

知能機械システム工学科 卒業論文

小型風力発電機的设计と磁場解析

1020153 汀 祥子

目次

第 1 章	緒言	2
	1.1 風力発電機の現状	
	1.2 本研究の目的	
第 2 章	3D-CAD ソフト	5
	2.1 Solid Edge	
	2.2 Solid Designer	
第 3 章	小型風力発電機の設計と磁場解析	8
	3.1 450mm 発電機の設計	
	3.2 250mm 発電機の設計	
	3.3 磁場解析	
	3.3.1 解析目的	
	3.3.2 解析条件	
	3.3.3 物性条件	
	3.3.4 結果及び考察	
第 4 章	小型風力発電機の製作	14
	4.1 モニュメントタイプ風力発電システム	
	4.2 自然エネルギー自立電源街路灯	
第 5 章	終章	16
	5.1 結言	
	5.2 今後の課題	
	謝辞	17
	参考文献	
	付録	18

第1章 緒言

1.1 風力発電機の現状

現在、日本の発電電力量（一般電気事業用）は原子力、天然ガス、石油によってまかなわれている。また、資源に限りのある多くの化石燃料も年々、減少の一方で問題の一つとなっている。

もう一つの地球に関する問題として、環境問題が多く取り上げられる近年、石油を使用せず、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーは、多くの注目を浴びている。グラフ1.1は1960年と2010年の電力量の構成比を比較したもので、1996年では0.1%しかなかった新エネルギーの構成比が2010年には全体の1%にまでなる予定である。新エネルギーの一つに風力発電機がある。風力発電の場合、資源が広範囲にあり、無尽蔵な純国産のエネルギーを作り出すことができる。そして、風の力を利用するので環境問題にかかわってくる二酸化炭素などの有害物質を排出しない。

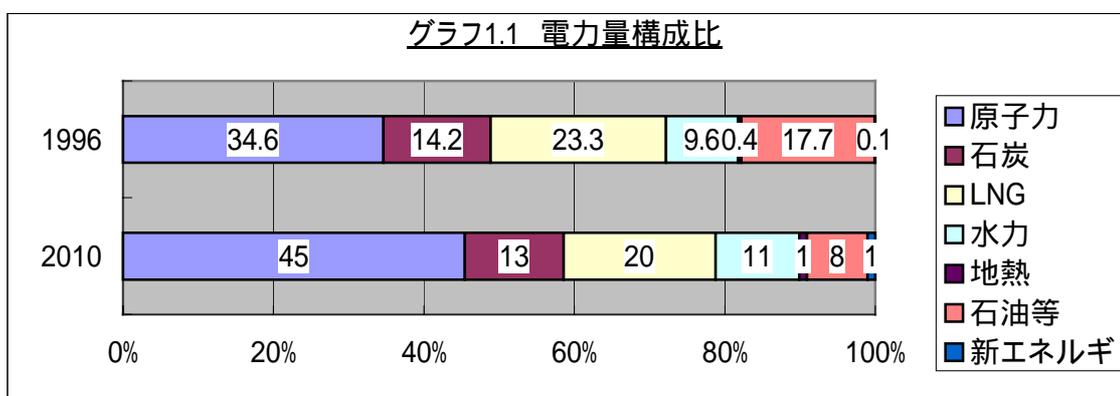


表 1.1 Wind Power Generators Sold in Japan

日本では通商産業省が 1976 年以降のサンシャイン計画において風力発電システムの技術開発を進めてきた。高知県の風力発電の設置容量は 2001 年では 3,450 kW であった。日本の風力発電の設置容量は 2003 年には約 560 MW、が予想されている。現在、日本で多く普及しているものは大型の風力発電機である。表 1.1 は日本で販売されている小型発電機の価格と発電量の表である。値段を見ると、アメリカやドイツに比べ日本の発電機の値段は高いものが多い。日本の発電機の多くは、おもに山岳や海岸沿いの風況の良い所に設置されている。しかし、日本で風力発電を効率よく行うには下記に述べるようにいくつかの問題点がある。

Generator	Price (\$)	Power W at (m/s)	Weight (kg)
USA-1	400	400(12.5)	6
USA-2	1,400	500(13)	10
USA-3	1,100	500(13.3)	13
USA-4	550	350(15.1)	7
USA-5	1,200	600(11)	30
USA-6	1,900	1,000(11)	42
USA-7	4,400	3,000(11)	99
GB-1	560	20(10.5)	5
GB-2	1,900	100(14)	13
GB-3	1,100	72(10)	11
GB-4	1,300	72(10)	16
GB-5	3,800	250(10)	50
JPN-1	13,500	450(unknown)	unknown
JPN-2	17,000	800(unknown)	unknown
JPN-3	1,300	20(13)	7
JPN-4	780	50(10)	9
JPN-5	5,100	500(12)	30
JPN-6	5,700	750(12)	40
JPN-7	5,900	1,000(12)	50
JPN-8	7,400	1,500(12)	65

USA: United States of America

GB: Great Britain, JPN: Japan

The price base is 1998-1999 (1\$: 220yen)

- 日本の風は吹き続けることが無い
- 山、森、ビルなどが比較的近い地域にある
- ため、周辺の風況は乱れ成分が多く含まれている
- 風向や風速の変化により安定したエネルギーの供給は困難とされる
- 日本の国の面積は他国と比べて、狭く広大な土地が無い
- 発電機のコストが他国に比べて高い

全く新しい風力発電機は、小型であること、安全であること、振動騒音が少なく台風に耐えるなど、より人間と自然に優しいものが必要である。

1.2 本研究の目的

風力発電機で使われる風車の中には幾つかの種類があり、大きく分けて水平軸風車と垂直軸風車に分かれる。海岸や山岳で多く目にするのはプロペラ型の発電機が多い。今回、比較的トルクは大きく回転数の低い、風速と同じくらいの周速度で回る垂直型風車のサボニウス型を使用し、最大電力制御、希土類永久磁石発電の組み合わせにより性能的に優れ価格的にも優利な小型風力発電機システムの研究開発を実施した。



写真 1.1 サボニウス型

写真 1.1 は大学に設置されたサボニウス型風力発電機である。

第2章 3D - CAD

2.1 3D-CAD の学習

風力発電機的设计・制作には 3D-CAD の学習が必要であった。このため、3D-CAD ソフトを勉強した。

従来、设计技術者は装置や部品の図面を描くとき、製図機械、製図台、製図板の 3 点をセットで製図を描く作業を行っていた。近年は、3D-CAD によって设计することが主流となっている。グラフ 2.1 は 3 次元 CAD の利用率のグラフである。年々、パソコンの普及により、CAD ソフトを使った図面の作成が企業でも多くなってきている。現在ではまだ、手書で作業される企業も多いが、2~3 年後は CAD ソフトを使った図面の作成の方が手書より、増えるだろうと予想されている。

CAD ソフトを利用した場合と人の手で描かれるものの違いは、次の通りである。

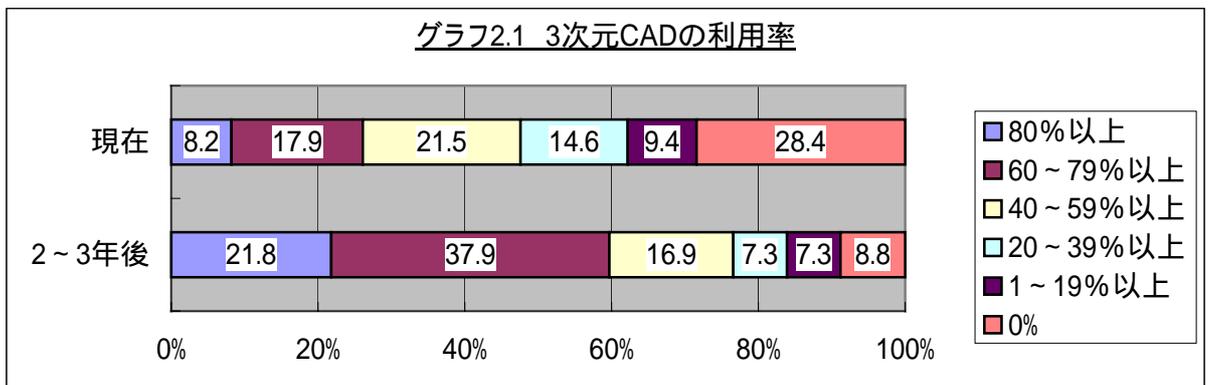
早く図面を描くことができる

図面の変更や修正が手で描かれたものより簡単に素早くできる

手で描かれたものは消しゴムで消すと汚れてしまう時があるが、CAD ソフトではそのようなことがなく、綺麗に仕上げることができる

時間の短縮につながる

図面をメールで送りあう事ができる



2.1 Solid Edge

我々の研究室では CAD ソフトによる 3D - CAD での図面の描き方を習熟するために Solid Edge を使用し、3 次元モデルの例題の図面を 4 枚描き、その後、3 次元モデルを 2 次元のモデルにして描く練習をした。また、例題を描き終わったら、自分達の身近に存在する製品や部品の寸法を測り、それを 3 次元、2 次元モデルで描く練習を行った。

図 2.1 - 2.2 は例題として描いた図面の一部である。

Solid Edge では、3つの基準平面を使いモデルを描いていく。図 2.1 のように円を描いたとき、CAD ソフトによっては綺麗に円の形が表現されないものもある。穴あけに対しては、Solid Edge の場合は切り抜きコマンドであるが、このコマンドでは同じ大きさの穴は一度に1つしかあけることができない。

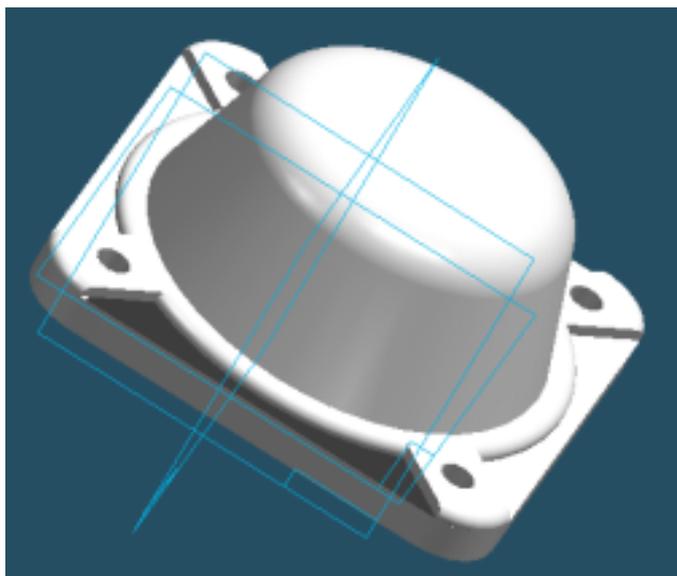


図 2.1 例題 (3次元)

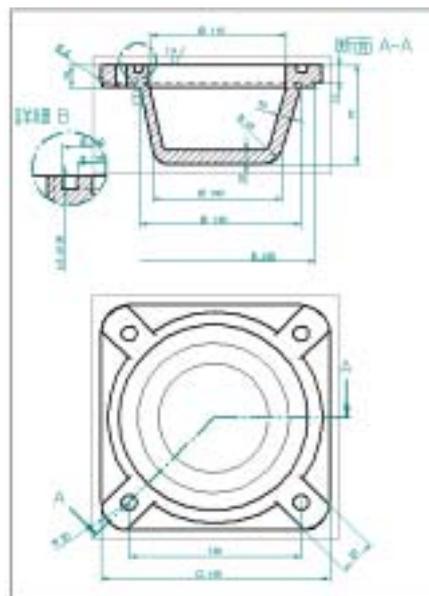


図 2.2 例題 (2次元)

2.2 Solid Designer

次に、Solid Designer を使い 3次元、2次元の図面を描いた。Solid Designer は、CAD のソフトの中でハイエンド(高性能)のクラスに属する。

図 2.3 は Solid Designer の基本画面である。Solid Designer では、ワークプレーンと言う中央の緑色の基準平面を使いモデルを描くソフトである。一般的な機能として Solid Edge には無いアンドゥ、リドゥボタンがあり、すぐ前の画面をやり直す時には便利で

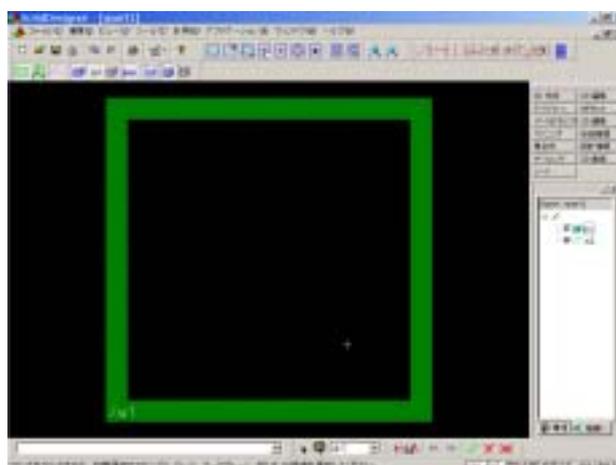


図 2.3 Solid Designer の基本画面

ある。Solid Designer での穴あけはマシニング機能の中のパンチというコマンドを使う。このパンチの機能は同じ大きさのものだと一度に多くの穴あけを実行でき、Solid Edge のように同じ作業を何度も繰り返し行う作業の手間が省かれる。

Solid Designer の機能の中にはモジュールメニューによりモジュールとアプリケーションの追加ロードができる。そして、その中の一つに Annotation がある。Annotation では 3 次元の画面で寸法を変えた場合、2 次元の画面でも図面の寸法が簡単に変えることのできる機能で、設計変更が生じた時などに役立つ。3D - CAD で一般的に使われる中間ファイルの形式として IGES (.igs) や STEP などがある。Annotation 内の拡張子の形式にはバンドル (.bdl) という形式があり、バンドルを使うと IGES よりファイルの容量が小さくなる。表 2.1 は発電機の部品でのファイルの違いである。

今回、Solid Edge と Solid Designer を使い比べた時、450mm 発電機と 250 mm 発電機を設計するのにこの Solid Designer の多くの機能が役に立つと思われ、使うことにした。

表 2.1 ファイルの容量

部品名	.bdl	.igs
磁石	235KB	
バックヨーク	161KB	1,884KB
ハウジングシャフト側	239KB	4,300KB
ハウジング	231KB	4,226KB
シャフト	398KB	2,504KB
全体のアセンブリ	1,610KB	

第3章 小型風力発電機の設計

3.1 450mm発電機の設計

過去の研究データから 300mm発電機は 150rpm で 150W の結果が得られた。この結果より、外径、コイル数、磁石数を増やした 450mm 発電機は、150rpm で 300 発電機の 7 倍に相当する 1 k w 程度の発電量が得られるのではないかと予想した。表 3.1 は、300mm発電機、350mm発電機、450mm発電機の磁石数、コイル数、結線のそれぞれのものを示す。350mm 発電機と 450mm 発電機の磁石数とコイル数の比は 4 : 3 になっている。

表 3.1 発電機の内部

発電機	磁石数	コイル数	結線
300mm 発電機	18	9	集中、3 相、3 段のコイル設置
350mm 発電機	24	12	集中、3 相、3 段のコイル設置
450mm 発電機	32	24	集中、3 相、1 段のコイル設置

450mm 発電機を 3D - CAD で設計した。この時、高知工科大学では 2 名、共同開発者の坂本技研では 1 名が分担して行った。発電機の 3D - CAD の全体図を図 3.1 に示す。また、実物を写真 3.1 で示す。この発電機は、シャフトとコイルを固定させその他の部品を回すタイプである。担当した部品は、ハウジング（付録 1）、ハウジングシャフト側（付録 2）、バックヨーク（付録 3）、磁石（付録 4）、シャフト（付録 5）である。

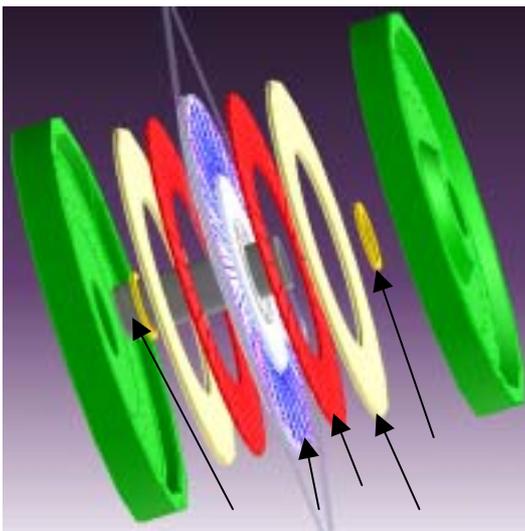


図 3.1 全体図

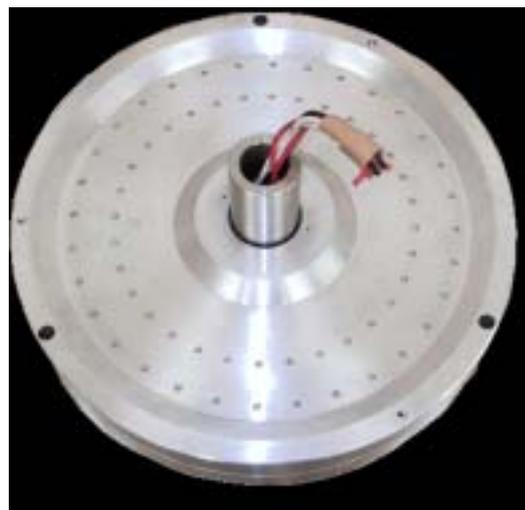


写真 3.1 完成品

(各 부품の役割)

ハウジングは全体の部品を覆うカバーである。 スペーサーはハウジングがシャフトを軸に回転する時、ベアリングに似た役目をする。 バックヨークは 磁石、32 枚を固定させるためのものである。バックヨークには磁石をはめ込む溝はなく、直接、接着剤によって固定する。以下にそれぞれの図面を載せる。

製作された発電機は近々、前田建設工業(株)の風洞実験装置での風洞実験で発電量の計測を行う予定である。

3.2 250mm発電機的设计

自然エネルギーの自立電源の利用方法を考えた結果、その一つが街路灯である。街路灯は、100W 程度の明るさがあればよいので発電機の直径を 250mmにした。そして、軽量化に対しても検討した。表 3.2 は磁石数を 32 枚から 24 枚に、コイル数を 24 コから 18 コに減少させた。また、コイルをシャフトと固定させるために 450mm発電機では樹脂を使用していたが、250mm 発電機ではベークライトを使用することになり、外形ばかりでなく、中で使用される部品にも軽量化に向けて思案されている。

表 3.2 発電機の内部

発電機	磁石数	コイル数	結線
450mm発電機	32	24	集中、3相、1段のコイル設置
250mm発電機	24	18	

250mm 発電機は 450mm 発電機と似たようなタイプである。部品の中には役割としては同じだが、450mm 発電機の時と少し形が変わったものをのせる。

図 3.2 はバックヨークの 3D-CAD、図 3.3 は 2D-CAD である。 450mm 発電機ではバックヨークに磁石をはめ込む溝はなく、直接接着剤により固定させていたが、250mm 発電機では、磁石をバックヨークにはめ込むため、1mm の溝が掘られてある。また、厚さが 4mm の部分にはハウジングと固定させるためにネジ穴が開いている。

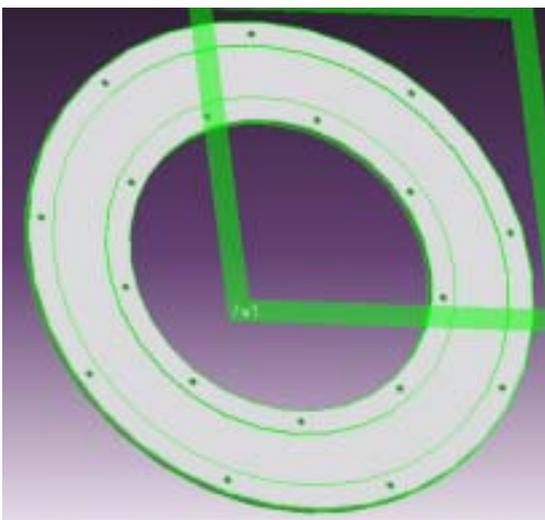


図 3.2 バックヨーク

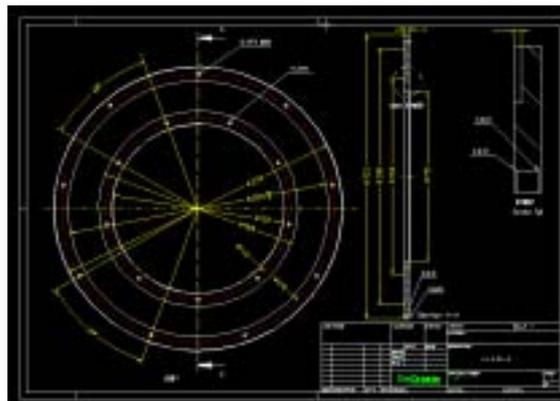


図 3.3 バックヨークの図面

図 3.4 は磁石の 3D-CAD、図 3.5 は磁石とバックヨークのアセンブリ図である。磁石の大きさは 450mm 発電機では半径方向に長細かった物が、今回、短くなっている。

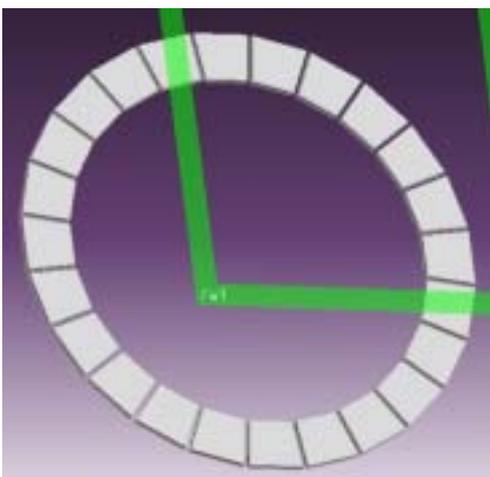


図 3.4 磁石 24 枚

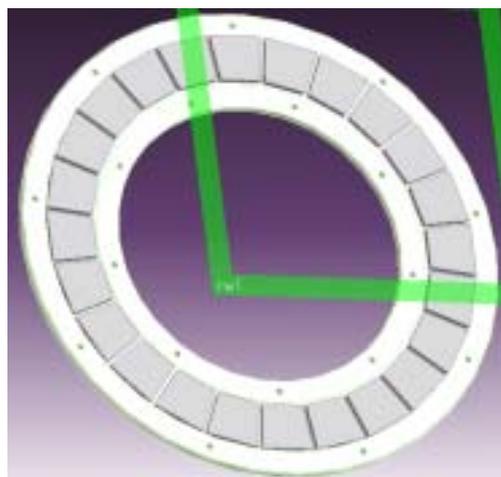


図 3.5 磁石とバックヨークのアセンブリ

3.3 磁場解析

近々、実験を行う 450mm 発電機について、300 回転での開放電圧（抵抗無限大）を解析で求め、実験値を予測することとした。また、250 発電機についても 450mm 発電機の実験値と比較するために開放電圧を求める。

3.3.1 解析目的

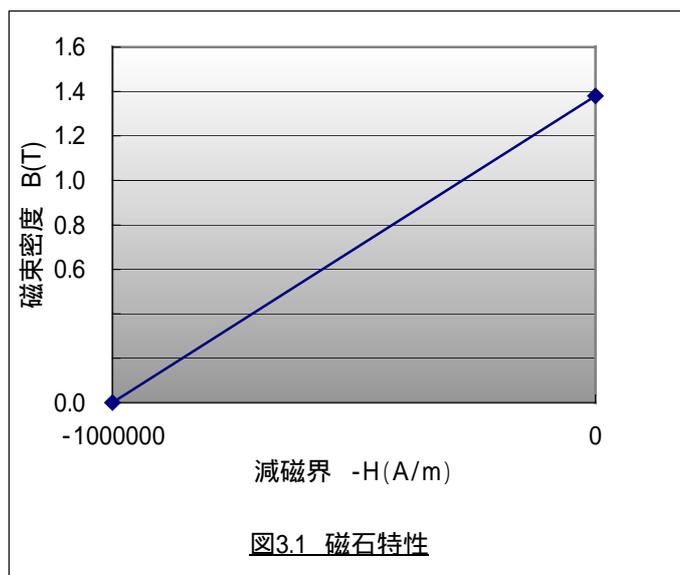
450mm 発電機、250mm 発電機を有限要素モデリング/ポストプロセッシングシステムである FEMAP を用いてモデル化し、3 次元非線形動磁場解析ソフトウェアの ELF/MAGIC を用いて解析を行い、開放電圧を調べることにした。

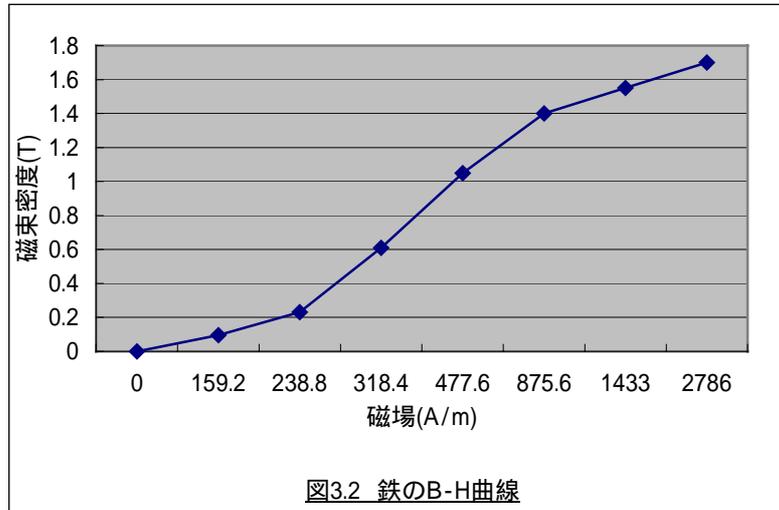
3.3.2 解析条件

- ・今回、解析については計算規模の点を考慮して、コイル 3 コ、磁石 2 組をモデル化する。
- ・対象性から解析対称の 450mm 発電機では 1/8 を 3 次元でモデル化する
- ・対象性から解析対称の 250mm 発電機では 1/6 を 3 次元でモデル化する
- ・ローターは磁石、バックヨーク、ステーターはコイルとする
- ・解析の条件は動解析とする

3.3.3 物性条件

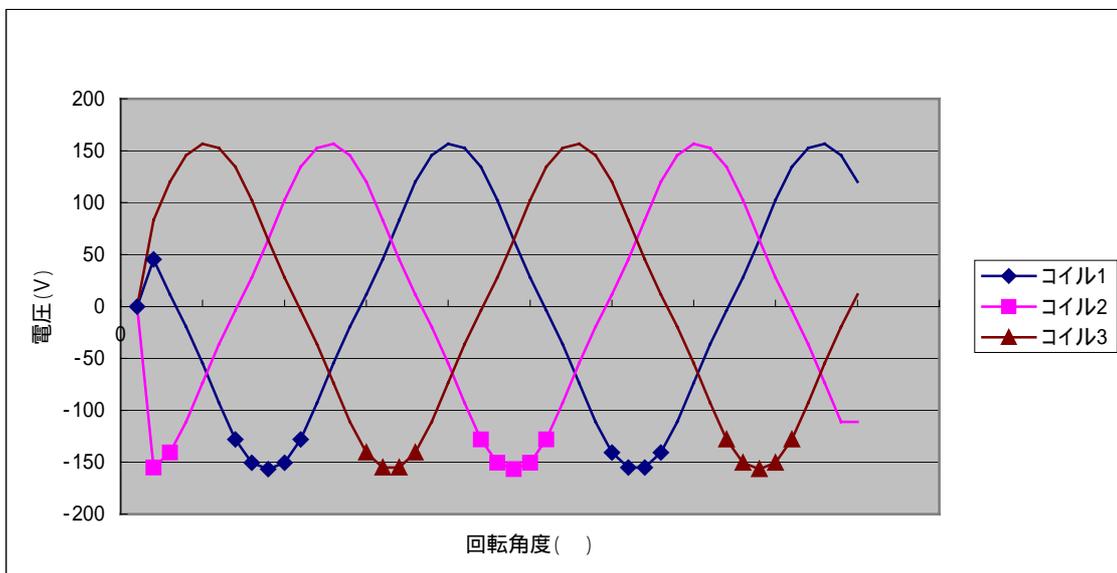
- ・磁石・・・磁石特性は図 3.1 の値を入力
- ・鉄・・・図 3.2 の B-H 曲線の値を入力





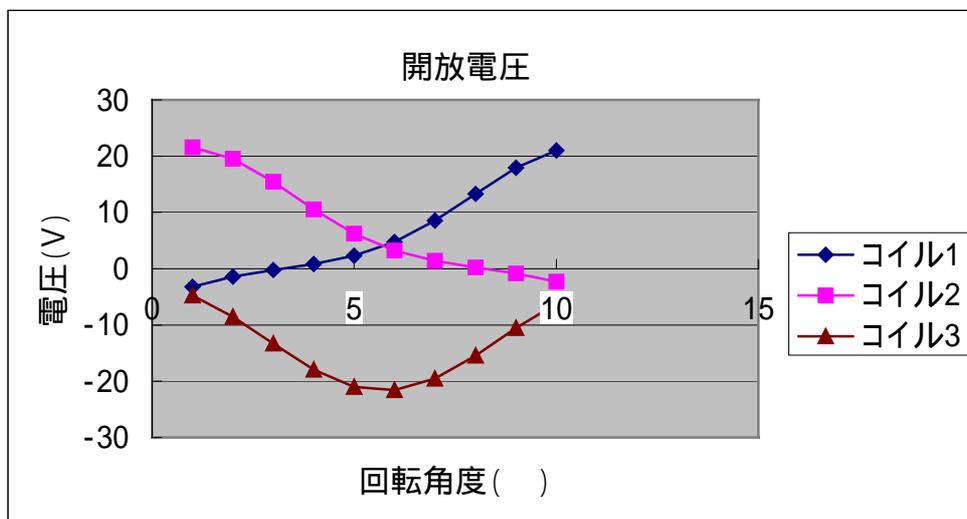
3.3.4 解析結果及び考察

450mm 発電機については 0° から 45° までを移動させた時の開放電圧を求めた。



250mm 発電機は 0° から 10° までを移動させたときの開放電圧を求めた。 250mm 発電機では 1 つのコイルの 1 周期だけを取り出し、細かな開放電圧の値を

見ることにした。



グラフ 3.4 250mm 発電機

直径が大きく、コイル数、磁石数が多い 450mm 発電機の方は最高電圧が高い。また、250mm 発電機に対し 450mm 発電機の直径は 1.8 倍であるが開放電圧に関しては約 7.3 倍の値がでた。

今回、それぞれの開放電圧を求めることによって今後、実験結果と比較していきたいと思う。

第4章 小型風力発電システムの実用化

4.1 モニュメントタイプ風力発電システム

モニュメントタイプの風力発電システムを高知県企業と開発した。南国道の駅に2001年の5月にサボニウス型のモニュメントタイプ風力発電機が設置された。名前はキララである。写真4.1は夜に撮影されたキララである。この発電機は、坂本技研、エムエムエス、スカイ電子、高知高専、高知工科大学により製作されたものである。キララは350mm発電機にサボニウス風車を取り付けたもので、図4.1はキララのシステムを簡単に記したものである。350mm発電機は12m/sの風で300回転し300w程度の発電量がえられる。しかし、風の力だけでは発電量がまかなえない場合にソーラーパネルを利用した太陽光発電も兼用するようになっている。



写真 4.1 南国道の駅 キララ

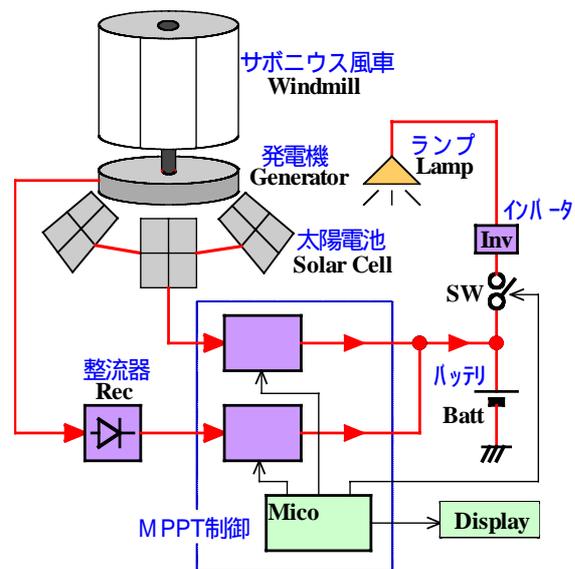


図 4.1 発電機のシステム

4.2 自然エネルギー自立電源街路灯

現在、使われている電気エネルギーは、発電所によって多くの場所、各家庭や公共の場に送られている。街路灯もその一つである。もし、災害が起こり発電所から電気エネルギーが来なくなった場合、従来の街路灯では暗い道を照らすことは出来なくなる。しかし、自然エネルギーを利用した街路灯では、自然の力がある限り発電することが可能であり、自立電源なので災害で発電所からの電気エネルギーが来なくなった場合などには役立つのである。

写真 4.2 は風力を利用した自立電源の街路灯である。この発電機はモニュメントタイプであり、構造は写真 4.1 のキララと同じである。小型化を目指し、全体的に小さく 250mm 発電機を設置させ、ソボニウスの羽根も縦に長く横の幅は短い。12m/s の風で 300 回転、100w 程度の電力が予想されている。この街路灯用として 250mm 発電機設計を報告者らが担当した。



写真 4.2 小型風力発電機



写真 4.3 小型風力発電機

第 5 章 終章

5.1 結言

本研究では、小型風力発電機の 3D-CAD 設計と磁場解析を実施した。今回、設計に関しては実際に加工するメーカーとの図面の話し合いで多くのことを学ぶことができた。また、計画を立てて図面を作成していても計画通りに図面の作成が進まないことがあり、発電機の試作品の完成が遅れることもあった。

450mm 発電機に関しては、前田建設工業（株）の風洞装置を借りて近々、風洞実験を行う。250mm 発電機に関しては今後も設計を行っていく。また、風力発電機についてもっと多くを学んでいこうと思う。

5.2 今後の課題

今回の研究では、450mm 発電機の実験に伴い、開放電圧を求めた。450mm 発電機は 12m/s の風で 300 回転し 1kw の発電量が得られると予想されている。また、250mm 発電機に関しては 12m/s の風で 300 回転し 100w 程度の発電量が予想されている。これらの発電機を今後、動磁場解析を行い、それぞれの発電量を調べたいと思う。また、最適設計を行うためには磁束密度を解析により求め、内部の磁束の把握する必要がある。この 2 つの発電機はそれぞれ、コアなしのタイプであるがコアを入れた場合の磁束密度、発電量も解析を進めていく必要があると考えられる。そして、コア有りとコア無しの比較をし、どちらが発電機に適しているのかを考えていきたい。

謝辞

本研究において終始ご指導頂いた坂本東男教授、修士 1 年生の内野喬誌さん、小型風力発電機設計での共同研究者である吉岡秀高さんに深くお礼申し上げます。また、風力発電機に関して図面の指導や色々お話をして下さいました坂本技研の関係者各位、解析ソフトである ELF/MAGIC のご指導をして下さいました(株)エルフ朝井敏文様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 風力発電ビジネス最前線 前田以誠 双葉社
- 2) エネルギー2000 資源エネルギー庁(編) 電力新報社
- 3) CAD 攻略マガジン 10 月別冊

付録

450mm 発電機

付録 1 : ハウジング 3D-CAD 2D-CAD

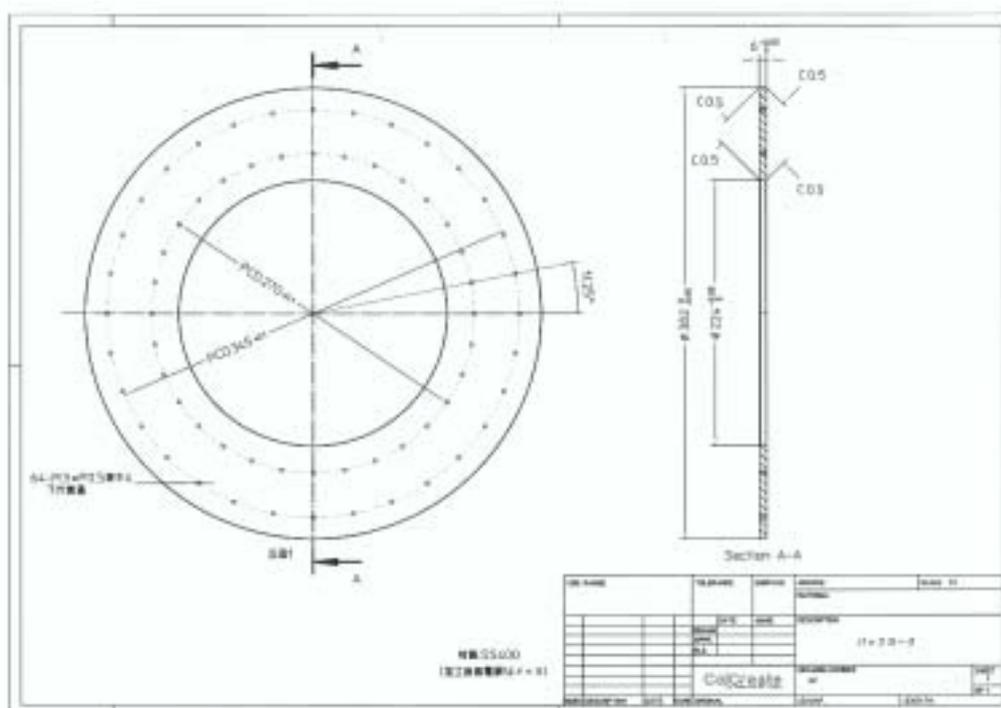
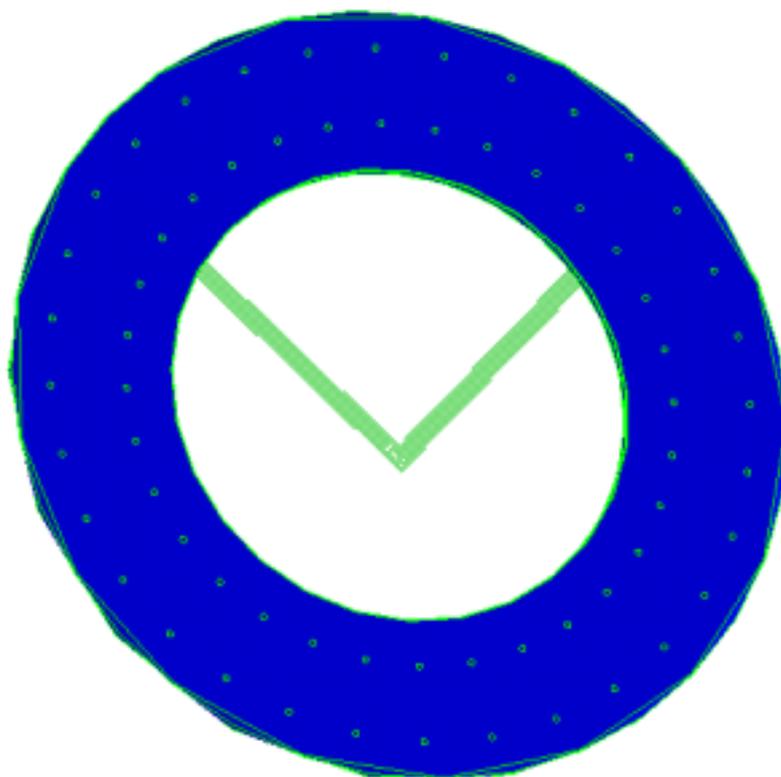
付録 2 : ハウジングシャフト側 3D-CAD 2D-CAD

付録 3 : バックヨーク 3D-CAD 2D-CAD

付録 4 : 磁石 3D-CAD 2D-CAD

付録 5 : シャフト 3D-CAD 2D-CAD

付録3 バックヨーク (450mm 発電機)



付録4 磁石 (450mm 風力発電機)

