

昆虫の可能性と資源利用の試みー モデル、材料、機能

竹田 真木生(神戸大・自然科学研究科)

現在検討中のまたはすでに実用段階に入った、昆虫の機能利用は次の様にまとめられる。即ち、1) 生物農薬として、天敵昆虫と、花粉媒介昆虫の利用で、既にオランダを中心に産業利用が始まっている。ハウス栽培から果樹や野菜を経て、稲作にまで適用される見通しで、2030年の市場規模は600億円が見込まれている。2) 耐性強化作物。セクロピア蚕の抗菌性蛋白質セクロピン遺伝子をタバコに導入して青枯病耐性の形質転換体は実用化に入っている。2030年までの市場規模は2兆円と予測されている。3) 医薬品。バキュロウィルスなどの開発で2000年には、全ての医薬品の半分の生産が見込まれている。2030年の市場規模は2兆円と予測されている。4) 絹などの有用蛋白質の生産。2030年の市場規模はハイブリッドシルクで2,000億円、フィブロインの頭髪・皮膚用化粧品で330億円とみ込まれている。5) キチン、キトサン、シェラックなどの新素材で2030年の市場規模は500億円がみ込まれている。6) 畜産排泄物処理と再資源化で、2030年の市場規模は100億円が見込まれている。7) 昆虫産業の育成にともない、2030年には、周辺技術の独自市場が800億円規模に到達するだろう。8) 食用および飼料として、2030年にはそれぞれ、750億円及び500億円の市場が形成されるだろう。9) 環境指標昆虫が市場価値はもたないが、重要になるだろう。10) ペット昆虫の市場は2030年で8億円くらいはあるだろう。11) 昆虫のセンシング技術を用いた、バイオ素子とロボットに関する技術の市場が2030年にそれぞれ7,500億円および、1,650億円みこまれ、これらをすべて合計すると、5兆4898億円の昆虫産業が発展すると、社団法人農林水産技術情報協会の昆虫利用推進委員会(1993)はまとめている。

1 バキュロウィルスの Rapid expression vector 系

核多角体病ウィルスはバキュロウィルスという節足動物、特に昆虫に特異的に感染するウィルスで、一匹の蚕を短期間に融解して膿状の多角体の袋に変えてしまう。このウィルスは、強力なプロモーターをもち、優れた遺伝子発現ベクターとして、医学、農学、生物工学的な研究レベルでのツールとしてだけでなく、いまや産業レベルでも急速に、脂肪酸や糖の付加、燐酸化、分泌シグナルペプチドの切断の不可能な大腸菌のシステムを置換しつつある。

バキュロウィルス科(Baculoviridae)は感染細胞内に封入体を形成するEubaculovirinae、形成しないNudibaculovirinaeの2亜科に分けられている。前者はさらに核多角体ウィルス(NPV=nuclear polyhedrosis virus)と顆粒病ウィルス(GV=granulosis virus)属に分けられている。後者は、non-occluded baculovirus(NOB)のみである。NPVは80-200k Bの2本鎖DNAを封入体の中に格納している。寄主は鱗翅目、

直翅目、鞘翅目、脈翅目、膜翅目など 400 種に及ぶ。おもに脂肪体、血球核内で繁殖し、直径 0.5-1.5 の多角体を形成する。主要蛋白質はポリヘドリンとよばれる 30 kDa のものであり、この部分はウィルスの生存・増殖には必要ないためこの部分をインターフェロンなどの有用蛋白質と置換し、大量発現させる系をバキュロウィルス・ベクター・システムと言う。

表 1-1 昆虫ウィルスの分類と形状・サイズ

科・属	形態	鎖数	RNA/DNA	大きさ	遺伝子数	封入体の有無
ピコルナウィルス	直鎖	1	R (+)	7-8kb	5-8	-
ノダウィルス	直鎖	1	R (+)	5	2	-
ラウドウィルス	直鎖	1	R (-)	10-13	5	-
レオウィルス	直鎖	2	R	20-30	10	+
パルボウィルス	直鎖	1	D	5-6	2	-
イリドウィルス	環状	2	D	200	150	-
ボックスウィルス	環状	2	D	220-350	200-300	+
ポリドナウィルス	環状	2	D	200-400	100	-
バキュロウィルス	環状	2	D	100-180	100-150	+

大腸菌とプラスミドを用いたこれまでの発現系は手軽であるが、原核生物の系であるため、真核生物の遺伝子をうまく発現させることが難しい場合がある。このような背景から、1983年にキンウワバというヤガの培養細胞系とNPVを用いて、ヒトの β -インターフェロンの大量培養にアメリカのサマーズ一派が成功した。日本では、前田進が蚕の幼虫体を使って、 α -インターフェロンの発現に成功した。培養系を用いると、均質な遺伝子産物が得られるが、培養液や装置にコストがかかる。一方、幼虫を用いると、ずっと大量の産物が容易に得られる。蚕の体液はpH 7.0位で、プロテアーゼ活性が無いため分泌性蛋白質は血中に大量に安定に蓄積される。しかし、この系では、精製に手間がかかる。しかし、これらの問題も幾つかのキットで、急速に改善されつつあり、もちいられる遺伝子数も急速に増えている。酵素、ワクチン、抗原物質、ホルモンおよびその受容体、ビタミン受容体、毒素、インターフェロンなど広範な物質が既にこの系で生産されている。

トランスファーベクターは多角体産生部分の遺伝子のDNA断片から不要の多角体蛋白質をコードする部分を切り取り（プロモーター部分を残す）、プラスミド（pUC）のポリリンカー（アンピシリン抵抗性遺伝子を含む）をトランスファーベクターのリンカー（外来遺伝子の挟み込みのための制限酵素認識部位）として用い、この部分に大腸菌の系の組み替えでインターフェロンのような有用遺伝子を挟む。このレコンビナントプラスミドと多角体ウィルスを培養細胞に同時注入し、組み替えで、多角体蛋白質の代わりに有用蛋白質を発現するクローンを拾う。これをさらに培養細胞に感染させて増殖し、あとは

直接これをカイコに注射すればよい。

このシステムの基本原理のひとつは NPV の非常に高い **promotor** 活性を使うということであるが、他に高い **promotor** 活性を利用する道もある。ピテロジェニンの **promotor** 強力で、他の利点も考えて、深海にすむ魚の耐凍性蛋白質がショウジョウバエで発現されたという報告がある。このシステムでは体液中に発現された蛋白質が分泌される。

バキュロウイルス以外でも **pantropic retrovirus** という昆虫、ほ乳類、魚、甲殻類、軟体動物など広範な動物に感染力を持つレトロウイルスの LTR の間に 10 – 13 KB の DNA を挟んで **transfection** を行う方法が試みられている。この方法は細胞への取り込みが簡単に行われ、広範な細胞に適用でき、しかも安定な封入体を形成するので超遠心で簡単に精製できるのが利点である。

2 昆虫の抗菌性物質の利用

前述の様に、昆虫のレクチンの中には抗生物質耐性菌にたいする活性を哺乳類の免疫細胞に付与するものがあるが、これらの昆虫の生体防御因子を動物同士だけではなく、植物へ導入して、植物病原性細菌を殺すための形質転換体を作成するといった試みが広範に行われつつある。例えば、各種軟腐病菌、各種腐敗病菌、トマト潰瘍病菌、アブラナ科の黒腐病菌、イネ白葉枯病菌、麦黒節病菌等に対する耐性を付与する形質転換体作成素材として有望視されている。タバコ青枯れ病耐性形質転換体はセクロピンの導入によって既に実用化段階に入っている。

昆虫の抗菌物質は多くの動物病原微生物に対する活性を持っており、これらのアミノ酸配列のうち特に活性部位を合成して用いた場合にも活性が保持される場合が報告されており、あたらしい抗生物質の素材として注目されている。こうして活性部位を短くし、適宜代謝によって壊れる部分を修飾して強化し、人体で発現したときに抗原性も持たず持続性あるものが出来たときに初めて医薬としての利用が可能になる。例えば、天然の L- に変えても活性が維持される場合には、これが代謝されにくいという利点を生かして、持続性のものがつくれる可能性がある。こうした新しい素材の利用によって、MRSA や薬剤耐性マラリアの駆除する可能性が現在検討されている。

さらに、薬用に供せられているものの中には免疫活性を付与するインターロイキン様の活性を有するものも有るに違いない。これらのものはしかしまだ系統的な探索が始まっていない。

3 食糧化及び薬用昆虫の利用

既に世界各国で昆虫の食糧及び薬用への利用は広範に行われているが、ヒトだけではなく家畜の飼料等も含め、蛋白源としての昆虫の利用価値は高いと考えられる。薬用など徳用

資源としての価値も注目されるが、現在までの所、殆ど未開発である。

日本における昆虫食；クロスズメバチなどハチノコ（山梨、長野、岐阜）、イナゴ、蚕蛹（全国、後者は金魚の餌にも使われる）、ザザムシ（カゲロウ・カワゲラなどの水生昆虫幼虫）（伊那地方）、カミキリムシ幼虫（長野県地方）、孫太郎虫（ヘビトンボ幼虫）（子どもの癒おさえ）、タガメの卵（京都、千葉、静岡、岡山）、ガムシ（東北地方）。昭和の始め頃の我が国における食用昆虫は9目48種と農事試験場の調査は記している。ブドウスカシバ（カマユビムシ）やクロスズメバチ（蜂の子）も高価な値段で鳥の飼育家の間で取引されたようだ。

この他さまざまな昆虫が釣り餌として育てられる（コオロギ、ウジ、ハチミツガなど）。養殖用の金魚のエサとしてカイコの蛹、ユスリカ幼虫なども使われた。中国ではバッタを放したニワトリに食べさせている。エサとバッタの防除と両方の目的が達せられる。日本でも鳥のエサとしてヘリクロキンノウバ（フクロムシ）を捕まえる専門職人がいたらしい（熊本県）。清流魚類のエサとして水産業にも大きな寄与をしている。

日本における薬用昆虫；日本全国でナツアカネ、ショウジョウトンボ、ミヤマアカネなどの成虫はアカトンボと称せられ、喉の腫れ、咳止め、子供の疳、ジフテリア、口中の痛み、喘息、百日咳、解熱などに使われる。蟻螂の卵囊、成虫は眼病、脚気、解熱などに使われる。スズメバチの焼酎漬けは高血圧や前立腺肥大の人に効果があるそうで利用が広まっている。前述の農事試験場の報告によると12目108種が薬用に用いられているという。

中国における食・薬用としてのサクサン（中国東北地方）；蛹を炒める。サクサン酒（前立腺炎に効く）。料理に混ぜ込む。

漢方薬；冬虫夏草、ガムシ（テストステロンを含む）、赤トンボ、白彊蚕（硬化病に罹った蚕。副腎皮質を刺激し、鎮痙、鎮痛のほか外用薬としても使われる）、蟬退（空蟬のこと。解熱、消炎）。冬虫夏草は *Cordyceps sinensis* という昆虫寄生菌である。この菌は *Hepialus armoricanus* というコウモリガの幼虫に寄生する。この幼虫は一世代に4年かかり、*Polygonum viviparum* という海拔2300-4000m くらいの高地に生える日本のイブキトラノオの仲間を食する。滋養強壮、喘息、貧血、糖尿病、肝炎から免疫附活（NK細胞の附活）、癌抑制までの効果が知られている。抗癌活性についてはコルジセピン（Cordysepin= 3'-*deoxyadenosine*）が Gunningham によって Nature(1950)に記載された。作用機作はRNAおよびDNA合成阻害といわれている。もう一つ近年 allograft（別個体または異種間臓器）の移植が行われるようになって allograft を拒絶する免疫機構の抑制が必要になってきた。カビの仲間からはすでにシクロスポリンという成分がとられこれがヘルパーT細胞からのインターロイキン-2（IL-2）の放出抑制を行う機構が知られているが、冬虫夏草からはISP-1(天然物)および合成物のFTY-720がIL-2の作用を抑制しヘルパーT細胞の増殖抑制によりサブレッサーT細胞、キラーT細胞の増殖を抑制するという機構が明らかになった。この成分はツクツクボウシセミタケ *Isalia sinclairii* から同様のものが得られている。循

環器系疾患にたいする効果は D・マンニトールによるもので、カルシウム拮抗的に働くのが作用機作であると考えられている。

地球温暖化、薬剤耐性ハマダラカ、クロロキンなどに耐性のマラリア原虫の出現によってマラリアの蔓延の危険が叫ばれていて、こうした状況の中漢方薬が見直されている。こうした漢方薬の一つにアリジゴクがある(蟻獅子)。アリジゴクは体外消化をするが、この時強い毒性の物質を注入する。このとき餌食となるものは強い蛋白質分解酵素の力で液化化されて皮膚を残して吸い込まれると思われる。アリジゴクには昆虫には効かないが脊椎動物に効く強力な毒物質も持っているらしい。

世界の昆虫食；タガメ(タイ)、セセリチョウの幼虫(メキシコ)、飴のなかにいれたチャイロコメノゴミムシダマシ幼虫(メキシコ)、タイワンオオコオロギの仲間(タイ、インドネシア)、シロアリ(アフリカ)、バッタ(各国)、ココナツゾウムシ(ベトナム)。シロアリは 100 g あたり、561 kcal、イナゴでも 278 kcal あり、栄養価は高い。

食用・薬用としてのゴキブリ；卵鞘のフライ(タイ)、スープ(イギリスの船乗り)、ゴキブリ茶が破傷風に効く(アメリカ・ルイジアナ)、ゴキブリ酒がインフルエンザに効く(ペルー)、ゴキブリを焼いた灰が虫下し及び砂糖漬けが癌に効く(ジャマイカ)、漢方薬。

植物の葉や茎にゴール(虫えい=虫瘤)をつくるものがあるが、その中で没食子、五倍子と呼ばれるものが古代から薬用や工芸に使われてきた。主成分はタンニン酸であるが、薬用だけでなく、皮のなめし、インクの素材、染料としても重要なものであった。タンニンは粘膜や組織を形成する蛋白室を固定し、下痢止め、消炎、止血等の作用がある。

4 昆虫型マイクロロボットの開発

昆虫の様に動く機械を作ることは、工学者の夢であり、機械の機能を効率化させ、ダウンサイジングを行って行くとそれは限りなく昆虫の様な形になっていくという。その意味で、昆虫はすべての精密機械のモデルであり構造的なインスピレーションを工学者に与える。それだけではなく、機械工学は電子工学と結合して、機械の知能化に向かって進む。現在のコンピュータや人工知能では、昆虫のような複雑な行動は作り出せないが、昆虫の神経細胞の数を 10 万とすると、かなり手の届く範囲になってきている。すでに、摩擦力を最小にする弾性ヒンジや(昆虫の飛翔構造からヒントを得た)、微小の筋構造からモデル化された静電アクチュエーター(駆動機)、一枚の板から羽ばたきを与える 3 次元構造の蚊ロボットとよばれるもの、自由に歩ける、1 mm の蟻ロボットも試作されている。

複数の小さなシステムが自立的に動きながらお互いに協調した全体秩序が維持されるシステムを自立分散と呼んでいる。例えば、魚の群や鳥の渡りにはリーダーは存在せず、中央制御的な統制ではない。これは極めて生命特異的な機能であって、一部が壊れても損害が軽く棲むものである(ロバスト性)。昆虫の神経系は他ならぬこうしたシステムのひとつであり、工学的応用の一つのモデル系である。昆虫の脳細胞は 1-10 万個で、100 以

上のヒトと比べればはるかに小さいし、昆虫のニューロンは大きく特異な形状も有していて個別認識がたやすい。さらに、昆虫の刺激応答は定型的で、一定の外界からの刺激に対する反応が厳密である。これもモデルシステムとしてはよい。CNSは3つの階層から成り立っている。(1) 感覚器に入力された刺激が定型反応をひきおこす鍵刺激かどうかの判断をする機構。(2) Central Pattern Generator=CPG; eclosion hormone 放出によって規則的な筋収縮がみられるが、こうした運動パターンを発生させるメカニズム。(3) (1)と(2)を結合するニューロン=司令 (command) ニューロンの3階建て構造である。3つのCPG(胸部の各節に対応)を脳のコマンド(C)が支配する歩行するロボットが考えられた。左右と前後のユニットはお互いに抑制しあう。Cからはそれぞれのユニットへ刺激の入力が入る。各ユニットにはそのユニットの構成部分を制御するペースメーカー(P)がヒエラーキーの頂点にいて、前方への振りを興奮させ、脚の引き上げ(FT)と後方へのふり(BS)が抑えられる。脚のふりが極大値に達すると、それぞれの振り角のセンサーが働く。後方へのセンサー(BAS)はPを刺激する。前方へのセンサー(FAS)はPを抑制する。FASはFSを抑制し、BSとFTを刺激する。CはPだけではなくBSも刺激する。こうして、多重のフィードバックシステムができあがり、これによって左前・右中・左後の3脚と右前・左中・右後の3脚が交互に踏み出し他の組が体を支えることになる。しかも、踏みだしは後ろから前へと波動のように伝わる。Pの出力に応じて歩行速度が変わり、それに応じた歩行パターンが再現されたという。このようなシステムでは、脚が一本とれたような状況でも他の脚は独立して作動できる。

5 絹の医療素材などへの利用

絹は、伝統的な用途のほかに、すでにハイブリッドシルクとして、加工した形の使用が繊維としても行われているが、新機能として、化粧品・機能食品への添加剤をはじめ、一定の処理を加えて得られる絹膜の酸素透過性と透明性を人工皮膚などの医療目的に用いられたり、コンタクトレンズの材料として注目を集めている。絹は溶かした溶液(塩化カルシウムや臭化リチウムなどの高濃度溶液。そしてこれを純水で透析する。)の蒸発速度を制御すると、溶液状、粉状、膜状など様々な形状の素材が調製できる。こうした特性は他の素材には見られない絹だけの特色である。この水溶性の絹をメタノール溶液に晒すと、水不溶性になる。この処理時間をかえると異なった酸素透過性の膜が得られる。これをコンタクトレンズの材料にする試みがなされている。酸素の透過性だけでなく、水分の透過性もかえられ、この性質は人工皮膚素材として重要である。また、こうして調製した絹膜はコラーゲン膜に匹敵する細胞接着性を示す。これは、C- の塩基性アミノ酸特にArgに由来するところが多い。そこでこの部分を化学修飾すると、全く新しい特性が示された。酵素の保持材としても優れているため、GOD(グルコース酸化酵素)を固定化した膜はグルコースセンサー(過酸化水素電極と組み合わせると電気信号に転換される)として使われ

る。絹膜に固定した酵素はpH幅が広くなり、酵素活性も安定するから、担体として最適である。血液とコンタクトしても血液凝固を引き起こさないから、医療素材としても最適である。これにいろいろな生理活性物質を付加すると、徐放担体としても機能する。将来は人工肺や人工血管などの素材として期待されている。再生フィブロインのpH4くらいに下げ、ゲル状態にした後凍結乾燥すると粉になる。この超微粉末は、その吸水・吸湿性が化粧品素材として注目されている。腱の損傷の修復過程で人工腱として絹蛋白質の利用が考えられている。力学的特性の他に骨の材料であるハイドロキシアパタイトとの結合性が問題になるが、ハイブリッド絹の工夫により、カルシウム沈着率が飛躍的に向上している。したがって、これから有望である。

6 血液凝固系と吸血性昆虫 (鎮西講師を参照)

吸血の昆虫やマダニなどの節足動物は病原性微生物の媒介者として、忌み嫌われるが、彼らが血液の凝固阻害因子、血管拡張物質、血小板凝集阻害物質、炎症抑制物質の宝庫であることは見逃されている。血液凝固はそれ自体はヒトの生体防御反応であるが、脳の外科手術の場合などはそれによって命を失うことがかなり高い確率でおこる。血液凝固はカスケード機構で起こるが、その中間過程のいろいろな因子の特異的阻害蛋白質がこれらの昆虫から見つかってきている。例えば、*Rhodnius prolixus* からは約 20 kDa の prolixin-S という凝固阻害因子が取られているが、これは VIIa 因子の有無に関わらず、Ca²⁺ と phospholipid の存在下で、IXa 因子による X 因子の活性化を阻害する。Rhodnius、この Xase complex とよばれる系の阻害因子のほかに、もう一つ IIa 因子の阻害因子も唾液腺にもっているらしい。後者は serine protease かもしれないと考えられている。X 因子の活性化阻害を起こす因子はこれまで全く知られていなかった。Prolixin-S は 402 nm に吸収極大を持つ赤い蛋白質でヘムを含む。Prolixin-S はこのヘムと相互作用し、NO を発生させて血管の拡張を引き起こす。それゆえ別のグループの研究者はこれを nitrophorin 2 と呼んで独自にこの物質を追ってきたが結局同一の蛋白質であることが判明した。同じ吸血性のカメムシでも、*Triatoma* と *Rhodnius* では異なった作用部位をしめす。これらの因子を上手く使うと手術中の死亡が劇的に下がると期待されている。マダニからは、Xa 因子を阻害する tick anticoagulant peptide (TAP) や ixin というトロンビン阻害性の因子が取られている。ツェツェバエからもトロンビン阻害因子が得られている。

表 6-1 マダニと寄主の間の免疫的攻防

ホストの側の防御

- ・別の補体系
- ・Anaphylatoxin B
- ・NK細胞

マダニ側の対応

- ・C3b 蓄積、convertase 形成の阻害
- ・唾腺の carboxypeptidase による不活性化
- ・唾腺分泌物質による機能抑制

- ・ T細胞の増殖
- ・ 唾腺分泌物質による増殖因子の反応抑制
- ・ IL-1, TNF 因子の Mφ による教育
- ・ 唾腺分泌物質によるサイトカインの抑制
- ・ IL-2, IFN-γ の T ヘルパー 1 細胞による教育
- ・ 同上

表 6-2 いろいろな吸血性節足動物による血液凝固系の阻害

給血する側の種	凝固系のターゲット因子
<i>Dermacentor andersoni</i> ¹	VIIa 因子
<i>Eutriatomamaculata</i> ² , <i>Ixodes ricinus</i> ¹	Va/Xa 因子/PT>>>> トロンビン
<i>Glossina austeni</i> ³	フィブリン
<i>G. morsitans</i> ³ , <i>I. holocyclus</i> ² , <i>I. ricinus</i> , <i>Tabanus bovinus</i> ³	トロンビン
<i>Ornithodoros moubata</i> ¹	IX 因子>>>> Ixa 因子
<i>O. moubata</i> , <i>E. maculata</i> , <i>Similium vittatum</i> ³	Xa 因子>>>>
<i>Rhodnius prolixus</i> ²	VIIa 因子>>>> VIIIa/iXa/X 因子
<i>D. andersoni</i> , <i>S. vittatum</i>	V 因子>>>> Va 因子
<i>E. maculata</i> , <i>O. moubata</i> , <i>R. prolixus</i> , <i>S. vitytata</i> , <i>Triatoma infestans</i> ²	トロンビン>>>>

1. マダニ、2. サシガメ、3. サシバエ(*Glossina*)、アブ(*Tabanus*)、ブユ(*Similium*)

7 モデルシステムとしてのショウジョウバエの利用

ショウジョウバエは実験生物として様々な利点を備えている（短い発育期間、全般的な生物学的情報の蓄積、人工飼育の容易さ、キメラ個体の作製、唾腺多糸染色体＝polytene chromosome のバンディング、卵細胞への外来因子の注入技術、母性効果欠失個体の作成、突然変異マーカーと変異株のストック、エンハンサートラップ法とクローン解析法、GAL4/UAS システムによる遺伝子の過剰発現、細胞・核移植技術、突然変異の誘発とバランス染色体など突然変異固定化法の確立、中でも P 因子による外来遺伝子の挿入と移動等の P 因子関連技術）。哺乳動物の遺伝子機能をテストするときその遺伝子をショウジョウバエに組み込んでテストすることができれば場所も時間もコストも節約できる。哺乳類の様々な薬剤にたいする代謝酵素（チトクローム P 450 など）が P 因子によってショウジョウバエに導入されてテストアニマルとして薬剤代謝や発ガン性の検定に用いられている。マウスなど哺乳動物の遺伝子をヒトの代替物として用いるより、この系ではヒトの遺伝子を直接利用できるというメリットがある。

T.H.Morgan 以来、ショウジョウバエはこれまで生物学の様々な分野で先駆的な発見をもたらしてきた。既に述べたもののうちでは、エクダイソンによるパフの誘導（ホルモンが遺伝子に作用するという例）、形態形成（一連の homeotic genes）や行動（*per* や *tim* の例、

circadian rhythm の formal analysis)、トランスポゾンの発見、放射線による突然変異の誘導などがある。

忘れてならないのは、ショウジョウバエのシステムからの神経生物学的な貢献がある。2つの分野における貢献がある。第一は学習の機構についてのモデルとしてのそれで、第2は神経化学、特にイオンチャンネルや神経伝達物質の受容体の構造決定における貢献である。学習・記憶のメカニズムについてもショウジョウバエはいくつかよいミュータント系を提供した。学習の系については電気ショックや褒美が与えられるのだが、例えば amnesiac(amn)というミュータントはほとんど正常の学習が行われるが、急速に忘れる。dunce(dnc)というミュータントはいくつかの条件付け学習で忘れっぽいものであるが、これはフォスホヂエステラーゼが上手く働かない為に、高濃度の(6-8倍) cAMP が脳内に蓄積されることで、シナプス膜電位を恒常的に高め (hyperpolarization)、神経伝達物質が不足するという状況をつくりだすことによってその忘れっぽさを実現することになる。この遺伝子は 140kb 以上という大きなサイズのもので、多くの転写開始点を含んだ非常に複雑な構造をしている。複数の alternative splicing sites と 3' 末端の異なった processing sites があって、4.2kb から 9.5kb のサイズの少なくとも 8 つから 10 の mRNA を生み出す。そのうちの 1 つは雌の妊性に関わる。2つのイントロンのうち、1つのイントロンは 79 kb という大きいものであるが少なくとも 2つの遺伝子をコードする (*Sgs-4* と *Pig-1*)。もう一つも 5つ以上の遺伝子をコードする。イントロンは普通遺伝子をコードしないのであるから、これは珍しい例だ。この genes within genes 構造はこの例のものだけではないが、これが最も良く解析された例だ。*Sgs-4* は glue protein と呼ばれる幼虫期に発現する蛋白質をコードする。これは *dunce* と同じ方向に読まれる。*Pig-1*(pre-intermolt gene)も幼虫の唾腺に発現するが、これは逆方向に読まれる。*Dunce* は保存された遺伝子である。なぜならその homologue はヒト、ラット、マウスでも見つかっているからだ。*dunce* の発現は mushroom body の傘の部分に限局される。この部分は視覚や嗅覚の情報が入ってきて、ヒトの海馬 (ヒトの記憶の中核) に似たところである。hydroxyurea を食べさせるとこの部分が壊れる。すると、匂いと結合した学習ができなくなる。また mushroom body の異常を呈する mushroom body deranged(*mbd*)や mushroom body miniature(*mbm*)というミュータントでも学習ができなくなる。*rutabaga(rut)*というミュータントは cAMP を減少させる。この遺伝子は実は Ca^{2+} /カルモジュリン感受性のアデニル酸シクラーゼであった。この酵素は G s 蛋白質によってカプリングされている。この2つ (*dunce*, *rutabaga*) のミュータントの解析から記憶のメカニズムに cAMP が関与することが明らかになった。DCO (catalytic subunit of protein kinase A)も同じ情報のフローの経路にのっているから当然のように、学習能力を損ねた。一方、turnip(*tur*)というミュータントは匂いの区別ができなくなり、幼虫も馬鹿になり、足の置き方も学べず、報償系の働く記憶がとんだ。この遺伝子は X 染色体に座乗し、protein kinase C(PKC)の働きと関わるものであった。turnip はほかならぬ PKC kinase である。このほかに、amnesiac を含み、radish(*rad*), cabbage(*cab*),

latheo, linotte などというミュータントがとれている。radish は記憶の固定化に働く遺伝子であることが解明された。ドーパミンとセロトニン合成にかかわるドーパ・脱炭酸酵素のミュータント (*Ddc*) も学習と記憶を損なう。実際、ドーパミン作動性の線維は mushroom body にはいつている。

最近、ヒト第 21 染色体の少ない遺伝子の overdose によって引き起こされることが判っている Down's syndrome (新生児の 1/700 くらいの確率で生まれる) を引き起こす遺伝的要因の解析の中から、拾い出された exon の一つがショウジョウバエの single-minded(*Sim*) に非常によく似た塩基配列を持っていることが明らかになった。*sim* はショウジョウバエの神経系形成の初期に midline 形成の master regulator として働く transcription factor で、ラットの胎児でも顔や頭蓋骨、脊椎の形成の起こる発生の初期に発現する。このことから、Down's syndrome はこのころに発現する神経系形成の異常によって起こるのではないかと推察された。これはひとの病気の原因の解明にショウジョウバエが貢献した例である (Dahmane, N. et al., 1995, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 92, 9191-9195)。

神経活動を担う主役は神経細胞膜上のさまざまなイオンチャンネルであるが、このうち一番原始的な K^+ イオンチャンネル (early and late voltage dependent currents, early and late calcium dependent currents を制御する少なくとも 4 種ある) の遺伝子群はショウジョウバエでまずクローニングされ、それをもちいてヒトやネズミのものがとられた。Shaker(*Sh*), Shal, Ahab, Shaw といった遺伝子は哺乳類、節足動物、軟体動物からみついている。つまり系統発生の初期からあったのだということになる。

アセチルコリンエステラーゼ遺伝子 (*Ace*) は哺乳類とショウジョウバエの両方で決定されたが、前者が祖先型で、後者の方にはイントロンの挿入があった。アセチルコリン受容体の方は非常に高い homology があった。

8 ミツバチの資源利用

ミツバチはおそらく人類の歴史における最初の家畜に違いない。紀元前 8,000—15,000 年くらいの洞窟壁画に蜂蜜を採取するヒトの絵が存在する。養蜂は古くエジプト文明において盛んに行われた。紀元前 2400 年の寺院の壁画に養蜂の様子が描かれている。蜂蜜を材料とした酒 (mead) が人類の最初の酒でもある。インドからアレキサンダー大王の遺体の運搬を行ったように、中世の豪族・王族は死体の保存のために蜂蜜を利用し、ヨーロッパでは数百年前の彼らの遺体がほとんどそのままの形で出現することがときどきある。これは、蜂蜜に含まれる抗菌物質 (H_2O_2 など) による。花粉にも抗菌物質が入っている。ミツバチの生産物は蜂蜜の他に、1) ローヤル・ゼリー、2) プロポリス、3) ビー・ワックスなどがある。花粉もアミノ酸に富み、食用に供せられる。受粉昆虫としての役割も特筆される。

昆虫界でミツバチは非常に特殊な存在であることは間違いない。1) 高度な分業（行動多型=polyethism）と安定した社会性をもつこと、2) 優れたナビゲーション能力と高度な学習能力をもつこと、3) 高度なコミュニケーション能力（音、匂い、ダンス）をもつこと、4) 短い幼虫期間を含め、高い繁殖能力をもつこと、5) 雄雌の産分け能力をもつことなどがあげられる。これらの機能を解明することは、昆虫機能利用（社会学的、工学的、資源利用学的、生物学的、行動学的、神経生理学的など様々なレベルで）の一つのモデルケースとなるだろう。行動多型は日令に依存するだけでなく、蜜の産生量、コロニー構成、温度条件などに応じて調整もされる。そのための予備役のような蜂がコロニー中に一定数蓄えられている。

ミツバチは最も徹底し、完成した社会性昆虫である。個体は一つの集団という superorganism の部分である。無駄な部分は直ちに捨てられる。繁殖期が終わると雄 (drone, $n=16$) は働きバチ ($2n=32$) から給餌を止められ、死んでゆく。彼らは自分で働くことをしないので（口器が退縮している）、死が待つばかりである。働きバチも年老いて行くに従って、内勤から外勤へとよりリスクの高いところに追いやられる。内勤蜂 (house bee) の仕事は巣房の清掃、育児、巣作り、食物貯蔵などである。外勤蜂 (forager) の仕事は門番に始まり採餌蜂を経て、最後は兵役で、外敵に自らの産卵管である毒針を刺し込むことで絶命する。給餌の量も女王蜂 ($2n=32$) 場合の 3000mg 程度に比較して 15mg 程度しか与えられない（雄の場合は約 45mg 程度）。育房も差別されている（働蜂、雄は横向きで小さく、女王は下向きで大きい=王台）。産卵から羽化までの期間はこのサイズの昆虫にしては早い。それは花粉と蜜という高栄養物が与えられることと共に巣内の温度が 33-36°C に保たれていることにもよる（低温の場合は翅を振動させ、高温の場合は水をつけた口吻を出し入れし、気化熱を奪うことで調節する。この tongue-lashing と呼ばれる行動で蜜の濃縮も行う）。このような貯蜜は代謝の特性にも反映されている。一般に昆虫の血糖はトレハロースであるが、ミツバチをはじめとする社会性ハナバチでは蔗糖を分解したグルコースとフラクトースが血中に多く、それを直接燃やし、過剰のエネルギーは胸の長い毛から放熱する。このエネルギーによってニホンミツバチは天敵のスズメバチに密集し、これを蒸し殺すことができる。この時の温度は 45°C にもなるらしい。

ナビゲーションの能力は、太陽コンパスに含まれる Zeitgedachtnis という概日振動に基づく時間記憶装置と偏光を感受する能力によって高められていることは既に紹介した。従って、太陽が地平線上にある限りナビゲーションは可能である。一匹の働き蜂は 900km くらい飛ぶという。ヒトに直せば、100,000km (地球 2 周以上) にあたる。正確なナビゲーションが出来なければ帰巣出来ない。太陽の角度は光に含まれる UV 光の割合と入射光の幅を知ることによる。このほかに、地磁気を感受するという証拠もある。蜜蜂のダンスはかなり詳しい情報を伝達するようで、ダンスする方は自分の経験を正確に再現するのだし、伝達される側は側でよくそれを記憶する。色も、形も、匂いも、パターンもよく記憶する。

蜜蜂には3種のダンスが知られている。尻振りダンス (waggle dance) は収穫ダンスとも言われ、外勤蜂が食物源の位置を伝達する。8の字をかくときと、円形の場合 (円舞) がある。身震いダンス (trembling dance) は花蜜採集蜂が食物貯蔵蜂を増やすためのダンスで、尻振りをさせないようにして花蜜の搬入を抑制する作用もある。振身ダンス (vibration dance, jerking dance) は背腹振動 (dorso-ventral abdominal vibration) ともいわれ、16Hz、1・2秒の短い振動で他の蜂に乗っかり採餌を促す。収穫ダンスは、巣と花の距離によって異なる。100m以内の時は円舞になる。15秒間に9・10回転するときはこの距離は100mくらいであるが、200mのときは7回転、1kmは4・5回転、6kmでは2回転と長くなるほど遅くなる。8の字ダンスの中央線と垂線に形成される角度が巣を起点に花と太陽のなす角度になる。回転するときの翅のたてる音の振動数が問題なのだと唱える学派もある。2種類の採餌ダンスがあって近距離 (数 cm 以内) で働く少数のハチへの伝達 (250Hz 位) と広域に発信する伝達が区別されている。前者の場合には空気の振動が触角の共振という形で伝達されるのに対し、後者の場合は巣板への振動の伝達を介する。ミツバチのコロニーは餌の条件が悪くなったときやスズメバチに襲われた場合などに逃散を起こすことが知られているが、この逃去に先立って8の字ダンスではなく異常に長い発音をともなうダンスを巣内のあちらこちらで静かに踊るといわれている。巣板の振動は肢で感受されるらしい。

蜜蜂は様々な音を信号に使う。コロニーにおいて女王の数は適正 (普通1) に保たなければならない、分封のときは一匹の女王が巣に残されねばならない。新旧の女王のコミュニケーション、女王と働き蜂のコミュニケーションにも音が用いられる。多くのフェロモンや匂いも用いられる。女王の大顎腺から分泌される(E)-9-oxo-2-decanoic acidは、1) 働き蜂の卵巣成熟を抑える。2) 働きバチを女王に引きつけ女王の世話をさせる。3) 新しい女王の創出を抑える。この物質の濃度が落ちたとき、働きバチは新しい女王の送出手を始める。この時、王座の創出をするか否かの決定は直接参加の民主主義で決定される。即ち、ある蜂は分封に賛成してワックスを積むが、別の蜂はそれをはがす。そういう過程を暫くして全体意志が決定されると全ての構成員はどちらかの決定に従う。また、ニホンミツバチは威嚇音を発するらしい。

ローヤルゼリーは働きバチが将来の女王のために餌として与える特別の生産物である。下咽頭腺から分泌され、花粉由来の蛋白質性のヨーグルト状のものである。ビタミンB類と、アセチルコリン含量が高い。

プロポリスは樹脂を吐き戻してつくられ、粘着性で蟻からの巣の防衛に使われる。ともに美容・健康食品として用いられる。フラボノイドを多く含み、アレルギー性疾患、内科系疾患、循環器系疾患、ストレス、皮膚や耳、鼻の症状に効くといわれる。ヴァイオリンのつや出しにも使われる。

ビーワックス (蜜蝋) は蝋燭の材料として使われてきた。この蜜ろうやカイガラムシのワックスは石油ワックスにない多くの特性をもっているため、伝統的に様々な用

途に使われてきたが、電気機器の絶縁材や情報記録材、食品・医薬品のコーティング剤、マイクロカプセル添加剤、高機能プラスチックの離型剤などとしてハイテク時代にも欠かすことができない素材となった。この蟻は腹板の間から分泌される。

さらに、一匹の女王が1日あたり2000-3000卵も産むことができるため虫体も資源利用が可能である。虫体は捕食性天敵としてのテントウムシの代替試料にされる。

ミツバチの抗菌蛋白質であるアピダエシンも機能性蛋白質として利用される可能性を秘めるが、まだシステムティックな利用は行われていない。

蜂毒を医療用に用いる研究もあるが、全体的には未開発の領域である。民間のレベルでは、神経痛、リウマチ、肩こり、腰痛、化膿性の病気を直す蜂針療法というのがあり、広まってきている。痛みや痒みを引き起こすのはアミン類である。ヒスタミンやノルアドレナリンが含まれる。毒腺中にある神経毒のアパミン (apamin) とよばれる毒性ペプチド (H-Cys-Asn-Cys-Lys-Ala-Pro-Glu-Thr-Ala-Leu-Cys-Ala-Arg-Arg-Cys-Gln-Gln-His-NH₂) は1と11, 3と15番目のCysが架橋したものであるが神経毒として最小のペプチドで唯一 Blood-Brain-Barrier を通過するものである。毒腺の MCD Peptide または Mast cell degranulating peptide と呼ばれるペプチド (H-Ile-Lys-Cys-Asn-Cys-Lys-Arg-His-Val-Ile-Lys-Pro-His-Ile-Cys-Arg-Lys-Ile-Cys-Gly-Lys-Asn-NH₂) は μ M 以下の濃度で voltage-gated K⁺channel を阻害する。CA-1 と呼ばれる海馬のニューロンにおける興奮性後シナプス電位の long-term potentiation(LTP)を引き起こす。これは3と15,5と19のCysの間に disulfide 結合が入る。このペプチドは肥満細胞から顆粒放出、即ちヒスタミン遊離作用を持つ。Melittin という26アミノ酸のペプチドはCaイオン依存性にカルモジュリンと結合し、phospholipase A2を活性化しPKCをMg²⁺-ATPase 依存的に不活性化する。これはG蛋白質を直接活性化する。この phospholipase A は溶血、筋収縮、呼吸酵素系への作用が知られている。ヒアルロニダーゼという酵素も含有されていて、これは蛇、さそり、蜂の毒腺からみつかつてきており結合組織に作用してその透過性を変える。ミツバチの場合もはじめ spreading factor として他の毒成分の速やかな拡散を促すものとしてみつかった。ミツバチ毒腺cDNAから推定されたヒアルロニダーゼは349アミノ酸からなるポリペプチドで4つのシステインと3つのN-glycosylationのおこりうる部位を持っていた。プロ酵素から Thr-Pro で切り出しが起こるがこのような切り出しはあまりほかに例がない。homology 検索の結果大腸菌の41kDaのポリペプチドとPH-20とよばれるモルモット精子の膜蛋白質と相同性が見つかった。前者はヒアルロニダーゼの活性を持っていたが、後者は特に精子が卵にくっつくときに機能するものであって。ここから逆にヒアルロニダーゼが受精に関与することが示唆されたのである。このほかにヒスタミンも含まれている。刺針の根もとの有毛膜組織からはイソアミルアセテートを主成分とする警報フェロモンが分泌されそれによって他の働きバチの攻撃性が開発される。オオミツバチは徹底した集団攻撃をするのでしばしばヒトが死亡する。

セイヨウミツバチ *Apis mellifera* に対し日本にも土着するニホンミツバチは *A.*

serana と呼ばれるが、このハチは前者に比べ多少適応の性質が異なり独自の利用法が開発されてくるだろう。このハチはスズメバチに対して熱殺という方法で対抗するが、スズメバチの攻撃が激しいと、逃散を起こす。前者の場合は全滅するケースが多い。解放空間にも巣を作るから森のない都会に進出しつつある。このハチはキンリョウヘン、カンラン、シュンラン、スルガランといった和蘭に誘引・集結する性質がある。セイヨウミツバチのナサノフ腺はゲラニオール、シトラール、ゲラニック酸を放出するがニホンミツバチのナサノフ腺はリナロール、リナロールオキサイド、脂肪酸などが含まれ、和蘭はこれらを放出するのではないかとされているが誘引物質についてはまだよく判っていない。

ミツバチではないが1日100kmを飛ぶと言われるスズメバチは、幼虫に運んだ餌の報酬として幼虫が大顎腺から分泌する分泌物をもらう。これが理想的なスポーツ飲料としてオリンピック選手などに飲まれている(Vespa Amino Acid Mixture=VAAM, 販売明治乳業)。

9 昆虫および節足動物毒

約650種のサソリの殆どが毒を有する。尾角のものは哺乳類からの防衛のためと小動物を捕獲する昆虫毒の2様である。口器の毒は後者の目的に使われる。前者としては15-20種の蛋白質が知られる。これらは蛋白毒や酵素である。後者の例としてはphospholipase A2, hyaluronidase, acetylcholine esterase, 酸性フォスファターゼ、蛋白質分解酵素などがある。前者の多数は60-70アミノ酸からなる塩基性の蛋白質でS-S結合を4つ持っている。またこれより短いもあり、これは35-37アミノ酸からなるもので2つのS-S結合を持つ。哺乳類に攻撃が合った場合は自律神経を興奮させ、呼吸と循環機能を昂進させ、筋肉のひきつりを起こす。特異的にNaチャンネルに結合するので膜蛋白質の解析に使われる。電位依存的にsite3に結合する α 毒素と電圧に依存してsite4結合する β 毒があり、旧世界のサソリは大体前者で、新世界のものは後者が多い。

サソリ毒をバキュロウイルスの強力なプロモーターに繋いで即効性の殺虫成分を構築する試みが行われている。昆虫特異的的成分はこうした観点から重用である。2つのタイプがあって、1つは活動電位を起こらなくするもの、他は運動ニューロンの連続的な発火を誘導するものである。この成分にはモノアミン、ポリアミン、酵素、蛋白質分解酵素、毒が含まれる。Agelenopsis aperta という種では作用部位の異なる2種類のものが採られている。一つは後シナプス膜受容体に作用する α アガトキシンとよばれる acylpolyamine、もう一種は glutaminergic な昆虫の神経筋接合部位で presynaptic に働く2つのタイプの毒である： μ -agatoxin(36-38アミノ酸)は興奮性に、 ω -agatoxin(66アミノ酸以下)は抑制的に働く。

ミツバチの毒については前述したが、彼らは kinin を生産しない点で社会性狩蜂類と違う。スズメバチ毒にはアミン類(ヒスタミン、セロトニン、ノルアドレナリン、アド

レナリン) のほかにキニン類が見られる。アミン類は疼痛、発赤、血圧降下を引き起こす。キニン類は蜂の属名に由来する Vespakinin, Polisteskinin, Vespulakinin などと呼ばれる。血圧降下、平滑筋収縮、膜透過性亢進、疼痛を起こす。Vespa maculifrons からの Vespulakinin-I は glycosylthreonin 2 つ含んだ変わった構造である。哺乳類のブラジキニンと比べスズメバチの仲間のキニンは N 末端が伸長している (蛙皮膚では C 末端が伸長)。もっとも強力な毒は mandarotoxin(20kDa) と呼ばれるもので、一回でヒトを殺す神経毒である。ナトリウムチャンネルを遮断する。hornetin はこれより穏やかである。マストパラリン (mastoparan はミツバチの mast-cell degranulating peptide (MCD) と同様の作用をするが構造もサイズも全く違う。これは溶血作用も示す。また PhospholipaseA₂, (PLA₂) の活性を高める。PLA₂、ヒアルロニダーゼ、プロテアーゼが局所破壊を起こす。Ves-CP と呼ばれるペプチドは白血球遊離作用を示す。同様のものがマルハナバチでも採られているがいずれも種特異的である。自身の防衛に使われる毒の他に単独性狩りバチは餌を麻痺させて幼虫に与える。この時毒を注射された獲物は生き続ける。このような毒も非常に応用的には重用であるが、ゴキブリ幼虫を狩るセナガバチで少し研究されている以外は、あまり研究されていない。

表 9-1 ミツバチとスズメバチ毒の成分と作用

作用点	反応	ミツバチ	アシナガバチ・スズメバチ類
皮膚	痒み、痛み	ヒスタミン(HA)、ノルアドレナリン(NE)	HA, 5HT, NE, アドレナリン、キニン類
	HA 遊離作用	MCD・ペプチド	マストパラリン(MP)
血管	白血球遊離作用		Ves-CP
血球	溶血	メチリン、 フスフォリパーゼ A ₂ (PLA ₂),	MP, PLA ₂
筋肉	局所破壊	ヒアルロニダーゼ (HUase)	HUase, PLA ₂ , PLA ₂
	プロテアーゼ		
	平滑筋収縮		キニン類
神経	神経伝達遮断	アパミン	マンダラトキシン

セアカゴケグモの仲間のクロゴケグモ (Black-widow) の毒は α -ラトロトキシン (α -ltx) と呼ばれる分子量約 13 万の蛋白質で、ニューレキシンと呼ばれる受容体に結合し、Ca²⁺ を神経終末に導入し、神経伝達物質の無秩序の放出を促すことによりこれらを枯

渴させることで作用を発揮する。

体外消化をする昆虫は毒と共に強力なプロテアーゼを注入し獲物を溶かしてその分解物を吸う。アリジゴクでもふぐ毒テトロドトキシンよりさらに強力な毒が見つまっている。

10 In vitro culture

昆虫の細胞機能の解明、有用物質の産生のために in vitro culture は極めて有用な技術である。昆虫の細胞培養はほ乳類のように CO₂ インキュベーターなどの特殊な設備を必要としない。胚子や成虫芽、血球または卵巣や脂肪体などから 500 以上の cell line が確立されているほか、神経系や中腸でも cell line が確立されている。Primary culture(初代培養)としては様々の組織からカルチャーが報告されているが、細胞の分化を研究するのに鱗翅目の中腸に由来する幹細胞のカルチャーは便利である。*Heliothis* の幹細胞は中腸を培地に浸漬すると遊離してくる。このカルチャーの培養液から脊椎動物の fetuin にホモロジーを持つペプチド性の細胞増殖因子が得られた。これは幹細胞を刺激して円柱細胞と盂状細胞への分化を促進するが (Midgut differentiation factors=MDF 1 and 2)、免疫組織化学をするとこの抗原は円柱細胞に見られた。また、蛹の脂肪体由来の増殖因子も認められている。培地としては、Grace 培地、Mitsubishi and Maramorosh (MM) 培地、Mitsubishi-Grace-Maramorosh (MGM) 培地と呼ばれるものが広範に使われている。

11 昆虫ゲノムプロジェクト

現在までに 100 種ほどのゲノムの完全解読が行われている。そのほとんどは細菌であるが、Eukaryote では出芽酵母、多細胞生物としては 1998 年に初めて *C.elegans* が、続いて 2000 年に *Drosophila* の全ゲノムが解明された。ショウジョウバエには 4 つの染色体の上に 1,370 個の遺伝子が乗っており、ゲノムサイズは 16×10^7 ベースペア (160Mbp) であった。cDNA の供給も行われていて、www.fruitfly.org に請求すると送ってもらえる。昆虫では、これに続いて、カイコのゲノム解読の努力がなされている。カイコのゲノムサイズは 530Mbp と比較的大きく、染色体数も 28 ある。現在までに推定された遺伝子数 2 万のうち、約 7000 の遺伝子が EST (expressed sequence tagged) data base (<http://www.ab.a.u-tokyo.ac.jp/silkbase/>) に収められているが、これは 5' 末端から 700 bp を読んだものである。この部分のアミノ酸配列を既存の種の求める物質と比較し、マッチするものがあれば、そのクローンを請求し、完全なシーケンスを決めれば求めるものが得られる。

カイコには 400 以上の突然変異を含む、これまで蓄積された系統があるし、カイコ独特の技術の集積もある。連鎖地図もできている。雌では交叉が起こらないと言う特別な性質

もある。農業害虫の中では、鱗翅目は最も重要なもので、鱗翅目の遺伝子機能を解析するために広く利用される可能性がある。7,345 の独立したクローンを blastx で相同性の検索をしたら 2,952 の相同性が確認できたが、4,393 はカイコに独特のものであった。これらの遺伝子を解析する中で、新しい機能調節と材料が見出される可能性がある。ショウジョウバエと相同のもの、ショウジョウバエには無く、哺乳動物や線虫と共通するもの、また、これらとの相同性は無いが細菌などに相同なものが見ついている。後者の場合は細菌のゲノムがカイコに取り込まれたと考えられる。この典型的なものは BmChi-h と名付けられたキチナーゼである。これは、他の昆虫のキチナーゼよりも *Serratia* や *Enterobacter* (以上 Enterococcaceae) または *Aeromonas* や *Vibrio* (以上 Vibrionaceae) のキチナーゼに似ている (因みに昆虫のキチナーゼは多数のイントロンを含むのに BmChi-h はイントロンがない)。それに対して、カビのキチナーゼとはかなり異なっている。カイコは進化過程で、細菌のキチナーゼ遺伝子を取り込み、カビの侵略に対抗したのではないか。しかし、同時に NPV も同様のキチナーゼを持つのでこの戦争の帰趨を判断するのは難しい。いずれにせよ細菌、ウイルス、昆虫の間でどのようにキチナーゼが動いたのか興味のあるところである。この ORF に隣接して BMC というカイコのレトロポゾンが見られるのも水平移動がおきたという考えを支持する。このような水平移動の例は他にもあって (sucrase, Glucose-1-phosphatase, Glycerophosphoryl diester phosphodiesterase といった加水分解酵素)、第一のものは *Zymomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Escherchia* と相同性が高く、最後のものは *Pseudomonas*, *Streptomyces* 等に相同性が認められる。このようにゲノムプロジェクトが進むと、ゲノムから出発した研究の方向が生じる訳である。