

15MW風車用の風力発電施設浮体試設計

洋上風力に発電に関する
うみそら研研究会

2021年12月6日

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所
黒岩 隆夫

1. 背景と本検討の目的

- ・ 風力エネルギーの有効利用、浮体式洋上風車の活用の必要性。
- ・ 風車の大型化。最近では**15MW**。

表 大型風車を搭載した浮体式洋上風車の例 (バージ型、TLP型を除く)

浮体形式	スパー型	セミサブ型
商用機	Hywind Tampen (8MW、コンクリート製)	Windfloat Atlantic (8.4MW、スチール製)
検討	福王ら (10MW、コンクリート製)	NREL/Maine大学 (15MW、スチール製、コンクリート製)

本検討の目的

- ・ **15MW**風車を搭載する、スパー型浮体の概略設計。
- ・ スチールとコンクリートの比較。



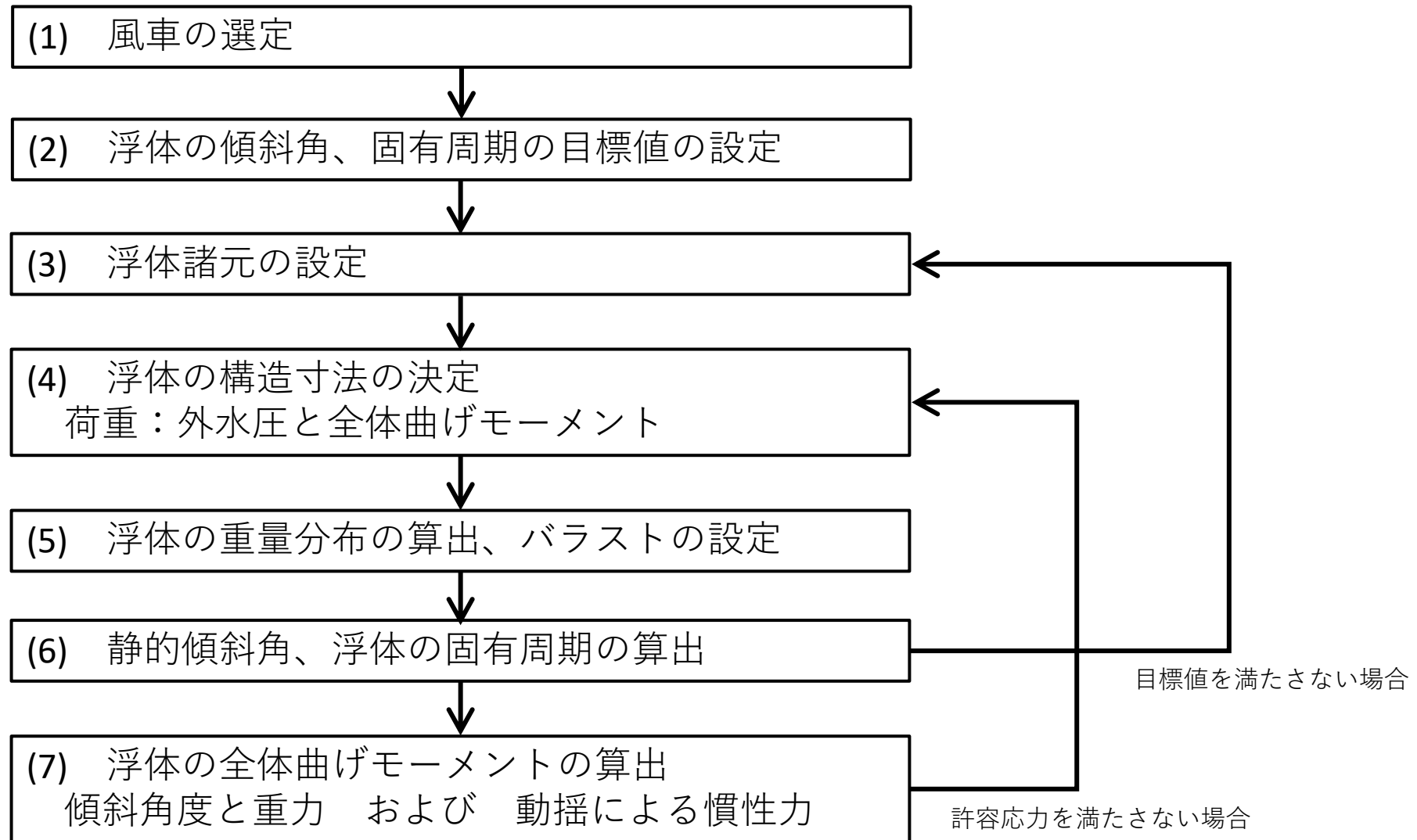
将来の検討

- ・ 大型浮体にコンクリートを用いる場合の課題の抽出
- ・ セミサブ型など各種浮体形式との比較

NEDO先導研究にて、金沢工大とCFRP補強コンクリートを検討中。

別の請負研究にて15MWセミサブ型の検討中。

2. 概略設計の手順



3. 傾斜角・固有周期の目標、風車、浮体諸元

目標値 静的傾斜角：3度以下、動的傾斜角：片振幅5度
 浮体の固有周期：20秒以上

風車：NREL 15MW風車

表 風車の重量、重心高さ

ナセル・ハブ重心高さ	150 m
ナセル重量	631 ton
ハブ重量	190 ton
ブレード重量 (1本)	65 ton
タワー重心高さ	56 m
タワー重量	1,250 ton

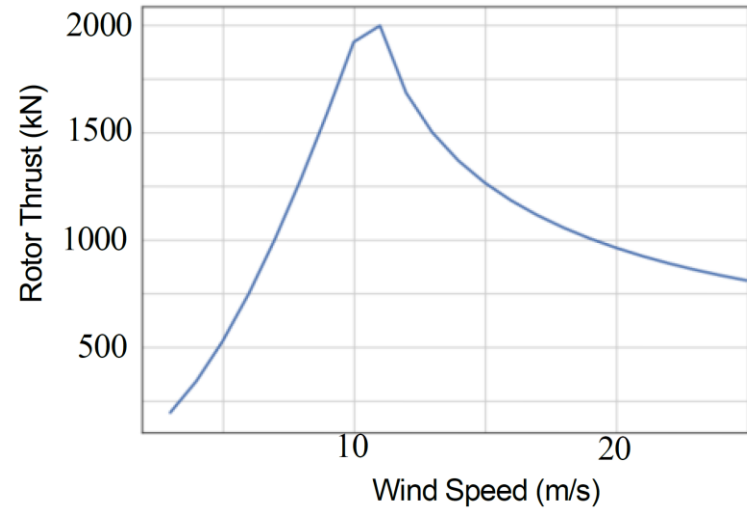
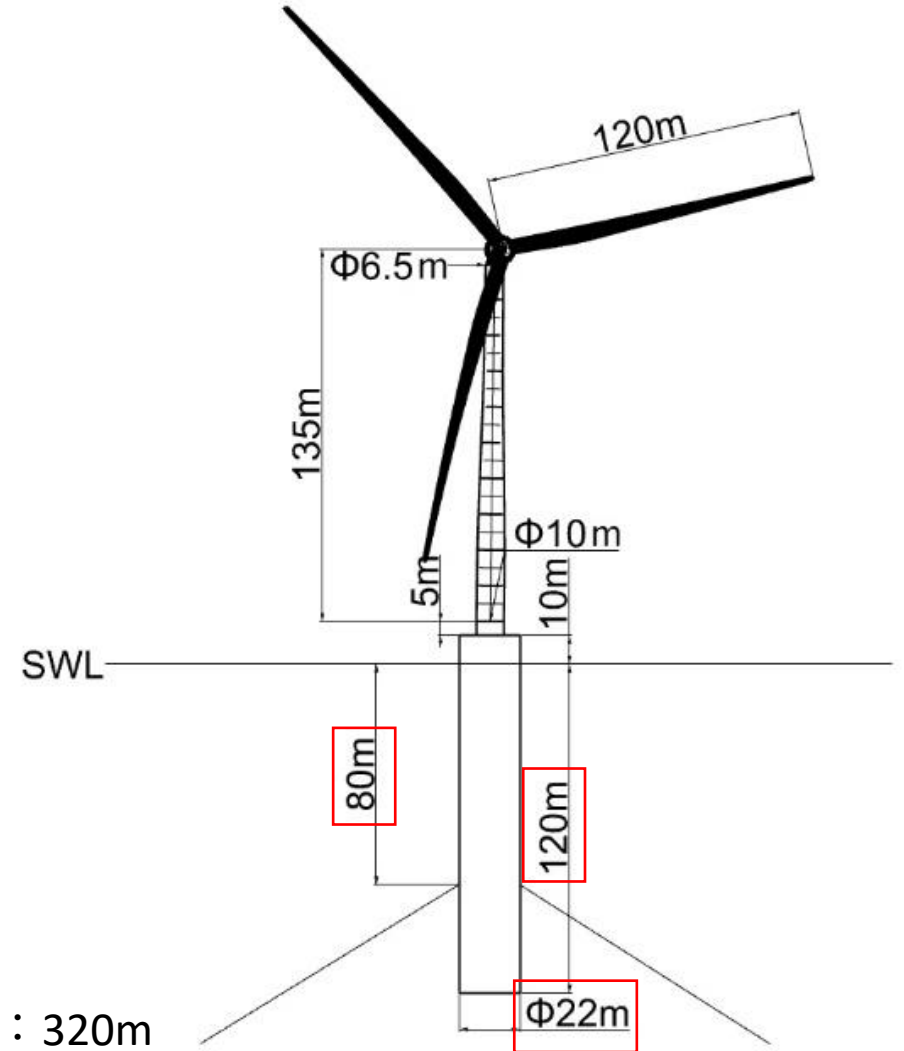


図 スラストカーブ



係留 水深：320m
 係留本数：3本

図 浮体の諸元

4. 浮体の構造寸法の決定（スチール製）

- ・ 水平の隔壁：間隔 $l = 5\text{m}$ （水面～深さ40m）
間隔 $l = 3.3\text{m}$ （深さ40m～深さ120m）
- ・ 鉛直方向のスチフナ：間隔 $S = 0.96\text{m}$ （円周に72本）

(1) 水圧に対して

- ・ 船級協会規則を参考として、以下で寸法を定める。
- ・ スパーの外板の板厚 t 、スチフナの断面係数 Z

$$t = \frac{13}{\sqrt{24 - 15.5 f_B}} S \sqrt{h}$$

$$Z = \frac{100}{24 - 15.5 f_B} S h l^2$$

S : スチフナの間隔 (m)、
 h : 水頭 (m)、

l : 隔壁の間隔（スチフナの長さ）(m)
 f_B : 曲げ応力 (kgf/mm²) / 15.5

(2) 全体曲げモーメント M_T に対して

曲げ応力 = M_T / スパー全体の断面係数

曲げ応力 < 許容応力

5. 浮体の構造寸法の決定（コンクリート製）

- ・ 水平の隔壁は、強度の観点からは設置しない。
損傷時安定性などの観点からの、水平隔壁については別途検討する。
- ・ スチフナは用いない。

(1) 水圧に対して

- ・ 厚肉円筒（外径 R 、内径 r ）とみなして、発生応力を求める。
内面に作用する周方向応力が最大となる。
- ・ 水圧による応力 $\sigma_P < \text{許容応力 } \sigma_A$

$$\sigma_P = -\frac{2pR^2}{R^2 - r^2}$$

(2) 全体曲げモーメント M_T に対して

- ・ 曲げ応力 = $M_T / \text{スパー全体の断面係数}$
- ・ 曲げ応力 $\sigma_M < \text{許容応力 } \sigma_A$

(3) 許容応力 σ_A

- ・ $\sigma_A = 10 \text{ N/mm}^2$ とする。
- ・ 水圧による応力と、曲げ応力は、独立に評価する。

6. 静的傾斜角、固有周期の算出

静的傾斜角 ϕ

$$F L = W g GM \sin \phi$$

F：スラスト力

L：ナセル高さと係留接続位置の間の距離 (230 m)

W：風車、浮体、バラストの全体の重量

GM：重心とメタセンター高さの距離

固有周期 T

$$T = \sqrt{K / I_M}$$

$K = W g GM$ ：復原バネ

I_M ：風車、浮体、バラストおよび付加質量を考慮した回転慣性

7. 検討結果

	スチール製	コンクリート製
最大スラスト力での静的傾斜角度 (度)	2.3	2.7
浮体のピッチ動揺の固有周期 (秒)	24.0	26.5
浮体の板厚 (mm) (*1)	20~50	200~1200
浮体の材料の密度 (kg/m ³)	7,850	2,450
風車・タワー・浮体構造の重量 (ton)	3,000	16,000
バラストの重量 (ton)	43,000	30,000
風車・タワー・浮体構造・バラストの重心高さ (m) (*2)	-84.7	-81.1
浮心高さ (m)	-60.0	
メタセンター高さ (m)	-59.8	
重心～メタセンターの距離 <i>GM</i> (m)	24.9	21.4

(*1) スチール製浮体では等価板厚.

(*2) 水面を 0m とし, 鉛直下向きが負.

- ・コンクリート製の外板の板厚は、200～1200mm。
- ・外径22m、板厚1.2mのコンクリート製円筒を、適切に製造する方法が、今後の検討課題。

- ・スチール製に比べ、コンクリート製は静的傾斜角度が大きく、固有周期が長い。
- ・スチール製に比べ、コンクリート製の浮体の板厚が厚く、材料の密度を考慮しても、浮体の重量が重い。
- ・その分、バラストの重量が軽く、全体の重心が高い。
- ・そのため、ピッチに対する復原力Kが、コンクリート製はスチール製の約8割であった。

7. 検討結果 (続き)

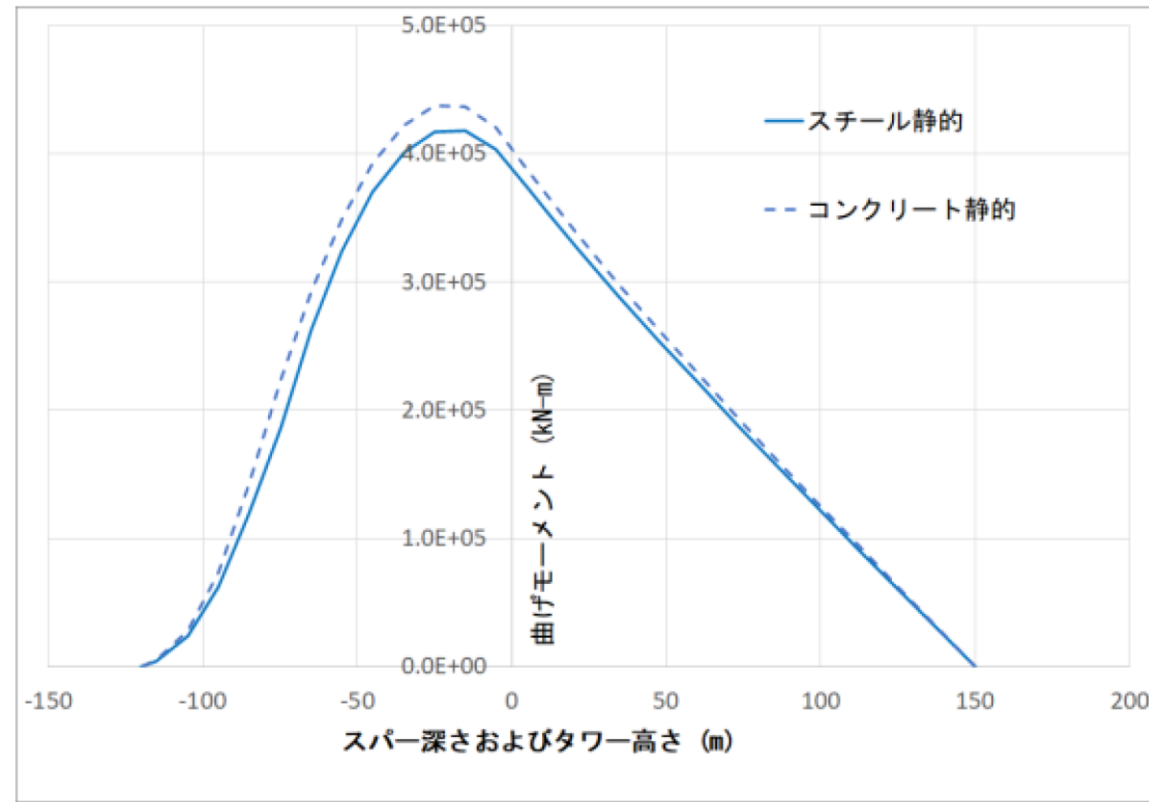


図 静的曲げモーメント (風車最大スラスト力に対する)

- 静的曲げモーメントは、水面より少し下で最大の約400 MN-mであった。
- スチール製に比べ、コンクリート製の浮体の静的傾斜角がやや大きく、その分曲げモーメントがやや大きい。

8. 数値シミュレーション（連成・時系列解析）

- ・ 浮体の設計は、風況・海象・風車の運転状態の組合せからなる、多数の**Design Load Case**に対して、風車と浮体の連成・時系列解析を行って、各部に作用する最大荷重・疲労荷重を算出し、それらの荷重に対する構造設計を行う。
- ・ 今回概略設計を行った浮体に対して、連成解析を試行した。
- ・ **Orcina**社製の**OrcaFlex**を用いた。風車の制御は、**NREL**から提供されている浮体風車用のものを用いた。
- ・ タワーおよび浮体は、**OrcaFlex**の**Line**要素を用いて弾性体としてモデル化した。
- ・ 浮体に作用する付加質量、流体減衰は、モリソン式によって与えた。

- ・ 海象は、波高**2m**、周期**6秒**の**JONSWAP**スペクトルの長波頂不規則波とした。
- ・ 風は、平均風速**10m/s**の非定常風とした。
- ・ 波の向きと、風の向きは一致させた。

設計荷重ケース (Design Load Case) 環境条件

表 2-1 設計荷重ケース (DLC)

設計条件	DLC	風条件	波	風及び波の方向性	海流	水位	その他の条件	解析のタイプ	部分安全率
1) 発電	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	RNA に対する 極値荷重の外挿時	U	N (1.25)
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS H_s 、 T_p 及び V_{hub} の結合確率分布	MIS 及び MUL	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—

MIS 方向の不ぞろい (第2編第1章3-1.を参照)

MUL 多方向 (第2編第1章3-1.を参照)

疲労強度検討 (F)

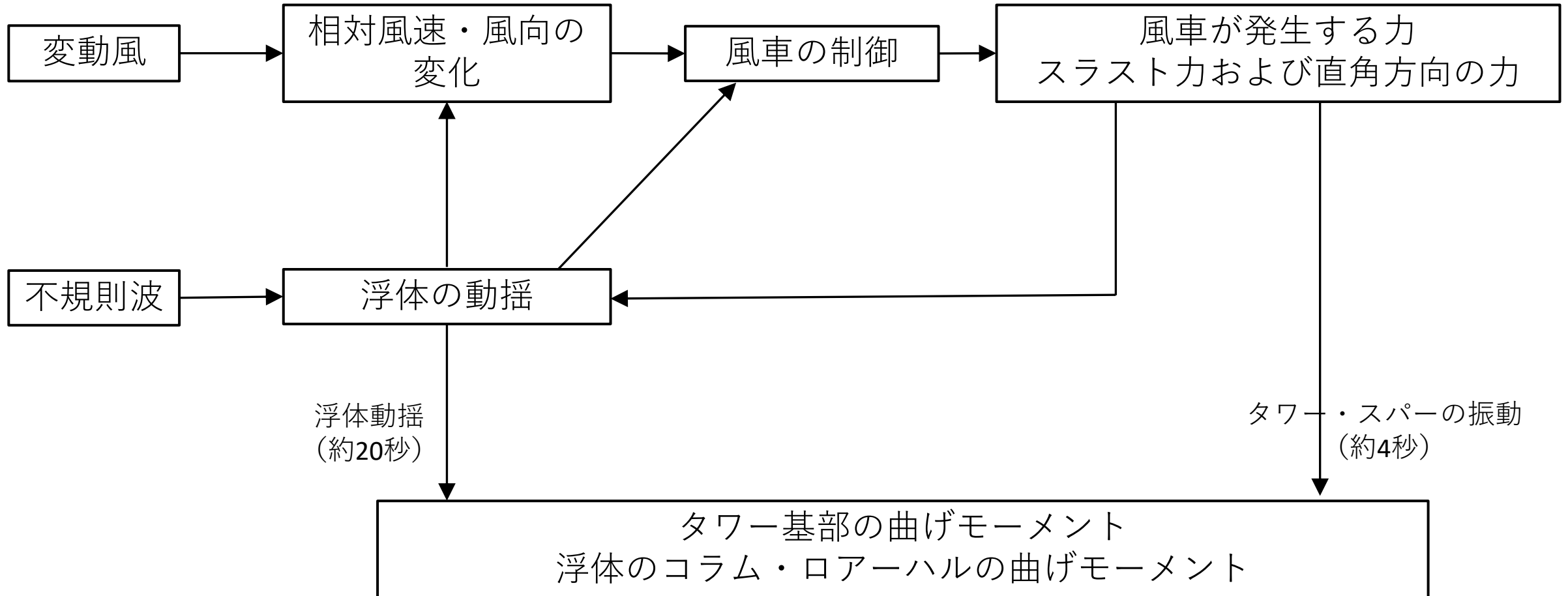
風速 V_{hub} : 発現確率を考慮する。

波浪 : 波高 H_s 、波周期 T_p と、風速 V_{hub} の結合確率分布を考慮する。

MIS : 風と波の方向の不一致を考慮する。

MUL : 多方向

風車と浮体の連成の概念

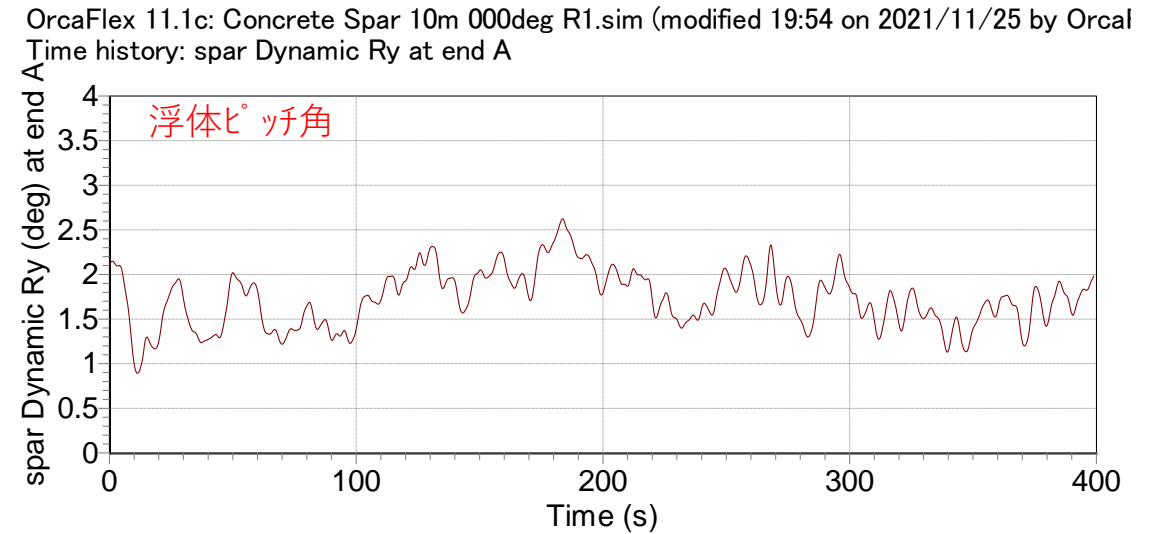
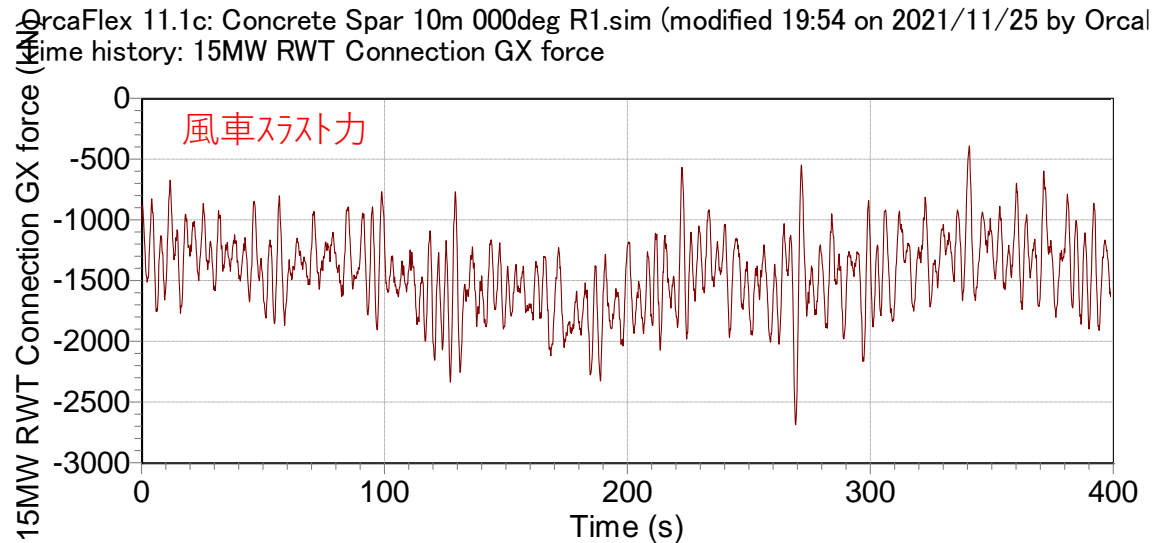
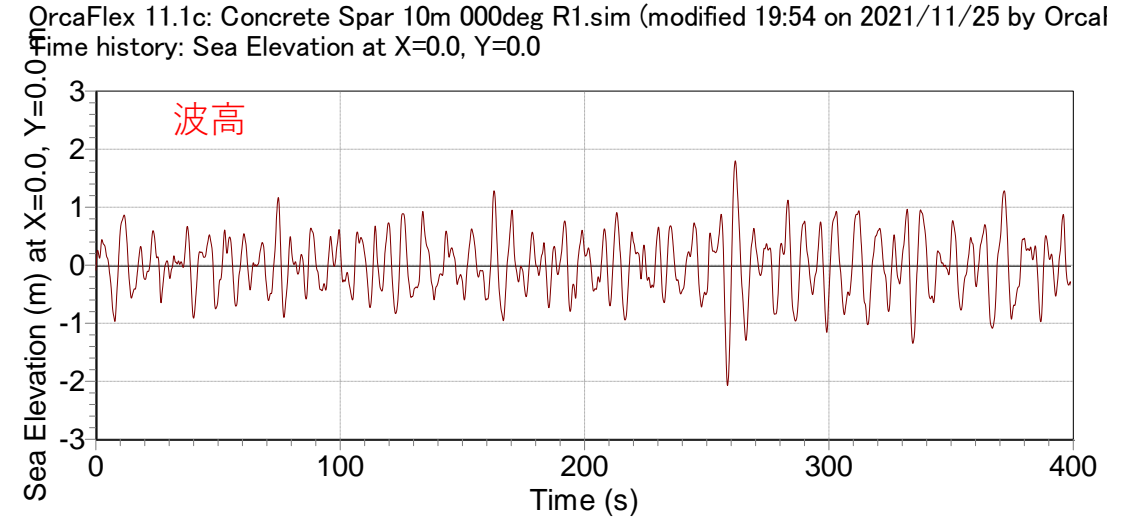
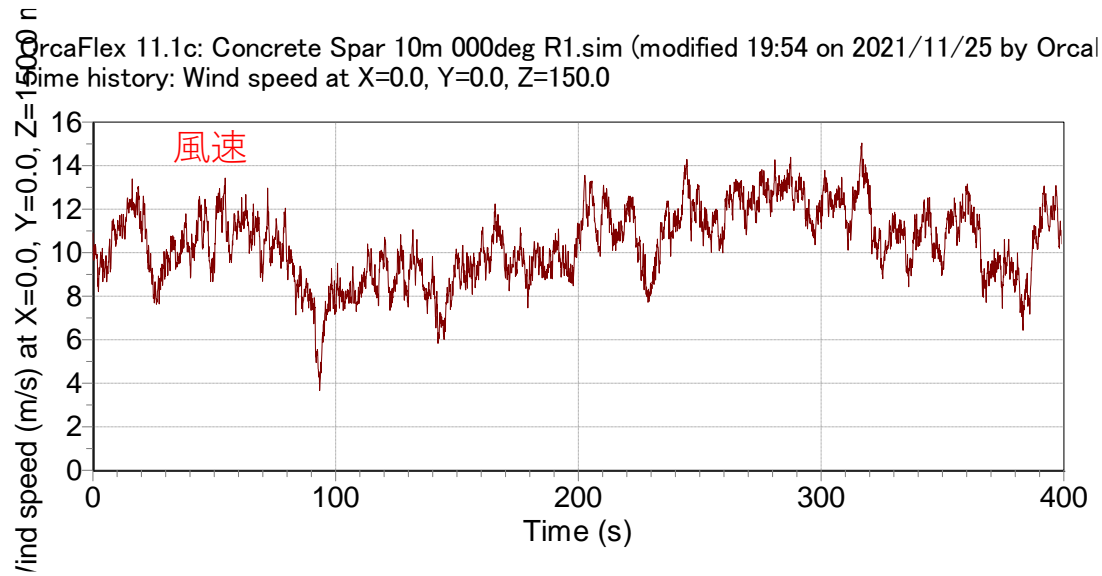


風、波、風車スラスト力、浮体ピッチ

コンクリート製スパー

風：IEC Kaimal、Ref, mean speed = 10 m/s

波：JONSWAP、 $\gamma = 1$ 、 $H_s = 2$ m、 $T_z = 6$ s



タワー基部の曲げモーメント

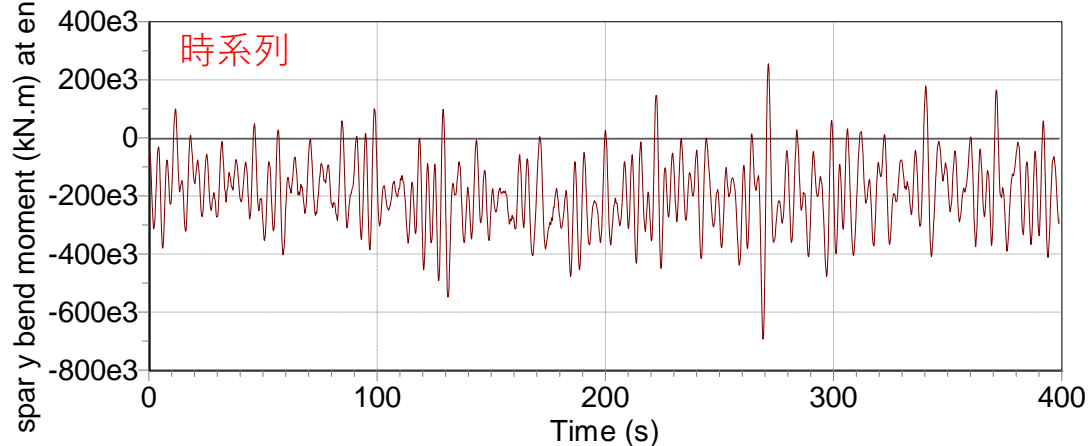
コンクリート製スパー

風：IEC Kaimal、Ref, mean speed = 10 m/s

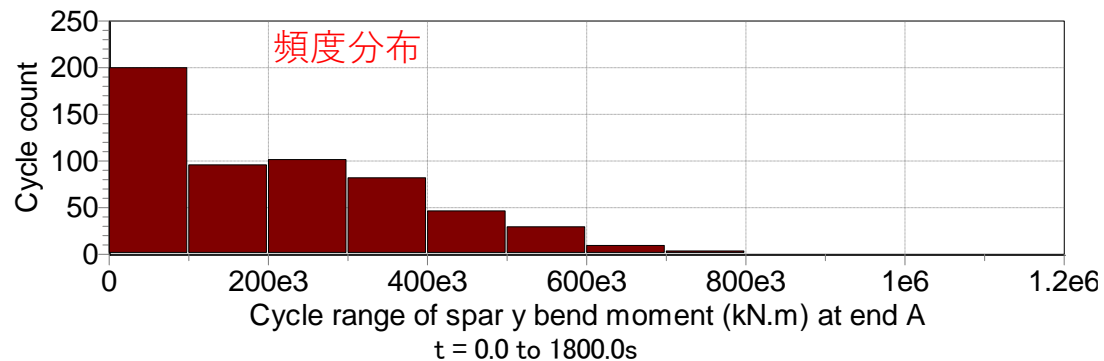
波：JONSWAP、 $\gamma = 1$ 、 $H_s = 2$ m、 $T_z = 6$ s

Y軸回り (風方向)

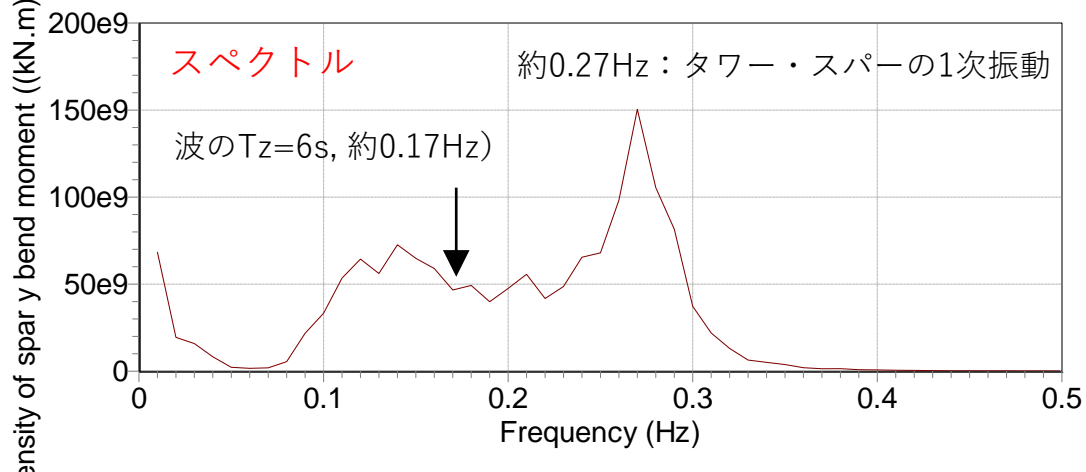
OrcaFlex 11.1c: Concrete Spar 10m 000deg R1.sim (modified 19:54 on 2021/11/25 by OrcaFlex)
Time history: spar y bend moment at end A



OrcaFlex 11.1c: Concrete Spar 10m 000deg R1.sim (modified 19:54 on 2021/11/25 by OrcaFlex)
Rainflow cycles of spar y bend moment at end A



OrcaFlex 11.1c: Concrete Spar 10m 000deg R1.sim (modified 19:54 on 2021/11/25 by OrcaFlex)
Spectral density of spar y bend moment at end A, over t = 0.0 to 1800.0s



- S-Nカーブを与えて、疲労被害度を算出する。今後実施予定。

9. まとめ

- (1) 現在の最大級の風車である**15MW**風車用の、スパー型浮体の予備検討を行った。浮体の傾斜角、固有周期、および構造強度の観点から、スチール製あるいはコンクリート製で成立することが分かった。
- (2) OrcaFlexによる数値シミュレーションを行い、静的傾斜角度、傾斜角度に対するタワー基部の曲げモーメントは、概略計算の結果とほぼ一致した。今後、多くの風況、海象条件に対する数値シミュレーションを行い、浮体の挙動を確認していく。
- (3) これらの結果を用いて、今後大型浮体にコンクリートを用いる場合の課題の抽出、各種浮体形式との比較を行う。

謝辞

本研究の一部は、NEDO先導研究プログラム（JPNP14004）／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム、「超長寿命CFRP補強コンクリートの研究開発」の一部として行った。