

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	昆虫の翅を規範とした柔軟なマイクロ人工翅
Title(English)	Micro Artificial Flexible Wings Mimicking Insect Wings
著者(和文)	田中 博人
Authors(English)	Hiroto Tanaka
出典(和文)	精密工学会誌, Vol. 81, No. 5, pp. 405-409
Citation(English)	Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 81, No. 5, pp. 405-409
発行日 / Pub. date	2015, 5

昆虫の翅を規範とした柔軟な マイクロ人工翅*

Micro Artificial Flexible Wings Mimicking Insect Wings

田中博人**

Hiroto TANAKA

Key words flapping flight, insect wing, MEMS, micro molding, Parylene, butterfly, hoverfly

1. 緒 言

チョウ、セミ、バッタ、トンボなど、飛翔する昆虫はわれわれの日常生活の中でよく目にする身近な存在である。その飛翔昆虫を手にとって翅をよく観察してみると、非常に薄い翅の中を枝分かれする脈（翅脈）が走り、曲線的で美しいパターンを描いていることに気が付く。さらにその翅脈に支えられた翅の膜面は平坦ではなくシワがよっており、なかにはトンボやアブの翅のように鋭角にギザギザとした立体的な形状をもつものもある。指で触れてみると、付け根付近や前縁は比較的頑丈だが、その他の翼面は非常に薄く柔軟である。昆虫の飛翔は、この精緻で複雑な構造の翅を羽ばたかせて実現している。

人工の航空機では、揚力と推力はそれぞれ翼とエンジンが別々に発生する。つまりエンジンで機体が推進することで翼に相対風が流入すると、翼が揚力を発生する。しかし昆虫は推力を発生するエンジンをもたない。その代わりに翼を羽ばたかせて能動的に翼に風を当て、体重を支える鉛直上向きの空気力と進行方向の推力を同時に発生する。しかも昆虫のような小さなスケールでは、レイノルズ数（流体の慣性と粘性の比を表す無次元数）が 10^4 以下になり、流体の粘性の影響が強くなるため揚力は減少し抗力は増加する。そのため小さな昆虫ほど高周波数で羽ばたき、それに伴う非定常な渦を利用して空気力を発生する¹⁾。たとえば大型のアゲハチョウの羽ばたき周波数は10 Hzだが、小型の体長10 mm程度のハナアブでは150 Hzにもなる。昆虫の翅の構造は、この高速の羽ばたきに耐える強度と、翅の質量による慣性力を抑える軽量性を兼ね備えている。

さて、昆虫の羽ばたき飛翔は生物学者だけでなく工学者も魅了し、飛翔昆虫を規範とした超小型の羽ばたき飛行体の研究が長年行われてきた。特に近年は、昆虫よりはるかに大型ではあるものの、複数の回転翼によって飛行するマルチコプタが市販化されて普及の兆しを見せており、飛行

ロボットの有用性は周知のものとなった。昆虫サイズの羽ばたき機構と飛行制御システムを開発することは依然として技術的に困難であるが、筆者も所属していたハーバード大学の研究グループがハチサイズの羽ばたき機構の自由飛行（ただし電源と姿勢センサは外部供給）に成功するなど²⁾、着実に研究は進んでいる。その中で筆者は、昆虫の翅の精緻な美しさに魅かれ、人工的に翅を再現してその機能を探る実験的研究を行ってきた。本稿では、MEMSプロセスを応用した翅脈付き人工アゲハチョウ翅と、レーザーアブレーションを利用した3次元人工ハナアブ翅の製作方法を紹介する。

2. 翅脈付き人工アゲハチョウ翅

昆虫の翅はキチン質のクチクラから成り、翅面は厚さ数マイクロメートルの2層構造で、翅脈は中空のパイプ構造である。羽化の際は、翅脈に体液が送り込まれることで翅が広がり、乾燥して硬化する。乾燥後の翅脈は、翼の形状を保持する支持構造として機能する。翅内部には筋肉は存在せず、翼面は荷重によって受動的に変形する。翅脈パターンの例として、筆者が観察したカルナルリモンアゲハ *Papilio karna* の乾燥標本の翅脈パターンを図1に示す。多くの昆虫では翅脈は翼付け根から放射状に枝分かれして

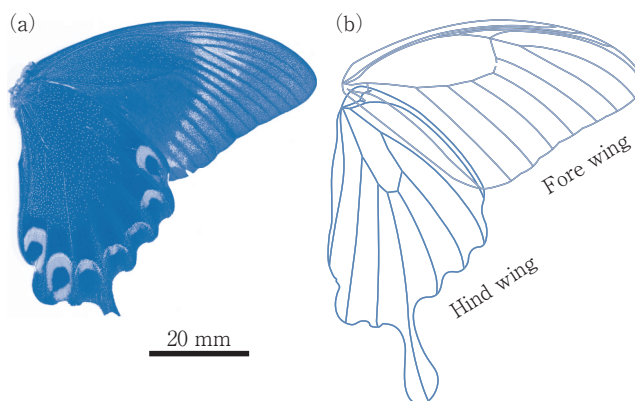


図1 カルナルリモンアゲハ *Papilio karna* の前翅と後翅の裏面写真 (a) およびトレースした翅平面形と翅脈パターン (b)³⁾

*原稿受付 平成27年2月19日

**千葉大学・上海交通大学国際共同研究センター（千葉県千葉市稲毛区1-33）

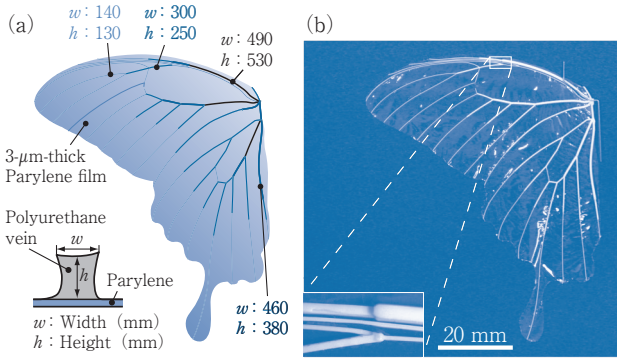


図2 人工アゲハ翅の平面形と翅脈の断面形状 (a) および製作した人工翅 (b)³⁾

いき、根元ほど太く先端ほど細い。このカルナルリモンアゲハの場合は、前縁付け根付近の翅脈厚さは500 μm 以上にもなる一方、後縁付近の翅脈径は約30 μm だった。このような翅脈の枝分かれパターンと太さの分布が、翼面内の剛性分布と質量分布を決定し、羽ばたき飛行中の翼面の受動的な変形を構造的に決定する。筆者は、チョウの飛行において翅脈構造が飛行中の受動的翼変形と飛行運動に与える影響を調べるために、翅脈を有する人工翅を製作してゴム動力無尾翼羽ばたき機に取り付けて飛行実験を行った。人工翅を用いることで任意の翅脈形状を比較することができる。また人工翅のみを交換して同一の羽ばたき機を用いることで、飛行運動の違いを抽出して観察できる。

製作した人工翅の模式図と写真を図2に示す。翅脈は長方形断面のポリウレタン樹脂、翅面は平坦なパリレン薄膜である。人工翅の外形と翅脈パターンは、実際のカルナルリモンアゲハ *Papilio karna* の乾燥標本を写真撮影し(図1(a))、トレースして得た(図1(b))。さらに前翅と後翅を統合して1枚の翼とした(図2(a))。これは、アゲハチョウは前進飛行時には前翅と後翅を一体化して1枚の翼として羽ばたかせることから、1枚の翼に統合することで製作精度向上と飛行実験の再現性向上を図ったものである。翅脈の太さは、後述する羽ばたき機に人工翅を取り付けて飛行実験を行い、安定した飛行が可能となるように試作を繰り返して決定した。

人工翅は、PDMS (poly(dimethylsiloxane)) 製の翅脈メス型を基板上に成膜したパリレンフィルムにかぶせ、密閉したメス型流路に熱硬化性ポリウレタン樹脂を注入し硬化させ、ポリウレタン翅脈とパリレンフィルムを一体化させて製作する(図3(10~12))。パリレンフィルムを曲面上に成膜しておけば、曲面状の翼面をもつ人工翅も製作可能である⁴⁾。製作手順を図3に示す。PDMS メス型は、DRIE (deep reactive ion etching) で製作したシリコンメス型に(図3(1~6))、PDMS を流し込んでPDMS オス型を作り(図3(7))、離型層としてフルオロカーボンを成膜したのち再度PDMS を流し込んで製作する(図3(8))。シリコンメス型のDRIEの際に、ポリイミドテープ

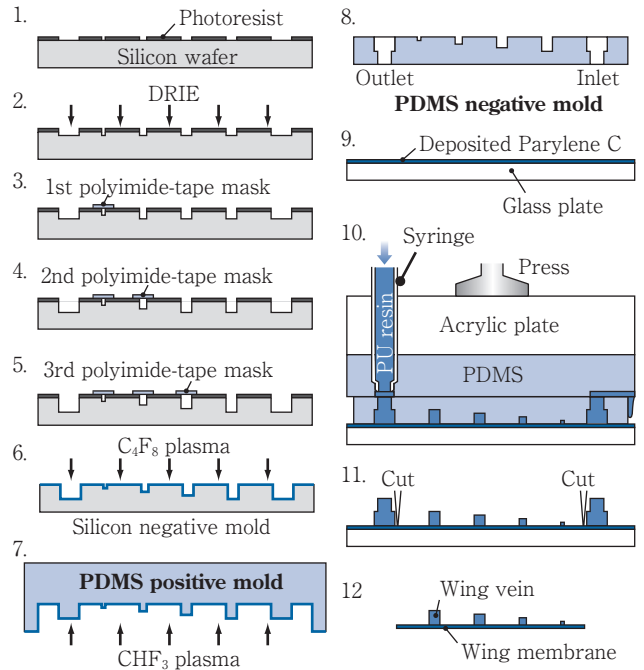


図3 人工アゲハ翅の製作プロセスフロー³⁾

で翅脈部を段階的に保護することで、異なる翅脈厚さを実現した(図3(2~5))。MEMS フォトリソグラフィ・エッチングプロセスを利用することで、微細な人工翅脈を再現できた。

製作した人工翅は、バルサ材で作られたゴム動力羽ばたき機に取り付けられ、実際に前進飛行に成功した(図4(a), (b))。機体の総質量は0.39 g で、比較対象とした生体ナミアゲハの質量0.3 g とほぼ等しい。そのうち1対の人工翅の質量は0.14 g で、全質量の35%を占める。ナミアゲハの乾燥標本でも、翅質量は全質量の30%であり、翅が全質量に占める割合もほぼ等しい。羽ばたき機はゴム動力で約3秒間飛行する。飛行時間はわずかだが、高速度カメラを用いた運動解析には十分である。この研究では、アゲハチョウの「ひらひら」とした飛び方がどのように発生し、どのような空気力学的機能をもつかを調べることを目的とし、実際のナミアゲハの前進飛行の運動と比較した(図4(b), (c))。それぞれの胴体の飛行軌跡から分かる通り、羽ばたきごとに上下運動している。運動解析の結果、機体の上下運動が翼の迎え角を羽ばたき周期で変化させ、打ち下ろし時の鉛直上向きの空気力成分が打ち上げ時の鉛直下向きの空気力成分に打ち勝つことが分かった。

人工翅と羽ばたき機を用いることで、実際の昆虫では不可能な比較実験を行うことができる。例えば、翅脈をもたない人工翅を製作して翅脈付き人工翅と比較することで、翅脈が翼面変形と飛行運動に与える影響を抽出した(図5)。その結果、翅脈がない場合は翼面が大きく膨らんで迎え角が小さくなり、揚力係数が減少して「ひらひら」とした機体の上下運動が抑制されることが分かった。このように、人工翅は昆虫飛翔研究の新たなツールとして有用である。

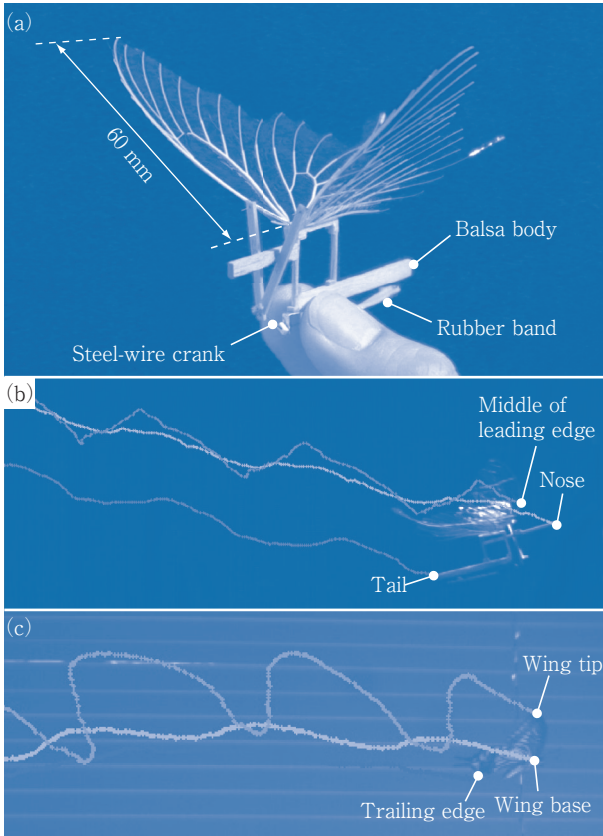


図4 (a) アゲハチョウ型羽ばたき機³⁾. (b) 羽ばたき機の自由前進飛行. (c) ナミアゲハの自由前進飛行

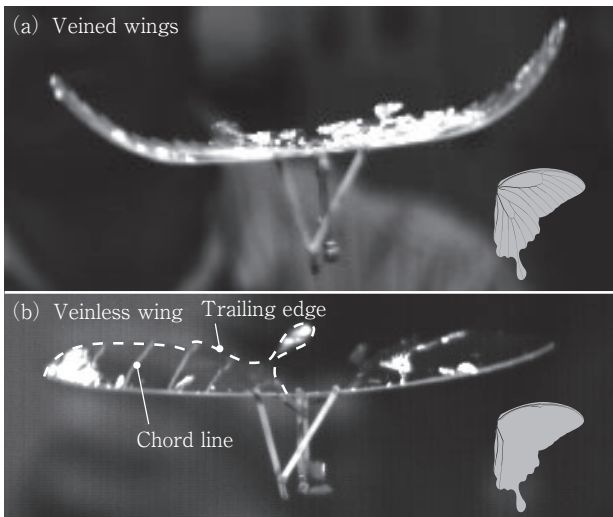


図5 自由飛行中の打ち下ろし時の翼変形³⁾. (a) 翅脈をもつ人工翅. (b) 翼面内の翅脈をもたない人工翅

以上のアゲハチョウの人工翅の製作方法と羽ばたき飛行実験の詳細は、文献3)、4)を参照されたい。

3. コルゲーシオン付き人工ハナアブ翅

昆虫の翅の剛性は、翅脈だけでなく立体的な断面形状にも影響される。例えばトンボやハエでは翼断面が三角波状

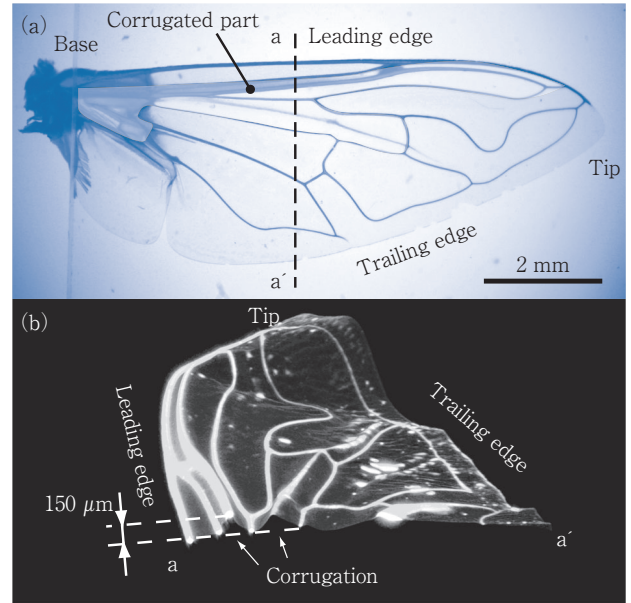


図6 ハナアブ *Eristalis tenax* の翅⁶⁾. (a) 平面形と翅脈パターン. コルゲーシオン部分を灰色で示す. (b) X線CTで可視化した翼断面

にギザギザしており、翼幅方向の曲げ剛性が強化されていると考えられている⁵⁾。このようなギザギザ断面をコルゲーシオン (corrugation) と呼ぶ。本章では、ハナアブ (hoverfly, *Eristalis tenax*) のコルゲーシオンに着目した人工ハナアブ翅を紹介する。

ハナアブの翅の翼長は約 10 mm で、前縁に沿って2つの顕著なコルゲーシオンが存在する (図6 (a))。コルゲーシオンの高さは約 150 μm である (図6 (b))。この観察に基づいて、コルゲーシオンと翅脈をもつ人工ハナアブ翅を設計した (図7 (a))。翅脈の太さは7種類で、断面形状は楕円である。前縁に沿って最大高さ 150 μm のコルゲーシオンをもつ (図7 (b), (c))。

このようなマイクロスケールの3次元的形状をもつ翅脈付き薄翼を製作する方法として、3次元マイクロモールドを用いた熱硬化性樹脂の一体成形方法を考案した。プロセスの概要を図8に示す。水溶性犠牲層⁷⁾として7% ポリアクリル酸 (PAA, poly(acrylic acid)) 水溶液をスピコートしたシリコン下型に、主剤と硬化剤を混合した熱硬化性ポリウレタン樹脂を流し込み (図8 (1))、大気圧に戻したのち PDMS 上型をかぶせて密閉する (図8 (2))。樹脂の硬化後、翅の外形を切り出し (図8 (3))、水中に数時間浸して水溶性犠牲層を溶かして人工翅を離型する (図8 (4))。一般的に、樹脂を上型と下型ではさんで成形するエンボス加工では、型同士の接合面に残留する樹脂が問題となる。人工ハナアブ翅のプロセスでは、接合面の残留樹脂を翼面として利用し、翅脈と翼面を一体成形する。このために上型表面には翼面厚さを制御するスペーサ突起を付与している。

この手法では、マイクロスケールの3次元モールドの製

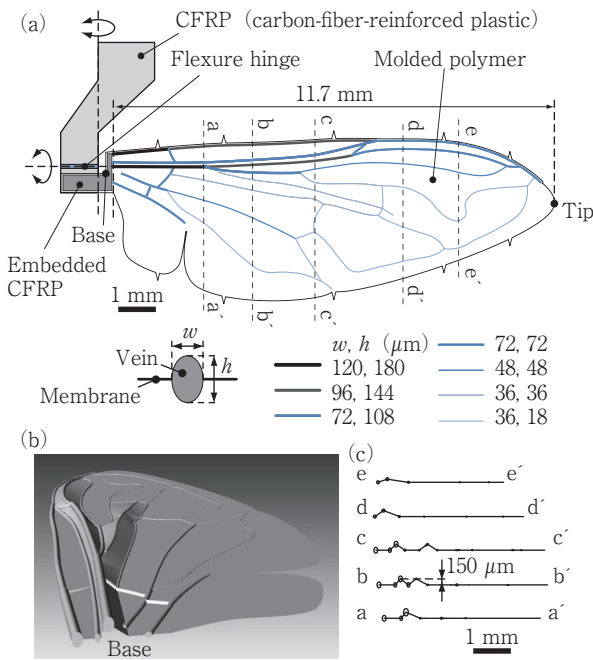


図7 人工ハナアブ翅のデザイン⁶⁾. (a) 平面形と翅脈太さ. (b) モールド製作用の3次元CADモデル. (c) 三角波状の翼断面

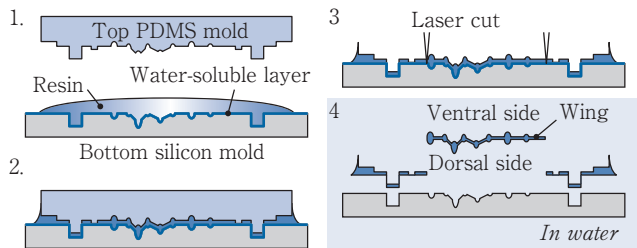


図8 人工ハナアブ翅のプロセス概要⁶⁾

作方法が大きな課題となる。本研究では DPSS (diode pumped solid state) レーザ加工機でシリコンウェハ表面を1層ごとスキャンして3次元形状を削り出した(図9(a))。使用したレーザはNd:YVO4(ネオジウム添加バナジウム酸イットリウム)レーザで、波長は355 nm, 平均出力は2 W, パルス幅は20 kHzにおいて約15 nsである。レーザのスポット径は約10 μmであり、1層のスキャンで約5 μm加工できる。下型はシリコンウェハを直接加工して製作した。上型はまずシリコン凸型を製作し、それをPDMSで型取りしてPDMS上型とした。上型の材料を柔軟なPDMSとすることで、人工翅硬化後の離型が可能となる。シリコン凸型の表面の写真を図9(b)に示す。マイクロスケールの曲面的な3次元形状が実現している。

この加工方法の注意点は、加工中に定期的にエッチングレートを計測してレーザ出力を調整する必要がある点である。また加工後の表面粗さを小さくするためにはレーザ加工条件の十分な調整が必要であり、それでもなお平滑な表面は実現困難である。例として長方形断面のマイクロチャ

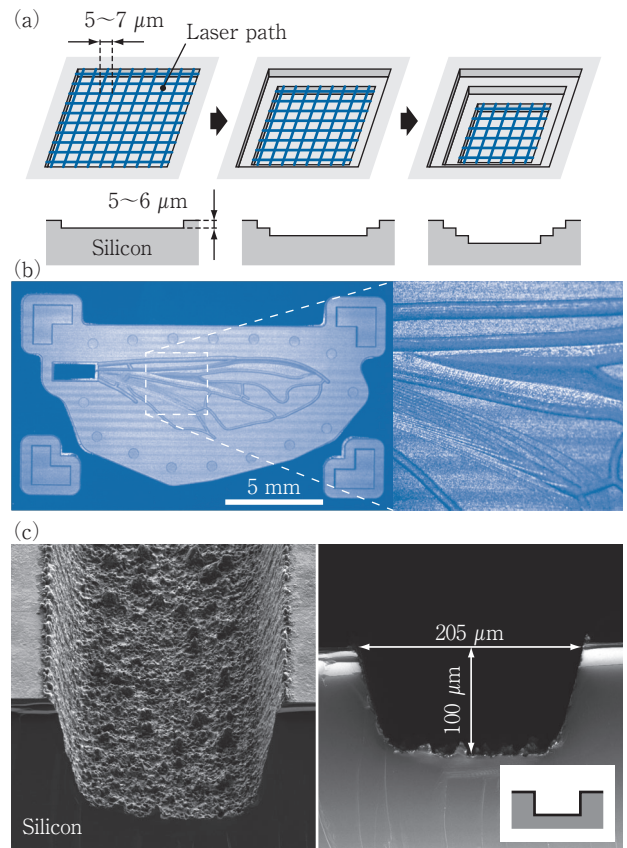


図9 レーザスキャニングアブレーションによる3次元モールドの製作⁸⁾. (a) シリコンウェハの表面をレーザで繰り返しスキャンして3次元形状を削り出す. (b) 加工後のシリコンウェハ表面の光学顕微鏡写真. (c) 長方形断面のマイクロチャネルのSEM画像

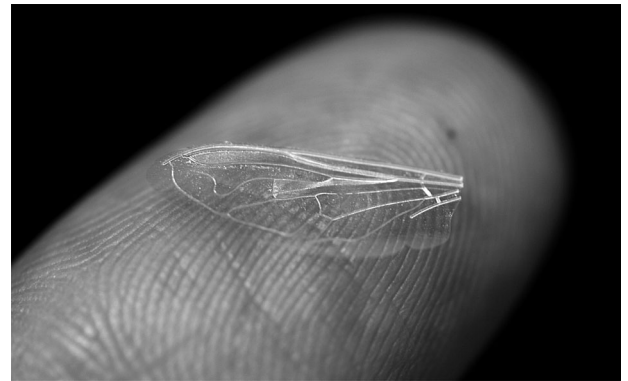


図10 指先にのせた人工ハナアブ翅

ネルを製作した際の表面と断面のSEM画像を図9(c)に示す。パルスレーザのアブレーションによる10 μm程度の凹凸が見られる。

製作した人工ハナアブ翅の写真を図10に示す。翅面の厚さは10 μm以下と薄いため、下にある指先の指紋が透けて見えている。このコルゲーション付き人工翅は、実際のハナアブと同程度の静的曲げ剛性をもつことが点荷重試験によって分かった。さらにピエゾセラミックアクチュエータで駆動する固定羽ばたき機構に取り付けて、実際のハ

ナアブと同じ 150 Hz で羽ばたかせたところ、コルゲーションがない場合は人工翅が破損してしまったが、コルゲーションがある場合は破損することなくハナアブの体重に相当する揚力を発生した。ただし、この羽ばたき実験では羽根付け根にヒンジを設けているため (図 7 (a)), 炭素繊維強化プラスチックフレームで支持された平坦な剛体翼でも大きな揚力を発生できることが確認されている。羽ばたき翼の揚力や効率を向上させるための最適な柔軟翼構造の指針、つまり翼付け根の柔軟性と翼面の柔軟性の最適な組み合わせ方法は、まだ研究途上である。

人工ハナアブ翅の製作方法と羽ばたき実験の詳細は、文献 6), 8) を参照されたい。

4. 結 言

昆虫の翅脈と 3 次元的翼面形状を実際と同じサイズの人工翅で再現するマイクロ加工方法について、人工アゲハチョウ翅と人工ハナアブ翅を例として紹介した。最先端のマイクロ加工技術を応用することで、生物学的な昆虫飛翔研究に人工翅という新たなツールをもたらすことができた。さらに、昆虫の精緻な構造の人工的再構成に挑戦することで、新たなマイクロ加工方法を創出できることを示した。生物を規範とした工学は、このように生物学と工学の両分野に貢献しうるのである。

参 考 文 献

- 1) S.P. Sane : The Aerodynamics of Insect Flight, *J. Exp. Biol.*, **206**

(2003) 4191.

- 2) K.Y. Ma et al. : Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot, *Science*, **340** (2013) 603.
 3) H. Tanaka and I. Shimoyama : Forward Flight of Swallowtail Butterfly with Simple Flapping Motion, *Bioinspiration & Biomimetics*, **5** (2010) 026003.
 4) H. Tanaka, K. Matsumoto and I. Shimoyama : Fabrication of a Three-dimensional Insect-wing Model by Micromolding of Thermosetting Resin with a Thin Elastomeric Mold, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17** (2007) 2485.
 5) C.J.C. Rees : Form and Function in Corrugated Insect Wings, *Nature*, **256** (1975) 200.
 6) H. Tanaka, J.P. Whitney and R.J. Wood : Effect of Flexural and Torsional Wing Flexibility on Lift Generation in Hoverfly Flight, *Integrative and Comparative Biology*, **51** (2011) 142.
 7) V. Linder et al. : Water-soluble Sacrificial Layers for Surface Micromachining, *Small*, **1** (2005) 730.
 8) H. Tanaka and R.J. Wood : Fabrication of Corrugated Artificial Insect Wings Using Laser Micromachined Molds, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **20** (2010) 075008.



田中 博人

2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。博士 (情報理工学)。専門分野は MEMS, 流体力学, 微細加工技術を応用して生物の飛翔や飛行ロボットの研究を行う。2009 年 4 月からハーバード大学にて研究員。2011 年 10 月から千葉大学にて特任助教 (現職)。