中国・内モンゴル向けマイクロ垂直軸風車の回転特性の向上と強風対策

Improving Rotational Characteristics and Safety-Measuring against Strong Wind of Micro-size Vertical-Axis Wind Turbine for Inner Mongolia in China

08TM0331　白 相国　　指導教員 佐藤 建吉

SYNOPSIS

The purpose of this study is to build a high rotational performance micro vertical axis wind turbine (VAWT) with a safety measurement against strong wind in Inner Mongolia in China. Mongolian nomads have been eager to use long-life movable wind turbines as a new power source. I, therefore, has devoted to produce an innovative micro VAWT which has two features: one is a blade pitch controlling mechanism for rotational performance improvement and the other is a magnetic open-and-shut mechanism of blades for rotation limitation against strong wind. The primary objective of this study has been attained. The article describes a summary of the thesis.

1. 緒言

化石燃料と原子力は地球環境と人間の生活に被害をもたらしている。将来のエネルギーを供給するため、再生可能エネルギーへの転換に早急に取り組まなければならない。風力エネルギーは再生可能エネルギーのトップライナーであり環境問題・エネルギー問題・地球温暖化問題に貢献でき、世界では飛躍的にその導入量が増加している（図 1）。

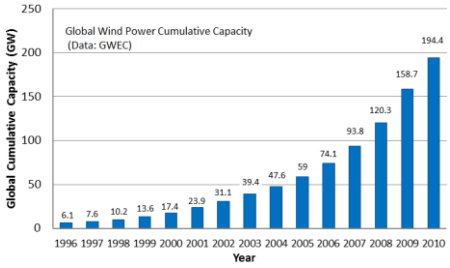

図 1　世界風力エネルギーの発電量

現在、デンマーク、ドイツ、アメリカなど、欧米の国は風車の最新技術を開発されている。2005 年以降、中国で風車の建設はさかんに行われているが、技術的には、ドイツとアメリカから導入している。日本も 2011 年 3 月の福島第一原子力発電所の事故がきっかけとなって、風力発電と太陽光発電、太陽熱利用の装置を大幅に設置するようになっている。

2. 本研究の背景と目的

内モンゴルは風や太陽光など、自然エネルギー資源が豊富に存在し、中国の国土面積の 12.3%にも及ぶ 118.3 万 km^2 の土地がある。内モンゴル全域での平均風速は 3～7m/s で風力発電利用可能地域は全区の約 80%にも相当し，全国の風力資源量の 5 分の1が内モンゴルに存在すると推定されている。このような自然エネルギー資源が豊富な地域で生活しているモンゴル人の中、季節によって、移動し、普通ゲルと呼ばれる住宅で生活している遊牧民がいる。遊牧生活は移動しているため、電気を利用できないという事情がある。しかし、遊牧している草原では、風は強いという特徴があって、移動するのに便利な風車があれば、電気を利用し、明るい生活できる。この背景で、本研究の風車は移動設置が容易で、高寿命で、性能に優れたマイクロ垂直軸風車の設計と開発を行った。

3 垂直軸風車の設計

3.1 風車の構造の特徴

本論文で研究した風車には二つの特徴がある。過回転防止対策（強風対策、図 2)と、回転を向上させる対策（図4）である。

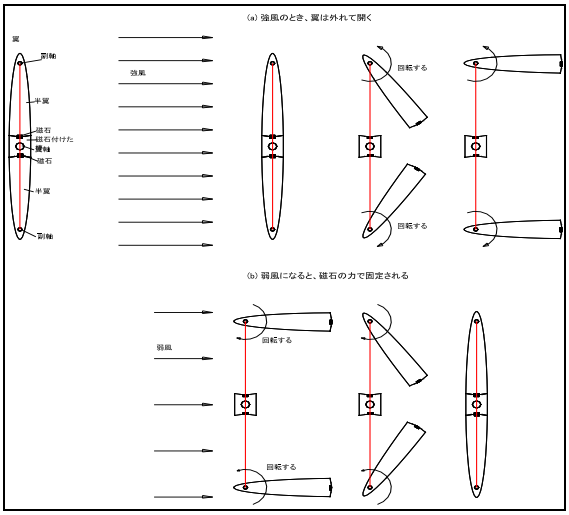

図 2　風車の翼を開放して強風対策する模式図

台風のような強風の時には、回転速度は速くなり過ぎて、風車全体を破壊する恐れがあるので、安全のため図 2 の a のように翼の中心からまるでドアが開くように開いて風を逃がし、風車の回転速度を低下させるように対策する設計を行った。回転速度が低下すると、また元のように翼を閉じる仕組みに設計した。図 2 の b のようになる。この仕組みは、翼の外れる側（半翼）と翼軸側に、それぞれ磁石を取付けて、通常は相互に磁石で引き合っている。

垂直軸の回転特性の向上は、風上側に回転するときに抗力が生じないようにした。そのため風車の上部にローラチェーン構造を設置して、翼のピッチ角を制御した。翼を図 3 のように回転をさせるため、軸と主軸のスプロケットは外径が 2：1 の関係にならなければならない。

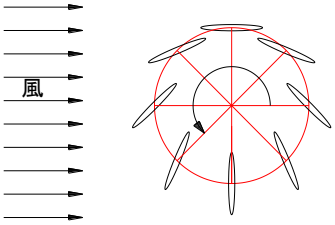

図 3　風車の回転方向

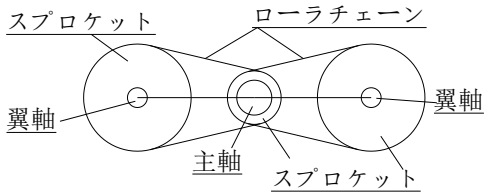

図 4　ローラチェーン構造

風車の全体の概観図は、図 5 ようになる。

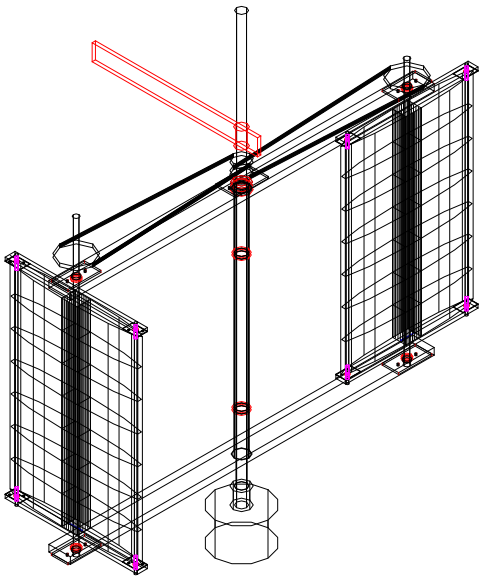

図 5　風車の概観図

3.2 マイクロ垂直軸風車の各部品の設計

①　翼の設計

翼は強風時に安全対策として開閉させるため、翼の両端に副軸をつける必要がある。このために翼は対称形ではなければならない。本マイクロ垂直軸風車の翼には、NACA 系の対称翼である NACA0006 の翼型を利用して、翼型の前縁部分だけを採用し、それを左右対称にして翼の断面として構成させた。また、翼に生じる抗力と揚力を計算し、設計図を描いて、しかも、実際に製造するとき便利を図るため、構成された翼の断面は NACA0006 の前縁部分を対称にした形を似ている楕円の式$\frac{x^2}{200^2}+\frac{y^2}{20^2}=1$の形を利用するようにした。図 6 に示す。翼の高さを 600mm にした。

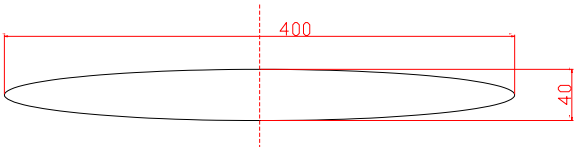

図 6　楕円の図（翼の断面）

②　軸の設計

本風車では三つの種類の軸は必要であった。風車全体を支える軸を主軸、翼を通して腕枠と固定する軸を翼軸、翼の半分が外れていくとき、支える軸を副軸である。

③　腕枠の設計

本風車では翼を固定する板と風車全体を固定する板という二種類の板が必要である。ここで、翼で使用する板を翼板と呼び、風車全体を固定する板を腕枠と呼んだ。腕枠には上部板と下部板が含まれている。翼板の寸法は翼の幅によって、長さは 400mm にした。

腕枠の長さは、翼が離れていくとき、主軸に当たらないように設計する必要があって、図 7 のように、半翼は翼軸から離れても、主軸に当たらない最小距離は 355mm で、この距離より小さいと外れた半翼が主軸に衝突する。この状況によって、翼軸と主軸の距離を 500mm にした。したがって、腕枠の長さは 1100mm になる。

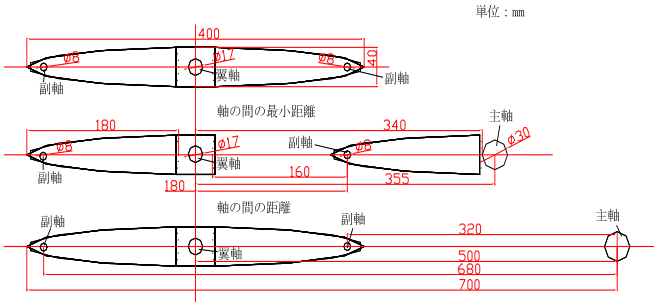

図 7　腕枠の距離設定

④　磁石

磁石の吸引力を利用して、半翼は翼軸から離れて、また元に戻る役割を果たさせる。このため、翼の外れる側と翼軸に木材の四角棒を通して、そこに両側に磁石を取付けた。一面には 5 個磁石を付けた。全部 8 面があるので、40 個磁石を使用した。

4. マイクロ垂直軸風車の製作

4.1 設計図

本風車の設計図を磁石の部分、翼の部分、腕枠の部分と軸の部分に分けて、設計した。それで、主に翼の部分を例として、あげる。図 8 のようになる。

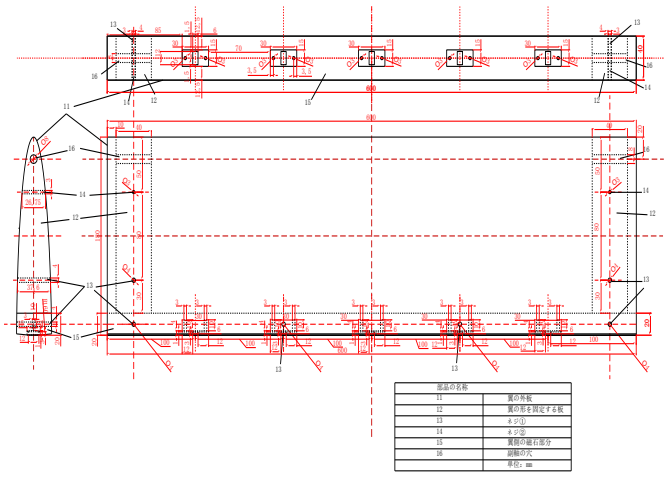

図 8　翼の設計図

4.2　軸に各部品の配置する図

本風車で、三種類の軸が必要であるが、その軸の各部品を配置する位置関係は必要であった。図 9、図 10、図 11 に示す。

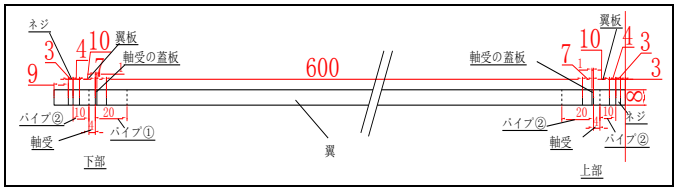

図 9　副軸の部品の配置図

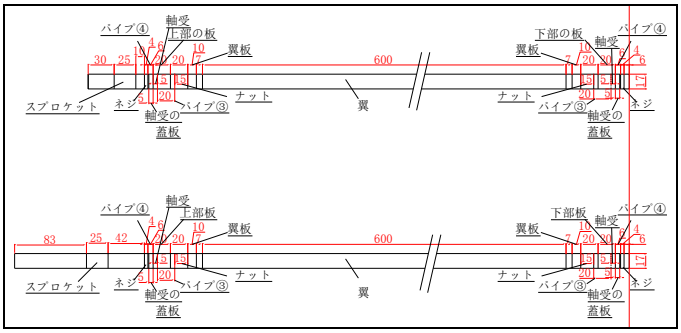

図 10　翼軸の部品の配置図

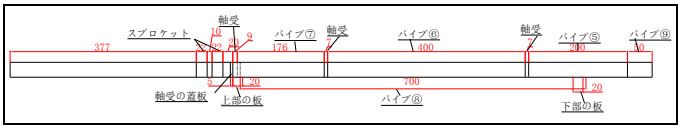

図 11　主軸の部品の配置図

4. 3 実物

図 12 は組立てた風車である。発電機は付いてない。

図 12　実験モデル風車

5.　実験と考察

5. 1 回転数

風車の翼は、風速（回転数）が増加しても、磁力による吸引力を超えて開放しないように、粘着テープでシールして行った。送風機の周波数を上昇させると、風車の回転も速くなっていく。図 13 に示す。

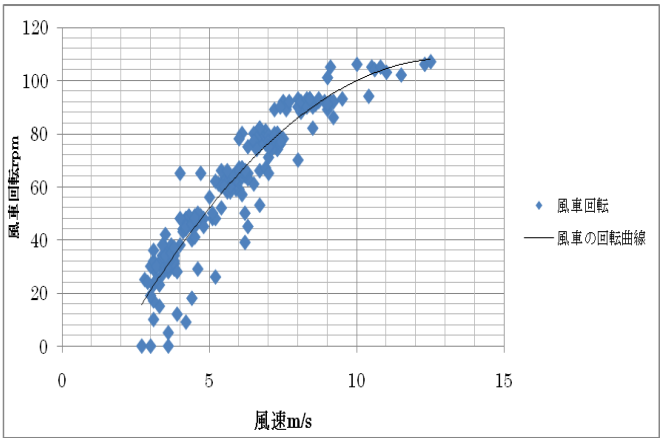

図 13　風車の回転数

本風車は回転し始める風速は 2.5～3.0m/s の間であり、風車の周速比は 0.5 ぐらいになる。

5.2　過回転防止対策（翼が開放する効果について）

実験から風速は、10m/s 以上になると風車の回転は 107rpm になり、とても速い。これにより実験風車は、全体のバランスが崩れる兆候が見られる。その安全を保護するため、翼は翼軸から離れ開放する仕組みを機構として取り入れてある。この対策の効果を実験により検討した。実験結果を図 14 と図 15 に示す。

風速が 2.6m/s から風車は起動して、風速が 4.4m/s の時（図中、矢印 a)、風車の回転数 48rpm なり、一枚の半翼は外れて回転は低下し、回転数 26rpm ぐらいで一定になった（図中、矢印 b)。ここで風速を低下させると、半翼は回転途中で磁石の力で閉じた。

そこで再び風速を上げると（図中、矢印 c)、回転数は上がって、回転数 48rpm の時、半翼はまた外れ（図中、矢印 d)、回転数は低下した。風速を一定とすると、半翼は外れたままで、風車の回転数は一定となった。

ここで風速を低下させると、また、半翼は閉じた。その回転数は 11～18rpm の間であった。

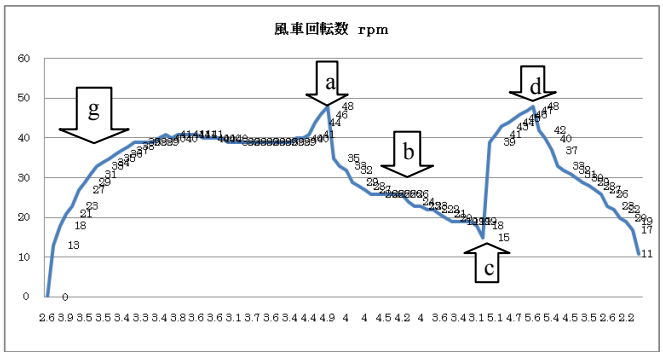

図 14　過回転防止対策の効果：一枚の半翼が開閉した場合

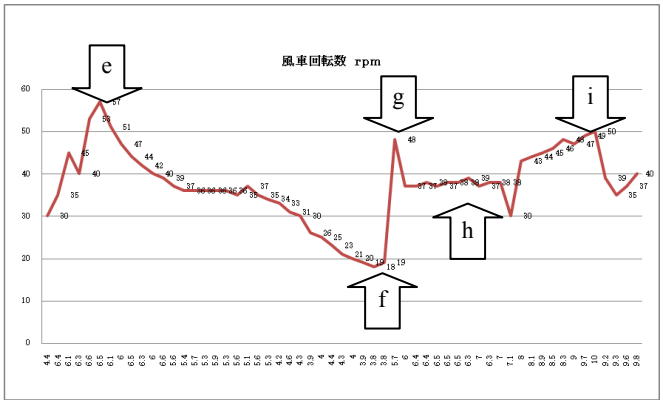

図 15　過回転防止対策の効果：2 枚以上の半翼が開閉した場合

図 15 は、風速が速い場合の結果で、この時には複数枚の風車の翼が開閉する。風速を上昇させた場合、風速が 6.5m/s の時、回転数は 57rpm になり、二枚の半翼は同時に外れて開き（図中、矢印 e)、回転数が低下した。風速を低下させると、回転数は 18rpm で一枚の半翼は戻り（図中、矢印 e)、風速は再び上昇し、風車の回転は速くなって、48rpm の時、一枚半翼が外れて開いた（図中、矢印 g)。風速が上がると、第三目の半翼は離れた（図中、矢印 h)。この時には、合計三枚の半翼が離れている。続けて、風速を上昇させると、回転数が 50rpm ぐらいで（図中、矢印 i)、回転は低下した。

以上実験結果から、風車の安全を保護する仕組み（過回転防止機構）は、非常に成功していることをわかる。

5.3　パワー係数

本風車の回転を、通常時（翼が外れていない場合）と、翼が外れた時と、二つの条件で回転数と発電した電力を測定した（図 16）。この測定値によって、パワー係数 C_p を計算して、風車の性能を評価した。

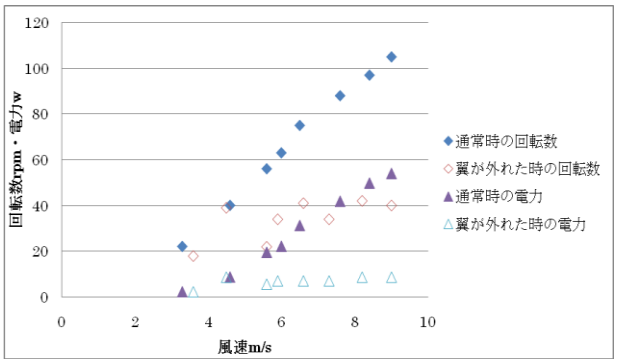

図 16　普通回転と翼が外れた時の回転数と電力

図 16 によると、風車は回転数が上がると、出力(電力)も上がる。風速は速くなると、過回転防止機構が働いて翼は外れて開くが、その時、回転数と出力も下がっている（◆⇒◇、▲⇒△）ことを、実験結果から知ることができる。

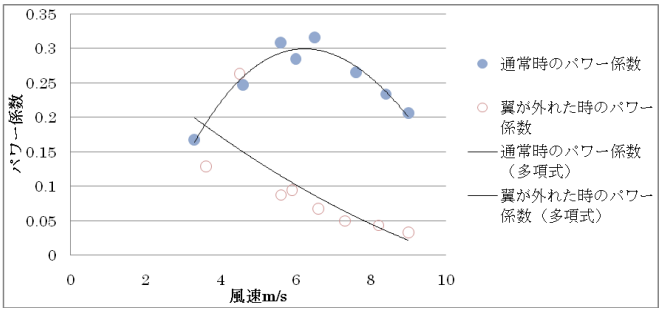

図 17 通常時と翼が外れた時のパワー係数 C_p

図 17 では、通常時（翼が外れていない場合）のパワー係数は最大で 0.3 を超えている。その時の風速は 6m/s ぐらいであり、風速が高くなるとパワー係数が下がる。それは発電機の特性にも関係している。翼を外れるようにした場合、風速が高くなって 5m/s ごろになると、翼が外れて開き、結果として回転数も発電出力も低下する。この時にはパワー係数も下がっている。

5.4 本マイクロ垂直軸風車の評価

5.4.1　発電特性

まず、マイクロ垂直軸風車の発電特性と回転特性は、風車の翼が外れていない通常時（翼をテープで貼り付け半翼が開かないようにした時）での実験結果に説明する。

- 風車の回転し始める風速（すなわち、カットイン風速）は、2.6m/s であった。一般の垂直軸風車では、風向きに逆らう回転位置（本論文では θ =90° 付近）においても、翼の面積が広いので、回転の障害になる。本研究で開発した風車は、この位置で翼の面積をピッチ角制御にして、風の抵抗（抗力）を消している。実験結果と計算結果からは、この位置においてはむしろ揚力が生じて、順方向へ回転させるトルクを生じさせていると考えられる。
- このことが、パワー係数を 0.32 のレベルまで向上させた原因であると言える。抗力型垂直軸風車のパワー係数は、理論では、0.15 以上となることは、理論的に難しいとされているが、ピッチ角制御機構を備えた本風車のパワー係数は 0.32 まで上昇している。この結果から、本風車は、ピッチ角を翼の回転位置に応じてスプロケットとローラチェーンを用いて制御していることが効果を出して、性能向上を発揮したことが確かめられた。
- 本風車は、通常時の翼が開かない場合には、翼回転面積が直径方向 1m、軸方向 0.6m と小さいが、出力は、風速 8m/s で約 50W クラスである。その時の回転数は、約 90rpm となっている。重量は、約 40kg であり文字通りマイクロ風車としての範疇である。
- 風速が、さらに高い 10m/s であれば、発電出力は、80W 程度に向上するはずである。
- 発生出力をもっと大きくするには、羽根枚数を 2 枚から 3 枚にすること、そして大きさを直径方向 1.5m、軸方向に 1m にすれば、150W クラスになると言える。

5.4.2　回転特性

本研究のマイクロ垂直軸風車は安全を保護する仕組みとして、磁石による吸引力を超えた風荷重では、翼が開いて風を解放する方法を採用してある。実験で、この二つ仕組みは設計のとおり、過回転防止機構は風速が速くなると、翼が外れて開き、風速が低くなると磁石の力で閉じて、動作している。

- この過回転防止機構により、通常の翼では回転数は 90rpm から翼が開くと 40rpm に低下している。この回転速度は、風速がさらに上がっても、2 枚の風車翼を構成する 4 枚の半翼とも開くので、回転速度は 40rpm 以上には高まらないと考えられ、風車の倒壊や破壊は、防止できる。
- この過回転防止機構により、回転速度が高まらないが、外れた半翼は風車の回転により、ともに回転する。その回転は非常に一定している。

5.5　本風車の用途

本風車は、以上のように性能向上と安全対策の二つを導入しており、その用途としては、中国の内モンゴル地方などでの遊牧民の電源として想定した。したがって、電力源としては風車以外に太陽光発電も可能であるので、これらのハイブリッド利用が望ましい。

6　結言

本研究では、中国・内モンゴルで利用できるマイクロ垂直軸風車を設計し、開発すること目的とした。この風車を開発するため、各部品の設計を行い、それを基づいて材料を注文して、製作をした。本風車の実験モデルに関して、風車の性能を評価するため、回転トルク、抗力係数、パワー係数を求める実験と本風車の特性の実験を行った。実験結果から、本風車の性能は設計通りに向上した、実用化のためには、さらに製作精度の改善と、耐久試験が必要である。

文献

1) 関和市、牛山泉：垂直軸風車、パワー社、2008. 2) 牛山泉、三野正洋：小型風車ハンドブック、パワー社、1980.