

洋上風力発電施設に作用する風抗力及び減衰定数に関する風洞装置を用いた基礎的実験

FUNDAMENTAL WIND TUNNEL EXPERIMENTS ON WIND DRAG FORCES AND DAMPINGS OF AN OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURE

関田欣治¹・石川裕和²・林辰樹³

山下 篤⁴・林伸幸⁵・矢後清和⁶

Kinji SEKITA, Tatsuki HAYASHI, Hirokazu ISHIKAWA
Atsushi YAMASHITA, Nobuyuki Hayashi and Kiyokazu YAGO

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東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

³正会員 (株)東邦コンサルタンツ (〒202-0022 東京都西東京市柳沢2-2-3)

⁴正会員 新日本製鐵(株)鉄構海洋事業部 建設・技術部 (〒100-8071東京都千代田区大手町2-6-3)

⁵新日本製鐵(株)鉄構海洋事業部 建設・技術部

⁶海上技術安全研究所 海洋開発工学部 (〒181-0004東京都三鷹市新川9-38-1)

Since an offshore wind turbine may be designed considering the effects caused by fluctuating wind and wave loadings as well as forces by rotation of blades, it is necessary to make clear dynamic characteristics such as damping and drag force coefficients of the blades and a tower-like-structure. Therefore we conducted a 1/55 scale model test for a rotor-nacelle-tower-foundation structure of 1500kW wind generator at top. The foundation corresponding to several kinds of structure was modeled as columns having different flexural rigidity. The wind force measurements were done for a sole tower and a tower with rotating and non-rotating three-blades to obtain the drag coefficients of the tower and blades respectively. While the damping constants were measured by free oscillation tests without wind during non-operation, the ones with wind during both operation and non-operation condition were also determined by half power point method for response spectra of strains and accelerations induced in the tower. The paper also describes a comparison with the measured and calculated response of the model.

Key Words: offshore wind turbine, dynamic analysis, waves, fluctuating wind forces, damping, drag force coefficients

1. はじめに

地球温暖化を抑制し、且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注目され、とりわけ風力が経済性、環境性、安定供給の3点で評価が高い。経済性の点ではこれら再生可能エネルギーのなかで突出しており、まさに採算に乗る段階に有る。環境の面でも、化石燃料のように有害な排気ガスを放出しないクリーンエネルギーでもある。ヨーロッパでは風力発電は大型化とともに集積(ウィンドファーム)化がなされ商用段階にはいつているものもあり、日本でも北海道や東北など沿岸部で大型のウィンドファームが建設されてきている。しかしながら、ヨーロッパでは陸上の適地が景観、電波障害、生息動物への影響など含め少なくなってきたことから、洋上に多くのウィン

ドファームが建設されてきているものの、わが国では本格的な沖合の風力発電の導入はまだではある。しかしながら、海上風が陸上風より質や量の点で適性が高い¹⁾ ことなどからも今後風力発電の海上での設置がおこなわれると思われる。

さて、国内の気象・海象はヨーロッパよりも厳しいといわれており、その場合暴風時における構造強度を確認し耐久性を適切に判断しないと、インドや鹿児島であった倒壊事故の発生が危ぶまれる。さらには、運転や、常時の気象・海象の繰り返しによりタワーや基礎などの構造部分の疲労が長期的に発生する可能性がある。そこで我々は洋上立地を我が国で進めるために将来問題になると予想される振動応答や疲労対策のために、ブレード部の風との相互作用による減衰の究明や風荷重測定などの風洞装置を用いた研究を行ったので、その一部を整理し解析したので報告する。

2. 研究目的

洋上における風力発電施設は、変動風が海上部分の構造体へ、波浪が同時に基礎部へ作用するため複雑に応答する。またタワー部は経済性を追求するため、最小断面で設計する傾向にあり、国内の洋上の気象・海象はヨーロッパなどよりも厳しいともいわれている。暴風時における構造強度を確認し運転時の気象・海象によるタワーや基礎など構造部分の耐久性を適切に判断しないと、倒壊事故の発生や、供用期間中に疲労損傷が発生する可能性がある。そこで、①ロータ（3枚のブレードとハブ）・ナセル（遊星ギヤ付きモータ内臓）・タワー・基礎からなる一体模型に関する振動応答実験により、動的特性を明確にして設計に取り込むこと②変動風と波浪の同時作用における最大応力の重ね合わせや部材応力範囲の計数を適切に行い、疲労解析に反映する必要がある。本研究では、ハブ高さ約66m、定格1,500kWのプロペラ型風力発電施設の1/55縮尺模型を用いて定常風や変動風を作用させ、風荷重測定や振動特性がどのような影響を示すかを調べることにした。そのため上述の①～②の課題等に対応するため以下の実験を行い、今回は以下の2つを述べる。

- 1) 運転時及び暴風時の風速に対する風抗力
- 2) 風単独作用下での振動応答（固有周期・減衰などの特性把握）

3. 実験条件及び実験方法

(1) 実験装置及び風力発電施設モデル

実験は独立法人海上技術安全研究所の風水洞（風路部長さ15m、幅3m、高さ2m、水路部深さ1.5m）を用いた、これは風と波を同時に発生できるものであり、世界的にも数少ない施設である。

風力発電施設モデルは、実機としてNEG MICON社製風力発電施設を想定し実験装置の断面寸法、造風・造波性能等の制約から本実験の縮尺を1/55（フルード則適用）と決定した。その結果、模型の最大高さとして水槽底部から嵩上げを含め3.4mである。これはブレード部が長さ58cm、最大部分での幅11cmである3枚羽根をハブで固定したロータ、ナセル、タワー及び基礎で構成される。タワー（直径15mm、板厚0.8mm、全長1405mm）は真鍮パイプ製であり、上部・中央・下部の3点を50cm等間隔に風方向に裏表2枚のひずみゲージを貼り、ナセル直下のタワー部及び、タワー中央に加速度計をそれぞれ2つ、風方向及び直角方向に取付けた。また、風荷重を測定するため、4セクション（それぞれの直径×長さ、42mm×291mm、53mm×300mm、64mm×300mm、76mm×493mm）からなる発砲スチロール製の円筒を真鍮パイプに多段状に巻き断面がコーン形状の実物の投影面積にあわせた。発砲スチロール表面の粗度は特に滑らかにするなど手を加えず製造状態のままである。

模型の基礎は、3箇所の異なる地盤に設置されたジャケット構造の水平荷重と変位の関係から決定した水平ばね定数にほぼ対応したステンレス製の板ばねでモデル化した。幅と長さは一定で板厚のみ異なる硬（9mm）・中（7mm）・軟（5mm）と3種類のばね（幅20mm×高さ363mm）を用いた。ブレードに関してはねじれや厚み、各部での断面形状に関する詳細な図面が入手できないので、投影面積とアスペクト比をできるだけ一致させ、全体に流線形断面とし、ハブ取付け部で45°、先端で2°と段階的に小さくなるねじりをつけている。材料は木（ラワン）製で、一枚当たりの質量は約34gである。

(2) 実験条件

a) 抗力係数測定

抗力係数を求めるため表-1に示すような10種類の定常風に対し、ロータが回転している運転状態（モータで負荷を加え回転を0.47s一定に保った状態、ロータ円周速度7.7m/s）、また台風時を想定してロータが停止している状態での風荷重を測定した。加えて、3枚のブレードとタワーにそれぞれ作用する風荷重を測定するためブレードなし、即ちナセルとタワーのみの模型についても実験した。

表-1 抗力係数測定の実験ケース

実験条件	実機風速 (m/s)	模型風速 (m/s)
ナセル・タワーのみ (ブレード無)	5	0.67
	10	1.30
	15	1.98
ブレード有り 運転状態	20	2.23
	25	2.98
	30	3.70
ブレード有り 停止状態（Y字固定、逆Y字固定）	40	5.16
	50	6.67
	50	6.67
	60	8.05

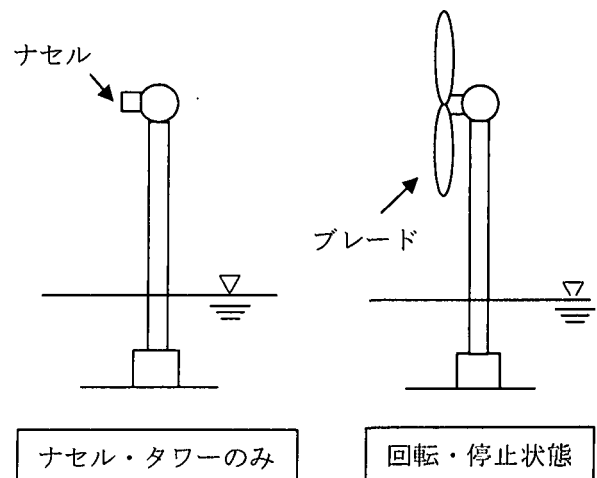


図-1 風車側面図

表-1に示す回転停止状態の実験では、ブレード3枚のうち一枚がタワーと重なる位置で停止した

(Y字固定)状態とブレード3枚ともタワーと重ならない位置で停止した(逆Y字固定)状態についても測定を行った。これらは、同じ風速条件から得られたタワー単独(実際はハブ付きナセル一体)で受ける風荷重を差し引くことで、前者を2枚のブレードに作用する荷重、後者を3枚ブレードに受ける荷重とみなして停止時のブレード一枚に作用する風荷重を測定するためである。

b) 無風時の減衰定数測定

風や波による振動ではなく、風車自体の回転トルクや遠心力などによってどのような振動を受けるかを解明するため、同じ剛性、質量、断面積などの特性を有するタワーを異なる曲げ剛性を有する基礎(硬ばね、中ばね、軟ばね)で支える3種類の模型のナセル部に紐をつけ、風方向、風直角方向にばねはかりで5Nの力を加えそれぞれ自由振動させた。

タワー模型上部(ひずみ3)と中間部(ひずみ2)に下部(ひずみ1)に貼ったひずみゲージおよび、加速度計(加速度計2,4は風方向、加速度計1,3は風直角方向、また加速度計1,2はタワー中央に、3,4はタワー上部に設置した)により記録した自由振動波形から、固有周期と無風時の減衰定数を求めた。測定時間は、風方向、風直角方向とも120秒とし、得られた測定値の平均を各測定値とした。

c) 風を受ける状態での減衰定数

風を受ける場合の減衰定数はロータ回転(稼働)時と停止時について測定した。風を受けた場合は、風速が1.30, 2.23, 5.16, 8.05 m/sの変動風と定常風をそれぞれタワーに作用させ、タワーに設置したひずみゲージと加速度計の記録をスペクトル解析し、得られた応答カーブからハーフパワーポイント法によって減衰定数を求めた。

4. 実験結果

(1) 風速分布とスペクトル

実験の開始に当たり、模型設置予定位置から前面300cm, 50cm, 後面50cm位置3断面で、風水洞幅方向の中央、±60cmの位置における定常風の鉛直分布を測定した。その結果、風洞長さ方向及び幅方向にわたり、天井部や水面では境界層の影響があるが、水面上30cmから200cmまではほぼ様な風速分布となり、これはブレード最高位置182cm, 最低位置65cmが完全にこの範囲にはいることを確認した。

実験では、定常風で主に風荷重を測定し、変動風を用いて動的把握をすることとしたが、実験に用いた風水洞では定常風しか発生できない。そのため、風路前面に布付きネットをとりつけ、変動風を発生させた。その特性を把握するため、乱れを与えた変動風についてスペクトル解析を行い、それを無次元表示し、Ochiなど²⁾の提案したスペクトルと比較した。この結果、模型風速2.23m/sにおける変動風のスペクトルを図-2に無次元化して示すが、低周波数側では少しエネルギー密度が小さいものの、海上

風のスペクトルと高周波数側は類似のスペクトルが得られた。

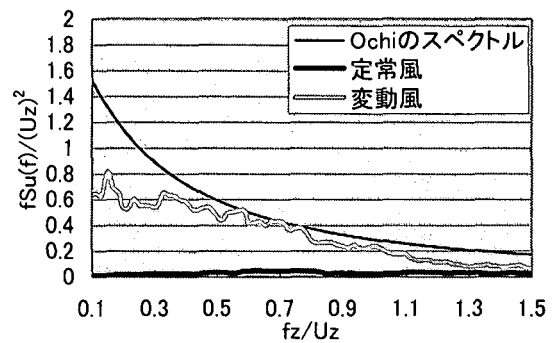


図-2 変動風と定常風のスペクトル

(2) 風速抗力係数の比較

ここではモリソン式により、実験時の風温(t)と気圧(P)から得られた単位質量(ρ)を用いて抗力係数(C_d)を求めた。

$$F = \frac{1}{2} \rho u^2 C_d A \quad (1)$$

ただし、

u : 風速

A : 投影面積

ρ (kg/m^3) = $1.2936 \times 273 / (t + 273) \times P / 760$

タワーとナセルの模型から得られた風荷重から、タワーに比較し投影面積の小さなナセルもタワーの一部としてタワーの抗力係数を算出した。また、ブレードについては、ブレード・ナセル・タワーに作用する風荷重から、同じ風速条件でのタワー・ナセルのみの風荷重を差し引きしブレードに作用するネットの風荷重を求め、同様に(1)式により、抗力係数を算定した。

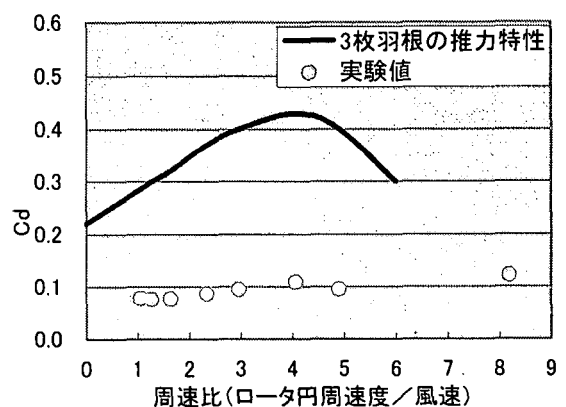


図-3 ブレードのCdと周速比の関係

図-3には周速比(ロータ円周速度/風速)と抗力係数の関係としてプロットしたものである。実線で示した3枚ブレードにおける推力(C_d の相当)によれば³⁾、周速比の増加とともに抗力係数は増加し、4.3で最大になりそれ以上では減少する傾向があり、実験値も周速比の大きい点を除けば周速比約

4.3で最大になる傾向とよく一致する。周速比の大きい場合（図に示してないが、風速0.67 m/s周速比14でCd=0.15）は風速が小さいため、ばらつきが生じたものと考えられる。Cd値としては既存のデータ（周速比4.3で0.35程度）に比べ相対的に小さく最大値が0.12と小さい。これはブレード形状の違いの他、特にブレードの幅が根元から先端にかけ滑らかに変化し、ねじれも根元部で45°から先端部で2°程度と滑らかに変化する流線型となっているため、既存のものと比較し小さくなったと考えられる。

一方、表-2では風速の一番小さな0.67m/sを除き、各実験から得られた回転時、非回転時のブレード及び、円筒タワー抗力係数のCd値とその平均を表-2に示す。また、実験におけるレイノルズ数は0.1～2.5×10⁷の範囲にある。

表-2 抗力係数の比較

実験	抗力係数 / 平均	投影面積	参考値
回転時のブレード	0.08 ~ .12 / 0.1	円盤(ブレード半径とする)	0.3 ~ 0.9(円盤のCd)
停止時(逆Y字)のブレード	0.55 ~ 1.2 / 0.6	ブレード3枚分の面積	1.2(長方形板アスペクト比1:11のCd)
停止時(Y字)のブレード	0.35 ~ 1.6 / 0.6	ブレード2枚分の面積	
円筒タワー	0.8 ~ 1.2 / 0.9	タワー投影面積	0.8(円柱のCd)

この表では運転時は回転速度が速いので、投影面積はロータ全般を円盤とみなして算定したものであり、停止時は一枚のブレードのCdである。停止時のブレード一枚のCdはアスペクト比1:11の矩形板の値に比べ、平均でちょうど半分となる。これは回転時もそうであるが、前述の理由の通りである。

タワーに関しては、一般の滑らかな表面を有する円柱の抗力係数0.8と一致する値であった。

(3) 固有周期の比較

固有周期は、図-4に示すような自由振動波形のうち100秒間の繰返し回数とカウント数（10回が1s相当）から振動の周期を求めた。こうして得られた固有周期を表-3、4に示す。

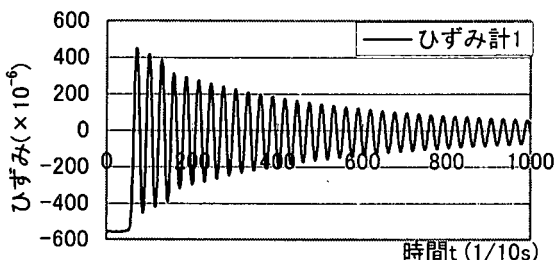


図-3 風方向の硬ばねの自由振動

風方向では、3点のひずみと2点での加速度記録とも、硬ばねが0.58s、中ばねが0.69s、軟ばねが1.34s

表-3 風方向の固有周期

		ひずみ1	加速度2	加速度4
硬ばね	周期(s)	0.58	0.58	0.58
中ばね	周期(s)	0.69	0.69	0.69
軟ばね	周期(s)	1.34	1.34	1.34

表-4 風直角方向の固有周期

		加速度1	加速度3
硬ばね	周期(s)	0.49	0.49
中ばね	周期(s)	0.49	0.49
軟ばね	周期(s)	0.51	0.51

であったが、基礎の剛性が大きい硬いばねほど、固有周期は当然であるが短くなった。この増加の割合はタワー部の剛性が同じであるので、基礎部剛性の影響は弱められ平方根に比例せず、むしろほぼ4乗根に比例している。これは、ロードセル自体がばね系を構成し、基礎のばねと並列ばねになり、この合成された剛性が弱められる結果および、固有周期が長いと運動が大きくなり基礎部での付加質量も大きくなるためと考えられる。

一方、風直角方向では加速度計しか取付けていないが、全てのばねで0.50秒前後であった。若干異なる原因は風直角方向の幅が変わり、剛性が少し小さくなるためである。

固有周期については5.のモーダル法による応答解の項で述べるが、先端に集中質量(W)を有する片持ち梁の1次固有周期に関する(2)式に示す理論値と実験で得られたものとの比較を以下に示す。

$$\omega = \sqrt{\frac{3EIg}{\gamma A l^4 (\mu + 0.23)}} \quad (2)$$

ω : 固有円振動数 g : 重力加速度
 E : 弾性係数 l : タワーの高さ
 I : 断面二次モーメント A : 面積
 γ : 材料の単位体積重量 $\mu = W / (\gamma A l)$

上式に数値をあてはめると

$$\omega = \sqrt{\frac{3 \times 9.267 \times 10^7 \times 980}{8.04 \times 0.377 \times (143.59)^4 \times 1.88}} = 10.6 \quad (3)$$

となり、ここから固有周期を求めると次のようになる。

$$T = \frac{2\pi}{10.6} = 0.59s \quad (4)$$

実験での固有周期は0.58秒であり、固定条件における理論値と近い値が得られた。

(4) 減衰定数の比較

a) 無風状態（自由振動試験）

風を受けない場合の自由振動試験から得られた図-3のような減衰波形から最初の21波の振幅(x_i)を読み取り、次式により20波の平均の減衰定数(h_1)を算出した。

$$h_1 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (5)$$

表-5 自由振動試験から得られた減衰定数

	硬ばね	中ばね	軟ばね
加速度x	0.011	0.027	0.027
加速度x	0.012	0.017	0.032
ひずみ1	0.027	0.027	0.019
ひずみ1	0.015	0.015	0.021
ひずみ1	0.017	0.017	0.025
平均	0.016	0.020	0.025

自由振動試験では風方向のみ実施したが、その減衰定数はばらつきがあるので平均値でみると、硬いばねでは1.6%と小さく、中ばね2%, 軟ばね2.5%と、若干おおきくなる。若干大きいのは基礎部が水中にあるためと思われる。

b) 風を受ける場合(振動試験から)

風速がある状態で自由振動させることも考えられたが、ここでは風を受けて振動するタワーのひずみと加速度の応答スペクトルから、ハーフパワーポイント法により減衰定数を決定する。図-5は風速2.23m/s(実物スケールで20m/s)を受けるナセル直下における加速度の応答倍率であり、この図の最大倍率の70%となる点の周波数を f_1 , f_2 を求め、最大倍率の周波数 f_0 との関係から、減衰定数 h は次式で求められる。

$$h = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (5)$$

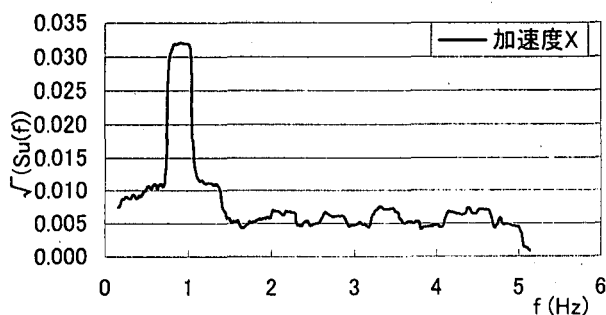


図-5 共振曲線(回転時, 定常風速20m/s)

表-6 回転時(定常風)の減衰定数

風速	加速度X	加速度Y	ひずみ1	ひずみ2	ひずみ3
10	—	0.07	—	—	—
20	0.08	0.12	0.08	—	—
30	0.12	0.05	0.12	0.13	0.13
40	—	—	0.09	—	0.13
50	—	0.11	0.10	0.07	—
平均	0.10	0.09	0.10	0.10	0.13

(—は読み取ることができなかった)

表-7 回転時(変動風)の減衰定数

風速	加速度X	加速度Y	ひずみ1	ひずみ2	ひずみ3
10	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07
20	0.07	0.06	0.08	0.07	0.09
30	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07
40	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
50	0.08	0.06	0.08	0.06	0.10
平均	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08

表-8 停止時(定常風)の減衰定数

風速	加速度X	加速度Y	ひずみ1	ひずみ2	ひずみ3
10	—	—	—	—	—
20	0.09	0.10	—	—	—
40	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
60	0.09	0.10	0.06	0.07	0.07
平均	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08

表-9 停止時(変動風)の減衰定数

風速	加速度X	加速度Y	ひずみ1	ひずみ2	ひずみ3
10	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07
20	0.08	0.05	0.08	0.08	0.08
40	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08
60	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08
平均	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08

ここでは、実機風速10~40m/s (1.3~5.16m/s)のものについてデータ解析を行った。

この結果、

- ・ 定常風と変動風を比較すると、回転時・停止時ともに全体的に定常風の数値のほうが若干大きい。
- ・ 減衰定数は読み取れないものもあるが、大ききばらつきがすくなくほぼ一定である。

以上から、減衰定数は振動応答の曲線より決定して、回転時は10%程度、停止時は7%程度と大きい。ただし、この方法では応答のピークが明確に現れないと大きめに読んでしまう欠点もあるので、実際は7割程度に多少割り引いて考えなければならないが、それでも回転するロータ、あるいは停止時はブレードと風との相互作用により、かなりの減衰が作用することが判明した。

5. モーダル法による応答解析

振動解析⁴⁾では、ブレード・ナセルとタワーおよび海中部の質点からなる多自由度系にモデル化して構造物の挙動を把握する。その運動方程式は次式のようになる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P_{WIND}(t) \quad (7)$$

固有値問題により求めた固有円振動数ベクトル(ω_n)とモードマトリックス「 Φ 」を用いて、時間のみ関数である一般化座標(q)を導入する。

$$q = [\Phi]x \quad (8)$$

この関係から、(8)式はモードマトリックスの直

交性を用い、運動方程式は(9)式のように変形できる。各係数は一般加質量(M_n)、一般化減衰(C_n)、一般化剛性(K_n)、一般化外力(P_n)と言われるものである。

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \quad (9)$$

この運動方程式は N 個の独立な1質点の運動方程式で、任意波形外力に対しその解が得られる。求められた解から、(8)の関係により最終的な解(x)が得られる。

(1) 固有周期

計算に用いた基礎部の剛性は、板ばねの剛性にロードセルの剛性を並列的に重ね合わせたものであり、柔らかいばねほどロードセルの剛性が寄与する。また、解析で入力した基礎部の付加質量は、硬バネでバネのフランジ直径(12cm)の高さ34cmの円筒と仮定した付加重量に相当する。

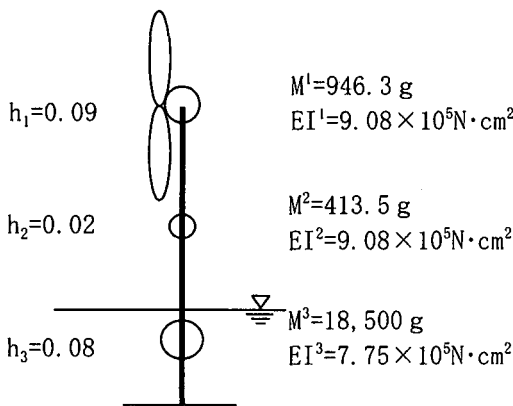


図-6 3自由度モデル

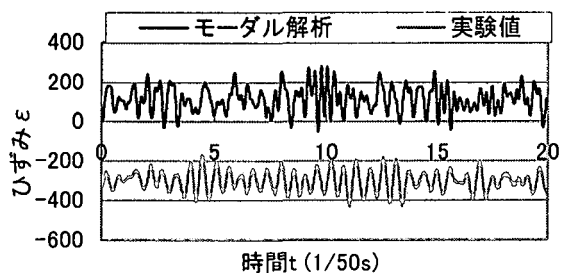
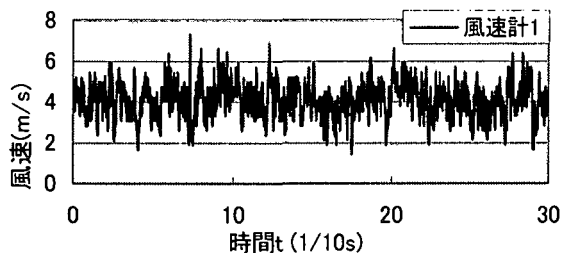


図-7 実験結果とモーダル解析との比較

(2) 応答結果

図-6に示す実験から得られた減衰定数を与え、硬ばね基礎モデルの振動解析を行った結果を図-7にひずみ1の測定結果と並べて示す。解析で得られた点と測定位置が完全に一致しているわけではない

が、ほぼ類似の波形と振幅となっている。

6. 結論及び考察

風水洞を使用して、プロペラ式風車をタワーと海底の基礎で支える洋上風力発電施設に関し、その風荷重の把握と振動特性を評価するため、1/55模型実験を実施した。その結果、以下のような結果が得られた。

(1) 抗力係数(Cd)

通常、風車運転時は20rpm程度と回転速度が速いため、円盤として風荷重を算定すると、ブレードのピッチ角が大きいせいもあり、Cd値は0.2程度であった。回転するブレードの周速比との関係では、既存のデータと同様、周速比が大きくなるにつれCdが増加し、周速比4.3近辺でCdが最大となった。ブレード一枚の抗力係数は同じアスペクト比を有する矩形板の半分、すなわち0.5程度になる。これはブレード形状やねじれのためと考えられる。一方、タワーのCdは滑面円柱の従来データとほぼ一致した。

(2) 減衰定数

減衰定数は風がない条件では、基礎部の流体減衰のため、若干大きく平均で1.5~2.5%と大きい。風がある場合は、定常風と変動風を比較すると、変動風の場合の方がわずかに大きく、回転時で10%と停止時で7%と全体的に風を受けている場合のほうが風との相互作用により、かなり大きくなることが判明した。こうして得られた減衰定数等実際の構造物へ適用する場合の考察が重要だが、波浪が同時に作用する場合などの解析を含めた詳細な検討により、適用の検証などしていく必要がある。

(3) 振動応答

得られた減衰定数を用いて変動風に対するモーダル解析により応答解析を行った結果、ほぼ類似のひずみ波形が得られたので、実験によって得られた減衰定数と抗力係数は概ね妥当と言える。

参考文献

- 1) 井口高志, 関田欣治: 海上風力発電に関する優位性確認の研究, 土木学会, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 141-146, 2000.
- 2) M.K.Ochi: Wind Turbulent Spectra for Design Consideration of Offshore Structures, pp. 461-467, Pro. 12th OTC, 1988.
- 3) 牛山泉: さわやかエネルギー風車入門, 三省堂, pp. 53, 2001.
- 4) 関田欣治, 林辰樹: 基礎構造が異なる海上風力発電の波浪及び風に対する振動特性の解析, 土木学会, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 55-60, 2001.