

# 予測の不確実性が考慮された仮想台風シナリオを用いた防災 訓練教材の構築と改善に向けた評価

中條 壮大<sup>1)</sup>

1) 大阪市立大学 大学院工学研究科 e-mail: nakajo@eng.osaka-cu.ac.jp

これまでの防災訓練では台風予測の不確実性についてはあまり考慮されていないが、現在全国的に進められているタイムライン防災においては、予測の変動幅を考慮した行動が一層求められると思われる。本研究では過去の予測データの分析から、リアリティのある仮想台風シナリオを作成し、それを元にした防災訓練教材の一例を作成した。一般市民と大学生を対象として試行を行い、アンケート結果より今後の改善方策について検討した。防災教材としての学習要素とゲーミフィケーションの重要項目との相関は高いことが示された。

Key words : 台風, 防災訓練, 予測の不確実性, 最大風速

## 1. はじめに

2012年にニューヨークを襲ったカテゴリー3のハリケーン・サンディは、ニューヨークで大規模な高潮浸水を引き起こした。死者は170人以上、被害額は750億ドルと決して小さな被害ではなかったが、ニューヨーク市長の強いリーダーシップと事前に決められていたタイムライン（防災行動計画）が被害の軽減に役立ったと評価された<sup>1)</sup>。これを受けて日本でもタイムラインの活用検討が進められた。2015年関東・東北豪雨による鬼怒川の決壊なども経験しながら、2017年には「逃げ遅れゼロ」を目指した水防法の改正とともに、タイムライン防災の構築が全国的に推進されている。2021年に大阪市で配布された水害ハザードマップでも、マイタイムラインの説明がなされ、市民が各自の事前行動計画を作成して行動をとることが促されている。

事前の防災行動計画が作成されることはもちろん重要であるが、それが実際の行動につながるかどうかはさらに重要である。台風災害に関するタイムライン防災の中で重視されている広域避難が実施されるような大規模浸水の恐れがある場合には、排水から事後処理まで2週間程度の長い避難生活が求められ、およそ2日前からの準備行動が必要となるであろう。しかし、ここで問題になるのは台風の予測精度である。気象庁が示す48時間前の台風経路の予測精度は、2000年頃には全領域平均で約300kmほどの誤差があったが、2017年頃には120km程度とかなり精度が改善された。しかし、120kmの誤差は強い台風の最大旋衡風速半径の2倍程度であり、特定の都市における災害の様相を大きく変化させるほどの影響がある。また、台風経路だけでなく台風の強さを表す中心気圧についても、予測誤差は大きい。こうした予測の不確実性を考慮して防災行動の判断を問うような防災訓練は、これまでほとんど実施されたことが無く、台風の経路や中心気圧は予報通りに進行することを前提としている。ちなみに台風予測の際に示される予報円については、アンサンブル気象予測の結果に基づいた変動幅であり、これは実際の台風と予報との差を表すものではない。

このように台風の発達過程が明らかな防災訓練では、現実には生じる「どの程度の備えをすべきか」といった判断について学ぶことはできない。その結果、実際に深刻な被害をもたらす台風が進行してきた場合にも適切に行動できないということが起こり得る。これまでに生じた台風の予測と実際とのズレについて、対象地ごとに台風の経路の多様性や予測誤差の変動について分析し、統計量を示すことは可能である。しかし、そうした統計量と各台風の予測結果を組み合わせた場合にどのような台風のシナリオが生じうるのかを想像するのは容易ではない。そこで、これまでの台風予測の誤差を付与した台風シナリオをモンテカルロ法により多数シミュレートし、仮想の予報情報

を作成し，それを元にどのような行動をとるべきかを判断する防災訓練教材の開発を提案する．実際に深刻な被害をもたらす台風の再現年数は100年や200年と長期間であり，人生の時間スケールと比べて長い．こうした低頻度大災害をもたらす台風に対して備えるために，仮想空間上で大量の台風に遭遇し，それに対する備えの判断を経験する中で「空振りも備えである」という考えを身につけられないか，というのが狙いである．本稿では実際の予報誤差を取り込んだ仮想台風シナリオと，それを用いた防災訓練教材の作成方法について説明する．また，教材を用いた訓練を試行した際のアンケート結果から今後の改善点について考察する．

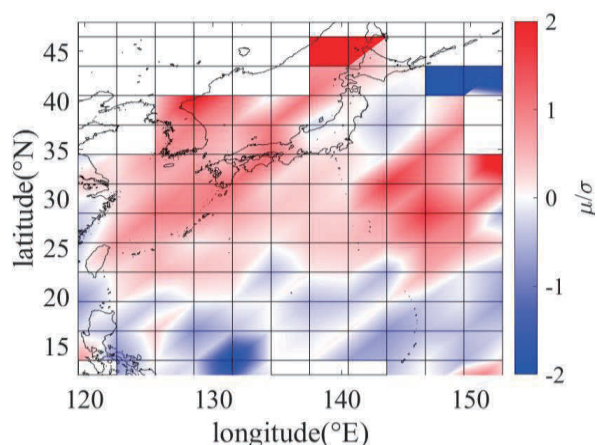


図1 経路の予測誤差の平均値／標準偏差（リードタイム24時間）．赤色は予測の東へのずれを，青色は西へのずれを表している．

## 2. 分析に用いた台風予測資料と分析方法

今回分析に用いたのは，気象庁がHP上で「台風情報」として公開する予報情報である．予報情報は台風位置，進行方向と中心気圧，中心付近の最大風速と最大瞬間風速，予報円半径，暴風警戒域が含まれるトラックデータであり，これらの現況と予報結果が示される．実際に市民や各機関の防災担当者はこうした情報をもとに，それぞれの判断で防災行動を決定している．「台風情報」は気象数値予報モデルの結果であり，各地で観測される気象データを反映させながら，時々刻々と予報が変化する．過去の予報結果は新しい予報の開示とともに上書きされるため，後日に参照することはできない．そこで，ウェブスクレイピングにより自動的に「台風情報」の結果を取得した．今回分析したデータは2015年の7号台風から2020年の10号台風までの137台風である．

取得した台風予報データと実況値との差について，予報のリードタイム毎に算定し，3度の格子上で誤差の平均と標準偏差を算定した．実際には実況値と予報値の時刻が同じとなることは少ないので，各経路データを時間軸方向に内挿補間を行った結果で差を評価している．図1には一例として経路の予測誤差の平均値（バイアス）について示している．ここでは標準偏差に対する比を示すことで変動量に対して有意に大きいかどうかを判別しやすくしている．明らかな傾向として，北緯22.5度付近を境に予測経路の東西方向のバイアスが入れ替わっている．この原因は定かではないが，気象庁の予報モデルが日本周辺とその外縁部とで切り替わっている可能性と，偏西風による台風進路の転向の予測精度が関係している可能性があると考えている．また，対象地によって多少の差はあるが，バイアスの大きさは変動量である標準偏差とほぼ同程度であることもわかる．図は割愛するが，各緯度帯で平均の経路予測誤差を評価すると，リードタイムが24時間以下であれば日本の位置する北緯35度付近までは北上するほどに精度はわずかに改善する傾向にある．24時間前予報であれば，北緯35度では平均して50km程度の予測誤差，48時間前予報であれば75km程度の予測誤差であった．これは気象庁が示している平均的な予測誤差よりもやや精度が良いが，概ね同程度の値であると思われる．中心気圧の予測データについても同様の分析を行った．

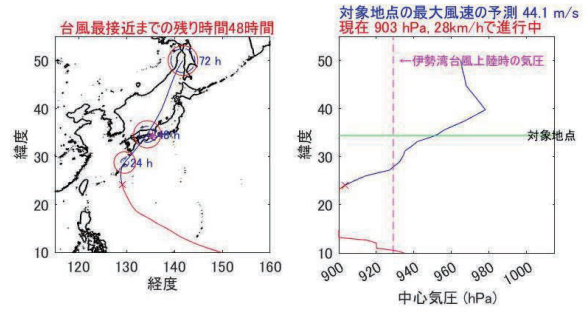
## 3. 仮想台風シナリオの作成

台風予測のバイアスと標準偏差から仮想台風シナリオを作成する手法には幾つか考えられる．ここでは既往の台風経路データに対して見かけ上の予測誤差を付与することで仮想台風シナリオを作成し，過去の台風事例の学習も兼ねられるように配慮した．既往の台風経路についてはNOAAのIBTrACSデータベースより，対象地付近を通過したものを選出した．選出した台風経路を実際に通過する台風とした．これに対し，台風予測の誤差に関する統計情報から正規分布を仮定したモンテカルロ計算により，付与する予測の誤差を算定し，実際の台風情報の経路と中心気圧に与えることで仮想台風シナリオ（予報値）を作成した．このとき，各リードタイムで独立して乱数を与

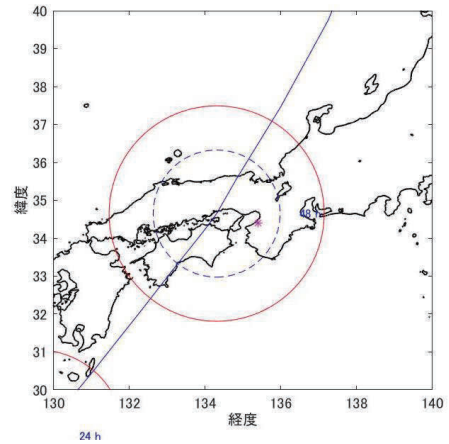
えると予測経路や気圧がジグザグになるために，24時間予報では東方向に経路がずれると判定された場合には，48時間予報でも同様に東にずれるように拘束条件を与えている。

台風がどの場所を通過するかを予測するだけでも防災教材としては成立すると思われるが，より具体的な被害状況と結びつけて学習するために，各台風の経路で生じる風の場についても，同心円状の気圧分布を仮定する経験的台風モデル（Holland<sup>2)</sup>）を用いて各時刻の計算を行った。この時，風速は台風の中心気圧，最大旋衡風速半径，進行方向，進行速度に依存する。最大旋衡風速半径は未知の定数であるが，ここでは中心気圧との相関関係から決定される経験式を用いて算定した。予測と比較する通過後の確定値としての風速についても，同様に算定した。これにより，各時刻の台風経路の予測とともに，その予測であれば対象地ではどの程度の風速が生じるかが算定できることになる。

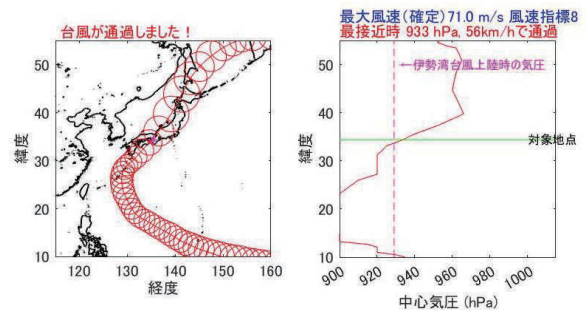
図2は作成された仮想台風シナリオの一例である。実際には台風の発生時から最接近の72時間前予測についても資料を作成しているが，ここでは48時間前予測と通過後の確定情報のみを示す。図中には台風接近までのリードタイムと，24時間後，48時間後，72時間後の台風経路および中心気圧の予測が示されている。経路および中心気圧の赤線は既に生じた結果であり，青線が今後の予測である。また対象地の座標はアスタリスクで示されている（ここでは大阪市住吉区を設定）。また各代表時刻には青丸の予報円と赤丸の暴風円も示されている。ここで予報円は過去の予報結果から与えられる統計値を元にモンテカルロ法で与えており，予測の誤差とは無関係に与えていることには注意が必要である。実際に予報の誤差と予報円の関係についても分析を行ったが，両者には有意な相関は見られなかった。中心気圧の各緯度における変化を示す図には，参考として対象地の緯度と，伊勢湾台風上陸時の気圧も示している。この例では1961年の第2室戸台風を対象に作成しているので，最発達時の気圧は表示下限の900 hPaを振り切っているが，48時間前の予測としてはその後減衰して950 hPa程度の勢力で対象地付近を通過する予測である。この時の最大風速の予測値が右上に示されていて約44m/sとなる見込みである。図の(b)は経路予測の拡大図を示している。今の予測では対象地の西側を通過することになっており，いわゆる危険半円が通過するという予測である。実際はどうで



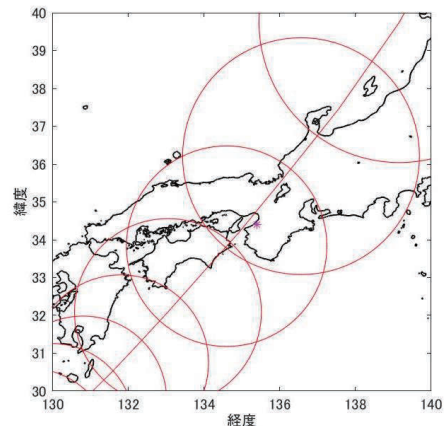
(a) 最接近 48 時間前の予測情報



(b) 最接近 48 時間前の予測情報（拡大図）



(c) 通過後の確定情報



(d) 通過後の確定情報（拡大図）

図2 仮想台風シナリオの作例

表1 気象庁の風速階級と設定した風速指標

風速指標	0	1	2	3	4	5	6	7	8
風速 m/s	0～10	10～15	15～20	20～25	25～30	30～35	35～40	40～50	50～
予報用語		やや強い風	強い風	非常に強い風		猛烈な風			

あったかということを図の(c)と(d)で確認すると、台風は予測よりも減衰せずに、933 hPa で通過することとなった。つまり48時間前予測は過小評価していたことになる。経路については予報よりもやや対象地に近い場所を通過している。その結果として、対象地の最大風速は71 m/s という極めて強い風が吹くことになった。上記の図はモンテカルロ法と組み合わせて自動生成されており、このような台風シナリオを無数に作り出すことができる。また対象地を変化させることも可能である。

#### 4. 防災訓練ゲームとしての設定

防災訓練の受講者は、これまでに示したような予測結果を参考にしながら、実際にはどのような結末となるかを予測することになる。現段階では広域避難の目安として48時間前を設定し、このときの予測値を元に行動宣言することになる。防災訓練としてどのような行動宣言を行うかについても、幾つかのバリエーションが考えられるが、ここでは単純に風速の階級を当てることとする。気象庁は表1に示すように風速階級毎に被害の目安を示しているため、これを用いることとした。表中の風速指標とは本研究で便宜上定義した数値である。ちなみに風速50 m/s以上という風速階級については、温暖化による台風の強大化予測を踏まえて、気象庁が2021年度以降に導入する予定の階級である。防災訓練においては、この風速指標を予測するというルールを設けたことから、今回の防災訓練は「台風ルーレット」と暫定的に呼称している。

シナリオの決まっている防災訓練とは異なり、台風の予測変動幅を体験しながら学ぶことが今回の狙いである。すなわち、多数の台風シナリオに対して擬似予測体験をしてもらう必要がある。そのために、防災訓練にゲーム的要素を取り入れる工夫、すなわちゲーミフィケーションは必須であると考えている。この方法についても多数の方法が考えられるが、ここでは風速指標を点数化し、風速指標を当てることができれば、その数値だけの得点を台風に対して備えることができたアドバンテージとして獲得することとした。逆に風速指標を過小評価すれば、その数値だけ減点されることで損害を受けたことを表現する。過大評価した場合についての扱いをどのようにするかについては、安全側の予測をしたということで予測と実際の差分について減点することとした。この点については異論のあるところだと思われるが、仮に過大に評価することを正とすれば、どのようなシナリオに対しても過大に備えると申告し続けることが正しいということになってしまう。しかし、実際に過大に備えるということは、極端に言えば危険性の小さい台風であっても毎回広域避難を選択するということになり、それは現実的ではなく、実際の備えには時間や経費の支出を伴うからである。毎回の予測と結果の開示の後には、学習に用いた台風の背景（何年どのような特徴を有した台風であったのかなど）の解説を加えることで付加的な学習要素を取り込んだ。ゲームは

1. 仮想台風シナリオの提示
2. 回答者による風速指標の予測と回答用紙への記入
3. 正解の提示
4. 回答者自身による点数の計算
5. 当該シナリオの元となった台風の解説

という流れで進行した。

#### 5. 一般市民と大学生を対象とした試行とアンケート評価

作成した仮想台風シナリオを用いて、防災士養成プログラムを受講前の一般市民と大阪市立大学工学部で河海工

学を受講している学生を対象に防災訓練「台風ルーレット」を試行し，その内容についてアンケートを実施した。ただし，時間の関係上，市民は約5事例に対して訓練を実施し，大学生は10事例に対して実施した後の回答となる。また，市民に対しては訓練前に台風災害に関する15～20分ほどのレクチャーをした後にプロジェクターへの投影で実施しているが，大学生は60分ほどの講義を受講した後に各自でPDF資料をめくりながらの回答であるという点や，年齢層が20代前半であるという点も異なる。市民からは134件，大学生からは41件の回答を得た。表2に受講者の年齢層を示す。30代の受講者が少ないが比較的年齢層は広く分布している。

表2 受講者の年齢層

年齢層	人数
20代	50
30代	6
40代	28
50代	26
60代	26
70代	3
未回答	23

質問は全部で9つあり，それぞれ5段階評価で回答を求めた。それに加えて，自由記述のコメントを収集している。各質問に対する回答数を表3に示す。質問内容はQ1-1「このゲームを通じた台風災害の学習について：学ぶ点は少ない1～学ぶ点が多い5」，Q1-2「このゲームの防災ワークショップへの利用について：適していない1～適している5」，Q2-1「ゲームの展開として，与えられる情報の量は：少なすぎる1～多すぎる5」，Q2-2「ゲームのデザイン・ビジュアル面について：不満がある1～満足できる5」，Q2-3「ゲームの展開・進行について：不満がある1～満足できる5」，Q3-1「ゲームとしての楽しさ：楽しくない1～楽しい5」，Q3-2「ゲームとしての明確な目標：目標が不明瞭1～目的が明確5」，Q3-3「ゲームとしての達成感：達成感はない1～達成感はある5」，Q3-4「誰かと一緒に楽しむ：勧めたくない1～ぜひ勧めたい5」となっている。各質問についてはMcGonigal<sup>3)</sup>の示すゲームに必要な4つの特徴である「ゴール」「ルール」「フィードバックシステム」「自発的な参加」を参考に決定した。

表3の単純集計結果より，今回の台風ルーレットを通じて過半数より学ぶ点が多く，防災ワークショップへの利用が適しているとの回答を得ることができた。一般市民と大学生を比較すると，大学生の方がやや平均点が高くなっている。ただし，一部，「適していない」と回答した意見の中には，「専門家でない一般人が予報するのは不適切である」「現在の気象予報はかなり正確なので自分で台風を予測する必要性を感じられない」などの意見も見られた。これについては，本稿の冒頭で述べた予測の不確実性や，避難情報だけに頼らずに各自でタイムラインを作成して行動しなければならないという点についての理解が十分に

表3 アンケートの集計結果（ ）内は大学生の回答数を示す

質問	評点					平均点
	1	2	3	4	5	
Q1-1	10(0)	10(2)	50(6)	41(21)	63(12)	3.77(4.05)
Q1-2	11(0)	9(0)	56(6)	40(20)	54(15)	3.58(4.22)
Q2-1	19(0)	37(9)	94(23)	16(8)	6(1)	2.68(3.02)
Q2-2	8(0)	24(9)	98(18)	22(7)	21(7)	3.10(3.29)
Q2-3	4(0)	18(7)	75(8)	43(19)	33(7)	3.44(3.63)
Q3-1	13(0)	15(4)	60(13)	43(19)	28(5)	3.06(3.61)
Q3-2	13(0)	12(3)	45(6)	43(15)	42(17)	3.17(4.12)
Q3-3	19(2)	23(8)	54(10)	36(12)	24(9)	2.81(3.44)
Q3-4	15(1)	18(5)	55(9)	47(22)	22(4)	2.94(3.56)

表4 各質問に対する回答の相互相関

	Q1-1	Q1-2	Q2-1	Q2-2	Q2-3	Q3-1	Q3-2	Q3-3	Q3-4
Q1-1		<b>0.63</b>	0.31	0.33	<b>0.45</b>	0.38	0.35	0.39	<b>0.43</b>
Q1-2			0.27	0.34	<b>0.43</b>	<b>0.44</b>	<b>0.49</b>	<b>0.54</b>	<b>0.52</b>
Q2-1				0.16	0.24	0.34	0.32	0.27	0.31
Q2-2					<b>0.45</b>	0.29	0.32	0.32	0.31
Q2-3						0.34	0.36	0.36	0.34
Q3-1							<b>0.70</b>	<b>0.76</b>	<b>0.80</b>
Q3-2								<b>0.70</b>	<b>0.76</b>
Q3-3									<b>0.84</b>

(a) 全回答

	Q1-1	Q1-2	Q2-1	Q2-2	Q2-3	Q3-1	Q3-2	Q3-3	Q3-4
Q1-1		<b>0.43</b>	0.21	-0.05	0.09	<b>0.44</b>	0.03	0.32	0.16
Q1-2			0.09	0.16	-0.03	0.37	0.04	<b>0.40</b>	0.31
Q2-1				-0.11	0.23	0.14	0.14	0.16	0.13
Q2-2					0.22	0.23	0.26	0.31	0.17
Q2-3						<b>0.44</b>	<b>0.41</b>	<b>0.41</b>	0.29
Q3-1							0.35	<b>0.68</b>	<b>0.62</b>
Q3-2								0.36	0.36
Q3-3									<b>0.68</b>

(b) 大学生のみ

ない可能性もある。また、自分たちで災害リスクを判断することは難しく、決断を任されたくないという思いの表れであると解釈できる。逃げ遅れゼロを進めるタイムライン作成における難しさを表す意見であろう。これらの回答に対して年齢に関する相関を調べてみたが、特に有意な相関は見られなかった。ゲームのデザイン・ビジュアル面においては、多くは中立であるが、やや不満寄りの評価となっている。試行段階では風速の面的分布についての情報が示されておらず、台風周りの風についての知識が十分でない場合には推測が難しかったのではないかと推測される。その他にも予報円や暴風円、気圧の変化など参照する指標が幾つもあるので、それらをどのように組み合わせるかで予測すればよいのか悩むようであった。このあたりは教材として簡素化するなど整理が必要である。ゲームの展開・進行については概ね満足されているが、「講師のように慣れている人でないと、実際のワークショップで結果の説明が難しいように思う」という意見も見られた。ゲームとしての楽しさや目標、達成感、誰かと一緒に楽しめるかという項目については、大学生の評価はよいが、一般市民の評価はまだ低い状況にあり、ゲーミフィケーションのさらなる工夫が必要であると思われる。表4に示す回答の相互相関から考えても、Q1-1やQ1-2とQ2-3、Q3-1~Q3-4との相関は高く、またQ3-1~Q-4の間の相関も高いことから、ゲーミフィケーションの向上によってさらに有効な教材として進展させることができるだろうと考えている。なお、今回は本教材による学習効果の把握までは実施しておらず、今後の検討項目である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省・防災関連学会合同調査団(2013), 米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書(第二版), 109p.
- 2) Holland, J. G. (1980), An analytical Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricane, *Monthly Weather Review*, 108, pp. 1212-1218.
- 3) Mcgonigal, J. (2011), Reality is broken (訳: 藤本徹・藤井清美, 幸せな未来は「ゲーム」が創る), 早川書房, 542p.