

# PS-38 浮体式洋上風力発電施設の浮体構造に働く荷重について

※平尾 仲達\*、穴井 陽祐\*\*、松井 亨介\*、二村 正\*、下里 耕平\*  
 中條 俊樹\*、羽田 絢\*、谷口 友基\*、石田 茂資\*、井上 俊司\*  
 \*洋上再生エネルギー開発系、\*\*構造安全評価系(研究当時：洋上再生エネルギー開発系)

## 1. 緒言

浮体式洋上風力発電施設（以下 FOWT と略す）の挙動評価では、従来の浮体式海洋構造物と異なり、ブレードピッチ制御も含めて環境外力が複雑であることから、空力荷重と水理荷重の連成一体時系列解析が求められるのが一般的である。しかし、浮体運動や風車挙動についての解析例が先行している一方で、浮体構造の曲げモーメント、剪断力等の内力の解析については開発途上にある。本研究では、スパー型の FOWT を対象にマルチ・ボディ・ダイナミクス(以下 MBD と略す)を利用した連成一体解析手法を開発した。また、バックボーンを有する FOWT 模型を用いた水槽試験法を開発し、荷重分布計測した。

また、FOWT は、動揺環境で長期間運用されるため、風車の稼動状況だけでなく構造健全性についてもモニタリングする事が望ましい。これらを簡易に行うため、計測が容易な浮体運動から各部の荷重・応力を推定する手法を開発した。

## 2. MBD を用いた風・波中の連成一体解析

分布荷重を算出するにあたり、MBD を用いた。MBD とは、構造物を複数の要素物体で構成されるシステムとして表し、各要素物体の運動および相互結合力を解析する手法である(図-2)。MBD の計算をするにあたって、風車に作用する外力は AERODYN を用いて算出し、波の外力の分布は WAMIT を用いて算出した。計算のフローを図-4 に示す。図-3 は計算に用いた MBD のモデルで、横方向の線は分割箇所である。

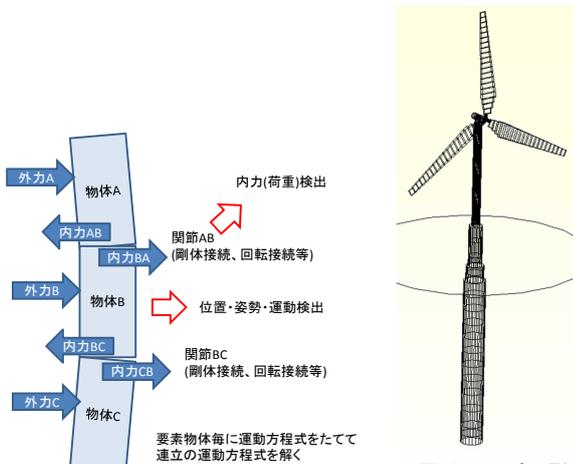


図-2 MBD イメージ図

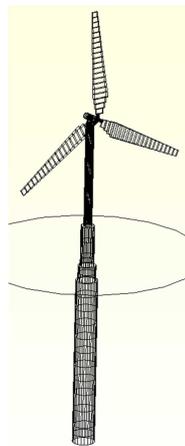


図-3 スパー型 FOWT の MBD モデル

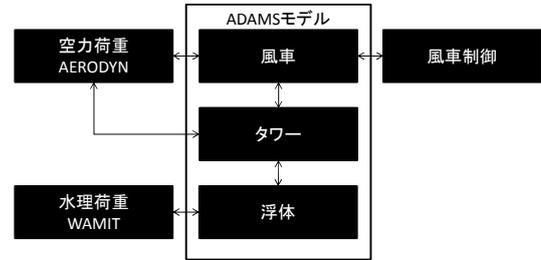


図-4 計算フロー図

## 3. 水槽試験

荷重分布計測のため、バックボーン模型による水槽試験法を開発し、スパー型浮体に適用した。

### 3.1 模型概要

供試模型は、2MW 機を搭載するスパー型 FOWT の 1/50 模型である(図-1)。スパーの中心にアルミ製のバックボーンを通し、断面 1~4 に歪ゲージを貼付して荷重分布を取得した。図中に座標系の定義を示す。

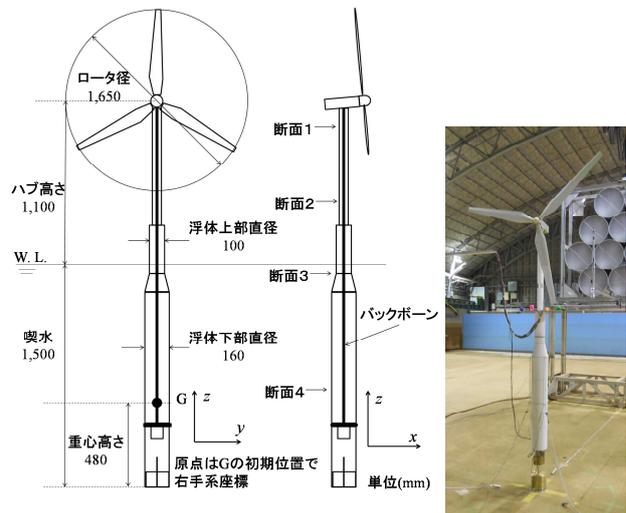


図-1 模型概要

### 3.2 水槽試験条件

試験条件を表-1 に示す。波と風は同一方向から模型正面に入射するものとした。風は無風状態、発電時(定格風速)、待機時(強風)の3種類を想定した。波は、規則波、一方向不規則波、多方向不規則波(cos<sup>2</sup>分布)を用いた。

表-1 試験条件

	風速 (m/s)	規則波		不規則波	
		波高	波周期	有義波高	有義波周期
		(m)	(sec.)	(m)	(sec.)
無風	—	0.040,0.060,0.080	1.0-2.4	0.040 0.120	1.27 1.70
発電時風速	1.84	0.040,0.060,0.080	1.0-2.4	0.040	1.27
待機時風速	4.95	0.040,0.060,0.080	1.0-2.4	0.120	1.70

### 3. 3 水槽試験結果

例として無風規則波中の周波数応答を図-5～図-7に示す。サージ  $X$ 、ピッチ  $\Theta$ 、及び断面3の  $y$  軸回りの曲げモーメント  $My_3$  の無次元値を示す。ここで、 $\zeta$  は波振幅、 $k$  は波数、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $\nabla$  は排水体積である。

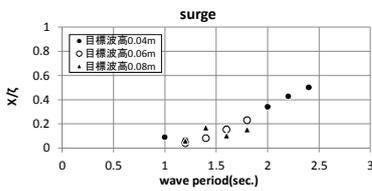


図-5 無風規則波試験・サージ運動

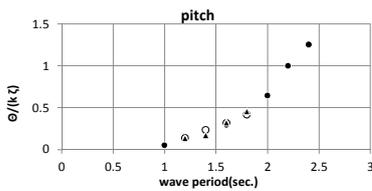


図-6 無風規則波試験・ピッチ運動

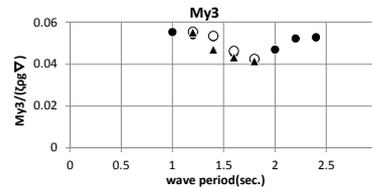


図-7 無風規則波試験・断面3の  $y$  軸回り曲げモーメント

### 4. 解析結果と水槽試験結果の比較

前述の解析の結果と水槽試験の結果を比較した。 $y$  軸回りの曲げモーメント分布を図-8に示す。MBDによる数値計算結果は、実験結果を概ね推定できている。

### 5. 荷重・応力モニタリング手法

上記の手法は、海象（風、波、流れ）を入力とするが、実海域で海象を常時計測することは必ずしも容易ではない。そこで、計測の比較的容易な浮体運動から荷重・応力を推定する手法を開発した。本手法の対象は、支持構造物（タワー部及び浮体施設部）において、運動と荷重の線形応答、荷重と応力の線形応答が仮定できるものである。

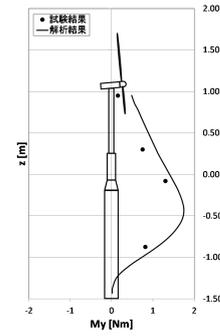


図-8 曲げモーメント分布

(数値計算結果と水槽試験結果・無風、波高0.04m、周期1.4秒)

### 5. 1 荷重推定手法

荷重推定手法では、運動と荷重の周波数応答から相関を近似的に求め、運動の時系列から荷重の時系列を推定する。水槽試験の結果に本手法を適用した例を図-9に示す。図中の破線は、断面3の  $y$  軸回りの曲げモーメントの推定値であり、実線は計測値である。実線と破線は概ね一致しており、推定手法の有用性を示すことができた。

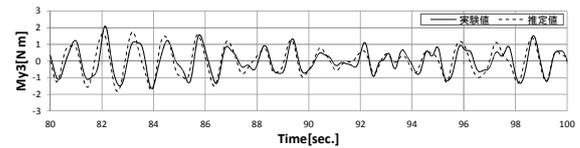


図-9 曲げモーメントの試験結果と推定の時系列

(無風・一方向不規則、波有義波高0.040m)

### 5. 2 応力推定と余寿命評価

構造物の健全性を評価するためには応力をモニタリングする必要がある。応力集中が懸念される複雑な部位の応力は、以下の手順で推定可能である。

- ①対象部位を含む適当な構造要素に弾性有限要素解析を実施し、その構造要素の境界に作用する荷重と応力の相関を求める。
- ②境界に作用する荷重として、上記手法で求めた荷重を適用する。

この場合、構造要素の境界は、局部応力の影響が小さい(MBDで推定しやすい)断面とする必要がある。

上記手法によって、浮体運動から応力の時系列が推定可能である。このデータを解析することで余寿命評価も可能になると考えられる。

### 6. 結言

スパー型 FOWT における分布荷重を MBD により算出する手法を確立した。また、バックボーンを有する FOWT 模型を用いた水槽試験法を開発し、荷重分布計測することに成功した。荷重・応力モニタリング手法の開発により、運動時系列から荷重時系列を評価した。推定荷重から、応力、疲労余寿命評価が可能になる。