象に対応して、追跡する巻雲の高度も時空間的に変化するので、気圧面設定に依存しない結果は、本方法の長所である。

250mbの比較2、比較3はRMSに大きな差は無い。式(7)から判断すると、隣接した3層での平均風を取る事は、高い振動の波を除去する事に対応すると思われる。又、200mb南北成分のRMSは、東西成分のRMSに比べて、改良の度合いが小さい。これは、除去する関数の個数に関係している。表2の統計結果によれば、南北成分は第3モードまで除去しなければならない。表1のテスト1と標準偏差からもその事は、推測出来る。成層圏データの利用を考慮すれば、南北成分のRMSも改良されるであろう。

図5は、各区毎のRMS値である。海洋上、陸上の区別無く、全体的に関数展開法が良い結果を与えている。特に、陸上でのインパクトが大きい。又、東西成分の結果に比べ、南北成分のインパクトは小さい事は、区

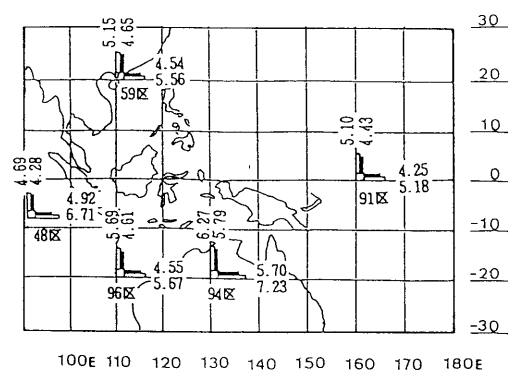


Figure 5 Root Mean Squares in every assigned regions. Horizontal and vertical bars show the zonal and meridional components of the wind, respectively. White and black bars indicate RMS in the present and proosed techniques, respectively. Figures mean RMS values.

分領域に依存しない。又、表3の調査では、衛星風とレーウィン風との差に系統的なバイアスは見られなかった。

### 5. まとめと将来の課題

低緯度(20N-20S)に於ける上層の衛星風の利用法を提案するために、衛星風とレーウィン風の比較を行った。一般に、衛星風の精度は、レーウィン風との比較によって評価される。併し、測定方法の異なる観測値の比較は、精度の比較と言うよりも、観測方法間の差を示しているにすぎない。従って、これらの観測値を使用する時は、目的別に工夫をする必要があると思われる。

今回の調査では、衛星風は関数の第1、第2モードを除いた風の強さに現方式よりも対応している事が明らかになった。柏木(1990)の調査によれば、熱帯上層では数値予報値と衛星風の精度は等しい。従って、衛星風を数値予報モデルの客観解析に利用する場合は、数値予報モデルによる6時間予報値を関数展開し、第1と第2モードの再合成と計算された衛星風を加えた値を新たに衛星風とする方法が考えられる。これによって、衛星風の精度を数値予報結果で改善する事が可能と思われる。また、この方法を取れば、利用者は従来の方式を何ら変更することなく、精度を高める事が可能である。このためには、数値予報による第一推定値について、第一推定値から第1、第2モードの寄与を取り除いた値と対応するレーウィン風との比較を前もって行う必要がある。

数値モデルでは、低緯度の風データが大気の運動表現に重要な役割を果たしているため、風の精度向上が望まれる。ヨーロッパセンターでは、衛星データの品質管理を強化することで、良い予報結果を得たと報告している(Lonnberg, 1988)。また、低緯度の風のモデルに与える重要性はDaley, et. al. (1981)によって指摘されている。かれらの論文によれば、熱帯での風データの影響は1日以内で中緯度に現れる。数値予報での衛星風の評価を得るためには、低緯度の解析及び予報精度ばかりでなく、中緯度への影響を調査しなければならない。関数展開法による、衛星風の数値予報への影響は、次に調査すべき課題である。

これまで、衛星風に関しては、主にレーウィン風を真値と仮定した時の差を精度として議論する事が多かった。衛星センターでは、精度向上のために算出方法の改善に努力を傾けている。併し、算出方法は観測方

法或いは機器の精度に依然存している部分も多い。従って、観測機器の改良を待つと共に、数値予報結果を品質管理の面だけでなく、衛星風算出の過程に利用する方法も有用である事を指摘したい。利用可能なデータを総合的に組み合わせる事も、将来の課題である。

今回は、主に関数展開法の可能性を探るために、成層圏データの収集に注意を払っていない。しかし、熱帯領域で良い結果を得る事が出来た。更に精度向上を計る為には、成層圏データも加えて再吟味する必要がある。又、他の緯度帯への適用も可能と思う。もちろん、積雲活動の活発な熱帯と異なり、中緯度はシノプティックスケールの波が卓越しているので、中緯度帯でも、同じ方式が可能か否かは、調査する必要がある。

## 謝 辞

データ収集につき、また種々のコメントに対し解析課の内藤調査官に、計算機使用についての協力、助言に対しデータ処理課員に謝意を表す。尚、調査にあたり衛星センターの計算機M380 Sを使用した。

## 参考文献

- 大島 隆、1988：自動算出法の現業用上層風算出システム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.
- 大島 隆、1989：風計算処理、気象衛星センター技術報告・特別号(1988) II、85-102.
- 柏木 啓一、1990：気象データと客観解析、数値予報課報告、別冊第36号、2-131.
- 重久 陽亮、工藤 達也、1984：ノーマルモード・イニシャリゼーション、電子計算室報告・別冊第30号、92pp.
- 土井 恵治、内田 裕之、内藤 成則、1990：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、気象衛星センター技術報告、第20号、61-73.
- Daley, R., Tribbia, J., Williamson, D.L., 1981: The excitation of large scale free Rossby waves in numerical weather prediction, Mon. Wea. Rev., 109, 1836-1861.
- Hamada, T., 1982: Representation heights of GMS satellite winds. Met. Sat. Center Tech. Note, No. 6, 35-47.
- Lonnberg, P., 1988: Developments in the ECMWF analysis system. Proceedings of the ECMWF seminar on data assimilation and the use of satellite data. Reading, 5-9 September, 1988.
- Newell, R.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent and G. J. Boer, 1972: The general circulation of the tropical atmosphere and integrations with extratropical latitudes vol. 1, 258pp. The MIT press.
- Pailleux, J., G. Kelly, J-F. Flobert, E. Anderson, 1988: Current Work at ECMWF on the use of satellite data. Proceedings of the ECMWF seminar on data assimilation and the use of satellite data. Reading, 5-9 September 1988, vol. 2, 215-233.
- Sugi, M., K. Kuma, K. Tada, K. Tamiya, N. Hasegawa, T. Iwasaki, S. Yamada, T. Kitade, 1990: Description and Performance of the JMA Operational Global Spectral Model (JMA - GSM88), Geophysical Magazine, 43, 105-130.