

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

On the Optimal Time-interval of Satellite Image Acquisition for Operational Cloud Motion Wind Derivation

浜田 忠昭†

Tadaaki Hamada†

Abstract

Several articles, in which the experiments of target cloud tracking for deriving cloud motion wind using several pairs of time-sequential images taken at different intervals are described, are reviewed for the purpose of getting the information on the optimal time interval of ingesting images for tracking. The reviewed results are briefly summarized in the following outline.

1. In view of image granularity, the longer time interval of ingesting images is desirable than shorter one, and

2. In view of life-time and deformation of the target cloud, the shorter time interval of ingesting images is desirable than longer one.

Author proposes that the optimal time interval of ingesting images is 15 minutes, on the basis of the review as mentioned above and further discussion. Following benefits are expected from the wind derivation using images taken at 15 minute interval instead of 30 minute interval:

1. Cirrus clouds moving with rather high speed can be accurately tracked; and

2. The total number of resultant satellite winds can be increased for both high-level and low-level.

Followings are pointed out as future problems:

1. In view of data homogeneity, it is desirable that the time interval of ingesting images for wind derivation is the same as that of any other geostationary meteorological satellite system; and

2. The representative height of low-level wind derived from images taken at shorter time interval may be lower than that derived from images taken at longer time interval.

1. はじめに

静止気象衛星画像から雲の移動量を算出し、極地方を除く広範な領域の高層風を得ようとする風計算処理は、現在日本（気象衛星センター、MSC/JMA*）、アメリカ（NESS/NOAA**）およびヨーロッパ（ESOC/

ESA***）の3つの機関で現業的に行なわれている。アメリカは1970年代のはじめから、他の2機関は1978年の半ばごろまでに相ついで現業処理を開始して現在に至っている。

これらの現業による衛星風の算出は、いずれの国も30分間隔の画像を使用している。このうち日本の上層風

tration, USA.

*** ESOC/ESA; European Space Operations Centre /European Space Agency, 欧州宇宙機関。

****最近の情報によると、1982年7月1日からNESSの上層風はイメージディスプレイを使用したマンマシンインタラクティブ法により算出されている。詳細な情報は入手していない。

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

* MSC/JMA; Meteorological Satellite Center/Japan Meteorological Agency, 気象庁気象衛星センター。

** NESS/NOAA; National Earth Satellite Service /National Oceanic and Atmospheric Adminis-

は、4枚の画像を35mmフィルムによる動画として1時間30分間の雲の移動量を測定している。NESSは5枚の16mmフィルムの動画を使用している****。(脚注は前頁) 下層風については、いずれの国においても、30分間の雲の移動量を測定している。

現業処理以外では、短時間(3分~15分)間隔の画像から台風の周辺における風計算の例や時間々隔を変えて追跡した例などが発表されている。

本報告は、これらの現業での風計算結果と、短時間々隔画像からの風計算結果を考察検討をしているいくつかの文献のレビューを行ない、現行の風計算結果の質の向上という観点から、最適の画像時間々隔を探り、今後のシステムの改良に役立てることを目的としたものである。

2. 追跡雲の寿命と画像の量子化誤差

雲の追跡に使用する画像の時間々隔は、少なくとも追跡雲の寿命より短くなくてはならない。寿命の観点から見れば画像の時間々隔が短い程多くの雲の移動量を算出できることになる。一方2枚の画像間で雲の移動位置をパターンマッチングの技法のひとつである相互相関法で求める場合、その移動位置は、画像の画素間隔による不連続な(量子化された)位置にのみ求まる。この量子化の観点から見れば、画像の時間間隔が長ければ長い程雲の画面上の移動距離は大きくなり、その結果相対的に量子化の誤差は小さくなり、算出された移動量の精度は良くなる。本節では、これらの2つのことについて簡単に考察する。

2.1. 画素間隔による量子化誤差

画素の間隔は、使用する画像の種類が決まれば衛星直下点では一定の値である。しかしながら追跡を行ない、それを風速に変換するとき時間で割るので、追跡に使用する2枚の画像の時間々隔が長くなればなる程、量子化の影響は小さくなる。この場合近い方の画素位置でマッチングがとれるとすると、2分の1画素に相当する風速が誤差の目安となる。この関係を第1図に示す。第1表にGMS-2の衛星直下点(SSP*: 140°E, 赤道上)の画像の画素間隔を示す。SSPから離れるに従ってこれらの画素間隔は大きくなり、日本付近ではSSPでの約1.3倍となる。もし1/2画素間隔の大きさが直接風速の誤差となるならば、赤外画像の場合15分間隔、可視画像の場合は3~6分間隔程度であれば、3m/sの誤差になることがわかる。

* SSP; Sub-satellite point, 衛星直下点。

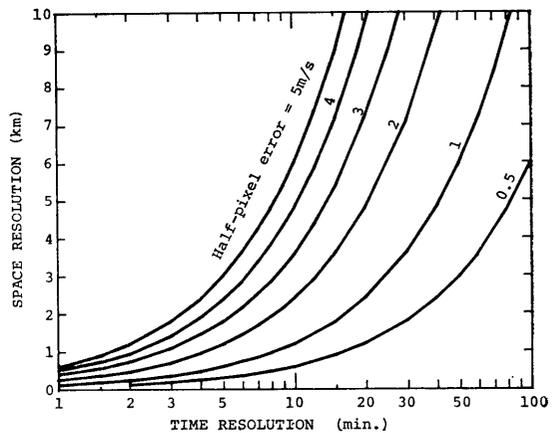


Fig. 1 Half-pixel error due to image granularity.

Table 1 Image granularity of GMS-2 at sub-satellite point (SSP).

Image	Granularity at SSP	
Visible	Pixel*	0.86 km
	Line*	1.25
Infrared	Pixel*	3.6
	Line*	5.0

* "Pixel" means the direction of east-west and "Line" north-south.

上述の画素間隔による誤差を小さくするためにいくつかの方法が考えられる。現在日本の風計算システム(CWES*)においては、相互相関法により算出した相関値配列上の最大値(最大相関係数値)の位置を雲の移動位置としている。この不連続な格子点上に求まったマッチング位置を、周辺の4格子点上の相関係数値を用いて楕円放物面での曲面補間を行ない、最大値の位置を格子点間に補正して求める方法が採用されている。この方法はウィスコンシン大学のMcIDAS**の風計算システム

* CWES; Cloud Wind Estimation System, 気象衛星センターの風計算システム。処理の詳細については浜田(1979)を参照されたい。

**McIDAS: Man-computer Interactive Data Access System。ウィスコンシン大学のSSECで開発された気象衛星の画像データ等を処理するためのシステム。これにはWINDCOと呼ばれる風計算システムが組込まれている。詳細はSmith(1975)を参照されたい。また浜田(1981A, 1981B)にMcIDASの機能の詳細な紹介がなされている。

に採用されている方法である。この方法によると補間の効果はあるが完璧とは言えない(浜田, 1979の Appendix A.3 参照)。アナログの画像による追跡を行なうループレフィルム法(LF法)では、人間が指定した雲指定点位置をデジタル化するとき、1画素間隔以下の精度で行なうことにより自然に補正されているといえる。さらにある領域でいくつかのベクトルを平均することによりこの誤差を小さくすることが考えられるが、同じ組み合わせの2枚の画像から算出したベクトルを使った場合、各ベクトルの誤差の大きさも同じ傾向を持つ可能性がある。

2.2. 追跡雲の寿命

1) ジェット気流に伴なう網雲

Fujita (1970)によると、ジェット気流に伴なう網雲の寿命*は第2表に示す様になっている。これによると、通常追跡の対象となる水平方向に10 km以上の広がりを持った(以下大きさ10 km以上と言う)網雲は十分長い寿命を持っている。

Table 2 Half-life of jetsream cirrus (after Fujita, 1970)

Size of jet stream cirrus	Half-life
2~3 n.mi. (4~6 km)	49 min.
4~6 (7~11)	130 min.
10~13 (19~24)	40 hrs.

2) ハリケーンに伴なう積雲

Fujita (1970)によると、ハリケーンの南東象現における積雲の寿命は第3表に示すようになっている。大きさ10 km程度の積雲では約36分、大きさ20 km程度でも1時間であり、網雲と比べるとかなり短い。

Table 3 Half-life of cumulus clouds in the southeast sector of a hurricane. (after Fujita, 1970)

Size of cumulus clouds	Half-life
2~3 n.mi. (4~6 km)	23 min.
4~6 (7~11)	36
7~9 (13~17)	44
10~13 (19~24)	60

* 寿命; 対称とする一群の雲の総数が半分になる時間、即ち half-life の時間を言っている。

3. 画像の撮像時間間隔と算出ベクトルの精度

本節では、異なる時間間隔画像による風計算結果の検証を行なった例を紹介し、次節で最適時間間隔の考察を行う。

3.1. SMSの短時間観測画像から算出された風のデータセット間の比較 (Johnson et al., 1980)

30分, 15分, 6分, および3分間隔の画像を使用し、SSECのMcIDASにより風計算を行なっている。下層3例, 上層2例の報告がなされているがそれらをまとめると次のとおりである。

- a) 下層風——雲の成長や消滅の激しい日々について。3分間隔の画像からは30分間隔の画像からと比較してほとんど10倍の数(17個対165個)のベクトルが得られた。また3分間隔画像からの方が広い範囲からベクトルが得られた。
- b) 下層風——雲の寿命の長い日について。3分間隔と30分間隔と比較してベクトルの数はそれ程大きな違いはなかった。
- c) 上層風。網雲の寿命は積雲に比べてずっと長いので、30分間隔の方が追跡しやすく、またスムーズな風の場を得ることができた。
- d) 短時間間隔画像の観測について——長時間間隔画像では見落したメソスケールの形(feature)をしばしばつかまえることができた。その結果得られた風の場が画像の時間間隔によって異なることもあった。また短時間間隔画像の方が追跡に時間がかかった。

これらの結果を踏まえてこの論文の著者は次の2点の提言をしている。

- a) 網雲に対しては、30分間隔画像を使用し Single Pixel法(雲の移動の始終点ともマンが指定する、日本のMM-2法)による追跡を行なうこと。
- b) 下層雲に対しては、短時間(6~10分)間隔の画像を使用すること。

これら結果を踏まえてこの論文の著者は次の2点の提言をしている。

- a) 網雲に対しては、30分間隔画像を使用し Single Pixel法(雲の移動の始終点ともマンが指定する、日本のMM-2法)による追跡を行なうこと。
- b) 下層雲に対しては、短時間(6~10分)間隔の画像を使用すること。

3.2. 熱帯低気圧周辺の風計算に短時間観測画像を使用することの利点 (Rodgers et al., 1979)

3分, 7.5分間隔の画像を使用しGSFC*のAOIPS**により風計算を行なった。また画像の水平方向の解像度1, 2, 4 および8 kmの画像を使用した。5個のスト

* GSFC: Goddard Space Flight Center, NASA (National Aeronautic and Space Administration), U.S.A.

**AOIPS: Atmospheric and Oceanographic Information Processing System. GSFCにある画像処理システム。詳細はBillingsley(1976)を参照されたい。

ムの中心から 650 km 以内で、上層風 (約 200 mb の高度) と下層風 (約 900 mb) を算出した。

その結果次の様なことがわかった。

a) 短時間間隔画像からは上・下層とも 30 (15) 分間隔の画像からの 10 倍 (5 倍) の数の風が得られた。この時の風速は、下層 10~20 m/s, 上層 10~40 m/s であった。

b) 短時間間隔画像からは中心付近の濃密な雲におおわれている内側で下層の風に流されているとみられるいくつかの明るい領域を追跡することができた。飛行機観測との差は平均 2.5 m/s であった。

c) 15 m/s 程度以下で移動する遅い積雲の短時間間隔画像 (7.5 分以下) による追跡には full-resolution (1 km) である可視画像が必要である。

d) 1 例については、中心付近で雲に完全におおわれている部分の外側 (中心から 200-400 km) で下層風 (20 m/s 程度以下) が得られ、飛行機観測との差は平均 2.5 m/s であった。

3.3. GOES 画像による亜熱帯ジェット気流近傍における上層風の算出 (浜田, 1982)

15分および30分間隔の画像を使用し SSEC の McIDAS により風計算を行なった。算出したのは上層風のみで、最大風速 65 m/s 程度の亜熱帯ジェット気流軸近傍の絹雲を追跡した。

その結果次の様なことがわかった。

a) 亜熱帯ジェット気流軸付近の絹雲を識別できる場合、それを追跡して算出した上層風は、NMC*の解析図によく一致している。近傍のラジオゾンデ風と直接比較すると 5 m/s 程度の差で一致している。

b) 30分間隔画像よりも15分間隔画像の方が多くのベクトルが算出でき、またオペレーションも容易である。

c) ある領域では15分間隔と30分間隔画像から算出されるベクトル数は異っていても同一の場を表現している。しかし追跡雲の変形の激しい領域では、30分間隔では十分な数のベクトルが得られなかったが15分間隔画像からは得られた。

d) 風速の速い時ラジオゾンデ風が欠測となることがあり、衛星風がそれを補っている場合がある。

4. 考察

4.1. 上層風の算出について

Johnson *et al.* (1980) で調査対象となった上層風の平均風速は 20 m/s 内外である。そのときの 1 例の写真を第 2 図に示す。第 3 図 (左) は 30 分間隔、(右) は 15 分間隔の画像から算出したベクトル図である。これらの結果が第 4 表に示されている。ここで注目すべきことは、平均風速が画像の時間間隔が短くなるにつれて 20.1 m/s (30 分間隔) から 25.5 m/s (3 分間隔) まで増加していることである。同様な傾向は、同じ著者の別の日 (1978 年 5 月 20 日) の調査でも見られ、同じく 16.4 m/s から 31.8 m/s まで増加している。

浜田 (1982) で調査対象となったジェット気流の風速は最大 65 m/s 程度である。この場合の等風速線解析図によっても、60 m/s, 65 m/s の等風速線の位置からみて 15 分間隔の画像から算出した衛星風の方が 30 分間隔の画像から算出したものよりも 2~5 m/s 程度風速が大きいことが示されている。

これらの結果は、画像の撮像時間間隔が長いと、何かうまく追跡できない場合 (たとえば位相速度を追跡している) があるかもしれないということを示している。したがって、絹雲のライフタイムは充分に長いとは言え、短い時間間隔の画像で追跡を行なった方が良い。

4.2. 下層風の算出について

Johnson *et al.* (1980) に示されている下層風の平均風速は 3 例のうち 2 例までが 10 m/s 内外であり、それは、先に述べた上層の場合と異なり画像時間間隔に依存して変化はしていない。

このうち 1978 年 4 月 9 日の例の写真を第 4 図に、算出したベクトル図を第 5 図に、その結果を第 5 表に示す。この例はライフタイムの比較的短い雲を追跡したものであり、算出されたベクトル数が、画像の時間間隔が短くなるに従い急速に増加している。この傾向は Rodgers *et al.* (1979) の例でも見られる。風速は、絹雲の場合と異なり時間間隔が短くなるに従い減少している。これは、おそらく時間間隔が長い場合ライフタイムの長い背の高い積雲のみを追跡しており、追跡雲の移動が表わしている周辺の風の高度が高いためと推定できる。これと同様な現象は、飛行機観測ではあるが Fujita *et al.* (1975) にも示されている。

4.3. 最適撮像時間々隔

本節では、現在国際的に 5 個の衛星から風計算を行なう主な目的である全地球的なデータを得ることを前提とした最適時間間隔について主に考察してみたい。

* NMC: National Meteorological Center, NOAA.

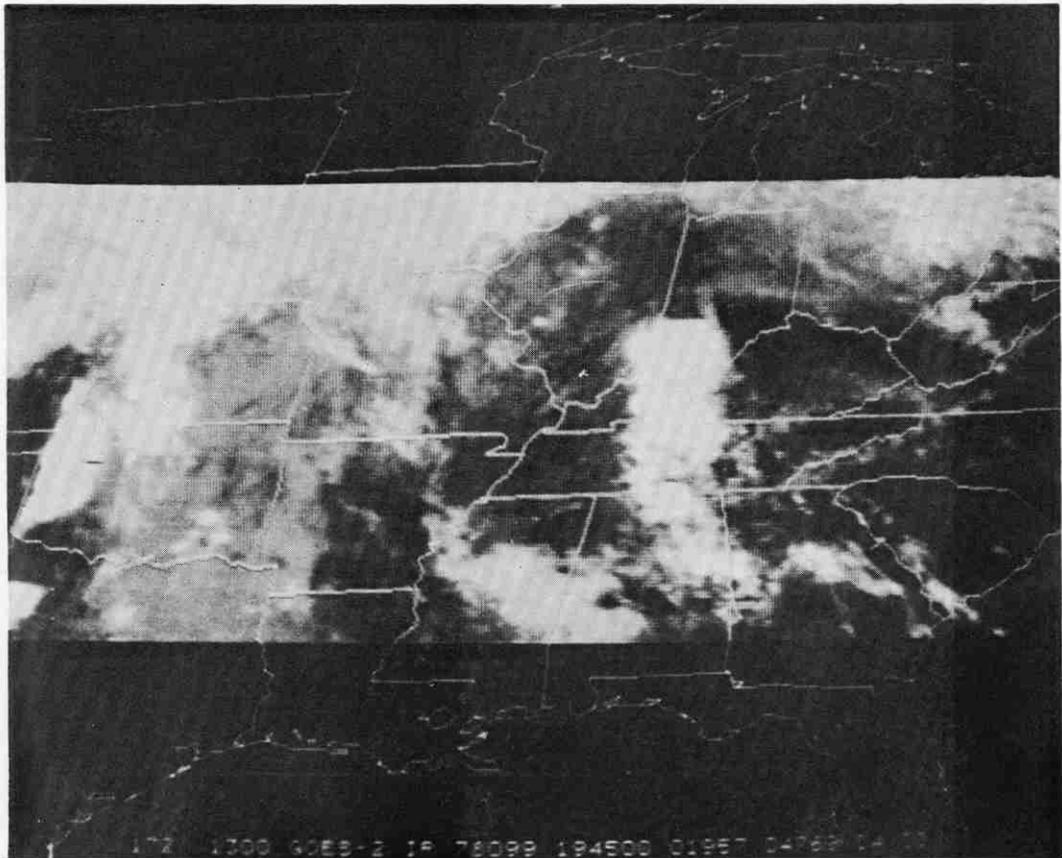


Fig. 2 Infrared satellite image, 1945 GMT 9 April, 1978. (After Johnson *et al.*, 1980)

Table 4 Cloud-tracking results, cirrus-level, 9 April 1978. (After Johnson *et al.*, 1980)

Single-pixel tracked					
Time interval (min)	Number of vectors	Direction (deg)		Speed (m s ⁻¹)	
		Mean	Std. dev.	Mean	Std. dev.
30	90	256.3	22.6	20.1	6.1
15	87	261.2	22.1	23.1	7.3
6	77	257.5	23.3	25.0	7.8
3	65	261.3	23.4	25.5	11.6
rms values(m s ⁻¹)					
Time intervals compared	Mean <i>u</i> -component	Mean <i>v</i> -component	Mean resultant wind		
30 min vs 15 min	4.0	2.1	4.5		
30 min vs 6 min	4.3	2.3	4.9		
30 min vs 3 min	3.7	2.1	4.2		

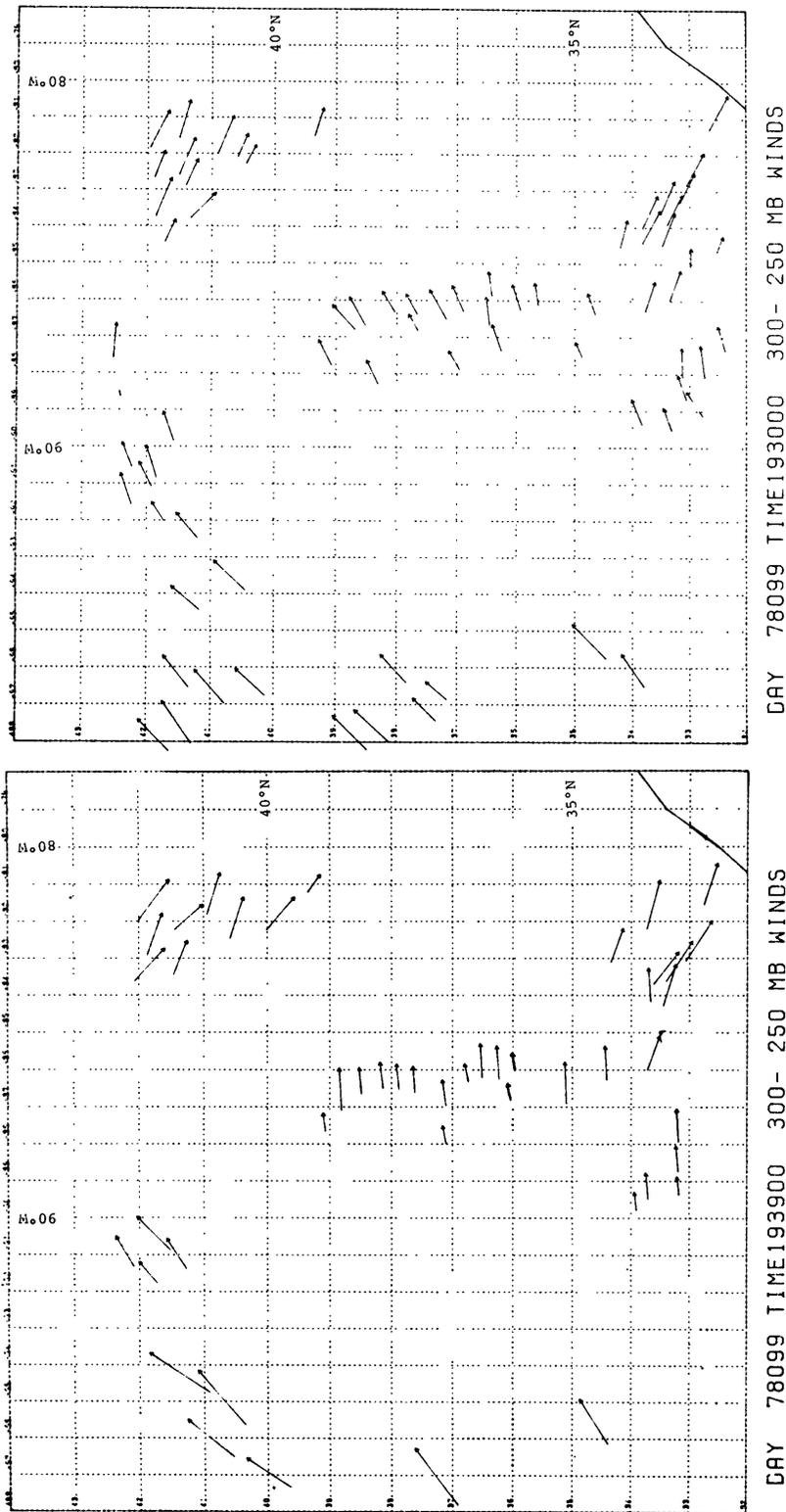


Fig. 3 Cirrus level wind sets, 9 April 1978.

Left: 30 minute interval, 2000GMT.

Right: 3 minute interval, 1942GMT.

(After Johnson *et al.*, 1980)

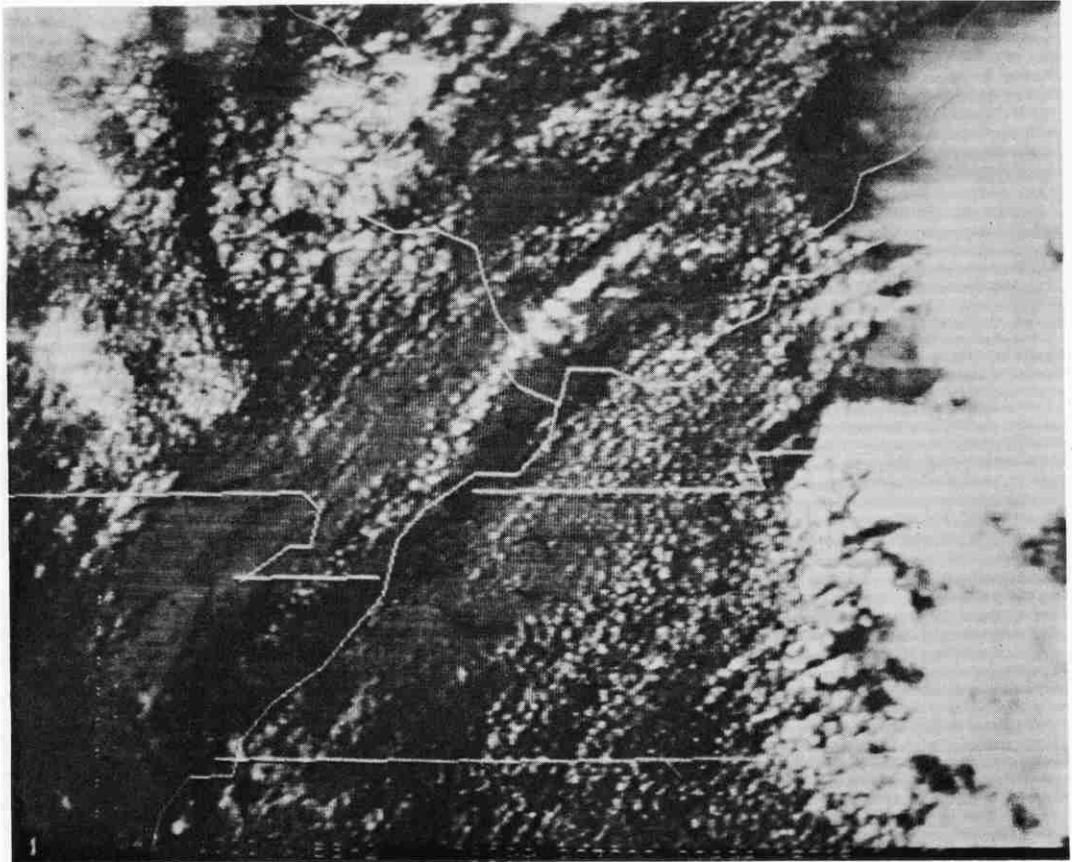


Fig. 4 Visible satellite image, 2030GMT 9 April 1978, centered on the mid-Mississippi River Valley. (After Jhonson et al., 1980)

Table 5 Cloud-tracking results, low-level, 9 April 1978. (After Johnson *et al.*, 1980)

Time interval (min)	Number of vectors	Grid point values	Direction(deg)		Speed(m s ⁻¹)	
			Mean	Std. dev.	Mean	Std. dev.
30	17	39	208.1	6.4	12.4	2.2
15	46	117	212.0	6.8	10.3	2.0
6	85	156	207.3	8.9	10.4	1.9
3	165	218	210.4	8.2	9.3	1.3

rms values(m s ⁻¹)			
Time intervals compared	Mean <i>u</i> -component	Mean <i>v</i> -component	Mean resultant wind
30 min vs 15 min	2.7	4.4	5.2
30 min vs 6 min	3.1	5.4	6.3
30 min vs 3 min	3.5	5.6	6.7

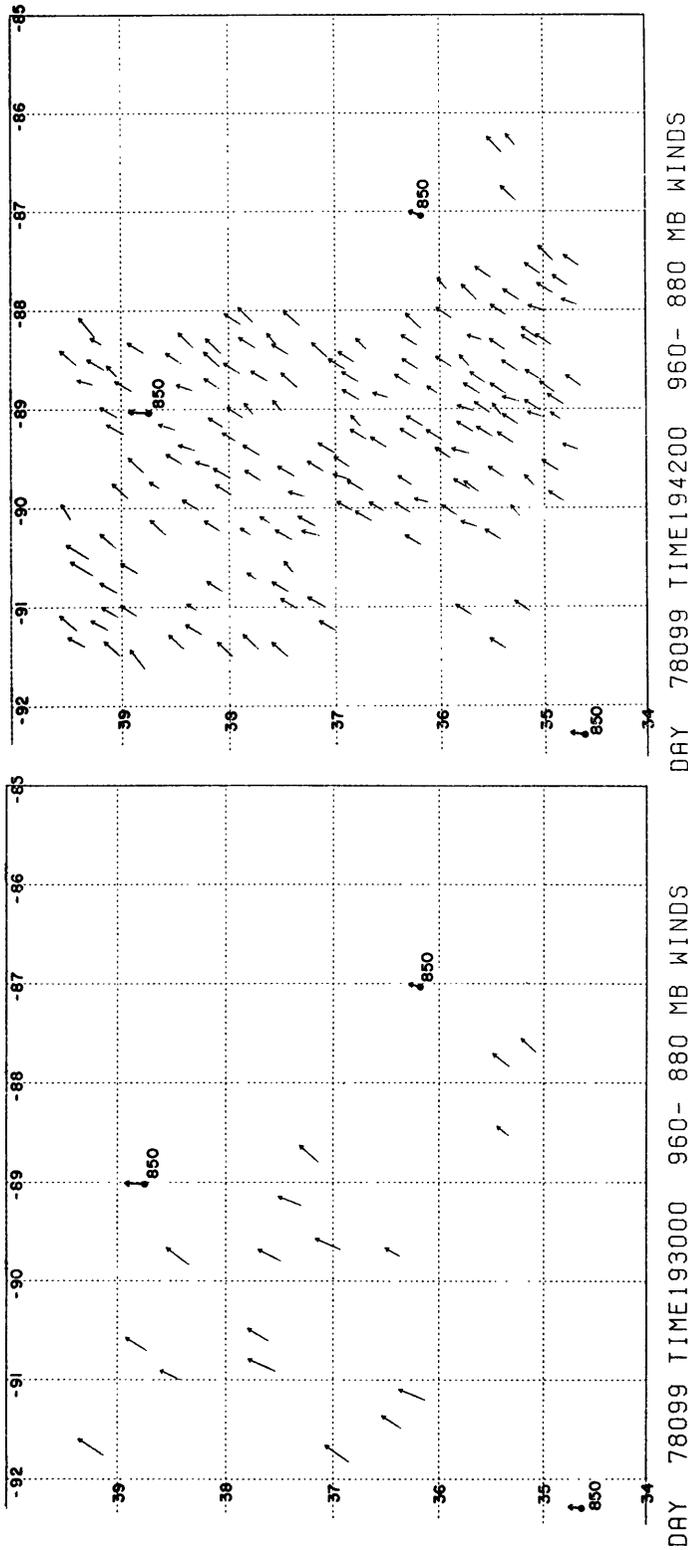


Fig. 5 Cumulus level wind sets, 9 April 1978.

Left: 30 minute interval, 2000 GMT with 850 mb winds superimposed.

Right: 3 minute interval, 1945 GMT with 850 mb winds superimposed.

(After Johnson *et al.*, 1980)

上層風の算出のためには、追跡すべき絹雲の寿命はかなり長い、風速が大きくなる程雲の形状の変化のためや、画像上の移動量が大きくなりすぎるために追跡が困難になってくる。その結果、位相速度を追跡したり、誤った追跡を行なう可能性が大きくなる。現行の1時間30分間隔(MSC)あるいは2時間間隔(NESS)は、特に高速の絹雲を追跡するには適していない。この場合には15分間隔程度の時間間隔であれば多くの風ベクトルの算出が期待できる。絹雲の追跡に通常使用される赤外画像の場合には、1画素間隔が縦方向に5kmである。量子化の誤差を0.5画素間隔と考えれば、風速にして2.8m/sとなるが、既述の様にマッチング位置の補間などにより、さらに小さくすることができる。

下層風の算出のためには、追跡すべき背の低い積雲の寿命が短いことを考えると現行の30分間隔は長すぎる。短かくすれば追跡は容易となるにしても、画素間隔による量子化の誤差の影響が無視できない。この誤差を0.5画素間隔と見積れば、GMS可視画像では6分~3分間隔、(風速誤差2.7~3.5m/s)、赤外画像では15分間隔(同2.8m/s)が可能である。画像時間間隔を短かくすればかなり小さなスケールの風場を表現できることになる。

これまでの文献調査と考察結果から、現業での風計算用画像の時間間隔として15分間隔を筆者は提案する。この間隔で3枚の連続画像を使用することにより、現行の30分間隔画像あるいはそれ以上の時間間隔の画像で追跡することと比較して次の様な改善が期待できる。

a) 上層風について、かなり高速の絹雲を正確に追跡できるようになる。このことにより冬期中緯度の上層風の精度の向上が期待できる。

b) 上・下層風とも、算出個数の増加を図ることができる。

これらのことについて、次の点に留意すること、あるいはさらに調査をすすめることが必要である。

a) 全地球的な規模のデータであることを考えると、他衛星の風計算画像の時間間隔と同じであることが、資料の均質性の観点から見ても重要であること。

b) 下層風については、時間間隔を短かくすることにより背の低い雲が追跡の対象となり、表現する風場が異なって来る場合があることに留意しなければならない。

5. おわりに

本報告ではこれまでの文献などの調査結果から、15分間隔の画像による風計算を提案した。筆者は、現時点では現業処理としてこの時間間隔が最適であると考えているが、将来ともそうでなければならぬとは考えてはいない。むしろ、この提案を土台にしてさらに討論を積み重ね調査資料を蓄積することにより、現業での最適画像取得時間間隔を決めることが望ましい方向である。

本稿は、1982年10月6日気象衛星センターにおける「計算機リブレース検討委員会」の画像ワーキンググループの会合での報告をまとめたものである。その時に熱心に討論しまた適切な意見を出して下さった気象衛星センターの皆様へ感謝致します。

References

- 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, 1981A: ウィスコンシン大学に滞在して——研修報告(その1)——, 気象衛星センター技術報告, 第3号, 101-125.
- 浜田忠昭, 1981B: ウィスコンシン大学に滞在して——研修報告(その2)——, 気象衛星センター技術報告, 第4号, 171-198.
- 浜田忠昭, 1982: 未発表.
- Billingsley, J. B., 1976: Interactive image processing for meteorological applications at NASA/Goddard Space Flight Center. Preprint of Seventh Conference on Aerospace and Aeronautical Meteorology and Symposium on Remote Sensing from Satellites. Nov. 16-19, 1976; Melbourne, Fla. Published by American Meteor. Soc., Boston, Mass.
- Fujita, T. T., 1970: Basic problems on cloud identification related to the design of SMS-GOES spin scan radiometers. SMRP Papers, No. 84, The University of Chicago.
- Fujita, T. T., E. W. Pearl and W. E. Shenk, 1975: Satellite tracked cumulus velocities. J. Appl. Meteor., 14, 407-413.
- Johnson, G. L. and D. Suchman, 1980; Intercomparisons of SMS wind sets: A study using rapid-scan imagery, Monthly Weather Review, 108, 1672-1688.
- Rodgers, E., R. C. Gentry, W. E. Shenk and V. Oliver, 1979: The Benefits of using short-interval satellite images to derive winds for tropical cyclones. Mon. Wea. Rev., 107, 575-584.
- Smith, E. A., 1975: The McIDAS system. IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-13, 123-136.