

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

A Numerical Study of Wind Wave and Swell by Using Wave Prediction Models and Combined Wind Fields

種本 純^{*1} 石原 孟^{*2}
Jun TANEMOTO Takeshi ISHIHARA

^{*1} Graduate Student, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo Tokyo, 113-8656, Japan, Fax:+81-3-5841-1147, E-mail: tanemoto@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

Abstract

Wind wave and swell prediction are carried out by using third generation wave models and wind fields. Although predicted wave heights by SWAN show good agreement with observations, predicted wave periods are underestimated significantly due to underestimations of wave spectra in the low frequency range. WW3 predicts wave heights, periods and spectra correctly. The relation between wave heights, wave periods and wind speeds obtained by WW3 also show good agreement with observations. The mechanism of decreasing wave periods with increase of wind wave is well explained by the wave spectra and the combined wind wave and swell model. Several wind fields used as sea surface boundary conditions for wave simulations are also validated. It is found that predicted extreme wave height and period by using the wind field obtained from the mesoscale model underestimate tropical cyclone induced extreme wave height and period and these underestimations are improved by using the wind fields obtained from the typhoon model and the combined wind field.

キーワード：波浪推算モデル，合成風速場，風波，うねり

Key Words : Wave prediction model, Combined wind fields, Wind wave, Swell

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計外力を評価するために波高、波周期等の波浪条件及び風速との相関を求める必要がある。日本における波浪の特徴は、開放海域である太平洋側で大きなうねりを伴うことであり、例えば杉本と近澤¹⁾により、日本海側では波高と波周期の相関が高い風波、太平洋側では相関が低いうねりにより示される波浪特性が観測値の分析から明らかにされている。

風波とうねりを予測する手法の一つとして、第三世代の波浪モデルを用いた波浪推算が挙げられる。間瀬ら²⁾は閉鎖海域である広島湾と大阪湾において、浅海域モデル SWAN (Simulating WAve Nearshore) を用いた波浪推算により観測値の波高と波周期を精度良く再現できることを示した。一方、石原ら³⁾や桜庭ら⁴⁾は太平洋沿岸で SWAN による波浪推算を行い、有義波周期を正確に予測できないことを明らかにした。駒口ら⁵⁾は WW3 (WAVE WATCH III) を用いた波浪推算により有義波周期の予測精度が改善されることを示したが、

詳細な分析は行われていない。最近では、銚子沖洋上風力発電所において詳細な波浪の観測が行われており、風波の発達時に有義波周期が大きく減少し、その時刻において二山型の波浪スペクトルが観測されることが福本ら⁶⁾により明らかにされた。このような複雑な現象を第三世代の波浪モデルによる波浪推算でどこまで再現できるかについては検証する必要がある。

波浪条件を予測するもう一つの手法として、風速の観測値から有義波高・有義波周期を推算する有義波法があり、GL (Germanischer Lloyd) 風車設計ガイドライン⁷⁾で採用されている。この手法では、風波モデルが用いられており、風速が0になれば波高と波周期がともに0になる。しかし、太平洋側などのうねりがある海域では、低風速時にも一定以上の波高、波周期が観測されているため、有義波法による波浪推算では疲労荷重を過小評価する恐れがある。この問題を解決するために、石原ら⁸⁾は風波モデルである SMB (Sverdrup and Munk⁹⁾, Bretschneider¹⁰⁾¹¹⁾) 法とうねり性波浪の予測式を合成したモデル (以降、混合モデル) を提案した。風波モデルでは風速が増加すれば、有義波高、有義波周期はともに増加するが、うねりを導入した混合モデルを用いることで、有義波周期がある風速域で減少し、

*1 東京大学大学院工学系研究科大学院生
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: tanemoto@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

*2 東京大学大学院工学系研究科教授
(原稿受付： 2014年 8月 15日)

風速がさらに大きくなると有義波周期が再び増加するという観測値の傾向を再現できることを示したが、そのメカニズムについては明らかにされていない。

波浪による終局荷重を評価する場合にも、極値波高とそれに伴う波周期を精度良く予測する必要がある。日本では多くの場合、熱帯低気圧に伴う高波高が極値波高を決定する要因となる。波浪推算モデルには気象シミュレーションの風速を海面境界条件として用いることが多いが、この手法は間瀬ら¹²⁾の研究により熱帯低気圧の高波高を過小評価することが示されている。

一方、Ou et al.¹³⁾は台湾で台風モデルの予測風速場を用いた波浪推算を行い、観測値と良く一致することを示した。この手法では熱帯低気圧の外側で風速を過小評価することが種本と石原¹⁴⁾により示されている。種本と石原¹⁴⁾はメソスケールモデルと台風モデルの合成風速場を提案し、風速場の予測精度の改善を示したが、合成風速場を用いた波浪推算により、極値波高と波周期の予測精度の検証を実施していない。

そこで、本研究では風波とうねりの両方を予測するための波浪推算手法について提案する。2章では、事例解析を通じて、第三世代の波浪推算モデルであるSWANとWW3の予測精度を評価するとともに、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場モデルが波浪推算の結果に与える影響を明らかにする。3章では、通年の波浪推算の結果から有義波高・有義波周期と風速の関係を評価するとともに、混合モデルから風波の発達時に有義波周期が減少するメカニズムについて明らかにする。4章では波浪シミュレーションにより熱帯低気圧時の極値波高と極値波周期の予測を行うとともに、各風速場モデルが極値波高と極値波周期の予測に与える影響を評価する。

2. 波浪推算モデルによる波高と波周期の予測

本章では事例解析を通じて、SWANとWW3の2種類の波浪モデルの評価と、波浪推算モデルの境界条件に用いる風速場の評価を行う。2.1節ではモデルの概要と本研究での計算条件を説明する。2.2節では温帯低気圧時における波高と周期の時系列の予測を行い、観測値と検証することで、SWANとWW3の波浪モデルを評価する。2.3節では、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場を波浪推算モデルの海面境界条件に用いて予測された熱帯低気圧時の波浪時系列を比較検証し、風速場を評価する。

2.1 波浪推算モデルの概要

本研究では第三世代の波浪モデルとして、オランダ

のデルフト工科大学により開発されたSWAN Cycle III Ver.40.91¹⁵⁾及びNOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration / National Center for Environmental Prediction) により開発されたWW3 Ver.3.14¹⁶⁾を用いた。

SWAN及びWW3の基礎方程式は式(1)で表される。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

ここで、 $N(\sigma, \theta)$ は作用密度であり、角周波数 σ を乗じることによってエネルギースペクトル $E(\sigma, \theta)$ が得られる(θ は方向を表す)。 c_x 及び c_y は地理空間(x, y)、 c_σ 及び c_θ はスペクトル空間(σ, θ)における波の進行速度であり、(1)式により N の時間変化(t)、空間変化($x, y; \sigma, \theta$)、を解いている。 $S(\sigma, \theta)$ は(2)式で表されるソース項であり、(1)式の左辺で線形波の伝播を解き、 S により波の非線形的な変化を与えている。

$$S = S_{lin} + S_{in} + S_{nl} + S_{tr} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} \quad (2)$$

S_{lin} , S_{in} はそれぞれ線形的、非線形的な風から波へのエネルギー伝達を表す。 S_{nl} , S_{tr} はそれぞれ4波共鳴、3波共鳴(浅海域)と呼ばれる、波の非線形相互作用をモデル化した項である。 S_{ds} , S_{bot} , S_{db} は、それぞれ白波、海底摩擦、砕波による散逸項である。

SWANとWW3のデフォルト設定に用いられている各ソース項のモデルをTable 1に示す。浅海域モデルとして開発されたSWANには S_{tr} の項が考慮されているが、全球モデルとして開発されたWW3には S_{tr} は考慮されていない。それ以外の項は、チューニング係数等の若干の違いはあるものの、 S_{in} と S_{ds} を除いて共通のモデルが用いられている。詳細は各モデルのマニュアルを参照されたい。本研究での波浪モデルの計算条件をTable 2に示す。太平洋を伝わるうねりを予測するために、本研究では領域1の大きさを変更した数値実験を行い、有義波周期の予測値が計算領域に依存しなくなる最小の領域を領域1として決定した。温帯低気圧時又は常時の波浪について議論する2.2節及び3章で

Table 1 Source terms used in wave models.

	SWAN	WW3
S_{lin}	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981)	
S_{in}	Komen et al. (1984)	Tolman and Chalikov (1996)
S_{nl}	Hasselmann et al. (1985)	
S_{tr}	Eldeberky and Battjes (1996)	None
S_{ds}	Komen et al. (1984)	Tolman and Chalikov (1996)
S_{bot}	Hasselmann et al. (1973)	
S_{db}	Bettjes and Janssen (1987)	

Table 2 Configurations of wave models

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Spin-up	More than 10 days			
Horizontal resolution	0.5°×0.5° (161×121 grids)	0.2°×0.2° (81×81 grids)	0.05°×0.05° (81×81 grids)	0.02°×0.02° (81×81 grids)
Domains	Choshi offshore site			
	110°-190°E, 0.0°-60.0°N	133.0°-149.0°E, 28.0°-44.0°N	138.5°-142.5°E, 33.5°-37.5°N	139.7°-141.3°E, 34.7°-36.3°N
Domains	Nakagusuku bay			
	110°-190°E, 0.0°-60.0°N	120.0°-136.0°E, 18.0°-34.0°N	125.8°-129.8°E, 24.0°-28.0°N	127.0°-128.6°E, 25.2°-26.8°N
Bathymetry	ETOPO2			ETOPO1
Sea surface boundary	Mesoscale model(see below), typhoon model or combined wind field			
	NCEP-FNL (1.0°) or NNRP (2.5°)	WRF (18km)	WRF (6km)	WRF (2km)
Lateral boundary	Open	Nest down (2-way nesting)		
Spectrum resolution	36 directions and 36 frequencies (0.0345-0.97Hz)			

は銚子沖洋上風力発電所を、熱帯低気圧時の波浪について議論する 2.3 節及び 4 章では日本で最も強い熱帯低気圧が襲来する全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS, Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS) 中城湾を検証地点とし、4 段階の 2-way nesting により波浪推算を行った。領域 1 の海面境界条件には全球客観解析値である NCEP-FNL (final operational global analysis data) を、領域 2-4 ではメソスケールモデル WRF (Weather Research and Forecasting Model) ¹⁷⁾ の予測風速を用いた。但し、NCEP-FNL が利用できるのは 2000 年 7 月以降であるため、それ以前の期間も計算対象とする中城湾では、NNRP (NCEP / NCAR (National Center for Atmospheric Research) Reanalysis Project) を用いた。WRF の境界条件には、計算期間に応じて NCEP-FNL または NNRP を用いた。計算領域は波浪推算の領域 2-3-4 を満たす広さに設定し、水平解像度はそれぞれ 18km-6km-2km とした。また、熱帯低気圧襲来時には種本と石原 ¹⁴⁾ による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。合成風速場の風速は式(3)で表される。

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

ここで、 u_M は気象モデルの予測風速 (一番大きい領域は全球客観解析値、領域 2 以降は WRF の結果)、 u_T は石原ら ¹⁸⁾ が提案した台風モデルの風速である。また、 W は重み関数であり、台風の中心に近い場所ほど台風モデルの風速場が重みを持つ。詳細は種本と石原 ¹⁴⁾ の論文を参照されたい。

波浪モデルはスペクトル法により、波高、周期を計算している。一方、観測値はゼロアップクロス法で有義波高、有義波周期を計算する。本研究では、有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ は、式(4)及び式(5)で表され

るスペクトルと代表波の統計的な関係 ¹⁹⁾ を用いて求めた。

$$H_{1/3} \approx 0.956H_{m0} = 0.956 \times 4\sqrt{m_0} \quad (4)$$

$$T_{1/3} \approx T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (5)$$

ここで、 m_n は n 次モーメントであり、波浪モデルのエネルギースペクトル $E(f, \theta)$ と周波数 f の積を積分した式(6)で表される。

$$m_n = \iint f^n E(f, \theta) df d\theta \quad (6)$$

2.2 温帯低気圧時の波浪時系列の予測

本研究では、銚子沖洋上風力発電所 ⁹⁾ において観測された風波とうねりの特性を示す事例について SWAN 及び WW3 でシミュレーションを行い、観測値と比較することにより、二つの予測モデルの精度評価を行う。本事例では、2010 年 1 月 20 日から 22 日にかけて、寒冷前線が関東を通過し、1 月 21 日の午前 4 時 20 分に銚子气象台で 10 分平均の最大風速 13.4m/s を記録した。

Fig. 1 には有義波高と有義波周期の予測値と観測値の時系列の比較を示す。本研究で検証に用いる観測値は、評価時間 20 分間の有義波高、有義波周期であるが、波浪モデルでは評価時間 1 時間から 3 時間の風速場を用いており、有義波高、有義波周期の予測値も 1 時間から 3 時間程度の評価時間であると考えられる。ここでは、これらの評価時間の違いを考慮して、予測値と観測値をそれぞれ 3 時間移動平均により平滑化して時系列の比較を行う。Fig. 1 の図中に破線で示す時刻 A (1 月 19 日午前 4 時 40 分) においては有義波高は小さいが、有義波周期が大きい。これは、大きなうねりを伴う波浪に対応している。時刻 B (1 月 20 日午前 4

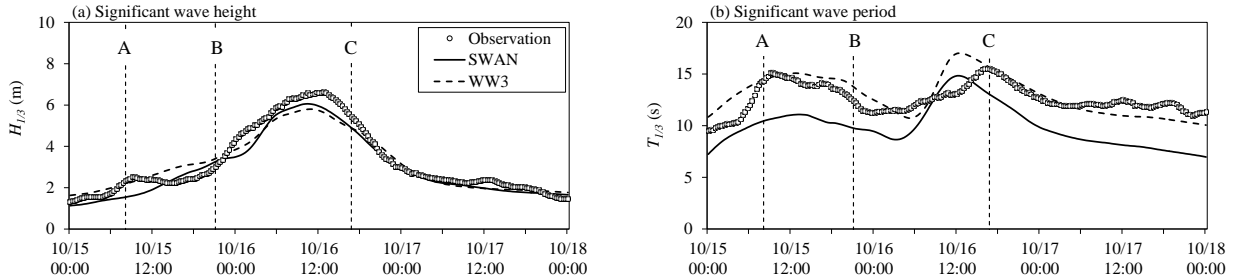


Fig. 1 Comparison of observed and simulated wave heights and periods.

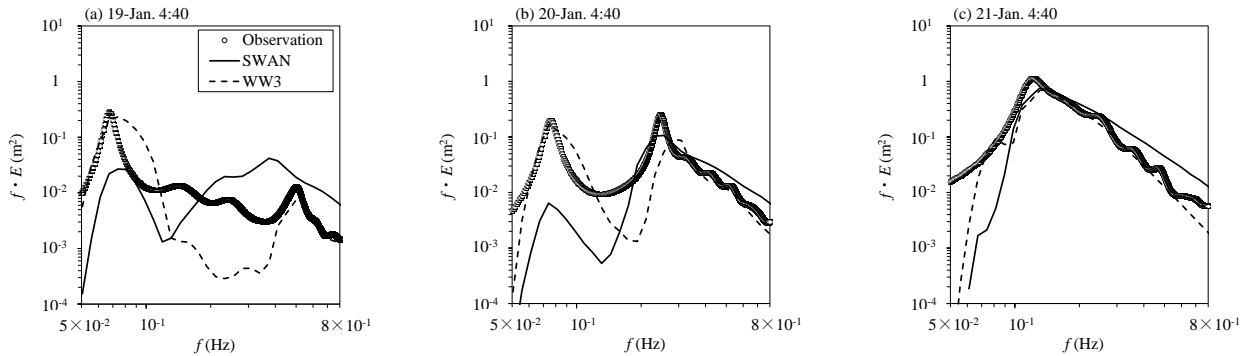


Fig. 2 Comparison of observed and simulated wave spectra.

時 40 分) では、有義波高はやや大きくなる一方、有義波周期は大きく減少している。時刻 C (1 月 21 日午前 4 時 40 分) においては、本事例の最大波高を観測している。有義波高については、SWAN, WW3 の予測値はともに観測値の有義波高を概ね再現できている。一方、有義波周期については、SWAN の予測値は 1 月 19 日から 20 日にかけての有義波周期を大きく過小評価しているが、WW3 では観測値の時系列変化を概ね再現できている。

SWAN が有義波周期を大きく過小評価している理由を探るために、Fig. 1 の図中に破線で示す時刻 A、時刻 B 及び時刻 C に対応するシミュレーションと観測値のパワースペクトルを求め、Fig. 2 に示す。時刻 A においては、波浪スペクトルは 0.1Hz より低周波側にピークを持ち、うねり性の波浪の特性を示す。時刻 B においては風波とうねりが共存する二山型の波浪スペクトルとなり、この時刻において有義波周期が大きく減少している。本事例による有義波高の最大値を観測した時刻 C では二つのピークが合体し、幅広いスペクトルとなっている。Fig. 2 から、SWAN, WW3 の両方のモデルで有義波高、有義波周期ともに観測値を良く再現できている時刻 C では、観測値のパワースペクトルを良く再現できている。一方、有義波周期を大きく過小評価した SWAN では、時刻 A, B ともに、低周波側において観測値のパワースペクトルを大きく過小評価しており、ピーク周波数が観測値より高周波側に位置することがわかる。一方で、有義波周期がよく再現できている WW3 では低周波側にあるパワースペクトル

のピーク値を良く再現できている。

以上の結果から、SWAN による予測は波高を再現できるが波周期を過小評価する。一方、WW3 による予測は波高と波周期をともに再現できることがわかる。SWAN が波周期を過小評価する理由としては、低周波側の波浪スペクトルを過小評価することが挙げられる。

2.3 熱帯低気圧時の波浪時系列の予測

次に、NOWPHAS 中城湾において熱帯低気圧に起因する高波高が観測された事例について、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場の 3 種類の風速場を海面境界条件に用いた WW3 による波浪推算を実施し、波高と波周期の時系列データの予測と観測を比較することにより、各種風速場モデルが波浪予測の結果に与える影響を明らかにする。本節では 2004 年 10 月 13 日にマリアナ諸島付近で発生した台風 23 号 (T0423) を対象とする。本事例では同 19 日に沖縄本島に最接近し、那覇市で最大瞬間風速 48.0m/s を記録した²⁰⁾。本研究の検証地点においては、同日 12 時に、毎偶正時に記録された評価時間 20 分の有義波高の最大値 11.93m を記録した。

シミュレーションと観測値の時系列を Fig. 3 に示す。メソスケールモデルの風速場を用いた波浪推算による有義波高の予測値は、観測値の最大値を大きく過小評価している。一方、台風モデルと合成風速場を用いることで、この過小評価は改善される。また、台風モデルの風速場を用いた波浪推算による有義波高の予測値は、熱帯低気圧が襲来する前の時刻において有義波高

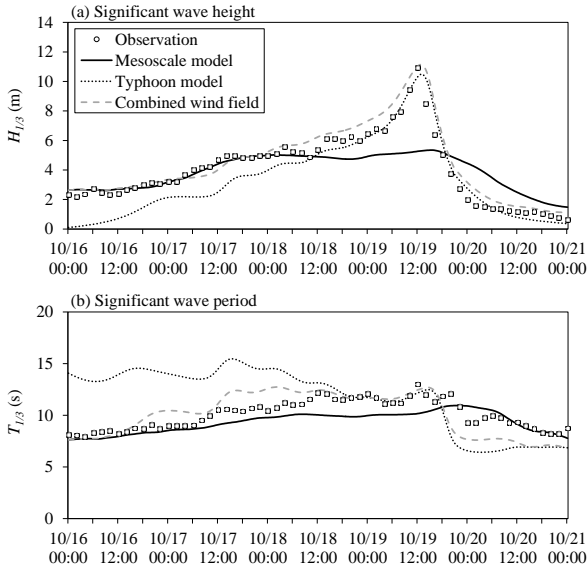


Fig. 3 Comparison of observed and simulated wave heights and periods.

を過小評価している。合成風速場を用いることにより、この過小評価は改善され、全ての時刻において観測値を精度良く再現できている。

有義波周期についても、メソスケールモデルの風速場を用いた波浪推算結果は、観測値を過小評価する。一方、台風モデルの風速場を用いた波浪推算では、熱帯低気圧が襲来する前の時刻において有義波高を過小評価したが、有義波周期の予測値は観測値を大きく過大評価する。その理由は、熱帯低気圧の外側における風速を過小評価するため、風波に起因する高周波側の成分を過小評価するためである。結果として、熱帯低気圧の外側ではうねり成分のみが評価されて、観測値の有義波周期を大きく過大評価することになった。合成風速場を用いることにより、風波に起因する高周波側の成分が正しく評価され、有義波周期の過大評価は改善された。

以上より、合成風速場を波浪推算モデルの境界条件に用いることにより、熱帯低気圧に伴う風波、うねりの両方を精度良く再現できることがわかる。

3. 有義波高・有義波周期と風速の関係

本章では有義波高・有義波周期と風速の関係を評価するとともに、風波の発達する際に有義波周期が減少するメカニズムについて説明する。3.1節では風波とうねりの混合モデルについて概説し、3.2節では、2013年2月から2013年11月までのWW3と、混合モデルによる波浪推算から有義波高・有義波周期と風速の関係をそれぞれ予測し、観測値及びこれまでの風波モデルと比較して予測精度を評価する。3.3節では、混合モデルとスペクトルの関係から、風波の発達時に有義波

周期が減少するメカニズムについて説明する。

3.1 風波とうねりの混合モデルの概要

石原ら⁸⁾は、波浪には風波成分とうねり成分が存在すると考え、2つの成分の混合による有義波高 $H_{1/3,C}$ 、有義波周期 $T_{1/3,C}$ を式(7)、式(8)により表した。

$$H_{1/3,C} = \sqrt{H_{1/3,W}^2 + H_{1/3,S}^2} \quad (7)$$

$$T_{1/3,C} = \frac{T_{1/3,W} H_{1/3,W}^2 + T_{1/3,S} H_{1/3,S}^2}{H_{1/3,W}^2 + H_{1/3,S}^2} \quad (8)$$

ここで、 $H_{1/3,S}$ 、 $T_{1/3,S}$ はそれぞれうねりによる有義波高、有義波周期であり、定数で表される。本研究では $H_{1/3,S} = 0.9\text{m}$ 、 $T_{1/3,S} = 7.5\text{s}$ として風速が 0m/s の時の値を用いた。 $H_{1/3,W}$ 、 $T_{1/3,W}$ は風波による有義波高、有義波周期であり、SMB法⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾により式(9)、式(10)でそれぞれ表される。

$$H_{1/3,W} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (9)$$

$$T_{1/3,W} = \frac{2.74\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad (10)$$

ここで、 g は重力加速度である。また、 F は吹送距離であり、本研究では石原ら⁸⁾と同様に $235,000\text{m}$ とした。

風波とうねりの混合モデルを検証するために、本研究では、予測及び観測された有義波高、有義波周期及び風速を用いて、 1m/s の風速ビンにおける平均有義波高 $H_{1/3}$ 及び調和平均有義波周期 $T_{1/3}$ を式(11)と式(12)により表す。

$$H_{1/3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{1/3,i} \quad (11)$$

$$T_{1/3} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{1/3,i}} \right)^{-1} \quad (12)$$

ここで、 n は各風速ビンにおける総データ数であり、 $H_{1/3,i}$ 、 $T_{1/3,i}$ はそれぞれ各風速ビンにおける有義波高、有義波周期の予測値または観測値である。観測値の風速は 40m と 80m 高度に設置された三杯風速計で観測された値から時々刻々のべき指数を同定し、べき法則により 10m 高度の風速に変換した。

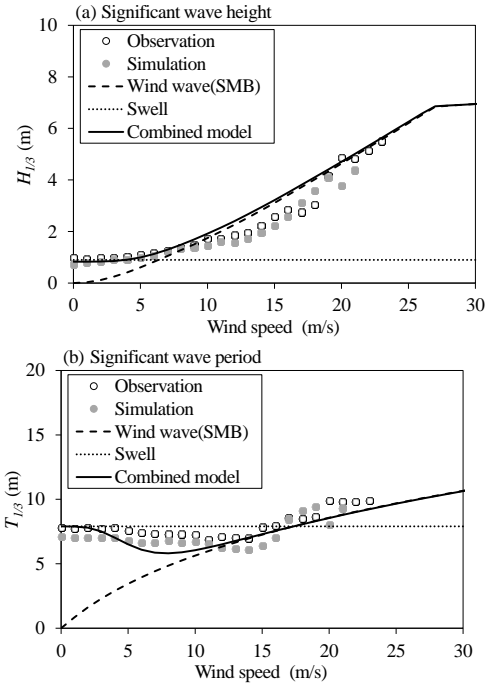


Fig. 4 Predicted and observed significant wave heights and periods of each wind speed bin.

3.2 波浪推算の結果と観測結果との比較

Fig. 4 には、WW3 による波浪推算の結果及び観測結果を用いて、混合モデルにより求めた有義波高及び有義波周期と比較を示す。本研究で検証を行った銚子沖洋上風力発電設備では、波高は浅水変形及び砕波変形の影響を受けるため、土木学会指針²¹⁾を参考に、(7)式に対して浅水変形と砕波による波高減衰による補正を行ない、Fig. 4 に示した。観測値では、10~15m/s の風速域では風速が大きくなるにつれて有義波周期が減少し、さらに風速が大きくなると有義波周期が再び大きくなる現象が見られる。2 章で有義波周期が減少する現象を再現できた WW3 では、有義波高、有義波周期と風速の関係も良く再現している。しかし、破線で示す風波モデルでは、低風速時の有義波高と有義波周期を大きく過小評価しており、また、観測値に見られる有義波周期の減少を再現できていないことがわかる。一方、混合モデルでは、波浪のうねり成分を与えることにより、低風速時の有義波高、有義波周期を再現するとともに、有義波周期の減少を概ね再現できた。

3.3 有義波周期の減少メカニズム

有義波周期が減少するメカニズムを説明するために、風波とうねりの混合モデルの予測式(10)を式(4)及び式(5)で書き換えると、次式になる。

$$T_{1/3,C} = \frac{m_{-1,W} + m_{-1,S}}{m_{0,W} + m_{0,S}} \quad (13)$$

式(6)に対して、ある周波数以下の成分をうねり成分、それ以上の成分を風波成分と仮定して積分すると、それぞれ成分に対する-1次と0次のモーメントが求まる。風波成分はうねり成分より高周波側であるため、風波の成長により風波成分のパワースペクトルの面積が大きくなり、うねり成分のパワースペクトルの面積と等しくなる時に、有義波周期は式(14)になる。

$$T_{1/3,C} = \frac{m_{-1,W} + m_{-1,S}}{2m_{0,S}} < \frac{m_{-1,S}}{m_{0,S}} = T_{1/3,S} \quad (14)$$

風波成分はうねり成分より高周波側であるため、風波が成長すると、うねり成分のみある初期状態に比べ有義波周期が低くなる。Fig. 2 で示した二山型スペクトルでは、特に高周波部分にエネルギーを持つため、 $m_{-1,W}$ が $m_{-1,S}$ より顕著に小さくなり、Fig. 1 に示す有義波周期の減少を説明できる。

4. 波浪推算モデルを用いた極値波高と波周期の予測

2.3 節では、熱帯低気圧の一事例について、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場の3種類の風速場を用いた波浪推算を行い、それぞれの風速場の予測精度を評価した。本章では、これらの3種類の風速場を用いた波浪推算により極値波高と波周期の予測精度を評価する。4.1 節では対象地点及び極値波浪の評価手法を概説する。4.2 節では予測結果を示し、風速場モデルが極値波高と極値波周期の予測精度に与える影響を明らかにする。

4.1 対象地点及び極値波浪の評価手法の概要

波浪推算において海面境界条件に用いる風速場は重要である。メソスケールモデルの風速では熱帯低気圧の中心付近で風速を過小評価する。一方で、台風モデルの風速場では、熱帯低気圧の中心付近の風速を精度良く予測できるが、熱帯低気圧の遠方では風速を過小評価する。実現象では、風からのエネルギー供給により波が発生し、エネルギーの累積により波浪が発生するため、台風モデルの風速場を用いた波浪推算では、波周期を精度良く再現することができないことは2.3 節に示す通りである。種本と石原¹⁴⁾はメソスケールモデルと台風モデルの合成風速場を提案し、それぞれのモデルの風速場の過小評価を改善した。本章では日本で最も強い熱帯低気圧が襲来する沖縄県中城湾において、上記の3種類の風速場を波浪モデルの境界条件に用いて、極値波高と周期の予測を行う。

本研究では1992年から2011年までの20年間で、

NOWPHAS 中城湾を中心とした半径 1000km 以内を通過し、強風半径を持つ熱帯低気圧全てをシミュレーションした。NOWPHAS の観測値からは、評価時間 20 分の毎偶正時の有義波高、有義波周期のデータが得られるが、本研究では NOWPHAS の観測値を山口ら²²⁾の手法により、20 分毎に出力したシミュレーション結果を移動平均により、それぞれ評価時間 3 時間の有義波高及び有義波周期に変換して比較した。有義波高の極値分布は、観測値の年最大有義波高からガンベル分布により求めた。また、有義波周期の極値は、観測値の年最大有義波高とそれに対応する有義波周期との関係から求めた。本研究ではこの関係を指数関数で近似できると仮定し（例えば、合田¹⁹⁾）、観測値から年最大有義波高と対応有義波周期を式(15)に表した。係数 a 及び b は最小二乗法により同定した。

$$T_{1/3} = aH_{1/3}^b \quad (15)$$

4.2 極値波高と波周期の予測結果

Fig. 5 には、波浪推算と観測値の年最大有義波高から求めた極値分布を示し、メソスケールモデルの風速場を用いた波浪推算では、年最大有義波高が大きく過小評価されていることがわかる。Fig. 6 には、式(15)にある係数 a 及び b を観測データから同定した曲線と年最大有義波高の予測値とそれに対応する有義波周期の関係を示す。Fig. 6 から、台風モデルから求めた風速場を境界条件に用いた波浪推算では年最大有義波高の予測値が小さい時に対応する有義波周期の予測値が観測値より大きくなることわかる。これは、2.3 節で述べた通り、熱帯低気圧の中心から離れた場所での風速の過小評価により、高周波側の成分を過小評価し、この結果年最大有義波高に対応する有義波周期が過大評価される。

Table 3 には有義波高の評価期間中における極値の最大値（約 20 年再現期待値に対応）と、それに対応する有義波周期の極値の最大値を示す。極値波高につい

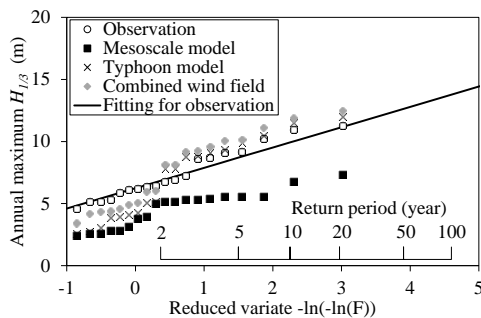


Fig. 5 Comparison of observed and simulated extreme wave height.

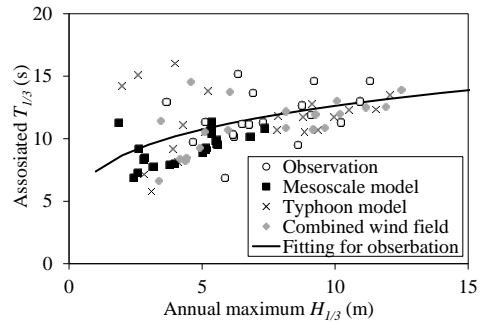


Fig. 6 The relation between annual maximum wave heights and associated wave periods obtained from observations and simulations.

Table 3 Observed and simulated extreme wave heights and associated wave periods.

	Observation	Mesoscale model	Typhoon model	Combined wind field
$H_{1/3, 50}$	11.3m	7.3m (-35.0%)	12.0m (6.7%)	12.4m (10.5%)
$T_{1/3, 50}$	14.7s	10.9s (-25.9%)	13.6s (-7.5%)	13.9s (-5.0%)

てはメソスケールモデルから求めた風速場を海面境界条件に用いた波浪推算では極値波高を大きく過小評価し、観測値から求めた有義波高の極値との誤差は 35% となる。一方、台風モデルまたは合成風速場を用いた波浪推算では有義波高の極値の誤差は 6.7%、10.5% であり、メソスケールモデルの風速場を用いた場合の極値波高の過小評価が大きく改善されている。

有義波周期については、台風モデルまたは合成風速場を用いた波浪推算では、観測値から求めた有義波周期を概ね評価できるのに対して、メソスケールモデルの風速場を用いた波浪推算では、有義波周期の極値が大きく過小評価されている。これは、メソスケールモデルの風速場を用いた波浪推算では、極値波高を大きく過小評価していることによるものである。一方、台風モデルと合成風速場を用いた場合には極値波高に対応する有義波周期の観測値から求めた値との差はそれぞれ 7.5%、5% であり、極値波高と極値波周期ともに 10% 程度の誤差で再現できることが分かる。

5. 結論

本研究では波浪モデルの評価と混合風速モデルを用いた風波とうねりの予測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 波浪モデルである SWAN と WW3 の精度評価を行った。SWAN による予測は波高を再現できるが、波周期を過小評価する。SWAN が波周期を過小評価する理由としては低周波側の波浪スペクトルを過小評価することが挙げられる。一方、WW3 による予測は波高と波周期をともに再現できることが

分かった。

- 2) 合成風速場を用いた波浪推算では有義波高と有義波周期とも精度良く予測できるのに対して、メソスケールモデルは有義波高を過小評価し、台風モデルは有義波周期を過大評価することがあることを明らかにした。
- 3) WW3 を用いた波浪推算により、有義波高・有義波周期と風速の関係を再現できることを示した。また、風波の発達時に有義波周期の減少はうねりの存在によるものであり、風波とうねりの混合モデルから説明できることを示した。
- 4) メソスケールモデルを境界条件に用いた波浪推算では有義波高と有義波周期の極値を大きく過小評価する。一方、台風モデルと合成風速場を用いた波浪推算では有義波高と有義波周期の極値を予測できることを示した。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」で得られた研究成果である。また、SWAN を利用した波浪シミュレーションに関しては、岐阜大学の小林智尚教授にご指導とご協力を賜った。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 杉本悟史・近澤昌寿, 気象庁沿岸波浪観測に基づく日本沿岸の波浪特性の調査, 測候時報, Vol.75, 2008, pp.577-95.
- 2) 間瀬肇・平尾博樹・国富将嗣・高山知司, SWAN による波浪推算システム-閉鎖性湾内における波浪推算への適用-, 京都大学防災研究所年報, No.44 B-2, 2001, pp.333-351.
- 3) 石原孟・山口敦・ムハマドワヒードサーワー・老川進, 洋上風力発電所建設のための海象・気象条件と施工稼働率の数値予測, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.35, No.4, 2012, pp.7-14.
- 4) 桜庭雅明・倉田貴文・蛭田啓久・稲垣青生, 富士海岸における台風来襲時の波浪の発達特性, こうえいフォーラム, No. 14, 2006, pp.21-26.
- 5) 駒口友章・三島豊秋・山下隆男・李漢洙・H. Mohammed, 地域環境シミュレーターの実用化に関する産学連携研究, 国際協力研究誌, Vol. 15, No.1-2, 2009, pp.229-237.
- 6) 福本幸成・前田修・宇佐美栄治・林田宏二・石原孟, 洋上風力発電設備基礎周辺の波浪の観測 (その2), 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2013, pp.248-251.
- 7) Germanischer Lloyd, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Ed 2005, 2005.
- 8) 石原孟・小川豪・林賜銘・嶋田健司, モノパイル式洋上ウィンドファームのフィージビリティスタディー その 1 気象・海象条件の評価, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2012, pp.199-202.
- 9) Sverdrup H. and W. H. Munk, Wind, Sea, and Swell: Theory of relations for forecasting. U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, No.601. 1947.
- 10) Bretschneider C. L., The generation and decay of wind waves in deep water. Trans. A.G.U., Vol. 33, No.3, 1952, pp.381-389.
- 11) Bretschneider C. L., Revision in wave forecasting; deep water and shallow waters, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp.30-67.
- 12) 間瀬肇・森信人・中條壮大・安田誠宏・S. Dong・池本藍, 気象・海象の再解析値と予測値を利用した洋上風力発電施設の設計外力算定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, 2011, pp.I_1226-I_1230.
- 13) Ou S.H., J.M. Liao, T.W. Hsu and S.Y. Tzang, Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. Ocean Eng., Vol.29, 2002, pp.947-971.
- 14) 種本純・石原孟, 熱帯低気圧に伴う風速場の予測手法に関する研究, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.37, No.3, 2013, pp.47-54.
- 15) The SWAN team, SWAN Scientific and technical documentation, SWAN Cycle III version 40.91AB, 2013, pp. 113.
- 16) Tolman H. L., User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 2009, pp.194.
- 17) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 2008, pp.96.
- 18) 石原孟・松井正宏・日比一喜, 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布性質, その 2, 台風時の強風, 日本風工学会論文集, No.66, 1996, pp.3-14.
- 19) 合田良實, 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 2008, pp.430.
- 20) 気象庁, 気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/>, アクセス 2014 年 5 月 15 日.
- 21) 土木学会, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (2010 年度版), 2011, pp. 582.
- 22) 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, pp. 215-218.