

# インドにおけるサイクロンハザードモデルの基礎的な研究

## A Basic Study on the Wind Hazard Analysis Model for the Cyclone in India

○渡部弘之<sup>1</sup>, 鈴木弘二<sup>1</sup>, 矢代晴実<sup>2</sup>, 福島誠一郎<sup>3</sup>

Hiroyuki WATABE<sup>1</sup>, Koji SUZUKI<sup>1</sup>, Harumi YASHIRO<sup>2</sup> and Sei'ichiro FUKUSHIMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>アジア防災センター

Asian Disaster Reduction Center

<sup>2</sup>東京海上日動リスクコンサルティング(株) 開発グループ

Group of Development, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co.,Ltd.

<sup>3</sup>東電設計(株) 防災グループ

Disaster Reduction Engineering Group, Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.

Recently, various alternative risk transfer transactions have been issued to diversify the natural catastrophic risk retained by insurers to the financial market instead of reinsurance market. Especially, the catastrophic bond based on the parametric trigger such as the center pressure depth at the cyclone landing is high transparency and objective index for the investors. Gujarat State in western part of India have rarely suffered the heavily losses by intense wind due to cyclone. The study is focused on the development of the cyclone hazard model to design risk financing such as risk securitization using parametric trigger. In the study, we statistically analyzed the historical cyclone data to fit the probable distribution function of cyclone parameters. Using these parameters, we stochastically generated a large number of cyclone events to estimate the peak gust wind speed at various sites around Gujarat.

**Key Words :** Risk Finance, Wind Disaster, Cyclone Simulation

### 1. はじめに

近年、インドでは人口、資本、労働生産性の向上などにより経済成長が著しく、今後さらなる成長が見込まれているが、特に経済活動の活発なグジャラート州では地震、サイクロン、水災等の様々な自然災害が頻発し、成長の阻害要因の一つとなっている。これらの自然災害リスクへの対応は経済発展を促す上でも極めて重要である。

グジャラート周辺のサイクロン上陸頻度は年 0.1 個程度となっているが、財物の集積度も高く、過去、大規模な被害が発生している。こうした低頻度、甚大な被害をもたらす事象については、過去の僅かな被害データからリスク評価を行うことは難しく確率モデルによる手法あるいはサイクロンが発生したという条件下での確定論的なリスク評価手法によらざるを得ない。

一方、このような事象のリスク低減には、防災に加えリスクファイナンスによるリスク転嫁が有効である。昨今は保険に加え、資本市場に補填を求める自然災害リスクの証券化<sup>2</sup>等が活発化している。こうしたリスクファイナンスの設計、その効果の定量把握等には、確定論的な評価よりも確率論に基づくことが実際的である。特に証券化においては投資家からの元本没収トリガーとなるパラメトリックトリガー設定のためには確率論的な評価が不可欠となる。そこで、本研究では、リスクファイナンスニーズに対応するために、サイクロンリスク解析用のハザードモデルの基礎的な研究を行う。

### 2. サイクロン・ハザードの評価手法

サイクロンに伴う被害は強風および降雨によるものが

あるが、過去の被害事例からは前者が支配的であるため、本研究では、前者を扱うこととする。風災による建物被害の大きさは、建物構造、外装材等の脆弱性により、一般的には最大瞬間風速に依存するとされており、リスク評価にあたっては評価対象物の所在地で予想される最大瞬間風速データが必要となる。しかし、当該地における過去の最大瞬間風速データを得ることは近傍に気象官署がなければならず、得られたとしても本検討で対象とする極めて稀に出現するデータを得ることは困難である。

したがって、本検討では、まず、過去のサイクロンパラメータの統計量を分析し、これを基に仮想的に生成したサイクロンを用いて複数の評価対象地点にて最大瞬間風速を推定し、グジャラートにおける風災ハザードを作成することとした。

### 3. サイクロンパラメータの分析

最大瞬間風速は、モデル化したサイクロンの気圧分布を用いて計算により推定する必要がある。ここでは、その際に必要なサイクロンの襲来頻度、中心気圧差、進行速度、進行角度等のパラメータについて設定する。

#### (1) 統計分析に用いるデータ

分析データは Joint Typhoon Warning Center (JTWC) による North Indian Ocean の Best Track データ<sup>3</sup>である。統計期間は 1945-2005 年と長期だが、データが均質に得られるのは 1972 年以降であることから、分析対象データ期間を 1972-2005 年の 34 年間とした。分析対象地域は、グジャラート州周辺地域とし、図 1 のように海岸沿いに設定したゲートを通過した過去のサイクロンを分析対象とする。また、対象地域では 10 年間に 1 個程度のサイクロ

ンが上陸するのみで、過去のサイクロンのみを対象としただけではデータ数の点で不十分である。ここでは評価対象とするデータを、サイクロンの定義に満たない最大風速 64knot 未満のトロピカルストーム (TS) にも広げた。但し、中心気圧が 1000hpa を上回る衰弱したものについては分析対象から除外した。

次に、ゲートを通じた TS の経路を図 2 に示す。大半は、ゲートを南西側より北東側に通過するが、一部、東側の大陸側からゲートを西側に通過する TS も見られる。これらについては勢力も弱く、分析対象から外すこととした。以上より分析対象となる過去のサイクロン数 (一部 TS を含む) は 9 個となった。なお、最大瞬間風速の推定には、中心気圧および最大旋衡風速半径のパラメータが必要である。しかしながら、中心気圧のデータは存在しないことから、Atkinson-Holiday<sup>4</sup> による(1)式を用いて JTWC により公表されたサイクロン中心付近での最大風速値を基に中心気圧を推定した。

$$V_{max} = 6.7 \cdot (P_n - P_c)^{0.644} \quad (1)$$

ここで、 $V_{max}$  は中心付近での最大風速 (kt) ,  $P_c$  は中心気圧 (hpa) ,  $P_n$  は周辺気圧 (hpa) であり、ここでは周辺気圧を 1010hpa<sup>5</sup> と設定した。また、 $R_m$  も観測データは 2001 年以降しかなく勢力の強いサイクロンに対して十分なデータが揃わないことから、既往の研究データ<sup>6</sup> を用いた。

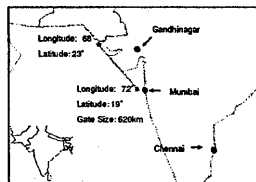


図 1 設定ゲート

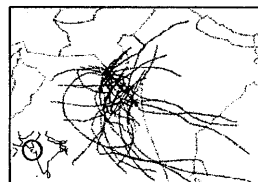


図 2 通過サイクロン (1946-2005 年)

(2) パラメータの統計量

ゲート通過サイクロンの頻度について分析を行った。カイ二乗検定により確認したところ、図 3 のように有意水準 5% でポアソン分布が妥当であることが確認できた。

次に、最大瞬間風速推定のため、パラメータについての分析を行う。必要パラメータはゲート付近通過時の気圧差、進行速度、ゲート通過角度、およびゲート通過後の気圧減衰率である。各パラメータに過去のデータに対して適合した累積確率密度関数を図 4~6 に示す。

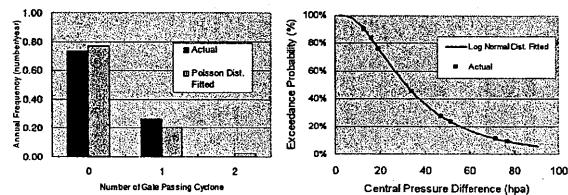


図 3 サイクロン頻度分布

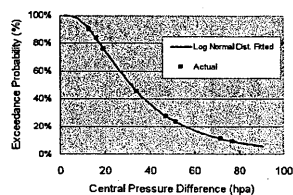


図 4 気圧差の分布

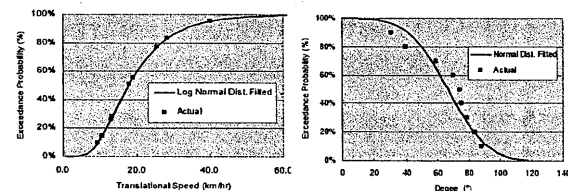


図 5 進行速度の分布

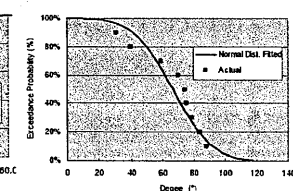


図 6 進行角度の分布

また、図 7 のように確率紙を用い正規、対数正規、ワイブル分布への適合性を調べたが、中心気圧差、進行速度には対数正規分布が、また角度には正規分布への適合度が高かった。なお、各パラメータの平均値、標準偏差については、確率紙上の切片、傾きより算出した。パラメータ間の相関関係については、図 8 のように、いずれについても相関係数は極めて小さく、相関関係は認められなかった。

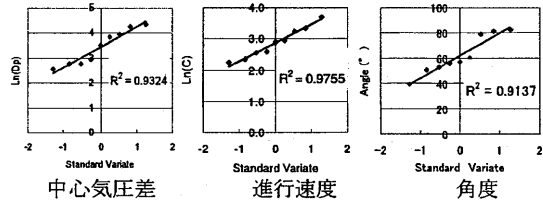


図 7 確率紙上のパラメータの確率密度関数への適合度

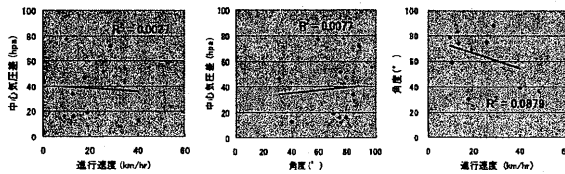


図 8 パラメータ間の相関

次にゲート通過後の気圧パラメータの変化については Fujii<sup>7</sup> による(2)式を用いて評価した。

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-a_p t) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta p_0$  はゲート通過時における中心気圧と周辺気圧との差 (hpa) ,  $\Delta p$  はゲート通過  $t$  時間後における気圧差 (hpa) ,  $a_p$  は減衰率である。ゲート通過後に中心気圧の変化が明確に現れるサイクロン、すなわちゲート付近通過時に 980hpa 以下の 4 つのサイクロンを分析した。図 9 にはゲート通過後の気圧差の減衰率を示している。サイクロン毎にばらつきはあるが、サイクロン毎に平均値を求め、さらに 4 つのサイクロンに対しての平均値は 0.03 程度となった。得られた各種パラメータの統計量を表 1 に示す。

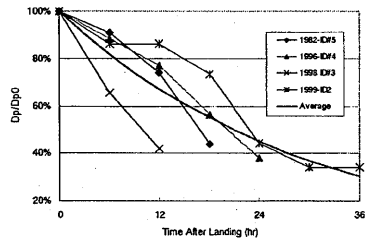


図 9 ゲート通過後の気圧差の変化

表 1 設定したパラメータ

Item	Probable Distribution Type	Mean	Standard Deviation
Central Pressure Difference (hpa)	Logarithm Normal Distribution	31	0.7
Translational Speed (km/hr)	Logarithm Normal Distribution	2	2.4
Passing Angle (°)	Normal Distribution	1	1
Radius of the Maximum Wind Speed (km)	Logarithm Normal Distribution	36-52	0.4
Frequency of Cyclone Passing (number/year)	Poisson Distribution	0.26	---
Filling Rate Coefficient ( $a_p$ )	---	0.03	---

#### 4. 最大瞬間風速の算出

得られた各種パラメータの統計量，仮定した確率密度分布を基に設定ゲート上にてポアソン分布に従い仮想的に 10000 年分のサイクロンを発生させ，得られたサイクロン毎に対象地点での最大瞬間風速を推定する。サイクロンのモデル化には，ハリケーンや台風において適用される手法<sup>8</sup>を採用した。すなわち，気圧分布を仮定し，傾度風を求め，これを地上風に変換しガストファクターを掛けて算出する。シミュレート例を図 10 に示す。

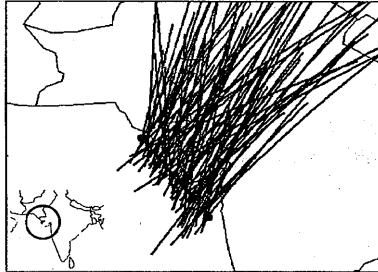


図 10 シミュレートしたサイクロン経路の例

##### (1) サイクロンの気圧場

発達したサイクロンの気圧場はその等圧線が同心円状になり，中心からの距離の関数として表され，Holland<sup>9</sup>はこの関数を以下のように与えた。

$$P(r) = P_c + D_p \exp\left\{-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right\} \quad (3)$$

ここで， $P_c$ ， $D_p$ ， $R_m$ ， $r$ ， $B$  は，台風の気圧場を表す変数で，それぞれ中心気圧 (hpa)，中心気圧差 (hpa)，最大旋衡風速半径 (km)，サイクロン中心と対象地点との距離 (km)，形状係数である。形状係数は 1.0~2.5 が適切であると， $B=1.0$  の場合は Schloemer の提案した同心円の式となる。ここでは，Holland は  $B=1.5$  を推奨しているが，低緯度のサイクロン程，中心付近における気圧勾配は高くなることから，Tang et al.<sup>11</sup> による下式を用いることとした。

$$B = 1.5 + (980 - P_c) / 120 \quad (4)$$

##### (2) 傾度風速の算出

傾度風速の予測式は，気圧傾度力が遠心力とコリオリ力にバランスする運動方程式から求めた(5)式により表される。これはプラトンの公式を用いて移動による流線曲率の変化を考慮したものである。

$$V_{gr} = \frac{c \cdot \sin \theta - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot \sin \theta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P(r)}{\partial r}} \quad (5)$$

ここで， $V_{gr}$  は傾度風速 (m/s)， $c$  は気圧場の移動速度 (m/s)， $r$  はサイクロン中心と対象地点との距離 (m)， $\theta$  は中心から対象地点へ向かうベクトルを基準に進行方向を表す角度 (反時計回りを正)， $f$  はコリオリパラメータ (1/sec)， $\rho$  は空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) を表す。

##### (3) 傾度風から地表風への変換

既往の研究にて傾度風から地表風への変換については様々な手法が提案されている。藤井ら<sup>8</sup>によれば，台風 7705 および 7709 のデータを基に，式(6)により傾度風から地表風への変換を行っている。

$$\frac{V_s}{V_{gr}} = G(\infty) \times \left[ 1 + 10^{0.0231 \Delta p - 1.96} \left(\frac{\xi}{\xi_p}\right)^{m-1} \exp\left\{\left(1 - \frac{1}{m}\right) \left\{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_p}\right)^m\right\}\right\} \right] \quad (6)$$

ここで， $V_s$  は地表風， $V_{gr}$  は傾度風， $G(\infty)$  は周辺における  $V_s/V_{gr}$ ， $\Delta p$  は対象地点における気圧差 (hpa)， $\xi$  は  $r$  と  $R_m$  の比率， $\xi_p$  と  $m$  は係数である。

また，孟・松井<sup>11</sup>らは，台風発生時の平均風速は地表面の影響を無視できる自由大気中の傾度風速と準定常的に発生する地表面の摩擦による成分の和として表すことができるとし，数値的に台風時の大気境界層における強風を表す式を提案した。

$$U(z) = v_{\alpha} \left(\frac{z}{Z_G}\right)^{\alpha_M} \quad (7)$$

$$\alpha_M = 0.27 + 0.09 \log Z_0 + 0.018 (\log Z_0)^2 + 0.0016 (\log Z_0)^3 \quad (8)$$

$$Z_G = 0.06 U_G / f_i (\log R_{0.2})^{-1.45} \quad (9)$$

ここで， $U(z)$  は高さ  $z$  での風速 (m/s)， $v_{\alpha}$  は傾度風速 (m/s)， $Z_G$  は傾度風の高さ (m)， $Z_0$  は粗度長 (m)， $f_i$  はコリオリパラメータ (1/sec)， $R_{0.2}$  はロスビー数を表す。その他，山崎ら<sup>12</sup>は，気象官署で得られた上空風と地表風の風向別比を求め，シミュレーションで得られた傾度風に適用し地表風を求めている。また，勝地ら<sup>13</sup>は，台風シミュレーションで得られた傾度風について一般的に適用されている係数，すなわち，海上では 2/3，地上では 1/2 を傾度風に掛け合わせている。ここではインドにおける上空風と地上風との観測風速データも得られないことから，上記 3 手法により地表風の評価を行ない比較することとした。なお，得られた地表風速に対して最大瞬間風速値を得るためには，ガストファクターを設定する必要がある。すなわち，

$$U_p = G \cdot U(z) \quad (10)$$

ここで， $U_p$  は最大瞬間風速 (m/s)， $G$  はガストファクター， $U(z)$  は高さ  $z$  での風速 (m/s) である。既往の研究<sup>14</sup>にてハリケーン時と非ハリケーン時における  $G$  の違い，さらには平均風速値に対する  $G$  のばらつき等が検討されている。ここでは，既往研究に基づき 1 時間平均風速に対する  $G$  を 10 分間の平均値に換算して適用した。

##### (4) 予想最大瞬間風速の検証

算出した最大瞬間風速値の妥当性を検証した。気象官署での観測データが得られなかったため，建築コードにおける Design Wind Speed を基に作成された再現期間 200, 100, 50, 25 年での Peak Gust (3 秒間，Open Terrain，高さ 10m)<sup>15</sup> との比較を行った。図 11 の Hazard Risk Zonation (以下 Hazard Map) は気象官署の観測データに基づき作成されている。

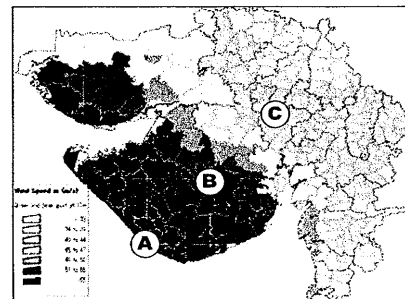


図 11 Hazard Risk Zonation (200 年再現期間)

まず、海岸から内陸に從って約 50km 程度、離れた A~C の 3 地点 (緯度/経度は其々 21.0/ 70.0°, 22.0/ 71.0°, 23.0/72.0°) にて 3 通りの地表風換算法を用い 200, 100, 50, 25 年再現期間の最大瞬間風速を推定し、Hazard Map 上の最大瞬間風速値と比較した。その結果を図 12 に示す。海岸付近の A 地点は、いずれの再現期間においても Hazard Map の風速が算出した値よりも高くなっている。B 地点は、A 地点ほどの乖離は見られず、藤井らの手法によって算出された最大瞬間風速との乖離は少ないことが判る。C 地点では、Hazard Map の風速がいずれのモデルによる風速よりも低くなっている。藤井らのモデルでは、他 3 手法よりも計算される値は高くなるものの、Hazard Map との比較において結果の適合性が高いことが判った。また、図 13 に藤井らによる地表風算出手法に基づいた 200 年再現最大瞬間風速を示す。図中の数字は最大瞬間風速値を示す。ほぼ Hazard Map と同程度の風速分布になることが判る。

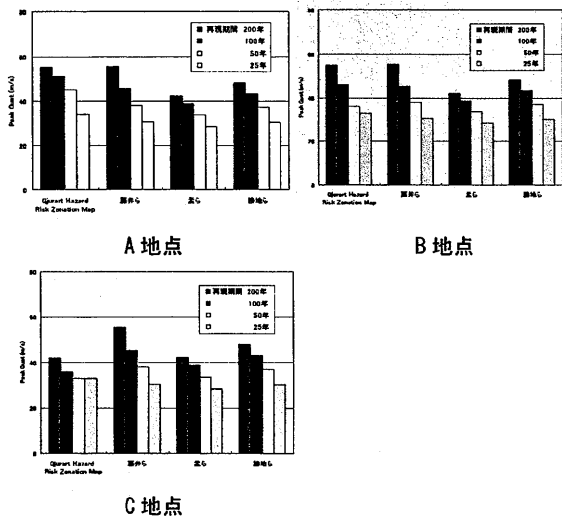


図 12 A~C 地点における最大瞬間風速値の比較

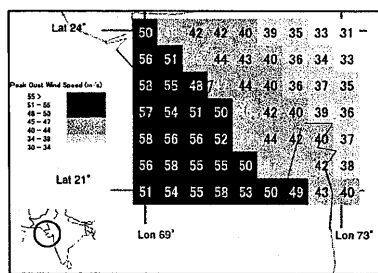


図 13 モデルによる最大瞬間風速 (200 年再現期間)

5. まとめ

本研究では、サイクロンリスクの証券化等のリスクファイナンスを行う際の基礎的な研究を目的としてグジャラート州のハザードモデルの開発を行なった。その結果、以下の知見を得た。

- ① グジャラート周辺に襲来するサイクロンは低頻度事象であり風災リスク評価に必要な統計データは不十分であるが、確率論的な手法により風災ハザード評価

手法を構築した。

- ② 過去のサイクロンデータを分析し、中心気圧、進行速度等のパラメータの統計的な性質を明らかにした。
- ③ 使用パラメータ間に相関がないことを明らかにした。
- ④ モデル算出最大瞬間風速と現地での風災ハザードマップにおける最大瞬間風速と比較したところ、モデルで算出した最大瞬間風速の適合度は高かった。

今後、得られたハザードを基に建物被害のリスク量を算出するモデルを開発し、サイクロンリスクヘッジのニーズに対応するために、リスク証券化等のリスクファイナンスの設計に活用したい。

参考文献

- 1) 2004 Annual Cyclone Report, U.S. Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center/ Joint Typhoon Warning Center, Pearl Harbor, Hawaii
- 2) The Growing Appetite for Catastrophe Risk, The Catastrophe Bond Market at Year-End 2004, MMC Securities
- 3) Joint Typhoon Warning Center ATRC Archives
- 4) Atkinson, G.D. et al.: 1977 Tropical cyclone minimum sea level pressure-maximum sustained wind relationship for western North Pacific. Mon. Wea. Rev. 105, 421-427.
- 5) Roger A. Flather: Storm Surge Prediction Model for the Northern Bay of Bengal with Application to the Cyclone Disaster in April 1991, pp172-190, Journal of Physical Oceanography, Vol. 24, (January 1994)
- 6) Bell, G. J.: Observations on the size of Typhoon eye, WMO technical conference on typhoon modification, n0. 408, Manila, Oct. 14-18, 1974
- 7) Takeshi Fujii: Statistical Analysis of the Characteristics of Severe Typhoons Hitting the Japanese Main Islands, pp. 1091- 1097, Monthly Weather Review, Vol. 126, Issue 4 (April 1998)
- 8) 藤井健, 光田寧: 台風による強風の出現確率の予測について, 自然災害科学, Vol. 11, No. 3, pp. 125-144, 1992
- 9) G. Holland: An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, pp. 1212-1218, Monthly Weather Review, Vol. 108
- 10) Tang et al.: A Numerical Study of the Storm Surge Generated by Tropical Cyclone Jane, pp. 963- 976, Journal of Physical Oceanography, Volume 27, Issue 6 (June 1997)
- 11) 孟ほか: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その2, 台風時の強風, pp. 3-14, Journal of Wind Engineering, No. 86, Jan. 1996
- 12) 山崎ほか: 送電用鉄塔の耐風設計のための風向別基本風速に関する検討, pp. 19-34, Journal of Wind Engineering, JAWE Vol. 29, No. 3, July 2004
- 13) 勝地ほか: 海面水温の影響を導入した台風シミュレーション, Journal of Wind Engineering, JAWE, Vol29, No. 3 (No. 100), July 2004
- 14) Vickery et al.: Hurricane Gust Factors Revisited, pp. 825-832, Journal of Structural Engineering, May 2005
- 15) Gujarat State Disaster Management Authority: Gujarat Cyclone Hazard Risk Zonation 200-year return period, MAP No.: CYM-07 of 08, Date 18/8/2006