

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820053

研究課題名(和文)羽ばたき運動, 羽の受動変形, 剥離渦の連成解析による羽ばたき音の発生機構の解明

研究課題名(英文) A study on mechanisms of sound created by flapping wings associated with unsteady motion, wing deformation, and vortices

研究代表者

青野 光 (AONO, Hikaru)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：10623712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既存の羽ばたき模型飛行機の羽ばたき運動中に発生する音を無響室での計測に成功し、羽ばたき飛行機から発生する音の特性を明らかにした。羽ばたき周波数とその倍の周波数成分に卓越した音圧レベルを示すことから、羽ばたき飛行中に生じる音は主に羽ばたき運動する羽が作り出す渦とそれによって生じる翼面圧力変動であることが分かった。続いて、羽ばたき周波数を固定したとき、羽の弾性変形により羽音の音圧レベルが最大になる周波数が変化することも明らかにした。これらの知見は今後の羽ばたき飛行機の設計と開発に活用されるものである。

研究成果の概要(英文)：A FMAV considered in this study was a hummingbird-inspired FMAV that had approximately a six centimeter half wingspan and was capable of realizing up to the flapping frequency of 30 Hz. The sound produced by the FMAV was measured using the 1/2 inches diameter microphone in the acoustic chamber under the quiescent flow condition. Results revealed the characteristics of flapping-wing sound in terms of directivity, frequency response, and attenuation. Moreover, effects of wing flexibility on the sound pressure level (SPL) were investigated. Results showed that when the flapping frequency was set to be same in all the cases, the degree of wing deformation could vary the frequency corresponding to the maximum SPL. All outcomes of this study would be helpful to develop new FMAVs.

研究分野：流体工学

キーワード：羽ばたき音 渦 小型飛行機

1. 研究開始当初の背景

近年、火星などの惑星大気探査機や災害時などの緊急時の情報収集機として、全長 15cm、重さ 3 グラム以下の小型飛行体（最新の旅客機ボーイング 787 と比較するとその大きさは 400 分 1 以下）の研究開発が世界中で活発に行われている。過去 20 年間にわたり、その飛行体と同等な大きさで空を自由に飛び回る昆虫や鳥などが利用している羽ばたきを小型飛行機の推進機構に適用するための研究が行われ、その空気力発生メカニズムの詳細が徐々に明らかになっている[1]。このように世界中で活発に行われている羽ばたきの研究であるが、基礎的な研究にまだいくつかの未解明なことが残されている。その一つが本研究の対象である羽ばたき中に生じる可聴域の羽ばたき音（以降、羽音）の発生機構とその制御である。

2. 研究の目的

本研究では、羽ばたき模型飛行機 (FMAV: Flapping-wing Micro Air Vehicle) の静止飛行中に生じる音の強さ、指向性、周波数特性を明らかにし、受動変形する羽ばたき翼まわりに生じる流れ場（渦の生成と剥離など）と羽音の関係を調べ、羽音の発生機構を解明することを第一の目的とした。さらに、羽ばたき運動と翼の構造の工夫による羽音の制御効果を調査し、羽ばたきの応用先として新規性の高い羽ばたき型低騒音マイクロデバイスなど新たな応用の可能性を探求し、その可能性を示すことを第二の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では図 1 に示す既存の羽ばたき模型飛行機を対象とした。本機はハチドリを模倣した X 型の 4 枚翼の羽ばたき飛行機[2]である。本機は①羽ばたき周波数が可変、②小型で軽量、③実用化に向けた自律制御などの導入が検討されているなど、高い将来性を備えた羽ばたき機である。本機は、翼長が約 15cm、重さが 3 グラム程度、実際に飛行が可能である。本機はリンク機構により 1 自由度の往復運動（羽ばたき運動）を作り、数十 μm の薄いフィルムで作られた羽は受動変形によりピッチング角を作りだし、空気力を得ている。リンク機構はバッテリー駆動のモーターにより動作するが、本実験中に羽ばたき周波数にばらつきがみられ、データの採取が困難であった。そのため、安定化電源を利用可能するための機体の改良（尾翼を取り外すなど）を行い、その問題を解決した。

(2) 本解析で重要なパラメータは、飛行機の羽ばたき周波数であり、その範囲は機器の機体の制約から最大 30Hz である。本研究では、羽ばたき周波数を 25Hz に設定し、その時の翼端の平均速度と羽の翼弦長に基づくレイノルズ数は、 $O(10^4)$ 程度である。さらに、流れ場の非定常性を示す無次元周波数は

0.375 であり、これらの値は過去の研究成果 [1,2] から得た生物飛行で頻繁にみられる範囲内でありかつ羽ばたき翼周りの流れの変化と翼の変形に支配的なものであり、得られた羽音の発生機構の一定の普遍性は確保できているものと考えている。

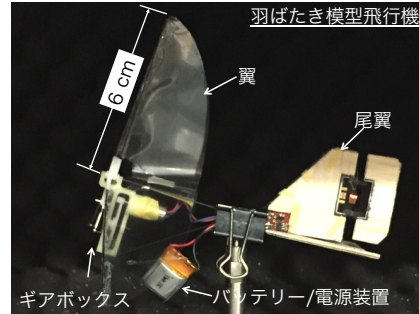
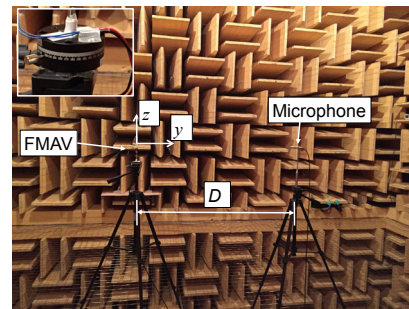
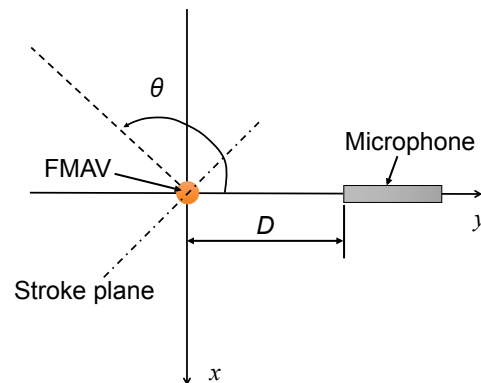


図 1 羽ばたき模型飛行機[1]

(3) 羽音の計測実験は株式会社小野測器が所有する無響室と株式会社アコーが所有する無響室をそれぞれ借用し、無風環境で実施した。口径が 1/2 インチのマイクロフォン（株式会社アコー）を用いて羽音を計測した。本マイクロフォンの計測可能な周波数範囲は 20Hz-20,000Hz である。



(a) 側面図



(b) 上面図

図 2 羽音計測システムの概要図

(4) 実験システムの概要を図 2 に示す。本研究では、マイクロフォンを固定し、機体とマイクロフォンとの傾き角 (θ) と定義し、機体を 360 度回転させることで羽ばたき飛行機

の羽ばたき面と垂直な面内の羽音の計測を実施した。なお、傾き角 (θ) の詳細については図 2 に示す。機体とマイクロフォンの距離 (D) は 1 m に設定した。測定時間は 30 秒、各測定後駆動モーターを冷却するための休み時間を 10 秒程度とった。マイクロフォンのデータサンプリング周波数は 44,100 Hz である。計測条件と無次元パラメータについて表 1 にまとめた。

表 1 計測条件と無次元パラメータ

パラメータ	値
傾き角 θ [degs.]	0, 20, 40, 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 270, 280, 300, 320, 340
羽ばたき周波数 [Hz]	約 25
羽ばたき振幅 [degs.]	約 120
レイノルズ数 [-]	約 12500
無次元周波数 [-]	0.375

(4) 本研究の第二の目的を達成すべく、図 3 に示す羽の材料と厚みを変えた機体を製作し、羽音の制御効果を調査した。ベースとして考えた羽ばたき機の羽の材料と厚み (E1T2) は、テイジンテトロンフィルム、25 μ m である。本実験では、厚みが 25 μ m で材料が異なるケース (EXT2、X が変数)、材料がテイジンテトロンフィルムで厚みが異なるケース (E1TX、X が変数) のベース羽を含めて計 5 ケースの羽について羽音の計測を行い、その特性の変化を調べた。

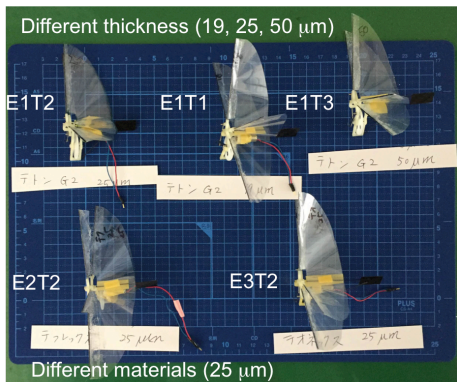


図 3 羽音制御に向けた羽ばたき試験機

(5) 音圧レベル SPL の定義は以下の式を用いた。

$$SPL = 20 \log_{10}(V_{mic}/V_{ref}) \text{ [dB]}$$

ここで、 V_{mic} はマイクに入力された電圧値であり、 V_{ref} はマイク較正によって得られる値である。なお、マイクの較正は Sound Calibrator TYPE2127 (株式会社アコー、1000 Hz、94 dB) を用いて行った。

(6) 計測された音響データは Fast Fourier

Transform (FFT) によりスペクトル分析を行った。FFT に使用した各種パラメータを表 2 に示す。

表 2 FFT パラメータ

パラメータ	値
サンプリング周波数	44.1 kHz
サンプルデータ数	32768
オーバーラップ	50%
平均処理回数	80

4. 研究成果

初めに、静止飛行中のベースとした羽ばたき機 (E1T2) の羽音の特性について示す。図 4 は傾き角 0 度時の羽音の周波数解析 (FFT) の結果である。縦軸が音圧レベル (SPL)、横軸が羽音の周波数成分を示す。羽ばたき機から発生する音は、駆動に利用するモーターから出る高周波のノイズと羽ばたき運動に起因する空気力学的音で主に構成されていることが明らかになった。羽ばたき運動に起因する音の周波数領域に注目すると、羽ばたき周波数とそのハーモニクスが高い音圧レベルを示している。羽ばたき周波数の音圧レベルより羽ばたき周波数の 2 から 3 倍の周波数の音圧レベルが高いのは、羽ばたき運動の上死点と下死点で一度ずつ羽ばたき運動により生じた渦が剥離して翼面から完全に剥がれてしまったことが原因であると考えている。

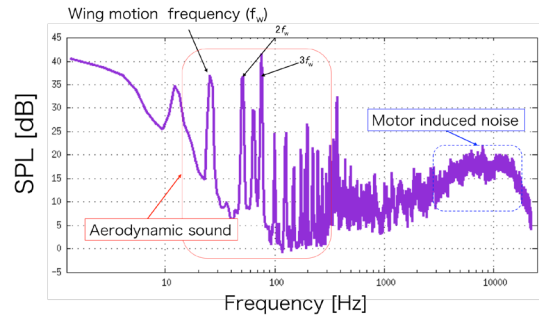


図 4 羽ばたき機の羽音の周波数特性

続いて、図 5 に周波数特性と傾き角 (θ) の関係を示す。図 4 で明らかにした羽音の周波数特性と同様な特性がどの傾き角でもみられた。ただし、傾き角 50~90 度、230~270 度で羽ばたき周波数の倍の周波数での音圧レベルが若干小さくなっており、羽音に指向性がある可能性を示唆する。

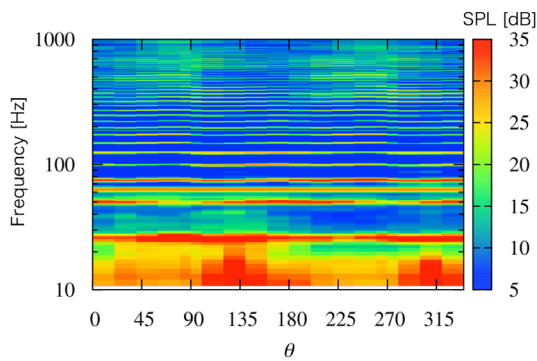


図5 傾き角と周波数特性の関係

続いて、図6に傾き角とOASPLの関係を示す。この図より、平均音圧レベルがモーター起因のノイズにより13dB程度の上昇していることが分かる。また、モーター起因のノイズは指向性を明確であるが、羽ばたき起因の羽音の指向性の有無を今回の実験データから確認することが難しかった。

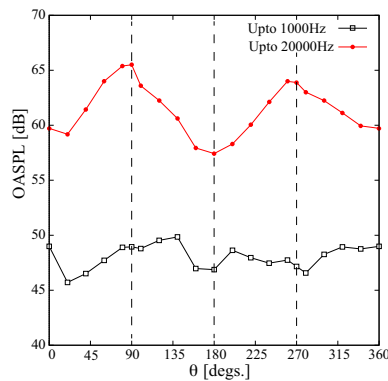


図6 傾き角とOASPLの関係

次に、図7に羽の厚みを変えた場合(E1T3)の羽音の周波数特性の比較と図8に羽の材質を変えた場合(E2T2)の比較を示す。どちらケースとも羽ばたき周波数の倍の周波数の音圧レベルが高くなり、ピークを示す。この結果は、本研究の対象模型より大型の羽ばたき実験モデルでも同様な傾向[3]が示されており、本実験の妥当性を示している。さらに、羽ばたき周波数の4倍の周波数である100Hzから200Hzの間でテスト羽(E1T3、E2T2)で大きな音圧レベルを示している。これらの結果より、同一の周波数で羽ばたき運動するとき、羽の材質と厚みを変えた場合、音圧レベルが最大になる周波数とその大きさは変えることができる。しかし、それら卓越した周波数はほぼ同じ周波数である。従って、羽ばたき周波数とそのハーモニクス成分を減衰できる羽の構造など作成すれば、静かな飛行機を開発できる可能性を示唆している。

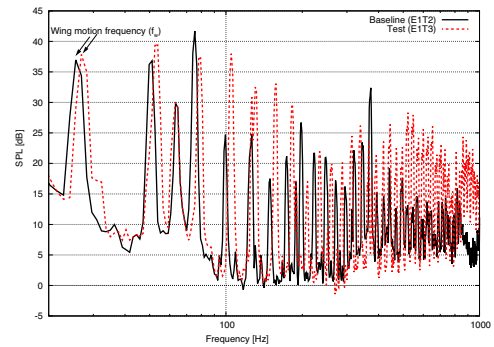


図7 厚みが異なる羽の羽音の周波数特性

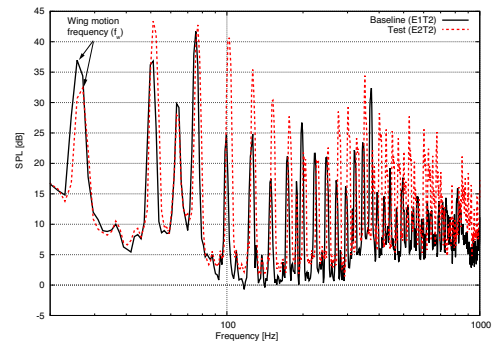


図8 材料が異なる羽の羽音の周波数特性

以上のように、羽ばたき模型飛行機から発生する羽音を計測するシステムを開発し実測に成功した。計測結果を詳細に解析することで、その羽音の特性(強さ、指向性、周波数特性)を明らかにすることができた。さらに、羽の構造を工夫し羽ばたき翼周りの流れ場を変えることで羽音制御の可能性を検討し、その効果を示した。今後は羽音の特性と平均空気力の関係を明らかにし最適化することで、これまでにない新しい羽ばたき模型飛行機を創出したい。

<引用文献>

- ① W. Shyy, H. Aono, C-K. Kang, H. Liu, An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics, Cambridge University Press 2013.
- ② T. Nakata, H. Liu, Y. Tanaka, N. Nishihashi, X. Wang, A. Sato, Aerodynamics of a Bio-inspired Flexible Flapping-wing Micro Air Vehicle, Bioinsp. Biomim. 6(2011) 045002.
- ③ Z. Lu, Q.V. Nguyen, W-L. Chan, M. Debiassi, Acoustic Characteristic of a Bat Inspired Membrane Wing with Adaptive Compliances, Proceedings on Inter Noise 2015.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

① Hikaru Aono, Yuta Ozawa, Chang-Kwon Kang, Makoto Yamamoto, Hao Liu, Effects of Wing Flexibility on Sound Characteristics of Four-winged Flapping Wing Micro Air Vehicle, 5th Joint meeting, Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Honolulu, Hawaii (USA), November 28th – December 2nd 2016 (submitted).

② 青野 光、小澤 雄太、山本 誠、野々村 拓、藤井 孝藏、劉 浩、羽ばたき模型飛行機から発生する羽音の発生メカニズム解明に向けた研究、第 47 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム、2D07、東京大学生産技術研究所、平成 27 年 7 月 2-3 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青野 光 (AONO, Hikaru)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：10623712