

平成 25 年 3 月修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

## 浮体式洋上風車の風車浮体連成挙動に関する研究

### A study on coupled motions of rotor and floater for floating offshore wind turbines

学籍番号 47116645 柴田 創

指導教員 鈴木 英之 教授, 平林 紳一郎 講師

(平成 25 年 2 月 5 日発表予定)

Keywords: 洋上風力発電, 運動応答解析, 海洋構造物, 運動制御

Keywords: Offshore Wind Energy, Dynamic Response Analysis, Marine Structure, Motion Control

## 1. 序論

浮体式洋上風車は着底式洋上風車とは異なり浮体式洋上風車自体が運動するため、風車部で受ける風や風車回転数制御の影響と浮体部で受ける海洋波の影響が互いに連成し合って複雑な挙動を示す。風車浮体連成挙動にはネガティブダンピングのように波浪による動揺よりも大きな振幅で動揺してしまう可能性があるものや、ヨーイングのように外力をかけていない方向に運動するものがあるため、風車の性能予測や強度設計、さらには抑制法の検討のために、風車浮体連成挙動の定量的な解析が必要であった。

しかし浮体式洋上風車の既存の数値応答解析手法では風車-浮体間の相互作用の考慮は十分とは言えなかった。例えば浮体が搭載風車から受ける影響を浮体質量の増加と風車ローターが受ける抗力に簡略化している場合、風車回転速度やブレードピッチ制御に起因する力の影響を考慮できない。また風車部を時間領域で解いていても浮体部の応答解析を周波数領域で予め行った結果を読み出している場合は非定常現象の発生による風車浮体の連成を時刻歴に考慮できない。また要素の一部を剛体で解いているため強度設計に用いることができないという問題点もあった。そのため風車及び浮体をそれぞれ弾性体として取り扱いし、時刻歴応答解析するプログラムの開発が求められてきた。

藤岡[1]が開発した風車浮体連成応答解析プログラム UTWind は以上の要件を満たすものである。しかし藤岡の研究では、座標変換行列や風車流入風速や係留系を考慮する際に近似を用いていた他、検証に風車を搭載しない模型による模型実験しか行っておらず風車浮体連成挙動の考察にはさらなる拡張と検証が求められていた。

本研究の研究目的を以下に示す。

- ・風車浮体連成応答解析プログラム UTWind の拡張による性能向上
- ・風車搭載模型を用いた水槽実験による UTWind の検証
- ・風車浮体連成挙動の定量的解析と発生メカニズムや傾向の考察
- ・風車浮体連成挙動の一つであるピッチ方向のネガティブダンピングの抑制装置の検討

## 2. 風車浮体連成応答解析プログラム UTWind

### 2.1 プログラム概要

UTWind は風車ローター部での運動応答計算と浮体部の 2 パートにおいてそれぞれ運動応答計算を行っている。

風車ローターパートでは、前計算タイムステップにおけるナセル位置・速度・節点力を境界条件として考慮する。そこで翼素運動量理論によって空力を計算する。計算された空力をローターとともに回転する回転座標系で記述された運動方程式に外力として与える。回転座標系で記述しているため、風車ブレードの回転に伴う慣性力である遠心力やコリオリ力も共に考慮する。運動方程式を要素ごとに解くことによってローターの中心要素の節点力を求め、ナセルを通して浮体部に引き渡す。

浮体部ではナセルで引き渡された節点力に加え、異方性要素の計算にも対応した拡張モリソン式によって計算された流体力を外力として考慮する。

運動方程式は風車ローターパート・浮体パートともに Newmark- $\beta$  法により数値積分される。また各要素は弾性体として扱われているため内力の計算が可能である。

計算に必要な入力情報は、浮体及び風車を構成する各要素の節点・節点面の短径方向及び長径方向を指定するための座標、及び流体力の計算のための各係数、要素の密度及びヤング率、ブレードの空力性能の係数などである。モデリングする際は、流体力係数や空力性能の係数を外部計算プログラムや文献値・経験則などから準備した。UTWind はセミサブ型風車、スパーク型風車、さらに TLP 浮体式風車など計算する浮体式風車のタイプを選ばない。

## 2.2 本研究における拡張点

UTWind について本研究において大きく拡張した点は以下のようにまとめられる。

- ① 要素座標への変換行列を時刻毎に求めるようにした点
- ② 空力計算において相対風速を翼素ごとに考慮できるようにした点
- ③ 係留系の線形バネモデルを2次的に拡張し、ヨー方向の復原効果を考慮できるようにした点

## 3. 風車搭載模型を用いた水槽実験による UTWind の検証

### 3.1 水槽実験概要

UTWind の風車浮体連成の検証のために水槽実験を行った。この実験では風波共存状態での運動応答やタワー基部モーメントについて比較をする。実験は(独)海上技術安全研究所海洋構造物試験水槽にて行った。実験に用いた模型は相似した NK モデルの 2 MW セミサブ浮体式風車のフルード則により相似した 1/50 模型であり、搭載風車はブレードピッチ制御も可能なものである。今回検証に用いたのは模型の正面から 1.9 m/sec (定格)の風と波振幅 3 cm で波周期 0.6 sec~2.4 sec の規則波を当てるものである。係留系は水面上を張ったラインの先にバネを取り付け、線形バネを再現した。風車ローターの計算にはブレードの空力性能係数の算出が必要になるため、ブレードの翼型データとレイノルズ数から、山口[2]が開発した prblg.f を用いた計算結果から多項式近似関数を作成した。

### 3.2 実験結果と考察

Fig.1~3 にサージ・ヒープ・ピッチ方向の運動応答と Fig.4 にタワー基部曲げモーメントの計算結果と実験結果の比較を示す。数値は全て模型スケールで記している。運動応答は本検証に用いた浮体式風車模型のヒープの固有周期である 3.24 rad/sec 付近の値以外は良好に再現できたと言える。固有周期周りで変化する流体力係数を、レイノルズ数に作成したデータベースから読み出すようにすると運動応答の計算精度が上がると考えられる。内力計算に関しては Fig.4 に示すように 5.5 rad/sec 周りの計算結果周りでピークを再現できていないため別の FEM プログラムの計算結果などを用いて再検証する必要があると考えられる。

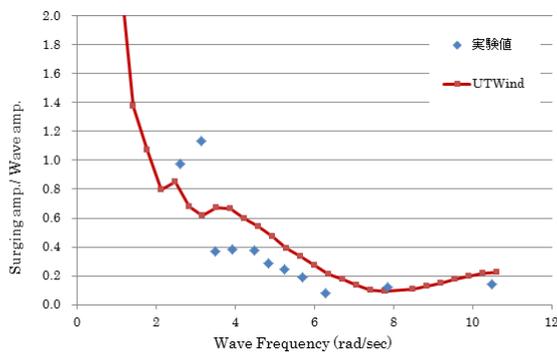


Fig.1 Comparison of surging RAO

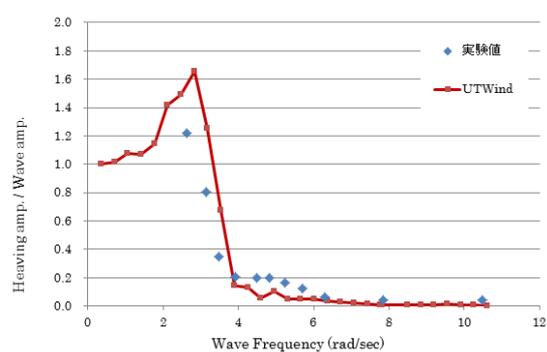


Fig.2 Comparison of heaving RAO

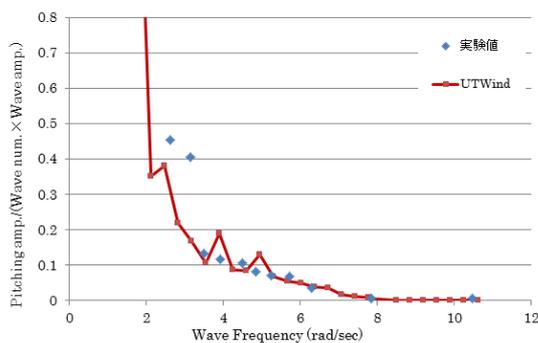


Fig.3 Comparison of pitching RAO

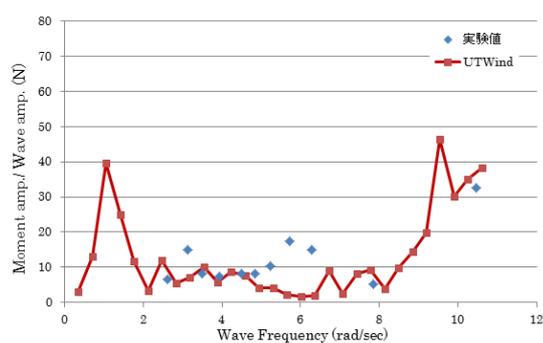


Fig.4 Comparison of bending moment on tower base

## 4. 風車浮体連成挙動の定量的解析

### 4.1 ネガティブダンピングの発生メカニズム

ピッチ方向のネガティブダンピングとは、定格風速以上の風が風車ローターに流入する場合に発電量を一定に保つために行われるブレードピッチ制御が原因で風車の系の減衰が負になることによって発

生ずるピッチ方向の不安定挙動である。浮体が動揺することで前傾斜方向にピッチ運動すると、ローターに流入する相対風速は風車が固定されている場合に比べて増加する。ここで風車はナセル部への負荷を下げるためにブレードピッチ制御を行うため、ローターによって発生するスラスト力は減少する。逆に後傾斜する場合はスラスト力が増加するため、同様にピッチ方向の復原効果が弱くなる。この繰り返しによってピッチ運動が強まる現象がネガティブダンピングであり、藤岡[1]による簡易モデル化によるから、浮体のピッチ方向の固有周期振動が励起されることが示された。

#### 4.2 ネガティブダンピングの実験結果との比較

Fig5 にブレードピッチ制御をしている場合の検証実験で用いた 2 MW セミサブ浮体式風車 1/50 に定格風速で波周期 5.71 rad/sec(実機スケール 0.81 rad/sec)、波振幅 3 cm(実機スケール 1.5 m)の波を与えた時に発生するピッチ方向変位をフーリエ変換して周波数スペクトルを示した。同条件の UTWind の計算結果も併記する。実験結果及び UTWind の計算結果共にピッチ方向の固有周期である周波数 1.8 rad/sec にピークが見られた。このピークは同様の風波条件でブレードピッチ制御を行わない場合には実験及び UTWind 共に確認されず、5.71rad/sec の波周期でのピークのみが確認されたため、UTWind でピッチ方向のネガティブダンピングが計算できることが示された。

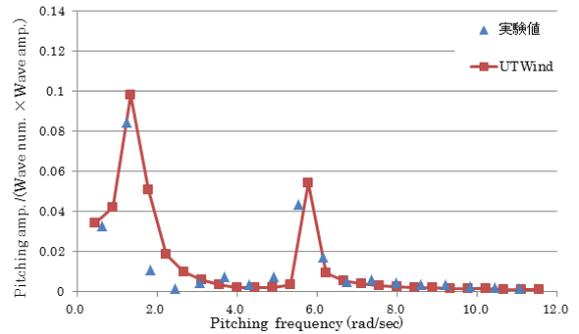


Fig.5 Comparison of result of FFT for pitching moment

#### 4.3 ネガティブダンピングと波振幅の関係に関する考察

次にピッチ方向のネガティブダンピングと波振幅及び波周波数の関係について考察を行う。通常海洋構造物は運動振幅と波振幅はほぼ線形関係にあると考えられる。ネガティブダンピングが発生している時にピッチ方向の固有周期振動が波振幅とどのような関係にあるのかを解析した。Fig.6 に 2MW セミサブ浮体式風車に定格風速(13.4 m/sec)、波周期 0.8 rad/sec 時に波振幅 0.5~4.0 m までの波を与えた時のピッチ運動の波周期成分と固有周期成分を実機スケールで示す。Fig.6 から波周期成分は波振幅に合わせてほぼ線形に増加するが、固有周期成分は減少することが分かった。また Fig.7 に示すように波周期 0.6 rad/sec 及び 1.0 rad/sec の時にも同様の傾向が得られるが、固有周期成分が発生しなくなる波振幅は周波数によって異なることが分かった。ナセル動揺速度比例するブレードピッチ制御による動揺増加効果と、モリソン式抗力項で表される流体粒子と浮体要素の相対速度の 2 乗に比例する動揺抑制効果の関係によるものだと考えられる。

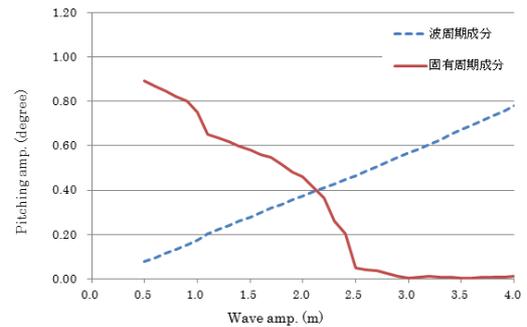


Fig.6 Relationship between wave amplitude and negative damping

上記の結果からネガティブダンピングと波振幅の関係について 2 次元スパモデルを用いた定式的考察を行った。ピッチ方向の回転中心を原点にとり、浮体に鉛直方向に伸びている座標系  $r$  において、浮体断面の半径が  $R_y$  で一定なスパ型風車において、流体密度  $\rho_f$ 、抗力係数  $C_D$ 、ナセル位置  $r_n$ 、外部環境風速  $V_{WIND}$  の時の風車で発生するスラスト力を  $F_T(V_{WIND})$ 、静水面位置を  $r_s$ 、スパ底部位置を  $r_b$ 、波周期  $\omega$  の時の浮体のピッチ運動の応答関数を  $b(\omega)$  とおくと、ブレードピッチ制御によるスラスト力の減少とモリソン式抗力項のピッチ運動に起因する増加分の釣り合いから、周波数  $\omega$  の時のピッチ方向のネガティブダンピングが発生する最小の波振幅は、周波数  $\omega$  の極大値を持ちうる関数として式(1)の  $a_m$  として示される。

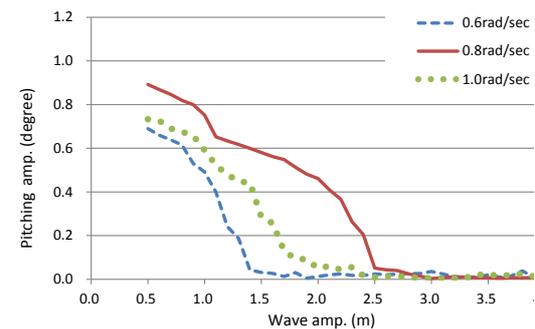


Fig.7 Comparison of natural frequency Oscillating component on each wave frequency

$$a_m = \frac{r_n^2 \left( -\frac{\partial F_T(V_{WIND})}{\partial V_{WIND}} \right)}{\rho_f C_D R_y \omega \left( \frac{2r_s^3}{3} + \frac{r_b^4}{4} b(\omega) - \frac{2r_s^3}{3} - \frac{r_b^4}{4} b(\omega) \right)} \quad (1)$$

## 4.2 ヨーイング

ヨーイングとは正面から風波が流入する場合にヨー方向に浮体が回転変位をもつ運動のことである。UTWind の計算結果から定常変位成分の上に振動成分が重なることが分かった。振動成分に関してはブレードピッチ制御を行ってネガティブダンピングが発生している場合にピッチ方向の固有周期振動が検出されたので、既存研究で指摘されていた通り風車回転に起因するジャイロ効果が原因であることが確認された。定常変位成分は鉛直方向の流入風速の不均一によるものであると考えられる。Fig.8 に示すようにブレードピッチ制御の有無によってそれぞれの成分が風速によってどのように変化するかを解析した。定常変位成分は風速が上がるにつれて、大きくなっているのが分かる。またブレードピッチ制御により風のエネルギーを逃がすことにより両成分がとも小さくなるため、セミサブ浮体式風車では実際の風車運用に問題が生じる程度にはならないことが分かった。

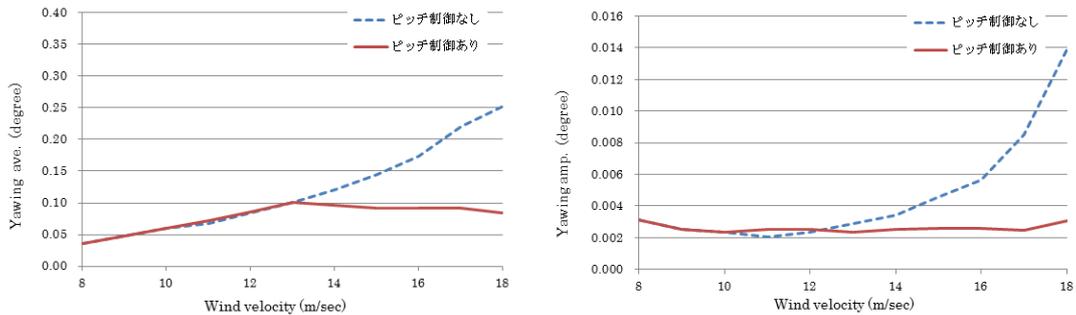


Fig. 8. Stationary displacement(left) and oscillating amplitude(right) on each wind velocity

## 5. 可動バラストを用いたネガティブダンピング抑制法に関する基礎研究

可動バラストを用いたネガティブダンピングの抑制手法に関する基礎研究を行った。現在研究中の他の抑制方法と違い、風車での出力一定制御を保ちながらバラストの移動によりネガティブダンピングを抑制する手法である。本研究ではアクティブ縦移動モデルとパッシブ横移動モデルの二つのモデルについて UTWind による動的解析で評価を行い、Fig.9 にコンセプト概念を示すパッシブ横移動モデルで動揺抑制効果を確認できた。パッシブ横移動モデルは浮体傾斜に合わせてバラスト可動部が移動することによって、バラスト可動部と浮体中心間に搭載されたバネとダンパによって浮体中心に力をかける。同時に転倒方向にバラスト重量が移動することにより増加するモーメントも考慮する。Tuned Mass Dampner(TMD)を応用し抑制装置の固有周期と風車のピッチ方向の固有周期を一致させることによって常に動揺抑制方向にバラスト可動部を配置できる。バラスト可動部の重量が大きすぎると浮体に疲労荷重がかかるため、動的解析により可動バラスト部重量の最適化を行い、Fig.10 に抑制効果を示す可動部バラスト重量 700 t を最適値とした。本研究はコンセプト設計に留まるため、今後は実用化に向けた設計や実海域運用シミュレーションが行われることを期待する。

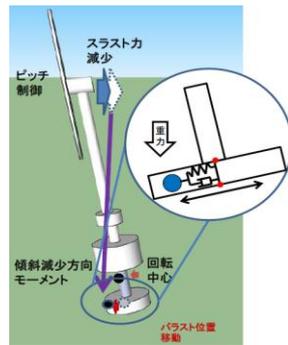


Fig. 9 Concept of suppressor

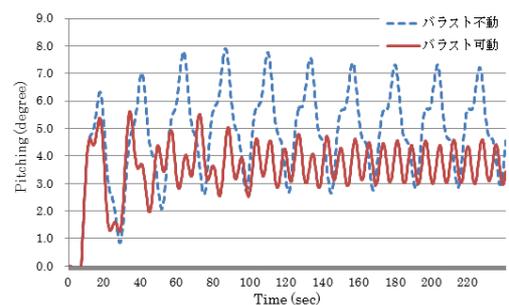


Fig. 10 Effect of suppressor for negative damping

## 6. 結論

本研究によって浮体式洋上風車風車浮体連成応答解析プログラム UTWind を改良し、風車搭載模型を用いた水槽実験による検証を行い良好な結果を得た。そして UTWind を用いて典型的な風車浮体連成挙動であるネガティブダンピングとヨーイングについての定量的及び定式的な考察を行った。またネガティブダンピングの抑制装置に関する基礎研究を行い、パッシブ横移動モデルを提案した。

## 参考文献

- [1] 藤岡弘幸：修士学位論文，東京大学（2012年）
- [2] 山口一，定常流中の2次元翼及び翼列の流体力学的特性を境界層影響を考慮して予測するためのコンピュータプログラム“prblg.f”プログラムの概要（1999）