

## 審査の結果の要旨

氏名 田中 博人

本論文は「チョウの羽ばたき飛行運動における翅脈構造の機能」と題し、6章からなっている。チョウの翅面に走る翅脈は、翅の弾性と羽ばたき飛行中の翅の変形に影響すると考えられている。本論文は、翅脈形状による羽ばたき飛行運動の違いを実験的に比較するために、羽ばたき機に人工翅を取り付ける実験方法を提案し、アゲハチョウのような大型のチョウの羽ばたき飛行における具体的な翅脈の機能を解析した。

第1章「序論」では、研究の目的と背景について述べている。

第2章「人工翅の設計と製作」では、人工翅の設計と製作方法について述べている。人工翅は実際の翅のように翅脈をもつ薄膜である。人工翅の平面形状と脈相は実際のアゲハチョウ *Papilio karna* と同一で、翼長は 60 mm で前翅と後翅を結合した形で、翅脈の太さは 4 種類（幅・高さが 450・600, 450・450, 300・300, 150・150 (単位:  $\mu\text{m}$ )）である。人工翅は、翅脈部分はポリウレタンで薄膜はパリレンであり、プラスチック材料を採用することで柔軟さを実現している。製作方法として、パリレン薄膜上にポリウレタン翅脈を MEMS プロセスで製作したシリコンゴム型によって成形するマイクロモルディング法を開発している。この製作方法では、翅脈の断面のアスペクト比が 1.0 のとき翅脈幅の 500 倍以上の長さが成形可能であり、人工翅の製作に十分であることが示されている。上記設計の人工翅を「基準人工翅」とし、翅脈の機能を比較実験から明らかにするために、翅面内に翅脈を持たない「無翅脈人工翅」と、全て翅脈が翅基部の翅脈と同様に太い「厚脈人工翅」を製作している。

第3章「人工翅の定常空気力特性」では、各人工翅の定常流における揚力曲線と抗力曲線が計測されている。基準人工翅に比べて無翅脈人工翅は、翅脈の無い翅面が大きくまくれ上がるので、失速までの揚力曲線の傾きが小さい。厚脈人工翅は、基準人工翅に見られる周縁部の反り上がりも見られず平坦で、失速までの揚力曲線の傾きは大きい。

第4章「人工翅を実装した羽ばたき機の飛行運動」では、各人工翅を羽ばたき機に取り付け、その前進飛行を高速度カメラで解析し、比較している。基準人工翅を取り付けたときの羽ばたき機の総質量は 385 mg でアゲハチョウと同程度であり、約  $1 \text{ N/m}^2$  の低翼面荷重と約 10 Hz の低羽ばたき周波数というアゲハチョウと同様の特徴を有する。基準人工翅機の自由飛行において、体軸迎え角が羽ばたきに同期して約  $0^\circ$  から  $40^\circ$  の間で振動するという特徴が見られ、この体軸迎え角変化によって打ち下ろし中の方が打ち上げ中よりも翅の迎え角が大きくなり、打ち下ろしによる上向きの揚力が打ち上げの下向きの揚力にまさることが示されている。羽ばたきサイクル単位の揚力係数・抗力係数の平均値は、定常流中の値の 1.9 倍である。無翅脈人工翅機では体軸迎え角の振動が約  $10^\circ$  から  $20^\circ$  と小さく、揚力係数と抗力係数は基準人工翅よりも小さい。厚脈人工翅機の体軸迎え角の振動は基準人工翅機と同程度であったが、揚力係数と抗力係数は定常流中の場合と異なり基準人工翅よりも小さく、翅質量当りの揚力と抗力も基準人工翅より小さくなることが示されている。これらの結果から、翅面内の脈相は翅面のまくれを防ぎ、揚力係数と抗力係数の低下を防止する機能があり、翅脈が周縁部ほど細いことによって翅が軽量化され、翅の質量当り空気力を向上させる機能があることが述べられている。

第5章「アゲハチョウの飛行メカニズムと翅変形」では、第4章までに述べられた飛行メカニズムと翅脈の機能が、実際のアゲハチョウの前進飛行でも現れるか検証している。アゲハチョウの前進飛行を高速度カメラで解析した結果、基準人工翅機と同様の体軸迎え角変化が見られ、基本的な飛行メカニズムは 1 自由度の羽ばたき機と同様であることが示されている。翅の変形については、翅脈によって翅面のまくれが防止されるのは共通だが、実際の翅の 3 次元構造も翅の変形には影響することが示唆されることが述べられている。

第6章「結論」では、本研究によって得られた成果とその結論が述べられている。

以上のように、本論文では人工翅と羽ばたき機を用いた実験方法を提案し、アゲハチョウの前進羽ばたき飛行のメカニズムと翅脈の機能を明らかにしている。これは、小さなスケールでの動的な構造と流体力の関係の解明を通して MEMS の設計論に及ぶものであり知能機械情報学の発展に貢献するものである。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。