

相互作用を考慮した波浪高潮結合モデルの開発

佐藤孝夫*・末永正次**・橋本典明***
中垣 壽****・宇都宮好博*****

1. 緒 言

WAMDI Group (1988) により, 第三世代波浪推算モデル (WAM モデル) が開発され, 各国で波浪予測や波浪追算調査に用いられている。また, 日本の気象庁においても 1998 年 4 月から第三世代波浪推算モデル (MRI-III) が用いられており, 海岸工学の分野においても WAM モデルを用いた応用研究が盛んに行われるようになった。

一方, 旧運輸省第四港湾建設局 (現国土交通省九州地方整備局) では管内波浪推算高度化調査として, 従来の第一世代波浪推算モデルから第二世代波浪推算モデル, さらに第三世代波浪推算モデルへと波浪推算手法の高度化を行い, 九州及び南西諸島沿岸において定期的に波浪推算を実施し, 確率波浪を算出すると共に各格子点の波浪推算結果をデータベースとして保存・追加・活用してきた。さらに, 周防灘等の内湾浅海域においても第三世代浅海波浪推算モデルを適用し, 内湾浅海域における波浪推算手法の高度化を行っている。

本研究では, 満潮時刻と台風襲来が重なった台風 9918 号を契機に, 佐藤ら (2001) の高潮による水面変化や潮流変化等が波浪推算に無視し得ない影響を与えるというテスト計算を踏まえ, 1) 波浪モデルに高潮モデルで計算される時々刻々の潮位変動 (水深変化) と流れとを取り入れるよう波浪モデルの改良を行い, 2) 高潮モデルに波浪モデルで計算される海面の状態に応じた摩擦速度を取り入れるよう高潮モデルの改良を行った後, 3) これらの改良された波浪及び高潮モデルをお互いのタイムステップが一致するように同時に計算する波浪高潮結合モデルを開発した。また, 波浪高潮結合モデルの検証のため, 矩形の海域を対象としたテスト計算を行い, 定性的な傾向を調べた。最後に実海域として周防灘海域を設定し, 台風 9119 号時及び台風 9918 号時の計算を行った。

2. 波浪モデルの概要

(1) 基礎方程式

球面座標系におけるエネルギー平衡方程式は以下のよう

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\phi \cos \varphi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta F) \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega F) = S \quad (1)$$

$$\phi = \frac{C_g \cos \theta - \vec{U}|_{\text{north}}}{R} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{C_g \sin \theta - \vec{U}|_{\text{east}}}{R \cos \varphi} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{C_g \sin \theta \tan \varphi}{R} + \theta_h \quad (4)$$

$$\theta_h = \frac{1}{kR} \frac{\partial}{\partial h} \left(\sin \theta \frac{\partial h}{\partial \varphi} - \frac{\cos \theta}{\cos \varphi} \frac{\partial h}{\partial \lambda} \right) \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (6)$$

ここに, $F(f, \theta)$: 波浪のスペクトルエネルギー, f : 周波数, θ : 波向, ϕ : 緯度, λ : 経度, t : 時間, ω : 角周波数, U : 流れ, C_g : 群速度, R : 地球の半径, h : 水深, である。

また, 分散関係式は以下のように表される。

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kh} \quad (8)$$

さらに, 式 (1) の右辺のソースファンクション S は, 風から波へのエネルギー輸送, 非線形エネルギー輸送, エネルギー消散, 海底摩擦を考慮し, 次式で表される。

$$S = S_{\text{net}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl}} + S_{\text{ds}} + S_{\text{br}} \quad (9)$$

ここに, S_{in} : 風から波へのエネルギー輸送項, S_{nl} : 非線形エネルギー輸送項, S_{ds} : エネルギー消散項, S_{br} : 海底摩擦項, である。

(2) テスト計算

波浪推算における水深変化の影響を把握するため, 波浪推算モデルを用い, 台風 9918 号時の周防灘における波

* 正会員 工修 (現) 国土交通省航空局飛行場部計画課
.. (前) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所
(現) 国土交通省中国地方整備局調査課
.. (前) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所
*** 正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
**** (財) 日本気象協会九州支社 調査部応用気象課
***** 正会員 工修 (財) 日本気象協会首都圏支社 調査部海洋調査課

浪を計算した。波浪推算に用いた風場計算結果を周防灘沿岸の実測風と比較したのが図-1である。この海上風の計算では、広領域ではカルドンの方法で計算し、狭領域ではカルドンの計算結果を初期値としてマスコンモデルにより地形の影響を取り入れた。この図を見ると、全体的な変化傾向は再現できているが、台風が接近してくる時までは過小に、台風通過後は過大に評価しており、

台風中心の近くほどその傾向が顕著である。

次で、台風 9918 号時の周防灘では、平均水面より約 1.5 m 高い満潮時に、高潮偏差約 2 m を記録している。つまり、平均水面より 3.5 m 高い水面状態で台風が最接近したことになる。そこで、潮位変化が波浪推算に及ぼす影響の程度を把握するため、通常の水深を用いて波浪推算を行った場合と、平均水深+4 m の水深で波浪推算を行った場合とを比較した。図-2 は平均水深での計算、平均水深+4 m での計算及び深海として計算した結果を比較したものである。この結果によると、潮位変化を考慮した場合、約 70 cm 波高が増大している。

これらのことから、水深が 30 m 以下の周防灘では、波浪推算の精度向上のためには、高潮等の潮位変化を考慮する必要があるものと思われる。

3. 波浪高潮結合モデルの構築

(1) 結合モデルの構築

先ず、同じ風場が与えられた場合でも、海面の状態に依存して風から波へのエネルギー輸送量が異なってくるため、波浪推算モデルで算出された摩擦速度や抵抗係数を高潮推算モデルに取り入れる。さらに、高潮推算モデルにより計算された流れや水位を波浪推算モデルに取り入れる。これらのモデルをお互いのタイムステップが一致するように同時に計算していく結合モデルを構築した。

結合モデルの概念を図-3 に示す。

(2) テスト計算

2 章では、平均水深で計算した場合と平均水深に潮位及び高潮分を加えた水深で計算した場合を比較検討し、水深変化が波浪に及ぼす影響は無視できないことを明らかにしたが、時空間的な潮位（水深）変化は考慮していなかった。そこで、高潮推算モデルにより計算される潮位（水深）や流れの時空間変化を波浪推算モデルに取り入れた。波浪推算モデルでは潮位変化は水深の変化として取扱う。そこで、潮流が波浪に及ぼす影響を評価するため、図-4 に示す計算領域において、表-1 に示す計算

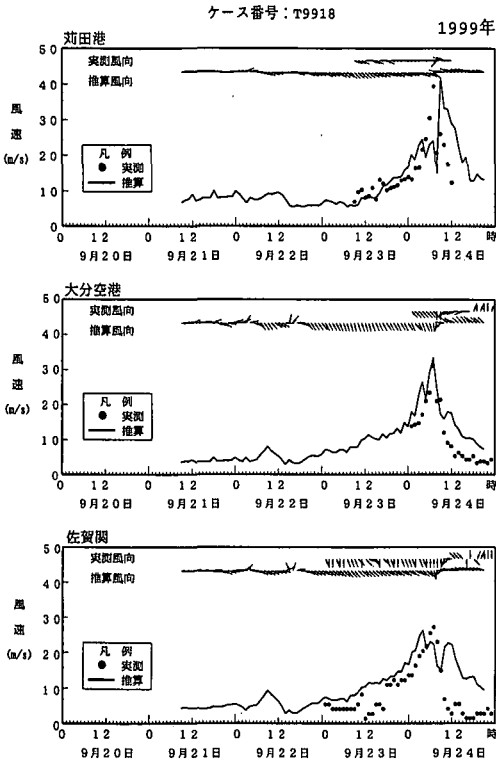


図-1 台風 9918 号時の風の経時変化図

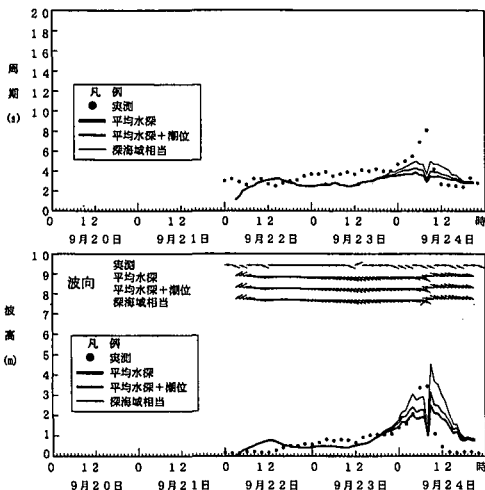


図-2 潮位変化が波浪推算に与える影響

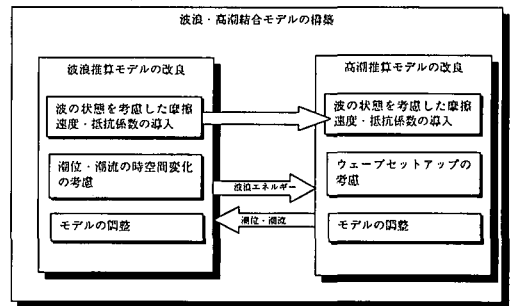


図-3 波浪高潮結合モデルの概念図

条件でテスト計算を行った。

一般に、逆流では波高が高くなり、順流では波高が低くなる。また、逆流ではシャープな(狭い)方向分布となり順流では広い方向分布になる。等々言われている。

図-5は、流れ無し、順流及び逆流について、地点A～Cの有義波高の時間発達を示したものである。この図を見ると、逆流ほど波高は高くなり、急激な発達を示しており、妥当な結果といえる。

また、図-6は計算開始から8時間後の方向スペクトル示したものであり、上段が逆流、中段が順流、下段が横流の計算結果である。これらの図を見ると、逆流では狭い方向分布を示し、順流では広い方向分布を示していることが窺える。なお、横流の場合、東流の影響により波のエネルギーが東に偏っていることがわかる。

以上のことにより、潮流を考慮した波浪推算モデルの結果は妥当と判断される。

4. 実海域への適用

(1) 計算条件

結合モデルの計算は、まず外洋を対象とした広領域で波浪推算を行い、その結果を時空間的に引き継ぐ形で内湾域の狭領域を計算する。広領域では深海モデルとして波浪だけの計算をするが、狭領域では波浪高潮結合モデルにより、水深や流れの影響を取り入れた計算を行う。計算領域図を図-7、8に示す。

広領域(図-7)では、格子間隔0.5度(約50 km)とし、計算タイムステップは5分とした。

また、狭領域(図-8)では、格子間隔0.05度(約5 km)、計算タイムステップは、波浪計算部分が15秒、高潮計算部分が5秒、とした。なお、広領域では計算対象周期を

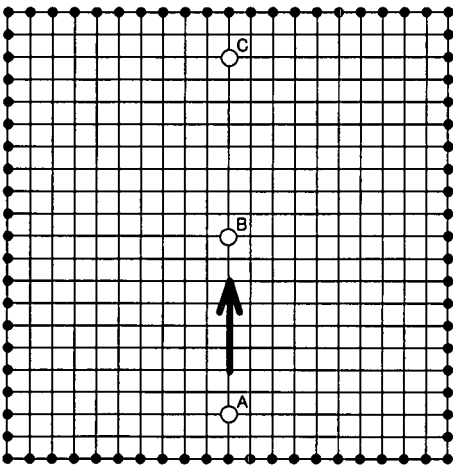


図-4 テスト計算のモデル地形

表-1 テスト計算の計算諸条件

領域	狭領域 (格子間隔 0.05°)
格子数	21×21
格子間隔	0.05 度 (約 5 km)
方向分割数	36 (5°～355 度)
周波数分割数	40
周波数帯	0.035 Hz～1.009 Hz
周期帯	28.6 秒～1.0 秒
成分数	1440 成分
計算時間間隔	15 秒
風条件	風速 20 m/s の南風
水深条件	深海
流れ条件	① 流れなし
	② 順流 (5 ノット) 北流
	③ 逆流 (5 ノット) 南流
	④ 横流 (5 ノット) 東流

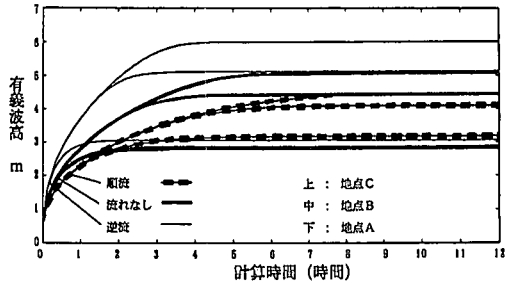
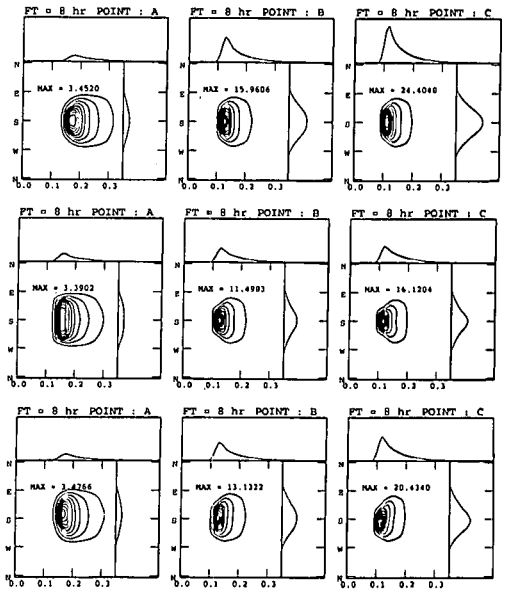


図-5 流れ有無の状態と有義波高の経時変化図



上段：逆流，中段：順流，下段：横流

図-6 8 時間後の方向スペクトル図

2秒までとしたが、狭領域では内湾の風浪成分を評価するため、計算対象周期を1秒まで拡張した。

対象とした気象擾乱は、周防灘において満潮と高潮とが重なった台風9918号及び干潮時に高潮となった台風9119号である。

(2) 結合モデルによる計算結果

図-1, 2に示した佐藤ら(2001)の結果では、風の再現性に若干の問題があり、周期の再現性もあまり良くはない。そこで、風の計算手法を変え、新たな風場で波浪を計算した結果が図-9である。従来の風の計算では、天気図から傾度風及び温度風を算出し、台風中心域は台風

モデルを用いる手法を用いていたが、台風の非対称性を再現できるように方向毎に台風半径を変えた手法で再計算した。その結果、台風接近前の過小評価は改善されなかったものの、台風通過後の過大評価は改善されている。また、周期の精度も格段に向上し、内湾域における波浪推算においては風の精度に極めて敏感であることが分かる。さらに、台風最接近時の高風速が再現されていないことにより波高のピークの再現性には問題があるものの、全体的な波高の精度も向上している。

さらに、図-10は、図-1と同じ風を用いて計算した場合の結果をプロットしたものである。図中の凡例は図-2と同じであるが、「潮位変動」とは波浪高潮結合モデルによる計算結果であり、参考のため毎時潮位もプロットしている。(平均水深とは、潮位200cmに相当)

この図を見ると、波浪高潮結合モデルの計算結果は、「平均水深」結果と「平均水深+4m」結果との中間に位置し、満潮と高潮とが重なり、波高が1m以上になる場合に差が顕著である。波高が1m以下の場合には「平均水深」による計算結果と差は見られない。

なお、台風9119号時の計算では、干潮時に台風が来襲したため、両者のモデルに顕著な差は見られなかった。

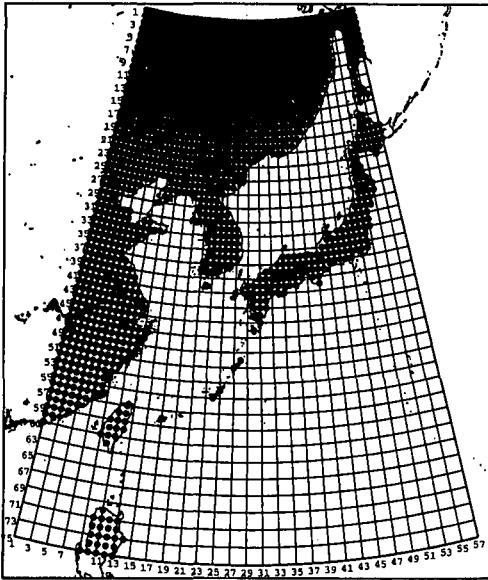


図-7 広領域の計算領域図

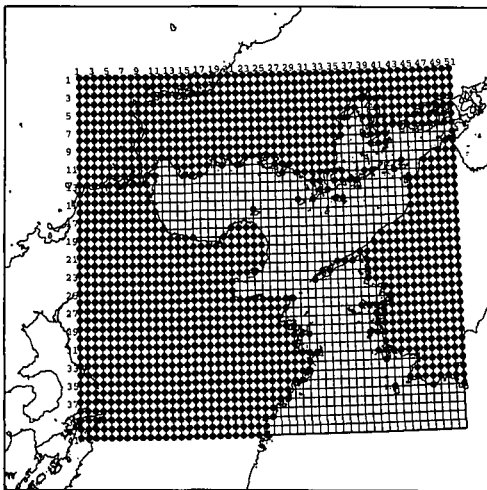


図-8 狭領域の計算領域図

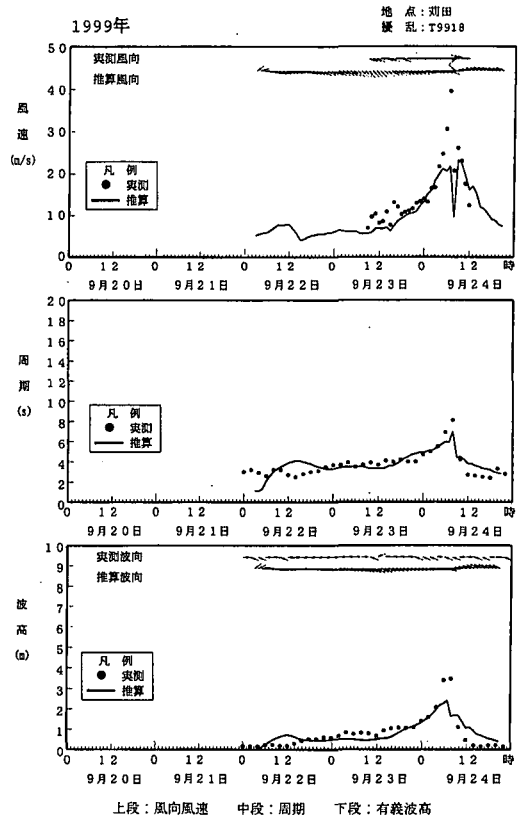


図-9 結合モデルによる台風9918号の計算結果

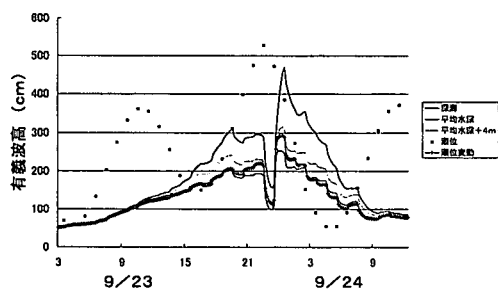


図-10 従来結果との有義波高比較

5. 結 語

本研究では、内湾浅海域での波浪推算精度向上を目的とし、第三世代浅海波浪推算モデルを基に、波浪と高潮の相互作用を考慮した波浪高潮結合モデルを開発した。

先ず、波浪推算モデルでは、高潮推算モデルで計算される水深及び流れの時空間変化を考慮できるように改良を行った。

次で、高潮推算モデルでは、波浪推算モデルで計算される海面の状態に応じた摩擦速度や抵抗係数を考慮できるように改良を行った。

さらに、波浪推算モデルと高潮推算モデルとを同時に計算し、各々のタイムステップで計算結果を受け渡す結合モデルを構築した。

本研究の主要な結論を以下に列挙する。

① 内湾浅海域における波浪推算の精度向上のため、波浪と高潮の相互作用を考慮できる結合モデルを開発し

た。

② 種々のテスト計算の結果、モデルの計算結果は、定性的に妥当と判断された。

③ 周防灘海域における台風9918号時の計算では、平均水深で計算する従来のモデルに比べ、有義波高で約50 cm (15%) 高くなることが確認された。しかし、台風9919号の計算では、干潮時と高潮とが重なったため、両者に有意な差は見られなかった。

④ また、内湾浅海域における波浪推算の精度向上のためには、風の推算精度向上が重要である。

最後に、内湾浅海域では僅かな風向の違いがフェッチ等に大きく影響するため、局所的な地形の影響を考慮できる高精度の風場推算が必要である。また、台風9918号のような満潮と高潮とが重なる場合、有義波高が約15%増大するという本研究の試算により、波浪推算の精度向上には高潮の影響を取り入れることが重要である。

参 考 文 献

- 磯崎一郎・鈴木 靖 (1999): 波浪の解析と予報, 東海大学出版会, 274 p.
- 宇都宮好博・大西健二・鈴木 靖 (1999): 第三世代波浪推算モデルの浅海域への適用, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 266-270.
- 佐藤孝夫・神岡文雄・橋本典明・市川雅史・宇都宮好博 (2001): 内湾浅海域(周防灘)における波浪推算手法の高度化, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 19-24.
- The WAMDI Group (1988): The WAM model: A third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, pp. 1775-1810.