



論文



台風による強風ハザードの評価：台風ノモグラムの開発

Assessing Typhoon Wind Hazard : Development of Typhoon Nomogram

山崎聖太*¹ 筆保弘徳*² 加藤雅也*³ 竹見哲也*⁴ 清原康友*⁵

Shota YAMASAKI, Hironori FUDEYASU, Masaya KATO, Tetsuya TAKEMI, Yasutomo KIYOHARA

SUMMARY

The strong winds are observed over Japan, although the distribution is varied because of the mountainous terrain. The topography effect resulting in the strong winds associated with tropical cyclones (TCs) is intimately linked to the TC tracks. The purpose of this study is to examine the distribution of surface winds associated with TCs over Japan, based on numerical experiments. Using ensemble experiments with several TC cases, we detected the distribution of surface winds associated with TC tracks and developed a disaster-prevention graph so called “Typhoon Nomogram” at each location in Japan. The Typhoon Nomogram is useful for understanding the variability in the distribution of surface winds over Japan which depend on TC tracks and is useful for reducing the wind disasters caused by TCs.

key words: typhoon simulation, Typhoon Nomogram

1. はじめに

台風が日本列島に接近あるいは通過すると、各地で強風が発生し、ときには甚大な災害が生じる。このような台風に伴う強風災害を軽減するためには、台風の経路毎に強風リスクがどのように高まるかということを地域毎で把握することが有効である。そこで本研究では、日本

全国を対象に台風に伴う強風と台風経路の関係を調べて、台風ハザードマップを作成することを目的とする。

台風は中心ほど暴風となっているため、台風が近づくほど強風となる。また、風の回転成分に台風の移動速度が加わるために台風の進行方向右半円に該当する地域で風がより強まる。さらに、台風に伴う風の向きや強さは、

-
- *1 横浜国立大学大学院教育学研究科 大学院生 (研究当時)
Graduate Student, Graduate School of Education, Yokohama National University
 - *2 横浜国立大学大学院教育学研究科 准教授
Associate Professor, Graduate School of Education, Yokohama National University
 - *3 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究員
Researcher, Institute for Space-Earth Environmental Research
 - *4 京都大学防災研究所 准教授
Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
 - *5 日本気象予報士会 会員
Member, Certified and Accredited Meteorologists of Japan

(原稿受理年月日：2016年12月13日，採用決定年月日：2017年8月16日)

それぞれの地域の地形の影響を大きく受けて複雑に変化する。台風の強風と地形との関係は盛んに調べられていて¹⁾²⁾³⁾、入江や海峡、岬、谷筋、山の尾根などでは風が強く吹く傾向にあるとされる⁴⁾。

台風時に発生する強風の特徴や、強風と地形との関係性を調べた研究では、複雑である台風や地形の特徴を簡略化する例が多い¹⁾²⁾³⁾。また、異なる経路の台風をシミュレーションする手法にはモンテカルロ法が多く利用されている¹⁾²⁾。モンテカルロ法は、台風を特徴付ける数個のパラメータ（進行速度、最大風速、中心気圧、最大風速半径など）に対して確率分布を設定することで様々な台風を確率統計的に想定し、その影響を評価できる。菊地ら¹⁾の研究では、標高や相度などの地形情報と、モンテカルロ法で再現された台風の経路や風速分布から、ある特定地点で想定される風速変動を計算し、その確率分布を評価している。しかし、彼らの研究のように、台風をいくつかの仮定のもと簡略化すると、強風の発生を力学的に正しく再現できない可能性がある。例えば、台風時に那岐山の麓に強風をもたらす「広島風」は、その発生に風の地形収束と、台風特有の大気の鉛直構造が関係する⁵⁾。このような台風時に特有の強風の発生を再現するためには、大気の挙動を3次元的に解くことができる物理モデルの利用が有効である。

Jarrell と Englebretson は、横須賀・岩国・佐世保のそれぞれの米軍基地で観測した地上風速を台風の中心位置に対する座標でマッピングしたところ、台風時の強風分布が地域毎に固有であることを示した⁶⁾⁷⁾。そして、各地域の地上風速を台風の最大風速で規格化した風速比を等値線で示し、それぞれの基地にとって風災害リスクの大きくなる台風位置を示す分布図「台風ノモグラム」を作成した。この台風ノモグラムは、実地形の影響を受けて台風時に発生した強風をもとに作成されている。そのため、各地域の地形を考慮した台風の位置と地上風速の関係を示している。この特徴を踏まえると、台風ノモグラムは各地域の台風による強風ハザードを示す防災情報として利用を期待できる。風速比をハザード評価に用いることで、台風強度に応じて変動する地上風速を規格化でき、それぞれの台風の強度の影響を除いた強風ハザード評価を実現できる。さらに、台風の経路と強度が既知である場合、ある地点の台風ノモグラムの風速比と台風の最大風速を掛け合わせることで、ある地点の地上風速の変化を推定できる。米軍の予報現業の担当者によると、米軍基地では、台風接近時の強風予報に各基地の台風ノモグラムを活用しており、各国の現業モデルの予報が十分に利用で

きない台風接近の4~5日前は台風ノモグラムによる簡易予測の結果を重視しているとのことである(personal communication)。日本国内でも、台風情報の量的予測の基礎資料として南大東島の台風ノモグラムが作成されている⁸⁾。南大東島地方気象台は、比嘉らにより作成された台風ノモグラムに改良を施し、それらの台風ノモグラムを用いて1998年台風7号における風向と風速の予測を行っている⁹⁾。

上記のように台風ノモグラムは、各地の防災情報としてだけではなく、台風に伴う強風の予測にも活用できる。しかし、観測結果で作成する手法⁶⁾⁷⁾⁸⁾で台風ノモグラムを作成するためには、長期にわたる台風情報と定点での地上風観測値が必要であり、台風ノモグラムを作成できるのはその観測地点に限られる。本研究では、従来に変わる手法として、気象モデルを用いて多数の仮想台風を生成する経路アンサンブルシミュレーションを行い、その結果を用いて台風ノモグラムを作成する。

経路アンサンブルシミュレーションを用いた研究には Oku et al.¹⁰⁾がある。Oku et al.¹⁰⁾は、台風渦位ボーガス¹¹⁾を用いて大気の間を固定しながら計算初期時刻での台風の位置を意図的に移動させる方法で、台風経路アンサンブルシミュレーションを実施した。その結果、紀伊半島における降水リスクが最大となる台風経路が明らかとされた。このように、台風経路アンサンブルシミュレーションを用いれば、観測データが無い地点に関しても様々な経路で台風が通過した時の雨や風の分布が得られる。しかし、渦位ボーガスによる台風経路の操作を用いると、指向流に影響を与える総観スケールの環境場は操作しないため、台風の経路が一定の範囲に収束することになる。台風ノモグラムを作成できる範囲は、観測結果だけを用いる作成手法に比べて広がるものの、一部の地域に限定される¹⁰⁾。

広範囲の地域で台風ノモグラムを作成するためには、従来の渦位ボーガスによる台風経路の操作ではなく、大気を固定して地形全体を東西にずらした「地形シフト」という操作方法が適している。この手法を用いた台風経路アンサンブルシミュレーションでは、台風の経路に影響を与える指向流を台風と共に東西にシフトするため、再現された仮想の台風は現実の経路と平行にずれた経路をとる。その結果を用いれば、特定の地域に限らず、広範囲にわたって台風ノモグラムの作成が可能となる。

本論文では、2章で地形シフトを用いた台風経路アンサンブルシミュレーション手法や台風ノモグラムの作成手法の説明と、その手法の妥当性を示す検証方法を記す。3

章では新手法で得られた結果の検証を行い、4章では台風ノモグラムに防災利用を目的とした改良を加えた上で、台風ハザードマップとして利用可能な精度を有するのを実際の台風事例に適用することを通して議論する。

2. 実験および検証手法

2. 1 台風経路アンサンブルシミュレーション

本研究は、大気の数値モデルとしてWeather Research and Forecasting (WRF-ARW)モデルVersion 3.6.1¹²⁾を用いた。WRF-ARWは、米国大気研究センター (NCAR)が中心となり開発した3次元完全圧縮非静力学モデルである。これまでWRFを用いた台風の研究は多く、その再現性には実績がある¹³⁾。

台風経路アンサンブルシミュレーションには、地形シフトの操作を用いて実施した。現実の台風の初期位置で行う数値シミュレーションをコントロールラン(CTL)とする。計算初期時間におけるCTLの台風の位置に対して、経度方向に約20°の範囲の中で0.2°間隔に海陸分布や地形を仮想的にずらす。日本列島に相対的に大気全てが東方向または西方向にシフトするため、台風の計算初期時刻の位置だけでなく、経路を決定する偏西風帯や太平洋高気圧などの指向流もシフトし、台風はCTLの経路とほぼ平行の経路をとる(3章参照)。

WRF-ARWの計算設定を表1にまとめる。初期・境界値に利用した格子点値データセットは、気象庁55年長期再解析(The Japanese 55-year Reanalysis : JRA-55)¹⁴⁾である。提供されているJRA-55には海面温度がないため、海面温度に相当する物理量として輝度温度を利用した。輝度温度および地上2m温度は海陸分布とともに固定し、その他の物理量をシフトした。

実験対象には、日本に強風災害をもたらした強度の強い台風である1958年台風22号(IDA)、1959年台風15号(VERA)、1961年台風18号(NANCY)、1995年台風12号(OSCAR)、2004年台風06号(DIANMU)、2013年台風26号(WIPHA)を選択した(表2・図1)。これらの台風を対象にした理由は、日本に接近・上陸する台風であって強風の影響を評価する上で、以下の3点の理由から適した事例であったためである。1) 強度の弱い台風を数値シミュレーションすると、東西にずらすことで台風の経路と強度がCTLと比べて顕著に変わってくるため、なるべく強い強度の台風を選択することが求められる。また、2) 計算領域の制約から、東西にシフトした経路が日本沿岸から500km以内の範囲を満たすような事例を選ばなければならない。さらに、3) 同時期に別の台風が存在している

事例は地形以外の影響が複雑になるために避けた。これらの条件を満たす台風事例を選択すると、秋に発生した台風に偏っていたため、本研究では季節性の比較はできない。

それぞれの台風事例において、水平解像度15kmの親領域(Domain1)を計算し、水平解像度5kmの子領域(Domain2)へネストダウンする。モデル間は双方向ネスティングで接続しており、計算コスト削減のためDomain2の計算開始時刻は、Domain1の計算開始時刻より後に設定した(表2)。地形の影響を調べるためには、できるだけ高い解像度の計算が一般には望ましい。しかし、予備実験として水平解像度1kmならびに3kmの計算を実施したが、得られた結果は水平解像度5kmと大きな差はなく、計算コストなどを考慮した結果、以上のような設定に統一した。

JRA55のデータは1.25°間隔であるため、台風の渦としての構造が鮮明に表現できていない。この渦をもとに計算すると台風が十分に発達しないことが懸念されるため、Domain1の計算初期時刻の初期渦を、WRFの台風ボーガス機能を用いて強化した。また、Domain1の高度600hPaより上層の風にスペクトルナッジングを適用した。各事例の台風はそれぞれ106~121ケースを計算し、東西それぞれへのシフト範囲はそれぞれ日本の岸から500kmの範囲を可能な限り覆うように設定している。シミュレーション結果の出力間隔は30分とした。さらに短時間間隔で出力することも検討したが、最終的な台風ノモグラムの分布に大きな影響がないことを確認したため、この出力間隔に統一した。

2. 2 台風ノモグラムの作成方法

ここでは本研究で開発した台風ノモグラムについて、横浜を例にして説明する。台風経路アンサンブルシミュレーションにより、台風の中心位置、台風強度(台風最

表1 WRFの計算条件
Table 1 Calculation condition of WRF

	Domain1	Domain2
水平解像度	15km	5km
水平格子数	220×215	601×541
地形データ	GTOPO30	
鉛直層数	45	
最下層高度	約30m	
モデル最上端高度	20hPa	
微物理スキーム	WSM 6-class graupel scheme	
放射スキーム	Rapid Radiative Transfer Model for GCM	
大気境界層スキーム	Yonsei University scheme	
対流スキーム	Kain-Fritsch scheme	
台風ボーガス	あり	なし

表2 対象とする台風の計算設定 (括弧内は Domain2 の計算開始時刻を示す。)

事例	国際名	計算期間		東西シフト範囲 [度]	計算総数 [ケース]
		[UTC]			
1958年22号	IDA	1958/09/24 06:00 (09/25 00:00) ~ 1958/09/27 18:00		-13.0 ~ +10.0	116
1959年15号	VERA	1959/09/23 18:00 (09/24 18:00) ~ 1959/09/27 06:00		-12.0 ~ +10.0	111
1961年18号	NANCY	1961/09/13 06:00 (09/14 00:00) ~ 1961/09/16 18:00		-8.0 ~ +14.0	111
1995年12号	OSCAR	1995/09/13 18:00 (09/15 00:00) ~ 1995/09/17 18:00		-14.0 ~ +10.0	121
2004年06号	DIANMU	2004/06/18 12:00 (06/19 06:00) ~ 2004/06/22 06:00		-8.0 ~ +14.0	111
2013年26号	WIPHA	2013/10/13 12:00 (10/14 06:00) ~ 2013/10/16 12:00		-13.0 ~ +8.0	106

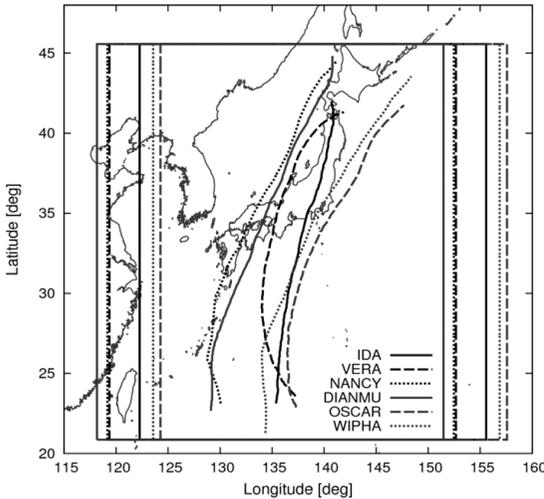


図1 計算領域(Domain2)と各台風の標準実験経路

Fig. 1 Model domain and TC tracks

大風速), そしてそれぞれの格子点における地上 10 m 風速が 30 分間隔で得られる。シミュレーションにより再現された台風の中心位置は海面更正気圧が最低値をとる地点として定義した。

規格化に用いる台風最大風速は地上 10 m 風速ではなく、傾度風を用いることにした。地上 10 m 風速を用いて台風最大風速を定義すると、海陸の摩擦の差により、上陸台風の強度の過小評価に繋がること懸念されるためである。まず、海面更正気圧の座標系を、直交座標から円筒座標に変換する。円筒座標は台風の中心を原点とし、半径方向の格子間隔 (Δr) を 5 km, 方位角方向の格子間隔 ($\Delta \theta$) を 1° とした。次に、半径毎に海面更正気圧を方位角平均した上で、式 (1) を用いて傾度風を算出する。

$$Vg = \frac{1}{2} \left(-fr \pm \sqrt{f^2 r^2 + 4rPn} \right) \quad (1)$$

ここで、 Vg は傾度風を、 f はコリオリパラメータを、 r は半径を、 Pn は気圧傾度力を意味する。低気圧を想定する

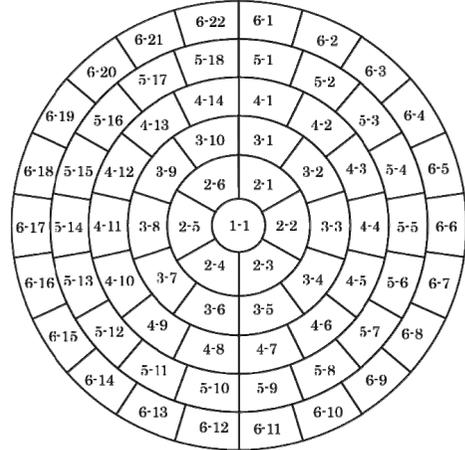


図2 台風経路の分類に用いた座標

Fig. 2 Coordination of typhoon nomogram

ため、 $Vg > 0$, $Pn > 0$ である。 Pn は式(2)で与えられる。

$$Pn = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (2)$$

ρ は大気密度、 p は気圧、 n は台風中心からの距離である。気圧には海面更正気圧を利用し、密度は 1.20 kg/m^3 で一定、コリオリパラメータは台風の中心緯度の値で定義した。そして、求めた半径毎の傾度風の最大値を台風最大風速とする。

台風最大風速が得られたら、それぞれの台風中心位置で、各位置に台風が存在した時刻の横浜における風速比を、式(3)を用いて計算する。

$$WR = \frac{WS}{MWS} \quad (3)$$

ここで WR は風速比、 MWS は台風最大風速、 WS はシミュレーションで得られた横浜における地上 10 m 風速を意味する。そして、横浜を中心とした円内を等面積で 71 個の区域(「セル」と呼ぶ)に分割し(図 2)、風速比をセルに表示することで「横浜-台風ノモグラム」とした。このセルの集合は Jarrell と Englebretson の研究^{6,7)}で台風の経

路分類に用いられたものであるが、本研究では円の半径を500 kmにした。以後このセルの集合を「等積円筒座標」と称する。等積円筒座標は、中心から外方向に6分割し、12時の方向から時計回りに分割している。セルの番号は、「1-1」「2-1」などと表現する。セル一つあたりの面積を同じにすることで、台風中心が各セルに入る確率から面積の影響を排除し、一つのセルの中の風速比に面積の違いによる偏りが出ないようにする。これまでの台風ノモグラムは、風速比を等値線で示したもの(文献⁶⁾のFig.5など)であったが、本研究では、これまで示されなかった統計量を算出するためと、一般の方でも分かりやすい防災情報になることを考慮して、上記のようなセルを塗りつぶした台風ノモグラムに発展させた。

2. 3 台風ノモグラムの検証手順

本研究では、作成した台風ノモグラムが妥当なものであるのか、大きく分けて4つの検証を行う。以下に順序をおって4通りの検証手順について述べる。

第1の検証として、台風アンサンブルシミュレーションから作成した台風ノモグラムと、観測値から作成した台風ノモグラム(以後は「観測台風ノモグラム」と記す)とを比較する。本研究では、気象庁が提供する台風ベストトラックと気象官署およびAutomated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS)での地上風速の観測値から、観測台風ノモグラムを作成する。気象庁ベストトラックは台風の位置や強度などの情報を6時間(日本接近時は1~3時間毎)にまとめたデータセットである。台風経路アンサンブルシミュレーションを利用する場合と比べて、ベストトラックを用いる場合は、台風の位置情報の量が少なく、空間的に均一かつ密なデータが得られていない。そこで、観測台風ノモグラムの作成に使用するデータ量を補うために、ベストトラックを地上風速の観測値の間隔(1時間間隔)に揃えたデータセットを作成した。まず、ベストトラックに記録されている台風位置(中心の緯度ならびに経度)および強度(最大風速)に対し、時間方向に1時間毎の内挿を施す。内挿手法は一次補間を用いているため、台風の進行速度が内挿に用いる2点間で一定であると仮定している。次に、台風強度と地上風速から式(3)を用いて風速比を計算する。最後に、等積円筒座標で経路を分類し、セル毎に風速比を平均して観測台風ノモグラムを作成する。なお、地上風観測値とベストトラックは、1977年から2015年の期間におけるデータを用いた。

第2の検証として、異なる台風事例それぞれで作成される台風ノモグラムの差がどれほど大きいのかを調べる。全国各地の台風ノモグラムが台風事例毎に6パターン作

成できる。台風ノモグラムの風速比分布に与える地形の影響が、他の影響に比べて極めて強ければ、台風ノモグラムの分布には事例間で大きな差は現れないと予想される。一方、事例間の差が大きい場合は、その地域では地形の影響が弱く、他の影響が強いことを示している。本研究では、各地点で6つの経路アンサンブルシミュレーションから作成された6つの台風ノモグラムがあるため、このうち2つの台風ノモグラムの風速比で比較した相関係数を合計15通りの組み合わせの場合で調べる。この検証で事例間でのばらつきが小さいと確認されれば、セルに使われるデータ量を増やして統計的な信頼性を高めるために、6つの台風事例のノモグラムを合成した「合成台風ノモグラム」を作成する。

第3の検証では、日本全国で作成した合成台風ノモグラムを、自己組織化マップ¹⁵⁾によって16パターンに分類し、そのパターンの地域分布と地形図を比較することで、台風ノモグラムの分布に与える地形の影響を検証する。自己組織化マップは、多次元データの分類に多く利用されており、入力したデータを類似度に応じて機械的に分類し、2次元平面上に写像することができる手法である。本研究では、自己組織化マップに入力する多次元データとして、台風ノモグラムにおける71次元のセルの風速比を利用した。なお、陸上全ての格子点(17639地点)のうち、71次元全ての風速比が計算できた地域(13305地点分)に関して入力データを作成した。入力データに対しては最大値を1、最小値を0とする標準化を行い、分類された台風ノモグラムの風速比に方位の特徴が現れるようにした。

第4の検証では、台風ノモグラムを新たな台風ハザードマップとして有効に利用するための検討を行う。従来の台風ノモグラムとは異なり、セルで区分したために、一つのセル中でも多数の風速比の情報がおり、統計量も算出できる。また、台風の経路を合成台風ノモグラムに重ねることで、ある地点での風速の時間変化も見積もることができる。このような情報を台風接近時の防災情報として社会に向けてどのように発信できるかを議論する。

3. 台風ノモグラムの検証結果

3. 1 台風経路アンサンブルシミュレーションの結果

図3は、台風経路アンサンブルシミュレーションにより得られたDomain2での台風経路を示す。太線がCTL、細線がシフトした実験結果の経路を示している。台風経路の数はそれぞれの事例で異なり106~121ケース(表2)である。CTLにおける台風は、現実の台風とほぼ同じ経路をとり、IDAが静岡県中部、VERAが紀伊半島、NANCYが鹿児島

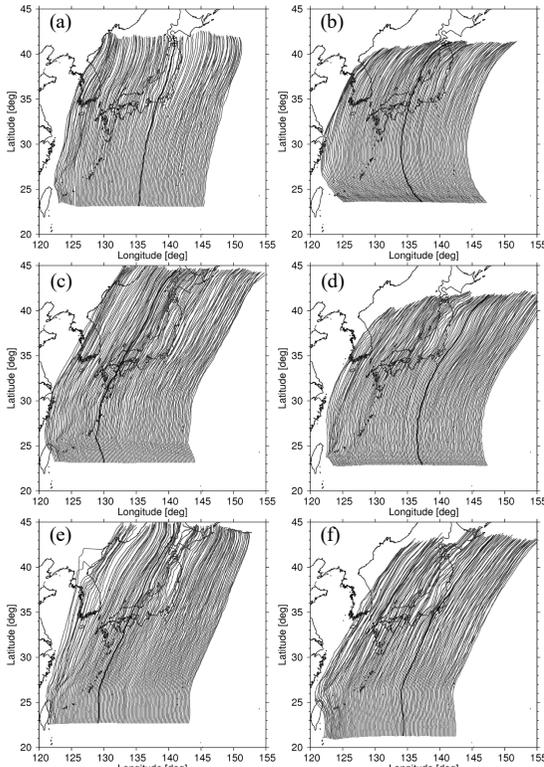


図3 事例毎の経路アンサンブルシミュレーションにより得られた台風経路 (a)IDA (b)VERA (c)NANCY (d)OSCAR (e)DIANMU (f)WIPHA

Fig. 3 Simulated typhoon tracks

県、DIANMU が高知県、WIPHA は伊豆半島に上陸し、OSCAR は上陸せずに関東地方の東沖を北上した。CTL における積分期間内での台風の平均速度は、IDA が 33 km/h と最も低速で、WIPHA が 53 km/h と最も高速で移動した。

経路アンサンブルシミュレーションの結果、東経 121 度から東経 155 度、北緯 22 度から北緯 45 度の範囲を覆うように、平行な経路をとる多数の台風アンサンブルを生成することができた(図3)。この台風経路アンサンブルシミュレーションにより、本州・四国・九州・沖縄本島の沿岸から 500 km の範囲内で高密度の台風経路が得られたため、それらの地域では台風ノモグラムの全セルの風速比を計算できる。しかし、八重山諸島や北海道では台風経路が十分に得られていないため、全セルを満たす台風ノモグラムは作成できなかった。

それぞれの台風の Domain2 における台風最大風速の時系列を図4に示す。図3と同様に太線がCTL、細線がシフトした実験結果を示している。Domain2 の計算開始直

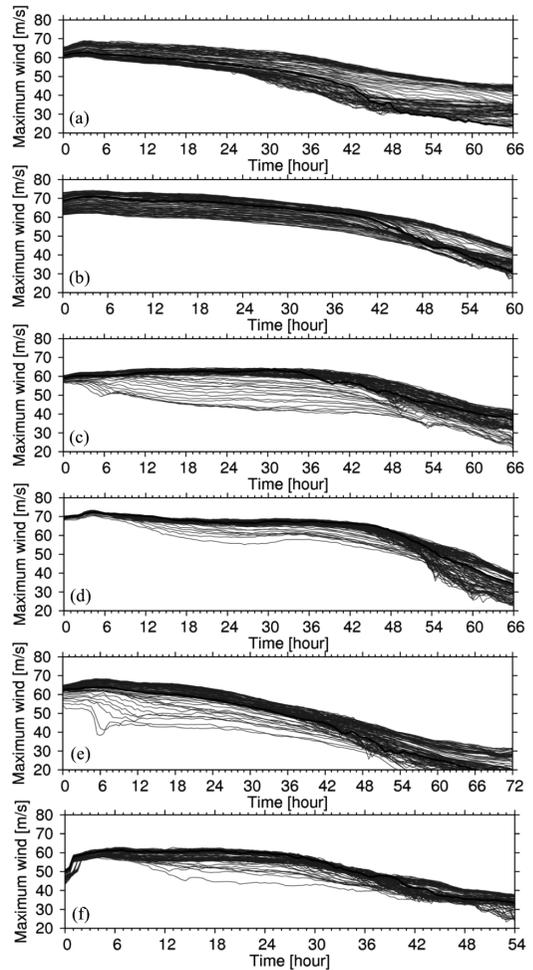


図4 各台風の最大風速の時系列 (a)IDA (b)VERA (c)NANCY (d)OSCAR (e)DIANMU (f)WIPHA

Fig. 4 Simulated maximum winds

後は、高解像度の計算に移行したことに伴う台風最大風速が一時的に増加する様子が見られる。しかし、計算初期時刻を台風の最盛期以降に設定しているため(表2)、台風最大風速は一時的に上昇した後は緩やかに弱まった。経路アンサンブルシミュレーションの台風最大風速は、台風が海上に位置する計算期間の前半では海面温度の影響を受けてその強さが経路毎に異なっており、その差はおよそ 10 m/s 程度であった。一方、上陸するタイミングが経路によって異なるため、計算期間の後半では台風最大風速のばらつきはおおよそ 20 m/s と増加した。一般的にボーガス機能を用いて加えた Domain1 の台風は、計算直後に数値計算上の粘性と拡散により弱化する。しかし、計算が進むに連れて海面からエネルギーを補給し、対流が組織化することで台風強度が増加した。Domain2 との

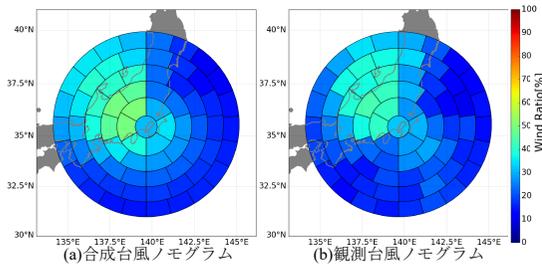


図5 横浜-台風ノモグラム

Fig. 5 Composed and observed Yokohama-typhoon nomogram

通信が始まるころには、台風としての構造が再現されていて、計算初期の問題はほぼ解消されていた。

3. 2 観測台風ノモグラムとの比較

作成された台風ノモグラムを、横浜を例にして検証する。図5は、横浜における合成台風ノモグラム(以後「横浜-合成台風ノモグラム」と観測台風ノモグラム(以後「横浜-観測台風ノモグラム」)である。それぞれの事例で得られた横浜-台風ノモグラムの比較については次節で記すが、横浜-合成台風ノモグラムと横浜-観測台風ノモグラムの同じセル同士を比較した相関係数は0.87と強い正の相関を示している。そのため、横浜では観測結果から

みても合成台風ノモグラムは妥当であると言える。図6(a)(b)は横浜-合成台風ノモグラムと横浜-観測台風ノモグラムの作成に用いた台風経路、図6(c)(d)は各セルのサンプル数を示す。図6(a)(b)の台風経路は、風速比で色分けしている。観測台風ノモグラムにおいて、北寄りに位置するセル内部の台風経路が少ない。これは、台風が北上すると移動速度が増加して各セルに位置する頻度が減るためだと考えられる。横浜-合成台風ノモグラムは台風事例毎に分類しており、事例毎にセル内のサンプル数が異なる。具体的には、横浜-観測台風ノモグラムでは1セルあたり約5~90個の経路情報がある一方、シミュレーションでは1事例につき1セルあたり約20~30個あり6事例合計すると1セルあたり約90~200個の経路情報が得られた。横浜を含む神奈川県はもともと台風の上陸・接近数が全国で10位と多い県である¹⁶⁾が、横浜-観測台風ノモグラムでは全セルでの情報量の合計はわずか2020個である。一方、台風経路アンサンブルシミュレーションでは合計10218個という観測の約5倍の情報量が得られている。台風経路アンサンブルシミュレーションのメリットは、地上風の観測結果がない地域で台風ノモグラムが作成できる点にあるだけでなく、作成の根拠となるデータをより多く蓄積できる点にもある。

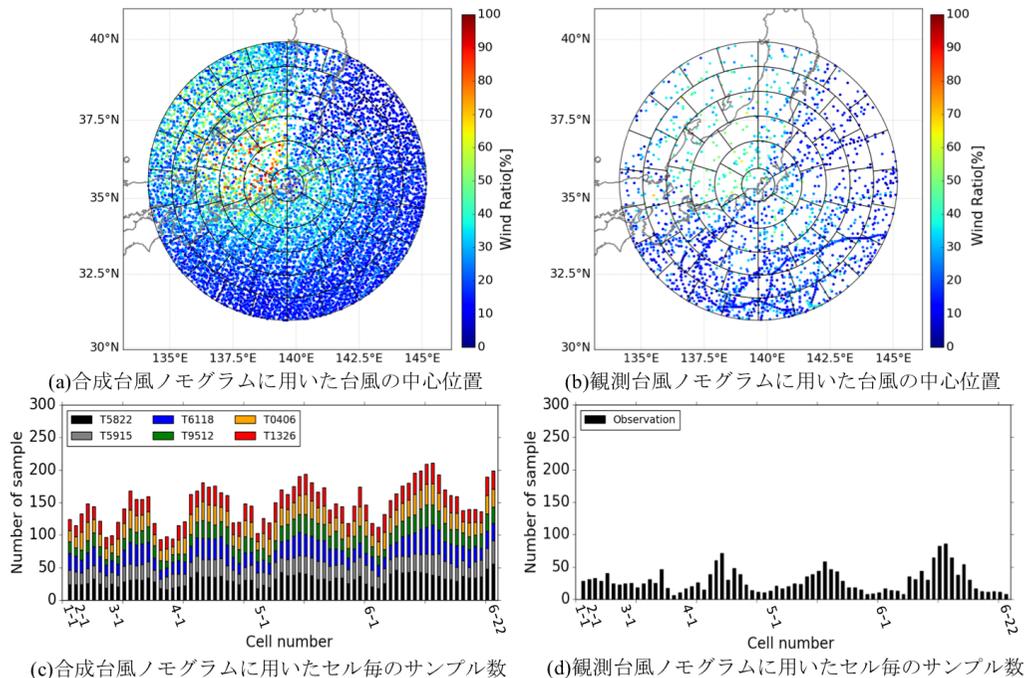


図6 横浜-台風ノモグラムの作成に用いた台風の中心位置とサンプル数

Fig. 6 Samples and numbers data for Yokohama-typhoon nomograms

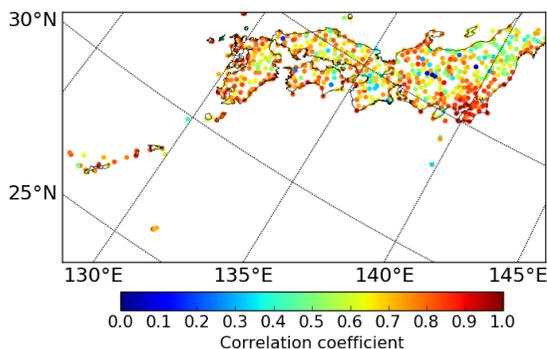


図7 観測台風ノモグラムと合成台風ノモグラムの相関係数

Fig. 7 Correlation coefficients between observed and composited typhoon nomograms

前述のように、横浜-合成台風ノモグラムが観測台風ノモグラムと高い相関を持っており、よく類似していることが定量的に示された。観測台風ノモグラムが作成可能な617地点において、合成台風ノモグラムと観測台風ノモグラムとの相関係数を示したのが図7である。観測台風ノモグラムと合成台風ノモグラムのセル同士の相関係数を全国平均すると0.69であった。詳細に見ると、関東平野・濃尾平野・仙台北平野などの大規模な平野部の地点の場合に相関係数が高い。また、複雑な地形を有する内陸部に比べ、沿岸の地域でも相関係数が高い傾向にあり、また日本海沿岸に比べ太平洋沿岸の地域でより相関が高い。しかし、全体のうち5地点にあたる福島県や長野県の山岳地域などで無相関となっており、これらの地域では、合成台風ノモグラムと観測台風ノモグラムが類似していない。

3. 3 台風依存性の検証

台風ノモグラムの台風事例に対する依存性を調べるために、6事例の横浜-台風ノモグラムを比較した(図8)。事例毎にセルの風速比はわずかに異なるものの、それぞれの事例で台風が北西に位置した時に風速比が大きくなり北東に位置した時に風速比が小さくなるということが共通している。さらに、中心のセルの風速比が北西に比べ小さくなっている。詳細に比較すると、WIPHAとDIANMUでは北西象限かつ中心付近において他事例に比べ風速比が大きい。VERA・DIANMU・NANCYでは他事例に比べ、北西のみならず北のセルでも風速比が大きい。IDAでは風速比の大きいセルが他事例に比べ南西により大きく広がる傾向をもつ一方、OSCARは南西象限で風速比が小さくなる。

これら6事例の台風ノモグラムにおいて、71のセルそ

れぞれで比較した相関係数を15組で計算した。横浜-台風ノモグラムの場合には、各事例の風速比の相関係数が0.76~0.94の幅にあり、どの組み合わせも高い正の相関にある。このことから、横浜では、本研究で選択した事例においては、台風事例による依存性が小さいと言える。

陸上の格子点に対し、横浜と同様の解析を行った。ただし、沖縄・九州北西部・本州の西端にあたる地域・能登半島北部・東北などの地域は、台風経路サンプル数の不足により、6事例全てにおいて全セルを満たす台風ノモグラムが作成できなかったため解析から除外している。

図9は、解析した8919地点のうち33地点を抜粋し、15組の相関係数を箱ひげ図に示している。地域差があるものの、横浜以外の地域でも相関係数が高く、ばらつきも小さい。図10は、解析した全地点において15組の相関係数の平均を地図上に表示したものである。相関係数の全国平均値は0.79と高く、九州・四国・紀伊半島・房総半島で特に高い結果が得られた。ただし、日本海沿岸や内陸の地域で相関係数が0.60~0.70とやや低くなった。本研究では北上に伴い西向きから東向きへと進路を変えた点で共通する台風を相互に比較したため、事例依存性が小さくなった可能性がある。事例依存性を精密に議論するためには、本研究で選択した事例と経路の特徴が異なる台風を追加し調査する必要がある。しかし、選択した6事例の台風は我が国に接近・上陸する台風の典型的な特徴を表していることから、それらをもとに作成した合成台風ノモグラムの示す情報は代表的な風速比分布を表すと判断した。

3. 4 台風ノモグラムの分類と分布

日本列島上の13305地点の合成台風ノモグラムを見比べると、よく似た分布をした地点もあれば、全く異なるものもある。そこで、台風ノモグラムの地域性を調べるために、自己組織化マップを用いて、全ての地点の合成台風ノモグラムを客観的に16パターン(第1~16ノード)に分類した。図11にその分類した結果を示す。区別のために各パターンの枠に16色を割り当てている。各マス右下にある数字は各ノードに該当した地点の数を、左下にある数字は各ノードに該当した地点の全体に対する割合を示す。左上の数字はノード番号、右上に主観的に判断した風速比の大きい方位をパターン名として記した。パターン名は東から反時計回りに風速比の強い方位が連続している場合は「-」、断続している場合は「・」で分けている。各ノードの台風ノモグラムの色は0~1の範囲に標準化された風速比を示す。この分類結果に基づくと、最も多いパターンは北東・北西パターン(第7ノード)で全

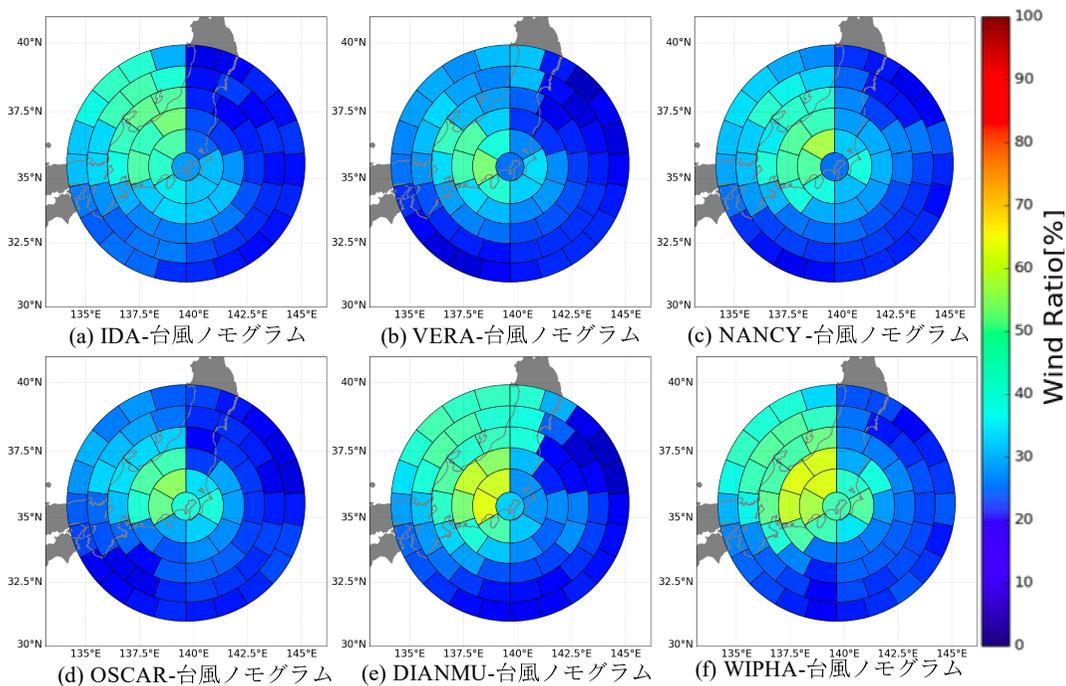


図8 6事例の台風を用いて作成した横浜-台風ノモグラム

Fig. 8 Yokohama-typhoon nomograms for 6 typhoons

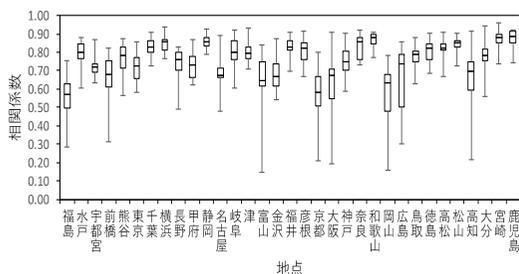


図9 台風ノモグラムの事例間における相関係数

Fig. 9 Correlation coefficients for each case of 6-typhoons nomograms

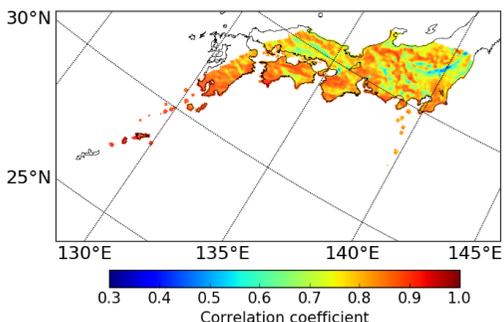


図10 台風ノモグラムの事例間における相関係数の平均値の分布

Fig. 10 Averages of correlation coefficients for each case of 6-typhoons nomograms

体の9.9%を占める。一方、最も少ないのは北・南西(第1ノード)パターンで全体の3.1%である。

図12はその分類の分布を示している。第2ノードのパターン(赤色)は、台風が該地点の北側を通過する時に強風となる地点であり、東北地方北部に多く分布している。台風が東を通過すると強風となる第3・4ノードのパターン(黄色および橙色)は九州・中国・近畿・北陸の各地方の日本海沿岸地域に多い。この理由としては、台風が東側を通過するときには日本海からの北寄りの風が地形に遮られることなく、これらの地域に吹き込むためであると考えられる。関東地方、静岡県東部、三陸地方沿岸地域では第6ノードのパターン(濃緑色)が占めており、北西および南東を通過する際に強風となる傾向を持つ。関東地方の東京湾に面した地域では第11ノードのパターン(青色)であり、北西を台風が通過した時に強風となる。静岡県西部から西の太平洋沿岸地域では第14・15ノードのパターン(茶色および黄土色)が多く広がる。これらの地域では西寄り、または南寄りの風が吹く範囲に台風が位置する場合に強風となる傾向を持つ。紀伊半島の東側や九州および四国の北東側では第8ノードのパターン(黄緑色)となっており、西および北東を通過するときに強風となりやすい。第12ノードのパターン(水色)は、中国地方や四国の内陸に多い。これらの地域では、地域の西および

東を台風が通過したときに強風となる。

4. 台風ハザードマップへの応用

4. 1 合成台風ノモグラムでの統計量

台風ハザードマップに向けて、合成台風ノモグラムの各 71 個のセル内でのばらつきの大きさを示す。風速比の平均値に加えて、標準偏差の情報を同時に提供することで、風速比データの分布形状がある程度理解できるようになり、台風ノモグラムの示す情報の不確実性が可視化できる。ここでは風速比の散布度として、標準偏差と変動係数を調べる。変動係数 $WRcv$ は次式(4)により求める。

$$WRcv = \frac{WRstd}{WRav} \quad (4)$$

式(4)の $WRstd$ は風速比の標準偏差、 $WRav$ は風速比の平均である。風速比の散布度を図 13 に示す。図 13(a)の標準偏差は、風速の平均値が大きい北西象限のセルで最大 25% となっており、平均値が大きいセルでばらつきが大きくなるという傾向が見られる。一方で北西象限を除けば、セルのばらつきは小さく、10% 程度に収まっている。図 13(b)に示される変動係数は北東象限で大きく、中心のセル(1-1)でも大きい。南半円に限定すると、変動係数は中心を除く内側のセルでの数値が外側の場合よりも小さい傾向がある。しかし、横浜-合成台風ノモグラム全体では変動係数とノモグラムの中心(横浜)から各セルまでの距離に関係は見られなかった。横浜以外の地点で合成台風ノモグラムを調べたところ、それぞれの地点で傾向は違っていた。最終的に防災情報として合成台風ノモグラムを利用する時は、セル毎の風速比の平均値だけでなく、それぞれのセル内での標準偏差と変動係数といった統計情報も提供することで、平均値の確度も示すことが可能となる。また、後述する台風経路と台風ノモグラムから地上風を見積もる場合には、セル毎の風速比の平均値だけでなく、ばらつきと関連する統計量として 90% 信頼区間なども追加する。

4. 2 風向の情報

図 13(c)は、それぞれのセルに台風が位置した時に想定される横浜における風ベクトルを示す。この風ベクトルは、それぞれの台風経路に伴い横浜で吹いた地上 10 m 風を単位ベクトルに直した上で、そのサンプル全ての東西成分および南北成分を各々平均して求めている。単位ベクトルに直して風向を求めるため、得られる風向は最多風向に近い意味合いをもつ。図 13(c)では、ベクトルの始点は各セルの重心位置とし、ベクトルの大きさは全てのセルで統一している。台風の風が中心に向かって反時計

回りに吹き込むことを反映し、想定される風向が方位に沿って連続的に変化する様子が現れている。横浜-合成台風ノモグラムでは、風向は中心から見て時計回りに高気圧性回転しており、ベクトルの先端は接線方向からやや外向きに向いている。

4. 3 台風ノモグラムを用いた風速の推定

各地域の台風ノモグラムに、観測された台風の経路と強度を入力することで、各地で観測された風速変化を推定できるかを検証した。ここで検証に用いるのは、関東地方に強風をもたらした 2016 年台風 7 号(CHANTHU)である。なお、観測台風ノモグラムを作成する上で CHANTHU の観測結果は用いていない。2016 年 8 月 14 日午前 3 時に北マリアナ諸島の西海上で発生した CHANTHU は、北上して 17 日午前に関東地方に接近し、最大風速 28.3 m/s に達した。当初は関東に上陸する予報もあり警戒が呼びかけられたものの、実際は本州東岸沖を北上し北海道の襟裳岬付近に上陸した。ここでは、CHANTHU 接近時に横浜 AMeDAS で観測された地上風速を、横浜-台風ノモグラムを用いてどの程度表現できるかを調べる。合成台風ノモグラム風速と観測台風ノモグラム風速は、それぞれの台風ノモグラムと台風経路ならびに台風強度を用いて、式(5)で与えられる。

$$WSe = WR \times MWS \quad (5)$$

式(5)の MWS は気象庁ベストトラックに記録されている CHANTHU の最大風速、 WR は横浜-台風ノモグラムにおいて同台風の中心が位置する各セルの風速比を意味する。図 14(a)に、横浜-合成台風ノモグラムのセル毎の風速比の中央値と CHANTHU の最大風速を乗じた風速変化 $WSe1$ 、風速比の平均値と CHANTHU の最大風速を乗じた風速変化 $WSe2$ 、セル毎の 90% 信頼区間の風速比を乗じた風速変化 $WSe3$ を示す。合成台風ノモグラム風速を見ると、ノモグラム風速 WSe は、観測風速 WSo の局所的な強まりを推定できていないものの、全体的な風の変化はよく推定している。この合成台風ノモグラム風速 WSe と横浜における観測風速 WSo との相関係数を求めると 0.65 であった。また、観測風速 WSo はノモグラム風速 $WSe3$ の 90% 信頼区間にはほぼ収まっている。中央値の $WSe1$ と平均値 $WSe2$ とで大きな差がないことから、統計量として平均値と中央値はどちらも適切であることが確かめられた。一方、横浜-観測台風ノモグラムで見積もった風速(図 14(b))については、横浜における観測風速 WSo との相関係数は 0.74 であった。観測風速 WSo はほぼ 90% 信頼区間に収まっている。観測においても、中央値 $WSe1$ と平均値 $WSe2$ とで大きな差がないことから、統計量と

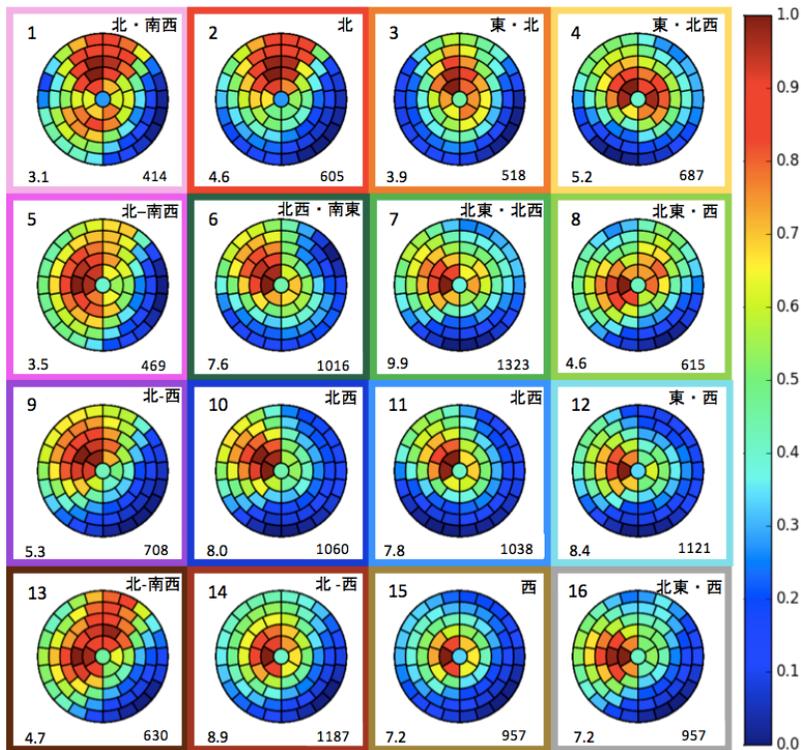


図 11 自己組織化マップにより各ノードに現れた台風ノモグラム
 Fig. 11 16 Nodes of typhoon nomograms classified by self-organizing maps

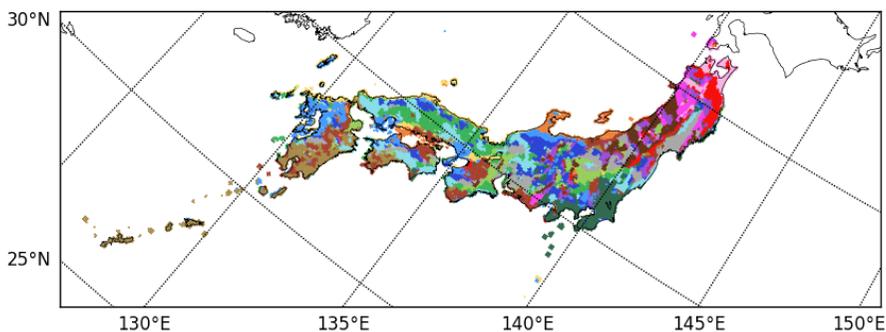


図 12 16 パターンの台風ノモグラムの地域分布
 Fig. 12 Distribution of 16 nodes of typhoon nomograms

して平均値と中央値はどちらも適切である。同じく CHANTHU を解析対象として、実際に観測された風の変化を、台風ノモグラムによりどの程度表現できたかを全国的に調べた(図 15)。各地点のプロットの色は W_{So} と W_{Se} から算出した相関係数を示す。なお、CHANTHU は北海道の北沖まで北上したため、北海道も解析に加えている。関東・東北・北海道の地点では、台風ノモグラムを用いた推定風速と観測風速との相関係数は 0.50~0.80 と高く、台風ノモグラムは観測風速をよく推定できてい

る。一方で、CHANTHU は強風半径が 500 km に満たない台風であったこともあり、台風経路から離れた近畿・中部地方では、推定風速と観測風速との相関係数は 0.2 未満と低い。一事例の検証ではあるが、台風経路から近い地域では台風による風速の推定に台風ノモグラムが有効であることが確認できた。今後さらに複数の台風事例を用いて検証していくことが必要である。

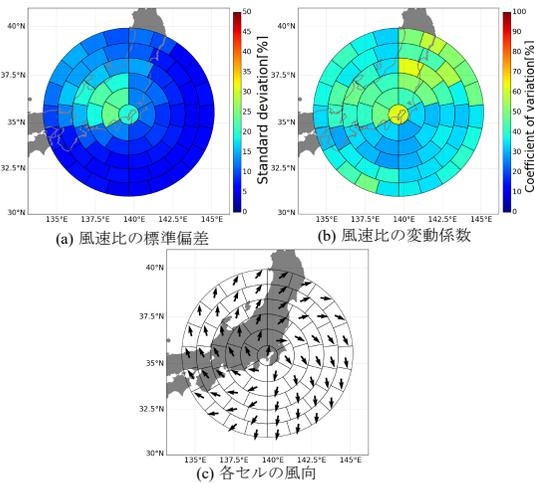


図13 風速比に関する各セルの標準偏差と変動係数および各セルの風向

Fig. 13 The standard deviation and coefficient of variation of the wind speed ratio and the wind direction

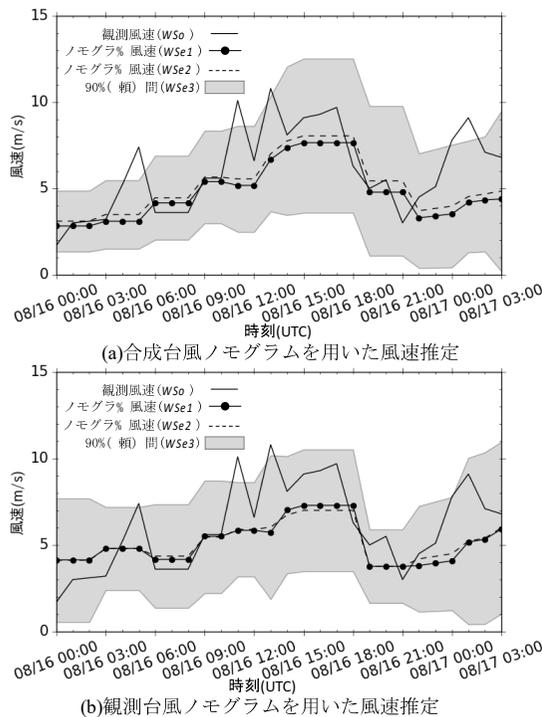


図14 2016年台風7号に伴う横浜の観測風速および台風ノモグラムを用いて推定した風速

Fig. 14 Observed wind speed and wind speed estimated by Yokohama-typhoon nomogram

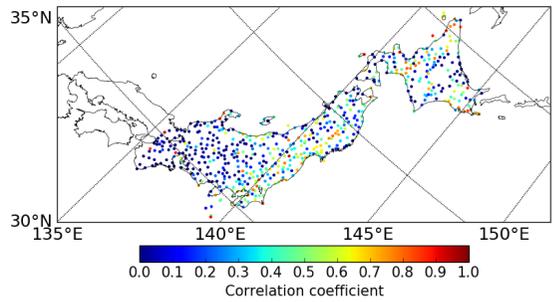


図15 観測風速とノモグラム推定値の相関係数

Fig. 15 Correlation coefficient between observed and estimated wind speeds

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめた。

- (1) 経路アンサンブルシミュレーションを用いることで、日本全国13305地点の台風ノモグラムを作成した。
- (2) 異なる6事例の台風を用いて作成した台風ノモグラムの相互比較ならびに観測結果との比較検証を行い、各地の台風ノモグラムには固有の風速比分布が現れていることを示した。
- (3) 台風ノモグラムのパターンを自己組織化マップを用いて抽出した。それぞれのパターンに該当する地域の分布を調べたところ、台風ノモグラムの風速比分布が周辺地形の影響を反映していることが明らかとなった。
- (4) 従来の台風ノモグラムで示されていなかった風向やばらつきに関する情報の表示を実現し、防災情報としての利用価値を高めた。
- (5) 台風ノモグラムの実用性を示すために2016年台風7号を対象として台風ノモグラムを用いた風速推定の精度を検証した。その結果、台風ノモグラムを用いることで台風通過時の風速を想定できることが確認され、現実の台風に適用可能であることを示した。

今後、実際の台風を対象とした精度の検証を重ねると同時に、台風通過時の強風ハザードと地形との因果関係を明らかにすることで、より科学的根拠に裏付けられる防災情報とすることを目指したい。

謝辞

本研究は、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムの支援のもと名古屋大学並びに東京大学から計算資源の提供を受けて実施された。また、京都大学防災研究所共同研究一般研究集会27K-03, 28K-05 および共同研究29G-05, 日本学術振興会科学研究費助17H02956の支援も受けた。株式会社エムティーアイの皆様には社会実装

に関する御助言および御協力をいただいている。関係各位に感謝の意を表す。なお、本研究は平成 28 年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。

参考文献

- 1) 菊地 由佳, 石原 孟, 「台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を考慮した風速割増係数の評価手法の提案」, 第 21 回 風工学シンポジウム論文集, 一般社団法人 日本風工学会, pp.31-36,(2010)
- 2) 松井 正宏, 日比 一喜, 「実測と台風モデルの平均化時間の違いを考慮した台風シミュレーションによる年最大風速の予測手法」, 日本建築学会構造系論文集 63.506, pp.67-74,(1998)
- 3) 藤井 健, 光田 寧, 「台風域内の強風と地形との間の統計的關係についての一考察」, 京都大学防災研究所年報 30, pp.279-285,(1987)
- 4) 気象庁, 「台風に伴う風の特性」, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/typhoon/2-1.html>, (2017 年 1 月閲覧) .
- 5) Fudeyasu, H., T. Kuwagata,, Y. Ohashi, S. I. Suzuki, Y. Kiyohara, and Y. Hozumi, "Numerical study of the local downslope wind "Hirodo-Kaze" in Japan." Monthly Weather Review ,136.1, pp. 27-40,(2008)
- 6) Jarrell, J. D. and R. E. Englebretson, "Forecast aids for predicting tropical cyclone associated gusts and sustained winds for Yokosuka, Japan", (1982)
- 7) Jarrell, J. D., "Forecasting aids for setting tropical cyclone conditions: Sasebo and Iwakuni, Japan", (1988)
- 8) 比嘉 恒貞, 上江洌 司, 金城 康広, 「南大東島における台風用ノモグラムの作成」, 沖縄技術ノート, 第 40 号, pp.10-16,(1992)
- 9) 南大東島地方気象台, 「南大東島の台風ノモグラムの改良」, 沖縄技術ノート, 第 55 号, pp.40-46,(2000)
- 10) Oku, Y., J. Yoshino, T. Takemi, and H. Ishikawa, "Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of Typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity", Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14, pp. 2699-2709, doi:10.5194/nhess-14-2699-2014, (2014)
- 11) Yoshino, J., Kojima, H., and Yasuda, T., "Development of a new typhoon bogussing scheme based on potential vorticity dynamics for highly accurate typhoon forecasts", Kaigan-Kogaku-Ronbunshyu, 55, 436-440, (2008)
- 12) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M.G. Dura, X. Huang, W. Wang, and J. G Powers, "A description of the advanced research WRF version 3, NCAR, Tech. Note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division", National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, (2008)
- 13) Ge, X., T. Li, and M. Peng, "Tropical cyclone genesis efficiency:mid-level versus bottom vortex", J. Tropical Meteorology, 19 (3),197-213. IPRC-897, (2013)
- 14) Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, "The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics", J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001, (2015)
- 15) Kohonen, T. "Self-organized formation of topologically correct feature maps", Biological Cybernetics, 43:59-69, (1982)
- 16) 筆保 弘徳, 伊藤 耕介, 山口 宗彦, 「台風の正体」, 朝倉書店, pp. 52, (2014)