

風車制御が発電出力と支持物に作用する荷重に与える影響に関する研究

The effect of control logic of wind turbines on the power and the load on supporting structure

山口 敦¹⁾ 石原 孟²⁾

Atsushi YAMAGUCHI¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾

ABSTRACT

In this study, a control logic of wind turbines by using fuzzy function is proposed and the effect of control logic on the power performance and the load on supporting structure is investigated. By using proposed control logic which uses fuzzy function and use the gain values calculated by loop shaping, the fluctuation of the rotor speed can be reduced. By adding additional loop from acceleration of the nacelle is introduced and it is shown that this method can effectively add additional damping and resulting damage equivalent fatigue load of the tower base moment is reduced while the other fatigue load does not increase. This indicates that the tower acceleration feedback is a effective tool to reduce tower load.

Key Words: Wind turbine control logic, wind turbine performance, load on wind turbine support structure

1. はじめに

最近の風力発電設備においては発電機のトルクとブレードのピッチ角を制御することにより定格風速以下では発電効率を最大にするとともに、定格風速以上では発電出力を一定にすることが行われている。通常、実風車の制御アルゴリズムは風車の性能に直結することから各風車メーカーの高度な秘密事項であるため、公開されていない。一方で、風力発電設備支持物に作用する荷重を検証する際や、支持物に関する研究を行う際には具体的な制御モデルに基づくことが不可欠である。また、浮体式洋上風力発電設備においては、風車の制御が浮体動揺や荷重に大きな影響を与えることから、標準的な風車制御モデルが求められている。

現在までに、提案された一般的な制御モデルとしては、Hansen et al.¹⁾ によるものがある。このモデルは Jonkman et al.²⁾ によって実装され、ソースコードが公開され、世界中で広く使われている。また、我が国の土木学会の荷重指針においても、荷重評価のための標準的な制御モデルが提案されているが、制御モデルの詳細が不明であるという問題点がある。また、これらの標準制御モデルを実風車に適用して検証した例は少なく、実風車の制御モデルの代わりに用いることができるかどうかはわかっていない。

本研究では、銚子沖 2.4MW 風車を対象として、今までに公開されている標準風車制御モデルを適用した場合の問題点を明らかにするとともに、改良標準風車モデルを提案し、これらの問題点を解決する。また、タワーの加速度を利用してピッチ制御を利用して付加減衰を与える手法を適用し、タワー・ブレード・主軸等に作用する荷重にどのような影響を与えるか明らかにする。なお、銚子沖 2.4MW 風車の制御以外の部分のモデル化については、文献³⁾を参照されたい。

1) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 特任准教授(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授

2. ベースライン標準風車モデル

本研究では Jonkman et al. ²⁾ によって説明されているモデルをベースライン標準風車モデルとした。このモデルは制御モデルのソースコードが公開されており、詳細な点まで明らかにされている。この制御モデルは、ロータ回転数とブレードピッチ角に応じて異なる制御が行われている。図 1 にベースラインモデルにおける制御方法概要を示す。

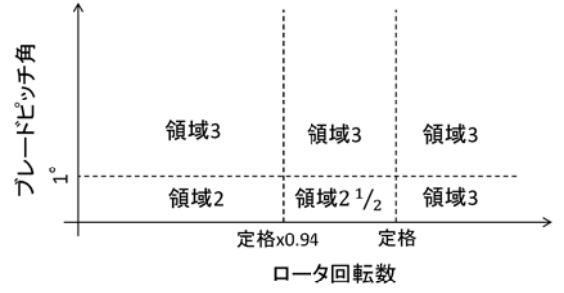


図 1 ベースラインモデルの制御方法の概要

風力発電機の効率は風速と翼端速度の比である周速比の関数であるため、可変速の風力発電機では、発電機の回転数が定格(Ω_r)以下の領域 2 では、発電効率が最大となる周速比となるように発電機のトルク Q を(1)式に従って制御する。またこの時、ブレードのピッチ角 θ は常に 0 である((3)式)。

$$Q_{R2} = k_{opt} \times \Omega_f^2 \quad (1)$$

$$k_{opt} = \frac{\pi \rho R^5 C_{p_{opt}}}{2 r^3 \lambda_{opt}^3 \eta_M} \quad (2)$$

$$\theta_{R2} = 0 \quad (3)$$

ここで Ω_f は発電機回転数、 ρ は空気密度、 R はロータ半径、 $C_{p_{opt}}$ は最適収束比、 η_M は発電機効率、 r は増速機のギア比である。発電機回転数が定格(Ω_r)以上の場合、発電機の出力が一定となるように、発電機のトルクは出力が定格を維持するように定格出力 P_r を発電機回転数で除した値を指示値とする(式(4))。

$$Q_{R3} = \frac{P_r}{\Omega_f} \quad (4)$$

また、ピッチ角は発電機の回転数が一定となるように PI 制御によって制御する。(式(5))

$$\theta_{R3} = \kappa(K_p e(t) + K_I u_I(t)) \quad (5)$$

ここで、 $e(t)$ と $u_I(t)$ は発電機回転数の偏差とその積分値であり、比例ゲイン K_p と積分ゲイン K_I は Hansen et al¹⁾に従い式(6)(7)により求める。また、 κ はゲインスケジューリング関数であり、(8)式を用いる。

$$K_p = \frac{2I_d \Omega_r \zeta_\varphi \omega_{\varphi n}}{r \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (6)$$

$$K_I = \frac{2I_d \Omega_r \omega_{\varphi n}^2}{r \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_k}} \quad (8)$$

ここで I_d はロータ、増速機、発電機の回転子の慣性モーメントの合計であり、 ζ_φ は制御系の減衰、 $\omega_{\varphi n}$ は周期であり、タワー1次固有周期の3倍となるように設定した。この制御領域を領域 3 と呼ぶ。

領域 2 における発電機トルクと回転数の関係(式(1))と領域 3 における発電機トルクと回転数の関係(式(2))は通常一致せず、領域 2 と領域 3 の発電機トルクを発電機の定格回転数時に比べると、領域 3 におけるトルク値の方が大きい。このため、領域 2 と領域 3 を滑らかにつなぐための中間領域が必要である。この領域を領域 2.5 と呼ぶ。領域 2.5 では、発電機トルクを急激に変化させる必要がある。Jonkman²⁾ では誘導発電機の滑りの性質を利用して領域 2.5 でのトルク制御とした。

3. 本研究で提案する制御モデル

ベースラインモデルを銚子 2.4MW 風車に適用し、動解析を行った結果、いくつかの問題点が明らかになったため、改良を行った。本節ではそれについて述べる。

3.1 制御領域 2.5 におけるピッチ制御

ベースラインモデルを用いて定格風速よりやや高い平均風速 16m/s のシミュレーションを実施した際、ロータ回転数の大幅な振動が見られた。(図 5(c))これは、制御領域 3 と制御領域 2.5 の間の切り替えが頻繁に発生したためと考えられる。銚子沖 2.4MW 風車においては、制御領域 2.5 において負のピッチ角となっており、この領域においてピッチ制御を行わないとこの例のように定格風速よりやや高い風速域において不自然な振動が発生する。本研究では、制御領域 2.5 においてもピッチ制御を行うとともに、ピッチ角の最低値のモデルとして(2)式を提案した。

$$\theta_{min} = \begin{cases} \frac{\theta_{10} - \theta_9}{\omega_{10} - \omega_9}(\omega - \omega_9) + \theta_9 & \omega < \omega_{10} \\ \frac{\theta_{11} - \theta_{10}}{\omega_{11} - \omega_{10}}(\omega - \omega_{10}) + \theta_{10} & \omega \geq \omega_{10} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 ω_9 、 ω_{10} 、 ω_{11} はそれぞれ風速 9m/s、10m/s、11m/s の時の発電機回転数であり、 θ_9 および θ_{10} はそれぞれ風速 9m/s、10m/s の時の最低ピッチ角である。

また、ベースラインモデルでは、ブレードピッチ角の PI 制御における比例ゲインと積分ゲインを、Hansen et al.¹⁾に基づいて求めている。一方、吉田³⁾は、ループ整形法により PI ゲインを求める手法を提案している。本研究では、ループ整形法により PI ゲインを求めることとした。

3.2 トルク制御におけるファジー関数

図 3 に示すように、ベースラインモデルでは、制御領域 2 と制御領域 2.5 あるいは制御領域 2.5 と制御領域 3 の接続部において、発電機回転数の関数としての発電機トルクが滑らかに変化していないため、ロータ回転数の振動が発生するという問題点があった。本研究では制御領域の境界において発電機トルクをなめらかに与えるため、ファジー関数を用いた。本研究の手法では、発電機トルク Q は(3)式で与えられる。

$$Q = \frac{W_2 Q_{R2} + W_{2.5} Q_{R2.5} + W_3 Q_{R3}}{W_2 + W_{2.5} + W_3} \quad (9)$$

ここで、 Q_{R2} 、 $Q_{R2.5}$ 、 Q_{R3} はそれぞれ、元々の制御領域でのトルク指令値であり、 W_2 、 $W_{2.5}$ 、 W_3 は図 2 に示すような重み関数である。(9)式で表される重みを付けたトルク指令値を従来のトルク指令値と比べたものを図 3 に示す。従来のトルク指令値は領域の境界部において急激に変化しているが、本研究で提案したトルク指令値は滑らかに変化していることがわかる。

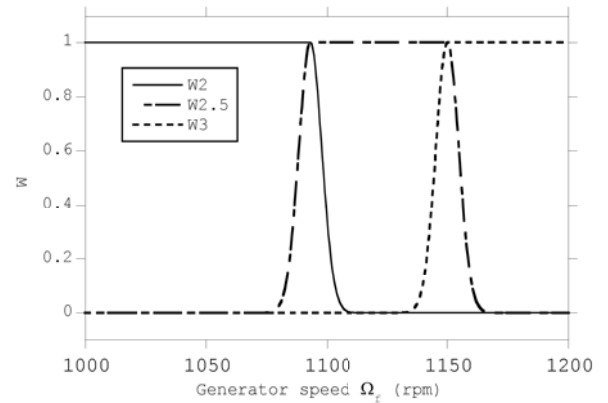


図 2 本研究で使用した重み関数

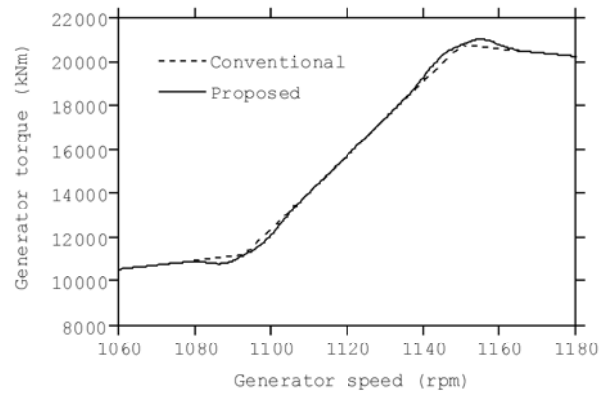


図 3 発電機回転数の関数としてのトルク指令値

3.4 ベンチマークによる検証

以上本研究で提案した制御モデルとベースラインモデルを用いて実風車のシミュレーションを行い、本研究での提案を検証した。検証には、ステップ型に風速を変化させたケースと乱流風速場を用いたケースの2通りを実施した。

図4はステップ型に風速を変化させた場合の風車のロータ回転数、ブレードピッチ角、出力を示す。従来のベースラインモデルを使用した場合にはステップ状の風速変化後に回転数が大きく変動しているのに対し、提案したモデルを利用した場合にはそのような変動が見られず、システムが安定であることがわかる。

本研究で提案した制御手法は乱流下での風力発電設備の応答も改善する。図5は3次元乱流風速場の下での風力発電設備のロータ回転数、ピッチ角、出力を示すが、従来の制御手法で発生しているロータ回転数の変動とそれに伴う出力の変動が改善されていることがわかる。

4. ピッチ制御による付加減衰

Leithead et al.⁵⁾によりピッチ制御を利用してタワーに付加減衰を与える手法が提案されている。風車タワーの振動を1自由度と仮定すると、ナセルの前後方向の運動は(10)式のように記述できる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{th}(\theta) \quad (10)$$

ここで、 $F_{th}(\theta)$ はピッチ角の関数としてのスラスト力である。ピッチ角を $\Delta\theta$ 変化させると、(10)式は

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{th}(\theta) + \frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \Delta\theta \quad (11)$$

となる。計測されたナセルの加速度からナセル速度を数値積分により計算し

$$\Delta\theta = \alpha \dot{x} \quad (12)$$

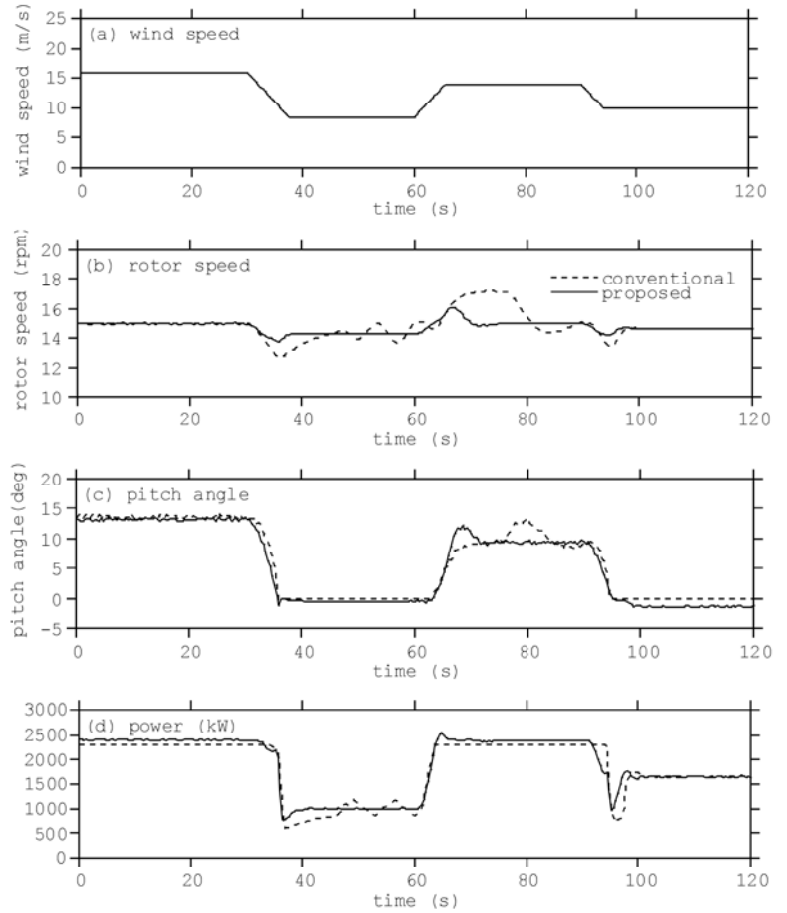


図4 ステップ型風速に対する風車の応答

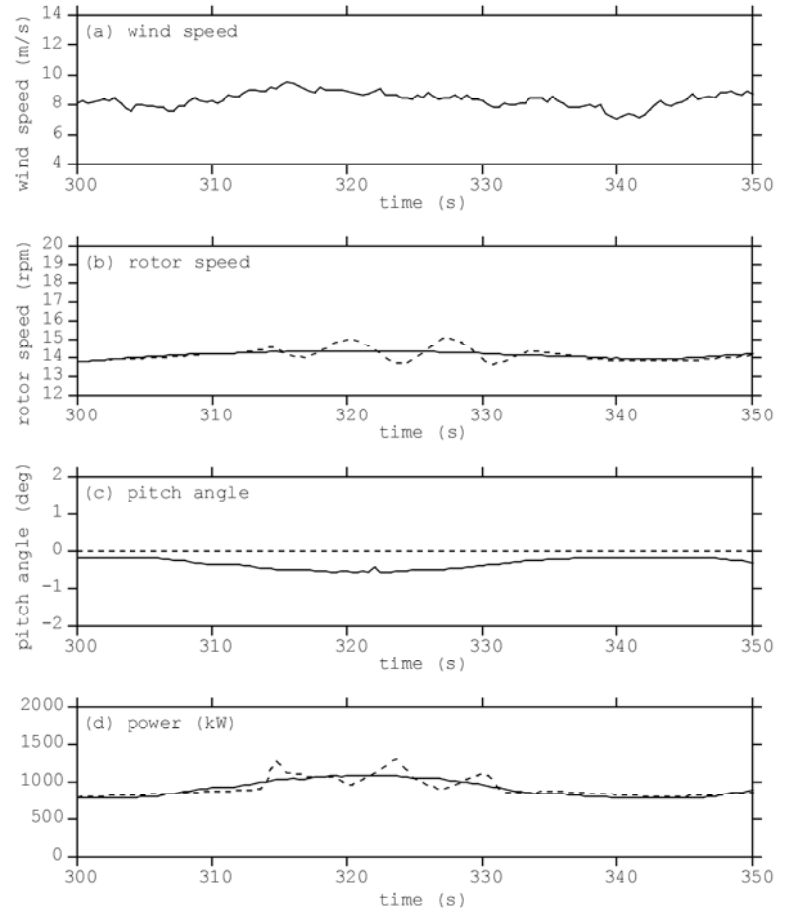


図5 乱流に対する風車の応答

となるようにピッチ角を変更させると, (11)式は

$$m\ddot{x} + \left(c - \frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \alpha\right) \dot{x} + kx = F_{th}(\theta) \quad (13)$$

となり, 付加減衰を与えることができる。本研究ではこの方法に従い, ナセルにおける加速度の計測値を利用して付加減衰を与えた。この制御の効果を確認するため, ステップ状に風速を変化させ, 自由振動を励起させたシミュレーションを実施し, 減衰を同定した。図 6 にその結果を示す。ピッチ制御による付加減衰を加えない場合に比べ, 付加減衰を加えた場合には減衰が大きくなっていることがわかる。

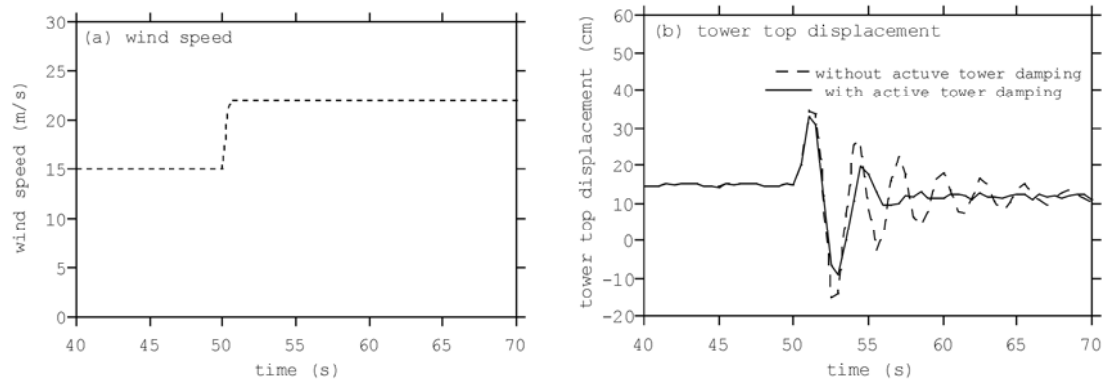


図 6 風速変動による自由振動試験結果

また, 乱流風速下でも付加減衰を加えた場合には減衰の効果により, タワー基部に作用する変動荷重が小さくなる。図 7 は付加減衰を加えた場合と加えない場合のタワー基部モーメントの比較であるが, 付加減衰を加えた場合には変動荷重が小さくなっていることがわかる。

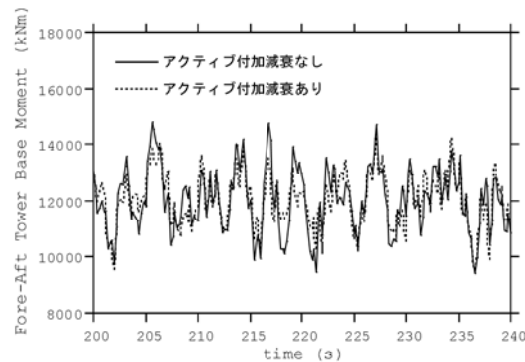


図 7 加速度フィードバックによるタワー基部転倒モーメント低減の例

さらに, 定格風速付近の 14m/s とカットアウト直前の 22m/s に対して前後方向のタワー基部モーメントおよびその他の荷重の等価疲労荷重⁶⁾を比べたものを図 8 に示す。タワーに付加減衰を与えることにより, 高風速時のタワー基部モーメントの等価疲労荷重が減少しているが, 本手法に与える減衰は, 風車タワー 1 次モードを対象としたものであるためブレードの振動など他の振動モードには全く影響を与えず, ブレード基部モーメントの等価疲労荷重は全く変化していない。このことから, ブレードのピッチ制御を用いることにより, 付加減衰を与える手法はタワー基部転倒モーメント低減に有用であることがわかった。

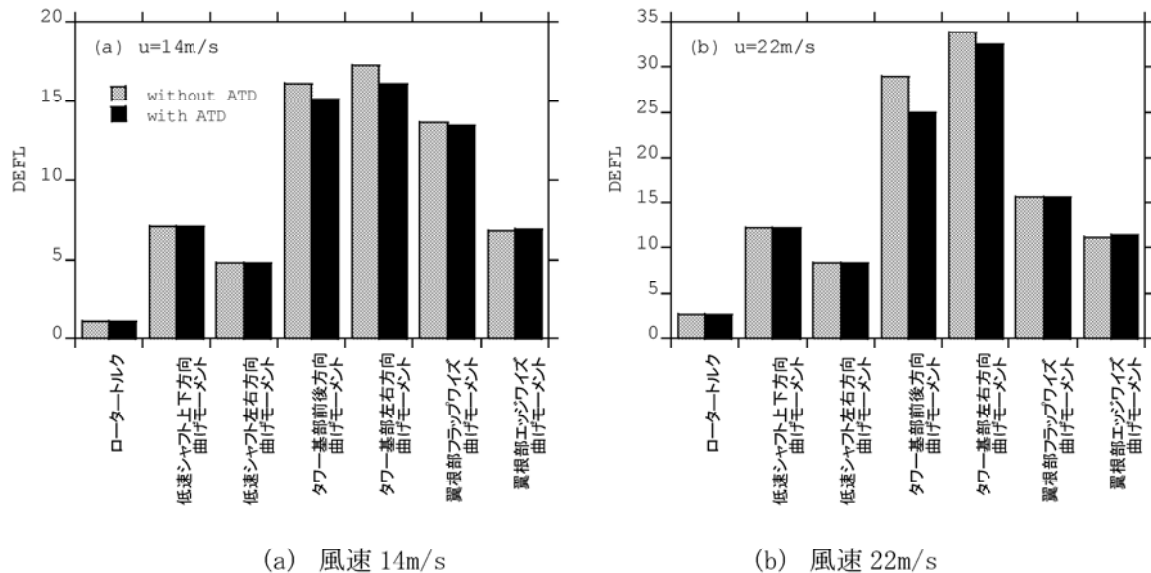


図 8 付加減衰なしと付加減衰ありの場合におけるブレード、主軸、タワー基部における等価疲労荷重の例

まとめ

本研究ではファジー関数を用いた風車制御モデルを提案するとともに、ナセル加速度を用いたフィードバック制御を行い、以下の結論を得た。

- 1) 最大効率を目的とする領域 2, 定格出力での一定出力を目的とする領域 3 およびそれらの接続領域である領域 2.5 において、トルク制御に対してファジー関数を用いるとともに、整形法により求めたゲインを用いることにより、ロータ回転数の変動を抑えることが可能であることを示した。
- 2) 領域 3 において、ピッチ制御によってタワーに付加減衰を与えることが可能であり、タワーに付加減衰を与えた場合、タワー基部モーメントの変動荷重は減少するが、それ以外の荷重はほとんど変わらないことを明らかにした。

謝辞

本研究は、NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究の一部として実施したものであり、ここに記して関係者の皆様に謝意を表する。

参考文献

- 1) M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen and P. Fuglsang, Control design of a pitch-regulated, variable speed wind turbine, Risø National Laboratory, Risø-R-1500(EN), 2005.
- 2) J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-38060, 2009.
- 3) 山口敦, プラサンティ ウィディヤシ サリ, 石原孟: 風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, pp. 133-138, 2014.
- 4) 吉田和信: ループ整形法による PID 補償器の設計, 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008
- 5) W. E. Leithead, S. Dominguez. and C. Spruce., Analysis of tower/blade interaction in the cancellation of the tower fore-aft mode via control. In: European Wind Energy Conference 2004.
- 6) 吉田茂雄: 代表的な 2MW 風車の疲労荷重データベース, 風力エネルギー Vol.31, No.4, pp123-128, 2007.