

4. 荷重評価

4.1 設計荷重ケース（DLC）設定

4.1.1 概要

船舶安全法に対する適合性は、同法の下に策定された浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）³に基づき確認が行われ、より具体的には浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）⁴が設計に適用される。

気象・海象調査結果から導かれた設計条件より、上記ガイドラインに従い設定される種々のDLCで連成解析および水槽試験を実施する。連成解析はDLCの全ケースで行う。水槽試験については、連成解析を行った結果を用いて最も厳しいケースについて実験・検証を行う。

安全性確認・評価にはシミュレーションを用いるのが一般的であり、風車・浮体・係留ラインが一体となった連成解析による荷重評価を行うことが望ましい。

DLCは、設計条件（設計想定の状態）ごとに詳細に設定されており、風、波、海潮流、水位、その他条件との組み合わせによる解析を必要とする。DLCおよびその特記事項の詳細は、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）³を参照されたい。荷重についての評価フローを図4.1-1に示す。

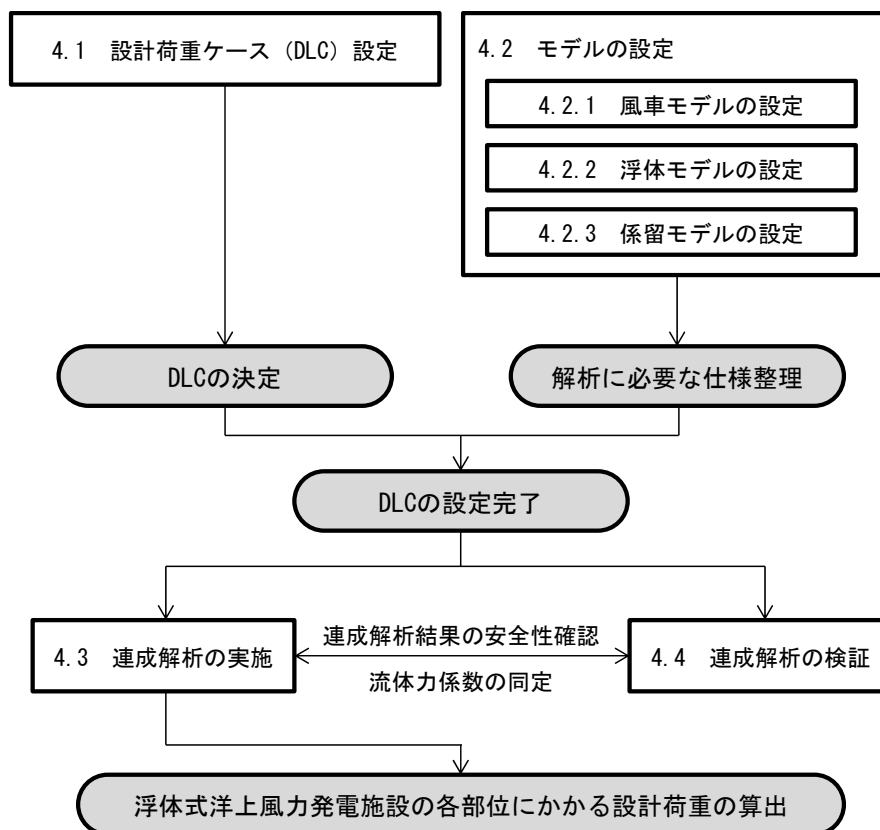


図 4.1-1 評価フロー

※海水の影響がある場合、海水設計荷重ケース E1～E7 を追加で設定（IEC 61400-3 の付属書 E を参照）

4.1.2 設計荷重ケース（DLC）の設定方法

解析のタイプは、疲労強度の評価に用いる疲労荷重の解析を意味する「F」タイプと、材料強度および構造安定性に関係した終局荷重の解析を意味する「U」タイプの2つに分けられる。「U」で示される設計荷重ケースは、「通常状態（N）」、「異常状態（A）」または「輸送および建造状態（T）」に分類される。各々の設計条件において数種類の設計荷重ケースを考慮しなければならない。原則として、表 4.1-1 に示す設計荷重ケースを考慮する必要がある。さらに、海氷が発生すると予測される海域に設置する洋上風力発電施設では示す荷重ケースに加えて、表 4.1-2 の荷重ケースも考慮する必要がある。海氷設計荷重ケース E1～E7 については JIS C 1400-3（2014）⁶の附属書 E を参照する必要がある。

なお、DLC による連成解析結果は水槽試験結果と比較して各部位にかかる荷重を算出するだけでなく、流体力係数を同定することも行う。

表 4.1-1 設計荷重ケース⁴

設計条件	DLC	風条件	波	風および波の方向性	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 および 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 および V_{hub} の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}$ 、 V_r および $V_r + 2 \text{ m/s}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	MIS および風向変化	NCM	MSL		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_s SSS$	COD および UNI	NCM	NWLR		U	N
2) 発電中の故障発生	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL	制御装置の故障またはネットワークロス	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL	保護装置または先行する内部の電気故障	U	A
	2.3	— EOG — $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および V_{out}	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL	外部または内部の電気故障 (ネットワークロスを含む)	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上	制御、保護または電気装置の故障 (ネットワークロスを含む)	F	—
3) 起動	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	3.2	— EOG — $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ — および V_{out}	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	3.3	EDC ₁ $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および V_{out}	NSS (または NWH)	MIS および風向変化	NCM	MSL		U	
4) 通常停止	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	4.2	— EOG — $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および V_{out}	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
5) 緊急停止	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
6) 待機中 (静止またはアイドリ)	6.1	EWM 乱流モデル $V_{hub} = k_1 V_{ref}$	ESS $H_s = k_2 H_{s50}$	MIS および MUL	ECM	EWLR		U	N
	6.2	EWM 乱流モデル	ESS	MIS および MUL	ECM	EWLR	ネットワークロス	U	A

設計条件	DLC	風条件	波	風および波の方向性	海流	水位	その他の条件	解析のタイプ	部分安全率
ング)		$V_{hub}=k_1 V_{ref}$	$H_s=k_2 H_{s50}$						
	6.3	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	ESS $H_s=k_2 H_{s1}$	MIS および MUL	ECM	NWLR	極値ヨー誤差	U	N
	6.4	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$	NSS H_s, T_p および V_{hub} の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	-
7) 待機中に故障の発生	7.1	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	ESS $H_s=k_2 H_{s1}$				U	A
	7.2	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$	NSS H_s, T_p および V_{hub} の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	-
8) 曳航,設置および保守	8.1	製造業者が規定						U	T

表 4.1-2 海水の設計荷重ケース⁴

設計条件	DLC	海水条件	風条件	水位	解析のタイプ	部分安全率
発電	E1	温度変動による水平荷重	NTM $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ および V_{out} 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E2	温度変動またはアーチ効果による水平荷重	NTM $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ および V_{out} 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E3 極値事象 の外挿	該当速度の移動氷盤による水平荷重 $h=h_{50}$ in open sea (外洋) $h=h_m$ for land-locked waters (湖)	NTM $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ および V_{out} 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E4	該当速度の移動氷盤による水平荷重 $h=h_{50}$ in open sea (外洋) $h=h_m$ for land-locked waters (湖)	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NWLR	F	-
	E5	水位変動による結氷板の垂直荷重	風荷重は適用しない	NWLR	U	N
待機状態	E6	氷丘氷および氷陵からの圧力	EWM 乱流風モデル $V_{hub}=V_1$	NWLR	U	N
	E7	該当速度の移動氷盤からの水平荷重 $H=h_{50}$ in open sea (外洋) $H=h_m$ for land-locked waters (湖)	NTM $V_{hub} < 0.7_{ref}$	NWLR	F	-

COD 同一方向
 ECD 方向変化を伴う極値コヒーレントガスト (JIS C 1400-1)
 EDC 極値方向変化 (JIS C 1400-1)
 ESS 極値海況
 EWM 極値風速モデル (JIS C 1400-1)
 MIS 方向の不ぞろい
 MUL 多方向
 NTM 通常乱流モデル (JIS C 1400-1)
 NWLR 通常水面範囲
 NSS 通常海況
 SSS 厳しい海況
 UNI 単一方向
 F 疲労
 N 通常

DLC 設計荷重ケース
 ECM 極値水流モデル
 EOG 運転時の極値突風 (JIS C 1400-1)
 ETM 極値乱流モデル
 EWLR 極値水面範囲
 EWS 極値ウィンドシア (JIS C 1400-1)
 MSL 平均海水面
 NCM 通常水流モデル
 NWH 通常波高
 NWP 通常ウィンドプロファイルモデル (JIS C 1400-1)
 $V_r \pm 2 m/s$ この範囲内のすべての風速に対する感度を解析しなければならない。
 U 終局荷重
 A 異常
 T 輸送および建設

4.2 モデルの設定

ここでは、浮体式洋上風力発電施設の各部位のモデル（風車・浮体・係留ライン）の設定方法について示す。

4.2.1 風車モデルの設定

1) 概要

風車モデルは、主にプロペラ式水平軸風車が提案されており、その特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示す風車モデルは、RNA、タワーに該当する部分である。連成解析を実施するために必要な風車モデル仕様を設定する。

2) 風車モデルの設定方法

設置海域において生じる荷重に対して風車モデルの各部位・部材を評価し、風車モデルを決定する。モデルの決定に際しては、各部位・部材の性能の違いを考慮する必要がある。

風車モデルの設定例を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 風車モデルの設定例¹²

メーカー	Aerodyn Engineering GmbH
型式	SCD3MW-NEDO
定格出力	3MW
ロータ直径	100m
ハブ高さ	72m (above sea level)
ブレード枚数	2blades
ロータ位置	Upwind
ティルト角	3degree
コーニング角	5degree
出力制御	Variable speed, Individual pitch control
ブレーキ	ピッチブレーキ（運転中）、高速段ブレーキ、ロータロック（パーキング状態）
ヨー制御	Active yaw E-motor
定格回転数	17.1rpm
増速比	24.01
発電機種別	Permanent magnet synchronous generator
PCS方式	Full converter (IGBT)
変圧器定格電圧	22kV/0.62kV
カットイン風速	3m/s
カットアウト風速	25m/s
風速クラス	クラス S

3) ブレードピッチ制御に伴うスラスト荷重

風車は、発電量を安定させるためにブレードピッチ制御を行うため、この制御に伴うスラスト荷重の変化も重要な要素である。特に、制御の与え方によっては、ネガティブダンピングと呼ばれる浮体の応答が増幅される現象が生じることが知られており、十分に注意する必要がある。

国内では、古典制御の一種である PI 制御を用いて、ロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の 2 つの目的に対して制御プログラムを作成し、その効果を確認した上で、2 つを組み合わせることでロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の両立を目指す検討が行われた。

4.2.2 浮体モデルの設定

1) 概要

浮体モデルは、主にセミサブ形式、ポンツーン形式（バージ形式）、スパー形式、TLP形式が提案されており、各形式の特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示す浮体モデルも風車モデル同様、連成解析を実施するために必要なモデル仕様を設定する。

2) 浮体モデルの設定方法

浮体モデルの設定にあたっては、浮体モデルの動揺がRNA、タワーに悪影響を及ぼさないよう、適切に浮体モデルの動揺を抑制しなければならない。ここでは、NEDOの次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究として採択された、セミサブ形式とバージ形式の浮体モデルの設定方法について概要を示す。

(1) セミサブ形式

浮体モデルに必要な項目の例を表 4.2-2 に、浮体モデルの設定例を表 4.2-3 に示す。また、浮体の形状例を図 4.2-1 に、風車モデルを含む浮体式洋上風力発電施設の外寸法の例を図 4.2-2 に示す。

表 4.2-2 浮体モデルに必要な項目の例（セミサブ形式）¹²

大項目	中項目	小項目
浮体	形状	サイドカラム（円柱）間隔（平面3角形辺長）
		サイドカラム（円柱）直径
		ヒーププレート（扁平円柱）直径
		ポンツーン（底部スポーク）材の幅
		ブレース（斜材）直径
	重量	浮体重量
		バラスト水重量
	その他	喫水

表 4.2-3 浮体モデルの設定例（セミサブ形式）¹²

項目	2MW	5MW
サイドカラム（円柱）間隔（平面3角形辺長）	50.2m	50.2m
サイドカラム（円柱）直径	7.5m	12.0m
ヒーププレート（扁平円柱）直径	14m	24m
ポンツーン（底部スポーク）材の幅/せい	3~6m/4 m	3~6m/4 m
ブレース（斜材）直径	2.25m	2.25m
浮体重量	2500t	3850t
バラスト水重量	2214t	8232t
喫水	16.0m	21.3m

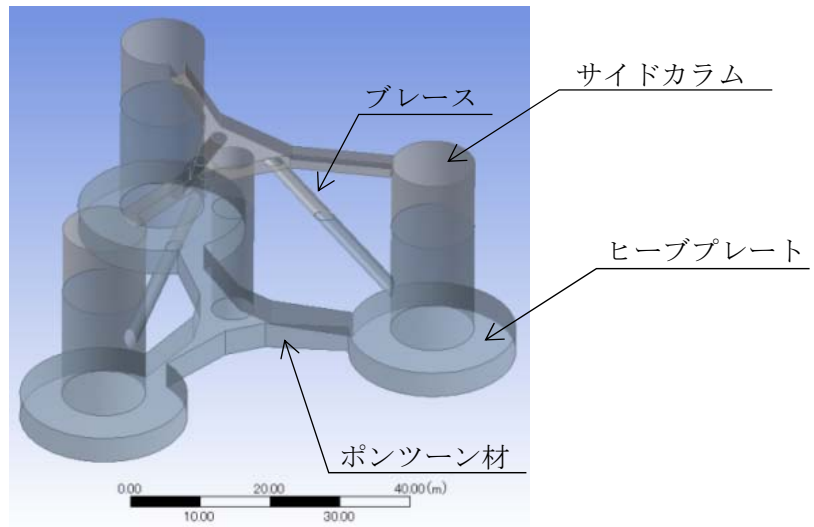


図 4.2-1 浮体の形状例 (セミサブ形式)

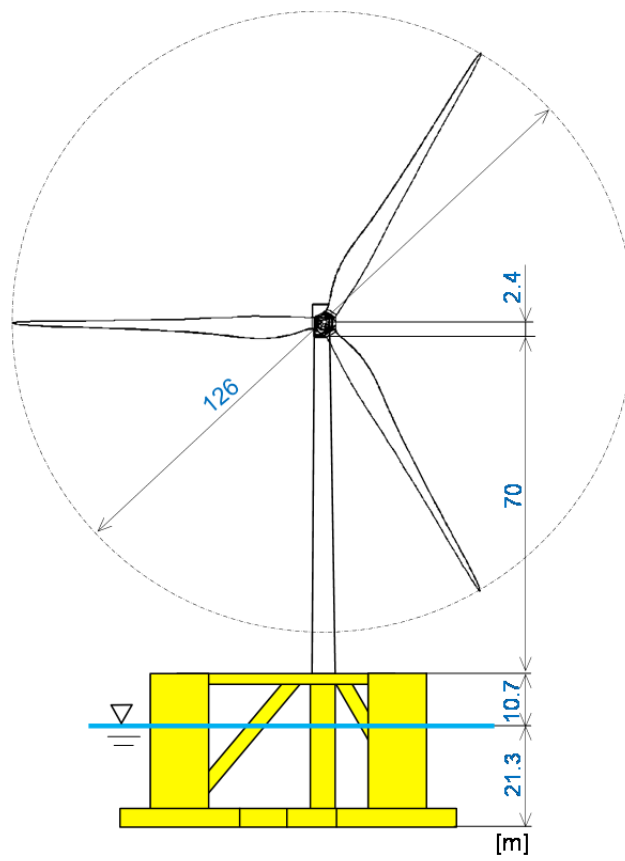


図 4.2-2 浮体式洋上風力発電施設の外寸法の例

(2) バージ形式

浮体の形状例を図 4.2-3 に示す。また、浮体モデルの設定例を表 4.2-4 に示す。

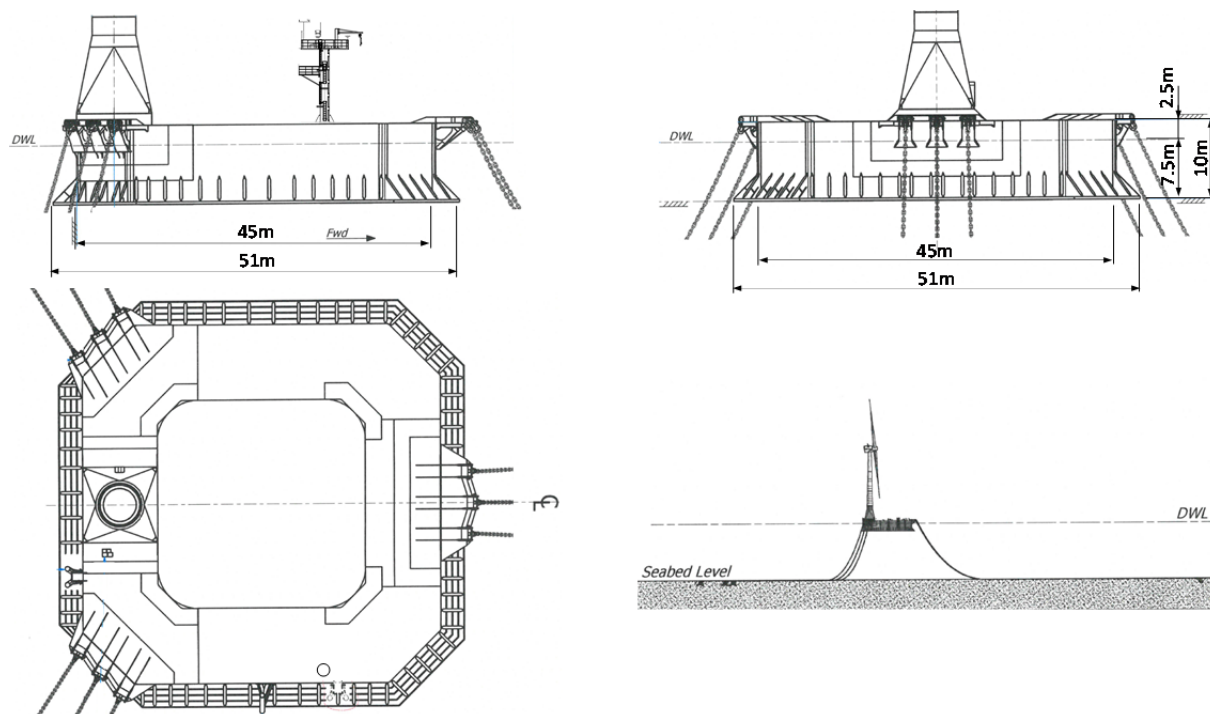


図 4.2-3 浮体の形状例（概要図）¹²

表 4.2-4 浮体モデルの設定例（バージ形式）¹²

構造形式	バージ形式（鋼製）
寸法	長さ 45.0m×幅 45.0m×高さ 10.0m（スカート幅 3.0m）
喫水	7.5m
排水量	9858.0t
搭載風車	3,000kW 風車／2 枚翼／アップウインド型
ハブ高さ	72.0m
スカートの長さ	3m（後部の角を除いて）
開口部の幅	26.2m
外殻の深さ	10.0m
重心座標（Xg;Yg;Zg）	（22.5m;0.0m;7.275m）

4.2.3 係留モデルの設定

1) 概要

係留モデルは、主にカテナリー係留、トート係留、TLP 係留等が提案されている。さらに、アンカー部分は、ストックレス、打ちこみ杭、吸引管、重力アンカーが提案されている。このような各形式の特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示すモデルは、浮体モデルの下側に連結しているチェーンおよびアンカーに該当する部分である。連成解析を実施するために必要な係留モデル仕様を設定する。

2) 係留モデルの設定方法

係留モデルは、浮体式海洋構造物および移動式海洋構造物の位置保持装置の規格である ISO19901-7 (2013) ³⁴を満たすと良い。係留モデルの設定例を表 4.2-5 に、また、チェーンの許容張力の例を表 4.2-6 に示す。

表 4.2-5 係留モデルの設定例 ¹²

係留形式	All チェーン+ドラッグアンカー
係留本数	9 本 (3 点×3 条)
チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食磨耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 4.2-6 チェーンの許容張力の例 ¹²

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8598
単一索破断状態 (再現期間 1 年)	1.25	11486
単一索破断時の過渡状態 (再現期間 50 年)	1.05	13675

※安全率は浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン⁴による。

4.3 連成解析の実施

4.3.1 概要

浮体式洋上風力発電施設には、風車の発電時・停止時等の状況に応じた風荷重が発生し、また、加えて波・潮流等の外力によって浮体動揺が発生する。浮体動揺によって風車への相対風速が変化する他、浮体構造物周りに流体力が発生し、浮体構造物につながる係留系や送電ケーブルからの荷重も発生する。また、風車はブレードのピッチ角制御を行うので、それによる荷重変動も考慮する必要がある。

これらの荷重は、連成させた評価が必要である。発電機特性やブレードのピッチ角制御を含めた風車の稼働状態および暴風状態等をモデル化し、風車に働く風荷重、浮体構造物に働く波、流れ等の外力、係留系の影響等を同時に考慮し、一体として評価する必要がある。

一般的に、浮体式洋上風力発電システムにおける浮体の運動方程式は式 4.3-1 のように表される。

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = \{F_G\} + \{F_B\} + \{F_H\} + \{F_M\} + \{F_R\} \quad \text{式 4.3-1}$$

ここで、

- x : 浮体の変位
- M : 慣性力マトリクス
- C : 減衰マトリクス
- K : 剛性マトリクス
- F_G : 重力
- F_b : 浮力
- F_H : 流体力
- F_M : 係留力
- F_R : 復原力

流体力は、波強制力（フルードクリロフ力、ディフラクション力）、ラディエーション流体力（造波付加質量、造波減衰力）、非線形減衰力の3つに分類される。細部材では、波の変形によるディフラクション力が無視でき、粘性影響による非線形抗力が支配的であり、モリソン式が適用される。一方、大部材では、部材による波の変形・回折の影響が大きく、浮体の運動による造波減衰力と反射波による波強制力が支配的であり、ポテンシャル理論が適用される。

なお、流体解析については付属資料編「5. 流体解析モデル」に詳しく記載している。

4.3.2 連成解析の流れ

連成解析のフローを図 4.3-1 に示す。連成解析では、風車、浮体、係留を別々に解析し、時間ステップ毎の計算結果をそれぞれの境界面のデータとして、他の解析に受け渡して計算する弱連成が一般に行われる。具体的には、浮体の動揺を解析し、その結果を風車、係留の解析条件として強制変位として作用させる等して解析を行う。

評価に用いるツールは付属資料編「4.2 主要な連成解析モデル」に詳しく記載している。

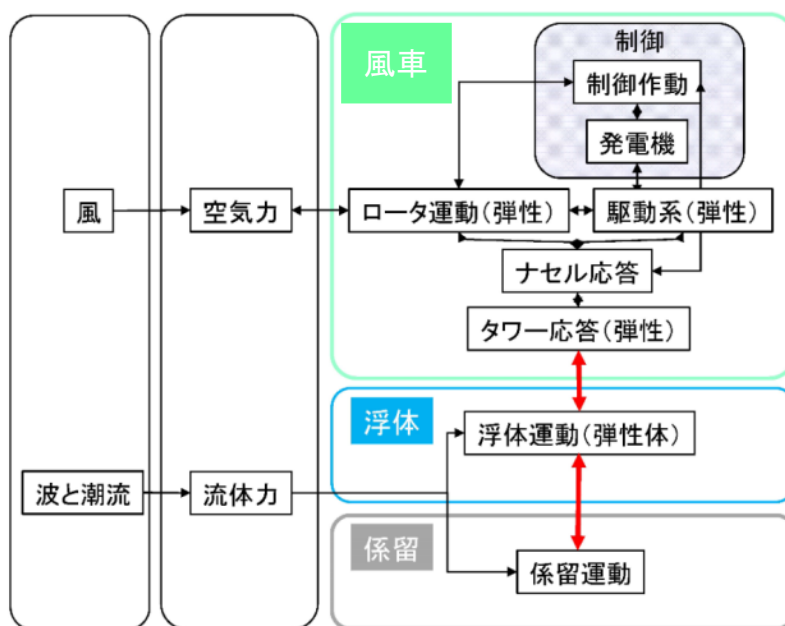


図 4.3-1 連成解析のフロー

4.3.3 動解析手法

連成解析に用いる動解析手法は、水槽試験を実施し高い精度で計算が行える事を確認したものを利用する。なお、確認が取れていない新たな手法を用いる場合においては、水槽試験を通じて精度を確認する必要がある。

解析手法は、風車制御を考慮した動的、非線形、時刻歴解析が望ましい。連成解析の計算結果として導出する必要のある項目は、表 4.3-1 に示す通りである。

表 4.3-1 連成解析の計算結果として導出する必要のある項目

対象	項目
風車・タワー部	RNA 加速度、タワー断面力、ブレード荷重
浮体・係留ライン	タワー基礎断面力、浮体各部断面力、浮体変位、係留力

1) 浮体動揺の動解析手法

現在、一般的に用いられている浮体動揺の動解析手法を表 4.3-2 に示す。

手法①：浮体を剛体と仮定して一慣性体で表し、マルチボディダイナミクス解析を実施する。流体力の評価は、ポテンシャル理論を解いて、6自由度のマトリクスとして評価する。浮体を剛体と仮定するため、全ての浮体形式に適用できる一方で共振現象を評価することができない。

手法②：浮体を弾性体と仮定し有限要素法を用いて解析を実施する。流体力の評価は、部材の各断面に働く流体力を評価することが可能なモリソン式を用いて評価する。部材に働く応力分布を評価することができ、部材の共振現象を評価することができる。しかし、モリソン式は波の反射が無視できる細い部材にのみ適用可能なため、細い部材で構成された浮体（セミサブ形式やスパー形式）にしか適用できない。

現状は、提案されている多くの浮体が十分に剛体であるため、手法①が用いられることが多い。浮体が弾性体である場合は、部材の共振現象を評価する必要がある、解析方法に注意が必要である。また、浮体が弾性体の場合に手法①を用いた場合、風車の固有振動数が実際よりも過小評価されるため、風車モデルの剛性を調整する必要がある。

また、それぞれの手法ともに、非線形粘性項の流体力係数を評価する必要がある。水槽試験を実施し、規則波試験における浮体動揺の周波数応答関数（RAO）が一致するように同定する方法が最も一般的である。

表 4.3-2 浮体動揺の動解析手法

	手法①	手法②
風車	弾性体	弾性体
浮体	剛体	弾性体
流体力評価	ポテンシャル理論により 浮体全体に働く流体力を評価	モリソン式により 部材に働く流体力の分布を評価
長所	全ての浮体形式に 適用することができる。	部材の共振現象を評価できる
短所	部材の共振現象を 評価することができない	細かい部材で構成された浮体のみ にしか適用できない
適用可能な 浮体形式	セミサブ形式 スパー形式 ポンツーン形式	セミサブ形式 スパー形式

2) 係留力の解析手法

係留索の解析手法には表 4.3-3 に示す解析解を求める方法、有限要素法で解く方法がある。下記に示す理由から、両手法の浮体動揺の予測精度は変わらないことが NREL 等より報告されている。予測精度の比較として、不規則波中サージ方向動揺例を図 4.3-2 に示す。

- 浮体式海洋構造物では浮体の排水量に比べて係留索が軽量で、弛緩状態で使用されるため、係留索に働く流体力を考慮しても浮体の運動にほとんど差が生じない。
- 浮体が長周期運動を行う場合でも係留索の運動速度、運動加速度は極めて小さく、カタナリーの変形から生ずる静的復原力で十分とされている。

表 4.3-3 係留力の解析手法

ツール	手法①	手法②
係留	解析解を求める方法	有限要素法

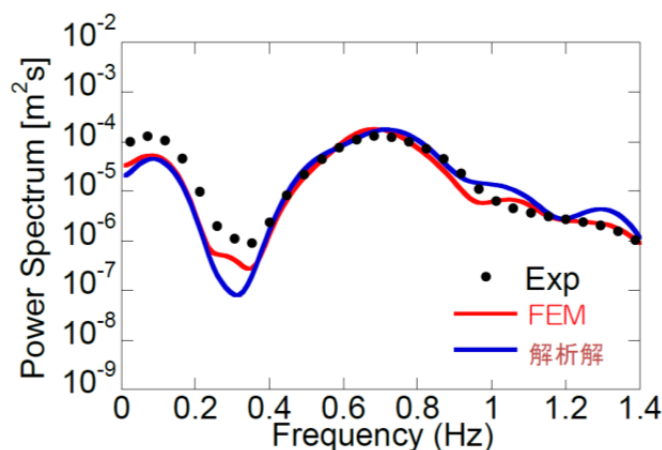


図 4.3-2 不規則波中サージ方向動揺例³⁵

また、係留索と浮体の解析手法を表 4.3-4 に示す。実際の設計では計算コストを下げるため、①の手法を採用することが多いが、②との整合性を検証する必要がある。

表 4.3-4 浮体と係留の解析手法

解析方法	説明
① One way	浮体の動揺を強制変位として、係留ラインの動揺を解く方法
② Coupling	浮体と係留の連成解析を、反復計算を実施して解く方法
③ Decoupling	浮体と係留の連成解析を、反復計算を実施しないで解く方法

3) 波漂流力の解析手法

水面付近の体積が大きい浮体では、波漂流力が大きくなり係留システムに影響を与える。波漂流力は、流体力学的には2次の力であり、波高の自乗に比例する量として整理される。波周期に比較して変動周期が長いため、係留設計では定常力として扱われることも多い。水槽試験または理論計算によって求める。

4.4 連成解析の検証

4.4.1 概要

連成解析の検証は水槽試験によって行い、連成解析結果が安全側の数値を与えることを確認する。また、複雑な形状の浮体については、流体力係数の同定を行い、その結果を連成解析に反映することも行われる。

浮体部分については、一般的な浮体構造物と同様にフルード則によってスケールダウンする。一方、風車部分は、実機と模型でレイノルズ数が大きく異なる等の問題があり、発電時の相似性を確保することが難しい。従って、風車運転時の DLC については、模型風車の特性を十分に考慮して水槽試験結果を利用することが必要である。

なお、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）³では、時間領域での連成解析を求めるとともに、模型試験によって荷重を算定しても差し支えないとしていることから、水槽試験結果からそのまま使用できるデータも提示することが望ましい。

水槽試験のイメージを図 4.4-1 に示す。

なお、わが国の水槽試験施設、水槽試験に係る実状と留意点等について付属資料編「3. 水槽試験」に詳しく記載している。

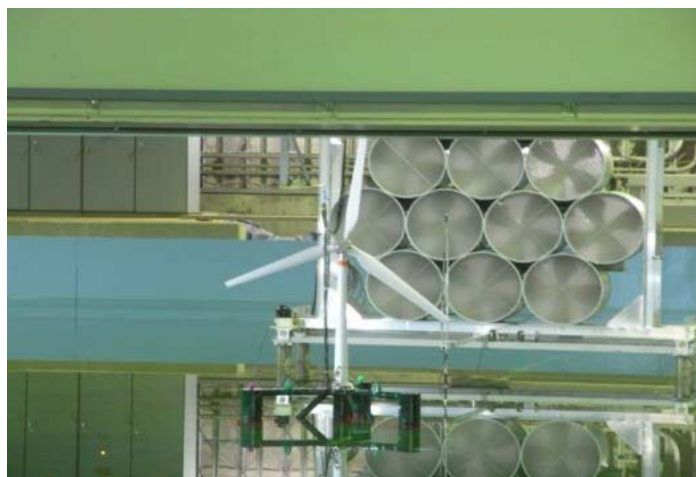


図 4.4-1 水槽試験のイメージ

4.4.2 模型

水槽試験に用いる縮尺模型の設計・製作におけるモデル化の範囲は、浮体部分、風車部分、係留部分に大別される。

浮体部分については、形状、重量、喫水に加え、KG（ベースラインから重心までの距離）、GM（メタセンター高さ）、慣性モーメント等を十分正確に模擬することが必要である。また、浮体に働く風速や潮流速度についてはフルード則が適用されることが多い。

係留は、カテナリー係留を用いることが多い。カテナリー係留では、ライン本数、ライン形状、アンカー位置、重量分布、抗力係数を実機に一致させることが望ましいが、水槽の寸法が制約条件になることが多く、水深と係留展開面積の点で、実機を正確に模擬できないことがある。このような場合には、水平方向の係留反力を模擬することが第一に重要である。トート係留では、水平方向とともに鉛直方向の係留反力を模擬することが必要である。

風車部分は、停止時を対象とするのであれば、実機の形状を模擬しフルード則に従って風速を設定することで、概ね風荷重を再現することができる。発電時については、浮体が動揺すれば風車への流入風速が変化し、それによって回転速度が変わり、また定格風速以上であればブレード・ピッチ制御やトルク制御が行われ、結果としてスラスト荷重が変動する。この変動荷重を正確に模擬するモデルは困難なため、後述するような工夫が必要である。平均的な風荷重を模擬する方法として、風圧を受ける円盤や小型送風機を風車位置に設置する等の方法が取られることもある。

4.4.3 環境外力

水槽試験における代表的な環境外力として風、波、流れがある。風、流れの流向と波向は、最も厳しい組合せで試験をすることが望ましいが、困難な場合は、予め連成解析を行って水槽で再現できる最も厳しい組合せで試験する必要がある。波と流れについては、一般的な浮体構造物と同様であり、フルード則によりスケールダウンする方法が用いられる。以下では、浮体式洋上風力発電施設にとって重要となる風荷重の考え方の概要を示す。

1) 送風装置

風水洞設備における実験を除き、水槽設備内の送風装置を用いて流場を模擬する。常設送風装置には、送風装置が水槽台車に据付けられている形式や水槽外に据付けた送風装置とフレキシブルダクトから構成される形式がある。一方、仮設送風装置の多くは一般的なファン複数機と整流のためのハニカム樹脂から構成され、これを水槽曳航台車に設置する形式および水槽底を移動可能な架台上に設置する形式がある。

特に仮設送風装置を用いる場合は、水槽試験に先立って風速分布を計測し、一様性等を確認する必要がある。

2) 送風方法

浮体運動論の観点から相似的にフルード則を用いるため、モデルのレイノルズ数は実機に比べて著しく低下する。その結果、風車の発電状態における空力特性（出力係数、スラスト係数等）は実機とモデルで大きく乖離してしまう。そこで、風車に作用するスラストが相似になるよう、風速、ブレードの回転速度、ブレードのピッチ角を調整等の工夫がなされることが多い。

3) 留意点

風車の空力特性はブレード先端近傍の風速が最も重要であることに留意し、また、浮体が動揺する量を予測して、送風装置の送風面は十分な広さとする必要がある。また、浮体構造部にも風荷重が作用することに留意する必要がある。

4.4.4 計測項目と計測方法

浮体式洋上風力発電施設は、一般的な海洋構造物の試験と同様に浮体動揺や係留力の把握が必要であるが、風車部のデータとしてタワー基部の曲げモーメントが重要である。また、ナセル加速度を問題にする場合には、タワーの剛性・固有振動数を適切に選ぶ必要がある。回転機構のある風車では、風車の回転速度やブレード・ピッチ角を計測しておくことが必要である。

4.4.5 水槽試験の留意事項

浮体式洋上風力発電施設では、水力現象、空力現象、ブレード・ピッチ制御等が複雑に連成することから、ネガティブダンピング、ジャイロ・モーメント等特有の現象が発生する。相似則ではフルード数やレイノルズ数等、同時に満足しがたい。そのため、浮体運動から発電性能までを一度に総合的に評価する実験は困難である。

浮体運動については、風荷重を模擬する方法が種々試みられており、これを適用することである程度評価可能と思われる。一方、発電性能については、レイノルズ数が2桁程度違う他、ブレード・ピッチ制御やジャイロ・モーメントによるヨー角の変化等、現象の複雑さが影響するため、直接的な評価は容易ではないと考えられる。

機器の点では、特に風車回転時の現象やブレード・ピッチ制御を模擬する場合、ナセル回りの機構が複雑になり、寸法と重量が縮尺比よりも大きくなる傾向があるため、小型軽量の機器の開発とともに、これを適切に考慮することが必要になる。

5. 構造評価

5.1 概要

構造評価においては、部分安全率法を用いて荷重および材料の不確かさ、ばらつき等を考慮しても十分な耐力を持つことが求められる。

具体的には、RNA、タワー、浮体設備、浮体設備とタワー基部の結合部、係留ラインについて浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）³を満たすように部材等の設定・評価を実施する。ただし、RNA とタワーについては、JIS C 1400-1（2010）⁵に規定した要求事項を満たす必要がある。

浮体設備の材料および溶接については、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）⁴に規定した要求事項を満たす必要がある。

本技術ガイドブックでは、DLC に沿って浮体設備、浮体設備とタワー基部の結合部、係留ラインの構造評価に主眼を置き記述する。

以下に、基本事項を示す。

なお、構造解析モデルについては付属資料編「6. 構造解析モデル」に詳しく記載している。

1) 設計寿命

構造物の寿命は、使用環境、使用する材料、保守・点検方法に依存する。洋上風力発電施設の寿命は、JIS C 1400-1（2010）⁵において風力発電機の疲労寿命が 20 年以上と定められており、浮体施設の設計寿命は最低でも 20 年とする。

2) 安全性

荷重を受ける部材が健全であることを検証し、許容水準の安全性を確認する。部材が健全であるとは、設計される条件下において十分な耐久性能、耐荷重性能を有するということである。

3) 強度検証

強度の検証においては、終局限界状態および疲労限界状態に対して検証を行う。構造部材の強度については、計算および試験またはそのいずれかによって検証し、適切な安全水準の構造的健全性を立証する。

4) 座屈強度

圧縮荷重が作用する部材の設計においては、座屈強度に注意する必要がある。その部材の形状、寸法、周囲条件等を考慮して、座屈に対し十分な強度を有するものとする。

5) 疲労強度

疲労強度に注意する必要がある。繰り返し応力を受ける部材は、繰り返し応力の大きさ、繰り返し数、部材の形状等を考慮し、疲労に対し十分な強度を有するものとする。

6) 応力集中

構造的な不連続部や溶接止端部等による応力集中の存在は、部材の疲労強度を大きく低下させる原因となるため、疲労強度評価の際には応力集中を適切に考慮する必要がある。

7) 開口部

浮体施設およびタワーにおいて、大きな開口を有する構造とする場合には、開口による剛性の低下、応力集中の発生に留意する必要がある。なお、ムーンプールの取り扱いについては、鋼船規則 PS 編³⁶等を適宜参照する。また、基部等に開口を有するタワーの強度評価においては、風力発電設備構造設計指針・同解説（2010）⁷に記載の手法を準用しても良い。

5.2 風車の構造評価

風車の構造的な健全性は、原則として連成解析によって得られる風車に対する荷重と、風車の型式認証で用いられた設計荷重と比較することによって示す必要がある。サイト固有の環境条件に基づく設計条件が、風車の型式認証で認められた設計条件の範囲に収まる場合であっても、連成解析結果に基づく構造評価を実施しなければならない。

連成解析によって得られる風車に対する荷重と、風車の型式認証で用いられた設計荷重を上回らない場合、サイトの環境条件に対する風車の構造的な健全性は担保されることになる。連成解析によって得られる風車に対する荷重が風車の型式認証で用いられた設計荷重を上回る場合、その影響を受ける部品の健全性を検証しなければならない。

また、風車の型式認証書には記載されていない新規の部品、改良もしくは補強された部品がある場合、または制御を変更する等の変更を加える場合、該当する部品および制御システムは風車の型式認証に対する要求事項にも適合しなければならないことに留意する必要がある。

いずれにしても、浮体式洋上風力発電設備に搭載される風車は、現状の電気事業法による法規制における取扱いにより、サイト環境条件への適合性について認証機関による評価を受ける必要がある。

なお、この認証機関による評価については、風車メーカーと認証機関の間での直接のやり取りによって実施されることが一般的な流れである。

5.3 浮体施設の構造評価

5.3.1 終局強度の検討

1) モデル化

FEM（Finite Element Method（有限要素法））解析では、解析で得られた水圧分布を作用させながら、照査対象範囲において断面力も精度よく再現できるようモデル化する。浮体各部のモデル化の例を図 5.3-1 に、部分モデルのイメージの例を図 5.3-2 に示す。

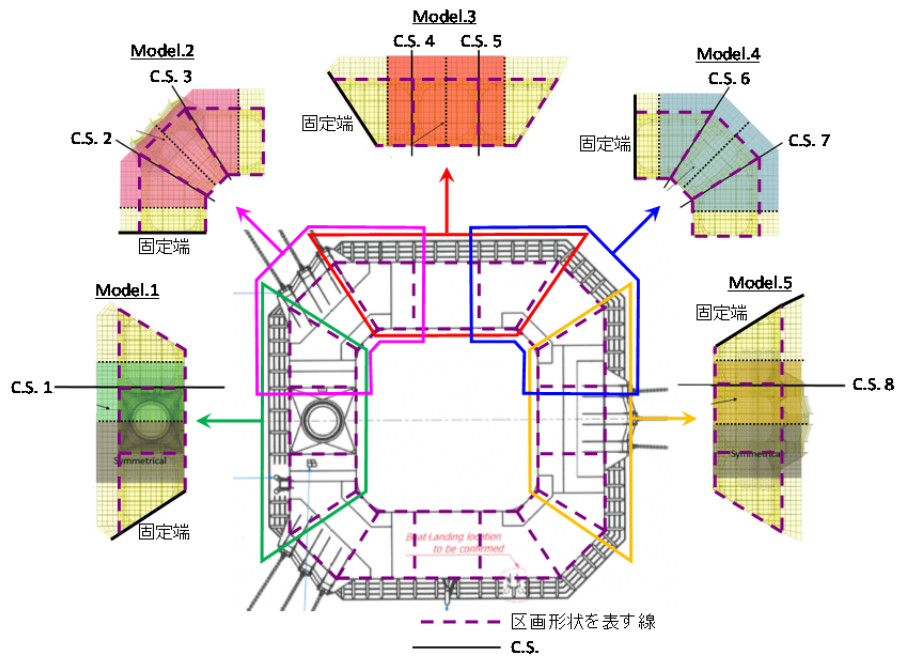


図 5.3-1 浮体各部のモデル化の例¹²

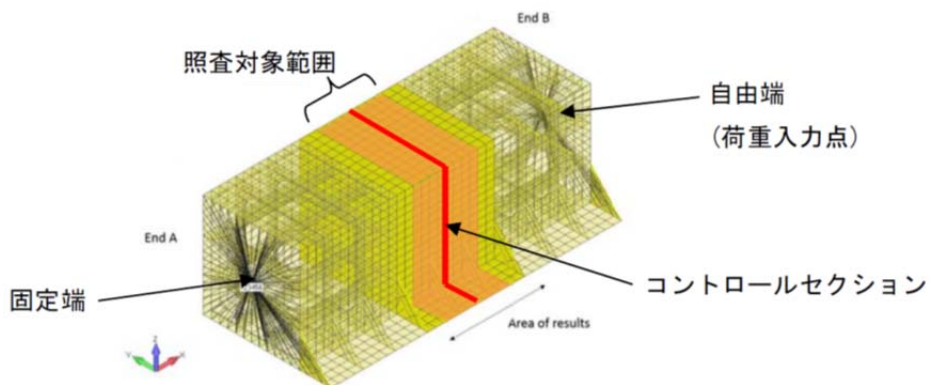


図 5.3-2 部分モデルのイメージの例¹²

2) 検討方法

荷重ケースを設定し、FEM 解析により強度照査を行う。FEM 解析を行う荷重ケースの設定例を表 5.3-1 に示す。

表 5.3-1 FEM 解析を行う荷重ケースの設定例¹²

荷重ケース	断面力			圧力分布
断面力 最大 ケース	L-max Fx	縦方向せん断力 Fx 最大	+ 同時刻のその他断面力成分	Fx 最大時刻の圧力分布
	L-min Fx	縦方向せん断力 Fx 最小	+ "	Fx 最小 "
	L-max Fy	横方向せん断力最大 Fy	+ "	Fy 最大 "
	L-min Fy	横方向せん断力 Fy 最小	+ "	Fy 最小 "
	L-max Fxy	合成せん断力 Fxy 最大	+ "	Fxy 最大 "
	L-max Fz	軸力 Fz 最大	+ "	Fz 最大 "
	L-min Fz	軸力 Fz 最小	+ "	Fz 最小 "
	L-max Mx	横曲げモーメント Mx 最大	+ "	Mx 最大 "
	L-min Mx	横曲げモーメント Mx 最小	+ "	Mx 最小 "
	L-max My	縦曲げモーメント My 最大	+ "	My 最大 "
	L-min My	縦曲げモーメント My 最小	+ "	My 最小 "
	L-max Mxy	合成曲げモーメント Mxy 最大	+ "	Mxy 最大 "
	L-max Mz	トルク Mz 最大	+ "	Mz 最大 "
L-min Mz	トルク Mz 最小	+ "	Mz 最小 "	
圧力 最大 ケース	P-max side	外側板圧力最大時刻の断面力		外側板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max bottom	底板圧力最大時刻の断面力		底板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max inside	内側板圧力最大時刻の断面力		内側板で最大圧力発生時刻の圧力分布

3) 構造解析結果の評価

FEM 解析で得られた応力の最大値 σ_{\max} と許容応力 $\sigma_{vm,a}$ の比 ($\sigma_{\max}/\sigma_{vm,a}$) が 1 以下となることを確認する。応力の照査結果の例を図 5.3-3 に示す。

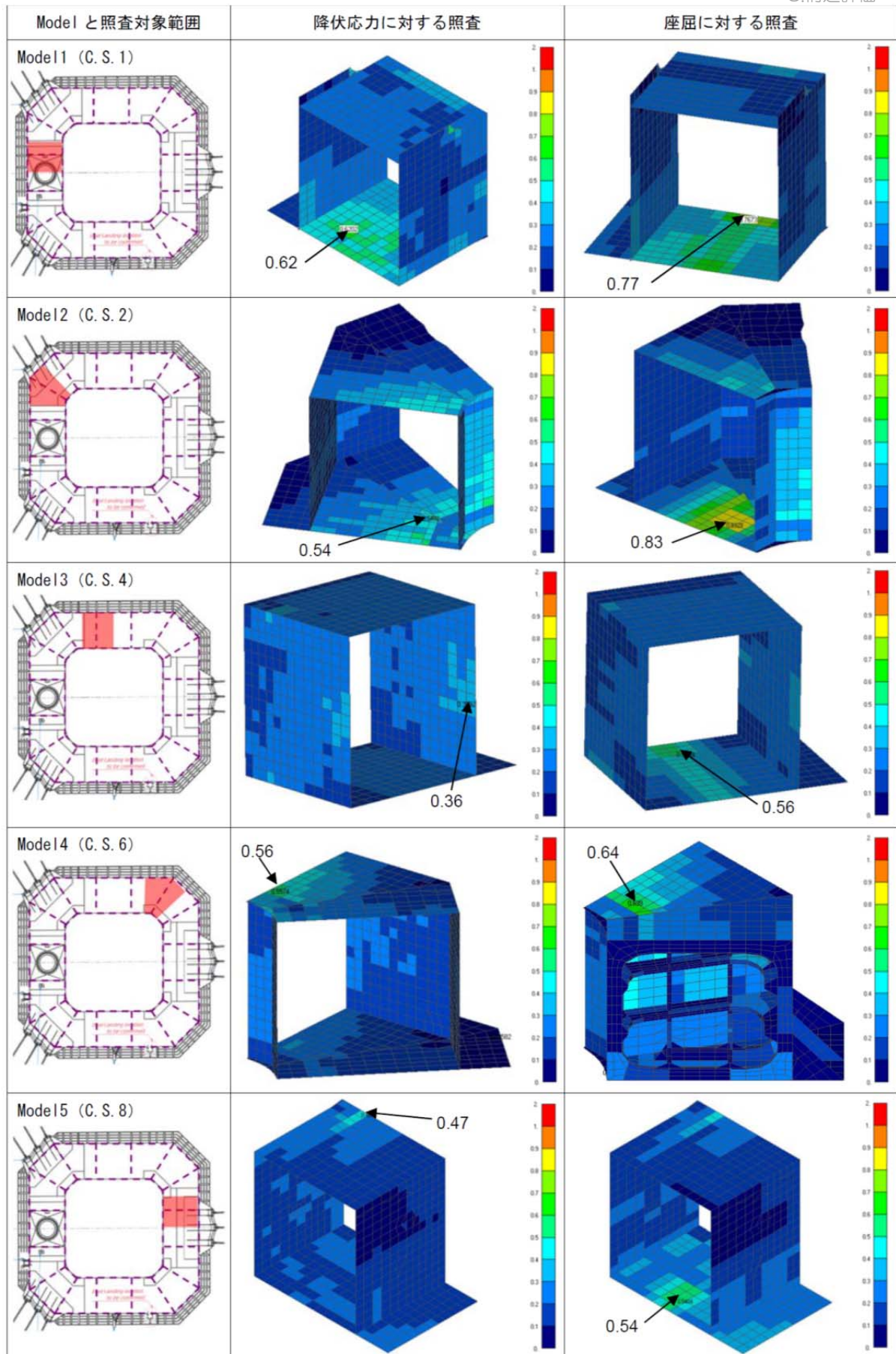


図 5.3-3 応力の照査結果 ($\sigma_{vm,max}/\sigma_{vm,a}$) の例¹²

5.3.2 疲労強度の検討

1) 検討手順

疲労検討の手順の例を図 5.3-4 に示す。疲労検討では、照査対象を応力集中部に限定し、時刻歴解析手法により応力の時刻歴を求めて、レインフロー法により応力振幅をカウントする。

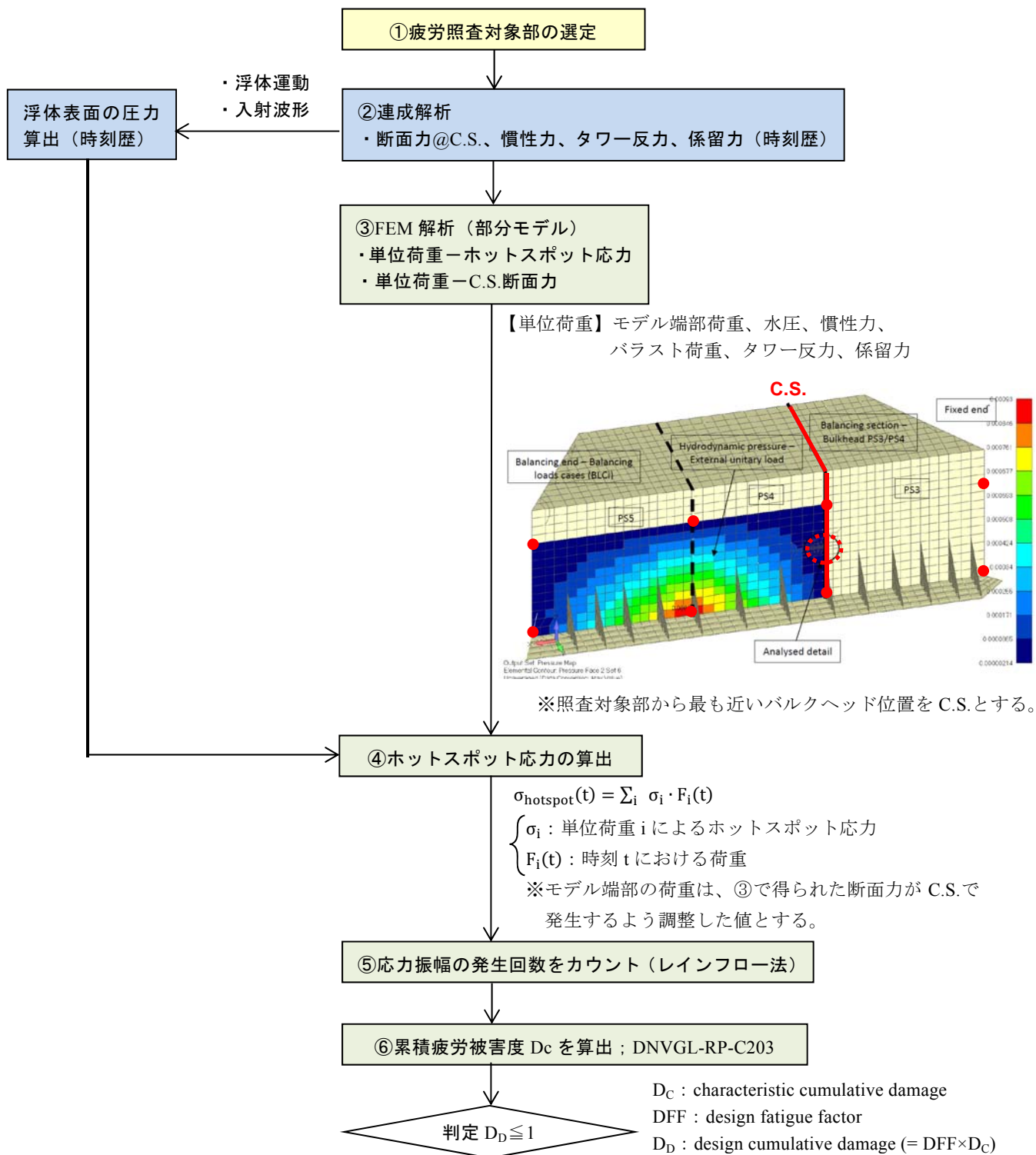


図 5.3-4 疲労検討フローの例¹²

2) 疲労照査対象部の選定 (図 5.3-4 のフロー①)

疲労照査対象部の例を図 5.3-5 に示す。FEM 解析では部分モデルを使用し、各照査対象部周辺のメッシュサイズを細かくした詳細モデルを作成する。

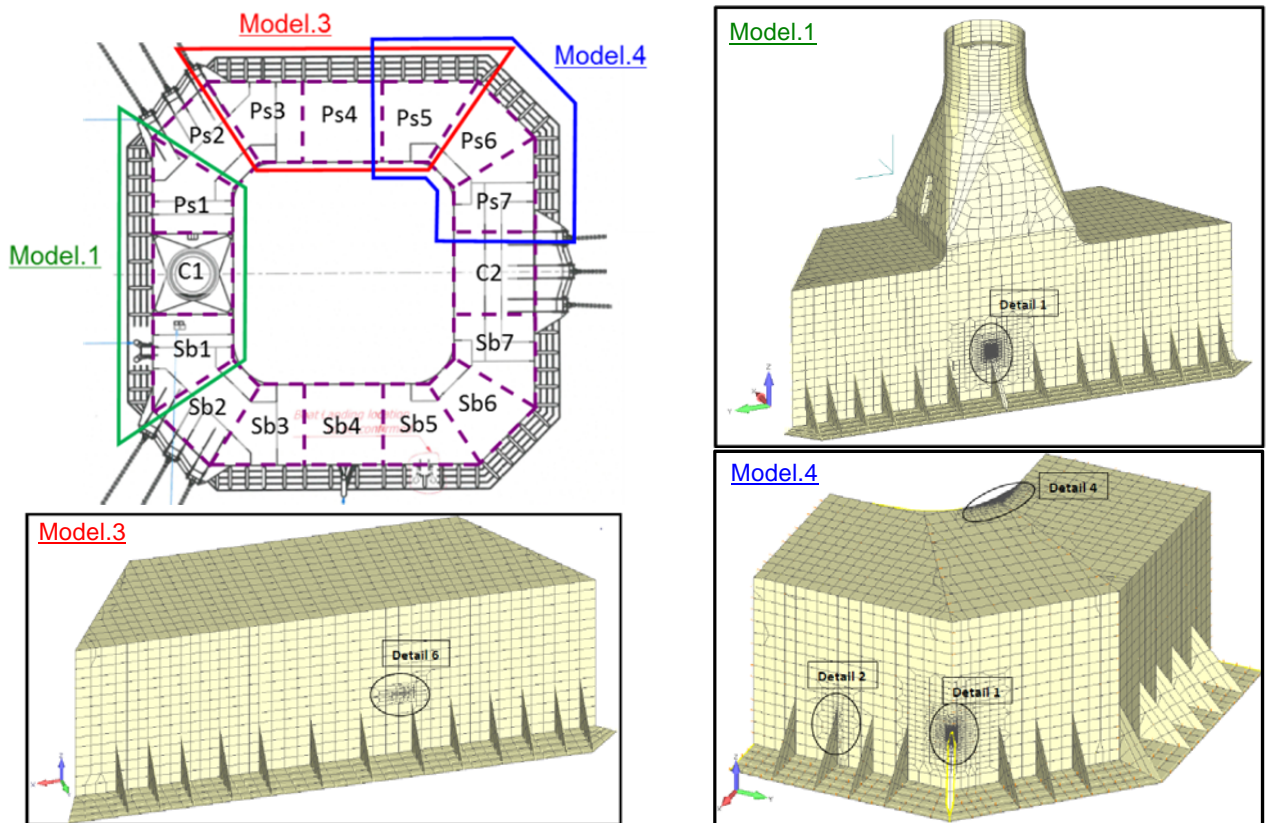


図 5.3-5 疲労照査対象部の例¹²⁾

3) 連成解析 (図 5.3-4 のフロー②)

荷重ケースを設定し、連成解析を実施する。荷重ケースの設定例を以下に示す。

【荷重ケースの例】

- ・ 波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布
12 方位に分割 (IEC 61400-3³⁷⁾) ⇒ 波浪発生頻度が 1%以上の 6 方位について計算 (図 5.3-6)
- ・ 風条件：最大スラスト風速 $V_{hub}=12.8\text{m/s}$ (全ケース一律)、12 方位 (風、波向きの変差考慮)
- ・ 解析時間：600s/1 ケース
⇒ 合計 1,334 ケース

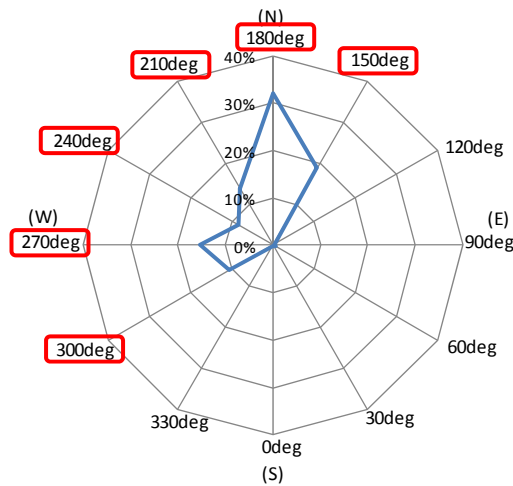


図 5.3-6 方位別の波浪発生頻度の例¹²

4) FEM 解析 (図 5.3-4 のフロー③)

部分モデルに単位荷重を作用させ、単位荷重とホットスポット応力、単位荷重と C.S.における断面力の関係を求める。

【単位荷重の例】

- ・ 6 自由度の断面力 (自由端から入力)
- ・ 水圧 (図 5.3-7)
- ・ 慣性力 (バラスト含む)
- ・ タワー反力

単位水圧の作用イメージの例を図 5.3-7 に示す。この例の場合、各モデルの側板上 8 点 (図 5.3-7 の赤点部) に単位水圧を作用させる。底板、内側板についても同様に 8 点の作用点を設け、それぞれの単位水圧に対するホットスポット応力を求める。

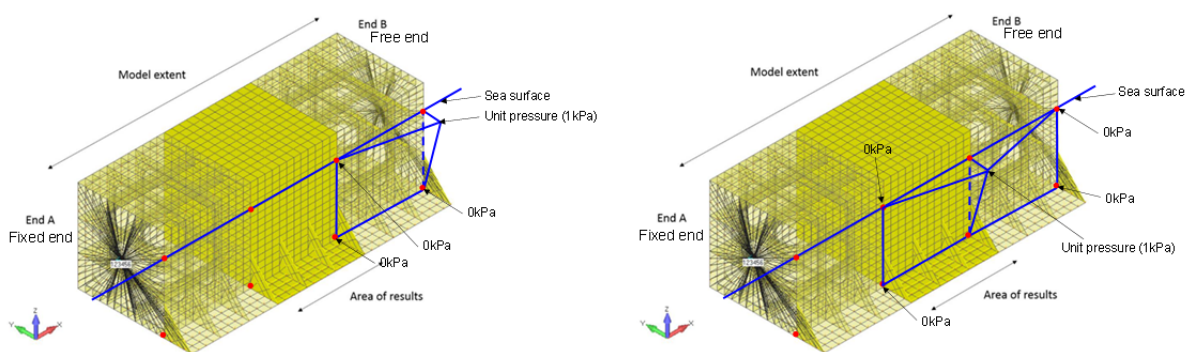


図 5.3-7 単位水圧作用イメージの例¹²

5) ホットスポット応力の算出 (図 5.3-4 のフロー④)

断面力、浮体の運動(加速度)、局部水圧、タワー反力の時刻歴と、それぞれの単位荷重一応力の関係から、荷重ケース毎にホットスポット応力の時刻歴 $\sigma_{hotspot}(t)$ へ変換する。具体的には次式による。

$$\sigma_{hotspot}(t) = \sum_i \sigma_i \cdot F_i(t) \quad \text{式 5.3-1}$$

ここで、

- $\sigma_{hotspot}(t)$: ホットスポット応力の時刻歴 (t)
- i : 単位荷重の種類
- σ_i : 単位荷重*i*によるホットスポットの応力 (Mpa)
- $F_i(t)$: 時間ステップ*t*における荷重(断面力はモデルの自由端での値) (Mpa)

6) 疲労照査結果 (図 5.3-4 のフロー⑤⑥)

レインフロー法により応力振幅の発生回数をカウントし、DNVGL-RP- C203³⁸のSN曲線に従い累積疲労被害度 D_C を次式により算出する。

$$D_C = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \text{式 5.3-2}$$

ここで、

- D_C : 累積疲労被害度
- n_i : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ の発生回数
- N_i : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ により疲労破壊に至るまでの $\Delta\sigma_i$ の発生回数で DNVGL-RP- C203³⁸による

D_C より DFF を用いて D_D を算出し $D_D \leq 1$ であることを照査する。疲労照査結果の例を表 5.3-2 に示す。

表 5.3-2 疲労照査結果の例¹²

Model	Detail	区画	部位	疲労曲線	D _C	DFF	D _D (≦1)
1	1	C1	スカート補強部	D	1.89E-03	3	5.68E-03
3	2	Ps3	浮体内部 骨部材の交差部	D	5.31E-02	2	1.06E-01
	3	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	2.87E-02	2	5.74E-02
	5	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	2.36E-01	2	4.71E-01
	6	Ps4/5	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	B2	4.06E-03	2	8.12E-03
	7	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	1.58E-02	2	3.16E-02
	8	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	6.82E-02	2	1.36E-01
4	1	Ps6/7	スカート補強部	D	1.92E-02	3	5.77E-02
	2	Ps7	浮体内部 骨部材の交差部	D	4.50E-02	2	8.99E-02
	3	Sb6/7	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	1.29E-03	2	2.58E-03
	4	Sb5/6	隅角 R 部	B2	7.16E-02	2	1.43E-01

DFF(Design fatigue factor) : 海水中は 3、浮体内部 (バラスト水あり) は 2

D_D(Design cumulative damage) : =DFF×D_C ≦ 1.0

極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を考慮するため、ワイブル分布を用いて応力振幅の発生頻度および疲労被害度を評価する³⁸。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.3-3}$$

ここで、

$Q(\Delta\sigma)$: 応力振幅 $\Delta\sigma$ の超過確率

h : ワイブル形状パラメータ

q : ワイブル尺度パラメータで、式 5.3-4 で与えられる。

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.3-4}$$

ここで、

q : ワイブル尺度パラメータ

$\Delta\sigma_0$: n_0 回に 1 回の割合で発生する最大応力振幅

n_0 : 応力振幅 $\Delta\sigma_0$ の発生回数

h : ワイブル形状パラメータ

累積疲労被害度が最も厳しいケースを対象に、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度と終局強度解析時の最大応力 (50 年に 1 回) を考慮し、式 5.3-3 の形状パラメータ h および尺度パラメータ q を設定し、応力振幅の発生頻度を再評価する。

- ・終局強度解析の最大応力の倍を 50 年最大の応力振幅として、これが 50 年に 1 回 (20 年に 0.4 回) 発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から得られた応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度が、許容値($D_D \leq 1.0$)を下回ることを確認する。

【ワイブル分布による疲労被害度の評価結果の例】(図 5.3-8)

$$D_D = D_C \times DFF = 0.278 \times 2 = 0.556 \quad (\text{長期分布のみの場合 } D_D = 0.471)$$

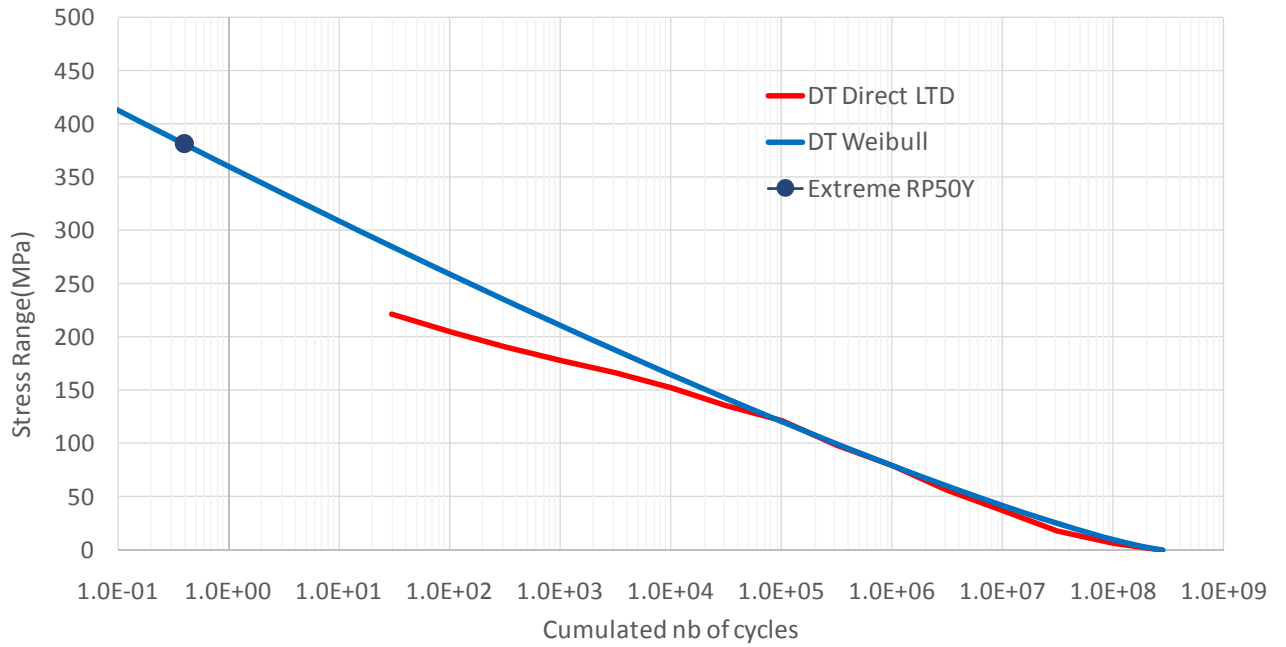


図 5.3-8 ワイブル分布による応力振幅の発生頻度の評価の例¹²

5.4 係留施設の構造評価

係留施設は、計画されたすべての運転条件に対して浮体施設を所定の位置に保持するために十分な能力を有し、かつ安全なものでなければならない。

低温、凍結、着氷等が想定される海域に設置される浮体の係留施設にあたっては、それらの影響を考慮したものとするか、適切な保護対策を施さなければならない。

係留施設の設計においては、表 5.4-1 に示す係留状態を係留解析により検討する。

表 5.4-1 係留解析で考慮すべき状態⁴

番号	状態	内容
①	非損傷状態	浮体施設および係留施設のすべての構成要素が正常である状態
②	単一係留ライン破断状態	浮体施設は非損傷状態で、係留ラインの1本が破断したと仮定したときに係留ラインの張力が最大となる状態をいう。非損傷状態において最大張力が発生する索の破断を仮定することが必ずしも最も過酷な状態になるとは限らないため、リード索破断、あるいは隣接する索の破断等様々なケースに対して解析を行い、最も過酷な状態について特定された状態
③	単一係留ライン破断時の過渡状態	係留ラインの1つが破断（原則リード索とする）し、浮体施設が過渡的な運動（オーバーシュートを含む）の後、残った係留ラインにより浮体施設が定常な状態に達するまでの状態

5.4.1 終局強度の検討

1) 係留ラインの仕様設定

係留索配置の例を図 5.4-1 に、係留索仕様の例を表 5.4-2 に示す。係留チェーンの許容張力は、NK ガイドライン⁴の腐食摩耗量の最大値 0.4mm/年（8mm/20 年）を考慮した Net 径の破断荷重から設定する。チェーン許容張力の例を表 5.4-3 に示す。

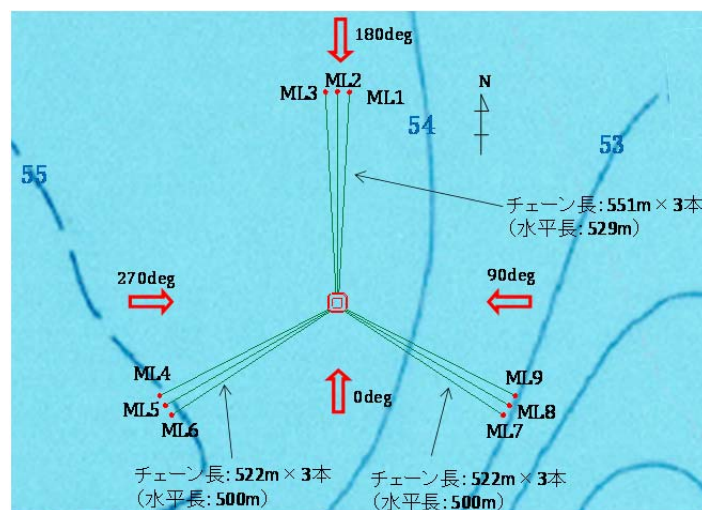


図 5.4-1 係留配置図の例¹²

表 5.4-2 係留チェーン仕様の例¹²

チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食摩耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 5.4-3 チェーン許容張力の例（安全率はNK ガイドラインによる）¹²

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8,598
単一索破断状態（再現期間 1 年）	1.25	11,486
単一索破断時の過渡状態（再現期間 50 年）	1.05	13,675

2) 検討方法

DLC について、連成解析を用いて係留の動的応答、外力の方向性を考慮した詳細解析を実施し、係留索の安全性を評価する。解析時間は全て 3,600s で、6 シードの解析を実施する。

Step1~4 の手順で検討を行う。IEC では基本的に波と風のみスアライメントの考慮を要求されている。ここでは、Step1 で波、風同一方向の解析を行い、クリティカルな外力方向を特定した上で、Step2 以降で、クリティカルな方向をベースにミスアライメントを考慮した検討を実施する。連成解析のモデル図の例を図 5.4-2 に示す。

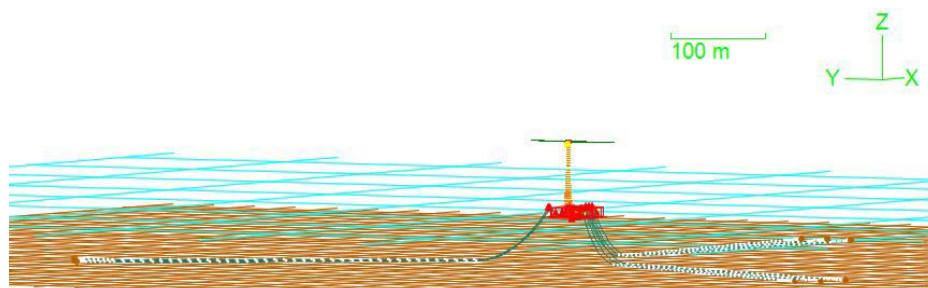


図 5.4-2 連成解析のモデル図の例¹²

(1) Step1 : 非損傷時（波、風同一方向）

外力方向を 30deg 毎に変えて検討を行う。荷重ケースの例を表 5.4-4、考慮する外力方向の例を図 5.4-3 に示す。また、周囲を陸地に囲まれ、波については顕著な方向性がみられる海域では方位別に波浪条件を変えて解析を実施する。

表 5.4-4 Step1 の荷重ケースの例¹²

DLC	風速 (at Z_{hub})	H_s	$T_{1/3}$	海面流速	方向
1.6 (運転時)	12.8m/s (最大スラスト)	5.42m	7.9s,9.0s,10.2s	0.10 m/s	図 5.4-3 の通り
	25.0m/s (カットアウト)			0.19 m/s	
6.1 (停止時)	48.5m/s	図 5.4-4 の通り		1.04 m/s	

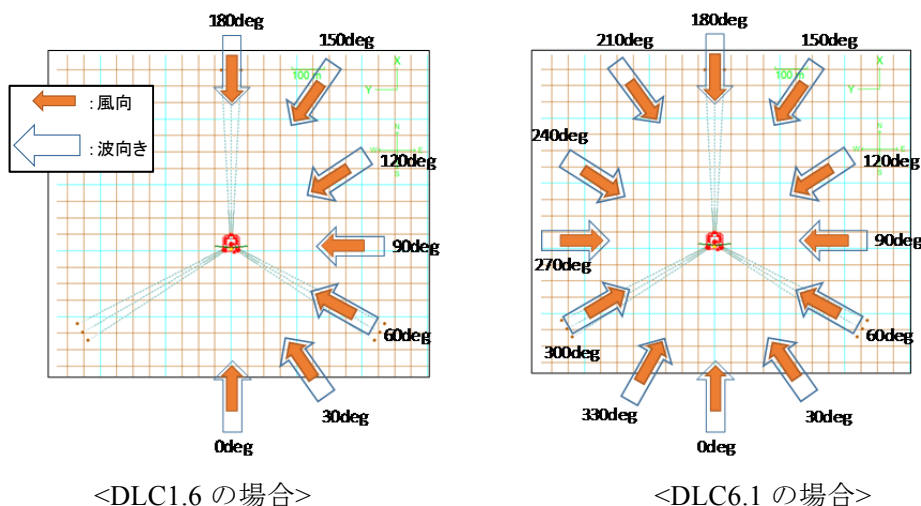


図 5.4-3 Step1 で考慮する外力方向組合せの例¹²

波浪推算データから求めた方位別の50年再現期待値、国土技術政策総合研究所資料²³の方位別の50年再現波高を比較し、最も安全側の波高を抽出する (図 5.4-4)。採用した波高が、1年再現期待値 $H_{s1-1hour}$ を下回る場合、その方位の設計波高は $H_{s1-1hour}$ とする。波周期はNKガイドライン⁴の式 5.4-1に従い範囲を求め、最小、中間、最大値について解析を実施する。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \tag{式 5.4-1}$$

ここで、

- H_s : 有義波高 (m)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- T : 周期 (s)

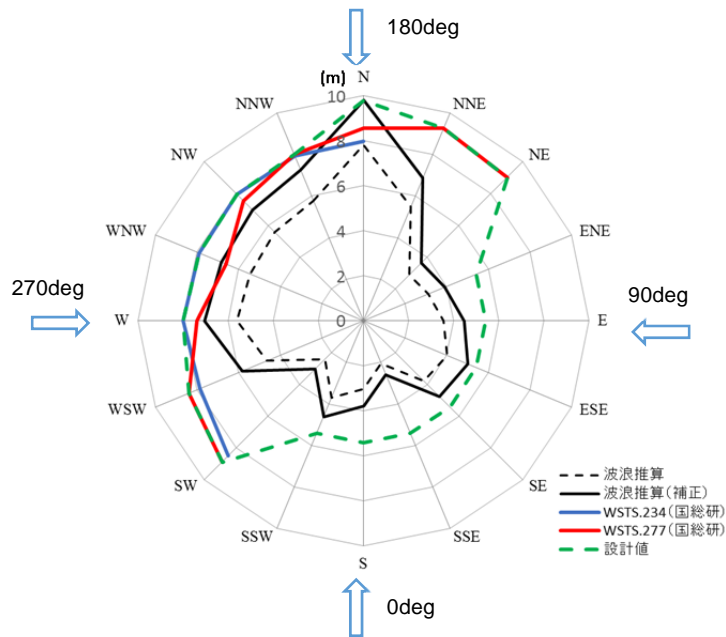


図 5.4-4 方位別の 50 年再現期待値波高の例¹²

(2) Step2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向について、 $\pm 30\text{deg}$ (10deg 毎)の風向と波向のミスアライメントを考慮した計算を行う (図 5.4-5)。流れについては、吹送流は風向と、水中流は波向とそれぞれ同一とする。

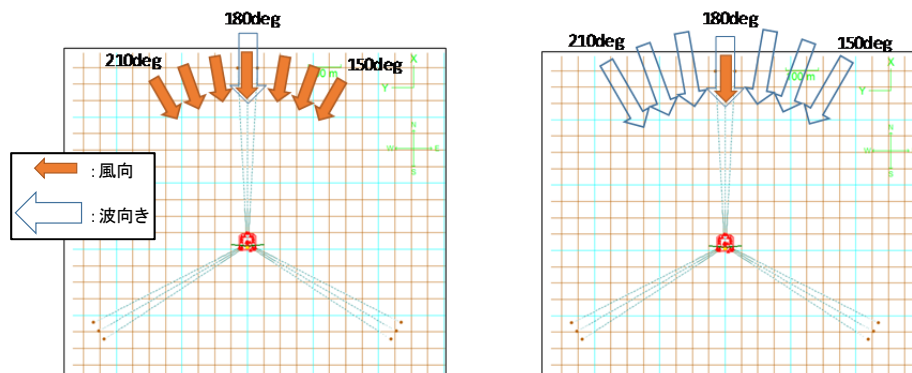


図 5.4-5 Step2 で考慮する外力方向の例 (180deg 方向をベースにしたケース)¹²

(3) Step3 : 単一索破断時 (破断後の平衡状態)

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向について、張力が最も大きいラインおよび 2 番目に大きいラインの破断を想定した解析を行う。解析で考慮する外力方向は Step2 と同じとする。環境荷重の再現期間 1 年 (NK ガイドライン⁴で規定) および 50 年 (参考扱い) の両ケースについて検討する。

(4) Step4：単一索破断時の過渡状態

非損傷時の検討（Step1、2）のうち最も張力が大きくなったケースについて、2番目に張力が大きいラインが途中で破断した状態を想定し、解析を行う。破断ラインの張力が最大になる時刻で破断すると仮定する。

3) 解析結果

(1) Step 1 : 非損傷時 (波、風同一方向)

最大張力の解析結果の例を表 5.4-5 に示す。UF (最大張力/許容張力) ≤ 1 であることを確認する。

表 5.4-5 Step 1 の最大張力の例¹²

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	7,500	0.87	7,019	0.82	DLC6.1_D150deg_V48.5_Hs9.28_T10.3
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1_D180deg_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML3	7,455	0.87	6,958	0.81	DLC6.1_D180deg_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML4	6,338	0.74	5,785	0.67	DLC6.1_D300deg_V48.5_Hs8.88_T11.6
ML5	6,015	0.70	5,415	0.63	DLC6.1_D300deg_V48.5_Hs8.88_T11.6
ML6	5,742	0.67	5,275	0.61	DLC6.1_D330deg_V48.5_Hs8.88_T10.1
ML7	2,781	0.32	2,052	0.24	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML8	3,596	0.42	2,932	0.34	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML9	4,709	0.55	4,155	0.48	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2

(2) Step 2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

最大張力の解析結果の例を表 5.4-6 に示す。UF (最大張力/許容張力) ≤ 1 であることを確認する。

表 5.4-6 Step 2 の最大張力の例¹²

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	8,244	0.96	7,810	0.91	DLC6.1_Dwind150_Dwave160_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1_Dwind180_Dwave180_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML3	8,117	0.94	7,650	0.89	DLC6.1_Dwind180_Dwave200_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML4	1,234	0.14	678	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML5	1,081	0.13	668	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML6	959	0.11	700	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML7	2,562	0.30	1,830	0.21	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML8	3,343	0.39	2,652	0.31	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML9	4,341	0.50	3,756	0.44	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2

(3) Step 3：単一索破断時（破断後の平衡状態）

最大張力の解析結果の例を表 5.4-7、表 5.4-8 に示す。UF（最大張力／許容張力） ≤ 1 であること、最大張力が破断荷重を下回ることを確認する。

表 5.4-7 Step 3（単一索破断時：再現期間 1 年）の最大張力の例¹²

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	ML2	3,635	0.32	2,986	0.26	Dwind150 Dwave160 V38.8 Hs5.42 T7.9
ML2	ML1	3,415	0.30	2,703	0.24	Dwind170 Dwave180 V38.8 Hs5.42 T7.9

表 5.4-8 Step 3（単一索破断時：再現期間 50 年）の最大張力の例¹²

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	
ML1	ML2	11,820	14,358	11,536	14,358	Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	ML2	11,610	14,358	11,314	14,358	Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6

(4) Step 4：単一索破断時の過渡状態

最大張力の解析結果の例を表 5.4-9 に示す。UF（最大張力／許容張力） ≤ 1 であることを確認する。

表 5.4-9 Step 4（単一索破断時の過渡状態：再現期間 50 年）の最大張力の例¹²

荷重ケース	最大張力 (kN)								
	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
Dwind150_Dwave160_V48.5 Hs9.8 T10.6	10,282	破断	7,653	676	715	747	1,021	1,135	1,295
UF	0.75	—	0.56	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09

4) 終局強度の評価

(1) チェーンの評価

最大張力の計算結果の例を表 5.4-10 に示す。UF（最大張力／許容張力） ≤ 1 であることを確認する。

表 5.4-10 最大張力の計算結果の例¹²

状態	最大張力 (kN)	許容張力 (kN)	UF
非損傷時	8,244	8,598	0.96
単一索破断状態（再現期間 1 年）	3,635	11,486	0.32
単一索破断時の過渡状態（再現期間 50 年）	10,282	13,675	0.75

(2) アンカーの評価

① 水平保持力

アンカー点最大荷重に表 5.4-11、表 5.4-12 に示す安全率を考慮した必要保持力がアンカー保持力を下回ることを確認する。アンカー点最大荷重と水平保持力の例を表 5.4-13 に示す。

表 5.4-11 カテナリ係留およびトート係留の海底係留点の水平保持力に関する安全率⁴

非損傷時	1.50
単一索破断時極限状態	1.00

表 5.4-12 トート係留の海底係留点の鉛直保持力に関する安全率⁴

非損傷時	1.20
単一索破断時極限状態	1.00

表 5.4-13 アンカー点最大荷重と水平保持力の例¹²

状態	アンカー点最大荷重 (t)	安全率	必要水平保持力 (t)	アンカー水平保持力 (t)
非損傷時	796.4	1.5	1194.6	1,200
単一索破断時 (再現期間 1 年)	304.5	1.0	304.5	1,200

② アップリフト

地鎖余長はアンカー点張力を浮体係留点に水平荷重として与えてカテナリー計算により求める。全てのラインで地鎖余長が残っており、アップリフトが発生しないことを確認する。非損傷時および単一索破断時のアンカー点での最大張力および地鎖余長の例を表 5.4-14 に示す。

表 5.4-14 アンカー最大荷重と地鎖余長の例¹²

ライン No.	アンカー点最大張力 (kN)	地鎖余長 (m)
ML1	7,810	3
ML2	6,973	32
ML3	7,650	8
ML4	5,785	74
ML5	5,415	90
ML6	5,275	95
ML7	2,052	268
ML8	2,932	215
ML9	4,155	153

5.4.2 疲労強度の検討

1) 解析条件および荷重ケース

解析条件および荷重ケースを設定する。設定例を以下に示す。

【解析条件および荷重ケースの設定例】

- ・使用モデル：連成解析モデル（浮体：剛体モデル、係留：動的応答）
- ・波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布
- ・風条件：最大スラスト風速 $V_{hub}=12.8\text{m/s}$ （全ケース一律の風速、波と同一方向と仮定）
- ・流速：50年最大流速 1.04m/s （全ケース一律の流速、波と同一方向と仮定）
- ・解析時間：600s/1 ケース

2) 検討方法

検討方法を以下に示す。

- ①各荷重ケースに対して連成解析により時刻歴解析を行い、係留チェーン張力振幅 ΔT を算出
- ②レインフロー法により各ケースの張力振幅の発生回数をカウント
- ③チェーンの応力振幅 $\Delta\sigma_j$ は、NK ガイドライン⁴の腐食摩耗量の最大値 0.4mm/年 (8mm/20年) を考慮した Net 径 $d=124\text{mm}$ から算出（全ケースに適用）

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta T}{(2\pi d^2/4)} \quad \text{式 5.4-2}$$

ここで、

- $\Delta\sigma$: チェーンの応力振幅
- ΔT : 係留チェーン張力振幅
- d : Net 径 (mm)

- ④累積疲労被害度を DNVGL-OS-E301³⁹の S-N 線図（図 5.4-6）を用い、マイナー則に基づき算出

$$D = \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i \quad \text{式 5.4-3}$$

$$d_i = \sum_{j=1}^p d_{i,j} \quad \left[d_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{N_{c,j}} = \frac{n_{i,j}}{a_D \cdot (\Delta\sigma_j)^{-m}} \right] \quad \text{式 5.4-4}$$

ここで、

- D : 累積疲労被害度
- N_i : 海象ケース i の 20 年間の発生回数
- d_i : 海象ケース i による疲労被害度
- $d_{i,j}$: 海象ケース i における j 番目の応力振幅ブロックによる疲労被害度
- $n_{i,j}$: 海象ケース i における j 番目の応力振幅ブロック $\Delta\sigma_j$ の発生回数

- $N_{C,j}$: 応力振幅 $\Delta\sigma_j$ により疲労破壊に至るまでの応力振幅 $\Delta\sigma_j$ の発生回数
- a_D : 6.0×10^{10} (スタッドレスチェーンの場合)
- m : 3.0 (スタッドレスチェーンの場合)

NK ガイドライン⁴に従い安全率3を考慮； $3 \times D$ の値が1を超えないことを確認する。

⑤疲労強度の判定

安全率3を考慮し、疲労に対する安全性を評価する。($3 \times D$ の値が1を超えないことを確認する。)

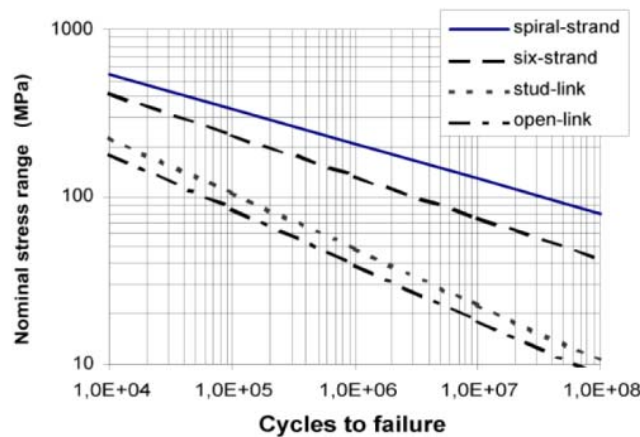


図 5.4-6 S-N 曲線 (DNV-GL OS E301)³⁹

3) 解析結果

係留ラインの累積疲労被害度および疲労寿命算定結果の例を図 5.4-7 および表 5.4-15 に示す。疲労寿命が20年以上となることを確認する。

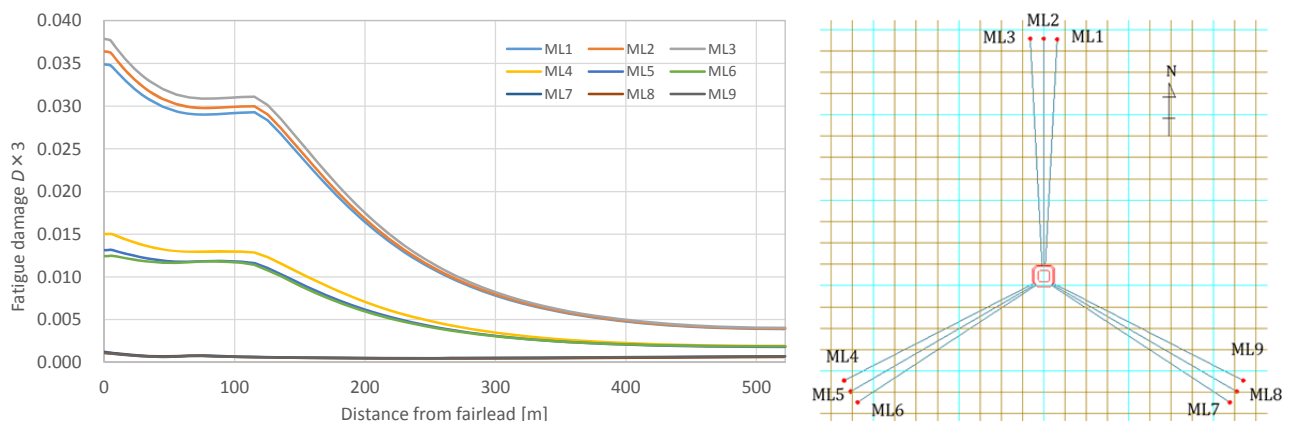


図 5.4-7 各ラインの疲労被害度 $D \times 3$ の例¹²

表 5.4-15 累積疲労被害度および疲労寿命の算定結果の例¹²

	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
累積疲労被害度 3×D(≦1)	0.0349	0.0364	0.0379	0.0150	0.0132	0.0125	0.0012	0.0011	0.0011
疲労寿命 (≧20年)	573	549	528	1,329	1,518	1,600	16,429	17,480	18,059

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命はNKガイドラインの安全率3を考慮した値

浅海域係留の場合には、極値波浪条件において大きな張力変動が生じ、それが累積疲労被害度に大きな影響を及ぼすことが考えられる。そこで、疲労被害度が大きい係留ラインについて、再現期間1年、10年、30年、50年最大波における張力振幅を算出し、極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を評価する。

DNVGL-RP-C203³⁸にワイブル分布を用いて疲労被害度を評価する手法が示されている。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.4-5}$$

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.4-6}$$

ここで、

- $Q(\Delta\sigma)$: 応力振幅 $\Delta\sigma$ の超過確率
- h : ワイブル形状パラメータ
- q : ワイブル尺度パラメータ
- $\Delta\sigma_0$: n_0 回に1回の割合で発生する最大応力振幅
- n_0 : 応力振幅 $\Delta\sigma_0$ の発生回数
- h : ワイブル形状パラメータ

式 5.4-5 を、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度および極値波浪時の最大応力振幅に当てはめ、累積疲労被害度を再検討する。具体的には、

- ・50年最大の応力振幅が50年に1回(20年間に20/50=0.4回)発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から求められた応力振幅-発生頻度曲線(図 5.3-8 の赤線)、1年、10年、30年の最大応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定

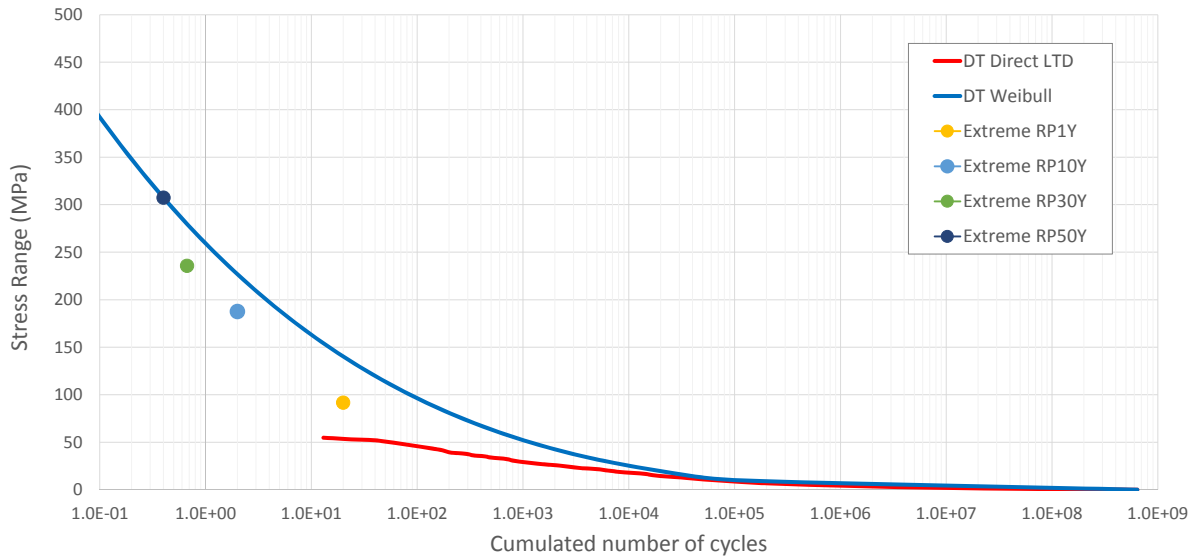


図 5.4-8 ワイブル分布によるチェーン応力振幅の発生頻度の評価の例¹²

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度および疲労寿命の例を表 5.4-16 に示す。疲労寿命が 20 年以上となることを確認する。

表 5.4-16 極値波浪条件を考慮したチェーンの疲労被害度および疲労寿命の例¹²

	応力振幅総数	50 年最大応力振幅 [M Pa]	形状パラ メータ h	累積疲労被害度 $D_r \times 3$ (≤ 1)	疲労寿命(年) (≥ 20 年)
ML1	6.297E+08	307.1	0.26	0.0708	282
ML2	6.412E+08	308.2	0.26	0.0722	277
ML3	6.399E+08	307.3	0.26	0.0715	280

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命は NK ガイドラインの安全率 3 を考慮した値