

独立行政法人港湾空港技術研究所

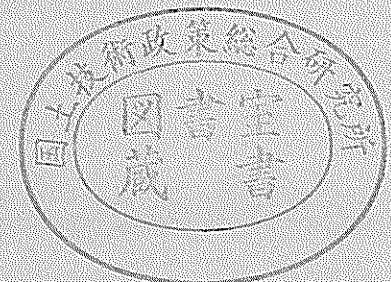
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.3 September 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 巻 第 3 号 (Vol. 42, No. 3), 2003 年 9 月 (September 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法
.....岩波 光保・渡辺 健・横田 弘・二羽 淳一郎 1
(Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods
..... Mitsuyasu IWANAMI, Ken WATANABE, Hiroshi YOKOTA, Junichiro NIWA)
2. 触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究
.....平林 丈嗣・山本 恭・酒井 浩・秋園 純一・内海 真 33
(Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powerd construction machine
..... Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Junnichi AKIZONO, Makoto UTSUMI)
3. 強潮流海域における水中観測システムの研究
(第 1 報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)
..... 酒井 浩・田中 敏成 57
(Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current
(1st Report;The basic System and Results of the Motion Simulation)
..... Hiroshi SAKAI, Toshinari TANAKA)
4. 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築
..... 河合 弘泰・川口 浩二・橋本 典明 85
(Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay
..... Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Noriaki HASHIMOTO)
5. 模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価
..... 安田 誠宏・平石 哲也 111
(Experimental Risk Assessment of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)

台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築

河合 弘泰*・川口 浩二*・橋本 典明**

要 旨

これまで一般的に波浪推算と高潮推算はそれぞれ独立して行われてきたが、このような方法でも実務で大きな支障が生じることは少なかった。ところが、台風9918号による周防灘西部の波浪と高潮を十分に再現することはできなかった。その原因の一つは海上風の過小評価であるが、その他にも波浪・高潮の相互作用を考慮していないことが考えられる。

そこで本研究では、気圧分布の歪みやスーパー・グラディエント・ウィンド(SGW)を考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算の間で必要な変数を双方向にやりとりをしながら両方の推算を同時に進めていくことのできる、新たな推算モデルを構築した。このモデルにおいて、波浪推算にはWAM cycle4を用い、高潮推算で得られた非定常な水位と流れを波の発達や屈折に考慮できるようにした。また逆に、高潮推算には非線形長波近似に基づくモデルを用い、波浪推算で得られた海面抵抗係数を導入し、天文潮も合わせて計算できるようにした。

次に、この新たに構築した推算モデルを用いて、台風9918号による周防灘と八代海の波浪と高潮を追算した。その結果、波浪や高潮の推算には、まずこれらの外力となる海上風の推算が重要であり、気圧分布の歪みやSGWを考慮して海上風を推算する必要があることが分かった。また、水深の浅いところでは高潮や天文潮による水位の変化や流れによって波浪が変化し、高潮の原因として吹き寄せの効果の卓越する湾奥では波浪による海面抵抗の変化によって高潮偏差も変化することが明らかになった。したがって、内湾の波浪と高潮の推算では、波浪・高潮の相互作用も考慮する必要がある。以上のような方法を用いることによって、従来の方法では過小評価されていた周防灘西部でも、観測値に近い波浪や高潮が得られた。

キーワード：波浪推算，高潮推算，波浪・高潮の相互作用，台風，内湾，天文潮

* 海洋・水工部主任研究官

** 海洋・水工部海洋水理研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5052 Fax：046-844-1274 e-mail: kawai@pari.go.jp

Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay

Hiroyasu KAWAI*
Koji KAWAGUCHI*
Noriaki HASHIMOTO**

Synopsis

Generally a wave model and a storm surge model have been conducted independently, however the wave height and the storm surge in west Suo-nada Bay by Typhoon 9918 might be underestimated by neglect of the interaction between wave and current as well as the underestimation of the marine wind speeds.

For such a background, in this study the wave model (WAM cycle 4) is improved to take water surface elevations and currents of astronomical and meteorological tides into the calculation of wave generation and refraction. On the other hand, the storm surge model based on the non-linear long wave theory is improved to introduce the surface friction coefficients in the wave model and astronomical tides into the calculation of storm surges. Then the wave model and the storm surge model are mutually combined each other. The marine wind for the combined model is estimated by considering the distortion of typhoon pressure field and the existence of super gradient wind.

The waves and the storm surges in Suo-nada and Yatsushiro-kai Bays by Typhoon 9918 are hindcasted by the combined model. The wave height may increase by the rise of the water level in their shallow regions, while the surface friction coefficients in the wave model may affect the storm surge in their innermost regions. Therefore, the mutual interaction between wave and current should be taken into the estimation of waves and storm surges in closed bays.

Key Words: wave hindcasting, storm surge hindcasting, mutual interaction between wave and current, typhoon, closed bay, astronomical tide

* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

** Head, Hydrodynamics Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445052 Fax : +81-46-8441274 e-mail: kawai@pari.go.jp

目 次

| | |
|----------------------------------|-----|
| 要 旨 | 85 |
| 1. まえがき | 89 |
| 2. 従来の波浪と高潮の推算法およびその問題点 | 89 |
| 2.1 気圧分布と海上風 | 89 |
| 2.2 波浪 | 90 |
| 2.3 高潮 | 92 |
| 3. 波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築 | 94 |
| 3.1 気圧分布の歪みとSGWを考慮した海上風の推算 | 94 |
| 3.2 天文潮の導入 | 96 |
| 3.3 波浪推算と高潮推算の結合 | 99 |
| 4. 台風9918号による波浪・高潮の追算 | 99 |
| 4.1 周防灘の波浪・高潮 | 99 |
| 4.2 八代海の波浪・高潮 | 104 |
| 5. 結論 | 108 |
| 6. あとがき | 108 |
| 謝辞 | 108 |
| 参考文献 | 108 |
| 記号表 | 109 |

1. まえがき

これまで一般に、台風による内湾の波浪や高潮の推算では、台風の気圧分布を同心円で近似し、海面摩擦の影響のない自由大気の流れに一定の係数を乗じて海上風を求め、この海上風による波浪と高潮をそれぞれ独立に推算してきた（以下では「従来の推算」と記す）。

しかし現実には、陸上地形によって台風の気圧分布は歪むことがある。また、台風の中心付近ではその三次元構造に起因して海上風が強まることも知られており、この風はスーパー・グラディエント・ウィンド（以下では「SGW」と略す）とよばれている。さらに、高潮や天文潮による水位の変化や流れは、波浪の発達・伝播に影響する。逆に、波浪の発達に伴う海面抵抗の変化は、高潮の一因である吹き寄せを左右する。従来の推算ではこれらの物理現象が無視されていたが、それにもかかわらず実務において大きな支障が生じることは少なかった。

ところが、この従来の推算方法では台風 9918 号による波浪と高潮を十分に再現できず、例えば周防灘西部の苅田では、有義波高も高潮偏差も推算値が観測値を大きく下回った（橋本・真期, 2000; 河合ら, 2000a, 2000b）。その最大の原因は海上風の過小評価にあり、海上風の推算において台風の気圧分布の歪みや SGW を考慮する必要性が既に指摘されている（Veltcheva and Kawai, 2002; Veltcheva・河合, 2002）。さらにその他にも、波浪・高潮の相互作用が考慮されていないことが考えられる。外洋に比べ内湾では、水深が浅く、高潮や天文潮による水深や流れの変化は波浪の発達・伝播に影響しやすい。また逆に、この波浪の発達は海面せん断応力を変化させ、流れにも大きな影響を及ぼすと考えられる。

そこで本論文では、従来の推算法の概要を述べるとともに、台風 9918 号の追算を通じて明らかになった問題点を整理した（第 2 章）。そして、これら問題点を解決するために、気圧分布の歪みや SGW を考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算の間で必要な変数を双方向にやりとりしながら両方の推算を同時に進めていく、新たな推算モデル（以下では「WASM」と略す）を構築した（第 3 章）。さらに、この WASM によって、台風 9918 号による周防灘と八代海の波浪・高潮を追算し、その結果を従来の推算法によるものと比較した（第 4 章）。

2. 従来の波浪と高潮の推算法およびその問題点

2.1 気圧分布と海上風

従来の海上風の推算では、台風の気圧分布を同心円で

近似し、次式に示す Myers の分布で与えてきた。

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2.1)$$

ここに、 p は台風の中心から距離 r だけ離れた点の気圧、 p_c は中心気圧、 Δp は気圧深度、 r_0 は最大風速を与える半径である。しかしながら、実際の台風では、上陸などの影響によって気圧分布が歪んでいることもある。

台風の風の成分には、台風の気圧勾配に起因する傾度風と台風自体の移動によって生じる場の風とを分けて考える。まず、傾度風の成分については、自由大気において気圧勾配、遠心力、コリオリ力の静的な釣り合いから風速 U_{gr} を求め、これに経験的な低減係数 $C_1 (=0.6 \sim 0.7)$ を乗じて海上における風速 U_1 を求める。

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (2.2a)$$

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (2.2b)$$

ここに、 f はコリオリの係数 ($=2\omega \sin \phi$, ω : 地球自転の角速度 $=7.29 \times 10^{-5}$ rad/s, ϕ : 緯度), ρ_a は大気密度 ($=1.22 \text{ kg/m}^3$) である。自由大気に比べ海上では、風向が台風の中心側に $30 \sim 40 \text{ deg}$ 偏向しているものとする。一方、海上における場の風成分の風速 U_2 は、台風の進行速度 V_T と経験的な低減係数 $C_2 (=C_1$ あるいは $1)$ を用いて、次式のように仮定する。

$$U_2 = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T \quad (2.3)$$

この成分の向きは台風の進行方向と同じとする。これら 2 つの風速成分 U_1 と U_2 をベクトル合成したものを、波浪推算や高潮推算における海上風として用いている。

ところで、橋本・真期(2000)は、風速低減係数を 0.6 と仮定して台風 9918 号による周防灘の波浪を追算したが、その西部に位置する苅田では海上風や有義波高の追算値が観測値を大きく下回った。そこで、風速低減係数の与え方を工夫し、風上側の近傍が全て陸地となる計算格子では 0.3、全て海の場合には 0.9、陸地と海が混在する場合にはその面積比に応じて 0.3 と 0.9 を内分した値を与えるモデルを導入した。その結果、観測値に近い海上風や有義波高が得られた。一方、河合ら(2000a, 2000b)は、風速低減係数を 0.7 と仮定して高潮を追算したが、やはり苅田で海上風や高潮偏差の追算値が観測値を大きく下回った。そこで、台風の接近時に限って風速低減係数を 0.7~1.0 の範囲で経時的に変化させ、苅田における海上風を再現できるようにした。その結果、高潮偏差も追算値が観測値に近づいた。

このことは、台風の規模、中心の接近の程度、あるいは海域など、条件によっては風速低減係数を経験的に使われてきた0.6~0.7よりも大きくとる必要があることを示している。東京湾、伊勢湾、大阪湾など、日本の太平洋に面する内湾の多くは南北に長く、これらの内湾では台風の中心が西側に数十 km 離れたところを通過した場合に湾奥に顕著な高潮が発生することが知られている。このような条件で発生する波浪や高潮の推算には、台風の中心から離れた東側の海上風を正確に与える必要があり、0.6~0.7 という風速低減係数は主としてこれらの内湾での経験に基づいて選ばれたものであると思われる。

ところが、周防灘は東西に長い内湾であり、台風9918号のようにこれを横切るコースをとった場合には、台風の中心付近の気圧低下や中心より前方で吹く海上風が波浪や高潮の発達にとって重要となる。このような気圧や海上風についても精度良く与える必要がある。

2.2 波浪

波浪推算モデルには様々なものがあり、第三世代波浪推算モデルとして位置づけられる WAM (The WAMDI Group, 1988; Komen et al. 1994) も、その一つとして使われるようになりつつある。以下ではそのヴァージョンの一つである cycle 4 について記す。

WAM には球面座標系と平面座標系のモデルが用意されているが、平面座標系におけるその基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x E) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y E) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(c_\sigma \frac{E}{\sigma}\right) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta E) = S \quad (2.4)$$

ここに、 t は時刻、 E は方向スペクトル、 σ は角周波数、 θ は波向、 c_x , c_y , c_σ , c_θ は波速、 S は次式によって表されるエネルギー・ソース関数である。

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} \quad (2.5)$$

ここに、 S_{in} はエネルギー入力項であり、

$$S_{in} = B \cdot E \quad (2.6)$$

によって与えられる。 B は Janssen (1989, 1991) の quasi-linear 理論による係数であり、同じ風場が与えられた場合でも海面の状態によって風から波へのエネルギー輸送が異なり、次式で定義される波齢 w_{age} が若い波ほどエネルギー輸送が活発であることも考慮している。

$$w_{age} = u_* / c \quad (2.7)$$

ここに、 c は波速、 u_* は摩擦速度である。もう少し具体的には、次式で示すように、波の周波数 f 、波向 θ 、風

向 φ などを考慮した海面抵抗係数 C_D を導入している。

$$C_D = \left\{ \frac{\kappa}{\ln(L/z_0)} \right\}^2 \quad (2.8a)$$

$$z_0 = \frac{\alpha \tau}{g \sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}} \quad (2.8b)$$

$$\tau_w = \rho_w \iint_{\theta f} 2\pi f \gamma E(f, \theta) \cos(\theta - \varphi) df d\theta \quad (2.8c)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 L は海面上の高さ (=10m)、 z_0 は海面上の粗度長、 α は係数、 g は重力加速度、 τ は海面せん断応力、 τ_w は波によるせん断応力、 ρ_w は海水の密度である。 γ は波の発達係数で波齢 w_{age} と風の鉛直分布を表すパラメタによって与えている (Janssen, 1991)。

式(2.5)においてさらに、 S_{dis} はエネルギー消散項であり、次式によって与える。

$$S_{dis} = -\gamma_d \cdot E \quad (2.9)$$

ここに、 γ_d は係数である。また、 S_{nl} は非線形相互作用によるエネルギー輸送項であり、次式によって与える。

$$S_{nl}(\mathbf{k}_4) = \omega_4 \iiint Q(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times \{n_1 n_2 (n_3 + n) - n_3 n (n_1 + n_2)\} dk_1 dk_2 dk_3 \quad (2.10)$$

ここに、積分の核関数 Q はスペクトル成分の結合係数、 δ はデルタ関数で非線形相互作用の共鳴条件を表す。

ところで、一般に波浪推算では、天文潮や高潮による潮位の変化や流れを無視し、平均海面、朔望平均満潮位、被災時潮位など一定の潮位を用いてきた。また、WAM の cycle 4 では定常な流れを考慮できるが、非定常な流れや潮位には対応していない。

以上のような海上風と波浪の推算方法を用いて、台風9918号による周防灘と八代海の波浪を推算した。台風9918号は、図-2.1に示すように、八代海の西方を通過し、周防灘を横切るコースをとった。太平洋の波浪は豊予海峡、伊予灘を通じて周防灘の東部に入射すると考えられるため、周防灘を対象とした波浪推算では、図-2.2に示すように、日本列島をとりまく外洋の計算領域 (格子間隔 32.4km) を設け、その内部に格子間隔の細かい領域を接続させた。豊後水道から周防灘と安芸灘に至る海域の格子間隔は 1.8km である。一方、八代海は多くの水道を通じて東シナ海や島原湾とつながっているものの、その幅は狭く、外洋波浪に対する遮蔽性は高いと考えられる。そこで、図-2.3に示すように、八代海の全域を含む長方形の計算領域のみで波浪推算を行った。ただし、八代海

の地形は複雑であるため、格子間隔は周防灘より細かい
0.6kmとした。

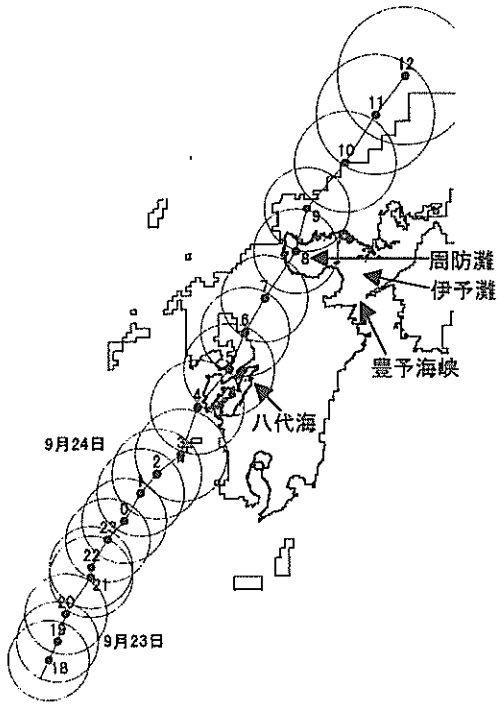


図-2.1 台風 9918 号の経路

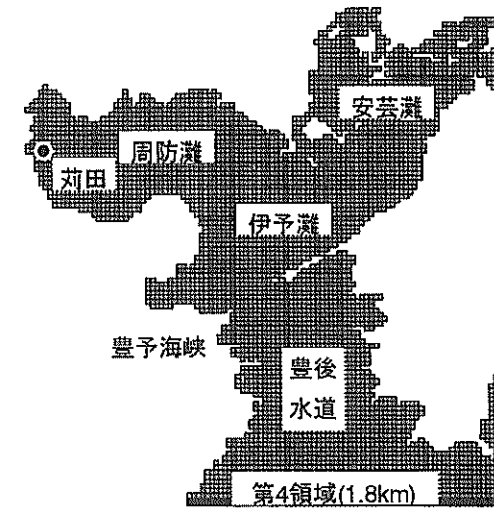
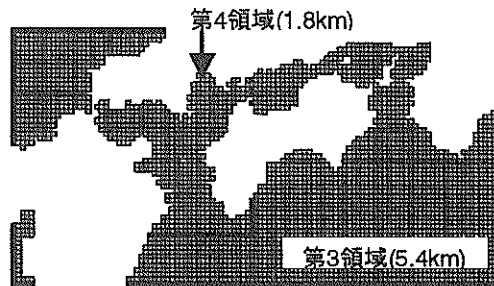
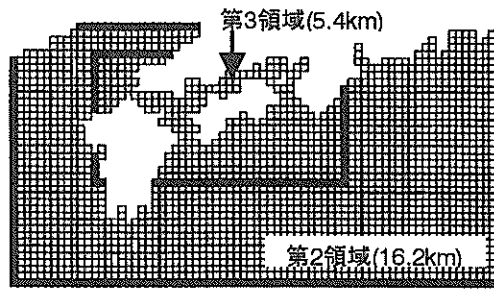
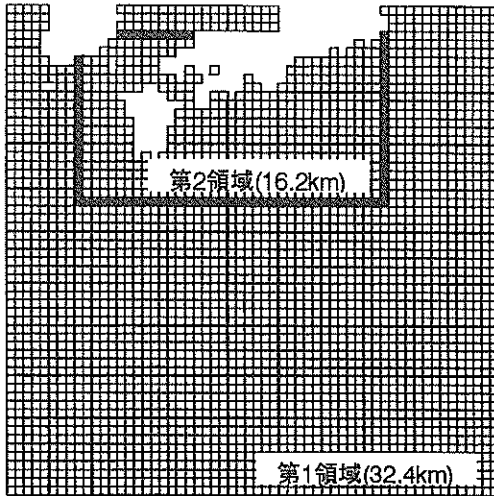


図-2.2 波浪推算の領域 (周防灘)

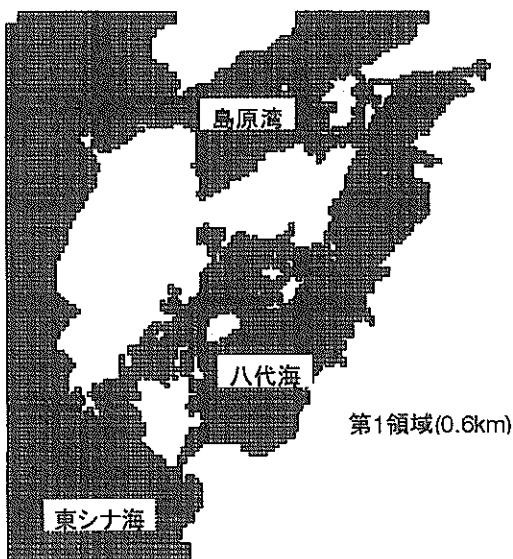


図-2.3 波浪推算の領域(八代海)

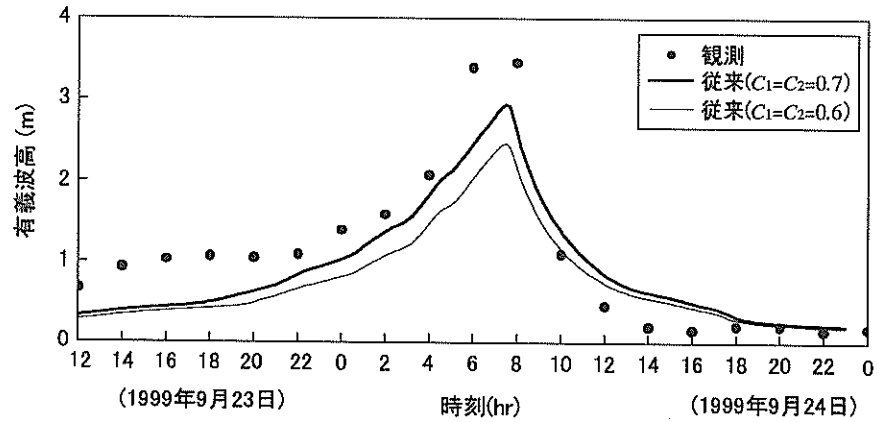


図-2.4 従来の方法による有義波高の追算値 (苅田)

図-2.4 は、周防灘の苅田 (位置は図-2.2 を参照) における有義波高の経時変化を示す。最大有義波高は $C_1=C_2=0.6$ の場合に 2.5m, $C_1=C_2=0.7$ でも 2.9m であり、何れの場合も観測値の 3.5m と比べてかなり小さい。なお、橋本・真期(2000)も、周防灘に 1/54deg (周防灘周辺で南北約 2.1km, 東西約 1.7km) 間隔の計算格子を用い、風速の低減係数を $C_1=C_2=0.6$ として、同様な結果を得ている。

2.3 高潮

高潮の推算では一般に、天文潮による水位の変化や流れを無視し、静水面として平均海面、朔望平均満潮位、被災時潮位などを与えてきた。そして、気圧低下による海面の吸い上げや強風による吹き寄せで生じる海水の運動の分だけを、次式に示すような、非線形長波近似した連続の式と運動方程式によって計算する。

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ & = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \\ & + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.12a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \\ & + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.12b)$$

ここに、 t は時刻, M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス, D は全水深 (= 静水深 h + 高潮偏差 η), ρ_w は海

水の密度, p_0 は海面気圧, A_h は水平渦動粘性係数である。また, τ_{sx}, τ_{sy} は x, y 方向の海面せん断応力, τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の底面せん断応力であり、それぞれ以下のように与えられる。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (2.13a)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (2.13b)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.14a)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.14b)$$

ここに、 W_x, W_y は海上風速 W の x, y 成分, n は Manning の粗度係数(0.025 程度)である。

また、 C_D は海面抵抗係数であり、本多・光易(1980)による式を用いる。

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (2.15)$$

すなわち、海面抵抗係数を風速だけの関数で与えており、波浪による海面粗度の変化までは考慮していない。なお、WAM においても、本研究で用いる cycle 4 より一つ前の cycle 3 では海面抵抗係数を風速だけ関数で与えていた。

$$C_D = \begin{cases} 1.2875/10^3 & (W < 7.5) \\ (0.8 + 0.065W)/10^3 & (W \geq 7.5) \end{cases} \quad (2.16)$$

この式は Wu(1982)によって提案されたもので、図-2.5 に示すように、本多・光易(1980)よりやや大きい値になっている。

以上のような方法によって台風 9918 号による高潮を追算した。追算に用いた計算領域は、図-2.6 および 2.7 に示すように、外洋を再現する格子間隔の粗い計算領域の内部に、格子間隔の細かい計算領域を接続させたもの

である。周防灘と八代海の全域を0.6km 間隔の計算格子で再現した。

図-2.8はその結果を検潮記録や痕跡(河合ら, 2000a, 2000c)と比較したものである。図には3種類の痕跡による高潮偏差を示しており、○印は潮位を示すと考えられる痕跡、×印は越波による浸水など潮位より高いと考えられる痕跡、△印はピークが欠測した検潮記録や高潮により水没した構造物の天端高などから、それぞれ求めた

ものである。推算値を示す実線が■印と○印を貫き、×印よりも低く、△印よりも高ければ、その推算値は正しいと判断できる。八代海では検潮記録や痕跡による値に近い傾向が得られているが、周防灘では西部(図の地点①~⑦)で過小評価している。例えば、①荻田では、観測値が2.1mであるのに対し、推算値は1.2mである。なお、河合ら(2000a, 2000c)も最小で0.2km 間隔の計算格子を用いて同様な結果を得ている。

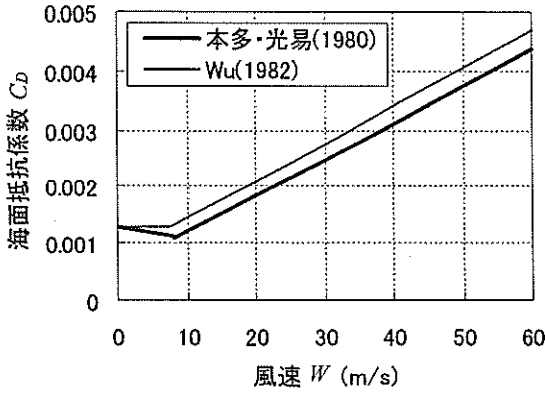


図-2.5 風速と海面抵抗係数の関係

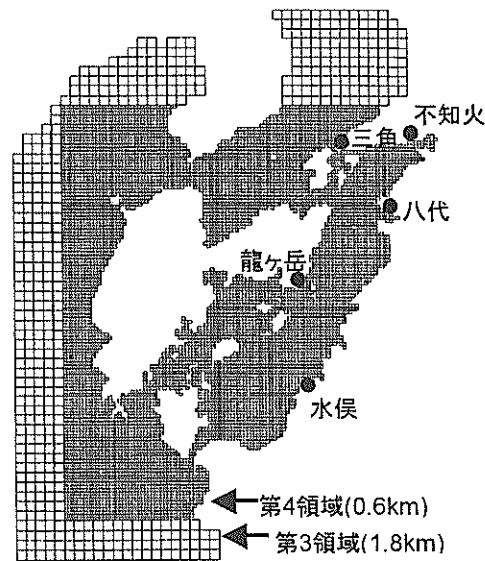
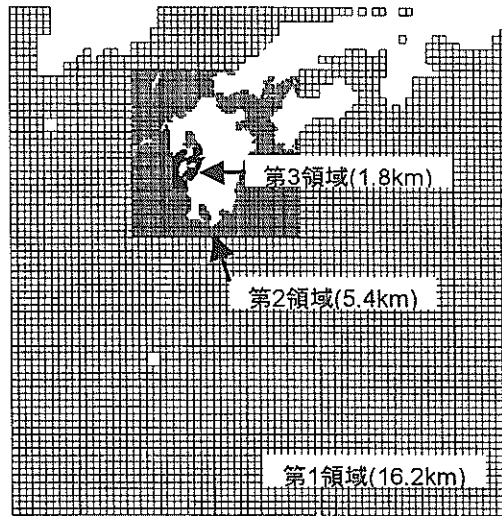


図-2.7 高潮推算の領域 (八代海)

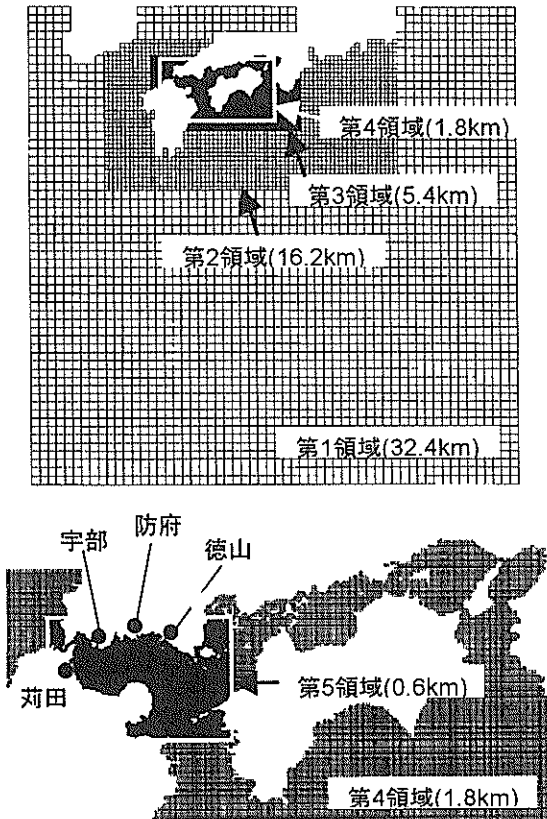
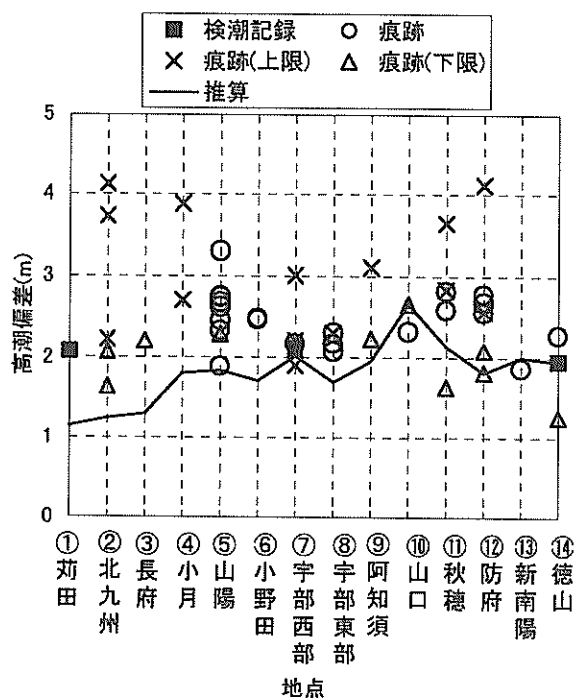
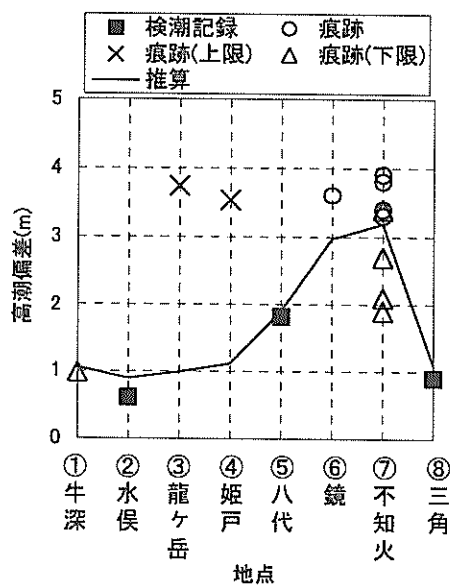


図-2.6 高潮推算の領域 (周防灘)



(a) 周防灘



(b) 八代海

図-2.8 従来の方法による高潮偏差の追算値

3. 波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築

3.1 気圧分布の歪みと SGW を考慮した海上風の推算

(a) 気圧分布の歪み

これまで一般に、台風の気圧分布には同心円の分布を

仮定してきたが、陸地に接近あるいは上陸した台風の気圧分布は歪んでいることがある。そこで、台風の半径 r_0 を、台風の中心からみた方向 β のフーリエ級数 $r_0(\beta)$ で与える (Veltcheva and Kawai, 2002 ; Veltcheva・河合, 2002)。

$$r_0(\beta) = \bar{r}_0 + r_{01} \cos(\beta - \alpha_1) + r_{02} \cos(2\beta - \alpha_2) \quad (3.1)$$

ここに、 \bar{r}_0 , r_{01} , r_{02} は半径, α_1 , α_2 は位相であり、台風周辺の気象官署で観測された気圧をもとに最小二乗法で求める。台風 9918 号が接近していた時間帯 (1999 年 9 月 24 日 5 時~11 時) についてあてはめた結果は表-3.1 の太枠内に示す通りである (Veltcheva and Kawai, 2002)。なお、この表において 9 月 23 日 3 時以前の気圧深度が 0 または 40hPa になっているが、これらの値は波浪や高潮の推算において台風が存在しない状態から実際の気圧や風に穏やかに近づけるために用いる値であり、実際の値とは異なる。

(b) SGW

これまで風速低減係数 C_1, C_2 の値には 0.6~0.7 が使われてきた。しかしながら、台風の中心付近では、その三次元構造に起因して、海上風の風速が自由大気の風速に近いかそれ以上になることが知られている。このような SGW を考慮した海上風の風速 W を表す式として、次式が提案されている。

$$W = C_1(X) U_G \quad (3.2a)$$

$$C_1(X) = C_1(\infty) + [C_1(X_p) - C_1(\infty)] \left(\frac{X}{X_p} \right)^{k-1} \cdot \exp \left\{ \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left[1 - \left(\frac{X}{X_p} \right)^k \right] \right\} \quad (3.2b)$$

$$U_G = \frac{1}{2} \left\{ -(f r - V_T \sin \beta) + \sqrt{(f r - V_T \sin \beta)^2 + 4 \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \right\} \quad (3.2c)$$

ここに、 $X=r/r_0$, $C_1(X)$ は風速低減係数である。この風速低減係数は、図-3.1 に示すように $X=X_p$ で最大値 $C_1(X_p)$ をとる関数になっており、その最大値については様々なものが提案されている (藤井・光田, 1986; Mitsuta and Fujii, 1987; 山口ら, 1995)。例えば、②~④は異なる台風に対して求められた係数であり、気圧深度など台風の勢力によって係数に違いがあるものと考えられる。Veltcheva and Kawai(2002)および Veltcheva・河合(2002)は④の係数を仮定して周防灘の高潮を追算しているが、本研究では⑤~⑦のように台風の気圧深度 Δp も考慮した

表-3.1 海上風の推算に用いる台風 9918 号の属性

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 経度 (deg) | 緯度 (deg) | 気圧深 度(hPa) | 移動速 度(km/h) | 半径(km) | | | 位相(rad) | |
|----|---|----|----|---|-------------|-------------|---------------|----------------|--------|----------|----------|------------|------------|
| | | | | | | | | | r_0 | r_{01} | r_{02} | α_1 | α_2 |
| 99 | 9 | 22 | 6 | 0 | 127.2 | 26.6 | 0 | 11.1 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 0 | 0 | 127.2 | 26.6 | 0 | 11.1 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 3 | 0 | 127.2 | 27.0 | 40 | 13.0 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 6 | 0 | 127.3 | 27.4 | 83 | 14.8 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 9 | 0 | 127.3 | 27.8 | 83 | 14.8 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 12 | 0 | 127.5 | 28.3 | 83 | 16.7 | 45.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 15 | 0 | 127.8 | 28.9 | 78 | 20.4 | 46.3 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 18 | 0 | 128.1 | 29.5 | 78 | 24.1 | 47.5 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 19 | 0 | 128.2 | 29.7 | 78 | 24.1 | 47.9 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 20 | 0 | 128.3 | 30.0 | 78 | 24.1 | 48.3 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 21 | 0 | 128.6 | 30.4 | 78 | 25.9 | 48.8 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 22 | 0 | 128.6 | 30.5 | 78 | 27.8 | 49.2 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 23 | 23 | 0 | 128.8 | 30.8 | 78 | 31.5 | 49.6 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 24 | 0 | 0 | 129.0 | 31.0 | 78 | 31.5 | 50.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 24 | 1 | 0 | 129.2 | 31.3 | 78 | 33.3 | 51.3 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 24 | 2 | 0 | 129.4 | 31.5 | 78 | 33.3 | 52.5 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 24 | 3 | 0 | 129.7 | 31.7 | 78 | 35.2 | 53.8 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 9 | 24 | 4 | 0 | 129.9 | 32.2 | 73 | 37.0 | 55.0 | 0.0 | 0.0 | 0.05 | -3.03 |
| 99 | 9 | 24 | 5 | 0 | 130.3 | 32.6 | 68 | 40.7 | 56.0 | 9.7 | -2.9 | 0.05 | -3.03 |
| 99 | 9 | 24 | 6 | 0 | 130.5 | 33.0 | 63 | 44.4 | 59.5 | 10.8 | -7.1 | -0.13 | 2.70 |
| 99 | 9 | 24 | 7 | 0 | 130.8 | 33.4 | 63 | 44.4 | 57.6 | 13.5 | -3.2 | -0.16 | -4.48 |
| 99 | 9 | 24 | 8 | 0 | 131.2 | 33.9 | 63 | 50.0 | 52.5 | 5.8 | -3.5 | -1.24 | 0.94 |
| 99 | 9 | 24 | 9 | 0 | 131.3 | 34.3 | 53 | 51.9 | 80.4 | 21.8 | -9.9 | -0.21 | 4.61 |
| 99 | 9 | 24 | 10 | 0 | 131.8 | 34.8 | 53 | 57.4 | 72.1 | 16.7 | -12.6 | -0.68 | 3.79 |
| 99 | 9 | 24 | 11 | 0 | 132.2 | 35.3 | 53 | 59.3 | 102.8 | 41.9 | -22.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 12 | 0 | 132.6 | 35.7 | 48 | 61.1 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 13 | 0 | 132.7 | 36.2 | 45 | 61.1 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 14 | 0 | 133.1 | 36.5 | 45 | 76.4 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 15 | 0 | 133.7 | 37.1 | 45 | 77.0 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 16 | 0 | 134.8 | 37.7 | 45 | 78.6 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 17 | 0 | 135.4 | 38.1 | 45 | 79.2 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 18 | 0 | 135.6 | 38.8 | 40 | 55.2 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 19 | 0 | 135.6 | 39.0 | 40 | 53.1 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 20 | 0 | 136.2 | 39.5 | 40 | 65.5 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 21 | 0 | 137.0 | 40.0 | 40 | 66.5 | 102.8 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 22 | 0 | 137.4 | 40.4 | 40 | 69.6 | 110.0 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |
| 99 | 9 | 24 | 23 | 0 | 137.9 | 40.8 | 40 | 61.1 | 124.0 | 0.0 | 0.0 | 1.38 | 0.25 |

Mitsuta and Fujii(1987)のモデルを導入することにした。
このモデルでは風速低減係数の最大値 $C_1(X_p)$ を次式によって与えている。

$$C_1(X_p) = \frac{2}{3} \left\{ 1 + 10^{(0.0231\Delta p - 1.95)} \right\} \quad (3.3)$$

この式は、図-3.2 に示すように、台風が発達して気圧深度 Δp が大きくなると風速低減係数の最大値 $C_1(X_p)$ を大きく与え、減衰して気圧深度 Δp が小さくなると中心から無限遠点の値 $C_1(\infty)=0.66$ に近い値を与える関数形になっている。

また、自由大気の風の推算において、従来は傾度風と場の風を別々に求めてからベクトル合成する方法をとっていたが、式(3.2c)の U_G は台風の移動を考慮した座標系

における気圧勾配、遠心力、コリオリ力の釣り合いから一度に風速を求めるものである。

以上のような気圧分布の歪みと SGW を考慮して海上風を推算した結果を図-3.3 に示す。SGW を考慮することによって台風が最接近した頃の風速は全体的に大きくなり、従来の推算法では過小評価されていた(a)の荊田沖においても観測値に近い風速が得られた。なお、新門司の風速は高さ 30m で観測されたものであり、10m での風速はこれより小さいものと考えられる。また、風速のピークは台風の眼の前後に一つずつあり、従来のベクトル合成による推算では眼の後にあるピークの方が大きかった。しかしながら、自由大気の風の推算に式(3.2c)を用いることで、眼の後にあるピークはかなり緩和された。

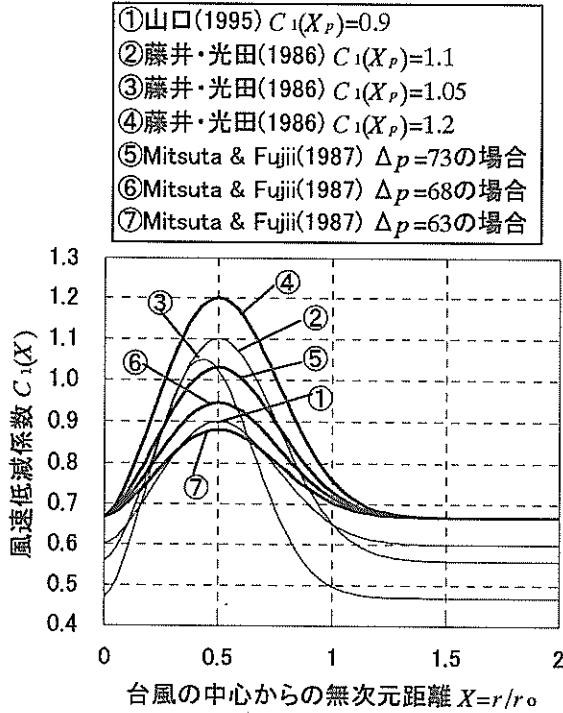


図-3.1 SGWを考慮した風速低減係数

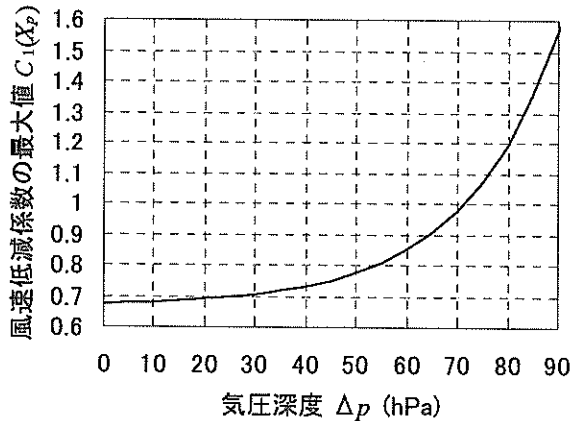
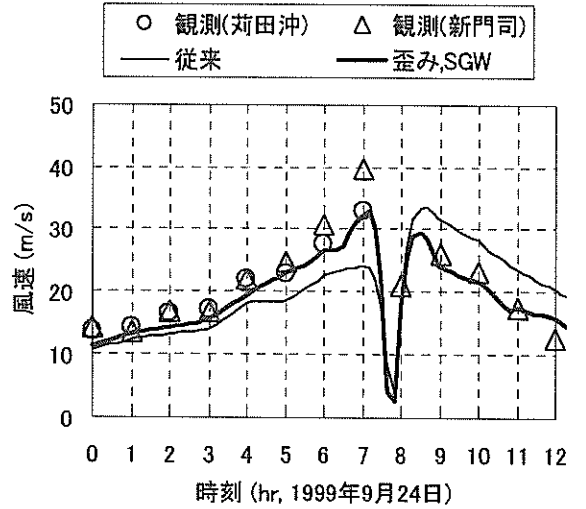


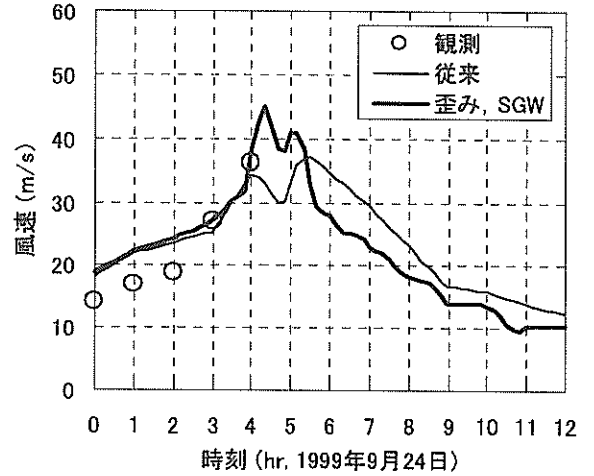
図-3.2 風速低減係数の最大値

3.2 天文潮の導入

これまで一般に、波浪推算や高潮推算では天文潮を無視してきた。しかし、満潮で水深が深くなると高潮の主な原因の一つである吹き寄せ効果が小さくなるように、水深の浅い内湾の、特に吹き寄せの効果が蓄積される湾奥では、天文潮位の変化が高潮偏差に影響を及ぼすものと考えられる。特に本研究で対象とする周防灘と八代海は、日本の代表的な内湾の中では有明海と並んで、最も湾奥部の水深が浅く、天文潮差も大きい。また、波の発達や屈折は、天文潮と高潮を合わせた潮位や流れの変化



(a) 苅田 (周防灘)



(b) 龍ヶ岳 (八代海)

図-3.3 気圧分布の歪みとSGWを考慮した海上風の推算値

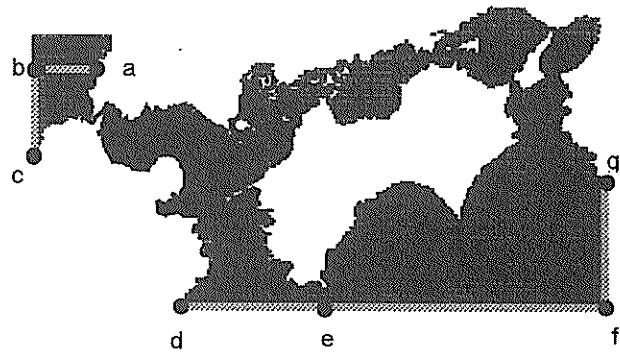
に影響される。

そこで、図-3.4に示すように、周防灘や八代海から離れたところに線境界を設け、この線上の計算格子に時々刻々と変化する天文潮位を与えることで、計算領域内に天文潮を発生させた。線境界における潮位は、まず表-3.2に示す主要4分潮の調和定数(海上保安庁, 1992)を用いて代表地点(周防灘ではa~g, 八代海ではa~e)における潮位を計算し、これらを内挿して各計算格子における潮位を与えた。

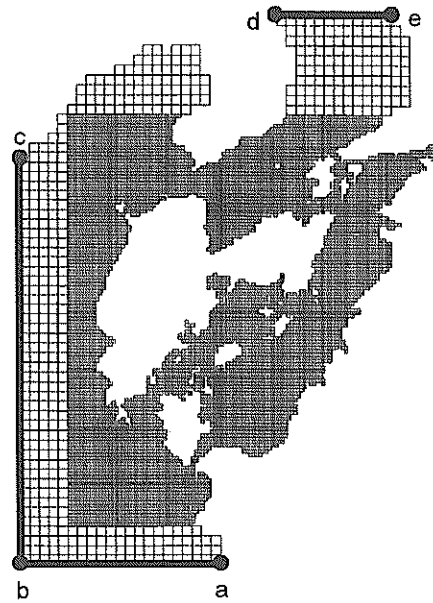
このような方法によって計算した1999年9月22日6

時から 25 日 0 時の天文潮位を図-3.5 に推算①として示す。天文潮を起動させたときに生じる短周期の振動は概ね 6 時間以内におさまる、それ以降は滑らかな天文潮位の変化となっている。

しかしながら、こうして発生させた天文潮は、周防灘や八代海の内部において、その位置の調和定数から直接計算したものより干満差が大きく、位相も遅れている。その原因としては、線境界の代表地点の調和定数に、数十 km 離れた位置にある検潮所の値をそのまま用いたことが考えられる。そこで、表に示した平均半潮差に対して周防灘では 0.75、八代海では 0.95 を乗じて補正したものを、代表地点の平均半潮差として用いた。また、周防灘では 1 時間、八代海では 30 分だけ位相を早めた。これらの補正によって、天文潮位は図-3.5 の推算②のようになり、その位置の調和定数から直接計算した潮位とほぼ重なった。なお、周防灘では 9 月 24 日 6~10 時、八代海では同日 4~7 時に波浪や高潮が顕著となったが、これらの時間帯には既に安定した天文潮が再現されている。



(a) 周防灘



(b) 八代海

図-3.4 天文潮を入射させる線境界

表-3.2 線境界の代表地点の調和定数

| 海域 | 地点 | 参照した 検潮所名 | 平均半潮差(cm) | | | | 遅角(deg) | | | |
|-----|----|--------------|-----------|------|------|------|---------|-------|-------|-------|
| | | | M2 | S2 | K1 | O1 | M2 | S2 | K1 | O1 |
| 周防灘 | a | 津屋崎 | 48.0 | 23.0 | 21.0 | 13.0 | 281.0 | 303.0 | 271.0 | 254.0 |
| | b | 響灘 | 30.0 | 15.0 | 10.0 | 10.0 | 285.0 | 305.0 | 285.0 | 260.0 |
| | c | 萩 | 16.3 | 8.3 | 9.8 | 10.9 | 317.0 | 337.5 | 326.2 | 300.6 |
| | d | 細島 | 50.3 | 21.9 | 20.5 | 15.6 | 176.9 | 200.6 | 189.2 | 169.3 |
| | e | 土佐清水 | 50.8 | 22.2 | 21.6 | 16.4 | 176.0 | 200.1 | 189.7 | 169.9 |
| | f | 紀伊沖 | 45.0 | 20.0 | 21.0 | 16.5 | 176.0 | 200.0 | 188.0 | 168.0 |
| | g | 串本 | 45.7 | 20.5 | 21.9 | 16.7 | 175.3 | 198.4 | 187.9 | 166.7 |
| 八代海 | a | 阿久根 | 79.7 | 34.9 | 25.4 | 19.7 | 221.1 | 247.0 | 205.6 | 185.4 |
| | b | 牛深 | 85.0 | 36.0 | 26.0 | 20.0 | 226.0 | 255.0 | 209.0 | 189.0 |
| | c | 網場 | 94.9 | 40.8 | 24.8 | 20.1 | 234.0 | 261.6 | 206.8 | 178.0 |
| | d | 島原 | 135.4 | 56.0 | 25.3 | 20.2 | 257.8 | 299.4 | 219.0 | 204.1 |
| | e | 熊本 | 134.7 | 57.9 | 28.1 | 21.2 | 255.1 | 290.7 | 217.5 | 197.3 |

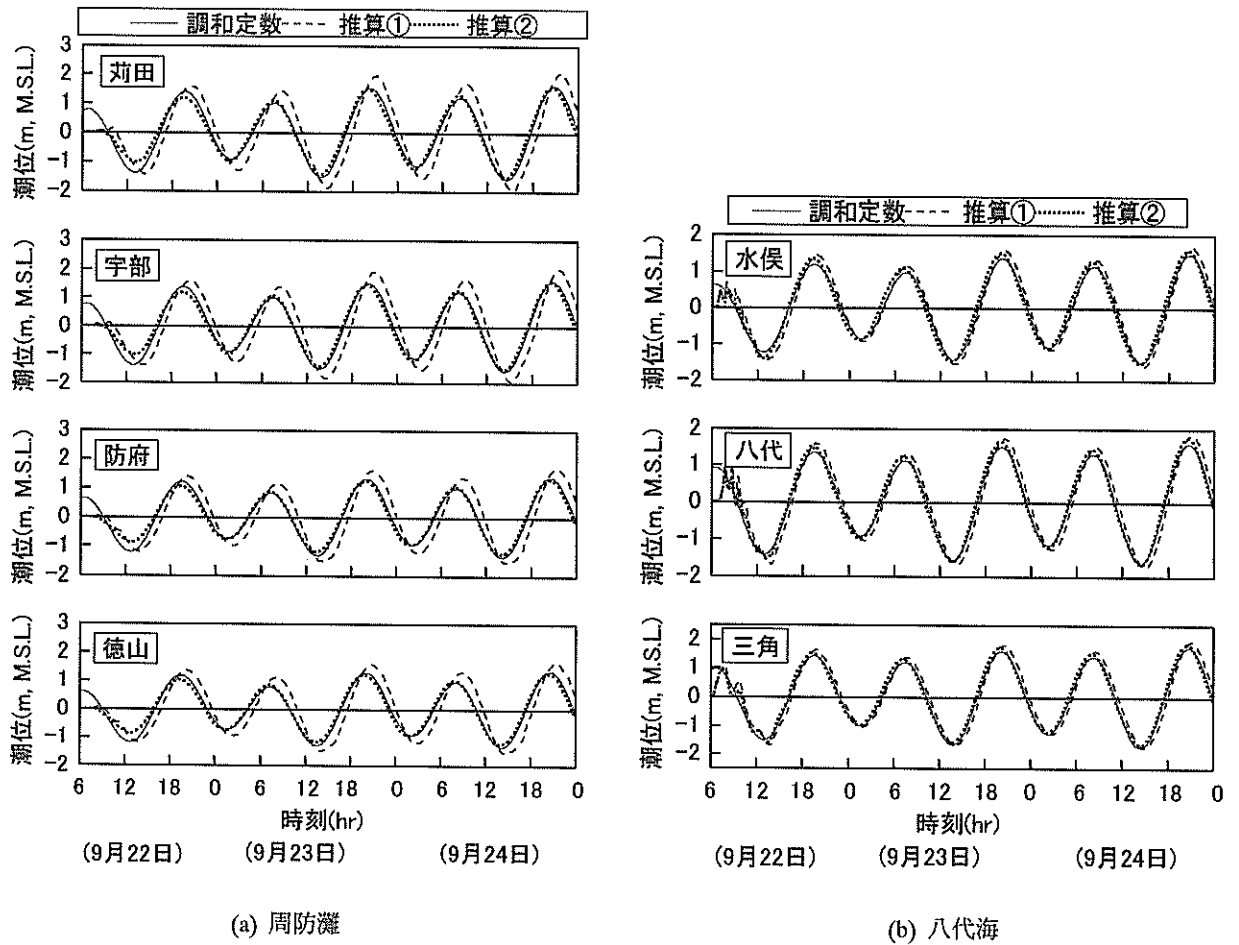


図-3.5 天文潮の再現

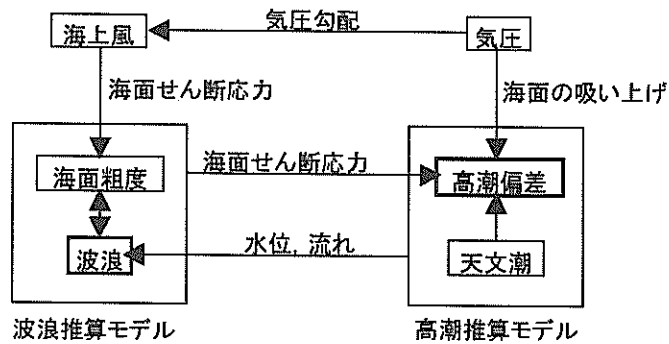


図-3.6 波浪推算モデルと高潮推算モデルの結合

3.3 波浪推算と高潮推算の結合

これまで一般に、波浪推算と高潮推算はそれぞれ独立して行われてきた。これに対し本研究では、波浪推算と高潮推算の間で必要な変数を双方向にやりとりしながら両方の推算を同時に進める、新たな推算モデル WASM (Wave and Storm surge Model の略) を構築した。その構成を図-3.6 に示す。このモデルでは、台風の気圧分布の歪みやSGWを考慮して推算した海上風 (3.1節を参照) を、波浪推算と高潮推算に共通して与える。その波浪推算には WAM cycle 4 (2.2節を参照) を用い、高潮や天文潮による非定常な水位や流れを考慮できるように改良している。また、高潮推算には非線形長波方程式に基づくモデル (2.3節を参照) を用い、天文潮を線境界から入射させ (3.2節を参照)、波浪推算モデルで計算された海面抵抗係数で海面せん断応力を計算するように改良している。

周防灘に対する計算では、波浪推算を 60s 間隔、高潮推算を 4s 間隔、両モデル間のデータ (水位や流れ、海面

抵抗係数) の受け渡しを 2min 間隔で行った。八代海に対する計算では、波浪推算を 20s、高潮推算を 10s、両モデル間の受け渡しを 2min 間隔で行った。

4. 台風9918号による波浪・高潮の追算

4.1 周防灘の波浪・高潮

(a) 波浪

苅田 (位置は図-2.6 を参照) における有義波高の経時変化を図-4.1(a) に示す。従来の推算法では風速低減係数 C_1, C_2 を 0.7 とした場合でも有義波高の最大値が 2.9m であったが、海上風の推算に気圧分布の歪みやSGWを考慮すると約 1割大きい 3.2m が得られた。これに天文潮や高潮を考慮すると、水位と流れによってそれぞれ 0.1m ずつ大きくなり、観測値の 3.5m に近い 3.4m が得られた。したがって、内湾を対象とした波浪推算においては、海上風の推算に加え、天文潮や高潮の影響も重要であることが分かる。

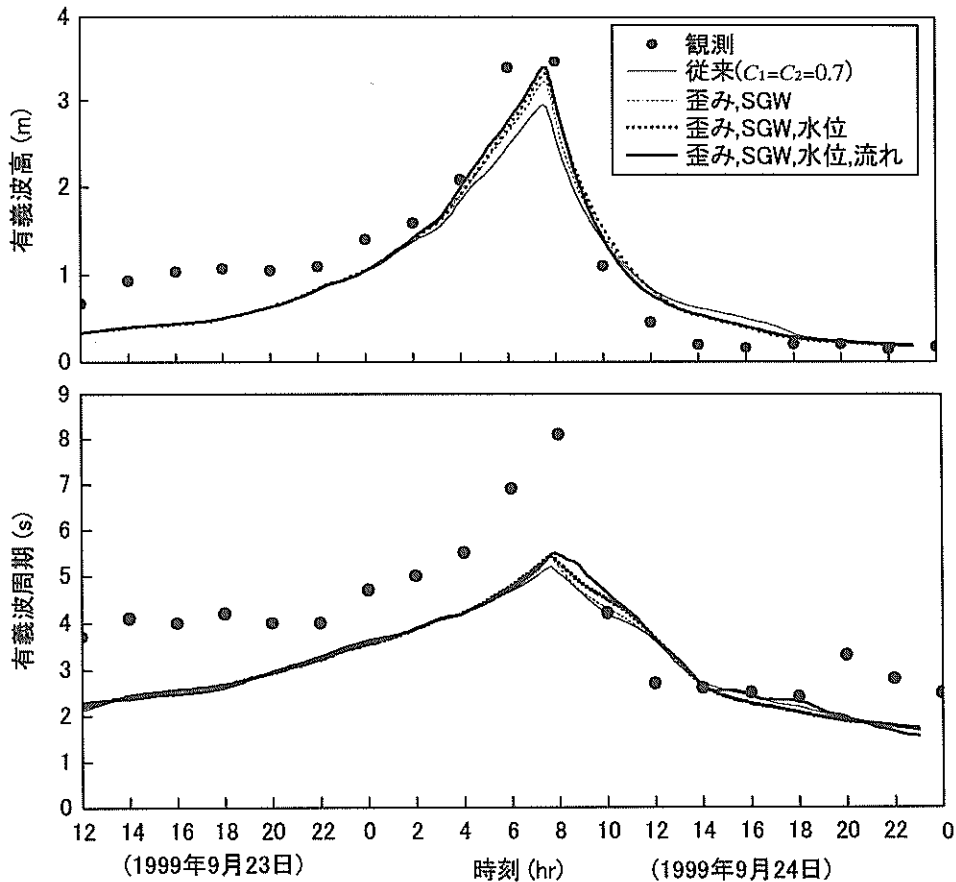


図-4.1 苅田における波浪の経時変化 (周波数分割数 $N_{fre}=35$)

一方、(b)の有義波周期については、波浪に対して追い風・順流の条件となる9月24日2時から7時半頃までの間、水位や流れの影響があまり現れていない。しかし、逆風・逆流の条件となる7時半から12時にかけては、水位や流れを考慮することによって有義波周期がそれぞれ約0.2sずつ長くなっている。なお、推算された有義波周期は観測値よりも全体的に短く、WAM cycle 4における非線形相互干渉の考慮が必ずしも十分ではないことも分かる。

ところで、WAMのデフォルトの設定では周波数成分の数 N_{fre} を25（最小周波数：0.04177 Hz，最大周波数：0.4114 Hz）にしており、この値は主として外洋における波浪の計算を想定して選ばれたものと考えられる。ところが、台風接近時の内湾の波浪推算では、外洋よりも高周波数成分の再現が重要になるものと考えられる。そこで本研究では、周波数成分の数を35に増やし、最大周波数を1.067 Hzまで大きくした計算条件を基本にした。ただし、少なくとも台風9918号による周防灘の波浪に限

って言えば、図-4.2に示すように、周波数分割数 N_{fre} が有義波高や有義波周期に及ぼす影響は、ピーク時の付近ではそれほど大きくない。

荻田以外の地点における波浪推算の結果を比較するために、周防灘とその周辺海域における最大有義波高の分布を図-4.3に示す。従来の方法による(a)と(b)では周防灘の西岸で有義波高が2m台である。台風の気圧分布の歪みやSGWを考慮して海上風を推算すると、図-3.3(a)からも分かるように台風の眼の前方で吹く東風が強まり、その結果、周防灘の西岸における有義波高は(c)に示すように3mを超える。また、(c),(d),(e)の比較から、岸のすぐ近くを除けば、波浪に及ぼす水位や流れの影響は小さく、従来から行われていたように高潮推算と独立した波浪推算でも支障のないことが分かる。ただし、豊予海峡から周防灘の入口にかけての海域では、流れの影響が比較的顕著に表れている。なお、(e)と(f)の比較で分かるように、周波数成分の数による違いも周防灘の中では比較的小さい。

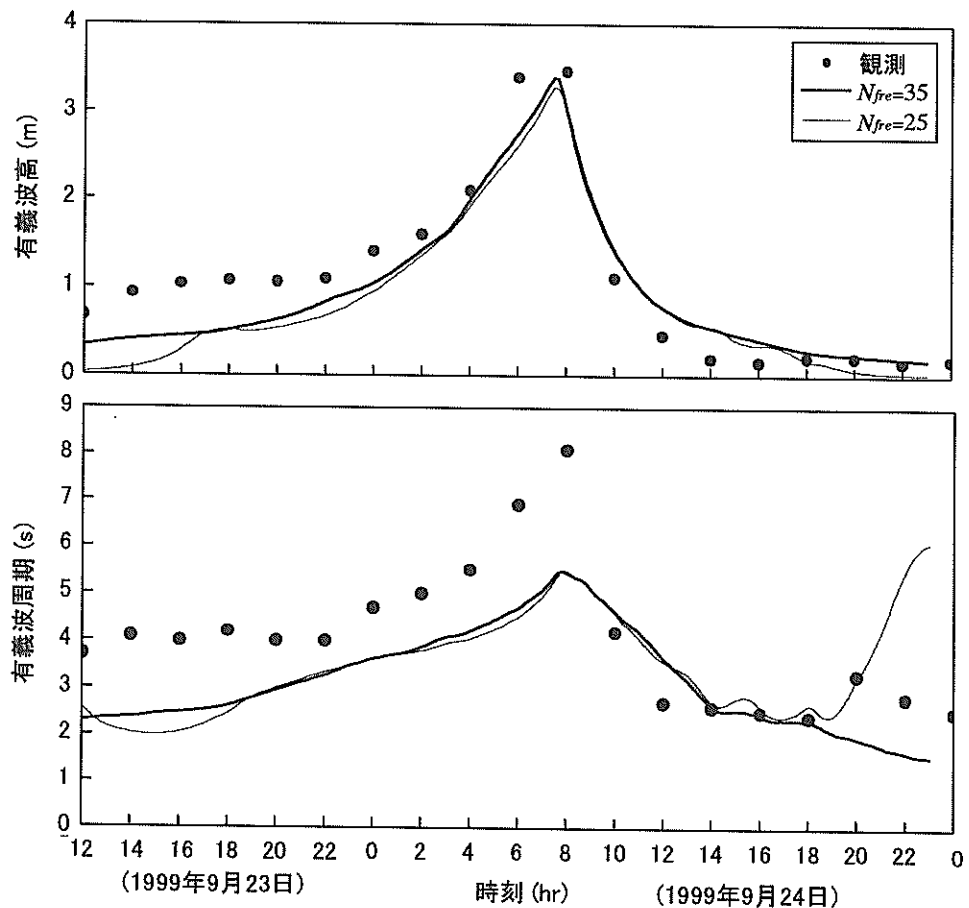
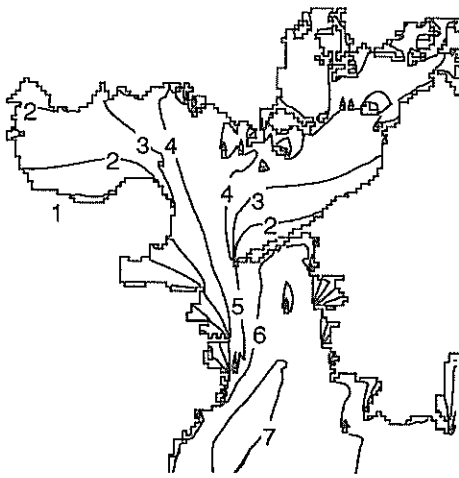
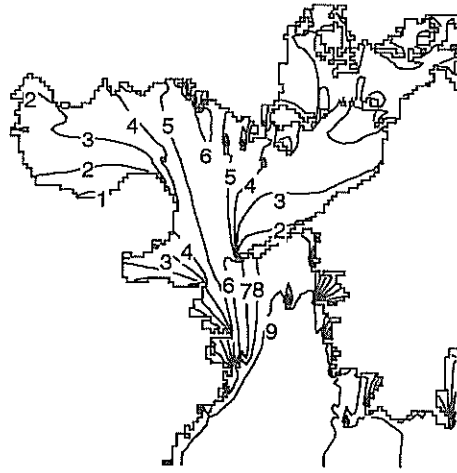


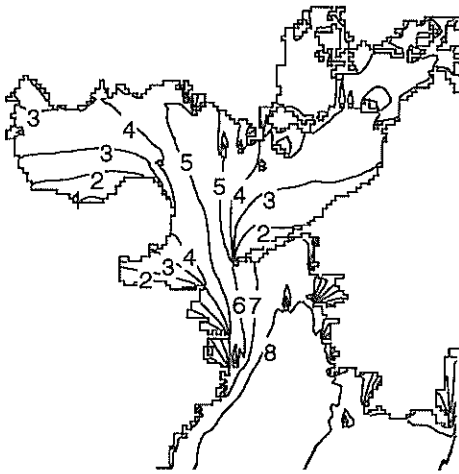
図-4.2 周波数成分の数 N_{fre} が波浪に及ぼす影響



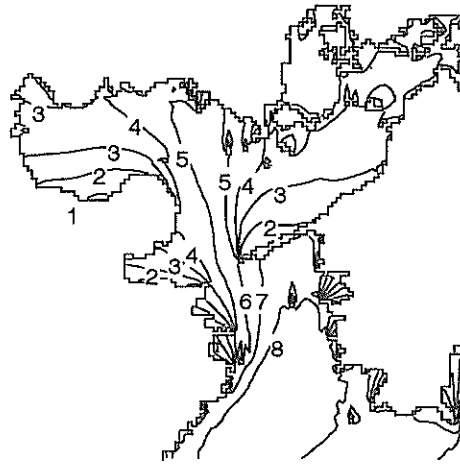
(a) 従来の方法($C_1=C_2=0.6$)



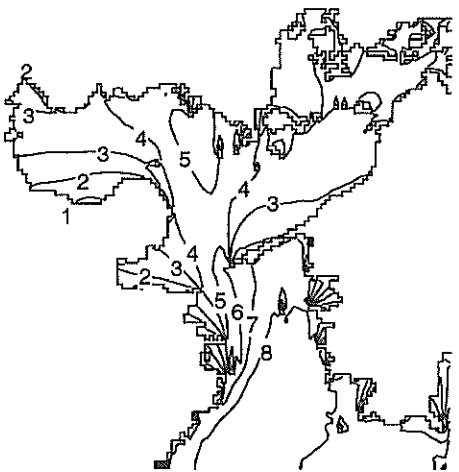
(b) 従来の方法($C_1=C_2=0.7$)



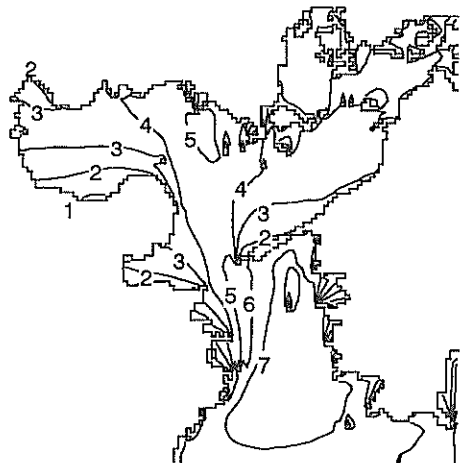
(c) 気圧分布の歪みとSGWを考慮



(d) 歪み, SGW, 水位を考慮



(e) 歪み, SGW, 水位, 流れを考慮



(f) 周波数成分の数 N_{fc} をデフォルト値 25 にした場合

図-4.3 周防灘における最大有義波高の分布

(b) 高潮

周防灘の代表地点における最大高潮偏差を図-4.4 に示す(①荻田~⑭徳山の位置は後出の図-4.5(a)を参照). 従来の方法($C_1=C_2=0.7$)では, ①荻田~⑦宇部西部において, 推算値が現地調査による値を大きく下回っていた. そこで, 海上風の推算に台風の気圧分布の歪みや SGW を考慮すると, 高潮偏差は①荻田から③長府にかけて大きくなり, ⑦宇部西部から⑫防府にかけては逆に小さくなった. これに天文潮も考慮すると, 周防灘全体としては高潮偏差に大きな変化がないものの, ①荻田や⑦宇部西部のように約 0.3m 増加した場所もある. さらに, 波浪推算の海面抵抗係数を導入すると, 周防灘の西へ行くほど, すなわち台風接近時の風下側へ行くほど, 高潮偏差は大きくなった. 周防灘の西岸におけるその増加量は, 波浪推算の周波数成分の数 N_{pc} を 35 にした場合で 0.5m 程度であり, WAM のデフォルト値である 25 とした場合には 1m 程度に及んでいる. このうち現地調査による高潮偏差に近い値が得られたのは, 周波数分割数を 35 にした場合である. 周波数成分の数は, 図-4.2 および 4.3 に示したように有義波高にはそれほど大きな影響を及ぼさなくても, 吹き寄せの推算に用いる海面抵抗係数そのものの評価に対しては大きな影響を及ぼす可能性のあることが分かる.

図-4.5 は, 周防灘とその周辺の最大高潮偏差の分布を示す. 周防灘の奥部 (①荻田と⑦宇部を結ぶ線より関門海峡側の海域) においてコンターの向きを比較すると, 従来の方法(a)では山口県側で高潮偏差が大きくなっているのに対し, 海上風を修正した(b)~(f)では関門海峡側で大きくなっている. ただし, (c)では関門海峡の入口付近で高潮偏差がやや小さくなっている.

以上のことから, 高潮の発生原因として吹き寄せの効果が卓越する湾奥に対しては, 海上風の正確な推算に加え, 波浪による海面抵抗係数の変化も重要であることが分かる.

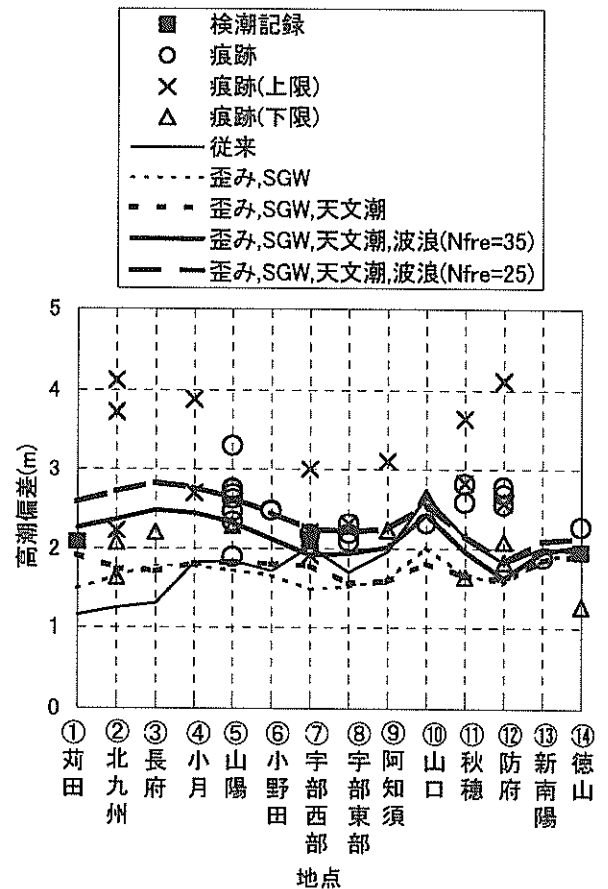
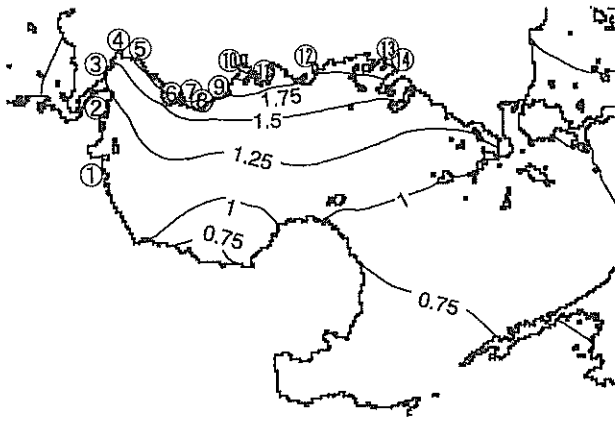
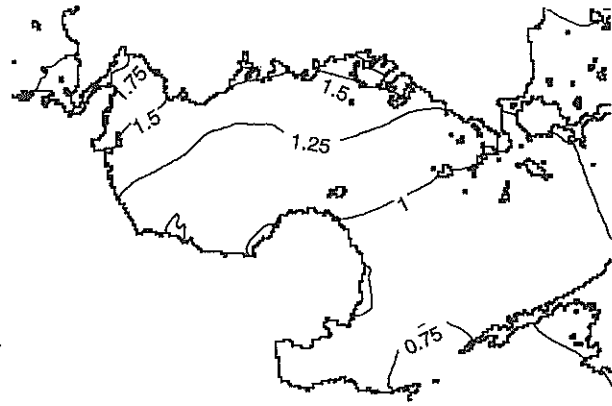


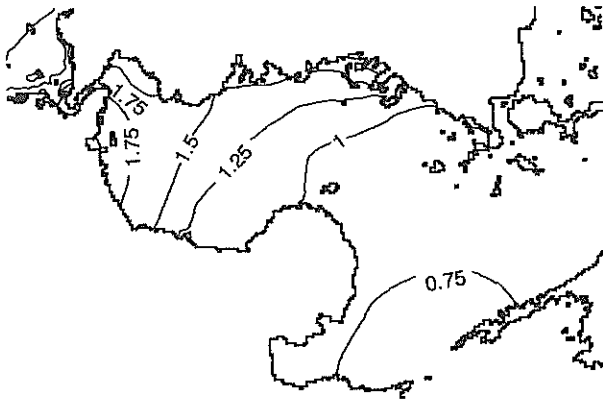
図-4.4 周防灘における最大高潮偏差の推算値と観測値



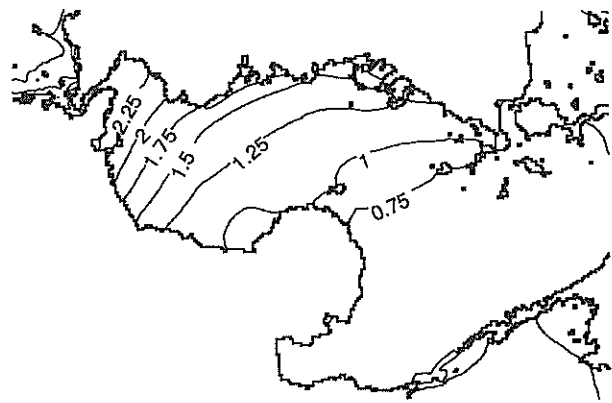
(a) 従来の方法($C_1=C_2=0.7$)



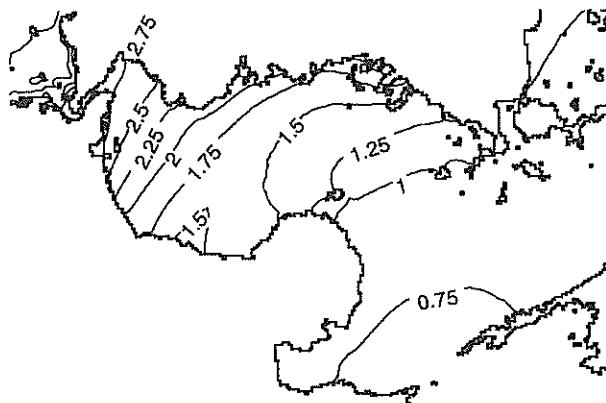
(b) 気圧分布の歪み, SGW を考慮



(c) 歪み, SGW, 天文潮を考慮



(d) 歪み, SGW, 天文潮, 波浪を考慮



(e) 周波数成分の数 N_{fc} をデフォルト値 25 に戻した場合

図-4.5 周防灘における最大高潮偏差の分布

4.2 八代海の波浪・高潮

(a) 波浪

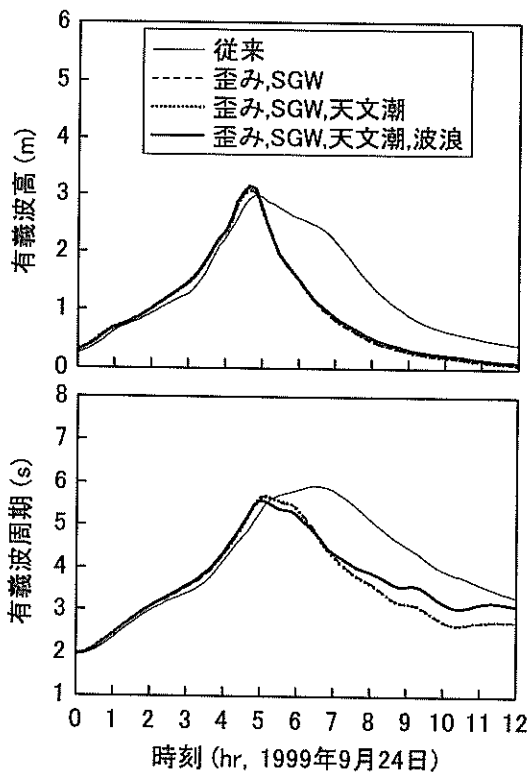
八代海の中部に位置する龍ヶ岳と湾奥に位置する不知火（詳細な位置については図-2.7を参照）における有義波高の経時変化を図-4.6に示す。

海上風の推算に気圧分布の歪みやSGWを考慮することによって、龍ヶ岳では5時頃に現れる有義波高の最大値がやや大きくなり、それ以降の有義波高は時間とともに急速に減少するようになった。有義波周期が最大値となる時刻も7時頃から5時頃に早まっている。一方、不知火でも、有義波高と有義波周期の両方で、最大値がやや小さくなり、その時刻は早まっている。

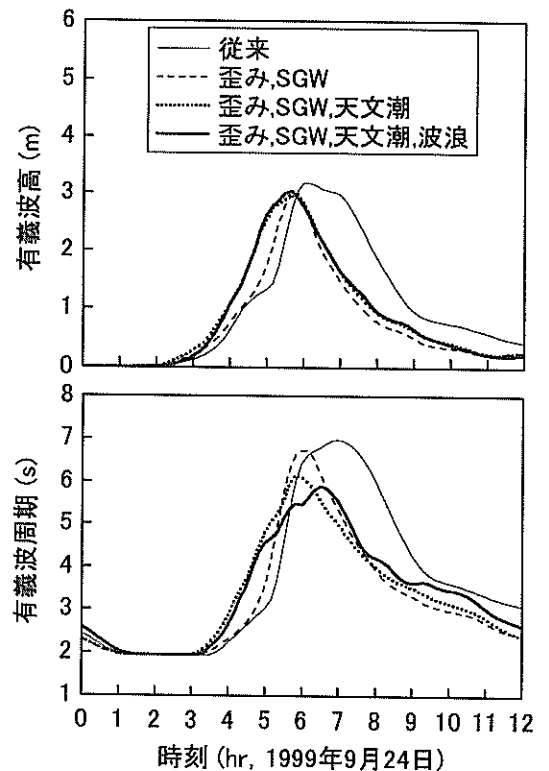
天文潮や高潮による水位の変化や流れは、水深の比較的深い龍ヶ岳の波浪にはほとんど影響を及ぼしておらず、このようなところに対しては、従来のように高潮推算と独立した波浪推算でも大きな支障はないことが分かる。ところが、不知火では、波浪推算に水位の変化を考慮すると、有義波高は早い時刻から増加し始め、例えば有義波高が2.5mを超える時刻は約20分早まっている。有義

波周期についても早い時刻から増加し始めるが、最大値では0.6s短くなる。さらに流れも考慮して波浪を推算すると、有義波高に及ぼす影響は小さいが、有義波周期は最大値で0.3s短くなった。したがって、湾奥の浅瀬を対象に波浪推算を行う場合には、高潮推算と結合させた波浪推算が必要であると考えられる。

ところで、平石ら(2000a, 2000b)は、第一世代波浪推算モデルの一つであるMRIモデルを用いて八代海の波浪を推算し、龍ヶ岳で越波災害が発生したと考えられる時刻(9月24日5時, 被災者に対するヒアリング調査による)の波浪として有義波高2.2m, 有義波周期7.4sを得ている。しかしながら、この波浪では被災地の浸水を十分に説明できず、例えば有義波高が3.0m, 有義波周期が9.0s, 潮位が当時の高潮推算による値よりも0.42m高くないと説明できないと指摘している。これに対し、第三世代波浪推算モデルのWAM cycle 4を用いると、被災時刻の付近で3m程度の波浪が得られている。ただし、有義波周期は5.5s程度と短く、後述するように龍ヶ岳周辺の高潮偏差は波浪推算と結合させた推算を行っても当時



(a) 龍ヶ岳



(b) 不知火

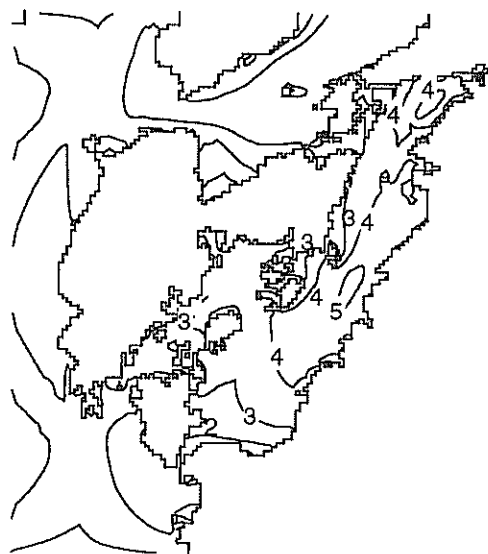
図-4.6 龍ヶ岳と不知火における波浪の経時変化

の結果とほとんど変わらない。

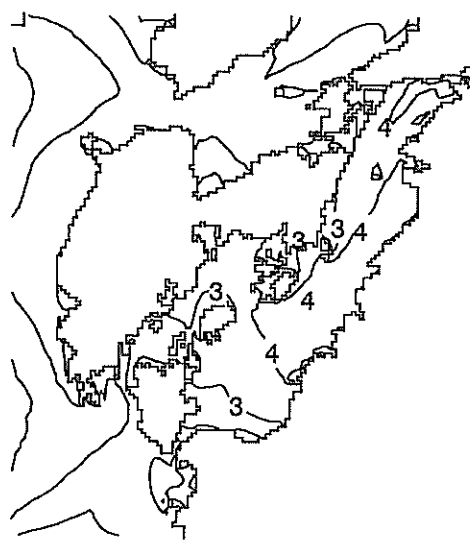
龍ヶ岳と不知火以外の地点についても波浪を比較するために、八代海全体の最大有義波高の分布を図-4.7に示す。(b), (c), (d)の比較から、海岸線のそばや湾奥部にある浅瀬を除けば、高潮や天文潮による水位や流れが波浪に及ぼす影響は小さいことが分かる。

なお、八代海の波浪推算では込み入った地形を再現す

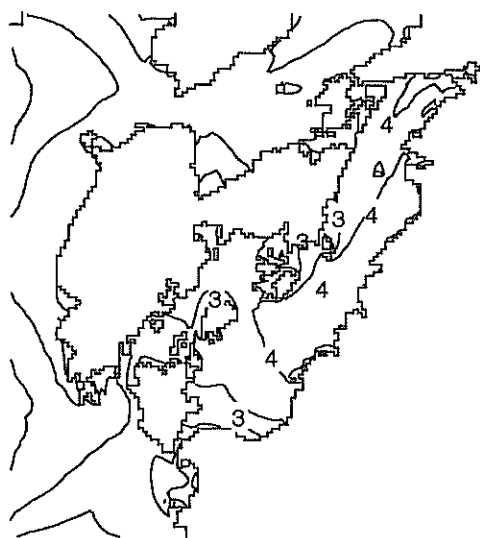
るために格子間隔を周防灘よりも細かい0.6kmにしており、波浪エネルギーの増加限界には Hersbach and Janssen (1999)のモデルを用いた。この増加限界モデルは WAM のデフォルトの周波数成分数($N_{fc}=25$)に対応したものであるため、本研究でも八代海に対してはこの周波数分割数を用いた。



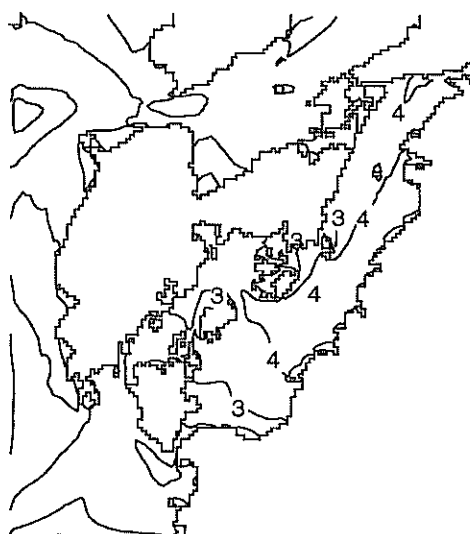
(a) 従来の方法($C_1=C_2=0.7$)



(b) 気圧分布の歪み, SGW を考慮



(c) 歪み, SGW, 水位を考慮



(d) 歪み, SGW, 水位, 流れを考慮

図-4.7 八代海における最大有義波高の分布

(b) 高潮

八代海の代表地点(これらの位置については図-4.9(a)を参照)における最大高潮偏差を図-4.8に示す。従来の方法でも、検潮記録や痕跡による高潮偏差を概ね再現することができている。また、海上風の推算に気圧分布の歪みやSGWを考慮しても、高潮偏差は0.1m程度しか変化していない。ところが、天文潮を考慮すると高潮偏差は、湾中部の②水俣～⑤八代で約0.2m減少し、湾奥部の⑥鏡や⑦不知火では約0.5mも減少した。さらに波浪の影響も考慮すると、高潮偏差は湾奥部のみで逆に約0.5m増加した。以上の結果、湾口部から湾奥部まで全体的に、従来の方法よりも現地調査による値に近い追算値が得られた。したがって、周防灘だけでなく八代海においても、天文潮や波浪を考慮して高潮を推算する必要がある。

八代海全体の最大高潮偏差を図-4.9に示す。従来の方法から波浪の影響を考慮した方法まで、コンターのパターンはよく似ており、湾奥に向かって高潮偏差が大きくなっている。ただし、湾奥部の高潮偏差の値は、気圧分布の歪み、SGW、天文潮、波浪のどこまでを考慮するかによって異なっている。

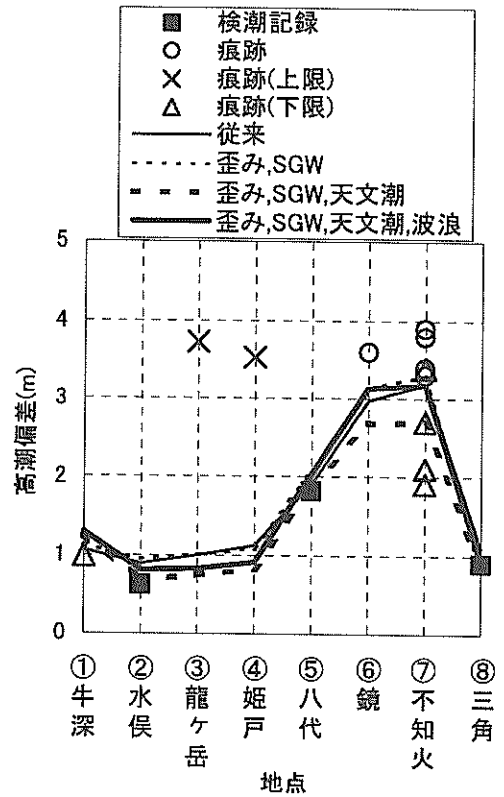
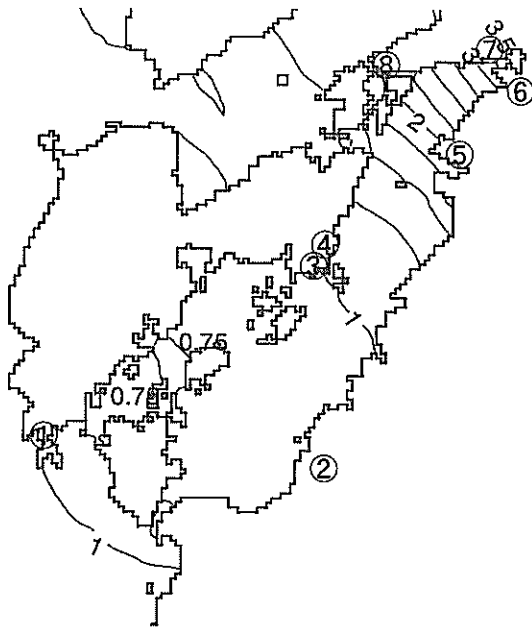
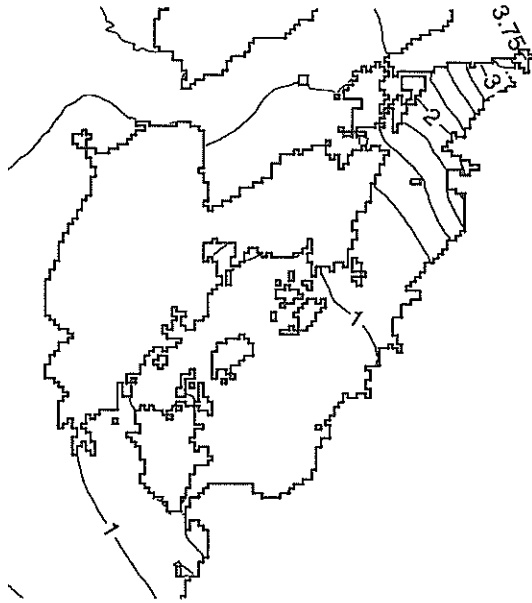


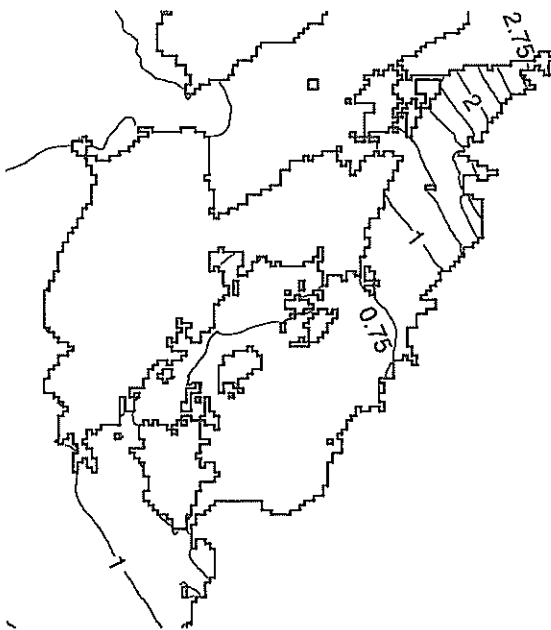
図-4.8 台風 9918 号による八代海の高潮偏差



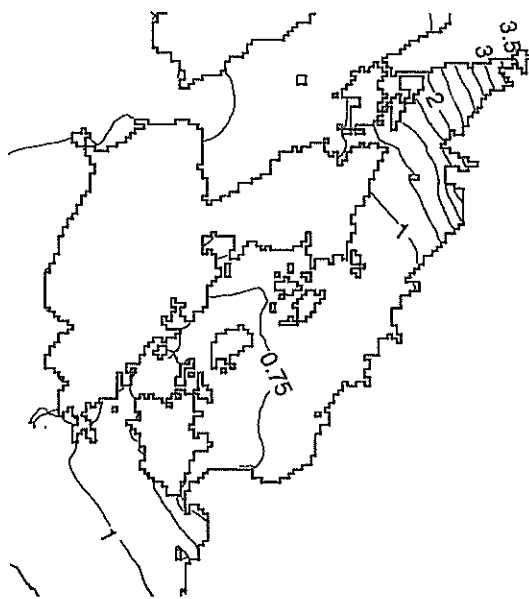
(a) 従来の方法($C_1=C_2=0.7$)



(b) 気圧分布の歪みと SGW を考慮



(c) 歪み, SGW, 天文潮を考慮



(d) 歪み, SGW, 天文潮, 波浪を考慮

図-4.9 八代海における最大高潮偏差の分布

5. 結論

本研究では、気圧分布の歪みやSGWを考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算の間で必要な変数を双方向にやりとりしながら両方の推算を同時に進める、新たな推算モデルWASMを構築した。その波浪推算には第三世代波浪推算モデルのWAM cycle 4を用い、高潮推算で得られた非定常な水位と流れを波の発達や屈折に考慮できるように改良した。また、高潮推算には非線形長波方程式に基づくモデルを用い、波浪推算で得られた波齢を考慮する海面抵抗係数を導入し、天文潮も合わせて計算できるようにした。

そして、このWASMを用いて、台風9918号による周防灘と八代海の波浪と高潮を追算した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 波浪や高潮の推算にはまず外力となる海上風の正確な推算が重要であり、そのためには気圧分布の歪みやSGWを考慮する必要がある。
- ・ 水深の浅いところでは、高潮と天文潮による水位の変化や流れの影響によって波高が変化する。また、高潮の原因として吹き寄せの効果が卓越する湾奥では、波浪の影響を考慮することで高潮偏差も変化する。
- ・ 気圧分布の歪みとSGWを考慮して海上風を推算し、さらにこれを外力として波浪推算と高潮推算を双方向に結合させた推算を行うことによって、従来の方法では過小評価されていた周防灘西部でも、観測値に近い波浪や高潮が得られた。

したがって、内湾の波浪や高潮の推算では、海上風の推算精度を高めるとともに、波浪・高潮の相互作用も考慮する必要がある。

6. あとがき

本研究では、波浪推算と高潮推算を双方向に結合させた推算モデルを構築し、台風9918号による周防灘と八代海の波浪と高潮を追算した。その結果、従来の方法では再現が難しかった周防灘西部の波浪や高潮も再現することができた。他の台風や他の海域の波浪・高潮についても同様に、従来のモデルと本研究で構築したモデルによって追算を行い、波浪・高潮の相互作用に関する検討を積み重ねていく必要があると考える。これを今後の課題としたい。

(2003年5月12日受付)

謝辞

本研究は運輸施設整備事業団基礎的研究制度によるも

のであり、本研究を進めるにあたっては、新田尚元気象庁長官、合田良實横浜国大名誉教授、高山知司京都大学防災研究所教授ほか多くの方々からご指導を得ており、ここに記して謝意を表します。

参考文献

海上保安庁(1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第742号, 267p.

河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男(2000a): 台風9918号による高潮の現地調査と追算, 港湾技研資料, No.971, 43p.

河合弘泰・平石哲也・佐藤孝夫・大川郁夫(2000b): 台風9918号による九州沿岸と瀬戸内海西部の高潮の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.321-325.

河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男・古屋正之・石井伸治(2000c): 八代海と周防灘における台風9918号の高潮・波浪災害の現地調査, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.311-315.

永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏(2000): 台風9918号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性, 港湾技研資料, No.969, 48p.

橋本典明・真期俊行(2000): 波浪推算法による台風9918号の異常波浪の再現計算, 港湾技研資料, No.970, 33p.

平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功(2000a): 熊本県竜ヶ岳町における台風9918号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.306-310.

平石哲也・平山克也・河合弘泰(2000b): 台風9918号による越波災害に関する一考察, 港湾技研資料, No.972, 19p.

藤井 健・光田 寧(1986): 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, 京都大学防災研究所年報, 第29号, B-1, pp.229-239.

本多忠夫・光易 恒(1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93.

Veltcheva, A.D.・河合弘泰(2002): 台風の気圧分布の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, pp.241-245.

Hersbach, H. and P.A.E.M. Janssen (1999): Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model (WAM). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.16, pp.884-892.

Janssen, P.A.E.M. (1989): Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, *Journal of Physical*

Oceanography, vol.19, pp.745-754.
 Janssen, P. A. E. M. (1991): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, Journal of Physical Oceanography, vol.21, pp.1631-1642.
 Komen, G.J. et al. (1994): Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge University Press.
 Mitsuta, Y. and T. Fujii (1987): Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.37, Part 4, No.329, pp.169-185.
 The WAMDI Group (1988): The WAM model – A third generation ocean wave prediction model, Journal of Physical Oceanography, vol.18, pp.1775-1810.
 Veltcheva, A. and H. Kawai (2002): Investigation of the Typhoon Pressure and Wind Field with Application for Storm Surge Estimation, Report of Port and Airport Research Institute, Vol.41, No.2, pp.23-44.
 Wu, J. (1982): Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, Journal of Geophysical Research, No.87, C12, pp.9704-9706.

| | |
|----------------|------------------|
| r : | 台風の中心からの距離 |
| r_0 : | 台風半径 |
| \bar{r}_0 : | 台風半径の平均 |
| r_{01} : | 台風半径の一次成分 |
| r_{02} : | 台風半径の二次成分 |
| S : | エネルギー・ソース関数 |
| S_{dis} : | エネルギー消散項 |
| S_{in} : | エネルギー入力項 |
| S_{nl} : | 非線形相互作用のエネルギー輸送項 |
| t : | 時刻 |
| U_1 : | 海上風の傾度風成分 |
| U_2 : | 海上風の場の風成分 |
| U_{10} : | 海上風速 |
| U_G : | 移動座標系での自由大気の傾度風速 |
| U_{gr} : | 自由気における傾度風の風速 |
| u_* : | 摩擦速度 |
| V_T : | 台風の進行速度 |
| W : | 海上風速 |
| W_x : | 海上風速の x 成分 |
| W_y : | 海上風速の y 成分 |
| w_{age} : | 波齢 |
| x : | 水平方向の座標系 |
| x : | 台風の中心からの無次元距離 |
| x_p : | 風速係数が最大となる無次元距離 |
| y : | 水平方向の座標系 |
| z_0 : | 海面上の粗度長 |
| α : | 係数 |
| α_1 : | 台風半径の一次成分の初期位相 |
| α_2 : | 台風半径の二次成分の初期位相 |
| β : | 風向の偏向角 |
| γ : | 波の発達係数 |
| γ_d : | エネルギー消散項の係数 |
| Δp : | 気圧深度 |
| $\delta(\)$: | デルタ関数 |
| κ : | カルマン定数 |
| η : | 高潮偏差 |
| ρ_a : | 大気の密度 |
| ρ_w : | 海水の密度 |
| τ : | 海面せん断応力 |
| τ_{bx} : | 底面せん断応力の x 成分 |
| τ_{by} : | 底面せん断応力の y 成分 |
| τ_{sx} : | 海面せん断応力の x 成分 |
| τ_{sy} : | 海面せん断応力の y 成分 |

記号表

| | |
|--------------|---------------------|
| A_h : | 水平渦動粘性係数 |
| B : | エネルギー入力項の係数 |
| C_1 : | 傾度風に対する風速低減係数 |
| C_2 : | 場の風に対する風速低減係数 |
| C_D : | 海面抵抗係数 |
| c : | 波速 |
| c_x : | 波速の x 方向成分 |
| c_y : | 波速の y 方向成分 |
| c_θ : | 波速の方向 θ 成分 |
| c_σ : | 波速の角周波数 σ 成分 |
| D : | 全水深 |
| E : | 方向スペクトル |
| f : | コリオリのパラメタ |
| g : | 重力加速度 |
| L : | 海面上の高さ |
| M : | 流量フラックスの x 成分 |
| N : | 流量フラックスの y 成分 |
| N_{pre} : | 周波数分割数 |
| n : | 粗度係数 |
| p : | 気圧 |
| p_0 : | 海面気圧 |
| p_c : | 中心気圧 |
| Q : | スペクトル成分の結合係数 |

τ_w : 波による海面せん断応力
 σ : 角周波数
 θ : 波向
 ω : 地球の自転の角速度

φ : 風向
 ϕ : 緯度