

浮体式洋上風車の風と波に対する損傷評価（その1：評価方法）

防衛大学校 正会員 ○矢代 晴実
長崎総合科学大学 正会員 藤田 謙一

1. はじめに

洋上風力発電などのクリーンエネルギー利用は、脱炭素社会に向けた国際目標である。国内においては、長崎沖、秋田沖、銚子沖などで洋上風力発電の実現に向けたプロジェクトが進められている。発電のための風車を浮体式とする場合、大波や強風に対する構造検討がとくに重要である。さらに持続可能な運用を行うには、陸上構造物の地震リスク評価のように波と風に対する構造損傷リスクの検討が必要になる。

本研究では、浮体式洋上風車の構造損傷リスク評価方法の構築に向け、風と波による構造損傷確率を定常ランダム振動理論から得られる応答解析結果を用い、信頼性理論により評価する考え方を示す。また、浮体が傾斜した際のブレードが海面に接水する接水確率の考え方を示す。

2. 解析モデル

本研究における浮体式洋上風車を図1に示す。浮体は矩形平面の鋼製バージ、風車は円筒断面の鋼製タワーであり、風および波に対する挙動は線形弾性である。海水領域は水深一定で無限に広がり、非粘性・非圧縮・渦なしの完全流体である。

解析モデルの概要を図2に示す。浮体式風車は有限要素（FE）でモデル化し、浮体は *Mindlin* 平板、風車は梁でモデル化する。風車のローター、ブレードおよびナセルは、ひとつの質点で表現する。海水領域は、支配方程式、自由表面条件、海底面剛体条件および *Sommerfeld* の放射条件を満足する *Green* 関数を用い、浮体と海水の接触面のみ境界要素（BE）でモデル化する。接触面の FE と BE はともに2次要素（8節点アイソパラメトリック要素）で離散化するため、要素数と節点数を完全に一致させることができ、浮体と海水の運動の連続条件と力の釣合を満足することができる。

3. 構造損傷確率の評価方法

浮体式洋上風車の損傷確率は、風と波に対する応答解析結果を用いて評価する。評価フローを図3に示す。

洋上風車の風に対する応答は、静的解析により評価する。解析における受風面を図4に示す。風車運転時はブレードを含むローターを直径とする円とタワーの投影面とし、停止時は風車の投影面とする。波に対する応答は、平均値 0 の定常確率ガウス過程であるとし、モード合成法と定常ランダム振動理論を用いて評価する

1). 浮体に作用する動水圧は、海面上 19.5m の風速で海

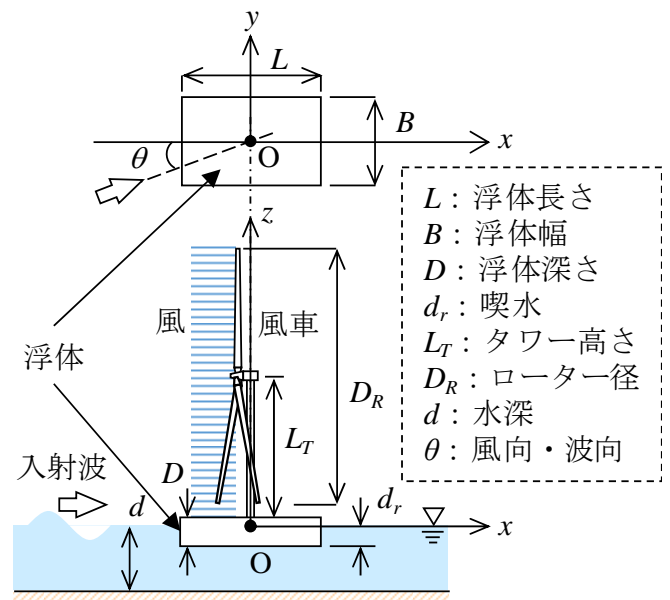


図1 浮体式洋上風車

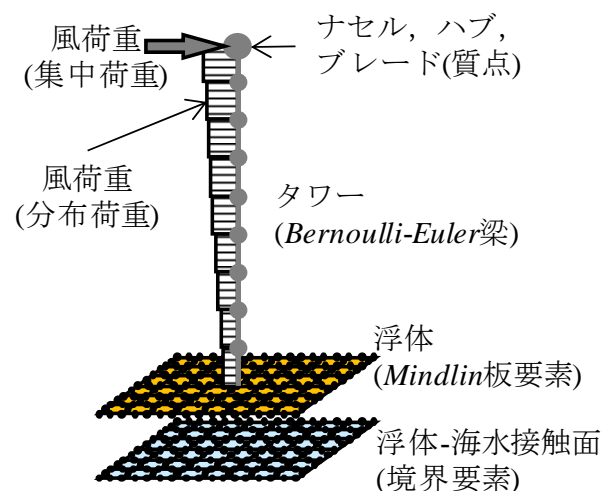


図2 解析モデル

浮体式洋上風車、損傷確率、信頼性理論、定常ランダム振動、不規則波応答、風荷重

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1丁目10番20号 防衛大学校建設環境工学科 TEL046-841-3810

面状態が表される Pierson-Moskowitz の波高スペクトルを用いて評価する。

風車の損傷確率は、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)を対象に評価する。損傷確率は、構造信頼性評価の考え方を採用して評価する。風と波により風車に生じる応力および風車の許容力は、正規分布に従うと仮定する。応力の平均値は風に対する応答値、標準

偏差は波に対する応答の標準偏差で表す。また許容力の平均値および標準偏差は、使用材料の降伏応力度に関する統計データ²⁾を用いて評価する。曲げ圧縮座屈による損傷確率は次式を用いて、 $Z \leq 0$ となる確率を AFOSM (Advanced First-Order Second-Moment) により求める。

$$Z = 1 - (S_C / R_C + S_B / R_B) \quad (1)$$

ここに、 S_C はタワー脚部に生じる圧縮方向力の確率変数、 R_C はタワーの座屈耐力の確率変数、 S_B はタワー脚部に生じる曲げモーメントの確率変数、 R_B はタワー脚部の許容曲げ耐力の確率変数である。

4. ブレードの接水確率の評価方法

ブレードの接水確率の評価は、風車の停止時を対象に行う。風と波を受けて浮体が傾斜したときにブレードが接水する確率の考え方を示す。ブレードの接水確率は、ブレード先端の軌跡である円が接水したときの接水時の海面を弦とする円の中心角 θ_C 内にブレードがある確率として定義する。洋上風車が傾斜したときの θ_C を図5に示す。中心角 θ_C は浮体の復原性の計算過程において、浮体傾斜角および海面とブレード先端の円軌道との最小距離を用いて評価できる。

5. まとめ

浮体式洋上風車の風と波による損傷確率を定常ランダム振動理論と信頼性評価理論を用いて評価する方法を示した。また、洋上風車が傾斜したときにブレードが海面に接水する接水確率の考え方を示した。

今後は風荷重をランダム荷重として扱うため本手法を拡張し、さらにブレードの接水により波・流れ荷重の作用下での風車の損傷評価方法を構築する予定である。

参考文献

- 1) 藤田謙一, 矢代晴実: 浮体式洋上風車の不規則波応答, 令和3年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-016, pp. 31-32, 2022.
- 2) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計基準 (案)・同解説, 1990.

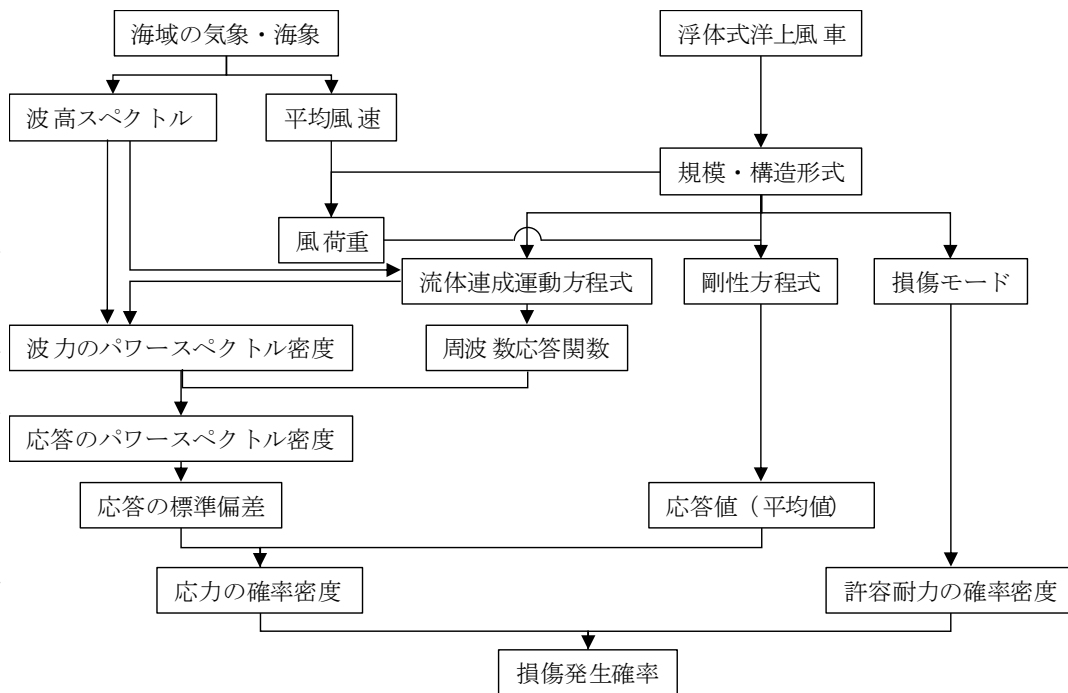


図3 構造損傷確率の評価フロー

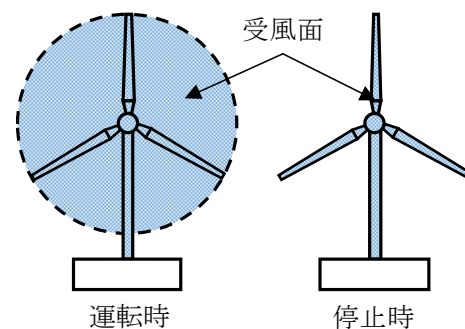


図4 風車受風面

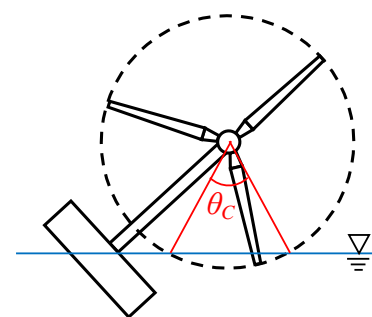


図5 傾斜時の中心角