

浮体式洋上風車の浸水時挙動に関する研究
Motion Characteristic of FOWT under flooded condition

学籍番号 47-176649 牧村 直輝
指導教員 鈴木 英之 教授
平林 紳一郎 准教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)

Keywords: 浮体式洋上風車, 運動応答, 遠隔監視, 浸水損傷, 異常検知

Keywords: FOWT, Motion Characteristic, Remote monitoring, Flooded condition, Anomaly detection

1. 序論

1.1 研究背景

浮体式洋上風力発電は世界的に注目されている再生可能エネルギーの一つであり, 商業化にはコスト削減が急務である. 浮体式洋上風力発電のコスト構造に着目すると, O&M におけるアクセス回数を減らすことが重要な要素の 1 つであり, そのためには風車基礎部や係留部のスマートメンテナンスシステム(SMS)の確立が必要である. 本研究ではその中でも FTA(Fault Tree Analysis)に基づいたリスクの高い事例の一つとして浸水損傷に注目した. 洋上風車の浸水損傷は実海域でも確認されている. センサを増やせば検知できる可能性が上がるが, ウィンドファームを想定した場合センサの故障リスクの増加や, コストの増加に繋がるので, 企業側はむしろ減らす方向への規制緩和を求めている. そこで, 浮体式ならではの検知手法として様々な情報が含まれており, 比較的精度よく計測できる運動応答の変化から浸水損傷を捉える手法の検討を行う. 現在浮体式洋上風車の浸水損傷時運動特性変化に関する論文はなく, 浮体係留系に関する SMS に関する検討も未着手である.

1.2 研究目的

本研究では, SMS 確立において最も重要な要素の 1 つである浸水時における応答特性を明らかにすることを目的とする. また, 動揺データからの浸水検知について検討を行う.

2. 風車-浮体-係留-連成応答解析プログラム NK-UTWind

浸水損傷をシミュレーションで表現するために, 本研究室が開発した風車-浮体-係留連成応答解析プログラム UTWind の浮体部分と NREL が開発した風車の連成応答計算のためのツールである FAST の風車部分を取り出して連成させた NK-UTWind を用いた. 追加した点は以下の 2 点である.

2.1 波力評価への Potential 理論の適用

現在世界中で風車-浮体-係留-連成応答解析プログラムの開発競争が行われているが, Potential 理論による波力評価に加え粘性項を考慮し, 構造部を弾性体として取り扱える時系列解析プログラムはまだない. そこで本研究室が主導し開発を行った. 本研究では Potential 理論による波力評価を取り入れ, スパー型・セミサブ型モデルを用いて検証を行った. スパー型モデルについては WAMIT と 3 次元特異点分布法の 2 つのソフトウェアを用いた比較を行ない, WAMIT 単体では考慮できない粘性項が機能している様子や, 3 次元特異点分布法を用いても一致することを確認した.

2.2 浸水損傷への対応

浸水時には自由水の影響を考慮しなければならない. 浸水速度はゆっくりで, 自由水表面は水面と位相差を持たないとする. このときタンク内の自由水による転倒モーメントは液面の中心線に関する二次モーメントを J_x , 傾斜角を ϕ とすると, 以下のように与えられる.

$$W \cdot \overline{BG_0} \sin \phi + \rho' g J_x \sin \phi \quad (1)$$

本研究における浸水タンク (3.1 使用モデル参照) の二次モーメントはタンクの半径を R とすると, 下記のように求められる.

$$I_x = \frac{\pi - 2}{16} R^4 \quad (2)$$

$$I_y = \left\{ \frac{\pi}{16} + \frac{8}{9\pi} (1 - 3\sqrt{2}) + \frac{1}{8} \right\} \cdot \frac{R^4}{\cos^3 \phi} \quad (3)$$

以上から求めた外力を自由水による付加的な外力として浸水箇所にて与えて浸水損傷を表現する.

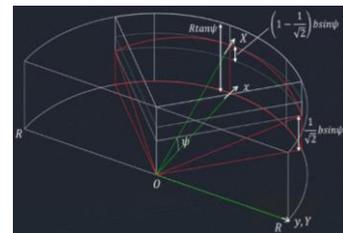


Fig. 1 Calculation of inertia

3. 水槽実験による浸水損傷の表現

3.1 使用モデル

実験模型は一般的な浮体式洋上風車をセミサブ型浮体 DeepCWind[1]を参考に設計し、検討を行った。浸水区画は浮体前方のベースコラム 1 区画に設け、北九州沖における 1 年間の波風予測データをもとに解析条件を決定した。風車部はスラスト力が合うように円盤で近似し、カタナリー係留は重量分布が合うように再設計した。模型は 1/72.72 相似模型である。

Table1 に浮体の主要目を示す。

3.2 実験概要

東京大学柏キャンパスの生産技術研究所海洋工学水槽にて実験を行った。計測項目は動揺、係留張力、タワートップ加速度、スラスト力で、自由動揺試験・風単独試験・波単独試験・波風共存試験を実施した。浸水量を 0cm~6.2cm (0%~3.26%の重量増加) まで徐々に増やして、浸水による応答の変化をとらえる。Table2 に浸水による主要目の変化を示す。

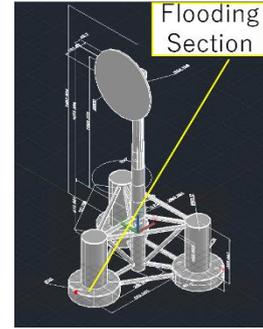


Fig. 2 Definition of scaled DeepCWind

Table 1 System Property

Water Depth	100 m
Draft	20 m
Complete system mass	13851310 kg
CM location below SWL	6.96 m
System roll inertia about CM	8.9295E+09 kgm ²
System pitch inertia about CM	9.1049E+09 kgm ²
System yaw inertia about CM	6.6698E+09 kgm ²
Rating	5 MW

Table 2 System Property for each flooding condition

Flood	Mass Ratio	Draft	I _y [kgm ²]
0 cm	0.00 %	20.00 m	9.1049E+09
1 cm	0.54 %	20.19 m	9.1176E+09
2 cm	1.07 %	20.39 m	9.1301E+09
3 cm	1.59 %	20.58 m	9.1424E+09
4 cm	2.11 %	20.77 m	9.1546E+09
5 cm	2.62 %	20.96 m	9.1667E+09
6.2 cm	3.26 %	21.20 m	9.1817E+09

4. 結果・考察

4.1 規則波試験

規則波試験では、浸水による周波数応答関数 RAO の変化を求めた。シミュレーション (Morison 式, Potential 理論) と実験による結果を Fig. 3 ~ Fig.5 に示す。実験結果と一致していた。Surge, Pitch は Morison 式と Potential 理論の違いが確認できなかったため Morison 式の結果のみ掲載する。Surge の RAO の浸水による運動応答の変化は確認できなかった。

Heave の RAO は浸水によって周期 15s 付近の波なし点なくなる傾向が得られた。この傾向は Morison 式でのシミュレーションと非常によく一致していた。一方 Potential 理論による計算結果ではこの傾向が表れなかった。これは浸水によって定常傾斜した状態での流体力評価を Potential 理論で行っていないためと考えられる。ここから、波なし点付近での浸水による変化は定常傾斜によって流体力が変化し、減衰が減少したと考えられる。

Heave の RAO は固有周期のピーク値が上昇する傾向も得られた。これは Potential 理論 Morison 式とも表れていた。固有周期には変化がないことから、定常傾斜によって粘性項が変化し、減衰が減少したためであると考えられる。また、これらの結果から Potential 理論では正しく定常状態を推定したのち Potential 理論計算を行わなければいけないという使用上の注意も確認できた。

Pitch の RAO は浸水によって固有周期が短くなることが確認できた。この理由は後述する。

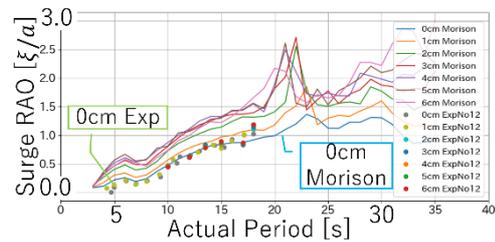


Fig. 3 Surge RAOs for Regular Wave conditions

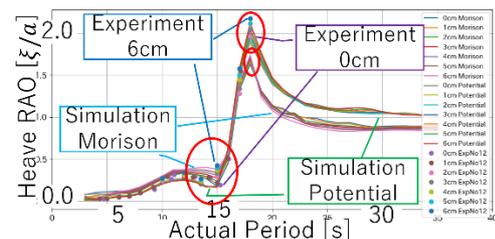


Fig. 4 Heave RAOs for Regular Wave conditions

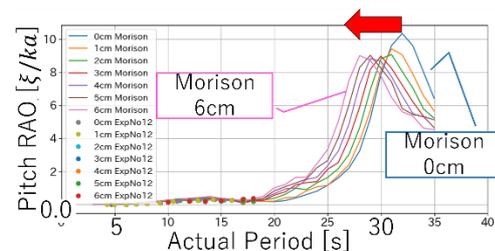


Fig. 5 Pitch RAOs for Regular Wave conditions

4.2 不規則波試験

不規則波試験では Pierson-Moskovitz スペクトル (PM スペクトル) をシードを変えて 5 回計測し、実海域の 3 時間分に相当するデータを得た。ここでは計測した波スペクトルと Pitch の運動応答スペクトルを横軸を実機スケールで示す。波スペクトル Fig.6 と運動スペクトル Fig.7 を比べると、波による動揺より 2 次波力による固有周期での応答が大きいことがわかる。これは有義波高が 1.67m と比較的小さいためであると考えられる。ここから固有周期を推定することができ、Fig.8 よりシミュレーションと同様に浸水によって固有周期が短くなる傾向が確認できる。

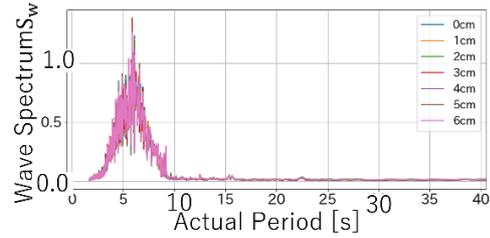


Fig. 6 Measured Irregular Wave Spectrum

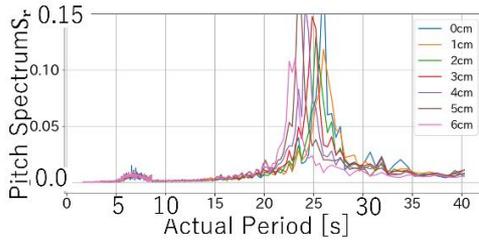


Fig. 7 Measured Pitch Spectrum

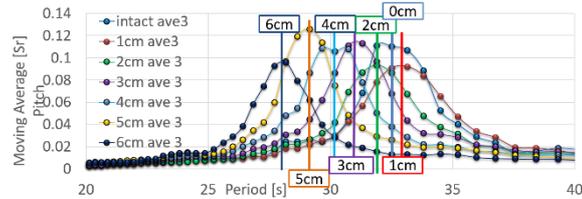


Fig. 8 Measured Pitch Spectrum around natural period

4.3 波風共存試験

波風共存試験は後述する検知手法 1 (平均値) が成り立つかを判断するために用いる。計測時間は実海域での 30 分ほどしかない。計測されたデータに対して平均を取って平均値を求めたものを Fig. 9 に示す。単純に平均を取るだけであると、浸水による傾斜と風による傾斜が見分けがつかないことが分かる。そこで、Fig.10 に示す風単独試験の結果を用いて風による傾斜を推定し、結果を差し引く処理を行った。処理後のグラフを Fig. 11 に示す。この処理を行うことで浸水による傾斜が判断できることがわかる。

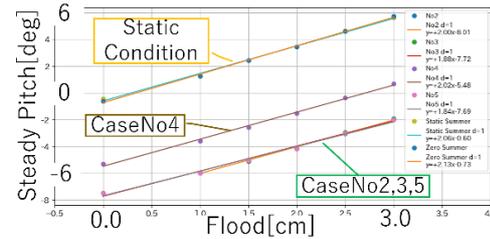


Fig. 9 Pitch Displacement in Wind and Wave Conditions

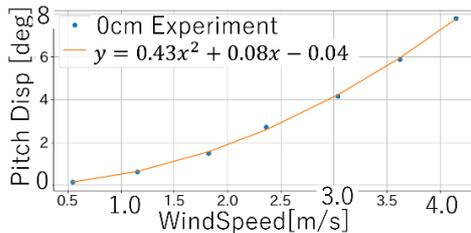


Fig. 10 Pitch Displacement in Wind Only Condition

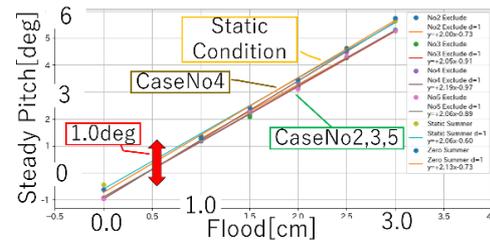


Fig. 11 Wind and Wave Condition Exclude Wind Effect Pitch

4.4 Pitch 固有周期が短くなる理由について

シミュレーションでも実験でも浸水によって Pitch の固有周期が短くなるという特徴的な結果が得られた。この要因について検討を行った。まず、Pitch の固有周期は(4)式で表される。

$$T_{pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{GM \cdot mg}} \quad (4)$$

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (5) \quad \overline{BM} = \frac{Mt}{F \sin \phi} \quad (6)$$

微小傾斜の場合、 \overline{BM} は傾斜によらず一定であり、わずかな浸水で \overline{GM} はほぼ変わらないが、 I が増加するので、固有周期 T は長くなると考えられることが多い。

しかしながら短くなっており、これは(6)式より、復

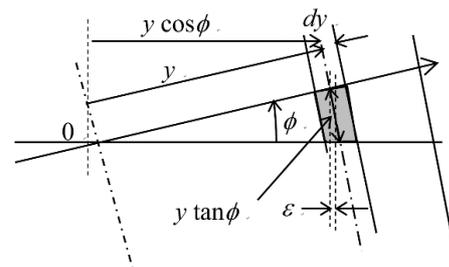


Fig. 12 Reconsideration about horizontal length ϵ

原モーメントが大きくなることを意味する。復原モーメントが大きくなる要因は係留によるものと浮体によるものが考えられる。

浸水によって定常傾斜が発生し、カテナリー係留の非線形的な張力分布により、係留による復原モーメントが増加する可能性を検討すべく、カテナリー解を解くプログラムを用いて定常傾斜前後の係留張力の差分を求めた。しかし、係留張力による復原モーメントの増加は確認されなかった。

よって定常傾斜により浮体の復原モーメントが増加することが原因であることがわかった。これは、傾斜が大きな場合に復原モーメントの計算過程において、厳密には Fig. 12 に示すような傾斜によって変化する微小長さ ε が存在しており、傾斜によって \overline{BM} が変化することによる。この微小項は Fig. 13 のような回転中心からコラムまでの距離 L の長い海洋構造物特有の性質である。Fig. 13 のようにして本研究で使用したモデルの簡易浮体を想定して、初期傾斜 ϕ_0 のある状態からさらに $\Delta\phi$ 傾斜した時の復原モーメントを計算すると、復原項は下記のように表せる。

$$\Delta M_{\text{Restore}} \approx \rho g \nabla \left[\pi r_2^2 \left(2L_2^2 + L_1^2 + \frac{3}{4}r_2^2 + \frac{r_1^4}{4r_2^2} \right) \left(1 + \frac{3}{2}\phi_0^2 \right) \cdot \frac{1}{\nabla} + \overline{KB} - \overline{KG} \right] \Delta\phi \quad (7)$$

ここで ∇ は排水量を示す。以上から Pitch の固有周期を求めると Fig. 14 で示す赤色の線となり、自由動揺試験や不規則波実験、シミュレーションから得られた固有周期の傾向と似た傾向を示していることがわかる。実験値などよりも下がり幅が大きかったのは、係留の影響や付加慣性モーメントが正しく推定できていないことにあると考える。

5. 検知手法の検討

検知手法は複数の手法での結果を総合的に評価することが精度向上につながる。浸水による顕著な運動応答の変化として Pitch の固有周期の変化、わずかな変化として減衰による Heave の変化があることが分かった。この運動特性の変化を捉える手法として4つ提案し、有効性について検討した。

5.1 単純平均による浸水検知

観測値に対して平均をとって定常値の検知を試みる手法である。4.3 波風共存試験で述べた通り、風の影響を算出できれば良い指標となり、計測誤差があっても浸水 1cm (全体重量の 0.5%) から検知可能であることが分かった。

5.2 RAO による浸水検知

周波数応答関数を求める手法である。実海域での波の計測精度が悪いことや、波スペクトルが短周期側にあることにより長周期側の変化が捉えられないことから、実用的でないことが分かった。

5.3 不変量による浸水検知

RAO の変化を海象条件に因らない量で検知することを試みた手法である。PM スペクトルを仮定し、海象条件を表す係数 α, β を消去するため $\omega_1^{-4} - \omega_2^{-4} = \omega_2^{-4} - \omega_3^{-4}$ の関係を満たすように ω を選ぶと (8) 式のように不変量が定義できる。しかし、浸水による顕著な変化は捉えられなかった。

$$\frac{R(\omega_1)R(\omega_3)}{R(\omega_2)^2} \left(\frac{\omega_2^{-10}}{\omega_1^{-5}\omega_3^{-5}} \right) = \frac{H^2(\omega_1)H^2(\omega_3)}{H^4(\omega_2)} = \text{const} \quad (8)$$

5.4 運動スペクトルによる浸水検知

不規則波単独試験 (Fig. 8) に示したようにして 2 次波力により励起される固有周期の変化を検出して推定する手法である。風車が稼働していない状態でのデータの使用を前提としている。この手法であれば、ばらつきを考慮して浸水 2cm (全体重量の 1%) から検知可能であることが分かった。

6. 結論

本研究を通して (a)NK-UTWind の Potential 理論による波力評価、(b)NK-UTWind への浸水影響計算機能の追加、(c)実験・シミュレーションによる浸水損傷時の運動特性の把握、(d)検知手法の提案を行った。浸水による定常傾斜によって減衰が減少し、Heave が増加すること、Pitch の固有周期が短くなることを示し、単純平均による手法と運動スペクトルによる手法が浸水検知に有効であることを示した。

参考文献

[1] A. robertson, J. Jonkman, F. Wend et. Al., Definition of the OC5 DeepCwind Semisubmersible Floating System, (2015)

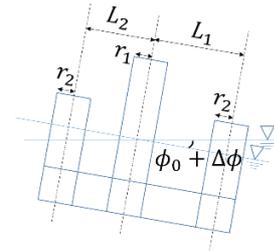


Fig. 13 Restoring Moment about Simplified DeepCwind Model

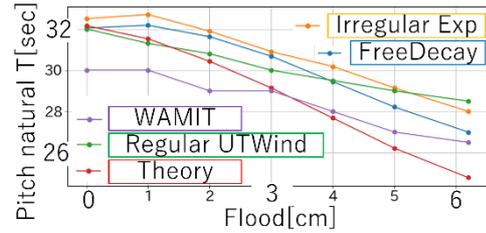


Fig. 14 Natural Period of Pitch