低レイノルズ数で作動する回転翼による小型アクチュエータ^{*1}

Small Actuator with Propellers Acting under Low Reynolds Numbers

得 竹 浩^{*2}・砂 田 茂^{*2}・藤 永 仁^{*2}

Hiroshi TOKUTAKE, Shigeru SUNADA and Jin FUJINAGA

Key Words: Actuator, Low Reynolds Number, Propeller

Abstract: The characteristics of a small actuator with propellers have been studied. The generated force increases as the rotational speed of the propellers and the viscosity of the liquid inside the actuator increase. This can be predicted by a simple analysis using the characteristics of wings at the Reynolds numbers where they operate. The understanding of wing characteristics at low Reynolds numbers, which has recently become important for designing a MAV (Micro Air Vehicle), can contribute to developing a small fluid machinery such as this small actuator with propellers.

1. はじめに

航空機や車両など多くのビークルにおいて運動制御装置が実用化されている。それらの制御装置では、操縦桿やハンドルなどの操縦感覚が重要となる。本研究では、人の操舵を補助する用途を想定した小型のアクチュエータ¹⁾を開発した。任意の力を発生させるとともに、外力に対してはダンパとして働く装置である。アクチュエータが発生する力より大きな外力を加えると、その外力に従ってアクチュエータは動き、その速度に比例した反力を発生する。この装置を利用すれば操舵補助に加えて減衰力からなるフィードバックシステムを構成することが可能である。本アクチュエータは自転車の操舵補助装置に適用された実績がある（たとえば文献 2)）。

また、近年マイクロエアビークルの開発が盛んになってきており、 $10^5 \sim 10^6$ のレイノルズ数下での翼特性の研究が数多く行われている³⁾。さらに低い 10^4 以下のレイノルズ数での翼特性は、主に昆虫の飛行の解明のために調べられてきたが、今後、航空機の小型化がさらに進むと、その開発に利用できる可能性がある。また、小型の流体機器で回転翼が用いられる場合、 10^4 以下のレイノルズ数で作動する場合がある。本アクチュエータはプロペラを用いた油圧機器であるが、このプロペラは $50 \sim 2 \times 10^3$ のレイノルズ数で作動する。本アクチュエータは、このような低いレイノルズ数で作動するプロペラによって力を発生することによる特性を有している。本稿では、プロペラが低レイノルズ数で作動するために発現する、本アクチュエータの特性について述べる。

本稿は新しいアクチュエータについて述べたものである

が、操縦補助に適することやその性能が翼特性によることなど航空宇宙工学分野との関連は深い。総合工学である航空宇宙工学の知見を他の分野に広く活用した 1 例であると言える。

2. 開発したアクチュエータ

開発したアクチュエータは、 $X = 100 \text{ mm}$, $Y = 60 \text{ mm}$, 奥行 $Z = 30 \text{ mm}$ の直方体のケースとその外部にある DC モータ（マブチモーター（株）製、RS-540SH）とからなる。第 1 図に示すように、ケースの中は内径 $d = 20 \text{ mm}$ の円形断面の流路から形成されている。流路内には流体が満たされ、さらにプロペラ、移動板が置かれている。プロペラは直径 d_p の回転軸で接続する DC モータによって駆動される。プロペラによって駆動される流路内の流体が、直径 $a = 0.018 \text{ m}$ または 0.0196 m の移動板に力を及ぼす。移動板は直径 d_m の軸に連結し、軸はケースを貫通し、軸の一端、点 A で外部に力を作用することができる。

プロペラは、プロペラ A（半径 $R = 9.6 \text{ mm}$ 、コード長 $c = 6.0 \text{ mm}$ ）とプロペラ B（半径 $R = 9.9 \text{ mm}$ 、コード長 $c = 11.7 \text{ mm}$ ）の 2 種類を用意し（第 2 図）、プロペラ段数は $N = 4, 6, 8$ とした。どのプロペラのピッチ角も、翼取り付け部で 0 度、翼端で 30 度で、その間は線形に変化する。本アクチュエータは DC モータを正・逆回転させることによって、第 1 図に示す x , $-x$ の両方向に力を発生可能であるが、両方向の特性を等しくするために、プロペラの断面形状は、対称翼（平板翼）としている。また、同理由によって、各段においてプロペラピッチ角を変えることをせず、同一形状のプロペラを使用している。なお、アクチュエータの形状に関する諸元を第 1 表にまとめる。

3. 性能試験方法

3.1 アクチュエータ出力測定 上記のように、プロペラサイズ、段数、移動板直径をパラメータとし、プロペラ回転

^{*1} © 2006 日本航空宇宙学会

平成 17 年 9 月 16 日、第 37 回流体力学講演会において発表。平成 17 年 9 月 1 日原稿受理

^{*2} 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻航空宇宙工学分野

第1表 アクチュエータの諸元

Items	Abbreviation	Values
Diameter of moving plate	a	18, 19.6 mm
Thickness of moving plate	t_m	2 mm
Diameter of a moving bar	d_m	6 mm
Radius of propeller	R	9.6 mm (propeller A) 9.9 mm (propeller B)
Chord length of propeller	c	6 mm (propeller A) 11.7 mm (propeller B)
Thickness of propeller	t_p	0.5 mm (propeller A) 0.8 mm (propeller B)
Number of propeller stages	N	4, 6, 8
Diameter of propeller hub	d_h	6 mm (propeller A) 7 mm (propeller B)
Diameter of rotational axis of propeller	d_p	3 mm

第2表 作動流体の諸元

Liquid	Viscosity, η	Density, ρ	Brand name (Company)
Suspension oil 1	0.02 N·s/m ²	763 kg/m ³	fork oil 5WT (Rock Shocx)
Suspension oil 2	0.075 N·s/m ²	845 kg/m ³	fork oil 10WT (Rock Shocx)
Silicon oil 1	0.50 N·s/m ²	880 kg/m ³	KF-96-500CS (Shin-etsu Chemical)
Silicon oil 2	1.0 N·s/m ²	897 kg/m ³	KF-96-1000CS (Shin-etsu Chemical)

第1図 開発したアクチュエータ

第2図 アクチュエータで用いられるプロペラ

数とアクチュエータの出力 F_a との関係測定した。また、本性能試験においては、第2表に示す流体で流路を満たした。回転数の測定には非接触型のデジタル・タコメータ（株）小野測器製，HT-5100）を、力の測定にはCPUゲージ（アイコーエンジニアリング（株）製，MODEL-RX-1）を使用した。この測定は、直動軸が動かず、点Aの変位を0として行われたものである。

3.2 アクチュエータ減衰力測定 本アクチュエータの出力軸に外力を加えた場合、アクチュエータの変位が発生（点Aが移動）しながら、出力軸には抵抗力が働くことになる。この抵抗力を測定するために、点Aを $-x$ 方向に一定速度 V で移動したときの、抵抗力 F_d を測定した。 V はポテンシオメータ（株）ミドリ測器製，GreenPot LP-200F）で、 F_d はCPUゲージ（アイコーエンジニアリング（株）製，MODEL-RX-1）を用いて測定した。この測定の際、アクチュエータ内はシリコンオイル1（ $\eta = 0.5 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ， $\rho = 880 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）で満たされ、4段のプロペラBを使用し、以下のケースについて測定を行った。（ケース1） $a = 19.6 \text{ mm}$ の作動板を使用し、プロペラを約7500 rpmで回転させた場合（この場合、点Aの変位が0である条件下で測定されたアクチュエータの発生力 F_a は、第6図から8 Nである）、（ケース2） $a = 19.6 \text{ mm}$ の作動板を使用し、プロペラを回転させずアクチュエータとしての発生力が0 Nの場合、（ケース3）作動板を取り去り、プロペラを回転させずアクチュエータとしての発生力が0 Nの場合、の3ケースである。

4. 理論解析

上記レイノルズ数で作動するプロペラであることを念頭に、アクチュエータの発生力の特徴を示す解析式を導く。まず、プロペラについて考える。プロペラとケーシング、プロペラ段間の干渉を無視し、本アクチュエータのプロペラを、開空間にある N 枚の単独プロペラとすると、プロペラ全体の発生する推力 T は翼素理論⁴⁾によって以下のように書ける。

$$T \propto N \rho R^3 c \Omega^2 (C_l - C_d \phi) \approx N \rho R^3 c \Omega^2 C_l \quad (1)$$

ここで C_l 、 C_d 、 ϕ はプロペラのスパン方向で平均した揚力係数、抗力係数、誘導迎角であり、幾何迎角が 30° 以下

であることから、 $\phi < 1$ である。また、上記レイノルズ数領域で迎角が 30° 以下の場合、 $C_1 > C_d^{(5)}$ であるので、 $C_1 - C_d\phi \approx C_1$ とした。

一方、 N 段のプロペラが開放空間にあり、 N 段のプロペラを半径 R の1枚の作動円盤と考える。その際、プロペラ全体の発生する推力 T は単純運動量理論⁴⁾ によって以下のように書ける。

$$T \propto \rho R^2 v^2 \quad (2)$$

ここで v は無限後流での誘導速度である。式(1)、(2)より、 v について次式が得られる。

$$v \propto \sqrt{NRcC_1\Omega} \quad (3)$$

次に、移動板について考える。移動板とケーシングの干渉を無視し、移動板が一樣流速 v の中にあるとする。移動板に働く流体力、すなわちアクチュエータの発生力 F_a は、以下のように書ける。

$$F_a \propto \rho v^2 a^2 C_D \quad (4)$$

ここで C_D は移動板の抵抗係数である。

Re が十分小さいとき、

$$C_D \propto 1/Re \propto \frac{\eta}{\rho v a} \quad (5)$$

である⁶⁾ ので、式(3)、(4)、(5)より F_a は次式のように書ける。

$$F_a \propto \eta \Omega a \sqrt{NRcC_1} \quad (6)$$

5. 結 果

5.1 アクチュエータ出力 第3~6図に、それぞれ(プロペラA, $N=4$)、(プロペラA, $N=6$)、(プロペラA, $N=8$)、(プロペラB, $N=4$)の場合の、プロペラ回転速度と発生力 F_a との関係を示す。流体の粘性係数 η と移

第3図 アクチュエータの発生力 ($N=4$, Propeller A)

動板の直径 a とがパラメータである。これらの図において、シンボル、各種の線は、それぞれ測定結果、測定結果を線形近似した結果を表す。また、これらの図から得た F_a と η の関係、 F_a と N の関係をそれぞれ、第7, 8図に示す。なお、プロペラに対する $Re = 0.75R\Omega cp/\eta$ は、回転数 $\Omega = 10000$ rpm のときを例にとると、 50 ($\eta = 1.0 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)~

第4図 アクチュエータの発生力 ($N=6$, Propeller A)

第5図 アクチュエータの発生力 ($N=8$, Propeller A)

第6図 アクチュエータの発生力 ($N=4$, Propeller B)

第7図 アクチュエータの発生力と粘性係数 (Propeller A, $N = 6$, $\Omega = 10000$ rpm, $a = 0.018$ m)

第8図 アクチュエータの発生力とプロペラ段数 (Propeller A, $\eta = 0.5$, $\Omega = 10000$ rpm, $a = 0.018$ m)

2×10^3 ($\eta = 0.02$ N·s/m²) 程度である。式 (6) によると、 F_a は η , Ω , a , $\sqrt{N}$, $\sqrt{R}$, $\sqrt{c}$ に比例することが予想される。この知見に対して、第3~8図より以下のことが言える。

- ・第3図の $\eta = 0.02, 0.075$ N·s/m² の場合のように、回転数を増加していくと、 F_a が頭打ちになる場合があるが、これは翼が失速するためと考えられる。
- ・第4~6図の η が共通で a が異なる結果を比較すると、移動板直径 a を大きくすると、式 (6) で予想される以上に F_a が増加する。ケースと移動板のクリアランスが小さくなり、ケース壁と移動板との干渉が強くなるためと考えられる。
- ・式 (6) から得られる予想とは違って、第7図から分かるように、粘性係数 η の増加によって F_a は線形に増加しない。これは、 η の増加によって、壁での摩擦損失が大きくなるためと考えられる。
- ・第8図から分かるように、段数 N による F_a の増加は式 (6) で予想されるほど大きくない。段数が増えていくと、後段翼への流入角が低下し、揚力係数が低下するためと考えられる。

5.2 アクチュエータ減衰力 測定された抵抗力 F_d を、変位 = 0 でのアクチュエータの発生力 F_a と、変位があるための力 F_e との和とする。すなわち、

$$F_d = F_a + F_e$$

(ケース1) の場合、 $F_d = 8N + F_e$ であり、(ケース2)、(ケース3) の場合、 $F_d = F_e$ である。

第9図 アクチュエータの減衰力

第9図に、変位速度 V と F_e との関係を示す。この図から、 F_e すなわち F_d と V は線形関係があるので、本アクチュエータは外力に対してダンパの機能を有している。また、ケース1と2との比較から、 F_e は F_a によって増加することが分かる。ケース3は作動板がない場合の測定結果であり、測定値には直動軸とケースとの間の摩擦、直動軸に働く流体力が含まれる。ケース1, 2の測定値にも、これらの力が含まれている。ただし、ケース1, 2, 3とでは、流れの様子が異なるので、直動軸に働く流体力は同一でない。

6. ま と め

外力に対してダンパ機能を有する小型アクチュエータを開発したが、そのアクチュエータではプロペラが $Re = 50 \sim 2 \times 10^3$ で作動する。本レイノルズ数領域での翼特性と、高レイノルズ数で用いられる回転翼の性能評価法を合わせることで、本アクチュエータの発生力の大きさに影響を与えるパラメータ (プロペラ回転数、使用流体の粘性係数、作動円盤の直径等) を特定することができた。低レイノルズ数での翼性能を明らかにすることで、本アクチュエータのようなプロペラを用いた小型流体機器の性能の理解が可能になる。

本研究は、堺工業技術研究会との共同研究として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 得竹 浩, 砂田 茂: ダンパー機能付きアクチュエータとその用途, 特願 2004-354374.
- 2) 倒れにくい自転車, 日経ビジネス, 2005年9月26日号, 日経BP社, 東京, 2005, pp. 112-114.
- 3) Muller, T. J.: Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, AIAA, Virginia, 2001.
- 4) Gessow, A. and Myers, C. G.: Aerodynamics of the Helicopter, College Park Press, Bethesda, 1967.
- 5) Thom, A. and Swart, P.: The Forces on an Aerofoil at Very Low Speeds, J. Roy. Aero. Soc., 44 (1940), pp. 761-770.
- 6) Hoerner, S. F.: Fluid-Dynamic Drag, Published by the author, 1965.