

再生可能エネルギーに関する実験装置の開発と解析評価

三重県立四日市工業高等学校 ものづくり創造専攻科

臨時的任用講師 山川 昌文

報 告 書

1. 研究の目的

本校ものづくり創造専攻科では、現在エネルギー分野への就職希望が増えているにも関わらず再生可能エネルギーに関する機材も実験実習もほとんどないのが現状です。最近実施した専攻科の修了研究テーマ希望調査では、「太陽光発電の環境への影響を調べたい」「風力発電のことを実学的に学びたい」「風力発電や水力発電に関する省エネ化・効率化を学びたい」など、生徒からの要望がありました。

「学びたい」「知りたい」という生徒の要望に応えるべくテーマの設定と理論に基づく学術的手法での追究方法を実験的に学ぶことを目的としました

2. 研究の概要

ものづくり創造専攻科の2年生3名それぞれが、修了研究で再生可能エネルギー（①水力発電②太陽光発電③風力発電）に関する研究開発に取り組みました。R7年7月末に中間発表を行い、翌年1月末には修了研究発表および論文（本報告書2ページ以降の参考資料）の提出を行いました

3. 研究成果の分析と考察

①水力発電②太陽光発電③風力発電に関する論文3編を添付しました

4. 今後の課題と展望

各研究に関するわかったことおよび今後の課題等は、各論文の『まとめ』で述べました。またこれらの発電に関する研究開発を通して、生徒は授業で習った理論が現実とどうつながって行くかを実験的に確認できました。このように講義だけで終わらせるのではなく実践的な教育こそが生徒には必要ではないでしょうか。

今後の予定ですが、R8年度の電力関係の実験実習に本研究成果を取り入れていく予定です。具体的には「『発電機』からの出力がMPPT方式の『充電コントローラ』を介して『バッテリー』に充電される実験構成で、発電機の出力が充電コントローラで調整されバッテリーに充電される過程における電流・電圧を測定し、発電量および発電効率を計算する」などで、発電から電力貯蔵の流れを実験的に学ぶことができます

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所工業教育研究助成により成し得たことであり、深く感謝申し上げます。

参考資料

1. 「小水力発電の効率に関する実証実験」ものづくり創造専攻科 2年 笹江 力 pp. 2-7
2. 「太陽光パネルの温度と発電量の関係」ものづくり創造専攻科 2年 與那嶺 拓光 pp. 8-13
3. 「パンタレイ風力発電の性能評価」ものづくり創造専攻科 2年 山路 佳和 pp. 14-19

小水力発電の効率に関する実証実験

ものづくり創造専攻科 2年 6席 笹江 力

1. はじめに^{※1}

日本や中国、インド、東南アジア諸国では発電の約7割が火力発電に依存していることから、地球温暖化がますます進行している。この温暖化に対し脱炭素やカーボンニュートラルの観点から、再生可能エネルギーの普及が期待されてきており、大規模な設備ではなく小型で比較的身近なものから発電ができ、しかも場所を選ばない小水力発電の需要が高まりつつある。

また、中部電力株式会社の再生可能エネルギーカンパニーでは、再生可能エネルギー部門の一つである水力発電にも力を入れており、低コストで一定量の電力を安定的に供給できる「ベースロード電源」として水力発電は、重要な役割を担っている。今後は、各家庭など小規模な場所での、自然エネルギーを利用した発電の可能性を模索していくものと思われる。

本研究では小水力発電に関する知識を深めることを目的に、発電量が位置エネルギーと流量に依存する水力発電の理論から、発電効率に着目した水車の羽枚数と発電量の関係を調べる。

2. 水力発電について^{※2※3}

水の流量で表される勢いで水車を回転させ、この機械エネルギーを水車に直結した発電機のコイルが回転することで電気エネルギーに変換される。発電機は、コイルと磁石の相対的な動きによる「電磁誘導」の原理を用いて電気を生み出す。理論的には水力発電所の出力は、次のように水量と落差(放水路の水面からダムまでの高さ)によって決まり、水の密度 ρ を 1000 kg/m^3 とすると

$$\begin{aligned} \text{理論出力 } P \text{ [kW]} &= \text{重力加速度 } 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} \times \text{質量流量 } \rho Q \text{ [kg/s]} \times \text{落差 } H \text{ [m]} \times \text{効率 } \eta \\ &= 9.81 \eta \rho Q H \text{ [kW]} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

で表される。

またエネルギー保存則を適用し位置エネルギーがすべて運動エネルギーに変わったと仮定すれば、

$$= \frac{1}{2} \times \text{質量流量 } \rho Q \text{ [kg/s]} \times \text{流速 } v^2 \text{ [m}^2\text{/s}^2\text{]} \times \text{効率 } \eta \quad \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

となる。本研究は実験室での狭い空間での実験であり、実質的には発電効率は下がるものの理論式②で基準に対する相対的評価を行っていくものとする。

3. 実験機器

使用する機器は、発電機、ポンプ、デジタル回転計、電圧・電流計を含む測定器(図 3.3)を用いる。また設計にはCADソフトのAutodesk Inventorを使用した。

発電機を固定するために、レーザー加工機を用いてアクリル板を切り抜き、水槽の形状に沿うように木材を張り付けた治具を製作した。回転数の測定には、デジタル回転計を用い、非接触で水車の回転数を測定した。発電時の電圧および電流は、測定器およびクランプメータを使用して測定した。

水車部分には自作した羽を取り付け、これを用いて実験を進めた。また、使用した発電機の内部構造を確認し、

その内部配線をもとに結線を行った。

水車の内部抵抗を調査するために分解したところ、内部にはコンデンサ 1 つ、抵抗 1 つ、ダイオード 6 つが確認された。よって、このシステムは三相出力であると判明した。

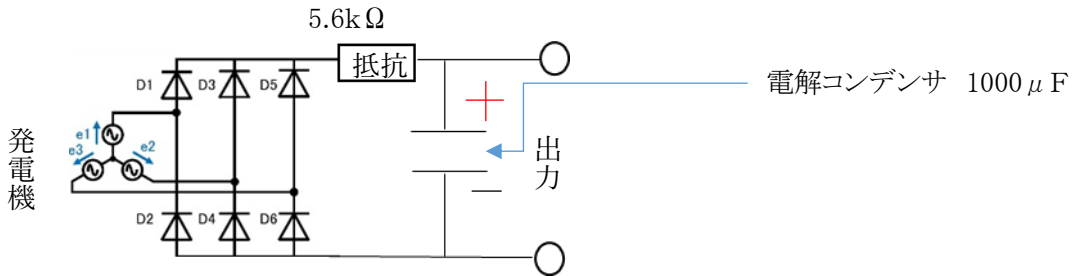


図3.1 内部結線^{※3}

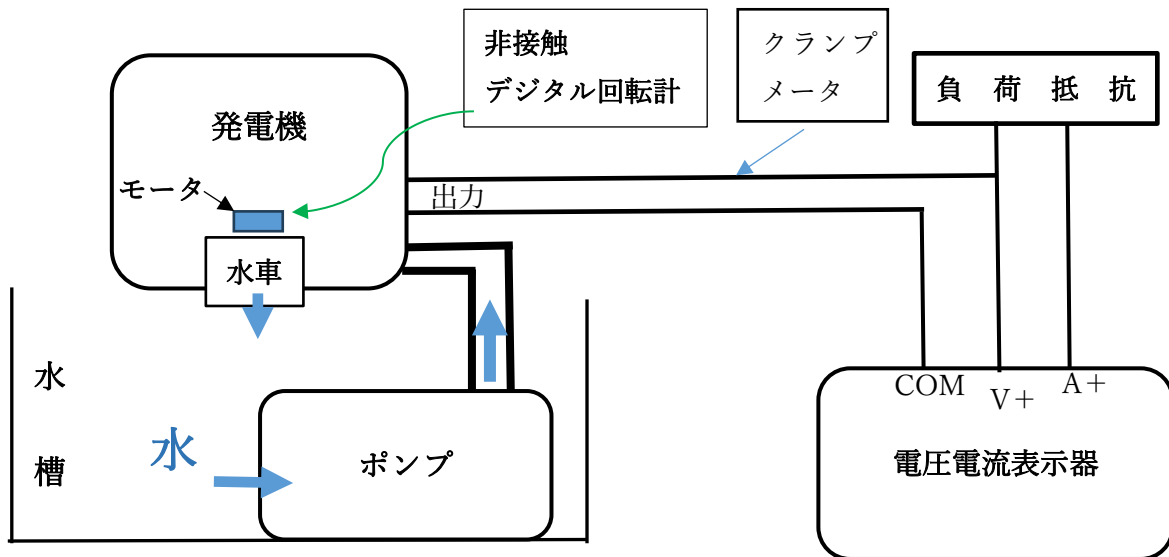


図 3.2 実験構成図

4. 実験方法

4.1 負荷抵抗の選定

水車についていた内部抵抗はカラーコードから読むと 5.6 kΩであった。したがって、5.6 kΩよりも大きい抵抗値を持った抵抗を繋げることで、分圧法により実際の出力が測定できると考えた。最適な接続抵抗の選定をするため、図 3.8 に示された測定構成で、負荷抵抗を

無負荷、10Ω、100Ω、1kΩ、10kΩ、100kΩ、1MΩ

としたときの出力電圧を測定した。

4.2 標準モデルの出力特性

購入した水車の標準モデル(7枚羽)をもとに、実際の発電システムとしての性能を調べる。またこの水車を基準にして、自作で同じ枚数の羽を用いた場合の出力と比較する。

性能測定について、各流量(出力レベル)における電圧(V)と電流(A)をデジタルマルチメーターで測定し、発電出力(W)、発電効率(%)を計算する。また回転部分に反射シールを貼り、タコメーターを使用して回転数(min^{-1})を測定する。

4.3 自作した 7 枚羽の出力特性

自作した 7 枚羽の特性を調べる。3D プリンターを使用して、元の水車に取り付ける羽を製作した。自作した羽は、強度と耐久性を考慮して PLA (ポリ乳酸) で作製した。実験の手順は以下に示す。

- (1) 自作羽の製作: 3D プリンターを使用して、7 枚羽の新しい羽を製作する。
- (2) 性能測定: 4.2 性能測定と同様。

この実験で得られたデータをもとにモデルと自作の性能比較を行い、羽枚数に対する性能比較をするための基準値を確立する。

4.4 羽の枚数と出力の関係

羽の枚数を変更しながら、以下の実験手順にしたがい出力を測定する。

- (1) 羽の枚数: 4 枚、6 枚、7 枚、8 枚、12 枚、14 枚、16 枚
- (2) 性能測定: 最大流量 (5000L/H) における電圧 (V) と電流 (A) をデジタルマルチメーターで測定し、発電出力 (W)、発電効率 (%) を計算する。また回転部分に反射シールを貼り、タコメーターを使用して回転数 (min^{-1}) を測定し、各羽枚数における回転数 (min^{-1})、発電出力 (W)、発電効率 (%) を比較する。

5. 実験結果と考察

5.1 実験 4.1 の結果と考察

無負荷時、発電出力は 5.6V で、10 Ω 、100 Ω と順に抵抗を接続すると出力が増加 (図1)。1M Ω が最も安定した出力を得られることが確認できた。図1は横軸が抵抗値、縦軸が出力電圧である。

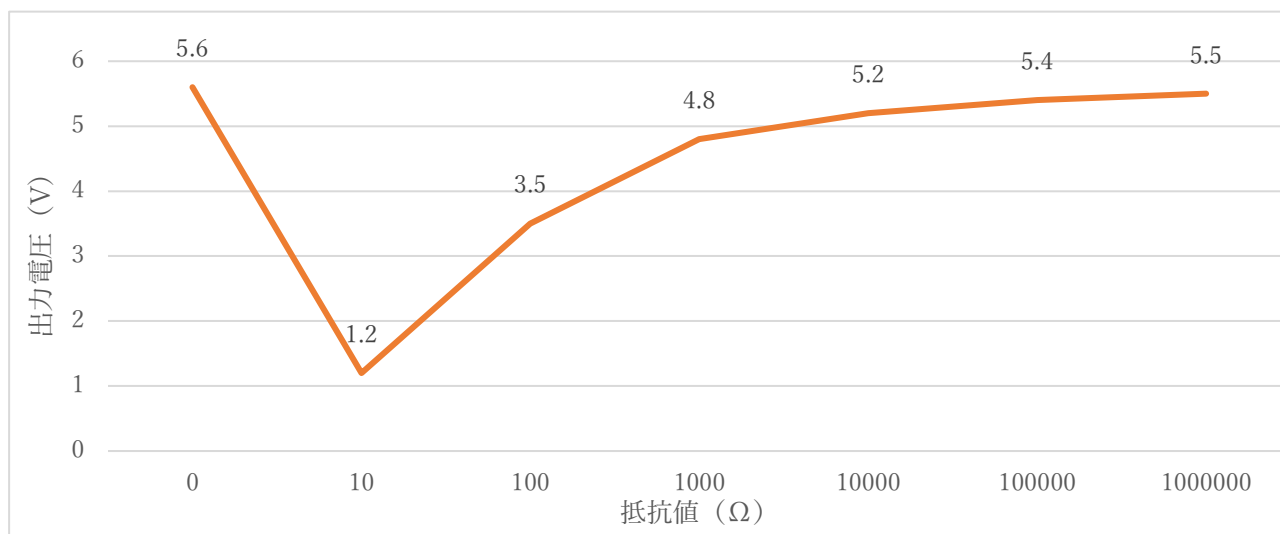


図1 抵抗と出力電圧との関係

負荷抵抗を小さい値から大きい値へと変化させると、出力電圧は増加した。これは、発電機が内部抵抗 (約 5.6 k Ω) をもつ電圧源であり、負荷抵抗が小さい場合には分圧により内部抵抗側で電圧降下が大きくなるためである。負荷抵抗を十分大きくすると無負荷状態に近づき、発電機の起電力に近い電圧を安定して測定できた。以上より、内部抵抗より十分大きい 1 M Ω の抵抗が出力電圧測定に適していると判断した。

5.2 実験 4.2 の結果と考察

標準モデル(7枚羽)の水車では、最大の 5000L/h で出力 1.66W、効率 12.32%、回転数 287.6rpm が得られた。効率が予想より低かったが、基準となるデータとなった(図 2,3,4)。図2は横軸が流量、縦軸が出力である。図3は横軸が流量、縦軸が回転数である。図4は横軸が流量、縦軸が発電効率である。

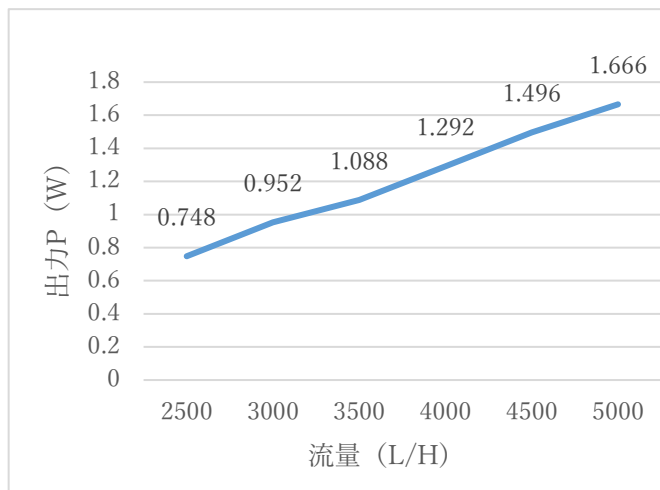


図 2 流量と出力

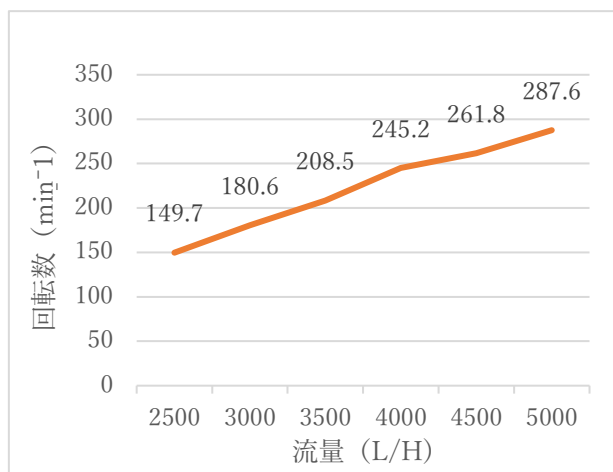


図 3 流量と回転数

図4より得られた発電効率は予想より低い値となった。これは、水車および発電機内部での機械的損失や電氣的損失、また流体抵抗や軸摩擦などの影響により、入力エネルギーの一部が損失として失われたためと考えられる。しかし、本測定結果は安定して再現性のある値であり、今後自作水車との比較を行う際の基準データとして十分に有効である。

そして、クランプメータでは 0.34A が表示され負荷抵抗 1MΩ を使用しているので、出力 = 電流の2乗 × 抵抗の計算では、明らかに出力が大きくなるが理論式②で基準に対する相対的評価で考えていく。

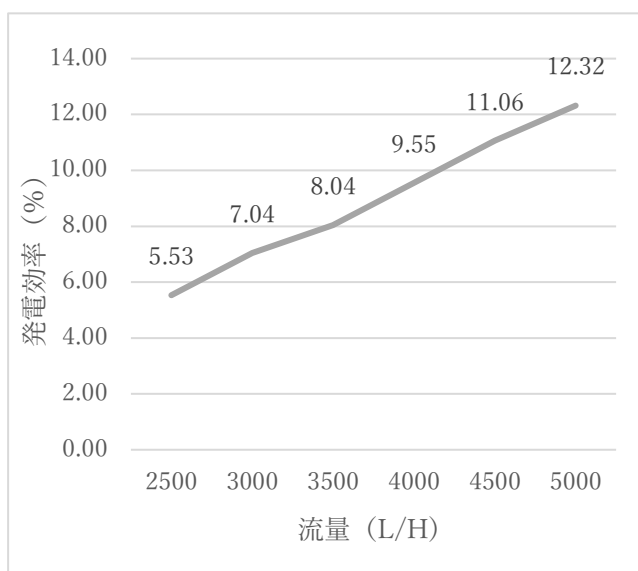


図 4 流量と発電効率

5.3 実験 4.3 の結果と考察

自作羽を取り付けた水車では、5000L/h で出力が 1.734W、効率 12.82%に向上。回転数は 297rpm に増加

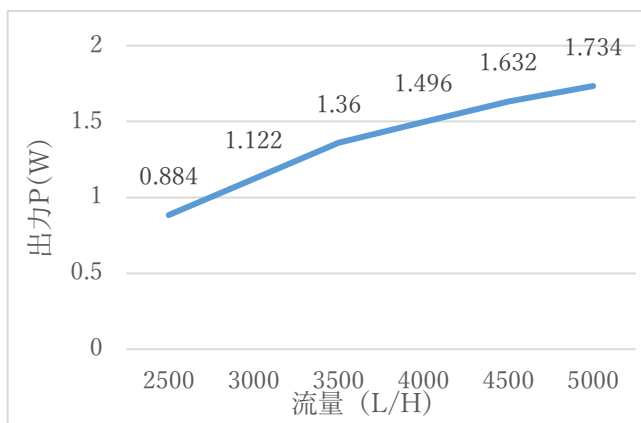


図 5 流量と出力

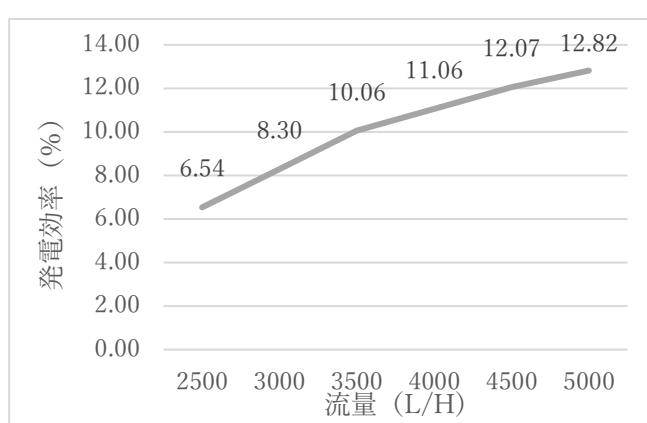


図 6 流量と回転数

し、素材や形状の違いが効率に影響を与えたことが分かった(図 5.6.7)。図5は横軸が流量、縦軸が出力である。図6は横軸が流量、縦軸が回転数である。図7は横軸が流量、縦軸が発電効率である。

これは、同じ羽枚数でも結果が違うことから、羽の設計や材質が水車性能に影響を与えることが確認でき、自作羽は性能比較の基準として有効である。

5.4 実験 4.4 の結果と考察

羽枚数を 4 枚から 16 枚に変更した結果、12 枚羽が最も高い出力 (2.074W)、効率 (15.33%)、回転数 (351 min^{-1}) を記録。枚数が増えると出力と効率は減少し、羽の設計が重要であることが示された(図 8.9.10)。図8は横軸が羽枚数、縦軸が出力である。図9は横軸が羽枚数、縦軸が回転数である。図 10 は横軸が羽枚数、縦軸が発電効率である。

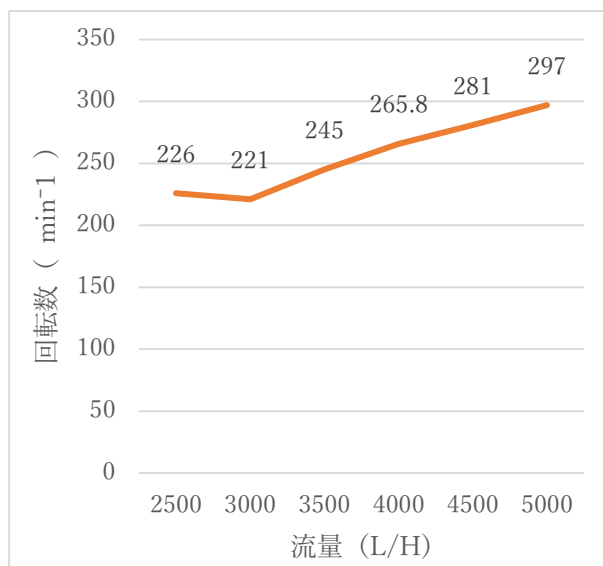


図 7 流量と発電効率

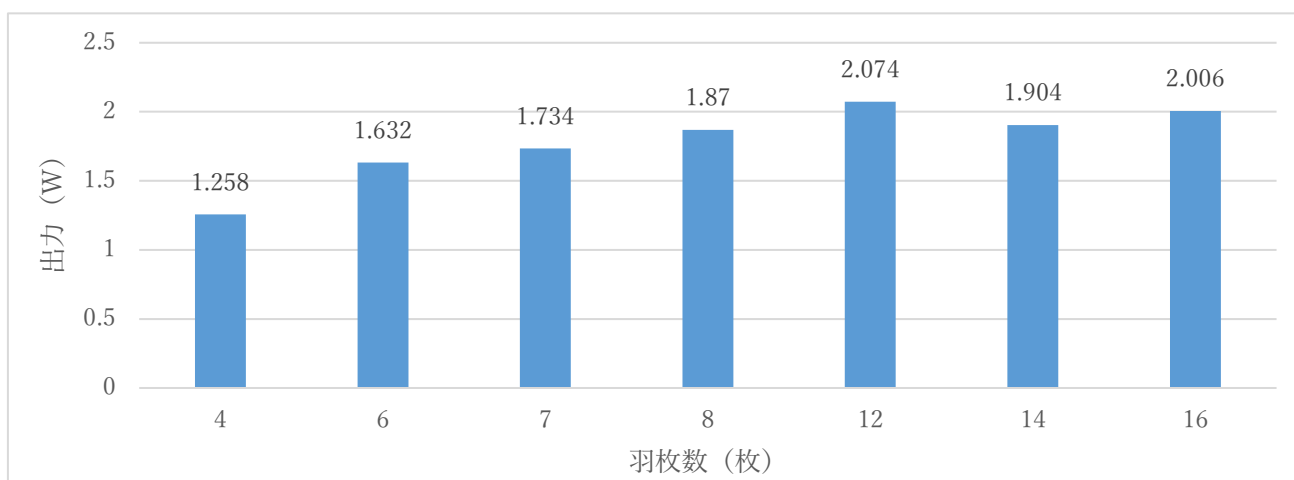


図 8 各枚数による出力

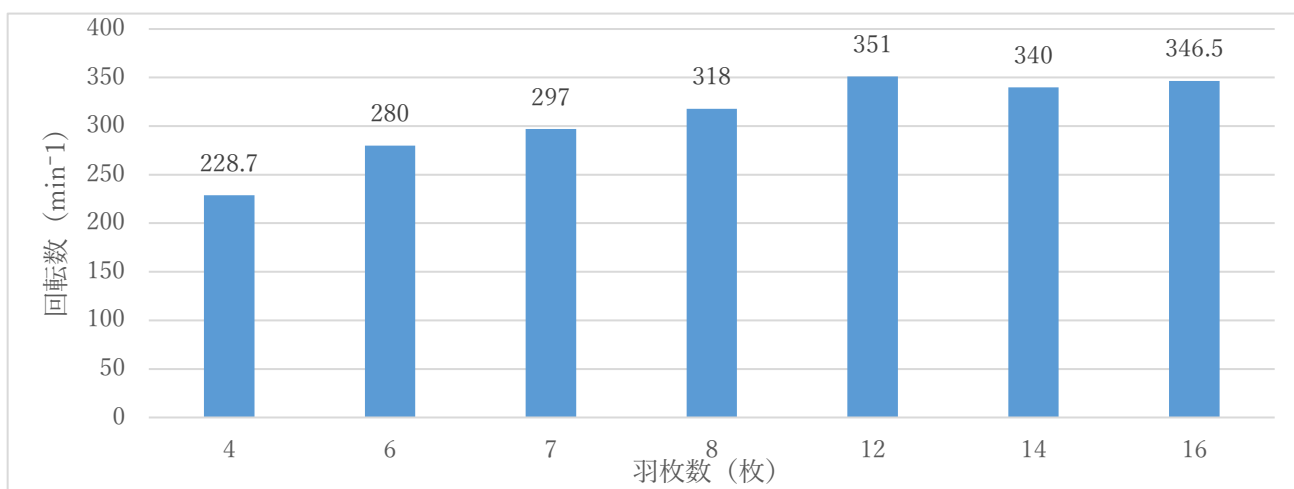


図 9 各枚数による回転数

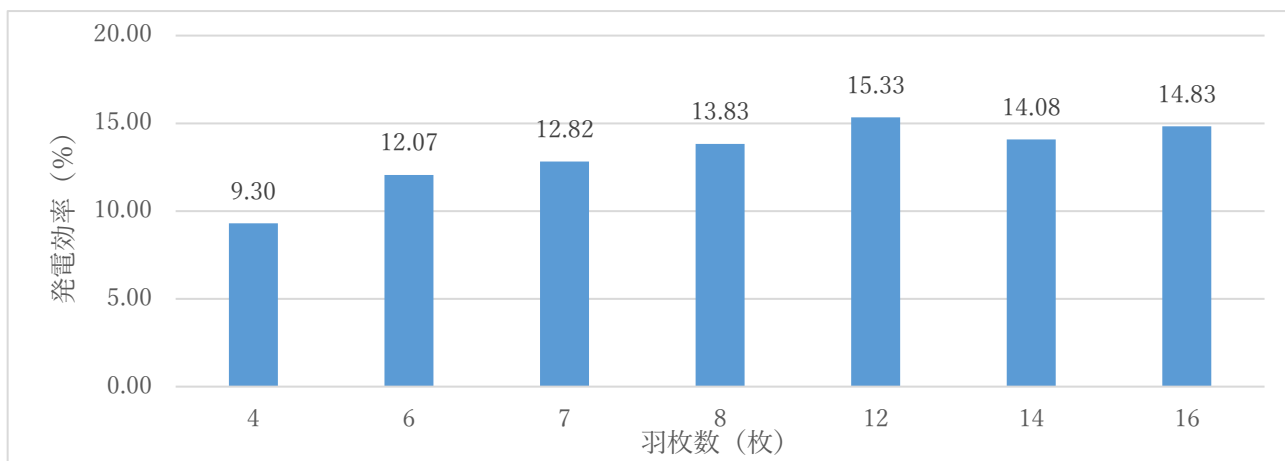


図 10 各枚数による発電効率

羽枚数の増加により水流から受けるトルクが増加し、一定の範囲では回転数および発電出力が向上したと考えられる。しかし、12 枚を超えると出力および効率は低下した。これは羽間隔が狭くなり、水流の乱れや羽同士の干渉が大きくなったため、水流エネルギーを十分に回転へ変換できなかったことが原因と考えられる。以上より、水車の羽枚数には最適値が存在し、羽の設計が発電性能に大きく影響することが確認できた。

6. まとめ

本研究では、羽枚数を増やすことで回転数は増加し、発電出力や効率は一定範囲で向上した。特に 12 枚羽では、最適な性能が得られた。一方、16 枚羽では効率が低下し、最適羽枚数の存在が確認された。

また、本実験で発電効率が低くなった主な要因として、実験環境により十分な落差を確保できないため理論式①による評価は困難であり、そのため本研究では理論式②に基づく標準モデルに対する相対的評価を行った。その結果、絶対的な効率は低いものの、羽枚数による性能の差を比較する基準として有効であることが確認できた。

今後は羽の形状や角度の最適化により、さらなる効率向上が期待される。

謝辞

本研究は公益財団法人天野工業技術研究所工業教育研究助成により成し得たことであり、深く感謝いたします。

また、さまざまなご指導や取り次ぎをして頂いた山川昌文先生をはじめ、ものづくり創造専攻科の先生方に感謝いたします。

参考文献

- ※1. 経済産業省—資源エネルギー庁—水力発電について
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/
- ※2. 中部電力株式会社—水力発電のしくみ・特徴
https://www.chuden.co.jp/energy/renew/ren_shikumi/wat_shikumi/wat_tokucho/
- ※3. 電気の神髄—水力発電における基本式、三相全波整流回路
<https://denki-no-shinzui.com/three-phase-bridge-rectifier/>

太陽光パネルの温度と発電量の関係

ものづくり創造専攻科 2年17席 與那嶺 拓光

1. はじめに

近年、地球温暖化対策や再生可能エネルギーの必要性拡大に伴い、太陽光発電の導入が世界的に進められている。しかしながら、太陽光パネル(特にシリコン系)は動作温度の上昇により発電効率が低下するという課題がある。一般的に太陽電池は温度が 1℃上昇するごとに約 0.3～0.5%の効率低下が発生するとされており^{*1}、特に夏季や直射日光下での著しい性能低下が懸念される。

2. 研究の目的

日照時間に対する太陽光パネルの温度変化および、発電量を測定し、太陽光パネルの温度が発電効率に与える影響を実験的に検証する。また熱対策として水上設置(水冷)による冷却効果の有用性を、水冷の有無で比較検討する。

3. 太陽光発電について

3.1 太陽光パネルの仕組み

図1のようにシリコン半導体に光が当たると電気が発生する現象を利用しており、太陽の「光エネルギー」を直接「電気エネルギー」に変換して活用される。

太陽光パネルには、電氣的な性質が異なる N 型半導体(表面)と P 型半導体(裏面)が使われ、N 型半導体(表面)と P 型半導体(裏面)を重ね合わせて光を当てると、接合面を境に N 型側に電子(-)、P 型側に正孔(+)が集まるという性質を利用し、それぞれの電極をつなぐことで電気が流れる仕組みを作り出す。一般的な商用 PV モジュールを最大出力で稼働させると、入射する太陽光の約 20%しか電気に変換されず、残りの大部分は熱に変換されるため、パネル温度が上昇する。

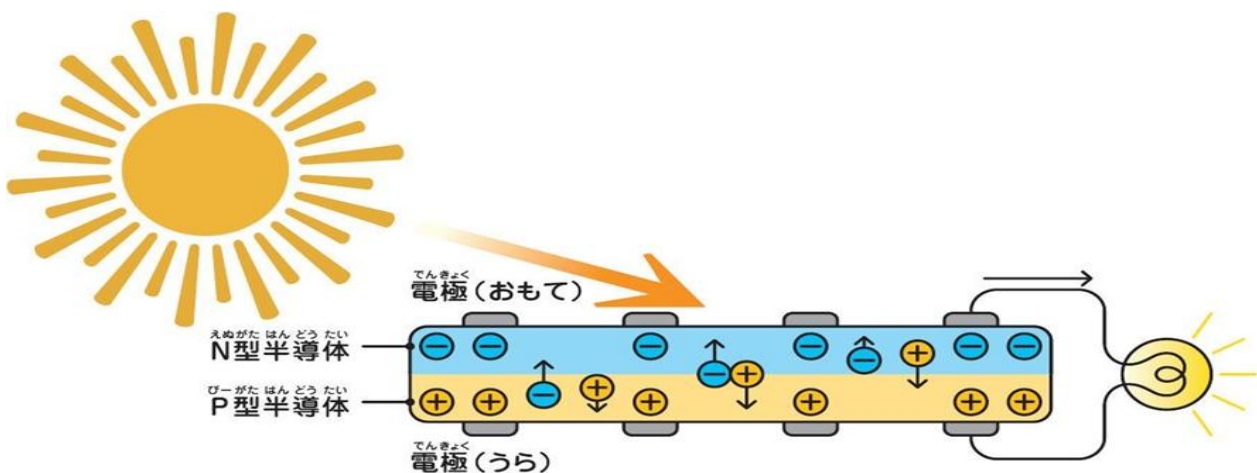


図1:シリコン半導体の光電効果^{*1}

3.2 効率低下の理論式^{※2}

太陽電池の変換効率を η とすると、 η は温度 T に対しておおよそ以下の関係がある。

$$\eta(T) = \eta_{ref} \times [1 + \gamma \cdot (T - T_{ref})] = \eta_{ref} + \gamma \eta_{ref} (T - T_{ref}) \dots \dots \textcircled{1}$$

$\eta(T)$: 温度 T における変換効率

η_{ref} : 基準温度(通常 25°C)での変換効率 20%など

γ : 温度係数(%/°C) 通常 -0.3 ~ -0.5 %/°C

T : 動作温度(セルの温度) 60°Cなど

T_{ref} : 基準温度(通常 25°C) 25°C固定

4. 実験装置および実験構成図

本研究で使用した主な実験装置を以下に示す。

太陽光パネル: 100W ECO-WORTHY

太陽光パネル: 20W Nicesolar

チャージコントローラ: ECO-WORTHY EW1907

負荷抵抗: 10 Ω 100W メタルクラッド抵抗

バッテリー: 12.8V 20Ah Li Time

電圧・電流計: SANWA CD732

クランプメータ: SANWA DCL31DRBT

放射照度計温度計: BOSCH GIS500

パワーメータ: CEM DT-1307

熱電対温度計データロガー: Gain Express THE-373

以下に実験構成図を示す。

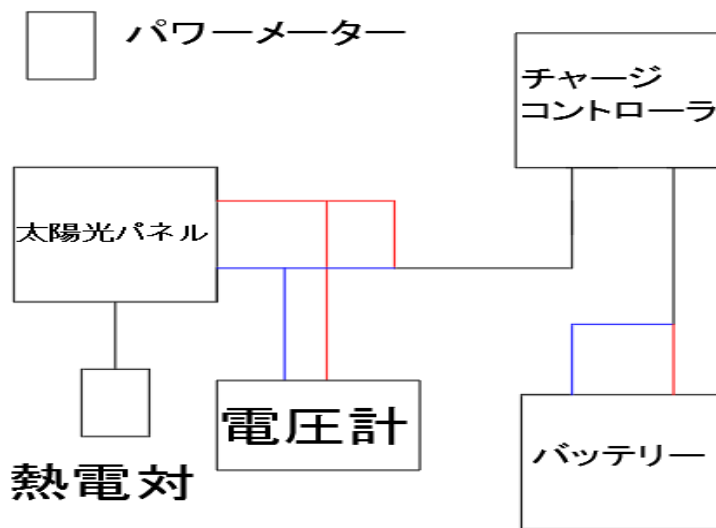


図2 太陽光発電実験構成

5. 実施方法および結果と考察

5.1 屋外での、太陽光パネルの表面温度と出力電圧との関係

5.1.1 実験1の方法

測定においては、太陽光パネルの温度、放射照度および開放電圧を主な評価項目とした。温度測定はセル温度をより正確に反映するため^{※3}、パネル裏面中央および四隅に熱電対を設置し、その平均値を用いた。専攻科の屋上にて100W 太陽光パネルで太陽光発電を行い、放射温度計を使用し太陽光パネルの中心付近温度と太陽光パネルから水平の位置で太陽に向けて放射照度計で放射照度を、またテスターでチャージコントローラの開放電圧を計測し、散布図でパネル温度と出力電圧の関係を調べる。ただし、電力測定は負荷条件に大きく依存するため、太陽光パネルの性能を示す指標であり温度の影響を評価しやすい開放電圧を用いた。

5.1.2 実験1の結果

太陽光パネルの温度が上昇するにつれて電圧が低下する結果が得られた。

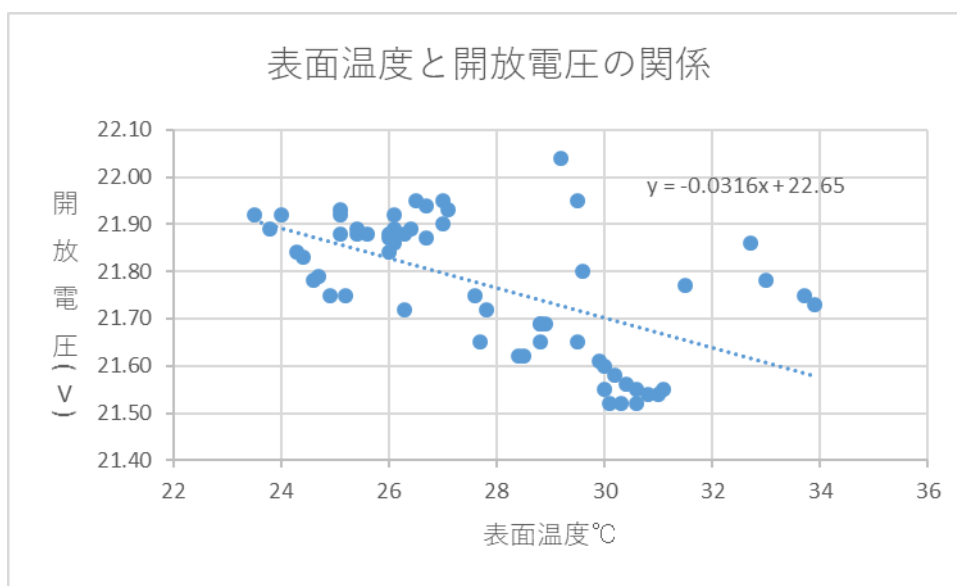


図3 表面温度と開放電圧の関係

5.2 実験室での、太陽光パネルの裏面温度と出力電圧との関係

5.2.1 実験2の方法

風や雲によって発電量が変わる事象を防ぐために屋内にて太陽光発電を行う。屋内の実験室で実験を行うため、太陽光パネルは20W に縮小する。初めに太陽光の代用としてハロゲンランプを光源とした疑似太陽を製作する。アルミ板に穴をあけ、ソケットをねじでとめて250W ハロゲンランプを取り付ける。本研究では、式①の Tref を基準とする温度に対する相対的な出力変化に着目したこと、また光源の違いは相対的な出力変化に着目したことで、太陽光パネルの性能評価への影響は限定的であると判断した。ハロゲンランプは、点灯直後からフィラメントが急激に加熱され、安定するまで時間がかかる。ランプが定常状態に達してから、発光量(照度)が安定し、一定の出力が得られるようになる。まずはこの定常状態に入る時間を調べる。

作製した疑似太陽を棚の上に設置し、30cm離れた場所に太陽光パネルを設置する。パネル中央で放射照度計を使用し放射照度を調べた。結果を図4に示す。横軸を経過時間(分)、縦軸を放射照度[W/m²]とするハロゲンランプで自作した光源の放射照度の時間推移を表している。グラフを見ると、ランプ点灯開始から20分

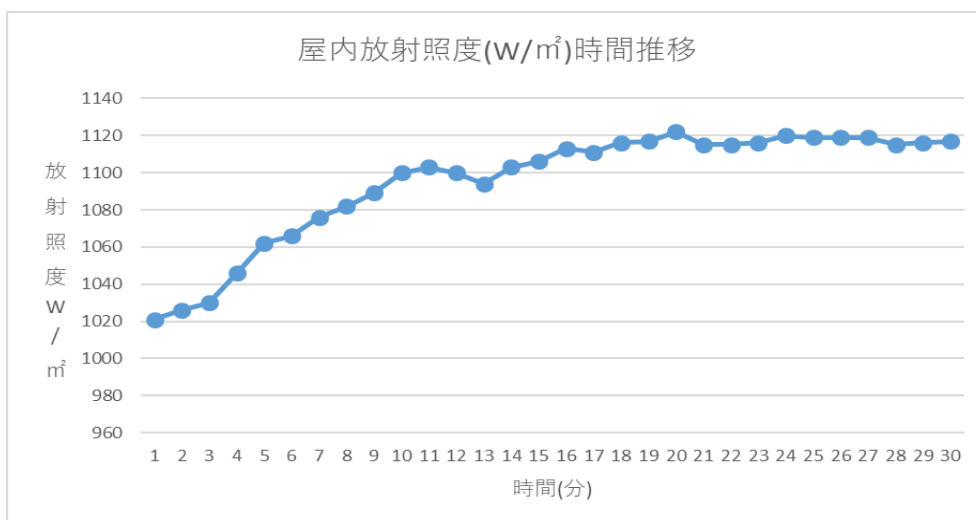


図4 ハロゲンランプによる放射照度の時間推移

経過すると放射照度は 1120W/m²付近で安定することがわかる。ここで太陽光の放射照度は 1000 W/m²であるが、ハロゲンランプのスペクトルは、近赤外から紫外領域にかけて連続した波長をもつ太陽光とは、特に可視光域外で異なるとされている。しかしながら、1000 W/m²以上の放射照度を持つこのハロゲンランプで太陽光パネルを照射したところ十分充電できることは実証できており、実験室内での各種実験に十分応えられるものと考えられる。この実験の結果を踏まえ、パネル温度・電流・電圧等の計測をランプ点灯 20 分後から開始する。ランプ点灯20分後、開放電圧(V)、熱電対を太陽光パネルの四隅と中央の裏面に取り付け、平均セル温度(°C)を測定する。

5.2.2 実験2の結果

結果を図5に示す。横軸を裏面の温度上昇で電圧が低下する実験5.1と同じ結果を得ることができた。

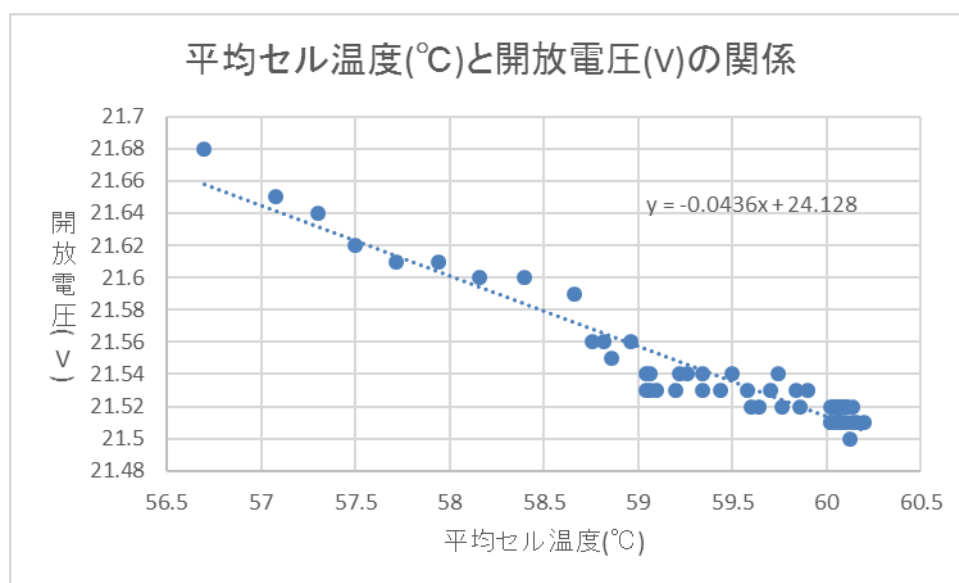


図5 平均セル温度と開放電圧の関係

5.3 太陽光パネル発電における水冷効果について

5.3.1 実験 3 の方法

5.2 で屋外と実験室で同様の出力特性を得られることを確認した。次に、太陽光パネルの背面に水槽を設置することで太陽光パネルの冷却をおこなった場合の太陽光パネルの温度と出力の関係を調べる。20W 太陽光パネルを水槽の上に設置する。太陽光パネルと疑似太陽は 30cm 離す。本実験では水槽内の水は静水状態であり、水温管理は行っていない。

5.3.2 実験 3 の結果

結果を図 6 に示す。水冷を行うことで、セル温度が約 1.0°C 低下し、それに伴い開放電圧が 0.1V 上昇する結果が得られた。

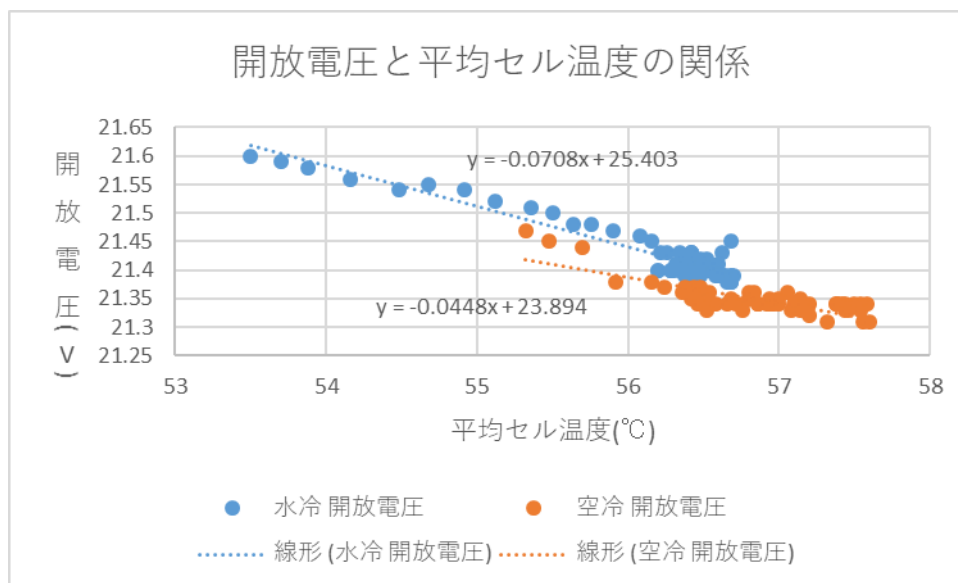


図 6 水冷と空冷における平均セル温度と開放電圧の関係

6. 考察

6.1 温度上昇が開放電圧に及ぼす影響

実験で行った屋外実験および実験室での実験の結果から、太陽光パネルの温度が上昇するにつれて開放電圧が低下する傾向が確認された。この挙動は、3.2 節で示した温度係数 γ が負の値をとる理論式と整合しており、本実験結果は太陽電池の温度依存特性を実験的に確認したものといえる。

6.2 屋外実験と屋内実験の比較

屋外実験では、日射量の変動や風の影響により測定条件が一定でないという課題がある。一方、実験室での実験では光源としてハロゲンランプを用いることで、放射照度や周囲環境を比較的安定させた状態で測定を行うことが可能であった。両実験において、温度上昇に伴う開放電圧低下という同様の傾向が得られたことから、光源の違いにかかわらず、太陽光発電の電圧特性は主にセル温度によって支配されていることが示唆される。したがって、本研究で用いた屋内疑似太陽による実験手法は、温度依存性を評価する上で有効であると考えられる。

6.3 実験3 水冷による冷却効果について

一般に太陽電池の温度係数が $-0.3 \sim -0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 程度とされており、本実験においても温度低下に伴う電圧上昇が確認されたことから、実験3の結果から水冷による冷却効果が発電特性の改善に寄与していることが示唆される。

一方で、本実験における温度低下量および電圧変化量は比較的小さく、測定誤差の影響も考慮する必要がある。これは、水槽内の水が静水状態であったことや水温が実験中に上昇したことにより、冷却効果が限定的であった可能性が考えられる。また、流水条件による冷却や水温管理を行うことで、より大きな温度低下効果が得られると予想される。しかしながら、本実験で得られた電圧変化量は小さいものの、太陽電池の温度係数と同程度の変化傾向を示しており、測定結果は妥当であると考えられる。

以上より、水冷は太陽光パネルの温度上昇を抑制し、発電特性の低下を緩和する手法として一定の有効性を有することが確認された。

7. まとめ

本研究では、太陽光パネルの温度と発電特性の関係に着目し、屋外および実験室での実験を通じて温度上昇が開放電圧に及ぼす影響を調べた。その結果、セル温度の上昇に伴い開放電圧が低下する傾向が一貫して確認され、理論的に示される温度依存性と整合する結果が得られた。また水冷は太陽光パネルの温度上昇を抑制し、発電特性の低下を緩和する手法として一定の有効性を有することが確認された。

今後は、流水の条件で水冷を行い、より大きな温度低下効果が得られるか実験を行う予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人天野工業技術研究所工業教育研究助成により成し得たことであり、深く感謝申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり、終始ご指導ならびに多くの助言を賜りました山川先生に深く感謝申し上げます。ならびに実験環境を整えていただいた関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

※1 京セラ株式会社 太陽光発電の発電効率と影響要素より

<https://www.kyocera.co.jp/solar/support/topics/system/>

※2 効率低下の理論式

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122012022?utm_source=chatgpt.com

※3 内挿温度線センサーによる太陽電池モジュール内セルの高精度温度計測

https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2017/poster/P89_.pdf

パンタレイ風力発電の性能評価

ものづくり創造専攻科 2年14席 山路 佳和

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの重要性が高まる中、下記図 1 に示されているように地域や家庭でのエネルギー自給を促進するため、小型で効率的な風力発電システムのニーズが増加している。

現在普及している一般的な風力発電ではプロペ

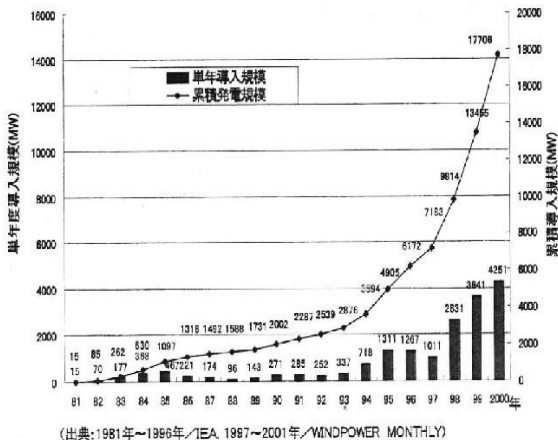


図 1 世界の風力発電の推移¹⁾

ラ型風車が採用されている。しかしながら、設置に適した場所には複数の条件があり、さらに居住地域への騒音問題への配慮が必要であるほか、落雷や台風などの自然災害によって破損する可能性も考慮しなければならないなどの欠点がある。²⁾

一方、パンタレイ型は、図 2 に示されているように静穏性や耐久性、設置場所の柔軟性に優れるとされており、特に都市部や狭小地での導入が期待されている。しかしながら、風力を直接受けて回転するプロペラ型に対し、パンタレイ型は羽の背面にある反射板と羽間で発生するカルマン渦により回転するとされており、風力変換効率の向上が求められる。

本研究では、パンタレイ型風力発電の発電効率向上のため、3枚羽のプロペラ型風車と3枚羽のパン

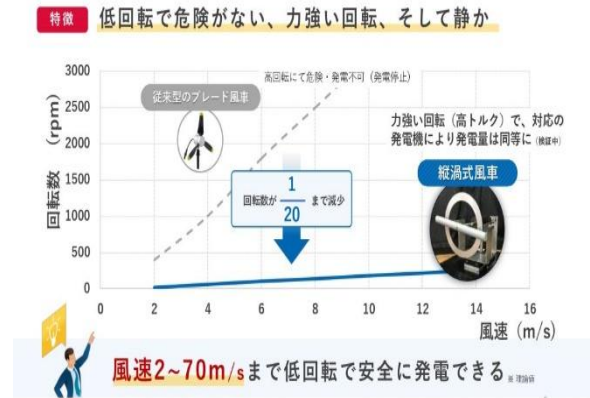


図 2 パンタレイ型風車の静穏性³⁾

タレイ型風車の発電効率を実験的に評価し、パンタレイ型風車のブレード数や形状を変えることで発電効率への影響を調べる。

2. 風力発電について

風という空気の流れは、運動エネルギー ($\frac{1}{2}mv^2$) を持っている。質量を質量流量にするとエネルギーの大きさは、式①のように空気密度、受風面積、そして風速の3乗に比例し、風速が2倍になると、エネルギーは8倍になる。

風車から得られるパワー (P) [W] は、次の式⁴⁾で求められる。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \cdots \textcircled{1}$$

P:出力 W ρ:空気密度 kg/m³
A:受風面積 m² V:風速 m/s

3. 装置概要

3.1 使用機器

3D 設計ソフト:Autodesk Inventor

3D プリンター:Bambu Lab A1

風量:コードレスブロワ RB 36DA Li-ion

出力機器:プロペラ型3枚羽風力タービン
(PLXSZ 製 B0F7LDX3KS)

回転数計測:タコメーター (Wolfroont SM6236E)

出力測定:電圧・電流計 (SANWA CD732)

3.2 パンタレイ型風力発電機の設計製作

Autodesk Inventor で羽(図 3)、羽つけ軸(図 4)、
回転軸(図 5)、円盤(図 6)、土台(図 7)を設計し組み立
てた(図 8)。

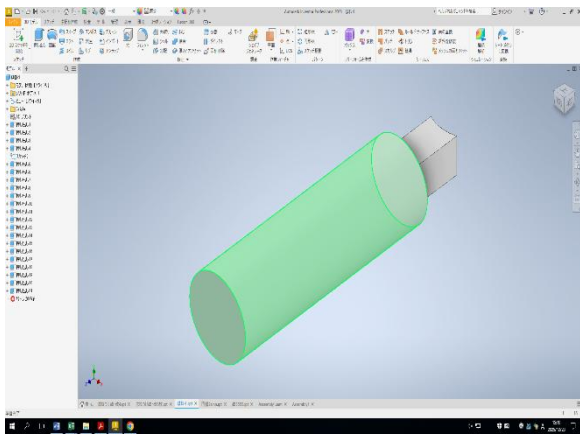


図3 羽の設計図

パンタレイ風力発電特有の円柱の羽であり、取り外し
ができるように取り付け部分を作成した。

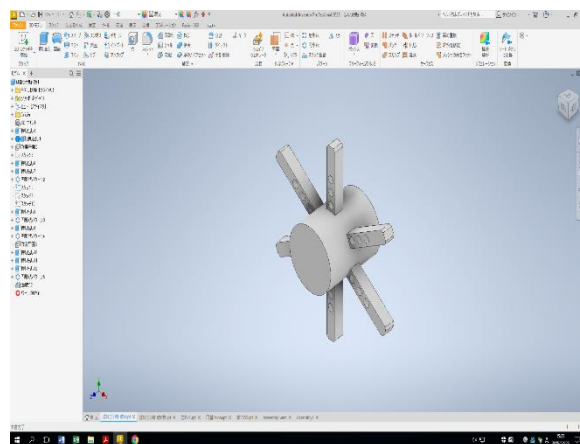
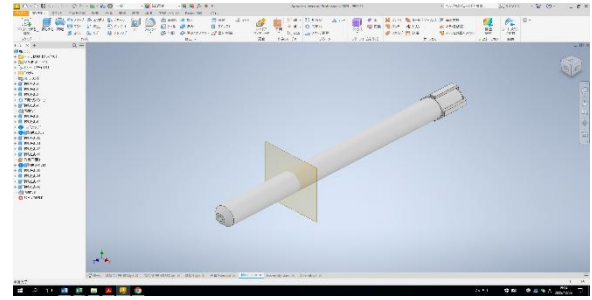


図4 羽つけ軸の設計図

羽を付けるための中心となる軸を羽の枚数を変更でき
るように円柱状にし、取り付け棒はネジ止めで羽との



接続をより強固にした。

図5 軸の設計図

モーターと回転部分をつなぐ軸、回転数のロスを減ら
すために回転部分との固定部位を十字型にして空回
りしないようにした。

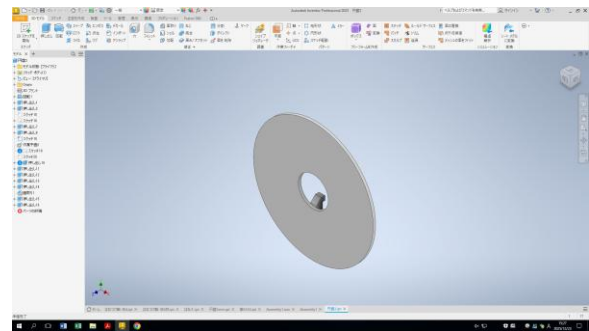


図6 円盤の設計図

風を反射し羽との間に、カルマン渦を発生させるため
の円盤、風の通り方などを考慮し中心に穴を開けた。

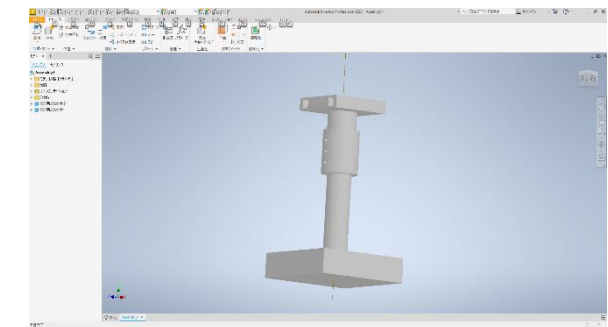


図7 土台

モーターを固定し高さを調節でき、円盤との距離も調
節できる土台とした。

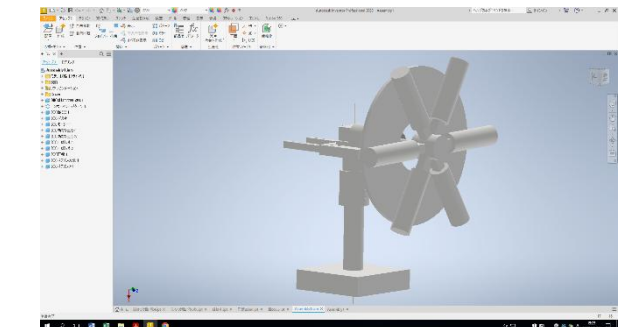


図8 完成図

Autodesk Inventor のアセンブリの機能で実際に組み立てて確認した



図9 完成品

Bambu Labを使用し、3Dプリンターで部品を作成、組み立てることによって完成させた。図中羽の色は、回転数を計測するため白黒にした。

4. 実験方法

実験構成図を図10に示す。図のように風車の高さを30cm、ブロワーの高さを25cm、風車とブロワーの距離を1mとする。ブロワーから出力された風力が風車の羽を回転させることで風車内蔵の発電機が発電する。この発電機の出力に負荷抵抗(図中R)を接続し電圧(V)と電流(A)を計測することで発電量を計算する。

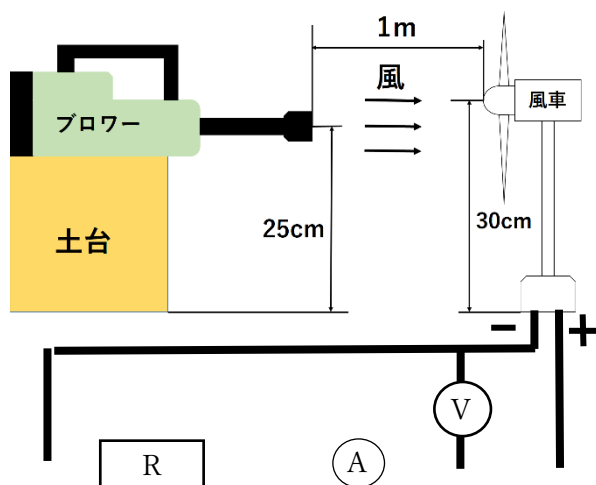


図10 実験構成図

4.1 プロペラ型風力発電機の発電特性

プロペラ型風力発電機の発電特性を評価するため、風速を9.22m/s、10.69 m/s、11.1m/s、11.5 m/s、12.50 m/s、13.11 m/s、14.06m/s、14.80 m/sとした各風速に対する出力電圧、電流、回転数を測定し、発電量と発電効率を計算する。ここで負荷抵抗は1MΩとする。

4.2 3枚羽パンタレイ型風力発電の発電特性

3枚羽のパンタレイ型風力タービンの出力に10Ωの負荷抵抗を接続し、実験4.1と同じ風速条件下で出力電圧、電流、回転数を測定し、発電量と発電効率を計算する。

4.3 パンタレイ型風力発電の発電特性

羽の枚数が4,6,8枚の発電特性を実験4.2と同様にして測定および計算する。

5. 実験結果と考察

5.1 実験4.1の結果と考察

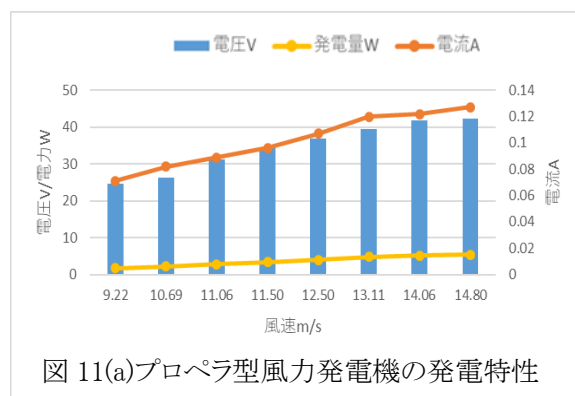


図11(a)プロペラ型風力発電機の発電特性

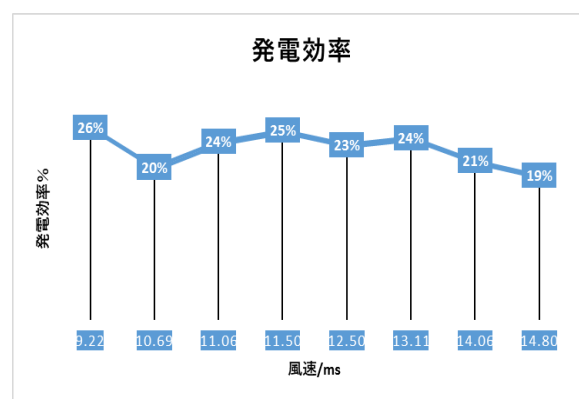


図11(b) 風速と発電効率の関係

図11(a)に示されたグラフは、横軸に風速を、左

縦軸に電流、右縦軸に出力電圧および電力をとったプロペラ型発電機の発電特性を表している。この図から、プロペラ型風力発電機を使用し一定の風速条件下で測定を行った結果、風速の増加に伴い出力電圧、電流および発電量が増加することが確認された。

図 11(b)に示されたグラフは、横軸に風速を、縦軸に発電効率をとった風速に対する発電効率を表している。この図から、同一の風速域における発電量と発電効率について、以下のような傾向が確認された。プロペラ型風車では、比較的低い風速域から出力電圧および回転数が増加し、それに伴って発電量も安定的に増加することがわかる。しかし風力の発電効率は40%とされているが、図 11(b)に示されたグラフは、それを下回っていることが確認できる。この結果は、本来の広範囲の風量ではなく、ブローヤによる収束された風量であるために本来の性能が発揮できなかったと考えられる。

5.2 実験 4.2 の結果と考察

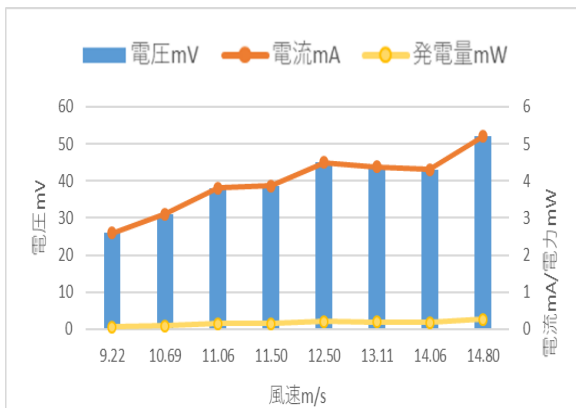
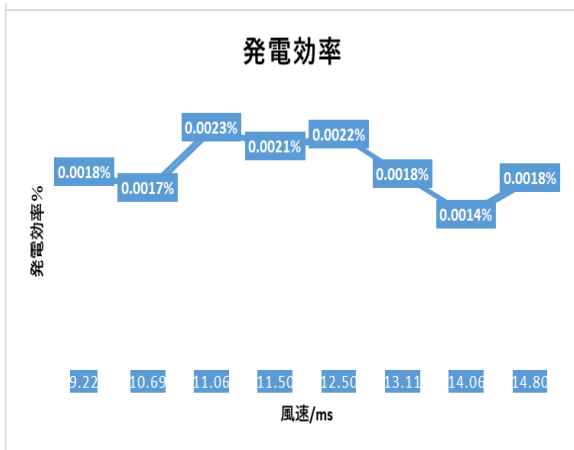


図 12(a)3 枚羽パンタレイ型風力発電の発電特性



12(b) 風速と発電効率との関係

図 12(a)に示すグラフは、横軸に風速を、左縦軸に電流および電力、右縦軸に出力電圧をとり風速に対する発電特性を表している。このグラフから、パンタレイ型風力発電機について同様の風速条件下で測定を行った結果、両者とも風速の増加に伴い出力電圧、電流、回転数および発電量が増加することが確認されたが、図 11(a)と比較すると明らかに出力電圧や発電量が低いが、これらの原因としてモーターの違いがあげられる。実験 4.1 にて使用したモーターは、実験 4.2 にて使用したモーターの4倍大きい。このようにモーターを使い分けた理由としてトルクの違いがある。パンタレイ型の方が丈夫であるがその反面トルクが低く、しかも今回製作したパンタレイ型は、トルクを多く必要とする巨大なモーターを稼働させるには至らなかったためである。

図 12(b)に示すグラフでは、横軸に風速を、縦軸に発電効率をとり風速に対する発電効率を表している。この図から、風速が高くなるにつれて発電量は増加するものの、発電効率の値が必ずしも一定ではないことが確認できる。これは、ある一定の風量を超えると円板との間に出来るカルマン渦が過剰になり抵抗になっていると考えられる。

5.3 実験 4.3 の結果と考察

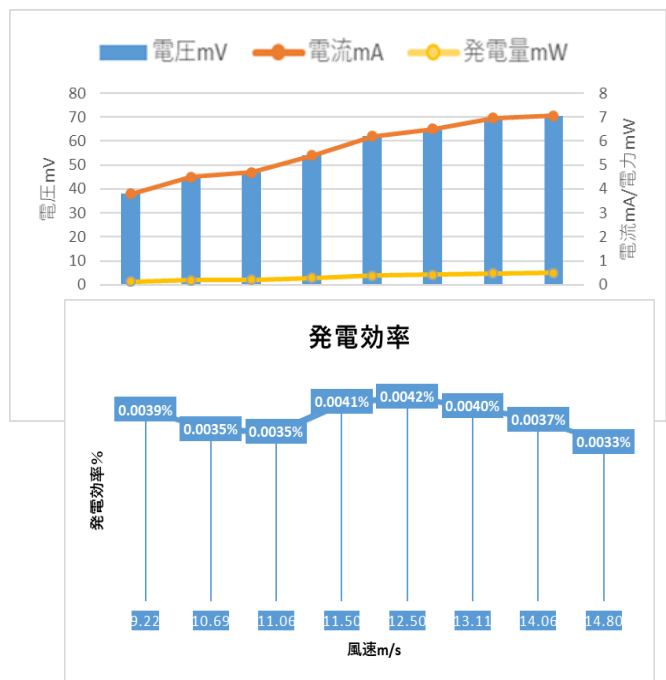


図 13(b) 発電効率

図 13(a)に示すグラフは、横軸に風速を、左縦軸に電流および電力、右縦軸に出力電圧をとり風速に対する4枚羽の発電特性を表している。4枚羽条件における計測結果では、風速の増加に伴い発電電量が増加していることが確認できる。このことから枚数を増やすことによって電力量を増加させることができると考えられる。

図 13(b)に示すグラフは、横軸に風速を、縦軸に発電効率をとり風速に対する4枚羽の発電効率を表している。この図から発電効率は、風速が高くなるにつれて必ずしも増加せず、一定の範囲で変動していることが確認できる。

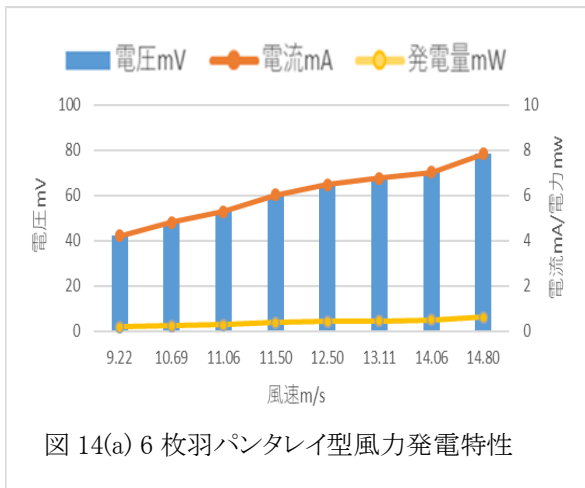


図 14(a) 6枚羽パンタレイ型風力発電特性

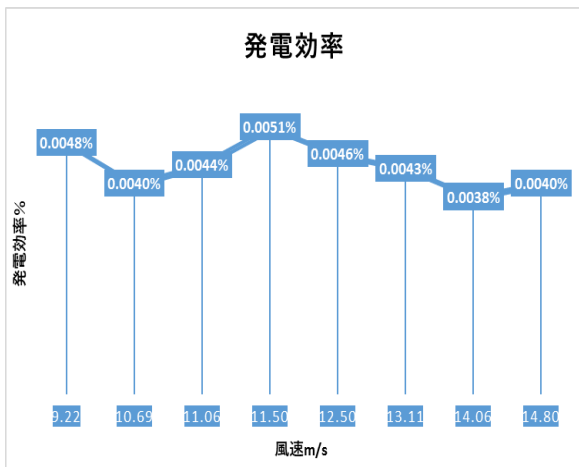


図 14(b) 発電効率

図 14(a)に示すグラフは、横軸に風速を、左縦軸に電流および電力、右縦軸に出力電圧をとり風速に対する6枚羽の発電特性を表している。この図から6枚羽条件では、4枚羽と同様に、風速の増加に伴う発

電量の増加が確認された。特に中～高風速域において、出力電圧および電流の増加が明確に表れている。

図 14(b)に示すグラフは、横軸に風速を、縦軸に発電効率をとり風速に対する6枚羽の発電効率を表している。この図から発電効率を比較すると、同一風速域においても4枚羽条件とは異なる値を示していることが確認できる。

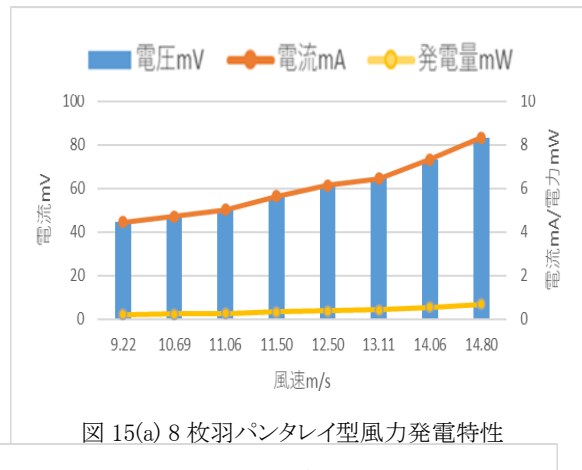


図 15(a) 8枚羽パンタレイ型風力発電特性

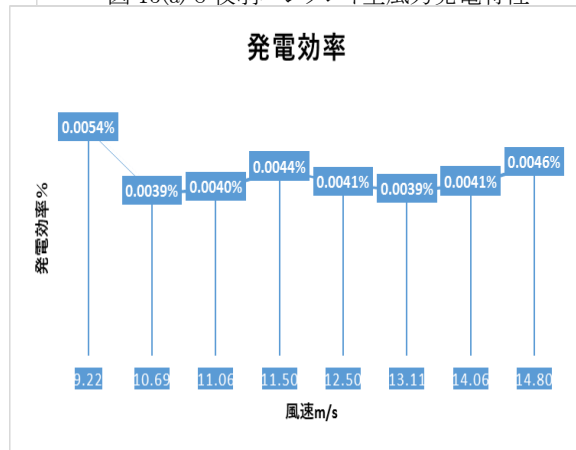


図 15(b) 発電効率

図 15(a)に示すグラフは、横軸に風速を、左縦軸に電流および電力、右縦軸に出力電圧をとり風速に対する8枚羽の発電特性を表している。この図から8枚羽条件においても、風速の増加に伴う回転数および発電電量の増加が確認された。一方、回転数の増加割合や発電効率は、4枚羽および6枚羽条件とは異なる傾向を示している。

図 15(b)に示すグラフは、横軸に風速を、縦軸に発電効率をとり風速に対する8枚羽の発電効率を表している。この図から発電電量が増加している条件においても、発電効率が低下している測定点が存在する

ことが確認できる。これらの結果から、羽の枚数を増やすことで必ずしも発電効率が向上するわけではないことが、実測データとして示された。

5.4 プロペラ型とパンタレイ型風力発電機の発電特性に関する考察

プロペラ型風車とパンタレイ型風車の発電効率を比較すると、風速に対する発電特性の変化が異なることが、実測データとして示された。特に、発電量の増加と発電効率の変化が一致しない点は、両方式がもつ特性の差を示す結果である。

このことから、パンタレイ型風力発電機において、羽の枚数が発電量、回転数および発電効率に影響を与える要因の一つであることが、実験結果から確認された。

6. まとめ

本研究では、小型プロペラ型風力発電機およびパンタレイ型風力発電機とも、風速を段階的に変化させた条件下で、出力電圧、電流、回転数を測定し発電量および発電効率を計算することで、発電特性を実験的に評価した。その結果、いずれの風車においても、風速の増加に伴い出力電圧、電流、回転数および発電量が増加することが確認された。このことから、羽の枚数を増やすことで、発電量を上昇させることが可能であると考えられ、発電効率はどの風速でもほぼ変わらない傾向を示した。

謝辞

本研究は公益財団法人天野工業技術研究所工業教育研究助成により成し得たことであり、深く感謝いたします。

また、本研究に際して、様々なご指導や取り次ぎをして頂いた山川昌文先生をはじめ、ものづくり創造専攻科の先生方に感謝いたします。

参考文献

1)風力発電:日本の現状と問題点

<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp>

[/NSRG/seminar/No84/Ishida0110.htm](https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/No84/Ishida0110.htm)

2)風力発電のメリット・デメリットを解説！日本の現状と普及に向けた取り組みを紹介

<https://www.wsew.jp/hub/ja-jp>

[/blog/article_53.html#03](https://www.wsew.jp/hub/ja-jp/blog/article_53.html#03)

3)株式会社パンタレイ

<https://www.pantarhei-japan.com/>

4)風力発電について

<https://www.globalenergy.co.jp/windpower.html#>