

1991年サイクロンによるバングラデシュの高潮・強風災害

サイクロン災害研究グループ* 代表 桂 順 治

1. 緒 言

バングラデシュの貧しい人々にとって、1991年4月29日の夜は究極の悪夢であったにちがいない。瞬間風速 50 m/sec に近い強風に家やまわりの物が吹き飛ばされ、身動きもできない闇の中を沿岸部では高潮が襲い、13万8千人の人が亡くなった。この死者数はこの国で史上第5位である。バングラデシュ気象局 (BMD) では4月23日に NOAA の映像からこのサイクロンを察知しており、26日には異常に勢力の強いものであることがわかった。その後、28日にはサイクロンに関する情報が新聞に報道され、29日の早朝には上陸地点も予測されて、半時間ごとにラジオ放送により警報が出された。また、2万1千人の赤新月社 (わが国の赤十字社に相当する) に属するボランティアはメガホンで必死の避難勧告に活動したこともあって、サイクロンの接近を知らない住民はほとんどいなかったそうである。しかしながら、その日暮らしが精一杯という沿岸部に住む多くの人々にとって、それが自分の身にふりかかる災いでないよう願う気持ちがあったのであろう。実際には、災害後の赤新月社のアンケート調査に如実に現れているように、住民登録や不動産登記の制度の完備していない多くの発展途上国に共通に見られる、家屋や財産の略奪からの防御のための避難辞退が、そしてサイクロンシェルターの不足が人的な被災規模を増幅したわけである。もちろん、前述した避災願望の心理状態が避難の遅れとなり、深刻な被害につながった原因の1つであると思われる。

本報告は自然災害に関与する種々の専門的立場から1991年4月29～30日のバングラデシュにおけるサイクロン災害を論じたものである。2章ではバングラデシュのサイクロン災害の歴史をまとめたもので、今回のサイクロンが記録破りのものであったこと、赤新月社の人々の活動や各国からの緊急援助が実を結んで、コレラ、赤痢といった疫病の蔓延が最小限に喰いとめられたことなどが述べられる。第3章は公表された3種類のサイクロン径路と地上観測記録の対応とサイクロンモデルの作成である。第4章は高潮災害についてのもので、気圧降下と風と海面との摩擦を考慮した高潮の推算と現地計測との比較、およびモデル化されたサイクロンによるベンガル湾沿岸部を襲うサイクロンの数値シミュレーションである。また、第5章はチッタゴン周辺の災害の調査とわが国の災害を含めた比較災害論であり、第6章では同国の防災・減災のあり方に対する提言をまとめたものである。

2. バングラデシュにおけるサイクロン災害の歴史

バングラデシュに襲撃するサイクロンはベンガル湾南部およびアダムン海で発生する。1780年からの10年毎の同国へのサイクロン来襲数とその月別変化を示したものが Fig. 1 および 2¹⁾ である。これから、10年当たり平均的に3ないし5個のサイクロンが上陸し、それがブレおよびボ

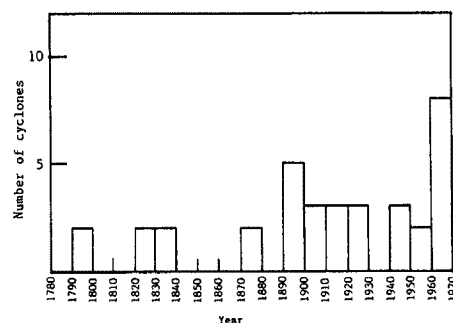


Fig.1. Annual distribution of cyclones striking Bangladesh 1780 - 1970¹⁾.

* 林 泰一, 藤井 健, 西村仁嗣, 磯部雅彦, 山下隆男, 河田恵昭, 安田孝志, 中川 一

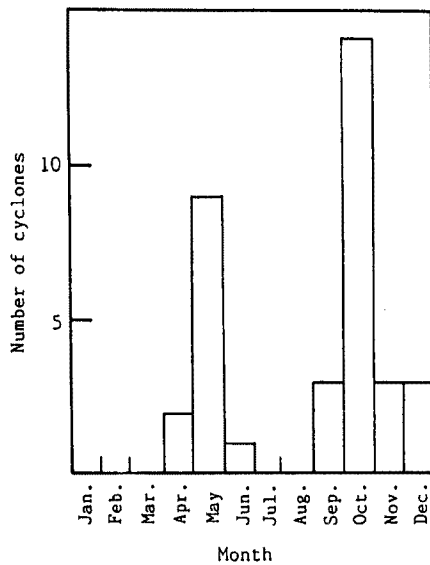


Fig. 2. Monthly distribution of cyclones striking Bangladesh¹⁾.

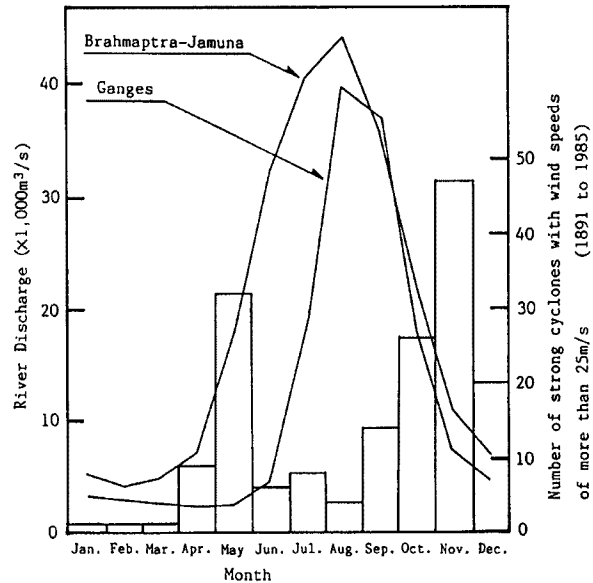


Fig. 3. Mean discharges in the Brahmaputra-Jamuna river system and the Ganges River, and the monthly occurrence of strong cyclones²⁾.

Table 1. Major storm surge disasters in the Noakhali and Chittagong districts.

Date	District	Features of the disaster
June 3, 1795	C*	
Nov. 1797	N**	
Nov. 1867	N	Water depth in the interior area was 1.2m.
Nov. 1872	C	
Oct. 31, 1876	N, C	Water depth on the main street was 0.75m. Hatiya(drownings : 36,324, cholera : about 60,000 cases) Chittagong(drownings : 14,000, cholera : 18,000 cases)
Oct. 27, 1893	N	
Oct. 1895	N	
Oct. 24, 1897	C	Kutubdia(drownings : 14,000, cholera : 18,000 cases)
Nov. 1904	C	
May 1941	N	
Aug. 1947	C	
May 1958	C	
Oct. 23, 1958	N	

C* : Chittagong district, N** : Noakhali district.

スト・モンスーン期に集中している。Fig. 3²⁾は1891年から1985年までに上陸したサイクロンのうち、最大風速が25 m/s以上のものについて、その月別変化を示したものであり、前述したことが確認できる。同図にはガンジスおよびブラマプトラ・ジャムナ川の流量が示されており、モンスーン期に洪水の脅威があるなど、ほぼ通年にわたって自然災害発生の危険にさらされていると言える。

Table 2. Major cyclones in Bangladesh since 1960 (Chowdhury [1991] supplemented by Bangladesh Meteorological Department [1990] data).

Data	Maximum wind speed (m/s)	Storm surge height (m)	Number of death
Oct. 9, 1960	45.0	3.0	3,000
Oct. 30, 1960	58.3	4.6—6.1	5,149
May 9, 1961	40.6	2.4—3.0	11,466
May 30, 1961	40.6	6.1—8.8	—
May 28, 1963	56.4	4.3—5.2	11,520
April 11, 1964	—	—	196
May 11, 1965	45.0	3.7	19,279
May 31, 1965	—	6.1—7.6	—
Nov. 5, 1965	44.4	2.4—3.7	—
Dec. 14, 1965	58.3	4.6—6.1	873
Oct. 1, 1966	40.6	4.6—9.1	850
Nov. 1, 1966	33.3	6.1—6.7	—
Oct. 11, 1967	—	1.8—8.5	—
Oct. 24, 1967	—	1.5—7.6	—
May 10, 1968	—	2.7—4.6	—
April 17, 1969	—	—	75
Oct. 10, 1969	—	2.4—7.3	—
May 7, 1970	—	3.0—4.9	—
Oct. 23, 1970	45.3	—	300
Nov. 12, 1970	61.9	6.1—9.1	500,000
May 8, 1971	—	2.4—4.3	—
Sep. 30, 1971	—	2.4—4.3	—
Nov. 6, 1970	—	2.4—5.5	—
Nov. 18, 1973	—	2.4—4.0	—
Dec. 9, 1973	33.9	1.5—4.6	183
Aug. 15, 1974	26.9	1.5—6.7	—
Nov. 28, 1974	45.0	2.1—4.9	a few
Oct. 21, 1976	29.2	2.4—4.9	—
May 13, 1977	33.9	—	—
Dec. 10, 1981	26.9	1.8	2
Oct. 15, 1983	26.9	—	—
Nov. 9, 1983	33.9	1.5	—
June 3, 1984	24.7	—	—
May 25, 1985	42.8	3.0—4.6	11,069
Nov. 29, 1988	45.0	1.5—3.0	2,000
April 29, 1991	62.5	6.1—7.6	138,000
June 2, 1991	27.8	1.8	—

つぎに、バングラデシュ中央部のノアカリと東部のチッタゴン県における1960年までの過去のサイクロン災害をまとめたものがTable 1である。1991年のサイクロン災害はこれら両県で被害が集中している。チッタゴンにおける記録に残っている最古のサイクロン災害は1795年6月3日であり、ノアカリでは1797年11月のものである。1876年10月31日にハチャで発生した災害では約10万人死亡した。今回、

Table 3. Storm warning alerts issued at maritime ports in Bangladesh.

Distance	Level	Storm warning signals	Description
Distant signals	Cautionary	1	A region of squally weather exists in which a storm may be formed.
	Warning	2	A storm has formed.
Local signals	Cautionary	3	Port threatened by squally weather.
	Warning	4	Port threatened by a storm, but the danger is not yet sufficiently great to justify extreme precautionary measures.
	Danger	5-7	Port will experience severe weather from a storm of slight or moderate intensity.
		5	Storm expected to cross the coast to the south of the port.
		6	Storm expected to cross the coast to the north of the port.
		7	Storm expected over or near a port.
	Great danger	8-10	Port will experience severe weather from a storm of great intensity.
		8	Storm expected to cross the coast to the south of the port.
		9	Storm expected to cross the coast to the north of the port.
		10	Storm expected over or near a port.
Failure of communication			Communication with the Meteorological Warning Center has broken down, and the local officer considers that there is danger of bad weather.

19133人の死亡者を数えたクトゥブディア島では、1897年10月24日の高潮で溺死14000人、コレラによる犠牲者18000人が生じたと言われている。これらの表から、バングラデシュではおよそ100年毎に大きなサイクロン災害が繰り返されてきたことがわかる。チッタゴンで前回、1876年10月31日に12000人溺死し、14788人がコレラで亡くなっている。このように、低頻度ながらも大きな被害の高潮災害が今回の被災地でも歴史的に繰り返されてきたわけである。

1960年以降についてはTable 2³⁾にまとめられている。1991年までの32年間に37件の高潮災害が記録されており、毎年のように発生していることが認められる。この中で、1970年のものが被害の上で突出しており、この大災害を契機にサイクロンシェルターの建設などによる高潮災害対策が本格化したといえる。また、絶対値での正確な比較はできないが、この表から、わが国で見られる高潮に比べて最高潮位が一般にかなり大きくでっており、後述するサイクロンのスケールと地形条件の関係や陸棚の発達の影響がここにも現れているといえる。なお、参考のために現在のバングラデシュにおける気象警報のレベルをTable 3⁴⁾に示した。わが国に比べてかなり細かく規定されていることがうかがわれる。

3. サイクロンの気象要素の特性

3.1 サイクロン襲来時の気象状況

このサイクロンは、ベンガル湾の中心部で4月23日に弱い低圧部として発生したことが、気象衛星によって認められた。4月25日には発達してサイクロンとなった。最初、このサイクロンは北西に進んだが、次第に進行速度は遅くなり、4月26日には北緯12度、東経87度付近で停滞した。この付近を転向点として、4月27日には北上し始め、進行方向を東よりに変えて4月29日にはチッタゴン地区の海岸に上陸した。サイクロンの経路をFig. 4に示す。この図には3種類の経路が示されているが、これは次に示す3つの異なる組織によって、それぞれ発表されたものである。

- (1) アメリカ合衆国陸軍及び空軍合同台風警報センター (U. S. Army and Air Force Joint Typhoon Warning Center, JTWC)
- (2) バングラデシュ赤新月社 (Bangladesh Red Crescent)
- (3) バングラデシュ宇宙遠隔探査組織 (Space Research and Remote Sensing Organization, SPARRSO)

JTWCは西太平洋のグアム島にあって、この地域の台風を監視しているセンターであり、1990年から日本の気象庁などと台風特別実験 (SPECTRUM) なども展開している。このJTWCが発表したサイクロンの位置はTable 4に示すとおりである。同表にはサイクロンの中心気圧も示してあるが、これはインド気象局が発表したものである。

赤新月社は日本の赤十字に相当し、サイクロンの接近時には、その位置に関する情報を流し、危険が迫っている地域の人々にはサイクロンの接近を知らせる警報を出す。ダッカにある本部から無線によって各地の支部に情報が伝達され、最後にボランティアによって口伝で警報が危険地域の隅々まで伝えられる。さらに、被害が発生した地域の人命救助や復旧作業にも当たる。この赤新月社が発表したサイクロンの時間と位置をTable 5に示す。

SPARRSOは気象衛星からの衛星写真を受信している。バングラデシュは自前のロケットや人工衛星のどちらも持っていないので、気象資料としては、アメリカ合衆国のNOAA-11と日本のGMS-4の2つの衛星の雲の写真を受信している。NOAA-11は極軌道衛星であり、バングラデシュ付近の雲の写真は1日1回ないし2回しか撮影しない。GMS-4は東経140度の赤道上に位置しているので、バングラデシュは視野の西の端になり、非常に歪んだ映像しか受信することができない。ベンガル湾のサイクロンを監視するには、インドのINSATが最適であると思われるが、政治的な理由からか、受信できていない。Fig. 4のSPARRSOの発表したサイクロンの経路はNOAA-11の雲の写真から決定したものである。このため、サイクロンの正確な位置は大きい時間間隔でしか得られてはいない。3種類の経路を見ると、JTWCとSPARRSOの発表した経路では、100 kmもの差があるところがある。現在のところ、どちらが正しいかを決める材料はない。バングラデシュ気象局 (BMD) では、ダッカ、ケプバラ、コックスバザールの3地点に気象用レーダーを設置し、バングラデ

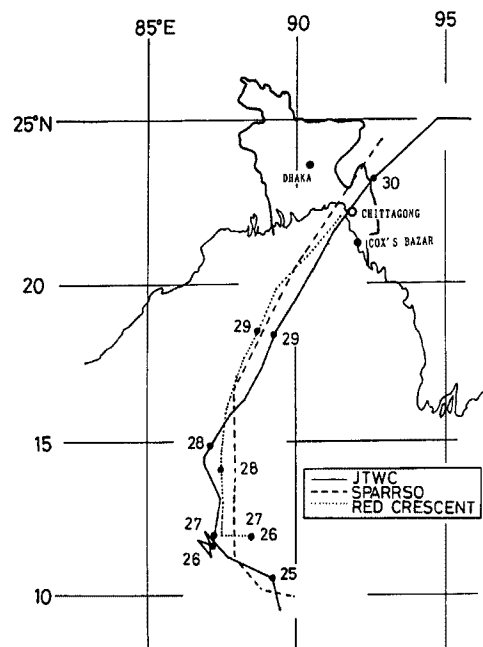


Fig. 4. Tracking paths of the 1991 cyclone.

Table 4. Position of and meteorological data on the 1991 cyclone published by the Joint Typhoon Warning Center. Pressure data were recorded by the Indian Meteorological Department.

DATE	TIME (GMT)	LAT (°N)	LONG (°E)	WIND SPEED (kt)		PRESSURE (hPa)
				MAXIMUM	MAX GUST	
APRIL 24	18	9.5	89.5	30	40	
	21	9.5	89.5			
25	0	11.05	89.2	30	40	
	3	10.6	89.0			
	6	11.2	87.7	35	45	
	9	11.4	87.4			
	12	12.0	87.0	40	50	
	15	12.4	86.7			996
	18	11.6	87.4	45	55	
26	21	11.8	87.2			
	0	11.6	87.1	45	55	
	3	11.7	86.9			
	6	11.6	86.7	45	55	
	9	11.7	86.5			
	12	11.3	87.2	50	65	990
	15	11.4	87.1			
27	18	11.5	87.4	55	70	
	21	11.6	87.3			
	0	11.7	87.4	60	75	
	3	11.8	87.3			
	6	13.1	87.4	60	75	990
	9	13.3	87.4			
	12	14.3	87.0	70	85	975
28	15	14.7	86.9			
	18	14.5	87.0	90	110	
	21	14.8	87.0			
	0	14.8	87.2	90	110	970
	3	15.0	87.2			
	6	15.9	87.8	90	110	
	9	16.3	87.8			957
29	12	16.3	88.3	95	115	
	15	16.6	88.5			
	18	17.3	88.9	110	135	
	21	17.8	89.1			
	0	18.4	89.3	115	140	
	3	19.0	89.5			
	6	19.4	89.8	130	160	
30	9	19.9	90.1			
	12	20.4	90.5	140	170	
	15	20.9	90.8			940
	18	21.7	91.3	135	165	
	21	22.2	91.7			
	0	23.0	92.4	130	160	
	3	23.5	92.8			
	6	25.0	94.7	110	135	
	9	25.8	95.8			
	12	25.0	96.0	80	100	
	15	25.3	97.0			
	18	25.6	98.5	50	65	
	21	25.8	99.4			

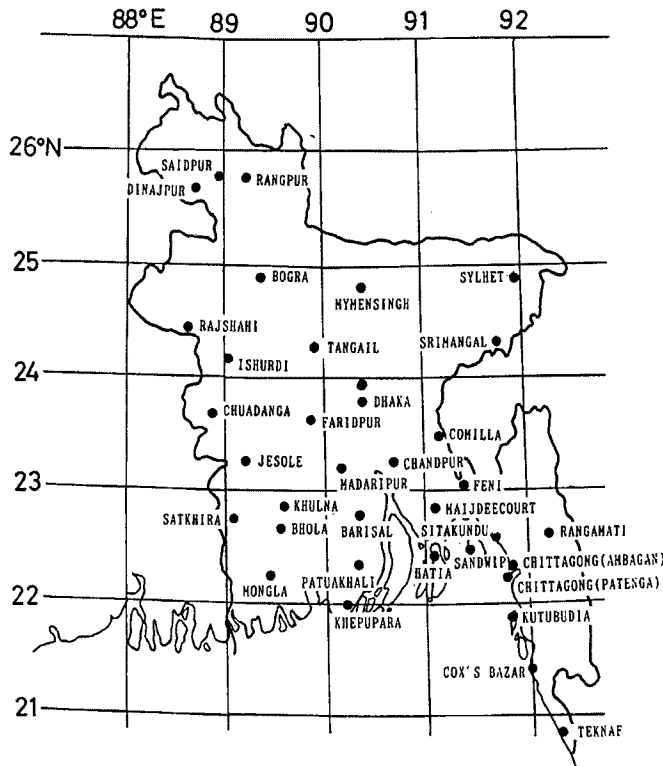


Fig. 5. Locations of the meteorological stations in Bangladesh.

Table 5. Positions of the 1991 cyclone warning signal transmission records of the Red Crescent of Bangladesh.

DATE	TIME (GMT)	LAT (°N)	LONG (°E)
APRIL 24	3	10.0	89.0
	12	11.3	88.5
	18	11.5	88.5
26	0	11.8	88.5
	6	11.8	88.5
	9	11.8	88.5
	12	11.8	87.5
	18	11.8	87.5
27	3	12.5	87.5
	6	13.0	87.5
	9	13.6	87.5
	12	14.0	87.5
	18	14.5	87.5
28	3	15.3	87.5
	6	15.8	87.7
	9	16.3	88.0
	12	16.8	88.0
	18	17.6	88.3
29	0	18.5	88.7
	3	19.0	89.0
	6	19.8	89.4
	6	20.2	89.8
	12	20.8	90.4
	15	21.2	90.0
	17	21.7	91.1
	18	22.0	91.4

シュ全国とベンガル湾をカバーしている。3地点の間には現在のところ、デジタル回線がないために、データを直接やりとりすることができていない⁵⁾。すべてのレーダーエコー

はダッカのBMDの本部ですらリアルタイムでみることはできない。相互の連絡は電話やテレックスによって口頭または書面で情報が伝えられている状態である。このレーダーによって観測された雲のエコーは、フロッピーディスクに記録されている。現サイクロンの際のレーダーの資料が入手できれば、サイクロンの進行状況はより詳しくわかり、経路も明確に決定できると思われる。しかし、現在のところ、資料は提供されておらず、正確な経路は確定できない。

バングラデシュ気象局には36カ所の地上観測点があり、それらの位置を示したのがFig. 5である。通常の気象観測は3時間ごと、1日8回である。4月29日12時から30日3時までの、各地点の風向風速の変化のようすをFig. 6に示す。同図にはサイクロンの中心位置も示しているが、回転性の風系が見られる。いくつかの場所で強風が観測されたが、最大瞬間風速が40 m/sを越えたのは、次のとおりである。クトゥブディア島で50.4 m/s、シタクンダで49.9 m/s、コックスバザールで46.3 m/s、ボーラで46.3 m/s、ケプパラで41.7 m/s、パツアカリで41.2 m/sであった。バングラデシュ気象局での正式な観測ではないが、他のいくつかの報告では、サンドウィッチで62.5 m/sを記録したことが報告されている^{6, 7)}。

最低気圧はチッタゴン（アンバガン）で4月29日21時に958 hPaが観測された。この場所はサイクロンの中心の上陸地点のすぐ近くである。サイクロンが上陸したのはこの時間ではないので、この値が上陸の中心気圧を示しているわけではない。ほかに測定された、より詳しい観測例をFig. 7に示す。これは、バングラデシュ海軍の船のウマル・フルークの船上で観測されたものである。この船はサイクロンの間、チッタゴン港に係留されていた。気圧は4月30日1時45分には930 hPa以下になって観測不能

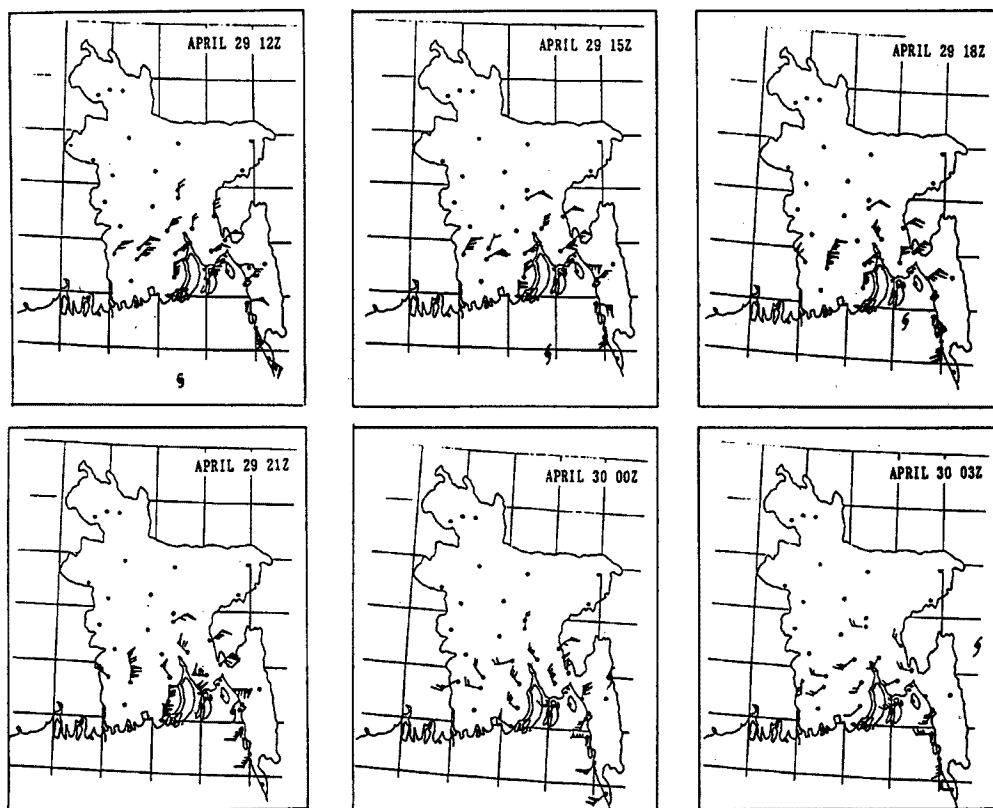


Fig. 6. Time series of the wind distribution from 12Z on the 29th to 03Z on the 30th of April during the 1991 cyclone. The bar indicates a grade of wind force of 1 and the pennant a grade of 5. The position of the cyclone (●) as determined by the JTWC.

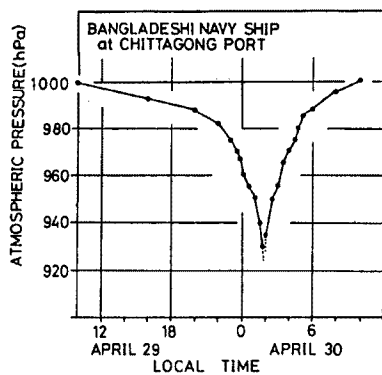


Fig. 7. Pressure data recorded on the Bangladeshi Navy ship, Umar Frooq, at Chittagong Port.

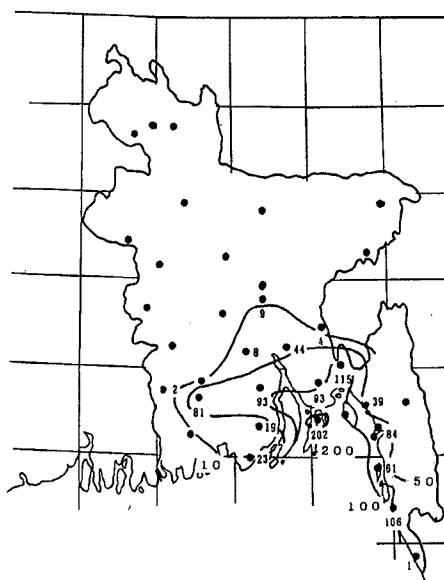


Fig. 8. Distribution of rainfall (mm) from 06Z on the 29th to 06Z on the 30th of April.

になったが、2時には935 hPaに回復した。この船上での観測例は海面更正はなされてはいない。

激しい降雨がいくつかの観測点で観測された。例えばハチャでは、4月29日15時から18時までの3時間に81 mm、マイジェコートでは4月29日21時から4月30日0時までの3時間に80 mmの降雨を記録した。4月29日6時から4月30日6時までの日降水量の分布をFig. 8に示す。最も降水量が多かったのはハチャで200 mmを越えている。降水量が100 mmを越える地域はガンジス川の河口付近に当たっている。これは、人工衛星の写真で、サイクロンの北側の発達した雲によってもたらされたことがわかる。

3.2 熱帯低気圧の気圧場の客観解析

発達した台風は、その中心から半径200 km程度の内では、気圧パターンはほぼ同心円状に維持されていて、第1近似として台風城内の等圧線は同心円状に分布していると仮定することができる。この仮定のもとに、著者⁸⁾は、Schloemer 気圧分布式⁹⁾を用いて、台風城内の気圧場の客観解析の方法を開発した。この方法を用いて、1951年から1983年までの33年間に日本本土に上陸した台風のうち上陸時の中心気圧が980 mb以下の49個の顕著台風について上陸後1時間おきに気圧場の客観解析を行い、中心の位置、中心気圧、中心気圧低下量および最大旋衡風速半径を決定した¹⁰⁾。

この方法を用いて、1991年4月29～30日にバングラデシュを襲ったサイクロンの気圧場の解析を行ってみた。しかし、算出された中心気圧の値は異常に低く、妥当な値は得られなかった。この原因は、主として、観測所の分布密度の粗さにより、中心から数十km以内の気圧傾度が大きい範囲において観測資料が2～3個と少ないことによるものと考えられる。そこで、著者¹¹⁾が、1990年9月19日に和歌山県白浜町の南方に上陸した台風9019号の気圧場の解析において試みた時空間変換により観測資料の少なさを補う解析方法をこのサイクロンの気圧場の解析に適用してみた。

(1) 資料

解析には、バングラデシュ国内の18観測所の3時間ごとの海面気圧を用いた。ただし、この資料のなかでシタクンドの29日21時(GMT)の海面気圧は943.9 mbであり、あまりにも低すぎて、信頼性に問題があるので、解析のさい除外した。また、解析時刻の3時間前と後の観測値も、観測資料の不足を補うために追加した。しかし、観測時刻の資料よりも軽視するために、これらの資料には重み $w_i (= 1/2)$ を掛けた。

(2) 客観解析の方法

半径方向の気圧分布を与える Schloemer の式⁹⁾は、中心からの距離 r における気圧を p とすると、

$$p = p_c + \Delta p e^{-1/x} \dots\dots\dots (1)$$

と表される。この式で、 p_c は中心気圧、 Δp は中心気圧低下量、 x は r/r_m に等しく、 r_m は旋衡風速が最大となる半径である。

なお、観測資料には、中心付近で現実の気圧分布とよく一致させるために、次のような重み w_r を掛けた。

$$\left. \begin{array}{l} w_r = \frac{100}{r}, \quad r > 10 \\ w_r = 10, \quad r \leq 10 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r はkmで測った値である。

気圧場の客観解析は、次の手順により3時間間隔で実行し、式(1)で表される気圧分布が現実の気圧分布を最もよく表現するように、台風の中心の緯度 ϕ 、経度 λ 、 p_c 、 Δp 、および r_m の5個のパラメーターを

決定した。

解析に先立って、 ϕ と λ の初期値を与えておく必要がある。これらの値としては、JTWCが決定したサイクロンの中心の緯度・経度を用いた。

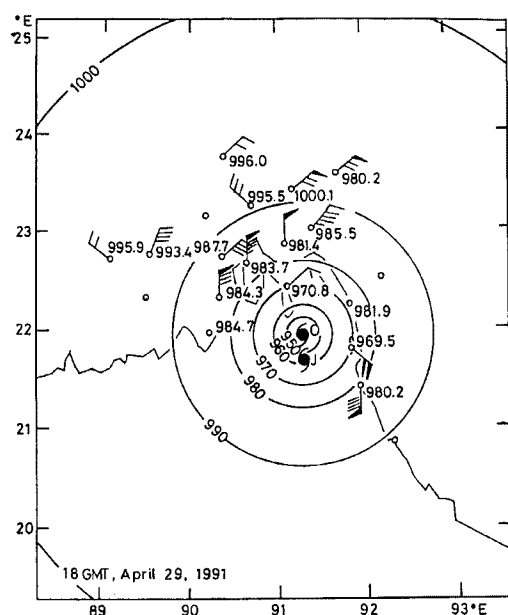
まず、サイクロンの中心が ϕ と λ の初期値の位置にあるとして、時空間変換により海面気圧の観測値を各時刻の中心の位置に相対的に分布させ、これを合成して、半径方向の気圧分布を作成する。この気圧の観測値の半径方向の分布を式(1)で表す。これは、 r_m の値を0.5 km間隔で変化させながら p_c と Δp の値を求めていき、重み w_i と w_r を掛けた気圧の観測値の平均二乗誤差

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum w_i w_r (p_{comp} - p_{obs})^2}{\sum w_i w_r}} \dots \dots \dots (3)$$

が最小となる r_m 、 p_c および Δp の値を求めるのである。なお、この式で、 p_{comp} と p_{obs} は、それぞれ、式(1)による気圧の推算値と海面気圧の観測値である。次に、中心の位置を緯度0.01°あるいは経度0.01°

Table 6. Values of the parameters determined by objective pressure analysis.

Date (GMT)	Time (GMT)	ϕ (°N)	λ (°E)	p_c (mb)	Δp (mb)	r_f (km)	σ_p (mb)
'91. 4. 29	18	21.95	91.30	946.9	60.5	50.5	3.6
'91. 4. 29	21	22.60	91.79	948.8	60.5	55.5	3.6



ずつ移動させてこの解析を繰り返し、 σ_p の値が小さくなる方向へ中心を移動させていく。そして、 σ_p が最小となる値の組み合わせとして、 ϕ , λ , p_c , Δp , および r_m の値を決定するのである。

(3) 解析結果

前述の気圧場の客観解析法による結果のうちで、妥当と考えられる結果が得られたのは、29日18時と21時（いずれもグリニッジ標準時）の2例のみであり、これらの時刻における解析により決定した各パラメーターの値を **Table 6** に示す。また、解析結果による等圧線の分布を **Fig. 9** に図示する。この図においては、JTWCによる中心の位置も示してあるが、この位置に対して客観解析による中心の位置は30—40 kmも北に偏っている。しかし、これらの客観解析による位置は、気圧分布、風速分布、および他の機関が決定した位置などから考えて妥当な位置と考えられる。

なお、他の時刻の解析において中心気圧が900 mbを割るなど満足すべき結果が得られなかったのは、観測資料がサイクロンの中心に対して一方方向に偏っていることによるものと考えられる。

3.3 強風災害

バングラデシュの田舎の人々は **Photo 1** に示すように、竹で編んだ壁に茅葺の粗末な家に住んでいる。25 m/sの風が来れば、脅威に瀕し、多くの家が吹飛ばされたことであろう。しかし、それらは数日で建替えができる。日本の通常の瓦屋根も30 m/sの風で飛散する危険がある。これらは災害といえども、それを完全に防ごうとすれば経済性という別の問題が持上る。この度のサイクロンではチッタゴン港で多くの船舶が流されたり座礁したりした。港内に沈没した船は緊急物資の輸送障害にさえなった。しかしながら、ベンガル湾を北上する巨大なサイクロンが2、3日前にわかったとしても、一体どこへ退避すればよいのだろうか。いずれにせよトルネード以外の強風は人々を脅しこすれ、飛散物にさえ注意すれば、人命を奪うことは少ないということを認識すべきである。

Fig. 10 は前節の気象データと現地観察から描いた最大風速の分布図である。またサイクロンのマークは前節のモデルによる現地時間20日深夜0時における中心位置であり、破線はそのときの等風速線である。ダッカからチッタゴンへ向かう途中の電柱はシタクンダのあたりで真新しいものが目立ちところどころ路線さえ付替えられたところもあって、そのあたりがチッタゴン（アンバガン）よりも風が強かったことが伺える。時速30 km/h強という進行速度を考慮しても、3つの進行径路のうちSPARRSOのものに合うように思われる。ただこれらの風速値は評価時間が明確でなく、被害の様子等から推量して最大瞬間

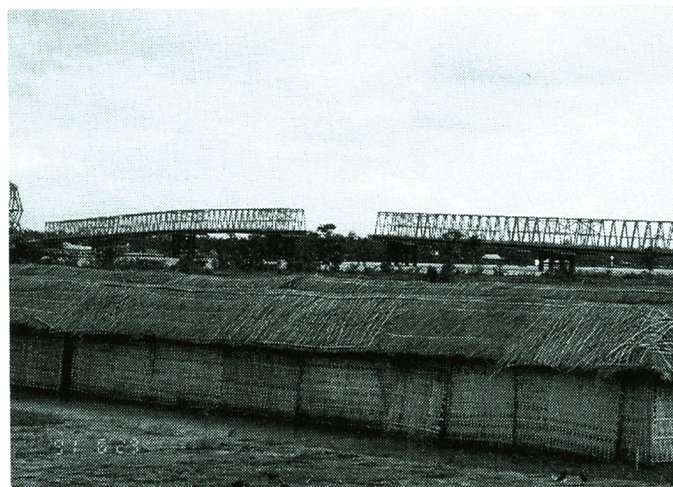


Photo 1. Restored houses.

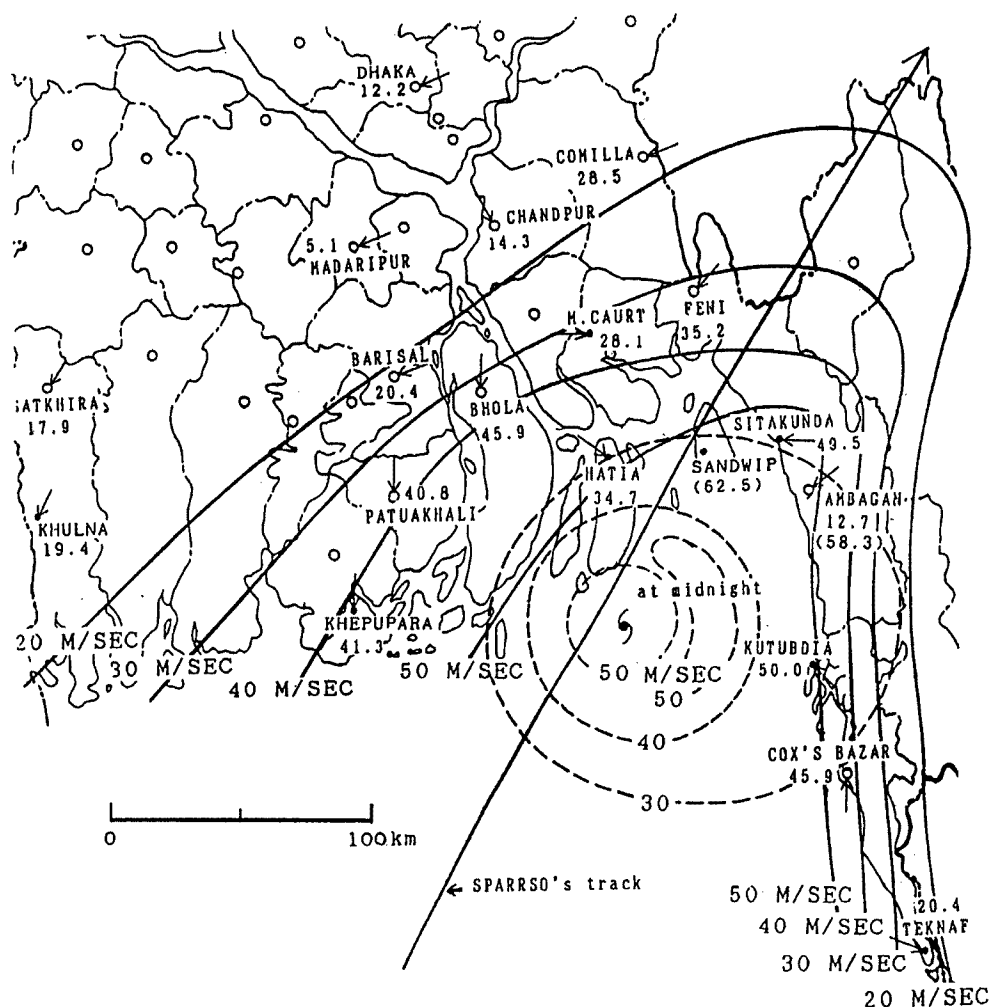


Fig. 10. Distribution of maximum wind speeds and positions presumed from Schloemer's model; () : from other data sources.

値に近いものと考えられる。

Photo 2 はチッタゴンのホテルの最上階から南西方向で見つけたものである。最初に風上側の窓が吹破られ、続いて側面が内側からやられる典型的な強風被害である。練瓦壁の被害は部分的なもので、新しくするために残部を取払ったものと思われる。この国で練瓦は主要な建材であり、横荷重に耐えるため適当な間隔で控えを設けるなどして少し工夫を要する。隣合った2戸とも同じような壊れ方をしており、局地的に 50 m/s かそれ以上の風速だったに違いない。

Photo 3 はパテナガ堤防のそばに残されていた電柱である。コンクリートの破片を持帰り、シュミットハンマーテストの結果は 200 kgf/cm² 程度の強度があり、十分なものであった。根本での曲げ強度は 3.1 tf・m あり、単独ならば、80 m/s の風にも耐えられるが、9 本も電線を架け、30 m のスパンでは 40 m/s 強で折れてしまう。堤の上の最大風速は 60 m/s を越えていたと推測され、高潮が襲う前に電柱は倒れていたであろう。ちなみにわが国の電柱の設計強度は 40 m/s で台風 1991 号では多くの電柱が倒れた。これも住宅の問題と同様、経済との平衡で考えるべきものであろう。同国にはインドネシアから輸入した置ききがあって、すぐさま立替えるという見上げた復旧対策がとられている。



Photo 2. Blowdown brick walls.



Photo 3. Broken electric line pole.

Photo 4 はコックスバザールの測候所の敷地にあった物置である。測候所の最大風速が 45.9 m/s であるから、この物置の高さでも 40 m/s 程度の風であったと思われる。構造体が崩れていることはともかく、この鉄板葺の屋根はそれほど剥がれてなく、わが国の瓦屋根と遜色がない。これは下地が野地板状のものではなく、竹網であることに関連しているものと思われる。空隙がない板状のものには葺材の継目で生じる正圧が裏側に回り込んで剥離を促進する作用があるが、それをうまく避けている。ただ、薄鉄板は一度剥がれると飛距離が長く、人を傷つけやすいので、できるだけ多く止め付けておくことが大事である。

Photo 5 は被災3日後に現地入りした馬場1等書記官の撮影になるもので、同国の情報の中枢アンテナの倒壊である。一目みて重要なアンテナ塔とは見えず、高さが 84 m もあったにしては、部材の太さが通常の送電鉄塔並に細い。倒壊の直接原因は柱材のフランジにおける引張ボルトの破断であろうが、その



Photo 4. Peeling off thinplate roofing.



Photo 5. Destruction of an antenna tower. Photograph taken by Mr. H. Baba, 1st Secretary of the Embassy of Japan.

前に腹材の変形が大きかったことが水平材の座屈から伺える。またこの種のアンテナには特定の風向で予測しがたい力が発生することがあるため、再建する場合は部分模型を用いた風洞実験を行うべきである。設計風速はこの程度のサイクロンならば、高さ 30 m の位置で 70 m/s ぐらいであろう。アンテナの高さでは 80 m/s 以上となるため設計ができなければ、強風時に姿勢を制御するような装置も考えられる。その他この写真には非常に多くのケーブル類が垂下がっている。これらは電柱の場合と同様、付加的な抗力をもたらすため、束ねるなり、柱材に沿わせるなりした方がよい。

4. 高潮の特性とシミュレーション

4.1 高潮の特性

Fig. 11 はベンガル湾の等深線を表している。湾の入口では水深が 3,000 m を越えるものの、湾奥では浅い部分が広がり、10 m の等深線が海岸線から 100 km も離れたところにも見られる。このことは高潮発生の重要なメカニズムである吹寄せ効果を大きく増大させる。高潮の痕跡高調査を 6 月 22 日から 7 月 2 日にかけて行い、数カ所の地点において高潮の明確な痕跡が見いだされた。Fig. 12 に示すように、痕跡の高さをまず地盤高 (G.L.) を基準としてとして測定し、さらに地盤高から平均海面を基準とした高さ

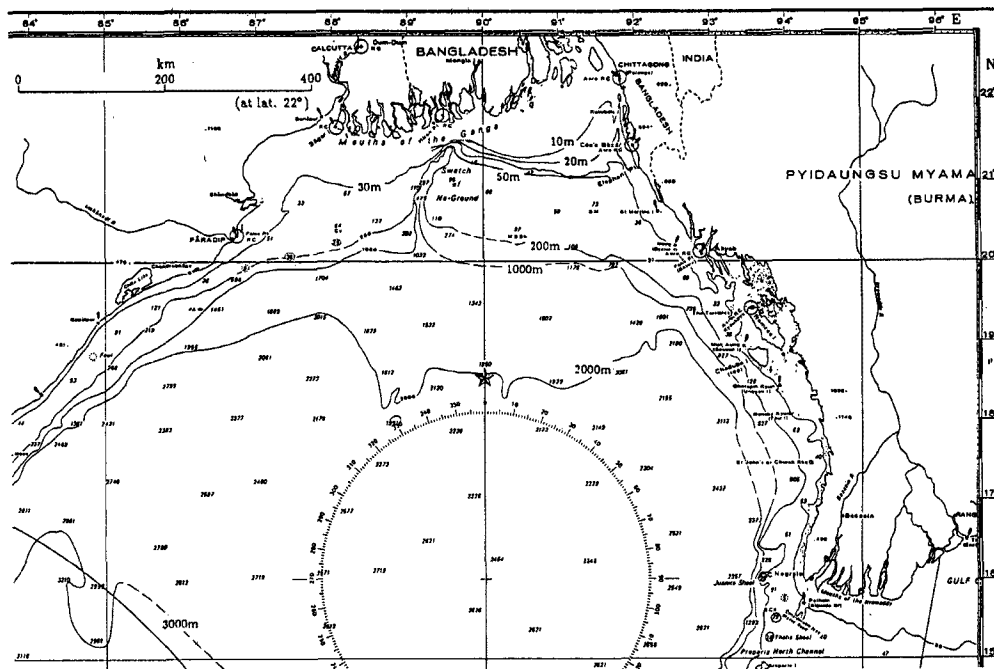


Fig. 11. Sea chart of the Bay of Bengal.

に換算した。また、天文潮の分を除いた高潮の偏差を求める場合には、1991 年 4 月 30 日 1:17 の潮位表による満潮位 2.1 m を用いた。

Fig. 13 はチッタゴン市内の高潮の遡上高の分布を示す。図中の max. および st. はそれぞれ最大遡上高および準静的水位を表す。記号 JPN で示す著者らのデータとともに CPA および DHI で示す Chittagong Port Authority および Danish Hydraulic Institute のデータも示されている。高潮は南西の方向からやってきて、チッタゴン市の大きな部分が浸水した。ベンガル湾に面した海岸では高潮が高く、また、カルナフリ川に沿って高潮が遡上したことがわかる。

Fig. 14 はバングラデシュの海岸に沿った高潮の高さを

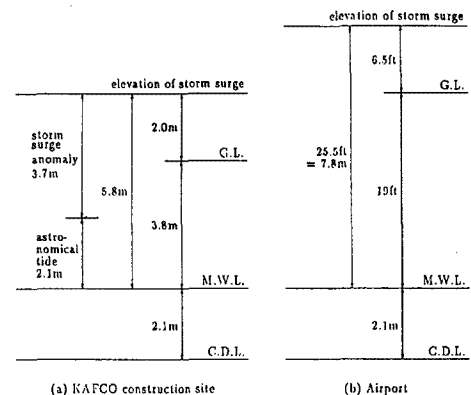


Fig. 12. Sample of storm surge tracings.

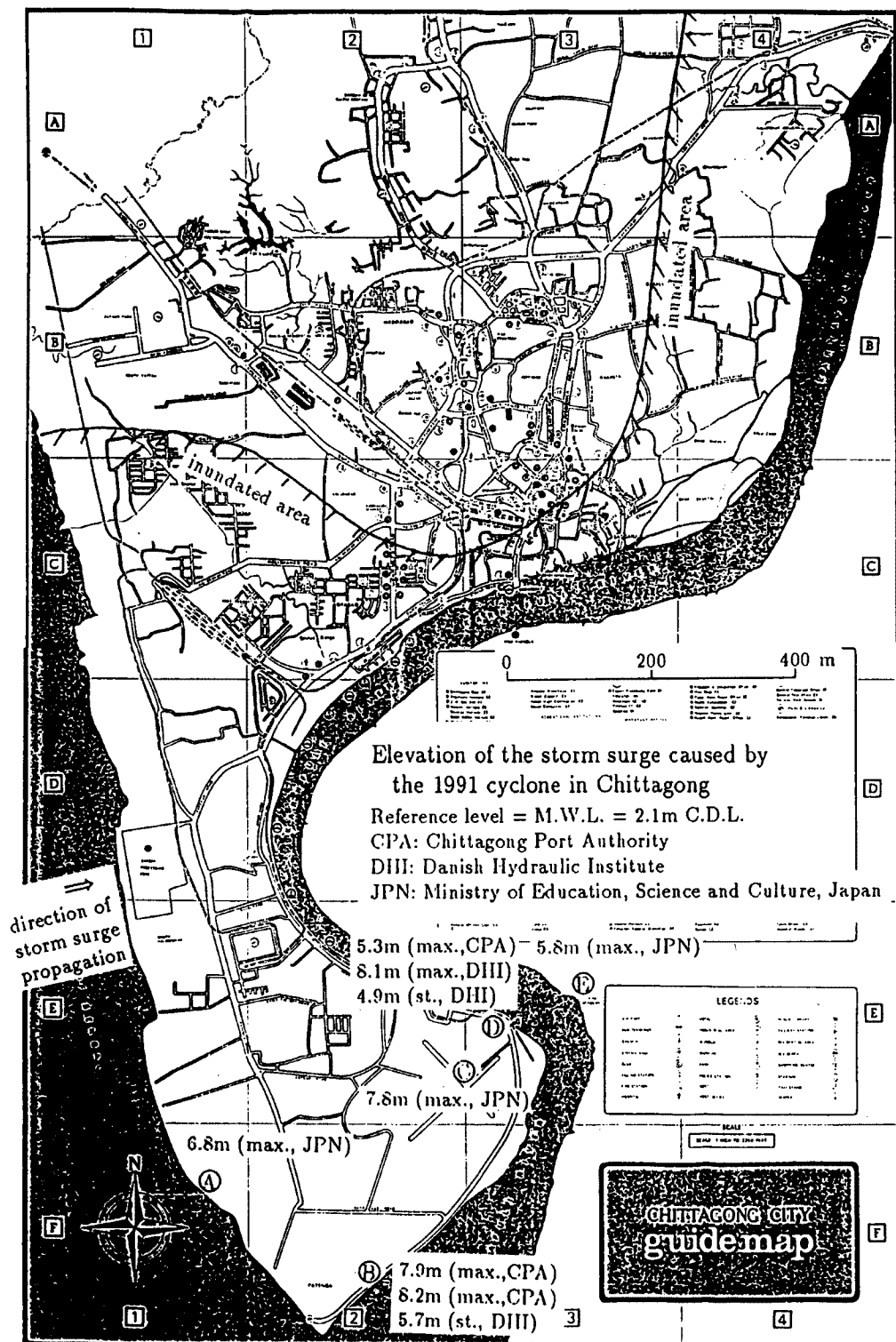


Fig. 13. Storm surge elevation in Chittagong.

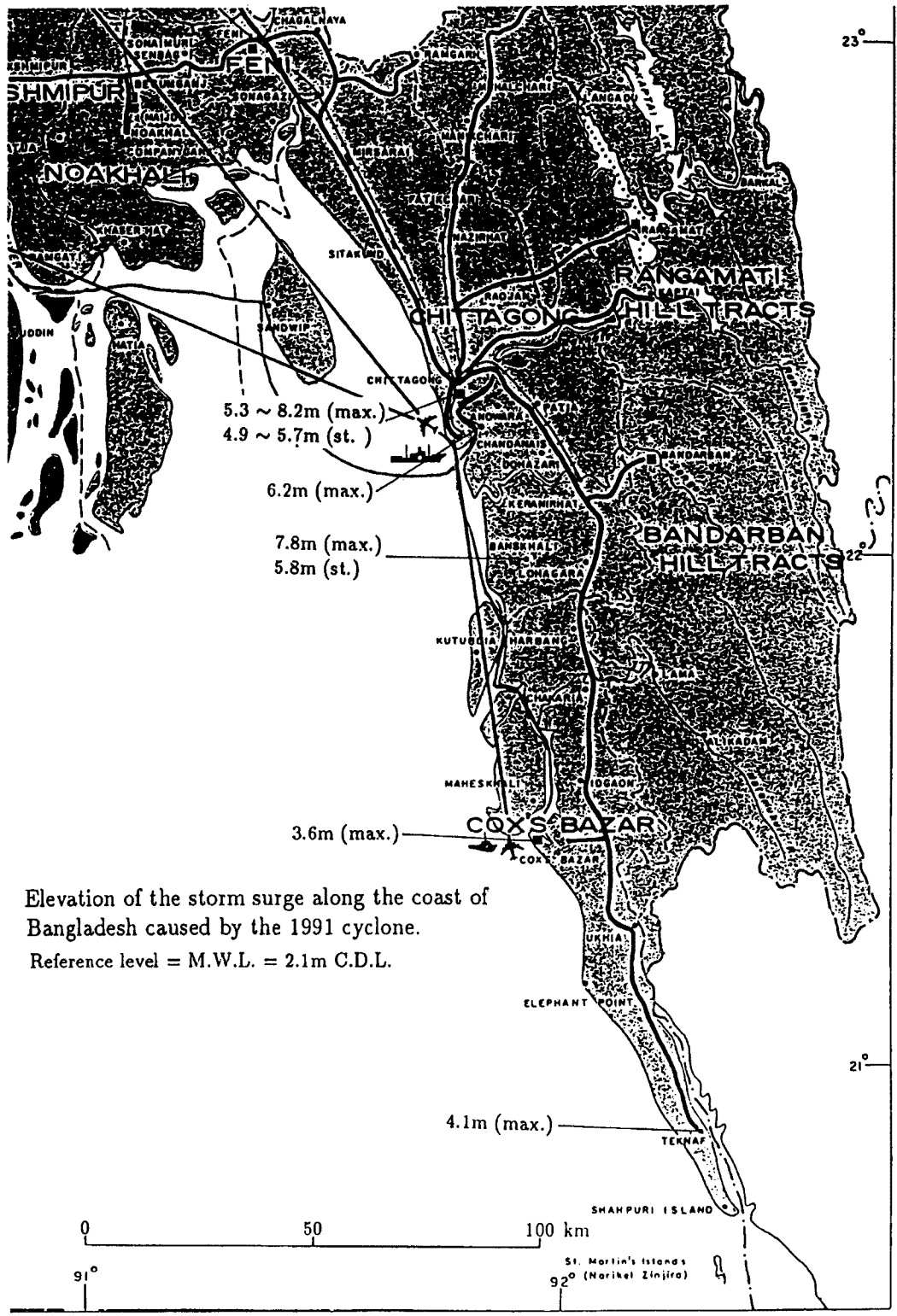


Fig. 14. Observed storm surge elevation along the coast in Bangladesh.

示している。これらのデータは、Chittagong Port Authority (1991), Danish Hydraulic Institute (1991), および著者らによって得られたものである。図から、ベンガル湾の湾奥では高潮が高いことが明らかであるが、これは高潮の発生メカニズムから理解される結果である。

4.2 高潮の予備的追算

この節では、高潮の単純な発生機構に基づく予備的な追算を行った結果について述べる。高潮の発生外力は低気圧と風である。まず、低気圧は海面を吸い上げるが、それによる海面上昇は、

$$\Omega_p = \Delta p / \rho g \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ここに、 Δp : サイクロン内の気圧低下量, ρ : 海水の密度, g : 重力加速度である。この式より、1 mb の気圧低下は 0.99 cm の海面上昇をもたらすことになる。次に、風は海面の摩擦を通じて海面を傾斜させるが、この吹寄せによる傾斜量 $d\Omega_w/dx$ は、

$$\frac{d\Omega_w}{dx} = f_w(1+\lambda) \frac{\rho_a}{\rho} \frac{U^2}{gh} \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表される。ここに、 f_w : 海面の摩擦係数 (約 0.026), λ : 海底面と海面における摩擦応力の比, ρ_a : 空気の密度, U : 平均風速, および h : 水深である。そして、高潮による全海面上昇量は $\Omega_p + \Omega_w$ となる。

1991 年のサイクロンに対しては、気圧低下量 65 mb, および最大風速 62.5 m/s が得られているが、これより平均風速を 30 m/s とする。また海岸からの距離 80 km にわたって、静的な水深が 0 ~ 10 m と直線的に変わるものとすれば、 $\Omega_p = 0.64$ m, $\Omega_w = 4.07$ m, したがって $\Omega = 4.71$ m を得る。この値は現地調査の結果と整合しており、さらに詳細な要素も含めて数値シミュレーションを行うことにより、より正確な値が得られるものと期待される。

4.3 高潮の数値シミュレーション

(1) 流体運動の数値モデル

本研究で用いる高潮数値モデルは、山下ら¹²⁾により開発されたモデルで、その概要は以下のようである。基礎方程式は水平 2 次元の長波近似式に、海面でのせん断応力 (吹寄せ作用), 大気圧の勾配の項 (吸上げ作用) を考慮したもので、バングラデシュの河口部の地形のような tidal flat 上での潮流、高潮の伝播計算や高潮の陸上へのそ上計算も可能である。数値計算法は有限差分法の格子点法で、基礎式における各項の離散化に最適の計算方法を適用するために時間分割法を採用している。すなわち、長波近似方程式の微分方程式系としては、伝播効果を表す非線形の 1 階双曲型と拡散現象を表す楕円型との結合したものになっているため、非線形移流項から生じる数値粘性、数値分散を抑える計算が必要となる。このため、本モデルでは非線形移流計算、拡散計算および伝播計算のための時間分割法を用い、それぞれの計算に対して、特性曲線法 (Two-Point Fourth-Order Scheme), ADI 法 (交互陰解法) および Iterative ADI 法 (繰り返し交互陰解法) を用いている¹³⁾。

1) 基礎方程式

基礎方程式を形成する水平 2 次元の長波近似方程式は次式で与えられ、 x, y 方向における運動方程式と連続方程式で表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(uU)}{\partial x} + \frac{\partial(vU)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + fV + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (6) \\ & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(uV)}{\partial x} + \frac{\partial(vV)}{\partial y} \end{aligned}$$

$$= -gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - fU + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $z(x, y, t)$ ：基準面から自由水面までの高さ、 $h(x, y, t)$ ：水深、 $U(x, y, t)$ 、 $V(x, y, t)$ ： x, y 方向の単位幅当りの流量、 $u(x, y, t)$ 、 $v(x, y, t)$ ： x, y 方向の流速、 F ：コリオリの係数、 τ_{bx} 、 τ_{by} ： x, y 方向の海底面でのせん断応力、 τ_{sx} 、 τ_{sy} ： x, y 方向の自由表面上でのせん断応力（主に台風などによって生じるもの）、 p ：大気圧低下量の水柱換算値、および K ：水平方向の渦動粘性係数、である。

2) 非線形移流項計算

この計算で解くべき方程式系に含まれる移流に関する部分および局所的加速度項の計算方法について考察する。 $U=uh$ 、 $V=vh$ の関係をを用いて移流項を差分近似すると、 x, y 方向の差分式はそれぞれ次式のようなになる。

$$\frac{u^{n+1/3}-u^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial u^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial u^n}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{v^{n+1/3}-v^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial v^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial v^n}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここで、添字は、タイムステップを表す。 x 方向の掃過に対しては、 y 方向の流速変化を無視し、 y 方向の掃過に対しては、 x 方向の流速変化を無視することにより、Two-Point Fourth-Order Schemeを用いて計算する。

3) 拡散計算

この計算で解くべき方程式系は、水平方向への運動量拡散を表す部分およびコリオリ力と局所的加速度項とのつり合いで、次式の方程式である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = fV + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial U}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -fU + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial V}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (12)$$

この計算は、ADI法により数値計算される。

4) 伝播計算

この計算では、運動方程式中の圧力勾配、大気圧勾配、海底面、自由水面上での摩擦力に関係する部分および連続式で構成される次の方程式を解く。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{sx}}{\rho} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{sy}}{\rho} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

これらを線形化すると、 $\Delta z = z^{n+1} - z^n$ に関する楕円形偏微分方程式が以下のように得られ、これを

Iterative ADI法を用いて解く。

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\Delta z}{g\Delta t^2} + \alpha^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial(\Delta z)}{\partial x} + \frac{\Delta z}{\varepsilon} \frac{\partial z^n}{\partial x} + \frac{\theta_x}{\varepsilon} \Delta z \right) \\
 & + \alpha^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial(\Delta z)}{\partial y} + \frac{\Delta z}{\varepsilon} \frac{\partial z^n}{\partial y} + \frac{\theta_y}{\varepsilon} \Delta z \right) \\
 & = f_1 + f_2 - \frac{\alpha}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_x}{\varepsilon} \right) - \frac{\alpha}{g} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{c_y}{\varepsilon} \right) \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

ここに、 α は重みであり、その他は以下のものである。また、 C はChézy係数である。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= 1 + \alpha g \left(\frac{|\bar{U}|}{C^2 h^2} \right)^{n+2/3} \Delta t \\
 \theta_x &= -2 \left(\frac{|\bar{U}|}{C^2 h^2} \right)^{n+2/3} \frac{U^{n+2/3}}{h^n} + \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p^n}{\partial x} \\
 \theta_y &= -2 \left(\frac{|\bar{U}|}{C^2 h^2} \right)^{n+2/3} \frac{V^{n+2/3}}{h^n} + \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p^n}{\partial y} \\
 c_x &= (1-\alpha)g \left(\frac{|\bar{U}|}{C^2 h^2} \right)^{n+2/3} U^{n+2/3} - \frac{\tau_{sx}}{\rho} \\
 c_y &= (1-\alpha)g \left(\frac{|\bar{U}|}{C^2 h^2} \right)^{n+2/3} V^{n+2/3} - \frac{\tau_{sy}}{\rho} \\
 f_1 &= \frac{\alpha}{g\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^{n+2/3}}{\varepsilon} \right) + \frac{1-\alpha}{g\Delta t} \left(\frac{\partial U^n}{\partial x} \right) - \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial z^n}{\partial x} \right) - \frac{\alpha}{\rho g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial p^n}{\partial x} \right) \\
 f_2 &= \frac{\alpha}{g\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^{n+2/3}}{\varepsilon} \right) + \frac{1-\alpha}{g\Delta t} \left(\frac{\partial V^n}{\partial y} \right) - \alpha \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial z^n}{\partial y} \right) - \frac{\alpha}{\rho g} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^n}{\varepsilon} \frac{\partial p^n}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

(2) サイクロンモデル

わが国の高潮は、100 km程度の湾内で発達し、気象じょう乱に付随する水位変動と自由進行波の副振動とで構成される。高潮海域は半径数百kmの台風の一部にすぎず、その他は起伏の激しい陸上である。わが国においては、このような地形条件での風域場を再現するための台風モデルが構築されてきた。ここでは台風モデルをベンガル湾のサイクロンに適用する場合の問題点の検討を行う。

1) 台風モデル

ハリケーンや台風などの極度に発達した熱帯性低気圧は、同心円状の気圧分布を仮定して、指数関数による遞減曲線でモデル化される。実際には、進行方向に対する左右の非対象性や2つの渦中心が存在することもあるが、気圧分布はおおむねこの関数で近似できるようなのである。

しかしながら、風速分布は問題であり、地球表面の粗度や気流の渦動粘性係数の他、中心付近での強風域の存在 (super gradient wind) などを考慮したモデル化が必要となる。すなわち、台風内の気流運動を記述する方程式において、鉛直分布、移流の影響を無視して傾度風を計算し、これと風域場が移動する速度をベクト的に足し合わせれば、摩擦を考慮しない風の場合 (FFW: Friction Free Wind) が計算される。移動座標系における地上風の流跡線の曲率は静止状態での傾度風の勾配と移動速度とのやや複雑な関数となり、これを直接計算するか、近似するかでモデルが異なる。最も本質的な点は、地上での摩擦をどのように評価するかであり、これにより FFW と地上風との偏角が決まる。

藤田のモデルおよび光田・藤井モデルでは、偏角を経験的に固定し (例えば、30°)、地上風の流跡線の曲率も経験的に関数で近似している。一方、Yoshizumi のモデルは、FFW の風速場と摩擦係数で表示

される Ekman spiral の鉛直分布近似式 (Rosenthal, 1962)¹⁴⁾ を仮定して、地表の摩擦特性を直接考慮した風域場の定式化を行っている。

Yoshizumi モデルではより多くの力学を取り込んでいるが、計算時間がややかかること、台風中心近傍の風速場の計算が難しい欠点がある。台風モデルでは、最大風速半径の内側での風域場が重要であり、ここで観測される super gradient wind の存在が光田¹⁵⁾により指摘されているが、今回のサイクロンにおいて、この効果がどの程度存在しているかを検討する。

本研究で対象とする3つの台風モデルの概要は以下のようである。

(a) 藤田のモデル

台風域内の気圧分布は、台風中心に対して対称であると仮定して、次式で示される。

$$p = p_{\infty} - \frac{\Delta p}{\sqrt{1 + (r/r_m)^2}} \quad (18)$$

傾度風は、

$$V_{gr} = C_1 r \left(\sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \frac{1}{\rho r}} - \frac{f}{2} \right) \quad (19)$$

ここに、 p ：台風域内の気圧、 p_{∞} ：台風の周辺気圧、 Δp ：台風中心と周辺の気圧の差、 r ：台風中心からの距離、 r_m ：台風の最大風速半径、である。 f はコリオリの係数で、 $f = 2\omega \sin\phi$ 、 ω は地球自転の角速度、 ϕ は計算する地点の緯度、 ρ は空気の密度である。また、気圧傾度 $\partial p / \partial r$ は式(18)により、

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\Delta p r}{r_m^2} \left\{ 1 + \left(\frac{r}{r_m} \right)^2 \right\}^{-2/3} \quad (20)$$

で与えられる。また、台風の進行に伴う場の風(V_p)は、次式で与えられる。

$$V_p = V_s \alpha_0 e^{-r/\beta} \quad (21)$$

ここに、 V_s ：台風中心の進行速度 (m/s)、 α_0 、 β ：台風によって決まる係数で、 β は、 $r = 500 \text{ km}$ で $e^{-\pi}$ になるように定めた値である。この V_p と V_{gr} のベクトル和で風速が計算される。

(b) 光田・藤井のモデル^{15, 16)}

気圧分布は Schloemer の定式化を用いる。

$$p = p_c + \Delta p e^{(-r/r_m)^2} \quad (22)$$

ここに、 p ：台風域内の気圧、 p_c ：台風中心の気圧、 Δp ：台風中心と周辺の気圧の差、 r ：台風中心からの距離、 r_m ：台風の最大風速半径、である。

傾度風は次式で計算される。

$$V_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (23)$$

地上風の流跡線の曲率半径 r_t は、Blation の公式により次式で与えられる。

$$\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{C}{V_{gr}} \sin\alpha \right) \quad (24)$$

ここに、 α は台風の進行方向を基準に時計回りに定義した計算点の角度である。

台風域内の地表風速 V_s と V_{gr} との比の値は一定ではなく台風眼付近で大きくなる super gradient wind の特性を定式化するため、Weibull 分布型の強調関数 $G(x)$ を用いている。

$$G(x) = G(\infty) + \{G(x_p) - G(\infty)\} \left(\frac{x}{x_p}\right)^{k-1} \exp\left[\left(1 - \frac{1}{k}\right) \left\{1 - \left(\frac{x}{x_p}\right)^k\right\}\right] \dots\dots\dots (25)$$

ここに、決定すべきパラメーター k , x_p および $G(x_p)$ は、台風 7705 号と 7709 号の観測結果から、 $k=2.5$, $x_p=0.5$, $G(x_p)=1.2$ が得られているが、台風固有の未定定数である。また、 $G(\infty)$ の値としては、海面上の風速と傾度風速の比として一般的に用いられている $2/3$ を用い、地表風と FFW との偏角は 30° を推奨している。

(c) Yoshizumi のモデル¹⁷⁾

気圧分布は Schloemer の式(22) で与える。このとき、極座標 (r, θ) で表した風速ベクトル $(V_{s\theta}, V_{sr})$ は、台風の進行速度 (V_r, V_θ) とそれと風速との相対速度 (V_r', V_θ') を用いて次式のように表せる。

$$V_{s\theta} = V_\theta + V_r' \cos\beta + V_\theta' \sin\beta \dots\dots\dots (26)$$

$$V_{sr} = V_r - V_r' \sin\beta + V_\theta' \cos\beta \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 β は等圧線と V_s の方向とのなす角で、等圧線の接線方向のつりあい式

$$fV \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \dots\dots\dots (28)$$

より、次のように求められる。

$$\beta = -\arctan\left(\frac{\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial r} + V \cos\theta}{V \sin\theta}\right) + \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 V_r', V_θ' は次式のように与えられる。

$$V_r' = V_{gr} + V' \exp(-bz) \cos(\alpha - bz) \dots\dots\dots (30)$$

$$V_\theta' = \sqrt{\frac{1+2K}{1+K+S}} V' \exp(-bz) \sin(\alpha - bz) \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 z : 鉛直方向の変位、 K_m : 渦粘性係数、抵抗係数 C_d を用いて、 b, α, V', K , および S はそれぞれ次式で与えられる。

$$b = \left[\frac{(1+2K)(1+K+S)f^2}{4K_m^2} \right]^{1/4}, \quad \tan\alpha = \frac{-b}{b + |\bar{V}| C_d / K_m} \dots\dots\dots (32)$$

$$V' = -(V_{gr} + V_\theta)(\sin\alpha + \cos\alpha) + \sqrt{\frac{1+K+S}{1+2K}} \cdot V_r(\sin\alpha - \cos\alpha) \dots\dots\dots (33)$$

$$K = \frac{V_{gr}}{f_r}, \quad S = \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial V_{gr}}{\partial r} \dots\dots\dots (34)$$

ここに、 V_{gr} : 傾度風速 (Rosenthal の近似解より求められる)、 $\bar{V}$: 地表での FFW の風速ベクトル、である。

(d) 風速場の比較

以上の 3 モデルにより、Table 7 に示す条件で計算される地上風 (Yoshizumi モデルでは地表 $z=10$ m) 計算結果を Fig. 15 に示す。図から判断されるように、各モデルの特色は以下のものである。藤田モデルの風域場はなだらかで、台

Table 7. Typhoon constants.

周辺気圧 (P_f)	1010 (mb)
中心気圧 (p_c)	950 (mb)
台風の進行速度 (V_c)	10 (m/s)
最大風速半径 (r_m)	60 (km)
渦動粘性係数 (K_m)	100 (m^2s^{-1})
抗力係数 (C_d)	0.0030

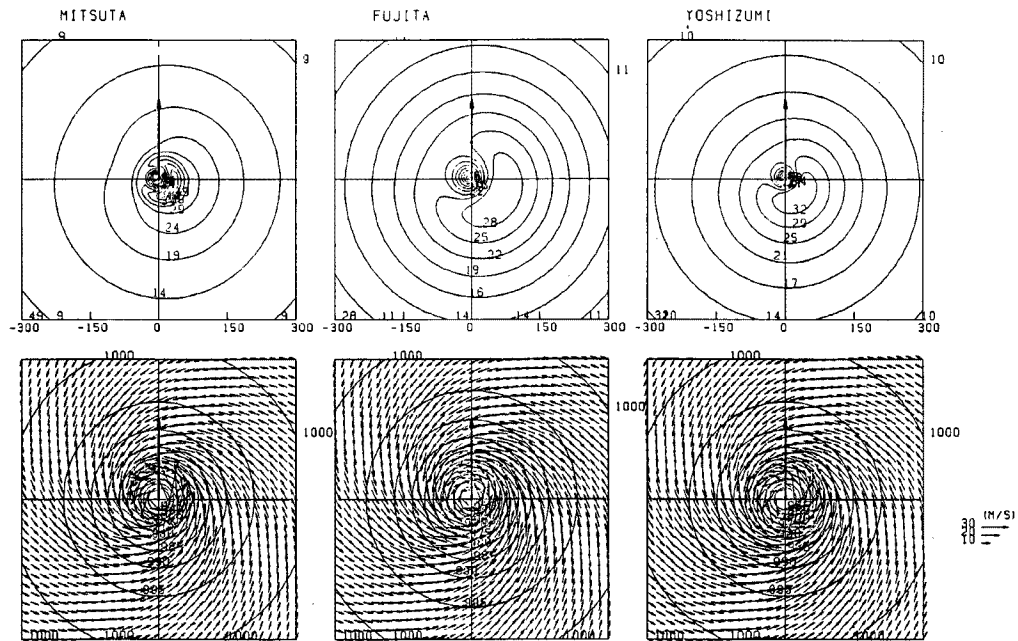


Fig. 15. Surface wind fields computed by three typhoon models.

風中心から離れた風域場が強めに計算される。これに対して、光田・藤井モデルでは super gradient wind がモデル化され、外縁では傾度風が 2/3 に弱められている。Yoshizumi モデルでは FFW と地上風との偏角が 30° より小さく、強風域の集中度は藤田モデルより鋭く、光田・藤井モデルより緩やかである。

2) 1991 年のサイクロンの気圧、風域場の計算

バングラデシュは国土全体がひとつのデルタ地形であり、海拔 3 m 以下の土地が内陸 100 km にまで達する極めて地盤高の低い地形のため、風域場の観測には適している。

(a) 経路

これまでに発表されているサイクロンの経路図は、JTWC の Tropical Storm Warning 記録、赤新月社の警報伝達記録および SPARRSO の経路図があり、三者ともにコースが異なる。すでに、Fig. 4 にこれらの経路を示したが、最も東よりの JTWC と西よりの SPARRSO のものでは 100 km 近くも異なっている。

高潮の数値シミュレーションに用いることができる情報は JTWC のものだけであるが、3.2 で示したように、藤井は気象観測ステーションのデータを用いて気圧場の客観解析を行い、JTWC サイクロンの位置および中心気圧の修正を行った。

(b) 最大風速半径および中心気圧

最大風速半径 (r_m) および中心気圧は台風モデルで風域場を決定する重要なパラメータである。これらをバングラデシュの気象観測ステーションの 3 時間おきの観測データから Fig. 16 により推定する。この図は、台風中心からの気圧分布を Schloemer の式において、28 日 6 時 970 mb, 28 日 15 時 954 mb, 29 日 21 時 940 mb および 30 日 3 時のチッタゴン (アンバガン) の 955 mb, 30 日 6 時 970 mb を信頼できる値としてその間を線形内挿した中心気圧を用いて計算したものである。最大風速半径 r_m を 60 km, 80 km, 100 km の 3 通りについて計算し、観測データと比較してある。図中の○印はサイクロンの東側の観測点、×印は西側の観測点の海面補正後の気圧を示しているが、信憑性の欠けるとされるシタクダの

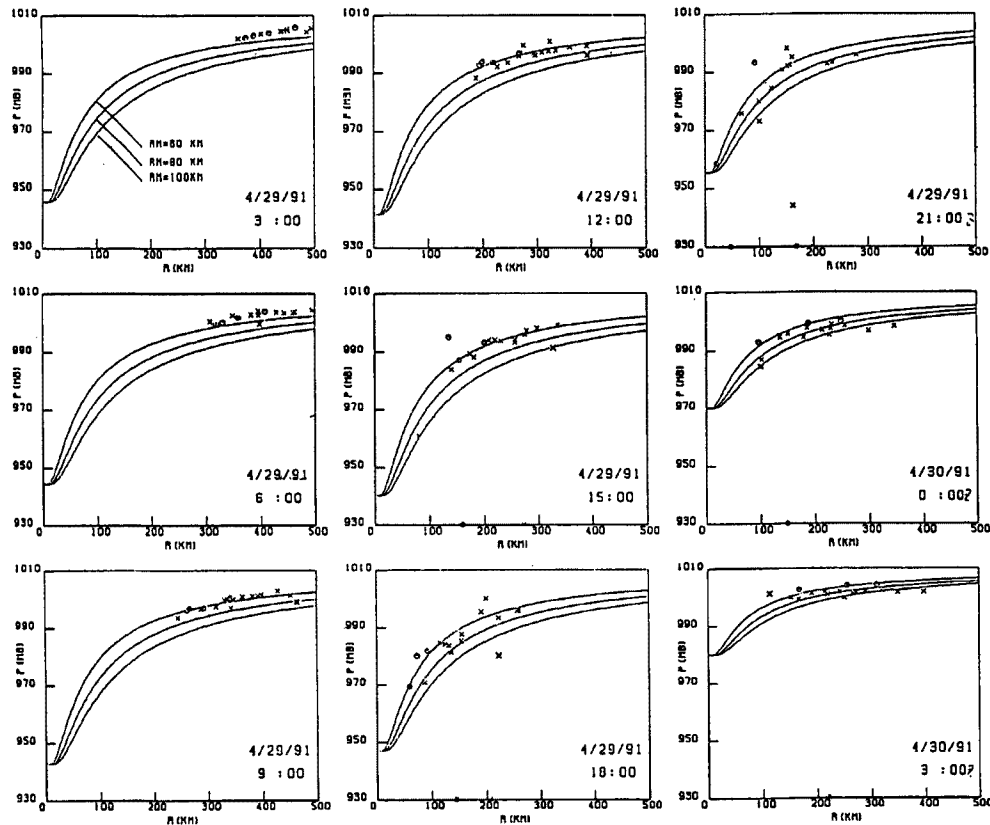


Fig. 16. Comparison of the radial distribution of the sea surface pressures between observations and Schloemer's formula.

データは太い×印にした。

この図から判断して、30日3時までは最大風速半径 $r_m = 60$ km、その後は80 kmとした。なお、周辺気圧は1010 mbとした。

以上のように決定したモデル定数とJTWCの経路図を用いて藤田、光田・藤井およびYoshizumiモデルにより風域場を計算し、各観測点での時系列風ベクトルと比較した結果、以下のように結論付けられた。藤田モデルは遠方の風域場を過大評価しているが、台風を中心付近の風速は小さめに計算されている。Yoshizumiモデルは台風中心付近の風向が合っていない。偏角 30° で与えた光田・藤井モデルおよび藤田モデルはの風向は観測結果と良い一致を示している。光田・藤井モデルは台風中心付近の風ベクトルが観測値と良い一致を示しており、遠方の風域場の風速のオーダーも良く合っている。

以上のことから、風上での台風観測に基づきモデル化された光田・藤井モデルをバングラデシュのサイクロンのモデルとして使用することにする。

(3) バングラデシュの高潮の追算

1) 潮汐計算

ベンガル湾沿岸、とくにバングラデシュにおける検潮所は少なく、コックスバザールとカルナフリ川河口のチッタゴン、ノーマンズポイントだけである。チッタゴン港はカルナフリ川上流約18 kmに位置しているため、湾内の潮汐計算のためのデータとしては使えない。そのためここではSchwiderski^{18, 19)}による全球規模での潮汐計算結果を境界条件として与え、高潮計算領域において M_2 および K_1 の2分潮の数値計算を行った。これには 1° メッシュで、位相および振幅が表示されており、潮汐とは次式で与えられ

る。

$$\zeta = \xi \cos(\sigma t + \chi - \delta) \dots \dots \dots (35)$$

ここに、

σ : 潮汐の周波数 ($M_2: 1.405 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$, $K_1: 7.292 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$),

$\chi = 2\pi(h_0 - s_0)/180(\text{rad})(M_2)$, $\chi = \pi(h_0 + 90)/180(\text{rad})(K_1)$

$h_0 = 2.797 \times 10^2 + 3.600 \times 10^4 T + 3.030 \times 10^{-4} T^2$

$s_0 = 2.704 \times 10^2 + 4.813 \times 10^5 T - 1.133 \times 10^{-3} T^2 + 1.900 \times 10^{-6} T^3$

$T = (2.739 \times 10^4 + 1.000 \bar{D}) / 3.653 \times 10^4$

$\bar{D} = D + 365(Y - 1975) + \text{Int}[Y - 1973]/4]$

Y : 年 (≥ 1975),

D : 対象年の日数 ($D=1$ が1月1日), t : 対象日の時刻(sec)

であり、 $\text{Int} [\]$ は整数化を意味する。また、 ξ および δ は Schwiderski により計算された振幅 (m) および Greenwich 時間での位相 (rad) である。

計算領域は Fig. 17 に示す範囲で、メッシュ間隔は経度方向 $\Delta x = 1,726 \text{ m}$ 、緯度方向 $\Delta y = 1,700 \text{ m}$ である。図中、4点の●印は式(35)で計算される潮位であり、図中に示した Schwiderski の位相、振幅を与え、開境界条件はこれらを線形内挿した。なお、バングラデシュ時間はグリニッジ時間より6時間早い。さらに、Fig. 18 は高潮計算に用いる数値モデルにより計算された、チッタゴンにおける潮位波形であり、カルナフリ川河口での推算潮位の干、満潮位を○印で表示してある。また、破線は河口から約18 km上流のチッタゴン港 (Lat. $22^\circ 20'$, Long. $91^\circ 50'$) での、 M_2 , K_1 分潮のみを考慮した推算潮位である。

流れの抵抗係数に関しては、数ケースのテストランから、Chézy 係数 $C = 58.7 (\text{m}^{3/2}/\text{s})$ 、(水深 10 m での Manning 係数 $n \approx 0.025 (\text{s}/\text{m}^{1/3})$ に相当) および水平渦動粘性係数 $100 (\text{m}^2/\text{s})$ を設定した。潮汐計算において、チッタゴン (カルナフリ河口) での干満の時刻、潮位が、推算潮位とほぼ一致していることから、潮汐波の伝播がうまく計算

されていることが確認できる。そこで、以下の高潮計算においても、潮汐計算で設定した乱流定数を用いる。

2) 高潮計算

初期条件は静止状態として、高潮計算の 6 hr 前から潮流計算をはじめ、初期じょう乱の影響が小さくなった時点で、サイクロンの影響

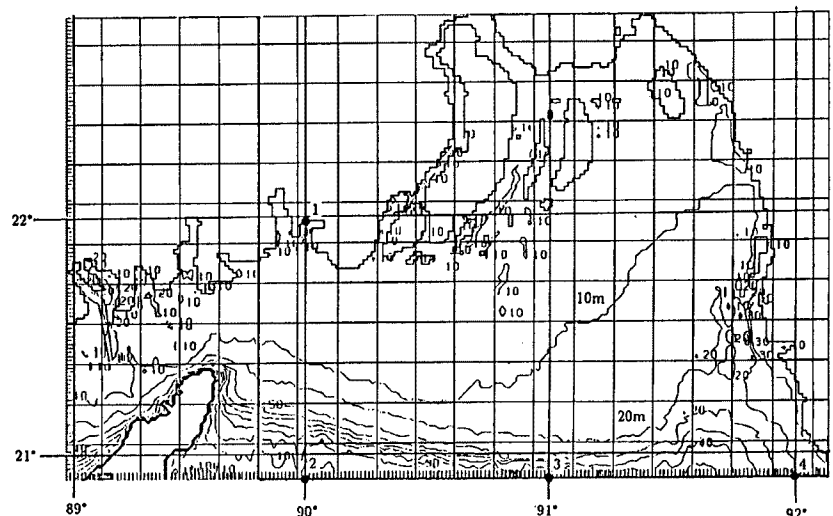


Fig. 17. Computational domain.

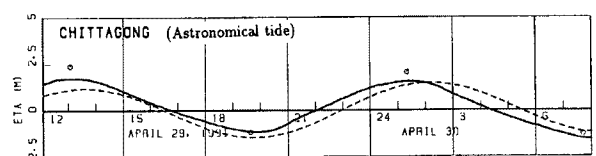


Fig. 18. Computed tide at Chittagong.

が出始めるよう設定した。また、開境界条件としては、天文潮2分潮、 M_2 、 K_1 、および気圧低下による静的な吸い上げ相当水位を与え、海岸線では完全反射条件とし、海面せん断応力の抵抗係数 C_D は0.0026とし、コリオリパラメータは北緯 21.5° での値を与えた。サイクロンの経路および中心気圧は、JTWCの情報そのものと客観解析により、それを修正したものをを用いた。

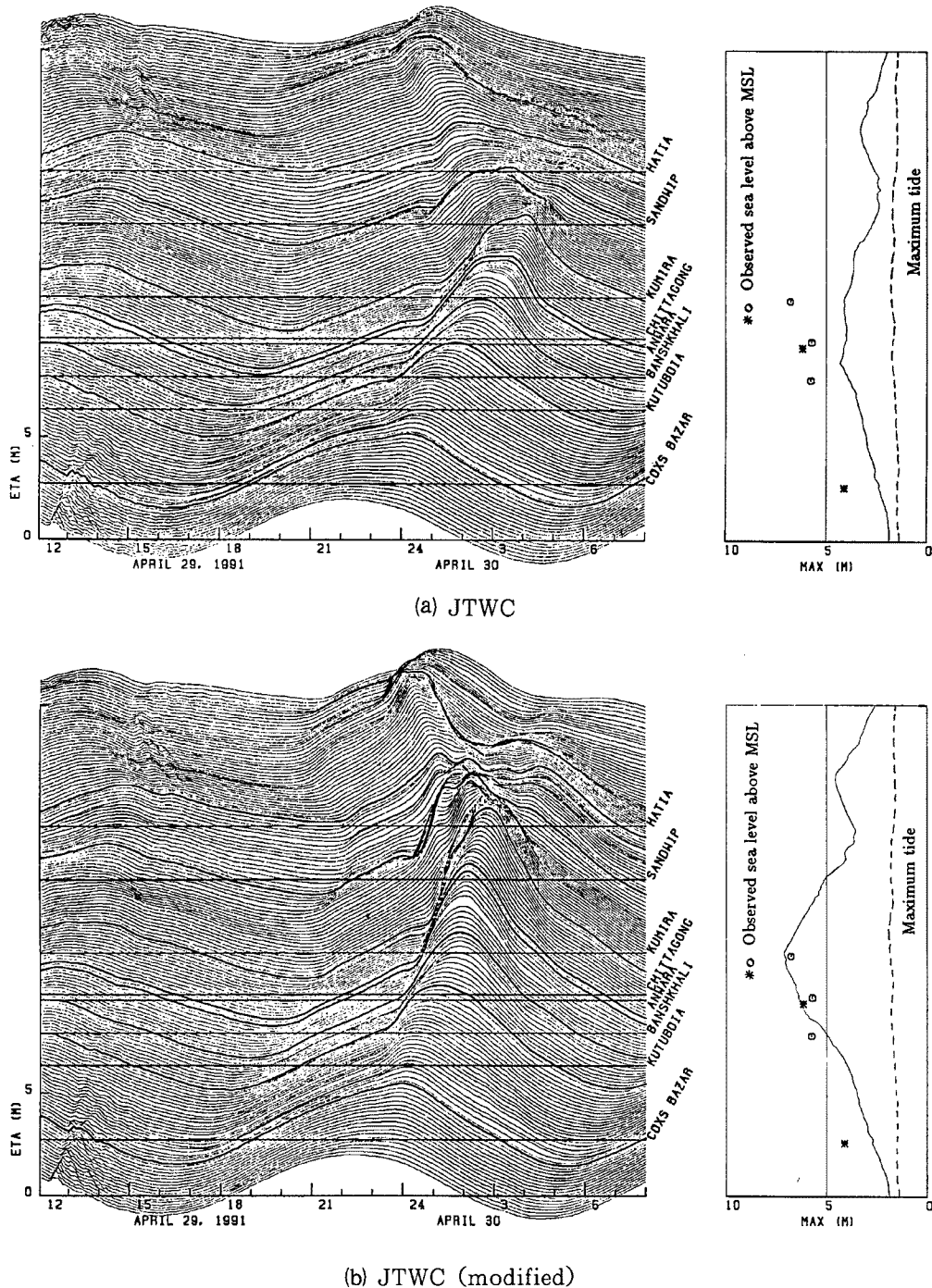


Fig. 19. Time-variation of the computed coast-line water elevation and distribution of its maximum.

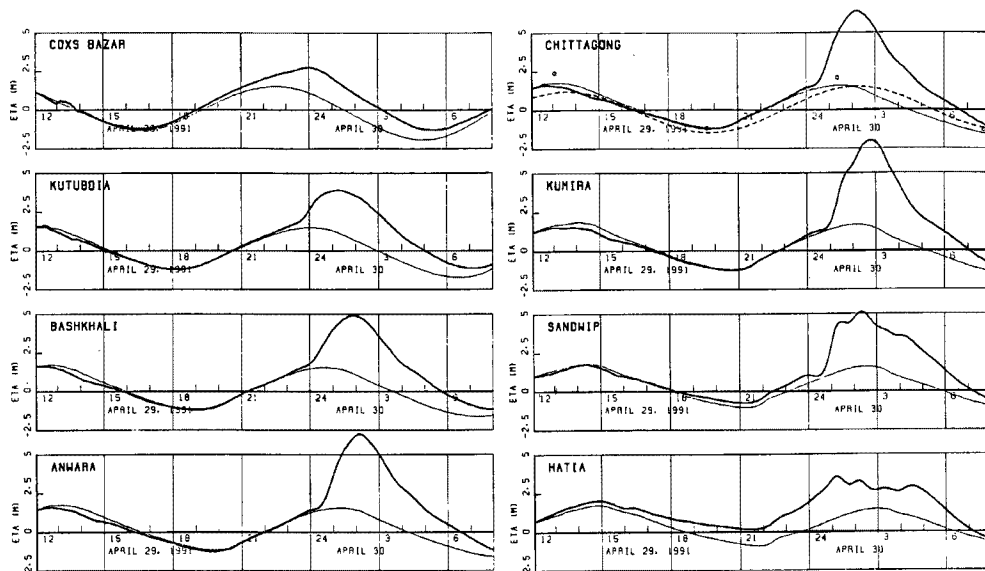


Fig. 20. Time-variation of storm surges computed at output points.

Fig. 19(a) および (b) には、それぞれ JTWC および修正サイクロンを用いた場合の沿岸域での高潮の追算結果の時空間変化およびそれらの最大値の分布を示してある。図中、観測潮位の最大値の沿岸方向分布として、クミラフェリーターミナル、チッタゴン、(カルナフリ川河口)、アンワラ、バスハリおよびコックスバザールでの観測結果をプロットしてあり、○印は静水状態に近い場所での観測結果で、*印はそうでないものである。図からわかるように、どちらのコースでも潮位が高いのは、サンドウィップ島東岸のクミラからバスハリまでで、そこからコックスバザールに向かって小さくなっている。特に、修正したコースによるとクミラからアンワラにかけてはほぼ満潮時に重なり、高潮の最大値は 6 m 以上になり観測結果とよく一致する。このことから、客観解析によるサイクロンのコース、中心気圧の修正は信頼できるものと考えられるため、以下には、修正したサイクロンによる計算結果を示し高潮の特性を考察する。

Fig. 20 には、代表水位出力点における高潮（太線）および M_2 , K_1 天文潮位（細線）を、Fig. 21 には、潮位、流速ベクトル、風速ベクトルおよび等風速線の空間分布の毎正時出力を示す。なお、水位の基準面は平均海面 (MSL) とした。

これらの図より、数値計算結果から見出される高潮の特性として、以下のことがいえる。

(1) 高潮の最大値はサンドウィップ島東岸のクミラからバスハリまでの沿岸で高く、そこからコックスバザールに向かって小さくなっている。これはサイクロン中心からの距離以外にも、コックスバザールでは、気象潮の最大値出現時刻（4月30日0:30頃）と天文潮の満潮時（4月29日22:30頃）との差が約2時間であるのに比べて、チッタゴン、クミラではその差が1時間から30分と極めて小さいことに起因している。すなわち、サイクロンがもう1時間早く来襲していたならば、潮位はさらに大きくなっていたであろうことが予想される。

(2) Tsuchiya・Yamashita²⁰⁾ の大陸棚上での高潮の動的特性をしらべた数値実験によれば、Bengal 湾湾奥の海底地形で、中心気圧 940 mb のサイクロンに対して、その移動速度が 30 km/hr と 60 km/hr とでは高潮の最大値は、Fig. 22 から、それぞれ 4 m および 5.5 m であり、移動速度の早いサイクロンによる高潮が 1.5 m 高くなる。これは、吹寄せによる浅海域での大規模循環流の形成に重要な時間と、サイクロンの移動速度との関係で高潮の大きさが決定されるためで、移動速度が速過ぎて大規模循環流が十分に発達できず高潮が小さくなる限界速度までは、サイクロンが速く移動すれば大きな高潮が起こるためであ

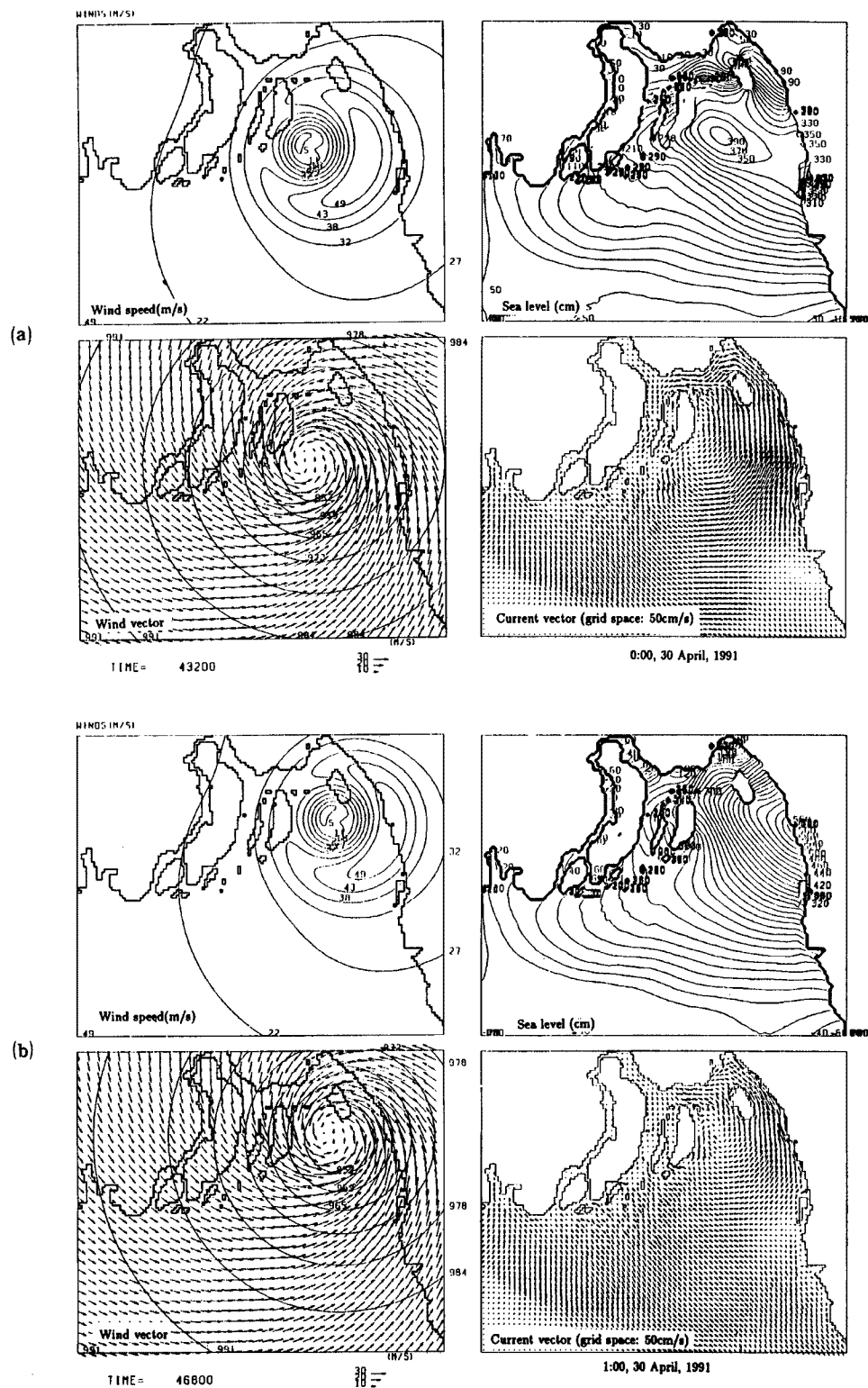


Fig. 21. Spatial distributions of storm surges, current vectors, wind speed and wind vectors.

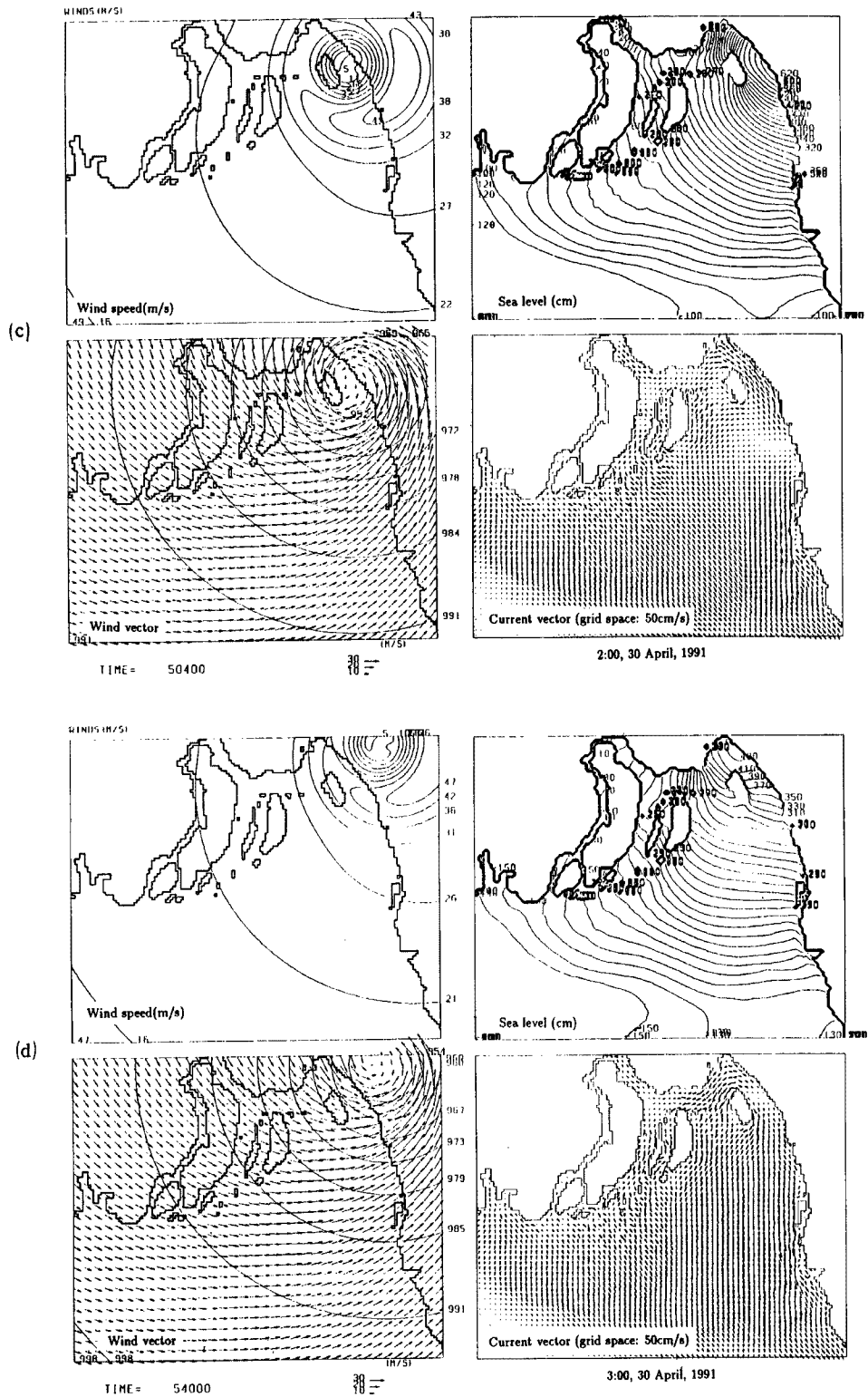


Fig. 21. Spatial distributions of storm surges, current vectors, wind speed and wind vectors.

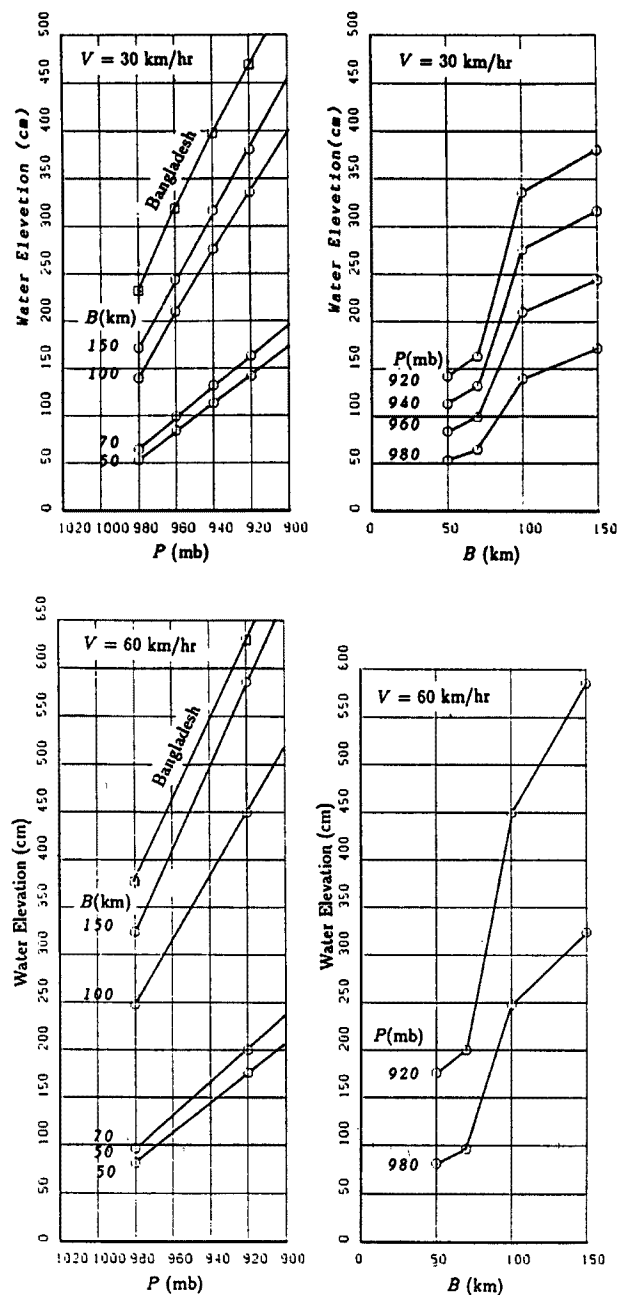


Fig. 22. Relation of water elevation v.s. central pressure of cyclone and continental shelf width⁹⁾.

る。このことは、Fig. 21 の4月30日1:00および2:00の流況の計算結果によく現れており、大規模な反時計回りの進行性の渦が形成され、サイクロンの上陸直前にそれが海岸線に衝突し、大きな水位上昇を引き起こしていることがわかる。今回のサイクロンの移動速度は約30 km/hrであったが、以上の結果から、同一規模のサイクロンであっても、さらに1.5 m程度大きな高潮が発生する可能性があることがわかる。

Table 8. List of worldwide catastrophic storm surge disasters.

Country	Year	Number of dead	Risk to life	Lifespan (in years)
Netherland	1287	5×10^4	38.6×10^{-3}	23.5
Indonesia	1737	30	1.57	23.0
Japan	1828	1.3	0.406	38.5
India	1864	5-7	0.226	23.5
"	1876	20	0.769	23.5
Vietnam	1881	30	—	—
India	1882	10	0.373	23.5
"	1942	4	0.125	30.8
Bangladesh	1963	2.2	0.371	40.4
"	1965	5.7	0.917	42.8
"	1970	50	7.14	46.3
India	1971	1	0.0228	46.0
"	1977	2	0.0328	51.0
Bangladesh	1985	1	0.0101	58.0

5. 高潮氾濫による被害

今回の高潮災害によって、約13万人の死者を数えたが、これはTable 8からわかるように、死者数の多さでは、記録に残る世界の高潮災害の中で第15位に相当する巨大災害であった。本章ではなぜこのような激甚な災害になったかについて考察する。

5.1 被害の概要

Fig. 4に示したように、サイクロンはチッタゴンの北部を通り抜けている。したがって、その東半円では高潮が増幅されることになる。バングラデシュ南部では海岸線がほぼ南北に走っており、まずコックスバザールを高潮が襲った後、最高潮位が順次北上することになった。被害者の多くは海岸低地あるいは島嶼に住んでいた住民であった。

チッタゴンはダッカの南約350 kmに位置し、すでに中世に交易都市として栄えていた²¹⁾。現在人口は200万人以上であって、ダッカに次ぐ第2の都市である。ここはバングラデシュで唯一の外貿易港を有しており、また国際空港もあり、安い労働力を目当てにして、わが国や欧米の近代工場の進出が最近加速されており、したがって人口増加率も高いと言われている。Fig. 23に示したように、本市の西部はベンガル湾に面し、東部はS字型に屈曲するカルナフリ川に挟まれた半島状の低地に位置し、北部は丘陵地となっている。

高潮氾濫においては、チッタゴン市中央部のみが都市災害の様相を示し、その他の地域では従来の田園災害であった。被災過程を正確にトレースするのは困難であるが、聞き取り調査などから時系列としての

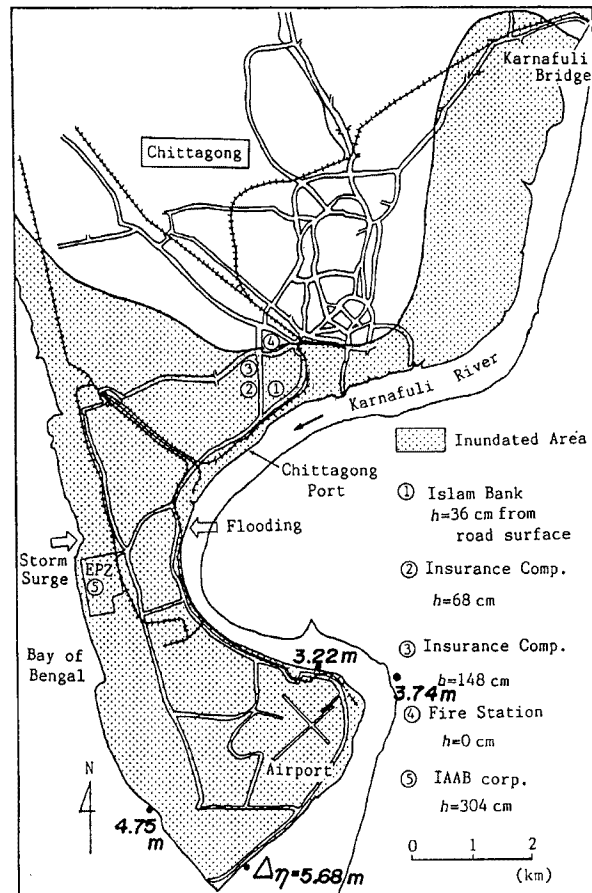


Fig. 23. Flooded area, inundation depth, and maximum anomaly of the storm surges at Chittagong.

災害の伝播状況を、つぎのように把握することができた。

サイクロンがチッタゴン市に接近したのは29日から翌30日にかけての真夜中のことであった。運悪く、高潮と朔望満潮位とが重なり、未曾有の潮位となったわけである。ちなみにこの付近での潮位は約4 mであり、もし干潮時であれば死者数も2オーダー以上小さかったと推察される。都市中心部では浸水はヒタヒタと音もなく始まり、水深だけが少しずつ増したとされている。チッタゴン市周辺のみ海岸堤防が建設されていたが、このような被災過程から、東部の土を積み重ねただけの堤防は高潮襲来の早い時期から寸断されていたと考えてよい。雨についてはチッタゴン市内の聞き取り調査だけでも、降り方が場所的に相違し、共通しているのは長時間降らなかったということである。今回の高潮で牛を中心とした家畜が千万頭以上死亡し、災害後の農作業の継続に多大の支障をもたらしていると報告されているが、これは深い氾濫水深による溺死が原因していると考えられる。

5.2 高潮の挙動と海岸堤防の被害

チッタゴン市内での現地踏査とチッタゴン西方、約15 kmに位置するサンドウィップ島での高潮氾濫の痕跡写真から、高潮は西方から来襲し、最高潮位に達した後、今度は西に向かって引いていったことがわかった。Photo 6はカルナフリ川に沿ったレンガ塀の倒壊状態であって、引き潮時に倒れたことが確認されている。Photo 7はカルナフリ川河口右岸のレンガ張り堤防の被害状況である。この堤防はECAFE



Photo 6. Brick wall toppled by flooding water.



Photo 7. Damaged levee that had been armored with asphalt and bricks along the right side of the mouth of the Karnafuli River.

の援助によって1970年代に完成したものであって、今回の高潮が堤防を越流し、表層のレンガがはがれて堤防に沿って堤内側に平行に堆積しているのが認められた。チッタゴン市の港湾局の調査では、潮位は平均海面上7.875 m（最大偏差 5.68 m）に達し、河川堤防の天端高はふめいであるが、相当の越流水深になったことは間違いない。しかも、この付近では堤防は破壊していないので、越波による破壊より、高潮の越流による破損が卓越したと推察される。

Fig. 24 には今回の現地調査で得た地上からの浸水深と高潮の最大偏差を示した。市内では浸水深は50～60 cm程度であって、床上浸水ながらも、それ程の被害は発生していない。むしろ南部一帯の被害が大きく、EPZ（Export Processing Zone）で調査したところ、日本企業の工場で3 m以上浸水した所がある。この地区は埋立造成で陸地化したところで、海側にある土堤防は至るところで歯抜け状に完全に破堤している。これらの水域には沿岸に沿ってマングローブが繁茂しており、その切れ目背後の堤防が破堤している例が多く

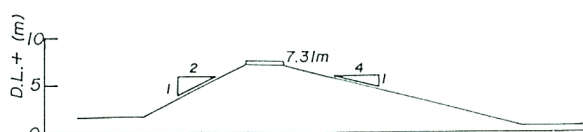


Fig. 24. Cross section of the design of a coastal dike.



(a)



(b)

Photo 8. Broken concrete blocks from a sea dike
near the south end of Chittagong.

(a) concrete blocks

(b) scattered blocks and clay core

見受けられた。ただし、土を締め固めただけの堤防は、本来強度的に不足していることはもちろんであるが、天端の絶対高さが不足していることは明らかであり、今回の高潮来襲前に計画されていた **Fig. 24** に示す堤防断面でも高さが不足していることがわかる。EPZ よりさらに南部の地域では農村地帯となるが、**Fig. 8** に示すように $60 \times 60 \times 30$ cm のブロック張り堤防が 18 km にわたって完全に破堤している。この地域はインド洋に面しており、高潮による水深増加によって比較的波高の大きな波が襲来し、堤体に直接作用したものと判断される。

Fig. 25 はサンドウィッチ島とクトゥブディア島の堤防の破損状況であり、斜影の部分が残存した堤防である。推定 2 m 程度の高さの堤防のうち、とくに西側のものがほぼ全壊していることがわかる。これらの島では全域にわたって水没し、しかもその水深が数 m あったといわれている。

5.3 人的被害

今回のサイクロンによる死者は 131,539 人、負傷 460,123 人と報告されている²²⁾。死者のうち埋葬されたのが 75,523 体とあるから、6 万体制以上が行方不明という計算になる。冒頭でも述べたように、住民登録がないので一家全滅した場合には計上のしようがないということから、実際にはさらに多い可能性が高い。著者は²³⁾ 人的被害の程度は、死者の絶対数と、地域住民のどれくらいの割合が死亡したか、すなわち

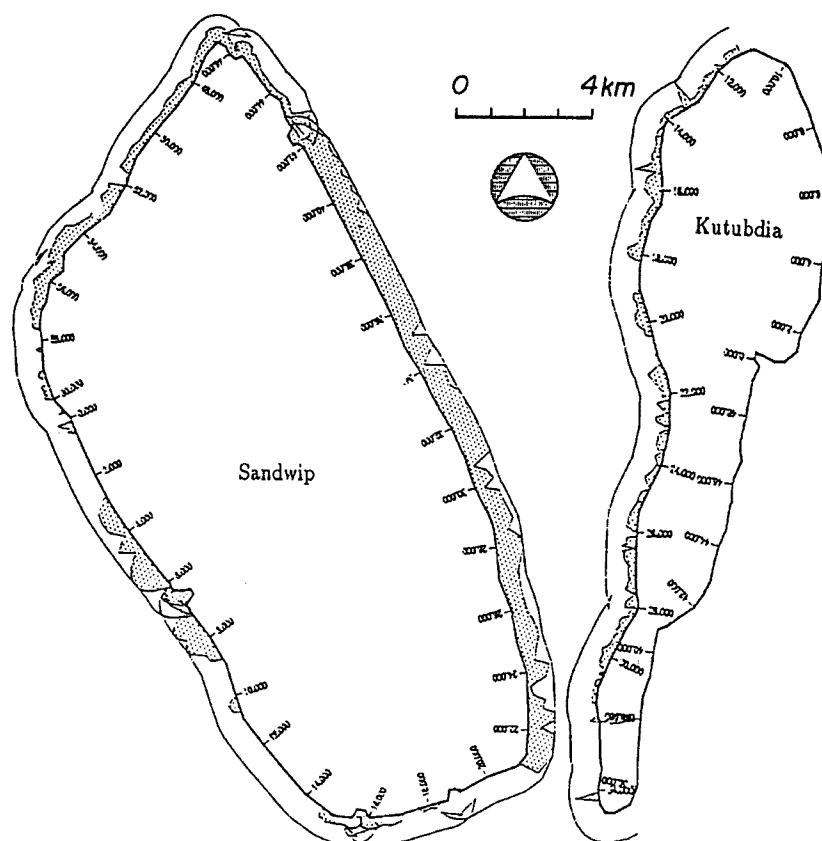


Fig. 25. Damaged coastal dikes around Sandwip and Kutubdia islands.

Table 9. Damaged areas, population, number of deaths, and risk to life.

Area	Population	Density of Population	Number of Deaths	Risk to Life
Sandwip	318,158	418/km ²	23,090	0.0726
Chittagong	2,029,557	8,421	1,651	0.00813
Patia	430,149	1,277	894	0.00208
Anwara	218,222	1,455	9,970	0.0456
Banskhali	327,648	903	42,117	0.129
Kutubdia	101,118	954	19,133	0.189
Chakaria	392,427	651	17,442	0.0440
Maheshkhali	191,357	491	12,137	0.0624
Cox's Bazar	230,257	1,107	1,260	0.00547
Hatia	300,819	295	2,956	0.00983

死亡リスクによって表されるべきであると指摘してきた。

Fig. 26 および Table 9 は死者数の10地区の人口、人口密度、死者数及び死亡リスクをまとめたものであり、これらの地区で死者総数の実に94%を占めている。なかでも、クトゥブディア島では住民5.3人に1人、サンドウィップ島では同13.8人に1人というように、沿岸に近接した島嶼での被害が大きい。これらの島と同程度の広さをもつわが国の地域のうち、近代に入ってからの高潮による最大の死亡リスクは1925年の室戸台風による堺市で記録され、0.01すなわち住民100人に1人の割合で死亡している²⁴⁾。それに比べても非常に多い。室戸台風当時の気象情報の精度、伝達方法あるいは高潮防御施設そのものを取ってみても、江戸時代から延長上にあつて、都市の高潮氾濫災害に対して実質的にはほぼ無策に近かったと言ってもよい。そうするとわが国との差は、もちろん高潮の潮位の差も少し影響しているが、地盤高さや後述するように家屋の構造などに依存していると言わざるを得ない。チッタゴン市を除けば、これらの地区の平均値から、住民18人に1人の死亡というのはこれまでの高潮災害で記録された1287年のオランダの26人に1人の死亡割合を2倍以上、上回っている。当時のオランダの自然条件と現在のバングラデシュのそれに共通するのは海岸超低平地の存在であつて、これらのことから高潮に対していかに地盤高が被害の大きさを決定する重要な要素になっているかが理解できる。

Fig. 27 は C.D.L (Chittagong datum level) を基準とする最高潮位(計算値)と死亡リスクとの関係を表したものである。これから、つぎのことが指摘できる。

1) クトゥブディアとマエスカリは死亡リスクが極端に大きくなっている。両島では、前回の大潮災害が1897年であつたため、1970年の高潮災害を契機とするサイクロンシェルターの重点建設地域とはなっていない。また、クトゥブディアでは島の東側に海岸堤防がないことなどに見られるように、防災・減災対策が遅れていたことが理由として挙げられる。

2) コックスバザールやサンドウィップ島ほか2つの地域は第2グループを形成している。これらの地域ではサイクロンシェルターは十分な数ではな

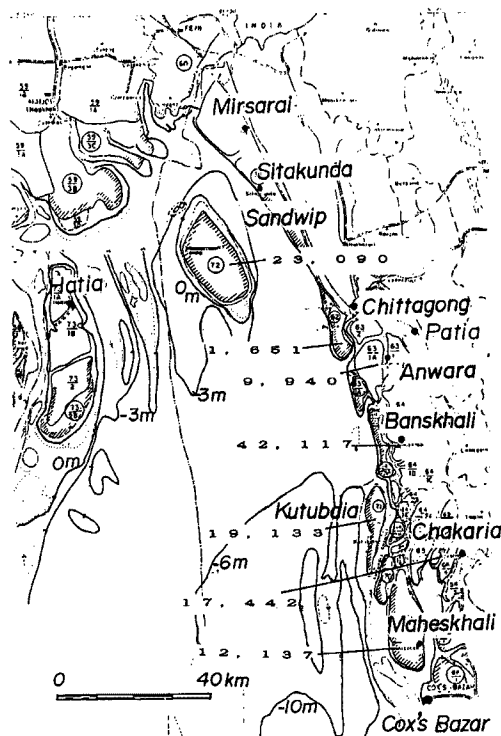


Fig. 26. Sites of damaged areas, loss of life, and sounding chart.

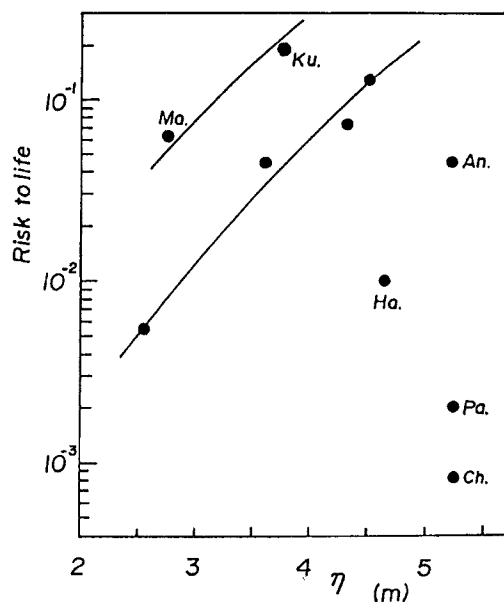


Fig. 27. Relation between the highest tide level and risk to life (Ma.: Maheskali, Ku.: Kutubdia, Ha.: Hatia, An.: Anwara, Pa.: Patia and Ch.: Chittagoog).

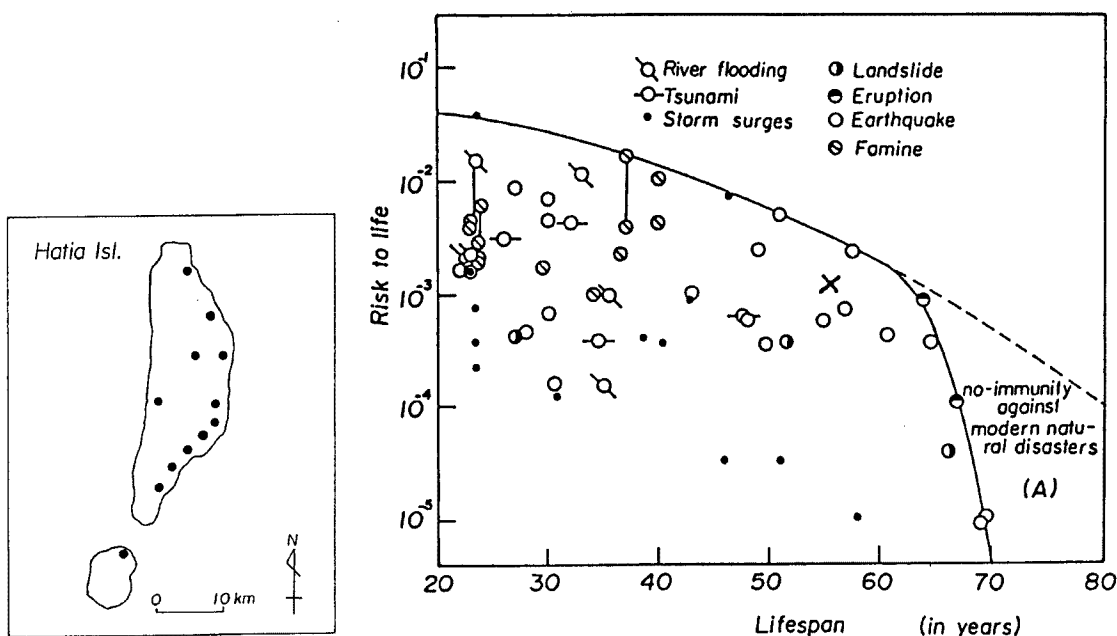


Fig. 28. Locations of cyclone shelters on Hatia Island.

Fig. 29. Relation between lifespan and risk to life in catastrophic natural disasters world-wide since the 12th century²³⁾.

かったけれど、過去の高潮災害に基づく避難訓練や災害についての学習が行われていたと報告されており、この効果が出ていると考えられる。

3) ハチャでは Fig. 28 に示すように 12 基のサイクロンシェルターが完成しており、また CPP (Cyclone Preparedness Programme) による、人命の犠牲を少なくするプログラムが実施されており、それらによって島でありながら死亡リスクは小さくなっている。

4) アンワラ、パチャおよびチッタゴンでは最高潮位がほぼ同じであるにもかかわらず、死亡リスクに大きな差が現れている。この原因は海岸線の長さとその違いによる沿岸低地での住民の居住数の割合が異なっていることによると推察される。

ここで、国単位の今回のサイクロン災害（高潮災害と言ってよい）の危険度がどの程度であったかを検討してみよう。Fig. 30 は 12 世紀以降の世界の大災害における死亡リスクと平均寿命の関係を示したものである²³⁾。これから、社会の防災力は平均寿命の関数で表され、しかも死亡リスクに上限値が存在することがわかっている。そこで、今回のバングラデシュの災害の場合、国単位の死亡リスクは人口が 1 億 1030 万人であるから、 1.19×10^{-3} となり、最新のデータである 1988 年の平均寿命が 56 才となっているので、図中の×印の位置にプロットされる。これから、今回のサイクロン災害の被災規模は同国で発生する最大のものに近いと考えてよいことがわかる。

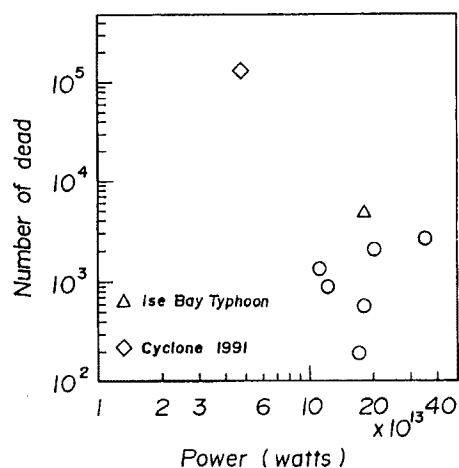


Fig. 30. Relation between the power of large scale typhoons that have struck Japan and that of the 1991 cyclone, and the numbers of dead.

5. 4 物的被害

1) 家屋被害

Fig. 30 はサイクロンのエネルギーと家屋全壊率の関係を調べたもので、図中の白抜き記号はわが国の伊勢湾台風高潮やそのほかの高潮によるものである。これから、サイクロンのエネルギーがそれほど大きくないにも関わらず、全壊率はわが国のその 2 オーダ程度高い。これは今回被害の大きかった沿岸域の最貧層の家屋が竹や木を組み合わせただけの簡単で、耐久性に欠ける構造であったことに依存している。また、Fig. 31 は家屋の全壊率と死亡リスクの関係を表し、図中の記号は Fig. 31 と共通である。これから、わが国の高潮災害と今回のサイクロン災害の場合に、家屋の全壊率と死亡リスクとの関係が同一の関係で表されることがわかる。このことは、従来型の高潮災害の場合、氾濫に伴う死者は、住居の全壊や流失と密接に関係していることを表している。要するに、在宅中に被災した住民が多いわけである。

2) 学校施設被害

後述する理由から、発展途上国では学校施設は防災・減災についての長期戦略を進める上で極めて重要である。そこで、チッタゴン地域における学校種類毎の施設の被害数とその役割を求めたものが Table 10 である。現況は同国の統計書²⁵⁾に基づいた値である。ここに、Colleges とは修業年限 2-3 年の短期大学、Madrasas とはイスラム教の神学校のことである。Madrasas は異常に多く被災しており、そのほかの学校は、およそ 30% が被災していることがわかる。現在、沿岸各地でサイクロンシェルターが建設されつつあるが、その地区の唯一あるいはそれに近い数の鉄筋コンクリート構造の施設がサイクロンの時の避難施設としてしか利用されていない現況は、ある意味では大変贅沢であると言わざるを得ない。つまり、日常的には教育あるいは行政施設として使用し、サイクロン来襲時には避難場所となるような多目的な利用が可能な形態へと替えていくべきと考えられる。現に一部ではこのような取り組みが実施されている。

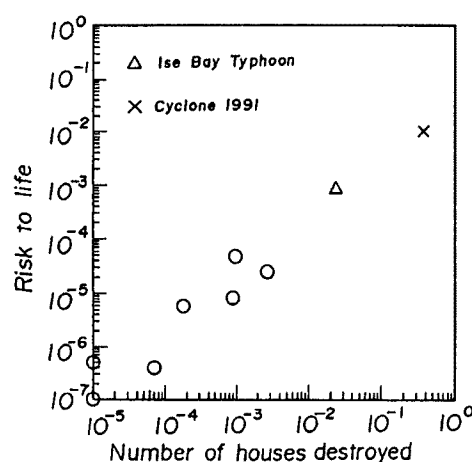


Fig. 31. Relation between risk to life and the number of houses completely destroyed by the 1991 cyclone and by typhoons due to accompanying storm surges.

Table 10. Damage to educational facilities.

	Primary	Secondary	Colleges	Madrasas	Total
(A) Number of Educational Institutes	12,083	2,151	193	1,106	15,533
(B) Damaged	3,532	652	82	912	5,178
(B/A) (%)	29.2	30.3	42.5	82.5	33.3

6. 減災方法の提案

まず、減災対策を進める上で参考とすべきはオランダのデルタ計画であって、この完了までに 100 年かかっているという事実である。先進国でしかもカスト制のような身分制度（バングラデシュでは、一応法律で禁止されている）のない国ですら、海岸低平地を高潮から守るのにこのような期間が必要となったわけである。バングラデシュの最近の統計では、人口増加率は 2.32%, GNP の伸びは 1.99% である。この

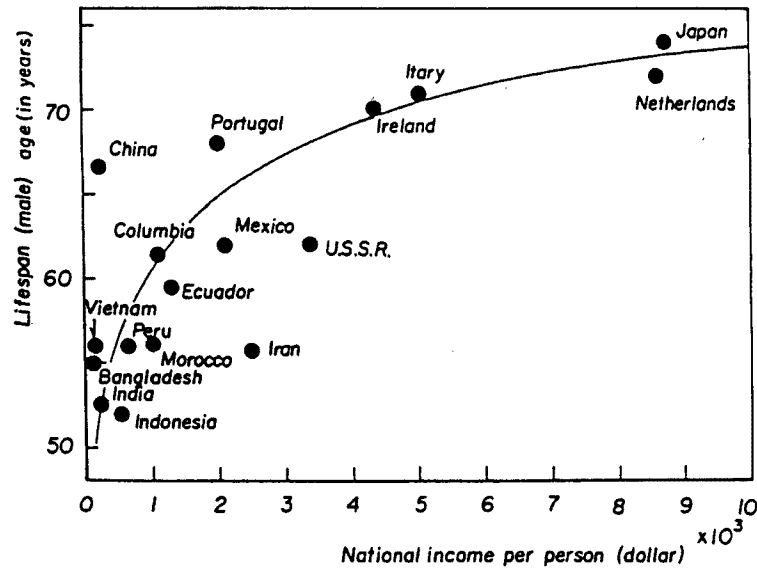


Fig. 32. Relationship between national income per person and lifespan²³⁾.

事実は年とともに1人当りのGNPが少なくなっている、すなわち、ますます貧乏になっているわけである。

いま、減災の最大の目的が、人命の損失を減らすことにあると仮定してみよう。

そうすると、Fig. 29に示したように、死亡リスクを小さくするためには、平均寿命、すなわち社会の富と情報を増やせばよいわけである。しかも、平均寿命と一人当りの国民所得（あるいはGNPでもよい）にはFig. 32²⁶⁾の関係が見いだされる。これらの事実から、まず人口の増加率を経済成長率以下に小さくする必要がある。

この点に関しては、女性の初婚年齢を引き上げて（現在18.2才）生涯出生数（たとえば40才代の婦人で平均出生6.76人）を減らすことが重要と考えられる。現実には、前述のEPZで働く女性達の平均初婚年齢は徐々に上昇する傾向があるということである。これは、広義には教育の効果と考えられる。貧しさから抜け出すための雇用の増大は、人口増加率の減少に寄与することがわかってきている。これと同時に初等・中等教育を徹底するための教員の給与等の援助と教育施設の充実もかなり減災に貢献するものと考えられる。これらの事業は、現在同国で進められているインフラストラクチャー整備に関する援助事業と同等に重要であり、長い目でみれば、減災への道につながると思われる。

7. 結 語

現地調査ではできるだけ資料を収集し、持ち帰って解析することになっていたが、気象資料の入手に手間取り、外力となった高潮計算が進みはじめたのはその年の12月に入ってからであった。そのため、構成メンバー間の十分な討議ができなかったきらいがあるものの、ファックス等を駆使してその点をカバーした積もりである。本調査では、バングラデシュの高潮災害の実態がかなり明らかになったと言えるが、今後、全体的な精度を上げるためにどのようなデータを取得しなければならないかなど、バングラデシュの研究者との共同研究に待つ部分が大い。幸い平成4年度から3年計画で、文部省科学研究費国際学術研究において「バングラデシュの洪水・高潮災害とその被害軽減に関する研究」が防災研究所を中心とした

メンバーによって進められることになっており、その点に関する成果が期待されている。なお、本論文のさらに詳しい報告書として「STORM SURGE AND SEVERE WIND DISASTERS CAUSED BY THE 1991 CYCLONE IN BANGLADESH」を出版していることを付記する。

最後に、今回の調査に際しては多くの人々にお世話になった。まず、突発災害の予算交渉にご支援いただいた東京大学地震研究所伯野元彦教授、現地でお世話になったパシフィック・コンサルタンツ・インターナショナル (PCI) の内田泰夫氏、日本大使館の馬場仁志一等書記官、三井建設の本庄英夫氏、チャタゴンの港湾局の S. M. Shaidullah 夫人、日本国名誉領事の M. N. Islam 氏に心からお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) M. Aminul Islam: A Plea for Danger Reduction Programme, The Dairy Star May 28, 1991.
- 2) Kazuaki Kamei: Storm Surges in Bangladesh, —Numerical Simulation of Storm Surges Due to 1991 Cyclone—, Graduation Thesis, Dep. Civil Engg., Kyoto University, 1992.
- 3) Chowdhury, A. M. (1991): Cyclones in Bangladesh, p. 24.
- 4) Bangladesh Meteorological Department (1991): Major cyclonic storms with maximum wind speed and tidal surges in Bangladesh, p. 2.
- 5) 馬場仁志: バングラデシュ・サイクロン災害報告, 河川, Nos. 539, 540, 1991, pp. 124-133, 91-105.
- 6) A. M. Chowdhury: Cyclones in Bangladesh, Bangladesh Quarterly, 1991, pp. 7-12.
- 7) SPARRSO: Supercyclone 1991, SPARRSO Newsletter, Vol. 6, Issue 3, 1991.
- 8) 藤井 健: 台風域内の気圧場の客観解析法, 京都産業大学論集, 自然科学系列, 第4巻第1号, 1974, pp. 77-90.
- 9) Schloemer, R. W.: Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida, Hydrometeorological Report, 31, 1954, pp. 1-49.
- 10) Mitsuta, Y., T. Fujii and K. Kawahira: Analysis of typhoon pressure patterns over Japanese Islands. Natural Disaster Science, 1979, pp. 3-19.
- 11) 藤井 健・劉 迎: 台風 9019 号の地表風と地形との間の統計的關係について, 京都産業大学論集, 自然科学系列, 第22巻, 第1号, 1992, pp. 124-148.
- 12) 山下隆男・山中久生・土屋義人: エスチャリーにおける長周期波の数値計算 —田辺湾の潮流・吹送流シミュレーション—, 京大防災研究所年報, 第34号B-2, 1991, pp. 449-469.
- 13) Holly, F. M., and Preissmann, A.: Accurate Calculation of Transport in Two Dimensions, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 103, No. HY 11, 1977, pp. 1259-1277.
- 14) Rosenthal, S. L.: Theoretical Analysis of the Field Motion in the Hurricane Boundary Layer, National Hurricane Research Project Report, No. 56, 1962.
- 15) 藤井 健・光田 寧: 台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京大防災研究所年報, 第29号B-1, 1986, pp. 229-239.
- 16) 光田 寧・末延龍雄 (1980): 台風の中心付近の構造について, 京大防災研究所年報, 第23号B-1, 1980, pp. 281-287.
- 17) Yoshizumi, S.: On the Asymmetry of Wind Distribution in the Lower Layer in

- Typhoon, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 46, No. 3, 1968, pp. 405 - 415.
- 18) Schwiderski, E. W.: Global Ocean Tides, PART II The Semidiurnal Principal Lunar Tide (M_2), Atlas of Tidal Charts and Maps, 1979.
 - 19) Schwiderski, E. W.: Global Ocean Tides, PART IV The Diurnal Luni-Solar Declination Tide (K_1), Atlas of Tidal Charts and Maps, 1981.
 - 20) Tsuchiya, Y. and T. Yamashita: Dynamical Features of Storm Surges in Continental Shelf; Numerical Experiment, Proc. PACON 92, 1992 (to be submitted).
 - 21) Qunungo, S. B.: A history of Chittagong, Vol. 1, Billan Printers, 1988, pp. 670.
 - 22) Zonal Relief Coordinator: Operation Sheba, 1991, pp. 133.
 - 23) Kawata, Y.: Estimation of loss of life in the catastrophic disasters, Proc. of Intern. Symp. on Natural Disaster Reduction and Civil Engineering, JSCE, Osaka, 1991, pp. 39 - 48.
 - 24) Tsuchiya, Y. and Y. Kawata: Risk to life, warning systems and protective construction against past storm surges in Osaka bay, Jour. of Natural Disaster Science, Vol. 3, No. 1, 1981, pp. 33 - 55.
 - 25) Bangladesh Bureau of Statistics: Statistical Yearbook of Bangladesh, 1990, p. 707.

STORM SURGE AND SEVERE WIND DISASTERS CAUSED BY THE 1991 CYCLONE IN BANGLADESH

By *Junji* KATSURA and his research group

Abstract

At the midnight on 29 April 1991, a cyclone accompanied with storm surges hit the southeast area of Bangladesh. Unfortunately, the the maximum anomaly of the storm surges simultaneously occurred at the spring high tide. The highest tidal level observed in Chittagong was 7.875 m above MSL, therefore every coastal dike was overflowed by the storm surges and flooding occurred at the coastal lowland and islands. The number of the dead was more than 130,000, which was the fifth worst storm surge disasters in the world since the 13th century. After the 1970 storm surge disasters which generated severe damages in the central of Bangladesh, construction of cyclone shelter and Cyclone Preparedness Programme (CPP) have been promoted to reduce the disaster victims. Nevertheless, these projects are not enough to be effective at the southeast area. Through the field survey, the characteristics of the storm surges in Bengal bay and spatial distribution of human and property damages and preparedness of countermeasures are analyzed.