

京都大学工学部

学生員 ○西村 優希

京都大学大学院工学研究科

正会員 宇都宮 智昭

1. はじめに

浮体式洋上風力発電施設の構造安全性を検証する上で、暴風等の動揺を把握することが極めて重要となる。そこで本研究では、解析コードとして米国国立再生可能エネルギー研究所（以後 NREL とする）が開発した水平軸風車用解析コード FAST¹⁾と MSC.Software 社が開発した汎用機構解析ソフト MSC.ADAMS に NREL が開発した風荷重計算コード AeroDyn とプラットフォームにかかる荷重を計算するコード HydroDyn を組み込んだもの（以後、これを ADAMS とする）の 2 つを用いて、スパー型洋上風力発電施設の暴風時動揺解析を実施する。なお、FAST、ADAMS のいずれも浮体式洋上風車に対しては妥当性が検証されていないため、本研究にて暴風時における応答結果の違いを検証する。

また、本研究では、スパー型浮体式洋上風力発電施設の係留索をバネ・質点系でモデル化し、係留索の先端を 2 股にした形状のモデルで Yaw 方向の剛性がどれだけ高まるのか、また摩擦力の応答への影響についても検証を行う。

2. 解析モデル

本研究では、解析モデルとしてスパー型プラットフォームの上に定格出力 2MW のダウンウインド型風車が搭載されるもの(図 1)を想定した。係留索の本数は 4 本とし、初期水平張力 300(kN)とした。本研究におけるプラットフォームの応答は浮面心（水面上の浮体の中心）からみたものである(図 2)。変位の呼称も図 2 に示す。係留索の先端を 2 股にした形状を図 3 に示す。

3. 係留索のバネ・質点系モデルの検証

本研究では、係留索をいくつかの質点に分割し、質点の間をバネでつないだモデルで係留索を近似する。

呼び径 87(mm)、全長 408.2(m)のチェーンを 20 個の質点に分割し、線形バネでつないだ。海底から浮体着鎖点までの高さを 84(m)とし、海底着鎖点と浮体着鎖点との水平距離 X(m)を変化させて重力のみを作用させて ADAMS を用いて動的に解析を行い、その時の浮体着鎖点に働く係留力の水平成分 Th(kN)を出力した。出力された Th と、FAST・ADAMS 内の係留索による力の計算の際に用いられているカテナリー理論から得られる理論値²⁾を比較し図 4 に示す。

図 4 より、バネ・質点系モデルはカテナリー理論とほぼ一致する水平張力を発生しており、この点において妥当なモデル化であるといえる。

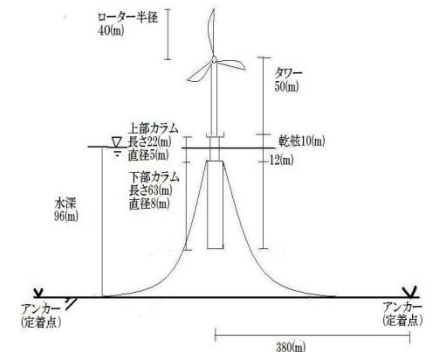


図 1 解析モデル

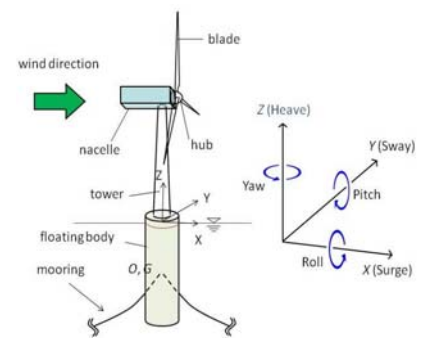


図 2 座標と変位の呼称

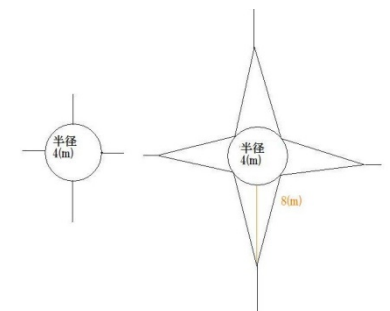


図 3 係留索の概形

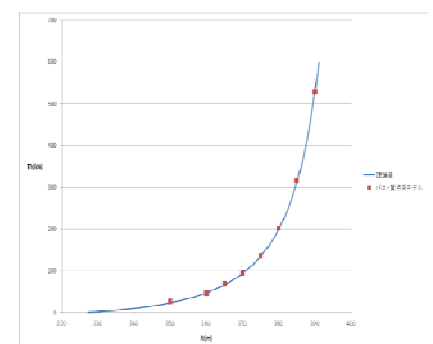


図 4 理論値との比較

4. バネ・質点系モデルによる風車の自由振動

表 1, 表 2 に示す各モデルで波・風がない状態でプラットフォームを Yaw 方向に 10 度回転させた位置を初期状態とし, 300 秒間解析を行い, 固有周期を計算した(表 3). なお, 2 股の係留索を FAST で計算する場合には Yaw 方向の付加剛性を入力することでこれを模擬する. 本研究で入力する Yaw 方向の付加剛性 K は次式で計算する.

$$K = Th \times L \times n$$

(Th:係留索の水平張力, L:2 股の部分の水平長さ,

n:係留索の本数)

本研究では $Th = 300(\text{kN})$, $L = 8(\text{m})$, $n = 4$ (本)である.

表 3 の固有周期より 2 股でない係留索の場合はバネ・質点系モデルでも FAST のカテナリー理論を用いた静的解析モデルとほぼ同様の剛性比が得られているが, 2 股のバネ・質点系モデルでは, 計算した付加剛性を入力した FAST のモデルに比べて, 摩擦なしの場合 0.74 倍, 摩擦ありの場合 0.53 倍の剛性しか得られなかった.

5. バネ質点系モデルによる暴風時動揺解析

表 4 に示す各モデルにて, 外力条件として波がない状態で x 軸方向に乱流強度 0.11, ハブ高さでの 10 分間平均風速 56(m/s)の風を作用させ, 同じく x 軸方向に有義波高 8.9(m), 有義波周期 12.4(s)の波を作用させて, 先端が 2 股の係留索を想定して 300 秒間解析を行った.

荷重が直接作用する (Surge, Heave, Pitch) 方向のプラットフォームの応答結果の時刻歴の標準偏差を表 5 に, 3 方向のパワースペクトルを図 5 から図 7 に示す.

図 5 から図 7 より, これら 3 方向のパワースペクトルはほぼ一致している. また, 表 5 より 3 方向における時刻歴の標準偏差を見ると 4 つの各モデルで大きな差はない. つまり, FAST・ADAMS・バネ質点系モデルのどのモデルにおいても Surge, Heave, Pitch の 3 方向でのプラットフォームの応答変位はほぼ同じ値をとることが確認できた.

参考文献

- 1) National Renewable Energy Laboratory: FAST User's Guide, NREL/EL-500-38230,2005.
- 2) O.M.Faltinsen: Sea Loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press, pp.257-265,1990.

表 1 2 股でない係留索を有するモデル

解析コード	係留索の解析方法	摩擦力	Yaw付加剛性
FAST	HydroDyn(カテナリー理論)	なし	なし
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	なし	なし
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	あり	なし

表 2 先端が 2 股の係留索を有するモデル

解析コード	係留索の解析方法	摩擦力	Yaw付加剛性
FAST	HydroDyn(カテナリー理論)	なし	あり
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	なし	なし
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	あり	なし

表 3 Yaw 固有周期

2股でない係留索			
	FAST	バネ・質点系モデル(摩擦なし)	バネ・質点系モデル(摩擦あり)
周期(s)	16.3	17.10	16.10
剛性比	1	0.91	1.02
2股の係留索			
	FAST	バネ・質点系モデル(摩擦なし)	バネ・質点系モデル(摩擦あり)
周期(s)	9.4	10.90	12.90
剛性比	1	0.74	0.53

表 4 解析モデル

解析コード	係留索の解析方法	摩擦力	Yaw付加剛性
FAST	HydroDyn(カテナリー理論)	なし	あり
ADAMS	HydroDyn(カテナリー理論)	なし	あり
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	なし	なし
ADAMS	動的解析(バネ・質点系モデル)	あり	なし

表 5 時刻歴の標準偏差

自由度	モデル	標準偏差
Surge(m)	FAST	3.03
	ADAMS	2.95
	バネ・質点系モデル(摩擦なし)	3.02
	バネ・質点系モデル(摩擦あり)	2.96
Heave(m)	FAST	0.55
	ADAMS	0.58
	バネ・質点系モデル(摩擦なし)	0.53
	バネ・質点系モデル(摩擦あり)	0.56
Pitch(deg)	FAST	2.06
	ADAMS	2.13
	バネ・質点系モデル(摩擦なし)	2.12
	バネ・質点系モデル(摩擦あり)	2.11

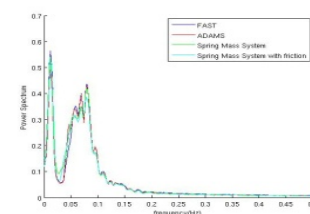


図 5 Surge 方向のパワースペクトル

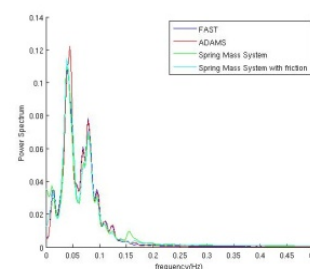


図 6 Heave 方向のパワースペクトル

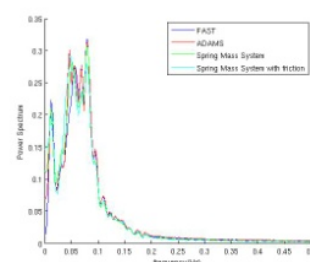


図 7 Pitch 方向のパワースペクトル