

# ネオジウム鉄ボロン永久磁石を用いた 小型風力発電機とその応用

坂本東男

高知工科大学 工学部

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮の口 185

Email: sakamoto.haruo@kochi-tech.ac.jp

**要約:**1998-2000 年度の間、高知県産業振興センターの資金で実施されたローカルクリーンエネルギーの研究会で小型風力発電機を研究開発し、その応用として高知県を中心に約 60 セットの自立電源街路灯が設置されている。街路灯は南海地震などの避難用灯り確保を目指したものである。街路灯の場合には電力はあまり大きくなくてもよいが、体育館などの避難場所での灯りとなればより大きな発電能力が求められる。上記の研究会に参加した企業は 10kW 発電能力の発電機を実用化しているが、重量が 90kg、大きさが 600mm 直径と持ち運び、設置が困難である。更なる軽量化と発電能力の向上が求められる。本報告は 2006 年度より私学振興事業団の研究支援で実施したもので、10kW 発電能力以上の発電機の開発のため、従来のコア無し(コイル内に鉄心がない)をコア有り(通常の電磁石と同じで鉄心有り)コイルの発電機として検討した結果である。

## 1. はじめに

通常の発電機は中のコイルが鉄心に巻き付けられた(コア有りコイルと呼ぶ)電磁石が使われている。しかしながら、微弱な風で発電する風力発電機に電磁石を使用すると、回転する永久磁石と回転しない電磁石が反発あるいは引き合う力(コギングトルクと呼ばれる)のため回転がスムーズにできない。山の上の大型風力発電機の場合は 5-6 m/s 以上の風でないとう効な発電ができないと言われているが、山の上ではそのような強風で回転は確保できる条件である。しかしながら地上では一般にそのような強風は少ない環境である。このため、過去にはコアレス(コアのない)コイル発電機(コギングトルクが小さいので回転し易い)を開発し、実用化してきた。最近 10kW(90kg の重量で、直径 600mm 発電機使用)の風力発電機が開発されたが、さらに大きな出力の発電機が求められている。発電機自身の大きさを制限して(運搬と設置の問題)、出力を高める必要がある。そこで、過去に一部検討したコア有りコイル発電機を見直すこととなった。最近2年で実施している研究状況を報告する。

## 2. コアレスコイル発電機(従来の研究)

### 2.1 研究のきっかけ(渦電流ブレーキ装置)

1990 年前後に Nd-Fe-B 永久磁石を用いたトラックバス用渦電流ブレーキ装置を開発し、実用化<sup>1)</sup>されている。そのとき回転するドラムの材質に関して検討した。表 1 に示す Maxwell の方程式を展開して、トルク(ブレーキ力)を磁石強度、磁石形状ファクター、ドラム材料比透磁率の影響因子(それぞれ F1、F2、F3)で整理した。図 1 がブレーキ装置であり、表 2 が整理した結果である。また、図 2 は回転速度係数(S)とトルクの内の F3 との関係を示す。図 2 は特に非透磁率( $\mu_r$ )が及ぼすブレーキ力 F3 の影響が注目され、ブレーキ装置で使うドラム材質によりブレーキ力が異なる。現状のドラムは鉄で  $\mu_r=500$  程度であるが、アルミなどの  $\mu_r=1$  の方が低速域ではトルクが大きい。図 3 はローレンツ力などを動磁場解析した結果である。磁束密度が回転方向に直角な成分が大きい程トルクが大きいのであるが、鉄のドラムであると図 3 より回転方向に磁束密度が流されていることがわかった。ドラムは熱に対する強度が必要なため、ドラム材質は望ましいアルミ(回転方向に直角に入り、磁束密度が流されにくいと予想)を採用することができなかった。しかしながら発電機ではアルミ(ここではコアレスコイル)の採用を考えると発電効率(ブレーキの場合ではトルク)が大きく期待できると考えた。

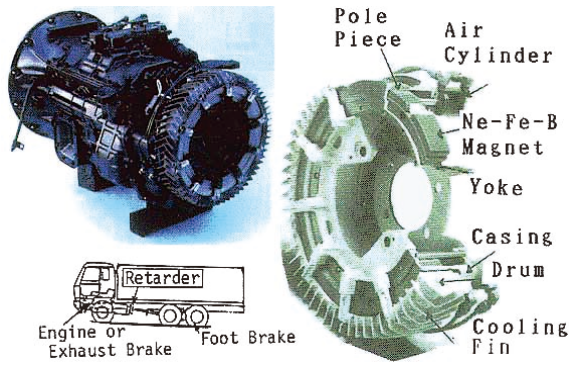


図1 トラックバス用ブレーキ装置<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{J} &= \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \\ \mathbf{B} &= \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad \text{or} \quad \mu \mathbf{H} (= \mu_0 \mu_r \mathbf{H}) \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \quad \mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \end{aligned}$$

表1 Maxwellの微分形式方程式 (記号は一般的であるため省略)

$$\begin{aligned} T &= F_1(M) \cdot F_2(k, a, b, c, \omega) \cdot F_3(S, \mu_r, kb) \\ F_1 &= (4\mu_0 M^2) / \pi^2 \\ F_2 &= \sin^2(k\omega/2) (\sinh(ka) / \cosh(kb))^2 \\ F_3 &= (S/\alpha) \cdot \mu_r^2 / \\ &\quad \sqrt{1 + \mu_r^2 S^2 + 2\alpha \mu_r \tanh(kb) + \mu_r^2 \tanh^2(kb)} \end{aligned}$$

表2 ブレーキトルク(ローレンツ力、F1、F2、F3)に及ぼす磁石強度(M)、磁石形状因子、回転数係数(S)、非透磁率( $\mu_r$ )の影響

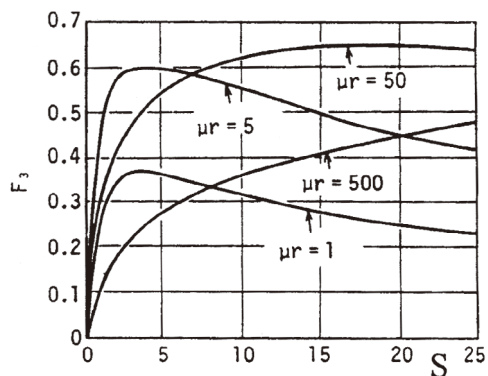


図2 ブレーキトルク(ここではF3)に及ぼす回転数係数(ここではS)とドラム材質(ここでは非透磁率)に及ぼす影響

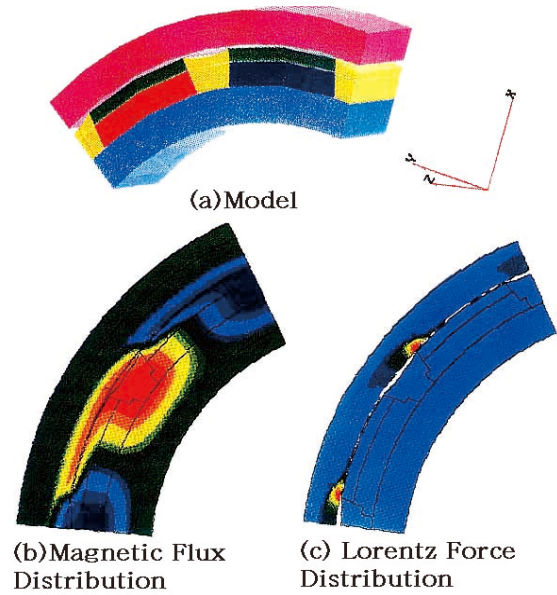


図3 動磁場解析ソフトによる磁束密度とローレンツ力の解析結果



図4 開発された発電機外観とコイル組み立て外観(株式会社スカイ電子製作)



図5 サボニウスタイプ(左:大学内設置)とジャイロタイプ(右:株式会社スカイ電子提供<sup>5)</sup>)の太陽光と風力発電ハイブリッド街路灯

## 2.2 コアレスコイル発電機<sup>2)4)</sup>

前述で説明したようにブレーキ装置などでは回転するドラムの材質(非透磁率)によりトルクがかなり異なる。ブレーキ装置ではドラムは 3,000rpm などの高速回転速度であるが、風力発電では 200-300rpm など一桁小さい回転速度である。図2から風力発電ではアルミを巻いたコイルが有効ではないかと考えた。即ち鉄心のない(アルミ=磁気的には空気=コアがない)コイルでこれをコアレスコイルと呼ぶ。風力発電機の研究を開始して8個の発電機(4つが風力発電、2つが水力発電、1つは自転車用、1つは軽自動車用)を購入し、分解調査を行った。7つはコア有りコイル(電磁石)であった。イギリス製のみがコアレスであった。しかしながら磁石はフェライトで、磁石とコイルの数は8個ずつで比率が 1:1 の組み合わせであった。随分後で筆者が御岳に登った際、この発電機ではコアレスが回転し易い(コギングトルクが小さいため)ことを実感した。2つのタイプが 10-20 台、山の中腹に設置されていたが、イギリス製と思われる発電機(外見はコアレスと推定)は良く回転していたが、米国製などコア有り(電磁石)タイプは全く回転していなかった。

1998 年から3ヶ年実施されたローカルクリーンエネルギーの研究会(足利工業大学牛山泉教授「現副学長」、高知工業高等専門学校野村弘教授「現名誉教授」、高知県企業株式会社坂本技研、株式会社スカイ電子他5社、住友特殊金属株式会社「現・株式会社 NEOMAX 社」、著者が参加)にコアレスコイル発電機を提案した。フェライトでなく Nd-Fe-B 永久磁石(20 年位前に当時住友特殊金属で開発された世界最強磁石)とし、磁石とコイルの数の比率を検討して設計した。図4にその発電機の外観とコイル組み立てを示す。

開発された発電機は高知工科大学が関係した商品化の第1号である。現在この発電機を使った街路灯(災害避難に利用され、系統電力が不要)は高知を中心に約 60 セットが設置されている。図5に太陽光と風力を組み合わせたサボニウスタイプとジャイロタイプのハイブリッド街路灯を示す。図6と図7に制御と発電データを示す。

30-40 年後には 50%の確立で南海地震が生じると予想されている。特に高知県中部や西部は地震と共に直ぐに地盤沈下が起きて海水が押し寄せることから地震が生じたらまず避難が重要である。その際、夜間であれば避難には灯りが必要であり阪神・淡路大震災などで明らかになったように系統電力は使えない。今回開発した発電機を使った自立電源街路灯であれば、地震などの災害でも灯りは確保できる。また、日常でも街路灯として機能する。

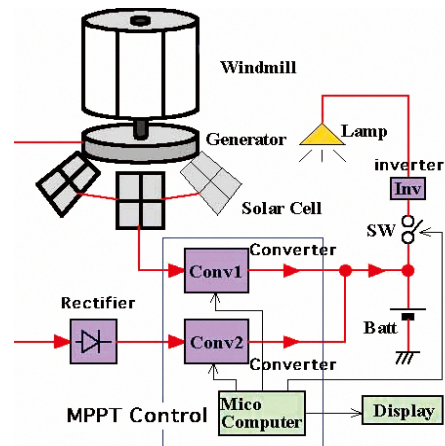


図6 サボニウス風車と太陽光のハイブリッド街路灯の制御(野村弘教授)

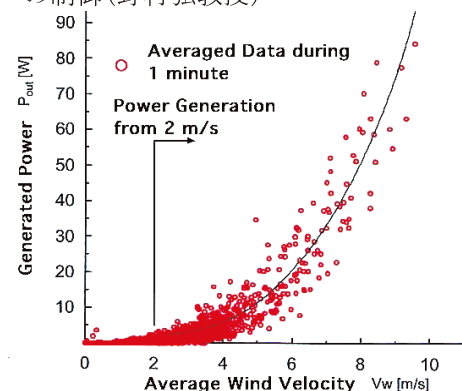


図7 サボニウス風車と太陽光ハイブリッドシステムでの風力発電データ(野村弘教授)

## 3. コア有りコイル発電機(最近の研究<sup>6)</sup>)

先に述べたように軽量の 10kW あるいはそれ以上の発電能力の発電機が求められている。そのため、コア有りコイルによる発電機の性能向上を目指すこととした。そこでコイル内部に入れるコアの厚さに及ぼす発電量(ここでは電圧)とコギングトルクの影響を解析で調査した。ここでは従来の研究でも使用した解析ソフトを用いているが、最近の研究でモデル化に関して Solid Model を用いて対称性など従来工夫を凝らしてプリソフトを使用している。

解析ソフトは市販の積分方程式を用いたソフト(ELF/Magic)を使用した。まず発電機の設計は高知工科大学の4年生学生と高知県企業(株式会社坂本技研<sup>7)</sup>)が協力してインターネットを利用して過去に行った。図8に示すような発電機の構成であり、ハウジング、バックヨーク、永久磁石、コイル、永久磁石、バックヨーク、ハウジングの組み合わせである。コイルのみが停止(stator)で後の部品(rotor)は羽根の回転と共に回転する。

図9と 10 は発電機の動磁場解析に用いた対称性を考慮した解析モデルである。図 11 にコアの入れ方を示

す。また図 12 と図 13 は解析に用いた Nd-Fe-B 永久磁石の磁気特性である。解析は回転数 200rpm の条件で実施している。解析結果のベクトル表示と電圧を図 14 と図 15 に示す。また図 16 に整流化した発電電圧の結果を示す。この結果 200rpm 回転時には約 350V の電圧が解析で得られた。一方、ジャイロタイプの風車を発電機に取り付け、実験<sup>2)</sup>で発電電圧を求めたところ 380V であり、誤差は 10%以内であった。風車の代わりにモーターを直接発電機に取り付け、回転数と発電電圧の関係<sup>2)</sup>を調べた所、両者は一致した。このように解析の妥当性を確認した後、コイル厚さによる発電電圧とコギングトルクを求めた。図 17 と図 18 にその結果を示す。これらの結果から 70-80%程度のコアを入れるとコギングトルクを大きくしない範囲で発電量(電圧)を2-2.5倍以上に高められることがわかった。図 19 に 10kW 発電機とそれを使った秋田マグナス協会の建設中中型風力発電機を示すがこれはコア無しコイルが使われたものである。今後コア有りコイル発電機の実用化により、より高性能で重量が小さいものを普及できると期待している。

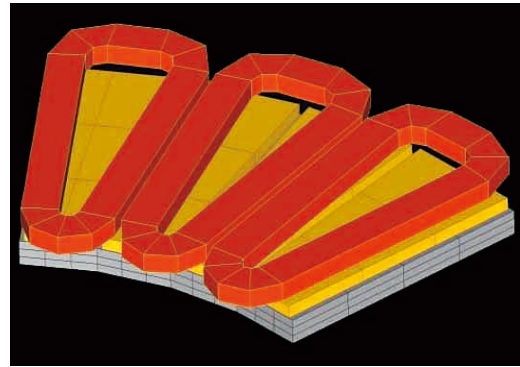


図 10 1/30 の解析モデル

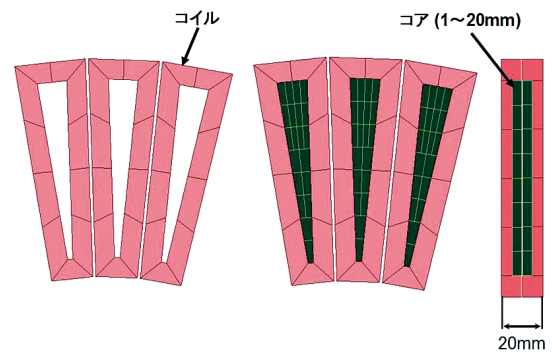


図 11 コアの入れ方

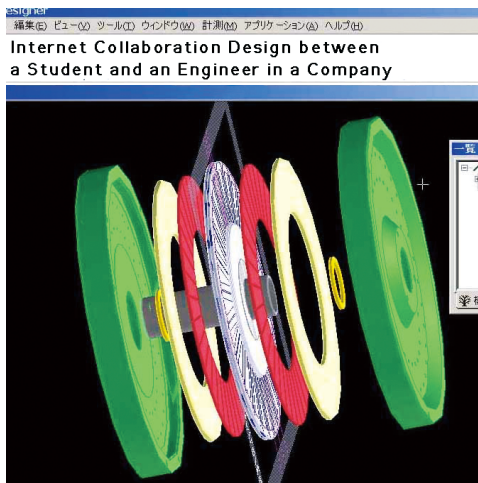


図8 発電機のインターネットコラボレーション設計

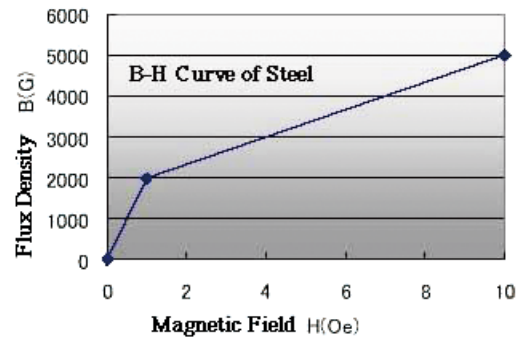


図 12 Nd-Fe-B 磁石の磁気特性(鉄の B-H 線)

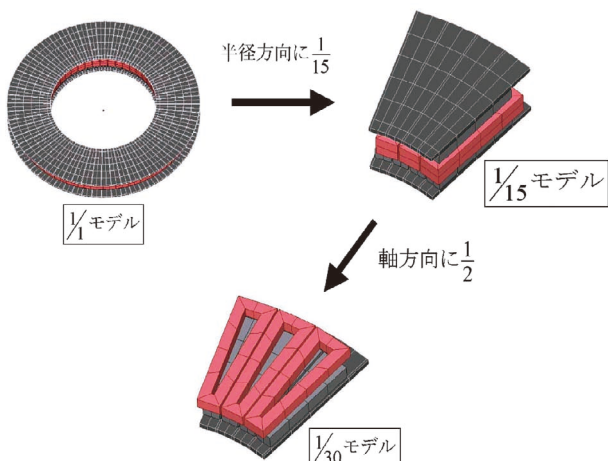


図9 対象性を考慮した解析モデル

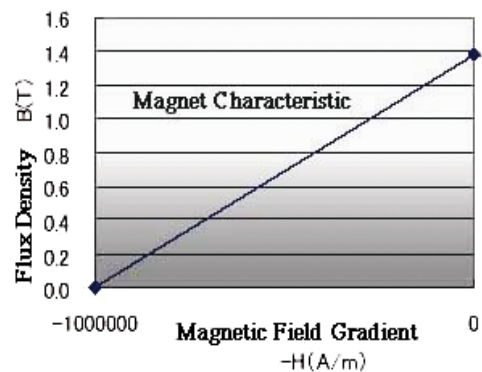


図 13 磁束密度と磁場の変化率

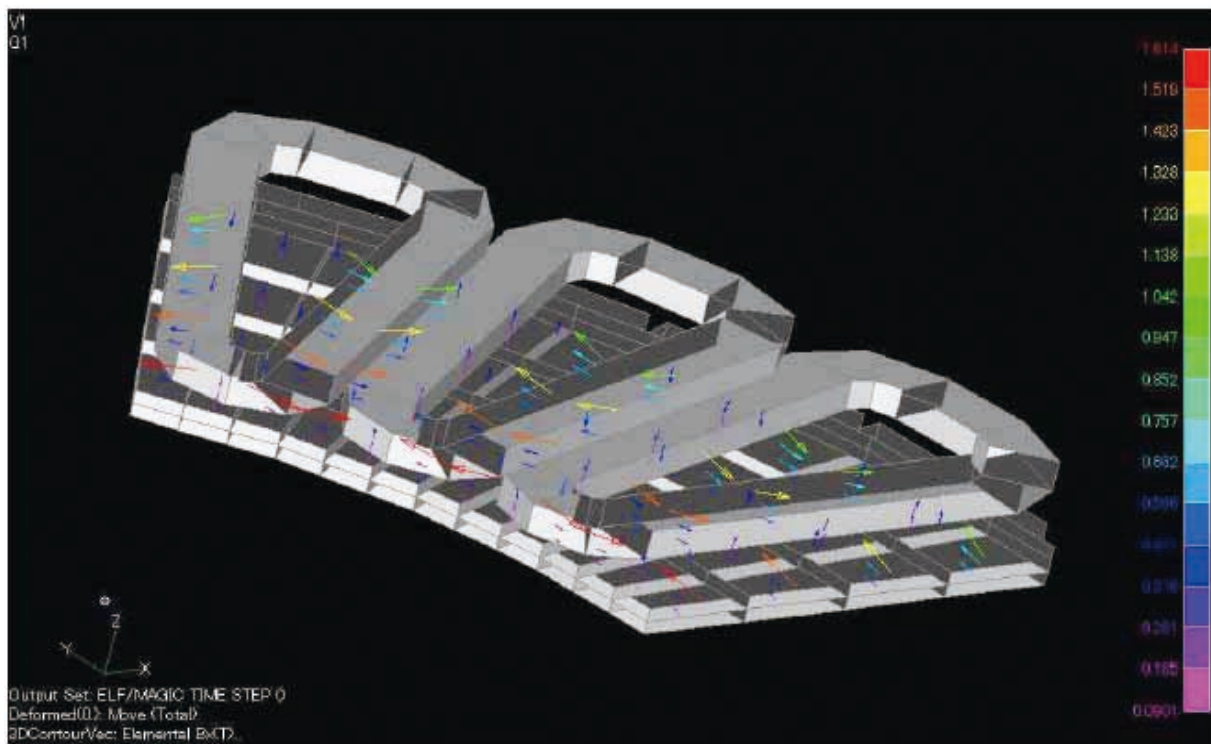


図 14 解析結果のベクトル表示

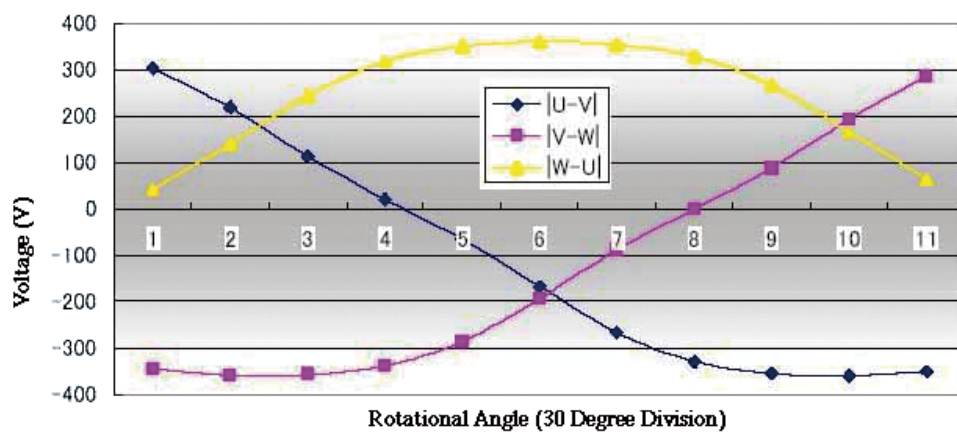


図 15 解析結果の回転毎の電圧

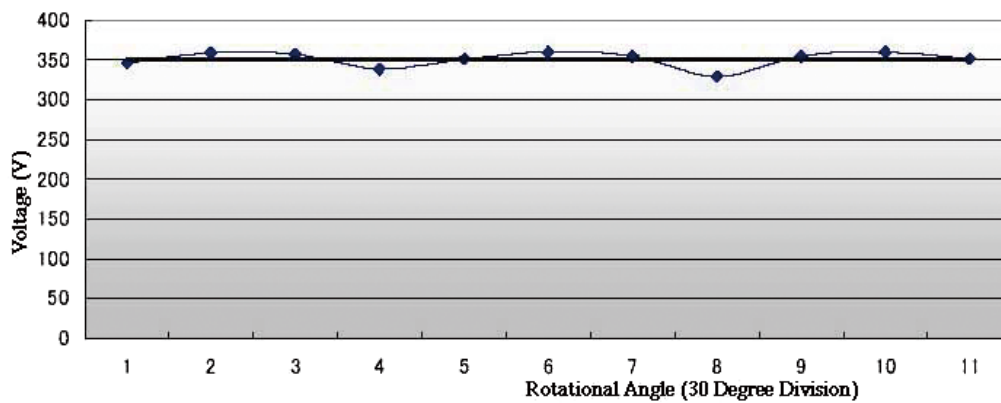


図 16 整流後の電圧

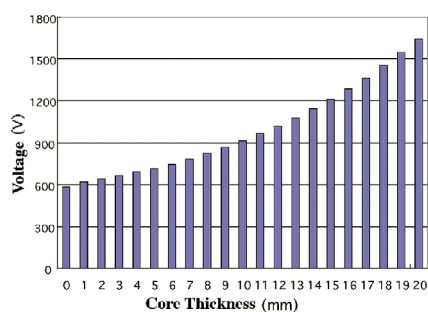


図 17 発電量(電圧)に及ぼすコア厚さの影響

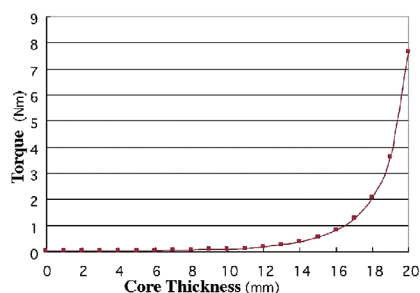


図 18 コギングトルクに及ぼすコア厚さの影響



図 19 10kW 発電機(株式会社スカイ電子提供<sup>5)</sup>) とマグナスタイプ発電機(秋田マグナス協会<sup>8)</sup>)

#### 4. まとめ

サボニウスやジャイロタイプは回転軸が垂直型であり、通常のプロペラタイプ(横型、強風でないと発電しない)と異なり低速あるいは中速回転で発電する。一方、10kW などの中型発電機には新しい形としてマグナスタイプ<sup>8)</sup>も実用化されている。10 kW 以上の風力発電機はニーズがあるものと考えられ、またそのタイプも種々でてくると予想される。今回の結果から 20-25kW の発電機は開発の可能性が認められる。今後コア有りコイル発電機の試作と実験を行い、実用化につなげたい。

#### 謝辞

本研究の一部は平成 19 年度 私学振興事業団特別補助(地域研究支援)による「知能化システム構築のための高機能材料の利用および加工技術に関する研究」の一環として実施された。

本報告の内、従来の研究では足利工業大学現副学長牛山泉先生、高知工業高等専門学校名誉教授野村弘先生、株式会社坂本技研坂本正興社長、株式会社スカイ電子廣林孝一社長をはじめ多くの方に御世話になったことを篤く感謝したい。高知県産業振興センターの研究資金支援およびオブザーバーとして参加されサボニウスタイプの風力発電機を製作担当された現 M シート前田幸久社長にお礼を申し上げたい。

当時修士学生であった、内野喬誌氏、汀祥子さん、その後の最近の研究では当時修士学生の西村幸弘氏、尾崎聖宏氏が熱心に設計と解析を進められた。これらの多くの方に感謝したい。

#### 文献

- (1) Sakamoto H., Araki K., Ishida A., Kobayashi S., and Kuwahara T., “Design of Permanent Magnet Type Compact ECB Retarder”, SAE Transactions, Volume 106, Journal of Commercial Vehicles, Section 2, pp. 508-514, 1997
- (2) Sakamoto H., Migiwa S., Nouda S., Asai T., and Maruyama Y., “Dynamic Magnetic Field Analysis and Optimum Design of Small-sized Wind Power Generator”, EcoDesign Conference, Tokyo, 2003.
- (3) Sakamoto H., Osaki M., and Nishimura Y., “Effect of Core Design on Efficiency in Wind Power Generator”, EcoDesign 2005, Paper 1E-2-4S, 2005.
- (4) Sakamoto H., Nishikawa S., Takemura Y., and Hirobayashi K., “Design and Development of a Self-powered Street Light with Wind Power Generator and Solar Cell”, Eco-Design conference, B2-2-1S, Tokyo, Dec. 11, 2007
- (5) 株式会社スカイ電子ホームページ (URL= <http://sky-denshi.co.jp>)
- (6) Sakamoto H., “Small-sized Wind Power Generator using Nd-Fe-B Permanent Magnet”, ASME IMECE 2007-43662, 2007
- (7) 株式会社坂本技研ホームページ (URL=<http://sg.kcan.ne.jp/>)
- (8) 秋田マグナス協会ホームページ (URL= <http://www.akita21.com/magnus/>)

# Small-sized Wind Power Generator using Nd-Fe-B Permanent Magnets

**Haruo Sakamoto**

Faculty of Engineering, Kochi University of Technology  
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502 JAPAN  
Email: sakamoto.haruo@kochi-tech.ac.jp

**Abstract:** A small-sized wind power generator has been studied, since the local clean energy research activity in Kochi Industrial Promotion Center in 1998-2000 years. The research results are self-powered street lights using developed small-sized wind power generators, which are useful in case of disaster occurrence such as earthquakes. For more electric generation like more than 10kW, cored-coil generators are thought to be needed, instead of existing core-less coil generators, which were developed from the local clean energy research results. The produced 10kW generator weighs 90kg and is 600 mm diameter large, which is hard to carry and install. The light-weight and more power generator is required to cored-coil generator idea, instead of the originally developed core-less coil generator.