

## 海底接触式コンプライアント洋上風車の浅海域における動揺応答特性に関する研究 Dynamic response of offshore wind turbine placed on seabed in shallow sea

学籍番号 47-146651 広川英司  
指導教員 鈴木英之 教授  
平林紳一郎 講師

(平成 28 年 8 月 24 日発表予定)

Keywords: 海底接触式コンプライアント洋上風車, 浅海域, 動揺応答解析, パラメトリック励振

Keywords: Wind turbine placed on seabed, shallow sea, dynamic response, parametric excitation

### 1. 研究背景・目的

洋上風力発電は、着底式と浮体式に大別される。水深によって着底式と浮体式は使い分けられ、着底式は水深 30m 以下の海域で、浮体式は水深 100m 以上の海域で開発が進んでいる。着底式は深い海域では外力によって下端の基礎構造に働くモーメントが大きくなり、それを支持するために基礎構造が大規模化する問題がある。また、浮体式は浅い海域では係留索の張力変動が大きくなるという問題がある。石原 (2012)[1] の推定によれば、現在洋上風車の活用が難しい水深 30~100 m の海域に大きな未利用風力エネルギーが存在する。従って、現在開発が困難なこの海域で風車を活用することには大きな意義がある。

本研究では、この海域を活用する風車として、浮体式風車を緩やかに海底に着底させる海底接触式コンプライアント洋上風車（以下接触式風車）を提案する。この風車では、タワー下端で回転を許すことで曲げモーメントを緩和し、また着底させることにより係留索の使用を回避する。下端で回転を許す機構の一例として、プラットフォームを海底に作った碗状の窪みに緩やかに据え置く方法等が挙げられる。課題としては風や波による傾斜角および下端支持部での上下方向、左右方向の静的および変動支持力がどの程度になり、設計として現実性があるか明らかにする必要がある。

本研究では、接触式風車の浅海域での動揺応答特性に焦点を当て、以下の 3 つを目的とする。(1) 接触式風車とその設計方針の提案、(2) 運動方程式の定式化と動揺応答特性の把握、(3) 実海域環境での成立性の検討。

関連研究として、下端で回転が可能なタワーとして Articulated Tower と呼ばれる海洋構造物を洋上風力発電に用いる関田ら (2003) [2] や Philip ら (2015) [3] の研究がある。また浅海域での洋上風車プロジェクトとして、GICON は、水深 30 m で適用可能な TLP を開発中である [4]。浅海域でのカテナリー係留にも、これまでに様々な方法が提案されており、複合索係留、中間シンカー、中間ブイなどの方法がある [5]。

### 2. 接触式風車の提案と設計方針

提案する接触式風車のイメージを Figure 1 に示す。接触式風車の下端は曲面となっており、この曲面に沿って傾斜することが可能である。

接触式風車の設計において、最大傾斜角と固有周期が重要となる。以下に定常傾斜角および固有周期を求める式を示す。

$$\theta_0 = \frac{M_{thrust} + M_{tower}}{\rho g V \cdot (\overline{KB} - r) + mg \cdot (r - \overline{KG})} \quad (1)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I + I_a}{\rho g V \cdot (\overline{KB} - r) + mg \cdot (r - \overline{KG})}} \quad (2)$$

ここで  $\theta_0$  は定常傾斜角、 $T$  は固有周期、 $M_{thrust}$  は風車に働くスラスト力、 $M_{tower}$  は風車タワーに働く風抗力、 $I$  は接触式風車の慣性モーメント、 $I_a$  は接触式風車の付加慣性モーメント、 $\rho$  は海水密度、 $g$  は重力加速度、 $m$  は接触式構造物の質量、 $\overline{KB}$  は接触式風車下端から浮心までの距離、 $\overline{KG}$  は接触式風車下端から重心までの距離、 $r$  は接触式風車底面部の曲率半径である。これらの式から

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I + I_a}{M_{thrust} + M_{tower}}} \theta_0 \quad (3)$$

と表せることから、この拘束条件下で以下の二つの設計方針が考えられる。(1) 定常傾斜角  $\theta_0$  を小さくし、同時に固有周期  $T$  も小さくする。(2) 定常傾斜角  $\theta_0$  は小さくするが、慣性モーメント・付加慣性モーメント  $I + I_a$  を大きくすることで固有周期  $T$  は大きくする。

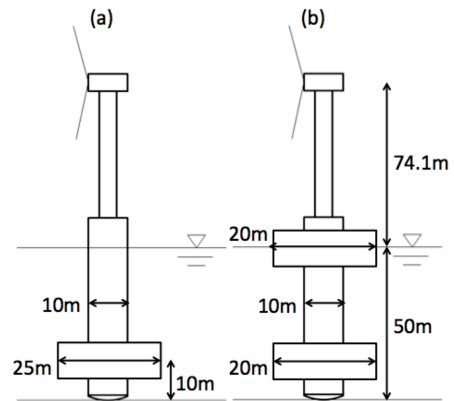


Fig. 1 Example of design of softsettled wind turbine with 5MW wind turbine in 50 m water depth.

固有周期を小さくするための設計方針と課題は以下のようにまとめられる。(1) 浮力 × 浮心-重心間距離を大きくする。ただし、浮心-重心間距離は水深によって制約を受ける。浅海域では特に制約がきびしくなる。(2) 重量を浮力に比べて大きくする。ただし、重量の増加はコスト増につながる可能性がある。(3) 重心高さに比べて底面の曲率半径を大きくする。ただし、曲率半径の上限はタワー半径によって制約される。

固有周期を大きくするための設計方針と課題は以下のようにまとめられる。(1) 高い位置で重量を増やす。ただし、これによって定常傾斜角は大きくなる。(2) 高い位置で浮体を大きくする。ただし、固有周期は大きくなりやすく、また重量も増やさなければならなくなる可能性がある。

### 3. 運動方程式

運動方程式は二次元物体固定座標系で立てる。運動の角速度は小さいので、遠心力、コリオリ力は無視する。運動方程式で用いる外力とタワーの関係は Figure 2 に示す。xz 座標系は空間固定座標系を、XZ 座標系は物体固定座標系を表す。Figure 2 はタワー傾斜角が  $\theta$  のときを表す。タワーは風車部分でスラスト力を受け、また支柱部分で風による抗力を受ける。水面下では波力を受ける。タワー下端では、地面からの反力を受ける。タワーはこの他に、重力と浮力を受ける。これらより、回転方向、X 方向、Z 方向の運動方程式はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$I\ddot{\theta} = M_{wind} + M_{wave} - C\dot{\theta} - (\rho g V(t, \theta) \cdot (\overline{KB}(t, \theta) - r) + mg \cdot (r - \overline{KG})) \sin \theta \quad (4)$$

$$m\ddot{X} = \int \Delta m \ddot{\theta} z dz + f_{wave_x} + f_{wind_x} + F_X - (\rho g V(t, \theta) - mg) \sin \theta \quad (5)$$

$$m\ddot{Z} = f_{wave_z} + f_{wind_z} + F_Z + (\rho g V(t, \theta) - mg) \cos \theta \quad (6)$$

ここで、 $\theta$  はタワー傾斜角、 $X$  はタワー X 方向変位、 $Z$  はタワー Z 方向変位、 $C$  は線形減衰係数、 $\Delta m$  は高さ幅  $dz$  あたりのタワー質量、 $M_{wave}$  は波による回転モーメント、 $M_{wind}$  は風による回転モーメント、 $f_{wave_x}$  は X 方向波力、 $f_{wave_z}$  は Z 方向波力、 $f_{wind_x}$  は X 方向風抗力、 $f_{wind_z}$  は Z 方向風抗力、 $F_X$  は下端での X 方向摩擦、 $F_Z$  は下端での Z 方向反力である。

風による回転モーメントは風車を受けるスラスト力とタワーが受ける風抗力を考慮している。スラスト力は定格出力に達した時点で最大となり、カットイン風速以下およびカットアウト風速以上ではフェザリングにより 0 となる。

タワー直交方向波力には修正モリソン式を用いる。修正モリソン式中のディフラクションの項から付加慣性モーメントを導出する。タワー軸方向波力はフルードクリロフ力と付加質量から導出する。波面上昇の影響は Wheeler Stretching を用いて考慮した。

付加質量係数  $C_M$  については大塚ら (1993) [6] による KC 数を用いた推定法を用いた。

重量と浮力による復原モーメントは底面の曲率の影響を踏まえ考慮した。特に浮力については没水体積の変化を考慮する定式化を行った。これにより、運動方程式の形式からパラメトリック励振の発生が予想される。

### 4. 模型実験

接触式プラットフォームの周波数領域、時間領域での応答を調べるため、規則波実験を行った。実験は 2016 年 6 月 3 日から 6 月 17 日まで、東京大学柏キャンパス環境棟 172 号室にある変動風波水槽を用いて行った。実機スケールは水深 50 m の海域を想定し、模型スケールは 1/100 とした。プラットフォームには固有周波数は 0.6 Hz のものを採用した。観測した周波数はフルード則および水槽の性能から波振幅に応じて 0.9~1.5 Hz とした。

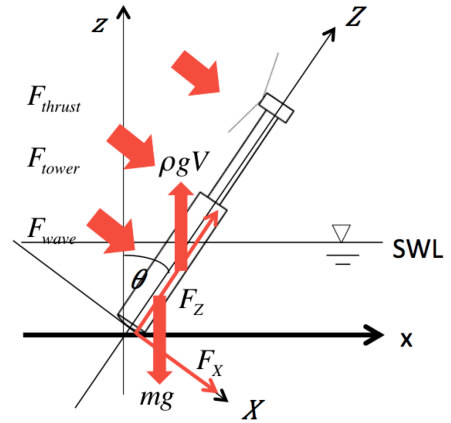


Fig. 2 Coordinate and forces to softsettled wind turbine.

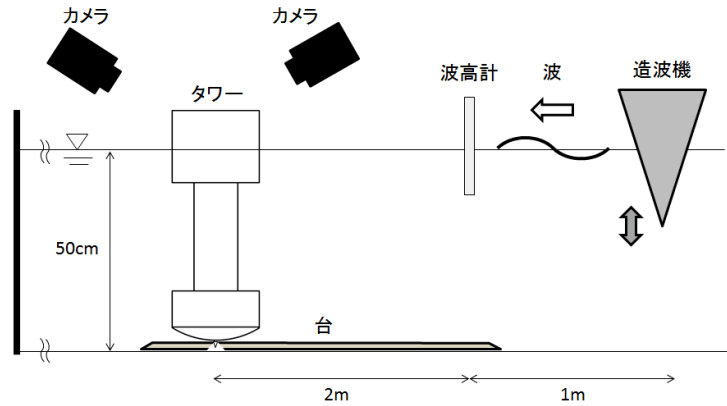


Fig. 3 Experiment system.

Fig.3 に実験の全体像を示す。計測には、タワーの動揺を記録する2台のモーションキャプチャーカメラと、波面上昇を記録する波高計を用いる。波進行方向を x 軸負方向とし、x 方向の回転角をピッチ角、y 方向の回転角をロール角とし、モーションキャプチャーで計測したの x、y 方向変位からそれぞれの方向への傾斜角を求めた。

Fig.4 に周波数領域での応答を示す。縦軸には複数の周波数成分を含む時系列応答の最大値と最小値から得られる振幅を波振幅で割った値をプロットした。実験データである赤点と青点を見ると、波振幅によって非線形性が現れることがわかる。

Fig.5 は波周波数 1.2 Hz、波振幅 1.0 cm の応答である。周波数成分は、波周波数の 1.2 Hz 周辺以外にもう一つ 0.6 Hz 周辺の成分が含まれている。これらの 0.6 Hz 周辺の成分はパラメトリック励振によって生じていると考えられる。波周波数成分は x 方向に働いているのに対し、没水体積の変化によって生じるパラメトリック励振は方向性を持たないため、波振幅が大きい場合の y 方向の運動では顕著になっている。

## 5. 数値計算

実験で使用した接触式プラットフォームと同じ形状、重心位置、慣性モーメントの形状を数値計算上で再現し、応答を調べた。抗力係数、波振幅を変えて計算した結果を Fig.4 に示す。グラフから次のことが読み取れる。

まず、固有周波数である 0.6 Hz 周辺と、パラメトリック励振が起こる 1.3 Hz 周辺にピークがある。

次に、抗力係数による応答の違いが見られる。抗力係数が小さいほど、各ピーク周辺の応答は大きくなっている。1.3 Hz 周辺のピークの幅は抗力係数が大きいものほど狭くなっている様子がわかる。このことから、抗力係数が大きくなるにつれて、パラメトリック励振が起こる周波数が限定されていくことがわかる。

さらに、波振幅による非線形影響が見られる。0.6 Hz 周辺の応答においては、波振幅が小さいときのピークの方が大きくなっている。一方、1.3 Hz 周辺の応答においては、波振幅が大きいときのピークの方が大きい。

0.6 Hz 周辺の応答については、二つの理由が考えられる。一つ目は抗力の影響である。抗力是非線形項であり、傾斜角が大きいほどよく働く。傾斜角振幅は波振幅が大きい方が大きいため、抗力によって応答を抑制する効果が波振幅が大きいものほどよく働く。二つ目は没水体積の増加の影響である。傾斜角が大きいほど没水体積は大きくなる。没水体積の増加は復元モーメントの増加になるため、波振幅が大きいときほど運動を抑制する力が強く働く。これらの理由から、0.6 Hz 周辺での応答は波振幅が小さいものほど大きくなると考えられる。

1.3 Hz 周辺での応答が波振幅が大きいときに大きい理由については、没水体積の変化が考えられる。没水体積の変化量は、以下に示す Mathieu 方程式の  $\epsilon$  に影響する。

$$\ddot{x}(t) + (\omega_0^2 + \epsilon\Omega^2 \sin \Omega t) x(t) = 0 \quad (7)$$

没水体積の変化量が大きいほど、Mathieu 方程式中の  $\epsilon$  は大きくなる。  $\epsilon$  が大きいほど方程式は不安定になることから、パラメトリック励振時の応答は波振幅が大きいときほど大きくなる。

また、実験で周波数成分として観測されたパラメトリック励振のピークが現れなかった理由として、反射波の影響で計測時間が短く、パラメトリック励振の応答が励起されるのに十分な時間がとれなかったことが数値計算の結果から明らかとなった。

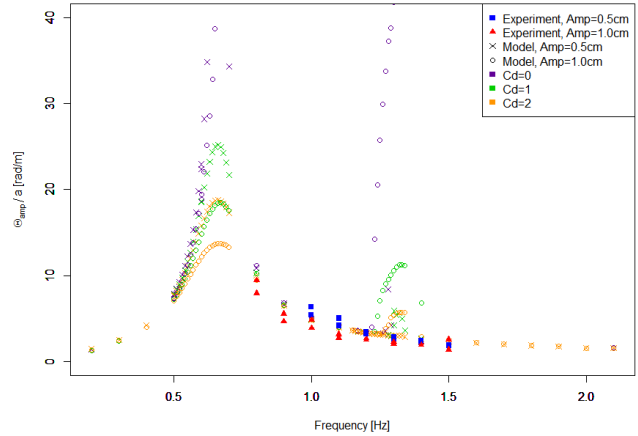


Fig. 4 Relation between wave frequency and pitch amplitude / wave amplitude.

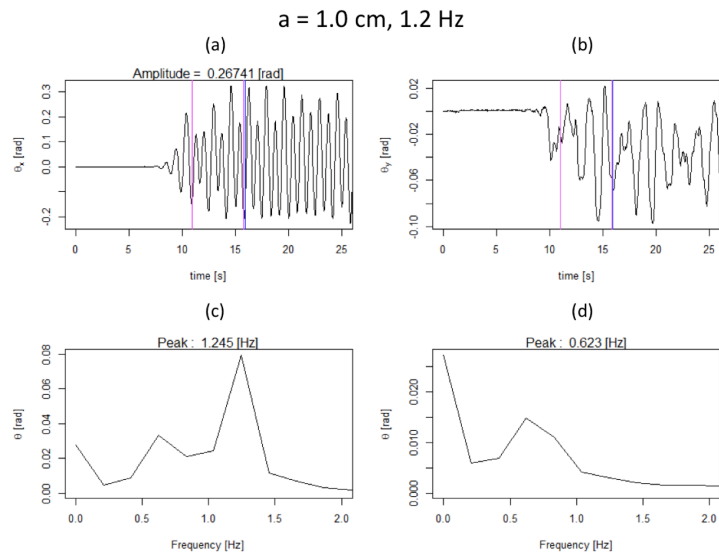


Fig. 5 (a) and (b) are time series of pitch angle and roll angle. (c) and (d) are spectra of (a) and (b) between the pink lines.

## 6. 実機応答計算

次に実スケールでの動揺応答を調べるために数値計算を行った。対象としたのは水深 30~90 m の海域で、風車は 2 MW、5 MW を想定した。風速は 0、12、50 m/s とした。成立性の目安として、発電時最大傾斜角 10 度以下とした。固有周期を短くする方針、長くする方針を検討した。一例として水深 70、90 m での結果を示す。水深 70 m、90 m では Fig.6 に示した形状のプラットフォームを検討した。水深に応じて図中の  $L$  を変え、また浮体の直径  $D$  を 15~25 m の範囲で変えて応答を確認した。Fig.7 に、水深 70 m、90 m のときの 1000 波最大値を示す。

グラフからわかるように、水深が深い海域では慣性モーメントが大きくなることから固有周期を長くする方針が可能であり、また傾斜角の条件を満たす形状の設計も可能である。また、時間領域の応答から、喫水が大きい場合には没水体積の変化率が小さくなるため、パラメトリック励振は起こりにくくなることがわかった。

浅海域では慣性モーメントが小さくなるため固有周期を長くとることが難しくなっていく。固有周期を短くする形状は、動揺の制約条件を満たす形状は作れるものの、重量が非常に大きくなってしまふことがわかった。浅海域ではネガティブダンピングによる運動の励起も見られた。

また、水深によらず浮体が大きいほど定常傾斜角は小さくなるが、波力の影響を強く受けるようになり動揺による傾斜角振幅が大きくなる。それぞれの傾斜角の大きさは搭載する風車によって変化する。そのため、最大傾斜角（定常傾斜角+傾斜角振幅）を小さくするためには、風車に合った浮体の選択が必要である。

動揺応答が小さい時には、固有周波数の倍周波数以外の周波数でもパラメトリック励振が生じる。ただし、応答が大きければ抗力による影響でパラメトリック励振は起こりにくくなる。

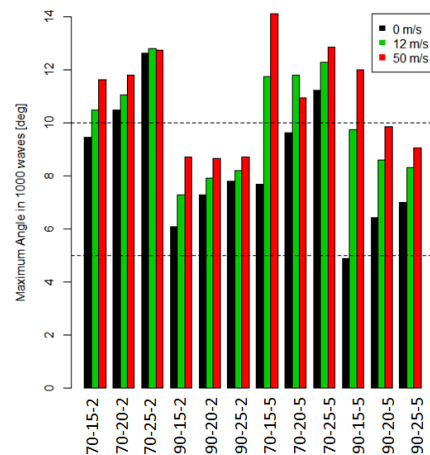
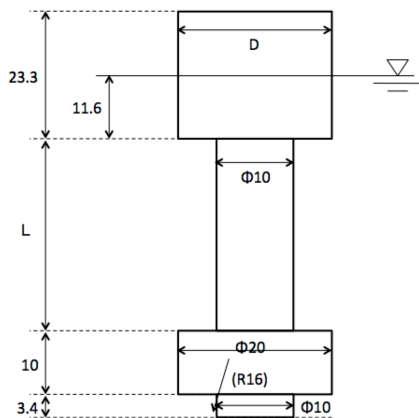


Fig. 6 Shape of platform that is considered in the numerical calculation.

Fig. 7 Maximum pitch angle in 1000 waves of each wind turbine design. The labels indicate "Depth-D-MW".

## 7. 今後の課題

今後の課題としては、水平方向に固定する機構の具体的な提案、数値計算のさらなる精緻化（係数等の調整、風車部のモデル化、摩擦の考慮等）、内力特性の把握、円筒以外の形状の検討などが挙げられる。

- [1] 石原孟: 洋上風力発電の現状と将来展望, 土木技術, **67**, (2012), 8.
- [2] 関田欣治, 石川裕和, 吉成岳彦他: 風車搭載可能なアーティクレートタワーの風と波に対する応答実験, 海洋開発論文集, **19**, (2003), p457-462.
- [3] Vivek Philip, Anitha Joseph and Chinsu Mereena Joy, Three legged articulated support for 5MW offshore wind turbine, Aquatec Procedia 4, (2015), p500-507.
- [4] The GICON-TLP for wind turbines [https://www.sintef.no/globalassets/project/deepwind2014/presentations/e/adam-f\\_gicon.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/deepwind2014/presentations/e/adam-f_gicon.pdf) (2016年7月29日参照)
- [5] 飯島一博, 鈴木英之, 井上俊司, 高木健, 岡田真三, 前田克弥, 尾崎雅彦, 正信聡太郎, 神田雅光, 松浦正己. 船舶海洋工学シリーズ 12 海洋構造物, (成山堂書店, 2013), p139.
- [6] 大塚耕司, 池田良穂: 低  $K_c$  数域における波浪中水平没水円柱の質量係数の推定法, 関西造船協会誌, **219**, (1993), p135-141.