



カイコパート6 飛べ！カイコ！III～カイコの飛翔能力消失の謎に迫る！～

つくば市立竹園東中学校
2年 八田 曉美

1、研究の動機

私がカイコと出会ってから今年で6年が経つ。かつて近代日本を支えた養蚕業は、今もなお大切な文化として皇室でも受け継がれている。カイコはけっして感情表現の薄い、ただの昆虫などではない。6年間カイコと過ごしていると、カイコと気持ちが通じ合う瞬間がたくさんあったように思う。私にとっては犬と同じくらい人を癒す、アニマルならぬインセクトセラピーにもってこいの大切なパートナーだ。

カイコは上質な絹糸を取ることを目的に、野蚕であるクワコが家畜化されて誕生した。その改良の中で、飛翔能力を失うことになった。カイコ蛾は食べることも飛ぶこともできず、ただ子孫を残すためだけに羽化して来るはかない生き物だ。「そんなカイコを大空に飛ばしてあげたい！」という夢を持ち、一昨年からカイコの表現型で飛翔能力を持つカイコの系統作りに挑戦してきた。結果、カイコとクワコを2回戻し交配することで得られたF₂の中で、カイコの表現型かつ飛翔能力を持つ個体をさらにカイコとかけあわせることで、F₃ではすべてがカイコの表現型となり、かつほぼすべての雄で飛翔能力が見られ、夢の系統作りに大きく近づけることができた。

これまでの研究で、飛翔能力に大きく関係する形態学的特徴として、「**体重の軽さ**」と「**胸の発達**」が考えられた。カイコは飛翔能力を持たないが、翅の形態はクワコとほぼ同じである。カイコも体重が軽ければ、飛翔することは可能なのだろうか。また、胸の発達の違いは、本当に飛翔筋の発達によるものなのだろうか。



昆虫の飛翔能力の消失について、「翅の萎縮」「飛翔行動の消失」「飛翔筋の萎縮」の3つのうち、どれか1つ以上が見られると飛翔能力が消失すると、クワガタの研究をしている先生から聞いた。そこで、本研究では、カイコ・クワコ・ハイブリッド (F₁)・F₄の個体において、この昆虫の飛翔能力消失の3つの条件について検討し、カイコで飛翔能力がほとんど見られない理由に迫ることを目的とした。

2、研究の目的

本研究は、昆虫の飛翔能力消失の3つの条件においてカイコで検討し、飛翔能力がほとんど見られない理由を解明する。

【昆虫の飛翔能力消失の条件】

条件1：「翅の萎縮」に迫る！

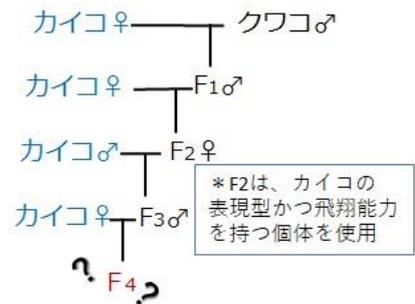
- ・4種類の系統(カイコ・クワコ・F₁・F₄)の展翅標本を作製し、翅の形状を比較する。
- ・翅の総表面積と、体重に対する翅表面積を算出し、翅の萎縮の程度を比較する。

条件2：「飛翔行動の消失」に迫る！

- ・F₃まで継続した高い飛翔能力が、F₄ほどの程度遺伝するのかを調べる。
- ・フライトミルを使用した潜在的飛翔可能速度の計測により、4種類の系統の飛翔行動の程度を比較する。
- ・翅の表面積と潜在的飛翔可能速度の相関について検討する。

条件3：「飛翔筋の萎縮」に迫る！

- ・4種類の系統の解剖を実施し、飛翔筋の発達の程度を評価し、胸の発達と飛翔筋の発達の関係を調べる。
- ・飛翔筋の組織切片を観察することで、筋組織の発達の違いと胸の外骨格の発達の理由を解明する。



3、研究の方法・予想・結果・考察

≪研究1：条件1「翅の萎縮」と条件2「飛翔行動の消失」に迫る！≫

【方法】

- ① 以下の4種類の卵を孵化させ、飼育する。(各約50頭)
カイコ：NB1系統 (NBRPからの提供)
クワコ (NBRPからの提供)
F₁：カイコ×クワコで得たもの
F₄：昨年度誕生したF₃の個体×カイコで得たもの (A18-46×カイコ)
- ② 誕生した4種類の蛾の体重と体長を測定する。
- ③ 蛾を100cmのジャンプ台から飛ばし、壁か地面に止まるまでの飛翔時間と飛翔距離を測定し、Flying Level (FL) を求める。
- ④ 作成したフライトミル(図1)を使用して潜在的飛翔可能速度を測定する。(測定は、羽化翌日に実施。) フライトミルで得られた結果をもとに、それぞれの潜在的飛翔可能速度を算出する。(10回転にかかる時間を計測し、分速を算出。)
- ⑤ 酢酸エチルによる安楽死後に展翅標本を作製し、蛾の総翅面積を求める。(ImageJ使用)
- ⑥ 4種類の蛾において、「潜在的飛翔可能速度」と「翅の表面積」・



図1：フライトミル

Flying Level (FL)

- 0：落下
- 1：1秒未満もしくは1m未満
- 2：1～5秒もしくは1～5m
- 3：5秒以上もしくは5m以上

「実際の飛行能力」の関係について調べる。また、F3まで遺伝した高い飛行能力が、F4でどの程度発現するのかを調べる。

【結果】

1) 翅の萎縮

【翅の形状比較】

飛行能力を持たない系統（カイコ、F4飛行不能個体）は、飛行能力を持つ系統（クワコ、F1、F4飛行個体）と比較して前翅の切れ込みが浅い可能性が考えられた。

【蛾の総翅面積と、体重あたりの翅面積】

翅の総表面積は、クワコで小さくなりカイコで大きくなっていった。しかし体重に対する翅面積で比較すると、飛行能力を持たないカイコ・F4は、飛行能力を持つF1・クワコと比較して、体格に対する翅面積が小さいことが分かった。（図2）

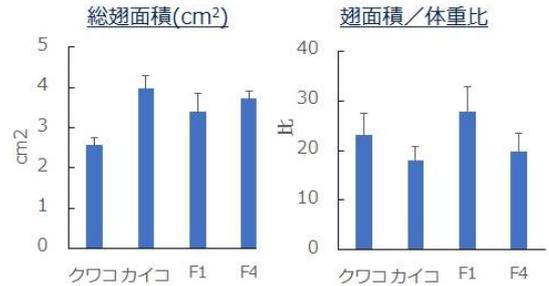


図2：翅の総表面積と体重に対する翅面積

2) 飛行行動の消失

【F4への飛行能力の遺伝】

オスにおいて、F3まで高い割合で発現した飛行能力は、F4になると急激に低下することがわかった。また、メスでは戻し交配が進むにつれて飛行能力は次第に低下し、F4ではすべての個体において失った。

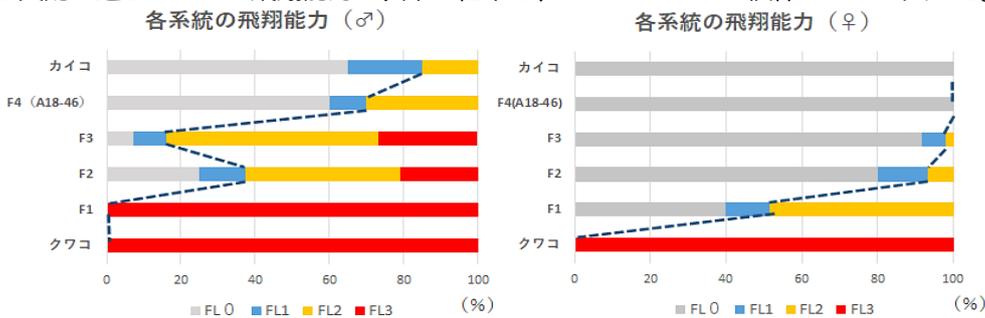


図3：各系統の雌雄別飛行能力

【4系統の潜在的飛行可能速度】

潜在的な飛行可能速度はカイコで38.5m/minと、クワコやF1と比較して明らかに遅くなった。しかし、飛行能力をもたないカイコでも、フライトミルを回すことが可能なことがわかった。（図4）

また、「翅の表面積」と「飛行速度」の関係について、カイコとクワコで比較すると、翅の表面積自体はカイコの方が大きいですが、飛行速度は遅くなった。

【翅面積と飛行速度の関係】

飛行能力が見られたクワコ、F1、F4では翅面積が大きくなるほど飛行速度が速くなる正の相関が見られたが、飛行能力がほとんどないカイコでは、同様の傾向は見られなかった。（図5）

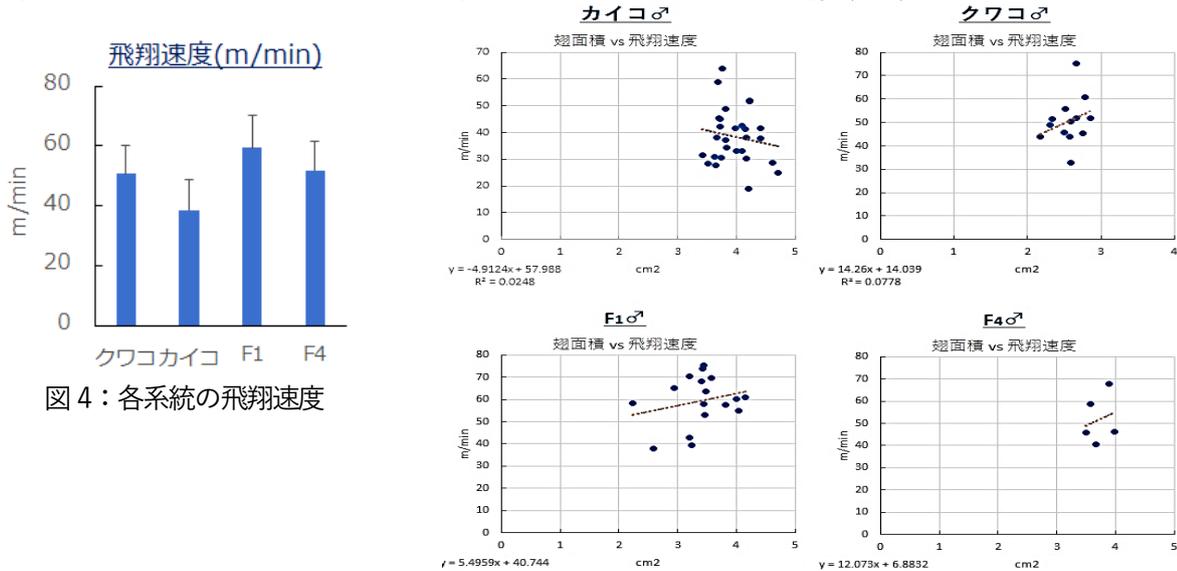


図4：各系統の飛行速度

図5：各系統の翅面積と飛行速度の関係

【考察】

【戻し交配による飛翔能力の消失】

クワコとカイコの戻し交配を繰り返すと、F4で急激に飛翔能力が低下することがわかった。

【翅の萎縮】

飛翔能力をほとんど持たないカイコでは、体格に対する翅面積が小さく、クワコなどの飛翔可能な系統に比べて翅が萎縮している可能性が考えられた。

【飛翔行動の低下】

カイコもフライトミルを回転させられたことより、飛翔に必要な「揚力」、「推進力」のうち、「推進力」につながる翅の動きが可能であることがわかった。また、カイコはクワコより翅面積が大きい飛翔速度が他の系統と比較して明らかに遅く、翅面積と飛翔速度に正の相関が見られなかったことから、カイコは他の系統に比べて推進力につながる翅の羽ばたきの効率が悪いことがわかった。以上のことから、カイコでは飛翔行動の低下がみられることが考えられた。

《研究2：「飛翔筋の萎縮」と胸の外骨格発達の関係に迫る！》

【方法】

- ① 実験1で誕生した4種類の蛾を安楽死させて展翅作業をした後、すぐに冷凍保存をする。
- ② 鋏で蛾の頭、左右翅、腹を切り落とす。
- ③ 腹と胸の境を70%エタノールで浸し、キムワイプで余分なエタノールを吸い取る。
- ④ カメラで撮影する（大学院生オリジナル反射板付き一眼レフカメラ）
- ⑤ ImageJを使用して背腹筋、背縦走筋の胸の断面積に対する割合を求めて定性評価をおこない、4種類の蛾での発達の度合いの違いを調べる。

【評価方法】

- 1：飛翔筋が萎縮している（背縦走筋：15%未満、背腹筋：30%未満）
- 2：飛翔筋が中程度萎縮している（背縦走筋：15~20%、背腹筋：30~50%）
- 3：飛翔筋が発達している（背縦走筋：20%以上、背腹筋：50%以上）

- ⑥ カイコとクワコの胸の切片を顕微鏡で観察し、飛翔筋組織を観察する。（パラフィン包埋、HE染色）

【結果】

1) 胸部冠状断での解剖による飛翔筋の観察と飛翔筋の定性評価

飛翔筋である背縦走筋、背腹筋の両方において、クワコで飛翔筋の割合が一番大きくなっていて、F1で割合が高く、F4で減少し、カイコではクワコの約50%程度と一番少なくなっていた。（図6、表1）



図6：胸の解剖による飛翔筋観察

表1：胸に占める飛翔筋の割合算出と評価

種類	雌雄	背縦走筋 (赤)		背腹筋 (青)	
		割合 (%)	評価	割合 (%)	評価
カイコ	♂	12	1	23.4	1
	♀	9.2	1	27.9	1
クワコ	♂	24.2	3	53.2	3
	♀	21.7	3	52.4	3
F1	♂	17.9	2	41.9	2
	♀	21.4	3	42.6	2
F4	飛行個体	15.7	2	41.8	2
	飛行不能個体	17.3	2	32	2

2) 顕微鏡による、飛翔筋組織の観察

背縦走筋・背腹筋の両方において、カイコでは筋繊維間に隙間が多く空いていて並びが雑な様子が見られたが、クワコでは密に集まって隙間も少なくきれいに配列している様子が見られた。

また、筋繊維断面（背縦走筋）では、クワコは均一な形状をしているが、カイコは、大小不同のばらばらな構造をしていた。

カイコ・クワコ両方において、背腹筋が外骨格に付着している様子が観察された。(図7)

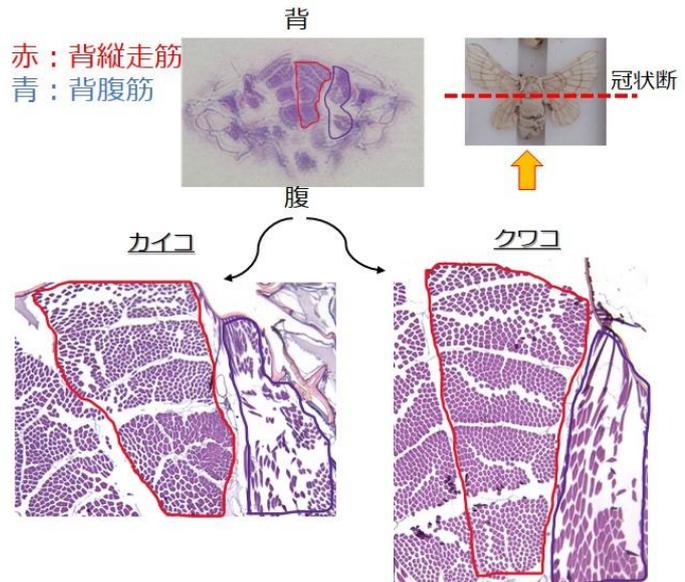


図7：胸の組織切片による飛翔筋

【考察】

断面積に対する飛翔筋の割合から、飛翔能力を持つ個体は飛翔能力を持たない個体に比べて、飛翔筋の割合が高くなっていった（特に、クワコ雌雄、F1雌）。このことから、飛翔能力を持つ個体は飛翔筋の割合が高く、飛翔能力を持たないカイコでは飛翔筋の割合が明らかに低くなっていることがわかった。

また組織切片の観察から、カイコは背縦走筋に隙間が多くクワコは隙間が少なかった。よって、カイコよりクワコの方が筋肉の密度が高く飛翔筋が発達しており、カイコは飛翔筋の発達が低いと考えられた。

さらにクワコとカイコでは、背腹筋が外骨格に付着している様子が見られた。飛翔筋は大きく2種類に分けられる。飛翔筋が直接翅の基部に付着する「直接飛翔筋」と、飛翔筋が外骨格に付着する「間接飛翔筋」である。今回の観察から、クワコやカイコの飛翔筋が間接飛翔筋であることが確かめられた。

間接飛翔筋のうち、今回観察した背縦走筋は、体軸前後方向に結ぶ筋肉で、翅の打ち下ろしを行う。一方、背腹筋は背と腹をつなげる筋肉で、背板を押し下げることで翅を持ち上げ、翅の振り上げをおこなう。飛翔行動を持つクワコでは、この飛翔筋が発達することによって、胸の外骨格が発達したのだと考えられた。クワコでは外骨格が発達することで、背腹筋の収縮時に胸を大きく縮めることができるので、翅の振り上げ幅が大きくなり、より飛翔能力を増しているのではないかと考えられた。(図8)

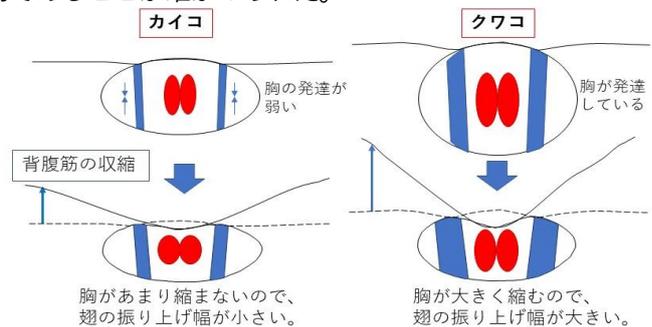


図8：カイコとクワコの飛翔時の模式図

4、結論

カイコは、昆虫の飛翔能力消失の条件である「翅の萎縮」「飛翔行動の低下」「飛翔筋の萎縮」のすべてに当てはまることが考えられる。また、この3つの条件と併せ、昨年度の研究より「体重の軽さ」もカイコの飛翔能力消失の原因の1つと考えた。さらに、カイコは飛翔能力をほとんど持たないが、推進力を生み出す翅の動きができる可能性が考えられる。また、クワコで胸の外骨格が発達しているのは、飛翔筋が発達しているためであることが考えられる。

5、感想

「カイコも飛翔するための翅の動きができる！」カイコ蛾がフライトミルをすいすい回した時、私はすごく感動した。なぜなら、飛翔行動ができないカイコは、フライトミルを回せないと思っていたからだ。カイコも、飛翔の「揚力」「推進力」のうち、「推進力」を生み出す動きが実は可能であることがわかった瞬間は本当に驚いた。でも、フライトミルを使った実験結果は、あくまでも蛾を吊るすというイレギュラーな状況下での「推進力」であって、「真の推進力」とイコールかどうかは慎重に考えないといけないと知り、実験装置を使って生物を研究し解釈することの奥深さを感じた。

「甲虫で、飛翔能力の消失が種の分化を促進した」という、京都大学の発表を読んだ。これは、飛翔に費やすエネルギーを繁殖にまわしたことによるものだという事だ。カイコは、家畜として改良されたことで飛翔能力を失った。実際、カイコの産卵数はクワコと比較して多い。もしかしたらカイコも飛翔能力を失うことで得をしたことがあるのかもしれない。来年度はこの、飛翔能力と繁殖能力の関係についても迫ってきたい。