風力発電用３次元加工ブレードの研究

研究者
大嶋　駿仁　　志水　太陽　　野溝　快斗　　牧田　朋晃　　増澤　俊太郎

指導教諭
安達　隆太　先生

要旨（Abstract）

近年注目されている再生可能エネルギーの中でも，風力発電は装置の大きさや価格の面，定格風速の大きさから技術的課題を多く抱えている．我々は一般的な風速 5m/s で発電できる風力発電装置を作成した．風車のブレードを３次元的に加工し，ブレードの曲げ方に対して電力や電圧がどのように変化するのかを記載的に研究することを目指した．

ブレードは，回転方向前方と後方やブレードが風を受ける向きを放物線型に加工し，ふくらみの大きさや軸の位置を変えたり，ウイングレットを取り付けたりして最適な形状を模索した．評価の方法は電流電圧特性を測定することである．結果は，最大電力や最大電圧の値から考えると，ブレードの長さに対して対称な形状で，回転方向前方を 0.12 倍，後方を 0.35 倍，風を受ける向きに前方 - 後方 2：9 の位置を幅に対して 0.11 倍膨らませて，でっぱりが最低でも 50㎜ のウイングレットを取り付けた形が有効であると考えられるが，３次元加工ブレードの変数が非常に多くすべての場合を網羅することはできなかった．

１．はじめに

１－１　研究の動機

今日の日本では，電力発電量のうち再生可能エネルギーが占める割合は約 20%であり，風力発電，水力発電，地熱発電の割合はここ 20 年間でほとんど変わっていない．[1]再生化のエネルギーのさらなる普及を進めるためには，これらの発電方法をより使いやすいものにする必要がある．さらに，日本は風力発電に適した土地が少なく，台風が多いため大型の風力発電装置には向かない．また，現在通信販売サイト[2]で確認した範囲では，小型風力発電機はすべて定格風速が 10m/s 以上であり，我々の住む地域の一般的な風速 5m/s ではほとんど発電することができない．そこで我々は風速５m/s 程度でも 5V で 2.5W（スマートフォン充電の定格電力）発電することができる小型風力発電機の作成の過程を通じて，より大きな電力を生み出すブレードの形状を研究したいと考えた．

２．研究内容

２－１　目的

ブレードの長さ 1.7×10^2mm（直径 4.3×10^2mm）の小型ブレードを風速 5.0m/s 程度の風で回転させ，自転車のハブダイナモ（ＮＨ－Ｈ８０）でより大きな電力を生み出すブレードの形状を明らかにすること．

２－１　仮説

先行研究より，昨年の伊那北高校研究[3]や矢口喜一による研究[4]のように，ブレードを平面的に加工することによって電力が大きくなることが明らかとなっている．（[3]からは，回転方向前方に山の形状をもつブレードの発電量が大きいことが分かった．）

また，コルゲート翼の模倣[6]やカエデの種子の模倣[7]など，ブレードを断面的に加工することによってもまた，電力が大きくなることが明らかとなっている．

よって，ブレードの平面と断面の形状の両方を電力が大きくなる形状に加工すれば，相乗的な効果が期待でき，より大きな電力を得られると考える．

３．実験

３－１　風洞について

３－１－１　風洞の作成

ブレードに均一な風を送れる風洞を作成する．

１：昨年作成した丸型のポリバケツ
（120L，直径 603mm，高さ 657mm ）
の底面を切断したものを用意する．

２：１の底面にストロー
（直径 14mm，長さ 210mm）を敷き詰めて整流器とする．

３：１の上面の口に主扇風機
①（YUASA YS-455T）
を設置して送風機とする．
さらに５つの補助扇風機
②（toyotomiFS-D30KHR）×２
③（YAMAZENPSLT-K30-W）×２
④（national）×１
を図１のように設置する．

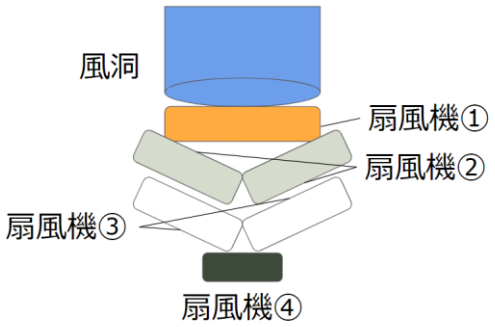


図１：風洞装置を上から見た図

風洞を通した風速は日によって異なっていたため，全体の平均が 5.0m/s に近づくように扇風機の風洞に対する角度は毎回調整した．

４：電圧調整機に全ての扇風機の電源を繋ぐ．
電圧を 86v に設定し，全扇風機の風力設定を最大にすることで計測風速約 5.0m/s になるように調整した．

３－１－２　風洞の評価

整流器側に風速計を設置して 9 ヶ所の風速を測定した．風速が安定してから 10 回数値を得た．中心極限定理より，測定回数が少なくても値は平均値の周辺に均等にばらつくと考えられるため，この 10 回の平均値を真の値とみなし，値が正規分布すると仮定して標準偏差 σ を計算した．誤差は標準誤差 3σ を用いた．測定した結果は図２に示す．

4.6±0.44	5.0±0.24	4.2±0.32
4.7±0.31	2.2±0.40	5.2±0.28
5.0±0.27	5.4±0.34	4.9±0.27

図２：風洞内の風速の分布

図２は，風洞を整流器側から見た図である．風洞の中心以外，おおよそ風速 5.0m/s に相当する風が吹いているのを確認できる．風洞中心の風は発電機本体に当たりブレードに当たらないため，発電に影響はないと考えられる．中心部分を除いた全体の平均風速は 4.9±0.31m/s である．

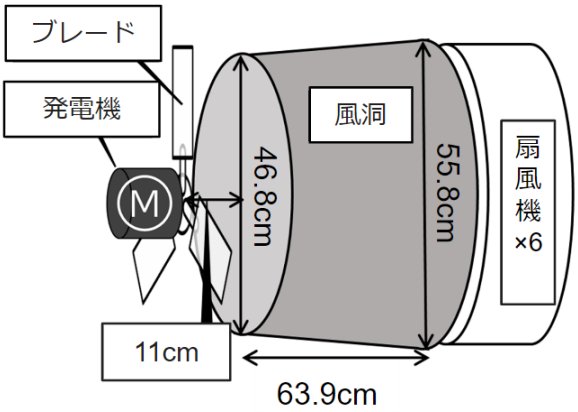


図３：実験装置の概要
実験装置の全体図である．
この図で見て風洞の左側に φ１４mm のストレートストローを敷き詰めて整流器とした．

３―２　風力発電機について
３―２―１　発電機とローター
　ハブダイナモ（ＮＨ－Ｈ８０）を風洞底面の中心にくる位置で設置し，図 4 のようにブレードを設置する．

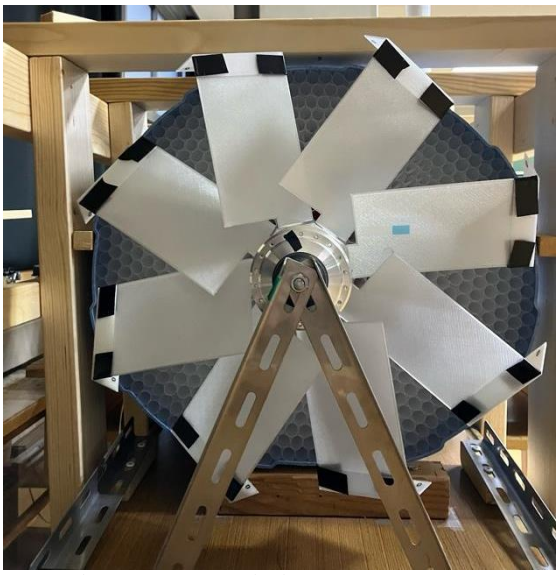


図 4：ブレードをハブダイナモに取り付け，風洞から風を受けるように設置した写真

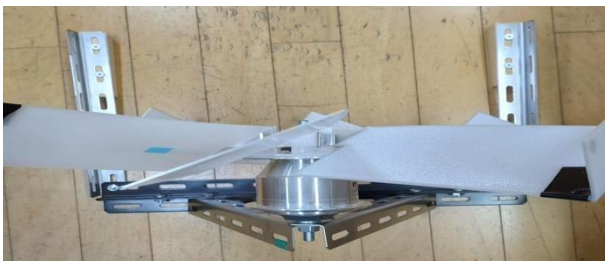


図 5：発電機本体を上から見た写真

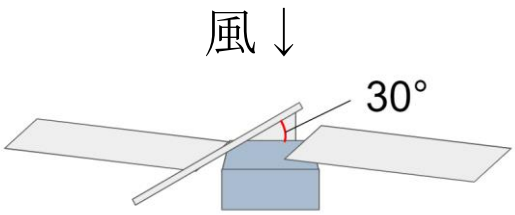
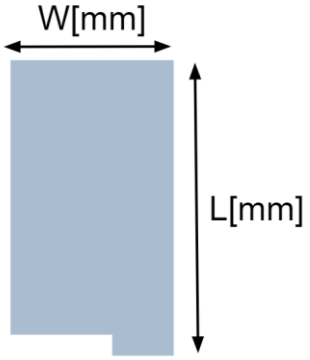


図 6：発電機本体を上から見た図
このようにすべてのブレードを風洞に対して 30°の角度で取り付けた．

３―２―２　ブレード
　ブレードの素材には，軽くてかつ加工が容易な「PETG」を用いて３D プリンター（SOVOL SV06 - PLUS）により作成した．ブレードは全て縦の長さを 1.7×10^{2}mm に統一し，ブレードのソリディティ（風車が回転した時にできる円の面積に対する、実際にブレードがある部分の割合）を統一するためにブレード１枚当たりの面積を 1.56×10^{4} mm^2 とした．ブレードの質量は１枚当たり 24.18±8.036g であった．
　ブレードの枚数は 8 枚で，総面積は $1.1\times10^{5}\pm1.8\times10^{3}$mm^2 とした．理由は，ハブダイナモが回転するために必要なトルク 0.0675N・m以上の力のモーメントを得るためである．

また，以下に使用した羽を示す．
※翼の最大の長さを L[mm]　最大の幅を W[mm] とした．ブレード 1 枚あたりの風に当たる面積は S[mm^2]=1.56×10^{4} mm^{2}である．ばらつきの程度は最大でも 0.2%であった．数値や放物線の軸は３DCAD の設計上の値である．用いた 3DCAD は Fusion360 である．

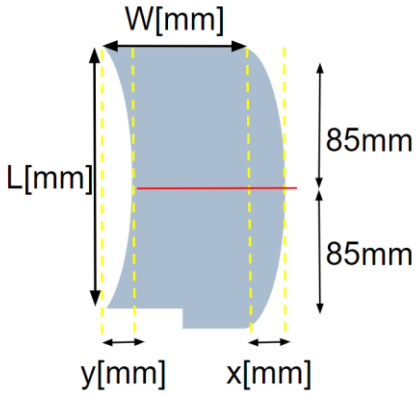
【 ⓪基準 】
長方形型である．このブレードを基準にどの程度電力が向上したかを比較する．



（回転方向→）

記号	L[mm]	W[mm]
⓪	170	95

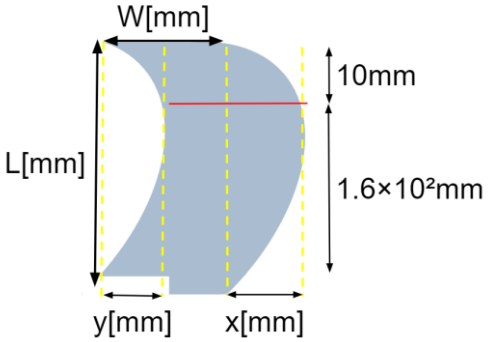
【 ①山谷対称 】
下図のように回転方向が頂点になるような放物線の形（赤線は軸）に曲げた形状である．作成目的は，参考文献[4]より，前方が曲がっていることが最大電力を上げる要素であるから，その曲がり方を変化させ，最も発電できるブレードの形状を明らかにすることである． x， yは基準ブレードから頂点がどの程度動いたかを表す．（以下同様）全部で６種類作成した．



（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	x [mm]	y [mm]
①. 1	170	95	25	25
①. 2	170	95	50	50
①. 3	170	95	75	75
①. 4	170	95	100	100
①. 5	170	95	125	125
①. 6	170	95	150	150

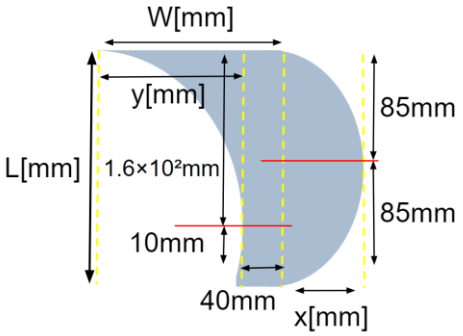
【 ②山谷非対称・軸外 】
通常の「①山谷対称」から放物線の軸をずらした形状である．赤線が軸である．軸の位置を変化させることで電力などが変化するかどうかを調べた．



（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	x [mm]	y [mm]
②. 1	170	95	50	50
②. 2	170	95	75	75
②. 3	170	95	100	100

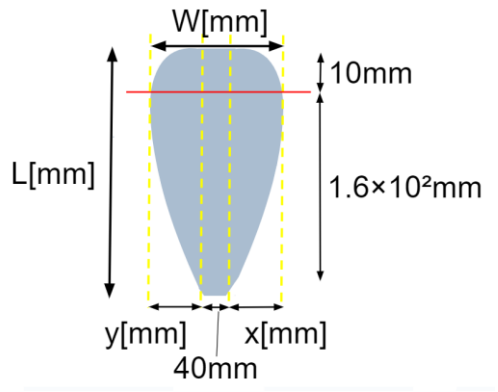
【 ③山谷非対称・軸内 】
回転方向の前後で放物線の軸をずらし，非対称に曲げた形状である．赤線が軸である．軸の位置を変化させることで電力などが変化するかどうかを調べた．



（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	x [mm]	y [mm]
③. 1	170	130	50	90
③. 2	170	130	75	110

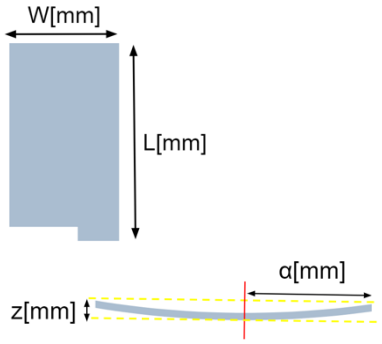
【 ④山山非対称・軸外 】
基準ブレードの両端を，赤線を軸とした放物線型に，対象に歪ませた形である．後方の谷が電力などに与える影響を調べた．



（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	x [mm]	y [mm]
④	170	120	40	40

【 ⑤断面放物型 】
基準ブレードを回転方向と直角な方向に放物線の形に曲げた．作成目的はブレードを曲げることで風を受け止め，ブレード回転のエネルギーに変換されやすくするためである．z は回転方向前方の放物線の頂点が基準からどれだけ動いたかを，α は軸の位置を表す．

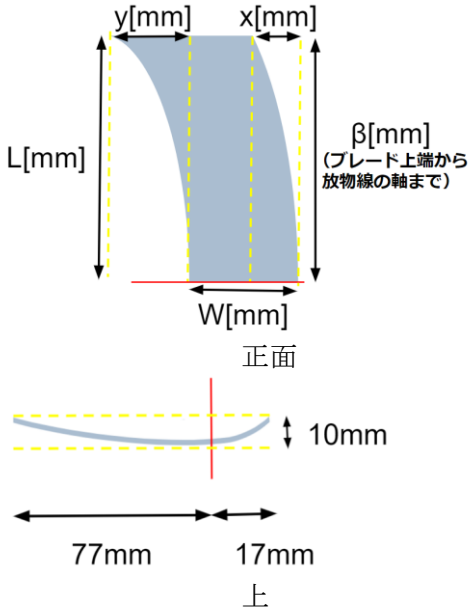


正面
（回転方向→）

上
（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	z [mm]	α [mm]
⑤.1	170	92	5	48
⑤.2	170	93	10	17
⑤.3	170	93	20	17
⑤.4	170	93	30	17

【 ⑥山谷対称＋放物 】
回転方向に曲げた「①山谷対称」と風を受ける向きに曲げた「⑤断面放物線」を合わせた形状である．作成目的は，発電量の向上が大きく見られたブレード同士の特徴を組み合わせることが目的である．断面放物型の形状はもっとも発電できた⑤.2 を採用し，カモメ型の継受を変化させた．x，y，z はそれぞれブレードの外端から放物線の軸までの距離，回転方向前方，後方の放物線の頂点が基準からどれだけ動いたかを表す．



（回転方向→）

記号	L [mm]	W [mm]	β [mm]	x [mm]	y [mm]
⑥.1	170	100	170	50	55
⑥.2	170	95	85	15	40
⑥.3	170	100	85	20	60

３―２―３　ウイングレット

それぞれのブレードでウイングレット（航空機の主翼翼端部分に取り付けられているようなでっぱり）を取り付けた場合でも測定した．目的は，引用文献よりウイングレットを取り付けた板に風を当てると，揚力や抗力が大きくなることがわかっているので[5]，風力発電にも利用して揚力や抗力を大きくすることである．横幅は 95mm．でっぱりの大きさ p[mm]は 50mmとした．⑥.3 のブレードのみ，ウイングレットの効果を調査するため p が 25mm，75mm のものもつけて測定した。以下，ウイングレットは㋐と表す．なお，基準ブレードと比較して，より大きな電力を得ることが出来ないと推測されたブレードの一部は，研究の時間の都合上，ウイングレットを装着して実験を行っていない．

また，ウイングレットの質量は 9.531±3.347g であった．

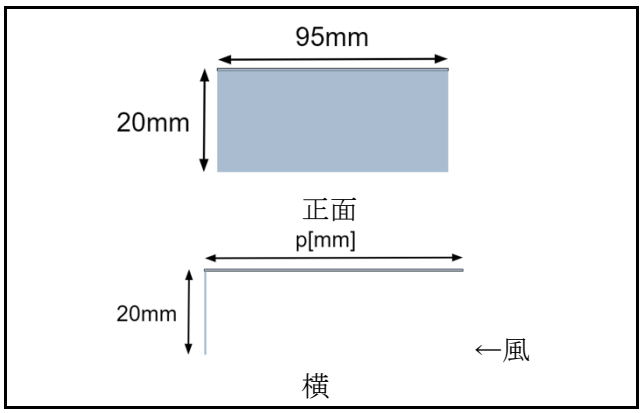


図 7：ウイングレットの概要

３―３　電力の測定方法

電気回路は図 8 を用いる．可変抵抗器は０～１MΩ まで変化させることができる．（M が発電機）電流は時間変化するため，交流電流計と交流電圧計を用いる．測定値は実効値である．抵抗の値を変化させることにより，I-V 特性を得る．

測定方法として、変化させた抵抗ごとに電流，電圧の変動を 1 分程度撮影し、5 秒ごとに値を読み取ってそれぞれ平均化した．一部目測で値の平均を読み取っている（結果の誤差範囲のバーがないものが当てはまる）．

最大の電力 P[mW]=I [mA]×V [V] を求め、各ブレードの P [mW] を比較した．

平均値を真の値とみなし値が正規分布すると仮定して標準偏差 σ を計算した．誤差は標準誤差 3σ を用いた．

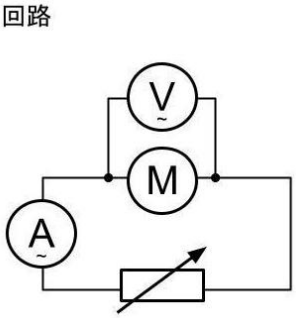


図 8：回路図

３―４　基準ブレード

３―４―１　目的

このブレードを基準として、他のブレードと最大電圧や最大電力を比較し、他のブレードの発電能力を評価するためである。

３―４―２　結果

３―１～３―３の材料と方法を用いて電圧と電流の値を測定した。

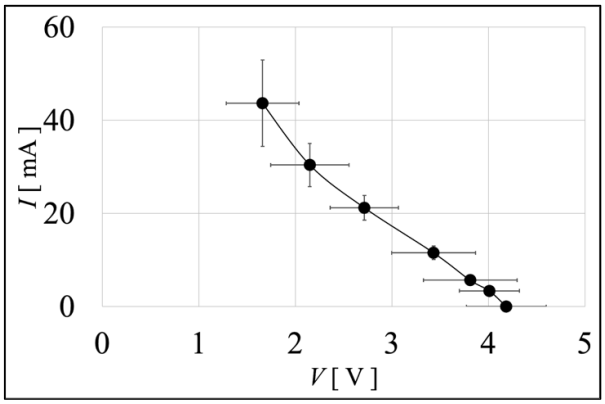


図 9：「⓪基準」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，　横軸は電圧 V [V]、エラーバーは標準誤差（３σ）を表す(以下同様)．
（散布図のマーカーを繋いでいる線はデータを滑らかにつないだものであり，関数を定義できる近似曲線ではない．以下の散布図も同様である．）

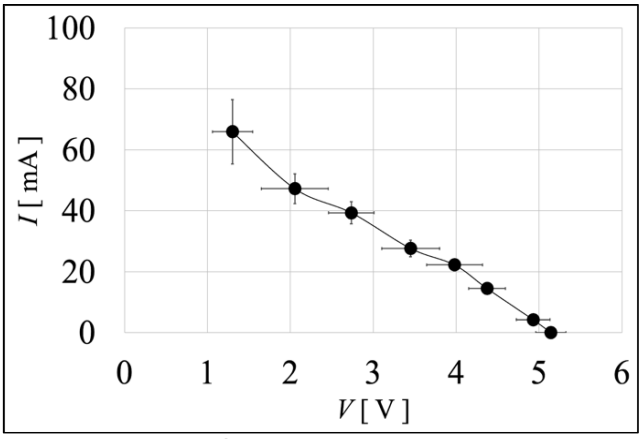


図 10：「⓪基準㋒」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，　横軸は電圧 V [V]を表す．

図 12 のように、「⓪基準」では，最大電圧が 4.19±0.42V，最大電力が 72.3±31.8mW であった．また，43.6mA よりも大きい電流が流れると風車の回転が停止した．

次に，図 13 のように，「⓪基準㋒」では，最大電圧が 5.14±0.18V，最大電力が 107±14mW であった．また，65.9mA よりも大きい電流が流れると風車の回転が停止した．

３―５　形状変化による発電量変化

「３―２　風力発電機について」で述べたブレードの形状，発電機，測定方法を用いて，どのような形状がもっとも発電できるか調査する．

３―５―１　結果

図 11 はウイングレットがない場合の最大電圧を

まとめたものである．図 12 はウイングレットがある場合の最大電圧をまとめたものである．

縦軸は最大電圧 V [V]，横軸は各ブレードの記号，エラーバーは標準誤差（3 σ）を表す．

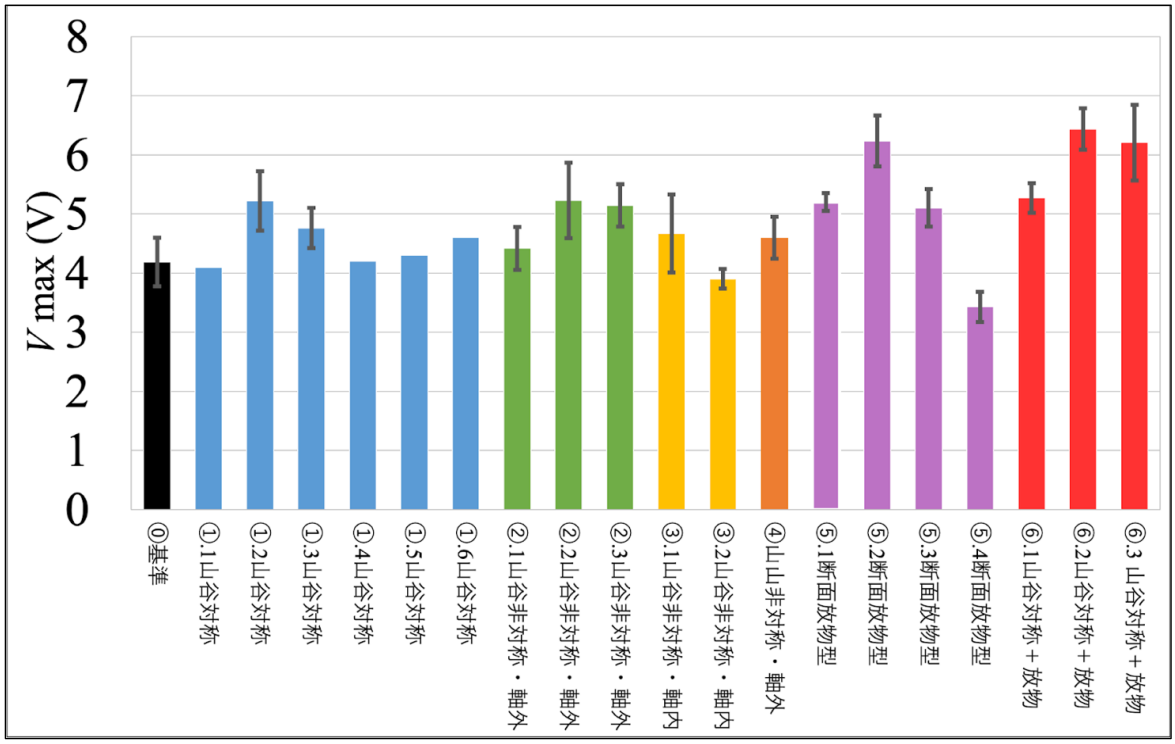


図 11：各ブレード（ウイングレットなし）の最大電圧の値
縦軸は最大電圧 V [V]，横軸は各ブレードの記号である．

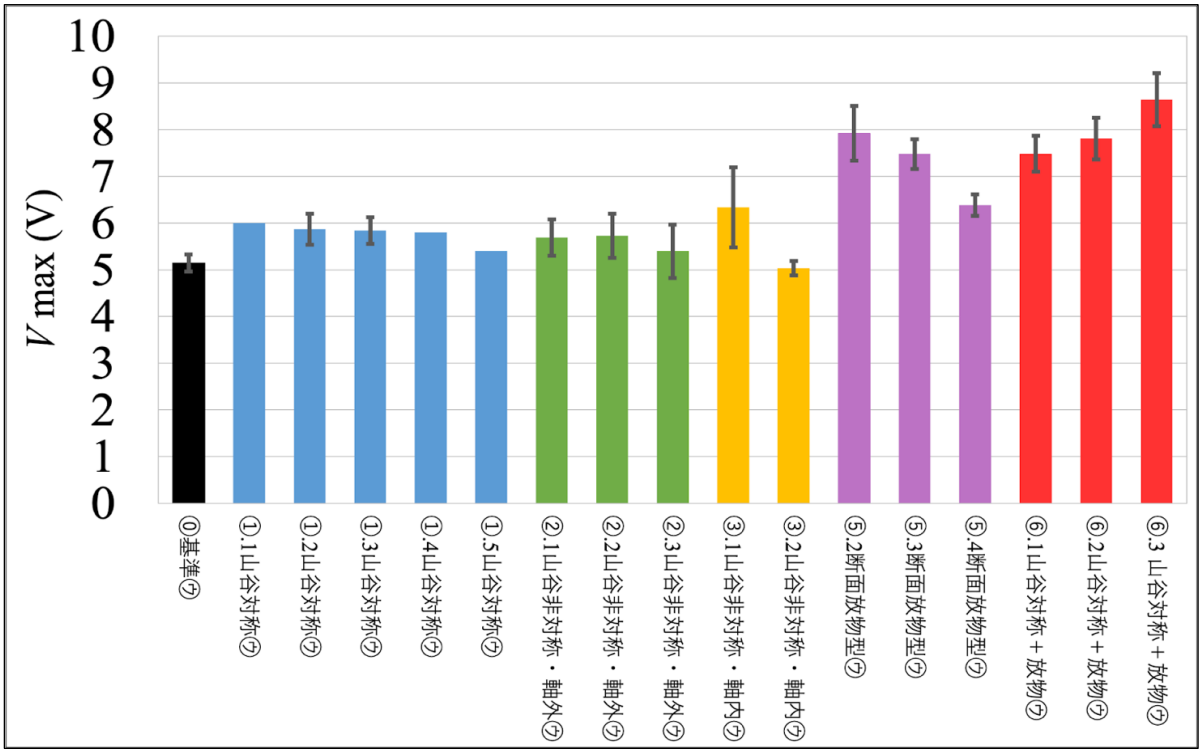


図 12：各ブレード（ウイングレットあり）の最大電圧の値
縦軸は最大電圧 V [V]，横軸は各ブレードの記号である．

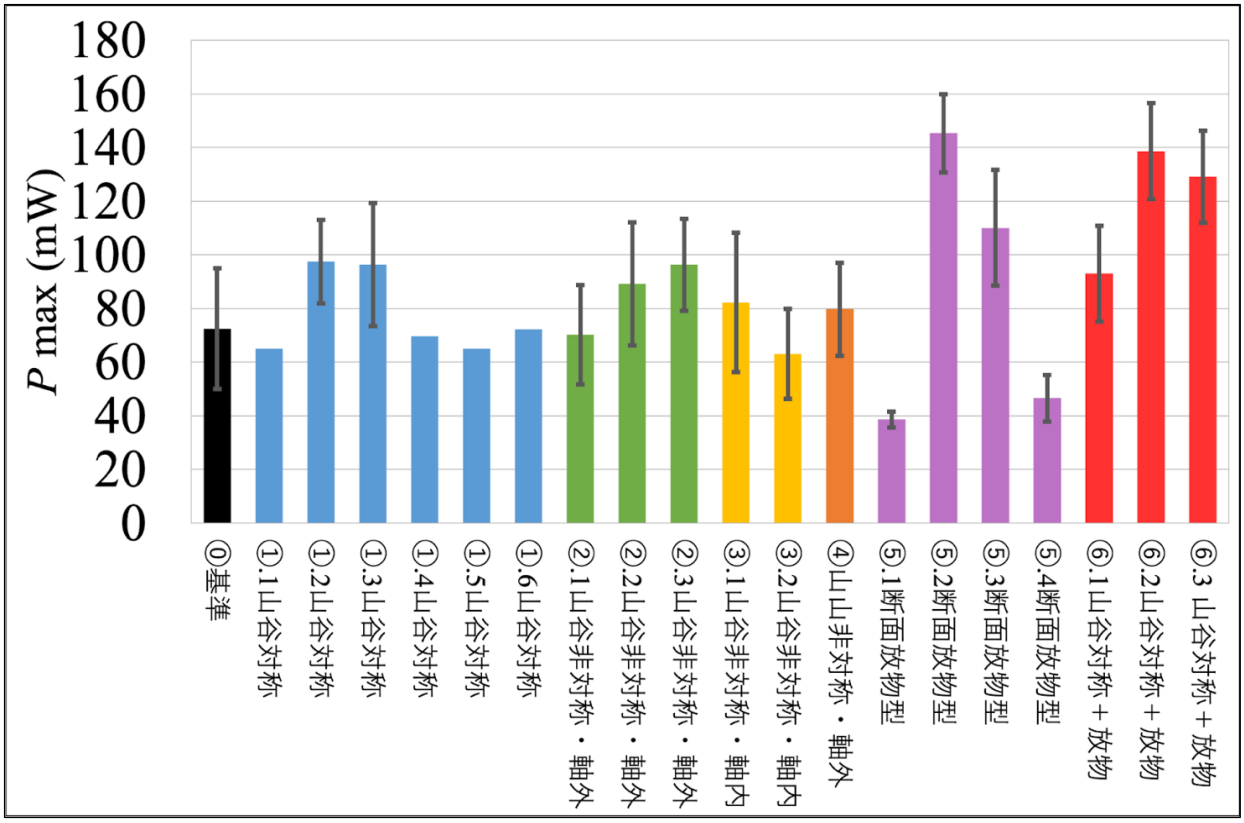


図 13：各ブレード（ウイングレットなし）の最大電力の値
縦軸は最大電圧 P [W]，横軸は各ブレードの記号である．

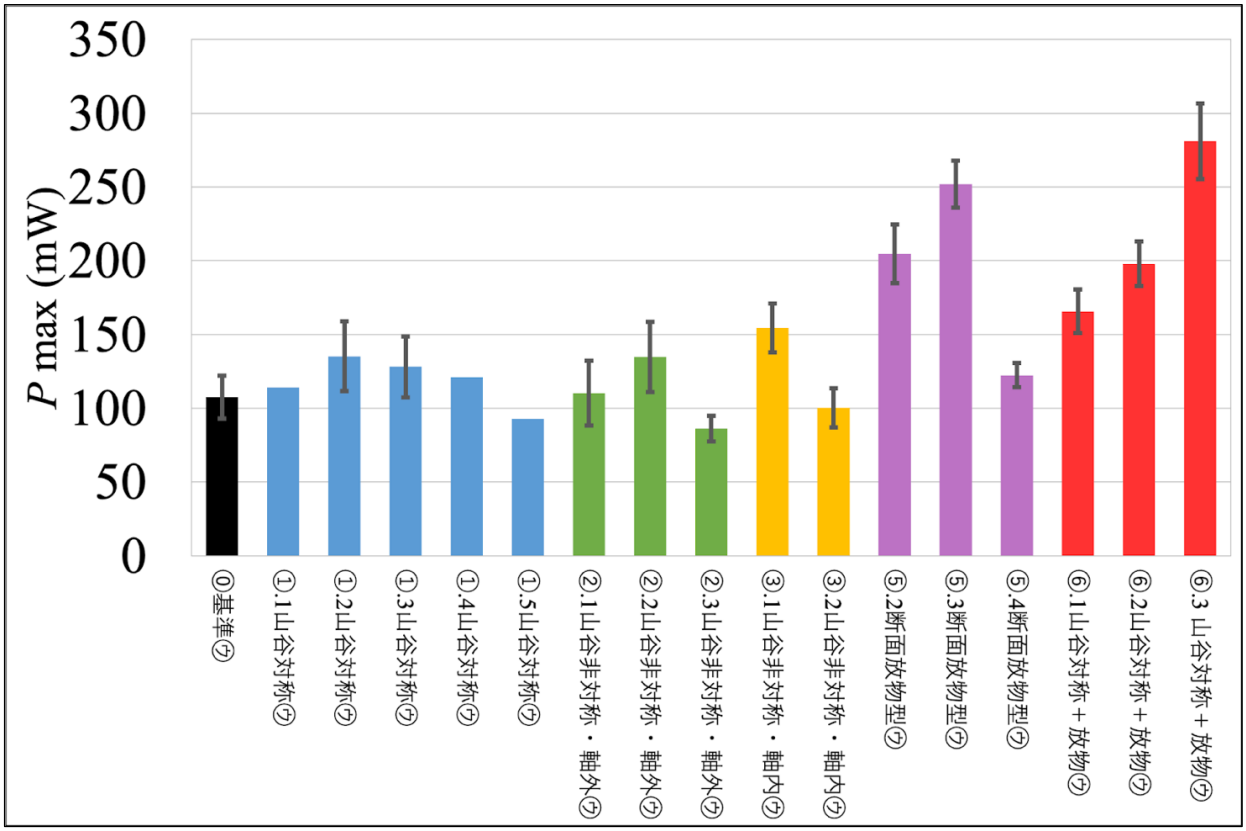


図 14：各ブレード（ウイングレットあり）の最大電力の値
縦軸は最大電力 P [W]，横軸は各ブレードの記号である．

３―５―２　平面加工ブレードについて

３―５―２―１　目的

平面加工による形状で，電力をより大きくする形状やその条件を明らかにすることである．

３―５―２―２　ウイングレットなしの平面加工ブレードについて

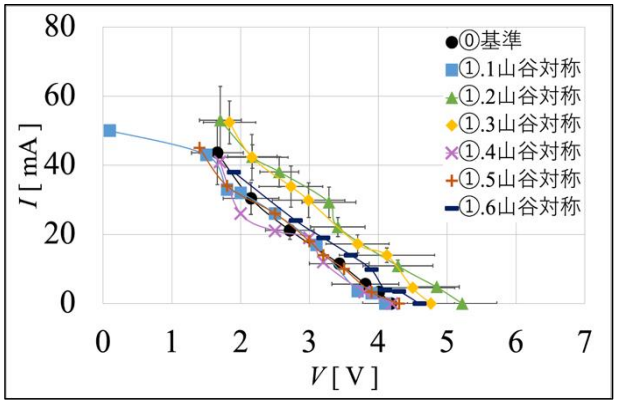


図 15：「⓪基準」，「①.1～6 山谷対称」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

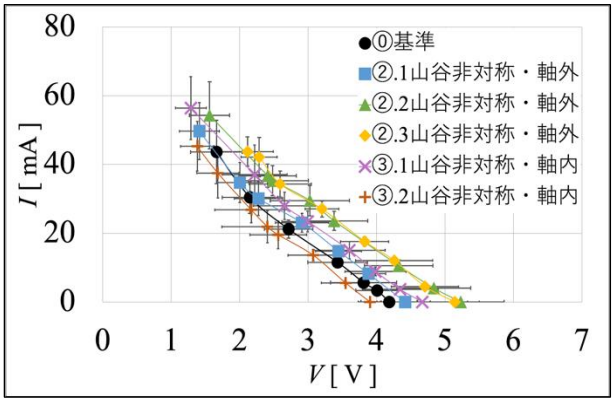


図 16：「⓪基準」，「②.1～3 山谷非対称・軸外」，「③.1～2 山谷非対称・軸内」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

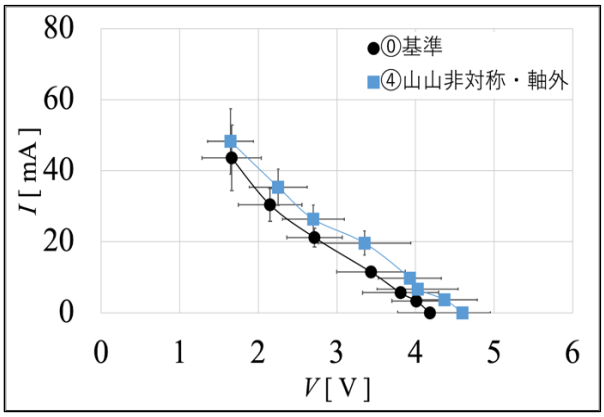


図 17：「⓪基準」，「④山山非対称・軸外」の電流電圧特性（I-V 特性）

縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

図 11，13 より，「①.1～6 山谷対称」の最大電圧（電流が 0mA のときの電圧）と「基準⓪」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

- ①.1 ： 4.10V（0.98±0.10 倍）
- ①.2 ： 5.22±0.50V（1.25±0.17 倍）
- ①.3 ： 4.76±0.34V（1.14±0.14 倍）
- ①.4 ： 4.20V（1.00±0.10 倍）
- ①.5 ： 4.30V（1.03±0.10 倍）
- ①.6 ： 4.60V（1.10±0.11 倍）

また，「①.1～6 山谷対称」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

- ①.1 ： 65.0mW（0.9±0.4 倍）
- ①.2 ： 97.5±15.6mW（1.3±0.6 倍）
- ①.3 ： 96.3±22.9mW（1.3±0.7 倍）
- ①.4 ： 69.7mW（1.0±0.4 倍）
- ①.5 ： 65.0mW（0.9±0.4 倍）
- ①.6 ： 72.2mW（1.0±0.4 倍）

これより，「①山谷対称」の中では，「①.2」と「①.3」が最大電圧・最大電力が最も大きくなった．また，「①.1」や「①.4～６」は，「⓪基準」に対して最大電圧・最大電力は有意な差が無い．

また，図 15 より，「⓪基準」に対して「①.2」，「①.3」は電流電圧特性のグラフが右上に変化していることから，全電圧に対して電力が大きくなったことが分かる．「①.1」や「①.4～６」は，「⓪基準」に対して大きく変化しない．

なお，「①.2」の山の高さ，谷の深さはそれぞれ 50mm，「①.3」の山の高さ，谷の深さはそれぞれ 75mm である．

以上から，ウイングレットなしの状態では，ブレードの前方の山の高さと後方の谷の深さは、それぞれ 50～75mm 程度であれば、最大電圧と最大電力を最も大きくすることができる．

図 11，13 より，「④山山非対称・軸外」の最大電圧と「基準⓪」に対する最大電圧の倍率は，

- ④ ： 4.60±0.35V（1.10±0.14 倍）

また，「④山山非対称・軸外」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率は．

- ④ ： 79.7±17.4mW（1.1±0.5 倍）

これより，「④山山非対称・軸外」は「⓪基準」に対して最大電圧・最大電力は有意な差が無かった．

また，図 17 より，「⓪基準」に対して「④山山非対称・軸外」は電流電圧特性が大きく変化しない．

以上から，ブレードの前方と後方がともに山の場合，最大電力・最大電圧をともに大きくできないか，有意な差が出るほど山の高さを変え

ることができていなかった，ということが考えられる．

図 11，13 より，「②.1～3 山谷非対称・軸外」，「③.1～2 山谷非対称・軸内」の最大電圧と「基準⓪」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

・ ②.1 ： 4.41±0.36V（1.10±0.14 倍）
・ ②.2 ： 5.23±0.64V（1.25±0.20 倍）
・ ②.3 ： 5.14±0.36V（1.23±0.15 倍）
・ ③.1 ： 4.67±0.66V（1.12±0.19 倍）
・ ③.2 ： 3.90±0.17V（0.93±0.10 倍）

また，「②.1～3 山谷非対称・軸外」，「③.1～2 山谷非対称・軸内」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

・ ②.1 ： 70.1±18.5mW（1.0±0.5 倍）
・ ②.2 ： 89.2±22.9mW（1.2±0.6 倍）
・ ②.3 ： 96.3±17.1mW（1.3±0.6 倍）
・ ③.1 ： 82.3±26.0mW（1.1±0.6 倍）
・ ③.2 ： 65.0±26.0mW（0.9±0.4 倍）

これより，「②山谷非対称・軸外」，「③山谷非対称・軸内」の中では，「②.2」と「②.3」が最大電圧・最大電力が最も大きくなった．しかし，最大電圧・最大電力の値は標準誤差の範囲内であるため，有意な差は得られない．

また，図 16 より，「⓪基準」に対して「②.2」と「②.3」は電流電圧特性のグラフがやや右上に変化していることから，全電圧に対して電力がやや大きくなったと考えられるが，値は標準誤差の範囲内であるため，有意な差は得られない．

なお，「②.2」は「①.3 山谷対称」の，「②.3」は「①.3 山谷対称」の放物線の軸を中心から外側にそれぞれ７５mm 移動させたブレードである．

以上から，放物線の軸を外側に寄せると，「②.2」や「②.3」のように山の曲がりが比較的大きいブレードの最大電圧・最大電力を大きくすることができると考えられるが，標準誤差の範囲内で有意な差は得られない．

結果をまとめると，ブレードを平面加工した場合，ウイングレットなしの状態では，「①山谷対称」のように，ブレードの前方に山を，後方に谷を，上下対称の形状で加工した場合が最大電圧・最大電力を最も大きくすると考えられる．最大電圧・最大電力が最も大きくなったのは「①.2 山谷対称」と「①.3 山谷対称」である．「①.2 山谷対称」のブレードの長さは 170mm，山の高さと谷の深さはそれぞれ 50mm，一方「①.3 山谷対称」のブレードの長さは 170mm，山の高さと谷の深さはそれぞれ 70mm であるので，ブレードの長さに対して山の高さと谷の深さをそれぞれ，0.29 倍または 0.44 倍にすれば最も大きな電圧と電力を得ることができる．「①.2 山谷対称」と「①.3 山谷対称」で最大電圧・最大電力に有意差がなかったため 50～75mm の間に電圧・電力が最大となる山の高さ，谷の深さがあると考えられる．

３―５―２―３　ウイングレットありの平面加工ブレードについて

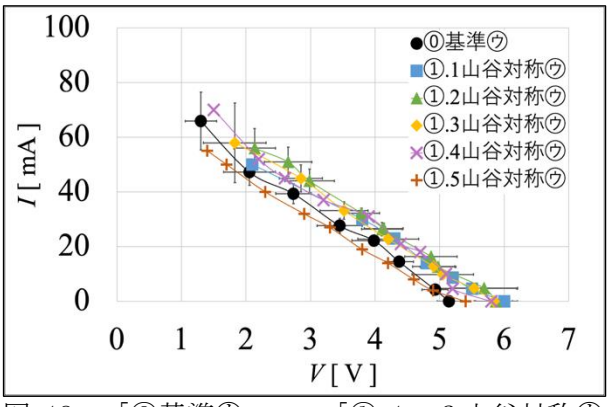


図 18：「⓪基準㋒」，「①.1～６山谷対称㋒」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

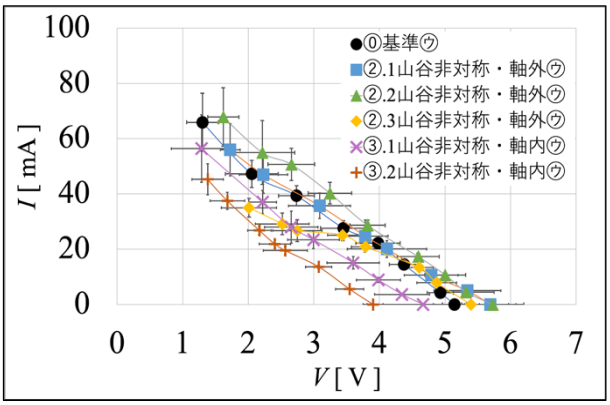


図 19：「⓪基準㋒」，「②.1～3 山谷非対称・軸外㋒」，「③.1～2 山谷非対称・軸内㋒」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

図 12，14 より，「①.1～５山谷対称㋒」の最大電圧と「基準⓪㋒」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

・ ①.1㋒ ： 6.00V（1.17±0.04 倍）
・ ①.2㋒ ： 5.87±0.34V（1.14±0.08 倍）
・ ①.3㋒ ： 5.84±0.29V（1.14±0.07 倍）
・ ①.4㋒ ： 5.80V（1.13±0.11 倍）
・ ①.5㋒ ： 5.40V（1.05±0.10 倍）

また，「①.1～５山谷対称㋒」の最大電力と「基準⓪㋒」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

・ ①.1㋒ ： 114mW（1.1±0.2 倍）
・ ①.2㋒ ： 135±24mW（1.3±0.3 倍）

・①.3㋒ ： 128±21mW（1.2±0.3 倍）
・①.4㋒ ： 121mW（1.1±0.2 倍）
・①.5㋒ ： 92.8mW（0.9±0.2 倍）

これより，「①.1～５山谷対称㋒」の中では，最大電圧はあまり変化が無く，最大電力は「①.2㋒」「①.3㋒」が最も大きくなった．しかし，最大電力の値は標準誤差の範囲内であるため，有意な差は得られない．また，「①.1～５山谷対称㋒」は，「⓪基準㋒」に対して最大電力は有意な差は無い．最大電圧については，「①.1～５山谷対称㋒」は，「⓪基準㋒」に対して最大電圧が平均値で 0.5V 程度大きくなっている．

また，図 18 より，「⓪基準㋒」に対して「①.1～５山谷対称㋒」は電流電圧特性は大きく変化しない．

図 11，13 より，「②.1～3 山谷非対称・軸外㋒」，「③.1～2 山谷非対称・軸内㋒」の最大電圧と「基準⓪㋒」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

・②.1 ： 5.69±0.39V（1.11±0.13 倍）
・②.2 ： 5.73±0.47V（1.11±0.14 倍）
・②.3 ： 5.40±0.57V（1.05±0.15 倍）
・③.1 ： 6.34±0.86V（1.23±0.21 倍）
・③.2 ： 5.04±0.15V（0.98±0.10 倍）

また，「②.1～3 山谷非対称・軸外㋒」，「③.1～2 山谷非対称・軸内㋒」の最大電力と「基準⓪㋒」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

・②.1 ： 110±22mW（1.0±0.3 倍）
・②.2 ： 135±24mW（1.3±0.3 倍）
・②.3 ： 86.2±8.81mW（0.8±0.2 倍）
・③.1 ： 154±17mW（1.4±0.3 倍）
・③.2 ： 100±13mW（0.9±0.2 倍）

これより，「②.1～3 山谷非対称・軸外㋒」，「③.1～2 山谷非対称・軸内㋒」の中では，最大電圧・最大電力は「③.1㋒」が最も大きくなった．しかし，最大電圧・最大電力の値は標準誤差の範囲内であるため，有意な差は得られない．また，「③.1㋒」のみ，「基準⓪」に対して，最大電力が 50mw 程度大きくなり，最大電圧が１Ｖ程度大きくなった．他のブレードについては最大電力と最大電圧ともに「基準⓪」に対して有意な差は得られなかった．

また，図 19 より，「⓪基準」に対して「③.1」は電流電圧特性のグラフがやや右上に変化していることから，全電圧に対して電力がやや大きくなったように考えられる．「②.1～3」，「③.2」は，「⓪基準」に対して大きく変化しない．

結果をまとめると，ブレードを平面加工した場合，ウイングレットありの状態では，「③.1 山谷非対称・軸内㋒」のように，非対称な山谷型(軸内側)の形状で加工した場合が最大電力・最大電圧を最も大きくすると考えられる．この「③.1 山谷非対称・軸内㋒」のブレードの長さが 170mm，山の高さが 50 mm，谷の深さが 90mm なので，ブレードの長さに対して山を 0.29 倍、谷を 0.53 倍にすれば最も大きな電力と電圧を得ることができる．

３―５―２―４　ウイングレットあり・なしでのデータの比較

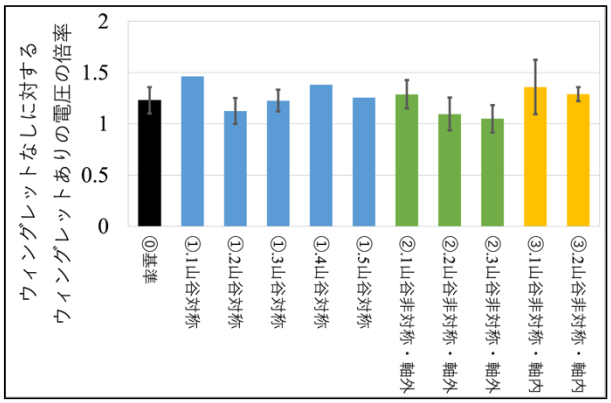


図 20：平面加工ブレード（「①.1～５山谷対称」，「②.1～3 山谷非対称・軸外」，「③.1～2 山谷非対称・軸内」）のウイングレット搭載前後の最大電圧の変化
縦軸は，ウイングレットなしに対するウイングレットありの最大電圧の倍率，横軸は各ブレードの記号を表す．

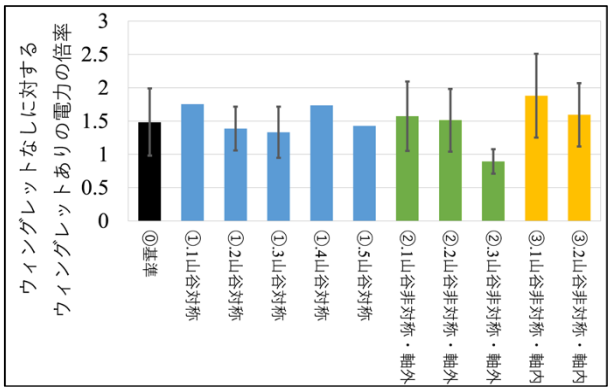


図 21：平面加工ブレード（「①.1～５山谷対称」，「②.1～3 山谷非対称・軸外」，「③.1～2 山谷非対称・軸内」）のウイングレット搭載前後の最大電力の変化
縦軸は，ウイングレットなしに対するウイングレットありの最大電力の倍率，横軸は各ブレードの記号である．

図 20 より，平面加工ブレードにおいて，ウイ

ングレットを付けた場合，つけない場合に比べて最大電力は大きくなる．

図 21 より，平面加工ブレードにおいて，ウイングレットを付けた場合，つけない場合に比べて最大電力は原則大きくなる．特に③.1 が 1.88±0.63 倍で大きくなった．しかし②.3 は 0.90±0.18 倍で小さくなった．

３―５―２―５　結論　（平面加工について）

＜ウイングレットがない場合＞

最大電圧および最大電力を大きくする形状は①.2 であり，ブレードの長さ(L = 170mm)に対して，山と谷は 0.29～0.44 倍の高さと深さ(x = y = 50mm～75mm)であればよい．

＜ウイングレットがある場合＞

最大電圧および最大電力を大きくする形状は③.1 であり，ブレードの長さ(L = 170mm)に対して，山は 0.29 倍の高さ(x = 50mm)，谷は 0.53 倍の深さ（y = 75mm）で，谷をつくる放物線の軸はブレードの長さ(L = 170mm)に対して内側から 10mm の位置にあればよい．

ただし誤差範囲を考えない単純な平均値で比較した場合であり，ほとんどの他の形状と有意差は見られない．

３―５―３　断面加工ブレードについて

３―５―３―１　目的

基本ブレード(⓪)の断面を放物線の形状で曲げた場合に，最大電力と最大電力がどのように変化するかを調べること．

３―５―３―２　ウイングレットなしの断面加工ブレードについて

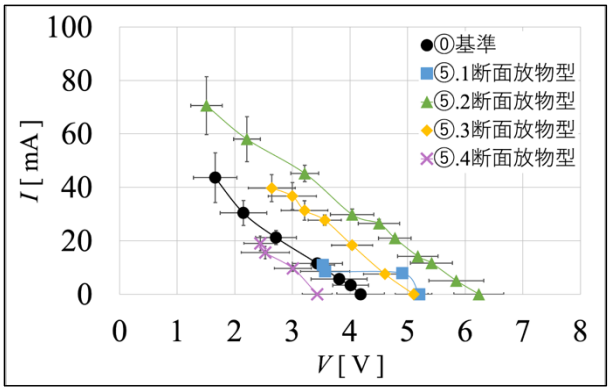


図 22：「⓪基準」，「⑤.1～4 断面放物型」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，横軸は電圧 V [V]である．

図 11，13 より，「⑤.1～4 断面放物型」の最大電圧と「基準⓪」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

- ⑤.1 ： 5.20±0.15V（1.24±0.13 倍）
- ⑤.2 ： 6.24±0.43V（1.49±0.18 倍）
- ⑤.3 ： 5.10±0.32V（1.22±0.14 倍）
- ⑤.4 ： 3.43±0.26V（0.82±0.10 倍）

また，「⑤.1～4 断面放物型」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

- ⑤.1 ： 38.6±2.92mW（0.53±0.24 倍）
- ⑤.2 ： 145±15mW（2.0±0.9 倍）
- ⑤.3 ： 110±22mW（1.5±0.7 倍）
- ⑤.4 ： 46.5±8.64mW（0.64±0.31 倍）

これより，「⑤.1～4 断面放物型」の中では，「⑤.2」が最大電圧が最も大きく，「⑤.2」と「⑤.3」が最大電力が最も大きくなった．また，「⓪基準」に対して最大電圧が大きかったものは，「⑤.1～３」，小さかったものは，「⑤.4」であった．一方，「⓪基準」に対して最大電力が大きかったものは，「⑤.2，⑤.3」，
平均値では小さくなり標準誤差の範囲で差がなかったものは「⑤.4」，明確に小さくなったのは「⑤.1」であった．

また，図 22 より，「⓪基準」に対して「⑤.2」と「⑤.3」は電流電圧特性のグラフが顕著に右上になったので，測定した電圧の範囲で電力が大きく向上したといえる．
「⑤.4」は，「⓪基準」に対して電流電圧特性のグラフが平均的には左下になったことより，電力が低下したといえる．「⑤.1」は５V 以上では⓪よりも電力が大きく，４V 以下では⓪よりも電力が小さい．

結果をまとめると，断面を曲げたブレードの場合，ウイングレットなしの状態では，測定したすべての電圧において「⑤.2 断面放物型」が最も電力を大きくする形状である．この形状は，(W = 93mm)に対して，断面の軸の位置がブレードの前方の端から後方へ 17mm の位置にある．割合で記述すれば幅に足して 18%程度前方端から後方に動かした位置に軸があればよい．放物線の高さは 10mm である．放物線の高さが 20mm(⑤.3)，30mm(⑤.4)の場合は最大電圧も最大電力も小さくなる．特に⑤.4 の場合は羽の厚みが大きくなりすぎて回転を妨害している可能性がある．

一方で，軸を幅(W)の中央にした場合，４V 以下の比較的遅く回転する領域で電力が減少した．電圧が大きく比較的早く回転する領域で電力が上昇した．

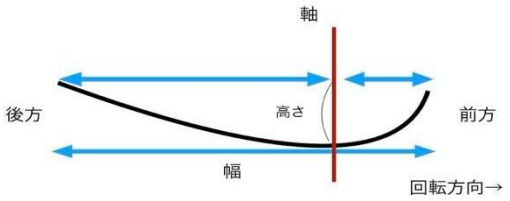


図 23：「⑤断面放物型」，　「⑥.2 山谷対称＋断面放物型」の，放物線の軸の位置についての補足

３―５―３―３　ウイングレットありの断面加工ブレードについて

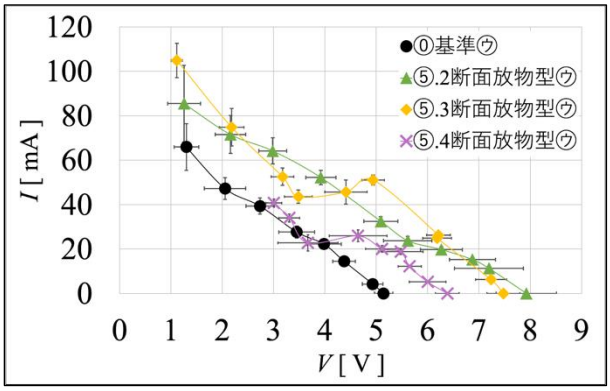


図 24：「⓪基準㋒」，　「⑤.1～4 断面放物型」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，　横軸は電圧 V [V]、エラーバーは標準誤差（３σ）を表す.

図 12，14 より，「⑤.2～4 断面放物型㋒」の最大電圧と「基準⓪㋒」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，
・⑤.2 ： 7.92±0.59V（1.54±0.19 倍）
・⑤.3 ： 7.48±0.32V（1.45±0.16 倍）
・⑤.4 ： 6.39±0.23V（1.24±0.13 倍）
また，「⑤.2～4 断面放物型㋒」の最大電力と「基準⓪㋒」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，
・⑤.2 ： 205±20mW（1.9±0.4 倍）
・⑤.3 ： 252±16mW（2.3±0.5 倍）
・⑤.4 ： 122±8.1mW（1.1±0.2 倍）
これより，「⑤.2～4 断面放物型㋒」の中では，最大電圧は「⑤.2，⑤.3」，最大電力は「⑤.2」が最も大きくなった．また，「⓪基準」に対して最大電圧が大きかったものは，「⑤.2～4」，小さかったものはなかった．一方，「⓪基準」に対して最大電力が大きかったものは，「⑤.2，　⑤.3」，小さかったものはなかった．
また，図 24 より，「⓪基準」に対して「⑤.2」，「⑤.3」は電流電圧特性が右上に変化をしたので，すべての電圧で電力が大きくなった．同じ電圧なら電流値が大きいほど電力は大きくなるので，「⑤.2」の電力が「⑤.3」の電力よりも大きくなる領域は 2.5 V<V<4.5 V，7 V<V<8 V である．

「⑤.4 は」４V より大きな電圧（回転数が比較的大きな）領域では電力が大きくなった．４V より小さな電圧（回転数が比較的小さい）領域では電力が小さくなった．
以上から，ウイングレットありの状態では，最大電圧は「⑤.2，⑤.3(断面放物型㋒)」，最大電力は「⑤.3 断面放物型㋒」が最も大きくなる．ただし，2.5 V<V<4.5 V，　7 V<V<8 V の領域では「⑤.2 断面放物型㋒」の電力が大きくなる．
基準面からの放物線の頂点の深さ(z)は 1.0～20mm 程度であり，ブレードの幅(W=93mm)に対して 11%～21%程度にすればよい．

３―５―３―４　ウイングレットあり・なしでのデータの比較

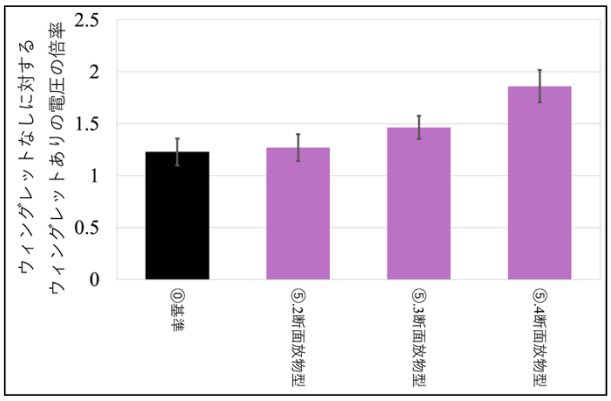


図 25：断面加工ブレード（「⑤.1～4 断面放物型」）のウイングレット搭載前後の最大電圧の変化
縦軸は，ウイングレットなしに対するウイングレットありの最大電圧の倍率，横軸は各ブレードの記号である(図 26 も同様).

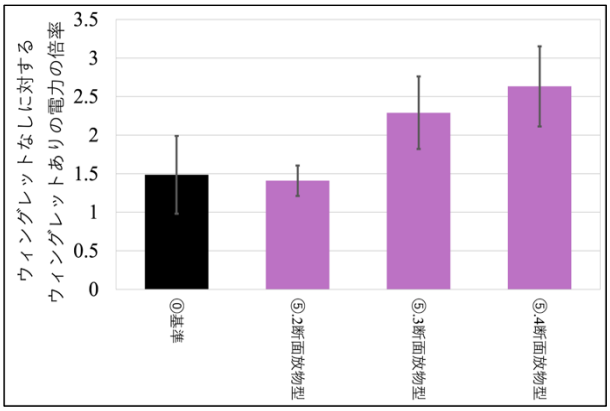


図 26：断面加工ブレード（「⑤.1～4 断面放物型」）のウイングレット搭載前後の最大電力の変化

図 25，28 より，全てのブレードでウイングレットを搭載すると最大電圧・最大電力が大きくなる．⑤.4㋒のブレードは最大電力が２倍になっているが，ウイングレット取り付け前が 46.5mW で取り付け後が 122mW の変化なので，⑤.3㋒の 252mW の半分程度までしか電力は上昇していないから，ウイングレットによる効果よりもブレードの厚みが 30mm であることによる回転の妨害の効果の方が大きいと考えることができる．

結果をまとめると，断面を加工した場合，すべてのブレードはウイングレットを搭載することで最大電圧・最大電力が大きくなると考えられる． 今回実験で行った断面加工ブレードの形状では，ウイングレットを搭載することで，最大電圧は約１．2～1．８倍， 最大電力は約 1.4～2.6 倍になると考えられる．

３―５―４　平面＋断面加工ブレードについて

３―５―４―１　目的

平面加工と断面の曲げを組み合わせてブレードの加工を行うことで電力と電圧がどのように変化するかを調べる．

平面加工については技術的な問題のため，(山の高さ)＜(谷の深さ) の状態になった．

３―５―４―２　ウイングレットなしの場合で，平面＋断面加工ブレードについて

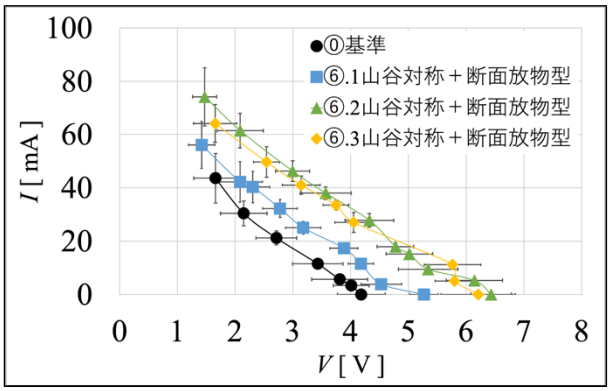


図 27：「⓪基準」，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]， 横軸は電圧 V [V である．

図 11，13 より，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の最大電圧と「基準⓪」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

- ⑥.1 ： 5.27±0.25V（1.26±0.14 倍）
- ⑥.2 ： 6.44±0.35V（1.54±0.17 倍）
- ⑥.3 ： 6.21±0.64V（1.48±0.21 倍）

また，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

- ⑥.1 ： 92.9±17.9mW（1.28±0.62 倍）
- ⑥.2 ： 138±18mW（1.9±0.9 倍）
- ⑥.3 ： 129±17mW（1.8±0.8 倍）

これより，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の中では，「⑥.2」と「⑥.3」が最大電圧・最大電力が最も大きくなった．「⓪基準」に対して最大電圧が大きかったものは，「⑥.1～3」のすべてであった．一方，「⓪基準」に対して最大電力が大きかったものは，「⑥.2～３」，有意な差がなかったものは「⑥.1」であった．

図 27 より，「⓪基準」に対して「⑥.2」，「⑥.3」は右上方向に大きく変化しているので，すべての電圧において電力が大きくなった．

よってウイングレットがない場合，平面方向に幅(W)が 100mm 程度に対して山の高さは 15～20mm，谷の深さは 40～60mm 程度の対照的な放物線で曲げ，断面方向に 10mm 曲げたときに電力と最大電圧が大きくなる．ただし全てを網羅していないので，条件を変えればもっと大きな電力を得られる可能性がある．

３―５―４―３　ウイングレットありの場合，平面＋断面加工ブレードについて

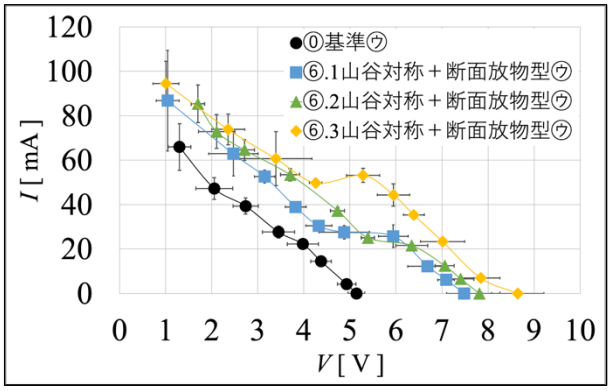


図 28：「⓪基準㋒」，「⑤.1～4 断面放物型」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]， 横軸は電圧 V [V である．

図 12，14 より，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型㋒」の最大電圧と「基準⓪㋒」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

- ⑥.1 ： 7.48±0.38V（1.45±0.16 倍）
- ⑥.2 ： 7.81±0.45V（1.52±0.17 倍）
- ⑥.3 ： 8.65±0.56V（1.68±0.20 倍）

また，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の最大電力と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

- ⑥.1 ： 166±15mW（1.5±0.3 倍）
- ⑥.2 ： 198±15mW（1.8±0.4 倍）
- ⑥.3 ： 281±25mW（2.6±0.6 倍）

これより，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型㋒」の中では，「⑥.3」が最大電圧・最大電力が最も大きくなった．しかし，最大電圧の値は標準誤差の範囲内であるため，有意な差は得られない．「⓪基準」に対して最大電圧が大きかったものは，「⑥.1～3」のすべてであった．また，「⓪基準」に対して最大電力が大きかったものは，「⑥.1～３」のすべてであった．

また，図 28 より，「⓪基準」に対して「⑥.1～３」は電流電圧特性のグラフが大きく右上に変化していることから，全電圧に対して電力が大きく上昇した．特に，「⑥.3」は電圧が４～７V のときに，他のブレードよりも大きな電力を生み出す．

なお，「⑥.3」の山の高さは 20mm，谷の深さは 60mm である．

以上から，ウイングレットありの状態では，ブレードの前方の山の高さが 20mm またはそれ以上，後方の谷の深さが 60mm またはそれ以上であれば、最大電圧と最大電力を最も大きくすることができると考えられる．ただし全てを網羅していないので，条件を変えればもっと大きな電力を得られる可能性がある．

結果をまとめると，ブレードを平面＋断面加工した場合，ウイングレットありの状態では，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型」が最大電圧・最大電力が最も大きくなる．

「⑥.3」でブレードの長さが 170mm に対し，山の高さが 20mm，谷の深さが 60mm なので、ブレードの長さに対して山の高さを 0.12 倍に，谷の深さを 0.35 倍にすると最も大きな電力と電圧を得ることができる．

また「⑥.3」でブレードの幅 93mm に対して，断面の軸の位置がブレードの幅を前方から 17mm-76mm に分ける位置で，高さが 10mm なので，ブレードの幅に対して前方-後方を 2:9 で分ける軸の位置で，高さがブレードの幅に対して 0.11 倍の時，最大の電力，電圧を得ることができる．

３―５―４―４　ウイングレットあり・なしでのデータの比較

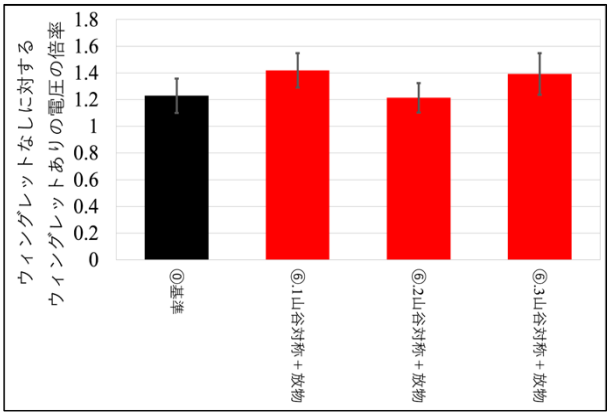


図 29：平面＋断面加工ブレード（「⑤.1～4 断面放物型」，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」）のウイングレット搭載前後の最大電圧の変化
縦軸は，ウイングレットなしに対するウイングレットありの最大電圧の倍率，横軸は各ブレードの記号，エラーバーは標準誤差（３σ）を表す．（図 30 も同様）

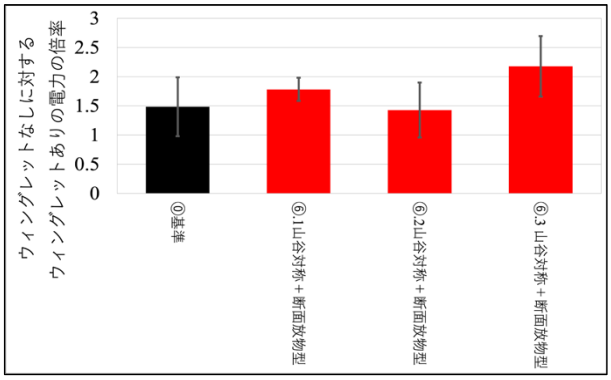


図 30：平面＋断面加工ブレード（「⑤.1～4 断面放物型」，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」）のウイングレット搭載前後の最大電力の変化

図 29，32 より，すべてのブレードはウイングレットを搭載することで最大電圧・最大電力が大きくなると考えられる．　今回実験で行った平面＋断面加工ブレードの形状では，ウイングレットを搭載することで，最大電圧は約１.2～1.8 倍，　最大電力は約 1.4～2.6 倍になると考えられる．

４．考察

４―１　最大電圧・最大電力をより大きくするための条件についての考察

最大電圧・最大電力を最も大きくするための条件について考察するために，今回の研究の中で最大電圧・最大電力が大きかった，「⑤.2 断面放物型㋒」，「⑥.2 山谷対称＋断面放物型

㋒」，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」の３つのブレードについて考察する．

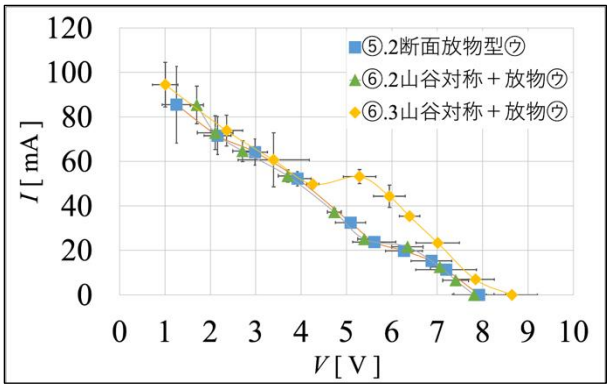


図 31：「⑤.2 断面放物型㋒」，「⑥.2 山谷対称＋断面放物型㋒」，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」の電流電圧特性（I-V 特性）
縦軸は電流 I [mA]，　横軸は電圧 V [V]である．

図 12，14 より，　「⑤.2 断面放物型㋒」，「⑥.2 山谷対称＋断面放物型㋒」，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」の最大電圧と「基準⓪㋒」に対する最大電圧の倍率はそれぞれ，

・ ⑤.2 ： 7.92±0.59V（1.54±0.19 倍）
・ ⑥.2 ： 7.81±0.45V（1.52±0.17 倍）
・ ⑥.3 ： 8.65±0.56V（1.68±0.20 倍）

また，「⑥.1～3 山谷対称＋断面放物型」の最大電力　「⑤.2 断面放物型㋒」，「⑥.2 山谷対称＋断面放物型㋒」，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」と「基準⓪」に対する最大電力の倍率はそれぞれ，

・ ⑤.2 ： 205±20mW（1.9±0.4 倍）
・ ⑥.2 ： 198±15mW（1.8±0.4 倍）
・ ⑥.3 ： 281±25mW（2.6±0.6 倍）

これより，平均値で考えると，最大電力・最大電圧ともに「⑥.3㋒」のブレードが最も大きくなる．最大電力は 281±25mW，最大電圧は 8.65±0.56V である．

標準誤差を含めて考えると「⑥.3㋒」と「⑤.3㋒」は最大電力に有意な差はなかった．標準誤差を含めて考えると「⑥.3㋒」と「⑤.2㋒」は最大電圧に有意な差はなかった．

また，これらのブレードについて，I-V グラフを比較すると，図 31 より 4.5～6.5V の範囲で有意な差があり、最大電力について，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」は，「⑤.2 断面放物型㋒」や「⑥.2 山谷対称＋断面放物型㋒」に比べ平均１９ｍＡ程度高かった。よって，4.5～6.5Ｖの範囲では，「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」が３つのブレードの中で，一番電流電圧特性のグラフが右上にあることから，同じ電圧でもより大きな電流を流すことができるので，4.5～6.5V の範囲で電力を供給するときに適していると考えられる．実験の状況では，ただし全てを網羅していないので，条件を変えればもっと大きな電力を得られる可能性がある．

実験の状況では，「⑥.3㋒」は，実験回路の抵抗を小さくしていくと電圧が減少し，徐々にブレード回転数が低下していくが，4.5V より少し電圧が高くなると著しく回転数が低下した．この変化はウイングレットがついておりかつ断面加工がある場合に生じる．

回転数が急に下がる要因として考えられることは，回転トルクが下がったか空気抵抗が大きくなったか，である．

４―２　「揚力」・「抗力」測定実験について

４―２―１　目的

平面加工ブレード，断面加工ブレードの中で比較的最大電圧・最大電力が高かったブレードをそれぞれ１つずつ選出し，基準ブレードも含めた３つのブレードの特性を調べるためである．

４―２―１　実験方法

「⓪基準」，「②.2 山谷非対称・軸外」，「⑤.2 断面放物型」の３つのブレードにおいて，ウイングレットあり・なしを含めたそれぞれのパターンについて，ブレード 1 枚あたりの「揚力」・「抗力」を測定する．

ここで，この実験での「揚力」・「抗力」について次のように定義をする．

「揚力」はブレードの回転によって起こる，ブレードに対して相対的な風が，ブレードを上方向に引っ張る力である．

「抗力」は風洞から出る風が，ブレードを下方向に押す力である．

「揚力」は，紙飛行機などが飛行する時に利用している力である揚力と同じ種類の力で，ブレードの回転を阻害する力だと考えられ，「抗力」はブレードを回転させるための直接的な力であると考えられる．

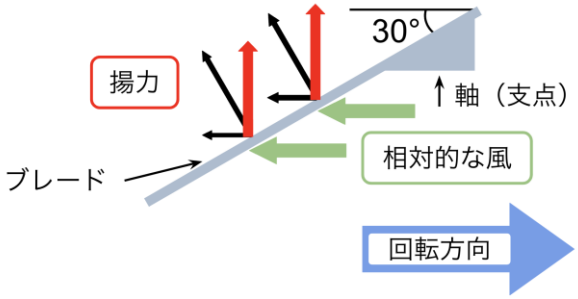


図 32：「揚力」についての補足

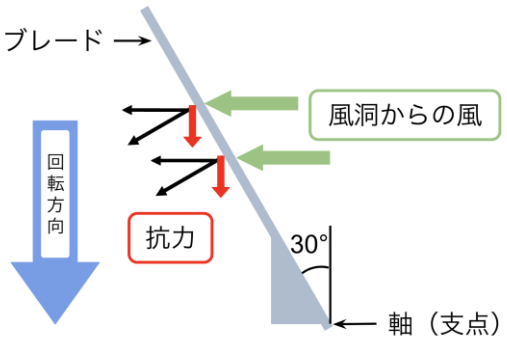


図 33：「抗力」についての補足

「揚力」・「抗力」の測定方法は，伊那北高校の先行研究[5]の方法を引用し，その先行研究での揚力（ここでは一般的に定義されている力）の測定方法から，この実験の「揚力」・「抗力」を測定した．

「揚力」を測定するときには，風速を 1m/s 程度とした．これは，その３つのブレードの周期からブレードの回転速度を計算したところ，およそ 1m/s ということが分かったので，その回転速度と等しくなるように設定するためである．

「抗力」を測定するときには，風速を５m/s 程度とした．これは，風洞から出る風の風速がおよそ 5m/s であり，その風速と等しくなるように設定するためである．

４―２―２　結果

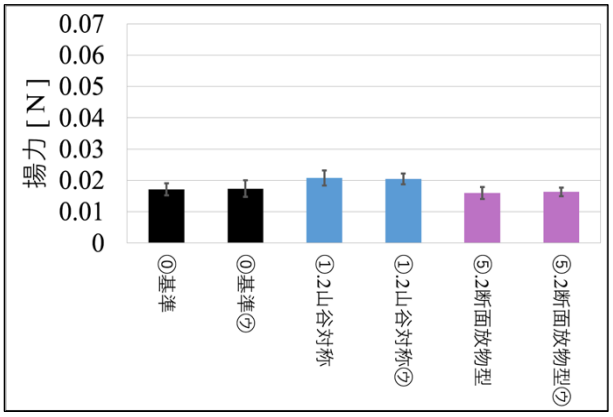


図 34：「⓪基準」，「②.2 山谷非対称・軸外」，「⑤.2 断面放物型」の，それぞれのブレード１枚あたりの「揚力」の値．縦軸は「揚力」[N]，横軸は各ブレードの記号である．

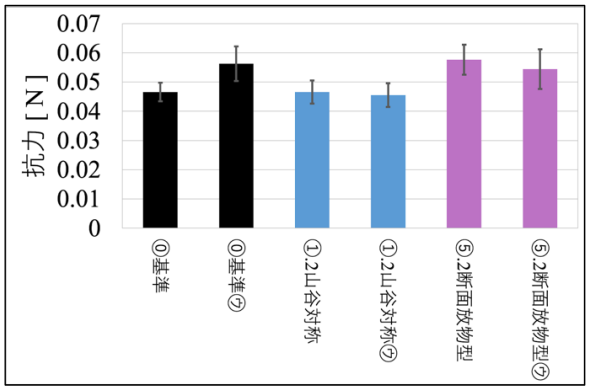


図 35：「⓪基準」，「②.2 山谷非対称・軸外」，「⑤.2 断面放物型」の，それぞれのブレード１枚あたりの「抗力」の値．縦軸は「抗力」[N]，横軸は各ブレードの記号である．

図 34 より，「⓪基準」，「②.2 山谷非対称・軸外」，「⑤.2 断面放物型」のそれぞれのウイングレットあり・なしの「揚力」の値はそれぞれ，

- ⓪　　：0.0172±0.0019N
- ⓪㋐　：0.0174±0.0027N
- ①.2　：0.0208±0.0024N
- ①.2㋐：0.0205±0.0017N
- ⑤.2　：0.0160±0.0019N
- ⑤.2㋐：0.0163±0.0014N

これより，形状が変化すれば平均値で 0.0025N 程度変化するものの，図 34 より有意な差があるとはいえない．また，ウイングレットの有無での揚力変化は，平均値で各ブレードで揚力の 1.02%以下であり，標準誤差の振れ幅に比べて十分に小さい．よって，風速（≒ブレードの速さ）が 1m/s 程度であれば，ウイングレットによる揚力の上昇効果はないと考えられる．ただし，風速（≒ブレードの速さ）が大きくなれば有意な差が出ることを否定することはできない．

図 35 より，「⓪基準」，「②.2 山谷非対称・軸外」，「⑤.2 断面放物型」のそれぞれのウイングレットあり・なしの「抗力」の値はそれぞれ，

- ⓪　　：0.0466±0.0032N
- ⓪㋐　：0.0563±0.0059N
- ①.2　：0.0466±0.0040N
- ①.2㋐：0.0455±0.0041N
- ⑤.2　：0.0577±0.0051N
- ⑤.2㋐：0.0544±0.0068N

これより，形状が変化すれば平均値では０．００５７１N 程度変化するものの，図 35 より有意な差があるとはいえない．

また，ウイングレットの有無での抗力変化は，

平均値では各ブレードで抗力の 1.10%以下であり，標準誤差の振れ幅に比べて十分に小さい．よって，風速が 5m/s 程度であれば，ウイングレットによる抗力の上昇効果はないと考えられる．

４―２―３　考察

結果より，この実験の風速の設定では，各ブレードの「揚力」・「抗力」の値と，最大電圧・最大電力の値には関係性がないと考えられる．また，ウイングレットのあり・なしによって「揚力」・「抗力」は変化しなかった．

よって，各ブレードによって最大電圧・最大電力が異なるのは，「揚力」・「抗力」の大きさではなく，空気抵抗の大きさが小さいほど最大電圧や最大電力は大きくなると考えられる．（４－１の考察における，⑥.3 で５V 付近での回転数の急激な減少は空気抵抗に起因するものである可能性が考えられる．）

ここで，図 14，15 より，ウイングレットを搭載することで各ブレードの最大電圧の平均値はすべて大きくなっていることが分かる．ファラデーの電磁誘導の法則によると，誘導電流の起電力は磁束の時間に対する変化率で表すことができる．また，回路に流れる電流がゼロであれば，発電機の内部抵抗を無視することができるので，起電力の大きさとブレードが回転する速度は比例の関係になるはずである．したがって，最大電圧が大きくなるということは，最大の回転速度が速くなるということである．ウイングレットの有無によってソリディティは変化しない（＝ブレードが発電機を回す力の大きさは変化しない）ので，ウイングレットを装着することによって最大の回転速度が速くなるということから，ウイングレットは空気抵抗を減らす役割があると考えられる．

４―３　ウイングレットのでっぱりの大きさについて

４―３―１　目的

目的は，ウイングレットのでっぱりの大きさの発電への影響を調べることである．

４―３―２　実験方法

「⑥.3 山谷対称＋断面放物型㋒」に搭載するウイングレットのでっぱりの大きさ p[mm]を 25mm，50mm，75mm と変化させて，最大電圧・最大電力を比較する．電圧と電力の測定方法は 3－3 に示した方法と同様である．

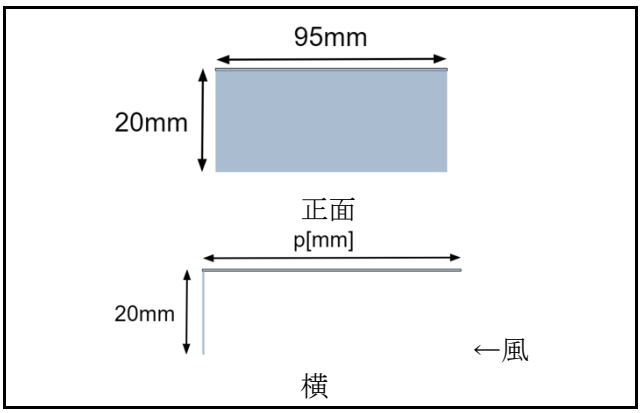


図 36：ウイングレットの概要

４―３―３　結果

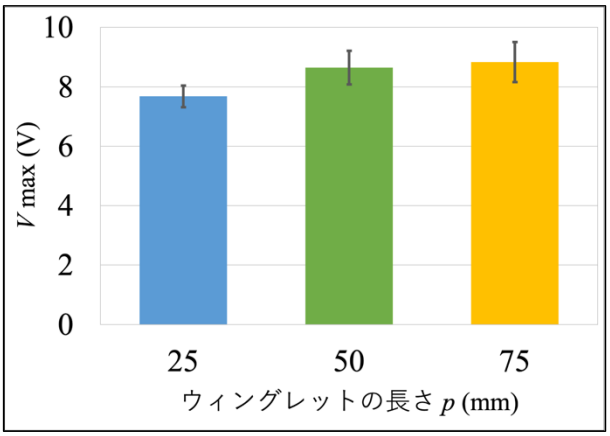


図 37：ウイングレットの長さと最大電圧のグラフ
縦軸は最大電圧 V[V]，横軸はウイングレットのでっぱりの長さ p [mm]である．

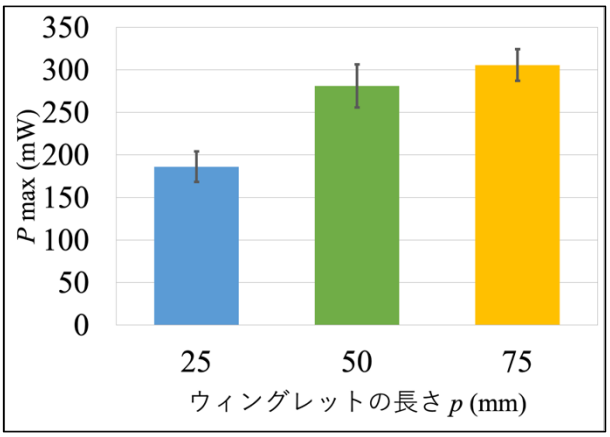


図 38：ウイングレットの長さと最大電力のグラフ　縦軸は最大電力 P[mW]，横軸はウイングレットのでっぱりの長さ p [mm]である．

図 37 より，最大電圧はそれぞれ

- p = 25mm ： 7.68±0.36V
- p = 50mm ： 8.65±0.56V
- p = 75mm ： 8.83±0.67V

また，電力はそれぞれ

- p = 25mm ： 186±18mW

・ p = 50mm ： 281±25mW
・ p = 75mm ： 306±18mW

これより，平均値で考えると p が 75mm の時に最大電力・最大電圧が最も大きくなる．最大電力は 306±18.5mW，最大電圧は 8.65±0.56V である．標準誤差を含めて考えると，p が 75mm の時と 50mm の時は有意差がなかった．また，p が 75mm の時と 25mm の時は有意差があった．

以上から，ウイングレットのでっぱりの大きさは大きいほど最大電圧・最大電力は上昇するといえる．ただし，p>75mm の条件については今後の課題である．

5． 結論

4－1 から，最大電圧・最大電力が最も大きいといえるのは⑥.3 の形状である．また，4－3 から，ウイングレットのでっぱりの大きさが大きいほど最大電圧・最大電力が大きくなる．このことから，電圧と電力をより大きくするための要素として，

①.平面加工では，ブレードの長さに対して回転方向前方に 0.12 倍，後方に 0.35 倍の深さの放物線形状とする．放物線の軸はブレードの中央である．

②断面加工では，軸が前方-後方を 2:9 で分ける位置で，高さがブレードの幅に対して 0.11 倍の放物線を作る．

③最低でもでっぱりが 50mm 程度のウイングレットを搭載する．

6． 展望

図 16 を見るとウイングレットありの場合、「⑥山谷対称+断面放物線型」の山の高さと谷の深さを大きくし，ブレードを曲げていくほど最大電圧・最大電力が大きくなっていることが分かった．しかし，断面曲げの軸の位置と曲げの大きさ，前方の山の高さと，後方の谷の深さについては調査しきれなかったので，電力を大きくする形状を調べる必要がある．

⑥.3 のブレードは 5V 付近から電圧が下がると急激に回転数が小さくなる．要因としては空気抵抗の急激な増加が考えられる．この電圧の付近をもっとよく調べれば，ブレードの特性を明らかにする結果が得られるかもしれない．

また、ウイングレットのでっぱりの大きさについての実験からの結果からウイングレットの長さが大きければ大きいほど最大電圧・最大電力が大きくなっていることがわかる．しかし今回は最大電圧・最大電力を大きくするために最も適したでっぱりの大きさはどのくらいか分からなかったため今後はよりウイングレットの長さを大きくしたもの作成して結果を比較する実験をする必要がある．

7．引用文献

[1]2022 年の自然エネルギー電力の割合(暦年・速報).環境エネルギー政策研究所.
2023―4―14.
https://www.isep.or.jp/archives/library/14364

[2]小型風力発電機定格風速.価格.com.
https://kakaku.com/

[3]伊藤駿吾,小山滉貴,宮澤太地,宮下尚也,森川翔太.生物模倣を用いた風力発電.伊那北高校.2022.

[4]矢口喜一.風車ブレードの開発～ベッツの限界に迫る～.伊勢高等学校.

[5]唐木怜,白鳥佑空,鈴木多聞,武田悠生.翼端板による揚力と抗力の変化.伊那北高校. 2021.

[6]原田敦史,黒越隆宏,小幡章.コルゲート翼を有する水平軸風車の断面形状が与える影響について. 2014.

[7]島田邦雄,WumairMuzapaer,高橋大樹.カエデの種型風車の低風速時における特性. 2012.