

5 複数の着床式洋上風車の応答に対する波の影響評価

加島 寛章*, 米山 治男*

Wave Effect on Dynamic Response of Fixed-Bottom Offshore Wind Turbines

by

KASHIMA Hiroaki and YONEYAMA Haruo

Abstract

The offshore wind turbine industry has been actively working toward the goal of carbon neutrality by 2050, and technological developments in large-scale offshore wind turbines have led to improved power generation and economic efficiency. However, their wind turbine response characteristics and the relationship between the scale of power generation and wind turbine response remain largely unknown. In this study, coupled load analyses in wind and waves were performed on fixed-bottom offshore wind turbines with varying power generation scales to investigate the differences in the response characteristics of each turbine. The results indicated that wind response characteristics are similar between wind turbines of different power generation scales. In addition, the larger the wind turbines, the more structurally stable they are against external forces. Lastly, the response amplification characteristics due to waves differ between wind turbines of different power generation scales depending on their wind response characteristics even under the same wave conditions.

* 港湾空港技術研究所海洋利用研究領域

原稿受付 令和4年4月27日

審査日 令和4年5月26日

1. はじめに

2020年に洋上風力発電施設の設計指針である『洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）』¹⁾が改訂されるとともに、グリーン成長戦略の柱である2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現に向けた動きと相まって、近年では洋上風力発電施設の建設や導入が活発化している。同時に、発電効率や経済性のより高い風車建設を目指すため、風車の大型化や高出力化等に関する技術開発が加速している。大規模な洋上風車を対象とした研究事例として、Wangら²⁾は10MWのモノパイル式洋上風車を対象に、波の非線形性が風車応答に及ぼす影響について検討している。また、Xiら³⁾は既存の荷重連成解析に地盤と構造の相互作用効果を導入し、10MWのモノパイル式洋上風車の疲労寿命について検討している。さらに、Medinaら⁴⁾は風車の地震リスクを評価するため、5、8、10、15MWのモノパイル式洋上風車を対象に風車規模と地震応答の関係性について検討している。このように、最近では、風車の大型化等の動向を踏まえ、大型の着床式風車を対象とした応答評価に関する検討が行われてきているものの、大型風車の応答について、風車規模による応答の違いを含めて必ずしも十分な知見が得られているとは言えない状況である。

そこで本研究では、発電規模の異なる3基のモノパイル式洋上風車を対象に、波と風の同時作用下における荷重連成解析を行い、波と風に対する風車の応答特性や風車規模によるこれらの違いについて検討を行った。

2. 解析構成

2.1 風車モデル

本検討では、図-1に示すような国際エネルギー機関風力技術協力プログラム（IEA Wind TCP）の解析コード比較検証で採用された定格出力5、10、15MWの3基のモノパイル式洋上風車モデル^{5),6)}を対象とした（表-1）。これらの風車は、ブレードピッチ制御による可変速風力発電機を搭載した3枚翼アップウィンド型の風車であり、水深 $h=20.0$ m海域に設置された状況を想定した。風車モデルのタワー部およびモノパイル部の材質はそれぞれ鉛直上方に直線のテーパ型の鋼管および円筒型の鋼管であり、後述する解析コードの関係上、実際の施工とは異なり、根入れ長はなく海底面に固定されたモノパイル式風車を仮定している。ブレードについては、5MW風車ではDU型およびNACA型断面⁹⁾、10MWおよび15MW風車ではDTU FFA-W3型断面⁶⁾が用いられている。

2.2 解析コード

解析には、アメリカの国立再生可能エネルギー研究所NREL（National Renewable Energy Laboratory）で開発された風車解析コードOpenFAST（Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence）⁸⁾を用いた。本コードは、以下の5つのモジュールから構成された風・波・構造連成解析コードである。1つ目は翼素運動量理論により風荷重を算定する空力弾性解析

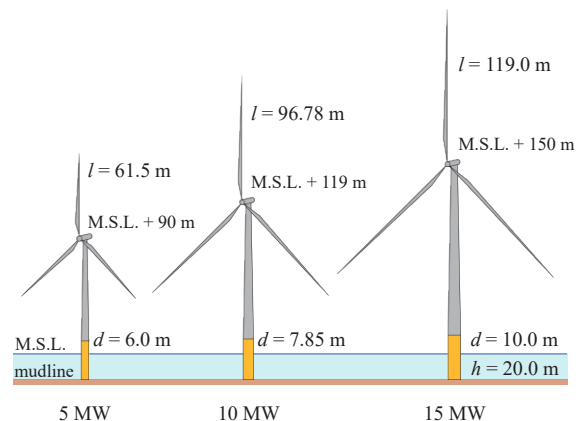


図-1 本検討で対象とした風車モデルの概略図（ l ：ブレード長、 d ：モノパイル径、 h ：水深）

表-1 主要な風車の構造諸元

項目		諸元値		
		5MW風車	10MW風車	15MW風車
タワー頂部	高さ (m)	M.S.L. + 87.6	M.S.L. + 115.6	M.S.L. + 144.5
	直径 (m)	3.87	5.50	6.50
	厚さ (mm)	19.0	20.0	24.0
タワー基部	高さ (m)	M.S.L. + 10.0	M.S.L. + 11.5	M.S.L. + 15.0
	直径 (m)	6.0	7.85	10.0
	厚さ (mm)	27.0	38.0	41.0
モノパイル部	高さ (m)	30.0	31.5	35.0
	直径 (m)	6.0	7.85	10.0
	厚さ (mm)	60.0	60.0	60.0
ハブ	高さ (m)	M.S.L. + 90	M.S.L. + 119	M.S.L. + 150
ブレード	長さ (m)	61.5	96.78	119.0
カットイン風速 (m/s)		3.0	4.0	3.0
定格風速 (m/s)		11.4	11.0	10.6
カットアウト風速 (m/s)		25.0	25.0	25.0

モジュール、2つ目は修正モリソン式により波荷重を算定する流体力解析モジュール、3つ目はマルチボディダイナミクス法によるRNA部の振動解析モジュール、4つ目はモーダル法によるタワー（風流入および風流入直交方向を2次のモード形状で表現）とブレード（長軸方向を2次、短軸方向を1次のモード形状で表現）の振動解析モジュール、5つ目はオイラー梁要素を用いた有限要素法によるモノパイル部の振動解析モジュールである。なお、モノパイル部の解析モジュールでは地盤とモノパイルの相互作用効果が、流体力解析モジュールではストレッチ法による流体力の鉛直方向の伸縮効果や砕波力が考慮されていない。

2.3 検討条件

まず、風車の風応答特性を把握するため、4.0~24.0 m/sのハブ高さ平均風速を2.0 m/s刻みで分割した変動風条件を設定した。風速変動データは、IEC61400-1⁹⁾に規定されている標準乱流モデルを用いて作成した。本モデルでは、発電時の乱流強度はハブ高さの風速の関数として表され、乱流強度カテゴリは洋上風車を想定したカテゴリCを、乱流スペクトルは

表-2 不規則波浪条件

No.	T_{in} (s)	H_{in} (m)	No.	T_{in} (s)	H_{in} (m)	No.	T_{in} (s)	H_{in} (m)
1	6.0	2.0	8	12.0	2.0	15	14.0	8.0
2	6.0	3.0	9	12.0	4.0	16	16.0	2.0
3	8.0	2.0	10	12.0	6.0	17	16.0	4.0
4	8.0	4.0	11	12.0	8.0	18	16.0	6.0
5	10.0	2.0	12	14.0	2.0	19	16.0	8.0
6	10.0	4.0	13	14.0	4.0			
7	10.0	6.0	14	14.0	6.0			

Kaimal モデルをそれぞれ採用した。また、風速の鉛直プロファイルはベキ指数が 0.14 のベキ乗則を用いた。

ついで、風と波に対する応答特性を把握するため、表-2 に示すような 6.0~16.0 s の有義波周期 T_m と 2.0~8.0 m の有義波高 H_m で風波発達過程において波として成立しうる一方向不規則波と上記の変動風を組み合わせた条件を設定した。不規則波の水位変動データは、スペクトル尖鋭度が 3.3 の JONSWAP 型スペクトルで表される線形波に、Sharma and Dean¹⁰⁾による 2 次の非線形波を考慮したものとして作成した。なお、波は風が風車ロータ面に流入する方向と同一の方向から作用するものとした。

解析データのサンプリング条件は、データサンプリング周波数は 20 Hz、解析時間は 600 s とし、解析では波の影響が比較的大きい海底面における風流入直交方向の曲げモーメント（以下では、曲げモーメントと表記し、以降の図中では下添え字 y で表記する。）に着目した。

3. 結果と考察

3.1 風車の風応答特性

まず、発電規模の異なる3基の風車に変動風による風荷重のみが作用した場合における風応答特性を把握するため、定格風速 u_r で無次元化したハブ高さ平均風速 u_m と曲げモーメント M_y の関係について調べた (図-2)。図中の各色は発電規模を表し、*、○、ハッチはそれぞれ、時々刻々変動する曲げモーメントの時間最大値、時間平均値、標準偏差である。この図より発電規模の小さい5MW風車についてみると、まず定格風速以下ではピッチ角を小さい角度で一定に保持して風に対する受風面積を大きい状態で、風速の増加に伴って風車ロータ回転数やスラスト力を増加させるため、風速の増加とともに曲げモーメントが大きくなり、定格風速近傍で最大となる。その後、定格風速を超えると、風車ロータ回転数を一定に保持して風速の増加に伴ってピッチ角を大きくさせるため、(スラスト力の減少を伴って) 曲げモーメントが小さくなることわかる¹¹⁾。このようなブレードピッチ制御に依存する風応答特性は、10MWおよび15MW風車と風車規模が異なっても同様に確認できる。また、曲げモーメントの最大値は、風車ロータ面に生じる風荷重がブレード長に依存して増大することやハブ高さにより、発電規模が大きくなるほ

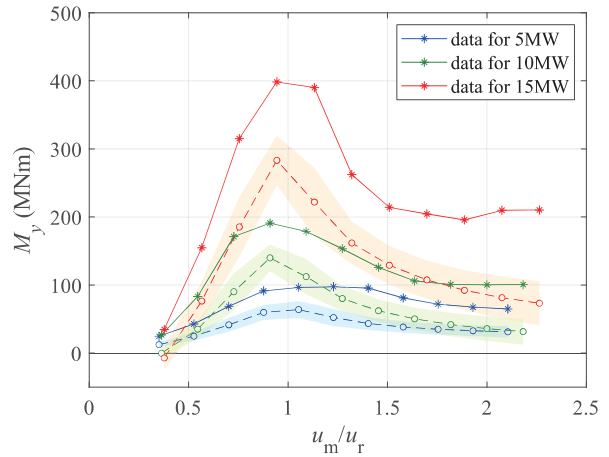


図-2 変動風作用下における無次元ハブ高さ平均風速と曲げモーメントの関係 (各色：発電規模、*：最大値、○：平均値、ハッチ：標準偏差)

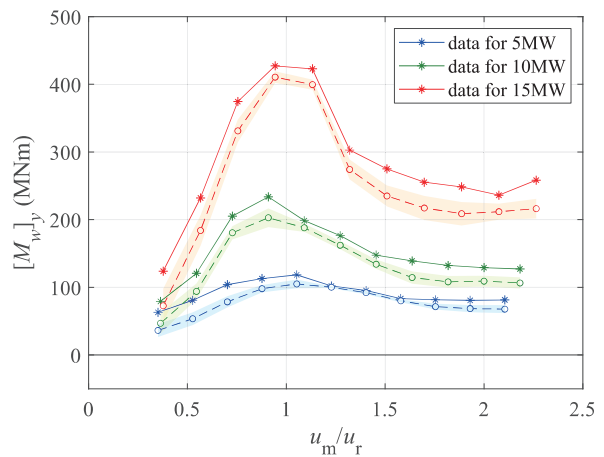


図-3 波風同時作用下における無次元ハブ高さ平均風速と曲げモーメントの関係 (各色：発電規模、*：時間最大値、○：時間平均値、ハッチ：標準偏差)

ど増大する。

3.2 波風同時作用下における風車の応答特性

ついで、前節で述べた変動風による風荷重のみが作用した時の風応答特性を踏まえ、風荷重に波荷重が加わった場合における風車の応答特性について調べた。波と風の同時作用下における風車応答は、一波一波の波の影響が重要となると考えられるため、作用波の水位変動にゼロダウンクロス法を用いた波別解析により個々波の情報を取得し、得られた個々波の作用時間 (= 個々波の波周期に相当する時間) 中に時々刻々変動する曲げモーメントのうちの最大値を個々波に対応する曲げモーメント M_w として定義し、この物理量を用いて風車の応答特性について整理した。なお、このような定義のため、上記の個々波に対応する曲げモーメントの平均値は、変動風作用下における時々刻々変動する曲げモーメントの時間平均値とは一致しない。

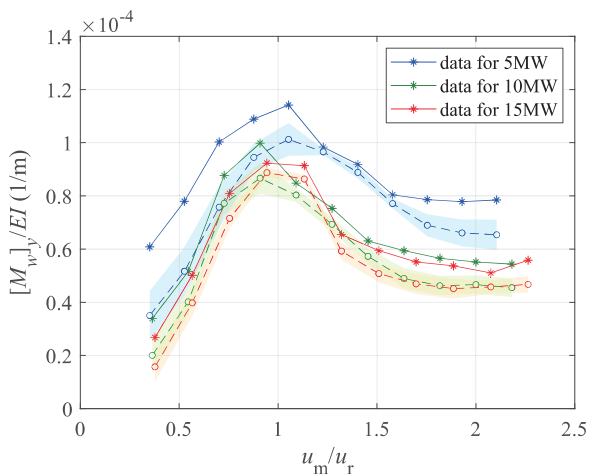


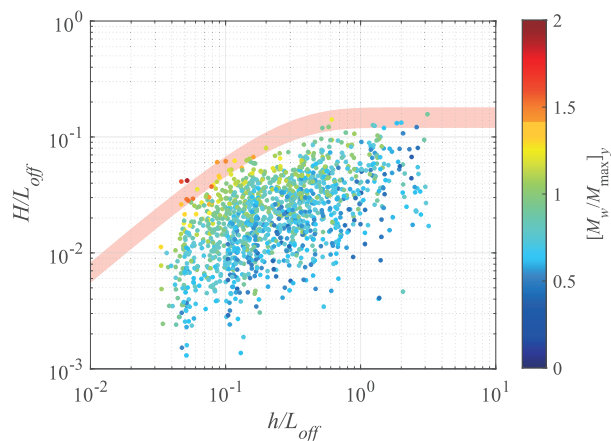
図-4 波風同時作用下における無次元ハブ高さ平均風速と曲率の関係 (各色：発電規模，*：最大値，○：平均値，ハッチ：標準偏差)

図-3 に波と風の同時作用下における無次元ハブ高さ平均風速と個々波に対応する曲げモーメントの関係を示す。図に示している結果はすべての波条件に対するものであり，*，○，ハッチはそれぞれ，個々波に対応する曲げモーメントの最大値，平均値，標準偏差である。波風同時作用下における曲げモーメントの時々刻々の変動は，風荷重のみの曲げモーメントに波成分が付随して変動することから¹²⁾，個々波に対応する曲げモーメントは波が作用した分だけ増大する。このため，波風同時作用下の曲げモーメントは，図-2 で示した変動風作用下の曲げモーメントと同様な分布形状となり，発電規模が大きいほど大きな曲げモーメントが発生する。

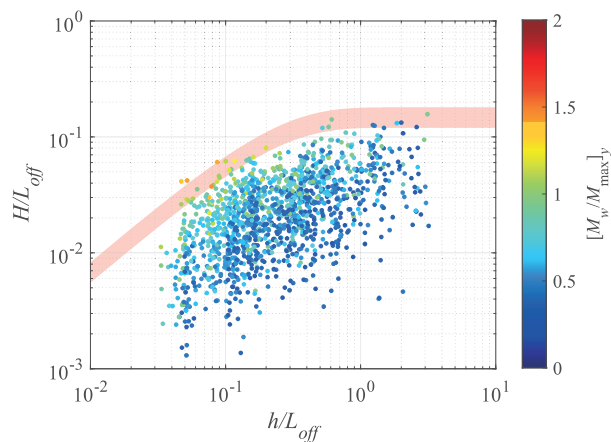
一方，構造物の安定性を評価するためには構造特性を含めて応答を評価することが重要となる。そこで曲げに対する構造物の耐力指標として曲げ剛性を取り上げ，曲げモーメントを曲げ剛性 EI (E :モノパイル部の材質である鋼のヤング率， $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ ， I :モノパイル部の断面2次モーメント) で除した曲率について整理した。図-4 に波と風の同時作用下における無次元ハブ高さ平均風速と個々波に対応する曲率の関係を示す。検討対象とした 10MW 風車と 15MW 風車については顕著な差は確認されないものの，発電規模が大きいほど曲率はおおむね小さくなり，特に大きな曲率の発生する定格風速を超える風速時には，10MW および 15MW 風車の曲率が 5MW 風車のそれに比べて最大値レベルで 2~3 割程度小さくなる。このように，風車の発電規模の増大に伴って大型化することにより，波や風の外力に対して構造的に安定した風車の建設を期待できることが示唆される。

3. 3 波風同時作用下における波による応答増幅特性

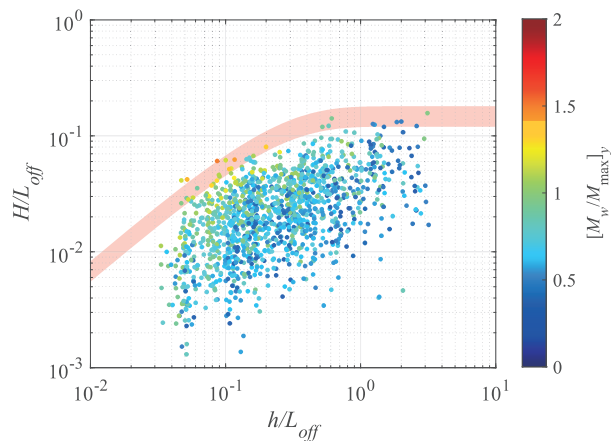
前節までは波と風が同時に作用した時に海底面において発生する曲げモーメントについて整理したが，波が加わることにより，曲げモーメントがどれくらい増幅するのかを調べ



(a) 5MW 風車



(b) 10MW 風車



(c) 15MW 風車

図-5 個々波の波形勾配および相対水深と波による曲げモーメントの増幅率の関係 (ハブ高さ平均風速 6.0 m/s の場合)

ておくことも重要となる。そこで，波風同時作用下における曲げモーメント M_w と，変動風のみ作用下における曲げモーメントの最大値 M_{max} の比を波による曲げモーメントの増幅率と定義し，この増幅率の発電規模による違いについて整理した。図-5に示すのは， $u_m = 6.0 \text{ m/s}$ におけるすべての波条件を対象とした個々波の波形勾配 H/L_{off} と相対水深 h/L_{off} ，波

による曲げモーメントの増幅率の関係である。ここで、 H は個々波の波高、 L_{offl} は線形分散関係により得られる個々波の周期をもつ深海波の波長である。図中の各点の色合いは波による曲げモーメントの増幅率であり、赤色ハッチ領域は海域の目安として合田¹³⁾の砕波限界領域（砕波係数 $A = 0.12 \sim 0.18$ ）を表している。図より発電規模の小さい5MW風車では、相対水深が小さくかつ波形勾配が大きい個々波が発生するような条件（砕波限界領域に達するような波条件）において、 $[M_w/M_{max}]_y \cong 2.0$ となり、この領域に近づくほど波による曲げモーメントが増幅する。しかしながら、10MW風車や15MW風車においては、5MW風車と同様の分布傾向を示すものの、増幅率は最大でも約1.5であり5MW風車に比べて小さく、特に10MW風車では、全体的に増幅率が最も小さくなる。一方、風速によっては、発電規模が大きいほど増幅率が大きくなり、発電規模の最も大きい15MW風車において、増幅率が1.0を超える場合があり、各風車に同一条件の波が作用した場合でも、波作用時の風速によっては、風車間の波による曲げモーメントの増幅特性が異なる。そこで、波風同時作用下における波と風の各成分の曲げモーメントに対する寄与を調べるため、曲げモーメントの周波数特性について整理した。

図-6に示すのが、波の影響が比較的大きいと思われる条件（ $T_{in} = 16.0$ s, $H_{in} = 8.0$ m）に対する結果である。各色はハブ高さ平均風速、一点鎖線および実線は波風同時作用下および変動風作用下における結果であり、縦破線、縦一点鎖線、縦点線（太・細）はそれぞれ、3P周波数、風車の固有周波数、波のピーク周波数（1次波・2次波）を表している。波による局所的な曲げモーメントの増幅に着目しているため、周期100s程度の長周期な曲げモーメントの変動を除くと、 $u_m = 6.0$ m/sでは波の1次あるいは2次のピーク周波数と3P周波数に相当するエネルギーの差として波による増幅が表現され、発電規模が大きいほどその差が小さい。一方、 $u_m = 16.0$ m/sでは固有周波数あるいはブレードピッチ制御等の風車の機械的要因に伴う周波数（ $f = 0.06 \sim 0.08$ Hz）に相当するエネルギー¹¹⁾との差として波による増幅が表現され、発電規模が大きいほどその差が小さくなり、これらの結果は図-5の結果を支持している。このように、異なる発電規模の風車に同一条件の波が作用した場合でも、波風同時作用下における曲げモーメントの周波数特性の違いにより、波による曲げモーメントの増幅特性が異なることがわかった。

4. おわりに

本研究では、発電規模の異なるモノパイル式洋上風車を対象に、波と風の同時作用下における荷重連成解析を行い、波と風に対する風車応答特性や風車規模によるこれらの違いについて検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- ・ 発電規模の異なる風車間の風応答特性は類似している。
- ・ 発電規模が大きいほど応答値は大きくなるが、風車の大型化により波風外力に対して構造的に安定する。
- ・ 異なる発電規模の風車に同一条件の波が作用した場合でも、

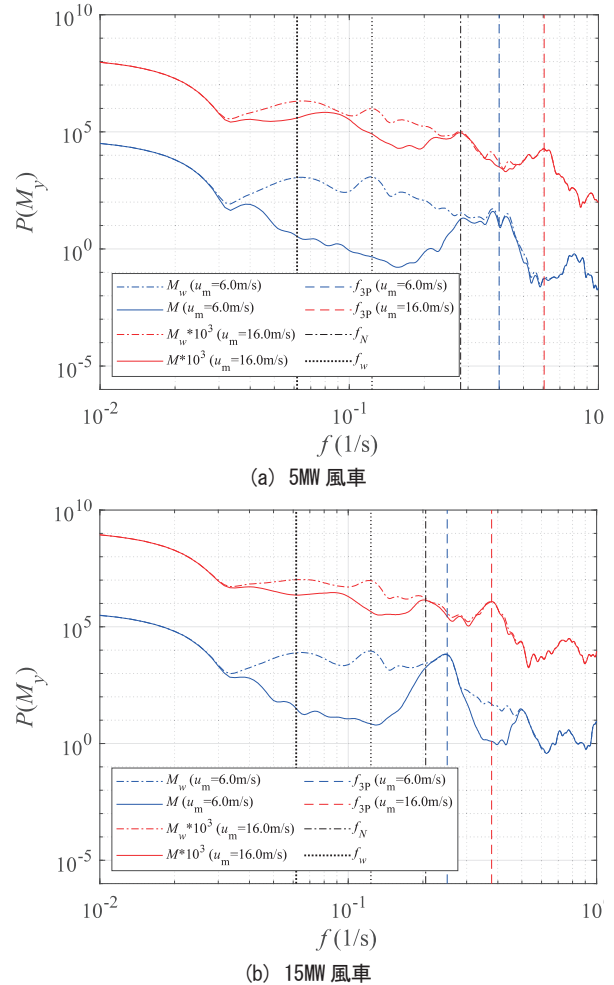


図-6 波風同時作用下における曲げモーメントの周波数特性
（各色：ハブ高さ平均風速、縦破線：3P周波数、縦一点鎖線：風車の固有周波数、縦点線：波のピーク周波数）

波風同時作用下における各風車応答の周波数特性の違いにより、波による応答増幅特性が異なる。

References

- 1) 洋上風力発電施設検討委員会, 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説（令和2年3月版）（2020）.
- 2) Wang, S., Karsen, T. J. and Bredmose, H.: Ultimate load analysis of a 10 MW offshore monopile wind turbine incorporating fully nonlinear irregular wave kinematics, *Marine Structures*, 102922, 76 (2021).
- 3) Xi, R., Du, X., Wang, P. et al.: Dynamic analysis of 10 MW monopile supported offshore wind turbine base on fully coupled model, *Ocean Engineering*, 234 (2021).
- 4) Medina, C., Alamo, G. M. and Roman, Q. R.: Evolution of the seismic response of monopile-supported offshore wind turbine of increasing size from 5 to 15 MW including dynamic soil-structure interaction, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 11 (2021).

- 5) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G.: Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, NREL Technical Report, NREL/TP-500-38060 (2009).
- 6) Bortolotti, P., Tarres, H. C., Dykes, K. et al.: IEA Wind Task 37 on system engineering in wind energy WP2.1 reference wind turbines, NREL Technical Report, <https://doi.org/10.2172/5729216> (2019).
- 7) Gaertjer, E., Rinker, J., Sethuraman, L. et al.: Definition of a 15-megawatt offshore reference wind, NREL Technical Report, NREL/TP-500-75698 (2020).
- 8) NREL: OpenFAST documentation release v3.0.0 (2021).
- 9) IEC: IEC 61400-1 Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements (2019).
- 10) Sharma, J. and Dean, R.: Second-order directional seas and associated wave forces, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21, 1(1981), pp.129-140.
- 11) 山本学, 内藤幸雄, 近藤宏二: 風力発電コンクリートタワーの風応答特性の把握, 風力エネルギー利用シンポジウム, 第27回 (2005), pp.295-298.
- 12) 加島寛章, 米山治男: モノパイル式洋上風車の動的応答に対する波浪の影響に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2 (2020), pp.I_887-I_892.
- 13) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号 (1975), pp.59-106.