回転体が風を受けた時に生じる力について

小栗智樹

要旨

3D プリンターで作製した円，正三角形，正方形，および三枚刃プロペラ，四枚刃プロペラを使用し，回転速度と風速を変えて揚力を測定した。正多角形は円柱よりも揚力が下がる傾向にあり，低速回転時は角数が多いほど揚力が増加したが，高速回転時には逆に減少することが判明した。プロペラ形は風速が小さい時は円よりも揚力は大きいが風速が上がると円の方が大きくなった。また，プロペラ形は一定の風速で揚力の上昇が緩やかになり，刃の数が増えるほど揚力が低下した。

キーワード：マグヌス効果，風車，正多角形，プロペラ

Ⅰ．はじめに

風が当たった回転円柱に生じる作用としてマグヌス効果というものがある。マグヌス効果とは，図 1 のように風の向きに対して垂直な力が生じることであり，このときの力をマグヌス力という。また，マグヌス効果はベルヌーイの定理によって説明ができる。ベルヌーイの定理とは，流体において速度が速くなると圧力が下がり，遅くなると圧力が上がるというものである。図 1 では，円の回転方向と風の向きが等しい上側と，円の回転方向と風の向きが異なる下側で速度差が生じ，そのため圧力差が生じ上向きの力が生まれる。

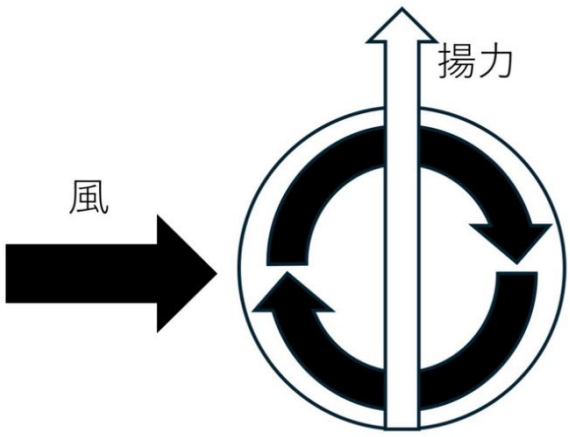


図 1　マグヌス力の向き

生澤ほか(2019)によると，図 2 のように回転円柱上に直線のフィンがあるもの(図中(b))はないもの(図中(a))よりもマグヌス効果による揚力が 1.5 倍～2.5 倍程大きくなった。またフィンを曲げて取り付けたもの(図中(c))が直線のフィン(図中(b))よりも揚力が 1.1 倍～1.5 倍ほど大きくなった。

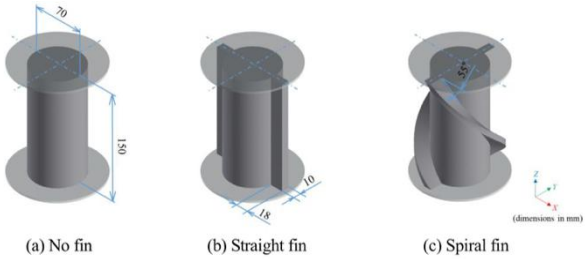


図 2　フィンの形状(生澤ほか(2019)より)

このように回転体の形状によってマグヌス力は変化する。

現在，マグヌス効果の工学的利用として風車や乗り物等への応用が挙げられる。清水(2023)によると，発電効率に課題はあるが，発電量制御に優れ，また暴走やバードストライクを起こしづらい，マグヌス効果を用いた垂直軸型風車を研究，試運転している(図 3)。



図 3　垂直軸型マグヌス風車(清水(2023)より)

また，安川(2023)によると船に回転円柱を備えることで風によって推力を得ることができ，風速が 10 m/s～12 m/s で 3～5%の省エネにつながる。

マグヌス力の近似式として式(1)が挙げられる。

$$F \fallingdotseq \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L \quad \cdots式(1)$$

ρ は空気の密度[kg/m³]，v は空気の速度[m/s]，A は回転体の投射面積[m²]，C_L は揚力係数である。

伊藤ほか(2025)によると，揚力係数 C_L は，スピン比($SP=\frac{\omega r}{v}$，ω は回転体の角速度[rad/s]，r は回転体の半径[m]である)とレイノルズ数によって図4のように非線形的に変化する。

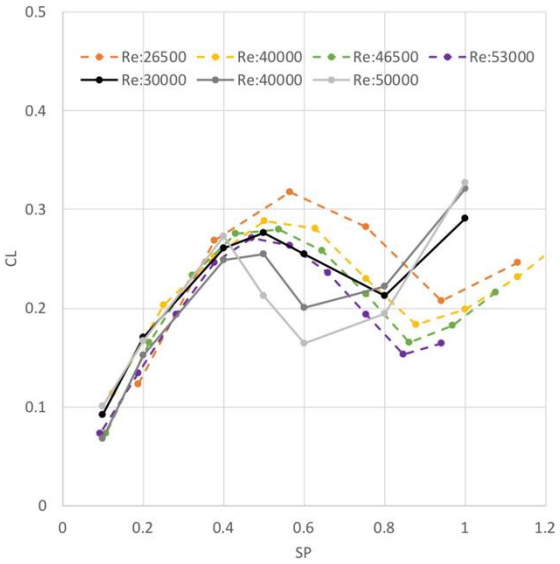


図4　スピン比と揚力係数の関係(伊藤ほか(2025)より)

レイノルズ数は式(2)のように表すことができる。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \cdots式(2)$$

L は円の直径[m]，μ は空気の粘度[Pa・s]を表す。

また，式(1)はレイノルズ数のオーダーが10^4~10^6のときに成り立つ。

このようにマグヌス力の近似式は存在するが，正多角形やプロペラ形などの円柱でない場合の式は知られていない。そこで，本研究では正多角形やプロペラ形では揚力が円柱時とどのように異なるのかを明らかにすることを目的とする。また，風車として利用する場合，どの形状を使うべきかを考えたい。

II. 手法

1）道具

・幅 0.03m，半径が 0.085m の円(図 5)
・外接円の半径が 0.085m となるような幅 0.03m の正三角形，正方形，三枚刃プロペラ，四枚刃プロペラ(図 5)
・支柱(段ボール)
・変圧器
・ジェット扇風機
・直流モーター「DMN37HB」
・電子ばかり(TS500S，30kg まで，最小目盛 0.001kg，±0.3%)
・電源装置
・角イス
・ジャッキ

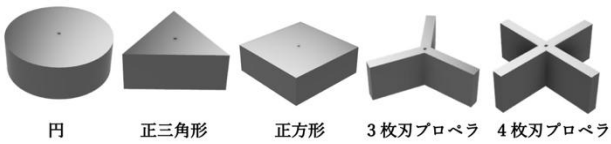


図 5　回転体の形状

2）準備

図 6 のように変圧器を取り付けたジェット扇風機を回転体にかかる揚力が上向きになるように，回転体の中心との距離が 0.50 m，はかりから 0.60 m 上にして設置した。風が当たっても倒れないように足元におもりを設置した。

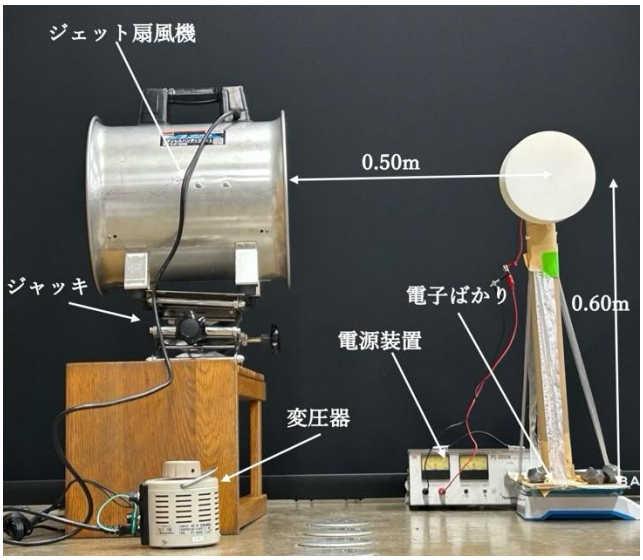


図 6　実験装置

3）手順

1, 変圧器を用いてジェット扇風機に 10 V～90 V まで 10 V 単位で交流電圧を加えた。

2, ジェット扇風機から 0.50 m 離れたところでの風速をそれぞれ計測した。

3, 円，正三角形，正方形，三枚刃プロペラ，四枚刃プロペラをつけたモーターを 1 V,2 V,3 V(以下 1 V,2 V,3 V はモーター電圧を表す)で回転させた。

4, それぞれの条件でジェット扇風機に 10 V～90 V まで 10 V 単位で交流電圧を加え，風を発生させた。

5, はかりは風を発生させていないときを基準とし，値の 30 秒間での質量の最小値と最大値を記録し，力のつり合いより重力加速度を用いて揚力を算出した。

III. 結果

それぞれの条件(形状とモーターに加える電圧)下での風速と揚力の関係は図 7～図 11 となった。

なお図では，最大値と最小値の中点をプロットした。

図 7 より円の場合，風速が 5~6 m/s のときにはモーター電圧による変化が見られないが，風速を上げるにつれて 1 V と 2,3 V との差が開いていき，約 10 m/s で揚力が 0.1 N ほどとなっている。その一方で，2 V と 3 V 間では差はあまり見られなかった。また図 8 より，正三角形では概ね風速によらず 1 V と 2 V 間で 0.05 N～0.1 N，2 V と 3 V 間で 0.05 N 程度の差が出た。円と比べると 2 V と 3 V 間での差が顕著に表れている。図 9 を見ると正方形では 4～6 m/s では 1 V と 2,3 V 間での差が 0.05 N 程見られるが風速が上がるにつれて徐々に差が縮まっていき，風速が 10 m/s 付近ではほとんど差が見られない。また，円と同様に 2 V と 3 V 間では差がほとんど見られない。

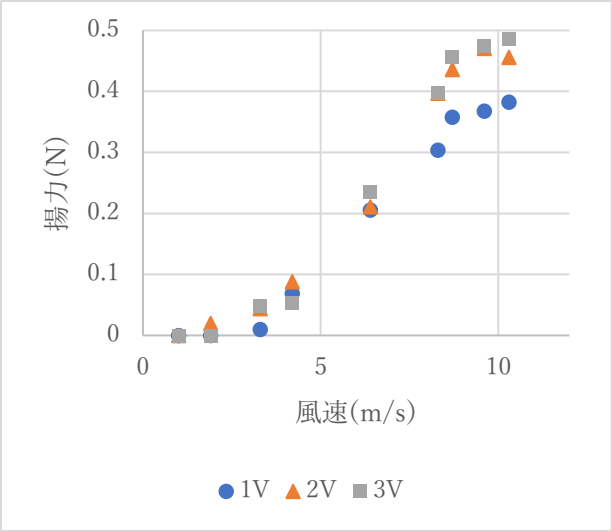


図 7　円における風速と揚力の関係

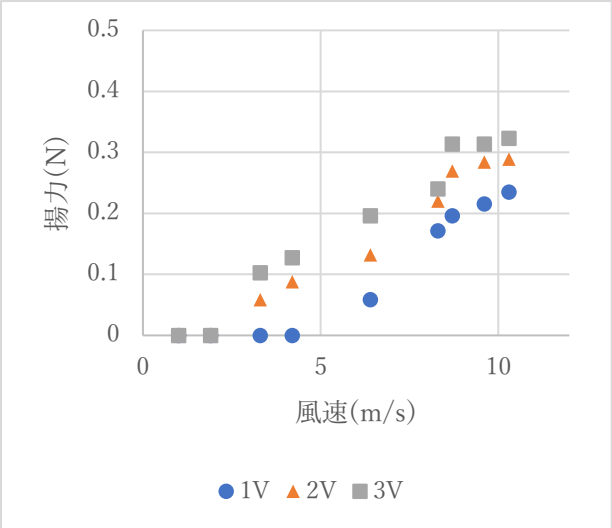


図 8　正三角形における風速と揚力の関係

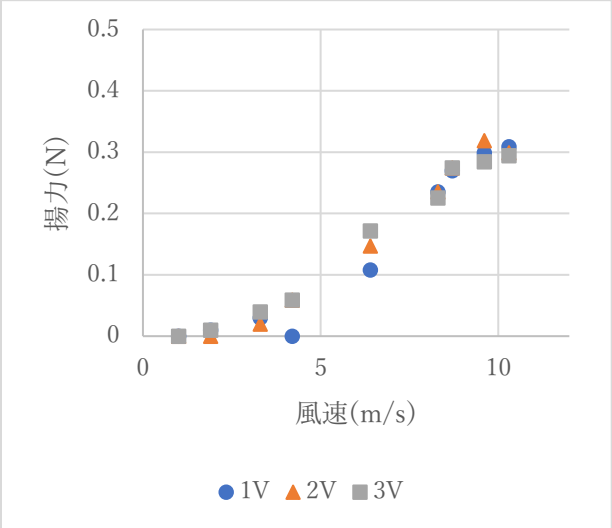


図 9　正方形における風速と揚力の関係

図 10 と図 11 よりプロペラでは 2 V と 3 V の差が，風速が約 4 m/s まで上がるにつれて開いていき，円と比べると差が顕著に見られる。また，プロペラでは風速が 4 m/s 付近から風速の増加に伴う揚力の上昇がゆるやかになっており，四枚刃プロペラの 2 V と 3 V では約 6.5 m/s で揚力の上昇が止まっている。

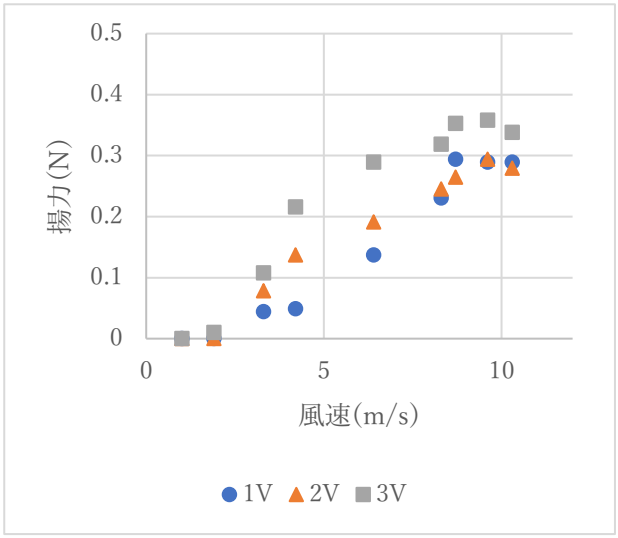


図 10　三枚刃プロペラにおける風速と揚力の関係

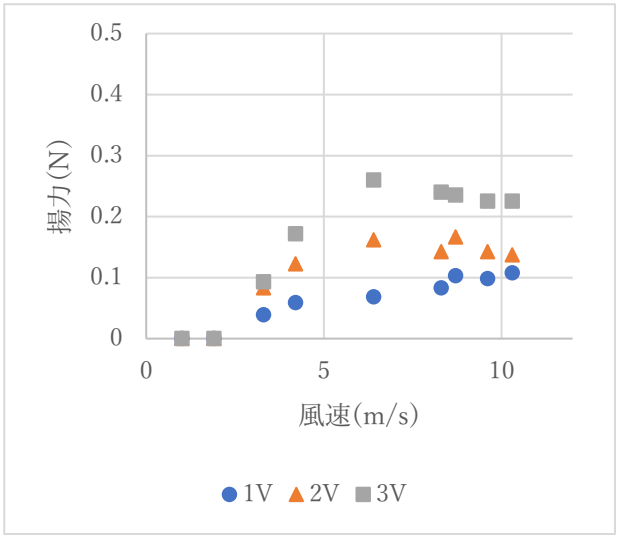


図 11　四枚刃プロペラにおける風速と揚力の関係

IV. 考察

図 12 にモーター電圧 1 V のときの形状ごとの風速と揚力の関係を示した。図 12 より，1V では風速がおよそ 4m/s 以前はプロペラが最も揚力が大きく，それ以降では円が最も揚力が大きくなっている。この理由は，風速が小さいときは，プロペラが円よりも強く空気の流れを作り，上下間での風速差が円よりも大きくなるため圧力差が円よりもプロペラの方が大きくなる。一方，風速が大きくなるにつれてプロペラのつくる流れと風がつくる流れが衝突し，まわりの流れが乱れて上下間での風速差が生じづらくなるからと思われる。

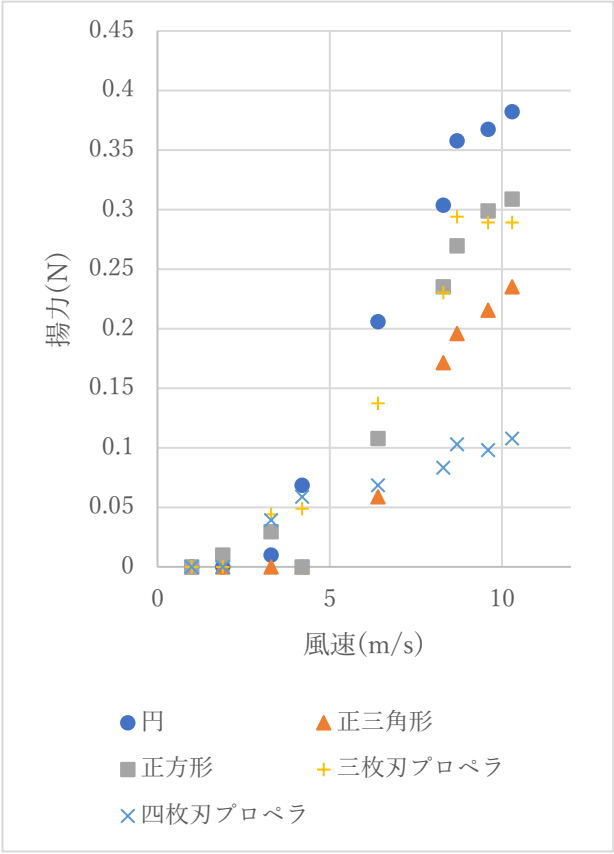


図 12　異なる形状での比較(1V)

図 13 にモーター電圧 3 V のときの形状ごとの風速と揚力の関係を示した。図 12 より，3 V では風速がおよそ 7 m/s 以前では最も揚力が大きいのは三枚刃プロペラ，次点で四枚刃プロペラとなっていて，それ以降では円で最も揚力が大きくなっている。これも 1 V の時と同様の理由で説明できると考えられるが，円の揚力がプロペラ形での揚力を超した風速(7m/s)が，1 V の時(4m/s)よりも大きくなったのは，回転速度が速くなった分，プロペラが回ることでの空気の流れが強まり，それを乱すために必要な風速が大きくなったからと思われる。

また，円と正多角形の関係としては 3 V で風速がおよそ 4 m/s 以下では円よりも正三角形のほうが揚力は大きくなったが，それを除くと円は正多角形よりも揚力が大きくなった。正多角形では角があり，空気の流れが乱れやすくなるため揚力は円よりも小さくなると思われる。正三角形の方が特定の条件で揚力が大きくなったのは，正三角形の形状がその条件下でプロペラ形と同じように空気の流れに作用したためと考えられる。

風速によらず，1 V の時(図 12)は正方形の方が正三角形よりも揚力は大きい一方，3 V の時(図 13)では正三角形の方が正方形よりも揚力が大きくなった。これは，回転速度が小さいとき(モーター電圧が小さいとき)は内角が小さく，一つの角が鋭い正三角形の方が，空気の流れを乱しやすいが，回転速度が大きくなる(モーター電圧が大きくなる)と一つの角の鋭さよりも，角の数の多さによって，空気の流れが影響を受けやすくなり，正三角形の方が揚力は大きくなったと思われる。

また，1 V と 3 V どちらの時も，風速によらず三枚刃プロペラの方が四枚刃プロペラよりも揚力が大きくなった。この理由としては刃の枚数が多いほど，前の刃の空気の押し出しの影響を次の刃も受けやすくなり，空気の流れが安定しないことが考えられる。

また，風車への応用に関してどの形状を使うべきかについては，年間平均風速が 3.0 m/s 前後の東京や，4.0 m/s 前後の千葉等の風速が小さいところでは，三枚刃プロペラを用いるのが適していると考えられる。一方，風速が大きいもしくは不安定なところでは，風速が 7 m/s 前後でもプロペラ形に劣らず，それよりも風速が大きくなっても揚力が頭打ちしない円形を用いるのが適していると考えられる。

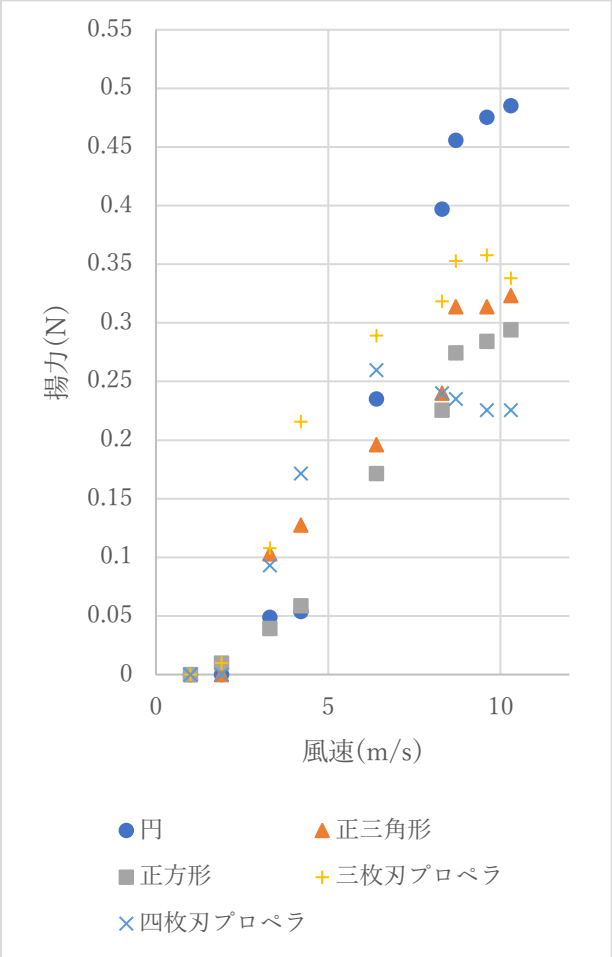


図 13　異なる形状での比較(3V)

V. 結論

円と正多角形の比較としては，概ね円の方が揚力は大きくなった。また，回転速度によって正多角形の角の数と揚力の関係は変わり，モーターに 1 V の電圧を加えた時は角を増やすと揚力が増加したが，モーターに 3 V の電圧を加えた時は角を増やすと揚力は減少した。円とプロペラ形の比較に関しては，風速が小さい時はプロペラ形の方が円よりも揚力は大きい一方，風速が上がると逆転し円の方が揚力は大きくなった。プロペラは刃の数を増やすと揚力が下がった。また，プロペラでは風速を上げると最初は揚力が増加したが，ある一定の風速になると上昇が緩やかになった。

風車としての利用に関しては，風速が安定して小さいところでは三枚刃プロペラを用いるのが良いが，風速が不安定または大きいところでは円形を使うのが最適であると考えられる。

今後の展望は，風によって支柱全体が揺れることや，プロペラを回転させたときの風がはかりに直接作用することを避け，より実験の精度を高くしたい。

謝辞

藤本将秀先生，中川雅斗先生，助言をくださり大変感謝しております。

文　献

生澤由也・長谷川裕晃・羽二生稔大(2019)：フィンが回転円柱の空力特性に及ぼす影響.

清水敦史（2023）：風力発電にイノベーションを起こし，全人類に安心安全なエネルギーを供給する風車の開発.

安川宏紀(2023)：フレットナーロータを備えた船の推進性能の予測.

伊藤建一・上島慶(2025)：数値流体力学解析を用いたスピン中の卓球ボールの空力特性推定.

John D. Anderson（1984）：Fundamentals of Aerodynamics.