

メソスケールモデルと台風モデルを用いた 関東沿岸域における極値水位と極値波高の予測に関する研究*

Prediction of extreme water levels and extreme wave heights in the Kanto coastal area
using mesoscale and typhoon models

福島 雅人**, 石原 孟**

Masato FUKUSHIMA, Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計では、極値水位と極値波高を正確に推定する必要がある。熱帯低気圧に伴う極値波高の推定には、30 年間以上の現地観測データまたはハインドキャスト¹⁾を要するが、洋上の観測点は少ないため、数値予測が不可欠である。

極値水位及び極値波高の予測精度は、台風時の気象場の予測精度に依存する。台風時の風速場を精度良く求めるため、メソスケールモデルと台風モデルの合成風速場が提案されている^{2),3)}。台風モデルは、台風パラメータの同定が必要であるが、気圧の観測値や天気図の等圧線を用いた同定手法は、沖合で同定率が低下する。種本・石原²⁾は、全球再解析データを用いた同定手法を提案し、沖合の同定率を大幅に向上させた。しかし、気圧分布は Schloemer の式でモデル化しているため、台風の気圧分布の近似精度が低い場合があり、Holland の式によるモデル化が必要である⁴⁾。また、種本・石原²⁾では気圧分布の妥当性が検証されていないことや風速場の合成時に利用される重み関数において台風影響半径が用いられている問題が残されている。台風影響半径は千 km になることがあり、気圧分布が同心円状にならない範囲まで台風モデルの影響が波及してしまう。

また、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（以下、土木学会指針）では、設計高潮位を朔望平均満潮位と気象庁の経験的予測式に基づく台風潮位偏差により算定できるとしているが、その適用範囲は検潮所近傍に限定される。川崎ら⁵⁾は、海洋流動モデルにより潮位偏差の予測を行ったが、3 次元の運動方程式を解く必要があり、高い計算コストを要する。

そこで、本研究では、まず沿岸の観測値と数値モデルの予測値を用いて、台風パラメータと台風影響

半径を同定する手法を提案する。次に、メソスケールモデルと台風モデルの合成気圧場及び合成風速場を用いて、洋上の任意地点における極値水位を予測する。最後に、メソスケールモデル及び本研究で提案した合成風速場を与えた波浪予測を行い、各モデルにおける極値波高の予測精度を検証する。

2. 予測手法

2.1. 数値モデルと観測値

本研究では、気象場の予測にメソスケールモデル WRF ARW ver3.4.1、台風時の気象場の予測に台風モデル、波浪予測に第三世代波浪予測モデル WAVE WATCH III ver4.18（以下、WW3）、天文潮の予測に NAO.99Jb をそれぞれ用いた。

図 1 に、WW3 の解析領域と対応する格子解像度を示す。解析条件の詳細は、参考文献⁶⁾を参照されたい。ただし、WRF の大気境界層モデルには、強風時の再現性を高めるために、ACM2 を用いた。

WW3 で予測したスペクトル有義波高 H_s は、 $H_{1/3} = 0.956H_s$ の関係を用いて有義波高 $H_{1/3}$ に変換した。また、ピーク波高は、石原ら⁶⁾の手法に従い、ピーク発生時前後 9 時間を対象として、砕波しない深い水深の補正係数 1.19 を用いて補正した。

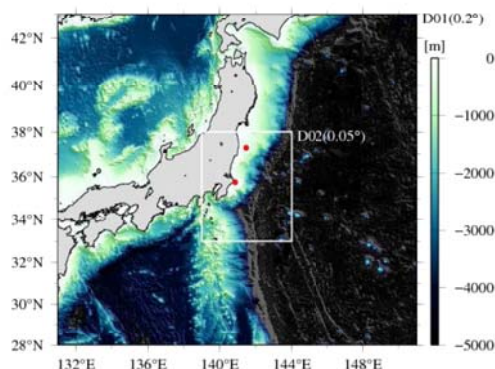


図 1 WW3 の解析領域・解像度（ドメイン 0 を除く）
（赤点はいわき沖波浪観測点及び銚子地方気象台）

波浪観測値はナウファス⁷⁾のいわき沖（水深 137m）を用い、毎偶正時前後 20 分の観測値を、山口ら⁸⁾の手法に従って、評価時間 3 時間の値に変換した。

* 令和 4 年 12 月 2 日第 44 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東京大学大学院 工学系研究科
〒113-8656 東京都文京区 7-3-1

本研究では、極値波高の予測にあたり、台風 9512 号を対象とした。図 2 に、台風 9512 号の概要を示す。台風 9512 号は、9 月 12 日の発生から 9 月 16 日にかけて 925hPa まで発達した後、9 月 17 日に約 945hPa で関東・東北沿岸域を通過した。

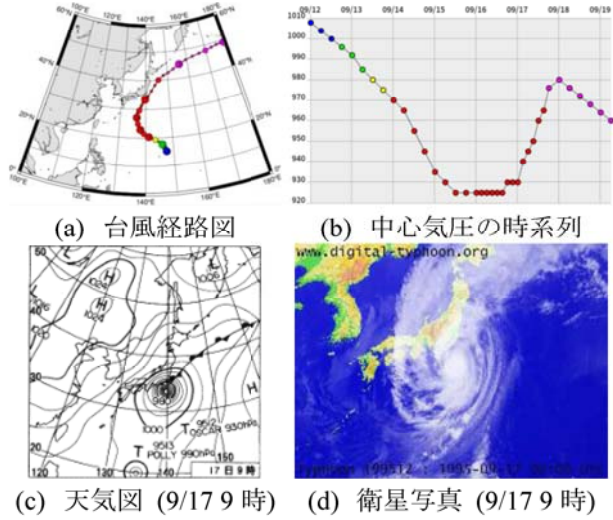


図 2 台風 9512 号の概要

2.2 台風に伴う気圧場・風速場の合成手法

本研究では、沿岸の観測値と数値モデルの予測値を用いて、台風パラメータと影響半径の同定手法を提案するとともに、メソスケールモデルと台風モデルの気圧場及び風速場の合成手法を提案する。

(1) 観測値を用いた台風パラメータの同定

種本・石原²⁾による台風モデルの気圧分布 $p(r)$ は、次式に示す Holland の式の形状係数 B を 1 とした Schloemer の式が用いられている。

$$\frac{p(r) - p_c}{p_\infty - p_c} = \exp\left(-\frac{R_m}{r}\right)^B \quad (1)$$

ここで、 p_c は台風中心気圧、 p_∞ は周辺気圧、 R_m は最大旋衡風速半径、 r は台風中心からの距離である。

2 つの未知数 R_m 、 p_∞ は、全球再解析データの地上気圧 R_B 、傾度風が 15m/s になる R_{15} の 2 つの条件式により同定される。ここで、 R_B は台風影響半径、 R_{15} は気象庁ベストトラックで示されている V_{15} （風速 15m/s）の領域半径であり、 R_B はコリオリパラメータ f を用いて、次式により求められる。

$$V_{15}R_{15} + \frac{1}{2}fR_{15}^2 = \frac{1}{2}fR_B^2 \quad (2)$$

この手法では、観測値のない沖合でも台風パラメータを同定できるが、形状係数 B が 1 であるため、気圧分布を正確に表現できない場合がある。

そこで、本研究では、沖合では従来手法を用い、台風が沿岸に接近した（台風中心から最近傍観測点

までの距離が 600km 以内）時点、沿岸部の気象台から得られている気圧の観測データを用いて台風パラメータを同定する手法を提案する。

観測気圧の値には、気象庁の沿岸観測所 25 地点における海面更正気圧を用いた。また、台風パラメータのうち、 p_∞ は従来手法で求めた値を用い、 R_m 、 B の 2 変数を最小二乗法により同定した。

(2) 影響半径 R_B の同定と合成気圧場の提案

台風モデルとメソスケールモデルの風速場 u_T 、 u_M は、重み関数 W を用いて、次式のように合成される。

$$u_c = Wu_T + (1 - W)u_M \quad (3)$$

$$W = \left(\frac{R_B^2 - r^2}{R_B^2 + r^2}\right)^n \quad (4)$$

ここで、 u_c は合成風速場、 R_B は影響半径、 r は台風中心からの距離、 n は重み係数である。種本・石原²⁾では、 $n = 0.5$ とし、影響半径には台風影響半径を用いている。しかし、極値波高の成因になり得る大型台風の台風影響半径は千 km になることがあるため、同心円状の気圧分布の仮定が成立しない範囲に、台風モデルの風速場が影響を及ぼすことがある。

そこで、本研究では、台風中心から台風モデルとメソスケールモデルの気圧が一致する（気圧差分 1hPa 未満）までの距離を影響半径と定義した。なお、台風中心から半径 600km 以内にメソスケールモデルの格子点が入らない場合は、全球再解析データの気圧を用い、影響半径の上限は台風影響半径とした。

また、本研究では、風速場と同様の手法により、式(5)で示すように気圧場の合成を行った。

$$p_c = Wp_T + (1 - W)p_M \quad (5)$$

ここで、 p_T と p_M は台風モデルとメソスケールモデルの気圧場である。なお、重み係数 n は、風速場の合成時に $n = 0.5$ 、気圧場の合成時に $n = 0.25$ を用いた。

2.3 極値水位の予測方法

土木学会指針では、天文潮を HWL とし、気象潮（台風潮位偏差）を次式で算定できるとしている。

$$\zeta = a(p_0 - p) + bW^2 \cos \theta + c \quad (6)$$

ここで、 ζ は潮位偏差、 p_0 は基準気圧、 p は最低気圧、 W は 10 分間平均風速の最大値、 θ は主風向と最大風速のなす角、 a, b, c は地点毎の定数である。定数 a の値域は 0.48~4.303、 b は-0.167~0.181 であり、地点特性により大きく値が変動している。

そこで、本研究では、天文潮を NAO.99Jb モデル

により予測し、気象潮を理論式とメソスケールモデルと台風モデルで求めた気圧・風速により予測した。ただし、NAO.99Jb モデルの長期変動成分及び合成風速場のピーク風速は観測値を用いて補正した。

吸上げ効果による潮位偏差 ζ_s の理論式⁹⁾は、海面水位と気圧の静的釣り合いから、次式で表される。

$$\zeta_s = \frac{(p_0 - p)}{\rho_w g} \approx 0.99 \cdot (p_0 - p) \quad (7)$$

吹寄せ効果による潮位偏差 ζ_w の理論式⁹⁾は、式(8)の海面接線応力と海底摩擦応力の釣り合い式を、式(9)の一樣海底勾配 α を用いた水深 h のもと、風上端から風下端まで積分して、式(10)のように表される。

$$d\zeta_w = kW^2 dx/h(x) \quad (8)$$

$$h(x) = h_0 - x \tan \alpha \quad (9)$$

$$\zeta_w = k'W^2 \cot \alpha \ln(h_1/h_2) \quad (10)$$

ここで、 k' は係数、 h_1, h_2 は風上端及び下端の水深である。本研究では、 $\alpha = 1/200, h_1 = 200\text{m}, h_2 = 6\text{m}$ とし、係数 k' は銚子漁港における潮位偏差の観測値を用いて同定し、 $k' = 8.1 \times 10^{-5}$ とした。

3. 結果

台風 9512 号を対象に、観測値及び数値モデルの予測値により台風パラメータ及び影響半径を同定し、メソスケールモデルと台風モデルの合成場を用いて極値水位及び極値波高の予測を行った。

3.1 気圧場及び風速場の予測結果

図 3 に、観測気圧及びメソスケールモデルと台風モデルによる気圧と台風中心からの距離の関係を示す。メソスケールモデルの気圧分布は中心気圧を過大評価したが、中心から約 300km 以上離れたと観測値と概ね一致した。Holland の式に基づく気圧分布は観測値をよく再現できており、台風パラメータが適切に同定されている。また、既往研究の影響半径 R_B が 1,167km であるのに対し、本手法では 315km となり、図 2(c)の天気図に示す同心円状の気圧分布となる範囲と概ね一致した。

図 4 に銚子气象台における気圧の時系列比較を示し、図 5 及び図 6 に、各モデルによる気圧場及び風速場をそれぞれ示す。メソスケールモデルは、楕円形の気圧場を再現できているが、台風中心付近の気圧場は再現されておらず、銚子气象台位置では台風通過時の気圧を約 5hPa 過大評価した。一方、提案モデルでは、天気図で示された台風中心付近の急激な

気圧低下が再現されており、台風通過時の最低気圧の予測誤差は約 0.5hPa と、観測値とよく一致した。

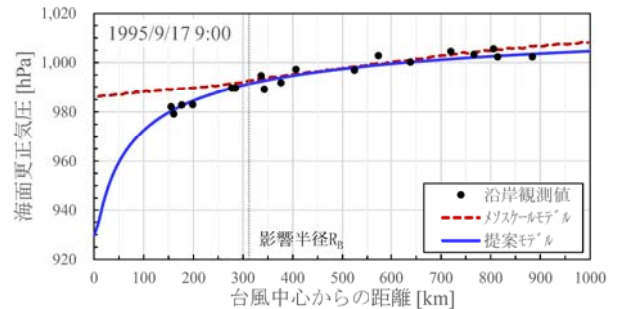


図 3 気圧と台風中心からの距離の関係

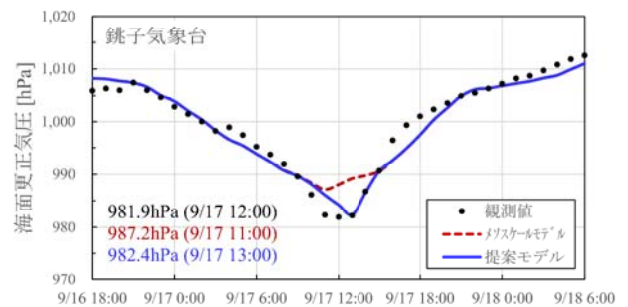


図 4 銚子气象台における気圧の時系列比較

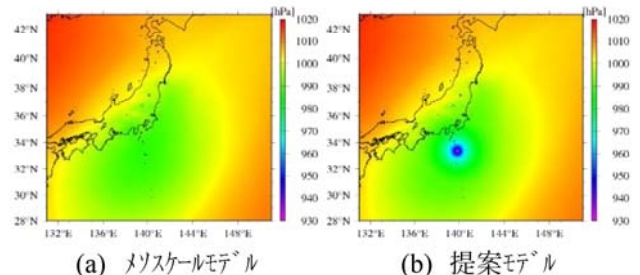


図 5 各モデルによる気圧場 (1995/9/17 9:00)

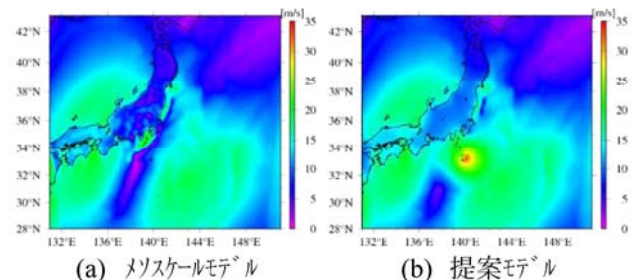


図 6 各モデルによる風速場 (1995/9/17 9:00)

3.2 極値水位の予測結果

図 7 に、銚子漁港における天文潮の予測結果を示す。NAO.Jb99 モデルによる天文潮の予測値は観測値とよく一致しており、沖合や検潮所が近傍にない地点における天文潮の予測に十分な精度を有している。

図 8 に、銚子沖における離岸距離と極値水位の関係を示す。土木学会指針に基づく方法では、観測値

をやや過小評価しており、離岸距離に関わらず潮位偏差が一定値となる。提案モデルでは、吹寄せ効果を生水深の関数としているため、離岸距離が大きくなるにつれ、吹寄せ効果の寄与が小さくなり、沖合における気象潮を合理的に算定できることが分かる。

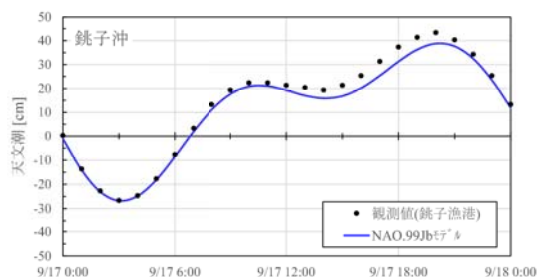


図 7 銚子漁港における天文潮の時系列比較

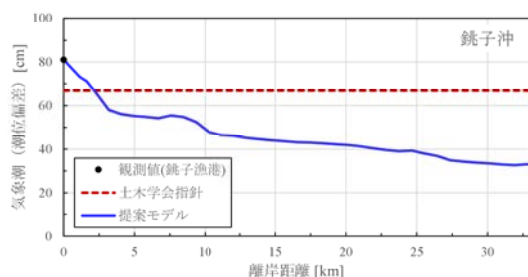


図 8 離岸距離と気象潮の関係

3.3 極値波高の予測結果

メソスケールモデル、提案モデルの風速場をそれぞれ与えた波浪予測を行い、台風 9512 号に伴う極値波高の予測精度を検証した。

図 9 にいわき沖における有義波高の時系列比較を示し、図 10 に各モデルによる波浪場を示す。メソスケールモデルでは、台風中心付近の暴風域が十分再現されていないため、ピーク波高を 14.4%過小評価しており、ピーク波高の発生時間が 4 時間ずれている。一方、提案モデルでは、メソスケールモデルの結果と比較して、台風接近時のうねりや暴風域の再現性が向上しており、ピーク波高の発生時間が改善するとともに、ピーク波高の予測誤差は-0.2%まで低減した。

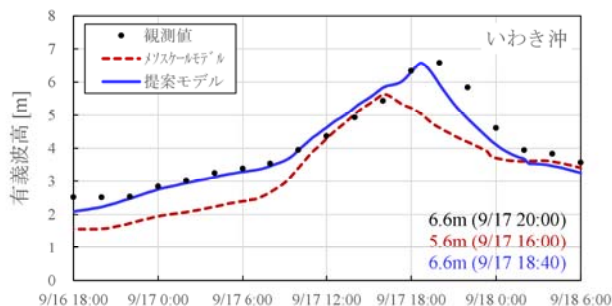


図 9 いわき沖における有義波高の時系列比較

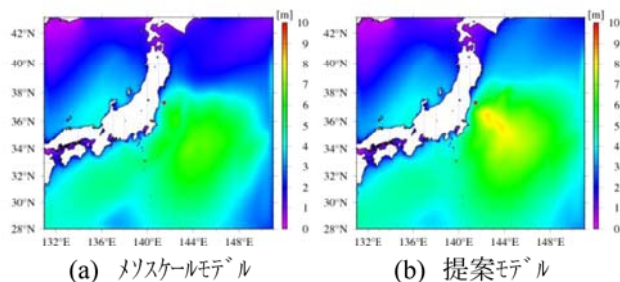


図 10 各モデルによる波浪場 (1995/9/17 18:00)

4. まとめ

本研究では、関東沿岸域において、メソスケールモデルと台風モデルを用いた極値水位と極値波高の予測を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 台風パラメータ及び影響半径の同定手法を提案し、台風通過時の最低気圧の予測誤差が、メソスケールモデルの+5.3hPa から、提案モデルで+0.5hPa まで低減した。
- 2) 合成気圧場及び合成風速場を用いた洋上における極値水位の予測手法を提案し、沖合の極値水位を合理的に算定できることを示した。
- 3) 提案した風速場に基づく波浪予測により、極値波高の予測誤差が、メソスケールモデルの-14.4%から、提案モデルで-0.2%まで低減した。

参考文献

- 1) IEC 61400-3-1: Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, 2019.
- 2) Jun Tanemoto and Takeshi Ishihara: Prediction of tropical cyclone induced wind field by using mesoscale model and JMA best track, The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2013.
- 3) 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, 風力エネルギー学会論文集, Vol. 38, No.4, 2014.
- 4) 北村 康司・孟 岩・増田 悦久・津嘉山 正光・仲座 栄三, ウィンドプロファイラを用いた台風の観測, 第 15 回風工学シンポジウム, 1998.
- 5) 川崎 浩司・二村 昌樹・村上 智一・下川 信也・尼子 順子, 非構造格子海洋流動モデル FVCOM による伊勢湾湾奥部の高潮浸水計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No.2, 1 223-228, 2019.
- 6) 石原 孟・大森 政則・荒川 洋・山口 敦, 銚子沖における波浪の数値予測に関する研究, 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2017.
- 7) 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報観測網, ナウファス.
- 8) 山口 敦・石原 孟, 洋上風力発電設備設計のための有義波高の評価時間に関する研究, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2012.
- 9) 合田良實・佐藤昭二, 新訂版 海岸・港湾, 1998.