

スパー型浮体を用いた洋上風力発電施設の係留検討について

MOORING DESIGNS FOR A SPAR-TYPE FLOATING WIND TURBINE

関田欣治¹・大久保寛²・吉田茂雄³・北勝利¹

Kinji SEKITA, Hiroshi OKUBO, Shigeo YOSHIDA and Katsutoshi KITA

¹正会員 工博 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 (〒424-8610 静岡市清水区折戸3-20-1)

²正会員 工修 新日鉄エンジニアリング(株)海洋・エネルギー事業部 (〒229-1131 相模原市西橋本5-9-1)

³富士重工業(株) 工博 風力発電プロジェクト(〒320-8564 宇都宮市陽南1-1-11)

While floating wind turbines are said to be constructed economically in a sea deeper than sixty meters, the world's first one was installed in a water of 108m off the southern Italy in 2008. A spar buoy moored by multi-lines is regarded as feasible in terms of hydrodynamic stability and due buoyancy. Though it is subjected to winds, currents and waves, relevant mooring designs are required. As the spar is apt to respond dynamically, so using the multi-mooring analyses taken the dynamic response to waves into consideration, we have compared with a catenary mooring of a single line and a conventional anchor and tout moorings of a single or combined line and a suction anchor. The paper also describes the analysis in damaged condition that one mooring line breaks and time domain analysis for yawing response due to torque induced by a rotor, because of the spar having small restoring characteristic.

Key Words : Floating wind turbines, spar, mooring analysis, catenary and tout mooring, anchors

1. 初めに

浮体式洋上風力発電は水深が約60mを超えると経済性の点で着床式より有利になるといわれ、TLPと称される緊張係留浮体が初めて2008年にイタリアで設置された。油田開発で実績のあるSPAR型浮体(以下SPARと呼ぶ)は海中部分に大きな容積があるので安定性や浮力特性が優れ洋上風車においても有望とされる。しかしSPARは風や流れ、波浪の影響を受け易いので適切な係留システム検討が重要である。係留検討にあたっては、動的影響を考慮した多点係留解析、緩係留とトート係留の比較並びに複合ラインの適用性検討、トート係留では引抜きや施工性に応じたアンカーの選定と把駐力解析、健全時に加えライン切断を想定した損傷時の安全性、小さいyaw復原ばね特性に起因し風車が生起するyawトルクに対する影響等の評価が不可欠である。SPARについての簡便な準静的係留設計法確立のため、本論文ではこれらの課題に対し種々の検討を実施した結果を述べる。

2. 研究の内容

ロータ径80m発電量2MW風車を搭載するSPARを研究の対象とした。図-1には風車とタワーを除く4条で係留したSPARを図示しているが、荷重に対し左右対称形に配置した多点係留を前提とする。また浮体に作用する荷重のうち、潮流力と波漂流力及び風荷重は定常荷重、波浪強制力(以下波力と呼ぶ)は変動荷重として扱う。荷重は一番厳しい同一方向・同向きに作用する。主に4条係留条件において、荷重作用側(以下風上側)の2条が殆どの荷重を受け持つ45°配置、及び1条が受け持つ0°配置の2状態に

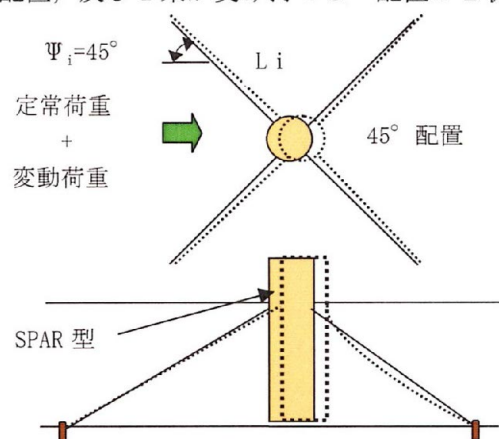


図-1 係留索(4条45°配置)

について検討する。動的解析に関しては、準静的手法を適用することとし、暴風時と稼働（定格、カットアウト）時の自然環境条件に対し検討する。さてわが国では浮体式風車は離岸距離が短い浅海域に建設されることが望ましいので、検討水深を100m程度とした。SPARには緩いか或いはトートな係留が適すと予想し、表-1に両者が装備すべきライン材等を整理し示した。

表-1 SPARに適用される係留システム

係留(理論)	係留ライン材	アンカー
緩(カタナリー)	チェーン	重力式, ドラッグアンカー他
	複合(チェーン+鋼索, チェーン+合成繊維索)	同上
トート(トラス)	鋼索(スパイラル, 6ストランド), 合成繊維索	杭(打設, サクション, 自由落下), VLA 他
	複合(チェーン+鋼索, チェーン+合成繊維索)	同上

緩係留とは、十分長いチェーン等を用いることで、海底でのライン立上角 θ_b が 0° を常に保持するものである。一方、トート係留はラインがほぼ直線状に張られ、 θ_b が水深によるが $10 \sim 50^\circ$ 程度となる。ラインには鋼索が単独に、また海底部に敷設するチェーンと軽量の索が複合して使用されることが多い。そこで、チェーン緩係留、合成繊維索単独及びチェーンと鋼索複合トート係留について解析を行う。さらにトート係留には引抜抵抗のある板状アンカーVLA (Vertical Loading Anchor) や杭¹⁾ が不可欠なので、とりわけ設置性に優るサクション杭に関し、斜め引張荷重下での水平・鉛直相関抵抗を評価し適用性を調べる。加えて風上側チェーンが切断するという損傷時安全性評価²⁾ や yaw 運動に関する時刻歴解析を行い回転する風車がSPARへ及ぼす影響を明らかにする。

3. 解析法

(1) 係留ラインばねマトリックス

1 条の緩係留、十分長いチェーンと合成繊維索からなる複合ラインの復原ばねマトリックスを、鈴木が無限長カタナリー、無限長カタナリーとトラスとの組合せモデルとしてそれぞれ導出した³⁾。我々はトート係留複合ラインを扱うため、有限長カタナリー、及び有限長カタナリーとトラスとの複合ラインについて鈴木に倣って定式化した。図-2 には長さ s_0 のカタナリーと長さ L のトラスからなる複合ライン形状を図示した。SPAR 係留点に作用する水平・鉛直力 F_x , F_y についての複合ラインの釣合式を偏微分することで、変位増分 Δx , Δy に対する

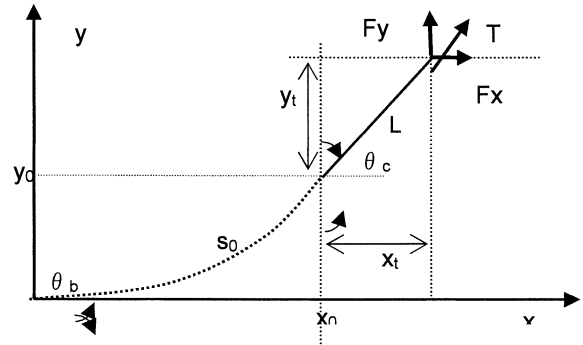


図-2 複合索トート係留解析

荷重増分 ΔF_x , ΔF_y の関係、すなわち係留ライン 1 条のばねマトリックスが求まる。有限長カタナリーでは、 s_0 が一定なので Δs_0 が零という制約条件でのライン一般部と海底部傾斜角 θ , θ_b の正接 p , p_b と特性長 a の関係を求め、これと水平長 x_0 と高さ y_0 に関するカタナリー式を偏微分して得られる関係から式 (1) のばねマトリックス K_c を誘導した。これはトート状態の複合ラインにおける海底部チェーンにも、また単独チェーンにも適用できる。なお特性長 a は張力 T をチェーンの単位長あたりの水中質量 w_w で除したものである。

$$K_c = \begin{bmatrix} aC_{22} & -aC_{12} \\ -F_xC_{21} & F_xC_{11} \end{bmatrix} / (C_{11}C_{22} - C_{21}C_{12}) \quad (1)$$

なお、式 (1) のマトリックス C の成分は付録を参照されたい。一方、鈴木³⁾ が与えているように上部ラインは式 (2) で表されるトラスの剛性マトリックス K_t で近似できる。 EA は軸剛性、 L は長さ、 θ はラインの傾きである。本式は単独の合成繊維索トート係留に適用する。

$$K_t = \begin{bmatrix} \frac{T}{L} \sin^2 \theta + \frac{EA}{L} \cos^2 \theta & \frac{EA-T}{2L} \sin 2\theta \\ \frac{EA-T}{2L} \sin 2\theta & \frac{T}{L} \cos^2 \theta + \frac{EA-T}{L} \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 種類のラインの複合ばねマトリックス K_m は、ライン接合点での力の釣合に関する増分関係から次式のように算定できるが、その成分は複雑になるのでここでは示さない。

$$K_m = (I - K_t(K_t + K_c)^{-1}K_t) \quad (3)$$

なお、 I を単位マトリックス、それぞれラインの水平ばね定数は、式 (1) ~ (3) の $[1, 1]$ 成分に相当する。また、長方形格子状浮体に対して式 (2) を適用し、ポリエステルロープを用いた多点係留解析⁴⁾ を筆者の一人が実施し有効性を確認している。

(2) surge 復原ばねと換算波力

初期張力が導入された多点係留状態のSPARの surge 復原ばね定数は、荷重方向とラインの方位角 Ψ_i (既に示した図-1参照) の余弦と水平ばね定数の積を全ラインにわたり総和し得られる。荷重作用

時は初期釣合状態からの移動量を解析し、新たな釣合位置での風上・下側ラインのばね定数を算定し直し、さらにライン長に対し移動量は小さいので方位角は変わらないものと仮定し全ラインによる surge 復原ばね定数を求める。ついで SPAR の 1 自由度運動とする surge 固有周期 T_n を求める。これと波浪有義周期 $T_{1/3}$ から応答倍率 $A(T_n, T_{1/3})$ を決定し、式 (4) のように波力 $F_w(t)$ に対し準静的水平荷重(以下換算波力という) F_{dyn} が得られる。

$$F_{dyn} = A(T_n, T_{1/3}) F_w(t) \quad (4)$$

(3) 係留システムの安全性評価

ラインの安全性は、稼働時と暴風時条件に対し評価する。初期張力 T_I 下での釣合位置から、定常荷重や換算波力を受け風下側に SPAR が移動する結果、風上側ラインの張力は最大張力 T_{max} に、風下側は最小張力 T_{min} になる。 T_{max} は式 (5a) のように破断強度 MBL を安全率 γ で除した許容値を超えないとする。一方、暴風時のような極限状態では風下側ラインが緩んでキンクや圧縮疲労のため切断する怖れがあるので、 T_{min} は式 (5b) の下限張力を上回るものとする。ただし、 MBL は破断強度、 μ は係留材毎に定める安全率である。

$$T_{max} = T_I + T_{const} + T_{dyn} \leq MBL / \gamma \quad (5a)$$

$$T_{min} = T_I - T_{dyn} \geq MBL / \mu \quad (5b)$$

なお、 T_{const} 、 T_{dyn} はそれぞれ定常荷重と換算波力による発生張力である。アンカーについても、アンカー点における係留ラインの最大水平・鉛直張力成分が、アンカーの許容水平及び鉛直抵抗力以下であることを確認し安全性を評価する。

4. 検討条件

(1) SPAR 型浮体諸元

風車とタワー等の上載重量は 4,014kN、搭載時の重量 35,863 kN であり、乾舷は 12m、喫水が 57m である。SPAR は、底部の直径 12m、中間部 8.4m、水線面 4.8m となる 3 段状円筒コンクリート構造である。また、ハブの高さはデッキ面上 55m である。なお、本研究で扱う SPAR の諸元及び次の (2) で述べる波力等は宇都宮等⁵⁾ が決定したものである。

表-2 SPAR 型浮体に作用する荷重

検討条件	風速 V (m/s)	波 $H_{1/3}$ (m) $T_{1/3}$ (s)	定常力 F_c (kN)	波力 F_w (kN)
定格	13	3.0/7.2	486	993
カットアウト	25	6.8/9.8	423	2,708
暴風	50	12.5/15	869	4,940

(2) 自然海象条件と荷重

稼働・暴風時の自然環境条件と浮体が受ける定常荷重や波力を表-2 に示した。定常荷重のうち潮流力は流速 1.03m/s 下で抗力係数 0.5 としてまた波力もモリソン式により、定常漂流力は特異点分布法により解析したものである。風荷重は風方向のロータ・ナセルとタワーの抗力と風直交方向のロータによる揚力のベクトル和とし算定した。

5. 主要な結論

(1) チェーン緩係留における荷重

初めに、チェーン緩係留に関し自然環境条件ごとに換算波力がどの程度なのか述べる。チェーンは無限長カテナリーとして扱い、4 条係留 45° 配置での結果を表-3 に示す。

表-3 チェーン係留における固有周期等

検討条件	定格	カットアウト	暴風
定常荷重 F_c (kN)	343.3	299.0	614.6
全水平力 F_c' (kN)	653.1	608.9	924.4
チェーン長 S_o (m)	302.1	292.4	355.7
チェーンばね K (kN/m)	95.2	86.1	157.4
固有周期 T_n (s)	37.7	39.7	41.5
応答倍率 A	0.12	0.11	0.10
換算波力 (kN)	87.5	213.3	352.2

チェーン径は 84mm、水中質量 125.37kg/m であり、初期張力は施工性からあまり大きくしたくないので、310kN を各条に導入した。表-3 にある全水平力は定常荷重に初期張力水平成分を加えたものであり、風荷重が占める割合が大きいの、風荷重が小さいカットアウト時が最も小さい。当然、風上側の海中部分のチェーン長も短い。チェーン一条のばね定数は暴風時が一番大きい。稼働時は風上・下両側のチェーンのばねが効くとし、surge 復原ばねを算定した。これに対しチェーンを用いた緩係留の場合は暴風時に風下側が緩んでも最小張力が負にならなければよいと考え、風上側チェーンだけで復原ばねを算定した（一般的には風下側のばねも働くので両者を考慮する）。その結果、暴風時の固有周期は稼働時より長い結果となるものの、それでも換算波力が一番大きい。応答倍率は、SPAR の付加質量が 3,439 t、減衰係数 3% としたところ 0.1~0.12 程度である。換算波力の定常荷重に対する割合は、定格が 25%、カットアウトが 71%、暴風時 57% である。60~110mm の 5 種類の公称径の G3 規格のチェーンに対し 4 条及び 6 条係留も検討した結果、70mm 以下は成立せず 90mm 径の 4 条係留が係留システム重量を最小となることが判明した。なお、チェーン安全率 γ は 2.5、下限規定値 $1/\mu$ は 0.0 とした。

(2) トート係留における surge 固有周期

緩係留では、暴風時の荷重条件、特に換算波力によって係留ラインの最大・最小張力が決まった。単独使用の合成繊維索も同様であり、ここでは合成繊維索（索径 137mm、軸剛性 EA 1,382MN）を用いた 4 条トート係留に関し、換算波力の大きさを決定する固有周期 T_n の影響を水深 h が 100m の初期張力条件に対し検討する。トート係留での surge 復元ばね定数は、初期張力 T_i 、EA、 h 、索長 L に依存する。特に影響の大きい L と T_n の関係を図-3 に示した。 L が約 130m を下回ると索が急角度 (h/L が大) となるため、式 (2) からわかるように初期張力によるばね成分 T_i/L 項の影響が大きくなるがばねは全体に弱くなる。反対に L がおよそ 1,000m を超えるような傾斜角 θ が小さいと T_i/L 項の寄与が小さく、同時に L も大きいことから EA/ L 項の寄与も小さくなり、ばねは弱くなる。

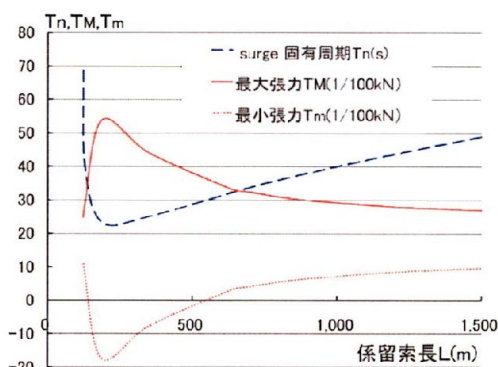


図-3 索長と固有周期, 最大・最小張力

その結果、両範囲では T_n が 40s を超え応答倍率は小さくなり、索に生じる張力変動範囲 ($TM-T_m$) も減少する。中間の索長特に 150~500m の範囲では、固有周期が短くなり張力変動範囲も最大張力 TM も大きく、アンカーに大きい引拔力が作用すると考えられる。(1) と (2) の結果、100m 前後の浅い水深では、単独索のトート係留よりチェーン単独の緩係留の方が固有周期を長く設定でき、単独チェーンを用いた緩係留の方が広い設計自由度を有するといえる。なお、図中の最小張力 T_m が負であるが、これは式 (5b) のように規定することで実設計から除かれる。

(3) 複合トート係留おける結果

チェーンと鋼索（スパイラルロープ）を複合的に用いたトートラインを水深 70m 水面上 10m 位置で 4 条張った条件で解析結果を、図-4 に 0° 及び 45° 配置状態についてそれぞれ示す。図ではチェーン長は 10m とした。解析ではアンカー一点での θ_b が 10° 一定を保つように繰り返し計算で釣合位置を求め鋼索長を決定した。チェーン公称径は 70mm、単位長さ水中質量 w_w が 107kg/m、破断強度 MBL が 5,647kN である。鋼索の w_w は 23.8 kg/m、軸剛性は 540MN である。図からもわかるように、風上側ラインが

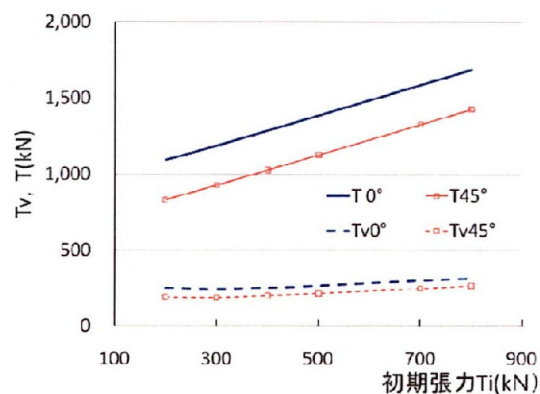


図-4 初期張力と索張力, アンカー引拔力

ほぼ 1 条で受ける 0° 配置が、全般にライン張力 T_0 もアンカーに作用する引拔力 T_{v0} も 45° 配置の T_{45} 、 T_{v45} より大きく厳しい側の条件となる。全般に T_{v0} は 220~471kN に、 T_0 が 1,380~1,421kN である。なお、暴風時荷重に対する変位振幅は初期張力が 200kN の場合が最大となり、 0° 配置が 3.2m、 45° 配置が 5.4m であり、複合トート係留においても動揺量は極めて小さいことが特長である。しかしながら、初期張力 500kN 一定の条件での 0° 配置において θ_b を $8 \sim 20^\circ$ と変化させた結果、 T_n は 20~60s と変化し、暴風時変位は 3.0~14.7m となりライン長が長いと変位は大きくなってしまふ。

(4) サクション杭の水平・鉛直相関抵抗

上で述べた数 100 kN の引拔力にサクション杭が抵抗できるかどうか、粘土地盤中の水平・鉛直相関抵抗を解析する。サクション杭が引拔を受ける際には、逆先端抵抗 (reverse end bearing) と周面付着力が働く。一般に全引拔抵抗の半分以上は逆先端引拔抵抗であった。土のせん断強度はボーリング調査等によって得られるものである。ここでは新潟沖水深 80m における地盤強度 (深度方向のせん断強度勾配 k が 4.01kN/m³) を用いた。解杭は直径 4m 長さ 5m とし、杭の中間に相当する 2m 高さで係留ラインを繋ぐとした。これは中間を引張ることでサクション杭に不要な剛体回転を生じさせずに有効な水平係留力を発揮させることにある。土中のチェーンは周りの土によって形状や抵抗が影響を受ける⁶⁾が、ここでは浅い深さなので無視した。サクション杭は一般に径が太いので剛体として取り扱う。Aubeny et al の方法⁷⁾によりアンカー先端部でのすべり破壊や周面付着、塑性流動域とその周辺の剛体域の摩擦を考慮し、これらによる内部消散率と引張荷重や重力による外部仕事率の評価より破壊荷重を算定する。解析では、回転中心を仮定し最小となる水平及び鉛直抵抗の破壊荷重の組合せを見つけることにある。作成した解析プログラムでは、杭を深さ方向に 10 分割し各要素に作用する水平抵抗を水平支持力係数とせん断強度から算定する。水平支持力係数は Aubeny et al が使用した深さに依存する関係から決定

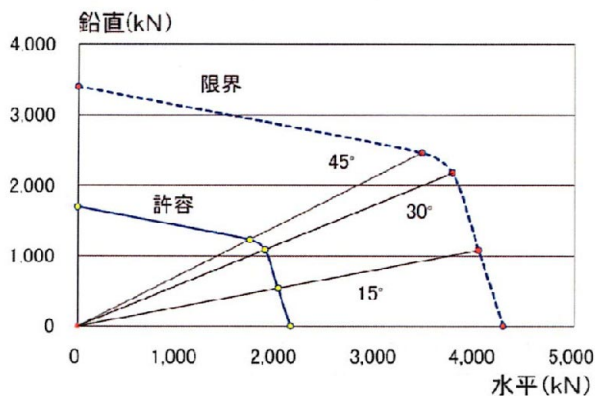


図-5 サクション杭の水平・鉛直相関抵抗

したが、この杭サイズでは約5～8の範囲にあった。また、逆先端支持力係数は12.0、付着力係数は0.5とし、海底面に対し15、30、45°方向から張力を受けるとし相関抵抗を解析した（図-5参照）。図中には限界及び許容（安全率2.0で除したもの）相関抵抗の二つを載せた。この結果、(4)で想定したアンカーに要求される把駐性能に対し、十分この杭で対応できることが分かった。さらに、本杭の貫入に必要なサクション圧解析も行った結果、サクション杭内でボイリング、ヒービングまた盤膨れ等の発生を起こさず貫入できることも確認した。

(5) 損傷時解析

単独チェーンによる緩係留において、図-6に示す対称形に張られた多点係留ラインのうち荷重的に最も厳しい風上側チェーンL1が切断され

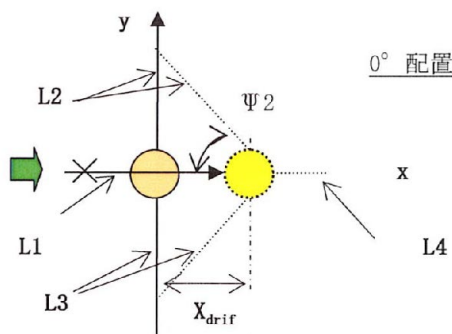


図-6 損傷時の係留ラインの移動

た状況を想定し損傷時の解析を行った。図示した0°配置ではL1が切断されるとx軸に並行に浮体は移動しL2とL3が2条で荷重を等しく分担する。L4は完全に緩むとする。図示していないが、45°配置ではL1切断後x軸y軸方向に浮体は移動するのでL2とL3の分担割合は異なる。しかし、0°配置の方が厳しいので、この条件の荷重Fxに対する分担すべき荷重を式(7)に示す。

$$F_N = 1/2 F_x / \cos \psi \quad (7)$$

方位角 ψ は移動量 X_{drift} とL2チェーン水平長 x_{o2} 、余長 S_{c2} との幾何学的関係がある（L3も同様）。

$$\tan \psi = (x_{o2} + S_{c2}) / X_{drift} \quad (8)$$

余長とはアンカーからチェーン立上点までの距離で、アンカー点と浮体係留点までのチェーン全長 S_{max2} から懸架部分のチェーン長 S_{o2} を引いた長さである。切断後の移動位置でのアンカー点からの水平距離にあたる式(9)の左辺 L' が、切断前のアンカー点と浮体係留点の水平距離 $x_{o2} + S_{c2}$ と X_{drift} つくる距離と等しくなることが適合条件である。これを満たす移動量を繰り返し計算で求める。

$$S'_{c2} + x'_{o2} (= L') \approx \sqrt{X_{drift}^2 + (x_{o2} + S_{c2})^2} \quad (9)$$

損傷時と(1)で述べた健全時に対し、図-7に示すように両者のアンカー及びチェーン質量を公称径d毎に比較したところ、損傷時のチェーン余長を確保するためには余計長さが必要となる。チェーンの安全率は健全時並みに確保できるが、損傷時のアンカーでは安全率1.0以上とした。例えば、81又は90mm径に対応するアンカー重量はそれぞれ50%、20%増となる。したがって、アンカー含め係留システムの要目は損傷時の条件で決まることが判明した。

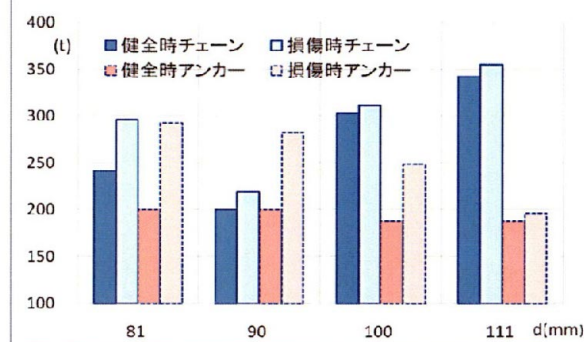


図-7 健全時と損傷時係留系所要質量

(6) 発電時の浮体のyaw応答

発電（風速13m/s）時の平均ウィンドシア（0.2）と変動風に起因して、風車を回転させるyawトルクが発生する。yaw応答の時間領域解析を行い、その影響を定量的に評価した（図-8参照）。なお、yawトルクはIEC61400-1における変動風モデルと風車の

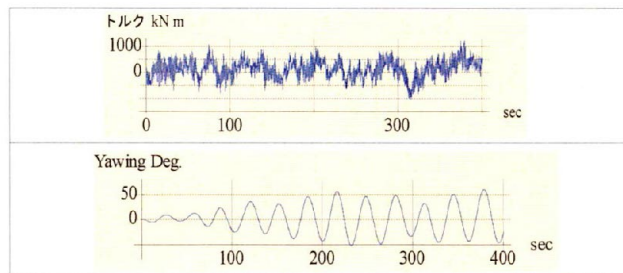


図-8 yaw トルクと回転応答

空力弾性モデルに基づく時刻歴シミュレーションによる結果である。図-8の上段、下段はそれぞれYaw

トルク, Yaw 回転応答を示したものである。係留は公称径 87mm チェーン 8 条を半径 4.5 m のタワーに繋ぐ緩係留である。解析モデルでは 2 個のばねが SPAR の 4 隅に直角に、合計 8 個のばねが設けられるとして SPAR の yaw 復原ばねを算定した。初期張力 50kN を導入し、無限長カテナリーとして算出した各チェーンの水平ばね係数は 20.3 kN/m である。果たして、yaw 復原ばねが排水量に比して小さいので、固有周期は約 30 秒と長く、yaw 応答の時刻歴解析結果（図-8）では短周期のトルク変動には応答しなかった。しかし、固有振動が励起され、その振幅が大きかった。そこで、タワー下部に面積 90m² の 8 枚の平板を放射状に取り付け抗力減衰(Cd=2.0 相当)を与えた結果、図-9 のように最大振幅を抑制できる。

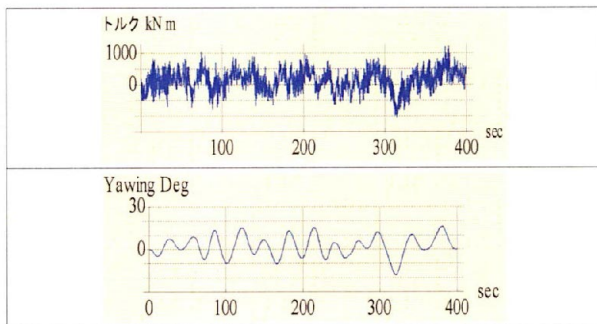


図-9 yaw トルクと回転応答

5. おわりに

簡便な設計手法をもとに水深100m程度の浅海域でのSPAR型浮体の多点係留の成立性に関わる種々の検討を行った。その結果、従来アンカー・チェーン緩係留あるいはサクション杭・チェーン・鋼索複合トート係留が可能性あると確認した。また、損傷時の解析によって係留システムの要目が決まることも分かった。さらに yaw 復原ばねが小さい結果時刻歴解析により低減工が要ることがわかった。

本研究で主に用いた簡易解析法や損傷時解析法には幾つかの前提条件を仮定しているので、今後は厳密な時刻歴解析との比較を行いその妥当性を検証する必要がある。また、yaw 応答については荷重含め運動抑制工法の有効性確認も必要である。さらに、設置費を基に浅海域における SPAR に関する最適な係留システムを明確にする必要がある。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究（B）（20360202）の助成を受け実施したものである。研

究実施にあたり貴重な討論をいただいた同研究グループの各位に対し厚く謝意を表します。

付録

特性長 a_0 、カテナリー一般部及び海底部傾斜角の正接 p_0 、 p_{b0} とした場合のマトリックス C の成分は以下の通りである。それぞれ、カテナリー上端での増分変位 dx, dy に対する偏微分係数 C_{11} ($=dx/da_0$)、 C_{12} ($=dx/dp_b$)、 C_{21} ($=dy/da_0$)、 C_{22} ($=dy/dp_b$) である。

$$C_{11} = \sinh^{-1} p_0 - \sinh^{-1} p_{b0} - \frac{p_0 - p_{b0}}{\sqrt{1 + p_0^2}} \quad (A1)$$

$$C_{12} = a_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 + p_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + p_{b0}^2}} \right) \quad (A2)$$

$$C_{21} = \sqrt{1 + p_0^2} - \sqrt{1 + p_{b0}^2} - \frac{p_0(p_0 - p_{b0})}{\sqrt{1 + p_0^2}} \quad (A3)$$

$$C_{22} = a_0 \left(\frac{p_0}{\sqrt{1 + p_0^2}} - \frac{p_{b0}}{\sqrt{1 + p_{b0}^2}} \right) \quad (A4)$$

参考文献

- 1) 関田欣治, 大村優太, 臼井慧介, 大川 豊: トート係留に使用するための杭型及び平板アンカーの試設計と適用性検討, 土木学会, 海洋開発論文集, VOL. 22, pp. 739-744, 2006.
- 2) API: Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures, *API RP 2SK*, 2nd ed., American Petroleum Institute, 1996.
- 3) 鈴木英之: 成果報告書「浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究」, 各種浮体係留法の比較, (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構JRTT, pp. 44, 2003.
- 4) 砂原 俊之, 関田欣治: 浮体式風力発電に用いる基盤浮体の動揺低減に関する研究, 第20回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, pp. 1-8, 平成20年.
- 5) 宇都宮智昭, 佐藤朋希, 松熊秀和, 矢後清和: 洋上風力発電用スパー型浮体の波浪応答実験と解析, 土木学会, 海洋開発論文集, 2009 (投稿中).
- 6) 関田欣治, 北勝利, 大久保寛: 深く埋設されたアンカー用係留ラインの海底地盤による張力や形状に及ぼす影響, 土木学会, 海洋開発論文集, VOL. 24, pp. 975-980, 2008.
- 7) Aubeny, C. and Murff, J.D.: Simplified Limit Solutions for the Capacity of Suction Anchors under Undrained Conditions, *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp.864-877, 2005.