

風力発電の一方法

(第一報)

井上 実*

一 序 言

化石燃料の所要量は現在日本の外貨支出の相当部分を占めて居り、そのための国の不安は大きく産業の歪みや国民生活の今後について心有る方々の御指摘が多く有る。石油ショックを契機にエネルギー経済が考え直され、各種自然エネルギー活用の方策が考えられて来た。我々も亦其の線に沿って些かな試みを行って来た。

風力装置は元来機械工学の領域であり、電気の教室の我々には苦手とする所であるが、最近の電子技術を応用すれば、或は実用に近づけると思はれる所も多く着手した。電気の神秘は尚ほ今日深く、多くの疑問は有るもののその解明は非才の及ぶ所ではない。それ等深遠の問題は他の諸科学分野との関連や応用の発展の中に、次の天才による広い視野の啓発に待つこととして、明日の問題への試みを行うこととした。

古くから風力利用は数多く行はれて居り、それぞれに或る程度の機能を果して来たが未だに未完成である。未完成の要素を分析すると、次に列挙する条項等に解答を求められて居るようである。

イ。風の持つ運動エネルギーは風速の三乗に比例すること。

東京の年間平均風速は2.6米/秒であるが最大瞬間風速は30米/秒以上である。従って平均風速で使用する風車も、その1,000倍以上の風力に耐えなければならないので機構、材料に困難な点が多い。

ロ。風の強さや方向の時間的変化が大きいこと。

強風の吹く時間は多くの場所で長く続かず従って長時間非効率な大きい機械を動かさなければならず、又需要時に適切な電力供給ができない。従って適切なエネルギー備蓄設備との併用が望ましい。

ハ。空気の密度は水の数百分の一であること。水力発電に比較しても、又加圧蒸気機関に比較しても、体積当りの出力が低い。

ニ。構造上の難問が多いこと。

前述のロ、ハ、の項で求められる条項を翻って考えると、部分的に激しい力を受けても毀れず、風車の部分的或は全体的な振動も十分に防止できる構造でなければならない。

ホ。単位設備当り大出力は期待し難いこと。

其他設置場所の選定に問題も有り、環境との調整も必要となり、単位エネルギー当りの原価計算でも不利であるが、本当に困ってからの開発では遅過ぎる。

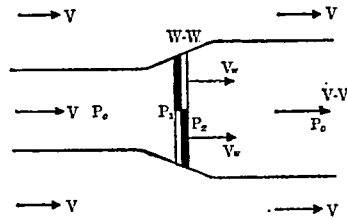
* 理工学部電気工学科教授 応用電機機器

琉球大学の永井実博士が偶々、同じ構想の下に文部省の科学研究費助成を受けて活発な研究成果を得て居られる。同博士の申出と、児玉学長の御判断を受け、今後共同研究の形で実用化に向けて問題点の解明を行う予定である。

二 風車に関する工学的考察

1. Betz の理論

一様に流れる気流中に置かれた翼車の受ける仕事を考える。第1図に示すように翼車、 $W-W$ に風速 V の風が当たると、翼車による減速を受けて翼車を V_w で通過し、通過後は $V-V'$ となる。空気密度は殆んど変化しないので、流速の変化に伴って風路の断面積が変ると考え、翼車によって生ずる風の回転運動は一応考えない。翼車の充分前方および後方の風路は周囲と風圧差は少く一定 p_0 とし翼車の前後にのみ風圧差 p_1-p_2 を生ずるとすれば Bernoulli の定理により



第1図

$$p_0 + \frac{\rho}{2} V^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} V_w^2$$

$$p_2 + \frac{\rho}{2} V_w^2 = p_0 + \frac{\rho}{2} (V - V')^2$$

$$\therefore p_1 - p_2 = \rho V' \left(V - \frac{V'}{2} \right)$$

翼車の半径を R とすれば翼面積は πR^2 従って翼面に働く総力 F は

$$F = \pi R^2 (p_1 - p_2) = \pi R^2 \rho V' \left(V - \frac{V'}{2} \right)$$

となる。

又単位時間に翼車を通過する空気の運動量の変化を考えると $\pi R^2 \rho V_w \times V'$ で、これは上記の F に等しいゆえ、

$$\pi R^2 \rho V_w \times V' = \pi R^2 \rho V' \left(V - \frac{V'}{2} \right)$$

$$\therefore V - V_w = \frac{V'}{2}$$

即ち翼面を通過する風速は翼の前方および後方の風速の概ね中間値となる。

一方翼車の前方および後方における風の運動エネルギーの差は

$$\frac{1}{2} \rho V^2 - \frac{1}{2} \rho (V - V')^2 = \rho V' \left(V - \frac{V'}{2} \right)$$

此の運動エネルギーが全翼面を通じて翼の回転エネルギー E に変換されるとすれば

$$E = \pi R^2 \rho W_{\pi} \cdot V' \left(V - \frac{V'}{2} \right) = \pi R^2 \rho \left(V - \frac{V'}{2} \right)^2$$

翼車の無い場合の風の持つ運動エネルギーは

$$\frac{1}{2} \pi R^2 V^3$$

であるから翼車の効率 η は、 E との比で求められ

$$\eta = \frac{V' \left(V - \frac{V'}{2} \right)^2}{\frac{1}{2} V^3}$$

効率の最大値は上記 η の最大値、即ち下式で与えられる。

$$\eta_{\max} = \frac{d\eta}{dV'} = 0$$

即ち

$$V' = \frac{2}{3} V$$

$$\eta_{\max} = 0.594 \div 0.6$$

2. 効率を高めるための諸考慮

Betz の理論は翼車の駆動に関与する流線に沿って Bernoulli の式が成立つとしている。その最大効率の条件は上記の式を繰返すと、

$$V' = \frac{2}{3} V$$

即ち気体の密度は一応不変と考えられるので翼の前方の風路の断面積の 2 倍が翼車の断面積であり、翼車通過後は 3 倍に拡がり、風速は 1/3 に減少する。

この場合翼車を外れて流れて来た風の速度は V であるから、翼車を通過した遅い流れとの境で渦流を作る。翼車を通過した風は翼車の反作用を受けて渦を作る。従って其の渦の方向と外部を流れた気流の方向は一致しないので、渦は複雑となる。 $\eta_{\max} = 0.6$ は困難な目標値であるが、流路寸法の実際値は渦流の成長を防止する整流翼等の設計と共に検討すべき要項である。

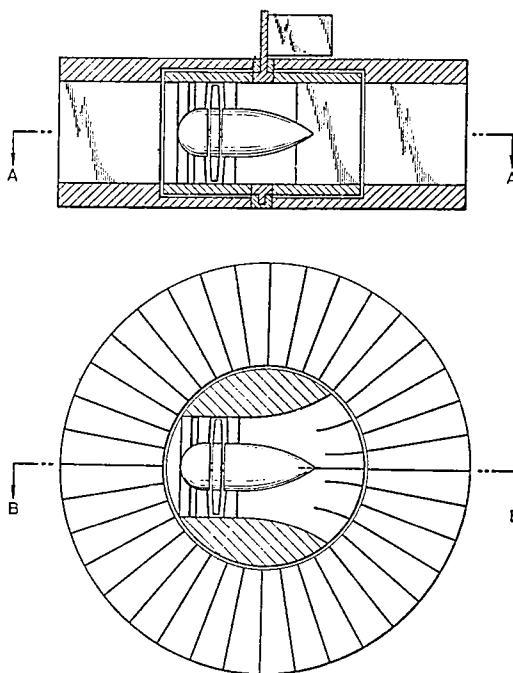
3. 翼車の形状等に関する考慮

多くの流体機械は概ね流体速度が適当な範囲で効率を高くするよう作られている。自然風の場合には方向・速度の変化が甚しく一様には風が吹いて呉れない。即ち翼の形は設計風速の前後に多少余裕度のあるよう考えなければならない。又翼車の受風面積を大きく取ると、翼車の全面積に亘って均一な風の流入は期待し得ず刻々作用点の変化する不規則な打撃を受けるに似た応力を受け、部分的或は全体的に変形、振動を誘発する。又風車は回転体であるから受風による圧力の外にコリオリの力が作用し複雑な動きとなる。これ等に対しては、今後設計の段階に充分考慮すべき要項であろう。

三 明星式風力発電装置の概要

第 2 図に明星式風力発電装置の概念を示す。この基本構想は次の各項の妥協的集成である。

- イ、翼車は水平回転軸の軸方向の風を受けるようにする。
- ロ、翼車を風の吹く方向に翼面を向けるようにする。



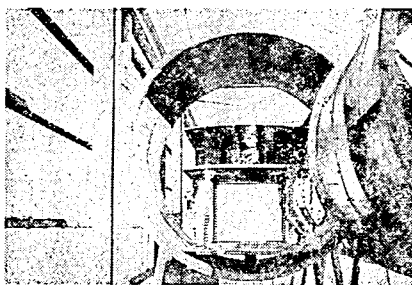
第2図

ハ、翼車の前後に翼車附近の風速が早くなるよう風路を形成する。

ニ、暴風・降雪等の破壊につながる事態の時には風路を容易に遮断する。

第3図に示すように外部に放射状に配列された固定翼があり、その中央部の円筒状空間内に発電機を廻す翼車があり、その翼車が常に風上方向に向くよう円筒が回転するように作ったものである。

詳細は昭 56-64169 号の公開特許公報（A）を参照されたい。



A



B

第3図

四 風洞模型実験

第 3 図に模型実験のための風洞およびその内部に置かれた風車装置の模型を示す。

1. 風 洞

実際の風力発電装置は自然風場で使用される。従って一般に流体実験に用いる乱れの無い優良な風洞である必要はないと判断し、屋上に円筒状の吸込型風洞を設けた。円筒部の直径は 1,900 mm, 全長 8,000 mm その風の入口より 4,000 mm より 6,000 mm の間は実験模型の設置部で写真のように横に引出せるように作ってある。風洞の出口には栗田電気製の送風機 (30 Hp 6 P 誘導電動機付) があり、送風機は電動機との結合ブリーを交換して行く。

初めは屋上にこの円筒部のみを置き自然風の影響は建物の壁で避けるようにしたが、建物壁だけの遮風では不十分と分り写真に示すように風洞の再側面に高さ 3 米の壁を立てた。

2. 放射状固定翼模型

直径 1,000 mm のベニヤ板の中心部に直径 500 mm の穴を開けたもの 2 枚を 30 cm 間隔に保って円環部の上下の枚の間に 18 枚又は 24 枚垂直固定翼を放射状に挿入したものである。

流入角は環の中心部に入れる円筒空間内の風路の入口側の開口面積で定まり、これを変えて流入角を調節した。

第 2-B 図はその水平断面図である。円筒部は自由に固定翼中心を中心として回転するので、円筒部の風路の壁が放射状固定翼の翼面と一致するとは限らない。

3. 翼 車

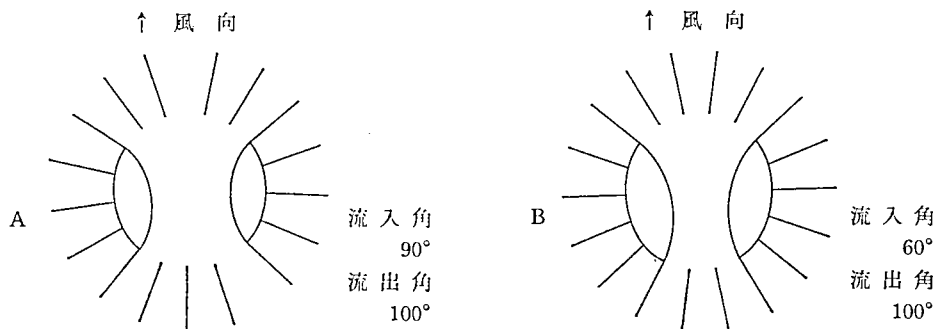
鉄板製の直径 30 cm 6 枚翼の市販の家庭用換気扇 (日立 SA-303 (006)) を購入した。

6 枚翼の一部を除外し、6, 3, 2 と変え、又翼の支持板と翼面との角度を、 24° , 45° に曲げ異った翼のピッチの翼を作った。

翼車の軸はトルク計および発電機の回転軸に直結している。

4. 回転円筒部

直径 50 cm 高さ 30 cm の空間内に前記の翼車が設置される。翼車の前方および後方の円筒壁にこの空間への風の流入口および流出口があり、その大きさは第 4 図の A, B で示すような寸法になっている。流入口および流出口以外の円筒部側面は壁面を構成し、放射状固定翼部との空気の流れを遮断する構造になっている。この遮断壁は翼車の側面からの



第 4 図

風の吹込みを防止する機能と、固定翼側面に生ずる負圧部分と風路の間を遮断し、風路の風速を高める機能を持たせてある。

5. 風速計

各種風速計は、目的や条件に従って長短があるが、我々は日本科学社製の熱線風速計を使った。風速測定は今回の実験で重要な要素となるので、次のように使用上留意した。

- イ、模型が小さいので測定器の挿入が風流を乱さないこと。
- ロ、低速部でも精度が落ちないこと。
- ハ、即応性が良く、測定場所から離れた所で測定値が分かること。
- ニ、電気記録ができること。

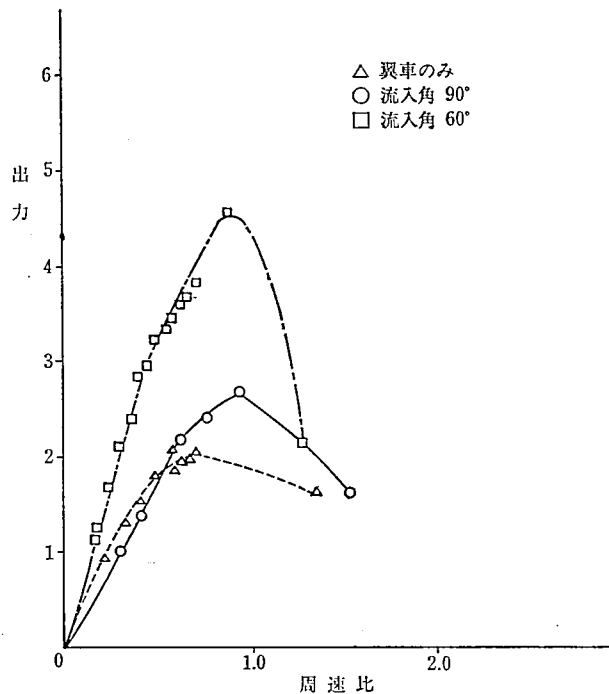
熱線風速計は概ね上記に適合するが、正確さに疑問があり、机上に置ける基準風速測定器（自作）と照合したり、又気温の影響が相当にあるので、模型実験をする風洞の定点での測定値を基準にして補正を加えた。

五 準定結果の概要

1. 風路形状と風車出力との関係

次の3つの場合における風車出力を測定した。

- イ、翼車（トルク計発電機を含む）のみを、風洞内に置いた場合。
- ロ、翼車を前記円筒空間の風路に挿入しそれを放射状固定翼部の中に入れた場合、但し風路の入口の広さが、円筒中心より 90° （風路の中心線より左右に 45° ）開いた場合
- ハ、ロと同じ条件で風路の入口広さが中心より左右に 30° 即ち入口の広さが 60° の場合



第5図

合

以上の3者を比較すると、第5図に示すように、流入角が 60° の場合に、出力が大きい。図に於いて風速比と言う表現を使っているが、これは翼車の周辺速度と風速との比である。

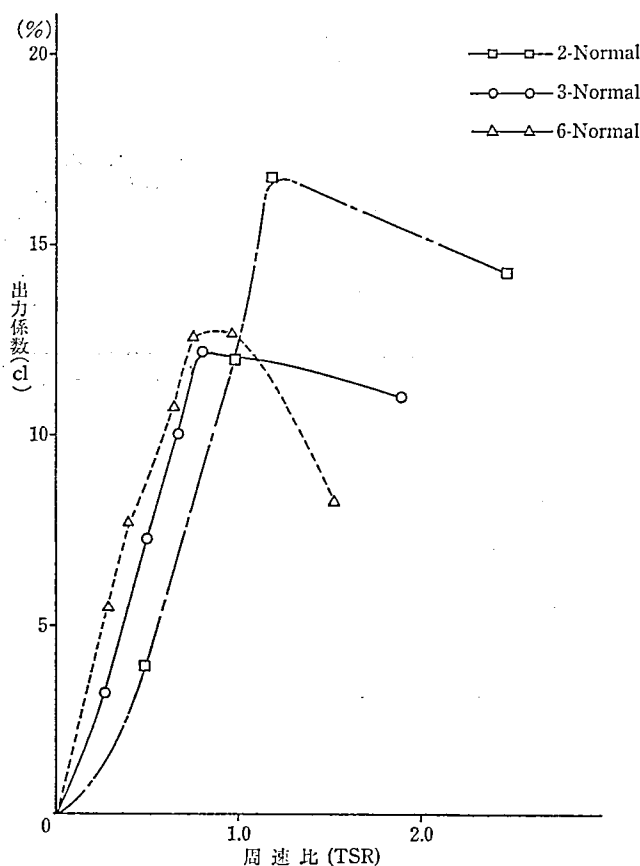
2. 翼車の翼数を変えた場合の出力

翼車の翼数を、2, 3, 6 (何れも翼の取付角は翼の軸に垂直な面(回転面)に対して 24° 傾いている)に変えた場合の出力係数 (Betz の理論出力と実際の出力との比) の関係を第6図は示す。

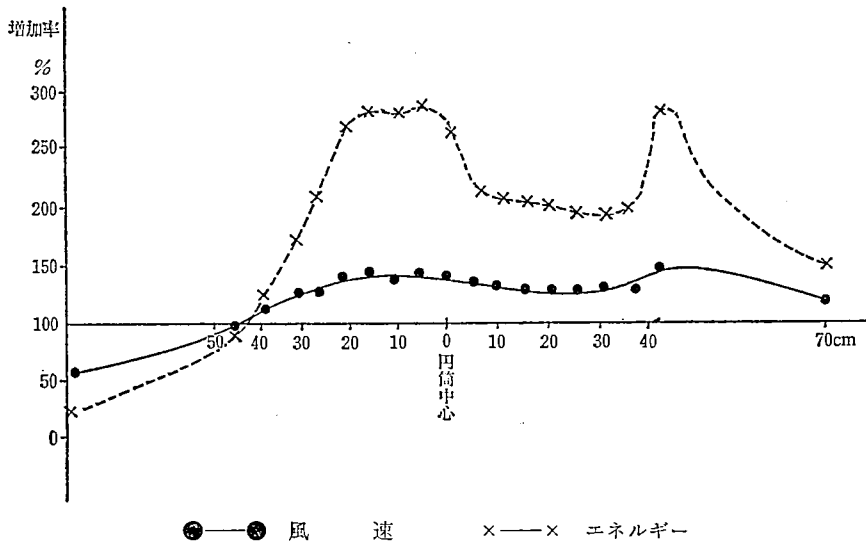
翼の数が多きときには、翼面後方の風圧上昇の度合が風の流れが早い場合には大きく出力が低下することが分る。

3. 円筒部流入角を変えた場合の風路中心軸上における風速分布と増速率

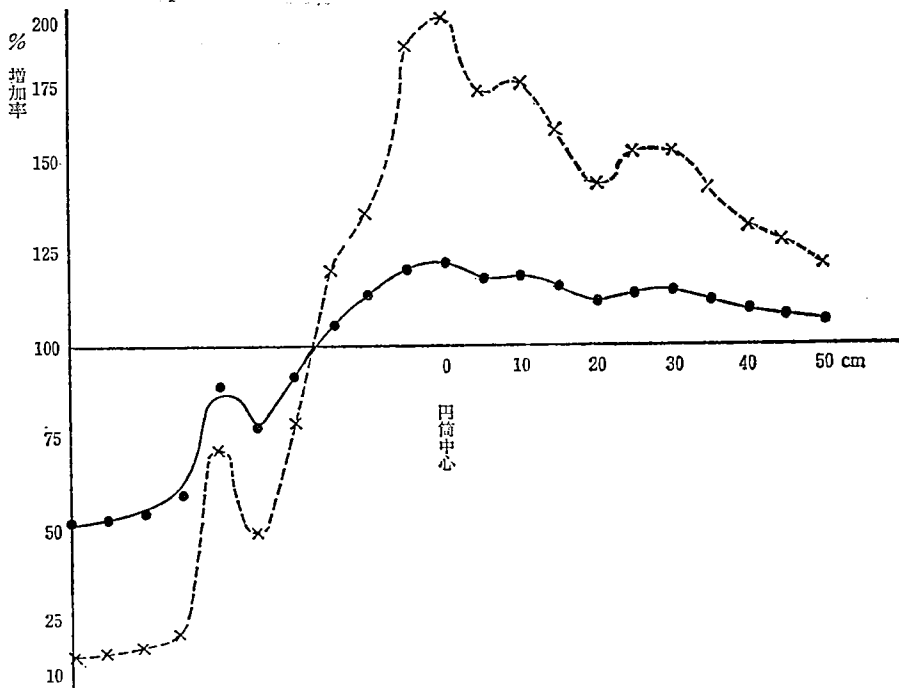
第7図は流入角 90° 、第8図は流入角 60° の場合の風速の風路中心軸上の様子を表す。その速度の場合に風の持つ運動エネルギーの増加率の分布も併記する。風路に沿って風路断面積が変り、又流線の変化も有るので、この曲線が直ちに翼車を設置に適した位置を示すのではない。上記2、でも述べたように、翼車後方の風圧が効率に大きく影響するからである。



第6図



第7図 流入角 60° の場合の流速およびエネルギー密度の増加率



第8図

六 結 言

風力発電の一方法として、放射状固定翼を持つ明星式風車装置の予備実験の概要を報告した。一応模型実験では在来形に較べて効率の向上が見られたが、自然風の場合には更に各部の検討を重ねなければならない。本文の各所に実験値の考察と共に現在思い付く配慮すべき事項を述べたが、尚ほ及ばぬ所も多いと存じ御注意、御提言を頂き度い。

本研究に終始御鞭撻を頂いた児玉学長を始め機械工学科の上松，相沢，神宮教授，電気工学科の川村助教授，其他学内の多くの方々に厚く御礼申し上げる。又日立製作所斎藤孝氏，日立プラント建設田中健一氏，明星大学相川和信君等の献身的努力や炎天の下，或は酷寒の烈風下で御協力下さった学生の労に感謝申し上げます。