

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、進路予測に注目すると、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

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。)

RSMC/TCWC		予報時間	客観台風強度予報ガイダンス						
			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
米 国	マイアミ ホノルル	5 日	SHIPS, LGEM, GFDL, HWRF	SHIPS LGEM	○	SHIFOR	GFDL HWRF		Florida State Super Ensemble(FSSE)
	JTWC	5 日	SHIPS, LGEM, CHIPS, GFDN, HWRF, COAMPS-TC	SHIPS STIPS LGEM	○	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		○	○	SCIP	NHWRF		
オーストラリア		5 日		STIPS SHIPS LGEM	○		HWRF COAMPS-TC ACCESS		環境場（特に鉛直シアー）

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。

プロジェクト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 multi-model 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>