

形態と生態からみたチョウの飛翔

愛媛県立松山南高等学校 松南バタフライ班
豊岡杏菜・伊藤優希・大澤璃奈・難波和佳奈

1 要旨

私たちは長距離移動を可能とするアサギマダラの飛翔メカニズムに興味を持った。チョウの形態と生態という二つの視点から実験を行い、三種のチョウを比較した。実験の結果、アサギマダラは効率よく省エネルギーで飛翔を行っていることが分かった。

2 緒論・目的

アサギマダラ *Parantica sita* は約 2000 km にも及ぶ「渡り」と呼ばれる長距離移動を行うことで知られている¹⁾。また、アサギマダラの翅の構造は、ネイチャーテクノロジーを搭載した扇風機 (SHARP 社製) の羽根の構造に役立てられている²⁾。一方でアサギマダラは謎の多いチョウでもあり、「渡り」をする理由や長距離移動をするためのエネルギーをどう蓄えているのかなど、未解明な点も複数挙げられる。そこで私たちはアサギマダラの長距離移動を可能としている飛翔メカニズムに興味を持った。

アサギマダラと同サイズかつ体長と前翅長の比が比較的近いアゲハ *Papilio xuthus* を比べると、アサギマダラはアゲハに比べて風の抵抗を低減し、少ないはばたき回数で飛翔していることが分かっている³⁾。このことを踏まえ、本研究では他にも長距離移動を可能とする要因があるのではないかと考え、アサギマダラの飛翔メカニズムをさらに詳しく調べた。また、助言をもとに、同じタテハチョウ科で移動性が高い、ツマグロヒョウモン *Argyreus hyperbius* を新たな実験対象とした。この3種で形態調査と生態調査を行い比較することで、渡りを可能にする飛翔メカニズムを解明することを目的に本研究を行った。

3 材料と方法

本研究では3種のチョウについて、翅の構造に着目した「形態」と、はばたき回数や飛翔前後での体温の変化に着目した「生態」の観点から比較実験を行った。

(1) 形態調査

ア 鱗粉面積指数の算出

翅の5つの部位(図1)を切り取り、光学顕微鏡で観察して撮影し、以下に表記した鱗粉面積指数を算出した。この指数は、植生調査などで用いられる「葉面積指数(Leaf Area Index[LAI])」(単位面積あたりの葉面積の合計)を鱗粉に当てはめた、独自の算出方法である。

$$\text{鱗粉面積指数} = \text{鱗粉総面積} / \text{視野面積}$$

イ 流れ場の可視化実験

塩素系白煙発生装置を用いて標本に正面から白煙を当て、翅周辺に形成される空気の流れ場を可視化し、その様子を撮影した動画から翅周辺の空気の流れ場を観察した。(図2)

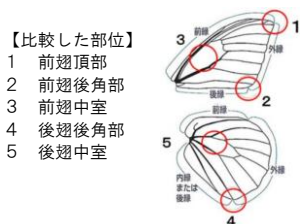


図1 鱗粉を観察した部位³⁾

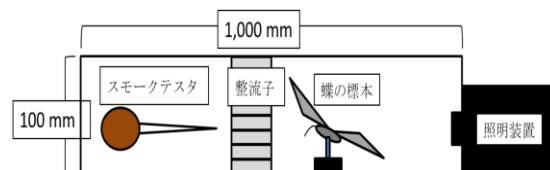


図2 流れ場の可視化実験

(2) 生態調査

ア はばたき回数の計測

実験室内で一定時間放蝶した様子の動画を撮影し、その映像からカウンターとストップウォッチを用いて、一秒間あたりのはばたき回数を計測し、平均値を算出した。

イ 飛行前後の体温差の測定

放蝶時にレーザー機能付きの放射温度計を用いて飛行前と飛行直後の静止状態の胴体部分の体温を測定し、その差を体温差とした。なお、実験時の室温は25度に統一し実験を行った

4 結果

(1) 形態調査

ア 鱗粉面積指数の算出

アサギマダラとツマグロヒョウモンは前翅の指数が全体的に大きかったが、後翅中室においてはアサギマダラの指数が他2種と比較して小さかった。また、ツマグロヒョウモンのレーダーチャートは正五角形に近いものとなった。有意差検定ではアサギマダラ・ツマグロヒョウモン間においては後翅中室、ツマグロヒョウモン・アゲハ間においては前翅後角部で有意差がみられた。なお、先行研究からアサギマダラ・アゲハ間ですべての部位において有意差が確認されている³⁾。

表1 3種のチョウの各部位の鱗粉の比較

| | 前翅頂部 | 前翅後角部 | 前翅中室 | 後翅後角部 | 後翅中室 |
|-----------|------|-------|------|-------|------|
| アサギマダラ | | | | | |
| ツマグロヒョウモン | | | | | |
| アゲハ | | | | | |

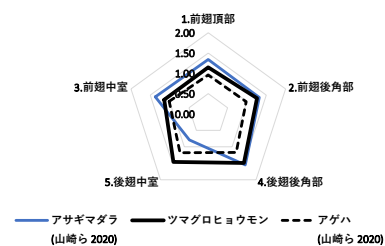


図3 3種間の鱗粉面積指数の比較

イ 流れ場の可視化実験

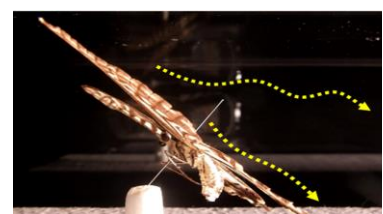
アサギマダラでは前翅と後翅、ツマグロヒョウモンは前翅において渦状の流れ場がみられた。アゲハでは渦状の流れ場はみられなかった(図4)



アサギマダラ



ツマグロヒョウモン



アゲハ

図4 流れ場の可視化実験

(2) 生態調査

ア はばたき回数の計測

実験の結果、アサギマダラが一番少ない数値となった。(図5)。多重比較検定の結果、アサギマダラ・ツマグロヒョウモン間とアサギマダラ・アゲハ間に危険率5%で有意差がみられた。

イ 飛行前後の体温差の測定

私たちは飛行時の筋運動によって、すべてのチョウの飛行後の体温は上昇すると考えた。しかし、本来昆虫は高温に弱いため、体温が一定以上になると運動能力が低下するため、長距離移動するアサギマダラの体温上昇は他のチョウより抑制されているという仮説を立てた。結果は仮説

に反して、アサギマダラとアゲハでは飛翔後に体温が減少する傾向がみられたが、ツマグロヒョウモンでは飛翔後に体温が上昇する傾向がみられた(図6)。多重比較検定の結果、どの種間にも有意差はみられなかった。

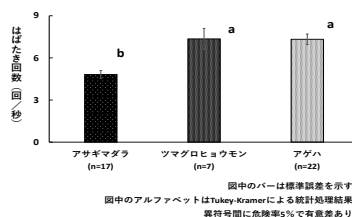


図5 はばたき回数の比較

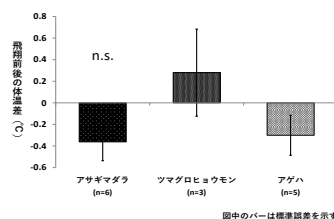


図6 飛翔前後の体温差の比較

5 考察

(1) 形態調査

ア 鱗粉面積指数の算出

ツマグロヒョウモンはアサギマダラと同様に前翅における指数が大きい。このことについて、瀧脇正樹氏(九州工業大学大学院情報工学研究院)から「鱗粉面積指数が大きくなることで翅の表面に凹凸構造が形成され、空気の抵抗低減に寄与する可能性がある」という指導助言をいただいた。身近な例として、ゴルフボールなどが挙げられる。よって、アサギマダラとツマグロヒョウモンの鱗粉面積指数の大きい前翅は、揚力を得やすい構造であることが示唆される。また、アサギマダラはチョウの胴の部分に近い後翅中室における指数が小さいことから、風が通りやすく、飛翔に伴う筋運動によって生じる熱が逃げやすくなっているのではないかと考えた。今後は鱗粉の構造とそのはたらきを調べる方法を確立し、異なる種類の鱗粉が飛翔に及ぼす影響を調べていきたい。

イ 流れ場の可視化実験

アサギマダラとツマグロヒョウモンの前翅頂部、アサギマダラの後翅中室上において渦状の流れ場が形成された。したがって、渦状の流れ場が発生した前翅と後翅では、翅周辺で空気の密度変化が起こり、揚力が生じやすくなっていると考えられる。今回は翅の角度を前傾45度にして実験を行ったがチョウには滑空姿勢など様々な種類の飛び方がある⁴⁾ため、今後は翅の角を水平や後傾などに変えて実験を行っていきたい。

(2) 生態調査

ア はばたき回数の計測

アサギマダラは同じタテハチョウ科で比較してもはばたき回数が少なく、他のチョウより少ないエネルギーで飛ぶことが示唆された。今後はチョウの体重と翅長も考慮して実験を行っていきたい。

イ 飛翔前後の体温差の測定

アサギマダラとアゲハにおいて飛翔後に体温の減少がみられたことから、飛翔することでその際に生じた熱を逃がしているのではないかと考えた。一方でツマグロヒョウモンでは飛翔後に体温の上昇がみられた。しかし、ツマグロヒョウモンは実験を行った3匹中2匹の体温は減少していることに加え、3種間で有意差がみられないことから、3種のチョウ全ての体温は減少する傾向がある可能性も示唆される。さらに実験を重ねるにつれてほとんどのチョウの体温が飛翔後に減少していることから、チョウが飛翔する目的の一つに「体温上昇を防ぐこと」があげられるのではないかとという新たな仮説が生まれた。

(3) 新たな仮説の検討

新たな仮説である体温上昇の抑制に関連して、鱗粉の構造や色が放熱に役立っているという興味深い報告がある⁵⁾。

チョウの翅の鱗粉には様々な構造があることが分かっている。また表1から、アサギマダラは部位によって鱗粉の形や構造が異なることが分かる。それに対し他2種の鱗粉には大きな違いは確認できなかった。このことからアサギマダラの部位によって異なる鱗粉には、他のチョウとは異なった役割があり、その役割がアサギマダラの長距離移動を可能としているのではないかと推測している。加えてチョウの鱗粉と翅の翅脈に放熱のはたらきがあることが明らかになっている⁵⁾。図7から翅脈と前翅中室は熱放射率が高いことが分かる。なお、図8の右の翅は鱗粉を除去したもので、左の翅は鱗粉がついたままのものである。図8から翅脈の温度が低いことが分かる。この2つの結果から翅脈や前翅中室で放熱が行われ、体温が他の部位より低く保たれていることがいえる。私たちは後翅中室周囲の翅脈でも放熱が行われていると考えた。これはアサギマダラの後翅中室の鱗粉面積指数が小さいことにも関係しているのではないかと推測している。

以上のことからチョウは、はばたくことにより体温が減少するだけでなく、チョウの構造自体に体温を減少させる仕組みがあることが分かった。体温を減少させる仕組みは特定のチョウだけでなく、チョウそのものに備わっている機能であると考えられる。特にアサギマダラはその仕組みが優れており、3種のなかで最も省エネルギーで飛行を行っているチョウだといえる。

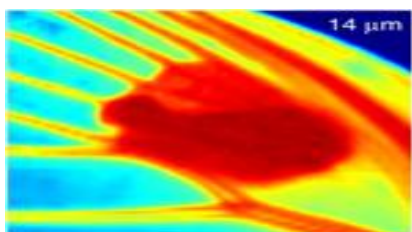


図7 熱放射線の分布⁵⁾

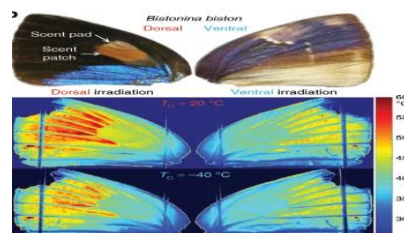


図8 温度分布⁵⁾

6 結論

- (1) アサギマダラとツマグロヒョウモンは前翅の面積指数が大きく、翅周辺の空気の流れ場に渦が形成されたことから、前翅の構造は飛行時の揚力確保に寄与している。
- (2) アサギマダラは後翅中室の鱗粉面積指数が小さく、飛行時に生じた熱を逃がしている。一方、ツマグロヒョウモンは後翅中室の鱗粉面積指数が大きく、熱を逃がしにくい。
- (3) アサギマダラは他2種と比較してはばたき回数が少なく、エネルギー消費を抑えた飛行を可能としており、飛行による体温の上昇が抑制されている。

7 参考文献

- 1) 栗田昌裕 (2014) 『謎の蝶アサギマダラはなぜ未来が読めるのか?』, 株式会社 PHP 研究所, p 40-41
- 2) SHARP Be Original. リビングファン | ネイチャーテクノロジー
<https://jp.sharp/nature/tec/living-fan/> (2021年8月13日最終閲覧)
- 3) 山崎豊・花岡龍之介・白石浩都(2020) 「アサギマダラの効率的な飛行メカニズムの探究」『愛媛県立松山南高等学校理数科課題研究論文集』愛媛県立松山南高等学校, p39~42.
- 4) 白水隆(2006) 『日本産蝶類標準図鑑』学習研究社, p. 9
- 5) Cheng-Chia Tsai et al (2020), Physical and behavioral adaptations to prevent overheating of the living wings of butterflies. Nature communications, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14408-8>