

ベンガル湾における代表的なサイクロンおよび波浪特性に関する研究

STUDY ON CYCLONE FREQUENCY AND WAVE CHARACTERISTICS IN BAY OF BENGAL

櫻庭 雅明 *

Masaaki SAKURABA

This paper presents highlights from the study of a cyclone frequency and a wave characteristic in Bay of Bengal. In recent times, landing cyclones in Bay of Bengal has caused much damage due to wave and the storm surges.

In this study, cyclone track archives and weather re-analyzed data were collected. Then analysis of cyclone tracks frequency and wave prediction analysis based on the third generation wave prediction model (SWAN) were carried out. The results here present the frequency and the wave scale in a typical area of Bay of Bengal.

Keywords : Cyclone, Bay of Bengal, JTWC, ECMWF, SWAN

1. はじめに

インド、バングラデシュおよびミャンマーにかこまれたベンガル湾は、サイクロンの発達およびそれに伴う高潮や波浪の発生により沿岸域でこれまで多くの波浪や高潮に伴う被害が生じた。過去の被害調査を含め、ベンガル湾におけるサイクロンおよびそれに伴う高潮の検討は各種報告されている。事例として、1991 年に来襲したサイクロンの調査および高潮の検討¹⁾や、2007 年に来襲したサイクロン Sidr について、土木学会による現地調査²⁾がある。また、2008 年にミャンマーのエーヤワディ地域に甚大な被害を与えたサイクロン Nargis は柴山ら³⁾により現地調査、サイクロンの来襲特性および高潮の両者の特性について研究されている。このように、ベンガル湾における代表的なサイクロンおよびそれに伴う高潮に関する個別の研究事例は多いものの、過去におけるサイクロンの来襲頻度や各地域における上陸の特徴について議論された事例はほとんど見られない。また、ベンガル湾内にサイクロンが発生した場合の波浪の条件については、これまで検討された事例は山下ら⁴⁾による波浪推算によるものがあるが、その他検討されている事例はほとんど見られない。

本研究では、ベンガル湾に来襲するサイクロンの頻度やそれに伴う波浪の発達特性について過去の資料に基づいて検討したものである。サイクロンの発生および代表地点に来襲する頻度、過去に発生したサイクロンの経路情報を用いた。経路情報から代表的な地点におけるサイクロンの通過する頻度を分析した。サイクロンを通過する頻度から各地点の代表的なサイ

クロンを複数個抽出した。

サイクロンの発達に伴い、波浪がどのように来襲するかを考察するために、本研究では第三世代波浪推算モデル SWAN⁵⁾により複数のケースにおける波浪推算を行った。波浪推算に先立って、対象とする海上風のデータとして、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データを用いた。代表的なサイクロンにおける気象の再解析データを用いて波浪の時間的変化を考察するとともに、過去 30 年の代表的なサイクロンにおける各地の最大の波高について算定した。この結果を用いて、各地における極値統計解析を行った。本研究の結果より、バングラデシュおよびミャンマーではインドやスリランカに比べてサイクロンの来襲頻度が高いことが確認された。さらに、頻繁に高い波高を推算することが確認された。これらの結果より、数年の頻度で来襲するサイクロンにおいて、ミャンマーおよびバングラデシュの沿岸では 3m を越えるような高波浪が来襲する可能性が高いことを示した。

2. 収集したデータおよび解析方法

(1) サイクロン経路

米軍合同台風警報センター (JTWC) では、1945 年から現在までのサイクロンに関するベストトラックアーカイブを公開している⁶⁾。このデータは、サイクロンの経路、最大風速を記録しており、2001 年からは中心気圧も記録したデータを公開している。本研究ではインド洋に来襲したサイクロンのうち、1978 ~ 2013 年にベンガル湾内を通過した台風を全て抽出し

* 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

た。このうち、JTWC がサイクロンとして定義づけている、最大風速が 33m/s (64 ノット) 以上を記録したサイクロンをさらに抽出した。なお、JTWC のベストトラックデータは、1945 年以降のデータがダウンロード可能となっている。しかしながら、Chu and Sampson⁷⁾によると JTWC のデータには 1976 年以前と 1977 年以降においてサイクロン出現数に不連続が見られる点や 1970 年以前のデータには十分な検証がされていないことが述べられている。このため、本研究では、JTWC のデータは 1978 年以降を対象としている。

(2) 風速

サイクロンのベストトラックアーカイブは、サイクロンの経路情報として活用することが可能であり、中心気圧と台風半径がわかれば当時の風速場を推定することが可能である。上記 (1) で収集したデータは中心気圧が公開されているのが 2000 年以降であるため、過去の風速分布を推定することが困難である。本研究では、過去の風速から波浪分布を推定するにあたり、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データを用いた。ECMWF の再解析データは各種あるが、本研究では、比較的長期にわたり解像度の高いデータを提供している ERA-Interim を用いた。このデータは、東西南北 0.75 度、6 時間間隔で気象の主要データがそろっている。サイクロン来襲時の風速分布については後で考察する。

(3) 海底地形

代表的なサイクロンの発生時期に対する波浪推算を行うにあたっては、ETOPO1 によりベンガル湾を包括する範囲における海底地形メッシュデータを作成した。

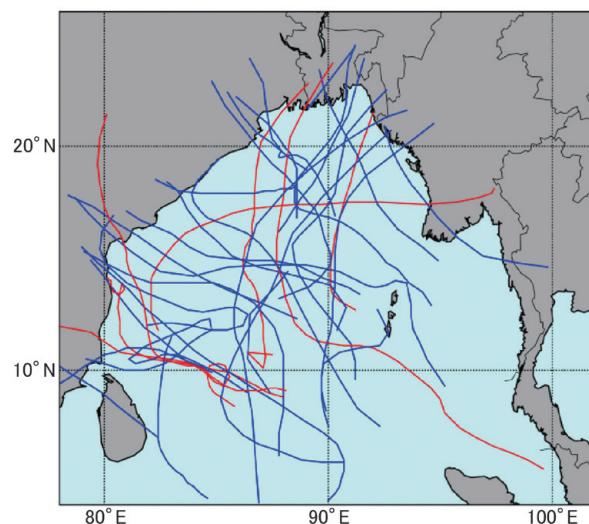
3. サイクロン来襲頻度の解析

(1) ベンガル湾におけるサイクロンの来襲頻度

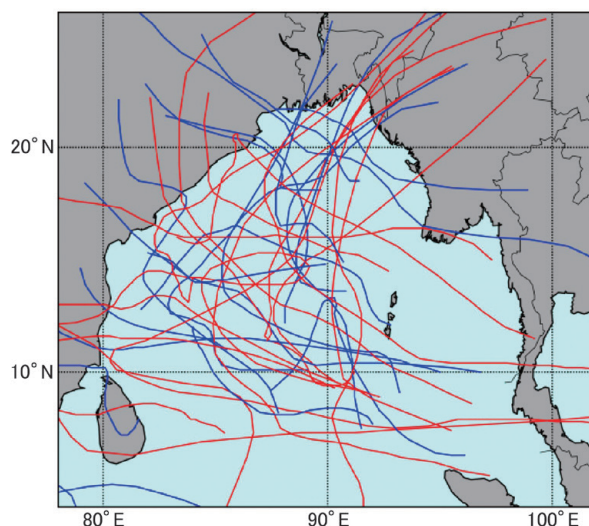
図-1 に 1980 ~ 2010 年の 30 年間に来襲したサイクロンを 10 年間ごとに見た結果を示す。赤線は風速 64 ノット以上となったもの、青線は 64 ノットを下回ったものである。この結果、1990 年代は他の年代に比べて強いサイクロンが多く発生したことが確認できた。この理由は当時の気象条件等が関連すると考えられるが周辺の風速分布、水温などのデータからさらに考察を重ねる必要があり、今後の検討を要する。なお、1990 年代はバングラデシュで大きな被害が生じた 1991 年のサイクロンを含めて、ほぼ毎年規模の大きなサイクロンが発生した。

(2) 代表地点におけるサイクロンの来襲頻度

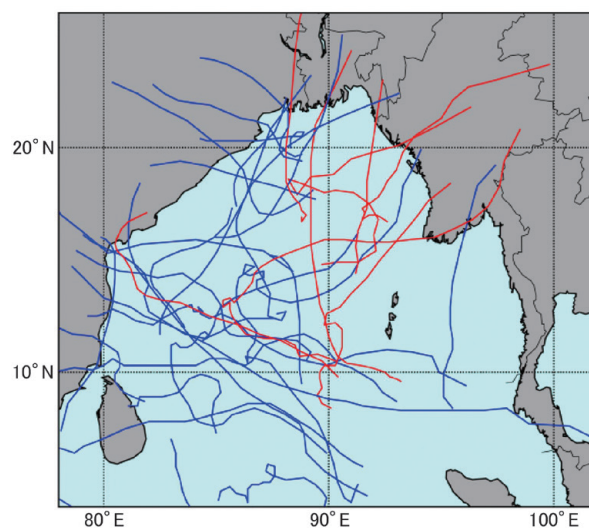
サイクロンの来襲頻度を把握するにあたり、対象とする地域を選定した。ベンガル湾では、これまでサイクロンおよび高潮が数年に 1 度の頻度で来襲し沿岸に被害が生じている。1991 年に来襲したサイクロンはバングラデシュのチッタゴンの沿岸で高潮災害が生じた。2007 年のサイクロン Sidr ではバングラデ



(a) 1981 ~ 1990 年



(b) 1991 ~ 2000 年



(c) 2001 ~ 2010 年

図-1 1981 ~ 2010 年におけるサイクロンの経路
(赤線：最大風速 64 ノットを超えた場合)

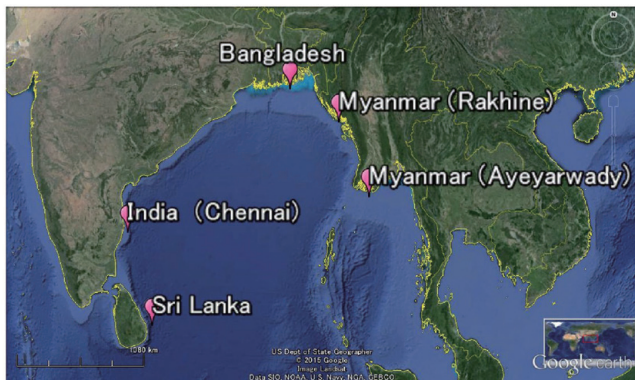
シュの南西部沿岸における被害があった。その後、2008 年にはサイクロン Nargis によりミャンマーのエーヤワディ地区やヤンゴン川周辺での浸水被害が報告されている。バングラデシュはこれまでに高い頻度でサイクロンが来襲していることが報告されている^{1),2)}。ミャンマーではその頻度は少ないものの規模の大きいサイクロンが来襲している³⁾。サイクロントラックデータによる来襲頻度の検討にあたっては、バングラデシュおよびミャンマーの沿岸を対象とした。ミャンマーはエーヤワディ地区だけでなく西部のラカイン地区にもサイクロンがこれまで通過していることから、ミャンマーは 2 地区を対象とした。また、インドおよびスリランカの地域については、ミャンマーやバングラデシュのような大きな被害が見られていないが比較のために選定した。

図－2 に示す地点（バングラデシュ沿岸、インド（チェンナイ）沿岸、スリランカ沿岸、ミャンマー（ラカイン、エーヤワディ））における沿岸の半径 300km 圏内に来襲したサイクロンを抽出した結果、最大風速が 64 ノット以上の場合が含まれる頻度について表－1 に示す。この結果より、バングラデシュは来襲頻度、最大風速 64 ノット以上のサイクロンとも大きいことが確認できる。また、インド（チェンナイ）でも多くのサイクロンが来襲したことが分かる。それに続き、ミャンマー（ラカイン、エーヤワディ）およびスリランカの順の来襲する頻度となる。こ

の結果を最大風速の大きさ順に並べて最大風速 64 ノット以上をある程度包括する個数である上位 15 個のサイクロンを抽出した。この結果を図－3 に示す。図より、バングラデシュおよびミャンマーに比較的多くのサイクロンが来襲していることが分かる。また、インド（チェンナイ）およびスリランカは上位を占めるサイクロンはほとんど来襲しない結果となった。抽出したサイクロンは、バングラデシュで被害があった 1991 年のサイクロン、2007 年サイクロン Sidr およびミャンマーで被害があったサイクロン Nargis が含まれている。

(3) サイクロンの年間到達頻度

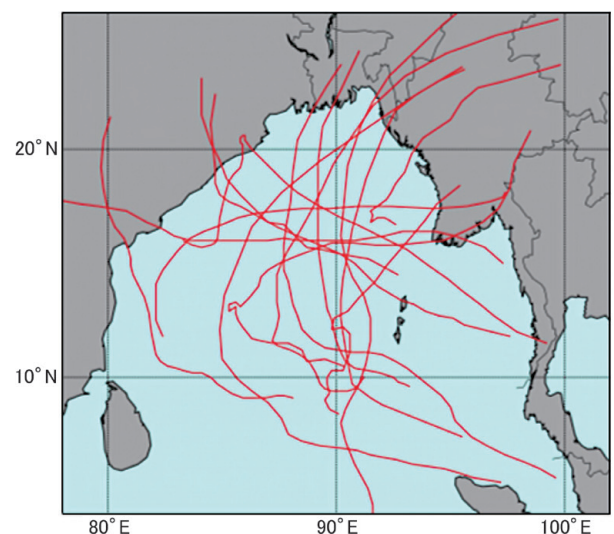
表－1 に示す各地点の通過した来襲するサイクロンは 1978 ～ 2013 年のインド洋におけるベストトラックから抽出した結果である。この 35 年間の来襲個数を年平均にするとバングラデシュで 1.3 個／年、64 ノット以上で 0.4 個となる。バングラデシュでは大型のサイクロンが 1 年に 1 回以下の確率となる。なお、インド（チェンナイ）では、64 ノット以上のサイクロンがバングラデシュより頻度が高い結果となる。しかしながら、前述のとおり、最大風速の大きさで頻度を考えるとインド沿岸の頻度が低くなる。これより、インド周辺ではサイクロンの頻度は高いがその規模はバングラデシュやミャンマーに比べて小さいことが分かる。なお、ミャンマーでは、バングラデシュに比べると頻度は 1 個／年と少ない。しかし、2008 年のサイクロン Nargis のようにベンガル湾内で急激に経路を東方向に変化させ、さらにミャンマー特有の広大なデルタ地帯により、高潮や波浪が陸域に広範囲に遡上するような地形条件が重なった甚大な被害が生じている。ミャンマーにおいては頻度だけでなく地形特性を踏まえて議論する必要がある。



図－2 検討対象箇所

表－1 各地点におけるサイクロンの来襲個数
(1978-2013 年)

地点	通過したサイクロン	最大風速 64 ノット以上
バングラデシュ	46	14
ミャンマー (ラカイン)	29	12
ミャンマー (エーヤワディ)	18	9
インド (チェンナイ)	52	17
スリランカ	20	7



図－3 対象とするサイクロンの経路

4. 波浪推算による湾内の波浪発達特性

(1) 対象とするサイクロンおよび解析条件

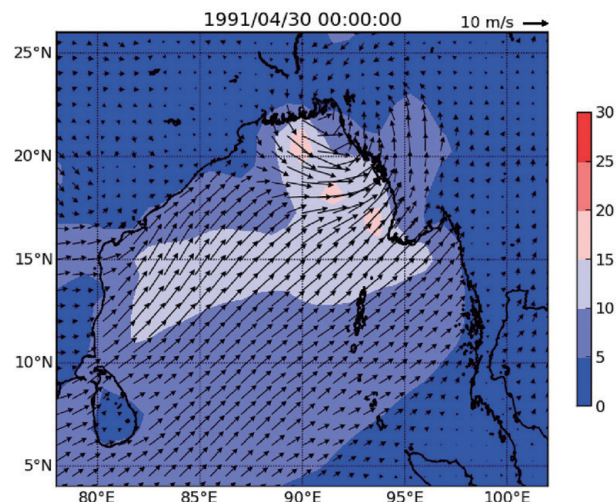
抽出した15個のサイクロンが来襲した時期に対してECMWFの風速データを収集して、波浪推算モデルSWAN⁵⁾により波浪推算を実施した。典型的なサイクロンにおけるECMWFの風速分布を図-4に示す。この結果より、ECMWFの風速分布が当時来襲したサイクロンを再現していることが分かる。また、SWAN⁵⁾による波浪推算の計算条件を表-2に示す。

(2) 各地の波浪達成特性

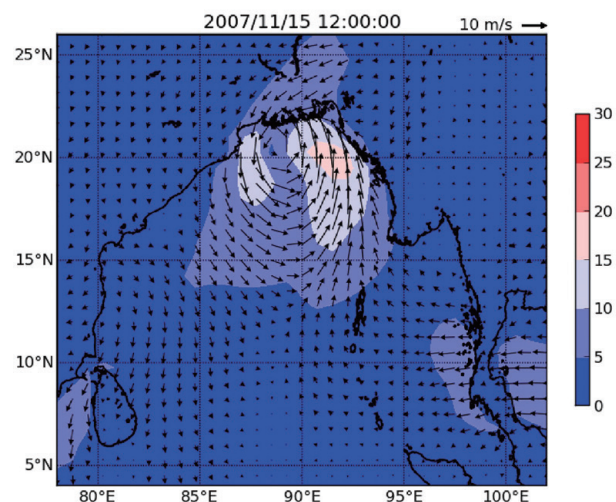
図-3に示したサイクロンにおける有義波高の分布を図-5に示す。この結果より、いずれのサイクロンでも有義波の最大値は5m程度となっていることが分かる。ここで示す代表的なサイクロンの3ケースの波浪分布としては、1991年のサイクロンが最も広域かつ高波浪となったことが見てとれる。バングラデシュの東部およびミャンマーの西側沿岸に広く発達したことが推定できる。これは図-4に示す風速分布からも分かるように、15m/s前後の平均風速が広がって沿岸部で発達している。また、バングラデシュおよびミャンマーはデルタ地形による極浅海域が広く、その影響により波浪推算では、浅水変形により有義波高が増大すると考えられる。結果として広い範囲の高波浪の結果となっている。なお、それぞれのサイクロン来襲時における各地での波浪特性は後述する。

表-2 波浪推算の計算条件

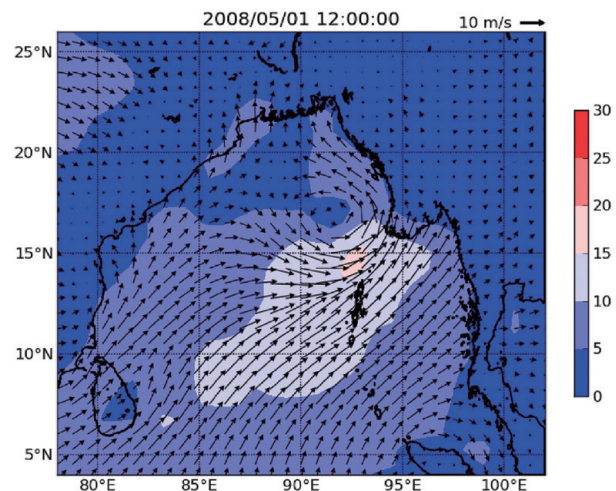
項目	条件	
波浪推算法	SWANに基づく第三世代波浪推算モデル Cycle III ver 40.91AB	
計算範囲およびメッシュデータ	ベンガル湾内を包括する範囲を8分間隔の格子データに分割 経度方向180×緯度方向165分割	
計算条件	方向分割数	36
	周波数分割数	21
	周波数の上下限	上限=1.0Hz 下限=0.05Hz
	風入力理論	JANSSENモデル
	底面摩擦	JONSWAP型
	4波共鳴	考慮する
	3波共鳴	考慮する
	白波砕波	考慮する
台風の条件	浅水砕波	
	考慮する	
台風の条件	ECMWFの風速データ(0.75°間隔)をメッシュ上に補間	



(a) 1991年サイクロン

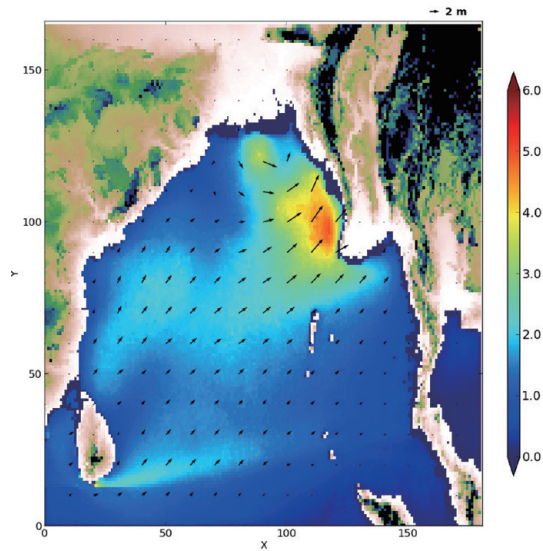


(b) 2007年サイクロン Sidr

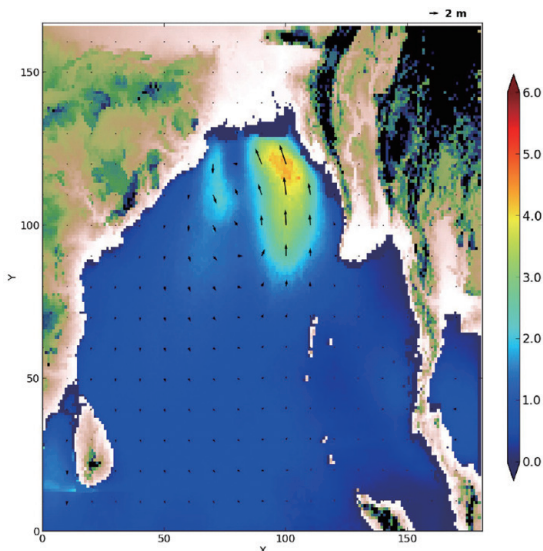


(c) 2008年サイクロン Nargis

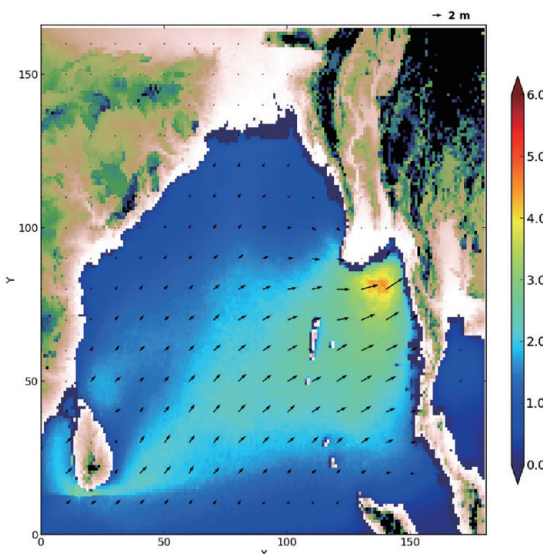
図-4 代表的なサイクロン来襲時の風速分布
(ECMWFの再解析値データ)



(a) 1991 年サイクロン



(b) 2007 年サイクロン Sidr



(c) 2008 年サイクロン Nargis

図－5 代表的サイクロンにおける有義波高分布

既往の研究⁴⁾による波浪推算ではサイクロン Nargis ではミャンマーのエーヤワディの沿岸の波高が 3 ～ 5m 程度であるとされている。本研究で実施した波浪推算の結果はほぼこのオーダーとなっている。しかしながら、観測によるベンガル湾における高波浪の記録は殆どみられていないため、今後さらに計算精度に関しては精査が必要である。

(3) 波浪の最大値および極値特性

次に、対象とした 15 個のサイクロンにおける波浪推算の結果のうち、対象地点を通過した際の最大有義波高を示したものが表－3 である。この結果よりインド・スリランカ沿岸においては、全体的に波高が小さい結果となった。バングラデシュ沿岸では、1991 年 4 月、1995 年 11 月、1999 年 10 月、2007 年 11 月のサイクロン Sidr および 2013 年サイクロン Phailin で 3m 程度以上の有義波高となった。ミャンマーでは、サイクロン Nargis において高潮による被害が出ているが、有義波高は 3m 程度となっている。2006 年 Mala や 1997 年のサイクロンで 3m を大きく上回る結果となっており、過去に被害報告された事例以外に大きな波高を記録したサイクロンがあることが確認できる。

この結果を用いて、各地点の波浪特性を判断する資料を作成するために波浪推算結果より極値統計解析を行った。極値統計解析の方法は合田⁸⁾に従った。この結果を表－4 に示す。この結果より、ミャンマーのラカイン地域が最も波高が高い結

表－3 各ケースの有義波高の最大値 (単位 : m)

年月 名称	Bangladesh	Myanmar Rakhine	Myanmar Ayeyarwady	India	Sri Lanka
1982年 5月	1.23	0.70	2.10	1.28	0.83
1988年 11月	1.25	0.67	0.71	1.06	1.24
1990年 5月	1.66	0.79	0.87	3.32	1.58
1991年 4月	2.97	3.79	2.76	1.34	1.11
1994年 5月	1.20	1.15	1.58	1.59	1.01
1995年 11月	5.80	8.11	1.45	2.56	1.60
1996年 11月	0.58	0.67	0.64	0.61	0.59
1997年 5月	2.16	5.34	6.19	2.11	2.92
1999年 10月	1.79	2.25	1.37	0.80	1.10
1999年 10月	3.88	2.91	3.93	1.01	0.95
2006年4月 Mala	0.75	1.15	4.62	0.90	1.03
2007年11月 Sidr	3.11	2.67	0.88	1.20	1.07
2008年5月 Nargis	1.07	1.43	3.19	1.23	1.33
2010年10月 Giri	0.49	0.91	1.48	0.82	0.65
2013年10月 Phailin	3.93	1.86	1.57	0.98	1.15

表－4 極値統計解析結果（単位：m）

再現期間	Bangladesh	Myanmar Rakhine	Myanmar Ayeyarwady	India	Sri Lanka
5 年	1.74	1.55	1.76	1.11	1.08
10 年	2.84	2.83	2.96	1.69	1.36
20 年	3.93	4.46	4.17	2.27	1.67
30 年	4.58	5.53	4.87	2.61	1.89
50 年	5.39	6.98	5.76	3.04	2.21
100 年	6.49	9.10	6.96	3.61	2.77

果となっている。これは、抽出したサイクロンが対象地点を通過する頻度・規模が大きく全体的に得られた波高が大きいためである。なお、インドおよびスリランカはバングラデシュおよびミャンマーの半分以下程度の結果となっている。これらの結果より、ベンガル湾における波高の極値を概ね把握することが可能となった。しかしながら、本検討で行った極値統計解析は、任意に抽出した代表的なサイクロンからの極値統計でありさらに有義波高は数値計算による結果である。今後、さらに気象データの収集により波高統計の精度を向上させることが必要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、既往のサイクロン経路記録および気象の再解析データを用いて、ベンガル湾に来襲したサイクロンの頻度を分析した。また、波浪推算により湾内における波浪の発達特性を考察した。その結果、以下の結論が得られた。

- 規模の大きなサイクロンは 1990 年代に集中して来襲していることが確認できた。原因は当時の気象条件に関連すると考えられるが、全体の気象、風速場および温度（気温・水温）の変動を考察する必要があり、今後の検討課題となる。
- 各地域のサイクロンの来襲頻度と規模を分析した結果、インド（チェンナイ）ではサイクロンが多く来襲するが、規模の大きなサイクロンはバングラデシュ、ミャンマーに集中することが確認できた。
- 波浪推算モデルにより、各地点の代表的なサイクロンによる波浪を推算した結果、バングラデシュおよびミャンマーで有義波で 3m を越えるような高波浪が数年に 1 度来襲することが確認できた。

- 極値統計解析により各地における波高の極値統計量を算出した。この結果ミャンマー・バングラデシュの統計量に比べて、インド・スリランカは半分程度になっていることが確認できた。
- 本検討は、既往のサイクロンおよび波浪についてデータの少ない地域でできるだけ長期間の傾向を捉えることができるように、気象解析データおよび数値シミュレーションを利用して行ったものである。ベンガル湾だけでなくその他高潮・高波の来襲が多い地域への適用が可能あり、アジア圏を中心とした水防災の資料として資することが可能である。

今後は、さらに気象データの収集・解析を行ってベンガル湾内のサイクロン・波浪・高潮の発達特性を検討する予定である。特に、高潮による潮位偏差の傾向について同等の条件で行う予定である。

参考文献

- 1) サイクロン災害研究グループ：1991 年サイクロンによるバングラデシュの高潮・強風災害、京都大学防災研究所年報、Vol.35-A、pp.119-159、1992
- 2) 土木学会バングラデシュ水害調査に対する災害緊急調査団：2007 年バングラデシュ・サイクロン SIDR 高潮水害調査報告書、土木学会、p.88、2008
- 3) 柴山知也、高木泰士、ヌン ヌウ、青木陽平：サイクロン Nargis による高潮被害の調査、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.B2-65、No.1、pp.1376-1380、2009
- 4) マハメド ハガグ、山下隆男、桜庭雅明：2008 年のサイクロン Nargis の気象、海象外力の数値解析、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.B2-65、No.1、pp.1371-1375、2009
- 5) Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen: A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, Journal of Geophysical Research, Vol.104, No.C4, pp.7649-7666, 1999
- 6) JTWC: Tropical Cyclone Best Track Data, <http://www.usno.navy.mil/JTWC/>, 2015 年 4 月 3 日
- 7) Jan-Hwa Chu and Charles R. Sampson: The Joint Typhoon Warning Center Best-Tracks 1945-2000, report, Joint Typhoon Warning Center, Pearl Harbor, Hawaii., 2002
- 8) 合田良實：耐波工学－港湾・海岸構造物の耐波設計－、鹿島出版会、p.430、2008