

ドローンの騒音測定法に関する研究

小林, 渡 / KOBAYASHI, Wataru

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025272>

ドローンの騒音測定法に関する研究

STUDY ON NOISE MEASUREMENT OF DRONE

小林渡

Wataru KOBAYASHI

指導教員 御法川学

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

As the massive development of drone technology, a lot of situations using drone for not only taking pictures and surveillance, but also cargo logistics and transportation. In the near future, drones fly over urban areas with high density and the noise from drones will be one of serious problems from environmental viewpoint. However, noise characteristic of drone and standardization of drone noise measurement have not been established. The present study is an attempt to clarify the characteristics of noise from drone and its operating condition such as the propeller rotation speed, the thrust and so on. It was cleared that the drone noise showed very similar acoustic characteristics as that of small fans and the methodology of measuring the sound power level from drone was presented in this study.

Key Words: Drone noise, Measurement method, Flight status, Rotation speed of propeller, Thrust

1. 緒論

(1) 研究背景

近年急速にドローンを商用利用する多くの需要が発生している。ドローンビジネス調査報告書によると、2025年度には6,468億円の市場規模に達すると予測されている。その市場規模拡大の大きな要因とされているのが、物流による利用である。将来的には、人が少ない農村部などの地域だけでなく、中国のように都市部での利用も予測されている。日本においてもドローンの物流サービスの試験運用が離島や山間部などで実施されており、2020年には日本郵便が小型ドローンを使った郵便物の配送を奥多摩郵便局の配達区内で実験¹⁾し、2021年12月から2022年1月までヤマト運輸が岡山県和気町で医療医薬品の配送の試験運用²⁾を行った。このように、ドローン物流の普及は近い将来確実に訪れると考えられる。

一方で、ドローンが物流に利用されることで発生する問題としてドローンの飛行ルート周辺の環境騒音がある。そこで、ドローンの静音性能や機体が発生させる騒音の評価法を確立することは急務である。しかし近年急速に発展している産業であるため、ドローンの騒音測定方法や評価方法に関する研究は僅かである³⁾。

ドローン騒音について上空を飛行する航空機の騒音と仮定した場合、現行の航空機騒音評価法は大型機が空港を離着陸する場合を想定したものであるため適用困難である。あるいは自動車騒音のような交通騒音と仮定した場合、上空から騒音が伝搬するために音源のモデル化が異なり、

機体の騒音測定法も自動車とは異なる音源特性である。いっぽうドローンは見通し距離によってはほとんど点音源とみなせるため、音源としての機体の音響パワーとラベリングは重要な指標になると考えられる。

そこで、本研究では、ドローン騒音の放射特性を測定し、飛行状態すなわちドローンのプロペラ回転数・推力と騒音の関係を調べ、ドローンの音響パワーレベル測定法確立に繋がる知見を得た。

2. 実験装置及び方法

(1) 供試ドローン

本研究で使用したドローンは、LHI製のQAV250のボディを使用した。プロペラは直径5インチ、ピッチ3インチの2枚翼プロペラ（以下、2枚翼）と直径5インチ、ピッチ4インチの3枚翼プロペラ（以下、3枚翼）及び、直径5インチ、ピッチ4.5インチの3枚翼プロペラ（以下、3枚翼高ピッチ）の3種類のプロペラを使用した。FC (Flight Controller) とESC (Electric Speed Controller) はHobby Wing製XRotor F7を使用した。通常ドローンはバッテリーを機体に搭載して飛行するが騒音測定中に電圧低下の恐れがあるため、直流安定化電源を使用し、電圧は3セルLipoバッテリーを想定し、最大電圧である12.6Vを供給した。

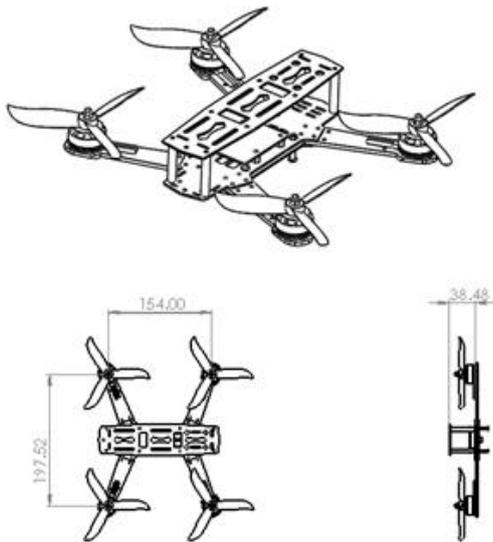


Fig. 1 Tested drone for noise measurement

(2) 推力測定

測定系の全体構成図を Fig. 2 に示す. ドローンの推力を測定するため, ドローン下部をロードセル(IMADA DPU-100N)を介して三脚に固定し, ドローンの上下方向の推力のみ測定できる状態とした. ジャイロセンサを搭載した本実験のドローンの制御は有線でPCと接続し, ソフトウェア(BetaFlight)を利用して, モーターの回転数のみ変化させた. ロードセルの出力は周波数分析器(RION SA-01)に接続し, モーターの回転数を測定するとともに, 同時間軸で推力と騒音を測定した.

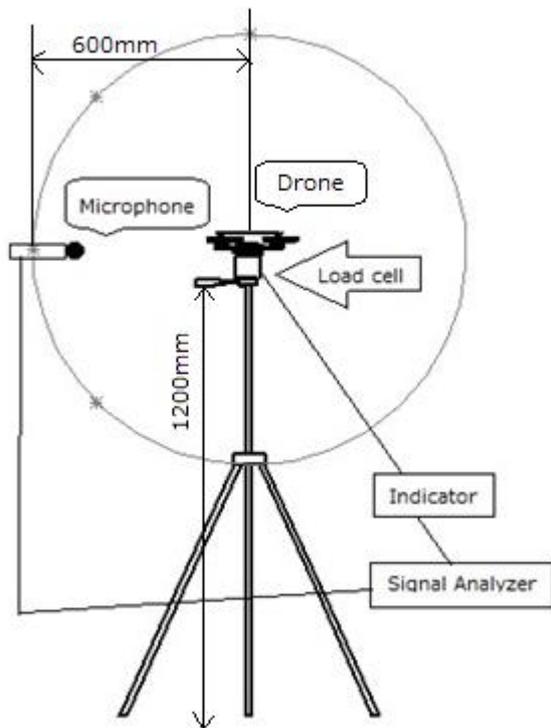


Fig. 2 Measurement setup

(3) モーター回転数測定装置

モーターの回転数を測定するにあたり, 三相モーターの一つの電圧を抽出し, 交流波形の変化を見ることで, モーターの回転数を測定した.

実験に使用したモーターの極数は 14 である. モーターの回転数は以下の式(1)を用いて, 求めた.

$$N = \frac{60}{\frac{P}{2} \times T} \quad (1)$$

但し,

N : モーター回転数 [rpm]

P : モーター極数

T : 交流波形の周期 [s]

(4) 騒音測定

ドローンから生じる騒音を, 測定対象のドローンを中心に半径 $r=600\text{mm}$ の球面上の 8 点で測定した.

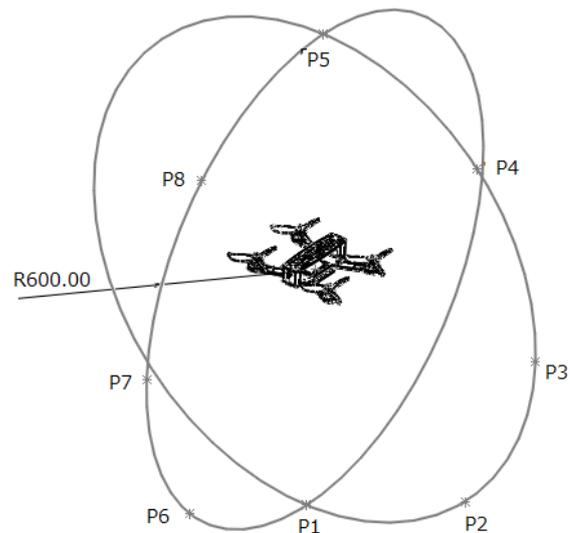


Fig. 3 Microphone position on measurement sphere

(5) 音響パワーレベル測定

音響パワーとは, 単位時間あたりに音源が放射した空気中の音響エネルギーの総量であり, 音響パワーレベルを測定することにより, 試験環境や音源からの測定距離などの情報がなくても, 騒音源の音響出力を客観的に比較することができる. 音響パワーレベルは測定環境や場所に依存しないため, 既知の音響環境における, ある騒音源から特定の場所への音圧レベルの影響を計算することも可能である.

ドローンの飛行状態は, 推力とドローン自重との比すなわち荷重倍数で表すことができる. 荷重倍数と飛行状態, 推力と回転数の関係を Table 1 に示す.

音響パワーレベルを測定する際も同様に, 騒音測定は上記 Fig. 3 の P1-8 の 8 点で行った.

Table 1 Load factor and flight status of 2-blade propeller

Flight status	Lift [g]	Load factor [-]	Motor speed [rpm]
Descent	255	0.5	9740
Hovering	510	1.0	13393
Climb	765	1.5	15873
Steep climb	1020	2.0	18634

音響パワーレベルは以下の式(2)を用いて、算出した。

$$L_W = L_P + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2)$$

但し、

L_W : 音響パワーレベル [dB]

L_P : オーバーオール音圧レベル [dB]

S : 測定球面の表面積 [m²]

S_0 : 基準表面積 (=4π [m²])

3. 実験結果及び考察

(1) オーバーオールレベルの指向性と騒音スペクトル

a) オーバーオールレベルの指向特性

プロペラ回転数 $N=12422\text{rpm}$ (荷重倍数=2.25に相当) における測定点別のオーバーオール音圧レベル(以下, OA値)を Fig. 4 と Fig. 5 に示す. プロペラ下方における P1 の OA 値が最も高い. また, ドローンの横方向 P3, P7 の OA 値は低くなっている. このことから, ドローンの飛行騒音には指向性があることがわかる. この指向性は回転翼を持つ VTOL 機と同様である.

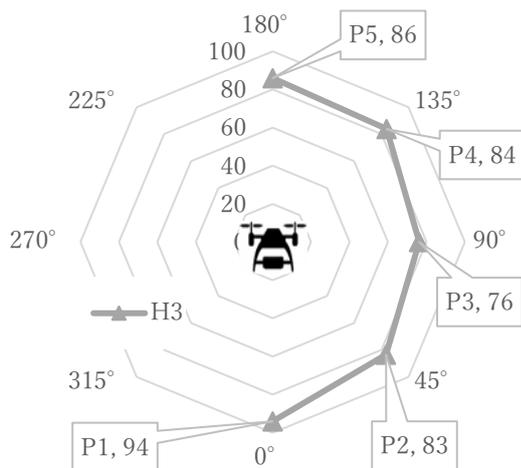


Fig. 4 Distribution of overall sound pressure level of tested drone with high pitch 3-blade propeller at P1, P2, P3, P4 and P5

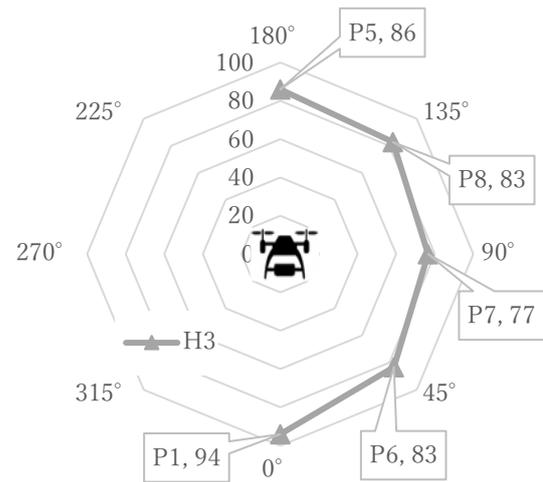


Fig. 5 Distribution of overall sound pressure level of high pitch 3-blade propeller at P1, P5, P6, P7 and P8

b) 各測定点における騒音スペクトルの比較

一般的にプロペラのようなファンから発生する流体騒音には広帯域周波数騒音と離散周波数騒音とが共存している. 広帯域周波数騒音は乱流騒音によるものであり, 主に乱流境界騒音と剥離流れ騒音が原因である. 離散周波数騒音は周期性を持つ成分で, BPF (Blade Passing Frequency: 翼通過周波数) 音であり, プロペラ周辺に形成される圧力場が観測点に対して周期的に移動することにより発生する動翼回転騒音と, プロペラがドローン機体のアーム部やモーター本体と干渉することによって生じる干渉騒音に分けることができる. さらに, クワッドコプター型のドローンは4個のモーターを用いて飛行制御を行うため, 各モーターの回転数は同期しておらずかつ微妙に変動しており, それにより生じる周波数成分の揺らぎがある. そのため, 周波数のピークは BPF 付近で単一でなく, 複数現れることがある. 測定点別の騒音スペクトル図を以下 Fig. 6 から Fig. 9 に示す. プロペラ回転数は $N=12245\text{rpm}$ から 12605rpm の範囲で出来る限り一定に保持してある.

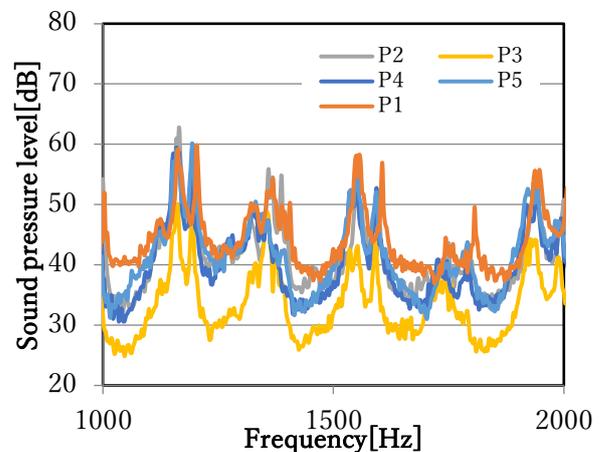


Fig. 6 Comparison of noise spectra of 2-blade propeller at P1, P2, P3, P4 and P5

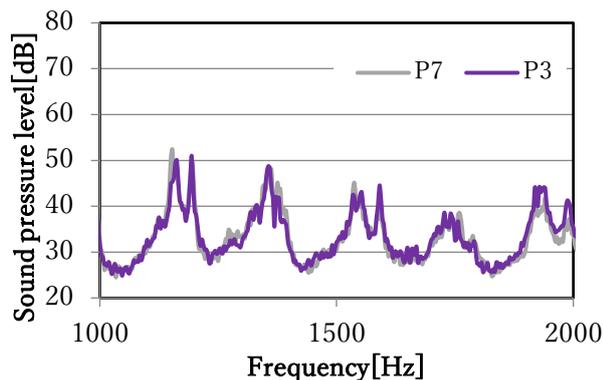


Fig. 7 Comparison of noise spectra of 2-blade propeller at P3 and P7

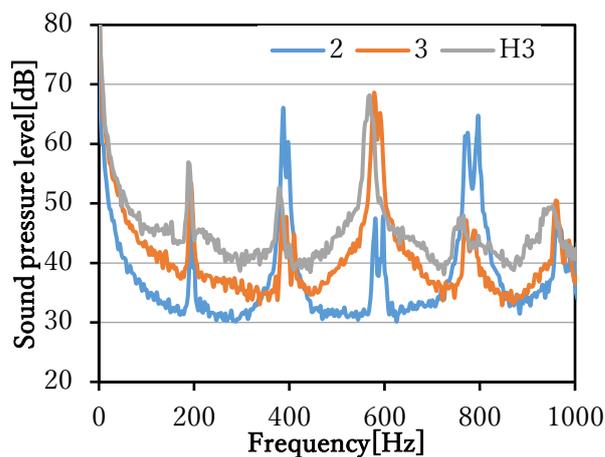


Fig. 10 Comparison of noise spectra of tested propellers at P5

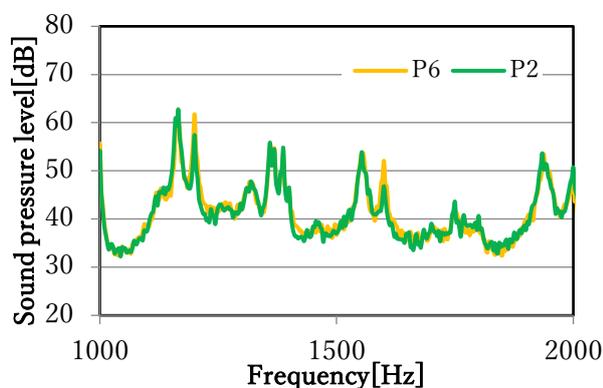


Fig. 8 Comparison of noise spectra of 2-blade propeller at P2 and P6

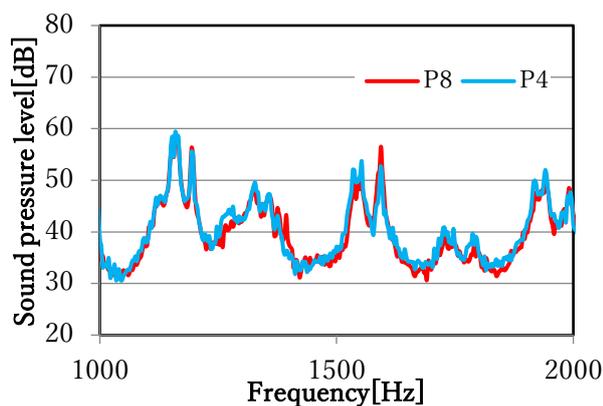


Fig. 9 Comparison of noise spectra of 2-blade propeller at P4 and P8

測定点 P5 における騒音の周波数特性をプロペラの違いで比較した図を Fig. 10 に示す。2 枚翼の BPF は 400Hz, 3 枚翼の BPF は 600Hz である。プロペラ翼枚数が増加する、もしくはピッチが大きくなると、ピークの周辺のサイドローブ周波数のレベルが上昇していることがわかる。これは、プロペラの空力負荷が大きくなって、発生する乱流が増加した結果であると考えられる。

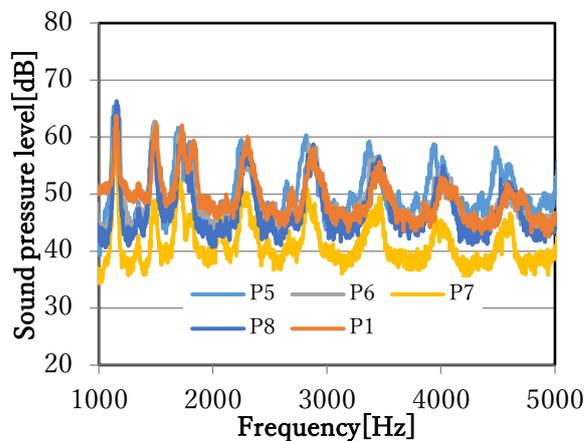


Fig. 11 Comparison of noise spectra of high pitch 3-blade propeller at P1, P5, P6, P7 and P8

3 枚翼高ピッチのプロペラの騒音スペクトルを Fig. 11 に示す。機体の横方向である P3, P7 において音圧レベル全周波数帯域にわたり低下しており、この結果が Fig. 4, Fig. 5 で示した OA 値の差異につながっている。Table 2 にプロペラごとの OA 値を示す。

これらからクアッドコプター型のドローンの飛行騒音は各周波数においても機体の水平方向に対してほぼ対称性を持つことがわかる。ピーク周波数レベルの若干の相違は、回転数の揺らぎによるものと考えられる。このことから、ドローンの騒音測定を行う際は、Fig. 3 の P1 から P5 の 5 つの測定点による評価で差し支えないと考えられる。

Table 2 Comparison of overall sound pressure level of tested propellers (Unit in dB)

POINT	2-blade	3-blade	High pitch 3-blade
1	84	94	94
2	78	80	83
3	70	74	76
4	78	82	84
5	80	84	86

プロペラの空力騒音特性はダイポール特性であり、プロペラ面の法線方向に強い放射特性を持つことを裏付けている。この傾向は、翼枚数や翼形状によって同一であった。また、P1での2枚翼プロペラと3枚翼プロペラのOA値差が他測定点と違いがある原因は、P1ではプロペラが発生させる下降風を多く受けるため、マイクロホンに風雑音に乗ってしまった結果である。ドローン鉛直下方の測定において、マイクに風防スポンジをつけるなどの対策が必須である。

(2) ドローン推力とオーバーオール音圧レベルの関係

推力とオーバーオール音圧レベルを Fig. 12 に示す。ファンの比騒音レベルの式を変形すると、プロペラの騒音は推力の2.5乗に比例して増大する⁴⁾ことが報告されているが、ここでも同様の結果が得られた。

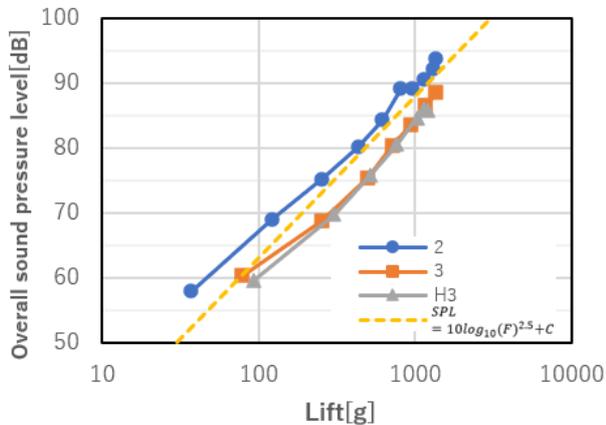


Fig. 12 Relationship between lift and overall sound pressure level of tested propellers at P5

このように、推力と騒音の関係を整理することで、プロペラの所定の推力に対する静音性を評価することができる。本実験では、2枚翼よりも3枚翼のほうが同じ推力で5dB以上静音であると言える、また高ピッチとしても騒音の悪化はあまりないことがわかった。

(3) 回転数とオーバーオール音圧レベルの関係

通常、プロペラなどの二重極音源の騒音は理論的に回転数の6乗に比例し、前述のようにファンの比騒音の式からは回転数の5乗に比例することが知られている。Fig. 13は

回転数とOA値の関係を示したものである。ドローンのプロペラ騒音においても、プロペラ周速度の5~6乗に近い比例関係があることがわかった。

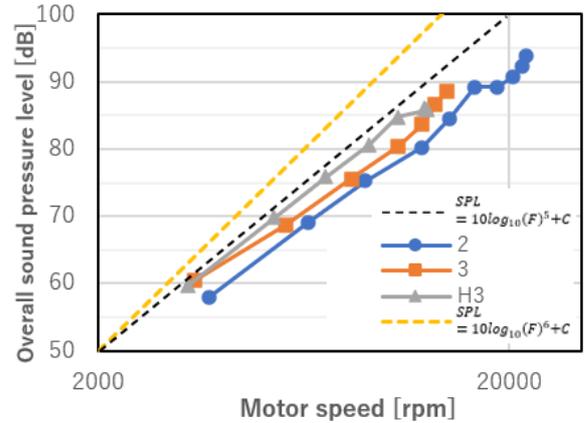


Fig. 13 Relationship between rotation speed and overall sound pressure level of tested propellers at P5

(4) 音響パワーレベル

式(2)を用いて求めた音響パワーレベルと飛行状態すなわち荷重倍数の関係をプロペラ別に比較したものを Fig. 14 に示す。なお、音響パワーレベルの計算には、8点の測定点の平均値を用いた。

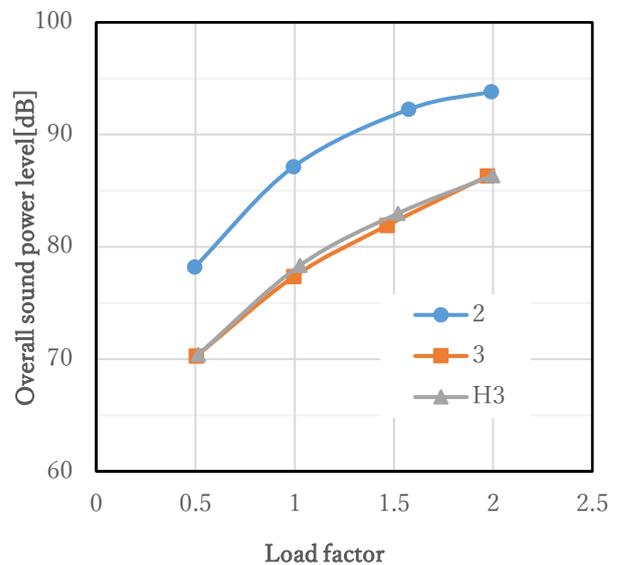


Fig. 14 Relationship between load factor and sound power level of tested propellers

音響パワーレベルは音響パワーを基準音響パワーとの比の序用対数で表したものであり、音響パワーとは測定面を単位時間を通して音の全エネルギー⁵⁾である。したがって、音響パワーレベルは騒音測定距離や指向性に依存しない、音源固有の値となる。上図から、2枚翼に比べ、3枚翼のプロペラが発生させる音響パワーレベルは8dBほど小さくなった。荷重倍数が変化しても、この傾向は変化し

なかったことから、ドローンの飛行騒音の評価をする際は、荷重倍数1の騒音を評価基準として良いと考える。

4. 結論

クワッドコプター型のドローンに関して、推力測定とモーターの回転数測定と騒音測定を行うことで、ドローンの騒音特性に関して調べるとともに、ドローンの騒音測定法（ドローンの音響パワーレベル測定）について検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) ドローンを固定した状態での騒音測定では、騒音の大きさは推力の2.5乗に比例し、プロペラの回転速度の5~6乗に比例することがわかった。これは、一般的なファンの騒音と似た性質であり、ファンの騒音評価方法を適用できる。
- 2) 飛行状態すなわち荷重倍数と騒音の関係を調べた結果、荷重倍数が異なってもプロペラ毎の騒音の大小傾向があまり変化しないため、ドローンの騒音評価または騒音測定を行う際は機体を固定し、荷重倍数1の推力時の騒音を測定することで、評価の基準とすることが可能である。
- 3) 同じ推力でも、プロペラにより騒音特性や音響パワーレベルが大きく異なることがわかり、今回はプロペラの違いで約8dBの差があった。
- 4) 人が実際に聞くドローンの騒音はプロペラ鉛直下方の騒音になるので、最も騒音測定を要する。しかし、三脚を用いて、騒音測定を行う場合、プロペラ鉛直方向下方の騒音が機材の反響や風切り音の影響が大きくなり、正確に測定することが難しい。よって、ドローンの飛行騒音は指向性が顕著であることからプロペラ鉛直下方の騒音の代替としてプロペラ鉛直方向上方の騒音測定を参考にすることによる評価も可能であると考える。
- 5) ドローン騒音の音響パワーレベル測定を行う場合は、その放射特性からドローンを囲む球面の音圧レベルを測定して音響パワーレベルを求める方法は有効である。しかしながら、地面の反射の影響やドローンの気流による風雑音の影響を考慮する必要がある。併せてドローンを囲む球面の大きさについても検討する必要がある。

参考文献

- 1) ヤマト運輸株式会社, ” 持続的な医薬品輸送ネットワークの構築に向けドローンの経済的実現性を検証する実証実験を12月6日から開始”
https://www.yamato-hd.co.jp/news/2021/newsrelease_20211125_1.html
(2022/1/30 閲覧)
- 2) 日本郵便株式会社, ” ドローン(小型無人航空機)の飛行に関するお知らせ”
<https://www.post.japanpost.jp/about/other/drone.html>

(2022/1/30 閲覧)

- 3) C. Legendre, V. Ficat-Andrieu, A. Poulos, Y. Kitano, Y. Nakashima, W. Kobayashi and G. Minorikawa, Computational noise level predictions of small multi-rotor unmanned aircraft systems at different payload conditions, DICUAM 2021, 2021-3
- 4) 倉永卓弥: 推進用小型電動ダクトファン設計試作に関する研究, 法政大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 修士課程 2018年度修士論文, 2022
- 5) 鈴木昭次, 西村正治, 雫本信哉, 御法川学: 機械音響工学, コロナ社, 初版第5刷, pp. 97, 2014