

# SWAN による 2019 年台風 19 号の波浪推算

坂本大樹<sup>i</sup> 吉村英人<sup>ii</sup> 荒木和博<sup>iii</sup> 眞鍋尚<sup>iv</sup>

## Wave prediction and analysis of typhoon 19 in 2019 by using SWAN

Daiki SAKAMOTO Hideto YOSHIMURA Kazuhiro ARAKI Takashi MANABE

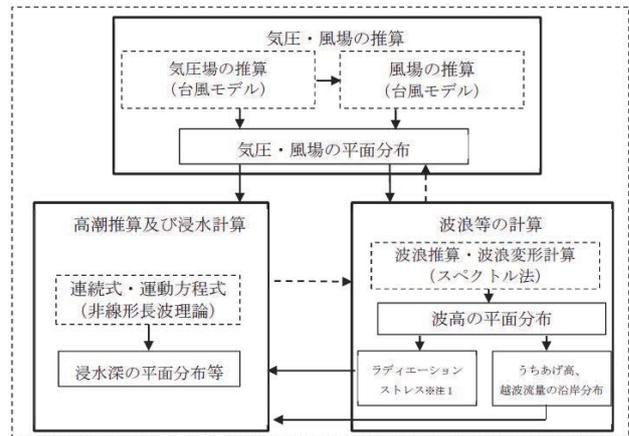
近年、日本近辺を通過する台風が大型化していることで、港湾施設の設計や維持に関しては、このような大型台風が通過した際の風波による影響を想定しておくことの重要性が高まっている。本稿では、波浪推算に関する基礎理論をまとめたうえで、2019 年に関東甲信から東北といった広域にわたる被害をもたらした台風 19 号に関して波浪推算を行った結果を示す。

(キーワード):高潮, 台風, 波浪推算, SWAN

### 1 はじめに

近年の地球温暖化に伴い、日本近辺を通過する台風が大型化し、各地の河川、港湾施設、家屋などに大きな被害を及ぼしている。例えば 2019 年では、台風 15 号 (Faxai) や、台風 19 号 (Hagibis) による被害が記憶に新しい。特に台風 19 号に関しては、被害は関東甲信から東北といった広域にわたり、死者 96 名、行方不明者 4 名、住家の全半壊等 27,684 棟、住家浸水 59,716 棟の極めて甚大な被害が発生した<sup>1)</sup>。また港湾施設においても大きな被害が生じ、例えば東京湾では、横浜港大黒ふ頭での岸壁前面の損傷や、川崎港川崎コンテナふ頭での荷捌き地の床版の一部損傷、フェンス倒壊などの被害が生じた<sup>2)</sup>。

港湾施設の設計や維持に関しては、このような大型台風が通過した際の波浪による影響を想定しておく必要があり、そのための手段として波浪推算が挙げられる。波浪推算によって得られた波高や周期、波向などから作用波力や護岸越波量が求められ、港湾施設の設計などに利用される。また我が国では図 1 に示すように台風による高潮浸水シミュレーションにあたっては、



※注1：ラディエーションストレス：潮位偏差の計算、ウェイブセットアップを考慮する際に必要となる。

※注2：点線矢印は、結合モデルなど相互作用が考慮できる場合に限る。

図 1 台風による高潮浸水シミュレーションの流れ<sup>3)</sup>

- ・気圧，風場の推算
- ・波浪等の計算
- ・高潮推算及び浸水計算

について各々の計算結果を連結することを基本としている<sup>3)</sup>。このうち波浪等の計算に用いられる手法の1つとしても波浪推算が挙げられ、近年の台風大型化に伴いその重要性が増してきている。

<sup>i</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム コンサルタント

<sup>ii</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席主任コンサルタント 博士 (工学)

<sup>iii</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席主任コンサルタント

<sup>iv</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 次長 博士 (工学)

2 波浪推算の概要

2.1 波浪推算とは

波浪推算とは地形や気象条件を与えて海洋の波浪を計算する手法のことであり、近代的な波浪推算は1950年代第2次世界大戦中のノルマンディ上陸作戦で波浪の予測を試みたことがきっかけとなり発展した。波浪推算が用いられる背景としては、海洋の波浪の定常観測に比べて風などの気象データの観測データが豊富にあることが挙げられる。例えば我が国では1970年代から波浪の定常観測が始まり、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)によって波浪観測データが蓄積されている。しかし、得られる観測データは観測点のある地点に限られ、特定の海域の波浪特性を観測データのみで明らかにすることは難しい。一方、気象データは適当な場所に配置された気象台や観測所により絶えず観測が行われており、海洋の波浪と比較してデータ量が十分にある。海洋波は主に風により発生し、その風は気圧配置、気温、水温などといった気象データをもとに計算できる。そのため、蓄積された気象データをもとに風場を計算し、風と波の関係から任意の海域や地点、任意の期間における波浪情報を解析によって得るための手法を波浪推算と呼ぶ。

2.2 波浪推算の発展過程 (図 2)

2.1 で述べたように、近代的な波浪推算法の始まりは、第2次世界大戦中のノルマンディ上陸作戦にて波浪の予測が試みられたことであり、その成果は Sverdrup & Munk<sup>4)</sup> の論文にまとめられている。Sverdrup らにより、不規則に変動する海洋波の定量的に評価するために有義波という概念が導入され、風波の発生、発達、伝播、減衰といった一連の減少に関する考え方の枠組みが提唱された。さらに、Bretschneider<sup>5),6)</sup> などにより有義波高、有義波周期、外的条件の関係式が提案された。例えば Bretschneider の式では、有義波高、有義波周期、外的条件はそれぞれ式(1)~(3)で表される。

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.283 \tanh \left\{ 0.0125 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{U^2} = 7.540 \tanh \left\{ 0.0770 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right\} \quad (2)$$

$$t = \int_0^F \frac{dx}{C_g} = \int_0^F \frac{dx}{\left( \frac{gT}{4\pi} \right)} \quad (3)$$

ただし、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期、 $U$ は風速、 $t$ は吹送時間、 $F$ は吹送距離、 $g$ は重力加速度を表す。以上の手法のことを Sverdrup, Munk, Bretschneider の頭文字をとって SMB 法もしくは有義波法と呼ぶ。SMB 法には、うねりの評価が明確でない、多方向の波の取り扱いがあいまいであるといった欠点があり、これらを解決するため、1950年代に入り波浪推算の考え方に海洋波のスペクトルを導入した手法が Pierson, Neumann & James<sup>7)</sup>によって提案された。この手法は3人の頭文字をとって PNJ 法と呼ばれる。

上記の2手法は、風場が定常状態の場合に適用できる。風場が時間的、空間的に変動している場合に対応するため、波のエネルギースペクトルの変動を記述する微分方程式としてエネルギー平衡方程式を導入したものが、第1世代波浪推算モデルである。エネルギー平衡方程式の詳細は次節に述べるが、外力に関する非線形効果を取り入れることで、第2世代モデルへと発展し、現在ではさらに非線形効果をより正確に取り入れる手法として、第3世代モデルが開発されている。特に、波浪の非線形性をできるだけ正確に取り入れた第3世代波浪推算モデルの適応性が2000年代以降に検討され、最近では実務でも利用され始めている。代表的な第3世代波浪推算モデルに WAM, SWAN, Wave Watch III (以下 WW3 と記す)がある。また、MRI III (日本気象庁), JWA3G (日本気象協会)なども WAM に基づいて開発されている。波浪推算の発展過程の詳細は光易など<sup>8)</sup>を参照されたい。

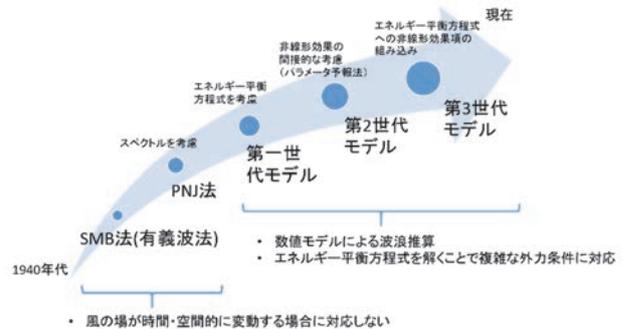


図 2 波浪推算の発展過程

2.3 エネルギー平衡方程式

第3世代波浪推算モデルの基礎となるエネルギー平衡方程式は以下のとおりである。

表 1 代表的な第 3 世代波浪推算モデル特徴のまとめ

WAM	開発元	WAMDI グループ
	平衡方程式	エネルギー平衡方程式
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 沖合の計算にて精度がよい</li> <li>・ 計算時間が早い</li> </ul>
SWAN	開発元	デルフト工科大学
	平衡方程式	波作用量スペクトルに関する平衡方程式
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 沖合に加え浅海域での推算精度がよい (特に波高)</li> <li>・ WAM や WW3 の計算結果を入力条件とすることができる</li> </ul>
Wave Watch III	開発元	米国海洋大気局 (NOAA) など
	平衡方程式	波作用量スペクトルに関する平衡方程式
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ うねりや周期の推算精度がよい</li> <li>・ 風波の発達やエネルギー損失項などで多数のモデルを収録</li> <li>・ 2way のネスティングが可能</li> </ul>

$$\frac{\partial E(\sigma, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot \nabla E(\sigma, \theta) = S \quad (4)$$

ただし、 $E(\sigma, \theta)$ は風波の方向スペクトル密度、 $C_g$ は群速度ベクトル、 $S$ はエネルギー入出力関数を表す。このうちエネルギー入出力関数  $S$  は、様々な効果が考えられており、近似的には式(5)で表される。

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (5)$$

ここで、 $S_{in}$ は風と波との相互作用によるエネルギーの収支、 $S_{ds}$ は波からのエネルギー損失、 $S_{nl}$ は、風波の成分波間に存在する弱い非線形相互干渉によるエネルギーのやりとりを表す。なお、SWAN や WW3 では、上記の式ではなく、 $E(\sigma, \theta)$ を相対角周波数で割った波作用量スペクトル  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ に関する平衡方程式を解いている。

### 2.4 第 3 世代波浪推算モデルによる違い

表 1 に WAM, SWAN, WW3 における主な違いをまとめた。SWAN と WW3 は WAM を改良したものであり、SWAN は非線形相互干渉によるエネルギーのやりとりとして 4 波共鳴に加え 3 波共鳴を考慮している点や地形性碎波や Wave Setup を考慮している点などから浅海域の計算に強みがある。一方、WW3 はうねりや周期の推算精度向上が図られ、外洋域の計算に強みがある。このように第三世代波浪推算モデルは複数存在するが、実際の解析業務では解析対象域や波浪観測値と波浪推算値の比較により、どのモデルを用いるかを決定するのが望ましい。また、

SWAN では WAM や WW3 での外洋の計算結果を引き継ぐ機能を有しており、複数モデルを組み合わせることで波浪推算を行うことも可能であるため、沿岸の港湾施設を対象として計算を行う際には、外洋域を WW3 で、浅海域を SWAN で計算するといった取り組みもなされている。

### 3 SWAN を用いた解析

本稿では、第 3 世代波浪推算モデルの一つである SWAN を用いて、2019 年度の台風 19 号時の解析を行い、ナウファスの実測値との比較を行った事例を紹介する。

#### 3.1 2019 年台風 19 号について

2019 年台風 19 号の概要は表 2 のとおりである。また、台風経路を図 3 に、中心気圧の時系列データを図 4 にそれぞれ示す。なお時刻は UTC である。

表 2 2019 年台風 19 号概要<sup>10)</sup>

名称	台風 201919 号 (Habigis)
発生日時	2019-10-05 18:00:00 UTC
消滅日時	2019-10-13 03:00:00 UTC
最低気圧	915 hPa
最大風速	105 knot

#### 3.2 計算領域

計算にはネスティング格子を用い、計算領域を図 5 に示す領域 1~3 の 3 段階に設定した。領域 1~3 それぞれの範囲と格子点数を表 3 にまとめる。

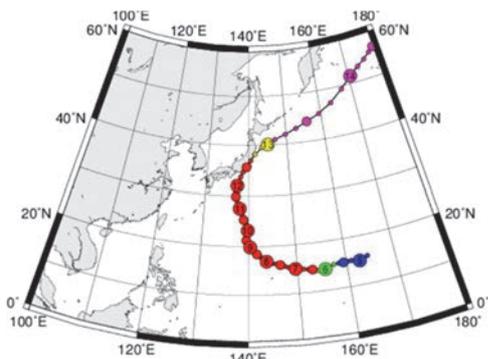


図 3 2019 年台風 19 号の経路<sup>10)</sup>

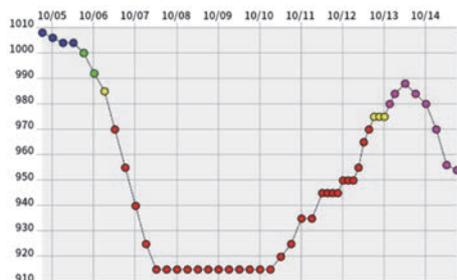


図 4 2019 年台風 19 号の中心気圧推移<sup>10)</sup>

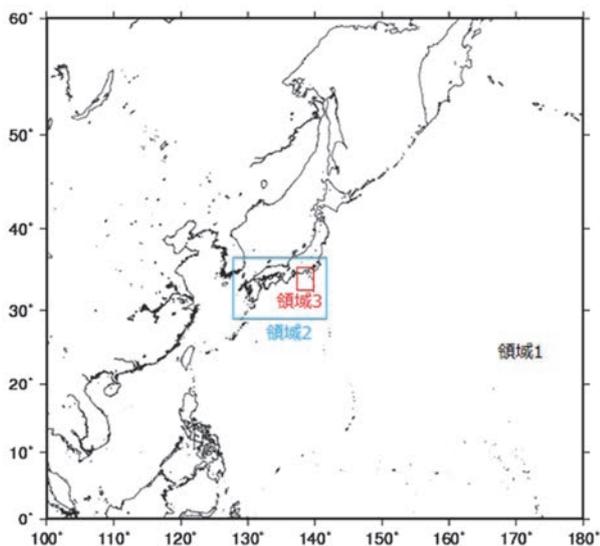


図 5 計算領域図

表 3 計算領域データまとめ (SWAN)

	領域 1	領域 2	領域 3
南西端 (経度)	100	127.8	137.3
北東端 (経度)	180	141.8	139.8
南西端 (緯度)	0	28.9	32.7
北東端 (緯度)	60	36.6	35.4
格子点数 (経度方向)	322	282	201
格子点数 (緯度方向)	242	147	321

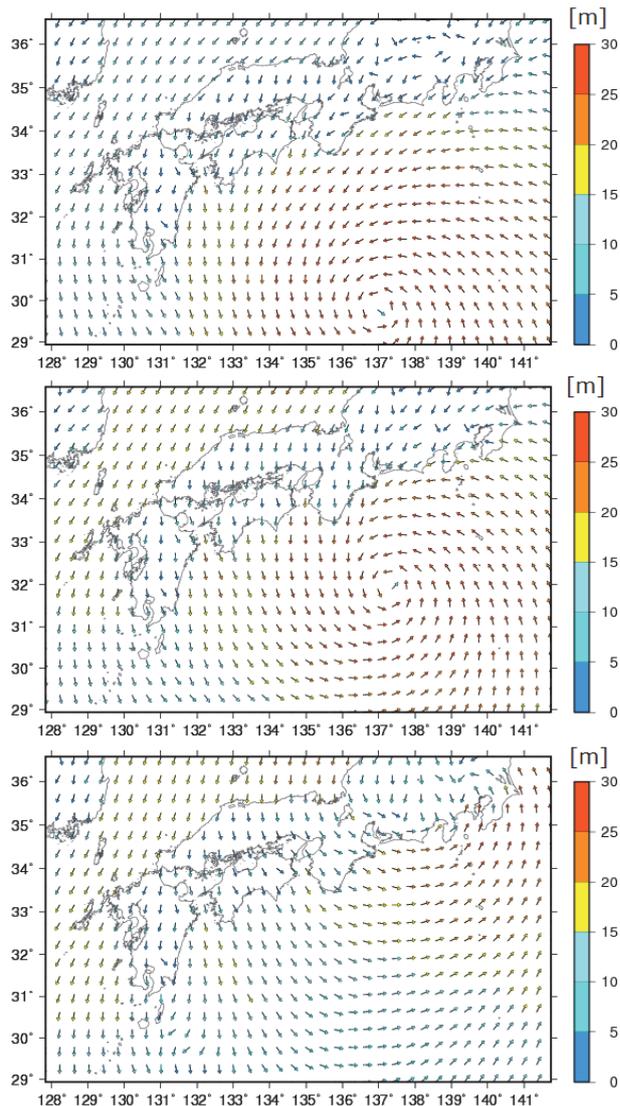


図 6 MSM 風データ (上 : 2019 年 10 月 11 日 21 時, 中 : 2019 年 10 月 12 日 9 時, 下 : 2019 年 10 月 12 日 21 時)

### 3.3 計算条件

以下に主な計算条件をまとめる。

#### 3.3.1. 地形データ

地形データは表 3 に示す各計算領域のメッシュの格子点毎に値を与えている。なお地形データの作成には、当社が開発した津波高潮シミュレータ Q-Wave<sup>®11)</sup>の地形作成機能を用いた。

#### 3.3.2. 風データ

計算の入力条件として用いる風データは気象業務支援センターから提供されている全球数値予報モデル GPV (GSM) とメソ数値予報モデル GPV (MSM)

表 4 風データ参照元まとめ

領域	データ元
領域 1	GSM 2次元物理量瞬間値 風の u 成分, v 成分
領域 2	MSM 2次元物理量瞬間値 風の u 成分, v 成分
領域 3	

表 5 風データまとめ

	GSM	MSM
南西端 (経度)	0	120
北東端 (経度)	360	150
南西端 (緯度)	-90	22.4
北東端 (緯度)	90	47.6
格子点数 (経度方向)	720	481
格子点数 (緯度方向)	360	505
データ時間間隔	6 時間	1 時間

を用いた。各参照元からダウンロードした風データについて SWAN に適用した条件を表 4 と表 5 にまとめる。また図 6 に MSM より抽出した風速ベクトルを示す。なお以降の時刻表記はすべて JST である。

### 3.3.3. 時系列データ出力点

ナウファスの実測値との比較を行うため、表 6 および図 7 の地点について時系列データを出力した。なおナウファスの実測値には、確定値と速報値の 2 種類があるが、本稿作成時点では確定値は公表されていないため、速報値を用いて比較を行っている。

### 3.3.4. その他の条件

その他の解析条件を表 7 にまとめる。

## 3.4 計算結果

御前崎、下田、清水における SWAN の計算結果とナウファス観測値に関して有義波高と平均波周期を図 8～図 10 に示す。なおナウファス観測値で値が飛んでいる箇所は、計測が正常に行われず欠損値となっていた箇所である。また、御前崎の計算結果にて有義波高が最大となった 2019 年 10 月 12 日 17 時の有義波高と平均波周期の分布図を図 11 に示す。計算結果と観測値を比較すると、有義波高については概ねピーク値を再現できている。本件では外力として与

表 6 時系列データ出力地点座標

地点名	緯度	経度
御前崎	34° 37' 17"	138° 15' 33"
下田	34° 38' 48"	138° 57' 11"
清水	35° 01' 16"	138° 32' 05"

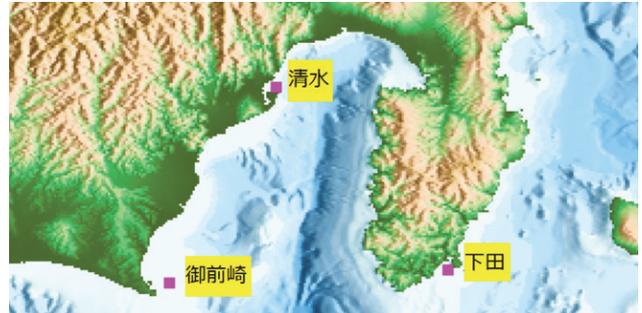


図 7 時系列データ出力地点位置

表 7 その他計算条件

	領域 1	領域 2	領域 3
計算開始日時	2019/10/9/ 9:00		
計算終了日時	2019/10/14 3:00	2019/10/13 12:00	
計算時間刻み	120 秒	60 秒	30 秒
スペクトル分割数	36		

える風データに MSM データを用いているが、種本ら<sup>12)</sup>を参考に外力として与える風データに台風モデル等を組み込むことで更なる精度向上が見込まれる。また平均波周期についても概ねピーク値は再現できているが、有義波高のピーク以前では全体的に過小の値となっている。台風が接近する以前の低風速時にもうねりに伴う一定以上の波高や波周期が観測されているが、SWAN ではこの影響を過小に評価する傾向が指摘されており<sup>13)</sup>、本件の原因として考えられる。WW3 ではうねりや周期の推算精度向上が図られており、海洋状況に応じて波浪推算モデルを使い分けることでさらなる精度向上が見込まれる。

## 4 おわりに

本稿では、近年の大型化する台風に伴い、港湾施設において台風により発生する風波の把握の重要性が増していることや、そのための手法である波浪推算についての紹介を行った。また、第 3 世代波浪推算モデルの一つである SWAN を用いて 2019 年に日本各地に被害をもたらした台風 19 号についての解析を

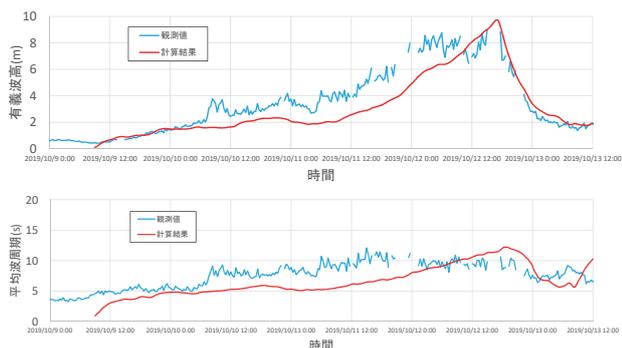


図 8 計算結果とナウファス観測値の比較 (御前崎, 上: 有義波高, 下: 平均波周期)

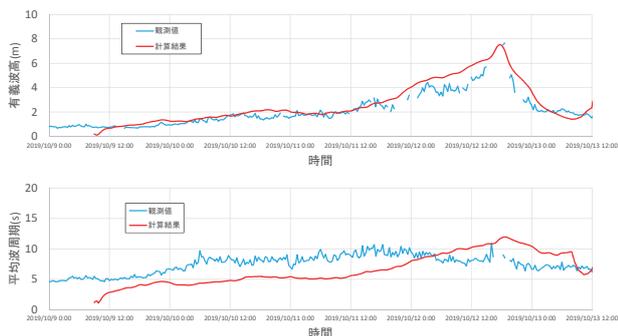


図 9 計算結果とナウファス観測値の比較 (下田, 上: 有義波高, 下: 平均波周期)

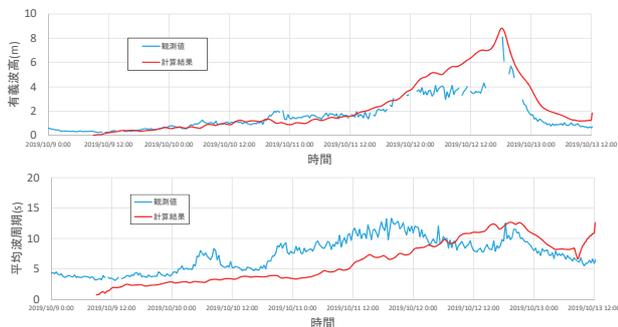


図 10 計算結果とナウファス観測値の比較 (清水, 上: 有義波高, 下: 平均波周期)

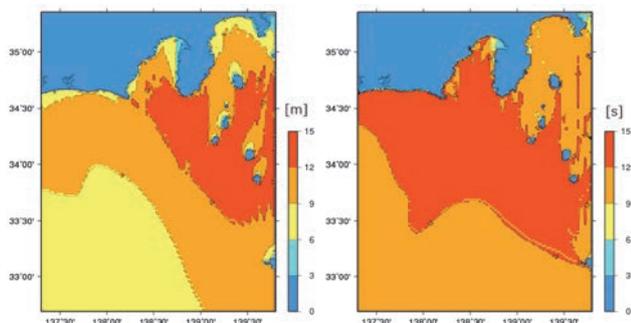


図 11 2019年10月12日17時計算結果 (左: 有義波高, 右: 平均波周期)

行い、実測値との比較を行った事例を示した。

当社では、波浪推算に加え、津波高潮などの浸水解析、沿岸域での浮体の動揺解析に関する業務実績が豊富であり、今後も当該分野の技術開発に貢献していきたいと考えている。

### 引用文献

- 1) 国土交通省：台風 19 号による被災状況と今後の対応について、国土の長期展望専門委員会, (2019).
- 2) 国土交通省：令和元年台風第 15 号及び 19 号による港湾の被害状況，交通政策審議会第 77 回港湾分科会参考資料, (2019).
- 3) 農林水産省，国土交通省：高潮浸水想定区域図作成の手引き ver.1.00, (2015).
- 4) Sverdrup, H. U. & Munk, W. H.: Wind sea and swell. Theory of relation for forecasting, *U. S. Navy Hydroger. Office, Washington*, No.601 (1947) 44.
- 5) Bretschneider, C. L.: The generation and decay of wind waves in deep water, *Trans. A. G. U.*, 33(3) (1952) 381-389.
- 6) Bretschneider, C. L.: Revision in wave forecasting; deep and shallow water, *Proc. 6<sup>th</sup> Conf. on Coastal Eng.*, (1958) 30-67.
- 7) Pierson, W. J., Neumann, G. & James, R. W.: Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, *U. S. Navy Hydroger. Office, Washington*, No.603 (1995) 284.
- 8) 光易恒：海洋波の物理 (岩波書店, 1995).
- 9) 久保田博貴，辻尾大樹，森信人：WAVE WATCHIII-SWAN カップリングモデルの空間解像度に対する沿岸域に対する波浪推算精度の検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74-2 (2018) I\_617-I\_622.
- 10) デジタル台風 HP： <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201919.html>.ja.
- 11) 吉村英人，坂本大樹，荒木和博，眞鍋尚：津波高潮シミュレータ Q-Wave による 2019 年台風 19 号の高潮解析，みずほ情報総研技報，Vol.11-1 (2020).
- 12) 種本純，石原孟：メソスケールモデルと台風モデルの合成風速場を用いた極値波高予測に関する研究，風力エネルギー利用シンポジウム論文集, Vol.35 (2013) 391-394.
- 13) 種本純，石原孟：波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測，日本風力エネルギー学会論文集, Vol.38-4 (2014) 124-138.