

# 浮体に設置された洋上風車・タワーの変形解析

## (基礎的モデル解析)\*

### Basic Analysis of Dynamic Deformation of the Offshore Wind Turbine and Tower Installed on a Float Foundation

金子 誠次 \*\*

佐藤 建吉 \*\*\*

KANEKO Seiji

SATO Kenkichi

## 1. 緒 言

近年わが国における風力発電設備容量の伸びは著しい。2001年には政府も、2010年までの目標設備容量を300万kWに掲げた。この目標値は、陸上風車を想定して決められているが、ヨーロッパでは海上風車の設置計画が大規模に進められており、これが主流となしつつある。わが国は、南北に長い島国であり、海上風車のエネルギー賦存量は、長井<sup>1)</sup>、荒川<sup>2)</sup>らの推算によって非常に大きいことが示されており、今後活発な利用が進められると予想される。海上風車のメリットは、風速が陸上よりも高くしかも安定していること、また騒音や電波障害の制限がほとんどなく高効率の風車・発電機システムを開発利用できることにある。一方、デメリットには、海上から陸上までの送電線設備あるいは漁業保証等のコスト高に加え、台風・津波に耐える設置基礎の開発・建設コスト高に加え、開発時間を要すること等が挙げられ、これらの解決と運用には今後さらに10年近くを要するだろう。

デンマーク、ドイツ、オランダ、イギリスなど欧州諸国では、北海、バルチック海などの水深20m以下の浅海を対象として着床式の基礎により海上風車が実施・運用されている。わが国では、メガフロートと呼ぶ大型鉄鋼浮体が海上空港の開設を目的として研究開発され、実用化に向けた試験的技術はほぼ完了した。わが国においては、欧州とは異なり沿岸域は20mを超える海域がほとんどであり、フロート式の基礎の利用が望まれる。

本研究では、このメガフロートを設置基礎として海上風車を建設した場合に生じると予想される波浪荷重と風荷重によるタワーの動的変形・揺動、およびこれに搭載される風車の動的変位について、基礎的なモデ

ル数値解析を行なった結果について報告する。

浅海での気象データより風波条件を設定して、実験および解析を行なった。

## 2. 想定実機と設置条件

本研究の模型実験及び数値計算に想定する風車のモデルには、表1の仕様をもつ実用風車を想定した。

表1. 想定風車諸元

Rated Speed		12 [m/s]
Number of Blades		3
Swept Area		1735 [m <sup>2</sup> ]
Hub Height		40.7 [m]
Top diameter		2.0 [m]
Bottom diameter		3.0 [m]
Weight	Rotor	29 [t]
	Nacelle	20.4 [t]
	Rotor	7.2 [t]

基礎として想定したメガフロートの全長は300m、全幅60m、型高さ3m(喫水1m)であり、空港規模の1/15程度の箱型フロートである。

実機風車の設置海域は、風速は高いが波浪が穏やかな湾内が最適であるが、本研究では、過酷な条件下におけるタワー・風車の動的挙動の解析を目的として、具体的な海域は指定しないで波浪条件を、1/3有義波高、1/3有義波周期、および平均風速の3つのパラメータを変化させ、模擬実験とモデル解析を行なった。

## 3. 模型実験

### 3.1 実験及び結果

実験用模型は、相似則としてフルード則を適用し、タワーと風車の形状・寸法、さらに曲げ剛性などを定

\* 第24回風力エネルギー利用シンポジウムにおいて講演

\*\* 非会員、千葉大学大学院自然科学研究科

\*\*\* 会員、千葉大学工学部都市環境システム学科

(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

めて製作した。図1に、実験に用いた装置の全体図を示しており、紙面に垂直手前が風上であり、これと一致する軸上で風と正対する向きにx方向、紙面右向きにy方向、床面より鉛直上向きにz方向と定めた。幅3m×高さ2mの風洞内で風速を2~8[m/s]の範囲で変化させ風荷重を負荷するとともに、波浪荷重を模擬するためモータを回転させタワーをy軸周りに繰返し揺動させた。この時z方向ひずみを、x方向位置とy方向位置について、ともに下から高さ37.5cmと87.5cmの2箇所、合計4箇所に関して計測した。

またタワーの根元にかかる荷重については各軸にかかる力 $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ とその軸周りのモーメント $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ をロードセルで計測した。

なお、風速・ロータ回転速度も相似則により条件を定め実験を行った。ロータ回転速度は120rpmとした。

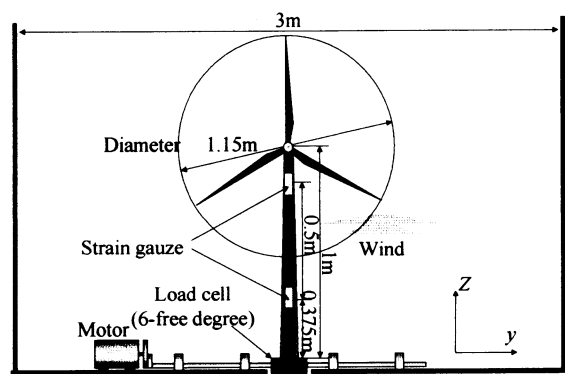


図1. 実験装置

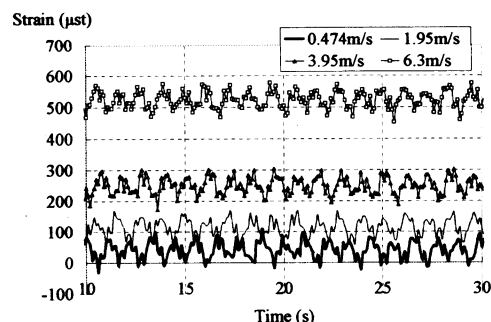
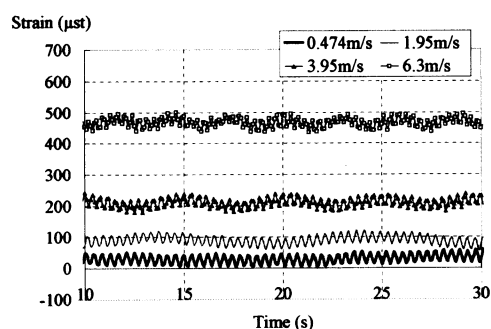


図2. ひずみの時系列  
[上]動揺なし [下]動揺あり

### 3. 2 実験結果

x方向の下側の計測点におけるひずみの時系列を図2に示す。同図の上側波形は風車に動揺を与えない場合、下側波形はそれを与えた場合(周期1.1s, 傾斜角 $1.5^\circ$ )である。上の図は値がほぼ一定であるのに対し、下の図は動揺の影響を受けていることが明らかである。両方の図で細かな振動が見られるが、これはロータ回転に依存するものである。図3は図2のデータの平均と最大振幅を取ったものである。この図より平均はほぼ同じであるが、ひずみ振幅(全幅)は動揺がないときより、あるときの方がはるかに大きいことがわかる。このことから実機において問題になる疲労設計においては、波浪による動揺があるところに設置する場合ひずみ振幅(すなわち応力振幅)の大きさが重要である。

図4にロードセルで収録された動揺がある場合とない場合の $M_y$ の時系列データ、図5に図4の $M_y$ のスペクトル解析結果を示す。実験状態は動揺の周期(周波数)が1.8s(0.56Hz)、傾斜角 $2.5^\circ$ 、風速は3m/sである。 $M_y$ の値を比較すると、動揺がある場合の方がはるかに大きい。基礎との接合部の荷重が大きくなるため、動揺のある場合の方が、破損確率が高くなる。スペクトル解析結果より、動揺のない場合はロータ回転数の整数倍にピークが現れ、動揺のある場合は動揺周期にピークが現れている。

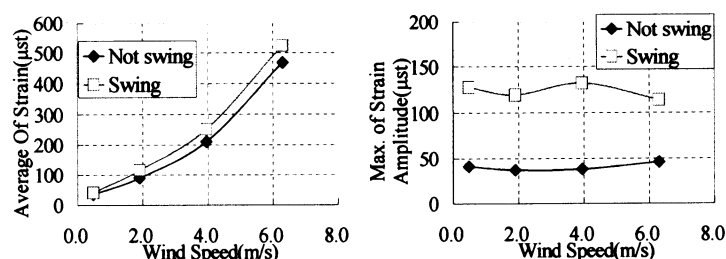


図3. 風速によるひずみの平均値と最大振幅  
[左]ひずみの平均値 [右]ひずみ振幅の最大値

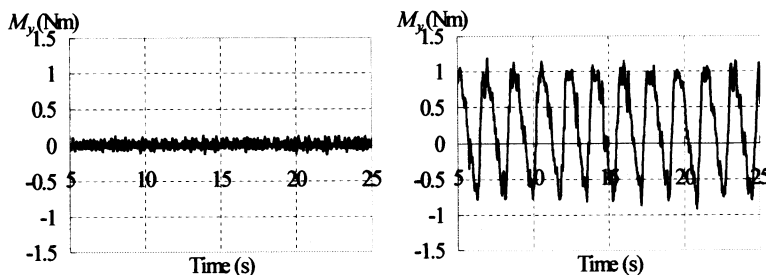


図4. モーメント $M_y$ の時系列データ  
[左]動揺なし [右]動揺あり

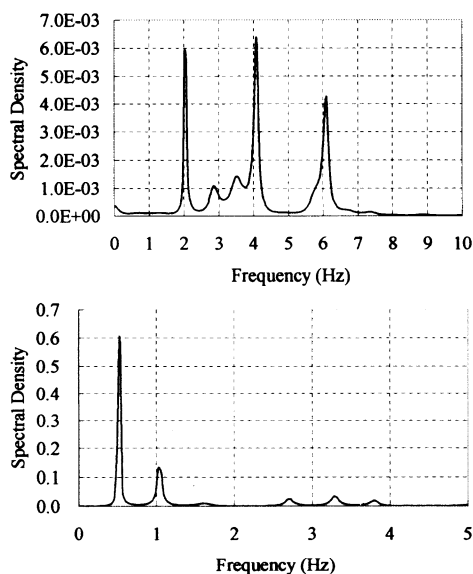


図5. 図4の $M_y$ のスペクトル解析結果  
[上]動揺なし [下]動揺あり

## 4. 数値計算

### 4.1 解析方法

強制動揺と風荷重が同時に作用する場合の風車タワーの動的応答を数値解析した。このとき支配方程式は、

$$\{M\}\{\ddot{u}(t)\} + \{C\}\{\dot{u}(t)\} + \{K\}\{u(t)\} = \{F(t)\}$$

であり、実際の風車を有限要素法の梁モデルと集中質量で表現し(要素数は8)、係数マトリックスを設定した。外力ベクトル $\{F(t)\}$ については1番下の要素に接合部(根元)の動揺による強制力、ハブ位置には風荷重の2つを入力した。

風荷重を求める上で必要になる変動風速 $u(t)$ はOchi&Shinのスペクトルを用いて生成し、単位面積あたりの風荷重を求める式

$$P(t) = 0.5 \rho C_D (U + u(t))^2$$

( $\rho$ :空気密度[kg/m<sup>3</sup>]  $C_D$ :抗力係数  $U$ :平均風速[m/s])に代入した。なお、高さ方向の風速分布は1/7乗則で推定した。

波浪によるタワーの揺動は、タワーの下端に境界条件として傾斜角度を設定し、その角度を振幅として調和振動させる強制変位力を負荷し解析した。ウィルソンの $\theta$ 法を用いて振動を数値積分して、変位の時系列を求めた。時間きざみは0.05s、0sから1000sまで解析を行った。

以上の解析の後、得られた変位の時系列データからひずみと応力を以下の式により求めた。

$$\{e_i(t)\} = \{b_i\}\{u_i(t)\} \quad \{\sigma_i(t)\} = \{D\}\{e_i(t)\}$$

$\{u_i(t)\}$ :  $i$  番節点の変位マトリックス

$\{b_i\}$ : 変位-ひずみマトリックス

$\{D\}$ : ひずみ-応力マトリックス

$\{e_i(t)\}$ :  $i$  番梁要素のひずみマトリックス

$\{\sigma_i(t)\}$ :  $i$  番梁要素の応力マトリックス [N/m<sup>2</sup>]

座標系は実験でのそれと同じであり、風荷重、強制変位力ともにx方向から作用する。したがって、以下の図に示す変位や応力は、全てx方向のものである。

### 4.2 解析結果

図6に、「動揺なし・ロータ回転時」の条件でのタワー頂上位置での変位の時系列を示す。風速が高くなるにつれて変位の変動が大きいく。これは平均風速が高いときほど風速の変動が大きいくことに起因する。また、

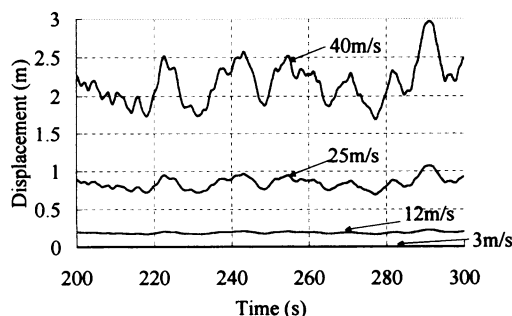
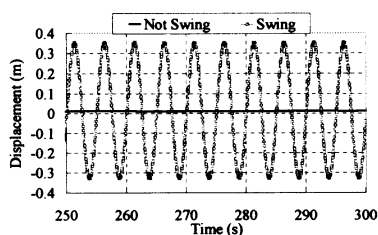
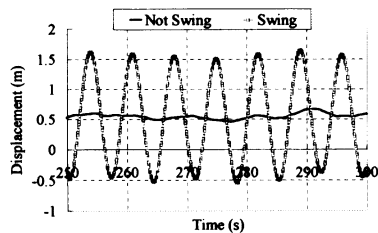


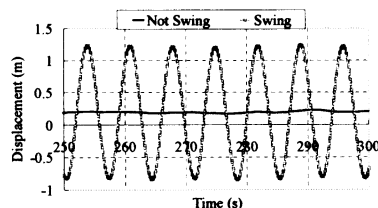
図6. 頂点変位の時系列



周期 5.0[s]  
傾斜振幅 0.5°



周期 7.0[s]  
傾斜振幅 1.0°



周期 7.0[s]  
傾斜振幅 1.5°

図7. 動揺の有無による変位の違い

[上] 風速3m/s [中] 風速12m/s [下] 風速20m/s

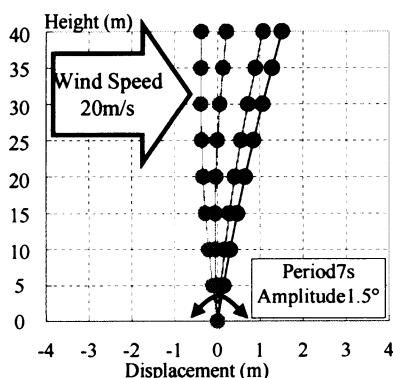
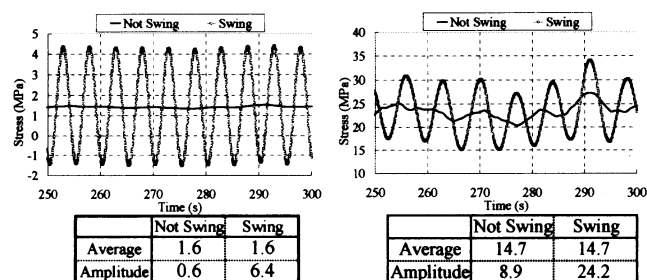


図8. タワーの挙動

風速が大きくなるほどシヤーが大きくなり、タワーの変位変動も大きくなる。

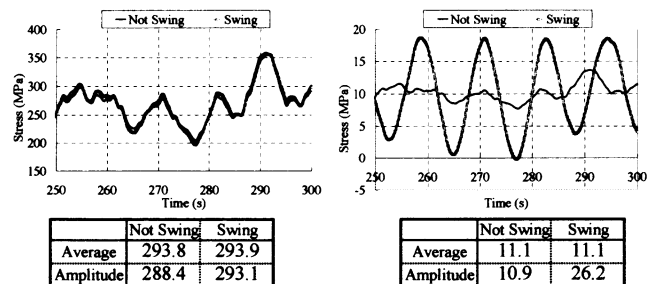
図7に、「ロータ回転時」で「動揺の有無」によるタワー頂上位置での変位の相違を示す。当然ながら、動揺があると変位振幅はやはり大きくなり、さらに風速が大きくなるにつれて振動の中心が後方へ移動する。この振動を横から見ると図8のように、風によって風車のタワーがたわんだ状態で振動している。

動揺の有無による応力変動の違いを図9に示す。応力の計測点は根元から15mの高さにある。ロータ回転時に風速が低い場合には、動揺により応力変動はほぼ正弦波状となる。しかし風速が大きい場合には正弦波状の動揺によってもきれいな正弦波を描かない。これは、図9に示したようにタワーの変形が動揺よりも風



[a] 風速 3m/s(ロータ回転)

[b] 風速 12m/s(ロータ回転)



[c] 風速 40m/s(ロータ回転)

[d] 風速 40m/s(ロータ停止)

図9. 動揺の有無による応力変動の違い

荷重の影響を強く受けているからである。

風速 3m/s や 12m/s にロータを回転させた場合の応力は、図9[a][b]に示すように疲労に影響するレベルではない。万一風速 40m/s でロータを回転させた場合には、図9[c]より応力が 300MPa 前後で変動するので、破断の可能性、あるいは疲労を考慮しなくてはならないだろう。しかし、風速 40m/s でロータを停止させたときは図9[d]に示すように応力はかなり小さく、疲労に影響するレベルではない。

## 5. 結 言

浮体にタワーと風車を設置した海上風車を想定し、風荷重と波浪荷重を負荷し、模型実験とモデル数値解析を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 模型実験とモデル解析の結果は直接的には比較できず一致しているかどうかは再検討を要する。
- ・ 同一の風速の下で、波浪による動揺がある場合とない場合では、ある場合の方がひずみ振幅（すなわち応力振幅）が大きくなり、負荷条件はより過酷になる。
- ・ 定格出力の風速 12m/s において、動揺ありで、ロータ回転時のひずみ振幅は 25MPa であり、これは疲労破壊の面では問題ない。
- ・ 動揺がある場合でも、定格出力範囲を超える風速 40m/s の高風速の下でもロータを停止させれば、風車のタワーに過剰な力がかからず、疲労破壊は起こらないといえる。

以上の検討は、基礎的な検討であり、未着手のタワー／浮体接合部、さらにロータ回転時の翼の疲労負荷解析などを行なう。

## 参考文献

- 1) 長井, 牛山ら: 「日本におけるオフショア風力発電の可能性」 第19回風力エネルギー利用シンポジウム
- 2) 荒川ら: 「東京湾における風力発電」 第2回風力エネルギー利用総合セミナー
- 3) 江守一郎, D.J. シューリング 共著: 「模型実験の理論と応用」 技報堂
- 4) 日野幹雄: 「スペクトル解析」 朝倉書店
- 5) J.S. シェムニスキー: 「マトリックス構造解析の基礎理論」 培風館
- 6) 戸川隼人: 「有限要素法による振動解析」 サイエンス社
- 7) (社) 日本造船学会: 「超大型浮体構造物」 成山堂