



カイコガの体内機能の進化

～エリートカイコガの変遷～

福島県立会津学鳳高等学校 SSH探究部 生物班

3年：相原健志 佐藤智輝

1年：菅原 駿 玉川和希 塚目慎也

畑 悠希 星 貴之

1. 研究の動機

カイコガは、絹糸を得るため人間が家畜化した昆虫である。約1万年におよぶ養蚕の歴史の中で、人間はより優れた品種を得る目的で選別と育種を行ってきた。

会津は古くから養蚕の一大拠点であり、かつて本校に隣接する場所に養蚕試験場があった。そのような経緯で地元の養蚕の歴史を調べる機会があり、現代品種は明治時代のものと比較すると2倍以上の長さの絹糸を作り出せるよう改良されているという興味深い事実を知った。その原因を確認するため調査を続けた結果、カイコガに関する研究は個々の品種の飼育に関する内容が多く、生体機能の進化に関する研究報告を見出すことができなかった。そこで、我々はこの原因を調査し、絹糸生産能力の向上の目的で人間が経験的に行ってきた選別が、カイコガの体内機能にどのような変化をもたらしたのかを科学的に解明することにした。

2. カイコガの特徴

カイコガ（学名：*Bombyx mori* (Fig.1)）は、鱗翅目カイコガ科に分類される昆虫で、完全変態により孵化後26日で成虫になる。桑葉を唯一の食草にし、蛹化の前に絹糸を何重にも巻いて作られる繭を形成する。この絹糸は衣服の素材として適しているため、人間は古来より養蚕を行ってきた。



Fig.1 カイコガ

カイコガの幼虫は、桑葉を唯一の食草とし水分も桑葉から得ている。桑葉は他の植物と比較して多量のタンパク質を含有する。このため多くのガの幼虫は桑葉を食草とすることができない。タンパク質の消化により発生するアミノ酸は、生体内に余剰に蓄積されると遊離アミノ酸として代謝を阻害し、中毒症状を引き起こすためである。これに対しカイコガはアミノ酸を結晶タンパク質のフィブロイン、つまり絹糸に変換して、体外に排出することで桑葉の摂食を可能としている。言い換えれば、カイコガにとって絹糸は糞や尿と同様の排泄物であり、人間にとってのカイコガは、桑葉という原料から絹糸という製品を合成する生物工場といえる。

カイコガの幼虫期間は約20日で、4回の脱皮を経て成長していく。この間、成長に伴い体内の様子も変化していく。Fig.2は、5齢幼虫を背面から解剖した模式図である。口から肛門まで一直線に貫く消化管が、体内のほとんどを占めている。赤く示した部分が絹糸腺で、絹糸を合成・貯蔵している器官である。絹糸腺は、5齢期間中に著しく発達する。

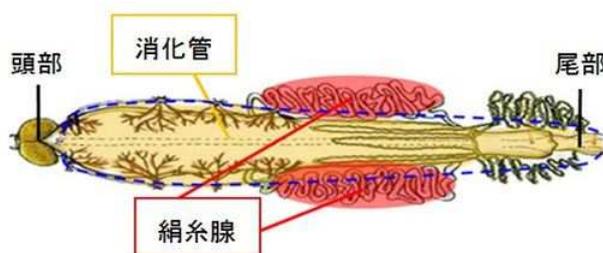


Fig.2 カイコガ 5 齢幼虫を背面から解剖した模式図
赤く示した部分が絹糸腺。

3. 研究の概要

カイコガ幼虫の桑葉の摂食行動は、桑葉に存在する化学物質に起因して、反射的・断続的に行われる。事実、幼虫期間は4回の「眠」（脱皮の準備期間で一切摂食しない）を除いて昼夜の区別なく摂食し続ける。したがって、我々はカイコガの摂食能力は消化産物のアミノ酸の処理能力、すなわち絹糸腺のタンパク質合成能力によって決定すると考え、以下の仮説を立てた。

仮説：現代品種は、絹糸腺のタンパク質合成能力が発達したことにより、多くの桑葉を摂食できるようになった。

繭（以後は「絹糸」と表記する）は、その成分の97%がタンパク質である。我々は、桑葉・糞・蛹・絹糸のそれぞれの要素に含まれるタンパク質の質量を、その成分であるアミノ酸を定量分析することで求めた。これにより、カイコガが摂食した桑葉に含まれるタンパク質が、糞・蛹・絹糸のそれぞれにどれだけ移行したかを調査した。そして、絹糸への移行率から各品種の絹糸合成能力を求め、摂食量と比較した。

材料と方法：育成された時期が想定でき、飼育が容易な3品種を設定した。(Table1) 試験区は、各品種共に20頭×2連、計40頭を用いた。飼育条件及び飼育時期は以下の通りである
温度 25℃・湿度 60%の暗所（注1）

飼料：桑葉「しんいちのせ」

飼育期間：2011年10月19日～2011年11月18日（孵化～5齢幼虫末期）

調査期間：2011年11月8日～2011年11月18日（5齢幼虫期間）（注2）

（注1）予備調査として事前に暗所と明所でカイコガを飼育し、比較対照した結果、カイコガの成長に差が生じないことが判ったため、環境の変動が少ない暗所で飼育を実施した。

（注2）カイコガは、5齢幼虫期間に一生分の桑葉の8～9割を摂食し、絹糸腺もこの時期に著しく発達するので、これに合わせて調査期間を設定した。

Table1 調査対象とした3品種

時代	絹糸長	品種名	コード番号	幼虫	絹糸・蛹
室町時代	300m	大造	N17		
明治時代	595m	小石丸	N18		
現代	1300m	日 140× 支 141	N40×N41		

調査① 桑葉の摂食量を調査した。各試験区で給餌した桑葉及び次回の給餌（24時間後）に食べ残されていた桑葉の質量を測定した。質量の減少分からさらに桑葉が蒸発によって失った水の質量を差し引いた値を摂食量とした。このようにして得られる摂食量を、下の計算式に示す。

$$\text{摂食量} = \text{桑葉の質量変化} - \text{桑葉からの水の蒸発量}$$

調査② 糞の排出量を調査した。各試験区で給餌の際に24時間分の糞を採取して、その質量を測定したものを糞の排出量とした。

調査③ 繭の質量を調査した。蛹化3日目の絹糸を切除して、内部の蛹本体と外側の絹糸（繭層）を分離後、各々の質量を測定した。

調査④ 各要素（桑葉・糞・蛹・絹糸）1g中のタンパク質含有量を調査した。初めに各試料10mgを粉砕し、6M塩酸10mlを加え、減圧下で24時間作用させて加水分解した。次に分解により得られたアミノ酸を、SHIMADZU LC-2010HTを使用したOPAポストカラム誘導体化法により種類ごとに定量した。各アミノ酸の定量値の合計を、各要素1g中のタンパク質含有量として求めた。

$$\begin{aligned} \text{各要素 1g 中のタンパク質含有量} \\ = \text{各要素 1g 中のアミノ酸含有量の合計} \end{aligned}$$

調査⑤ 摂食した桑葉に含まれるタンパク質の各要素（糞・蛹・絹糸）への移行量を調査した。調査①～③と調査④で得られた結果を、下の計算式に代入して各要素の総タンパク質量を求め、絹糸合成能力を比較した。

$$\begin{aligned} \text{総タンパク質量} \\ = \text{各要素（糞・蛹・絹糸）の質量} \times \text{1g 中のタンパク質含有量} \end{aligned}$$

4. 研究の結果

(1) 日別の摂食量の変化 (調査①の結果)

Fig. 3は、各品種で5齢期の幼虫1頭における1日あたりの摂食量の推移を示したものである。全ての品種で、成長に伴い摂食量が日ごとに増加していることが判明した。また、1日目の摂食量は、どの品種においても1頭あたり1g以下で大差はなかったが、3日目からは現代品種と古い品種との間に明らかな差異が認められた。

現代品種のN40×N41(Table1)は、雄の体表に斑紋が無く、雌雄の判別が容易なため、別々に調査した結果、摂食量は雌が雄に比べやや上回っていた。また、N17とN18は7日目に蛹化し始めたが、現代品種が蛹化し始めたのは8日目であった。

Fig. 3の結果をもとに、毎日の摂食量を累計した総摂食量をTable2に示す。古い品種N17とN18に比べ、現代品種N40×N41が2倍ほどの値を示した。

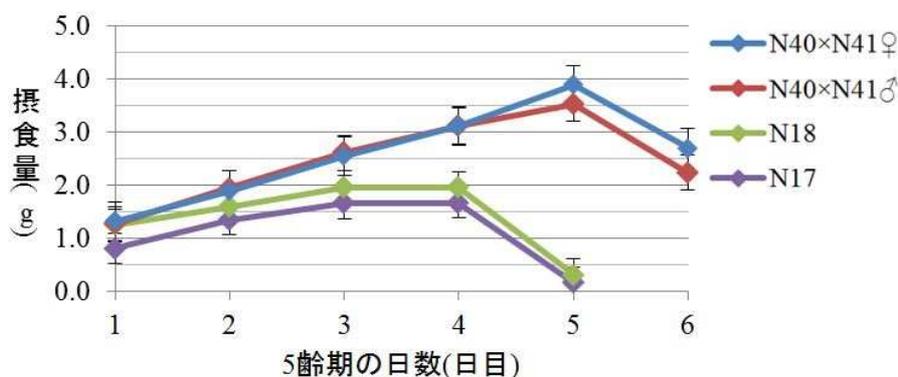


Fig.3 日別摂食量の推移 (1頭あたり)

Table2 総摂食量の比較 (1頭あたり)

	総摂食量(g)
N17	5.65
N18	7.62
N40×N41	15.10

赤字は現代の品種

(2) 日別糞排出量の変化 (調査②の結果)

Fig. 4は、各品種で5齢期の幼虫1頭が1日に排出する糞量の推移を示したものである。糞排出量は摂食量に連動し増加していた。また、3日目までの排出量は、どの品種においても1頭あたり1.5g以下で大差はなかったが、4日目からは、現代品種と他種との間に明らかな差異が認められた。総摂食量と同様に5齢期間中の糞量を累計した総糞量をTable3に示す。現代品種(N40×N41)は他種と比較して2倍以上の高い値を示した。

なおこの調査に関連して、摂食物(桑葉)が排泄されるまでの経過時間を、解剖によって調べた結果、約2時間を要することが判った。

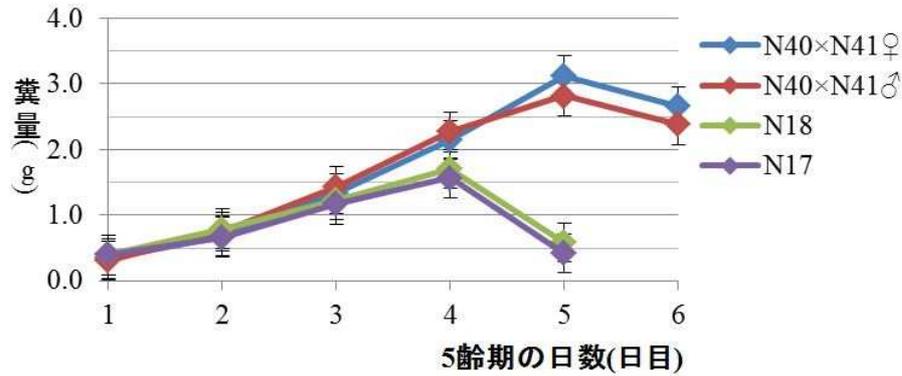


Fig.4 日別糞排出量の推移の比較 (1頭あたり)

Table3 総糞量の比較 (1頭あたり)

	総糞量(g)
N17	3.96
N18	4.99
N40×N41	10.06

赤字は現代の品種

(3) 蛹と絹糸の質量 (調査③の結果)

Table4 は、各品種 1頭あたりの蛹本体と絹糸の質量を示したものである。蛹質量は、各品種共にほぼ 1g と大差はなかったが、絹糸質量については、現代品種の質量が他種の 3 倍以上であった。

Table4 蛹・絹糸の質量比較 (1頭あたり)

	蛹本体(g)	絹糸(g)
N17	0.94	0.12
N18	1.01	0.15
N40×N41	1.18	0.47

赤字は現代の品種

(4) 桑葉・糞・蛹・絹糸のそれぞれ 1g 中のアミノ酸含有量 (調査④の結果)

Fig. 5 は、桑葉及び N40×N41 の糞と蛹について、Fig. 6 は各品種の絹糸について、1g 中に含まれるアミノ酸を、その種類ごとに質量表示したものである。これは、各要素のタンパク質をアミノ酸に分解後、定量して求めたものである。

桑葉と糞に含まれる各アミノ酸成分に差異は認められるものの、それほど大差があるとは言えないものであった。一方、蛹中のアミノ酸はグリシンとアラニン及びセリン・ロイ

シンが大きく減少しており (Fig. 5)、絹糸 (Fig. 6) ではグリシン・アラニン・セリン・チロシンが突出した構成となっていた。

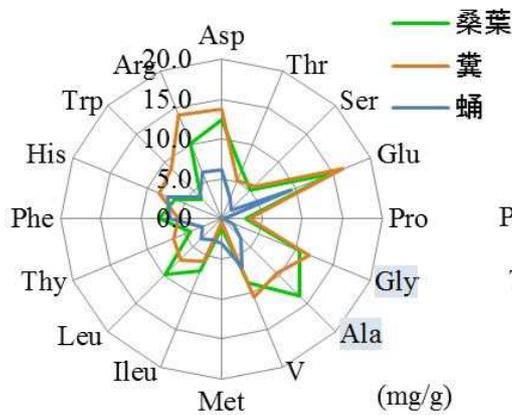


Fig.5 (桑葉・糞・蛹)1g 中のアミノ酸含有量

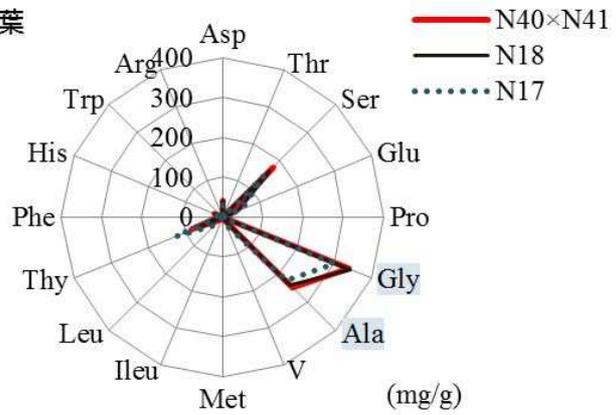


Fig.6 絹糸 1g 中のアミノ酸含有量

アミノ酸の定量は N17 と N18 についても実施した。Fig. 5, 6 で求めた各要素 (桑葉・糞・蛹・絹糸) ごとに、1g 中の各種アミノ酸含有量を合計した値を、1g 中のタンパク質含有量として Table5 に示す。

糞中のタンパク質量は N17 でやや低い値を示したものの、各要素共に品種間で大差はみられなかった。これを各要素 1g 中のタンパク質の質量として質量%で示すと、桑葉と各品種の糞は 11~14% とほぼ同様の値であるのに対して、絹糸は 97% 以上と、そのほぼ全てがタンパク質で占められていた。

Table5 各要素 (桑葉・糞・蛹・絹糸) 1g 中のタンパク質含有量

品種	桑葉(mg/g)	糞(mg/g)	蛹(mg/g)	絹糸(mg/g)
N17	124.5	112.7	71.1	986.6
N18		132.7	67.8	970.2
N40×N41		133.2	86.2	970.0

赤字は現代の品種

(5) 摂食した桑葉に含まれるタンパク質の各要素への移行 (調査⑤の結果)

実際の各要素の総タンパク質量は、各要素の質量 (Table2, 3, 4) に、各々の 1g 中のタンパク質含有量 (Table5) を掛け合わせて求められる。各々の値を算出した結果を Table6 に示す。現代品種の N40×N41 が N17 と N18 に比べて、桑葉から摂取した総タンパク質量及び糞に含まれる総タンパク質量では約 2 倍、絹糸タンパク質の質量については 3 倍以上の高い値を示したが、蛹に含まれる総タンパク質量では大差がなかった。

各要素の 1g 中のタンパク質含有量 (Table5) が、3 品種間で大差ないことから、Table6 の 3 品種間の総タンパク質量の差異は各々の質量差が原因であることが明らかとなった。

Table6 各要素 (桑葉・蛹・絹糸) 中の総タンパク質量 (1 頭あたり)

品種	桑葉(mg)	糞(mg)	蛹(mg)	絹糸(mg)
N17	703.4	446.4	66.9	118.4
N18	948.7	662.1	81.0	146.4
N40×N41	1879.6	1273.1	80.0	456.0

Fig.7 は、Table6 の結果をもとに、各品種 1 頭あたりの桑葉・蛹・絹糸について、総タンパク質量をグラフ化して比較したものである。蛹に含まれるタンパク質量は、言い換えれば、カイコガ自身が必要とするタンパク質量である。これは 3 品種とも大きな差異はない。絹糸については、現代品種が他種の 3 倍以上のタンパク質を絹糸に移行していた。

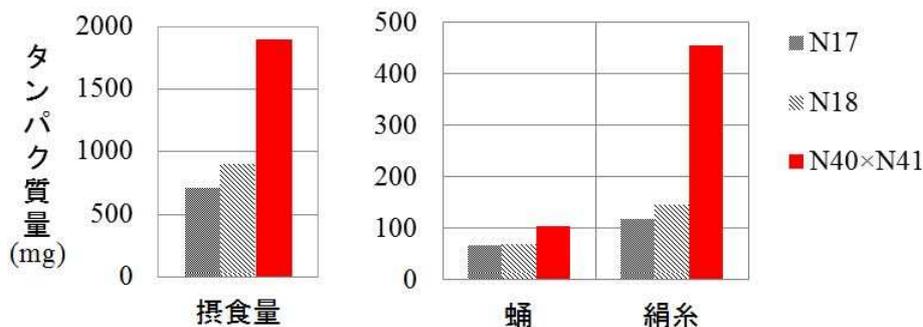


Fig.7 各要素 (桑葉・蛹・絹糸) 中の総タンパク質量 (1 頭あたり)

5. 考察

(1) 摂食量と糞排泄量の調査を通して、カイコガの摂食行動は、昼夜の区別なく行われていることが判った。したがって摂食物 (桑葉) は、新たな摂食物によって、太い消化管内を後ろへ押し出されるように移動していると考えられる。また、Fig.5 より、葉と糞は各々 1g に含まれるアミノ酸成分とその質量がほぼ同様であることから、カイコガは消化管において、アミノ酸の選択的な吸収は行っていないと考察した。

(2) 絹糸を構成するアミノ酸成分の調査結果 (Fig.6) では、グリシン、アラニンとセリンが突出していた。桑葉中にもこれらは多く含まれており (Fig.5)、まさに絹糸タンパク質のフィブロインは余剰アミノ酸の排泄手段であると考えられる。

(3) 摂食した桑葉に含まれるタンパク質の移行調査の結果 (Fig.7) より、人間が品種改良により大きな繭を選抜し続けた結果、現代品種は Fig.8 に示すように他の 2 種と比較して絹糸タンパク質の合成能力が 3 倍以上高くなり、その結果として大量の桑葉摂食が可能になったと考察できる。

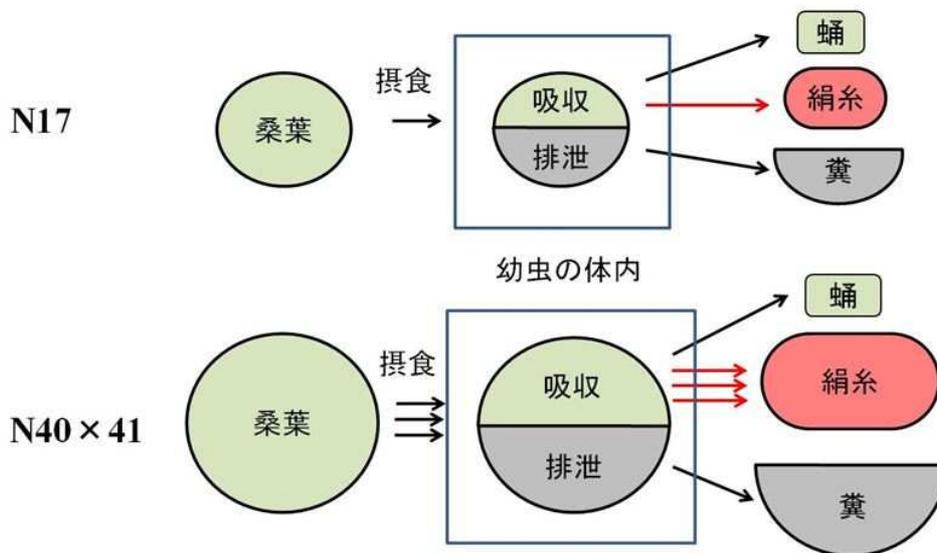


Fig.8 タンパク質の推移の概念図

6. 結論

カイコガの摂食は本能行動であり、余剰アミノ酸を体内に蓄積できる量には限界がある。摂食行動はそのバランスのもとで成立している。したがって、摂食量と余剰アミノ酸の排泄能力が個々に増加したのではなく、排泄能力の発達が必然的に摂食量の増加を引き起こしたといえる。

より長い絹糸を求め行われた経験的なカイコの選別と育種の歴史は、科学的に考察すると、絹糸合成能力つまりは体内の余剰アミノ酸の排泄能力を高めることであった。

7. 今後の展望

今回は、桑葉（入口）から絹糸（出口）のタンパク質移行により調査・考察した。今後は、解剖により直接5齢期の絹糸腺の質量変化と絹糸腺内部のアミノ酸の定量を行い、今回の結果の検証を行いたい。

8. 参考文献

- ・堀内彬明(1991), 絹を生むカイコ, 40頁, 農山漁村文化協会
- ・小山長雄(1958), 昆虫の実験, 255頁, 陸水社
- ・京都大学農学部農芸化学教室(1983), 新改版 農芸化学実験書(1~3巻), 1424頁, 京都大学農学部編産業図書
- ・Neill A Campbell / Jane B Reece(2007), キャンベル生物学, 1494頁, 丸善株式会社

謝辞

本研究を行うにあたり、東京農工大学農学部大学院教授 蜷木理様より蚕種の提供と飼育指導をいただきました。また、福島県農業総合センター様からは桑葉の提供をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。