

# SPAR型洋上風力発電所の耐風・耐波性能

## BEHAVIOR OF SPAR TYPE WIND FIRM AMONG WAVES AND WINDS

新井信一<sup>1</sup>・長尾昌朋<sup>2</sup>・上岡充男<sup>3</sup>

Shinichi ARAI, Masatomo NAGAO and Mitsuo KAMIOKA

<sup>1</sup>正会員 工博 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科 (〒326-8558 栃木県足利市大前町268)

<sup>2</sup>正会員 工博 足利工業大学助教授 工学部都市環境工学科

<sup>3</sup>正会員 足利工業大学 工学部都市環境工学科

It is essential for Japan to investigate the possibility of a floating type wind farm on the ocean. A SPAR type structure is selected as a base of a 2MW-wind turbine set at sea of the depth 100m. An equation for the wind load on a rotor is deducted and the inclination of the SPAR is estimated. Then, after the motions among waves calculated by applying Morison's equation are examined with experimental results, the maximum inclination of the SPAR due to irregular waves is estimated as well. The total inclination seems to be allowable for the wind turbine generating. It is also found that the mooring point on a SPAR at the level of the gravity center is better for SPAR motion than the point at the level of sea surface.

*Key Words : Wind turbine, floating structure, motion in waves, wind load, mooring.*

### 1. 緒言

二酸化炭素などの温室効果ガス排出を低減するために、クリーンな再生エネルギーの利用は重要な課題である。その再生エネルギーの中でも風力発電は現時点では最も有望視されている。欧州では、陸上に加えて洋上での風力利用も進んでおり、浅い海底から直立するモノタワー式風力発電が既に実用段階にある。デンマークでは必要電力の10%を陸上風力、40%を洋上風力から、また、英国では10%を洋上風力から発電しようとしている。

一方、我が国では、陸上の風力利用がまだ活発とは言えず、また、周辺の広大な洋上を利用するためには多くの技術的課題を解決しなければならない。急峻な海底が多い我が国では、欧州では必要とされない浮遊式発電所の建設技術が課題の一つとなる。これらの点に関し既にいくつかの系統的検討が開始されており<sup>1)・2)</sup>、成果がまとめられつつあるが、更なる検討が必要である。

本研究の目的は、洋上風力発電所の重要な要素である、浮遊式構造物(以下、浮体と称する)の耐波性能や耐風性能を明らかにしていくことである。その際、浮体の挙動に与える稼働風車の影響を考慮しなければならない。暴風時には発電が停止され風車

は静止するため、従来の構造物と同様の取り扱いが可能となる。しかし、稼働中には、風車に作用する風荷重の算定が必要となる。ところが、著者らの知るところ、その算定法は公にされておらず、洋上発電所を検討する際に支障となる。

そこで、ここでは風車稼働時の浮体の挙動を中心に検討することとした。ただし、暴風時についても参考程度には調べた。研究の第1段階として、風車にかかる風荷重の定常成分の考察から検討を開始することとし、その変動成分の検討は次の段階とした。浮体としてはいろいろな形式が考えられる中から、上下揺れと横揺れで長い固有周期を期待できる、鉛直長円筒形のSPAR型構造物を選び、係留状態での風荷重に対する傾きや波浪中の運動を調べた。

### 2. 検討モデル

欧州では、2000年に英国のBlyth沖に出力2MWのモノパイル・モノタワー式が2台とデンマークのMiddelgrundtenにやはり出力2MWで重力基礎式モノタワー式20台が設置され、営業運転が開始された。営業運転できる最小規模は1機当たり1.5MWとされている。

一方、我が国ではまだ実績はないものの、JOIA

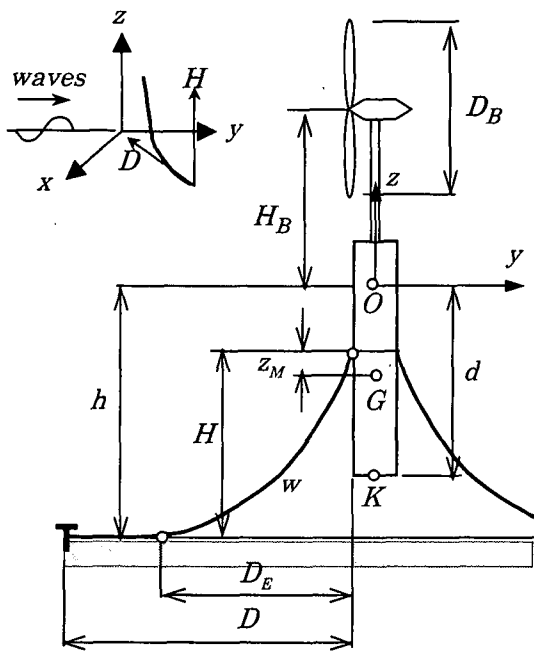


図-1 SPAR型風力発電基地モデル

(社・日本海洋開発産業協会)にて既に浮遊式洋上風力発電が検討されている<sup>2)</sup>。そこでは複数の浮体方式が検討され、風車としてはプロペラ型(3MWと5MW)と直線翼垂直軸型(1.7MW)が取り上げられている。上述のようにプロペラ型は既に2MWが洋上で欧州で実用されている。一方、垂直軸型は風向に影響されず発電できる点が長所であり魅力があるが、このクラスの実績がまだない。

以上のことを参考に、本研究では図1に示すごときモデルを検討することとした。すなわち搭載する風車は実績を重んじてBlythの3枚羽根プロペラ型風車とし、浮体は先に述べた比較的構造が単純なSPAR型浮体である。これらの諸元は表-1に示されている。なお、使用風速範囲4~25m/s、ナセル重さ558kN、ローター重さ225kNであり、タワーは長さ50m、直径3.5m~2.2m、重さ980kNである。発電電力は水素に変換して貯蔵することを想定し、従って、送電線は考慮されていない。

表-1 検討される洋上風力発電所の諸元

項目		項目	
風車直径 $D_B$	66m	SPAR部半径 $R$	8m
ナセル高 $H_B$	58m	OG	45m
SPAR部全高	80m	環動半径	26.9m
SPAR喫水 $d$	72m	水深 $h$	100m

係留については、設置水深が深いので鎖の自重を生かしたカテナリー係留とし、浮体円周方向に複数本を等間隔に張りまわす方式とした。緩係留状態から緊張状態になって衝撃的な力が発生することを防ぐため、海底部の鎖に十分な長さを確保する。具体

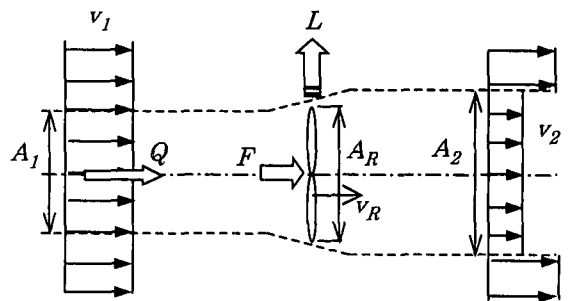


図-2 風車の発電量と作用外力

的な係留諸元は風荷重や浮体運動解析結果を考慮して後に決定される。

施工法については、著者らの専門の域を外れるので机上の案になる恐れがあるけれど、以下のように考えている。まず、基礎浮体(SPAR部分)を横倒しにして浮かべ、設置海域に曳航してから姿勢を正しく直す。上部構造物(風車部+タワー)は、最寄りの港で組み立てた後、台船により現地へ運搬し、クレーンにより基礎浮体に取り付ける。風車部の設置に関して、Blythでは1機目の海上での風車組み立てに難渋したため2機目はこの方式に変えている<sup>3)</sup>。

### 3. 風車の風荷重

ここでは風車の出力係数を求めるモデル<sup>4)</sup>を使用して、風荷重を推定する。

風車にあたる空気の流れを図-2のごとくモデル化する。すなわち、面積 $A_1$ 速度 $v_1$ で流量 $Q$ の風が受風圧面積 $A_R$ の風車に仕事をして、運動量を失い、後流域で圧力が回復して面積 $A_2$ 速度 $v_2$ の流れになる。

空気の流れが等温で密度 $\rho$ が一定とみなせれば、エンタルピーは圧力項と速度項のみとなる。その時、風車から引き出されるエネルギー $L$ は、上流と下流のエネルギーの差であり、圧力項の差はないから、

$$L = \frac{1}{2} \rho Q (v_1^2 - v_2^2) \quad (1)$$

一方、受風圧面積 $A_1$ の理想風車を単位時間に通過する風のエネルギー $L_1$ は、

$$L_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 \quad (2)$$

である。よって、 $A_1 \cong A_R$ とみなせば、出力 $L$ の風車の出力係数 $C_p$ は、 $v_2/v_1$ の関数として次式のように求められる<sup>4)</sup>。

$$C_p = L/L_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left( 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \quad (3)$$

風車に働く力を $F$ とすると運動量の定理と連続の式から、

$$F = \rho A_2 v_2 (v_1 - v_2) = \rho A_R v_R (v_1 - v_2) \quad (4a)$$

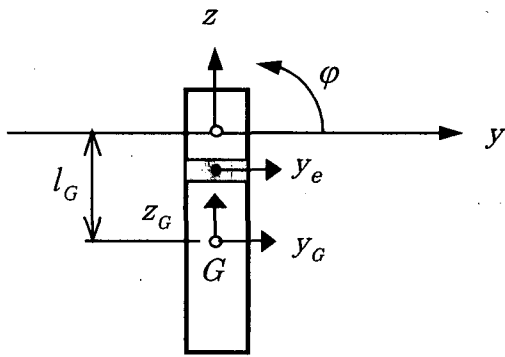


図-3 左右揺れと横揺れに対する浮体の要素

風が風車にした仕事は単位時間当たり  $Fv_R$  であるから、これが  $L$  に等しいと置くと  $v_R$  と  $v_1$ ,  $v_2$  の関係が得られ、(4a)式は

$$F = \frac{1}{2} \rho A_R v_1^2 \left( 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \quad (4b)$$

となる。後流速度が理論上ゼロとなる極限を考えると、式(3)により、利用できるエネルギーは存在する分の半分で、また、式(4)により、作用外力は鉛直壁に働く噴流の力の半分となる。

式(3)は、 $v_2/v_1 = 1/3$  で出力  $C_p = 0.593$  の最大を与えるが、実際には  $C_p = 0.4$  がせいぜいとされる<sup>4)</sup>。そこで、 $C_p$  を 0.4 以下と制限すれば、 $C_p$  と  $F$  は  $v_2/v_1$  を通して 1 対 1 の対応となる。いま、使用する風車は効率がよいと仮定すれば、ほぼ  $C_p = 0.4$  であり、その時の作用外力  $F$  を求め、これを風車への設計外力とする方法が考えられる。 $C_p = 0.4$  の時には  $v_2/v_1 = 0.734$  であるから、風荷重算定式として式(5)を得る。

$$F = 0.231 \rho A_R v_1^2 \quad (5)$$

ところで、技術マニュアル(案)<sup>1)</sup>には海底固定式風力発電塔の設計が試みられており、そこではローターに作用する風荷重にメーカー指定値が使用されている。それによれば風車直径 55m、風速 17m/s で指定荷重は  $F = 228\text{kN}$  である。一方、式(5)による算定荷重は  $F = 190\text{kN}$  となり、やや小さい。理由としては、式(5)を誘導する際に各種のエネルギー損失を無視したことと、指定荷重は設計上安全側に設定される性質があることなどが考えられる。

そのため、実際の運用にあたっては理論式(5)の修正が必要となる。複数例の指定荷重を調査しないと結論できないけれど、ここでは、本研究対象の風車直径 66m とほぼ同じ規模である引用例の値を尊重し、式(5)の二割増とした式(6)を「効率がよい風車」の稼働時の風荷重とする。

$$F = 0.277 \rho A_R v_1^2 \quad (6)$$

#### 4. 浮体の波浪中の運動方程式

座標や浮体諸量、係留諸量を図-1のごとくとする。 $w$  は係留鎖の単位長さ当り海中重量である。また、SPARの円柱部の半径を  $R$  とする。波高を  $2\eta_a$ 、波数を  $k$ 、角周波数を  $\sigma$  とし、入射波

$$\eta = \eta_a \cos(ky - \sigma) \quad (7)$$

が図-1のごとく来襲する。浮体はこれに应答し、その運動は重心点での左右揺れ (Swaying,  $y_G = y_a \cos(\sigma + \varepsilon_y)$ ) と上下揺れ (Heaving,  $z_G = z_a \cos(\sigma + \varepsilon_z)$ ) および横揺れ (Rolling,  $\varphi = \varphi_a \cos(\sigma + \varepsilon_\varphi)$ ) で表すことができる。

その運動を求めるために必要な流体力の計算方法については、特異点分布法や領域分割法などいろいろな方法があるが、ここではSPAR型浮体の形状特性に適していると思われる。また、比較的運用が簡単なモリソン式を用いることとする。この方法は、より形状が複雑な半潜水構造物の運動解析にも有効である<sup>5)</sup>。ただし、流体力係数の値を注意深く選定する必要がある。

##### (1) 左右揺れと横揺れの運動方程式

図-3に示すようにSPARを厚さ  $dz$  のいくつかの輪切りの要素  $e$  に分ける。 $l_G$  は重心  $G$  が座標軸原点  $O$  の上にあるときを正とする。浮体が左右揺れと横揺れをした時に、 $z$  にある要素  $e$  の  $y$  方向変位  $y_e$  は

$$y_e = y_G - (z - l_G)\varphi \quad (8)$$

波による水平方向水粒子速度を  $v$  とし、この要素に働く  $y$  軸方向流体力をモリソン式で求めると、

$$dF_M = -C_a \rho A_W dz (\ddot{y}_e - \dot{v})x - C_d \rho R dz | \dot{y}_e - v | ( \dot{y}_e - v ) \quad (9)$$

ここに、 $C_a$  は付加質量係数、 $C_d$  は抗力係数、 $A_W = \pi R^2$  である。この他に要素には進行波の圧力による、いわゆるフルードクリロフ力が働き、浮体要素の円周面積上でその圧力を積分すると、それは、

$$dF_F = \rho A_W dz v \quad (10)$$

よって、この要素に働く力を合計することにより、左右揺れと横揺れの運動方程式は、

$$M \dot{y}_G = \int_d (dF_M + dF_F) + F_{Ky} \quad (11)$$

$$I_\varphi \ddot{\varphi} = \int_d (z - l_G) (-dF_M - dF_F) + F_S + F_{K\varphi} \quad (12)$$

ここに、 $M$  は浮体の全質量、 $I_\varphi$  は重心周りの慣性モーメント、 $F_{Ky}$  と  $F_{K\varphi}$  はそれぞれ  $y$  方向と  $\varphi$  方向の係留反力、 $F_S$  は静水圧による復元モーメントである。

これらを整理すれば、左右揺れの運動方程式として、

$$(M + C_{ay} \rho A_W d) \ddot{y}_G + \frac{2}{3\pi} C_{dy} \rho R \int_d U_{0y} dz \dot{y}_G$$

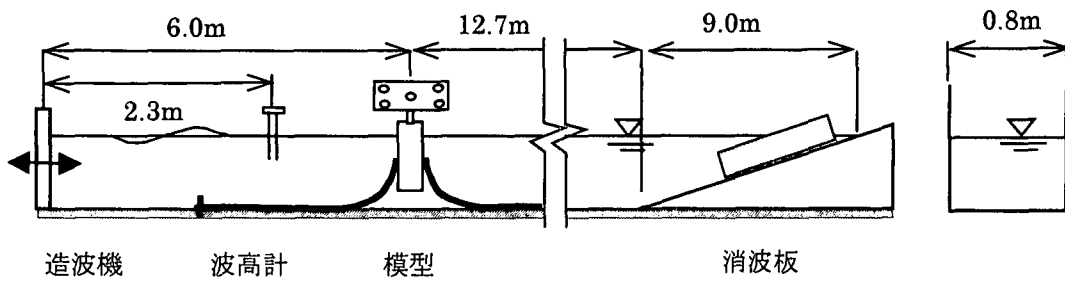


図-4 実験状況

$$\begin{aligned}
 &+K_{yy}y_G + K_{yz}z_G + C_{ay}\rho A_W \int_d^0 (z-l_G) dz \ddot{\phi} \\
 &+ \frac{2}{3\pi} C_{dy}\rho R \int_d^0 U_{0y}(z-l_G) dz \dot{\phi} + K_{y\phi}\phi \\
 &= (1+C_{ay})\rho A_W \int_d^0 \dot{v} dz + \frac{2}{3\pi} C_{dy}\rho R \int_d^0 U_{0y}v dz \quad (13)
 \end{aligned}$$

また、横揺れの運動方程式として

$$\begin{aligned}
 &\left[ I_\phi + C_{ay}\rho A_W \int_d^0 (z-l_G)^2 dz \right] \ddot{\phi} \\
 &+ \frac{2}{3\pi} C_{dy}\rho R \int_d^0 U_{0y}(z-l_G)^2 dz \dot{\phi} \\
 &+ (\rho g A_W d \cdot \overline{GM} + K_{\phi\phi})\phi + K_{\phi z}z_G \\
 &+ C_{ay}\rho A_W \int_d^0 (z-l_G) dz \ddot{y}_G \\
 &+ \frac{2}{3\pi} C_{dy}\rho R \int_d^0 U_{0y}(z-l_G) dz \dot{y}_G + K_{\phi y}y_G \\
 &= -(1+C_{ay})\rho A_W \int_d^0 \dot{v}(z-l_G) dz \\
 &- \frac{2}{3\pi} C_{dy}\rho R \int_d^0 U_{0y}v(z-l_G) dz \phi \quad (14)
 \end{aligned}$$

をうる。ここに、 $K_{ij}$ は*j*方向の運動により*i*方向に発生する係留系反力のバネ定数である。また、付加質量係数と抗力係数の添え字*y, z*はそれぞれの流体力の方向を示している。

式中、 $y=0$ での水平方向水粒子速度は

$$v = \sigma \eta_a \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(\sigma t) \quad (15)$$

であり、要素との相対速度は

$$\dot{y}_e - v = U_{0y} \cos(\sigma t + \epsilon_{Uy}) \quad (16)$$

とされている。そして、モリソン式の相対速度の自乗の項を、1周期になす仕事が変わらないように線形化している。

## (2) 上下揺れの運動方程式

上下揺れの場合の流体力は、鉛直壁面における流体摩擦を無視すると、底面に作用する分しかないことを考慮して、運動方程式は

$$\begin{aligned}
 &(M + C_{az}\rho A_W d) \cdot \ddot{z}_G + \frac{4}{3\pi} C_{dz}\rho A_W U_{0z} \dot{z}_G \\
 &+ (\rho g A_W + K_{zz})z_G + K_{zy}y_G + K_{z\phi}\phi \\
 &= C_{az}\rho A_W d \cdot \dot{w}_{z=-d} + \rho g \eta_a \int_{bottom} p_{z=-d} dA
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{4}{3\pi} C_{dz}\rho A_W U_{0z} w_{z=-d} \quad (17)$$

ただし、ここでの*p*は進行波の動圧力である。また、バネ定数や流体力係数の添え字の意味は前例と同じである。

$z=-d$ の浮体底面での鉛直方向水粒子速度は

$$w_{z=-d} = -\sigma \eta_a \frac{\sinh k(h-d)}{\sinh kh} \sin(\sigma t) \quad (18)$$

であり、浮体底面での相対速度を

$$z_G - w_{z=-d} = U_{0z} \cos(\sigma t + \epsilon_{Uz}) \quad (19)$$

とされている。また、前例と同様に線形化している。

3方向の運動方程式ともに運動振幅の自乗の量が含まれているので、運動振幅の初期値を設定して、運動方程式の答えが収束するまで繰り返し解くこととなる。

なお、カタナリー係留点の変位に対する反力および係留バネ定数の計算方法は、高木ほか<sup>6)</sup>の方法によった。

## 5. 運動の計算結果と実験結果の比較・考察

### (1) 実験方法

実験模型は約1/180で図-4に示すように造波水槽に設置された。造波機は反射波吸収式である。模型の諸元は表-2の通りである。係留鎖は市販の装飾用鎖で、これを波上側と波下側に1本ずつ設置し、浮体重心高さに係留した。これは実機で考えると、φ120mmの鎖12本を浮体の周りに等角度で張り巡らした状態と力学的には概ね対応する。運動は、水槽側面からビデオカメラにより記録され、画像解析により求められた。そのための計測用追跡マークのボー

表-2 実験模型の主要目

項目		項目	
SPAR高	50.0cm	水深 <i>h</i>	55.0cm
SPAR喫水 <i>d</i>	40.0cm	鎖水中重量 <i>w</i>	0.290N/m
SPAR半径 <i>R</i>	4.5cm	鎖高さ <i>H</i>	30.0cm
KG	12.5cm	鎖水平長さ <i>D</i>	253cm
		鎖持ち上がり	
環動半径	15.0cm	水平長さ <i>D<sub>E</sub></i>	44.6cm

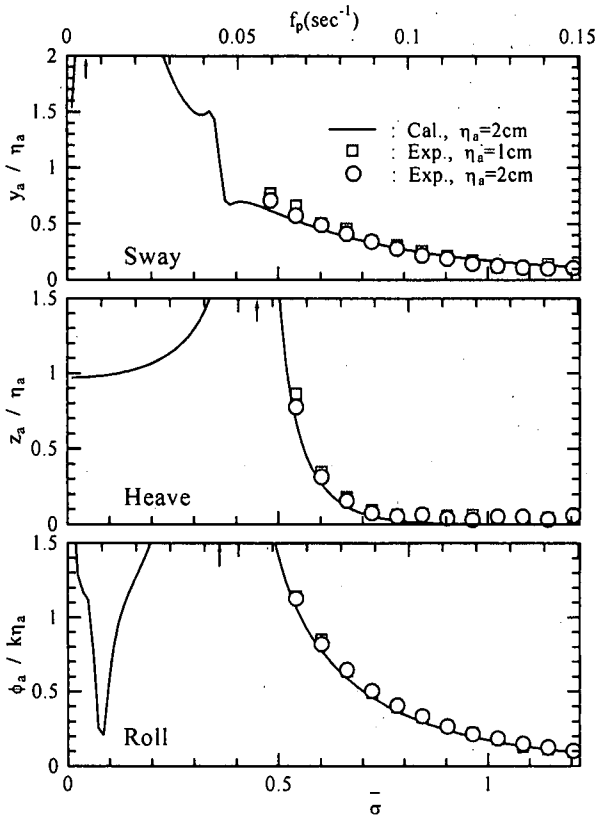


図-5 浮体運動の実験値と計算値  
 $(\bar{\sigma} = \sigma \sqrt{2R/g}, f_p : \text{実海域の波周波数})$

ドが風車の代わりに図-4のように浮体上部に載っている。造波した波は規則波で、稼動時の海象条件をカバーする範囲の波周波数で実験を実施した。

## (2) 計算結果と実験結果

予め浮体の上下揺れ自由動揺試験を実施し、付加質量係数  $C_{az} = 0.14$  を得た。このモードの付加質量に関しては、浮体底面周りの流体现象が支配的であるから、円筒面半径を半径とする半球の流体質量  $2\rho\pi R^3/3$  で与える考え方があがるが、それから本例の定義の付加質量係数を求めると  $C_{az} = 0.15$  となり、殆ど同じ値になる事がわかった。ここでの計算には前者の値を用いることとした。また、 $C_{ax} = 1.2$ ,  $C_{ay} = 1.0$ ,  $C_{dy} = 1.2$  とした。

運動振幅計算結果を実験結果とともに図-5に示す。横軸  $\bar{\sigma}$  は無次元波周波数である。図中の矢印は、自由動揺試験による同調周波数である。実験値と計算値は実験の範囲で極めてよい対応を示しており、運動計算方法の妥当性を確認できる。

実験波は、実海域で表現すると周期が15秒から6.7秒まで造波した。その範囲では波周期が短く、すなわち周波数が大きくなるほど運動は小さくなる。発電稼動時には、後出の有義波波周期が7.2秒であるから、このSPARの発電稼動時の運動がきわめて小さいことを期待できる。

運動の同調周波数は、具体例は割愛するが、上下

揺れでは喫水が大きくなるほど小さくなり、横揺れでは重量配分の調整によりGMを小さくすれば小さくなる。そのためある程度は波の存在する範囲でのSPARの運動を小さくするような設計が可能である。

また、実験の範囲内では係留鎖は、緊張したり踊ったりすることはなく、緩係留状態を保っていた。

## 6. 風と波によるによるSPARの挙動

以上を元に、実機での挙動を調べてみる。係留方法を3ケース考えた。使用係留鎖は  $\phi 120\text{mm}$  で長さが270m、海中重量は2.94kN/m、破断荷重は6.79MNである。また、波は不規則波で、ブレットシュナイダー・光易のスペクトルを有するものとする。

ケース1は、実験の係留にほぼ対応するもので、12本を張り巡らせる。初期張力は313kNで係留高さは浮体重心位置とする。これは、やや過剰係留と思われるので、ケース2では係留鎖本数を減らして8本にした。ケース3は、本数は8本であるが浮体水面位置に係留し、初期張力を2倍にした。いずれの係留もいわゆる緩係留で、ゆったりと張られている。

稼動時の気象条件は、風速をカットアウト風速に対応する25m/sとし、波浪条件は有義波高5.9m、有義周期7.2sとした。暴風時の気象条件は、風速50m/s、有義波高12.5m、有義周期12.0sとした。暴風時には波周期が上下揺れと横揺れの固有周期まで存在するので、同調の強さが合計の揺れに影響する。一般に同調の強さは計算では過大評価されるので、後で示される結果は幾分大きめの値を与えていると考えられる。従って、暴風時の結果は参考値としてみていただきたい。

揺れを求める一連の計算は以下の通りである。

①まず、風荷重を計算する。風速の鉛直分布は無視して、高さ方向に一様であるとした。従って、風荷重は実際よりも若干大きめに評価される。風車回転部に働く力は(6)式による。ナセルと風車の塔部と浮体上部に働く風圧力は、やや大きめの評価になると思われるが、 $C_D = 1.2$  として抗力の式から求めた。暴風時は姿勢制御をしないとの考え方に立ち、かつ、風車は停止しているので、翼への荷重は3枚羽の投影面積から、また、ナセルへの荷重はその最大投影面積から計算した。

②次に、その風荷重下に於ける浮体のつりあい位置  $y_{mean}$  と浮体傾斜  $\phi_{mean}$  を求め、その状態の係留反力のバネ定数を求める。

③そのバネ力を浮体の運動方程式に入れ、浮体の応答とナセルでの水平方向加速度を求めた後、スペクトル計算を実施し、標準偏差を求める。その標準偏差を4倍して、1/1000最大期待値としての  $y_{aMax}, z_{aMax}, \phi_{aMax}$  を求める。

このようにして求めた計算結果を表-3と表-4に示す。表中のモーメントは浮体重心周りの値である。ケース1の係留鎖が12本とケース2の8本では浮体

の平衡移動距離が異なるだけで、釣り合い位置での動的挙動は概ね同じとなる。

表-3 稼働時の挙動  
( $U=25\text{m/s}$ ,  $H_{1/3}=5.9\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.2\text{s}$ )

	ケース1	ケース2	ケース3
風荷重	834kN(ローター710kN, ナセル3.2kN, タワー63.4kN, 浮体57.5kN)		
風モーメント	81.2MN・m(ローター73.1MN・m, ナセル0.2MN・m, タワー4.94MN・m, 浮体2.82MN・m)		
$y_{mean}$	5.30m	7.23m	7.20m
$\varphi_{mean}$	0.0566rad	0.0568rad	0.0293rad
$y_{aMax}$	0.79m	0.79m	0.73m
$z_{aMax}$	0.040m	0.039m	0.043m
$\varphi_{aMax}$	0.050rad	0.050rad	0.057rad
$\varphi_{total}$	0.107rad	0.107rad	0.086rad
ナセル水平加速度	5.11m/s <sup>2</sup>	5.10m/s <sup>2</sup>	5.57m/s <sup>2</sup>

表-4 暴風時の挙動  
( $U=50\text{m/s}$ ,  $H_{1/3}=12.5\text{m}$ ,  $T_{1/3}=12.0\text{s}$ )

	ケース1	ケース2	ケース3
風荷重	729kN(ローター178kN, ナセル67.5kN, タワー253kN, 浮体230kN)		
風モーメント	56.3MN・m(ローター18.3MN・m, ナセル6.95MN・m, タワー19.7MN・m, 浮体11.3MN・m)		
$y_{mean}$	4.72m	6.55m	6.35m
$\varphi_{mean}$	0.0388rad	0.0389rad	0.0150rad
$y_{aMax}$	4.43m	4.42m	4.65m
$z_{aMax}$	8.59m	8.33m	8.97m
$\varphi_{aMax}$	0.187rad	0.188rad	0.454rad
$\varphi_{total}$	0.226rad	0.227rad	0.469rad
ナセル水平加速度	12.8m/s <sup>2</sup>	12.8m/s <sup>2</sup>	21.6m/s <sup>2</sup>

風車稼働時の傾斜の制限として、確定値ではないが10度(0.174rad)程度まで対応できるといわれている。ケース1および2は稼働時にはその約6割の値であり、問題はないと思われる。しかし、暴風時には10度を超過してしまう。この場合は構造的にもてばよいので、ナセル高さでの加速度が重要になると考えられる。それは、重力加速度の3割増となっており、風車の設計に考慮されるべきである。なお、ケース2で、最大張力は1.89MN、その時のアンカー把駐力は1.68MNとなる。

ケース3は、風に対する浮体の傾斜を低減するべく、浮体上の係留点を水面まで上げ、係留による復原力を期待した例である。結果を見ると、静荷重に対しては確かに傾斜が小さくなるけれど、運動は、横揺れの固有周期が小さくなって波の方に近づき、

よって、横揺れが増加する。その結果、合計の傾斜は、稼働時において小さくなる効果が見られるものの、暴風時には逆に大きくなるのがわかる。この時ナセルでの加速度も大きいので、このような係留は得策ではないように思われる。

## 7. 結論

SPAR型浮体に2MWクラスの風車を搭載して、水深100mの海域に鎖で係留される発電所を想定し、波と風に対するその耐候性を調べた。今後、風の変動成分の影響を調べる必要があるけれど、本検討モデルについて得られた結果は以下の通りである。

- 1) 風車稼働時にローターに働く風荷重が理論的には式(5)となる。しかし、摩擦損失などに対する修正が必要で、本研究ではメーカー指定荷重を参考にした修正式(6)を用いた。
- 2) 浮体に働く波力の計算にモリソン式を用いて浮体運動を求めたところ、実験値とよく一致した。
- 3) 定常風と不規則波に対するSPAR型浮体の挙動を調べてみると、浮体の水面高さに係留するよりは重心高さに係留した方が、よい結果となる。その時、稼働海象条件においては、横揺れは最大6.1度(0.107rad)であり、暴風時には12.9度(0.227rad)となる。発電可能な限界の傾きを10度程度とすれば、本例のSPARは風力発電用浮体として合格といえる。ただしナセル設計の際には、暴風時に重力加速度以上の水平加速度がかかるので、注意が必要である。

謝辞：足利工業大学の牛山泉教授と(社)日本海洋開発産業協会の金網正夫氏には貴重なご助言をいただいた。また、足利工業大学平成14年度卒業研究生の久保田進氏、田中康子氏、山本和文氏には実験に際して絶大なる尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 洋上風力発電基礎工法の技術(設計・施工)マニュアル(案), (財)沿岸開発技術研究センター, 2000.11.
- 2) 金網正夫: 浮遊式風力発電について—海洋自然エネルギー総合利用システムの実現を目指して—, 第2回風力エネルギー利用総合セミナー, 足利工業大学総合研究センター, pp.58-69, 2002.6.
- 3) Still D. and Grainger W.: Blyth—the UK's first offshore wind farm, MAREC2001, pp.3-5, 2001
- 4) 牛山泉, 三野正洋: 風車の基礎知識, 小型風車ハンドブック第4版第3章, パワー社, pp.45-66, 1994.
- 5) 飯塚智樹, 新井信一, 長尾昌朋, 上岡充男: 孤立波に対する無係留半潜水型構造物の運動応答に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.15, pp.381-386, 1999.
- 6) 高木又男, 新井信一, 梅野佳子: 係留浮体の規則波中の運動に関する理論計算, 日本造船学会論文集, 第135号, pp.81-93, 1974.6.