

浮体式洋上風車の不規則波応答

長崎総合科学大学 正会員 藤田謙一
防衛大学校 正会員 矢代晴実

1. はじめに

風力発電の活用は、脱炭素社会の実現およびクリーンエネルギーの利用推進に向けた国際的目標の一つである。国内では、長崎県沖、秋田県沖および青森県沖で洋上風力発電の事業化が推進されている。洋上風力発電を浮体式とする場合、浮体式は風と波により常に動揺状態にある。このため、長期的視点からは、計画・設計段階での構造評価に加え、運用期間中の構造損傷による損失期待値の評価が重要となる。

本研究では、バージ式浮体式風車の風と波に対する損失期待値評価手法の構築に向けて、波に対する浮体式風車の応答をモード合成法¹⁾と定常ランダム振動理論に基づいて評価する。数値例題では3MWクラスの浮体式風車の不規則波応答を検討する。

2. 解析モデル

解析モデルを図1に示す。浮体は自由浮体であり、風車はバージの平面中央に配している。浮体式風車は有限要素(FE)でモデル化し、風車は梁要素、浮体は平板要素で離散化する。海水領域は境界要素(BE)でモデル化し、海水と浮体の接触面のみ離散化する。

3. 応答解析

不規則波の波形は、平均値0のエルゴード過程に従うものとする。不規則波は成分波の重ね合わせで表現し、成分波の波振幅($H/2$)はPierson-Moskowitzの波高スペクトルを用いて評価する。浮体式風車の運動方程式は海水との連成を考慮して作成する。浮体式風車の質量、剛性および静水中での復原力による付加剛性マトリクスはFEで評価する。波により浮体に作用する波強制力ベクトル、浮体の運動により浮体底面に生じる付加質量および造波減衰マトリクスはBEで評価する。不規則波に対する浮体式風車の応答は、非減衰流体連成自由振動解析より求めたモード形を合成して評価する。

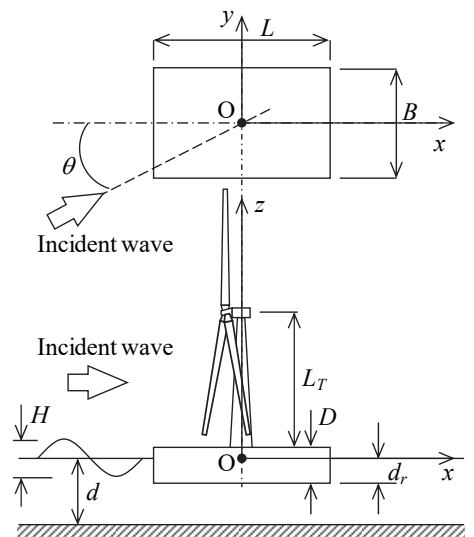


図1 解析モデル

4. 数値例題と検討

2種類の3MWクラスの浮体式風車を対象に、不規則波応答を検討する。浮体式風車の諸元を表1に示す。Model-S(S)は正方形平面、Model-R(R)は長方形平面の浮体である。浮体のFEとBEの要素数は、Model-Sで2,500、Model-Rで1,000である。風車は鋼製の円筒断面であり、頂部断面は $\phi 4,000 \times 22\text{mm}$ 、脚部は $\phi 6,000 \times 36\text{mm}$ である。風車のFEの要素数は15であり、頂部にブレード・ハブ・ナセルの質量を付加した。図2に不規則波の波高スペクトルおよび両モデルの固有振動数を示す。浮体の剛体モードのみスペクトルの領域内にあった。

応答解析は波向き 0° に対して行う。両モデルの浮体短辺方向中央における浮体長辺方向の変位応答の標準偏差

表1 浮体式風車の諸元

諸元	Model-S	Model-R
浮体長さ $L(\text{m})$	50	50
浮体幅 $B(\text{m})$	50	20
浮体深さ $D(\text{m})$	10	10
喫水 $d_r(\text{m})$	7.5	7.5
浮体のヤング係数 $E_p(\text{N/m}^2)$	5.553×10^9	5.559×10^9
浮体のポアソン比 ν_p	0.167	0.167
水深 $d(\text{m})$	50	
海水の質量密度 $\rho_w(\text{kg/m}^3)$	1025	
風力タワー長さ(デッキ上から) $L_T(\text{m})$	70	
風力タワー質量 $m_T(\text{Ton})$	278	
ブレード、ナセル、ハブ質量 $m_B(\text{Ton})$	150	
風力タワーのヤング係数 $E(\text{N/m}^2)$	5.553×10^{10}	
風力タワーのポアソン比 ν	0.3	
風力タワーの質量密度 $\rho_T(\text{kg/m}^3)$	7850	
全体質量 $m_S(\text{Ton})$	19226.4	7695.1

を図3に示す。縦軸の U_z は浮体の鉛直方向変位、横軸の U_x は風車の水平方向変位であり、浮体長辺方向の座標と重ね書きしている。なお、風車高さ方向スケールは縮小している。浮体の変位応答は両モデルともヒープとピッチが連成する分布形を示した。風速が速いと、波周期は長く、波高は高くなり、浮体は波乗り状態となる。このため、風速 20m/s 以上で発生する波に対する変位形状に大きな違いは現れていない。風車の弾性変形は小さく、浮体の動揺に従う変位分布であった。

図3と同位置における曲げモーメントの標準偏差を

図4に示す。縦軸の M_x は浮体の長辺方向の曲げモーメント、横軸の M_y は風車の曲げモーメントであり、浮体長辺方向の座標と重ね書きしている。浮体の曲げモーメントは両モデルともタワー脚部で鋭いピークを示した。風車では脚部で最大となる三角形の分布形を示し、その程度は Model-R で大きい。ピッチが大きいいためと考えられる。浮体は風速 20m/s 以上の波で波乗り状態となるため、曲げモーメントにも大きな違いは見られなかった。ただし、風圧を考慮することにより浮体式風車の曲げモーメントに大きな違いが現れると考える。

5. まとめ

モード合成法と定常ランダム振動理論を用いて浮体式洋上風車の不規則波応答を検討した。

謝辞

本研究は 2021 年度戸田育英財団の研究助成を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田謙一、矢代晴実：浮体式洋上風車のウェットモード合成法による波浪応答の基礎研究、日本建築学会九州支部研究報告第 61 号、2022.3

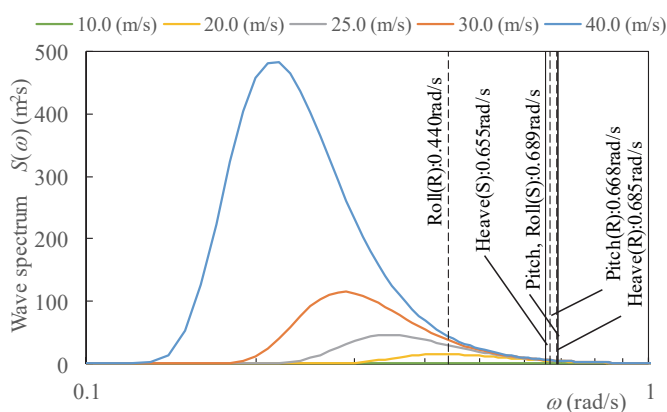
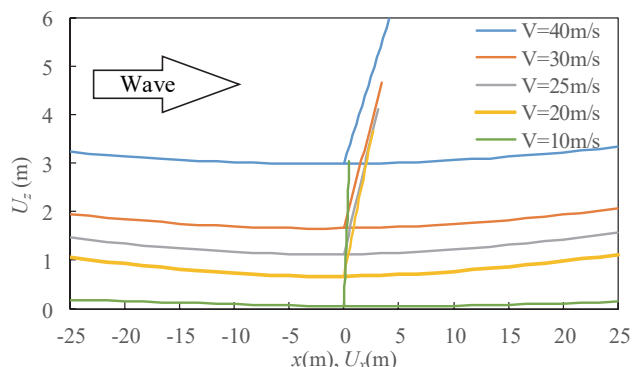
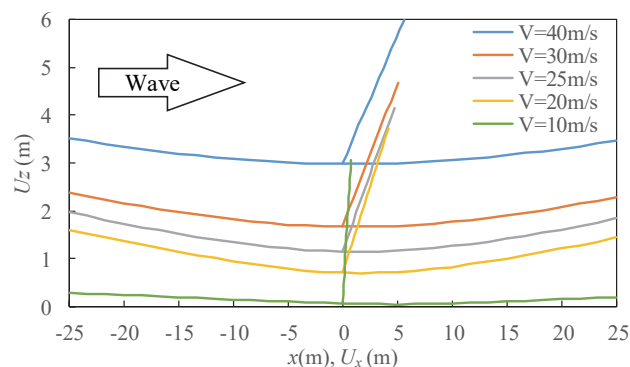


図2 波高スペクトル

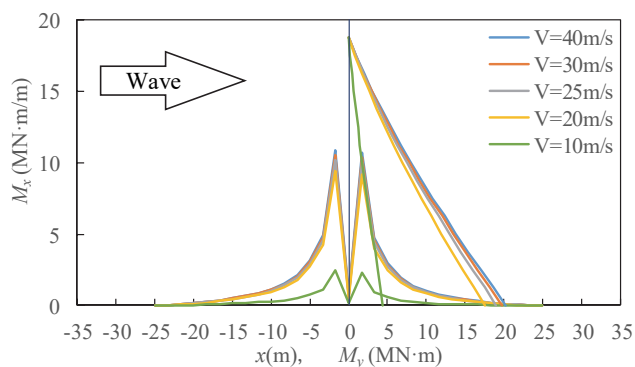


(a) Model-S

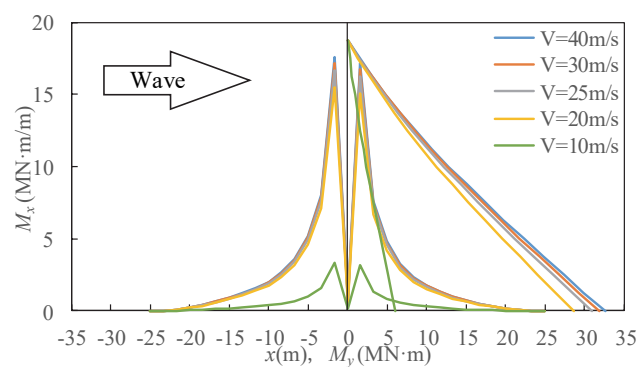


(b) Model-R

図3 浮体式洋上風車の変位



(a) Model-S



(b) Model-R

図4 浮体式洋上風車の曲げモーメント