

タワーレス垂直軸型風車を題材にした教材の開発

東京都立蔵前工業高等学校 岩下 修

1. 目的

実際に発電できる風車を製作することで流体の基礎理論や発電機に関する理解を深める。また、自然エネルギーを研究する楽しさを知る。

2. 風車の種類

現在、風力発電の主流は3枚羽プロペラ風車の水平軸揚力型であるがジャイロミル風車やダリウス風車等の垂直軸揚力型に分類される風車も活躍している。垂直軸風車は他にもクロスフロー風車やサヴォニウス風車等の抗力型も存在するが大規模発電には利用されていない。

一般に風車は地面に穴を掘りタワーを建設してその上部に設置するので、その施工費用も含めるとkW単価は高くなる。また、風車は大きい方が粘性摩擦の影響が少なく効率が良いと知られているが、現在100mを超える風車は存在していない。これは受風面積とタワーの断面積が高さの2乗に比例するのに対して質量は3乗に比例するためである。

参考資料（牛山 泉・三野 正 共著『小型風車ハンドブック』）によれば、上記の問題を解決するために『タワーレス風車』が構想されたが実用化は難しかったようである。今回製作した風車は『タワーレス垂直軸風車』と分類できるのではないかとと思われる。

3. タワーレス垂直軸型風車の特徴

垂直軸型風車は反回転方向にも風が当たる。このマイナス要素の風を図2のように、回転方向に導くと効率よくなる。案内羽根としての機能をフレームに持たせるために、試作と計測を続けた結果、図3のようにフレームがつくる三角形の外接円の半径と風車の半径が近いとき効率が良いこと等がわかった。

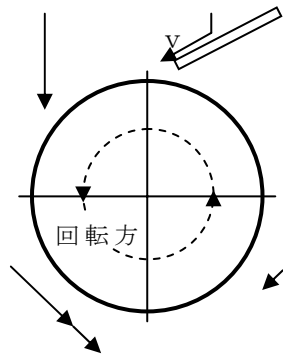


図2 案内羽根としての機能

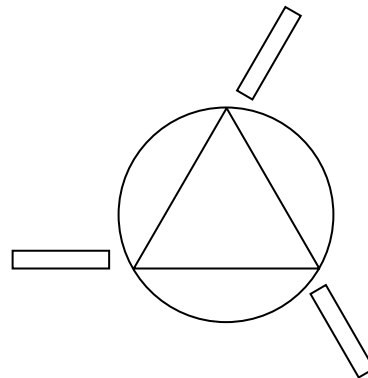


図3 風車半径とフレームの比

小さい風車では特に問題にはならなかったが大きい風車では先に述べた2乗3乗法則による問題が無視できなくなる。そこで図4のようにフレームの天井部と風車の軸に磁石を取り付け、その間にスチールボールを挟み、磁力によって風車をつり上げる工夫をした。

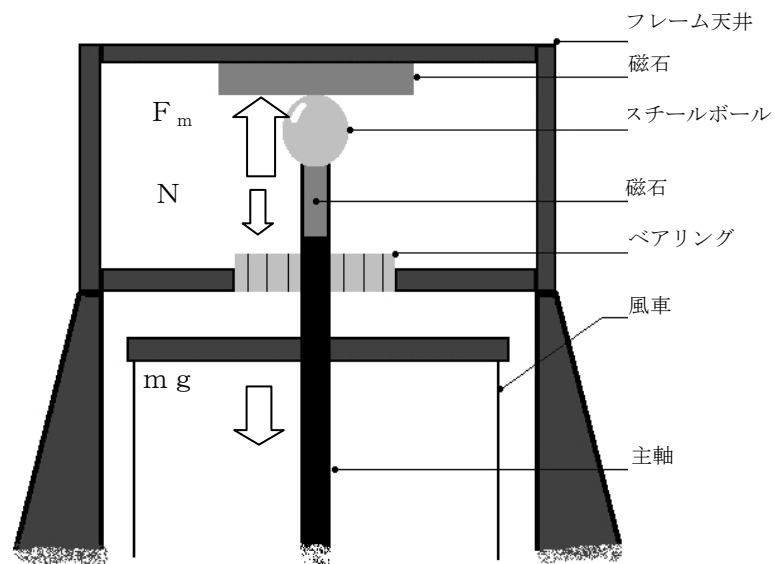


図4 質量による摩擦を磁力で減少させる工夫

4. 設計図

5. 製作の流れ

画像ファイルが大きく、添付できなかったため本ファイルから省略させていただきました。

6. 実験

風車の高さや電力を記号化した数学的なモデルを探すために様々なデータが必要になる。そこで以下のような実験を行った。

- ① 大きさが異なる相似な風車を3基製作する。
- ② ギヤ比を調整し発電用モータを取り付ける。
- ③ 実習室の空気を換気扇、扇風機で吸い出す。
- ④ 実習室に流れ込む風を風車にあてる。
- ⑤ 熱線風速計で風車前方の風速を測定する。
9カ所以上で測定した平均を風速とする。
- ⑥ 最大電力測定法を用いて電力を計測する。

内風車はサヴォニウス型を使用した。

発電機はタミヤ社ソーラーモータ02を使用した。

図16の実験用風車の高さは次の通りである。

1. 20 [m]
- 0.75 [m]
- 0.48 [m]

実験は2回行った。

- 1回目の風速 0.95 [m/s]
- 2回目の風速 1.36 [m/s]

どちらもほぼ一様な層流を風車にあてることができた。

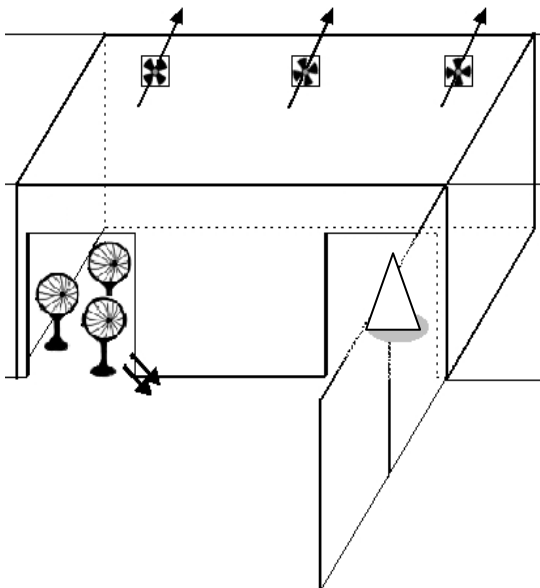


図16 大きさが異なる相似風車

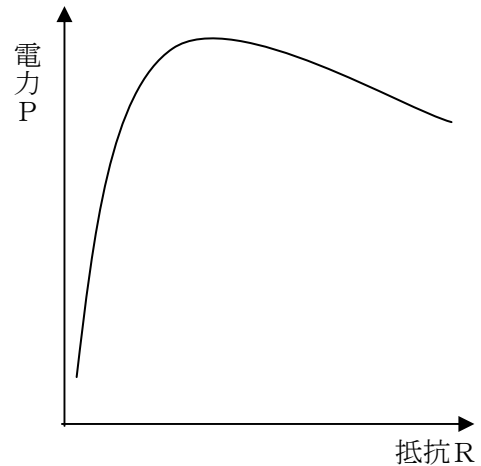


図17 実験方法

図18 最大電力測定法の記録例

7. 実験結果

	風速 0.95 [m/s]	風速 1.36 [m/s]
高さ 0.48 [m]	電力 0.00 [mW]	電力 1.95 [mW]
0.75 [m]	6.85 [mW]	12.00 [mW]
1.20 [m]	28.30 [mW]	45.10 [mW]

実験の結果は以下のようになった。

8. 結果の考察

考察用簡易モデルと記号化した要素を以下に示す。

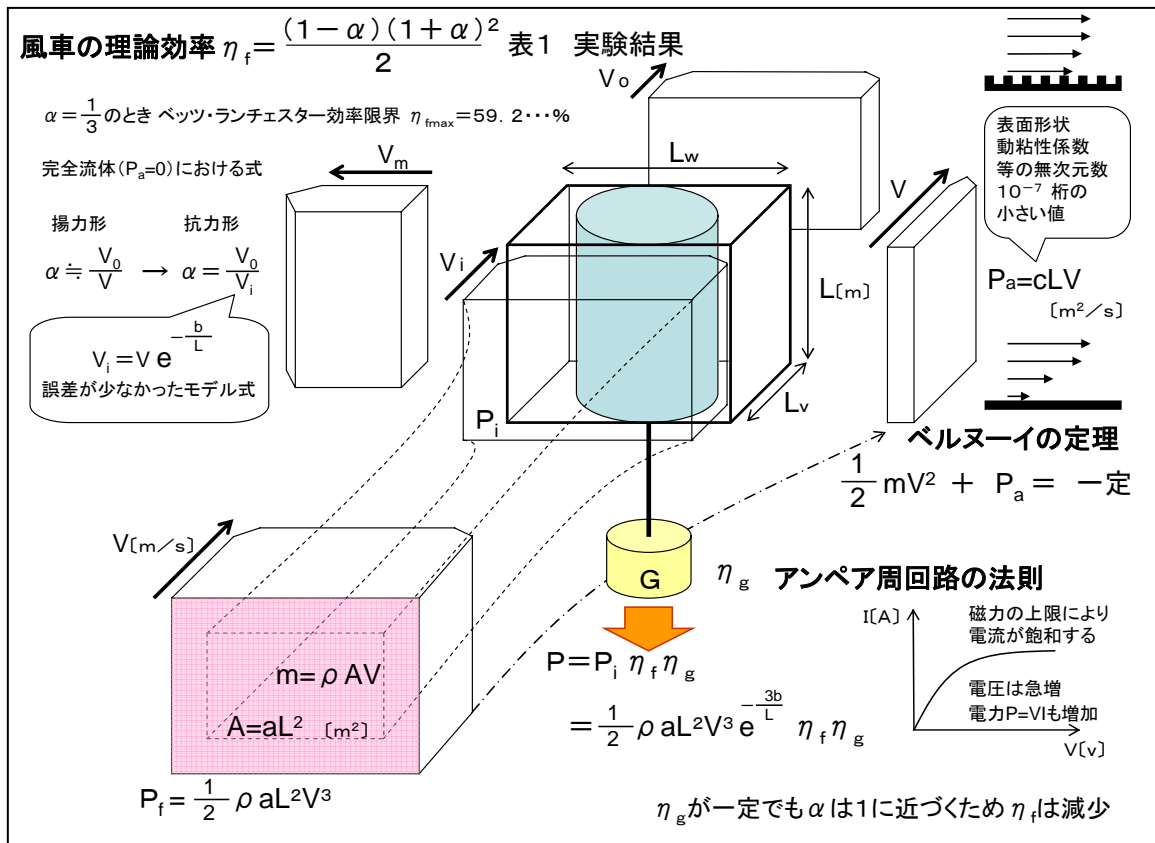


図19 考察用簡易モデル

- V [m/s] : 風速 V_i [m/s] : 流入速度 V_0 [m/s] : 流出速度 V_m [m/s] : 転進速度
- α : 風車前後風速比 L [m] : 風車高さ L_v [m] : 風車奥行 L_w [m] : 風車幅
- A [m²] : 投影面積 P_f : 風のエネルギー P_i : 流入風のエネルギー P : 発電される電力
- a : 面積比 b : 境界係数 c : 動粘性等の係数 e : オイラー数

η_f : 風車の理論効率 η_g : 発電機の効率 ρ : 空気密度 m : 移動流体の質量

考察は次のような手順で行った。

【I】 風車前の風速 V [m/s] によるエネルギーは次式で表せる。

$$P_f = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho A V \times V^2 = \frac{1}{2} \rho_a L^2 V^3$$

【II】 風車前の風速 V [m/s] と平行な面に発生する粘性摩擦は次式で表せる。

$$P_a = c L V$$

c は L_v と L の比や粘性摩擦、表面形状等を含む無次元の係数で、 10^{-6} 桁以下と極めて小さな値。表面にディンプルがあるとさらに小さくなる。(※1)

[m] × [m/s] = [m²/s] という不思議な単位は、ベルヌーイの定理に当てはめて考えれば上昇する気圧 [Pa/s] であることがわかる。

物体表面の気圧が上昇する空間は境界層とも呼ばれる。

【III】 風車前方風速 V は境界層によりその全てが風車内に入ることはできなくなる。

粘性摩擦が引き起こす効率低下の大きな原因といえる。

【IV】 粘性摩擦の影響を受けない速度成分を風車流入速度 V_i とする。

【V】 風車に当たり方向を変えた速度成分を転進速度 V_m とする。

この反作用によって効力型風車は回転する。

【VI】 発電機の電機子を貫く磁束が多すぎて風車が回転しなければ、 V_i の全てが V_m

になるが電力は 0 [W] になる。逆に磁束が 0 [Wb] でも風車の周速度は V_i と同じになりこれも 0 [W] になる。 V_m とは別に、風車と一緒に移動して風車後方に流出する風速が発電には必要で、これを流出速度 V_o とする。

【VII】 風車の理論効率は次式で表される。

$$\eta_f = \frac{(1-\alpha)(1+\alpha)^2}{2}$$

α は風車前面と後面の風速比であるが理論効率は完全流体（粘性摩擦 0 の流体）における式なので実在の流体では次式で表すことになる。(※2)

$$\alpha = \frac{V_o}{V_i}$$

※1 流体の相似性を表す無次元数としてレイノルズ数 (Re) がよく使われる。

静止流体の割合を要素にしている c には逆数の (Re^{-1}) が含まれていると考えられる。

※2 十分に大きな揚力型の風車は粘性摩擦の影響が小さいので $V \approx V_i$ として計算される。

【VIII】 タワーレス垂直軸風車は粘性摩擦の影響を強く受ける。

問題は完全流体に換算された V_i は V とどのような関係にあるのかという点である。様々なモデル式をコンピュータで実験値と比較したところ

$$V_i = V e^{\frac{-b}{L}}$$

というモデル式の誤差が一番少ないという結果が出力された。

このモデル式の指数部には V の要素が存在していないので様々な候補モデル式の中では当初あまり期待をしていなかった。

しかし、コンピュータの演算結果を受けて改めて以下のように考察した。

空気の動粘性係数や表面形状等による係数 c は 10^{-6} 桁と極めて小さいため、風速が多少変化しても境界層の厚さはほとんど変化しない。むしろ大きさ L_w との比に強く支配される。

【IX】 発電機から取り出せる電力 P は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} P &= P_i \eta_f \eta_g \\ &= \frac{1}{2} \rho a L^2 V^3 e^{\frac{-3b}{L}} \eta_f \eta_g \quad \text{①} \end{aligned}$$

①式の係数をコンピュータで解析したところ次のような値になった。

$$a \eta_f \eta_g = 0.0416528 \quad b = 0.2733$$

【X】 ①式と実験値との間には、まだ13 [mW] という誤差が存在する。

この原因はアンペア周回路の法則と関係が深いのではないかと考えた。

アンペア周回路の法則は『磁界の強さの総和と電流の総和が等しい』というもので磁気と電気のエネルギー保存則ともいえる。

このことを踏まえ以下のように考察した。

速い風が風車内に流入しても電機子を貫く磁束以上の電流は取り出せない。

このため風車の回転数は急激に上昇する。回転数に比例して電圧も上昇する。

最大電力測定法で計測した場合、全磁束が電流になっても電力 $P = V I$ [w]

は上昇し続けるため、発電機の効率 η_g は大きく減少しない。

しかし風速比 α は1に近づくため理論効率 η_f は急激に減少する。

1回目の実験では風車が回り始める風速であったため電流がまだ飽和状態には

なく推論値より高めになったと思われる。