

# 浮体式洋上風車の暴風時の動揺特性に関する水槽試験

海洋再生可能エネルギー導入に向けた可能性評価

## Tank Test on Disturbance Characteristics of Floating Offshore Wind Turbines during Storms

Feasibility evaluation on the implementation of ocean renewable energy

(電力技術研究所 土木技術G 水理T)

(Hydraulic Team, Civil Engineering Group, Electric Power Research and Development Center)

浮体式洋上風車を対象として暴風波浪時における動揺特性を評価する水槽試験を実施した。試験対象とする浮体式風車は、5MWダウンウィンド風車とし、スパー型浮体ならびにセミサブ型浮体にそれぞれ搭載した形式を想定した。この試験の結果、浮体形式毎に特徴的な動揺特性があること、また、いずれの形式も動揺量は十分に小さいレベルであることを確認した。

We conducted a water tank test to evaluate the disturbance characteristics of floating offshore wind turbines related to extreme waves during storms. The floating wind turbines tested were 5 MW downwind turbines mounted on a spar type floating body and a semi-submerged floating body. As a result of this test, it was confirmed that there are distinct disturbance characteristics for each floating type, and that the amount of disturbance is sufficiently small for all types.

### 1 はじめに

浮体式洋上風力発電は、賦存量の大きさから将来の再生可能エネルギーとして期待される技術であり、現在、国内外で実証試験が行われている。この新しい技術の導入可能性を見極める上でも、当該技術のリスク評価を適切に行うことは重要である。陸上風車と異なり、洋上の浮体式風車は風や波等の外力を受けて動揺する。浮体式風車の発電性能や構造部材の強度などの諸性能は、動揺の程度に影響されることから、その動揺特性を正しく評価しておく必要がある。本稿では、第1ステップとして、浮体式風車の受ける外力が最大となる暴風波浪時（発電停止時）を対象として、日本周辺海域の風波条件下における浮体式風車の動揺特性を、水槽試験により評価したので、その結果について報告する。

浮体を検討対象として選定した。

模型の縮尺率は1/70に設定した。水槽試験用模型の主な諸元を第1表に、外観を第1図に示す。この縮尺では暴風時における乱流状態は保持されているものの、翼に対する空気粘性の影響がやや大きいため、翼形状をそのまま縮尺したのでは、風車に作用する風荷重が試験モデルでは過小になってしまう。そこで、暴風時に想定される動揺角を考慮した迎角（風と翼のなす角）の範囲（-10deg ~ 10deg）で、翼に働く風荷重が相似となるような平板翼を新たに設計し、模型の翼に採用した。

### 2 水槽試験用模型の設計

試験対象とする浮体式洋上風車は、5MWダウンウィンド風車をスパー型（円筒型）浮体ならびにセミサブ型（半没水型）浮体にそれぞれ搭載した形式を想定した（第1図参照）。想定した実機風車はNREL（米国再生可能エネルギー研究所）が提唱した5MW風車を参考にダウンウィンド風車用に微修正した諸元とした。ダウンウィンド風車は、風を受けるロータが風下に配置された風車であり、風向きに対する姿勢の安定性に優れ、風車が傾いた際の受風面積の減少も小さいなど、浮体式にとっての利点を有している。想定した実機浮体は、国内外で実施されている実証試験機（主に2MW風車搭載浮体）を参考に、浮体としての復原力（浮体が傾いたときに姿勢を保とうとする力）が相似となるようにスケールアップした。なお、スパー型は単純な円筒形状であるがセミサブ型は様々な形状が可能であるため、ここでは従来式の中でも軽量で経済的と考えられる三本カラム式のセミサブ

第1表 試験対象とした浮体式風車の主な諸元

	項目	スパー型	セミサブ型
風車	ロータ直径	126m (1.80m)	
	ハブ高さ	83m (1.19m)	
	風車質量	345t (1.0kg)	
浮体	喫水	106m (1.52m)	16m (0.23m)
	最大幅	11m (0.16m)	88m (1.25m)
	排水質量	9,610t (27.3kg)	10,609t (30.2kg)

※括弧内は模型量

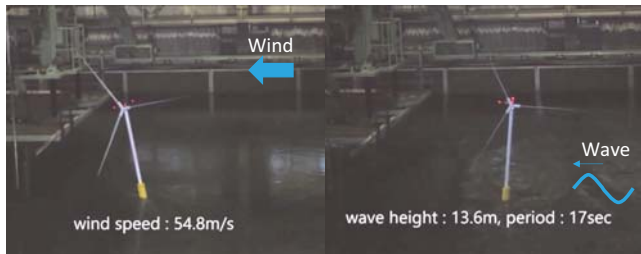


第1図 模型の外観(左図：スパー型、右図：セミサブ型)

### 3 水槽試験

製作した浮体式洋上風車模型を当社試験水槽（水深

3m×幅23m×長さ30m) に浮かべてチェーン係留した。まず、模型を自由振動させて固有周期を調べ、浮体式風車模型が設計どおりに実機を再現しているか確認した。その後、生起確率50年相当の極値風・波浪(平均風速54.8m/s、有義波高13.6m/s、有義波周期17s)を作用させた試験を行い、各浮体式風車の動揺特性を調べた(第2図参照)。



第2図 水槽試験の様子

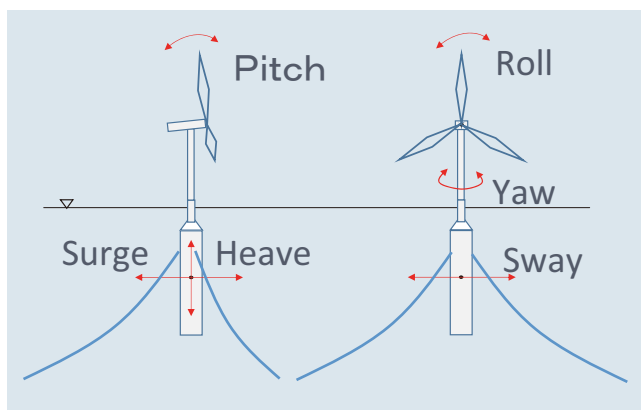
### (1) 固有周期

第2表に水槽試験で確認した6自由度毎の固有周期を設計値とともに示す。なお、6自由度の定義は第3図のとおりである。試験値と設計値の比を見ると、2形式ともに概ね10%以内の誤差となっている。スパー型のYawの試験値が小さいのは、試験に用いた市販チェーンの単位長さ当たりの重量が設計よりもやや大きく、それが大きく影響したためと考えられる。浮体の浮力が主な復原力となるHeave、Pitch、Rollの固有周期はスパー型のほうがセミサブ型より大きく、浮体としての特徴が現れている。

第2表 模型風車の固有周期の比較

スパー型			
自由度	設計値	試験値	試験/設計
Surge	122.3s	112.1s	0.92
Heave	33.7s	34.3s	1.02
Pitch	36.8s	36.8s	1.00
Yaw	19.7s	12.5s	0.63
セミサブ型			
自由度	設計値	試験値	試験/設計
Surge	158.5s	143.9s	0.91
Heave	15.4s	18.4s	1.19
Pitch	22.2s	24.3s	1.09
Yaw	81.5s	79.5s	0.98

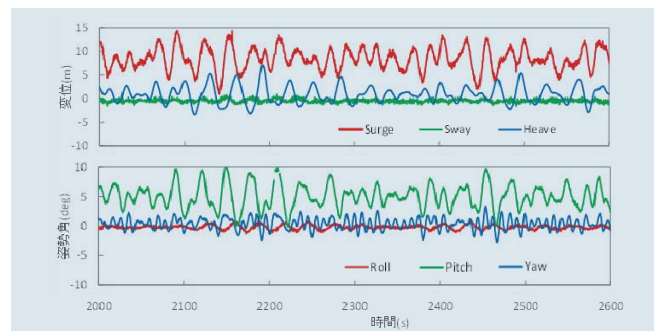
※Sway, RollはそれぞれSurge, Pitchとほぼ同じため省略



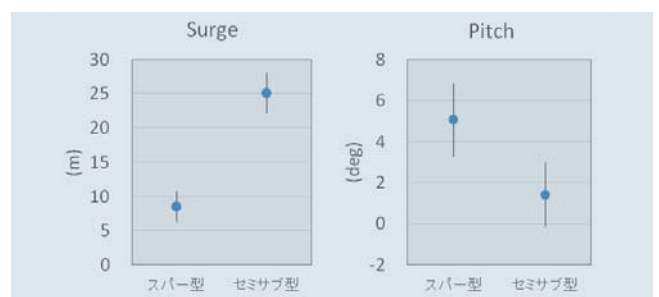
第3図 浮体の6自由度

### (2) 風・波浪応答

第4図にスパー型に風と波浪を同時に作用させた時の模型の動揺の時系列変化の一例を示す。風・波浪の主方向であるSurgeとPitchが大きく振動しており、その振動に伴いHeaveやYawがやや小さく振動していることがわかる。大きな振動のSurgeとPitchについて、浮体毎の比較を第5図に示す。本図は傾き(Pitch平均値)や水平移動量(Surge平均値)とともに、振動幅をその標準偏差で示している。スパー型は約8m移動し、約5°傾き±2°で振動した。一方、セミサブ型は約25m移動し、約2°傾き幅±2°で振動した。このようにスパー型はPitch方向の傾斜が大きく、セミサブ型はSurge方向の水平移動が大きい結果となった。スパー型は固有周期を長めに設定できるが、それに伴い浮力による復原力が小さくなり傾斜角が大きくなる傾向がある。セミサブ型は、喫水を浅くできる反面、水面付近の垂直投影面積が大きくなるため、波力や風荷重を受けやすく水平移動が大きくなる傾向にある。ただし、6自由度の動揺の値そのものは両浮体とも十分に小さいレベルにあると考えられる。



第4図 動揺の時系列変化の一例(スパー型)



第5図 風波応答の平均値(点)と標準偏差(縦棒)

## 4 おわりに

暴風波浪時を対象とした浮体式洋上風車の水槽試験を実施し、浮体形式毎に特徴的な動揺特性があること、また6自由度の動揺量は十分に小さいレベルであることを確認した。今後は、発電時を対象として風車制御に起因した浮体動揺や、ウエイク(後流)が浮体式風車の動揺に与える影響等を評価するための水槽試験を実施する予定である。



執筆者/杉山陽一