

最新刊

シルクの第一人者が紐解く、絹糸昆虫のすべて

もっと知りたい、絹糸昆虫

— 家蚕と野蚕の魅了とシルク利用の広がり —

● 著者：塚田 益裕 (元 信州大学繊維学部 教授)

小泉 勝夫 (元 シルク博物館 部長)

共著

● A5判 256 ページ カバー巻き

● 発行：(株)ファイバー・ジャパン

● 定価：3,300 円 (本体 3,000 円+税 送料 500 円別)

多目的にご活用下さい。

天然繊維・合成繊維開発に 公設試験・各種検査機関に
染色加工、商品企画開発に 大学・研究者、化粧品業界に

本邦初の写真満載！ 本文カラー刷り



「発刊に寄せて」より

カイコは不思議な昆虫です。カイコが吐くシルク(繭糸)は魅力的なマテリアルであり、その世界は奥深く、私たちの好奇心を強く喚起するものです。

……本書は、カイコや野蚕など絹糸昆虫の幅広い種に関して、その特徴や生態といった基本的な知識から、観察や実験の方法、応用に関する逸話などを紹介しています。読者が自身の興味に合わせてカイコやシルクとの関係をつくってゆくために必要な内容が網羅されており、これまでに類を見ない書となっています。……カイコや野蚕のライフサイクル、絹糸の構造・物性、野蚕とカイコの共通点や相違点をわかりやすく比較しながら、さらに絹糸の化学加工・物理加工、繰糸や染色・仕上げ、その応用まで、数多くの写真・図版を用いて、若い人たちにも理解できるように丁寧に解説をされています。また、これまでの著者の国際的な活動や社会貢献、実験でのエピソードなども紹介されており、これからの若い研究者・技術者のロールモデルとして参考になる部分が多くあります。専門家だけでなく大学生や高校生・一般市民にとって、きちんとした学術的内容をわかりやすく解説した書となっており、今後、この分野のシチズンサイエンスを広げてゆくためにも貴重な図書ということが出来ます。

信州大学繊維学部

学部長 森川 英明

● お申し込みは — 裏面 FAX申込書またはHP/E-mailで!! <https://www.fiberjapan.co.jp>

「蚕糸科学」による繊維産業の新時代を拓く この1冊!!

本書の内容

[発刊に寄せて]

……信州大学 繊維学部長 森川 英明

第1章 野蚕に関する総論

- (1) 絹糸昆虫に関する基礎情報
- (2) 完全変態をする絹糸昆虫
- (3) 絹糸昆虫の生態
- (4) カイコの祖先
- (5) クワコの種類と染色体
- (6) カイコとクワコの化性
- (7) カイコの派生系統
- (8) 野蚕の体色

第2章 絹糸昆虫とその繭糸特性の概観的な解説

2.1 絹糸昆虫の卵、幼虫、繭と蛹そして成虫

- (1) 絹糸昆虫が摂食する植物葉
- (2) カイコの脱皮
- (3) カイコの絹糸合成能力
- (4) カイコの繭づくり
- (5) カイコの吐糸
- (6) 羽化（成虫化脱皮）
- (7) 頭部の構造
- (8) 絹糸昆虫の蛾の配偶行動

2.2 野蚕絹糸とカイコ絹糸の染色性

- (1) 野蚕絹糸の構造特性
- (2) アミノ酸組成と染色性
- (3) 酸性染料モデル
- (4) 絹糸の染着量
- (5) 絹糸特性の基礎知識
- (6) 絹糸のボイド
- (7) カイコと野蚕絹糸の引っ張り特性

2.3 野蚕の生態

- (1) 野蚕の生活史
- (2) 絹糸昆虫の卵と繭
- (3) 野蚕の生息地
- (4) 国内に生息する野蚕の生態
- (5) テンサン
- (6) サクサン
- (7) ヨナグニサン
- (8) カイコの繭と野蚕繭の形状

第3章 国内に生息あるいは輸入種による繊維用の野蚕

3.1 テンサン

- (1) テンサンの呼称
- (2) 飼育上の留意点
- (3) 微粒子病の検査
- (4) 学生実習によるテンサン飼育
- (5) 天敵回避のためのネット被覆
- (6) テンサンの逃避行動
- (7) テンサンの卵
- (8) テンサンの孵化
- (9) テンサンの特徴
- (10) テンサン繭の特性
- (11) テンサン繭糸の観察
- (12) 加害動物
- (13) 安曇野でのテンサン飼育
- (14) 安曇野におけるテンサン飼育と課題
- (15) テンサン繭の繰糸
- (16) テンサンによる地域おこし
- (17) テンサンとサクサンの見分け方
- (18) 幻のテンサン雌雄同体蛾
- (19) 雌雄同体の生物学的な意味づけ
- (20) テンサンの翅色の多様性
- (21) テンサンの多様な翅色
- (22) テンサン翅色が多様である仮説
- (23) テンサン用の人工飼料
- (24) テンサンシルクの産業への応用
- (25) テンサンシルクの薬用価値
- (26) 野蚕の休眠を打破する化合物
- (27) 野蚕由来の有用物質

3.2 ヨナグニサン

- (1) ヨナグニサンかヨナクニサンか？
- (2) ヨナグニサンの生活史
- (3) ヨナグニサンの繭
- (4) 精練法
- (5) 蛾の翅と触角
- (6) 幻のヨナグニサンとの出会い

3.3 サクサン

- (1) サクサンの蚕種
- (2) サクサン飼育の歴史
- (3) サクサン研究を導いた恩師
- (4) 院生時代の研究成果

- (5) サクサン幼虫と吐糸
- (6) サクサンの産卵用の籠
- (7) サクサンの孵化
- (8) サクサンの半化蛹
- (9) サクサンの繭糸表面
- (10) サクサンの繭重と繭糸長
- (11) 野蚕繭の製糸
- (12) サクサンの蛾と配偶行動
- (13) サクサンシルクの産業への応用
- (14) 野蚕絹糸の紬糸
- (15) サクサン絹糸の染色
- (16) ナノファイバー

3.4 エリサン

- (1) エリサンの生活史
- (2) エリサンの飼育史
- (3) エリサン繭の生産量
- (4) エリサン飼育が不振となった理由
- (5) エリサンセンター（タイ国）
- (6) 営繭用の族
- (7) エリサンシルクの産業への応用
- (8) 日常品の小物への利用
- (9) 低分子吸着をするエリサンシルク
- (10) エリサンシルクのナノファイバー

第4章 国内外に生息し繊維素材化が進行中、進行見込みの絹糸昆虫

4.1 ムガサン

- (1) ムガサンの生活史
- (2) ムガサン絹糸の特性
- (3) アミノ酸分析

4.2 クリキュラ

- (1) クリキュラの生活史
- (2) 見直された食害昆虫のクリキュラ
- (3) クリキュラ繭と煮繭
- (4) クリキュラの繭色

4.3 ゴノメタ

- (1) ゴノメタの生活史
- (2) 国際共同研究とゴノメタ絹糸
- (3) アミノ酸分析

4.4 シンジュサン

- (1) シンジュサンの生活史
- (2) シンジュサンの繭
- (3) シンジュサン蛾の翅
- (4) 大都市に生息するシンジュサン
- (5) シンジュサンの繭糸

4.5 ウスタビガ

- (1) ウスタビガの生活史
- (2) 威嚇音を出すウスタビガ
- (3) 特徴的な営繭方法
- (4) ウスタビガ繭の性質
- (5) ウスタビガの蛹と繭層
- (6) ウスタビガの蛾
- (7) ウスタビガの絹糸腺
- (8) シルクのナノファイバー
- (9) ウスタビガ繭採取の思い出
- (10) ウスタビガ繭の利用
- (11) ウスタビガ幼虫の体色と天敵からの回避
- (12) ウスタビガシルクの産業への応用

4.6 ヒメヤママユ

- (1) ヒメヤママユの生活史
- (2) ヒメヤママユの繭
- (3) ヒメヤママユシルクの産業への応用
- (4) ヒメヤママユシルクのナノファイバー
- (5) 繭層抽出物に含有する有用物質

第5章 国内外に生息し今後の利用に注目したい絹糸昆虫

5.1 クワコ

- (1) クワコとの出会い
- (2) クワコの生活史
- (3) クワコの繭
- (4) クワコの皮膚色と脱皮
- (5) クワコの飼育観察
- (6) クワコシルクの産業への応用

5.2 オオミズアオ

- (1) オオミズアオの生態
- (2) オオミズアオ幼虫と蛾の翅色
- (3) オオミズアオ飼育と観察
- (4) オオミズアオの繭
- (5) オオミズアオシルクの産業への応用
- (6) オオミズアオシルクのナノファイバー

5.3 クスサン

- (1) クスサンの生活史と気門
- (2) 網目状の繭

- (3) 蛾の特徴
- (4) クスサンの繭
- (5) クスサン繭の思い出
- (6) 釣り糸としてのクスサンシルクテグス糸
- (7) テグス糸を製造するための裏技

5.4 エゾヨツメ

- (1) エゾヨツメの生活史
- (2) 幼虫の特徴
- (3) エゾヨツメ幼虫の体色
- (4) エゾヨツメ蛾の翅
- (5) 昆虫を見慣れることのすすめ

5.5 アナフェ

- (1) アナフェの大型繭
- (2) 超大型繭をつくる絹糸昆虫アナフェ
- (3) アナフェの繭層
- (4) アナフェの繭糸
- (5) 社会性昆虫のアナフェ
- (6) アナフェの絹糸構造とアミノ酸分析

5.6 アゲマミトレイ

- (1) アゲマミトレイの生活史
- (2) 撮影できたアゲマミトレイ繭
- (3) アゲマミトレイの繭層構造
- (4) アゲマミトレイの繭はなぜプラチナ色を発するのか
- (5) アゲマミトレイ蛾の翅と繭利用

5.7 魅力ある野蚕利用の展望

- (1) 進展する野蚕研究
- (2) 野蚕由来の新規素材
- (3) 特異的機能の研究
- (4) 果てしない野蚕の魅力

第6章 シルクに関する面白い話あれこれ

6.1 衣料材料分野産業への応用

- (1) 落下傘に使う絹の綱糸
- (2) 転写捺染で絹繊維を染める
- (3) 絹糸を食害する昆虫
- (4) 防炎性の絹繊維製品
- (5) セリシン繊維を吐糸するカイコの品種「セリシンホープ」
- (6) 高高い絹繊維

6.2 非衣料、バイオ材料への応用

- (1) 金属イオンと結合する絹糸
- (2) 化学加工で製造した絹糸の抗菌活性
- (3) 酸素を良く透過するシルク膜
- (4) シルク表面での細胞付着
- (5) サクサン絹糸の前処理効果と化学加工
- (6) 親水性の絹繊維の応用
- (7) 絹繊維製品の撥水性を向上させる化学加工
- (8) 酵素処理で劣化するシルク膜
- (9) 土に埋設したテンサン絹糸の経時的な形態変化

6.3 絹糸昆虫に学ぶ

- (1) 絹糸昆虫の飼育からの学び
- (2) 理科教材に適する絹糸昆虫
- (3) 不思議なことが多い絹糸昆虫
- (4) 昆虫を食べる
- (5) 昆虫研究に課せられた今後の課題
- (6) タイ国・タマサット大学の卒業式への出席
- (7) 昆虫を愛する少年少女に望むこと
- (8) 絹糸昆虫と新素材開発
- (9) バイオミメティクス

野蚕などに関する文献一覧

絹糸昆虫などに関する書籍リスト

付表

索引

[コラム]

カイコの成長と齢
カイコの人工孵化法
呼称「カイコ」の由来
繭糸、生糸、絹糸
アミノ酸
テンサンの微粒子病検査
江戸時代のテンサン飼育書
日本の近代化と蚕糸業
カイコの人工飼料
精練
化学構造・二次構造
発達した養蚕業の顛末
転写捺染
グラフト加工
化学加工
試薬濃度の単位
絹糸虫の昆虫食
バイオミメティクス

購読申込書

お申し込みは FAX. 06-4950-6284

単行本「もっと知りたい絹糸昆虫」を 冊申し込みます。

会社(団体、学校)名

通信欄

所属部課

申込者名

住所

〒 -

TEL.

FAX.

本文 組見本 (1)

～5g/L 炭酸ナトリウム水溶液で4時間沸騰処理するのが望ましい精練条件である³⁾。

2.2 野蚕絹糸とカイコ絹糸の染色性

(1) 野蚕絹糸の構造特性

野蚕繭糸には、カイコの繭糸と同様、炭水化物、脂質そして色素などが含まれ、^{こうちやく}膠着物質であるセリシンの付着が見られる。セリシン量は、繭糸を加熱したアルカリ水溶液で処理する際に見られる試料重量の減少量（減少率）となる。カイコの繭糸と野蚕繭糸の周囲にあるセリシン量は、生糸重量に対して、それぞれ20%、5～6%ほどで、カイコの繭糸のセリシン量は野蚕繭糸に含まれるセリシン量より4倍ほど多い。カイコのセリシンと野蚕のセリシンの結晶構造や分子構造には差異がない。野蚕に含有するセリシンの分子形態には、分子が乱れたランダムコイルに加えて、 α -ヘリックスを十分に引き伸ばしたときの分子形態である β 構造が含まれる。カイコの繭糸と野蚕繭糸から取り出したセリシンの分子形態や熱的挙動はほぼ同一である²⁾。野蚕繭糸の周囲にあるセリシンは水に対して難溶性であるため繭糸を精練するには工夫を要する。カイコの繭糸からセリシンを除去するためには、加熱したマルセル石けん水溶液で精練するのが一般的である。野蚕繭糸では、精練性を向上させ、温度変化に対する練減率変動を抑えるため希薄炭酸ナトリウム水溶液で精練することが好ましい。野蚕繭糸を精練する際の浴比は300倍ほどが妥当である。繭層の中層部位は、3g/L 炭酸ナトリウム水溶液で、繭層の外層あるいは内層の部位は4

(2) アミノ酸組成と染色性

多種類の野蚕繭糸の中で、衣料材料として利用されるのは、テンサン (*Antheraea yamamai*) 繭糸、サクサン (*Antheraea pernyi*) 繭糸、エリサン (*Samia cynthia ricini*) 繭糸などである。野蚕繭糸を精練して調製できる絹糸からできる絹繊維製品は前もって仕上げ加工や染色をすることがある。野蚕絹糸を染色したり、野蚕絹糸に新しい機能を付与するためには化学加工が有効である。化学加工のための加工試薬は、絹糸の塩基性アミノ酸と化学反応する。野蚕絹糸の染色挙動や化学反応性を予め知っておくには、野蚕絹糸のアミノ酸組成を評価すると良い。染料の染着性に関与する野蚕絹糸構成のアミノ酸は、塩基性アミノ酸や酸性アミノ酸である。テンサン、サクサン、エリサンの絹糸に含まれる塩基性あるいは酸性アミノ酸の組成を集約したものが表2.1である。野蚕絹糸と、その対照区としてのカイコの絹糸のアミノ酸組成を比べてみよう。野蚕絹糸を構成するアミノ酸には、カイコの絹糸を形成するアミノ酸に比べてリシン (Lys)、アルギニン (Arg)、ヒスチジン (His) などの塩基性アミノ酸が多い。野蚕絹糸ではこれらのアミノ酸の合計値がカイコの絹糸に比べると3～4倍ほど多く、野蚕絹糸にはアスパラギン酸 (Asp)、グルタミン酸 (Glu) などの酸性アミノ酸がカイコの絹糸に比べて1.5～1.9倍ほど多く含まれる⁴⁾。

II

絹糸昆虫とその繭糸特性の概観的な解説

Column

繭糸, 生糸, 絹糸

繭糸と絹糸とは似た言葉のようにみえるが、全く異なる絹繊維である。カイコが吐き出した糸や繭から繰り出した1本の糸が繭糸、繰糸工程で、煮繭から繰り取ったばかりで周囲がセリシンで覆われた繊維が「生糸」である。繭糸や生糸のセリシンは、膠着物質があるため糸の感触は悪い。集束した生糸を加熱したアルカリ水溶液で煮沸するとセリシンだけが除去されて「絹糸」ができる。絹糸は、手触り感が良く、光が当たると特有の真珠光沢を示すため、古くから衣料繊維として愛用されている。

表2.1 各種絹糸のアミノ酸組成⁴⁾

	塩基性 AA*	カイコ塩基性 AA 比	酸性 AA*	カイコ酸性 AA 比
カイコの絹糸	0.181	1.0	0.355	1.0
テンサン*1	1.034	5.7	0.685	1.9
サクサン*2	0.901	5.0	0.676	1.9
エリサン*3	0.658	3.6	0.485	1.4
野蚕平均値	0.864	4.8	0.615	1.7

*単位: $\times 10^{-3}$ eq/g

・AA: アミノ酸

・野蚕平均値とは、*1、*2、*3の合計値の平均を意味する。

20

21

(9) テンサンの特徴

テンサン幼虫は大変に神経質であり、おまけに警戒心が強いので、サクサン幼虫とは違って注意深く飼育する必要がある。他の個体が近づくと噛みついたり、移動性が大きいのでよく動き回り、サクサンより飼育し難い³⁾。テンサン幼虫は群がることを嫌い、他の個体が近づくと噛みつくことがあり、少々犖犖な行動を見せる。脚（腹脚と尾脚）の把握力が大変強いので、クヌギの小枝からテンサン幼虫を無理に取り外そうとすると、昆虫の脚が小枝を強くつかんでいるので幼虫から脚がちぎれてしまうほどである。テンサンが移動する行動範囲は広い³⁾。幼虫は好んで水を飲み、4～5 齢の発育齢期で多少の差はあるが、5 齢期の最大時には、平均して1 回当たりの飲水量が1.2 mL ほどである³⁾。

食害植物を摂取しながら成長したテンサンが図3.4-1である。熟蚕期に入るとテンサン幼虫の体は次第に丸みを帯び、頭胸部を背中側にもち上げるようにして反らす行動が見られる（図3.4-2）。

(10) テンサン繭の特性

カイコは熟蚕期になると頭胸部と腹部の一部をしきりに振り動かすようにな

り、体が透けてきて^{あめいろ}鉛色になるので熟蚕になったことがわかるが、テンサンなどの野蚕幼虫は体色変化が不鮮明であるため、見慣れないと熟蚕期に近づいたことを見逃してしまう。食樹の枝の下側にぶら下がる姿勢のまま吐糸の準備に入る。吐糸後、半日ほど経過するとテンサンは食樹の葉を綴りながら繭糸を吐きはじめる。通常、テンサンは、クヌギの葉2～3枚を綴って繭をつくる。緑色の薄い繭の中で吐糸をする幼虫を観察するため、クヌギの葉を剥がして撮影したものが図3.5-1である。クヌギ葉から採取したエメラルドグリーン色の多量のテンサン繭を^ま取繭して竹製の^{ざる}箕に入れる作業は、学生実習での楽しみの光景である（図3.5-2）。テンサン繭（図3.6左）から取り除いた真綿状の毛羽が図3.6右である。テンサンの生存率と取繭率はカイコと比べると低く、飼育が容易でないため、テンサン絹糸はおよそ30～50万円/kg の高価格で取引される。このようにテンサン絹糸は、希少価値が高いため、繊維のダイヤモンドと呼ばれている。

テンサン繭層の繭糸は^{かいり}解離（ほぐれ状態）が悪いので製糸作業は困難である。テンサン繭（図3.7左）を加熱したアルカリ水溶液で煮ることによって得られる真綿を紡績すると嵩高い紡績糸ができる（図3.7右）。運搬しやすいように何本か並

III

国内に生息あるいは輸入種による絹織物の野蚕



図3.3 営繭直前のテンサン



図3.5-1 テンサン繭（営繭初期）



図3.5-2 収穫したテンサン繭



図3.4-1 テンサン（5 齢）



図3.4-2 テンサン（営繭周辺）



図3.6 テンサン繭（左）と毛羽（右）



図3.7 テンサンの出殻繭（左）と紡績糸（右）

43

44

べて束ねてつくったテンサン糸の「括」が図3.8-1である。テンサン絹糸に光が入射すると鏡面反射のようにキラッと輝くような光沢が発生する(図3.8-2)。絹糸に光が当たることによって生ずる光沢は、日本女性には好まれないが、タイ国の女性には人気がある。絹糸が発する光を好むかどうかは国によっても異なるようである。

繭殻を繰糸して繭糸となる割合(糸歩)を見てみよう。テンサン繭1,000粒からは約350gほどの繭糸が取れ、繭糸に付着するセリシンなどを除くために精練すると約200gの絹糸が得られることになる¹⁾。テンサン繭を繰糸してから製造した繭糸と、繭糸を精練してつくったテンサンの真綿が図3.9下である。

(1) テンサン繭糸の観察

テンサン繭糸の走査型電子顕微鏡(SEM)の写真(図3.10-1)を見てみよう。繭糸表面には結晶性のシュウ酸カルシウムが付着し、その形は、正方形から立方体で大きさが2~3 μm ほどの結晶物である(図3.10-1)。こうした立方体



図3.8-1 テンサン絹糸の括



図3.8-2 テンサン絹糸の括の拡大写真



図3.9 テンサンの真綿と絹糸

のしごみ同様の落ち葉に含まれる有機物由来の雑多な色素が繭糸に含まれるためである。

(3) ヒメヤママユシルクの産業への応用

(ヒメヤママユ繭糸の観察)

ヒメヤママユ繭糸(単繊維の径は10 μm)と精練後の繭糸と絹糸の走査型電子顕微鏡(SEM)の画像が図4.39-1と図4.39-2である。カイコの繭糸表面にはセリシンが糊状に付着することは、すでに説明したとおりであるが、精練前のヒメヤママユの繭糸(図4.39-1)の表面は平滑であり、セリシンの付着量は少ない。ヒメヤママユの繭糸を、90°Cの0.2%炭酸ナトリウム溶液で精練した絹糸には精練前の繭の薄茶褐色が多少残る。ヒメヤママユ繭糸を精練した絹糸のSEM写真が図4.39-2である。ヒメヤママユ絹糸は捻れたり捩れており、絹糸断面はリボン状であるように見受けられる。ヒメヤママユ絹糸の繊維径(μm)は45.7 \pm 4.7ほどである。

(4) ヒメヤママユシルクのナノファイバー

ヒメヤママユの絹糸を室温のトリフルオロ酢酸(TFA)で72時間処理して完全に溶解させて調製できるヒメヤママユシルクの10wt TFAをエレクトロスピニング(印可電圧15kV, 紡糸距離15cm)することでナノファイバーを製造した。微細なナノファイバーの繊維径分布を調べたものが図4.40である。ナノファイバーの平均繊維径(nm)は、およそ158 \pm 52であり、繊維径のバラツキ

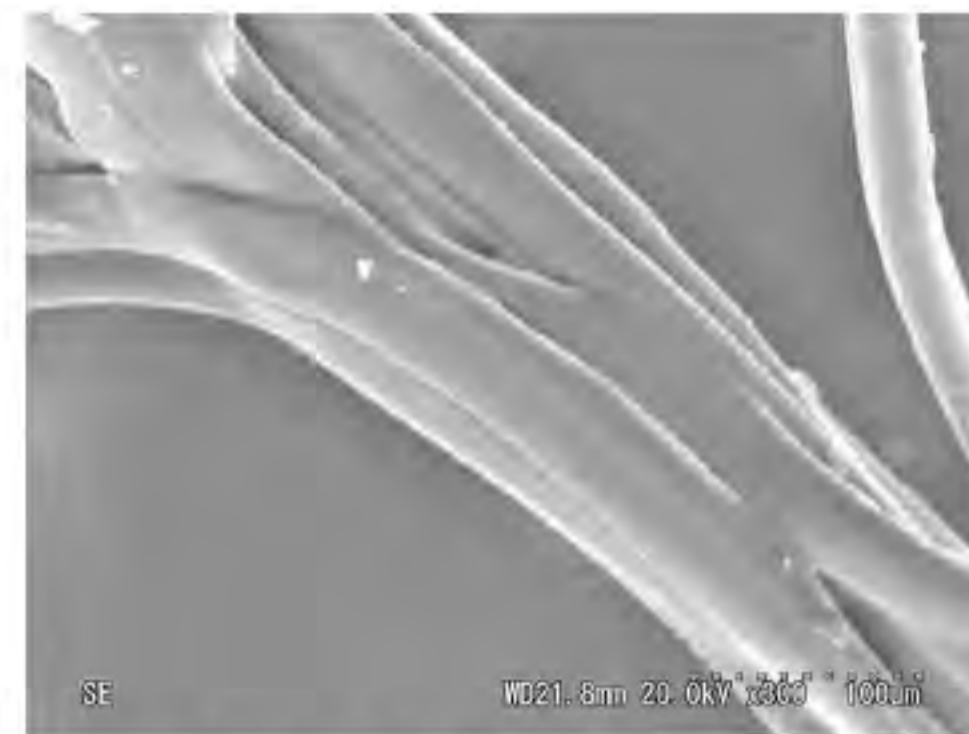


図4.39-1 ヒメヤママユ繭糸のSEM写真

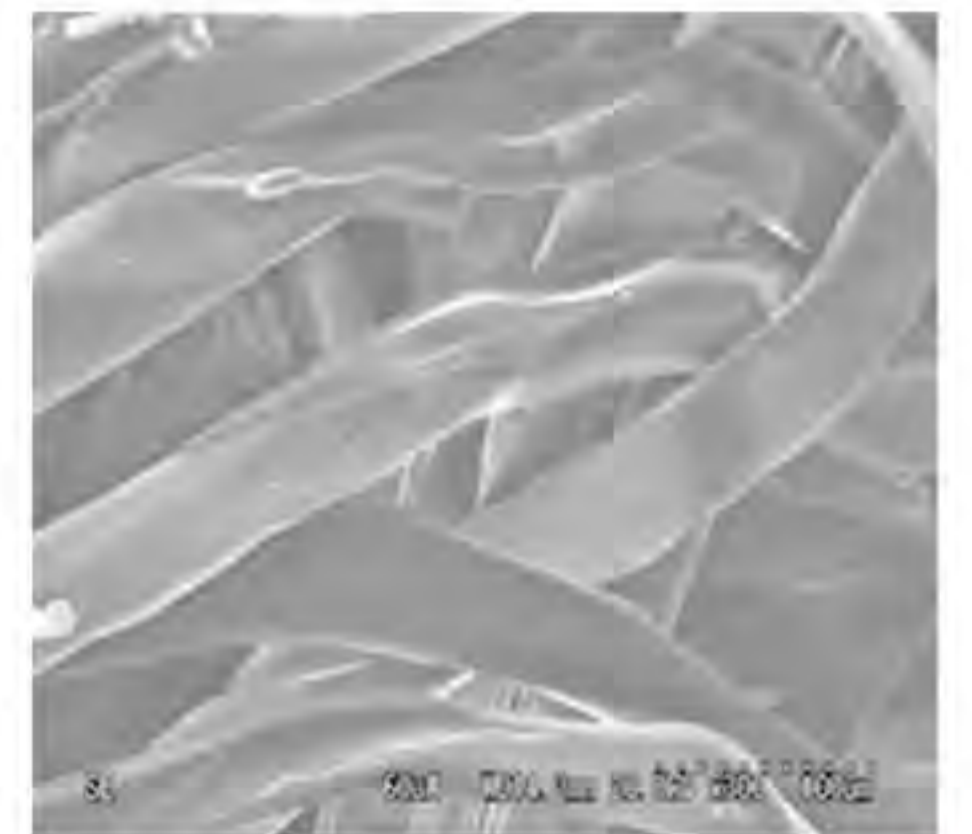


図4.39-2 ヒメヤママユ絹糸のSEM写真

膜の熱機械的測定(TMA)によると、フィルムの収縮、伸長挙動が、ある特定の温度で明瞭に起こるため、サクサンシルク膜は実験試料としては適している²⁵⁾。学生時代にはじめたサクサンシルクの研究成果は、農林省蚕糸試験場に就職してからも大いに役立つことになり、野蚕シルクを扱った数多くの論文を投稿することができた。

(5) サクサン幼虫と吐糸

孵化した幼虫は、約42日~52日で繭をつくる。幼虫の頭部は褐色で、胸部、腹部の体色が濃い緑色である(図3.24-1)。熟蚕期になるとサクサン幼虫の体色は次第に黄緑色になり、幼虫の体は縮んで丸みを帯びる(図3.24-2, 図3.25)。幼虫が丸みを帯びる体つきの変化から、吐糸がいよいよはじまることがわかる。

体内にある細長い後部絹糸腺で生合成された液体状態のシルクは、後部から中部、そして前部へと絹糸腺腔内を移動する。幼虫の頭胸部の付近で1対の前部の絹糸腺が合流し、吐糸口から細い繭糸が吐き出される。吐糸口から吐き出される繭糸の断面は、円形ではなく扁平状態である²⁶⁾。



図3.24-1 サクサン幼虫



図3.24-2 丸みを帯びたサクサン幼虫



図3.25 サクサン幼虫

熟蚕頭部にある吐糸口付近をSEM画像で観察してみよう(図3.26-1)。噴火口のように凹んだ挿鉢状の底に吐糸口が開いている(図3.26-1)。吐糸口から次々に吐き出されるサクサン繭糸は、やや扁平な形をしている(図3.26-2)。熟蚕期のサクサンは営繭するための足場を探して繭づくりをはじめめる。足場糸となる繭糸の吐糸軌跡を見てみよう(図3.27)。繭糸の吐糸軌跡を観察すると、カイコ幼虫の吐糸軌跡より一回り大きなループを描く。これは、サクサン幼虫はカイコの幼虫に比べて大型であり、吐糸のために振り動かす頭胸部の動きが大きいためである。

(6) サクサンの産卵用の籠

サクサンは、営繭作業を終えると灰褐色~赤褐色の繭をつくる。毛羽が付いたサクサンの繭が図3.28-1。産卵籠の骨組みの竹棒にサクサンは産卵するた



図3.26-1 サクサンの吐糸口(吐糸前)



図3.26-2 サクサン繭糸を吐き出す吐糸口²⁷⁾



図3.27 営繭開始時のサクサン繭糸の軌跡



図3.28-1 繭殻に産み付けたサクサン卵



図3.28-2 サクサン繭と卵

本文 組見本 (3)

振興する突破口になるものと考え、その重要性をアピールしたのは、国際野蚕学会および日本野蚕学会会長の赤井弘である。赤井弘は、カイコや野蚕の絹糸腺の組織形態学を追究し、繭糸の構造解析の研究に長年にわたって携わってきた。野蚕絹糸の形態を電子顕微鏡で解析する研究活動をとおして、野蚕絹糸の新しい利用法を提案している。これがきっかけとなり、野蚕糸の重要性が世界中に広まることになった。現在、日本国内ではクリキュラ繊維を用いて和服や帯などが製織され販売されている。

(3) クリキュラ繭と煮繭

インドネシアではこれまでは害虫として扱われてきたクリキュラ (*Cricula trifenestrata*) がつくる黄金の繭が上述したように有用生産物であるとして現地で理解されはじめ、クリキュラ繭が一躍脚光を浴びはじめた³⁾。この絹糸昆虫は、カイコガ上科、ヤママユガ科に属し、その繭は「黄金の繭」(図4.3-1、図4.3-2)とも呼ばれる⁴⁾。

わが国に生息するクスサンは、淡茶～淡褐色の網目状の繭をつくるが、海外に生息するクリキュラも同様に網目状繭をつくる(図4.4)。クリキュラ繭の外

周を被う毛羽は、ループ状になっている。繭殻は緻密な網目構造のものや、木目が粗いものもある。クリキュラ繭の繭層の網目はルーズではあるが、網目状のクスサン繭とは違って緻密であり、繭殻を透かしても内部を見ることは困難である(図4.4)。

他の野蚕のテンサン繭などと同様に、クリキュラ繭から繭糸を取り出す繰糸作業は、容易ではない。亜硫酸水素ナトリウム水溶液を用い、続いて、炭酸水素ナトリウム水溶液を作用させて繭を煮繭し、繰糸速度30 m/min⁵⁾で繰糸をすることでようやく繭糸が製造できる。クリキュラ繭(図4.5左)と、クリキュラ繭を精練してから繰糸をして製造した絹糸が図4.5右である。

大日本蚕糸会・蚕糸科学研究所(令和3年4月から大日本蚕糸会 蚕糸科学技術研究所に改編)の西城正子は、クリキュラ繭をアルカリ水溶液で煮沸し、続いて精練してから調製した綿状のシルクウェブを手作業で紡いで糸を製造することに成功した。彼女は、クリキュラ繭の生産地であるインドネシアを訪れ、農村の女性にクリキュラ繭の煮繭法や紡績糸の製造法の技術指導を行った⁶⁾。

(4) クリキュラの繭色

クリキュラ繭を精練し、繭層繭糸を広げて調製できるシルクウェブを原料にして、手で紡いで製造したものが紡績糸である。金色に輝くクリクラ繭を、薬品を使って精練すると、この美しい色は消えて別の色になってしまう。クリキュラ繭、真綿、それを紡いだ紡績糸が図4.6-1である。真綿と紡績糸を拡大



図4.3-1 クリキュラの黄金繭



図4.3-2 クリキュラの繭



図4.4 クリキュラ繭



図4.5 クリキュラ繭(左)と紡績糸(右)

IV

国内外に生息し繊維素材化が進行中、進行見込みの絹糸昆虫

ごし、ごみ同様の落ち葉に含まれる有機物由来の雑多な色素が繭糸に含まれるためである。

(3) ヒメヤママユシルクの産業への応用

(ヒメヤママユ繭糸の観察)

ヒメヤママユ繭糸(単繊維の径は10 μ m)と精練後の繭糸と絹糸の走査型電子顕微鏡(SEM)の画像が図4.39-1と図4.39-2である。カイコの繭糸表面にはセリシンが糊状に付着することは、すでに説明したとおりであるが、精練前のヒメヤママユの繭糸(図4.39-1)の表面は平滑であり、セリシンの付着量は少ない。ヒメヤママユの繭糸を、90 $^{\circ}$ Cの0.2%炭酸ナトリウム溶液で精練した絹糸には精練前の繭の薄茶褐色が多少残る。ヒメヤママユ繭糸を精練した絹糸のSEM写真が図4.39-2である。ヒメヤママユ絹糸は捻れたり振れており、絹糸断面はリボン状であるように見受けられる。ヒメヤママユ絹糸の繊維径(μ m)は45.7 \pm 4.7ほどである。

(4) ヒメヤママユシルクのナノファイバー

ヒメヤママユの絹糸を室温のトリフルオロ酢酸(TFA)で72時間処理して完全に溶解させて調製できるヒメヤママユシルクの10 wt TFAをエレクトロスピンニング(印可電圧 15 kV, 紡糸距離 15 cm)することでナノファイバーを製造した。微細なナノファイバーの繊維径分布を調べたものが図4.40である。ナノファイバーの平均繊維径(nm)は、およそ158 \pm 52であり、繊維径のバラツキ



図4.39-1 ヒメヤママユ繭糸のSEM写真



図4.39-2 ヒメヤママユ絹糸のSEM写真

5.3 クスサン

(1) クスサンの生活史と気門

クスサン(樟蚕/楠蚕)(学名 *Saturnia japonica*)は、鱗翅目・カイコガ上科・ヤママユガ科に属し、日本全土の他、中国北部、台湾にも分布する。成虫の開翅長は100 mm以上ある。幼虫はクリ、クスギ、コナラ、カシワ、サクラ、カキ、ウメ、ナシ、リンゴ、スモモ、イチョウ、クスノキ、エノキなどさまざまな樹木の葉を食べる⁸⁾。年1回発生して卵で越冬し、幼虫は4~7月に出現する。クスサン幼虫は6回脱皮し終齢(7齢)になると、体長80~90 mm程度にまで成長する。体色は青白色で、体には無数の細かい体毛が生えておりシラガタロウ、クリケムシなどとも呼ばれる。産毛のような数え切れないほどの体毛が体中に生えているため、他の野蚕幼虫とは直ぐに見分けできる。幼虫の柔らかい産毛(図5.20)に触れても刺されたり怪我をすることはない。体側面には毒々しい複数の青色をした気門(図5.20)が一列に並んでいるので、他の野蚕幼虫との違いは明瞭である。

(2) 網目状の繭

クスサン幼虫は、7月前半ごろ、細長く硬くて内部が透けて見える楕円形の繭をつくる(図5.21-1、図5.21-2)。栗の葉などで綴られる繭(図5.21-2)が網目状であるのは、営繭時、クスサンが頭胸部を振り動かす際、比較的、所定

V

国内外に生息し今後の利用に注目したい絹糸昆虫



図5.20 クスサン幼虫



5.2 オオミズアオ

(1) オオミズアオの生態

オオミズアオ（学名 *Actias aliena*）は鱗翅目、ヤマユガ科に属する1化性ないしは2化性の絹糸昆虫である。北海道から本州、四国、九州、対馬、屋久島に生息し、最近ではサクラ樹やカエデなどが植えられている都心のビル街でもオオミズアオを見掛けることがある。蛹で越冬し2化性のものは4月下旬から5月と7～8月ごろ羽化をする。幼虫はサクラ、カエデ、クリ、ハンノキ、ウメ、リンゴ、アセビ、カバノキなど、いろいろな植物を食べて生育する。幼虫は4回脱皮し、5齢末期に繭をつくる。

ところで、地球上には数十万種以上もの昆虫が生息しているといわれ、このうち蝶と蛾などの鱗翅目昆虫は、10万から15万種がいることが知られている。絹糸昆虫も同様、多くの種類のあることが知られている。これらの昆虫が吐糸する繊維量や営繭挙動はそれぞれ異なり、紡ぎ出すタンパク質繊維には特異的な生理活性機能をもつ化合物が含まれる⁴⁾。数多い絹糸昆虫の中でタンパク質繊維として古くから衣料素材に使用されてきたのは、サクサン、テンサン、タサルサン、ムガサンなどなどの繊維である。ヨナグニサンやゴノメタなどがつくる繭繊維は少量ながら衣料用に供されたとの報告があるが、今後、これら繊維の新しい利用については関心が寄せられている。

都会にまで生息するようになったオオミズアオであるが、よほど注意をして

いないとヒトの目には触れ難い絹糸昆虫である。オオミズアオと同様に、身近にいる絹糸昆虫のようであっても人目に触れ難い種としてシンジュサン⁵⁾、ヒメヤママユ⁶⁾、ウスタビガ、あるいはクスサン⁷⁾などを挙げる事ができよう。これら昆虫の繊維を衣料素材として利用しようとする試みは知られていない。オオミズアオの旧学名 (*Actias artemis*) はギリシア神話のアルテミスに由来するといわれている。

(2) オオミズアオ幼虫と蛾の翅色

成虫の体色は青白色～薄紫色をしており、後翅には外側に湾曲する少し長めの尾状突起が、この蛾の特徴である（図5.9-1）。翅の形は、オモチャのグライダーの羽根のように均整がとれており、前翅の前縁には紫色を帯びた薄紫色の帯状線がはっきりと見えるので、他の絹糸昆虫の蛾とはすぐに区別できる。全体的には青白色ないしは淡い紫色で均整がとれた翅をもつオオミズアオの蛾（図5.9-1、図5.9-2）からは、清楚で小柄な貴婦人のような印象を受ける。前翅には不明瞭であるが一对の小さい薄紫色をした目玉模様の環状紋（眼状紋）が、後翅にもやや明瞭であるが一对の環状紋がある（図5.9-1、図5.9-2）。この幼虫（図5.10）は、モミジ樹の葉などを食べて成長し、樹枝や地面の落葉の



図5.9-1 オオミズアオ蛾



図5.9-2 翅を広げたオオミズアオ蛾



図5.10 オオミズアオ幼虫 その1

V

国内外に生息し今後の利用に注目したい絹糸昆虫



6.2 非衣料、バイオ材料への応用

化学加工やグラフト加工によって本来の絹糸にはない新しい機能特性を絹糸に付与することができる。化学加工した絹糸は、非衣料分野をはじめ、医学分野でのバイオ材料として広く応用が可能な新素材となるものと期待できる。ここでは、水をはじく撥水性、水に親しむ親水性、病原微生物の増殖を抑制する抗菌性、あるいは気体透過性などの機能を備えたシルク膜などの新しい利用技術の成果を紹介しよう。

(1) 金属イオンと結合する絹糸

外見上1本に見える絹糸は階層構造からできている。カイコが吐糸した1本の繭糸は、一对のフィブロイン繊維から構成される。フィブロイン繊維の繊維径は10μmほどであり、太さが0.2～10.4μmほどで数百本のフィブリルの束からできている。フィブリルは超微細なマイクロフィブリル（0.01～0.02μm）の集合体である（改訂蚕糸学入門、大日本蚕糸会（2002））。フィブリルとマイクロフィブリルの表面積の合計値は、大変に広くなるはずである。広い比表面積をもつ微細繊維の表面は、気体などの低分子物質を吸着するのではないかと期待される。絹糸は身の周りにある悪臭気体を吸着するか調べたところ、ホルムアルデヒド、トリメチルアミン、酸化窒素などの有害ガスを効率的に吸着することがわかった。

(9) バイオミメティクス

バイオミメティクス (Biomimetics) は、「生物の構造や機能、生産プロセスを分析して、そこから着想を得て、新しい技術開発や物づくりに活かす科学技術」を意味する。日本語の表記では生物模倣技術あるいは生物模倣と呼ばれる (Wikipedia より)。別な言い方をすれば、昆虫機能を模倣することで、生物の機能を活かし、産業分野での応用を目指す科学領域がバイオミメティクスである。

熱帯から寒帯にまで広く生息する昆虫は見事に気候適応を行っている。こうした優れた機能を解明することで、昆虫が温度適応を獲得することになった進化の過程を新たに見直すことができ、将来的には、環境適応性の機構を備えた物づくりに応用できるようになるかもしれない。

蜂や蝶のような小さな生き物は、限りあるパワーを省資源的に活用しながら見事に飛行する。こうした昆虫が飛行する技術的な機能を探求すれば、経済的に飛翔する飛行体の開発が将来的には可能になるのではないだろうか。

カイコの雄蛾の頭部にある一对の触角や臭覚器官である触角を走査型電子顕微鏡で観察してみた（図6.45-1、図6.45-2）。触角には雌蛾が発するフェロモンを精度良く検出する臭覚受容体があり、匂い物質を高精度で検出できる。このような臭覚機能がさらに詳細に解析できれば、ある種の匂い物質を高い精度で見つけ出すための省資源的なセンシング技術⁴⁰⁾の開発を行うための技術革新が可能となるのではないだろうか。

昆虫に由来するシルクがもつ成形性や理化学特性を追究することで新しい素材開発につながる可能性がある。シルクの構造変化からの着想を得て、シルク



図6.45-1 カイコ雄蛾の触角の走査型電子顕微鏡写真



図6.45-2 カイコ雄蛾の触角の走査型電子顕微鏡写真（拡大図）