

作品名
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

研究者名 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、フライホイールに目を付けた。通常のフライホイールは慣性モーメントが変化することがないが、我々の考案したものはフライホイール内部には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ことによって全体の慣性モーメントが変化する機構を搭載している。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風力変化時の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、プロペラの回転が一定でないことから、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。また、本研究において安定とは風速変化時の電力変化が小さいことを指す。

3 研究の目的

回転の安定の観点で最も優れた慣性モーメントの条件を調べ、それをもとにフライホイールを作成してプロペラの回転を安定させ、安定した電力供給と騒音被害の軽減を実現する。

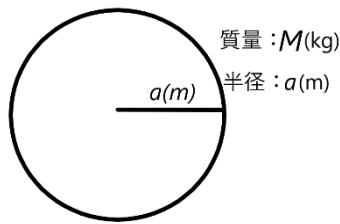
4 慣性モーメントについて

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1]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。

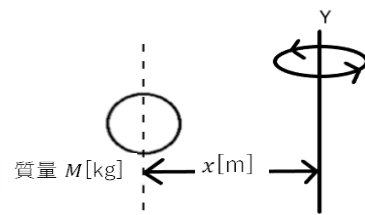
$$\frac{1}{2}Ma^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

[図2]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。

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



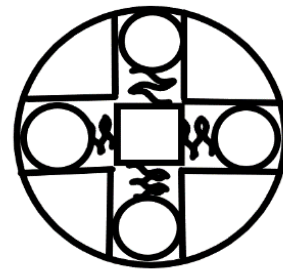
[図 1] 円盤状物体



[図 2] 回転体

5 自作のフライホイールについて

[図 3]のように、円盤状物体の内部にばねを取り付けた回転体(鉄球)を設置したフライホイールを考えた。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。回転時は、回転開始時と比べ、ばねが遠心力により伸び、回転体が外側に移動するので慣性モーメントが大きくなり、回転が安定する。



[図 3] 自作のフライホイール

6 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)・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

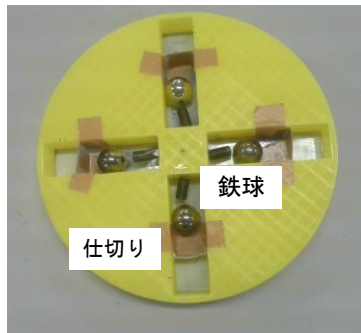
●フライホイールは 3D プリンターを用いて自作した。研究を通してばね定数、鉄球やフライホイールの質量を変化させるなどの改良を繰り返し、現在のフライホイールが完成した。

(2) 実験 1 (ばね定数: 22 N/m)

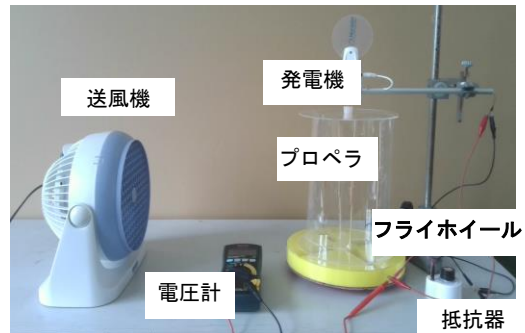
- ① 内部に鉄球を設置した自作のフライホイール [図 4] に発電機、自作プロペラ、抵抗器、電圧計を接続する [図 5]。プロペラの中心から送風機までの距離を 45 cm に固定して、電力の時間による変化を測定した。測定開始時に風速を強(風速 4.03 m/s)、60 秒後に弱(2.67 m/s)、120 秒後に強、180 秒後に送風機を停止した。
- ② フライホイール中心から鉄球の端までの距離を 6.5 cm(内側固定)、12.0 cm(外側固定)に固定した 2 種類、ばねによる鉄球の可動上限が中心から 9.0 cm(仕切り 1)、10.5 cm(仕切り 2)、12.0 cm(仕切りなし)である 3 種類について比較した。([図 6]、[図 7])

内側固定の慣性モーメント：14.255 kg・m²

外側固定の慣性モーメント：61.014 kg・m²



〔図4〕自作のフライホイール



〔図5〕実験装置

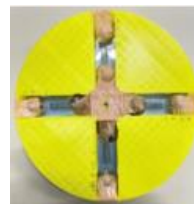


〔図6〕

仕切りなし 12.0 cm

仕切り1 9.0 cm

仕切り2 10.5 cm



〔図7〕

外側固定 12.0 cm

内側固定 6.0 cm

(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。測定開始時に風速を強(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。測定開始時に風速を弱(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、測定開始時の風速を弱にして90秒後に送風機を停止する場合と、風速を強にして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。

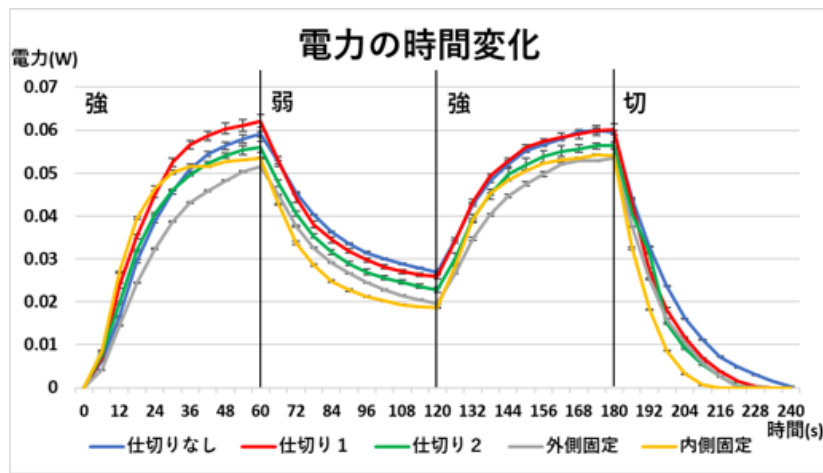
(7) 実験6 (ばね定数：22 N/m)

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速と電力の時間による変化を測定した。

7 実験結果

(1) 実験 1 の結果

- 仕切りなし→風速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。
- 仕切り 1 →電力の最大値が最も大きい。（0.062 W）
- 仕切り 2 →仕切り 1 とあまり変わらないが、電力の最大値は小さい。
- 内側固定→風速変化時の電力変化が大きい。
- 外側固定→内側固定より風速変化時の電力変化が少ない。



[図 8] 実験 1 電力の時間変化

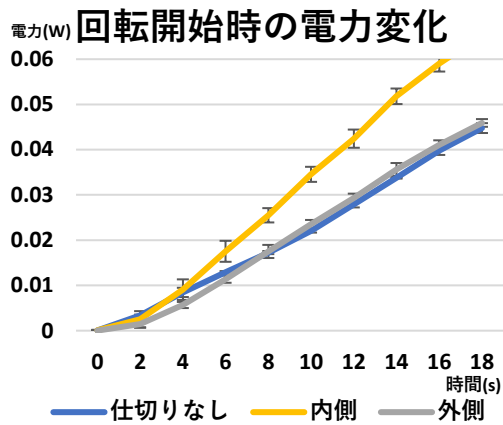
	電力(60s) [W]	電力(120s) [W]	減少量 [W]	減少率
仕切りなし	0.059	0.027	0.032	-54 %
仕切り 1	0.062	0.026	0.036	-59 %
仕切り 2	0.056	0.023	0.033	-59 %
内側固定	0.053	0.019	0.035	-65 %
外側固定	0.051	0.020	0.032	-62 %

[表 1] 実験 1 の電力の減少の様子

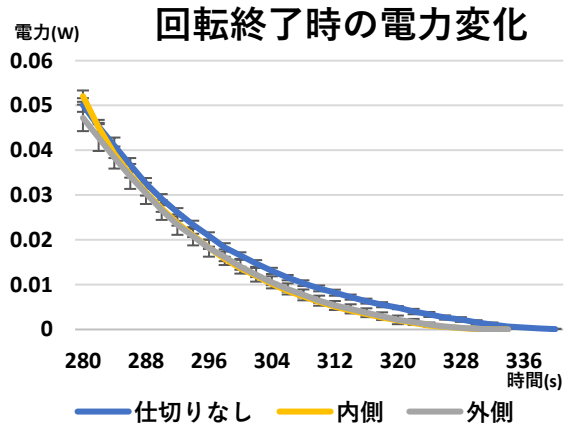
- 仕切りなしの減少率が一番低い。（-54 %）
- 内側固定の減少率が一番高い。（-65 %）

(2) 実験2の結果（仕切りなしについて）

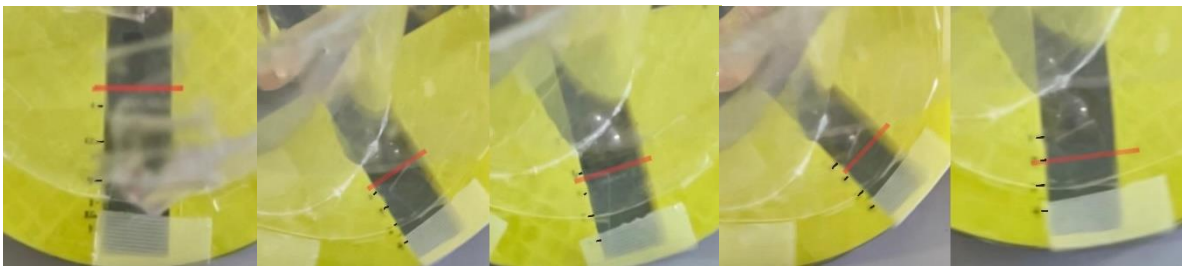
- 0～4秒→内側固定とほとんど同じ電力変化。
- 4秒以降→外側固定とほとんど同じ電力変化。



[図 9] 実験 2 回転開始時の電力変化



[図 10] 実験 2 回転終了時の電力変化



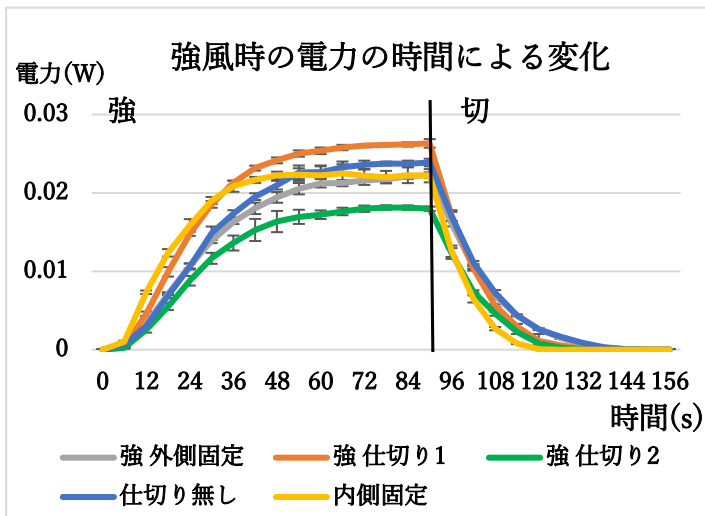
[図 11] 回転開始時のスローモーション
（左から 0 秒、3 秒後、4 秒後、5 秒後、6 秒後）

(3) 実験3の結果 [図 12]

- 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。

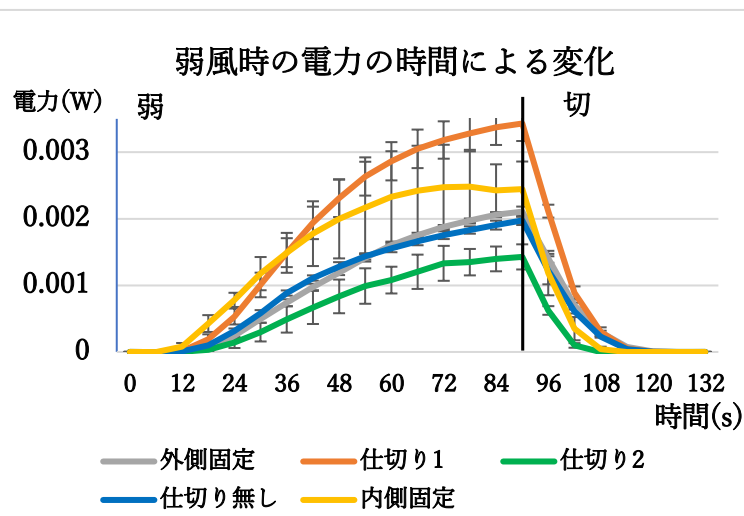
(4) 実験4の結果 [図 13]

- 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。



[図 12] 実験 3

強風時の電力の時間による変化

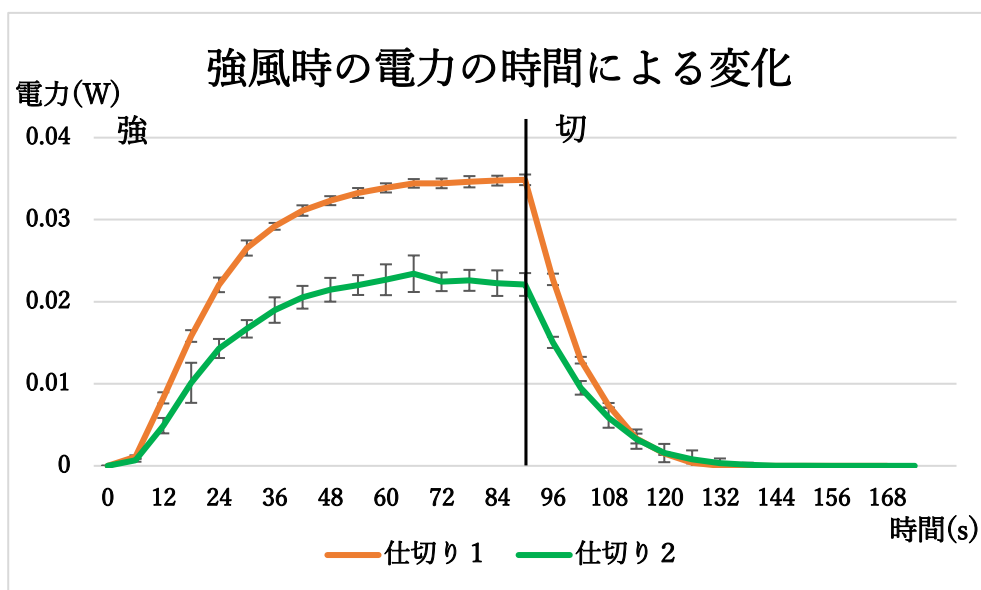


[図 13] 実験 4

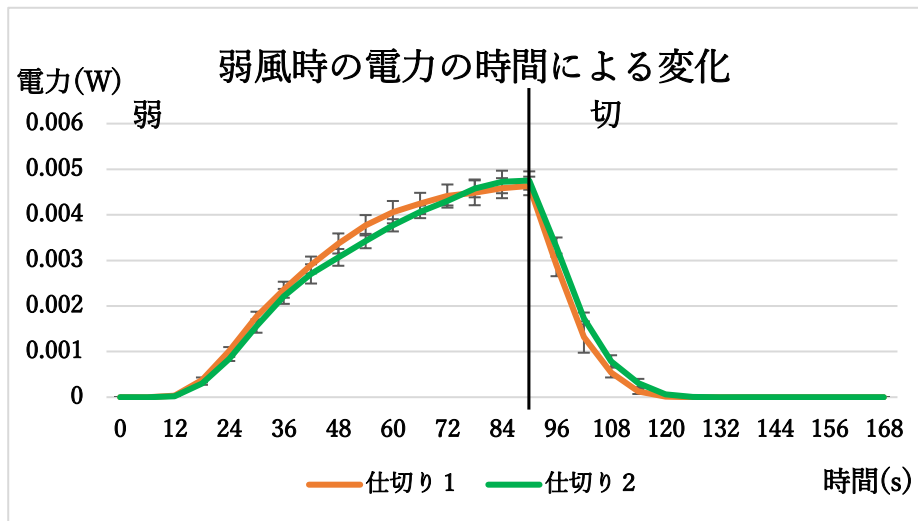
弱風時の電力の時間による変化

(5) 実験 5 の結果

- 強風時：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：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。

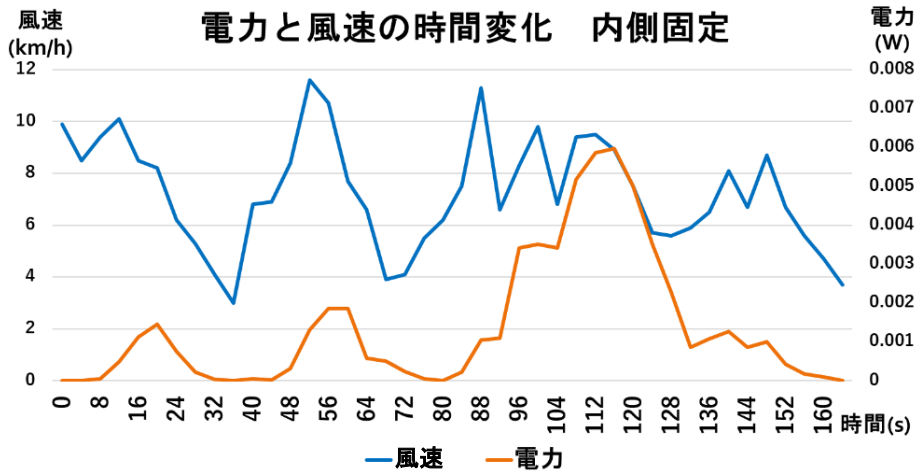


[図 14] 実験 5 強風時の電力の時間による変化 (仕切り 1・仕切り 2)

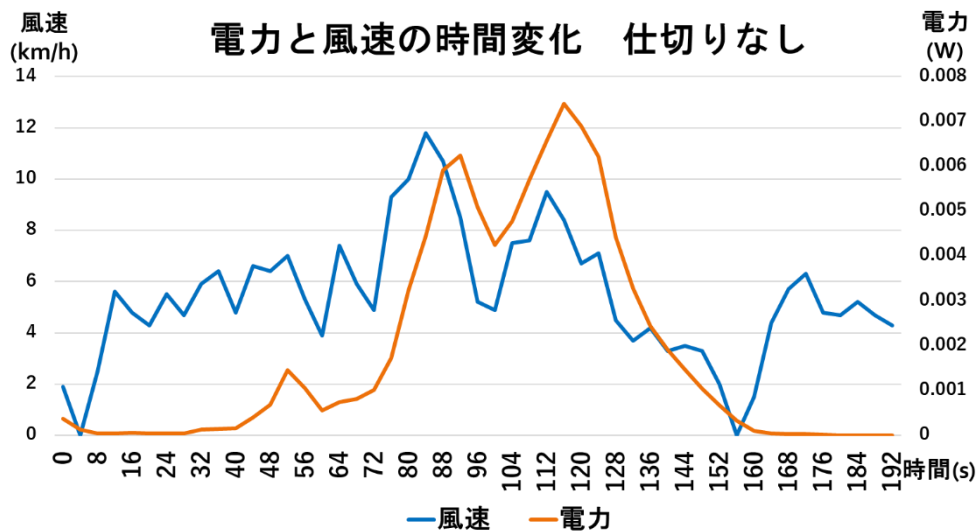


[図 15] 実験 5 弱風時の電力の時間による変化 (仕切り 1・仕切り 2)

(6) 実験 6 の結果



[図 16] 実験 6 電力と風速の関係性 内側固定



[図 17] 電力と風速の時間変化 仕切りなし

8 考察

(1) 実験 1

- ・仕切りなしの電力の時間変化について

[図 8] と [表 1] より、風速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考える。

- ・仕切り 1 の電力の時間変化について

[図 8] 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考える。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 9] 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 [図 11] より、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。

- ・回転終了時

[図 10] 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 12] 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 では途中で風速を弱めていたので、風速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、風速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 13] 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、風速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 14] 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 よりも仕切り 1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 15] より、弱風時は実験 4 の結果と異なり、仕切り 1、仕切り 2 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

[図 16] の 112~128 秒の部分と [図 17] の 88~104 秒の部分の風速の減少及び電力の減少を比較すると、仕切りなしの方が回転を持続していることがわかる。

9 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たい。

回転の保持の観点では、実験 1 で得た風速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

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。

10 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. 1 2 2-D, No. 3