

付録1 地震・津波の浮体への影響評価法

(当付録の位置付け)

浮体式洋上風力発電施設技術基準では、過去発生した最大レベルの地震・津波を考慮し、崩壊及び漂流に至らないように求めている。

一方で、一般に浮体式構造物は、地震や津波の影響を受けにくいとされ、必ずしも検討がなされない場合が多い。(但し、TLP型については鉛直地震動に敏感であり、検討がなされる。)

そこで、当付録では、我が国における最大レベルの地震・津波に対する浮体の影響度合いを試算し、従来の知見どおり地震や津波の影響を受けにくいことを示すと共に、個別の状況に応じた検討の際の検討手法の参考にも供することを目的とした。

1. 地震の浮体への影響評価法

地震動は海底面に設置されたアンカー一点から係留索を經由して浮体に伝達され、浮体式風力発電施設に振動を与える。水平方向地震動と鉛直方向地震動について評価する必要がある。

1.1 水平地震動

水平地震動は、地盤→アンカー→係留索(チェーン)を介して浮体施設にほとんど伝達されないため、風力発電設備の各機器に対する影響は省略して良く、係留索の張力変動の観点から評価されるべきである。

評価手順を以下に述べる。なお地震波は、平成12年建設省告示第1461号第4号イに定められた解放工学的基盤における加速度応答スペクトルをもち、建設地表層地盤による増幅を適切に考慮して作成した告示波を用いれば良い。

- (1) 係留索、浮体施設、風力発電設備をバネ・質点系でモデル化する。ここで係留索は、地震波入力の間隔に対して適切な質点間隔とする。
- (2) 告示波の加速度を数値積分して速度と変位を求めて入力とし、係留索の最大係留張力を計算する。
- (3) 最大係留張力で最小破断荷重(MBL)を割って安全率を求める。

1.2 鉛直地震動

鉛直地震動は、地盤→アンカー(シンカー)→係留索(チェーン)を介して浮体施設に伝達される。

鉛直地震動は、次の観点から評価されるべきである。

- (1) 浮体施設への影響
 - (2) シンカーへの影響
- (1)の観点では、トート係留方式やTLP係留方式などの緊張型係留方式の場合、鉛直地震

動が浮体構造に伝達されて支配荷重になる場合があり、水平地震動と同様にバネ・質点系でモデル化して適切に評価する必要がある。一方、カテナリー係留方式などの緩係留では、鉛直地震動の影響は省略できる。

(2)の観点では、地震時においてシンカーの滑動が生じないかを確認する必要がある。シンカーは、鉛直下向きの自重 W 、浮力 B が作用した状態で加速度 α の鉛直地震動を受けた場合、上向きに慣性力としての付加質量力を受け、さらに運用時の係留力を水平方向に受ける。この状態での滑動に関する次の照査式を満足すれば、滑動はしない。

$$\mu\{W - B - \alpha_v(1 + C_a) \times W\} > S_f \times F_o \quad (1)$$

ここで、 B 、 W 、 μ 、 C_a 、 S_f 、 F_o 、 α_v はそれぞれ、浮力、気中重量、摩擦係数、付加質量係数、安全率、シンカー点での張力、鉛直加速度である。

【例】水平地震動の評価

①モデル

二次元の鉛直面内の運動を考え、係留索を $3N$ 質点、浮体を 1 質点、風車を 1 質点とした $3N+2$ 質点系で系全体をモデル化した。アンカーと質点 1 及び各質点間は、係留力特性を模擬した定数を有するばねで連結した。海底との摩擦力は、水中重量に摩擦係数を掛けたものであり、静止摩擦係数も動摩擦係数も等しく、動摩擦力の方向は海底との相対速度の反対方向と仮定した。呼径 56mm の 3 種スタッド付きチェーン (Grade3) 3 本で係留され、表 1 のような諸元を持つ浮体式洋上風力発電施設を例に採り、海底地盤面 (アンカー) に水平地震動の変位と速度を入力し、係留索、浮体施設、風力発電設備の応答を求めた。

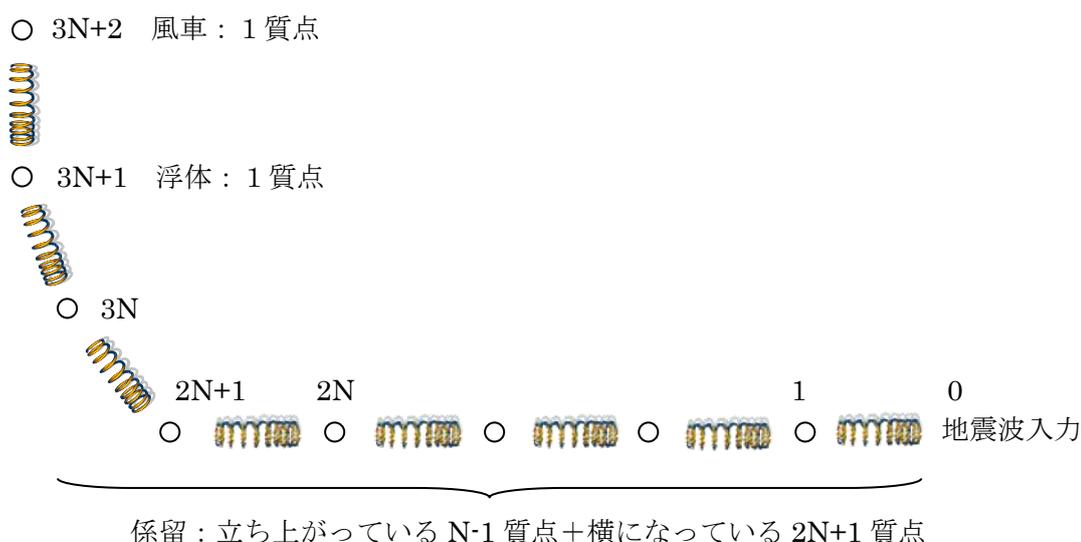


図 1 モデル図

表 1 諸元

項目	値
フェアリーダーから海底までの鉛直距離 [m]	91.5
係留索全体的水中重量 [tf]	76.8
浮体施設の質量 [t]	372
風力発電設備の質量 [t]	27.6
係留索長さ [m]	425
構造減衰率 [%]	1

②計算結果

浮体が係留された状態での水平面内の固有周期は 1 分程度と長く、地震の主要動の周期から大きくはずれている。

図 2 に、過去における代表的な観測地震波 Tohoku の最大速度振幅を 0.5m/s に基準化して作成した、極めて稀に発生する地震動を入力し、N=50 とした場合の、摩擦係数影響を示す。摩擦係数が 1.0 の場合には、横になっている係留索は滑らずに地震動と一緒に振動しているが、摩擦係数が 0 の場合には滑って地震動よりも大きな振幅で振動している事が判る。また、この例では摩擦係数が 1.0 の場合と 0.5 の場合の結果に大きな差は無い。

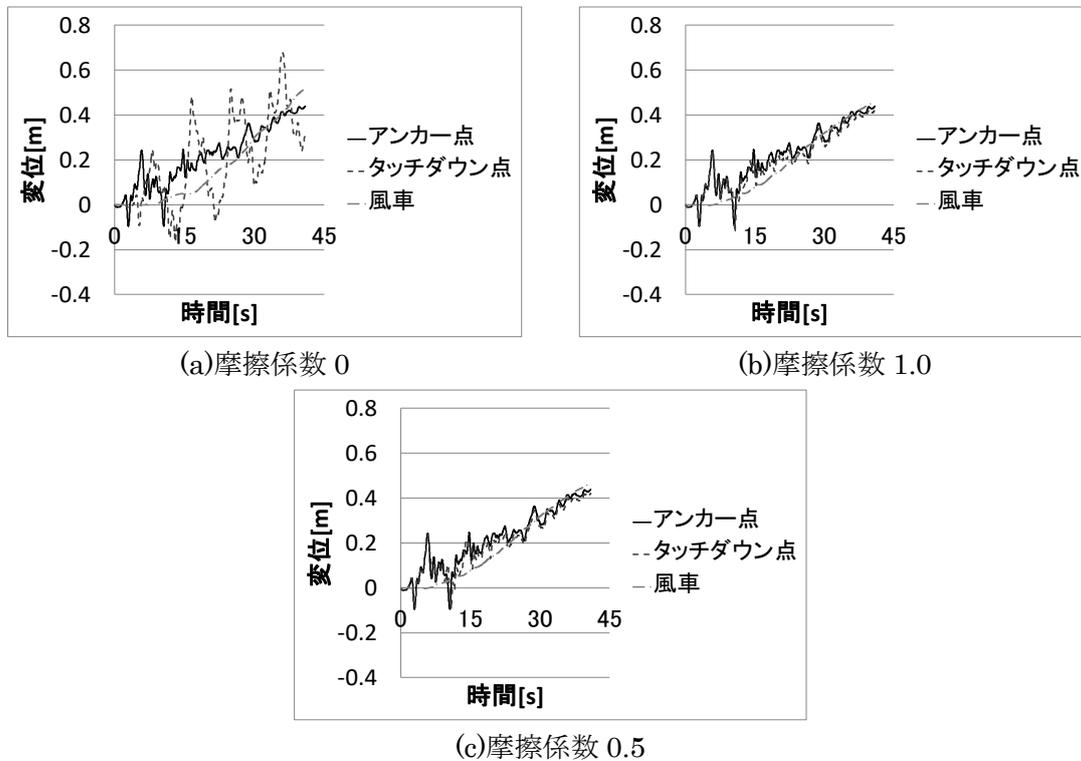


図 2 海底摩擦影響 (Tohoku、N=50)

図3は、摩擦係数が0.5の場合に、4種類の過去における代表的な観測地震波 El Centro、Hachinohe、Taft、Tohoku の最大速度振幅を 0.5m/s に基準化して作成した、極めて稀に発生する地震動を入力とした場合の最大変動張力に対する係留分割数の影響を調べたものである。最大変動張力は係留分割数が 150(N=50)以上(質点間隔 2.83m 以下)ではほぼ一定となる。なお、観測地震波の加速度の時間間隔は 0.02 秒であった。

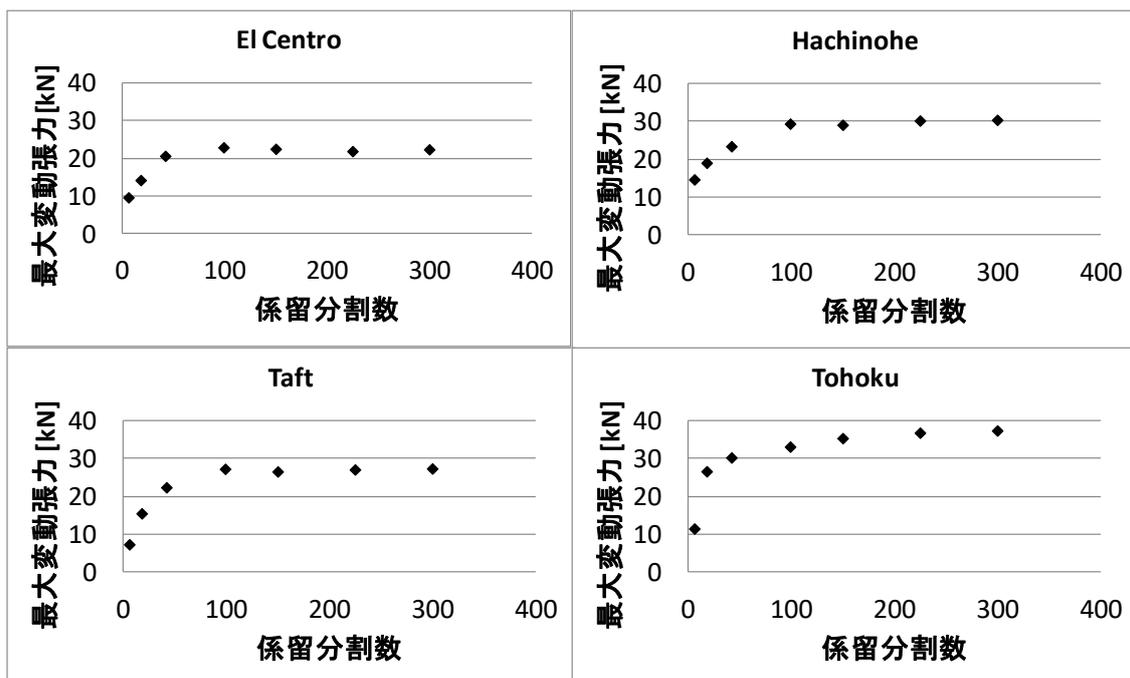


図3 係留モデル質点数影響 (摩擦係数 0.5)

図4は、N=50、摩擦係数0.5の場合の、極めて稀に発生する地震動 El Centro、Hachinohe、Taft、Tohoku に対する変動張力の時間履歴である。

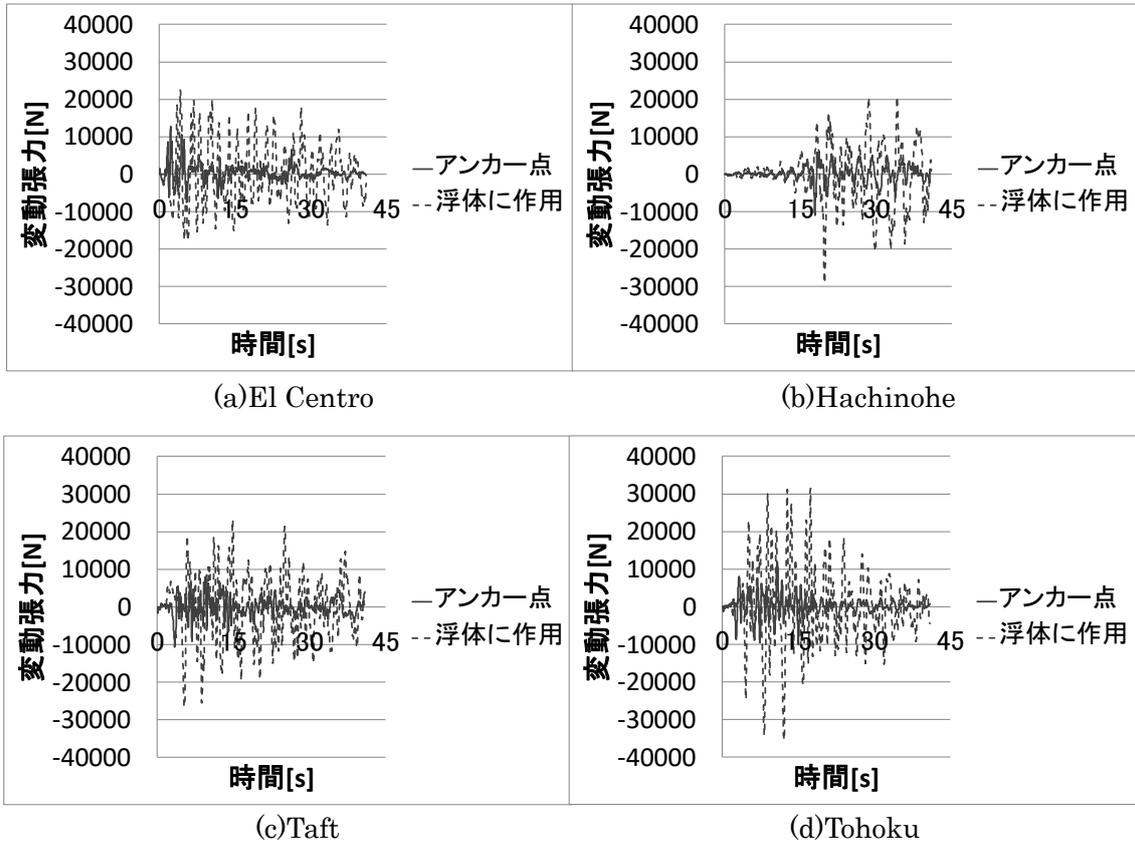


図4 変動張力 (N=50、摩擦係数 0.5)

図5は、N=50、摩擦係数 0.5 の場合の、極めて稀に発生する地震動 Tohoku に対する、加速度、速度、変位、変動張力の各時間履歴である。風力発電設備の加速度は入力加速度に比べて極めて小さい。

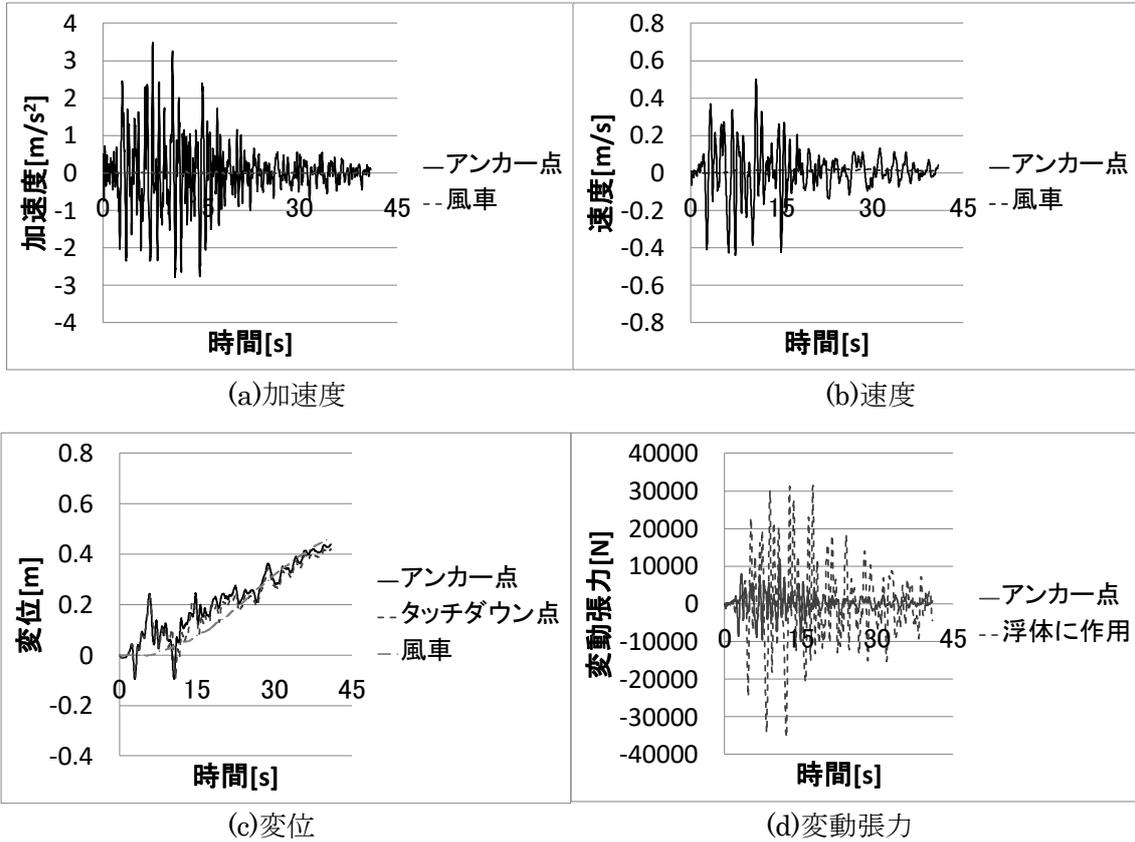


図5 Tohoku (N=50、摩擦係数 0.5)

図6に、Tohokuの最大速度振幅に対する最大変動張力の変化を示す。海底摩擦の影響で運動方程式が非線形なため、最大速度振幅を0.5m/sにして作成した極めて稀に発生する地震動の場合の最大変動張力が35.4kNなのに対し、最大速度振幅を10倍の5.0m/sにした場合の最大変動張力は約6倍の215kNにしかない。

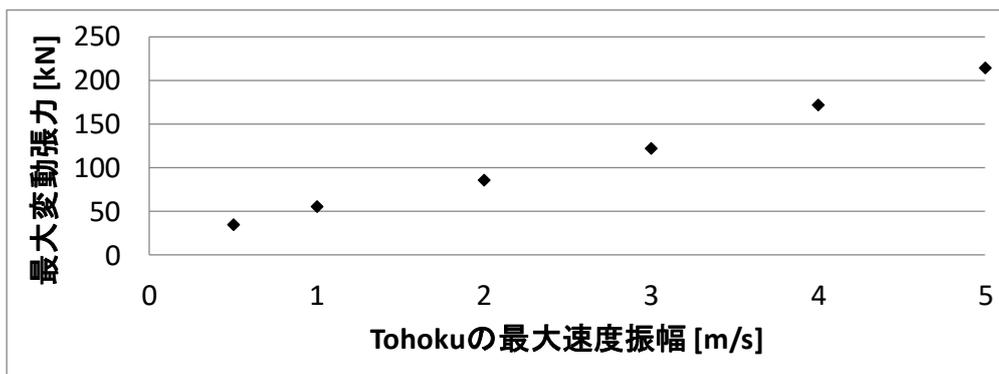


図6 Tohokuの最大速度振幅に対する最大変動張力 (N=50、摩擦係数0.5)

③まとめ

風力発電設備の加速度は入力加速度に比べて極めて小さく、本計算で、風力発電設備の各機器に対する地震動の影響は軽微である事が確認された。

係留分割数を150以上にすると、最大変動張力はほぼ一定となり、その大きさは極めて稀に発生する地震動Tohokuで約40kNである。今、静止状態での水平方向の張力が113kNであり、係留上端での張力が275kNであるので、最大変動張力を足しても暴風時の最大張力である440kNに満たない。

また、例え最大速度振幅が10倍の超巨大地震が発生したとしても、最大変動張力は215kNであり、最大張力(約490kN)に対して呼径56mmの3種スタッド付きチェーン(Grade3)の最小破断荷重(MBL)2430kNの安全率は4より大きい。

2. 津波の浮体への影響評価法

震源域の海底に生じた海底地盤上下変動により、津波波源域の水面が変化すると、周辺水面との圧力差を生じ、津波となって伝搬していく。水深が十分深い海域に設置された浮体式洋上風力発電施設では津波による上下方向の変位と流速の増加を評価する必要がある。

津波による上下方向の変位と流速の増加は非線形長波理論に基づく結果を用いることを基本とするが、設置海域の水深、海底勾配、津波高などの条件によっては線形長波理論に基づく結果を用いることが出来る。

浮体施設の係留設計の際には津波による長周期動揺が励起されないよう配慮する必要がある。なお、日本沿岸を震源とする地震等によって生じる津波（近地津波）の周期は5分～数十分程度²⁻¹⁾、²⁻²⁾であり、遠方を震源とする地震等によって生じる津波（遠地津波）の周期は数時間～20数時間程度²⁻³⁾である。

2. 1 最大クラスの津波の設定

設置海域周辺地域毎に最大クラスの津波を設定する必要がある。過去に発生した津波の実績津波高及びシミュレーションにより想定した津波高、発生が想定される津波の津波高などから津波高が最も大きい津波を設定する。設定までの手順を図7に示す。その際、中央防災会議や地震調査研究推進本部等の公的な機関におけるシミュレーション結果（表2）が公表されているものについては、当該結果も参考とする。

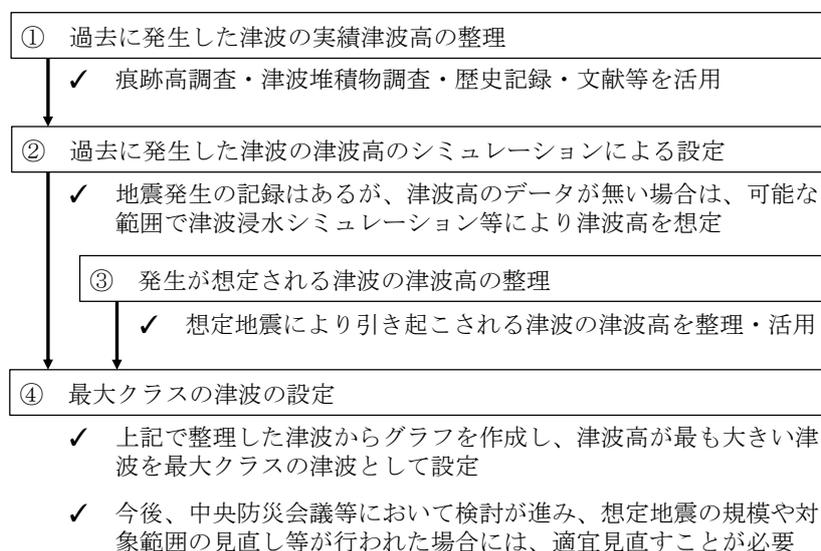


図7 最大クラスの津波の設定²⁻⁴⁾

表2 津波評価に資する調査資料

出典		入手先	
中央防災会議	東南海、南海地震等に関する 専門調査会（第16回）	資料2 東南海、南海地震に関する報告(案)図表集	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou2zuhyou.pdf
		資料3 東南海、南海地震の強震動と津波の高さ(案)	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou3zuhyou_1.pdf
			http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou3zuhyou_2.pdf
			http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou3zuhyou_3.pdf
			http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/siryou3zuhyou_4.pdf
		津波の計算手法	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/sankousiryou2_6.pdf
		インバージョンによる津波波源域の計算手法	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/sankousiryou2_7.pdf
	時間差をもって地震が発生した場合の津波の検討	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/sankousiryou2_9.pdf	
	東北地方太平洋沖地震を教訓 とした地震・津波対策に関する 専門調査会	今後の津波防災対策の基本的考え方について(中間とり まとめ)(平成23年6月26日公表)	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/tyuukan.pdf
	防災対策推進検討会議 「南海トラフ巨大地震対策検討 ワーキンググループ」	南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_nankaitrough/1/4.pdf
	防災対策推進検討会議 南海トラフの巨大地震モデル検 討会	津波断層モデル編 —津波断層モデルと津波高・浸水域 等について	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report01.pdf
		津波断層モデル編 津波断層モデルと津波高・浸水域等 について_津波計算結果_(津波高等)_破壊伝播図	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report02.pdf
		津波断層モデル編 津波断層モデルと津波高・浸水域等 について_津波計算結果_(津波高等)	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report07.pdf

	津波断層モデル編（別添資料）—地形メッシュデータの作成方法について	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report03.pdf
	津波断層モデル編（参考資料）南海トラフにおける発生頻度の高い津波の基本的な考え方	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/pdf/20120829_2nd_report04.pdf
「東海地震に関する専門調査会」	取りまとめ資料(図表編) 平成13年12月11日	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/11/siryou2-2.pdf
東南海、南海地震等に関する専門調査会	東南海、南海地震の津波波高の検討	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/10/siryou1.pdf
	図表集(津波計算関連資料)	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/7/siryou2-2.pdf
日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(第10回)	強震動及び津波高さの推計について(図表集)	http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/10/index.html
日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会	千島海溝および日本海溝で発生した各地震の震度と津波の高さ(参考資料2)	http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/houkoku/sankou2.pdf
東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(第2回会合)	日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会における対象地震の考え方	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/2/3-1.pdf
東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(第1回)	気象庁資料「東北地方太平洋沖地震の概要」	http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/1/2.pdf
地震調査研究推進本部事務局	全国地震動予測地図 別冊2(震源断層を特定した地震動予測地図) 海溝型地震・日本海東縁部の地震	http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/b2_kaiko_nihon-kaikou.pdf

気象庁	東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報改善に向けた勉強会	http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami_keihou_kaizen/index.html
	津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する検討会	
	津波予測技術に関する勉強会	http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/workshop/index.html#kentokai_betsu

2. 2 津波の理論方程式

津波は長波の理論方程式で記述することができる。長波理論を記述するパラメータとしては、波高水深比、水深波長比およびこれらを組み合わせたアーセル数がよく用いられる。波高水深比は非線形性の強さ、相対水深は鉛直方向の加速度の重要度の目安を与えるものである。これらのパラメータを用いて摂動法により各種の長波理論式が導かれる。波高水深比が非常に小さくアーセル数が $\ll 1, \sim 1$ のオーダーでは線形長波理論式(2)~(4)が適応され、波高水深比が大きくアーセル数が $\gg 1$ のオーダーでは非線形長波理論式(5)~(7)が適応される。ここで、 (x,y) は静水面に採った空間座標、 t は時間、 η は水位変動、 h は静水深、 D は全水深($D=h+\eta$)、 g は重力加速度、 (M,N) はそれぞれ (x,y) 方向の流量フラックスである。

(線形長波理論式)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

(非線形長波理論式)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{MN}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{MN}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

波高水深比が小さい波源域(震源域)から沖合までは非線形項は無視でき、線形長波理論が十分な精度を持つ。首藤²⁵⁾は近似的ではあるが、非線形長波理論の非線形項の大きさが線形項の $q\%$ となる水深の条件として、(8)式を導出している。ここで、 h_0 は境界条件を与える静水深、 A は入射津波の波高、 T は周期、 m は海底勾配である。

$$\frac{h}{h_0} = \left[\frac{6\pi A}{\sqrt{gh_0} m T} \frac{100}{q} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (8)$$

後藤ら²⁻⁶⁾は三陸沿岸を例に(8)式を用いた場合、非線形項の大きさが10%以上となる水深が40m程度であることを示している。また、深海域から水深50m位までは線形長波理論が適応できる²⁻⁷⁾との報告もある。浮体式洋上風力発電施設の設置海域は概ね水深50m以深と想定されており、設置海域によっては水位変動、津波による流速増加を評価する際には線形長波理論が適応できる。

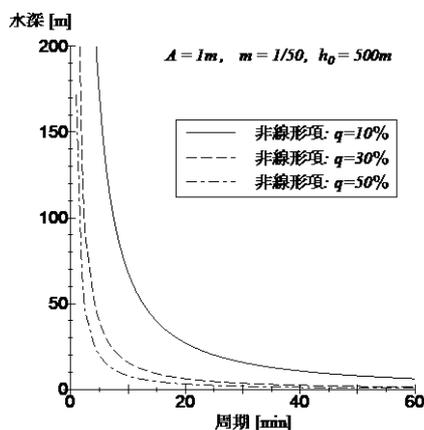


図8 非線形項の重要度 (三陸沿岸)

2. 3 津波高 (線型長波理論)

波源域 (震源域) で発生した津波は、沿岸に近づくにつれて浅水変形効果により波高が高くなる。線形長波理論の適応範囲では、グリーンの法則(9)式を用いて設置海域での津波高さを算出する。ここで、 η は津波の高さ、 h は水深を示す。なお、波源域 (震源域) での津波の初期水位は、地震の断層モデルによって計算される海底基盤の鉛直変位を海面に与える方法を用いる。津波の初期水位を与える断層モデルは、中央防災会議や地震調査研究推進本部等の公的な機関が妥当性を検証したものとして発表している断層モデルがあればこれも参考にして設定する。

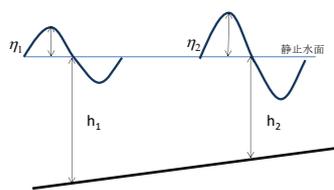


図9 グリーンの公式 概念図

$$\eta h^{\frac{1}{4}} = (\text{一定}) \quad (9)$$

2. 4 津波流速 (線型長波理論)

線型長波理論の適応範囲において、津波の水平最大流速： u は微小振幅波の基礎理論に長波近似を用いて(10)式のように求めることができる。

$$u = \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (10)$$

2. 5 津波流速、波高の推定

2. 5. 1 最大クラスの津波の設定

本検討では、過去最大クラスの津波として平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波（以下、当該地震津波）を対象とする。当該地震津波の沖合での津波波高は、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Port and HarbourS）の GPS 波浪計や気象庁、東京大学地震研究所、（独）海洋研究開発機構が設置した沖合水圧計、DART 式ブイでその一部が観測されている。表 3 に参考文献 2-2) に記載されている GPS 波浪計での観測結果を参考に示す。また、図 10 に参考文献 2-8) に紹介されている津波波形の時系列を示す。

表 3 三陸沿岸 GPS 波浪計の設置条件及び津波高²⁻²⁾

計測地点		緯度	経度	水深[m]	波高[m]
岩手県北部	久慈沖	40° 07' 00"	142° 04' 00"	125	4.02
岩手県中部	宮古沖	39° 37' 38"	142° 11' 12"	200	6.3
岩手県南部	釜石沖	39° 15' 31"	142° 05' 49"	204	6.67
宮城県北部	広田湾沖	38° 51' 28"	141° 53' 40"	160	5.68
宮城県中部	金華山沖	38° 13' 57"	141° 41' 01"	144	5.78
福島県沖	小名浜沖	36° 58' 17"	141° 11' 08"	137	2.62

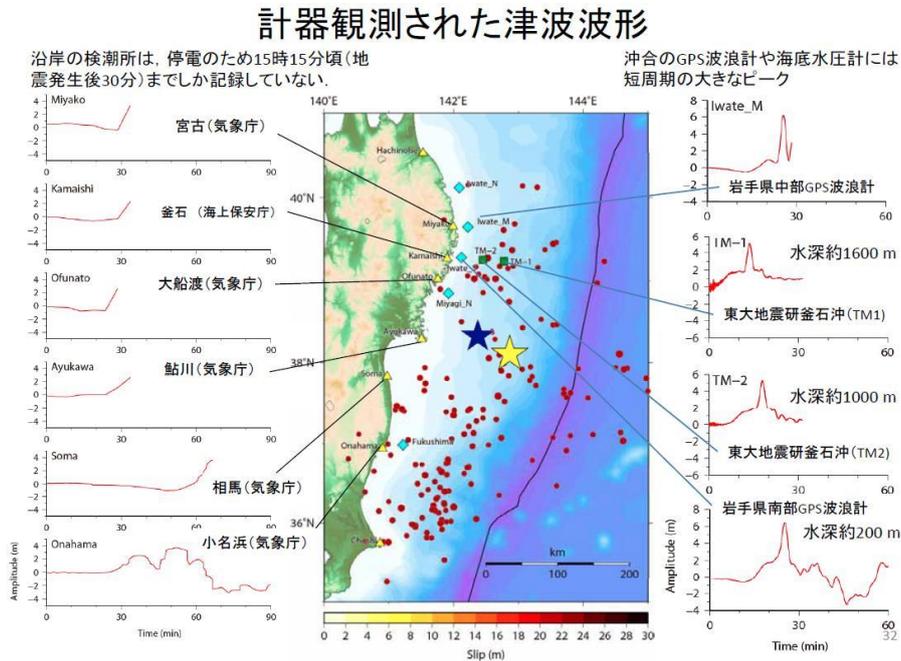


図 10 東北地方太平洋沖地震津波波形²⁻⁸⁾

2. 5. 2 津波流速、波高の試算

浮体式洋上風力発電施設の設置海域は概ね水深 50m 以深の沖合であることが想定されている。また、津波の周期は通常浮体施設の運動周期に比べて十分に長いので、津波が浮体施設に与える影響は、水平流速の増加、及び準静的な上下方向の変位と考えられる。

試算では、水深 200m 地点に波高 7.0m の津波が入射するとし、沖合での津波が線型長波理論の範疇と仮定する。津波の波高は(9)式を用いて設置水深での波高に換算し、津波の水平流速は(10)式を用いて求める。図 1 1 に横軸を水深としたときの水平流速を示す。図 1 1 には水深 200m 地点での波高を 3.5m, 2.0m とした結果も参考に示す。

表 4 に試算結果を示す。試算結果から浮体施設の設置水深が 100m としても、津波の波高は 8.3m 程度、水平流速は 1.1m/s 程度である。これらの値は、東北地方の沖合における 50 年再現の波高(有義波高:約 9m、最大波高:約 16m《片振幅:約 8m》)、潮流条件(1.0m/s)と同程度である。

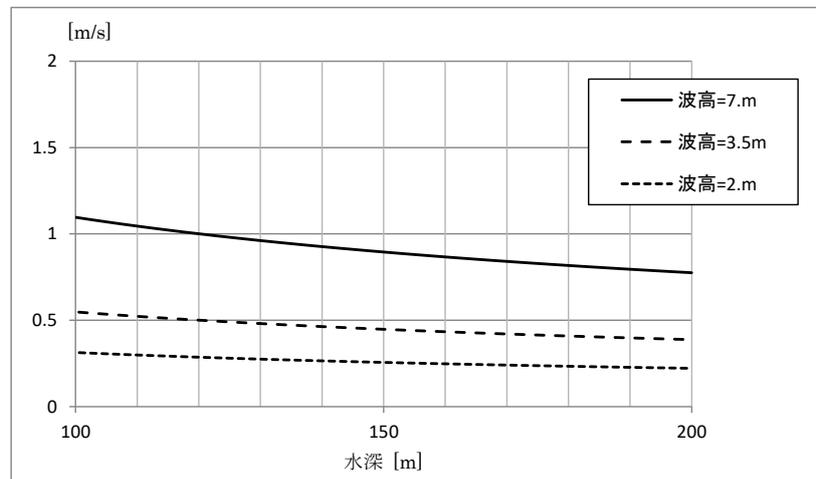


図 1 1 津波による水平流速

表 4 試算結果

	水深[m]	波高[m]	水平流速[m/s]
境界条件	200	7.0	0.78
設置海域 (水深 150m)	150	7.5	0.89
設置海域 (水深 100m)	100	8.3	1.1

参考文献

- 2-1) 首藤伸夫：津波はどこまで解明されているのか, *ながれ*, Vol.21, No.6, 2002.
- 2-2) 河合弘泰, 佐藤真, 他 2 名：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震津波の特性, *港湾空港技術研究所報告*, Vol.56, No.4, 2011.
- 2-3) 中央防災会議：津波の概要,災害時の避難に関する専門調査会, 津波防災に関するワーキンググループ, 第 1 回, 参考資料
- 2-4) 津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.00：国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室
- 2-5) 首藤伸夫：津波の計算における非線形項と分散項の重要性, *海岸工学講演会論文集*, Vol. 23, pp.432-436.
- 2-6) 後藤智明, 佐藤一央：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, *港湾空港技術研究所報告*, Vol.32, No.2, 1993.
- 2-7) 土木学会水理委員会：水理公式集[昭和 60 年版], 土木学会 (1985)
- 2-8) 佐竹健治, *港湾・空港・漁港技術講演会-東日本大震災による港湾・空港・漁港の地震・津波災害調査特別講演資料*

付録2 連成一体挙動を求める標準試験法及び計測結果例

(当付録の位置付け)

浮体式洋上風力発電施設技術基準では、荷重算定に当たって時間領域での連成解析を求めると共に、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。

そこで、当付録では、荷重算定に使用する解析手法の精度確認および荷重の算定に供される試験法につき標準的と思われる事項を整理すると共に、解析手法の精度確認にそのまま使用できるデータも提示した。

1. 概要

風車－浮体－係留の連成一体挙動を求めるための標準試験法（風洞試験および水槽試験）及び計測結果例を示す。

標準試験法の目的は、以下の2ケースを想定している。

- a) 数値シミュレーションの精度確認および計算上のパラメータ取得
(含、いわゆるプログラム・チューニング)
- b) 設計荷重等の設計用数値の取得

ここで示した計測結果例は、そのまま、数値シミュレーションの精度確認に用いることも可能である。

2. 基本的留意点

一般に、待機時を対象とする場合には、基本的には従来の海洋構造物の試験法が準用できる。発電時を対象とする場合には、従来の海洋構造物の試験法に加えて、風車について適切な模型を使用することが重要である。風車については、必要に応じて、ブレードピッチ制御についても模擬する必要がある。

フルード数、レイノルズ数などによる相似則について適切に配慮する必要がある。相似則を合わせる事が困難な場合、上記目的 a) b) に応じて、下記の配慮が必要である。

- a) 数値シミュレーションも模型スケールで行い、同じ寸法効果の下で比較を行う。
- b) 設定した模型の寸法効果が、実機に比して、設計上安全側になっていること。

構造剛性の考慮については、着目する外力の周波数 (f_{in}) と構造振動の固有周波数 (f_n) の関係で、下記を考慮する必要がある。

- i. $f_{in} \ll f_n$

構造応答は剛体を仮定したものとして差し支えない

NOTE : 波に対する浮体構造物の応答は、一般的には、この領域であるが、浮体が大型化した場合などで注意が必要である

- ii. $f_{in} \doteq f_n$

共振の可能性があるので、構造剛性を正確に扱う必要がある

iii. $f_{in} \gg f_n$

いわゆる柔構造であり、全体の構造応答挙動に対する剛性の影響が大きいので、構造剛性を正確に扱う必要がある

但し、上記 a)の目的である限りは、実機と模型の構造剛性の誤差が許容される範囲であれば、模型と同じ剛性を用いて数値シミュレーションを実行して比較することで目的を達成することができる。

3. 試験施設

3. 1 試験風洞

風車模型の基礎的な特性（発電量、回転数、スラスト等の関係等）の計測のために試験風洞を使用する。

施設の選定に当たっては、閉塞率（測定部断面において模型が占める比率）に注意が必要である。

3. 2 試験水槽

浮体式洋上風力発電施設の水槽試験では、風車を搭載した浮体模型（含、係留系）を試験水槽に設置し、外力（波・風・潮流）を作用させて、模型の挙動、タワー基部の荷重、係留索張力等を計測するため、所用の外力を発生する装置が必要である。

3. 3 送風装置

送風装置を水槽内に設置し模型に風外力を与える。送風機の水面付近の支持部材は、波を乱さないように極力波方向の幅を小さくするように工夫する。

なお、風速のばらつきは風車模型のロータ面内で±20%以下を標準とする。

4. 供試模型

4. 1 模型縮尺

水槽試験の模型縮尺は、実機と模型の間の重量分布を含む幾何学的相似性と流体力学的相似性を可能な限り再現するものとするが、想定実機の主要目と特性、試験の目的、要求精度、試験設備の制約などを考慮のうえ決定して差し支えない。

4. 2 風車模型

風車模型は、ブレードピッチ角制御機能を装備するものとするが、模型機構上の制約がある場合には 3 翼同時の制御でも差し支えない。ブレード形状は、風車のスラスト係数と周速比を出来る限り実機に合わせ、できるだけ幾何学的相似を満たすように決めることが望ましい。

4. 3 浮体模型

浮体模型は、従来の海洋構造物の波浪中試験用模型の考え方を準用して差し支えない。

5. 計測項目

標準的な計測項目を次に示す。各計測項目の記号、単位および無次元表記の例を表 1 に示す。

波・風・潮流

- ・波高および波周期：浮体模型の波上側 1 点
- ・風速：風車模型風上側 1 点（風速計は送風機に取付）
- ・流速：浮体模型の上流側 1 点

浮体・係留

- ・浮体変位：サージ，スウェイ，ヒープ，ロール，ピッチ，ヨー（6 自由度）
- ・風車タワー基部の荷重およびモーメント： F_x ， F_y ， M_x ， M_y （4 自由度）
- ・係留力：係留ライン 1 本につき 1 箇所

風車ナセル

- ・ロータ回転数
- ・スラスト
- ・加速度： Acc_x ， Acc_y
- ・ブレードピッチ角

その他

- ・ビデオ撮影：2 方向（横方向および後方上方から撮影）
- ・気温および気圧：1 日の試験開始時と終了時に計測

表 1 計測項目の記号および無次元表記例

項目	記号	単位	無次元表記例
入射波の振幅	ζ	m	
風速	V_w	m/s	
流速	V_c	m/s	
運動 (Surge)	X	m	X/ζ
運動 (Sway)	Y	m	Y/ζ
運動 (Heave)	Z	m	Z/ζ
運動 (Roll)	ϕ	deg	$\phi/k\zeta$
運動 (Pitch)	θ	deg	$\theta/k\zeta$
運動 (Yaw)	ψ	deg	$\psi/k\zeta$
タワー基部荷重 (Fx)	F_x	N	$F_x/(\zeta\rho g\nabla/L)$
タワー基部荷重 (Fy)	F_y	N	$F_y/(\zeta\rho g\nabla/L)$
タワー基部荷重 (Mx)	M_x	Nm	$M_x/(\zeta\rho g\nabla)$
タワー基部荷重 (My)	M_y	Nm	$M_y/(\zeta\rho g\nabla)$
タワー基部荷重 (Mz)	M_z	Nm	$M_z/(\zeta\rho g\nabla)$
係留索張力 (前)	T_f	N	$T_f/(\zeta\rho g\nabla/L)$
係留索張力 (右)	T_r	N	$T_r/(\zeta\rho g\nabla/L)$
係留索張力 (後)	T_a	N	$T_a/(\zeta\rho g\nabla/L)$
係留索張力 (左)	T_l	N	$T_l/(\zeta\rho g\nabla/L)$
風車 回転数	N_{rotor}	min^{-1}	
風車 ブレードピッチ角	θ_p	deg	
風車 加速度 (X)	$AccX$	m/s^2	$AccX/(\zeta g/L)$
風車 加速度 (Y)	$AccY$	m/s^2	$AccY/(\zeta g/L)$
風車 スラスト	F_{thrust}	N	
スラスト係数	C_t		$C_t = F_{thrust}/(\rho_{air}AV_w^2/2)$
(使用定数)			
波数	k		$2\pi/\lambda, \omega^2/g = k \tanh(kh)$
真水密度	ρ	kg/m^3	1000
重力加速度	g	m/s^2	9.80665
排水容積	∇	m^3	
代表長さ	L	m	
受風面積	A	m^2	2.138
ロータ直径	D_{rotor}	m	1.65

6. 外力条件（波・風・潮流）

波・風・潮流の外力条件は、対象とする浮体施設が設置されるサイトを代表する気象海象条件より設定される。

風条件

- ・風速は定常風でもよい。
- ・風に関する試験パラメータは、風向、風速、風車の向きを表すロータ角を標準とする。

波条件

- ・規則波と不規則波を実施する。
- ・規則波の波高は必要に応じて大波高も実施し波高影響を調べる。
- ・不規則波は、対象施設の設置場所の気象情報がある場合は、その情報に基づく 50 年再現と 1 年再現波を採用する。
- ・不規則波の計測時間は、実機換算で 3 時間分とする。試験設備の造波・消波能力の制約から 3 時間分を連続して造波できない場合は、分割してもよい。
- ・波に関する試験パラメータは、波向、波高・波周期を標準とする。なお、波向は、想定される波の主方向に設定することを基本とするが、必要に応じてその他の特徴的な波向についても選択する。

潮流条件

- ・使用水槽に潮流発生装置が無い場合は、潮流で生じる定常流体力を実験もしくは計算で求め、没水している部分の流れに対する投影面積の中心位置に同等の荷重をかけて模擬しても差し支えない。
- ・潮流に関する試験パラメータは、流向、流速を標準とする。

7. 試験条件

基礎特性試験

1) 自由動揺試験

- ・ 6 自由度動揺モードの固有周期と減衰係数を計測する。

2) 平水中の風荷重試験

- ・ 外力は風のみとして、風に対する応答量を求める。

3) 無風波浪中試験

- ・ 外力は波のみとして、波浪に対する応答量を求める。

設計荷重ケース（DLC）を模擬した試験

4) 発電時試験

5) パーク時（アイドルリング時）試験

6) トラブル時試験

- ・ トラブル時とは係留索の 1 本が破断した状態を指す。

実施する以上の試験について、標準試験法の試験条件の例を表2に示す。(但し、自由動揺試験は、表中では割愛している。)

表2 試験条件の一例

試験の種類	風			波		潮流	ピッチ制御	
	風速V	相対風向 θ_v	ロータ角 θ_R	波向 θ_w	波高H、波周期T			
風のみ	V	0度	0度	0度	波無し	—	—	
波のみ	風無し	—	0度	0度	規則波	—	—	
					不規則波(1年再現)			
発電時	V	0度	0度 (風に正対)	0度 (● 0度 ▲ 0度、30度、60度 ■ 0度、45度 ■ 0度、45度、90度)	規則波	—	無/有	
					不規則波(1年再現)			
		30度	30度 (風に正対)		0度			規則波
					0度			不規則波(1年再現)
パーク時	V_{50}	0度	0度 (風に正対)	0度	規則波	—	—	
			0度 (風に対して90度横向き)	0度	規則波	—	—	
		90度	0度 (風に正対)	0度	規則波	—	—	
				0度	不規則波(50年再現)	無/有	—	
			90度 (風に対して90度横向き)	0度	規則波	—	—	
				0度	不規則波(50年再現)	無/有	—	
トラブル時	V_{50} V_1	0度	0度	0度	不規則波 (50年再現、1年再現)	有	—	

8. 解析方法

- 自由動揺試験では、自由動揺の時系列より固有周期および減衰を求める。
- 規則波中試験では、フーリエ解析より平均値と一次振幅を求め、一次振幅の周波数応答関数(RAO)を求める。
- 不規則波中の実験では、統計解析及びスペクトラム解析を行い、代表的な統計量(有義値(振幅、周期)、標準偏差等)を求める。

9. 試験結果の例（風洞試験）

風車の基礎特性を把握する風洞試験の例を以下に示す。

9. 1 風車模型

実機としてアップウィンド型 5MW 機を想定し縮尺 1/75 とした風車模型の要目例を表 3 に、概観例を図 1、風洞設置状況の例を図 2、ブレード模型概観例を図 3 に示す。

表 3 風車模型要目の例

		想定実機 (5MW)	模型 (計測値) (縮尺 1/75)
ロータ径	m	123.75	1.650
ブレード長	m	60	0.800
ハブ高さ (タワー基部より)	m	75	1.000
ナセル質量	kg	240,000	1.100
タワー質量 (ブレード質量)	kg	347,500	0.900 0.095 (1 枚)

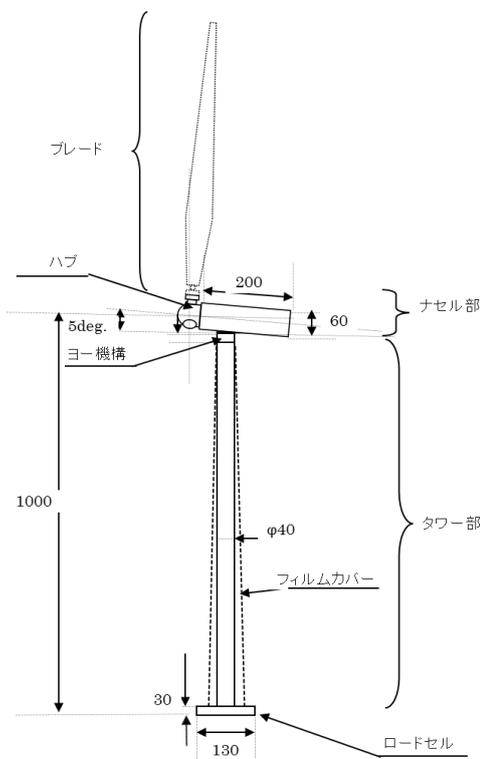


図 1 風車模型概観の例



図 2 風洞設置状況の例

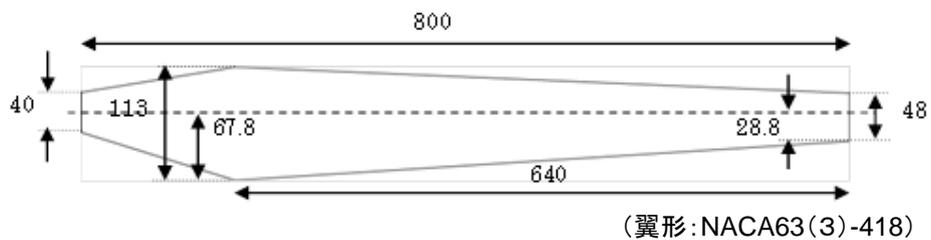


図3 ブレード模型概観の例

9. 2 試験結果

試験結果の例として、定格風速付近における風車特性の例を図4に示す。

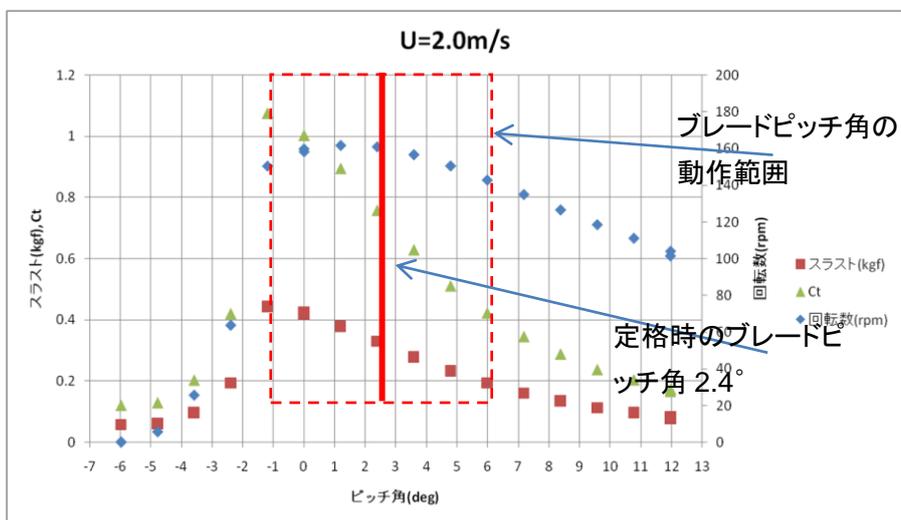


図4 定格風速付近における風車特性の例

10. 試験結果の例（水槽試験）

10.1 座標系、各種定義

浮体模型の座標系の例を図5に、風車タワー基部の外力およびモーメントの座標系の定義の例を図6に示す。また、風向、波向の定義の例を図7に示す。この例では浮体の座標系は、原点を模型重心にとる浮体固定座標系として、波向 θ_w は浮体に対して正対してくる方向を正面向い波（0度）としている。相対風向 θ_v は波向きに対してどれだけ偏角しているかを表し、波と同一方向の場合は相対風向を0度としている。

ロータ角 θ_R の定義の例を図8に示す。ロータ角 θ_R は浮体固定座標系で浮体に対する風車の向きを表し、浮体正面を向いている場合を0度としている。

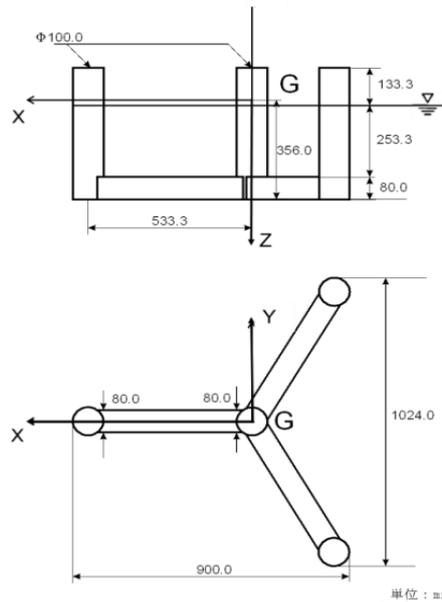


図5 模型の座標系の定義の例（TLPの例）

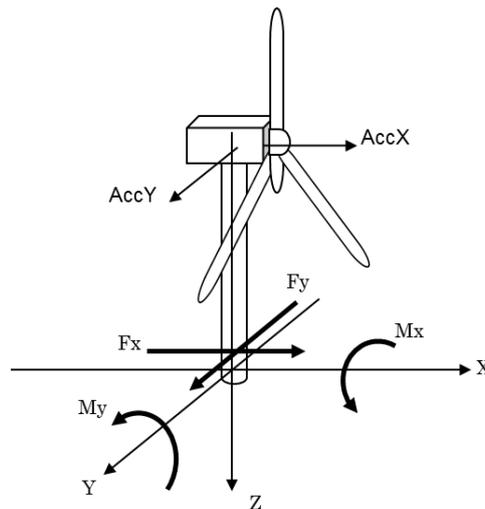


図6 風車タワー基部の荷重・モーメント座標系の定義の例

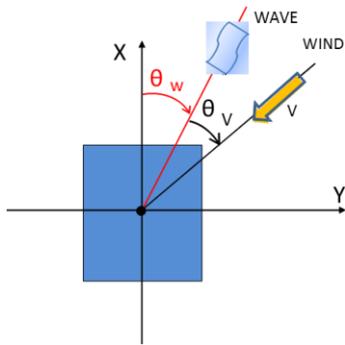


図 7 波向 θ_w 、風向 θ_v の定義の例

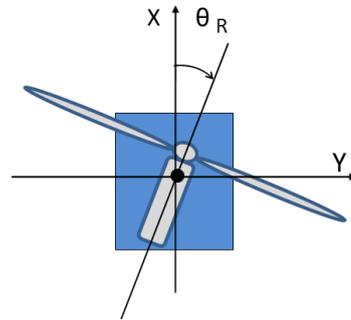


図 8 風車の向きを表すロータ角 θ_R の定義の例

減衰は、フルードの表現による減減係数で表している。

フルードの表現による減減係数 a 、 b は次のように定義される。

$$\Delta \phi = a \phi_m + b \phi_m^2$$

ここで、 $\Delta \phi = \phi_n - \phi_{n+1}$ (減衰曲線の相隣る 2 つの振幅 ϕ_n 、 ϕ_{n+1} の差)

$\phi_m = (\phi_n + \phi_{n+1})/2$ (減衰曲線の相隣る 2 つの振幅 ϕ_n 、 ϕ_{n+1} の平均)

応答関数の位相は、入射波に対して遅れを正としている。定義を次式に示す。

入射波 : $\zeta = \zeta a \cdot \sin(\omega t)$

応答 : $\xi = \xi a \cdot \sin(\omega t - \varepsilon)$

ここで、 ζa : 波振幅、 ξa : 応答振幅、 ω : 円周波数、 ε : 位相、

10.2 外力条件（波・風・潮流）

以下に試験結果を例示する水槽試験の外力条件を表4～表7に示す。

表4 風速の条件

	実機 m/s	模型 m/s
発電時 V	15.0	1.8
50年再現 V_{50}	50.0	5.8
1年再現 V_1	35.0	4.0

表5 規則波の条件

波周期（模型） s	実機		模型	
	小波高 m	大波高 m	小波高 cm	大波高 cm
0.60	3.0		4.0	
0.80	3.0		4.0	
1.00	3.0	12.0	4.0	16.0
1.20	3.0	12.0	4.0	16.0
1.40	3.0	12.0	4.0	16.0
1.60	3.0	12.0	4.0	16.0
1.80	3.0	12.0	4.0	16.0
2.00	3.0	12.0	4.0	16.0

表6 不規則波の条件

JONSWAP スペクトル $\gamma = 2.5$

		実機	模型
1年再現	有義波高	6.0 m	8.0 cm
	有義波周期	13.0 s	1.5 s
50年再現	有義波高	9.0 m	12.0 cm
	有義波周期	16.0 s	1.85 s

表7 潮流の条件

	実機	模型
流速	1.0 m/s	0.12 m/s

10.3 セミサブ型

10.3.1 浮体模型、係留模型

セミサブ型模型の概観例を図9に、要目例を表8に示す。

ここに示すセミサブ型の係留模型は、カタナリーチェーン方式スプレッド係留（索数：6本）された実機を想定して、比較的緩い係留特性を線形ばねでモデル化している。

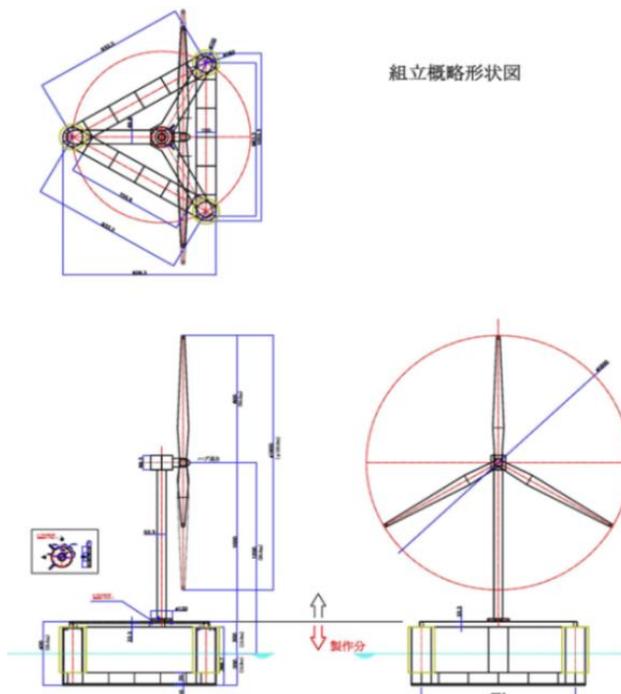


図9 セミサブ型模型概観の例

表8 セミサブ型模型要目例

		想定実機	模型
		5MW-SS70	縮率 1/75
<セミサブ浮体>			
全長	m	72.62	0.968
全幅	m	82.00	1.093
コラム間	m	70.00	0.933
型深さ	m	30.00	0.400
喫水	m	15.00	0.200
コラム幅	m	12.00	0.160
ローハル幅	m	12.00	0.160
ローハル高	m	6.00	0.080
排水量（真水）	Kg	15,582,000	36.934
全体重心(キール高)	m	15.15	0.202
<係留装置>			
索径	mm	100.0	1.33
索長	m	600.0	8.00
単位質量	kg/m	190.4	0.0338

10.3.2 試験結果（セミサブ型）

(1) 自由動揺試験

セミサブ型の自由動揺試験結果の一例を表9に示す。

表9 自由動揺試験結果の一例（セミサブ型）

	固有周期 [s]		減減係数 a	b [※]
	実機	模型		
Surge	94.8	10.95	0.249	0.039
Sway				
Heave	21.4	2.467	0.012	0.232
Roll	25.1	2.9	0.179	0.030
Pitch	25.1	2.9	0.120	0.047
Yaw				

※[1/m] : Surge,Sway,Heave の場合の次元

※[1/deg] : Roll,Pitch,Yaw の場合の次元

(2) 規則波中試験

セミサブ型の規則波中試験結果の例として、運動の周波数応答関数の一例を図10に示す。正面向波中での6自由度運動についてブレードピッチ角制御有り無しの比較をしている。

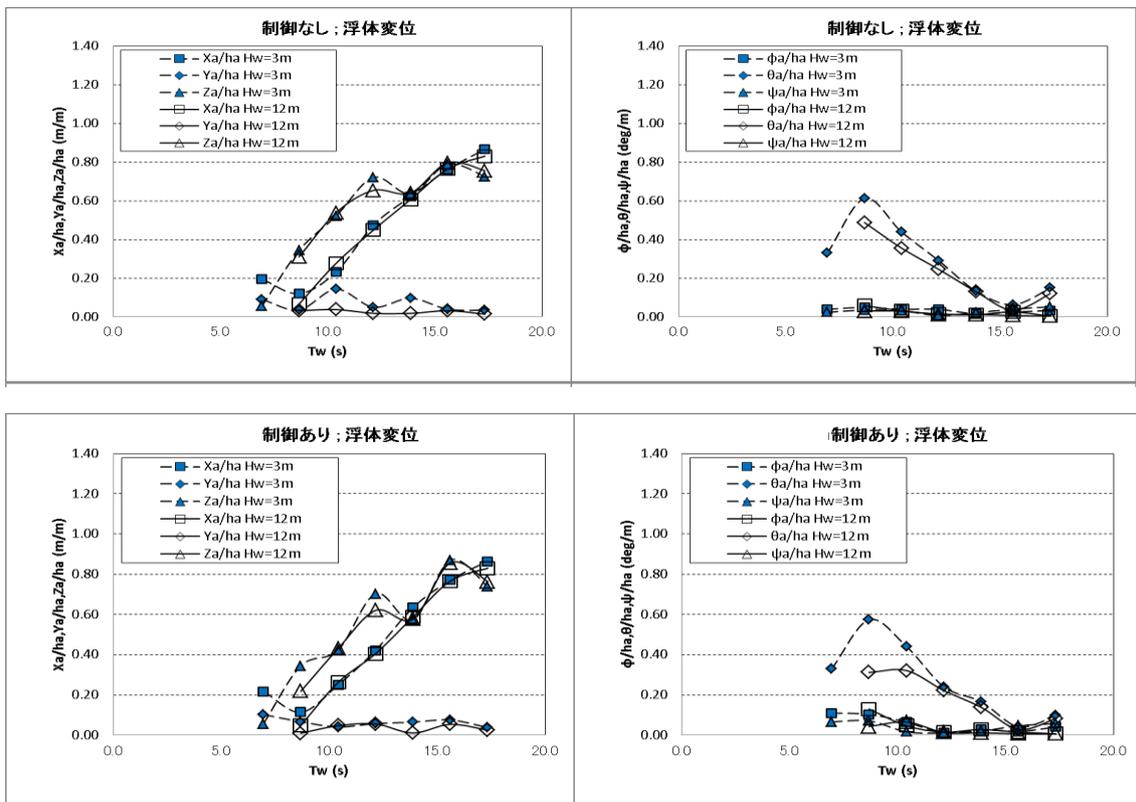


図10 規則波中試験結果の一例（セミサブ型）

(3) 不規則波中試験

セミサブ型の不規則波中試験結果の例として、運動の統計解析結果（有義値、平均値、最小値、最大値）の一例を表 10 に示す。

表 10 不規則波中試験の統計解析結果（運動）の一例（セミサブ型）

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Surge				Sway				Heave			
							有義値	平均値	最小値	最大値	有義値	平均値	最小値	最大値	有義値	平均値	最小値	最大値
							(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
発電時	V	0	0	0	無し	無し	2.16	-10.85	-20.29	-6.41	0.53	0.01	-1.96	2.02	2.08	0.16	-4.34	3.77
発電時	V	0	0	0	有り	無し	1.95	-10.88	-20.14	-6.90	0.47	0.01	-1.33	1.72	2.01	0.06	-4.34	4.12
発電時	V	0	0	30	無し	無し	1.74	-8.58	-17.09	-4.13	1.14	-5.62	-10.31	3.20	2.01	0.17	-4.18	4.24
発電時	V	0	0	30	有り	無し	1.91	-9.10	-19.64	-4.93	1.06	-4.31	-9.27	2.52	2.05	0.25	-4.55	4.79
発電時	V	0	0	60	無し	無し	1.08	-5.22	-9.73	-2.97	1.79	-9.38	-17.35	-5.95	2.06	-0.01	-5.31	4.42
発電時	V	0	0	60	有り	無し	1.02	-4.92	-8.62	-2.53	1.78	-9.11	-15.86	-5.31	2.00	0.19	-4.30	4.17
発電時	V	30	0	0	無し	無し	2.02	-10.95	-21.71	-5.55	0.59	-5.92	-7.78	-3.79	1.85	2.01	-2.24	7.24
発電時	V	30	0	0	有り	無し	2.04	-10.77	-21.94	-5.37	0.58	-5.83	-7.50	-3.89	1.87	1.91	-2.36	7.05
バーク時	V50	0	0	0	-	無し	3.70	-11.91	-19.85	-5.91	0.99	-3.41	-5.64	-1.13	3.58	-0.08	-6.64	5.74
バーク時	V50	0	0	0	-	有り	3.57	-13.56	-21.76	-8.50	1.09	-3.51	-6.13	-1.12	3.55	0.02	-6.12	5.90
バーク時	V50	0	90	0	-	無し	3.05	-21.23	-28.45	-16.33	0.64	0.29	-1.00	1.69	3.67	-1.05	-7.80	11.78
バーク時	V50	0	90	0	-	有り	3.04	-21.04	-27.56	-16.11	0.69	0.14	-1.37	1.58	3.75	-4.34	-11.02	9.34
バーク時	V50	90	90	0	-	無し	3.63	-1.90	-11.27	2.88	1.14	-21.24	-24.07	-19.20	2.84	1.54	-3.21	6.60
バーク時	V50	90	90	0	-	有り	3.42	-1.56	-10.53	3.31	1.05	-21.09	-23.85	-19.21	3.11	1.88	-3.66	7.18
バーク時	V50	90	0	0	-	無し	3.26	-1.33	-9.92	3.55	0.76	-10.22	-11.97	-8.72	2.06	0.03	-3.87	3.65
バーク時	V50	90	0	0	-	有り	3.26	-1.15	-9.75	3.83	0.79	-10.27	-12.14	-8.78	2.06	0.04	-3.72	3.69
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	4.92	-30.14	-39.24	-20.98	2.13	-19.13	-23.72	-13.83	3.27	5.96	0.31	11.92
トラブル時	V	0	0	0	-	有り	1.65	-2.58	-8.29	1.51	0.71	-0.87	-3.45	11.57	1.88	-0.02	-3.55	4.39

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Roll				Pitch				Yaw			
							有義値	平均値	最小値	最大値	有義値	平均値	最小値	最大値	有義値	平均値	最小値	最大値
							(deg)											
発電時	V	0	0	0	無し	無し	0.50	0.05	-1.21	1.28	1.23	2.66	-1.42	4.73	0.89	-1.28	-4.67	1.37
発電時	V	0	0	0	有り	無し	0.44	0.05	-1.00	1.08	1.16	2.65	-1.65	4.46	0.64	0.43	-2.71	2.67
発電時	V	0	0	30	無し	無し	0.91	-1.30	-3.30	0.41	0.90	2.22	-0.49	3.89	1.53	1.77	-2.42	5.44
発電時	V	0	0	30	有り	無し	0.96	-1.33	-3.80	0.58	0.93	2.20	-0.36	4.02	2.03	3.26	-2.82	10.31
発電時	V	0	0	60	無し	無し	1.25	-2.24	-5.29	0.04	0.66	1.32	-0.22	2.79	0.68	1.00	-1.00	3.37
発電時	V	0	0	60	有り	無し	1.19	-2.21	-5.14	-0.17	0.63	1.31	-0.20	2.74	0.60	0.84	-1.03	3.86
発電時	V	30	0	0	無し	無し	0.52	-1.70	-2.82	-0.46	1.31	2.71	-0.98	4.90	0.63	1.01	0.00	3.14
発電時	V	30	0	0	有り	無し	0.53	-1.69	-3.06	-0.56	1.28	2.66	-0.99	4.86	1.29	2.06	-0.01	5.09
バーク時	V50	0	0	0	-	無し	0.79	-0.46	-2.08	1.26	1.19	1.44	-1.57	3.32	2.16	3.25	-0.49	7.31
バーク時	V50	0	0	0	-	有り	0.87	-0.48	-2.14	1.11	1.17	1.24	-1.87	3.44	2.33	4.06	-0.13	8.64
バーク時	V50	0	90	0	-	無し	0.47	0.07	-0.91	1.08	1.07	4.53	2.00	6.43	0.55	-0.87	-1.76	0.00
バーク時	V50	0	90	0	-	有り	0.49	0.07	-0.99	1.12	1.07	4.49	1.92	6.36	0.10	-0.17	-0.33	0.00
バーク時	V50	90	90	0	-	無し	0.71	-5.22	-6.60	-3.78	1.41	-0.05	-3.45	2.39	0.15	0.22	-0.02	0.45
バーク時	V50	90	90	0	-	有り	0.72	-5.15	-6.70	-3.80	1.40	0.01	-3.60	2.71	0.53	0.81	0.01	1.72
バーク時	V50	90	0	0	-	無し	0.53	-1.78	-2.98	-0.72	1.43	0.68	-3.16	3.36	0.19	0.26	-0.01	0.59
バーク時	V50	90	0	0	-	有り	0.54	-1.68	-2.87	-0.42	1.41	0.72	-2.92	3.24	0.14	0.19	-0.01	0.39
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	1.11	-3.15	-5.55	-0.82	1.18	0.43	-2.07	2.84	0.08	0.08	-0.05	0.23
トラブル時	V	0	0	0	-	有り	0.50	-0.07	-1.23	1.00	0.99	0.13	-2.61	1.99	2.07	2.95	-0.53	12.72

10.4 スパー型

10.4.1 浮体模型、係留模型

スパー型模型の概観例を図 11 に、要目例を表 11 に示す。

ここに示すスパー型の係留模型は、4 点カタナリー係留として、設置角は $\theta=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ としている。係留索は水中張力計を介して浮体に取り付け、係留支持台下のプーリーを介し上部に引き上げ、バネ、支持台上のワイヤー巻取り機の順に取り付けている。また、潮流力は流速 1.0m/s (実機換算) に相当する模擬ウェイトを浮体の水中横投影面積の中心位置にプーリーを介してかけることにより水平力を与えている。

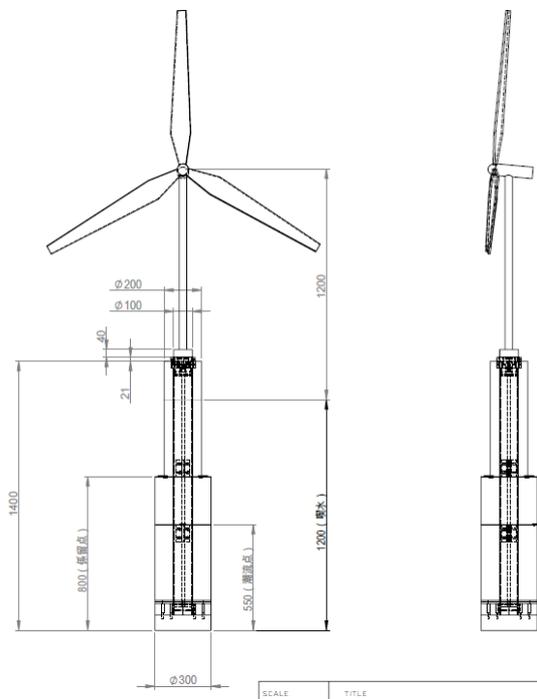


表 11 スパー型模型要目例

	実機	模型
スケール比	1	75
全高 (m)(底からナセルまで)	180.00	2.400
喫水 (m)	90.00	1.200
喫水上 (m)	90.00	1.200
主幹直径 1 (m)	22.50	0.300
主幹直径 2 (m)	15.00	0.200
主幹高さ 1(m)	60.00	0.800
主幹高さ 2(m)	45.00	0.600
総質量 (ton, kg)	30186.0	69.80
KG (m) 下端から	24.70	0.330
GM (m)	13.60	0.181
空中 Kxx (m)	38.10	0.507
空中 Kyy (m)	38.10	0.507
空中 Kzz (m)	7.70	0.102
係留点高さ (m) (下端から)	60.00	0.800
係留初期張力 (kN, kgf)	2069	0.5
係留バネ定数 (kN/m, kgf/m)	11.1	1.5
潮流力 (ton,kgf)	65.8	0.156
潮流力作用点高さ (m)	41.3	0.550

図 11 スパー型模型概観の例

10.4.2 試験結果

(1) 自由動揺試験

スパー型の自由動揺試験結果の一例を表 12 に示す。

表 12 自由動揺試験結果の一例（スパー型）

	固有周期 [s]		減減係数 a	b [※]
	実機	模型		実機
Surge	130.3	15.04	0.356	2.18
Sway	130.7	15.09	0.402	2.27
Heave	27.5	3.18	0.110	0.72
Roll	23.4	2.70	0.125	0.029
Pitch	22.9	2.65	0.125	0.019
Yaw	27.7	3.20	0.035	0.023

※[1/m] : Surge,Sway,Heave の場合の次元

※[1/deg] : Roll,Pitch,Yaw の場合の次元

(2) 規則波中試験

スパー型の規則波中試験結果の例として、運動の周波数応答関数の一例を図 12 に示す。正面向波中でのサージ、ヒープ、ピッチ運動についてブレードピッチ角制御有り無しの比較をしている。

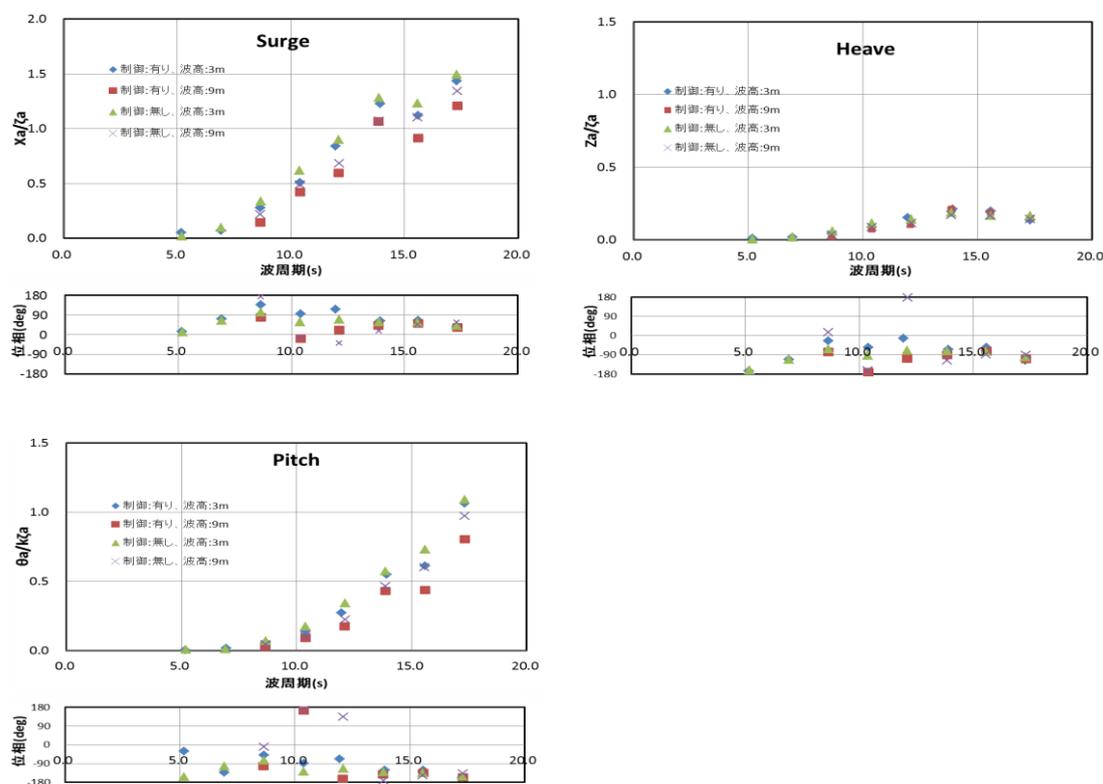


図 12 規則波中試験結果の一例（スパー型）

(3) 不規則波中試験

スパー型の不規則波中試験結果の例として、運動の統計解析結果（有義値、平均値、最小値、最大値）の一例を表 13 に示す。

表 13 不規則波中試験の解析結果の一例（スパー型）

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Surge				Sway				Heave			
							有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)	有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)	有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)
発電時	V	0	0	0	無し	無し	39.42	-55.55	-127.25	13.65	13.19	24.09	0.79	53.09	7.08	4.67	-12.13	19.47
発電時	V	0	0	0	有り	無し	35.91	-55.77	-119.87	14.53	13.44	20.79	-9.01	49.69	7.14	4.68	-8.82	19.18
発電時	V	30	0	0	無し	無し	38.61	-43.43	-117.33	28.07	16.18	-10.47	-42.37	29.23	6.88	5.58	-6.22	18.98
発電時	V	30	0	0	有り	無し	36.21	-57.21	-128.21	3.09	15.18	-27.11	-61.21	10.30	6.36	3.08	-8.12	14.38
パーク時	V50	0	0	0	-	無し	74.07	-35.12	-156.62	109.68	30.78	21.09	-40.21	83.89	16.56	-2.63	-31.33	24.67
パーク時	V50	0	0	0	-	有り	74.04	-28.13	-151.13	114.07	46.37	27.11	-54.29	115.51	19.90	-1.77	-35.17	32.53
パーク時	V50	0	90	0	-	無し	67.32	-116.19	-239.59	12.01	29.38	40.78	-16.02	97.68	14.86	6.84	-20.36	39.54
パーク時	V50	0	90	0	-	有り	64.55	-127.41	-245.41	-1.41	30.37	35.93	-21.37	89.73	14.33	6.82	-20.48	31.72
パーク時	V50	90	90	0	-	無し	77.70	28.85	-193.75	232.25	29.11	25.02	-32.08	73.92	15.08	-3.40	-33.20	27.10
パーク時	V50	90	90	0	-	有り	129.90	42.44	-296.96	250.24	60.37	8.54	-125.46	108.54	23.43	-0.69	-41.59	62.61
パーク時	V50	90	0	0	-	無し	88.26	48.30	-175.60	274.40	30.31	91.87	33.17	144.77	14.75	3.55	-31.15	32.05
パーク時	V50	90	0	0	-	有り	83.73	45.12	-209.08	254.02	83.73	45.12	-209.08	254.02	15.12	1.32	-29.98	29.02
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	78.74	-119.08	-258.08	51.12	52.16	186.17	81.07	293.17	15.43	5.68	-26.02	41.68
トラブル時	V1	0	0	0	-	有り	42.64	-74.56	-168.26	5.54	26.79	100.22	40.82	169.12	9.23	3.19	-17.21	24.39

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Roll				Pitch				Yaw			
							有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)	有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)	有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)
発電時	V	0	0	0	無し	無し	1.18	0.61	-1.55	2.46	1.79	1.25	-1.59	4.29	1.49	-0.57	-3.39	2.01
発電時	V	0	0	0	有り	無し	1.17	0.18	-1.96	2.30	1.54	1.28	-1.57	3.94	1.48	-0.27	-2.65	2.19
発電時	V	30	0	0	無し	無し	1.22	-0.46	-2.87	1.66	1.84	1.03	-1.84	4.35	1.69	-0.37	-3.95	2.43
発電時	V	30	0	0	有り	無し	1.31	-0.16	-2.35	2.13	1.66	1.04	-1.37	4.12	1.74	-0.92	-4.30	2.20
パーク時	V50	0	0	0	-	無し	2.12	0.09	-3.56	3.62	3.59	0.59	-5.99	6.47	3.67	-0.63	-7.43	5.51
パーク時	V50	0	0	0	-	有り	3.59	0.65	-4.67	6.14	3.69	0.75	-5.51	7.21	8.04	-0.52	-15.10	13.40
パーク時	V50	0	90	0	-	無し	1.93	-0.11	-3.72	2.60	3.28	2.28	-3.21	9.42	3.02	1.09	-4.37	6.05
パーク時	V50	0	90	0	-	有り	1.81	0.59	-2.12	3.86	3.27	2.11	-3.51	8.26	3.64	0.61	-6.29	7.25
パーク時	V50	90	90	0	-	無し	2.14	0.66	-3.45	4.95	4.63	-0.84	-9.73	9.57	4.82	-0.35	-9.29	9.23
パーク時	V50	90	90	0	-	有り	2.66	0.38	-7.52	4.29	7.58	-0.84	-12.00	14.01	21.91	0.78	-29.08	31.88
パーク時	V50	90	0	0	-	無し	1.85	2.22	-1.63	4.98	4.89	-0.56	-10.69	10.94	5.16	1.44	-7.90	11.40
パーク時	V50	90	0	0	-	有り	2.08	1.35	-2.45	4.41	4.57	0.03	-10.65	12.18	6.79	1.62	-9.98	13.72
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	3.21	1.15	-4.78	6.43	3.47	0.35	-5.37	7.49	11.43	-1.02	-31.10	24.86
トラブル時	V1	0	0	0	-	有り	1.47	0.31	-2.32	2.72	1.83	0.29	-2.79	3.87	6.33	-0.61	-17.53	18.41

10.4 TLP型

10.4.1 浮体模型、係留模型

TLP型模型の概観例を図13に、要目例を表14に示す。

ここに示すTLP型の係留模型は、浮体のサイドカラムの底面から出たワイヤーを水槽底に設置されたアンカーと垂直に接続する緊張係留とし、実機では各サイドカラム2本ずつの係留索を用いるが、模型では簡略化のため1本で代表している。そのため、係留索が1本破断した場合のトラブル時試験を行う際は、伸び剛性が小さいワイヤーに交換し、係留索破断状態を模擬している。

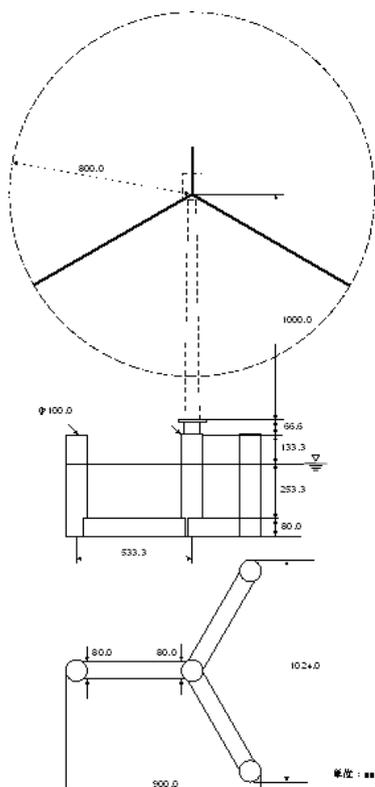


図13 TLP型模型概観の例

表14 TLP型模型要目の例

項目		実機	模型 1/75
センターカラム	直径	7.5 m	100.0 mm
	高さ	35 m	466.7 mm
サイドカラム	直径	7.5 m	100.0 mm
	高さ	35 m	466.7 mm
ポンツーン	幅	6 m	80.0 mm
	厚さ	6 m	80.0 mm
	長さ	32.5 m	433.3 mm
浮体高さ		35 m	466.7 mm
浮体外径		87.5 m	1166.7 mm
浮体質量		610 t	1.4 kg
排水容積		808 m ³	0.0019 m ³
余剰浮力		198 kN	0.463 N
喫水		25 m	333.3 mm
水深		187.5 m	2.5 m
KG		26.7 m	356 mm
Kyy		43.7 m	582 mm
Kxx		44.5 m	594 mm

10.4.2 試験結果

(1) 自由動揺試験

TLP型の自由動揺試験結果の一例を表15に示す。

TLP型浮体は緊張係留のため、Heave、Roll、Pitchについては動揺させることができないため、打振を行い、係留索張力の振幅から固有周期を求めている。

表15 自由動揺試験結果の一例 (TLP型)

	固有周期 [s]		減減係数 a	b [※]
	実機	模型		実機
Surge	60.6	7.00	0.085	0.095
Sway	64.1	7.40	0.020	0.117
Heave	1.10	0.12	—	—
Roll	1.99	0.23	—	—
Pitch	1.99	0.23	—	—
Yaw	50.3	5.80	0.092	0.039

←打振

←打振

←打振

※[1/m] : Surge,Sway,Heave の場合の次元

※[1/deg] : Roll,Pitch,Yaw の場合の次元

(2) 規則波中試験

TLP型の規則波中試験結果の例として、運動の周波数応答関数の一例を図14に示す。

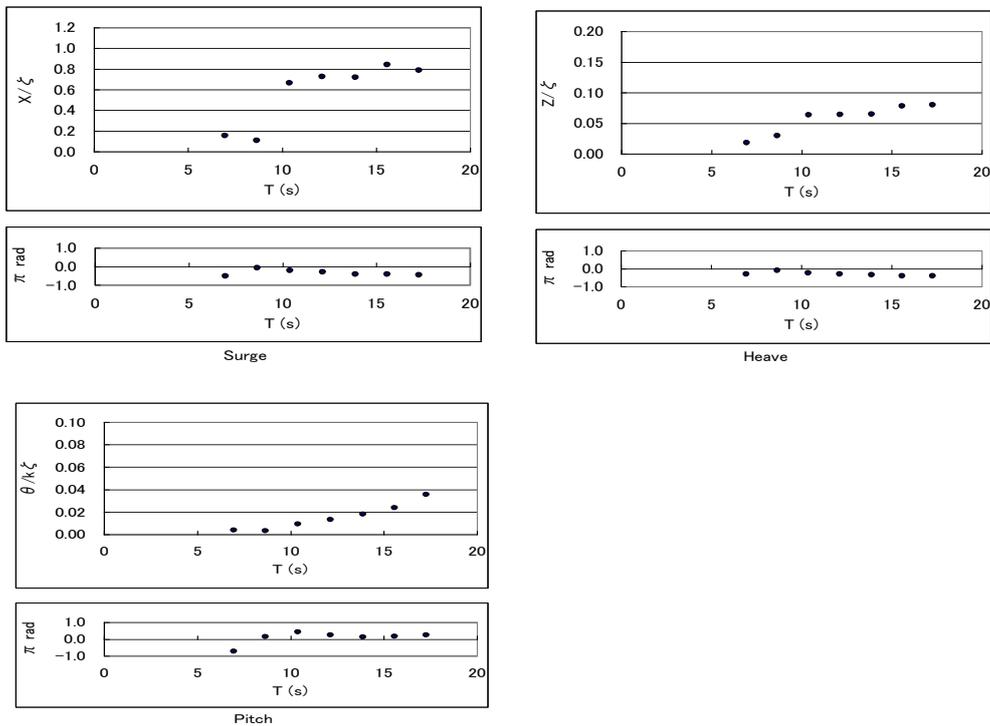


図14 規則波中試験結果の一例 (TLP型)

(3) 不規則波中試験

TLP 型の不規則波中試験結果の例として、運動の統計解析結果（有義値、平均値、最小値、最大値）の一例を表 16 に示す。

表 16 不規則波中試験の解析結果の一例 (TLP 型)

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Surge				Sway				Heave			
							有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)	有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)	有義値 (m)	平均値 (m)	最小値 (m)	最大値 (m)
発電時	V	0	0	0	無し	無し	2.01	-15.64	-18.04	-12.76	0.41	-1.39	-2.01	-0.83	-	-1.32	-1.62	-0.93
発電時	V	0	0	0	有り	無し	1.93	-8.31	-11.85	-5.50	0.25	-0.66	-1.08	-0.19	-	-0.55	-0.91	-0.30
発電時	V	0	0	30	無し	無し	1.78	-10.77	-13.05	-7.94	1.10	5.21	3.47	6.89	-	-1.02	-1.35	-0.67
発電時	V	0	0	30	有り	無し	1.63	-7.47	-9.90	-5.57	1.06	3.70	2.53	5.42	-	-0.62	-0.95	-0.43
発電時	V	0	0	60	無し	無し	1.07	-7.53	-8.95	-5.53	1.78	12.23	9.22	14.79	-	-1.37	-1.86	-0.89
発電時	V	0	0	60	有り	無し	1.03	-4.53	-6.06	-3.32	1.76	7.83	5.88	10.62	-	-0.71	-1.09	-0.50
発電時	V	30	30	0	無し	無し	1.91	-14.21	-17.03	-11.20	0.56	7.49	6.59	8.38	-	-1.31	-1.76	-0.98
発電時	V	30	30	0	有り	無し	2.14	-7.69	-10.60	-5.29	0.38	4.34	3.75	4.87	-	-0.51	-0.81	-0.32
パーク時	V50	0	0	0	-	無し	3.54	-7.78	-14.26	-2.59	1.84	5.56	3.01	8.07	-	-0.60	-1.20	-0.13
パーク時	V50	0	0	0	-	有り	3.46	-13.21	-18.66	-7.78	1.71	4.86	2.54	7.27	-	-1.17	-1.97	-0.61
パーク時	V50	0	90	0	-	無し	3.41	-18.32	-24.05	-13.25	0.55	-0.62	-1.52	0.12	-	-1.74	-2.74	-1.03
パーク時	V50	0	90	0	-	有り	3.34	-22.76	-27.86	-17.42	0.47	-0.37	-1.14	0.30	-	-2.57	-3.61	-1.62
パーク時	V50	90	90	0	-	無し	4.19	4.92	-2.40	10.47	1.05	8.37	7.00	9.93	-	-0.25	-0.49	-0.12
パーク時	V50	90	90	0	-	有り	3.94	-1.13	-8.11	5.02	1.11	8.58	6.97	10.12	-	-0.38	-0.86	-0.15
パーク時	V50	90	0	0	-	無し	3.87	-0.21	-7.56	4.77	0.97	18.73	17.30	20.22	-	-1.25	-1.70	-1.04
パーク時	V50	90	0	0	-	有り	3.32	-7.50	-14.19	-1.79	0.74	17.85	16.68	19.33	-	-1.64	-2.34	-1.15
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	3.38	-14.47	-20.15	-9.02	1.60	6.38	4.11	8.49	-	-1.42	-2.28	-0.74
トラブル時	V1	0	0	0	-	有り	1.94	-10.18	-13.58	-7.49	0.91	1.83	0.55	3.21	-	-0.81	-1.20	-0.55

試験種類	風速	相対風向 (deg)	ロータ角 (deg)	波向 (deg)	翼ピッチ制御	潮流	Roll				Pitch				Yaw			
							有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)	有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)	有義値 (deg)	平均値 (deg)	最小値 (deg)	最大値 (deg)
発電時	V	0	0	0	無し	無し	-	-0.15	-0.31	0.01	-	-0.09	-0.22	0.03	0.63	0.57	-0.29	1.51
発電時	V	0	0	0	有り	無し	-	-0.09	-0.27	0.09	-	-0.10	-0.25	0.08	0.47	0.36	-0.33	1.21
発電時	V	0	0	30	無し	無し	-	-0.10	-0.28	0.07	-	-0.10	-0.23	0.05	0.82	0.94	-0.45	2.60
発電時	V	0	0	30	有り	無し	-	-0.05	-0.18	0.07	-	-0.11	-0.22	0.04	0.75	0.62	-0.46	1.78
発電時	V	0	0	60	無し	無し	-	-0.23	-0.41	-0.08	-	-0.01	-0.10	0.14	0.56	1.09	0.34	2.00
発電時	V	0	0	60	有り	無し	-	-0.18	-0.32	-0.07	-	0.03	-0.06	0.12	0.59	0.80	-0.09	1.66
発電時	V	30	30	0	無し	無し	-	-0.07	-0.28	0.11	-	0.00	-0.13	0.12	0.67	0.87	-0.19	1.96
発電時	V	30	30	0	有り	無し	-	0.00	-0.12	0.15	-	0.00	-0.07	0.08	0.69	0.44	-0.54	1.38
パーク時	V50	0	0	0	-	無し	-	-0.16	-0.39	0.10	-	0.00	-0.19	0.23	0.89	1.24	-0.14	2.73
パーク時	V50	0	0	0	-	有り	-	-0.15	-0.45	0.09	-	0.00	-0.15	0.17	0.94	2.22	0.86	3.73
パーク時	V50	0	90	0	-	無し	-	-0.36	-0.54	-0.17	-	-0.13	-0.26	-0.02	0.54	2.13	1.22	2.94
パーク時	V50	0	90	0	-	有り	-	-0.37	-0.54	-0.20	-	-0.15	-0.25	-0.04	0.48	1.92	1.12	2.67
パーク時	V50	90	90	0	-	無し	-	-0.10	-0.25	0.01	-	0.02	-0.11	0.17	0.86	1.59	0.31	2.88
パーク時	V50	90	90	0	-	有り	-	-0.14	-0.41	0.10	-	0.05	-0.13	0.22	0.91	2.67	1.37	4.03
パーク時	V50	90	0	0	-	無し	-	-0.17	-0.37	-0.08	-	0.34	0.13	0.57	0.87	2.79	1.33	4.20
パーク時	V50	90	0	0	-	有り	-	-0.58	-0.87	-0.14	-	0.74	0.47	1.01	0.87	6.08	4.64	7.82
トラブル時	V50	0	0	0	-	有り	-	-0.43	-0.67	-0.10	-	0.08	-0.08	0.27	0.98	2.83	1.33	4.21
トラブル時	V1	0	0	0	-	有り	-	0.06	-0.20	0.29	-	-0.08	-0.24	0.09	0.48	1.08	0.11	1.84

以上

付録3 損傷時復原性要件検証のための水槽試験

(当付録の位置付け)

浮体式洋上風力発電施設は、発電時においてはローターで生じる推力が傾斜モーメントを発生させる主たる要因となる。一方、待機時においては既往の海洋構造物と同様に浮体施設や風力発電設備に働く風荷重により傾斜モーメントが生じる。風力発電設備の運転状態により傾斜モーメントが発生する機構が異なるため、浮体施設の復原性評価を行う場合は、発電時、待機時の両方を検討することが推奨される。

本付録ではセミサブ型^(注)の浮体施設を対象に実施した水槽試験の結果をもとに、損傷時においては発電時、及び待機時の両状態について、浸水中間段階、浸水後の浮体施設の運動の計測結果から運動振幅が増幅されるような過渡応答は見られないことが確認されたことを示し、浮体式洋上風力発電施設技術基準に基づく設計の評価への参考に資することを目的とする。

(注) ここでは安全側の検討をする意図から、損傷時復原性要件に対応した設計での区画浸水時の浮体の傾斜角が一般的に大きい浮体形式の代表として、セミサブ型を選択した。スーパー型やバージ型等についても、ここでの現象は定性的には同じと考えられる。

1 概要

セミサブ型浮体施設を対象に波・風の複合環境外力下における浮体施設の運動計測を行った。試験は、風力発電設備が発電時、待機時の2条件、合計4状態について実施している。浸水中、浸水後の運動計測を実施し、運動振幅が増幅されるような過渡応答は見られないことを確認した。

2 試験施設および供試模型

2-1 試験施設

試験は海上技術安全研究所にある海洋構造物試験水槽にて実施した。

2-2 供試模型

水槽試験では、セミサブ型浮体施設の1/50模型を用いた。浮体施設に搭載する風力発電設備は、ダウンウィンド方式の風車模型を用いている。浮体施設模型の概略形状を図1に示す。この模型は3つのコラムの内1つを浸水状態にすることが出来る。浸水状態はコラム内部に設けた浸水区画模型を浸水させることで再現した。なお、浸水区画模型はコラム内部を上下昇降可能とし、外部より注排水を行う機構を有している。浸水区画模型の概略図を図2に示す。

模型の係留系は、各コラムに1本の係留ラインとし、復原性に与える影響をできるだけ小さくする為、設定重心高さでの水平方向係留とした。

実験状況を図3に示す。

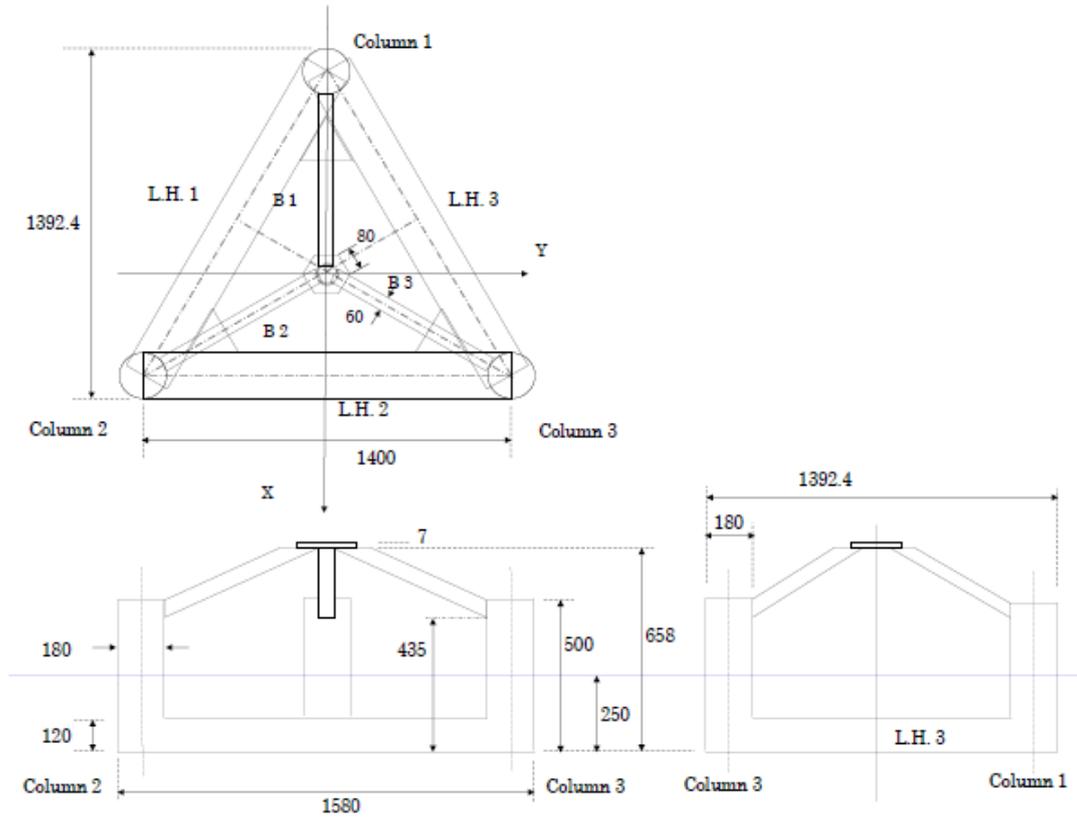


图 1 模型概略形状

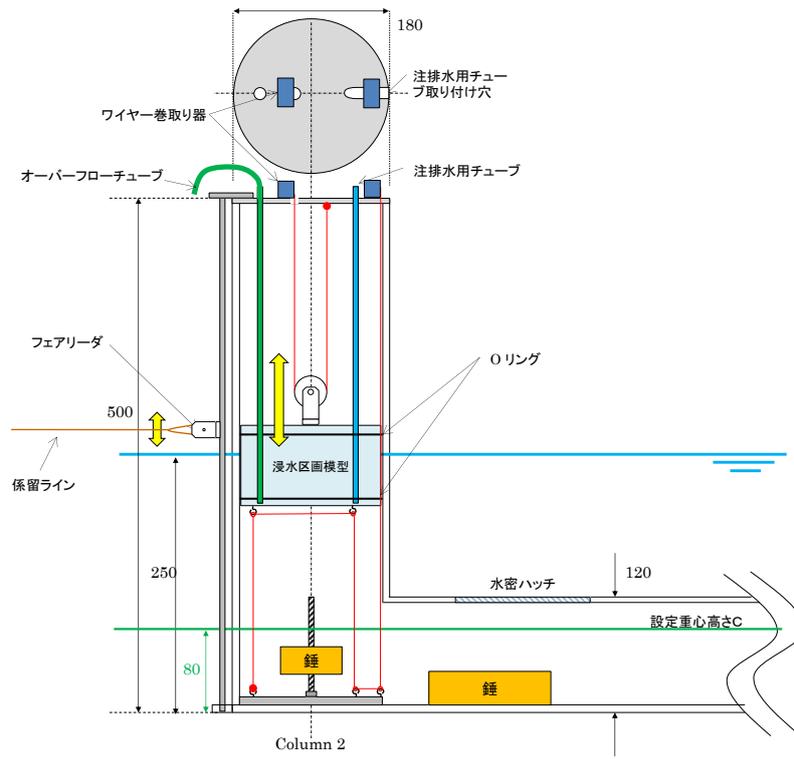


図2 浸水区画模型概略形状

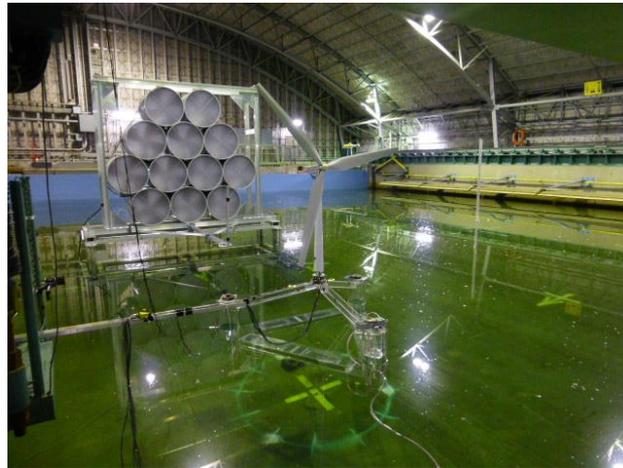


図3 浮体施設模型及び風車模型（発電時）

3 試験内容

3-1 概要

試験では、浮体施設の重心高さを変化させ、安全率 1.3 となる状態を再現し、喫水線付近のコラム内部を浸水させた。試験は発電時、及び待機時の両方について実施し、浸水中・浸水後の浮体運動、浸水流量、タワー基部反力等を計測した。

3-2 試験条件

コラムの 1 つが風下側に来る条件が最も復原性に不利であることから、試験時の風向、波向は図 4 に示す条件とした。係留ラインは図 4 の様に各コラムに 1 本の係留ラインを取付けている。係留反力が復原性に与える影響を出来るだけ小さくする為、係留点高さは設定重心高さとした。各係留ラインの初期張力を表 1 に示す。

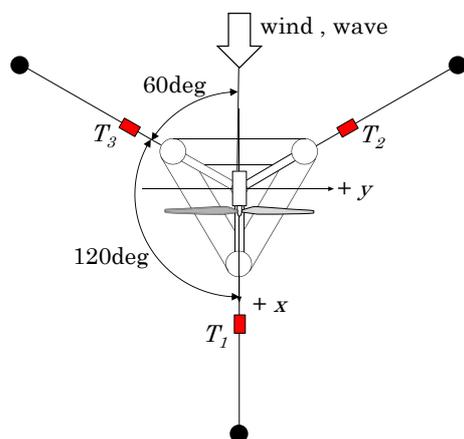


表 1 係留ライン初期張力

バネ定数: k	N/mm	0.035
T_1	N	21.4
T_2	N	21.4
T_3	N	20.0

図 4 係留ライン配置図

風車模型は、発電時に風下側への傾斜が生じる時、アップウィンド方式よりもダウンウィンド方式の方が大きな傾斜モーメントが生じるため、ダウンウィンド方式を採用した。なお、発電時の風車模型の運転条件は表 2 に示す定格運転条件としている。また、待機時の試験は側面風状態とした。

損傷時の試験では、図 1 に示したコラム 1 を損傷させた。コラム 1 内部に設置した浸水区画模型は、実機に換算して喫水線上 5.0m、喫水線下 3.0m の位置に水密隔壁を有しており、浸水量は浮体施設の排水量の 0.97%程度とした。浸水量を表 3 に示す。

表 4 に試験時の波浪条件を示す。試験を実施した設定重心高さ、安全率を表 5 に示す。なお、発電時、待機時の安全率を求める際には、風洞試験にて求めた風荷重を用いている。設定重心高さ毎の試験条件を表 6～表 10 に示す。

表2 風車運転条件

		ダウンウィンド方式
風速	m/s	2.1
設定ブレードピッチ角	deg	+0.73

表3 浸水量 (表中の数値は模型スケール)

浸水量	N	9.27
-----	---	------

表4 波浪条件 (表中の数値は模型スケール)

	有義波高 [m]	有義波周期 [sec]
1年再現波	0.12	1.84
50年再現波	0.18	2.26

表5 設定重心高さ、安全率 (表中の数値は模型スケール)

設定重心高さ KG [m]	安全率	
	発電時	待機時
0.24	1.84	1.5
0.25		1.33
0.258	1.48	1.21
0.266	1.33	1.08
0.278	1.09	

表6 試験条件 KG=0.24m、安全率 (発電時:1.84, 待機時:1.5)

浮体状態	風車状態	風速 [m/s]	波浪条件
損傷時	発電時	2.1	1年再現波
	待機時	7.1	50年再現波

表7 試験条件 KG=0.25m、安全率 (待機時:1.33)

浮体状態	風車状態	風速 [m/s]	波浪条件
損傷時	待機時	7.1	50年再現波

表8 試験条件 KG=0.258m、安全率 (発電時:1.48, 待機時:1.21)

浮体状態	風車状態	風速 [m/s]	波浪条件
損傷時	発電時	2.1	1年再現波
	待機時	7.1	50年再現波

表 9 試験条件 KG=0.266m、安全率（発電時:1.33, 待機時:1.08）

浮体状態	風車状態	風速 [m/s]	波浪条件
損傷時	発電時	2.1	1年再現波
	待機時	7.1	50年再現波

表 10 試験条件 KG=0.278m、安全率（発電時:1.09）

浮体状態	風車状態	風速 [m/s]	波浪条件
損傷時	発電時	2.1	1年再現波

3-3 試験結果

3-3-1 発電時（損傷状態）動揺計測結果

浸水時に最も復原性に不利となるコラム 1 の内部に浸水区画モデルを設置し、区画に注水することで損傷状態を模擬した。

なお、試験では損傷後も風力発電設備が発電状態と想定している。また、風車モデルはブレードピッチ角の制御は行わない。前後揺れ、上下揺れ、縦揺れ、相対水位、ナセル部加速度、タワー基部 F_x , M_y の有義振幅（両振幅）を非損傷時、損傷時で比較した結果を図 7～図 13 に示す。非損傷時と損傷時の計測結果は定性的にも定量的にもよく一致しており、損傷が生じることで運動振幅、タワー基部に働く力・モーメントの振幅が増幅されるような現象は見られない。

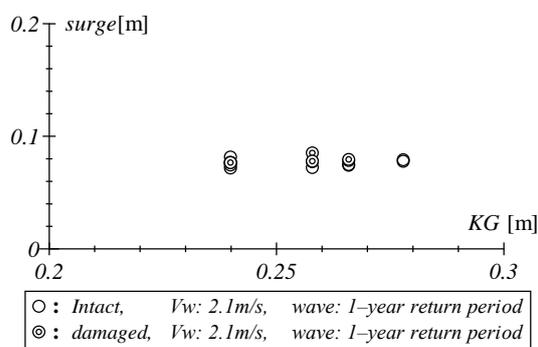


図 7 前後揺れ（有義振幅）

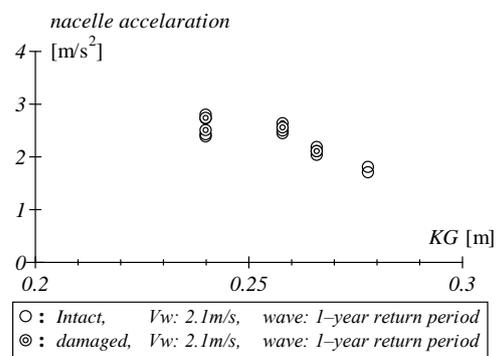


図 8 ナセル加速度（有義振幅）

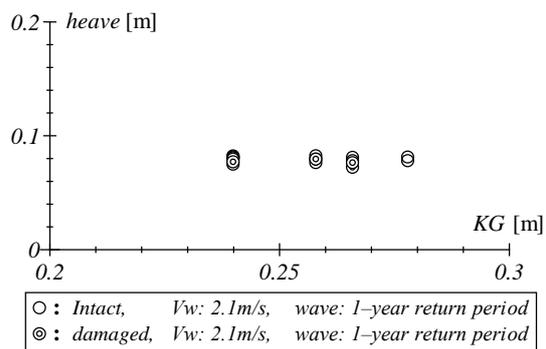


図 9 上下揺れ (有義振幅)

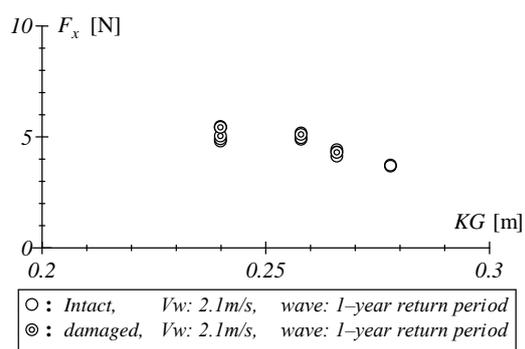


図 10 タワー基部 F_x (有義振幅)

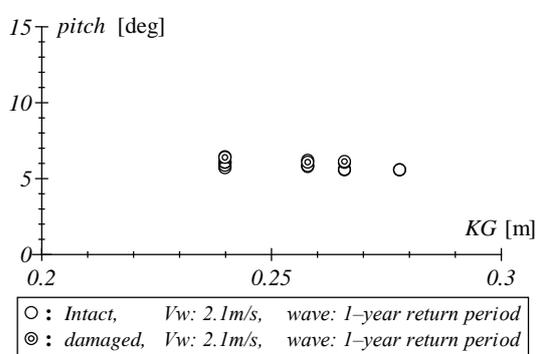


図 11 縦揺れ (有義振幅)

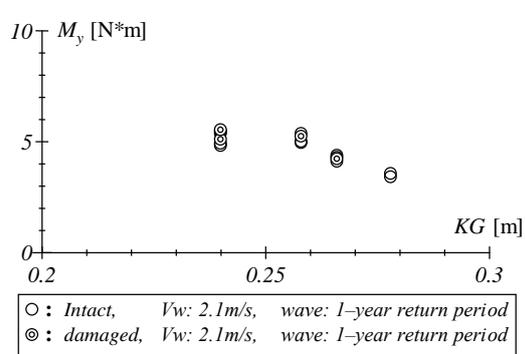


図 12 タワー基部 M_y (有義振幅)

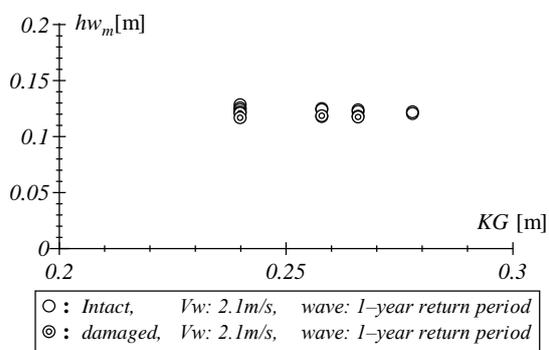


図 13 相対水位 (有義振幅)

図 14 に $KG=0.266$ (発電時安全率 1.3 相当) とした時の浸水中間段階における浮体運動の時系列を示す。なお、浸水量を示した上段のグラフでは浸水量 (9.27N) に達した段階で 100%としている。前後揺れ、上下揺れ、縦揺れの時系列を見ても、浸水中間段階に過渡的な応答は見られない。また、浸水後の運動の有義振幅も浸水前と後で変化は少ない。

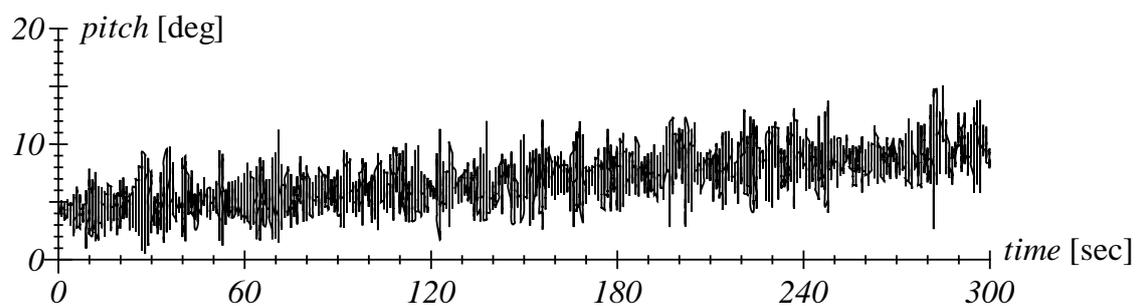
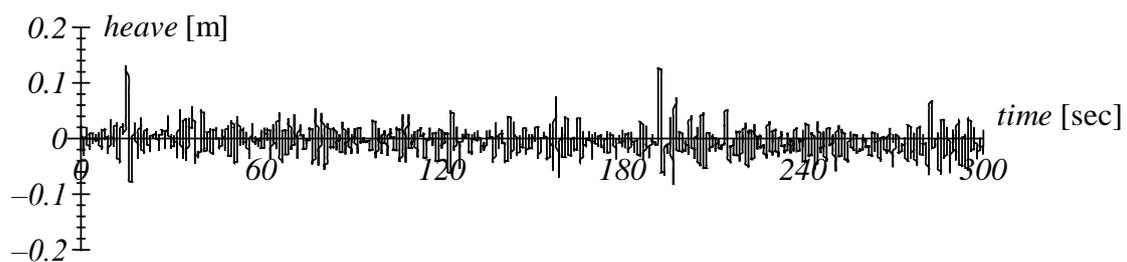
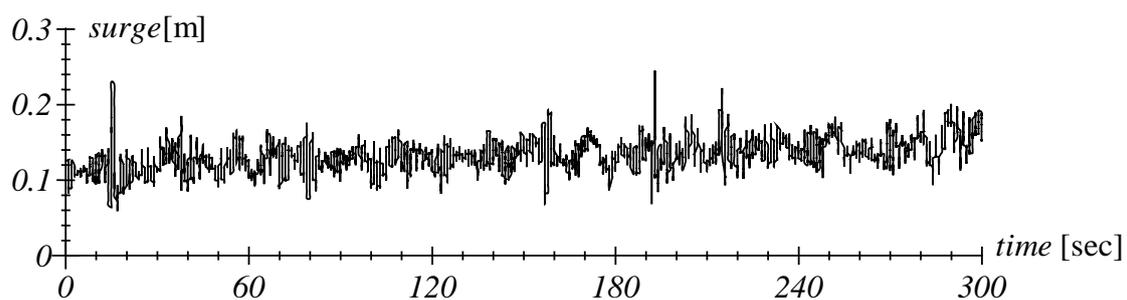
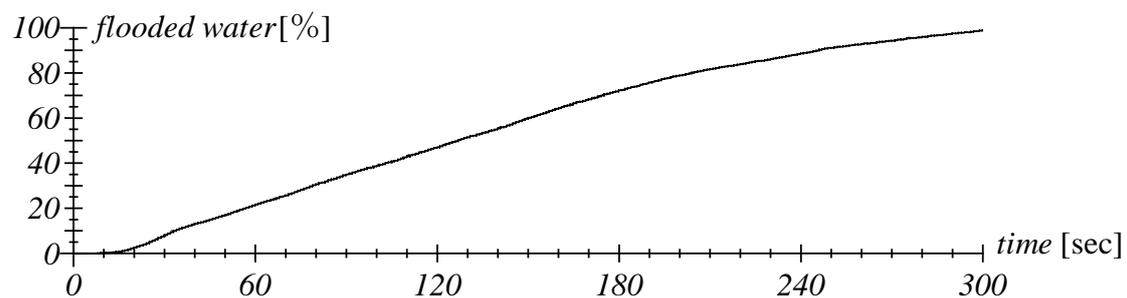


図 1 4 浸水中の浮体運動の時系列

3-3-2 待機時（損傷状態）動揺計測結果

前節と同様に、コラム 1 の内部に浸水区画模型を設置し、区画に注水することで損傷状態を模擬した。

損傷時復原性評価は、非損傷状態での待機時に設定される風速 50m/s を風速 25.8m/s に軽減して評価が行われるが、本試験では非損傷状態での待機時（50 年再現の極値風速、50 年再現の波浪条件）に損傷が生じるという厳しい環境外力下で損傷時復原性評価を行った。図 1 5～図 2 1 に浮体施設の運動及びタワー基部 F_x , M_y の有義振幅（両振幅）を示す。グラフには非損傷状態の結果も比較のため示している。これらの結果から、待機時においても損傷時に運動振幅が増加或いは減少することが無いと確認できる。なお、発電時の結果（図 7～図 1 3）と比べて見ると、波浪条件が 50 年再現波と厳しくなっているにもかかわらず、縦揺れやナセル加速度の有義振幅は発電時よりも小さくなっている。

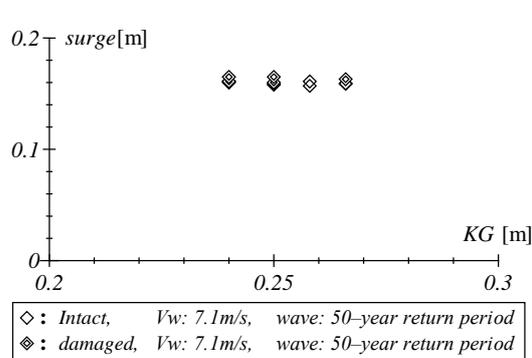


図 1 5 前後揺れ（有義振幅）

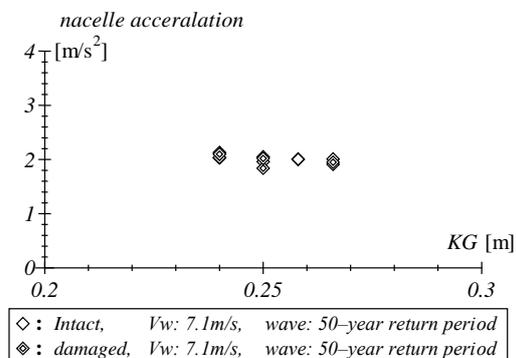


図 1 6 ナセル加速度（有義振幅）

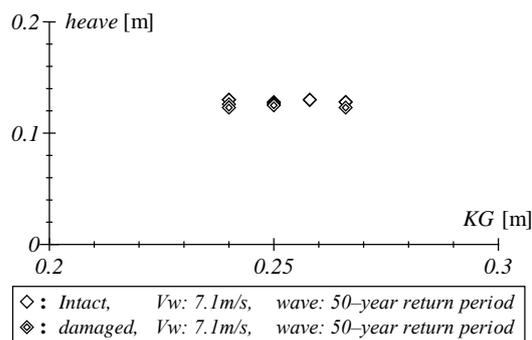


図 1 7 上下揺れ（有義振幅）

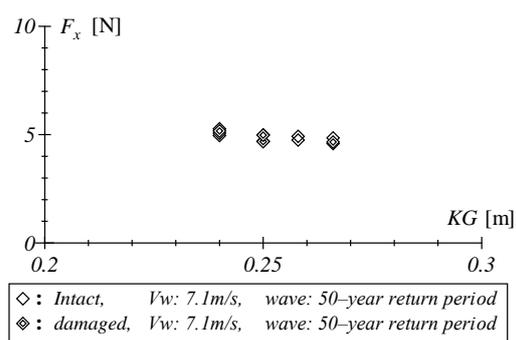


図 1 8 タワー基部 F_x （有義振幅）

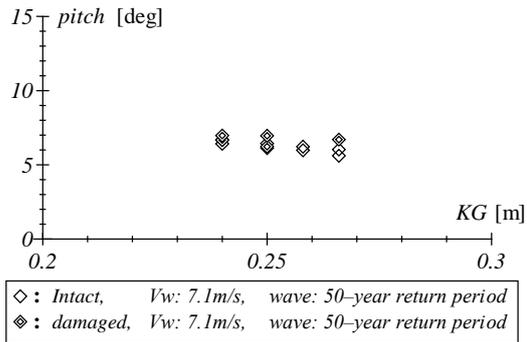


図 1 9 縦揺れ (有義振幅)

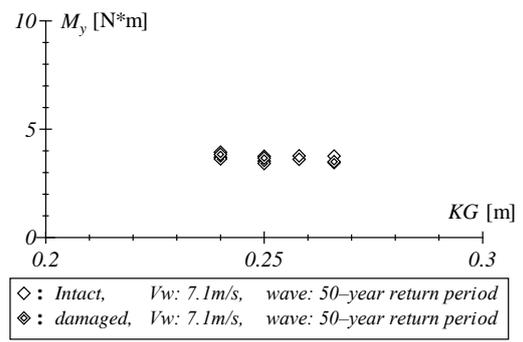


図 2 0 タワー基部 M_y (有義振幅)

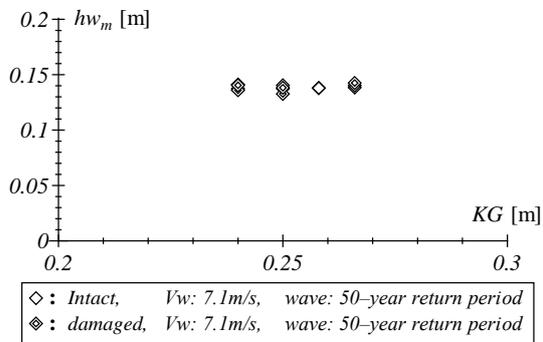


図 2 1 相対水位 (有義振幅)

図 2 2 に浸水中間段階での浮体動揺の時系列を示す。図 2 2 は待機時安全率 1.3 相当の結果である。なお、浸水量を示した上段のグラフでは浸水量 (9.27N) に達した段階で 100% としている。前後揺れ、縦揺れ、上下揺れの時系列を見ても、浸水中に運動振幅が増大する等の過渡的な応答は見られない。

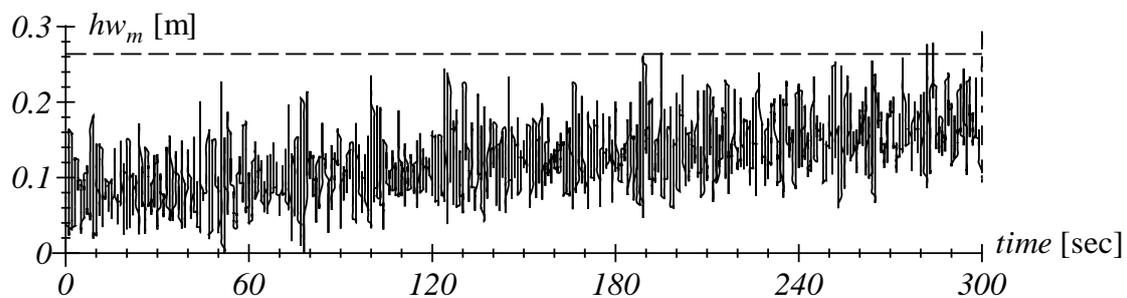
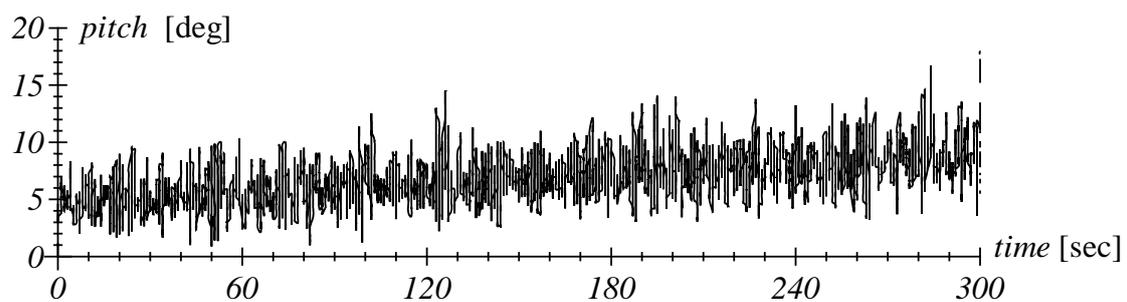
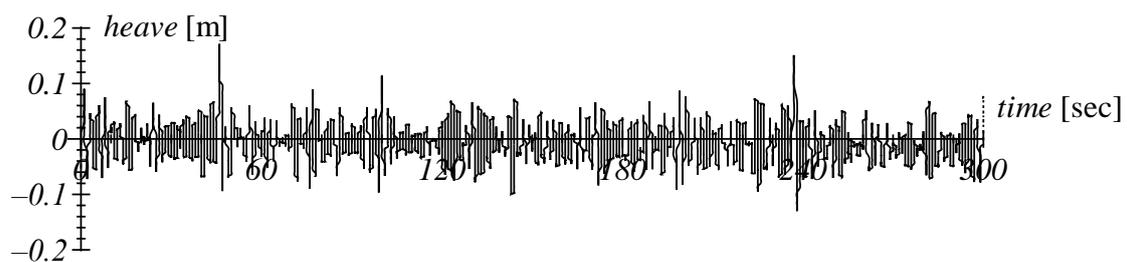
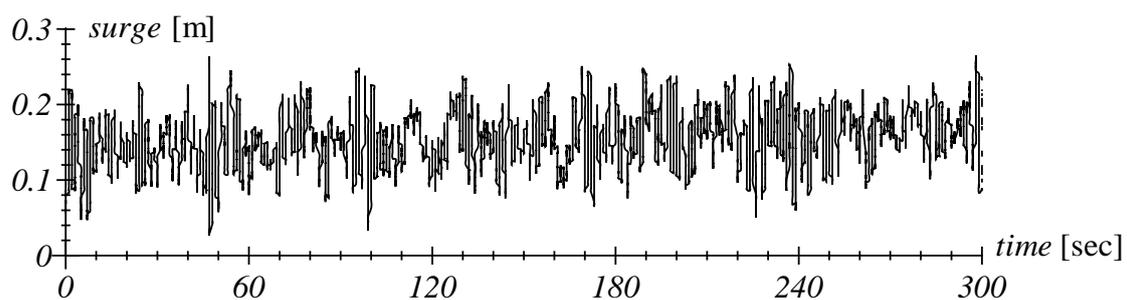
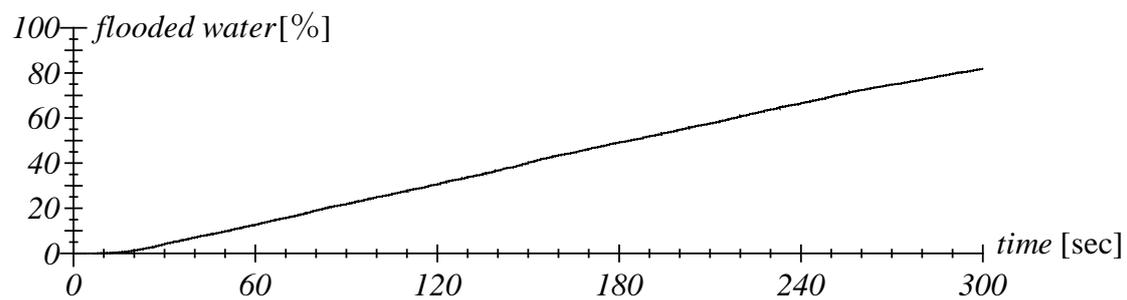


図 2 2 浸水中の浮体運動の時系列

4 まとめ

風力発電設備が発電時、待機時の両状態について損傷時の試験を実施し、浸水中間段階で運動の振幅が増大する等の過渡応答が発生しないことを確認した。また、損傷後の運動振幅は、損傷前とほぼ同程度となる。

付録4 VIM評価法

(当付録の位置付け)

浮体式洋上風力発電施設技術基準では、流体の流れによって生じる渦から励起される動揺について考慮することが求められている。

そこで、当付録では、当該検討につき標準的と思われる手法を整理した。

1. 概要

VIMとは流れの中に係留された浮体構造物が主に流れに直角な方向に大振幅の水平動揺をする現象で、渦励起動揺（Vortex Induced Motion）の略である。スパーク型浮体で発生しやすい事が知られているが、条件によってはセミサブ型浮体やポンツーンでも発生する。

運動の形態は固有周期に近い周期で運動する Transverse（流れに直角方向）動揺と固有周期の約半分の周期で運動する In-line（流れに平行な方向）動揺が連成し、8の字または円弧状の水平軌跡を示す。また、Roll, Pitch, Yawなどの動揺が生じることもある。

VIMを発生させる起振力は、浮体の側壁から左右交互に放出される剥離渦による抗力や横力であるとされる。係留浮体の固有周期が渦放出周期に近づくと浮体は動揺を始める。この時の運動周期はストローハル数と流速によって決まる渦放出周期とは異なり、ほぼ一定の運動周波数となる。この状態を「ロックイン」状態という。流速が速くなり、安定的なVIMを生じなくなる状態を「ロックアウト」と言う。

VIM振幅は、最大で浮体幅と同程度となることがあり、係留系の強度に大きな影響があると考えられる。このため、流れの存在する海域に浮体構造物を係留する場合、以下の項目を評価する必要がある。

- 1) VIMを考慮した係留系の終局強度
- 2) VIMを考慮した係留系の疲労強度

終局強度及び疲労強度は、それぞれ安全率によって評価される。要求される安全率は第3章に示される安全率と同一で、VIMを考慮するため高い強度が要求されることを意味する。

以下に、VIMを考慮した係留系の強度評価の手順について説明する。

2. VIM特性の設定

VIMによる係留系の強度評価を行うには、先ず浮体のVIM特性を設定する必要がある。VIM特性を表すパラメータは以下の通りである。

- VIMを発生させる環境を示すパラメータとしての換算流速 V_r

- V_r の関数としての In-line と Transverse 動揺の振幅 A/D
- V_r におけるロックイン・ロックアウト範囲
- Transverse 動揺の A/D の関数としての抗力係数 C_d
- Transverse 動揺の A/D の関数としての動揺周期 T (一般に固有周期 T_n とは異なる)
- VIM の軌跡が描く包絡線の形状

VIM 特性の設定には模型試験が必要であるが、模型試験での不確定性の影響を考慮するため、最も確からしい設定値 (ベースケース) の他に感度解析用の設定値 (感度ケース) をいくつか用意することが望ましい。

以下に各パラメータについて説明する。

2. 1 換算流速

VIM の特性は、換算流速 V_r の関数として表現される。 V_r は、流速 V 、特性時間 T_c 、代表長さ D を用いて次式によって定義される。

$$V_r = \frac{V \cdot T_c}{D} \quad (1)$$

洋上風力発電施設用プラットフォームとして考えられる浮体 (スパー型、セミサブ型、TLP 型等) において VIM 外力の発生源は主にコラムであり、主な動揺は Transverse 動揺である。このことから、 V_r を定義する特性時間と代表長さは、Transverse の固有周期 T_n とコラムの幅 (直径) とすることによりよい。

Transverse の固有周期 T_n は次式により定義される。

$$T_n = 2\pi\sqrt{M/k} \quad (2)$$

ここで、 k は定常外力 (風・波・水流) による平均変位 O_m (Mean offset) での Transverse 方向の係留剛性、 M は浮体質量と付加質量の和としての全質量で、静水中固有周期を定義する質量を用いる。

一般に k は流向・流速毎に異なるので注意が必要である。付加質量は、汎用解析ツール又は模型試験から求められるが、利用できるのであれば、実機データを用いることが望ましい。平均変位 O_m は、抗力係数 C_d と VIM 振幅 A/D に依存するので、 O_m 算出には反復計算が必要である。

2. 2 VIM 振幅

VIM 振幅 A/D の定義は、Transverse 動揺または In-line 動揺の振幅 A をコラム幅 D で無次元化するのが一般的である。 A/D は、換算流速 V_r の関数であるが、 V_r が閾値以下であれば、VIM は発生しない。

V_r に対する A/D の関数形の例を図 2-1 に示す。閾値以上の V_r でロックイン状態になり、 A/D が増加する。値の大きな V_r において、ロックイン状態を維持する場合とロックアウト

トする場合がある。

通常 A/D の関数形は流向によって変化する。スパー型浮体は軸対象形状であるが、付加物（アノード・螺旋ストレーキ等）の付け方によっては A/D の関数形は流向によって変化する。このため、流向毎に A/D の関数形を設定する必要がある。

In-line 動揺の振幅は Transverse 動揺の振幅に比べて小さく、一般に Transverse 動揺の振幅の 10%~15%とされる。

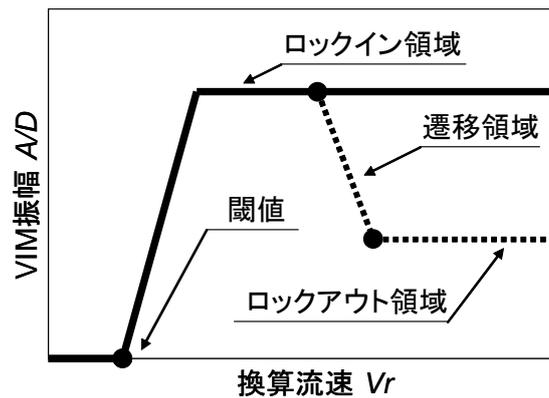


図 2-1 VIM 振幅の関数形の例

2. 3 抗力係数

抗力係数 C_d は次式で定義される。

$$C_d = \frac{F_m}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_p} \quad (3)$$

ここで、 C_d は VIM がある場合の平均抗力係数、 F_m は In-line 方向の平均抗力、 ρ は流体密度、 V は流速、 A_p は水面下の流速ベクトルに対する投影面積である。

C_d は一般に VIM 振幅 A/D と換算流速 V_r の関数であるが、スパー型浮体のロックイン領域での C_d は、 A/D に対して線形に増加することが知られており、次式で表される。

$$C_d = C_{d0} + k \cdot (A/D) \quad (4)$$

ここで、 C_{d0} は VIM が発生していない状態の抗力係数、 k は比例係数である。

2. 4 動揺周期

ロックイン状態での Transverse の動揺周期は A/D の関数として与えられる。固有周期からのずれは VIM の起振力が動揺の加速度に比例する成分を含んでいることから生じる。逆に VIM の起振力が動揺の加速度に比例する成分を含まないような浮体では、VIM の動揺周期は固有周期に一致する。

VIM の動揺周期と係留ライン張力の変動周期は異なる場合があるので、疲労強度評価に

は張力の変動周期を用いる必要がある。

2. 5 包絡線形状

スパー型浮体の VIM の軌跡は水平に 8 の字または円弧を描くことが知られている。これは、Transverse の動揺周期に対して In-line の動揺周期は約 1/2 となっているためである。VIM の軌跡が 8 の字になるか円弧になるかについては Transverse 動揺と In-line 動揺の位相差による。

包絡線形状は、VIM の軌跡が面的広がりを持っていた場合、その外周によって形作られる形状である。VIM による係留ライン張力の変動を算出する場合、この形状に沿って浮体を動かし、その時の準静的または動的なライン張力応答を計算する。

図 2-2 にスパー型浮体の VIM の軌跡の実機観測データの例を示す。

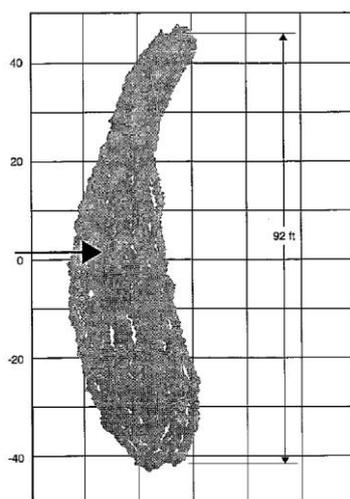


図 2-2 VIM の軌跡の観測例 [1]

2. 6 模型試験

VIM 特性 (VIM 振幅 A/D 、抗力係数 C_d 、動揺周期 T 、及び包絡線形状) の設定においては、検証された数値解析手法がないことから模型試験が必要である。しかしながら、模型試験にも不確実性が存在する事を念頭に置く必要がある。模型試験の不確実性には以下の要素が関連すると考えられる。

1) 流体力学的相似性

実機と模型の間の流体力学的相似性を保つためにはフルード数 F_n とレイノルズ数 Re を実機に合わせる必要がある。 Re は、流速 V 、代表長さ D 、流体の動粘性係数 ν を用いて次式で定義する。

$$Re = VD / \nu \quad (5)$$

F_n は流速 V 、代表長さ D 、重力加速度 g を用いて次式で定義する。

$$F_n = V / \sqrt{gD} \quad (6)$$

VIM は渦放出に伴う現象であることから、 Re 影響は特に重要である。しかしながら、 Re を実機と合わせることは事実上不可能であり、一般には低 Re での試験が行われる。表面が滑らかな浮体について Re 影響を考慮するには、超臨界 Re （二次元円柱で $Re > 600,000$ とされる）試験を行う方法と境界層の乱流促進のため、表面粗度をつけた模型を用いる方法が考えられる。アノードや螺旋ストレーキ等の付加物を有する浮体の場合については、渦の剥離点が固定されて Re 影響が出にくくなると考えられる。この場合、亜臨界 Re 試験は超臨界 Re 試験に比べわずかに安全側の推定になるという研究報告もある。^[2]

2) 動力的相似性

VIM 特性試験で動力的相似性を確保することは、換算流速 V_f を実機に合わせることに相当する。すなわち、係留剛性、浮体質量・付加質量、流速との関係を実機と模型の間で同じにすることを意味する。また、系全体の減衰力も動力学特性に影響を及ぼす。模型試験での係留装置等の機械的な減衰は実機には存在しないものである。

3) 幾何学的相似性

幾何学的相似性は、模型形状・付加物の形状の他に、試験目的に応じて係留配置、流速の鉛直分布を合わせることを意味する。

4) 試験方法

VIM の試験方法には、模型を曳航台車に係留して曳航する方法と、流れの中に模型に係留する方法がある。

前者は精度の良い流れを再現できるが、水槽の長さの制限から計測時間長に制限がある。計測時間長はデータの統計解析上の精度に影響を与える。曳航開始後の過渡状態のデータは解析に用いるべきではない。また、結果的に流速の鉛直分布は一様流のみである。

後者は計測時間長における制限が少なく、流速の鉛直分布を実機と同様に再現できる試験水槽も存在する。但し、流れの乱れが前者に比べて大きい場合が多く、試験精度に注意を要する。

以上の観点に留意して設定した VIM 特性を用いて、係留系の強度評価を行う。

3. 終局強度評価

係留系の終局強度評価を行うためには 50 年再現期間の風・波・水流に対して VIM を考慮した浮体動揺解析を行う必要があるが、流速に比べ風・波が穏やかである場合以下の簡易解析手順が利用できる。

- 1) 流れ方向を選択する。
- 2) VIM 振幅 A/D を仮定して抗力係数 C_d を求め、流向・流速に対応する平均抗力 F_m と係留・送電ケーブル反力の釣り合い点である平均変位 O_m 及びその変位における

Transverse 方向の固有周期 T_n を求める。上下揺れの復原力が小さい場合、浮体の浮力と係留・送電ケーブル反力の鉛直成分の釣り合いを考慮する必要がある。

- 3) 固有周期 T_n と流速 V から換算流速 V_f を求め、設定した VIM 特性に基づき Transverse の A/D を決定する。
- 4) A/D が 2)項で仮定した A/D と大きく異なる場合、反復計算が必要である。反復計算のフローを図 3-1 に示す。
- 5) Transverse の A/D から動揺周期 T 、In-line の A/D 及び平均変位 O_m 周りの軌跡の包絡線形状を決定する。
- 6) 浮体位置を包絡線形状に沿って数周期分変位させて、準静的係留解析により係留ラインの最大張力とアンカーの最大荷重を求める。
- 7) 大水深または係留ラインに合成繊維ロープを用いる場合、準静的解析の代わりに動的解析を行うことが望ましい。
- 8) 他の流向に対するライン張力とアンカー荷重を得るためにステップ 1)~7) を繰り返す。
- 9) 感度ケースを用いて係留系のロバスト性の確認を行う。

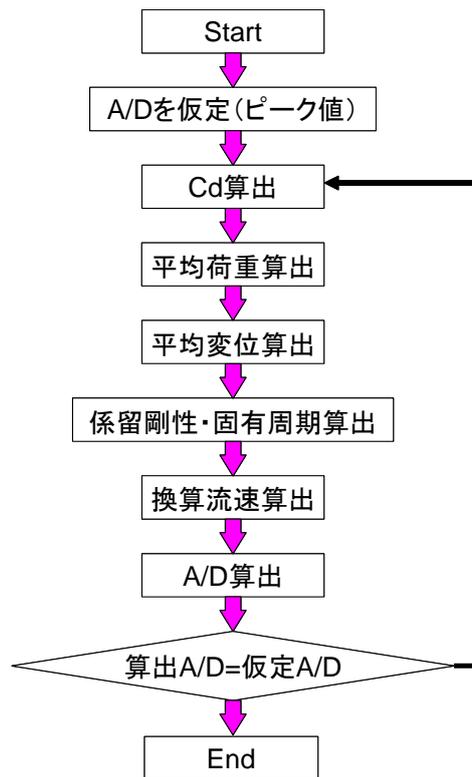


図 3-1 反復計算のフロー

50 年再現期間の風・波の条件が厳しい場合でも、大水深または係留ラインに合成繊維ロープを用いる場合を除いて、以下の簡易手順が利用できる。

- 1) 前記の手順 1)~5)を実施し、VIM による最大振幅ベクトル（平均変位は含まない）を求める。ただし、固有周期 T_n を求めるための平均変位 O_m は、平均抗力 F_m の他に定常波漂流力と定常風荷重の影響を含むものとする。
- 2) VIM を考慮した C_d を用いて波浪中動揺計算を行い、平均変位ベクトル及び動揺振幅ベクトル（有義値・最大値：技術基準第 3 章 3.(8)参照）を求める。
- 3) 平均変位ベクトル、VIM 最大振幅ベクトル及び波浪中動揺の動揺振幅ベクトルを加算して最大変位ベクトルを求め、その点での準静的係留張力を求める。
- 4) 準静的計算の安全率を適用する。
- 5) 他の方向について手順 1)~5)を繰り返す。

4. 疲労強度評価

疲労強度評価は 50 年再現期間までの流速に対して、10~50 に分割した流況条件を用いて行われる。波浪中動揺による疲労被害と VIM による疲労被害を独立に求め、その和をトータルの疲労被害として扱うため、各流況条件は、流向・流速の結合確率分布のみが必要である。流向に関するデータが無い場合、VIM による係留系の疲労が最も厳しい方向からの流れを想定する。疲労解析は、流況条件の分割数に敏感であるため、感度解析によって分割数を決定することが望ましい。

VIM 特性の不確定性の影響を確認するため、感度ケースを考慮することも推奨される。以下に疲労強度評価の手順を示す。

- 1) 1 つの流況条件を選択し、流速と流向の発生確率に基づき、年あたりの当該流況条件の持続時間 t_i を計算する。
- 2) 図-3 の手順に基づき換算流速 V_r 、VIM 振幅 A/D 、抗力係数 C_d 、固有周期 T_n 及び軌跡の包絡線形状を求める。
- 3) 浮体位置を包絡線形状に沿って変位させながら、準静的または動的係留解析により係留ライン張力時系列を求め、張力レンジ R_i を決定する。
- 4) T-N 曲線から、 R_i に対応する破断サイクル数 N_i を決定する。
- 5) i 番目の流況条件に対する年あたりの疲労被害 D_i を式(7)により計算する

$$D_i = \frac{(t_i / T_i)}{N_i} \quad (7)$$

ここで、 t は流況条件の継続時間、 T は動揺周期、 N は推定された張力レンジでの破壊繰り返し数、 i は流況条件の番号を表す。

- 6) 全ての流況条件に対して手順 2)~5)を繰り返す。
- 7) 全ての流況条件を考慮した長期疲労被害 D_{VIM} を式(8)により求める。これに風・波による疲労被害 D_{wave} を加えたものがトータルの疲労被害 D である（式(9)）。疲労寿命 L は疲労被害 D と安全率 η から式(10)により求められる。この値が共用年数

上である必要がある。

$$D_{VIM} = \sum D_i \quad (8)$$

$$D = D_{wave} + D_{VIM} \quad (9)$$

$$L = \frac{1}{\eta D} \quad (10)$$

5. 単一異常 VIM に対する疲労評価

最近の研究では、一回の異常な VIM で極めて大きな疲労被害を引き起こされた例が報告されている。したがって、長期疲労被害評価に加え異常 VIM に対する疲労評価も推奨される。VIM は、換算流速に大きく依存するので、異常 VIM は 50 年再現流速で引き起こされるとは限らない。このため、異常 VIM を引き起こす流向と流速を VIM の解析から求め、その時の持続時間を環境条件の観測データから確認しておく必要がある。

疲労設計に要求される安全率は、風・波・VIM の複合による長期疲労被害と単一異常 VIM に対する疲労被害に独立に適用される。

6. 疲労評価の実施例

スパーク型浮体を例にして、係留系疲労評価の実施例を示す。

6. 1 想定浮体

想定浮体は右図に示す 2 段スパークとする。

上部浮体：直径 15m、深さ 30m

下部浮体：直径 22.5m、深さ 60m

喫水：90m

排水量容積 29,158m³

等価排水容積直径 20.3m (代表長さ)

想定に係留系は、4 本のカテナリーチェーンのスペルッド係留とする。

アンカー点半径：700m

アンカー点水深：225m

取り付け点半径：11.25m

取り付け点深度：30m

ライン長：806m

チェーンはスタッドレスの S4 とし、規格を表 6-1 の通りとする。

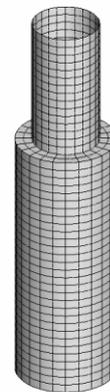


図 6-1 想定浮体形状

表 6-1 チェーンの規格

呼径	152.4	mm
軸剛性	2,038,000	kN
空中重量	462	kgf/m
水中重量	400	kgf/m
基準破断強度	19,089	kN

6. 2 VIM 特性の設定

(独) 海上技術安全研究所で実施した、洋上風力発電施設用浮体の VIM に関する試験結果を参考に VIM 特性を設定する。^[3] 本試験は大型スパー模型を用いた、超臨界 Re 試験結果である。但し、水槽の制約により想定浮体よりも喫水/直径比が小さくなっている。VIM 特性の設定値を以下に示す。

表 6-2 スパー浮体の VIM 振幅特性 (A/D)

Vr	5.0	7.0	> 9.5
A/D	0.0	0.2	1.0

動揺周期 T は固有周期 T_n に等しいとした。上記試験結果によると大型スパー模型の動揺周期は固有周期近傍で一様にばらついている。

$$T/T_n = 1 \quad (11)$$

抗力係数 C_d と VIM 振幅 A/D との関係を次式で与える。

$$C_d = 0.19(A/D) + 0.41 \quad (12)$$

In-line 動揺の振幅 A_i/D と Transverse 動揺の振幅 A_t/D の関係は次式で与える。

$$A_t/D = 0.127(A_i/D) \quad (13)$$

VIM の軌跡については、Transverse は運動周期、In-line はその 1/2 の周期の正弦関数で運動するとし、位相差を 270deg とした。位相差が 270deg の場合、軌跡は円弧状になる。

$$x = A_i \sin\left(\frac{4\pi}{T}t + \theta\right) \quad (14)$$

$$y = A_t \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (15)$$

ここで、 x は In-line の平均変位からの座標、 y は Transverse の平均変位からの座標、 T は動揺周期、 t は時刻、 θ は位相差である。

6. 3 環境条件

ここでは、特定の流向・流速が1年間続く（発生確率=1）と仮定する年間疲労被害を算出する。また、流速の鉛直分布は一様とする。流向の定義は図 6-2 に示すものとし、0deg、15deg、30deg、45deg の4方向について計算例を示す。

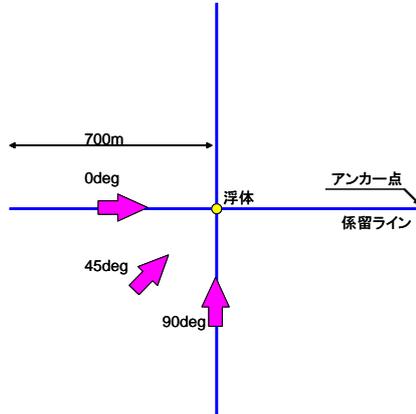


図 6-2 流向と係留ライン配置の関係

6. 4 VIM 特性の算出

図 3-1 に示したフローに従い、流況条件毎に算出した VIM 特性を表 6-3～表 6-6 に示す。

表 6-3 流況条件毎の VIM 特性（流向 0deg）

V (m/sec)	C_d	O_m (m)	V_r	At/D	Ai/D	T (sec)
0.1	0.413	0.190	1.67	0.0	0.0	—
0.2	0.413	0.765	3.34	0.0	0.0	—
0.3	0.415	1.772	5.08	0.008	0.0001	343
0.4	0.448	3.470	6.77	0.177	0.022	344
0.5	0.542	6.518	8.45	0.665	0.084	343
0.6	0.608	10.481	10.11	1.0	0.127	342
0.7	0.608	14.132	11.75	1.0	0.127	341
0.8	0.608	18.230	13.37	1.0	0.127	339
0.9	0.608	22.627	15.54	1.0	0.127	351
1.0	0.608	27.241	17.33	1.0	0.127	352
1.1	0.608	31.912	18.93	1.0	0.127	349
1.2	0.608	36.543	20.4	1.0	0.127	345
1.3	0.608	41.052	21.87	1.0	0.127	341
1.4	0.608	45.412	23.28	1.0	0.127	337
1.5	0.608	49.447	24.79	1.0	0.127	335
1.6	0.608	53.283	26.16	1.0	0.127	332

表 6-4 流況条件毎の VIM 特性 (流向 15deg)

$V(\text{m/sec})$	C_d	$O_m(\text{m})$	V_r	At/D	Ai/D	$T(\text{sec})$
0.1	0.413	0.190	1.69	0.0	0.0	—
0.2	0.413	0.764	3.39	0.0	0.0	—
0.3	0.415	1.771	5.11	0.011	0.0001	346
0.4	0.448	3.465	6.81	0.181	0.023	346
0.5	0.559	6.699	8.72	0.751	0.095	354
0.6	0.608	10.494	10.42	1.0	0.127	353
0.7	0.608	14.154	11.98	1.0	0.127	347
0.8	0.608	18.305	13.68	1.0	0.127	347
0.9	0.608	22.708	15.11	1.0	0.127	341
1.0	0.608	27.431	16.81	1.0	0.127	341
1.1	0.608	32.186	18.18	1.0	0.127	335
1.2	0.608	37.033	19.97	1.0	0.127	338
1.3	0.608	41.715	21.21	1.0	0.127	331
1.4	0.608	46.319	22.79	1.0	0.127	330
1.5	0.608	50.695	23.83	1.0	0.127	322
1.6	0.608	54.829	24.23	1.0	0.127	307

表 6-5 流況条件毎の VIM 特性 (流向 30deg)

$V(\text{m/sec})$	C_d	$O_m(\text{m})$	V_r	At/D	Ai/D	$T(\text{sec})$
0.1	0.413	0.189	1.70	0.0	0.0	—
0.2	0.413	0.763	3.42	0.0	0.0	—
0.3	0.416	1.765	5.14	0.014	0.0002	348
0.4	0.452	3.482	6.98	0.198	0.025	354
0.5	0.555	6.747	8.65	0.728	0.092	351
0.6	0.608	10.501	10.19	1.0	0.127	345
0.7	0.608	14.198	12.11	1.0	0.127	351
0.8	0.608	18.368	13.55	1.0	0.127	344
0.9	0.608	22.943	15.22	1.0	0.127	343
1.0	0.608	27.767	16.72	1.0	0.127	339
1.1	0.608	32.782	17.70	1.0	0.127	327
1.2	0.608	37.919	19.16	1.0	0.127	324
1.3	0.608	43.038	20.05	1.0	0.127	313
1.4	0.608	48.003	20.93	1.0	0.127	304

1.5	0.608	52.877	21.61	1.0	0.127	292
1.6	0.608	57.580	22.23	1.0	0.127	282

表 6-6 流況条件毎の VIM 特性 (流向 45deg)

$V(\text{m/sec})$	C_d	$O_m(\text{m})$	V_r	At/D	Ai/D	$T(\text{sec})$
0.1	0.413	0.187	1.72	0.0	0.0	—
0.2	0.413	0.762	3.44	0.0	0.0	—
0.3	0.419	1.770	5.30	0.030	0.0004	358
0.4	0.457	3.516	7.07	0.223	0.028	359
0.5	0.549	6.858	8.56	0.698	0.089	347
0.6	0.608	10.489	10.46	1.0	0.127	354
0.7	0.608	14.225	12.00	1.0	0.127	348
0.8	0.608	18.416	13.46	1.0	0.127	342
0.9	0.608	23.035	15.25	1.0	0.127	344
1.0	0.608	27.979	16.34	1.0	0.127	332
1.1	0.608	33.087	17.70	1.0	0.127	327
1.2	0.608	38.375	18.70	1.0	0.127	317
1.3	0.608	43.617	19.73	1.0	0.127	308
1.4	0.608	48.816	20.30	1.0	0.127	294
1.5	0.608	53.810	21.05	1.0	0.127	285
1.6	0.608	58.812	20.89	1.0	0.127	265

6. 5 流況条件毎の疲労被害の算出

式(14)、式(15)に従って軌跡をトレースしたとき、図 6-3 に示すような係留ライン張力の時系列が得られる。この山と谷の差を基準破断強度で割ったものが張力レンジ R である。

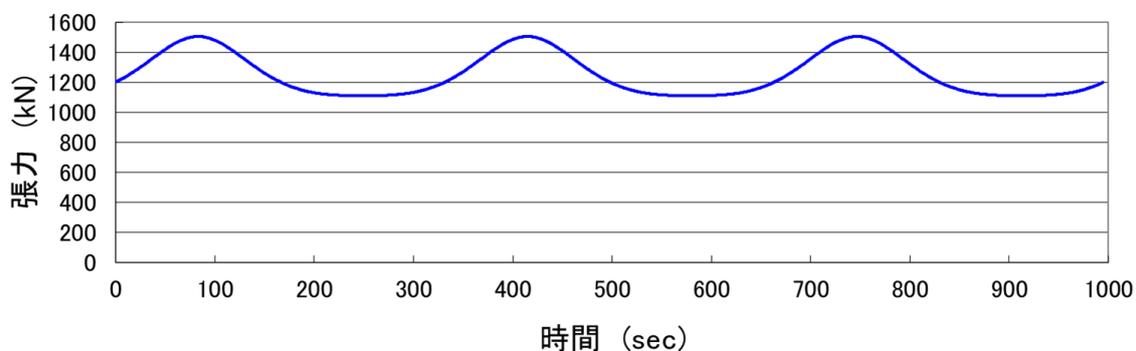


図 6-3 係留ライン張力の時系列 (流速 1.0m、流向 45deg)

張力レンジ R と破壊繰り返し数 N との間には次式で示す関係がある。

$$NR^M = K \quad (16)$$

この R と N の関係を図示したものが T-N 曲線である。ISO19901-7 ではスタッドレスチェーンの T-N 曲線を $M=3$ 、 $K=316$ としている。図 6-4 にスタッドレスチェーンの T-N 曲線を示す。

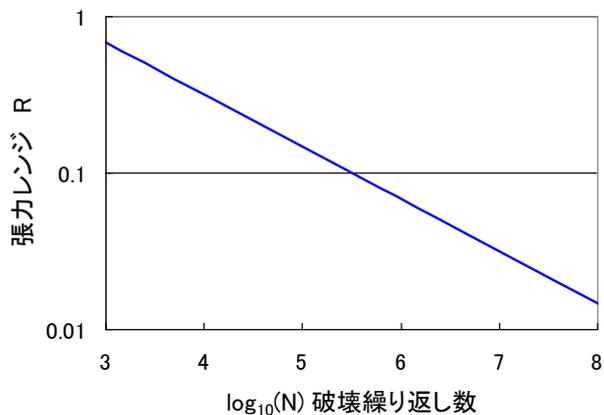


図 6-4 T-N 曲線 (スタッドレスチェーン)

式(7)に従い、年間疲労被害を算出する。年間疲労被害度を算出する場合、 i 番目の流況条件の継続時間 t_i は次のとおりである。(地球の公転周期から決まる時間で、 $(365+1/4)$ 日である。)

$$t_i = 365 \times 24 \times 3600 + 6 \times 3600 = 31,557,600 \text{ sec} \quad (14)$$

表 6-7 に流況条件毎の年間疲労被害 D_i を示す。

表 6-7 年間疲労被害

V(m/s)	流向			
	0deg	15deg	30deg	45deg
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.4	0.000007	0.000007	0.000007	0.000006
0.5	0.000405	0.000588	0.000441	0.000233
0.6	0.001533	0.001660	0.001465	0.000901
0.7	0.001550	0.001817	0.001666	0.001123
0.8	0.001564	0.001985	0.001998	0.001449
0.9	0.001528	0.002228	0.002468	0.001880
1.0	0.001554	0.002536	0.003071	0.002675
1.1	0.001595	0.002920	0.004132	0.003795
1.2	0.001646	0.003355	0.005443	0.005658
1.3	0.001701	0.004038	0.007515	0.008540
1.4	0.001752	0.004793	0.010565	0.013360

1.5	0.001799	0.005887	0.015143	0.020916
1.6	0.001850	0.007459	0.021889	0.034256

疲労寿命は疲労被害の逆数を安全率で割った値である。安全率を 3 として、同じ流況条件が続いたとした場合の疲労寿命を図 6-5 に示す。

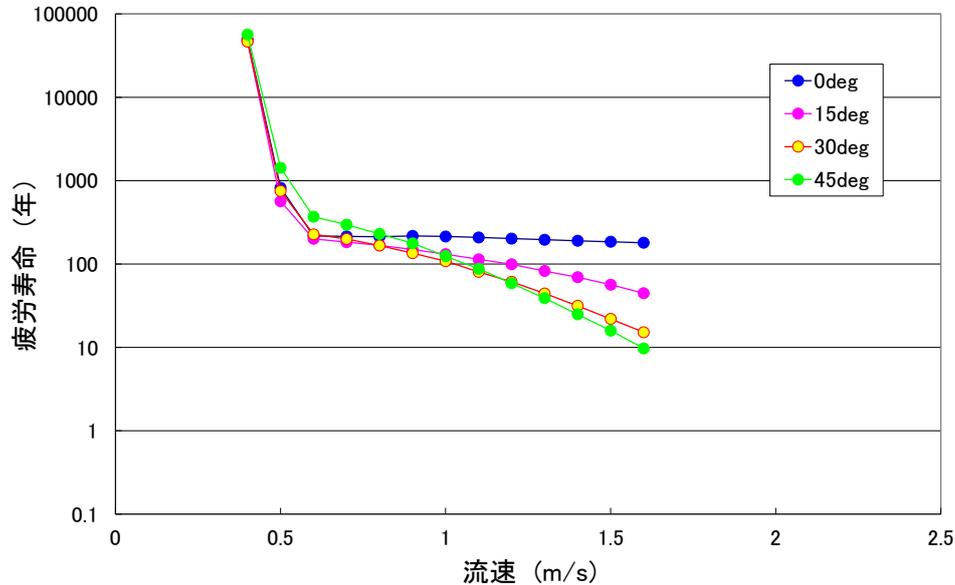


図 6-5 流況に対する疲労寿命

5. 6 長期疲労被害

長期疲労被害 D は次式で与えられる。

$$D = \sum q_i D_i \quad (15)$$

ここで、 $q_i = t_i / T_i$ (式(7)参照) は流況条件の発生確率である。

VIM による疲労長期疲労被害と波浪中動揺解析から得られる長期疲労被害の和がトータルの疲労被害である。疲労寿命はトータルの疲労被害の逆数を安全率で割ったものである。疲労寿命は耐用年数よりも長い必要がある。

参考文献

- [1] API, 'Design and Analysis of Stationkeeping Systems for floating Structures', Recommended practice 2SK, p130, 2005
- [2] Dominique Roddier, et.al., "INFLUENCE OF THE REYNOLDS NUMBER ON SPAR VORTEX INDUCED MOTION: MULTIPLE SCALE MODEL TEST COMPARISONS", OMAE2009-79991, 2009
- [3] 海上技術安全研究所、「洋上風力発電施設の安全性ガイドラインに関する研究報告書」付属書類「VIM 特性把握のための水槽試験」、2013

付録5 浮体施設の周辺を航行する船舶の衝突による構造全損確率に関する評価方法

(当付録の位置付け)

浮体式洋上風力発電施設技術基準（第2編第5章4.(1)）及び安全ガイドラインにおける解説では、周辺を航行する船舶の衝突に起因する復原性喪失による1年当たりの構造全損の確率が、 1×10^{-4} 以下であることが確認された場合において、一定の条件の下で、損傷時復原性の検討に当たって外板を含む区画の浸水を考慮しなくても良いこととしている。

そこで、当付録では、浮体施設の周辺を航行する船舶の衝突による構造全損確率の評価に用いることができる方法及び具体的海域における確率の算出例を示した。

1. 評価の手順

浮体施設の周辺を航行する船舶の衝突による構造全損確率の評価及び当該評価結果を踏まえた損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置の適用可否に係る判断の手順は以下のとおり。

手順：

- ① 当該海域における1年間のAIS (Automatic Identification System：船舶自動識別装置)による船舶情報(以下、「AIS情報」という。)を用い、浮体施設に接近し、衝突する虞のある船舶の数(年間接近頻度 n_g (回/年))を算出し、これを年間接近確率 P_g とみなす(※1)。
- ② 年間接近確率 P_g に避航を失敗する確率 P_c ($10^{-3.7}$)を乗じ、年間衝突確率 $P1$ を算出する。
- ③ 船舶の衝突による構造全損(復原性の喪失)の確率 $P2$ を算出する(②で評価した衝突船のうち、当該船舶の大きさと浮体施設の構造強度に鑑み、衝突をしても明らかに外板に破口を生じないものを除いて算出)。
- ④ $P1$ と $P2$ を掛け合わせた結合確率として1年当たりの構造全損の確率 PT を求め、 1×10^{-4} (※2)以下であるか確認する。 1×10^{-4} 以下であれば損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置を適用できる。
- ⑤ PT が 1×10^{-4} 以下とならない場合においても、フェンダーの設置等の追加対策の効果を踏まえて③からの計算を行い、結果として 1×10^{-4} 以下であれば損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置を適用できる。

ここで、②で算出した年間衝突確率 $P1$ が 1×10^{-4} 以下となった場合は、③以降の実施を省略して損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置を適用できる。

複数の浮体施設から構成されるウィンドファームについては、個々の浮体施設に対して独立に確率を評価する。

ただし、当該ウィンドファーム内に存在する他の浮体施設について確率を評価した結果

及び浮体施設周辺の航行船舶の航跡に鑑み、当該他の浮体施設よりも船舶の衝突による1年当たりの構造全損の確率 PT が低くなることが明らかであり、当該確率が 1×10^{-4} 以下となる蓋然性が十分高いものについては、管海官庁の確認を受けた上で、1年当たりの構造全損の確率 PT の計算を省略できるものとする。

----- Note 年間接近確率 P_g について (※1) -----

船舶の衝突は稀な災害事象であるため、一般に災害発生の確率過程として用いられるポアソン過程として扱うことができる。このとき、事象の発生頻度が単位時間あたり n_g である場合に、時刻0から t までの間に事象が1回以上発生する確率 P_g は、 $n_g t$ が1より十分に小さい場合に次式で表される。

$$P_g(t) = 1 - e^{-n_g t} \approx n_g t \quad (n_g t \ll 1 \text{ のとき}) \quad (\text{N-1})$$

ここで、1年間の衝突確率を考える場合、 $t=1$ となる。

----- Note ここまで-----

----- Note 構造全損の確率 PT の比較対象となる確率 1×10^{-4} について (※2) -----

国際基準¹⁾等によれば、常時有人でない建造物の年間の構造全損の確率は、平均的に 1×10^{-4} 程度。これを踏まえ、損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置を適用しない（水線面付近に防水区画を設けない）ことによる船舶との衝突による1年当たりの構造全損の確率 PT が 1×10^{-4} 以下であることを求めるものである。

----- Note ここまで-----

2. 評価のフロー

浮体式洋上風力発電施設技術基準第2編第5章4. (1)ただし書に規定される損傷時復原性に係る例外措置の適用を検討する際の浮体施設の周辺を航行する船舶の衝突による1年当たりの構造全損の確率 PT の算出及び評価に係るフロー図を以下に示す。

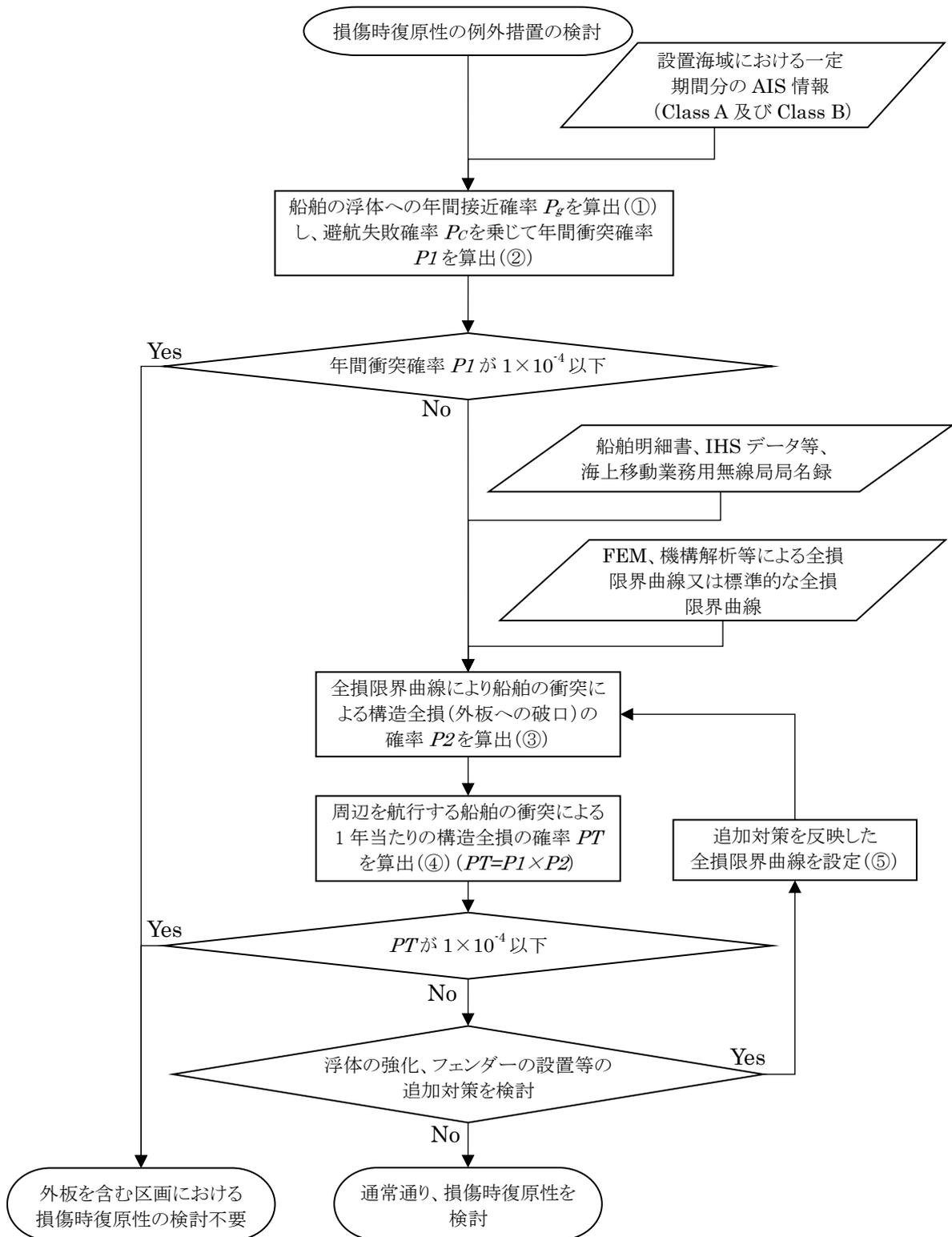


図 1 損傷時復原性の例外措置の判断・評価フロー
(船舶の衝突による構造全損の確率の評価)

3. 周辺を航行する船舶の衝突による1年当たりの構造全損の確率 PT の算出

3. 1 年間接近頻度の算出 (手順①)

船舶の浮体施設への年間接近頻度 (n_g [回/年]) は、式(1)に示すように、個船毎に算出した接近頻度 (n_{gi} [回/(年・隻)]) を浮体周辺船舶の延べ隻数分足し合わせて求める。

$$n_g = \sum_i^n n_{gi} \quad (1)$$

ここで、 n は浮体周辺船舶の延べ隻数であり、 n_{gi} は、浮体施設を設置する海域における過去1年間分のAIS情報(※3)から、式(2)により求める。

$$n_{gi} = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{(x_i-\mu_i)^2}{2\sigma^2}\right)} dx \quad (2)$$

ここで、

B : 代表船幅 [m]。Class A の AIS 搭載船舶については、当該海域を航行する船舶の型幅の平均値を AIS 情報内の MMSI (Maritime Mobile Service Identity : 海上移動業務識別コード) を用い、IHS データ・船舶明細書等のデータベースから取得する。Class B の AIS 搭載船舶についても同様に平均値を求める。この際、代表船幅の決定に当たり AIS 非搭載船舶からのデータ取得は不要とする。Class B の AIS 搭載船舶に関し、データベース等により当該海域を航行するすべての船舶が照合できない場合は、Class B に係る代表船幅を 8m と仮定してよい。

D : 浮体施設の幅 [m]

σ : 個船の進路のばらつきを正規分布で表現した際の標準偏差 [m]。アプローチ操船が行われる海域など、操船に制約がある場合を除き 700m (※4) としてよい。

x_i : 進路のばらつきを正規分布として考慮した後の個船の位置 (確率分布) [m]

μ_i : 浮体施設の中心点と個船の中心点との平均距離 [m]

なお、本項による個船の浮体への接近頻度 n_g の算出は、航海毎の進路のばらつきが正規分布に従うものとし、浮体施設との衝突に至る範囲の確率分布を個船毎に積分することによる。

個船の進路のばらつきを正規分布で表現した際の標準偏差 σ については、浮体設置海域周辺の航路分析、交通流シミュレーション等により、実際の浮体設置海域周辺の σ を算出し、管海官庁の確認を受けた場合は、これを標準値の 700m に代えて適用しても差し支えない。

浮体施設の中心点からの個船の中心点の距離については、浮体施設の中心線を通り、浮体周辺の主要航路と直交する直線(仮想ゲート※5)を設定し、仮想ゲートを通過した個船の中心点の位置と浮体中心との直線距離をもって、上記 μ_i とみなしてよい。ただし、浮体周辺において主要航路を明確に判別できない場合は、浮体中心からの最短距離を個船ごとに求め

なければならない。

一般に、浮体施設は一定規模以下の小型船舶の衝突に対して十分な強度を有している（5. を参照）ことを踏まえ、頻度の算出に当たっては、総トン数 150ton 以上（漁船については、総トン数 250ton 以上）の AIS 情報のみを用いることとする。また、設計時に利用可能な AIS 情報には、浮体施設の維持管理等に用いる通船等は含まれていないが、これを考慮する必要はないものとする。なお、通船等の接舷荷重等は、浮体式洋上風力発電施設技術基準第 2 編第 2 節 3-9. 曳航、設置、保守及び修理（DLC8.1~DLC8.4）において考慮されている。ただし、総トン数 250ton 以上の通船等を用いる場合には、その衝突による影響について確認を行い、必要に応じて対策を検討すること。

----- Note AIS の搭載義務とその情報及び分析（※3） -----

AIS は、一定の間隔で自船及び他船の位置、船速等の情報について国際 VHF を利用して送受信する装置である。我が国においては、国際航海に従事する旅客船及び総トン数 300ton 以上の船舶並びに国際航海に従事しない総トン数 500ton 以上の船舶に搭載が義務付けられているほか、搭載を義務付けられてはいないが、任意で搭載している船舶も存在する。本付録では、搭載義務のある船舶に搭載される装置を Class A、搭載義務がなく主に小型船に搭載される装置（一般的に簡易的な装置）を Class B と区分する。

AIS により送受信される情報（AIS 情報）は、ITU(International Telecommunication Union：国際電気通信連合)²により規格が定められており、内容として、Message ID、個船の ID（MMSI（Maritime Mobile Service Identity：海上移動業務識別コード）等の識別番号）、船速、位置情報、航行方向等が含まれる。AIS 情報は販売業者から入手することになるが、データフォーマット等は販売業者や販売時の契約により異なると考えられるため、本付録による検討に用いることが可能なデータとなっているかどうか、留意が必要である。本付録による検討に必要な項目は、Message ID、個船の ID（MMSI 等の識別番号）、船速、位置情報、データ受信時間である。なお、ITU によれば、Class A と Class B は Message ID を用いることで区分できる。Message ID が 1, 2, 3 であれば Class A の位置情報が記載されているデータであり、18 であれば Class B の位置情報が記載されているデータである。

AIS 情報を取得する空間的範囲は、浮体施設を中心とした 20 海里四方とし、MMSI によって個船を識別して分析を行う。また、浮体施設設置後の交通流シミュレーション等がまだ行われていない段階でも評価可能とするため、浮体施設の設置による周辺の航路の変化を加味しない安全側にマージンを持った評価として、浮体施設の設計時に利用可能な最新の 1 年間の AIS 情報を用いることができることとする。ただし、航行安全に係る検討のための委員会等における浮体施設設置後の交通流シミュレーション等の情報が存在し、当該情報の信頼性等について管海官庁の確認を受けた場合には、当該情報を用いて浮体施設の設置による周辺の航路の変化を加味してもよい。

1 年間の AIS 情報を得難い場合には、当該期間による評価が安全側の評価であることを港湾統計等を元に証明し、管海官庁の確認を受けることを前提に、1 月間以上 1 年間未満の期間の AIS 情報を用いることができることとする。

----- Note ここまで-----

----- Note 個船の進路のばらつきに関する標準偏差 σ (※4) -----

本付録における標準値としての $\sigma=700\text{m}$ は、浮体式洋上風力発電施設周辺の航行船舶データのうち、浮体の避航や元の航路への復帰行為が明確に見られ、多くのデータ数を得られる海域として、福島沖ウィンドファームの航行船舶データを解析した結果から得られたものである。

当該解析の内容について5. (備考1) に示す。なお、本解析の手順は、実際の浮体設置海域周辺の交通流シミュレーション等から σ を解析する際にも活用可能である。

----- Note ここまで-----

----- Note 仮想ゲートについて (※5) -----

衝突確率の算出には浮体と浮体周辺の航行船舶の距離が必要であるが、この距離は浮体と各船舶の最短距離となる。ただし、浮体周辺において主要な航路が明確に判別できる場合には、簡易的な手法として仮想ゲートを設置して浮体と各船舶の距離を求めてもよい。その場合、浮体と各船舶の距離は仮想ゲートを船舶が通過した際の距離とみなすことができる。

例えば、図 N-1 を見ると浮体 (図中心部の赤丸) の北側海域に東西に航行する船舶が多いこと、南側海域を航行する船舶は少なくその多くは北東-南西方向であること、南北方向に航行する船舶は少ないことが分かる。したがって、本データを評価する場合においては南北方向に解析のための仮想ゲート (紫線) を設置しても差し支えないと考えられる。

仮に南北方向の航路と東西方向の航路の両方が見られる場合、仮想ゲートは東西方向と南北方向に2本設置されることになるが、同一船舶が重複しないよう留意する必要がある。その際、個々の船舶はいずれかの仮想ゲート上の浮体との距離について、短い方の距離を採用して衝突確率を求めなければならない。

仮想ゲートは緯線あるいは経線に沿って東西あるいは南北に設置すると、仮想ゲートを通過した船舶と浮体との距離を容易に計算することができるが、斜め方向に主要な航路が確認される場合、これに直交するように設置しなければならない。また、輻輳海域等において明確な航路の判別が困難な場合、浮体と個々の船舶の航跡から最短距離を求めなければならない。

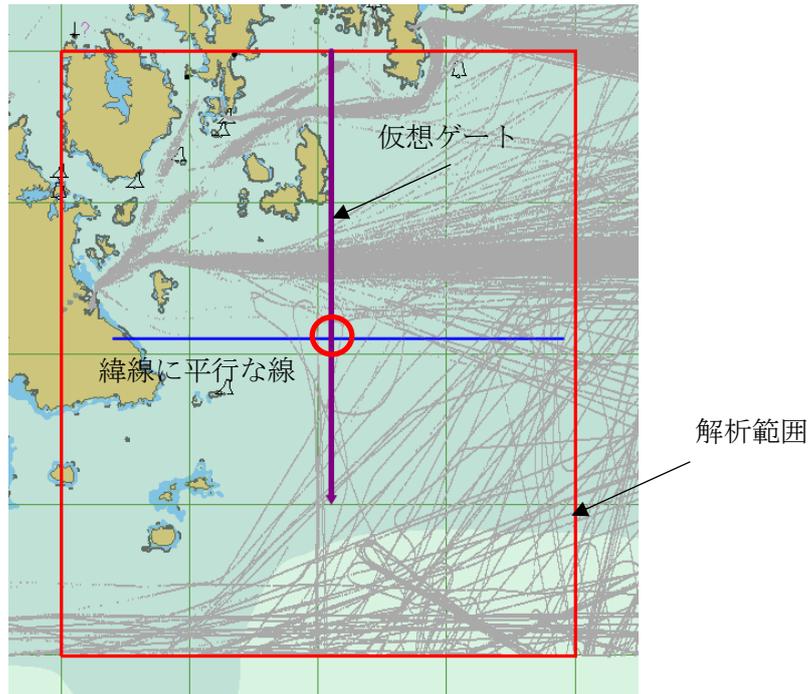


図 N-1 解析範囲及び仮想ゲート

---- Note ここまで----

3. 2 年間衝突確率 $P1$ の算出 (手順②)

3. 1 で算出した年間接近確率 (P_g) に、浮体施設に接近した船舶が避航に失敗する確率 (P_C) を乗じて、年間衝突確率 $P1$ を算出する。このとき、浮体施設に接近する船舶に関して、Class A を搭載した船舶の年間接近確率 P_{gA} と搭載していない船舶の年間接近確率 $P_{g\bar{A}}$ をそれぞれ区分すると次式のように表される (P_C を乗じたものをそれぞれ $P1_A$ 、 $P1_{\bar{A}}$ と定義)。

$$\begin{aligned}
 P1 &= (P_{gA} + P_{g\bar{A}}) \cdot P_C \\
 &[= P1_A + P1_{\bar{A}}]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$P_{g\bar{A}}$ については、Class A を搭載していない船舶のうち Class B を任意で搭載している船舶の数 (Class B の搭載率) に基づき推定する。Class B の搭載率は日本周辺の AIS 情報に係る統計データ^[3]の分析結果から 25% とし、 $P_{g\bar{A}}$ を次式から求めることとする。

$$P_{gA} = n_{g\bar{A}} = 4.0 \cdot n_{gB}
 \tag{4}$$

ここで、Class B を任意で搭載している船舶数に関する年間接近頻度 n_{gB} は、Class A を搭載した船舶と同様の手法により AIS 情報の分析を行うことで求める。

避航に失敗する確率 P_C は、海上交通工学 (藤井弥平他) ^[4] に基づき、 $P_C = 10^{-3.7}$ とする。

ここで、この値は、明石海峡での底触・座礁、備讃瀬戸小瀬居島での乗揚げ及び鳴門海峡中瀬での乗揚げ並びに明石海峡での試掘やぐらと船舶との衝突の事例に基づくものであり、浮体式洋上風力施設のように、視認性が高く、かつ、海図への記載等の措置がとられている浮体施設の避航に失敗する確率よりも安全側の評価となっているものと考えられる。

図 1 のフローに示されているように、年間衝突確率 $P1$ が 1×10^{-4} 以下である場合には、3. 3以降の検討を省略することが可能である。

3. 3 船舶の衝突による構造全損（復原性の喪失）の確率 $P2$ の算出（手順③、④）

浮体施設への船舶の衝突による構造全損（復原性の喪失）の確率 $P2$ は、3. 2で確率を評価した浮体施設に衝突する船舶のうち当該衝突により外板に破口を生じるものを、当該船舶の大きさ（排水量 Δ [ton]）（※6）及び船速 V [knot] を用いて抽出して算出する。

$P2$ を求める簡便な方法としては、AIS 情報等から船舶の速力及び排水量を把握した上で、図 2 に示す全損限界曲線（※7）を用いる。すなわち、

$$P2 = \frac{n_d}{n} \quad (5)$$

ここで、 n は先にも示した浮体周辺船舶の延べ隻数であり、 n_d は AIS 情報等から得られた全損限界曲線の上方（危険側、高速・大型船）にある船舶隻数である。

船速は、個船の浮体に最も接近した際の速度を AIS 情報によって特定して求める。

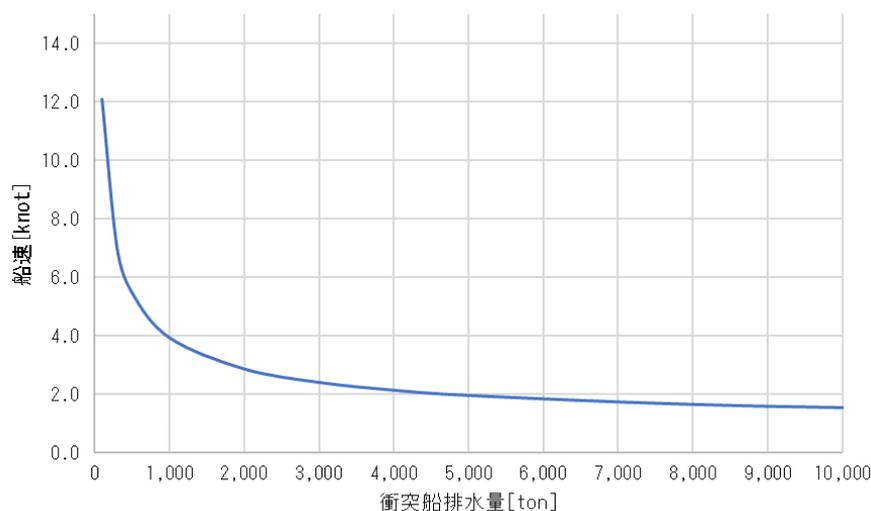


図 2 全損限界曲線の例

図 2 に示す全損限界曲線を近似式で定義すると以下である。

$$V = 80.0 \cdot \Delta^{-0.44} \quad (6)$$

このとき、 $\Delta > 10,000\text{ton}$ の場合は、 $\Delta = 10,000$ を上限値として近似式を用いる。

なお、浮体施設は、損傷時復原性を確保するための水密区画が配置されていないものと想定しており、船舶の衝突により水線面付近の外板に破口が生じることで、必ず、復原性の喪失、即ち構造全損に至るものと考えている。

図 2 の全損限界曲線は、最低限の強度とした代表的モデルに基づき求められたものであり、標準的に利用できることとする。

ただし、実際の浮体施設の構造強度を反映したモデルに基づく全損限界曲線を水槽模型試験や構造解析により導出した全損限界曲線を用いることもできる。実際の浮体施設の設計を踏まえた全損曲線の導出方法については、6. (備考2) を参照すること。

図 1 のフローに示されているように 1 年当たりの構造全損の確率 PT が 1×10^{-4} 以下である場合及び浮体施設の強化やフェンダーの設置等の追加対策を検討しない場合には、3. 4 の検討は不要である。

----- Note 船舶の排水量データの入手及び換算について (※6) -----

船舶の排水量 Δ については、日本海運集会所が発行する船舶明細書や IHS Markit 社が提供する船舶データ (IHS データ) 等を活用する。この際、AIS 情報に含まれる MMSI 又は IMO 番号を用いて個船の紐付けを行うこととなるが、個々の船舶に恒久的な番号として付与される IMO 番号 (IMO Ship Identification Number) と異なり、MMSI は、売船等が行われた場合には、同一の船舶に異なる識別コードが付与されることがある点に留意が必要である。一般的な船舶諸元データベースには、排水量の記載がない場合もあるが、構造全損の確率を計算するためには、船舶の排水量が必要であるため、排水量の情報が得られない場合には、GT (総トン数) または DWT (載貨重量トン数) を元に以下の式 (N-2) に従い排水量に換算することにより求めてもよい^[5]。

貨物船 :	$\Delta = 2.920 \cdot DWT^{0.924}$	
コンテナ船 :	$\Delta = 1.634 \cdot DWT^{0.986}$	
タンカー :	$\Delta = 1.688 \cdot DWT^{0.976}$	
ロールオン・ロールオフ船 :	$\Delta = 8.728 \cdot GT^{0.790}$	
自動車運搬船 :	$\Delta = 1.946 \cdot GT^{0.898}$	
LPG 船 :	$\Delta = 4.268 \cdot GT^{0.914}$	(N-2)
LNG 船 :	$\Delta = 1.601 \cdot GT^{0.970}$	
旅客船 :	$\Delta = 2.730 \cdot GT^{0.871}$	
中短距離フェリー :	$\Delta = 4.980 \cdot GT^{0.855}$	
長距離フェリー :	$\Delta = 15.409 \cdot GT^{0.735}$	

----- Note ここまで-----

----- Note 全損限界曲線について (※7) -----

全損限界曲線は、FEM 解析により求められた浮体に破口が生じる際の、衝突船の運動エネルギーを図示したものである。これは浮体に破口の生じるエネルギーを基に、排水量を変えて作成されたもので、全損限界曲線の上方にある船舶は危険側（高速・大型）、下方にある船舶は安全側（低速・小型）であることを示す。なお、浮体に破口の生じるエネルギーは衝突船の船種や船速、排水量等によらず一定であると仮定している。

図 2 はコラム内に一般的なフロアを有さず、リングガーダー及びロンジフレームのみで構成された排水量約 10,000ton の浮体コラムに対する、排水量約 10,000ton のバラ積み船による衝突解析から得られた全損限界曲線である。全損限界曲線は、曲線より下側（船速あるいは排水量が小）にある船舶による衝突に対し、浮体に破口を生じないことを意味する。

----- Note ここまで-----

3. 4 追加対策を反映した全損限界曲線の設定（手順⑤）

浮体の強化やフェンダーの設置等の追加対策を検討する場合にあつては、当該追加対策の効果を反映した全損限界曲線を 6. により導出し、3. 3 と同様の評価を行う。

フェンダーにより 2MJ のエネルギーを吸収可能とした場合の例を図 3 に示す。

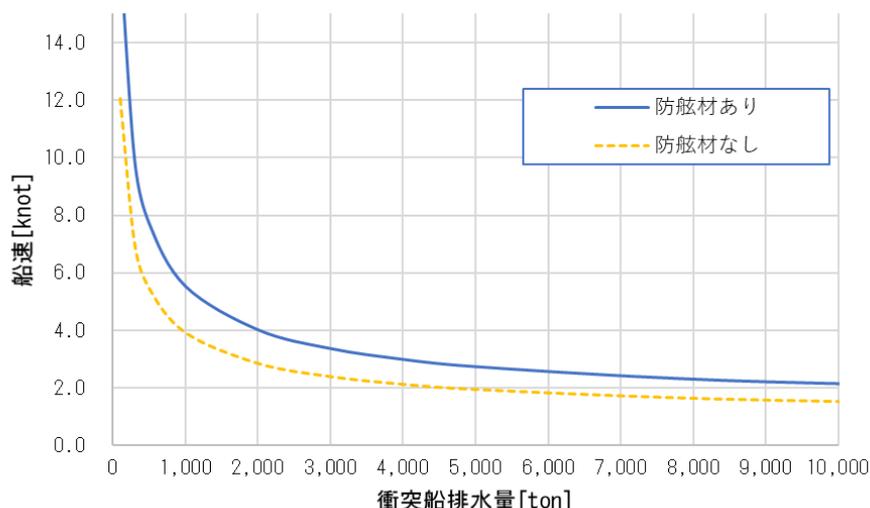


図 3 全損限界曲線（フェンダーによる衝撃吸収の効果を反映）

4. 衝突確率算出方法の評価例及び解説（長崎県五島市沖の例）

4. 1 評価対象

ここでは、3. に示す方法に基づき、長崎沖の表 1 及び図 4 に示す位置に新たに浮体を設置する事例について、船舶の衝突確率の具体的な算出事例を示す。

表 1 仮想の浮体設置位置

	緯度	経度
座標	32°40.5'N	129°0.5'E

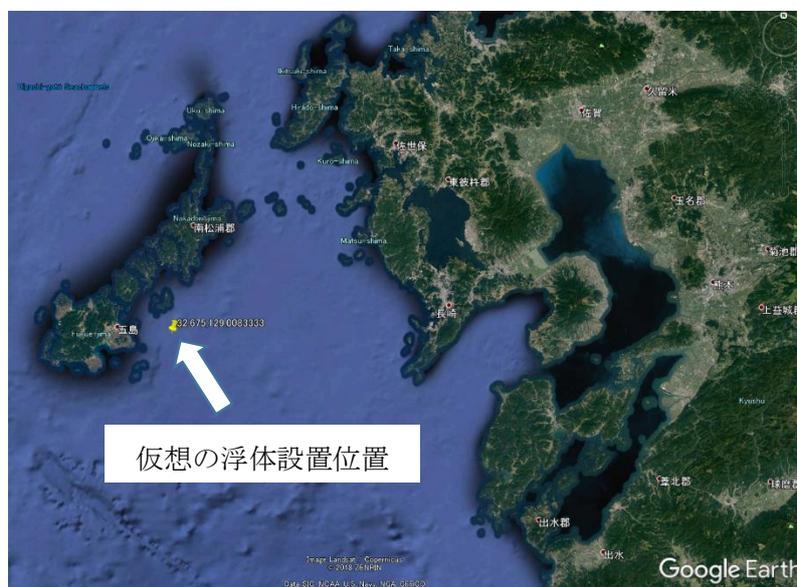


図 4 仮想浮体の設置位置

4. 2 解析条件及びデータ

長崎沖における解析条件を表 2 に、浮体周辺の航跡図を図 5 に示す。AIS 情報には、搭載義務のある Class A を搭載した船舶情報と搭載義務のない Class B を搭載した船舶情報があり、Class A についてはほぼ 1 年間分のデータを用い、Class B については 2 か月分のデータを使用した。

表 2 長崎沖における解析条件

		緯度	経度
海域範囲 (図 5 内の赤枠)	左下座標	32°30.0'N	128°50.0'E
	右上座標	32°50.0'N	129°10.0'E
浮体設置位置		32°40.5'N	129° 0.5'E
仮想ゲート (図 5 内の紫線)	始点 (北)	32°50.0'N	129° 0.5'E
	終点 (南)	32°35.0'N	129° 0.5'E
	長さ	27,722 m	
AIS データ (AIS Class A 搭載船)		2018 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 18 日 (352 日間)	
AIS データ (AIS Class B 搭載船)		2019 年 5 月 1 日から 2019 年 6 月 30 日 (61 日間)	

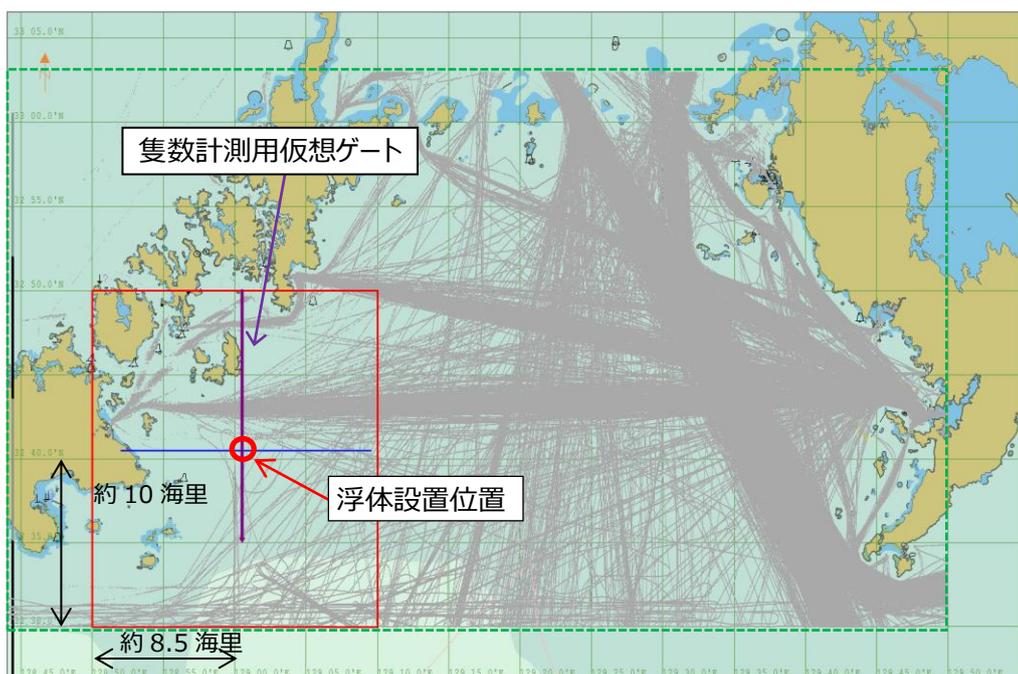


図 5 長崎沖の解析対象と航跡図（2018年3月1日～3月31日）

4. 3 使用した AIS 情報、船舶データベースの詳細について

AIS 情報と船舶データベース（船舶明細書及び IHS データ）に収録されている情報について、表 3 及び表 4 に示す。衝突確率 $P1$ の算出には AIS 動的情報を使用し、構造全損確率 $P2$ の算出には船舶データベースを使用する。それぞれの情報源に共通して収録されているものが MMSI であり、AIS 情報と船舶データベースとの関連付けに用いる。なお、表 4 に示す情報については未収録のデータがありうることに注意する必要がある。

表 3 情報源に収録される船舶の概要

情報源	収録船舶
AIS 動的情報	① 搭載義務を有する船舶
AIS 静的情報	<ul style="list-style-type: none"> • 国際航海に従事する総トン数 300ton 以上の全ての船舶 • 国際航海に従事する全ての旅客船 • 国際航海に従事しない総トン数 500ton 以上の全ての船舶 ② 搭載義務を有しないが AIS を搭載している船舶
船舶明細書	<ul style="list-style-type: none"> • 総トン数 20ton 以上総トン数 100ton 未満の日本籍船舶 • 総トン数 100ton 以上総トン数 500ton 未満の日本籍 1・2 種漁船
IHS データ	<ul style="list-style-type: none"> • 就航中及び建造中の総トン数 100ton 以上の商船 • 就航中及び建造中の総トン数 100ton 以上の軍用船

表 4 主なデータ項目の収録状況

	項目	AIS		船舶 明細書	IHS データ	備考
		動的情報	静的情報			
動的 情報	時刻	○	○	—	—	
	緯度経度情報	○	—	—	—	
	針路	○	—	—	—	
	船首方位	○	—	—	—	
	船速	○	—	—	—	
静的 情報	船名	—	○	○	○	
	船種	—	○	○	○	コード化されて収録
	総トン数	—	—	○	○	
	載貨重量	—	—	○	○	
	全長	—	○	○	○	
	垂線間長	—	—	○	○	
	型幅	—	○	○	○	
	型深	—	—	○	○	
	満載排水量	—	—	○	○	
	喫水	—	○	○	○	AIS 静的情報は生値（情報登録時点）、船舶明細書と IHS データは満載喫水
	航海速力	—	—	○	○	
	MMSI 番号	○	○	○	○	各情報源を紐付ける項目として使用可能
	IMO 番号	—	○	—	○	各情報源を紐付ける項目として使用可能

4. 4 解析の詳細

長崎沖の AIS Class A 搭載船の通航状況は、以下の通りである。仮想ゲートを通じた船舶数は 4,386 隻であった。

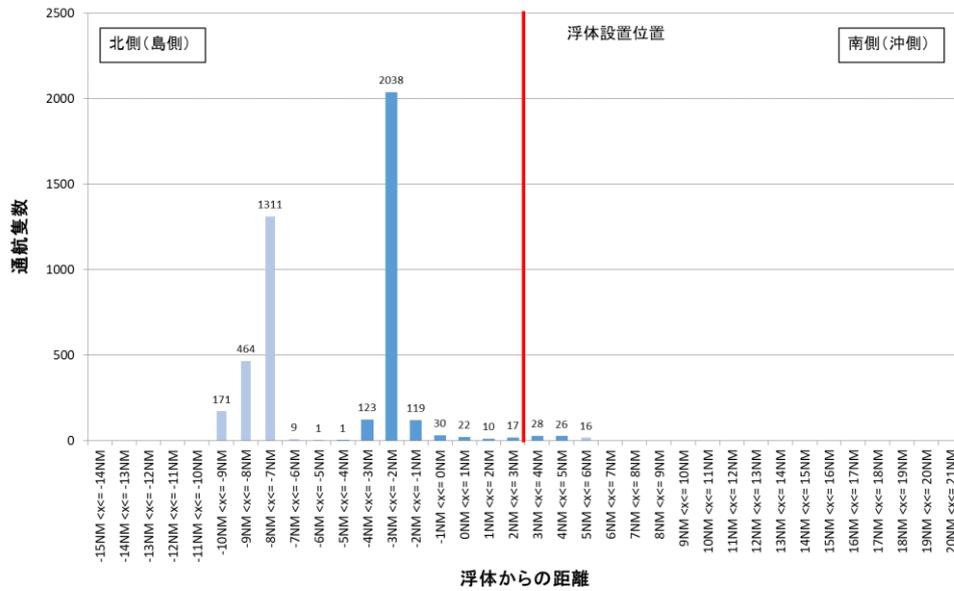


図 6 仮想ゲート通過時の通航位置分布

長崎沖を航行する i 番目の個船の通航位置が浮体に衝突する領域（船幅 B + 浮体幅 D ）（浮体の両側ともに）となる確率を求める。

例えば、1 隻の AIS 搭載船舶（ $B = 14\text{m}$ ）について、浮体からの距離 μ が $1,852\text{m}$ である場合を考える。この船舶が浮体（ $D = 12\text{m}$ ）に衝突する領域、すなわち浮体中心の基準点から 26m 以内に接近する確率 P_{gAi} は、 f_{Ai} を進路のばらつきとすると次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 P_{gAi} &= n_{gAi} = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} f_{Ai}(x) dx \\
 &= \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^2}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} dx \\
 &= \int_{-0.5(14+12)}^{0.5(14+12)} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 700^2}} e^{\left(-\frac{(x-1852)^2}{2 \cdot 700^2}\right)} dx \\
 &\approx 3.5 \times 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{7}$$

この船舶が浮体に衝突する確率 $P1'_{Ai}$ は、式(8)のように避航失敗確率 P_C をかけて求められる。これに AIS データの取得期間である 352 日を考慮し、年間の衝突確率は式(9)となる。

$$\begin{aligned}
 P1'_{Ai} &= P_{gAi} \cdot P_C \\
 &= 3.5 \times 10^{-4} \cdot 10^{-3.7} \\
 &\approx 6.9 \times 10^{-8}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$P1_{Ai} = P1'_{Ai} \times \frac{365}{352} \quad (9)$$

$$\approx 7.1 \times 10^{-8}$$

次に、仮想ゲートを通過した全船舶数 4,386 隻について、次式のように上記の確率を求め総和すると、解析期間における船舶と浮体との衝突確率 $P1_A$ が求められる。

$$P1_A = \sum_{i=1}^{4386} P1_{Ai} \quad (10)$$

$$\approx 7.5 \times 10^{-5}$$

同様に Class A の AIS 搭載船舶以外の船の衝突確率 $P1_{\bar{A}}$ の計算を行う。このとき、浮体施設への衝突影響は小さいと判断し、総トン数 150ton 以下の内航船、総トン数 250ton 以下の漁船は除外した。また AIS 情報の解析期間が 2 か月分であるため、1 年間の衝突確率に換算している。

$$P1_{\bar{A}} \approx 1.8 \times 10^{-6} \quad (11)$$

以上より、年間衝突確率 $P1$ は式(12)のように求められた。

$$P1 = P1_A + P1_{\bar{A}} \quad (12)$$

$$\approx 7.7 \times 10^{-5}$$

$P1$ が 1×10^{-4} に比べて十分小さいため、手順③以降の検討を省略し、損傷時復原性に係る浮体式洋上風力発電施設技術基準の例外措置を適用できると判断できた。

参考文献

- [1] ISO 19904-1:2006, Petroleum and Natural Gas Industries – Floating Offshore Structures – Part 1- Monohulls, semi-submersibles and spars
- [2] Recommendation ITU-R M.1371-5(02/2014) Technical characteristics for an automatic identification system using time-division multiple access in the VHF maritime mobile band, International Telecommunication Union, 2014
- [3] 日本内航海運組合総連合会ウェブページ、
http://www.naiko-kaiun.or.jp/about/about_naikou.php
- [4] 藤井弥平他、海上交通工学、海文堂、1981
- [5] 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)、社団法人日本港湾協会、2018

5. 個船の進路のばらつきに関する標準偏差 σ の導出方法（備考1）

手順：

- i. 対象海域（ここでは福島沖）を航行する船舶の浮体との距離を求める。
- ii. 浮体からの距離 C を設定し、浮体陸側において距離 C 以遠を通航する船舶群を A 群、浮体回りの距離 C 未満の範囲を通過する船舶を B 群とする。
- iii. 一意の標準偏差 σ [m] を設定したとき、個船の通航位置が浮体から上記の距離 C 未満の範囲内となる確率を総和する。これは A 群の船舶群において何らかの原因により航路を外れて浮体からの距離が C 未満となる際の船舶数である。この距離 C については、表 備 2 を参照されたい。
- iv. ニュートン法等により σ を変化させ、上記で求めた数値と B 群の隻数が等価となる σ を求める。

具体的な収集データに基づき標準偏差 σ の求め方を示す。

季節変動や交通量等の短期的な要素を極力除き、長期の平均的な通航状況を観察するため、福島沖の場合では直近の約1年間のAIS情報の分析を行った。浮体周辺の通航筋が把握できる範囲として、当該海域を南北方向に通航する船舶の航路筋の変針点を出入り口とする範囲を設定した。図 備 1 に解析範囲と航跡図を示す。なお、図中の赤○は浮体の設置場所である。

さらに浮体に向かって通航する船舶数を観察するため、主要な航路筋を横切る仮想ゲートとして、浮体（ふくしま絆）が設置された緯度を持つ緯線に平行な線（図 備 1 中の紫線）を設定し、この仮想ゲートを通過する隻数と浮体からの距離を計測した。なお、浮体の東西に航跡が認められるが、主たる航路である浮体西側を航行した船舶を対象に標準偏差 σ を導出した。

表 備 1 福島沖における解析条件

		緯度	経度
海域範囲	左下座標	36°00.0'N	140°30.0'E
	右上座標	38°00.0'N	142°00.0'E
ふくしま絆の設置位置		37°18.65'N	141°14.4'E
仮想ゲート	始点（北）	37°18.65'N	141° 1.2'E
	終点（南）	37°18.65'N	141° 0.0'E
	長さ	86,875 m	
AIS 情報		2018年1月1日から2018年12月18日（352日間）	

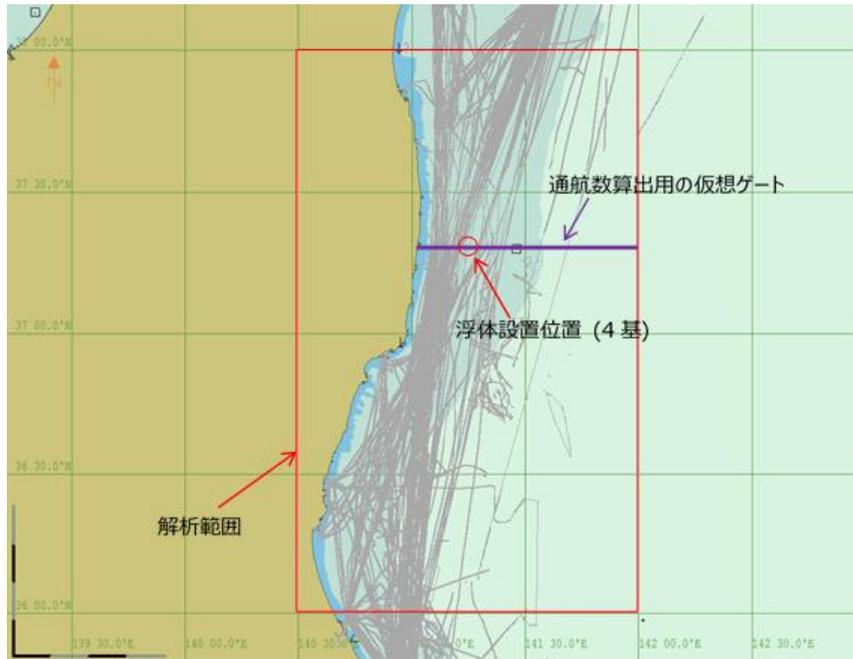


図 備 1 福島沖の対象解析範囲と航跡、及び仮想ゲート

図 備 2 に仮想ゲート通過時の通航位置分布を示す。

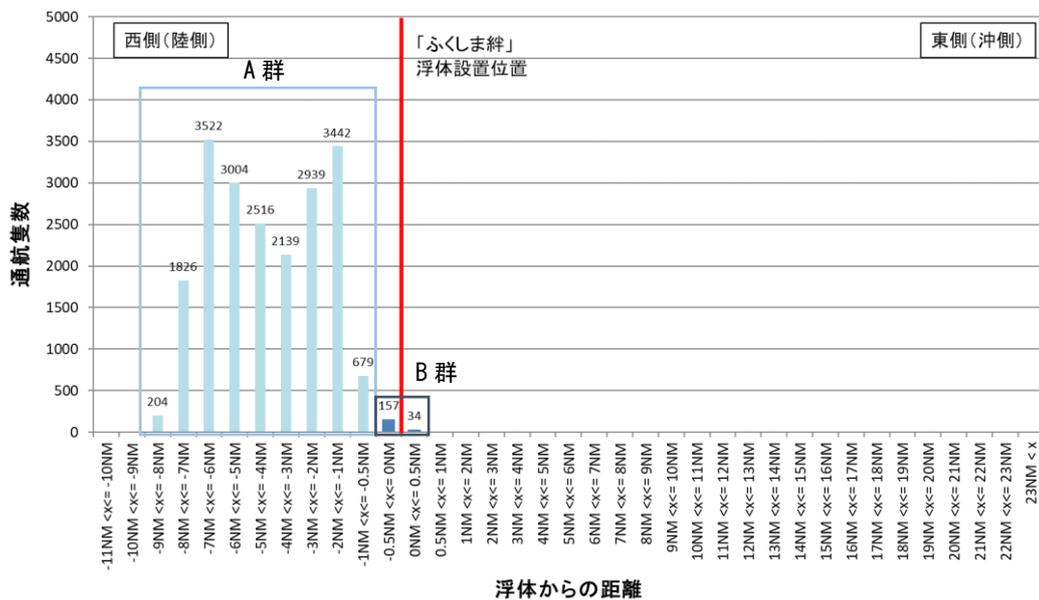


図 備 2 福島沖の仮想ゲート通過時の通航位置分布

解析結果より、福島沖の通航状況は以下の通りである（手順 ii）。なお、ここでは浮体からの一定距離 C が 0.5 海里である場合の数値を示す。

- ・ A 群（浮体からの陸側の距離 C 以遠の船舶群）：20,271 隻

・ B 群（浮体からの距離 C 未満の船舶群（通船除く））：191 隻

図 備 3 に標準偏差 σ と A 群の船舶群において浮体からの距離 C が 0.5 海里未満となる
ときの船舶数の関係を示す（手順 iii）。

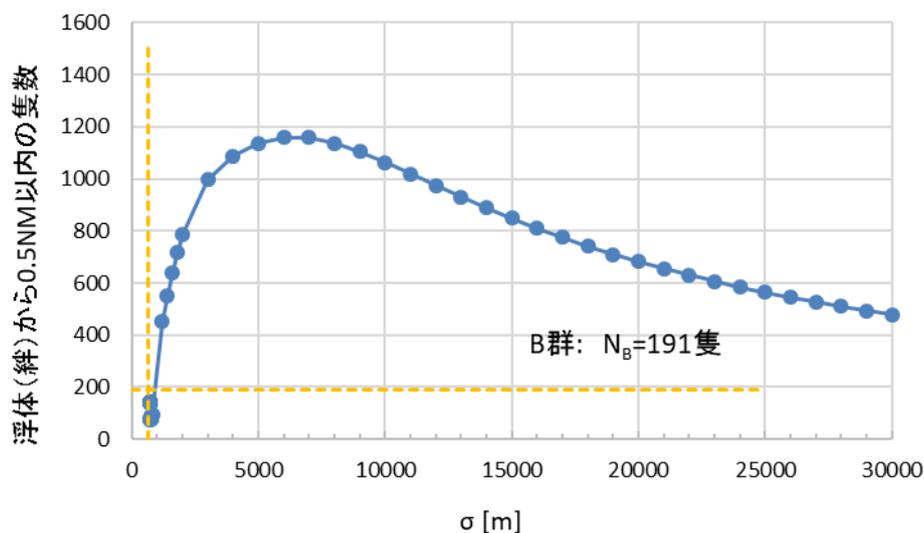


図 備 3 浮体からの距離が 0.5 海里未満となる時の船舶数と σ の関係

B 群の隻数と等価となる時の σ を求める（手順 iv）と、 $\sigma=670\text{m}$ となった。同様に、距離 C を変えた感度解析を実施し、表 備 2 に示す計算結果に大きな差がないことを確認したため、他海域における σ も推奨値として平均的値 $\sigma=700\text{m}$ を設定した。

表 備 2 福島沖浮体から求められた個船進路のばらつきに関する標準偏差 σ

浮体からの距離 C [NM]	距離 C 内の 通行隻数	σ [m]
0.1	27	747
0.2	51	708
0.3	93	725
0.4	140	710
0.5	191	670

6. 全損限界曲線の導出方法（備考2）

6. 1 全損限界曲線の概念

船舶との衝突においては、衝突時の船舶（以下、衝突船と記す）の運動エネルギーが入力となり、また、AIS 情報等により事前に入手可能なデータは、衝突船の船速及び排水量であるので、衝突影響の判定を代表的な衝突船の船速及び排水量を用いて実施する簡便な方法を示す。

図 備 4 に全損限界曲線の例を示す。曲線は浮体に破口の生じるエネルギーを基に、排水量を変えて作成されたもので、コラム内に一般的なフロアを有さず、リングガーダー及びロンジフレームのみで構成された排水量約 10,000ton の浮体コラムに対する、排水量約 10,000ton のバラ積み船による衝突解析から得られた全損限界曲線である。全損限界曲線は、曲線より下側（船速あるいは排水量が小）にある船舶による衝突に対し、浮体に破口を生じないことを意味している。

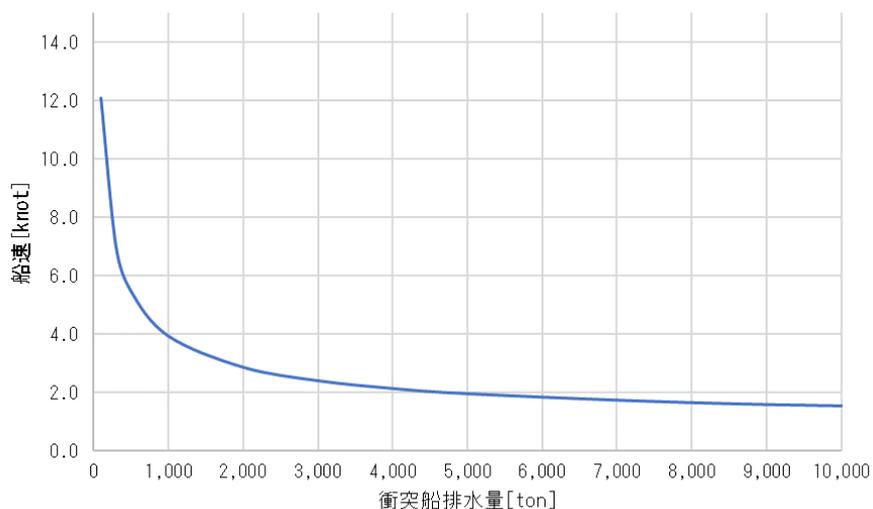


図 備 4 全損限界曲線

全損限界曲線は、FEM 解析により求められた浮体に破口が生じる際の、衝突船の運動エネルギー（式（備-1））を図示したものである。

$$E_0 = \frac{1}{2} M_B V_B^2 \quad (\text{備-1})$$

ここで、 M_B ：衝突船の質量（付加質量を含む）、 V_B ：衝突船の衝突直前の衝突方向の速度である。

6. 2 に示す FEM 解析により、浮体に破口が生じる際の衝突船と浮体の両方で吸収する変形エネルギー E_{defo} が求められる。衝突前後の運動量保存則及び運動エネルギー保存則はそれぞれ式（備-2）及び式（備-3）のように表すことができる。

$$M_B V_B = (M_A + M_B) V' \quad (\text{備-2})$$

$$\frac{1}{2} M_A V_A^2 + \frac{1}{2} M_B V_B^2 = \frac{1}{2} M_A V'^2 + \frac{1}{2} M_B V'^2 + E_S \quad (\text{備-3})$$

ここで、 M_A ：浮体の質量（付加質量を含む）、 V_A ：浮体の衝突直前の衝突方向の速度（=0）、 V_B ：衝突船の衝突直前の衝突方向の速度、 V' ：衝突直後に衝突船・浮体が一体となって剛体運動するときの速度、 E_S ：衝突船と浮体の両方で、船体運動以外で吸収すべきエネルギー（歪エネルギー＋摩擦エネルギー等）である。

式（備-2）より、

$$V' = \frac{M_B V_B}{M_A + M_B} \quad (\text{備-4})$$

が得られ、式（備-4）を式（備-3）に代入すると

$$E_S = \frac{1}{2} V_B^2 \left(\frac{M_A M_B}{M_A + M_B} \right) \quad (\text{備-5})$$

を得る。 E_S は、運動量保存則及び運動エネルギー保存則から導き出される値であり、衝突船と浮体の排水量及び衝突速度が決まると一意に定まる物理量である^[備-1]。

摩擦等の影響が小さいと仮定すると式（備-5）のエネルギー E_S は浮体と衝突船の変形で吸収するエネルギーとみなすことができ、式（備-6）のように表される。

$$E_S = \frac{1}{2} V_B^2 \left(\frac{M_A M_B}{M_A + M_B} \right) = E_{defo} \quad (\text{備-6})$$

式（備-6）及び FEM 解析より求められた E_{defo} より、衝突時の船速は式（備-7）のように求めることができる。 E_{defo} は衝突船の船種や船速、排水量等に依らず一定と仮定し、この船速と衝突船の排水量（付加質量を含む）により求められた運動エネルギーを一定とし船速・排水量を変化させたものが全損限界曲線である。なお、衝突船と浮体の両方で吸収する変形エネルギー E_{defo} における衝突船の変形エネルギーと浮体の変形エネルギーの比率は、6. 2に示す FEM 解析により、船種、排水量、船速によらず3:7とした。

$$V_B = \sqrt{2 E_{defo} \left(\frac{M_A M_B}{M_A + M_B} \right)} \quad (\text{備-7})$$

6. 2 FEM 解析による衝突エネルギーの導出

6. 2. 1 はじめに

6. 1 に示した全損限界曲線の導出には、FEM 解析による衝突エネルギーの導出が必要である。想定浮体と想定船舶の衝突においてどの程度の速度、すなわち運動エネルギーで破口が生じるのか明らかにすることで、当該排水量及び船速以外の条件においても破口の生じる運動エネルギー（全損限界と定義）を求めることができる。ここでは、FEM 解析による衝突エネルギー導出のための標準的な手法について試解析例と併せ紹介する。

6. 2. 2 概要

衝突解析においては、汎用動的非線形構造解析ソフトを用いることが一般的である。通常、衝突影響を精度よく考慮する必要がある場合は衝突速度、浮体外板の板厚、係留モデルの有無、係留モデルとして用いたばね要素のばね定数を変化させたシリーズ解析を行い、浮体破口発生時の衝突船速度（限界衝突速度）を計算する。一方、実際の船舶と浮体の衝突においては、船の寸法や排水量、船種、船速、衝突角度、衝突個所等は多様に分布する。これらの条件を網羅的に考慮して衝突解析を実施することは、計算コスト等の観点から現実的には困難であると考えられる。そこで、解析対象の船舶は浮体設置海域を航行する主要な船舶として解析モデルを作成し、衝突も正面衝突として限定して全損限界曲線を作成して差し支えない。

衝突船が風車タワーの設置された浮体コラムに正面から衝突するシナリオを図 備 5 に示す。

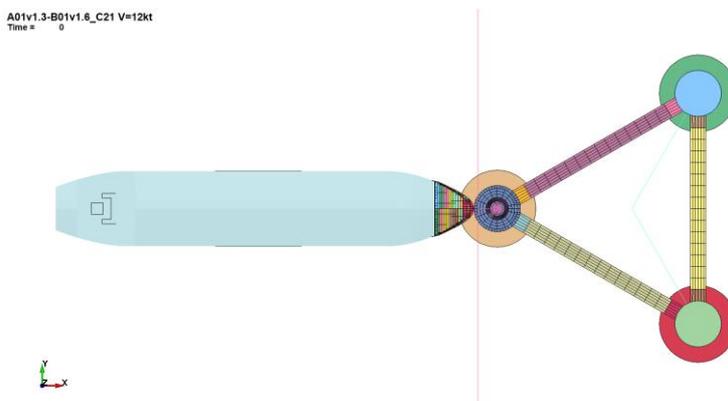


図 備 5 衝突シナリオ（上面図）

6. 2. 3 解析手法

汎用動的非線形構造解析ソフト（LS-DYNA^[備-2]、米国 LSTC 社製）を用いた衝突船と浮体の衝突解析手法を示す。

衝突船 FEM モデルの例を図 備 6 及び図 備 7 に示す。衝突個所（船首部）は弾塑性体要素で作成しなければならないが、Collision bulkhead より後方（図 備 6 青色部分）は、剛体要素で作成して差し支えない。

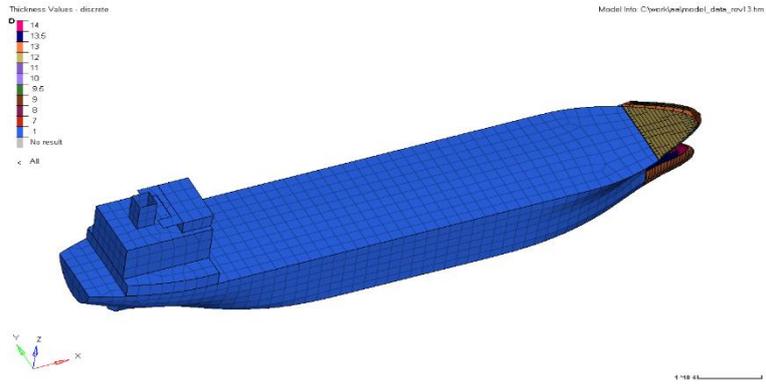


図 備 6 衝突船 FEM モデル (斜め視野図)



図 備 7 衝突船 FEM モデル (バルバスバウ)

また、解析には図 備 8 に示すような衝突船 FEM モデルの重量分布が必要となる。

DATA-14 LIGHT WEIGHT DISTRIBUTION

I T E M	WEIGHT (t)	MID. G (m)	LOCATE FROM A. P.		WEIGHT DIST. (t/m)	
			AFT (m)	FORE (m)	AFT	FORE
MACHINERY	140	38.100	4.800	18.800	10.000	10.000
ACCOMMODATION	228	39.822	1.800	16.700	10.201	20.403
PROPELLER & RUDDER	22	48.550	-2.100	4.800	3.188	3.188
DECK CRANE	54	-6.000	53.100	58.700	9.643	9.643
HULL-1 (AFT PART)	523	36.509	-3.870	27.200	11.222	22.444
HULL-2 (MID PART)	1241	-4.950	27.200	82.500	22.441	22.441
HULL-3 (FORE PART)	200	-37.889	82.500	94.400	22.409	11.204
HULL-4 (FORE PART)	92	-48.625	94.400	104.300	13.939	4.646
LIGHT WEIGHT	2500	t				
MID. G.	6.423	m				

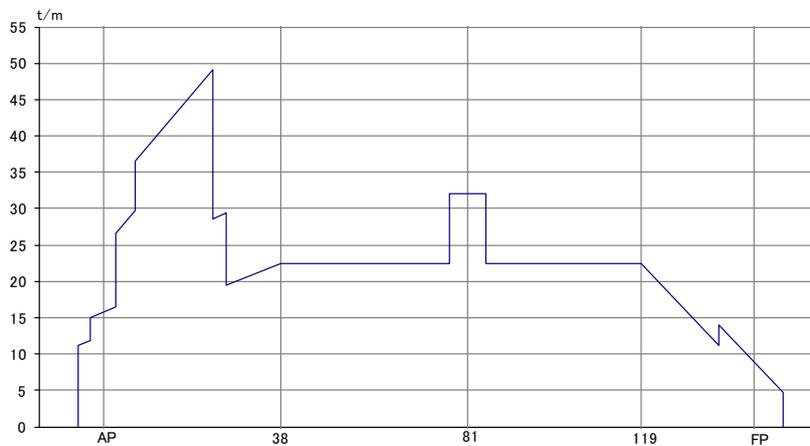


図 備 8 重量分布 (衝突船)

係留系による衝突への影響は、一般的なカテナリー係留の場合、別途実施した水槽試験結果からは微小であるといえる。しかし、トート係留や TLP のように緊張状態にある係留系の場合、より影響が大きくなる。衝突解析においても係留のモデル化は重要となるが、ここでは、カテナリー係留をモデル化する方法として、係留計算から求められた係留系の変位と張力の関係を線形ばねに置換する例を示す。図 備 9 に係留モデルの設置位置を示す。

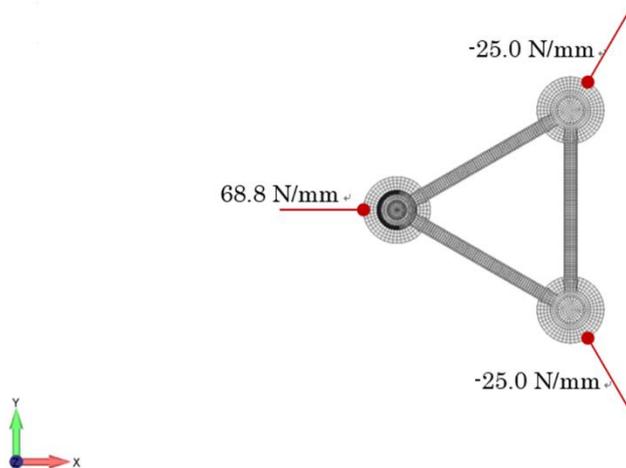


図 備 9 係留モデル

浮体が衝突後に周囲の流体より受ける力をモデル化することは、計算精度の向上に大きな意味を持つが、有限要素解析ソフトウェアにおいては詳細なモデル化が困難な場合もある。例えば、衝突時の付加水質量の影響を、別途ポテンシャル理論等に基づく数値シミュレーションソフトウェアを用いて計算された、水平方向 (X-Y 平面内) の運動に対する周波数無限大時の付加質量をモデル全体に分散させた集中質量要素として与えることで考慮できる。また、衝突船の付加質量は、Moulas (2017) により示された方針として、全体重量の 10% としてよい^[備-3]。

6. 2. 4 解析事例

具体的な解析事例を示す。

衝突船 FEM モデルの主要目を表 備 3 に示す。当該船舶は NK 船級の規則に沿って作成されている。

衝突船の船首部に使用した軟鋼と、Collision bulkhead より後方に使用した剛体部分の材料物性値を表 備 4 及び表 備 5 に示す。LS-DYNA の材料構成則には、以下の材料モデルを使用した。なお、両表の物性値は同一であるが、計算の実行に剛体部分にも物性値の入力が必要であり、表 備 4 の物性値を適用したためである。

軟鋼 : *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (No. 24)

剛体 : *MAT_RIGID (No. 20)

表 備 3 主要目 (衝突船)

船種	バラ積み船
垂線間長	99.80 m
船幅	19.60 m
型深さ	13.20 m
喫水	7.0 m
軽荷重量	2,500 ton
満載排水量	10,000 ton
船速	10.0 knot

表 備 4 軟鋼の物性値 (衝突船)

ヤング率	206,000 MPa
質量密度	$7.85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ポアソン比	0.3
降伏応力	235 MPa
最大耐力	465 MPa
破断歪値	0.12
歪速度パラメータ C	40
歪速度パラメータ P	5

表 備 5 剛体部分の物性値 (衝突船)

ヤング率	206,000 MPa
質量密度	$7.85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ポアソン比	0.3

浮体形式は3本コラムセミサブ型とし、浮体主要目を表 備 6 に示す。浮体に搭載される風車は、NREL (米国再生可能エネルギー研究所) の 5MW 風車とした。浮体は 100m 程度の水深に係留されているとする。通常コラム内には水密区画等を考慮してデッキが配置されるが、安全側の対応として衝突時に浮体への影響が大きいと想定されるデッキ無しの状態を本モデルでは採用した。

表 備 6 主要目 (浮体)

乾舷	15 m
喫水	20 m
型深さ	35 m
コラム本数	3
コラム中心間距離	60 m
コラム高さ	30 m
コラム直径	12 m
フーティング高さ	5 m
フーティング直径	20 m
ローワーハル長さ	40 m
ローワーハル幅	4 m
ローワーハル高さ	5 m
アッパーハル長さ	40 m
アッパーハル幅	4 m
アッパーハル高さ	4 m
重心高さ (KG)	13.3 m
メタセンター高さ (GM)	11.9 m
排水量	12,744 ton

浮体 FEM モデルを図 備 10 に示す。

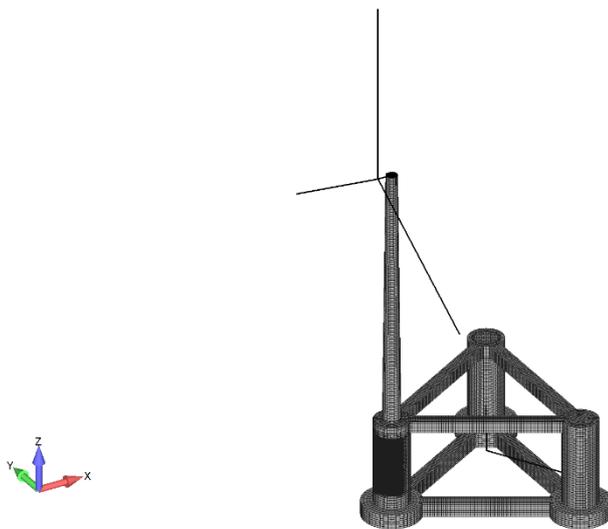


図 備 10 浮体 FEM モデル (斜め視野図)

浮体 FEM モデルの重量分布を表 備 7 に示す。

表 備 7 重量分布 (浮体)

タワー	347.5 ton
RNA	424.5 ton
浮体部	3,248.0 ton
艀装品等	844.0 ton
バラスト水	7,879.9 ton
合計	12,743.9 ton

タワーは複数要素に分割し、各要素に重量を設定した。RNA (Rotor Nacelle Assembly) 重量は、重心位置に集中質量として与えた。艀装品は、各節点負担板厚ネット質量に係数を乗じた集中質量として考慮した。バラスト水は、対象範囲の節点に分配した集中質量として考慮した。RNA が設置されるタワー上部には下記の慣性質量を与えた。

$$I_{xx}=44,238 \quad [\text{ton} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{yy}=100,000 \quad [\text{ton} \cdot \text{m}^2]$$

$$I_{zz}=100,000 \quad [\text{ton} \cdot \text{m}^2]$$

浮体の弾塑性体に使用した KA36 材の材料物性値を表 備 8 に示す。剛体部の材料物性値を表 備 9 に示す。被衝突コラム及びアッパーブレースは KA36 とし、それ以外は剛体とした。LS-DYNA の材料構成則には、以下の材料モデルを使用した。

KA36、SM520 : *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (No. 24)

剛体 : *MAT_RIGID (No. 20)

表 備 8 KA36 材の物性値 (浮体)

ヤング率	206,000 MPa
質量密度	$7.85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ポアソン比	0.3
降伏応力	355 MPa
最大耐力	555 MPa

表 備 9 剛体の物性値 (浮体)

ヤング率	206,000 MPa
質量密度	$7.85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ポアソン比	0.3

解析結果の一例として、衝突船が 12.0knot で衝突した際の計算結果を図 備 1 1 から図 備 1 3 に示す。

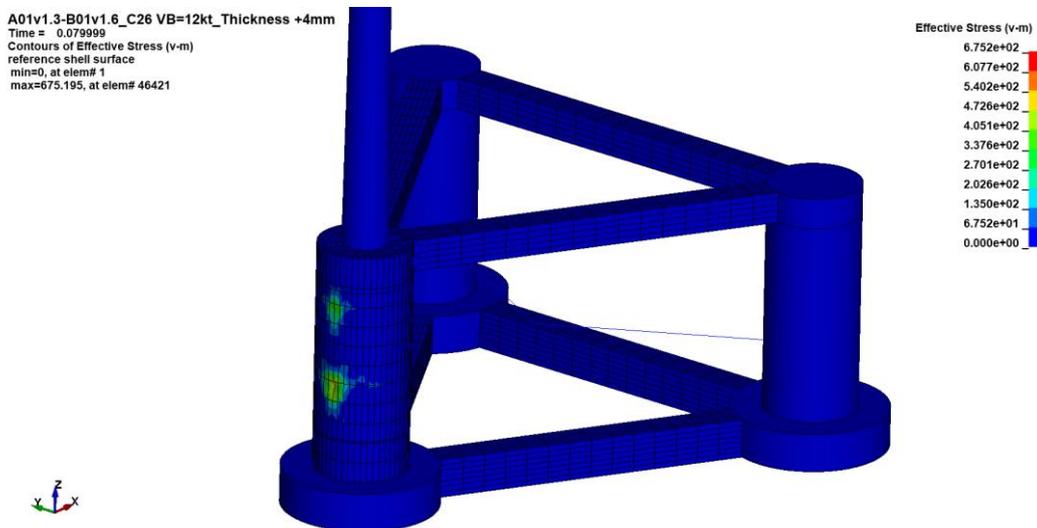


図 備 1 1 衝突時の破口発生時の浮体応力コンター

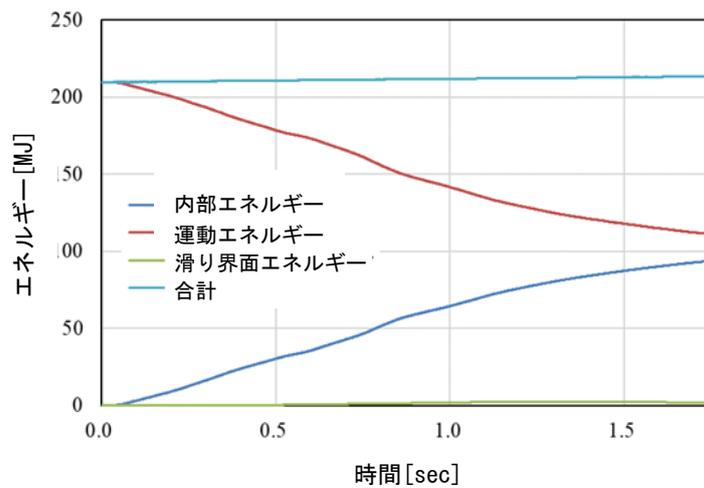


図 備 1 2 エネルギー時刻歴

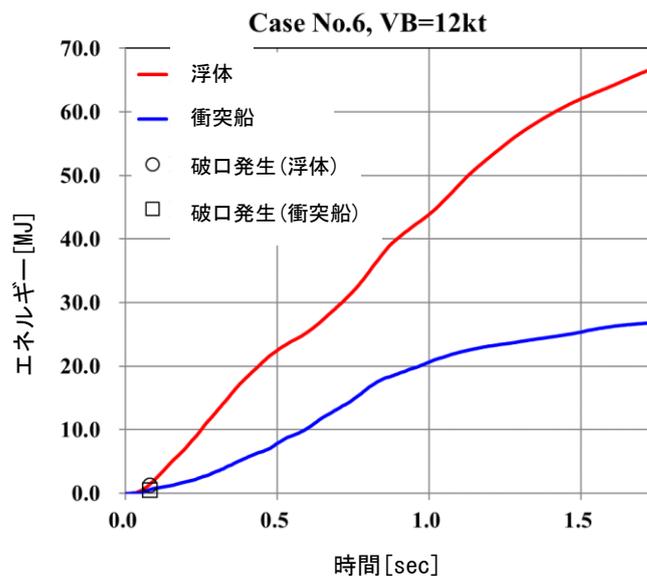


図 備 1 3 構造破壊等で吸収すべきエネルギー (E_s) の時刻歴

図 備 1 3 には、破口発生の瞬間を○ (浮体) 及び□(衝突船)を図示した。

表 備 1 0 破口発生までに構造破壊等で吸収したエネルギー

V_B [knot]	Time of rupture [sec]	$E_{s,A}$ [MJ] (浮体)	$E_{s,B}$ [MJ] (衝突船)	E_s [MJ]	$V_{B,cr}$ [knot]
12	0.078	1.252	0.527	1.943	1.458

表 備 1 0 に破口発生までに構造破壊等で吸収したエネルギーを示す。浮体側の構造破壊で吸収したエネルギーは、約 1.3MJ であり、衝突船の変形エネルギーと浮体の変形エネルギーの比率はおよそ 3:7 となった。

6. 3 機構解析による衝突位置影響の考慮

6. 3. 1 はじめに

4. 2 では、衝突をコラム中央への正面衝突と仮定して衝突エネルギーを導出したが、実際には様々な位置に様々な角度で衝突現象が発生すると考えられる。そのような多くの条件を FEM 解析で再現することは計算時間や計算コストの面から困難であることが多い。そこでより簡便に衝突現象を再現可能な機構解析ソフトウェアを用いた手法を紹介し、解析結果から衝突位置が衝突エネルギーに及ぼす影響を示す。

6. 3. 2 概要

機構解析は、系を構成する要素間のつながり (結合条件) を未知数として系全体を表現し、

要素の運動を中心に求める解析手法であり、要素同士の接触や反発のような非線形の現象も解析可能である。実際の衝突現象のような、要素形状の変形を伴う解析を実施する場合には、非線形の有限要素解析を併せて実施する必要がある。本付録では、汎用の機構解析ソフトウェアである MSC Adams^[備-4]を用いた解析手法と解析事例を示す。

MSC Adams で系を構成する主要要素は、ボディ（物体）、コネクタ（拘束条件）、フォース（荷重）の 3 種類であり、これらを適切に組み合わせることが必要である。ボディは、1 つ以上の形状要素と、重心位置・慣性の情報から構成される。複雑な形状を再現する必要がある場合や内力等の取得が必要な場合は、検討対象を複数のボディを用いて再現する必要がある。その場合は、コネクタを用いてボディ要素同士を結合する。コネクタは異なるボディの 2 点同士をつなぐ要素であり、その自由度を状況に合わせて変更できる。フォースは、ボディ要素に対して作用させる荷重の設定に用いる。ボディの任意の点を指定し、作用する荷重を数式表現で設定する。また、接触荷重などの特殊な荷重も再現可能である。

6. 3. 3 解析手法

本項では、機構解析を用いて船舶と浮体の衝突現象を再現する手法について記述する。機構解析は自由度の高い解析手法であり、衝突現象の再現に様々なアプローチがあると考えられる。ここではその一例について、系を構成する構造と、作用する荷重に分けて説明を行う。

衝突現象に係る主要な構造要素は船舶と浮体であり、それぞれ最低 1 個以上の部品で構成される要素として設定できる。また、衝突挙動のみに着目する場合は、材料特性を考慮しなくてよい。また、両者の衝突箇所については、適切な手法でモデルを構築する必要がある。ここでは、一例として浮体側に衝突部を別途用意し、浮体主要部とバネ・ダンパで接続する手法を紹介する。図 備 14 にその概要を示す。

まず、浮体部を主要部と衝突コラム部に分割して考慮する。前者は全体の慣性等を再現する要素であり、後者は衝突箇所の形状のみを正確に再現する部位で、船舶との衝突の判定に直接利用する要素である。また、衝突時に作用する荷重は、接触荷重とそれに伴う荷重の伝達として 2 種類のモデルを組み合わせる。接触荷重はペナルティ法と同等の手法を採用し、荷重の伝達は線形のバネ・ダンパ系として模擬する。また、浮体を構成する主要部とコラム部は船体進行方向の運動のみを許容する並進拘束で接続する。以上により、船舶と浮体衝突コラム部間で発生した接触荷重がバネ・ダンパ系を介して浮体主要部に伝達し、全体の挙動が発生する様子が再現できる。

衝突部のモデル概要（上面図）

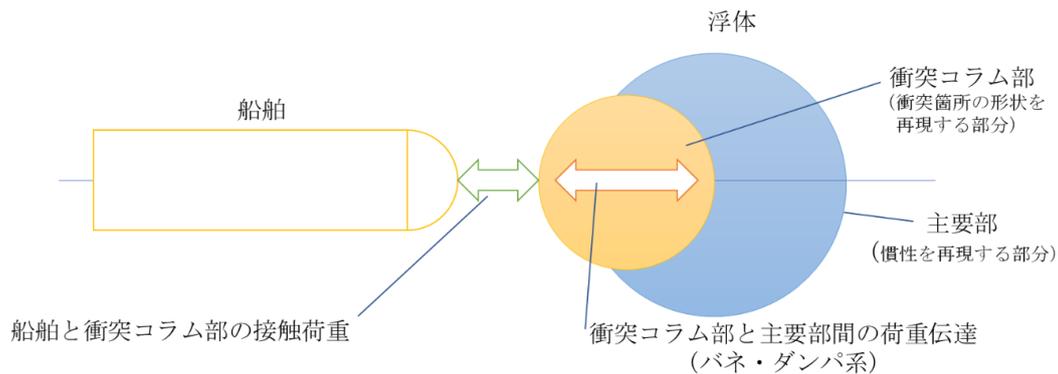


図 備 1 4 衝突箇所のモデル化手法概要

浮体の係留系は、ランプドマスの手法を用いることができる。すなわち、係留系を多数のボディが連なる系として再現し、ボディ同士を荷重要素等で結合する手法である。係留要素の動特性を考慮できる一方、パラメータ調整に別途ソフトウェアを用いたバリデーションを実施することが望ましい。また、係留系の荷重特性を把握している場合は、後述のように作用荷重として導入してもよい。

船体及び浮体にはさまざまな荷重が作用するが、衝突過程の現象について着目する場合、これらのすべてを考慮する必要はなく、用途に合わせた検討が必要である。ここでは代表的なものを紹介する。

- 波浪強制力

波粒子の運動による水線面下の物体に対する荷重であり、一般的には 3 次元パネル法等を用いたディフラクション問題として、ディフラクション力とフルード・クリロフ力を与える。

- 付加質量・造波減衰力

付加質量は、流体中を運動する物体が、周囲の流体を伴って運動することから、見掛け上の質量が増加したように作用する慣性力である。周期的な運動によるものであれば、ラディエーション流体力のうち、運動加速度に比例する成分として取り扱いが可能である。衝突前後の挙動変化について着目する場合は、同様の扱いが困難となるため、付加質量を一定値として近似して用いることが実用的と考えられる。造波減衰力はラディエーション流体力のうち、運動の速度に依存する成分として取り扱うことができる。

- 流体抵抗

物体中を物体が運動するとき、流体から受ける抵抗であり、相対流速の 2 乗と投影面積に比例する力として扱うことができる。

- 係留反力

係留系を構造モデルにしなかった場合は、荷重としてモデル化する。浮体変位に比例する荷重として取り扱うことができる。

6. 3. 4 解析事例

機構解析を用いた具体的な適用事例を示す。

対象となる船舶及び浮体の主要目を表 備 1 1 に示す。船体の船首部と、浮体のタワー下コラムが衝突することを想定する。

表 備 1 1 船舶及び浮体模型主要目

項目	単位	衝突船	浮体
幅	m	19.5	80
型深さ	m	14.5	105.5
喫水	m	8.5	20
長さ	m	100	72
排水量	ton	10000	10340

作成したモデルの概要を図 備 1 5、設定の一覧を表 備 1 2 から表 備 1 4 に示す。

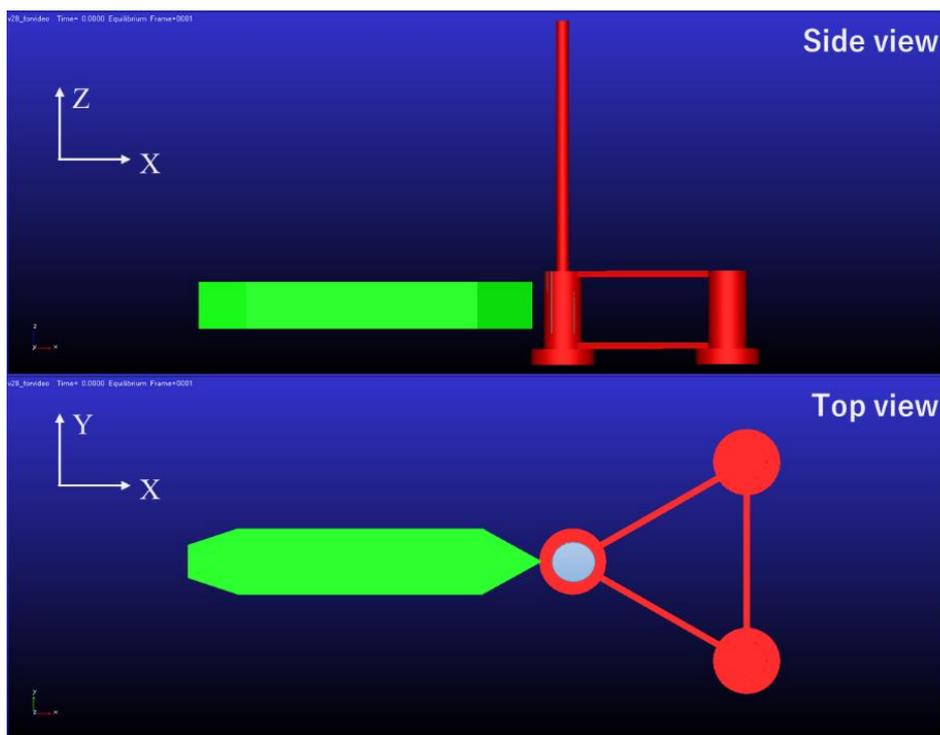


図 備 1 5 衝突現象評価用モデル

表 備 1 2 構造のモデル化

モデル化対象	項目名	モデルの考え方 (例)
船体	主要部 (衝突箇所)	直方体と円柱 (船首部先端) の組み合わせとしてモデル化し、重量及び重心位置を設定した。また、X 方向の初期速度を設定した。
浮体	主要部	3D モデルより作成した形状モデルに、実験より求めた重量及び重心位置を設定した。
	コラム (衝突箇所)	衝突箇所を円柱としてモデル化、自重は無視できる程度の値を設定した。
	拘束	コラム部が主要部に対して X 方向にのみ動くことを許容した。

表 備 1 3 船体の作用荷重のモデル化

モデル化対象	作用位置	モデルの考え方
重力	重心	重心に作用する定常荷重として設定した。
浮力	浮心	定常荷重として設定した。
復原力	重心	船体変位に比例する荷重として設定した。
付加質量	重心	浮体の加速度に比例する荷重として設定した。船体の進行方向成分のみ定義し、船体排水量の10%とした。
流体抵抗	重心	船体速度の2乗に比例する成分として設定した。係数は要素ごとの投影面積と代表的な抵抗係数等より決定した。
衝突荷重 (接触力)	—	衝突箇所である船体とコラム部間で接触力を定義した。

表 備 1 4 浮体の作用荷重のモデル化

モデル化対象	作用位置	モデルの考え方
重力	重心	重心に作用する定常荷重として設定した。
浮力	浮心	定常荷重として設定した。
復原力	重心	浮体変位に比例する荷重として設定した。
付加質量	浮面心	浮体の加速度に比例する荷重として設定した。係数はWAMIT ^[備-5] より導出した値を使用した。同ソフトが水線面まわりでの計算をおこなうため、入力が浮面心となる。
流体抵抗	重心	浮体速度の2乗に比例する成分として重心位置に入力した。係数は要素ごとの投影面積と代表的な抵抗係数等 ^[備-6] より決定した。
係留力	フェアリーダ 高さ	浮体変位に比例する荷重として設定した。係数は模型試験の結果を用いて決定した。
衝突荷重 (衝突部緩衝 剤影響)	衝突コラム 中心	浮体主要部と浮体コラムの間の相対変位ならびに相対速度に比例する荷重として設定した。剛性係数、減衰係数は試験結果と比較した調整により決定した。
衝突荷重 (接触力)	—	衝突箇所である船首部とコラム部間で接触力を定義した。

オフセット距離 (図 備 1 6) を変更した場合の影響について示す。ここでは、浮体コラム部と浮体主要部の間に設置したバネ・ダンパ系のバネエネルギーを、衝突によって浮体が吸収する弾性エネルギーとみなし、総エネルギーの低下や他モードの発生に伴う低減率を比較した。浮体が吸収する弾性エネルギーを、衝突船と浮体の中心線が一致した場合の値で正規化した。その結果を図 備 1 7 に示す。

計算結果より、初期位置のわずかな移動によって浮体が吸収する弾性エネルギーが大きく減少し、浮体の半幅付近において浮体が吸収する弾性エネルギーがほぼ 0 になることがわかる。これは、船体船首が尖鋭な形状をしているため、正面衝突したとき以外は比較的少ないエネルギーしか伝わらないことを示している。これらの結果を用いて、全損確率の導出に用いる浮体が受けるエネルギーを詳細に定めることができる。

ここでは、衝突位置が平均的に一様に分布しているものと仮定し、衝突範囲として船幅と浮体幅の合計を考慮する。図 備 1 7 は片側のみを計算しているため、衝突エネルギーを $B/2 + D/2$ の範囲 (図 備 1 7 における浮体と衝突船のオフセット距離が 0 から 1 の範囲) で平均し、想定浮体において、4. 2 において求めたエネルギーの 25% とした。この比率を α (この場合は 0.25) として全損限界曲線を求めると、式 (備-8) のように表される。

$$V_B = \sqrt{\frac{2E_{defo}}{\alpha} \left(\frac{M_A M_B}{M_A + M_B} \right)} \quad (\text{備-8})$$

機構解析による衝突位置の影響を考慮した全損限界曲線を図 備 1 8 に示す。

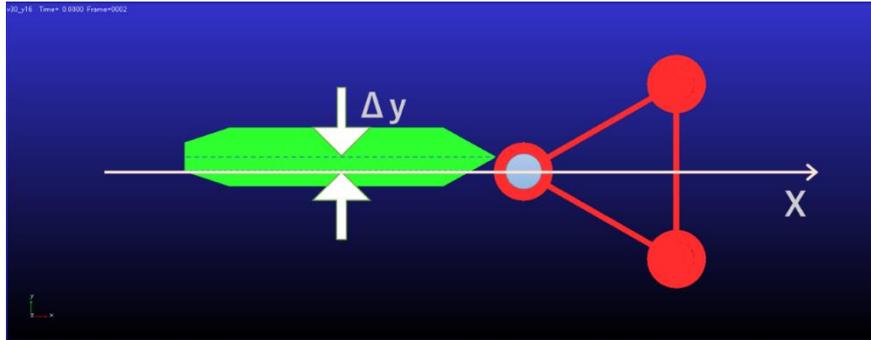


図 備 1 6 船体と衝突コラムの位置関係

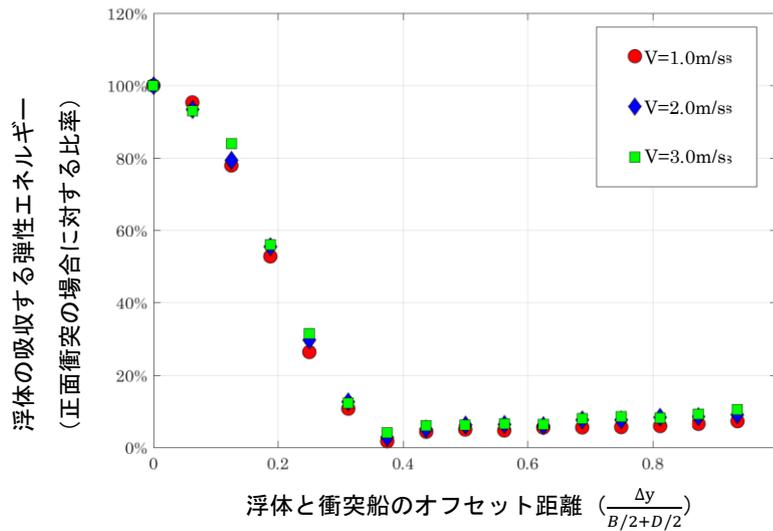


図 備 1 7 機構解析による衝撃物体間の直角方向相対距離と浮体が吸収する弾性エネルギー

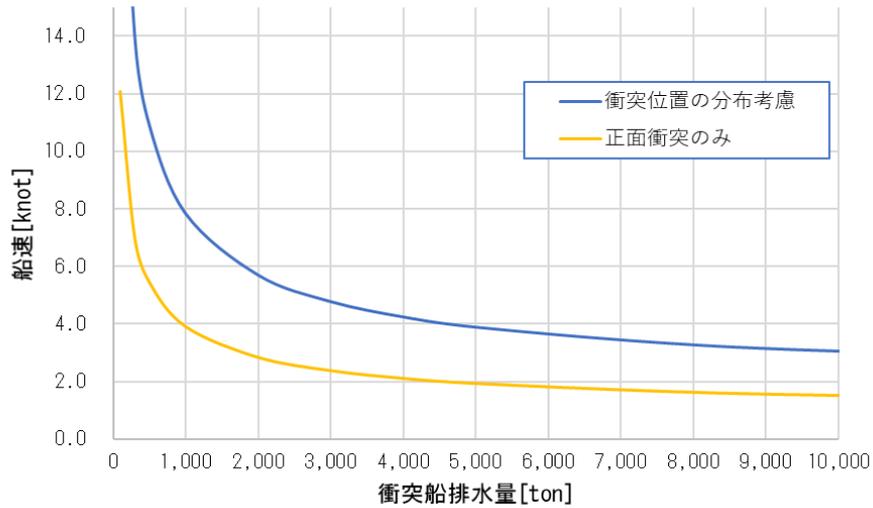


図 備 18 全損限界曲線（機構解析による衝突位置の影響を考慮）

参考文献

- [備-1] V. U. Minorsky, An Analysis of Ship Collision With Reference to Protection of Nuclear Power Plants, Journal of SHIP RESEARCH, 1959
- [備-2] ANSYS LS-DYNA ウェブページ、<https://www.ansys.com/ja-jp/products/structures/ansys-ls-dyna>
- [備-3] D. Moulas, M. Shafiee, A. Mehmanparast, Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations, Ocean Engineering, 143, 2017
- [備-4] MSC Adams ウェブページ、<http://www.mscsoftware.com/ja/product/adams>
- [備-5] WAMIT ウェブページ、<http://www.wamit.com/>
- [備-6] D. N. Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C205, 2010.

付録6 浮体施設の漂流挙動の推定手法（浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討）

（当付録の位置付け）

浮体式洋上風力発電施設技術基準は、施設の健全性の担保を目的としているので、漂流という事象は取り扱っていない。漂流は事実上無視できる確率で起こらないように、安全を確保するという立場である。しかし、最近の一般論として、非常に確率が低い万一の事象に対しても社会システムとしてカタストロフィーを防止する冗長性・ロバスト性が求められる場合がある。

そこで、当付録では、浮体施設が漂流を開始した後の挙動推定手法例を提示した。但し、結果に対する一概なクライテリアは本来存在せず、判断は施設の周辺の自然環境、社会環境等に強く依存するため、現象の推定方法を提示するに留めている。

1. 概要

浮体施設の漂流は、周辺船舶や周辺施設への被害につながる可能性がある。当付録では、個別の漂流施設の挙動推定手法について記述する。

2. 外力の推定

2. 1 風抗力

浮体施設が動いていない状態での風抗力はロータ部、ナセル部、タワー部、浮体施設の空中部に働く風抗力に分割される。ここでは、それぞれを式(1)から式(4)のように定義した。ただし、ロータについては発電時の主方向成分、ナセルについては待機時の横方向成分の影響が大きくなる。

$$F_{rotor} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_t A_{rotor} U_{hub}^2 \quad (1)$$

$$F_{nacelle} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_{dn} A_{nacelle} U_{hub}^2 \quad (2)$$

$$F_{tower} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_{dt} A_{tower} U_{10}^2 \quad (3)$$

$$F_{float} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_{df} A_{float} U_{10}^2 \quad (4)$$

ここで、 ρ_{air} は空気密度、

C_t はスラスト係数

C_{dn} , C_{dt} , C_{df} はそれぞれナセル、タワー、浮体施設の抗力係数、

A_{rotor} はロータの受風面積、

$A_{nacelle}$, A_{tower} , A_{float} はそれぞれナセル、タワー、浮体施設の投影面積である。

スラスト係数は風速によって大きく変動するので留意する必要がある。

2. 2 潮流力

潮流力も同様に式(5)

$$F_{current} = \frac{1}{2} \rho_{water} C_d A V_{current}^2 \quad (5)$$

と定義できる。

2. 3 波漂流力

規則波の定常波漂流力として式(6)を用いた。

$$F_{wave} = \frac{1}{2} \rho_{water} g R \zeta_a^2 L \quad (6)$$

ここで、 g は重力加速度、 ζ_a は入射波振幅、 L は浮体施設の代表長さである。

R は波漂流力係数であるが、波周期の依存性を水槽試験結果や推定式等から適切に織り込む必要がある。

不規則波中の波漂流力については不規則波を個別の波に分解しそれぞれの波について波漂流力を求め足し合わせることで求めることができる。

2. 4 抗力係数(Cd)の例

抗力係数を定めた複数の基準から、2009 IMO MODU CODE を参考に浮体式洋上風力発電施設の風荷重評価に必要な項目を以下に整理した。

表 抗力係数の例

形状	抗力係数
球殻構造	0.4
円筒形構造	0.5
浮体施設の平面構造、浮体施設全体投影面	1.0
独立した構造部分（クレーン、形鋼、梁等）	1.5
甲板下の部分（平滑面）	1.0
甲板下の部分（暴露した梁、桁等）	1.3
作業用やぐら、トラス構造部分（各面）	1.25

3. 運動方程式

以上に基づき浮体の運動方程式を浮体の加速度と速度を用いて、例えば

$$m\ddot{x} = F + D\dot{x} \quad (7)$$

のように運動方程式を立て、New Mark β 法や Runge-Kutta 法等を用いて時系列解析を行う。

外力についてはランダム性を有するため、適切に評価しなければならない。

付録 7 浮体施設の連鎖衝突の確率評価法（浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討）

（当付録の位置付け）

浮体式洋上風力発電施設技術基準は、施設の健全性の担保を目的としているので、漂流に係る連鎖衝突という事象は取り扱っていない。そもそも漂流は事実上無視できる確率で起こらないように、安全を確保するという立場である。しかし、最近の一般論として、非常に確率が低い万一の事象に対しても社会システムとしてカタストロフィーを防止する冗長性・ロバスト性が求められる場合がある。

そこで、当付録では、浮体施設が漂流を開始した後の連鎖衝突挙動推定手法例を提示した。但し、結果に対する一概なクライテリアは本来存在せず、判断は施設の周辺の自然環境、社会環境等に強く依存するため、現象の推定方法を提示するに留めている。

1. 概要

多数の浮体施設で構成されるウィンドファームにおいて、一つの浮体施設の漂流が発生すると、浮体施設への連鎖衝突につながる可能性がある。そこで、当付録では、ウィンドファーム全体のリスクを評価するための、連鎖衝突確率の基礎的な算出法の例について記述する。

2. 検討のフロー

何らかの原因による一つの浮体施設の漂流を起点とし、他の浮体施設への衝突に至るフロー例を以下に示す。

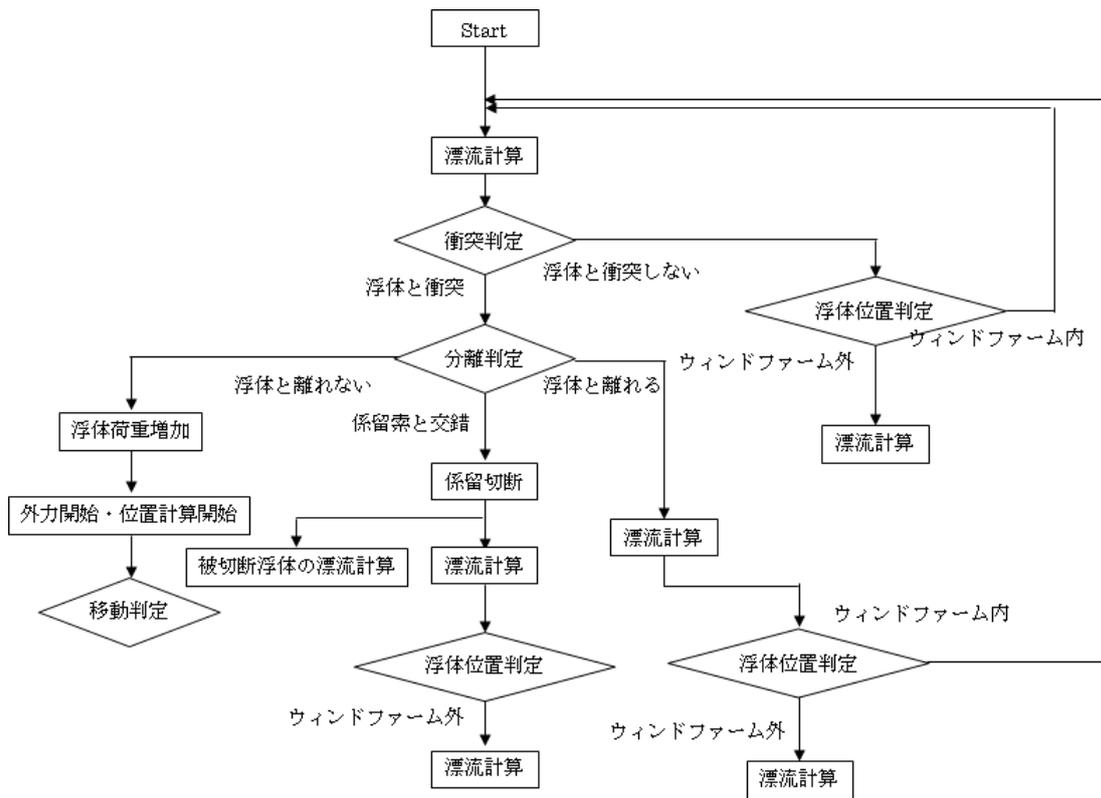


図1 衝突シミュレーションの概略フロー図

3. 解析について

3.1 衝突判定

浮体同士の衝突については、浮体形式や係留式により様々な判定基準が考えられるが、ここでは単純に浮体間距離に基づく判定基準を紹介する。

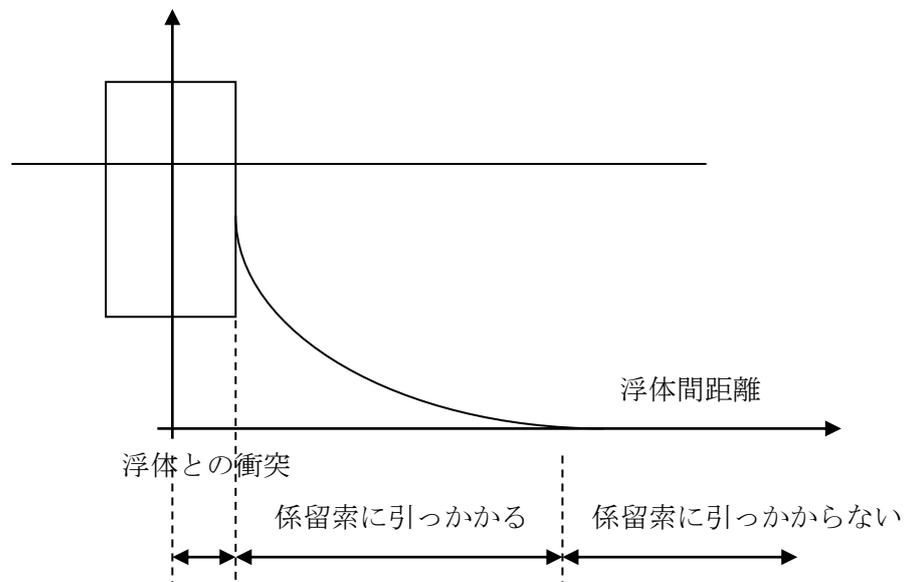
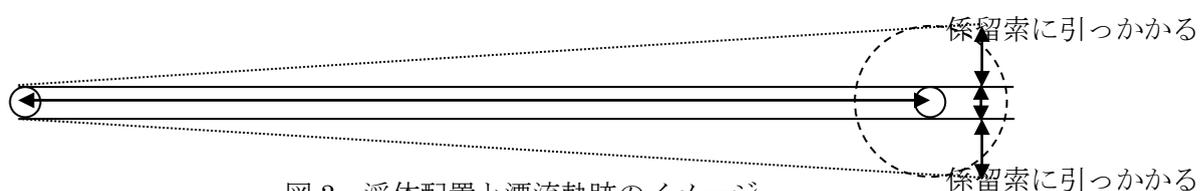


図2 衝突判定のイメージ

浮体同士の衝突や、漂流浮体が係留索に引っかかった後の浮体挙動については参考となるデータが少ないことから、水槽試験を実施し多くの試行パターンによる計測結果から判断するか、数値シミュレーションで感度解析を行うことが考えられる。

3. 2 浮体配置

既往検討例では、浮体配置を様々な形状に仮定して衝突確率を解析している例があるが、ここでは簡便のため、2浮体が流れの主流方向に配置されていると仮定し、シミュレーションを行う例を紹介する。外力については波、風、潮流の大きさ、方向に適切なランダム性を持たせ衝突確率を算出する。



4. まとめ

浮体の漂流挙動を解析し、2浮体の衝突確率を算出する手法を簡便に示した。衝突確率のシミュレーション結果は浮体配置間隔の設定やリスク評価に用いることができる。

付録8 荷重・応力モニタリング手法

(当付録の位置付け)

ライフサイクルにわたる構造健全性を担保するためには、定期的な検査・点検を行うのが基本であるが、対象施設が日常的に接近および作業できる環境に無い場合には、遠隔モニタリングを併用することが有効である。

当付録では、当ガイドラインが対象とする支持構造物の構造健全性を対象に、簡易かつ高精度なモニタリング手法を例示する。

なお、モニタリングは、法令においては強制要件では無いが、参考情報として示すものであり、このようなアプローチは、優先的検査箇所の抽出や検査インターバルの適正化(中間検査の可否等)の検討に資することが期待される。また、ここに例示する手法は今後の当分野の研究開発に資するべく供するものである。

1. 概要

支持構造物(タワー部及び浮体施設部)において、溶接鋼構造等の線形応答が仮定できるものを対象として、構造上の危険個所の応力履歴等を常時モニタリングし、疲労余寿命を評価する手法を提供する。

ここでは、比較的容易な計測から多点の応力履歴を把握する手法として、浮体運動の計測結果から荷重および応力をデータ処理によって推定できる手法を示す。なお、本モニタリング手法において推定する荷重・応力は、疲労強度評価への対応として振幅を対象とする。

2. 荷重・応力モニタリング手法

上述の通り、浮体運動を計測項目とし、得られた計測値から荷重ならびに応力を算出可能なものとした。モニタリングのフローを図1に示す。

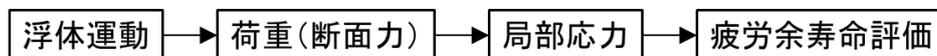


図1 当該手法におけるモニタリングのフロー

3. 当該手法における荷重推定方法

当該手法においては、計測される浮体運動の時系列データを基に、以下の算式・手順によって浮体に生じる荷重（断面力）を算出する相関式を構築する。

A) 基本算式

$$\{F_i\} = [A_{ij}]\{x_j\} + [B_{ij}]\{\dot{x}_j\} + [C_{ij}]\{\ddot{x}_j\} \quad (1)$$

ただし、

$\{F_i\}$: 荷重（断面力）、 $\{x_j\}$: 変位、 $\{\dot{x}_j\}$: 速度、 $\{\ddot{x}_j\}$: 加速度

$[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$: 運動－荷重相関マトリックス

B) 具体的な手順

基本的には式(1)内のマトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ を同定する作業である。また、着目する断面ごとに、各マトリックスの数値は異なる。

- 1) 6自由度の浮体運動及び荷重の応答関数を求める（※1）。
- 2) 浮体運動の応答関数の1階微分及び2階微分を用意する。
- 3) 計測より得られた荷重及び変位の応答関数ならびに計算した1階微分及び2階微分を式(1)に代入し、最小二乗法を用いることで各マトリックスの値を同定する（※2）
- 4) 得られた各マトリックス及び実際の浮体運動の時系列データを用いて、評価対象の各断面に生じる荷重の時系列データを算出する。

※1 : 運動と荷重の応答関数は、水槽試験または数値計算等により求める。

※2 : 各マトリックスの同定においては、十分な近似が得られる場合には、対象となる荷重に関する運動モードに限定してもよい。（例えば Y 軸まわりのモーメントに対してはサージ運動とピッチ運動に限定してもよい。なお、座標系は付録2の図6参照。）

4. 当該手法における応力推定方法

当該手法においては、弾性有限要素解析を実施し、以下の算式・手順によって単位外力載荷時の各部に生じる応力を算出する相関式を構築する。

A) 基本算式

$$\{\sigma_i\} = [D_{ij}]\{f_j\} \quad (2)$$

ただし、

$\{\sigma_i\}$: 応力、 $\{f_j\}$: 単位外力、 $[D_{ij}]$: 荷重－応力相関マトリックス

B) 具体的な手順

基本的には式(2)内のマトリックス $[D_{ij}]$ を同定する作業である。また、応力を評価する箇

所ごとに、マトリックスの数値は異なる。

- 1) 評価箇所を含む有限要素モデル（局部応力評価部位はファインメッシュ）を作成し、モデル境界に単位外力を作用させる。
- 2) 単位外力载荷時の評価箇所における応力を算出し、マトリックスの値を同定する。
- 3) 得られたマトリックスならびに推定した荷重の時系列データを用いて、推定荷重が断面力として作用した際の評価箇所に生じる応力の時系列データを算出する。

5. 疲労余寿命評価の方法

上記3. 及び4. により、浮体運動の時系列データから評価箇所の応力の時系列データが得られるため、これを基に疲労被害度 d_i を算出し、累積することで評価箇所の累積疲労被害度 D を算出できる。

累積疲労被害度の現状値と許容値との差で疲労余寿命を評価する。

$$D = \sum d_i \quad (3)$$

モニタリング時間が限定される場合（1日のうち数時間分等）には、モニタリング時間中に得られた d_i を適宜修正し、式(3)に代入する。

（備考）他の方法との特徴比較

現状一般的に実施されているモニタリング手法には、手法における計測項目の観点から、大きく分けて表1に示す2つの手法がある。また、それぞれの手法が抱える課題を表中に併せて示す。モニタリングのフローの比較を図2に示す。

当該手法は、従来手法の課題を解決し、浮体運動という比較的計測が容易なデータを基に、多数の箇所の疲労余寿命評価を実施するという特徴がある。このため、ウインドファームのように多数の浮体施設を同時に維持管理する際にも有効である。

表1 応力モニタリングの現状手法とその課題

	計測項目	手法概要	課題
手法①	局部応力	ひずみゲージ等で応力を直接測定	<ul style="list-style-type: none"> ● 多数の箇所に対応困難 ● ひずみゲージ等の寿命
手法②	気・海象	気・海象データを基に、浮体運動→荷重→応力までを追算	<ul style="list-style-type: none"> ● 気・海象の計測が高価 ● リアルタイムでの応力把握が困難

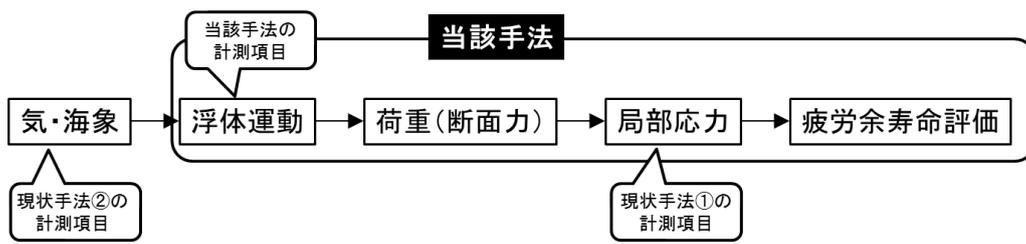


図2 モニタリングのフローの比較

付録A 設計等に当たって参考となる情報

(当付録の位置付け)

多数の実績があるとは必ずしも言えない浮体式洋上風力発電施設について、産業界における実際の損傷などの事例と考えられる対策の例を広く共有することは有益と考えられる。これを踏まえ、表 A-1 のとおり、産業界からのご協力により収集した情報を整理した。なお、本情報はあくまでも参考情報であり、義務的なものではないことに留意されたい。

表 A-1 設計等に当たっての参考情報

対象	事象の概要・原因	対策（例）
浮体施設	<ul style="list-style-type: none"> 運用開始から約一年後、セミサブ型浮体施設のローハル根元部に疲労亀裂が発生 設計段階では係留による拘束影響を考慮して強度解析を実施したが、これによりローハルの水平方向の変位が制限され、ローハルに作用する水平曲げモーメントが過小評価となっていたことが原因 	<ul style="list-style-type: none"> 恒久対策工事を実施 構造解析手法を見直し、係留による拘束影響を考慮せず無拘束条件下での強度解析を実施することで、ローハルに作用する水平曲げモーメントや、実際に亀裂が発生した箇所の変位を精度良く再現可能であることを確認
浮体施設	<ul style="list-style-type: none"> 数回の台風遭遇後、コラム外面に設置していた交通装置が損傷 	<ul style="list-style-type: none"> 交通装置の設置位置をかさ上げ 幅を必要最低限とする
浮体施設	<ul style="list-style-type: none"> 乗り込み梯子の背かごを陸上と同様にフラットバーで製作したところ、台風時に青波を受けて大きく変形 	<ul style="list-style-type: none"> 背かごに代わる対策を検討する 青波を考慮した背かごの設計とする

略語一覧

CALM	Catenary anchor leg mooring
COD	同一方向(Co-directional)
DLC	設計荷重ケース(Design load case)
ECD	方向変化を伴う極値コヒーレントガスト (Extreme coherent gust with direction change)
ECM	極値水流モデル(Extreme current model)
EDC	極値方向変化(Extreme direction change)
EOG	運転時の極値突風(Extreme operating gust)
ESS	極値海況(Extreme sea state)
ETM	極値乱流モデル(Extreme turbulence model)
EWLR	極値水位変動域、又は極値水面範囲(Extreme water level range)
EWM	極値風速モデル(Extreme wind speed model)
EWS	極値ウィンドシア(Extreme wind shear)
HAT	天文学的最高潮位(Highest astronomical tide)
IEC	国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission)
ISO	国際標準化機構(International Organization for Standardization)
JIS	日本工業規格(Japanese Industrial Standard)
LAT	天文学的最低潮位(Lowest astronomical tide)
MIC	微生物腐食(Microbiologically influenced corrosion)
MIS	方向の不ぞろい(Misaligned)
MSL	平均海水面(Mean sea level)
MUL	多方向(Multi-directional)
NCM	通常水流モデル(Normal current model)
NSS	通常海況(Normal sea state)
NTM	通常乱流モデル(Normal turbulence model)
NWLR	通常水位変動域、又は通常水面範囲(Normal water level range)
NWP	通常ウィンドプロファイルモデル(Normal wind profile model)
RNA	ロータとナセルの組立品(Rotor-nacelle assembly)
SALM	Single anchor leg mooring
SSS	高波浪時海況、又は厳しい海況(Severe sea state)
SWL	静水面(Still water level)
TLP	テンションレグプラットフォーム(Tension leg platform)
UNI	単一方向(Uni-directional)