

## 土佐湾高潮の数値計算

宮崎正衛, 岡田正実

### Numerical Simulation of Storm Surges in Tosa Bay

By

Masamori Miyazaki

*Meteorological Research Institute, Tokyo*

and

Masami Okada

*Marine Division, Japan Meteorological Agency, Tokyo*

(Received January 14, 1975)

#### Abstract

On 21 August, 1970, a severe typhoon (Typhoon 7010) struck the Shikoku area and induced heavy storm surges along the coast of Tosa Bay (Fig. 1). The highest sea level measured by the high water mark (not the smoothed tide) was 2.4m higher than normal at Katsurahama, situated at the entrance of the channel to Kochi harbour. This value of deviation is far larger than estimations by former experimental laws.

Numerical simulations are made for this case and the case of a larger typhoon (Ise Bay Typhoon), in which we assume smaller frictions for sea surface winds and that the sea surface elevation is twice the hydrostatic estimation at she outer edge of the continental shelf. The area of computation is shown in Fig. 2.

The computed peak surge at Katsurahama is 1.9m. The observed value 2.4m would include some effects of wind waves, and the computed value 1.9m seems to be a good estimation. Time variations of computed and observed surges are compared in Fig. 3, and an example of the horizontal storm-surge patterns is shown in Fig. 5, respectively. Storm surges in Tosa Bay for the case where an Ise Bay Typhoon model runs the same track are also computed, and results are shown in Fig. 4 and Fig. 6.

#### 1. はしがき

1970年8月21日、四国南岸に上陸した台風第10号は土佐湾一带に著しい高潮をもたらした。高知、桂浜検潮所で8時45分、東京湾中等潮位上313cmの最高値を記録している。これに対応する偏差値は235cmとなり、日本の外洋に面した海岸におこった高潮としては最大級のものと考えられる。もっとも、これ以後の記録は欠測となっており、したがって潮候曲線を平滑した潮位についての最高値が得られなかった。平滑曲線に対する最高値は前述の値よりいくらか低目となることも考えられる。

次にこの高潮の数値モデルによる追算、およびこれと同じ径路に伊勢湾台風モデルを走らせた場合の数値計算の結果について述べる。

ところで、このような外洋に面した、開いた湾の高潮の数値計算は従来の内湾の場合と同じような考え方ではうまくゆかないものと思われる。とくに、台風域内の風の分布のあたえ方と、陸だなの外縁における境界条件のとり方が問題となる。

## 2. 基礎方程式と境界条件

流速の水平成分を鉛直方向に海面から海底まで積分したものを体積輸送という。これをベクトル  $\mathbf{S}$  であらわし、また海面の上昇量を  $h$  であらわせば、基礎方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} + i f \mathbf{S} &= -g d \nabla (h - h_0) + \rho^{-1} (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_b) \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\text{div } \mathbf{S} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ここで、 $f$  はコリオリの係数、 $d$  は水深、 $h_0$  は気圧降下に応じた静力学的な海面上昇量、 $\mathbf{T}_s$ 、 $\mathbf{T}_b$  は海面、および海底における接線応力、 $\rho$  は海水密度をあらわす。また、 $i \equiv \sqrt{-1}$ 、 $\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y}$  である。

海岸における境界条件としては  $\mathbf{S}$  の法線成分を  $S_n$  であらわせば

$$S_n = 0 \quad (2.2)$$

となるが、水深が海岸で零ならば  $\mathbf{S}$  の接線成分も零となる筈である。

また、計算区域の他端を陸だなの外縁（水深 200 m 以上）にとれば、そこでもう一つの境界条件が必要となる。もし、陸だな斜面以遠で水深が十分大きいと見なすことができれば

$$h = h_0 \quad (2.3)$$

が陸だな外縁における条件となる。しかし、一般には陸だな斜面やそれ以遠の部分でも水深は有限であり、動力学的効果は必ずしも無視できない。とくに、陸だな斜面では水深が急激に減少するので、エネルギーの集中がおこり、海面異状の振幅が増大することが考えられる。たとえば水深が 1/10 になったとき、もし反対の影響がなければ振幅は 1.8 倍になることとなる（グリーンの法則）。さらに、これまでは風の影響を考えなかったが、陸だな外縁ではこれが必ずしも無視できないことを考えれば、さらに振幅の増加率が大きくなることもありうるであろう。

これらの影響を考慮に入れると、陸だな外縁における条件として (2.3) の代わりに

$$h = n h_0 \quad (n \geq 1) \quad (2.4)$$

とした方がよいと考えられる。今回の計算ではと仮定した。東京湾のような比較的閉じた湾の場合には  $n \sim 1.5$  とすればほぼ湾内の高潮分布を実況に合わせるができるが、土佐湾のような開いた湾ではの値はもう少し大きいと考えられるからである。

もちろん、これは厳密な取り扱い方ではない。より厳密な解き方としては計算海域を外方に拡げ、そこで適当な条件をあたえなければならないが、その場合にもやはり条件のあたえ方が問題となる。今回はコンピュータの容量と使用可能時間の関係もあって、やむを得ず上述のようにとったのである。

### 3. 数値計算のスキームと予報方程式

数値計算はいわゆる原始法 (primitive method) によったが、差分のとり方は staggered mesh を使い、leap frog 法によることとした。この場合、 $\zeta$  と  $S(S_x, S_y)$  の値は1つおきの交互の格子点で、交互の時間ステップに対してあたえられる。したがって、たとえば  $\zeta$  の値の得られる間隔は  $2\Delta s, 2\Delta t$  となる。いま、格子点を  $(i, j)$ 、時間ステップを  $n$  であらわし、また  $(i+j)$  は偶数、 $n$  は奇数にとれば、予報方程式は次のようになる。(MIYAZAKI 1953)。

$$\left. \begin{aligned} S_{i,j}^n &= \frac{1 - \beta_{i,j}^{n-2} - i\alpha}{1 + \beta_{i,j}^{n-2} + i\alpha} S_{i,j}^{n-2} - \frac{g d_{i,j} \Delta t}{1 + \beta_{i,j}^{n-2} + i\alpha} \nabla_{i,j} (h - h_0)^{n-1} + \\ &+ \frac{(1 + 5\gamma_b) k \Delta t}{1 + \beta_{i,j}^{n-2} + i\alpha} (|W| W)_{i,j}^{n-1}, \\ h_{i+1,j}^{n+1} &= h_{i+1,j}^{n-1} - \Delta t \operatorname{div}_{i+1,j} S^n \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここで、 $i \equiv \sqrt{-1}$ 、また  $\nabla_{i,j}, \operatorname{div}_{i+1,j}$  はそれぞれ  $(i, j)$  における  $\nabla$ 、および  $(i+1, j)$  における  $\operatorname{div}$  に対応する中心差分演算を示す。たとえば

$$\nabla_{i,j} \phi \equiv \left( \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta s}, \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2\Delta s} \right) \quad (3.2)$$

である。さらに

$$\alpha \equiv \frac{1}{2} f \Delta t, \beta_{i,j}^n \equiv \frac{1}{2} \gamma_b^2 (d^{-2} |S|)_{i,j}^n \Delta t, \quad (3.3)$$

また

$$k \equiv \rho^{-1} \rho_a \gamma_s^2 \quad (3.4)$$

で、 $\gamma_s, \gamma_b$  はそれぞれ海面、および海底における drag coefficient をあらわす。

### 4. 気圧、および風速分布

ここで、気圧、および風速の分布が問題となる。相対的な分布の形についてはそれまでの考え方による。すなわち、気圧分布については藤田の式

$$p = p_\infty - \frac{p_\infty - p_0}{\sqrt{1 + (r/r_0)^2}} \quad (4.1)$$

を仮定し、風についてはこの気圧分布に対応する傾度風に比例する中心対称の風と、台風の追行速度に比例する場の風とベクトル和に等しいと考えるのである。

ただし、この中心対称風についてはこれまでの内湾の計算では傾度風速に 4/7 から 6/7 までの係数を乗じ、また等圧線に対し 30 度の吹き込みを考えた。しかし、土佐湾のような外海に大きく開いた湾ではこのような係数を乗ずることは実情に合わない。たとえば、21 日 8 時の土佐湾の最大風速は 45 m/s ぐらいと考えられるが、係数 4/7 では 26 m/s、6/7 でも 38 m/s にしかない。そこで、今回の計算ではこの係数を 1.0 とし、また吹き込み角も実際の状況を考えて 15 度とした。



る。なお、Fig. 2 中に各流量計算点における水深 (m) を示しておいた。 $p_{\infty}-p_0$ 、および  $r_0$  の値は毎時ごとの値をあたえ、20 分ごとにこれらの値を直線内挿して各格子点の気圧と風の応力とを計算した。中間の時間ステップにおける気圧と風の応力との値はさらにこの 20 分ごとの計算値を直線内挿することによって求めた。

格子間隔  $\Delta s$  は 4 Km, 時間間隔  $\Delta t$  は 1 分にとった。 $p_{\infty}-p_0$ 、および  $r_0$  の毎時の値は Table 1 に示したとおりである。なお、伊勢湾台風モデルについてはこれらの値はそれぞれ 70 mb. および 75 Km にとった。

Table 1. Hourly values of  $(p_{\infty}-p_0)$  and  $r_0$  (Typhoon 7010).

$t$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	hour
$p_{\infty}-p_0$	78	71	66	63	60	55	52	48	44	40	38	37	36	mb
$r_0$	60	61	63	64	64	65	66	68	70	73	75	78	80	km

## 6. 計算結果

10 号台風に対する上述の方法による高潮追算の結果、高知 (桂浜) 付近における最大偏差は 8 時 20 分におこり、その値は 187 cm となった。また、伊勢湾台風モデルをこの台風の径路に沿って走らせた結果、対応する最大偏差値は 236 cm となった。

10 号台風に対する計算値は前述の桂浜の観測値 (推定) 235 cm よりいくらか低いが、この推定値には短周期の振動や波浪などの影響が含まれている可能性を考えると、観測値と計算値とはほぼ一致したと考えるべきであろう。Fig. 3 に桂浜の計算偏差の時間変化 (細線) と、これ

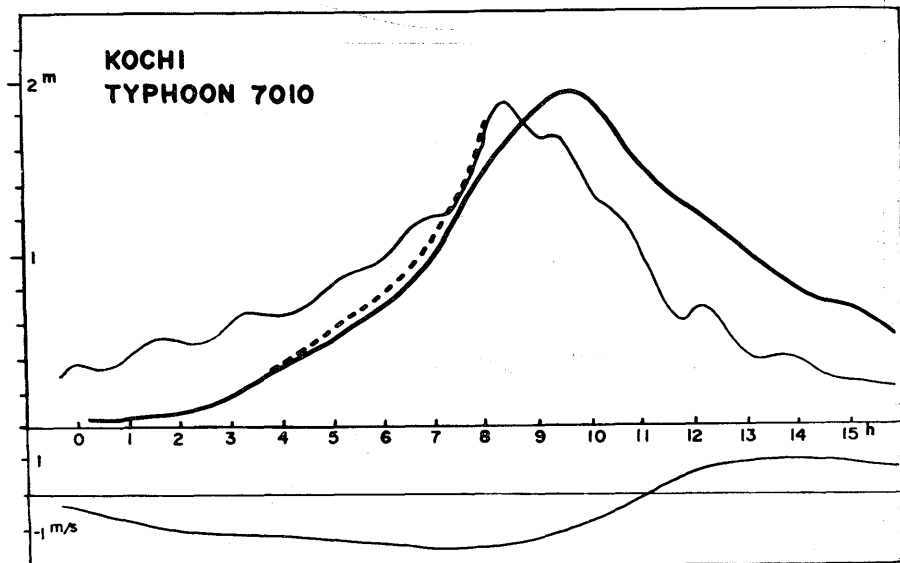


Fig. 3. Time variations of tidal residue at Katsurahama during the passage of Typhoon 7010.  
 fine line—computation at Katsurahama  
 dashed line—observation at Katsurahama  
 thick line—observation at Wakamatsuchō (near the bottom of inner embayment)  
 curve at the bottom—computed current speed (east component) to the south of Katsurahama

に対する観測値の時間変化（点線）とを示す。なお、桂浜の記録は途中で欠測となっているので、参考のため浦戸湾奥の若松町で観測した潮位偏差を太線で入れておいた。

計算偏差の時間変化のパターンはほぼ実測と一致しているとみなされよう。若松町は内湾の奥にあるため、ややピークの位相のおくれがあらわれている。また、この図の下方に示したのは、桂浜のすぐ外側の格子点での流速の東分の変化である。流向は11時ごろ西から東に変っている。

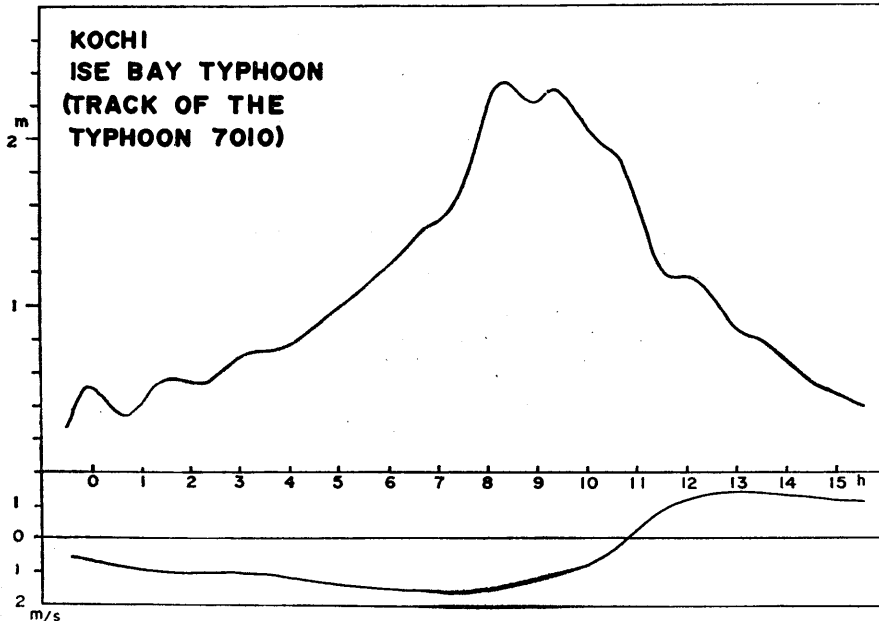


Fig. 4. Time variation of computed tidal residue at Katsurahama during the passage of a model typhoon comparable to the Ise Bay Typhoon. Curve at the bottom shows the computed current speed (east component) to the south of Katsurahama.

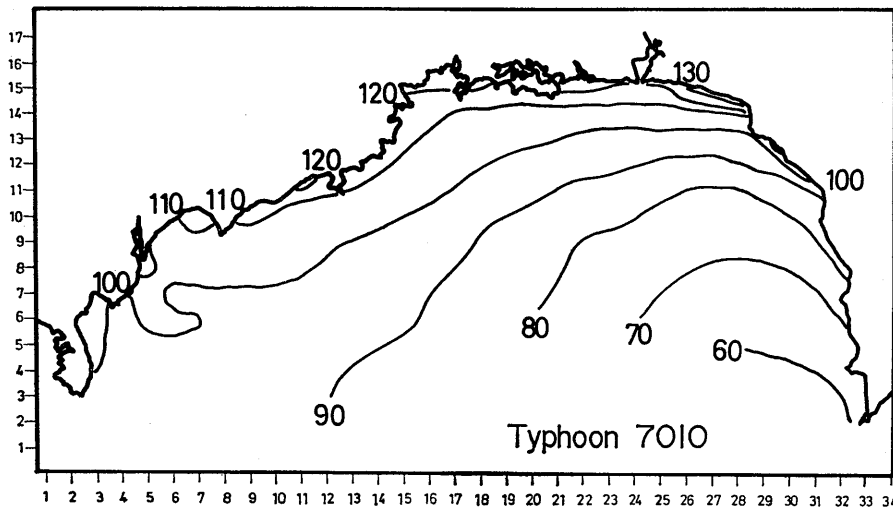


Fig. 5. Computed horizontal pattern of tidal residue at 8h, August 10 (Typhoon 7010).

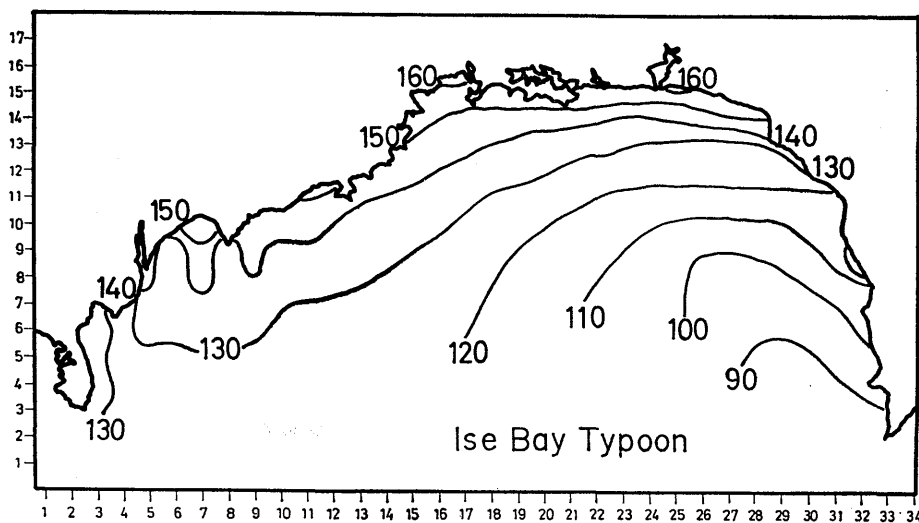


Fig. 6. Computed horizontal pattern of tidal residue at 8h, August 10  
(A model typhoon comparable to the Ise Bay Typhoon).

なお、伊勢湾台風モデルに対する桂浜の計算偏差の時間変化を同じく Fig. 4 に示す。

偏差の水平分布の一例として、8時における10号台風、および伊勢湾台風モデルの土佐湾の計算値の分布を Fig. 5 および Fig. 6 にかかげておく。Fig. 5 と比較するだけの十分な観測値の分布は残念ながらそろっていない。しかし、一応の比較のため、湾岸の数点の最大偏差の観測値と計算値とを例記したものが Table 2 である。観測値は桂浜以外は何れも検潮器による。両者はだいたい一致しているように見える。

Table 2. Observed and computed values of peak surges along the coast of Tosa Bay.

Station	Observed	Computed
Tei	1.40 m	1.53 m
Katsurahama	(2.35)	1.87
Suzaki	—	1.62
Shimoda	1.24	1.34

## 謝 辞

この研究は高知県主催の「土佐湾高潮対策技術会議」より依頼を受けて行なわれたものである。著者等に研究の機会をあたえられた同会議の委員、その他関係者の方々に深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 高知地方気象台 1970: 昭和45年台風第10号概報 125 pp.  
 MIYAZAKI, M. 1963: A numerical computation of the storm surge of Hurricane Carla 1961 in the Gulf of Mexico. *Oceanogr. Mag.*, **17**, 109-140.

## 土佐湾高潮の数値計算

宮崎正衛, 岡田正実

1970年8月21日, 四国南岸に上陸し台風第10号は土佐湾一帯に著るしい高潮をもたらした。高知, 桂浜では8時45分, 東京湾中等潮位上3.13mのピークを記録した後, 欠測となった。これを偏差に換算すると2.34m(ただし未平滑値)となる。この値はこれまでの実験式などから推定される値よりもはるかに大きい。

そこで, 筆者等はこの台風, およびこれと同じ組路を伊勢湾台風が通過したと仮定した場合, について土佐湾高潮の追算を行なした。この際, 海面風に対する摩擦は従来の内湾に対する仮定より小さいと考え, また陸だなの外縁における偏差値は静力学的な推定値の2倍とした。

計算の結果, 10号台風による桂浜に対する最大偏差値は1.9mとなった。この値は前述の値2.35mがピーク値で風浪などの影響を含んでいることを考えると, よく一致したといえるように思われる。