TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.82

Development of 5-day Typhoon Intensity Forecast Guidance by the Project

Team for Improvement in Operational Typhoon Forecasts and Analysis

BY

Munehiko Yamaguchi¹, Udai Shimada¹, Masahiro Sawada¹, Takeshi Iriguchi¹, and Hiromi Owada²

¹ Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute ² Japan Meteorological Agency

気象研究所技術報告

第82号

台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる

5日先台風強度予報ガイダンスの開発

山口宗彦¹、嶋田宇大¹、沢田雅洋¹、入口武史¹、大和田浩美² ¹ 気象研究所台風研究部、² 気象庁

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN February 2019

気象庁は、世界気象機関(WMO)地区特別気象中枢(RSMC)台風センターとして、北西 太平洋域の台風災害の防止・軽減に貢献している。現在(2018年11月)、気象庁では、台 風の5日先までの進路予報、3日先までの強度予報を発表している。一方、他海域のRSMCに おいては、熱帯低気圧の5日先の強度予報に加え、数日先の発生予報が標準となりつつあ る。また、北西太平洋域でも、諸外国が5日先台風強度予報を導入するなど、台風情報の 高度化を図っている。従って、気象庁が引き続き、RSMC として北西太平洋域の台風防災 に主導的な役割を果たすためには、台風の予報・解析技術、とりわけ、台風強度予報技術 の高度化が焦眉の急である。

この状況を背景として、気象庁予報部及び気象研究所台風研究部が中心となって2015年 9月に「台風予報・解析技術高度化プロジェクトチーム」が発足した。本技術報告「台風 予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる5日先台風強度予報ガイダンスの開発」 は、このプロジェクトチームの下で、主として気象研究所台風研究部が取り組んだ、台風 強度予測手法(ガイダンス)の開発を記述する。尚、短期間でガイダンスを実用化するた め、基本的に米国で開発され実用実績のあるガイダンスを輸入し、気象庁のデータを使っ て計算ができるようにシステムを構築した後に、これまでの北西太平洋域での台風研究の 知見を活かした改良を行った。

開発されたガイダンスは、プロジェクトチーム活動の下で、既に気象庁予報部に技術移転されている。現在、これらのガイダンスは予報部で実用化に向けた試験中であり、2019年3月に現業運用が開始される予定である。また、これらのガイダンスにより、強度予報の精度が大幅に改善することが期待されることから、気象庁の台風強度予報も5日へと延長される予定である。

これらのガイダンスの実用化が短期間で成就したのは、気象研究所台風研究部および気 象庁予報部を中心としたプロジェクトチームのメンバーの非常な努力の賜である。メンバ ー各位に改めてお礼を申し上げる。また、ガイダンスの基となるソースコードの提供等の 多大な援助をいただいた、米国ハリケーンセンター、米国北大西洋海洋気象研究所ハリケ ーン研究部、コロラド州立大学、米海軍研究所、及びマサチューセッツ工科大学にも深く 感謝する。

> 平成31年2月 気象研究所台風研究部長 青梨 和正

Abstract

We report on five-day typhoon intensity forecast guidance products developed by the Project Team for Improvement in Operational Forecasts and Analysis, which was established in September 2015 with staff members mainly from the Forecast Division of the Japan Meteorological Agency (JMA) and the Typhoon Research Department of the Meteorological Research Institute. Five kinds of guidance products have been developed: Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS), Logistic Growth Model (LGEM) and Rapid Intensification Index Equation (RII) \mathbf{as} ล statistical-dynamical approach, Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS) as a dynamical approach that uses a simplified axisymmetric numerical model, and consensus as an ensemble approach using multiple guidance. The outline, technical development for operation at the JMA, forecast performance, and instructions for use are reported for each guidance product.

As one of the Project Team's activities, the developed guidance products were transferred to the Forecast Division and tested experimentally. Because the accuracy of operational typhoon intensity forecasts is expected to improve with the newly developed products, they are scheduled to become operational in March 2019. At the same time, the forecast length is scheduled to be extended from the current three days to five days.

概要

本技術報告では、気象庁予報部及び気象研究所台風研究部が中心となって 2015 年 9 月に 設置された、「台風予報・解析技術高度化プロジェクトチーム」のもとで取り組んだ、台風 強度予測手法(ガイダンス)の開発に関して報告する。プロジェクトチームは以下に示す 5 つのガイダンスを開発した。これらは統計力学手法である SHIPS(Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme)、LGEM(Logistic Growth Equation Model)、RII(Rapid Intensification Index)、簡易的な軸対称数値モデルを用いた力学手法である CHIPS(Coupled Hurricane Intensity Prediction System)、複数のガイダンスを利用するア ンサンブル手法であるコンセンサス予測である。それぞれのガイダンスに関して、その概要 や気象庁で運用するために行なった技術開発、予測精度や利用上の注意点等について記す。

開発したガイダンスは、プロジェクチーム活動のもと、既に気象庁予報部に技術移転され ており、予報部で試験的に現業利用されている。これらのガイダンスにより、気象庁の強度 予報の精度が大幅に改善することが期待されることから、2019年3月にガイダンスの現業 運用が開始される予定である。また、それに合わせて台風強度の予報時間が現在の3日か ら5日へと延長される予定である。

目次

第1章	はじめに	·1
第2章	SHIPS ·····	$\cdot 4$
2-1.	SHIPS とは	$\cdot 4$
2-2.	. 気象庁版 SHIPS の構築	$\cdot 4$
2-3.	. 精度検証	·9
2-4.	. まとめと課題	17
第3章	LGEM	20
3-1.	. 気象庁における LGEM 開発の目的	20
3-2.	LGEM の予測式	20
3-3.	. 中心気圧を予測する LGEM の開発	21
3-4.	. 回帰係数の作成方法	22
3-5.	. 使用データ	24
3-6.	Persistence が原因の過発達への対応	24
3-7.	LGEM の予測事例	25
3-8.	統計検証	27
3-9.	. まとめ	29
3-10	0. 今後の課題	29
第4章	RI インデックス	31
4-1.	RIインデックスとは	31
4-2.	. 気象庁版 RI インデックスの構築	31
4-3.	. 精度検証	34
4-4.	. まとめと課題	36
第5章	CHIPS ·····	39
5-1.	CHIPS とは	39
5-2.	. 使用データ	41
5-3.	. 気象庁版 CHIPS(JCHIPS)の構築	42
5-4.	精度検証	43
5-5.	. まとめと今後の展望	45
第6章	コンセンサス予測	47
6-1.	. コンセンサス予測とは	47
6-2.	. 使用データ	47
6-3.	. 気象庁版コンセンサス予測の構築	47
6-4.	精度検証	47
6-5.	. まとめと課題	51

第	7章	まとめ	53
	謝辞·		54
	付録	1. SHIFOR ······ 5	55
	付録2	2. 検証指標	58
	略語君	長	59

第1章 はじめに1

熱帯低気圧は、熱帯や亜熱帯の海洋上で発生する低気圧である。強い風と雨を伴い、時に甚大な人 的・経済的被害を引き起こす。熱帯低気圧は、我々が暮らす地球上で発生する最も激しい大気擾乱の一 つで、その構造や発達メカニズムを解明することは気象学的に重要な課題である。一方、熱帯低気圧の 予測は防災対応や災害の軽減に直結していることから、予測精度の向上は防災・減災の観点から重要な 課題である。

熱帯低気圧の予測には、発生、進路、強度(中心気圧や最大風速)、温帯低気圧化、また熱帯低気圧 に伴う強風や大雨、高潮などがある。例えば、進路予報に注目すると、その予測精度は数値予測、発表 予報の両方において過去数十年間向上している。気象庁は、現業の全球数値予測システムによる熱帯低 気圧進路予測の検証を四半世紀以上に渡って一貫した手法で行っている。例えば、台風の発生する北西 太平洋域においては、1994 年から 2014 年の約 20 年間で予測時間にして 2.5 日分予測精度が向上してい る (Yamaguchi *et al.* 2017)。また、発表予報に関しても、数値予測システムによる進路予測の精度向上 や、複数の予測結果のアンサンブル平均を用いるコンセンサス手法(例えば、Nishimura and Yamaguchi 2015)の活用などにより、気象庁以外の気象機関や北西太平洋域以外の海域においても、全般的に予報 誤差は減少傾向にある(Elliott and Yamaguchi 2014)。

進路に比べて強度はどうか。進路と比べると強度の予報にはまだ課題が多いのが現状である。例えば Ito (2016)は、熱帯低気圧地区特別気象センター(RSMC Tokyo Typhoon Center)の年次報告書に掲載されている気象庁の発表予報の精度を 1992 年から統計的に解析し、台風強度予報の誤差が減少していないことを示した。このような傾向は、気象庁以外の気象機関や北西太平洋域以外の海域においても見られ、強度予報の改善は熱帯低気圧研究・予報コミュニティ全体の課題であると言える。

強度の予測精度向上を目指し、様々な取り組みが行われている。例えば、米国では、海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) が中心となって、Hurricane Forecast Improvement Project (HFIP) と呼ばれる熱帯低気圧予測改善プロジェクトを実施している (Gall *et al.* 2013)。現業機関、研究 機関、大学等が連携して強度予測の精度改善に取り組んでおり、近年のハリケーン領域モデル (Hurricane Weather Research and Forecast system, HWRF) の改善はこのプロジェクトの成果の一つである。2016 年 の HWRF による強度予測を米国国家ハリケーンセンター (National Hurricane Center, NHC) の発表予報 と比較した検証結果によると、北大西洋域では予報時間4日以降、北東太平洋域では予報時間2日以降、 HWRF 方が強度予測の精度が良かった (Gopalakrishnan *et al.* 2017)。このような数値予測システムの改 善による強度予測の精度向上を目指す取り組みに加え、米国を中心として統計・力学的な手法による 強度予測システムの開発が行われており、成果を出している。代表的なものは、2章で述べる Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) や3章で述べる Logistic Growth Equation Model (LGEM) である。これらの統計・力学手法による強度予測システムは、現状、数値予測システムによる強度予測 と同程度かそれ以上の精度を持っている一方、開発や運用に必要となる人的・計算機資源は数値予測シ ステムのそれよりも遙かに少ないという特徴を持っている。

領域モデルや統計力学的手法を用いた強度予測は米国だけでなく、RSMC ラ・レユニオン、ニュー デリー、オーストラリアの熱帯低気圧警報センター(Tropical Cyclone Warning Center, TCWC)において も現業的に実施されており、これらの予測結果を総合的に判断して強度予報が発表されている(Sampson and Knaff 2014,表 1.1)。また、NHC や米国合同台風警報センター(Joint Typhoon Warning Center, JTWC) では、数値予測の結果や統計・力学手法による強度予測の結果など複数の予測結果に基づくコンセンサ

¹ 山口宗彦

RSMC/TCWC		予却			客観	台風強度予報	ガイダンス		
		報時 間	コンセンサス	統計力学モデ ル	急速発達 インデックス	統計モデル	領域モデル	軸対称台風 モデル	その他
	マイアミ ホノルル	5 日	SHIPS, LGEM, GFDL, HWRF	SHIPS LGEM	0	SHIFOR	GFDL HWRF		Florida State Super Ensemble(FSSE)
米 国	JTWC	5 日	SHIPS, LGEM, CHIPS, GFDN, HWRF, COAMPS-TC	SHIPS STIPS LGEM	0	SHIFOR WANI	GFDN HWRF coamps-tc	CHIPS	環境場(上層発散、鉛直シ ア、TUTT、中緯度トラフと の相互作用、海洋貯熱量、海 面水温、他の台風との距離、 中下層の湿度、陸との相互作 用など)
ラ・	レユニオン	5 日		STIPS		STIPS	AROME		環境場(鉛直シア、上層発 散、下層収束、中下層の湿 度、上層トラフとの相互作 用、海洋貯熱量、海面水温、 MPI、陸の影響)
東京		3 日		開発中		SHIFOR		開発中	環境場
ニューデリー		5 日		0	0	SCIP	NHWRF		
オー	ストラリア	5 日		STIPS SHIPS LGEM	0		HWRF COAMPS-TC ACCESS		環境場 (特に鉛直シアー)

表 1.1 RSMC/TCWC における台風強度予報ガイダンスの利用状況 (Sampson and Knaff 2014 をもとに作成。 「開発中」はプロジェクトチーム立ち上げ当時。)

ス手法が発表予報に採用されている (DeMaria et al. 2014)。

気象庁における台風強度予報はどうか。気象庁では、予報官による風の鉛直シアや海面水温などの環 境場の監視に加え、気象庁全球モデル(JMA 2013)による予測結果や2-5節で述べる気候学的な統計ガ イダンス(Statistical Hurricane Intensity FORecast, SHIFOR)をもとに強度予報を発表する(Sampson and Knaff 2014)。気象庁は、台風を対象とする領域数値予測システム「台風モデル」(例えば、北川 2005) を運用していたが、その運用は2008年に終了し、現在は領域モデルによる強度予測は行っていない。 また、SHIPSのような統計・力学的手法による強度予測も行っていない。さらに予報時間に注目すると、 表 1.1 が示すとおり、気象庁は予報期間が3日であるのに対して、海外の気象局では5日先までの台風 強度が予報対象となっている。

気象庁は、RSMC 台風センターとして、北西太平洋域の台風災害の防止・軽減に貢献している。2014 年 12 月に韓国で開催された第 8 回世界気象機関熱帯低気圧に関する国際ワークショップ(International Workshop on Tropical Cyclones, IWTC-8)では、熱帯低気圧の現業予報の現状に関するレビューが行われ た。近年、同海域において、諸外国が、我が国と同等以上の進路予報精度を達成するとともに、我が国 に先立ち5日先強度予報を導入するなど、台風情報の高度化を図っていることなどが報告された。気象 庁が引き続き RSMC 台風センターとして国際競争力を維持し、我が国を含む北西太平洋域の台風災害 の防止・軽減に引き続き主導的な役割を果たすためには、台風解析技術のさらなる向上、進路予報精度 のさらなる改善、5日先強度予報や台風発生予測情報の現業化、新たな情報の発表にも対応可能な現業 体制の整備等が不可欠である。こうした状況を踏まえ、気象庁予報部及び気象研究所台風研究部が中心 となり、台風情報の高度化に向けた研究開発や現業体制の強化に必要な項目について検討・整理を行っ た。取り纏めた項目は多岐にわたることから、各項目²が研究開発から現業化までの一連の取り組みと して、有機的に連携し、また、効率的かつ円滑に実施されるよう、「台風予報・解析技術高度化プロジ

² 「5日先台風強度予報ガイダンスの開発・現業導入」、「台風発生予測ガイダンスの開発・提供等」、「台風解析技術の高度化」、「進路予報ガイダンスの高度化」、「台風予報作業手順の改善等」

ェクトチーム」を2015年9月に設置した。「5日先台風強度予報ガイダンスの開発・現業導入」は本プロジェクトチームの任務のひとつであり、台風強度予報の改善、および予報時間を3日から5日へと延長することを目的として、さまざまなガイダンスの開発が行われた。

基本的な開発の方針は、米国で開発され、NHC やJTWC で実績のあるガイダンスを気象庁に導入す ることであり、気象庁のデータ(再解析データや予報値、ベストトラックなど)を使ってガイダンスの 計算ができるようにシステムを構築した。また、米国のガイダンスは最大風速を予測対象としているた め、気象庁における現業予報を考慮して中心気圧を予測対象とする新たなガイダンスの作成なども行っ た。IWTC-8 以降、NHC などを複数回訪問し、米国のガイダンス開発者と協力関係を築き、ソースコー ドの提供や科学・技術的なアドバイスを受けるなど、米国からの支援を受けながら開発を行った。

プロジェクチーム活動において、全部で5つのガイダンスを開発した。それらは、NHCやJTWCで 実績のある統計力学的手法である SHIPS、LGEM、Rapid Intensification インデックス(RI インデックス)、 米国マサチューセッツ工科大学の Kerry Emanuel 教授によって提唱された力学的手法である Coupled Hurricane Intensity Prediction System (CHIPS)、これらのガイダンスを組み合わせて利用するアンサンブ ル手法であるコンセンサス予測によるガイダンスを開発した。

本技術報告では、プロジェクトチーム活動のもとで開発を行ったこれらのガイダンスについて報告を 行う。それぞれのガイダンスの手法や具体的な計算手順、使用データなど、技術的な内容を報告するこ とを目的とする。構成は以下の通りである。2章ではSHIPS、3章ではLGEM、4章ではRII、5章では CHIPS、6章ではコンセンサス予測に関して、使用データや気象庁で運用するために行った技術開発、 また予測精度などについてそれぞれ記述する。最後7章はまとめである。

参考文献

- DeMaria, M., C.R. Sampson, J.A. Knaff, and K.D. Musgrave, 2014: Is Tropical Cyclone Intensity Guidance Improving?. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, 387–398, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00240.1
- Elliott, G., and M. Yamaguchi, 2014: Advances in Forecasting Motion, WMO 8th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-8), 44pp.[Available online at http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic1_AdvancesinForecastingMotion.pdf]
- Gall, R., J. Franklin, F. Marks, E.N. Rappaport, and F. Toepfer, 2013: The Hurricane Forecast Improvement Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94, 329–343, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00071.1
- Gopalakrishnan, S., and co-authors, 2017: 2016 HFIP R&D Activities Summary: Recent Results and Operational Implementation, NOAA, 61pp.[Available online at http://www.hfip.org/documents/HFIP AnnualReport FY2016.pdf]
- Ito, K., 2016: Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters, *SOLA*, **12**, 247-252, doi:10.2151/sola.2016-049

北川裕人,2005:全球・領域・台風モデル,平成17年度数値予報研修テキスト,38-43.

- Nishimura, M., and M. Yamaguchi, 2015: Selective ensemble mean technique for tropical cyclone track forecasts using multimodel ensembles. *Tropical Cyclone Research and Review*, **4**, 71-78, doi: 10.6057/2015TCRR02.03
- Sampson, C., and J.A. Knaff, 2014: Advances in Intensity Guidance, WMO 8th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-8), 26pp.[Available online at http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic2.7_ AdvancesinIntensityGuidance.pdf]
- Yamaguchi, M., J. Ishida, H. Sato, and M. Nakagawa, 2017: WGNE Intercomparison of Tropical Cyclone Forecasts by Operational NWP Models: A Quarter Century and Beyond. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 2337–2349,https://doi. org/10.1175/BAMS-D-16-0133.1

第2章 SHIPS¹

2-1 SHIPS とは

SHIPS とは、重線形回帰式を用いて、予測初期時刻からそれぞれの予測時刻までの熱帯低気圧の強度 変化量を予測するモデルのことである。以下の式で表される。

 $y = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \cdots$ (2.1) ここで、yはモデルの初期時刻(Forecast Time: FT = 0 h)から予測時刻までの強度変化量、 x_1, x_2, x_3 は説明変数、 α , β , γ はそれらの係数を表す。予測時刻は6時間先(FT = 6 h)から6時間おきに120時間(FT = 120 h, 5 日)先まであり、予測時刻の数(20 個)だけ重線形回帰式がある。説明変数はどの予測時刻の回帰式でも同じものを使う。予測時刻によっては寄与がほとんどない説明変数があるものの、同じ変数を使うことで予測結果の解釈が容易になり、またFT=6 hからFT=120 hまでの予測値の不規則変動を抑えられる。SHIPSの説明変数としては、現在強度や直近の強度変化傾向の他、数値モデルが計算した熱帯低気圧の予測進路に沿って平均した環境場条件、および予測初期時刻における静止気象衛星の輝度温度情報が使われる。

SHIPS は、DeMaria and Kaplan (1994) によって開発され、その後改良が重ねられ(DeMaria and Kaplan 1999; DeMaria *et al.* 2005)、精度改善が図られてきた。現在では、信頼できる熱帯低気圧強度ガイダンス モデル(表 1.1)の一つとして、世界の現業機関で広く使われるようになっている(Sampson and Knaff 2014)。

重線形回帰式に基づく強度予報モデルの利点は、全体の強度変化量に対する各説明変数の寄与が求 まることである。台風予報官は、強度予報の際に、その根拠も報告することになっている(予報根拠報)。 SHIPS は、各説明変数による強度変化への寄与を定量的に評価できるという点で、その根拠報作成に欠 かせない有力なツールとなる。

一方で、SHIPS は物理関係式に基づくモデルではないため、その予測精度には限界がある。SHIPS の 重線形回帰式では、統計的に最も起こりうる強度変化量を予測することになる。しかし、現実の熱帯低 気圧は、たとえ環境場条件が同じであっても、内部プロセスの違いにより、同じ強度変化をするとは限 らない(例えば、Hendricks *et al.* 2010)。また、後に実証する通り、SHIPS は、統計的に頻度が少ない 急発達の予測が極めて不得手である。

以降では、気象庁用に構築した SHIPS で使用されるデータ、SHIPS 係数の特徴、上陸時等における 予測値の補正、予測実験・精度検証の方法を述べる。その後、精度検証の結果を示し、SHIPS の良い点、 限界点を明らかにする。最後に全体をまとめ、今後の課題を述べる。

2-2 気象庁版 SHIPS の構築

気象研究所では、2015年以降、米国の SHIPS 開発者からの多大なる協力と計算コードの提供を得て、 気象庁全球モデル(GSM)に適用させた SHIPS の開発を行った。以降、これを「気象庁版 SHIPS」と 呼ぶ²。米国の SHIPS は、最大風速(Vmax)の変化量のみを予測するが、気象庁版 SHIPS ではそれに 加えて中心気圧(Pmin)の変化量も予測するよう、気象研究所でさらなる開発が加えられた。気象庁 版 SHIPS は北西太平洋海域における熱帯低気圧の強度予報を対象とする。

¹ 嶋田宇大、大和田浩美

² 気象庁では、本稿を執筆以降に、「気象庁版 SHIPS」を TIFS (Typhoon Intensity Forecast scheme based on SHIPS) と名付けた。

2-2-1 使用データ

表 2.1 に気象庁版 SHIPS に使用されるデータセットを示す。気象庁版 SHIPS の係数作成に使用する データ(以下、「トレーニングサンプル」という。)は、気象庁ベストトラックデータ(6時間間隔の 最大風速、中心気圧、中心位置)、JRA-55 大気再解析データ(Kobayashi et al. 2015)、赤外静止気象衛 星データ、COBE-SST(海面水温データ、Ishii et al. 2005)、北太平洋海洋データ同化システム(MOVE/ MRI.COM, Usui et al. 2006)による海洋表層再解析データから作成した海洋貯熱量(OHC、Wada 2015) データである。海面水温データは、JRA-55 の境界値として使用されたデータと同じで、このデータか ら経験式に基づいた最大到達可能強度(MPI)が算出される。OHC データは気象庁海洋気象情報室で 作成されたものである。トレーニングサンプルに含まれる熱帯低気圧は、中心が海上にある時に限定さ れる。係数作成期間は 2000 年から 2012 年までの 13 年間とした。

SHIPS の予測に使用するデータは、熱帯低気圧速報解析データ、一日4回のGSMの予測値、海面水 温としてGSMの境界値として使用されている全球日別海面水温解析データ(MGDSST、栗原ら2006)、 赤外静止気象衛星データ及びOHCデータである。精度検証のための予測実験は、2013年から2016年 の4年分のデータで行った。2013年から2015年までのGSMは、12UTC初期時刻のみ11日先まで計 算され、他の3回は84時間先までの計算である。2016年のGSMでは、他の初期時刻(00,06,18UTC) でも132時間先まで試験的に計算されたデータを使用した。従って、本報告の精度検証では、FT=90h 以降のサンプル数は大きく減る。

本報告の精度検証では、正解を気象庁ベストトラックの強度とする。ただし、気象庁ベストトラック には、熱帯低気圧が台風強度未満の時、Vmax 値がない。また、熱帯低気圧速報解析とベストトラック では温帯低気圧化や台風未満の熱帯低気圧に衰弱するタイミングが異なることがある。そのため本報 告では、Vmax の精度検証はベストトラック上で台風強度期間のみの予測サンプルを用いて行う。Pmin の検証は、台風の温帯低気圧化前後を含む衰弱時の精度評価をするために、ベストトラックに対応する 時刻の強度情報がある限り、全ての予測サンプルを使用する。従って、ベストトラックに含まれる温帯 低気圧化した擾乱も検証対象とする³。なお、SHIPS と他のガイダンスモデルの精度比較は、第6章を 参照していただきたい。

2-2-2 説明変数

気象庁版 SHIPS の説明変数は、全部で 26 個からなり(表 2.2)、米国の SHIPS ですでに長期間にわた り使用されている変数の他、重線形回帰式モデルにとって最適な説明変数を探索するステップワイズ法 で選択された新たな変数からなる。このうち後者には、新たに Pmin 用の SHIPS を開発するために、気 象庁版 SHIPS 独自に導入されたものが含まれる。一方、米国の SHIPS では使われているが、気象庁版 SHIPS には使われていない説明変数もいくつかある。鉛直シアーの向き及び台風の指向流高度がそれに

 係数作成データ
 予測データ

 熱帯低気圧情報
 気象庁ベストトラック
 熱帯低気圧速報解析

 大気環境場
 JRA55
 GSM 予測値

 海面水温
 COBE-SST
 MGDSST

 海洋貯熱量
 MOVE/MRI.COM
 MOVE/MRI.COM

表 2.1 SHIPS で使用されるデータセット

³ SHIPS の予報は、その擾乱が熱帯低気圧と解析され、GSM 予報値のトラッキングがされている時に限り行われる。

- 5 -

説明変数		対象
MSLP	初期時刻の Pmin	P, V
VMAX	初期時刻の Vmax	-
VMA2	VMAX の二乗	V
PER	前 12 時間の Pmin または Vmax の変化傾向	P, V
OSLP	初期時刻の Pmin と 970 hPa の差の絶対値	Р
PMPE	$(MSLP - 880) \times PER$	Р
VMPE	VMAX×PER	V
POT	最大到達可能強度 (MPI)と VMAX との差	P, V
POT2	POT の二乗	P, V
COHC	海洋貯熱量 (OHC)	Ρ, V
OHC2	COHC の二乗	P, V
T200	200 hPa 高度の気温(r=200–800 km)	P, V
T250	250 hPa 高度の気温 (r=200–800 km)	P, V
ZNAL	東西方向の移動速度	P, V
RHMD	700–500 hPa 相対湿度 (%) (r=200–800 km)	P, V
EPOS	地上空気塊を持ち上げた時の環境場との <i>θ</i> _e 差 (r=200-800 km) (地上-100 hPa 間の正値の平均)	P, V
SHDC	850–200 hPa 間の鉛直シアー (r=0–500 km)	Ρ, V
SHGC	1000–100 hPa 高度の一般化鉛直シアー(DeMaria 2010 参照)	P, V
SHSH	SHDC の二乗	Ρ, V
SHLT	SHDC×sin(latitude)	Ρ, V
SHVM	SHDC / VMAX	Ρ, V
VMSH	VMAX×SHDC	V
PMSH	$(MSLP - 880) \times SHDC$	Р
Z850	850 hPa 高度の絶対渦度 (r=0–1000 km)	Ρ, V
D200	200 hPa 高度の発散 (r=0–1000 km)	Ρ, V
TWAT	850 hPa 高度の接線風の時間変化傾向 (r=0–500 km)	Ρ, V
TADV	850–700 hPa の間の温度移流(r=0–500 km)	P, V
TGRD	850–700 hPa の間の温度勾配 (r=0–500 km)	P, V
PC30	中心から半径 50–200 km 以内の IR 輝度温度–30℃以下の割合	P, V
SDIR	中心から半径 0–200 km 以内の IR 輝度温度の標準偏差	P. V

表 2.2 SHIPS 説明変数リスト。Pmin 及び Vmax 用の説明変数として、P 及び V で記されている。

当たる。この理由は、変数それぞれに対して使うべき、北西太平洋における最適な係数に対する統計調 査ができていないためである。これは今後の課題である。

Pmin 用に新たに導入された説明変数は、「初期時刻の Pmin と 970 hPa の差の絶対値(OSLP)」、「(初期時刻の Pmin – 880)×前12時間の強度変化傾向(PMPE)」、「(初期時刻の Pmin – 880)×鉛直シアー(PMSH)」である。これらの変数は、SHIPSの Pmin 予測全体のパフォーマンス改善に寄与していたため、気象庁版 SHIPS に導入した。具体的には、OSLP は、台風の発達期において、FT = 0 h における中心気 圧が 960–975 hPa 付近の台風で最も気圧低下量が大きいという研究成果に基づく(Shimada *et al.* 2017)。 PMPE 及び PMSH は、Vmax における、「初期時刻の Vmax×前12時間の強度変化傾向(VMPE)」及び「初期時刻の Vmax×鉛直シアー(VMSH)」に相当する変数として導入した。

ステップワイズ法によって新たに選択された変数は、「海洋貯熱量(COHC)の二乗(OHC2)」、「鉛 直シアーの二乗(SHSH)」、「鉛直シアー/初期時刻のVmax(SHVM)」である。説明変数の二乗は、「初 期時刻のVmaxの二乗(VMA2)」や「最大到達可能強度と初期強度の差(POT)の二乗(POT2)」と同 様に、線形回帰式の SHIPS に非線形的な関係を持たせる効果を持つ。なお、これらの説明変数は、従 来の説明変数と強い相関関係を持つ。一般に、重線形回帰モデルでは多重共線性の問題があるため、高 い相関関係にある説明変数を共に用いることを避ける。気象庁版 SHIPS の開発に当たっては、この点 に注意しつつ、十分な数のサンプルを用意すること、算出された係数が相関の高い変数同士でおかしな 値にならないこと、両方の変数を使用した方が精度改善することを確認の上、26 個の説明変数を決定 した。

トレーニングサンプルを使用して作成した SHIPS の重線形回帰式は、どの程度強度変化量を説明で きているだろうか。それには、自由度調整済決定係数(R_f^2)を見るとよい。 R_f^2 は大きいほど、重回帰 式の当てはまりの良さを表す。 R_f^2 は、以下の式で計算される。

$$R_f^2 = 1 - \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n (y_k - f_k)^2 \\ \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n-1 \\ n-p-1 \end{pmatrix}$$
(2.2)

 y_k は k 番目の標本値、 f_k は SHIPS による k 番目の予測値、 \mathfrak{p} は標本平均値、nは標本数、pは説明変数の 数である。図 2.1 は、Pmin 及び Vmax の決定係数を示す。この決定係数の大きさは、全体的に米軍合同 台風警報センター (JTWC) の SHIPS のそれら (Schumacher *et al.* 2013 の図 4) より 1 割前後大きかった。 これは第 2-3-1 節に示すように、JTWC の SHIPS と気象庁版 SHIPS の予測誤差の大きさの違いが関係し ているかもしれない。

次に SHIPS 係数の特徴を紹介する。SHIPS の係数計算に当たっては、最初に SHIPS の説明変数の値 から各サンプル平均値を引き、それの標準偏差で割ることで規格化する。これにより、SHIPS の係数の 大小が説明変数の相対的な寄与として表現される。図 2.2a は Pmin の係数を示す。MSLP はサンプル平 均値 (972 hPa) よりも大きい場合、発達に寄与する変数であることがわかる。「前 12 時間の強度変化 傾向 (PER)」は FT = 36 h まではサンプル平均値よりも小さい場合(従って Pmin が大きく低下してい る時)に発達に働くが、それ以降はわずかに衰弱に寄与する⁴。OSLP は予測期間前半を中心に、サン プル平均値よりも小さい時(FT = 0 h の Pmin が 990–950 hPa の時)、発達に寄与する。POT 及び COHC の係数については、それぞれの二乗項の係数と逆符号であることが重要である。これらの変数は、単 独項と二乗項の寄与が互いにある程度相殺されることで、変数の値に応じて非線形的な寄与をする。 POT については、それがサンプル平均よりある程度大きい時は発達に寄与するが、非常に大きい時に は POT2 の寄与が上回り、全体として POT は衰弱に寄与する。COHC も同様だが、COHC は非常に大 きい時でも OHC2 の寄与が上回ることはなく、基本的に発達に寄与する。こうして、POT 及び COHC は、 ある程度大きければ発達に効くが、大きければ大きいほど発達に寄与するわけではない。「地上空気塊 を持ち上げた時の環境場との相当温位(θ_e) 差 (EPOS)」は、対流不安定の程度を表す変数である。サ



⁴ このように、SHIPS は変数間で相関を持つ変数を含む設計になっている。従って、POT や COHC のような変数 の寄与については、相関関係にある単独項と二乗項の寄与の合計で評価するべきである。

ンプル平均より大きい場合、発達に寄与する。つまり、対流不安定であるほど、発達に寄与する。「鉛 直シアー(SHDC)」、「一般化鉛直シアー(SHGC)」、SHSH、「鉛直シアー×緯度(SHLT)」、SHVM及 びPMSHは鉛直シアーに関連する説明変数である。これもSHDCとSHSHの係数の符号が逆になって いるなど、鉛直シアーの寄与が非線形的に働くようになっている。ここでは直感で理解できる範囲で、 それぞれの係数の寄与を述べる。SHDC及びSHGCは基本的にサンプル平均より大きければ衰弱に効く。 ただし、SHSHが、鉛直シアーが大きすぎても衰弱量が大きくならないよう抑える役割を果たしている。 SHLTは、熱帯低気圧が鉛直シアーのある中緯度帯に北上し、そこで温帯低気圧化して再発達する効果 を持つ説明変数である。SHVM及びPMSHは、係数の物理的な解釈が困難であるが、予測時刻によっ て発達にも衰弱にも寄与する特徴を持つ。「数値モデル(GSM)における擾乱の850 hPa接線風速の時 間変化傾向(TWAT)」は、それがサンプル平均よりも大きい時に発達に寄与する。その他の変数の寄 与は相対的に小さい。「中層湿度(RHMD)」の寄与が小さいのは意外であるが、米国のSHIPSでも同 様である(Schumacher *et al.* 2013)。

Vmaxの係数(図 2.2b)は、Pmin と似たような傾向だが、いくつかの変数で異なる特徴を持つ。「初期時刻のPmin (MSLP)」はサンプル平均(~972 hPa)より大きい時、つまり中心気圧が大きい時、衰弱に寄与する。これは、通常は「初期時刻のVmaxの二乗(VMA2)」が小さい時に相当する。VMA2はサンプル平均より小さい時に発達に寄与する変数であるため、MSLPは発達初期段階でVmaxの増加量が相対的に小さくなるように寄与すると考えられる。シアーに関係する項の係数については、SHSH、SHVM、及びVMSHでPminのそれらと異なった特徴を持つ。



図 2.2 SHIPS の係数。(a)Pmin 用。(b)Vmax 用。横軸の各ボックス内に FT=6h から FT=120h までの各説 明変数の回帰係数が棒グラフで示されている。ただし、Pmin の係数は Vmax と比較できるよう、係数が 逆符号になっている。例えば、MSLP の係数が正値の場合、その変数がサンプル平均値より大きい時、発 達に寄与することを意味する。

2.2.3 予測値の補正

SHIPS の予測値は、熱帯低気圧が上陸した場合や非現実的な値を予測した場合に補正される。式(2.1)で算出される SHIPS の強度変化量は、熱帯低気圧が海上にあるか陸上にあるかに関係なく計算 される。その際、陸域には外挿した海面水温や OHC が与えられる。熱帯低気圧が海上にある間は、 SHIPS の予測量がそのまま出力となる。熱帯低気圧の中心が陸地から半径 110 km 以内に接近した場合、 または上陸した場合には、以下の式と条件を用いて減衰補正を行う。

まず Vmax については、得られた FT = 6 h から 120 h までの Vmax 予測値を用いて、次のように補正 を行う(Kaplan and DeMaria 1995, 2001; DeMaria *et al.* 2006)。

$d(Vmax)/dt = -\mu(Vmax-Vb)$ (2.3)

μ は減衰率、Vb は気候学的な背景風速を表す。減衰率は中心から半径 110 km 以内の海陸比に応じて変わり、陸の割合が大きくなるにつれて減衰率が大きくなる。上陸した熱帯低気圧はこの減衰率に従って 背景風速に次第に近づく。現在の気象庁版 SHIPS では、北大西洋域の上陸熱帯低気圧から統計的に算 出された Vmax の減衰率と背景風速を使用している。

一方 Pmin に対しては、先に「1034 マイナス Pmin 予測値」を計算し、その値を Vmax に相当するものとして式 (2.3) を使い減衰させ、最後に「1034 マイナス減衰した値」をして元に戻す。定数 1034 は、1000 hPa の Pmin の熱帯低気圧が 34 kt の Vmax に相当するように設定されている。これにより Vmax とほぼ同じスケールの変数になるため、Vmax と同じ減衰率を用いる。北西太平洋用の減衰率を開発することが今後の課題として残る。

なお、SHIPS は強度変化量を算出するモデルであるため、場合によっては Pmin が 1020 hPa や Vmax が負値になるなど、非現実的な値をとることがまれにある。このような場合に対して、適切な補正をす る必要がある。特に温低化している台風は、スケールが次第に大きくなり、海水温が低くても発達する 場合がある。また、中国大陸に上陸するような台風は、衰弱しても中心気圧は 990 hPa 台のままである ことがよくある。そこで、Pmin については、減衰率によって補正した後の強度予測値が、熱帯低気圧 周辺 200 - 800 km 以内の平均気圧 (Penv) に比べて次の上限値より大きい場合には、さらに補正をする。 Vmax > 40kt なら、Pmin の上限値を"Penv-10hPa"とする⁵。35kt < Vmax <= 40kt なら、Pmin の上限値 を"Penv-5hPa"とする。Vmax <=35kt なら、Pmin の上限値を"Penv-3hPa"とする。Vmax に対し全て 30 kt に補正している。これは気象庁でリアルタイムに解析される台風未 満の熱帯低気圧の強度は、全て 30 kt と解析されるためである。

2-3 精度検証

2-3-1 統計検証

初めに、気象庁版 SHIPS 固有の精度を評価するため、GSM の予測進路が海上にある時の事例を対象にした、気象庁版 SHIPS の Pmin 及び Vmax 予測の平均絶対誤差(MAE)及びバイアスを示す(図 2.3a)。これらの事例は、上陸補正も周辺気圧場に合わせた補正も行っていない。熱帯低気圧の中心点が陸地から半径 100 km 未満に接近した事例も含んでいない。SHIPS の MAE は、Pmin、Vmax ともに予測期間前半のうちに大きく増加し、予測期間後半はほとんど変わらなくなる。FT = 84 h と 90 h の間に不連続があるのは、90 h 予測以降のサンプルに 2016 年事例の割合が多くなるためである。バイアスについては、Pmin も Vmax も予測期間後半にやや過発達の傾向を示す。

図 2.3b は、上陸補正や環境場の気圧補正を行った事例のみを対象とした MAE 及びバイアスを示す。

⁵ ここで使用する Vmax も減衰補正後の値である

サンプル数が少ないことに注意が必要である。図 2.3a に比べて MAE は小さく、バイアスも3(hPa, kt) 未満となっている。全体として一連の補正は、SHIPS 固有の精度を悪化させない範囲で、新たなバイア スを生じさせることなく行われていることが確認できる。

図 2.3c は、上陸事例等も含む全事例を対象とした、気象庁版 SHIPS の MAE 及びバイアスを示す。 これが気象庁の現業で実際に使われる SHIPS の精度である。以降の全ての精度評価は、図 2.3c と同じ 事例で行われる。Vmax の MAE は、FT = 120 h で 13 kt 程度である。JTWC の報告によると、北西太 平洋を対象とした SHIPS や LGEM の MAE は FT = 120 h で 18 kt 程度だった(Schumacher *et al.* 2013)。 JTWC は 1 分値の Vmax を扱っており、JTWC のベストトラックの Vmax は成熟期にかけて急激に増大 する傾向がある(例えば、Nakazawa and Hoshino 2009)ため、これが JTWC の SHIPS 誤差を大きくし ている要因と考えられる。

SHIPS の精度は、台風の発達・定常・衰弱事例で大きく異なる。図 2.4 左は、x 軸に予測時間、y 軸 に実際の強度変化量をとり、カラーで MAE を示した図である。サンプル数をカラーで図 2.4 右に示す。 Pmin については、FT = 60 h までの特性として、実際の強度変化量が小さいほど誤差が小さいこと、急 発達・急衰弱のような強度変化量が大きい事例の誤差が非常に大きい(30 hPa 以上に達する)ことがわ かる(図 2.4a)。ただし、そのような事例数は全体からすると非常に少ない。FT = 60 h より先になると、 大きな衰弱事例の誤差が非常に小さくなる。上陸補正がうまく働き、上陸に伴う大きな衰弱が予測でき ているためである。一方、強度変化量が小さい事例で誤差が大きくなる特性が現れる。Vmax 予測につ



⁽c) 上陸事例を含む全事例。棒グラフはそれぞれのサンプル数(右縦軸)を示す。

いても、Pminとほぼ同様な特性がみられる(図2.4b)。

以上の予測誤差の傾向を、発達(Intensify)・定常(Steady)・衰弱事例(Weaken)の三つに分けたものを 図 2.5 に示す。発達・定常・衰弱事例の分類は、FT=0hから各予測時刻までのベストトラック上の強



図 2.4 予測時間 (x 軸) と実際の強度変化量 (y 軸) に対する MAE (左) とサンプル数 (右)。(a)Pmin 予測。 (b)Vmax 予測。



図 2.5 強度変化事例別の MAE。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。棒グラフはそれぞれのサンプル数(右縦軸) を示す。

度変化量で定義し、Pmin (Vmax)の変化量が -10 hPa より小さければ (15 kt 以上ならば)発達事例、 10 hPa より大きければ (-15kt 以下ならば)衰弱事例、その他を定常事例と呼ぶ。図 2.5 によれば、発 達事例では、Pmin、Vmax ともに予測前半を中心に MAE が定常事例や衰弱事例よりも大きい。一方、 定常事例では、Pmin は FT = 30 h まで、Vmax は FT = 12–90 h で最も精度が良いが、FT = 120 h には両 者とも最も MAE が大きい。衰弱事例では、Pmin で MAE がほぼ一定で、FT = 36 h 以降は最も MAE が 小さい一方、Vmax では定常事例の MAE と似た変化をし、予測後半になるにつれて MAE が増加する 傾向にある。

強度変化事例別でバイアスをみると(図 2.6)、全体として、発達事例は実際より弱めに、定常・衰弱 事例は実際より強めに予測される傾向にある。発達事例は、Pmin、Vmaxともに予測後半に、MAEは 小さくはないものの(図 2.5)、バイアスは小さい傾向にあることは一つの特徴である。

2-3-2 72 時間予測の精度評価

ここでは気象庁版 SHIPS の予測の代表例として、初期強度別に Pmin の 3 日先(FT = 72 h)予測の 精度をもう少し詳細に紹介する。図 2.7 は初期強度を横軸にした、FT = 72 h 予測の MAE を示す。初期 Pmin が 980 hPa 以上の事例で、それ未満の強度の事例に比べて誤差が大きい。Vmax についても、初期 Vmax が小さい事例ほど誤差が大きい傾向がある。この傾向は、しばしば台風未満の熱帯低気圧を含む 初期強度が弱い定常事例において過発達を予測する事例が多い(図 2.6)ことと関係している。図 2.8 は実際の強度変化量を横軸にした、FT = 72 h 予測の MAE を示す。Pmin は、サンプル数は少ないもの の、3 日先までに 60 hPa 以上低下する事例で MAE がかなり大きい。Vmax も、55 kt 以上増加する事例 で MAE がかなり大きい。つまり、SHIPS が急発達の予測をできていないことを示す。一方、衰弱事例 については、急発達事例ほど MAE は大きくない。図 2.8 の衰弱事例(図 2.8a の横軸の正値、図 2.8bの 横軸の負値)にみられる MAE の極大は、進路予測誤差によって上陸のタイミングが異なったため大き くなる場合が見られた。例えば、2016 年台風第 14 号(Meranti)の事例では、GSM はバシー海峡を抜 ける進路予測だったのに対し、実際には台湾に上陸したため大きな誤差が生じた。







図 2.8 72 時間強度予測の実際の強度変化量別の MAE。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。

図2.9は72時間予測誤差の頻度分布を示す。全体としては、ほぼ左右対称の山型だが、強度変化別では、 誤差に偏りがある。発達事例のPmin (Vmax)は、正(負)の側に偏っており、発達量を十分に予測で きていない。特にVmaxで頻度分布の偏りが目立つ。逆に、定常及び衰弱事例のPmin (Vmax)は、負(正) の側に偏っている。特に定常事例でPmin が低めに、定常・衰弱事例でVmax がやや強めに予測される 傾向が目立つ。

2-3-3 事例検証

ここでは、発達事例を対象に、SHIPS の特性をいくつか紹介する。一つ目は、典型的な発達をした 2015 年台風第 16 号である(図 2.10)。2015 年 8 月 15 日 12UTC 初期値の予測では、気象庁版 SHIPS は、 ほぼベストトラックと同じような発達予測をした。ただし、発達率は実際よりやや小さく、最大強度 は 934 hPa、94 kt で、実際の生涯最大強度(925 hPa、100 kt)には達しなかった。それでも、SHIPS は GSM よりずっと良い強度予測をした。この予測結果から、気象庁版 SHIPS の利用は、気象庁の台風強 度予報の精度を大きく改善させることが期待される。

しかしながら、同じ発達台風でも、ある予測時刻に急に大きく発達する事例では、SHIPSの予測精度 は良くない。その例が、図 2.11 に示す 2 事例である。これらの事例では、FT = 24 h 及び FT = 12 h に中 心気圧が大きく下がるべきだが、SHIPS は滑らかな発達を予測するだけで、ベストトラックの生涯最大 強度には達しない。これらの事例では、GSM も発達の程度、タイミングともにうまく予測できてない。 このような事例が、発達事例の MAE 及びバイアスを大きくしている。

もう一つ、逆に SHIPS が熱帯低気圧を過発達させる事例を紹介する(図 2.12)。この特徴は、モンス ーンジャイア(Lander 1994)またはモンスーントラフ(Lander 1996)と呼ばれる擾乱を起源とする熱



図 2.9 72 時間強度予測のエラー頻度分布。(a)Pmin 予測の全事例。(b)Pmin 予測の強度変化事例別。(c) Vmax 予測の全事例。(d)Vmax 予測の強度変化事例別。



図 2.10 2015 年台風第 16 号における、2015 年 8 月 15 日 12UTC 初期値の強度予測事例。(a)Pmin 予測。(b) Vmax 予測。



図 2.11 (a)2013 年台風第 19 号における、2013 年 9 月 18 日 06UTC 初期値の強度予測事例 (Pmin)。 (b) 2015 年台風第 6 号における、2015 年 5 月 9 日 06UTC 初期値の強度予測事例 (Pmin)。

帯低気圧で典型的に見られる。2014年台風第12号がその代表的な事例である。大きなスケールを持つ モンスーンジャイアの中心領域付近で17 m s⁻¹以上の風速が観測され、中心領域付近の渦が台風として 識別されるものだが、降水域がまばらで組織化されていない(図2.12b)。このような事例は、頻度は多 くはないものの、時々起きている。この種の台風は、海面水温などの環境場条件が熱帯低気圧の発達に 好都合であっても、大きく発達することはない。7月30日12UTC初期値の予測事例では、実際にはこ の後ベストトラックでは Pmin が10 hPa しか深まらなかったが、SHIPS は FT = 42 h までに 20 hPa 以上 深まると予測した。Vmax も過発達の予測だった。SHIPS はほぼ環境場の説明変数で強度変化量が決ま るため、この時期海面水温が高く、鉛直シアーが弱いと、SHIPS はこの種の台風でも発達を予測してし まう。この種の台風については、ほぼ環境場変数に依存した SHIPS では予測精度に限界がある。





図 2.12 2014 年台風第 12 号における、2014 年 7 月 30 日 12UTC 初期値の強度予測事例。(a)2014 年 7 月 31 日 00UTC の地上天気図。(b) 2014 年 7 月 30 日 12UTC の MTSAT 赤外画像。(c)Pmin 予測。(d)Vmax 予測。

2-4 まとめと課題

気象庁版 SHIPS は、GSM が予測する熱帯低気圧の進路に沿った環境場条件を使い、5 日先までの Pmin 及び Vmax を予測する重線形回帰モデルである。気象庁版 SHIPS は、米国の SHIPS 開発者から主 要な計算コードを提供いただくとともに、気象研究所独自に Pmin を予測するように改良を重ねた。気 象庁版 SHIPS の特徴を以下にまとめる。

- ・気象庁版 SHIPS は、予測前半を中心に最もサンプルの多い事例(定常事例)で誤差が相対的に小さく、 また GSM が発達を予測できていない場合でも発達傾向を捉えており、強度予報に使えるガイダン スモデルである。
- ・気象庁版 SHIPS の全体の精度は、予測後半にかけて、海上にある熱帯低気圧は過発達傾向、上陸 事例は衰弱させすぎる傾向がある。
- ・全体の精度で見るとバイアスは小さいが、発達・定常・衰弱事例別でみると、予測特性が大きく異 なることに注意が必要である。またその特性は予測時間にも依存する。
- 一般的に、発達事例の精度は、全ての予測時間を通じて定量的に良くない。特に急発達の予測はできない。
- ・定常事例については、Pmin、Vmax 予測ともに、予測期間前半は精度が良い(誤差が小さい)が、 後半にかけて過発達させる傾向がある。
- ・衰弱事例については、Pmin 予測は若干負のバイアス傾向があるが、予測後半を中心に発達・定常 事例に比べて良い精度である。Vmax 予測も若干正のバイアス傾向がある。

実際に SHIPS を利用して強度予報を行う際は、これらの特徴をよくつかんでおく必要がある。一方で、 これまで述べたいくつかの SHIPS の限界は、さらなる開発により軽減できる可能性があると著者らは 考えている。具体事例で示した通り、環境場変数の利用のみでは、過発達させる場合がある (図 2.12)。 しかし、最近の熱帯低気圧強度に関する研究によると、熱帯低気圧の発達は、環境場だけでは決まら ず、熱帯低気圧の内部プロセスが関係していることがわかってきた (Hendricks *et al.* 2010; Miyamoto and Takemi 2013, 2015)。内部プロセスの違いは、内部構造の違いに現れる。例え環境場が同じでも、内部 で起きているプロセスが異なれば、発達率は違ってくるはずである。現在、このような最新の研究成果 を強度予測に生かすため、GSMaP (JAXA 2018) という全球衛星降水データから熱帯低気圧の内部構造 情報をとり出し、SHIPS に追加することで SHIPS の精度向上を図る取り組みを行っている (Shimada *et al.* 2018)。

また熱帯低気圧の内部構造情報の他にも、発達率に寄与する重要な要素として、熱帯低気圧が急発 達する時には、その直前に OHC が大きな海域を通過していることが挙げられる(例えば、Lin et al. 2005)。現在の SHIPS では、OHC を使用しているものの、進路に沿った平均値を使っているため、進 路に沿った海洋場の変化情報を必ずしも的確に取り込めていない。特に急発達は一度オンセットすると、 その後の強度が大きく変わるため、この課題に今後取り組む必要がある。

参考文献

- DeMaria, M., 2010: Tropical cyclone intensity change predictability estimates using a statistical-dynamical model. Extended Abstract, 29th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, May 10–14, 2010, Tucson, AZ. [Available online at http://rammb.cira.colostate.edu/research/tropical_cyclones/ships/docs/demaria_hurr10_predictability.pdf]
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **9**, 209–220, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0209:ASHIPS>2.0.CO;2
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **14**, 326–337, doi:10.1175/1520-0434(1999)014<0326:AUSHIP>2.0.CO;2

- DeMaria, M., J.A. Knaff, and J. Kaplan, 2006: On the decay of tropical cyclone winds crossing narrow landmasses. J. Appl. Meteor., 45, 491–499, doi:10.1175/JAM2351.1
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, 20, 531–543, doi:10.1175/WAF862.1
- Hendricks, E. A., M. S. Peng, B. Fu, and T. Li, 2010: Quantifying environmental control on tropical cyclone intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3243–3271.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865–879, doi:10.1002/joc.1169
- Japan Aerospace Exploration Agency, 2018: JAXA global rainfall watch. [http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index.htm]
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 1995: A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall. J. Appl. Meteor., 34, 2499–2512, doi:10.1175/1520-0450(1995)034<2499:ASEMFP>2.0.CO;2
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2001: On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area. J. Appl. Meteor., 40, 280–286, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0280:OTDOTC>2.0.CO;2
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Japan., 93, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001
- Kurihara, Y., T. Sakurai, and T. Kuragano, 2006: Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations (in Japanese). *Wea. Bull.*, **73**, S1–S18
- Lander, M. A., 1994: Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the western North Pacific during August 1991. *Wea. Forecasting*, **9**, 640–654, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0640:DOAMGA>2.0.CO;2
- Lander, M. A., 1996: Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **11**, 170–186, doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0170:STCTTA>2.0.CO;2
- Lin, I.-I., C.-C. Wu, K. A. Emanuel, I.-H. Lee, C.-R. Wu, and I.-F. Pun, 2005: The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2635–2649, doi:https://doi.org/10.1175/MWR3005.1
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the axisymmetric spontaneous intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112–129, doi:10.1175/JAS-D-11-0285.1
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2015: A Triggering Mechanism for Rapid Intensification of Tropical Cyclones. J. Atmos. Sci., 72, 2666–2681, doi:10.1175/JAS-D-14-0193.1
- Nakazawa, T., and S. Hoshino, 2009: Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **5**, 33–36, doi:10.2151/sola.2009-009
- Sampson, C. R., and J. A. Knaff, 2014: Advances in intensity guidance. 8th International Workshop on Tropical Cyclones, Jeju, Republic of Korea. [Available online at https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic2.7_ AdvancesinIntensityGuidance.pdf]
- Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical cyclone intensity change and axisymmetricity deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1003–1017, doi: 10.1175/MWR-D-16-0244.1
- Shimada, U., H. Owada, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sawada, K. Aonashi, and M. DeMaria, 2018: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme using tropical cyclone rainfall and structural features. *Weather and Forecasting*, 33, 1587–1603, doi:10.1175/WAF-D-18-0021.1
- Schumacher, A., M. DeMaria, and J. Knaff, 2013: Summary of the new statistical-dynamical intensity forecast models for the Indian Ocean and Southern Hemisphere and resulting performance. JTWC Project Final Report.[Available online at http://rammb.cira.colostate.edu/research/tropical_cyclones/ships/docs/JTWC_project_final_report_oct_2013.docx]

Wada, A., 2015: Utilization of Tropical Cyclone Heat Potential for Improving Tropical Cyclone Intensity Forecasts. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, 17.

第3章 LGEM¹

3-1 気象庁における LGEM 開発の目的

気象庁では台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームの枠組みのもと、統計力学モデル SHIPS を用いた5日先までの台風強度予測の現業運用を目指して開発が進められている。2章で詳しく述べら れている通り、SHIPS は重線形回帰に基づいて台風強度を予測する統計力学モデルであり、数値予報モ デルで予測される大気環境場や、海面水温、気象衛星の観測データ等を説明変数として利用している。 このため、これまで気象庁で台風強度予測ガイダンスとして利用されてきた SHIFOR 等の単純な統計 モデルと比べて、より現実に近い大気状態を反映した強度予測が可能となっている。

これに加え、気象研究所では統計力学モデルの一つである LGEM (Logistic Growth Equation Model, DeMaria 2009)を北西太平洋海域における台風強度予報向けに開発した。SHIPS のような重線形回帰に 基づいた統計力学モデルでは発達率の大きな台風の予測が難しい場合があるのに対し、LGEM の予測 式はロジスティック方程式となっており、その解は非線形であるため、急発達のような発達率の大きな 台風の強度予測により適していると考えられる。米国で開発されたオリジナルの LGEM は最大風速の みが予測対象であるが、台風中心気圧も予測可能な LGEM を新たに開発し、台風強度予測精度のさら なる向上を目指す。

3-2 LGEM の予測式

この節では、米国で開発された LGEM の予測式について述べる。LGEM では台風中心が海上にある 場合と陸上にある場合で別の予測式を使っている。台風中心が海上にある場合、式 (3.1) により最大風 速の予測を行っている。

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{V}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \kappa_V \mathbf{V} - \beta_V \mathbf{V} \left(\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{\mathrm{mpi}}}\right)^{\mathbf{n}_{\mathrm{V}}} \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

ここで、Vは予測対象である台風の最大風速である。V_{mpi}は最大風速の Maximum Potential Intensity (MPI) で、式 (3.2) で示す海面水温 (Sea Surface Temperature, SST) で決まる経験式を用いて算出している。

 $MPI = A + B \times \exp\{C(SST - SST0)\} \cdot \cdot \cdot \cdot (3.2)$

ここで、A、B、C、SSTOは定数であり、SSTは各予測時間における台風中心位置の海面水温である。北 西太平洋域ではVmpiの経験式として次の式 (3.3)を用いている。

 $V_{mpi} = 19.7 + 88.0 \times exp{0.1909 (SST - 30)} ・・・(3.3)$ ここで計算された V_{mpi} の単位は m/s であるため、1.944 をかけてノットに変換したうえで予測計算に利用している。

SHIPS では重線形回帰により直接 V を予測するが、LGEM では式 (3.1)の第1項の係数 κ_v を重線形回 帰で算出し、算出した係数を用いて V の予測計算を実行する。使用する説明変数としては、SHIPS と 同様に数値予報モデルで表現される風速の鉛直シアー等の台風周辺の環境場や衛星観測データ等を利用 している。 n_v 、 β_v は予報時刻によらない正の定数としている。式 (3.1)の右辺第1項から κ_v の値が大き いほど台風が発達する式となっている。また、右辺の第2項は V が Vmpiに近いほどより大きくなるので、 V が Vmpiに近いほど発達を抑える式となっている。

台風中心が陸上にある時は次の式(3.4)を用いて予測を行っている。

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\alpha_{\mathrm{V}}(\mathrm{V} - \mathrm{V}_{\mathrm{b}}) \cdot \cdot \cdot (3.4)$$

この式は、最大風速 V を減衰定数 αv で背景風 Vb まで弱めることを表している。αv 及び Vb は緯度ごとに

¹ 入口武史

統計的に決められた値が用いられており、現時点で用いている値は北緯 36 度で α_v =0.095、 V_b =36 kt、 北緯 40 度で α_v =0.183、 V_b =40 kt であり、その間の緯度の値については内挿で計算している。

式(3.1)は非線形微分方程式となっており解析的に解けないため、数値積分で強度予測を行っている。 予測計算のタイムステップは1時間としており、タイムステップごとに台風中心位置の海陸判定を行っ て、式(3.1)または式(3.4)のどちらを使うかを決定している。なお、LGEMでは台風中心位置の予測は 行っておらず、数値予報モデルで予測された台風トラッキングデータを使用している。

3-3 中心気圧を予測する LGEM の開発

台風中心気圧は、気象庁が発表する特別警報の基準の一つとして用いられるなど、防災上、重要な 要素の一つである。現業での利用を考慮し、最大風速の予測式(3.1)と(3.4)を台風中心気圧に拡張する ことにより、中心気圧を予測する LGEM を新たに開発した。式(3.1)と同様に、海上における中心気圧 の予測式を式(3.5)で与える。

$$\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dt}} = \kappa_P \mathrm{P} - \beta_{\mathrm{P}} \mathrm{P} \left(\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{P}_{\mathrm{mpi}}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \cdot \cdot \cdot (3.5)$$

ここで、Pは台風中心気圧、 P_{mpi} は台風中心気圧の MPI であり、 κ_P は重線形回帰で導出する。 n_p 、 β_P は正の定数であるが、その最適値は n_V 、 β_V と同じではなく、Vの予測とPの予測で異なる。なお中心気圧の予測では、PをP'=1013 - Pと変換した上で予測計算を行っている。これは n_p 、 β_P が適切であれば、LGEMの予測値は0から MPIの間に収まり、極端な予測値の算出をある程度抑えることが可能となるためである。

式 (3.5) を用いて中心気圧の予測を行うには、Pmpiが必要となるが、Pmpiについても式 (3.2)の形の経 験式で与えることとした。Pmpiの経験式の導出には、2000 年から 2012 年までの気象庁ベストトラック の台風中心気圧と中心位置、及びそれに対応する時刻、位置の COBE-SST の格子点値を利用した。

図 3.1 は期間中の海面水温と台風中心気圧の散布図を示しており、横軸は海面水温、縦軸は台風中心 気圧である。DeMaria et al. (1994) にならってSST0を 30℃とした上で、各海面水温に対する最小値付近 の気圧データのみを使用して、最小二乗法により定数A、B、Cを決定した。これによって導出した中心 気圧の MPI の経験式を式 (3.6) に示す。

 $P_{mpi} = 999.3 - 134.5 \times \exp\{0.114(SST - 30)\} \cdot \cdot \cdot (3.6)$

但し、SSTが 15℃未満の場合はPmpiを 980.0hPa、30℃以上の場合は 864.8hPa で一定値とした。



図 3.1 台風の中心位置における SST と気圧の散布図。実線は台風中心気圧の MPI の経験式。

3-4 回帰係数の作成方法

前述の通り今回開発した LGEM では、式 (3.1) 及び式 (3.5) 中の κ_V 及び κ_P を重線形回帰で算出して予測計算を実行するが、重回帰計算で利用する回帰係数を計算するためには κ_V 及び κ_P の値が必要となる。例えば最大風速予測式中の κ_V の値は式 (3.1) を変形して、以下の式から計算する。

$$\kappa_{\rm V} = \left(\frac{1}{\rm v}\right) \frac{\rm dV}{\rm dt} + \beta_{\rm V} \left(\frac{\rm v}{\rm v_{\rm mpi}}\right)^{n_{\rm v}} \quad \cdot \quad \cdot \quad (3.7)$$

式 (3.7) から、 κ_V を算出するためには最大風速の時間変化率 $\frac{dV}{dt}$ の実況値が必要となるが、これについては DeMaria *et al.* (2009) にならって 24 時間の最大風速の時間変化率を用いた。ここでは、最大風速の実況値として気象庁ベストトラックを使用し、台風中心が 24 時間海上にある場合のみ κ_V を計算して、回帰係数作成に利用した。 V_{mpi} は式 (3.3) により計算する。 n_V 、 β_V については、最適な値が台風ごとに異なるため、それぞれ少しずつ値を変えて計算した κ_V を用いて回帰係数を算出し、それらを利用した強度予測の統計検証結果を比較して、パフォーマンスが最もよくなる値を採用した。なお、回帰係数は熱帯低気圧や台風が存在するそれぞれの日時を初期時刻として、6 時間ごと 120 時間予報まで、予報時刻に対応する日時のトレーニングサンプルを用いて計算している。前述したとおり、LGEM の数値計算はタイムステップを1時間としているが、1 時間毎の回帰係数は数値積分実行時に6時間間隔で作成した回帰係数から線形内挿により算出している。

さらに、予報初期時刻において熱帯低気圧(Tropical Depression:TD)である場合と台風(Tropical Storm:TS、Severe Tropical Storm:STS、Typhoon:TY)である場合に対して、それぞれ別のトレーニング サンプルを用いて回帰係数を作成し使用するようにした。これは環境場が同じであっても、熱帯低気圧 と台風では内部構造の違い等によって発達率が異なるので、これらを分離したほうがより適切な強度予 測が可能と考えられるためである。TS、STS、TY についてもそれぞれのカテゴリー毎に回帰係数を作 成して利用することで予測精度が向上する可能性もあるが、今回はこれらについては分割せずに回帰係 数を計算した。台風用の回帰係数計算には気象庁のベストトラックにTS、STS、TY として記録されて いる日時のトレーニングサンプルを使用した。一方、TD 用の回帰係数計算には、TD として記録されて ている日時のトレーニングサンプルに加え、TS 以上に発達してから5日後までのトレーニングサンプ ルを使用した。なお、ベストトラックには台風が温帯低気圧に変化した後のデータも記録されているが、 気象庁では温帯低気圧に変化した後の進路予測や強度予測は台風予報情報として発表していないため、 温帯低気圧のデータは回帰係数作成には利用していない。

今回開発した LGEM の予測実行に採用した説明変数の一覧を表 3.1 に、*n*、βの値を表 3.2 に示す。但 し、LGEM の予測計算において、回帰係数及び*n*、βの設定は予報初期時刻における強度にのみ依存す ることとし、予測の途中で TD から台風に発達した場合、及び、台風から TD に衰弱した場合、予報の 途中で*n、*βや回帰係数を変更するといったことは行わない。表 3.2 から TD 用と台風用で*n、*βの値が大 きく異なっており、時間的な強度変化特性の違いが大きいことがわかる。

ここで、TD の強度予測に台風用の回帰係数、n、βを使用した場合と、TD 用の回帰係数、n、βを使 用した場合の違いの例を図 3.2 に示す。赤線は LGEM の最大風速予測、青線は当時の気象庁全球モデ ル (GSM、水平解像度約 20km) による最大風速予測である。濃い線は台風に対する強度予測、薄い線は 台風に発達する前の TD に対する強度予測を示している。黒線は気象庁ベストトラックである。図 3.2 左は TD の予測に台風用の回帰係数を使用した場合の図である。図 3.2 左から、台風用の回帰係数、n、 βを使用した場合、LGEM による TD の強度予測はベストトラックに対して過発達となっている。一方、 TD 用の回帰係数、n、βを使用した場合を図 3.2 右に示す。この事例では台風用の回帰係数、n、βを使 う場合に比べて過発達の傾向が改善されている。

説明変数	説明	対象
MSLP	初期時刻の Pmin	P, V
VMAX	初期時刻の Vmax	P,V
PER	前 12 時間の VMAX の変化傾向	V
1 110	前 12 時間の MSLP の変化傾向	Р
РОТ	VmpiとVMAX の差	V
	Pmpi と MSLP の差	Р
COHC	海洋貯熱量(OHC)	P, V
T200	200-hPa 高度の気温(r=200–800 km)	Ρ, V
T250	250-hPa 高度の気温 (r=200–800 km)	Ρ, V
EDOC	地上空気塊を持ち上げた時の環境場との $ heta_{\!\!e}$ 差	ъv
EPOS	(地上-100hPa平均)	P, V
SHDC	850–200-hPa 間の鉛直シアー (r=0–1000 km)	P, V
SHGC	1000–100hPa 高度の一般化鉛直シアー(DeMaria 2010 参照)	P, V
SHLT	SHDC×sin(緯度)	P, V
Z850	850-hPa 高度の絶対渦度 (r=0–1000 km)	P, V
D200	200 ⁻ hPa 高度の発散 (r=0–1000 km)	P, V
TWAT	850 hPa 高度の接線風の時間変化傾向 (r=0–500 km)	P, V
TADV	850–700 hPa の間の温度移流 (r=0–500 km)	P, V
TGRD	850–700 hPa の間の温度勾配 (r=0–500 km)	P, V
PC30	中心から半径 50–200km 以内の IR 輝度温度–30℃以下の割合	P, V
PTPI	予報初期時刻の Pmpi と MSLP との差	P, V
PTVI	予報初期時刻の Vmpi と VMAX との差	P, V

表 3.1 気象研究所で開発した LGEM による強度予測に採用した説明変数一覧。表 2.2 から抜粋。但し、 PTPI、PTVI は独自に追加。r は台風中心からの距離を表す。

表 3.2 気象研究所で開発した LGEM による強度予測に採用した n 及びβの値

	最大	風速	中心参	贰圧
	n	β	n	β
TD 用	1.2	0.5	1.2	1.0
台風用	2.5	0.083	1.8	0.083



図 3.2 2013 年台風第6号に対する最大風速予測。左図は TD の最大風速の予測のために、台風用の回帰 係数とn、βを使用した場合。右図は TD 用の回帰係数とn、βを使用した場合。赤線は LGEM による予測、 青線は GSM による予測である。薄い赤、薄い青はそれぞれ LGEM による TD の予測、GSM による TD の予測を示しており、濃い赤線、濃い青線はそれぞれ LGEM による台風の予測、GSM による台風の予測 を示している。黒線は気象庁のベストトラック。

3-5 使用データ

この節では気象研究所における LGEM 開発で利用したデータについてまとめておく。

- (i) 台風中心気圧の MPI の経験式の導出に利用したデータ(3-3節)
- 台風中心気圧の MPI の経験式を導出するために、台風中心気圧と SST の散布図を作成した。台風 中心の位置と気圧については気象庁ベストトラック、対応する位置、時刻の SST については COBE-SST のデータ(日別値)を利用した。
- (ii) 台風中心が海上にある場合の予測式中のκ(κ_V及びκ_P)を重線形回帰で導出するために必要な
 回帰係数作成に利用したトレーニングサンプル(3-4節)

κを重線形回帰で導出するために必要な回帰係数作成のためのトレーニングサンプルとして、次の データを使用した。熱帯擾乱の最大風速、中心気圧、中心位置については気象庁ベストトラックデータ、 台風周辺の大気環境場についてはJRA55 大気再解析データを使用し、SST については COBE-SST を 使用した。海洋貯熱量データ(Ocean Heat Content, OHC)は、気象庁海洋気象情報室で作成された再 解析値を利用した。また、2章と同様、気象衛星の輝度温度観測データを使用している。

(iii) LGEM による強度予測実行時に使用したデータ(3-4節、3-7節、3-8節、3-9節)

LGEM の予報初期値としては気象庁の熱帯低気圧速報解析の最大風速と中心気圧を利用した。重 線形回帰計算に必要な説明変数の算出には GSM の予報値、GSM で利用されている全球日別海面水 温解析データ(MGDSST)、気象庁海洋気象情報室作成の海洋貯熱量速報解析データ及び気象衛星の 輝度温度観測データを使用した。なお、3-9節で述べる統計検証の真値として気象庁ベストトラック データを使用している。

3-6 Persistence が原因の過発達への対応

今回開発した LGEM では説明変数の一つとして、予報初期時刻の 12 時間前から予報初期時刻までの 台風強度(中心気圧、最大風速)の変化量(Persistence、PER)を利用している。LGEM で利用してい る説明変数の中で、PER は予報時間に対する依存性が比較的大きな説明変数であり、予報初期では予 測に与える影響が大きいが、予報時間が長くなるにつれて影響が小さくなっていくという特徴を持って いる。

個々の事例を調査していくと、PER が大きい場合にベストトラックに比べて大きく過発達な予測となる事例が見られた。図 3.3 左は 2014 年 10 月 7 日 18UTC を初期値とした台風第 19 号に対する LGEM の予測事例である。気象庁ベストトラックでは 2014 年台風第 19 号の中心気圧は 10 月 7 日 18UTC では 900hPa であり、8 日 12UTC まで 900hPa の勢力を保ち、その後衰弱している。一方、LGEM の予測



図 3.3 PER が原因で発生する過発達抑制処理の導入による中心気圧予測の違い。左図は抑制処理を行わなかった場合のLGEMの予測、右図は抑制処理を適用した場合のLGEMの予測。赤線はLGEMによる予測、青線はGSMによる予測、黒線は気象庁ベストトラック。

では FT=6h にあたる 8 日 00UTC で 880hPa まで勢力を強め、その後 FT=12h にあたる 8 日 06UTC には 876hPa まで発達させた後、衰弱する予測となっており、ベストトラックと比べるとピーク時で 24hPa の過発達となっている。

LGEMによる強度予測実験では、初期値及びPERの算出に利用するV、Pの値として熱帯低気圧速 報解析のデータを利用しているが、この事例では中心気圧のPERは-45hPaとなっており、このような 大きな変化量がLGEMの予測に影響を及ぼしていると考えられた。熱帯低気圧速報解析は、解析に利 用できる観測データがベストトラック作成時の解析と比べて少なく、使用できるデータ量に応じて解析 精度が悪くなる場合もしばしば見られる。そのため品質管理の意味も兼ねてPERに制限を与え、PER が-20hPaよりも小さくなる場合は-20hPaに抑えるようにした。この変更を加えた場合のLGEMの予測 を図 3.3 右に示す。変更後はFT=6hで 892hPa、12hで 891hPaとなっており、予報初期で実況に近づい ている。一方、予報中盤以降はPERの影響が他の説明変数に比べて小さくなるため、変更前後でそれ ほど大きな違いは見られない。

3-7 LGEM の予測事例

図 3.4 に 2013 年 10 月 11 日 12UTC を予報初期時刻とした台風第 26 号に対する LGEM の強度予測と、 当時の GSM の進路予測及び強度予測を示す。図 3.4 左は台風の進路予測を示しており、気象庁ベスト トラックの台風中心位置 (BST) と LGEM の説明変数算出に利用する GSM の進路予測が示されている。 右上の図は台風中心気圧の予測図で横軸が日付、縦軸は中心気圧である。同様に、右下の図は最大風速 の予測図である。

この事例では、ベストトラックでは FT=48h にあたる 13 日 12UTC に中心気圧が 930hPa まで発達し ているが、GSM では発達の予測が弱く、960hPa までの発達しか予測できていない。一方、LGEM の 予測では若干ピークの時刻が遅いもののベストトラックに近い予測ができている。また、図 3.5 に示す 2014 年台風第 8 号に対する予測事例では、図 3.4 の事例とは対照的に GSM の予測は最盛期においてベ



T1326(D0031) Typhoon Forecast and Analysis (Track and Intensity) - 2013/10/11 12UTC -

図 3.4 2013 年 10 月 11 日 12UTC における台風第 26 号の強度予測事例。左側の図は台風の進路予測を示しており、気象庁ベストトラックの台風中心位置 (BST) と当時の GSM の進路予測 (GSM) が示されている。 右上の図は台風中心気圧の予測図で横軸が日付、縦軸は中心気圧である。右下の図は同様に最大風速の予測図。 ストトラックに対して過発達な予測となっているが、LGEM の予測では過発達を抑え、よりベストト ラックに近い予測が出来ている。

LGEMの予測誤差が大きかった事例を図 3.6 に示す。この事例では、実況では予報初期の段階で台風 が転向し北東進しているが、GSMの予測では転向せずに転向点付近で停滞する予想になっている。前 述の通り LGEM では GSM の進路予測に沿って説明変数を計算しているため、GSM の進路予報誤差が 大きい場合に、LGEM の予測誤差が特に大きくなる事例が見られた。

なお、LGEM は温低化の過程を考慮していないため、台風から変化した温帯低気圧の強度予測で誤 差が大きくなる。例えば、図 3.7 は図 3.4 の例と同じく 2013 年台風第 26 号に対する予測で、2013 年 10



図 3.5 2014 年 7 月 4 日 12UTC 初期値の 2014 年台風第 8 号の強度予測事例。図の内容は図 3.4 と同じ。



T1526(D0027) Typhoon Forecast and Analysis (Track and Intensity) - 2015/11/23 06UTC -

図 3.6 2015 年 11 月 23 日 06UTC における台風第 26 号の強度予測の事例。図の内容は図 3.4 と同じ。



図 3.7 2013 年 10 月 14 日 18UTC における台風第 26 号 の中心気圧の予測事例。2013 年台風第 26 号は 10 月 16 日 06UTC に台風から温帯低気圧に変化した。赤線は LGEM による予測、青線は GSM による予測、黒線は気 象庁ベストトラック。

月14日18UTCを予報初期時刻とした事例である。 2013年台風第26号は16日06UTCに温帯低気圧 となっており、ベストトラックでは温低化した 16日06UTCまでは中心気圧が時間と共に弱まり、 温低化直後にやや気圧がさがったものの、その後 は概ね一定となっている。ところがLGEMの予 測では温低化後も気圧を弱め続けており、予報時 間が長くなるにつれてベストトラックとの差が大 きくなっている。一方、GSMは温低下前後でや や誤差が大きいものの、LGEMに比べて精度の よい予測が出来ている。温帯低気圧化後のデータ も含めた回帰係数を使用してもこの傾向はほとん ど変わらなかった(図略)。

3-8 統計検証

LGEMによる台風強度予測の統計検証結果(検証期間は2013年から2015年の3年間)を図3.8に示す。 図3.8 左は中心気圧の予測精度の図である。横軸が予報時間、左の縦軸は平方根平均二乗誤差(Root Mean Square Error,RMSE)またはバイアス(BIAS)を示しており、右の縦軸はサンプル数(Num)を示して いる。青線はRMSE、オレンジ色の線はBIAS、灰色の線はサンプル数である。同様に図3.8 右は最大 風速の予測精度を示す図である。LGEMの予測精度は、48 時間予報のRMSE は最大風速13.4kt、中心 気圧15.7hPa、120 時間予報のRMSE では最大風速18.1kt、中心気圧21.8hPa であった。バイアスについ ては概ね予報前半を中心に若干台風強度を弱めに予測するバイアスがあり、予報後半では台風を強める バイアスが見られた。

また、3-4節で述べた、TD用の回帰係数及びn、 β を用いた場合と、台風用の回帰係数及びn、 β を用いた場合のTDの強度予測の統計検証の比較を図3.9に示す。図3.9左は中心気圧の予測、右は最大風速の予測であり、赤線がTD用の回帰係数とn、 β を用いた場合、青線は台風用の回帰係数とn、 β を用いた場合の予測精度である。実線はRMSE、点線はBIASを表している。なお、この統計検証に利用した予測データはベストトラックに記録されているTDでかつ、熱帯低気圧速報解析でTDと解析されたデータのみである。つまり、熱帯低気圧速報解析では台風と解析されたが、ベストトラックではTDとなっているデータについては統計に含めていない。

図 3.9 左より、中心気圧の予測精度の比較では台風用の回帰係数及び*n、β*を TD の予測に利用した場合、予報の初期から中盤にかけてベストトラックより台風を弱め、FT=96h 以降は強めるバイアスが見られるが、TD 用の回帰係数及び*n、β*を利用した場合は FT=48h までの正バイアスと FT=96h 以降の負バイアスを大幅に改善しているのがわかる。RMSE についても予報終盤を中心に予報期間全体にわたって精度が改善している。一方、図 3.9 右に示す通り、TD 時の最大風速の予測については予報終盤では若干改善傾向がみられるものの、予報初期、予報中盤ではそれほど改善は見られず、むしろ悪化している時間帯もある。このような結果となった原因の1つとして、以下の可能性が考えられる。

中心気圧については、TD時でも6時間毎にベストトラックにデータが記録されているので、その時間変化を問題なく回帰係数に反映することが可能である。しかし、気象庁ベストトラックにはTD期間の最大風速が記録されていないため、回帰係数作成時に一様に30ktを仮定して計算を行った。これは、TDの強度予測を行う場合に最大風速の初期値として30ktを仮定していることを考慮したものであるが、

このことが式(3.7)で計算するκ_vの精度に影響を及ぼしたと考えられる。例えば発達中のTDの場合は、 実際には式(3.7)の第1項が正の値となるが、一様に30ktを仮定した場合は0となる。そのため、TD のままである可能性が比較的高い予報前半を中心として、平均的にκ_vの値が小さくなることが原因とな って、予報前半を中心に負バイアスとなっているのではないかと考えられる。以上の理由により、TD の最大風速の予測に関しては、回帰係数作成に気象庁ベストトラックのみを利用するかぎり限界がある と考えられ、精度向上には更なる検討を行う必要がある。



図 3.8 LGEM による台風強度予測検証。左は台風中心気圧、右は最大風速の検証図。左の縦軸は RMSE または BIAS を表しており右の縦軸はサンプル数 (Num)を表す。横軸は予報時間である。青線は RMSE、オレンジ色の線は BIAS、灰色の線はサンプル数を示している。



図 3.9 ID の予測に台風用の回帰保致、n、βを使用した場合(青色)とID 用の回帰保致、n、β(赤色) を使用した場合の比較。左図は中心気圧の予測精度、右図は最大風速の予測精度の図。実線は RMSE、点 線は BIAS を示している。灰色の線はサンプル数。

3-9 まとめ

米国で開発された LGEM をベースに、気象庁の熱帯低気圧速報解析、全球モデル等のデータを入力 として台風強度を予測する気象庁版 LGEM を開発した。米国版 LGEM は最大風速のみが予測対象であ るため、ここでは中心気圧の MPI の経験式を導出し、さらに中心気圧を変数変換した上で予測する等 の工夫を施すことにより、台風中心気圧を予測する LGEM を新たに開発した。台風が海上にある場合 の予測式中のκを重線形回帰で計算するための回帰係数及びn、βは、TD と台風で異なるものを用いる ようにした。但し、この設定は予報初期時刻における熱帯擾乱の強度にのみ依存することとした。

2013年台風第26号及び2014年台風第8号に対してLGEMによる強度予測を実施し、当時のGSM(水平解像度約20km)の予測と比べて精度の良い予測ができていることを確認した。一方LGEMは、GSMの台風進路予測に沿って説明変数を計算しているため、GSMの進路予測誤差が大きい場合、LGEMの予測誤差が特に大きくなる事例が見られた。

2013 年~2015 年の TD と台風に対して統計検証を実施したところ、48 時間予報の RMSE は最大 風速で 13.4kt、中心気圧で 15.7hPa、120 時間予報の RMSE については最大風速で 18.1kt、中心気圧で 21.8hPa であった。BIAS については概ね予報前半を中心に若干台風を弱めに予測する傾向があり、予報 後半では台風を強めるバイアスが見られた。

3-10 今後の課題

3-8 節の統計検証から、今回作成した LGEM では予報期間の前半を中心に台風をやや弱め、終盤で強めに予想する傾向があることがわかる。このようなバイアス傾向となる要因はいくつか考えられるが、 その一例を図 3.10 に示す。図 3.10 は 2017 年台風第 18 号に対する LGEM による中心気圧の予測事例で、 予報初期時刻は 2017 年 9 月 9 日 12UTC である。横軸は予報時間、縦軸は台風中心気圧であり、赤線は LGEM の予測、黒線は気象庁ベストトラックデータを示している。2017 年台風第 18 号は熱帯低気圧速 報解析では 9 月 9 日 06UTC までは TD であり、9 月 9 日 12UTC に台風に発達した。図から LGEM の 予測は予報初期を中心に緩やかな発達を予測しているが、気象庁ベストトラックデータでは LGEM よ りやや発達率が大きくなっている。また、気象庁ベストトラックデータでは FT=66h から 90h にかけて 一時的に発達が停滞している期間があり、その後再び発達しているが、LGEM の予測では実況で発達 が停滞している時間帯に発達率が大きくなっており、発達停滞の予測ができていない。今回開発した LGEM の予測では、このような一時的な発達の停滞を予測できず、誤差が大きくなる事例が散見された。



図 3.10 予報前半でベストトラックより弱め、終盤で強めとなっている LGEM による台風中心気圧予測の例。2017 年台風第 18 号に対する LGEM による中心気圧の予測事例で、予報初期時刻は 2017 年 9 月 9 日 12UTC。赤線は LGEM による予測、黒線は気象庁ベストトラック。

台風発達の一時的な停滞の原因については様々な要因が考えられる。例えば一時的な鉛直シアーの 強まり等、台風周辺の環境場に主要因があると考えられる事例については、説明変数の一つとして台風 周辺の鉛直シアーを使用しているため、停滞の予測も可能であると考えられる。一方、台風の壁雲交換 にみられるように、台風の内部プロセスが主要因と考えられる事例もしばしば見られる。現時点では台 風内部プロセスに関するメカニズムには未解明な部分も多いことや、説明変数算出に利用している、水 平解像度約 20km の GSM ではこのような内部プロセスを適切に表現することが難しいといった事情も あり、今回開発した LGEM では現実的な台風の内部プロセスをほぼ考慮できていないと思われる。

3-4 節で述べた TD と台風の予測で用いる回帰係数の分離の必要性についても、気象庁ベストトラックに TD 時の最大風速値がないことに加えて、このようなことが潜在的な要因となっている可能性もあるだろう。LGEM の手法では予測が難しい事例も少なくないと思われるが、台風内部プロセスのメカニズム解明や全球モデルの性能向上により、回帰係数を分離しなくてもより精度の良い予測ができると考えられる。

参考文献

- DeMaria, M., 2009: A Simplified Dynamical System for Tropical Cyclone Intensity Prediction. Mon. Wea. Rev., 137, 68-82, https://doi.org/10.1175/2008MWR2513.1
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic Basin. *Weather* and Forecasting, **9**, 209-220, https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0209:ASHIPS>2.0.CO;2
- Schumacher, A., M. DeMaria, and J. Knaff, 2013: Summary of the new statistical-dynamical intensity forecast models for the Indian Ocean and Southern Hemisphere and resulting performance. JTWC Project Final Report.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Japan., 93, 5–48, https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865–879, https://doi.org/10.1002/joc.1169.
- DeMaria, M., 2010: Tropical cyclone intensity change predictability estimates using a statistical-dynamical model. Extended Abstract, 29th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, May 10–14, 2010, Tucson, AZ.

第4章 RI インデックス¹

4-1 RI インデックスとは

RIインデックスは、急発達(以下、RIと記す。)インデックスの略で、熱帯低気圧が今後24時間以内に急発達する確率を予測する指標である。SHIPSと同様に、数値モデルが予測する熱帯低気圧進路に沿った環境場条件と統計量等を用いて、RIの確率を算出する統計力学モデルである。第2章で示した通り、SHIPSは急発達の予測を不得手としており、強度を弱めに予想する傾向がある。この欠点を補うため、RIの発生確率の予測に特化したモデルとして、RIインデックスがKaplan et al. (2010)により開発された。現場の台風予報官は、RIインデックスを通じてRIの可能性が高いと予測される時に、SHIPSの予測強度を大きめに補正することが可能となる。

ここで、RIの確率がどのように計算されるかを説明する。RIインデックスは、判別関数に基づき、 その関数に対応づけられた RI の確率値として作成される。判別関数とは、ある事例がいくつかのグル ープの中の一つに属していると考えられる時、関連する説明変数を用いてその事例がどのグループに属 するのか判別するために使われる関数である。気象庁で使用する RIインデックス(以下、「気象庁版 RIインデックス」という。)では、Kaplan *et al.* (2010)と同様に、各事例を RI しているグループ(RI グ ループ)と、RI していないグループ(non-RI グループ)の2つに分け、判別関数として線形判別式を 用いる。線形判別式は説明変数の数 p に対し次式で表される。

 $z = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \cdots + w_p x_p \quad (4.1)$

zは、各説明変数($x_1, x_2, x_3, \cdot \cdot \cdot, x_p$)に対し、各事例がどちらのグループに属するか最適に判別する重み($W_1, W_2, W_3, \cdot \cdot \cdot, W_p$)によって線形写像される値である。重みベクトル**W**は、

w = **S**⁻¹ ($\overline{\mathbf{x}_{RI}} - \overline{\mathbf{x}_{non-RI}}$) (4.2) で計算され、それぞれのグループの説明変数の平均値の差($\overline{\mathbf{x}_{RI}} - \overline{\mathbf{x}_{non-RI}}$)が大きく、説明変数の共分 散**S**が小さくなるように与えられる。ここで太字はベクトルを表す。詳しくは、例えば Wilks (2006)の 第 13 章第 2 節を参照されたい。

実際の作業では、まずトレーニングサンプル(従属サンプル)を用い、各事例を RI グループと、 non-RI グループに分ける。次に、その分類に基づき、線形判別式 (4.1)の重みを算出する。判別関数で 使用する説明変数は、RI 事例と non-RI 事例で統計的に有意な差があるものを用いる。

こうして算出した判別関数に、トレーニングサンプルの各事例の説明変数を改めて代入しても、ある z値できれいに RI 事例と non-RI 事例が分かれるわけではない。複数の事例でほぼ同じz値になっても、 実際にある事例は RI 事例で、別の事例は non-RI 事例となり得る。しかし、全体的には、z値とそこに RI 事例が含まれる確率は比例する関係となる。RI インデックスは、判別関数のz値をマッチアップテ ーブルによって RI の確率値に対応づけたものである。マッチアップテーブルは、一度トレーニングサ ンプルを用いて判別関数を作成した後、トレーニングサンプルの説明変数を再び判別関数に代入して z 値を得て、それを RI の確率と対応させることで作成する。ここまでがトレーニングサンプルを使った 事前準備である。予測の際には、説明変数から判別関数のz値を計算し、その値とマッチアップテーブ ルから RI の確率を求めることになる。

4-2 気象庁版 RI インデックスの構築

気象庁版 RI インデックスは、24 時間に 20 hPa 以上、または 20 kt 以上発達するものを急発達と定義し、 その発生確率を計算するものとした。この定量的基準は、全体のトレーニングサンプルの十数 % 程度

¹ 嶋田宇大

が RI グループに属するよう(つまり、RI の確率の気候値が十数%となるように)決定された。通常、 RI の定量的基準として、24 時間に 30 hPa (Shimada *et al.* 2017) や 30 kt (Kaplan and DeMaria 2003) 以上の 強度変化量が用いられることが多い。しかしながら、2000 年から 2012 年までのトレーニングサンプル では、通常の基準だと RI の確率の気候値が 5-10 % となり、RI の確率を算出するのに十分なサンプル が集まらなかった。

4-2-1 使用データ

気象庁版 RI インデックスに使用するデータは、SHIPS と同様である。表 2-1 及び第 2-2-1 節を参照い ただきたい。

4-2-2 説明変数

表 4.1 に RI インデックスで使用される説明変数リストを示す。Pmin、Vmax の RI インデックスは、 その計算にあたってそれぞれ 9 つの説明変数を使用している。これらは Kaplan et al. (2010) で使用され ていたものを基準として選んでいる。ただし、Pmin の RI インデックスの説明変数のうち、下層または 中層湿度は、RI 事例と non-RI 事例で大きな差が見られなかったため、SHIPS で寄与度の大きな変数と して使われている「初期時刻の Pmin と 970hPa の差の絶対値 (OSLP)」を代わりに使用することにした。 なお、RI インデックスの説明変数については、SHIPS のそれと同様に、表 4.1 の「最大到達可能強度 (MPI) と初期時刻の Vmax との差 (POT)」、「鉛直シアー (SHDC)」、「200 hPa 高度の発散 (D200)」、「海洋貯 熱量 (OHC)」及び「下層湿度 (RHLO)」は RI 予測の対象期間である初期時刻から 24 時間先までの予 測された台風進路に沿った平均値である。

表 4.2 及び表 4.3 はそれぞれ、RI 事例と non-RI 事例に対する各説明変数の平均差を示す。Pmin の説 明変数は、全ての変数で 99.9 %の水準で統計的に有意な平均差があった。POT、D200、「前 12 時間の Pmin の変化傾向(PERP)」、「輝度温度 –30℃以下の割合(PC30)」、OHC、「数値モデル(GSM)におけ る擾乱の 850 hPa 接線風速の時間変化傾向(TWAT)」は RI 事例ほど大きい傾向があった。一方、SHDC、「輝 度温度の標準偏差(SDIR)」、OSLP は RI 事例ほど小さい傾向があった。Vmax については、SDIR 以外 の変数で統計的に有意な差があった。その値の傾向は Pmin と整合的である。SDIR において、Pmin と Vmax で傾向が異なる理由は不明である。SDIR については今後、RI 事例と non-RI 事例間で統計的に有 意な差がある別の変数に変更することが課題として残る。

説明変数	説明	対象	
CONST	環境場の気候値	P, V	
POT	最大到達可能強度(MPI)と初期時刻の Vmax との差	P, V	
SHDC	850–200 ⁻ hPa 間の鉛直シアー (r=0–500 km)	P, V	
D200	200hPa 高度の発散	P, V	
PERP	前 12 時間の Pmin の変化傾向		
PERV	前 12 時間の Vmax の変化傾向	V	
PC30	中心から半径 50–200km 以内の IR 輝度温度–30℃以下の割合		
SDIR	中心から半径 100–300km 以内の IR 輝度温度の標準偏差		
OHC	海洋貯熱量(熱帯低気圧中心付近)		
OSLP	初期時刻の Pmin と 970hPa の差の絶対値	Р	
RHLO	下層湿度(850–700 hPa)	V	
TWAT	850hPa 接線風速の変化傾向	P, V	

表 4.1 RI インデックスの説明変数リスト。Pmin 及び Vmax 用の説明変数として、P 及び V で記されている。

Predictor	RI	non-RI	RI – non-RI	unit
POT	107.7	92.9	14.8	kt
SHDC	8.8	12.7	-4.0	kt
D200	67.2	50.2	17.0	$\times \ 10^{-7} \ \mathrm{s}^{-1}$
PERP	9.8	2.2	7.5	hPa
PC30	92.7	81.7	11.0	%
SDIR	19.7	21.0	-1.3	Κ
OHC	90.0	53.2	36.9	kJ cm ⁻²
OSLP	12.5	19.5	-7.0	hPa
TWAT	1.9	0.3	1.5	kt

表 4.2 Pmin 用の RI インデックスで使用される説明変数の、RI 事例及び non-RI 事例の平均値。太字は non-RI 事例と RI 事例で説明変数の平均差が統計的有意(99.9% レベル)であることを示す。

表 4.3 Vmax 用の RI インデックスで使用される説明変数の、RI 事例及び non-RI 事例の平均値。太字は non-RI 事例と RI 事例で説明変数の差が統計的有意(99.9% レベル)であることを示す。

Predictor	RI	non-RI	$\mathrm{RI}-\mathrm{non}\text{-}\mathrm{RI}$	unit
POT	112.2	92.7	19.5	kt
SHDC	9.0	12.6	-3.6	\mathbf{kt}
D200	67.5	50.7	16.9	$\times \ 10^{-7} \ s^{-1}$
PERV	9.2	2.4	6.9	\mathbf{kt}
PC30	90.7	82.3	8.3	%
SDIR	20.7	20.8	-0.1	Κ
OHC	92.5	53.9	38.5	kJ cm ⁻²
RHLO	71.2	69.9	1.3	%
TWAT	1.8	0.4	1.4	kt

4-2-3 RI インデックスの作成

第4-1節で説明した通りの手順で、第2章と同じトレーニングサンプルを使用して RI インデックス を作成した。判別関数の構築に当たり、本研究では IMSL ライブラリーを利用した。ここで注意したい のは、判別関数を使っても、RI 事例と non-RI 事例がきれいに分類されるわけではないということである。 表4.4 及び表4.5 は、トレーニングサンプルを使用し、Pmin 及び Vmax の RI が判別関数そのものによ ってどの程度判定できるかを分割表に示したものである。判別関数で RI と判別されても実際には RI し ない事例、及び non-RI と判別されても実際には RI した事例が、従属サンプルでさえ多く存在する。

とはいえ、判別関数に基づく RI インデックスは、気候学的な RI の確率よりも精度が良いことは確認 できる。ここではその指標として、ブライア・スキル・スコア(BSS)(付録 2 参照)を使用する。従 属サンプルを利用して計算した RI インデックスの BSS は、Pmin で 32.2, Vmax で 26.4 であり、気候学 に基づく RI 予測よりも精度が良いことを示す(表 4.6)。

表 4.6 では、BSS の他に、RI インデックスの値がある閾値以上の時は RI 予測、以下の時は non-RI 予測とした場合、どの閾値をとると、スレット・スコア(TS)(付録 2 参照)の値が最も良いかを従属サンプルで調べた結果を示す。その結果、Pmin については RI インデックスの閾値を 32.5、Vmax は 22.5 にすると良いという結果が得られた。この時の各種指標値は表 4.6 に示す通りである。

表 4.4 RI インデックスの判別関数を用いて従属サンプルを分類した場合の分割表 (Pmin の場合)。この結 果は、この判別関数がそもそもどの程度従属サンプルを分類できるのかを示している。

Pmin	non-RI 判別	RI 判別	
non-RI 観測	2965	305	
RI 観測	227	360	

表 4.5 表 4.4 と同じ、ただし Vmax に対する分割表。

Pmin	non-RI 判別	RI 判別
non-RI 観測	2965	305
RI 観測	227	360

表 4.6 RI インデックスの導出に使用した従属サンプルの数と、従属サンプルを利用して計算した RI イン デックスのブライア・スキル・スコア (BSS)、従属サンプルを使用した場合に最も大きな(最適な)ス レット・スコア (TS) 値をとる RI インデックスの閾値、及びその場合の精度評価。各種指標の定義は付 録 2 を参照のこと。

	Pmin	Vmax
予測事例数	3857	3857
BSS	32.2	26.4
最適な TS 値	40.4	35.6
(その時の RI インデックス値)	(32.5)	(22.5)
バイアス	113.3	174.3
捕捉率(Hit Rate, POD)	61.3	72.1
空振り率 (FAR)	45.9	58.7
誤検出率(F, POFD)	9.3	14.6

4-3 精度検証

4-3-1 統計検証

2013 年から 2016 年までの独立サンプルを用いた RI インデックスの信頼度評価として、信頼度曲線 図を用いる(図 4.1)。この図は、RI インデックスの値に対して、実際に RI が起こった確率は何% で



図 4.1 独立サンプル(2013-2016 の事例)による RI インデックスの信頼度曲線。横軸が RI インデックス、 左縦軸が実際に RI が起きた確率(緑)、右横軸がサンプル数(棒グラフ)。(a)Pmin。(b)Vmax。 あったかを示すもので、横軸が RI インデックス、左縦軸が各 RI インデックス値のサンプル数に対する 実際の RI 比率 (%)、右縦軸が各 RI インデックス値のサンプル数である。緑の線が実際の RI の比率を 示し、1 対 1 線上にあれば、信頼度情報として RI インデックスは十分な精度を持つことを示す。図 4.1 によると、Pmin については、おおむね 1 対 1 線上に乗っている。一方で、RI インデックスが 0 の時に も実際には RI していた事例がいくつか存在していたことも示している。Vmax については、おおむね 良いが、RI インデックスが 20% から 40% の間にある時、実際に RI が起きた比率が低すぎる傾向がある。 また、Pmin と同様に、RI インデックスが 0 を示した時にも RI が起きていた。

次に、確率予測の精度として、独立サンプルの BSS で評価する(表 4.7)。Vmax の BSS 値(7.2)が Pmin の BSS 値(19.9)よりもずっと低くなっており、独立サンプルでは Vmax の RI の確率予測精度が かなり劣ることがわかる。ただしそれでも気候値予測よりは精度が良かった。

次に、最も TS 値が大きくなる RI インデックス値を調べる(表 4.7、表 4.8、表 4.9)。Pmin は 33.5、 Vmax は 36.5 を RI 予測とするかどうかの閾値とした時の TS 値が最も良かった。従属サンプルで決定 された閾値と比べると(表 4.6)、Pmin はほぼ同じ値に対し、Vmax は大きめの値となった。図 4.2 は、 横軸に RI インデックス値、縦軸に 24 時間の実際の強度変化(hPa)の散布図を示す。基本的には、RI イ ンデックスが大きいほど、実際の強度変化量も大きい関係にあった。一方でばらつきも大きく、決定論 的に RI を予測することの難しさを示すものとなっていた。

表 4.7 RI インデックスの導出に使用した独立サンプルの数と、独立サンプルを利用して計算した RI イン デックスのブライア・スキル・スコア (BSS)、独立サンプルを使用した場合に最も大きな(最適な)ス レット・スコア (TS) 値をとる RI インデックスの閾値、及びその場合の精度評価。最適な RI インデッ クス値で判別した場合の分割表は、表 4.8 及び表 4.9 に示されている。各種指標の定義は付録 2 を参照の こと。

Pmin	Vmax
2112	1551
19.9	7.2
32.6	25.9
(33.5)	(36.5)
89.7	95.1
46.6	40.1
48.0	57.8
5.1	7.3
	Pmin 2112 19.9 32.6 (33.5) 89.7 46.6 48.0 5.1

表 4.8 表 4.7 の TS (32.6) をとる RI インデックスの閾値(33.5%)を用いた場合の分割表(Pmin の場合)。

Pmin	non-RI 予測	RI 予測
non-RI 観測	1793	96
RI 観測	119	104

表 4.9 表 4.7 の TS (25.9) をとる RI インデックスの閾値 (36.5%)を用いた場合の分割表 (Vmax の場合)。

Vmax	non-RI 予測	RI 予測
non-RI 観測	1269	100
RI 観測	109	73



図 4.2 独立サンプル(2013-2016の事例)による RI インデックス(横軸)、実際の 24 時間後までの強度 変化量(縦軸)の散布図。RI を予測する基準を表 4.8、表 4.9 に基づき決定し、分割表にしている。(a) Pmin。(b)Vmax。

4-3-2 事例検証

2015年台風第15号を例に、RIインデックスの特性を例示する(図4.3)。この台風は一度、-20 hPa (24h)⁻¹のRIを経験し、その後やや衰弱した後、再びRIを経験した事例である。一度目のRIについてみると、実際にRIをする24時間前からRIインデックスがPminでは20%以上、Vmaxでは30%以上を示すようになっていた。しかし、RIインデックスの大きさと実際の強度変化量が必ずしも比例しているわけではなかった。二回目のRIについては一回目と異なり、PminのRIインデックスはRIの発生に合わせてほとんど値が上がらなかった。VmaxのRIインデックスは、実際の発生時に20%強を示し、前節に示した最もTS値が大きくなるRIインデックス値(36.5)以下ではあるものの、RIの可能性を示唆していた。このようにRIが起こる時に必ずしもRIインデックスが高くなるわけではないため、RI インデックスの精度には課題が残る。このような現状の精度に合わせて、RIインデックスをどのように効果的に使うべきかという課題が残っている。

4-4 まとめと課題

Kaplan *et al.* (2010) に基づき、気象庁版 RI インデックスを作成した。独立サンプルによる 2013 年から 2016 年までの検証では、この RI インデックスは、気候値予測よりも高い精度を持つという点で、 RI 予測の参考資料として使用できるものであることが確認された。ただし、RI インデックスに基づく Vmax の RI 予測は、Pmin のそれよりも精度が劣ることもわかった。

RI 予測に関する、さらなる精度向上の取組みが現在行われている。例えば、SHIPS と同様に、 GSMaP の降水情報(熱帯低気圧の軸対称度や熱帯低気圧周辺の積算降水雨量)を使った RI インデッ クスの開発を著者は行っている。また、最近 Kaplan *et al.* (2015)は、静止衛星データから抽出した新し



図 4.3 2015 年台風第 15 号の事例。6 時間毎に算出される RI インデックスを赤棒で、実際の 24 時間後ま での強度変化量を青棒で示す。(a)Pmin の RI インデックス。(b)Vmax の RI インデックス。ベストトラッ クの強度(緑線)を右縦軸に示す。

い説明変数を用いた RI インデックスを開発している。さらに、米国では、線形判別関数だけでなく、 ベイズ推定やロジスティック回帰に基づく手法も開発されている(Rozoff and Kossin 2011; Rozoff *et al.* 2015; Kaplan *et al.* 2015)。著者は、ランダムフォレスト等の機械学習アルゴリズムを利用する手法も考 案中である。

上記とは別に、複数の RI 基準(例えば、25 kt (24h)⁻¹, 30 kt (24h)⁻¹, 35 kt (24h)⁻¹) に基づく RI インデ ックスを用意しておき、RI インデックスを決定論的に利用する方法も提唱されている。Sampson *et al.* (2011) は、RI インデックスの閾値を 40% と設定し、もし 35 kt (24h)⁻¹ の RI インデックスが閾値以上な らば、強度予報コンセンサス(詳しくは第6章参照)に 35 kt (24h)⁻¹ のメンバーを追加し、もし 35 kt (24h)⁻¹ が閾値以下でも 30 kt (24h)⁻¹ が閾値以上なら、30 kt (24h)⁻¹ のメンバーをコンセンサスに追加する という方法を提案した。しかし、5日先まで行う強度予報の中で、24 時間先までのメンバーを一つ追加 する方法は、時間連続的な強度予報の算出を困難にするため、米国ハリケーンセンター(NHC)にお いては現在のところ、その手法の現業利用はされていない(DeMaria 2017, personal communication)。

気象庁での現業利用の観点から見て、RIインデックスを実際の強度予報でどのように活用するかが 今後の検討課題として残されている。特に現在のRIインデックスでは、RIが予想される時に、SHIPS やコンセンサス予報の予測値を定量的にどの程度修正するべきか、不明である。現在の台風強度予報が 決定論的である以上、予報官の主観に頼らない、客観的で定量的にRIを予測する手法の開発が望まれる。 その際、24時間先、48時間先にどの程度発達するかだけでなく、どのタイミングでRIがスタートする かも予想できるとよい。タイミングのずれは大きな予報誤差を生むためである。台風の強度予報誤差は 主にRI事例によってもたらされているため、このような開発により、強度予報誤差の低減が図られる よう引き続き取り組みたい。 参考文献

- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. Wea. Forecasting, 18, 1093–1108, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2
- Kaplan, J., M. DeMaria, and J. A. Knaff, 2010: A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and east Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 25, 220–241, doi:10.1175/2009WAF2222280.1
- Kaplan, J., and Coauthors, 2015: Evaluating environmental impacts on tropical cyclone rapid intensification predictability utilizing statistical models. *Wea. Forecasting*, **30**, 1374–1396, doi:10.1175/WAF-D-15-0032.1
- Rozoff, C. M., and J. P. Kossin, 2011: New probabilistic forecast models for the prediction of tropical cyclone rapid intensification. *Wea. Forecasting*, **26**, 677–689, doi:10.1175/WAF-D-10-05059.1
- Rozoff, C. M., C. S. Velden, J. Kaplan, J. P. Kossin, and A. J. Wimmers, 2015: Improvements in the probabilistic prediction of tropical cyclone rapid intensification with passive microwave observations. *Wea. Forecasting*, **30**, 1016–1038, doi:10.1175/ WAF-D-14-00109.1
- Sampson, C. R., J. Kaplan, J. A. Knaff, M. DeMaria, and C. A. Sisko, 2011: A deterministic rapid intensification aid. Wea. Forecasting, 26, 579–585, doi:10.1175/WAF-D-10-05010.1
- Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical cyclone intensity change and axisymmetricity deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1003–1017, doi: 10.1175/MWR-D-16-0244.1

第5章 CHIPS¹

5-1 CHIPS とは

CHIPSとはマサチューセッツ工科大学(MIT)のKerry Emanuel 教授が開発した大気海洋結合台風軸 対称モデル(CHIPS; Emanuel et al. 2004)である。それを、北西太平洋の台風向け(気象庁版)に修正 したものをここでは JCHIPS と呼ぶ。台風周辺の環境場と初期渦に関するパラメータ等を入力すること で、簡易化した方程式系において、台風の軸対称構造の発達を予報し、台風の最大風速および中心気圧 を出力する。現業予報センターでは、JTWC が台風強度のコンセンサス予報を構成する一メンバーとし て CHIPS を利用している(Sampson and Knaff 2014)。

台風強度は中心付近の複雑な対流活動・内部コア力学に依存していると考えられるため(Charney and Eliassen 1964; Miyamoto and Takemi 2013; Emanuel and Zhang 2016)、これまでは様々な物理過程を含 んだ高解像度非静力学モデルの開発に多くの資源が費やされてきた。それにもかかわらず、精緻な3次 元非静力学モデルを用いた台風強度予報は必ずしも良い成績を残しているとは言えない(Emanuel et al. 2004; DeMaria et al. 2014)。むしろ、環境場の外的要因の影響を重視して簡易な力学(内部プロセス)の み解く CHIPS、統計力学モデル SHIPS(第2章参照)、LGEM(第3章参照)といった簡易モデルの方が、 高い強度予報精度を示している(Emanuel et al. 2004; DeMaria et al. 2014; Emanuel and Zhang 2016)。この ことは、「内部プロセスによる強度変化量を正確に解くことで強度を予測する試みは難しい」というこ とを示唆している。対流活動は数分から数十分の時間スケールを持つうえ、最大風速や中心気圧には1 時間以内にその応答が現れる(e.g. Ito et al. 2011)。精緻な非静力学モデルを用いて、12時間から数日と いう予報時間で意味のある強度予報を出すためには、内部の力学・熱力学過程が最終的に強度変化に至 る過程を、非常に高い精度で解く必要がある。加えて、数値モデルを解く上で、高い精度の初期値を与 えることが不可欠であるが、観測の乏しい海洋上では精度の良い初期値を得ることは困難である。それ に対し、CHIPS は台風の発達における基本的な内部プロセスを記述する簡易化された方程式を解いた 上で、環境場の影響を考慮している。環境場の変化(背景風の鉛直シアや中層相対湿度など)に対し、 ごく短時間で調節過程・対流などを通じた不安定の解消が進み、常に傾度風平衡・静水圧平衡の状態に あると仮定して、内部プロセスを陽には解かない(雲物理などは扱わない、軸対称構造のみ考慮など) という簡略化を施すことで、精緻な非静力学モデルが直面する困難(高精度な力学・熱力学過程と精度 の高い初期値に対する台風強度変化の鋭敏性)を避けることができる。言い換えると、台風強度変化は、 第一近似的には傾度風平衡、静水圧平衡、環境場の変化を考慮することで、ある程度予測できる。この 点こそが、CHIPS の数日スケールの予報精度が良い(Emanuel et al. 2004)理由だと考えられる。一方、 簡略化による欠点として、温低化時や非軸対称構造が卓越した事例は CHIPS で強度変化を扱うのは不 向きである。さらに、近年の非静力学モデルの改善やデータ同化による初期値推定精度の向上などによ り、非静力学モデルによる台風の強度予測誤差が減少しているので(Marks and Kurkowski 2018)、一概 には CHIPS の方が精緻な非静力学モデルより予報精度が良いとは言えない状況になっている。

次に Emanuel et al. (1989, 1995, 2004) に基づいて CHIPS の概要について紹介する。CHIPS は大気 側には軸対称、静水圧平衡、傾度風平衡、斜向対流中立(絶対角運動量面に沿って湿潤断熱)を仮定 したモデル(Emanuel 1989, 1995) である。この大気モデルの開発目的は、Rotunno and Emanuel (1987) で示された、大気海洋間の熱力学的非平衡状態をエネルギー源として(台風と風による蒸発フィード バックで)発達する・しない擾乱の違いが何かを簡易モデルで調査するためであった(wind-induced surface heat exchange という言葉は使われていないが、それを示唆する言葉として、"feedback between

¹ 沢田雅洋

the cyclone and wind-induced evaporation"とある)。半径方向にはポテンシャル半径 R $(R^2 = \frac{2rv}{f} + r^2)$ 、

鉛直には大まかに3層(上層、中下層、境界層〜雲下層であるが、変数により定義される高度あるいは 層が異なる)の座標系を用いている。ポテンシャル半径を用いるのは、渦度の大きい領域に格子を密に 配置できることと対流調節が絶対角運動量面に沿って表現できる(角運動量輸送を鉛直運動とみなせ る)という利点があるためである。以下に Emanuel (1995) に従って予報方程式を記述する(各変数は無 次元化されていることに注意。例えば、 \mathbf{r} , \mathbf{R} は $\mathbf{x}^{1/2}/\mathbf{f}$ で無次元化など。詳細、式の導出は Emanuel (1989, 1995)を参照)。

$$\frac{\partial r_b^2}{\partial \tau} = \psi_0 - \psi + D_b \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial r_t^2}{\partial \tau} = \psi + D_t \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial x^*}{\partial \tau} = Q \left(M_u + M_d - \frac{\partial \psi}{\partial r_i^2} \right) + D_{x^*} - \text{rad}$$
(5.3)

$$\gamma \frac{\partial x_b}{\partial \tau} = \psi_0 \frac{\partial x_b}{\partial r_b^2} - \frac{1}{2} (|w_e| - w_e + |M_d| - M_d) (x_b - x_m) + \frac{C_k}{C_d} (1 + c|V_b|) |V_b| (x_s^* - x_b)$$
(5.4)

$$\frac{\partial x_m}{\partial \tau} = -\frac{1}{2} (|w_e| + w_e)(x_b - x_m) + M_u(x_b - x_m) [\Lambda_{\max}(1 - \epsilon_p) + \Lambda_{\min} \epsilon_p] - \frac{\Gamma_m}{\Gamma_d} \text{rad} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial M_u}{\partial r_d} = \frac{\partial M_u}{\partial M_u} - \frac{\partial M_u}{\partial M_u} - \frac{M_u}{\partial M_u} = \frac{M_u}{\Gamma_d} + \frac{M_u}{\Gamma_d} +$$

$$\frac{\partial M_u}{\partial \tau} = \psi_0 \frac{\partial M_u}{\partial r_b^2} + \frac{(M_{ueq} - M_u)}{\tau_e}$$
(5.6)

rは物理半径、 $\psi_0 \geq \psi$ はそれぞれ境界層上端の質量流線関数と対流圏中層の質量流線関数、 τ は時間、Dは摩擦(および乱流混合)、radは放射冷却、 γ は境界層の厚さ、 W_e は境界層上端の雲域外の鉛直流(負 を仮定)、 $C_k \geq C_d$ はそれぞれ熱と運動量の海面交換係数、cは海面フラックスの風速依存性、 $M_u \geq M_d$ 、 $M_{u_{eq}}$ はそれぞれ雲底での対流性上向きマスフラックスと下向きマスフラックス、平衡上向きマスフラッ クス、Qは乾燥静的安定度、 $\Lambda_{max} \geq \Lambda_{min}$ はそれぞれ雲域からの高エントロピーの最大、最小デトレイ ンメント率、 ϵ_p は降水効率、 $\Gamma_m \geq \Gamma_d$ は湿潤と乾燥断熱減率、 τ_e は対流の時間スケールである。添え字bは境界層(boundary layer あるいは subcloud layer)、tはモデル上端、* は飽和(x*は対流圏中層、 x_s^* は 海面)、mは対流圏下層(Emanuel (2004)では中層)、sは海面を表す。

式 (5.1), (5.2) は物理半径の予報方程式で角運動量・質量保存則などから導出される。ポテンシャル半径の定義より、接線風 $V_b = (R^2 - r_b^2)/2r_b$ と診断される。つまり、 r_b の減少が接線風増加(台風の発達) となる。質量流線関数の鉛直勾配 $\psi_0 - \psi$ は動径風に相当し、負の時に中心への吹き込みを表す。式(5.3),式(5.4),式(5.5) は湿潤エントロピーの予報方程式で熱力学保存則などから導出される。式(5.3) 右辺第一項は対流フラックスによる湿潤エントロピー輸送、第二項と第三項はそれぞれ乱流混合、放射冷却による寄与を示す。式(5.4) 右辺第一項は動径方向の湿潤エントロピー輸送、第二項は対流フラックスによる湿潤エントロピー輸送、第三項は対流フラックスの予報方程式である。

また、湿潤エントロピーsは以下で定義される変数xを用いて書き直されている。

$$x^* = (T_s - T_t)(s^* - s_{bi})$$
$$x_b = (T_s - T_t)(s_b - s_{bi})$$
$$x_m = (T_s - T_t)(s_m - s_{bi})$$

T_sとT_tはそれぞれ海面水温と上層アウトフロー温度、Sbiは環境場の雲下層湿潤エントロピーを表す。 定義より、 $x_m \leq 0$ となる ($s_m = c_p \ln \theta_e$ は対流圏下層の湿潤エントロピーで、 s_{bi} より小さい)。このよ うに、大気側の予報変数は、物理半径2つ、湿潤エントロピーに相当する変数3つ、上向きマスフラッ クス1つの計6つである。上記の予報方程式の他、いくつかの診断方程式を組み合わせて、モデルの時 間積分が実行される。接線風速、地上気圧は以下の診断方程式から得られる。

$$V_{b} = \frac{1}{2} \frac{R^{2} - r_{b}^{2}}{r_{b}}$$
(5.7)
$$\frac{\partial}{\partial R} \left[P + x^{*} + \frac{1}{8} \left(\frac{R^{4}}{r_{c}^{2}} + r_{b}^{2} \right) \right] = \frac{1}{2} \frac{R^{3}}{r_{c}^{2}}$$
(5.8)

V_bは境界層内の接線風速(ポテンシャル半径Rの定義から導出)、Pは地上気圧(旋衡風平衡から導出) である。

海洋モデルはバルクリチャードソン数によるエントレインメントのパラメータ化、台風下の海上風 により駆動された混合層の海流を取り込んだ鉛直1次元海洋モデル(Schade and Emanuel 1999)である。 鉛直1次元のみ考慮するので、エクマン湧昇などの3次元的な海洋応答は扱わない。しかし、この効果 が顕著になるのは台風の移動速度が遅い事例で、Yablonsky and Ginis (2009) によれば、5m/s 以上の移動 速度ならば鉛直1次元モデルでも海水温低下を十分に再現できると述べられている。

先にも述べた通り、精緻な3次元モデルに比べて計算コストは非常に軽く、ノートパソコン等で5日 予報に係る計算時間は十秒弱である(予報部分のみ)。

5-2 使用データ

モデルに入力する環境場は鉛直シア、中層湿度、下層湿度、周辺場の海面気圧、海面水温、海洋混 合層の深さ等が与えられる。環境場は気象庁全球モデル (GSM) による熱帯低気圧予報進路に沿った場 から計算される。移動速度はこの熱帯低気圧進路予報から与えられる。上陸判定には台風中心の標高が 利用される。標高がゼロを超える値の場合に上陸と判定するが、時間積分はそのまま続ける。

初期渦に関するパラメータは最大風速、最大風速半径を設定し、これらを元に風速場を作成する。予 報実験では、最大風速はベストトラックの値を使用した。最大風速半径はベストトラックには含まれて いないため、70km に固定した。

台風内部の気温・水蒸気場(CHIPSの予報変数としては、湿潤エントロピーxm)の初期値は観測デ ータに基づいて与えるのが困難である。GSM は水平解像度が 20km と CHIPS で使用する半径方向の解 像度数 km と比べて粗く、台風内部の構造を十分に表現できない。そこで、ベストトラックなどの台 風の強度変化率に近づくように、Emanuel et al. (2004) では中層の湿潤エントロピーの予報方程式 (5.5) に以下のような項を加えて、予報を開始する日時の1~2日前から初期値化(スピンアップ)を行っている。

 $\frac{\partial \chi_m}{\partial \tau} = \dots + \gamma_{vi} (V_{obs} - V_{max}) (x_m - x_{m0})$ Yviは定数(0~1)、Vobsはベストトラック最大風速、VmaxはCHIPS での予報変数から(5.7)を用いて診断 された最大接線風速、xmoは環境場の湿潤エントロピー(初期の中層エントロピー欠損)である。xm、 x_{m0} はそれぞれ負の値で、 $x_m > x_{m0}$ となる。よって、 $V_{max} < V_{obs}$ ならば式 (5.9) 右辺の追加項は正となり、

(5.9)

xmを増加する方向に働く。

鉛直シアにより乾燥空気が台風中心付近に輸送される(Ventilation, Gray 1968)影響を取り込むため、 中層の湿潤エントロピーの予報方程式に以下のような項を加えている。

 $\frac{\partial x_m}{\partial \tau} = \dots - \alpha V_{shear}^2 V_{max}^2(x_m - x_{m0})$

(5.10)

αは定数(=0.02)、 V_{shear} は850hPaと200hPaの鉛直シアで、環境場パラメータとして与えられる。 α の値と式(5.10)右辺中の V_{shear} および V_{max} の指数は重回帰から決められた経験式である。 $x_m > x_{m0}$ となるので、環境場として与えられる鉛直シアや CHIPS 内で診断される最大接線風速が強いほど x_m を減らす方向に働く。

上陸による海面からの水蒸気供給の減少は、エンタルピーの交換係数を標高で線形に減少させることで表現され、標高 40m でゼロとなるように設定されている。CHIPS に入力する変数一覧について、表 5.1 にまとめる。

Emanuel et al. (2004) では NCEP/NCAR 再解析値の日平均値と週に1回更新される海面水温から得ら れるポテンシャル強度、海洋混合層と混合層の成層安定度は1か月平均の気候値(Levitas 1982)を入 力として CHIPS を駆動し、その精度評価を行っている。2002年の大西洋域のハリケーンについての検 証結果によると(Emanuel et al. (2004)の Fig. 4)、72時間予報で最大風速の2乗平均平方根誤差(RMSE) は約 25.5kts で、当時の力学モデル(GFDL)や統計力学モデル SHIPS より誤差は小さいことが示され ている²。

5-3 気象庁版 CHIPS (JCHIPS)の構築

GSM から入力する大気環境場(鉛直シア、中層湿度)、気象庁が作成している Merged Global Daily SST (栗原ら,2006)から海面水温を与える。海洋混合層と混合層の成層安定度は ECMWF- Ocean ReAnalysis System 4 (ORAS4: Balmaseda *et al.* 2013)の30年分(1980-2009年)から作成した気候値を 用いる。標高データは GTOPO30を 0.1 度格子に粗視化したものから作成した。ただし、台風中心のみ の値ではなく、半径 100km 内で重み付き平均して標高パラメータを作成した。スピンアップ期間は5

入力変数	変数の定義や説明
初期の最大風速	ベストトラック
初期の最大風速半径	70km で固定
初期の風速ゼロとする半径	350km で固定
海面水温	半径 200km 内で平均
上層アウトフローの温度	半径 800km 内で平均
地上付近の環境場相対湿度	75%で固定。GSM 予報値を入力とすると
	感度が大き過ぎたため。
鉛直シア(850-200hPa)	半径 800km 内で平均
中下層の環境場相対湿度	高度 600hPa、半径 800km 内で平均
環境場地上気圧	半径 800km 内で平均
環境場海洋混合層深さ	ORAS4 気候値、半径 200km 内で平均
海洋混合層水温成層	ORAS4 気候値、半径 200km 内で平均
半径方向の格子数	40
積分間隔	20 秒
半径方向の境界	1200km

表 5.1 入力変数一覧

² http://hurricanes.ral.ucar.edu/repository/models/chip.php

日間とした。大気環境場は台風中心から 800km 内、海洋環境場は 200km 内で平均した値とした。

CHIPS の元論文である Emanuel et al. (2004) では初期値化に用いるYviは 0~1 の間の数字とあるのみ で具体的な値は分からない。そこで、Yvi に対する台風強度予報への依存性を調べた。初期値化に用い るYviは、大きいほどベストトラック強度に至る時間が短くなり、初期誤差(速報解析あるいはベストト ラックとの差)が大きい事例は減少するが、Yviが大き過ぎると式 (5.9) で加えた項が大きくなり過ぎて、 計算が破綻(異常終了)する事例が増加する傾向が見られた(表 5.2)。全事例数 2805 個に対して異常 終了する事例は、35 ~ 55 個(2% 弱)であった。異常終了はしなくともスピンアップがうまくいかず、 初期誤差が大きくなる事例も見受けられた。初期誤差が 20hPa より大きくなった事例は 63~145 個(2.3 ~ 5.2%)であった。γ に対する初期誤差の依存性を図 5.1 に示す。γ が大きいほど、初期誤差が小さい カテゴリ(± 5hPa 内)の割合が増加することが分かる。一方、初期誤差が 30hPa より大きい割合や異 常終了の割合が大きくなる。ここでは、初期誤差が 20hPa 内に収まった事例数の最も多かったYvi =0.5 を使用して、以降の検証結果を示す。最大風速についても同じ条件での検証結果を示す。

5-4 精度検証

5-4-1 統計検証

予報実験は2012-2015年に発生した台風について行った。中心気圧は2693事例、最大風速は2222事例について、それぞれ検証を行った。結果を図5.2に示す。中心気圧、最大風速ともに誤差の時間変化は似ている。バイアスを見ると、FT=06で中心気圧(最大風速)は約3hPa(3kt)で実況より弱めに予報し、徐々にバイアスは小さくなり、FT=96でバイアスが反転して、FT=132で約3hPa(2kt)の過発達となる。RMSE、MAEともにFT=60付近で誤差がほぼ飽和し、それぞれ約22.3hPa、17.5hPa(20.9kt、

表 5.2 初期値化に使用する*Yvi*に対する予報実験の異常終了事例数および初期誤差の大きい事例数の依存 性。予報実験は 2805 事例。カッコ内は全体に対する割合。ただし、下段は正常終了した全事例に対する 割合 (%)。

γ _{vi}	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
予報実験が異常終了した事例数	35	47	49	51	55
	(1.2)	(1.7)	(1.7)	(1.8)	(2.0)
初期誤差が 20hPa 以上の事例数	145	77	63	70	76
	(5.2)	(2.8)	(2.3)	(2.5)	(2.8)



図 5.1 初期値化に使用する γ に対する初期誤差の依存性。横軸は 5hPa 刻み。縦軸は各初期誤差に対する 事例の割合。 16.9kt)の大きさである。

図 5.3 は強度変化率別に分けた 72 時間予報誤差を示す。最大風速については中心気圧の誤差傾向と 同様であるため、図は示さない。バイアスを見ると、実況で深まった時(FT=72 で 70hPa 以上の気圧低下) に 25hPa 以上の正バイアス(実況より弱め)が見られる。強度変化量が小さい時(FT=72 で± 10hPa の 気圧変化)は、負バイアスとなり、過発達傾向となる。RMSE、MAE ともに実況で深まった時(FT=72 で 70hPa 以上の気圧低下)にそれぞれ 30hPa、25hPa 以上の誤差がある。実況で衰弱傾向であるほど、 RMSE、MAE は小さくなる。強度変化別に分けた検証の注意点として、強度変化量が小さくとも、72 時間内で発達・衰弱の過程を経ているものも含まれており、実況の強度変化と全く異なる可能性もある。

5-4-2 事例検証

ここでは、JCHIPS での予報結果の良かった事例・悪かった事例をそれぞれ一つ紹介する。良かった 事例の例として、2015 年台風第 15 号の予報結果(初期値は 2015 年 8 月 14 日 12UTC)を図 5.4 に示す。 JCHIPS はベストトラックに比べて予報開始から 36 時間まで弱めに発達させるが、それ以降は発達傾向 をよく捉えている。図 5.4 で最大発達した時刻(FT=42-66)に注目すると、ベストトラックは Pmin が 45hPa 低下(Vmax が 35kt 増加)に対して、JCHIPS は Pmin が 40hPa 低下(Vmax が 36kt 増加)と急激 な発達を再現した。一方、GSM は緩い発達を示し、Pmin が 7hPa(10kt)の発達で、実況の強度変化を 捉えていなかった。

JCHIPS の強度予報精度の悪かった事例として、2015 年台風第23 号(初期値は2015 年 10 月2 日 12UTC)の予測結果を図5.5 に示す。この事例では、GSM がベストトラックとほぼ同様の強度変化傾向を示すが、JCHIPS は FT12 以降に急発達させ、ベストトラックでは最大強度は965hPa (60kt) に対し、 JCHIPS は912hPa (110kt)と53hPa (50kt)の過発達傾向となる。JCHIPS ではこのような過発達事例が 多数見受けられ、環境場の条件が台風の発達に都合が良いと(過)発達を抑止できないことがあった。 初期値化による中層湿潤エントロピーの与え方や環境場に応じて過発達をしないような改良が必要と考 えられる。



図 5.2 CHIPS の平方根平均二乗誤差 (RMSE、赤線), 平均絶対誤差 (MAE、青線),系統誤差 (BIAS、黒線)。 (a) Pmin、(b) Vmax の検証結果。単位は(a) hPa、(b) kt で左 y 軸に対応。灰色の縦棒は検証事例数で右 y 軸 に対応。検証対象は 2012 ~ 2015 年の全台風、全初期 時刻の予測(00,06,18UTC 初期時刻は予測時間 84 時 間まで、12UTC 初期時刻は 132 時間まで)。



図 5.3 強度変化別に分けた 72 時間予報の CHIPS の RMSE (赤線), MAE (青線), BIAS (黒線)。単位は hPaで左 y 軸に対応。灰色の縦棒は検証事例数で右 y 軸に対応。検証対象は 2012 ~ 2015 年の全台風。



図 5.4 2015 年台風第 15 号 (Goni) の予報実験結果。 予報開始時刻は2015 年 8 月 14 日 12UTC。(a)中心気圧、 (b) 最大風速。黒線はベストトラック、緑線は GSM、 青線は CHIPS の予報結果。



図 5.5 2015 年台風第 23 号 (Chio-wan) の予報実験結果。 予報開始時刻は2015 年 10 月 2 日 12UTC。(a) 中心気圧、 (b) 最大風速。黒線はベストトラック、緑線は GSM、 青線は CHIPS の予報結果。

5-5 まとめと今後の展望

大気海洋結合台風軸対称モデル CHIPS を Kerry Emanual 氏から提供いただき、気象庁 GSM などを入 力値として、132 時間先までの台風強度予報実験が行えるように開発した。それを用いて、過去4年 分の台風(検証に用いた事例数は2639 事例)について強度予報を行い、検証を行った。その結果、事 例別に見ると、GSM では再現されていなかった急発達する事例を捉えている事例が複数見られた。ま た、発達するタイミングはずれているが、生涯到達最大強度を再現する事例も多数みられた。GSM や SHIPS や RI インデックスなどの統計力学モデルで再現が難しい急発達を捉えられる可能性を持つので、 コンセンサスなどでの活用が検討されている(第6章参照)。その一方、誤差はFT=60までに急速に増 加し、その後ほぼ飽和する、バイアスは実況で中心気圧が深まる事例ほど正バイアス(実況より弱め)、 強度変化の小さい事例で負バイアス(過発達)といった傾向がある。また、初期値化が不十分な事例(初 期時刻で実況と大きな差が生じる)、正常終了しない事例が少なからずあった。実際に CHIPS を利用す るには、まず正常終了かつ初期誤差を小さくすることが不可欠である。そのうえで、誤差成長を抑える 取り組みが必要である。

いくつかの入力値は気候値や固定値を与えているが、実況(観測)に基づいたデータを与えることに よって、以上に示した問題について改善することを検討している。本実験では海洋混合層の厚さや水温 成層は気候値で与えているが、実況値を与えることで適切な海洋応答を表現できる。初期の台風構造に ついても固定値で与えているが、最大風速半径や接線風の広がり(風速をゼロとする半径)を実況に基 づいた値を与えることで改善できる可能性がある。

発展として、物理的な方程式及び経験式に基づいて台風強度を推定する手法として、CHIPSよりも さらに簡易である台風強度シミュレータ(Tropical cyclone intensity simulator)がEmanuel (2017)によ って提案されている。これは温暖化時の台風最大強度推定が主目的で開発されたものであるが、CHIPS と比べて強度誤差は大差ないことが示されている。予報変数は最大接線風速と内部コアの湿度に相当す る変数の2つで、解く方程式系は2つの常微分方程式となり、CHIPSに比べて簡易であることが明ら かである。つまり、方程式系で表現される構造には鉛直構造はなく、半径方向の構造もない。このよう な簡易な物理的な関係式に基づく台風強度手法を導入することで、コンセンサス予報に独立した情報を 与えられる可能性があることから、実現可能性を調査することも1つの選択肢である。 参考文献

- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイ クロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日 別海面水温解析, 測候時報, 73, s1-s18.
- Charney, J. G., and A. Eliassen, 1964: On the Growth of the Hurricane Depression. J. Atmos. Sci., 21, 68–75, doi:10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2
- DeMaria, M., C. R. Sampson, J. A. Knaff, and K. D. Musgrave, 2014: Is Tropical Cyclone Intensity Guidance Improving? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 387–398, doi:10.1175/BAMS-D-12-00240.1
- Emanuel, K., 1989: The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis. J. Atmos. Sci., **34**, 3431–3456, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<3431:TFANOT>2.0.CO;2
- Emanuel, K. A., 1995: The Behavior of a Simple Hurricane Model Using a Convective Scheme Based on Subcloud-Layer Entropy Equilibrium. J. Atmos. Sci., 52, 3960–3968,doi:10.1175/1520-0469%281995%29052<3960%3ATBOASH>2.0.C O%3B2
- Emanuel, K. A., C. Desautels, C. Holloway, and R. Korty, 2004: Environmental Control of Tropical Cyclone Intensity. J. Atmos. Sci., 61, 843–858, doi:10.1175/1520-0469%282004%29061<0843%3AECOTCI>2.0.CO%3B2
- Emanuel, K., and F. Zhang, 2016: On the Predictability and Error Sources of Tropical Cyclone Intensity Forecasts. J. Atmos. Sci., 73, 3739–3747, doi:10.1175/JAS-D-16-0100.1
- Gray, W. M., 1968: Global View of Origin of Tropical Disturbances and Storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669–700, doi:10.1175/1520-0493%281968%29096<0669%3AGVOTOO>2.0.CO%3B2
- Ito, K., Y. Ishikawa, Y. Miyamoto, and T. Awaji, 2011: Short-Time-Scale Processes in a Mature Hurricane as a Response to Sea Surface Fluctuations. J. Atmos. Sci., 68, 2250–2272, doi:10.1175/JAS-D-10-05022.1
- Levitus, S., 1982: Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Prof. Paper 13, 173 pp.
- Marks, F. and N. P. Kurkowski, 2018: Update on NOAA' s Hurricane Forecast Improvement Project: Proposed Framework for Addressing Section 104 of the Weather Research Forecasting Innovation Act of 2017, TCORF2018, [Available online at https://www.ofcm.gov/meetings/TCORF/ihc18/session_7/7-1-presentation. pdf]
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the axisymmetric spontaneous intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112–129, doi:10.1175/JAS-D-11-0285.1
- Rotunno, R., and K. A. Emanuel, 1987: An air-sea interaction theory for tropical cyclones, Part II: Evolutionary study using axisymmetric nonhydrostatic numerical model. J. Atmos. Sci, 44, 542–561,doi:10.1175/1520-0469%281987%29044<0542%3AAAITFT>2.0.CO%3B2
- Sampson, C., and Jo. Knaff, 2014: Advances in Intensity Guidance, WMO 8th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-8), 26pp.[Available online at http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic2.7_ AdvancesinIntensityGuidance.pdf]
- Schade, L. R., and K. A. Emanuel, 1999: The Ocean's Effect on the Intensity of Tropical Cyclones: Results from a Simple Coupled Atmosphere-Ocean Model. J. Atmos. Sci., 56, 642–651, doi:10.1175/1520-0469%281999%29056<0642%3ATOS EOT>2.0.CO%3B2
- Yablonsky, R., and I. Ginis, 2009: Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricane–ocean model forecasts. Mon. Wea. Rev., 137, 4410–4419, doi:10.1175/2009MWR2863.1

第6章 コンセンサス予測

6-1 コンセンサス予測とは

複数の予測結果の平均による予測を、一般的にコンセンサス予測と呼ぶ。平均のとり方は、コンセン サス予測を構成する各予測結果に均等な重みを置く単純平均、予測精度が相対的に高い予測結果に大き い重みをつける重み付き平均がある(例えば、山口 2013)。コンセンサス予測は熱帯低気圧の進路予報 の分野で幅広く利用されており(Elliott and Yamaguchi 2014)、コンセンサス予測の方が各予測よりも統 計的に精度が高くなることが多くの先行研究で示されている(例えば、Goerss 2000; Goerss *et al.* 2004; Komori *et al.* 2007; Sampson *et al.* 2007)。強度予報の分野では、NHC や米国合同台風警報センター(Joint Typhoon Warning Center、JTWC)において、数値予測の結果や統計・力学手法による強度予測の結果な ど複数の予測結果に基づくコンセンサス予測が発表予報に採用されている(DeMaria *et al.* 2014)。

本章では、現在気象庁の強度予報で使用されている気象庁全球モデル(JMA 2013)による予測結果 と統計手法による強度予測である SHIFOR(付録 1)、さらに台風予報・解析技術高度化プロジェクト のもと新たに開発した SHIPS(2章)、LGEM(3章)、CHIPS(5章)による5つの予測結果を用いたコ ンセンサス予測の精度検証結果を示す。また、この5つの予測結果に、気象庁非静力学モデル(NHM、 Saito *et al.* 2006)による台風強度予測を加えた、全6つの予測結果でコンセンサス予測を作成した場合 の精度検証結果も示す。

6-2 使用データ

SHIPS、LGEM、CHIPS の予測データは、それぞれ 2 章、3 章、5 章で用いられている 2013 年~2015 年のデータを使用した。気象庁全球モデル(以下、GSM)と SHIFOR の予測データは、気象庁の現業 強度予報で使用されている 2013 年~2015 年のデータを使用した。気象庁非静力学モデルによる予測デ ータに関しては、Ito et al. (2018)が 2012 年~2014 年の台風を対象として北西太平洋域全域で数値実験 を行った際のデータを使用した。数値実験の設定等については Ito et al. (2018)を参照されたい。検証には、 気象庁ベストトラックを使用した。

6-3 気象庁版コンセンサス予測の構築

本章では、コンセンサス予測を構成する各予測結果に均等な重みを置く単純平均に加え、重み付き平 均によるコンセンサス予測の検証を行う。また、予測データをそのまま使う手法に加え、初期時刻によ るバイアスを補正した予測(傾向予測)によるコンセンサス予測の検証も行う。本章のコンセンサス予 測は、中心気圧 (Pmin)を対象としたコンセンサス予測であり、6-4節の精度検証では中心気圧の予測精 度に関して検証が行われる。

6-4 精度検証

まず始めに、個別の予測結果の検証結果を示す。これらは各章で詳細に記述されているが、本章で はそれらをまとめて共通のサンプルで検証を行った結果を示す。このように検証対象の全ガイダンスで 検証サンプルを揃えて検証を行う手法を、共通サンプル検証という。図 6.1 は、GSM、SHIPS、LGEM、 CHIPS、SHIFOR による強度予測の平方根平均二乗誤差(RMSE)、平均絶対誤差(MAE)、系統誤差(BIAS) で、検証対象は 2013 ~ 2015 年の全台風、全初期時刻(00、06、12、18 UTC)の予測である。GSM は、 12UTC 初期時刻の予報時間は 11 日であるが、00、06、18UTC 初期時刻は予測時間が 84 時間であるため、

¹ 山口宗彦



図 6.1 GSM(赤線), SHIPS(緑線), LGEM(青線), CHIPS(橙線), SHIFOR(黒線)による強度予測の(a) 平方 根平均二乗誤差(RMSE),(b)平均絶対誤差(MAE),(c)系統誤差(BIAS)。単位はhPaで左y軸に対応する。 黒丸は検証の事例数で右y軸に対応する。検証対象は2013 ~ 2015年の全台風、全初期時刻の予測(00, 06,18UTC 初期時刻は予測時間3日まで、12UTC 初期時刻は5日まで)。

FT (h)

検証の事例数は4、5日予測で少なくなる。SHIPSは、RMSE、MAE、BIASのどの検証においても、既 存の GSM や SHIFOR よりも誤差が小さい。RMSE、MAE は、3 日予測までは誤差が増大し、それ以降 ほぼ変化しないという特徴を持つ。BIASは、予報期間を通じてほぼゼロに近い値であるが、予測前半(1、 2日予測)は中心気圧を浅く、予測後半(4、5日予測)は中心気圧を深く予測する傾向がある。LGEM は、SHIPS とほぼ同じ特徴を持っているが、予測時間4、5日では SHIPS よりも RMSE、MAE が大き い。RMSE は、既存の GSM や SHIFOR よりも誤差が小さいが、MAE で評価すると LGEM と GSM は 5日予測でほぼ同じ値となっている。CHIPSは、既存のGSMやSHIFORと比較するとBIASは小さい。 RMSE、MAE では目立った改善は見られないものの、少なくとも GSM と SHIFOR と同程度の精度を持 っている。CHIPS は台風強度の傾向予測は得意であり、また SHIPS や LGEM が不得意とする急発達の 予測を得意とする。また、コンセンサス予測の観点からは、独立した予測結果を複数用いることが精度 向上に寄与すると期待される。

表 6.1 は、精度評価のベースラインとなる SHIFOR の RMSE、MAE に対する各予測の改善率(%)を示す。 RMSE の改善率と MAE の改善率を比較すると、概して後者の方が大きい傾向にある。これは、RMSE は大外しをより大きな誤差として扱うためであると考えられる。予報時間別に見た最大改善率は RMSE で 22.9 ~ 29.2 %、MAE では 26.6 ~ 33.6 % であり、全予報時間で SHIPS が最大の改善率を与える。

次に、コンセンサス予測の検証結果を示す。本調査では、1)単純平均、2)傾向予測を使った単純平均、 3) 重み付き平均、4) 傾向予測を使った重み付き平均、の全4種類のコンセンサス予測を作成した。「単 純平均」は、GSM、SHIPS、LGEM、CHIPS、SHIFOR の全5つの予測結果に均等に 0.2 の重みを付け た予測結果である。「傾向予測」とは、予報初期時刻におけるベストトラックと予報時間0時間におけ る予測値との差(初期バイアス)を、その後の予測値に足したものを予測値とするものである。「重み 付き平均」および「傾向予測を使った重み付き平均」は、RMSE、MAEの改善率がそれぞれ最大とな るように各予測結果の重みを予報時間ごとに変えたものである。表 6.2 は、SHIFOR の RMSE、MAE に 対する各コンセンサス予測の改善率(%)を示す。表 6.1 同様、MAE の改善率の方が RMSE の改善率 よりも大きい傾向がある。予報時間別に見た最大改善率は RMSE で 26.2 ~ 33.9 %、MAE では 30.1 ~ 36.0%であり、個々の予測結果が与える最大の改善率よりも大きくなる。1、2日先は、「傾向予測を使 った重み付き平均」、3日先以降は「重み付き平均」が最大の改善率を与える。表 6.3 は、最大の改善率 を与えるコンセンサス予測の各強度予測の重みを示す。図 6.1、表 6.1 の結果が示すとおり、SHIPS の 重みが相対的に大きい傾向がある。CHIPS や SHIFOR の重みは予測時間によってはゼロでは無く、改

表 6.1 各強度予測 (GSM, SHIPS, LGEM, CHIPS)の SHIFOR に対する改善率 (%)。(a)は RMSE, (b)は MAE の改善率で、各予測時間で最も精度の良い強度予測の改善率を太字とした。検証のサンプルは図6.1と同じ。

(a)					
改善率(%)	1日予測	2日予測	3日予測	4日予測	5日予測
GSM	-53.4	-11.4	-1.4	-5.6	+1.7
SHIPS	+25.7	+29.2	+28.2	+25.8	+22.9
LGEM	+23.9	+26.0	+24.7	+18.4	+7.6
CHIPS	-24.8	-4.1	+3.1	+3.0	+0.7

(b)					
改善率(%)	1日予測	2日予測	3日予測	4日予測	5日予測
GSM	-31.5	+5.3	+11.3	+5.8	+13.0
SHIPS	+26.6	+33.6	+31.3	+29.1	+28.0
LGEM	+26.2	+30.7	+28.1	+20.1	+12.7
CHIPS	-28.5	-2.6	+5.2	+5.6	+4.8

善率の向上に寄与していることが分かる。GSM は、予測時間後半で重みが大きくなる傾向がある。これは、力学的な手法に基づいている予測結果の影響が予測時間とともに増大し、一方で統計的な手法に依存している SHIPS、LGEM の影響が予測時間とともに減少していることを示しているのかも知れない。

最後に、これまでに登場した全5つの予測結果に、気象庁非静力学モデル(NHM、Saito et al. 2006) を加えて全6つの予測結果でコンセンサス予測を作成した場合の改善率を示す。Ito et al. (2018)は、 2012 ~ 2014年の全台風、12UTC 全初期時刻の予測(3日予測)をNHMを使用して行い、その強度 予測誤差がGSM よりも小さいこと、さらに米国のハリケーン専用の領域モデル(Hurricane Weather Research and Forecasting Model; HWRF)と同程度の予測精度を持つことを示した。表 6.4 は、SHIFOR の

表 6.2 各コンセンサス予測(単純平均、単純平均+傾向予測、重み付き平均、重み付き平均+傾向予測)の SHIFOR に対する改善率(%)。(a)は RMSE, (b)は MAE の改善率で、各予測時間で最も改善率の高い強度予測の値を太字とした。検証のサンプルは図 6.1 と同じ。

(a)					
改善率(%)	1日予測	2日予測	3日予測	4日予測	5日予測
単純平均	+18.8	+25.8	+27.8	+26.1	+24.5
単純平均					
+	+30.5	+26.4	+24.2	+20.9	+17.0
傾向予測					
重み付き平均	+27.4	+30.1	+30.2	+27.7	+26.2
重み付き平均					
+	+33.9	+31.6	+29.1	+26.2	+21.1
傾向予測					

(b) 改善率(%) 1日予測 2日予測 3日予測 4日予測 5日予測 単純平均 +30.5+21.8+30.4+27.5+29.1単純平均 +32.7+29.5+25.4+20.4+20.8+ 傾向予測 重み付き平均 +29.0+35.3+34.8 +30.1 +32.6 重み付き平均 +36.0 +35.4 +31.2+27.3+26.8+ 傾向予測

表 6.3 表 6.2 で最も改善率の高い強度予測を与える各強度予測 (GSM, SHIPS, LGEM, CHIPS, SHIFOR) の重 み。(a) は RMSE, (b) は MAE。検証のサンプルは図 6.1 と同じ。

重み	1日予測	2日予測	3日予測	4日予測	5日予測
GSM	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
SHIPS	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4
LGEM	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
CHIPS	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
SHIFOR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

(b)					
重み	1日予測	2日予測	3日予測	4日予測	5日予測
GSM	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3
SHIPS	0.4	0.6	0.5	0.5	0.4
LGEM	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
CHIPS	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
SHIFOR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

RMSE、MAE に対する各コンセンサス予測の改善率(%) で、NHM を使用した場合と使用しない場合 の改善率をそれぞれ示す。検証対象は 2013 ~ 2014 年の全台風で、12UTC 初期時刻の予測で予測時間 3 日である。RMSE、MAE ともに、どの予測時間でも NHM を使用した方が改善率は大きい。例えば、3 日予測では、RMSE は 35.7 から 39.8 % へ、MAE は 42.1 から 46.8% へと、4 % 程度改善率が上昇しており、 NHM を使用することにより予測精度が向上することが分かった。

6-5 まとめと課題

本章では、気象庁の強度予報で使用されている GSM、SHIFOR に、「台風予報・解析技術高度化プロ ジェクトチーム」で開発を行った SHIPS、LGEM、CHIPS を加え、全5つのガイダンスを用いてコンセ ンサス予測による強度予測の有効性を調査した。SHIFOR からの改善率で見ると、個別のガイダンスの 精度検証では、予報時間1~5日の全予報時間で SHIPS が最大の改善率を与えた。これに対して、重 み付き平均、または傾向予報を用いた重み付き平均によるコンセンサス予測は SHIPS よりも改善率が 大きくなることが分かった。さらに、上記5つのガイダンスに NHM による強度予測を加えてコンセン サス予測を作成すると、さらに改善率が大きくなることが分かった。

現業予報の観点からは、重み付き平均という手法は扱いづらいかも知れない。本調査では、単純平均、 または傾向予報を用いた単純平均によるコンセンサス予測の検証を行ったが、SHIPS 単独の予測に対す

表 6.4 NHM による強度予測を加えない場合と加えた場合の各コンセンサス予測(単純平均、単純平均+ 傾向予測、重み付き平均、重み付き平均+傾向予測)の SHIFOR に対する改善率(%)。(a)は RMSE, (b) は MAE の改善率で、各予測時間で最も改善率の高い強度予測の値を太字とした。検証対象は 2013 ~ 2014 年の全台風、12UTC 初期時刻の予測(予測時間 3 日まで)。

改善率(%)	1日	1日予測		2 日予測		3日予測	
	NHM なし	NHM あり	NHM なし	NHM あり	NHM なし	NHM あり	
単純平均	+18.9	+12.6	+25.0	+25.3	+31.6	+34.0	
単純平均							
+	+31.7	+30.5	+27.0	+24.2	+29.3	+24.4	
傾向予報							
重み付き平	+30.1	+91.9	+30.6	1 91 0	+35.1	T30 8	
均	+30.1	+21.5	+30.0	+01.9	+30.1	+09.0	
重み付き平							
均	195.0	±96 1	191 0	±91.9	195 7	⊥91 9	
+	+55.0	+00.1	+51.0	101.2	+00.7	101.0	
傾向予報							

- 1	-)	
(aı	

改善率(%)	1日予測		2 日予測		3日予測	
	NHM なし	NHM あり	NHM なし	NHM あり	NHM なし	NHM あり
単純平均	+19.9	+14.9	+33.0	+34.1	+37.5	+40.5
単純平均						
+	+31.4	+29.9	+33.0	+29.7	+33.7	+28.1
傾向予報						
重み付き平	190.9	199.1	1.977.4	190.1	149.1	146.9
均	+29.5	722.1	±97.4	709.I	742.1	740.0
重み付き平						
均	199.0	194.1	120.0	196.7	141.0	196.1
+	±∂2.8	⊤∂4.1	+36.9	±90.7	±41.9	7-06.1
傾向予報						

(b)

- 51 -

るメリットは大きくなかった。コンセンサス予測では、同程度の精度の予測を組み合わせることで精度 の改善が見込め、精度が相対的に悪い予測を加えると逆にコンセンサス予測の精度が悪化する可能性が ある(例えば、Elsberry and Carr 2000)。実際のコンセンサス予測の運用では、そのような観点からコン センサスを構成する予測の選択(たとえば、SHIPS と NHM の2つによるコンセンサス予測など)を慎 重に行う必要があるだろう。

参考文献

- DeMaria, M., C.R. Sampson, J.A. Knaff, and K.D. Musgrave, 2014: Is Tropical Cyclone Intensity Guidance Improving? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 387–398, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00240.1
- Elliott, G., and M. Yamaguchi, 2014: Advances in Forecasting Motion, WMO 8th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-8), 44pp. [Available online at http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic1_ AdvancesinForecastingMotion.pdf]
- Elsberry, R. L., and L. E. Carr III, 2000: Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts Errors versus spread, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4131-4138, https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)129<4131:CODTCT>2.0.CO;2
- Goerss, J. S., 2000: Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1187-1193, https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<1187:TCTFUA>2.0.CO;2
- Goerss, J. S., C. R. Sampson, and J. M. Gross, 2004: A history of western North Pacific tropical cyclone track forecast skill, *Wea. Forecasting*, **19**, 633-638, https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0633:AHOWNP>2.0.CO;2
- Ito, K., M. Sawada, and M. Yamaguchi, 2018: Tropical cyclone forecasts for the Western North Pacific with high-resolution atmosphere and coupled atmosphere-ocean models, *Papers in Meteorology and Geophysics*, 67, 15-34, https://doi. org/10.2467/mripapers.67.15
- Japan Meteorological Agency, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System and Numerical Weather Prediction Research. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan. [Available online at http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/pdf/outline2013_all.pdf]
- Komori, T., M. Yamaguchi, R. Sakai, and Y. Takeuchi, 2007: WGNE intercomparison of tropical cyclone forecasts with operational global models: Quindecennial report, *Science Highlights*, WCRP, 4pp.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266– 1298, https://doi.org/10.1175/MWR3120.1
- Sampson, C. R., J. A. Knaff, and E. M. Fukada, 2007: Operational evaluation of a selective consensus in the western north pacific basin, *Wea. Forecasting*, 22, 671–675, https://doi.org/10.1175/WAF991.1
- 山口宗彦, 2013: 台風の進路予報, 気象研究ノート 台風研究の最前線(下), 227, 15-35.

第7章 まとめ1

気象庁は、WMO地区特別気象中枢(RSMC)台風センターとして、北西太平洋域の台風災害の防止・ 軽減に貢献している。近年、同海域において、諸外国が、我が国と同等以上の進路予報精度を達成する とともに、我が国に先立ち5日先強度予報を導入するなど、台風情報の高度化を図っている。当庁が引 き続き、RSMCとして国際競争力を維持し、我が国を含む北西太平洋域の台風災害の防止・軽減に引き 続き主導的な役割を果たすためには、台風解析・予報技術のさらなる向上が不可欠である。

このような背景のなか、気象庁予報部及び気象研究所台風研究部が中心となり、台風情報の高度化 に向けた研究開発や現業体制の強化に必要な項目について検討・整理を行った。取り纏めた項目は多岐 にわたることから、各項目が研究開発から現業化までの一連の取り組みとして、有機的に連携し、また、 効率的かつ円滑に実施されるよう、「台風予報・解析技術高度化プロジェクトチーム」を2015年9月に 設置した。本プロジェクトチームの任務のひとつは、「5日先台風強度予報ガイダンスの開発・現業導入」 で、台風強度予報の改善、および予報時間を3日から5日へと延長することを目的として、さまざまな 台風強度予測手法(ガイダンス)の開発を行った。

本技術報告では、プロジェクトチーム活動で開発を行った5つのガイダンスに関して、その概要や気 象庁で運用するために行なった技術開発、予測精度や利用上の注意点等について報告した。5つのガイ ダンスは、SHIPS、LGEM、RII、CHIPS、コンセンサス予測である。SHIPS、LGEMは、NHCやJTWC で実績のある統計力学的手法による強度ガイダンスで、台風の中心気圧と最大風速を予測する。第2章、 第3章で示されているとおり、これらのガイダンスを利用することで気象庁の強度予測の大幅な精度改 善が見込まれる。RII も NHC や JTWC で実績のある統計力学的手法による強度ガイダンスで、急発達 の可能性を百分率で予測する。SHIPS や LGEM が不得手とする急発達の予測を支援するツールで、第 4章で示されているとおり、確率予報として十分な精度があることが確認された。CHIPS は、簡易的な 軸対称数値モデルを用いた力学的手法による強度ガイダンスであり、生涯到達最大強度や急発達の予測 などに利用できる可能性がある。コンセンサス予測は、複数のガイダンスを組み合わせて利用するガイ ダンスで、第6章で示されているとおり、単独のガイダンスを用いる場合よりもコンセンサス予測の方 が多事例の検証では精度が良い傾向にあることが確認された。

これら開発したガイダンスは、プロジェクトチーム活動のもと、既に気象庁予報部予報課に技術移転 されており、試験的に利用されている。2019年3月には、SHIPSの現業運用が開始される予定で、そ れに合わせて台風強度の予報時間が現在の3日から5日へと延長される予定である。引き続き、プロジ ェクトチーム活動のもと、気象庁と気象研究所の連携を図り、現業化に関する課題を一つ一つ解決して いくとともに、さらなる台風強度予測の改善に向けて研究・開発を進める計画である。

本技術報告では、プロジェクトチーム活動のもとで開発を行ったガイダンスについて、その手法や 具体的な計算手順、使用データなど、技術的な内容を報告した。実際の気象庁における利用方法や精度 検証に関しては、今後担当課室が発表する資料や研修テキストなどを参照して頂きたい。

¹ 山口宗彦

謝辞

気象庁版 SHIPS の開発に当たり、米国の SHIPS 開発者から多大なる援助を受けた。特に、米国ハリ ケーンセンターの Mark DeMaria 氏には簡易版 SHIPS の開発からその後の精度向上に関する取組みま でサポートいただいた。コロラド州立大学 CIRA (Cooperative Institute for Research in the Atmosphere) の Kate Musgrave 氏からは SHIPS コードを提供いただいた。米海軍研究所の Back Sampson 氏には、気象 庁版 SHIPS を開発するきっかけを作ってくださった。また、本研究開発の一部は、JAXA 第8回降水観 測ミッション (PMM) から研究支援を受けた。

気象研究所における LGEM の開発に当たり、米国ハリケーンセンターの Mark DeMaria 氏からソース コードを提供していただいた。

気象庁版 RI インデックスの開発に当たり、米国の開発者から多大なる援助を受けた。特に、米国ハ リケーンセンターの Mark DeMaria 氏、米国北大西洋海洋気象研究所ハリケーン研究部の John Kaplan 氏 には様々なサポートをいただいた。

気象庁版 CHIPS の開発に当たり、マサチューセッツ工科大学の Kerry Emanuel 教授の開発したコード を頂き、使用許可を頂いた。また、本研究開発の一部は、科学研究費助成事業・基盤C(25400461、 16K05556)の支援を受けた。特に、琉球大学の伊藤耕介助教、研究協力者であるマイアミ大学研究海 外特別研究員の宮本佳明博士にはコードの改良及び検証において多大な協力を頂いた。

コンセンサス予測の開発の一部は、科学研究費助成事業・基盤C(16K05556)の支援を受けた。 最後に、本プロジェクトチーム活動に関係した皆様に感謝申し上げます。特に、プロジェクトチームの 立ち上げに尽力いただいた小出直久調査官、プロジェクトの管理者である予報課長、数値予報課長、台 風研究部長、実施責任者であるアジア太平洋気象防災センター長、主任予報官、数値予報モデル開発推 進官、台風研究部第一・第二研究室長に心より感謝申し上げます。

付録 1: SHIFOR

Statistical Hurricane Intensity Forecast (SHIFOR、Jarvinen and Neumann 1979)は、統計手法に基づく台風 強度ガイダンスで、数値予報モデルや高度な台風強度ガイダンスのベンチマークとして、またコンセン サス予測の一メンバーとして利用される(第6章)。第2章、第3章で述べた SHIPS や LGEM が「統計 力学ガイダンス」と呼ばれるのに対して、SHIFOR は「統計ガイダンス」と呼ばれる。SHIPS や LGEM は力学手法である数値予報の結果を利用するのに対して、SHIFOR の説明変数は台風の位置や強度の解 析値などで、将来の情報である数値予報の結果は用いていないためである。

基本的な設計は線形モデルの重回帰分析で、SHIPS と同一である。SHIFOR は、最大風速を目的変数 として開発されたが、気象庁では説明変数の風速項を気圧項に変えることで目的変数を中心気圧として いる。説明変数の候補は表 A1.1 に示す 7 つの基本的な変数とこれらを自乗、または相互に乗じた合計 35 個の変数である。JDAY で引かれている数値 248 は Neumann(1993) による北西太平洋での統計的な活 動のピーク日である。

重回帰係数作成のためのトレーニングデータには気象庁ベストトラックを使用する。気象庁ベストト ラックは 1951 年以降のデータが存在するが、最大風速等が記載されるようになった 1977 年以降のデー タを使用する。2011 年、2012 年で独立した検証を行うため、1977 年から 2010 年をトレーニングサン プルとする。

トレーニングサンプルは以下の条件を満たすものを使用する。

- 1. 解析時刻に TS の勢力以上で、北緯 45 度以南にある。
- 2. 解析時刻の12時間前がTS以上の勢力である。
- 3. 中心位置は沿岸から 50km 以上離れている。
- 4. 解析時刻の6時間前と12時間前に上陸していない(2.の条件を満たしている)。

海陸判別は簡易的に気象庁全球モデルの海陸分布を 0.5 度単位に変換したものを利用する。これらの 条件を満たした入力値の分布を図 A1.1 に示す。入力値の数は 14173 点となる。

重回帰係数の導出に関しては、説明変数の候補が多く、総当たりによる最適な説明変数の選択は計算 量の問題から困難なため、ステップワイズ変数選択を行った。35 個の説明変数は7 個の基本的な変数 を乗じて作っているため、相関が高く多重共線性が生じる変数が複数ある。多重共線性の除去は次のよ うに行った。まず全ての説明変数でステップワイズ選択を行い、仮の重回帰係数を求める。そこで選 択された変数から Variance Inflation Factor (VIF) が大きく多重共線性が疑われる変数を除去する。残った 変数で再度変数選択を行い、選択された変数すべてで VIF が十分小さくなるまで繰り返す。計算は統

	公 MI.I 还不可靠他们交 9人。
JDAY	年初からの通算日-248
LAT	中心位置の緯度(deg)
LON	中心位置の経度(deg)
PC	中心気圧(hPa)
DPC	12時間前との気圧差。PC(0h)-PC(-12h)
U	東向き移動速度(km/h)
V	北向き移動速度(km/h)

表 Δ11 基本的た説 間 変数



図 A1.1 重回帰係数作成のためのトレーニングデータとして 使用する気象庁ベストトラック (1977-2010)の分布。

計言語 R を用いた¹。最終的に選択された説明変数とその偏回帰係数を表 A1.2 に、標準化偏回帰係数 を表 A1.3 に示す。表 A1.2 を見ると定数項 (CONST) は時間とともに増加し、96 時間や 120 時間では他 の説明変数による調整の幅は小さくなる。標準化偏回帰係数は、各説明変数の目的変数に対する変動 の寄与を示す。予報前半では PC や DPC (表 A1.1)を含む項の寄与が大きいが、予報が進むにつれて JDAY、LAT、LON を含む項の寄与が大きくなり、予報後半は気候値的な様相を呈する。また、予報前 半は PC を含む項が大きな寄与を示しているが、予報後半になると突出した寄与を持つ項はない。重回

変数/予報時間	12	24	48	72	96	120
LAT	0	0	0	0	0	1.919348
LON	0	0	-0.24345	-0.38453	-0.41037	0
PC	0	0	0	0.159792	0	0
DPC	0.548418	0	0	0	0	0
JDAY*JDAY	0.000195	0.000436	0.000785	0.000963	0.000914	0.000868
JDAY*LAT	0	0.001477	0.002617	0.003939	0.003989	0.004033
JDAY*LON	8.66E-05	0	0	0	0	0
JDAY*DPC	0.00022	0	0	0.001491	0	0
JDAY*U	0	0	0	0	0	0.000956
LAT*LAT	0.007633	0	0.041429	0.056518	0.057876	0
LAT*PC	0	0.000809	0	0	0	0
LAT*DPC	0	0	0	0.018796	0	0
LON*PC	-4.94E-05	-7.98E-05	0	0	0	-0.00039
LON*DPC	0	0.005711	0.005466	0	0.002017	0.00201
PC*PC	0.000472	0.000389	0.000212	0	1.31E-05	0
DPC*DPC	0	0	0.007019	0	0	0
CONST	527.5118	595.7253	780.5963	839.0114	987.8261	985.2787

表 A1.2 最終的に選択した説明変数とその偏回帰係数。CONST は定数項。

表 A1.3 表 2 と同じ。	ただし値は標準	北偏回帰係数	で定数項はない。
-----------------	---------	--------	----------

変数/予報時	12	24	48	72	96	120
間						
LAT	0	0	0	0	0	0.454659
LON	0	0	-0.13825	-0.21523	-0.23489	0
PC	0	0	0	0.164252	0	0
DPC	0.203477	0	0	0	0	0
JDAY*JDAY	0.074835	0.16532	0.28939	0.34943	0.337449	0.334778
JDAY*LAT	0	0.06687	0.106787	0.149501	0.145518	0.145308
JDAY*LON	0.035922	0	0	0	0	0
JDAY*DPC	0.005649	0	0	0.038308	0	0
JDAY*U	0	0	0	0	0	0.038786
LAT*LAT	0.097551	0	0.410551	0.509384	0.49675	0
LAT*PC	0	0.218475	0	0	0	0
LAT*DPC	0	0	0	0.120928	0	0
LON*PC	-0.03124	-0.04846	0	0	0	-0.23501
LON*DPC	0	0.287846	0.269533	0	0.103987	0.107354
PC*PC	0.902376	0.740319	0.404549	0	0.02643	0
DPC*DPC	0	0	0.051	0	0	0

1 以下のサイトから重回帰分析(ステップワイズ変数選択)を入手した。

http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/R/sreg.html

帰分析での重回帰係数 R、決定係数 R2、自由度調整済み決定係数 R2*、事例数 N を表 A1.4 に示す。これらの係数は予報時間が進むにつれて減少している。

独立資料として検証を行った 2011-2012 年の結果を図 A1.2 に示す。気象庁全球モデル(GSM)によ る強度予測は 36 時間予報までは初期時刻における誤差の補正を行っているため、バイアスは 24 時間ま でとそれ以降で傾向が異なる。発表予報は常に負のバイアス(強めに予報)で、予報時間とともにバイ アスが増加する。RMSE で見ると発表予報は SHIFOR よりやや良いか同程度の結果となっている。統計 ガイダンスの 4 日目、5 日目の RMSE の増加は 3 日予報までの誤差の大きさとつながりが良い。

参考文献

- Jarvinen, B. R., and C. J. Neumann, 1979: Statistical forecasts of tropical cyclone intensity. NOAA Tech. Memo. NWS NHC-10, 22 pp.[Available online from National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 5285 Port Royal Rd., Springfield, VA 22151]
- Neumann, C. J., 1993: Global Overview. *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. [Available online athttp://cawcr.gov. au/bmrc/pubs/tcguide/globa_guide_intro.htm]

表 A1.4 重回帰分析での重回帰係数等。重回帰係数 R、決定係数 R2、自由度調整済み決定係数 R2* と事 例数 N。

	12	24	48	72	96	120
R	0.95732	0.86015	0.63958	0.53172	0.51212	0.49565
R2	0.91646	0.73986	0.40906	0.28273	0.26227	0.24567
R2*	0.91642	0.73971	0.40854	0.2819	0.26128	0.24427
Ν	12141	10452	8018	6075	4493	3235



図 A1.2 2011 ~ 2012 年の中心気圧の予報の平均誤差(左)と RMSE(右)。共通サンプルによる検証。 横軸は予報時間(時間)、縦軸は誤差(hPa)。青は SHIFOR、赤は GSM、緑は発表予報。事例数は 12 時間予報から順に 554、860、685、520、99、71。

付録 2: 検証指標

本報告では、以下の分割表と Wilks (2006) に基づき、精度検証で使用する各種指標の定義を定める。

表 分割表

	観測: Yes	観測: No
予測: Yes	a	b
予測: No	с	d

スレット・スコア (TS);
$$\frac{a}{a+b+c}$$

$$\vec{N} \vec{T} \vec{T} \vec{X}; \frac{a+b}{a+c}$$

捕捉率(Hit rate, POD (Probability of detection)); $\frac{a}{a+c}$

空振り率(FAR (False alarm ratio)); $\frac{b}{a+b}$

誤検出率 (F (False alarm rate), POFD (Probability of false detection)); $\frac{b}{b+d}$

RI インデックスのような確率予測の精度評価には、ブライア・スキル・スコアが使われる。
ブライア・スキル・スコア (BSS); BSS =
$$\left[1 - \frac{BSM}{BSC}\right] \times 100$$

BSM; RI インデックス予測(確率予測)のブライア・スコア
BSC; RI の気候学的確率予測のブライア・スコア
ブライア・スコア (BS) の定義は以下の通り。
 $BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (p_i - a_i)^2$
N は事例数、 p_i は確率予測値 (0 から1までの値)、 a_i は実況値(現象があれば1、なければ0とする)。

参考文献

Wilks, D. S., 2006: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2d ed. International Geophysics Series, Vol. 91, Academic Press, 627 pp.

略語表

- · ACCESS: Australian Community Climate and Earth System Simulator
- · AROME: MeteoFrance high resolution cloud resolving model
- BSS: Brier Skill Score
- · CHIPS: Coupled Hurricane Intensity Prediction System
- · COAMPS-TC: Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System for Tropical Cyclones
- · COBE-SST: Centennial Observation-Based Estimates of Sea Surface Temperature
- · ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- FAR: False alarm ratio
- · GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- GFDN: Navy version of GFDL
- · GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation
- GTOPO30: Global 30 Arc-Second Elevation
- · HWRF: Hurricane Weather Research and Forecasting model
- · IMSL: International Mathematics and Statistics Library
- IR: Infrared
- JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis
- JTWC: Joint Typhoon Warning Center
- LGEM: Logistic Growth Equation Model
- MAE: Mean Absolute Error
- · MGDSST: Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperatures
- MOVE/MRI.COM: Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation System / Meteorological Research Institute Community Ocean Model
- MPI: Maximum Potential Intensity
- NCAR: National Center for Atmospheric Research
- · NCEP: National Centers for Environmental Prediction
- NHC: US National Hurricane Center
- · NHWRF: HWRF run at the NCMRWF (National Centre for Medium Range Weather Forecasting (India)
- OHC: Ocean Heat Content
- ORAS4: Ocean ReAnalysis System 4
- POD: Probability of detection
- · POFD: Probability of false detection
- RI: Rapid intensification
- RMSE: Root Mean Square Error
- · RSMC: Regional Specialized Meteorological Center
- SCIP: Statistical Cyclone Intensity Prediction model
- SHIFOR: Statistical Hurricane Intensity Forecast model
- SHIPS: Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme
- SST: Sea Surface Temperature
- · STIPS: Statistical Typhoon Intensity Prediction Scheme
- STS: Severe Tropical Storm

- TCWC: Tropical Cyclone Warning Center
- TD: Tropical Depression
- TS : Tropical Storm
- TS: Threat Score
- TUTT: Tropical Upper Tropospheric Trough
- TY: Typhoon
- WANI: Weighted-ANalog Intensity