
切削加工より製作されるクアッドコプター用 小径プロペラの騒音解析

Development of quiet propellers for a vertical takeoff and landing-type quadcopter

●
鈴木 翔平
機械サイエンス専攻 学生
菅 洋志
機械サイエンス学科 助教

●
Shouhei SUZUKI
Dept. of Mechanical Science and Engineering, Student
Hiroshi SUGA
Dept. of Mechanical Science and Engineering,
Assistant Professor

●
2016年9月16日受付

●
Received : 16 September 2016

The quadcopter has been spotlighted in recent years as an unmanned aircraft used for aerially transporting goods to remote areas during disasters. An advantage of the quadcopter is that it can be used in a narrower flight airspace than a fixed-wing aircraft, as the quadcopter has a vertical rise and vertical drop. However, there are a number of issues associated with quadcopters, such as safety and noise. Noise is generated by the propeller. Especially, for small quadcopters, the noise generated by rotation is serious because of the high-speed rotation of the small propeller. However, there are few reports on reducing the noise by small propellers. Conventional small propellers are made using parameters such as size and twist angle, but sufficient consideration has not been given to the propeller's surface roughness. Therefore, we cleared the surface-roughness dependence and size-dependence on the noise. Propellers of various sizes and surface roughnesses were fabricated by NC machining, and their resulting noise was measured. We found that the surface roughness of the propeller blade influences the rotation noise of the small propeller.

キーワード：クアッドコプター，プロペラ，騒音

1. 序論

近年、救援目的とした AED（自動体外式除細動器）の運搬や地震などの災害時に無線の中継機として利用する無線中継伝送¹⁾、ダムや橋などの社会インフラ設備におけるクラックの検出²⁾、防犯システム³⁾、遠隔地への物資の運搬など多岐の目的において無人航空機（UAV）であるクアッドコプターが注目されている。

クアッドコプターは、固定翼機と比べて垂直上昇や垂直降下、ホバリング（空中停止）ができるため狭い飛行空域で使用できるという利点がある。しかし、墜落、衝突事故などの安全性やモータの駆動音、プロペラの回転音などによる騒音が問題になっている。クアッドコプターにより引き起こされる墜落や衝突事故の形態としては、墜落や多物体への衝突ないし異常接近、対人事事故などがある。首相官邸無人機落下事件やホワイトハウスへの墜落事故などは、制御を失ったクアッドコプターが重要施設へ墜落した事件

である⁴⁾。これらの事故を契機に各国で重要施設周辺での飛行が規制・禁止されるようになった。また、航空機への異常接近による飛行妨害事件なども起きている⁵⁾。クアッドコプターは、複数のロータ（モータとプロペラ）が高速回転することにより飛行することができる。しかし、ロータが高速回転するとモータの駆動音やプロペラの回転音により大きな騒音が発生する。クアッドコプターが急激に普及し街中や観光地など多くの場所で使用されるようになり、クアッドコプターの音によるトラブルが多発し、社会問題となることが懸念されている。すでに、米国では、このクアッドコプターの騒音と墜落などの危険性が相まって国立公園などでのクアッドコプターの使用が禁止になった例もある。

低騒音なクアッドコプターを製作するためには、騒音の原因とされるプロペラの回転音やブラシレスモータの駆動

音を低くする必要がある。ブラシレスモータは、電気モータの中でもブラシによる摩擦がないため静かで低振動のモータである。本研究では、3Dプリンターや3D切削機の普及で自在に翼形状を選び自作できるようになったプロペラに注目した。一般的に小径の樹脂プロペラは射出成形で作られているため、その表面粗さがRa 1.6程度と十分に小さいため騒音への影響は少ないと考えられてきた。それに対し、3Dプリンターや3D切削機で作製した場合、表面粗さは加工時間（コスト）によってRa 1.6～Ra25と大きく異なるが、小径プロペラの表面粗さと騒音の影響を調べた報告は我々の知る限りない。

そこで本報告では、一般的にクアッドコプターのプロペラの材料に使用されている樹脂材料を用い、直径および表面粗さが異なるプロペラを切削加工で製作し、プロペラ直径、および、翼面の表面粗さが騒音にどのような影響を与えるかについて調査を行った。直径126 mm以下の小径プロペラでは一般的なプロペラよりも騒音が増大し、推力が低下することを実験より明らかにした。そして、これらの影響を有効半径の減少と解釈することで、一般的な騒音・および推力の計算式より計算できることを明らかにした。また、翼面の表面粗さは騒音に影響し、表面粗さが大きいほど騒音が大きくなることを実験より確かめ、この騒音の増大を有効半径の減少として補正することで一般的な騒音の式より計算できることを示した。

2. 原理

2-1 クアッドコプターとは

マルチコプターは、マルチ・ロータ機とも呼ばれ、胴体中央部から放射状に配置される複数のロータを配置する形態である。図1のようにマルチコプターには複数のロータを持つ機体がある。ロータの反力を打ち消すために、右回りおよび左回りの回転方向のロータを交互に配置している。マルチコプターは、ローター・ブレードに固定ピッチのプロペラを搭載するものがほとんどで、各プロペラの回転数のみを変化させて飛行することができる。また、マルチコプターはすべてのロータ回転数を同時に増減することによって上昇や下降をさせることができる。前後のロータ

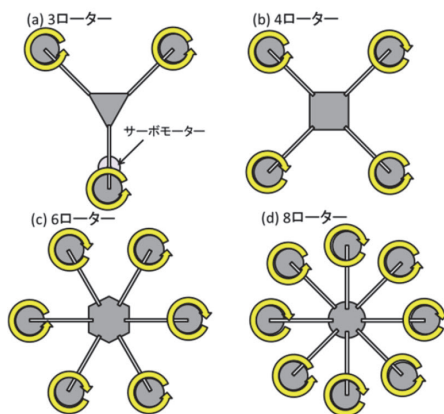


図1 マルチコプターの種類⁶⁾

回転数を別々に増減させることで機体姿勢を前傾もしくは後傾させ、傾いた方向に進むことができる。さらに、左右のロータ回転数を別々に増減させることで機体を左側もしくは右側に傾かせて、傾いた方向に進ませることもできる。

本報告では、上記の4種類のマルチコプターの中で4ロータであるクアッドコプターを取り上げる。クアッドコプターは、図2のように正方形の各頂点に回転の中心軸がくるようにロータを配置したものである。フレームが正方形の対角線を構成し、対角線の先端にブラシレスモータなどの電気モータを取り付け、モータの回転軸がロータのプロペラの回転軸と直結した構造となっている。

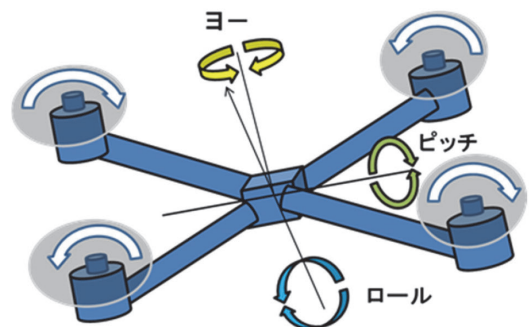


図2 クアッドコプターの構造

2-2 プロペラ回転音

プロペラの回転音が発生する理由として推力を発生する時に同時に生じる抗力がある。図3は、発生する抗力の種類である。

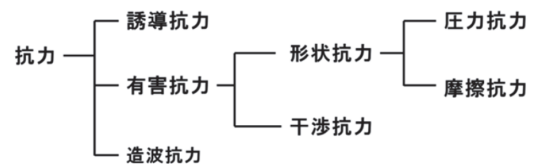


図3 発生する抗力の種類

誘導抗力とは、翼が揚力を発生する際に副次的に発生する抵抗のことである。揚力が発生するときに翼端では、翼端渦と呼ばれるものが発生する。この翼端渦は翼にあたる気流を下げる方向となり抗力を発生する。形状抗力とは、抗力のうち物体の形状のみ依存して変化する抗力である。形状抗力は、物体まわりの空気が剥がれ、後方に渦を作り圧力が低下することによって物体を後方に引っ張ろうとする圧力抗力と、物体表面に付着して流れる空気の摩擦によって生じる摩擦抗力に分けられる。ある物体まわりの空気の流れは、傍に別の物体を持ってこることによって影響を受け、流れの様子が変化するとともにそこに作用する空気力が変化する。この現象を干渉と呼び、干渉によって生じる抗力が干渉抗力である⁷⁾。プロペラの回転音は、ブレード

(翼) が流体を押し退けるために発生する翼厚音, ブレードが推力を発生するときに出る荷重音, 流体が物体の回り流れすぎるときに発生する渦や衝撃波などに起因する音が原因である. 流体が物体の回り流れすぎるときに発生する渦や衝撃波などに起因する音はブレード先端から生じる翼端渦とカルマン渦によって生じる音である. 翼端渦とカルマン渦の模式図を図4に示す. 翼端渦とは, プロペラの中心から先端に行くにつれて上面と下面に圧力差が生じることによって発生する. あるブレードから発生する翼端渦やカルマン渦が他のブレードと干渉することにより抵抗力が生じ, 音が発生する⁸⁾.

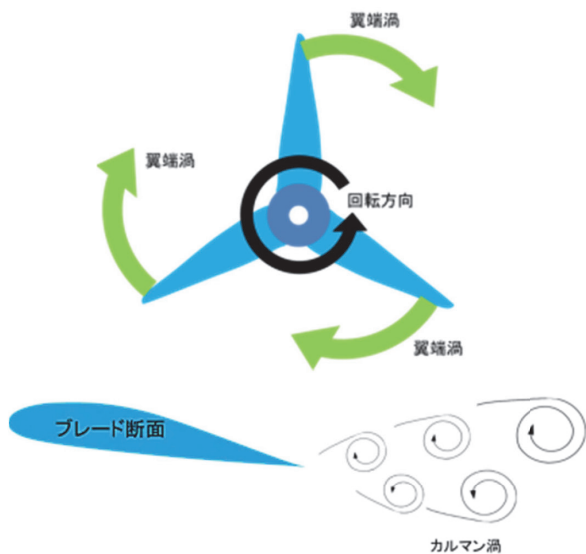


図4 プロペラ回転音の発生源

プロペラ騒音の音圧はプロペラ翼に作用する力学的な力によって発生するが, 定常的な力と非定常的な力に分けることができる. プロペラ騒音は, 定常的な推力とトルクによって発生することが知られており, 推進速度0の場合のプロペラの回転によって発生する音圧は以下の式となることが知られている.

$$p = \left(\frac{m B M_e}{2\sqrt{2}\pi S_0 R_e} \right) \left(\frac{-T \cos \delta + P}{c M_e^2} \right) (m \cdot B \cdot M_e \cdot \sin \delta) \quad (1)$$

ここで, p : 音圧, m : harmonic number, B : プロペラ翼の枚数, S_0 : 測定点までの距離, R : プロペラの半径, R_e : 有効半径 $0.8R$, T : 推力, c : 音速 (331.45 m/s), M_e : マッハ数, δ : 測定点とプロペラ軸の間の角度, そして, P : プロペラのトルクを表している⁹⁾. しかしながら, 式(1)は航空機, ヘリコプターなどの大型のプロペラの実験結果から導いた法則であるため, 小径プロペラに適用できるかは未知である.

2-3 プロペラの推力

プロペラの回転音は, ブレードが推力を発生するときに出る荷重音が主たる原因である. プロペラにおける推力は

以下の式で求めることができることがよく知られている.

$$T = \left(\frac{D}{10 \times 25.4} \right)^3 \times \left(\frac{P}{10 \times 25.4} \right) \times \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \times 0.22 \quad (2)$$

ここで, T は推力, D はプロペラ直径, P はプロペラのピッチ, N はプロペラ回転数である¹⁰⁾.

3. 実験方法・測定条件

3-1 ABS樹脂プロペラの製作

プロペラの作製方法について記述する. プロペラの翼型は一般的な翼形状のひとつである NACA0012 翼型¹⁰⁾で振り角 45° で設計を行った. プロペラに必要な条件である耐衝撃性や高い剛性を持ち, 加工も容易な ABS樹脂 (アクリルトリル-ブタジエン-スチレン樹脂) のブロックから, NC 切削機 (SRM-20, Roland DG 株式会社) を用いてプロペラを削り出した. プロペラの表面粗さとプロペラ直径を変化させて回転音の測定を行うため, 直径 140 mm, 126 mm, 112 mm, 98 mm のプロペラを製作した. プロペラの表面粗さは, NC 切削機のエンドミルの切削する間隔 (パス間隔) を変化させて製作する. 図5に製作したプロペラの一例の光学写真を示す. このプロペラは, 直径 140 mm, 振り角 45° , 表面粗さが Ra18.2 のパラメータで製作したプロペラである. 表1に本報告に使用したプロペラのパラメータを示す.

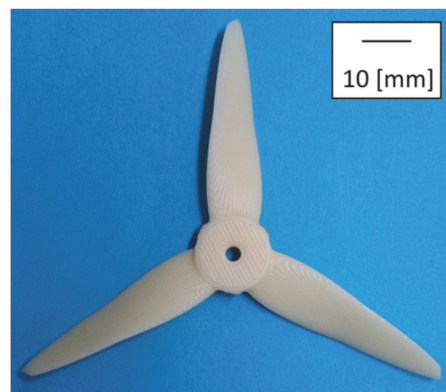


図5 製作したプロペラの光学写真の一例

表1 本報告で使用したプロペラのパラメータ

	直径 [mm]	表面粗さ [μm]	振り角 [$^\circ$]	翼の枚数 [枚]
1	98	18.2	45	3
2	112	17.8	45	3
3	126	17.3	45	3
4	140	18.2	45	3
5	140	9.6	45	3
6	140	5.2	45	3
7	140	2.8	45	3

3-2 騒音計測方法

プロペラの回転音測定の実験方法の概略を図6に示す. ブラシレスモータ (ARRIS 2204, ARRIS) に直流安定化

電源 (PD35-20, Kenwood) からの電流を流し, その間に ESC (ARRIS 12A 2-3S ESC) と受信機を挟むことでブラシレスモータに流れる電流量を制御しモータの回転数を制御する. プロペラの回転数を回転計 (株式会社カスタム製, RM-2000) で測定し, 回転数が 200 rpm ごとに騒音計 (株式会社オンソク製, OS-11) で回転音を測定する. 表 2 に回転音を測定する測定条件を示す. プロペラ軸から騒音計までの距離は 300 mm に固定した.

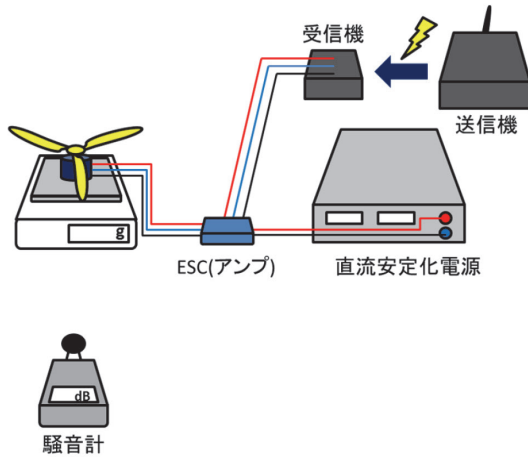


図 6 プロペラ回転音測定の実験概略図

4. 結果および考察

4-1 プロペラ推力のプロペラ直径依存性

プロペラの回転音は, ブレードが推力を発生するときに出る荷重音が主たる原因である. 小径プロペラにおける推力が従来の式と一致するかを調べた. 図 7 に小径プロペラの測定した推力を示す. 各プロットはプロペラの直径を示しており, 推力はプロペラ直径に依存性して変化することがわかる. なお, 直径 112 mm, 98 mm における低回転数領域の推力は, 計測の分解能が不足したことにより正確に計測できなかった, 破線は式 (2) より導いた値である. 直径 140 mm, 126 mm については, 実験値とよく一致しているのに対し, 直径 112 mm, 98 mm については乖離が認められる. 乖離はプロペラが小径になったことにより, 実効的な半径が小さくなったために起こったと考えられる. そこで, 式の有効直径 D' を以下のように定義し, 直径 112mm 以下のプロペラの推力を推定するための補正式を (2)' のように与えた.

$$T = \left(\frac{D'}{10 \times 25.4} \right)^3 \times \left(\frac{P}{10 \times 25.4} \right) \times \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \times 0.22 \quad (2)'$$

$$\text{ここで, } D' = \eta D, \eta = \sqrt{D/126}$$

図 8 に示すように, 補正式 (2)' より求めた計算値は小径プロペラの実験値に一致した.

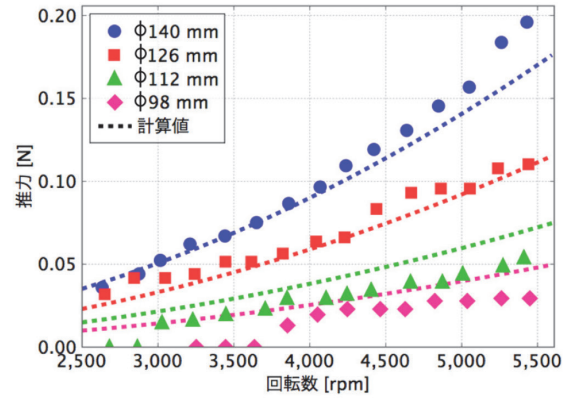


図 7 プロペラ推力のプロペラ直径依存性

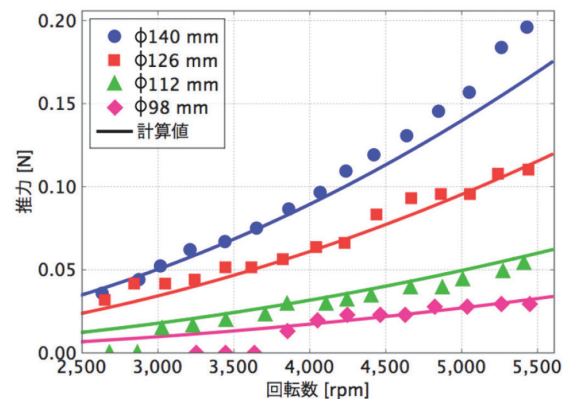


図 8 プロペラ推力のプロペラ直径依存性

4-2 プロペラ回転音とプロペラ直径との関係

図 9 にプロペラ直径と回転音の依存性を示す. 各色のプロットはそれぞれ直径での実験値である. プロペラの直径が大きくなるほど回転音も大きくなった. 破線は式 (1) より計算した騒音値である. 式 (2)' により与えたトルクを式 (1) に与えて求めた. いずれの直径においても式 (1) の値との大きな乖離が認められた. これは, 推力と同様, プロペラが小さくなることにより, 有効半径 R_e が小さくなったためと考えられる. プロペラ有効直径が小さくなると回転面積が小さくなり翼表面に発生する抵抗が減少したため, 回転音を発生させる抗力も減少する.

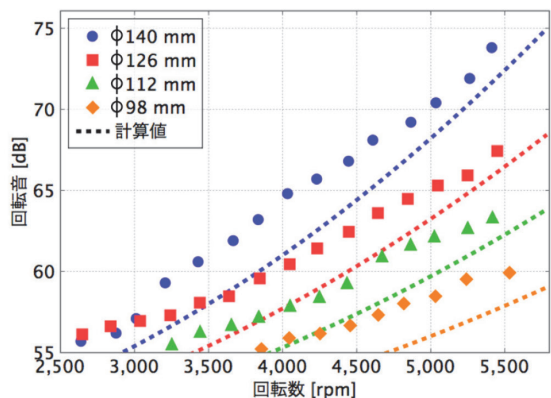


図 9 プロペラ回転音と直径との関係

小径プロペラの騒音式を推定する補正式を作るため、実験結果より有効半径 R_e' を以下のように与えた。有効半径 R_e' は ϕ 140 mm, ϕ 126 mm, ϕ 112 mm, ϕ 98 mm においてそれぞれ, 114.2 mm, 102.8 mm, 89.5mm, および 77.5 mm となり, 半径に依存して変化する。この R_e' を考慮した騒音を次式で計算する。

$$p = \left(\frac{mBM_e}{2\sqrt{2}\pi S_0 R_e'} \right) \left(\frac{-T \cos \delta + P}{cM_e^2} \right) (m \cdot B \cdot M_e \cdot \sin \delta) \quad (1)'$$

$$\text{ここで, } R_e' = (0.6 \times 10^{-3})R^2 + 0.732R$$

図 10 に示すように回転の実験値は, 補正式 (1)' を用いて表すことができる。

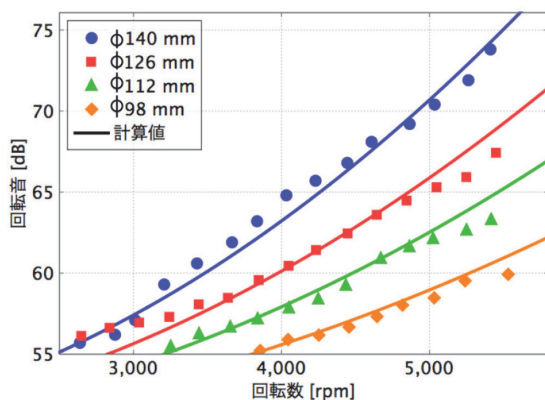


図 10 プロペラ回転音と直径との関係

4-3 プロペラ回転音のプロペラ翼表面粗さ依存性

翼の表面粗さが異なる 4 つのプロペラで回転音の測定を行い, プロペラ回転音のプロペラ翼表面粗さ依存性を調べた。その測定結果を図 11 に示す。横軸は回転数, 縦軸は回転音を表している。各色のプロットは, 表面粗さを示す。ここで, (1)' 式と (2)' 式より求まるプロペラ音の値を実線で示す。同じ直径のプロペラでも翼の表面粗さが粗くなるにつれて回転音も大きくなっており, Ra 18.2 と Ra 2.8

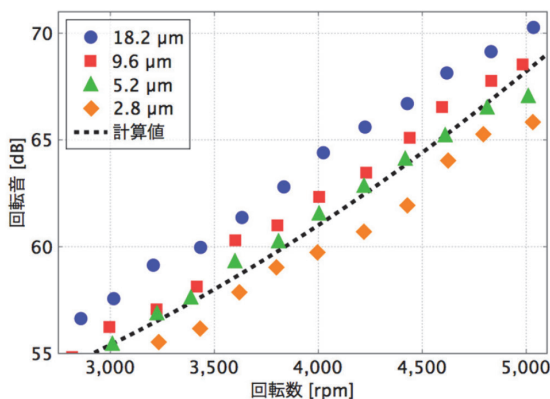


図 11 プロペラ回転音の表面粗さ依存性

では 10% 程度の差が認められる。プロペラ翼の表面粗さが粗いほど表面の凹凸が大きくなり, プロペラに進入する気流が剥離を起こしやすくなるため, この剥離によって生じたカルマン渦がプロペラの回転音に影響を与えたと考えられる。

そこで, 表面粗さの影響を考慮したプロペラ回転音の推定を行うため, 式 (1)' を補正した式 (1)'' を提案する。表面粗さを考慮し, 有効半径 R_e'' を以下のように定義する。

$$p = \left(\frac{mBM_e}{2\sqrt{2}\pi S_0 R_e''} \right) \left(\frac{-T \cos \delta + P}{cM_e^2} \right) (m \cdot B \cdot M_e \cdot \sin \delta) \quad (1)''$$

$$\text{ここで, } R_e' = (0.6 \times 10^{-3})R^2 + 0.732R,$$

$$r: \text{表面粗さ} [\mu\text{m}], R_e'' = R_e' \times \eta'$$

$$\eta' = (0.2 \times 10^{-3})r^2 - 0.0089r + 1.0417$$

図 12 に示すようにプロペラ回転音を, 表面粗さの効果を反映した式 (1)'' により推定することができる。

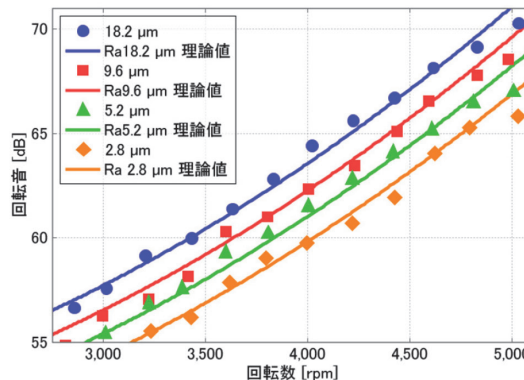


図 12 プロペラ回転音の表面粗さ依存性

5. まとめ

切削加工より製作される小径プロペラの形状と騒音の関係进行调查するために, 直径および表面粗さが異なる樹脂プロペラを切削加工で製作し, プロペラ直径, および, 翼面の表面粗さが騒音に与えるかについて調査を行った。直径 126 mm 以下の小径プロペラでは一般的なプロペラよりも騒音が増大し, 推力が低下することを実験より明らかにした。また, 翼面の表面粗さは騒音に影響し, 表面粗さが大きいほど騒音が大きくなることを実験より確かめた。そして, 小径プロペラ, および表面粗さの影響を有効半径の減少として補正することで, 一般的な騒音・および推力の計算式より計算できることを示した。以上より, 切削加工より製作される小径プロペラの騒音設計が可能である。

参考文献

- 1) 野波健蔵：日本ロボット学会誌, vol.34, No2, 2016, pp74-80.
- 2) 貝應大介：日本航空宇宙学会, vol.64, No.8, 2016 pp242-247.
- 3) 高橋亮輔：電気学誌, vol.136, No.9, 2016, pp623-626.
- 4) 岩田 拓也・加藤 晋：安全工学会誌, vol.55, No.4, 2016, pp237-243.

- 5) 吉田隆：「飛躍するドローン」, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2016, p23.
- 6) 牧野光雄：「航空力学の基礎」, 産業図書株式会社, 2013, pp.55.
- 7) 西村正治：日本音響学会誌, vol.65, No.7, p358-363
- 8) Gierke, H.A. : Physical Characteristics of AircraftNoise Sources. J.A.S.A. Vol. 25, No. 3 1953, p. 368.
- 9) 橋本孝明：「わかりやすい航空力学入門」, 晃洋書房, 2004, p.99.
- 10) 日本航空技術協会：「航空力学 I プロペラ機」, 日本航空技術協会, 2010, p93.