

セミの離陸飛行～セミの後翅はなぜあるのか～

三重県立伊勢高等学校 国際科学科 2年 矢口太一



要旨、概要

昆虫の後翅（後羽）の飛行における詳しい役割は解明されていない。昆虫は飛行制御を前翅で行い、後翅は翼面積を増加させるのが第一の利点と考えられている。そのためか、空気力学の解析では昆虫の後翅の役割は考慮されていない。また、蝶類においては「飛行に後翅は必要ない」との報告もなされている。

セミの研究を 7 年間継続して取り組んでいる私は、セミの後翅には明らかになっていない重要な役割があるのでは、との疑問からセミの後翅の飛行時の役割の離陸飛行を通して解明する事を目指し、本研究に取り組んだ。

生存のための最も重要な部分を占めているであろう逃避のための離陸飛行に、セミの飛行特性が最も現れると考え、後翅、前翅の翼長を変えた条件下でアブラゼミ (*Graptopsaltria nigrofuscata*) の離陸飛行をハイスピードカメラを用いて撮影する 227 回の実験を行なった。

セミは後翅がなければ離陸することが出来ず、前翅の損傷は離陸の成功率に大きな影響をもたらさないことが判明し、離陸の回転の役割を担っているのは後翅であり、前翅は回転の役割を担っていないことが明らかになった。また、離陸できた個体の全ては回転動作中には前翅と後翅が少なくとも片方はリンクしていることも明らかになり、前翅と後翅のリンクが離陸の必要条件である事が判明した。

そして、屋外環境で撮影が行なえるよう工夫を凝らすことで、室内実験環境の 2 倍以上の光量を確保し、ハイスピードカメラでの撮影を 200 回以上行なった。

セミは離陸飛行の振り上げ運動時にあえて片方だけ抵抗を受けることで回転できていて、木に羽がぶつかるなど、推進力が低下した際には、片方の羽のみ羽ばたかせることで回転

力を得ることが明らかになった。また、前翅と後翅がリンクできなかつたときは後翅は羽ばたかず、前翅に巻き込まれるのを待つことがわかった。

そして、セミが羽ばたき運動の際に、羽ばたく前翅に対して後翅は停止することで、リンク部分から前翅の動きを抑制し、ひねりを生じることで離陸を制御しているという後翅独立回転制御説を上記実験から提唱し、観察からもこれを後押しするデータが確認された。この説を応用した「セミを模倣した小型飛行ロボット」に関する特許を9月25日付で出願（出願番号 特願 2015-203239）し、本研究の応用に向けた取り組みも進めている。

問題提起、研究目的

セミをはじめ、昆虫の後翅の飛行時の詳しい役割は解明されていない。一般的に後翅は翼面積を増加させるのが第一の利点と考えられており、空気力学の解析では後翅と前翅は1枚の羽としてモデル化されているのが現状である。また飛行制御は前翅でおこなわれているとの見解が一般である。

また、Carnegie Mellon 大学の Benjamin Jantzen, Thomas Eisner による研究では、蝶類は後翅がなくても飛行できるという報告がなされており、種によっては後翅の存在意義が薄れているものもある。

私は「セミの飛翔」研究を小学校5年生のときから7年間継続して取り組んできた。今まで、大きな前翅にばかり注目してきたが、「後翅にはいったい何の役割があるのか、明らかになっていない重要な役割があるのではないか」といった疑問を解明すべく本研究に取り組んだ。

セミは地上での生活の大半を木の幹に止まって過ごしていると考えられ、その中で鳥などの天敵から、いかにすばやく逃げ切るかが生存の鍵となる。そこで、セミの飛行特性が最も現れるものとして急な体勢変化を要する、逃避のための離陸飛行に着目し、いまだ明らかになっていないセミの後翅の役割の追求、セミの離陸特性の解明に取り組み、昆虫の後翅の役割の解明の一步となることを目指した。

本研究での定義について

羽ばたき運動とはここでは、飛行しているかどうかに関係なく羽を動かしている運動のことを指すこととする。

はじめに

ここでは本研究で必要となる、「昆虫の飛行」に関する自身の研究と、先行研究を踏まえた従来の学説を紹介する。

○前翅と後翅の関係

従来の昆虫に関する研究では、「スズメガやハチといった前翅に比べ後翅が小さい昆虫では、前翅と後翅は物理的にリンクし、あたかも1枚の翅のように動作する」とされており、「前翅を動かすための中胸の飛翔筋は大きく発達しており、後翅を動かすための後胸はきわめて小さい」ことが言われている（以上、「」内は参考文献①）。

セミのように後翅が前翅に比べ小さい昆虫の後翅は翼面積を増加させることが第一の利点と考えられており、前翅の動きに従って動くと考えられ、飛行制御も前翅でおこなわれていると考えられている。それゆえ、空気力学の解析においても前翅と後翅は1枚の翅としてモデル化されており、後翅独自の役割についてのくわしい先行研究はないのが現状である。

一方で、Carnegie Mellon 大学の Benjamin Jantzen, Thomas Eisner の研究（参考文献②）によれば、「蝶類の後翅は飛行には必ずしも必要でない」という報告がなされており、後翅は単に翼面積を増やすだけという、後翅の存在意義が疑われている種も存在する。

また、実際に、セミにおいても写真①のように前翅と後翅はあたかも1枚の翅のようにリンクしている。

○離陸飛行に着目することについて

「昆虫の飛翔」について近年研究が盛んに行なわれている。研究対象となっている飛行形態は、主に「拘束状態での飛行」、「自由飛行」の2つである。上記の2つには私もすでに取組んでいる。

「拘束状態での飛行」の撮影は飛行運動を撮影しているというより、羽ばたき運動を撮影しているというのとほぼ同義であり、自然な飛行の観察をすることは困難である。

一方、「自由飛行」での撮影では、撮影や分析が困難ではあるが、ほぼ自然な飛行運動を撮影することができ、生物本来の飛行を観察することができる。

しかし、セミが自然環境下において、最も多く観察される飛行の形態は上記の2つではなく、本研究で着目する「離陸飛行」であると考えられる。たとえ通常の自由飛行を行なえる羽の損傷であったとしても、離陸飛行を行うことができなければ、セミにとっては生死に直結する。また、セミは捕食をせず、トンボなどの肉食昆虫のように相手より高度な飛行や、花の蜜を吸うためにホバリングをする必要はない。セミにとって、生存のためにもっとも重要なのは逃避のための「離陸飛行」だと考えられるのではないだろうか。

本研究ではこの「離陸飛行」に着目して、セミの飛行特性を解明する。

○セミの自由飛行時の特徴

セミは自由飛行（通常の飛行）時の振り上げ運動において、ひねる動作をするにより、負の揚力を生じることを極力防ぐことで飛行を行っていることが、自身の 2013

年時の研究で明らかになっている。

観察<1> 木にとまっているセミの離陸をハイスピードカメラで撮影して観察する

研究方法 実際に屋外で、ハイスピードカメラ（以下 HS カメラ）、三脚、長い棒（虫取り網で代用）を使って、セミの離陸飛行を撮影する。木に止まっているセミに長い棒で離陸運動を促す。また、スムーズな離陸飛行を撮影するため、なるべく個体と棒が接触しないように注意した。

結果 図 2、動画①のような撮影結果が得られた。

※本研究では主に撮影結果から観察される離陸特徴を忠実に再現した 3 次元モデルを使って説明を行なう。動画分析ソフト上での分析は出来ても、静止画像としては満足の出来る解像度ではないためである。

考察 セミの離陸飛行の撮影動画分析から、

- セミは離陸前に翅を図 2 の①のように振り上げてから離陸する。
- 木に止まっている体勢から図 2 のように回転し、通常の飛行体勢に回転し移行する。
- 回転の方向は左右どちらも観察される。
- 前翅と後翅がリンクしなかった場合、後翅は羽ばたかずに前翅に巻き込まれるのをまつ。ということがわかった。

研究 離陸飛行における後翅の役割を迫る

はじめに で述べたように後翅が前翅に比べ小さい昆虫の後翅の詳しい役割は解明されておらず、翼面積を増加させること以外の利点は解明されていない。Carnegie Mellon 大学の Benjamin Jantzen, Thomas Eisner による研究では、蝶類は後翅がなくても飛行できるという。しかし、私は後翅には重要な役割があるはずだと考え、次の仮説を考えた。

仮説 1：セミは後翅がなければ離陸飛行を行なえない

そして下記のように、

セミの後翅の全切除、部分切除によるセミの離陸飛行への影響を撮影、分析した。

また、後翅は前翅に従動して動くだけであるなら、後翅を切断して飛行能力が低下する

ことはあっても、回転を行なうことはできるはずである。

○セミの離陸飛行の定義について

セミが外的から逃げ切り、生存するために有利な要素として、本研究ではいかに早く体勢を整え、通常 of 自由飛行へ移行できるのかを重視する事とする。

よって、本研究では、自由飛行へ早く移行できたものほど生存に有利な飛行であると定義する。

研究方法

○研究対象

本研究では、アブラゼミ (*Graptopsaltria nigrofuscata*) を対象に研究を行った。

○セミの採取、管理の工夫

セミを対象とした研究を行っていく中で意外に大変なことは、セミを採取した後、撮影を行う場所までいかにセミの体を傷つけずに運ぶかである。セミを虫かごの中に複数入れてしまうと、セミが羽ばたいて暴れる際に互いの羽を大きく損傷してしまうことが多々あった。そこで一昨年の研究では虫かごの中に、新聞紙を入れることで対処したが、根本的な解決には至らなかった。また昨年、高1時の研究では、ビニールのチャック付きの袋にセミを1匹ずつ入れていたが、セミの呼吸が阻害され、セミを採取した状態のまま運ぶという点では大きな問題が残っていた。

そのため、本研究では学校で頂いた余ったわら半紙を適切な大きさにしたのち、丸め、柔らかくしたものでセミを1匹ずつ包み、マスキングテープで止めるという方法を考案し、行った。この方法ではセミの個体同士の接触で羽が損傷する事がなく、セミの呼吸を妨げることがないため、セミを採取した直後に近い状態で撮影場所に運ぶ事が出来る。(写真②参照)

○セミの羽の切断方法

セミの羽を切断する際に本研究では翼長を基準とした。翼長が飛行に及ぼす影響が大きいと考えたためである。

面積の比で切断する方法では生きているセミの翅のどこが面積比で切断すべきなのかを判断するのが非常に困難であること、セミの翅は各個体で面積が大きく異なるため切断すべき場所を求めるのに非常に時間がかかってしまうため、断念することとした。

よって、本研究では長さ比でセミの翅を切除する事にした。

○本研究で行なう実験での、セミの状態について

通常状態…採取した状態のままの個体のこと。羽に損傷が無い。

後翅を 1/n 切断…後翅を  1 のように羽の端を結ぶ線分に対して 1/n だけ垂直に切り取った状態のこと。

前翅を m% 切断…同様に、前翅を  1 のように羽の端を結ぶ線分に対して m% だけ垂直に切り取った状態のこと

○セミの離陸時の進行方向について

セミを離陸させるときに、各撮影で異なる方向に飛んでいってしまうと、各撮影ごとに条件が異なってしまう。

ここで、セミが正の走行性を有していることを利用し、本研究ではセミの離陸飛行、その後の通常の自由飛行の方向を、前方にタングステン電球を光源として設置することで、単に光量を確保するだけでなく、セミの離陸方向をほぼ一様にできるように考慮した（ 写真③参照）。

○離陸の自発性について

先行研究（参考文献③）で、離陸飛行における自発性の有無による離陸への影響が報告されている。本研究では多くの撮影を行なう必要があり、自発的な離陸飛行と非自発的な離陸飛行との差異は、離陸できるかを考える上では大きな影響はないと考えたため、本研究では非自発的な離陸飛行を中心に撮影することにした。

○実験結果について

本研究の実験では、各個体間のばらつき、同個体間でのばらつきに対処するため、6 個体、各 6 回ずつ以上の実験を行なうことを目指し、ばらつきが実験結果に大きな影響を持たないように最大限、配慮した。

○撮影の方法

照明にはタングステン電球を 2 台（6000Lx）、横方向からの撮影には HS カメラ、上方向からはビデオカメラをもちいて撮影を行い、切り株からセミに離陸させることとした。また、セミの飛行位置を正確に把握する為、自作の方眼紙を横方向、上方向それぞれ用意した。（ 写真③参照）

○分析の基準

1：通常の離陸を行なえた…観察<1>で観察されたようにフレーム内で体勢を通常の自由飛行を行なえる状態に移行できたものをこれに分類することにする。セミの生存の為にはすばやく離陸することが必要であるという観点から、フレーム内で回転を完了できなかった

たものはこれに含まないことにした (図 2 参照)。

2: 横に 90 度回転したが回転し切れなかった: 墜落はしなかったものの、回転がフレーム内で完了しなかった、もしくは、図 3 のように横に 90° 回転したままで飛行したものをこれに分類する。なお、図の方向への回転を一切していないものは含まない (図 3 参照)。

3: 後ろ向きのまま飛行: 一切の回転を行わず後ろ向きのまま飛行したものをこれに分類する。フレーム内で墜落したものはこれに含まない (図 4 参照)。

4: 墜落したが回転した…墜落したが、回転は完了したものをこれに分類する (図 5 参照)。

5: 回転できず墜落した…4 の場合を除いてフレーム内で墜落したものをこれに分類する。

有効撮影回数: セミを刺激しても反応しなかった場合をこれから除いている。

そして、表①では

離陸できたもの…1 をこれに分類した。

回転できたもの…1、4 をこれに分類した。

回転せず飛行…2、3 をこれに分類した。

回転できず墜落…5 をこれに分類した。

※実験<1>～<6>での考察は複数の実験をまとめて記述する。

実験<1>通常状態での撮影

研究方法

通常状態で上記の方法に従って撮影を行った。

結果

通常の状態を行えた (図 2 参照) のが 40 回

墜落したが回転したのが (図 5 参照) 1 回、

横に 90 度回転したが回転し切れなかった (図 3 参照) のが 1 回あった。

有効撮影は 42 回だった。(表①参照)

実験<2>後翅を全て切除する

研究方法

セミの後翅を両方全て切除し (図 1 参照)、6 個体各 6 回計 36 回、前述の撮影方法に従っ

て撮影を行った。

結果

回転できず墜落したのが 19 回、
墜落したが回転した (図 5 参照) のが 1 回、
横に 90 度回転したが回転し切れなかった (図 3 参照) のが 6 回、
後ろ向きで飛行した (図 4 参照) のが 9 回あった。
有効撮影は 35 回だった。(表①参照)

実験<3>後翅を 1/2 を切除する

研究方法

セミの両方の後翅を翼長比で 1/2 切除し (図 1 参照)、6 個体各 6 回計 36 回、前述の撮影方法に従って撮影を行った。

結果

通常の高陸を行えたのが 18 回 (11 回リンクせず)、(図 2 参照)
墜落したが回転したのが 7 回 (6 回リンクせず)、(図 5 参照)
回転できず墜落したのが 2 回、
横に 90 度回転したが回転し切れなかったものが 6 回、(図 3 参照)
後ろ向きで飛行したのが 3 回 (図 4 参照)。
高陸直後に前翅と後翅がリンクしなかったのは回転できたものの中で 14 回 (56%) 観察されたが、回転動作の際は全て少なくとも片方は前翅と後翅がリンクしていた。
有効撮影は 36 回だった。(表①参照)

実験<4>後翅を 1/4 を切除する

研究方法

セミの両方の後翅を翼長比で 1/4 切除し (図 1 参照)、7 個体各 6 回計 42 回、前述の撮影方法に従って撮影した。

結果

通常の高陸を行えた (図 2 参照) のが 37 回、
回転できず墜落したのが 1 回、
横に 90 度回転したが回転し切れなかった (図 3 参照) ものが 3 回、
後ろ向きで飛行した (図 4 参照) のが 1 回。
有効撮影は 42 回だった。(表①参照)

○実験<1>～<4>までの考察

実験<1>～<4>の結果から、後翅の長さ比での割合が低下するにつれて回転率、離陸成功率ともに顕著に低下する事がわかった（[グラフ 1・表①参照](#)）。このことから、

●セミは後翅がなければ離陸を行う事ができない。
ことが明らかになった。

また、[グラフ 1](#) から、回転をおこなえた個体はその後の離陸も成功しているものが多いことが観察されたことから、離陸の鍵を握るのは回転であり、

●セミの後翅は離陸の回転に非常に大きな役割を果たしている。
ということがわかった。

また、単に後翅が前翅に従動するだけなら、後翅は翼面積を増加させるためにあることになり、前翅のみであっても回転を行う事ができるはずである。しかし、前翅のみでは回転できないことが明らかになった。

そして、実験<3>では、離陸直後に前翅と後翅がリンクできていない個体が回転できた個体の中で 56%(14/25)も観察されたが、そのうち回転動作の際には 100%の個体が前翅と後翅が少なくとも片方の羽でリンクしていた。同じく、実験<4>でも回転できた個体はすべて回転動作の際にはリンクしていた。このことと前翅のみでは回転を行う事ができないことから、

●回転動作をするにはリンクすることが絶対の必要条件であることが高い可能性をもって示された。

以上から、従来の知見ではセミの飛行時の後翅の詳しい役割は明らかになっておらず、単に前翅に従動するととらえられてきたが、実験の結果から次の説が可能性が高い可能性で考えられる。

●後翅独立回転制御説：セミの後翅は単に前翅に従動して、翼面積を増やすという補助的な役割を果たすだけでなく、離陸時に後翅を前翅の羽ばたき運動に同調させずに停止することでリンク部分から前翅の動作を抑制し、回転を制御し、離陸を行っていると推測される。従来の固定翼の概念や用語では一概に定義しづらい。

ここで、仮に前翅に回転する役割があるとすれば、以上の結果は、飛行に必要な翼面積を大きく失ったため回転ができなかった、と考えることもできる。そこで後翅の損傷と同程度もしくはそれ以上の前翅の損傷時に回転ができるのかどうかを実験<5>、<6>で検証する。

実験<5>前翅を 20%切除する

研究方法 セミの両方の前翅を 20%切除し（[図 1 参照](#)）、6 個体各 6 回計 36 回、前述の撮

影方法に従って撮影した。

結果 通常の離陸を行えたのが 25 回 (図 2 参照)、
墜落したが回転したのが 9 回あった (図 5 参照)。
有効撮影は 34 回だった。(表①参照)

実験<6>前翅を 30%切除する

研究方法 セミの両方の前翅を 30%切除し (図 1 参照)、6 個体各 6 回計 36 回、前述の撮影方法に従って撮影した。

結果 回転できず墜落したのが 1 回、
通常の離陸を行えたのが 34 回 (図 2 参照)、
墜落したが回転したのが 1 回あった (図 5 参照)。
有効撮影は 35 回だった。(表①参照)

また、前翅を 40%切断した個体は通常の飛行を行なうこともできないため、前翅の切断は実験<6>の 30%切除で終了することとした。

○実験<1>、<5>、<6>の考察

表①より、前翅を切断したときの回転成功率はほぼ 100%に近い値が観察されたことから、

●セミの前翅の損傷は離陸の回転に大きな影響を与えない。

ことがわかった。よって、

●離陸時の回転の役割を担っているのは後翅である。

●前翅は後翅のような離陸飛行における回転の役割を担っておらず、飛行に必要な揚力、推力を発生させる役割を担っている。

ことが高い可能性を持って示されたといえるだろう。

一方で、前翅の損傷に伴った離陸の成功率の低下は観察されなかった。また、通常状態での回転率を前翅 20%切除のが上回り、前翅 20%切除の離陸成功率を前翅 30%切除のものが上回った。これらは個体差、離陸を促す刺激の差が生んだ結果で実験の誤差が影響したと考えられる。

※また、実験の様子を動画②で参照してください。

観察<2>日光を光源とした HS 撮影

研究方法

HS カメラを用いた撮影でこれまで苦労してきたことの 1 つは撮影動画の解像度の低さである。しかし、**後翅独立回転制御説**を実際に検証し、セミの離陸飛行を解明するためには極めて鮮明な撮影動画を得る必要がある。

そこで、撮影動画をより鮮明にするための方法として次の 2 つが考えられた。

- ① 高性能な HS カメラを入手する
- ② 撮影環境に工夫を凝らす

①は学生として現実的ではないため、撮影環境を工夫することで鮮明な動画を得ることに挑戦した。

撮影環境として、実験の環境から発展させられると考えたのは光量である。実験で用いているタングステン電球の照明では、6000Lx もの光量を得ているが、それでも十分でないと判断した。そこで、日光を光源とする事で解決をはかった。

セミが逃げていかないように、ビニール小屋を用意し、撮影台には白い紙を敷いて日光が反射し、日光の陰になるセミの部分にも光が当たるよう工夫し、同様にダンボールに白い紙を貼り付け光量を集める工夫を凝らした（**写真④参照**）。この撮影環境で、実験の環境の 2 倍以上である 14000Lx もの光量を確保することができた。

また、ピントの合わせ方にも注意し、前後 2 つの対象どちらにもピントが合うように設定し、セミの離陸中の位置のずれによるボケがなるべく起こらないようにした。

結果 撮影結果から**図 6~8**、**動画③**、**④**、**写真⑤**、**⑥**の結果が得られた。

考察

セミの離陸には、**図 6**、**7**の 2 つパターンが観察され、ほぼ大半は振り上げ運動の際にあえて片方の羽だけ負の揚力を得ることで回転を行なう「パターン 1」(図 6、写真⑤参照)に分類された。(詳細は図 6、7 の説明を参照)

一方、片方の羽のみを羽ばたかせて回転する「パターン 2」(図 7、写真⑥参照)は観察されたのは少数で、木に羽がぶつかるなど、推進力がパターン 1 に比べ小さい場合に観察されたことから、木に羽がぶつかるなど推進力(速度)が低下した場合で観察される離陸方法だと考えられ、セミが意図してこの方法を採用したとは考えにくい。

そして、後翅独立回転制御説に関して、振り上げ運動時の様子から、前翅が振り上げ運動でひねる際に、後翅は前翅に同調せず、停止しているのが確認された(図 8、写真⑦参照)。このことから、セミの飛行の制御を後翅独立回転制御説にもとづいて後翅が担っている事が高い可能性を持って示された。振り上げ運動は通常の自由飛行でも観察されることから、通常の飛行時にも後翅が制御している可能性が高いと考えられる。後翅独立回転制御説に

期待の持てる結果となったといえるだろう。

結論（課題）

☆セミの後翅の役割

実験<1>～<6>から

- セミは後翅がなければ離陸できない。
 - セミの前翅の損傷が離陸に与える影響は後翅に比べほぼない。
 - 回転できた全ての個体は回転動作の際に前翅と後翅が少なくとも片方は必ずリンクしている。
- ということがわかり、

- ◎セミの離陸時の回転の役割は後翅が担っている。
 - ◎セミの前翅は離陸時の回転の役割をほぼ担っておらず、推進力、揚力を得るための役割である。
 - ◎回転動作には前翅と後翅のリンクが絶対の必要条件である。
- という事がわかった。

そして、実験<1>～<6>と観察<1>、<2>より

- ◎後翅独立回転制御説：セミの後翅は単に前翅に従動して、翼面積を増やすという補助的な役割を果たすだけでなく、離陸時に後翅を前翅の羽ばたき運動に同調させずに停止することでリンク部分から前翅の動作を抑制し、回転を制御し、離陸を行っていると考えられる。従来の固定翼の概念や用語では一概に定義しづらい。

そして、セミの振り上げ運動時の負の揚力を得ないためと推測されるひねりが後翅の停止によって行われていることが分析から確認された。これより、後翅は離陸時の回転動作のみならず、飛行全般についての制御を後翅独立回転制御説に基づいて行っていると推測される。

☆セミの離陸特性

セミの離陸方法には

- ①：振り上げ運動の際にあえて片方の羽だけ負の揚力を得ることで回転を行なう。
 - ②：①と同様の動作に加え片方の羽だけ羽ばたかせることによって回転をしている。
- という2つのパターンが観察された。ただし、②については羽が木にぶつかるなどして推進力（速度）が低下した場合に用いられると考えられ、セミが通常採用する方法は①であ

ると考えられる。

◎前翅と後翅がリンクしなかった場合、後翅は羽ばたかずに前翅に巻き込まれるのをまつ。
という事もわかった。

本研究では詳しい解明の進んでいない昆虫の後翅の役割を、セミにおいて解明することで、前翅ではなく、後翅がリンク部分から前翅の動作を抑制して離陸をコントロールするという、新たな飛行制御の方法を高い可能性をもって示すことができた。同時に、同様に解明が進んでいないセミの離陸特性を解明することができた。セミは他の蝶やスズメガなどの昆虫に比べれば、羽は剛体に近く、昆虫の中でも種によって条件が異なるため、後翅独立回転制御説が他の昆虫でも適応できそうなのか、離陸特性は他にどのようなものが観察されるのか、非常に興味深いところである。

そして、本研究での後翅独立回転制御説を応用した小型飛行ロボットに関する特許を 9 月 25 日付で出願した (出願番号 特願 2015-203239)。従来の前翅主動の飛行制御より、後翅独立回転制御説を応用した飛行制御では簡単なつくりでの飛行体の実現でき飛行体の軽量化、そしてより安定した飛行性能が期待できる。従来とは大きく異なる画期的な手法であり、小型飛行ロボットの開発に新たな方向性を示すことができたと考えている (図 9 参照)。

しかし、一方で、ハイスピードカメラの性能から、やはりまだ満足の出来るデータを得ることが難しく、分析には苦労した。実験<5>、<6>で誤差と考えられる結果も出たため、今後は実験結果の誤差に対する的確な対応も求められる。また、撮影環境の改善にも取り組み、撮影精度の向上にも成功したが、撮影結果の質を同機種で向上させるのはこれ以上は困難であると考えられる。来年以降の研究では、こうした機材の面の問題を解決し、後翅独立回転制御説の確実な証拠を得るとともに、他の昆虫でも同様のことが言えるのかを検証していきたいと思っている。そして、本研究で発見された後翅独立回転制御説のようにまだ昆虫には解明されていない分野が数多く残されている。小型飛行ロボットをはじめとして、基礎的研究を応用した開発に来年からさらに積極的に取り組んでいきたいと思っている。

今回取組んだ離陸飛行は昆虫全般でまだまだ未解明な部分が多く、昆虫の飛行を解明する上で非常に期待が持てる着目点だと言えるだろう。

感想

これまで 7 年間セミの研究に取り組んできましたが、今回の研究で初めて、離陸飛行に着目して研究を進めました。新しい発見の連続で研究を進めるのは非常に楽しかったです。

離陸飛行に着目するきっかけとなったのは、何気なく、屋外で木に止まっているセミを

撮影したことでした。

また、長年セミの研究をしてきて、誰よりもセミについて理解したつもりになっていましたが、友達や家族から意見を聞いたことでたくさんのアイデアが生まれ、研究を進める上で非常に助かりました。

同時に、自身の統計学などの基礎的な知識の無さや、自分の考えを表現する手段であるソフトウェアなどの技術・知識の拙さを痛感しました。来年以降の研究では基礎的知識をしっかりと身につけて研究に取組もうと思います。

参考文献

- ①安藤規泰(2008) 昆虫飛行の神経系と筋肉系.昆虫ミメティックス(下澤楯夫, 針山孝彦 監修)、pp.397-407,エヌ・ティー・エス,東京.
- ②Benjamin Jantzen,Thomas Eisner(2008) Hindwings are unnecessary for flight but essential for execution of normal evasive flight in Lepidoptera. Proc.Natl.Acad.Sci.USA105:16636-16640
- ③Card, G. and Dickinson, M. H. (2008). Visually mediated motor planning in the escape response of *Drosophila*. Curr Biol 18, 1300-1307.

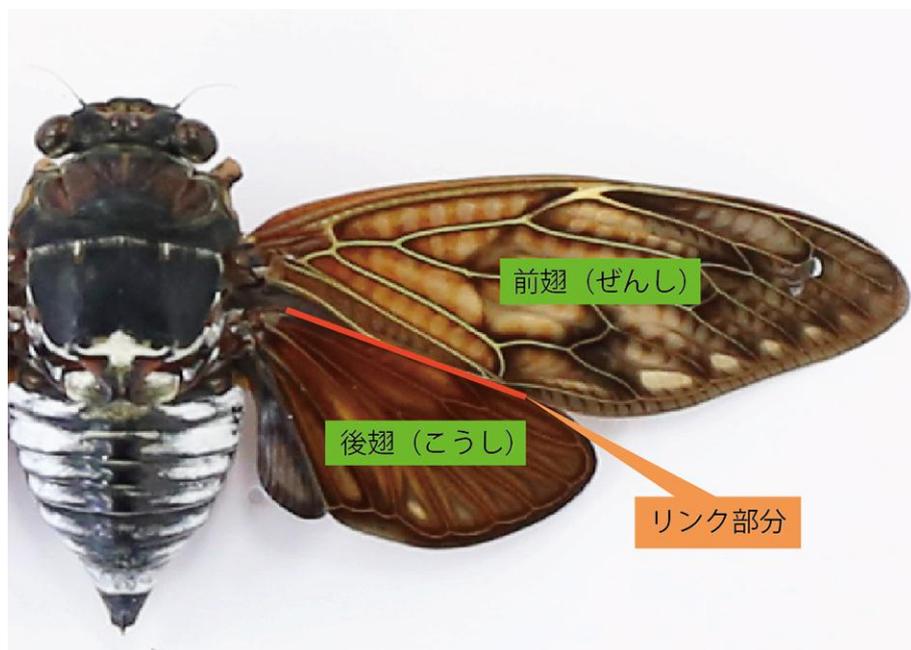
謝辞

研究への助言を何度もして下さった東京大学 先端科学技術研究センター 安藤規泰先生、研究へのヒントを下さった千葉大学 劉浩先生、本研究で使用した HS カメラを貸して下さった伊勢市立小俣中学校 泉勝人先生、研究へのヒントを下さったセミの抜け殻しらべ市民ネット 小久保雅之さん、堀内伸一郎さんに心から深く感謝致します。

そして、同じ学生研究者として日頃の研究の苦労やたくさんのアドバイスを聞かせてくれた京都市立桃稜中学校 早川優希君にも心から感謝します。

また、セミの採集から、様々な面でサポートしてくれた家族にも感謝します。

図表・画像



写真①「前翅・後翅・リンクの説明」



写真②「セミ採取の工夫」

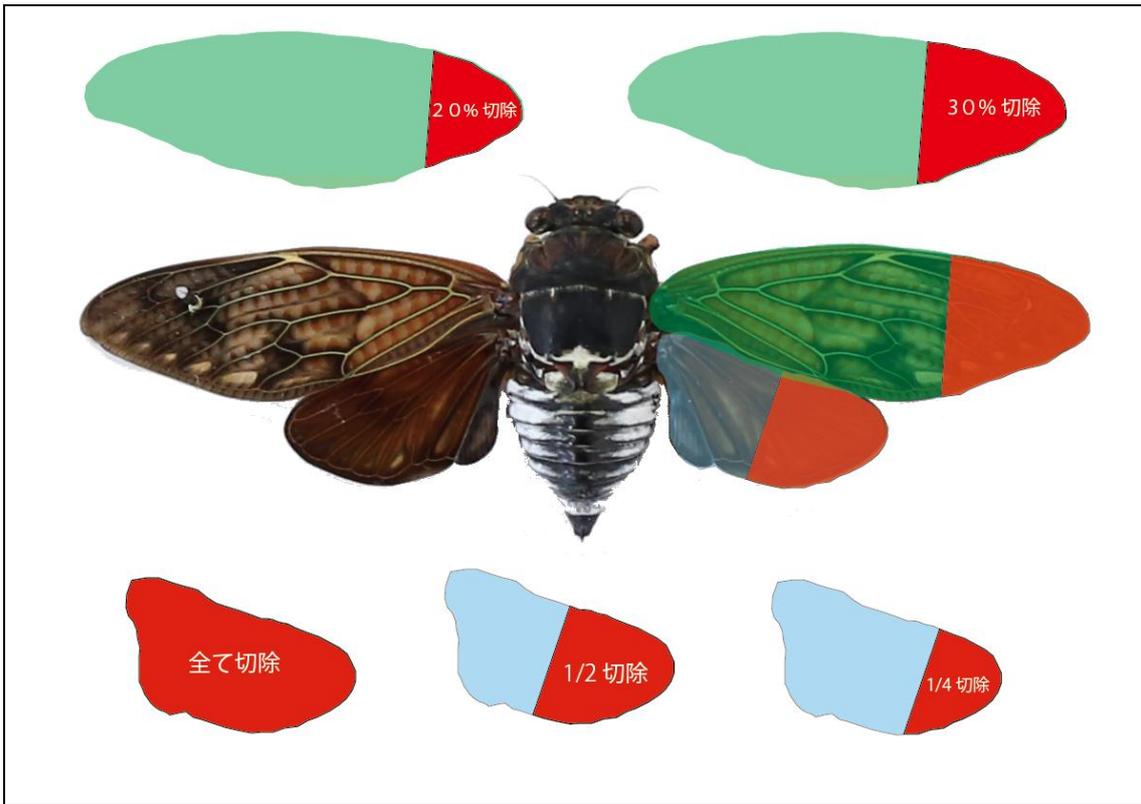


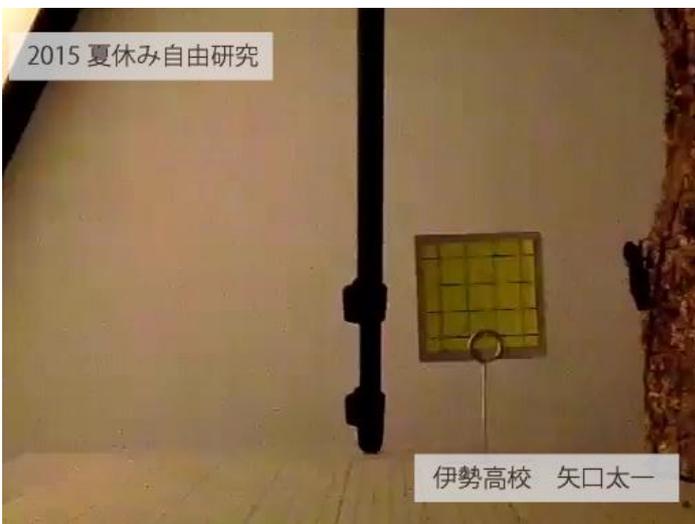
図1「セミの羽の切断の説明」



写真③「実験 撮影風景」



動画①「観察<1> 撮影動画・QR コード」



動画②「実験 撮影動画・QR コード」



動画③「観察<2> 撮影動画・QR コード」

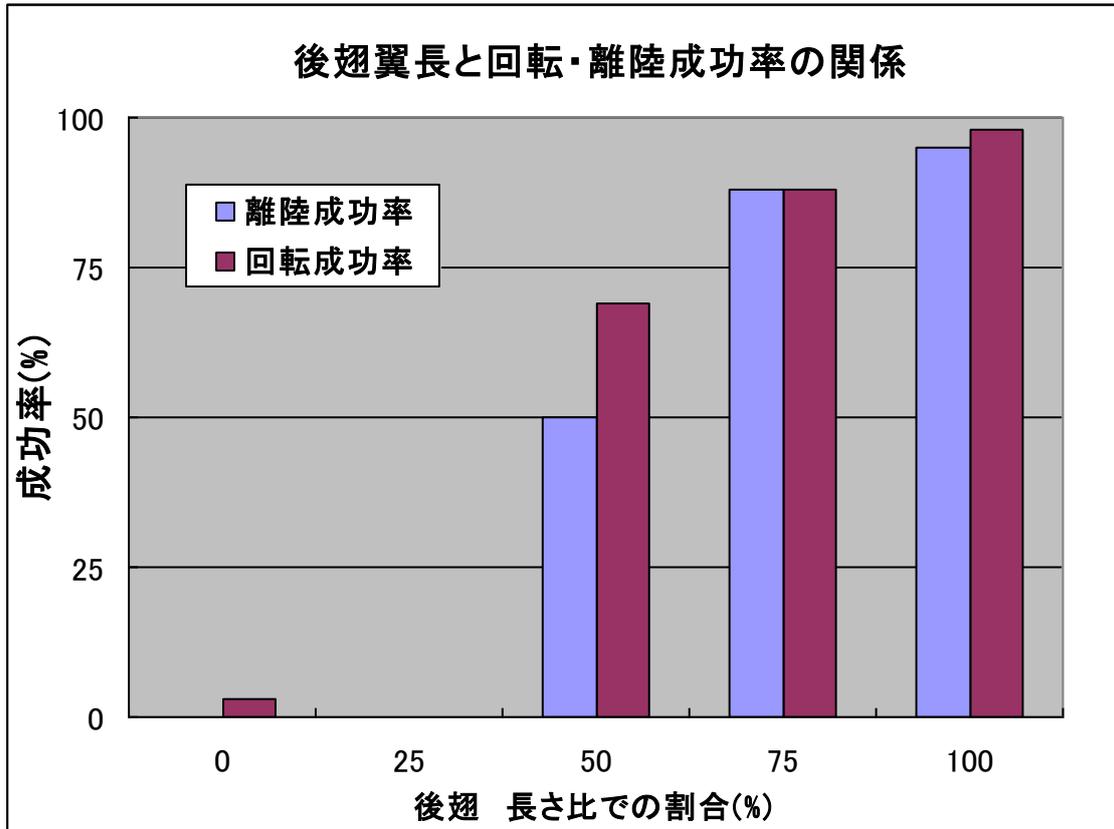




動画④「撮影 試行錯誤 撮影動画・QRコード」

		有効撮影 回数	離陸できた もの	回転できた もの	回転せず飛行	回転できず 墜落
通常状態	実験<1>	42	40(95%)	41(98%)	1(2%)	0(0%)
後翅 全切除	実験<2>	35	0(0%)	1(3%)	15(43%)	19(54%)
後翅 1/2 切除	実験<3>	36	18(50%)	25(69%)	9(25%)	2(6%)
後翅 1/4 切除	実験<4>	42	37(88%)	37(88%)	4(10%)	1(2%)
前翅 20%切除	実験<5>	34	25(74%)	34(100%)	0(0%)	0(0%)
前翅 30%切除	実験<6>	36	34(94%)	35(97%)	0(0%)	1(3%)

表①「各実験の結果」 %は小数点以下四捨五入



グラフ 1 「後翅翼長と回転・離陸成功率の関係」



写真④「観察<2> 屋外での撮影風景」

ビニールハウス内の温度は 40℃を超え、休憩を挟みながらの撮影であった。

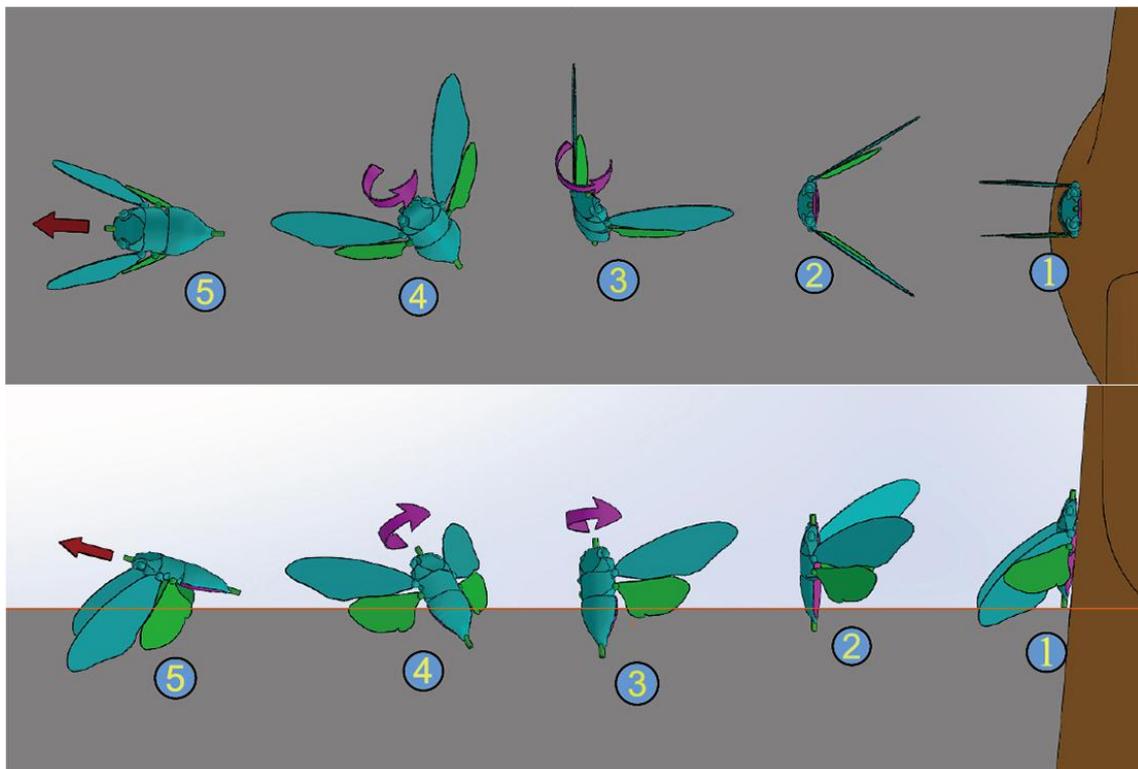


図2 「通常の離陸飛行」

説明 自発性の離陸であるとき、①のように羽を振り上げてから離陸する。非自発性であるときは①の動作をする前に足で木を蹴って、ジャンプする。

③、④で回転動作に入り、⑤で通常の飛行に移行し、離陸が完了する。回転の向きは左右どちらも観察されるが、本研究の図では全て右回転に統一した。

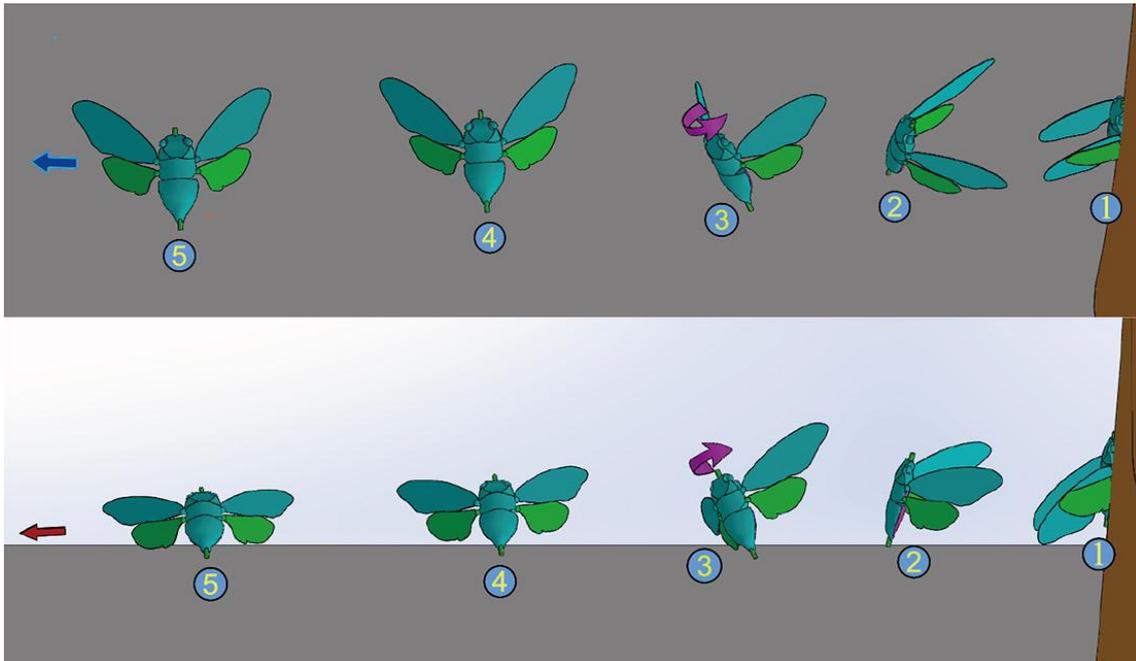


図3 「横 90° 前後の回転は出来たが、離陸が完了しなかった」

説明：①、②までは図2と同じ動作である。③でも同様に回転を試みるが、④以降で回転しきれないまま飛行を続けている。本研究では離陸を失敗したものとみなしている。

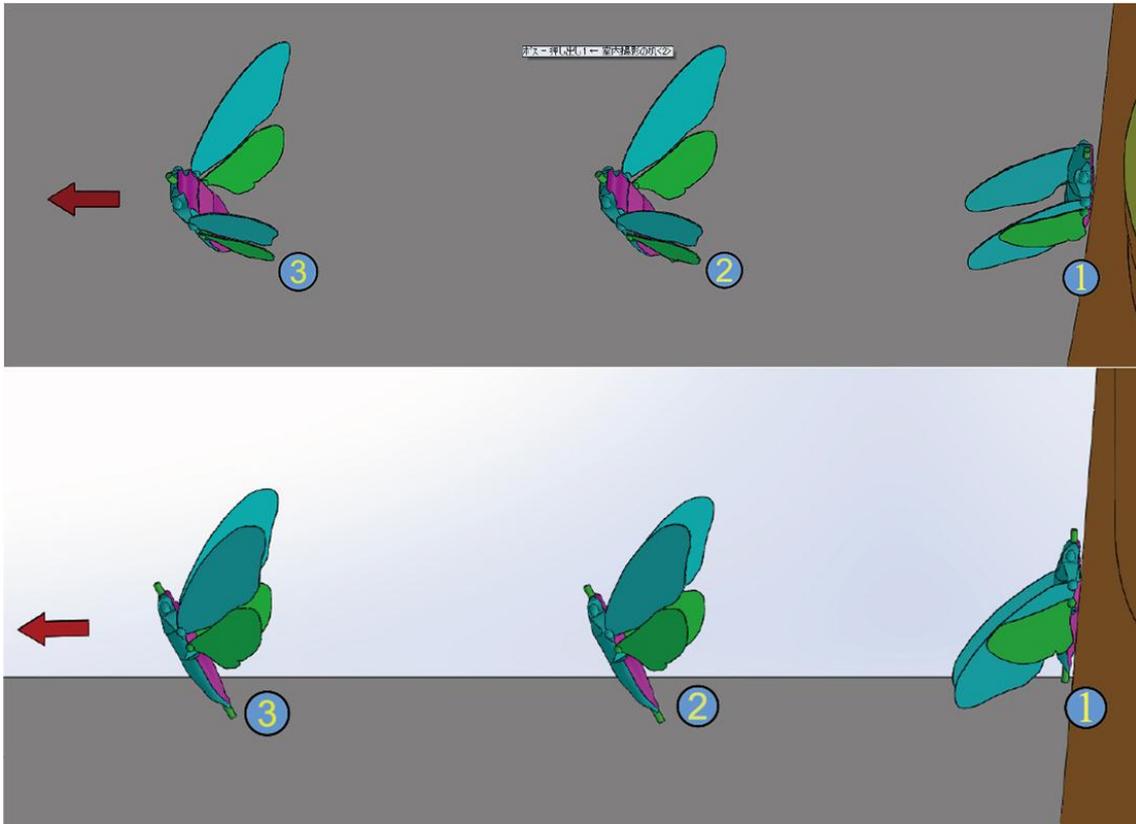


図4 「後ろ向きのまま飛行」

説明：①、②は図2の動作とほぼ同じであるが、③以降になっても少しの回転も行う事ができないが、墜落することなくそのまま飛行を続けていった場合である。

このケースは後翅を全て切断した際に多く観察されることから、前翅には回転の役割がなく、推進力、揚力を得る役割であると考えられるのである（実験を参照）。

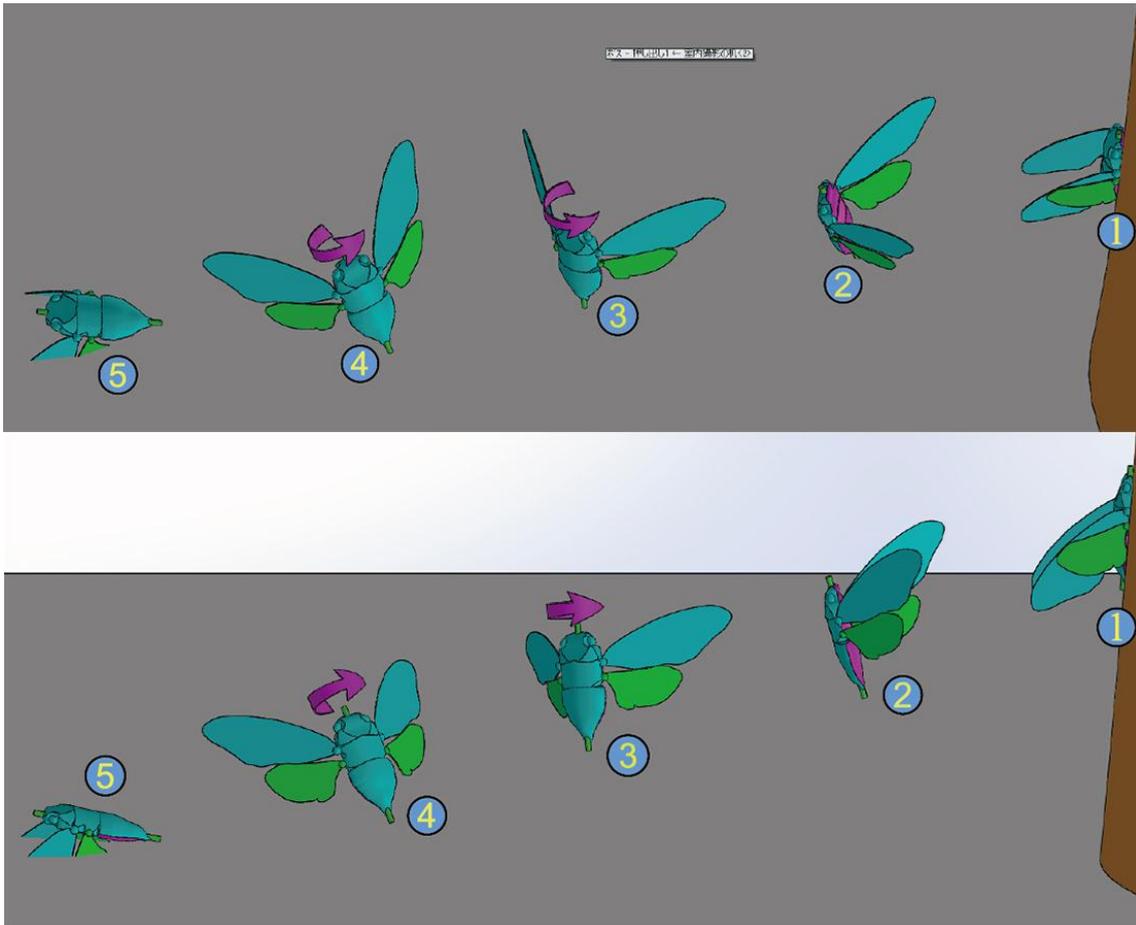


図5 「回転したが墜落」

説明：図2と同様に回転動作を行っているが、揚力の獲得に失敗し、墜落した場合である。この場合では、おもに揚力を得ることに失敗したと考えられる。本研究では離陸には失敗したが、回転はできた個体として分類する。

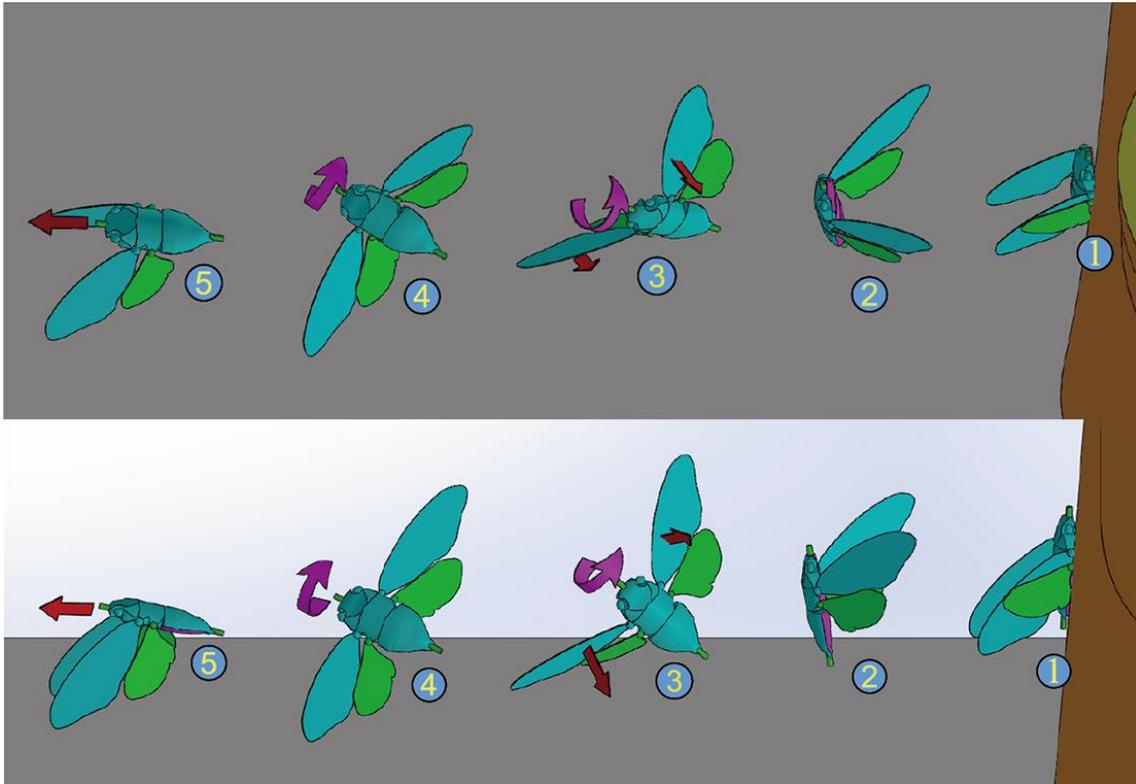
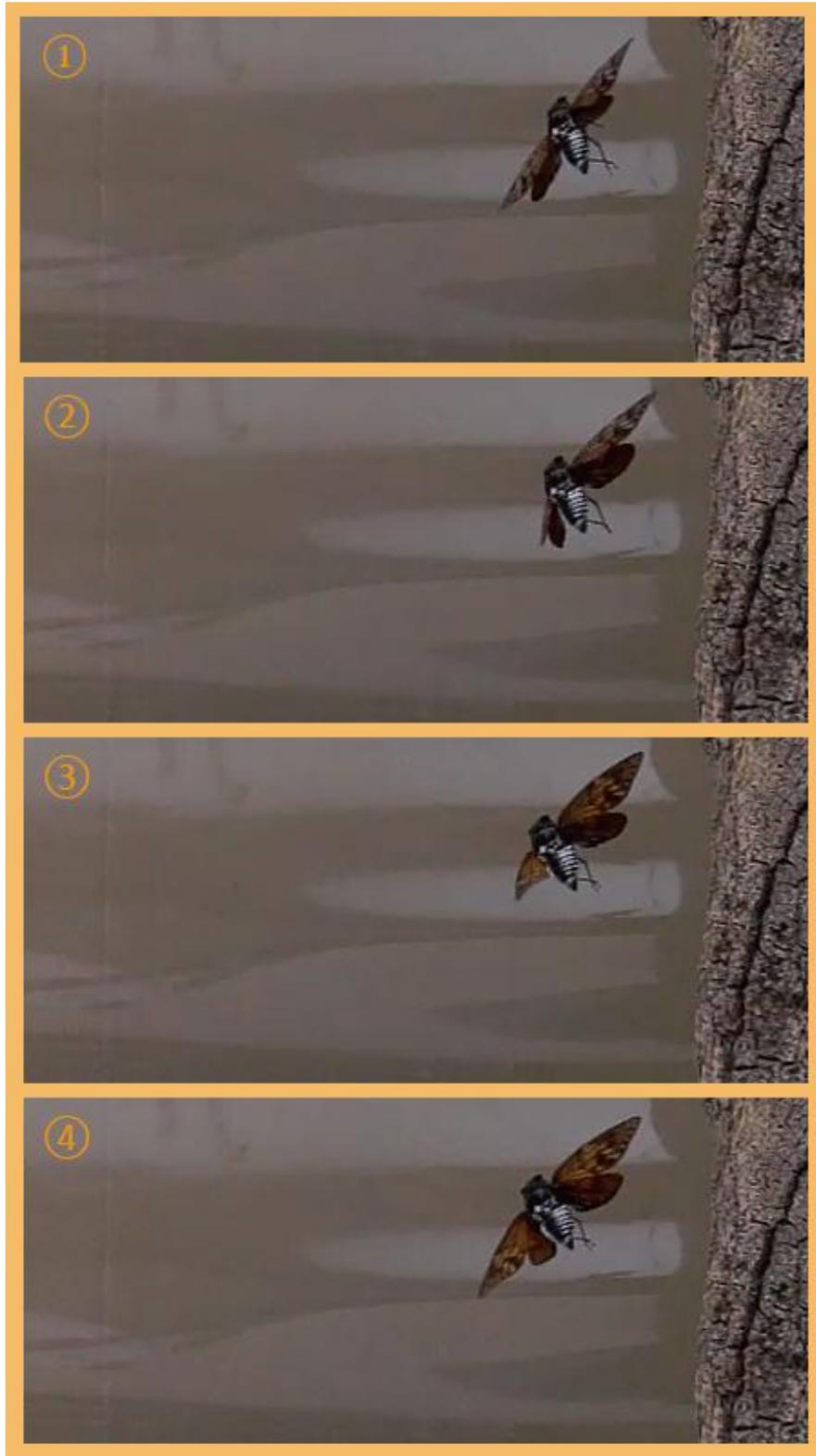


図6 「離陸方法パターン1」

説明：①で羽を振り上げる準備してから、離陸を行っている（自発的な場合）。②においては回転するための動作は観察されず、羽が木と接触しない位置まで進むため、速度を得るために推進方向に進んでいる。③から回転動作に入る。この際左の羽は振り上げ運動の際に負の抵抗を受けないためにひねりを生じているが、右の羽ではひねらずに、あえて負の抵抗を受けることで回転方向（図では右方向）への回転力を得ることに成功している。そして、⑤で回転が完了し、通常の飛行に移行している。

※図6の下の③の左羽の矢印は表現が難しく、適切に表現できていない。上の図の方の矢印が実際に示したい方向である。



写真⑤ 「離陸方法パターン1 撮影データ 600fps」

説明：①、②は振り下ろし運動であり、③から振り上げ運動に入る。③（「図6の③」と同じ場面）において左の羽が右に比べ大きくひねり、負の力を受けないようにしている。

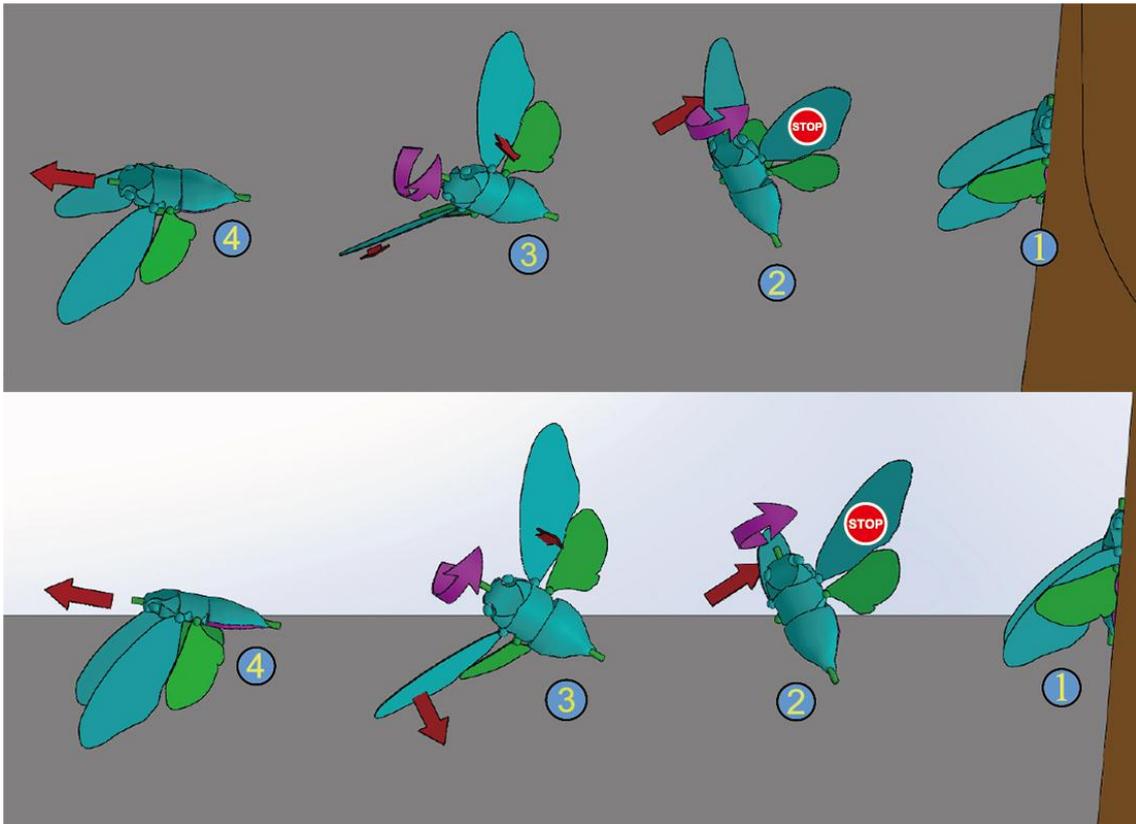
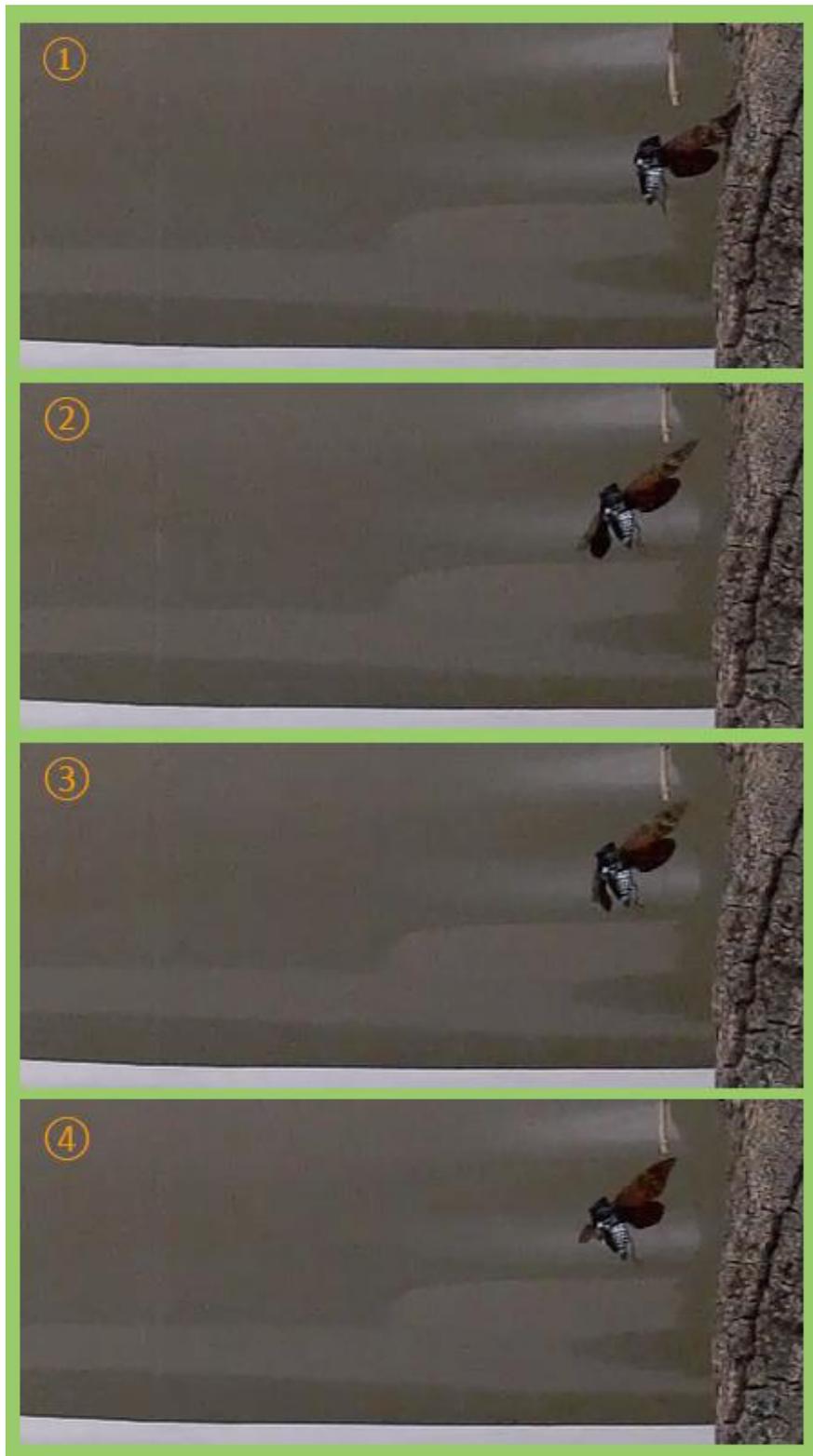


図7 「離陸方法パターン2」

説明：①は「パターン1」と同様、振り上げの準備をしているが、②では「パターン1」とは異なり、いきなり回転動作を始めている。右側の羽は固定し、左側の羽のみ羽ばたかせることで、回転方向への回転力を生じている。③では「パターン1の③」と同様に、左の羽は振り上げの際に負の抵抗を受けないためにひねりを生じているが、右の羽ではあえて負の抵抗を受けることで回転方向（図では右方向）への回転力を得ている。そして、④で回転が完了し、通常の飛行に移行している。

※図7の下の③の左羽の矢印は表現が難しく、適切に表現できていない。上の図の方の矢印が実際に示したい方向である。



写真⑥ 「離陸方法パターン 2 撮影データ 600fps」

説明：①で羽が木とぶつかり、推進力が減少し、図 7 で示したように、右の羽は固定され左の羽のみ振り下ろすことで回転を行っている。

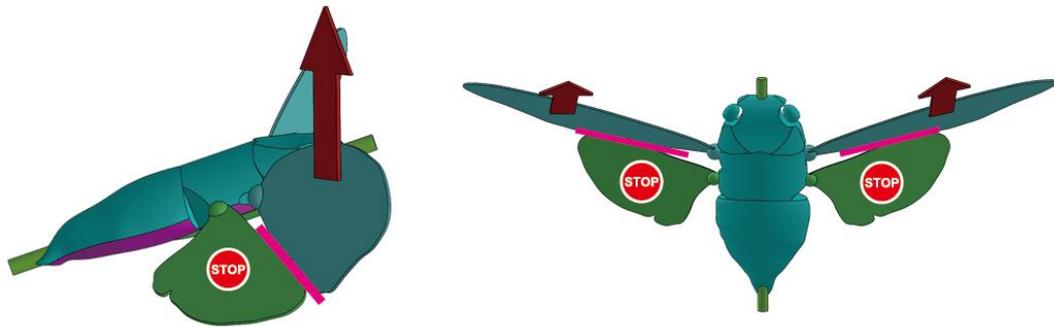
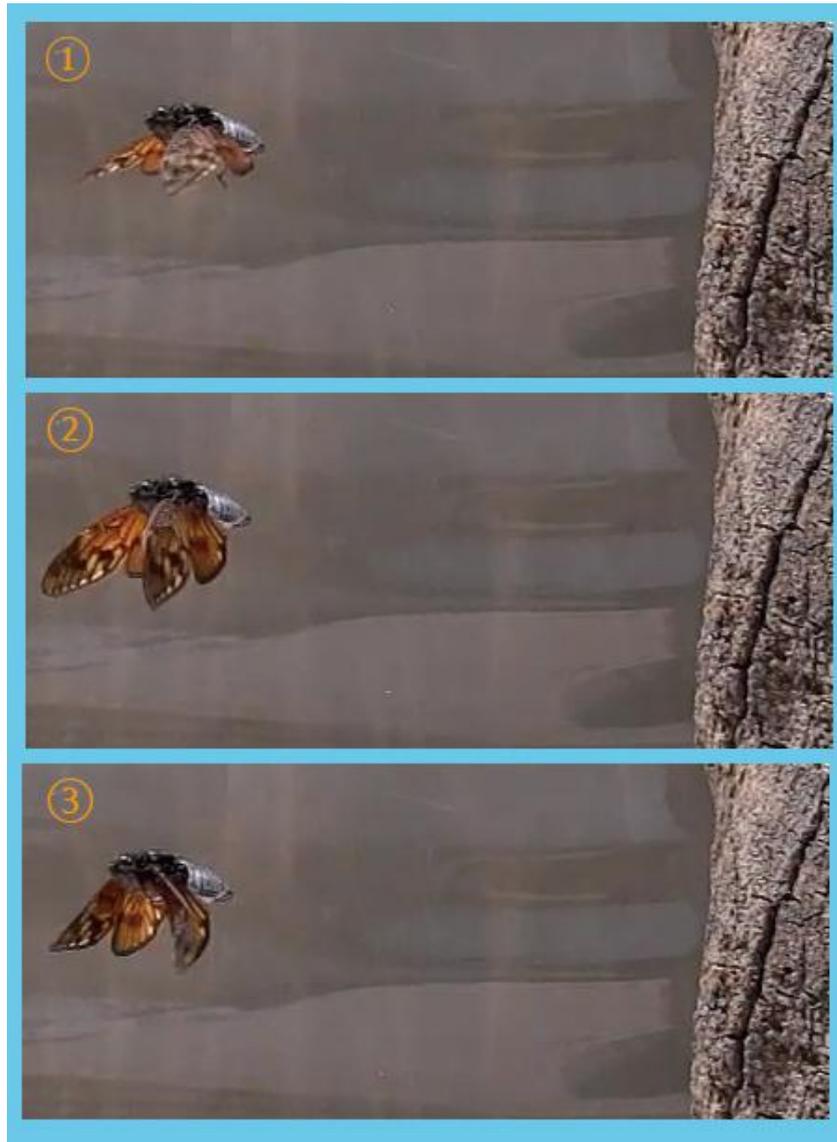


図 8 「セミの振り上げ運動時における後翅の役割について」

説明：前翅は矢印の方向に振り上げようとしているが、後翅はその場に停止し、前翅の動作を抑制している。そうすることによって前翅にひねりが生じ、負の揚力を極力得ずに振り上げ運動を行なうことが可能となっている。回転中についても後翅の役割は同様であると考えられるため、後翅独立回転制御説を後押しする結果となった。



写真⑦「図 8 の実際の例 撮影データ 600fps」

説明：①、②と振り下ろしにあわせ後翅も前翅に従動しているが、振り上げ運動に入る③では②の状態から後翅は動かず停止する事で、先行して動く前翅にひねりを与えている。

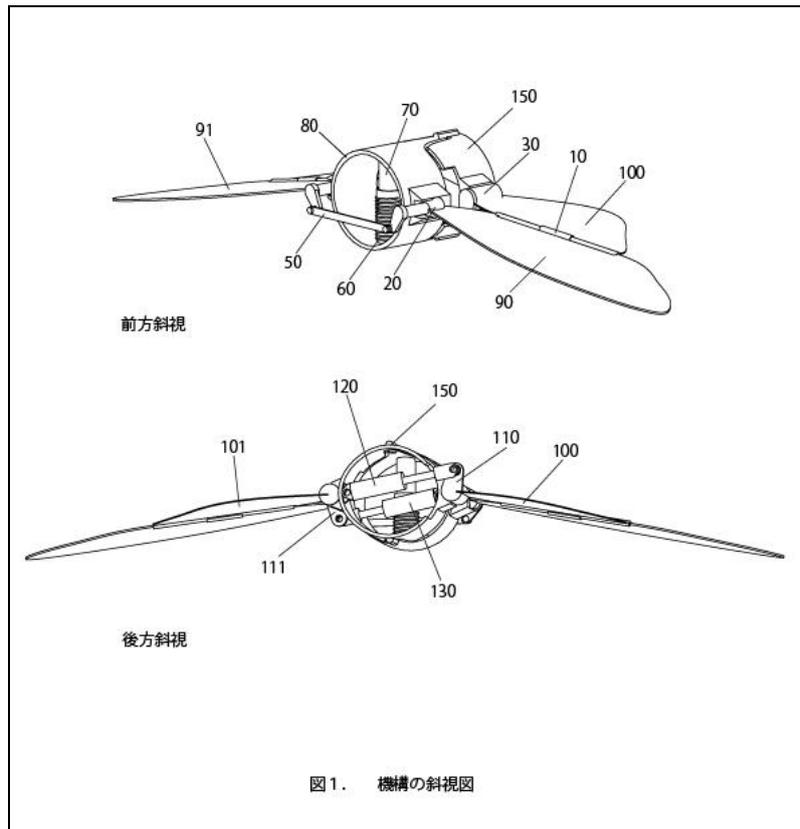


図9「特許出願（出願番号 特願 2015-203239）時の画像」

※図の” 図1” という名称は出願時のものであり、本研究の図1を指していない。