

台風 9119 号による瀬戸内海の高潮の追算

山下隆男*・土屋義人**・光田 寧***・山中久生****

1. 結 言

1991 年 9 月 27 日 18:00 頃、長崎県佐世保市に上陸した台風 9119 号は翌 27 日にかけてほぼ日本全国に被害をもたらした。広島県厳島神社の能舞台や回廊が破壊されたり、青森県特産のリンゴが 32,000 t 落果するなどの被害が生じた。またこの台風は各地に高潮災害を引き起こした。特に松山では潮位が T. P. +274.8 cm にまで達し、観測史上最高を記録した。そのほか、各地で潮位偏差が 100 cm を越えるような高潮が観測された。

従来から高潮の追算を行う場合には、外力としての風域場の推定が重要であることが指摘されている。瀬戸内海は周囲を陸地に囲まれており、また台風のスケールは海域の空間スケールより大きいと、海上での風速分布は陸地の影響を受けることが予想される。そのため、瀬戸内海での高潮を追算するには風域場として従来の高潮追算の際に用いられてきた台風モデルを用いることは必ずしも適切ではないように思われる。

そこで本研究では、風域場の推定に注意を払い、外力モデルとして光田・藤井のモデルを用いる場合と、陸地の影響を取り込んだ風速分布を用いる場合とについて、台風 9119 号による瀬戸内海の高潮の追算を行い、風域場による高潮の計算結果の相違について考察を行う。さらに、開境界条件および非線形移流項の影響についての考察を行う。

2. 高潮の数値計算モデル

高潮の数値計算モデルは山下ら (1991) のモデルを用いる。基礎方程式は水平 2 次元の長波近似方程式に、海面でのせん断応力 (吹き寄せ効果)、大気圧の勾配の項 (吸い上げ効果) を考慮した次式のような運動方程式および連続式である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial vU}{\partial y}$$

$$= -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + fV + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial uV}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - fU + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

この基礎方程式を差分法で解く。この場合、基礎方程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する。すなわち、基礎方程式を非線形移流項、拡散項および伝播項の 3 つに分け、各項の計算に対して、特性曲線法、ADI 法および Iterative ADI 法を用いる。以下では、本研究で影響を検討した非線形移流項計算について述べるが、その他は参考文献に委ねる。この項の計算では、移流および局所的加速度項からなる非線形方程式を解く。線形移流方程式に対しては QUICK 法、Holly-Preissmann スキーム、SOWMAC 法など多くの数値計算法が提案されているが、本モデルでは、高次の特性曲線法を利用する。すなわち、Holly-Preissmann スキームを 2 次元非線形移流方程式に適用する。Holly-Preissmann (1977) に倣い、 x 方向に関して局所的 Courant 数 $\alpha \equiv u^n \Delta t / \Delta x$ により求めたい流速 u_i^{n+1} を次式で近似する。

$$u_i^{n+1} = \alpha u_{up}^n + (1-\alpha) u_{dw}^n + \alpha^2 (1-\alpha) \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{up}^n - \alpha (1-\alpha)^2 \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{dw}^n \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 up, dw はそれぞれ流れの上流、下流方向を表し、 $\alpha = \alpha^2 (3-2\alpha)$ である。特性曲線の定義から $u_i^{n+1} = u^n$ でなければならないことから、 $u_i^{n+1} = \alpha \Delta x / \Delta t$ となり、式 (4) は α を未知数とする 3 次方程式に帰着する。これを解いて、 α が求めれば、 $n+1$ 計算ステップでの解が得られる。なお 3 次方程式を解く方法は u の更新に対しては

* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所
 ** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 *** 理博 京都大学教授 防災研究所
 **** 富山県土木部 道路課

x 方向の計算のみ、 v の更新に対しては y 方向の計算のみにしか適用できないので、それ以外の計算に対しては風上差分法を用いた。1 次元非線形移流方程式を上述の方法で解いて、解析解と比較すると、誤差はほとんどみられなかった。また、この非線形移流項と移動境界を組み込んで孤立波の遡上実験を行ったところ、Kim ら (1983) の BIEM 法を用いた数値実験結果と良く一致した。

さらに、この数値実験中 3 次方程式の解の挙動を調べたが、全ての計算点および計算ステップにおいて 3 次方程式の解は 1 個のみ得られ、2 個以上の解が得られたり解が存在しなかったりということは無かった。

3. 風域場および気圧場

3.1 風域場の推算

高潮の追算を行う場合、風速分布をいかに与えるかということが非常に重要である。特に瀬戸内海は周囲を陸地に囲まれ、台風のスケールが海域のスケールより大きいので、海上での風速分布は陸地の影響を受けることが予想される。本研究では、2 通りの風速分布を与え、高潮計算への影響を調べる。すなわち、台風モデルとして光田・藤井モデルを用いて風速場を与える場合と、陸地の影響を考慮に入れた風速場の推定値を用いる場合との 2 通りを高潮計算に適用する。

光田・藤井の台風モデルによる風域場は、山下ら (1992) の参考文献に委ねることとし、ここでは陸地の影響を考慮した風域場の推定法を示す。米国フロリダ州オケチョーベ湖上でハリケーン接近時の風速が測定されている。この観測結果を基にして、湖上を横切る方向の風速の陸地による減衰特性が求められる。光田・藤井はこれに基づき陸地の影響を考慮した風域場を求める方法を提案している。すなわち、陸地に近いところでは従来の台風モデルまたは FFW で計算された風速に、陸地からの距離に応じて係数をかけて風速を小さくすることにより陸上の影響を取り込むことになる。ここでは、気圧場から流線を描き風向を求め、陸地の影響による減衰効果を上述の方法で入れ、以下ではこれを減衰風域場と呼ぶ。

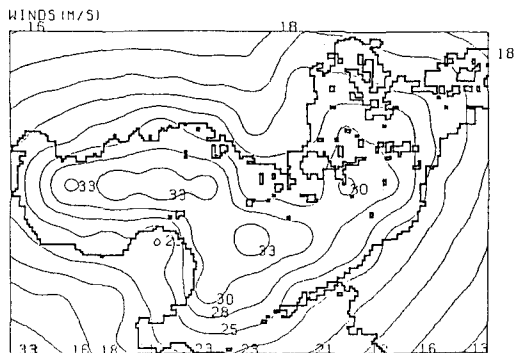
この 2 つの風域場の比較を図-1 に示す。図は台風が計算領域に最も接近した 9 月 27 日 18:00 において、両方法による風域場の空間的分布の比較を示しているが、この図からわかるように、モデル台風は特に中心付近で大きな風速を与えている。

3.2 気圧場の推算

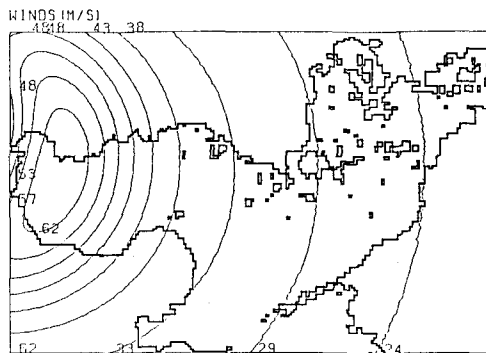
気圧場の推算には、次式で表される Schloemer の気圧分布式を用いる。

$$p = p_c + \Delta p \exp(-r_m/r) \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに、 p は台風中心から距離 r の地点の大気圧、 p_c は



(a) 陸地の影響を考慮したモデル



(b) モデル台風

図-1 高潮の追算に用いた 2 つの風域場の風速分布の一例

台風中心の気圧、 Δp は中心気圧低下量、 r_m は最大風速半径である。気圧場の推算に当たっては最大風速半径をどのように与えるかが重要であり、ここでは藤井の客観解析によって得られた最大風速半径を用いる (山下ら, 1992)。この方法で呉, 松山, 大分, 広島, 下関の各点で推算値と観測値を比較すると推算値が最大で約 10 hPa 高くなった。

4. 高潮の追算方法

4.1 計算条件

計算の対象とする海域は図-2 に示すような周防灘、伊予灘を中心とする瀬戸内海の、下関を西端、糸崎—今治間を東端 (東経 133°線上)、宇和島—下浦間を南端 (北緯 33°15'線上) とする領域で、これを $\Delta x = \Delta y = 1000$ m の正方形格子に分割した。時間刻み Δt に関しては Courant 数が 1 に近くなるように $\Delta t = 12.0$ sec とした。流れの抵抗係数に関しては、モデルの経験から、Chézy 係数 $C = 60.0 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (水深 10 m での Manning 係数 $n \approx 0.024 \text{ s/m}^{1/3}$ に相当) および水平渦動粘性係数 $50.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$ を用いた。

4.2 潮汐計算

計算の初期の状態では急激に潮位や風などの外力を加え

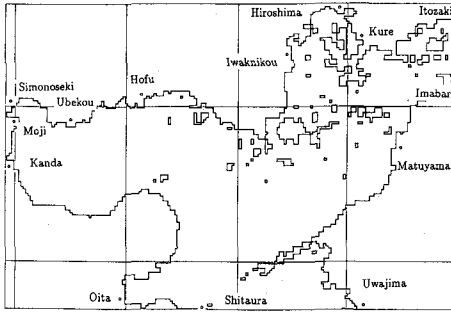


図-2 計算領域および水位の出力点

表-1 開境界条件と風域場を変えた高潮の計算条件

	開境界条件	風域場
Case 1	天文潮位+吸い上げ	減衰風域場
Case 2	天文潮位+吸い上げ	モデル台風
Case 3	実測潮位	減衰風域場
Case 4	実測潮位	モデル台風

るとじょう乱が発生する。このため、潮汐計算の1周期分は捨て、じょう乱がおさまった後の結果を高潮計算の初期条件とする。潮汐計算には気象庁発行の潮位表に記載されている値をそのまま用い、潮位表に記載されていない今治、下浦の潮位は各々の標準港のデータから推定した。また、宇和島一下浦間、今治一糸崎間のデータは、潮位表から与えられたデータを線形内挿したものを与えた。

潮汐計算の結果、松山、菊田、大分では満潮時刻が約30分遅れ、潮位も約15cm小さく、広島、呉などでは満潮時刻、潮位の両方に関してほとんど一致した。

4.3 高潮計算

ここでは、開境界条件として、2通りの方法を与える。まず、天文潮位に気圧低下相当の静的な吸い上げ水位を与えた場合と、糸崎、宇和島、門司で観測された実測潮位を与えた場合の計算を行った。前述したように、風域場を2通りに変えているので、表-1に示す4通りの計算を行ったことになり、高潮計算におけるこれらの影響を調べることができる。

図-3には2通りの開境界条件の水位を宇和島一下浦、糸崎一今治および下関について示す。図中、太い実線は観測潮位、細線は天文潮位に吸い上げ相当水位を加えたもの、破線は天文潮である。これから明らかなように、糸崎一今治の境界上では、台風通過時にあたる19:00~23:00にかけて両者に大きな差が生じている。これは吹き寄せ作用が寄与しているためで、瀬戸内海のような海域では開境界条件に天文潮位+吸い上げ相当水位の

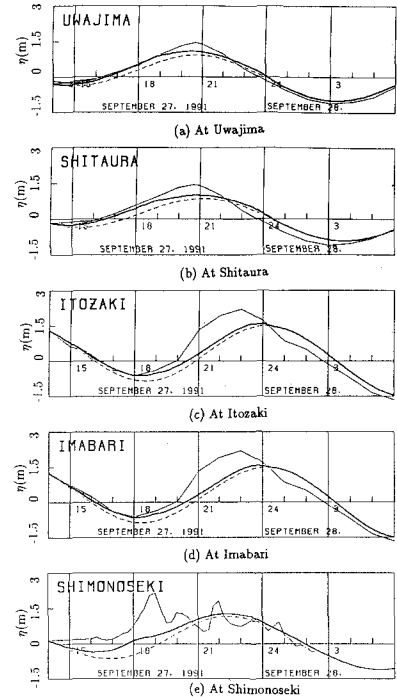


図-3 開境界条件(太線:天文潮位+吸い上げ, 細線:実測潮位, 破線:天文潮位)

条件を与えることは好ましくないことがわかる。このような海域では、むしろ海峡部まで計算領域を広げる方がよい。

なお、開境界条件には、日野・仲座(1988)の仮想固定壁による透過境界を用い、海岸線では完全反射条件とした。海面せん断応力の抵抗係数 C_D は0.0026とし、コリオリのパラメータは北緯34°の値を与えた。

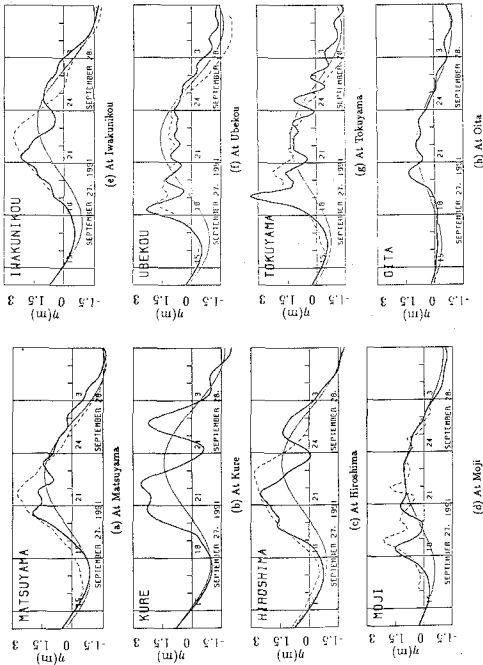
5. 計算結果の考察

図-4~図-7には、以上の4ケースの西瀬戸内海の高潮の追算結果を示した。結果は順番に、Case 1, 2, 3および4の代表点での潮位の時間変化に対応し、太線、細線、破線はそれぞれ計算値、実測値、天文潮位を表す。また基準面は平均海水面である。これらの図から次のようなことが分かる。

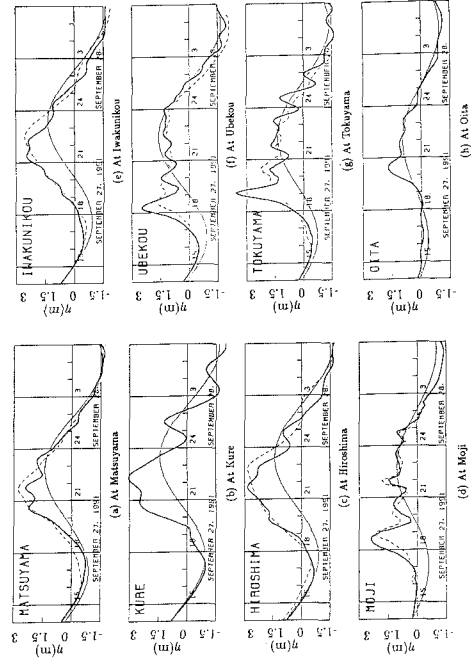
5.1 開境界条件の高潮計算結果への影響

開境界条件として天文潮位と気圧低下による静的な吸い上げ相当水位を与えて計算を行ったCase 1とCase 2では、松山、広島、岩国のように糸崎一今治の開境界に近い観測点では、ピーク時の潮位およびその生起時間および低下時の高潮波形が実測値と合っていない。

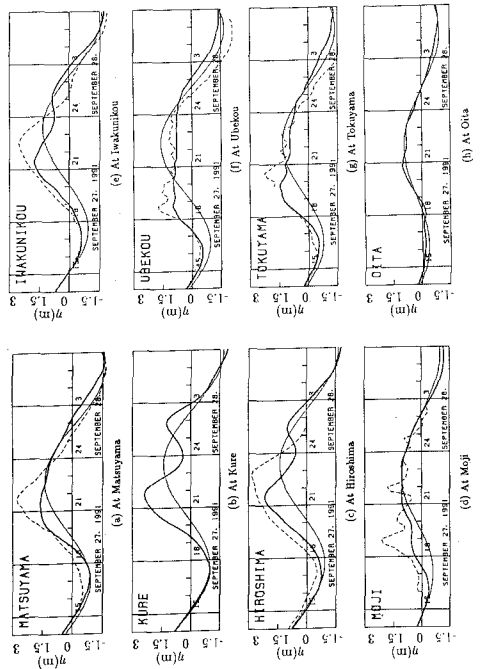
一方、開境界条件として実測潮位を与えて計算を行ったCase 3とCase 4では、当然のことながら、高潮の時間的变化は実測値と良い一致を示している。しかしなが



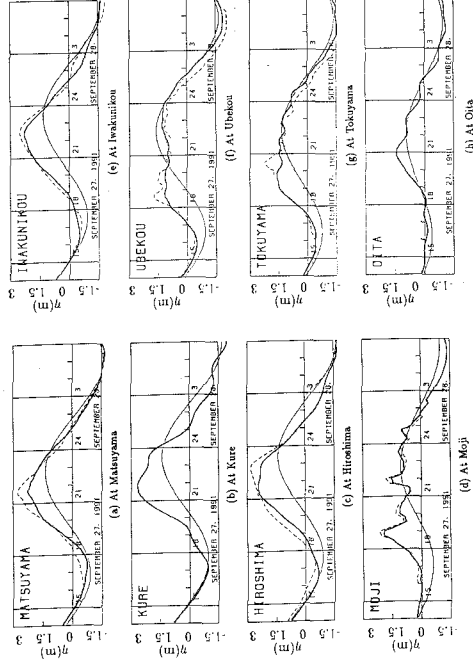
図—5 Case 2 の場合の実測潮位 (破線), 計算潮位 (太い実線) および天文潮位 (細い実線)



図—6 Case 3 の場合の実測潮位 (破線), 計算潮位 (太い実線) および天文潮位 (細い実線)



図—4 Case 1 の場合の実測潮位 (破線), 計算潮位 (太い実線) および天文潮位 (細い実線)



図—7 Case 4 の場合の実測潮位 (破線), 計算潮位 (太い実線) および天文潮位 (細い実線)

ら、モデル台風を用いた計算では、ピーク時の潮位およびその生起時間に関して誤差がみられる。例えば広島ではピーク時の潮位は良い一致をみせているが、その生起時間に関しては1時間近い誤差がでていいる。逆に松山では高潮のピークの高潮の生起時間についてはよくあっているが、その潮位に関しては小さめの値が計算されている。

また、門司に見られるような台風最接近時の18:00~19:00の大きなピークは、関門海峡が狭いため、開境界条件としては大きな影響は与えていない。そのため、宇部港、徳山ではCase 1とCase 3、Case 2とCase 4には大きな差が見られない。このことは、瀬戸内海のような海域の高潮計算の境界設定には、断面積の小さい海峡部まで計算領域を広げる方がよいことを示している。

5.2 風域場の相違による高潮計算結果への影響

全般的に、減衰風域場の場合には海域内での振動がかなり小さく計算されている。宇部港、徳山に見られる18:00~20:00の振動が再現されていないが、その他は観測結果と良く一致している。特に、実測潮位を与えたCase 4の広島、岩国の計算結果にみられる21:30~22:00以後の潮位の低下は、風域場を過大に評価したための負の吹き寄せによるもので、Case 3にはそれが現れていない。

このことは、宇部港、徳山、呉に見られる resurgence がモデル台風の場合には過大に出ていることもあわせて、モデル台風の風域場は湾水振動を大きく評価するのに反し、減衰風域場ではこれが抑えられ、実測に近いシミュレーションができることを示している。

5.3 非線形移流項の影響

本研究では、非線形移流項の高精度の計算ができているため、Case 4の場合についてこれを考慮する場合と考慮しない場合との計算の比較を行い、最大で約30 cm程度の差が生じる程度は影響があることがわかった。

6. 結 語

以上、1991年9月27日から28日にかけて日本各地に被害を及ぼし、西部瀬戸内海各地で過去最高の水位を記

録した台風9119号によって引き起こされた高潮の数値シミュレーションを行ったが、得られた主な成果は次のように要約される。

(1) 開境界条件の高潮計算結果への影響としては、瀬戸内海のような海域では開境界条件に天文潮位に吸い上げ相当水位を加えた条件を与えることは好ましくなく、これ防ぐためには、断面積の小さい海峡部まで計算領域を広げる方がよいことを案じた。

(2) 風域場の相違による高潮計算結果への影響としては、モデル台風の風域場は湾水振動を大きめに評価するが、減衰風域場を用いるとこれが抑えられ、実測に近いシミュレーションができることを示した。

(3) 非線形移流項は、計算された高潮において、台風9119号の場合には最大で約30 cm程度の差が生じる程度であることが示された。

最後に、陸地の影響を入れた風域場のデータをご提供いただいた京都産業大学教養部 藤井 健教授に謝意を表するとともに、この研究は平成3年度文部省科学研究費総合研究(A)(代表者 光田 寧教授, No. 03306022)の成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- Kim S. K., P. L. Liu, J. A. Liggett (1983): Boundary integral equation solutions for solitary wave generation, propagation and run up, *Coastal Engg.* 7, pp. 299-317.
- Holly F. M., A. Preissmann (1977): Accurate calculation of transport in two dimensions, *J. Hydraulics Div., Proc. ASCE*, Vol. 103, No. HY11, pp. 1259-1277.
- 日野幹雄・仲座栄三 (1988): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 262-26.
- 光田 寧(1992): 1991年台風19号による強風災害の研究, 平成3年度文部省科学研究費突発災害調査研究成果報告, pp. 23-51.
- 山下隆男・山中久生・土屋義人 (1991): 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—, 京都大学防災研究所年報, 第34号, B-2, pp. 449-469.
- 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, 39巻, pp. 236-240.