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	はじる	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
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
台風画	il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
台風画	ij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
おわり	りに	.21
	2.4 2.5 台風雨 3.1 3.2 3.3 台風雨 4.1 4.2 台風雨 5.1 5.2 おわり	<ul> <li>2.4 ドボラック法</li> <li>2.5 本論文のアプローチ</li> <li>台風画像コレクションの構築</li> <li>3.1 データセット</li> <li>3.2 台風画像の作成</li> <li>3.3 台風画像の作成</li> <li>台風画像の特徴抽出</li> <li>4.1 概要</li> <li>4.2 変形楕円を用いた台風雲パターンの形状分解</li> <li>台風画像解析-台風の日変化</li> <li>5.1 台風サイズの日変化</li> <li>5.2 台風の眼の日変化</li> <li>おわりに</li> </ul>

## 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る。 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きわ目を引く存在である。 発生当初は小さな雲のクラスタ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 リオリカの向きから、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) $\mathbf{r} = \mathbf{a}^{\theta}$ 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 的なブレー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、数箇所で雲パターンの認識 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、以下のように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 時間の変化傾向** 前 24 時間の T 数の変化量 から、発達 / 衰弱 / 変化無しの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. Cl 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目指す。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 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

表1: VISSR センサの主要諸元

バンド	波長	空間分解能
可視 (VIS)	$0.55\sim 0.90\mu$ m	1.25km
赤外 1 (IR1)	$10.5 \sim 11.5\mu$ m	5.0km
赤外 2 (IR2)	$11.5 \sim 12.5 \mu$ m	5.0km
赤外 3 (WV)	$6.5\sim7.0\mu$ 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 ドトルース」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「グランドトルース」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

<sup>1.</sup> 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 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。
- 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」グランドトル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。

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 ベ、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0900 UTCの観測では、 実際に北極側から観測を開始するのが0835 UTC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、台風の速度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種類の方法の比較

レ訪	緯	度	経度		
山牧	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。



(a) 赤外1(IR1)

(b) 赤外 2 (IR2)

(c) 赤外 3 (WV)

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 う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 のバンド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法の場合はほぼ 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。

ただし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 る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 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	センサを通した物理世界の観測・ 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カ+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に対象を絞 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

<sup>2.</sup> 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。

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)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。
- 楕円内部に含まれる画素のスコアの和をエネルギ とし、このエネルギ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 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]、エネルギ関数の定義が形 状分解結果を間接的に制御する点が特徴である。

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, θ)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。

$f(w) = f(r, \theta, \phi, p, a)$	(1)
$f(w) = f(x, y, \phi, p, a)$	(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 法などの方が、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 の前にスケーリング処理を施す。

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 $a^{-1}$ 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関数 E(x) を示す。

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

# 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, ..., T - 1) から 予測することができると仮定する。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、繁雑さを避けるため、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1500LST ~ 1800LST(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<sub>th</sub> 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<sub>th</sub> 以下である
   (中心付近の雲領域のみを対象とする)。
- 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、0000LSTがボトムで1700LST 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0000LST ~ 2400LST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とした。

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、

K.			5	Ś	S.		
96110318	96110322	96110402	96110406	96110410	96110415	96110501	96110505
Q		S.	Õ	$\hat{\mathbb{O}}$			
96110509	96110513	96110517	96110521	96110601	96110606	96110610	96110614
$\mathbf{O}$	5		5	6	5	5	0
96110618	96110622	96110702	96110707	96110711	96110715	96110719	96110723
S		5	S	S	Ô		
96110803	96110808	96110812	96110816	96110820	96110900	96110905	96110909
		5			0	G.	
96110913	96110917	96110921	96111001	96111006	96111010	96111014	96111018
S	Ċ,	C.	6	6,	6	6	JS -
96111022	96111102	96111107	96111111	96111115	96111119	96111123	96111203
S	j.		<u>S</u>		-0.00		0
96111208	96111212	96111216	96111220	96111300	96111305	96111309	96111313
<b>O</b> •	P	P		$\mathbf{Q}$	Q	Q	
96111317	96111321	96111401	96111406	96111410	96111414	96111418	96111422

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: 台風リイスの日変化 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ることができる。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

- 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),「台風一解析と予報一」,
   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 Date", *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 Coutour 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.