

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：33302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630395

研究課題名(和文)超小型低圧風洞の開発と超低レイノルズ数領域の昆虫サイズ翼空力特性の研究

研究課題名(英文)Development of small low pressure wind tunnel and study on aerodynamic characteristics of insect sized wing 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) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫のような小さな翼に作用する空気力は非常に微小であることから、レイノルズ数が10,000以下の翼の空力特性に関する実験データはほとんど得られていない。そこで、この小さな翼の空力特性を得るための専用の低圧風洞装置を開発した。その結果、レイノルズ数が1000～10,000の翼に作用する空力係数が精度よく測定できるようになった。そのため、本風洞を用いてさまざまな翼の空力特性について実験を試みたが、特にコガネムシの鞘翅に見られる大きなキャンバの円弧薄翼の空力特性で興味ある結果が得られた。このような小さな翼の空力データは、小型の冷却ファンや昆虫サイズの超小型航空機の翼の開発に役立つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：There are few experimental data on the aerodynamic characteristics of wings at Reynolds numbers less than 10,000 which correspond to those of insect wings, because the aerodynamic forces acting on the wing are very small. The objective of this study is to ascertain the aerodynamic characteristics of small wings like an insect wing through wind tunnel tests. In order to overcome the difficulty of experiment, a unique low-pressure wind tunnel was designed. As a result, the aerodynamic forces and moment acting on the wing were measured at Reynolds numbers between 1000 and 10,000. In the various examined airfoils, the aerodynamic characteristics of a large-camber thin circular arc airfoil which was seen in the elytra sections of beetles were more interesting results. The aerodynamic data of the small wings will be useful in designing wings which are used for the small cooling fan and insect-sized micro-air vehicles (MAVs).

研究分野：流体力学

キーワード：風洞実験 超低レイノルズ数 翼の空力特性 昆虫の翅

1. 研究開始当初の背景

大型の航空機に使われる翼は、翼型や平面形に関する系統的な風洞実験や理論解析による多数のデータが存在する。しかし、翼弦長を基準としたレイノルズ数 (以下 Re と表記) が 10,000 以下になる昆虫サイズの翼の系統的な空力データは非常に少ない。一方、昆虫の翅の形状は、航空機とは明らかに異なった特徴を有している。

昆虫のような超低レイノルズ数領域においては、航空機に使われるような前縁が丸い流線形の翼型は性能 (最大揚力係数や揚抗比) が悪くなり、薄いギザギザした非流線形の翼型の方が性能がよいことがある程度分かってきた (文献①, ②)。さらに、昆虫の翅は断面形状以外にも表面構造物等に生物特有の特徴を持っており、例えば、チョウの翅面は扁平な鱗粉で覆われており、生物学においてその構造の解明と機能の研究が進んでいる (文献③)。しかし、これらの形態や構造的特徴の空力的効果については十分検証ができていない。この検証が困難である理由の一つは、生物の翼が小さすぎて空気力を直接計測できない点にある。生物が長い進化の過程で得た超低 Re 数領域の翼の空気力学的特性を高い精度で計測できればその学術的意義は大きいと考えられる。また、これらの結果は、超小型の冷却ファンブレードや、災害現場や自然観測用の昆虫サイズの超小型航空機 (Pico Air Vehicle 文献④)、さらに、密度が地球の 1/100 という低圧環境下で飛行する火星無人探査航空機等への工学的応用が期待できる。

2. 研究の目的

専用の超小型低圧風洞と高感度の三分力天秤を組み合わせた小さな飛翔生物専用の風洞実験装置を開発し、昆虫の翅に見られる特有の形態や構造に対する空力的効果を微小空気力の計測を通して検証することを研究の目的とする。

3. 研究の方法

翼に作用する空気力を風洞実験によって測定する場合、低圧環境下で風洞実験を行うと、大気圧での実験と同じレイノルズ数を保つためにはより大きな風速が必要になる。このとき翼に作用する空気力は密度に反比例するが、風速の二乗に比例する動圧によって低圧環境下の方がより大きな空気力を得ることができる。そのため、提案した微小な空気力を測定する場合、低圧の環境を作ることにより低レイノルズ数領域まで測定が可能になると考えられる。この原理によって本研究に必要な低圧風洞装置および計測装置を開発し、昆虫サイズの翼の空力特性について計測を行う。さらに、本研究室では大気圧中でも $Re < 5000$ でも測定が可能で超高感度の三分力天秤を開発しており、これと組み合わせることで $Re = 1000$ における翼特性についても

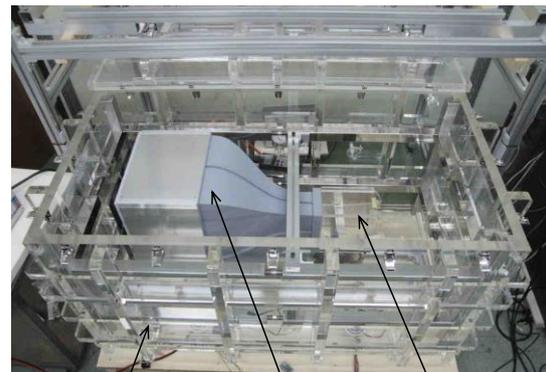
測定が可能になると考えられる。

4. 研究成果

(1) 風洞装置の開発

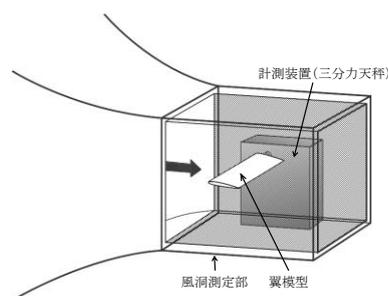
開発した低圧風洞装置および測定部の構成を図 1 に示す。本風洞装置は、図 1(a) のように内部寸法が 640(W)mm × 600(H)mm × 1240(L)mm のアクリル製真空デシケータ (伸栄産業株式会社) 内に自作の超小型風洞を設置している。風洞装置は 6 個のファンを整流部入口に並べることで拡散胴を無くし、全長を短くすることで小型化している。本装置では真空デシケータ内の圧力を大気圧 ~ 10kPa まで変化させて測定した。透明のアクリル製の真空デシケータを使用するメリットは実験中の翼の変形状態や周囲の流れを外部から容易に観測できることである。図 1(b) は 100(W)mm × 160(H)mm の長方形断面を持つ風洞測定部で、風速は $U = 7 \sim 10$ m/s に設定できる。風洞測定部における乱れの強さは 0.3% 以下 (大気圧) である。測定には、自作の三分力天秤を測定部の側面に取り付け、翼模型を両側面壁と僅かな隙間を設けて片持ち式に支持することで二次元翼として測定した。また、天秤に取り付けた超小型ステッピングモータで迎角を変化できる。天秤の最小読取値は、揚力が 3.4×10^{-5} N、抗力が 2.2×10^{-5} N、ピッチングモーメントは 2.1×10^{-7} Nm である。

風洞装置はその精度を下記のような実際に翼の測定を行いながら検証すると共に、細部に改良を加え、昆虫サイズの翼の測定に有効であることを確認した。



真空デシケータ 超小型風洞 風洞測定部

(a) 真空デシケータ内に設置した超小型風洞



(b) 風洞測定部の模型設置方法

図 1 本研究で開発された低圧風洞

(2) コルゲート翼の空力特性

トンボの翅の断面形は図 2(a)のようなギザギザしたコルゲーションを持った薄翼であるが、この翼の断面形状を図 2(b)のようなアルミ模型で再現し風洞実験を行った。昆虫に相当する低レイノルズ数領域での空力特性を得ると共に、類似した翼型と比較することでコルゲート薄翼の効果を検証した。図 2(c)はその比較した翼型で、薄板を「への字」状に折り曲げた折り曲げ薄翼 (airfoil 1)、コルゲート薄翼 (airfoil 2)、その凹部を塞いだ厚翼 (airfoil 3) を比較した。なお、airfoil 3 は、最大揚力係数 $C_{l\max}$ に影響が大きい後縁部は薄い板状のままとした。

図 3 はコルゲート薄翼 (airfoil 2) の迎角に対する揚力係数 C_l を表した揚力曲線と、抗力係数 C_d との関係を表した極曲線 (Polar curve) を示している。レイノルズ数は $2000 \leq Re \leq 20,000$ で変化させた。 $Re \geq 5000$ では迎角 $\alpha \leq 8\text{deg}$ では揚力曲線の非線形性は比較的小さく、 $\alpha > 8\text{deg}$ で C_l はほぼ一定になる。しかし、 $Re \leq 3000$ では揚力傾斜が小さくなると共に揚力曲線の非線形性が増加する。 C_d はレイノルズ数と共に増加し、揚抗比がレイノルズ数の減少と共に小さくなる事が分かる。

図 4 は airfoil 1~3 の最小抗力係数 $C_{d\min}$ と最大揚抗比 $(l/d)_{\max}$ を比較したものである。 $C_{d\min}$ はレイノルズ数の増加による摩擦抗力の減少と共に減少するが、 $Re \leq 5000$ では翼型による差は小さくなる。 $Re \geq 10,000$ では airfoil 1,2 の薄翼は airfoil 3 と比較して大きくなり、特に airfoil 2 は $Re=20,000$ で最も大きくなる。一方、 $(l/d)_{\max}$ は $Re \leq 5000$ で airfoil 1 と airfoil 2 は殆ど同じで、airfoil 3 が最も小さい。 $Re \geq 7000$ では airfoil 1 が最も大きくなり、 $Re \geq 15,000$ では airfoil 3 は airfoil 2 よりも大きくなる。このことから、コルゲート薄翼は、昆虫の翅に相当する $Re < 10,000$ で周囲を塞いだ厚翼よりは有効で、薄い板を折り曲げた「への字」翼とは $Re \leq 5000$ で $(l/d)_{\max}$ に差がなくなることが分かる。

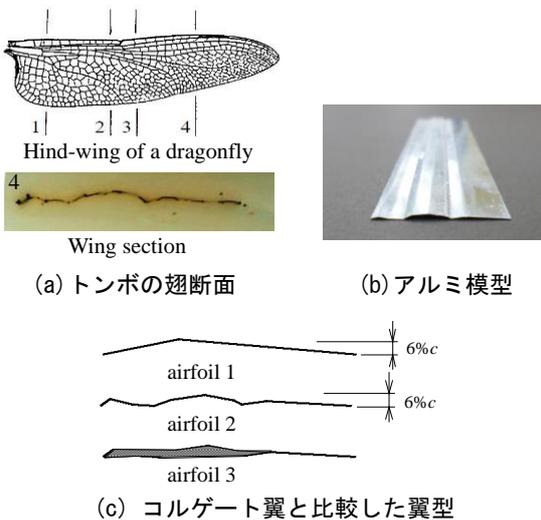


図 2. 実験翼型

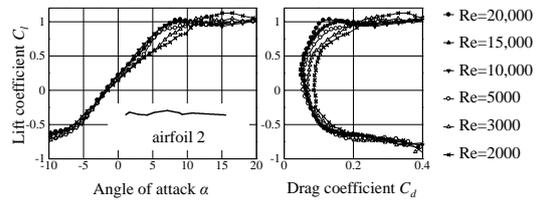


図 3 コルゲート薄翼の空力特性

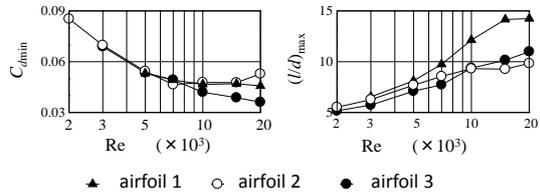


図 4 実験翼型の主要空力係数のレイノルズ数効果

コルゲート翼と厚翼の最小抗力係数 $C_{d\min}$ が $Re \leq 10,000$ では増加しないことから、図 5 のような Airfoil 4~Airfoil 6 の対称翼型の抗力 C_d を比較した。図 6 はその結果である。面白いことに $Re \leq 10,000$ の場合、コルゲーションを持った翼型 (Airfoil 4) が最も小さく、薄い平板より $C_{d\min}$ が僅かに小さくなる。ただし、 $Re=20,000$ では、流線形に近い Airfoil 5 の方が小さい。

このことから、 $Re < 10,000$ では Airfoil 4 のようなコルゲーションを持った対称断面は抗力を小さくするために有効である可能性がある。特に、薄い平板 (1.3% c) と同程度かそれ以下の C_d を示すことは、厚さを 5% c にしてもコルゲート断面を使うことで C_d を増加させることなく強度を高くできるメリットがある。そのため、例えば細いアンテナや構造物の支柱等の断面に使用できるのではないかと考えられる。

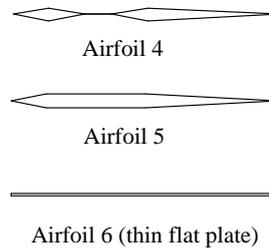


図 5 コルゲートを持つ対称翼型と比較翼型

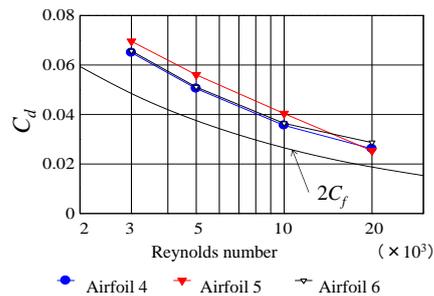


図 6 レイノルズ数の変化と抗力係数

(3) コルゲート表面の効果

チョウの鱗粉のような表面性状の効果調べていく中で、流れに直角に置かれた細かいコルゲート面を持つ平板の抗力が滑らかな面より小さくなることが判った。図7は、この実験に使用したSurface 1~7のコルゲート面を持つ平板翼で、殆ど境界層内に隠れてしまうような小さな凹凸を持っている。

図8はその最小抗力係数 $C_{d\min}$ の測定結果である。Surface 1は他の表面と比較してどのレイノルズ数においても $C_{d\min}$ が小さくなる事が分かる。特に、Surface 1は滑らかな表面を持つSurface 5よりも $C_{d\min}$ は小さいことが分かる。

さらに、その境界層内の流れを可視化することで境界層内の流れに差が生じていること、これらは層流境界中で有効であり、乱れた境界層中ではむしろ抗力は増加することが分かった。この結果は低レイノルズ数流れにおける物体表面の摩擦抗力の減少に効果がある可能性があるが、その効果の詳細はより系統的な実験が必要である。

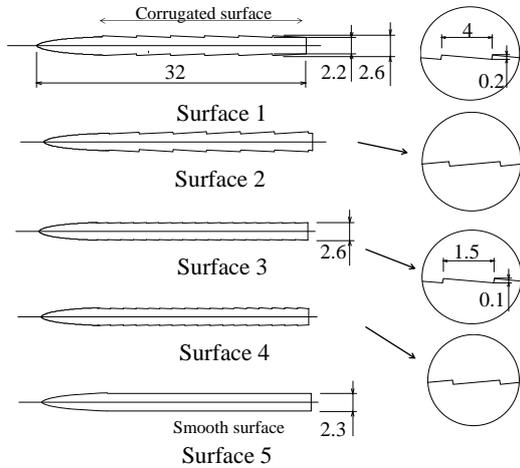


図7 コルゲーション表面を持つ平板翼

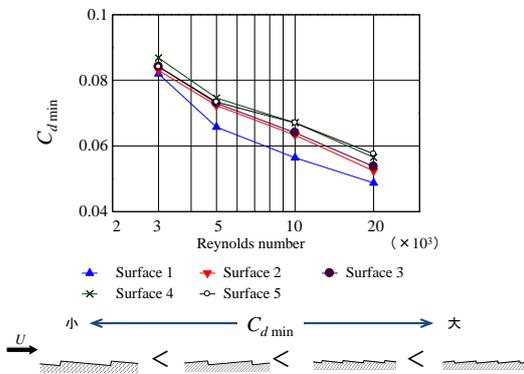


図8 最小抗力係数のレイノルズ数変化

(4) 大きなキャンバの円弧薄翼の空力特性

コガネムシなどの甲虫類は鞘翅と呼ばれる硬い角質化された前翅を持ち、甲虫の多くはこの鞘翅を開いて飛行する。飛行中以外では、鞘翅は閉じて折り畳んだ薄い後翅と体を保護するため、鞘翅の断面形は丸い

断面の体に沿って薄い円弧を形成しており、飛行中に開くと 20% c (翼弦長)以上の大きなキャンバを持った薄い円弧翼となる。

過去の実験結果(文献⑤)から、一般的に昆虫サイズの低レイノルズ数においてもキャンバは3% c ~6% c が最も性能(揚抗比)が大きくなるため、このような大きなキャンバの翼を広げて飛行することに疑問があった。そこで、キャンバの異なる円弧薄翼の風洞実験を行い、その空力特性を比較した。

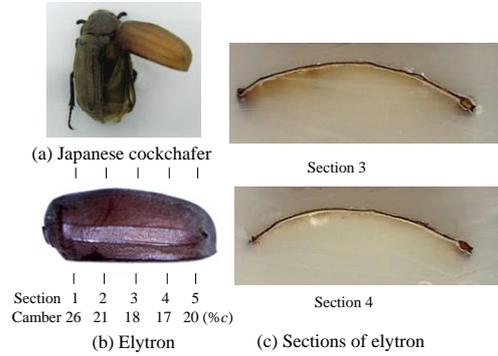
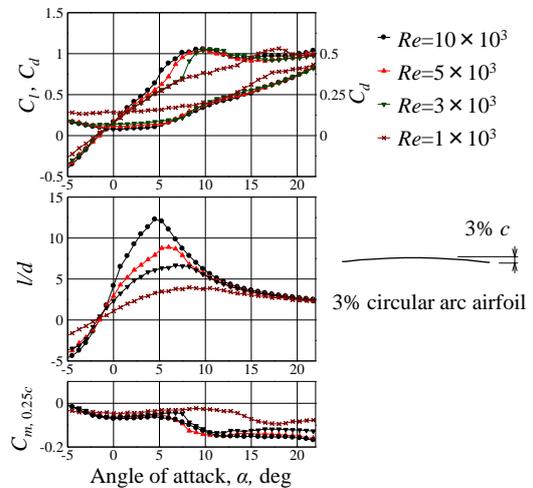
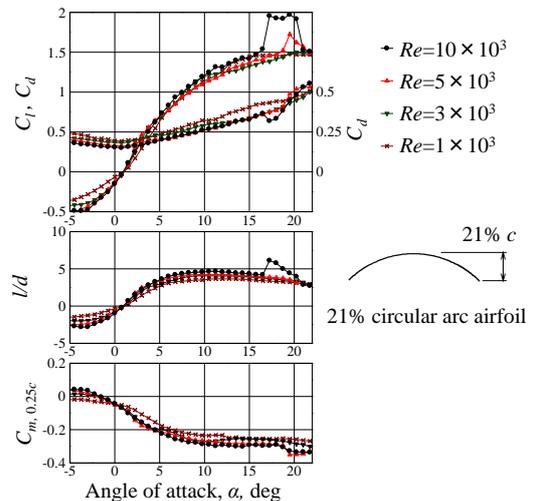


図9 コガネムシの前翅とその断面形状



(a) 3%円弧薄翼



(b) 21%円弧薄翼

図10 円弧薄翼の空力特性

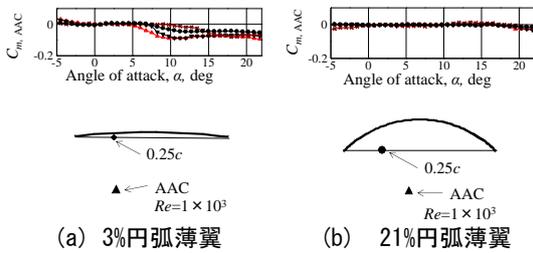


図 11 AAC 周りのピッチングモーメント

実験は、薄い平板とキャンバが 3% c ~21% c の範囲で 3%ずつ変化させた 7 種類の円弧薄翼を $Re=1000\sim 10,000$ の範囲で測定した。図 10(a),(b)はその中から 3%円弧薄翼と 21%円弧薄翼について迎角変化に対する空力係数の変化を示したものである。3%円弧薄翼について見ると、揚力係数 C_l は、迎角変化に対して非線形に変化し、レイノルズ数によっても揚力傾斜が異なることが分かる。また、揚抗比 l/d もレイノルズ数が小さくなると共に減少が大きく、レイノルズ数依存性が大きいことが分かる。また、ピッチングモーメント $C_{m,0.25c}$ もレイノルズ数によって変化が大きい。一方図 10(b)の 21%円弧翼を見ると、 C_l は $Re \geq 5000$ では急激に増加する迎角範囲 ($16\text{deg} \leq \alpha \leq 22\text{deg}$) が存在するが、それ以下のレイノルズ数ではレイノルズ数依存性は小さくなる。 l/d も 3%円弧翼と比較するとレイノルズ数依存性は小さくなり、さらに $Re \leq 2000$ になると 3%円弧翼との差も小さいことから、 C_l が大きい 21%円弧翼は $Re \leq 2000$ ではむしろ性能が優れていると言える。 $C_{m,0.25c}$ は C_l の増加と共に負に大きく変化するが、レイノルズ数による変化は小さいと言える。

さらに、興味ある結果がピッチングモーメント係数 $C_{m,0.25c}$ において得られた。零揚力角 $\alpha_{Cl=0}$ で正のキャンバを持つ翼は $C_{m,0.25c}$ は負の値を示すが、モーメント中心を翼の下方に移すことで抗力の大きな低レイノルズ数翼では $C_m=0$ になる点を作ることが可能である。そこで、 $\alpha_{Cl=0}$ になるようにモーメント中心を移動し、さらに迎角の増加と共に $C_m=0$ を保つことが出来るモーメント中心を探した。その結果、3%円弧翼では $\alpha \leq 5\text{deg}$ でのみ $C_m=0$ となったが、21%円弧翼では $\alpha \leq 20\text{deg}$ で $C_m=0$ を保つことが出来ることが分かった。この新たなモーメント中心を本研究では AAC (alternative aerodynamic center) と名付けた。図 11 はその結果で、AAC の位置は翼の下方にあり、レイノルズ数の減少と共に翼に近づいていき、さらに 21%円弧翼では翼の下方の比較的近い位置に AAC があることが分かる。

コガネムシの鞘翅のような大きなキャンバを持つ翼は適当な位置にモーメント中心を設定するとピッチングモーメントが大きな迎角範囲で $C_m=0$ となり、この中心はコガネムシの場合、後翅の推力中心や飛行時の重心位置付近に相当すると思われる。このことから、甲虫が鞘翅を広げて飛行するのは飛行

迎角に対してモーメントの変化を小さくし、飛行を楽にしている可能性がある。

以上のように、今回の開発した低圧風洞によって、これまで得られなかった $Re=1000$ における翼の空力特性が得られるようになった。その結果、昆虫サイズの翼について新たな特性や可能性を見出すことができた。

特に、上述の(4)で示した大型の航空機ではフラップを除いて使用されることがないような大きなキャンバを持った薄翼の空力特性は、超小型ファンや超小型無人航空機に利用できる可能性があると考えられる。今後、その工学的応用についても研究を進める予定である。

<引用文献>

- ① Okamoto, M., Yasuda, K., Azuma, A., Aerodynamic Characteristics of the Wings and Body of a Dragonfly, Journal of Experimental Biology, Vol. 199, 1996, pp. 281-294, 1996
- ② Azuma, A., Okamoto, M., Yasuda, K., Aerodynamic Characteristics of Wing at Low Reynolds Number, Progress in Astronautics and Aeronautics, Edited by Muller, T. J., AIAA, Vol. 195, 2001
- ③ 吉田昭広、チョウの鱗粉の生物学、昆虫と自然、Vol.44、No.9、2009
- ④ Wood, R. J., Finio, B., Karpelson, M., Ma, K., Perez- Arancibia, N. O., Sreetharan, P. S., Tanaka, H., Whitney, J. P., Progress on pico air vehicles,” International Journal of Robotics Research 31, 11, pp.1292-1302, 2012
- ⑤ Hidaka, H. , Okamoto, M., An Experimental Study of Triangular Airfoil for Mars Airplane, T. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Aerospace Technology Japan 12, 29, pp. Pk_21-Pk_27, 2014

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Okamoto M. and Ebina K., Effectiveness of Large-Camber Circular Arc Airfoil at Very Low Reynolds Numbers, Transactions of the JSASS / Aerospace Technology Japan, (2016. 6 Already accepted), 査読有

- ② 岡本正人、蛭名啓太、超低レイノルズ数におけるコルゲート翼の空力特性、宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-14-010、pp.169-172、査読無

[学会発表] (計 9 件)

- ① 蛭名啓太、岡本正人、超低レイノルズ数におけるコルゲート翼の空力特性、第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム、2014年7月4日、弘前文化センター(青森県弘前市)
- ② 岡本正人、蛭名啓太、超低レイノルズ数

におけるコルゲート翼の一提案、第 52 回飛行機シンポジウム、2014 年 10 月 8 日、長崎ブリックホール（長崎県長崎市）

③ 蛭名啓太、岡本正人、養寺正之、コルゲート翼の火星飛行機への応用、第 58 回宇宙科学技術連合講演会、2014 年 11 月 12 日、長崎ブリックホール（長崎県長崎市）

④ 岡本正人、蛭名啓太、コガネムシの鞘翅の空力特性、第 32 エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会、2015 年 3 月 23 日、東京電機大学東京千住キャンパス（東京都）

⑤ 蛭名啓太、谷口由佳、岡本正人、超低レイノルズ数における物体表面形状による抗力係数への影響、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、2015 年 7 月 3 日、東京大学駒場リサーチキャンパス（東京都）

⑥ 岡本正人、橋本昂太、塩崎友也、昆虫サイズの翼型空力特性のレイノルズ数効果、第 34 回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会、2015 年 3 月 23 日、東京工業大学大岡山キャンパス（東京都）

⑦ 佐々木航星、岡本正人、超低レイノルズ数における翼前縁形状の空力効果、第 48 回流体力学講演会／第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム、2016 年 7 月 8 日、金沢歌劇座（石川県金沢市）

⑧ 中村 輔、岡本正人、超低レイノルズ数における円盤翼の空力特性、第 48 回流体力学講演会／第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム、2016 年 7 月 8 日、金沢歌劇座（石川県金沢市）

⑨ 塩崎友也、岡本正人、低レイノルズ数流れにおける空力係数の翼型依存性、第 48 回流体力学講演会／第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム、2016 年 7 月 8 日、金沢歌劇座（石川県金沢市）

6. 研究組織

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

研究分担者 連携研究者 なし