

# **動磁場解析を用いた低回転用小型風力発電機の開発と最適設計**

The Development and Optimum Design of Low Revolution  
Wind Power Generator with Dynamic Magnetic Field Analysis

2003年 1月

高知工科大学 工学研究科 基盤工学専攻 知能機械コース 坂本研究室

1055030 内野喬誌

# 目 次

第 1 章 緒論、研究の目的と背景.....	3
1.1 研究の背景.....	3
1.2 本プロジェクトの概要.....	6
1.3 本プロジェクトの目的.....	7
第 2 章 従来の発電機やモーター及びコイルの技術.....	8
2.1 一般的な発電機の構造と原理.....	8
2.2 風車形式について.....	10
2.3 関連する文献調査のまとめ.....	13
2.4 最近の動向.....	13
2.5 本プロジェクトの位置付け.....	14
第 3 章 市販小型発電機の分解調査とラジアルギャップ型コアレス発電機の試作及び性能評価.....	15
3.1 緒言.....	15
3.2 分解調査を行った発電機の内部構造.....	15
3.2.1 Southwest Windpower 社製 Air403.....	15
3.2.2 Marlec 社製 Windcharger WG910 (改).....	16
3.2.3 三洋電機製 自転車用ハブダイナモ.....	17
3.2.4 小型水力発電機 Aqua U.W.....	18
3.2.5 新日本技研製 1kw 発電機.....	19
3.3 ラジアルギャップ型コアレス発電機の試作と性能評価.....	23
3.3.1 ラジアルギャップ型コアレス発電機.....	23
3.3.2 ラジアルギャップ型コアレス発電機の発電能力試験.....	23
3.4 ラジアルギャップ型コアレス発電機と Air403 の発電能力の比較.....	24
3.5 フィールドテストによる発電能力の調査.....	24
3.6 考察.....	25
3.7 結言.....	26
第 4 章 アキシアルギャップ型コアレス発電機の試作と風洞実験及び動磁場解析による発電機能力の検討.....	27
4.1 緒言.....	27
4.2 アキシアルギャップ型コアレス発電機の設計指針とその構造.....	27
4.3 風洞実験による発電機能力の検討.....	29

4.3.1	目的	29
4.3.2	実験概要及び測定項目	30
4.3.3	静特性試験	30
4.3.4	負荷時における起動特性（加速性能）の結果（コイル全てを使った場合・コイル1組のみを使った場合）	32
4.4	450mm 発電機の動磁場解析を用いた発電機性能調査	34
4.4.1	解析概要	34
4.4.2	動磁場解析ソフト ELF/MAGIC と FEMAP について	35
4.4.3	解析モデルと条件	35
4.4.4	解析結果	36
4.5	新日本技研製 1kw 発電機の動磁場解析を用いた発電機性能調査	39
4.5.1	解析概要	39
4.5.2	解析モデルと条件	39
4.5.3	解析モデルと条件	40
4.5.4	解析結果	42
4.6	考察	42
4.7	結言	43
第5章	動磁場解析による発電性能に及ぼす設計因子の影響	44
5.1	緒言	44
5.2	動磁場解析による設計因子が発電性能に及ぼす影響の調査	44
5.3	ラジアルギャップ型コアあり発電機の動磁場解析による発電性能に及ぼす設計因子の影響	45
5.3.1	解析概要	45
5.3.2	解析モデルと条件	45
5.3.3	解析結果	46
5.4	考察	51
5.5	結言	52
第6章	結論	53
	謝辞	54
	参考文献	55

## 第1章 緒論、研究の目的と背景

### 1.1 研究の背景

近年、増え続けるエネルギー消費による二酸化炭素排出の削減など地球環境の保全の観点から、クリーンなエネルギーに注目が集まっている。新エネルギーに分類されている風力発電はそのひとつとして高い関心を集めている。例えば、日本に設置されている大型風車の総発電量は年々増加しており、1998年には3.8万kW、導入基数約130基であったものが2000年には14.4万kW、約250基にまで増加しており、2010年度の目標は、300万kWとされている。(表1)

近年、技術の進歩による大型化が進んでおり、ローター直径80m、出力2000kWのものも製品化され、発電コストの下落(14円/kWh)が進み、売電を事業化している市町村が数多く存在する。

北海道の苫前町には、大型風力発電機が39基設置されており、計5万kWの発電がなされている。また、高知県においても売電事業を目的に、野市町、大豊町、梶原町に積極的に導入されており、近いうちにさらに設置される見通しである。(表2)

しかし、太陽、雨、風による自然エネルギーは従来の大プラントによる発電だけではなく小規模で我々の身近で発電できることが特徴である。すなわち、代替エネルギーを作ることだけでなく、エネルギーを必要とする場所で必要なエネルギーをクリーンなエネルギーから確保できるのである。クリーンな地域環境を作ることにより、クリーンな地球を取り戻す。これが本研究の目的である。

依然として風力発電は大型のイメージが強いものの、小型風力発電機についても外国製のものはあるが個人で購入し自宅に設置できるものもあり、環境問題を身近に捉えることが出来る。また、小型風力発電システムは気軽に設置できるため、土佐市宇佐地区の港湾施設に十数基設置されるなど、大型風力発電システムが立てら



図1 大豊風力発電所

れない場所でも活用されている。

表1 日本における風力発電システム導入量の推移

年	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
基数	6	7	20	29	36	50	61	75	115	177	251
設備容量 (kW)	798	898	2,639	4,439	5,330	8,987	12,260.5	16,063.5	30,933.5	69,683.5	136,508.5

注) 基数、設備容量は年末の値。

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構資料

著作権者：新エネルギー・産業技術総合開発機構

表2 日本における導入事例（高知県のみ抜粋）

設置年月日	設置者	設置場所	定格出力	台数	総出力	メーカー名	用途
1994年9月	四国電力(株)	高知県室戸市室戸岬	300	1	300	三菱重工業	実証試験
1995年3月	高知県企業局	高知県野市町	250	1	250	MICON	売電事業
1999年3月	高知県企業局 (大豊風力発電所)	高知県長岡郡大豊町	600	2	1,200	LAGERWEY	売電事業
1999年11月	高知県檮原町	高知県檮原町	600	2	1,200	NEG MICON	売電事業
1999年12月	山田カントリークラブ	高知県土佐山田町	225	1	225	VESTAS	自家用

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構

著作権者：新エネルギー・産業技術総合開発

## 1.2 本プロジェクトの概要

第3章で詳しく述べるように、小型の風力発電機はプロペラ型風車を採用した外国製のものが大多数を占めている。すなわち、諸外国のように風が比較的強く、風向きの変化が少ない安定した風が得られるような風境の良い地域で使用されることが前提になっていると考えられる。

これは、日本で数多く販売されている小型風力発電システムを見れば一目瞭然であるが、幅の狭いブレードが3枚というプロペラ形状が数多く採用されていること、またカタログ上での定格出力が得られる定格風速が十数 m/s と高く設定されていること、カットイン風速が3~3.5 m/s 前後となっているからも容易に想像できる。

日本で販売されている小型の風力発電システムは、輸入した外国製品を改良せずに、もしくは若干の改良のみを加えて販売しているだけにとどまっており、日本製の発電機を採用した小型風力発電システムはごく一部に限られているのが現状である。

したがって、風向きや風速の変化が激しい日本においては大部分の風力発電機はその能力を十分に発揮できず、期待通りの発電量が得られないのが現状である。

各社から発売されている小型風力発電機の分解調査の結果からも、小型風力発電システムの発電機における発電能力の向上については、多種多様な方式が存在し統一した設計概



図 2 太陽光・風力ハイブリッド発電システム

念が見受けられないことから、最適化設計のための指針は十分に確立されていない。

そこで、低回転から効率よく発電を行える発電機の開発を行い、低風速から高トルクが得られ、風向きに関係なく回転することが出来るサボニウス型風車と太陽光パネルを組み合わせ、さらに最大電力追従制御により高効率な発電ができるハイブリッド発電システムの開発を行い、さらに発電機の最適設計を進める事とした。

これにより、街路灯もしくは防災用無線や避難誘導灯として、商用電源がない場所においても、また停電や災害などが起こっても独立して稼動する必要があるものの電源として利用する事が出来る。さらに、サボニウス風車は抗力型風車であるため、比較的自由的なデザインにすることが可能であり、モニュメントとしての利用に重点をおいた発電システムとしての使用も可能である。図2は、当研究室が開発に関わった太陽光・風力ハイブリッド発電システムである。写真左が南国道の駅に設置されているタイプで、写真右が野市動物公園に設置されているものである。

本研究はこのような背景から実施したものであり、風洞実験や動磁場解析などを用いて、カタログスペックのみならず、日本での実使用における小型風力発電システム用発電機の効率向上を目的として実施したものである。

### 1.3 本プロジェクトの目的

本研究の目的は、日本の風境に合う低風速から効率よく発電できる発電機を開発する事である。

すなわち、エネルギー密度の低い風エネルギーを、低風速域すなわち低回転から効率良く電気エネルギーに変換できる発電システムの発電機の開発を行う必要がある。

そのために、既存風力発電機の分解調査による構造的特徴について整理を行い、既存発電機のフィールドテストと問題点の明確化を行った。また、動磁場解析を用いた新型発電機の最適化設計及び試作、風洞実験もあわせて行った。さらに、動磁場解析を行った結果について考察し、設計因子が発電量に及ぼす影響調査などを行うことにより、低風速域を重視する小型風力発電システム用発電機の最適化設計の方向性を見出す研究を行った。

## 第2章 従来の発電機やモーター及びコイルの技術

### 2.1 一般的な発電機の構造と原理

まず、発電機の原理を示す。

磁場の中で導体を移動させると、導体の両端に誘導起電力 $V$ が発生する。

$$V = vB\lambda \quad (1)$$

$v$  : 速度[m/s]

$B$  : 磁束密度[T]

$\lambda$  : 磁界中の電線長[m]

が発生する。

(1)式における誘導起電力の考え方を、コイルでの誘導起電力に置き換えて考えると、

$$V = -N \frac{d}{dt} \quad (2)$$

$N$  : コイル巻き数

: 磁束[Wb]

$t$  : 時間[s]

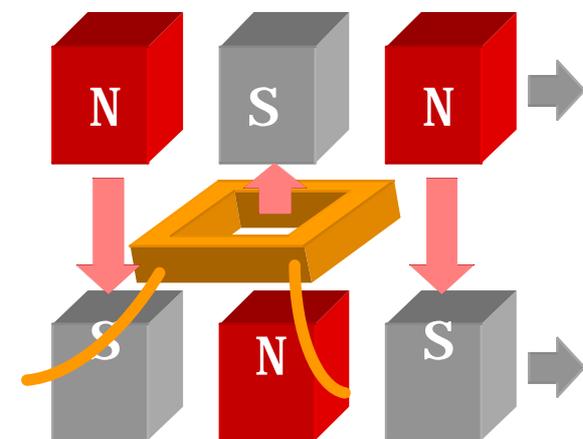


図 3 誘導起電力

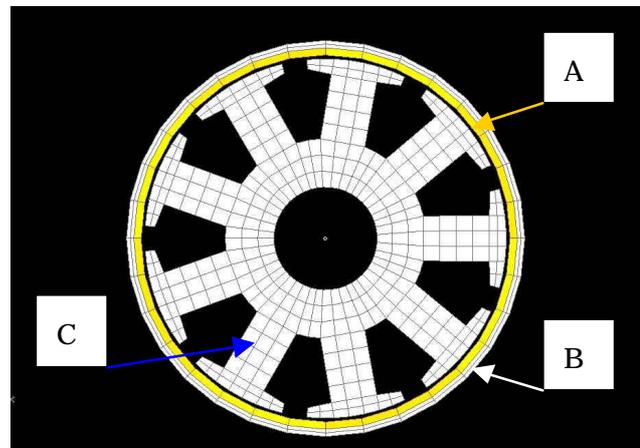


図 4 アウターローター型発電機の内部構造

で表す事が出来る。(図3)つまり、コイル中を貫く時間あたりの磁束変化にコイル巻き数をかけたものである。

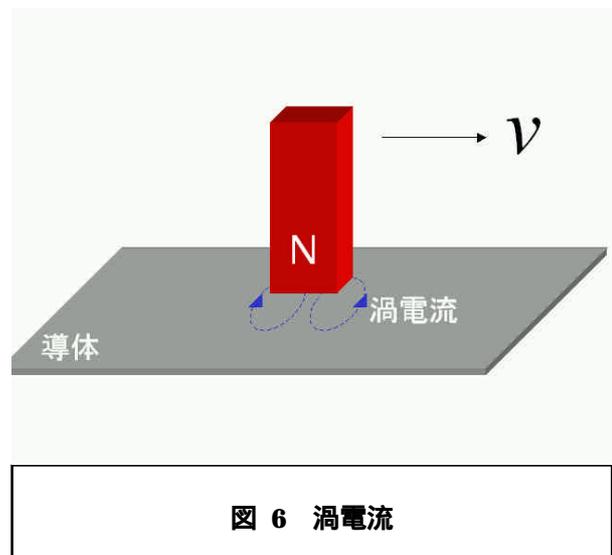
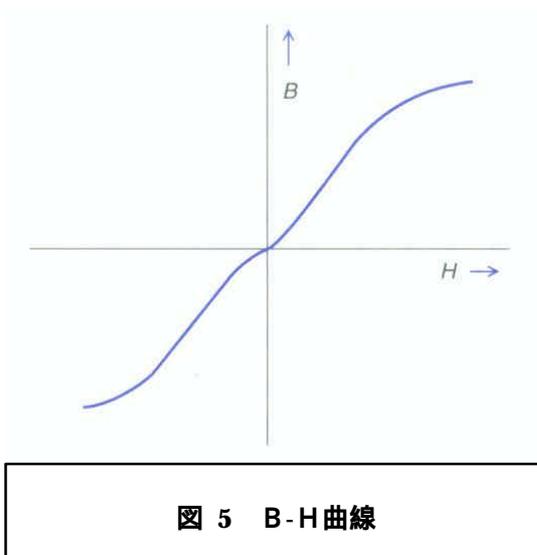
発電機には様々な形式のものが存在し、磁石表面から出た磁束をヨーク(鉄心)によって曲げ、またコイルの中に鉄心を入れるなどして様々な形の磁気回路を構成するが、基本は同じである。

図4に一般的なアウトローター型発電機の構造を示す。見やすくするため、コイルは省略して示す。図中Aが磁石、Bが磁石のバックヨーク(鉄)、Cがコイルが巻かれるヨーク(鉄)である。Aの磁石はオレンジ色(N極)と黄色(S極)が交互に配置されている。Cのヨークはステーター、A及びBがローターである。

磁石表面(N極)から出た磁束は一番近くにあるヨークに入り、そのヨーク内を通った後、S極に近い別のヨークを通過し、磁石表面(S極)に戻る。磁石は回転しているので、ヨーク内を通過する磁束の変化は継続する。このヨーク内を通過する磁束の変化によって、そのヨークに巻かれているコイルに誘導起電力が発生する。

上記の一般的なアウトローター型発電機は、ヨークにコイルが巻かれている。これは、空気よりも鉄の方が透磁率が大きいためである。すなわち、ヨークは磁石表面から出た磁束を特定の場所へ導く磁気回路を形成する役割を持っている。つまり、ヨークは外部から磁場(H)を加えていくと直ちに磁化(B)される方が良い。

このBとHの比を透磁率といい、材料の物性又は磁気回路設計で使用され、磁化されやすさを示す。この透磁率 $m_r$ の値が大きいほど磁束を通しやすいわけである。(図5)例えば、空気は $m_r=1$ であるのに対し、鉄はおよそ $m_r=1000$ である。



しかしその一方で、磁化されたためにヨークと磁石との間に引力が働く。コアありモーターなどを手で回転させるときに感じる“コツコツ”という回転の抵抗が感じられる。これはコギングトルクといいスムーズな回転の妨げとなる。そのため、発電機やモーターは様々な方法でコギング対策がなされている。

また、導体上を磁石が動くと導体表面に渦電流が発生する。(図6) 導体表面から見て磁石が遠ざかる部分には、いわば電磁石のような電流が流れることにより磁石を近づけようとする方向に電流が流れる。また逆に、導体表面から見て磁石が近づく部分には、磁石を遠ざけようとする方向に電流が流れる。

磁石と磁性体が引き合う以外にも、この渦電流もコギングトルクの原因となっている。

多くの場合において、コイルコアなど渦電流が発生する部分には、インゴットの鉄を使用するのではなく、絶縁したケイ素鋼板などを積層渦電流を抑制している。これは、渦電流の発生する方向を薄くする事によって渦を小さくする働きによるものである。

## 2.2 風車形式について

風車は昔から製粉や揚水などに利用されていたため、非常に多くの種類が存在する。

一般的に風車の種類を分類する場合、回転軸の方向によって、水平軸風車、垂直軸風車に分類される。(図7)

水平軸風車は回転軸が地面に対して水平であり、幅広く使用されている3枚ブレードのプロペラ型風車などはこれ

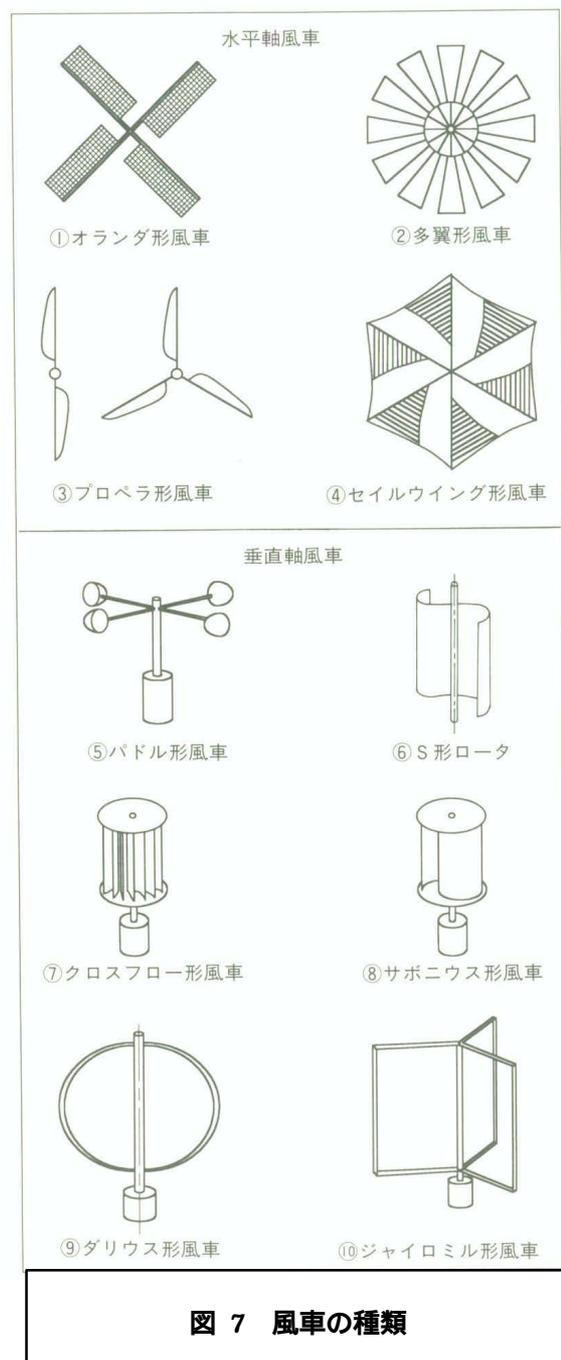


図7 風車の種類

に分類される。プロペラ型風車は主に揚力で回転している。トルクが小さく風が吹いている方向に正立しないといけないという欠点があるものの、高速回転が可能でありパワー係数が高いのが特徴である。

一方、垂直軸風車は回転軸が地面に対して垂直であり、積算風速計などに用いられるパドル型風車や、本研究で使用しているサボニウス型風車、ジャイロミル型風車は垂直軸風車である。サボニウス型風車は抗力で回転しており、パワー係数はプロペラ型に比べて低い。しかしながら、風向きに関係なく低回転から回転を開始し高トルクが得られるのが特徴である。

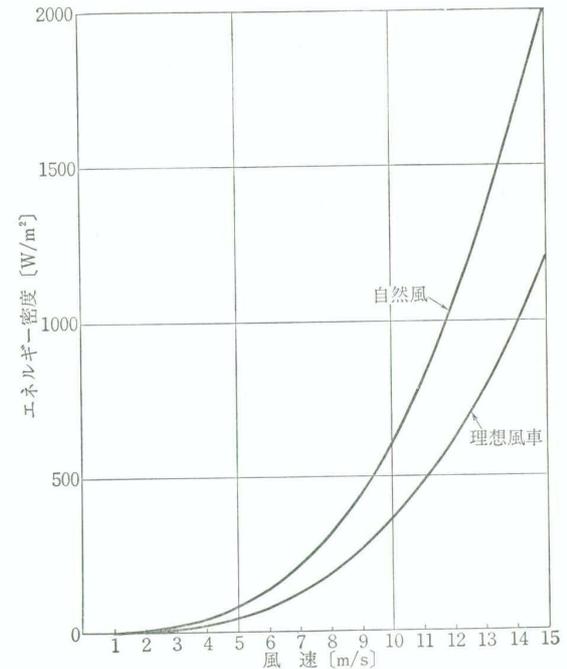


図 8 自然風のエネルギー密度

これらの風車と発電機を組み合わせる風力発電システムを考える場合、風車から得られるエネルギーの見積もりが必要である。

図 8 は、風が持っているエネルギーと理想風車の場合における風エネルギー変換後の風車からのエネルギーを示している。

風車形式によって、以下に示すような式及びパワー係数やトルク係数などで風車での風エネルギー変換後のエネルギーが求まる。

風エネルギーを風車が動力エネルギーに変換する関係式は次式で表される。

$$I = \frac{2pfR}{V}$$

$$P = C_p \frac{1}{2} rAv^3$$

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho A R v^3$$

$I$  : 周速比

$P$  : 風車出力 [W]

$T$  : 風車トルク [N・m]

$C_T$  : トルク係数

$C_p$  : パワー係数

$f$  : 風車回転数 [ rps ]

$\rho$  : 空気密度 (1.2) [ kg/? ]

$A$  : ローター受風面積 (風車の幅 × 高さ) [ m<sup>2</sup> ]

$R$  : 風車半径 [ m ]

$v$  : 風速 [ m/s ]

ここで、周速比とは風の速さに対する風車の速さの事であり、風車の性能を無次元化したものである。

周速比に対するパワー係数、トルク係数は実験的に求められている。このグラフを図 9 及び図 10 に示す。

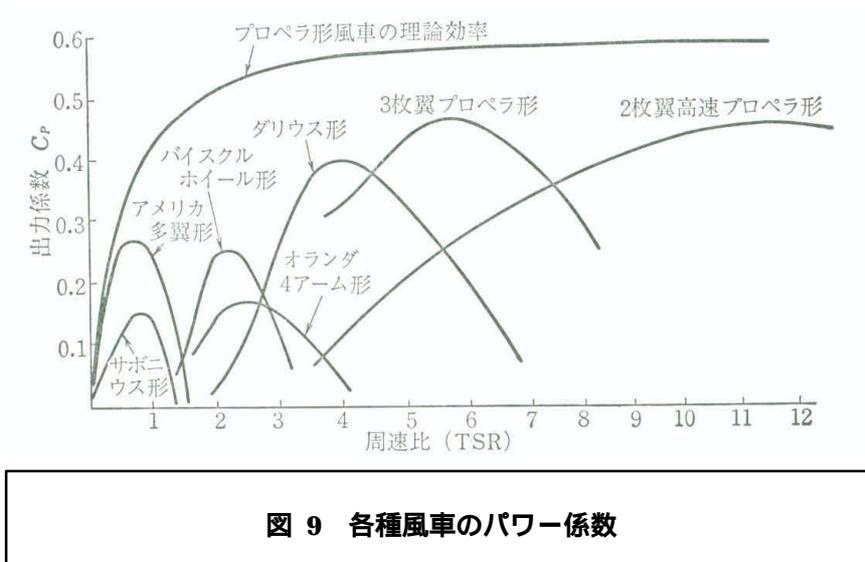
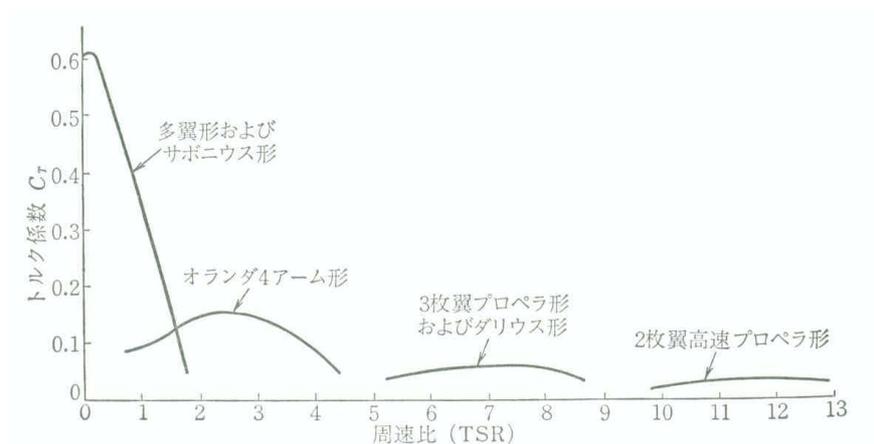


図 9 各種風車のパワー係数



**図 10 各種風車のトルク係数**

実際の出力、トルクは、計測した風速、風車回転数から、周速比を計算して各係数を求め上記の計算式によって求めることができる。

### 2.3 関連する文献調査のまとめ

近年、小型風力発電機が注目されるにともない、小型の発電機に関しては励磁の必要が無い永久磁石が多く使われている。特に永久磁石材料の進歩により、希土類永久磁石が多く用いられるようになってきている。一般的な発電機はコイル内部に鉄心を有するため、これに起因するコギングトルクの低減方法などの研究が幅広く行われている。その多くは、コイルが巻かれているヨーク先端の形状変更や、磁石の着磁方向及び磁石表面形状の変更、もしくはコイルコアと磁石の位置関係及びその数の比率などによって、磁束の流れを変更しコギングトルクを低減させる方法などが多く研究されている。

### 2.4 最近の動向

省エネルギー化、制御の高度化が進み、モーターに関してもコギングトルク低減の技術必須となっており、様々な工夫がなされている。コイルに関して、一般的に分布巻きの場合、ヨーク（スロット）を数個またいで連続してコイルを巻く必要があるため、コイルコアの上下に多くの銅線が必要となる。従来は分布巻きであったものが集中巻きに変更した事により、導線の使用量を従来の 50%にまで減少させ、軸方向寸法を 1/3 程度まで縮小できた事例が報告されている。さらに、断面が 4 角形のコイルを用いて巻き密度を向上させる技術が開発されている。

## 2.5 本プロジェクトの位置付け

従来から、コアレスコイルの発電機は渦電流による損失がほとんどないことから、高速回転機用として開発されてきた。

そこで我々は、コアレスコイル発電機を低回転機用発電機として利用する研究を行った。

## 第3章 市販小型発電機の分解調査とラジアルギャップ型コアレス発電機の試作及び性能評価

### 3.1 緒言

第 1 章で述べたように、この章では市販小型発電機の分解調査を行い、構造的長所や長所及び短所を明確化する。

現在、日本に流通している小型風力発電機は外国製のものを中心に多くの機種が存在する。かなりの販売実績を誇る Southwest Windpower 社製 Air403 (アメリカ) これに若干の改良を加えたと思われるゼファー株式会社製 Z-500 (日本) Southwest Windpower 社製 Windseeker (アメリカ) などである。

これらの中で、Southwest Windpower 社製 Air403 についてフィールドテストを行い、実使用での発電能力の検証を行う。

さらに、より効率の良い発電機を設計するため、分解調査の結果から Air403 の筐体を流用できる外形寸法のラジアルギャップ型コアレス発電機の試作を行い、実験により発電能力の検討を行う。これとあわせて、Air403 とラジアルギャップ型コアレス発電機について小型風洞での比較実験を行い、両者の性能について考察を行う。

### 3.2 分解調査を行った発電機の内部構造

磁石数、コイル数、出力波形、磁石形状、コギングトルク対策に注目し分解調査を行った。結果を表 3 にまとめて示す。

以下は各機種についてのコメントである。

#### 3.2.1 Southwest Windpower 社製 Air403

このアメリカラジアルギャップ型発電機は、日本においてかなりの数が出荷されている製品である。(図 11)

磁石は 12 極で希土類永久磁石が使用され、積層鋼板に 36 スロットの歯がありコイルは 3 スロットずつの分布巻きになっている。

風速 3.0 m/s から回転を開始し、定格出力は風速 12.5 m/s のときに 400 W である。

なお、強風対策として風速が 21.5 m/s に達するとブレード先端がねじれる事によって失速させ、発電機を保護する機能を有する。一般的にプロペラ型風車は揚力型であり回転速度が高いため、何らかの強風対策がなされている事が多い。

コギングトルク対策として、磁石表面の形状をかまぼこ型にする事で、ヨークに侵入する磁束の変化を緩やかにしている。(図 11 右下)

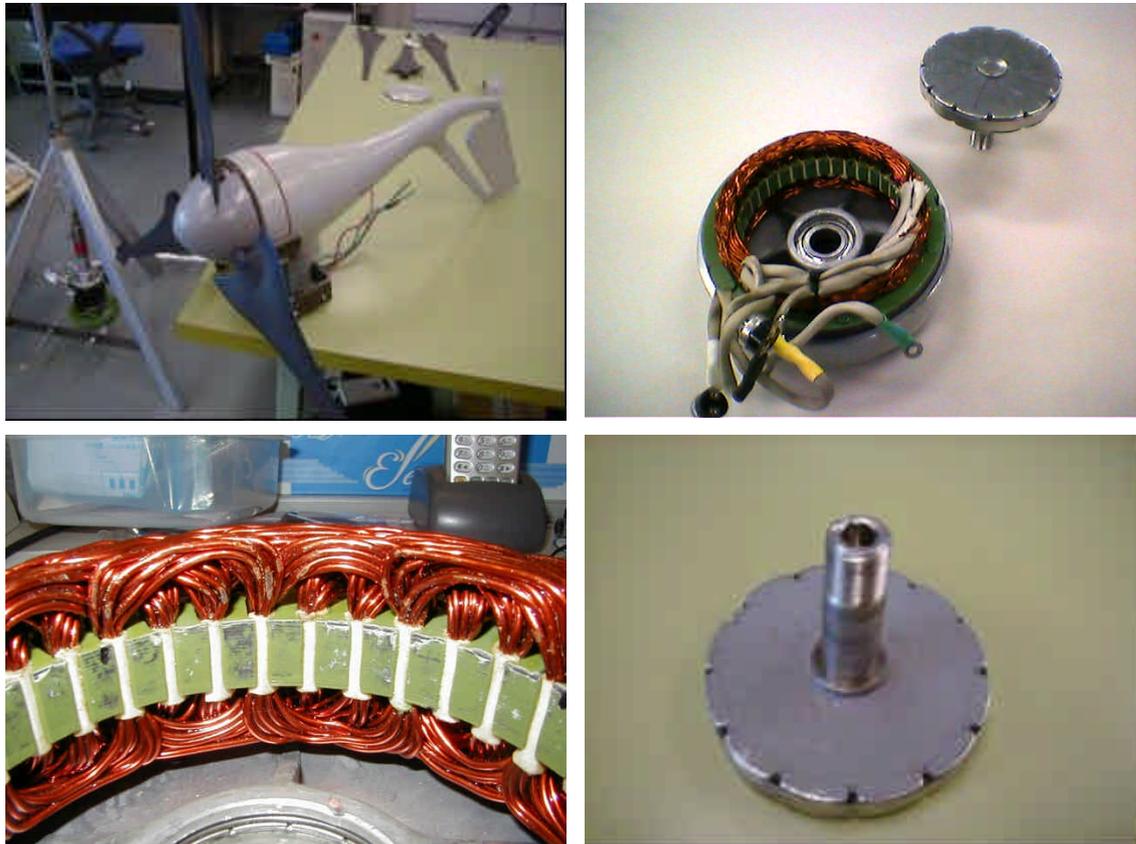


図 11 Southwest Windpower 社製 Air403

### 3.2.2 Marlec 社製 Windcharger WG910 (改)

イギリス製のこのアキシアルギャップ型コアレス発電機は、比較的低風速域を意識した6枚プロペラが発電機ハウジング外周に直付けされている。

本研究で分解調査したものは、上記の発電機のフェライト磁石を希土類永久磁石(住友特殊金属 NEOMAX44H)に換装したものである。(図 12)

ステーターには8個の集中巻きコアレスコイルがある。ローターには磁石が片面あたり8個使用されており、コイルを両側から挟み込むような構造になっている。コイルは樹脂によって固められている。出力波形は単相である。コアレスのためであると考えられるが、特にコギングトルク対策などはなされていないようである。

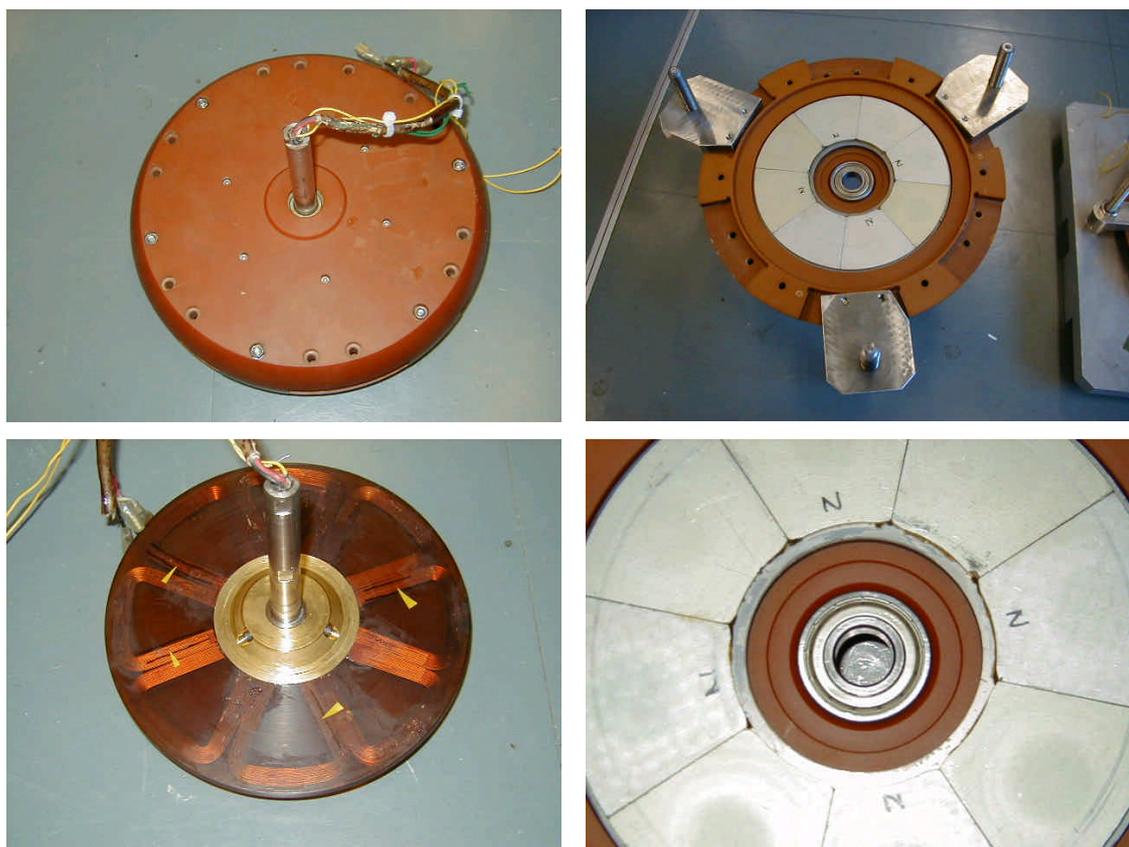


図 12 Marlec 社製 Windcharger WG910 (改)

従来から多く用いられてきたフェライト磁石に比べ、希土類磁石に換装したこの発電機のほうがより大きな出力が得られるが、反面発電機を回転させるのに必要なトルクが大きくなり、同じプロペラ型風車だと回転数が低くなることが実験より明らかになっている。したがって、高知工科大学と高知県の企業で構成されるローカルクリーンエネルギー研究委員会では、希土類磁石を使った発電機にはサボニウス型風車のような低回転高トルク型の風車との組み合わせが適当なのではないかという結論が得られた。

### 3.2.3 三洋電機製 自転車用ハブダイナモ

この発電機は自転車前輪のハブに内蔵され、低回転から実用的な電力を得る事が期待される。(図 13)

ステーターである 1 組のコイル上下両端から、16 組 × 2 組の計 32 個のヨークが互いに空間を持ちつつ噛み合うようになっている。ローターである磁石は、ハウジング内部

の外周に 1 枚あたり 8 極に着磁された磁石が 4 枚並べて貼り付けられており、計 32 極である。

回転の軸が歪んでいたため、実験による発電能力の評価は行えなかったが、発電機本体に記載されている数値としては、6V、2.4Wである。

磁石とヨークの数が異なる点を除けば、他の機種に見られるような、磁石表面に対するコア表面形状の工夫などのコギング対策は見受けられない。しかし、自転車前輪の軸部分に装着されるように設計されているために大きなトルクが得られることから、コギングトルクは考慮する必要がなかったと思われる。



図 13 三洋電機製 自転車用ハブダイナモ

#### 3.2.4 小型水力発電機 Aqua U.W.

アメリカ製のラジアルギャップ型発電機は、磁石及びコイルが 2 段あり、磁石の位置関係が上段と下段で約 30 度ずれて配置されている。(図 14) 1 段につき 6 個のフェライト磁石がありヨークにより磁束の向きが外側に変更されコイルと向き合う構造とな

っている。コイルは集中巻きで6個ある。

流速 4m/s で約 100W 程度の出力が得られる。高知県香美郡野市町三叉の用水路で伊東淳氏が実施したテストでは、流速 1.2 m/s で約 8W、流速 1.7 m/s で約 26W の電力が得られた。

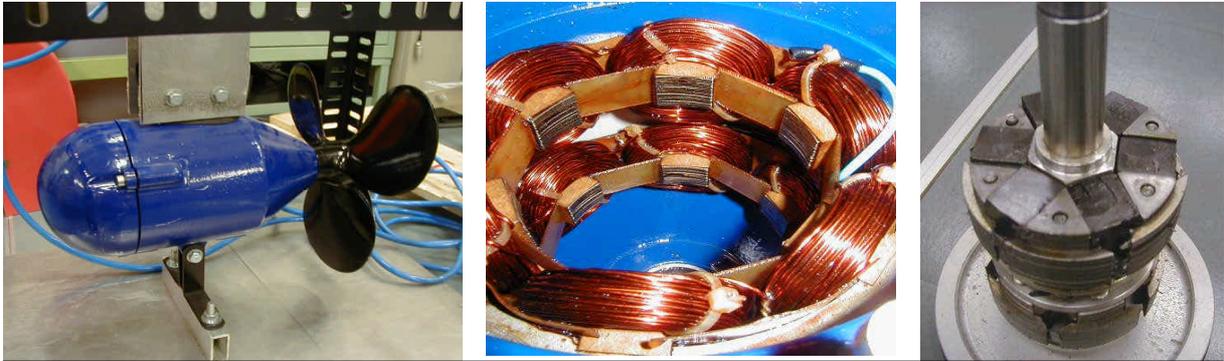


図 14 小型水力発電機 Aqua U.W.

### 3.2.5 新日本技研製 1kw 発電機

この発電機には内側にステーターの9極の鉄心があり、その外側に磁石が8極取り付けられているアルミ製ローターが被さっている構造である。さらに、この発電機が少しずれてもう1基接合されており、2基が1組となって定格出力1kWの発電機となっている。

コイルは3組存在し、3相交流の出力波形である。

この発電機は、低回転から発電が可能であり、かつコギングトルクが小さいことが特徴である。

コギングトルク対策として、磁石個数とコイルコアの数が8:9となっており、さらに発電機2機が角度を微妙にずれて接続されている(図15左下)。また、ギャップに面するヨーク表面両端がカットされており(図15右上)、ヨークに侵入する磁束の変化を緩やかにしている。

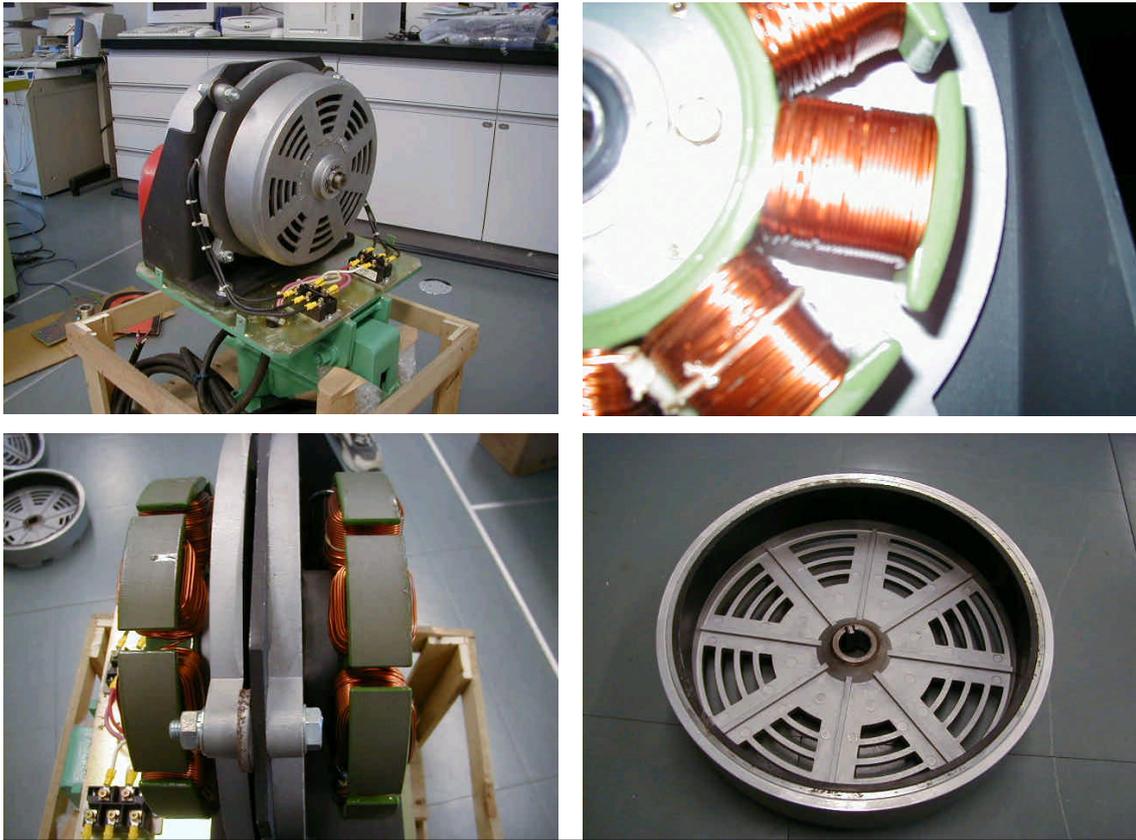


图 15 新日本技研製 1kw 發電機

表 3 市販発電機の製品分解調査

メーカーと機種名	出力	コイル巻き方	コイルコア	出力波形	磁石	コギングトルク対策
Southwest Windpower 社製 Air403	400W	分布巻き 36 コイル	コアあり	3 相	コイル内側に 12 極	磁石が蒲鉾状
Marlec 社製 Windcharger WG910	300W	集中巻き 8 コイル	コアレス	単相	コイル両側に 8 極 づ つ	
三洋電機製 自転車用ハブダイナモ	2.4W	集中巻き 1 コイル	コアあり	単相	コイル外側に 32 極	
Aqua U.W.	100W	集中巻き 6 コイル×2 列	コアあり		コイル内側に 6 極	
新日本技研製 1kw 発電機	1000W	集中巻き 9 コイル×2 列	コアあり	3 相	コイル外側に 8 極	スロット・磁極の組み合わせ 鉄心両端部をカット



### 3.3 ラジアルギャップ型コアレス発電機の試作と性能評価

#### 3.3.1 ラジアルギャップ型コアレス発電機

上記分解調査結果を参考に設計製作したのが、図 16 に示すラジアルギャップ型コアレス発電機である。これは Air403 の筐体とプロペラ（3枚）を流用できるように設計されているため、寸法上の制約がある。

限られた外形で最大の周速比が得られるよう、ラジアルギャップ型とした。コギングトルク低減のため、一般的な発電機に見られるコイル内のコアをなくし、比透磁率が 1 と低い空気中でもコイルに十分な磁束を与えられるよう、希土類永久磁石でコアレスコイル両側から挟み込む形とした。

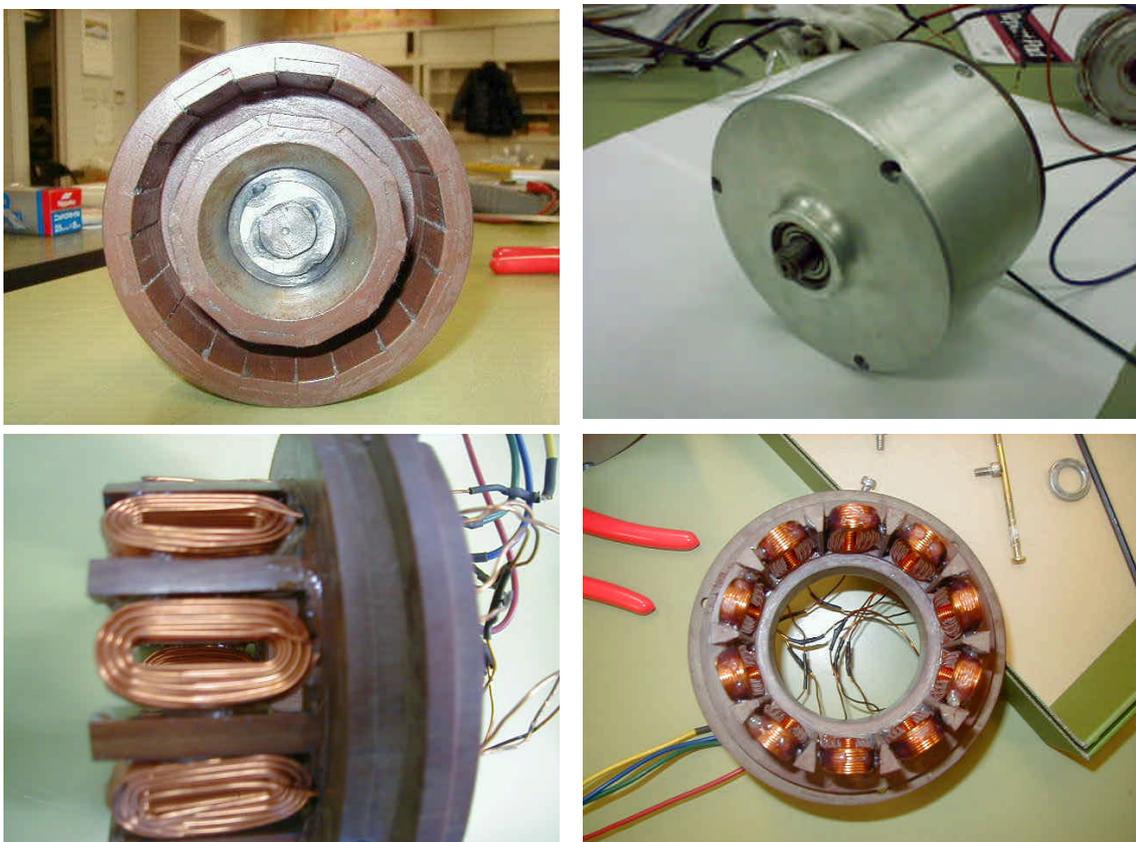


図 16 ラジアルギャップ型コアレス発電機

#### 3.3.2 ラジアルギャップ型コアレス発電機の発電能力試験

性能評価のため、モーターと直結して発電能力の調査を行った、高知高専野村弘教授実施の測定結果を図 17 に示す。

その結果、無負荷の状態において、非常に軽く回転する、すなわち小さなトルクでも

回転することが分かった。

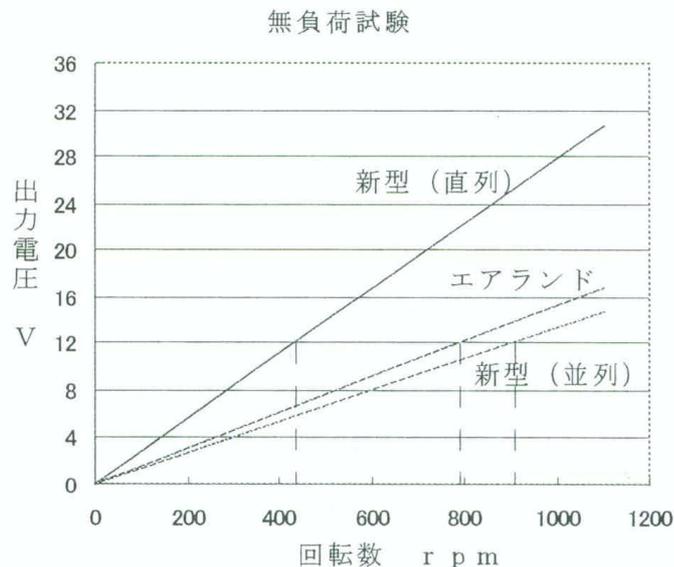


図 17 ラジアルギャップ型コアレス発電機 無負荷試

### 3.4 ラジアルギャップ型コアレス発電機と Air403 の発電能力の比較

ラジアルギャップ型コアレス発電機と Air403 の発電能力を比較するための実験を行った。工場扇と小型の風洞で風洞実験設備を構築し計測を行った。無負荷状態において、Air403 が風速約 4.0 m/s から回転を開始し、風速 5.5 m/s で約 100 rpm に達する。一方、ラジアルギャップ型コアレス発電機は風速 3.0 m/s から回転を開始し、風速 5.5 m/s では約 200 rpm まで回転が上昇する事が分かった。この実験により、コアレス発電機の起動性の良さが証明された。

### 3.5 フィールドテストによる発電能力の調査

上記の Air403 について、伊藤淳氏を初めとするメンバーが、実使用における発電能力の調査のため、フィールドテストを高知工科大学グラウンド横、及び高知県香美郡土佐山田町の北部に位置する甫喜ヶ峰森林公園で実施した。高知工科大学グラウンド横は強い風があまり吹かない場所である。一方、甫喜ヶ峰森林公園は山間部と平野部の境目にあり、山からの吹き降ろしおよび海からの風が強く、年間を通じて常に風が吹く場所である。

山頂部に位置するために周辺に風をさえぎるものが無く、フィールド実験には適した場所といえる。

結果として以下のことが分かった。

- 急な風向きの変化に追従できない
- 風向きが変化して発電機本体の向きが変わった瞬間、プロペラ回転数が急激に低下する。
- 風が止んだ後のプロペラの惰性での回転は、プロペラは回転しているが発電量はほぼ0 Wである。

この実験報告書より、プロペラ型・コアあり発電機である Air403 は、ほとんど発電できなかった。

### 3.6 考察

コイルコアの有無、結線方法、磁石及びコイル配置などに注目すると、コアレスコイル発電機においてはコギングトルク低減を目的とした何らかの対策がなされていること、発生した電力の使用方法はバッテリーへの充電であること、最終的に12V及び24Vでの直流出力にすることなどの共通点が見受けられるものの、統一した設計概念が見受けられず、最適化設計が必要である事が分かった。

分解調査した製品のうち、コアレスコイルタイプの発電機はわずか1機種のみであった。そして、コアありコイル発電機の機種は大きなトルクが得られる場所に設置されるハブダイナモ以外の機種については何らかのコギングトルク対策がなされていた。

Air403は磁石表面の形状を蒲鉾状にする対策方法を採用しており、新日本技研製1kW発電機はヨーク表面の両端カット及び発電機2基をずらして接続し多極化する対策方法を採用していた。これらの対策方法はいずれも磁束の変化を緩やかにする事によって、連続的な回転に必要なトルクのピークを抑える効果が期待できる。一方で、第2章で述べたように誘導起電力は単位時間あたりの磁束の変化量に依存する。そのため、磁束の変化が緩やかになることによる誘導起電力の低下が懸念される。

また、プロペラ型風車は数百回転にまで回転数が上がる場合があるため、これにともなう渦電流による損失（鉄損）また、分布巻きの欠点のひとつである導線が長くなってしまふことによる損失（銅損）についても何らかの対策が必要であると考えられる。

### 3.7 結言

市販小型発電機の分解調査及びフィールドテストを行い、構造的長所や長所及び短所を明確化し評価した結果、次の事が明らかになった。

- 永久磁石を使用している
- 何らかのコギングトルク対策がなされている
- ギアレスのダイレクトドライブである
- DC12V もしくは DC24V での蓄電のため交流出力を直流出力に変換していること
- プロペラ型 + コアあり発電機の組み合わせの場合、風向きや風速の変化が激しい場所に設置した場合、発電能力が十分発揮できない
- コアレス発電機の場合コギングトルクが無いため、コアあり発電機に比べてより低風速からプロペラの回転が開始する
- コアレス発電機の場合、コイル内部が空気のため磁束が通過しにくくなる。

## 第4章 アキシャルギャップ型コアレス発電機の試作と風洞実験及び動磁場解析による発電機能力の検討

### 4.1 緒言

第3章で述べた市販風力発電機の製品分解調査結果を参考にして、新たにラジアルギャップ型コアレス発電機を試作し、発電能力の実測を行った。この発電機はコアレスのため回転開始風速が低くスムーズに回転することが分かったものの、Air403の筐体を流用できるように設計したために外径寸法に制約があり、なおかつ同軸タイプであることからコイル部に費やせる空間が制限されるため、十分な巻き数が確保できないことが判明した。また、構造が複雑になるため製作が煩雑になる。

さらにフィールドテストの結果より、日本の風速や風向の変化が激しいような風境の悪い場所において、プロペラ型風車と組み合わせることは風向きの変化に追従できない、微風では回転しないという結果より最適ではないことが考えた。

そのため、より効率よく発電するため、組み合わせる風車をサボニウス型風車とし、コアレスという独自性はそのままに、これに適合する発電機を新たに設計して製作する。

動磁場解析に基づいて、アキシャルギャップ型の450mmコアレス発電機と250mmコアレス発電機的设计製作を行った。それとあわせて風洞実験を行い発電能力の検討を行う。

### 4.2 アキシャルギャップ型コアレス発電機的设计指針とその構造

第3章でのフィールドテストの結果より、小型風力発電システムにおいて風境が良くない日本にプロペラ型風車は適切であるとはいえない。

低回転で高トルクが得られ、風向きに関係なく回転することが出来るサボニウス型風車に組み合わせることができる、より低風速域での発電効率向上を狙ったコアレス風力発電機の開発を行った。

この発電機の開発における設計指針を示す。

- 周速度を稼ぐため、大外径化する
- コイル数、磁石数をできるだけ多く配置する(図18、図20)
- 構造が比較的簡単な磁石対向型とする(アキシャルギャップ型)
- 強い磁力が得られる希土類永久磁石の使用

- コギングトルクの原因となるコイル内部のコアを無くしたコアレスコイル( 図 19、図 21 ) にする
- 整流時に、比較的平均電圧が高く、効率よく電力が取り出せる磁石:コイル比( 4:3 ) とする

これらの設計指針の下、高知工科大学と坂本技研、MMS、スカイ電子で、450mm と 250mm の2種類の発電機を設計製作した。

いずれの発電機も、コイルを両側から磁石ではさむようなアキシシャルギャップ型とし、希土類永久磁石を用い、コアレスコイルとした。さらに、効率よく電力が取り出せるようコイル磁石比を 3:4 とするために、450mm 発電機では 32 磁石 24 コイル、250mm 発電機では 24 磁石 18 コイルとした。コイル結線は 2 つずつ飛ばし Y 結線で 3 相交流の出力波形となる。なお、450mm 発電機は製作できる最大の外径である。



図 18 450mm 発電機外観と磁石配置



図 19 450mm 発電機コイル部

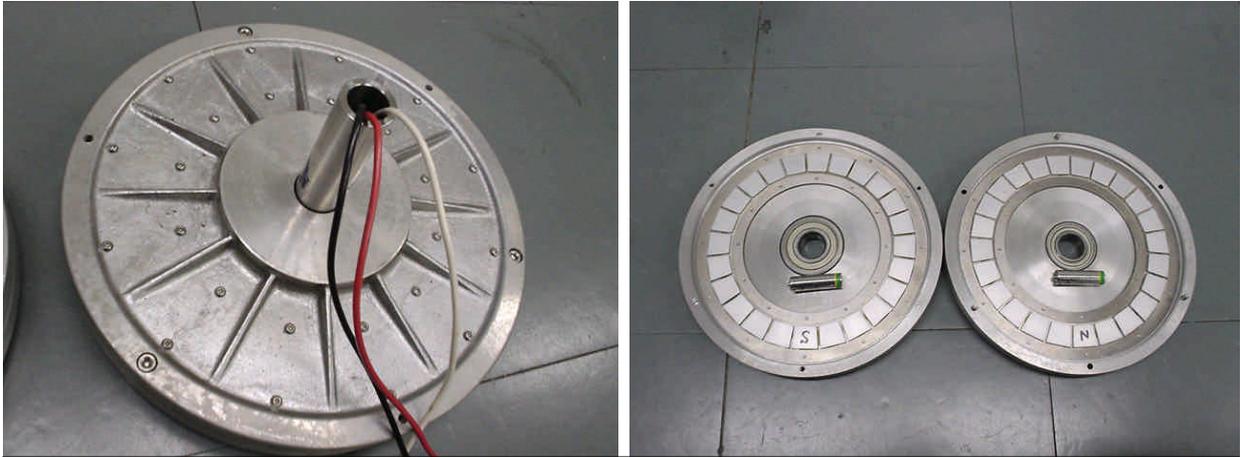


図 20 250mm 発電機外観と磁石配置



図 21 250mm 発電機コイル部

#### 4.3 風洞実験による発電機能力の検討

##### 4.3.1 目的

今回設計製作した発電機について、前田建設工業様所有のジャイロ型風車に、製作した450mm アキシャルギャップ型コアレス発電機を組み合わせた時の発電機の性能を測定する。

#### 4.3.2 実験概要及び測定項目

実験に使用した風洞は、測定洞断面が4.3m×3m、測定洞長さは8mで風速範囲は0.5～8 m/Secである。この風洞の中に、直径1700mm、高さ1700mmで3枚ブレードのジャイロ型風車（図22）を設置した。この風車にプーリーで3種類の増速比が得られるようにした上で、ベルトで発電機を駆動している。

発電機からの3相交流出力は、ダイオードブリッジを通して全波整流されている。電子負荷装置を用い、電圧計、電流計、デジタルワットメータで計測した。（図23）

なお、実験に用いた発電機は先述の450mmの低風速型小型風力発電機である。

測定項目は次の3点である。

- 静特性試験（無負荷時、負荷時）-発電機回転数と発電電圧の関係を調査する
- 起動特性試験（加速性能試験、負荷あり）-発電機に外部抵抗をつないだ状態で、風車の起動性を調査する。
- 起動特性試験（加速性能試験、負荷あり、コイル1組のみ使用）-発電機のコイル1組にのみ外部負荷をつないだ状態で、風車の起動性を調査する。

それぞれの項目について増速比を変えて実験を行った。



図 22 ジャイロ型風車

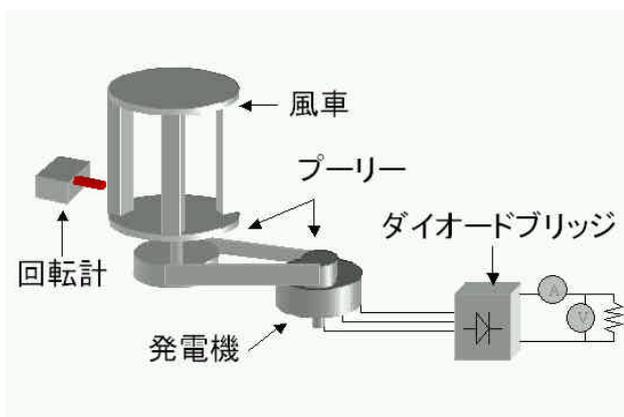


図 23 実験装置

#### 4.3.3 静特性試験

無負荷時における、増速比1.5倍時の発電機回転数-電圧の関係を図24に示す。

さらに、増速比を変更して実験を行ったところ、増速比1.5倍よりも3.0倍の方が高い

電圧が得られる事が分かった。これは、発電機コアレスタイプであるため、さらに無負荷でコイルに電流が流れていない状態のため、コギングトルクがほとんど発生せず、増速比を高くしてもスムーズに回転できる事を表している。

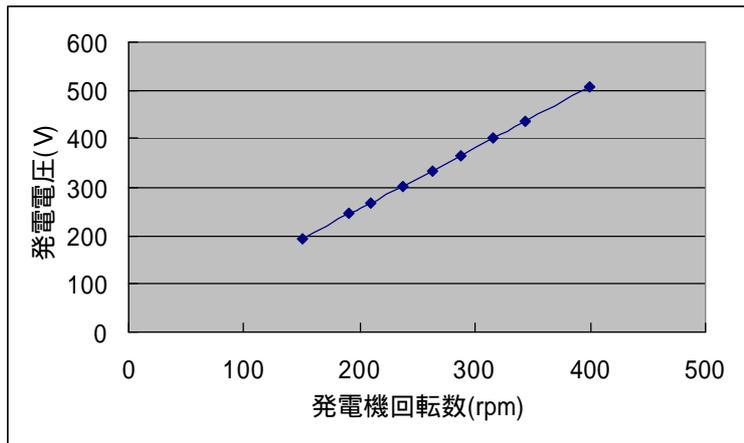


図 24 増速比 1.5 倍時の電圧-発電機回転数の関係

負荷時の電流-電圧及び電流-電力のグラフを図 25、

その時の発電機回転数を図 26、受風から発電機出力までの全効率のグラフを図 27 と図 28 に示す。横軸に電流、縦軸に電圧と電力及び発電機回転数をとっている。

負荷時において、増速比 1.5 倍の時よりも増速比 2.0 倍の時の方が電圧・電力共に高くなっている。また、図 27 と図 28 の効率グラフからも、増速比 1.5 倍の時よりも増速比 2.0 倍の時のほうが高効率であることが分かる。

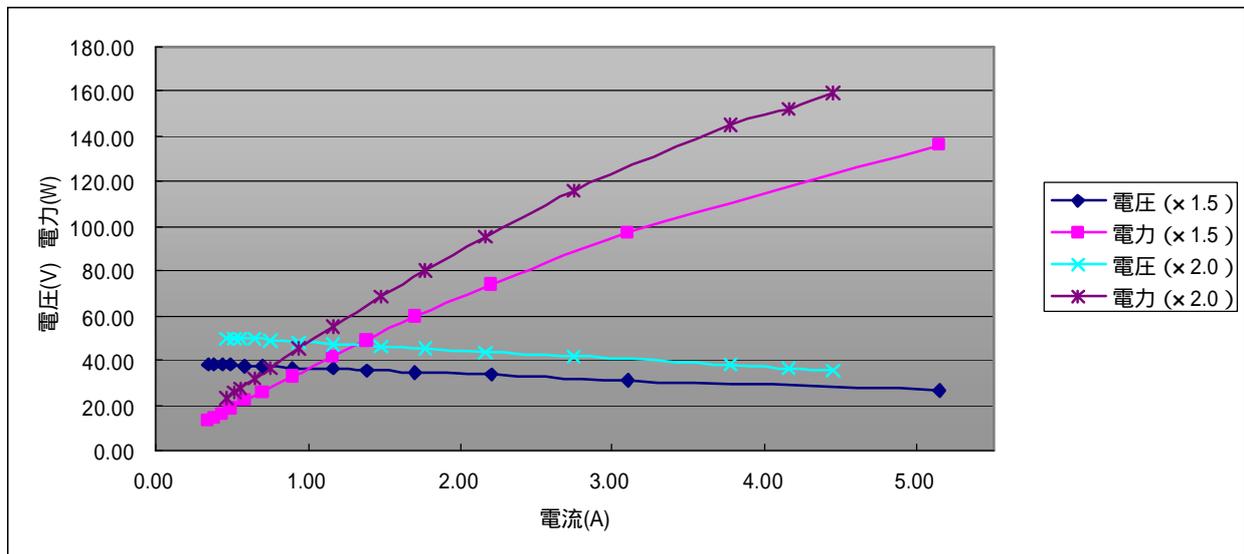


図 25 負荷時の電流-電圧及び電流-電力の関係

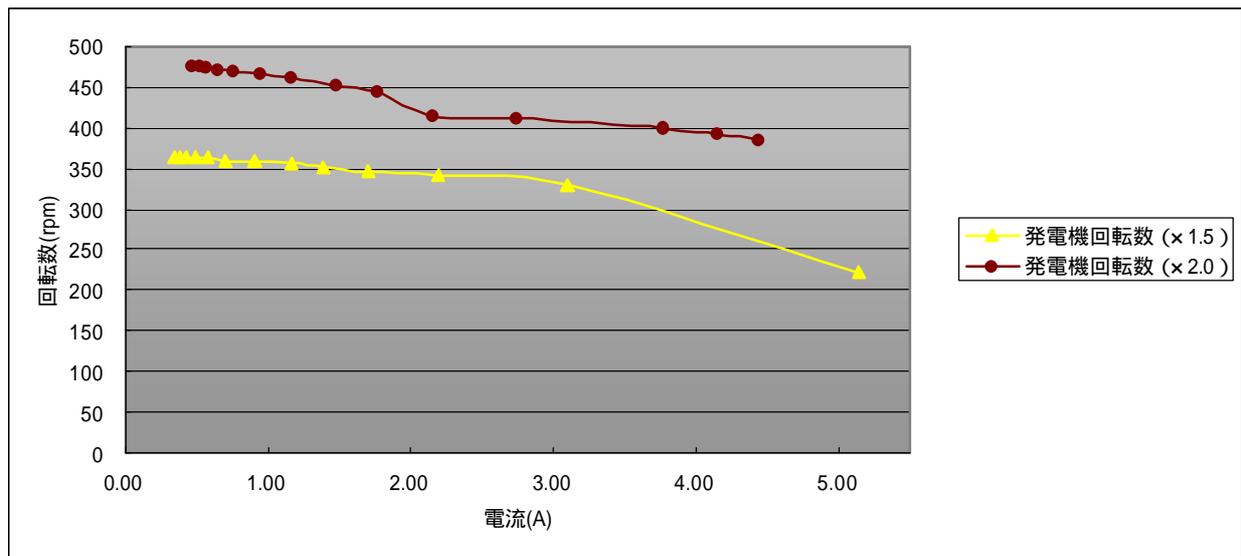


図 26 発電機回転数

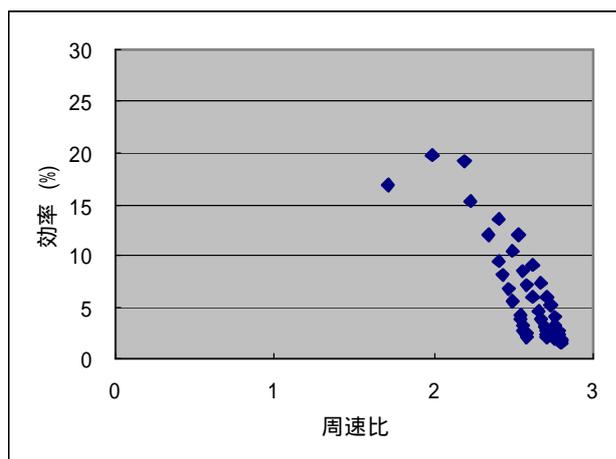


図 27 増速比 1.5 倍時の全効率

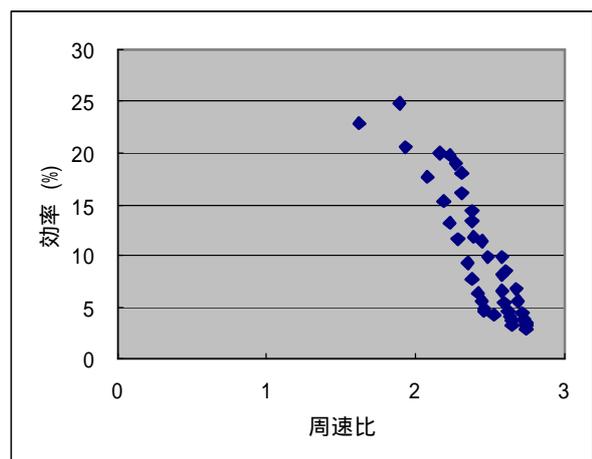


図 28 増速比 2.0 倍時の全効率

4.3.4 負荷時における起動特性（加速性能）の結果（コイル全てを使った場合・コイル 1 組のみを使った場合）

この試験は、加減速を繰り返す実用域での使用を想定して行った。あらかじめ風車を手で止めた状態で風速を設定し、風速が安定した所で手を離すと同時に計測を開始する。また、コイル 3 組全てを結線した状態（3 相）、コイル 1 組のみ使用した状態（単

相) それぞれについて計測した。

グラフは、横軸に時間、縦軸に発電機回転数、電圧、電力をとった。

どの風速、負荷抵抗についても、3組のコイルを全て使うよりも1組のみ使った方が発電機回転数が高く、また起動性が良かった。発電機回転数が高いのは、単純に全コイルの1/3しか使用していないためであるが、立ち上がりの素早さは注目に値する。

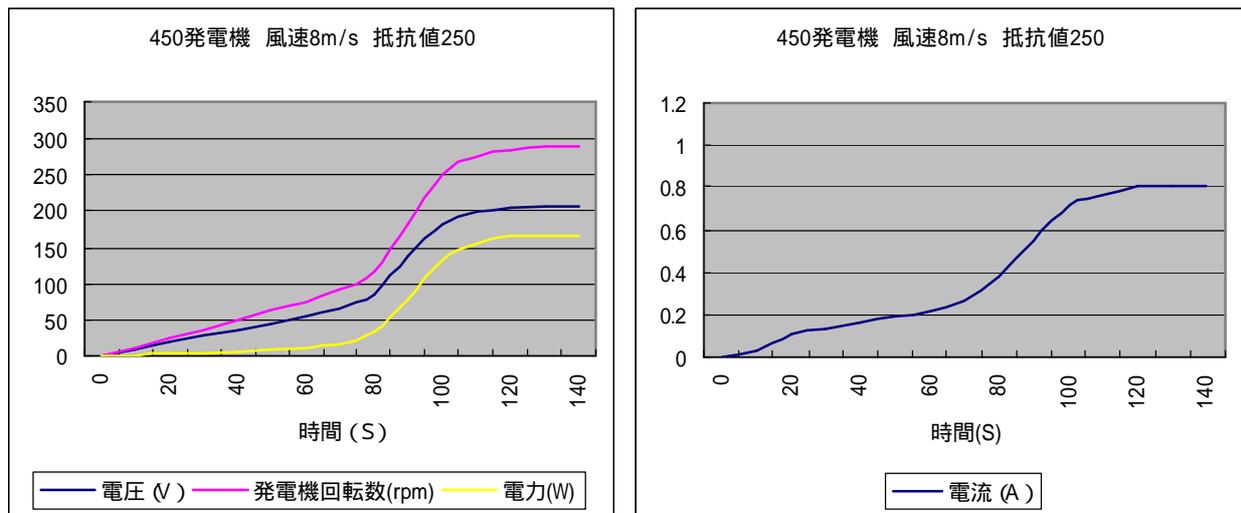


図 29 外部抵抗 250 時の起動特性

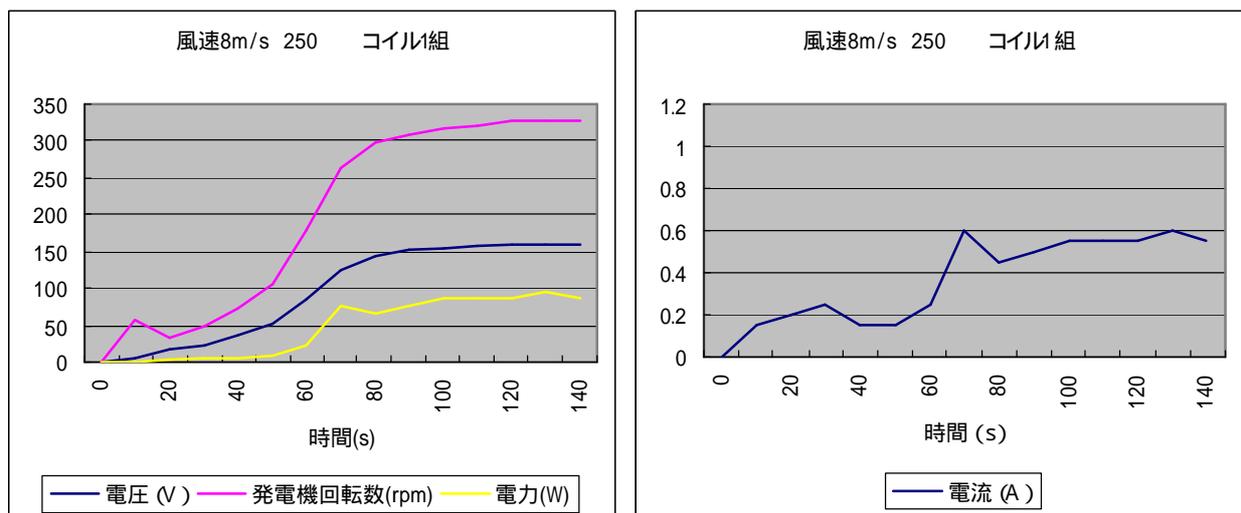


図 30 外部抵抗 250 、コイル 1 組のみ使用時の起動特性

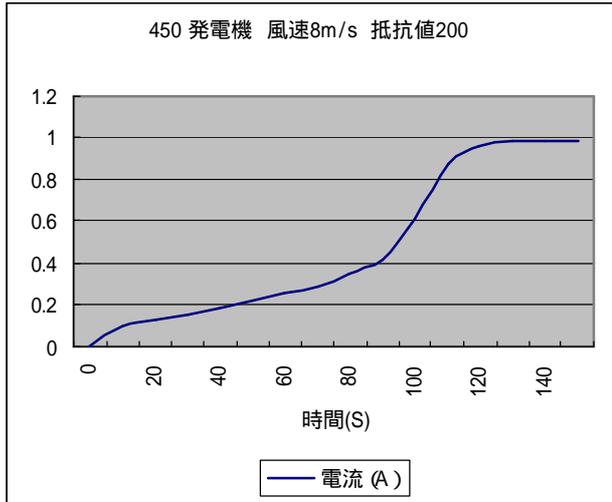
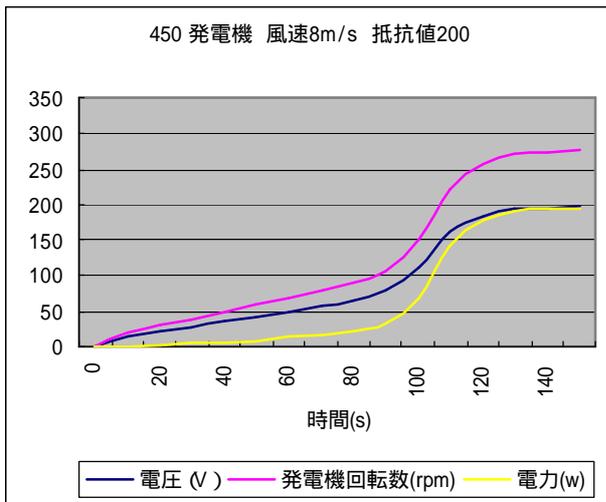


図 31 外部抵抗 200 時の起動特性

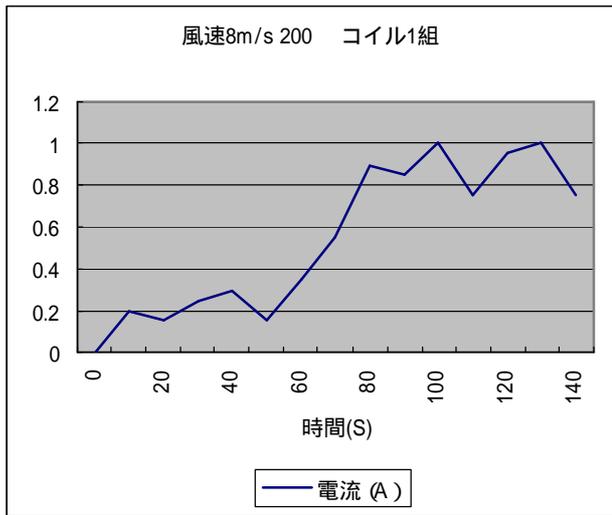
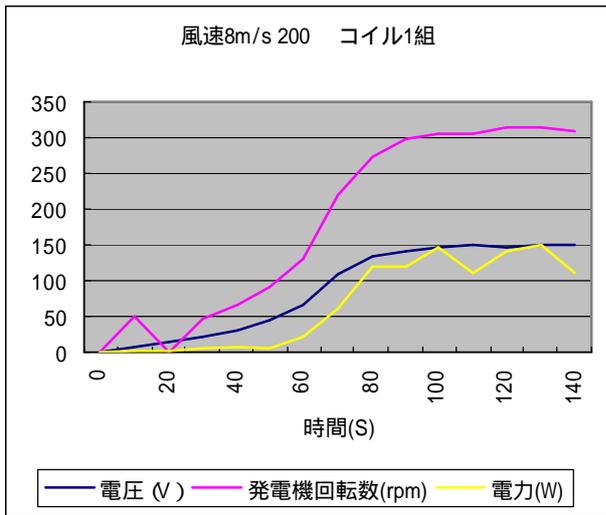


図 32 外部抵抗 200 時の起動特性

#### 4.4 450mm 発電機の動磁場解析を用いた発電機性能調査

##### 4.4.1 解析概要

誘導起電力と発電機回転に必要なトルクを計算し、発電能力の設計を行う。

#### 4.4.2 動磁場解析ソフト ELF/MAGIC と FEMAP について

使用した動磁場解析ソフトは株式会社エルフの ELF/MAGIC である。このソルバーは、従来の積分方程式法の欠点をいくつかの手法を複合化して克服した積分要素法 ( IEM ) を用いている。これは、表面磁化法と磁気モーメント法を連携させた手法である。

また、プリポストプロセッサには FEMAP Ver8.1 を利用した。

使用したパソコンは DELL PRECISION340 で、CPU は Pentium4 2.2GHz、メモリーは 1GB である。本研究で解析を行ったどのモデルについてもノード数約 2000、エレメント数 1500 で計算時間は 5~7 日である。

#### 4.4.3 解析モデルと条件

磁石、コイル、バックヨークのみ 3 次元でモデル化した。また対称性を考慮し、軸方向に対して下半分、かつ 45° のみをモデル化し、それぞれに境界条件を設定した。なお、回転速度は 300rpm である。1 ステップ 1° で 0 ステップから 14 ステップまで計算を行った。

図 33 に 450mm 発電機の内部構造、図 34 に解析モデルを示す。図 33 において、オレンジ色がコイル、黄色が磁石、灰色がバックヨークである。

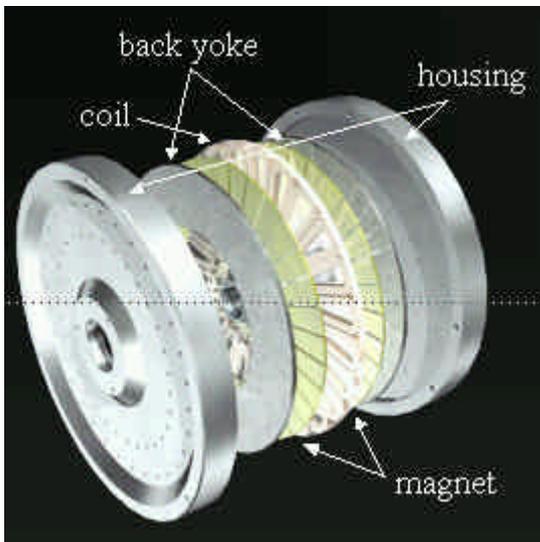


図 33 450mm 発電機内部構造

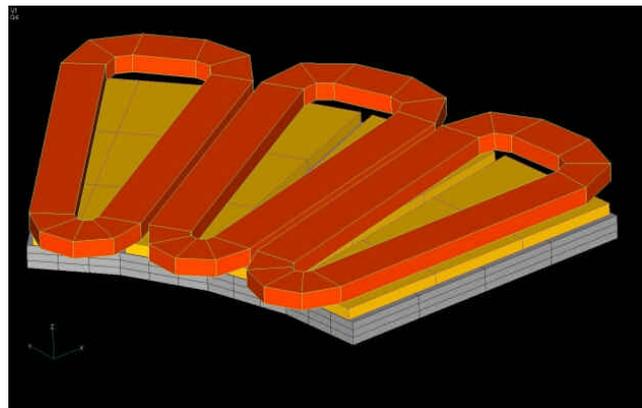


図 34 解析モデル

解析に用いたバックヨークと鉄心に使用した鉄、及び希土類永久磁石 ( NEO MAX 44H ) の材料物性を図 35 及び図 36 に示す。

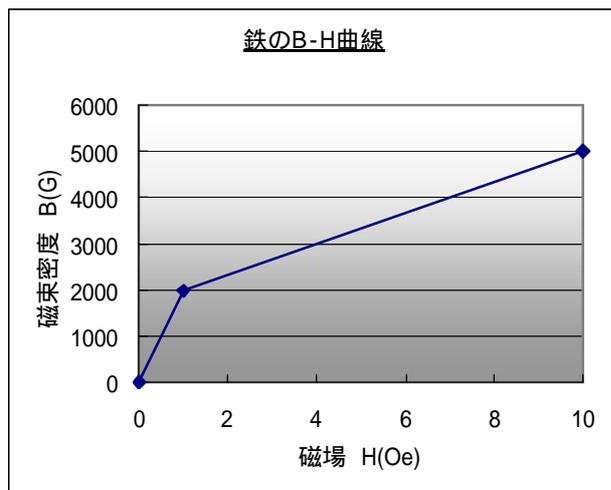


図 35 鉄の B-H 曲線

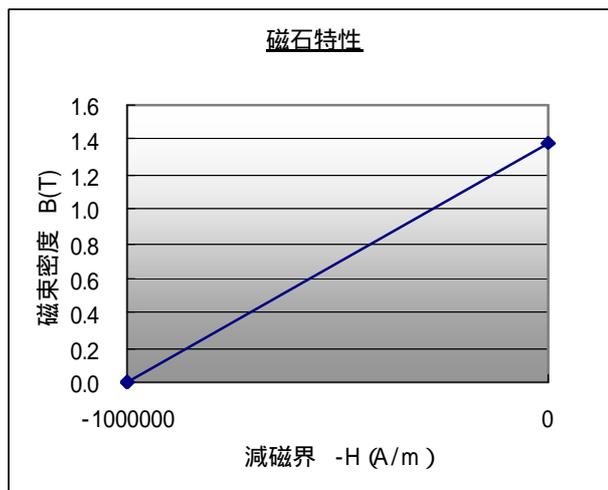


図 36 磁石特性

#### 4.4.4 解析結果

解析によって求めた誘導起電力のグラフを図 31 に示す。450mm 発電機のコイルは Y 結線されているので、U,V,W の線間電圧を引いた値をグラフ化している。

解析結果の様子を図 37 (コンター表示) 及び図 38 (ベクトル表示) に表す。また、得られた 3 相交流の波形を図 39 に、Y 結線時の線間電圧を図 40 に、全波整流した後の波形を図 41 に示す。

図 41 において、このグラフの最大値の平均は約 350V 程度である。なお、無負荷状態での解析のため、回転に必要なトルクはほぼ 0N・m である。

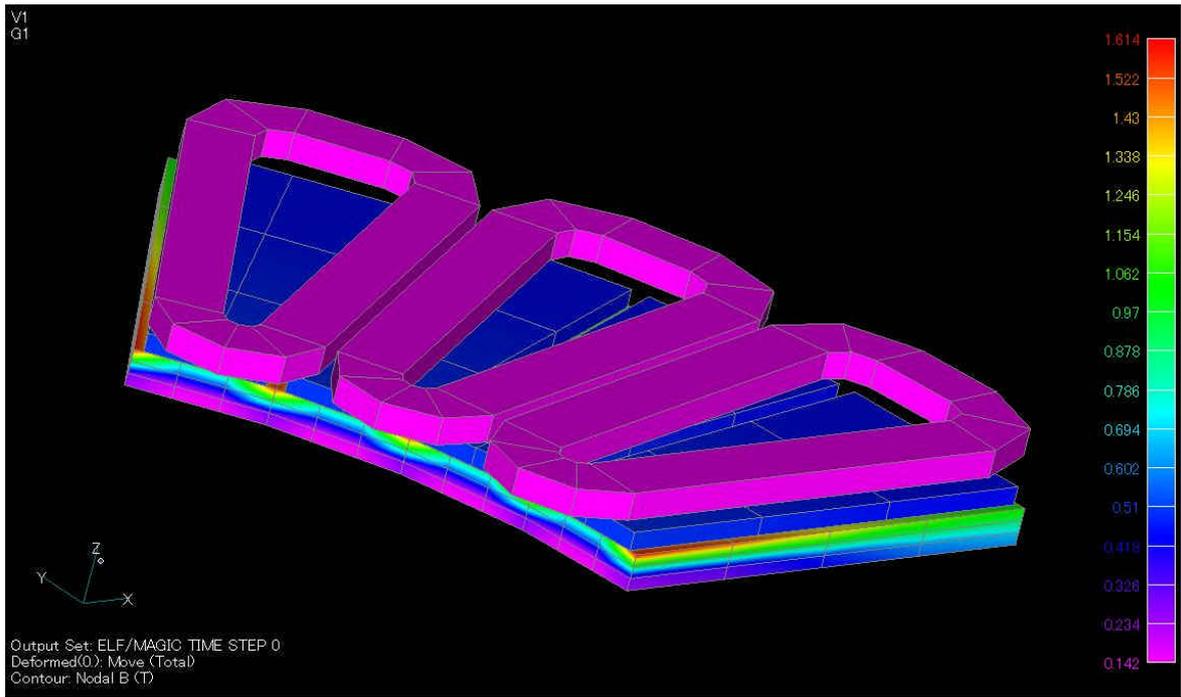


図 37 コンター図

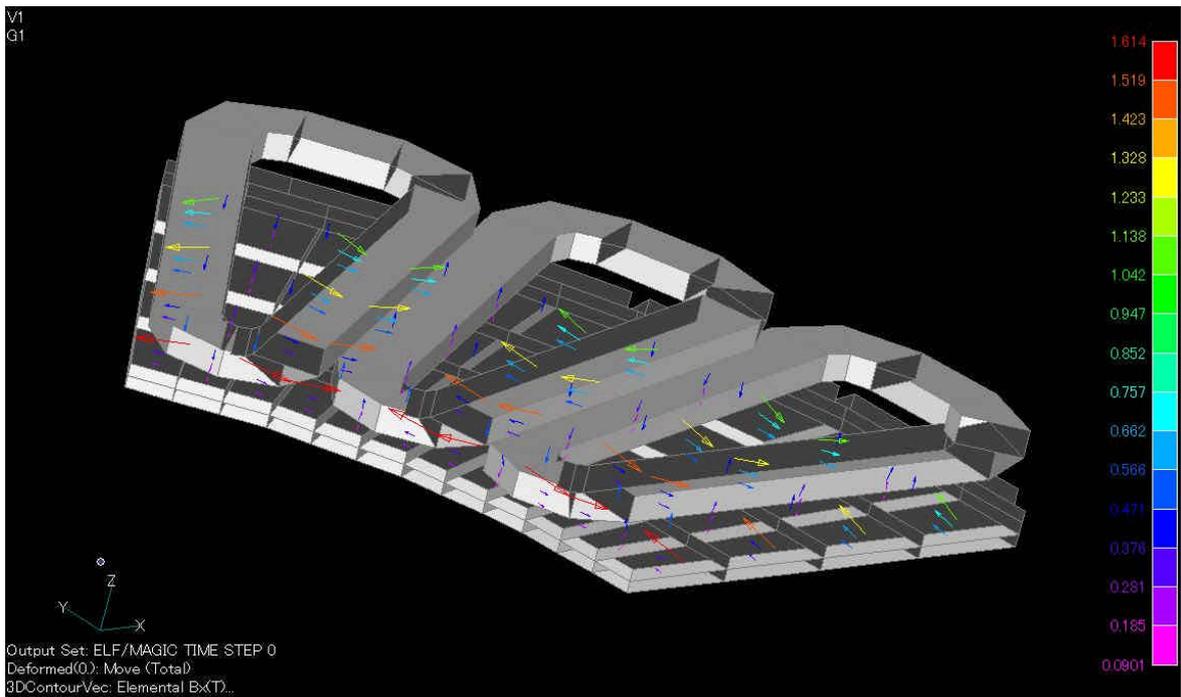


図 38 ベクトル図

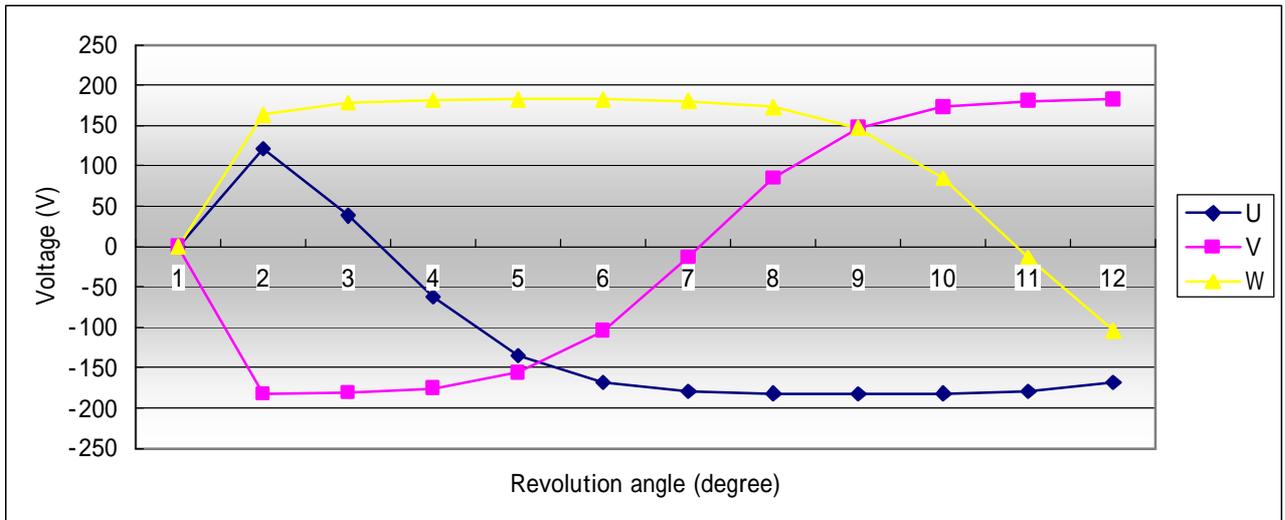


図 39 誘導起電力

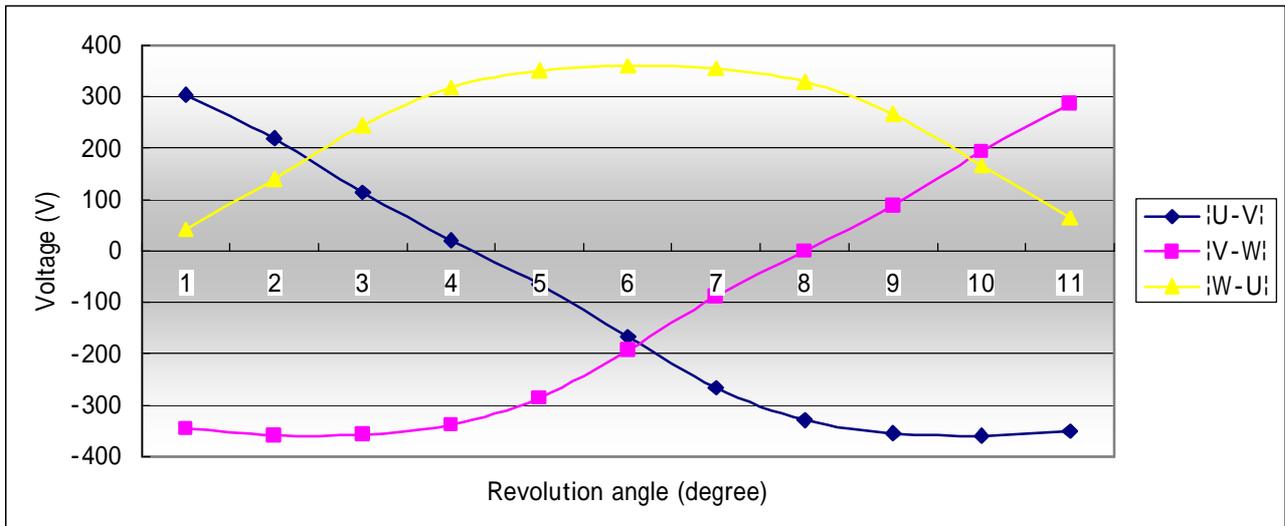


図 40 Y 結線時の線間電圧

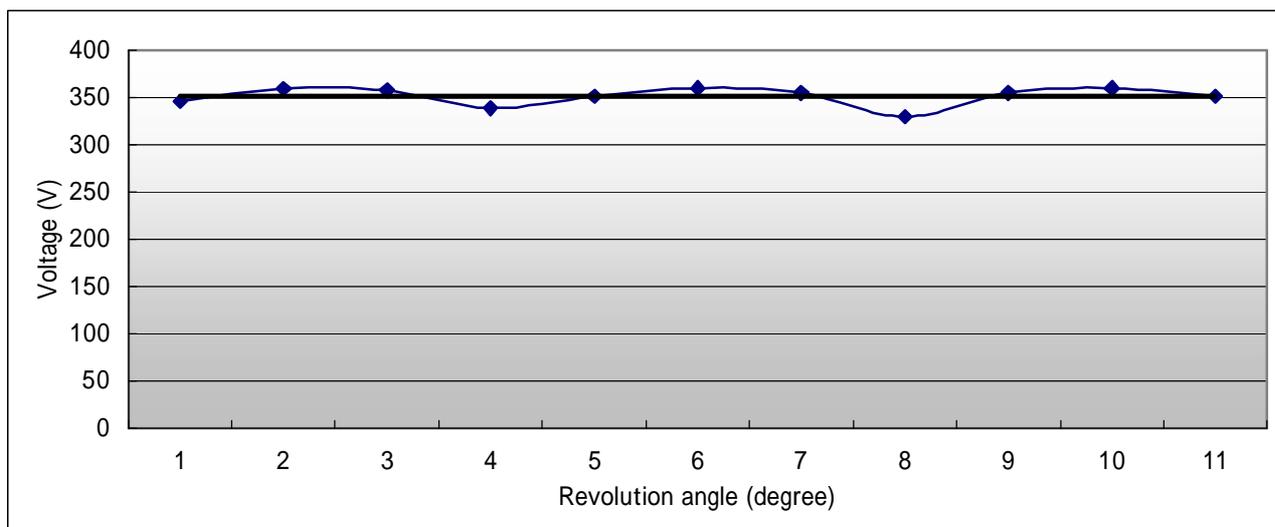


図 41 整流後の電圧（太線は平均値）

300rpm 時で、磁場解析結果では約 350V、一方先述の風洞実験結果では約 380V と、ほぼ同じ値を得る事ができた。したがって、本解析を有効に使う事で最適設計因子を求める事が可能である事が分かった。

#### 4.5 新日本技研製 1kw 発電機の動磁場解析を用いた発電機性能調査

##### 4.5.1 解析概要

コギングトルクの低減を第一に考えるとコアレスタイプが有利である。しかし、動磁場ではなく静磁場における話であるが、発電量に影響を及ぼすコイルを通過する磁束量のみ注目すると、コアタイプのほうが有利であることが今まで行った解析により明らかになった。

この発電機は磁石が 8 極に対し、コイルが 9 極である。この極数の違いが回転する磁石に対して鉄心内でどのような磁場分布になり、磁束はどのように動くのかを調査するため、コイルコア内部の磁束分布の調査を行う。

##### 4.5.2 解析モデルと条件

磁石、コイル、バックヨーク、コイルコアのみ 3 次元でモデル化した。なお、回転速度は 300rpm である。

#### 4.5.3 解析モデルと条件

磁石、コイル、バックヨーク、コイルコアのみモデル化した。なお、回転速度は 300rpm である。

1ステップ5°で0ステップから72ステップまで計算を行った。なお、材料物性は 450mm 発電機と同じ値である。

図 42 に解析モデルを示す。図 42 において、黄色及び緑色が磁石、灰色がバックヨーク、白色がコアである。

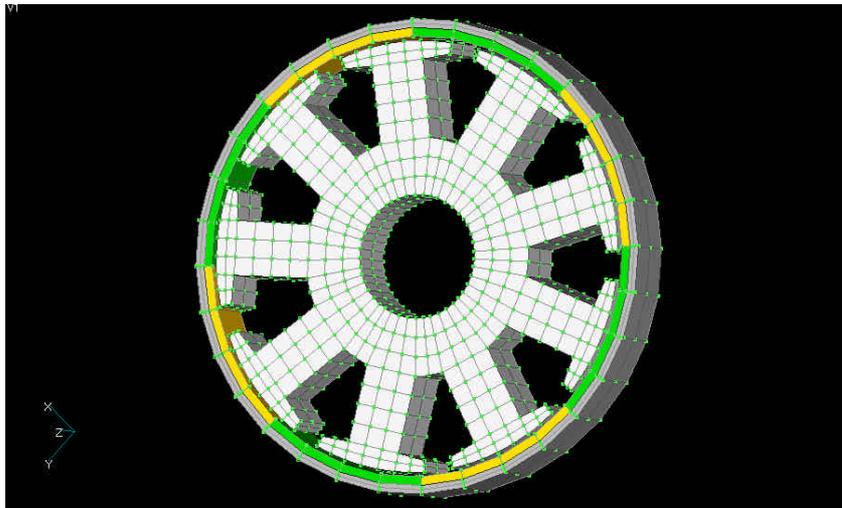


図 42 解析モデル

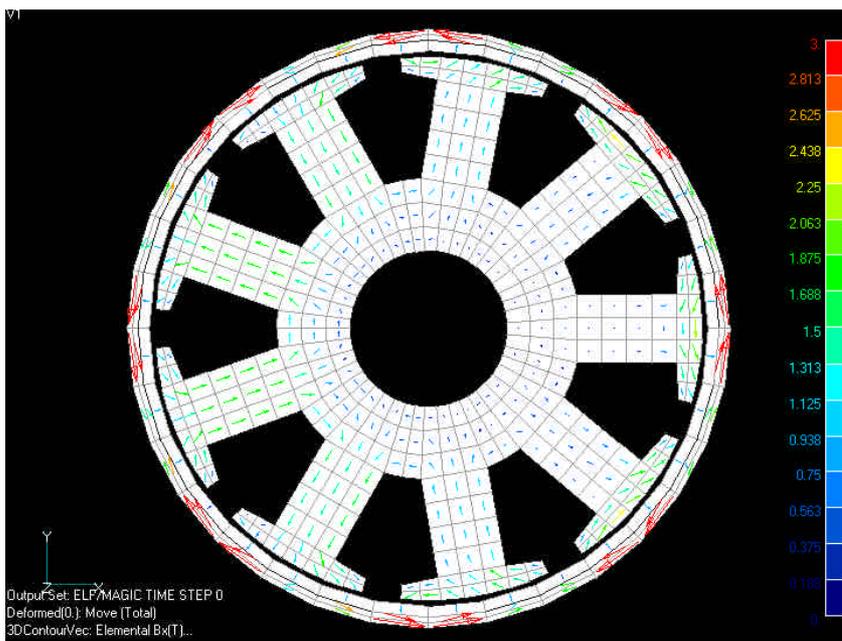


図 43 ベクトル図

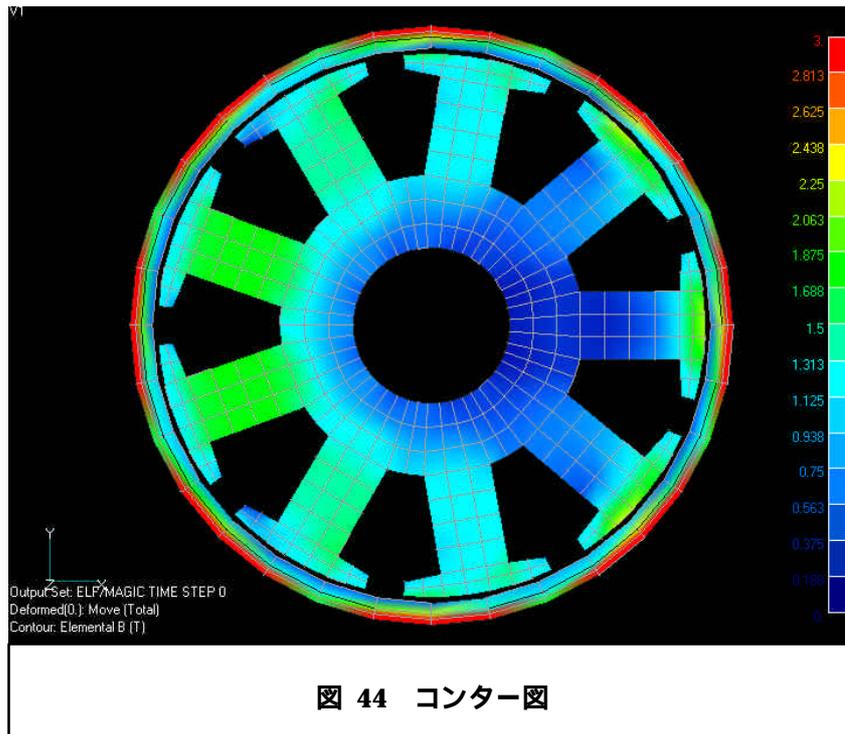


図 44 コンター図

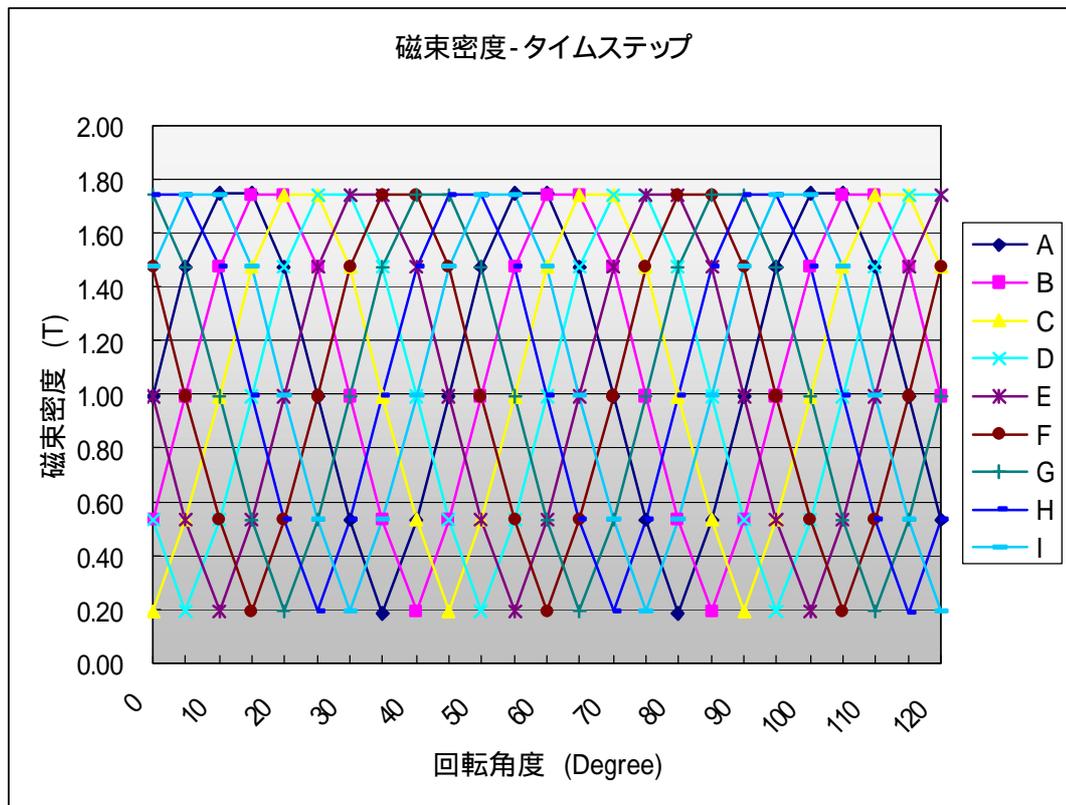


図 45 各ヨークにおける磁束密度の変化

#### 4.5.4 解析結果

磁束のベクトル表示と磁束密度コンターをそれぞれ図 43 及び図 44 に示す。これらはいずれもタイムステップが 0 の時（回転角度が  $0^\circ$  の時）の状態を示している。

さらに、鉄心の中心部分をそれぞれ抜き出し、その点の磁束密度をグラフ化したものが図 45 である。3 時の方向の鉄心から順に、A, B, C... と定義する。

このタイプの発電機は、長いヨークがあるためにコイルの巻き数を多くとることができる。しかし、磁気回路が長く磁束の向きの変化(反転)も激しいため、内部の損失や漏れ磁束による損失があるのではないかと考えられる。

ローターの回転によって、ヨークそれぞれに磁束密度が高い部分と低い部分ができ、その磁束密度の高低が回転しているように見える。磁石が 8 個なので当然ではあるが、ローター 1 回転に対し、鉄心ひとつ当たり 8 回(転)の大きな磁束の変化が見受けられる。

また、どの瞬間においても、3 個 1 セットのコイルに同時に同じ状態の磁束は流れ得ない。つまり、異なるタイミングで電流が流れるコイル同士を結線すると、電圧が他のコイルに逃げるような状態で、電圧が低くなるので結果として発電量が低下しているのではないかと考えられる。図 45 はヨーク A ~ ヨーク I における、各ヨークの中心部分を通過する磁束密度の変化である。実際にどの鉄心についても、同じ状態で変化しているものは無い。すなわち、3 つのコイルを直列接続しても電圧が低い状態である。しかし、微妙にずれているために、ピークの電圧は低いと考えられるが上下動が少ないため、安定した電圧が期待できる。

さらに、この発電機は 2 組で 1 機となっているが、互いに鉄心の位置が微妙にずらして配置されているため、発生する電圧は計算結果より滑らかで、且つ複雑になっていると考えられる。

#### 4.6 考察

ジャイロ型風車と低回転用発電機について検討を行う。高風速では高速回転が可能であるが起動性の良くないジャイロ型風車と低回転用発電機の組み合わせは若干矛盾しているように思われるが、適当な増速比でも回転することができ発電できたのは、先述したコアレスタイプの利点が利いてきたものと思われる。また、他の発電機よりも極数が多いため、増速による機械的損失も少なかったと思われる。

負荷時における起動特性実験（加速性能）の結果（コイル全てを使った場合・コイル 1 組のみを使った場合の実験）より、起動性の良くないジャイロ型風車と組み合わせる場合、揚力によって回転できるようになるまでは、コアレスコイル発電機といえども起動性にや

や難があった。コイル1組（単相）で発電し、回転が十分上昇した後、全コイル接続による発電に切り替える、もしくは全てのコイルから取り出す電力の量をスイッチングなどで最適に制御するなど対策を講ずれば、より高効率な発電システムになると考えられる。

また、増速すると発電量が増えるということは、風車発生トルクが十分生かされていないということを意味する。風車が持っているエネルギーを最大限利用するため、ダイレクトドライブ化し、発電機の回転に必要なトルクの設定値を若干上げる。すなわち、コイル内を通過する磁束量の増加を狙うため、若干コイル内部にコアを配置する。と言う方向性を次章探ることにした。

#### 4.7 結言

このように、今まで分解調査した発電機形式、また動磁場解析を行って検討した発電機形式について、それぞれの特徴もしくは傾向が明らかになった。

これら特徴を上手く組み合わせるために、おのこの設計因子が発電機出力にどのような影響を与えるのかを、次章で引き続き検討する。

## 第5章 動磁場解析による発電性能に及ぼす設計因子の影響

### 5.1 緒言

第4章で取り上げた発電機について、発電機形式によるそれぞれの構造上の特徴もしくは傾向が明らかになった。そこで、実用域（低回転域）での出力のさらなる向上を図るため、設計因子の変更にもなう発電量変化の調査を動磁場解析によって明らかにする。

ここでいう設計因子とは、コアレスコイル内部へ鉄心を配置したとき、及びその大まかな形状を変更したとき、さらに磁石配置や個数などを変更したときなどのことである。これらの設計因子を変化させた際の発電性能の変化を、動磁場解析を用いて検討し最適化設計を行った。

### 5.2 動磁場解析による設計因子が発電性能に及ぼす影響の調査

第4章の解析結果から、コアレス発電機においては非常に軽くスムーズにまわる、すなわち発電機を回転させるのに必要なトルクが少ないのが特徴であり、外径が大きい450mm発電機についてはその能力が測定しきれないほど高い電圧が得られることがわかった。一方で、風洞実験においては、風車の回転を増速機によって数倍に上げると、それに追従するように得られる電力が増加する。言い換えると、風車が持っている出力及びトルクを効率よく発電機が使えておらず、何倍かの適切な増速を行ってトルクと回転数を適合させないといけない、すなわちトルクを下げ回転数を上げる必要があるということである。

また、コイル内部はコアレスのため比透磁率 $\mu_r=1$ の空気であるが、比透磁率 $\mu_r=1000$ の鉄を使用すれば、発電機を回転させるのに必要となるトルクが大きくなるものの、コイル内部を通過する磁束量は大幅に増加するわけである。

そこで、風車の回転を増速することなく風車の持っているトルクを使い切ることが出来るよう、コアレスコイル発電機のコイル内部を通過する磁束量向上を狙い、コイル内部にコアを配置する。一方で、発電機を回転させるのに必要なトルクが小さく、かつ電圧が高くなるようなコア配置及びコア形状を検討する。

### 5.3 ラジアルギャップ型コアあり発電機の動磁場解析による発電性能に及ぼす設計因子の影響

#### 5.3.1 解析概要

第4章での磁場解析と同一のモデルに対し、コイル内部に3パターンの形状、さらにそれぞれの形状に対して軸方向の厚みを3パターン、合計9つのモデルの解析を行った。

この解析により、コイルコア形状および厚みに対して発電電圧や回転に必要なトルクにどのような変化が生じるのかを検討する。

#### 5.3.2 解析モデルと条件

磁石、コイル、コイルコア、バックヨークのみ3次元でモデル化した。また対称性を考慮し、軸方向に対して下半分、かつ45°のみをモデル化し、それぞれに境界条件を設定した。なお、回転速度は300rpmである。1ステップ1°で0ステップから14ステップまで計算を行った。

図46に解析モデルを示す。コイル内部のコア形状により、A、B、Cの3パターンのモデルを作成した。

ヨークは、Aはコイル長手方向の内側近傍両側に細く、Bはコイル内部にできるだけ大きく配置した。また、Cはコイル内部中央部に細いヨークを配置した。

さらにそれぞれについて厚みをコイル断面中心より $d=1.5\text{mm}$ 、 $3.0\text{mm}$ 、 $4.5\text{mm}$ の3パターンを作成した。なお、対称性を考慮してZ軸方向にも1/2にしているため、実際のコアの厚みは $2d$ であり、 $3.0\text{mm}$ 、 $6.0\text{mm}$ 、 $8.0\text{mm}$ となる。

図45において、オレンジ色がコイル、黄色が磁石、白色がコイルコア、灰色がバックヨークである。

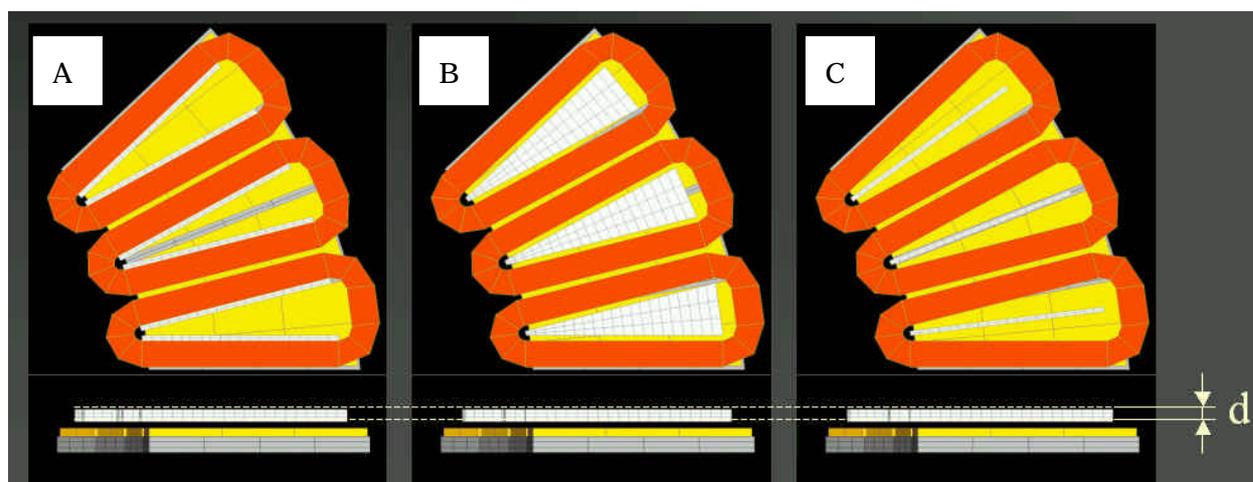


図 46 解析モデル

### 5.3.3 解析結果

求まった誘導起電力の線間電圧を引き、全波整流した後最大値を取ったグラフを、Aタイプは図 47 に、Bタイプは図 48 に、Cタイプは図 49 に示す。また、発電機を回転させるのに必要なトルクのグラフを、Aタイプは図 50 に、Bタイプは図 51 に、Cタイプは図 52 に示す。

また、ヨークの厚みに対する整流後平均電圧の関係及び回転に必要な最大トルクの関係を図 53 と図 54 に、コアタイプ別による整流後平均電圧の関係及び回転に必要な最大トルクの関係を図 55 と図 56 に示す。

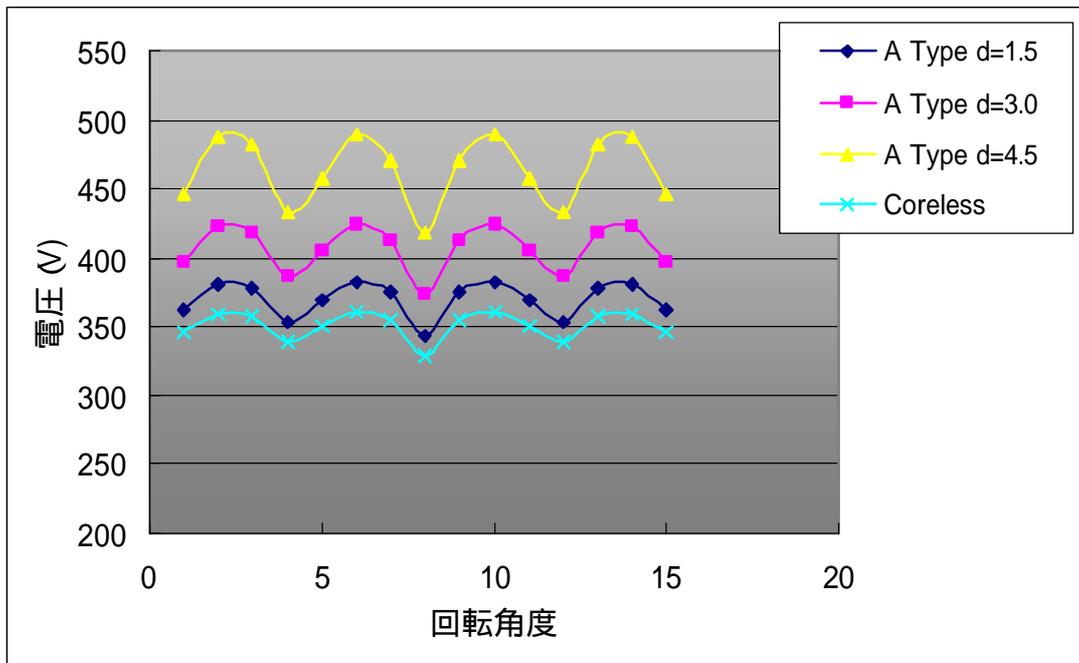


図 47 整流後の電圧 (Aタイプ)

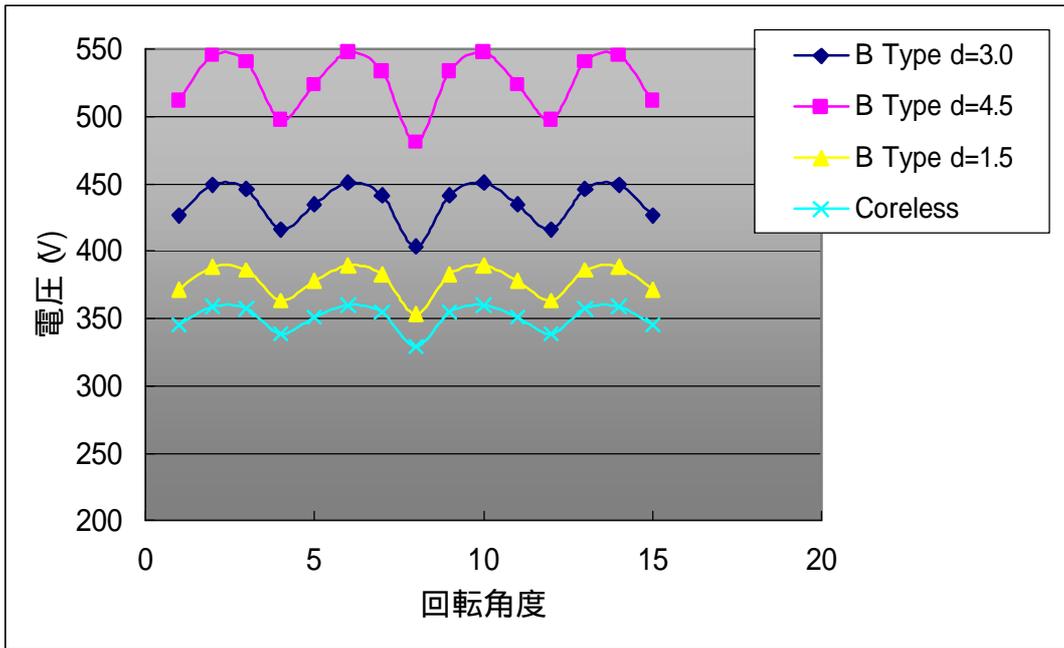


図 48 整流後の電圧 (B タイプ)

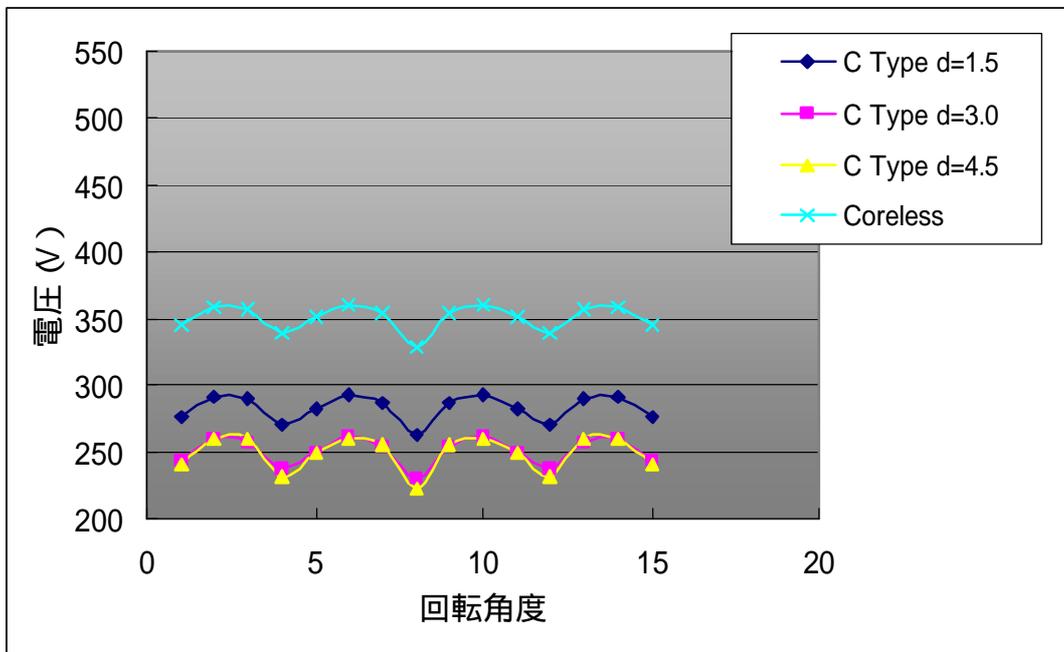


図 49 整流後の電圧 (C タイプ)

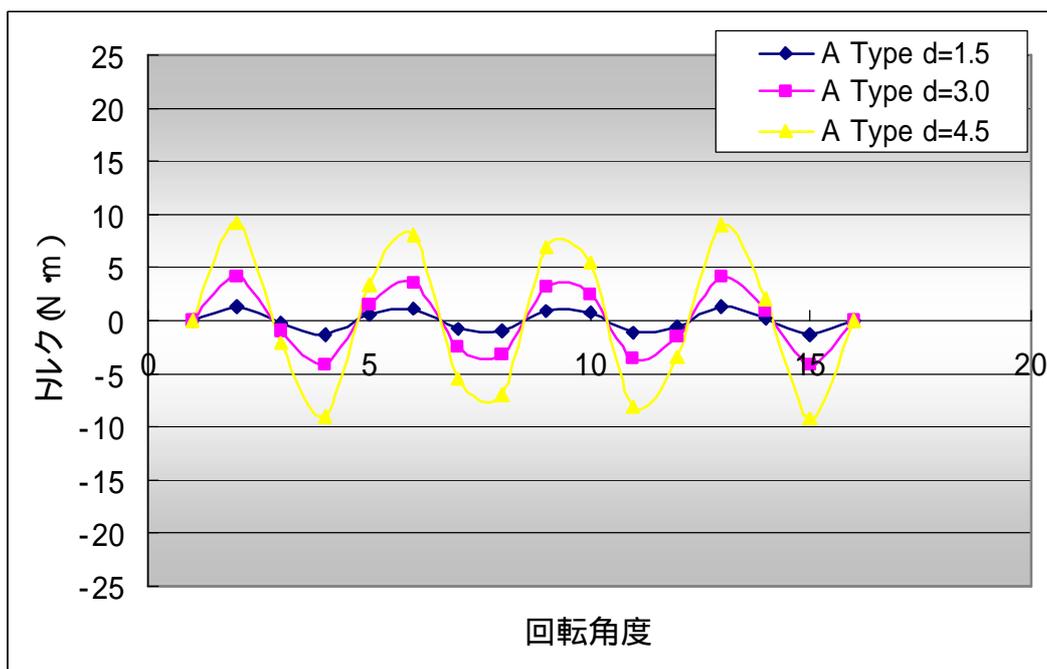


図 50 回転に必要なトルク (A タイプ)

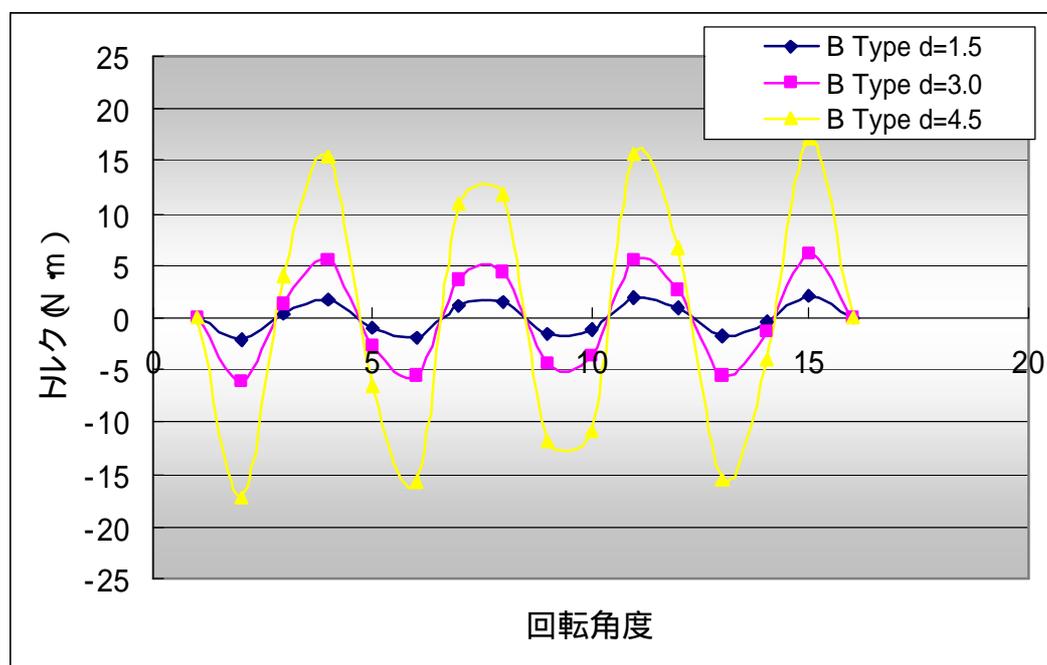


図 51 回転に必要なトルク (B タイプ)

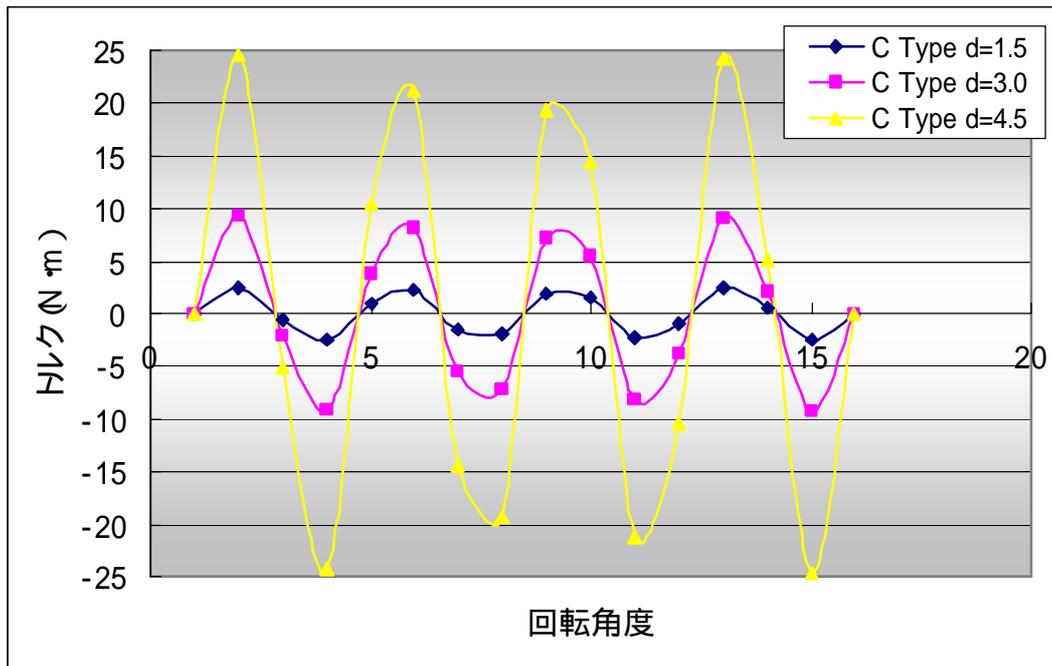


図 52 回転に必要なトルク (C タイプ)

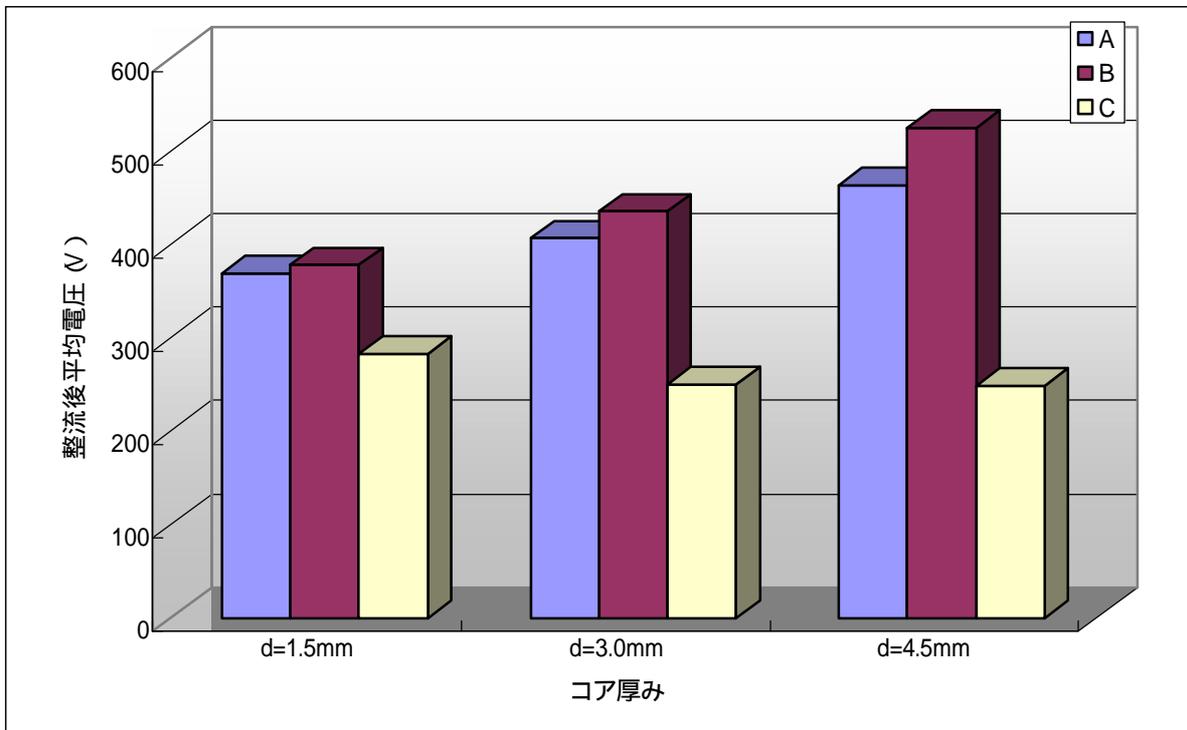


図 53 ヨーク厚みに対する整流後平均電圧の関係

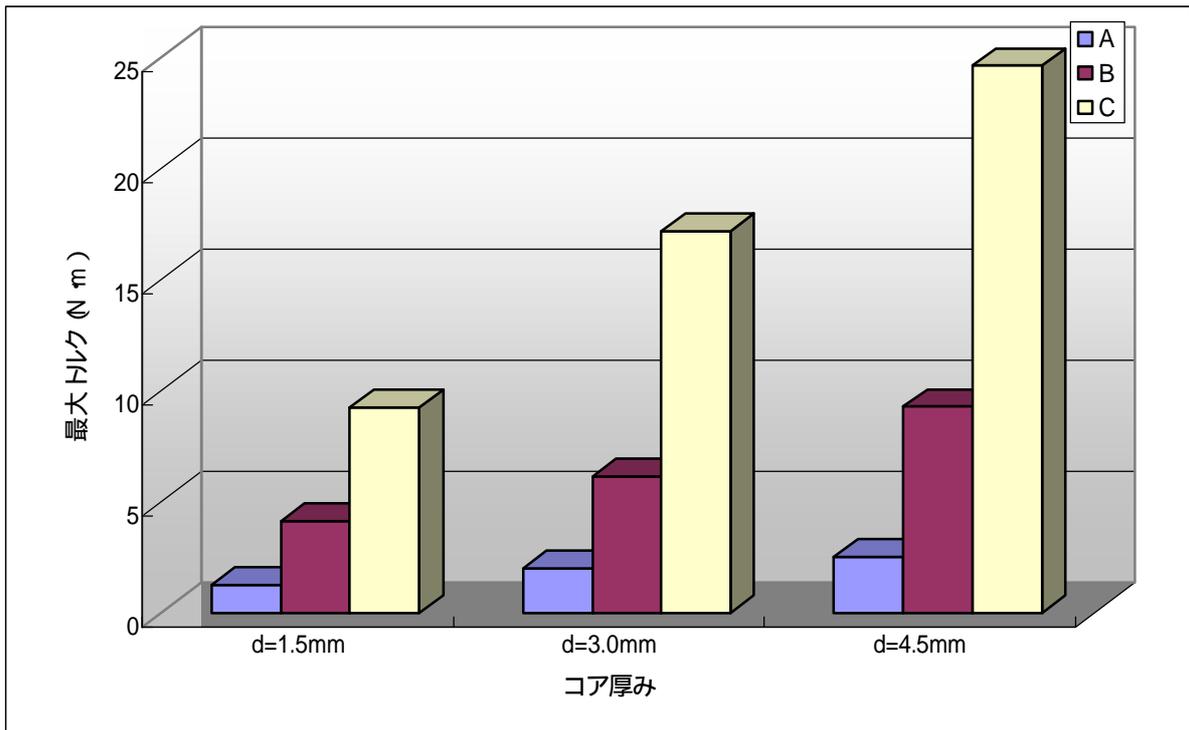


図 54 ヨーク厚みに対する最大トルクの関係

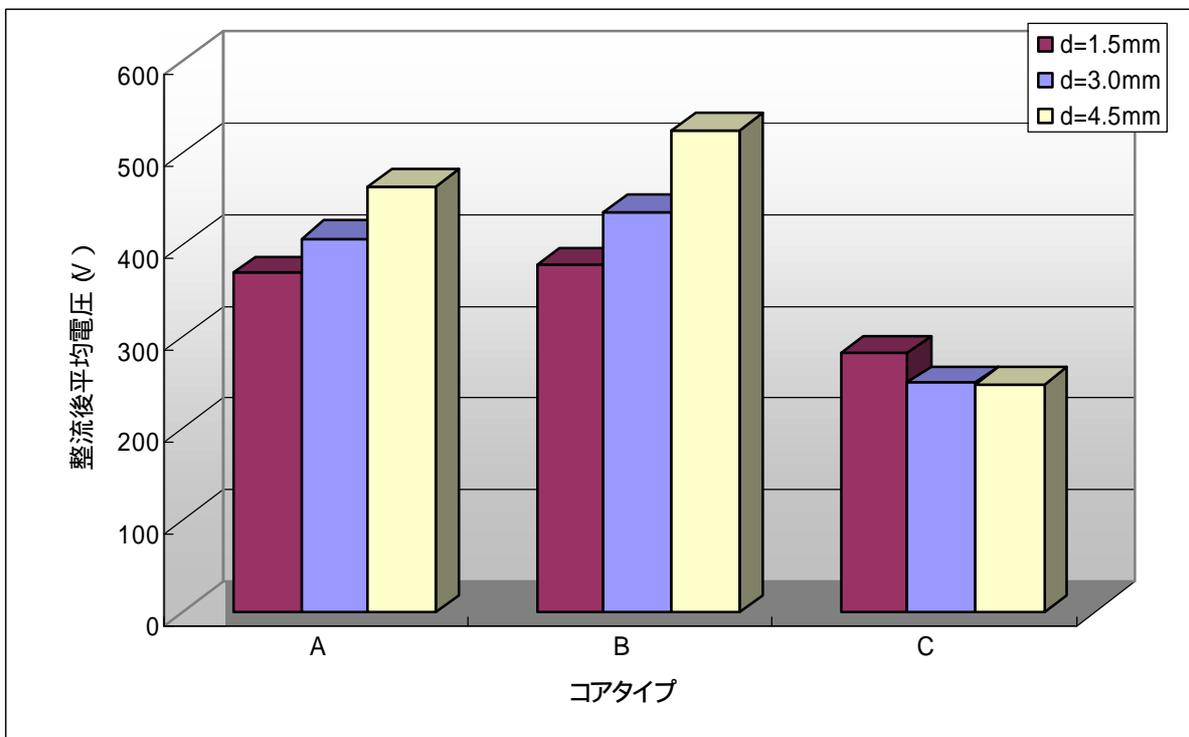


図 55 コアタイプ別による整流後平均電圧の関係

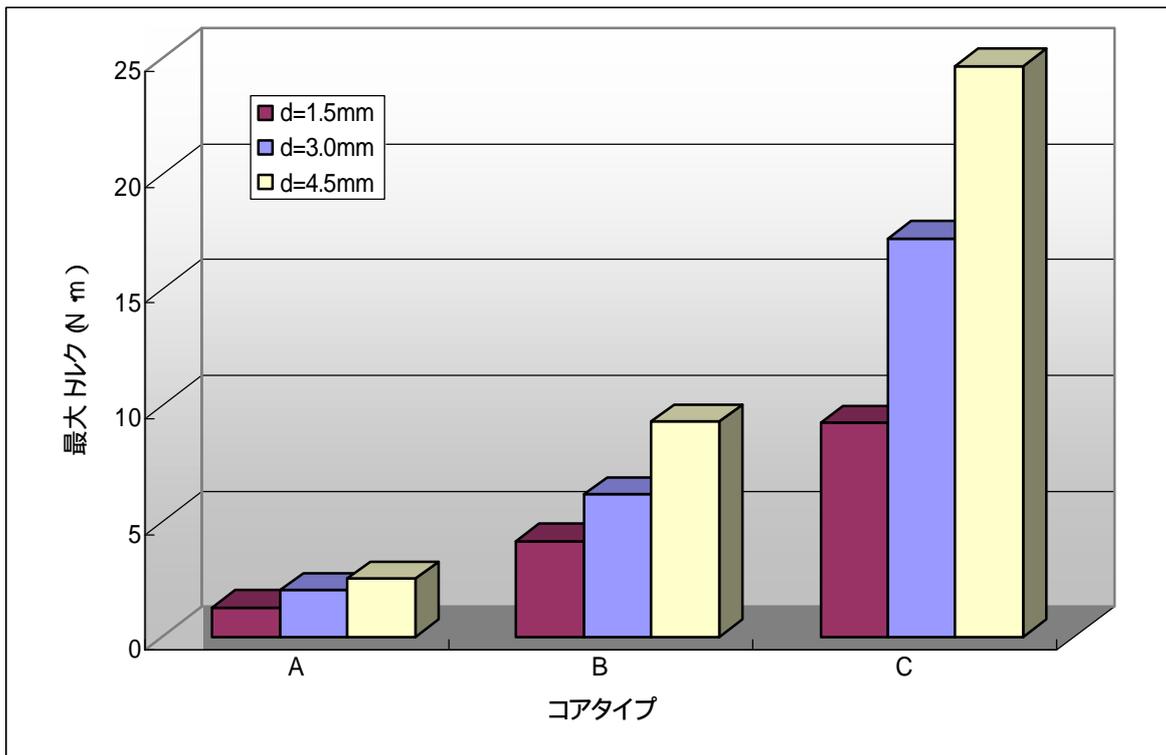


図 56 コアタイプ別による最大トルクの関係

#### 5.4 考察

図 54 及び図 56 から、A、B、C のいずれのモデルについてもヨーク厚みの増加に対して、回転に必要なトルクの増加割合が著しいことが読み取れる。また、回転に必要なトルクの大きさと電圧の高さには関係が無いことが分かる。

さらに回転に必要なトルクについて、磁石に向かい合う表面積に比例するというわけではないことが分かった。コイル内部一杯にコアを入れた B よりも、コアをコイル中心に少しだけ入れたものの方が回転に必要なトルクが大きくなる現象が認められる。(図 54)

恐らく、磁石表面から出た磁束が、B についてはコア面積が広く磁束が分散するため、磁束密度が低くなる。

一方、C についてはコア面積が狭いために磁束がコアに集中し、かつコアの幅が狭いために磁石の回転にともなう磁束変化が激しく渦電流が発生するため、発生した電圧が低くなり、また回転に必要なトルクも増加したものと考えられる。

B タイプで d=3.0 の時、コア中央部の磁束密度は最高 0.9T 程度であったのに対し、C タイプで d=3.0 の時には、コア中央部での磁束密度は 2.1T 程度もあったことから、磁束

の集中とその向きの著しい変化に起因すると考えられる。この現象は引き続き検証を行う必要がある。

## 5.5 結言

回転に必要なトルクは厚み以外にも形状によっても左右される。しかし、磁石に向かい合う面積に比例するというわけではない事が分かった。コイル内部一杯にコアを入れたBよりも、コアをコイル中心に少しだけ入れたものの方が電圧が低く、かつ回転に必要なトルクが大きくなってしまいう現象が認められる。

また、回転に必要なトルクと発電電圧には直接的な関係が無いことから、今回のコア形状以外にもモデル化を行って解析し、最適設計を進める余地がある。

## 第6章 結論

本研究では、低回転から効率よく発電できる発電機の効率向上について述べてきた。

また、動磁場解析を用いて、作成した発電機を解析し、問題点を明確化した上で最適設計を行い、サボニウス風車とコアレスコイル発電を組み合わせた小型風力発電システムが完成した。

さらなる効率向上のため、最適設計のひとつの方向性としてコアレスコイル内部にコアを配置し検討した。

本論文で得られた結論は次のとおりである。

- 市販風力発電機の製品分解調査結果より、小型風力発電機用発電機においては統一した設計概念が見受けられなかった。
- 発電機に多く用いられているコアあり発電機は、何らかのコギングトルク対策がなされている。
- 風洞実験の結果より、低回転用コアレス発電機はコギングトルクがほとんど無いため、揚力型の高速回転型風車にも適用できる事が分かった。
- 低回転用コアレス発電機は、回転に必要なトルクが小さくてもよいため、増速比を大きく取れることが分かった。
- 低回転用コアレス発電機は、回転に必要なトルクが小さくてもよいため、風車のトルクを適切な増速比で加減をすると、さらなる発電能力の向上が見込める。
- 増速が不足していると風車からのトルクが無駄になってしまうため、コイル内部にいく通りかのコアを配置すると回転に必要なトルクは増加してしまうが、発電電圧は上昇する。
- コイル内部にコアを配置した場合、磁石表面に面するコア面積と発電電圧の間には直接的な関係は無く、最適なコア配置の検討が必要である。

## 謝辞

本研究を行うにあたって、ご指導頂きました高知工科大学基盤工学専攻知能機械システムコースの坂本東男教授に深く感謝いたします。

また、共同で研究してくださいました、(有)坂本技研の坂本正興社長、各種計測データをご提供頂きました高知工業高等専門学校の野村弘教授、風洞実験設備を貸して頂き共同で実験させて頂きました前田建設工業株式会社の丸山勇祐様、動磁場解析で度々ご相談させて頂きました株式会社エルフの朝井敏文様、共同研究者の方々、研究室風力発電プロジェクトの澤田達郎氏、汀祥子氏をはじめ、他多数の方々に深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 牛山泉、三野正洋 “ 小型風車ハンドブック ” パワー社
- [2] 伊藤淳 “ 発電機（プロペラ）における風力・回転数の関係 ”
- [3] 坂本東男 “ ローカルクリーンエネルギーの研究実験 ”
- [4] 野村弘 “ コアレス発電機の特性試験 ”
- [5] 大西和夫 “ 永久磁石ブラシレスモータのコギングトルク低減 ”、電気学会学会論文集 D 122 巻 4 号、平成 14 年
- [6] E.Muljadi, J.Green : COGGING TORQUE REDUCTION IN A PERMANENT MAGNET WIND TURBINE GENERATOR
- [7] A.KEYHANI, C.B.STUDER, T.SEBASTIAN, S.K.MURTHY “ Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines ”
- [8] 村上浩、本田幸夫、森本茂雄、武田洋次 “ 永久磁石補助型シンクロナスリラクタンスモータ ”、電気学会学会論文集 D 122 巻 3 号、平成 14 年
- [9] 星野昭広、磯部真一、森本雅之、真田雅之、武田洋次、松井信行 “ コアレス巻き線アキシヤルギャップ型発電機の損失分析と高効率化 ” 電気学会学会論文集 D 121 巻 9 号、平成 13 年
- [10] 須田章博、川島修二、長瀬好彦、野本哲男 “ 集中巻 DC モータ搭載冷蔵庫用レシプロ型コンプレッサ ”