



第22回 海上技術安全研究所講演会



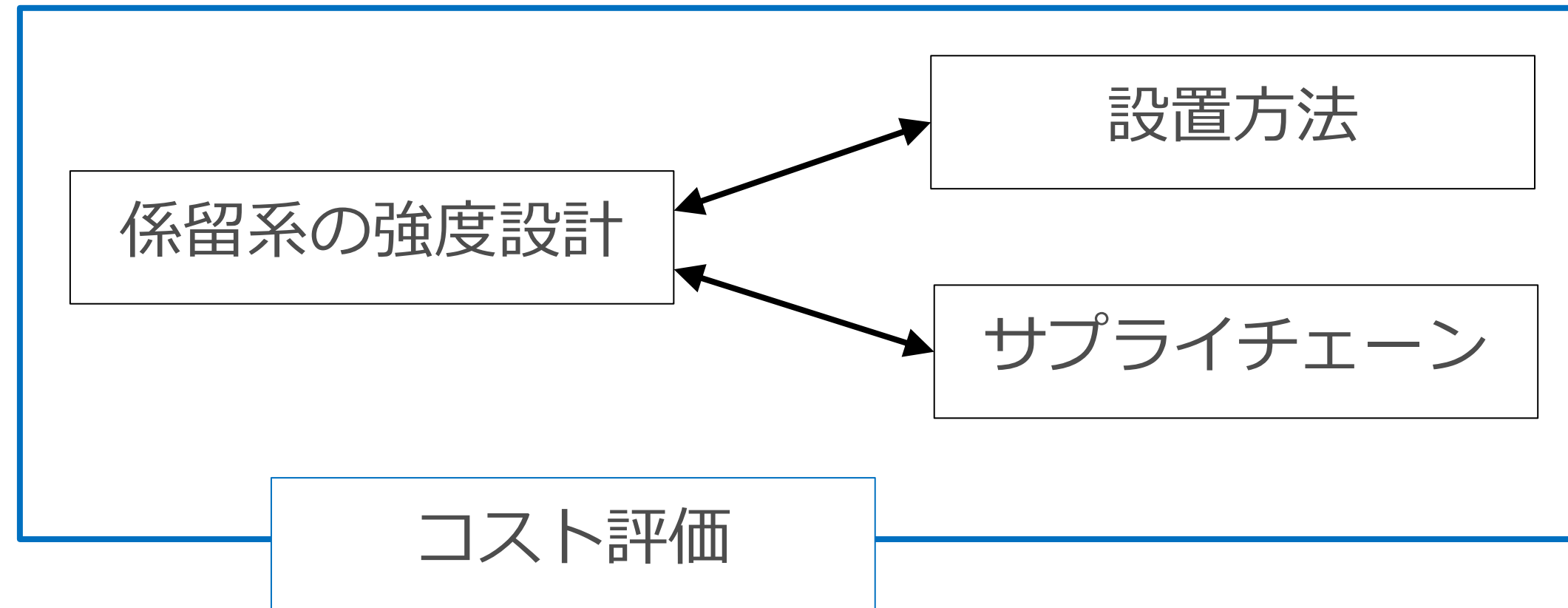
15MW浮体式洋上風力発電の係留系の設計

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 洋上風力発電PT 副PT長 黒岩 隆夫

株式会社ClassNKコンサルティングサービス 今村 博
(現 株式会社ウインドエナジーコンサルティング 代表取締役)

1. はじめに
2. 係留系の強度設計
 - 2.1 設計条件
 - 2.2 設計手順
 - 2.3 数値シミュレーション
 - 2.4 数値シミュレーション結果
3. 係留系の設置方法と設置コスト
 - 3.1 設置工程および影響する設計パラメータ
 - 3.2 係留索の本数と把駐力試験の荷重
 - 3.3 設置方法の検討
 - 3.4 設置工程の検討
 - 3.5 設置コストの検討
4. 係留系のサプライチェーンと材料コスト
 - 4.1 サプライチェーン
 - 4.2 材料コスト
5. まとめ

1. はじめに



- 係留系を合理的に設計するためには、
設置方法やサプライチェーンの制約も考慮して強度設計を行って、
係留系全体のコストを評価する必要がある。
- 本研究では、セミサブ型の15MW浮体式風車の係留系を対象に、
一連の検討を試みた。（NEDO/NKCS 2021年度研究）

2. 係留系の強度設計

2.1 設計条件



対象浮体、風車

- ・ 15MW風車用のスチール製セミサブ型浮体（NEDO/NKCS 2021年度研究）
- ・ 浮体：NRELおよび米Maine大学の浮体（右図）を参考とした。
- ・ 風車：NREL（米国再生可能エネルギー研究所）提案の15MW風車

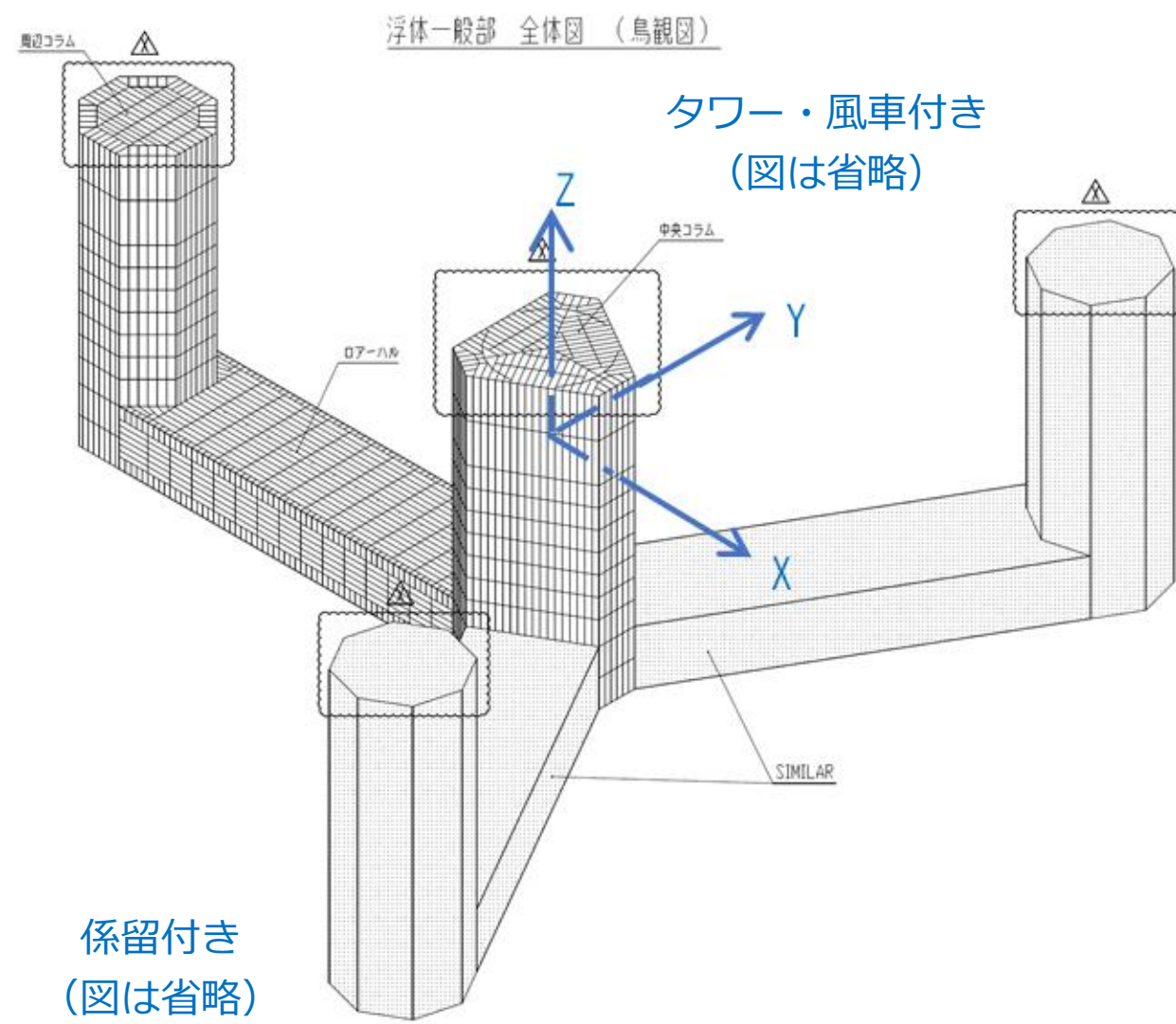


図 検討対象のスチール製セミサブ型浮体

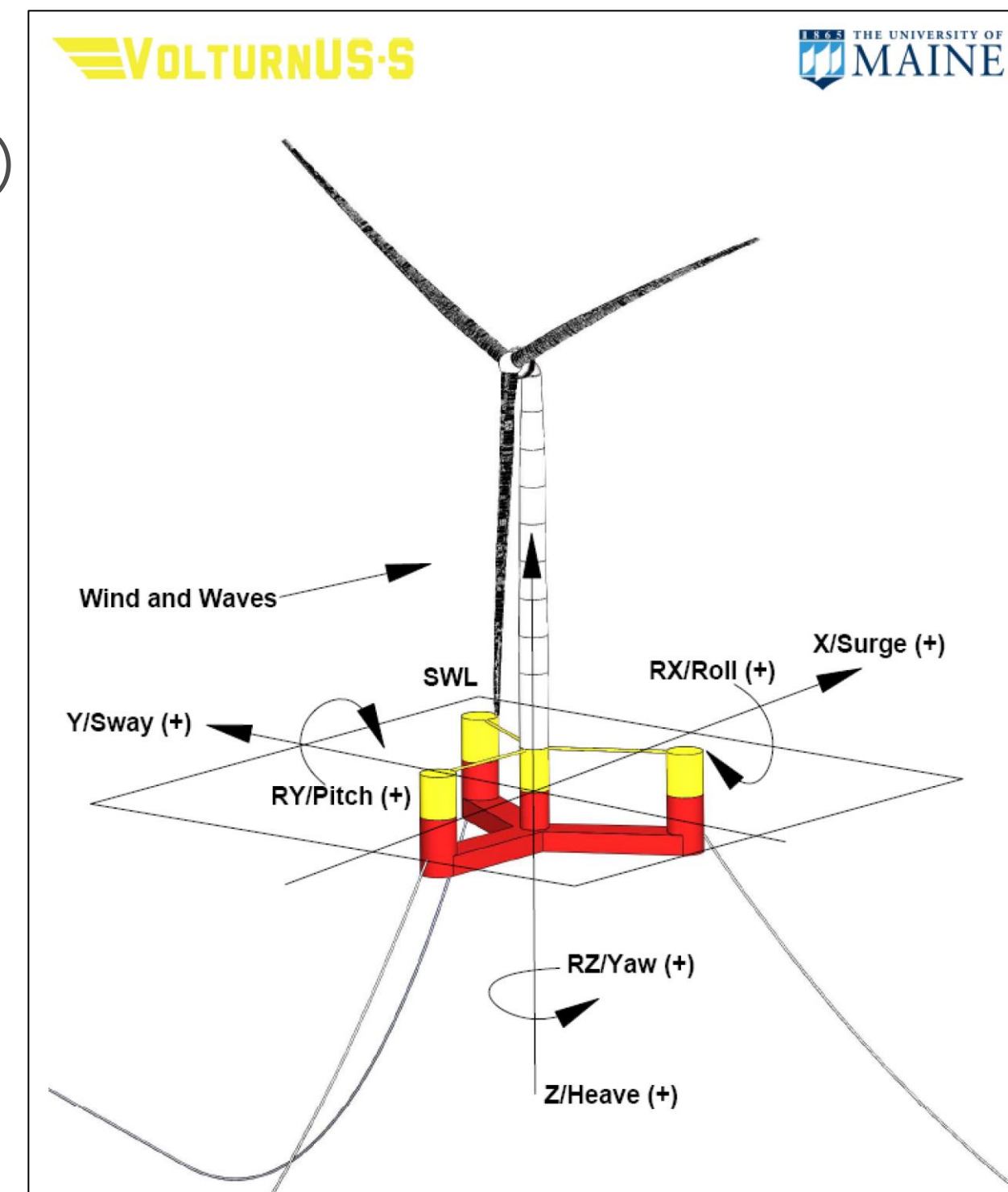


図 NRELとMaine大学の浮体

Allen, C. et al : Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5000-76773, 2020.

2. 係留系の強度設計

2.1 設計条件



水深、係留のタイプ

係留のタイプ	水深200m	水深100m
鋼製チェーンのみ	○	(検討対象外)
合成繊維索と鋼製チェーンの組合せ 以下「合成繊維索」と称す	○	○

風況、海象条件

- ・ 再現期間50年の極値風速 : 57 m/s (10分平均)
- ・ 再現期間50年の極値海象 : 有義波高 13.4 m、波周期 13 s
- ・ 潮流 : なし
- ・ 地盤 : 砂地盤

2.2 設計手順



係留系を以下の手順で設計した。

浮体～アンカーの水平距離

- ・水深の4～5倍を目安として、なるべく短く設定した。

係留索の本数

- ・3方向 × (2または3本) とした。

定常外力による設計

- ・風速 57 m/s、有義波高 13.4 mに対して、定常外力を下記と推定し、係留系を初期設計した。
- ・風荷重 (ロータ、タワー) : 2,800 kN
- ・風荷重 (浮体乾舷部) : 1,100 kN
- ・波漂流力 : 300 kN

数値シミュレーションによる設計

- ・上記の初期設計に対してシミュレーションを行い、チェーンやロープの太さなどを決定した。
- ・シミュレーションによって係留索に発生する最大の張力に対して、鋼製チェーンや合成繊維索 (ナイロンロープ) の破断荷重が、安全率を満たすこと。
- ・安全率は、NKガイドラインに基づき、動的解析を行う場合の以下とした。

鋼製チェーン : 1.67 合成繊維索 : 2.50

2.3 数値シミュレーション

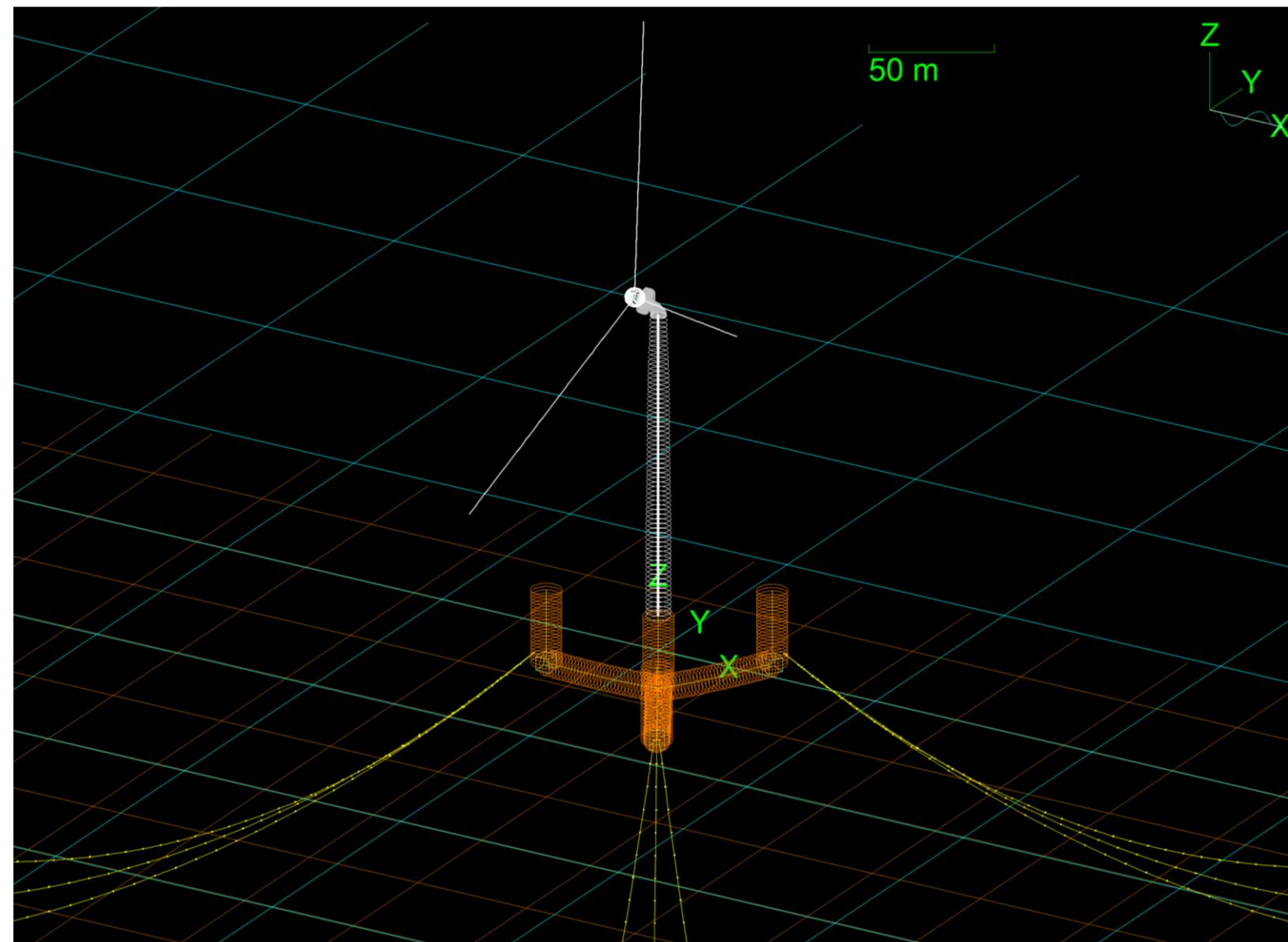
- 市販プログラムOrcaFlexにより、応答・荷重計算を実施した。

風車：Orcina社提供のNREL 15MW風車モデル

タワー、浮体：Line要素（弾性有限要素） 曲げ・捩り・軸剛性を考慮

係留索： Line要素（弾性有限要素） 軸剛性を考慮

流体外力：浮力、モリソン式



数値シミュレーション（計算条件）



表 設計荷重ケース DLC 1.6, DLC 6.1

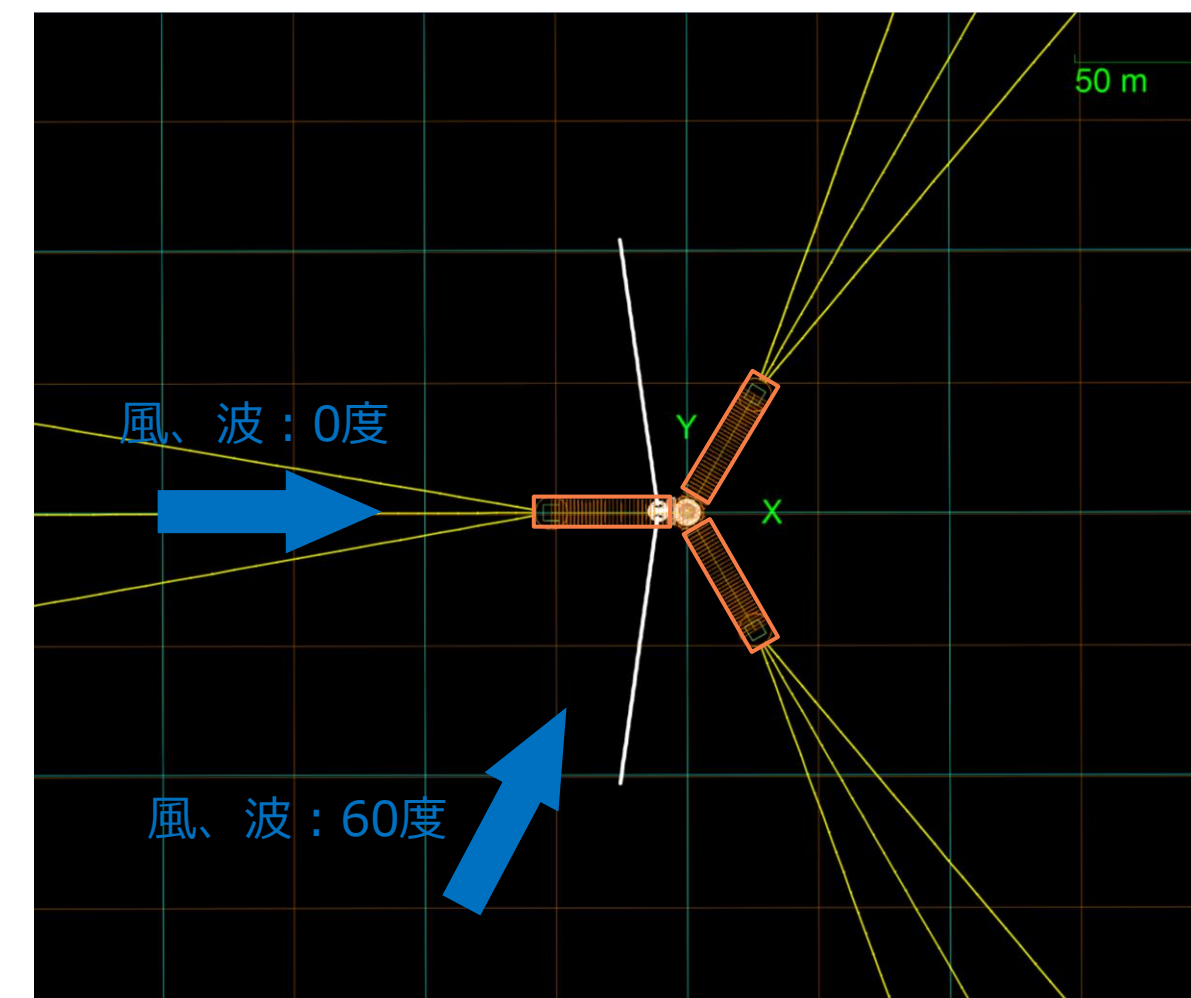
設計荷重ケース	風車の状態	風	波
DLC 1.6	通常発電時	3~25 m/s	有義波高 13.4 m 波周期 13 sec
DLC 6.1	暴風待機中	57 m/s	同上

表 応答計算での波と風の向き 通常発電時（DLC 1.6）

	波の方向 0 度	波の方向 60 度
風の方向 0 度	○（同一方向）	—
風の方向 60 度	—	○（同一方向）

表 応答計算での波と風の向き 暴風待機中（DLC 6.1）

	波の方向 0 度	波の方向 60 度
風の方向 0 度	○（同一方向）	—
風の方向 60 度	○	○（同一方向）
風の方向 120 度	○	○
風の方向 180 度	○	○
風の方向 240 度	—	○

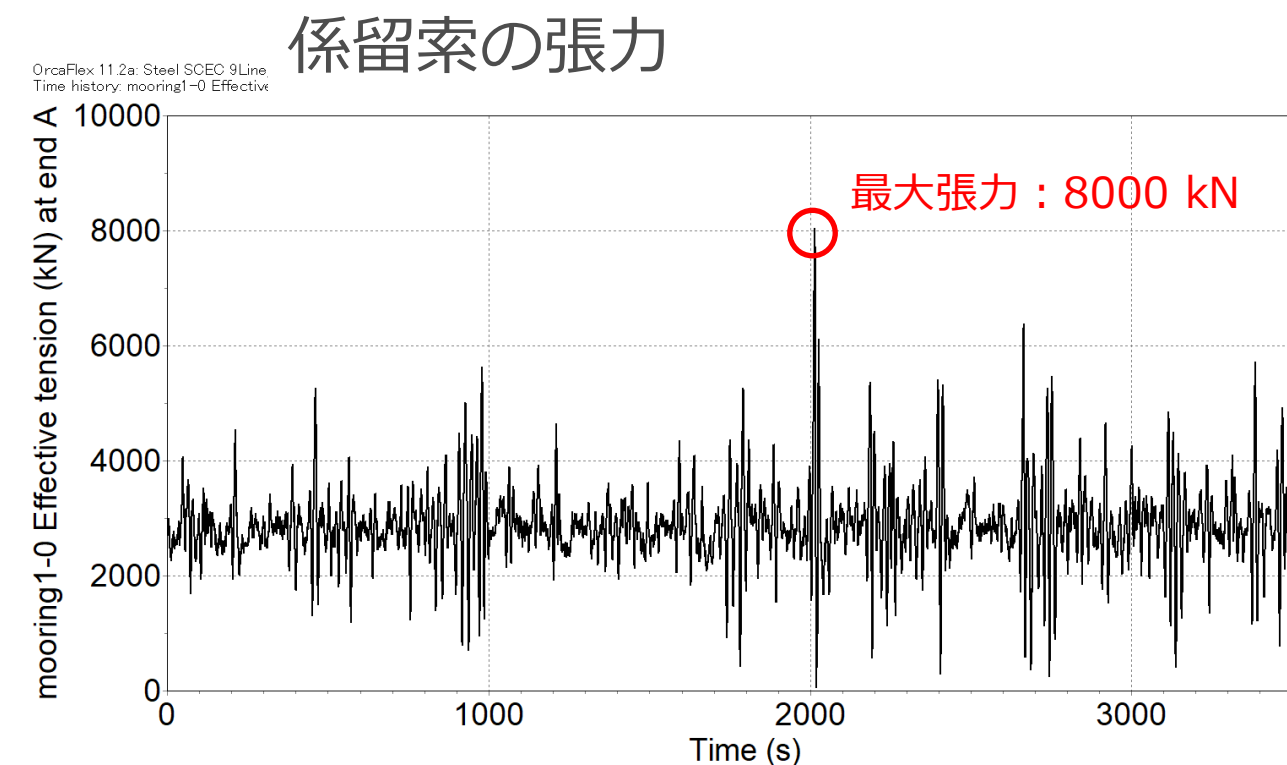
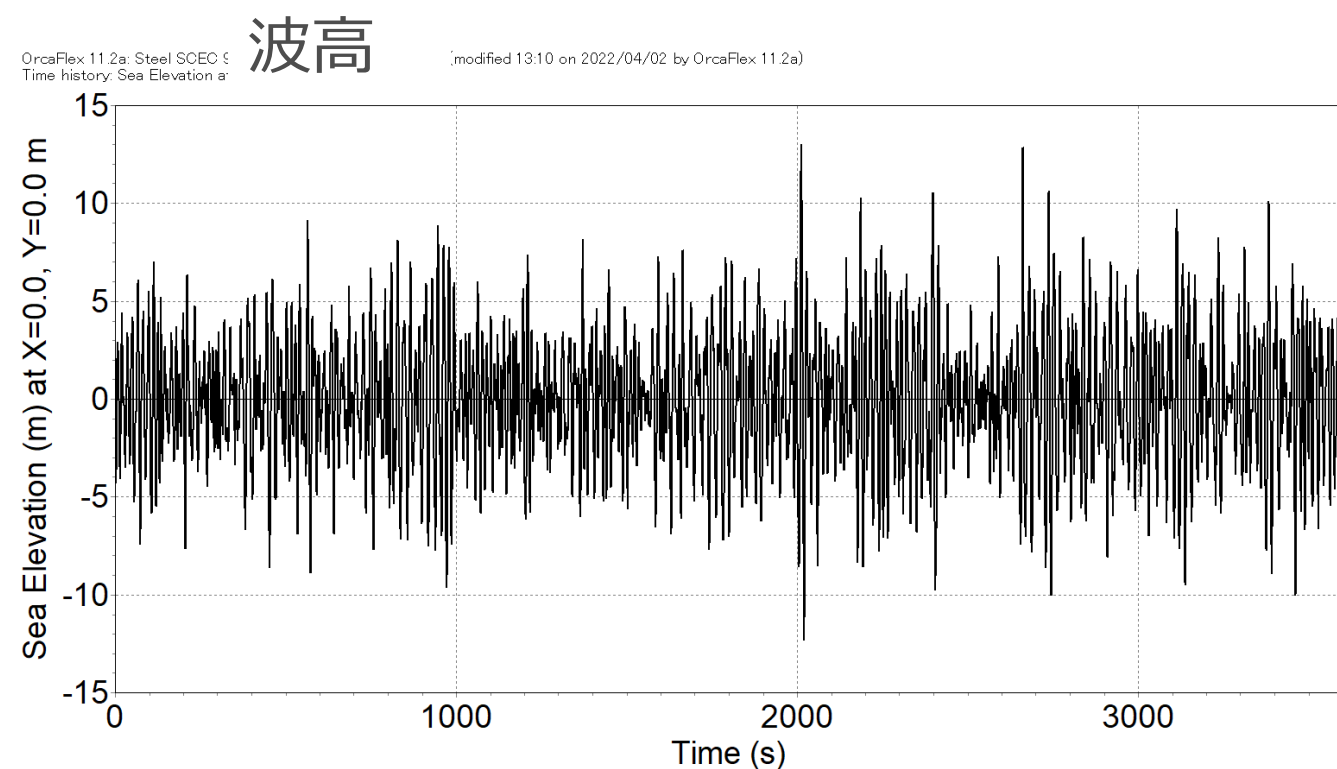
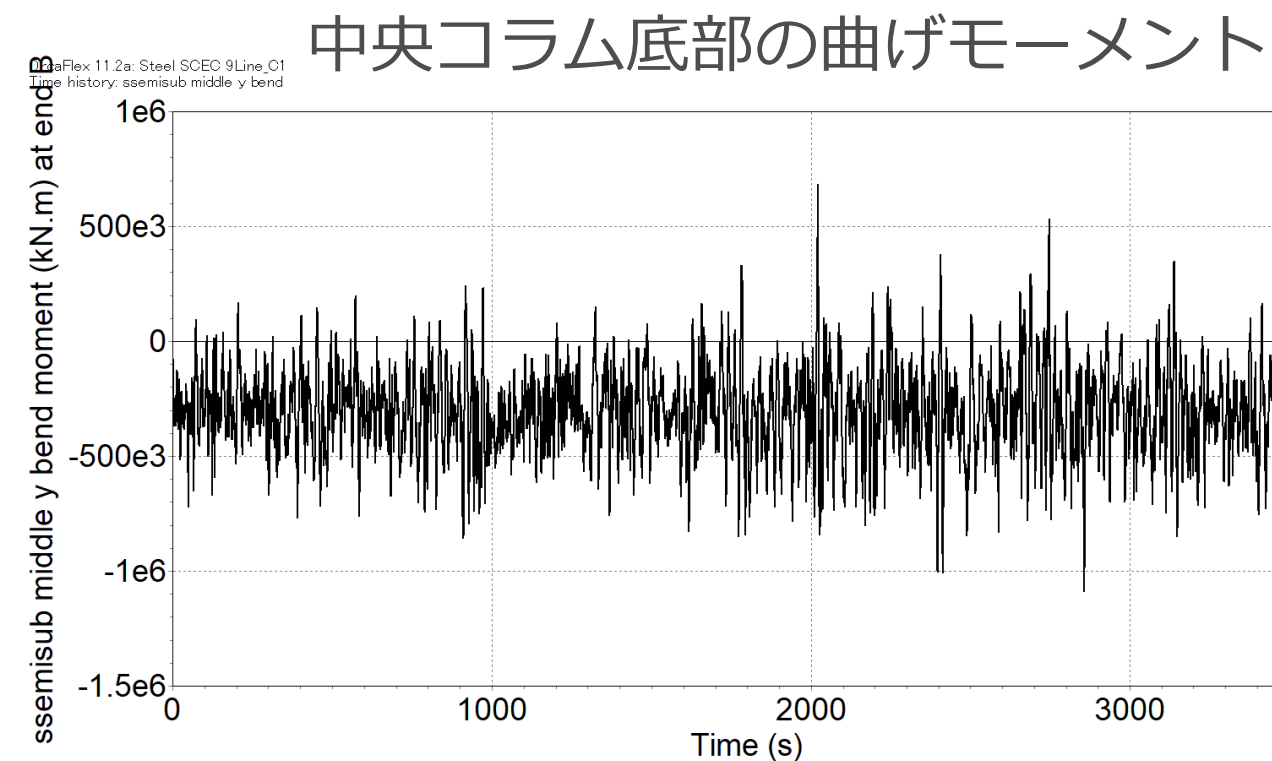
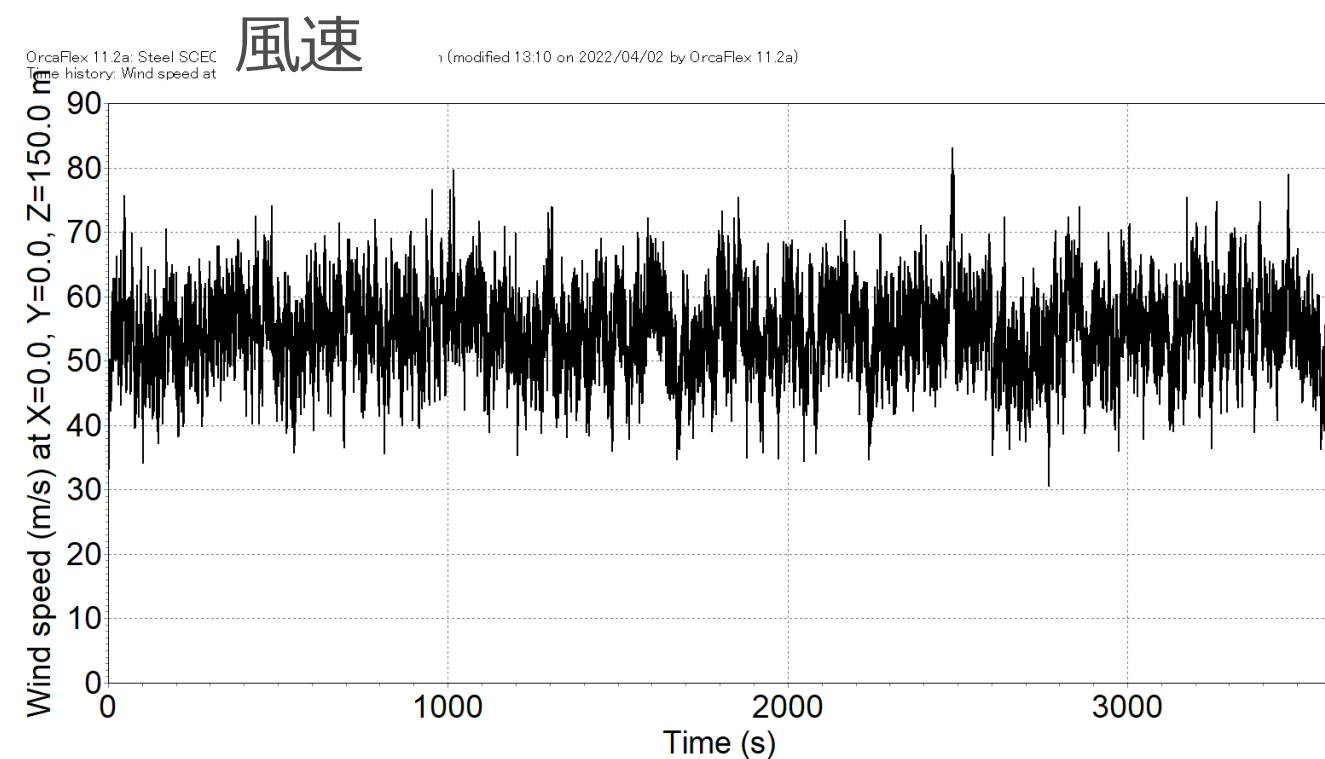


- 参考文献
- ・国土交通省海事局：浮体式洋上風力発電施設技術基準 安全ガイドライン、2020年3月。
 - ・日本海事協会：浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン、2012年7月。

数値シミュレーション（計算例）

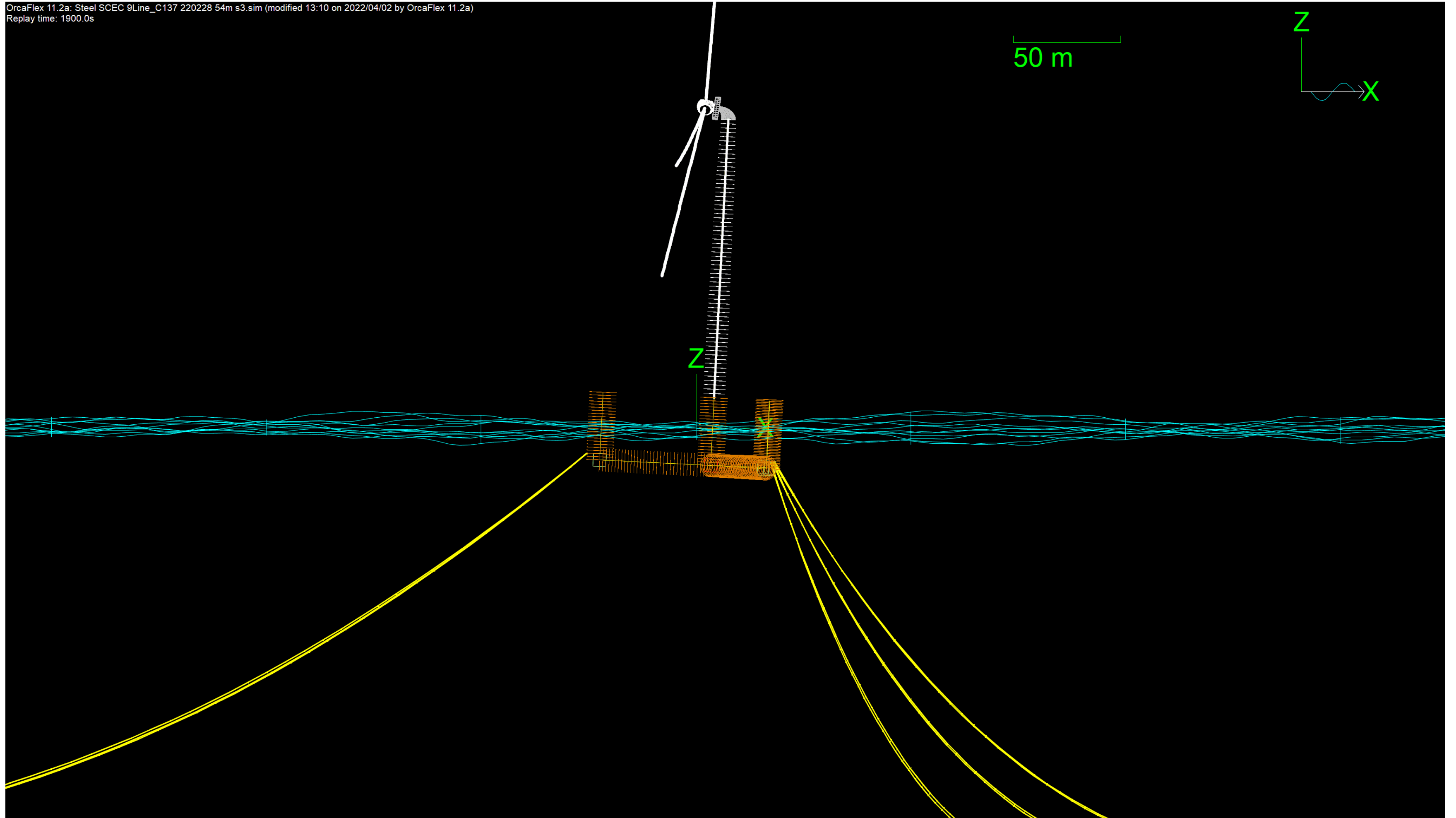


- 計算結果の例（風速57 m/s、有義波高13.4 m、波周期13 s、風および波：X正の方向へ）

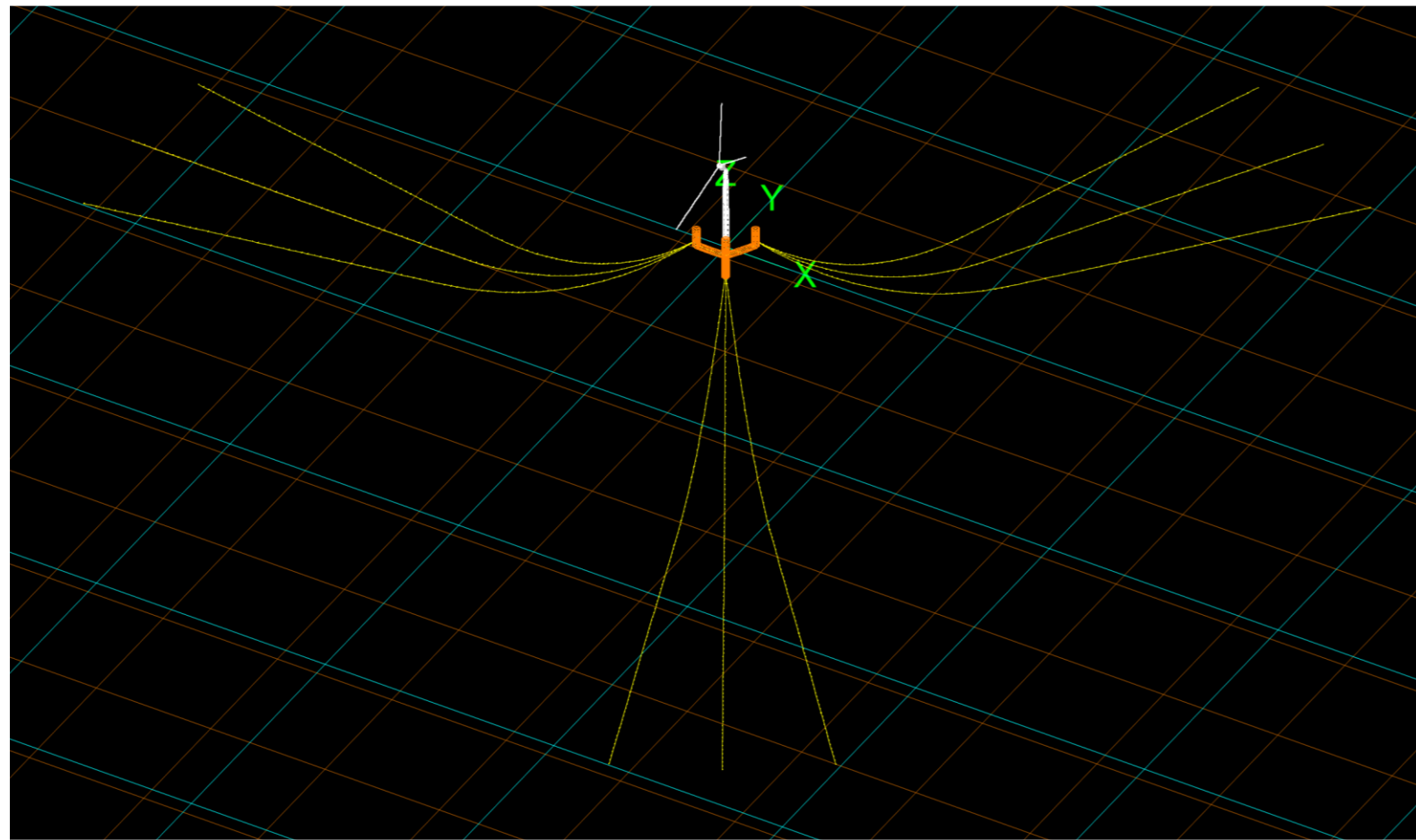


・ 計算結果の例（風速57 m/s、有義波高13.4 m、波周期13 s、風および波：X正の方向へ）

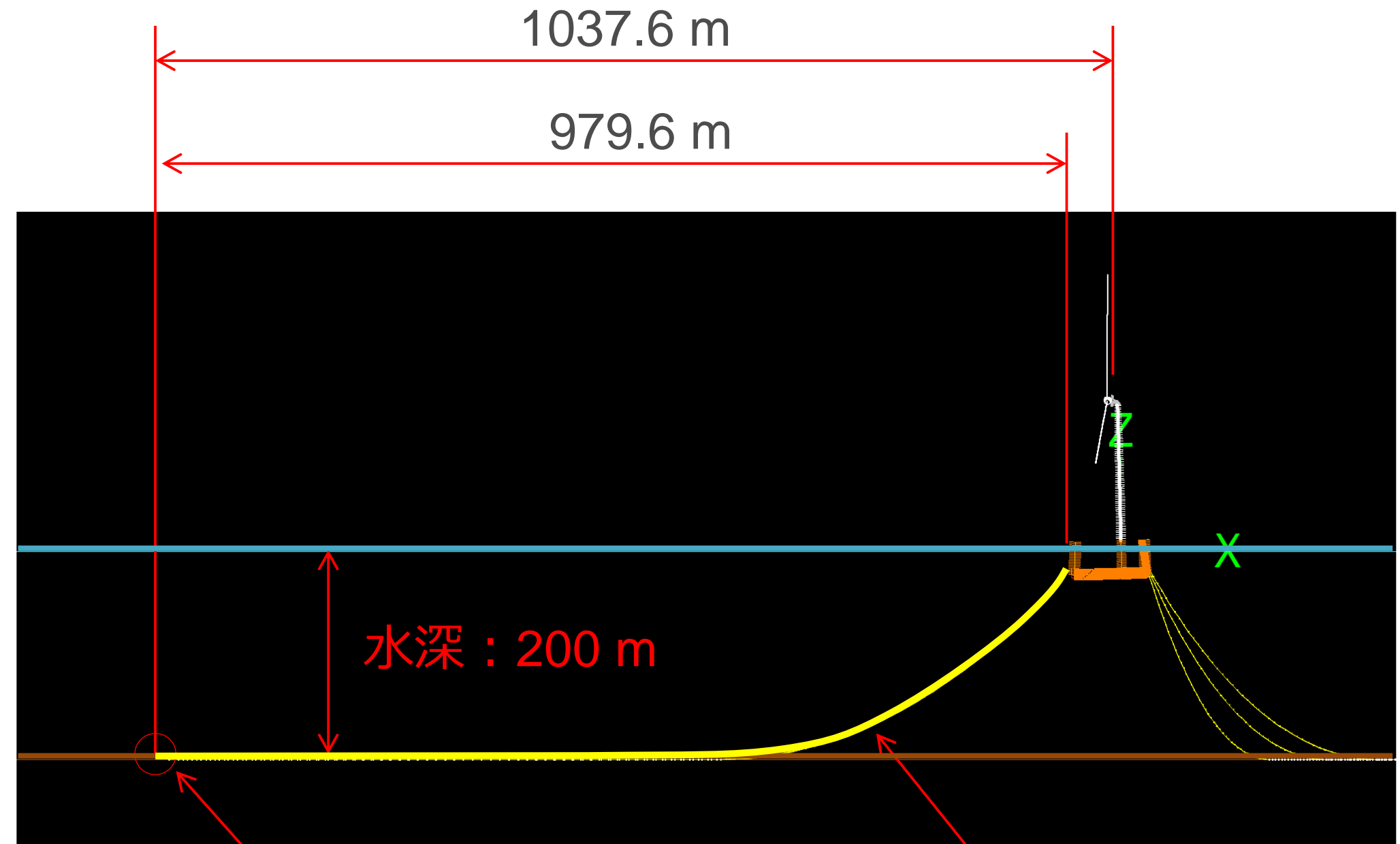
OrcaFlex 11.2a: Steel SCEC 9Line_C137 220228 54m s3.sim (modified 13:10 on 2022/04/02 by OrcaFlex 11.2a)
Replay time: 1900.0s



2.4 数値シミュレーション結果 (1) 鋼製チェーン、水深200m



3方向 × 3本 : 合計 9本



アンカー

チェーン長さ : 1031 m

(1) 鋼製チェーン、水深200m (続き)

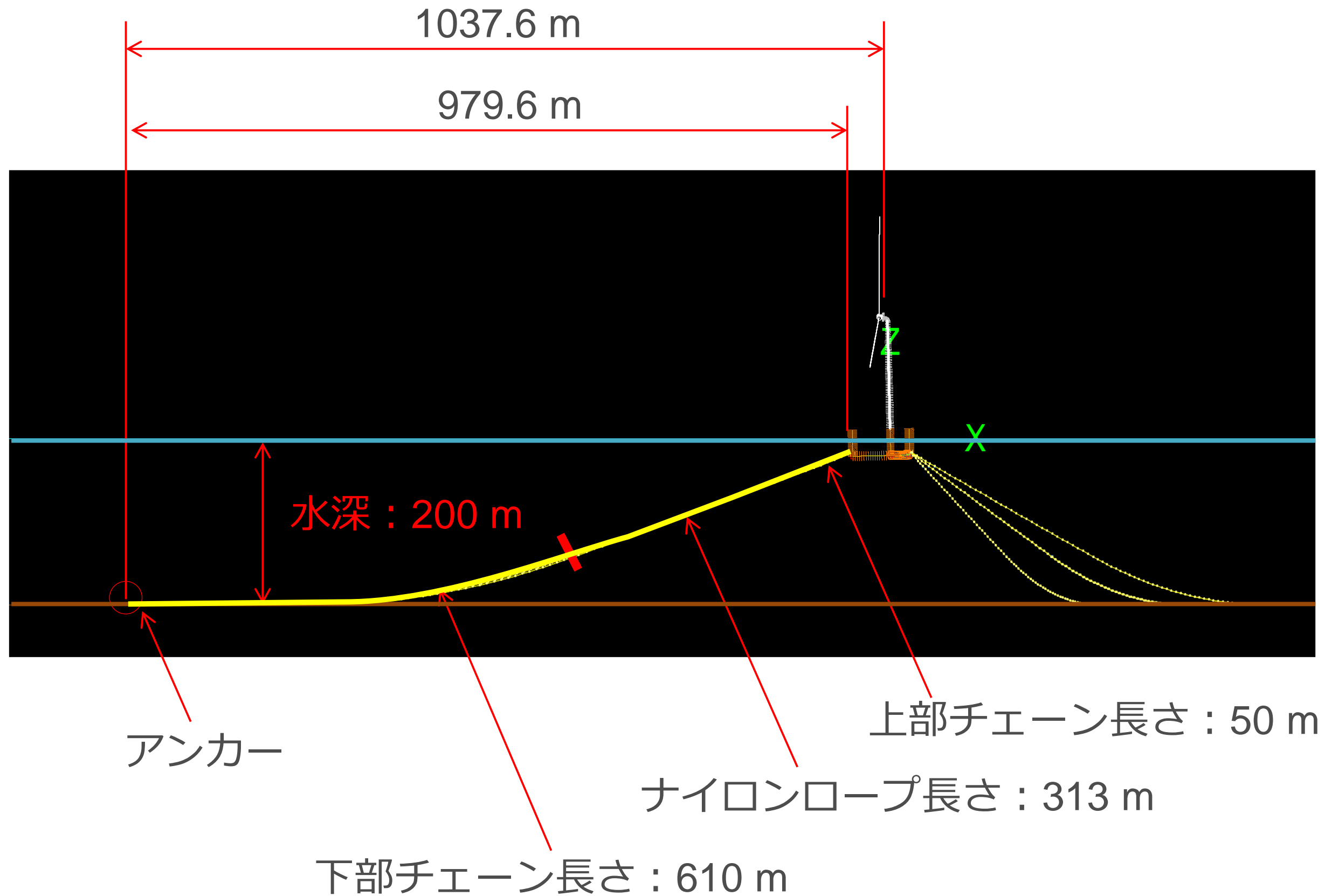


水深	200 m
係留索の本数	3 方向 × 3 本 : 合計 9 本
浮体中心とアンカーの水平距離	1037.6 m
係留索の長さ	チェーン : 1031 m
係留索の仕様 (チェーン)	呼び径 137、R3、Studless 375 kg/m
アンカー (Stevpris MK6)	20 ton × 9 個

(注) Stevpris MK6 : Delmar System and Vryhof 社

数値シミュレーション結果

(2) 合成繊維索、水深200m, 100m



(2) 合成繊維索、水深200m, 100m (続き)



水深	200 m	100 m
係留索の本数	3 方向 × 3 本 : 合計 9 本	同左
浮体中心とアンカーの水平距離	1037.6 m	同左
係留索の長さ	上部チェーン : 50 m ナイロンロープ : 313 m 下部チェーン : 610 m	上部チェーン : 50 m ナイロンロープ : 292 m 下部チェーン : 610 m
係留索の仕様 (チェーン)	呼び径 111、R3、Studless 246 kg/m	呼び径 132、R3、Studless 348 kg/m
係留索の仕様 (ナイロンロープ)	径 270 mm	径 310 mm
アンカー (Stevpris MK6)	15 ton × 9 個	18 ton × 9 個

(注) Stevpris MK6 : Delmar System and Vryhof 社

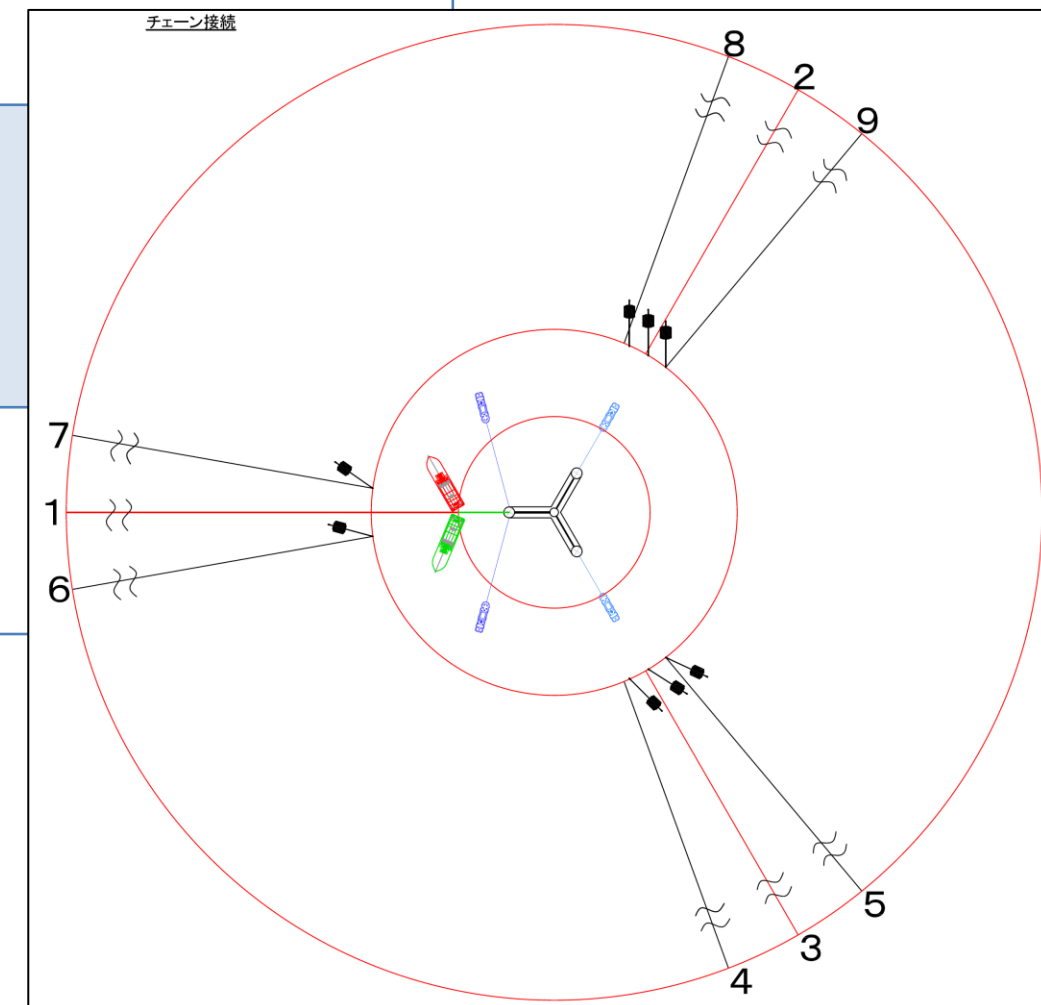
1. はじめに
2. 係留系の強度設計
 - 2.1 設計条件
 - 2.2 設計手順
 - 2.3 数値シミュレーション
 - 2.4 数値シミュレーション結果
3. 係留系の設置方法と設置コスト
 - 3.1 設置工程および影響する設計パラメータ
 - 3.2 係留索の本数と把駐力試験の荷重
 - 3.3 設置方法の検討
 - 3.4 設置工程の検討
 - 3.5 設置コストの検討
4. 係留系のサプライチェーンと材料コスト
 - 4.1 サプライチェーン
 - 4.2 材料コスト
5. まとめ

3. 係留系の設置方法と設置コスト

3.1 設置工程および影響する設計パラメータ



係留系の設置工程	影響する設計パラメータ
① アンカー設置 ・ アンカーおよびチェーンを海底に下す。 ・ 所定の長さのチェーンを、浮体の方向に向かって海底に下す。	・ アンカーの重量 ・ チェーンの重量、長さ
② 把駐力試験 ・ 上記①と同様にして、反力側アンカーを設置する。 ・ 反力用アンカーのチェーンを台船に固定する。 ・ 浮体用アンカーのチェーンを台船上のチェーンジャッキで巻き取り、把駐力を計測する。	・ 把駐力試験の荷重
③ 浮体曳航 ・ すべてのアンカーの把駐力試験を終えたら、浮体を所定の位置に曳航する。	—
④ 浮体・チェーン接続 ・ 浮体とチェーンを接続する。	—



3.2 係留索の本数と把駐力試験の荷重



係留索の本数	3 方向 × 2 本 : 合計 6 本	3 方向 × 3 本 : 合計 9 本
浮体中心とアンカーの水平距離	856.6 m	同左
係留索の長さ	チェーン : 850 m	同左
係留索の仕様 (チェーン)	呼び径 147、R3、Studless 432 kg/m	呼び径 132、R3、Studless 348 kg/m
アンカー (Stevpris MK6)	25 ton × 6 個	18 ton × 9 個
アンカー把駐力試験の荷重	13,400 kN	9,800 kN

数値シミュレーションの条件

- ・ 鋼製チェーン、水深200m・風速57m/s、有義波高13.4m、波0度、風0度、シード#1

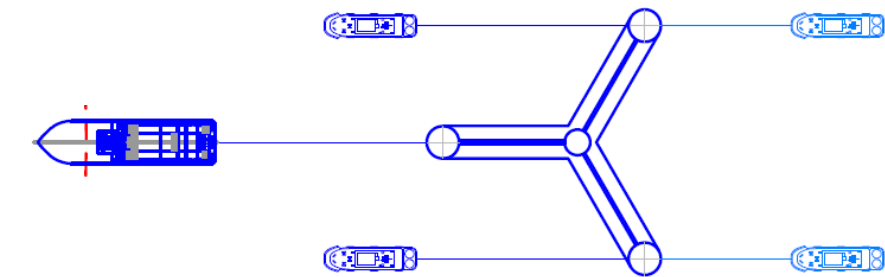
考 察

- ・ アンカー把駐力試験が可能である荷重は、現状では 10,000 kN 程度であると考えられるため、係留索の本数を3方向×3本に変更した。

3.3 設置方法の検討 必要な作業船



係留系の設置工程	作業船
① アンカー設置	・ アンカー設置船、100×36m、1隻
② 把駐力試験	・ 把駐力試験船、100×36m、1隻
③ 浮体曳航	・ 12,000 ps × 1隻 + 4,000 ps × 2隻 ・ 4,000 ps × 2隻 (ブレーキング)
④ 浮体・チェーン接続	浮体保持 ・ 4,000 ps × 4隻 チェーン接続 ・ AHTV × 2隻



浮体式曳航(拠点港～施工現地)
曳船: 12000ps + 4000ps × 2隻
ブレーキング船: 4000ps × 2隻
計=5隻で浮体曳航

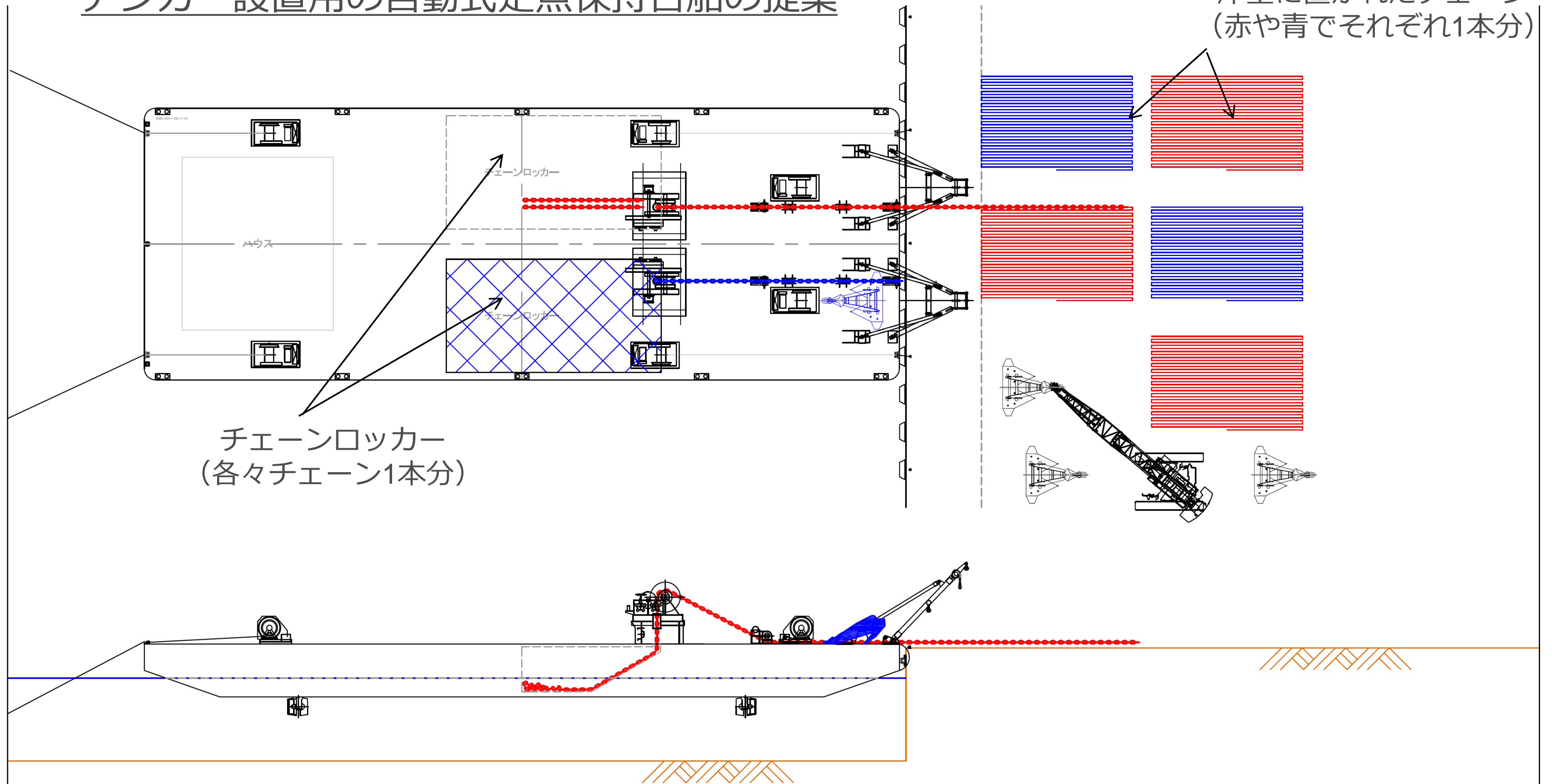
設置方法の検討（続き）

アンカー設置船の検討

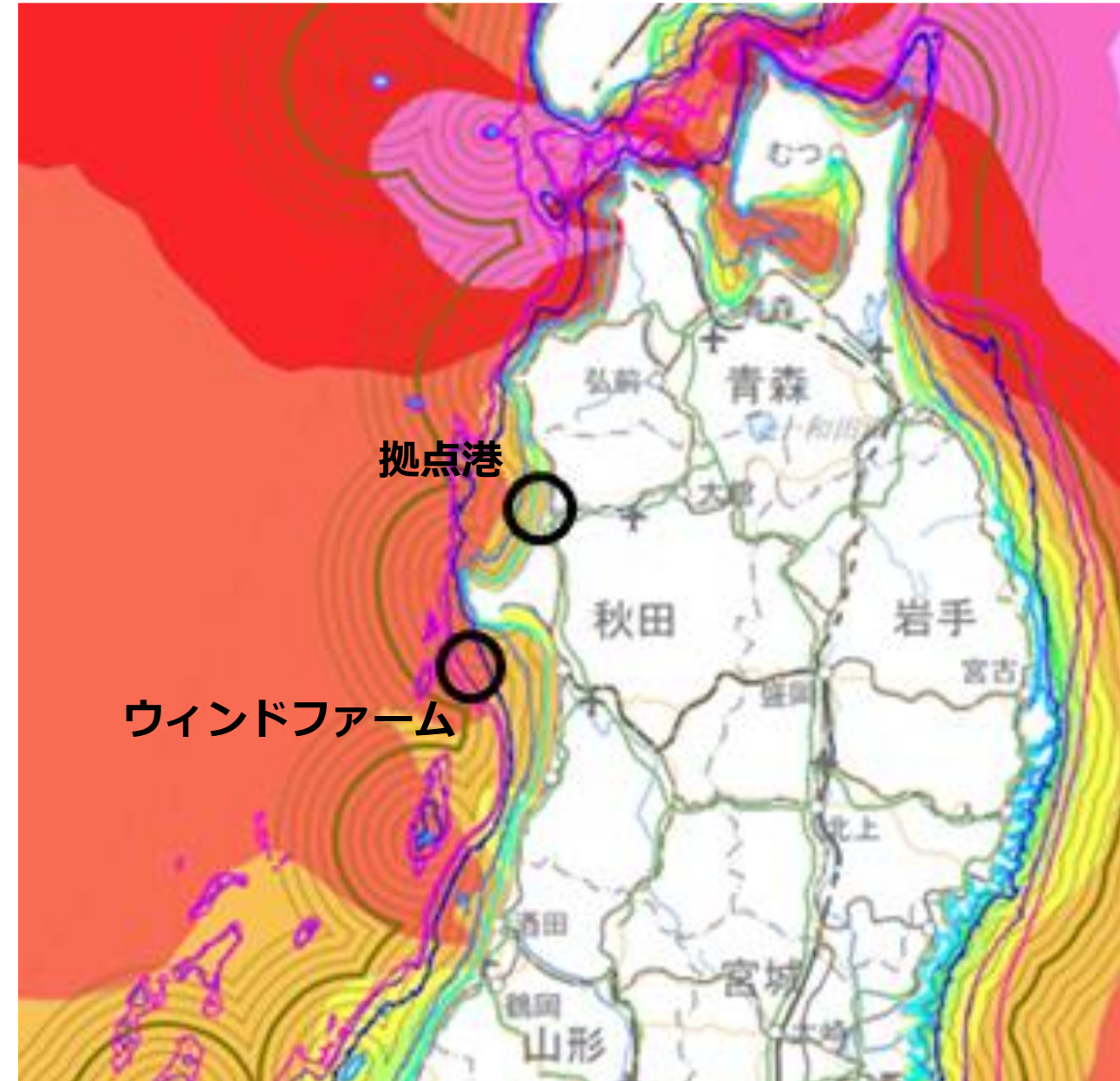
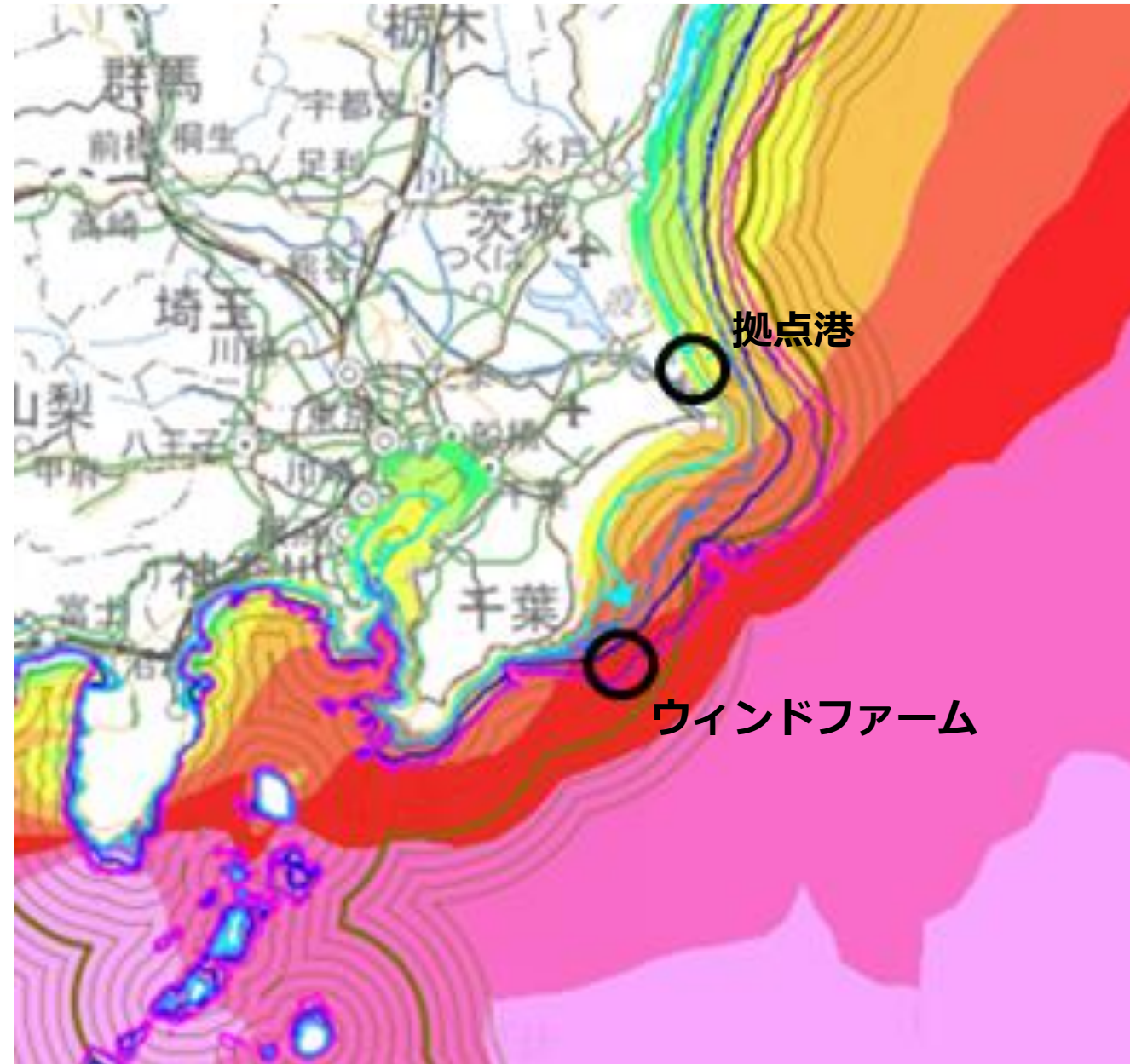


従来の工法	改善案
<p><u>1) 定点保持 (DPS)台船</u></p> <p>長所：デッキが広い、載貨重量が大きい、改造が容易</p> <p>短所：曳船による曳航が必要で波高の施工限界が低い（有義波高1.5m以下）機動性が劣る（航行速度が遅い）</p> <p><u>2) アンカーハンドリングタグ (AHTV)</u></p> <p>長所：機動性に優れる（航行速度が速い）、施工限界が高い（有義波高2.5m以下）</p> <p>短所：デッキが狭い、改造が困難</p>	<p><u>1) 自航式定点保持 (DPS)台船</u></p> <p>従来案の混合案</p> <p>長所：台船施工とAHTV施工の長所を取り入れられるデッキが広い、多くの積載が可能、機動性に優れる、施工限界が高い（有義波高2.0～2.5m以下想定）</p> <p>短所：建造価格が高い</p>

アンカー設置用の自動式定点保持台船の提案



3.4 設置工程の検討 設置場所の想定



設置場所 1 : 千葉県いすみ市沖
水深100~200 m、離岸距離約15 km、風速約8.5 m/s
拠点港 1 : 茨城県鹿島港

設置場所 2 : 秋田県男鹿半島南
水深100~200 m、離岸距離約15 km、風速約7.5 m/s
拠点港 2 : 秋田県能代港

設置工程の検討 設置場所の想定（続き）



	設置想定場所 1	設置想定場所2	本検討
水深	100～200m	100～200m	100～200m
離岸距離	15km	15km	15km
ウィンドファーム～ 拠点港の距離	100 km (54海里)	80 km (44海里)	100 km (54海里)
年平均風速	8.5m/s	7.5m/s	8.5m/s
50年再現の波 (*1)	有義波高 10.5 m 波周期 16.2 s	有義波高 6.2 m 波周期 12.5 s	有義波高 13.4 m 波周期 13.0 s

(*1) 海上技術安全研究所「日本近海の波と風のデータベース」による。水深50～200mの海域の平均値。

設置工程の検討 工程の細分化

①	1	アンカー設置船艀装	②	27	把駐力試験船艀装	④	44	AHTSV船回航(拠点港～現地)
	2	作業船回航		28	作業船回航		45	浮体接続(1/9)
	3	資機材積込(2セット)		29	把駐力試験船準備		46	浮体接続(2/9)
	4	回航(拠点港～現地)		30	回航(拠点港～現地)		47	浮体接続(3/9)
	5	アンカー設置(1/9)		31	把駐力試験(1/9)		48	浮体接続(4/9)
	6	アンカー設置(2/9)		32	把駐力試験(2/9)		49	浮体接続(5/9)
	7	回航(現地～拠点港)		33	把駐力試験(3/9)		50	浮体接続(6/9)
	8	資機材積込(2セット)		34	把駐力試験(4/9)		51	浮体接続(7/9)
	9	回航(拠点港～現地)		35	把駐力試験(5/9)		52	浮体接続(8/9)
	10	アンカー設置(3/9)		36	把駐力試験(6/9)		53	浮体接続(9/9)
	11	アンカー設置(4/9)		37	把駐力試験(7/9)		54	初期張力確認
	12	回航(現地～拠点港)		38	把駐力試験(8/9)		55	チェーン固定
	13	資機材積込(2セット)		39	把駐力試験(9/9)		56	余長チェーン片付け
	14	回航(拠点港～現地)		40	回航(現地～拠点港)		57	回航(現地～拠点港)
	15	アンカー設置(5/9)		41	浮体曳航準備			
	16	アンカー設置(6/9)		42	浮体回航(拠点港～現地)			
	17	回航(現地～拠点港)		43	浮体据付位置保持			
	18	資機材積込(2セット)						
	19	回航(拠点港～現地)						
	20	アンカー設置(7/9)						
	21	アンカー設置(8/9)						
	22	回航(現地～拠点港)						
	23	資機材積込(1セット)						
	24	回航(拠点港～現地)						
	25	アンカー設置(9/9)						
	26	回航(現地～拠点港)						

① アンカー設置 ② 把駐力試験
 ③ 浮体曳航 ④ 浮体・チェーン接続 の
 各工程を細分化し、方法と所用時間を検討した。

設置工程の検討

浮体1基当たり作業日数



日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
アンカー設置	■ (7.6日)																						
把駐力試験								■ (6.2日)															
浮体曳航															■ (0.9日)								
浮体・チェーン接続														■ (5.5日)									

合計：20.2日

- 船舶供用係数 a = 荒天待機を含めた総日数 / 作業実施日数
 - 太平洋側（鹿島港）： $a = 3.70$
 - 日本海側（能代港）： $a = 2.25$
- この船舶供用係数 a を適用すると、設置に要する期間は以下となる。
 - 太平洋側：1基当たり74.8日（ $= 20.2日 \times 3.70$ ）
 - 日本海側：1基当たり45.5日（ $= 20.2日 \times 2.25$ ）

(注) 正確には

船舶供用係数 a = 船舶供用日数 / 作業実施日数

船舶供用日数 = 作業実施日数 + 荒天日数 + 休祝日 + 安全教育等

3.5 設置コストの検討



- 傭船費用、燃料代、労務費などを考慮して、係留の設置コストを積上げた。
- 係留の設置コストは以下である。
 - 太平洋側：25基で216億円、1基当たり8.6億円（57百万円/MW）
 - 日本海側：25基で161億円、1基当たり6.5億円（43百万円/MW）
- これに加え、浮体の設置コストとして、以下を考慮する必要がある。
 - 浮体の建造場所から拠点港までの曳航
 - 浮体への風車の設置
- 2050年での洋上風車のCAPEXの目標（海上技術安全研究所の試算）では、浮体・係留の設置コストの目標：50百万円/MW
- 本検討による係留の設置コストを実現できれば、2050年の洋上風車のCAPEXの目標に近くなる。

1. はじめに
2. 係留系の強度設計
 - 2.1 設計条件
 - 2.2 設計手順
 - 2.3 数値シミュレーション
 - 2.4 数値シミュレーション結果
3. 係留系の設置方法と設置コスト
 - 3.1 設置工程および影響する設計パラメータ
 - 3.2 係留索の本数と把駐力試験の荷重
 - 3.3 設置方法の検討
 - 3.4 設置工程の検討
 - 3.5 設置コストの検討
4. 係留系のサプライチェーンと材料コスト
 - 4.1 サプライチェーン
 - 4.2 材料コスト
5. まとめ

4. 係留系のサプライチェーンと材料コスト

4.1 サプライチェーン



	本検討	カタログの最大値（海外）
鋼製チェーン R3 Studless	呼び径 111, 132, 137	呼び径 210
ナイロンロープ	径 270mm, 310mm	径 240mm
アンカー Stevpris MK6	15ton, 18ton, 20ton	30ton

- ・ 鋼製チェーン、アンカー：本検討による仕様はカタログ値の範囲内であり、入手可能である。
- ・ ナイロンロープ：
本検討による仕様が270mm、310mmであるのに対し、カタログの最大値は 240mmである。
しかしながら、310mmは240mmの約1.3倍であり、製造は可能と思われる。

4.2 材料コスト



鋼製チェーン、ナイロンロープ、アンカーのコストの推定方法 [1]

$$Cost_{chain} = (0.0591 \times MBL - 89.69) \times L_{section}$$

$$Cost_{nylon} = (0.0122 \times MBL + 12.116) \times L_{section}$$

$$Cost_{anchor} = 10.108 \times MBL$$

ここで、MBL : Minimum Breaking Load (kN)

Lsection : 鋼製チェーンあるいはナイロンロープの長さ (m)

- [1] Castillo, F. T. S : Floating Offshore Wind Turbines : Mooring System Optimization for LCOE Reduction, Master of Science Thesis TRITA-ITM-EX 2020:558, KTH School of Industrial Engineering and Management, 2020.

材料コスト（続き）



	鋼製チェーン		合成繊維索	
水深 (m)	200	200	200	100
チェーンの呼び径	137	111	111	132
チェーンのMBL (kN)	13,829	9,650	9,650	12,993
合成繊維の径 (mm)	—	270	270	310
合成繊維のMBL (kN)	—	14,325	14,325	18,884
チェーンの単位長さのCost _{chain} (€/m)	728	481	481	678
合成繊維の単位長さのCost _{nylon} (€/m)	—	187	187	242
Cost _{anchor}	139,784	97,542	97,542	131,333
チェーンの長さ (m)	1,031	660	660	660
合成繊維の長さ (m)	—	313	313	292
係留索9本の総コスト (億円)	10.0	5.3	5.3	7.3
係留材料費 (百万円/MW)	66	35	35	49

(注) 合成繊維のMBLは、径100mmで1965 kNで、径の二乗に比例するとした。

(注) 125円/€とした。

- 今回の検討では、合成繊維（ナイロンロープ）を用いた場合が、鋼製チェーンに比べてコストが低い。
 - ・ナイロンロープのコストが鋼製チェーンに比べて低い。
 - ・係留系に作用する張力が低くなり、ナイロンロープと共に使用する鋼製チェーンの呼び径も小さくすることができ、鋼製チェーンのコストも低くなる。
- 2050年での洋上風車のCAPEXの目標（海上技術安全研究所の試算）では、係留材料費の目標：14百万円/MW
 - ・上表の値は35～66百万円/MWの範囲であり、係留材料費の削減あるいは目標の見直しが必要である。

5. まとめ



- (1) 15MW風車用のセミサブ型浮体を対象に、
係留系の強度設計および設置方法、サプライチェーン、コストの検討を行った。
これらを考慮して、総合的に係留設計を行うことが必要である。
- (2) 設置方法が係留系の設計に影響する例として、
把駐力試験の荷重の上限が、係留索の本数に影響することを示した。
- (3) 設置方法の検討において、必要な作業船の例として、
「自航式定点保持台船」を提案した。
- (4) 海上技術安全研究所が提案する2050年におけるCAPEX（資本費）目標に対し、
今回の検討では、設置コストは達成可能なレベル、
係留材料コストはその削減、あるいは目標の見直しが必要なレベルであった。

本研究は以下の研究の一部です。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構から
ClassNK コンサルティングサービスが受託し、
さらに海上技術安全研究所が業務委託を受けた、
「浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発に関する調査」

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構殿に、感謝申し上げます。



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
National Maritime Research Institute

