翼周りの流れのフィードバック制御* (風速低下時における電磁型ミニアクチュエータの適用性)

山口 哲也^{*1}, 山口 真志^{*2}, 浜崎 陽平^{*3}, 千田 衛^{*4}, 稲岡 恭二^{*5}

Feedback Control of a Flow around a Symmetric Airfoil (Applicability of the Electromagnetic Actuators for the Wind Speed Decrease)

Tetsuya YAMAGUCHI, Masashi YAMAGUCHI, Yohei HAMASAKI,
Mamoru SENDA and Kyoji INAOKA^{*5}

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University
Kyotanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

Lift and drag of a symmetric airfoil with miniature electromagnetic actuators have been measured in the low Reynolds number region from 3×10^4 to 1×10^5 . It was found that the coefficient of the maximum lift increased as the Reynolds number was increased. The actuation made the maximum lift larger than that in the no-actuation case for each Reynolds number, although its effectiveness was the largest at the lowest Reynolds number of 3×10^4 and became smaller as the Reynolds number was increased. Even in the case of the wind speed decrease, it was demonstrated that the actuation was effective to avoid the stall. Feedback control using increase/decrease of angle of attack was also effective to maintain the high lift in the case of the wind speed decrease and the additional feedback operation of actuators worked well to suppress the abrupt decrease of the lift.

Key Words : Airfoil, Lift, Stall, Electromagnetic Actuator, Feedback Control

1. 緒 言

翼周りの流れの理解と制御は、飛翔体の安全な航行や熱流体機械の性能維持のために重要である。高レイノルズ数領域における翼の空力特性は、これまで多くの研究成果が蓄積されてきた。しかし、例えば環境調査や災害救助に使用される小型飛翔体の流れ場はレイノルズ数が $10^4 \sim 10^6$ の低レイノルズ数領域であり、諸特性の理解は未だ十分ではない⁽¹⁾⁽³⁾。著者らはレイノルズ数が 5×10^4 の対称翼周りの流れ場に注目し、翼の空力特性を測定し、翼の先端に設置した小型電磁型ミニアクチュエータ（以下、アクチュエータと呼称する）が果たす流れの制御効果を調査している。既報において、アクチュエータを稼働すれば揚力が増大すること⁽⁴⁾、また、揚力の低下を検知しアクチュエータを自動的に稼働させるフィードバック制御が、失速の回避に有効に作用すること⁽⁵⁾を示した。また、揚力が低下すれば迎角を低下させ、揚力が低下すれば迎角を増加させるフィードバック制御を与えると、高い揚力を維持することが可能で、アクチュエータを組合せると、更に高い揚力が維持できること⁽⁶⁾を報告した。

上述した小型飛翔体は様々な場面で活躍が期待され、翼の空力特性とアクチュエータの有効性をより広いレイノルズ数条件において調べることは重要である。また、例えば悪天候下では流れの条件が急に変化するため、飛行中の風速変化に対する制御性の検討も必要である。本研究では、流れのレイノルズ数が 3×10^4 から 1×10^5 の領域での揚力・抗力の測定実験を行い、アクチュエータが及ぼす揚力と失速角の増大効果について調べた。また、接近風速が低下する場合について、アクチュエータの制御性について実証実験を行い、その結果を検討した。

* 原稿受付 2013 年 7 月 9 日

^{*1} 学生員, 同志社大学大学院理工学研究科 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

^{*2} 同志社大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 同志社大学大学院理工学研究科

^{*4} 正員, フェロー, 同志社大学理工学部

^{*5} 正員, 同志社大学理工学部

E-mail: kinaoka@mail.doshisha.ac.jp

2. 実験装置と実験方法

使用した NACA0012 対称翼型（翼弦長 150mm，スパン長 620mm，翼厚 18mm）と電磁型ミニアクチュエータを図 1 に示す。アクチュエータは翼先端から 15mm の位置に 30 個設置してある。既報^{(4),(5)}と同じく、アクチュエータの可動部は長さ 12mm，幅 10mm であり、ポリイミドフィルムに銅回路をエッチングにより製作してある。その回路にパルス信号を与え通電方向を変化させ、翼型に埋め込まれた直径 10mm の永久磁石との相互作用を利用し、流れに対して垂直方向に振動させる。最大変位は 20° とした。翼型を分力検出器と接続支持し、低速風洞の測定部に設置した。図 2 のように主流方向となす角度を翼の迎角 α ，垂直方向の力を揚力 L ，流れ方向の力を抗力 D とした。レイノルズ数 Re は、翼弦長と主流速度を代表長さ、代表速度として定義した。揚力係数 C_L ，抗力係数 C_D は、 L と D をそれぞれ主流速度から求まる動圧と翼面積で除して定義した。

レイノルズ数 Re を 3×10^4 から 1×10^5 まで 10^4 ずつ変更しながら、迎角 α を $0^\circ \sim 20^\circ$ の範囲でその都度固定し、アクチュエータの非稼働時、稼働時の揚力 L と抗力 D を測定し、揚力増大効果を調べた。

続いて、風速を低下させる場合のアクチュエータの制御性を調べる二つの実証実験を行った。両者とも風速低下は流量弁を絞ることにより与えた。翼の近傍に設置したピトー管の出力をモニターしながら、風速低下を検知すればアクチュエータが自動的に稼働する単純なフィードバックプログラムを与えた。最初の制御実験（実験 F1 と呼称する）は、 $Re=6 \times 10^4$ で実験開始し、空力特性値が安定した約 11 秒後に弁を操作し、10 秒間かけて $Re=4 \times 10^4$ まで風速を減じた。実験 F1 では迎角を $\alpha=11^\circ$ に保った。次の制御実験（実験 F2 と呼称する）は、前報⁽⁵⁾と同様、最初に迎角を毎秒 1° ずつ増加させ、最大揚力値を経た後は揚力信号を入力とし失速を回避するフィードバック制御を与え、迎角 α の増減を繰返しながら高揚力を維持する状態を $Re=5 \times 10^4$ において実現した。その後、約 22 秒後に流量弁を操作し、 $Re=4 \times 10^4$ まで風速を減じた。実験 F2 では、風速低下を検知すればその時点で迎角操作を停止し、アクチュエータを稼働した。その後、風速低下が完了すればアクチュエータが停止するようプログラムを与え、揚力維持が可能かどうか、アクチュエータを稼働させない場合と比較し、その効果を見た。

翼背面の流れの様子を見るために、スモークワイヤ法により流れを可視化した。翼の前方に素線径 0.1mm のニクロム線を張り、油を塗布して通電し、蒸発した白煙を YAG レーザーで可視化した。画像の取得にはハイスピードカメラ（フォトロン社 SA-3、1024×1024 画素）を使用し、撮影速度は 4000fps とした。

Fig. 1 Airfoil and electromagnetic actuators.

Fig. 2 Angle of attack, lift and drag.

3. 実験結果および考察

3・1 低レイノルズ数 Re における翼の空力特性

揚力は前報⁽⁵⁾の結果に見るように、各レイノルズ数 Re において迎角の増加とともに大きくなり、失速角で最大になり、その後低下する。図 3 に各 Re 数における最大揚力 $L_{\max}$ と、失速角における抗力 D の値を示す。 $L_{\max}$ は Re 数の増加とともに増大すること、また、アクチュエータの稼働時の値は、非稼働時の値より大きいことが分かる。図 4 に失速角での最大揚力係数 $C_{L\max}$ と抗力係数 C_D を示す。 $C_{L\max}$ の値は、アクチュエータの稼働により、非稼働時に比べて大きくなることが分かる。このアクチュエータの揚力増大効果は、 Re 数が小さいほど大きく、 $Re=1 \times 10^5$ ではさほど見られない。 C_D はいずれの Re 数でも稼働時に増加している。

Fig. 3 The maximum lift and the drag for the Re.

Fig. 4 Coefficient of the maximum lift and the drag for Re.

3・2 風速低下に対するアクチュエータの制御性

実験 F1 の結果を図 5 に示す。上段にピトー管の出力信号、その下にはアクチュエータの稼働の有無、さらに下段に揚力と抗力の時系列信号を示す。実線がアクチュエータを稼働する制御を与えた場合、一点鎖線を与えない場合を示す。実験開始後、約 11 秒経過後に風速低下が始まっているが、それまでの揚力 L と抗力 D の値は、両者ともにアクチュエータは稼働しておらず、ほぼ同じ値を示している。その後、揚力 L の値は両者ともに急激に小さくなる。アクチュエータを稼働させない場合の揚力 L は約 15 秒後、その値が 0.6[N] を下回ると同時に小刻みに上下振動している。図 3 から $Re=4 \times 10^4$ の $L_{\max}$ が概ね 0.6[N] であり、この風速低下で翼は失速に至ったものと考えられる。図中に示した可視化写真を見ると、先端から大きな剥離流れが認められ、そのことが理解できる。一方、アクチュエータの稼働制御を与えた場合には、揚力は 0.6[N] に漸近する挙動を示し、可視化写真からも小さな剥離は生じるものの流れは翼に沿って流れており、失速状態から回避されていることが理解できる。

実験 F2 の結果を図 6 に示す。図 6 の最下段には迎角 α の時系列変化を示してある。実験開始から迎角 α を毎秒 1° ずつ増加させているが、それとともに揚力 L が増加している。そして、最大揚力を迎えて以後は、失速が生じる度に迎角を増減させながらも、高い揚力を維持するようにフィードバック制御が働いていることが読み取れる。約 22 秒後に風速低下を迎え、揚力 L の値が低下する様子が見て取れる。アクチュエータ稼働制御を与えない場合には、揚力は上下に振動しながら 0.6[N] を下回る。約 32 秒後までは迎角の変化が見られず、この時点では、翼は失速状態にあるものと推察できる。その後風速低下の完了とともに、また迎角の操作が開始されると揚

Fig. 5 Time variations of lift and drag for wind speed decrease experiment of F1.

Fig. 6 Time variations of lift and drag for wind speed decrease experiment of F2.

力は $0.6[\text{N}]$ となり、高揚力が維持されている。アクチュエータ稼働のフィードバック制御を与えた場合には、揚力 L の値は緩やかに減少し、また $0.6[\text{N}]$ を超える高い揚力値であること、また、振動も認められず、失速が回避できていることが分かる。約 32 秒後には風速低下の完了を受け、アクチュエータが停止し、揚力は急激に低下するが、その後は迎角の増減によって高揚力が維持されている。したがって、迎角の増減操作は風速低下時においても高揚力の維持に有効であり、アクチュエータの稼働は揚力の低下を緩やかにするとともに、失速を回避する上で有用であることが明らかになった。

4. 結 言

対称翼周りの流れについて、レイノルズ数が 3×10^4 から 1×10^5 の領域での揚力・抗力の測定実験を行い、翼面に設けた電磁型ミニアクチュエータを稼働する場合の効果について調べた。また、風速が低下する場合について、アクチュエータの制御性に対する実証実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) アクチュエータの揚力増大効果は、 Re 数が小さいほど大きく、 $\text{Re}=1 \times 10^5$ ではさほど見られない。
- (2) 風速が低下する場合においても、アクチュエータの稼働により、失速を回避できることが示された。
- (3) 風速が低下する場合においても、揚力を入力信号とするフィードバックに基づく迎角の増減操作は高揚力維持に有効であり、アクチュエータの稼働は揚力の低下を緩やかにする上で有用である。

文 献

- (1) 阿部裕幸, 筒井康賢, 吉識晴夫, “低レイノルズ数領域において翼形特性に及ぼす主流乱れの影響 (乱れ発生装置による実験)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 62, No. 602 (1996), pp. 3592-3598.
- (2) 中根紀章, 田中孝尚, 本橋龍郎, “広範囲のレイノルズ数における NACA0012 翼型の空力特性”, 第 35 回流体力学講演会 (2003), pp. 179-181.
- (3) 大竹智久, 中江雄亮, 本橋龍郎, “低 Re 数領域での NACA0012 翼の非線形空力特性”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 55, No. 644 (2007), pp. 439-445.
- (4) 稲岡恭二, 大嵩豪朗, 塚本兼大, 千田衛, “電磁型ミニアクチュエータを用いた対称翼の失速制御”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 752 (2009), pp. 683-690.
- (5) 川村晃平, 浜崎陽平, 稲岡恭二, 千田 衛, “翼周りの流れの失速検知とフィードバック制御 (迎角増加時における検討)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 796 (2012), pp. 2087-2095.