

回転体表面の凹凸によるマグナス効果の揚力変化の検証

宮城県仙台第三高等学校 理数科

要 旨

乱流状態の流体中に回転体を設置しマグナス効果を作用させる実験において、回転体表面に凹凸を取り付けると、発生した揚力に変化が見られた。本研究では、円柱に凹凸を取り付けた条件におけるマグナス効果による揚力の実験を行い測定した。そして、計測値の変化の原因を力学的観点から解明することを試みた。実験結果から、高レイノルズ数における円柱周りの抗力を根拠に、回転体表面の凹凸を変化させたために回転体周りの空気が乱流へ遷移し、剥離点が後退したことによる抗力の変化が揚力増減に影響していることが結論付けられた。

1. 序 論

一様流の粘性流体中に物体が流れの向きと垂直な軸で回転しているとき、その回転体に流れと回転軸のどちらとも垂直な方向に揚力が発生する現象は、マグナス効果と呼ばれている。この現象は野球のカーブボールなどの原理の説明とされ、ボールが回転しながら空気中を進行することによりマグナス効果が作用しているとみなされる。現在、マグナス効果による揚力は広く知られており、実験的な解析が進められた結果、工学的にも利用されるようになってきている。特に、垂直型マグナス式風力発電機¹⁾のように、再生可能エネルギーへの応用がなされているため、この現象の性質理解は重要な課題である。

マグナス効果について、レイノルズ数や回転体の回転速度、回転体表面の粗さなどの条件に対応する揚力は実験で確かめられ、マグナス効果による揚力の大きさを計算する方法については定量的に扱われている。しかし、この現象のメカニズムに関しては多様な説明があり、完全な原理の理解は未だ行われていないように思われる。例えば、ベルヌーイの定理による説明は、回転に対し順方向の流体は流速が速く、逆方向では流速が遅くなり、回転と流速の方向の異なる2点に圧力差が生じているという事実から一般的な説明に用いられることが多い。エネルギー保存の観点から、流体の運動エネルギーが小さければ圧力は大きくなるというのは正しい

ように思われる。しかし、Maruyama²⁾によると、ベルヌーイの定理による説明は流速差が発生する原因を説明できず、粘性流体を対象とした際の剥離などを加味していないとして不十分であるとされている。

我々はこの現象の定性的な説明が不確定である一方で、多様な条件での実験結果が先行している状況を課題であると考え、特定の条件下における揚力の発生メカニズムについて実験と議論を行った。特に、工学的に回転体表面の粗さに関する揚力の計測実験は多く行われており、条件による揚力の変化は確認されている。しかし、変化するメカニズムに関してはよく解明されていないように見られたことから、我々は「回転体表面の凹凸形状による揚力変化」に注目した。我々は実験を通して凹凸がある場合における揚力を測定し、高レイノルズ数の流体において凹凸がどのように揚力を変化させるのか検証を行った。

2. 実験装置と実験条件

本研究を行うにあたり、本校理数科第58回生理数科3班による先行研究³⁾を元に実験

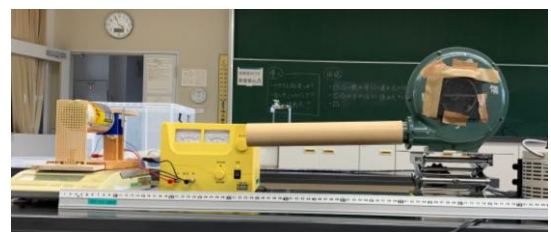


図1 実験装置の様子

装置を制作した。装置の概要は図1に示した。

実験装置は、回転体を回転させる装置(以下回転装置)、電子天秤、およびブロワーで構成される。実験に際して、ブロワーで発生した風を回転体が受けたことによる揚力を、電子天秤に回転体を乗せることにより重さの変化を計測することで、回転装置が受けた鉛直方向の力として計測した。

回転体は、直径 $d=60\text{mm}$ 、スパン長 $L=120\text{mm}$ の円柱(アルミ缶)を用いた。軸は両端が固定されており、電源装置から 2.0A の電流で接続した DC モーターで回転させた。回転体はブロワー吹出口からの平行な流線と垂直になるように調整した。ブロワーからの風は平均流速 $U=10\text{m/s}$ であり、気温 20°C における動粘性係数を $\nu=15.12\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ として、レイノルズ数 Re は以下の式で定義する。

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad \dots(1)$$

本実験の条件下では、レイノルズ数は $Re \approx 4.0 \times 10^4$ とする。

回転装置の角速度については予備実験を行い、電流を一定にして凹凸を取り付けた場合の回転の様子を動画で撮影し、回転数の比較をしたところ、差がほとんど見られなかった。そのため、本実験においては角速度を一定であるとした。

加えて、本実験では各実験で 30 回ほど測定した数値の平均値を取った。そして、測定値の平均を比較するにあたり、有意差比較として t 検定の片側検定を行っている(***: $p<0.001$)。

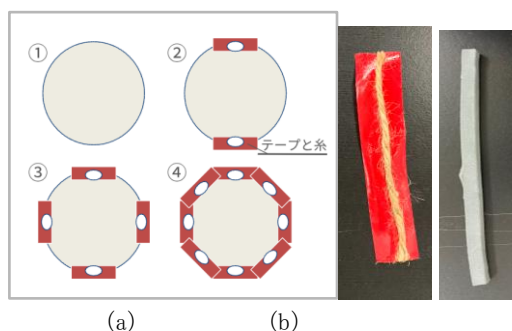


図2(a)凹凸を回転体に接着する様子
(b)凹凸①(左)と②(右)

3. 実験

3-1 実験1

実験に際して、仮説として「回転体に凹凸を取り付けると揚力が増加する」(以下、仮説1)を設定し、この仮説に基づいて実験1-1と実験1-2を開始した。

実験1-1では、回転体表面の凹凸の数による揚力の比較を行った。凹凸の回転体への接着の様子は図2(a)に示す。凹凸には、ビニールテープで麻紐を固定した幅 2mm のテープ(以下、凹凸①)を制作し、回転体に接着した。凹凸①の数が 2, 4, 8 枚の条件と凹凸が 0 枚の条件(以下、条件 A)で測定を行い、測定値の平均を比較した。

実験1-2では、凹凸の種類による揚力の比較を行った。凹凸①と異なるテープとして厚さ 5mm のスポンジテープ(以下、凹凸②)を用いた。凹凸①と凹凸②は図2(b)に示す。実験1-1と同様に、凹凸②が 2, 4, 8 枚の条件での揚力を測定し、実験1-1の数値と合わせて比較した。

実験1における凹凸の接着は、図3で示すように、凹凸ごとの間隔が等しくなるようにした。これは、回転による重心の移動によって振動が生じ、回転装置に負荷がかかるのを防ぐためである。

3-2 実験結果1および考察

実験1の結果は表1と表2に示す。実験1-1の結果より、最大値は 2 枚の条件で 3.57g であった。加えて、凹凸①の枚数にか

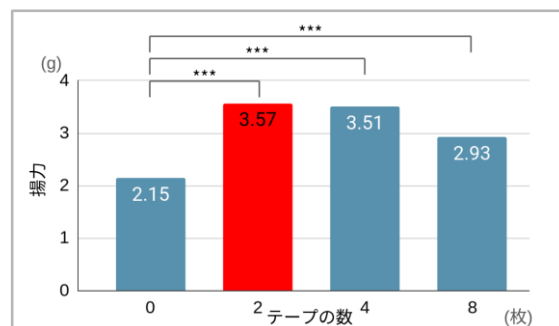


表1 実験 1-1 の測定結果と比較

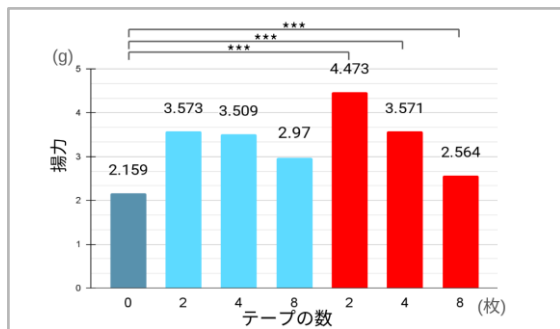


表2 実験 1-2 の測定結果と比較

かわらず条件 A より大きな揚力が発生していることが分かる。実験1-2の結果より、最大値は凹凸②が 2 枚の条件で 4.473g であった。実験1-1と同様に凹凸②を用いた場合にも、枚数にかかわらず条件 A より大きい揚力が発生していることが分かる。したがって、仮説1は正しいことが示された。

一方、各実験の凹凸 2 枚の条件では凹凸②のほうが揚力が大きく、テープ 8 枚の条件では凹凸①のほうが大きくなったことから、凹凸の種類による揚力の変化の傾向は確認できなかった。この比較に関して、凹凸の数に加えて凹凸の大きさも変化していることから、凹凸の種類のみで揚力を比較するのは不適切であったと考えられる。

各実験の凹凸の枚数と揚力の変化の傾向を比較すると、どちらも凹凸の枚数が増えるにつれて減少傾向があると推測された。よって、凹凸の枚数と揚力の負の相関を検討するため、次の実験2を開始した。

3-3 実験2

先の実験1より、新たな仮説として「凹凸の枚数と揚力の大きさには負の相関があ

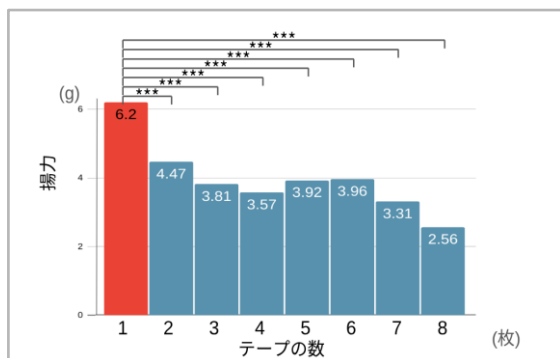


表3 実験 2 の結果と比較

る」(以下、仮説2)を設定し、この仮説に基づいて実験2を開始した。

実験2では、凹凸の枚数の条件を拡張して 1 枚から 8 枚までの 8 条件で計測し、平均値を比較した。ここで、実験1-2での凹凸①と②の比較からより揚力の変化が顕著であった凹凸②を実験2で採用した。

実験2における凹凸の接着は、実験1と同様に、各凹凸の間隔が等しくなるようにした。

3-4 実験結果2および考察

実験2の結果は表3に示す。最大値は 1 枚の条件で 6.20g、最小値は 8 枚の条件で 2.56g であった。相関係数は-0.841 で、強い負の相関があることが分かる。したがって、仮説2は正しいことが示された。

このことから、本実験の条件下におけるマグナス効果の特徴として、以下の 2 つの性質が検討された。

性質1:回転体に取り付けた凹凸は揚力を増加させるはたらきをもつ

性質2:凹凸の枚数と揚力には負の相関があるこれらの性質には矛盾が生じている。なぜなら、凹凸と揚力の関係が連続していると仮定すると、性質2に基づいた場合、凹凸が極限まで小さい、すなわち条件 A では揚力が最大となるはずである。しかし、性質1より、凹凸がある条件よりも条件 A のほうが揚力が小さいため、矛盾が生じる。

ゆえに、我々は性質2が不適であると結論付け、凹凸が短い場合の揚力の変化を計

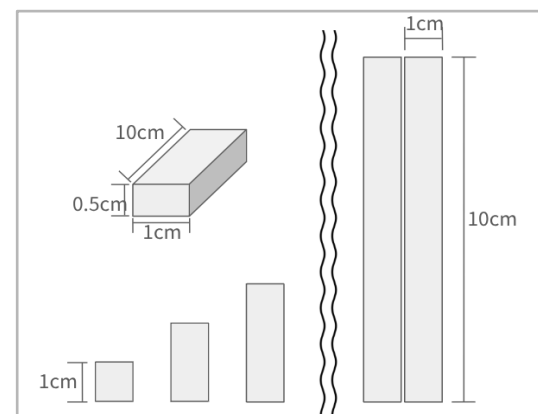


図3 実験3における凹凸②の切り取り

測し、実験1、2で確認した減少傾向が切り替わ

ることを確認するために実験3を開始した。

3-5 実験3

実験2の考察より、新たな仮説として「凹凸が短いとき揚力は増加傾向を示す」(以下、仮説3)を設定し、この仮説に基づいて実験3を開始した。

実験3では、条件 A から枚数が 1 枚の場合までの短い凹凸を比較することから、実験 1、2 のように凹凸の枚数による傾向ではなく、凹凸②を切り取った体積による傾向を検証した。

凹凸を切り取る様子は図3に示す。凹凸には実験2と同様に凹凸②を使用し、条件 A から 0.5 cm^3 ずつ 5.0 cm^3 まで、それ以降は 1.0 cm^3 ずつ 10.0 cm^3 までの凹凸をそれぞれ切り取って回転体に取り付けた。凹凸の取り付け位置は、凹凸の両端と回転体の端までの長さが等しくなるように調節した。先の実験と同様に揚力を計測し、平均値を比較した。

実験に際して、回転体として用いていた缶を同様の大きさの別の缶に変更したため、条件 A の値を再度測定した。測定した値は 4.334 g であった。

3-6 実験結果3および考察

実験3の結果は表3-1に示す。最大値は凹凸が 4 cm^3 の条件で 8.08 g であり、その条件

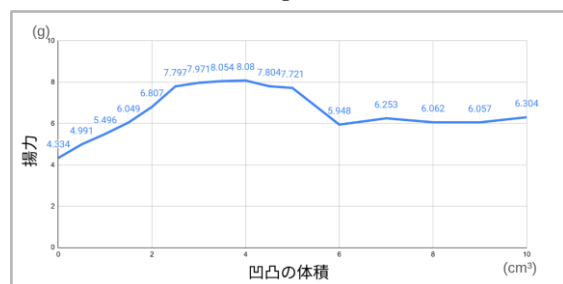


表3-1 実験3の結果と比較

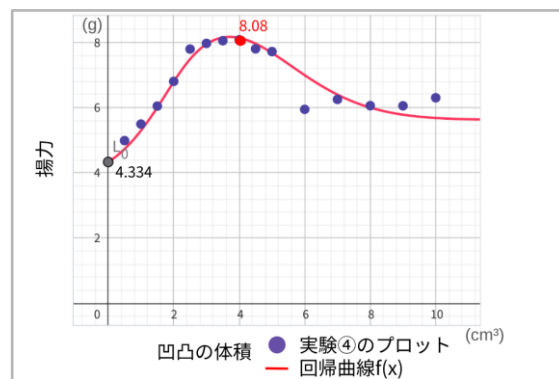


表3-2 回帰曲線による近似

を境に左側では増加傾向、右側では減少傾向が見られた。したがって、仮説3は正しいことが示された。

このことから、本実験条件下におけるマグヌス効果と凹凸との関係として、以下の性質が明らかになった。

性質1: 回転体に取り付けた凹凸は、凹凸がない状態よりも揚力を増加させるはたらきをもつ

性質2: 凹凸の大きさは一定値までは揚力増加に影響し、それ以降は減少傾向を示す

また、これらの性質は矛盾を含んでいない。

実験結果に伴い、グラフを元に回帰曲線を作成し、表3-2に示した。ここで、近似には以下の関数を用いた。

$$f(x) = \frac{14 \cdot 4^x e^{-4}}{x!} + \tan^{-1}(x - 2) + 4.742 \quad \dots (2)$$

ここで、結果に基づいて性質を議論するに際して、性質2に関しては、確からしさを証明できていないことを言及しておく。本実験以上の正確な結果を求めるには、実験装置の改善が必要である。性質1に関してはディンプルの効果として実験的に確かめられている事実である一方、性質2については、減少傾向が条件の範囲以外で成り立つかを確かめる必要がある。したがって、これらの性質の原理的説明について、性質2を議論するには定量的なデータが不十分であると判断し、本稿ではその議論を行わないこととした。

4. 考 察

以上の実験結果および考察から、我々はマグヌス効果における性質として性質1の議論を行い、凹凸形状による揚力の変化のメカニズムについて、力学の観点から説明を試みた。

第一に、粘性流体中に物体に境界層剥離が発生している場合に焦点を当てる。この条件において、上流の流線が物体表面と直交する点と、下流の流線が通らない点において淀み点の存在を考慮できる。このとき、上流の淀み点では流速が0になることで圧力が高く、下流では圧力が低くなるため、圧力差による力がはたらくことがわかる。加えて、高レイノルズ数の場合には、乱流境界層が発生することにより剥離点が後退するため、後流が剥離せずに低圧の淀み点を高圧に保つ事ができると分かっている。

第二に、凹凸により渦が発生し、乱流遷移が起こることに焦点を当てる。物体表面の凹凸は、気体の活発な運動量交換を可能にする。このことから、臨界レイノルズ数が小さくなり、低レイノルズ数の条件においても乱流遷移が可能になる。したがって、活発に乱流を発生させる凹凸形状を持つ物体は、粘性流体中で淀み点の圧力差を減少させることができると考えられる。

第三に、マグヌス効果に関する事実として、後流の向きが反れることに焦点を当てる。これは実験的に確かめられており、剥離点も同様にシフトすることが分かっている。後流の反れる向きは揚力の向きと逆であり、揚力の反作用で発生していると解釈

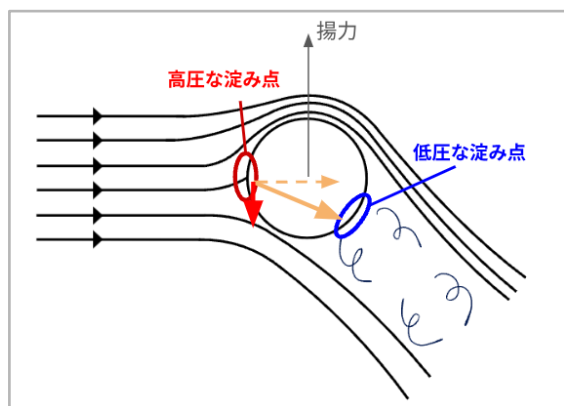


図4 後流が反れる様子と淀み点の発生

されている。このとき、回転体の低圧な淀み点

も、後流が反れた向きへシフトすることが考えられる。マグヌス効果により後流が反れる様子と、淀み点により斜め方向に圧力差が発生している様子は図4に示す。

これらの事実から、マグヌス効果において、凹凸形状を持たない回転体の場合、揚力と逆向きに反れた淀み点の発生によって、前面の淀み点との作用で揚力を妨げる向きに圧力（斜め方向の力の分解による鉛直下向きへの力）が作用するということが順当に考えられるだろう。加えて、凹凸による乱流遷移の性質から、剥離点が移動し淀み点の圧力差を減少させる。これに伴い、揚力を妨げていたと考えられる圧力差がなくなったことで、揚力が増加したのだと考えられる。

しかし、層流状態のベルヌーイの定理などを考慮すると、淀み点が発生しているか、揚力を妨げるほどの圧力差が発生しているかという疑問が生じる。この疑問に関しては正確に実験装置周囲の圧力分布を視覚化することができないため、本研究ではその説明を補うことができなかった。よって、このメカニズムの説明は不完全と言えるだろう。

5. ま と め

本研究では、凹凸形状を持つ回転体におけるマグヌス効果の発生について実験と議論を行った。

実験1では凹凸による揚力の変化を検証し、凹凸がない状態を条件Aとして、凹凸をつけた場合との比較を行った。それにより、凹凸形状は条件Aより大きな揚力を発生させることを確認した。加えて、凹凸の枚数による揚力の減少傾向が見られたため、実験2で検証することにした。

実験2では、凹凸の枚数による揚力の増減について実験し、凹凸の枚数との相関を確かめた。それにより、揚力と凹凸の枚数には負の相関があることが示された。

実験1と2より、マグヌス効果と凹凸の関係として「回転体に取り付けた凹凸は揚力を増加させる」、「凹凸の枚数と揚力には負の相関がある」という2つの性質が考えられたため、それぞれを性質1と性質2として検討した。しかし、性質2に

より「より短い凹凸はより大きな揚力を発生させる」という特徴は、性質1の条件 A (凹凸が極限まで小さい状態)と矛盾していることが考えられるため、実験3ではより短い凹凸について扱った実験を実施した。

実験3では、短い凹凸における揚力の増減について実験し、凹凸の体積との相関を確かめた。それにより、条件 A から一定の範囲までは増加傾向があり、それ以降は減少傾向があることを確認した。よって先の性質2を改め、「一定の大きさまでの凹凸の増加は揚力増加に影響し、それ以降は減少傾向に変化する」と結論付けた。

実験を元に我々は性質1について議論し、メカニズムの解明を試みた。その結果以下の四点が関係していると考えた。①粘性流体中の物体に高圧と低圧の淀み点が存在すること、②乱流状態では剥離点が後退し圧力差を軽減すること、③凹凸は粘性流体の低いレイノルズ数での乱流遷移を可能にすること、④マグヌス効果が発生する回転体の後流は揚力に対して逆の向きに反れ、淀み点の位置も同じ方へ移動すると考えられること。これらの要素から、凹凸が揚力の増加に影響するメカニズムとして、「凹凸により剥離点が移動し、淀み点による圧力差、すなわち揚力を妨げる鉛直方向に作用していた圧力差がなくなったことで、揚力が増加した」ことが結論付けられた。

今後は、他の条件における性質1の検証を進めるほか、性質2の議論を進めるためさらなる実験と比較を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 株式会社チャレナジー,垂直軸型マグナス式風量発電機,<https://challenergy.com/magnus/#results>(2014)
- 2) 丸山祐一『マグヌス効果の物理的メカニズムについて』(日本航空宇宙学会論文集,2009)57 巻 p.309-316
- 3) 仙台第三高校 58 回生理数科物理 3 班『マグナス効果における風速と力の関係』(2023-1)
- 4) MONO 塾,抗力係数を理解すれば空気中を移動するあらゆる物体を扱える <https://d-monoweb.com/blog/drag-coefficient/>(2024-3)
- 5) ゴルフ通訳の人,ゴルフボールが飛ぶ仕組み！回転と空気力学の秘密,https://note.com/_ayn/n/nff21f1c7ecb9(2021-10)
- 6) 須知成光,伊藤惇,村上信博,菊池博道,神山新一『付加構造をもつ回転円筒におけるマグナス効果に関する研究』(風力エネルギー利用シンポジウム,2004)26 巻 p.155-158
- 7) 辻裕,水野修,佐野俊史,森川敬信『球のマグナス力に関する実験』(日本機械学会論文集(B 編),1986-2)52 巻 474 号 p.557-563