

地域住環境に適応した小型垂直軸風車の開発研究

田川公太郎^{*}, 若良二^{*}, 仲井豊^{**}, 至田章展^{***}

Study for a Development of a Small Vertical Axis Wind Turbine Adapting to the Residential Environment in a Region

Tagawa Kotaro^{*}, Waka Ryoji^{*}, Nakai Yutaka^{**}, Shida Akinobu

キーワード：垂直軸風車、ジャイロミル型、自己起動、出力係数

Key Words : Vertical Axis Wind Turbine, Giromill Type, Self-starting, Power Coefficient

1. はじめに

地球環境の保全とエネルギー資源の確保という観点から、風力エネルギーは再生可能な自然エネルギーとして世界的に注目されており、2001年度末現在で世界における風力発電の設備容量は2,447万kW¹⁾に達している。わが国でも、年々大規模な風力発電システムの建設が進んでおり、2002年3月現在における設備容量は31.2万kW¹⁾に達しているが、これは世界の設備容量の1%強であるのが現状である。このように大型風車（出力1,000kW以上）の導入が推進されている一方で、公園、学校、ビルの屋上などの地域住環境において、マイクロ風車（出力1kW未満）や小型風車（出力1kW～20kW）の導入が増加している。これらの風車は、シンボルモニュメントとしての観光用、エネルギー・環境問題啓発の教育用、独立電源の特徴を活かした災害対策用など様々な用途に使われている。しかしながら、風車出力の安定性、翼の破損・飛散に対する安全性、風車の騒音・振動などといった問題が発生しており、これらの問題に対する早急な対策が重要課題となっている。

ところで、風車の種類は、風車の作動原理または地面に対する風車回転軸の回転方向によって分類される。風車の作動原理から分類すると、風車の翼に生ずる揚力を利用する揚力型風車と抗力を利用する抗力型風車に大別できる。揚力型風車は、風車に作用する風の速度以上の周速度で回転できること、風車の重量あたりの出力が大きいこと、設計点での効率が抗力型風車に比べて高くなることなどの利点を有している。また、風車回転軸の回転方向から分類すると、水平軸風車と垂直軸風車に大別することができる。水平軸風車では、揚力を利用するプロペラ形風車がほとんどの風力発電システムに導入されているが、風車の回転面を風向に向けるための方位制御装置が必要であることや発電機などの重量部分をタワーの上部に設置しなければならないなどの欠点がある。これに対して垂直軸風車では、方位制御装置が不必要なことや重量部分をタワー下部に設置でき、保守・管理が簡単であることなどの利点があるものの、揚力を利用するダリウス型風車やジャイロミル型風車には自己起動が困難であることなどの解決すべき課題がある。

以上のような背景の下で、本研究では地域住環境に適応したマイクロ風車・小型風車に関する設

* 鳥取大学教育地域科学部 地域設計学講座

** 鳥取大学教育学部 総合科学課程 理数情報コース (現 全研株式会社 ワールド学院)

*** 鳥取大学教育地域科学部 地域科学課程

計、運転および管理手法を確立することを目的としている。対象とする風車は、揚力型の垂直軸風車であるジャイロミル型風車である。そこで本報では、垂直軸風車の自己起動性を改善すること、出力性能および出力安定性を向上することなどを前提に、著者らが試作したジャイロミル型風車について、自己起動および性能特性に関する実験を行い、試作風車の基本的性能を明らかにする。

2. 使用記号および単位

A	: 風車掃過面積 [m ²]
c	: 翼弦長 [m]
C_p	: 出力係数 [-]
C_Q	: トルク係数 [-]
h	: 翼幅 [m]
n	: 回転数 [rpm]
P	: 出力 [W]
Q	: トルク [N・m]
R	: 回転半径 [m]
V	: 風速 [m/s]
z	: 翼枚数
λ	: 周速比 [-]
ρ	: 空気密度 [kg/m ³]
σ	: ソリディティ [-]
θ	: 自己起動時における翼の設置角度 [°]

添え字

max : 最大値

3. 実験装置

3.1 使用風車

3枚翼および4枚翼のジャイロミル型風車を試作した。3枚翼のジャイロミル型風車の構造について、風車の平面図および正面図を図1(a), (b)に示す。回転軸を中心とした同心円の半径方向に向かって3本のアルミ製支持翼が設置されており、その各先端に翼が1枚ずつ取り付けられている。それぞれの翼の位置関係は、隣り合う翼同士がなす角120°、翼の回転半径 $R=0.145\text{m}$ である。翼の材質は桐であり、その形状は対称翼型NACA0018、翼弦長 $c=0.07\text{m}$ 、翼幅 $h=0.325\text{m}$ である。図中において、紙面に対して左側から風が吹く場合、翼に働く揚力により、風車は反時計回りの方向に回転する。また、4枚翼のジャイロミル型風車の場合、4本のアルミ製支持翼の各先端に翼が取り付けられており、隣り合う翼同士がなす角90°であること以外、翼の材質、回転半径、翼型、翼弦長および翼幅は、3枚翼の場合と同じである。

3.2 実験装置

実験装置の概略図を図2に示す。実験に使用している風洞①は、吹き出し口が $0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$ の開

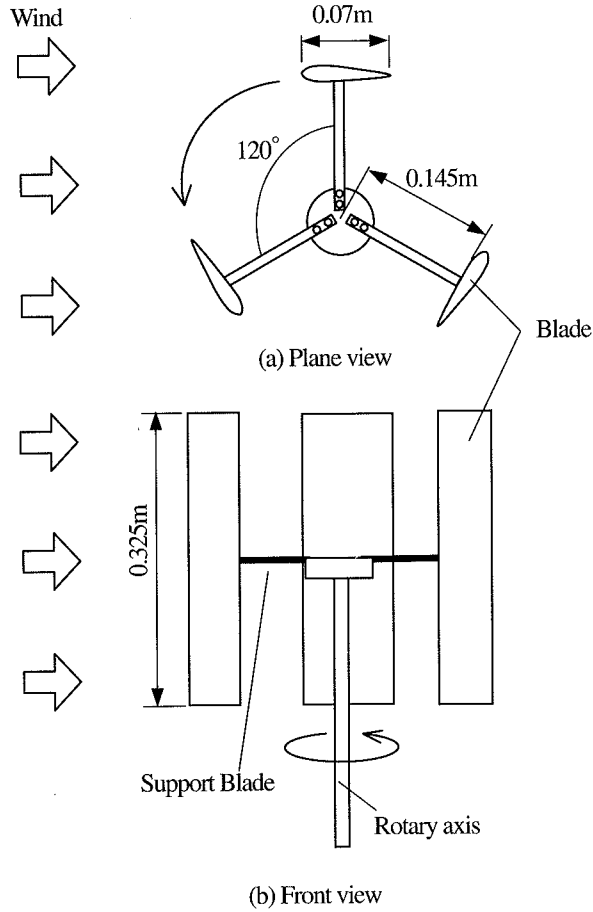


図1 使用したジャイロミル型風車の構造 (3枚翼の場合)

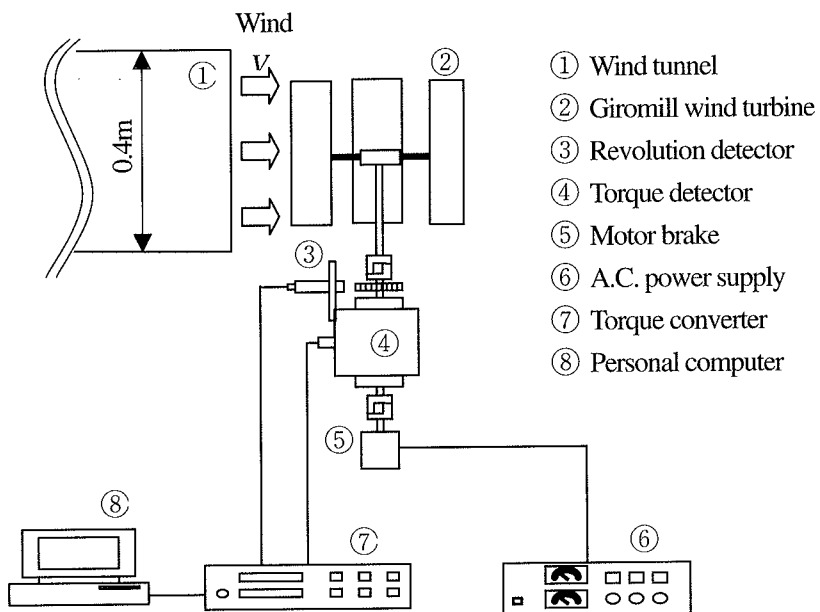


図2 実験装置の概略図

放型であり、インバータ制御により風速 $V=0\text{m/s} \sim 20\text{m/s}$ まで変化させることができる。ジャイロミル型風車②の回転軸は、カップリングを介して、トルク検出器④（小野測器、SS-002）および起動用/負荷用モータ⑤に接続されている。また、トルク検出器には磁電式回転検出器③（小野測器、MP-981）が取り付けられている。回転およびトルク検出器で検出された信号は、トルクコンバータ⑦（小野測器、TS-2600）によって回転数およびトルクとして数値化され、パーソナルコンピュータ⑧に保存される。交流安定化電源⑥により起動用/負荷用モータを制御し、風車の自己起動を補助する回転数および風車の回転時に与える負荷を変化させる。

4. 実験方法

4.1 自己起動に関する実験

まず無負荷状態の風車を、図3に示したように、基準位置（ 0° ）から反時計回りの方向に角度 θ だけ動かして静止させた。ここで、隣り合う翼同士のなす角度は、3枚翼および4枚翼でそれぞれ 120° および 90° であり、静止時における風車の設置角度はそれぞれ $0^\circ \leq \theta < 120^\circ$ 、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の範囲で十分である。次に、風洞から一定風速の風を送り、

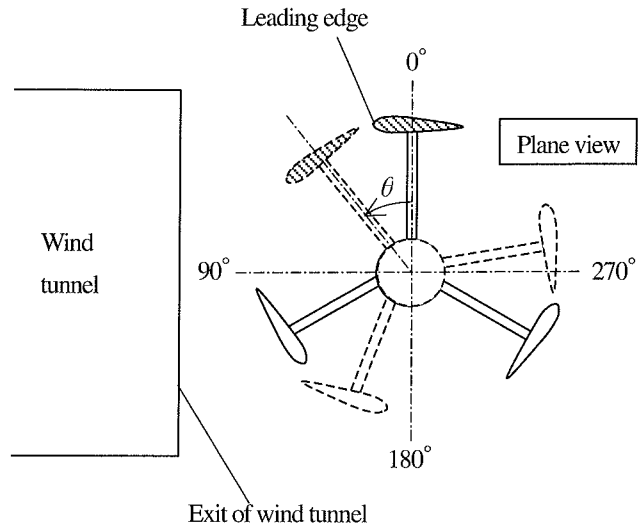


図3 静止時における風車の設置角度（3枚翼の場合）

ジャイロミル型風車の回転数の変化を回転検出器により測定するとともに、ジャイロミル型風車の自己起動の有無を観察した。この場合、自己起動の有無は、風車が回転し始め、その風速における最高回転数に到達したことを確認し、風車が自己起動したものと判断した。実験では、風車の設置角度を 5° ずつ変化させるとともに、各設置角度に対して風速 $4.0\text{m/s} \sim 7.0\text{m/s}$ の範囲で 0.5m/s ずつ変化させた。また、自己起動の再現性を確認するために、各設置角度および各風速に対して測定を5回ずつ行った。

4.2 性能特性に関する実験

静止させた無負荷状態のジャイロミル型風車に、風洞から一定風速の風を送り、風車を自己起動させた。なお、風車が自己起動しない場合には、モーターにより起動を補助し、風車の回転数がその風速における最高回転数に到達した後にモーターを停止した。次に、モーターを用いて風車にかかる負荷を徐々に大きくすることで、回転数の低下に伴うトルクの変化を回転検出器とトルク検出器により測定した。得られた測定結果から、風車の性能を評価する指標となる出力 P 、出力係数 C_p 、トルク係数 C_Q 、周速比 λ 、ソリディティ σ を以下の式から算出した。

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{2\pi nQ}{60}, & C_p &= \frac{P}{(1/2)\rho AV^3}, & C_Q &= \frac{Q}{(1/2)\rho AV^2 R}, \\ \sigma &= \frac{zc}{2\pi R}, & \lambda &= \frac{2\pi nR}{60V}, & A &= 2Rh \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 n は回転数、 Q はトルク、 ρ は空気密度、 A は風車掃過面積、 V は風速、 R は翼の回転半径、 z は翼枚数、 c は翼弦長、 h は翼幅である。

5. 実験結果および考察

5.1 自己起動特性

風車が自己起動した場合の風車設置角度 θ の範囲と自己起動回数について、3枚翼の場合を図4に、4枚翼の場合を図5に示す。図中の3箇所あるいは4箇所の同一領域は、3枚翼あるいは4枚翼の各位置に対応しており、数値軸は自己起動が起こった回数を表している。図4、図5から、3枚翼では風速5.5m/s以上で、4枚翼では風速5.0m/s以上で自己起動しており、風速が増加するにつれ、

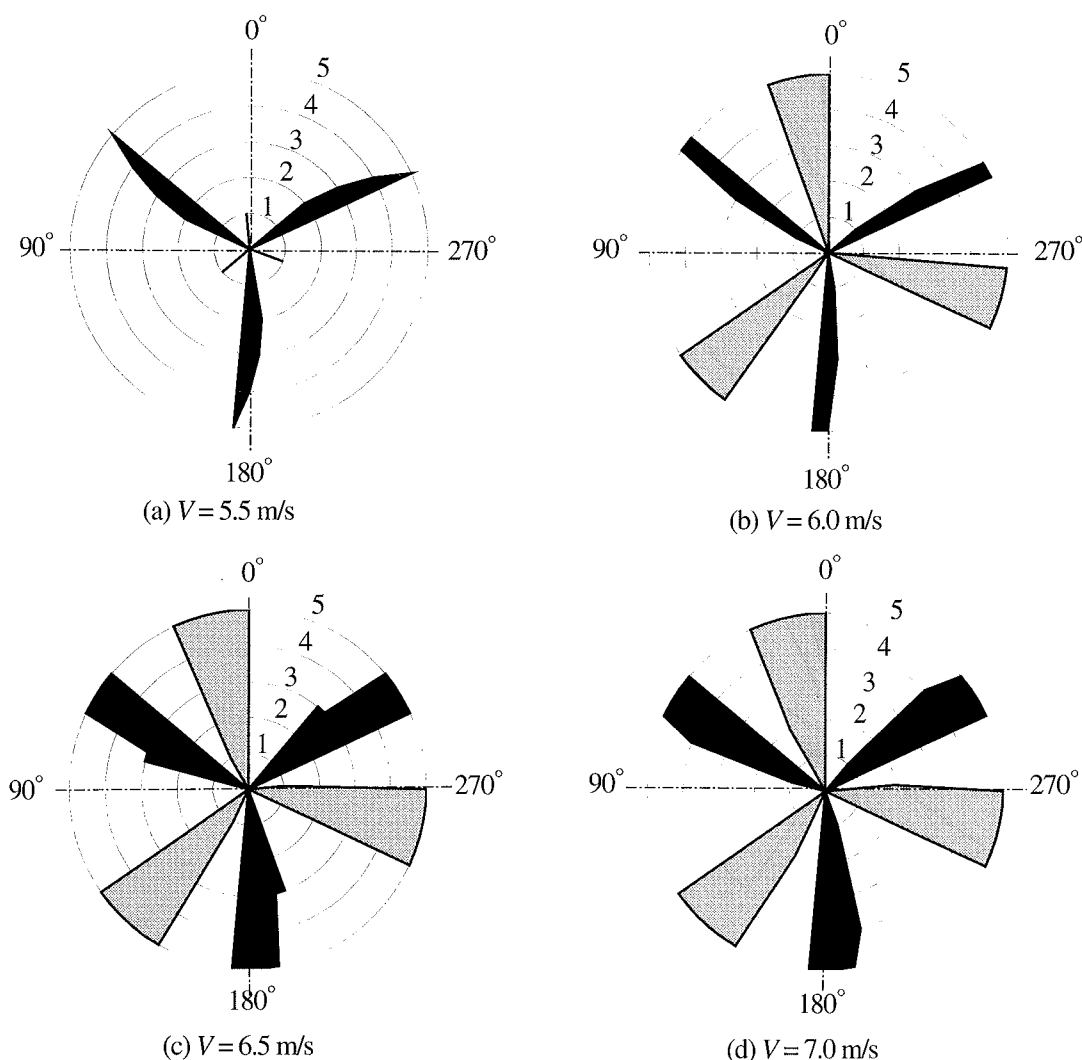


図4 自己起動した場合の風車の設定角度と自己起動回数 (3枚翼の場合)

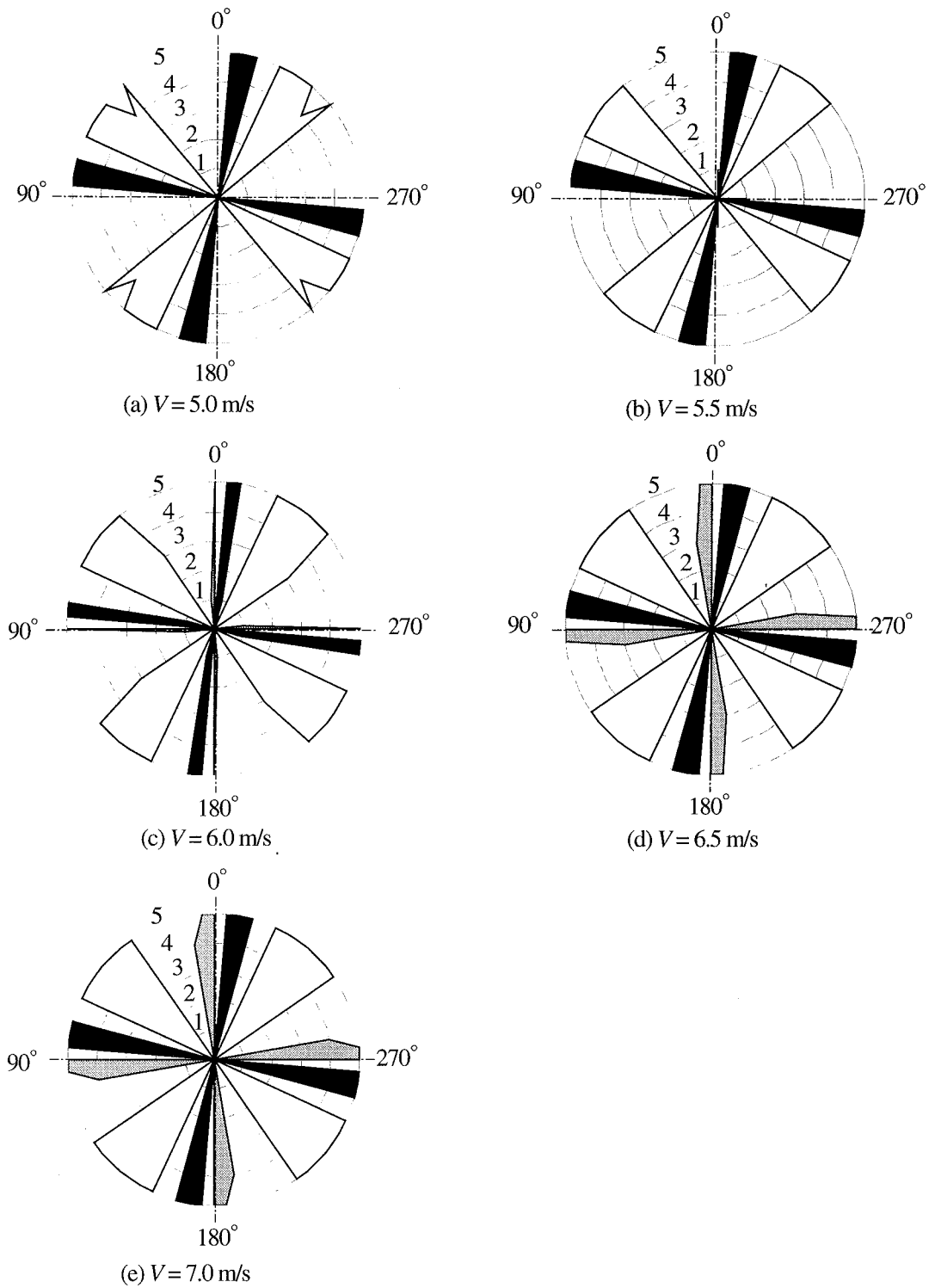


図5 自己起動した場合の風車の設定角度と自己起動回数 (4枚翼の場合)

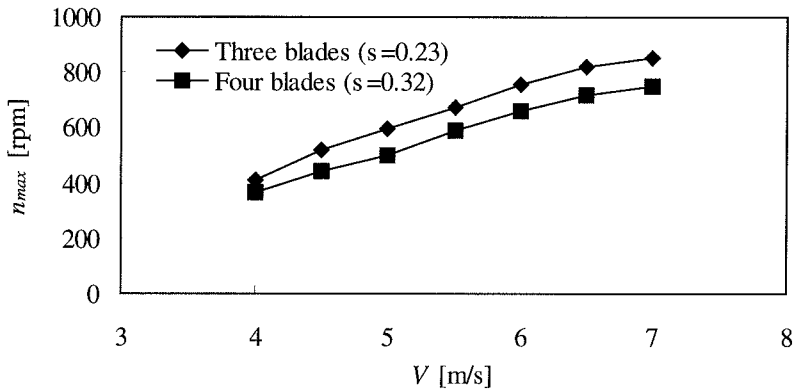


図6 起動後に到達した最高回転数と風速の関係

自己起動する翼の設置角度の範囲は広がっている。自己起動する風車設置角度の範囲は、3枚翼では $0^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$ および $50^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ の2つの領域に、4枚翼では $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ 、 $35^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ および $75^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$ の3つの領域に分かれていることがわかる。これらのことは、まず4枚翼の方が3枚翼よりもソリディティが大きいので、静止している風車に風が流入したときに発生する回転トルクが大きくなり、4枚翼のほうが低風速でも起動しやすくなる。また、風速がより大きくなるにつれ、静止している風車に働く抗力が大きくなり、風車の回転トルクが大きくなるので、風車が起動しやすくなる。これらの要因により起動した風車において、次に風速と回転速度から得られる相対速度が適度な迎角で翼に流入するため、徐々に揚力が増大していき、自己起動に十分な揚力が得られることになり、最終的にその風速における最高回転数に到達するものと考えられる。さらに、起動回数からこれらの範囲における自己起動の再現性も確認されている。

3枚翼および4枚翼の風車が自己起動後に到達する最高回転数 n_{max} と風速 V の関係を図6に示す。いずれの風速においても、3枚翼の最高回転数が4枚翼の場合よりも大きくなっている。これは、揚力によって回転している風車において、3枚翼の方はソリディティが小さいので、風車の翼自体が抵抗とならず、風のエネルギーを効率よく回転エネルギーとして取り出しているからである。また、風速が大きくなるにつれ、最高回転数が増加しているが、高風速領域で一定の回転数に漸近する傾向が見られる。

5.2 性能特性

3枚翼および4枚翼風車の各風速におけるトルク係数 C_Q と周速比 λ の関係を図7に示す。同一の周速比の場合、風速が大きくなるにつれてトルク係数は増加している。これは、風速が大きくなると、風車の翼に生ずる揚力が増加し、この揚力をモーメントとする風車のトルクが増加するからである。しかしながら、風速が大きい領域では、トルク係数の増加割合は小さくなっている。また、同一の風速の場合、3枚翼の方が4枚翼よりトルク係数が大きくなっている。これはソリディティが小さい3枚翼の方が4枚翼よりも回転数が高くなり、風車の翼に働く揚力が大きくなるので、風車のトルクが増加するからである。しかしながら、地域住環境に小型風車を導入する場合、安全性の面から、風車の回転数は低い方が良いので、同じトルクを得るとすると、回転数が低い4枚翼の

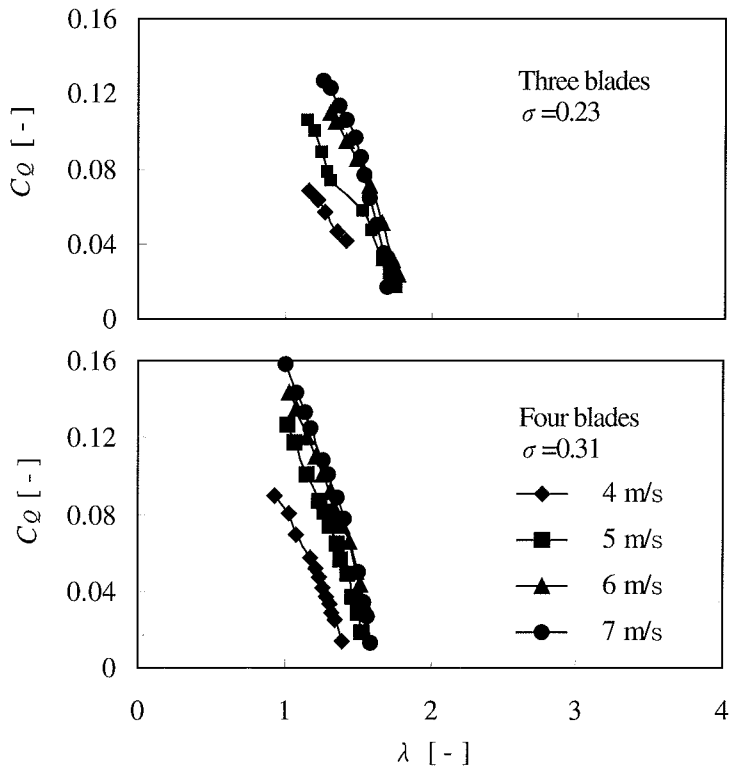


図7 トルク係数と周速比の関係

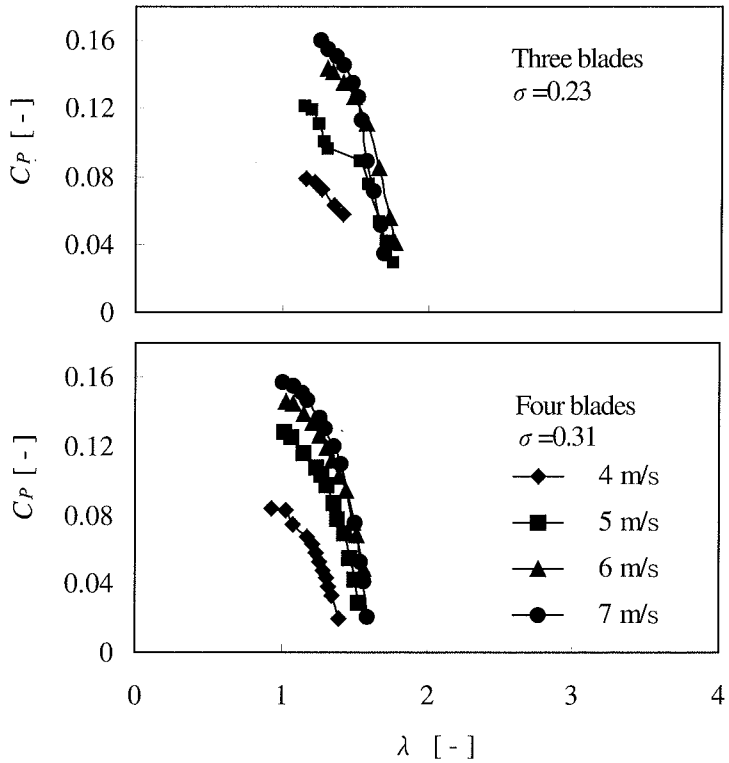


図8 出力係数と周速比の関係

方が有効であるとも言える。

3枚翼および4枚翼風車の各風速における出力係数 C_p と周速比 λ の関係を図8に示す。同一の周速比の場合、風速が大きくなるにつれ、風車のトルクが増大し、トルクと風車の回転角速度の積である出力は増加するので、出力係数は大きくなる。同一の風速の場合、3枚翼の方が4枚翼よりも回転数が高く、出力は増加するので、出力係数は大きくなる。したがって、同一の風速および回転数の場合、3枚翼の方が出力性能は高くなる。

図7および図8の結果から、地域住環境に導入する小型風車の設計において、低い回転数でありながら高い出力性能を有する翼枚数の選定が重要であることがわかった。

6. まとめ

地域住環境に適応したマイクロ風車・小型風車に関する設計、運転および管理手法を確立することを目的に、3枚翼および4枚翼のジャイロミル型風車を試作し、自己起動特性および性能特性に関する実験を行い、以下のことがわかった。

- 1) 本実験で使用した試作風車において、3枚翼の風車では風速5.5m/s以上で、4枚翼の風車では風速5.0m/s以上で自己起動することを確認した。
- 2) 試作風車の自己起動は、静止している風車の設置角度に影響を受けることがわかった。その設置角度は、3枚翼の風車では $0^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$ および $50^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ の2つの範囲に、4枚翼の風車では $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ 、 $35^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ および $75^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$ の3つの範囲に分かれていることがわかった。
- 3) 本実験範囲において、3枚翼の方が4枚翼よりもトルク係数および出力係数が大きくなった。また、風速が大きくなるにつれ、トルク係数および出力係数が増加した。これらのことから、地域住環境に導入する小型風車の設計において、低い回転数でありながら高い出力性能を有する翼枚数の選定が重要であることが示された。

7. 参考文献

- 1) 窪田新一：“内外の風力発電導入の現状と課題”，第24回風力エネルギー利用シンポジウム講演要旨集，p.20-p.26（2002）

