「バイオテクノロジーと蚕」特集

人工飼料による蚕の飼育

林 屋 慶 三

1. はじめに

横浜が開港され、1859年、生糸75キロがフランスへ向けて輸出された。わが国の産業近代化がこの時から始まる。130年前のことである。1870年、フランス人、P. Brunat が官営富岡製糸に招かれ、生糸作りに動力機械が導入され、1900年前後の10年間には人手による座繰製糸から動力による機械製糸への転換が急速に進行し、蚕糸から製糸が分業してゆく。一方で養蚕は、強健で多糸量の繭を作る蚕の一代交雑種の育成が始まり1931年にはこれによる蚕飼育が全国に普及する。雑種強勢の原理の生物産業への応用である。この70年間に行なった蚕糸業の技術革新に支えられて達成した生糸輸出は1929年には35000トンに達している。生糸を財源にしてわが国の産業は活性化し、農業国から工業国へと近代化した事情をこの数字が物語っている。しかし、以後生糸輸出は1960年には5300トンと減少し始めた。この間に機械製糸法は諸工程を自動制御できるよう改良し、高能力と均質化、さらに省力を図る自動繰糸機を発明したが、原料である繭の生産が急速に下落しはじめ、1988年の繭生産は4万トンにすぎなかった。これだけの原料から得られる生糸は約8000トンで輸出どころではなく内需を賄うことすら出来ない状態になった。世界の工業国と自他共に許すわが国はすでに1975年を境に生糸の輸入国となっている。農業技術の近代化だけでは抗し切れない時代に入ったと云えよう。

機械がフル回転し、いかに能率を高めても蚕が年一度しか卵から生まれないならば、繭の生産には自ら限界がある。ところが、1870年代にイタリア・フランスで相次いで、自然条件では越冬して翌春孵化するはずの蚕卵に電気ショック或いは酸刺激を与えるとその中に年内に幼

虫が生れ出すものがあることが見出された。

Raising Silkworms on Prepared Food

筆者紹介 HAYASHIYA KEIZO, Emeritus Professor of Kyoto Institute of Technology.

京都工芸繊維大学、名誉教授、農学博士

筆者は、生物化学・蚕糸学を専門とされ、昭和54年(1979年)日本蚕糸学会より蚕糸学賞を受賞。著書(共著)に「カイコの人工飼料育への道」(みすず書房、1975年)がある。本稿では、季節にとらわれない養蚕を可能にした、蚕の人工飼料の開発について紹介して頂いた。

この発見が因となって、自然の摂理を人工的に破って、随時に卵の孵化を促す、蚕種人工孵化法が1910年代に入って日本の研究者によって、冷蔵と浸酸を組合せた塩酸孵化法となって確立された。一年中、思い通りの日に蚕卵を孵化させることが出来る技術が約70年前にすでに完成していたのである⁵⁾。

蚕は桑でしか育たない単食性の昆虫である。冬でも卵に塩酸孵化法を施せば幼虫が得られるに拘らず、その時期には桑の樹から葉が落ちてしまっている。当然のこととして、栽桑の方法が検討され、桑樹の剪定の位置と時期に工夫が加えられた。そして、春用・夏秋用・秋用などの桑葉を採る技術が出来上った。現在年数回の養蚕が可能になっているのはこの技術のおかげである。しかし、それは所詮農業の近代化という技術改革の範囲に止まるものであり、工業化したわが国では経営上不利な産業となってしまったのである。蚕が桑生葉に依存する限りはこの状態から抜け出すことは極めて困難である。

ところが最近、数千年来の蚕の唯一の飼料であった桑に代わるものとして、大豆粉を主原料とする人工飼料が開発されつつある。これは上述の蚕卵の塩酸による人工孵化法の開発と相まって養蚕の脱季節化を可能にするものとして注目される。工業社会への仲間入りの準備が技術的にはようやく整えることが出来たと云えよう。

2. 蚕の摂食機構と人工飼料

1960年は蚕の人工飼料の研究にとって特筆すべき年と云える。この年を中心に関連の論文が急増するからと同時に、これらの論文に研究方法上異なった2つの流れがあることに気付くからである。

蚕の全令幼虫期間の飼育に成功した2つの特徴ある人工飼料組成を第1表に示す。1つは農林省蚕糸試験場・福田研究室の組成¹⁾であり、他は京都工芸繊維大学・浜村研究室で作成したものである²⁾。筆者はこれを、

第1表 M₅₀ 飼料組成 福田ら¹⁾より

材 料	重 量	調 製 方 法
桑 葉 粉 末	5 g	国桑19号および一の瀬の桑葉を冷凍乾燥機で40℃以下で乾燥、粉末にし、80メシューの篩にかけた。
澱 粉 キ ナ コ	1.5 1	いずれも市販品で、粉末にし、80メシューの篩をかけた。
脱脂凍豆腐	1	市販の凍豆腐をエーテルで脱脂したものを粉末にし、90メシューの篩にかけた。

以上を20%蔗糖溶液10ccと防腐剤10ccとともに練合する。

M₀ 飼 料 組 成 林屋ら²⁾より

(A) 飼料組成	(B) ビタミン混合	(C) 摂食誘起物対	
セルローズ粉	5.0 g	β-シトステロール	11.3 g
脱脂大豆粉	2.0	モ リ ン*	50 mg
蔗 糖	1.0	イノシトール	20
澱 粉	1.5	イノシトール	50
無機塩混合物	0.09	磷酸カリウム	
(WESSON'S salts)		(K ₂ HPO ₄)	50
ビタミン混合物	0.04		
摂食誘起物	0.17		
王 乳	1.5		
アセチルコリン	0.005		
水 分	15 cc		
計 (乾物)	11.3 g		

第2表 桑葉成分の分画
(浜村ら 京王織大学術報告 1962 より)

実験番号	I	II	III	IV	平均養致
桑 葉 粉 末	153	138	213	274	195
M _w +M _E +R ₁	150	121	283	247	200
M _w	96	83	80		86
M _E	78	43	45		55
R ₁	74	68	—	98	80
M _w +M _E	110	99	42	—	84
基 本 飼 料	32	41	43	46	41

	養致
基本飼料 (B.d.)	40
(Bd-濾紙粉) + 桑葉粉末	192
〃 + β-シトステロール+イノシトール+モリン* + R-Ac	68
〃 + 〃 + 〃 + 〃 + 〃 + R ₂	160
B.d. + 〃 + 〃 + 〃 + 〃 + 〃	127
(Bd-濾紙粉) + 〃 + 〃 + 〃 + 〃 + K ₂ HPO ₄ + R ₂	204
(Bd-濾紙粉) + 〃 + 〃 + 〃 + 〃 + S-cp	162

基本飼料: 1%シュクロースを含む2%寒天溶液3ccで700mgのセルローズを固めたもの

S-cp: シリカを含むセルローズ

*モリン: 桑葉より分離したフラボンの一種イソクエルシトリンと同様効果をもつ、市販のフラボンのモリンを代りに用いている。

M₅₀飼料, M₀飼料と区別している。Mとは Mulberry (桑)の頭文字, 数字は桑粉末の混入パーセントを示す。この2つの組成から判るように, その研究の発端に違いがあって, 前者は蚕の代用飼料の研究から始まり, 後者は蚕と桑との関わり合いを尋ねようとする研究から出発している。

60年程前に桑の粉末と“おから”とからなる蚕の代用飼料という特許が申請されたことがある。恐らくこれが桑に代わって人工的なものを蚕に与えようとしたははじめと思われるが, 豆腐かすの“おから”はその後蚕糸試験場の研究陣によって, “キナコ”と凍豆腐に改良されて上記の M₅₀ 飼料となって飼育に成功し, そして現在は脱脂大豆粉末となって, 蚕を安定して飼育し通すことの出来る飼料となった。今迄のところ大豆より優れた素材は見当たらない。従ってこの一連の研究が大豆を素材として取り上げた意義は大きいと思う。しかし上記の組成からも分かるように, 桑葉粉末が50%をしめているこの飼料は蚕の桑に対する嗜好性をそのまま利用した飼料なのである。

一方 M₀ 飼料はその組成表のC項にある。“摂食誘起物質”に1つの特徴がある。この項に入っている諸物質は, さきに浜村らの「蚕はなぜ桑ばかりを好んで食べるのか」というテーマで行われた食性に関する研究³⁾によって明らかにされた, 蚕の摂食に特に関与する一群の桑葉成分なのである。これらの物質の決定には大体第2表⁶⁾に示したように, 桑葉成分を既知物質で置き換えてゆく手法がとられた。まず標準食として桑葉粉末を寒天で固めたゼリー食が作られた。この飼料を摂食して蚕幼虫が, 24時間のうちに排糞する糞数は一頭当たり平均20粒であると計算された。次に, 桑葉粉末をその抽出分画, 例えば, エーテル可溶性分画 (M_E), 水可溶分画 (M_W), 残渣 (R) などで置換し, 糞数が標準食に達するにはどの分画がどれだけ必要かが追求された。各分画はさらに細分画されて, 第1表の摂食誘起物質 (C項) に掲げた数種の物質群で桑葉粉末が置き換えられるまでに至った。すなわちこの研究は必要な蛋白質はどの位か, と云うような栄養の問題から離れ, 蚕の摂食が化学物質の刺激によって引き起こされるものと仮定し, その実証として桑葉中の数種の成分からなる寒天飼料に対して蚕が桑葉同様に摂食することを示したのである⁴⁾。蚕の摂食機構さえ分かれば, あとは栄養素を加えさえすれば自然に人工飼料になる。上記の組成表はこのようにして出来上った。

M₅₀, M₀の飼料は蚕の人工飼料の研究にとってはそれぞれ両極に位置する。そして両飼料共に実用的な飼料の開発研究に重要な基礎飼料なのである。

3. 蚕の人工飼料の特色

ニワトリ・豚・牛等の配合飼料はすでに完成品として市場に出廻り, あたかも食肉製造工場のような施設で飼育がおこなわれている。蚕の人工飼料の研究が今日まで進展をみなかった理由は多々あろうが, 筆者は次の4点が大きな関所であったように思う。

- ① 蚕は単食性とも云える桑のみに頼って飼養されてきた昆虫である。このことについては上述のようにその解決に10年以上の年月が費やされた。
 - ② 蚕はその成長の過程で4回も脱皮し, 最後に蛹へと変態, やがて再び変態して蛾となる完全変態をする昆虫である。
 - ③ 蚕は4回目の脱皮後, いわゆる5令期に入って, 急速に絹物質すなわちフィブロインおよびセリシンタンパク質を生産しはじめる。絹糸腺で作られるこのタンパク質が絹となるのであるが, そのための生理的・栄養的要求を満たす飼料が必要である。
 - ④ 蚕には水を飲む習性がない。したがって水分の補給は飼料から, すなわち水分を80%も含む練り餌として食べさせねばならない。
- ②および③の問題がある程度解決されて, 最後に残された難問が④であった。生物がその一生を託する食物であるから, 鳥も家畜も, また人間も栄養要求はそれ程違っておらない。まさに生物が生きるに必要な要素がすべて含まれる。これらを水と練るのであるから, まさにその飼料は微生物の培養にも最適であろう。すなわち練り餌での飼育は水分の保持と腐敗の防止とに神経をすり減らす約1ヶ月の闘いの日々となる。

これらの難問を切りぬけて, 1970年代には蚕糸試験場, 大学, 企業, それぞれに創意をこらした飼料および飼育法が学会に報告され, またパイロットプラントによる飼育テストが実施されるようになった。

4. 蚕の人工飼料育

人工飼料の研究に2つの流れがあったように, 人工飼料育のすすめ方にも両者には視点の相違が感じられる。蚕糸試験場では現在の養蚕体系をふまえ, 蚕作の安定化と労働力の軽減をする現実的な人工飼料育のあり方を追求し, 大学の研究者達のそれは, 人工飼料によってこそ可能な新規の飼育法を考えようとする, いわば理想追求型であった。

(1) 蚕の幼虫期間約25日のうち前半の1令から3令までの期間を稚蚕期と呼び後半を壮蚕期と呼んでいる。前半は小さく且つ抵抗力の弱い時期であるから, 温湿度の

管理や病原菌からの隔離などに神経が使われ、現在では農家十数軒が単位となって稚蚕共同飼育場で丁寧に蚕を育てるのが普通である。後半は共同飼育場から各農家に配蚕されるが、この約2週間のうちに全幼虫期間に必要な桑の80%が摂取されると云われるから農家にとってこの時期が最も忙しい。稚蚕共同飼育場は国の補助もあってよく整備され、とりわけ稚蚕用に細かく刻んだ桑葉を自動的に給桑する機械、自動給餌機が考案され、1970年迄には全国的に普及され、各飼育場に備えられていた。蚕糸試験場の指導の下で人工飼料育は先ずこの稚蚕共同飼育場に導入された。

前述のように、蚕は自ら進んで水を飲む習性がない。従って粉末の飼料を水で練って蒸気滅菌し、少なくとも80%の水分を保つ練り餌として与えることとなる。羊羹に似たブロック状に固めた飼料を細かく刻んで自動給餌機上の稚蚕の上から撒いて供する。すなわち経験を積んだ育蚕技術線上で桑をそのまま人工飼料に置き代えて行なう飼育法が導入された。飼育室の消毒清浄化、温湿度の管理等が強化されより厳密に行われていることは当然である。この方法は共同飼育システムの運営に既に経験があることから導入が容易であった一方で、細片にした飼料の乾燥が早い飼料交換の回数が多いこと、飼料の腐敗を防ぐため強力な防腐剤の助けを借りねばならぬことなどの困難があり、飼料の価格の問題も加わって、稚蚕のうち1~2令期間のみ、すなわち約1週間の人工飼料育に止まっている地域が多いのが現状である。

(2) 一方大学の研究室、農場、また実用化研究に入った会社の研究陣がグループとなって開発してきたのが平板飼料一下方給餌—無菌飼育法であった。水分80~90%の飼料を厚さ2~3mmの平板状に展開させ、上にや、硬質の網を置く。飼料上に載せられた蚕は一面に広がって摂食するが、この事が同時に飼料の乾燥を防止する。食べ終ると糞を下に残して蚕は上の網に上り、ここで眠に入って脱皮する。この方法では飼料をプレートに載せ密に積上げて飼育できる。又ベルトコンベア上に乗せて移動させて飼育もできる。この時自動的に飼料交換する事もできる(写真参照)。次の問題は飼料の腐敗、蚕の病気との闘いであった。多くの防腐剤がすでに知られており、なかでも抗生物質のクロラムフェニコールは有効な薬品であった。しかしこれらに頼ることは耐性菌の広がることも意味し、なるべく避けるべきで理想的な飼育法とは云えない。そこで検討されたのが無菌飼育法であった。蚕の無菌飼育は先ず大学で試験管を使用して検討され⁷⁾、病蚕を出すことなく飼育出来る見通しがついた。会社の研究陣ではこれを規模拡大するテストが繰り返された。この間にこの無菌飼育法に2つの利点が見出さ

第1図 家蚕人工飼料育室(京工織大)

施設全図 a 機械室, b 飼料調製室, c シャワー室, d 作業衣管理室
e 前室, f オートクレープ室, g 稚蚕人工飼料育室, h 壮蚕人工飼料育室
稚蚕人工飼料育室(5,000×3,000×2,500Hmm)
陽圧4~5m/mAq, 除菌率99.9%,
連邦規格10⁴以下

写真 家蚕人工飼料育装置
(京工織大)

れた。1つは病蚕が出ないこと、他は外部と隔離することが人手の加わらぬこと、すなわち省力につながるという点であった。かくしてケンブリッジフィルターという細菌を通さないフィルターを通過した空気を飼育室に導入し、室内を陽圧して外の空気の流入を遮断し、その中で蚕幼虫数万頭を全令期人工飼料で飼育できるようになった。大学農場にこの施設が出来たのは1972年である。飼育のはじめと途中数回の手入れのために無菌服を着用した技術者が入るから、完全無菌とは云えないが、病院の無菌手術室に相当する清浄さは容易に保つことが出来る。研究の発端が試験管による無菌飼育からはじまっていることから、病院の例にならい、無菌飼育法と称している。

第3表 桑葉粉末を含む人工飼料組成

Substance	Diet for 1st-4th instars (g)	Diet for 5th instar (g)
Mulberry leaf powder	25.0	25.0
Soybean oil	1.5	3.0
Defatted soybean meal	36.0	45.0
Cholesterol	0.2	0.2
Citric acid	4.0	4.0
Ascorbic acid	2.0	2.0
Sorbic acid	0.2	0.2
Agar	7.5	7.5
Salt mixture	3.0	3.0
Glucose	8.0	10.0
Potato starch	7.5	15.0
Cellulose powder	20.8	—
Vitamin B mixture	Added	Added
Antiseptic	Added	Added
(Total)	(115.7)	(112.4)
Water	300ml	220ml

(3) 1980年、京都において国際昆虫学会が開催された。日本蚕糸学会では世界各国の研究者達に、日本の蚕糸業と蚕糸研究および蚕糸に関する展示品等を紹介する小冊子を配布した。当然のこととして新しい蚕糸技術、人工飼料育の問題が取り上げられている。この中にすでに実用段階に入った2種類の飼料組成表が記されているので第3・4表にこれを転載する⁸⁾。一方は桑葉粉末を含むM₂₅飼料であり、他はM₀飼料である。前出の1960年前後の2種の飼料組成と比較すると、これらが基礎になって展開した20年の研究の流れが推察できよう。この間に多くの企業が新飼料の研究開発に乗り出し、8社が生産開発に歩を進め、種々のタイプの人工飼料を市販し、また飼育法の検討を行なってきた。飼料は産業用として粉体のものおよび水で練った湿体のもの、あるいは研究・教材用として予めネットに飼料を塗布してのち凍結乾燥をしたもので、使用に当たって水に浸漬するだけで済む

第4表 桑葉粉末を含まない人工飼料組成

Substance	Starter ¹⁾	Dry diet (g) Grower ²⁾	Producer ³⁾
Potato starch	10.0	10.0	20.0
Sucrose	100	10.0	—
Glucose	—	—	12.0
Soybean meal, defatted	30.0	40.0	60.0
Soybean oil, refined	3.0	3.0	3.0
β -Sitosterol	8.5	0.5	0.5
Salt mixture, Wesson's	3.5	3.5	2.0
K ₂ HPO ₄	1.0	1.0	—
Ascorbic acid	2.0	2.0	2.0
Cellulose powder	34.0	34.0	—
Agar	15.0	15.0	5.0
Citric acid	0.5	0.5	0.5
Sorbic acid	0.2	0.2	0.2
Morin	0.2	0.1	—
Total	109.9	119.8	105.2
Vitamin mixture	Added	Added	Added
Antiseptic	Added	Added	Added
Dist. water	300ml	300ml	300ml

1) For the 1st instar.

2) For the 2nd-4th instars.

3) For the 5th instar.

第2図 人工飼料育による繭生産方式の概要

from K. Hayashiya:

Proc. 7th International Wool Textile Research Conference Tokyo 1985 Vol II

便利なタイプのものまで製造されている。また飼料中のタンパク資源を緑藻に求め、大豆の代りにクロレラを用いた飼料も開発され、筆者も亦ユーグレナの利用を検討した。これらは最近人工飼料による蚕の原種飼育が求められているので、より摂食性のよい飼料の研究が必要となってきたからである。

一方摂食性を飼料組成の側から検討する方向とは別に、蚕の食性そのものを換え雑食性の蚕を作ろうとする研究が行われている。これは摂食という点で変異を起した、桑ばかりでなく他の植物も食するという広食性の蚕が最近見出されたことに始まる。この突然変異蚕を選抜して食性の広い系統を育成する研究が進めば、桑に依存し狭

食性であったがために今まで制限されてきた飼料素材も自由になり、栄養豊富で安価な材料も使用可能となる。まだ実用化には日時を要すると思われるが、蚕糸・昆虫農業技術研究所を中心に企業の開発部も加わって検討が開始されているので今後の人工飼料の開発に新しい展開が期待される。

(4) 第2図に京都工芸繊維大学農場で行なっている人工飼料による繭生産方式の概要を示した。システムⅠは稚蚕期人工飼料—壮蚕期桑育、すなわち現在全国的に普及しつつあるシステムを平板下方給餌無菌飼育法で行なうもので、年間6回の飼育が実施されている。システムⅡは主として冬期に行われているもので、全幼虫期間を人工飼料で飼育するシステムである。農場は教育の場でもあり研究開発の場でもあるので、このような2つのシステムを併用している。システムⅡを用いた新しい生糸生産も試行された。織度1.4d、糸長2600mと云う極細長糸長繭糸を吐く蚕品種を全令人工飼料育し、製糸・製織すると云うものである。多様化した要望に応える特色ある生糸の生産を小規模の飼育施設で年間を通じて人工飼料によって生産する場面を想定しての試行であった。絹の特色である。“しなやかな風合”の織物を生産することに目標を置いたものであるが、ほぼ満足のゆく成果をおさめた⁹⁾。

以上のように人工飼料の研究開発は蚕糸業の新しい展開のため、ほぼその準備を整えたと云えよう。70年前に完成した蚕種の人工塩酸孵化法と最近30年の研究開発が達成した人工飼料法との2つの技術がセットとなって、ようやく季節にとらわれない養蚕が可能になり、何時・何処でも蚕を飼い、生糸を繰り、絹を生産することが出来るようになったのである。

5. おわりに

筆者が1963年に日本農芸化学会誌に最初の M_0 人工飼料組成を報告してから暫くして、アメリカ・カーネギー研究所から研究協力の依頼があり、手製の人工飼料を約2年間送り続けたのは1965年前後であったと思う。後に分かったことであるが、カーネギー研究所では鈴木義昭博士(現基礎生物学研究所教授)によって、その時すで

に蚕の絹フィブロイン遺伝子の研究が行われていた。すなわち、蚕の遺伝子DNA中のフィブロイン・タンパクを作る情報が記録されている、ポリヌクレオチド断片を決定する研究が進められていたのである。これは、本特集「バイオテクノロジーと蚕」に関する先駆的研究であった。筆者は当時自分の研究こそ先端であると得意になっていたのであるが、すぐその後に新時代の研究、ニューバイオテクノロジーの高波が押し寄せてきていることをこの時知らされた。鈴木博士はその後も親切に新しい研究の進展振りを伝えて下さっている。筆者のこれまでの研究を強いてオールドバイオテクノロジーと呼ぶならば、人工飼料がニューバイオテクノロジーとの繋ぎの役割を鈴木博士を通じて少しでも果たしたことを喜んでいる。

文 献

- 1) 福田紀文・須藤光正・樋口芳吉：日蚕雑。29, No. 1~3 (1960)
- 2) 林屋慶三・内藤謙一・西田順・浜村保次：農化。37, No. 12 735~7 (1963)
- 3) Y. Hamamura: *Nature*. 183, 1746~7 (1959)
Y. Hamamura・K. Naito: *Nature*. 190, 879~80 (1961)
Y. Hamamura・K. Hayashiya・K. Naito: *Nature*. 190 880~81 (1961)
- 4) Y. Hamamura・K. Hayashiya・K. Naito・K. Matsuura・J. Nishida: *Nature*. 194, 754~5 (1962)
- 5) 吉武成美：「家蚕の起原と分化に関する研究序説」東大・農・養蚕研究室, 1988年
- 6) 浜村保次・林屋慶三・内藤謙一・松浦敬子・西田順：京工織大・繊維・学報。3, No. 3 567~82 (1963)
- 7) 松原藤好・加藤勝・林屋慶三・児玉礼次郎・浜村保次：日蚕雑。36, 39~46 (1967)
- 8) 日本蚕糸学会編：Sericulture in Japan (1980)
- 9) 林屋慶三・宮原達男・大西盛夫・田中武・中田英敏・木村光雄：京工織大・繊維・学報。11, No. 1 7~18 (1985)

(平成元年6月7日受理)