

三相誘導電動機を用いた風洞装置の試作と評価

Trial Manufacture and Evaluation of the wind tunnel system using three-phase induction motor

北野 達也・小池 智史*

Tatsuya Kitano, Satoshi Koike

1. まえがき

近年、地球温暖化や大気汚染などの様々な地球環境問題が深刻化している。また、産業革命以降の急激な生産活動により石油などの化石燃料は底をつきかけている上、発展途上国の急速な経済成長、人口増加に伴うエネルギー消費量の急速な増加は、化石燃料のほとんどを中東などの国外から輸入している日本にとっては、エネルギーの安定供給の面から大きな課題である。そのため、クリーンで環境にやさしく、長期にわたって開発できるエネルギー源として、風力発電などの新エネルギーが石油代替エネルギーとして注目が集まり、また活発に研究開発が行われている。実際に、1基あたりの出力が1MWクラスの大型風車が設置され、稼動している。しかし、大型風車は風況や周辺住民の理解など設置条件が厳しく、また限定されている上、風速により出力が絶えず変化するため、系統安定度の面から設置数は頭打ちにならざるを得ない。本研究室では、蓄電池に充電を行う小型風力発電システムのシミュレーションを行ってきた。しかし、実機の風力発電システムの検証には、同一の天候条件(風速)で特性評価を行う必要があるが、自然風では任意の時間に、任意の風速の風が吹くとは限らないため、再現性のある特性評価は不可能である。また、スイッチングデバイスの急速な発達により、直流電動機よりも構造が単純で堅牢な誘導電動機を、直流電動機より高性能な可変速ドライブ制御が可能なベクトル制御理論が確立されている。本研究では、実機の風車による検証を行うに当たり、3相誘導電動機をベクトル制御により駆動させ、任意の風速を発生できる風洞装置を試作し、実用性を評価する。

2. 試作風洞装置

2.1 ベクトル制御理論

3相誘導電動機のベクトル制御ブロック図を図1に示す。直流電動機は界磁電流と電機子電流の積に比例したトルクを発生するが、交流電動機は磁界の相互干渉などにより瞬時的に発生トルクを制御することは困難である。そこで、ベクトル制御理論では巻線間の磁氣的相互干渉をなくするため3相電流(電流センサ検出値) i_u, i_v, i_w と等価的な2相電流 i_a, i_b に座標変換(3相/2相変換)し、さらに交流量である i_a, i_b を同じ周波数で回転する回転座標(dq座標)に変換(ab/dq座標変換)し、直流量である固定子電流 i_d, i_q を得る。電動機のトルク τ は、dq軸上では(1)式で表される。

$$\tau = \frac{p \cdot M}{L_r} (-\psi_{qr} \cdot i_{ds} + \psi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (1)$$

ここで、 τ を固定子電流 i_{qs} に比例させるには、固定子電流 i_{ds}, i_{qs} を固定子電流指令 i_d^*, i_q^* とし、回転子磁束鎖交数 ψ_{dr} = 一定、 $\psi_{qr} = 0$ とし、すべり

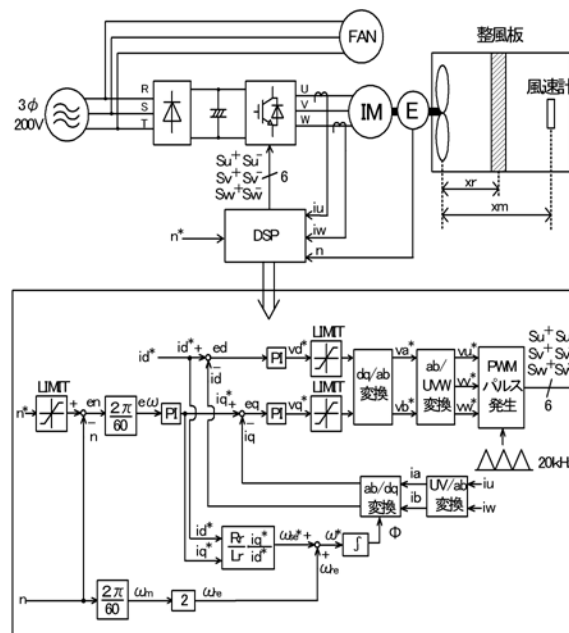


図1 風洞装置システム構成

角周波数 ω_{se} (=電気角周波数 ω_{re} - 励磁角周波数 ω)を、(2)式のように決定すればよい。ここで、電気角周波数 ω_{re} は機械角周波数 ω_m に電動機極対数 $p=2$ をかければよい。

$$\omega_{se} = \frac{R_r}{L_r} \cdot \frac{i_q^*}{i_d^*} \quad (2)$$

また、回転数指令 n^* と電動機回転数 n とが等しくなるように i_q^* を決定し、 i_d^* は界磁電流として一定値を与える。さらに、固定子電流 i_d, i_q と、固定子電流指令値 i_d^*, i_q^* とが等しくなるように、 d_q 軸上の電圧指令 v_d^*, v_q^* を決定し、最初に述べた座標変換と逆の座標変換を行い、3相電圧指令 v_u^*, v_v^*, v_w^* を決定し、3相PWMインバータにより出力する。

2.2 風洞装置ハード

試作した風洞装置の設計図を図2、外見写真を図3に示す。開放型風洞とし、ファンは工場扇用ファン(直径600mm、4枚羽、アルミ製)を使用し、ファン周囲に保護および外乱防止用の円筒型カバー(直径726mm、長さ900mm、厚さ2.3mmベニヤ板製)を取り付けた。また、送風方法は3相誘導電動機(EBKM8-VFV3、出力2.2kW、極対数2)をインバータ(MWINV-4R222)により駆動させた。このインバータは、制御をC言語のプログラミングにより行うことができ、2.1で示したベクトル制御をプログラミングにより実現した。また、パソコンとの互換性も優れており、各部の電流電圧や電動機に取り付けたエンコーダにより電動機回転数などの検出や、検出したデータの波形表示、運転中の制御パラメータの変更などが可能である。また、パソコンと接続せずにインバータ単体での運転も可能である。

3. 試作風洞装置の風洞内風況測定

風況測定の方法は、5秒間の平均風速を、図3に示すような風洞断面を9等分したマス(A～I)において風速計(AR826、ベーン式)を用いて測定する。まず、電動機回転数 n が一定の場合に、風洞内の場所により風速がどのように分布しているかを調べた。図4に回転数 $n=400\text{rpm}$ における、風速測定位置 x_m (図1参照)に対する風速分布の変化を示す。ここで、風速測定位置 x_m が大きくなるほどフ

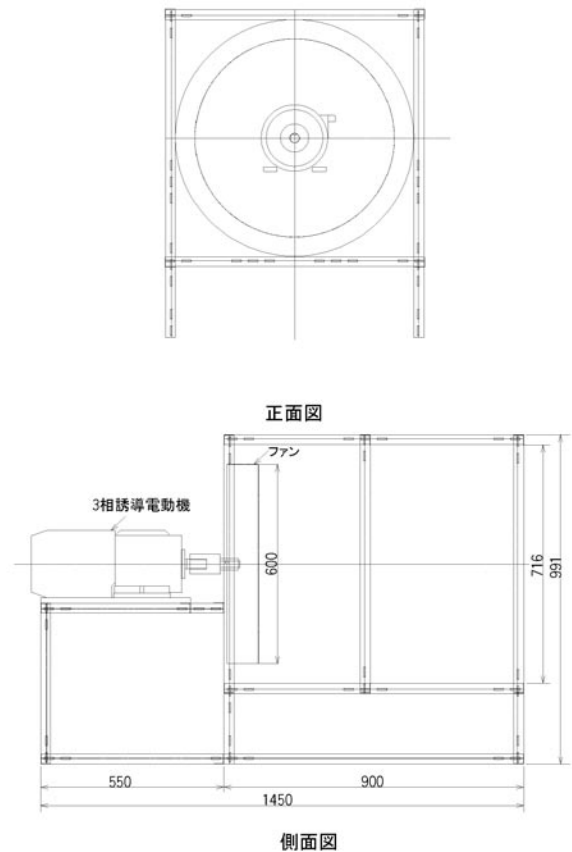


図2 風洞装置設計図

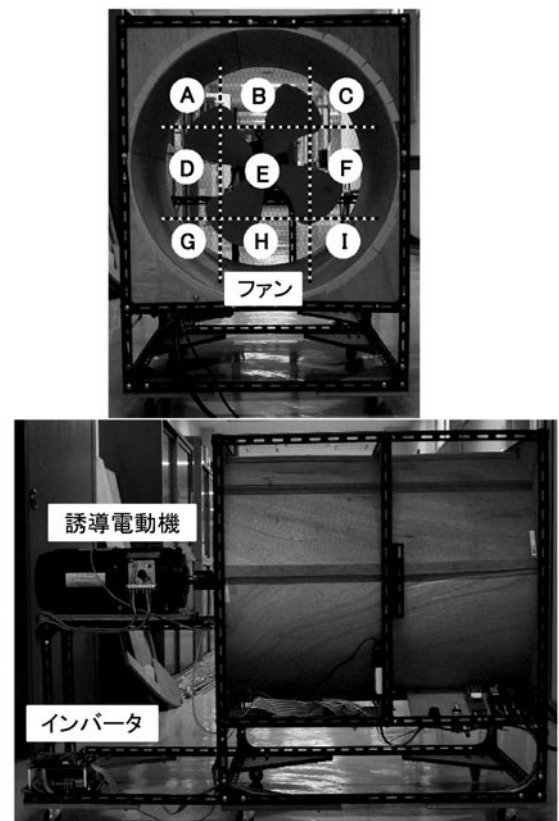


図3 風洞装置全景写真

ファンから遠方、すなわち風洞の吹き出し口の近傍であることを示す。図4より、風速測定位置 $x_m = 200\text{mm}$ においては風速のばらつきが約 1.5m/s (図4 (a) 参照) あるのに対して、風速測定位置 $x_m = 800\text{mm}$ においては風速のばらつきが約 1.0m/s (図4 (b) 参照) と、ばらつきが減少しているが約 1m/s ほどのばらつきが生じていることが分かる。次に、電動機回転数 n と風速 v との関係性を調べた。図5に風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ における、回転数 n に対する風速分布の変化を示す。ここで、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ としたのは、図4より最もばらつきが小さかったためである。図5より、低回転数(低風速)域に比べ、高回転数(高風速)域でのばらつきが約 3m/s (図5 (a) 参照) と非常に大きくなっていることが分かる。

この風速のばらつきは、ファンの回転に伴い風速の粗密がねじれた状態で進行してきたためと考えられる。ちょうど、図6に示すような船のスクリューが回転した際に発生する渦状の水流と同じ状態と考えられる。そこで、風洞断面を縦 50mm 、横 50mm 、奥行 100mm の正方形の小区間に分割する、整風板 (図7参照、厚さ 2.3mm ベニヤ板製) を設置し、ばらつきの改善を試みた。また、風洞試験時に、長時間運転していると電動機が停止する

不具合が生じた。原因としては、過電流、過電圧により、インバータの保護装置が働き、ゲート信号が遮断されたためと考えられる。そこで、電圧指令 v_d^* 、 v_q^* リミッタの追加、PI制御ゲイン、各パラメータの再設定などを行い改善した。

4. 改善後の風洞内風況測定

まず、整風板をどの位置に設置した場合に最も整風効果が得られるかを調べた。図8に回転数 $n=400\text{rpm}$ 、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ における、整風板位置 x_r (図1参照) に対する風速分布の変化を

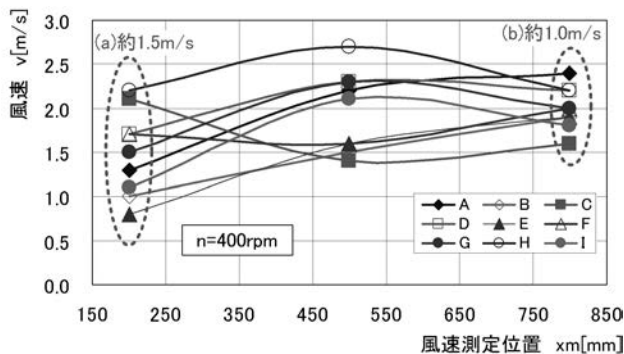


図4 風速測定位置に対する風速分布の変化

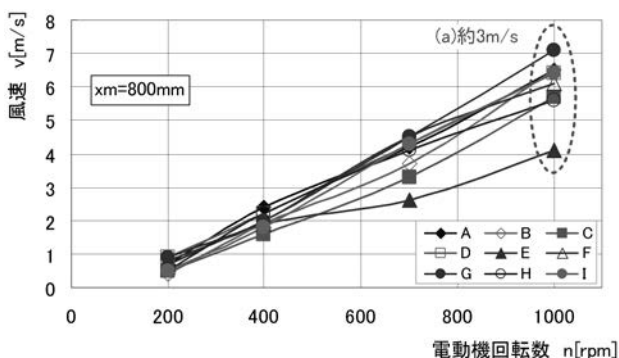


図5 電動機回転数に対する風速分布の変化



図6 スクリューによる水流

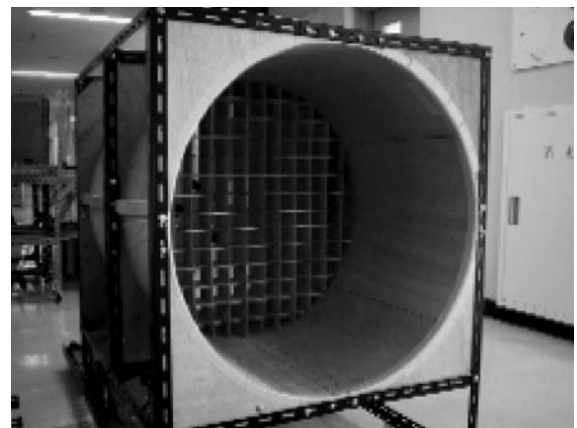
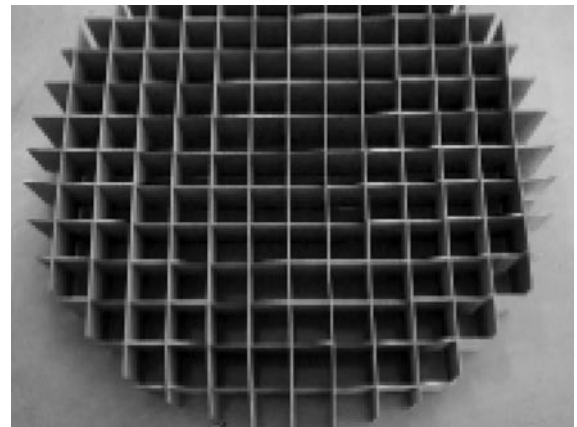


図7 整風板全形と取り付け写真

示す。ここで、整風板位置 x_r が大きくなるほど整風板がファンから遠方、すなわち風洞の吹き出し口の近傍に設置されていることを示す。図8より、整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ においてばらつきが 0.6m/s (図8 (a) 参照) と、最も改善されていることが分かる。

次に、整風板以降の風速分布の変化を調べた。図9に回転数 $n=400\text{rpm}$ 、整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ における、風速測定位置 x_m に対する風速分布の変化を示す。ここで、整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ としたのは、図8より最もばらつきが改善されていると思われるためである。図9より、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ においてばらつきが 0.6m/s (図9 (a) 参照) と、最も改善されていることが分かる。すなわち、現状の設備では整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ 、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ において、整風板の整風効果が最大となり、ばらつきが最も改善されていると考えられる。

最後に、整風板を設置したことにより、電動機回転数 n と風速 v との関係性に变化が生じたかを調べた。図10に整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ 、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ における、回転数 n に対する風速分布の変化を示す。ここで、整風板位置 $x_r=350\text{mm}$ 、風速測定位置 $x_m=800\text{mm}$ としたのは、図9より最も整風板の整風効果が大きいと考えられてからである。図10より、特に高回転数(高風速)域でのばらつきが約 1.5m/s (図10 (a) 参照) と、整風板によりばらつきを改善する前に比べ非常に小さくなっていることが分かる。また、電動機回転数 n に対して、風速 v はほぼ比例していることも分かる。

5. 自作風速計

試作風洞装置の3相誘導電動機は、電動機回転数 n によって制御されている。そこで、風速 v によって3相誘導電動機を運転させるため、風速フィードバックを行う必要がある。しかし、市販の風速計は高価であり、インバータとの互換性がない。そのため、最も構造の単純な「ベーン式風速計」を自作することにした。プロペラの回転数を検出するエンコーダはボール式マウスのものを、制御部分は「PIC16F84A」を、表示部分は3桁の7セグLED(カソードコモン)「LB203VL」およびデコーダ「74HC4511」を用いた。自作風速計の制御、表示回路を図11に示す。自作風速計の設計図を図12に

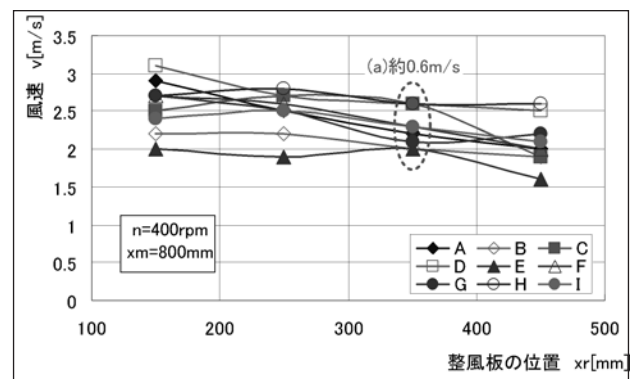


図8 整風板の位置に対する風速分布の変化

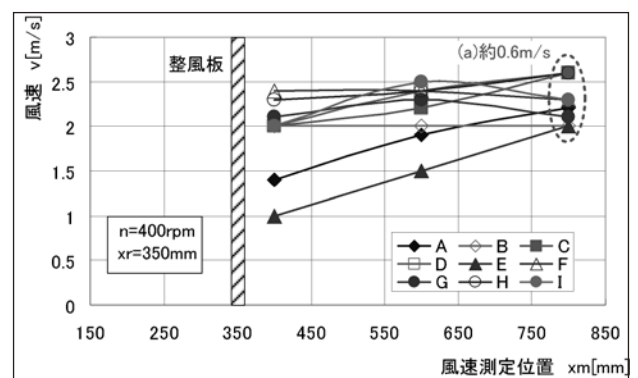


図9 整風後の風速分布の変化

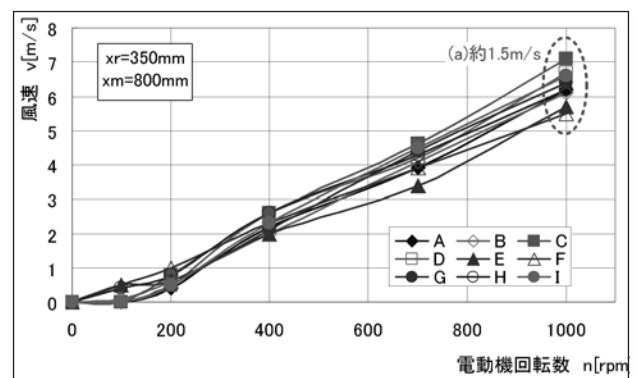


図10 整風後の電動機回転数に対する風速分布の変化

示す。プロペラは模型用のもの(直径 64mm 、3枚羽)を使用した。また、図13に自作風速計完成写真を示す。しかし、今年度では以下に述べるような様々な問題から完成に至っていない。模型用プロペラを使用しているため、低風速時の起動性能が悪い(現在風速 3m/s で起動)。これは、羽の枚数が多く、受風面積が大きく、ピッチ角が大きいプロペラに変更すれば改善されと考えられる。プロペラ軸(6角シャフト)および、機械的な接点の摩擦が大きく、回転数が変動する。これは、プロ

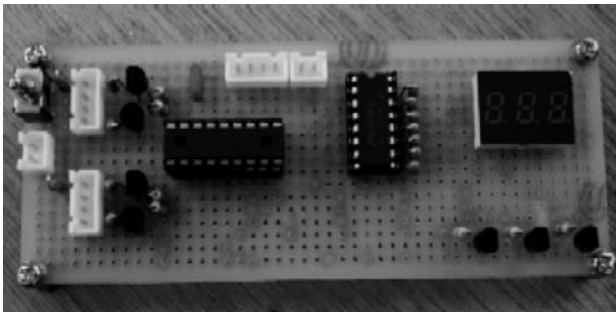


図11 自作風速計回路写真

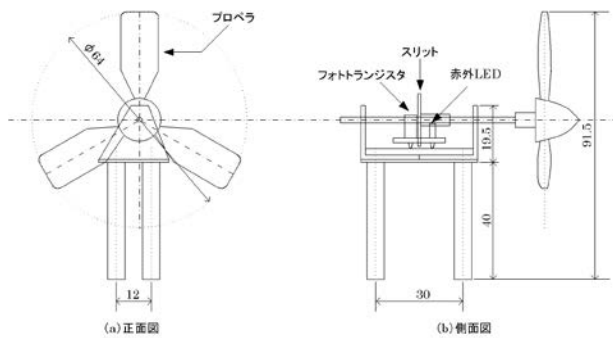


図11 自作風速計設計図

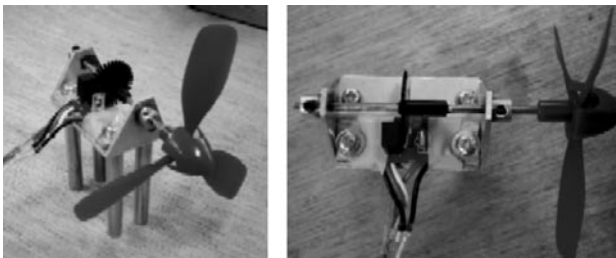


図12 自作風速計完成写真

ペラ軸を丸棒にして、軸受けをボールベアリングに変更すれば改善されと考えられる。プロペラ後流の影響が考えられるため、ベーン式ではなく熱電対を用いた「サーマル式」に変更といったことも考えられる。また、インバータとの同期もまだ行えていないため、同期用のプログラムの開発も必要である。

6. あとがき

本研究では、電動機回転数を一定制御し、さらに風洞内における風速のばらつきを、整風板を設置することで改善し、ほぼ一定の風速の風を発生することのできる風洞装置は完成した。また、整風板をファンから350mm、被試験体をファンから800mmに設置した場合が、最もばらつきが少なく、風洞試験に適していることが確認できた。自作風速計に関しては、エンコーダカウンタ値を検出し、

7セグLEDに表示できる段階まで完成した。今後の課題として、以下のようなことを行う予定である。自作風速計を完成させ風速フィードバックを行い特に高風速域での風速のばらつきをさらに改善する、実用性を高めるため、自然風の風況を風洞内に再現する、などを行う予定である。

所属機関 小山工業高等専門学校

所属名 電気情報工学科

E-mail kitano@oyama-ct.ac.jp

[参考文献]

- (1) 小川：「小型風力発電機の開発動向とその課題」、太陽エネルギー、Vol.30、No.5、pp.17-22 (2004)
- (2) 緒方・山口：「都市型風力発電システムの研究 第2報 システムの改良と性能」、日本機械学会年次大会講演論文集、Vol.2001、No. Vol2、9号 pp.309-310、(2001)
- (3) 佐藤・吉田・嶋田：「都市型風力発電システムの実用化開発」、電気学会論文誌D、125巻、11号 pp.1016-1021、(2005)
- (4) 高橋・安田・大本・原：「都市部における小型風力発電に適したラジアル型コアレス発電機の提案と試作」、電気学会論文誌B、27巻、4号 p.589-595、(2007)
- (5) 森本・武田：「永久磁石同期機の技術動向」、電気学会誌、122巻、11号 p.761-764、(2002)
- (6) 安田：「風力発電機の開発動向」、日本応用電気学会第147回研究会資料、pp.25-32、(2006)
- (7) 高橋・上田・安田・大本：「JMAG-Studioを用いた小型垂直軸風車用ラジアル型コアレス同期発電機のコギングトルク解析」、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、pp.9-10、(2005)
- (8) 貝沼・雪田・後藤・一柳：「マイクロ風力発電のための極数変換型発電機の検討」、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、41巻、403号 pp.11-12、(2006)
- (9) 井坂・塩田・関：「CCレス方式風力用発電装置の開発」、第28回風力エネルギー利用シンポジウム、28巻、pp.421-424、(2006)
- (10) 竹田・高橋・大本：「都市部における小型風力発電機に適したコアレス発電機の電機子コイル接続法」、平成19年電気学会全国大会、7-022、(2007)
- (11) 平尾・木村：「ウィンドファーム用出力安定化装置の基礎的検討」、平成17年電気学会全国大会、4-123、(2005)
- (12) 黒川：「太陽光発電の現状と展望」、計測と制御、1巻、1号、p.8-13、(2000)
- (13) 山下、西方：「軸発電システムの過渡特性解析」、電気学会論文誌D、123巻、8号 pp.934-941、(2003)
- (14) 西方、小高、小石川、片岡：「軸発電システムの特性解析」、電気学会論文誌D118巻、10号 pp.1209-1216、(1998)
- (15) 西方、小石川、三田、片岡：「出力電圧歪みの無い軸発電システムの研究」、電気学会論文誌D119巻、12号、pp.1549-1555、(1999)
- (16) T. S. El-Haman, P. C. K. Luk : "Magnet Topology Optimization to Reduce Harmonics in High-Speed Axial Flux Generators , "IEEE Transaction on Magnetics Vol.39, No.5, pp.3340-3343 (2003)
- (17) Yamashita, Nishikata : "Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine Generator System with Thyristor Inverter Connected to a DC Transmission System", ICEMS2006, Nagasaki, Japan, November, (2006)
- (18) 進藤：「低速風洞実験法」、コロナ社、(1992)
- (19) 中野：「交流モータのベクトル制御」、日刊工業新聞社、(1996)
- (20) 牛山：「風車工学入門」、森北出版、(2002)
- (21) 引原：「エース電気・電子・情報工学シリーズ エースパワーエレクトロニクス」、朝倉書店、(2000)