

## 研究論文

## 台風画像コレクションの構築および台風解析への応用

## The Construction of Typhoon Image Collection and its Application to Typhoon Analysis

北本 朝展  
 国立情報学研究所  
 Asanobu KITAMOTO  
 National Institute of Informatics  
 小野 欽司  
 国立情報学研究所  
 Kinji ONO  
 National Institute of Informatics

**概要**

本論文の目的は、気象学的知識と情報学的アプローチとを融合した台風雲パターンの時系列解析法を提案し、台風解析における熟練者の解析作業支援や、大量の台風画像からの知識発見などを実現することにある。そのための基礎となるデータセットとして、本論文では 20,000 枚規模の台風画像コレクションを構築する。ここで台風画像とは、台風のベストトラックに記録された台風中心が地図投影画像中心に一致するように、台風周辺領域を衛星受信画像から切り出したものである。このようなラグランジュ的表現によって、台風雲システム全体の動きから台風雲パターンに固有の動きを分離できる。次に本論文では、台風雲パターンに特徴的な楕円形状を表現するための手法として、変形楕円を用いた形状分解手法を提案する。この結果を用いて台風の日変化の解析という台風解析の問題に取り組んだところ、本論文で提案する手法は、気象学的知見と一致するような、気象学的に意味のある情報を抽出することができた。

**ABSTRACT**

In this paper, we propose methods for the time-series analysis of typhoon cloud patterns by combining meteorological knowledge and informatics-based approach. The purpose is two-fold: the one is to support human experts for their typhoon analysis process, while the other is to discover some knowledge on typhoons from the collection of about 20,000 typhoon images. Here the typhoon image is a map projected image cropped from an original satellite image so that the geographical location of the center of the typhoon, which is found in the *best track* record compiled by experts, corresponds to the center of the map projected image. With this representation, the evolution of typhoon cloud patterns can be separated from the overall movement of typhoon cloud systems. Next we propose a shape decomposition method for describing elliptical cloud patterns of typhoons with a set of deformable ellipses. Based on the results of applying these basic tools, our analysis on the daily evolution of typhoons demonstrated that the proposed methods have potential for extracting meteorologically meaningful information that coincides with empirical meteorological knowledge.

## [キーワード]

台風、気象衛星画像、画像コレクション、パターン認識、形状分解、時系列解析

## [Keywords]

Typhoon, Meteorological Satellite Imagery, Image Collection, Pattern Recognition, Shape Decomposition, Time-series Analysis

**目次**

1	はじめに .....	8
2	台風とは .....	8
2.1	台風の定義 .....	8
2.2	台風雲パターンの特徴 .....	9
2.3	2つの課題－解析と予報 .....	9

2.4	ドボラック法 .....	9
2.5	本論文のアプローチ .....	10
3	台風画像コレクションの構築 .....	11
3.1	データセット .....	11
3.2	台風画像の作成 .....	12
3.3	台風画像コレクションとその規模 .....	16
4	台風画像の特徴抽出 .....	16
4.1	概要 .....	16
4.2	変形楕円を用いた台風雲パターンの形状分解 .....	16
5	台風画像解析—台風の日変化 .....	19
5.1	台風サイズの日変化 .....	19
5.2	台風の眼の日変化 .....	19
6	おわりに .....	21

## 1 はじめに

台風は日本に大きな影響を与える顕著な気象現象であり、その正確な解析と迅速な予報には大きな意義がある。これらのテーマは、これまで主に気象学の分野で研究が進められてきたが、特に前者については台風雲パターンの時系列的解析という困難な課題を処理する必要があり、気象学の分野で蓄積されたテクニックだけでは必ずしも解決できない問題であると考え。そこで本論文は、大量の台風画像を集めた台風画像コレクションを対象として、気象学的知識と情報学的アプローチとを融合した台風雲パターンの時系列解析法を開発することで、台風解析における熟練者の解析作業支援や、大量の台風画像からの知識発見などを実現することを目標とする。

本論文の構成を以下に述べる。まず第2節では台風という気象現象の特徴について簡単に紹介し、現在の台風解析の問題点およびそれに対する本論文のアプローチを述べる。次に第3節では、台風画像コレクションの構築における基本的考え方を述べた後、台風画像コレクションを作成するために検討すべき複数の項目について、その優劣などを比較してまとめる。第4節では台風画像からの特徴抽出に関して、特に変形楕円を用いた形状分解手法の提案とその結果について議論する。そして第5節では、形状分解結果を用いて台風の日変化という台風解析の問題に取り組んだ結果、気象学の分野で得られていた知見と同様の現象を、大量の台風画像から得たデータで裏付けることができた。最後に第6節で本論文をまとめる。

## 2 台風とは

### 2.1 台風の定義

気象衛星画像に現れる雲パターンの中でも、台風の渦巻き状の雲パターンはひととき目を引く存在である。発生当初は小さな雲のクラスターであるものがしだいにまとまって渦巻き状に変形し、やがてくっきりした眼をもつ最盛期を迎える。しかし台風の北上とともに渦巻き状のパターンは急速に崩壊し、雲パターンの消滅と共にその一生を終える。

しかし台風のライフサイクルは常にこのような典型的なパターンをたどるわけではなく、台風ごとにそのライフサイクルは千差万別に異なる。また台風の雲パターンはしばしば短時間のうちにその形態や明瞭さが爆発的に変化することなども、長年の衛星観測を通して明らかとなってきた。このように、渦巻き状の雲パターンを大きな特徴とするものの、同時に個々の台風を見れば多様性にも豊んだ、台風という気象現象が本研究の主題である。

台風とは北西太平洋に起源をもつ成熟した熱帯低気圧 (tropical cyclone) に与えられる地域的な用語である [1]。成熟したかどうかは最大風速で判定され、日本の気象庁では最大風速が 34 ノット以上 (17.2 m/s 以上) の熱帯低気圧を「台風」と呼んでいる。他の地域で発生する熱帯低気圧には、ハリケーンやサイクロンなどの用語が与えられるが、いずれも物理的には同じ性質をもった大気擾乱である。

## 2.2 台風雲パターンの特徴

台風雲パターンの最大の特徴は「眼の壁雲」と「らせん状のレインバンド」である [2]。台風は中心付近に暖かい空気の核をもち、眼の壁雲付近では強い上昇気流が発生している。その中心に向かって下層では摩擦収束による吹き込みがある一方、上昇した気流は上層では巻雲の吹き出しとなっている。また空気塊に働くコリオリ力の向きから、円形の等圧線に沿って吹く傾度風は反時計回りに回転する。このような台風の物理的な性質から、台風の中心雲領域は、円形または楕円形の雲パターンとなることが多い。

それに対して台風のらせん状のレインバンドは、多くの対流雲が帯状に組織化されたものである。これがなぜらせん状になるのかはよくわかっていないが、地表付近の風が等圧線とある角度をなして吹き込むことが重要な理由であると予想されることから、一般的に等角らせん(対数らせん)  $r = a^{\theta}$  を用いてモデル化されることが多い。

以上の気象学的事実を考えると、台風の雲パターンとしては、「楕円」および「らせん」が本質的に重要なモデルであるとの仮説が成り立つ。そこで本論文では第4節において、特に前者の「楕円」に注目した台風雲パターンの表現法を提案する。そして台風雲パターンを数理モデルで表現することにより、台風解析の問題を扱おうというのが本論文の方針である。

## 2.3 2つの課題 — 解析と予報

気象学では一般に1) 観測、2) 解析、3) 予報、の3点が問題とされている。その事情は台風に関しても全く同じであり、特に文献 [3] のタイトルにもある通り台風の予報と台風の解析は大きな課題である。また両者は、台風解析の結果が予報モデルの初期場を設定するために使われ、その善し悪しが予報の精度に大きく影響するという意味において、密接な関係を持つことにも注意すべきである。特に台風はマクロな擾乱の構造がモデル化しやすい単純なものであるため、擾乱を特徴づける少数のパラメータ(台風の中心位置、中心気圧、強風半径など)に基づく初期場の設定の重要性が相対的に高い。そのため正確な台風解析と迅速な台風予報は重要な課題となる。

台風を直接観測するための有力な手段となっていた飛行機観測が廃止された現在では、気象衛星が熱帯低気圧監視の最大の武器であり、それゆえに台風解析においても衛星画像を用いた方法が主流である。その現

状は文献 [3] において以下のようにまとめられている。

衛星データによる熱帯低気圧の解析手法は、最初の極軌道気象衛星 TIROS 時代から米国を中心に精力的に開発が進められ、1960年代から70年代に大きな進展を見せた。この解析手法の特徴は、衛星画像から熱帯低気圧の「雲パターン」を認識することをベースにしているところにある。その成功した典型が Dvorak 法であろう。もちろんより客観的に熱帯低気圧の気象要素を抽出しようとする研究も数多く行われているが、現在も、少なくとも現業的に利用される解析手法は、この時代の延長上にあると言っても差し支えない。

このように台風解析は、「雲パターン」の認識という人間のパターン認識能力に依存した主観的な方法に多くを依存しており、これをできるだけ客観的な方法にしたいという希望はあるものの、1970年代以降は画期的なブレイクスルーが見られなかったようである。それでは、上記の文章中で「成功した典型」として言及されているドボラック (Dvorak) 法とは、どのような方法だろうか。

## 2.4 ドボラック法

ドボラック法とは、衛星画像の雲パターンから熱帯低気圧の強度を推定する方法であり、アメリカ大気海洋局 (NOAA) のハリケーン研究者 V.F. Dvorak により開発された [4]。日本では気象衛星による熱帯低気圧の解析は気象衛星センターでおこなわれているが、ここでもドボラック法に基づく方法が現在でも用いられている。図2にドボラック法の概略をまとめた [3, 5]。ドボラック法の処理手順では、数箇所雲パターンの認識処理が必要とされている。その多くの場合では、パターン認識は実際には手動的または半自動的であり、解析者の主観的な判断が入り込む余地がある。また示数の設定に関しても過去の事例から得られた経験則が多数組み込まれている。

さて、現在では世界中の気象機関でドボラック法、あるいはドボラック法を改良した方法が活用されており、台風解析という面で大きな実績を挙げている。ゆえに、雲パターンという情報が台風の強度推定に有効である、と仮定するのも問題はないであろう。ただしドボラック法はあくまで過去の観測例から定式化され

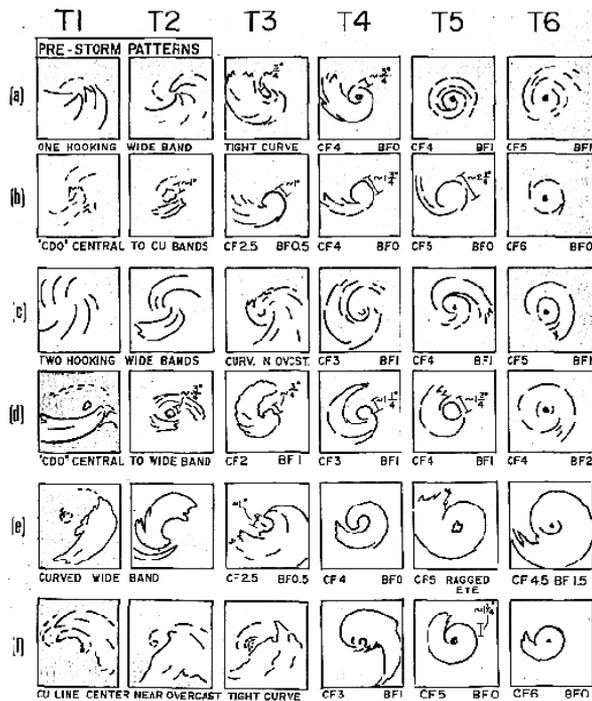


図 1: 熱帯低気圧の代表的なパターンと対応する T 数  
これらのパターンを熱帯低気圧の衛星画像に当てはめるためには回転させる必要がある場合もある。この画像は [4] から引用した。

た経験則であるため、気象力学モデルから演繹されるような確固とした理論的基盤を有するわけではない点に着目する。

## 2.5 本論文のアプローチ

以上に述べた台風解析の方法論に対し、台風予報に関しては、気象力学の運動方程式系に基づく数値予報モデルを用いる方法論が一般的である。中でも進路予報の研究が最も進展しているようであるが、強度や大きさなどに関する発達予報はやや難しく、台風の発生に関する予報はさらに難しい問題であると言われている。

ここで台風解析と台風予報とを比較すると、以下のよう両者が対照的な方法論に基づいていることがわかる。

- 台風予報 — 気象力学の運動方程式系に基づく演繹的モデル
- 台風解析 — 雲パターンに対する解釈と過去の観測記録との対応関係に基づく帰納的モデル

- 1. CSC (Cloud System Center) の決定** 雲パターンから中心位置を推定する。眼が明瞭であれば比較的容易であるが、組織化された雲パターンでない場合には困難な作業である。
- 2. DT 数 (Data T-number) の決定** DT 数とは「同じ雲パターンであっても、雲頂温度や雲バンドの長さなど画像上で測定できる雲の要素を測定し数値で表せば、その強弱を客観的に判断できる」との発想に基づく示数である。まず最初に衛星画像の雲パターンが、"Curved Band", "Shear", "Eye", "Embedded Center"のどのパターンに最も近いかを判定する。次に、各雲パターンごとに異なる雲の要素を測定する。測定対象は、雲システムの中心部に関する要素 CF (Central Feature)、および CF を取り巻く雲バンドに関する要素 BF (Banding Feature) であり、これらの測定値を換算して DT 数を求める。
- 3. CCC (Central Cloud Cover)** 熱帯低気圧の雲システムの中心部が、冷たい丸みを帯びた雲に覆われた場合の補正をおこなう。
- 4. 前 24 時間の变化傾向** 前 24 時間の T 数の変化量から、発達 / 衰弱 / 変化無し of いずれかを選択する。
- 5. MET 数 (Model Expected T-number) の決定** 「平均的な台風の発達モデルでの発達 / 衰弱時の変化率を参考にすると、これまでの雲パターンの変化傾向から現在の強度を推定できる」との発想に基づく示数である。具体的には 24 時間前の T 数、および変化傾向や過去の変化レートから T 数を補正する。
- 6. PT 数 (Pattern T-number) の決定** PT 数とは「現在の雲パターンを過去の数多くの台風 (すでに強度がわかっている) から作成した平均的な雲パターンと比較することにより、現在の強度を推定できる」との発想に基づく示数である。例えば図 1 のような台風の発達パターンの模式図から、最も類似しているパターンを選択することにより決定できる。
- 7. T 数 (T-number) の選択** DT 数、MET 数、PT 数の 3 つの T 数から適切なものを採用する。最も優先度の高い示数は DT 数である。
- 8. 最終 T 数** ある時間内の T 数の変化量に制限を加え、その変化量を越えたときの補正処理をおこなう。
- 9. CI 数 (Current Intensity number) の決定** 熱帯低気圧が発達期にあるか衰退期にあるかで T 数を補正する。この CI 数が熱帯低気圧の強度 (最大風速) と関連づけられている。なお中心気圧は、最大風速との変換表に基づいて変換する。
- 10. FI 数 (Forecast Intensity number) の決定** 24 時間後の CI 数を予測する。

図 2: ドボラック法の処理手順

そこで台風解析のような種類の問題は、むしろ気象学的アプローチと情報学的アプローチ<sup>1</sup>との融合によって、より有効に解決することができるのではないだろうか。すなわち大量データからの学習などをおこなうことで、ドボラック法とは異なるアプローチで台風解析の新しい手法を見出せるのではないだろうか。これが本論文の根本的な発想である。

そこで本論文では、大量の台風画像を集めた台風画像コレクションを作成し、そのデータセットに対してドボラック法を参考とする情報学的アプローチに基づく台風雲パターンの時系列解析法を適用することによって、台風解析における熟練者の作業支援や、大量の台風画像からの知識発見などを旨とする。台風のように複雑かつ柔軟に変形する形状の時系列解析という課題は、パターン認識やコンピュータビジョンの問題として興味深くかつ挑戦的な課題である。本論文はあくまで台風が研究対象であるが、本論文で提案する手法は、同様の性質をもつ他の問題にも応用可能であると考えられる。

### 3 台風画像コレクションの構築

台風画像コレクションとは、衛星受信画像から台風周辺部を切り出し、テキスト情報などの付加情報とともにデータベース化したものである。コレクションとしての一貫性を保つために、台風画像の生成法が満たすべき望ましい性質について検討する。

#### 3.1 データセット

##### 3.1.1 衛星画像

本研究では気象衛星 GMS-5、すなわち「ひまわり 5号」の画像を用いる。この衛星は東経 140 度の赤道上空約 36,000km に静止する衛星であり、表 1 に示す VISSR (Visible Infrared Spin Scan Radiometer) センサを用いて、可視領域で 1 バンド、赤外領域で 3 バンドの観測をおこなっている。観測間隔は 1 時間に 1 回であり、北極から南極までを毎回観測する。したがって台風の動きと変化は、欠測がなければ 1 時間をサンプリング間隔とする時系列として追跡できる。

台風画像コレクションとして、まず当面の間は赤外バンドの衛星画像のみを対象とする。可視画像は表 1 に示すようにより高い空間分解能を有しており、しかも

1. ここで「情報学」という言葉は、人によって意味内容が異なるかもしれないが、著者自身はかなり幅広い研究領域を指す言葉として用いている。

表 1 : VISSR センサの主要諸元

バンド	波長	空間分解能
可視 (VIS)	0.55 ~ 0.90 $\mu$ m	1.25km
赤外 1 (IR1)	10.5 ~ 11.5 $\mu$ m	5.0km
赤外 2 (IR2)	11.5 ~ 12.5 $\mu$ m	5.0km
赤外 3 (WV)	6.5 ~ 7.0 $\mu$ m	5.0km

高度の低い雲の分類などに威力を発揮するものの、昼間しか使えないという欠点がある。またさらに高解像度の衛星や降雨量を測定できる衛星など、特定の目的に適した衛星データは他にも多く、これらのデータとの統合が今後の課題である。

##### 3.1.2 ベストトラック

台風は特別に重要な気象現象であることから、1951 年以降に発生したすべての台風に関して、一定時間おきの中心位置や中心気圧・最大風速などが気象庁によって正式にまとめられている。この記録をベストトラック (最終解析結果) とよぶ。表 2 にはベストトラックのデータの例を、またこれを等緯度経度図法上にマッピングした図を図 3 に示す。

台風中心位置の決定という問題は、一見容易そうに思えるものの実際は困難な問題である。熟練者がある時点で下した決定も、台風のライフサイクルが確定した後で振り返ってみると、不適切な決定であったことが判明する場合も多い。そこで台風のライフサイクル全体を見直せるようになった段階で、すべてのデータを再検討し改めて総合的な判断のもとに台風の経路を決定する。これがベストトラックである。

つまりこのベストトラックは、中心位置、大きさ、強さに関する「正解データ」、あるいは近似的な「グランドトゥース」とみなすことができる。衛星画像のみから中心位置を自動的に決定するのは困難であることを考えれば、この「グランドトゥース」の存在は重要である。また、これだけの継続性と一貫性をもって記録がまとめられている気象現象は、他には存在しないと思われる。

##### 3.1.3 気象観測データおよび GPV

ひまわり衛星画像は雲パターンを観測できるものの、降雨量を直接観測できるわけではない。したがって災害軽減などの課題と関連づけるためには、降雨量などの気象要素を実測した気象観測データや、大気の状態

表 2：台風 9119 号のベストトラック (部分)

UTC (Universal Coordinated Time) と日本標準時 (JST) との時差は 9 時間である。

年月日時 (UTC)	指示符号	階級	緯度	経度	中心気圧	最大風速	暴風域		強風域	
91091512	002	2	140	1616	1004	000				
91091518	002	2	145	1598	1004	000				
91091600	002	3	148	1587	1000	035	00000	0000	90060	0060
91091606	002	4	151	1574	990	050	00000	0000	90060	0060
91091612	002	4	152	1566	985	055	90020	0020	90100	0100
91091618	002	5	154	1559	970	065	90050	0050	90120	0120

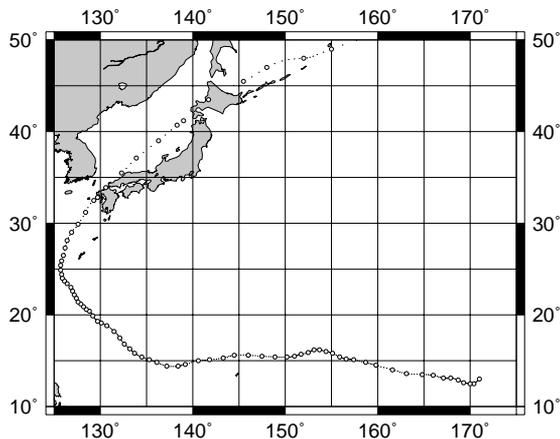


図3: 台風 9119 号のベストトラックの等緯度経度図法上へのマッピング

をシミュレートする数値予報モデルの出力結果である GPV (Grid Point Value) などのデータセットとの統合が重要な課題である。一般的には、アメダス AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) 観測情報が最も簡単に入手できるデータである。

このような気象観測データを観測日時をキーとして台風画像データベースに結合すれば、以下のような関連についても分析することが可能である。

1. 台風雲パターンと各地点の降雨量や風速との関連。
2. 台風の接近に伴う降雨地域や降雨量の時間変化との関連。

ただし現在のところ、まだこのようなデータの統合については開始していない。

### 3.1.4 各データセットの特徴

空間分解能と時間分解能の観点から各データセットの特徴を比較し、表 3 にまとめた。なおここで示した

表 3：空間分解能と時間分解能に基づく各データセットの比較

データセット	空間分解能	時間分解能
衛星画像 (IR)	5km (衛星直下点)	1 時間
ベストトラック	約 10km (0.1 度)	3 時間 or 6 時間
アメダス	約 17km (平均)	1 時間

ベストトラックの空間分解能は、中心位置が 0.1 度単位で決定されるという事実を反映したものであり、ベストトラック自体の精度について考慮した結果を示すものではない。実際には、熟練者が決定した中心位置といえども観測データから推測した中心位置であり、「真の」グランドトゥースとは異なる可能性もあることには注意すべきである。

## 3.2 台風画像の作成

### 3.2.1 ラグランジュ的表現

従来の台風画像データベース (例えば [6] など) は、ほとんどが地球に対して固定された座標系を用いており、この表現では台風システム全体の移動にむしろ注目が集まる傾向があった。しかし本論文のように台風雲パターンの時系列的な記述を目的とする場合、台風雲パターンの円運動など、むしろ台風雲パターンに固有の動きに関心がある。そこで台風システム全体の移動ベクトルの影響を排除し、台風雲システム全体の動きと台風雲パターン固有の動きとを分離して表現できれば便利である。

そこで本論文で作成する台風画像コレクションでは、台風中心が時系列画像において不動点となるように、台風中心と投影画像中心とを常に一致させながら、台風周辺領域を衛星受信画像から切り出す方式を用いる。これはテレビの天気予報番組のように地球に対す

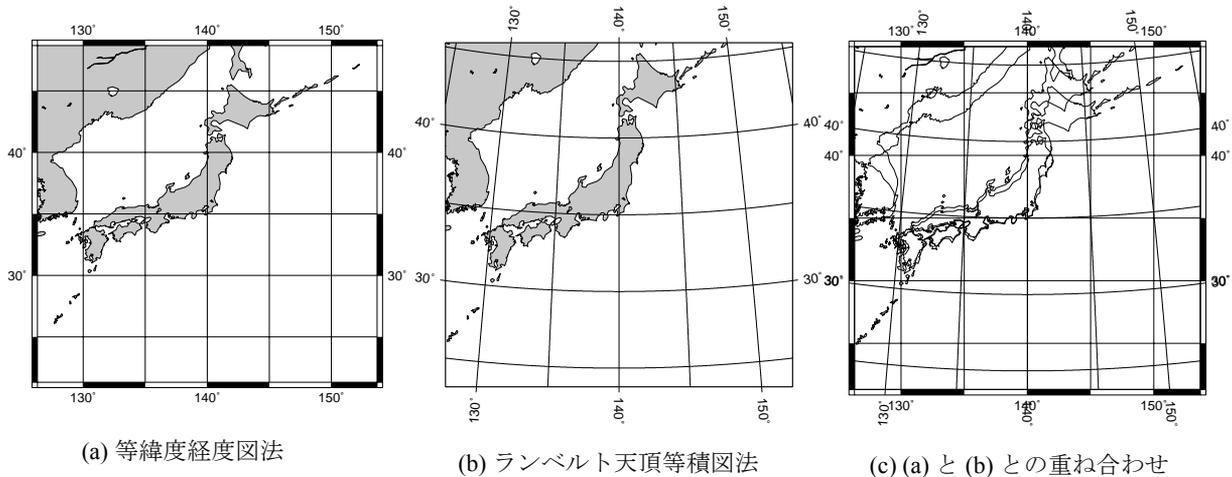


図 4: 地図投影法の比較

(a) と (b) は投影画像中心を (35.0°N, 140.0°E) と定め、中心から投影画像上の左右方向への半径を 1,250 km に定めた。その上で、(a) では南北方向の緯度差が左右方向の経度差と同一になるように、(b) では上下方向の半径が左右方向の半径と同じになるように作図した。(b) は本論文で構築する台風画像コレクションの画像と同一の大きさである。

固定的な座標から台風を眺めるオイラー的表現ではなく、台風中心と共に動く座標系から台風を眺めるラグランジュ的表現を用いることを意味する。このような表現によって、台風雲パターンの動きから台風システム全体の移動ベクトルを分離することが可能となる。

3.2.2 地図投影法

台風画像の作成とは、衛星受信画像における台風周辺の雲パターンに対応する画素を、特定の地図投影法に基づいて地図投影画像の画像座標系に写像する処理のことを指す。このとき、台風雲パターンの時系列変化を適切に解析するためには、地図投影法に対して等積や等角などの好ましい性質を要求すべきである。そこで本節では地図投影法の性質や、画像の大きさなどのパラメータに関する検討をおこなう。

まず衛星受信画像側のパラメータとして、台風周辺域として取り出す範囲の大きさについて検討する。その範囲は、台風の雲パターンを十分にカバーできるほどの大きさとする必要があるが、最も巨大な台風の大きさがおおよそ直径 2,000km である [5] ことを考慮し、余白部も含めて台風中心から半径 1,250km の範囲を台風周辺域と定めた。後述の図 6 「平均台風」や、かなり大きめの台風である図 7 の例を見ても、この範囲が台風雲パターンをカバーするのに適切であることが判断できる。なお衛星受信画像の幾何補正については、S-VISSR (Stretched-VISSR) に含まれる衛星の軌道姿勢情

報に基づく幾何補正のみを行っている [7]。

次に投影画像側のパラメータを検討する。本論文で用いる地図投影法はランベルト天頂等積図法 (Lambert azimuthal equal-area projection) [8] とする。この図法には、地球球面上の原点からある角距離で囲んだ球面上の円形の表面積と、地図上の中心を原点として描いた円の面積が等しくなる、という性質がある。ゆえに本論文の用途には以下の利点がある。

1. 台風中心と球面上の原点とを一致させることにより、台風の地理的な移動に関わらず地図上での台風の見かけの大きさを一定にできる。
2. 歪みが投影画像中心からの半径にしたがって増加するため、台風のような円形に近い物体では比較的影響が小さい。

ここで、等緯度経度図法やポーラステレオ図法・ランベルト等角割円錐図法など、気象関係でよく用いられる地図投影法と、本論文で用いる地図投影法を比較する。

**等緯度経度図法** 緯度と経度が画像上で等間隔に直交し、任意の画素の緯度経度が計算しやすいという利点はあるものの、台風の移動に伴って投影画像上の見かけの大きさや形が大きく歪むため、異なる画像同士の比較が無意味となる。

**ランベルト等角割円錐図法** 数値予報の格子モデルと

して用いられ、球面上と地図上の対応する点の近傍において任意の 2 方向の挟角が等しくなるという優れた性質 (等角) を備えているが、本論文で関心がある等積性の性質は持たない。

図 4 では各種地図投影法の比較の例として、等緯度経度図法とランベルト天頂等積図法との比較を示す。図 4(c) では特に地図の南北方向で両者の違いが明瞭に現われており、(a) の図法の場合は台風の北側が特に大きく歪むことになる。そこで本論文は、ランベルト天頂等積図法を地図投影法として用いる。

最後に投影画像のサイズは512×512画素の大きさと定める。これは以下の理由による。

1. 衛星直下点の赤外バンドの空間分解能5km/pixelを基準とすると、512画素幅が台風周辺域の範囲2,500kmに相当すること。
2. 画像の大きさが2のべき乗であると処理が効率的な場合があること。

ただし高緯度では実質的な空間分解能が低く、投影画像にもその影響が顕著に現れることに注意する。

### 3.2.3 台風中心位置の補間

ベストトラックは3～6時間ごとの記録であるのに比べ、衛星観測は1時間ごとである。そこでベストトラックの記録が利用できない観測時間の台風中心位置は補間によって求める。

そこで本論文では補間方法として、最も単純な方法である線形補間 (L法)、滑らかな方法である3次スプライン関数による補間 (S法)、そしてS法に観測時間の差も考慮した補間 (C法) の3種類を比較検討する。ここでC法で考慮する観測時間の差について説明する。ひまわり衛星の観測では北極から南極まで走査するのに約25分を要するため、例えば0900UTCの観測では、実際に北極側から観測を開始するのが0835UTC頃となる。したがって、衛星画像で観測される台風の中心位

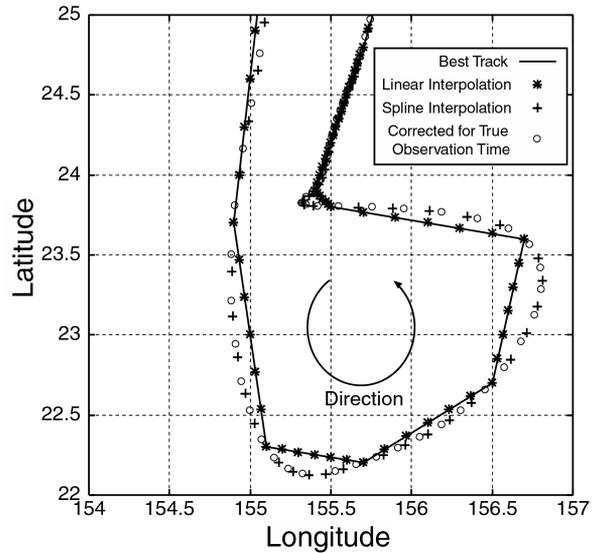


図 5: 台風中心位置の補間方法の比較  
台風 9710 号の軌跡の一部を例とした。

置は、正時よりもいくらか早い時間に相当する。このずれの影響は、台風が速くなるにしたがって大きくなる。

以上の3種の補間法の違いを、ある台風を例にして図示したものが図5である。この図から以下のような違いが読み取れる。

- L法とS法では、台風の進行方向が急角度で転向する場合には偏差が拡大するが、台風の進行方向が一定の場合には大きな差は生じない。
- C法はS法と同じ曲線上に補間点が乗るものの、台風が静止しない限りは観測時間の違いによる偏差が必ず現われる。

また全台風を対象にして、3種の補間法の差を定量的に比較したものが表4である。この表では、実際の台風のベストトラックに基づいて各観測時間ごとに補間点の緯度経度を比較し、その差の平均や標準偏差を計算した。この表から読み取れることは以下の点である。

表 4: 台風のベストトラックを補間する3種類の方法的比較

比較	緯度		経度	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
C法とL法	$-3.33 \times 10^{-2}$	$5.50 \times 10^{-2}$	$-1.65 \times 10^{-2}$	$10.95 \times 10^{-2}$
C法とS法	$-3.25 \times 10^{-2}$	$4.50 \times 10^{-2}$	$-1.32 \times 10^{-2}$	$9.52 \times 10^{-2}$
S法とL法	$-7.93 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-2}$	$-32.49 \times 10^{-4}$	$4.44 \times 10^{-2}$

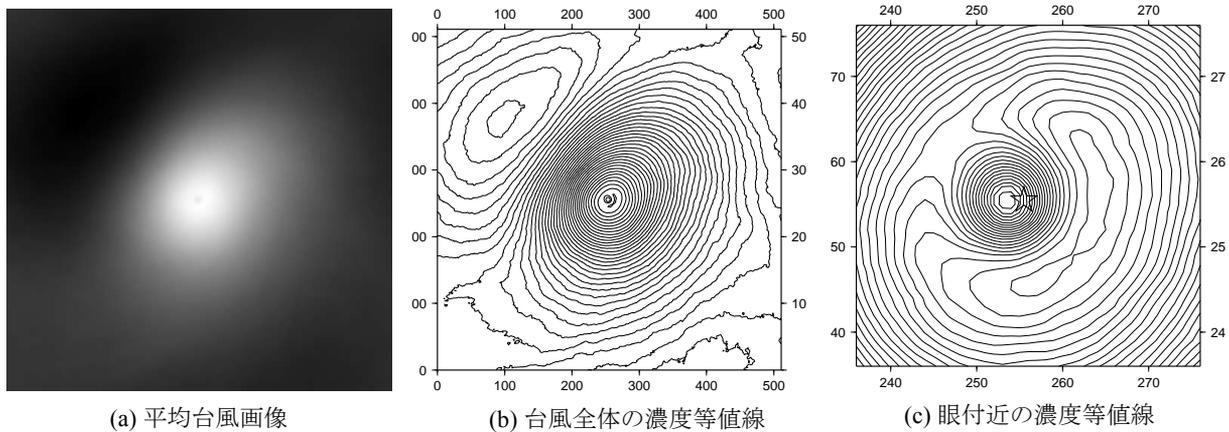


図 6: S 法を用いて得られた平均台風画像  
 1995 年から 1999 年の台風画像のうち、ベストトラックの階級が「台風」に属する画像、約 10,900 枚を対象として平均台風を計算した。また図 (c) 中の☆印は画像中心位置を示す。

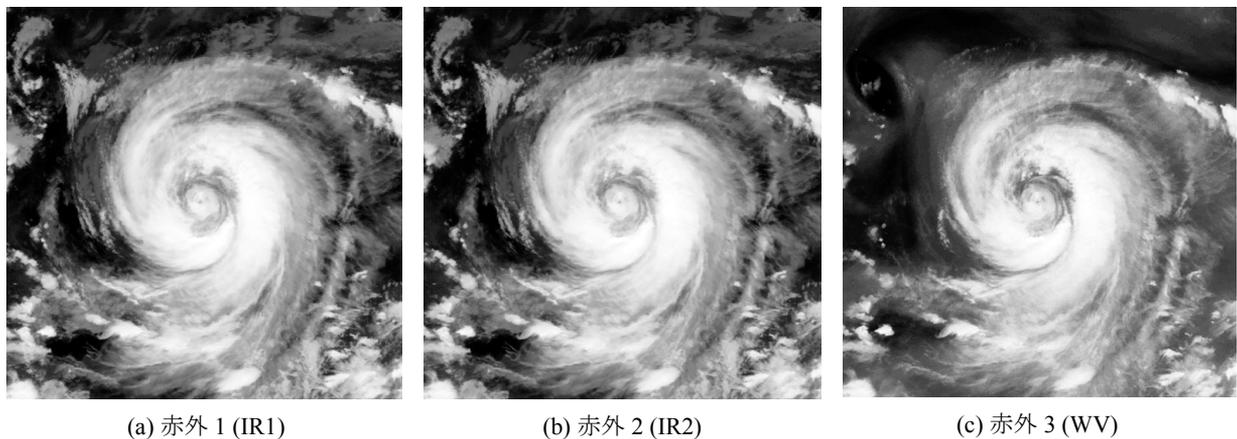


図 7: 台風 9713 号の赤外画像  
 観測は 1997 年 8 月 16 日の 1000 UTC (日本時間 19 時)。いずれもヒストグラム平坦化を施している。

1. S 法と L 法との差の平均は他の場合よりも 2 桁ほど小さく、衛星画像の観測精度以下に収まっていることから、実用上は差がない。
2. C 法と他の方法との差は 1 画素弱の偏差に相当し、影響がやや大きい。
3. C 法の補間点は他の方法に比べて平均的に南西側に位置する傾向が見られるが、これは台風が転向点以後北東方向に進行する際に速度を上げるといふ性質の反映であると予想される。

### 3.2.4 平均台風

表 4 は各補間法の相対的な偏差を表すものであり、各補間法の優劣はこの表だけでは判定できない。そこで次に「平均台風」を用いた比較を試みる。平均台風とは、台風画像コレクションの任意の部分集合に含まれ

る画像の画素値を単純に平均することで、台風の平均的なパターンを得るための処理である。このとき台風の本構造は多数の画像の加算によって打ち消されるため、台風中心付近の雲パターンのみが残ることになる。

図 6 は 1995 年から 1999 年の台風画像のうち、ベストトラックの階級が「台風」に属する画像を対象とした平均台風を示す。補間法には S 法を適用した。平均台風は (a) では濃淡で、(b) および (c) では等値線で図示されている。(a) では中心付近に眼らしき黒い部分が見えるため、(c) では中心部を拡大して表示した。すると (c) には確かに眼のような濃度の小さな円形の領域が存在し、そのほぼ中心に濃度値の極小点、つまり平均台風の眼の中心が存在している。

さて、本来ならば平均台風の眼の中心と台風画像中心

とが一致すべきであるが、この場合の台風中心座標は(254,256)であり、画像中心座標(255.5, 255.5)と厳密には一致していない。そこでL法やC法を用いた場合の一致度をS法の場合と比較する。表4を用いると、これらの場合の平均台風の中心位置は、L法の場合ほぼ同じ位置、C法の場合は図6よりも南東側に位置し、やや中心位置からの偏差が大きくなると予想できる。本論文では以上の比較結果を踏まえ、補間方法としてS法を用いることとする。

ただこうした系統的な偏差が生ずる原因の第一には、衛星画像の幾何補正の影響が考えられる。本論文では衛星の軌道姿勢情報に基づく幾何補正のみを行っているため、厳密にはより高精度の処理が必要であると考えられる。

### 3.3 台風画像コレクションとその規模

以上の手法を用いて作成した台風画像の例を図7に示す。この台風はかなり大きめの台風であるが、7の枠内に収まっていることから、地図投影法のパラメータは適切であると判断できる。次に各バンドの画像を比較する。まずIR1とIR2は波長帯が隣接しているために類似した画像に見えるが、両者に関してはむしろ画素値のわずかな差という情報が、ある種の雲の判別に有効である。一方WVは大気の中層以上の湿度を計測しているため、画像の周辺部に大気中の水蒸気のうねりのような流れが見えている。

このような台風画像を、1995年から1999年の間に発生した台風113個<sup>2</sup>に対して作成した。これらの台風のベストトラックをもとに、衛星受信画像約13,700シーンを入手し、そこから約20,200枚規模の台風画像コレクションを作成した。またこのとき、受信時にノイズの混入やデータの欠損が生じた画像を目視により除去することで、データの品質を保持する作業をおこなっている。

## 4 台風画像の特徴抽出

### 4.1 概要

本研究の目的は、台風画像コレクションの構築および台風解析への応用であるが、そのための一つの重要な機能となるのが台風画像データベースの内容検索機能である。なぜなら、過去の類似台風事例に基づいて現在の台風を解析するためには、現在の台風画像に類似

2. 同期間の台風は全部で115個であるが、そのうち9501号と9502号についてはデータが未入手である。

表5: 各レイヤの画像内容素と階層モデル

レイヤ	画像内容素
5. 意味レイヤ	画像の意味や人間の感性・主観を表すパラメータ
4. 関係レイヤ	領域間の関係を表す要素(画像表現モデル)
3. 領域レイヤ	領域の形状的特徴や構造的特徴を表す要素
2. 画素レイヤ	画素単位の分類または領域分割を経た画素
1. 観測レイヤ	センサを通じた物理世界の観測・種々の画像補正を経た画素値

した画像を検索する機能などの、画像内容に基づく検索機能が有用なためである。本論文ではスペースの都合から詳しい記述を省略するが、著者らは台風画像コレクションを対象とした画像内容に基づく検索についても研究を進めている[9]。

この台風画像データベースは画像内容素の階層モデルに基づいている。これは表5に示すように、画素レベルや画素領域レベルなど、画像内容を表現するのに適当な複数の階層を定めるモデルであり、個々の階層ではその処理目的に応じた適切なアルゴリズムを実装する。本論文は特に第3層の「領域レイヤ」に相当する手法について詳述する。その理由は、後述の台風解析の予備的実験において、変形楕円を用いた形状分解法というこのレイヤのアルゴリズムが重要な役割を果たすためである。

## 4.2 変形楕円を用いた台風雲パターンの形状分解

### 4.2.1 形状分解

第2節で述べたように、本論文は台風の雲パターンが円形とらせん形を基本とするパターンであるとの仮説に基づいている。円形は台風中心部の雲の表現に適しており、その物理的根拠はコリオリ力+遠心力と気圧傾度力とのつりあいで生じる傾度風にあると考える。図6の平均台風でも、台風の中心雲領域は北東から南西に伸びる楕円形となっており、この結果からも中心雲領域の表現には楕円が適当である。一方らせん形は台風中心から伸びるレインバンドの表現に適した形状であり、その物理的根拠は摩擦力の影響で等圧線と一定の角度で吹き込む摩擦収束にあると考える。

本論文では、特に前者の円形領域の表現を対象を絞り、変形楕円を用いた形状分解法を提案する。ここで形状分解(shape decomposition)とは、物体の形状を複数

のより基本的な部分に分解し、物体を「部分」の集合として表現する方法である。特に本論文では、楕円を基本構成要素として、台風雲パターンを楕円の集合として表現する方法を提案する。

その方法の概略を以下で説明する。まず各分類クラスに対して一種のスコアを定め、形状分解の目的に応じて、関心のある分類クラスに正のスコア、関心のない分類クラスに負のスコアを割り当てる。次に楕円内部に含まれる画素のスコアの和(エネルギー)を計算し、楕円をパラメータで変形させることでエネルギーを最大化するようなパラメータを求める。正負のスコアを定義しているため、楕円要素のエネルギーには極大値が存在する。こうして決定された楕円要素を取り除き再び同様の最適化を繰り返す。これをまとめると下記のようなアルゴリズムとなる。

1. 分類対象画像の画素すべてに、分類クラスに対応したスコアを割り当てる。
2. スコアが正の画素の分布状況から楕円要素の初期パラメータを設定する。
3. 楕円内部に含まれる画素のスコアの和をエネルギーとし、このエネルギーが最大となるように楕円パラメータを最適化する。
4. 最適化された楕円要素のエネルギーがしきい値よりも大きければ、形状分解要素として採用する。
5. エネルギーがしきい値より小さい楕円要素を複数回発見した後に終了する。
6. 形状分解要素の内部に含まれる画素のスコアを負の重複ペナルティに置換し、2に戻る。

#### 4.2.2 各分類クラスのスコアの設定

本論文で扱う台風画像は、あらかじめ各画素に雲/海/地面の分類クラスが付与されており、雲画素についてはその種類も分類済みであると仮定する。その分類アルゴリズムについては文献 [9] を参照のこと。次に形状分解の目的に応じて、注目する分類クラスに正のスコア、それ以外の分類クラスに負のスコアを定める。

その具体的な例を表 6 に示す。まず中心雲領域の抽出については、眼の壁雲付近での強い上昇気流により発生した積乱雲を抽出するために、積乱雲に類似したクラスに正のスコア、それ以外に負のスコアを割り当てる。一方台風の眼の抽出では、積乱雲に囲まれた積乱雲以外の雲領域を抽出するために、中心雲領域の抽出とはほぼ反対傾向のスコアを割り当てる。

スコアの割り当ては「どのクラスに関心があるか」と

いうユーザの目的を反映する過程であるため、先験的な設定は本質的に難しく、ユーザ自身が決定に関わる必要がある。ただし、スコアは各分類クラスの相対的な影響を大まかに指定するものであるため、微妙な調整はそれほど重要ではない。

最後にペナルティスコアについて付け加える。重複ペナルティとは、形状分解要素として採用された楕円要素内部に含まれる画素に対して設定する負のスコアであり、楕円要素同士の重なりを小さくするように働く。また枠外ペナルティとは、画像の枠外に想定する画素に設定する負のスコアであり、楕円要素の枠外へのはみ出しを小さくするように働く。

#### 4.2.3 楕円要素のパラメータ最適化

本論文ではエネルギー関数を、楕円要素の内部に含まれる画素のスコアの総和、と定義する。そしてエネルギー関数が最大となるパラメータを最適解とし、そのパラメータに対応する楕円を形状分解要素とする。このような枠組はエネルギー最小化に基づく変形モデルに触発されたものであり [10, 11, 12]、エネルギー関数の定義が形状分解結果を間接的に制御する点の特徴である。

ここで楕円要素のパラメータ表現について述べる。先述のようにラグランジュ的表現を用いる場合、画像中心を原点とするのが自然な座標系である。また図 8 の極座標  $(r, \theta)$  および直交座標  $(x, y)$  を比較すると、中心の周囲を円運動する雲の表現には (a) の極座標表現が基本的には自然である。ゆえに本論文では、楕円のパラメータベクトルを  $w$  として、以下の表現を用いる。

$$f(w) = f(r, \theta, \phi, p, a) \quad (1)$$

$$f(w) = f(x, y, \phi, p, a) \quad (2)$$

ここで  $a = q/p$  は縦横比である。ここで、式 (1) だけでなく式 (2) の表現を併用するのは、 $r \sim 0$  の場合に式 (1) を用いるとパラメータ  $r, \theta$  の推定誤差が大きくなるためである。こうして、楕円形状分解問題は、5次元のパラメータベクトル  $w$  の最適化、つまり 5次元空間での最適化問題に帰着する。

その最適化には Powell 法を用いる [13]。本論文のように関数の微分を正確に求めるのが困難な場合は、準ニュートン法などのように微分を用いる方法よりは、微分を必要としない Powell 法などが、安定して高速に解を求めることができる。ただし Powell 法では探索方法の特徴から、探索方向の初期設定におけるパラ

表 6 : スコアの設定例

各クラスに割り当てるスコアを変更することで、同じ手法を台風中心雲の抽出と眼の抽出の両方に用いることができる。なお眼の抽出に関しては、ペナルティスコアは明らかに不要である。また計算の高速化のためにスコアはすべて整数としている。

分類クラス	中心雲抽出	眼の抽出
積雲 (Cb)	10	-80
雄大積雲 (Cg)	8	-80
中層雲 (Cm)	1	8
積雲 (Cu)	1	8
厚い雲域 (Dense)	1	8
巻雲 (Ci)	-80	9
霧 (Fog)	-80	9
巻雲のミクセル (Mixel)	-80	9
海面 (Sea)	-160	10
地表 (Land)	-160	10
ペナルティスコア	中心雲抽出	眼の抽出
重複ペナルティ	-80	—
枠外ペナルティ	-10	—
形状制御定数	中心雲抽出	眼の抽出
縦横比制御定数	0.4	0.1

メータの並び順によって、たどりつく局所最適解が異なる場合がある。そこで簡単なテストの結果、パラメータの並び順を式 (1) および式 (2) の順序とした。また各パラメータの変動範囲がほぼ同じになるよう、最適化の前にスケール処理を施す。

最後に楕円の形状を制御する形状制御定数について述べる。これは、雲領域が円に近い楕円となりやすいことを考慮し、縦横比が不自然に大きい楕円に対してペナルティを課すものである。ここでペナルティ項としては、縦横比  $a \leq 1.0$  に対して、 $a=1.0$  のときに最大値をとり、 $a$  に関して単調非減少関数となる関数が適当であるため、本論文では  $a^{-l}$  の関数を用いることとした。ここで  $l$  は縦横比制御定数である。以上のペナルティを加えた本論文のエネルギー関数  $E(x)$  を示す。

$$E(x) = f(x) \times a^{-l} \quad (3)$$

#### 4.2.4 時系列解析

台風の時系列解析としてよく取り上げられるのは、台風の雲の動きを利用した風ベクトルの推定という問題

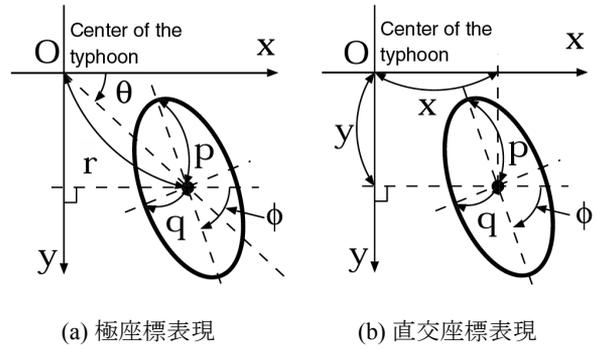


図 8: 楕円要素のパラメータ表現

である。これはブロック単位での雲の動きを、前後の画像の相関などを用いて推定するものであり、コンピュータビジョンにおけるオプティカルフローの問題とも共通する部分が多い。しかしこのような方法では通常の衛星観測の間隔よりも短い観測間隔でないと、風ベクトルを安定して推定するのが難しい [14]。

本論文はこれらの研究とは方向性が異なり、形状分解要素のパラメータに関する時系列解析を主に扱う。まず、ある時刻  $t$  での楕円パラメータを  $x^t$  とすると、時刻  $T$  の  $x^T$  は過去のパラメータ  $x^t (t=1, \dots, T-1)$  から予測できると仮定する。そのための方法として、一般的には自己回帰過程 (AR) あるいは移動平均過程 (MA) などのモデルを用い、パラメータをカルマンフィルタなどで更新する方法が用いられる。ただし本論文では現在のところ単純な方法として、前値予測  $x^T = x^{T-1}$  を用いている。

そこで、時刻  $T$  に最適化する形状分解要素のパラメータの初期値として、時刻  $T-1$  に得られた形状分解要素のパラメータを用いる。そして時刻  $T-1$  の形状分解で得られた形状分解要素の中からエネルギーが大きい順に要素を選び、時刻  $T$  の画像を対象にしたエネルギーの最適化を繰り返していく。こうして、複数の時刻にまたがる同一の形状分解要素の動きを追跡することができる。

#### 4.2.5 結果

本論文の提案手法を用いた形状分解結果を図 9 に示す。灰色で示された楕円が形状分解要素として採用された楕円である。積乱雲は白色で表されており、白い画素領域に正のスコアが割り当てられている。

台風の中心雲領域が比較的まとまっている場合、具体的には図 9 の 5 行目や 6 行目の画像に対しては、中心雲領域をうまく抽出するような形状分解結果が得られた。さらに 5 行目の例では、中心雲領域とバンド状雲

領域に異なる楕円が当てはめられており、両者を異なる部分として表現することが可能となっている。それに対し、2行目や3行目のように、台風の中心雲領域から南の方向へ太いバンド状雲が伸びている場合は、それらをまとめて大きな楕円で表現しており、中心雲領域とバンド状雲領域という異なる性質の雲領域が一体の雲システムとみなされてしまっている。

この問題を解決するために、新たなペナルティを導入すべきか、あるいは新たな形状分解要素を導入すべきか、などの点については今後の検討課題である。またバンド状雲などのより複雑な輪郭形状の表現には、Snakesなどの輪郭モデル[10, 11]との併用が有望な方法であると考えている。

最後にアルゴリズムの計算時間について述べる。計算時間は分解する楕円の個数などにより画像ごとに異なるが、平均すると約0.3秒であった(Pentium III733MHz)。

## 5 台風画像解析 — 台風の日変化

本論文では台風画像解析の一例として、台風の日変化に関する解析結果を示す。これらの解析方法は、ドボラック法のように台風の強さや大きさを総合的に解析できるレベルにはまだほど遠い。しかし本論文で提案する手法は、大量の台風画像コレクションから多数の時系列パターンを抽出し法則性を発見していくことで、気象学的にも意味のある性質が抽出できることを以下で示す。なお本節の記述で気象学的知見について引用している部分は、ほとんどが文献[3]からの引用であるが、複雑さを避けるため、文献番号の付記や原典への参照については省略する。

### 5.1 台風サイズの日変化

熱帯海洋上の対流活動には明らかな日変化があり、早朝に対流活動のピーク、午後から夕刻に対流活動のボトムがあることが知られている。この対流活動の変化にしたがって、台風のサイズにも日変化が観察される。本論文で関心がある「積乱雲」に相当する雲領域は、およそ1500 LST ~ 1800 LST (地方時)に最大になる、と気象学の文献には記されている。そこで本論文では、同様の日変化現象が本論文で提案する手法でも確認できるかどうかを検証する。その手法は以下の通りである。

1. すべての形状分解要素系列の中から、以下の条件を満たす時系列を探索する。
  - (a) 発生から消滅までに24時間以上追跡可能である(ある程度安定した要素のみを対象とする)。

- (b) 個々の形状分解要素の面積が  $S_{th}$  以上である(ある程度大きな要素のみを対象とする)。
- (c) 画像中心と楕円中心の距離が  $D_{th}$  以下である(中心付近の雲領域のみを対象とする)。

2. 上の方法で抽出された時系列に対して平均面積を求め、各時刻の面積を平均面積で正規化する。
3. 各時点の観測時刻を地方時に変換したのち、グラフにプロットする。

1995年から1998年の台風91個の時系列画像を対象とした実験では、上記の条件を満たす楕円要素時系列は60個検出できた。これらの楕円要素時系列を対象として計測した、台風サイズの日変化を示すグラフが図10である。この図には、0000 LSTがボトムで1700 LSTがピーク、その間は直線的にサイズが増加/減少するという、明瞭な日変化パターンが現われている。この変化パターンは、追跡初日の0000 LST ~ 2400 LSTのみならず2日目や3日目にも繰り返されているため、かなり安定したパターンであると考えられる。

この結果は、気象学の文献で報告されているピークの時刻とボトムの時刻にもほぼ一致している。ゆえに本論文で提案する形状分解手法は、気象学的にも意味のある性質を抽出する能力があると評価できる。なお図10では、平均的に3日目が面積最大となっている。これは形状分解要素には、初日から3日目ごろまで発達を続け以後は緩やかに衰える、という性質があることを示唆している。

### 5.2 台風の眼の日変化

次に台風の眼の日変化を計測する。台風の眼を抽出する場合にも、中心雲領域を抽出する場合と同一の形状分解アルゴリズムを用い、表6で示すようにスコアの設定のみを変更する。しかし中心雲領域の場合とは異なり、眼のサイズは小さいものでは数画素幅しかなく、楕円パラメータの推定誤差が大きくなるのは避けられない。そこで眼の日変化に関しては、各画像で眼が検出されたか否かのみを調べることで、地方時と眼の検出確率との関係を調べることにした。

まず本論文の手法による眼の検出確率は約16%となり、気象学の文献で言及されている値23%よりもやや低かった。その理由は小さな眼の検出に漏れが多いためと推測される。次に図11に眼の検出確率の日変化を示す。眼の検出確率は0700 LSTに最低となり、およそ2100 LSTに最高となった。気象学の文献では、眼の検出確率ではなく眼の大きさに関する調査結果として、



図 9: 台風 9624 号に対する楕円形状分解の結果  
 灰色の楕円が形状分解構成要素となる楕円である。4 観測画像ごとにサンプリングした。画像の下の 96110318 というインデックスは 1996 年 11 月 3 日 1800 UTC の衛星観測画像を意味する。

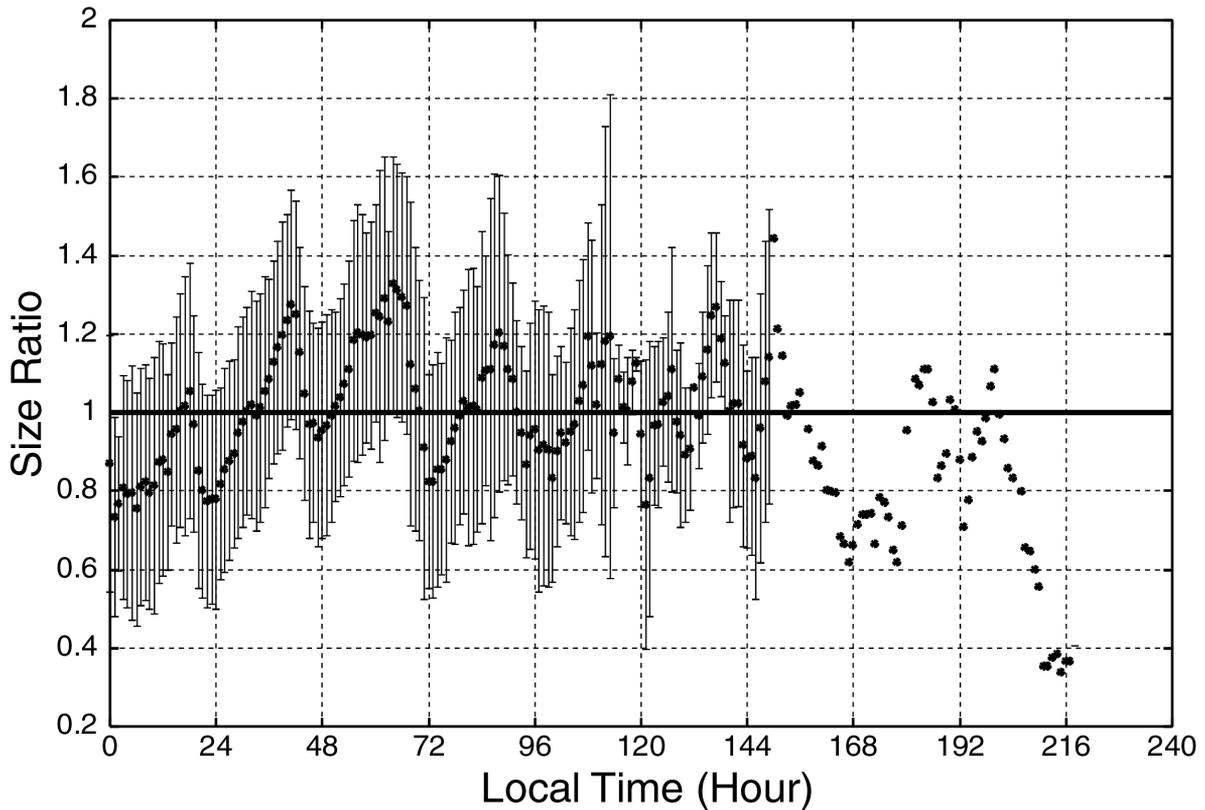


図 10: 台風サイズの日変化  
 長期間の追跡に成功した楕円要素を対象に面積の日変化を計測した。横軸は台風中心の地方時(1時間未満は四捨五入)、縦軸は各楕円要素の追跡期間中の平均面積を1として正規化した大きさ。エラーバーは標準偏差を表す。

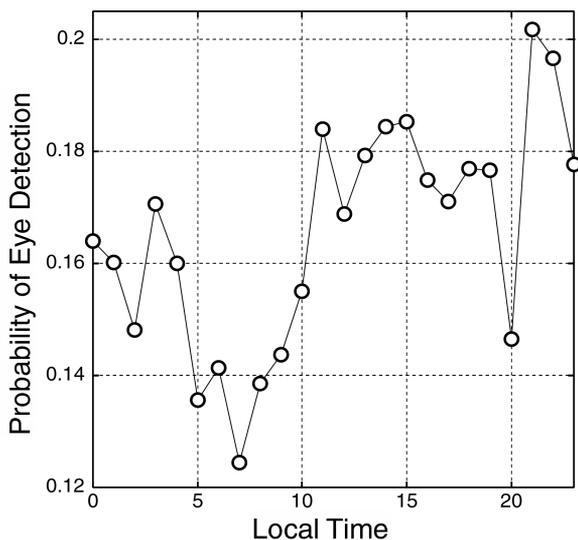


図 11: 台風の眼の検出確率と地方時との関係  
 ベストトラックの階級が「台風」である観測画像のみを対象とした。

眼の直径は早朝0600 LST ~ 0730 LSTに最小となり1500 LST ~ 2100 LSTに最大となる、との記述がある。そこで、眼のサイズと眼の検出確率とが正の相関関係にあると仮定すれば、本論文の結果は従来の知見と同じ結論を示唆していると考えられる。このように眼の検出確率に関しても、従来の知見を裏付ける結果が得られた。

## 6 おわりに

本論文では台風画像コレクションの構築に関する様々な問題点の議論に続き、台風画像コレクションを用いた台風解析の試みについて述べた。本論文の台風画像コレクションの特徴はラグランジュ的表現に基づくという点にある。この表現によって、台風雲システム全体の動きと台風雲パターンに固有の動きとを分離して解析できるようになる。また地図投影法としてはランベルト等積天頂図法を採用し等積性に配慮することで、雲パターンの時間的変化を台風の地理的な移動と関係なく比較可能となった。

以上の方法で作成された台風画像を対象に、台風雲パ

ターンを表現する一つの方法を提案した。それは変形楕円に基づく形状分解法であり、この結果を用いて台風の日変化の解析という簡単な台風解析に取り組んだ。すると、台風サイズの日変化および台風の眼の日変化という両方の解析に関して、従来の気象学的知見を裏付ける結果を得ることができた。これらの結果は「人間のパターン認識」に基づくドボラック法に代わり、情報学的アプローチに基づく新しい台風解析法への第一歩になると考える。

今後は、パターン認識手法やデータマイニング手法などに基づく情報学的アプローチをより強力に発展させていくことがまず必要である。また熟練者のパターン認識に基づくドボラック法にひそむ気象学的知識に関してもより深い理解が必要であり、これらの気象学的な知識体系をどのように、どこまでシステムに組み込み、情報学的アプローチと融合していくかが重要な検討課題である。さらに、他の衛星画像やアメダスデータなどの気象データセットとの統合もより有効なシステムの構築には必須の要素であり、「台風は地理的情報である」との発想に立てば、地理情報システムとの統合も将来的な方向性として有望であると考えられる。

#### 謝辞

本論文で用いた GMS 衛星画像の受信、蓄積および配布にご尽力くださる、東京大学生産技術研究所の喜連川優教授、根本利弘助手、および東京大学空間情報科学研究センターの柴崎亮介教授に深謝いたします。なお本文中の図の一部は GMT[15] を用いて描いた。また本研究の一部は、通信放送機構「創造的情報通信技術研究開発制度」の助成、および文部省科学研究費補助金(奨励研究 A、課題番号 12780300)の助成による。

#### 参考文献

- [1] Longshore, D., "Encyclopedia of Hurricanes, Typhoons, and Cyclones", Facts On File, Inc., 1998.
- [2] 山岬正紀, 「台風」, 東京堂出版, 1982.
- [3] 鈴木和史; 元木敏博(編), 「台風—解析と予報—」, Vol. 197, 『気象研究ノート』, 日本気象学会, 2000.
- [4] Dvorak, V.F., "Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery", *Monthly Weather Review*, Vol. 103, pp. 420-430, 1975.
- [5] 日本気象学会, 「新しい気象学～台風の理解はどこまで進んだか」, 1999.
- [6] 気象業務支援センター台風の事典編集委員会(編), 「理科年表読本 CD-ROM 台風の事典」, 丸善, 1998.

- [7] Kigawa, S., "A Mapping Method for VISSR Data", *Meteorological Satellite Center Technical Note*, No. 23, pp. 15-34, 1991.
- [8] 種田守, 「地図投影図法」, オーム社, 1975.
- [9] Kitamoto, A., "The Development of Typhoon Image Database with Content-Based Search", In *Proceedings of the 1st International Symposium on Advanced Informatics*, pp. 163-170, 2000.
- [10] Kass, M.; Witkin, A.; and Terzopoulos, D., "Snakes : Active Contour Models", In *Proc. of 1st International Conference on Computer Vision*, pp. 259-268, 1987.
- [11] Blake, A.; Isard, M., "Active Contours", Springer, 1998.
- [12] Singh, A.; Goldgof, D.; and Terzopoulos, D., "Deformable Models in Medical Image Analysis", IEEE Press, 1998.
- [13] Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; and Flannery, B.P., "Numerical Recipes in C", second edition, Cambridge University Press, 1992.
- [14] Zhou, L.; Kambhamettu, C.; and Goldgof, D.B., "Extracting Nonrigid Motion and 3D Structure of Hurricanes from Satellite Image Sequences without Correspondences", In *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. II. IEEE, 1999.
- [15] Wessel, P.; and Smith, W.H.F., "New, improved version of Generic Mapping Tools released". *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, Vol. 79, No. 47, pp. 579, 1998.