

基礎構造が異なる海上風力発電施設の波浪及び 風に対する振動特性の解析

STUDY ON THE VIBRATION RESPONSE TO WINDS AND WAVES OF OFFSHORE WIND TURBINES WITH A DIFFERENT SUBSEA BASE STRUCTURE

関田欣治¹・林辰樹²

山下 篤³・井口高志⁴

Kinji SEKITA, Tatsuki HAYASHI

Atsushi YAMASHITA and Takashi IGUCHI

¹正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

²学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

³正会員 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 建設・技術部

⁴正会員 株式会社 海洋河川研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-18-5 中央第7 西新宿ビル)

The construction of the wind farms in Japan has been planed nearshore such as on caissons of a harbor. However several offshore wind farms have already been constructed in European countries. Since oscillations of the offshore wind turbine have potential of fatigue damage to the wind turbine structures, it is necessary to appropriately select from various sub sea base structures such as a mono-pile, a caisson and a jacket, corresponding to the soil condition of the foundations, water depth and environmental condition so on. Here we conducted the time domain structural analyses for a blades-nacelle-tower-foundation system subjected to fluctuating wind and wave loadings in order to examine the effect of the sub sea foundation to the vibration characteristics of the system. The foundation structures having the three (high, medium, low) level of flexural rigidity were analyzed. As for wind force calculations, two kinds of offshore wind spectra were used, while wave forces were obtained through Morison equation with the associated area and volume of a sub sea base structure. The paper describes the results of dynamic analyses for the structural system in the operational and extreme conditions along with the natural periods of the structural system.

Key Words : Offshore wind turbine, dynamic analysis, waves, fluctuating wind forces, offshore wind spectrum

1. はじめに

我が国では原子力・火力・水力発電の順に発電量が多い。これらの発電のうちクリーンエネルギーである原子力発電はベースエネルギーとして重要であるが核廃棄物処理などの課題は大きい。また石炭・石油・火力発電のように地球温暖化の原因である二酸化炭素を大量に排出しているものもある。そこで地球温暖化を抑制し、かつ再生可能で無尽蔵な新エネルギーである太陽光発電・風力発電・温度差エネルギーなどの石油代替エネルギーの導入が検討されている。しかしながら、これら新エネルギーの我が国での導入においては一次エネルギーの供給に占める割合は1.2%程度である。これには種々の原因があるがとりわけ自然エネルギーが経済性がないとか質や量が一定しない理由による。しかしながら風力発電は大型化と共に商用化が近づいており海洋での建設が進むと環境負荷低減の観点から極めて有望な自然エネルギーになると思われる。日本では、本格的な沖合いの風力発電の導入はまだであるが、海上風が陸上風より適性が高い

事¹⁾などからも今後風力発電の海上利用の導入・検討はヨーロッパ諸国に追従し盛んになると思われる。

そこで本研究では海上展開で考えられる代表的な基礎構造に関し、変動する外力が基礎構造の違いによりタワーにどのように動的な影響を与えるか検討する。

2. 研究目的

海上風力発電施設はローターの回転によってもたらされる振動もさることながら、とりわけ波浪荷重と変動風荷重の作用を同時にくり返し受ける事になるので20年ともいわれる設計寿命に対し施設の疲労問題が顕在化する可能性がある。したがって我が国での海上展開で利用されると予想される代表的な基礎構造²⁾に関し変動する外力が基礎構造の違いによりタワーにどのような影響を与えるか検討する事は海上風力発電施設の耐久性とりわけ疲労損傷度を知る為に不可欠である。そこで本研究では海上風荷重スペクトルから算定した

変動風荷重に加え、波浪荷重を基礎モデル①小剛性基礎②中剛性基礎③大剛性基礎の各基礎構造に与えブレード、ナセル、タワー、基礎からなる、風力発電施設の時刻歴応答解析を実施した。

3. 風力発電施設の特徴

(1) タワーの質量、剛性及び減衰定数

本研究で用いる風力発電施設に関する構造体のモデルを図-1に示す。ただし風力発電装置に関してはENERCON E-40 (500kW)とする。ヨーロッパでは数m程度の水深で数MW級の開発が進められているが我が国では遠浅な海岸が少ないので水深20m地点にハブ高さ50mの風力発電装置を設置する場合を考え、ナセル部を質点1、タワー中間部を質点2と3として波力を受ける基礎部の上端を質点4とした。ナセル部及びブレードの総質量は32.5 t、タワーの質量は17.5 t、タワーは鋼で出来ておりヤング係数Eが $2.05 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、密度は 7.85 t/m^3 である。タワー径は3.256mである。減衰定数hは、質点1では風とブレードとの空気力減衰を考慮し5%に、質点4では流体減衰や地盤による減衰を考慮し同じく5%としている。タワーは鋼構造物で一般に使用されている0.2%とした。図中にある m_{4i} や $E_{4i}I_{4i}$ は基礎構造物の付加質量と地盤の影響を含めた曲げ剛性を示している。この値を変えることによって基礎の違いによる振動影響を比較検討する。

固定されるジャケットを想定する。大剛性基礎はデンマークなどの数mの浅海域で利用されているコンクリートや鋼殻ケーソンに対応する。我が国では様々な地盤条件を有し実際には構造と地盤条件など具体的に検討対象を設定しないと剛性は決定されない。また基礎部やタワー部に作用する波力を算定するため付加質量や投影面積、体積が必要になる、そのため小剛性モデルでは一般的な軟弱地盤中に貫入させた地盤の横抵抗を受けるモノパイルの荷重・変形曲線から水深相当部の長さを有する片持ち梁に近似し、これを基礎部分の等価剛性 (EI_4) として決定した。質量、付加質量、投影面積及び体積はモノパイルの値を採用した。中剛性モデルは同様の方法でジャケットを、また高剛性モデルでは円筒状ケーソンのものを用いる。ただし大剛性の剛性は小剛性モデルの単純に10倍とした。

表-1 基礎のモデルと剛性及び質量

基礎のモデル	曲げ剛性 EI_4 (kNm^2)	質点質量 m_4 (t)	基礎構造例
剛性小	5.8×10^7	310.	・モノパイル ・軟弱地盤上のジャケット
剛性中	2.0×10^8	500.	・コンクリート充填モノパイル ・通常地盤上のジャケット
剛性大	5.8×10^8	510.	・鋼殻ケーソン ・コンクリートケーソン

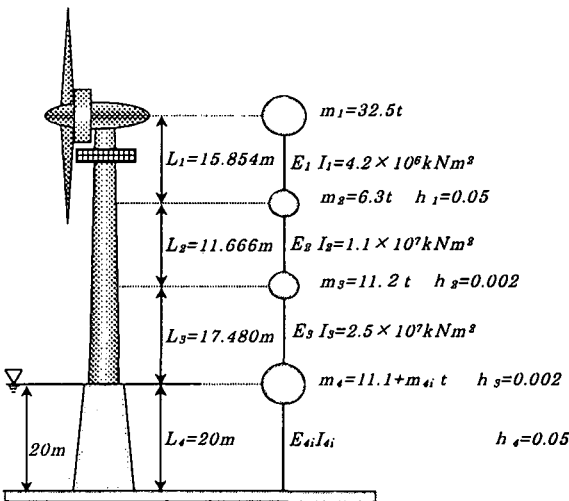


図- 1 構造体のモデル化

(1) 基礎構造形式

基礎の剛性や質量が振動特性に及ぼす影響を見るため、3つの基礎モデルを設定し検討を進める。表-1にあるように、小剛性基礎は通常の強度を有する粘性土地盤に油圧ハンマーなどを用いて打設またはケーシング工法などを用いて貫入設置されるモノパイルや軟弱地盤中に杭で固定されるジャケットを、中剛性基礎とはコンクリート充填し剛性を高めたモノパイルや通常の強度を有する地盤に

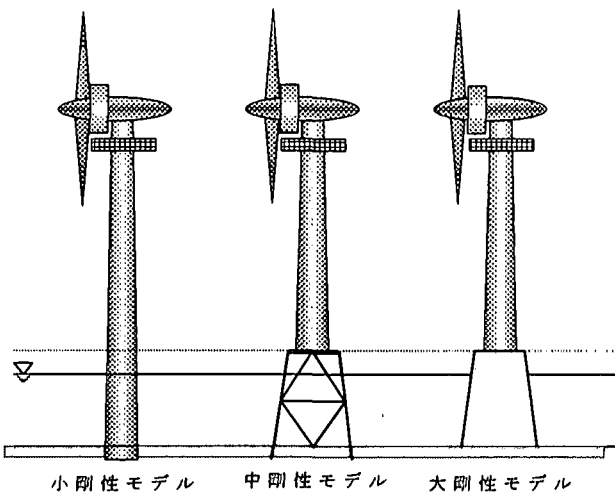


図- 2 基礎構造のケース

4. 解析方法及び理論

(1) 変動外力

a) 風荷重

ここでは加藤ほか³⁾の海上風パワースペクトルにより、高さ10mでの平均風速を10m/sとした変動風の時系列から次式により図-3に示すようなハブ高さでの風荷重時系列を作成する。なお10m高さでの平均風速(U_{10})からハブ高さでの平均風速 $\bar{U}$ への変換は対数則を用いている。

$$F_{WIND} = 0.5 C_{DW} \rho A_w (\bar{U} + U(t))^2 \quad (1)$$

F_{WIND} : 風荷重 (kN)

$U(t)$: 変動風成分(m/s)

C_{DW} : 抗力係数(-)

ρ : 空気の密度 $1.23 \times 10^{-3} \text{ kNs}^2/\text{m}^4$

A_w : 受圧面積(m^2)

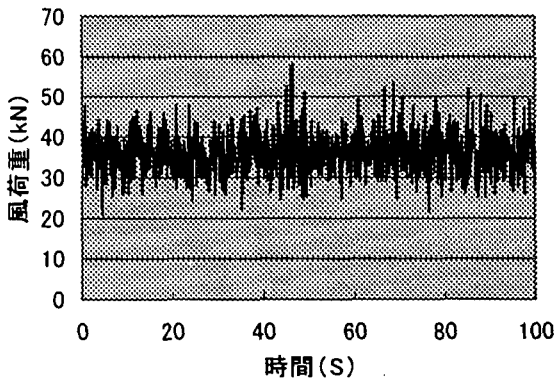


図-3 風荷重の時系列

本論文では通常時、台風時について検討するが台風時の風抗力係数(C_{DW})及び受圧面積(A_w)については発電を停止していることを考慮しそれぞれ表-2のように設定した。

表-2 ハブ部の風抗力係数と受圧面積

	風抗力係数	受圧面積 (m^2)
運転時	$C_{DW} = 1.1$	120 (ブレード回転面積)
台風時	$C_{DW} = 0.8$	60 (ブレード羽3枚面積)

b) 波浪荷重

波浪に関しては微小振幅波理論により水粒子速度を計算し以下に示す部材要素に作用するモリソン式から求める。

$$dF = \frac{w_0}{2g} C_D u |u| dA_n + \frac{w_0}{g} C_M \frac{du}{dt} dV \quad (2)$$

dF : 部材単位長さ当たりの波力 (kN)

w_0 : 海水の単位体積重量 (10.1 kN/m^3)

g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)

C_M : 慣性力係数 (2.0)

C_D : 抗力係数 (1.0)

u : 水粒子の運動速度 (m/s)

du/dt : 水粒子の加速度 (m/s^2)

dA_n : 部材単位長さ当たりの流行方向への投影面積 (m^2)

dV : 部材単位長さ当たりの体積 (m^3)

波浪荷重はタワー、ジャケット、円筒状ケーソンに対し波高が10m、周期10sの規則波に対するものを用いた。

(2) 変動風のシミュレーション

シミュレーションでは、海上での観測から決定された加藤ほか、Ochi&Shin⁴⁾の2つのパワースペクトルを用いて、それぞれの変動風の時系列を作成している。

a) 加藤ほかのパワースペクトル

加藤ほかのパワースペクトルは以下与えられる。

$$f S_u(f) / \sigma^2 = C X / (1 + X^2)^{5/6} \quad (3)$$

$$X = f / A$$

$$A = \frac{1}{2\pi C^{3/2} \kappa} \left(\frac{\sigma}{u^*} \right)^{-3} a^{3/2} \frac{U_z}{z}$$

ここで

$$a \approx 0.345 \quad (\text{Kolmogorov定数})$$

$$C = 0.4751$$

$$\sigma \approx 3.45 u^*$$

$$\kappa = 0.4 \quad (\text{Karman定数})$$

$S_u(f)$: スペクトルの密度関数 (m^2/s)

u^* : 海面の摩擦速度 (m/s)

f : 周波数 (Hz)

z : 海面からの高さ (m)

U_z : z での平均風速 (m/s)

b) Ochi&Shinのパワースペクトル

同様にOchi & Shinのパワースペクトルも以下与えられる。

$$S(f_*) = 583 f_* \quad 0 \leq f_* \leq 0.003$$

$$= \frac{420 f_*^{0.70}}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} \quad 0.003 \leq f_* \leq 0.1$$

$$= \frac{838 f_*}{(1 + f_*^{0.38})^{11.5}} \quad f_* \geq 0.1 \quad (4)$$

ここで,

$$u_* = \sqrt{C_{10}} U_{10}$$

$$f_* = fz/U_z$$

$$S(f_*) = fS_u(f)/u_*^2$$

U_{10} : 高さ10mでの平均風速 (m/s)

C_{10} : 高さ10mの風速により評価された海面の摩擦係数

c) パワースペクトルから時系列への変換

パワースペクトルに $(Su(f))$ を与え、次式により変動風成分 $U(t)$ を作成した。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2Su(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (5)$$

ここで, f_i : スペクトルの計算周波数

N : スペクトルの分割数

Δf_i : f_i 周波数での分割周波数幅

t : 時間

ε_i : 位相

なお、位相はホワイトスペクトルなので、乱数表を使って決定した、こうして式(1)によりブレードに作用する風荷重を算定した。

(2) 解析方法

応答解析は図-1に示したようにランプトマスに近似した振動モデルを用いてモーダルアナリシス法を適用し時刻歴解析を0.1sピッチで100s間行い、固有値解析はヤコビ法を用いた。

5. 解析条件

本研究では表-3のように構造体に風荷重だけを与えた時、波荷重だけを与えた時、そして両方与えた時の3ケースそれに加え、同じく台風を想定した場合の3ケース合計6ケースに対して振動解析を行った。ただし風荷重は質点1のみに作用するものとしている。台風時は波高11mとし、通常時は波高1.5m, 3.0m, 6.0m, 10m高さにおける風速は台風時で50m/s, 通常時は4m/s, 8m/s, 12m/sに設定した。

台風時はブレードの回転を止め、ストール状態でブレードとナセル部及びタワー頭部のみが風を受ける。一方通常時はブレードが回転し、ナセル部とブレードで風を受ける。それぞれに対する風荷重の算定は前述の表-2に述べた通りである。

表-3 解析ケース

条件	ケース	風荷重	波荷重
通常時	1	○	×
	2	×	○
	3	○	○
台風時	4	○	×
	5	×	○
	6	○	○

6. 解析結果

(1) 各基礎における固有周期

表-4は、それぞれのモデルに関する固有値を解析し4つのモードに対する固有値を求めたものである。

表-4 各基礎における固有周期

	T1(s)	T2(s)	T3(s)	T4(s)
剛性小	0.53	0.37	0.10	0.04
剛性中	0.41	0.21	0.10	0.04
剛性大	0.39	0.15	0.10	0.04

1次の固有周期では小剛性モデルが0.53sと長く他の基礎では、0.39sと短い。また2次モードの固有周期も小剛性モデルが長く、次に中剛性モデル、大剛性モデルの順で短くなる。3次、4次モードの固有周期はほとんど変わらない。

(2) 外力の振動影響・応答形状

a) 通常時応答

図-4から図-6は質点4に通常時で波高の大きい場合、即ち波高6m（周期7s）の規則波の波力を入力し、加藤ほかのスペクトル（高さ10mの平均風速を12m/s）で算定した風荷重に対する解析結果である。

- ・ 周期の長い波浪の応答に短周期の変動風成分による振動が重なった波形を示している。
- ・ ここでは示していないが0chiや加藤ほかの海上変動風スペクトルの違いによる応答の相違は少ない。
- ・ 静的な変位量については、それぞれの基礎に対応して荷重作用方向にずれている。
- ・ 頭部の応答は波浪応答とともに変動風成分と同調し高次モード(4次)の振動が生じており、剛性の小さいわりに質量の大きい小剛性モデルが大きく同調し、大剛性モデルが中剛性モデルよりいくらか大きい。

- ・タワー部の振動は小剛性モデルが大きい。
- ・波高が大きくなると応答がほぼ2乗で大きくなる。

b) 台風時応答

図-7から図-9は質点4に波高11m（周期12s）の規則波と加藤ほかのスペクトルにより10mでの高さの平均風速を50m/sを想定した解析結果である。

- ・ほぼ通常時と同様な傾向にあり、変位は小剛性モデル、中剛性モデルで5倍程度、大剛性モデルで2倍程度大きい
- ・通常時と異なるのは質点2と質点3のタワー中央部の応答が大きい。これは波浪の影響が大きく現れているためである。

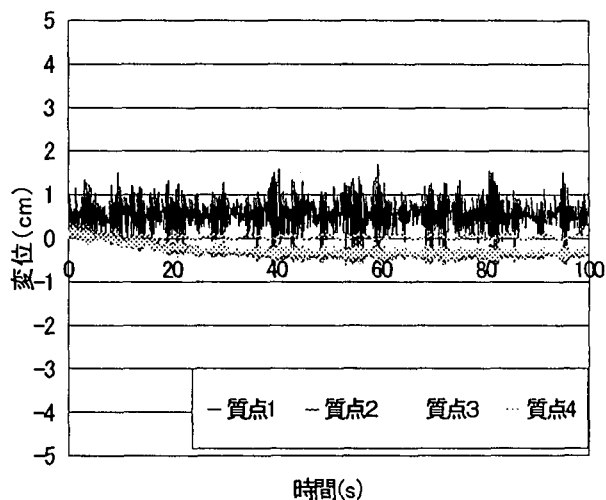


図-6 通常時における大剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

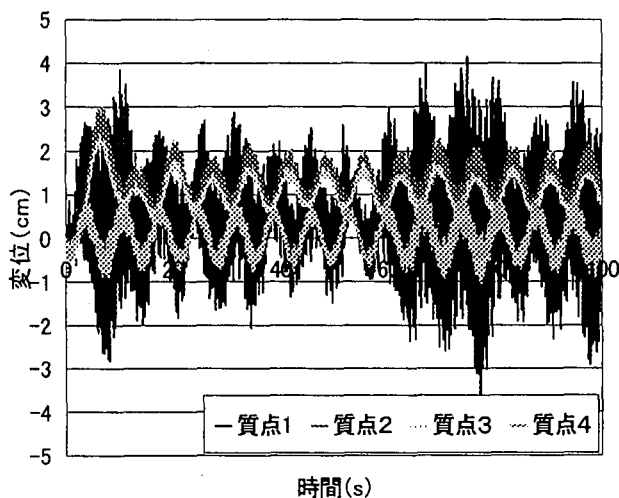


図-4 通常時における小剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

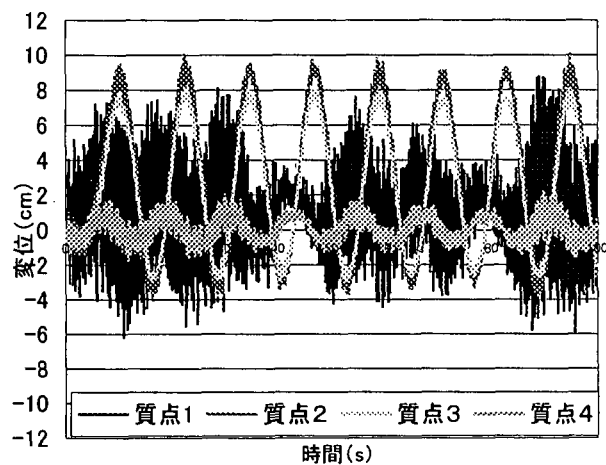


図-7 台風時における小剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

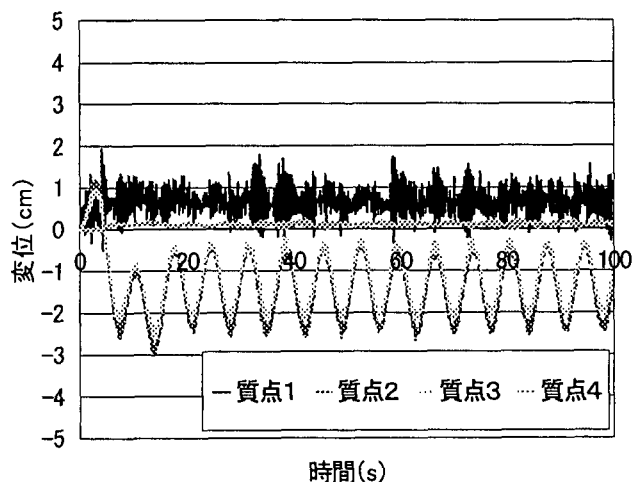


図-5 通常時における中剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

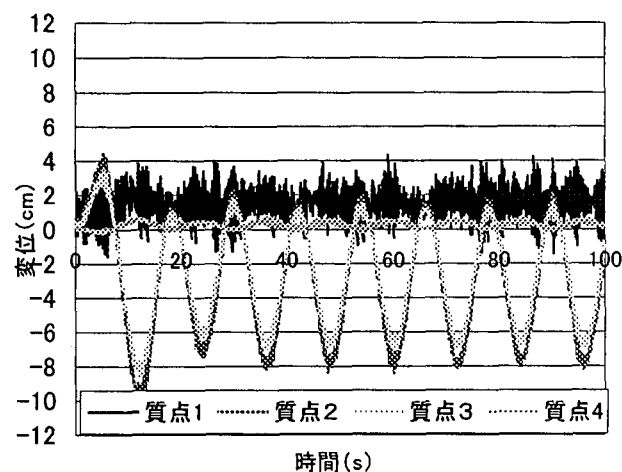


図-8 台風時における中剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

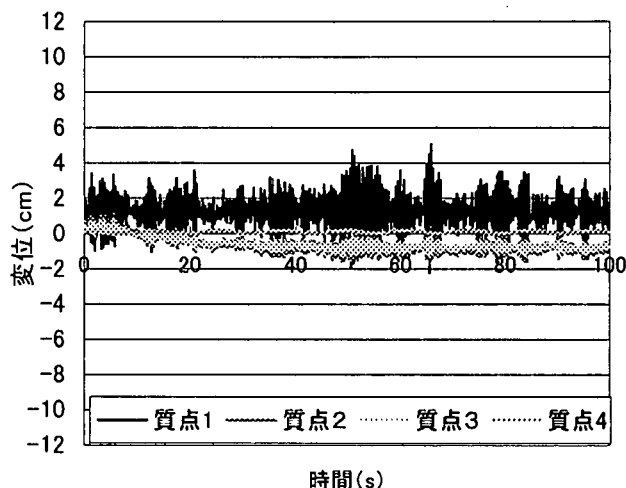


図-9 台風時における大剛性モデルの風・波浪荷重の変動影響

7. おわりに

本研究より得られた結論と今後の課題を以下のように整理し示す。

- (1) 海上で利用されると考えられる代表的な基礎に関し、基礎構造の曲げ剛性や質量の変化によりどのような応答が見られるかを動的解析した結果、基礎構造と上部構造（ナセル部・タワー部）の相互的な振動、及び適切なタワーと基礎の必要性が判明した。今後の研究では更に一般化した結論を得るため上部構造と基礎構造部の適切な組み合わせ、及び各構造物に対応した波・風荷重を設定し、振動解析によって両構造部がどのようにあるべきかを詳細に検討していく必要があると思われる。

(2) 解析から得られた結果を考え、基礎の重量が大きい大剛性モデルは剛性が小剛性モデルの10倍以上と大きいことから変位が小さい為にタワーに与える振動も少ないものと考えられる。これらから判断すると、振動影響に関しては大剛性モデルが適していると考えられる。ただしケーソンでは波の影響を大きく受けるので不利と考えられる。したがって波力を受けにくく剛性の大きい構造形式がすぐれると思われる。

(3) 振動解析の結果より風力発電本体の振動に大きな影響を与えるのは基礎構造であり、基礎構造の風・波荷重による影響は上部構造の振動を支配するものと考えられる。またブレードは減衰機構として作用することが分った。しかしながら、我々の使用した空気力減衰特性が実際的な値であるかの検討が模型実験や現地観測により決定することが重要になるといえる。

参考文献

- 1) 井口高志ほか：海上風力発電の優位性の研究，海洋開発論文集，Vol. 16, pp. 141-146, 1999.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：洋上風力発電基礎工法の技術（設計，施工）マニュアル（案），pp. 17-19, 2000.
- 3) 加藤俊司ほか：浮遊式海洋構造物の実海域実験，日本造船学会論文集，第172号，pp. 81-92, 1992.
- 4) Ochi, M. K and Y. Shin: Wind turbulent spectra for design consideration of offshore structures, OTC 5736, Vol. II, pp. 461-467, 1988.