磁気トルクで駆動した小型飛行素子の羽ばたき運動

Flapping Motion of Wings of Small Flying Elements Driven by a Magnetic Torque

島崎克彦・井上光輝・荒井賢一・本田 崇*

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (☎980-8577)

*九州工業大学電気工学科, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (☎804-8550)

K. Shimasaki, M. Inoue, K. I. Arai, and T. Honda*

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

*Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensuicho, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550

A small flying element was constructed with hard magnetic films as wings and a soft magnetic wire as a body. The element is free from power supply cables and guides, and can fly within an alternating magnetic field. To elucidate a design guideline for the elements, theoretical analysis of the flapping motion of wings was carried out by developing and solving motion equations for the wings of the element. The theoretical results coincide very well with the experimental results, suggesting that the motion equations developed here are effective for expressing the actual motion of wings.

Key words: magnetic torque, flapping motion, drag, simultaneous differential equations, elevation angle

1. はじめに

半導体微細加工技術の発展に伴い、マイクロマシンと呼ばれる微小機械の研究開発が盛んに行われている。マイクロマシンは、工業プラントにおける細管内の検査や修理を行ったり、人体内の血管や器官を移動しての診療を行う自走型マイクロロボット¹⁾への応用が考えられており、すでに医療用のマイクロロボット実現に関する研究も始められている²⁾。

このような自走型マイクロロボットの移動形態としては、走行、泳動、飛行などが挙げられる。なかでも、飛行による移動は、微小な世界では影響の大きい摩擦を極力避け、3次元空間を自由に移動できる利点があり、実際の移動環境において幅広い活躍が期待される³⁾。

われわれは先に、硬質磁性膜による磁気トルクを利用した羽ばたき運動と軟磁性細線による非接触の姿勢制御を可能とした小型飛行素子を開発し、その飛行に成功した⁴⁾。しかしながら、その明確な設計指針は確立されておらず、位置制御や積載能力の見積もりを行うのが困難であった。そこで、本研究では羽の最適設計を行うための第一段階として、羽の動作の基礎的な検討を行ったので報告する。

2. 素子構成

Fig. 1 と Fig. 2 に、本研究で用いた飛行素子の構成を示す。この飛行素子は、硬質磁性膜を有する羽（以後、磁気羽と呼ぶ）とポリイミドフィルムの羽（以後、ポリイミド羽と呼ぶ）からなる複合羽と、アモルファスワイヤを用いた軟磁性細線の胴体から構成される。磁気羽の硬質磁性膜は、7.5 μm 厚の

PET 基板上に Fe 基磁性粉末材料を 4 μm 厚塗布し長手方向に着磁したものである。磁気羽はこれを 2 枚貼り合わせ、幅 2 mm、長さ 10 mm の大きさに切り出して作製した。ポリイミド羽は 7.5 μm 厚のポリイミドフィルムを 10 mm 四方の大きさに切り出して作製した。胴体には直径 107 μm 、長さ 20 mm のアモルファス Co-Fe-Si-B 細線を使用した。ポリイミド羽は、約 8 μm 厚のポリエチレンヒンジを介して磁気羽の先端から 2 mm の下面に接合しており、磁気羽とポリイミド羽の接合には 7.5 μm 厚のポリイミドのヒンジを用いた。飛行素子の総質量は 7.0 mg であった。

Fig. 1 General view of the flying element.

Fig. 2 Side view of the flying element.

Fig. 3 Motion of wings of the flying element.

3. 羽ばたきによる飛行の原理

硬質磁性膜の磁気モーメントは長手方向を向いているので、膜面に対して垂直に磁界を印加すると、磁気羽はポリイミドヒンジを支点として磁界の方向に折れ曲がる。したがって、膜面に対して垂直に交流磁界を印加すれば、羽ばたき運動を行うことができる。このときの羽の抗力と飛行条件について、以下に簡単に述べる。

羽は、羽ばたきによって空気を押しやる際に、空気から反作用的に抗力を受ける。抗力は定義⁵⁾より、(1)式のように表される。

$$D = (1/2) C_D \rho_a S U^2 \quad (1)$$

ここで、 C_D は抗力係数と呼ばれる無次元の係数、 ρ_a は空気の密度、 S は羽の代表面積、 U は羽の速度である。上昇力は羽が打ち上げ時に受ける抗力が、打ち下ろし時に受ける抗力よりも小さくなるときに発生する。この抗力差を ΔD とすると、素子が羽ばたきによって飛行するためには、(2)式を満たす必要がある。

$$\Delta D \geq mg \quad (2)$$

ただし、 m は飛行素子の質量、 g は重力加速度である。本研究では抗力差を発生させるために、Fig. 2に示したヒンジ構造を採用した。この構造を用いることで、ポリイミド羽は上方には磁気羽で抑えられるが、下方には軟らかいヒンジを用いているため、非常に折れ曲がりやすい。そのため、羽を打ち下ろす際にはFig. 3(a)のように磁気羽とポリイミド羽は一体となるが、羽を打ち上げる際にはFig. 3(b)のように磁気羽とポリイミド羽の間に角度差が生じる。この結果、打ち上げと打ち下ろしの間に抗力差が発生する。

4. 片側弾性支持梁の基礎特性

4.1 ヒンジの剛性

前節より、飛行素子が自身の重力よりも大きな上昇力を得るためには、羽を速く羽ばたかせる必要がある。そこで、Fig. 4に示すように磁気羽と固定軸との間に弾性ヒンジを介した片側弾性支持梁を作製して、羽ばたき運動の基礎的検討を行った。

羽ばたき速度は(3)式で表される。

$$U = r\theta\omega \quad (3)$$

ここで、 r は梁の長さ、 θ は羽ばたき角、 ω は羽ばたき周波数である。速い羽ばたき速度を得るには機械的共振が有利で、またエネルギー効率の面からも好ましい。共振は梁の固有周波数と外部磁界の励磁周波数がほぼ等しくなったときに起こる。固有周波数は梁の慣性モーメント J とヒンジの剛性 k (バネ定数)の静的変位のみに依存し、(4)式で表される。

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{k/J} \quad (4)$$

上式から、固有周波数はバネ定数の平方根に比例するため、ヒンジ以外の形状と材質を等しくしたとき、剛性の違うヒンジを選んで共振周波数を制御することが可能である。

ここでは材質の異なる3種類のヒンジ(ポリエチレン、ポリイミド、PET)について検討を行った。これらヒンジ材料のバネ定数は、片側弾性支持梁の先端に荷重をかけ、得られた仰角の変位との関係より求めた。得られた結果をそれぞれの固有周波数とともにTable 1に示す。なお、磁気羽自身の弾性変形は小さいので無視した。

4.2 磁界中の片側弾性支持梁の挙動

4.1で得られたヒンジ剛性を踏まえて、交流磁界中で駆動した梁の羽ばたき角について検討を行った。Fig. 5は100 Oeの交流磁界で駆動した羽ばたき角の励磁周波数特性を示す。いず

Fig. 4 Model of the wing used in the calculations.

Table 1

Material	Spring constant [Nm/rad]	Natural frequency [Hz]
Polyethylene (t=8 μm)	1.42×10^{-7}	14.9
Polyimide (t=7.5 μm)	1.14×10^{-6}	26.9
PET (t=27 μm)	1.22×10^{-5}	87.8

Fig. 5 Measured flapping angle of the elastic support beams.

Table 2

Material	Resonance frequency [Hz]	Flapping velocity [m/s]
Polyethylene ($t=8\mu\text{m}$)	16	1.6
Polyimide ($t=7.5\mu\text{m}$)	26	2.37
PET ($t=27\mu\text{m}$)	87	1.09

れのヒンジの場合も固有周波数付近で共振が起こり、羽ばたき角が増大することがわかる。この結果から求めた共振時の羽ばたき速度を共振周波数と併せて Table 2 に示す。この表からわかるように、ポリイミドヒンジを用いた場合の羽ばたき速度が最も速く、実験に用いた 3 種類のヒンジの中で、磁気羽と胴体の接合に最も適していることがわかる。また、このポリイミドヒンジを用いた場合の複合羽の共振周波数は、ポリイミド羽による慣性モーメントを考慮すると、20 Hz 程度になると推量できる。

5. 羽の運動解析

5.1 羽の運動方程式

4 節の磁気羽の運動を基礎として、実際の飛行素子を構成する複合羽（磁気羽＋ポリイミド羽）の動作解析を試みた。解析を容易にするため、Fig. 6 に示すように、複合羽を支持体にポリイミドヒンジを介して接合した片側弾性支持梁を用いた。

この系での羽の運動方程式は、磁気羽とポリイミド羽について、次の連立微分方程式で与えられる⁶⁾。

磁気羽の運動方程式：

$$\begin{aligned} & \{J_1 + m_2(0.8l_1)^2\}(d^2\theta_1/dt^2) + 0.4m_2l_1l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)(d^2\theta_2/dt^2) \\ & + C_1 + C'_2 + C_n(d\theta_1/dt) + k_1\theta_1 + k_2(\theta_1 - \theta_2) \\ & = MH \cos \theta_1 \sin(\omega t) - (0.5m_1 + 0.8m_2)l_1g \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (5)$$

ポリイミド羽の運動方程式：

$$\begin{aligned} & 0.4m_2l_1l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)(d^2\theta_1/dt^2) + J_2d^2\theta_2/dt^2 \\ & + C_2 - k_2\theta_1 + k_2\theta_2 \\ & = -0.5m_2l_2g \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (6)$$

(5), (6) 式で、 J_1 と J_2 はそれぞれ磁気羽（バネ定数 k_1 ）とポリイミド羽（バネ定数 k_2 ）の慣性モーメントである。また m_i ,

Fig. 6 Side view of the wing.

l_i, w_i ($i=1, 2$) は Fig. 6(a) に示すように、それぞれの羽の質量と長さおよび幅である。これらの運動方程式を解くには、羽の受ける減衰をどのように決定するかがキーポイントとなる。減衰項は (5), (6) 式で、 C_1 と C_2 と $C_n(d\theta_1/dt)$ および C'_2 からなっており、速度の 2 乗と 1 乗に比例する⁷⁾。 C_1 と C_2 および C'_2 は、速度の 2 乗に比例する流体力で、それぞれ次式で与えられる。

$$C_1 = \pm(1/8)C_d\rho_a w_1 l_1^3 (d\theta_1/dt)^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C'_2 = \pm \{ & (1/2)C_d\rho_a w_2 0.8l_1 |0.8l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)(d\theta_1/dt) \\ & + r(d\theta_2/dt)| \{0.8l_1(d\theta_1/dt) + r \cos(\theta_1 - \theta_2)(d\theta_2/dt)\} dr \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_2 = \pm \{ & (1/2)C_d\rho_a w_2 r |0.8l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)(d\theta_1/dt) + r(d\theta_2/dt)| \\ & \{r(d\theta_1/dt) + 0.8l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)(d\theta_2/dt)\} dr \end{aligned} \quad (9)$$

速度が十分に速い場合には、速度の 2 乗に比例する流体力が主体である。逆に速度が十分遅い場合には速度の 1 乗に比例する流体力が大きく寄与する。そこで、変位の大きなポリイミド羽の減衰項は、速度の 2 乗に比例する流体力で十分に記述できるものとし、変位の小さい磁気羽の減衰項には速度の 1 乗に比例する流体力 $C_n(d\theta_1/dt)$ を考慮した。

流体力 $C_n(d\theta_1/dt)$ は代表面積と代表速度に比例するため、その係数 C_n は (10) 式のように表される。

$$C_n = X \{ (1/3)w_1 l_1^3 + \{w_2 L 0.8l_1 | \cos \alpha | \cos(\theta_1 - \theta_2 - \alpha) dr \} (d\theta_1/dt) \quad (10)$$

$$L = \sqrt{(0.8l_1)^2 + r^2 + 1.6l_1 r \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (11)$$

$$\cos \alpha = \{0.8l_1 + r \cos(\theta_1 - \theta_2)\} / L \quad (12)$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_2 - \alpha) = \{0.8l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + r\} / L \quad (13)$$

また (10) 式の係数 X は、実験的に決定したフィッティングパラメータである。上式の L および α は、Fig. 6(b) に示すように、 L は固定軸から羽上における微小領域までの距離であり、 α は固定軸と微小領域を結んだ線と磁気羽とのなす角である。

(a) Excitation frequency: 10 Hz

(b) Excitation frequency: 20 Hz

(c) Excitation frequency: 30 Hz

Fig. 7 Measured and calculated elevation angles of the magnetic wing and the polyimide wing.

5.2 実験結果および考察

5.1 節で述べた運動方程式をルンゲ・クッタ・ニストリウム法によって解き⁸⁾, Fig. 6 の位置を固定した梁の挙動を高速カメラで観察した結果と比較検討した。結果の一例を Fig. 7(a)~(c) に示す。励磁条件は印加磁界強度を 500 Oe とし、励磁周波数は 4 節で得た共振特性を踏まえて、10, 20, 30 Hz の

三つの周波数とした。同図で、実線と破線はそれぞれ磁気羽とポリイミド羽の計算結果で、速度の 1 乗に比例する減衰項を決定するパラメータは 1.3 とした。周波数が高くなるにつれ、計算値と実験値とのずれが大きくなるように見える。これは、比較的高い周波数では梁にたわみが生じて、磁気羽とポリイミド羽が完全剛体であるとした仮定が成り立たなくなることや、共振周波数に近い周波数帯域では計算での共振の効果が実験値より大きく現れることに起因する。しかしながら、計算値は実験値によく一致しているといえ、導出した羽の運動方程式が実際の羽の動作をよく記述しているといえる。このような理論解析結果と実験結果とのよい一致は、主として羽の受ける減衰力を定量的に評価した結果と思われる。このことは、飛行素子の運動が、羽の受ける抗力に支配されていることを示唆しており、素子の最適設計を行うには、羽の受ける抗力をいかに正確に評価するかがキーポイントといえる。

6. まとめおよび今後の課題

小型飛行素子の最適設計条件の確立のための第一歩として、磁気羽とポリイミド羽からなる複合羽の運動を理論解析と実験により詳細に調べた。その結果、共振周波数が 30 Hz 前後になるように、ヒンジの材質と羽形状を選定する必要があることがわかった。また、羽形状の設計には複合羽の受ける流体力を正確に評価する必要があることを指摘した。ここでは羽速度の 2 乗に比例する流体力以外の因子を速度の 1 乗に比例する流体力の中に組み込み、フィッティングパラメータ X として記述した。 X の値は 1.3 で理論値と計算値により一致が得られた。

現在この結果を基礎として、実際に素子が飛行している状態での羽運動を詳細に検討している。この結果は、上述の流体力パラメータ X の物理的説明と素子効率の算出を含めて、別の機会に報告する予定である。

文 献

- 1) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進 (共著): マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス (培風館, 1992).
- 2) 荒井賢一, 井上光輝, 山口正洋, 石山和志, 山田竜吾, 高井良尋, 高橋昭喜, 石橋忠司: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-179 (1997).
- 3) Y. Kubo, I. Shimoyama, and H. Miura: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, p. 386 (1993).
- 4) K. I. Arai, W. Sugawara, K. Ishiyama, T. Honda, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3758 (1995).
- 5) 安藤: 流体の力学 (培風館, 1989).
- 6) K. Shimasaki, M. Inoue, K. I. Arai, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.* (1998), in press.
- 7) 黒田 進, 保坂 寛, 島津 聡, 板生 清: 精密工学会誌, **62**, 742 (1996).
- 8) E. Kreyszig (田島一朗, 近藤二郎 訳): 技術者のための高等数学 I 常微分方程式 (培風館, 1965).

1997 年 10 月 29 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録