

平成 12 年度

卒業論文

サボニウス型風車における
羽根枚数による性能比較と実験

指導教員

坂本東男 教授

高知工科大学 知能機械システム工学科

1010120 伊藤 淳

目次

1 .緒言	-2-
2 .日本の風況環境に適した風車の選定	-2-
3 .実用化の目標	-3-
4 .実験装置および方法	-3-
4-1 供試風車	-3-
4-2 測定機器	-4-
4-3 実験方法	-5-
5 .結果および考察	-5-
6 .風力発電機の実出力	-5-
7 .結言	-6-

謝辞

参考文献

付録 1

付録 2

付録 3

知能機械システム工学科卒業論文

サボニウス型風車における羽根枚数による性能比較と実験

伊藤 淳

1. 緒言

自然エネルギーは多くの研究者に注目されている¹⁾²⁾。太陽光によるソーラーエネルギー、風による風力エネルギー、流水による水力エネルギーなどの自然エネルギーは単にクリーンなエネルギーであると言うだけでなく、資源を必要としない。しかし、従来のような大規模なプラントで発電する場合、広大な土地が必要であるだけでなく、建設工事等に莫大なコストがかかる。そこで、各個人、各家庭がある程度必要なエネルギーを発電、供給することができる小型発電機を身近に設置する事によって地球環境に根ざしたローカルクリーンエネルギーの実現を目的に研究を開始した。

ローカルクリーンエネルギーの利点は、各個人が必要なエネルギーをある程度確保することが可能な点にある。また、エネルギー消費の削減に繋がり、ひいては、二酸化炭素の削減、資源枯渇への歯止めにも繋がるところにある。また、直接ローカルクリーンエネルギーに関わることによって、各個人の地球のエネルギー環境への意識の向上にも繋がる。一方で、設置工事が簡単で低価格の小型発電機を広い地域に多く設置することで従来以上のコスト削減も期待できる。ローカルクリーンエネルギーの実現と技術の確立のために以下の研究開発を実施している

- 1) 市販風力・水力発電機のフィールド実験による性能調査
- 2) 8種類の風力、水力発電機の分解調

査による構造と設計思想の調査

- 付録 4

- 3) サボニウス羽根枚数(3,5,12)による性能比較(第1次) - 付録 3
- 4) サボニウス風力発電機のフィールド実験による性能調査
- 5) サボニウス羽根枚数(2,3,5)による性能比較(第2次)
- 6) サボニウス風力発電機の性能に及ぼすガイドベーンの影響調査
- 7) 磁石最適配列に関する静磁場解析
- 8) 市販発電機の磁束密度に関する磁場解析
- 9) 発電機の磁束密度に及ぼすコアの有無による磁場影響の解析
- 10) サボニウス直付けタイプ発電機的设计製作
- 11) 450mm 直径 1kw 発電機的设计製作
- 12) 永久磁石発電機の温度上昇に関する解析と実験

* は発表者が担当または参加
本報告は、この計画の5)の風車の羽根枚数において性能比較を行うものである。

2. 日本の風況環境に適した風車の選定

風のポテンシャルエネルギーを人間が消費できるエネルギーへ変換する手段として風車がある。図1に示すように様々な種類

の風車が開発されてきたが、構造上水平軸型と垂直軸型に大きく分けられる。垂直軸形については風向に左右されないという特徴がある。又、風車の性質上大きく2つに分けられる。揚力型（水平軸プロペラ型、垂直軸ダリウス型等）は低トルク・高回転型、抗力型（水平軸多翼型、垂直軸サボニウス型等）は高トルク・低回転型と一般にいられている。

風力発電の発達してきた欧米の強風速で常時一定方向に風が吹いている環境に対して、日本では風速域も2~4m/sと低く、地形の影響もあり、常時一定方向に風が吹いている場所もない。以上のように日本での風況環境を考慮した上で適していると思われる、本研究対象とした風車は垂直軸・サボニウス型風車である。

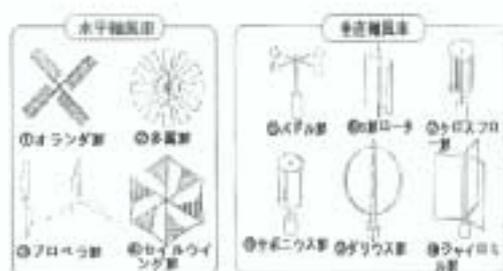


図1. 風車の種類

3. 実用化の目標

緒言で述べた実施事項や研究を1つにまとめ、図2に示す完全独立の小型発電機の開発、実用化が最終目標である。発電に必要な十分な風速のある場所であれば、新たに電気設備の設置（電線を新規に引く等）に困難な場所への設置が可能である。具体使用例としては、キャンプ場、山小屋、公園、道路の外灯が挙げられ、又、非常用電源と

しても使える。



図2. 実用例・外灯（MMS製作所）

4. 実験装置および方法

4-1 供試風車 図3に供試風車（2枚羽根）の横断面図を示す。ブレードと両端に取りつけた端板2枚からなる。風車の中心に直径12mmの軸が貫通している。

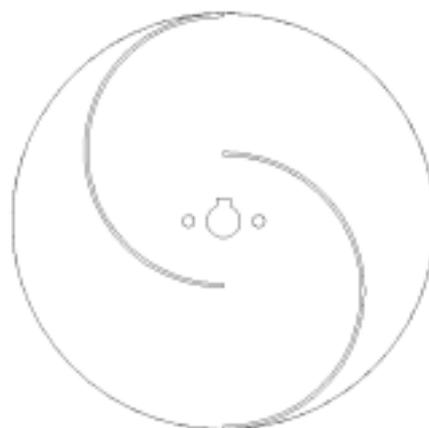


図3. サボニウス風車断面形状

風車は、半円筒形ブレード2枚・3枚・5枚を付けた3種の風車と端板とブレードの形状は統一した。

図4に示すように左から順にサボニウス型風車の基本形である2枚羽根、1枚羽根を追加することで受風によって発生する回転トルク変動を抑えた3枚羽根、回転トルク変動を抑えるであろうタイプでサボニウス

風車の定義限界範囲内と考えられる 5 枚羽根である。以上 3 種の風車を製作し性能比較をする。なお、2 枚羽根のサボニウス型風車のアスペクト比 $AR (= H/C)$ は 3.0、オーバーラップ比 $OL (= a/C)$ は 0.5 である。

端板：直径 D150mm

ブレード：直径 C100mm × 高さ H300mm

風車外形：直径 D150mm × 高さ H300mm

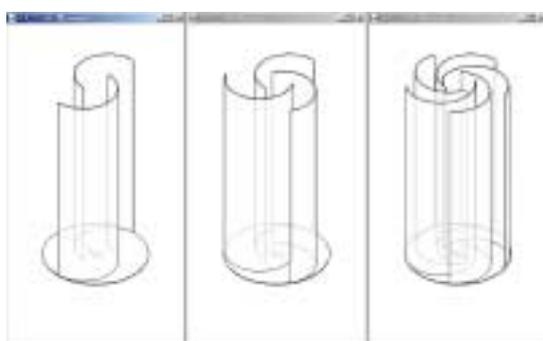
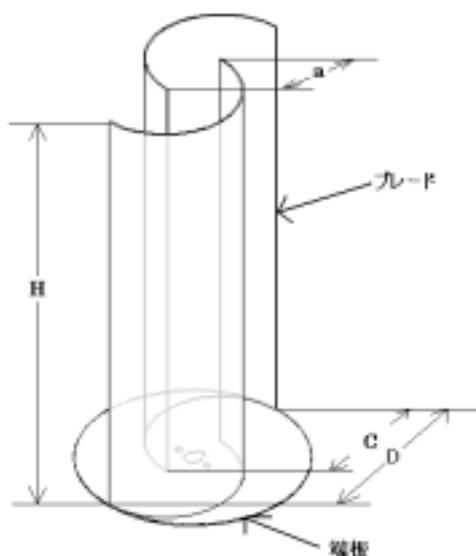


図 4. 供試風車の形状
(左から、2 枚、3 枚、5 枚羽根)

4-2 測定機器 計測に使用する、測定機器を図 5、図 6 に示す。

- ・風速計：米国製、風速測定範囲 0~19.9m/s
精度 ± 3%
- ・回転計：(株)小野測器製 HT-4100、非接触式ハンドタコメータ。回転の目印となる反射マークを回転軸に貼り、検出部からの可視光を当て測定測定範囲 30r/min ~ 50000r/min、精度 ± 1 r/min。
- ・トルク計：(株)新興通信工業製。抵抗線ひずみ計を応用した接触式トルクメータ(昭 42)。測定範囲 0.5kg・m
精度 ± 0.5% 以内。



図 5. 測定機器 1 (トルクセンサー)



図 6.測定機器 2 (左・回転計、右・風速計)

4-3 実験方法 図 7 に実験装置を示す。実験は、開放型風洞の正方形吹出し口 (断面寸法 450mm×450mm) の風洞断面中央に供試風車を設置して行う。風車回転軸延長上にトルクセンサーを設置、データレコーダに取り込む。風速は風車の手前で計測する。測定は、風速 0~5m/s の 1m/s 毎に各羽根枚数の風車の起動トルク、回転数、トルク変動のデータを収集する。各平均値風速域において、最初に風車軸に過大なトルクを付加し、これを徐々に減少させ起動開始点のトルクを計測、回転数も計測することによりトルク係数・パワー係数が算出できる。

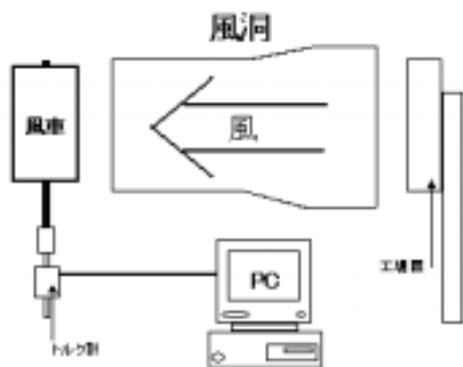


図 7.実験全体図

5. 結果および考察

今回の実験に不都合が生じデータを収集するには至らなかった。原因は回転軸軸受けの摩擦抵抗とトルクセンサーの回転抵抗が予想に反して大きかった、この 2 点にある。特にトルクセンサーにおいては年経過による内部ストレインゲージの劣化、スリップリング部のオイル切れによる摩擦抵抗

の増大が考えられる。

また、より正確にデータを取るためには供試風車模型サボニウスの出力の予測を立て測定範囲にあったセンサーの選択も必要である。サボニウスの特性を示す公式は基本的に実験式であるため出力算出は容易ではない。しかし既にサボニウスの最大パワー係数・トルク係数など足利工業大学の牛山泉教授らの研究³⁾によって提示されている。風車形状が若干異なるため算出される出力トルク等、実際の値とは異なるであろう。測定範囲などの目安にはなると考えている。

6. 風力発電機の出力²⁾

以降の式に用いられる記号を下記に記す。

- : 空気密度 = 1.2[kg/m³]
- C_D : 抗力係数[-]
- A : 受風面積[m²]
- v : 風速[m/s]
- R : 風車半径[m]
- f : 風車回転数[rps]
- : 角速度 = 2 f [rad/s]

ある物体が風によって受ける力 F [N]は

$$F = 1/2 \cdot C_D A v^2 \dots (1)$$

従って、得られるパワー P [W]は

$$P = Fv \\ = 1/2 \cdot C_D A v^3 \dots (2)$$

同じく、トルク T [Nm]は

$$T = FR \\ = 1/2 \cdot C_D A v^2 R \dots (3)$$

実際には風車の負側の抗力や複雑な風車の形状、風の流れなどを全て考慮して、 C_D の代わりに実験値より求めたパワー係数 C_P 、トルク係数 C_Q が使われる

P_e : 実際に得られるパワー[W]

T_e : 実際に得られるトルク[Nm]

$$C_P = P_e / (1/2 \cdot A v^3) \dots (4)$$

$$C_Q = T_e / (1/2 \cdot A v^2 R) \dots (5)$$

ここで風車の場合、風速に対する風車サイズを無次元化して考えられるよう周速比を用いるのが一般的であり、以下のように定義される。

$$= 2 \pi R / v \dots (6)$$

また、周速比とパワー係数、トルク係数の関係は図 8、図 9 に示す。

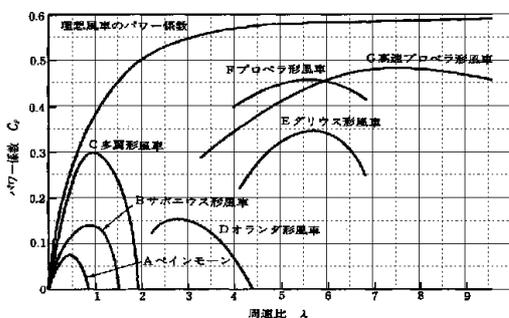


図 8 . 周速比とパワー係数の関係

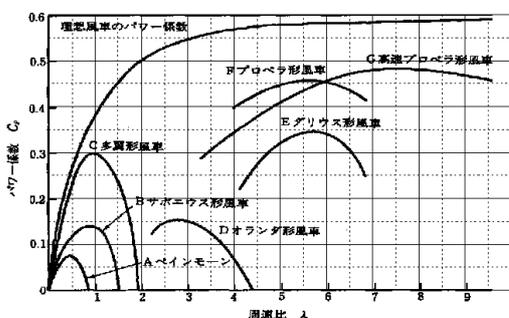


図 9 . 周速比とトルク係数の関係

(曲線 B がサボニウス型風車)

図 8 より、風車はある周速比でパワー係数の最大値をとる。サボニウス風車の場合、周速比 0.8 でパワー係数 0.15、図 9 よりその周速比でのトルク係数 0.25 となる。

ここで、今回製作した模型サボニウス (2 枚羽根) の最大パワーおよびトルクを計算する。

最大風速	5m/s
受風面積	0.15m × 0.3m
風車半径	0.075m

$$(4) \text{ 式より } P = C_P 1/2 \cdot A v^3 = 0.5[W]$$

$$(5) \text{ 式より } T = C_Q 1/2 \cdot A v^2 R = 0.012 [Nm]$$

($\lambda = 0$ のとき $C_Q = 0.37$ 、
最大トルク 0.018Nm)

$$(6) \text{ 式より } \lambda = 2 \pi R / v = 8.48[rps] = 509.2[rpm]$$

以上の計算より、製作した 2 枚羽根のサボニウス風車は、回転数 509.2[rpm] のとき、最大パワー 0.5[W]、トルク 0.012 [Nm] を得ることが出来る。

上限の予測は立った。上記の計算結果より計測の改良を行い、実際に実験記録を取ってからその議論は行うこととする。

7 . 結言

実験結果及び今後改善すべき点を以下にまとめた。

- ・トルクセンサーをはずした状態では低風

速から回転を開始することが確認された

- ・非接触式トルクセンサーへの交換をすることにより回転抵抗を低減させる必要がある
- ・安定した風を送るために送風側には十字フィンを設けること

以上の2点、準備が出来次第、再実験を行うこととする。

謝辞

ローカルクリーンエネルギーの研究に関しては高知県産業振興センターの運営する高知県産業育成支援資金をいただいて行った。最後に本実験に使用する実験器具を製作して下さった M・M・S 製作所に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) さわやかエネルギー風車入門 著 牛山泉
- 2) 自然エネルギー利用学 編著 清水幸丸
- 3) 牛山・他 2 名, 機論, 52-480, B (昭 61), 2973

付録 2 .

学会発表

坂本東男、松岡順一、伊藤淳、内野喬誌、横山應祥、製品分解による小型風力発電機、小型水力発電機的设计思想、エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム 2000 年 12 月、p90-93

付録 1.

サボニウス風車²⁾(図 10)の説明



図 10. サボニウス風車の断面

1929 年、フィンランドの S.J.サボニウスにより特許が取られた抗力利用のふうしゃである。円筒を縦半分に切った形の受風バケット(羽根・ブレード)を向かい合わせ、中心をずらして取りつけたもの。バケットの凹側と凸側で抗力に相違があることに加えて、図 10 に示すように、向かい合わせた受風部の中央の重なった部分から受風側、凹側からの気流が戻り側バケットの背面に流れこむため、ロータの戻り側バケットの背面を押す力がプラスされることになる。

従って回転力は大きい回転数は低く、風速と同等の周速度で回転。風の持つエネルギーを最大で 15 ~ 20% 程度取り出すことが出来る。

坂本東男（高知工科大学）、松岡順一、伊藤淳、内野高誌、横山應祥

Design Idea of Small-Size Wind and Water Power Generators Obtained by Product Dissection

Haruo Sakamoto (Kochi University of Technology), Junichi Matsuoka, Jun Ito, Takashi Uchino, Masaaki Yokoyama

1. 緒言:

近年、地球温暖化の防止や地球環境の保全化の観点から、新エネルギー確保の開発研究が盛んとなっている。通産省では 2010 年に太陽光発電を 500 万 kW、風力発電を 30 万 kW の目標で普及を目指している。

風力発電機には従来誘導型電磁石が使用されているが、最近特に中小型風力発電機に永久磁石が使われるようになってきている。従来の風力発電機はプロペラ(翼型)タイプが主流であり、定格発電能力は 12.5m/s など強風時に確保されるのが一般的である。小型風力発電機は集会所や個人住宅に普及されることを目指しており、このような強風状態での発電能力では十分な発電が得られないのが通常である。そこで、市販されている小型風力発電機を分解して、設計された思想をまとめ、今後の風力発電機の効率向上策に関して考察した。

製品分解は市販されている製品を分解して、中に含まれる創意工夫を学習出来る。また複数の製品を対象とすることにより、比較により、より良い設計の指針を得ることが可能となる。以下、市販の小型風力発電機、小型水力発電機を分解して、得られた指針を報告する。

2. 製品分解によるエコデザイン学習事例 1)

工学系大学、特に機械工学分野では製品分解によるデザインの学習を行う大学がある 2)。高知工科大学では 1 年生へ機械工学への導入学習として製品分解を実施した 1)。米国製、日本製の製品を分解して両者の設計思想を比較した。ここでは電池式室内クリーナーの例を説明する。

比較したのは図 1 に示す米国製ブランド A と日本製ブランド B の 2 つのクリーナーである。価格に関しては日本製が米国製の 3 倍以上であるが、外観、性能には大差が認められない。図 2 は 1 年生クラスでの分解作業風景であり、図 3 は分解した結果の比較である。さらに表 1 に 2 つのクリーナーの比較を数値で示す。米国製の方がエコデザインとなっている。日本製は消費者の意向である効率化、利便性の追求からねじ、部品点数が多くなっている。最終的には充電時間の違いが設計に大きく影響している。この例から言えることは、エコデザインを目指すには、日本では消費者の要求事項から考え直す必要がある。



図 1 電池式室内クリーナー (左日本製、右米国製)



図 2 1 年生のセミナー (製品分解) 風景



図 3 分解結果比較 (左米国製、右日本製)

比較の項目	米国製、ブランド A	日本製、ブランド B
ねじの数	6	12
電線の数	7	17
電気部品の数	2	52
フィンの数	6	19
スイッチの数	オンのみ	強、弱、オフ
フィルター	洗濯不可	洗濯可能
充電時間	24 時間	4 時間

表 1 分解結果比較

3. 市販小型風力発電機の分解

3.1 米国 Southwest 製エアランド 403(400W)

Southwest 製エアランド小型風力発電機は米国、日本で最も多く販売されていると言われている。

図4に外観を、図5に概略分解の状態を示す。本体は620mmの長さ、胴回り(最大)が142mm、重量は6.0kgである。長さ56cmの羽3枚で回転し、発電開始風速は3.0m/s、定格400Wは風速12.5m/sで出力される。図6に磁石が着いたローターとコイルの着いたステータを示す。ローターは12個のNd-Fe-B系永久磁石がエポキシで接着され、幅8mmのステンレス鋼バンドで補強されている。コイルは分布巻であり、コアの電磁鋼板の内径部は磁石の3倍の数である36個の突起を有している。3相での電力出力となっている。羽根はサーモプラスチック系カーボンファイバ強化材料で、効率的に電力を取り出す形状を検討されたと記述されている。強風時にはブレードの先が風によってねじられ、余分な力を逃がす働きをしている。



図4 米国製エアランド 403 小型風力発電機



図5 同上発電機の小分解

3.2 日本、新日本技研製 SNK-1000(1kW)

日本では風力発電機のメーカーが少なく、大型では三菱重工製が有名である。小型の風力発電機メーカーであった新日本技研が製作した定格1kW発電の風力発電機を入手して分解した。図7に外観を示す。図7左のフランジ部分に3枚の羽根(1.3m)をセットする。プロペラ(羽根)は木製である。本体は縦71cm、横38cm、奥行32cmの大きさである。重量は14kg。カタログによれば、発電開始風速は2m/s、定格1000wである。コイルは図8に示すように9個である。コイルの線径は1.7mm。左右のコイルは周方向にずれが見られる。ローターは直径28.5cm。磁石は8個であり、磁石は長方形でなく、菱形となっている。左右2つの発電機は整流器で並列、直流となっている。



図6 同上発電機のロータ、ステーター



図7 新日本技研の1kW風力発電機(左羽根をはずした外観、右フードをはずした外観)



図8 同ローターをはずした外観



図9 ローター(内径に8個の磁石)

3.3 英国製ウインドチャージャー300W

英国式ウインドチャージャを図10に示す。図面から3D-CADで描いてみた。真ん中がコイルをセットしたステーターであり、その両サイドに磁石が配置されたローターが2つある。コイルはコアがなく、樹脂で固められている。コイルは8個で磁石も片側8個である。

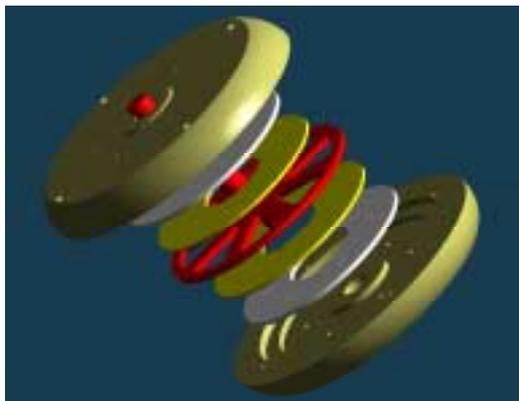


図 10 英国式ウインドチャージャの 3D-CAD

4 小型水力発電機の分解

4.1 米国製 AQUAIR 小型水力発電機



図 11 小型水力発電機（米国 AQUAIR）



図 12 同上磁石を付けたロータ（2段）

5. 結言：省略

サボニウス型風車の羽根枚数によるトルク変動

第 1 次 (3 枚羽根 ・ 5 枚羽根 ・ 12 枚羽根)

1 . はじめに

日本国内では、オランダやアメリカ合衆国のように常時一定方向に風が吹くというようなプロペラ型風車に適した土地は希である。そこで一般的日本の風況環境（風向が変化しやすい環境）に適した風車、サボニウス型と呼ばれる風車が挙げられる。サボニウス型風車は一般的に低回転・高トルクの特徴があり、回転数が風向に左右されないという利点を持つ。利点を活かした風力発電機開発の基礎を築くための実験として、風速や風車の形状の違いでトルクがどのように変動するのか、今後サボニウス風車に設計した発電機を駆動させる十分なトルクがあるのか（あるいは、設計された風車形状によって発生した回転トルク以下のトルクで発電する発電機の開発）という確認、考察するために、トルク測定実験を行う。

2 . 供試風車

上部中央：12 枚羽根（クロスフロー）
600mm × 610mm
下部左側： 5 枚羽根（サボニウス）
600mm × 610mm
下部右側： 3 枚羽根（サボニウス）
800mm × 610mm

* サボニウス型風車において羽根枚数の増加すると、低トルク・高回転型になる傾向がある。

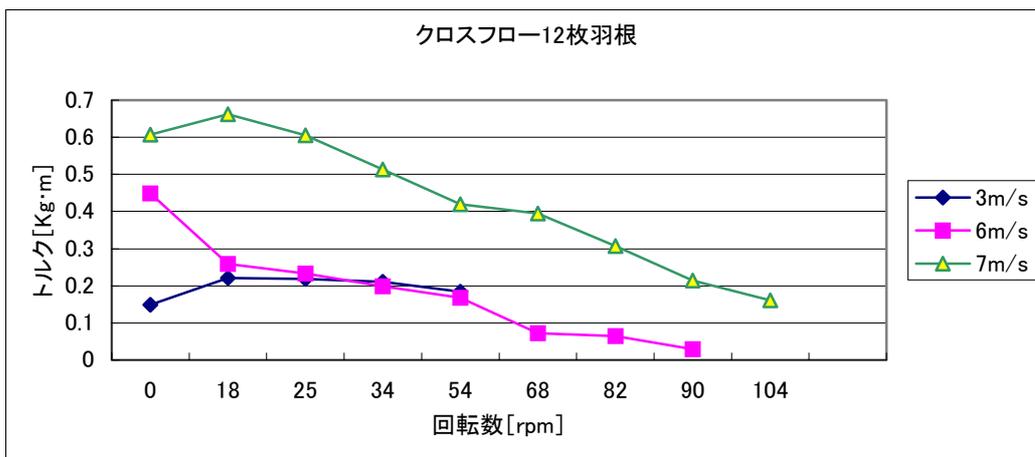
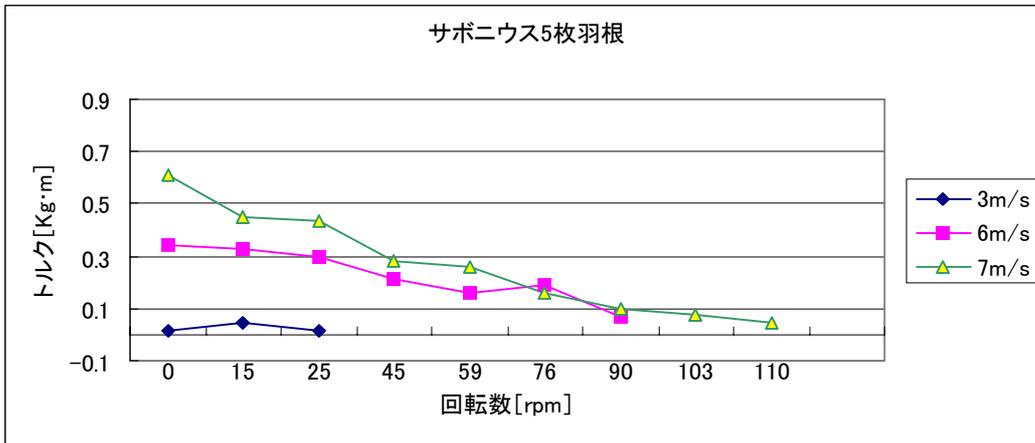
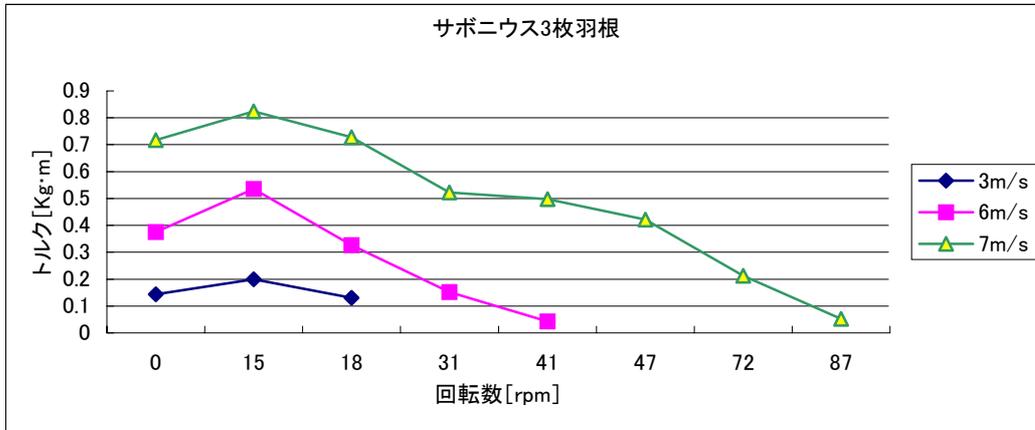


図 1 . 供試風車 (サボニウス ・ クロスフロー)

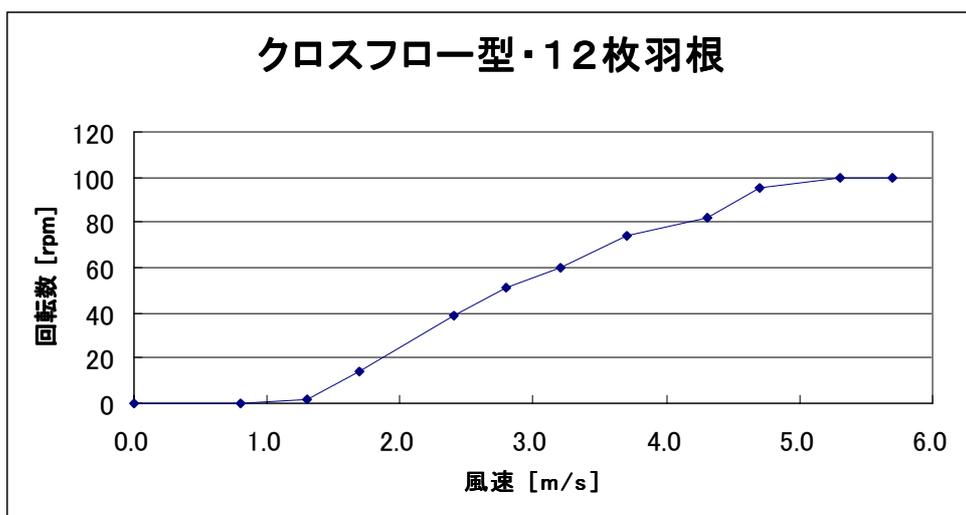
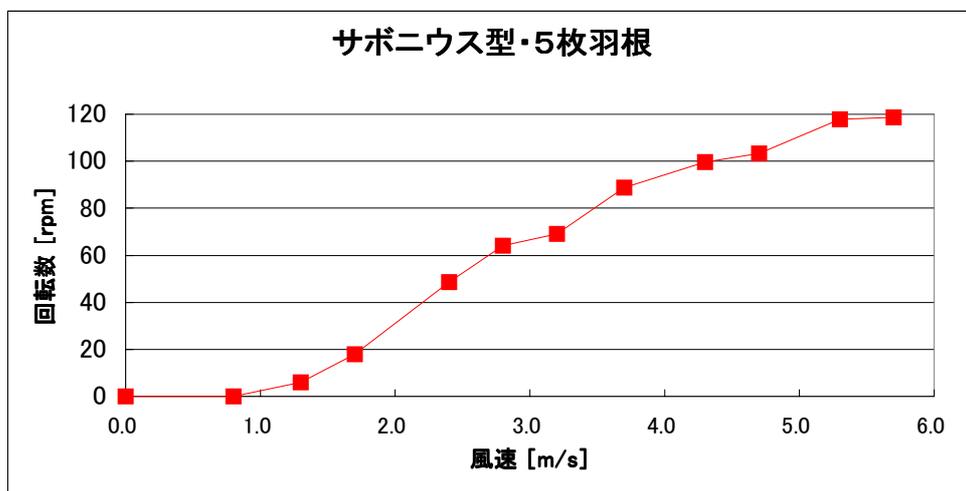
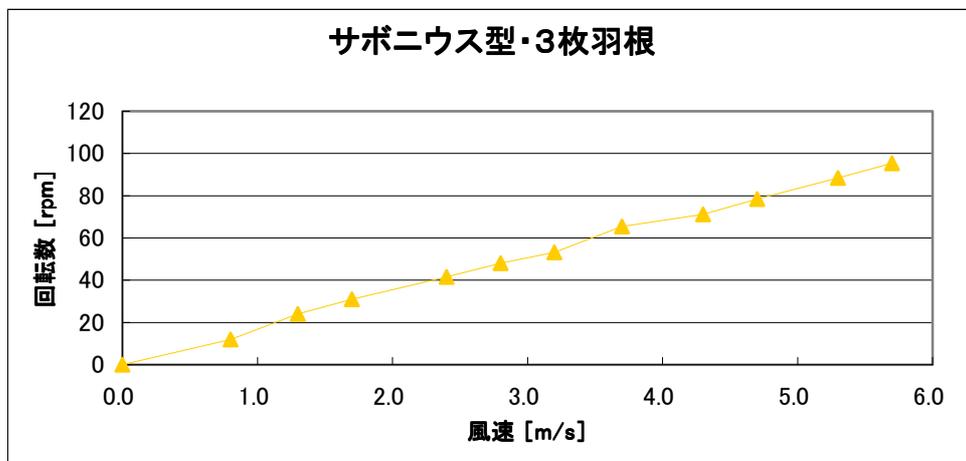
3 . 計測方法

風車の回転軸の延長上にトルク計を取り付け、一方のトルク計の軸には任意の抵抗がかけられるようにプーリーが設けられている。プーリーにある大きさの抵抗をかけた時の回転数・トルクを風速域 3.5m/s、6m/s、7m/s と 3 段階に分けて計測。

4. 計測結果 - 1 (各風速域における回転数とトルク変動)



5. 計測結果 - 2 (風速と回転数)



6. 考察

計測結果 1より比較的高いトルクが出力されていたのはサボニウス 3枚羽根とクロスフロー12枚羽根であった。実用の風速域(2~4 m/s)内においてもその傾向にあると推測できる。低風速時(3.5m/s)には3枚羽根・12枚羽根両方ともわずかなトルクの差は実質的に無いに等しいと判断する。しかし、足利工業大学・牛山泉教授らの研究によれば羽根の端板の有無によって若干ではあるが効率が上昇することが確認されている。従って、羽根部分のみの端板しかないことを考慮に入ると、サボニウス 3枚羽根の方が出力向上の可能性がある。高風速域(6m/s以上)時2種の風車、3枚羽根・12枚羽根にトルク、回転数において明確な差が確認された。サボニウス型は高トルクタイプ、クロスフローは高回転型に分けられる。サボニウス 5枚羽根においては他2種の間隔的な特性が見受けられた。しかし、低風速域においてはほとんどトルクが発生しておらず発電機を実装したとして、低風速域での発電量は3種の風車の中では最も低いであろう事は明らかである。

低風速域での風力発電機を開発製作するにあたってはサボニウス 5枚羽根風車を駆動源に使用することは避けた方が良く考える。低風速域での回転数は3者ともそれほど差は無く、更に確実にトルクを要求する発電機を実装するならばサボニウス 3枚羽根を選択した方がよいという結論に達する。

7. まとめ

- ・ 低風速域での回転数は3種とも大差は無いが、同時に出力トルクの点でサボニウス 3枚羽根、クロスフロー12枚羽根の順に有効である。
- ・ 高風速域ではサボニウス 5枚羽根、クロスフロー12枚羽根が高速回転をするトルクの点ではクロスフローの方が若干上である。このときサボニウス 3枚羽根の出力トルクは3種の中では随一ではあるが回転数が上がらず他の2種に比べ30回転程下回る。
- ・ 低風速域風力発電の駆動源としての風車はサボニウス 3枚羽根・クロスフロー12枚羽根が有効であるがサボニウス 3枚羽根はまだ改良の余地が残されている分発電機出力の向上の可能性が残されている。

8. 今後の計画

今回の実験では外形サイズは、ほぼ同形ではあったが羽根の形状が異なり、異なる種の風車が混在していたので、単に羽根枚数の変化によるトルク変動計測実験とはいい難いものがある。今後、同種の風車で外形サイズはもとより、羽根の形状も統一することにより、純粋に羽根枚数の変化による、性能・特性比較実験が必要であると考えられる。