

昆虫の翅にみられる数学的構造多様性

浜松学芸中学校・高等学校

1年 山本菜帆 他4名

1 研究の目的

昆虫の翅の構造は、昆虫種によって異なるが、基本的にはキチン質の薄い膜とそれを支える翅脈と呼ばれる太い脈で構成されており、翅脈の模様は人間の指紋のように1つとして同じものが存在しないといわれるほど多様で複雑なパターンを有している (Jordan Hoffmann et al. 2018)。トンボのような大きな昆虫は、太い1次翅脈とそのあいだを走る細い2次翅脈で構成され、翅は数百あるいは数千に達する細かな膜で区切られている。翅脈間の膜の構造に着目すると、三角形、四角形、五角形といった形や大きさ、割合にも飛翔能力が影響しているかもしれない。

多くの完全変態昆虫では蛹期に折りたたまれた状態で翅が形成され、羽化時に翅が展開する。昆虫の翅では、翅脈の太さ、翅脈のあいだの膜構造の大きさや形、多角形の割合に規則性があるのか、個体ごと地域個体群ごと近縁種ごとに差があるのかについての研究例はほとんどなく、単純な多角形の組合せが種間または同種であっても地域個体群間での遺伝的な差異を反映している可能性があるのだろうか。

そこで、本研究では成虫の翅でみられる数学的な構造多様性を明らかにすることを目的とし、湖西市、浜松市内で採集した大きさや飛翔能力の異なる4種のトンボ亜目とイトトンボ亜目を用いて翅の構造が遺伝的多様性や飛翔能力との関係性について解析を行った。

2 仮説

- (1) 種や個体間で翅の膜の数に差異がある
- (2) 各個体の翅の膜の数は左右で等しい
- (3) 採集場所が異なる個体群間での膜の割合は異なる

3 研究の方法

本研究では、昆虫の飛翔能力の高さや飛翔時にエネルギー効率に大きく関わるトンボの翅構造が、個体ごと地域個体群ごと近縁種ごとに形態に差があるのかについて解明することで、トンボの保全活動に貢献することを目的とする。そのため、成虫の翅でみられる数学的な構造多様性を明らかにし、湖西市、浜松市内で採集した4種のトンボ亜目とイトトンボ亜目の成虫を用いて翅の構造と飛翔能力の関係性について解析を行った。採集したトンボ種は、生息域が広いウスバキトンボ *Pantala flavescens*、シオカラトンボ *Orthetrum albistylum speciosum*、オオシオカラトンボ *Orthetrum triangulare melania* の3種に加えて、体が小さく飛翔能力が低いアオイトトンボ *Lestes sponsa* をそれぞれ54、29、8、60個体採取した。その後、採集したトンボで標本を作製し、乾燥させた。

トンボの翅全体で膜の幾何学的形状を比較し、翅脈と膜構造に見られる数学的な構造の多様性を解明するために、トンボの翅の複雑な構造を細分化して、個々の多角形の形状と個数を計測し、前翅と後翅の個数および左右の翅で個数や多角形の比率を測定した。はじめに、明瞭に翅脈が観察できるように、完全に乾燥したトンボ標本の左右の翅を白い紙の上に貼り付けた上でスキャンし、拡大した映像で翅をブロックごとに分け、そのなかの膜構造を計測した(図1)。さらに、翅のなかの膜構造を三角形、四角形、五角形などの多角形ごとに分

類して個数を計測し、翅のなかでの多角形の割合を算出した。研究対象である4種のトンボで体長の大きさと飛翔能力は大きく異なるため、体の大きさや飛翔能力と翅にみられる数学的な構造との関係性を評価した。さらに、作成したグラフ座標を用いて相対距離を算出し、国土地理院地図を用いて算出した実測距離との関係性を評価した。

4 結果

トンボ翅にみられる膜構造の個数を3種のトンボの翅をブロックごとに分け、計測した結果、トンボ亜目3種間で大きな差がみられた(図2)。近縁種であるシオカラトンボとオオシオカラトンボでは、前後の翅の前後の個数比が近い値を取り、グラフ上で隣接していた。一方で、亜科レベルで異なるウスバキトンボでは前後の翅の個数比が大きく異なっており、翅の前後比が種間の近縁関係を反映している可能性が示された。

トンボ亜目の体長と前後翅の膜の総数には中程度の正の相関がみられた($R^2=0.374$)。図上では、トンボ亜目3種が識別でき、翅の前後比(図1)と同様に、近縁種であるシオカラトンボとオオシオカラトンボでは、前後の翅の総数と体長の比が近い値であった。一方で、亜科レベルで異なるウスバキトンボでは前後の翅の総数と体長比が大きく異なり、翅の左右比が種間の近縁関係を反映していた。

前翅の前縁部の左右差では、種全体の平均値では左右差は全くみられないが、個体ごとに大きなバラつきがみられた(図3)。ウスバキトンボでは全体の75%に個体、シオカラトンボでは62%の個体で左右差が全くみられないかもしくは左右差が1の範囲内に入った。

本研究では、色分けされたトンボ3種の後翅を太い翅脈に囲まれたブロックに着目して、膜構造を三角形、四角形、五角形の3つに分類し、色分けをした(図3)。3種のトンボすべてで共通して翅の付け根に近い部分に少数の三角形が集中し、四角形は満遍なく多数が分布し、五角形は翅の先端部に集中する傾向がみられた。トンボ亜目のトンボ3種に着目して、三角形、四角形、五角形の割合を示す三角グラフを作成した(図4)。3種のトンボすべてでグラフ上の分布が一致しており、種間で多角形の構成割合は似通っており、差異は確認できなかった。

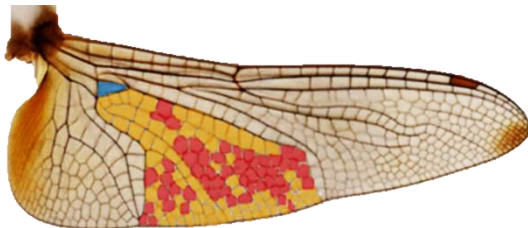


図3. トンボ4種の翅に見られる多角形の膜
三角形：青色、四角形：黄色、五角形：赤色

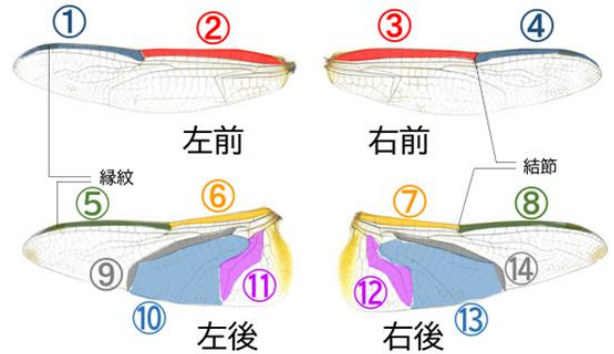


図1. トンボの翅の膜構造の個数の計測部位

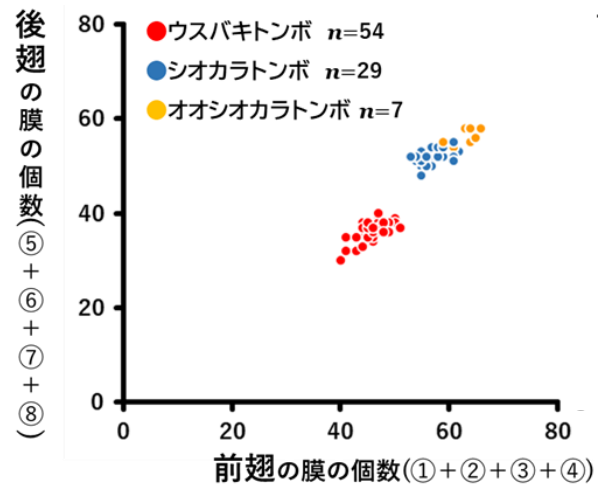


図2. トンボ亜目3種における前後翅の膜個数比

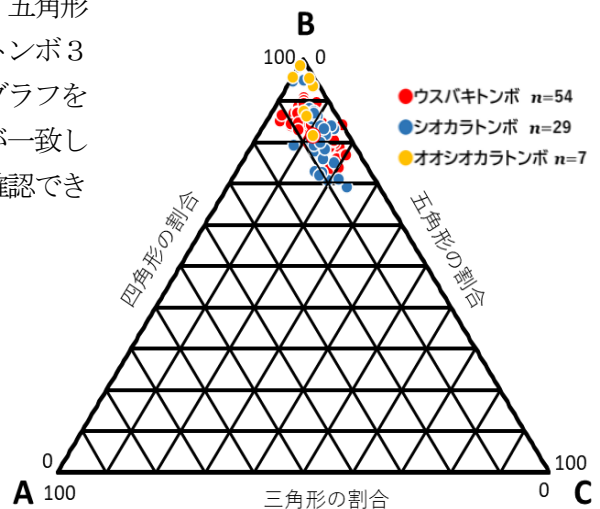


図4. トンボ亜目3種の翅にみられる多角形の膜の割合

飛行能力が低く生まれた地点からあまり移動しないアオイトトンボでは、地域間での交流がないことで、前後の翅の個数比に地域集団間で差が生じていることが明らかになった(図5)。また、図5より、距離が大きく離れた神ヶ谷地区と吹上地区で採集した集団間では完全にグラフ上の分布が離れていた。それに対して、2地点の中間に位置する馬郡地区で採集した個体では、2地点の値に重なるように分布していた。図11-Bから算出した3地点間の相対距離を縦軸に、国土地理院地図より算出した実測距離を横軸にしてプロットすると、強い正の相関がみられた($R^2=0.9803$ 、図6)。このことより、飛行能力の低いアオイトトンボの前後翅の個数比を計測することで、遺伝的な多様性を推測できる可能性が示唆された。

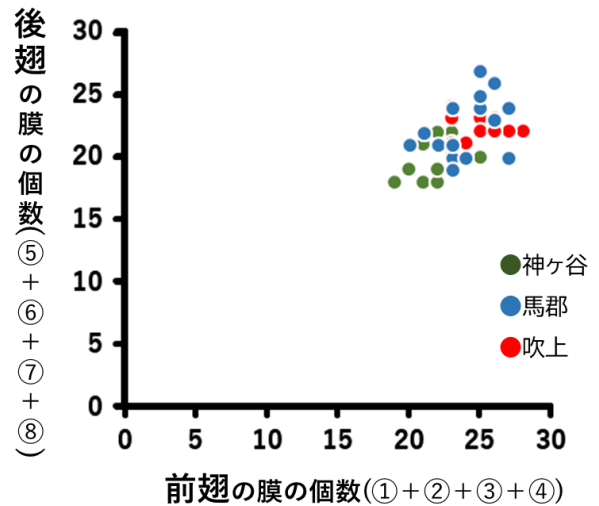


図5. 3地点のアオイトトンボ前後翅の膜の個数比

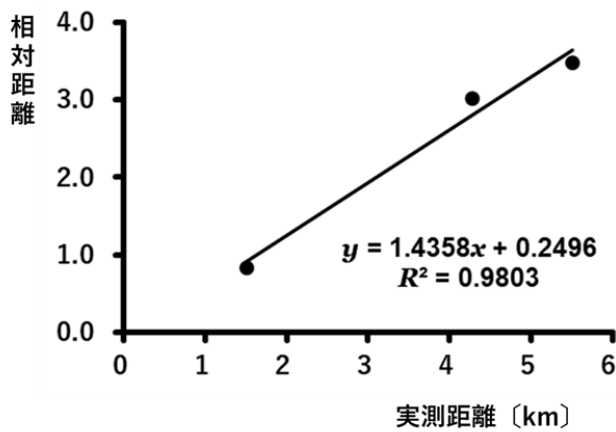


図6. 3地点のアオイトトンボにおける相対距離と実測距離



実測距離：国土地理院地図 計測ツールより
<https://maps.gsi.go.jp/#18/34.689558/137.614687/&base=ort&ls=ort&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m>

5 考察

翅の膜構造の個数をブロックに分け計測した結果、トンボ亜目3種間で大きな差があり、近縁種であるシオカラトンボとオオシオカラトンボでは、前後の翅の前後の個数比が近い値をとった。一方で、亜科レベルで異なるウスバキトンボでは前後の翅の個数比が大きく異なり、翅の前後比が種間の近縁関係を反映する可能性が示された。

トンボ4種の翅の前縁部でみられる膜構造は、すべて四角形で構成されていた。また、前翅の前縁部の左右比($|(\text{①}+\text{②})-(\text{③}+\text{④})|$)に、種全体の平均値では左右差は全くなく、個体ごとに大きなバラつきがあった。トンボ翅の断面は凸凹としており、凸凹している翅のまわりに巧妙に渦をつくることで揚力の増大に関する(Fujita and Iima 2023, 小幡 2017)。しかし、翅の前縁部では膜の折り畳みによる立体構造がみられないため、複雑な渦を生じる飛行に寄与しない。このため、前縁部における膜構造の左右差がトンボの飛行や生存に大きな影響を及ぼすこともなく、前縁部の膜個数が進化的に重要でない可能性が示唆された。

採集個体数が多かったウスバキトンボでは、採集場所による翅の個数比に差がみられなかった。ウスバキトンボは、毎年春に沖縄以南の暖かい地域から飛来した成虫が日本列島で産卵し、北上しながら子孫が繁殖を繰り返し増殖すると推察されており、寒さに弱く九州以北では成虫でもヤゴでも卵でも越冬できない(佐藤2004)。このことから、浜松学芸校内と湖西市白須賀で採集されたウスバキトンボ個体間で翅の膜の個数比に差がないのは、どちらで採集された個体も南から北上してきた個体群由来の子孫であるためではないか。ウスバキトン

ボは移動分散能力が著しく高いため、繁殖地で遺伝子交流が頻繁に行われ、種内での遺伝的多様性が低いと推定される。一方で、本研究において3地点で採取されたアオイトトンボの前後翅の膜の個数比に差がみられた。アオイトトンボは移動分散能力が低いため、生息場所間での個体の移動が少ないと考えられる。そのため、遺伝子の交流が少なく、個体群間で翅の膜の個数に差が生じるのではないかと。

トンボの移動距離についてはいくつかの報告例がある。守山ら(1990)は特定の繁殖地からトンボがどのくらい離れた場所まで移動しているかを調査することで、アオイトトンボ *Paracercion sieboldii* とアジアイトトンボ *Ischnura asiatica* について1.2~1.3km、ショウジョウトンボ *Crocothemis servilia mariannae* について1.0~1.1kmをそれぞれの移動距離と推定した。若杉ら(2002)は、栃木県宇都宮市の一般的な平地水田地帯で標識再捕獲法を用いて調査を行い、アジアイトトンボの移動距離が1.1~1.2kmであり、湛水休耕田の存在に大きく影響を受けていることを明らかにした。アオイトトンボの体長が27~38mm、アジアイトトンボの体長が24~33mmであるのに対して、アオイトトンボの体長は34~48mmと若干大きいくらいである。体長が41~55mmと比較的大きなショウジョウトンボの移動距離の推定値が1.0~1.1kmであったことから、アオイトトンボの移動距離も同程度であると推定される。

本研究のアオイトトンボ採集地点である吹上地区と馬郡地区の実測距離は1.5kmである。2地点間には放置された養鰻池が漸続的に広がり、個体間の交流が存在する可能性がある。一方で、馬郡地区と神ヶ谷地区のあいだでは実測距離が4.28kmに達し、2地点の集団間での遺伝子交流が存在しないために、大きな形態の差異が生じたのではないかと。同様に、吹上地区と神ヶ谷地区の2地点でも実測距離が大きいため直接個体間の交流がないであろう。一方で、この2地点の中間に位置する馬郡地区で採集された個体で、グラフ上の分布が他2地点と重なるのは、少なからず交流があると推定される。

6 まとめ

本研究で計測対象としたのは、トンボの翅の一部に過ぎない。より多くの部分で翅の膜の個数、膜の形を計測対象とすることでさらなる情報が得られ、個体識別や種同定もしくは地域個体群間での遺伝的な多様性を翅の膜個数から推定できる可能性がある。簡易的で安価に、トンボの遺伝的多様性を明らかにできる調査手法の構築につながる可能性がある。今後も、翅の構造多様性と遺伝的な多様性の関係について研究していきたい。

7 謝辞

本研究は、山崎自然科学教育振興会研究助成金の元で行われました。また研究の遂行にあたっては、浜松学芸高等学校の伊藤信一教諭、村上拓教諭、火物瑠偉教諭のご助言と、同サイエンス部の皆さんの多大なるご助力がありました。ここに記して、感謝の意を表明いたします。

8 引用文献

- Jordan Hoffmann · Seth Donoughe · Kathy Li · Chris H. Rycroft (2018) A simple developmental model recapitulates complex insect wing venation patterns. PNAS, file:///C:/Users/81906/Desktop/%E3%81%AF/%E5%8A%A9%E6%88%90/%E7%BF%85%E3%81%AE%E6%A7%8B%E9%80%A0/hoffmann-et-al-2018-a-simple-developmental-model-recapitulates-complex-insect-wing-venation-patterns.pdf. 2024年4月30日最終確認
- 小幡章(2017)トンボに学ぶ飛行テクノロジーと昆虫模倣. 技報堂出版, 東京
- Yusuke Fujita · Makoto Iima (2023) Dynamic lift enhancement mechanism of dragonfly wing model by vortex-corrugation interaction. Physical Review Fluids. 8 : 123101
- 守山弘 · 飯島博 · 原田直国 (1990) トンボの移動距離をとおしてみた湿地生態系のありかた. 人間と環境. 15(3) : 2-15