

# V. F. DVORAK 氏による衛星画像からの熱帯低気圧の強度推定方法の手順と応用例

## An Explanation of the Revised DVORAK Technique for Estimating Tropical Cyclone Intensity using Satellite Cloud Imagery and Some Results of its Application to Two 1982 Storms

木 場 博 之\*

Hiroyuki Koba\*

### Abstract

DVORAK technique for estimating tropical cyclone current intensity (CI) was revised (DVORAK, 1980) to include the use of enhanced infrared (EIR) imagery and further modification has been made recently (DVORAK, 1982). This article is an explanation of the technique and is intended for use by new comers in operational satellite tropical cyclone cloud imagery analysis at Meteorological Satellite Center, Japan Meteorological Agency. The revised technique was applied to the entire life of two typhoons, 8210 and 8213, and the performance of the revised technique was studied in some aspects.

(1) Estimated storm intensity (CI number) agreed well with that from JMA official analysis in 36% of total 74 cases in EIR imagery analysis and the difference between them fell within 0.5 number in 90% of whole cases. The range of CI number was 2.0~7.0.

(2) Previous technique (DVORAK 1980) showed better agreement between CI number and official minimum central pressure during the storm's development stage (CI number 5.0~7.0).

(3) Eye adjustment procedure gave lower estimation of CI number by 0.5. Independent application of the "eye features" or "vertical depth of cloud features" adjustment procedure yielded better results.

(4) During the storm development stage, the deepest central pressure was analyzed in retard of 6 to 12 hours after the most developed cloud pattern observed.

### 1. はじめに

DVORAK の方法は、衛星画像から熱帯低気圧の強さを推定し、予測する方法として、米国 NOAA の V. F. DVORAK 氏によって開発されたものである。その手法は、熱帯低気圧の雲パターンの特徴の変化をモデル化し、解析する熱帯低気圧の雲システムをそのモデルと対

\* 気象衛星センター解析課, Meteorological Satellite Center

比させることによって、強度を推定しようとするものである。

初期においては可視画像（以下、VIS 画像と略す）を用いた方法が開発され、その後強調処理した赤外画像（Enhanced IR imagery: 以下、EIR 画像と略す）を用いた方法が開発された。さらに解析手法も改善され、DVORAK (1980) では VIS 画像と EIR 画像の解析手順が統一された。また1982年5月にはWMOから、熱帯低気圧の観測と予報への衛星資料利用方法のセミナーで

用いるテキストとして DVORAK (1982) の論文が刊行された。この中で、従来の解析手順および強度解析の基準の一部が変更された。

DVORAK の方法については、VIS 画像を用いた方法は上田 (1974)、嶋村 (1975)、門脇 (1976) によって、EIR 画像を用いた方法は渡辺 (1979) によってそれぞれ紹介されている。それらの報告において DVORAK の方法の概念については知ることができるが、実際の解析手順を理解するにはやや困難な面があった。

このため、この報告では DVORAK (1982) に基づき、DVORAK の方法の基本概念および解析手順について解説し、実際の解析例からこの方法の精度、問題点などについて示す。

気象衛星センターでは、台風臨時観測時の 03Z と 12Z の画像について DVORAK の方法での強度推定を行っており、1983年度からは DVORAK (1982) の解析手順に従っている。またこの方法は 1983 年度の台風業務実験 (TOPEX) でも試行された。

## 2. 強度解析の概要

### 2-1. 熱帯低気圧の強度

DVORAK の方法における熱帯低気圧の現在の強度は CI 数 (Current Intensity number) と呼ばれ、1.0 から 8.0 までの数 (0.5 単位) で現わされる。この CI 数は、統計的に熱帯低気圧の最大風速 (1 分間持続値) と一義的に対応づけられている。一方、熱帯低気圧の中心気圧は、最大風速と中心気圧との統計的關係にもとづいて CI 数から推定する。

CI 数は、熱帯低気圧の雲システムの発達程度を示す指数 (T 数) をもとに、熱帯低気圧の盛衰の過程を考慮して決定する。次項ではこの T 数について解説する。

### 2-2. 雲パターンの数量化

V. F. DVORAK が示した熱帯低気圧の雲パターンの発達モデルを Fig. 1 に示す。一方強度 (T 数) 変化モデルを Fig. 2 に示す。

Fig. 1 の雲パターンの発達モデルでは、湾曲した雲バンドからの発達、中心部の濃密な雲域 (Central Dense Overcast: 以下、CDO と略す) からの発達および下層雲列で示される中心から離れて存在する強い対流雲域からの発達が示されている。DVORAK はこれらの発達型の夫々について、雲パターンの発達程度を数量化し T 数とした。

この T 数は、熱帯低気圧の雲システムを、次に示す 3

通りの方法で解析して得られる指数の中から決定する。

- (1) 熱帯低気圧の雲システムを、定められた雲パターンで解析し得られる指数 (DT 数: Data T-number)。
- (2) 24 時間前の雲パターンと比較し、強度変化モデルにもとづいて予測した指数 (MET 数: Model Expected T-number)。
- (3) 熱帯低気圧の雲システムを、定められた雲パターンモデルと比較して決定する指数 (PT 数: Pattern T-number)。

また(1)項で示した雲パターンの解析では、さらにいくつかの「指数」が定義されている。以下、雲パターンの種類とそれらの「指数」の定義について述べる。

#### a. 雲パターンの種類

熱帯低気圧の雲システムを次の 5 つの雲パターンに大別する。

- i) 「湾曲したバンド」パターン。
- ii) 「シアー」パターン。
- iii) 「眼」パターン。
- iv) 「CDO」パターン (VIS 画像のみ)。
- v) 「埋没した中心」パターン (EIR 画像のみ)。

また特別な雲パターンとして、「CCC (Central Cold Cover)」パターンが定義されている。以上の各雲パターンの特徴については、3 節の強度解析の手順の中で詳述する。

#### b. CF 数

CF (Central Feature) 数は熱帯低気圧の雲システムの中心部の状態を表わす指数で、「湾曲したバンド」パターンおよび「シアー」パターン以外の雲パターン解析で用いる。

#### c. BF 数

BF (Banding Feature) 数は BF 調整とも言い、熱帯低気圧の中心部 (CF) を一様に取り巻く雲バンドの状態を表わす指数である。EIR 画像解析では CF 数を調整する量であるが、VIS 画像では DT 数決定に重要な量となる。

#### d. E 数

E 数 (Eye number) は「眼」パターンの解析で得られる指数で、眼の周囲の濃密雲域 (CDO) の状態を表わす。

#### e. 眼調整

眼調整 (Eye Adjustment) は、眼の形状と対流の深さ (EIR 画像では眼の温度と眼の周囲の雲の雲頂温度との差) によって E 数を調整する量である。

以上の各種の「指数」から熱帯低気圧の強さを表わす CI 数が決定されるが、強度決定手順の概念図を Fig. 3

DEVELOPMENTAL PATTERN TYPES	PRE STORM T1.5 ± 0.5	TROPICAL STORM		HURRICANE PATTERN TYPES		
		(Minimal) T2.5	(Strong) T3.5	(Minimal) T4.5	(Strong) T5.5	(Super) T6.5 - T8
CURVED BAND PRIMARY PATTERN TYPE						
CURVED BAND EIR ONLY						
CDO PATTERN TYPE VIS ONLY						
SHEAR PATTERN TYPE						

Fig. 1 DVORAK が提案した熱帯低気圧の雲パターンの発達モデル。雲パターンの発達の程度はT数で表わす。各列それぞれ左から右へ Fig. 2, に示す標準的な発達パターンを表わす (DVORAK, 1982).

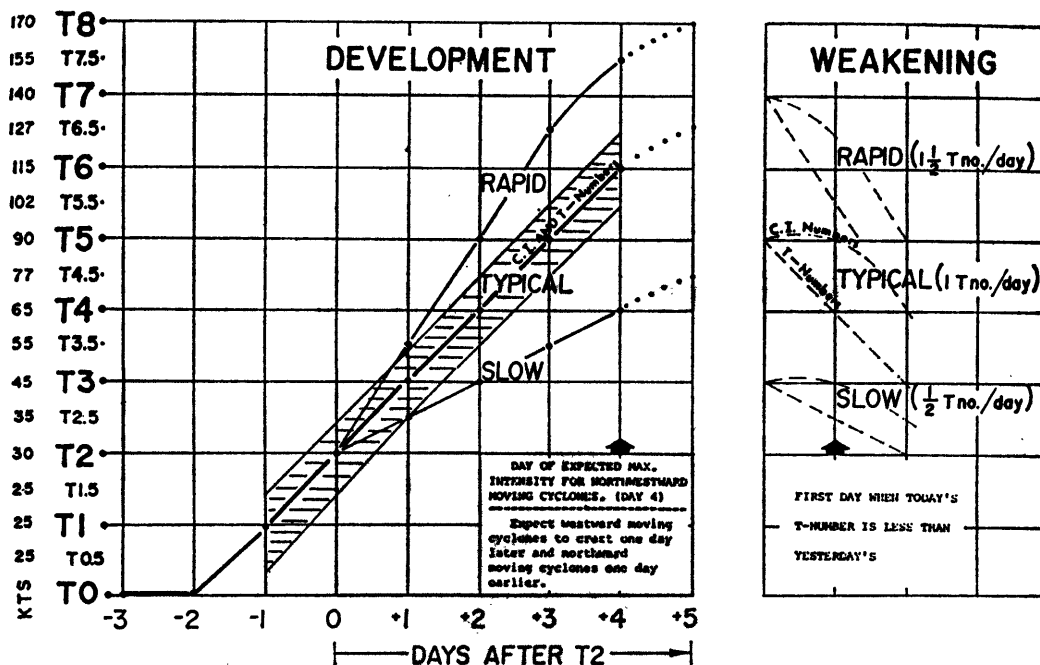


Fig. 2 T数の発達モデル (DVORAK, 1975).

に示す。図において、「指数」は下から上方への手順を辿って決定する。なお「眼」パターンにおける CF 数は、E 数と眼調整量を加えたものである。

2-3. 強度解析に用いる画像

DVORAK の方法による EIR 画像の例を Fig. 4-a に

示す。この画像は1983年夏期の TOPEX 第2回本実験において国際実験センター (IEC) で試用するために出力されたもので、DVORAK が示した温度階級 (Fig. 6 の Gray Shade Code 参照) を、Fig. 4-b に示す「画像濃度—赤外線輝度温度」対応図によって画像濃度に変換したものである。この報告 (第6節) で示す EIR 画像の解

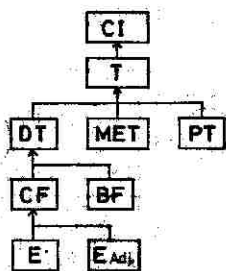


Fig. 3 DVORAK の方法で用いる各種の「指数」の略号と、その算出手順の概念図。下から上へ順に決めて行く。

析例は、上記の方法で作成した画像に依った。Fig. 5は Fig. 4-a の EIR 画像の各濃度階調を、同図の温度階級に付した括弧内の記号で表わしラインプリンターに出力したもので、気象衛星センターでの強度解析作業で使用しているものである。同図は赤外画素データを緯経度 0.1 度格子でサンプリングしたものの出力図であるが、0.05 度格子のものも併用している。

一方 VIS 画像は、気象衛星センターで作成されている高分解能画像でしる。

なお、EIR 画像での  $-81^{\circ}\text{C}$  以下の階調 (Coldest Dark Gray) は DVORAK (1982) で新しく追加されている。この階調の追加によって強度決定基準は変更され

ていないが、「埋没した中心」パターンでの雲システム中心の決定がし易くなった。

また EIR 画像の各階調は温度に対して不規則に定義されているが、その根拠は明確にされていない。筆者の考えでは、DVORAK の方法はまず VIS 画像で開発されたため、後で開発された EIR 画像での解析強度を VIS 画像での強度に適合させるために、統計的に決定されたと考えられる。

### 3. 強度解析の手順

EIR 画像での強度解析流れ図を Fig. 6 に、VIS 画像での同流れ図を Fig. 7 に示す。ここでは、これらの流れ図に沿って強度解析の手順を解説する。それぞれの流れ図では、ステップ 1 で雲システム中心、ステップ 2 で DT 数、ステップ 4・5 で MET 数、ステップ 6 で PT 数、ステップ 3 および 7・8 で T 数、ステップ 9 で CI 数を決定する。ただし、ステップ 3 およびステップ 7 以降の解析手順は、いずれの流れ図でも同じである。なお EIR 画像の解析手順の解説では、階調名は略号で示してある。

#### 3-1. 雲システム中心の決定

雲システム中心 (Cloud System Center: 以下 CSC と言う) は、「シアー」パターン、「眼」パターンおよび

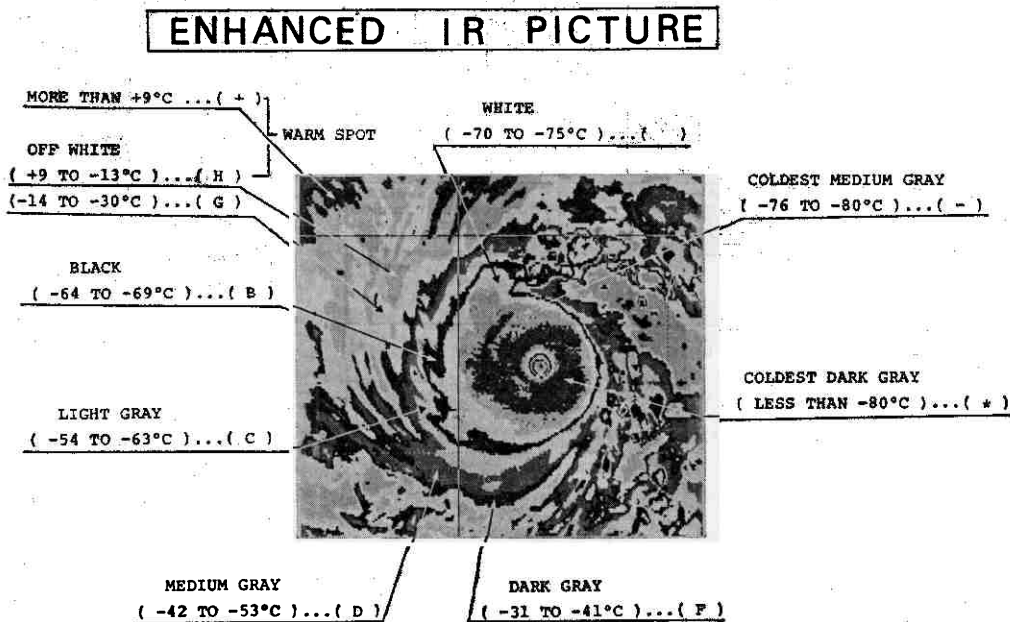


Fig. 4-a DVORAK の方法での赤外強調 (EIR) 画像の例。温度階級に付した括弧内の記号は Fig. 5 で用いる。



"ETR" ANALYSIS DIAGRAM

Version F. Dvorak [May 1982]

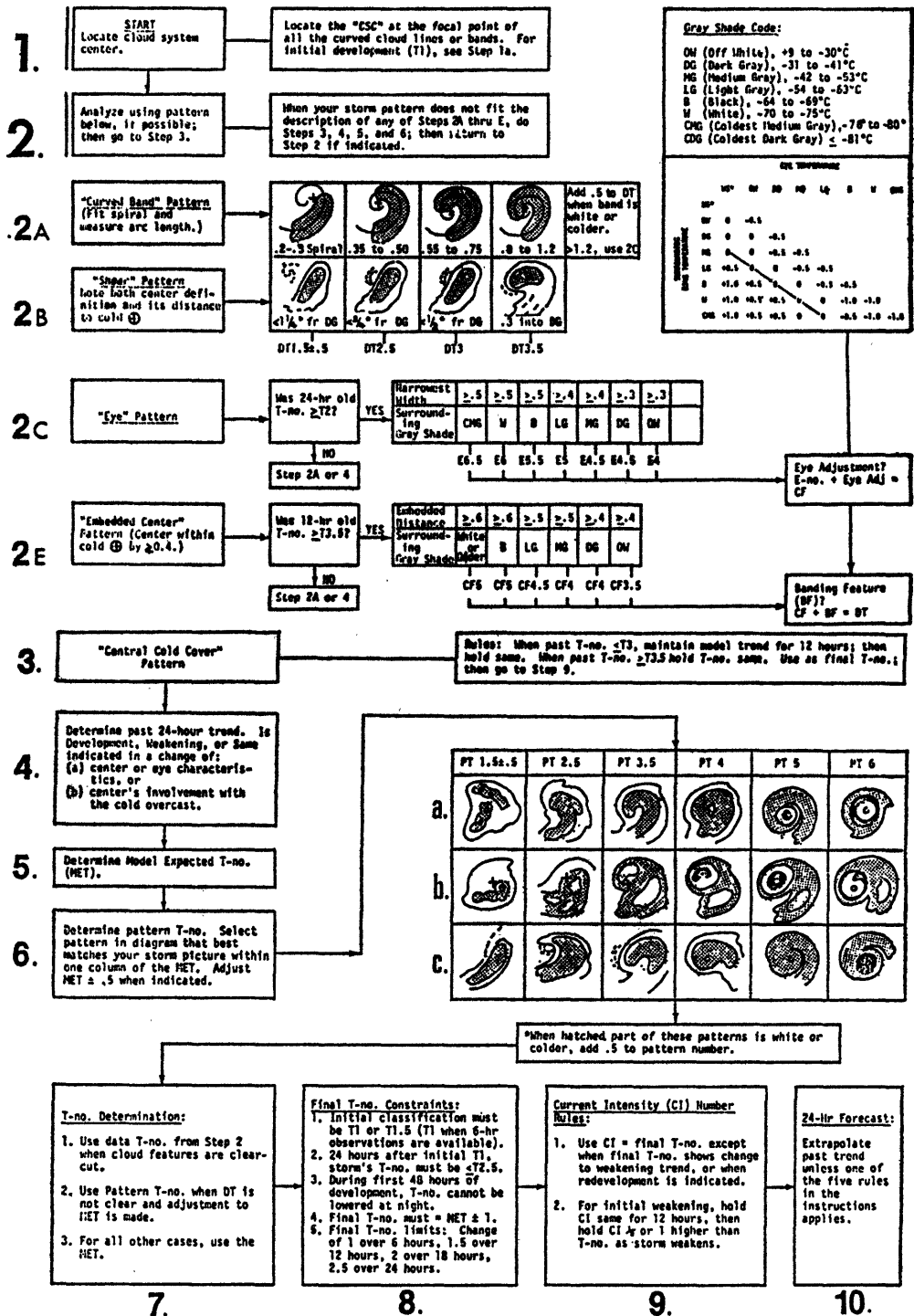


Fig. 6 EIR 画像解析流れ図 (DVORAK, 1982).

"VIS" ANALYSIS DIAGRAM

Vernon F. Dvorak [May 1982]

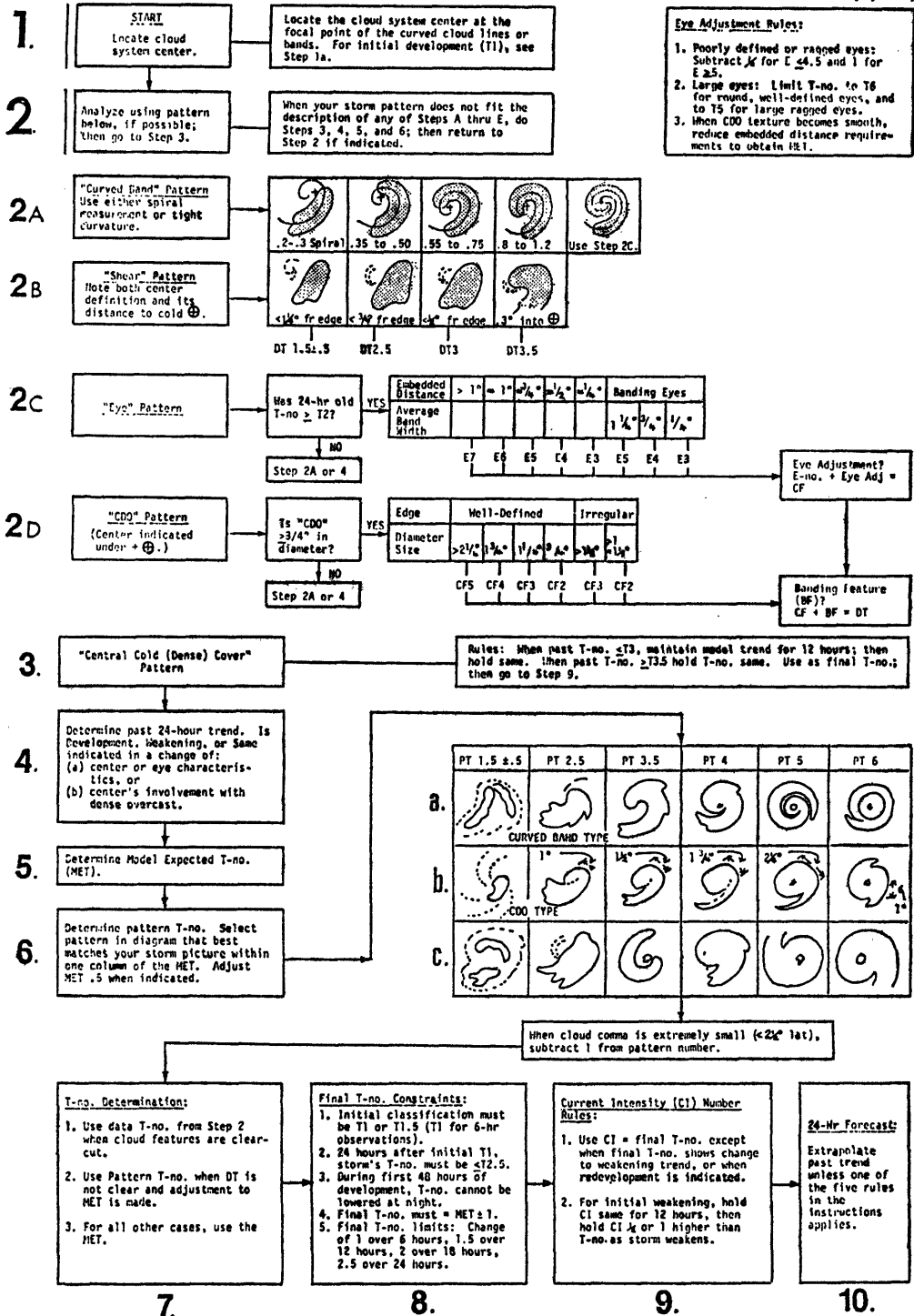


Fig. 7 VIS 画像解析流れ図 (DVORAK, 1982).

テム中に見られる雲列や雲域の境界などで示される全ての曲率円の共有領域の中心とする。

(5)EIR 画像での湾曲した雲バンドでは、バンド軸の反時計まわりの終りと暖域の侵入の先端を結ぶ中間点で、最も冷たい雲塊付近の温度傾度の大きい所に位置する。

(6)複数個の CSC が考えられる時は、特徴が最も明確で過去の熱帯低気圧の経路からみて最適と思われるものを CSC とする。

(7)強い鉛直シアのある場での CSC は濃密な雲域の風上側の縁に位置しやすい。

一方流れ図では示されていないが、熱帯低気圧へ発達する初期の雲パターンおよびその形成過程に見られる特徴が次のように定義されている。すなわち、熱帯低気圧に発達する雲システムの特徴は、その強さが T 数 2.5~3.5 に達する約 1.5 日前に現われる。この時の強さが T 数 1 で、雲列あるいは雲バンドを形成している対流雲が次のような特徴をしている。

(1)12時間以上持続している。

(2)その雲列や雲バンドで示される直径 2.5 度 (緯度) の円内に CSC が在る。

(3)CSC から 2 度 (緯度) 未満の位置に、1.5 度 (緯度) より大きい濃密雲域 (EIR 画像では DG 以下の冷たい階調域) が存在する。ただし、夜間は冷たい雲域が減少することもあるので、その場合、条件に合う雲域を注意して観察する必要がある。

そして、この時期の CSC は次のような雲システムの特徴によって決定できる。

(1)相対的に暖かい (雲のない) 所の周囲を、少なくとも 1/5 周している湾曲した濃密な雲バンド (EIR 画像では DG 以下の冷たい階調域)。絹雲が見られる時は CSC を横切って高気圧性のシアを示している (Fig. 6, 7 の流れ図, ステップ 6 の PT 1.5 の雲パターン参照)。なお、湾曲した雲バンドの長さの測定方法については、3-2 節で詳述する。

(2)濃密で冷たい雲域 (EIR 画像では DG 以下の冷たい階調域) 付近に中心を示唆する湾曲した絹雲列 (Fig. 6 の流れ図, ステップ 6 の PT 1.5 b の雲パターン参照)。

(3)あるいは(2)の雲域から 2 度 (緯度) 以内に在る CSC を示す下層雲列 (Fig. 6, 7 の流れ図, ステップ 2B のダイアグラムの DT 1.5 の雲パターン参照)。

また、熱帯低気圧に発達する雲システムは T 数 1 となる前 36 時間中に、幾つもの対流雲が発達し列状の配列が明瞭となると同時に、雲システムの北縁が滑らかになっ

てくる。このような状態となってから 12 時間後には T 数 1 が期待できる。しかし、この段階では絹雲や対流雲が存在しなかったり又は非常に発達した雲パターンを示すこともある。T 数 1 の段階で発達するほとんどの雲パターンでは高気圧性の曲率をもつ絹雲列が見られる。すなわちこの期間を通じて雲システムの北縁が滑らかになることは熱帯低気圧の発達を示す良い徴候であり、その状況が持続する時は 36 時間後に T 数 2.5 が予想される。

雲動画による解析作業の経験では、ある雲システムが熱帯低気圧へ発達する場合、周囲の雲システムの盛衰あるいは上層の寒冷渦などとも関連しているのが見られる。

### 3-2. 雲パターンによる強度解析

解析する熱帯低気圧の雲システムを、流れ図 (Fig. 6, 7) のステップ 2 に示される雲パターン (2A~2E) と対応させ DT 数を決定する。雲システムが雲パターンに該当しない場合はステップ 3 で降を実施する。なお雲パターンによっては MET 数を決める必要がある。その場合はステップ 4・5 を同時に実施する。

#### a. 「湾曲したバンド」パターン (Fig. 15 参照)

雲システムが流れ図 (Fig. 6, 7) の 2A に示される「湾曲したバンド」の形状をしている時、バンド軸の回転の長さによって DT 数を決定する。解析手順は、

(1)VIS 画像では視察によって濃密雲 (活発な対流雲) 域の輪郭を描き、EIR 画像では DG の階調の高温側の縁を見分ける。

(2)(1)項の雲域で最も濃密な部分 (あるいは最も冷たい階調) に沿ってバンド軸を描く。バンド軸は雲バンドの内側の縁とはほぼ平行となるようにする。

(3)Fig. 8 に示した傾角 10 度の対数ら旋 (以下、 $10^{\circ} \log$  スパイラルと略す) をそのバンド軸に適合させ、1 回転を 1.0 として 5/100 単位でバンド軸の長さ (CSC の周りをまわる回数) を測定する。バンド軸が 2 本以上描ける時は最も曲率の大きいものを測定する。なお描画の方法にもよるが、バンド軸のどこでも  $10^{\circ} \log$  スパイラルの形と常に一致するとは限らない。この場合、経験的には CSC に近い方の曲率を重視してスパイラルを適合させると良い。以後の雲バンドの長さの測定はこの方法に依る。

(4)バンド軸の長さをもとにダイアグラムによって DT 数を決定する。EIR 画像で W 以下の冷たい階調の長さを測定した場合は、決定した DT 数に 0.5 を加算する。

(5)バンド軸の長さが 1.25 以上の場合は、ステップ 2C の「眼 (Banding eye)」パターンとして解析する。



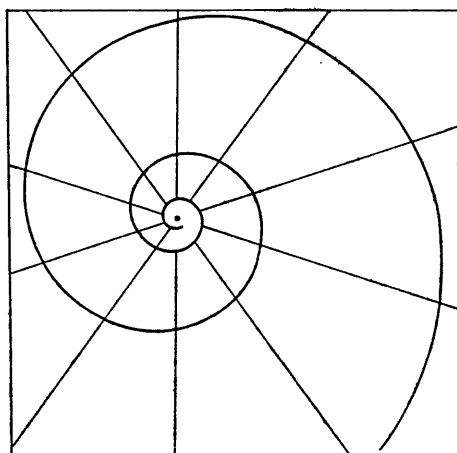


Fig. 8 Logarithmic Spairal, 10° Crossing Angale.

b. 「シアー」パターン (Fig. 16 参照)

「シアー」パターンは流れ図 (Fig. 6, 7) のステップ 2B で解析する。この雲パターンは熱帯低気圧が台風の強さに達する前の段階および衰弱期において、鉛直シアーが大きい時に出現する。すなわち「シアー」パターンは下層雲列によって決定される CSC と濃密雲域がずれている場合で、濃密雲域の縁と CSC の位置関係によって DT 数を決定する。その手順は、

- (1) 下層雲列によって CSC を決定し、
- (2) 濃密雲域の縁 (VIS 画像では視察によって描いた線、EIR 画像では DG の階調の高温側の縁) を決め、
- (3) CSC と縁との最短距離 (緯度) を測り、ダイアグラムによって DT 数を決定する。ただし、濃密雲域の縁から 0.3 度 (緯度) より内側に CSC が認められる時はステップ 2D 又は 2E を実施する。

c. 「眼」パターン

「眼」パターンは眼が存在し、24時間前の T 数が 2 以上の時のみ解析する。それ以外の時はステップ 2A 又はステップ 4以降を実施する。「眼」パターンでは E 数、眼調整 (E Adj.) および BF 数を加算して DT 数を決定する。なお「眼」パターンでの眼は次のように定義する。

- (1) 濃密な雲域 (EIR 画像では OW 以下の冷たい階調域) 中の黒い (暖かい) 所。
- (2) あるいは(1)項で示される雲域中にあって、少なくとも半周しているより冷たい (より濃密な) 雲バンドで示される円。
- (3) 10°log スパイラルで 1.25 周以上している雲バンドで囲まれた相対的に暖かい所。

- (4) 上記各項で示される眼の直径は 1.5 度 (緯度) 以下である。
  - (5) 直径が 3/4 度 (緯度) 以上の眼は「大きな眼」とする。
  - (6) 眼の長径と短径の比が 3:2 より大きい場合は「細長い眼」とする
  - (7) VIS 画像において、やっと識別できる程度の眼は「不確実な眼」とする。なおこの場合、太陽高度が高すぎたり逆に低すぎる時は眼が不確実となりやすく、また高分解能写真で不確実な眼は低分解能写真では現われにくいので注意する。
  - (8) 縁がぎざぎざしている眼は Ragged eye に含める。
- 以下、EIR 画像および VIS 画像での「眼」パターンの解析手順をそれぞれ示す。

c-1. EIR 画像の解析手順 (Fig. 17 参照)

(1) E 数

眼を一周している最も冷たい階調において、その最小幅がダイアグラムの基準 (Narrowest Width) を満足しているかを確認する。基準を満足していない場合は高温側の次の階調について同様に行う。基準を満足する最も冷たい階調によって E 数を決定する。なおステップ 2A での Banding eye の場合は 1.25 回転以上している階調の平均幅によって同様に E 数を決定する。

(2) 眼調整

眼の階調と眼を一周している最も冷たい階調との関係から、流れ図 (Fig. 6) に示される眼調整表によって、階調による眼調整量を決定する。ただし、「大きな眼」あるいは「細長い眼」については正の調整はできない。また E 数が 4.5 以上の「細長い眼」の場合は、他に負の調整がされていなければ -0.5 の調整をする。なお、眼調整表での WS (Warm Spot) の階調は -13.5 °C より暖かい領域で、第 4-a 図に示した EIR 画像では CMG と B の階調を用いて表わしてある。

(3) CF 数

E 数と眼調整量を加算して CF 数を決定する。

(4) BF 数

BF 数は、雲システムの MG 以下の冷たい階調域が Fig. 9 に示すコマ型の雲パターンをしている時、雲システムへの暖域 (DG 以上の暖かい階調) の侵入の程度によって決定する量で、その大きさは Fig. 9 に示されている。ただし、雲パターンが次の条件を満足している時のみ決定する。

- i) CF 数が 4 以上であり、
- ii) CF 数をもとに決定した T 数が MET 数より小さい。また、



Fig. 9 EIR 画像解析に用いる雲バンドの特徴 (BF) と BF 数 (DVORAK, 1982).

- iii) 雲システムのコンマの尾が、雲システムの中心部またはコンマの頭の周りを  $1/4$  以上回転しており、
- iv) Fig. 9 での腰域の侵入は、(a)と(b)では少なくとも  $1/2$ 、(c)では少なくとも  $2/3$  であること。

(5)DT 数

CF 数と BF 数を加算して DT 数を決定する。

c-2. VIS 画像の解析手順 (Fig. 18 参照)

(1)E 数

眼を取り巻く濃密雲域 (CDO) の輪郭を描き、眼中心からの最小幅を測定 (緯度) する。この最小幅をダイアグラムの Embedded distance として E 数を決定する。ただし、眼の直径が30海里より大きい時は眼壁からの最小幅とする。またステップ 2A での Banding eye の場合は、1.25 回転している雲バンドの平均幅をダイアグラムの Average Band Width として E 数を決定する。

(2)眼調整

VIS 画像では眼の明確さ、形、大きさ、あるいは CDO の状態によって眼調整量を決定する。眼調整は次の法則にもとづいて行う。

i) 不確実な眼あるいは Ragged eye の場合

E 数  $\leq 4.5$  の時  $-0.5$ 、

E 数  $\geq 5.0$  の時  $-1.0$  の調整量とする。

ただし、高分解能写真では「CDO」パターン (ステップ 2D) でも解析し、MET 数に近い方の CF 数を採用する。

ii) 大きな眼の T 数の上限は、円形で明瞭な眼の場合は T6、それ以外の時は T5 以下とする。これは眼形による T 数の制限条件に対応している。

iii) 次のような場合は  $0.5$  もしくは  $1.0$  プラスの眼調整を行う。すなわち、DT 数が MET 数より小さく、円形で明瞭な眼がキメの細かい CDO の中に在り、その熱帯低気圧の現在までの経過から見て T 数 6 以上が予想される時のみ加算する。

(3)BF 数

BF 数は  $0.5 \sim 2.5$  の範囲で CF 数に加算する数で、VIS 画像では重要な要素である。雲バンドの特徴と

BF 数を Fig. 10 に示す。BF 数は、中心部の周りを少なくとも  $1/4$  回転以上している雲バンドの周回数から、「バンド幅  $\times$  周回数  $\times 2$ 」によって得られる大きさ (0.5 単位) であるが、通常は Fig. 10 にもとづいて算出する。ただし、BF 数は T 数 4 以上の全ての台風ならびに「CDO」パターンで BF が認められる場合に算出する。

d. 「CDO」パターン (Fig. 19 参照)

「CDO」パターンは VIS 画像のみに適用し、コンマ状をした雲システムのコンマの頭に CDO が存在し、CSC が CDO の中に在る時に解析する。「CDO」パターンでは、CDO の最小直径と縁の明瞭さによって決定される CF 数、および BF 数から DT 数を決定する。流れ図 (Fig. 7) ではステップ 2D で解析し、その手順を次に示す。

(1)CDO の縁の明瞭さを判定する。ダイアグラムの Well-Defined とは、少なくとも CDO の一端が明瞭な縁となっている場合で、Irregular とは、CDO の境界が Ragged か一様なキメをしていない場合である。

(2)CDO の最小直径を測定 (緯度) し、ダイアグラムによって CF 数を決定する。ただし、CDO の直径が  $3/4$  度 (緯度) より小さい時はステップ 2A あるいはステップ 4 を実施する。

(3)BF が認められれば BF 数を算出し (VIS 画像の「眼」パターン参照)、CF 数に加算して DT 数を決定する。一般に明瞭な CDO の直径が 2 度 (緯度) 以上あれば T 数は 4 以上である。

e. 「埋没した中心」パターン (Fig. 20 参照)

「埋没した中心」パターンは EIR 画像に適用し、流れ図 (Fig. 6) ではステップ 2E で解析する。また解析する熱帯低気圧のこれまでの T 数が 3.5 以上で、CSC が OW 以下の冷たい階調域に明確に決め得る場合に解析する。このパターンでの解析手順は、眼調整が不要であること以外は「眼」パターンの手順と似ている。解析手順を次に示す。

(1)OW 以下の冷たい階調域にある、より冷たい階調で示される湾曲した雲列あるいは雲バンドによって CSC

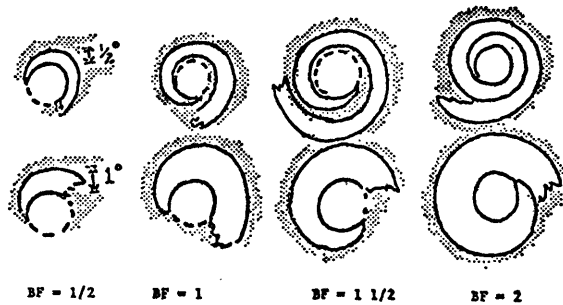


Fig. 10 VIS 画像解析に用いる雲バンドの特徴 (BF) と BF 数 (DVORAK, 1982).

を決定する。この場合、T 数 4 以上の雲パターンでは  $10^\circ \log$  スパイラルを用いて CSC を決定することができる。

- (2) CSC を取り巻く階調において、CSC からの最小幅 (CSC の最小埋没距離) がダイアグラムの Embedded Distance の基準を満足するかを確かめる。基準を満足する最も冷たい階調によって CF 数を決める。
- (3) BF が認められれば BF 数を算出し (EIR 画像の「眼」パターン参照), CF 数に加算して DT 数を決定する。

### 3-3. 「CCC」パターン (Fig. 21 参照)

「CCC」パターンは、熱帯低気圧の中心あるいはコンマ型をした雲システムのコンマの頭が、多小円形をした雲域で覆われた状態 (Central Cold Cover) の時に解析する。VIR 画像では絹雲の覆いを通して CDO が識別できるので、この雲パターンは主に EIR 画像に適用される。

「CCC」が始まるとその外側の雲バンドや雲列は衰弱し、雲パターンの変化を示す特徴が不鮮明となってくる。そして「CCC」が継続している時は、雲の特徴に再度の発達・衰弱の徴候が現われるまでは熱帯低気圧の発達 (衰弱) は抑えられる。

一方、「CCC」の周りには湾曲した絹雲列は現われないうが、非常に冷たいコンマ・パターン (通常 W 以下の冷たい階調域できめが細かく、コンマの頭と尾の間にくさびが存在) では、湾曲した絹雲列あるいは湾曲した絹雲域の境界が現われる。冷たいコンマ・パターンはしばしば急発達をするので、この雲パターンにおいて T 数が 3 以下の時には強度見積りで 0.5 を加える。

また、コンマの尾が衰弱し始める時に「CCC」パターンを弱まるとしてはならない。この現象は「CCC」の発生時には良く見られる。また T 数 4 の「眼」パターンの時、冷たい雲域中へ暖域が侵入し「CCC」が暖化する

(弱まる) が、これは雲パターンが強化する徴候である。

「CCC」パターンは流れ図のステップ 3 で解析し、次の手順によって T 数を決定する。

- (1) それまでの T 数が 3.0 以下の時は、以後 12 時間は発達モデルによって T 数を決定し、その後は T 数を同一にする。
- (2) それまでの T 数が 3.5 以上の時はその T 数とする。
- (3) ここで決定した T 数を最終 T 数としてステップ 9 を実施する。

### 3-4. 過去 24 時間の変化傾向の決定

流れ図ではステップ 4 で解析する。現在と 24 時間前の雲パターンを比較し、その特徴の変化を定性的に決める。通常、熱帯低気圧の中心が明瞭となるかあるいは濃密な雲域を伴うようになると熱帯低気圧は発達する。すなわち発達の特徴は、ステップ 2 での CF 数、BF 数を増加させる現象であり、衰弱はその逆の現象である。

雲パターンが発達した時は D (Developed), 衰弱した時は W (Weakened), 変化していない時は S (Steady) とする。以下、Central Feature, Banding Feature 以外の特徴とその時の変化傾向の決定について述べる。

- (1) 雲システムに顕著な暖化が見られない時は発達した (D) とする。顕著な暖化とは、日変化あるいは日没時に見られる変化でなく 3 時間以上続く変化であり、T 数を下げるに十分な変化を言う。
- (2) 時間がたつにつれ細長くなる雲システム、あるいは日変化以外に雲頂温度が暖化している雲システムは衰弱した (W) とする。これらについては特に注意して観察する。
- (3) 次の場合は変化なし (S) とする。
  - i) 「CCC」が T3.5 以上の熱帯低気圧で現われるか、より弱い熱帯低気圧で 12 時間以上に渡って続いている時。あるいは、

- ii) 「CSC」の冷たい雲に対する関係に顕著な変化がない時。あるいは、  
 iii) 発達と衰弱の両方の徴候が見られる時。

### 3-5. MET 数の決定

流れ図ではステップ5で解析する。まずステップ4で決定した雲パターンの変化傾向および過去の発達率を Fig. 2 の強度変化モデルに適合させ、T 数の変化量を予測する。Fig. 2 のモデルでは T2 以後の熱帯低気圧の発達について、標準的な発達・衰弱での T 数の変化率は 1/日、急速な場合は 1.5/日、緩慢な場合は 0.5/日となっている。急速な変化あるいは緩慢な変化は、6 時間以上の間隔の連続した 2 枚の画像によって決める。例えば、標準以上の発達（あるいは衰弱）の傾向が連続して認められる時は急速な変化とす。一方 1 枚の画像の場合、発達（あるいは衰弱）を示す強い徴候が認められる時は急速な変化とする。また新たな発達や変化傾向の反転のために変化率が確定できない時は 1/日の変化率とする。このようにして求めた変化量の予測値を 24 時間前の T 数に加減したものが MET 数である。すなわち、

- (1) 変化傾向が D の時

$$\text{MET 数} = 24\text{時間前の T 数} + (0.5 \sim 1.5)$$

- (2) 変化傾向が W の時

$$\text{MET 数} = 24\text{時間前の T 数} - (0.5 \sim 1.5)$$

- (3) 変化傾向が S の時

$$\text{MET 数} = 24\text{時間前の T 数}$$

となる。

### 3-6. PT 数の決定

流れ図ではステップ6で解析し、解析する雲システムを EIR 画像および VIS 画像それぞれについて示されている 18 個の雲パターンモデルと比較して決める。この場合ステップ5で得られた MET 数を参考にし、次の手順によって PT 数を決定する。

- (1) 解析しようとする雲システムをダイアグラムの MET 数と同じ PT 数の欄の雲パターンと比較する。雲パターンの特徴が一致すれば MET 数を PT 数とする。

- (2) もし一致せず、隣りの雲パターンに似ている時は  $\pm 0.5$  の範囲で MET 数を加減して PT 数とする。

すなわち、PT 数は MET 数を雲パターンモデルで調整して得る数である。

なお EIR 画像の解析ダイアグラムの下に示されている PT 数の調整条件（点彩域が W 以下の冷たい階調の時 0.5 を加算する）は DVORAK (1982) で変更されたものである。従来は a の PT 2.5 および PT 3.5 の雲パ

ターンに対してのみ適用されていたが、全ての雲パターンに適用されるようになった。

### 3-7. T 数の決定

流れ図ではステップ7で解析し、DT 数、PT 数、MET 数を優先順位として最も自信のもてるものを T 数とする。すなわち、

- (1) ステップ2での雲パターンの特徴が明瞭な時は DT 数を T とする。

- (2) DT 数の決定が不確かで、MET 数を加減して PT 数を決定した時は PT 数を T 数とする。

- (3) DT 数、PT 数の決定がいずれも不確かな時は MET 数を T 数とする。

T 数の決定方法は DVORAK (1982) で以上のように変更された。変更に伴う T 数決定への影響については後述する。

また T 数の一般的な解析基準としては、

- (1) 短時間間隔の画像が得られている時は、解析時刻の 3 時間以内で雲パターンの特徴が最も明瞭に現われている画像を用いる。

- (2) 同一画像から 2 個以上の T 数が得られる時（例えば 2 つの雲パターンで解析される時）は MET 数に近いものを T 数として採用する。

- (3) 判然とせず疑い時は MET 数に基づいた解析をする。

### 3-8. T 数の最終決定

流れ図ではステップ8で解析する。ここでは最終 T 数における制限条件が示されている。すなわち、ステップ7で得られた T 数は次の条件を満足しなければならない。

- (1) 発達の最初期の T 数は 1 又は 1.5 でなければならない（6 時間々隔で決定する場合は T 数 1）。

- (2) T 数 1 の強度に達してから 24 時間以内は T 数 2.5 以下でなければならない。

- (3) 発達初期の 48 時間内は、夜間は T 数を下げない。

- (4) 最終 T 数は MET 数  $\pm 1.0$  の範囲であること。

- (5) 最終 T 数の時間変化は、

$$6\text{時間} \leq 1.0, \quad 12\text{時間} \leq 1.5$$

$$18\text{時間} \leq 2.0, \quad 24\text{時間} \leq 2.5$$

の範囲でなければならない。

なお、(5) 項の 12 時間～24 時間の T 数変化量の制限は DVORAK (1982) で追加された。実際の解析の経験では、急速な発達の時は時間変化量の制限を越える場合がある。雲パターンの特徴がはっきりしている場合は以前

のT数の再解析を行う必要もある。

### 3-9. CI 数の決定

流れ図ではステップ9で解析する。ここでは最終T数をもとにCI数を決定する。CI数の決定方法を次に示す。

- (1) 熱帯低気圧の発達過程ではT数と同一にする。
- (2) 熱帯低気圧が最盛期に達した後の12時間はCI数を下げない。これは熱帯低気圧の雲パターンの衰弱と中心気圧の上昇との間に遅れがあるためである。
- (3) それ以降の衰弱においてはT数より0.5~1.0高目に決定する。この例はFig. 2にも示されている。
- (4) 再発達している時は、T数がCI数より低くてもT数がCI数と同じになるまではCI数はそのまましておく。

以上の手順によって熱帯低気圧の強度を示すCI数が決定される。なかでもMET数は強度決定の指標となる数であり、DVORAKの方法の基本概念でもある。このため強度解析にあたっては、雲パターンの発達モデルおよび解析する熱帯低気圧の履歴を十分に把握しておく必要がある。

なお、流れ図のステップ10は24時間後のCI数(Forecast Intensity number: FI数)を算出するステップである。FI数は、熱帯低気圧のこれまでの変化から強度変化モデルによって外挿して決めるが、解析時における雲パターンの変化傾向、24時間後の気圧場、地形および海面水温などの状況によって外挿値を調整する。この決定方法の詳細については渡辺(1979)の報告を参照されたい。なおDVORAK(1982)では、熱帯低気圧の強さがT数2となった時から最盛期となるまでの日数が、北進するものは4日、西進するものは6日、その他のものでは5日と修正されている。Fig. 2では、この修正前のものが示されている。

### 4. T数決定方法の変更とT数への影響

旧決定方法では、DT数、MET数、PT数の確度に応じて、DT数、 $(DT数+MET数)/2$ 、 $(PT数+MET数)/2$ 、MET数の順序の優先度で決定されていたが、DVORAK(1982)ではDT数、PT数、MET数の優先決定順位に変更された。その手順は3-3節に述べた通りである。

Fig. 11は1982年度に気象衛星センターにおいて旧決定方法で決定されたT数とDT数、DT数とPT数の相互の関係を示したもので、それぞれの差の度数分布を

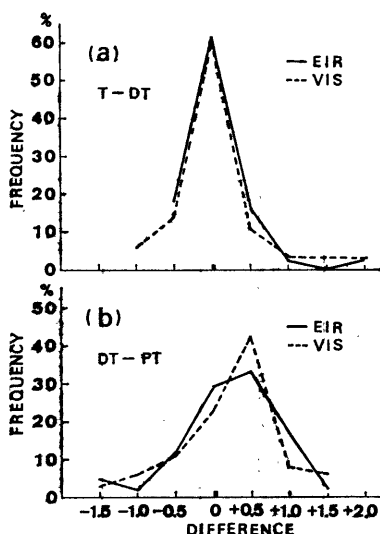


Fig. 11 Comparison between T number, DT number and PT number determined operationally at MSC in 1982. T number was determined following DVORAK (1980).

百分率で表わした。まずT数とDT数はVIS画像、EIR画像ともに60%の確率で一致している。また $\pm 0.5$ 数以内では85~95%で一致している。新決定方法ではDT数を最も重視してT数を決定するが、解析誤差を考慮するとT数決定方法の変更による影響は小さいと言える。しかし、VIS画像における差がEIR画像に比べて大きくなりやすいのは、VIS画像でのDT数決定の難しさ、あるいは解析の個人差が生じやすいことが考えられる。

一方DT数とPT数の比較では、その差の約75%が $\pm 0.5$ 数以内であるが、PT数に比べDT数が高目に決定されやすい傾向が見られる。言い換えれば、PT数はDT数よりも約0.5数低く決定されている。この傾向はDVORAK(1982)でEIR画像におけるPT数の調整条件が変更された(3-6節参照)ことと一致している。しかしVIS画像でも同様の傾向が見られることは、PT数決定での雲パターンモデルが弱目に決められていることが考えられる。

### 5. CI数の精度

Table 1はDVORAKが示したCI数とそれに対応する熱帯低気圧の最大風速(MWS)および北太平洋西部における中心気圧(MSLP)の関係である。CI数とMSLPの関係はDVORAK(1982)で更新されたので、この表

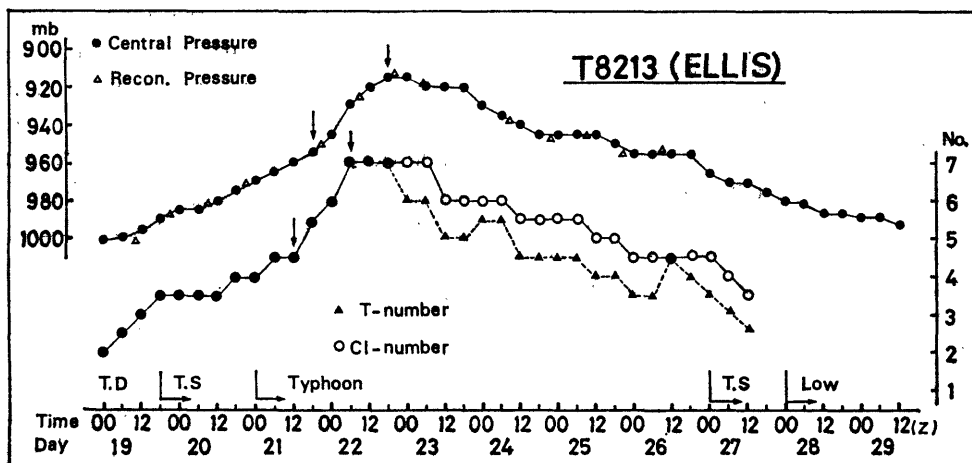
**Table 1** DVORAK が示した 熱帯低気圧の強度 (CI 数) と最大風速 (MWS) および北太平洋西部における中心気圧 (MSLP) との関係。新しい中心気圧は Sheuchuck and Weir (1980) によって推奨された値 (DVORAK, 1980, 1982)。

CI Number	MWS (Knots)	MSLP (mb) in NW Pacific	
		New	Old
1	25		
1.5	25		
2	30	1000	1003
2.5	35	997	999
3	45	991	994
3.5	55	984	988
4	65	976	981
4.5	77	966	973
5	90	954	964
5.5	102	941	954
6	115	927	942
6.5	127	914	929
7	140	898	915
7.5	155	879	900
8	170	858	884

では旧換算表を Old で新換算表を New で示した。

この更新は Shewchuck and Weir (1980) によって VIS 画像での CI 数の精度評価がなされ、その結果、北太平洋西部における熱帯低気圧の最大風速 ( $V_m$ ) と中心気圧 ( $P_c$ ) との関係として、 $V_m = 6.7 (1010 - P_c)^{0.644}$  の実験式 (Atkinson and Holliday, 1977) が推奨されたためである。

Fig. 12 は台風 8213 の中心気圧と T 数, CI 数の変化を 6 時間毎に示したものである。T 数, CI 数は EIR 画像解析によるもので、EIR 画像としては Fig. 5 に示したラインプリンター出力図を用いた。



**Fig. 12** Evolution of central pressure, T number and CI number case of Typhoon 8213 (ELLIS). Black arrows indicate the rapid development and mature stage of the storm.

Fig. 13 において T 数の変化を見ると、中心気圧が最低となると同時に T 数は急速に減少しており、CI 数決定の手順で示した熱帯低気圧の中心気圧の高まりと雲パターンの衰弱との時間差 (雲パターンの現象変化の先行性) を裏づけている。一方この現象は発達期においても見られ、矢印で示したように中心気圧が最低となる 12 時間前に T 数は最大となっている。また同様のことは急速な発達の始まりでも言える。すなわち衰弱期のみならず発達期において雲パターンの現象変化が先行し、変化が急である程その現象は明瞭に現われている。

Fig. 13, は台風 8210, と台風 8213 において, EIR 画像解析で得た 74 個の CI 数と, 中心気圧を表 1 の新・旧換算表によつて CI 数に換算したものととの差の平均値と自乗平均平方値 (RMS) を, 台風の発達期および衰弱期ごとに示したものである。図において New は新換算表, Old は旧換算表による場合である。

CI 数のレベルごとの差の平均を見ると、いずれの換算表でも衰弱末期を除いてはほぼ 0.5 以内であるが、差の全平均値 ( $\bar{M}$ ) では新表との対応が良い。新表での  $\bar{M}$  に対応する RMS は 0.43 で、CI 数のレベルごとの RMS もほぼ同様の値となっている。また新表における差の度数分布では、 $\pm 0$  が 36%,  $\pm 0.5$  が 54%,  $\pm 1.0$  が 10% であった。このことにより、新表での CI 数は  $\pm 0.5$  の誤差で評価できる。しかし発達期の CI 数 5.0 から 7.0, すなわち熱帯低気圧の最盛期付近での差の平均および RMS からは旧表との対応が良い。

また、いずれの表でも熱帯低気圧が衰弱するに従って誤差が大きくなっているが、これは雲パターンの急速な衰弱時における CI 数の決定方法にも問題がありそう

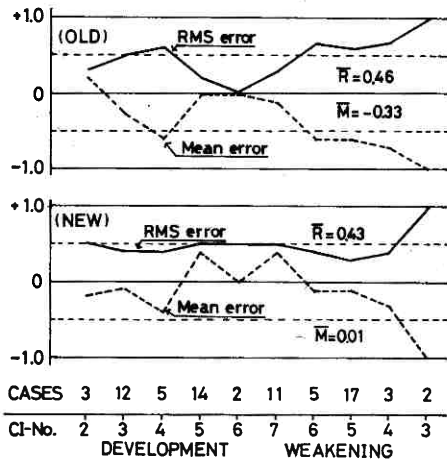


Fig. 13 Average and root mean square value of the differences in CI number derived from cloud analysis and from official surface analysis.  $\bar{M}$  and  $\bar{R}$  are the mean value and the root mean square value of total cases (74 cases) respectively.

だ。同様のことは急速な発達についても言える。一方、DVORAKの方法で定義されているEIR画像の眼調整の方法ではCI数が0.5低く見積られ、眼の形状による調整と階調による(対流の深さによる)調整をそれぞれ独立に行った結果が良かった。

これらの事例は2個の台風によるものであり、台風の持つ固有の特徴による影響も考えられる。DVORAK(1982)では新換算表が推奨されているが、強度決定の方法とともに今後さらに検討を続ける必要がある。

## 6. 強度解析の実例

ここでは雲パターン解析で得られるDT数について、その解析例を示す。なお、各雲パターンの解析例での画像は1枚であるのでMET数の決定はできないが、PT数はダイアグラムの雲パターンモデルと比較し決定することは可能である。またCI数決定の参考として、熱帯低気圧の盛衰の過程おと気象庁決定の中心気圧を示す。

### 6-1. 「湾曲したバンド」パターン

Fig. 14にEIR画像での解析例を示す。コマ型をしたDG以下の冷たい階調域に、W以下の冷たい階調で示されるクラスターa,bが存在し、湾曲したバンドを形成している。クラスターa,bの冷温極に沿って雲バンドの軸を描く(図では10°logスパイラルをバンド軸に適合

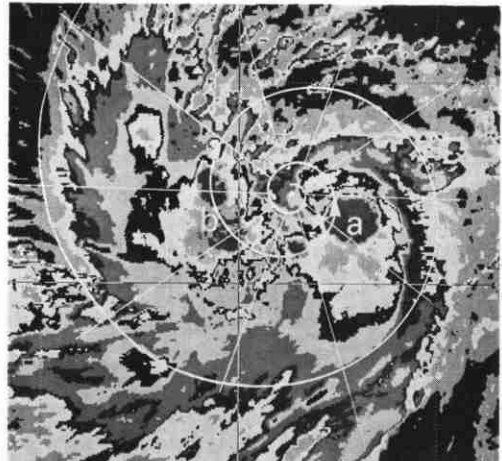


Fig. 14 Example of the "Curved Band" pattern in EIR imagery analysis, 00Z Aug. 20 1982, Typhoon 8213. (Curved Band Length; 0.6 (white) Spiral, DT=3.5, 985 mb; JMA Official Surface Chart Analysis, Development Stage).

させた)。バンド軸の長さはWの階調の(矢印で示す)長さで約0.6、そのバンド軸の延長上のDGの階調の長さは約0.9である。DT数は、いずれの場合も3.5と決定される。発達過程にある熱帯低気圧で中心気圧は985mb。なおCSCは星印の位置に決定される。

### 6-2. 「シアー」パターン

Fig. 15に「シアー」パターンの例を示す。CSCは下層雲列によって矢印の位置に決定される。一方活発な対流域の縁を破線で示す。CSCは対流雲域の縁から0.5度(緯度)内にあり、DT数は3.0となる。この熱帯低気圧

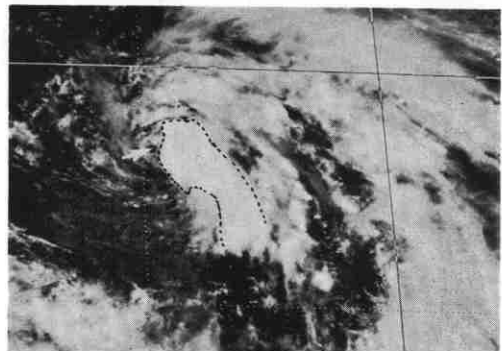


Fig. 15 Example of the "Shear" pattern in VIS imagery analysis, 03Z Aug. 13 1983, Typhoon 8306. (CSC;  $<1/2^\circ$  Lat., DT=3.0, 994 mb, Development Stage).

は発達過程にあるが発達は緩慢であった。中心気圧は 994 mb。

### 6-3. 「眼」パターン

「眼」パターンでは EIR 画像と VIS 画像における解析例をそれぞれ示す。まず、Fig. 16 に EIR 画像の例を示す。

CSC を×印で示す。雲システムでの最も冷たい階調は W であるが、CSC を一周していない。CSC を一周し、ダイアグラムの基準を満足する階調は LG で、E 数は 5.0 となる。眼は円形で、直径は 3/4 度 (緯度) 未満であるので階調による眼調整を行う。眼の階調は WS, 眼を一周している最も冷たい階調は B である。眼調整表によって +1.0 が得られ、CF 数は 6.0 となる。雲システムの MG 以下の冷たい階調域において Fig. 7 に示される BF は見られないので BF は 0。よって DT 数は 6.0 と決定される。雲パターンの特徴は明確であり、熱帯低気圧は衰弱初期の過程にある。中心気圧は 915 mb。12 時間前が最盛期で T 数は 7.0 であった。

Fig. 17 に VIS 画像の例について示す。ダイアグラムで決定する Central Feature と Banding Feature を輪郭で示し、それぞれ CF と BF で示す。眼の形状は Ragged であるが CSC は眼の左端に明確に決定される。CSC の最小埋没距離は約 1.0 度 (緯度) で、E 数

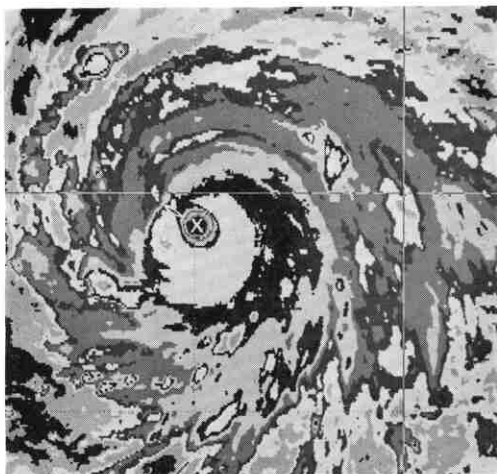


Fig. 16 Example of the "Eye" pattern in EIR imagery analysis, 00Z Aug. 24 1982, Typhoon 8213. (Surrounding Temp.; Light Gray, E=5.0, Eye Adj.=+1.0 (Surrounding Coldest Temp.; Black, Eye Temp.; Warm Spot), CF=6.0, BF=0, DT=6.0, 915 mb, Initial Decay after T7).

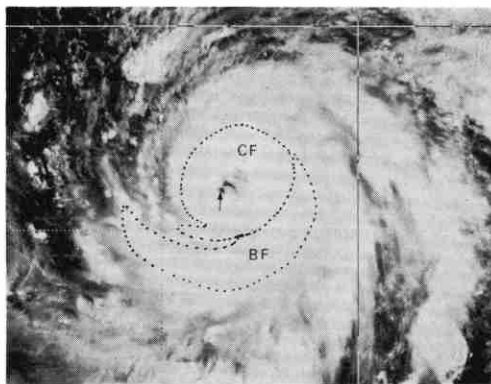


Fig. 17 Example of the "Eye" pattern in VIS imagery analysis, 00Z Aug. 23 1982, Typhoon 8213. (Embedded Distance; 1.0° Lat., E=6.0, Eye Adj.= -1.0; Ragged Eye, CF=5.0, BF=0.5, DT=5.5, 945 mb, Development Stage).

は 6.0 となる。また Ragged eye で E 数  $\geq 4.5$  であるので眼調整量は -1.0 となり、CF 数は 5.0 と決定される。一方 BF 数は、1.0 度 (緯度) 幅の雲バンドがほぼ 2/4 周しているが、Fig. 8 に示される程引き締っていない。よって BF 数は 0.5 と推定され、DT 数は 5.5 となる。この台風は発達過程にあり、中心気圧は 945 mb である。

### 6-4. 「CDO」パターン

「CDO」パターンでの解析例を Fig. 18 に示す。CSC はコンマ型をした 2 個の対流雲クラスター A, B によ

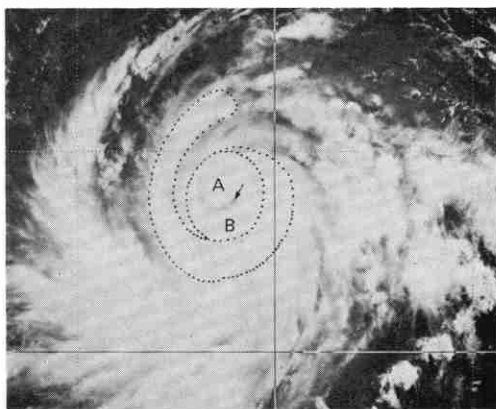


Fig. 18 Example of the "CDO" pattern in VIS imagery analysis, 00Z Aug. 21 1982, Typhoon 8213. (Diameter of CDO;  $\approx 2.0^\circ$  lat. (Irregular), CF=3.0, BF=1.5+, DT=4.5+, 970 mb, Development Stage).



て矢印で示す位置に決定される。クラスターAの西側の暗い線はクラスターによる影である。2個のクラスターによって眼が形成されつつあるが眼とは言えず、「CDO」パターンでの解析が適当と考えられる。CDOは2個の対流雲クラスターで構成され、最小直径は約2度(緯度)である。しかしそのCDOの縁は明瞭でなく、ダイアグラムでは Irregular として解析され、CF数は3.0となる。一方CDOを囲む雲バンドは1.0度(緯度)幅がCDOに接する形で2/4回転し、残りの雲バンドを加えるとほぼ1回転している。このことからBF数は1.5と推定され、DT数は4.5と決定される。この台風は発達過程にあり、中心気圧は970mbである。

6-5. 「埋没した中心」パターン

Fig. 19に「埋没した中心」パターンでの解析例を示す。この雲パターンはFig. 18のVIS画像に対応するEIR画像である。VIS画像を参考にするにEIR画像でのCSCは黒矢印の位置に決定される。CF数はダイアグラムの基準を満足する階調、W(白矢印でその最小幅を示す)によって5.0と決定される。Banding Featureは認められないのでBF数は0。よってDT数は5.0となる。

6-6. 「CCC」パターン

Fig. 20にDVORAKが示した「CCC」パターンを示す。パターンの変化は左から右で、左端の画像での雲システムは「湾曲したバンド」パターンであるが、その後CSC付近は冷たく丸味を帯びた雲域で覆われ(CCC)、中心気圧の変化も小さい。右端の画像ではCSCの北西側にくさび形の暖域の侵入が形成され、雲パターンの発達の徴候を示している。また同時に中心気圧も深まって

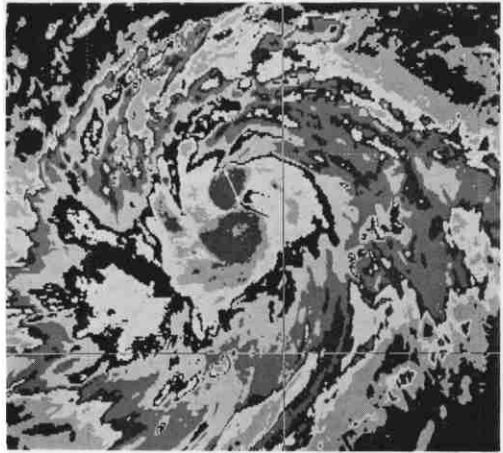


Fig. 19 Example of the "Embedded Center" pattern in EIR imagery analysis, 00Z Aug. 21 1982, Typhoon 8213. (Surrounding Temp.; White, CF=5.0, BF=0, DT=5.0, 970 mb, Development Stage).

いる。

7. おわりに

DVORAKの方法での強度解析は、雲パターンが不明瞭な場合や解析手順の複雑さから、解析作業も容易でない場合も少なくない。この報告では、気象衛星センターでの実際の解析作業の経験を含めてDVORAK氏の論文を要約したが、その主旨を十分伝えることができたか不安である。DVORAKの方法の理解は、まず実際に解析作業をやってみることが必要である。幸にも、気象衛星センター発行の台風資料集(第2号)にはDVORAKの方法でのEIR画像が掲載されている。この報告が興味あ

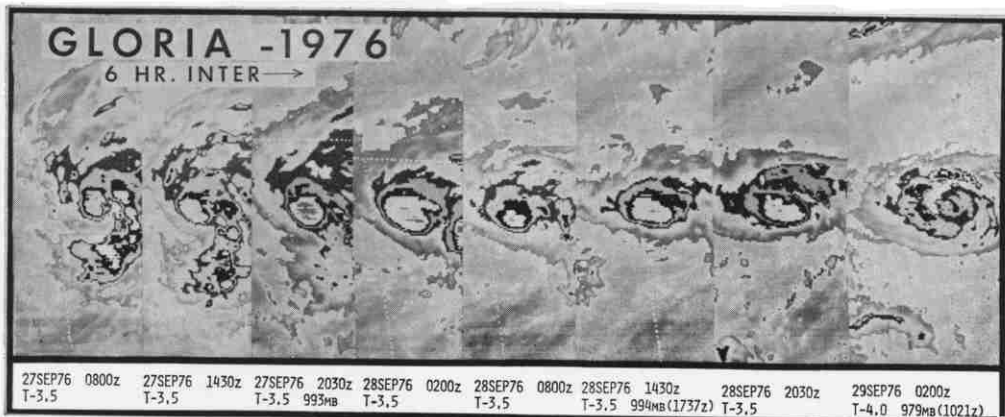


Fig. 20 Example of the life cycle of the central cold cover (CCC), (DVORAK 1982).

る人の参考になれば幸である。

最後に本稿の作成にあたって、門脇俊一郎データ処理部長には多くの助言を頂き、概要の英文作成をして頂きました。また本稿を書くことを勧めて下さった櫃間道夫解析課長ならびに解析課原田知幸技官には、強度解析他いろいろお世話になりました。皆さんに厚く感謝します。

#### 参 考 文 献

- 上田文夫, 1974: 衛星写真によるトロピカル・サイクロンの強さの予報と解析, 測候時報, Vol. 42, 11, 351-364.
- 嶋村 克, 1975: 衛星画像を用いた熱帯低気圧の強さの解析と予報, 気象衛星技術報告, Vol. 3, No. 2, 47-63.
- 門脇俊一郎, 1976: 北太平洋西部における台風観測, 気象研究ノート, 第129号, 159-164.
- Dvorak, V. F., 1975: Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery, Mon. Wea. Rev., 103, (5), 420-430.
- Dvorak, V. F., 1980: Tropical cyclone intensity analysis using enhanced infrared or VIS imagery, NESS, Application Division Training Notes.
- Dvorak, V. F., 1982: Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite visible or enhanced infrared imagery. (1982年5月, タイ国で開催された熱帯低気圧の観測と予報への衛星資料利用方法のセミナーでのテキスト)。 (partly corrected in July 1982)
- Shewchuck, J. D. and R. C. Weir, 1980: An evaluation of the Dvorak technique for estimating tropical cyclone intensity from satellite imagery. NOCC/JTWC 80-2, USNOCC, JTWC, Comnavmarinas, Box 17, FPO San Francisco, CA, 96630, 25pp.