

## 浮体式洋上風車の風と波に対する損傷評価（その2：評価結果と考察）

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

浮体式洋上風車の風と波に対する損傷評価は、洋上風車の長期運用の検討で重要である。ここでは、風車の仕様は同じとし、浮体平面規模の異なる2種類の洋上風車のモデルを設定し、前報（その1：評価方法）に示した風と波の入力による応答解析結果を用いて風車脚部の損傷確率および傾斜時におけるブレードの接水確率を検討する。

### 2. 検討モデル

検討に用いるモデルは、浮体平面規模の大きいモデルをL-model、小さいモデルをS-modelとする。風車の規模および仕様は両モデルとも同じである。損傷確率は風車脚部の軸力と曲げモーメントの組合せ応力（曲げ圧縮座屈）を対象に、風および波に対する応答解析結果を用いて評価する。本研究において、風と波に対する応答は、両結果の線形和で表す。また、ブレードの接水確率は、応答解析により得られる浮体の傾斜角を用いて評価する。

両モデルの要素分割を図1、寸法、材料など仕様を表1に示す。洋上風車の浮体は自由浮体である。解析における風向と波向は $0^\circ$ である。ハブ位置（海面上71.5m）における風速 $V_H$ は運転時で10, 15, 20, 25m/s, 停止時で30, 40, 50, 60m/sである。不規則波応答解析に用いるPierson-Moskowitzの波高スペクトルを図2に示す。図中の縦線は両モデルの流体連成固有円振動数である。

### 3. タワー脚部の構造損傷確率の評価

損傷確率の評価において、風車脚部の曲げ座屈に関する許容耐力および作用力は、正規分布に従うと仮定する。許容耐力および作用力の平均値と標準偏差を求めるにあたり、許容耐力は使用鋼材（SM490）の降伏点に関する統計資料<sup>1)</sup>を用いる。作用力については風に対する応答解析値を平均値とし、波に対する応答の標準偏差を用いて評価する。許容耐力の平均値と標準偏差を表2に示す<sup>2)</sup>。

風車脚部の曲げ圧縮座屈の損傷確率を図3

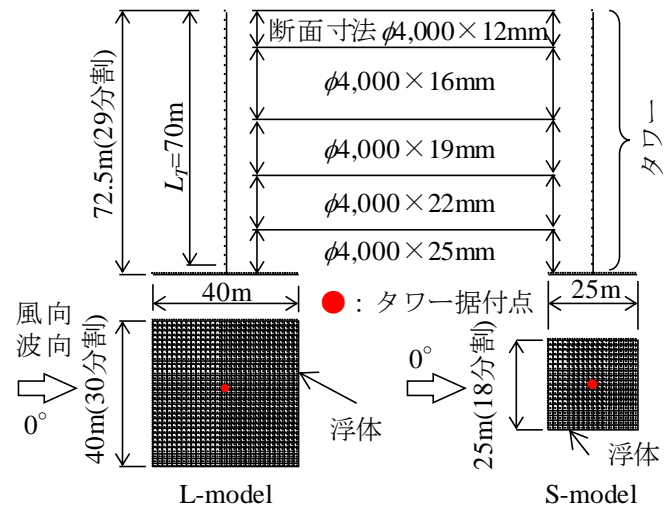


図1 要素分割

表1 検討モデルの仕様

諸元		L-model	S-model
浮体長さ、幅	$L, B$ (m)	40	25
浮体深さ	$D$ (m)	5	
喫水	$d_r$ (m)	3.75	
浮体のヤング係数	$E_p$ (N/m <sup>2</sup> )	$5.789 \times 10^9$	$5.926 \times 10^9$
浮体のポアソン比	$\nu_p$	0.3	
水深	$d$ (m)	50	
海水の質量密度	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025	
タワー高さ(デッキ上から)	$L_T$ (m)	70	
ローター直径	$D_R$ (m)	100	
タワー質量	$m_T$ (Ton)	128	
ブレード、ナセル、ハブ質量	$m_B$ (Ton)	160	
タワーのヤング係数	$E$ (N/m <sup>2</sup> )	$2.058 \times 10^{11}$	
タワーのポアソン比	$\nu$	0.3	
タワーの質量密度	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	7850	
運転時の受風面積	$A_O$ (m <sup>2</sup> )	8134.0	
停止時の受風面積	$A_S$ (m <sup>2</sup> )	672.7	
浮体式風車全質量	$m_S$ ( $\times 10^3$ kg)	6150.6	2402.4

浮体式洋上風車、損傷確率、接水確率、ランダム振動、傾斜、正規分布

連絡先 〒851-0193 長崎市網場町5 2 6 長崎総合科学大学工学部工学科建築学コース TEL095-838-4124

に示す。図には、傾斜角  $0^\circ$  から復原力消失角 (L-model で  $77.6^\circ$  , S-model で  $28.4^\circ$  ) までの風荷重による傾斜エネルギーに対する浮体の復原エネルギーの比(復原性安全率)も合わせて示した。損傷確率は両モデルとも運転時で高く、停止時で低い結果となった。風速よりも風の受圧面が大きく影響していること、波による影響は風よりも小さいためである。また、復原性安全率は運転時および停止時における風速が大きくなるほど小さくなり、洋上風車の転覆に対する余裕度は小さくなることを表している。

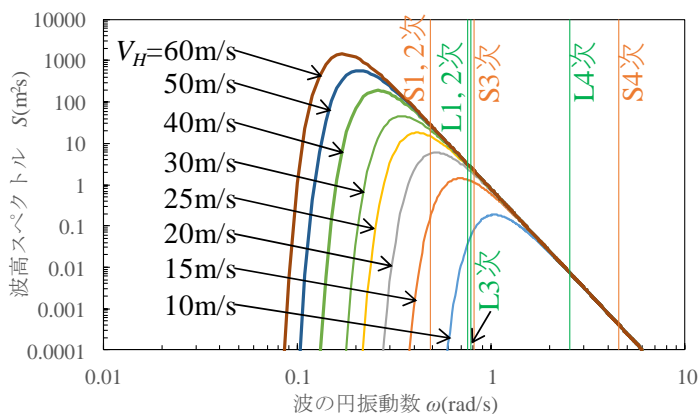


図2 Pierson-Moskowitz 波高スペクトル

#### 4. ブレードの接水確率の評価

風および波により浮体が傾斜するときのブレードの接水確率を検討する。検討は停止時(風速 30~60m/s)を対象とし、風向と波向き  $90^\circ$  に対して行う。検討において、浮体傾斜角は風による傾斜角と波による傾斜角の線形和で表している。波に対する応答は正規分布に従う定常確率過程であり、その時刻歴波形の包絡形の確率密度関数は Rayleigh 分布に従うと考えることができる。このため、波による浮体傾斜角の平均値は応答解析により得た傾斜角の標準偏差  $\sigma_\theta$  を用い  $1.253\sigma_\theta$  にて評価した。

表2 許容耐力の平均値と標準偏差

耐力	平均値	標準偏差	単位
座屈耐力 $R_C$	4.535	0.431	$\times 10\text{MN}$
脚部曲げ耐力 $R_B$	11.157	1.061	$\times 10\text{MN}\cdot\text{m}$

両モデルの接水確率を浮体傾斜角と合わせて図4に示す。規模の大きい L-model の接水確率は0であるが、規模の小さい S-model ではブレードの接水確率は高い結果になった。

両モデルの接水確率を浮体傾斜角と合わせて図4に示す。規模の大きい L-model の接水確率は0であるが、規模の小さい S-model ではブレードの接水確率は高い結果になった。

#### 5. まとめ

本研究では、浮体式洋上風車の風と波に対する応答解析結果を用いて風車脚部の曲げ座屈に関する損傷確率および傾斜時におけるブレードの接水確率を解析し、浮体規模と風速の違いによる確率を示した。

#### 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) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計基準(案)・同解説，1990。
- 2) 藤田謙一，矢代晴実：風と波を受ける浮体式洋上風車の損傷度評価，第29回海洋工学シンポジウム，日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会，CD-ROM, OES29-057, 2022。

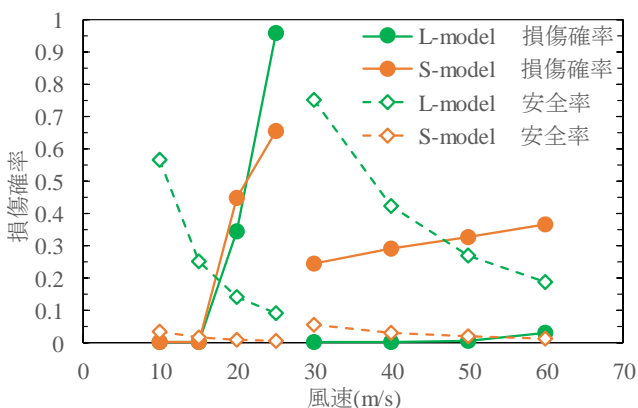


図3 タワー脚部の損傷確率

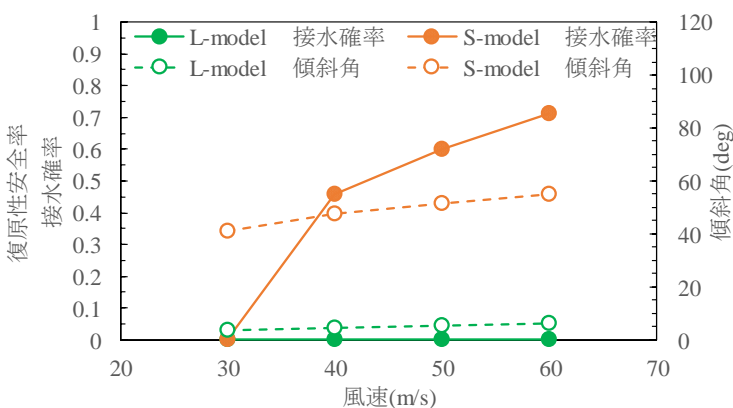


図4 ブレードの接水確率