

# PS-37 浮体式洋上風力発電施設のブレードピッチ制御

洋上再生エネルギー開発系 \*羽田 絢、國分 健太郎、中條 俊樹、石田 茂資

## 1. はじめに

浮体式洋上風力発電施設（以下 FOWT）には、波・風・流れ等が作用し、支持構造物が動揺する。加えて、風車の稼働時には、風荷重の変動が生じ、支持構造物の運動と相互に影響する。このような特徴を有する FOWT において、十分な安全性と高い発電効率を担保するためには、ブレードピッチ角を用いた制御器を適切に設計する必要がある。一般的な制御器の例としては、PID 制御に代表される古典制御があるが、近年では現代制御理論を採用した制御器設計の検討も行われている。本稿では、当所の FOWT 制御に関する取り組みとして水槽試験を用いた線形モデルの同定手法と現代制御理論の一つである  $H_\infty$  制御を用いた解析例を紹介する。

## 2. 力学モデル同定の実験的取り組み

FOWT の中でも非線形性の強い空力荷重のモデル化と浮体挙動との連成について調査するため、当所の変動風水洞で模型試験を実施した。

### 2.1 変動風水洞

本試験は当所の所有する変動風水洞にて実施した。同施設は幅 3m、高さ 2m の風洞に水槽が併設されているもので、精度の高い送風環境を保ちながら流力荷重を受ける物体の運動を調査できる。

### 2.2 風車模型

風車模型はロータ直径 1.25m、重量約 2kg である。想定実機として、NREL5MW 風車<sup>1)</sup>を採用しており、縮尺は 1/100 として設計した。なお、風車模型詳細については参考文献 2) にて説明している。

### 2.3 浮体模型

浮体模型概要図を図-1 に示す。浮体形式にはコラム 5 本のセミサブ型を採用した。排水量は約 57kg である。

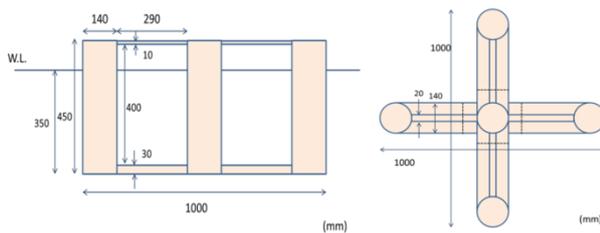


図-1 模型浮体概要

### 2.4 FOWT 線形力学モデルの導出

現代制御は、モデル化された制御対象システムを用いて解析的に制御器を設計する制御手法で、モデル化の正確性が制御の良し悪しに影響する。先に紹介した実験に用いた模型を対象とし、FOWT のサージ運動  $\xi_1$ 、ピッチ運動  $\xi_2$  ならびにロー

タの回転運動  $\omega$  に着目した連立方程式から平衡点周りの挙動をモデル化する。

まず、浮体動揺ならびにロータの回転運動を式-1、式-2 に示す。ここで、 $M_{ij}$  は慣性項、 $B_{ij}$  は減衰項、 $C_{ij}$  は復原項を示す。外力は波浪外力  $F_i$  と空力荷重のスラスト  $T$  およびトルク  $Q$  を想定した。また、 $L$  はハブ高さである。

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{15} \\ M_{51} & M_{55} \end{pmatrix} \ddot{\xi} + \begin{pmatrix} B_{11} & B_{15} \\ B_{51} & B_{55} \end{pmatrix} \dot{\xi} + \begin{pmatrix} C_{11} & C_{15} \\ C_{51} & C_{55} \end{pmatrix} \xi = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ L \end{pmatrix} T \quad (1)$$

$$I \dot{\omega} = Q \quad (2)$$

次に、非線形なスラスト及びトルクの微小変動量を、風速  $V$ 、ブレードピッチ角  $\theta$ 、ロータ回転数  $\omega$  の 1 次近似で表現した (式-3、式-4)。今回の線形化の有効性について、表-1 に検証結果を示す。平衡点を風速 2.3m/s、ブレードピッチ角 14.4deg、ロータ回転数 225rpm として設定したときの線形空力荷重変動について、2 種類の入力 (ブレードピッチ角および風速) が個別に作用した時の応答 (ロータ回転数、スラスト) を実験値と比較した。ブレードピッチ変動に対しては  $\pm 2$ deg 程度の変動までしか許容できない一方、風速変動に対しては  $\pm 0.5$ m/s 程度の変動に対しても一定の信頼性があることが判明した。なお、浮体動揺に伴う相対風速変動は実験においていずれの条件でも 0.5m/s 未満であった。

$$\Delta T = \Delta V \frac{\partial T}{\partial V} + \Delta \omega \frac{\partial T}{\partial \omega} + \Delta \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\Delta Q = \Delta V \frac{\partial Q}{\partial V} + \Delta \omega \frac{\partial Q}{\partial \omega} + \Delta \theta \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad (4)$$

表-1 線形力学モデルの有効性検証

ブレード 変動量 [deg]	回転数変動量			スラスト変動量		
	線形モデル [rpm]	実験 [rpm]	比率 [-]	線形モデル [N]	実験 [N]	比率 [-]
-3.60	19.14	11.76	1.63	0.92	1.07	0.86
-1.80	9.57	9.64	0.99	0.46	0.52	0.88
0.00	0.00	0.00	NA	0.00	0.00	NA
1.80	-9.57	-12.59	0.76	-0.46	-0.40	1.14
3.60	-19.14	-27.72	0.69	-0.92	-0.74	1.24
5.40	-28.71	-41.14	0.70	-1.38	-0.98	1.41
7.20	-38.29	-55.21	0.69	-1.83	-1.17	1.57
風速変動量 [m/s]	回転数変動量			スラスト変動量		
	線形モデル [rpm]	実験 [rpm]	比率 [-]	線形モデル [N]	実験 [N]	比率 [-]
-0.46	-55.22	-57.32	0.96	-1.08	-0.87	1.24
-0.23	-27.61	-31.48	0.88	-0.54	-0.49	1.10
0.00	0.00	0.00	NA	0.00	0.00	NA
0.27	32.41	33.01	0.98	0.63	0.72	0.88
0.49	58.82	60.92	0.97	1.15	1.33	0.86

線形化した空力荷重を組み込み、式-5 に示すように浮体運動が風速変動に寄与することを考慮して FOWT 全体の式を

線形化した。またこのとき、状態変数としてサージ速度 $\dot{\xi}_1$ 、サージ変位 $\xi_1$ 、ピッチ速度 $\dot{\xi}_5$ 、ピッチ変位 $\xi_5$ 、ロータ回転数 $\omega$ の5変数を設定し(式-6)、外乱を波浪外力のサージ成分 $F_1$ 、波浪外力のピッチ成分 $F_5$ 、風速変動 $V$ とし(式-7)、制御入力をブレードピッチ角 $\theta$ として設定(式-8)した。

以上から線形化したFOWTシステムが得られる(式-9)。このときの諸係数については表-2に示す。また、これを両辺とも左から質量成分の逆行列をかけることにより、状態空間表現が可能になる(式-10)。

$$\Delta V = (V - \dot{\xi}_1 - L\xi_5 - V_\infty) \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = (\xi_1 \quad \dot{\xi}_1 \quad \xi_5 \quad \dot{\xi}_5 \quad \omega)^T \quad (6)$$

$$\mathbf{w} = (F_1 \ F_5 \ V)^T \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \theta \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} M_{11} & 0 & M_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ M_{51} & 0 & M_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & B_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & B_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{53} \end{pmatrix} \mathbf{w} + \begin{pmatrix} B_{14} \\ 0 \\ B_{34} \\ 0 \\ B_{44} \end{pmatrix} \mathbf{u}$$

$$\leftrightarrow \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x} + \bar{\mathbf{B}}_1\mathbf{w} + \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{u} \quad (9)$$

表-2 線形システムの係数一覧

$A_{11} = -(B_{11} + \frac{\partial T}{\partial V})$	$A_{12} = -C_{11}$	$A_{13} = -(B_{15} + L \frac{\partial T}{\partial V})$	$A_{14} = -C_{15}$
$A_{15} = \frac{\partial T}{\partial \omega}$	$A_{31} = -(B_{51} + L \frac{\partial T}{\partial V})$	$A_{32} = -C_{51}$	$A_{33} = -(B_{55} + L^2 \frac{\partial T}{\partial V})$
$A_{34} = -C_{55}$	$A_{35} = L \frac{\partial T}{\partial \omega}$	$A_{51} = -\frac{\partial Q}{\partial V}$	$A_{53} = -L \frac{\partial Q}{\partial V}$
$A_{55} = \frac{\partial Q}{\partial V}$	$B_{13} = \frac{\partial T}{\partial V}$	$B_{33} = L \frac{\partial T}{\partial V}$	$B_{53} = \frac{\partial Q}{\partial V}$
$B_{14} = \frac{\partial T}{\partial \theta}$	$B_{34} = L \frac{\partial T}{\partial \theta}$	$B_{54} = \frac{\partial Q}{\partial \theta}$	

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \quad (10)$$

## 2.5 水槽試験による検証

図-2に規則波中(T=2.0sec, H=0.05m)の水槽試験結果と線形力学モデルとの比較を示す。良好な一致を示しており、線形力学モデルの精度を確認できた。

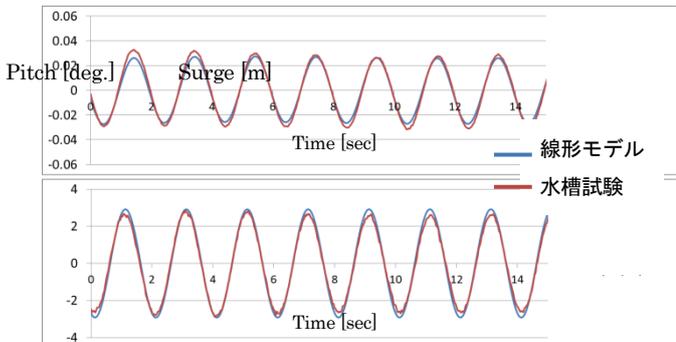


図-2 水槽試験と線形力学モデルの比較

## 3. H<sub>∞</sub>制御を用いた試解析

求めた線形システムを利用し、H<sub>∞</sub>制御器を設計した。この制御は周波数特性を有する外乱に対して全ての周波数で応答を低減させるように設計するものである。今回は、浮体ピッチ角とロータ回転数とブレードピッチ角を評価量とし、それぞれにゲインを設定した。

今回の試解析においては、一様風中に設置されたFOWTに規則波(T=1.8sec, H=0.05m)の波浪外力が入力したときの制御について検討した。図-3に結果の一例として浮体ピッチ角、ロータ回転、ブレードピッチ角の平衡点まわりの運動を示す。30secから制御を実行しており、浮体ピッチ角・ロータ回転数ともに応答の低減が確認できる。

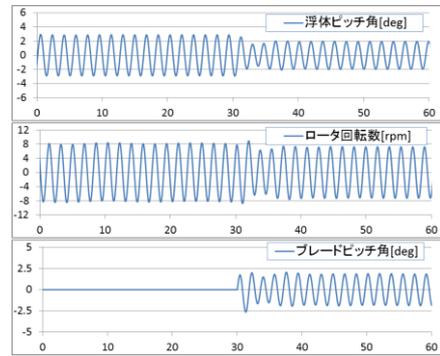


図-3 H<sub>∞</sub>制御を用いた制御結果

## 4. まとめ

浮体式洋上風力発電施設では、発電性能と安全性等に係る他の要件をバランス良く実現するため、ブレードピッチ角制御の高度化が望まれている。

本研究では、FOWT全体システムを線形モデルとして表現することを試み、特に線形化に注意が必要な風車特性に留意して風水洞における実験を行った。その結果から導出した係数を利用して、精度の高いモデルを作成することができた。また、求めた線形モデルの現代制御理論への適用例として、周波数外乱に対して有効であるH<sub>∞</sub>制御を導入した試解析を実施し、浮体動揺とロータ回転数を同時に安定化できることを確認した。

## 参考文献

- 1) J. Jonkman, et al., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060
- 2) T. Chujo, et al., Model experiments on the motion of a spar type floating wind turbine in wind and waves, OMAE2011-49793
- 3) 羽田純ら、浮体式洋上風力発電のブレードピッチ制御に関するH<sub>∞</sub>制御適用の基礎検討、第36回風力エネルギー利用シンポジウム、pp. 313-pp. 316