

# eVTOLのための革新的低騒音プロペラの研究状況

第7回 航空機電動化(**ECLAIR**)オープンフォーラム

嶋英志

JAXA (宇宙航空研究開発機構)

# 謝辞

---

本研究成果はJAXAと電力中央研究所，工学院大学，千葉大学，（株）ACSLとの共同研究によるものです。



# 動機：eVTOL（電動垂直離着陸機）のためのプロペラ騒音低減の必要性

- 近年ドローンをはじめeVTOLの利用が拡大している。
- 利用拡大とともに居住エリア近傍での大型の機体の利用増加が見込まれる。
- 機体の大型化に伴い推力が増加し居住エリアに近づくほど騒音環境は厳しくなる。
- 無人ドローンは低高度での運用が想定され距離が近い。
- eVTOLではプロペラからの空力騒音が支配的であり，これを削減する必要がある。

# 目的・目標・手法

- 目的：プロペラ空力騒音を減少させる革新的なプロペラの基本形状を見出す。
- 目標：ループ状プロペラ，ブレード枚数増加，フラップなどのプロペラの改良手法の効果を定量評価する。
- 手法：小型ドローンサイズのプロペラを複数個作成し，地上ベンチ試験により実験的に空力，音響および心理音響特性を取得し比較する。

# プロペラ騒音低減方法

- カウルやダクトによる吸音および遮音
  - ファンジェットエンジン（旅客機など）での主要な手段
  - プロペラ効率を上げる効果もある
  - ×重量増，前進飛行時の抵抗増
- **ANC(Active Noise Cancelling)**
  - スピーカーからの逆位相音で騒音を消す
  - ヘッドホン・イヤホンなどで大きな効果
  - ×外部音場での適用は困難
  - ×アンプ・スピーカーなどの重量増
- **プロペラ自体の低騒音化**
  - 推進性能の大きな低下がない
  - プロペラを変えるだけなので他システムの変更不要
  - ×使える手法に限りがある→斬新な設計を試みる

# 試行中のプロペラ騒音低減方法

- スキュープロペラ
  - 不等間隔プロペラ
- } Looppropによる構造的課題の解決
- 
- ブレード枚数の増加
  - 回転数の低下
- } 今回の改良点  
2ループ→3ループ  
Gurneyフラップの利用
- 
- 以下，各手法について簡単に説明する。

# スキュープロペラ, 不等間隔プロペラ

## 1. スキュープロペラ

音波のパルス性成分を減らす。(他の効果も有)

大スキュー角のプロペラは船舶のスクリューや換気扇ファンなどで常用されている。



Skewed propeller for submarine  
<https://japan.cnet.com/article/35051018/52/>

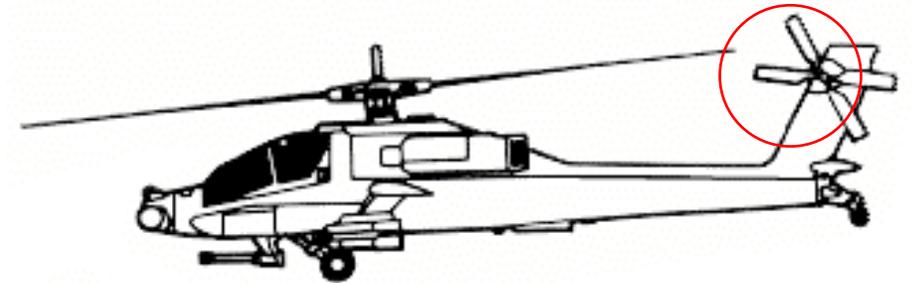


Ventilation fan (WIN2K by MELCO)

## 2. 不等間隔プロペラ

倍音成分を分散させる。

AH-64, OH-1, エアバスヘリコプタ社のフェネストロンなどのヘリコプタテールロータで用いられている。



AH-64  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/AH-64>

# 航空分野でのスキュープロペラ

スキュープロペラは高速固定翼航空機用プロペラで用いられているが構造強度の課題からスキュー角は小さく、かつ高価な軽量高強度材料が必要

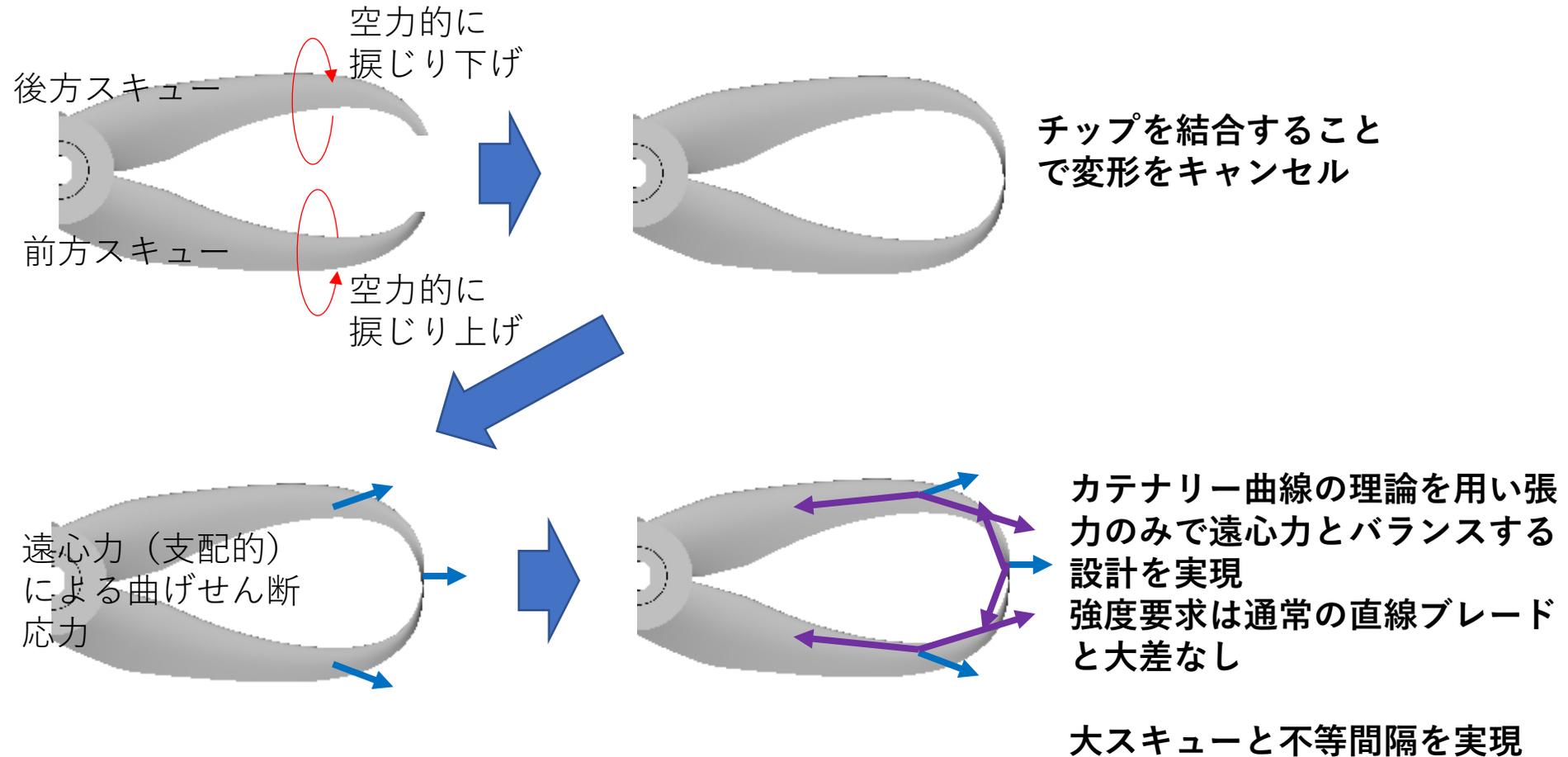


GE36 unducted fan

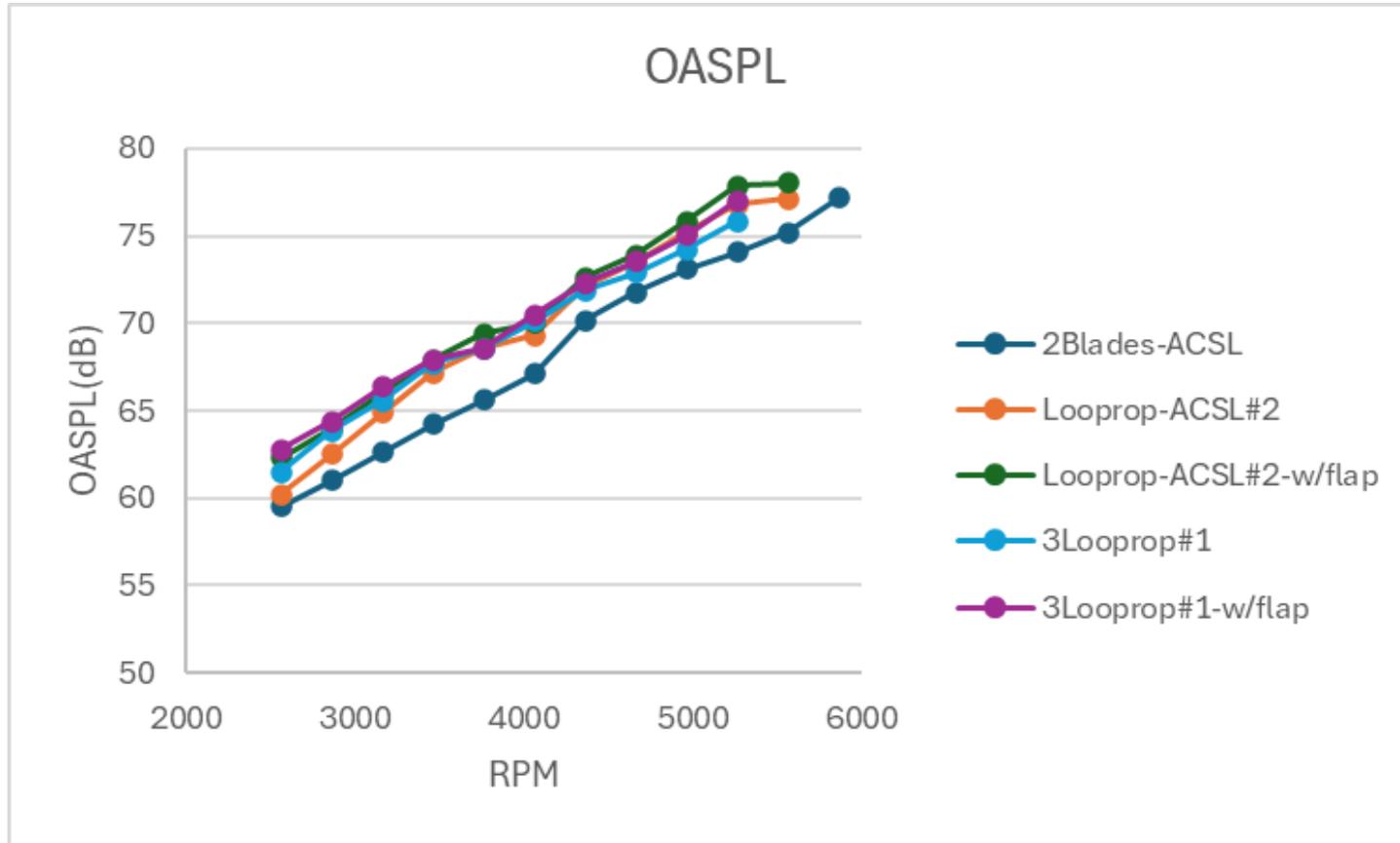


Propeller of A400M

# ループ型プロペラ (Loopprop) の構造



# プロペラ騒音の回転数依存性



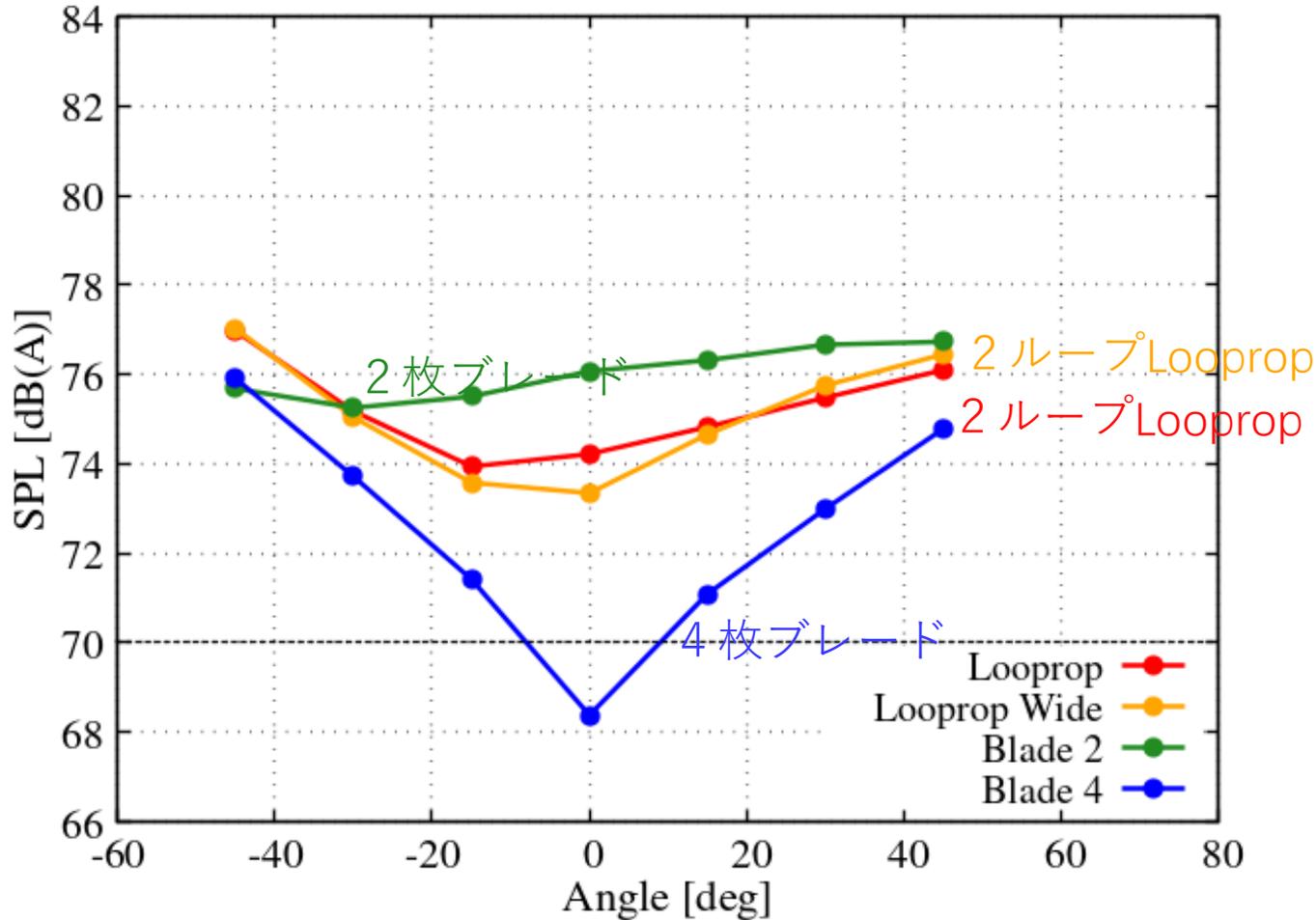
- ・ 各種プロペラの回転数-音圧の特性を示す\*。
- ・ 回転数と音圧レベル(dB)がほぼ比例している。
- ・ 推力は下式なので同推力時の回転数を下げるには $C_T$ を上げればよい。

$$T = C_T \rho R^4 \omega^2$$

- ・ ブレード面積を増せば $C_T$ は上がるが回転数制御性のため慣性モーメントは増やせない。

\* 嶋ら, 「新しいループ状プロペラに関する音響および心理音響特性」第62回飛行機シンポジウム, 2024

# ブレード枚数増加による騒音低減効果



- ・各種プロペラのクアッドコプタ形態，同一推力での騒音レベル
- ・2ループLooppropは通常の2枚ブレードプロペラより2dB程度低いが，0度（回転面内）付近では4枚ブレードはさらに5-6dB低い。

\* 西田，嶋，浦，「ループ状静粛プロペラのクアッドコプター形式での音響計測試験」，第59回 飛行機シンポジウム講演論文集，2021

# 静粛プロペラへの改良

① Loopprop化



2ループLoopprop  
質量・慣性モーメント  
翼型等基本設計同じ  
ブレード面積1.41倍

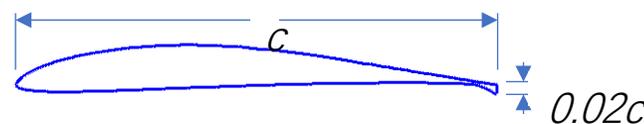
② ループ数増大



3ループLoopprop  
質量・慣性モーメント  
翼型等基本設計同じ  
ブレード面積1.73倍



③ Gurneyフラップ付与



**2% Gurney flap**を設  
けた翼型例



# プロペラ供試体



2-Blade ACSL  
RS(Relative Solidity)=1.0



Loopprop-ACSL#2  
RS=1.41



Loopprop-ACSL#2-w/flap  
RS=1.41

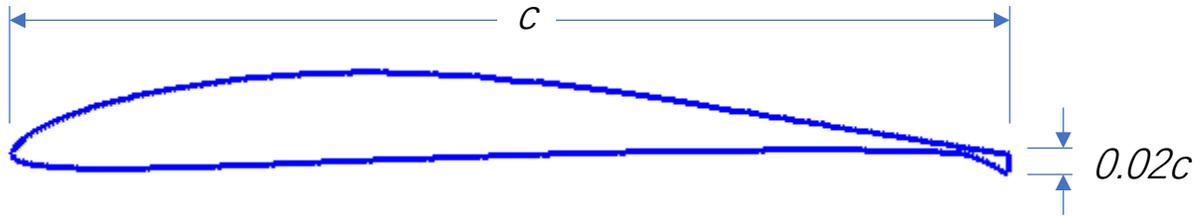


3Loopprop#1  
RS=1.73



3Loopprop #1 -w/flap  
RS=1.73

全プロペラは同じ質量と慣性モーメントを持つ



2% Gurney flapを設けた翼型例



ASCL SOTEN (1720g - 2000g)

# 計測手法

Arc Array:

$D = 0.8 \text{ m (6R)}$

$\Theta = -60, -40, -20, -5, 5, 20, 40, 60$   
deg

Rotation speed:

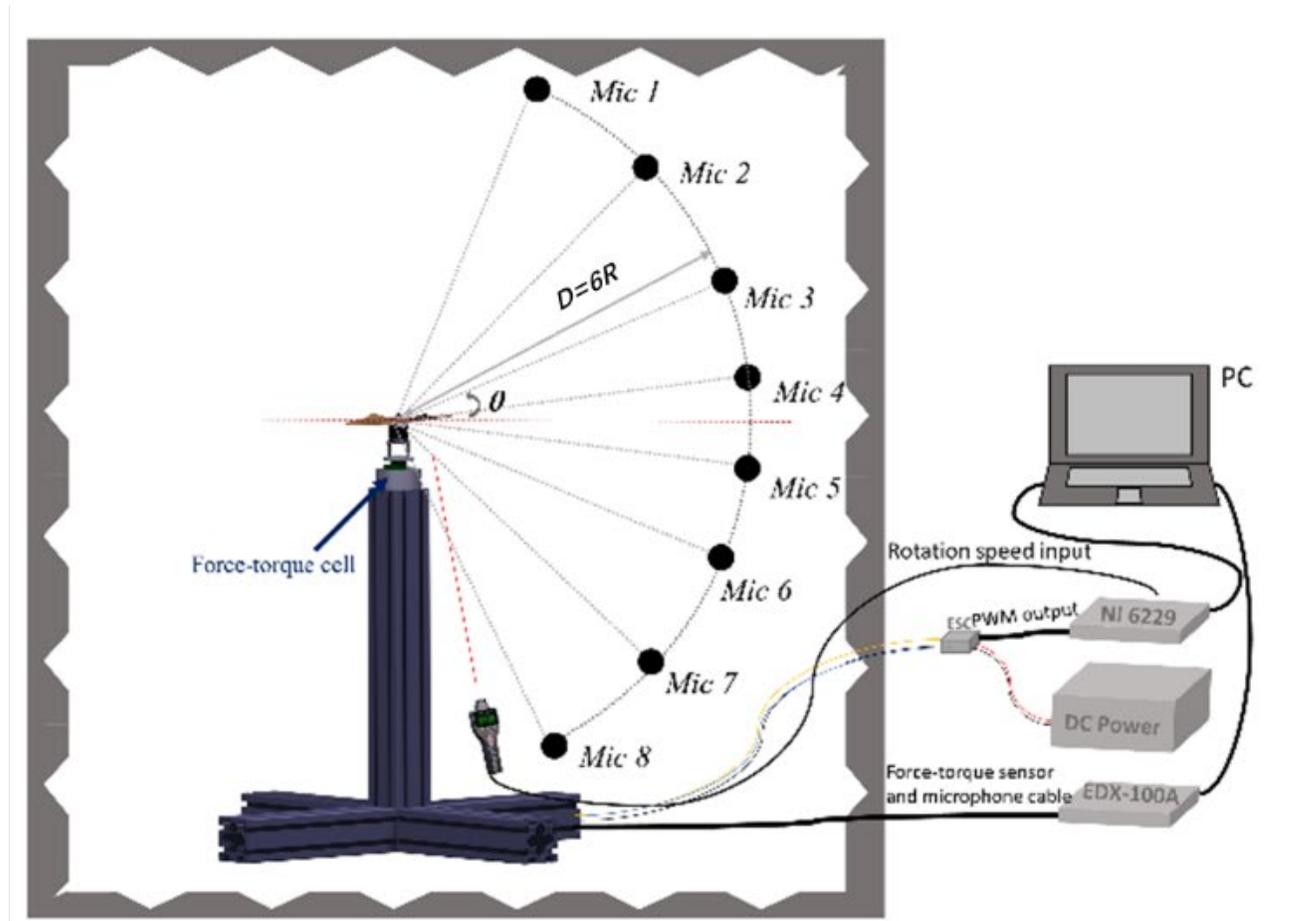
2560 rpm, 2860rpm, 3160 rpm, ...,  
5560rpm ...

Thrust & torque:

Average by 30sec data (1 kHz)

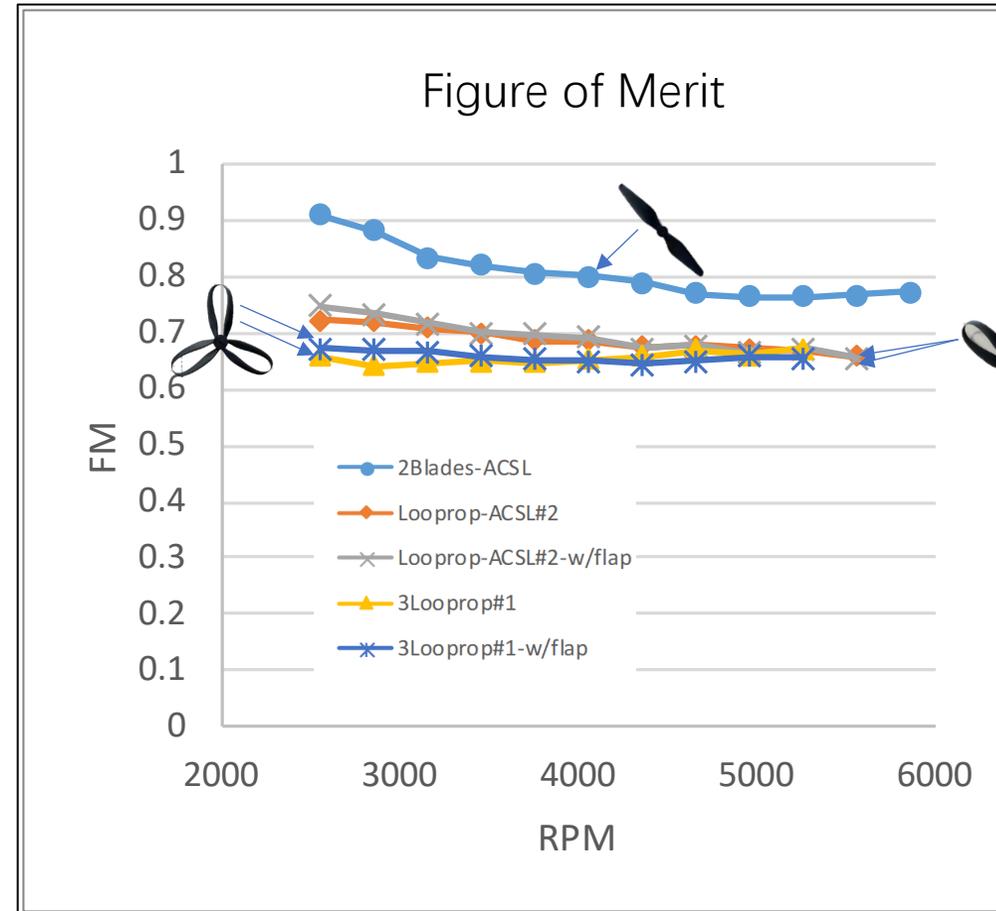
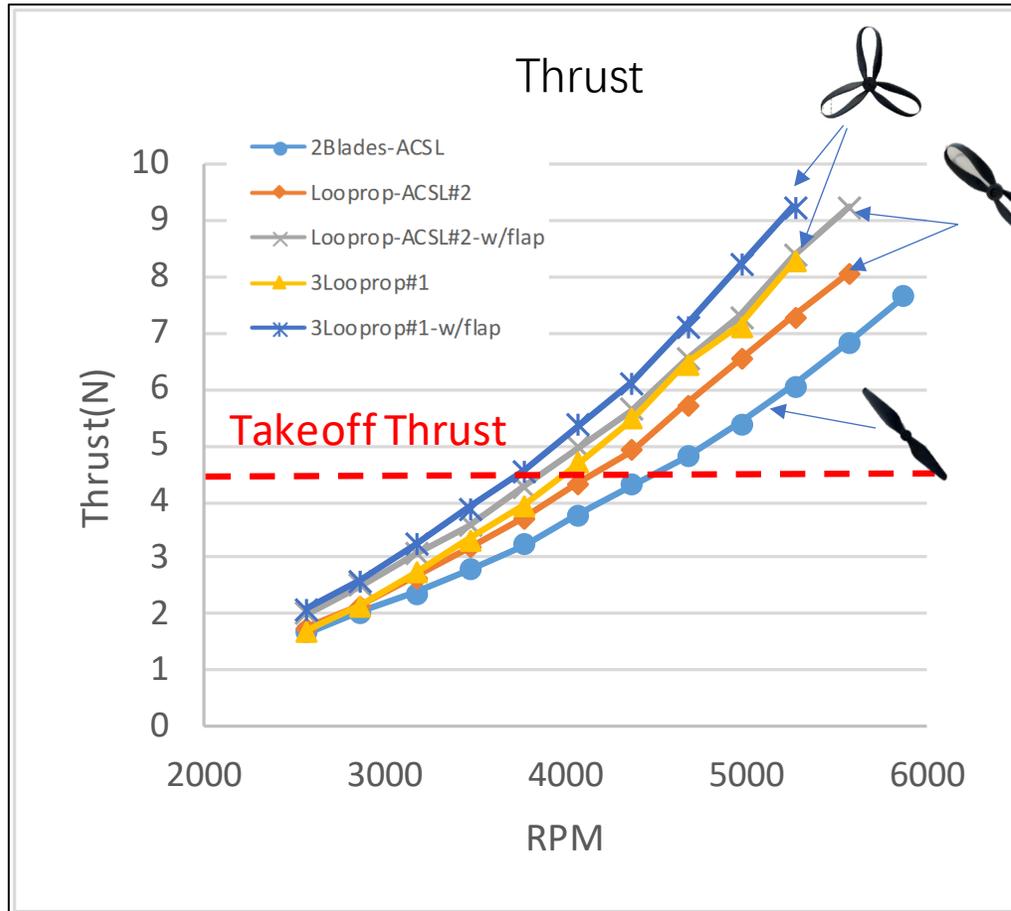
Sound pressure:

Sampling rate: 20kHz (10sec)



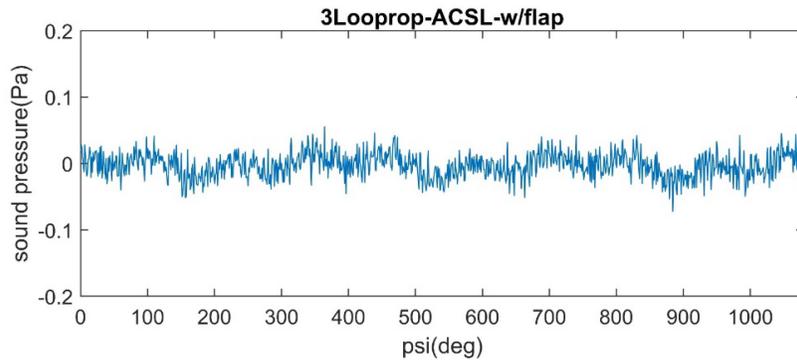
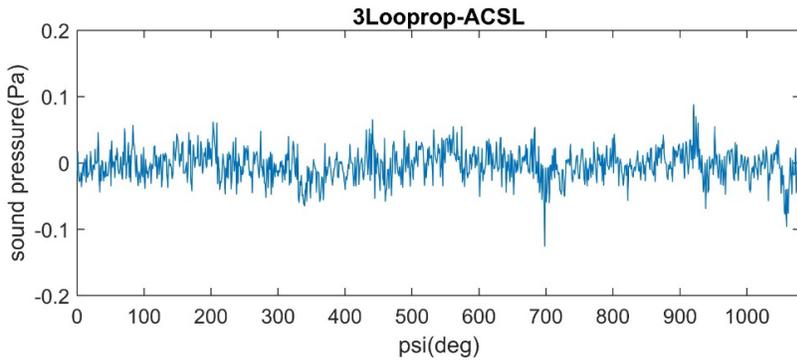
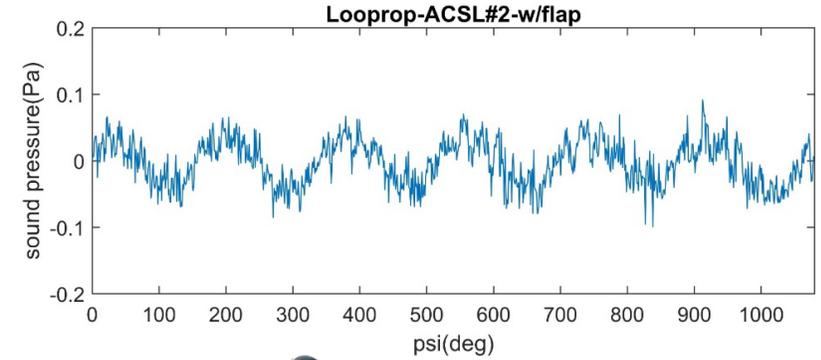
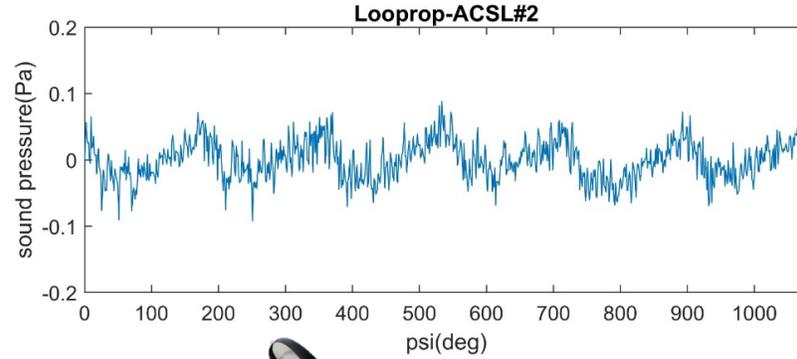
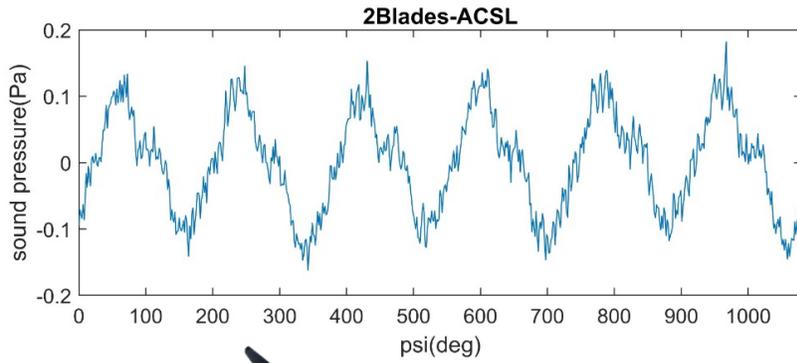
**推力, トルク と音圧** は回転数を一定回転に制御し are measured at stable RPMs under  
Microphone arrays for evaluation and comparison of aerodynamic and aeroacoustics  
performance

# 推力特性：推力および効率 (Figure of Merit)



- ① 3ループ化とGurneyフラップにより必要回転数が低下
- ② 各Looppropの効率は共通して10%程度低い
- ③ Gurneyフラップは効率を変えずに推力を増大できる。

# 各プロペラの音と位相平均後（500回平均）の音圧波形



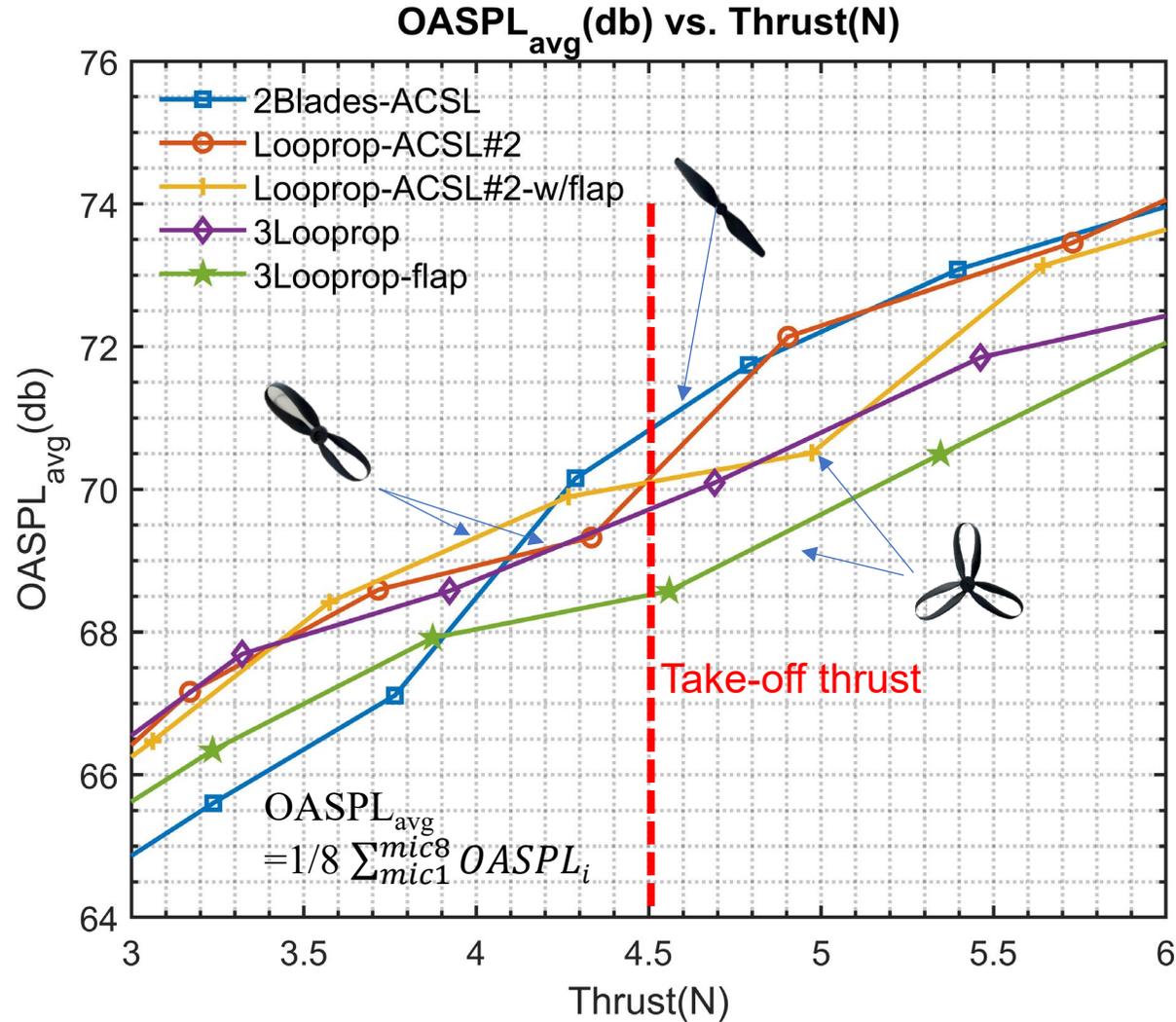
## Sound Pressure in Time Series

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(t_0 + iT)$$

$$N = 500, T(\text{period})$$

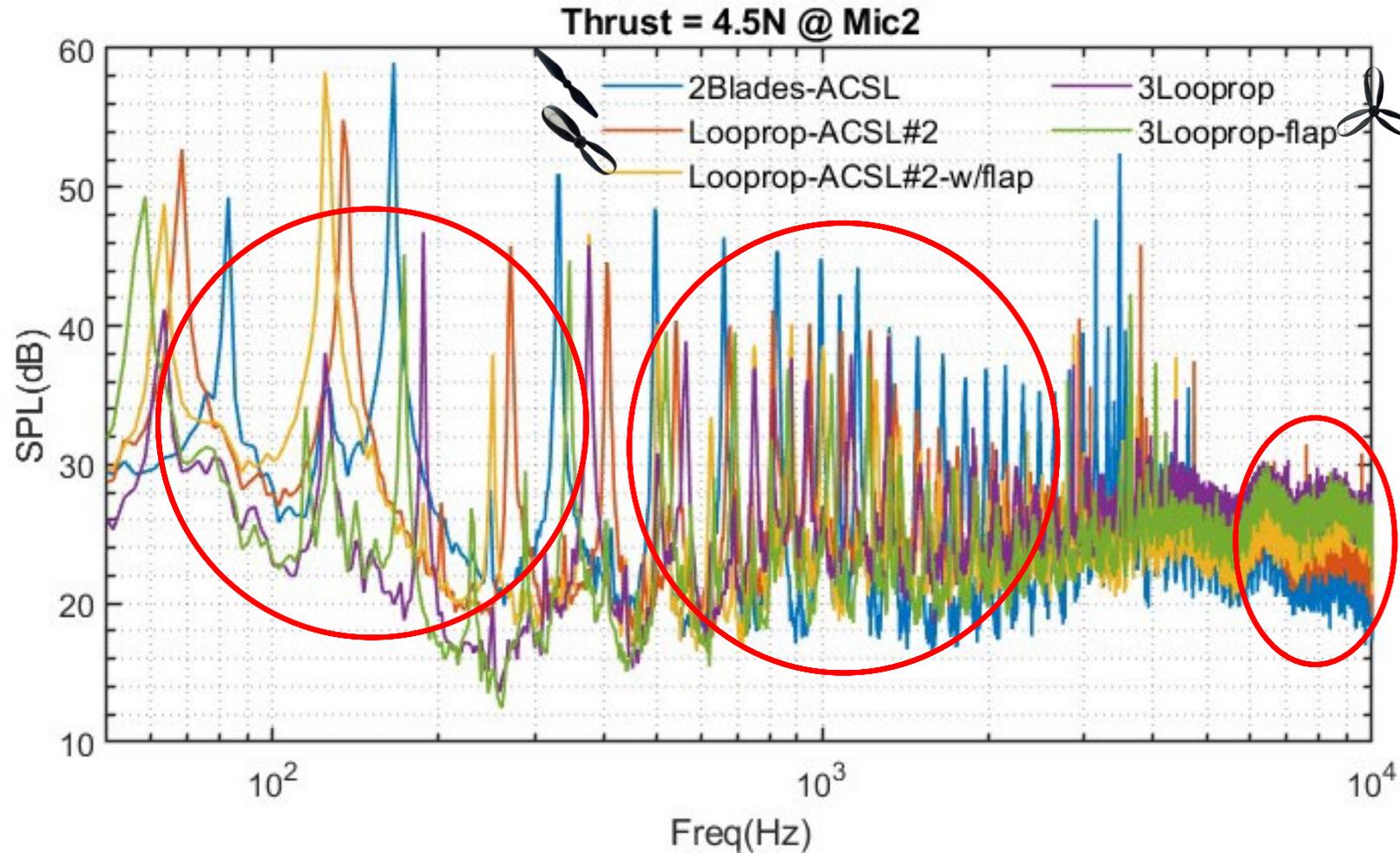
3Looppropおよび3Loopprop-w/flapは他のプロペラに対し顕著に周期性の音圧を低減している。

# Overall Sound Pressure Level



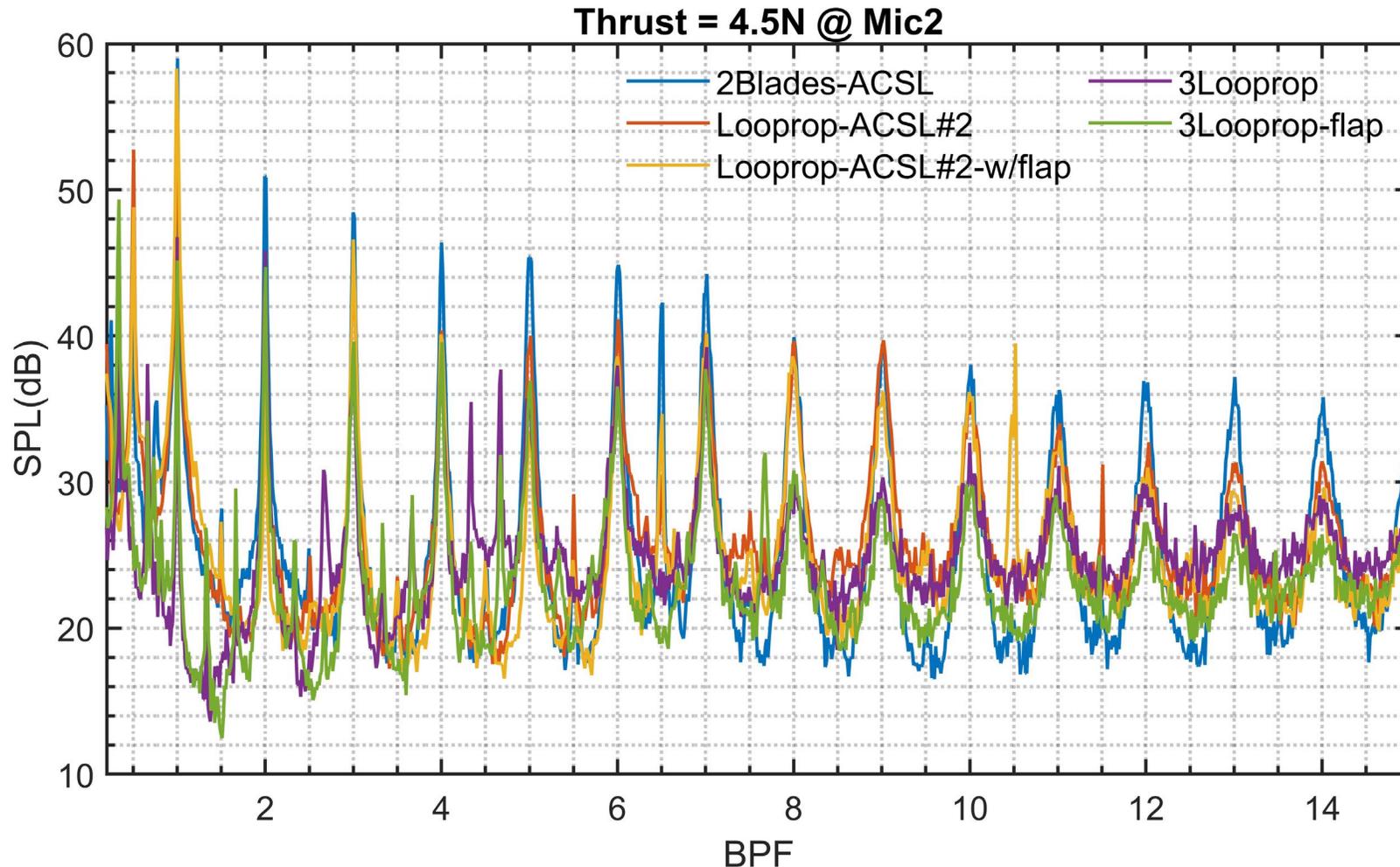
3Loopprop: OASPL (1.1dB ↓)低下  
 3Loopprop-w/flap: lower average OASPL (2.1dB ↓)低下  
 (標準推力において標準プロペラとの比較)

# Power Spectrum Density



LooppropはBPF (Blade Passing Frequency) とその高調波のSPLを顕著に減少させる半面、高域 (>5kHz)の広帯域騒音を増加させる。

# Power Spectrum Density



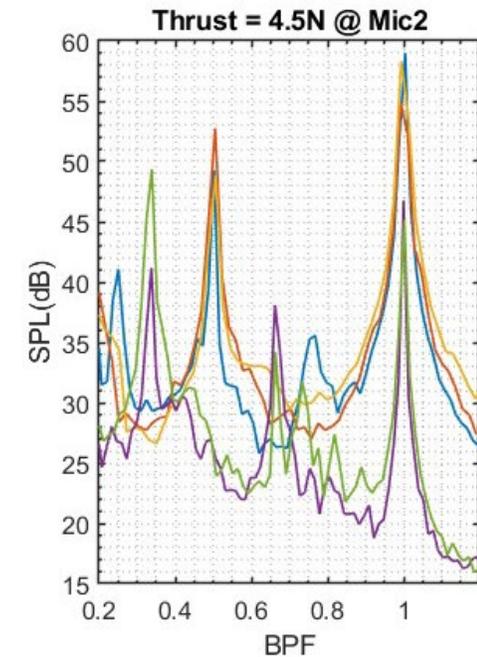
2Blades: 59.0dB

Loopprop ACSL#2: 55.0dB

3Loopprop: 46.7dB

Loopprop ACSL#2 flap: 58.3dB

3Loopprop flap : 45.1dB



LooppropはBPFとその高調波のSPLを減少させる。特に3 LooppropはBPFで14dB低下している

# Psychoacoustic Annoyance Model(Fastl & Zwicker )

PAモデルは、音を不快と感じる度合いとして定義され、音の特性の違いを含めて騒音を評価するためのツールである。

## Psycho-Acoustic Annoyance:

$$PA = N_5 \left( 1 + \sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2} \right)$$

$$w_s = \begin{cases} 0.25(S - 1.75) \lg(N_5 + 10) & S > 1.75 \\ 0 & S \leq 1.75 \end{cases}$$

*Zwicker.et al (2013)*

$$w_{FR} = \frac{2.18}{N_5^{0.4}} (0.4F + 0.6R)$$

where  $N_5$  is the percentile loudness in sone.

### Sharpness (acum):

$$S = k \frac{\int_{z=0}^{24} N'(z)g(z)zdz}{\int_{z=0}^{24} N'(z)dz},$$

$$g(z) = \begin{cases} = 1 & z \leq 15.8Bark \\ = 0.15e^{0.42(z-15.8)} + 0.85 & z > 15.8Bark \end{cases},$$

$$15.8Bark = 3054.1Hz, k = 0.11,$$

(A3)

where  $N'$  is Loudness density.

### Roughness (asper):

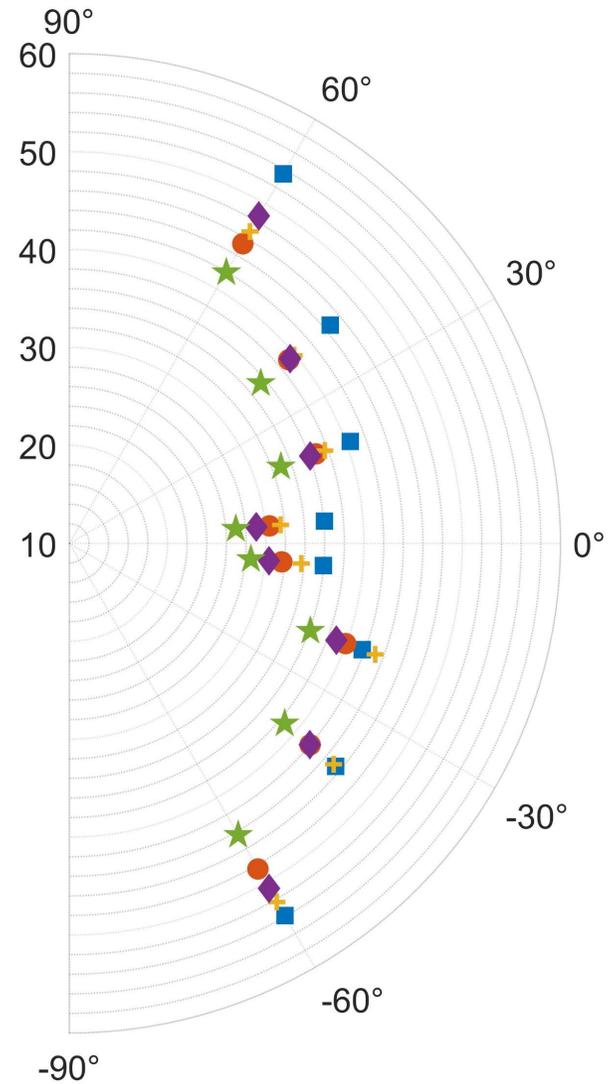
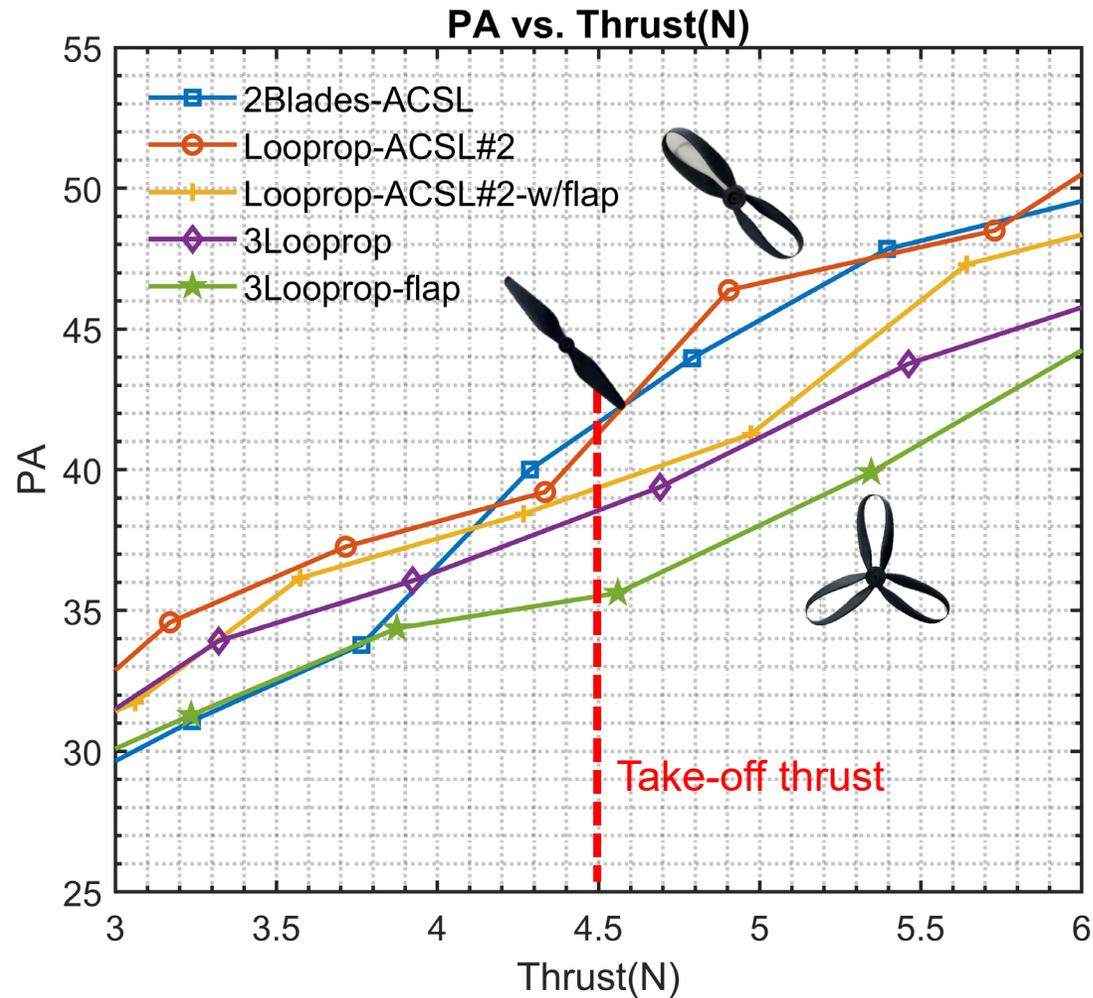
$$R = 0.3f_{mod} \int_0^{24Bark} \Delta L_E(z) dz,$$

where  $f_{mod}$  is the modulation frequency.

### Fluctuation Strength (vacil):

$$F = 0.008 \frac{\int_0^{24Bark} \Delta L_E(z) dz}{\frac{f_{mod}}{4} + \frac{4}{f_{mod}}}$$

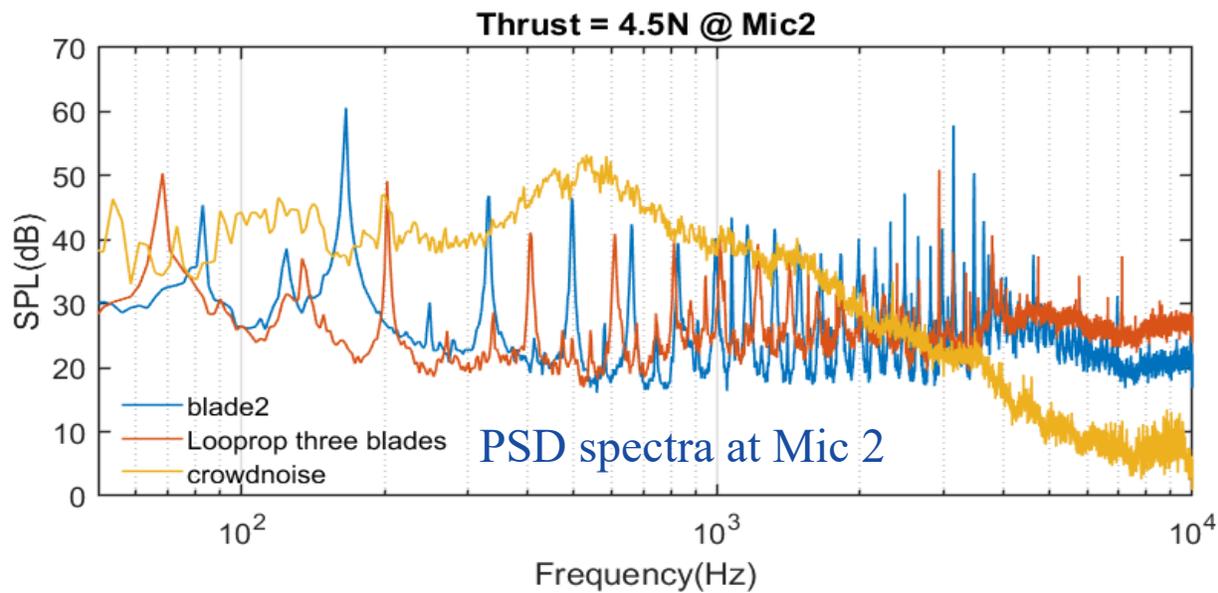
# Psychoacoustics Annoyanceによる評価



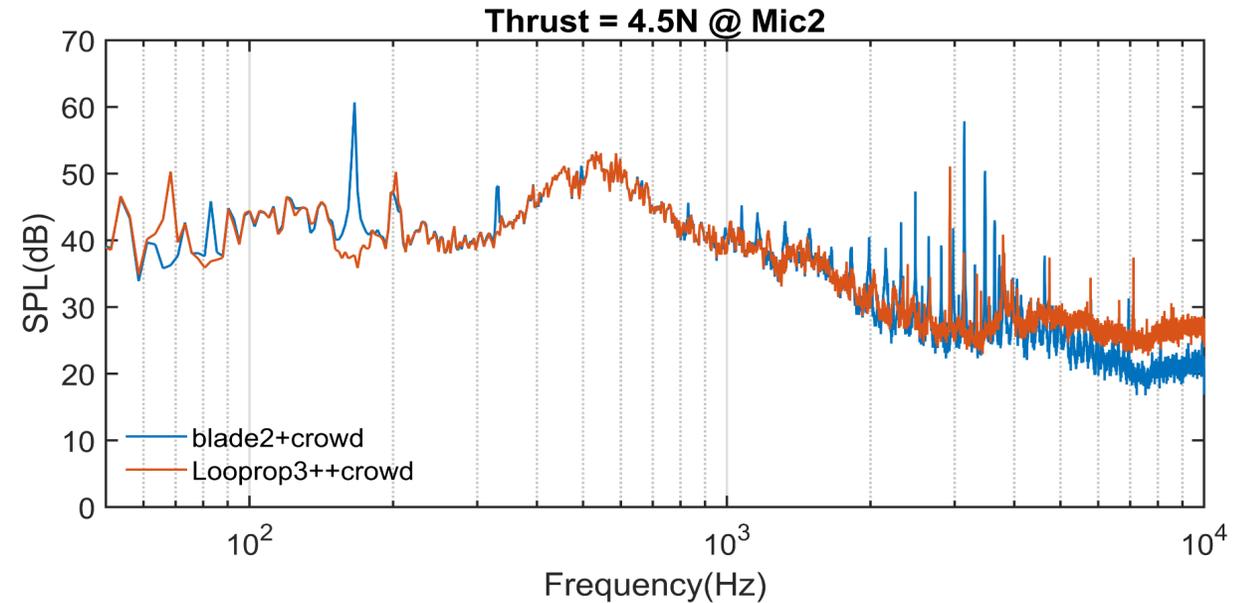
3Loopprop及び 3Loopprop-flapは他のプロペラと比較して音響心理特性が顕著に改善されている。

# 考察- 街中騒音によるマスキング

- Loopropsは、中低域のプロペラ特有の音を減少させた。
- 一方、高域の広帯域ノイズは増加した。
- これらの要因により、ループプロップのノイズはホワイトノイズに近づいている。
- この効果により、環境ノイズによってマスクされやすくなることが予想される。

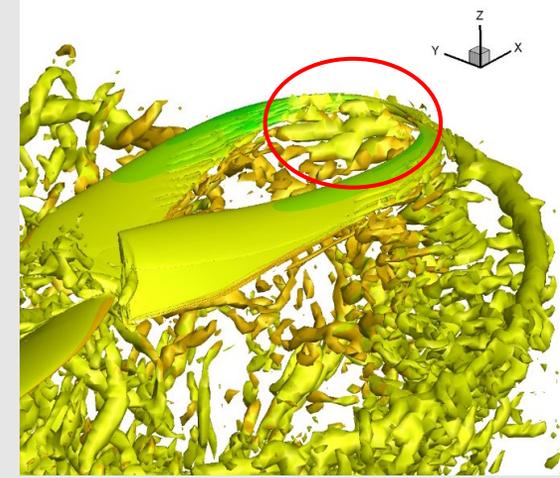
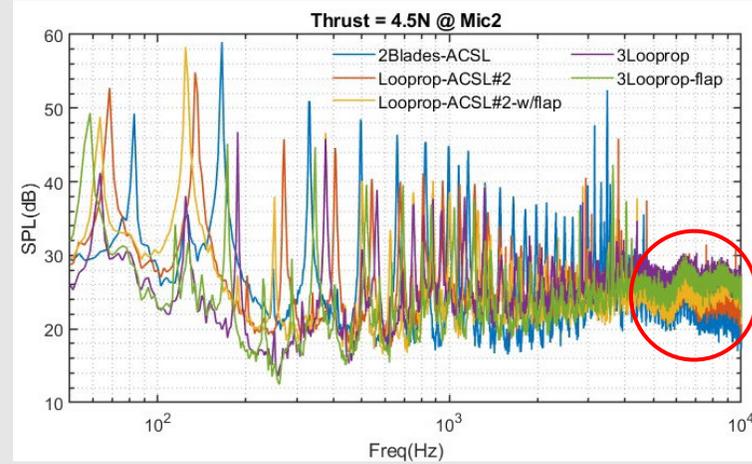
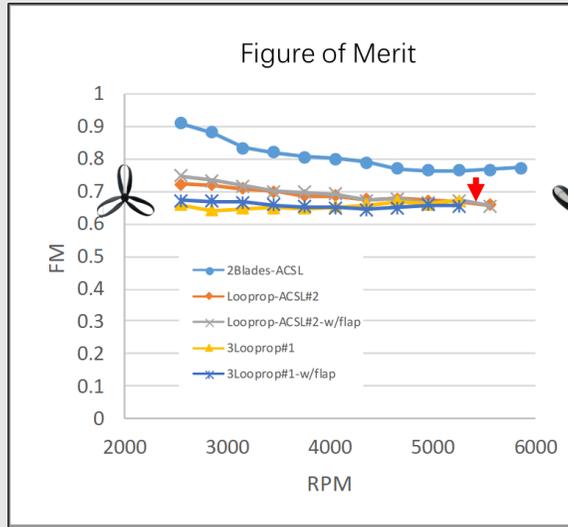


crowd: 



 2Blades + crowd:   3Looprop + crowd: 

# 考察- Looppropの課題と改良の方向性



Shima, E, et. Al., Preliminary Study on Innovative Loop Propellers for Quiet EVTOL. ,2019

- Looppropの効率はオリジナルプロペラより10%低かった。
- Looppropでは高周波の広帯域ノイズが大きくなった。
- 過去のCFD結果で、Loopropsの先端付近で流れの剥離が見られた。
- Looppropの問題は先端付近の流れの剥離が原因である可能性が高い。
- 次のステップとして、先端部の形状最適化が必要である。

# 結論と今後の課題

- 3ループ化によって質量/慣性モーメント一定で推力係数を増大，必要回転数を低下できた．今後の基本形態として有望である．
- 2%GurneyフラップによりFMを保ったまま推力係数を20%増大することができた．Gurneyフラップはプロペラの改良手法として有望である．
- 今回の設計ではピッチ角分布を標準プロペラと同等としたため， $C_T$ の増大に伴う流入速度 ( $V_{in} = \frac{\sqrt{C_T R \omega}}{2}$ )の増大と釣り合っていない．設計の見直しが必要である．
- いずれのLooppropも標準プロペラよりFMが10%程度低い同程度の値で，Looppropに共通した設計課題を示唆している．先端部の流れの剥離が原因と考えられ形状の改良が必要である．