

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630438

研究課題名(和文) 昆虫由来の翼面微細構造に基づく微小空力デバイスの研究

研究課題名(英文) Research on Small-sized Aerodynamic Devices based on Fine Structures on Insect Wings

研究代表者

浅井 圭介 (Asai, Keisuke)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40358669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、昆虫の翅の表面に見られる微小構造の空気力学的な機能を解明し、それに基づく空力制御デバイスを開発することを目的としている。そのため、100分の1気圧まで圧力を下げられる「低密度風洞」を使い、レイノルズ数に対する相似条件を満足した実験を実現する。ここでは特に微小な突起構造の影響に着目し、それらの寸法や配置を系統的に変えながら失速特性や揚抗比への影響を新規に開発した3分力天秤や感圧塗料を用いて定量的に評価した。さらには、これらの実験結果に基づき、超低レイノルズ数流れの制御に有効な「ミニフラップ」の有効性を調べ、剥離せん断層の間欠的な非定常性が揚力の増強に寄与していることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to understand the aerodynamic effects of protuberances, that can be seen on insect wings, on airfoil performance at low Reynolds numbers. In this study, we conducted airfoil tests in the Mars Wind Tunnel at Tohoku University, using an NACA0012 airfoil as base model. We attached two dimensional protuberances on the airfoil surface and changed its location and height. The obtained results revealed that the effects of protuberance are dependent on its location and height as well as Reynolds number. Particularly, when the protuberance was attached near the trailing edge on the pressure side, significant effects on the aerodynamic performance were noted. The effect of this protuberance is similar to that of Gurney Flap. The tests were conducted to understand the lift-enhancing mechanism of GF. Visualization results of flow around the airfoil show that unsteady vortex shedding on the upper surface forms low pressure region, producing higher lift.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：低レイノルズ数 空気力学 バイオミメティクス 感圧塗料 流体制御

1. 研究開始当初の背景

飛行能力に優れた昆虫の翅については、これまでたくさんの学術的研究が行われている。しかし、それらの研究の大部分がトンボの翼断面形状であるコルゲート翼を扱ったもので、それ以外の微細な突起構造については、空気力学的な立場から考察した論文は限られている。火星探査用航空機やマイクロ無人航空機 (MAV) が飛行する際のレイノルズ数は数千から数万程度であり、昆虫の飛行条件に相当する。低レイノルズ数で飛行するこれらの航空機の性能向上のための手段として、昆虫の翼に見られる突起物などの微小構造が利用できるか、詳細な調査が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、昆虫の飛行レイノルズ数において微細な突起構造が翼の空気力学的な特性に及ぼす影響を実験的に解明し、それに基づく空力制御デバイスを考案することである。基本翼としては NACA-0012 翼型を選択し、その表面に微小な突起物を装着し、これらの突起構造が翼性能に与える影響を突起物の高さや装着位置を系統的に変化させて調べる。その中でも特に性能向上が著しいケースについて、その背景となる空気力学的現象をより詳細に解明し、これらの空力デバイスによる空力特性改善の背景となる流体現象を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、翼型模型を内圧が百分の一まで低減できる火星大気風洞に入れて実験する。この風洞の特徴を利用すると、拡大模型を使って数千から数万程度の超低レイノルズ数環境を再現することが可能である。また、模型表面の流れ場の様子を感圧塗料 (PSP) などの蛍光イメージング技術を用いて測定することが可能になる。1年目は3分力天秤や感圧塗料を用いた可視化法の開発と同時に、翼模型に形成した微細な突起構造の寸法や配置を系統的に変えた実験を行い、それらが翼の失速特性と揚抗比に及ぼす影響を評価する。2年目は、初年度の実験で最も効果が大きかった下面後縁への突起物付加に注目し、翼型への装着デバイスとしてミニフラップ (Gurney Flap) を選びその形状を系統的に変化させた実験を行った。低速風洞を用いた可視化実験や後流計測を行い、空力特性が改善される流体力学的なメカニズムの解明に取り組んだ。

4. 研究成果

4 - 1 実験手法の開発

本研究において実験で使用する3分力天秤を自作した。モーメントセンサーの容量、重量および迎角変更用ステッピングモーターと

の位置関係を考慮した結果、モーメントセンサーを用いずに二つの揚力計測方向のロードセルから解析的にモーメントを求めることにした。自作した3分力天秤の模式図を Fig. 1 に示す。較正試験の結果によると、各ロードセルは微小な力に対しても出力が高い線形性を保っている。モーメントの較正結果ではロードセルの誤差の範囲外であっても、0.0069 程度の誤差でピッチングモーメント係数の計測が行える天秤が開発できた。

また、低密度環境で使用する先進計測手法として、非定常感圧塗料の開発と評価に取り

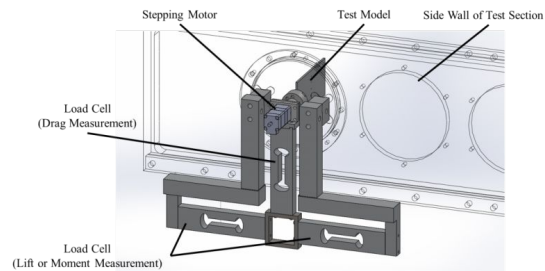
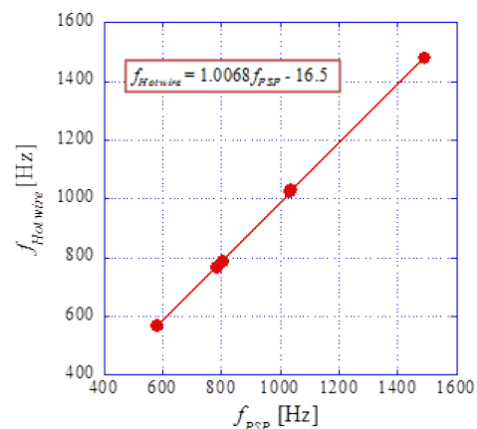
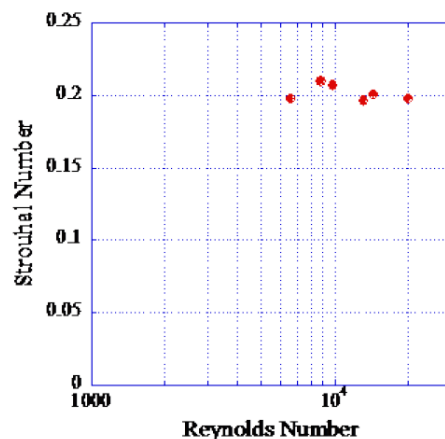


Fig. 1 火星大気風洞用3分力天秤



(a) Hot wire 計測値との比較



(b) ストローハル数の測定値の Re 数依存性

Fig. 2 非定常感圧塗料による円柱からの渦放出の測定

組んだ。陽極酸化被膜にルテニウム錯体を吸着させた感圧塗料を円柱の風洞試験に適用し、カルマン渦の放出に伴う圧力変動場の画像計測を試みた。その結果、円柱模型表面に生じるはく離を時系列データにおいて可視化することに成功した。FFT 解析により抽出された円柱表面のカルマン渦周波数は、熱線により計測された円柱後方における渦周波数計測結果と非常によく一致し、試験したレイノルズ数範囲で渦放出のストローハル数が 0.2 でほぼ一定となることを確認した (Fig. 2)。

4 - 2 微小な突起構造の系統的調査

低レイノルズ数環境において、翼面上の微小な矩形断面突起が空力特性および翼周りの流れ場に与える影響を解明することを目的に、 Re 数 = 11,000, 25,000 および 50,000 において、微小突起が翼性能および翼面圧力分布に与える影響を調べた。その結果 (Fig. 3), 上面前縁部 ($x/c = 5\%$) に設置された突起には剥離泡の位置と長さを固定し、揚力曲線の非線形性を緩和する効果があること、下面後縁 ($x/c = 95\%$) に設置された突起には、翼上面の圧力を減少させ、翼下面の圧力を増加し、揚力を増加させる効果があることが明らかになった。これに対して、上面後縁 ($x/c = 95\%$) に突起を設けた場合は特性が悪化、下面前縁 ($x/c = 5\%$) に突起物をおいた場合は、翼性能に大きな影響を与えないことがわかった。

下面後縁に設置された突起の効果は「Gurney flap」と酷似している。その効果は、突起の断面積に依存し、翼性能の向上のためには、比較的大きな突起を下面後縁に設置するのが効果的であることが明らかになった。

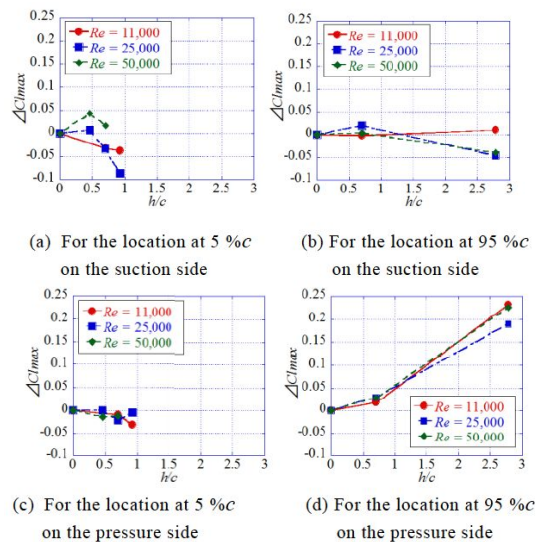


Fig. 3 微小突起の装着による最大揚力係数の変化

4 - 3 ミニフラップの揚力増強メカニズム

低レイノルズ数で有効と考えられる翼型への装着デバイスとして「ミニフラップ」(Gurney Flap, Fig. 4) に注目しその形状を系統的に変化させた実験を行った。低速風洞を用いた可視化実験や後流計測を行い、空力特性が増強されるメカニズムの解明に取り組んだ。 Re 数は 25,000 である。ミニフラップの長さを系統的に変化させた実験を行った結果、高さが翼弦の 10% のフラップの装着によって揚力が最大で 100% 以上改善することがわかった (Fig. 5)。しかし、揚力や揚抗比は改善するのに、フラップの装着により翼上下面の剥離域が拡大するという一見矛盾する結果が得られた。この現象を解明するため低速風洞を用いて可視化実験や熱線流速計による後流計測を行った。その結果 (Fig. 6), 剥離せん断層の間欠的な非定常性が揚力の増強に寄与していることが明らかになった。

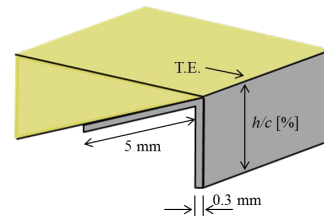


Fig. 4 Gurney Flap の模式図

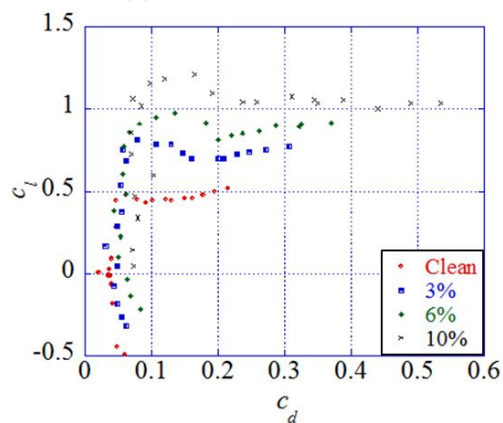
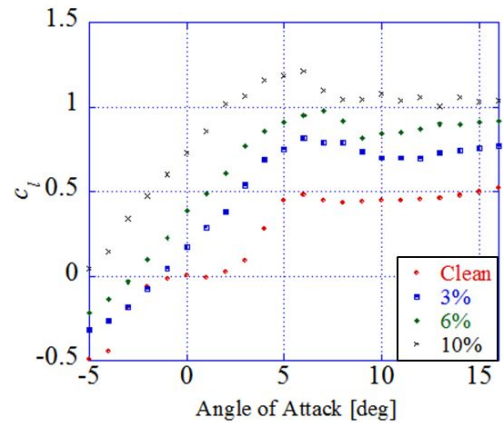
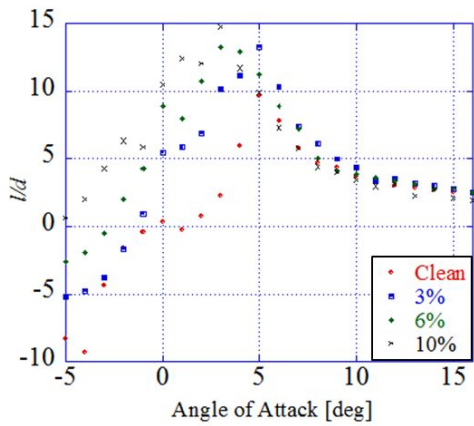
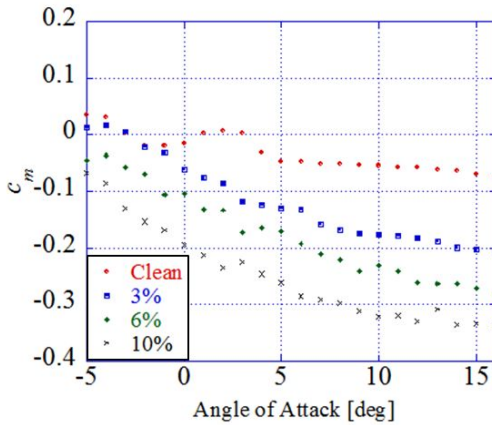


Fig. 5 Gurney Flap 装着の効果



(c) 付加による揚抗比への影響



(d) ピッチングモーメント曲線への影響

Fig. 5 Gurney Flap 装着の効果 (続き)

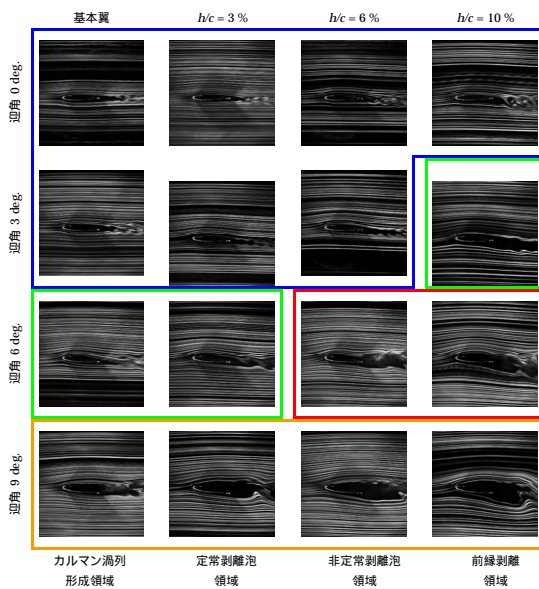


Fig. 6 翼周り流れ場の分類

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 10 件)

1. Daisuke Oshiyama, Daiju Numata,

Keisuke Asai, "Control of Vortex Shedding on an Airfoil using Mini Flaps at Low Reynolds Number," 68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2015 年 11 月 22 日- 11 月 24 日, Hynes Convention Center, Boston, MA, USA

2. 菅原康司, イ・テクジン, 杉岡洋介, 沼田大樹, 浅井圭介, Tianshu Liu, "超音速流中における円柱周りの衝撃波/境界層干渉の表面摩擦応力分布計測," 第 11 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2015 年 11 月 6 日, JAXA 調布航空宇宙センター, 東京

3. K. Yamahara, D. Oshiyama, H. Nagai, M. Kanazaki, D. Numata, K. Asai, "Evaluation of Aerodynamic Characteristics of an Optimized Airfoil for Mars Airplane," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日- 10 月 29 日 仙台国際センター, 宮城県仙台市

4. Tianshu Liu and K. Asai, "Global Skin-Friction Diagnostics Based on Surface Flow Visualization-Extension from PSP and TSP Technology," 5th Japanese-German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research, 2015 年 09 月 23 日-9 月 25 日, 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市

5. K. Sugawara, T. Lee, D. Numata, K. Asai, T. Liu, "Global skin friction measurements of shock/boundary-layer interaction around a circular cylinder in supersonic flow," 5th Japanese-German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research, 2015 年 9 月 23 日-9 月 25 日, 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市

6. 佐々木大介, 押山大佑, 安養寺正之, 沼田大樹, 浅井圭介, "非常感圧塗料の火星大気風洞への適用," 第 43 回可視化情報シンポジウム, 2015 年 7 月 21 日-7 月 22 日, 工学院大学, 東京

7. 押山大佑, 沼田大樹, 浅井圭介, "低レイノルズ数におけるミニフラップの空力効果," 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技術シンポジウム, 2014 年 7 月 3 日-7 月 4 日, 弘前文化センター, 青森

8. 押山大佑, 沼田大樹, 浅井圭介, "低レイノルズ数におけるミニフラップの揚力増強メカニズム," 日本航空宇宙学会

第 46 期年会講演会，2015 年 4 月 16 日
-04 月 17 日，山上会館，東京

9. Daisuke Oshiyama, Daiju Numata,
Keisuke Asai, “ Lift-enhancing effects
of mini flaps at low Reynolds number, ”
ELyT Workshop 2015, 2015 年 2 月 18
日-2 月 21 日，ホテル松島大観荘，宮城
10. Wallisky Nicolas, Daiju Numata,
Keisuke Asai, “ Application of
Biomimetic Concepts for low-Reynolds
flights, ” ELyT Workshop 2015, 2015
年 2 月 18 日-2 月 21 日，ホテル松島大観
荘，宮城

6 . 研究組織

(1)研究代表者

浅井 圭介 (ASAI KEISUKE)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40358669

(2) 研究分担者

沼田 大樹 (NUMATA DAIJU)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20551534