

令和元年6月19日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06897

研究課題名(和文) 羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性と三次元渦構造

研究課題名(英文) Effectiveness of flexible wing and three dimensional vortex structure in a flapping flight

研究代表者

石出 忠輝 (ISHIDE, Tadateru)

木更津工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：30212905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生物飛行の優位性を明らかにするために、主翼を柔軟な素材とし、ヒービング運動を付加した模型の空力特性を調査した。具体的には、ABS樹脂を造形剤とし三次元プリンタを用いて、翼幅及び翼弦方向にテーパを有する翼を種々製作し空気力測定を行った。その結果、翼幅及び翼弦方向共に、程良いテーパを与えると最大揚力係数が増加する事が確認できた。翼幅方向に適切なテーパを与えた場合、低迎角領域で揚抗比が大きくなることを見出された。

空力特性と流体現象との関連性をPIVトリガー計測手法を用いて調査し、前縁剥離渦と後縁剥離渦との位置関係及びヒービング運動と空気力変動との位相差が重要である事が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模災害時の的確で迅速な調査や、宇宙航空研究開発機構を中心に検討されている遠隔探査用小型飛翔体を用いた火星探査システムの開発において、鳥や昆虫の飛翔に見られるような高度な飛行形態を実現する事が求められている。

本研究成果は、翼の柔軟性が空力特性に与える効果とその流体力学的関連性について定量的に考察したものであり、羽ばたき翼開発における参考になるものである。プロペラ形小型無人航空機(ドローン)と比較すると、静粛性及びロバスト性(突風等に対応する飛行安定性)に優れており、社会的波及効果は高い。

研究成果の概要(英文)：In this study, the aerodynamic characteristics of a flapping wing model in which main wing is made of flexible material, in heaving motion is investigated to clarify the advantage of biological flight. The main tapered wings in span-wise or chord-wise directions are manufactured by three dimensional printer in which ABS resin is used as shaped material. As a result of aerodynamic force measurements, it is confirmed that the maximum lift coefficient increases for moderate value of taper in both span-wise and chord-wise directions. In addition, the lift-drag ratio is large in the region of low angle of attack less than five degrees when moderate value of taper in span-wise direction.

Moreover, the relation between the aerodynamic characteristics and the fluid phenomenon are investigated in detail according to particle image velocimetry trigger system. As a result of this measurements, it is found that the positional relation between the leading edge and the trailing edge vortex.

研究分野：流体力学，可視化画像計測

キーワード：バイオミメティクス 羽ばたき翼 空力特性 PIV計測 前縁剥離渦 後縁剥離渦 翼端渦 渦揚力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、生物の構造や機能から着想を得て、それらを人工的に再現することにより、工学や材料科学、医学などの様々な分野への応用を目指そうとするバイオミメティクスの研究が日本及び欧米先進国で活発に行われている。従来から羽ばたき翼に関する研究の多くは、剛体翼を対象にヒービング(体軸まわりの回転運動)、フェザリング(体軸に直交する水平軸まわりの回転運動)及びこれらの組み合わせ運動の有効性を議論してきた。しかしながら最近の研究では、鳥や昆虫の羽ばたき飛行における非定常空気力学原理の多様性が明らかになってきており、その中で翼弾性によって空力特性が大きく変化すると考えられ、翼弾性変形の効果の検証が重要視されてきている。

2. 研究の目的

大規模災害時の的確で迅速な調査や、宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心に検討されている遠隔探査用小型飛翔体(MAV: Micro Air Vehicle)を用いた火星探査システムの開発において、鳥や昆虫の飛翔に見られるような高度な飛行形態を実現する事が求められている。本研究では、生物飛行の優位性を明らかにするために、主翼を柔軟な素材とし、ヒービング(羽ばたき)運動を付加した模型の空力特性を調査し、固定翼と比較して空力的に優れている羽ばたき条件を見出す。そして、空力性能と流体力学現象との相互関係を明らかにしていく事を研究目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 主翼の製作: 根元部翼弦長 60mm, アスペクト比 8 とした楕円翼の翼厚分布を変化させ、三次元プリンタを用いて羽ばたき主翼を設計製作する。
- (2) 空気力測定: 6 分力ロードセルを用いて、空気力測定を行う。一様流速 $U=10\text{m/s}$ とし、模型迎角 $\alpha=0^\circ$ から 40° まで 1° おきに測定を行う。ヒービング振幅 $\theta=\pm 10^\circ$ 、ヒービング周波数 $f=5\text{Hz}$ とする。
- (3) 空力データ(揚力係数, 抗力係数, 揚抗比)を算出し、最大揚力係数及び最大揚抗比が得られた主翼模型に対して、高速度カメラを用いて翼面のねじれ変位を計測する。
- (4) PIV トリガー計測: 羽ばたき運動一周期における振り下ろし中間点及び振り上げ中間点における PIV トリガー計測を実施し、前縁剥離渦, 後縁剥離渦, 翼端渦のレイアウト変化を調査する。
- (5) PIV 計測と空気力測定の同時計測を実施し、流体现象と空力特性との関連について総合的に考察する。

4. 研究成果

- (1) 表 1 に示す種々の柔軟翼を 3D プリンタによって製作し、図 1 に示す羽ばたき翼模型をエッフェル型三次元風洞内(テストセクション $600\text{mm}\times 600\text{mm}$)に設置し、ヒービング運動させて以下の結論を得た。

図 2 に示す揚力曲線より、羽ばたき運動の効果は、迎角 10 度以上で顕著になる。

翼幅方向に主翼厚さのテーパを付けた場合、タイプ D (テーパ比 0.50) が最も $C_{L\text{max}}$ が大きくなった。

翼弦方向に主翼厚さのテーパを付けた場合、タイプ H (テーパ比 0.33) が最も $C_{L\text{max}}$ が大きくなった。また失速角 23 度であり、前述のタイプ D より 7 度大きい値となった。

及びの結果の再現性を確認することができた。

図 3 に示す揚抗比曲線より、翼幅方向にテーパを有するタイプ E は、迎角 $\alpha=3^\circ\sim 4^\circ$ にかけて C_L/C_D 絶対値最大となり、優れた特性を示している事が確認できた。



図 1 羽ばたき翼模型

- (2) 高速度カメラ 2 台を用いた三次元翼面変位計測システムにより、羽ばたき運動中の主翼面の時間変化を捉える事ができた(図 4)。結果として、空力特性良好な主翼タイプ H の翼端付近の振幅は、一定厚の主翼と比較して 1.3 倍になっている事が確認できた。

- (3) 模型に組み込まれているエンコーダ出力を基に、図 5 に示す PIV トリガー計測システムを構築し、特定のヒービング角度で PIV 計測することにより、羽ばたき条件の流体现象への影響を定量的に評価する事ができた。

- (4) (1)で記述した空気力測定結果を基に、PIV トリガー計測を行った結果を図 5 から図 10 に示す。図 5 から図 7 は、タイプ H の流れ場、図 8 から図 10 は、一定厚翼の流れ場を示している。図 5 に $y/b=0.25$ (y : 翼根元部から翼端に向かう翼幅方向距離, b : 片翼幅), 振り下ろし時における Type H の代表的なベクトルパターンを示す。図中白丸はそれぞれの渦核の位置を示し

	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G	Type H
material	SUS 304	AK-clear film + SUS 304	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)
chord length	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm
thickness	0.2mm	film:50 μ m vein:0.2mm	root:1.5mm tip:1mm	root:1.5mm tip:0.75mm	root:1.5mm tip:0.5mm	leading edge:1.5mm trailing edge:1mm	leading edge:1.5mm trailing edge:0.75mm	leading edge:1.5mm trailing edge:0.5mm

ている。本ベクトルパターンの PIV 解析結果 200 枚を母集団とする出現比率は 41% である。この図を見ると、翼前縁部に剥離渦 V_0 が発生し、 R_0 で再付着し逆流が生じている。また、翼後縁部近傍に同程度の領域である前縁剥離渦 V_1 と後縁剥離渦 V_2 が発生している。この 2 つの渦の領域からの流れが領域 X_0 において合流し、翼上面に前縁から 75%~100% の翼弦長範囲で強い再付着流れを誘起している。結果として、翼上面全体にわたって再付着流れが存在している事が確認できる。図 6 に $y/b=0.50$ における Type H の代表的なベクトルパターンを示す。本ベクトルパターンの出現比率は 47% である。この図を見ると、前縁剥離渦 V_3 と後縁剥離渦 V_4 の流れが合流し、 R_1 で再付着した後、 X_1 の領域で平均流速 2.0~3.0m/s の逆流が、前縁から 10%~100% の翼弦長に至る広範囲の翼表面に沿って存在していることが確認できる。図 7 に $y/b=0.75$ における Type H の代表的なベクトルパターンを示す。本ベクトルパターンの出現比率は 44% である。この図を見ると、翼後方に前縁剥離渦 V_5 と後縁剥離渦 V_6 が発生し、 X_2 の領域で翼全面にわたり 5.0m/s の逆流が翼面に沿って確認できる。これらの 3 断面の計測結果より、前縁剥離渦と後縁剥離渦との合流領域において、流れが加速され翼上面に再付着し、逆流領域を形成する事によって渦揚力を得ているものと考えられる。図 8 に $y/b=0.25$ における一定厚翼の代表的なベクトルパターンを示す。本ベクトルパターンの出現比率は 47% である。この図を見ると前縁剥離渦 V_7, V_8, V_9 が翼上面に沿って発生しているのが確認できる。Type H と比較すると、領域 X_0 のような後縁剥離渦との合流現象は観察できない。その結果、翼上面における渦領域が小さくなっている。図 9 に $y/b=0.50$ における一定厚翼の代表的なベクトルパターンを示す。本ベクトルパターンの出現比率は 63% である。この図を見ると、Type H と異なり、後縁剥離渦領域 V_{12} が縮小し、結果として、再付着領域 X_3 内の流

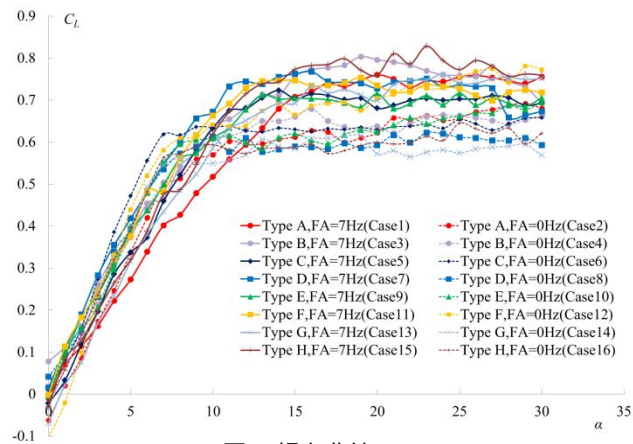


図 2 揚力曲線

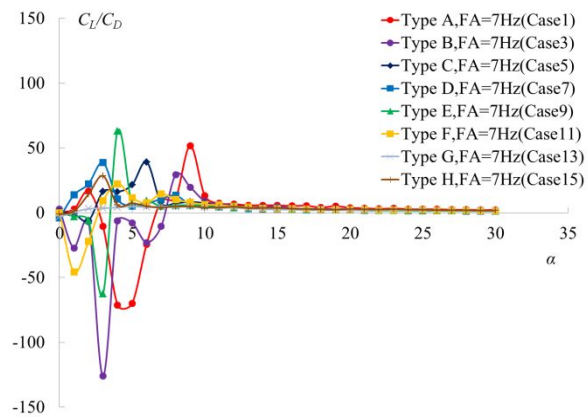


図 3 揚抗比曲線

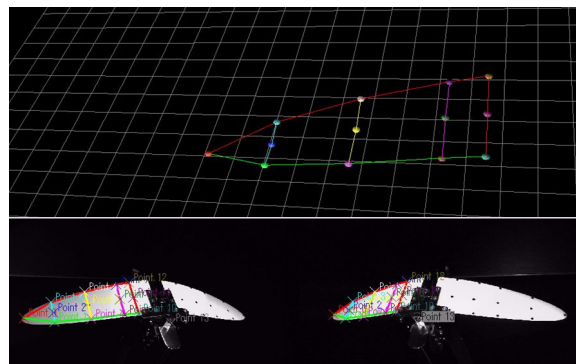


図 4 翼面変位計測

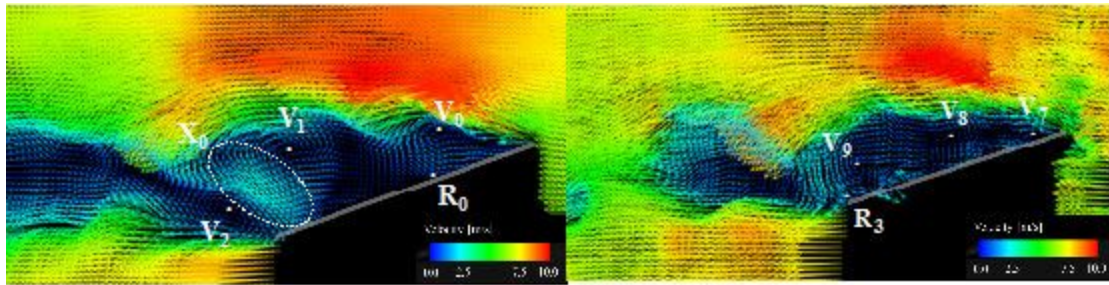


図 5 PIV 解析結果(Type H, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.25$)

図 8 PIV 解析結果(一定翼厚, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.25$)

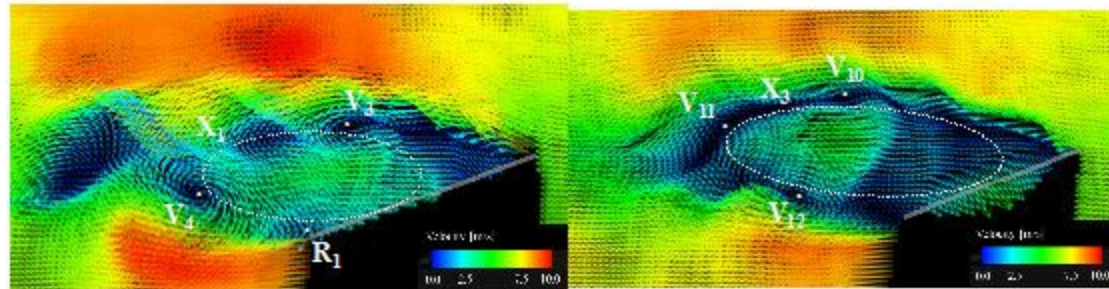


図 6 PIV 解析結果(Type H, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.50$)

図 9 PIV 解析結果(一定翼厚, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.50$)

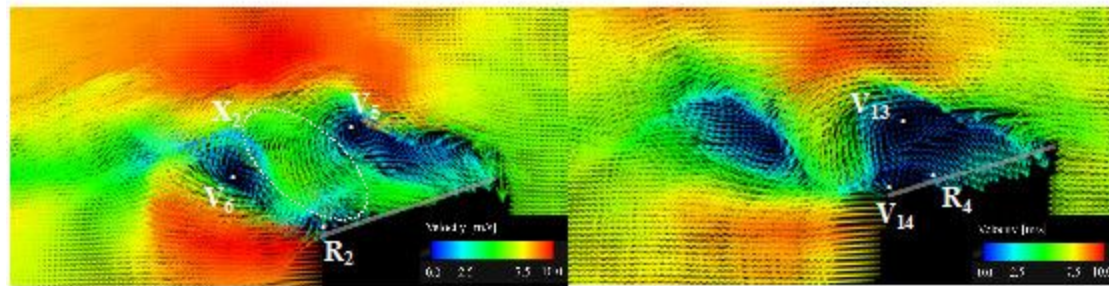


図 7 PIV 解析結果(Type H, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.75$)

図 10 PIV 解析結果(一定翼厚, $\alpha=20^\circ$, $\theta=0^\circ$, $y/b=0.75$)

れが弱まっている事が確認できる。図 10 に $y/b=0.75$ における一定厚翼の代表的なベクトルパターンを示す。本ベクトルパターンの出現比率は 55% である。この図を見ると、前縁剥離渦 V_{13} と後縁剥離渦 V_{14} が存在している事が確認できる。後縁剥離渦の位置が Type H と大きく異なり、結果として Type H で観察された強い再付着流は存在しない。これらの事から、翼弦方向に適切なテーパを設けると、前縁剥離渦と後縁剥離渦が隣接して存在する比率が増し、結果として加速された再付着流が翼上面に到達しているものと考えられる。

(5) 流体力と PIV の同時計測を実施し、Type H においてヒービング運動と揚力変動の位相が 45° ずれており、前述の前縁剥離渦が存在している間、揚力が増加している事が分かった。

(6) 現在シャインフルーグアタッチメントを有する 2 台の CCD カメラと、X 軸クロスローラにより精密位置決め可能なキャリブレーションプレートを用いたシート面内三次元 PIV ステレオ計測システムの構築完了し、一様流速中において良好な結果が得られている。今後の展望として、本計測システムによって前縁剥離渦、後縁剥離渦のスパン方向の速度成分を算出し、さらに翼端渦領域の PIV 計測を行うことによって、羽ばたき翼まわりの三次元剥離渦挙動を実験的に明らかにしていく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

T.Ishide, K.Naganuma, The Aerodynamic Improvement of a Flexible Flapping Wing, Journal of Advanced Experimental Mechanics, 査読有, Vol.1, pp.23-29(2016)

[学会発表](計 9 件)

石出忠輝, 木村幹, 藤井亮, 歸山智治, 羽ばたき飛行における翼幅及び翼弦方向の柔軟翼の効果, 日本機械学会第 29 回パイオフロンティア講演会, 2018

Y.Takagi, S.Otsubo, R.Fujii, T.Ishide, Study on Aerodynamic Characteristics of Flapping wing based on a Bird's Structure, The 3rd International Conference on Science of Technology Innovation 2018, Nagaoka (Japan), 2018

木村幹, 石出忠輝, 中野滉大, 板澤磨央, 藤井亮, 歸山智治, 羽ばたき飛行における翼幅及び翼弦方向の柔軟性の効果, 日本機械学会関東支部第 24 期総会講演会, 2018

T.Ishide, S.Obayashi, K.Nakano, K.Shimoyama, Effectiveness of flexible wing in a flapping flight, Proc. of the 17th International Symp. on Advanced Fluid Information, Sendai (Japan), 2017

T.Ishide, S.Obayashi, K.Nakano, K.Shimoyama, Effectiveness of flexible wing in a flapping flight, The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (Okinawa), 2017

中野滉大, 石出忠輝, 板澤磨央, 藤井亮, 歸山智治, 下山 幸治, 大林茂, 羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

中野滉大, 石出忠輝, 板澤磨央, 藤井亮, 歸山智治, 羽ばたき飛行における翼幅及び翼弦方向の柔軟性の効果, 日本機械学会関東支部第 23 期総会講演会, 2017

T.Ishide, S.Obayashi, K.Nakano, K.Shimoyama, Effectiveness of flexible wing in a flapping flight, Proc. of the 16th International Symp. on Advanced Fluid Information, Sendai (Japan), 2016

石出忠輝, 中野滉大, 板澤磨央, 藤井亮, 歸山智治, 下山 幸治, 大林茂, 羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 前野 一夫

ローマ字氏名: Maeno Kazuo

所属研究機関名: 東京工科大学

部局名: 工学部

職名: 客員教授

研究者番号 (8 桁): 30133606

研究分担者氏名: 劉 浩

ローマ字氏名: Ryu Hiroshi

所属研究機関名: 千葉大学

部局名: 大学院工学研究院

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 40303698