

大型風車の回転ブレードに及ぼす 風速の高度分布の影響

Effect of Vertical Distribution of Wind Speed
on Wind Turbine Blade

源　　由　樹^{* 1}
Yoshiki MINAMOTO

土　屋　幸　男^{* 1}
Yukio TSUCHIYA

榎　原　建　樹^{* 1}
Tateki SAKAKIBARA

Abstract

Wind Speed is measured with three-cups-type anemometers which are arranged every 10 m altitude on a 70 m height tower. The exponential approximation is used to present the wind speed as a function of altitude. Thrust moment and rotational torque which are applied to a blade-to-hub attachment of the wind turbine are calculated by taking account of the vertical variation of the wind speed as well as the gravitation of blade. Thrust moment and rotational torque change cyclically as the blade rotates. In case of an actual 14 m length blade, thrust moment and rotational torque change from 137 to 160 kNm and from 23 to 33 kNm under a mean wind speed of 10m/s, respectively. The centrifugal force of blade is estimated to be 38 kN at a rotor speed of 48 rpm. The cyclic changing of thrust moment and rotational torque are discussed from a view point of fatigue of the blade-to-hub attachment.

Key Words: Vertical distribution of wind, Thrust moment, Rotational torque,
Fatigue

1. はじめに

近年、我が国においても出力が 250 kW を超える大型風力発電機が各地に建設されるようになってきている。このような風車のロータ直径は 30 m 以上にも及び、また風速が高度によって異なるため、ブレードの両端での風速差はかなりのものになる。この風速差は、風車の回転に伴い、ブレードの推力モーメントおよび回転トルクの変化の原因となる。

本研究では、まず地上高 50 m までの風速の高度分布を詳細に計測し、その結果を踏まえて風速を地上高の関数として近似する。次に、この風速の高度分布を考慮して、大型風車のブレードの取付部に加わる推力モーメントおよび回転トルクを計算する。特に、これらの変化幅に着目し、長期連続運転する場合のブレード取付部の疲労に関して検討を加える。

2. 風速の高度分布の計測

高さ 70 m の鉄塔の一つのコーナーに長さ 1 m の腕木を取り付け、その端に前もって風洞実験によって校正しておいた 7 個の三杯式風速計を設置した。その位置は鉄塔の構造上、地上高 47.5, 37.5, 27.5, 17.5, 12.5, 7.5, 2.5 m の位置とした。計測は、夏の風として 1991 年 7 月の中旬に 5 日間、冬の風として 12 月下旬と 1992 年 1 月上旬の 7 日間行った。風速計からの出力はいったんデータレコーダに記録し、順次 A/D コンバータを介し、サンプリング間隔 5 s でコンピュータに取り込んだ。その後、これらのデータについて解析を行った。なお、取り付けた風速計から見て鉄塔方向から吹いてくる風は、鉄塔自身の影響を受けている可能性があるため、それらの風を省いて解析を行った。

* 原稿受付 平成 5 年 2 月 17 日

* 1 豊橋技術科学大学工学部

3. 計測結果

サンプリング間隔 5 s で計測した風速の時系列結果では、風速は時々刻々かなり変化しているため、高度による風速差が明確に表現できない。そこで、1 分平均値で示すことにする。計測結果の例を図 1 に示す。図 1 (a) は時期的に夏の海陸風を、(b) は冬の季節風の様相を示しているものと思われる。同図より、風速は上空に行くに従って強くなっていることがわかる。地上高 37.5 m と地上高 7.5 m (高度差 30 m) との風速差は(a)では 3 m/s, (b) では 7 m/s に達している。

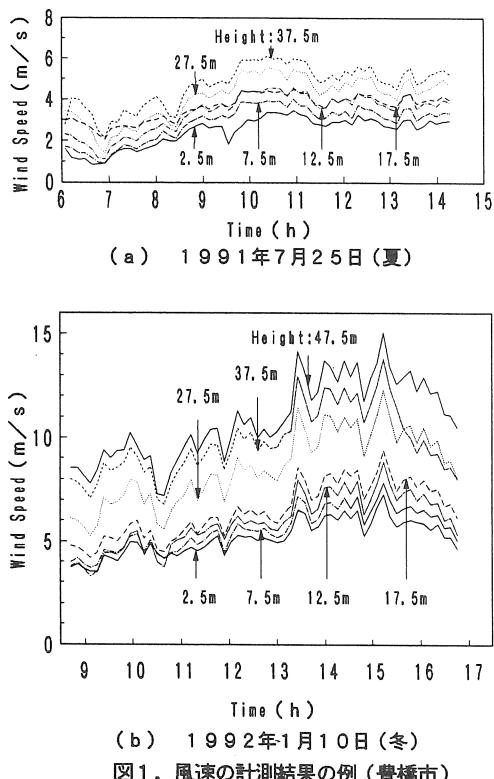


図 1. 風速の計測結果の例 (豊橋市)

4. 風速の地上高分布の数式化

風速の地上高分布 $V(h)$ を表すには、次式に示す指數近似^{(1), (2), (3)}がしばしば用いられる。

$$V(h) = V_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 V_1 は地上高 h_1 の風速である。一般にべき指数 n は、大気が安定になるほど大きくなり、また地表面が粗いほど小さくなるが、風速による影響はないと言われている。しかしながら本研究では、風速階級によって n の値が変化する可能性があると考え、式(1)を検討してみた。すなわち、地上高 h_1 の風速 V_1 、地上高 h の風速 V に関し、地上高 h_1 における風速階級ごと ($0 \sim 2, 2 \sim 4, 4 \sim 6, 6 \sim 8, 8 \sim 10, 10 \sim 12 \text{ m/s}$) に指數 n を求めてみた。

具体的には、地上高 $h_1 = 12.5 \text{ m}$ の風速を V_1 、地上高 $h = 47.5, 37.5, 27.5 \text{ m}$ の風速を V として、 h_1 における風速の時系列データのうち、例えば、 $4 \sim 6 \text{ m/s}$ の風速を抽出し、同時刻の h における風速の値を式(1)に代入することによりその風速階級の指數の値 n を逆算した。その際、季節(夏、冬)をパラメータとした。結果の平均値と標準偏差とを図 2 に示す。

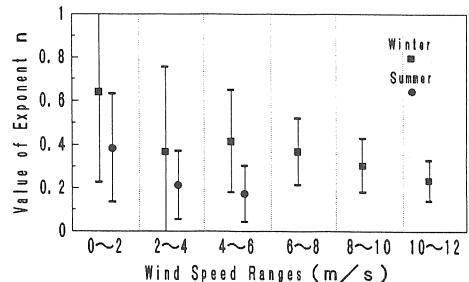
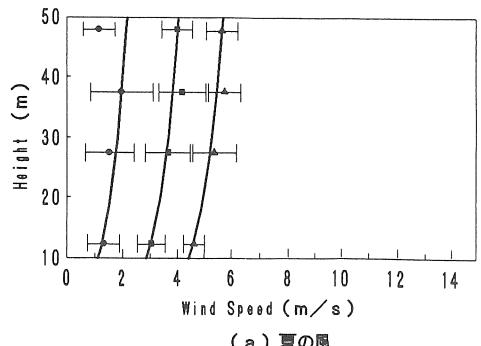


図 2. 指数の風速階級による変化

同図から、地上高 12.5 m の風速階級が高くなるほど、指數 n の平均値とその標準偏差は減少することがわかる。また、夏に比べて冬の方が n の値が大きくなっていることがわかる。このような結果は、風速の地上高分布に指數近似を適用する場合には、風速階級および季節に注意しなければならないことを示している。

図 2 で示す指數 n の値を用いて計算した風速の地上高分布を図 3 (a), (b) に実線で示す。なお同図では、



(a) 夏の風

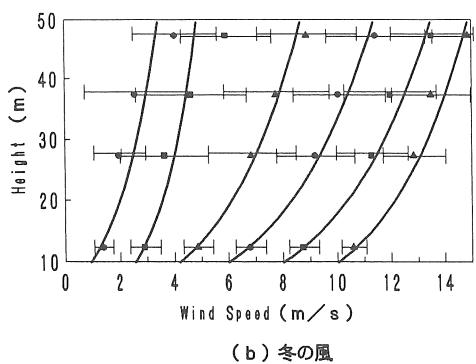


図3. 指数nを用いて計算した風速の地上高分布(実線)と各地上高において計測した風速の値(プロット)

地上高12.5 m の位置で計測された風速を風速階級別に分類し、同時刻の地上高 47.5, 37.5, 27.5 m における風速の平均値と標準偏差をも示した。計算値と計測値とは、特に、風の強い場合に良く一致している。

5. 風車ブレードに作用する力

ロータ直径が30 m を超える大型風車では、風速の高度分布の影響を受けるため、ブレード先端が最高位置にあるときと、最低位置にあるときとではブレードが風から受ける作用力が異なる。その様相を図4に示す。風から受ける作用力は、ブレードを後流方向に押す

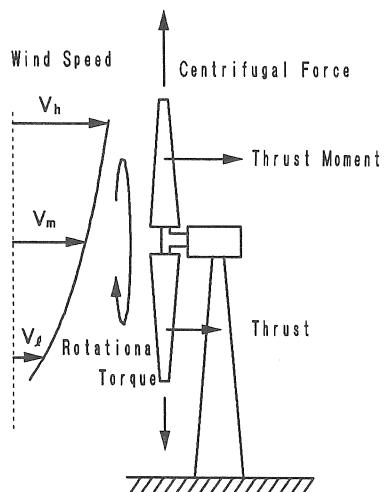


図4. 風速の地上高分布が風車ブレードに及ぼす力

す推力モーメント、ブレードを回転させようとする回転トルク、および回転に伴う遠心力がある。これらの力は風車のアキレス腱であるブレード取付部(ハブ)に集中的にかかることになる⁽⁴⁾。本節では、風速の高度分布を考慮した場合、これらの力、および風車の出力が回転とともにどのように変化するかを計算する。

5. 1 計算方法

風の力を受けて回転しているブレードに作用する推力モーメントおよび回転トルクの計算には、翼素理論がよく用いられる^{(5)・(6)}。図5は翼素理論においてブレードの翼素に作用する抗力dDと揚力dL、および推力dYと回転力dXを示しており、これらは以下に示す式で表すことができる。

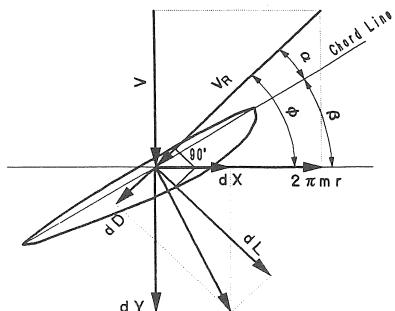


図5. 翼素に作用する力

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_D dS \quad (2)$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L dS \quad (3)$$

$$dY = dL \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + dD \cdot \sin\phi \quad (4)$$

$$dX = dL \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) - dD \cdot \cos\phi \quad (5)$$

$$V_r = \sqrt{V^2 + (2\pi mr)^2} \quad (6)$$

$$\tan\phi = \frac{V}{2\pi mr} \quad (7)$$

ここで、

C_D : 抗力係数 (Drag Coefficient)

C_L : 揚力係数 (Lift Coefficient)

dD : 抗力 (Drag) (N)

dL : 揚力 (Lift) (N)

dY : 推力 (Thrust Component) (N)

dX : 回転力 (Rotational Component) (N) m : ロータ回転速度 (Rotational Speed)

(rps)

 dS : 翼素面積 (Area of Blade Element) (m^2) V : 風速 (Wind Velocity) (m/s) V_r : 相対風速 (Relative Wind Velocity)

(m/s)

 α : 迎角 (Angle of Attack) (°) β : 取付角 (Blade Pitch Angle) (°) ϕ : 気流角 (Relative Wind Angle) (°) ρ : 空気密度 (Density of Air) (kg/m^3)

推力モーメント :

$$T_\tau(\theta) = \iint r dY \quad (8)$$

回転トルク :

$$T_R(\theta) = \iint r dX \quad (9)$$

ここで,

$$dS = d\ell dr$$

 θ : ブレードと鉛直方向とのなす角 (°) r : ブレードの長さ方向座標 (m) ℓ : ブレードの幅方向座標 (m)

なお、揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D は、迎角 α の関数で、レイノルズ数 R_e をパラメータとして表され、その値は、風車ブレードの断面翼型に依存する。また、実際に風車ブレードに加わる相対風速には、誘導速度による補正を考慮しなければならないが、ここでは一応補正しないこととする。

1枚の風車ブレード全体に加わる推力および回転力は、翼素に加わるそれをブレード全体に渡って積分することにより求めることができる。その際、風速の高度分布を考慮する場合には、図6のようにブレードの位置、すなわちハブの高さ h_0 とブレードの回転角 θ を与えてやらなければならない。そうすると、ハブに作用する推力モーメントと回転トルクは次式で計算される。

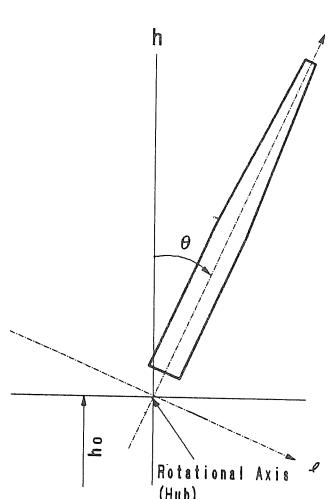


図6. ブレードの位置の説明

風速の高度分布を考慮する場合、風速 V は地上高 h の関数となり、式(1)を用いる。また、 h は次式で与えられる。

$$h = h_0 + r \cos \theta - \ell \sin \theta \quad (10)$$

計算の対象としては、定格出力 275 kW、定格風速 13 m/s の3枚翼風車のブレード（図7）を取り上げた。その際、同図に示す各位置の翼形に対応した C_D 、 C_L の値⁽⁷⁾を用いた。また、定数には以下の値を用いた。

$$h_0 : 30 \text{ m}$$

$$m : 0.8 \text{ rps} (= 48 \text{ rpm})$$

$$\rho : 0.125 \text{ kg/m}^3 \quad (10^\circ \text{C}, 1 \text{ atm})$$

$$R_e : 2.0 \times 10^6$$

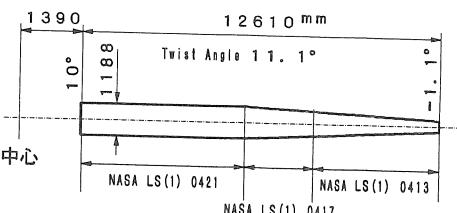


図7. 計算の対象としたブレードの翼型および寸法

5. 2 計算結果

パラメータとして地上高 $h_0 = 30 \text{ m}$ の風速を 6 m/s から 14 m/s まで 2 m/s ごとに変化させた。

5. 2. 1 推力モーメント

推力モーメント T_r に関する計算結果を図8に示す。同図から T_r は $\theta=0^\circ$ すなわちブレードが真上にきたとき最大値をとり、 $\theta=180^\circ$ すなわち真下にきたとき最小値をとることがわかる。その差は、 $V_{30}=6 \text{ m/s}$ で 28 kNm , $V_{30}=14 \text{ m/s}$ で 10 kNm となっている。これに対し、風速に高度分布がなく一様な場合、推力モーメントは回転と共に変化しない。その値は、図8における $\theta=90^\circ$ (270°) のときの値となる。

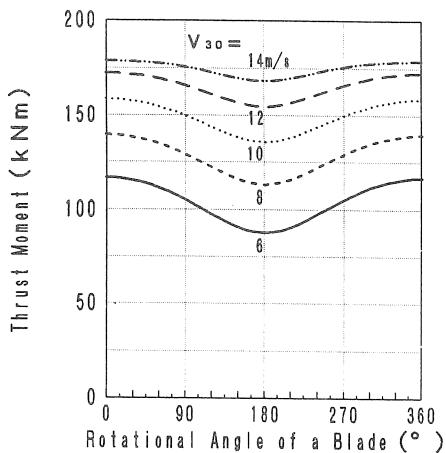


図8. ブレード1枚の推力モーメントの回転による変化

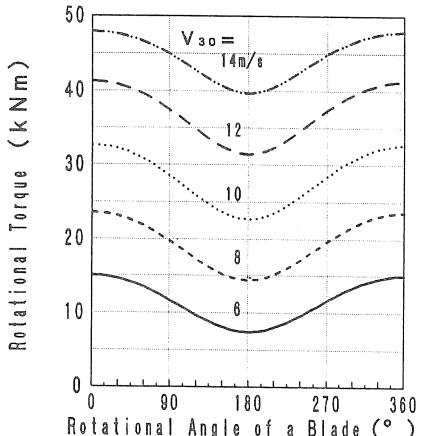


図9. ブレード1枚の回転トルクの回転による変化

5. 2. 2 回転トルク

回転トルク T_ℓ に関する計算結果を図9に示す。同図より、 T_ℓ は回転に伴い減少し、 $\theta=180^\circ$ で最小となり、再び増加している。最大値と最小値との差は、 $V_{30}=6 \text{ m/s}$ で 7.5 kNm , $V_{30}=14 \text{ m/s}$ で 8.6 kNm である。また、風速の増大に伴い、ほぼ比例的に T_ℓ

は増加している。風速が一様な場合には、 T_ℓ は θ によらず一定で、その値は $\theta=90^\circ$ (270°) のときと等しくなる。

5. 2. 3 重力を考慮した場合の回転トルク

回転トルクは、風速の影響だけでなく、ブレード自身の重力による影響も受ける。図10は、ブレードの質量を 300 kg , ブレードの重心半径を 5 m として重力による回転トルクを計算し、その結果に図9の結果を加えたものである。同図から、回転トルクは、 $\theta=75^\circ$ で最大となり、 $\theta=225^\circ$ で最小となることがわかる。また、 $V_{30}=6 \text{ m/s}$ のとき、 $210^\circ < \theta < 300^\circ$ では、回転トルクはマイナス（回転方向と逆向き）となっている。回転トルクの最大と最小との差は、 $V_{30}=6 \text{ m/s}$ で 30.0 kNm , $V_{30}=14 \text{ m/s}$ で 30.6 kNm である。

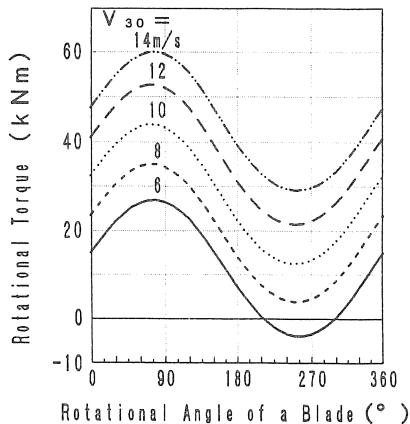


図10. 重力を考慮した場合の回転トルク

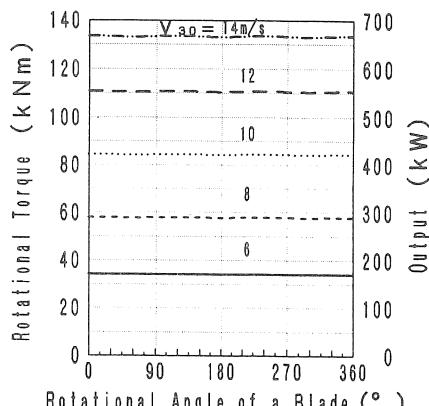


図11. 3枚翼風車の回転トルクおよび出力の回転による変化

5. 2. 4 三枚翼の場合の回転トルクおよび出力
ここまで計算の対象としたブレードを、3枚用いて3枚翼風車にした場合の回転トルクおよび出力について計算する。その場合の全回転トルクは図10の結果を120°ずつずらしたもの加えることによって得られる。また、風車の出力 $P(\theta)$ は全回転トルクに角速度を乗ずれば良い。計算結果を図11に示す。同図から、全回転トルクおよび出力は回転角 θ によらずほぼ一定となっていることがわかる。

5. 2. 5 遠心力

ブレードの回転によってハブには遠心力がかかる。その遠心力の大きさ F_c は、1枚のブレードの質量を300 kg、ブレードの重心半径を5 m、ロータ回転数を48 rpm とすると、 $F_c = 37.9 \text{ kN}$ となる。その値は重力の約13倍である。

6. 考察

風車のブレードが風を受けて回転しているとき、ブレードの取付部であるハブには、推力モーメント、回転トルクおよび遠心力の合力が応力としてかかる。これらのうち、ブレードの回転に伴って変化するのは、推力モーメントと回転トルクの2つである。推力モーメントの変化は風速の高度分布が原因で生じ、ブレードが1回転する間の変化幅は、その時の平均風速にも依存するが、本研究で対象としたブレードの場合、17～28 kNm である。一方、回転トルクの変化は、主にブレード自身の重力によって生じ、1回転する間の変化幅は風速によらずほぼ一定で、その値は本研究で対象としたブレードの場合、約 30 kNm である。

固体材料に繰り返し応力を連続的に加え続けると、一定方向の応力の場合よりもはるかに小さい応力で、疲労破壊する。この疲労限度は、鉄鋼材では疲労試験において 10^7 回以上の繰り返し数で破壊しない最大応力振幅で表している⁽⁶⁾。

ところで、本研究で対象としている風車を48 rpm の回転数で10年間連続運転したとすると推力モーメントおよび回転トルクの繰り返し数は約 2.7×10^8 となり、疲労試験回数 10^7 をはるかに超ることになる。それ故に、本研究で得られた数値などを十分考慮してハブ附近の強度を検討する必要がある。もちろん、これらの定常風によって発生する繰り返し応力に加えて、突風や風の乱れによって生じる応力も考慮しなければならない。

7.まとめ

本研究により、以下のことが明らかになった。

- 1) 風速の高度分布に指数近似を用いる場合には、風速階級や季節をパラメータとすることにより、より精確な近似式を得ることができる。
- 2) 風速の高度分布を考慮する場合、1枚のブレードがハブに作用する推力モーメントは周期的に変化する。本研究で対象としたブレードの場合、その変化幅は17～28 kNm になる。
- 3) 1枚のブレードがハブにおいてその回転方向に作用するトルクは、主にブレードの回転角度によって決まり、回転に伴って周期的に変化する。その変化幅は本研究で対象としたブレードの場合30 kNm である。
- 4) これらの応力の繰り返し数は、10年間で疲労試験回数 10^7 をはるかに超える。

今回は、風速の平均値で評価した場合のみを取り扱ったが、瞬間的な風速変動に対する推力モーメントおよび回転トルクの変動も重要である。そのことについては次の機会に報告したい。

文献

- (1) S. Alvil & Y. A. G. Abdalla, "Wind Speed Profiles over Bahrain", Wind Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 374-386, 1990
- (2) M. Grossi, "Wind Pressure Distribution around Buildings:a Parametrical Model", Energy and Buildings, No. 18, pp. 101-131, 1992
- (3) T. Hanafusa, "Winds in the Engineering Field", J. of Wind Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 1-31, 1984
- (4) 松宮輝：「風力エネルギーの実用化と将来」，太陽エネルギー，Vol. 18, No. 5, pp. 11-19, 1992
- (5) 本間琢也，「風力エネルギー読本」，pp. 56-57, オーム社, 1979
- (6) V. D. Hunt, Wind Power, pp. 116-118, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, 1981
- (7) 牛山泉, 三野正洋, 「小型風車ハンドブック」, パワー社, pp. 109, 1980
- (8) 「岩波理化学辞典 第4版」, 岩波書店, pp. 1068, 1987