

インドにおけるサイクロンリスク解析のための確率モデルの基礎研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE PROBABILISTIC MODEL FOR CYCLONE RISK ANALYSIS IN INDIA

渡部 弘之*, 矢代 晴実**, 福島 誠一郎***

Hiroyuki WATABE, Harumi YASHIRO and Sei'ichiro FUKUSHIMA

Recently, various alternative risk transfer transactions have been issued to diversify the natural catastrophic risk retained by property & casualty insurers to the financial market instead of traditional 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 has rarely suffered the heavily losses by intense wind due to cyclone. The study is focused on the development of the cyclone risk model to design risk financing such as risk securitization using parametric trigger. In this 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 the assumed portfolio. After applying various types of vulnerability function for buildings to the wind hazard, we obtained the risk curve.

Keywords: Risk Finance, Wind Disaster, Risk Curve, Cyclone Simulation, Portfolio

リスクファイナンス, 風災, リスクカーブ, サイクロンシミュレーション, ポートフォリオ

1. はじめに

近年, インドでは人口, 資本, 労働生産性の増加などを起因として経済成長を成し遂げ, ここ数年 8% 程度の成長率となり, 世界平均を上回る高水準の成長を記録している。今後はさらに, 資本蓄積・技術革新による生産性上昇なども見込まれている。こうした成長の中, インドではサイクロン, 地震等の自然災害が頻発しており, 成長の阻害要因の一つとなっている。特に経済活動の活発な西部地区, 州では地震およびサイクロンによる被害も発生しており, 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。

サイクロンは主にベンガル湾やアラビア海で発生するが, 年間の発生数¹⁾は各々約 3 個, 2 個であり, 上陸サイクロン数は, 平均して各々 0.92, 0.18 個程度と極めて少ない事象である。特に経済活動の活発なグジャラート周辺の上陸頻度は年間 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, 確率モデルを用いた確率論的な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。

ところで, このような事象のリスク低減には, 防災のみならずリスクファイナンスによるリスク転嫁が有効である。昨今は通常の保険に

加え, 資本市場に補填を求める証券化²⁾等のリスクファイナンスが活発化している。こうしたリスクファイナンスの設計と効果の定量把握等には, 確率論に基づくことが実際的であるため, 確定論的なリスク評価手法は適さず, 確率モデルによる評価を採ることになる。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^{注1)}の設定のために, 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, インドのサイクロンリスク証券化に資するサイクロンリスク解析用の確率モデルの基礎的な検討を行う。

2. サイクロンリスクの評価手法

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。そこで本研究では, 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ものとされており, リスク評価にあたっては評価対象物の所在地において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。さらには本研究では, 評価対象物のリスクを個

* アジア防災センター 修士(工学)

** 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 博士(工学)

*** 東電設計(株) 博士(工学)

Asian Disaster Reduction Center, M. Eng.

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

別に評価するのではなく、広域に点在した複数の評価対象物をポートフォリオとして扱い、被害の相関を加味して同時に評価する。

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する。次に、得られた最大瞬間風速情報を基に建造物の損傷度を基に設定したバルナラビリティカーブを適用し、広域に点在するポートフォリオの被害を推定し、確率論的に風災リスク評価を行うこととした。

3. サイクロンパラメータの設定

最大瞬間風速の推定は、サイクロンの気圧分布をモデル化し、計算により推定する必要がある。ここでは、サイクロンの襲来頻度、中心気圧差、進行速度、進行角度、最大旋衡風速半径、上陸後の中心気圧減衰率について設定する。

3.1 統計分析に用いるデータ

分析に用いたデータは Joint Typhoon Warning Center (JTWC) による North Indian Ocean の Best Track データ³⁾である。統計期間は 1945-2005 年と長期に亘っているが、必要なパラメータが均質的に得られるのは 1972 年以降であることから、分析対象とするデータ期間を 1972-2005 年の 34 年間とした。

分析対象地域は、インド全域ではなく、サイクロンリスク証券化のために対象とするグジャラート州周辺地域とし、図 1 に示すようにグジャラート州周辺の海岸沿い設定した 620km のゲートを通過した過去のサイクロンを分析対象とする。一般に大半のサイクロンは北上する際にアラビア海上の北緯 15~20°にて偏向⁴⁾し北東へ進むことが知られており、偏向したサイクロンを設定したゲートで捉えることができる。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あり、過去のサイクロンのみを対象と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 (33m/s) 未満のトロピカルストーム (以下、TS) にも広げた。ただし、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、ゲートを通過した 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 R_m のパラメータが必要である。しかしながら、中心気圧については JTWC では観測していない。そのため、中心気圧については、Atkinson-Holiday⁵⁾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。

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

ここに、 V_{max} は中心付近での最大風速 (knot)、 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 1010hpa⁶⁾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⁷⁾を用いることとした。表 1 に使用サイクロンデータを示す。

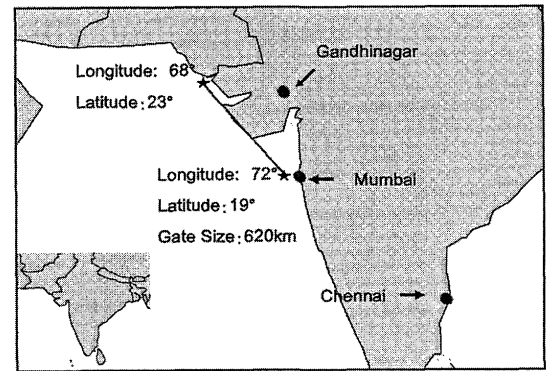


図 1 設定ゲート

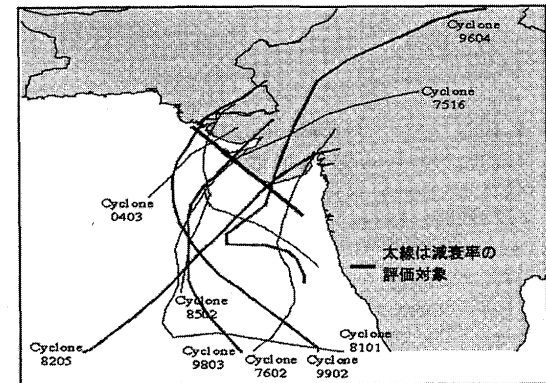


図 2 設定ゲートを通過したサイクロン (1972-2005 年)

表 1 ゲート付近通過時における過去のサイクロンデータ

Year	Month	Day	Storm ID	Longitude (Deg.)	Latitude (Deg.)	Max. Wind Speed at the Eye of Cyclone (knot)	Estimated Central Pressure (hpa)	Translational Speed (km/hr)	Angle (Deg.)
1975	10	22	16	21.2	68.8	80	963	18	56
1976	6	2	2	19.6	71.4	40	994	13	81
1981	11	1	1	21.6	69.2	45	991	19	51
1982	11	8	5	20.1	70.3	85	958	26	53
1985	5	31	2	22.8	68.4	40	994	9	79
1996	6	18	4	20.3	70.8	65	976	13	83
1998	6	9	3	21.5	69.0	105	938	29	57
1999	5	20	2	23.1	67.9	110	933	11	60
2004	10	3	3	22.2	67.8	35	997	40	40

3.2 パラメータの統計量

ゲートを通過したサイクロンの頻度について分析を行った。ゲート通過サイクロン数がポアソン過程に従うかを、カイ二乗検定により確認したところ、図 3 に示すように有意水準 5% でポアソン分布が妥当であることが確認できた。

次に、リスク評価で必要となる最大瞬間風速を推定するためのパラメータについての分析を行った。必要なパラメータは、ゲート通過個数、ゲート付近通過時の中心気圧と周辺気圧との差、進行速度、ゲート通過角度、 R_m 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フィッティングした累積確率密度関数を図 4~6 に示す。また、図 7 に示すように確率紙により正規分布、対数正規分布、ワイブル分布への適合性を調べたが、中心気圧差、進行速度に対しては対数正規分布が、また角度に対して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。

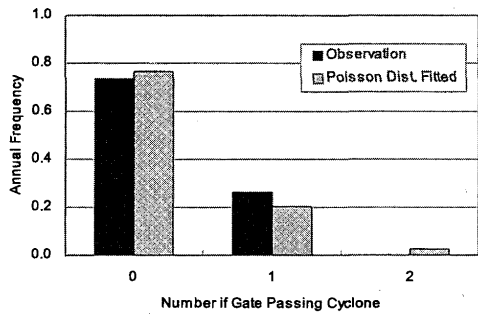


図3 ゲート通過サイクロンの頻度分布

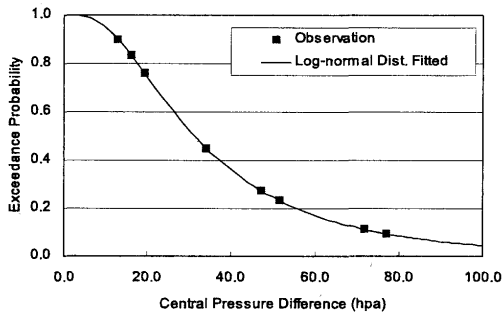


図4 気圧差の分布

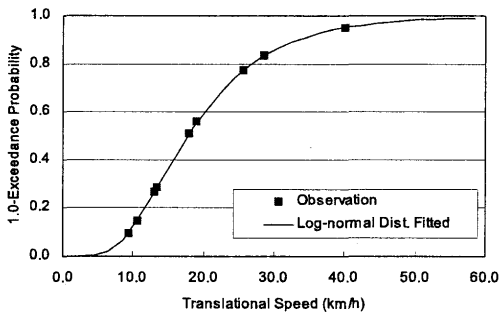


図5 進行速度の分布

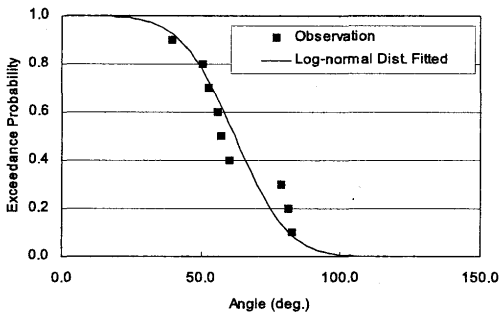


図6 進行角度 (経線に対する角度)

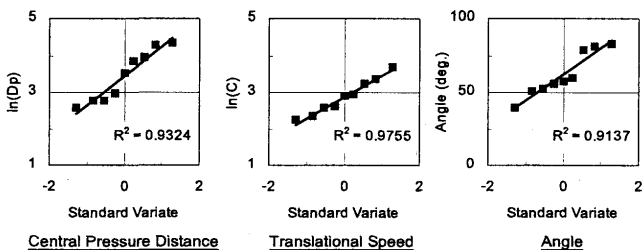


図7 確率紙上のパラメータの確率密度関数への適合度

パラメータ間の相関関係を図8に示す。中心気圧差と他の2変数との間の相関係数は極めて小さい。一方、進行速度と角度については、負の相関が確認された。 R_m については、表2に示すBell⁷⁾によるサイクロンの中心気圧と R_m との関係を用いた。中心気圧が低いサイクロン程、小さくなる傾向がある。

ゲート通過後の気圧パラメータの変化についてはFuji⁸⁾による上陸後の気圧差変化についての以下の式を用いて評価した。

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

ここに、 Δp_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)、 Δp はゲート通過 t 時間後における中心気圧と周辺気圧との差(hpa)、 a_p は減衰率である。

減衰率については、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つのサイクロンを対象に分析した。ゲート通過後の気圧差の減衰率を図9に示す。サイクロン毎にばらつきはあるが、1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する平均を求めたところ a_p は3.3%程度となった。なお、 a_p の感度解析については注2に記した。

以上より得られた各種パラメータの統計量を表3にまとめる。

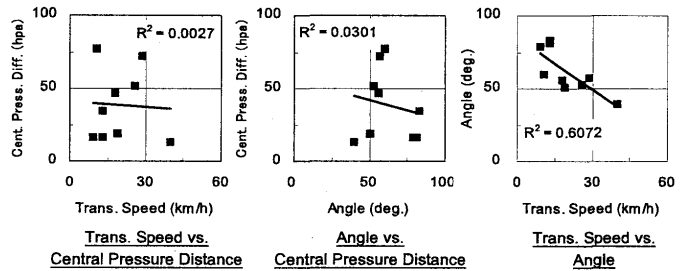


図8 パラメータ間の相関

表2 最大旋衡風速半径と中心気圧

Central Pressure (hpa)	-919	920-939	940-959	960-979	980-
Mean Diameter (km)	36.0	44.5	52.7	55.2	51.9

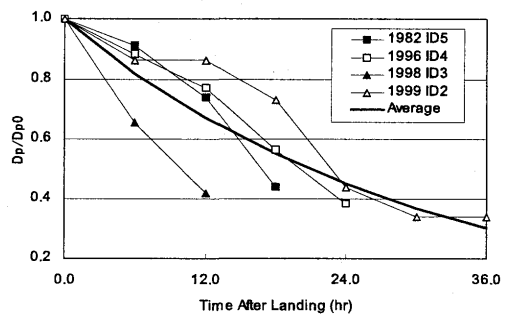


図9 ゲート通過後の気圧差の変化

表3 パラメータの特性

Item	Unit	Prob. Distribution	Mean	Std. Dev.
Central Pressure Difference	hpa	Log-Normal	31	0.7
Translational Speed	km/hr	Log-Normal	18	0.5
Passing Angle	deg	Normal	62	15
Radius of the Maximum Wind Speed	km	Log-Normal	36-52	0.4
Frequency of Cyclone Passing	times/yr	Poisson	0.26	-
Filling Rate Coefficient: a_p	-	-	0.033	-

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を用い、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モンテカルロシミュレーションにより仮想的に 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ついては、ハリケーンや台風において適用される手法⁹⁾と同様の手法を採用することとした。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合わせて算出する。シミュレートしたサイクロンのトラック例を図 10 に示す。

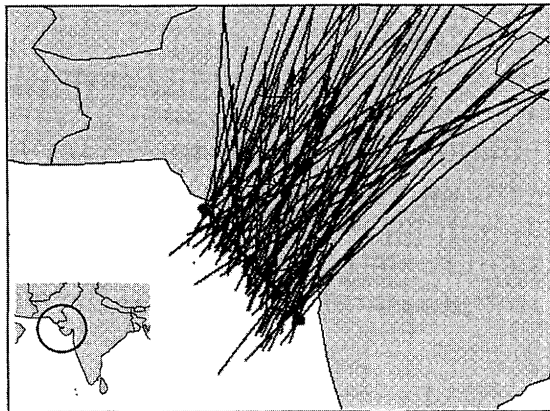


図 10 シミュレートしたサイクロン経路の例

4.1 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、Holland¹⁰⁾はこの関数を以下のよう

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

ここに、 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 B は 1.0~2.5 が適切であると、 $B=1$ の場合は Schloemer の提案した同心円の式となる。 B の設定についてはサイクロン襲来時におけるサイクロン周辺での気圧場の情報より設定する必要がある。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、ここでは、Tang et al.¹¹⁾ による下式を用いることとした。

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

4.2 傾度風速の算出

傾度風速の予測式は、気圧傾度力 (気圧差により働く力) 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以下の式により表される。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。

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

ここに、 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)、 θ はサイクロンの中心から対象地点へ向かうベクトルを基準にサイクロンの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)、 ρ は空気密度 (kg/m^3) を表す。

4.3 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⁹⁾によれば、台風 7705 および 7709 のデータを基に、(6)式により傾度風から地表風への変換を行っている。

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

ここに、 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} 、 Δp は対象地点における気圧差 (hpa)、 ξ は r と R_m との比率、 ξ_p と m は係数である。

また、孟・松井¹²⁾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。

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

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

$$Z_G = 0.06 U_G / f_{\lambda} (\log R_{0\lambda})^{-1.45} \quad (9)$$

ここに、 $U(z)$ は高さ z での風速 (m/s)、 v_{α} 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_{λ} は台風の持つ渦度と地球の自転による渦度 (コリオリ因子) の和である絶対渦度 (1/sec)、 $R_{0\lambda}$ はロスビー数を表す。

その他、山崎ら¹³⁾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¹⁴⁾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、海上においては $2/3$ を、地上においては $1/2$ 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が得られないことから、上記 3 手法、すなわち、藤井らによる手法、孟らによる手法および勝地らによる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、

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

ここに、 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 10 分間平均風速 (m/s) である。既往の研究¹⁵⁾にてハリケーン時と非ハリケーン時におけるガストファクターの違い、さらには平均風速値に対するガストファクター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、表 4 に示した 1 時間平均風速に対するガストファクターの Mean 値に Gust Factor Curve¹⁵⁾より読み取った係数 (1.08) を適用し 10 分間の平均値に対するガストファクター^{注 3)}を求めた。

表 4 設定したガストファクター

Mean Wind Speed (m/s)	Open Exposure Gust Factors			
	N	Mean	C.O.V.	Range
10	586	1.69	0.12	1.22-2.34
15	546	1.63	0.11	1.29-2.75
20	279	1.58	0.09	1.27-2.02
25	71	1.59	0.07	1.33-1.89
30	23	1.57	0.07	1.40-1.81
35	7	1.56	0.05	1.44-1.70
40	-	-	-	-
45	-	-	-	-
All	1512	1.64	0.11	1.22-2.75

4.4 予想最大瞬間風速の検証

モデルにより算出した最大瞬間風速値の妥当性を検証した。気象官署における観測データが得られなかったため、インドの建築コードにおける Design Wind Speed¹⁶⁾を基に作成された再現期間 200, 100, 50, 25 年における Peak Gust (3 秒間, Open Terrain, 高さ 10m)¹⁷⁾ 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。

まず、海岸沿いから内陸に従って約 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°) において 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の比較を行った。その結果を図 12-14 に示す。海岸付近の A 地点については、いずれの再現期間においても Hazard Map の風速がモデルにより算出した値よりも高くなっている。B 地点については、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 地点については、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、他の 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 15 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。これらの結果より藤井らによる手法に基づきリスク評価を行うこととした。

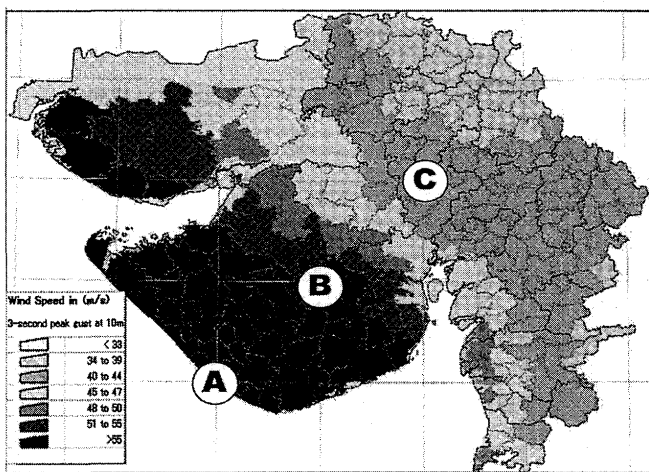


図 11 Hazard Risk Zonation (200 年再現期間)

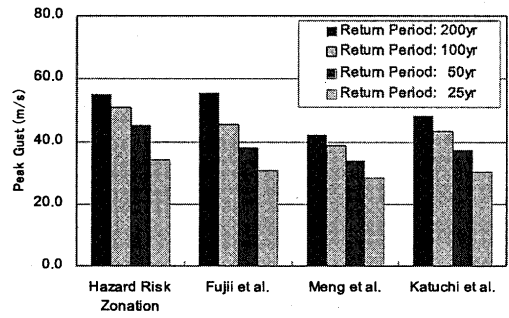


図 12 A 地点における最大瞬間風速値の比較

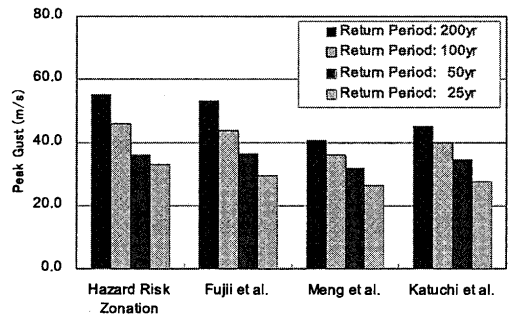


図 13 B 地点における最大瞬間風速値の比較

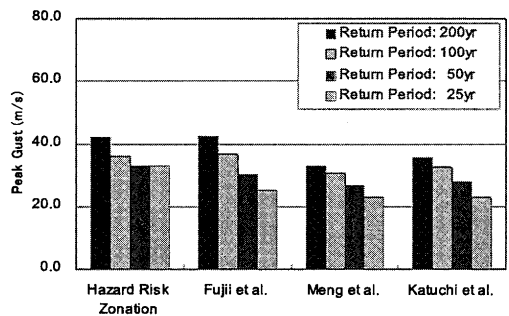


図 14 C 地点における最大瞬間風速値の比較

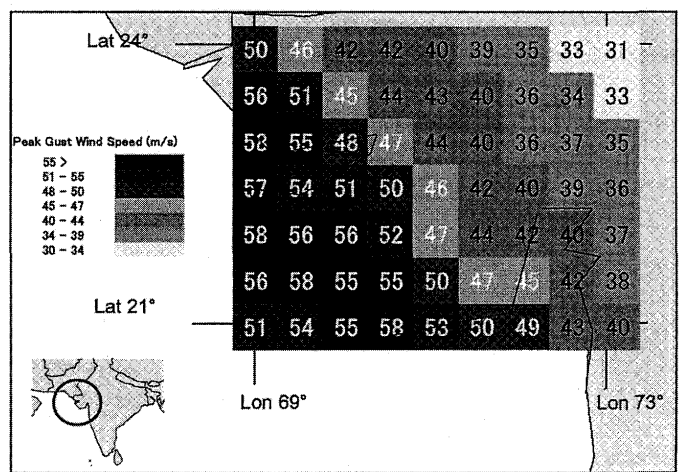


図 15 モデルによる最大瞬間風速 (200 年再現期間)

5. リスク評価

グジャラート周辺のサイクロンリスクを対象とした証券化のためには、当該地域にリスク評価対象用にポートフォリオとして建物群を仮定し、これらのリスク量を評価することとなる。証券化などのリスクファイナンスを行う上で、リスクカーブを用いたファイナンスの設計が不可欠であることから、本研究では、過去のサイクロンデータを基に得られた風災ハザードおよび評価対象物の脆弱性を示すバルナラビリティカーブを用いてポートフォリオのリスクカーブを作成する。図16にリスク評価のフローを示す。

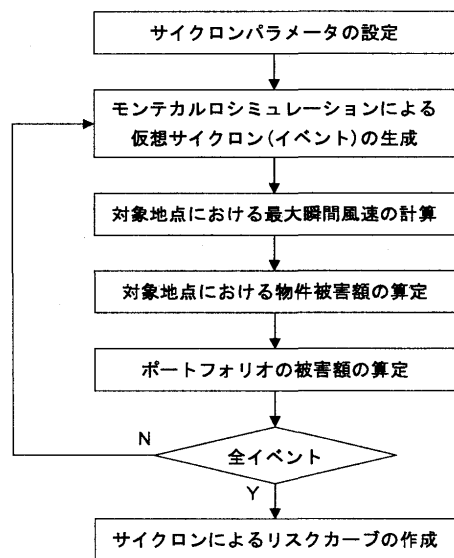


図16 リスク評価のフロー

5.1 バルナラビリティカーブの設定

風災リスク量の評価には構造別バルナラビリティが必要となる。既往研究によればオリッサ州を襲ったサイクロンによる被害データを基に設定したもの¹⁸⁾が知られているが Damage Ratio や風速値は不明である。Aryaらは既往の地震リスクの研究¹⁹⁾において風災リスクについても言及している。

本研究では、このデータを参照して図17のようにデータをプロットし、プロット間を線形補間することによりバルナラビリティカーブを設定した。なお、同図においては、「A3 Stone Wall Flat Roof 構造」以外の構造物のバルナラビリティカーブは、同一となっている。

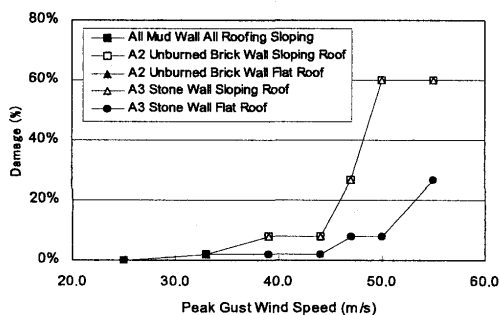


図17 バルナラビリティカーブ

5.2 リスクカーブの作成

リスク評価に必要なポートフォリオを表5のように仮定した。すな

わち、図18に示した50のロケーションに対してバルナラビリティカーブの異なる2つの構造種別の建物を配置する。

図19に最大瞬間風速の比較を行った3地点A, B, CにおけるA2タイプのバルナラビリティを適用した場合のリスクカーブを示す。地点Aは海岸沿いに位置し、いずれの再現期間においても推定される最大瞬間風速値は他2地点よりも大きく、リスク量も大きくなることが判る。なお、図19中の Expected Loss の10, 60にて不連続な点が見られるが、これは設定したバルナラビリティカーブの特性が現れているためと考えられる。

次にポートフォリオ全体のリスクカーブを図20に示す。これは設定したポートフォリオが同一のサイクロンにて同時に罹災するケースも加味したリスクカーブとなっているが、同図中には、設定したポートフォリオを構成する個々の物件ごとのリスクカーブを完全相関の条件にて合算した場合、さらには無相関の条件にて合算した場合も示した。完全相関の場合には、ポートフォリオ全体で評価した場合よりもリスクを過大に評価し、無相関の場合には、リスクを過小に評価してしまう可能性がある。すなわち、ポートフォリオに対するリスクを適切に評価するには、個々の物件毎のリスクカーブの合算する方法は不適切である。

表5 設定したポートフォリオ

Type of Vulnerability Curve	Structure	Value	Number of Bldg.	Total Value
A2	Unburned Brick Wall / Sloping Roof	100	50	5,000
A3	Stone Wall / Flat Roof	100	50	5,000

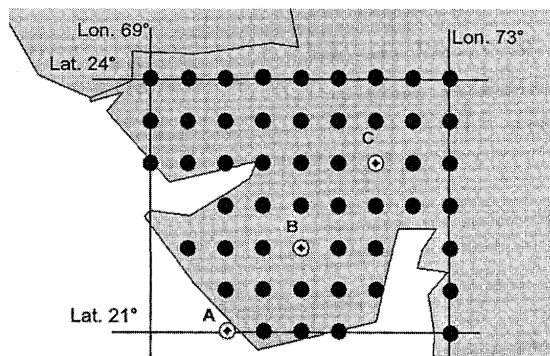


図18 ポートフォリオを構成する建物群の配置

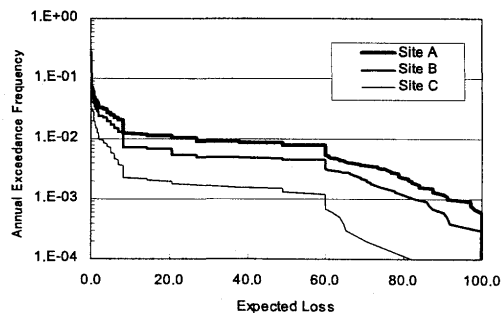


図19 3地点 (A, B, C) におけるリスクカーブ

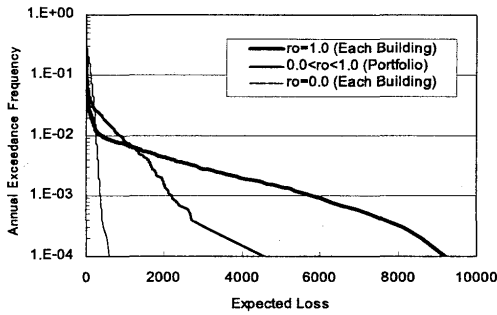


図 20 ポートフォリオのリスクカーブ

6. 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インド・グジャラート州に及ぼすサイクロンリスクを評価するために解析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最大瞬間風速の統計データは得られないが、過去のサイクロンのパラメータを分析することで確率的な手法によりサイクロンによる風災リスクの評価手法を構築することができる。
- ② 過去のサイクロンデータを分析し、中心気圧、進行速度等のサイクロンパラメータの統計的な性質を明らかにした。
- ③ モデルで算出した最大瞬間風速とグジャラート州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。
- ④ グジャラート周辺に設定した架空のポートフォリオの風災リスク量を算出したところ、サイクロンによる被害の相関を考慮するか否かにより、リスクカーブの形状が大きく変わり、ポートフォリオ個々の物件を評価する場合にはサイクロンリスクを過小もしくは過大に評価する可能性があることが明らかとなった。

低頻度で甚大な被害をもたらすサイクロンについても、サイクロン自体の統計的な性質を基にリスク評価を行うことができる。さら本結果を基に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も行うことができる。

今後は、得られたリスク評価モデルに基づき中心気圧差や進行速度等のサイクロンパラメータを用いたパラメトリックトリガーの設定を行うこととした。

謝辞

中心気圧に関して貴重なご意見を頂いた Dr. Roger Flather, Dr. John A. Knaff (Colorado State Univ.) 並びに JTWC の Edward Fukuda 氏に謝意を表します。

注

注1) パラメトリックトリガー：損害保険では、被害査定に基づき支払額を決定するが、証券化によるリスクファイナンスを行う場合には、パラメトリックトリガーを設定し、客観的な指標を基に支払額を決める方法が知られている。地震の場合にはトリガーとして、発生位置や規模等が用いられる。

注2) ゲート通過後の中心気圧の低下については、過去の4つのサイクロンの減衰率 a_p の平均値(3.3%)を用いて評価を行っているため、 a_p のばらつきは大きくなっている。ここでは、4つのサイクロンの a_p の上限と下限値、すなわち、サイクロン1998年ID3、1999年ID2について $a_p = 5.4%$ 、 $a_p = 1.7%$ を用いて感度解析を実施した。図A1には再現期間200年、減衰率平均(3.3%)を基準としたA~C地点での最大瞬間風速値比を示しているが、海岸に近いA地点ではサイクロンの減衰もなく、全ての減衰率のケースにおいて変化は見られないが、海岸から内陸になるに従い(B、C地点)中心気圧の効果が計算結果に見られる。ただし、B地点では5%程度、またC地点では10%程度の差であり、特に設定したポートフォリオの建物数は内陸になるにつれて減少することから最終的にリスク量へ与える影響は小さいものと思われる。

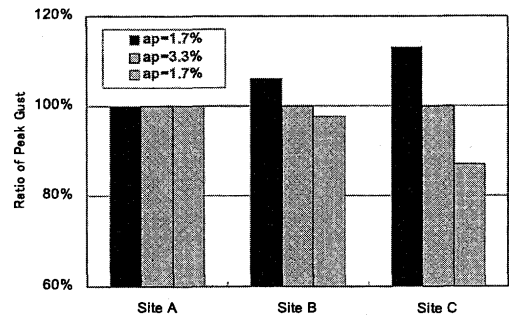


図 A1 サイクロン中心気圧の減衰率と最大瞬間風速

注3) 本シミュレーションで得られた地表風速は10分間の平均風速であるので、表4より得られた1時間平均風速に対するガストファクターを、10分間平均風速に対するガストファクターへ換算する必要がある。ここでは、図A2に示す既往の研究¹⁵⁾によるGust Factor Curveから読み取った係数1.08程度で1時間平均風速に対するガストファクターの平均値を割り戻し、10分間平均風速に対するガストファクターとしている。

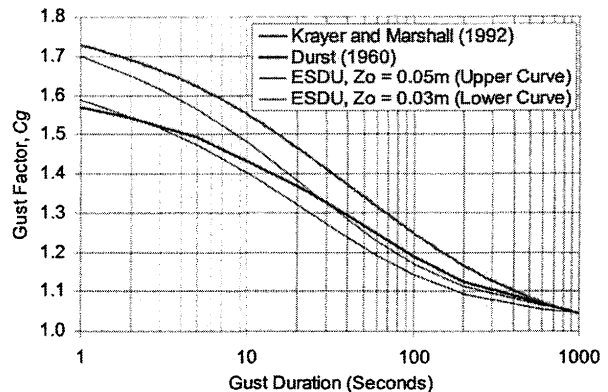


図 A2 Gust Factor Curve

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) 例えば, The Growing Appetite for Catastrophe Risk, The Catastrophe Bond Market at Year-End 2004, MMC Securities
- 3) Joint Typhoon Warning Center ATRC Archives, <http://www.npmoc.navy.mil/jtwc>
- 4) Hazarat Mir, Abdul Rashid, Waqarul Wheed Khan: Tropical Cyclone TC03A for the period 3rd June to 10th June, 1998, pp71-77, Vol2 Issue 4 (Nov, 2005), Pakistan Journal of Meteorology
- 5) Atkinson, G.D., and Holiday: Tropical cyclone minimum sea level

- pressure-maximum sustained wind relationship for western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 421-427, 1977
- 6) 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, 1997.1
 - 7) Bell, G.J.: Observations on the size of Typhoon eye, WMO technical conference on typhoon modification, nO.408, Manila, Oct.14-18, 1974
 - 8) 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, 1998.4
 - 9) 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
 - 10) G. Holland: An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, pp.1212-1218, *Monthly Weather Review*, Vol.108
 - 11) 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, 1997.6
 - 12) 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, 1996.1
 - 13) 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, 2004.7
 - 14) 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), 2004.7
 - 15) Vickery et al.: Hurricane Gust Factors Revisited, pp.825-832, *Journal of Structural Engineering*, 2005.5
 - 16) Dr. Prem Krishina et al.: A Commentary on Indian Standard Code of Practice for Design Loads (other than earthquake) for Buildings and Structures Part 3 Wind Loads (Second Revision)
 - 17) Gujarat State Disaster Management Authority: Gujarat Cyclone Hazard Risk Zonation 200-year return period, MAP No.: CYM-07 of 08, Date 18/8/2006
 - 18) Document of World Bank: India Financing Rapid Onset Natural Disaster Losses in India -A Risk Management Approach, Report No.26844-IN MS, 2003.8
 - 19) Anand S. Arya: Recent developments toward earthquake risk reduction in India, pp1270-1277, *Current Science*, Vol.79, No.9, 2000.10

(2006年12月10日原稿受理, 2007年7月31日採用決定)