

# パッシブヨー制御における暴風待機時の風荷重の評価と 実測による検証<sup>\*1</sup>

## Evaluation of wind loads by a passive yaw control at the extreme wind condition and its verification by measurements

清木 莊一郎<sup>\*2</sup>  
Soichiro KIYOKI

石原 孟<sup>\*3</sup>  
Takeshi ISHIHARA

佐伯 満<sup>\*4</sup>  
Mitsuru SAEKI

飛永 育男<sup>\*2</sup>  
Ikuro TOBINAGA

### 1. はじめに

風車設計においては、風車のライフタイムにおいて経験することが想定される様々な状況において、安全性を有することを確認する必要がある。その中でも強風時に発電を停止して待機する状況（以下“暴風待機時”と呼ぶ）は風車にとって最も厳しい状況の一つである。

現在風力発電の分野においては、発電時に風車の受風面であるロータをタワーの風上側に位置するアップウィンド型風車が主流であるが、ロータをタワーの風下側に位置するダウンウィンド型風車が開発されており（例として図1参照）、注目を集めつつある。

暴風待機時に荷重を低減しうる方策の一つとして、風による力を利用して受動的にロータ面を風に正対させるパッシブヨー制御がある。パッシブヨー制御を実施するにはロータをタワーの後方に位置する必要があるが、アップウィンド型風車でその状態に移行するにはヨーを180deg.旋回する必要がある。一方、ダウンウィンド型風車ではヨー旋回することなくパッシブヨー制御に移行可能であるというメリットがある。

本稿では、暴風待機時のパッシブヨー制御における解析条件設定について検討し（2章）、その設定方法による実測データの再現性を検証した（3章）。また、その解析条件においては平均風向の変化速度が重要となるため、その荷重への影響を調査すると共に、パッシブヨー制御による荷重低減効果を確認した（4章）。

### 2. 解析条件の設定方法と解析方法

現行の国際規格（IEC<sup>1</sup>およびGL<sup>2</sup>）においては、暴風待機時に、アクティブヨー制御に対しては定常風モデルで±15deg.、乱流風モデルで±8deg.のヨーミスアライメントを考慮することが規定されている。一方、パッシブヨー制御に対しては、乱流風モデルを使うことや、ヨーミスアライメントは風向変化と風車ヨーの

動的な応答に支配されることを指摘しているのみで、具体的な解析方法についての記載が無い。そこで本稿では、以下のような解析を実施した。

- (1) 風向は、乱流モデルより算出される短周期の変動に加え、暴風時に想定される平均風向の変化を一定の速度として与える。
- (2) ヨーミスアライメントは、風速、風向、風車ヨー応答の設定に応じて解析により算出される。
- (3) 平均風向の変化を一定の速度として与える場合に、解析開始より一定時間経過後には、ヨーミスアライメントはほぼ一定となると考えられる。風車の挙動や荷重の評価は、ヨーミスアライメントが安定した後のデータに対して実施する。

ダウンウィンド形態において風に正対するようにヨートルクが働く様子や、風車のヨー応答において重要となるヨーブレーキシステムの例を図2に示す。



Figure 1 HTW2.0-80 downwind turbine<sup>3</sup>

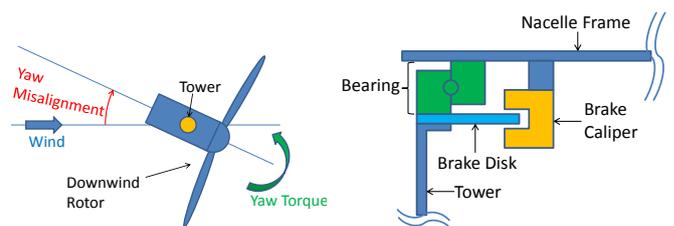


Figure 2 Mechanism of passive yaw control  
(left: driving force by wind, right: yaw brake system)

<sup>\*1</sup>平成29年12月7日 第39回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演  
<sup>\*2</sup>会員 ㈱日立製作所 〒317-0056 茨城県日立市国分町1-1-1  
<sup>\*3</sup>会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1  
<sup>\*4</sup>非会員 ㈱日立製作所 〒317-0056 茨城県日立市国分町1-1-1

### 3. 実測による検証

本章では日立製作所製 2MW ダウンウィンド風車 HTW2.0-80 において取得された実測データより、2章に示す解析方法について評価する。

#### (1) 実測データ

台風通過時に実測されたナセル風速・風向およびナセル方位角の時刻歴を図3に示す。風速は徐々に増大し、時刻 14.4 時頃に瞬間最大風速 61.2m/s を観測した後に、時刻 14.5 時以降は減少に転じている。風向は時刻 13.2 時までには約 130deg. でほぼ一定であり、その後南東から南西に転じ、時刻 15.1 時以降は約 240deg. でほぼ一定となっている。ナセル方位角はパッシブヨー制御により風向に少し遅れて追従している。以降の解析では、基本的に、風速が高く風向がほぼ一定割合で変化している時刻 13.5~14.5 時を対象とする。その期間の 10 分間毎の風況の統計値を図4に示す。

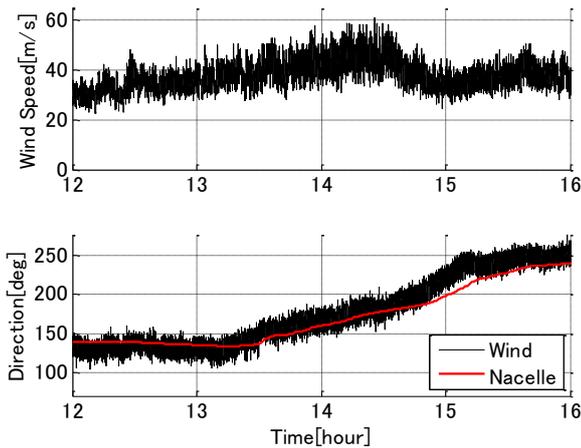


Figure 3 Measured wind speed and yaw angle

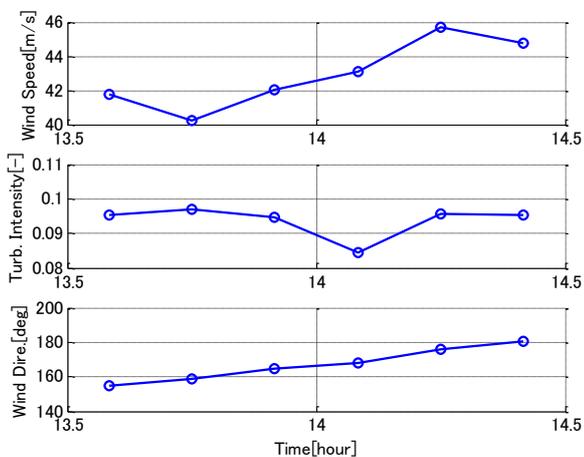


Figure 4 Measured 10-minute mean wind speed, turbulence intensity and wind direction

#### (2) 解析条件

解析条件を表1に示す。基本的にはサイトデータ(図4)を元に作成し、データが得られていない風況条件についてはサイトの地形特性より推定した。風速や風向の時刻歴は、設計段階では風況の統計値のみが得られると考えられるため、本検討でも再現することはせず、Kaimal スペクトルを想定し統計値のみを合わせ込みを実施し、評価は6つの乱数シードの解析結果に対して統計的に行った。平均風速は40および44m/sとし、乱流強度は対象期間の平均値とした。風向の標準偏差は、実測は矢羽根式の風向計であり、変動成分は信用できないため、風速の標準偏差3成分の比を対象サイトの地形(平坦地)において標準値である1:0.8:0.5となるように設定した。平均風向の変化速度は対象期間の平均値を一定値として与え、初期ヨーミスアライメントはヨーミスアライメントの安定化時間を低減するため、風向の変化速度の逆符号として与えた。ウィンドシア(べき指数 $\alpha$ )は暴風時に一般的な0.11とし、流れの傾きは海風であるため、0deg.とした。ヨーブレーキトルクは動摩擦および静摩擦に対して設定したが、静摩擦の影響は余り大きくないことを確認した。解析時間は910秒間とし、評価にはヨーミスアライメントが安定した後の310~910秒のデータを用いた。

Table 1 Analysis conditions for verification

風車モデル	HTW2.0-80 (日立製作所製)
乱流モデル	Kaimal スペクトル
乱数シード数	6
平均風速	40, 44m/s
乱流強度	9.4%
乱流3次元成分	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1:0.8:0.5$
風向の変化速度	0.0087deg./s (一定値)
初期ヨーミスアライメント	-10deg.
ウィンドシア ( $\alpha$ )	0.11
流れの傾き	0deg.
ヨーブレーキトルク	動摩擦+静摩擦
解析時間	910s (評価対象: 310~910s)
解析ソフト	BLADED <sup>4</sup> (DNV GL 社製)

#### (3) ヨーミスアライメントの評価

時刻歴の解析例を図5に示す。風向は短周期で変動しながら平均的にはプラス方向に変化している。ナセル方位角はそれに遅れて追従している。時刻 100 秒以降はヨーミスアライメントがほぼ一定となっている。

10 分間平均風速に対するヨーミスアライメントの

実測と解析結果の比較を図 6 に示す。40m/s 未満の低い風速においては、パッシブヨー制御によるヨーの風向追従性が弱いために比較的大きなヨーミスアライメントが発生しているが、風速が高くなるにつれて小さい値に収束している。評価対象とした 13.5~14.5 時では、解析結果は実測値とよく一致している。

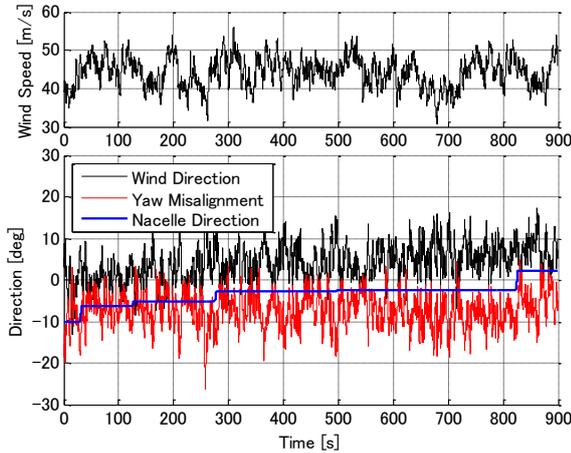


Figure 5 Time history of wind and direction

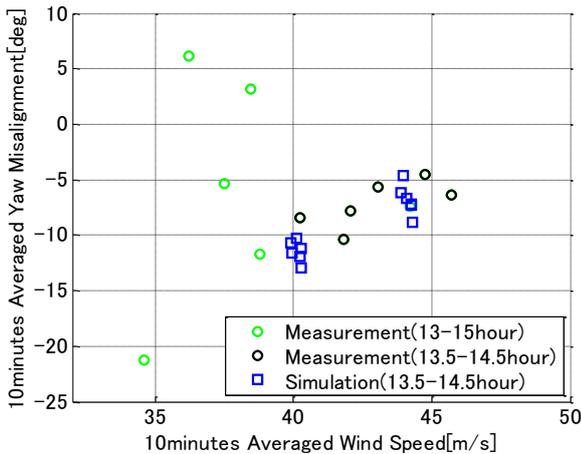


Figure 6 Comparison of predicted and measured yaw misalignment

#### (4) 荷重の評価

風車の主要荷重であり、暴風待機時がクリティカルになることが多いブレードのフラップ方向曲げモーメント（以下“フラップ曲げ”と呼ぶ）に対して、解析と実測との比較検討を行った。実測は、ブレードルート部の正圧側と負圧側に光ファイバ式歪みゲージを設置し、その計測データからフラップ曲げを算出した。図 7 と図 8 にある数値は、風車設計時の極大値で正規化した。

実測および解析におけるフラップ方向曲げモーメントの時刻歴の例を図 7 に示す。主にロータの回転周期で変動しており、それにブレードの振動による高周

波数の変動が付加されている。

風速に対するフラップ曲げの 10 分間統計値の実測と解析の比較を図 8 に示す。各点が 3 つずつあるのはブレード 3 本に対応する。平均値と最小値の予測値は実測値とよく一致しているが、最大値の予測値は実測値よりも若干大きな値を示しており、解析は若干安全側の評価となっている。

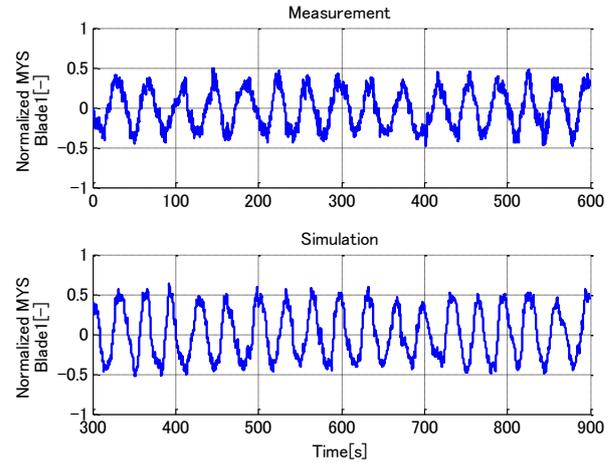


Figure 7 Time history of measured and predicted flapwise bending moment (above: measurement, below: prediction)

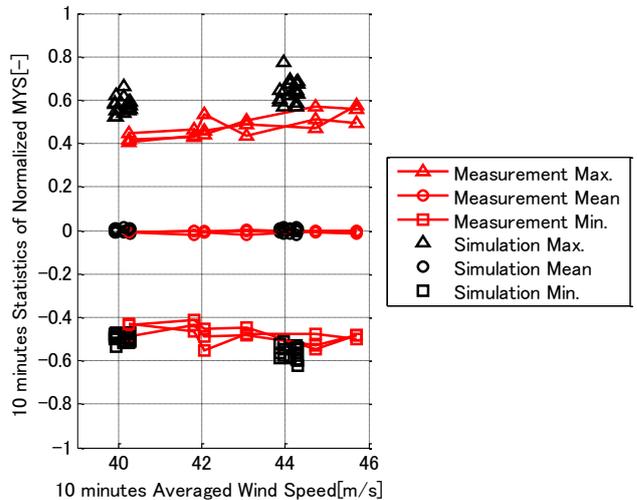


Figure 8 Comparison of predicted and measured flapwise bending moment

#### 4. 平均風向の変化速度の影響

パッシブヨー制御の設計パラメータとして風向の変化速度を追加し、ヨーミスアライメントと極値荷重への影響を空力弾性解析により調べた。

表 1 に示す解析条件からの変更点を表 2 に示す。平均風速および乱流強度は 50 年再現期待値として起こりうる大きな値はそれぞれ 55m/s, 11%とした。風向の変化速度は  $\pm 0.5 \text{deg/s}$  の間で変化させた。初期ヨーミスアライメントは、絶対値は 10deg.とし、符号は風向

の変化速度の逆符号とした。

風向の変化速度に対するヨーミスアライメントの10分間平均値を図9に示す。ロータの空気力の左右のアンバランスにより、風向の変化速度を考慮しない場合(0deg./s)においてヨーミスアライメントは約-1.5deg.であり、風向の変化速度を考慮すると、そこからずれた角度となった。ヨーミスアライメントの最大値は約4deg、最小値は約-8degである。

風向の変化速度に対するフラップ方向曲げモーメントの10分間最大値を図10に示す。図中の丸印("Typical value")は、6シードに対して平均を取り、3ブレードに対して最大を取ったものである。数値は、平均ヨーミスアライメントを-8, 0, 8deg.として解析したアクティブヨー制御時の値で正規化した。風向の変化速度が大きくなるとフラップ方向曲げモーメントも大きくなる傾向がみられる。また、風向の変化速度が負よりも正の場合にフラップ曲げモーメントが大きくなる傾向がみられ、これは図9で示したヨーミスアライメントの影響が考えられる。また、風向の変化速度が±0.5deg.以下においてはアクティブヨー制御時よりも荷重が小さく、暴風待機時におけるパッシブヨー制御の有効性が確認された。

Table 2 Analysis conditions for parameter study

平均風速	55m/s
乱流強度	11%
風向の変化速度	0, ±0.01, ±0.02, ±0.05, ±0.1, ±0.2, ±0.5 deg./s (一定値)
初期ヨーミスアライメント	-10deg.または+10deg. (風向の変化速度の逆符号)

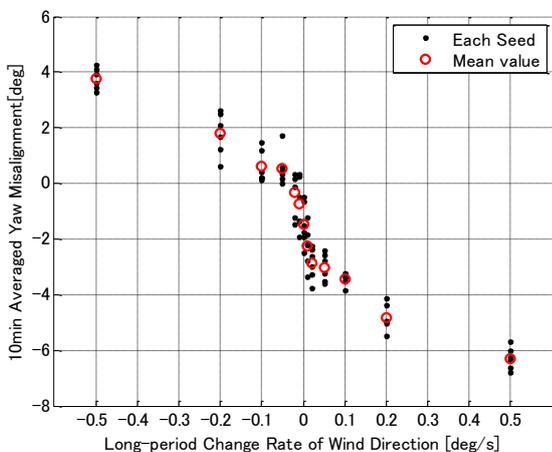


Figure 9 Variation of yaw misalignment with wind direction change

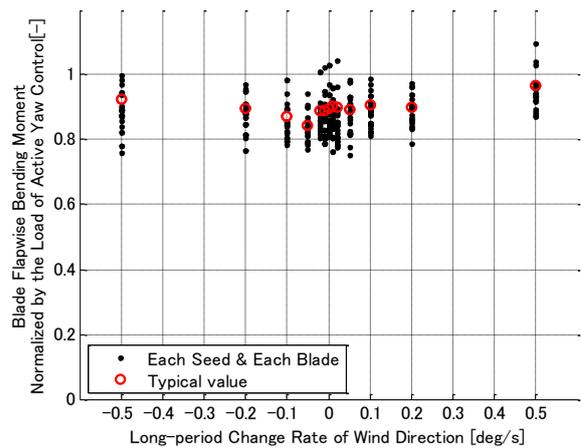


Figure 10 Variation of maximum flapwise bending moment with wind direction change

## 5. まとめ

パッシブヨー制御における暴風待機時のヨーミスアライメント、風荷重、風向の変化速度の影響を空気弾性モデルにより評価し、以下の結果を得た。

- (1) 平均風向の変化速度を設定することにより、パッシブヨー制御時の風荷重の評価手法を提案した。
- (2) 空気弾性モデルにより求めたヨーミスアライメントは実測により得られた値と良く一致した。またブレードのフラップ方向曲げモーメントの平均値と最小値も実測値と一致し、最大値は若干安全側の評価となっている。
- (3) 風向の変化速度の影響を空気弾性モデルにより調べた結果、ロータ空気力の左右アンバランスに起因し、ヨーミスアライメントとブレードの極値荷重に影響を与えることを示した。
- (4) パッシブヨー制御により暴風待機時のブレードの極値荷重を低減する可能性を示した。

## 参考文献

- 1) International Electrotechnical Commission, "Wind turbines- Part 1: Design requirements", IEC61400-1, Edition3.1, 2014
- 2) Germanischer Lloyd WindEnergie, Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines, Edition 2012.
- 3) [http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/products/htw2000\\_80/index.html](http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/products/htw2000_80/index.html)
- 4) Garrad Hassan and Partners, BLADED ver.4.2.0.83, 2012.