

マグナス効果を用いた ローターセイルの 効率化

物理3班

菅原 桜太

泉谷 武尊

高橋 海惺

南部 琥太郎

長坂 拓真

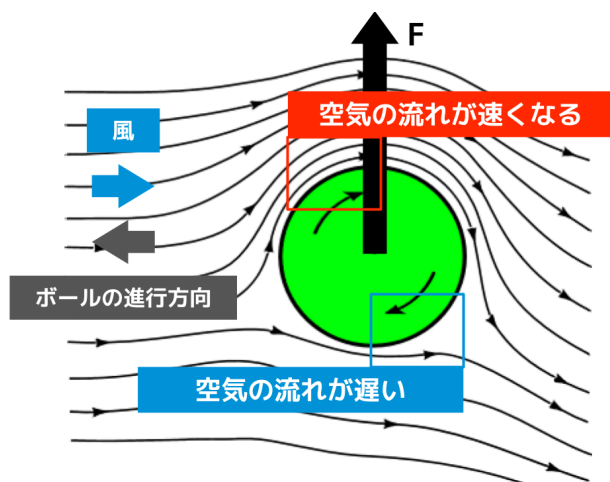
深澤 小夏

指導教員 小西 弘磨

1 研究の動機・目的

WBCでの日本の優勝の熱狂が未だ冷めぬ最中、課題研究を開始した私たちは、最後にトラウトを三振にとった大谷翔平のスーパーなどが例に挙げられる「変化球」というものが、なぜ曲がるのか疑問に思った。調査の結果、変化球には「マグナス効果」というものが関係していることが分かった。このマグナス効果に興味を持った私たちは、マグナス効果についてより詳しく調べてみることにした。

ここでマグナス効果について説明しよう。マグナス効果とは回転しながら進む物体の進行方向に対して垂直な揚力が働く現象のことである。



ボールにバックスピンをかけて投げたとすると、ボールは進行方向と逆向きの風を受ける。するとボールの上下で空気の流れの速度差、それに伴い生じた圧力差によって、上向きの力が発生する。反対に、トップスピンをかければ、下向きの力が発生する。この力をマグナス力、この現象全体をマグナス効果という。(図1)

図1

この現象を利用したものに変化球のほか、ローターセイルというものがあることを知った。ローターセイルを推進力の補助として利用したローター船は、普通の船と比べ、二酸化炭素排出量や燃料消費量を5~20%削減できると言われている。しかしあまり普及していないのが現状だ。その原因として考えられるのは、風速が小さいときにその恩恵を十分に受けられないことだ。風速が小さい状況でも十分な推進力を得られればより多くの利用が見込め、地球温暖化の抑止にもつながると考えた私たちは研究目的を次のように定めた。

最も効率的な帆を追求すること

そのためまずは、より大きな力を得られる条件を探ることにした。

2 実験1

最初に、得られる力の大きさについて、3つの仮説を立てた。

仮説1: 帆の直径が大きいほど、大きな力を得られる

仮説2: 帆が長いほど大きな力を得られる

仮説3: 帆の表面の形状によって、力の大きさは変化する

下図が実験の模式図。ローターセイルの模型を力学台車に取り付け、定滑車を経由し、おもりと台車を伸び縮みしない糸でつないだ。力の大きさは電子天秤で計測する。

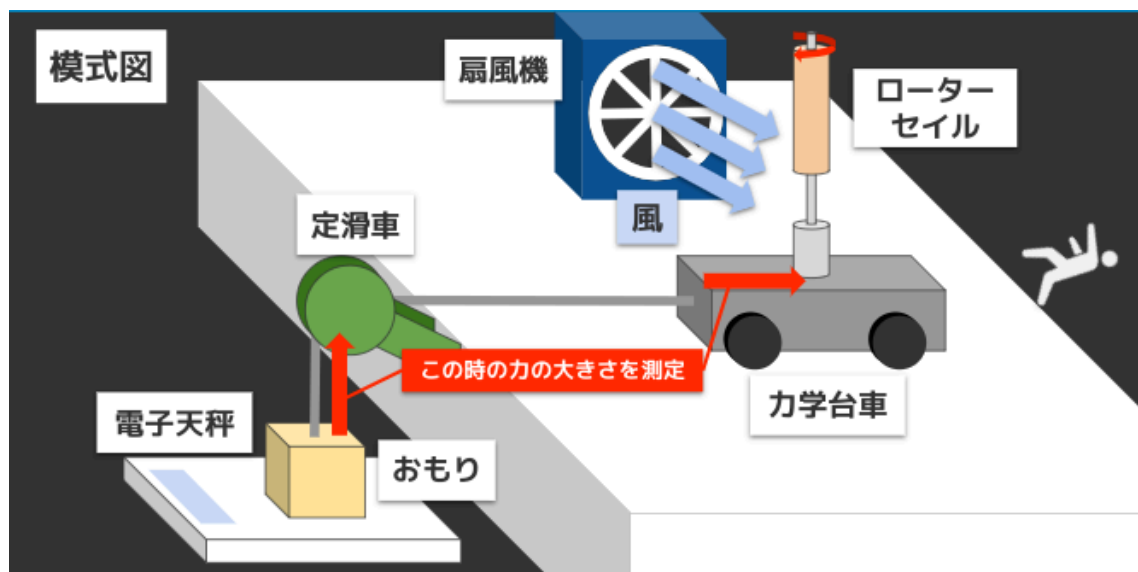


図2

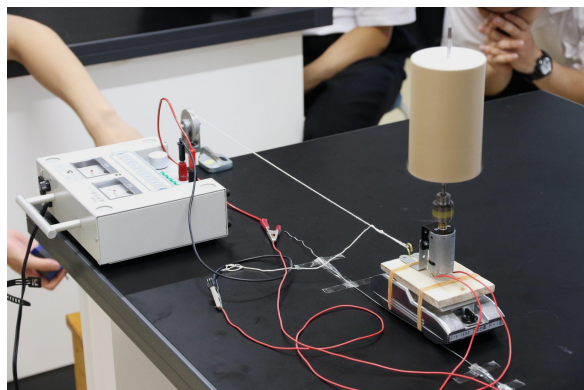


図2は実験の模式図であり、
図3がその実際の様子である。

図3

仮説1の検証 結果は図4のようになった。

直径(mm) と 力(gw)

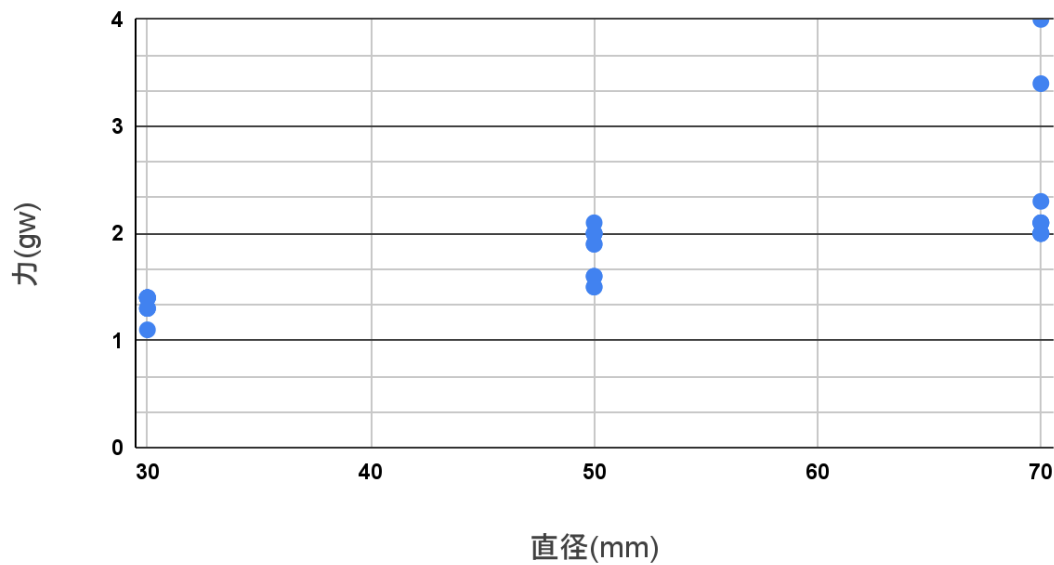


図4

gw(グラム重)...1gの物体に働く重力の大きさ
 $1gw = 0.0098N$

相関係数が0.72...となり、正の相関が見られた。

仮説2の検証結果は図5のようになった。

帆の長さ (mm)	80	120	160	
1回目	0.1	1.4	0.4	
2回目	0	1.4	0.5	
3回目	0.2	1.4	0.2	
4回目	0.3	1.4	うまく計測できず	
5回目	0	1.4		
6回目	0	1.3		
7回目	0.1	1.1		
8回目	0.1	1.4		
9回目	0.1	1.3		
10回目	0	1.3		
平均(gw)※	0.09	1.34		0.3666666667

図5

帆の長さが80mmの時に値が極端に小さくなり、160mmの時は値が装置の不備でうまく計測できなかった。

〈実験1の課題〉

1回目の実験では台車が風と振動によって横にずれ、計測を正確にできなかった。そのため実験方法を見直すことにした。また、力が想像よりも小さかったため、理論値と比較するようにする。理論式はクッタ・ジュコーフスキーの定理を用いる。

$$F=2\pi\rho ruU \text{ (N/m)}$$

$$\pi=3.141$$

$$\rho:\text{空気密度(kg/m}^3\text{)} \quad \rho=1.176$$

$$r:\text{円筒半径(m)} \quad r=0.015$$

$$u:\text{円筒外周回転速度(m/s)} \quad u=0.015 \times 40\pi$$

$$U:\text{円筒に向かう風}の速度\text{(m/s)} \quad U=3.0$$

この定理を用いると、長さ12cm、直径3cmの場合には理論値が7.52gwとなる。実測値が1.34gwなので、6.18gwの差があることがわかる。

3 実験2

実験1の課題より台車を使わない新しい実験方法を考えた。

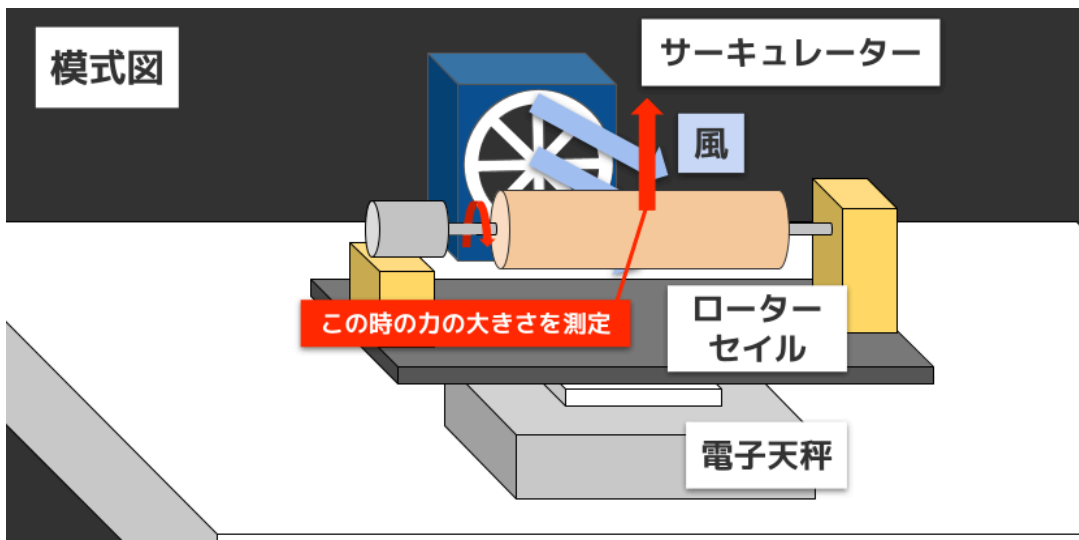


図6

実験の模式図(図6)

ローターセイルを横向きにしてその片側をモーターで回してもう片側をベアリングで固定し、横ずれをなくした。

この実験では次の3つの仮説を検証した。

仮説1帆の直径が大きいほど、大きな力を得られる。

仮説2帆が長いほど、大きな力を得られる。

仮説3帆の表面の形状によって、力の大きさは変化する。

さらにpythonを用いて、理論値を計算し実測値と比較した。
 表面の形状については 片面ダンボールをまいたもの、気泡緩衝材をまいたもの、
 何もまいていないものの3つで検証した。

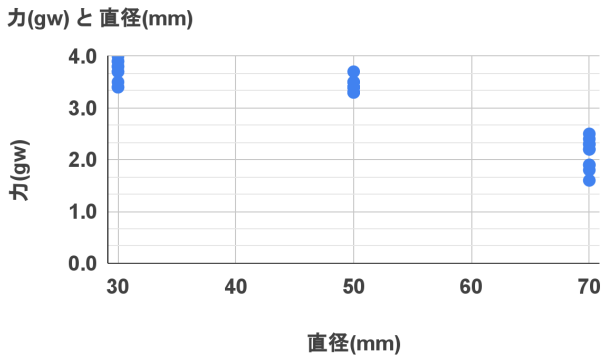


図7

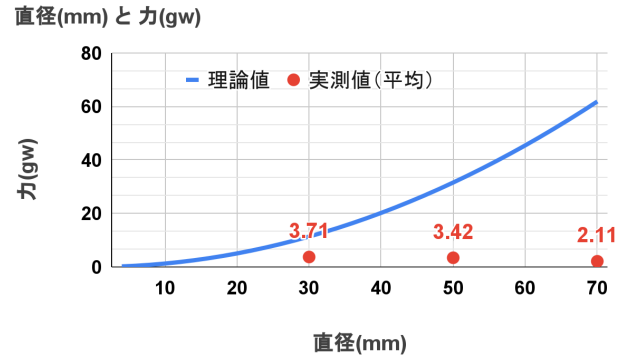


図8

仮説1 帆の直径が大きいほど、大きな力を得られる。(図7)

直径が大きいほど力が減少し、仮説と異なる結果となった。また、理論値と実測値を比較した結果、力の大きさが大きく異なった。(図8)

帆の上下に十分な気流の層がなかったのではないかと考え、サーキュレーターとローターセイルの距離を20cmから40cmに離し、追加実験を行った。

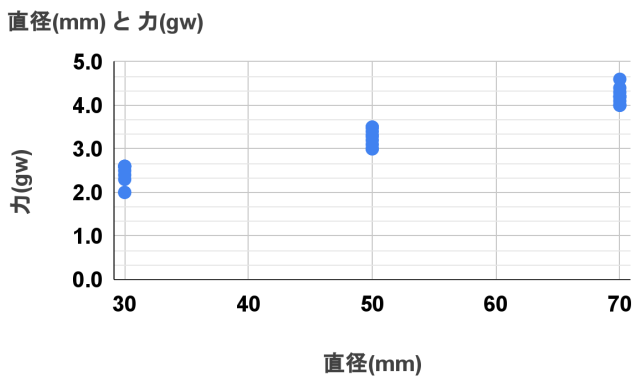


図9

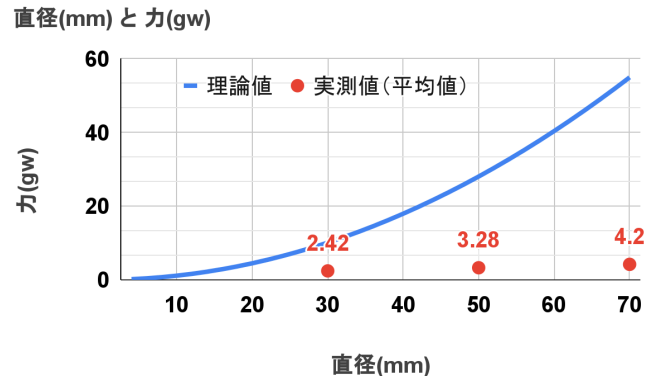


図10

直径が大きいほど力が増加し、仮説と同じ結果となった。(図9)しかし、理論値と実測値を比較した結果、力の大きさが大きく異なった。(図10)

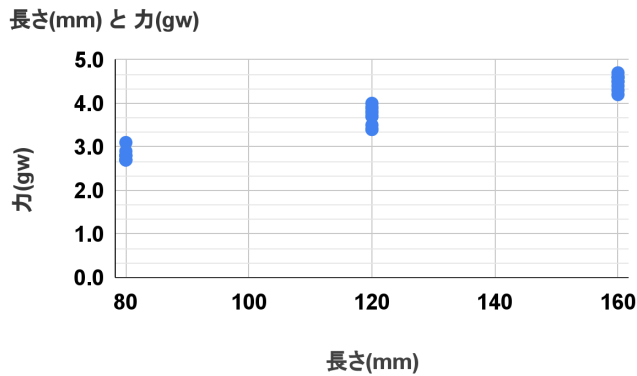


図11

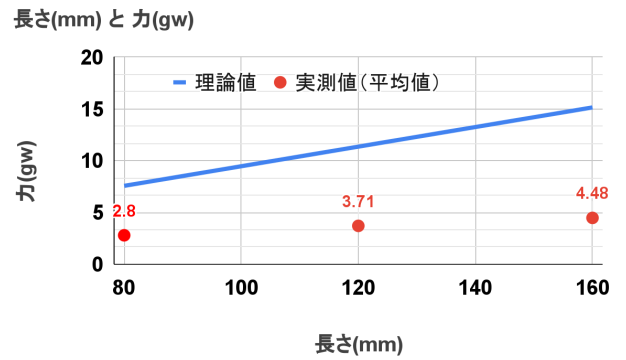
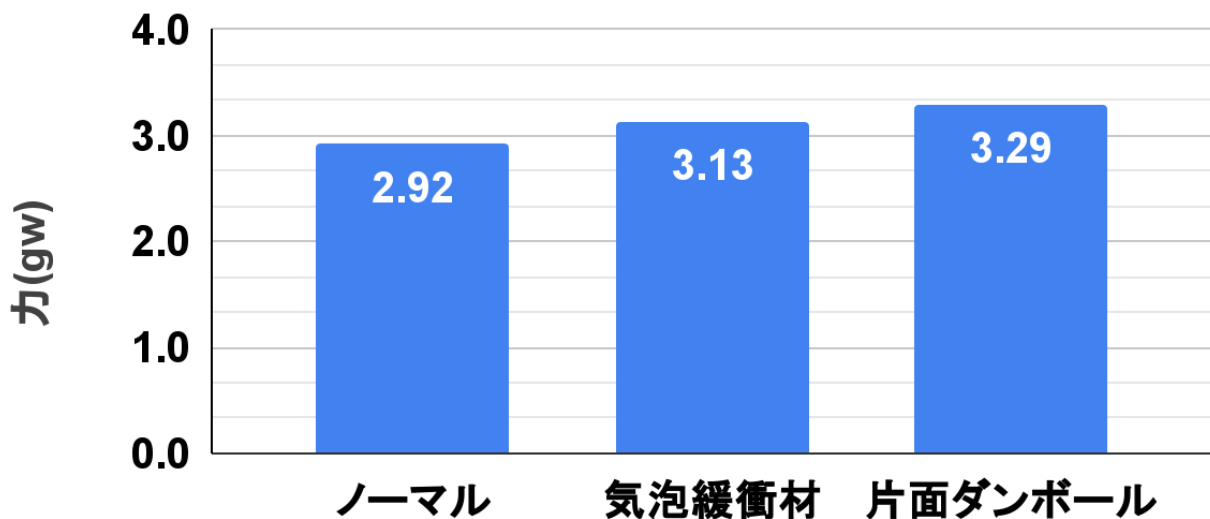


図12

仮説2 帆の長さが長いほど、大きな力が得られる
 帆が長いほど力が増加し、仮説と同じ結果となった。(図11)
 しかし、理論値と実測値を比較した結果、力の大きさが大きく異なった。(図12)

表面形状と 力(gw)



表面の形状

図13

仮説3帆の表面の形状によって、力の大きさは変化する
 帆の表面の形状によって得られる力の大きさに大きな差は見られなかった。(図13)

2つの結果「帆の直径が大きいほど、力も大きくなる」「帆の長さが長いほど、力も大きくなる」には次の2つが関係していると考えた。

- ・帆が風を受ける面積が大きくなったこと
- ・全ての帆で中心の回転速度が一定であるため、直径が大きくなると円柱の外周速度が速くなること

理論値と実測値で値が大きく異なったことについては、実験で使用したサーキュレーター風の流がスパイラル状であったことが影響していると考えた。サーキュレーターは風の流が螺旋状であり、帆に当たる風の風速が一様にはならない。

仮説3の実験では、帆の表面の形状によって得られる力の大きさに大きな差は見られなかったが、多少の差は見られたため帆の表面の形状がマグヌス効果に関係ないとは言い切れない。実際、ゴルフボールの表面に見られる凹凸はディンプル(図14)と呼ばれ、ボールをより遠くに飛ばす役割をしている。表面の凹凸は乱流を発生させ、その乱流は空気の流がボールの表面から剥離することを防ぐ。これがマグヌス効果を増幅させる。(図15)

このことから表面の形状がマグヌス効果による力の大きさに関係ないとは考えにくい。



図14

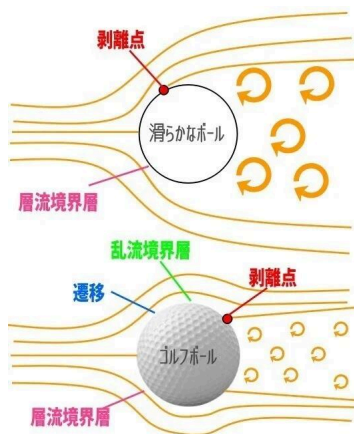


図15

4 今後の課題

今回の研究から次のことがわかった。

- 1 帆の直径が大きいほど、得られる力も大きくなる
- 2 帆の長さが長いほど、得られる力も大きくなる
- 3 帆の表面形状によって、得られる力は大きく変化しない

実験から、次のような課題が見つかった。

- 1 理論値と実測値が大きくなる
- 2 表面形状による影響がはっきりしない

1の解決策としては、風洞や整流格子を用いて空気の流を均一にすることが考えられる。2の解決策としては、より凹凸を大きくしたり、別の形状を試したりすることが考えられる。今後は、理論値と実測値との差が風の影響なのかを検証したい。検証には次のような実験装置を用いる。(図16)

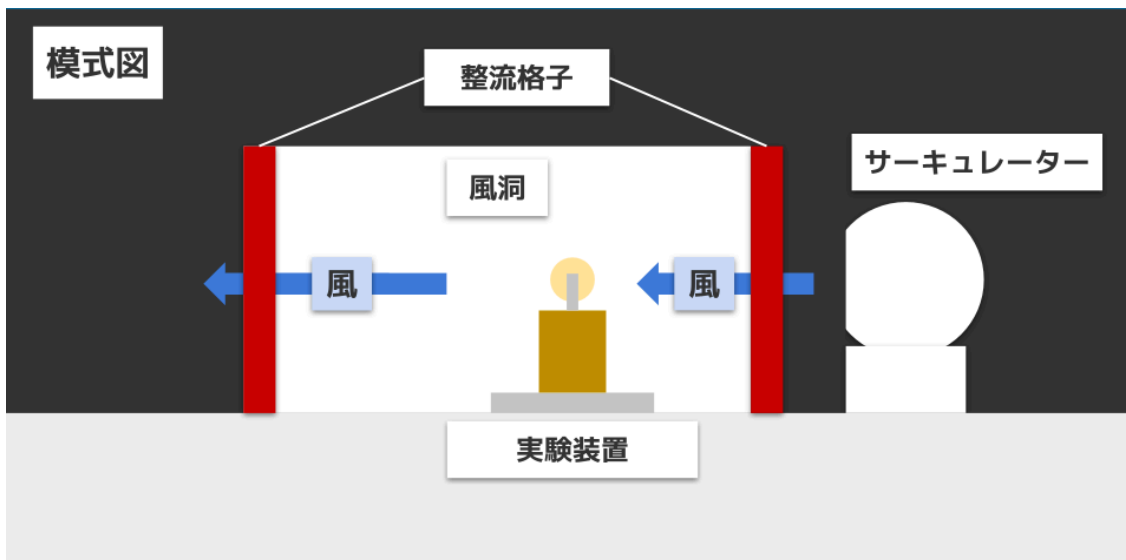


図16

5 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた小西先生、助言いただいた秋田県立大学システム科学技術学部 機械工学科 准教授 須知先生に厚く御礼申し上げます。

6 引用・参考文献

〈先行研究〉

岐阜県学校間ネット、「マグヌス効果」

<https://www.gifu-net.ed.jp/kyoka/rika/risu-tebiki/32/4magunusu.pdf>

東京理科大学、「風洞を用いたマグヌス効果の測定とフリースペースでの投球によるマグヌス効果の可視化」

<https://www.tus.ac.jp/uc/materials/2018/03/22/2753/>

〈その他参考〉

PBCF、「風力推進補助装置 ROTOR SAIL のご紹介」

<https://www.pbcf.jp/jp/column/detail.php?id=101>

日経クロステック、「飛距離を伸ばすゴルフボールのディンプル」

<https://xtech.nikkei.com/dm/article/COLUMN/20150803/430560/?P=4>

鳩ぽっぽ 初心者のための航空力学講座、「圧力抵抗」

<https://pigeon-poppo.com/pressure-drag/>

Wikipedia、「Kutta-Joukowski theorem」

https://en.wikipedia.org/wiki/Kutta%E2%80%93Joukowski_theorem