

令和元年6月15日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06894

研究課題名(和文) 超低レイノルズ数における昆虫サイズ翼の空力特性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of aerodynamic characteristics of insect sized wings at very low Reynolds number

研究代表者

岡本 正人 (Okamoto, Masato)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：70462124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫の翅に相当するレイノルズ数における翼の空力特性を、高感度な天秤を持つ独自の超小型低圧風洞装置によって解明することが本研究の目的である。この研究を通して、昆虫の翅に見られる独特の形状(トンボの翅のコルゲート翼等)における空気力学特性をレイノルズ数1000~10,000の範囲で得ることができた。さらに、CFD(数値流体解析)でもコルゲート翼に発生する渦を捉えることに成功した。一方、三次元翼の実験を進めた結果、低アスペクト比翼の空力特性に、このレイノルズ数領域特有の渦揚力消失現象が見つかった。これは今までに発表された低アスペクト比翼の空気力学特性としては初めての現象を捉えたものと思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昆虫サイズの翼の空力特性において、特に揚力係数、抗力係数、ピッチングモーメントなどの基礎的な空力データは極めて少ない。本研究ではその計測を重点的に行い、このレイノルズ数特有の現象がいくつか見つかった。これらの結果は、近年開発が盛んになってきた昆虫サイズの超小型航空機だけでなく、超小型のファンブレードの開発にも重要なデータになる。さらに、大気密度が地球の1/100という火星を飛行する航空機は、翼のレイノルズ数は地球上よりはるかに小さくなることから、そのデータとしても活用できる。さらにこの成果は、昆虫などの生態の解明やバイオミミクリ(生物模倣技術)にも応用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to ascertain the aerodynamic characteristics of the wings corresponding to insect wings by conducting the original low pressure wind tunnel test.

Through these studies, the aerodynamic characteristics of the wing sections of insects, such as corrugated thin profile of a dragonfly, were obtained at Reynolds number ranging between 1000 and 10,000. In addition, the vortex in the corrugation of thin corrugated airfoil was successfully analyzed by CFD (Computational Fluid Dynamics) solution.

Further, the new phenomenon was found in the planform aerodynamic characteristics of the small aspect ratio wings. Although the large maximum lift coefficient was obtained for the wing with the small aspect ratio around 1 at Reynolds number of 10,000, it decreased according to the decrease of Reynolds number due to the disappearance of vortex lift. In other words, the obvious Reynolds number effects of low-aspect-ratio wings existed at the current Reynolds number.

研究分野：流体力学

キーワード：翼の空力特性 低レイノルズ数 昆虫の翅

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

飛行昆虫の翅には航空機とは異なった翼構造や、その役割が不明な多くの形態的特徴があり、その流体力学的な解明はバイオミクラー（生物模倣技術）として工学的応用が期待できる。

このような昆虫の翅については、羽ばたき翼も含めると多くの研究成果があるが、実際にその空気力を測定した結果は極めて少ない。その理由は、レイノルズ数が小さいために翼に作用する空気力が微小であることが挙げられる。特に航空機の開発においては重要なデータである二次元翼空力特性や三次元翼空力特性において、迎角変化に対する揚力、抗力、ピッチングモーメントの空力係数を測定したデータは極めて少ない。これに対して申請者は、昆虫のような超低レイノルズ数領域の翼に作用する微小空気力を、高感度天秤を組み込んだ超小型低圧風洞装置を開発することによって計測に成功した（科研費課題番号 25630395）。これまでの低速風洞の三分力測定ではレイノルズ数 $Re=5000$ が限界であったが、本風洞装置では $Re=1000$ で測定が可能になり、昆虫の翅を直接計測できるようになった（文献①）。

近年、Pico Air vehicle（文献②）と呼ばれる昆虫サイズの超小型航空機が開発されるようになり、さらに地球の 1/100 の密度の火星で飛行する火星探査無人航空機（文献③）でも、その翼のレイノルズ数は非常に小さくなることが知られている。この研究で得られたデータは、これらの開発に重要なデータになると考えられる。また、その空力特性は低レイノルズ数領域で飛行する生物の生態解明にもつながる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、背景で述べた風洞装置を利用して、昆虫サイズ翼の空力特性を得ることを研究の目的とする。この研究目的を達成するための課題は以下の通りである。

- (1) 実験結果の検証には流れの解明が不可欠で、そのために PIV (Particle Image Velocimetry) による流れの可視化技術を確立する。
- (2) 昆虫サイズの翼における空気力学特性、及び生物の翅が持つ特有の形態に対する空気力学的效果を、可視化技術を加えた風洞実験を通して得る。
- (3) 風洞実験と共に近年研究が盛んになってきた CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を並行して実施し、CFD の有効性の検証と風洞実験による現象の解明に取り組む。

3. 研究の方法

研究課題を達成するため、具体的に行った研究方法は次の 3 点である。

- (1) 低圧風洞装置の改良を行いながら、同時に流れの可視化として本研究に最適な PIV 技術を確立する。PIV による流れの可視化を行う場合、本風洞装置は低圧容器内に設置されているため、直接この中に粒子を入れることが難しい。そこで、同一風洞による可視化専用風洞装置を製作し大気圧中で PIV 計測を実施する。
- (2) 低圧風洞装置を用いて、二次元翼、及び三次元翼の空力特性を計測し、さらに実際の生物の翼についてもその空力特性を検証する。
- (3) CFD は BCM(Building Cube Method)による解析を研究分担者を中心に進め、実験結果と比較する。

4. 研究成果

(1) PIV 計測方法の確立

PIV による可視化技術を確立するため、図 1 のような専用風洞装置を製作した。低圧風洞装置と同一の風洞をもう一台製作し、回流洞をその周囲に作ることで、トレーサー粒子の拡散を少なくした。当初、本風洞を使用したステレオ PIV 計測を検討したが、課題が山積したため、計測方法を工夫することでこの領域の現象を捉える工夫を行った。具体的には翼弦方向、断面方向、表面の可視化のように複数の流れの可視化方法を考案した。特に、翼表面の流れを可視化する方法にオイルフローがあるが、この低レイノルズ数領域では流速が小さいため翼表面のオイルが動かないという問題点がある。そこで、図 2(a)のようにレーザーシートを翼面と平行に作ることで、PIV によって翼表面の流れの可視化を可能にした(図 2(b))。

(2) 二次元翼空力特性

低圧風洞装置によって、二次元翼では種々の翼型の空力係数の測定を行った。まず、翼厚の異なる対称翼型 NACA0006~NACA0012 について、 $1000 \leq Re \leq 80,000$ 広範囲のレイノルズ数効果

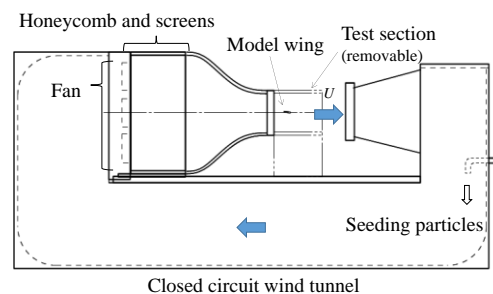
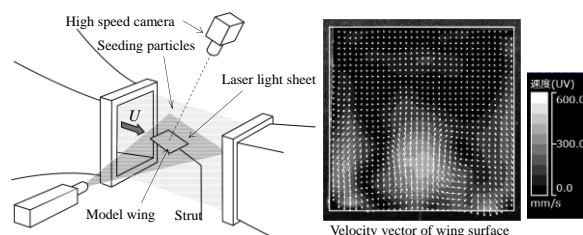


図 1. 製作した流れの可視化専用風洞装



(a) 翼表面流れの可視化方法 (b) 測定結果の例
図 2. PIV による流れの可視化方法とその結果の例

を調べた。その結果、最大揚抗比は $Re < 10,000$ では翼の前後を逆にした方が高くなること、翼厚の影響は $Re = 15,000$ 付近で最も大きくなることが分かった (図3)。この結果は低レイノルズ数領域の典型的な特性を表していると言える。次に、トンボの翅断面に見られるコルゲート薄翼については、多数の実験データを得た。さらに、CFD による解析も同時に進め、コルゲート断面の凹凸にできる渦を捉えることに成功した。これらの結果は逐次、学会で発表した。

(3) 三次元翼空力特性

今回の研究の中で、最も成果があったのは、低アスペクト比翼における翼端渦による渦揚力の消失現象が見つかったことである。低アスペクト比翼は、翼端渦によって高迎角まで失速しない特性を持ち、さらにその揚力係数には渦揚力が付加され、最大揚力係数が大きくなることが知られている。最初に、アスペクト比1の矩形翼に作用する空気力について $Re = 10,000$ 付近で実験を行うと、揚力係数曲線は高レイノルズ数の実験結果との差は小さく、低アスペクト比翼のレイノルズ数依存性は小さいと思われた。ところが、レイノルズ数を小さくしていくと、揚力係数が急減する失速現象が低迎角で起こるようになり、さらに $Re = 1000$ では翼端渦による渦揚力が全く見られなくなるという現象が捉えられた (図4)。そこで、PIV による流れの可視化を行ったところ、翼端渦はどのレイノルズ数でも見られるが、レイノルズ数が減少すると翼端渦は翼表面から離れ、渦揚力として作用していないことが分かった。その結果は渦格子法に前縁吸引力類推 (Polhamus's leading-edge suction analogy) を加えた理論揚力傾斜との比較においても明らかになったため、論文にまとめた。

さらに、アスペクト比や平面形状を変化させると、この現象は、楕円翼や三角形状翼 (デルタ翼) のように平面形状が異なる場合にも生じること、また渦揚力が消失するアスペクト比には一定の範囲のあることが分かった。例えば矩形翼の場合、アスペクト比が1付近でこの現象が生じ、アスペクト比が増加しても、減少してもその現象は明確でなくなった。図5は様々な平面形におけるレイノルズ数変化と最大揚力係数の関係を示したものである。すなわち、どの平面形も一定のアスペクト比の翼にレイノルズ数が減少した時の最大揚力係数の減少が見られることが分かる。これらの結果は逐次学会で発表してきたが、論文としても投稿し現在審査中である。

(4) 研究に付随したその他の測定結果

レイノルズ数に対する球の抗力係数の変化は古くから研究されており、さらに流線形物体の抗力係数についても飛行船の抗力係数の測定と共に高レイノルズ数では測定結果が存在する。しかし、レイノルズ数が昆虫の胴体に相当するまで減少したときのデータは全く存在しない。レイノルズ数が減少すると流線形物体の抗力係数は増加し、どこか

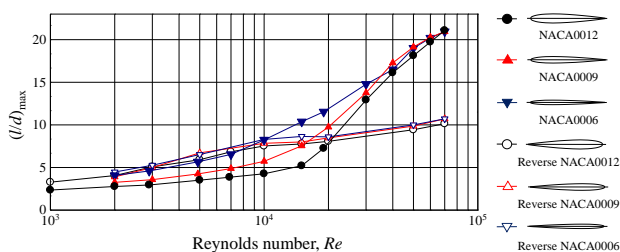


図3. NACA 対称翼型の最大揚抗比のレイノルズ数に対する変化

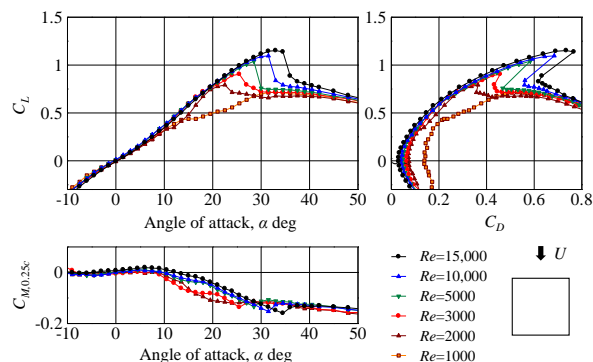


図4. 低アスペクト比翼における空力曲線のレイノルズ数による変化 (AR=1 矩形平板翼の場合)

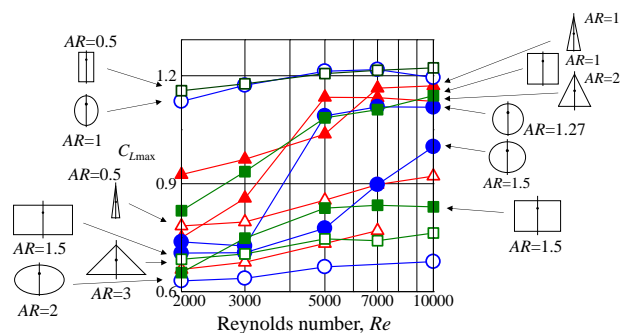


図5. 様々な平面形におけるレイノルズ数変化による最大揚力係数の変化

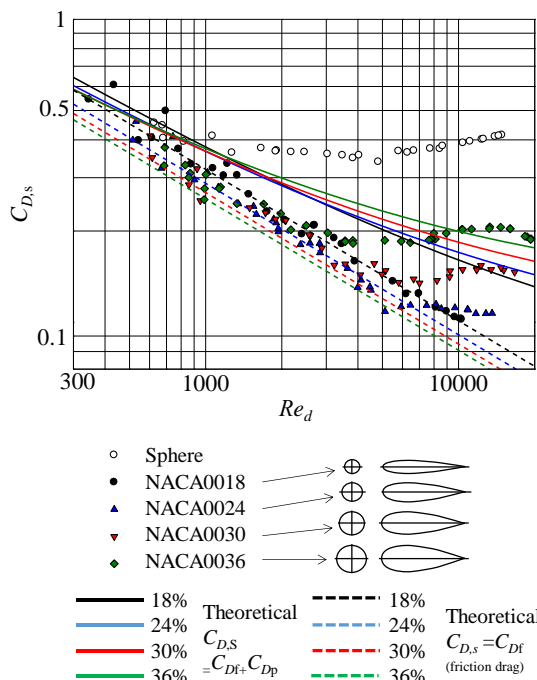


図6. 昆虫の胴体に相当する流線形物体の抗力係数のレイノルズ数変化

のレイノルズ数で球と同じになると思われるがそのレイノルズ数は判然としない。そこで、NACA0018 から NACA0036 の対称翼型の回転体の抗力係数を低圧風洞によって測定した。その結果、流線形回転体の直径を基準としたレイノルズ数 $Re_d < 700$ で球の抗力係数（直径基準）と流線形回転体の抗力係数には差がなくなることが分かった（図 6）。

(5) 社会への発信

研究成果は学会発表を通して社会に発信してきたが、前科研費課題（課題番号 25630395）の最後に投稿した論文（文献①）が、2018 年日本航空宇宙学会論文賞を受賞した。これに伴って、今回の研究成果も含めた昆虫サイズ翼の空力特性や実験方法について一般雑誌へ寄稿した。

<引用文献>

- ① M. Okamoto, K. Ebina, “Effectiveness of Large-Camber Circular Arc Airfoil at Very Low Reynolds Numbers”, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 59, No. 5, 2016, pp. 295–304
- ② R. J. Wood, et al., “Progress on pico air vehicles, Int. J. Robot. Res. 31, 11, 2012, pp.1292-130
- ③ T. Liu, A. Oyama, K. Fujii “Scaling Analysis of Propeller-Driven Aircraft for Mars Exploration” J. Aircraft Vol. 50, No. 5, 2013

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 岡本 正人、佐々木 大輔、佐々木 航星、中村 輔、昆虫サイズ AR=1 矩形翼の空力特性、日本航空宇宙学会論文集、2017, Vol. 65, No.5, pp. 178-183, 査読有
<https://doi.org/10.2322/jjsass.65.177>
- ② 岡本 正人、佐々木 大輔、佐々木 航星、中村 輔、昆虫サイズ翼の平面形空力特性、, JAXA-SP-18-005, 2019, pp. 195-198, 査読無, ISSN 2433-2232(Online)

[学会発表] (計 18 件)

- ① 飯岡大樹, 小林桂, 岡本正人, 佐々木大輔, 低レイノルズ数における折り曲げ薄翼の数値的・実験的研究, 日本航空宇宙学会 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2016
- ② Tasuku Nakamura, Masato Okamoto, Disappearance of vortex lift on low aspect ratio wing at very low Reynolds number, Thirteenth International Conference of Flow Dynamics, Tohoku University, 2016
- ③ Daiki Iioka, Kazuki Fukuda, Masato Okamoto, Daisuke Sasaki, Computational Analysis of Thin Airfoils under Low-Reynolds Number Flow using Block-Structured Cartesian Mesh, AIAA Science and Technology Forum and Exposition, 2017
- ④ 岡本正人, 稲田喜信, 小幡 章, 砂田 茂, 飛翔生物におけるレイノルズ数効果, 日本航空宇宙学会 第 48 期年会講演会, 2017
- ⑤ 佐々木航星, 岡本正人, 翼平面形状におけるレイノルズ数依存性, 日本航空宇宙学会 第 48 期年会講演会, 2017
- ⑥ 藤井遼太, 岡本正人, コルゲート翼のレイノルズ数依存性, 日本航空宇宙学会 第 49 回流体力学講演会/第 35 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2017
- ⑦ 中村 輔, 岡本正人, 超低レイノルズ数領域における円板翼の空力特性, 日本航空宇宙学会 第 55 回飛行機シンポジウム, 2017
- ⑧ Yuya Shiozaki, Masato Okamoto, Aerodynamic Characteristics of Stream Lined Symmetrical Airfoil at Very Low Reynolds Number, Fourteenth International Conference of Flow Dynamics, Tohoku University, 2017
- ⑨ 三輪恭也, 夏目雄太, 佐々木大輔, 岡本正人, 下山幸治, 超低レイノルズ数領域における低アスペクト比矩形翼の流体解析, 日本機械学会 北陸信越支部 第 55 期総会・講演会, 2018
- ⑩ 岡本正人, 鮫名啓太, 論文賞 Effectiveness of Large-Camber Circular Arc Airfoil at Very Low Reynolds Numbers, 日本航空宇宙学会 第 49 期年会講演会 記念講演, 2018
- ⑪ 岡本 正人、佐々木 大輔、佐々木 航星、中村 輔、昆虫サイズ翼の平面形空力特性、日本航空宇宙学会 第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2018
- ⑫ 山口裕也, 岡本正人, 佐々木大輔, 下山幸治, 大林 茂, コルゲート翼における凹凸が空力特性に与える影響の数値解析, 日本航空宇宙学会 第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2018
- ⑬ 小坂明生, 岡本正人, 低レイノルズ数における細長物体形状の空力効果, 日本航空宇宙学会 第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2018
- ⑭ 森 敦嗣, 岡本正人, 大きな上反角を有する低レイノルズ数翼の空力特性, 日本航空宇宙学会 第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙数值シミュレーション技術シンポジウム, 2018

- ⑮ 岡本正人, 森 敦嗣, 山崎拓人, 上窪雅也, 超小型火星探査飛行機の形態における一提案, 日本航空宇宙学会 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018
- ⑯ Yuya Yamaguchi, Daisuke Sasaki, Masato Okamoto, Koji Shimoyama, Shigeru Obayashi, Numerical Investigation of Geometrical Corrugation Influence, Fifteenth International Conference of Flow Dynamics, Tohoku University, 2018
- ⑰ Atsushi Mori, Masato Okamoto, Aerodynamic Characteristics of Wings with Large Dihedral angle at Low Reynolds Number, Fifteenth International Conference of Flow Dynamics, Tohoku University, 2018
- ⑱ 藤井遼太, 岡本正人, 定常翼としてのトンボの翅の空力特性, 日本航空宇宙学会, 第 56 回飛行機シンポジウム, 2018

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 岡本正人, 昆虫サイズ翼の空力特性においてわかったこと, 日本航空宇宙学会誌 Vol. 66, No. 12, 2018, pp. 355, DOI https://doi.org/10.14822/kjsass.66.12_355
- ② 岡本正人, 昆虫の翅の空力特性と風洞実験装置, 昆虫と自然, ニューサイエンス社, 2018, pp.31-35, ISSN 0023-3218

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：佐々木 大輔

ローマ字氏名：Daisuke Sasaki

所属研究機関名：金沢工業大学

部局名：工学部 航空システム工学科

職名：准教授

研究者番号：60507903

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。