

海洋-波浪結合モデルを用いた高潮推算事例の紹介

全 種赫ⁱ, 坂本 大樹ⁱⁱ

Storm Surge Simulation Using a Coupled Ocean-Wave Model

Jonghyeok JEON, Daiki SAKAMOTO

近年、自然災害の激甚化・頻発化により、防災・減災対策が急務となっている。そのなかで、高潮・波浪推算シミュレーションは、防波堤設計やハザードマップ作成に不可欠となっている。本論では、高潮と波浪の関連性を整理し、海洋モデル ROMS と波浪モデル SWAN を結合した COAWST を用い、d4PDF の台風トラックデータに対して高潮推算を行った事例を紹介する。

(キーワード): 高潮推算, 波浪効果, 台風, 海洋-波浪結合モデル

1 はじめに

近年の地球温暖化に伴った気候変動により、自然災害が激甚化・頻発化しており、わが国としてもその対策が迫られている。例えば、国土交通省が公開している第5次社会資本整備重点計画¹⁾では、重点目標の1つ目に「防災・減災が主流となる社会の実現」を挙げており、“激甚化・頻発化する、または切迫する風水害・土砂災害・地震・津波・噴火・豪雪などの自然災害に対し、強くてしなやかになるようにする対策がなされ、国民が安心して生活を送ることができる社会をつくる”ことを目指すべき姿としている。

自然災害の中でも風水害については、わが国でも毎年のように発生しており、令和6年奥能登豪雨による被害は記憶に新しい。また、能登における被害は低気圧や秋雨前線による降雨が原因であるが、台風に起因する波浪・高潮による風水害も過去発生しており、例えば2018年の台風21号(Jebi)によって大阪や神戸などに被害が生じた事例がある。

このような風水害については、国の方針としてもハード・ソフト一体となった対策が求められている。そのうえで欠かせないのが、高潮推算・波浪推算などのシミュレーション技術であり、ハード面では防波堤、防潮堤の設計などに、ソフト面ではハザードマップの作成などに活用されている。当社では、自社ソフ

トウェアである Q-Wave[®]などを用いて、これまで数多くの台風による高潮推算、波浪推算を実施した実績があり、例えばこの技報でも吉村ら²⁾、坂本ら³⁾により計算事例を紹介してきた。これらは高潮および波浪単体の計算を行ったものであったが、実際には高潮と波浪は相互に影響を及ぼし合うため、高潮推算を行う際も波浪効果(Wave Setup)を考慮することが望ましい。そこで本論では、高潮と波浪の関連性について整理するとともに、海洋-波浪結合モデル COAWST⁴⁾(The Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport)を用いて高潮推算を行った事例を紹介する。

2 高潮について

2.1 高潮発生の要因

高潮の発生要因は大きく分けると、吸い上げ効果・吹き寄せ効果・その他の3つに分類され、それぞれ以下に簡単に概要を記載する。

2.1.1 吸い上げ効果

台風は低気圧であるため、台風の中心部分を中心に大気圧よりも気圧が低下する。気圧が低下することにより、海面が吸い上げられるように上昇することを吸い上げ効果と呼ぶ。一般に、1hPaの気圧降下

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム シニアコンサルタント, 博士 (環境学)

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席シニアコンサルタント

があると海面が約 1cm 上昇すると言われている。

2.1.2 吹き寄せ効果

台風によって発生する風によって海水が海岸に吹き寄せられることで水位が上昇することを吹き寄せ効果と呼ぶ。一般には水位上昇量は風速の 2 乗に比例し、吹走距離が長く、水深が浅いほど効果が大きいと言われている。特に、遠浅の海や、風向に開いた湾では、地形が海面上昇を増大させるように働くため、潮位が顕著に高くなる。

2.1.3 その他

上記の吸い上げ効果および吹き寄せ効果が、高潮が発生する大きな要因であるが、それ以外の要因についても考えられており、気象庁が公開している高潮ガイドダンス⁹⁾では Wave Setup, 副振動, 海況要因, 陸棚波, 河川水の流入との相互作用を挙げている。また、密度成層による影響についても研究がされており、例えば柴木ら⁶⁾では土佐湾における台風 7010 号の高潮推算を行う上で、吸い上げ効果・吹き寄せ効果に加え、密度成層, 河川水の流入, Wave Setup を考慮した計算を行っている。

2.2 沿岸地点ごとの特性の整理

2.1 に記載したとおり、高潮発生には様々な要因があるが、地点ごとにどの要因による寄与が大きいかは異なる。この点を説明するために、気象庁の実験式について記載する。気象庁では、高潮推算を行わずに簡易的に各地の潮位偏差を推定する方法として、式(1)を提案している。

$$Z = a(1010 - P) + bW^2 \cos \theta + c \quad (1)$$

ここで、 Z :最大高潮偏差(cm), P :気圧の最低値(hPa), W :平均風速の最大値(m/s), θ :主風向(概ね湾軸方向)と最大風速 W がなす角度である。式(1)の右辺のうち、第 1 項が吸い上げ効果、第 2 項が吹き寄せ効果による寄与分を示している。係数 a, b, c については、気象庁が各地点で既往の観測値から求めた回帰係数であり、例えば表 1 に示すとおりである。

地点ごとに係数の値を相対的に比較すると、大阪、名古屋といった湾内の点については係数 a に対する係数 b の比率が他地点と比べて大きく、潮位上昇量における吹き寄せ効果の影響が大きいことが分かる。一方で、高松・和歌山など外洋に面している地点では、

係数 a に対する係数 b の比率が大阪、名古屋と比較して小さく、潮位上昇量における吹き寄せより吸い上げ効果の影響が大きいことが分かる。

表 1 気象庁の実験式(潮位偏差)回帰係数例

地点	a	b	c	主風向
名古屋	2.961	0.119	0	S33°E
大阪	2.167	0.181	0	S6.3°E
神戸	3.370	0.087	0	S24°E
洲本	2.281	0.026	0	SSE
和歌山	2.608	0.003	0	SSW
高松	3.184	0.000	0	SE

2.3 Wave Setup 効果について

2.1.3 にて、高潮の発生要因のうち、吸い上げ効果・吹き寄せ効果以外の効果について触れたが、ここではそのうち本論で焦点を当てる Wave Setup 効果について記載する。2.2 で示したような外洋に面した地点では、吹き寄せ効果による影響が小さく、吸い上げ効果による影響が大きいことが、2.1 に記載したその他の要因も考慮する必要があることが言われている。例えば、Jeon ら⁷⁾では 2019 年台風 19 号(Hagibis)について、清水港における当時の台風および海象条件や実被害について整理を行っているが、波浪効果による影響を指摘している。

清水港に限らず、一般に岸から沖に水深が急に深くなるような地域では、沿岸付近で波浪が急激に碎波し、Wave Setup 効果が大きくなることが言われている。この Wave Setup 効果による潮位上昇量については、すでに観測値などから研究もされており、例えば気象庁では Wave Setup 効果による水位上昇量を実験式として式(2)のように整理している。

$$Z_w = a_w H^2 + b_w H + c_w \quad (2)$$

ここで、 Z_w : Wave Setup による水位上昇量(cm), H :有義波高(m)である。また、 a_w, b_w, c_w は地点ごとに設定される係数であり、気象庁の高潮ガイドダンスでは、例えば表 2 のように整理されている。

なお、式(2)は有義波高による関係式となっているが、沿岸波浪モデルによる予測値などを用いることを想定している。この有義波高には、全波向成分が含まれているが、地点ごとに Wave Setup が効く波向は特定の方向に絞られるため、気象庁では、波向を絞ったうえで算出した有義波高を用いることで精度が向

上する可能性を示唆している。

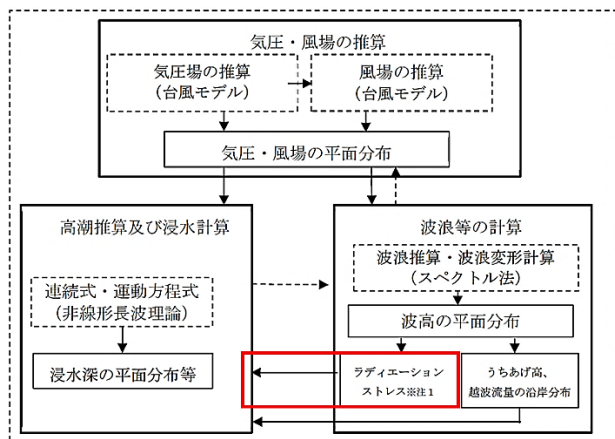
表 2 気象庁の実験式(Wave Setup 量)回帰係数例

地点	a	b	c
石廊崎	1.45	-3.62	1.44
赤羽根	1.87	-6.57	15.88
串本	-0.52	9.21	-21.36
御坊	1.74	3.58	-17.41
室戸岬	0.29	0.72	1.23
布良	0.87	-3.59	12.70

3 計算モデル

3.1 高潮の計算フローについて

農林水産省、国土交通省が公開している「高潮浸水想定区域図作成の手引き⁸⁾」では、台風による高潮浸水のシミュレーション手順を図 1 のように整理している。このうち赤枠の部分が 2.3 で記載した Wave Setup の計算に該当し、波浪推算が高潮推算に寄与する部分である。



※注1：ラディエーションストレス：潮位偏差の計算、wave setup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⁸⁾

高潮推算にて潮位上昇量を求める際に Wave Setup 効果による水位上昇量を考慮する方法は大きく分けて 2 つあり、1 つ目は高潮推算および波浪推算をそれぞれ単独で行い、高潮推算で求めた潮位上昇量に、波浪推算で求めた Wave Setup 効果による水位上昇量を加算して最終的な潮位上昇量を求めるものである。例えば気象庁が公開する高潮ガイドダンスでは、高潮推算モデルでは、波浪の効果は考慮せず式(2)で求めた Wave Setup 効果による水位上昇量を加算することで最終的な潮位上昇量を求めている。

一方、2 つ目の方法として高潮推算のモデルと波浪推算のモデルを結合させ、一度に Wave Setup 効果による水位上昇効果も含めた潮位上昇量を求める方法がある。このような海洋-波浪結合モデルの一つとして COAWST が挙げられる。COAWST は、海洋モデルとして Rutgers 大学と UCLA によって開発された ROMS⁹⁾ (Regional Ocean Modeling System)を、波浪モデルとしてデルフト工科大学によって開発された SWAN¹⁰⁾ (Simulating WAVes Nearshore)を用い、両者をカップリングしたフレームワークである。なお、COAWST では海洋モデル、波浪モデルに加えて領域気象モデルである WRF(Weather Research and Forecasting)もカップリングすることができるが、本論では検討の対象外としている。本章ではそれぞれのモデルについて概要を記載した後で、COAWST におけるカップリングモデルについて整理する。

3.2 海洋モデル

ROMS は、沿岸域から外洋まで多様なスケールの海洋現象をシミュレーションするために開発されたプログラムである。自由表面、 σ 座標系を持つ静水圧近似を仮定したプリミティブ方程式を支配方程式とする準 3 次元海洋モデルであり、台風による強風や気圧低下が海洋に及ぼす海面水位変動などの影響を再現するために用いられる。

3.2.1 基礎方程式

海洋モデルにおける流れの運動を支配する方程式は、以下に示す基礎方程式(3)~(8)で構成される。水平方向の運動方程式は式(3)、(4)のとおりである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_u + D_u \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + F_v + D_v \quad (4)$$

ここで、 u, v は直交座標系における x, y 方向の流速成分、 $\vec{v}=(u, v)$ は流速ベクトル、 f はコリオリパラメータ、 $\phi(=P/\rho_0)$ は動圧、 $P(\approx \rho_0 gz)$ は全圧力、 ρ_0 は基準密度、 F_u, F_v は x, y 方向の外力項、 D_u, D_v は x, y 方向の拡散項、 g は重力加速度を示す。

また、非圧縮性流体の連続方程式を式(5)に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

さらに、温度や塩分といった値の時間的な変化を表す移流拡散方程式を式(6)に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = F_C + D_C \quad (6)$$

ここで、 $C(T, S)$ は温度 T 、塩分 S などのスカラー量、 F_C は外力項、 D_C は拡散項である。

気圧が密度のみに依存する **barotropic** 条件下では、与えられた T, S および全圧力 P により、密度 ρ は式(7)で表される。

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (7)$$

なお、ブジネスク近似という方法を使うと、水の動きを計算する際、密度変化の影響を一部無視できる。ただし、浮力による動きは考慮する。

また、水面がほぼ水平であると仮定する静水圧近似を適用すると、水面勾配と鉛直圧力勾配の変化が、浮力と関係することになる。鉛直方向の運動方程式は式(8)で表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (8)$$

3.3 波浪モデル

SWAN は第 3 世代波浪推算モデルの一つであり、風による波の生成、非線形相互作用、海底摩擦、砕波といった物理過程を考慮し、沿岸域における波高、波周期、波向といった波浪特性を予測するために開発されている。また、台風に伴う強風によって発達した波浪が、沿岸域に到達し、港内など複雑な地形変化によって生じる回折、屈折、反射といった変形過程も考慮することができる。

3.3.1 基礎方程式

SWAN では波のエネルギー密度を表す波作用量に着目し、その時間的・空間的な変化を求めている。具体的には、風波の方向スペクトル密度 $E(\sigma, \theta)$ を相対角周波数 σ 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(9)を解いており、Booijら¹⁰⁾が参考になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 x, y は空間座標、 θ は波向、 c は伝播速度、エネルギー入出力関数 S である。

式(9)の左辺の各項は、第 1 項は時間変化、第 2 項、第 3 項は波の伝播 c_x, c_y による波作用量の輸送である移流項、第 4 項は波の伝播 c_σ による相対周波数の変化、第 5 項は波の伝播 c_θ による波向への変化である。また、式(9)の右辺の S は波の生成、消滅、エネルギー散逸などのソース項を示し、式(10)のように表すことができる。

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (10)$$

ここで、 S_{in} は風からのエネルギー入力、 S_{ds} は波からのエネルギー損失、 S_{nl} は波同士の非線形な相互作用によるエネルギー伝達を表す。このうち、特に S_{ds} は 2.3 に記載した Wave Setup 効果に関する砕波によるエネルギー損失、海底摩擦によるエネルギー損失などに関連するものである。

3.3.2 Wave Setup の考慮

SWAN モデルにおいては、波の位相平均効果を質量輸送として評価する Stokes Drift や、それを運動量に拡張した Radiation stress といった概念も重要となっている。Radiation stress を計算し、その勾配を ROMS に外力として与えることで、Wave Setup を考慮することができる。なお、Radiation stress とは、波浪による運動量の輸送を表すテンソル量であり、Longuet-Higgins ら¹¹⁾によって定式化されたものである。

岸向きに作用する Radiation stress である S_{xx} は、式(11)で表される。

$$S_{xx} = \int_{-h}^{\eta} (p + \rho u^2) dz - \frac{1}{2} \rho_w g (h + \eta)^2 \quad (11)$$

ここで、 p は流体圧、 u は流量速度ベクトルの振動部分の水平 x 成分、 z は垂直座標、 t は時間、 h は水深、 η は水位上昇量、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。また、 $\frac{1}{2} \rho_w g (h + \eta)^2$ は静水深度に対する静水圧の積分値を示す。

図 2 で示すように岸向きの S_{xx} が作用していると

き力の釣り合いは、 $\eta \ll h$ として波の作用により水面勾配が形成されることを説明できる。また、水面勾配による放射応力勾配と圧力項の釣り合いを考えると、式(12)となる。

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho_w g h} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (12)$$

ここで、 $d\bar{\eta}/dx$ は水面勾配である。式(11)、(12)によって、波の作用である Radiation stress により、水面勾配が形成され、水位が上昇することが分かる。

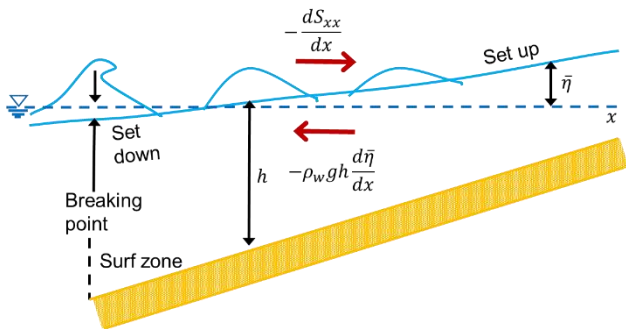


図 2 Wave Setup の模式図

3.4 海洋-波浪結合モデル

本論では、海洋モデル ROMS と波浪モデル SWAN を結合した COAWST を使用する。COAWST は、ROMS と SWAN を Model Coupling Toolkit (MCT) を用いて結合したもので、高潮と波浪の相互作用を考慮したシミュレーションが可能となる。MCT は、異なるモデル間や、領域・空間解像度の異なるメッシュ間でのデータ交換を効率的に行うためのツールである。

海洋・波浪結合モデルは、海洋モデルと波浪モデルの計算を同時に行う双方向カップリングを採用している。双方向カップリングでは、海の流れが波浪場に影響を与えるだけでなく、波浪場も海の流れに影響を与える。図 3 にカップリングフローの概要を示すように、ROMS と SWAN は計算を進めるうえで、随時 MCT を介して計算結果を交換している。

4 計算事例

4.1 計算概要

本論では、高潮推算において波浪効果の考慮の有無が与える影響を検討するため、波浪効果を考慮しないモデルとして ROMS 単体および、自社保有ソフトウェアである Q-Wave を、波浪効果を考慮したモデ

ルとして COAWST を用いて計算を行った。

また、本論では Wave Setup を検証する地点として、図 4 に示す串本・御坊・室戸岬の 3ヶ所を計算対象地域とした。

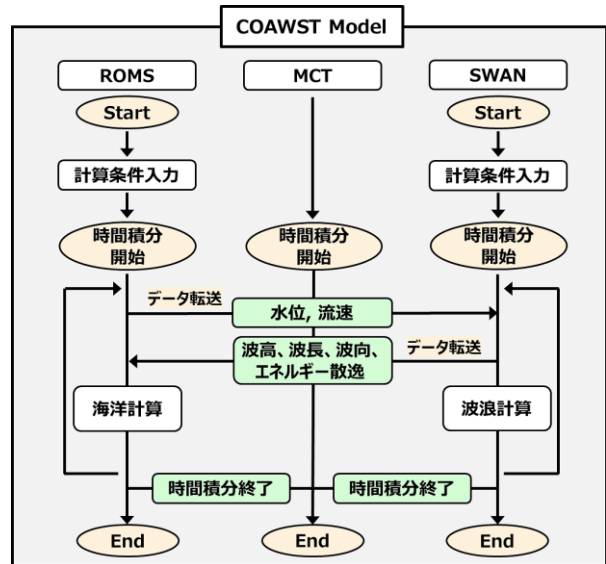


図 3 カップリングのフロー

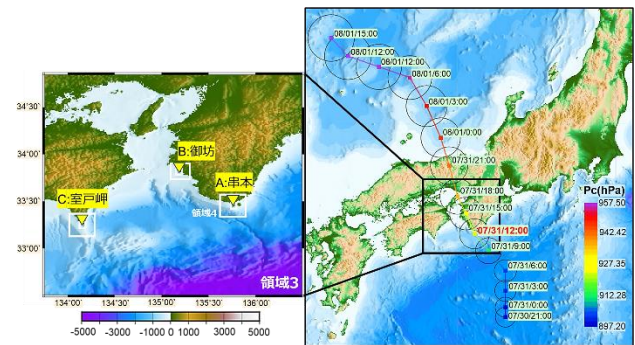


図 4 対象地域と台風経路

4.2 計算対象とする台風

大規模アンサンブル気候予測データベース (d4PDF^{12,13})は、高解像度大気モデルを使用した過去および将来の気候変動に関する膨大なデータセットであり、高潮・波浪の将来変化を推定するための重要な情報源となる。d4PDF には、過去実験 (60年×100メンバ)に加え、全球平均気温が産業革命以降 1.5, 2, 4°C の 3 パターンで上昇した際のモデル実験データが含まれている。また Webb ら¹⁴)では d4PDF データから台風トラックデータを抽出し公開している。

本論では、d4PDF の台風トラックデータを計算に用いることとした。4°C 上昇実験の台風トラックデータに対して 2.2 に示す気象庁の実験式を用いて、代表的な地点における最大高潮偏差を計算し、最大高潮

偏差が大きくなった台風として、シナリオ HFB_4K_MR のメンバー107 に含まれる台風を計算対象とした。台風経路を図 4 に示す。なお d4PDF データは数値実験であり、モデルバイアスが含まれるため、正確にはバイアス補正を行うことが望ましいが、本論では計算事例を紹介することが目的であるため、台風トラックデータをそのまま用いている。バイアス補正方法としては、例えば有村ら¹⁵⁾が挙げられる。

4.3 外力の設定手法

本論では、台風トラックデータから、経験的台風モデルを用いて、台風の気圧分布と風速分布を算出し、計算に用いた。具体的には、気圧分布の算定には Myers 式、風速分布の算定には傾度風と台風の移動速度、および海面摩擦による減衰を考慮した計算式を用いた。詳細を以下に示す。

4.3.1 気圧分布の算定

Myers 式に基づき、台風中心からの距離に応じて気圧を算出する。

$$p(r) = p_c + \Delta p \cdot \exp\left(-\frac{r_{max}}{r}\right) \quad (13)$$

$$\Delta p = p_\infty - p_c \quad (14)$$

ここで、 p は気圧(Pa)、 r は台風の中心からの距離(m)、 p_c は中心気圧(Pa)、 p_∞ は無限遠の気圧(=1013×10³ Pa)、 r_{max} は最大旋衡風速半径(m)である。

なお、最大旋衡風速半径は、加藤¹⁶⁾を参考に次式のように設定した。

$$r_{max} = 80 - 0.769(950 - p_c), \quad p_c < 950 \quad (15)$$

$$r_{max} = 80 + 1.633(p_c - 950), \quad p_c \geq 950 \quad (16)$$

4.3.2 風速分布の算定

傾度風、台風の移動速度、および海面摩擦を考慮し、風速分布を算出した。傾度風は式(17)に基づき求めた。

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p r_{max}}{\rho_a r} \exp\left(-\frac{r_{max}}{r}\right)} \quad (17)$$

ここで、 U_1 は Myers の 式を仮定した場合の傾度風速(m/s)、 ρ_a は大気密度(=1.2 kg/m³)、 f はコリオリパラメータ(=2 $\Omega \sin \phi$)、 Ω は地球の自転速度(1/s)、 r は台風中

心からの距離(m)である。

また、傾度風の風向に関して、台風中心から見た計算点の位置ベクトルを $\vec{r} = (r_x, r_y)$ とすると傾度風が x 軸から成す角 θ (°, 反時計回り) は式(18)で表すことができる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r_y}{r_x}\right) + 90 + \theta_{in} \quad (18)$$

ここで、 θ_{in} は傾度風の吹き込み角=30° とした。

また、台風の進行速度に伴う風速の大きさ U_2 は式(19)で表される。

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_{max})} V_T \quad (19)$$

ここで、 V_T は台風の進行速度(m/s)である。

上記で求めた U_1, U_2 に対し、風速低減係数を乗じてから、傾度風と移動に伴う風速を合成することで、式(20)、(21)のように海上 10m 風速を求めた。

$$u_{10}(r) = c_1 U_1(r) \cos \theta + c_2 U_2(r) u_T / V_T \quad (20)$$

$$v_{10}(r) = c_1 U_1(r) \sin \theta + c_2 U_2(r) v_T / V_T \quad (21)$$

ここで、 u_{10}, v_{10} は 10m 風速の経度、緯度方向成分(m/s)、 u_T, v_T は台風の進行速度の経度、緯度方向成分(m/s)、 c_1 は傾度風の風速低減係数(=0.66)、 c_2 は台風の進行速度に伴う風速の風速低減係数(=0.66)である。台風が日本列島に上陸する近辺の気圧場と風場例を図 5 に示す。

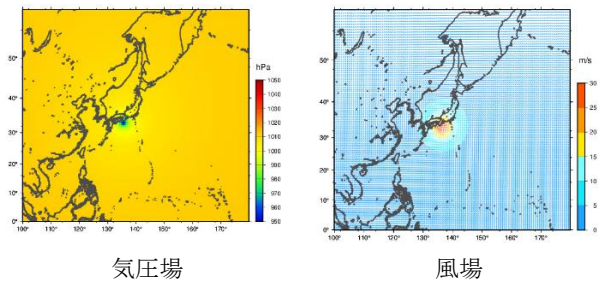


図 5 気圧場と風場

4.4 メッシュ作成

計算を行うにあたり ROMS, SWAN および Q-Wave の計算メッシュを作成した。計算領域は日本全体を覆う領域 1 から計算対象地域 3 地域に向けて徐々にメッシュサイズを細かくし、第 5 領域までを設定し

た。例えば、御坊の計算領域を図 6 に示す。各領域の格子幅目安を表 3 に示す。水深データは第 1 領域で GEBCO_2023、第 2 領域では中央防災会議の水深データを利用した。

なお Q-Wave では、BCM (Building Cube Method) に基づきメッシュ分割を行うため、図 7 に示すように、ROMS や SWAN で用いられる通常のネスティング手法とは異なり、複数の対象地域を一つのメッシュで表現することができる¹⁷⁾。BCM は解像度の異なる Cube を組み合わせる手法であり、海岸線沿いや遡上域に小さな Cube を配置し、外洋では大きな Cube を用いることで、計算効率と精度を両立する。これにより、複雑な海岸線にも柔軟に対応でき、時刻刻みの制限も緩和されるため、メッシュ作成の手間も軽減される。

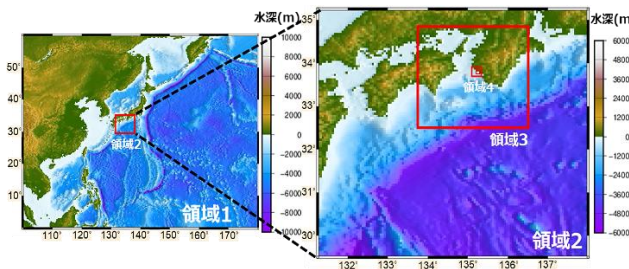


図 6 御坊における計算領域

表 3 各領域の格子サイズ目安

領域	格子幅(m)	経度格子幅(deg)	緯度格子幅(deg)
1	25,000	0.25	0.25
2	5,000	0.05	0.05
3	1,000	0.01	0.01
4	200	0.002	0.002
5	40	0.0004	0.0004

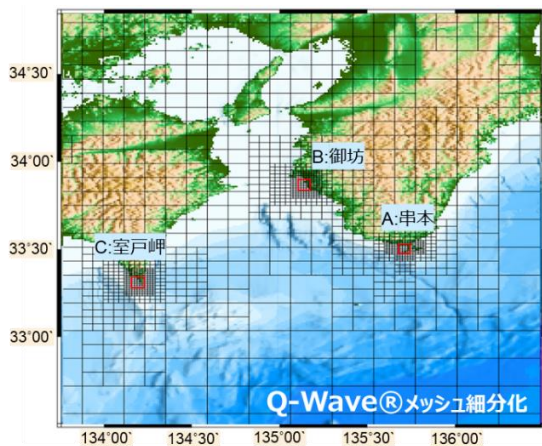


図 7 BCM のメッシュ作成

4.5 計算結果

串本、御坊、室戸岬の計算結果として、3 モデルによる潮位偏差と SWAN で求めた有義波高の計算結果を以下に示す。

まず、図 8～図 10 に示すように波浪の影響を考慮しない海洋モデルである ROMS 単体および Q-Wave での計算結果を比較したところ、潮位偏差上昇のタイミングおよびピーク値に関して、両モデルで概ね同等の結果となった。

一方、海洋-波浪結合モデルによる計算結果をみると、特に串本・御坊では、Q-Wave および ROMS 単体の計算結果と比べると潮位偏差のピークが遅れて現れたり最大潮位偏差が大きくなったりする結果となった。このピークが現れる時間は有義波高のピークと重なり、Wave Setup に起因しているものと考えられる。また室戸岬についても、串本・御坊と比較すると影響は小さいが、Wave Setup を考慮しない場合より潮位偏差が大きくなる結果となった。このように、波浪効果を検討することで従来とは異なる潮位偏差のピークが確認できることがあり、沿岸域の防災・減災リスクに影響があることがわかる。

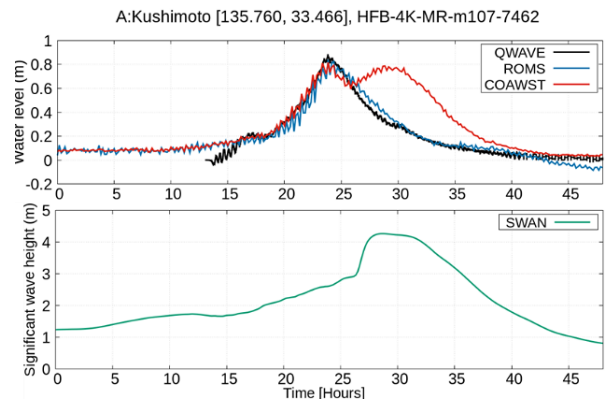


図 8 A : 串本の計算結果

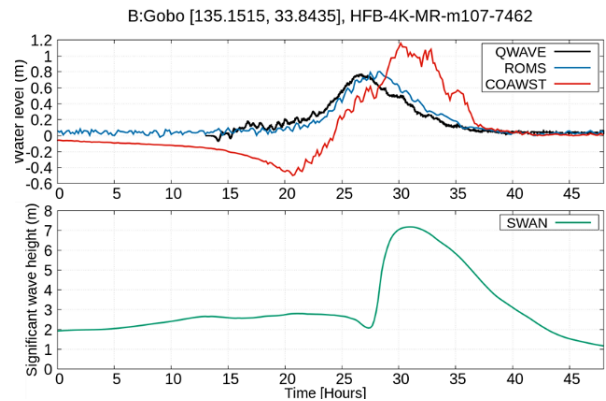


図 9 B : 御坊の計算結果

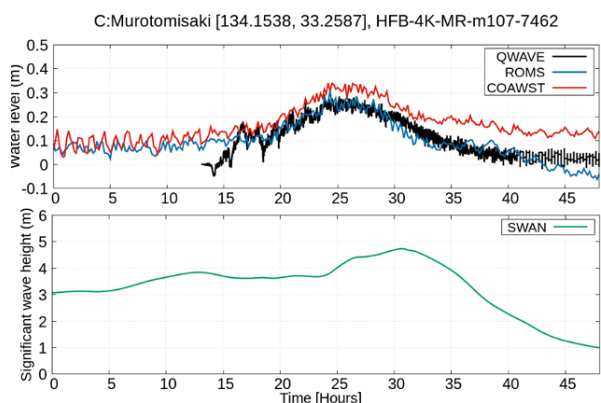


図 10 C : 室戸岬の計算結果

5 おわりに

本論では、高潮と波浪の関連性に着目し、海洋-波浪結合モデルの概要を整理した。さらに、d4PDFの台風トラックデータを用いた計算事例を紹介し、その結果を考察したところ、台風の気圧低下や風による海面上昇に加え、波浪が沿岸域の防災・減災リスクに影響を与える結果となった。将来の沿岸域における防災・減災リスク評価においては、台風の気圧、風速、波浪といった気象要素に加え、海面水温上昇などの複合的な要因を総合的に考慮する必要があると考えられる。当社でも高潮・波浪推算に関する技術を磨くとともに、洪水などによる水害計算と組み合わせた浸水リスク評価や、水害対策の費用・便益の具体化を行っていくことで、「防災・減災が主流となる社会の実現」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：第5次社会資本整備重点計画, (2021)
- 2) 吉村ら：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, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, Vol.1, No.1, (2021) 45-50.
- 3) 坂本ら：SWAN による 2019 年台風 19 号の波浪推算, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, Vol.1, No.1, (2021) 51-56.
- 4) Warner et al.: Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *Comput. Geosci.*, Vol. 34, No. 10, (2008) 1284-1306.
- 5) 気象庁大気海洋部：高潮予測の概要と高潮事例の検証 令和6年度 予報技術研修テキスト, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/expert/pdf/r6_text/r6_takashioyosoku-jirei.pdf, (参照 2025-04-28)

- 6) 柴木ら：密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, (2001) 286-290.
- 7) Jeon, J., 富田 孝史ら：清水港および焼津漁港における台風 Hagibis による高潮・高波被害に関する現地調査, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, (2020) 983-988.
- 8) 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.2.11, (2023).
- 9) Shchepetkin et al.: Regional Ocean modeling system: a split-explicit ocean model with free- surface and topography following vertical coordinate, *Ocean Model*, Vol. 9, (2005) 347-404.
- 10) Booij et al.: A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, (1999) 7649-7666.
- 11) Longuet-Higgins et al.: Radiation stresses in water waves; a physical discussion, *Deep Sea Res.*, 11(4), (1964) 529-562.
- 12) Mizuta R. et al.: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models, *BAMS*, (2017) 1383-1398.
- 13) d4PDF：地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース <https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF>, (参照 2025-04-28)
- 14) Webb et al.: Global Tropical Cyclone Track Detection and Analysis of the d4PDF Mega-ensemble Projection, *JSCE, Ser. B2*, 75, (2019) 1207-1212.
- 15) 有村ら：大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の台風を対象としたバイアス補正手法とその将来変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.77, No.2, (2021) 973-978.
- 16) 加藤 史訓：高潮危険度評価に関する研究, 国総研資料 No. 275, (2005).
- 17) みずほリサーチ&テクノロジーズ：BCMを用いた津波解析シミュレータ <https://www.mizuho-rt.co.jp/archive/solution/tsunami/02.html>, (参照 2025-04-28)