

直線翼垂直軸風力発電装置における 速度低減率に関する実験的検討

A study of Experimental Examination on Speed Reduction Rate for Vertical Axis Wind Turbine

細江 忠司¹
Tadashi HOSOE

雪田 和人²
Kazuto YUKITA

後藤 泰之²
Yasuyuki GOTO

一柳 勝宏²
Katsuhiko ICHIYANAGI

Abstract

In this paper, we report an analysis of the actual wind speed measured around a vertical axis wind turbine. This paper aims to propose the new calculation method of the power coefficient of a vertical axis wind turbine. In order to further improve the development of efficient vertical axis wind turbines, a field examination was carried out. In this field examination, the wind velocity in the proximity of three wind turbine blades was measured. The speed reduction rates were computed by measuring the wind velocity near the circumference of the wind turbine. The characteristic parameters of the turbine were also computed. The speed reduction rates were computed by using the actual wind velocities, which enabled the development of a calculation method for the characteristic parameters of the wind turbine.

キーワード：垂直軸風車，風速計，速度低減率，風車効率

Key Words: Vertical wind turbine, Anemometer, Speed reduction rate, Power coefficient

1. はじめに

近年，再生可能エネルギーを用いた発電方式である風力発電や太陽光発電が注目されている。このため風力発電を高い発電効率で運用するために，風レンズ方式，集風発電方式，風車ブレード(羽根)の形状などに関する数多くの研究報告がなされている^{(1),(2)}。また，風速観測方法としても，高精度な計測機器や計測手法が提案されており，風力発電システムのための風況予測や発電量予測に用いられている^{(3),(4)}。

著者らも，これまでに風力発電システムの発電効率向上を目的として，風を集めて増速させる集風装置や発電機の巻数を可変させる極数変換装置などの開発を実施してきた^{(5)~(7)}。このような開発は，風力発電システムを構成する各構成要素のみでの検討であり，風力発電システム全体を考えた場合には，かならずしも発電効率向上効果が得られないことが考えられる。これは風車，発電機と制御系の整合性に依存しており，風力発電システムを考えた場合，非常に重要な項目のひとつになる。そこで，

風車，発電機，制御系との整合性を図るために，風洞実験，流体実験，小型電動機などにより，システムの各係数やシステムパラメータを算出しシステム構築しているものが多い^{(8)~(10)}。このようにシステムを構築する場合，発電機の定格に基づいた設計や風車効率に基づいて設計されるものが一般的であるため，設計値による発電量と実フィールドにおける発電量が異なることが懸念される。これは，実システムを考えた場合，各構成要素技術だけでなく設置された環境などにも大きく左右されるためである。そこで，風力発電システム全体を考えた場合，実フィールドにおけるシステムの各係数やシステムパラメータの算出ができれば，より発電効率が高いシステムが期待できる。しかしながら，実稼動している小型風力発電システムにおける風車単独の効率を計測することは，非常に困難であると思われる。

そこで本論文では，実フィールドにおける小型直線翼垂直軸型風力発電システムにて，風車翼近傍での新たな風速計測手法を提案する。そして，実測した風速データより速度低減率を算出^{(11),(12)}し，風車効率の計算を実施した。この手法を用いることで，風洞実験装置を使用せずに，実フィールドにて風車効率の算出が可能となる。

この結果，実フィールドに設置された風力発電システムの構成要素における整合性の向上による発電電力の増加が期待できる。

*1 愛知工業大学 エコ電力研究センター(〒470-0392 豊田市八草町八千草1247) E-mail:t-hosoe@aitech.ac.jp

*2 愛知工業大学 工学部 教授
(原稿受付：2014年2月14日)

2. 速度低減率

風の運動エネルギーは、風車を通過することで回転エネルギーへと変換する。その際、通過する風力エネルギーは減少し、風速は減速する。図1に一樣流風速における風速の変化を示す。ここで、風の減速を速度低減率 a , 垂直軸風車を通過する前の一樣流風速を V_{∞} [m/s], 垂直軸風車内の風速を V_1 [m/s], 垂直軸風車を通過後の下流側風速を V_2 [m/s]とする。これらから、各風速と速度低減率の関係は次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$V_1 = V_{\infty}(1 - a) \quad \dots (1)$$

$$V_2 = V_{\infty}(1 - 2a) \quad \dots (2)$$

よって、垂直軸風車周辺の風速を計測することにより、速度低減率 a を算出することができる。

3. フィールド試験

3.1 フィールド試験場所の風況

本論文のフィールド試験は、本学講義棟である12号館屋上に直線翼垂直軸型風車を設置し実施した。図2に風向出現率を示す。ここで12号館は地上4階であり風車設置階は地上約24mである。風速計測は、2013年10月から12月までの3カ月間実施した。卓越風向は、西北西であり平均風速は2 m/sである。図3に風速出現率を示す。同図に示すように、カットイン風速である3m/s以上の風速は、全体の20%程度である。図2および図3の観測データは、3カ月間の10分間の平均風速で示している。

3.2 フィールド試験条件

フィールド試験に使用する直線翼垂直軸型風車の仕様とシステム構成を表1および図4に示す。風力発電装置は、風車、発電機、整流器、MPPT制御装置、蓄電池にて構成している。発電した電力は蓄電池へ充電する。ここで、試験中の蓄電池の状態は、適当な負荷を風車に与えるためと発電電力を確認するために充電率の約80%で運用する。従って、電力系統との連系は実施していない。

次に、風車翼近接の風速変化を計測するために東西南北の4箇所に風速計を設置した。図5は4箇所に設置した風速計の配置位置を示す。北に設置した風速計をPNとし、同様に東をPE、南をPS、西をPWとした。風速計の設置位置は、風車中心からの距離を2,020mmとし、風速計とブレードとの近接距離を770mmとした。また設置場所の風況を計測するため、風向風速計Aを風車中心位置から4,000mmの地点に設置している。これは風車の回転による風向風速の影響をなくすためである。風向風速計Aの位置は日本工業規格(JIS規格)により、ブレード直径の約2倍とした。図6に直線翼垂直軸型風車と4箇所の風速計の外観を示す。

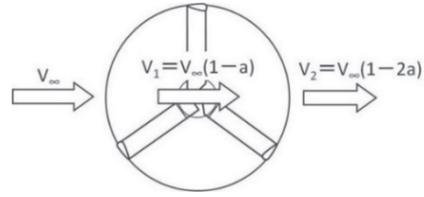


Fig.1 Characteristic of wind velocity
図1 風速の特性

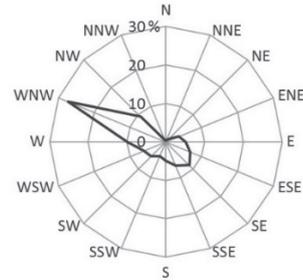


Fig.2 Wind direction appearance ratio (2013.10-12)
図2 風向出現率 (2013.10月～12月)

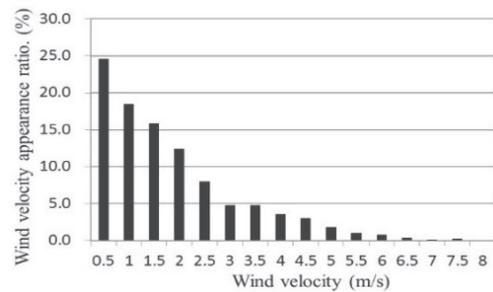


Fig.3 Wind speed appearance ratio (2013.10-12)
図3 風速出現率 (2013.10月～12月)

Table 1 Windmill system configuration
表1 直線翼垂直軸型風車仕様

Rated Power	1000 W
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	15 m/s
Blade length	2300 mm
Diameter	2500 mm
Chord length	300 mm

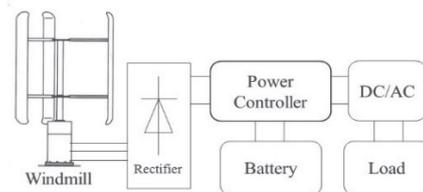


Fig.4 System configuration
図4. 風力発電システム

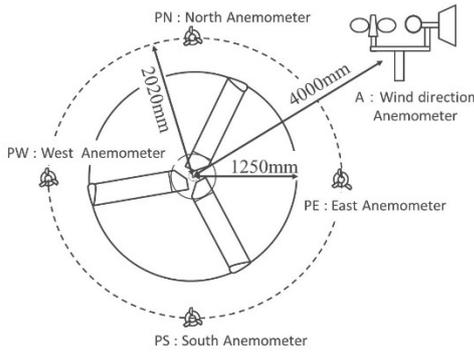


Fig.5 Anemometer of four directions

図 5 風速計設置位置



Fig.6 Appearance of anemometer

図 6 風速計設置外観

4. フィールド試験結果

直線翼垂直軸型風車において、まず風車を停止させたときの4箇所風の特性を計測した。次に、風車を通常運転させたときの4箇所風の特性を計測し、速度低減率を算出し、風車効率の算出をした。

4.1 風車停止時の試験結果

直線翼垂直軸型風車にブレーキをかけ、ブレードが回転しないよう停止させ、4箇所の風速を計測した。計測データは、風車を回転停止させた1日の1秒サンプリングを使用した。図7にその結果を示す。

図7(a)に風速が7m/s, 5m/s, 3m/sのときの4箇所の風速を示し、同図(b)には風向出現率の結果を示す。風向出現率の計測は、4箇所の風速計とは別の風車設置場所の風況を計測するための風向風速計Aを用いている。ここで、卓越風向が南東から南南東であるのに対して4箇所の計測風速がほぼ一定であることがわかる。これはブレードが回転していないときの4箇所の風速計は、一定方向の風速により一様な風速を計測していることが確認できる。

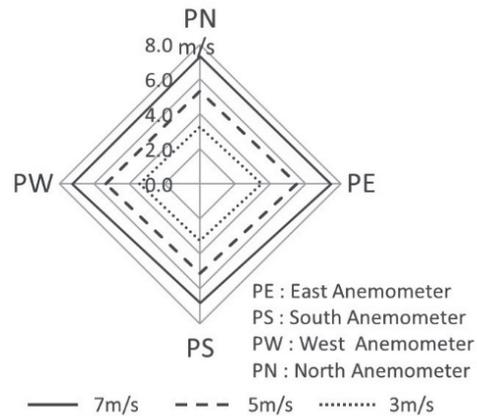
4.2 風車通常運転の試験結果

(1) 風車通常運転の風況状況 直線翼垂直軸型風車をフィールドにおいて通常運転させた1日の風況を図8に示す。ここで同図(a)は風向出現率を示す。同図(b)には風向による平均風速を示し、同図(c)に風速出現率を各々示す。

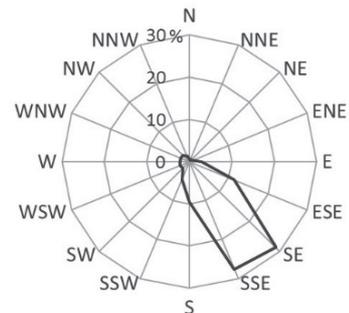
図8(a)より計測期間の卓越風向は西北西である。このため、風速計が設置してある東西南北のうち、北および西の方角からの風が吹いていることがわかる。同図(b)より北および西からの平均風速が、本試験で使用する直線翼垂直軸型風車のカットイン風速の3m/s以上であることが確認できる。また、同図(c)では、3m/s以上の風速が約25%以上あることがわかる。

これらの測定結果から速度低減率を算出するためには、風車がある風速において一定時間回転する必要がある。そこで、本論文においては、約1分間以上の回転時データを用いて解析を実施した。

(2) 4箇所の風速と回転数 直線翼垂直軸型風車をフィールドにおいて通常運転させ、4箇所の風速と回転数を計測した。その結果を図9に示す。図9の破線は北側に設置した風速計の風速と回転数を示し、同様に、同図の点線は南側、実線は東側、一点鎖線は西側の風速と回転数を示す。この4つの計測結果より、東側の風速計の結果において、他の風速計と比較して風速3m/s付近での変化が見られる。これは、風車のカットイン風速である風速であり、風車の回転数が増加し始めることの影響であると考えられる。計測日の卓越風向は西北西であり、西北西からの風により風車が回転し、東南東へ風が抜け、風のエネルギーを回転エネルギーへと変換しているため、東南東での風速が



(a) Wind velocity measured by four anemometers



(b) Wind direction appearance ratio

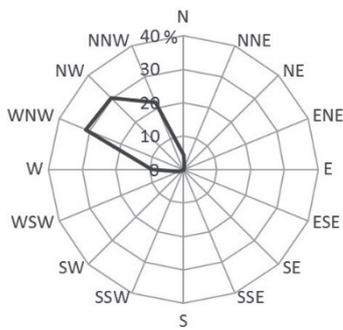
Fig.7 Field experiment result (1)

図7 フィールド試験風況計測 (1)

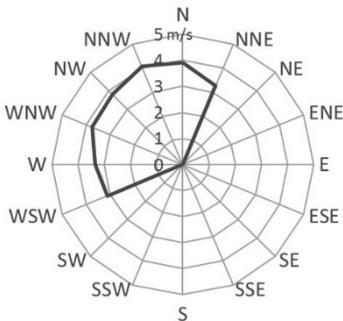
減速していると考えることができる。そのため、東南東に近い東側の風速計には、減速された風速が多く計測される。他の風速計と比較して風速が大きくなっても回転数は大きくは変化していない。

この結果により設置した4箇所の風速計において、風車がエネルギー変換した風速の減速する傾向が確認できることがわかる。

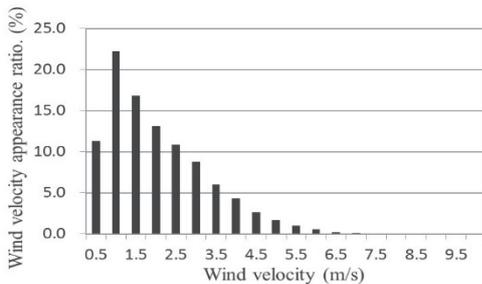
(3) 風速の減速 図9の計測結果における各回転数での4箇所の風速をレーダチャート図に示し検討した。この結果を図10に示す。図10(a)は、図8(a)に示しているデータであり、風向が西向きでの風速データを使用している。また、回転数が60rpm,50rpm,40rpmのときの各4箇所において計測した風速を示している。同図(b)には同様に図8(a)における風向が北からの場合の風速データを使用し、回転数が70rpm,60rpm,50rpmのときの各4箇所の計測した風速を示す。



(a) Wind direction appearance ratio



(b) Wind velocity



(c) Wind velocity appearance ratio

Fig.8 Field experiment result (2)

図8 フィールド試験風況計測 (2)

図10における(a)と(b)の回転数が異なるのは、各方向からの風速が異なるためである。この理由は、図8(b)に示す西の風速より北の風速の方が平均風速で0.5m/s大きいため、安定して回転数を得られた範囲が10rpm大きくなったためである。図10(a)と(b)の結果は、図7(a)の風車が回転していないときの結果と異なり、4箇所の風速計の風速に差が出ていることが確認できる。図10(a)ではPN, PS,

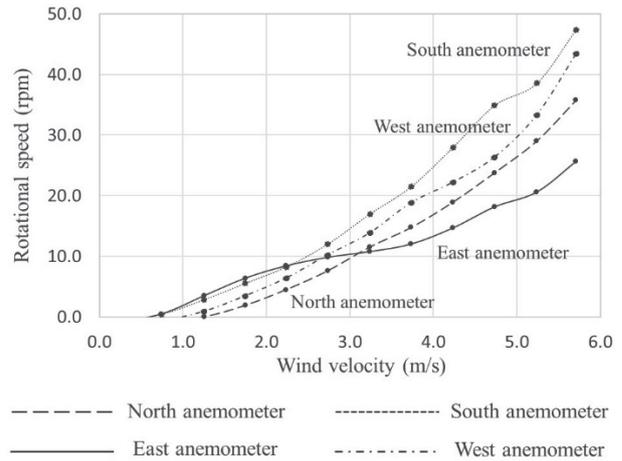
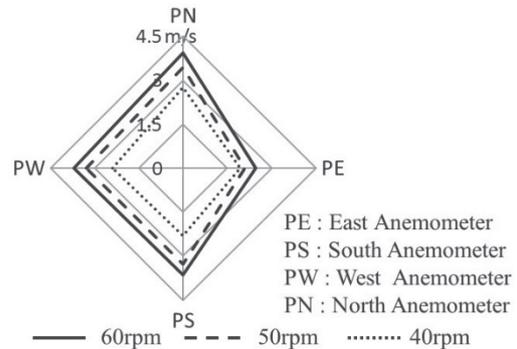
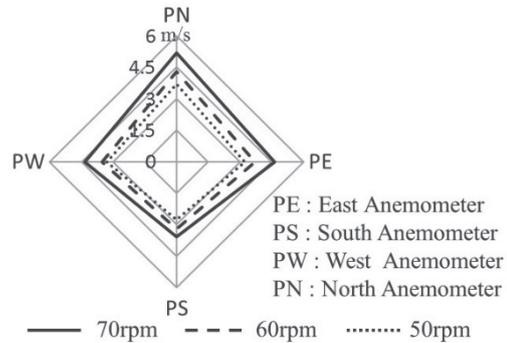


Fig.9 Measuring result of wind velocity

図9 風速計測結果



(a) Wind direction of West to East



(b) Wind direction of North to South

Fig.10 Field experiment result

図10 フィールド試験結果

PW の風速は、各回転数において PE と比較して大きい値が計測されており、同図(b)では、PN, PE, PW の風速は、各回転数において PS と比較して大きい値が計測されている。これは図 10(a)では、西からの風(PW)が東(PE)へ抜け、エネルギー変換により減速していることを示しており、図 10(b)では北からの風(PN)が東(PS)へ抜けていることを示している。図 11 に試験時の発電電力を示す。図 10 および図 11 により、本論文のフィールド試験から直線翼垂直軸型風車は、各方角からの風を受けて回転していることがわかる。

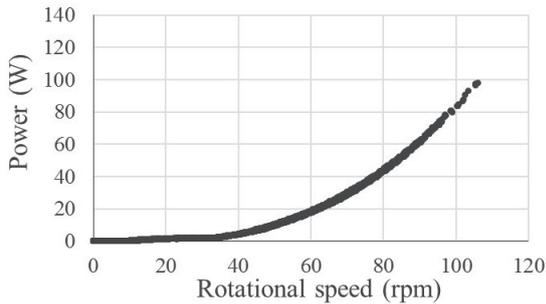


Fig.11 Power curve evaluated
図 11 風車出力特性

4.3 速度低減率の算出

図 10 での計測結果より、速度低減率の算出をした。算出方法は、図 10(a)および(b)の結果を用いて、風車に流入する風速 V_{∞} と風が吹き抜ける風速 V_2 (下流側風速) より算出した。一例として、図 10(a)の 60rpm の場合を図 12 に示す。風速計 PW にて計測した流入風速を $V_{\infty} = 3.7\text{m/s}$ 、風速計 PE にて計測した下流側風速を $V_2 = 2.4\text{m/s}$ として、(2)式を用いて速度低減率を算出した。

その結果を表 2 に示す。各回転数に対して速度低減率を求めている。表 2(a)の西からの風速時では、カットイン風速付近の風速であり、50rpm と 60rpm において、速度低減率がほぼ一定となっていることがわかる。表 2(b)の北からの風速時においては、5m/s 以上の風速が得られ 70rpm のときに最大となっている。このように、風速と回転数が変化すると、速度低減率は変化することがわかる。

そして表 2 の速度低減率を使用し、風車内風速 V_1 の算出を行った。この算出には(1)式を用いている。この結果を表 3 に示す。

4.4 風車効率の算出

風車の効率は、風が持っている運動エネルギーに対して、その風が風車にする仕事の比で定義することができる。この風車効率 C_p は速度低減率 a により、次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad \dots (3)$$

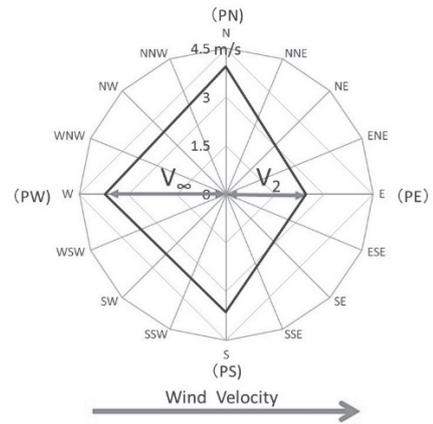


Fig.12 Inflow wind velocity and downstream wind velocity
図 12 流入風速と下流側風速

Table 2 Calculation result of speed reduction rate

表 2 速度低減率の算出結果

(a) Wind direction of West to East

Rotational speed (rpm)	Speed reduction rate
40	0.10
50	0.18
60	0.17

(b) Wind direction of North to South

Rotational speed (rpm)	Speed reduction rate
50	0.12
60	0.13
70	0.15

Table 3 Effect of wind direction on wind velocity

表 3 風速結果

(a) Wind direction of West to East

Rotational speed (rpm)	V_{∞} (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)
40	2.4	2.1	1.9
50	3.3	2.7	2.1
60	3.7	3.0	2.4

(b) Wind direction of North to South

Rotational speed (rpm)	V_{∞} (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)
50	3.7	3.3	2.8
60	4.3	3.7	3.2
70	5.2	4.4	3.6

Table 4 Result of power coefficient

表 4 風車効率結果

(a) Wind direction of West to East

Rotational speed (rpm)	Speed reduction rate	Cp
40	0.10	0.31
50	0.18	0.49
60	0.17	0.47

(b) Wind direction of North to South

Rotational speed (rpm)	Speed reduction rate	Cp
50	0.12	0.38
60	0.13	0.39
70	0.15	0.44

この式より、計測した風速より算出した速度低減率を用いて風車効率を算出することができる。この Cp は、風車軸出力での効率を表している。そして、表 2 の速度低減率を用いて風車効率を算出した。その結果を表 4 に示す。ここで算出には(3)式を用いている。この風車の効率は、風の運動エネルギーと回転エネルギーの仕事の比で定義される。したがって、速度低減率と同様に、回転数ごとに風車効率も変動していることがわかる。

4.5 設計理論値との比較

本論文では、前述までに算出した値と設計理論値との比較を実施した。ここで、本論文で使用した直線翼垂直軸型風車の設計上の総合効率 Cp' は次式により算出することができる⁽¹²⁾。風車出力 P は設計値を使用している。

$$Cp' = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^3 S_{\omega}} = \frac{2P\lambda^3}{\rho S_{\omega} R^3 \omega^3} \dots (4)$$

風車出力：P[W] 空気密度：ρ[kg/m³]
 一様流風速：V_∞[m/s] 風車投影面積：S_ω[m²]
 周速比：λ 風車回転半径：R[m] 角速度：ω[rad/s]

表 5 に、本システムの直線翼垂直軸型風車のパラメータを示す。図 13 に本システムの設計値での効率特性を示す。縦軸は風車の設計上の総合効率 Cp' を示し、横軸に周速比 λ を示す。周速比 λ を変化させ、そのときの設計上の風車出力 P を使用し、総合効率 Cp' を算出した。λ と Cp' の近似曲線を実線で示す。効率の最大値は、0.29 となっていることが確認できる。

この総合効率 Cp' は、表 4 の速度低減率より算出した Cp の結果とは、異なる値となっている。これは設計上の総合効率 Cp' には、制御装置の効率、発電機効率および線路損失等が含まれているためと考えられる。

本システムの発電機効率は約 60%であり、制御装置の効率は 90%である。そこで表 4 の Cp に、このシステム効率を考慮した結果を表 6 の Cp'' に示す。Cp'' は本論文で提案する手法において、算出した速度低減率を使用して求めた風車効率にシステム効率を含めた風車の総合効率である。

この結果は、図 13 に示す曲線上の効率の範囲内にあり、各回転数で風車効率が変わることが確認できる。また、設計上の効率との差が最大で 0.08 あることがわかり、実システムにおいては、設計上の効率よりも減少する傾向であることがわかる。これは、設計上の発電機効率は負荷の状態などが最適な条件で実施するが、実システムにおいては、負荷や設置条件などの影響を受け、実運用上の風車効率が減少したものと考えられる。

Table 5 Spec of vertical wind turbine

表 5 風車パラメータ

Parameter	Value
P [W]	1000
ρ [kg/m ³]	1.225
V _∞ [m/s]	11.0
S _ω [m ²]	5.75

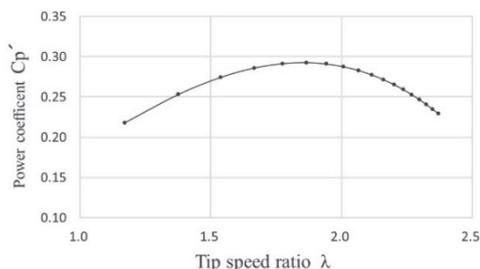


Fig.13 Characteristic of power coefficient

図 13 風車効率特性

Table 6 Comparison of power coefficient

表 6 風車効率比較

(a) Wind direction of West to East

Rotational speed (rpm)	Cp'	Cp''
40	0.25	0.17
50	0.27	0.26
60	0.29	0.25

(b) Wind direction of North to South

Rotational speed (rpm)	Cp'	Cp''
50	0.27	0.20
60	0.29	0.21
70	0.29	0.24

5. まとめ

本論文では、風力発電システムの構成において重要な係数である風車特性の速度低減率を、実フィールドにおいて算出した。そして、この速度係数から風車効率を算出し、算出した効率係数について検討した。また、提案する手法は、直線翼垂直軸風力発電において風車のカットイン風速以上の風速と回転数を計測することで、直線翼垂直軸風力発電に適用可能と考える。

この結果、提案する手法は、直線翼垂直軸風力発電において、風洞実験をしなくても、実フィールドにおけるシステム係数の算出が期待できるとの結論に至った。

そこで、実フィールドでの算出が可能となったことから、風力発電システムの構成要素におけるシステム係数が把握できることになり、風車、発電機、制御系との整合性を従来よりも高くすることが可能となり、発電システム効率の向上が期待できる。

今後は、フィールドにおける卓越風向や鉛直方向成分などを考慮し解析を実施していきたい。

(B編), 56巻524号, pp1049-1056, 1990年

1 1) 牛山泉:「風車工学入門 第2版」, 森北出版, 2013.

1 2) 関和司, 牛山泉:「垂直軸風車」, パワー社, 2008.

参考文献

- 1) 徳山栄基, 牛山泉, 関和司:「小型風力発電システム用翼型の実験と性能に関する研究」, 電気学論, Vol.123-B, No.2, p208,(2003)
- 2) 西沢良史,他:「水平軸小型風車の翼端形状に関する実験的研究」, 風力エネルギー利用シンポジウム, 巻30号, pp311-314, (2008)
- 3) 長井浩,他:「音響ドップラー・ソーダの風向・風速補正の試み」, 第29回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, Vol.2007 (2007.11)
- 4) 伊藤尚,他:「風況調査用小型データロガーの開発およびその教育的応用」, 第29回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, Vol.2007 (2007.11)
- 5) 細江忠司,他:「集風装置による小型風力発電機の高効率利用」, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 126 No. 3 pp.308-314, 2006年
- 6) 雪田和人,他:「マイクロ風力発電のための極数変換型発電機の基礎的検討」, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 128 (2008) No. 1 pp.201-207
- 7) 二宮貴之,他:「直線翼垂直軸型風車における発電量向上に関する研究」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, Vol.2011 (2011.9.)
- 8) 塩田剛, 井坂勉, 佐野孝, 関和司:「直線翼垂直軸型風車と新型風力発電装置の整合性に関する研究」, 電気学会電力・エネルギー部門誌, 128巻11号 pp1350-1358, 2008年
- 9) 鈴木政彦, 谷口英人:「垂直軸型ベルシオン式風力発電」, 強化プラスチック, Vol.53, No.11, pp463-467, 2007年
- 10) 清水幸丸, 笠原秀晃, 関和司, 古久保憲二:「中型水平軸風車の動特性解析に関する研究 (コンピュータシミュレーション結果とフィールド実験結果の比較)」, 日本機化学会論文集