

## 風の乱れおよび浮体の動揺が風車の疲労強度に及ぼす影響に関する研究

## その1 風車に作用する変動風荷重の評価

○	東京大学	正会員	石原 孟
	東京電力	正会員	助川 博之
	東京電力	正会員	高橋 孝介
	東京大学	フェロー	藤野 陽三

## 1. はじめに

現在ヨーロッパを中心に洋上風力発電が急速に普及しはじめている。日本においても陸上での適地不足から洋上風力発電が注目されている。ヨーロッパと異なり、日本近海では沖合に行くにつれ水深が急激に増大するため<sup>1)</sup>、着底式洋上風力を開発できる地域が限られており、浮体式洋上風力の開発が不可欠である。陸上風力に比べ、洋上の乱れが小さいという利点がある一方、浮体上に設置される風車が浮体動揺による変動荷重を受ける。浮体式洋上風車の疲労寿命を考える上で、洋上風の乱れおよび浮体の動揺を考慮した評価は必要となる。

本研究その1では、風車翼の構造諸元の推定手法を提案し、実風車に作用する変動風荷重を評価すると共に、観測結果と比較することによりその予測精度を検証する。本研究その2では風の乱れ、その3では浮体の動揺が風車の疲労強度に与える影響を明らかにすると共に、浮体式洋上風車の選定基準を提示する。

## 2. 風車に作用する変動風荷重の評価手法

洋上風力発電システムの疲労強度の評価に関する既往の研究としては、図1に示す等価的な抗力を与えるディスクモデルを用いた成瀬ら<sup>2)</sup>の研究と風車ロータの回転運動を考慮した回転モデルを用いたヘンダーソン<sup>3)</sup>の研究が挙げられる。成瀬らの研究では洋上風の乱れを考慮し、着底式風車に作用する疲労荷重を求めたが、風車ロータの回転による変動風荷重が評価されていない。一方、ヘンダーソンは図2に示すロータの回転運動を考慮した風車モデルにより浮体式風車の疲労荷重を検討した。この研究では、洋上風の乱れが考慮

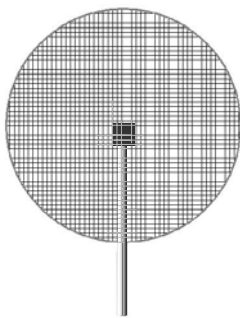


図1 ディスクモデル

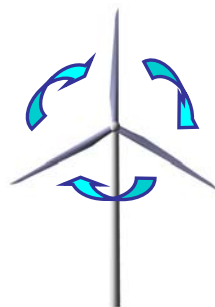


図2 回転モデル

されていないため、浮体式風力発電システムに必要な風車の選定基準が明らかにされていない。

以上のことから、本研究では、風車翼の構造諸元の推定手法を提案するとともに、ロータの回転を考慮する回転モデルと考慮しないディスクモデルを用いて風応答解析を行い、実測と比較することにより、ロータ回転を考慮しない従来のディスクモデルの問題点を明らかにする。

## 3. 風車翼の構造諸元の推定

風車ロータの回転を考慮した風応答解析を行うため、風車翼の構造諸元である質量分布と剛性分布が必要である。従来、風車の支持物の設計では、ディスクモデルが広く使われてきた。このモデルでは風車ロータを抵抗盤としてモデル化し、ロータの回転により発生する推力を等価抗力として用いて、風荷重を評価する。ディスクモデルはロータに作用する平均風荷重を正しく評価できるが、ロータの回転の影響を大きく受ける変動風荷重を正確に評価することが困難である。一方、風車本体の設計のためには回転モデルが用いられてきたが、回転モデルを使用するためには翼の質量分布などの構造諸元が必要となる。翼の構造諸元は一般に非公開であり、回転モデルにより風荷重を評価するためには翼の質量分布等の構造諸元を翼の幾何学形状、総質量、一次固有振動数などの既知のデータから推定する必要がある。

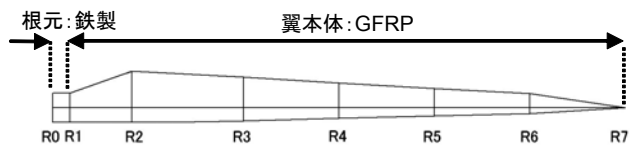


図3 翼の形状

本研究では翼の質量分布の推定方法を示す。図3には翼の形状を示す。翼根元部分の体積質量は翼固定用のボルトが入っているため、GFRP製の翼本体の体積質量より大きく、分けてモデル化する必要がある。GFRP製の外皮が翼の全断面積に占める割合(充填率)は、その断面の弦長と翼厚を用いて近似的に表すことができる。根元部分と翼本体の充填率がそれぞれ一定と仮定すると、翼の総重量 $M$ と翼弦長 $c$ 、翼厚 $t$ 、根元部の体積重量 $\rho_0$ 、翼本体の体積重量との関係を式(1)により

キーワード：浮体式洋上風力発電，変動風荷重の評価，ディスクモデル，回転モデル

連絡先：〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16 e-mail: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

表せる．根元部分と翼本体の充填率の比率（3:1）が与えられた場合に，充填率は式(1)により求められる．

$$M = \left\{ \int_0^{R_1} k_{\text{根元}} \rho_0 c(r) t(r) dr + \int_{R_1}^{R_{\text{tip}}} k_{\text{翼形}} \rho c(r) t(r) dr \right\} \quad (1)$$

本提案式の妥当性を検証するため，提案式により推定した質量分布を，実際に風車の翼を切断して求めた質量分布と比較した．図4には風車の各断面における単位長さ重量を示す．提案した推定モデルにより求めた結果は実測値とほぼ一致していることが分かる．

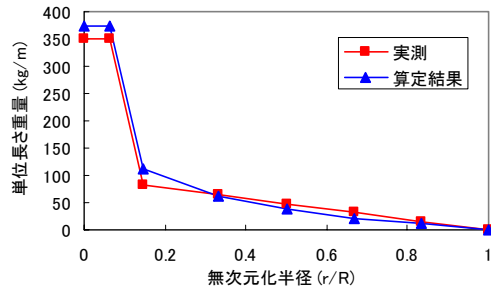


図4 翼の重量分布の実測値と推定値の比較

#### 4. 実証による検証

本研究で提案した構造モデルを用いて 600kW の実風車<sup>4)</sup>を対象に風車の動解析を行い，実測値と比較することによりディスクモデル，と回転モデルの予測精度を検証した．図5(a)には 600kW の実風車の写真を，図5(b)には動解析に用いた有限要素モデルを示す．このモデルを用いた固有値解析から得られたタワーの1次固有振動数は 0.94Hz であり，観測値と一致している．

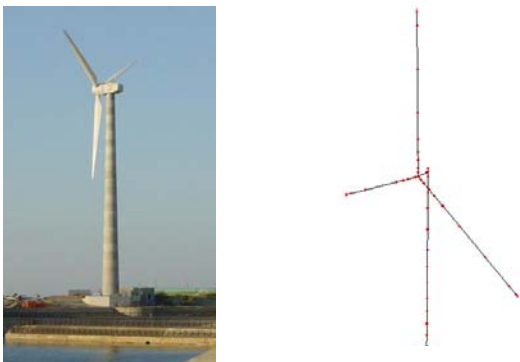


図5 (a) 実風車 (b) 多質点風応答解析モデル

図6には風車ロータの回転数（1P），翼がタワーを横切る周波数（3P）とタワーの1次固有振動数との関係を示す．可変速ピッチ制御風車は，発電を開始するカットイン風速から出力が最大となる定格風速までの間は回転数が風速と共に増大し，翼がタワーを横切る周波数も増大する．一方風車タワーの固有振動数は一定（0.94Hz）であり，風速 5m/s 付近で翼がタワーを横切る周波数とタワーの固有振動数が一致するため，共振が起こる可能性がある．

図7にタワー基部における転倒モーメントガストファクターと風速との関係を示し，実測結果も併記した．ガストファクターは式(2)により示す．

$$G = \frac{M_{\text{max}}}{M} \quad (2)$$

ここで， $M_{\text{max}}$  は転倒モーメントの最大値， $M$  は転倒モーメントの平均値を表す．

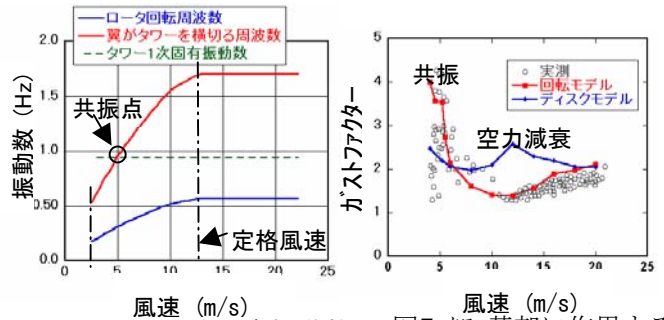


図6 タワー1次固有振動数と回転周波数との関係

図7 タワー基部に作用する転倒モーメントのガストファクター

図7から分かるように，風速 5m/s 付近でタワーとロータの回転と共振するため転倒モーメントガストファクター，すなわち，転倒モーメントの変動成分が大きくなっていることが分かる．回転モデルによる解析では共振によるガストファクターのピークをよく再現できているのに対して，ディスクモデルによる解析ではこのようなピークは見られない．またディスクモデルでは風速 10m/s 付近でのガストファクターを過大に評価されていることが分かる．これはディスクモデルが翼の相対運動による空力減衰を考慮できないためと考えられる．

#### 5. まとめ

本研究では，風車に作用する変動風荷重を評価するための風車翼の構造諸元の推定手法を提案し，従来のディスクモデルでは表せなかった翼の回転とタワーとの共振や翼の相対運動による空力減衰を再現することが出来た．また実測値と比較することによりディスクモデルと回転モデルの予測精度を明らかにした．

#### 参考文献

- 1) 石原 孟，山口敦，佐々木庸平，藤野 陽三：地域気象モデルと地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価，第26海風力エネルギー利用シンポジウム，2004
- 2) 成瀬英治，関田欣治，西和宏，岡俊蔵，原基久，横山茂生：洋上風力発電施設における疲労解析例，海洋開発論文集，第22巻，pp.881-886，2006
- 3) Andrew R Henderson: Analysis Tools for Large Floating Offshore Wind Farms, 2000
- 4) 山本学，内藤幸雄，近藤宏二，桜庭和子：風力発電タワーの風荷重に関する実測，第19回風工学シンポジウム論文集，pp.157-162，2006