

# 浮体式洋上風車の荷重設計及び動揺安定性の評価技術

Evaluation of Design Loads and Instability of a 7MW Floating Offshore Wind Turbine



中村 昭裕<sup>\*1</sup>  
Akihiro Nakamura

林 義之<sup>\*2</sup>  
Yoshiyuki Hayashi

松下 崇俊<sup>\*3</sup>  
Takatoshi Matsushita

刈込 界<sup>\*4</sup>  
Kai Karikomi

本田 明弘<sup>\*5</sup>  
Akihiro Honda

太田 真<sup>\*6</sup>  
Makoto Ohta

浮体式洋上風力発電は、従来の着底式では設置困難な水深 50m 以上の海域で発電できる上、風速増加により発電量の増大が見込めるなどポテンシャルが高い。国内でも“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”が開始され、当社は世界最大級の 7MW 浮体式洋上風車を供給する。浮体に搭載する風車では、波浪による動揺に対する健全性と、風車制御ー浮体動揺の連成振動に対する安定性が要求される。当社では信頼性確保のため、シミュレーション技術と水槽・風洞試験技術を駆使した検討を実施してきた。今後予定されている福島沖の実証試験にて、浮体動揺特性、風車の荷重特性や制御安定性等に関する実機検証を行い、浮体式洋上風車の経済性と安全性の向上を目指す。

## 1. はじめに

東日本大震災後、福島復興を合言葉に、浮体式洋上ウインドファームの実証研究として“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”が 2011 年より開始され、国内外で耳目を集めている<sup>(1)</sup>。このプロジェクトでは、異なる3台の浮体式洋上風車が福島沖 20km の沖合いに係留され、発電された電力は海底に敷設された電力ケーブルを介して東北地方に送電される。本実証研究事業に参画している当社においては、世界最大級の浮体式洋上風車となる、V字形状をした半潜水型浮体(セミサブ型浮体)に 7MW 風車を搭載した浮体式洋上風車(以下 7MW 浮体風車)を建造中である<sup>(2)</sup>。

浮体上部に搭載する 7MW 風車として、着底式洋上風車である既存の機種<sup>(3)</sup>を用いるにあたり、浮体風車への適用において以下に述べるような2つの技術課題があった。

ひとつは、浮体動揺の影響を考慮した荷重設計である。タワー基部が海底に固定されている着底式洋上風車と異なり、浮体式洋上風車は波浪による動揺に常にさらされるため、浮体部分と風車部分を連結する支持構造部に作用する荷重は着底式に比べて増大する。

つぎに、浮体式風車特有の課題として、“ネガティブダンピング”と呼ばれる、風車制御系と浮体動揺の連成を原因とする不安定動揺の可能性がある。これは、風車ロータに働くスラスト力が、浮体風車の前後揺れ運動に対して負減衰力として作用することで発生する、自励振動である。この不安定動揺は浮体風車の健全性や支持構造に作用する疲労荷重へ悪影響を及ぼすため、浮体風車の設計において重要な問題である。

\*1 エネルギー環境ドメイン再生エネルギー事業部 洋上風車部

\*2 エネルギー環境ドメイン再生エネルギー事業部 洋上風車部 主席チーム統括

\*3 エネルギー環境ドメイン再生エネルギー事業部 洋上風車部 グループ長

\*4 技術統括本部 長崎研究所 博士(工学)

\*5 技術統括本部 長崎研究所 主席 博士(工学)

\*6 技術統括本部 長崎研究所

このような課題に対して、当社ではシミュレーション技術と水槽・風洞試験技術を活用し、両面からの取り組みを実施してきた。本稿では、浮体式洋上風車の設計荷重及び動揺安定性の評価技術を紹介する。

## 2. 浮体動揺の影響を考慮した荷重設計

### 2.1 風車－浮体連成荷重解析モデル

荷重設計にあたっては、はじめに、荷重設計ツールを用いて浮体風車の数値モデルを構築する必要がある。風車の荷重設計ツールは、マルチボディダイナミクスの手法に基づき風車を弾性はりの集合体として表現し、ロータ空力や制御を考慮しながら各部の変位と荷重を時刻暦で解析する、数値シミュレーションツールである。

陸上風車及び着底式洋上風車では機器認証の取得を必要とするために、荷重設計の過程においては、認証機関が承認した荷重設計ツールが使用される。しかしながら、新規分野である浮体風車においては、認証されたツールは未だ存在しない。当社では複数の荷重解析ツールを適用して各々の計算結果が同傾向であることを確認しつつ、国内外有数の大型試験設備と豊富な実験ノウハウを有する強みを生かして、水槽試験による検証を並行して実施しながら荷重設計を進めた。

解析対象である 7MW 浮体風車の主要目は表1の通りである。図1に 7MW 浮体風車の概念図、浮体運動座標系及び方位図を示す。

表1 7MW 浮体式洋上風車の主要目

|    |          |         |     |
|----|----------|---------|-----|
| 風車 | 定格出力     | 7       | MW  |
|    | ロータ位置    | アップウィンド | —   |
|    | ドライブトレイン | 油圧式     | —   |
|    | ロータ直径    | 167     | m   |
|    | ハブ高さ     | 105     | m   |
|    | 定格風速     | 12      | m/s |
| 浮体 | 型式       | V字型セミサブ | —   |
|    | 排水量      | 26000   | t   |
|    | 移動時喫水    | 17      | m   |

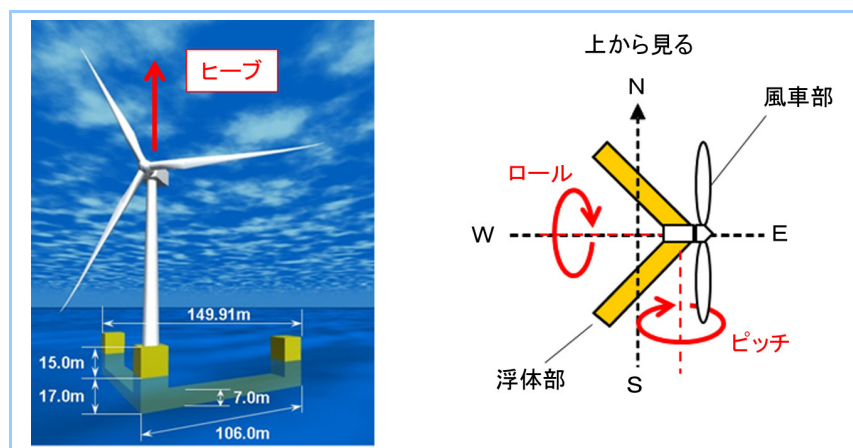


図1 7MW 浮体風車の概念図と運動座標系

### 2.2 計算モデルの妥当性検証

今回設計に用いた荷重設計ツールの精度は、風車部分に関しては、当社で実施したこれまでの陸上風車実証試験データとの比較検証により妥当性を確認している。浮体部分については未検証であるため、水槽試験を実施して得たデータを用いて検証をおこなった。

波浪中の浮体の運動を計測する試験を、当社所有の大型水槽設備である耐航性能水槽にて、縮率 1/64 の浮体模型を用いて実施した。図2に、波高が一定振幅で正弦波状に変化する“規則波”に対する浮体の応答振幅をプロットし、解析結果と試験結果を比較して示す。図中に

表記した“E波”“S波”は波向きを表し、それぞれ東からの波、南からの波である。この検証により、解析結果と試験結果においては、応答が増大する波周期や、浮体の同調周期(固有周期)が良く一致していることを確認できた。このような“規則波”は現実の海象状態では発生しない仮想条件で、上記のような浮体の基本特性である同調周期などの把握を目的としている。応答の定量値に関する精度は、実際の海象で発生しうる“不規則波”を用いて、次のように評価した。

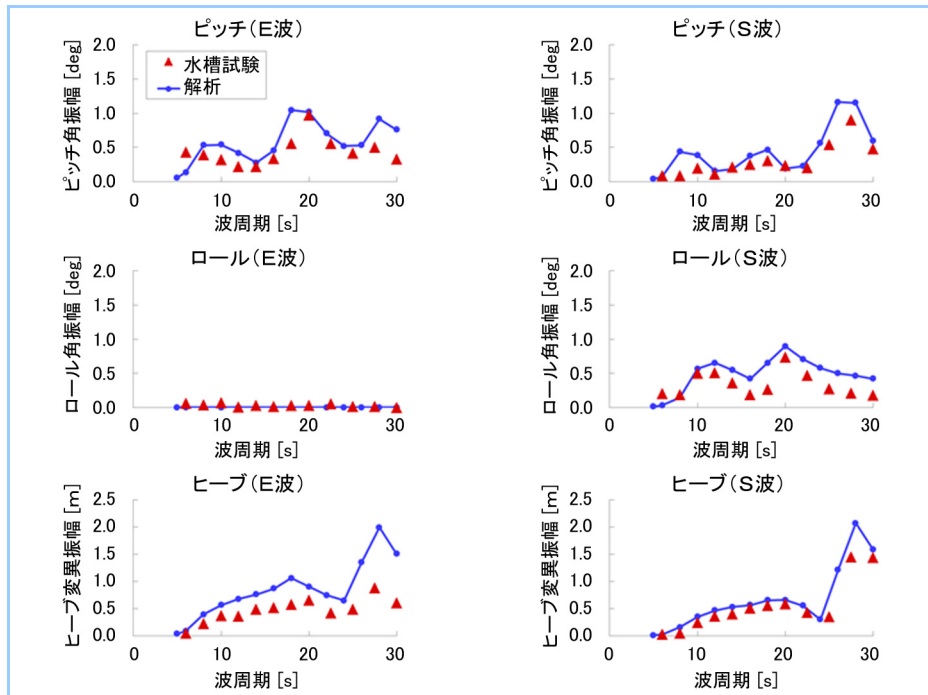


図2 規則波に対する浮体応答(水槽試験と解析の比較) 左列:E波, 右列:S波

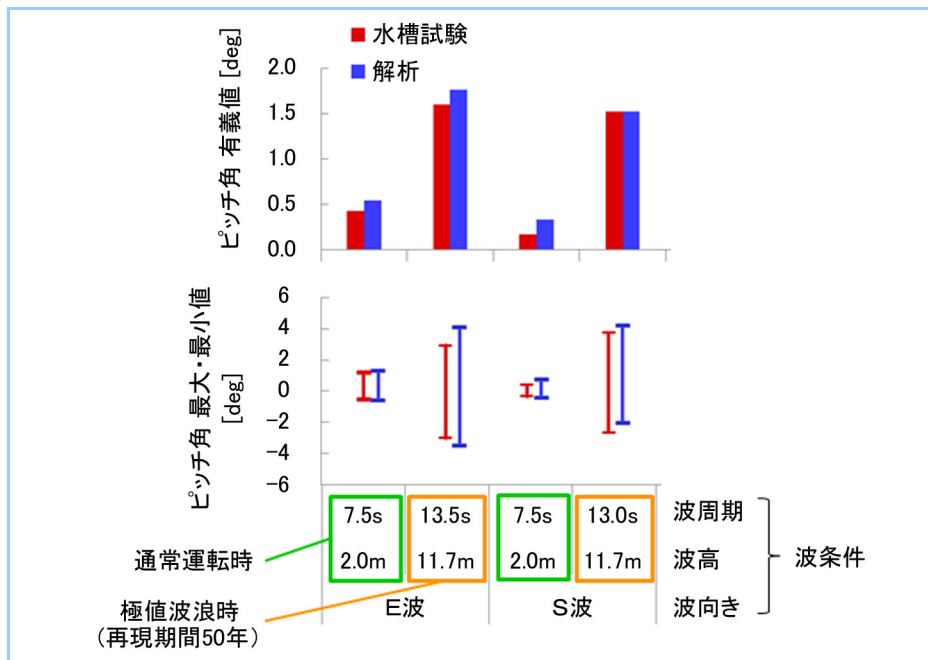


図3 不規則波に対する浮体応答(水槽試験と解析の比較)

複数の異なる波高と周期が重なった“不規則波”に対する浮体のピッチ方向の応答に関して時刻暦波形から抽出した統計量を、解析と試験で比較した。結果を図3に示す。不規則波の条件として、通常運転時と、再現期間50年の極値波浪時(運転停止)を想定した。それぞれの波向きにおいて解析結果は試験結果との良い一致を示しており、不規則波に対する浮体応答が解析により精度良く再現されていることがわかる。以上の検証から、荷重設計に用いる数値モデルの精度を確認できた。

## 2.3 設計荷重条件

設計荷重の計算では、浮体風車が設置される福島沖の気象と海象の条件(通年の気象や海象、暴風、波浪など)と、風車のさまざまな状態(通常運転、停止、故障)の組み合わせからなる設計荷重条件を設定した。当社浮体はV字形状で非軸対称であるため、波向きにより応答が異なることから、様々な風向と波向の組合せを考慮し、数千ケースからなるシミュレーションを実施した。気象海象条件は、“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”のコンソーシアムにて設定された条件を用いた(表2参照)。

表2 荷重計算に用いた福島沖環境条件の概要

| 項目           | 条件                  | 値    | 単位  |
|--------------|---------------------|------|-----|
| 風速<br>(ハブ高さ) | 年平均, 10 分間平均        | 7.6  | m/s |
|              | 再現期間 50 年, 10 分間平均  | 50.7 | m/s |
| 乱流強度         | 基準乱流強度              | 12   | %   |
| べき指数         | 発電時                 | 0.14 | —   |
|              | 暴風時                 | 0.1  | —   |
| 波            | 年平均, 平均有義波高         | 1.41 | m   |
|              | 年平均, 平均有義波周期        | 6.2  | s   |
|              | 再現期間 50 年, 3時間有義波高  | 11.7 | m   |
|              | 再現期間 50 年, 3時間有義波周期 | 13   | s   |
|              | 波のスペクトル:ピアソン・モスコビッツ |      |     |
| 水流           | 再現期間 50 年           | 1.5  | m/s |

波に関して“再現期間 50 年”と記載されている値は、台風や低気圧などによる暴風に伴って発生する極値波高を意味する。極値波高はタワー基部の設計荷重を支配する重要な荷重条件である。ただし、コンソーシアムより提示された極値波高は波の方位性まで考慮されておらず、波向きにより応答特性が異なる当社浮体に対してその値を全方位に一律に適用すると、過剰設計に繋がる恐れがあった。そこで当社では、長期にわたる沖波の実測データベース(国土交通省による NOWPHAS データ)を用いた極値統計解析を実施し、図4に示すような波の方位特性を考慮した設計波高モデルを算出し、荷重設計に適用した。この設計波高モデルによれば、陸側からの波(W波)が沖合いからの波(E波)に比べて0.6倍程度と減少しており、実現象が考慮された妥当な結果が得られている<sup>(4)</sup>。

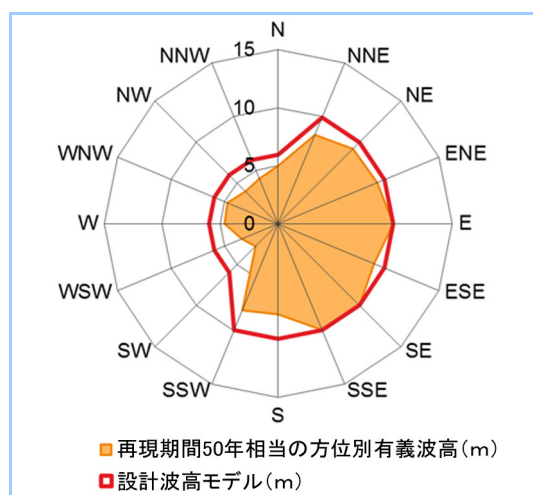


図4 方位別設計波高モデル

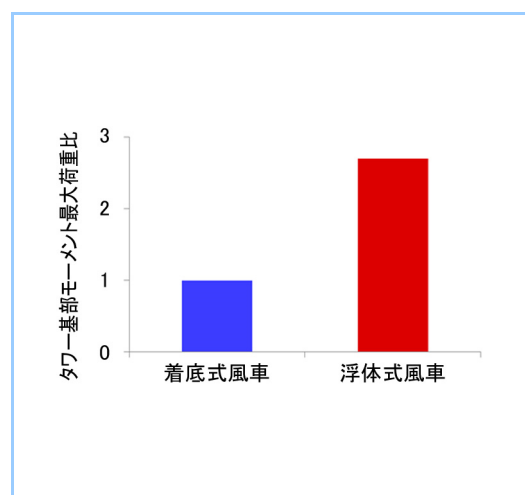


図5 タワー基部での最大モーメント(着底式風車と浮体式風車の比較)

## 2.4 荷重計算結果

再現期間 50 年の極値波高が発生した場合の、タワー基部に作用する最大モーメントを図5に示す。比較対象として、風車が浮体に搭載されていない場合、すなわち、着底式洋上風車の荷重を示す。浮体式風車でタワー基部に作用する荷重は、着底式に比べて約3倍に達する。この

要因は、風車の支持構造であるタワー基部においては、従来の風荷重に加えて、翼及びナセルといったタワートップ重量とその慣性力に由来する、浮体動揺に伴うモーメントが作用するためである。本荷重計算結果を反映し、浮体風車のタワー部分は着底式風車より体格を増強することで、耐荷重性の向上を図り設計されている。

### 3. 風車制御－浮体動揺の連成振動に関する安定性評価

先述したように、浮体式風車では、風車制御系と浮体動揺の連成を原因とする不安定動揺である“ネガティブダンピング”が発生する恐れがある。この自励振動が発生すると、浮体風車が大きく傾き重大事故につながるため、十全な検討が必要である。当社では荷重設計ツールによる検討に加えて、模型を用いた風洞試験により当社浮体の安定性評価を実施した。

ネガティブダンピングのメカニズムに関する模式図を図6に示す。風車の出力は、風速が増加すると風速の3乗に比例して増加するが、定格出力に達すると制御により翼の取り付け角度を変化させ、風速変化に対して一定の出力を保つ。これを“全負荷運転状態”と呼ぶ。その際、風車のロータ面に対して下流方向に作用する“スラスト力”は、風速増加に対して減少する特性を持つ。全負荷運転状態のとき、浮体風車が後傾するとナセルが風の下流側に移動し、ロータに流入する相対風速が減少するため、制御の影響によりスラスト力が増加する。すると、増加したスラスト力によってナセルがさらに下流側に押されるため、浮体がより一層後傾することになる。この繰り返しにより浮体風車の後傾が進み、浮体が不安定な状態となる。なお、ナセルが前傾した場合も同様のメカニズムで浮体風車が不安定化する。

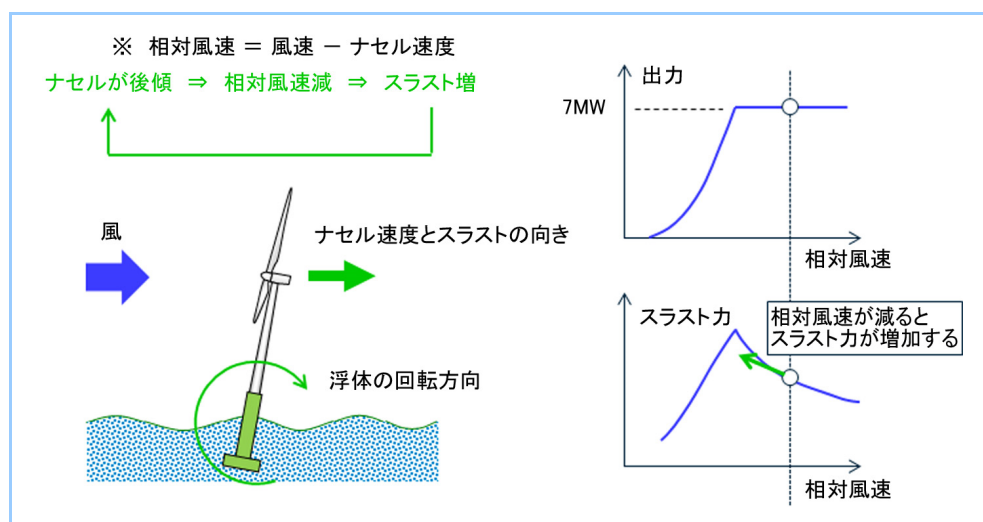


図6 ネガティブダンピングの発生メカニズム

風洞試験は当社所有の大型境界層風洞を使用した。浮体風車の模型を水面上に浮かべるため、風路床には小型水槽を設置した。縮尺 1/64 の風車模型は、実機と同様にロータ翼の風に対する角度を調整できるサーボ機構と制御装置を有し、実機と同等な発電性能とスラスト荷重を生み出す模型翼を装備している。図7に浮体風車模型を示す。

ネガティブダンピングは、スラスト力が負減衰として浮体風車に作用するため発生する振動である。よって、浮体の安定性は、浮体に働く流体による正減衰力と、スラスト力による負減衰力とのバランスに依存する。すなわち、流体減衰力が十分大きい浮体は安定であり、ネガティブダンピングが発生しない。この確認のために、減衰力がほぼ0に等しい模型(ロッキングモデル風車模型)を別途製作し、当社浮体風車模型との比較対象とした。ロッキングモデル風車模型は、前後方向に回転可能のようにタワー基部の下で軸受とばねにより支持されており、風車が前後に動揺する様子を再現できる。なお、固有周期と復原力は浮体模型と一致するよう調整されている。図8にロッキングモデル風車模型を示す。



図7 浮体式風車模型

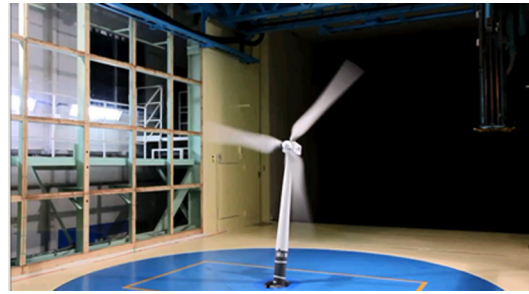


図8 ロッキングモデル風車模型

図9に示す安定性評価試験時の写真で、不安定動揺により風車が大きく後傾している。

試験においては、風洞の風速を風車が定格出力で運転する風速域に設定し、風車が発電している状態を模擬したうえで、その際の浮体風車の前後方向の回転角(図1のピッチ角)等を計測した。試験結果を図9に示す。ロッキングモデル風車試験では、時間の経過とともに浮体の前後方向の応答(浮体ピッチ)が増大しており、ネガティブダンピングが発生していることが良く捉えられている。なお、図10に示すように、ロッキングモデル風車では不安定動揺が成長する様子がよくわかる。一方で、図9に示したように、実際の浮体風車を用いた試験では浮体の応答はほぼ一定であり、当社浮体は流体による減衰力が十分大きいとネガティブダンピングが発生せず、安定であることが確認できた。

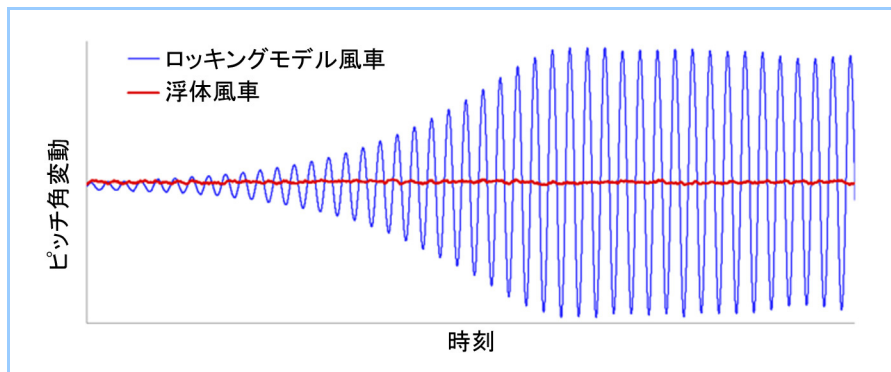


図9 風洞試験による安定性評価試験結果

縦軸は風車前後方向の回転角(ピッチ角)を表す。流体減衰力が十分大きい浮体風車は安定で、減衰力が0であるロッキングモデル風車は不安定である。

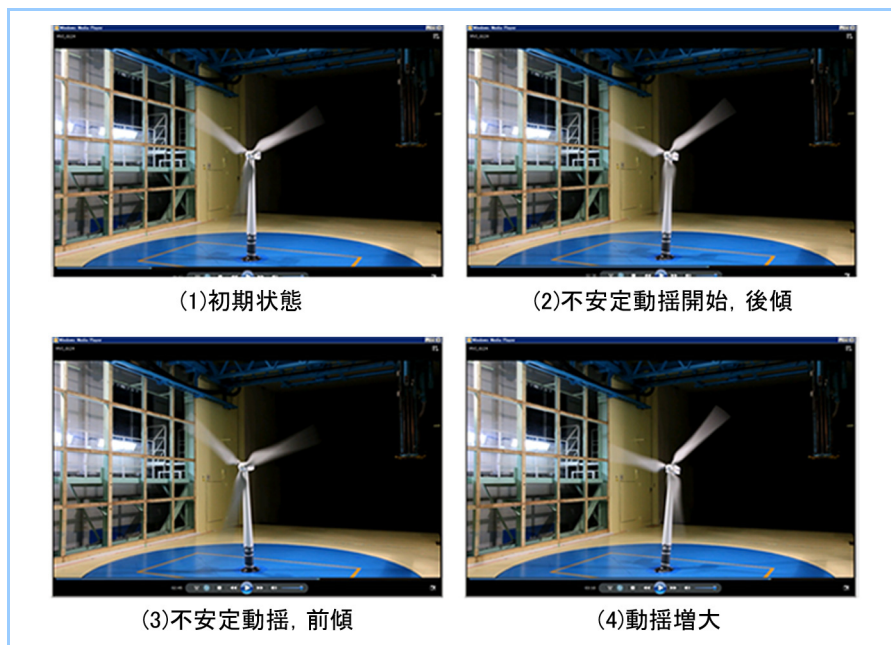


図10 ロッキングモデル風車で不安定動揺が成長する様子

## 4. まとめ

“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”にて当社が供給する 7MW 浮体式洋上風車について、波浪による動揺に対する風車の健全性と、風車制御－浮体動揺の連成振動に対する安定性について検証を実施した。

今後予定されている福島沖の実証試験では、浮体風車の運動性能、荷重特性、制御安定性等に関する実機検証を行い、浮体式洋上風車の経済性及び安全性の向上を目指す予定である。

## 参考文献

- (1) 福島洋上風力コンソーシアム(2011), Fukushima floating offshore wind farm demonstration project, <http://www.fukushima-forward.jp/pdf/pamphlet3.pdf>
- (2) 太田真ほか, 日本の海域に調和する洋上風車浮体の開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.2 (2013)
- (3) 宇摩谷雅英ほか, 風力発電(洋上風車の開発状況), 三菱重工技報 Vol.50 No.3 (2013)
- (4) 本田明弘ほか, 洋上風力発電設備における波の設計条件に関する方位性の導入, 日本風力エネルギー学会論文集 第 37 巻第2号(2013)