

PS-37 浮体式洋上風力発電施設の連成一体解析手法を用いた 設計検討に関する考察

洋上再生エネルギー開発系 *羽田 絢、中條 俊樹、二村 正、石田 茂資、井上 俊司

1. はじめに

化石燃料価格の高騰や温室効果ガス排出規制などを背景に、世界規模で再生可能エネルギーが注目されている。我が国では洋上風力エネルギーのポテンシャルが大きく、深い水深に適用可能な浮体式洋上風力発電施設（以下、FOWT）の実用化が期待されている。

FOWTの挙動評価には風、波浪、潮流などに加えてローター回転に伴うスラスト荷重を考慮しなければならない。同荷重はブレードピッチ制御等の影響を受けて非線形性が大きいと、時間領域における連成一体解析が必要とされる。

また、FOWTは外力や運転状況のさまざまな組み合わせを検討する必要がある、例えば国交省の定める設計荷重ケース（DLC）では約30ケースが想定されており、解析時間の増加も懸念されている。

本研究では連成一体解析を用いたDLCの試解析を実施し、特に重要な計算条件について調査するとともに、実用性の高い周波数領域法の適用可能性について検討した。

2. 連成一体解析手法を用いたDLC試解析

本節では、時間領域における連成一体解析手法を用いたDLCの試解析について報告する。

2.1 数値計算手法

数値計算には米国再生可能エネルギー研究所（NREL）の開発したFAST¹⁾にマサチューセッツ工科大学の開発したWAMIT²⁾を組み合わせ使用した。なお、当所ではFASTを改良し、係留系を剛性マトリクスとして与えるための外部入力や粘性減衰力を追加している。

2.2 対象モデル

NRELの設計した5MW風車（ローター直径126m、定格風速11.4m/s、定格回転数12.1rpm）とスパー型浮体（喫水90m、水線面直径7.5m）を組合せたFOWTを解析対象とした。

2.3 設計荷重ケース（DLC）

設計荷重ケースについては、国土交通省による浮体式洋上風力発電施設技術基準³⁾において詳細に解説されている。本試解析では発電時および待機時において、特に大きな外乱条件を有するものとして、4条件を抽出して解析を実施した。

ただし、波向及び風向きはFOWTに相対する向きのみと設定し、発電時における平均風速については風車のカットイン風速からカットアウト風速をフォローするように設定した（本検討においては風速4m/s～24m/s、ピンは2m/s）。また、ブレードピッチ角は固定とし、定格風速以上では定格回転数を保つように設定した。

2.4 試解析結果

試解析結果を表-1に示す。今回は、各設計荷重ケースに対して合計60分間の時系列計算を実施した。また本表ではサージ、ヒープ、ピッチの各方向変位およびタワー基部の荷重、加えてスラスト荷重の最大値をまとめている。

これより、発電時かつ高波浪条件であるDLC1.6aにおいて大きな荷重および変位が集中していることがわかる。また、風速が風から取り出すパワーが最大となる、定格風速近傍において大きなスラスト荷重が発生し、それに関連してタワー基部の荷重も増大している。

3. 周波数領域法の適用

3.1 検討目的および手法

周波数領域法は計算時間が短く、入出力間の因果関係が明確で設計にフィードバックしやすいという利点がある。また、船舶・海洋関係の設計者が習熟している手法であることから、IECにおいてもFOWT解析に取り入れることが検討されている。本研究では、同手法の適用性の検証を行った。FOWTの不規則波中応答を、周波数領域法（FASTで計算したRAOを用いた短期予測）と時間領域法（不規則波中挙動の時間領域計算を実施）で比較することで、両手法の差異を求めた。

3.2 対象モデルおよび解析条件

FOWTは、第2節と同一のモデルを対象とする。

解析条件として、発電時は平均風速11.4m/s、有義波高6m、有義波周期13secとし、ブレードピッチ制御は行わないものとする。待機時としては、平均風速50m/s、有義波高9m、有義波周期16secを設定し、風車はフェザリング状態とする。

3.3 解析結果

ピッチ変位とタワー基部モーメントのパワースペクトル密度（PSD）を図-1と2に示す。

表-1 設計荷重ケースと最大変位・最大荷重

DLC	発電状況	平均風速 (m/s)	乱流強度 (%)	有義波高 (m)	有義波周期 (sec)	浮体運動			タワー基部荷重			風車荷重 スラスト (kN)	
						サージ	ヒープ	ピッチ	サージ荷重	ヒープ荷重	ピッチ荷重		
						(m)	(m)	(deg)	(kN)	(kN)	(kN・m)		
1.3a	発電	4	53	1.0	8	48.29	0.23	0.90	639	5,782	46,610	700	
		6	37	1.0	8	53.14	0.29	1.45	867	5,804	62,610	873	
		8	30	1.0	8	54.37	0.32	2.14	948	5,809	67,810	921	
		10	25	1.0	8	55.50	0.32	2.18	1,074	5,819	77,370	1,047	
		12	22	1.0	8	54.95	0.36	2.33	1,092	5,828	79,250	1,066	
		14	20	1.0	8	54.79	0.32	2.22	1,073	5,823	77,160	1,079	
		16	18	1.0	8	53.66	0.30	1.64	1,030	5,825	74,930	1,068	
		18	17	1.2	8	52.86	0.30	1.25	982	5,838	72,820	1,064	
		20	16	1.5	8	50.88	0.27	1.02	1,172	5,838	85,130	1,156	
		22	15	1.8	8	50.09	0.28	1.18	892	5,811	65,180	940	
1.6a	発電	24	14	2.1	8	49.50	0.27	1.08	960	5,825	71,460	1,057	
		4	25	9.0	16	49.07	1.18	1.02	800	5,856	47,280	408	
		6	20	9.0	16	52.74	1.19	1.15	1,068	5,868	66,010	624	
		8	17	9.0	16	56.34	1.25	1.98	1,345	5,912	87,230	871	
		10	15	9.0	16	59.09	1.29	2.13	1,403	5,917	92,860	937	
		12	14	9.0	16	59.05	1.31	2.22	1,443	5,908	95,730	1,034	
		14	13	9.0	16	57.76	1.28	1.96	1,522	5,907	99,830	1,036	
		16	13	9.0	16	56.82	1.27	1.63	1,423	5,896	95,660	1,081	
		18	12	9.0	16	55.11	1.24	1.47	1,305	5,887	87,090	993	
		20	12	9.0	16	54.23	1.23	1.20	1,281	5,896	85,150	875	
6.1a	待機	22	12	9.0	16	53.86	1.22	1.35	1,281	5,887	84,710	830	
		24	11	9.0	16	52.82	1.21	1.01	1,240	5,878	83,440	846	
		6.1a	50	11	9.8	16	49.03	1.19	1.03	941	5,956	61,090	499
		6.3a	40	11	6.5	13	46.80	0.52	0.81	696	5,885	43,730	365

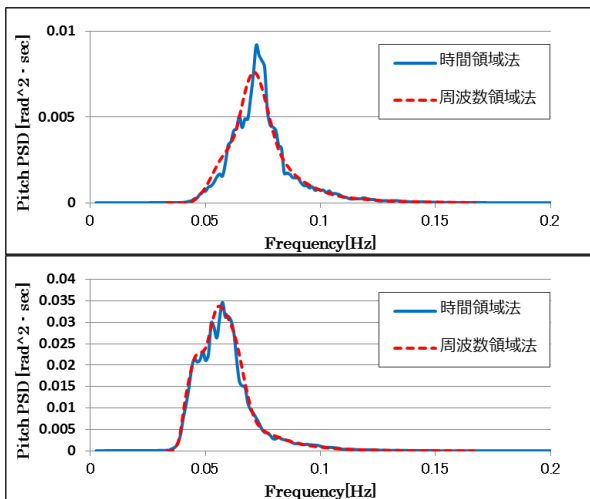


図-1 浮体ピッチ角 (上: 発電時、下: 待機時)

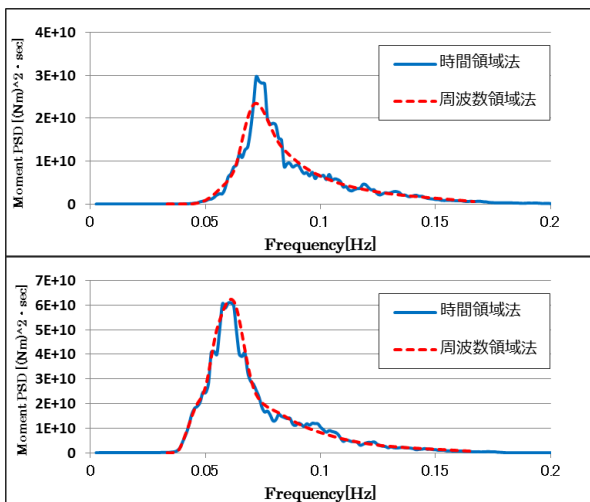


図-2 タワー基部モーメント (上: 発電時、下: 待機時)

これらの図より、ピッチ変位、タワー基部モーメントとも、風車が回転していない待機時には、計算手法による差が小さいことがわかる。一方、発電時にはピーク周波数における値に差が見られる。この原因としては、スラスト荷重と浮体運動の連成が考えられる。また、ここには示していないが、発電時の風条件を乱流風に変更した場合、サージの低周波数運動が卓越し、これに連成したピッチ運動やモーメントの発生が確認されている。このように風車が回転している状態では、周波数領域法の適用に限界があると考えられる。

4. まとめ

1. 風車荷重を考慮した連成一体解析手法を用いた DLC 試解析を実施し、FOWT の変位および荷重と DLC の関係について考察した。その結果、高波浪発電時の定格風速近傍において両者の値が特に大きくなることを確認した。
2. 周波数領域法の適用可能性を数値計算によって検討し、ピッチ運動、タワー基部モーメントともに待機時において十分な精度を有することを確認した。

参考文献

- 1) FAST : <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>
- 2) WAMIT : <http://www.wamit.com/index.htm>
- 3) 浮体式洋上風力発電施設技術基準 : <http://www.mlit.go.jp/common/001011513.pdf>