

新改良型風車（Ring・Ring 風車）と従来型風車の比較研究

Comparative study on new developed small HAWT with direct drive type “single stage axis type” and usual type small HAWT with two stage axes drive

清水幸丸*・岡村聖**・李杰**・程田

SHIMIZU Yukimaru*, OKAMURA Kiyoshi**, RI Ketsu***, TEI Den****

*名古屋産業大・大学院教授、**名古屋産業大・大学院准教授、***名古屋産業大学大学院M2、****名古屋産業大学大学院 M1

Abstract: Multipole permanent magnets are used in the generator. Also, this generator is directly connected to the wind turbine rotor, namely, the accelerated gear box is not used in this wind turbine. The experimental data is compared with that of accelerated gear box with two axis. Small HAWT of direct type generates the electric power from 2.5~3m/s low wind speed. Also, the power coefficient, C_p is a little improved, compared with one of two axis type HAWT.

Keywords: small horizontal axis wind turbine, Double pitch control mechanism, direct connection of generator, maximum output “3kW”, multi permanent magnets generator

1. はじめに

Ring・Ring 小型水平軸風車に関する第1報目は、2014年3月出版の環境経営研究所年報第13号に発表した。13号では、Ring・Ring 小型水平軸風車が完成した直後だったので、風車の構造等は詳述できなかったが、実験結果は、少なく、あまり述べることはできなかった。今回の報告では、2014年4月~12月までの李君の修士論文に必要なデータを中心に記述することが可能になった。風車改良前のデータは、すでに平成24年度に大学院を修了した石君が修士論文としてまとめた結果である。石君の論文、すなわち、従来型風車とは何か簡単に説明する。大きな相違点は、石君の論文の発電機は、永久磁石を使用した多極発電機では、あったが、低風速 2m/s~3m/sでの対応をよくするため、このような低風速では、発電量が押さえられるように制御されており、スタート時は、無発電状態、すなわち、空転に近く、風速が上昇して、回転数が上昇するにつれて、発電量が増加するように制御されていた。発電の特性を最高500rpm程度で最大出力 3kWが得られるようになっている。この回転数 500rpm という数値は、多いに問題で、風車ロータ直径が 1m前後であれば、問題がないが 3mを越えると風車ブレードの重量が大きくなるので遠心力荷重が大きくなり、ブレード

付根強度が不十分になっている。この対策として、ブレード回転軸と発電機軸の間に増速機をはさみ、発電機の回転数のみを上げる方法を採用してきた。増速比を上げると風車翼車の慣性モーメントが増速比の2乗に比例して大きくなり、回転しにくくなる。この問題を解決するため、Ring・Ring 風車では、風車翼車と発電機を直結させて、回転しやすくし、発電機の磁石数を増やし極数を増やし、コイル銅線径を太くして、比較的大きい電流にも耐えるような設計がなされている。Ring・Ring 風車と従来型との比較により、この問題に対する答えを検討する。実験結果は比較的によく、改善された結果を得ることができた。

2. 主な記号

A : 電流 (アンペア)

V : 電圧 (V)

W : 発電電力

rpm : 1分間の回転数

C_p : 出力係数 (= $W(\text{ワット}) \times 9.8 / \frac{1}{2} \rho A' U^3$)

P : 空気密度 (kg/m^3)

A' : 風車受風面積

U : 風速 (m/s)

3. 実験装置及び実験方法

3-1-1 改良型風車 (Ring・Ring 風車, 直結型風車)



写真1 改造小型水平軸風車実験装置実景

写真1には、改造小型水平軸風車実験装置実景を示す。今回従来の小型水平軸風車が大幅改造されて、建設された。

改造された項目は、以下の大きく6項目で、開発改良が行われている。

(1)風車ブレードの改良：ブレード長を200mm長くし、付根部翼型を風車専用厚翼にした。

(2)ナセルの改良：これまでの2段軸で増速比1.44倍を発電機の改良によって、発電機と風車ロータを直結型にした。すなわち、増速比1である。これらから期待される効果は、風車がより低風から起動しやすくなることである。

(3)発電機の改造：発電機の極数を増加させて対応した。さらにコイルの太さを増して最大発生電流量を増加させた。

(4)風車基礎の改良：地表から2m程度の地中に地下水があり、基本的に軟弱地盤である。軟弱地盤対策として、地中の地下水レベル約2mまで掘り下げ、土納袋に土をつめ、それを2m角の正方形面上にしきつめ、鉄骨を四角に溶接で組み上げて、設置し、生コンを厚さ400mm程度流し込み、比較的強度

の高い基礎を製作した。

地表面からの風車ハブ高さは、これまで6.5mのものを1m高くし、7.5mにした。しかし、ポールパイプの肉厚が、5mmと薄かったため剛性不足が心配されたのでポールが強風で大きく振動しないように、四方から8mmのワイヤで引っ張り補強した。

(5)バッテリーを四個直列に配置して、48ボルトとし、これにパワコンディショナー(太陽光発電用のもの)を接続して、出力電力を一般的に100ボルト使用できるようにしてある。また、200ボルトの汎用系統への接続も、実施はしていないが可能なシステムに作製した。

(6)インターネット回線に接続して、風車映像および電流、電圧、電力、回転数および風速データが見られるようにシステムを構築してある。

3-1-2 旧風車(従来の2段軸風車)



写真2 旧風車実験装置実景

3-1-3

新型直結タイプ風車と旧型 2 段軸タイプ風車の比較

新型直結タイプ風車の機械的構造

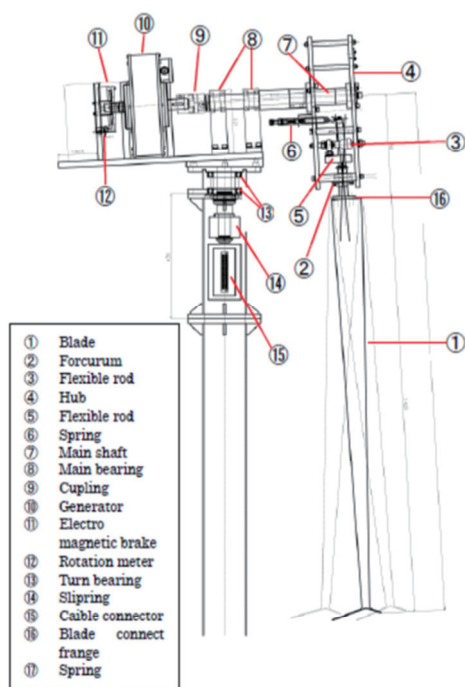


図 3-3：改造小型水平軸風車，風車軸系，発電機系，ポール，ハブおよびブレード等全体の組立図

新型直結タイプ風車の機械的構造

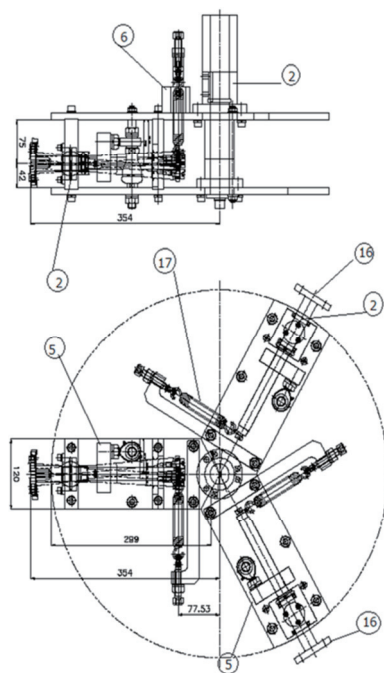


図 3-4：風車ハブの組立図

新型直結タイプ風車の機械的構造

新型風車の機械的構造について実際の風車組立図を用いて説明する。改造型風車組立図は、図 3-3 および図 3-4 に示す。いずれの図においても、主な風車構成要素は、丸印数字で示してある。実際の小型風車の部品構成要素を詳細に示すと、この丸印数字の数 10 倍になる。まず図 3-3 および図 3-4 の小型水平軸風車の風車軸系、発電機系ポール、ハブおよびブレード等を説明する。図には英語で説明されているが本文中には、日本語で示す。①風車翼(ブレード)、②ブレード軸の支点、③可変性直結棒 A、④風車ハブ、⑤可変性直結棒 B、⑥スプリング(引きバネ)、⑦主軸、⑧主軸受、⑨カップリング、⑩発電機、⑪電磁ブレーキ、⑫回転系、⑬風向変化軸軸受、⑭スリップリング、⑮結線台、⑯ブレード直結フランジ、⑰スプリング B、⑱タイミングベルト、これらの数字は、図 3-3 および図 3-4 共通である。図 3-3 および図 3-4 のみを見ると風車は精密機械ということになる。

全体を簡単に説明すると⑦風車主軸に、①風車ブレードを風速に応じて制御する機構を持つ④風車ハブを取り付けてある。この改造風車ではこの風車主軸に直結する形で⑩発電機が取り付けられている。⑩発電機の下流側軸端に⑪電磁ブレーキおよび⑫回転計が取り付けられている。短絡ブレーキは、回転計信号 350rpm あるいは電圧信号 250volt が出ると発電機出力回路が短絡状態になるように電氣的に制御されるので、図中には形となって表れてこない。発電された電力は、スリップリングを通過して、風車タワー外へ導き出され、コントローラで制御されてバッテリーへチャージ(充電)される。この電力は、パワーコンディショナ(パワコンと称する)で実用精度の高い電力となり、発電電力として供給される。

旧型 2 段軸タイプ風車の機械的構造

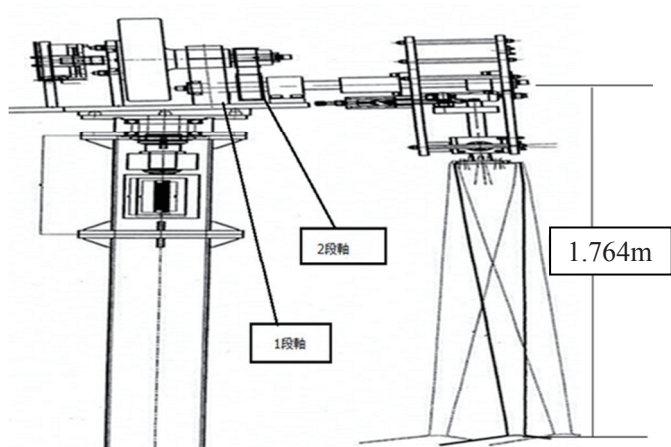


図 3-5 旧型風車の概略図(2 段軸タイプ風車)

図 3-5 の旧型の風車では、2 段軸で増速比 1.44 倍に発電機が増速されている。増速せず全て直結型で進めたいが、発電機の実用上増速した。地上から風車の回転軸までの高さは約 8m、風車の直径は 3.528m である。

新型直結タイプ風車、これまでの 2 段軸で増速比 1.44 倍を発電機の改良によって、発電機と風車ロータを直結型にした。すなわち、増速比 1 である。これらから期待される効果は、風車がより低風から起動しやすくなることである。

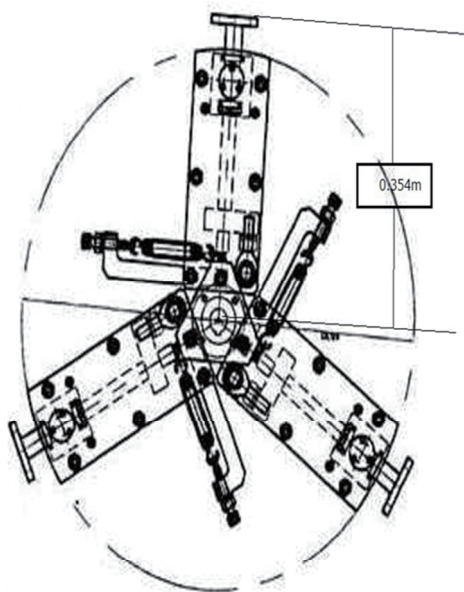


図 3-6 は旧型風車のハブの半径 0.354m である。

旧型小型風力発電機を説明する。まず、風車軸は 2 段になっており、増速機を入れて、1.44 倍まで発電機の回転数を増加させてある。風車直径は、3.15 m で、新型直結タイプ風車と比べて直径で約 0.4 m 小さいものが使われている。風車直径が小さくて、増速比が大きいと、最低風速、すなわち、起動風速が大きくなり、弱風で回りにくくなる。一方、強風対策は比較的やりやすくなる。新型風車では、風車ロータと発電機を直結して、低風速で回りやすくしてある。また、風車直径を 0.4m 大きくして比較的低い強風で、最大出力 3kW が得られやすくしてある。

旧型発電機の実用上の特性

旧型 2 段軸タイプ風車使用した発電機の実用上の特性は、500rpm で 2.5kw 出力、500~600rpm の間で 3kw 出力に達する 3kw 出力で 20 分以上連続運転すると発熱のため、発電機が焼損する危険があるため、一定温度に達すると短絡ブレーキが作動するようにしてある。(回転数が 500rpm)

この風車発電装置には、以下の保護装置が設置されている。

- ①ダブル・ピッチ過回転防止制御機構(別途説明)
- ②電氣的過回転防止装置：発電機が 500rpm 以上になると短絡ブレーキ回路が作動
- ③短絡ブレーキ作動後 3 秒経つと電磁ブレーキが作動
- ④台風時等で風速 40m/s を超える強風が予想される場合には、風車ポールを安全に横転させ、破損を防ぐ対策がとられている

3-1-3 充電制御器の仕組み

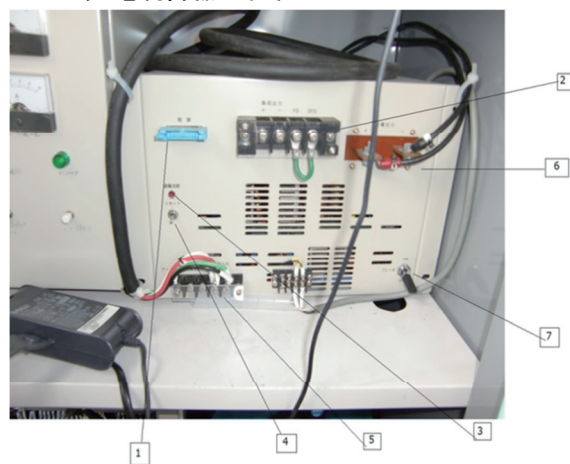


写真 4 充電制御器の仕組み

1 制御コネクタ

制御部を接続するときに使用します。

2 負荷出力端子台

負荷機器の接続用ですが、今はバッテリーに直接負荷機器を接続しています。

3 過電流断

負荷出力に接続した機器が過電流になると、負荷出力を遮断してこの LED を点灯させます。

4 リセット

負荷出力を遮断した後、再接続するときに ON にします。

5 入力端子台

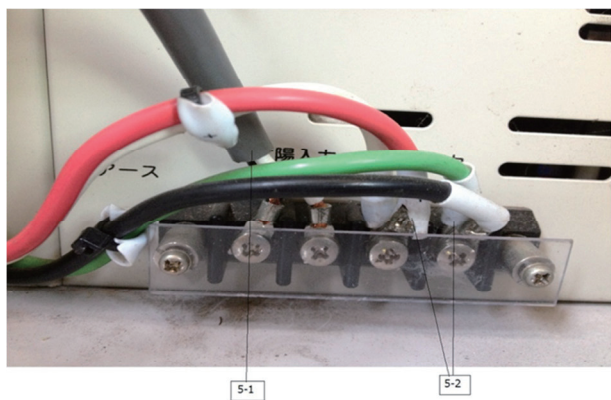
太陽光パネルと風力発電機を接続する端子台です。定格 200W までの太陽光パネルを接続できます。

6 充電出力端子

バッテリーを接続する端子です。

7 ブレーキスイッチ

このスイッチを ON にすると風力入力を短絡して風力発電機にブレーキをかけます。風力発電機の保守時や強風の時に ON しています。



5-1 は太陽光パネルを接続する端子台です。

5-2 は風力発電機を接続する端子台です

3-2 実験方法

3-2-1 連続自動測定方法

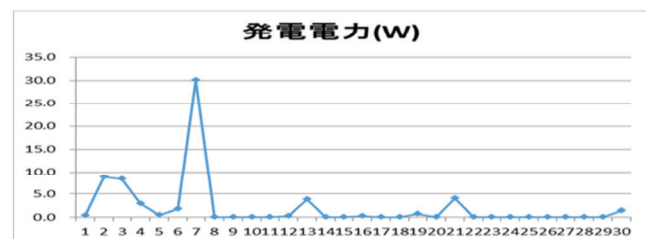
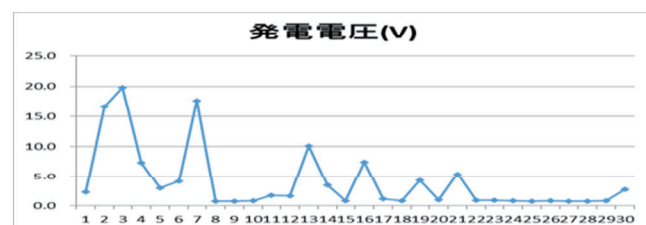
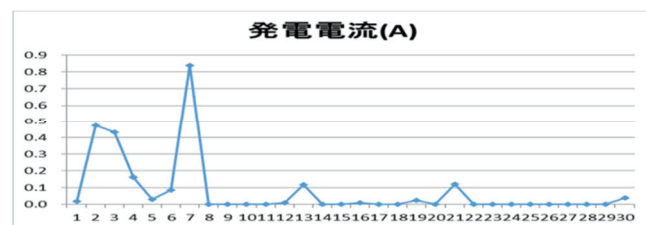
風力発電に関するデータ、電流、電圧、風車の回転数は 1 分間隔、10 分間隔でデータ処理ソフト、データビルダーを用いて測定されている。パソコンでエクセルで電流、電圧、風車の回転数の平均値、また電力、風車の出力値 C_p が求められる。風速に関して風速計は 2 種類用いられており、一種類はノ

-マッドで長期風速観測用で 1 分間隔、10 分間隔、もう一種類は、wind110 という風速計で 1 分間隔に測定され専用ソフト。風車の実験現場は三重県津市木造町周辺が水田地帯の畑の中である。交通の不便と研究経費の節約のため大学の研究室で LogMein というソフトと CarotDAV というソフトを使ってデータを収集して処理する。本実験では、風速計データは 1 分間隔、他のデータは 10 分間隔で処理されている場合が多い。

4. 実験結果の考察

4-1 9～12月の新しい実験結果

4-1-1 図 4-1 には新型直結タイプ風車の 2014 年 11 月から 12 月まで 30 日間の実験結果を示す。図 4-1 は上から 1 日の電流、電圧、電力、回転数、風速、 C_p の平均値が示している。



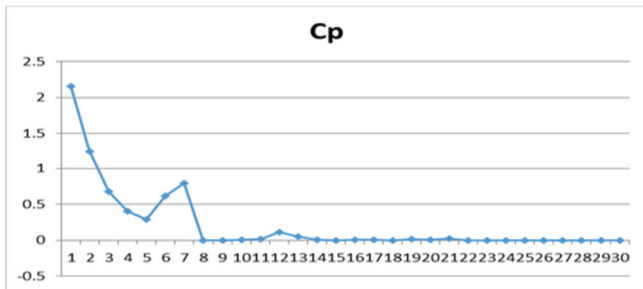
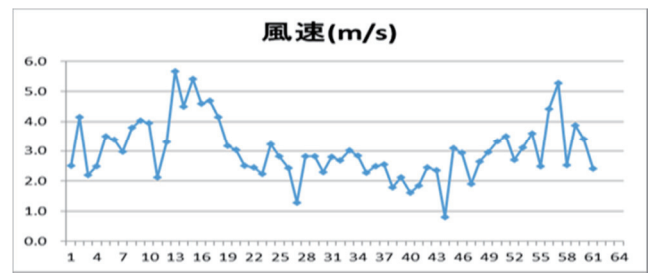
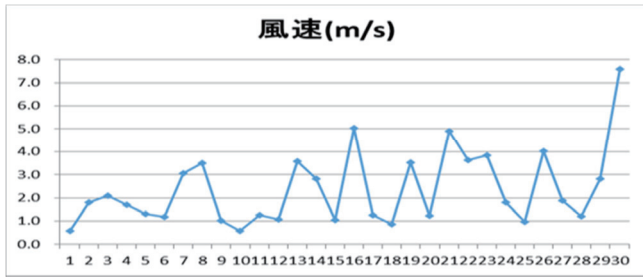


図 4-1

2014年11月から12月まで30日の電流, 電圧, 電力, 風速, 回転数, Cpの平均値

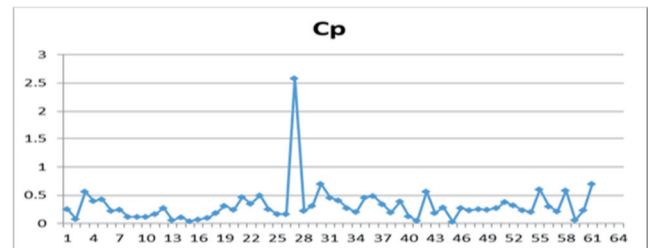
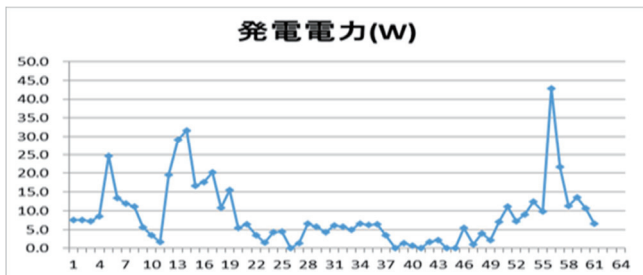
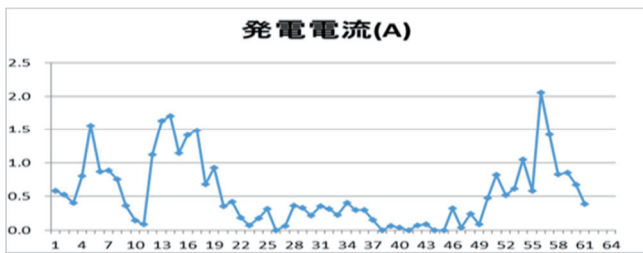


図 4-2

2014年9月3日 2m/s ~ 5m/s 代表的な1時間の電流, 電圧, 電力, 回転数, 風速, Cpの平均値



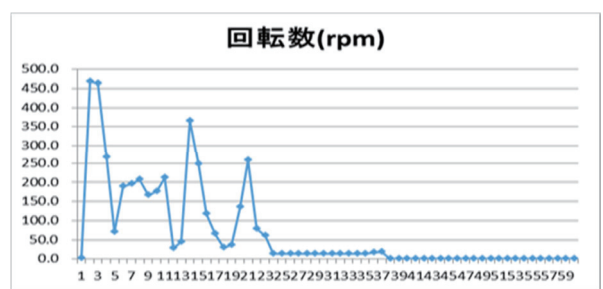
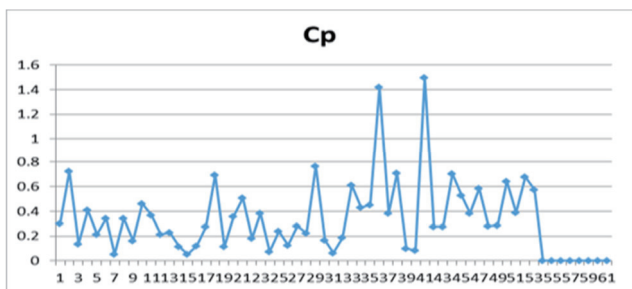
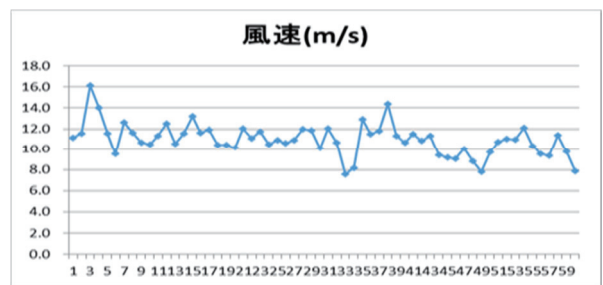
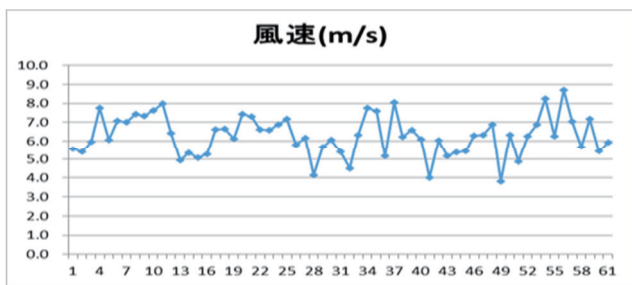
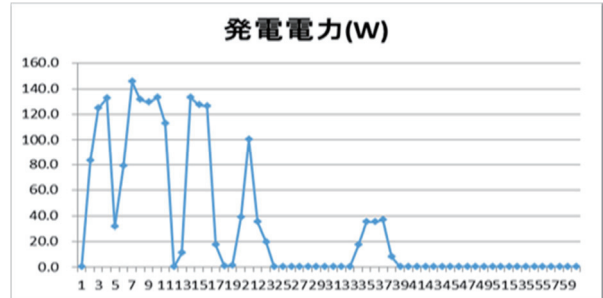
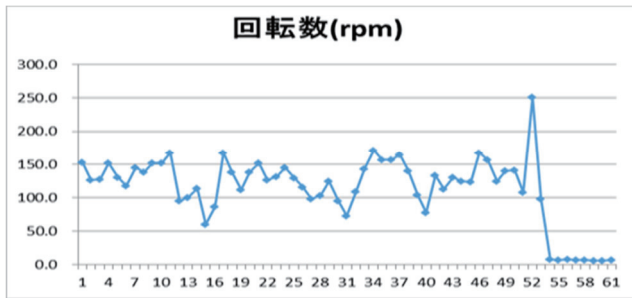
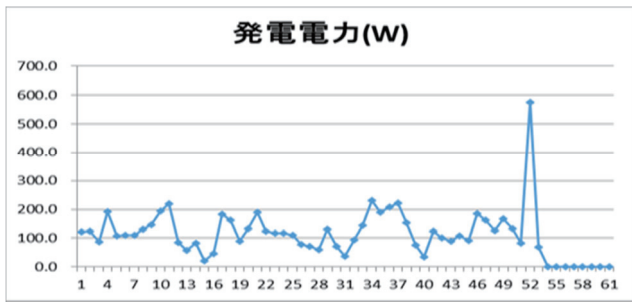


図 4-4

2014年9月3日風速6m/s～8m/s 代表的な1時間の電流, 電圧, 電力, 回転数, 風速, Cp1 分間の電均値

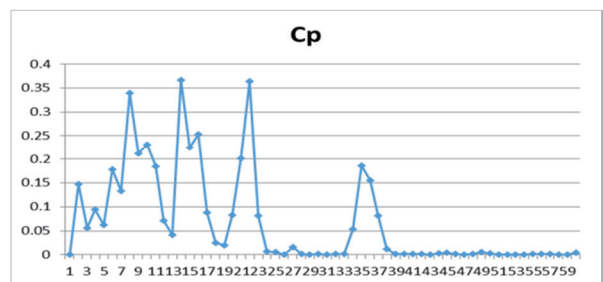
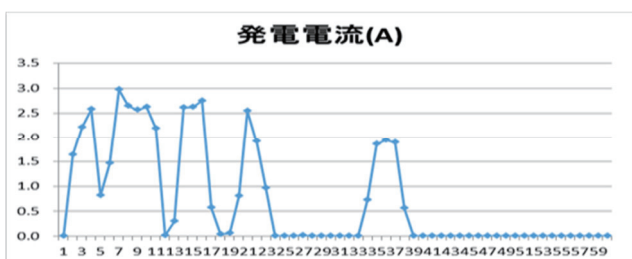


図 4-6

2014年12月風速9m/s～12m/s 代表的な1時間の電流, 電圧, 電力, 回転数, 風速, Cp1 分間の平均値

新型直結タイプ風車と旧型2段軸タイプ風車の性能 Cp の比較

図4-9と図4-10は風速2m/s～5m/sまで代表的な1時間のCpの比較

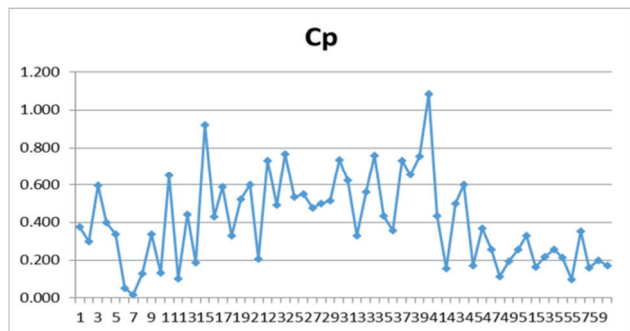


図 4-9

新型連結タイプ風車 2014年11月8日1時から2時までのCp1時間の平均値

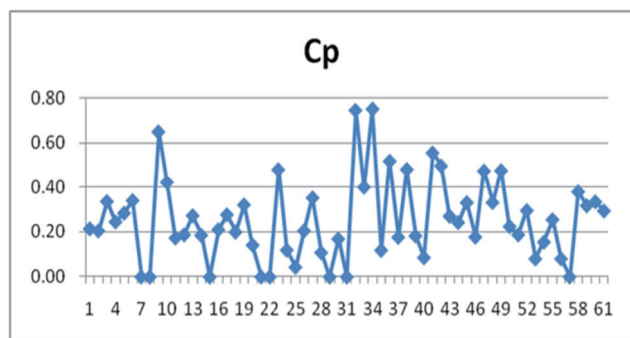


図 4-10

旧型2段軸タイプ風車 2012年11月8日風速3.52 m/sのCp1時間の平均値約0.23

図4-9と図4-10から見ると風速あまり変わらないけど、新型直結タイプ風車のCp値は旧型2段軸タイプ風車のCp値より約0.15高い結果である。新型のCpは0.15～0.6の間である。旧型のCpは0～0.5の間である。

図4-11と4-12は風速6m/sから8m/sまで代表的な1時間のCpの比較

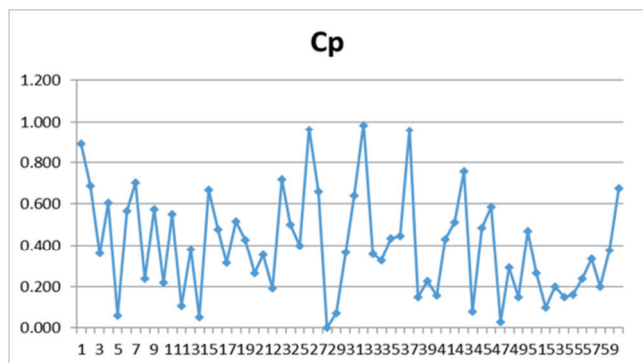


図 4-11

新型直結タイプ風車 2014年11月07日風速6.3 m/sのCp1時間の平均値約0.40

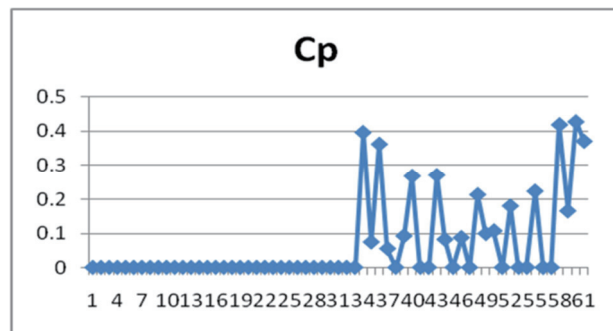


図 4-12

旧型2段軸タイプ風車 2012年11月風速6.36m/sのCp1時間の平均値0.23

図4-11と図4-12から見ると平均風速6.3m/s時、新型直結タイプ風車のCp値は旧型2段軸タイプ風車のCp値より0.17高いである。新型のCpは0.1～0.6の間である。旧型のCpは0.1～0.4の間である

図4-13と図4-14は風速9m/sから12m/sまで代表的な1時間のCpの比較

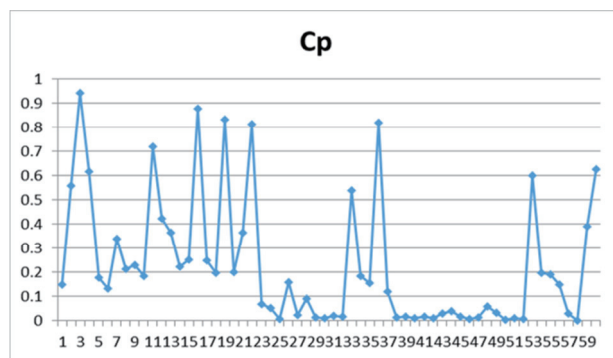


図 4-13

新型風車 2014年12月02日風速10.5m/sの時Cp1時間の平均値約0.33

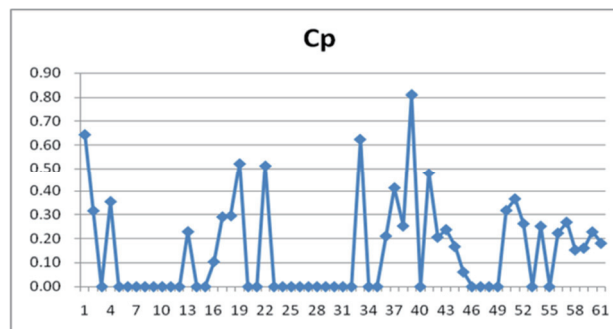


図 4-14

旧型風車 2012 年 11 月 08 日風速 10.02m/s の時 Cp 1 時間の平均値約 0.27

図 4-13 と図 4-14 から見ると風速 9m/s から 12m/s までの時、新型直結タイプ風車の Cp 値は旧型 2 段軸タイプ風車の Cp 値より 0.05 高いのである。新型の Cp は 0.1~0.6 の間である。旧型の Cp は 0.1~0.5 の間である

図 4-15 と図 4-16 は風速 11m/s から 13m/s まで代表的な 1 時間の Cp の比較

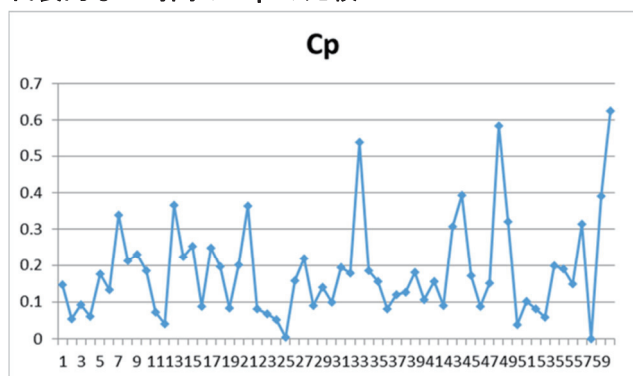


図 4-15

新型直結タイプ風車 2014 年 12 月 07 日風速 11.4 m/s の Cp の 1 時間平均値約 0.22

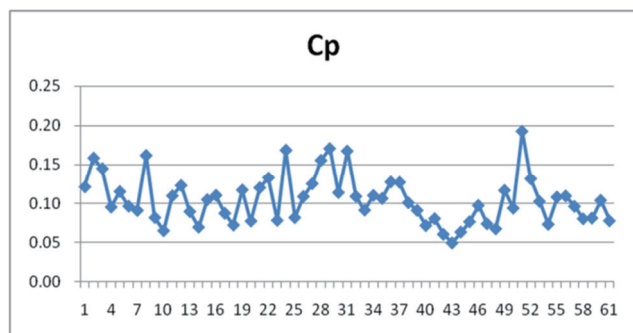


図 4-16

旧型風車 2012 年 12 月 04 日風速 13.24m/s の時、Cp の 1 時間の平均値約 0.14

図 4-15 と図 4-16 から見ると風速 11m/s 以上の時、新型直結タイプ風車の Cp 値は旧型 2 段軸タイプ風車の Cp 値より 0.08 高いのである。新型の Cp は 0.1~0.6 の間である。旧型の Cp は 0.1~0.2 の間である

図 4-19 と図 4-20 は風速 2m/s から 5m/s まで代表的な 1 日の発電量の比較

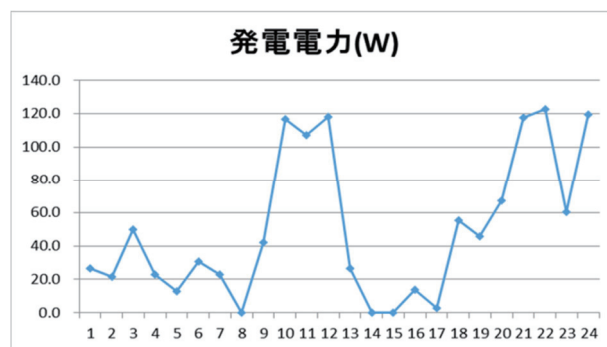


図 4-19

新型直結タイプ風車 2014 年 9 月 18 日風速 4.6m/s の時発電量 1 日の平均値約 48.9W

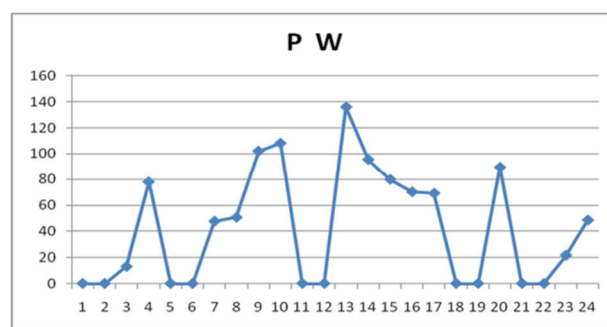


図 4-20

旧型 2 段軸風車 2012 年 11 月 10 日風速 4.75m/s の時発電量 1 日の平均値約 41.3W

図 4-19 と図 4-20 から見ると 2m/s から 5m/s まで代表的な 1 日の発電量の比較、新型直結タイプ風車は旧型 2 段軸風車の発電量より約 120W 高くなる。

図 4-23 と図 4-24 は風速 6m/s から 8m/s まで代表的な 1 日発電量の比較

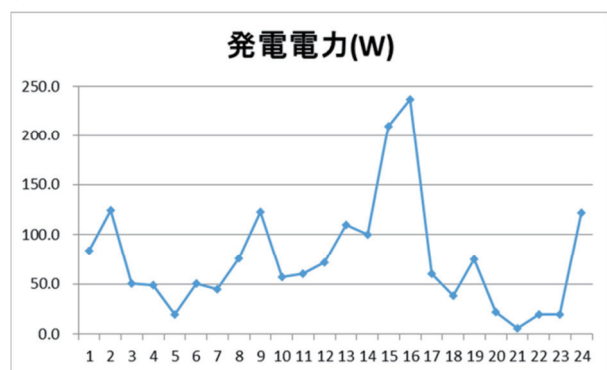


図 4-23

新型直結タイプ風車 2014 年 9 月 4 日風速 6.8m/s の時発電量 1 日の平均値約 74.2W

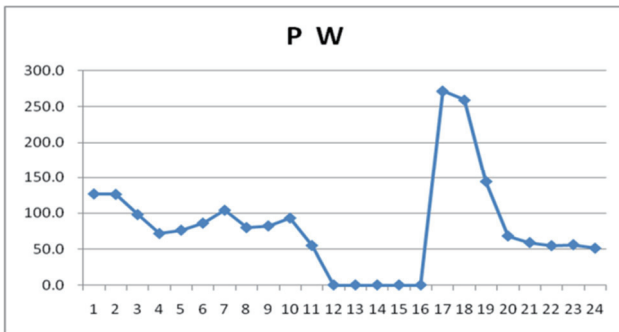


図 4-24

旧型 2 段軸風車 2012 年 11 月 16 日風速 6.60m/s 時発電量 1 日の平均値 67.5W

図 4-23 と図 4-24 から見ると 6m/s から 8m/s まで代表的な 1 日の発電量の比較, 新型直結タイプ風車は旧型 2 段軸風車の発電量より約 50W 高くなる。

図 4-25 と図 4-26 は風速 9m/s から 12m/s まで代表的な 1 時間発電量の比較



図 4-25

新型直結タイプ風車 2014 年 12 月 2 日風速 10.5 m/s の時発電量 1 時間の平均値約 74.8W

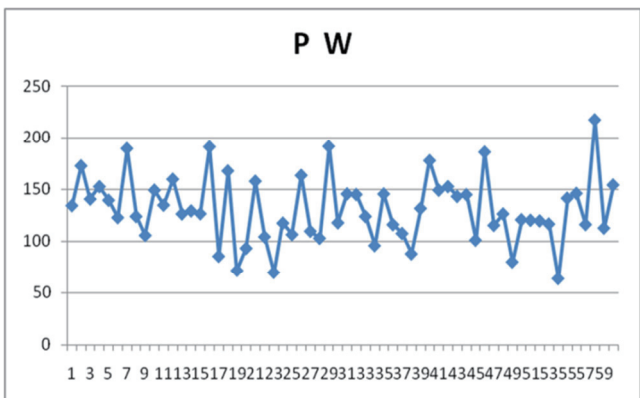


図 4-26

旧型 2 段軸風車 2012 年 11 月 08 日風速 10.02m 時発電量 1 時間の平均値約 151W

図 4-25 と図 4-26 から見ると 9m/s から 12m/s まで

代表的な 1 時間の発電量の比較, 新型直結タイプ風車は旧型 2 段軸風車の発電量より高くなる。

図 4-27 と 4-28 は風速 13m/s から 15m/s まで代表的な 1 時間発電量の比較

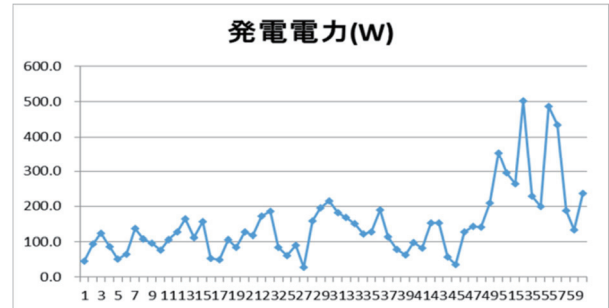


図 4-27

新型直結タイプ風車 2014 年 10 月 02 日風速 13.5 m/s の時 C_p の 1 時間の平均値約 147.5W

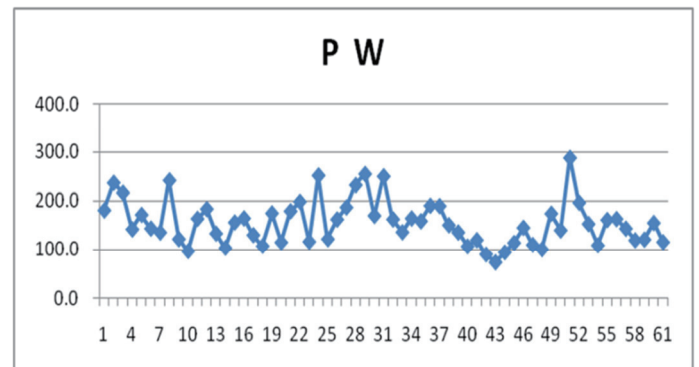


図 4-28

旧型 2 段軸風車 2012 年 12 月 04 日風速 13.24m 時の C_p の 1 時間の平均値 121.7W

図 4-27 と図 4-28 から見ると 13m/s から 15m/s まで代表的な 1 時間の発電量の比較, 新型直結タイプ風車は最高 100w~500w 間である。旧型 2 段軸風車は 90w~300w 間である。新型風車の方が発電量もう多い。

5. むすび

今回新たに開発した直結型小型水平軸風車と従来使用してきた 2 段軸小型水平軸風車を比較検討した結果, 次のような結果を得た。

- (1) 直結型風車のほうが 2 段軸風車よりも, 低い風車 2.5m/s~3m/s で起動することが明らかになった。
- (2) 両風車出力係数 C_p を比較した結果, 直結型の方が C_p が 0.05 程改善されていることが明らか

になった。

文献

- (1) 石宝華, 修士論文“ダブルピッチ制御付小型水平軸風車の性能実験に関する研究”平成 24 年度名古屋産業大学修士論文, 2013 年 2 月 4 日
- (2) 石宝華, 岡村聖, クルシドアラム, 清水幸丸“小型水平軸風車の性能評価に関する研究”, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, 平成 24 年 11 月 pp. 296-299
- (3) 清水幸丸, 岡村聖, 石宝華, “ダブルピッチ制御付小型水平軸風車の開発研究第 4 報 (風車直径を大きくして, 回転数を押え, 発電量を増加させる研究)”平成 24 年度環境経営研究所年報; 平成 25 年 3 月