

1. 研究の目的

近年、世界各地で自然災害が頻発し、倒壊した建物などからの被災者の発見・救助は困難を極めるだけでなく、原子力発電所など人間の侵入が容易ではない場所での大事故を引き起こすこともある。世界中で災害救助ロボットが開発されているもののその使用範囲は限定され、例えば、汚染水に浸された場所ではその技術を発揮できない。その一方で、欧米では、テロ対策や不審者の監視システム技術の開発が盛んに行われている。特に、昆虫を模倣した飛翔ロボットの開発への注目が高まっている。これらの背景の元、安全・安心の社会の実現のための小型飛翔体 (Micro-Air-Vehicle (MAV)) の開発が欧米を中心に盛んに行われてきた。しかしながら、その多くは、羽根が回転するローター型のロボットであり、その構造は部品点数も多く、複雑になるだけでなく、その飛翔形態は昆虫とは全く異なるため、欧米の目指す環境に調和した監視技術システムへは不向きである。そのため、これらのロボットの実用化は足踏み状態にあった。これまでに、蝶の飛翔メカニズムの解明とそれを基盤とした羽ばたき飛翔ロボットの開発を目指してきた。特に、蝶の翅の運動の幾何学的解析、また、翅まわりの流れ場の定量的可視化により、翅の運動により作り出される渦を捉え、その結果を基盤とし、尾翼を有することなく、2枚の翅の羽ばたき運動だけで安定的に自律飛翔するロボットを実現してきた。この飛翔ロボットのより複雑な飛翔、高揚力発生を実現するためには、蝶の飛翔メカニズムの中でも、翅の弾性変形により生み出される三次元渦流れ構造およびその動的挙動とそれにより生み出される揚力／推進力との関連機構を明らかにする必要がある。そのため、翅まわりの流れ場の定量的可視化計測および流体構造連成解析を用いたハイブリッド解析により、蝶の翅上に形成される渦輪の詳細な構造とその干渉に至るまでの一連の発達過程、さらには、この動的挙動が生み出す非常揚力／推進力特性との関連機構を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の内容 (手法、経過、評価など。)

1. 蝶の翅まわりの流れ場の定量的可視化による渦流れ構造とその動的挙動の解明

(1) 蝶の翅まわりの流れの定量的可視化(PIV)計測による渦輪の三次元構造

蝶の翅まわりの流れ場の高速 PIV 計測システムにより、翅上に形成される三次元渦構造の羽ばたき一周期当りの動的挙動を明らかにする。翅の羽ばたき運動は周期性があることから、二次元画像の重ね合わせにより複雑な三次元構造とその挙動を明らかにする。

(2) 翅まわりの渦構造の第二不変量による渦構造の詳細の解明

PIV 計測により得られた渦度の第二不変量を計算することで、渦構造の回転／ひずみ成分のどちらが渦構造の主となっているかを明確にし、その微細構造の詳細を明らかにする。

(3) 翅から巻き上がる渦輪の詳細な構造と動的挙動の解明

翅上に形成される渦輪の羽ばたき一周期当りの成長・発達過程を定量的・視覚的に解明する。研究成果である翅の弾性変形の結果と関連付けることで、翅の弾性変形の渦構造の成長・発達への寄与を明らかにする。

2. 研究の内容（続き）（書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。）

2. 翅から成長・発達する渦輪のダイナミクスの解明

(1) 流体構造解析による翅の打上げ／打下し時の渦輪の干渉の定量的評価

蝶の翅の羽ばたき運動により生成された渦輪の循環から蝶が生み出す揚力を導き出すことを目的とする。そのためには、渦輪の成長だけでなく、それらの干渉も定量的に評価する必要がある。しかしながら、上記1のPIV計測では、蝶の翅の打上げ／打下し時にそれぞれ形成される渦輪の干渉までは評価できない。そのため、渦輪の干渉とそのダイナミクスの解明は数値解析により行う。蝶の翅は、弾性変形するために、流体構造連成解析によりその解明を目指す。

(2) 渦輪の一連の発達過程の解明と非定常揚力の理論的導出

上記1.の結果と関連付けることで、蝶の翅の羽ばたき運動により翅上に巻き上がる渦輪がその後流に発達するまでの一連の成長過程を定量的に明らかにする。特に、PIV計測により得られる渦輪の渦度を評価することで、翅まわりに発達する循環、蝶が生み出す揚力を理論的に導出する。

(3) 弾性体の運動、曲げ剛性および非定常流体力の関連付け

運動によりしなやかに弾性変形する蝶の翅を模擬した二次元弾性翼まわりの流れ場の流体構造連成解析により、翅の運動周波数、曲げ剛性およびこれらが生み出す非定常流体力特性を無次元パラメータで関連付け、これらの関係を明確にする。

3. 蝶の翅まわりの流れ場と揚力／推進力の連関機構の解明と羽ばたき飛翔ロボットの高機能化

(1) 蝶が生み出す揚力／推進力の直接計測と翅の変形、渦輪の発達、揚力／推進力の関連付け

離陸飛翔する蝶が生み出す揚力および推進力を超小型六軸力覚センサにより直接計測する。上記2(2).のPIV計測で得られる渦度の循環から理論的に導出する揚力との比較・検討より、PIV計測結果の渦度の最適な閾値を決定し、直接計測不可能な自由飛翔時の揚力を渦輪の時空間積分から正確に導出することが可能となる。上記までに得られた飛翔形態による翅の弾性変形、渦輪の一連の発達過程、渦輪により生み出させる非定常揚力／推進力との関連性を明らかにする。

(2) 自由飛翔する蝶の翅まわりの渦構造の詳細とその性質の解明

PIV計測により得られた渦度の回転成分とひずみ成分を第二普遍量により評価し、渦構造の主となる成分を明らかにすることで、渦の性質を解明する。

(3) 複雑な飛翔および高揚力を実現する羽ばたき飛翔ロボットの設計指針の構築

上記までの結果を基盤として、急旋回、急加速などの複雑な飛翔、また、センサやカメラを搭載するために必要な高揚力を実現するために必要な非定常揚力／推進力を生み出す翅の設計指針を見出す。特に、これらの飛翔を実現するための翅の弾性変形およびそれに生み出される渦輪を作り出すための翅モデルの設計指針を構築する。

3. 研究の結論、今後の課題

1. 蝶の翅上に形成される渦輪は、蝶の種類に依らず形成され、また、安定飛翔する羽ばたき飛翔ロボットの翅上にも形成されることから、安定飛翔のための重要なパラメータになる。また、翅の打ち下ろし時に形成される渦輪に比べて、打ち上げ時に形成される渦輪は小さくなる。翅の翅脈の配置とその剛性により、打ち上げ時と打ち下ろし時の翅全体の弾性変形が異なるためであると予想できる。さらには、渦輪の翅端の渦度は、打ち下ろし時に、翅前縁から後縁に向かって大きくなることから、前縁から後縁にスパイラル状に形成され、三次元的に成長・発達していると言える。
2. 羽ばたき運動する蝶の翅の打ち下ろし／打ち上げ時に巻き上がり、後流へと発達する渦輪の循環から運動量理論を用いて蝶が生み出す非定常揚力を見積もる際には、打ち上げ／打ち下ろし時に生み出されるそれぞれの渦輪ではなく、両者の渦輪を考慮することで、正確な非定常揚力を見積もることが可能である。蝶の羽ばたき運動により生み出される非定常揚力は、翅の打ち下ろし時に、翅の羽ばたき角がほぼ水平になる際に最大で蝶の重量の約 4.2 倍の非定常揚力が生み出される。
3. 自由飛翔する蝶の翅まわりにも、固定飛翔と同様に翅上に渦輪が形成される。翅の打ち上げにより翅上に形成された渦輪は、飛翔方向に対して垂直方向に形成され、打ち下ろしにより発達した渦輪と干渉し、L 字状の連続的な渦構造となる。後流に発達した渦輪からは、飛翔速度とほぼ同等の増速流が生成され、下方に強い流れを誘起させる渦輪を連続的に生み出している。
4. 蝶の翅を模擬した弾性運動翼に働く非定常推進力は、その形状に依らず、単位曲げ剛性当たりの St 数の二乗に強く依存する。
5. 運動により変形する翅から巻き上がる渦の特性（回転／ひずみ成分）の解明と、翅の曲げ剛性と運動により生成される渦構造との関連付けが、飛翔ロボットの最適化設計のための次の課題である。

4. 成果の価値 (とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

羽ばたき飛翔ロボットの実用化は、世界中で急務とされている。自然災害による被災者の捜索、人間の侵入が困難な場所での監視・観察、また、不審者の監視システム技術など、これからの安全・安心の社会の実現ためには、最も注目され、実用化が急がれる技術開発である。世界中では、欧米を中心に膨大な資金の元、研究開発が進められているが、未だ実用化には至っていない。本研究では、これらの技術をロボット工学ではなく、流体力学的にアプローチし、8の字飛翔、ホバリング、離陸飛翔などのより複雑な飛翔を実現し、さらには、カメラ、センサ、知能を搭載するための高揚力発生を実現する羽ばたき飛翔ロボットのための基礎現象を解明する。この基礎現象を解明し、基礎技術へと展開し、実用化に繋げることで、いつ起きるかわからない自然災害への対応、生活弱者を守るための監視技術としての利用が実現できる。

2. 学術的価値

羽ばたき飛翔ロボットのための蝶の翅まわりの流れ場に関する研究は近年注目されつつある。しかしながら、その多くが流れ場の定性的評価であり、定量的評価もその瞬間的な流れ場だけである。本研究では、翅から巻き上がる渦の三次元構造だけでなく、そのダイナミックな挙動を定量的に捉えるだけでなく、その流れ場から蝶が生み出す非定常揚力の概算手法を構築し、さらには、流れ場の構造および挙動のダイナミクスと生み出す揚力・推進力と関連付けることで、その学術的価値は非常に高いと言える。飛翔する蝶の翅の運動と変形、流れ場のダイナミクス、揚力・推進力への影響に関する一連の現象を解明することで蝶がもつ機能、またはそれを超える機能をもつ羽ばたき飛翔ロボットの実現にアプローチしていることも高い学術性であると言える。

3. 成果論文 (本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

2012:

- (1) M. Fuchiwaki, K. Tanaka, A Pair of Vortex behind a Free Flight Butterfly, 5th Int. Symp. Aero Aqua Bio-Mechanisms, ID29
- (2) T. Kuroki, M. Fuchiwaki, K. Tanaka, Prediction of a Dynamic Lift Generated by a Butterfly, 5th Int. Symp. Aero Aqua Bio-Mechanisms, ID40
- (3) T. Kuroki, M. Fuchiwaki, K. Tanaka, Dynamic Behavior of a Vortex Ring over a Butterfly Wing, 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference, 1282855

2013:

- (5) M. Fuchiwaki, T. Kurinami, K. Tanaka, The Growth of Vortices in the Vicinity of a Wall of Elastic Moving Airfoils, ASMEA Fluid Engineering Summer Meeting, FEDSME2013-16362
- (6) M. Fuchiwaki, T. Kurinami, K. Tanaka, Eiji Itakura, Vortex Pairs Formed behind a Butterfly in Free Flight, The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering
- (7) T. Kuroki, M. Fuchiwaki, K. Tanaka, T. Tabata, Characteristics of Dynamic Forces Generated by a Flapping Butterfly, ASMEA Fluid Engineering Summer Meeting, FEDSME2013-16363,
- (8) T. Kuroki, M. Fuchiwaki, K. Tanaka, T. Tabata, Dynamic Lift Produced by Vortex Ring Over a Butterfly Wing, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013-1148D00
- (9) 黒木太一, 瀧脇正樹, 蝶の翅上を発達する渦輪から見積もる非定常揚力, 日本機械学会年次大会講演論文集, S053011
- (10) 川原卓也, 瀧脇正樹, 飛翔する蝶の後流に形成される二対の渦構造, 可視化情報シンポジウム講演論文集, 33-1, 29-30

2014:

- (11) M. Fuchiwaki, T. Kuroki, K. Tanaka, T. Tabata, Three-dimensional Vortex Structure around a Free Flight Butterfly, ASME Fluid Engineering Summer Meeting, FEDSME2014-21303
- (12) M. Fuchiwaki, T. Kuroki, K. Tanaka, T. Tabata, Wake Structure behind a Free Flight Butterfly and its Growth Process, 16th Int. Symposium on Flow visualization
- (13) M. Fuchiwaki, T. Kuroki, K. Tanaka, Growth of Vortex Structure around a Butterfly Wing in the Free Flight, 6th Int. Conf. Vortex Flows and Vortex Models
- (14) 瀧脇正樹, 飛翔する蝶の翅から巻き上がる渦輪の動的挙動, 可視化情報シンポジウム, 「WS2生物の生きる知恵と流体工学」
- (15) 瀧脇正樹, 黒木太一, 自由飛翔する蝶の後流に形成される渦輪, 日本流体力学会年会論文集