

〔技術報告〕

光造形方式 (MSLA) 3Dプリンタによる インドアプレーン用プロペラの試作と計測

足立 康志*¹

Prototyping and measurement of indoor plane propellers using a stereolithography
(MSLA) 3D printer

Yasushi ADACHI*¹

Abstract

A manufacturing contest for high school students is held every year at our university. The Department of Information Network Engineering holds an indoor plane for the manufacturing contest, and there are many participating schools every year. The indoor plane is a lightweight aircraft that flies indoors. According to the rules of the university's indoor plane, there is a free flight division with only the aircraft, batteries, motors, and propellers, and a radio control division that can be controlled by infrared rays. These basic parts are sent to participating schools for production, but electrical and electronic parts such as motors and batteries are relatively easy to obtain, but for propellers, select propellers of appropriate size and specifications. It was difficult to do, and even with the propellers available, I was not sure if it was appropriate, so I had no choice but to empirically confirm whether it could be used by actually using it with the staff of the university.

Moreover, since the propeller is a plastic part, there is no choice but to select an existing propeller, and it is difficult to freely produce the propeller. In this department, I had experience with 3D printers such as the Material Extrusion Modeling (FDM) method in the lectures at the Manufacturing Center and Manufacturing Exercise 1, but the prototypes made with this were inaccurate and unusable. In this research, we make a prototype propeller using the stereolithography method (MSLA) and measure how much performance it has.

Key Words : 3Dprinter, MSLA, Propeller, Indoor Plane, Thrust.

1. 緒 言

本学では高校生向けのものづくりコンテストが毎年実施されている。情報ネットワーク工学科ではものづくりコンテストには「インドアプレーンをつくろう」^①を実施しており毎年多くの参加校がある。インドアプレーンは室内で飛ばす軽量機で本学のインドアプレーンのルールでは、機体と電池、モーター、プロペラのためのフリーフライト部門と、赤外線によるコントロールができるリモコン飛行機部門がある。これらの基本的な部品を参加校に送って製作を行ってもらっているが、モーターと電池などの電気、電子部品は比較的入手しやすいが、プロペラに関しては適切なサイズ、仕様のプロペラを選定するのが難しく、また入手できるプロペラでもそれが適切であるかどうかはわからず、本学のスタッフで実際に使用してみても使えるかどうかを経験的に確認するしか方法がなかった。

またプロペラはプラスチック部品であるためすでにあるものを選定するしかなく自由に製作するのが困難であった。本学科ではものづくりセンターの保有機器や講義の使用で材料押出堆積方式 (FDM, Fused Deposition Modeling) 方式などで3Dプリンタの経験はあったが、これで試作したものは精度があまり高くなかった。しかし光造形方式 (MSLA, Masked Stereolithography) 3Dプリンタという高精度で表面が比較的なめらかなものが普及してきており、これらが実用的に使用できる可能性が出てきた。今後はプロペラ造形も「ものづくりコンテスト」の一つの要素となる可能性を考え、技術を蓄積するために、本研究ではMSLA方式の3Dプリンタを使用してプロペラを試作し、どの程度の性能

*¹ 情報ネットワーク工学科
令和3年11月15日受理

を持つかを計測する。

2. 3Dプリンタについて

3Dプリンタにはいくつかの種類があるが、現在安価に入手できる3DプリンタにはFDM方式とMSLA方式がある。FDM方式はフィラメントと呼ばれるプラスチックの線を溶融しながら積み重ねる方法で、現在の市販の3Dプリンタでは主力となっている。3Dプリンタ本体もフィラメントも比較的安価であり多くの種類の機器が各メーカーから市販されている。溶融したフィラメントをXY座標で動かしてノズルから押し出し積層させる方式のため、ノズルの穴の大きさと機械的な移動精度で製作精度が決まる。

MSLA方式は2年ほど前から増えてきた方式であり液体のUVレジンに紫外線で固める方式である。紫外線レーザーなどを点ごとに当てて固める方式もあるが、本研究で使用するelegoo Mars2 PROでは紫外線発光の液晶ディスプレイを使用して一層をまとめて露光固化できる方式を使用している。したがって、上下方向は機械的精度で、平面方向の精度は液晶ディスプレイの解像度に依存する。

造形精度では同じelegoo社のMSLA方式のMars2 PROとFDM方式のNeptune2と比べると、Mars2 PROのほうが精度が倍以上高くなっている。またNeptune2の機械的な移動精度はMars2 PROに近い所まで来ているが、Neptune2では粘度の高いプラスチックファイバーを溶かして押し出すためノズルの細さに限界があり凹凸ができてしまう。プロペラの制作の場合は空気の流れをなめらかにするために、造形物の表面もできるだけ滑らかにできることが望ましいため、精度の高いelegoo Mars2 PROのほうが良いと考えた(表1)。

本研究ではこのMSLA方式のelegoo Mars2 PRO(図1)(図2)を用いて試作を行う。今回の製作では層の厚さを標準の0.05mm(50um)として使用している⁽²⁾。

表1 FDM方式とMSLA方式の精度の違い

	印刷方式	層の厚さ	印刷精度/ 液晶解像度	ノズル直径
elegoo Neptune2	FDM	0.1~0.4mm	±0.1mm	0.2~0.4mm
elegoo Mars2 PRO	MSLA	0.01~0.2mm	0.05mm	なし



Fig. 1 試作に使用した3Dプリンタ



Fig. 2 製作中の様子

3. プロペラの設計と製作

プロペラは代表的な NACA 翼型を参考にして、強度を維持するために若干厚みをもたせて設計した。設計のためのソフトウェアには FreeCad0.19を用いた。翼長による性能の違いを計測するために初期値として22.5度の傾きの翼型を設計し (図3), その翼型の長さや傾きを調整して、20mm, 30mm, 40mm のプロペラ, それぞれの4枚翼, 2枚翼のピッチを変更したもの (表2) (図4) を作成した。表2にある uncell 60mm は市販品のものである。プロペラの直径は翼の長さを中心軸の部分5mmが合わさったものとなっており30mmの翼の場合はプロペラの直径は、翼の長さ×2 + 5mm = 65mmとなる。翼の長さや枚数, 傾きの作り分けに関しては FreeCad で作成されており, 形状を直線と

表2 製作, 計測したプロペラの仕様

ラベル	羽根長	直径	ピッチ	枚数	
	mm	inch	度		
30mm×2_07.5	30	2.6	7.5	2	製作
30mm×2_12.5	30	2.6	12.5	2	製作
30mm×2_17.5	30	2.6	17.5	2	製作
30mm×2_22.5	30	2.6	22.5	2	製作
30mm×2_27.5	30	2.6	27.5	2	製作
30mm×2_32.5	30	2.6	32.5	2	製作
20mm×2_22.5	20	1.8	22.5	2	製作
40mm×2_22.5	40	3.3	22.5	2	製作
20mm×4_22.5	20	1.8	22.5	4	製作
30mm×4_22.5	30	2.6	22.5	4	製作
40mm×4_22.5	40	3.3	22.5	4	製作
uncell 60mm	27	2.3	16	2	市販品

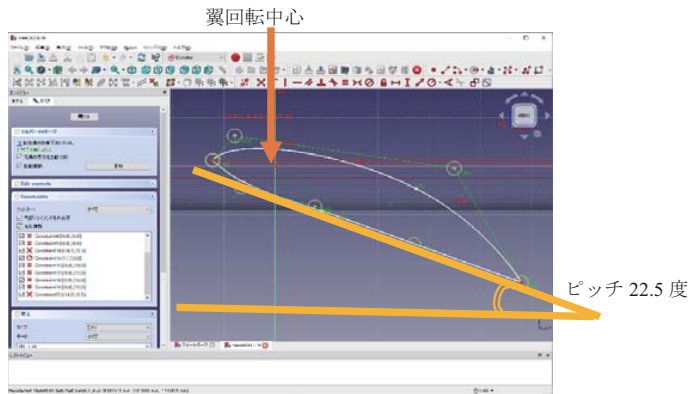


Fig. 3 FreeCad による翼型設計

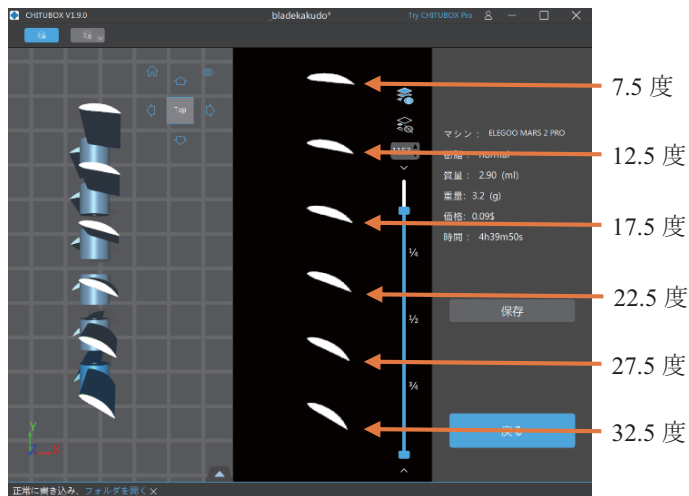


Fig. 4 プロペラの断面

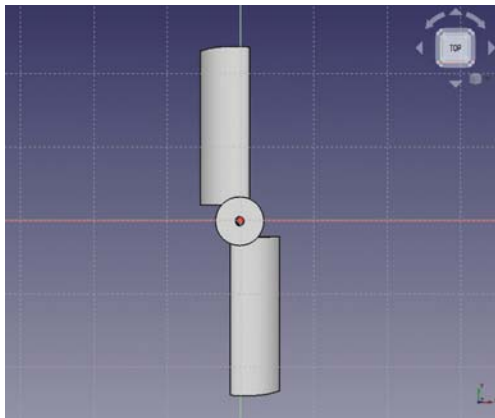


Fig. 5 20mm 2枚翼

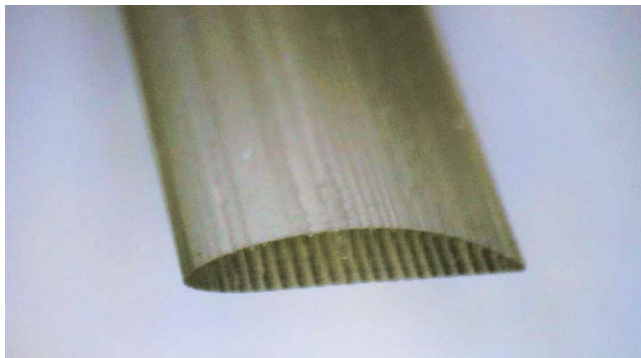


Fig. 6 製作したプロペラ (拡大)

してパラメータを若干いじるだけで変更できるように設計している。プロペラのねじれや太さや幅の変化があると、翼長やピッチを変える際にCAD設計が非常に難しくなるので今回は断念し、ねじれを持たない直線翼として作成した(図5)。

3Dプリンタによる製作ではクリア(透明)レジンを使用し、一層あたり0.05mm、露光時間6秒で設定している(図6)。実際に製作したところ設計データとの差異が若干あり、モーター軸の穴が狭くて固い、入りにくいという問題が発生しドリルで加工した。またこの3Dプリンタはプラットフォーム側の広い平面が変形すると言う問題があり、それについては洗浄硬化後に紙やすりで研磨加工した。また、そのためにプロペラ面がプラットフォーム側の変形面にならないように製造方向を調整している。

4. 計測手法について

プロペラの計測については、プロペラごとに推力、回転数、モーターの電流を計測した。モーターはNewone 7x16 mm コアレスモーターを使用した。プロペラは3章で設計製作したものと、今まで競技で供給していたuncell 60mmを計測した。モーターの給電にはHANMATEK 可変直流安定化電源 HM305を使用した。推力はHanchen 2N デジタ



Fig. 7 デジタルフォースゲージ



Fig. 8 デジタル非接触回転計

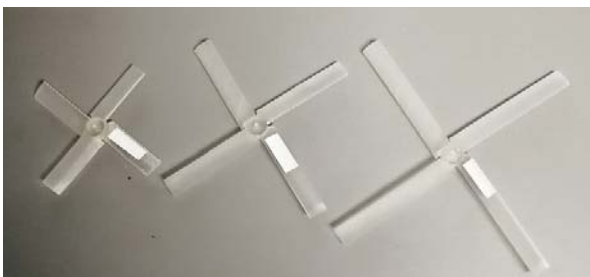


Fig. 9 回転計測用反射シール

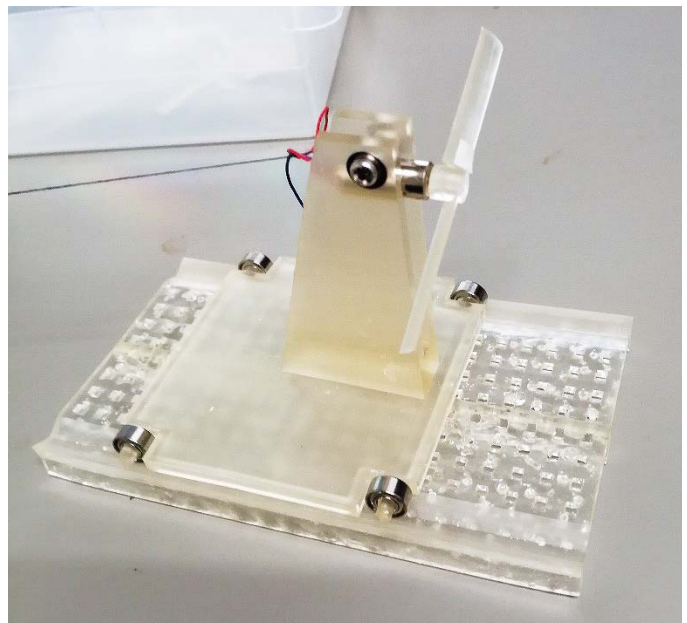


Fig. 10 プロペラ固定治具

ルフォースゲージを使用した (図7)。回転数はKKmoon デジタル回転計 GM8905 (図8) を使用した。これは非接触でプロペラに反射シールを取り付けてレーザーで計測するものである (図9)。プロペラやモーターなどの取り付けには3Dプリンタでジグを作成している (図10)。電圧、電流に関してはテスターのSANWA CD-800aを使用した。

5. プロペラの発生する推力と測定結果

5・1 プロペラの推力の計算

4章の計測器や製作物を使い、運転して推力、回転数、使用電力などを計測した。計測には表2のプロペラを製作したものを使用した。

本研究で行った計測は静止推力であり移動時 (飛行時) の計測は行っていない。飛行時の計測は困難であり厳密に実施するには風洞による計測や移動台車などを使用する必要があるが、今回は使用していない。

静止推力の計算はプロペラ直径の3乗、回転数の2乗で表され、

T : 静止推力 (g)

D : 直径 (inch)

P : プロペラピッチ (inch)

R : プロペラ回転数 (rpm)

K : プロペラ係数

のとき、 $T=(D/10)^3 \times (P/10) \times (R/1000)^2 \times K$ となる⁽³⁾。

プロペラ係数 K はレイノルズ数や形状による空気抵抗の違いなどを包含する係数である。いくつかの文献にあたった結果、模型飛行機用のプロペラでは係数 K は20~30の範囲のようであった。

下記の表3、表4、表5の計算推力は実推力と回転数からプロペラ係数を計算し、そのプロペラ係数から算出したものである。したがってプロペラ係数が各プロペラを含む諸条件を吸収しているため計算推力は実推力と同じになっている。

ここで使用するプロペラピッチは翼の傾きを表すものであるが、ネジの溝の傾きのように滑りがない場合に一周したときにどのくらい前に進むかを inch で示したものであり、先端の一周の距離を、羽根の傾きを θ とする $\tan\theta$ で掛けたものである。推力係数とトルク係数が測定できればプロペラ効率も計算できるが、トルクを計測する手段がなかったので断念した。その代わりに電力あたりの推力を計算したものを表3、表4、表5に入れている。これはモーターの損失も含んでおり正確なトルクは計測できないが参考のために乗せておくことにする⁽⁴⁾。

5・2 2枚翼の計測結果

まず、それぞれ翼長20mm、30mm、40mmのプロペラをそれぞれ計測してみた。その結果、20mmのものが一番推力が高かった。この範囲ではプロペラの回転数が高いほど推力が高い傾向があると見られる (図11)。翼長が長くなれば空気抵抗などにより回転数が下がるが、翼長が長い分先端速度は早くなるため推力はそれほど低下していない (表3)。

DCモーターの特性上、同じ電圧であれば高速で回転すれば電流量が小さくなるため電力効率も良くなる。直径が小さいプロペラは空気抵抗が小さく高速回転できるので、20mm翼が最も推力が高く電力効率も良い結果になった (図12)。また、いままで提供していた市販品のプロペラも参考のために計測した。薄くピッチも小さいため回転数は高いが推力は低めの値になっている。

表3 2枚翼の長さの違いによる計測結果

ラベル	翼長 mm	直径 inch	ピッチ 度	プロペラ ピッチ inch	回転数 rpm	計算推力 g	実推力 g	先端速度 m/s	電流 A	電圧 V	電力 W	推力/w mN/W	係数 K
20mm×2_22.5	20	1.77	22.5	2.31	15879	9.18	9.18	37.41	0.480	3.7	1.78	50.68	28.41
30mm×2_22.5	30	2.56	22.5	3.33	8550	8.47	8.47	29.10	0.628	3.7	2.32	35.72	20.76
40mm×2_22.5	40	3.35	22.5	4.35	5196	6.63	6.63	23.13	0.685	3.7	2.53	25.65	15.05
市販品	27	2.32	16	2.09	14113	6.12	6.12	43.60	0.507	3.7	1.88	31.98	11.72

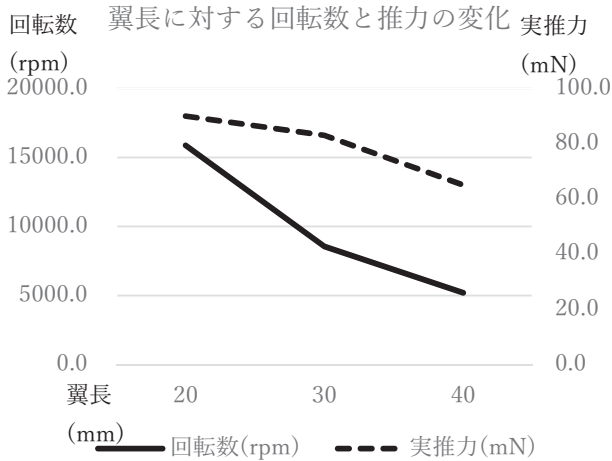


Fig. 11 2枚翼の翼長に対する回転数と推力の変化

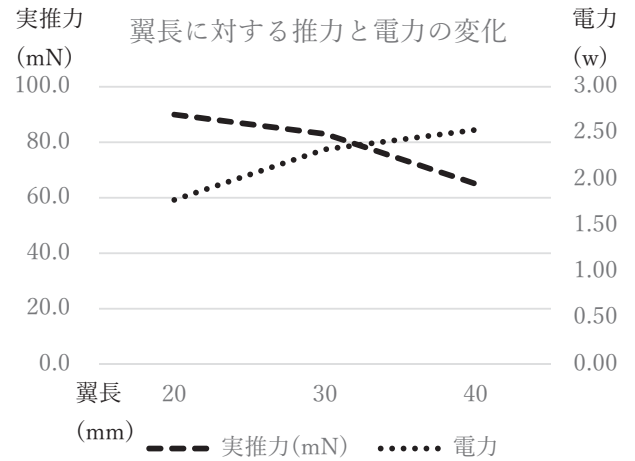


Fig. 12 2枚浴の翼長に対する推力と電力消費の変化

5・3 4枚翼の計測結果

翼長20mm, 30mm, 40mmのプロペラをそれぞれ計測した. その結果, 今度は30mmのものが一番推力が高かった (表4). 4枚翼は2枚翼に比べて空気抵抗が大きくなるため2枚翼より回転数が下がる傾向にあり, 枚数が多くても回転数が下がるため推力は上がらないどころかむしろ下がる傾向にあった (図13). 4枚翼は空気抵抗が大きくなるため回転数の低下も激しい. 30mm翼のときに推力は増加したが40mm翼では回転数の低下のほうが大きく, 電力消費は上昇したが推力は大幅に低下した (図14).

表4 4枚翼の長さの違いによる計測結果

ラベル	翼長 mm	直径 inch	ピッチ 度	プロペラ ピッチ inch	回転数 rpm	計算推力 g	実推力 g	先端速度 m/s	電流 A	電圧 V	電力 W	推力/w mN/W	係数 K
20mm×4_22.5	20	1.77	22.5	2.31	12517	6.33	6.33	29.49	0.542	3.7	2.01	30.92	31.50
30mm×4_22.5	30	2.56	22.5	3.33	6625	7.24	7.24	22.55	0.654	3.7	2.42	29.34	29.58
40mm×4_22.5	40	3.35	22.5	4.35	3918	6.12	6.12	17.44	0.706	3.7	2.61	22.97	24.44

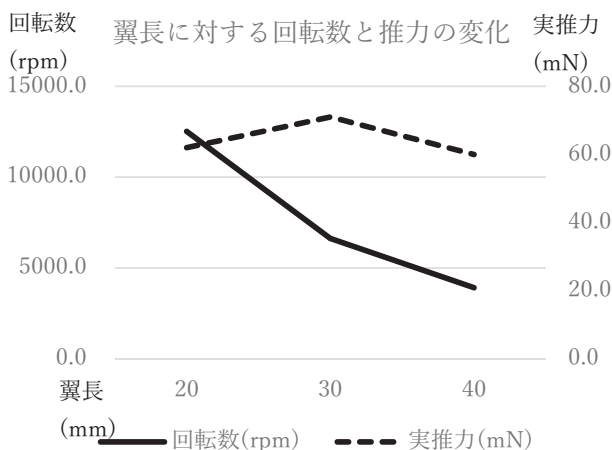


Fig. 13 4枚翼の翼長に対する回転数と推力の変化

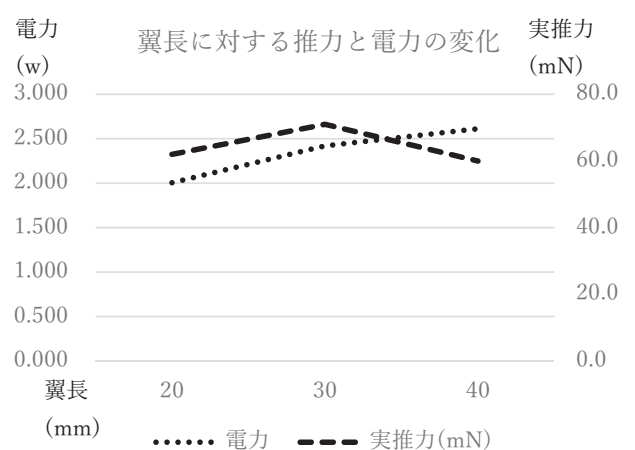


Fig. 14 4枚浴の翼長に対する推力と電力消費の変化

5・4 ピッチを変更した場合の計測結果

この計測をする前にモーターが故障しモーターを交換した. ここで使用している Newone 7x16mm コアレスモーターはばらつきが大きく条件が同じでもトルクや回転数が変わって以前のデータの (表3), (表4) の22.5度でも同じにはならないため, あくまでも傾向を把握するための参考とする. 翼長30mm 2枚翼のプロペラを7.5度から32.5度までの

5度刻みで6枚作成し、それぞれを計測した。

表5が計測結果である。実推力は12.5度のときに最も強くなり、それより角度が小さい7.5度では推力が低下した。また、22.5度までは若干の低下で安定していたが27.5度から急速に低下した(図15)。12.5度のときに最も推力が高いがこれは静止推力である。飛行する際にはその速度分だけ角度が小さくなる効果が生じるため、プロペラを12.5度に設定すると飛行するときは図15の12.5度の左の推力が小さい方向に寄ってしまうと考えられる。22.5度に設定しておけばそれほど推力の低下も大きくないことと、回転数とプロペラピッチから秒速8m、時速28km程度まではあまり推力の低下が起こらないと推定できる。実際にインドアプレーン大会の出場機によっては長距離を連続して飛んだ機体があり、それらはその領域にうまく収まった可能性がある。インドアプレーンで使用されたuncell 60mmのプロペラは16度である。電力は角度に対して緩やかに上昇傾向だった。22.5度を超えても電力消費は下がらず推力が下がり続けているので、推力が下がる部分は効率が低くなっていると考えられる(図16)⁽⁵⁾。

表5 角度の違いによる計測結果

ラベル	翼長 mm	直径 inch	ピッチ 度	プロペラ ピッチ inch	回転数 rpm	計算推力 g	実推力 g	先端速度 m/s	電流 A	電圧 V	電力 W	推力/w mN/W	係数 K
30mm×2_07.5	30	2.56	7.5	1.06	13825	5.20	5.20	47.05	0.521	3.7	1.93	26.46	15.35
30mm×2_12.5	30	2.56	12.5	1.78	11937	7.35	7.35	40.63	0.556	3.7	2.06	35.00	17.26
30mm×2_17.5	30	2.56	17.5	2.53	10039	7.14	7.14	34.17	0.594	3.7	2.20	31.85	16.68
30mm×2_22.5	30	2.56	22.5	3.33	8651	7.14	7.14	29.44	0.619	3.7	2.29	30.56	17.10
30mm×2_27.5	30	2.56	27.5	4.19	7505	5.10	5.10	25.54	0.641	3.7	2.37	21.08	12.92
30mm×2_32.5	30	2.56	32.5	5.12	6797	4.69	4.69	23.13	0.647	3.7	2.39	19.22	11.84

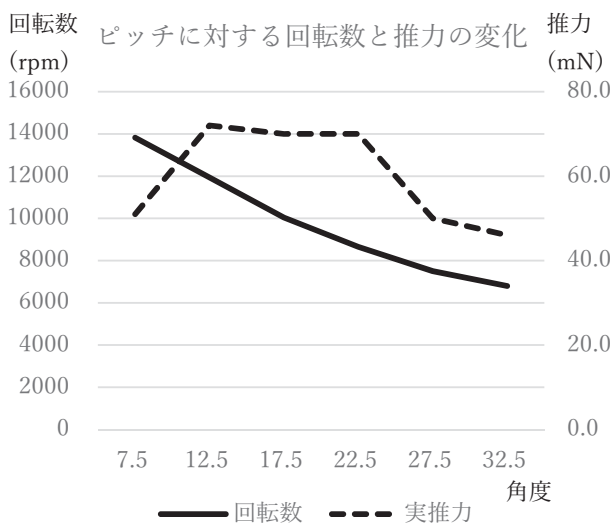


Fig. 15 ピッチに対する回転数と推力の変化

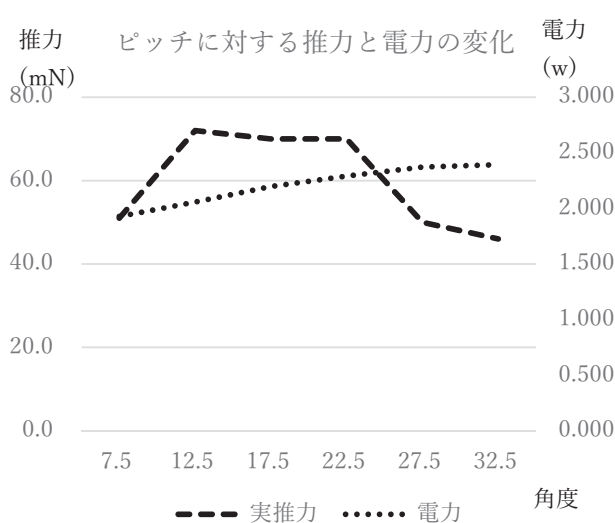


Fig. 16 ピッチに対する推力と電力の変化

7. 結 語

本研究ではMSLA式の3Dプリンタを使用してプロペラを作り、それらの性能を計測した。はじめの予想では長い翼を使用し枚数を増やせば推力が上がると考えていたが、長い羽根では負荷が増えることで回転数が下がるため性能が下がる局面もあった。プロペラの推力には適切な回転数と角度を維持する必要がある、むしろ回転数を下げないように可能な範囲内で直径や角度による抵抗を減らすほうがよいということがわかった。また、製作したプロペラは実験で破損することはなかったが、固くて割れやすくインドアプレーンコンテストで高校に配布した場合には破損が増える可能性も判明した。UVレジンを用いたMSLA式3Dプリンタでは最近では新しい素材も現れており破損についても検証していきたいと考える。

文 献

- (1) <http://www.kurume-it.ac.jp/in/ip/>, インドアプレーンを作ろう2021, 令和4年1月13日参照.
- (2) <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>, Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology, 令和3年10月20日参照.
- (3) 日本航空技術協会著, “航空工学講座 第6巻 プロペラ”, 日本航空技術協会, 2012年3月1日.
- (4) 赤坂剛史, 大澤忠明, 金平徳之, “小型無人飛行体に搭載するプロペラの高効率化について”, 川田技報 Vol29, 2010.
- (5) 小野浩平, 佐藤淳, “翼素理論に基づくプロペラの推力トルク連成運動のモデル化”, 計測自動制御学会東北支部, 第315回研究集会, 2018. 5. 21.