

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 アサギマダラ班

山崎 豊 花岡龍之介 白石浩都 指導教諭 若山勇太

1. はじめに

私たちは昆虫の機能的な生態に興味を持ち、日本において長距離の渡りを行うアサギマダラ *Parantica sita* の飛翔に着目した。若山ら(2011)によって四国においてアサギマダラの異常な飛翔ルートが報告されていることを知り、私たちは風が影響していると考え、飛翔に与える風の影響に関する研究を行った。そして風速 1,6m/s を境に、風に向かって飛ぶ逆風飛翔と風から遠ざかる逃避飛翔を行うことが分かった(花岡ら, 2019)。また、池田ら(2017)によるとアサギマダラは温度感受性が高く、体温上昇を防ぐ飛翔メカニズム「省エネ飛翔」によって、アゲハチョウ類に比べて約 9°C 体温を低く保っていることが分かっている。これらを踏まえた上で、アサギマダラの飛翔をさらに追究するために、私たちはアサギマダラの翅の構造に焦点を当て、研究を進めた。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* と鱗粉の密度やはばたき回数、体温を比較して飛翔に与える影響の探究を行った。また流体力学的な観点から鱗粉密度が空気の流れ場に与える影響を探究し、アサギマダラの効率的な飛翔のメカニズムを解明する手掛かりを得ることを目的としている。

2. 研究項目

(1) 鱗粉密度(鱗粉面積指数)の算出

私たちは風の影響に加えて翅の構造が飛翔メカニズムに影響を与えると考え、翅の鱗粉の密度を求めた。なお、対照群として、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を用いた。以下(2)~(4)についてもアゲハと比較した。

(2) 2種間の鱗粉密度に差異があるならば、羽ばたき回数にも影響が及ぶと考え、1秒間当たりの羽ばたき回数を計測し、比較を行った。

(3) 羽ばたきに伴う筋運動による体温変化に着目し、飛翔前後の体温差を測定した。

(4) 鱗粉密度が飛翔に及ぼす影響をさらに探究するために、蝶(標本)の翅の周りの空気の流れ、すなわち流れ場の可視化を試みた。

3. 研究方法

(1) 鱗粉密度(鱗粉面積指数)の算出

アサギマダラ、アゲハの雄について、翅の5つの部位(前翅頂部・前翅後角部・前翅中室・後翅肛角部・後翅中室)を光学顕微鏡で観察して撮影した(図1)。両種において以下に示す鱗粉面積指数を算出し、T検定を行って有意差を調べた。

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

(2) はばたき回数の計測

実験室内で一定時間放蝶し、カウンターとストップウォッチを用いてはばたき回数(回/秒)の平均値を算出した。

(3) 飛翔前後の体温測定

放射温度計を用いて(2)の実験前後の体温差[°C]を測定した。

(4) 流れ場の可視化実験

スモークテストというハンディタイプの塩素系白煙発生装置を用いてアサギマダラ、アゲハの標本に空気の流れ場を作り、可視化することを試みた(図2)。その様子を撮影した動画から翅の周囲の空気の流れ場を観察した。個体に当てる白煙の威力を一定にするために工作用紙を材料と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用いた。

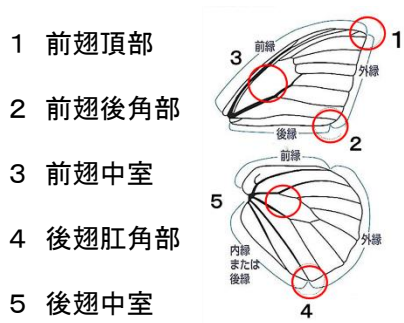


図 1-① 鱗粉を観察した部位
(白水(2006)より引用)

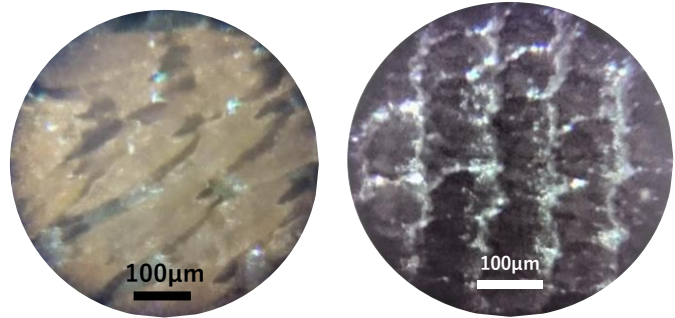


図 1-② 前翅頂部の光学顕微鏡撮影画像
(左：アサギマダラ、右：アゲハ)

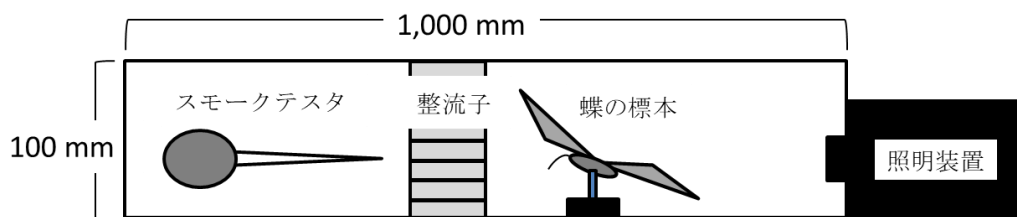


図 2 流れ場の可視化実験の装置の模式図

4. 結果

(1) 鱗粉密度 (鱗粉面積指数) の算出

標本を用いて鱗粉の密度を算出し (表 1)、レーダーチャートを作成した (図 3)。アサギマダラはアゲハに比べて前翅が全体的に高密度である一方、後翅 (特に後翅中室) の密度が低かった。また、アゲハは比較的的正五角形に近い、つまり全ての部位の密度がほぼ均一であった。

(2) はばたき回数の算出

はばたき回数を算出したところ、アサギマダラ (n=11) は平均 4.0 (回/秒) (標準誤差 0.15) という結果になり。アゲハ (n=6) は平均 5.0 (回/秒) (標準誤差 0.07) だった (図 4)。p < 0.05 より有意差ありと判断した。

(3) (2) で用いたアサギマダラ 5 個体の体温差 [°C] は個体によって -3.4 ~ +5.7°C、アゲハ 6 個体の体温差 [°C] は個体によって -5.5°C ~ +0.1°C と幅があった。測定方法の改善も含めて今後さらにデータを 得る必要がある。

(4) 流れ場の可視化

アサギマダラ (n=1) アゲハ (n=1) について角度を水平、滑空姿勢、前傾に設定しそれぞれについて撮影を行った。観察の結果、アサギマダラにあたった風は後翅の上で渦を巻いている流れ場が頻繁に見られた。それに対して、アゲハにあたった風は渦を巻くような流れ場が見られず、そのまま通り抜けていくように見られた (図 5)。

表 1 鱗粉の密度 (鱗粉面積指数 = 鱗粉総面積 / 視野面積) の比較

部位	アサギマダラ				アゲハ				t検定		
	A	B	C	平均	A	B	C	D	平均	p値	有意差
1 前翅頂部	1.37	1.27	1.39	1.3	0.94	1.02	1.01	0.87	1.0	0.0007	有
2 前翅後角部	1.39	1.26	1.32	1.3	1.07	0.99	0.95	0.91	1.0	0.0011	有
4 後翅肛角部	1.62	1.5	1.54	1.6	1.39	1.17	1.14	0.99	1.2	0.0135	有
5 後翅中室	0.63	0.89	0.84	0.8	1.32	1.1	1.17	1.14	1.2	0.0063	有
3 前翅中室	1.41	1.37	1.33	1.4	1.15	1.1	1.06	0.73	1.1	0.0253	有

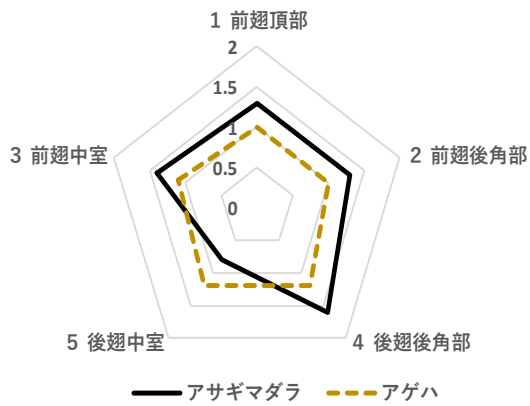


図3 鱗粉面積指数の比較

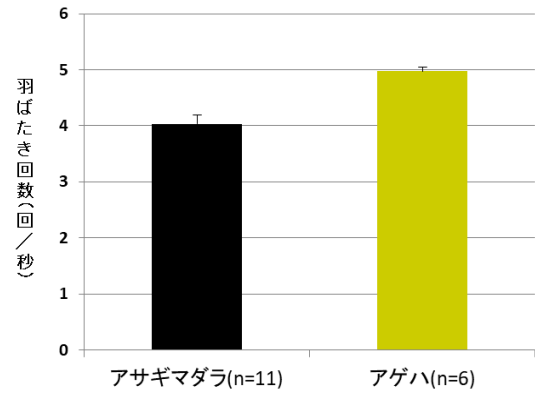


図4 はばたき回数の比較

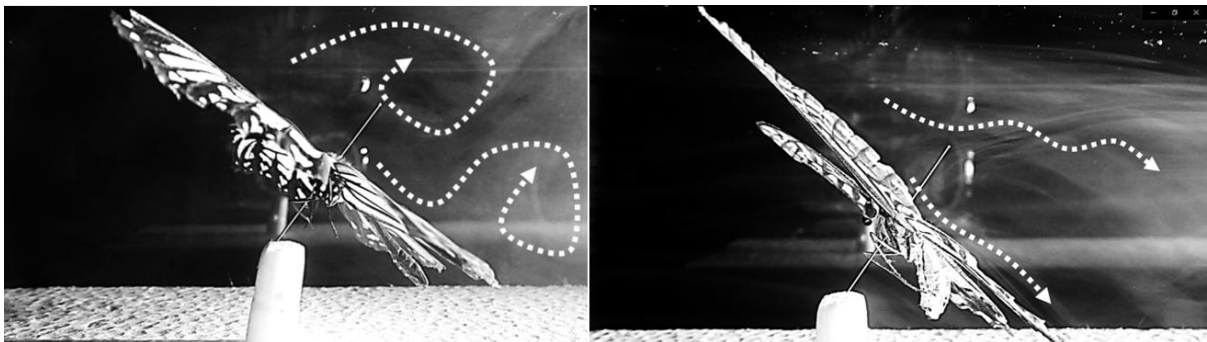


図5 流れ場の可視化実験（左：アサギマダラ、右：アゲハ）

5. 考察

(1) 鱗粉密度が飛行に及ぼす影響

アサギマダラは前翅の鱗粉密度が高く飛行中の揚力を得やすくなっているとともに、後翅中室における鱗粉密度が低く、飛行に伴う筋運動によって生じる熱を逃がしている可能性があるのではないかと私たちは考えている。また、指導助言をいただいている淵脇正樹教授（九州工業大学）によると、鱗粉密度が高い前翅は抵抗低減に寄与している可能性があるという。抵抗低減の身近な例としてゴルフボールの表面構造が挙げられる。ゴルフボールは表面に小さな凹構造を設けることで空気抵抗を小さくし、飛距離を伸ばしている。これと似た効果が、鱗粉密度が大きい前翅の表面で起こっているのではないかと考える。また、電子顕微鏡で撮影したそれぞれの後翅中室の写真（図6）を見ると、鱗粉の重なり度合いや密度がアサギマダラのほうが小さいことがわかる。また鱗粉の形にも違いが見られる、今後はこの形の違いによる影響について、飛行前後の体温変化と関連付けて探究したい。

(2) はばたき回数と体温変化の関係

アサギマダラの羽ばたき回数はアゲハに比べ、約1回/秒ほど少なかった。このことから、アサギマダラは羽ばたき回数を軽減し、体温上昇を抑えて飛行していること（省エネ飛行）が示唆された。

一方で、体温については誤差が多く、測定方法の改善が必要である。蝶の体温の測定方法は3種類あり、本研究で用いている放射温度計の他に、針型の熱電対を昆虫の体に刺して測る方法、サーモグラフィを用いた方法がある。それぞれの方法に長短があるので、それらを踏まえた上での再検討をしていく。なお、池田ら（2017）によると、アゲハ類の平均体温は31℃程度、アサギマダラの平均体温は22℃程度であり、約9℃の差があるという。

(3) 後翅後方に生じる渦状の流れ場が飛翔に及ぼす影響

図5の結果から、私たちはアサギマダラが高密度な鱗粉を利用して翅の上に渦をつくり、揚力を得ているのではないかと考えた。また、九州工業大学の瀧脇正樹氏から、「全体的に光が当たりすぎているため、光をシート状（スリット）にして、二次元断面にするといい」という指導助言をいただいたので、今後は実験条件を改善し、流れ場が飛翔に及ぼす影響を解明したい。

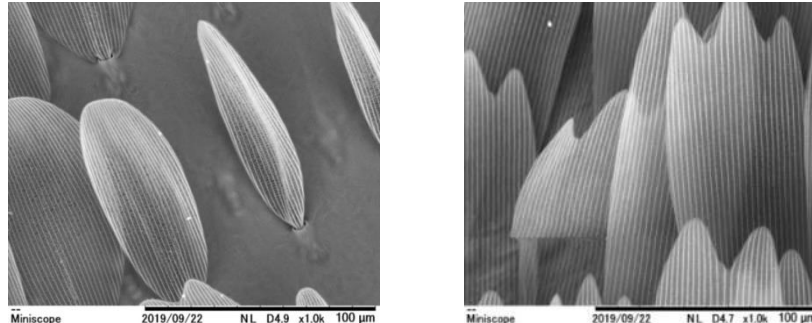


図6 後翅中室の鱗粉の電子顕微鏡画像（左：アサギマダラ、右：アゲハ）

（撮影協力：愛媛県立今治西高等学校生物部）

（機器：株式会社日立ハイテクノロジーTM3030）

6. まとめ

本研究により、以下の2点がアサギマダラの効率的な飛翔に寄与していることが示唆された。

- (1) アサギマダラはアゲハに比べて前翅の鱗粉密度が高く、飛翔中の抵抗低減に寄与している。
- (2) アサギマダラはアゲハに比べて後翅中室の鱗粉密度が低く、そこから体温を逃がすと同時に、はばたき回数も少ないため、体温上昇を抑制している。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、瀧脇正樹氏（九州工業大学大学院情報工学研究院）、高橋亮治氏（愛媛大学大学院理工学研究科）に貴重な指導助言・情報提供をいただいた。また、株式会社日立ハイテクノロジーTM3030を用いた電子顕微鏡画像撮影に際し、玉井洋介教諭（愛媛県立今治西高等学校生物部顧問）に研究協力をいただいた。以上3氏に心から謝意を表す。

8. 参考文献

- ・池田功輝・丸田明日香・河野克矢(2017)「体温から見るアサギマダラ *Parantica sita* の行動生態」日本昆虫学会第77回大会講演要旨 p. 95 (PJ04)
- ・井手純也(2012)「昆虫の体温と行動」『昆虫と自然』ニューサイエンス社, 47(13), p2-3.
- ・白水隆(2006)『日本産蝶類標準図鑑』学習研究社, p. 9
- ・花岡龍之介・山崎豊・白石浩都・中嶋滉(2019)「四国におけるアサギマダラの飛翔ルートに及ぼす風の影響」『平成30年度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, p. 19-20.