

台風9119号および9918号時の瀬戸内海 西部海域における異常波浪の推定

ESTIMATION OF HIGH WAVES ON THE WESTERN SETO INLAND SEA DURING TYPHOONS 9119 AND 9918

山口正隆¹・畑田佳男²・大福 学³・野中浩一⁴

Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA, Manabu OHFUKU and Hirokazu NONAKA

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²正会員 博士(工学) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

³愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科

⁴正会員 博士(工学) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科

Wave hindcasting with use of a shallow water model is conducted in order to estimate wave conditions on the Western Seto Inland Sea during Typhoons 9119 and 9918, which gave rise to severe damages to the coastal areas. Space-time variation of winds over the area calculated by either a space interpolation of wind data measured at coastal stations surrounding the sea area or a parametric typhoon model is given as input condition. Comparison between hindcast and measurement for time variation of wave height and period at coastal stations around the area reveals that hindcast waves under interpolated wind fields yield closer agreement with measured waves over those under typhoon model winds. Also, a detailed discussion is made for spatial distribution of the maximum wave height.

Key Words: interpolation of wind data, typhoon model, Western Seto Inland Sea, wave hindcasting

1. 緒 言

瀬戸内海西部海域沿岸に近年甚大な海岸災害をもたらした台風9119号および台風9918号時の波浪に関して、すでに多くの推算事例が報告されている(たとえば^{1), 2), 3)}。しかし、両台風時の波浪推算においては、地形の影響を含まない台風モデル法による海上風、あるいはこれに地形の影響を加味した海上風が入力条件として与えられていることから、これらは海上風の実態を必ずしも表しているとは云えない。海上風は波浪の推算精度に最も強く影響する要因であるから、台風モデル法に基づく海上風資料を入力条件とする波浪の推算精度にはおのずと限界がある。一方、山口ほか⁴⁾は内海における海上風を推定する方法として、沿岸部の風観測資料に対する空間補間法の適用を提案し、この方法によって当該海域の台風・季節風に伴う海上風の時空間分布を推定している。沿岸部における風観測資料は観測地点周辺の局所地形の影響を受けているので、風観測資料の空間補間によって推定される海上風分布も現実のものとは異なる可能性をもつけれども、沿岸部や高所における風観測資料を用いることによって、上記の問題はある程度解消されと考えられる。

そこで本研究では、地形の影響をあまり受けていない沿岸部の複数地点における風観測資料を用いて推定した両台風時における海上風分布を逐次入力条件として、瀬戸内海西部海域における波浪推算を行い、当該海域沿岸で取得された方向スペクトルを含む波浪観測資料との比較から、波浪の推算精度を検証したのち、数値計算結果に基づいてその最大波高の平面分布を考察する。また、波浪推算では台風モデル法による海上風分布を入力条件とする同様の推算結果と比較することによって、波浪に及ぼす海上風の影響を調べる。

2. 波浪推算の方法

(1) 海上風推定法

上述のように、2つの方法により瀬戸内海西部海域における台風9119号および台風9918号時の風分布を推定する。その1つは、瀬戸内海西部海域沿岸部の数十箇所の観測地点で1時間ごとに収集した観測風記録に対する空間補間である。風分布の推定にあたっては、周辺地形の影響をできるだけ受けず、しかも高風速が得られた海岸近くに位置する地点の記録を使用することとする。高度

z mの観測風速 U_z は1/7乗則,

$$U_z / U_{10} = (z/10)^{1/7} \quad (1)$$

により, 高度10mでの風速 U_{10} に変換した. しかし, 陸上風と海上風の関係は明らかでないので, 陸地地形の影響を考慮するために1.2程度の係数を乗じた宇和島など豊後水道沿岸の気象庁風観測地点における風速記録を除いて, 海上風速への変換を行っていないし, 風向も補正していない. 海上風の空間補間を使用する方法は, 不規則に分布する複数の入力データから正方格子网上的値を補間できる加重1次補間法⁹⁾であり, 各風速成分に対して適用する. 補間に用いた風観測地点は台風9119号時に26地点, 台風9918号時に19地点であり, 台風9918号時の位置を図-1に例示する.

もう1つは台風モデル法⁹⁾の適用である. 台風モデル法は台風内の気圧分布を円型気圧分布(Myers式)あるいは楕円型気圧分布で近似して求められる中心対称傾度風と台風の進行に伴う場の風をベクトル合成するとともに, 等圧線に対する傾度風の吹込み角および海面での摩擦抵抗を考慮することにより求められる. 中心対称傾度風と台風の移動に伴う場の風から海上風への変換係数をそれぞれ C_1 , C_2 とする.

また, 楕円型気圧分布を仮定する場合の海上風算定式は野中ほか⁷⁾によって与えられている. 台風モデル法の特徴は天気図などから得た台風パラメータを一定時間ごとに与えさえすれば, 台風に伴う場の風を簡単に再現できる点にあり, 陸地地形の影響を受けない外洋で台風の影響が支配的である場合には, 比較的良好な推定精度をもつ. しかし, 周囲を陸地に囲まれた瀬戸内海西部海域では, 台風モデル風に及ぼす陸上地形の影響を考慮するために, 場の風を含む傾度風から海上風への変換係数を $C_1=C_2=0.51$ とする. また, supergradient 風の影響を考慮するため, 傾度風速に対して, 光田・藤井⁸⁾の式による係数を乗じる.

$$G(x) = G(\infty) + \left\{ G(x_p) - G(\infty) \right\} \left(x/x_p \right)^{k-1} \cdot \exp \left[(1-1/k) \left\{ 1 - (x/x_p)^k \right\} \right]$$

$$G(\infty) = 0.51, \quad x_p = 0.5, \quad k = 2.5 \quad (2)$$

$$G(0.5) = G(\infty) (1 + 10^q), \quad q = 0.0231 \Delta p - 1.96$$

ここに, $x=r/r_0$, r :台風中心からの距離, r_0 :台風半径, Δp :台風中心の気圧深度, である.

式(2)は観測風速の解析に基づいて導かれた経験式であるが, 原式のままでは台風中心付近の風速を過大評価するので, 変換係数が原式より小さくなるように最大値を1としている. 変換係数は台風中心から離れた地点では $G(\infty)=0.51$ に漸近し, 台風中心付近ではこれより大きい値をとる. 空間変化を伴う海上風変換係数の実質的な使

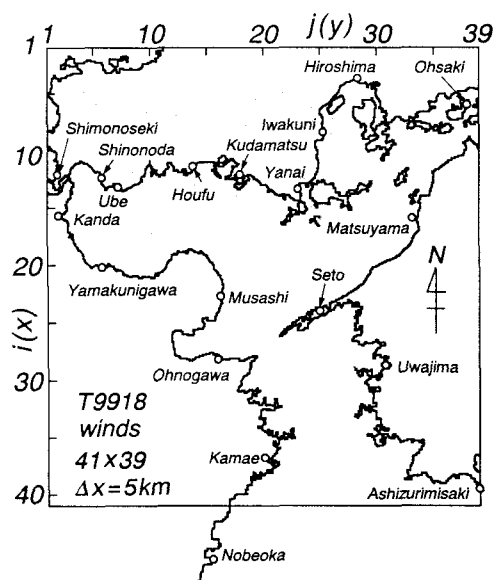


図-1 補間に用いた風観測地点 (台風9918号時)

用目的は周防灘における強風域を再現することにある.

(2) 波浪推算モデルおよび波浪推算条件

波浪推算には, 山口ほか⁹⁾の格子点法に基づく浅海波浪推算モデルを使用する. 計算は外洋から豊後水道を通じて瀬戸内海西部海域に伝播する波浪の影響を考慮するため, 図-2に示す北西太平洋海域格子網(北緯約20°~40°, 東経約122°~147°, 南北2800km, 東西2720km, 格子分割数36×35, 格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 80$ km)と図-3に示す瀬戸内海西部海域格子網(南北180km, 東西185km; 格子分割数181×186, 格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 1$ km)の2段階で行う. 格子間隔1kmの格子網を用いた波浪推算では1mといった浅い水深で計算を行う地点もあるので, 各格子点の水深に2mを加えるとともにBattjes・Janssenの段波モデル¹⁰⁾で碎波減衰を評価する. 各格子点の水深は海図に記載された最大干潮時の水面に対する値であることおよび当該海域の潮汐振幅が1~2m程度であることから, 台風時の水位上昇を考えると現実的な補正であると考えられる. また波浪推算では白波碎波による減衰を評価したのち, さらに段波モデルによって水深の制約による碎波減衰を考慮した. 段波モデルを適用する場合, 海浜流計算のように波の伝播方向の決定が容易でないことから, 海底勾配の影響を考慮せず, かつ碎波高も当該格子点の水深の0.57倍によって評価する.

瀬戸内海西部海域では, 格子間隔1kmとした格子網での観測風および台風モデル風を入力条件とする2ケースの計算を実施する. すなわち, まず, 北西太平洋領域における波浪推算は, 前述した台風モデル法による海上風を1時間ごとに入力して行い, 図-3の豊後水道境界に設けた波浪推算地点における方向スペクトルの値を記憶させる. この場合の海上風変換係数は $C_1=C_2=0.57$ である. ついで, 瀬戸内海西部海域における波浪推算は, 豊後水道地点に相当する格子点上に北西太平洋海域での方向ス

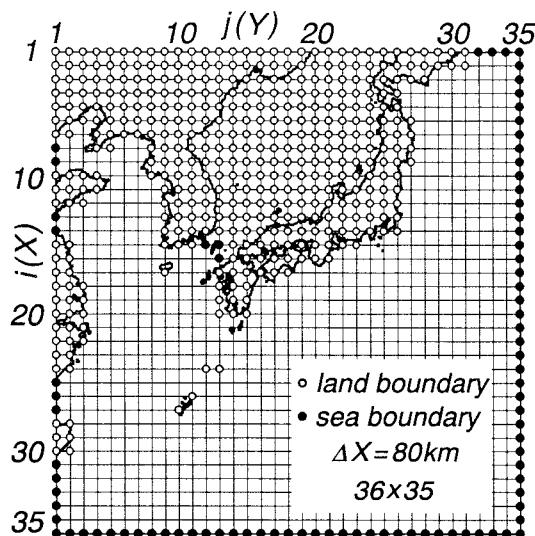


図-2 北西太平洋海域における計算格子網

ベクトルの推算結果を時間に関する線形補間を通じて1分間隔で入力するとともに、観測風の空間補間に基づく海上風を1時間間隔で、台風モデル法に基づく海上風を20分間隔で与えることにより、時間ステップを1分として実施する。

両海域における波浪推算で用いる周波数データの個数は $f=0.047\sim 1\text{Hz}$ 間を不等分割した20個、方向データの個数は $\theta=0\sim 360^\circ$ を方向幅 10° で等分割した37個である。方向分割数を通常ケースと比べて多くしたのは方向スペクトル $E(f, \theta)$ の滑らかな方向分布を得るためである。また、方向分割数を19とする計算も行ったが、有義波に関して両者の差は無視しえる程度であった。

3. 波浪観測資料

台風9119号時の波浪観測資料は、広島港出島および苅田で得られている。出島は、水深10mの地点に位置し、パルス式波高計により観測が行われているが、波向の観測は行われていない。苅田では、苅田沖約7kmに位置する水深9mの地点で、超音波式波高計および超音波式波向計によって波向も含めた観測が行われている。

台風9918号時の波浪観測資料は、広島港草津、苅田、佐田岬漁港および佐田岬先端において得られている。4地点のうち、波向が観測されているのは苅田と佐田岬先端である。草津は、広島港観音沖約700mの地点にあり、出島とほぼ同じ場所に位置する。水深は10mで、ステップ式波高計によって観測が行われている。苅田は台風9119号時と同じ観測条件である。佐田岬漁港の波高計は、沖合400mの水深14.5mに設置されており、設置場所は佐田岬先端より3kmほど東側に位置している。また佐田岬先端では、佐田岬沖の水深20mの海底に設置された水圧式および超音波式波高計により観測が行われている。な

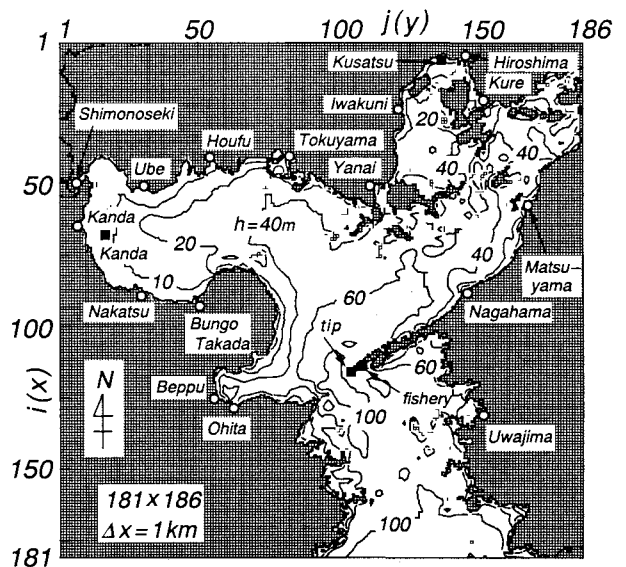


図-3 瀬戸内海西部海域における計算格子網

お、図-3には台風9918号時の推算結果との比較を行う波浪観測地点を黒四角で示している。

4. 台風時波浪の特性

(1) 観測波浪との比較

a) 台風9119号時の波浪

図-4は苅田における波高 H_s ・周期 T_s ・波向 θ の時系列を示す。波高は、台風モデル風を入力条件とする計算結果が観測風入力による結果と比べて台風接近時でやせた形をとっているが、ピーク値はほぼ一致している。観測風入力による結果は台風接近時の14時および16時に観測結果とほぼ一致する。周期は、台風モデル風入力による結果に比べて観測風入力による結果の方が大きく、観測結果に近い。観測風入力による計算波向は、台風モデル風入力による結果とほとんど一致する。また、観測波向は波高がピークとなる時刻以前において観測風入力による計算波向にほぼ一致し、台風モデル風入力による結果にも近い結果を示す。

図-5は広島港出島における波高・周期の時系列を示す。波高をみると、観測風を入力条件とする結果が観測結果に近く、同じことが周期についても云える。

b) 台風9918号時の波浪

図-6は佐田岬漁港における波高・周期の時系列比較図である。観測資料はピーク時付近の8時～16時に欠測しているが、推算波高は台風モデル風ケースに小さいピーク値を示す点を除いて、観測波高とよく符合している。周期の計算値は観測値より小さい。佐田岬漁港では、推算波高は、観測風を入力条件とする場合に、観測波高とかなりよく符合する。

佐田岬先端について波高・周期・波向時系列の比較を示したのが図-7である。佐田岬先端では超音波式波高計

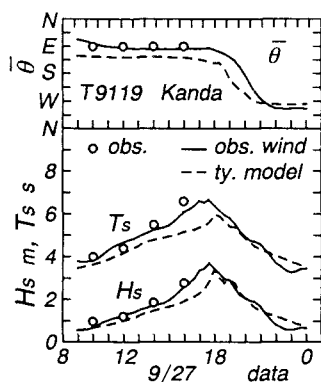


図-4 苅田における時系列（台風9119号時）

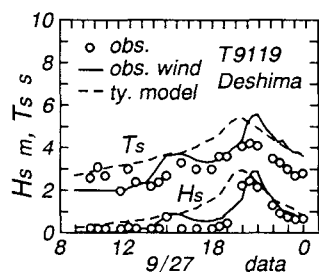


図-5 出島における時系列（台風9119号時）

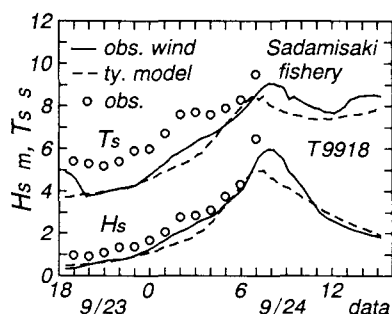


図-6 佐田岬漁港における時系列（台風9918号時）

と水圧式波高計の2種類の記録が取得されているが、超音波式波高計による記録はピーク時付近で異常値を与えているので、比較では水圧式波高計による記録のみを使用する。推算波高の時系列は、全体的に観測結果の傾向と類似しているが、台風モデル風を入力条件とする結果のピークがやや早い。波向についてみると、波浪はS方向から伝播していることから、台風モデル風と観測風を入力条件とする結果はほとんど一致している。

図-8は苅田における波高・周期・波向の時系列を示したものである。波高については、台風モデル風に基づく計算結果が観測結果より小さいのに対して、観測風に基づく結果は観測結果よりやや大きい値をとっているものの、より観測値に近い値を示す。周期についても、観測風に基づく結果が台風モデル風に基づく結果より観測結果に近い値を与えている。波向については、台風モデル風と観測風を入力条件とする結果はほとんど一致してい

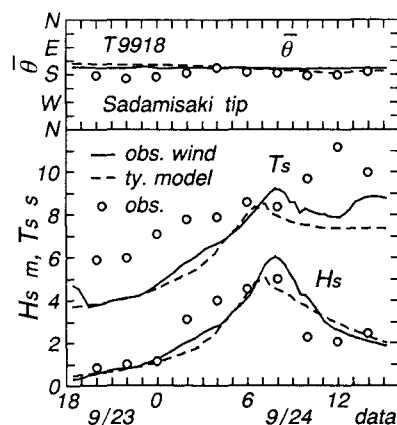


図-7 佐田岬先端における時系列（台風9918号時）

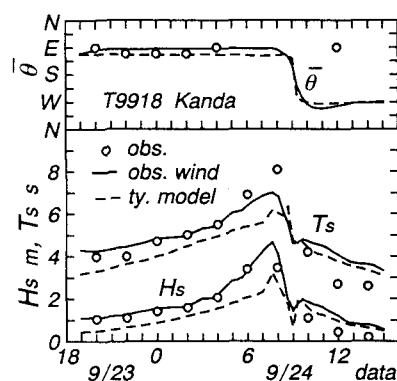


図-8 苅田における時系列（台風9918号時）

る。観測波向は台風通過後もE方向であるが、計算結果はW方向へと変化している。この相違は、波浪推算では全方向・全周波数成分に対する一種の加重平均により波向を定義しているのに対し、観測結果では異なる方法によっている可能性があるという平均波向の計算法の違いによるものと推測される。

図-9は苅田における無次元方向スペクトルの観測結果²⁾と観測風に基づく推算結果を、台風の通過に伴い風向が急変した2時刻について示す。推算結果は、新しい風向に早く応答することから、新しい風向に大きいエネルギーを与えるけれども、それぞれの時点ではほぼ観測結果に対応した周波数および方向にピーク値をとる。

図-10は広島港草津における波高・周期の時系列を示す。計算波高は、台風モデル風の場合にピーク以前で観測波高より大きいものに対して、観測風を用いた場合には観測結果と一致している。周期においても台風モデル風の場合は波高と同様にピーク時以前で観測結果より大きい。

経時変化の比較結果をまとめると、つぎのようである。佐田岬漁港および佐田岬先端のように外洋からの波浪が卓越する地点では、台風モデル風および観測風を入力条件とする結果の違いが小さい。佐田岬先端付近の波高は、外洋から入射する波浪が豊後水道九州側の沿岸地形によ

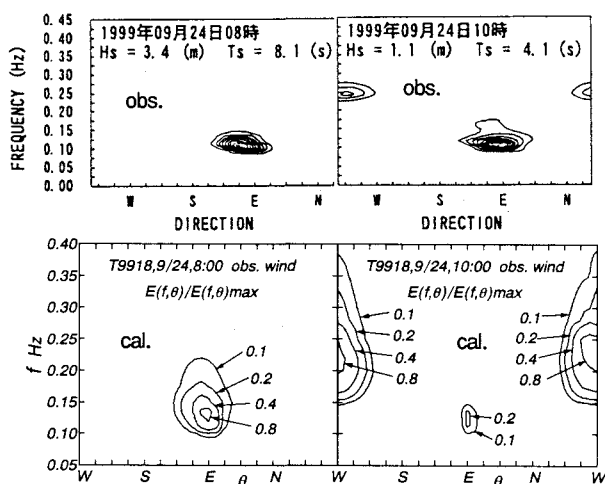


図-9 荻田における方向スペクトル（台風9918号時）

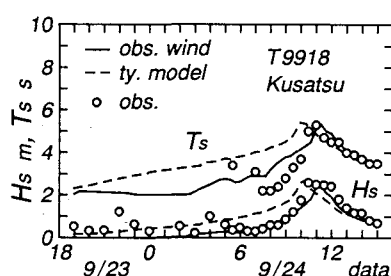


図-10 草津における時系列（台風9918号時）

る遮蔽効果を受けて西側にいくほど減少する。一方、内海の地点では海上風推定法による波浪推算結果の相違が大きく、その程度は周防灘西部の荻田、広島湾奥部の出島の順に増加する。とくに荻田では、台風9919号時より台風9918号時に観測風と台風モデル風を入力条件とする推算結果の差が大きく、海上風推定法の相違が波浪推算結果に及ぼす影響は台風により異なる。台風9918号は上陸後の勢力の減衰が台風9919号より著しく、その結果台風中心付近の風分布に、台風9919号より地形の影響が強く現れ、荻田の位置する周防灘で灘の長軸方向に吹送する傾向が増強された。このため、反時計回転をもつ同心円上の風分布を示す台風モデル風と地形の影響を反映した観測風の補間結果の相違が台風9919号時より台風9918号時に強く現れたと考えられる。

(2) 最大波浪の平面分布

a) 台風9919号時の最大波浪の平面分布特性

図-11は1分間隔の波浪推算結果から格子点ごとに有義波高の最大値（以下最大波高と云う）を選択して作成した瀬戸内海西部海域における台風9919号時の最大波高とそのときの波向の平面分布である。この図によると、豊後水道東側では外洋性波浪が豊後水道内でさらに発達し、7m以上に達する海域が見出される。一方、豊後水道西側では波高6m以上の外洋性波浪が九州沿岸による地形の影響を受けて減衰し、豊予海峡付近では波高4～5mと

なって内海に伝播する。この結果、豊予海峡から国東半島沖、さらに下松を中心とする山口県沿岸部では4mを越える高波が発生するが、これは波向からみても外洋性波浪と内海発生波が重なった波浪であると推測される。この4mを越える高波域は上述の海域から広島県沿岸部や愛媛県中予の島嶼部を含む伊予灘にまで及ぶ。伊予灘における高波高は波向から明らかなように、SW方向の強風により内海で発達したものである。また、山口県、大分県および福岡県に囲まれた周防灘では、外洋性波浪の影響は少なく、SSE～SW方向の強風による内海発生波が最大波高をもたらす。

b) 台風9918号時の最大波浪の平面分布特性

図-12は台風9918号時の最大波浪を図-11と同様な平面分布図として示す。両者はよく類似しているが、周防灘における4mの等値線が台風9919号時には灘北西部の山口県沿岸に現れるのに対して、台風9918号時には灘西部の福岡県沿岸に現れる点で異なっている。また、観測風の補間結果は灘や湾の長軸方向に沿って強風が吹き続ける傾向を有している。したがって、台風接近時にE方向の強風が吹く周防灘西部では台風モデル風より観測風を入力条件とする推算結果がより高い波高を与える。広島湾では、多くの小島によって減衰した観測風を入力条件とする結果に比べて、地形の影響を受けない台風モデル風を入力条件とする結果が高波高を与える傾向にある。

5. 結 語

本研究で得られた結果の要点はつぎのようである。

- ① 観測風に基づく海上風分布を入力条件とする浅海波浪推算モデルは、台風9919号および台風9918号時の複数地点における波高・周期の観測結果をかなりよく再現することから、波浪推算の精度を確保するためには、高地形解像度格子網と質の高い海上風資料の使用が必要であることが示唆される。
- ② 観測風と台風モデル風を入力条件とする波浪推算結果の相違は外洋波浪を受ける佐田岬漁港、佐田岬先端より内海の奥部にある荻田や広島港出島および草津で強く現れる。また、観測風に基づく推算結果は、台風9918号時の草津を除けば、台風モデル風に基づく場合より観測結果と良く符号する。
- ③ 荻田における台風9918号時の方向スペクトルの推算結果は、風向急変に対する応答が観測結果より早いけれども、ピークの周波数および方向が観測結果とほぼ符合する経時変化を示す。
- ④ 観測風の補間結果は灘や湾の長軸方向に沿って強風が吹き続ける傾向を有する。したがって、観測風を入力条件とする推算結果は、台風接近時にE方向の強風が吹送する周防灘西部において台風モデル風を入力条件とする結果より高い波高を与える。

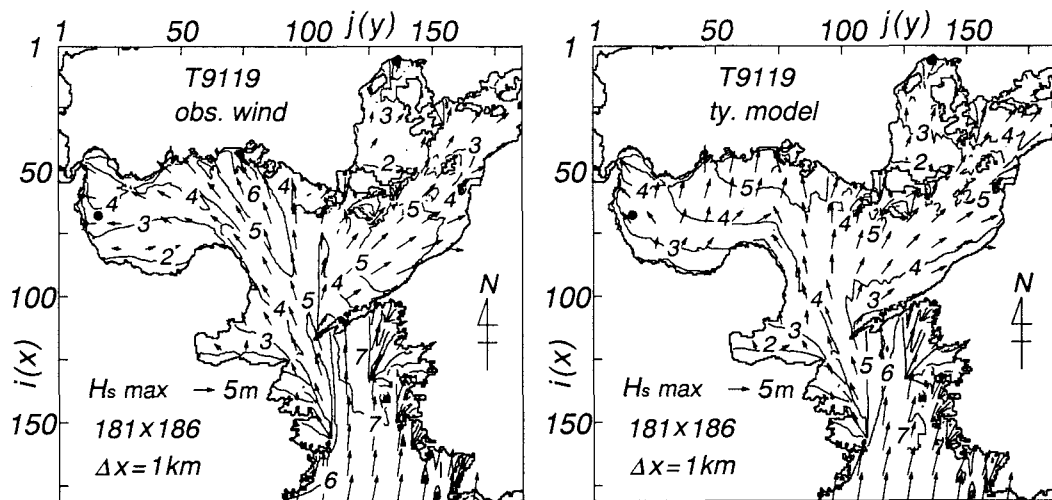


図-11 台風9119号時の最大波高と波向

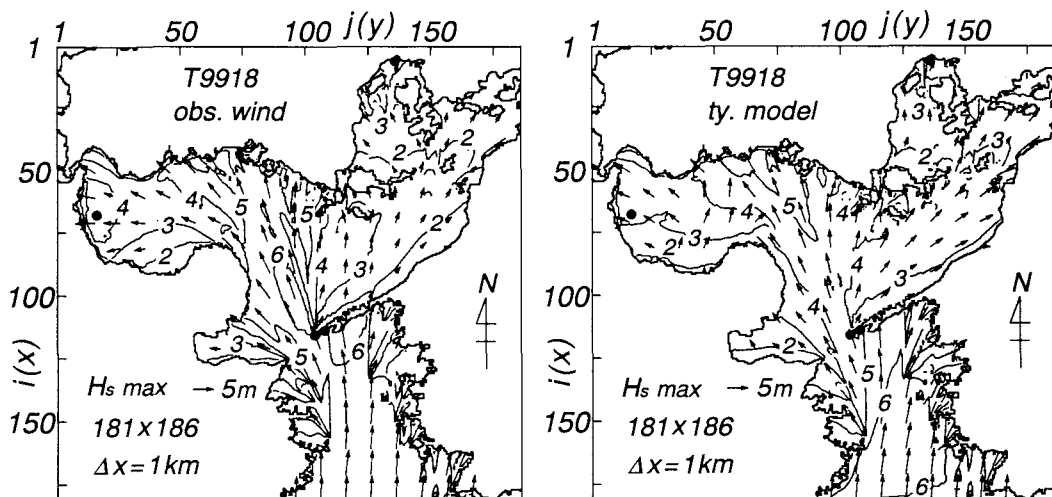


図-12 台風9918号時の最大波高と波向

謝辞：風・波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡田弘三・磯崎一郎・川村 宏・鳥羽良明：台風9119号による瀬戸内海の高波と強風，海の研究，Vol.5，No.5・6，pp.301-310，1996.
- 2) 橋本典明・真期俊行・吉松みゆき：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，pp.1-33，2000.
- 3) 光永臣秀・平石哲也・宇都宮好博・三原正裕・大川郁夫・中川浩二：台風9918号による周防灘での高潮高波被害の特性，土木学会論文集，No.726/II-62，pp.131-143，2003.
- 4) 山口正隆・畑田佳男・大福 学：瀬戸内海西部海域における海上風の平面分布特性，愛媛大学工学部紀要，第11巻第1号，pp.291-300，1986.
- 5) 塩野清治・弘原海 清・升本真二：パソコンで不規則に分布するデータを格子点データに変換してコンターマップを作成する方法(1)-加重1次補間法-，情報地質(10)，pp.65-78，1985.
- 6) 佐藤昭二・合田良實：海岸・港湾，わかりやすい土木講座17，彰国社，p.104，1972.
- 7) 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝：拡張型台風モデルを用いた波高の極値推定システム，海岸工学論文集，第47巻(1)，pp.271-275，2000.
- 8) 光田 寧・藤井 健：台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係，京都大学防災研究所年報，第40号B-1，pp.165-172，1997.
- 9) 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄：エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて，第31回海岸工学講演会論文集，pp.123-127，1984.
- 10) Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen：Energy loss and set-up due to breaking of random waves，Proc. 16th Conf. on Coastal Eng.，pp.559-589，1978.

(2004.9.30 受付)