高品質シルクとその無菌周年蚕糸生産技術

松原 藤好*, 山崎 隆**

エコロジーとエコノミーを両立させる新しい産業として無菌周年蚕糸生産技術が開発された。ここでは繭以降の生糸に関する特徴について述べる。

1. はじめに

京都工芸繊維大学の浜村保次名誉教授は、1935年から「カイコはなぜ桑しか食べないか」の命題を解明するために長年研究を進め、1959年にカイコの摂食の機構を明らかにし、その翌年にカイコの人工飼料が開発され、桑とカイコは発生以来から一体のものであったが、1960年以降、桑から離れてカイコは人工飼料によって飼育できるようになった^{1,2)}。

著者の1人である松原らは1962年から、カイコの人工飼料無菌飼育に関する基礎および応用に関する研究を進め、エコロジーとエコノミーを両立させる全く新しい産業としての無菌周年蚕糸生産技術を開発し、特に産業廃棄物オカラを含む低コスト人工飼料による周年養蚕により従来の桑葉養蚕ではみられなかった特徴を持つ繭、生糸の生産開発に成功した³⁾。周年無菌飼育に至るまでの開発経過については松原によって既に報告⁴⁾されているので、本稿では繭以降生糸に関する特徴について述べる。

2. 繭について

2.1 繭の形状と外観

本稿での人工飼料とは表1に示したオカラ含有人工飼料（オカラ飼料）であり、比較として従来用い

ていた標準人工飼料および桑葉を用いた。

繭の形はいずれの飼料によってもそれほどの差は認められないが、やや小さく感じられる。特徴的なことは白度が高いことである。表2の5令飼育および繭調査成績⁵⁾に示したように、5令から上族までの経過日数が約1日長いこと、全繭重が若干低いこと以外は大きな差は認められない。5令期間をオカラ飼料で飼育した結果、脱脂大豆粉末を主成分とした

表1 人工飼料の組成

飼料素材	添加量 (%)	
	オカラ飼育	標準飼育
乾燥桑葉粉末	15	32
脱脂大豆粉末	24	47
乾燥オカラ粉末	50	—
澱粉	5	12
セルロース	—	3
塩化コリン	0.2	0.2
アスコルビン酸	1.5	1.5
クエン酸	2.0	2.0
クロトン酸	0.4	0.4
リケステロール	0.4	0.4
微量成分	1.5	1.5
(ビタミンB群を含む)		
合 計	100.0%	100.0%

High Quality Silk and the Year, Round Production Technique of Aseptic Rearing with an Artificial Diet, *MATSUBARA Fujiyoshi, 京都工芸繊維大学名誉教授, **YAMAZAKI Takashi, 京都教育大学名誉教授, 絹衣笠会繊維研究所, Foundation Kinugasakai, Textile Research Institute.

表2 5 齢の飼育成績および繭調査成績¹⁾

調査項目	オカラ飼料	標準飼料
5 齢から上簇まで ²⁾ の経過日数	7 日23時間	7 日00時間
対5 齢起蚕結繭歩合	96.5%	97.1%
対5 齢起蚕健蛹歩合	94.8%	94.2%
全 繭 重 ♀ (g)	2.10	2.36
♂	1.72	1.77
平均	1.91	2.07
繭 層 重 ♀ (cg)	44.0	44.0
♂	39.1	39.2
平均	41.6	41.6
繭層歩合 ♀ (%)	20.9	18.6
♂	22.7	22.2
平均	21.8	20.1

1) 繭調査値は雄雌各20頭の平均値
2) 上簇までの経過日数は90%以上が熟蚕になった時点

表3 繰糸成績

調査項目	オカラ飼料	標準飼料
繭 糸 繰 度	2.73 d	2.65 d
解 じ ょ 率	80%	76%
生糸量歩合	17.06%	15.09%
繭 糸 長	985m	1,108m

人工飼料（標準飼料）で飼育した場合と同様に，良好な飼育成績が得られた。

2.2 繭糸および生糸について

オカラ飼料と標準飼料で飼育した場合の繰糸成績を表3に示した。オカラ飼料の場合，標準飼料と比較して生糸量歩合が優れていたが，逆に繭糸長が劣っていた。繭糸繰度と解紮率は両者の間で大差はみられなかった。

次に生糸検査の結果を表4に示した。また参考ま

表4 生糸検査成績

検査項目	オカラ飼料	標準飼料	参考区 ¹⁾
繰度 (d)	20.40	21.50	20.37
繰度偏差 (d)	0.95	1.25	1.06
糸むら二類 (個)	4	3	9.1
糸むら三類 (個)	0	0	0.1
節 (点)	95.00	97.50	97.39
小節 (点)	95.50	95.00	94.81
再繰切断 (回)	1	0	2.8
強力 (g)	4.01	4.04	4.00
伸度 (%)	21.3	19.4	20.4
繰減率 (%)	20.74	21.83	23.33
エクスフォリエーション(点)	70.12	70.37	69.41
抱合(回)	114	113	138
水分率(%)	9.02	9.24	9.81

1) は昭和59-63年日本神戸農林規格検査所における桑葉育による受検生糸の平均成績

でに神戸農林規格検査所における桑育の受検生糸の平均成績を併せて表示した。その結果，オカラ飼料で飼育した場合は標準飼料で飼育した場合および受検生糸の場合に比べて繰度偏差および繰減率が少ないのが特徴であった。

さらに，オカラ飼料で生産した生糸では標準飼料のものと比較して，光沢があり，白度が高く，140℃1 時間以上加熱した後の黄変度が小さいなどオカラ飼料の特徴が認められた。

周年無菌飼育で生産された繭は従来のような乾繭工程を省略して，直ちに煮繭し，いわゆる生繭繰糸が可能である。この生繭繰糸は従来のプロセスの省略による省力化と同時に，乾繭，貯繭による品質低下を防ぐことができる。生繭繰糸による生糸検査の結果を表5に示した。再繰切断は1 回以下で，繰度偏差は1.10～1.35の範囲であり，小節点は94.0～87.0，節点95.5～98.0と良好であった。強力は4.2g

オカラ繭内層

桑繭内層

図1 繭内層のSEM 写真（スケールは100μm）

表5 周年無菌養蚕における生繭繰糸の生糸検査

飼育時期	1994.9	1994.10	1995.5	
繭処理	生繭	生繭	生繭	乾繭
調査項目				
目的繊度 (d)	27	27	27	27
再繰切断 (回)	0	0	1	1
繊度偏差 (d)	1.10	1.10	1.35	1.75
小 節 (点)	96.0	97.0	95.5	94.5
節 (点)	95.5	98.3	98.5	95.5
糸 む ら 2 類	1	1	2	2
糸 む ら 3 類	0	0	0	0
抱 合	108	140	92	108
強 力 (g)	4.20	4.24	4.28	4.15
伸 度 (%)	21.6	22.4	22.3	21.8

以上、伸度は約22%であり、品質の向上が認められた⁶⁾。

2.3 繭層セリシタンパク質について

図1はオカラ飼料繭と桑葉育繭の内層表面のSEM写真である。前者は後者よりも視覚的にもセリシン量が多いことがわかる。また、0.5%の炭酸ナトリウム溶液中で100℃、30分間セリシンを溶解したときの脱セリシン量はオカラ飼料繭では28.1%と桑葉育繭の24.2%よりも多かった。しかしながら、両者のセリシンのアミノ酸組成は表6に示したように大差はなく、ほぼ一致している。

表6 未分別セリシンのアミノ酸組成 (Mol%)

アミノ酸	オカラ飼料	桑葉飼料	文献値 ^a	注
Gly	15.1	15.1	14.2	非極性
Ala	4.2	4.0	5.0	
Val	3.2	3.1	2.6	
Leu	0.8	1.1	0.7	
Ile	0.5	0.7	0.4	
Pro	0.6	0.3	0.4	水酸基
Phe	0.4	0.6	0.4	
Ser	31.7	31.4	34.3	
Thr	8.2	8.2	7.0	
Tyr	2.9	2.8	2.7	
Asp	19.4	19.9	17.5	酸 性
Glu	5.5	5.0	6.8	
Arg	2.9	3.1	2.4	塩基性
His	1.1	1.3	0.9	
Lys	2.7	2.8	3.8	含硫黄
Met	0.1	0.0	0.1	
Cys	0.6	0.5	0.5	

^aBy Kirimura et al

2.4 繭層セリシンの溶解特性

前述したように、生繭繰糸が可能であることなどからセリシンの溶解特性について検討した。図2に示したように、オカラ飼料育繭と桑葉育繭の熱水による溶解挙動にはかなり大きな差がある。両試料いずれも4つの直線部分は3つの屈曲点からなり、溶解特性の異なる4分画から構成されている。これは

図2 熱水による繭層セリシンの溶解特性
△：桑繭層 △：オカラ繭層

小松⁷⁾の報告した結果と一致している。オカラ、桑葉両飼料の各溶解直線の屈曲点間を溶解しやすい順でオカラ-I、II、III、IV、桑-I、II、III、IV、の4つの分画とした。オカラ飼料の3つの屈曲点の位置は桑葉飼料と比べて、いずれも短時間側にずれている。これは主としてオカラ飼料の第I分画の溶解速度の違いにより、その後の時間のずれをもたらした

表7 オカラ飼料育繭からのセリシン分別物のアミノ酸組成 (Mol%)

アミノ酸	オカラ-I	オカラ-II	オカラ-III	オカラ-IV
Gly	13.7	15.8	15.7	16.6
Ala	3.9	5.0	4.3	4.7
Val	3.2	2.7	3.2	3.6
Leu	1.0	1.0	1.1	1.1
Ile	0.7	0.6	0.7	0.7
Pro	0.6	0.8	0.6	0.7
Phe	0.4	0.5	0.4	0.6
Ser	33.3	30.5	31.7	31.3
Thr	8.3	6.9	8.8	7.9
Tyr	2.9	2.3	2.9	1.9
Asp	18.4	19.0	19.2	19.0
Glu	5.5	6.5	4.3	4.1
Arg	3.3	3.1	3.0	3.2
His	1.4	1.1	1.2	1.4
Lys	3.0	3.3	2.4	2.3
Met	0.0	0.0	0.0	0.0
Cys	0.3	0.8	0.5	0.8

表8 桑葉飼料育繭からのセリシン分別物のアミノ酸組成 (Mol%)

アミノ酸	桑-I	桑-II	桑-III	桑-IV
Gly	14.1	16.0	15.4	13.5
Ala	3.6	4.9	3.8	4.2
Val	3.4	2.9	3.4	3.7
Leu	1.3	1.2	0.9	1.4
Ile	0.8	0.8	0.6	1.1
Pro	0.7	0.7	0.3	0.3
Phe	0.4	0.5	0.3	0.5
Ser	31.2	30.3	33.4	33.3
Thr	7.8	7.0	9.1	10.3
Tyr	1.7	2.0	2.0	2.9
Asp	22.0	19.4	20.0	18.0
Glu	5.5	6.4	4.0	3.4
Arg	2.9	3.0	3.0	3.1
His	1.1	1.1	1.2	1.3
Lys	2.9	3.2	2.1	2.1
Met	0.0	0.0	0.0	0.0
Cys	0.5	0.6	0.6	0.8

ものと考えられる、

表6に示した両者のアミノ酸組成にはそれほど差がないにもかかわらず4つの分画、特に第I分画における差を検討するために両者の各分画セリシンのアミノ酸組成について検討した結果を表7、8に示した。オカラ-I分画では、桑葉Iと比較してセリンが多く、アスパラギン酸が少ない。また、この傾向は室温溶解の場合にも認められ、それぞれの第III分画と第IV分画でも差がある。オカラ飼料の第I分画のセリシンの高い溶解性はセリンやスレオニンのような水酸基を含むアミノ酸の量が桑葉飼料と比較して多いことが関係しているものと考えられる⁸⁾。

図3 紫外線照射後の繭層

表9 紫外線照射前後の繭層の黄変指数

	桑葉育繭	標準飼料育繭	オカラ含有飼料育繭
未照射	16.7	15.1	16.2
照射後	41.8	37.2	16.4

表10 セリシン分画と繭糸黄変との関係

抽出セリシン分画	桑葉飼料	オカラ飼料
I	24.46	18.93
I~II	21.33	19.35
I~III	21.58	19.61
I~IV	22.70	18.64

表11 dCMP および CMP で処理した桑葉育繭層の黄変指数

対照区	dCMP	CMP
38.1	26.8	29.8

黄変指数：5粒繭層の平均値

図4 紫外線吸収スペクトル
実線：桑繭層セリシン第Ⅰ分画
点線：オカラ繭層セリシン第Ⅰ分画

2.5 紫外線照射による繭層の黄変

オカラ飼料，標準飼料および桑葉飼料によって得られた繭の紫外線照射による黄変については図3に示した。明らかにオカラ飼料育繭が黄変しにくいことがわかる。そこでオカラ飼料の黄変に対する特性を明らかにするために，前述のセリシンの熱水溶解特性と結びつけて検討した。表9はオカラと桑葉飼料から得られた繭の紫外線照射前後の黄変度を黄変指数として示したものである。オカラ飼料繭の数値の変化に比べて桑葉飼料繭と標準飼料繭の値は大きく変化した。このことからオカラ飼料繭は黄変しにくいことがわかる⁹⁾。

2.6 繭層セリシン各分画抽出後の黄変

熱水溶解法により両飼料繭のセリシンの第Ⅰ分画だけ，第ⅠからⅡ分画まで，第ⅠからⅢ分画まで，さらに第ⅠからⅣ分画までをそれぞれ抽出した後，繭層を乾燥し，これらの繭層に紫外線を照射し，黄変指数を測定した結果を表10に示した。オカラ飼料の各分画区は桑葉飼料に比べてそれぞれ高い白度を示すとともに，両飼料育繭はセリシンを抽出するこ

図5 繭層セリシン第Ⅰ分画抽出後のクロマトグラム
①：デオキシリボヌクレオチド標準品
②：オカラ繭層
③：桑繭層

とによって黄変しにくくなる傾向がみられた。特に第Ⅰ分画を抽出することによって繭層が黄変しにくくなることから，本来，第Ⅰ分画は黄変しやすい性質をもつが，オカラ飼料には黄変が生じるのを防ぐ物質が含まれているのではないかと考えられる。

2.7 オカラ飼料育繭と桑葉育繭の紫外線吸収

オカラ，桑葉飼料育繭からのセリシンの各分画抽出液の紫外線吸収スペクトルを比較した結果，両飼料繭の第Ⅰ～Ⅳ分画では280nm付近に吸収極大を示すパターンのみで，両者のあいだには差は全く認められなかった。しかしながら，第Ⅰ分画だけは250nmと280nmの間で異なったパターンがみられた(図4)。桑葉飼料では260nm付近に最小吸収と，280nm付近に吸収極大を示すタンパク質の典型的

図6 絹フィブロインのX線回析写真

表12 オカラ含有量を異にした人工飼料育繭の黄変指数

紫外線 照射	オカラ10 繭糸	オカラ30 繭糸	オカラ50 繭糸
照射前	10.2	9.9	11.4
照射後	31.1	29.2	21.4

黄変指数：10粒繭層の平均値

表13 絹フィブロインのアミノ酸組成 (Mol%)

アミノ酸	オカラ飼料	桑葉飼料	文献値 ^a
Gly	43.2	42.8	42.8
Ala	30.3	30.7	30.0
Val	2.5	2.6	2.5
Leu	0.6	0.5	0.6
Ile	0.7	0.6	0.6
Pro	—	—	0.5
Phe	0.7	0.6	0.7
Ser	1.8	1.7	1.9
Thr	1.3	1.2	1.4
Tyr	0.5	0.5	0.5
Asp	0.2	—	0.2
Glu	0.5	0.5	0.4
Arg	11.4	11.4	12.2
His	1.1	1.0	0.9
Lys	4.4	4.9	4.8
Met	—	—	0.1
Cys	0.7	0.9	0.1

^aBy Kirimura et al

なスペクトルパターンに対して、オカラ飼料では260nm付近に紫外線吸収を持つ物質が多く含まれ、核タンパク質特有のスペクトルパターンを示した。この260nm付近での紫外線吸収を持つ物質が黄変抑制に関与しているのではないかと推測した。

HPLCにより得られた両飼料育繭のヌクレオチドクロマトグラムを図5に示した。デオキシリボヌクレオチド標準品のピークの溶出時間と比較したと

ころ、桑葉-Iの場合はピークがみられなかったのに対し、オカラ-Iの場合はデオキシシチジル酸(dCMP)に当たるピークが現れた。このことから桑葉飼料に比べ、オカラ飼料のセリシン第I分画中にはdCMPがかなり多く含まれていることが判明した。しかしシチジル酸(CMP)もdCMPもほとんど同じ溶出時間にピークが現れるのでピークの溶出時間のみでオカラ-I中にみられたピーク物質がdCMPかCMPか、それとも両者が共存するのかは区別できない。しかし、dCMP、CMPおよび対照として水でそれぞれ処理した桑葉育繭層に紫外線を照射した後の黄変指数によれば(表11)、水処理区の黄変が最も大きく、dCMPとCMPで処理した繭層の黄変がいずれも水処理区より明らかに小さくなった。特にdCMP処理区は最も高い黄変防止効果を示した。これについては、桑葉育繭層中に吸着したdCMP(あるいはCMP)が紫外線を吸収し、その結果チロシンやトリプトファンなどの酸化分解を防止し、繭糸の黄変を抑制するものと思われる¹⁰⁾。

2.8 人工飼料中のオカラ含有量と繭糸の黄変との関係

オカラ添加量を異にした人工飼料育繭の紫外線による黄変指数を表12に示した。表12から明らかのように、オカラ添加量が増加するにつれて黄変しにくくなる^{10,11)}。その原因は人工飼料中のオカラ含有量が増加するにつれて、繭糸中に含まれるdCMP(あるいはCMP)の増加によるものと思われる。

カイコを人工飼料を用いて飼育した場合、尿素が絹糸線を通してセリシンとともに排泄され、その尿素量は飼料組成や飼料調製法によって異なることが報告されている。また人工飼料育蚕に比べてグアニン+グアノシン、アデニン+アデノシンの量が著しく多いが、ウラシル+ウリジンの量は少なく、さらにウラシル+ウリジンとチミン+チミジンの量比が著しく低い。人工飼料組成の改良により人工飼料育蚕の血液中の遊離核酸塩基ならびにヌクレオシドの組成が桑葉育のそれに近づくことが知られている。今回オカラ飼料はセリシン第I分画中から検出されたdCMP(あるいはCMP)は、オカラが多量に含まれた人工飼料を用いてカイコを飼育することにより、幼虫体内に核酸やアミノ酸代謝、総括して窒素代謝系が桑葉育した場合と異なり、体内に蓄積された物質の一部が吐糸に伴って排泄されたのではないかと考えられる。ここにも人工飼料周年無菌飼育

蚕の特徴がみられる。

3. 絹フィブロインについて

セリシンのアミノ酸組成は全体としては大きな差はないが、量的には、今回用いたオカラを主成分とする人工飼料では桑葉育繭に比べて多かった。一方、絹フィブロインについて同様に分析したアミノ酸組成は表13に示したように桑葉育フィブロインとほとんど同様であった。X線回析による結晶領域の構造にも変化は認められない(図6)。すなわち、オカラ飼料は絹フィブロインのアミノ酸組成と結晶構造には影響しないが、伊藤らによる結晶化度は桑葉育に比べて若干低下し、そのことが繊維の伸度を大きくしている¹²⁾。

4. おわりに

我々の養蚕(蚕糸生産)は桑葉に変わるオカラを主成分とした低コスト人工飼料の開発と無菌飼育法の確立によって、季節に支配された生産リズムから脱脚して、鶏や豚や牛のような動物生産農業と同じように周年で蚕糸生産ができるようになり、今後の我国の蚕糸生産のモデルになるものと考えている。それは1989年から地方自治体や民間企業などの協力によって、山間地、中山間地および都市工業団地など数か所に京都工芸繊維大学(KIT)方式の周年無菌蚕糸生産工場を建設して検証実験を進め、生産性、安定性、品質および経済性などについて明らかにし、収繭量、繭糸長や品質などの成績は、ほぼ満足する結果を示し、従来の桑葉育や人工飼料清浄育と全く違った新しい繭生産技術を明らかにした。この方法で生産した生糸は色が白く、光沢があり、繊維が細く、強度もあり、その上、絹糸の最大の欠点といわれていた黄変を防ぐなど、優れた生糸特性を明らかにすることができた。オカラ飼料育の蚕糸は、従来の桑葉育蚕糸の延長にあるのではなく、新しい産業という考えに基づいて、新しい素材として各方面で活用されるものと思われる。このように、高品質シルクはノートバイオロジーを導入した新しい周年無菌蚕糸生産の技術によって安定して生産され、エコロジーとエコノミーを両立させるものであ

り、従来の農業生産のそれでもなく、工業生産といわれるものでもない、全く新しい生産様式の産業と考えている。

なお、本年度(1998年)より蚕糸業法などが全て廃止されるのでKITを中心として、われわれが開発した新しい生産技術は自由に利用していただけるものと思っている。

本稿の内容については多くの方々のご協力によるものであり、深く感謝する。

参考文献

- 1) Hamamura Y.; Nature. **183**, 1746-1747 (1959)
- 2) 浜村保次郎;「カイコの人口飼育への道」みすず書房、東京(1975)
- 3) 松原藤好;新版生物環境調節ハンドブック、養賢堂、484-494 (1995)
- 4) 松原藤好;絹の50年、繊維機械学会誌、**50**, 252-258 (1997)
- 5) 森ら;日本蚕糸学会誌、**60** (6) 445-449 (1991)
- 6) 松原藤好ら;京都工芸繊維大学繊維学術報、**20**, 27-36 (1996)
- 7) 小松計一;蚕糸報、**26**, 135 (1975)
- 8) Ito H.; Tex. R. J. 755-757 (1995)
- 9) 松原藤好ら;日本蚕糸学雑誌、**62**, (2) 162-164 (1993)
- 10) 陳ら;繊維学会誌、**49**, (8), 416-420 (1993)
- 11) 森ら;京都工芸繊維大学繊維学術報、**18**, 85-95 (1996)
- 12) 伊藤ら;繊維学会(要旨)、**1B15** (1997)

松原藤好(まつばらふじよし)
京都工芸繊維大学繊維学部卒、現在、同大学名誉教授、財衣笠会常務理事として、繊維教育の進捗と繊維産業、特に養蚕のFA化に関する研究開発に従事。(財衣笠会、〒603-8326 京都市北区北野下白梅町29、衣笠会館、TEL. 075-461-5949、FAX. 075-463-6679)

山崎 隆(やまざきたかし)
京都工芸繊維大学繊維学部卒、現在、京都教育大学名誉教授、財衣笠会常務理事として繊維教育の振興と繊維産業に関する研究開発に従事。(同上)