

第 I 部門

洋上風力発電システムを搭載した円筒スパー型浮体の動揺解析

京都大学工学部 学生員 ○松熊 秀和  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 宇都宮 智昭  
 戸田建設（株） 正会員 佐藤 郁

1. 研究目的

地球温暖化対策として風力発電が注目されている。わが国でも陸上での実用化が進んでいるが、今後更なる導入拡大を図るには、浮体式洋上風力発電の検討が必要である。本研究では、コンクリート製の円筒スパー型浮体基礎を有する洋上風車に着目し、その風荷重に対する動揺解析をおこなう。山口ら<sup>1)</sup>はロータ回転時の波浪中浮体動揺について検討しており、ロータ回転時には、ジャイロモーメントの作用によりロータ非回転時にはあらわれないRollおよびYaw方向の応答が生ずることを示している。しかし、風荷重の評価はおこなっておらず、また、浮体動揺に関して微小な調和振動が仮定されている。一方、関田ら<sup>2)</sup>は、浮体動揺を模擬した強制動揺を風車模型に与える実験から、相対風速の効果により風車に作用する風荷重や発電出力が大きく影響を受けることを示している。そこで本研究では、風車ロータの回転および浮体動揺を考慮した上で洋上風車に作用する風荷重を評価し、風車ロータ、ナセル、タワー+浮体基礎の3剛体(図1)からなる系に対しての応答解析をマルチボディダイナミクス理論に基づきおこなう。

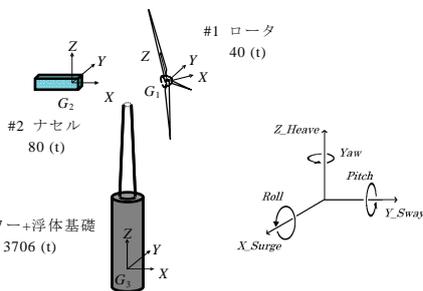


図1 3剛体モデル

本手法により、動揺の影響が加味された風荷重の作用の元での浮体動揺を、有限振幅応答として時間領域で解析できる。なお、ジャイロモーメントの浮体動揺への影響は自動的に取り込まれる。

2. 風車に作用する風荷重の評価

本研究では、解析モデルとして定格出力 2MW クラスのダウンウインド型風車を搭載した単純円筒スパー型浮体(図2)を想定した。解析モデルの諸元を表1に示す。また、係留索は重心位置Gに取り付けるものとした。

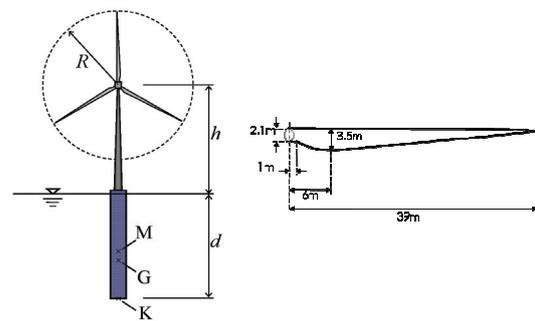


図2 解析モデル

表1 解析モデル諸元

空気密度 $\rho_a$	1.25kg/m <sup>3</sup>
水密度 $\rho_w$	1.025t/m <sup>3</sup>
ナセル高さ $h$	66m
ロータ半径 $R$	40m
ブレード翼型	NACA4412
タワー頂部径	2.5m
タワー基部径	4.0m
浮体直径	8.9m
喫水 $d$	60m
乾舷	4m
排水体積 $V$	3733m <sup>3</sup>
重心高さ $KG$	25.07m
メタセンタ高さ $GM$	5.01m

翼素運動量理論に基づいて、定格出力が得られる定格風速、および風車の安全確保のため発電を停止するカットアウト風速における風荷重を算出するとともに、その風荷重と浮体の傾斜により発生する復元力が釣り合った状態における傾斜角(静的ピッチ  $\theta$ )を算出した。静的ピッチは次式により求めた。

$$\theta = \frac{M_R + M_T}{\rho_w g VGM}$$

ここで、 $M_R$ 、 $M_T$  はそれぞれロータおよびタワーに作用する風荷重による転倒モーメントである。

また、 $\rho_w$  は水密度、 $g$  は重力加速度、 $V$  は排水体積、 $\overline{GM}$  はメタセンタ高さであり、表 1 に示した値を用いている。

風荷重および静的ピッチの算出結果を表 2 に示す。定格風速において、カットアウト風速よりも風速が小さいにもかかわらず、大きい値が得られることがわかる。

### 3. マルチボディダイナミクスによる動揺解析

マルチボディダイナミクス理論を用いて浮体式洋上風力発電施設を剛体系とみなした解析プログラムを作成し、浮体式洋上風力発電施設の動揺解析を行った。解析にあたって、以下に示す拘束剛体系の運動方程式を用いた。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^A \\ \gamma \end{bmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{M}$ ：質量マトリックス、 $\mathbf{q}$ ：一般化座標(図 1)、 $\mathbf{C}_q$ ：各剛体間の拘束式ヤコビアンマトリックス、 $\lambda$ ：ラグランジュ未定乗数、 $\mathbf{Q}^A$ ：作用外力、 $\gamma$ ：拘束式を 2 回微分して得られる拘束方程式を  $\mathbf{C}_q \ddot{\mathbf{q}} = \gamma$  と表現した時の右辺である。

本研究では、波浪の影響は考慮せず、風向・風速一定で定格風速の風（ナセル高さで 13m/s；風速の

鉛直方向分布をベキ乗則で考慮）が吹いている状況を仮定した。解析結果を図 3～図 6 に示す。

マルチボディダイナミクス理論を用いた動揺解析の結果(図 3, 4)より、風向方向に対する変位・回転 (Surge, Pitch) だけでなく、それ以外の方向への変位・回転(Sway, Roll, Yaw)も発生することが確認できる。これらの動的応答は、風車ロータの回転を考慮したこと由来するものであると考えられる。なお、十分時間がたった後には、ピッチ角は表 2 に示す静的ピッチ角に一致している。以上、風車を搭載した浮体の動揺解析にあたっては、ロータ回転を考慮することが重要である。

### 参考文献

- 1) 山口雄嗣, 村井基彦, 井上義行：風車の回転を考慮した SPAR 型洋上風力発電施設の波浪中動揺に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 4 号, pp.279-282, 2007.
- 2) 関田欣治, 臼井慧介, 宮島省吾, 矢後清和, 大村優太：浮体式風力発電の回転・並進動揺による風荷重と発電量影響に関する模型実験, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.997-1002, 2007.

表 2 洋上風車に作用する風荷重および静的ピッチ  $\theta$

	風速[m/s]	ブレード設定角 [度]	ロータに作用する風荷重[kN]	タワーに作用する風荷重[kN]	$\theta$ [度]
定格風速	13	7.7	259	17.3	8.5
カットアウト風速	25	26.0	159	63.8	6.0

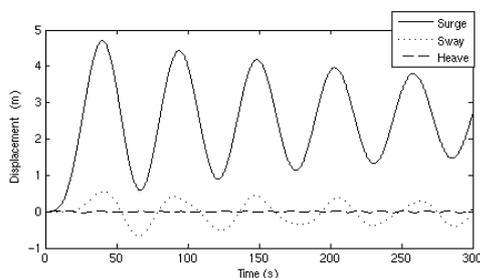


図 3 浮体基礎の並進動揺

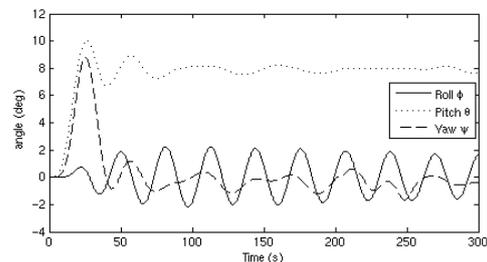


図 4 浮体基礎の回転動揺

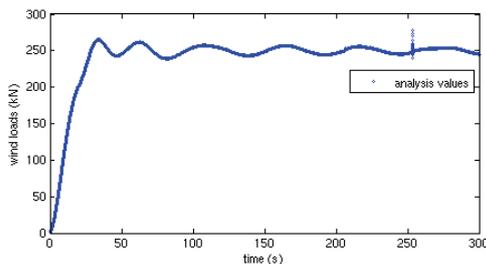


図 5 風荷重の変動

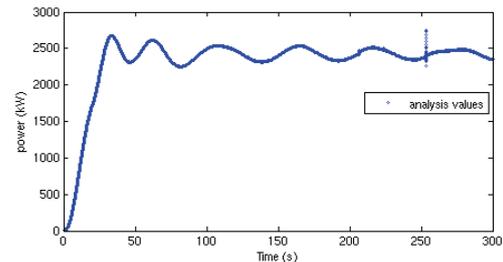


図 6 風車を取り出すパワーの変動