



第22回 海上技術安全研究所講演会



合成繊維索係留システムの 最適設計の考え方について

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

洋上風力発電プロジェクトチーム

齊藤 昌勝 中條 俊樹

□背景

□目的

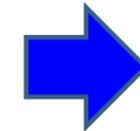
□設計ツールの考え方

□まとめ

- ヨーロッパでは浮体式ウィンドファームの設置例あり
 - Hywind Tampen、Hywind Scotland、Kincardine
 - 合成繊維索係留はFloatgen、Kincardineで使用されている。
- 我が国でも計画が進む
 - 長崎県沖：2.1MW×8基
 - グリーンイノベーション事業での実証も計画

ヨーロッパに比べ遅れをとっており普及が期待されている。

□我が国での普及への課題



<低コスト化>

■浮体建造コスト

■浮体設置コスト

■係留系コスト：設計、製造、設置に渡りコスト削減が必要

■O&Mコスト



合成繊維索の活用が期待されている

国土交通省の浮体式洋上風力発電施設のガイドラインの改定も係留系は合成繊維索の使用を念頭に進められている。

□メリット

■軽量・柔軟

- 多くの素材で海水と同程度の比重のため、浮体に働く鉛直荷重が小さく、浮体の小型化が可能
- 柔軟・軽量でハンドリングが容易（設置コストの極小化）

■素材・索の構成（編み方）のバリエーションが豊富

- 荷重－伸び特性のバリエーションが豊富で様々な水深、浮体に対応可能

■ロジスティック面での優位性

- リール状態での輸送・保管が可能

□デメリット

■価格

- 同程度の索径の鋼製ワイヤーと比較して高価、ただし量産化により低コスト化の可能性

■一部の素材を除き実績が乏しい

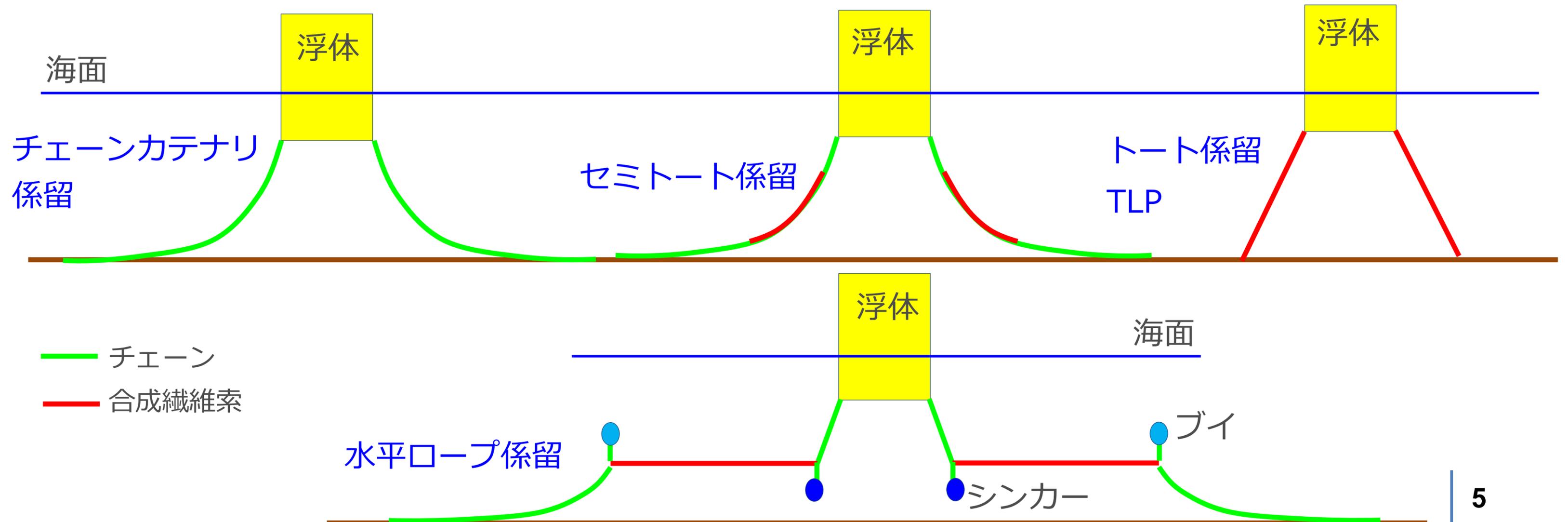
- 素材・索の編み方によるそれぞれの特性に適した海象条件・係留形式が不明確で選定が困難

■取り扱いに注意が必要

- 設置工事時の損傷や海底との接触を防ぐ必要がある

合成繊維索に適した係留形式

- 洋上風力発電は一般的なOil & Gasよりも大きな風荷重を受け、浅い水深で適用される。（一般的に係留系の設計は水深が浅いとより困難になる）
- 合成繊維索は剛性の低さから浅い水深に適していると考えられているが、全体的に実績が少なく、**水深・海象と索剛性と係留形式の適合性が不明確**



■最大張力が暴風時に発生するとは限らない

浮体式洋上風力発電では、発電時と暴風待機時で荷重が大きく異なる

- 発電時：定格風速付近におけるスラスト荷重が支配的（DLC1.6）
- 暴風待機時：波浪荷重、タワーへの風荷重が支配的（DLC6.1）
- 暴風待機 + 風車制御関連の故障：風荷重の極大化の可能性（DLC7.1）

■発電時・暴風待機に対応したDLC（設計荷重ケース）に基づく安全性解析が必要

DLC：供用期間中に浮体式洋上風力発電が遭遇すると考えられる様々な状況で、風車、浮体、係留に働く荷重を求めるための条件をまとめたもの

最大張力が発生する海気象が不明なため膨大な時間領域計算が必要

□ いい係留システムとは？

■ 安全であること

係留索鎖の必要な太さ・長さ・本数を確保し、安全率を満たす

■ コンパクトであること

係留索鎖の種類・太さ・長さ・本数を適切に選定し、製造コストを極小化する

■ 設置が容易であること

ハンドリングが容易な軽量材（合成繊維等）を使用し、設置コストを極小化する

■ 設計が容易であること

周波数領域の設計法を用い事前検討・解析計算量の削減により設計コストを極小化する

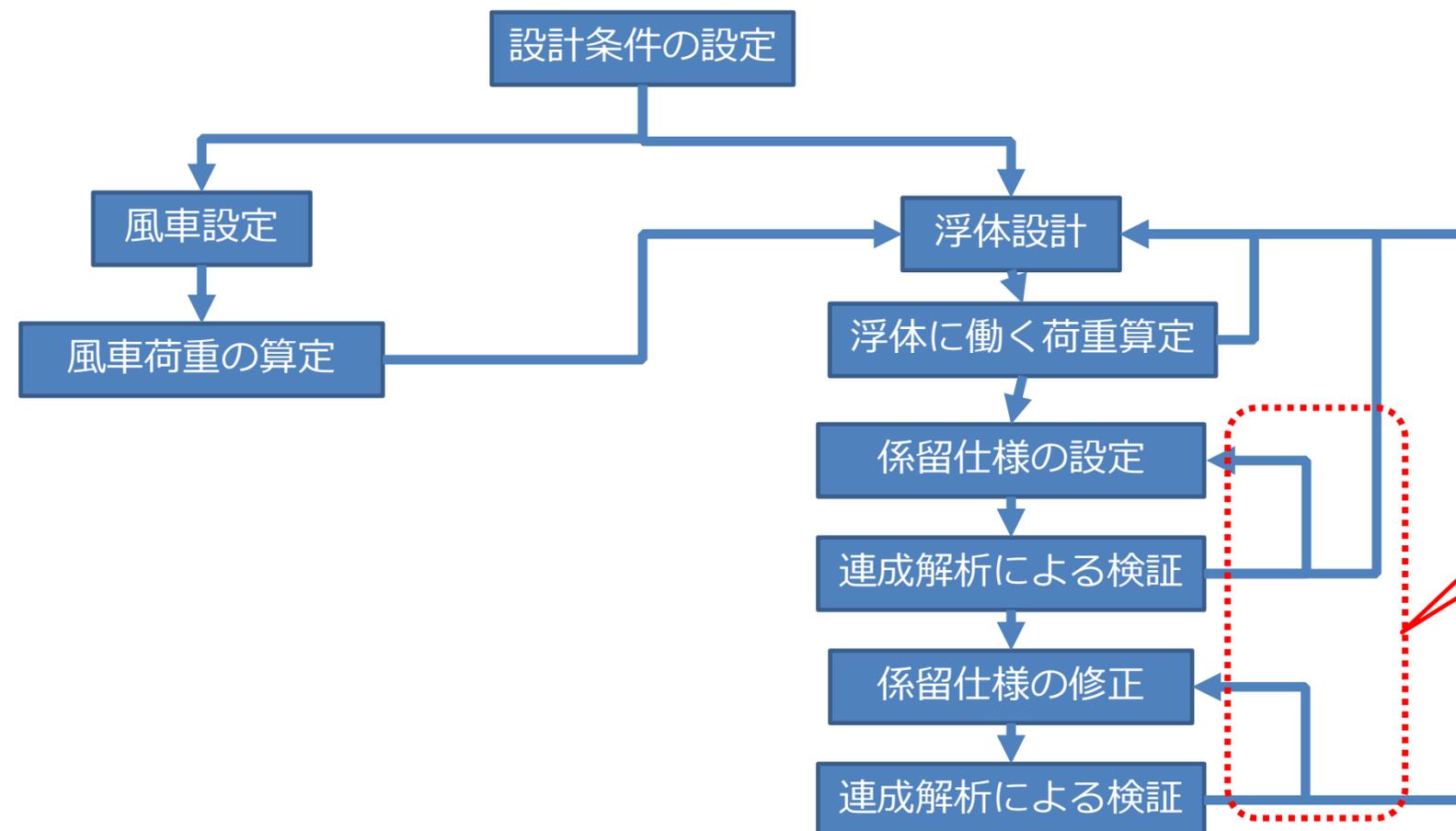
□ 研究の目的

- 設計コストの極小化に注目し、事前検討を容易にし、解析計算量を削減することを目的として合成繊維索を用いる係留システムの設計ツールを開発する。



このツールを用いて、
海象条件・水深・浮体規模毎にその適した係留システムを明らかにする

- 係留系の設計は、一般的には浮体・風車の設計後に実施される
- 係留系によって浮体・風車の仕様が大きく変更されることは少ないが、係留取付け部等の局部強度に影響が出ることや、浮体がコンパクトな場合は運動に影響することもあり、設計ループが発生する。
- 時間領域法を用いた解析の前に**周波数領域法による設計**を行うことで設計ループ及び時間領域法の計算量を削減する。



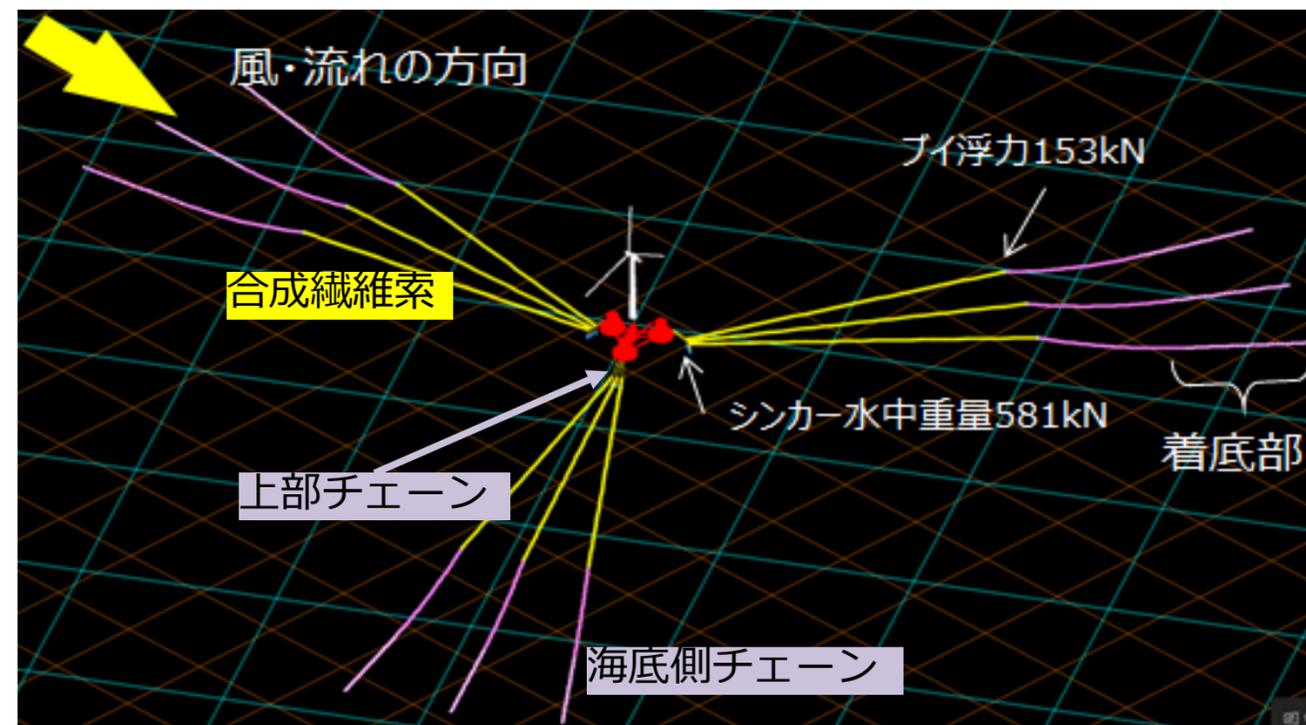
設計ループに伴う係留設計に関連する計算数を減らす

□ 水平ロープ係留を周波数領域法で設計した。

■ 周波数領域法の設計手順

- 定常変位・長周期運動振幅・波周期運動振幅の推定値から最大変位を推定
- 最大変位時の準静的張力を最大張力とみなす
- 安全率と許容最大変位を満たすように索径・索長を決定

□ 安全性評価はOrcaFlex（商用ソフト）を用いた時間領域法。



- 最大張力が発生する海象条件について
 - 計算試行数を減らすため、計算対象となる海象条件を絞り込む

- 合成繊維索を用いた洋上風力発電の係留系設計ツールにおける浮体運動の考え方
 - 風車スラストによる傾斜を考慮した定常変位計算
 - 水平方向の長周期運動振幅の計算
 - 係留剛性に即した波周期運動振幅の計算

設計ツールの考え方 – 張力が最大となる海象条件 –



- 最大張力を算出するため、赤枠の海象条件で時間領域計算を実施したところ、
 - 風車に働く風荷重は定格風速付近で最大となる
 - 波による変動張力は、波高が大きく周期が短い条件で大きくなる
 - 上記傾向から最大張力発生 の海象条件を絞り込む 設計コストを削減

平均風速 – 有義波高
結合頻度表 (単位: ‰)

定格風速付近

暴風待機時

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
平均風速 (m/s)	2.5	160.76	117.84	5.2702	0.1923	0.0087						
	6.25	94.146	233.99	26.786	0.6626	0.0446	0.0472	0.0028				
	8.75	7.4513	115.74	47.422	2.3184	0.1745	0.0356	0.003				
	11.25	1.3971	39.581	77.78	11.72	0.9521	0.1135	0.0115	0.0013			
	13.75	0.1254	2.1869	17.94	12.377	1.3647	0.1343	0.0443	0.0012			
	16.25	0.0276	0.4657	3.9588	8.1076	2.9091	0.5831	0.1984	0.0163	0.0075		
	18.75	0.004	0.0672	0.2137	0.8691	1.0259	0.3507	0.1834	0.0238	0.0122	0.0259	0.001
	21.25	0.0015	0.0175	0.0597	0.2185	0.4582	0.379	0.2543	0.1541	0.0751	0.0296	0.0222
	23.75		0.0016	0.0064	0.0194	0.056	0.0797	0.0559	0.0606	0.0378	0.0385	0.0315
	26.25			0.0017	0.006	0.0139	0.0407	0.0442	0.0147	0.0246	0.0102	0.0132
28.75						0.0061	0.0311	0.0083	0.0033	0.0018	0.0023	
31.25						0.0021	0.0115	0.0294				

赤枠の範囲の
計算を実施

有義波高 – 有義波周期
結合頻度表 (単位: ‰)

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
有義波周期 (s)	1	0.1936										
	3	124.2	38.002									
	5	72.603	299.62	36.28	0.4513	0.1012						
	7	57.244	143.22	131.35	21.376	0.7877	0.0619					
	9	7.3376	21.547	8.2699	13.555	5.5328	0.6647	0.1017		0.0064		
	11	2.0262	5.6556	2.4043	0.6467	0.3777	0.9271	0.6347	0.1756	0.0452		
	13	0.196	1.4435	0.7299	0.1756	0.1446	0.0935	0.0764	0.1047	0.1087	0.0923	0.0242

□最大張力発生時の海象条件について

- 頻度表から、定格風速～暴風待機条件、波高が高く周期が短い条件を解析対象とする

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
平均風速 (m/s)	2.5	160.76	117.84	5.2702	0.1923	0.0087						
	6.25	94.146	233.99	26.786	0.6626	0.0446	0.0472	0.0028				
	8.75	7.4513	115.74	47.422	2.3184	0.1745	0.0356	0.003				
	11.25	1.3971	39.581	77.78	11.72	0.9521	0.1435	0.0115	0.0013			
	13.75	0.1254	2.1869	17.94	12.377	1.3647	0.1343	0.0443	0.0012			
	16.25	0.0276	0.4657	3.9588	8.1076	2.9091	0.5831	0.1964	0.0163	0.0075		
	18.75	0.004	0.0672	0.2137	0.8691	1.0259	0.3507	0.1834	0.0238	0.0122	0.0259	0.001
	21.25	0.0015	0.0175	0.0597	0.2185	0.4582	0.379	0.2543	0.1541	0.0751	0.0296	0.0213
	23.75		0.0016	0.0064	0.0194	0.056	0.0797	0.0559	0.0606	0.0378	0.0385	0.0315
	26.25			0.0017	0.006	0.0139	0.0407	0.0442	0.0147	0.0246	0.0102	0.0132
	28.75						0.0061	0.0311	0.0083	0.0033	0.0018	0.0023
31.25						0.0021	0.0115	0.0294				

このあたりの海象を解析すれば最大張力を推定できる？

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
有義波周期(s)	1	0.1936										
	3	124.2	38.002									
	5	72.603	299.62	36.28	0.4513	0.1012						
	7	57.244	143.22	131.35	21.376	0.7877	0.0619					
	9	7.3376	21.547	8.2699	13.555	5.5328	0.6647	0.1017		0.0064		
	11	2.0262	5.6556	2.4043	0.6467	0.3777	0.9271	0.6347	0.1756	0.0452		
	13	0.196	1.4435	0.7299	0.1756	0.1446	0.0935	0.0764	0.1047	0.1087	0.0923	0.0242

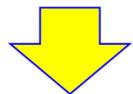
今回の解析での最大張力発生条件

■風車スラストによる傾斜を考慮した定常変位計算

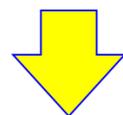
浮体の定常変位点（水平変位 X_0 ，鉛直変位 Z_0 ，傾斜 θ ）に対する排水容積，浮心の変化から浮体復原力を求める



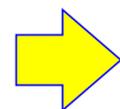
浮体の定常変位点における係留力変化を求める



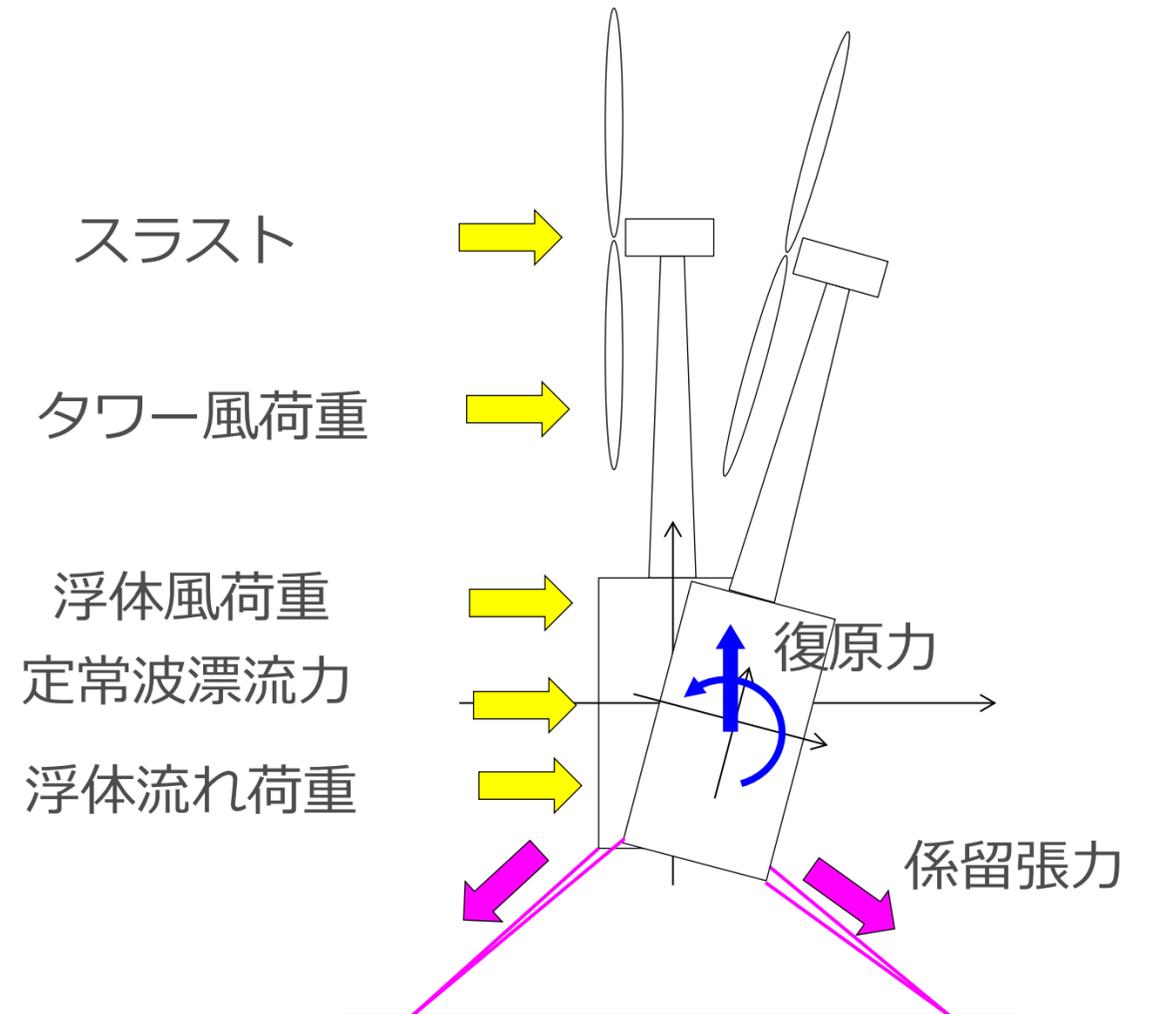
スラスト，タワー風荷重，浮体風荷重，浮体流れ荷重，係留反力，浮体復原力のつり合い式を X_0 ， Z_0 ， θ について解く



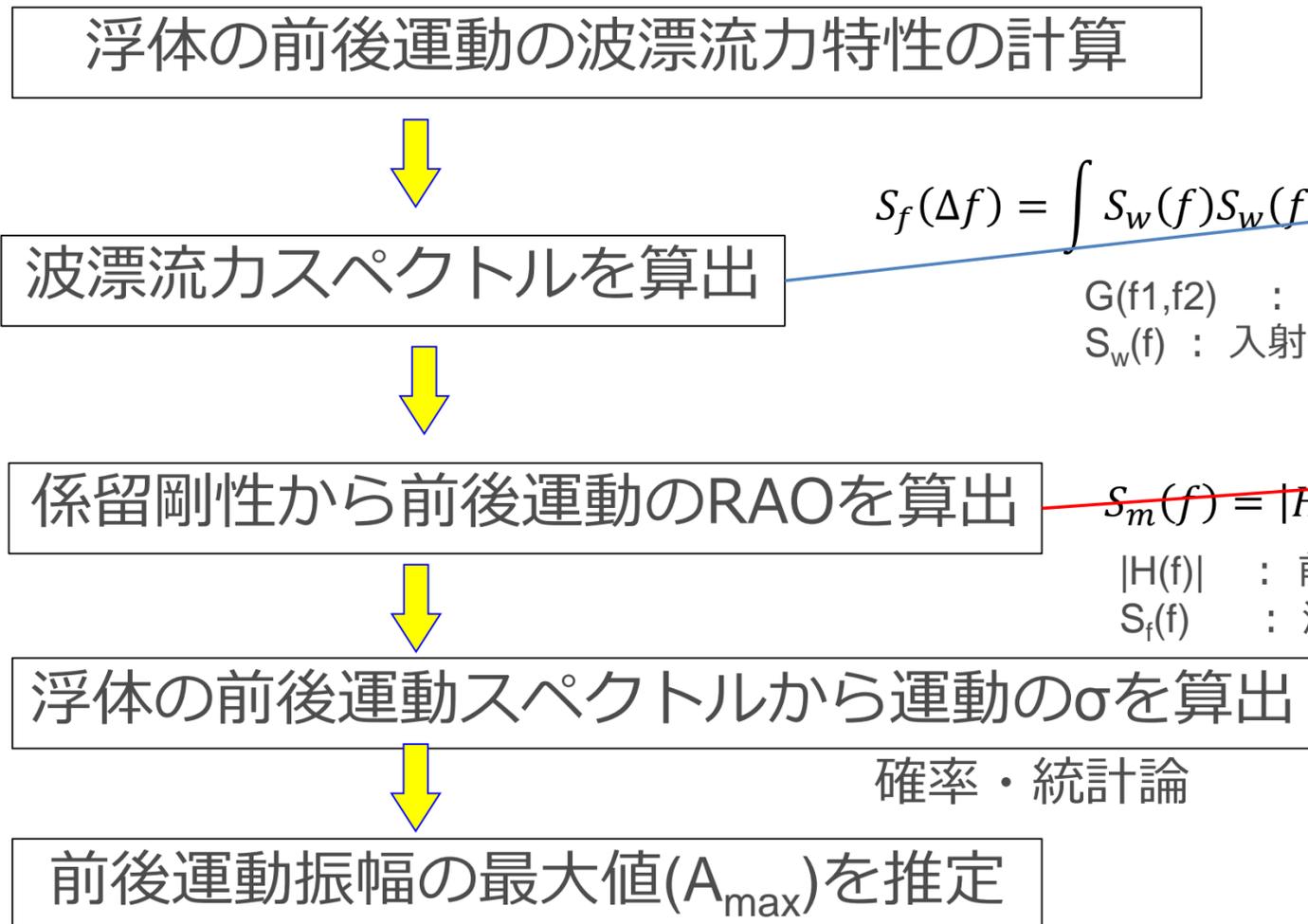
定常変位点での係留剛性を求める
定常変位点から微小変位させて張力変化を計算する



波周期運動・長周期運動のRAOを求める時の係留剛性として使用



■水平方向の長周期運動振幅の計算



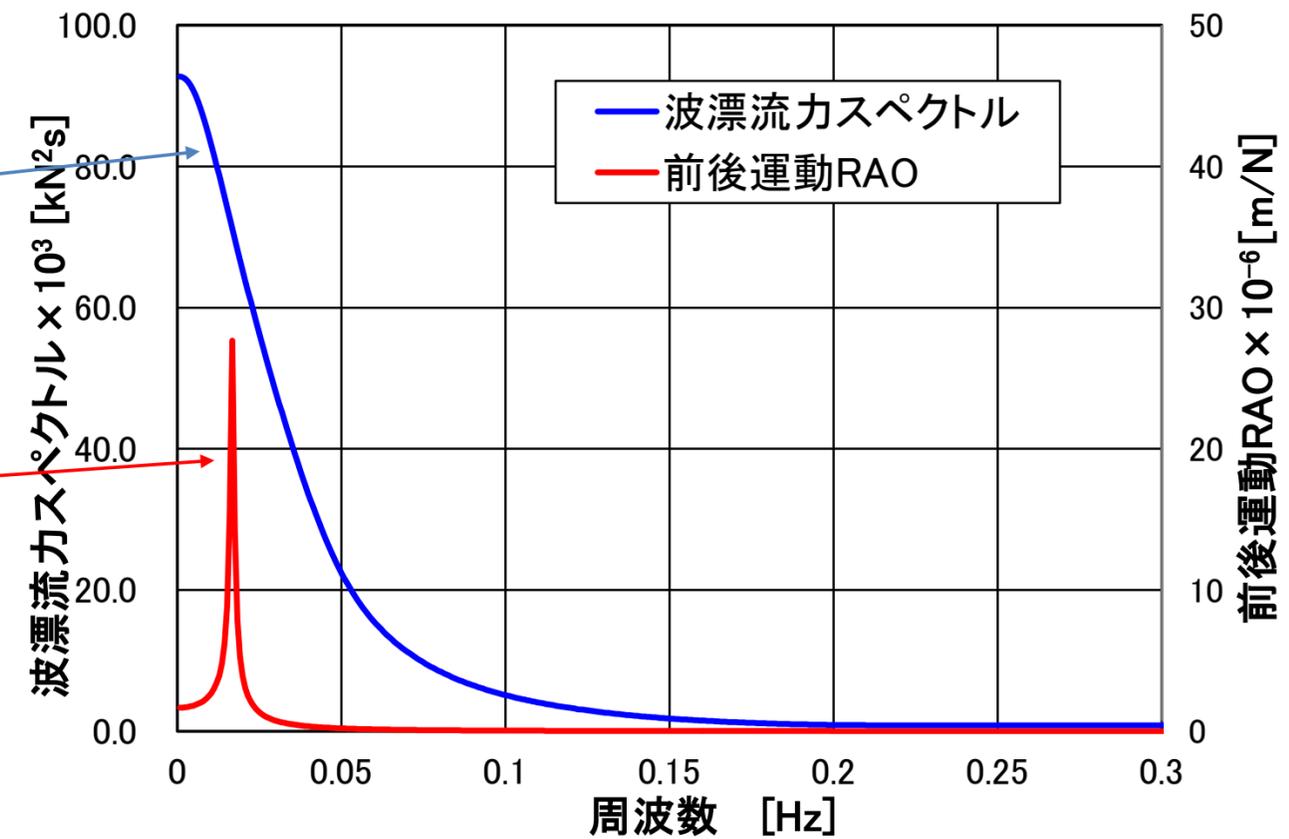
$$S_f(\Delta f) = \int S_w(f)S_w(f + \Delta f)G(f, f + \Delta f)^2 df$$

$G(f_1, f_2)$: 波漂流力関数
 $S_w(f)$: 入射波スペクトル

$$S_m(f) = |H(f)|^2 S_f(f)$$

$(\Delta f \rightarrow f)$

$|H(f)|$: 前後運動のRAO
 $S_f(f)$: 波漂流力スペクトル



前後運動の漂流力スペクトルとRAO

本ツールでは安全を考慮し、 $A_{max} = 2\sigma\sqrt{2\ln(N)}$ とする。

■係留剛性を考慮した波周期運動振幅と最大張力の計算

定常変位点の係留剛性と波力・流体力データからSurge, Heave, Pitchの運動方程式を構築し3自由度の波周期運動RAOを求める

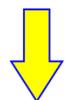


3自由度RAOと波スペクトルの積から係留取り付け点の前後・鉛直の最大振幅を求める。



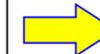
【仮定】

取り付け点はオービタルモーション（楕円運動）をする楕円の膨らみはSurge, Heave, Pitchの位相差で決まるスペクトルピーク周期の位相差で代表させる

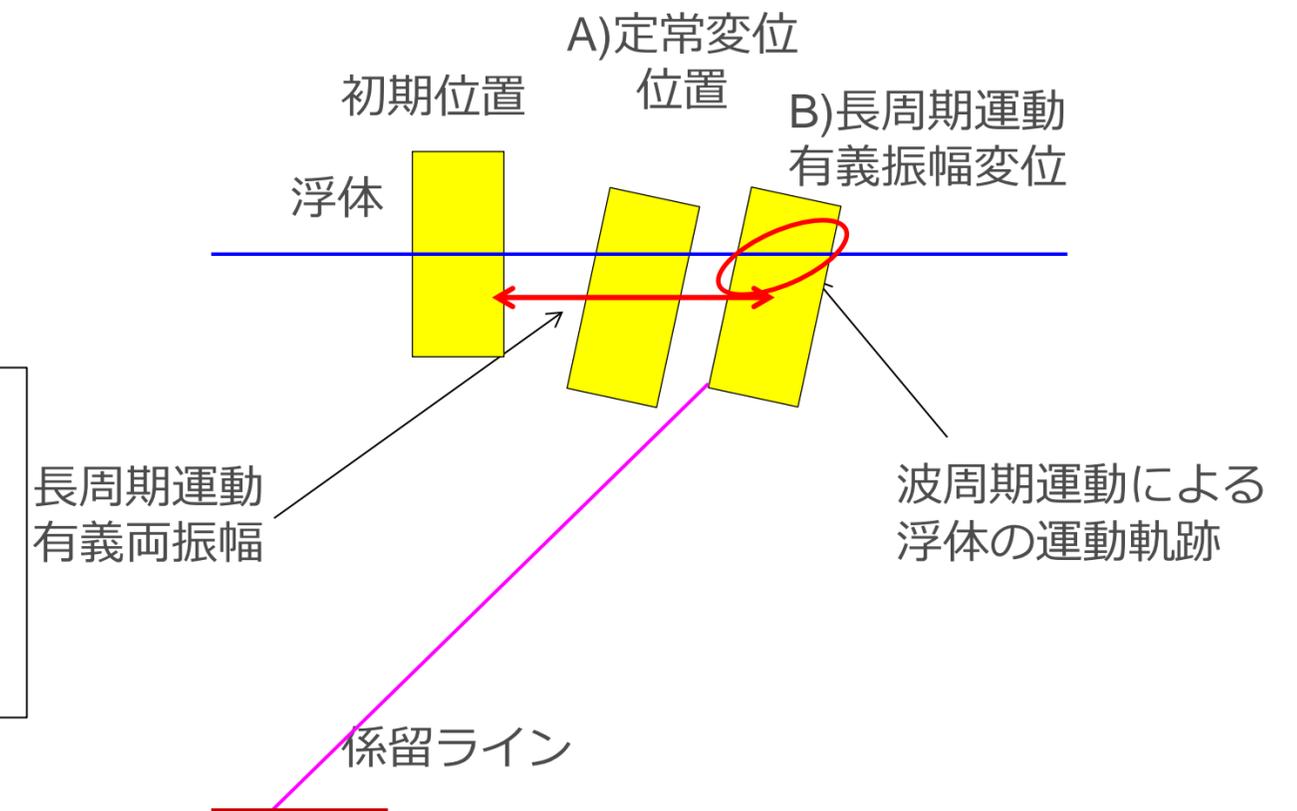


A)定常変位に B)長周期運動の振幅を加えた点を中心に、浮体を上記楕円に沿って変位させ、係留ラインの静的張力の変化を計算する

(この計算方法はトート係留のために考案)



静的張力の最大値を最大張力とし、MBL（最小破断荷重）との比で安全率を求める



□ブイ・シンカーを用いた水平ロープ係留について、周波数領域法を用いた設計結果

□設計条件（九州北西沖を想定）

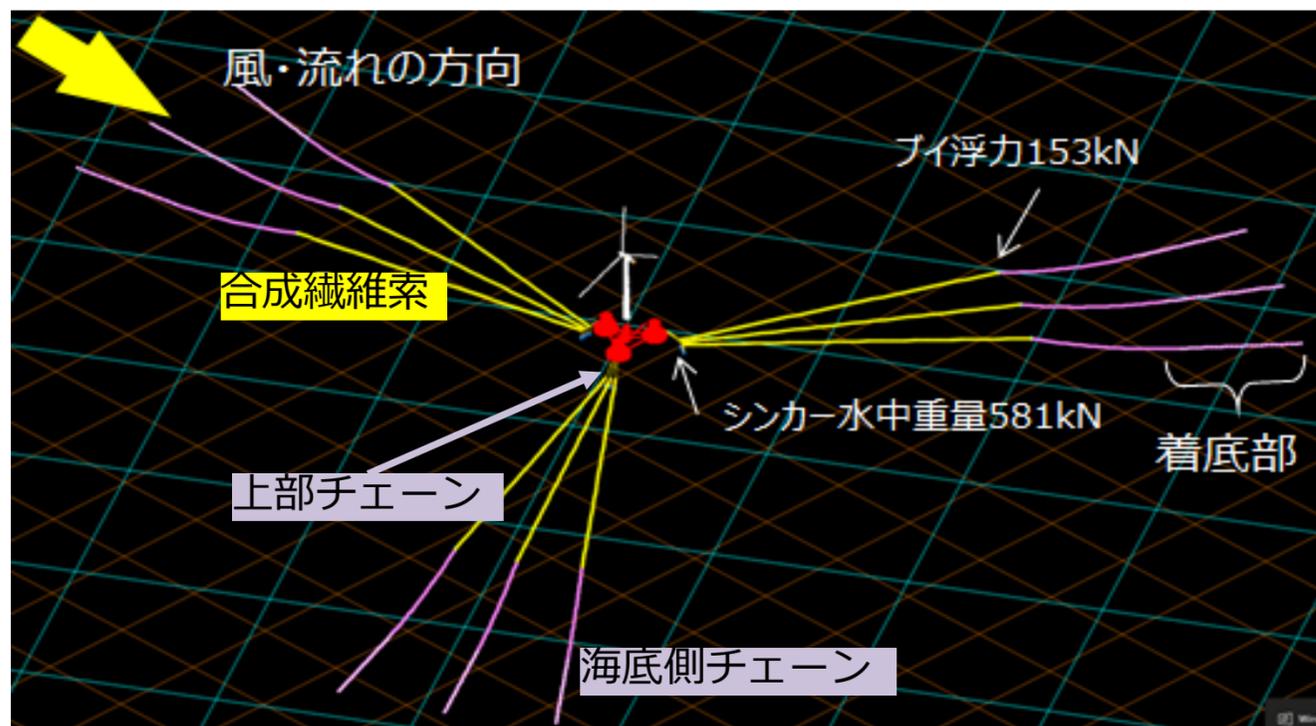
水深：64m

有義波高：9.3m

有義波周期：12.95sec

流速：0.75m/s

風速：35.15m/s



項目	仕様	
係留本数	9本	
上部チェーン	長さ	25m
	径	81mm
	MBL	5490kN
ロープ(ナイロン)	長さ	300m
	径	167mm
	MBL	5472kN
下部チェーン	長さ	270m
	径	81mm
	MBL	5490kN
シンカーの水中重量	581kN	
ブイの浮力	153kN	

- 浮体式洋上風力発電の普及拡大のためには合成繊維索を用いた係留が重要と考えられている
- 合成繊維索を用いた係留系の中で海象条件・水深・規模に適合した最適な形式を明らかにする必要がある
- 検討に必要な海象条件、浮体運動の考え方を整理
- ブイ・シンカーを用いた水平ロープ係留について試設計・検証計算を実施
- さらに、トート係留やTLPを含めた多様な係留形式に対応可能な簡便に係留仕様を算出可能なツールを開発中