

チョウの翅から見た省エネ飛翔の可能性

愛媛県立松山南高等学校 松南バタフライ班

伊藤優希 大澤璃奈 豊岡杏菜 難波和佳奈 指導教諭 若山勇太

1. はじめに

私たちはチョウの翅の構造が扇風機の羽根に応用されていることを知り、昆虫の機能的な生態、特にチョウの飛翔メカニズムに興味を持った。山崎ら(2020)によると、日本において長距離移動をすることで知られているアサギマダラ *Parantica sita* は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* に比べて風の抵抗を低減し、少ないはばたき回数で飛ぶことが示唆されている。私たちはこの効率的な飛翔を「省エネ飛翔」と定義し、アサギマダラが「省エネ飛翔」を行っているとは仮定した。香川大学教育学部の松本一範氏からいただいた御助言をもとに、アサギマダラと同じタテハチョウ科であるツマグロヒョウモン *Argyreus hyperbius* を加えた3種のチョウの鱗粉面積(密度)、1秒間あたりのはばたき回数、飛翔前後の体温差を比較し、さらには流体力学的な観点から翅の周辺に発生する空気の流れ場にも着目した。以上4つの観点からチョウの飛翔メカニズムを探究し、「省エネ飛翔」の可能性を見出すことを目的として本研究を行った。

2. 研究項目・方法

(1) 鱗粉面積指数の算出

アサギマダラ・ツマグロヒョウモン・アゲハ(いずれも雄)について、翅の5つの部位(前翅頂部・前翅後角部・前翅中部・後翅後角部・後翅中室)を光学顕微鏡で観察して撮影し(図1)、以下のように定義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。算出された指数はTukey-Kramerの多重比較検定によって、5%水準で有意差を判定した。

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

(2) はばたき回数の計測

アサギマダラ・ツマグロヒョウモン・アゲハ(いずれも雄)について、室温を一定に保った実験室内でチョウを一定時間放蝶し、その様子をスマートフォンで撮影してスロー再生した映像をもとにカウンターとストップウォッチを用いて、目視によって1秒間あたりのはばたき回数を計測した。

(3) 飛翔前後の体温差の測定

(2)の計測時にレーザー機能付きの放射温度計を用いて飛翔前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、飛翔後に静止した際、体温が上昇するのを防止し、光源の位置による飛翔の変化をなくすため室内の蛍光灯はすべて消灯した。

(4) 流れ場の可視化実験

ハンディタイプの塩素系白煙発生装置(スモークテスタ)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。その際標本に当たる白煙の威力を一定にするため、工作用紙で作成した整流格子とアクリル板を用いた風洞を利用し、白煙を見やすくするため照明器具を利用した。また、先行研究より九州工業大学大学院情報工学研究院の瀧脇正樹氏から頂いたご助言をもとに、照明器具の発光部にアルミホイルを張ることで光をシート状(スリット)にし標本全体に光が当たりすぎないようにしている(図2)。

【比較した部位】

- 1 前翅頂部
- 2 前翅後角部
- 3 前翅中室
- 4 後翅後角部
- 5 後翅中室

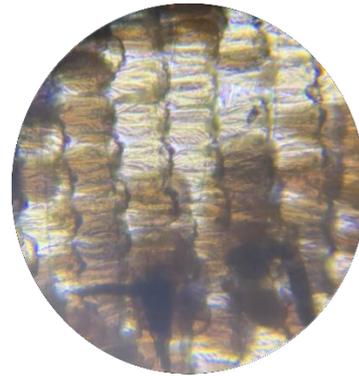
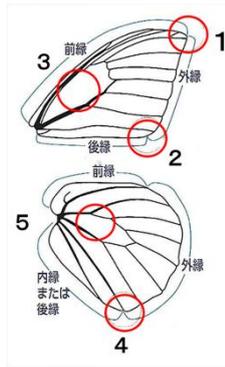


図 1-① 鱗粉を観察した部位
(白水 (2006) より引用)

図 1-② 前翅頂部の光学顕微鏡撮影画像
(ツマグロヒョウモン)

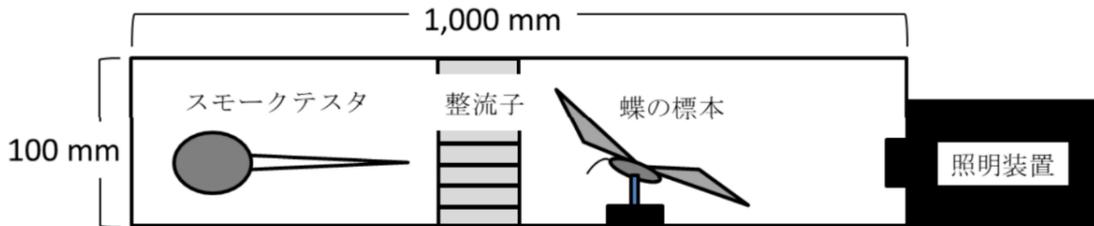


図 2 流れ場の可視化実験の装置の模式図

3. 結果

(1) 鱗粉面積指数の算出

3 種間における鱗粉面積指数を算出し、レーダーチャートを作成した (図 3・表 1)。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面積指数はアサギマダラと比較して各部位間の差が小さく、レーダーチャートは正五角形に近いものとなった。これはアゲハのレーダーチャートに類似した形であるが、ツマグロヒョウモンの指数はすべての部位においてアゲハよりも大きい。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で、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、アサギマダラ・アゲハ間では T 検定によりすべての部位において有意差が確認されている (山崎ら, 2020)。

(2) はばたき回数の計測

アサギマダラ (n=17) は 4.8 回/秒、ツマグロヒョウモン (n=7) は 7.4 回/秒、アゲハ (n=22) は 7.3 回/秒だった (図 4)。アサギマダラ・ツマグロヒョウモン間とアサギマダラ・アゲハ間において有意差がみられた。

(3) 飛行前後の体温差

アサギマダラとアゲハでは飛行後に体温が低下する傾向が見られた一方、ツマグロヒョウモンでは飛行後に体温が上昇する傾向がみられた (図 5)。どの種間においても有意差はみられなかった。

(4) 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上の流れ場がみられた。アゲハでは渦上の流れ場はみられなかった (図 6)。

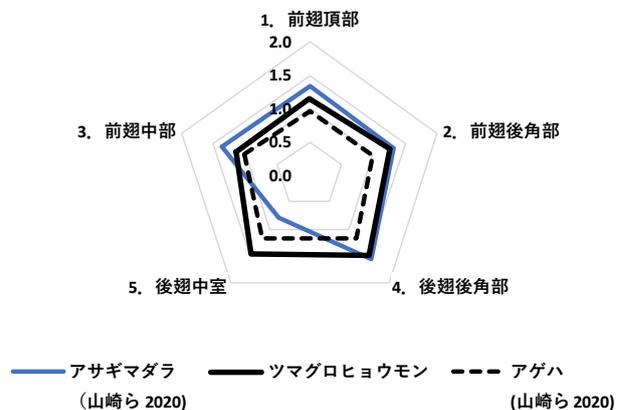


図 3 鱗粉面積指数の比較

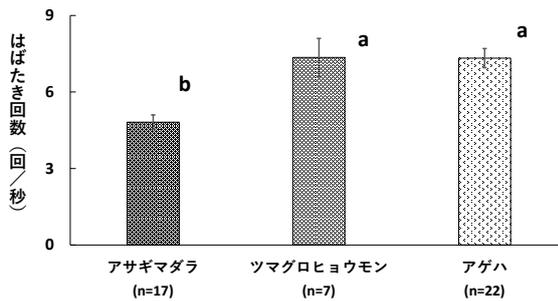
表1 各チョウの部位別鱗粉面積指数の比較

種名	供試数	前翅頂部	前翅後角部	前翅中部	後翅後角部	後翅中室
アサギマダラ	3	1.34 a	1.32 a	1.37	1.55	0.79 b
ツマグロヒョウモン	3	1.15 ab	1.26 a	1.14	1.49	1.46 a
アゲハ	4	0.96 b	0.98 b	1.01	1.17	1.18 a
判定		*	**	ns	ns	**

表中のアルファベットはTukey-Kramerによる統計処理結果

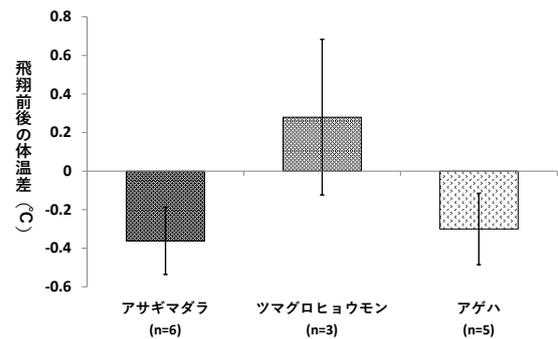
異符号間に5%水準で有意差あり

判定結果… ns：有意差なし *：p<0.05 **：p<0.01



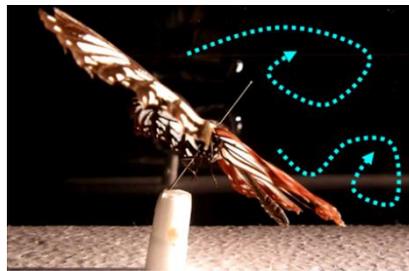
図中のバーは標準誤差を示す
図中のアルファベットはTukey-Kramerによる統計処理結果
異符号間に5%水準で有意差あり

図4 はばたき回数の比較



図中のバーは標準誤差を示す

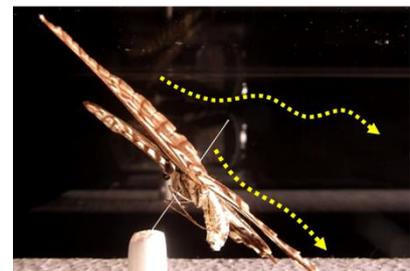
図5 飛行前後の体温差の比較



アサギマダラ (山崎ら 2020)



ツマグロヒョウモン



アゲハ (山崎ら 2020)

図6 流れ場の可視化実験

4. 考察

(1) 鱗粉面積指数

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。このことから、飛行中に揚力が得やすくなっている可能性が示唆された。瀧脇正樹氏(九州工業大学大学院)によると、鱗粉面積指数が大きくなることで翅の表面に凹凸状の構造が形成され、抵抗低減に寄与する可能性があるという。凹凸構造を設けることで空気抵抗を低減している例として、ゴルフボールなどが挙げられる。また、ツマグロヒョウモンはアサギマダラと比較して後翅中室における指数が大きいことから、飛行に伴う筋運動によって胴体部分から生じる熱が逃げにくくなっているのではないかと考えた。今後は電子顕微鏡を用いて鱗粉の形状を撮影し、形状の違いが飛行前後の体温変化と翅周辺の空気な流れ場及び影響について探究したい。

(2) はばたき回数

アサギマダラはツマグロヒョウモンと比較して約2.6回/秒、アゲハと比較して約2.5回/秒少なかった。このことから、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、体温の上

昇が抑制された効率の良い飛翔、すなわち「省エネ飛翔」を行っている可能性が示唆された。一方で、はばたき回数はチョウの体重や翅長が大きいほど少なくなる傾向にあるという反比例の関係にあるのではないかと考えているため、今後はそれらの条件を再検討していく。

(3) 飛翔前後の体温差

アサギマダラとアゲハにおいて飛翔後に体温の低下がみられた。このことから、これらのチョウは飛翔することでむしろそれに伴う筋運動によって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ことから、ツマグロヒョウモンは他2種と比較して熱を逃がしにくい可能性が示唆された。今後は飛翔前の体温の一定化、体温の計測方法などの改善を行い、試行数を増やしてデータを補填していきたい。

(4) 空気の流れ場

アサギマダラとツマグロヒョウモンにおいて渦状の流れ場が形成された。このことから空気の圧力変化が起り、揚力が生じている可能性が示唆された。今後は翅の角度を変更することで滑空姿勢などさまざまな飛翔姿勢を再現し、流れ場形成についてさらに探究していきたい。

5. まとめ

3種の比較より、以下の3点が示唆された。今後は実験条件の改善を経て試行回数を増やし、蝶の省エネ飛翔の可能性をさらに探究したい。

- (1) アサギマダラとツマグロヒョウモンは前翅の鱗粉面積指数が大きく、揚力の確保に寄与するとともに、翅の周辺に渦上の流れ場が形成し飛翔中の抵抗を低減している。
- (2) アサギマダラは後翅中室の鱗粉面積指数が小さく、飛翔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) アサギマダラは他種と比較してはばたき回数が少なく、飛翔による体温の上昇が抑制されている。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、松本一範氏（香川大学教育学部）と淵脇正樹氏（九州工業大学大学院情報工学研究院）に貴重な指導助言をいただいた。心から感謝申し上げます。

7. 参考文献

- ・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翔メカニズムの探究」『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