

風車のソリディティとエネルギー変換効率の関係

東京都立戸山高等学校 岡本 遼太郎

Abstract

Today, we must develop alternative energies. However, Japan does not have enough land to build large power plant. Therefore we studied about small-sized wind power generation for the purpose of developing a windmill which is suitable for the wind condition of its installed location.

序論

今日、世界では再生可能エネルギーの開発が急務とされている。風力をもっとも古くから利用されている再生可能エネルギーであり、比較的安価であることが利点であるが、国土の多くを山地が占めている日本では、世界中で開発が進められている大型の発電施設（ウィンドファーム）を設置することは困難である。しかし、山間の風が集まる場所の風力（局所風）や、都市部、住宅地など今まで利用できなかった場所の風力エネルギーの埋蔵量は多い。

従って日本においては、従来のような大規模集中型の風力発電ではなく、小規模分散型の風力発電（マイクロ風力発電）を行うことが望ましいと考えられる。マイクロ風力発電のような小規模分散型の発電にはエネルギーの地産地消が可能であるという利点もある。そこで今回私たちはマイクロ風力発電に用いられるマイクロ風車の性能向上を目指した。

研究目的

現在日本でも、マイクロ風力発電のユニットは市販されているが、それらに用いられている風車は多くが研究の進んだ主流の大型風車をそのまま小型化したものとなっている。しかし、大型風車は風力発電に適した海边などの強く安定した風が吹く場所に設置されることを前提として設計されているが、マイクロ風車が設置される場所はビルの屋上、山間地、住宅地など、必ずしも強い風が安定して吹くとは限らず、設置される場所によって風況（風の環境）は大きく異なる。

従って今回私たちは設置場所ごとの風況で最大の性能を示す風車を設計する方法を開発することを本研究の目的とした。

実験目的

本研究ではマイクロ風車の性能を向上することを目標としているが、風車の性能を一般的に評価する方法を以下に示す。

風車の性能はエネルギー変換効率として一般的に次の式

で表される。

エネルギー変換効率 C_p 、風車のトルク Q [Nm] 風車の回転角速度 ω [rad/s]

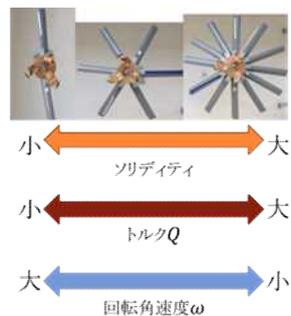
空気密度 ρ [kg/m³]、受風面積 A [m²]、風速 V_{∞} [$\frac{m}{s}$] とすると、

$$C_p = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_{\infty}^3}$$

この式の分母は風（空気）の単位時間当たりの運動エネルギー [W]、分子は風車が得た単位時間当たりの回転方向の運動エネルギー（我々が実際に使えるエネルギー） [W] を表す。

つまり風車が得た運動エネルギーは、トルク（回転方向の力の大きさ。モーメントと同じ。）と回転角速度（回転速度）から求められる。

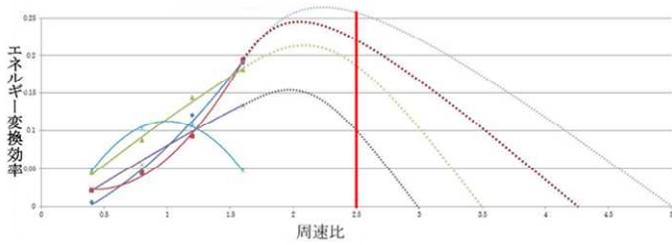
風車のトルクと回転角速度は風車の様々な設計要因によって変化するが、そのうち最も基本的で大きな要因として、ソリディティがある。ソリディティとは、風車が回転した時にできる円の面積に対する、実際にブレード（羽根）がある部分の割合のことである。一般的にソリディティと回転角速度及びトルクの関係は次のようになっている。〔図1〕



〔図1〕

「ソリディティと風車の回転角速度及びトルクの関係」

本実験では、風洞実験によって風車のエネルギー変換効率とソリディティの関係性を求め、次のグラフを作成することを目的とした。〔図2〕



〔図2〕「ソリディティ毎の周速比とエネルギー変換効率の関係」

※このグラフは本文の説明のために作成したもので、科学的な根拠はない。
 ※一つ一つの曲線がそれぞれ異なるソリディティの風車の性能を示す。

横軸の周速比というのは次の式で表されるもので、設計風速、発電に使用するモータの適正回転数から求められるもので、風車の設置環境を表すパラメータである。

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_w} = \frac{2\pi R n}{V_w}$$

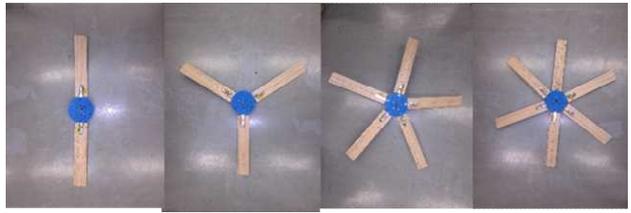
λ: 周速比 R: ロータ半径[m] n: 風車回転数[rps]

このグラフが作成できれば、例えば周速比 2.5 の風車を作成したいときは図から周速比 2.5 で最も高いエネルギー変換効率を示している青い曲線の風車を作成すればよいとわかる。

このようにして設置場所の風況での最適ソリディティを求めることが出来る。

実験装置

直径 60cm、ソリディティ 9.1%, 13.7%, 22.75%, 27.3%の風車を作成した。ブレードにはバルサ材を用い、翼形は最も広く使われており流体力学的なデータが多くとられている NACA4412 を採用した。〔図3〕



NACA4412

〔図3〕「ブレード写真及び翼形」

風洞は、全長 7m、風速 3.9m、吹き出し口直径 80cm×80cm 風源は山善 60cm 風洞扇 YDF-601 を 4 台用いたものを作成した。

〔図4〕 風源から送られた風は収縮部で一度圧縮され、その後薄い板を格子状に組み合わせたもの（整流格子）を通る。この過程で断続的ではばらつきのある送風機の風が均一になって風車に当たる。風洞が機能しているかを調べるために風洞の吹き出し口を 10cm×10cm の格子に区切って風速を測定した。その結果、今回作成した風洞は十分な性能を持っていると判断した。〔図5〕



〔図4〕「風洞外観」



〔図5〕左「性能試験図」 右「性能試験の様子」

※青い円は実際に風車が風を受ける部分。

実験方法

風車を DC モータに接続し、DC モータを可変抵抗を含む回路につなぐ。〔図6〕これを風洞の中に設置して風を送り、風車を回転させる。ここで、可変抵抗の抵抗値を大きくすると、回路を流れる電流は小さくなるため、モータの発電量は小さくなるので、風車がモータから受けるトルクの大きさは小さくなる。つまり風車は回転しやすくなる。逆に抵抗値を小さくすると、風車がモータから受けるトルクは大きくなり風車は回転しにくくなる。

ここで、前出の風車の運動エネルギーの式 $E_k = Q \cdot \omega$ を変形すると $Q = E_k / \omega$ と表される。よって、風車が、モータが発電したために受けたトルクは、モータの発電量 E_k を風車の回転角速度 ω で割ったものに等しい。これを Q_1 とする。回転角速度はレーザー回転数計で測定した。また、モータは無発電

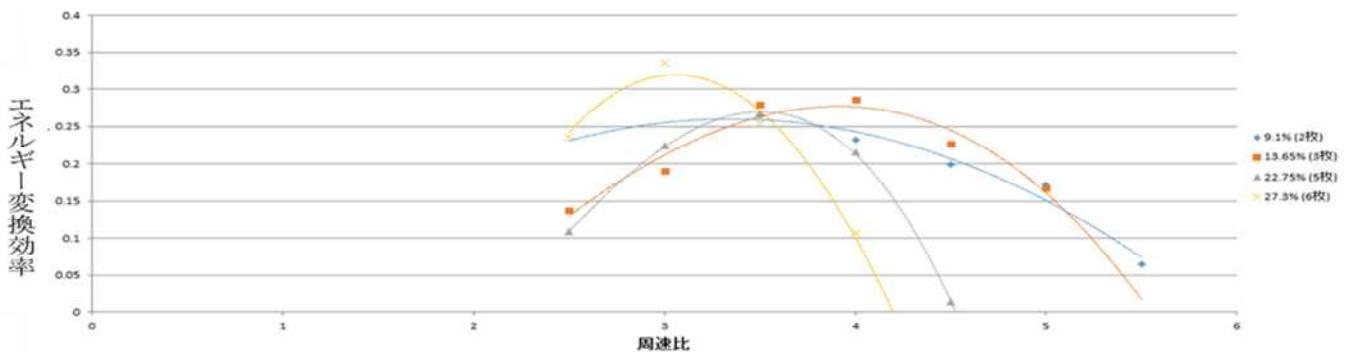
時でも摩擦によってトルクが生じるため、それを測定した。これを Q_2 とする。よって風車が回転角速度 ω の時にモータから受けるトルクの大きさは、 $Q_1 + Q_2 = (RI^2/\omega) + Q_2$ と表される。ここでは、モータの軸摩擦は回転数によって変化しないこととした。

従って、回転角速度 ω のときの風車のエネルギー変換効率は、 $\frac{[(RI^2/\omega) + Q_2]\omega}{0.41^2/2}$ と表される。

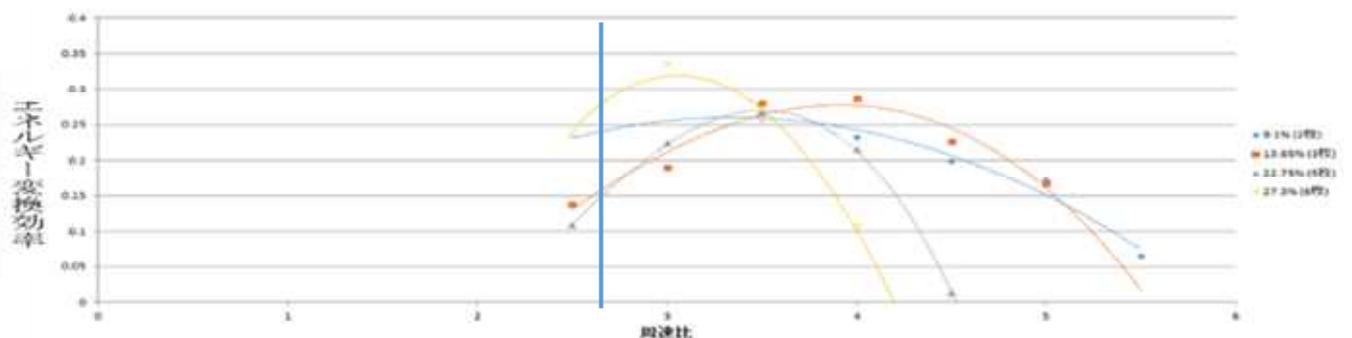
このようにしてそれぞれのソリディティでの周速比ごとのエネルギー変換効率を求め、グラフにした。

結果

結果を以下に示す。〔図6〕なお、風車の周速比とエネルギー変換効率の関係は、そのときの風速によってあまり変化しないため、今回の風洞実験（風速3.9m/s）で得られた結果は、他の風速の場合においても用いることが十分可能だといえる。



〔図6〕「実験結果グラフ」



〔図7〕「周速比 2.6 線」

考察1

ソリディティの大きい風車ほど、低い周速比でエネルギー変換効率のピークを迎える傾向があるといえる。

また、ソリディティ 9.1%の風車のみ、エネルギー変換効率のピークが見えにくく、上記の傾向に反しており、値も全体的に低い。これには次の二つの理由が考えられる。

① 9.1%の風車は高速で回転するため、空気の粘性の影響を受けやすいから。

② 9.1%の風車は2枚羽根風車であるが、2枚羽根風車は重量バランスが崩れやすく、振動を起こしやすいから。

しかし、これらはあくまで仮説であるので検証する必要があると考えられる。

考察2

例として、このグラフを用いて本校屋上で発電する場合の風車の最適ソリディティを求めてみる。

本校屋上にはデジタル百葉箱が設置されており、それによって記録された最近一年間の風速データをもとに考察する。

設計風速は、2015年8月1日から2016年8月1日までの各月の第1週、1時間ごとの風速データの中央値を用いた。使用するモータは現在最も一般的に使用されているモータスカイ電子 SKY-HG350 を想定した。このとき、設計周速比は2.6となる。

したがって次のグラフ〔図7〕より、本校屋上で発電する場合、ソリディティ 27.3%の風車をもっとも高い効率を示すと考えられる。

総合考察

今回の実験から、都市部にマイクロ風車を設置する場合は、ソリディティ約 27%という大きいソリディティの風車が高い性能を示すと考えられる。

しかし、今現在一般的に使われているマイクロ風車は、大型風車を単に小型化しただけのものが多く、ソリディティは3~5%と大変小さいものが多い。

したがって今回の結果を用いて、設置場所ごとに風車のソ

リディティを決定することでマイクロ風車の性能を飛躍的に向上させられる可能性があるといえ、そのときのソリディティは従来のものより大きい値をとることが予想される。

しかし、風力発電装置の性能は風車の性能だけでなく、風車と発電に用いるモータの相性による部分も大きく、また設計風速を風速の中央値にすることが適切であるか検証する必要があるため、実際にモデル機を作成し、フィールドテストを行うことが必要である。

参考文献

- 『風車工学入門第2版』牛山泉 著(森北出版 2013年)
『垂直軸風車製作ガイドブック』本文雄 牛山泉 西沢良史 共著(パワー社)
『風力エネルギー読本』牛山泉編著(オーム社 2005年)
『風力エネルギーの基礎』牛山泉著(オーム社 2005年)
『マイクロ風力発電機的设计と製作』久保大次郎著(CQ 出版社 2007年)
『水平軸小型風車のロータ形状に関する実験的研究』西沢良史 鈴木政彦 谷口英人 牛山泉 (日本機械学会論文集,B 編 75,1092-1100,2009年)

謝辞

実験に当たり、

東京大学物性研究所教授 家泰弘先生 足利工業大学学長 牛山泉先生

東京都立多摩科学技術高等学校 渡邊博道先生 同戸山高等学校物理科 小林一人先生を始め、多くの方にご指導、ご助力いただきました。ありがとうございました。