

慣性モーメントが変化する フライホイールを用いた風力発電

優秀賞

愛媛県立松山南高等学校・フライホイール班

村上晴文 森星七翔 神野絢音 楠原采留

1. 研究の要約

我々はプロペラの回転時の回転の安定性の向上を目指し、慣性モーメントが変化するフライホイールを考案した。このフライホイールは、内部にばねを取り付けた鉄球を設置し、鉄球の位置が遠心力により変化する機構である。本研究の結果から、慣性モーメントが変化するフライホイールを用いることで、従来のフライホイールを用いたときよりも電力が安定することを確認した。また、慣性モーメントが変化するフライホイールの中でも、鉄球の可動上限が最も大きいフライホイールの発電電力が最も安定することが分かった。

2. 研究の動機

SDGs が広く認知されている現在、風力発電は二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーとして、特に注目を集めている。しかし、風力はプロペラの回転が一定ではないことから、安定した電力が供給できない、騒音被害があるなどの問題点が生じる。そこで我々は、従来は回転を安定させるために自動車のタイヤなどに使われるフライホイールに着目した。これを発電に応用することで、プロペラの回転を安定させることができるのではないかと考えた。本研究を完成させることにより、SDGs の目標 7、9、11、13 に寄与できる。(図 1)



【図 1】SDGs ロゴ

3. 研究の目的

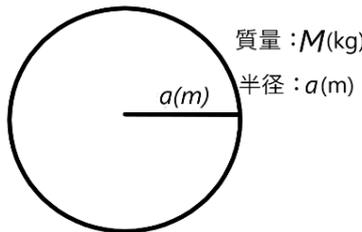
ばねを用いることで、遠心力により中心から鉄球までの距離が変化するフライホイールを製作する。フライホイールの慣性モーメントの変化によってどのように発電量が変化す

るのかについて実験を行う。また、実験の結果から、自作のフライホイールが風力発電の問題点を改善できるのかについて調べる。

4. 慣性モーメントについて

慣性モーメントとは回転運動の変化のしにくさを示す量で、フライホイールの性能に大きく関係している。[図 2]のような円盤状物体の質量を M [kg]、半径 a [m] とすると、円盤状物体の慣性モーメントは次のような式で表される。

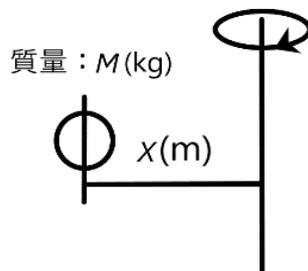
$$\frac{1}{2}Ma^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$



【図 2】円盤状物体

[図 3]のような質量 M [kg] の物体を y 軸周りに半径 x [m] で回転させるときの慣性モーメントは次のような式で表される。

$$Mx^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

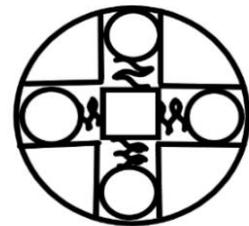


【図 3】回転体

5. 自作のフライホイール

従来、自動車のタイヤ等に用いられるフライホイールは回転により慣性モーメントは変化せず、前項の回転体のみを考えればよい。この回転体の慣性モーメントを大きくすることによってタイヤ等の回転の安定化を図って

いる。一方、我々は[図 4]のように、円盤状物体内部にばねを取り付けた回転体を 4 個設置したフライホイールを考案した。回転開始時は回転体が内側にあり、慣性モーメントが小さいので、回転に必要なエネルギーが小さく、回転開始が容易である。回転速度が上がると、遠心力によって回転体が徐々に外側に移動する。ばねが遠心力により伸び、回転体が外側に移動すると、慣性モーメントが大きくなり回転数が増えにくくなる。このことを本研究では、回転が「安定する」と述べている。



【図 4】自作のフライホイール (模式図)

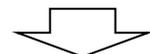


【図 5】自作のフライホイール

6. 過去の実験結果からの改善点

ここでは、研究の初期段階に行った実験結果より得られた改善点を踏まえ、本研究で用いたフライホイールの決定の過程を記す。

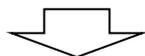
- ① フライホイールの質量に対して鉄球の質量が小さく、実験結果が鉄球を付けたことにより出た結果かわからない。



鉄球の質量を大きくし、フライホイ

ールを3Dプリンターで製作する際に充填率を小さくした。

- ② 鉄球の動きをスローモーション動画で確認した時、回転開始からすぐに鉄球が移動し、回転速度が上がらないうちに慣性モーメントが最大になってしまった。



フライホイールに取り付けるばねのばね定数を大きくした。

7. 実験方法

(1) 実験で用いる道具

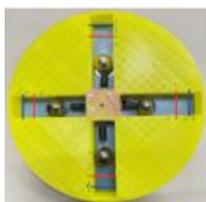
モータ(発電機)・プロペラ(直径20 cm、サボニウス型)・フライホイール(直径25 cm)・送風機・ストップウォッチ・カメラ・電圧計・抵抗器(100 Ω)



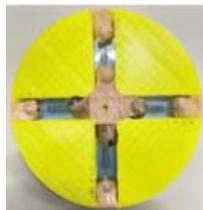
【図6】実験装置

(2) 実験1 (ばね定数: 17 N/m)

- ① 内部に鉄球を設置した自作のフライホイール【図5】に発電機、自作プロペラ、抵抗器、電圧計を接続する【図6】。プロペラの中心から送風機までの距離を45 cmに固定して、電力の時間による変化を測定した。測定開始時に風力を強(風速14.5 km/h)、60秒後に弱(10.5 km/h)、120秒後に強、180秒後に送風機を停止した。
- ② フライホイール中心から鉄球の端までの距離を6.5 cm(内側固定)、12.0 cm(外側固定)に固定した2種類、ばねによる鉄球の可動上限が中心から9.0 cm(仕切り1)、10.5 cm(仕切り2)、12.0 cm(仕切りなし)である3種類について比較した。



【図7】
仕切りなし 12.0 cm
仕切り1 6.0 cm
仕切り2 10.5 cm



【図8】
外側固定 12.0 cm
内側固定 6.0 cm

内側固定の慣性モーメント: 14 kg・m²
外側固定の慣性モーメント: 61 kg・m²

(3) 実験2 (ばね定数: 22 N/m)

実験1と異なるばねを用いて、内側固定、外側固定、仕切りなしの回転開始時(回転開始~18秒)と回転終了時(送風機停止~回転終了)の電力の時間による変化を詳細に測定し、比較した。

(4) 実験3 (ばね定数: 22 N/m)

実験1①と同じ手順で電力の時間による変化を測定した。測定開始時に風力を強(4.03 m/s)にし、90秒後に送風機を停止した。

(5) 実験4 (ばね定数: 22 N/m)

実験1①と同じ手順で電力の時間による変化を測定した。測定開始時に風力を弱(2.67 m/s)にし、90秒後に送風機を停止した。

(6) 実験5 (ばね定数: 22 N/m)

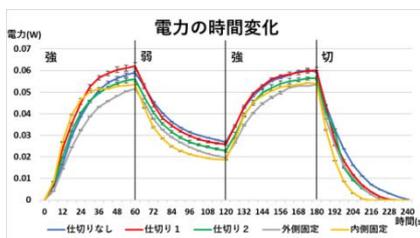
実験1①と同じ手順で電力の時間による変化を測定した。実験1の仕切り1と仕切り2の位置に鉄球を固定し、測定開始時の風力を弱にして90秒後に送風機を停止する場合と、風力を強にして90秒後に送風機を停止する場合について、それぞれの電力を比較した。

(7) 実験6 (ばね定数: 22 N/m)

内側固定と仕切りなしの2つの条件で、屋上で実際に自然の風を利用し実験を行った。プロペラの回転開始から回転停止までの風力と電力の時間による変化を測定した。

8. 実験結果

(1) 実験1の結果



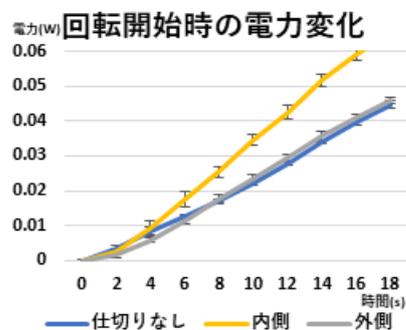
【図9】実験1 電力の時間変化

- ・仕切りなし
→風力変化時の電力の減少割合が最小(安定している)。回転停止までの時間が最も長い。
- ・内側固定
→風力変化時の電力変化が大きい。
- ・外側固定
→内側固定より風力変化時の電力変化が少ない。

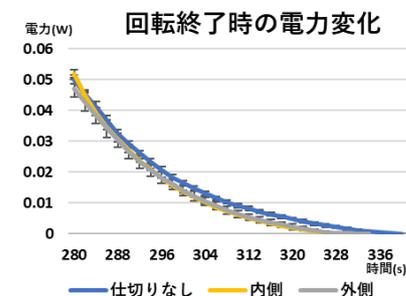
【表1】実験1における電力減少率

	電力 (60s) [W]	電力 (120s) [W]	減少量 [W]	減少率
仕切りなし	0.059	0.027	0.032	-54%
仕切り1	0.062	0.026	0.036	-59%
仕切り2	0.056	0.023	0.033	-59%
内側固定	0.053	0.019	0.035	-65%
外側固定	0.051	0.020	0.032	-62%

(2) 実験2の結果



【図10】実験2 回転開始時の電力変化



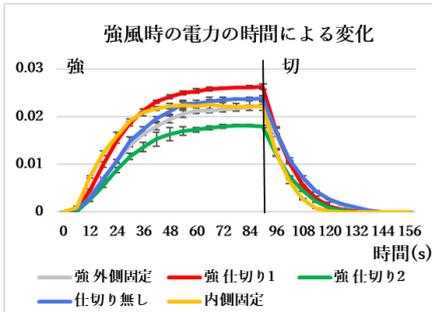
【図11】実験2 回転終了時の電力変化

- ・0~4秒
→内側固定とほとんど同じ電力変化。
- ・4秒以降
→外側固定とほとんど同じ電力変化。



[図 12] 実験 2 回転開始時の鉄球の様子
赤線は鉄球の端を示す
(左から、0、3、4、5、6 秒)

(3) 実験 3 の結果

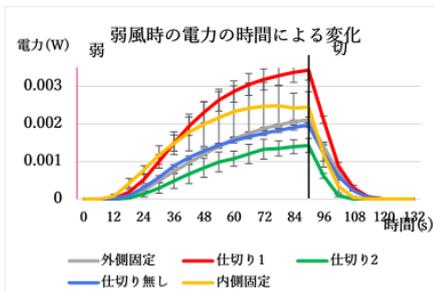


[図 13] 実験 3

強風時の電力の時間変化

- ・仕切り 1
→電力の上昇速度、最大値ともに最も優れている。
- ・仕切りなし
→回転停止までの時間が最も長い。

(4) 実験 4 の結果



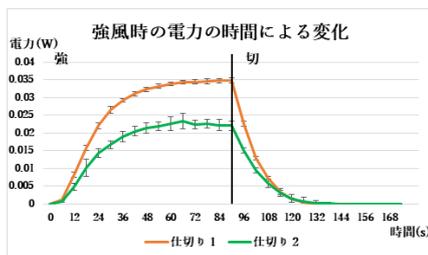
[図 14] 実験 4

弱風時の電力の時間変化

- ・仕切り 1
→電力の最大値が最も大きい。
- ・外側固定、仕切りなし
→送風機停止から回転停止までの電力減少が緩やか。標準偏差が比較的小さい。

(5) 実験 5 の結果

○強風時

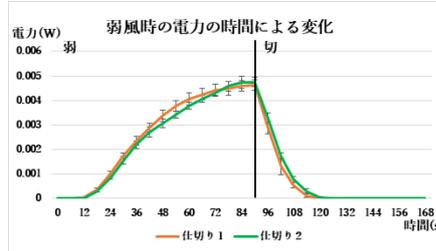


[図 15] 実験 5

強風時の電力の時間変化 (固定)

- ・仕切り 1
→電力の上昇速度、最大値ともに優れている。標準偏差が小さい。
- ・仕切り 2
→回転停止までの時間が長い。

○弱風時



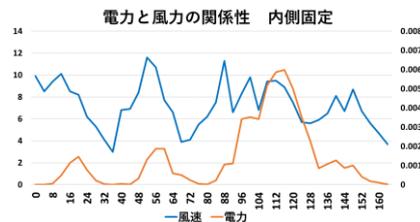
[図 16] 実験 5

弱風時の電力の時間変化 (固定)

仕切り 1、仕切り 2 の間で、電力量に大きな違いは見られない。

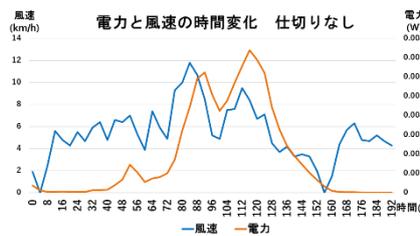
- ・仕切り 1
→電力の上昇速度が大きい。
- ・仕切り 2
→回転停止までの時間が長い。

(6) 実験 6 の結果



[図 17] 実験 6

電力と風力の時間変化 (内側固定)



[図 18] 実験 6

電力と風力の時間変化 (仕切りなし)

9. 考察

(1) 実験 1

- ・仕切りなしの電力の時間変化について
[図 9] と [表 1] より、風力を強から弱に変化させたときの電力の減少率が最も小さく、-54%である。また、送風機を停止してから、発電が停止するまでの時間が最も長いことが分かる。これら

のことから、弱風時に回転が保持されていると言える。このことより、慣性モーメントの変化するフライホイールを用いることでプロペラの回転をより保持することができると思う。

・仕切り 1 の電力の時間変化について

[図 10] より、電力の最大値が最も大きいことが分かる。このことより、慣性モーメントの変化が小さい方が電力の最大値が大きくなると思う。しかし、仕切りなしよりも慣性モーメントの変化が小さい仕切り 2 の方が電力の最大値が小さいなどの説明ができない点がある。

(2) 実験 2

・回転開始時

[図 10] より、0 秒～4 秒では内側固定、それ以降は外側固定とほとんど同じ電力変化を示した。このことより、今回の実験で用いたばね定数では、4 秒付近で慣性モーメントが変化し始めたと考えられる。このことは、スローモーション動画を用いた検証によって証明された。[図 12]

・回転終了時

[図 11] より、実験 1 と同様に、仕切りなしが、送風機を停止してから発電が停止するまでの時間が最も長いことが分かる。よって、このことから慣性モーメントの変化するフライホイールが、慣性モーメントの変化しないフライホイールより、回転の保持の観点で優れていると考えられる。

(3) 実験 3

[図 13] より、仕切り 1 の電力の最大値が最も高いことが分かる。実験 1 では途中で風力を弱めていたので、風力が変化した際に回転を保つことに優れている仕切りなしと仕切り 1 の電力の最大値が同じような値だった。しかし、風力を変化させない場合では仕切り 1 が最も電力の最大値が大きくなりやすいと考えられる。また、仕切り 2 は電力の最大値が小さかった。

(4) 実験 4

[図 14] より、弱風時は標準偏差が大きくなりやすいが、外側固定、仕切りなしは標準偏差が比較的小さいことが分かる。

このことより、慣性モーメントの最大値を大きくすることで電力の高低差を小さく

し、風力によってある程度定まった電力を発電できると考えられる。

(5) 実験5

[図15]より、強風時は実験3の結果と同様に電力の上昇速度、最大値ともに仕切り2固定よりも仕切り1固定の方が優れていることが分かる。このことより、実験3から読み取れる強風時での仕切り1と仕切り2の結果の差について、ばねを用いたことによる影響は小さいと考えられる。よって、強風時において、電力の観点では仕切り1の慣性モーメントの方が仕切り2の慣性モーメントより優れているといえる。

[図16]より、弱風時は実験4の結果と異なり、仕切り1固定、仕切り2固定の間で電力の値の変化に大きな違いはないことがわかる。このことから、実験4から読み取れる弱風時での仕切り1と仕切り2の結果の差について、ばねを用いたことによる影響が大きいと考えられる。よって弱風時は、電力の観点においては、ばねを用いるメリットは少ないと考えられる。

(6) 実験6

プロペラを回転させ、それを保持するためには7~8 km/h以上の風力が継続することが必要だと分かった。[図17]の112~128秒の部分と[図18]の88~96秒及び120~144秒の部分と比較すると、仕切りなしの方が回転を持続していることがわかる。

[図17]では風速の減少量が4 km/hであるのに対し、電力の減少量は0.005 Wである。一方、[図18]では、風速の減少量が6

km/hであるのに対し、電力の減少量が0.002 W程度である。このことから、慣性モーメントの変化するフライホイールを用いることによる効果が確認できた。

10. まとめ

(1) 結論

電力の観点では、実験1で得た電力の時間推移の結果より、仕切り1が最も優れていることが分かった。このことについては慣性モーメントの変化が最も小さいからだと考えられるが、疑問点もあるため、今後はより鉄球の可動上限を細かく設定して実験を行っていききたい。

回転の保持の観点では、実験1で得た電力を減少させたときの電力の減少の結果と、実験2で得た回転終了時の電力変化の結果より、仕切りなしが最も優れていることが分かった。このことから我々の考案した慣性モーメントの変化するフライホイールは、この観点において優れていると言える。

(2) 今後の課題

これからの研究では発電効率も考えて実験を行っていききたい。我々の実験では、風エネルギーのうち、2.5%程度の発電効率であった。本研究と同じサボニウス型では最大の発電効率が15%程度である。一方で、風力発電の発電効率には周速比が深くかわっている。周速比とは風速とプロペラの回転速度の比であり、今回の実験に用いているサボニウス型において、周速比は1が

最大である。周速比を求めるためにはプロペラの回転数を求める必要がある。今後の実験を通して求めたい。

また、本研究では仕切り1の発電電力がすべての実験を通して最大であった。このことから、フライホイールによって最適条件があると考えられるため、今後の実験で様々なフライホイールの最適条件を見つけ、フライホイールの大きさや鉄球の位置と質量、そして電力の値にどのような関係性があるかを調べる。さらに、プログラミングを用いてシミュレーションを行い、より正確な最適条件を見つけないかと考える。

11. 参考文献

中村造和、小柳明大、鈴木康慎、江口直也、佐藤義久、嶋田隆一(2002)、“風力発電におけるフライホイール発電容量に関する研究”、T. IEE Japan, Vol. 122-D, No. 3

愛媛県立松山南高等学校・教諭・理科・大上 千智

本研究のメンバーは4名の生徒からなる。ある生徒は海外に在住していた幼少期に環境教育に熱心に取り組み、ある生徒は自らの西日本豪雨被災の経験から発電に対して興味を持つようになった。そのような生徒が集まり、彼らが1年生の時に風力発電をテーマにした本研究が始まった。本研究は風力発電がテーマであるが、私たちが通常思い浮かべるような3枚の羽根がついた陸上風力発電と違い、騒音が抑えられるサボニウス型のプロペラを用いた風力発電に着目している。さらに、プロペラの下に自作のフライホイールを取り付けて回転速度により慣性モーメントが変化する機構を考えているところが本研究の目新しさである。2年弱前に前任の露口先生より、この研究を受け継いだとき、私は科学系課題研究の指導をしたことがなく、非常に不安であった。しかし、生徒たちが校訓「自らを律せよ」のもと、研究をしている様子を見て、私も生徒とともに実験を行い、考察に頭を悩ませるようになった。3Dプリンターを一台お釈迦にしたことをはじめ、プロペラ全体を回している軸である針の機嫌で実験結果が決まるなど、苦難の連続ではあったが、粘り強く実験を行っている姿が印象的であった。3年生になってからは、「せっかくだから自然風で発電したい」となり、普段は閉ざされている屋上での実験に取り組んだ。最終的に通常使われている風力発電の発電効率には及ばなかったが、慣性モーメントを変化させることで安定化を図ることができ、本研究の目的は果たせたと感じる。メンバーの一人が「今後も最適なフライホイールを模索したい」と意欲的であるため、彼らが卒業をした後もこの研究の行方に期待をしたい。最後に、本研究の基礎を作っていただいた愛媛県立新居浜工業高等学校の露口猛教頭先生に感謝申し上げる。