

ベンガル湾奥における高潮遡上計算

磯 部 雅 彦*・藤 城 透**

1. はじめに

ベンガル湾奥ではベンガル湾南部およびアグマン海で発生するサイクロンにより、大きな高潮災害を受けることも希ではない。実際に1991年4月のサイクロンによる高潮の場合には、バングラデシュで死者138,000人という甚大な被害を受けた。中でもバングラデシュの中央部に位置するChittagong地区では高潮と河川からの越流により広範囲にわたる浸水が起こり、多くの人命を失ったばかりでなく、社会・経済的な被害も非常に大きなものであった。このような高潮の挙動を予測し、効率的な対策を講ずるためには、海域における伝播から陸上への遡上を含む高潮の数値計算が有効である。しかし開発途上国などにおいては、地形、潮汐、気象などで数値計算に必要なデータが十分に整っていない場合が多い。

そこで本研究ではまず、高潮や津波の遡上計算で問題となる波先端の計算手法を提案し、その計算手法の妥当性の検討を行う。また地形・気象・海象に関して利用可能なデータを捜し、そこから数値計算に十分となるだけのデータに再構成する方法について考察する。さらにそれらを統合して、2次元数値モデルを用いた1991年4月のサイクロンによる、ベンガル湾における高潮およびChittagong地区周辺における高潮遡上の再現を試みる。

2. 高潮遡上計算の手法

(1) 基礎方程式

平面2次元の流体運動を表す基礎方程式は、浅水長波方程式として以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{d} \right) = -gd \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{\tau_x^{(s)}}{\rho} - \frac{\tau_x^{(b)}}{\rho} + \nu_h \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_x}{\partial y^2} \right) + f q_y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{d} \right) = -gd \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

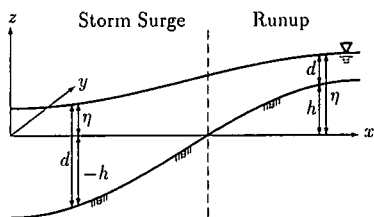


図-1 記号の定義

$$-\frac{d}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{\tau_y^{(s)}}{\rho} - \frac{\tau_y^{(b)}}{\rho} + \nu_h \left(\frac{\partial^2 q_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} \right) - f q_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで q_x, q_y はそれぞれ線流量の x, y 成分、 $d(=\eta-h)$ は全水深 (η は静水面からの水位上昇量、 h は静水深)、 p_a は大気圧、 ρ は海水の密度、 t は時間、 g は重力加速度、 $f(=2\omega \sin \phi)$ はコリオリ係数 (ω は地球自転の角速度、 ϕ は対象地域の緯度)、 $\tau_x^{(s)}, \tau_y^{(s)}$ はそれぞれ x, y 方向の海面摩擦力、 $\tau_x^{(b)}, \tau_y^{(b)}$ はそれぞれ x, y 方向の海底摩擦力、 ν_h は水平混合係数である (図-1 参照)。

(2) 越流計算

河川からの越流計算には、本間の越流公式を用いる。本間の越流公式は、河道の水位 (外水位) を H_r 、同じ地点の堤内地の水位 (内水位) を H_f 、さらに堤防高を H_0 とした場合、単位幅あたりの越流流量 q_0 は $H_r > H_f$ のとき、 $h_1 = H_r - H_0, h_2 = H_f - H_0$ として、

$$q_0 = \begin{cases} \mu h_1 \sqrt{2gh_1} & (h_2/h_1 \leq 2/3) \\ \mu' h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & (h_2/h_1 > 2/3) \end{cases} \quad (4)$$

と表される。ここで μ および μ' は完全越流および潜り越流時の流量係数で、それぞれ 0.35, 0.91 とされている。また $H_r < H_f$ のときには堤内地から河道への逆越流が生じるため、 $h_1 = H_f - H_0, h_2 = H_r - H_0$ として、式 (4) より越流流量を計算する。

ただしここで計算される越流流量は単位幅あたりの値であり、計算領域を正方形格子で表現した場合には、堤防長が実際よりも長くなり越流流量を過大評価してしま

* フェロー 工 博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

** 正 会 員 修 (工) 東京電力 (株)

うため、ここでは各格子ごとに堤防長を補正し、越流流量を求めている。

(3) 差分化

上述の式(1)~(3)をスタガードメッシュを用いた Leap-Frog 法で差分化する。また非線形移流項については1次の風上差分を用いる。

(4) 先端条件

Euler 座標を用いた高潮や津波の数値計算では、従来より先端条件に関する様々な議論がなされている。たとえば、岩崎・真野(1979)による境界条件があるが、この手法の場合、周期が10分以内の波の遡上高や、引き波時の空間波形には Shuto (1972) による線形理論解との差異が認められる。また厳密には連続式を満たしていない。そこで本研究では以下に示す手法により波先端の計算を行うことにする。

遡上時 図-2のように地形を階差的に表現し、格子境界における全水深 d を線形外挿により求める。いま $d \leq 0$ の場合は流量を0とし、 $d > 0$ の場合は式(1)、(2)により q_x, q_y を計算する。

引き波時 例えば図-3のような格子において、 $t = n\Delta t$ で水深が負となった場合、 $t = (n-1)\Delta t$ に格子内に存在した水量 V^{n-1} および流入量 q_{in} より、全流出水量 V_{out} を求める。この V_{out} を q_{out1}, q_{out2} の比に応じて配分し、流出量を修正する。すでに $t = n\Delta t$ における水位を計算している格子の流量を修正した場合には、その格子の水位を再び計算する。

3. 1次元計算による精度の検討

本研究で提案した波先端条件の精度を検討するため、Carrier・Greenspan (1957) による一様勾配斜面上にお

ける非線形長波の理論解と計算結果との比較を行った。計算条件として、斜面勾配 1/100、格子間隔を 50 m とし、波高 0.5 m、周期 8、16 分の 2 種類の正弦波を非線形性が無視できるほど十分沖側より入射させた。

表-1 に最大遡上高に関する計算値 R_{cal} と理論値 R の比を示す。計算値は最大遡上高として周期的に安定となった値を採用している。また図-4 には周期 8 分および 16 分のそれぞれの場合について、最大遡上時と最大引き波時の空間波形を示す。

これらを見ると、周期 16 分の場合には最大遡上高および空間波形とも理論解と非常によく一致しており、周期 8 分の場合には空間波形に若干の差異があるものの、最大遡上高についてはかなり理論解に近い結果が得られていることがわかる。以上により、本計算法はほぼ妥当な結果を示しているものと考えられる。

4. サイクロンパラメタの推定

高潮の数値計算を行う場合には、熱帯低気圧内の気圧分布および風速分布を正確に表現することが重要となる。しかし 1991 年 4 月のサイクロンの場合には、図-5 に示すように JTWC、赤新月社、SPARRSO によって発表されている 3 種類の経路図が存在し、ともにコースが異なる。図-5 には山下ら (1992) により推定されたサイクロンの中心位置も示しているが、本研究でも実際の観

表-1 1次元計算による計算結果

T_p [min]	R_{cal}/R	
	本計算手法	岩崎らの手法
8	0.97	0.86
16	1.00	0.99

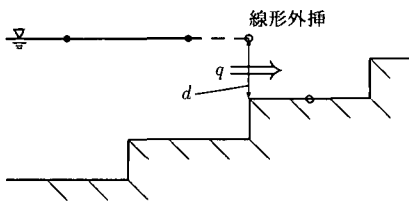


図-2 波先端の計算手法 (遡上時)

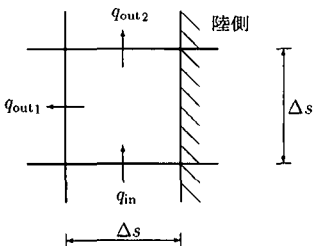


図-3 波先端の計算手法 (引き波時)

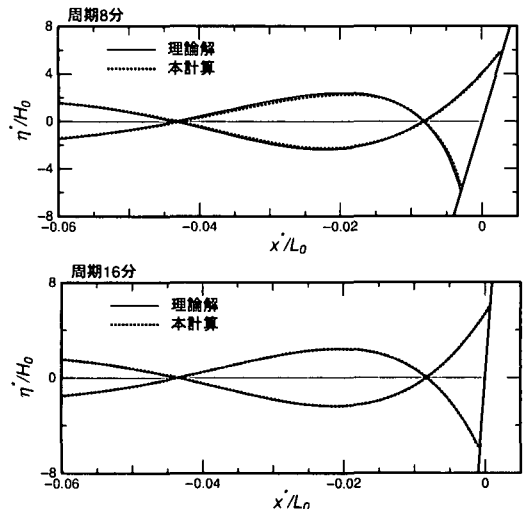


図-4 空間波形

測データを用いて以下のようにサイクロンパラメタを推定した。

パラメタの推定には、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が、観測データの中でSitakundaにおける4月29日21時[GMT]の海面気圧は943.9 hPaとあまりにも低すぎて信頼性に欠けるため、パラメタを推定する際に除外した。

(1) 台風モデル

台風モデルの気圧分布式としては、藤田の式とMyersの式が多く用いられている。藤田の式の場合には遠方の風速を過大評価する傾向があり、気圧分布についても藤田の式よりもMyersの式の方が実際の気圧場に比較的良く合致するという報告がなされている。そこで、本研究においてはMyersの式を用いることとした。

(2) パラメタの推定手法

パラメタの推定は、次の手順により3時間間隔で実行し、Myersの式で表される気圧分布が、実際の観測データに最もよく合致するように、サイクロンの中心位置、中心気圧 p_0 、および最大風速半径 r_{max} を決定した。ただし発達した低気圧の気圧分布がほぼ同心円状に維持されるのが半径200 km程度であるので、それよりも小さい半径150 km以内の距離にある観測所での気圧データのみを考慮した。

まず、JTWCによって決定されているサイクロンの中心位置よりも西へ40 km、南へ40 km移動させた地点をサイクロンの中心の初期値とし、サイクロンの最大風速半径 r_{max} の初期値を40 kmとする。また $p_0=1010$ hPaと仮定し、サイクロン中心から150 km以内の距離にある観測所における気圧 $p_{cal}[hPa]$ を計算し、気圧の観測値 $p_{obs}[hPa]$ との平均二乗誤差

表-2 サイクロンパラメタの推定結果

日	時刻 [GMT]	緯度 [°N]	経度 [°E]	中心気圧 [hPa]	r_{max} [km]	σ_r	データ数
29	15	21.10	90.81	930.0	44.5	0.34	4
	18	22.00	91.35	951.9	65.0	0.58	10
	21	22.35	91.82	958.3	79.0	0.40	7
30	0	23.23	92.14	960.0	44.5	0.76	6

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum w_r (p_{cal} - p_{obs})^2}{\sum w_r}} \dots\dots\dots (5)$$

を求める。ここで重み w_r はサイクロン中心に近い地点の観測値に、より気圧分布を一致させるようにするため、以下のように設定した。

$$w_r = \begin{cases} 100/r & (r \leq 100 \text{ km}) \\ 1 & (r > 100 \text{ km}) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

また気圧の観測値についての信頼性も考慮し、 p_{cal} と p_{obs} の差が最大となるものは除外することにする。次に p_0 を0.1 hPa間隔で、 r_{max} を0.5 km間隔で変化させ、さらにサイクロンの中心位置も東あるいは北に1 kmずつ移動させてこの計算を繰り返し、平均二乗誤差 σ_r が最小となる値の組み合わせとして、その時刻におけるサイクロンの中心位置、 p_0 および r_{max} を決定する。

(3) パラメタの推定結果

パラメタの推定は、サイクロン中心から150 km以内に3つ以上の観測所が含まれる1991年4月29日15時[GMT]から4月30日0時[GMT]まで行った。表-2に σ_r が最小となるサイクロンのパラメタを示す。この表を見ると、4月29日18、21時[GMT]においては妥当な値が得られているものの、それ以外の時刻においては、観測地点が少ないこともあり、とくに r_{max} の値が非常に小さくなってしまっている。以上の結果より、本研究では4月29日18、21時[GMT]のサイクロンパラメタについては推定された値を用いることとし、それ以外の時刻におけるサイクロンの中心位置、中心気圧についてはJTWCおよびインド気象局によって発表されたものを使用することにした。また r_{max} に関しては29日15時までは60 km、30日0時以降は80 kmと推定し、風速を算定する際の比例定数 C_1 、 C_2 については、通常用いられる値として0.6を採用した。また傾度風については、等圧線に対して30°内側に吹き込むと仮定した。

5. ベンガル湾奥における高潮遡上計算

(1) 地形データの作成

遡上計算領域における境界条件を適切に与えるためには、高潮計算領域における開境界をなるべく遠くに設定し、高潮の風による発達を適切に見積ることが望ましい。そこで今回は、海岸線などの地理的条件、サイクロンの

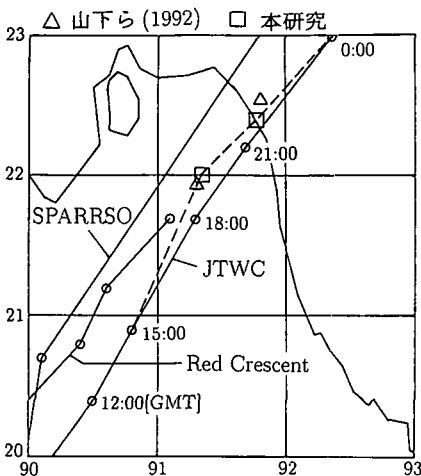


図-5 サイクロンの経路図

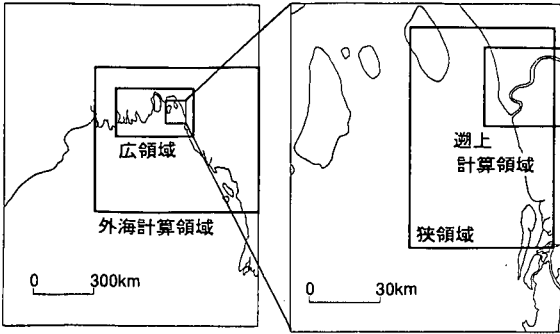


図-6 計算領域

移動経路などを考慮し、さらに数ケースのテストランにより、図-6のように計算領域を設定した。

また各計算領域における水深データについては、デジタイザを用いて海図に記載されている水深を入力し、それを内挿して作成した。遡上計算領域の標高データについては、National Geophysical Data Center による、1 km 格子のデジタル標高データ GLOBE (Global Land One-km Base Elevation) Ver 0.1 を用い、1 km の 1/3 である 333.3 m のデータを内挿により作成した。

(2) 潮汐計算

バングラデシュにおける検潮所はわずかに 3カ所と少なく、湾内の潮汐計算に使用することは不可能である。そこで本研究では山下ら (1992) にならい、開境界で Schwiderski (1979, 1981) による全球規模での潮汐計算結果 (1°メッシュの位相、振幅) を与え、計算領域において M_2 , K_1 , S_2 , O_1 の 4 分潮の数値計算を行った。Schwiderski の潮汐計算結果については、Molines ら (1994) により衛星データとの差異が指摘されているが、その絶対量は分からないため、今回は Schwiderski の計算結果をそのまま用いることとした。

海洋における Manning の粗度係数については、1991 年 4 月 29 日 19:17 の潮位表による Chittagong の満潮位 (2.1 m) とほぼ一致するように、0.015 (MKS 単位系) と推定した。

また、水平混合係数に関しては村上ら (1985) にならい、現象のスケールとして格子サイズ Δs を用いて、以下のように表している。

$$\nu_h = 0.025 \times (\Delta s \times 0.1)^{4/3} [\text{m}^2/\text{s}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

表-3 計算ケース

CASE No.	1	2	3
サイクロンパラメタ	A	B	B
Manning の粗度係数 (陸上)	0.060	0.060	0.080

A: 本研究の中で推測したパラメタを用いた場合

B: 山下ら (1992) により推測されたパラメタを用いた場合

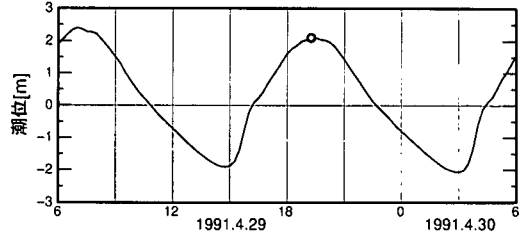


図-7 Chittagong における潮位変動

表-4 最大氾濫面積および最大氾濫水量

CASE No.	1	2	3
最大氾濫面積 [km ²]	30.3	78.4	71.3
最大氾濫水量 [$\times 10,000 \text{ m}^3$]	63	335	286

図-7 に Chittagong における天文潮の変化を示す。

(3) 計算条件

計算条件として、Chittagong 地区を流れる Karnafuli 川の流量を 2000 m³/s、河川部の粗度係数を 0.030 とし、当時の写真より河川の堤防高を 3 m とした。サイクロンパラメタおよび陸上における粗度係数については、表-3 に示すように設定した。

(4) 計算結果

図-8 に示している Chittagong における水位変動を見ると、最大水位は CASE 1 の場合に 5 m 程度であるのに対し、CASE 2 の場合には 6 m 近くにも達していることが分かる。またこの図より、Chittagong では水位が最大となる時刻が満潮時とほぼ重なっているため非常に高い水位を示していることが分かる。

最大氾濫面積および最大氾濫水量を表-4 に示す。この結果より、CASE 1 と CASE 2 の最高水位の差は 1 m 未満であるにも関わらず、最大氾濫面積は 2 倍以上に、さらに最大氾濫水量は 5 倍以上にもなることが分かる。また陸上における Manning の粗度係数を 0.060 とした CASE 2 と 0.080 とした CASE 3 の結果を比較すると、最大氾濫面積で 7 km² 以上、最大氾濫水量で約 500,000 m³ の違いが明らかとなり、陸上の粗度係数が結果に大きな影響を及ぼすことが分かる。

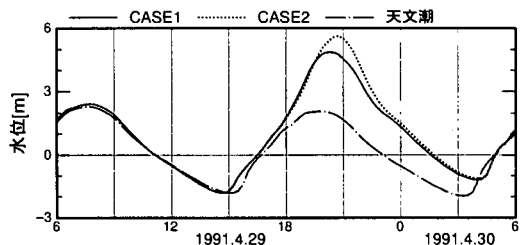


図-8 Chittagong における水位変動

表一5 最高水位の実測値と計算値の比較

測定地点	測定機関	実測値 [m]	計算値 [m]		
			CASE 1	CASE 2	CASE 3
A	JPN	6.8	5.00	5.68	5.68
B	CPA	7.9	4.93	5.65	5.66
C	JPN	7.8	—	—	—
D	CPA	5.3	4.63	5.27	5.27
E	JPN	5.8	4.66	5.34	5.34

また聞き込みによる浸水域と遡上計算領域におけるCASE2の場合の最大浸水深図をそれぞれ図一9、図一10に示す。これらの図より、標高データや堤防高の精度に問題があるためか、Karnafuli 川からの越流が過小評価されていることが分かる。しかしながら全体的には浸水域を再現できている。

また図一9中に示しているA～Eの地点においては、最高水位が測定されているため、その実測値と計算値との比較を表一5に示す。測定機関のJPN, CPAは測定を行った機関を表しており、それぞれ以下の通りである。

JPN: Ministry of Education, Science and Culture, Japan

CPA: Chittagong Port Authority

表一5の最高水位の測定値には、高潮による水位上昇だけでなく、波によるものも含まれている。それを考慮すると、CASE2の場合の最高水位はかなりよく実測値と一致しているといえる。なお表中の-は、浸水が起らなかったことを示している。

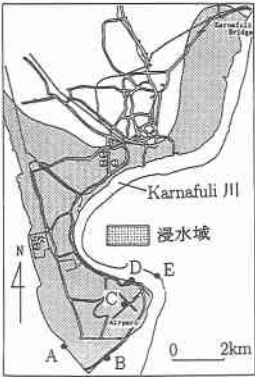
6. 結 語

本研究では、陸上への遡上計算で問題となる波先端の計算手法を新たに提案し、一様勾配斜面上における非線形長波の理論解との比較を行うことによりその妥当性が確認された。また1991年4月のサイクロンによる高潮計算より、天文潮の満潮時とサイクロンの襲来が重なったことがChittagong地区に大被害をもたらした原因の1つであると考えられる。さらに本研究で提案した計算手法により、Chittagong地区周辺における高潮遡上計算を行ったところ、地形データの精度の問題による誤差は見られたものの、全体的には浸水域を再現することができた。

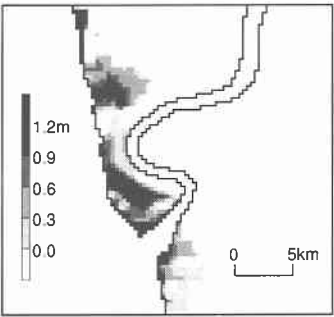
最後に、本論文で用いた潮汐データを提供して下さいました。京都大学防災研究所 山下隆男助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標における二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.



図一9 聞き込みによる浸水域と最高水位の測定地点



図一10 最大浸水深図 (CASE 2)

村上和夫・森川雅行・堀江 毅 (1985): ADI法による高潮の数値計算方法, 運輸省港湾技術研究所資料, No. 529, 35 p.
山下隆男・土屋義人・藤井 健 (1992): 1991年のサイクロンによるバングラデシュの高潮の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 236-240.
Carrier, G. F. and H. P. Greenspan (1957): Water waves of finite amplitude on a sloping beach, Jour. Fluid Mech. Vol. 4, pp. 97-109.
Katsura, J., T. Hayashi, H. Nishimura, M. Isobe, T. Yamashita, Y. Kawata, T. Yasuda and H. Nakagawa (1992): Storm surge and severe wind disasters caused by the 1991 cyclone in Bangladesh, Res. Rep. on Natural Disasters, Supported by the Japanese Ministry of Education, Science and Culture, 101 p.
Molines, J. M., C. Le Provost, F. Lyard, R. D. Ray, C. K. Shum and R. J. Eanes (1994): Tidal corrections in the TOPEX/POSEIDON geophysical data records, Jour. Geophys. Res., Vol. 99, No. C12, pp. 24,749-24,760.
Schiderski, E. W. (1979): Global ocean tides, PART II, The Semidiurnal Principal Lunar Tide (M_2), Atlas of Tidal Chart and Maps.
Schiderski, E. W. (1981): Global ocean tides, PART IV, The Diurnal Principal Luni-Solar Declination Tide (K_1), Atlas of Tidal Chart and Maps.
Shuto, N. (1972): Standing waves in front of a sloping dike, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 13-23.