

微生物農薬の現状と今後

タキイ研究農場

駒田 旦

I. はじめに——病害虫防除をめぐる最近の情勢

農業生産の発展の過程で、作物病害虫・雑草の防除は、収量の向上と安定化、省力化、品質の向上等に大きく貢献してきた。第2次世界大戦後から今日まで、病害虫・雑草による生産阻害要因の排除は、農薬に大きく依存してきた。農薬は病原菌や害虫、雑草を排除することによる直接的効果ばかりでなく、それによって施肥量の増加を可能にして、収量の大幅な増高をもたらし、加えて品質の維持向上にも大きく貢献してきた。

戦後、我が国の農業は、それまでの労働集約型から、農薬、肥料、燃料、機械、施設などの資材を多く投入する資本集約型へと急速に転換して、目覚ましい発展を遂げた。例えば野菜生産はその過程で常に先導的役割を担い、本来の「旬」を忘れるほど周年、鮮度の高い生産物の供給を可能にして、今日の「一億総グルメ時代」を支える柱の一つとなることができたが、それを縁の下で支えてきたのは、ほかならない農薬であるといえることができる。

ところが、このように急発展した農業生産には、一方で土壌病害虫の多発生による連作障害、農薬耐性菌や農薬抵抗性害虫の出現、土壌の理・化学性の悪化による地力低下など、資材多投による刹那的作物管理の歪みともいえる問題が続々と発生し、このまま行けば子孫の代への農業の継承が危ぶまれる状態になりつつあるのは否定できない事実であり、資材の投入量を減らして永続性のある農業を志向すべしとの機運が沸き起りつつある。

その上、化学合成農薬による河川・湖沼・地下水の汚染、自然生態系の攪乱、正しい使用法を守る限り問題ないはずの人間や家畜への悪影響に対する危惧（それはマスコミによって形成されたムード的な部分が大きい）から、農薬に対する依存度を軽減すべしとの強い動きが一方でみられる。

農林水産省は、平成4年6月に、内外の情勢に対応して、21世紀を目指す「新しい食

料・農業・農村政策の方向」を策定、公表したが、この中で「環境保全型農業」の確立をわが国全体として目指すべきことが示されている。最近の環境論議は、従来における「公害対策」から、将来の世代に良好な環境を引き継ぐため、より積極的に環境を保全することに重点が移りつつある。地球に住む人間1人1人が、今一度自らの行動を見直すことが求められている。今日まで、安全面、環境面に最大限の努力を払ってきた病虫害・雑草防除の分野でも、さらに一層の努力・配慮を求められることになるだろう。

上記のような農業生産をめぐる内外の諸事情をふまえて、農業生産は資材多投型から脱却して、自然生態系と調和した、永続可能な農業へと転換が求められる。それに伴って、病虫害、雑草の防除は、好むと好まざるとに拘らず、農薬の投下量を減らして生物機能を有効に利用する防除、すなわち生物(的)防除(Biological Control = Biocontrol)へと重点が移行することが予想される。

微生物農薬は、今後、病虫害・雑草の生物防除で、非常に重要な部分を担って行くことが予想されるが、その役割と戦略、またそれぞれに伴う問題点は、防除対象の違い(病害、害虫、雑草)によってかなり趣を異にする。以下に微生物農薬開発・利用の現状について簡単に紹介する。

II. 微生物農薬開発・利用の現状

1. 微生物による病害防除

病害の生物防除の場面で、微生物以外の動植物が直接関与することは極めて稀である。病害の生物防除のほとんどですべては、微生物の病原体に対する、抗生、寄生、競争等微生物間拮抗を利用するか、微生物の感染により宿主植物に起こる誘導抵抗性を利用するなど、微生物の何らかの機能を利用するものである。それだけに、病害の生物防除における微生物農薬の重要性は、害虫や雑草の生物防除におけるそれとは、比べものにならぬくらい高いといえることができる。

(1) ウイルス病の防除

ウイルスは汁液、アブラムシやヨコバイなど吸汁性昆虫あるいは土壌中の線虫や糸状菌の媒介によって伝染する。ウイルス病に対する実用的防除薬剤はないので、その防除はこれら媒介生物を防除したり、感染植物を除去するなどの間接的な方法に頼らざるを得ないが、実効は上りにくい。

ウイルス病には、ある植物がウイルスに感染すると、それと同種のウイルスの系統が後で感染しようとするときに、その感染や増殖が抑制される現象が知られている。これは干渉作用とか交差防御とか呼ばれているが、この現象を利用して、毒性の弱い系統のウイルス（弱毒ウイルス）を先に人為的に作物に接種して、後から起こる強毒系統のウイルスの感染を阻止しようとする、人間や家畜の予防ワクチン接種にも似た戦略が用いられる。

現状では、トマト（タバコモザイクウイルスによる）、キュウリ（キュウリ緑斑モザイクによる）、カンキツ（カンキツトリステチザウイルスによる）で実用化され、その他数種野菜で実用化が検討されている。

弱毒ウイルスは作物の幼苗期の接種により、長期に亘る防除効果が期待できるので、果樹のような栄養繁殖性作物の強毒ウイルスの感染を長期間阻止する上で有効な方法である。また野菜・花きなどでも、育苗中に接種すれば良いので、定植後の農薬（殺虫剤）による媒介虫の防除が不要になる。ただし大規模に直播栽培される種子繁殖性作物には事実上適用が困難である。

弱毒ウイルスは従来、自然界でウイルスを保有している植物から分離するほか、ウイルスを接種した植物の低温あるいは高温処理、汁液の亜硝酸処理やUV処理によって作出されてきた。近年、ウイルスの弱毒化の遺伝子レベルでの解析が進みつつあり、今後、遺伝子構造と機能に関わる基礎研究の蓄積により、より有効で効果の安定した弱毒ウイルスの作出や、今まで困難であったウイルスの人工的作出も可能となろう。

(2) 土壌伝染病の防除

ウイルス病に対して的確な防除薬剤がないのと同様に、病原性をもつ土壌微生物の寄生によって起こされる土壌伝染病の場合には、薬剤防除は極めて困難である。冒頭にも述べたように、病害虫・雑草の生物防除の必要性を論じる場合、農薬に対する依存度軽減がしばしばその理由とされる。しかし土壌伝染病の場合には、全く逆に、薬剤防除が困難なるがゆえに、生物防除により極面打解を図ろうという切実な理由が存在するといえる。

ところで、土壌中には、1g当たり数百万からときには数億の微生物が生息している。土壌伝染病の病原菌（以下土壌病原菌）もそれら土壌微生物の一員であ

り、種類によって様々な生態的地位を占めている。これら微生物は互に協調あるいは敵対関係にあって、直接、間接に影響し合いながら平衡状態を保っている。これら微生物のなかには、土壤病原菌に対して有害な抗生物質を産生（抗生、antibiosis）したり、土壤病原菌体に寄生（parasitism）したり、土壤病原菌と栄養や空間の競合（competition）を起こすことによって、土壤病原菌の耐久生存や活動に対して、直接あるいは間接に悪影響を与えるものの存在することが知られている。そこでそのような微生物の機能を利用して、すなわち土壤中で上記のような拮抗関係を成立させて、土壤病原菌の密度を低下させたり、作物根への感染を阻害して土壤伝染病の発生を少なくしようというのが、微生物による土壤伝染病防除の基本となる考え方である。

土壤は抗生物質産生微生物の宝庫である。土壤中から土壤病原菌に対して培地上で拮抗（多くは何らかの拮生物質の産生による）を示す微生物を分離するのは、ごく初歩的な手法で十分可能である。そして抗生物質産生は土壤微生物相の平衡を保つ重要な要因ではないかと推測し、抗生物質産生微生物を土壤中で増殖させて、土壤病原菌を消滅させることができたならとだれしも考えたい。人間の病気に対する抗生物質利用の成功に刺激され、抗生物質産生微生物を土壤に導入して土壤伝染病を防除しようという多くの試みが過去になされた。ところが、その多くは殺菌土壌では成功しても、自然土壌ではことごとく失敗に終わった。

失敗の理由は、①土壌中は栄養の豊かな培地上と異なり、根圏や新鮮な有機物の周辺を除いて極めて貧栄養であり、抗生物質産生が行われにくかった。また根圏や新鮮な有機物の周辺では、豊富な栄養をめぐって多種多様な微生物による争奪戦が繰り広げられ、特定の抗生物質産生微生物のみによる栄養利用の可能性は極めて低かった。かりに抗生物質が生産されても、②土壤粒子に速やかに吸着されたり、③他の微生物により分解されてしまった。その上、④抗生物質産生微生物の多くは在来の微生物ではなく、外来の微生物であるため、導入後、ただちに他の微生物の攻撃を受けて抗生物質産生どころか定着が果たせなかったと考えられる。在来の微生物であっても特定の微生物の密度を長期間、高く保っておくことは極めて至難の業であり、定着の問題は、抗生物質産生微生物に限らず、拮抗微生物を導入して土壤病害の防除を図ろうとするとき、必ず越えなければならないハードルであるといえることができる。

数多の失敗にもめげず、その後も抗生物質産生微生物をはじめ、土壌病原菌の生存や活動に対して抑制力をもつ微生物の利用研究が続けられ、最近では一部に実用化例もみられるようになった。それに伴って利用される微生物の拮抗機能の範囲も広がり、抗生物質産生のほか、病原菌体への寄生、栄養の競合などの単独あるいは複合した作用へと変化しつつある。かつては拮抗関係を成立させる場として土壌全体を対象と考えていたが、最近では定着の問題への配慮もあって、作物根圏、さらには根面に集中しつつあり、それに伴って拮抗微生物探索の場も土壌から根面へと変化しつつある。

利用される微生物の種類は、*Trichoderma*, *Gliocladium*, *Talaromyces* などの糸状菌、*Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas* の様々な種、*Bacillus subtilis*, *Streptomyces* など細菌や放線菌など多岐に亘っている。

交差防御：ある土壌病原菌に対して、近縁の微生物（特に同種の非病原性株）を作物に前以て接種すると、あとから起こる病原菌の感染が抑制されて、病害の発生が減少する。この現象を交差防御という。例えば健全なサツマイモの体内からは、サツマイモつる割病の病原菌（*Fusarium oxysporum* f. sp. *batatas*）と同種の、しかしサツマイモをはじめ主要な作物に対して病原性を全く示さないフザリウム菌が高頻度に分離される。この微生物を大量に培養してサツマイモ苗の基部切口に接種してから土壌に植え付ける（さし木）と、つる割病の発病が顕著に抑制される。この現象は、本微生物が苗基部の切り口組織に局部的に弱く感染した結果、サツマイモ体内に抵抗性物質が生成されて全身的抵抗性が発現し、病原菌の感染を阻止することになったと推定される。本微生物の大量増殖と製剤化の技術が既に確立され、実用化階段に到達している。土壌伝染病における交差防御は、ウイルス病におけるそれと現象的に類似するが、全く異なる機作による。また高等動物における抗原抗体反応に基づく免疫とも機作を異にする。この現象の応用による土壌伝染病防除の成功例は、フザリウム菌、バーティシリウム菌などによる導管病に特徴的であるが、今後、土壌伝染病の重要な戦略の一つとなることは間違いなからう。

(3) 地上部病害・凍霜害の防除

大部分の地上部病害の防除は、実用上、農薬（殺菌剤）による防除を唯一無二の

技術としている。これは、それだけ地上部病害を対象とした殺菌剤の防除効果が高くかつ安定していることを意味している。ウイルス病や土壌伝染病と異なり、地上部病害の防除はより一層農薬依存体質からの脱却を求められる分野ではあるが、そのためには、より高度の防除効果が微生物農薬に求められることになろう。

植物の茎葉の表面（葉圏）には、土壌中と同様に多種多様な微生物が生息し、それらの中には抗生物質産生、寄生、競合など様々な機能によって、地上部病害の病原菌の活動に悪影響を与えるものも少なくない。また植物に対して軽度感染する結果、抵抗性が誘導されて病原菌の感染が阻止される場面もある。ところが葉圏では、温・湿度など環境条件が激しく変動し、葉面微生物はそれに敏感に反応して短期間に激しく密度変動を繰り返す。このような条件下で目的とする拮抗微生物の定着を図り、拮抗能を発揮させるのは至難のわざといわざるを得ない。そのため実用段階に至った事例は極めて少ない。最近、ペクチナーゼ産生能を欠失して非病原性化した軟腐病菌により、ハクサイ軟腐病の防除に成功した事例が我が国で報じられているが、注目に値する。

葉圏微生物のうちのある種は、氷の生成の際の核になるタンパク質を生成して植物の凍霜害の原因となることが知られている。これら微生物の多くは細菌（氷核活性細菌と呼ばれる）であって、病原菌の場合と同様、その生育に不適當な状態を作り得る機能を示す微生物があれば、防除への応用は可能である。今日までにその可能性が数種の微生物について認められたほか、突然変異あるいは遺伝子操作によって氷核活性遺伝子を欠失した細菌によって、実用化を前提とし試験が行われ、ある程度の成果を収めている。

第1表に微生物による園芸作物の病害防除の成功例（Whipps 1992）を示す。

2. 微生物による虫害防除

虫害の実用的防除は、地上部病害の防除に勝るとも劣らず、農薬（殺虫剤）への依存度が高く、それだけにその体質からの脱却、生物防除への転換が強く求められるところである。害虫の生物防除とは、天敵すなわち寄生性および捕食性の生物により、害虫の個体群密度を被害許容水準以下に抑える方法である。いきおいその主役は天敵としての節足動物であり、天敵微生物すなわち病原性微生物利用の場面は、病害防除における拮抗微生物利用のそれと比べると極限されたものといえる。ただ

し節足動物と異なり、微生物の場合はより資材的（農薬的）扱いができるという利点がある。病原微生物としては、ウイルス、細菌、線虫、糸状菌の利用が検討されている。

(1) ウイルスによる防除

核多角体病ウイルス（NPV）顆粒病ウイルス（GV）、細胞質多角体病ウイルス（CPV）、昆虫ポックスウイルス（EPV）、これら4種の昆虫ウイルスのうち、防除への利用の可能性のあるのは前3者である。

NPV は鱗翅目昆虫などから発見された。畑害虫のヨトウガ、ハスモンヨトウ、森林害虫のハラアカマイマイ、クワ害虫のクワゴマダラヒトリ、クワ・街路樹害虫のアメリカシロヒトリ等鱗翅目害虫を対象に実用化のための研究が行われている。

GV は鱗翅目昆虫から発見され宿主特異性の高いウイルスである。リンゴコカクモンハマキ、チャクコカクモンハマキ、チャハマキ、コナガ、モンシロチョウなどで実用化のための研究が行われている。

CPV も鱗翅目その他の昆虫から発見されており、森林害虫マツカレハの CPV が「マツケミン」り名で農薬登録され、各地の松林を対象にマツカレハ防除のための航空散布が行われた。

NPV, GV については我が国では農薬登録の例はないが、アメリカ、カナダ、ソ連では農薬登録されている（第2表）。

(2) 細菌による防除

害虫防除に最も広く利用されているのは、*Bacillus thuringensis* である。経口感染し、Bt 菌の生産する結晶性タンパク毒素に高い殺虫活性があることが明らかになっている。生きた Bt 菌を成分とした製剤と、毒素だけを有効成分とした製剤とが市販されている。後者は微生物源農薬（抗生物質）と同様に、合成農薬の範疇に入ると考えてよかろう。市販されている Bt 菌は鱗翅目に特異的に有効であるが、ハエ、カ、甲虫類に対し、それぞれ特異的に病原性を示す菌株やカイコに対して病原性の弱い菌株も発見されている。

(3) 線虫による防除

Steinernema 属および *Heterorhabditis* 属線虫は共に、*Xenorhabdus nematophilis* および *X. luminescens* 属細菌と共生しており、線虫が宿主昆虫の体内に侵入すると、これら共生細菌が放出されて増殖し、宿主昆虫は敗血症を起こして死亡する。線虫は増殖した細菌をエサとして増殖し、人工増殖も可能である。

土壌生息性害虫（コガネムシ類幼虫）、穿孔性害虫（カミキリムシ幼虫）に効果が大きく、数種のスタイナーネマが国外から導入され、日本からも有望な新種がコガネムシから発見されている。現在、増殖法や利用法についての研究が行われているが、線虫は野外に放出した場合、乾燥や紫外線に弱いいため、土壌に施用する方法や活性を永続させる方法の研究が行われている。

(4) 糸状菌による防除

昆虫には各種糸状菌が寄生し、経皮的に感染して硬化病を起こす（第3表）。*Metharhizium*, *Beauveria*, *Verticillium* などが特に重要とされている。樹木のコガネムシ類、マツノマダラカミキリ、クワのキボシカミキリ、イネのイネミズゾウムシ、野菜、花のオンシツコナジラミ、果樹のモモシンクイガなどで実用化のための試験が行われている。一般に宿主範囲が広く、細菌やウイルスのように経口的感染では防除できない吸汁性害虫とも有効である。第4表は桐谷1990による天敵微生物の長所・短所の比較である。

3. 微生物による雑草防除

コイやアイガモによる水田除草の試みが、さももの珍しげにマスコミに取り上げられるということは、それだけ我が国では除草が農薬（除草剤）一辺倒になっていることを意味しており、殺菌剤と同様ないしはそれ以上に、生物防除への転換が求められるところである。

雑草を生物によって防除する意図は決して新しいものではなく、昆虫、ダニ、甲殻類、魚類、植物、微生物など様々な生物を用いた雑草防除が、外来のあるいは在来の生物によって試みられた。

ただし我が国では、微生物による雑草防除の試みは、最近までほとんど皆無の状態であった。戦中、戦後の半世紀における我が国の植物病理学が、農作物病理学とし

て偏った発達を遂げてきた歪みがここに現れているともいうことができる。

植物病原菌は決して農作物のみを侵すものばかりではなく、特定の雑草のみを侵すものも多い。したがってこのような雑草病原菌をうまく利用すれば、農用地雑草の防除が可能である。

雑草病原菌利用の戦略としては、在来の病原菌を利用する方法と、他の地域から導入する方法とがある。外国からの侵入雑草の防除に、雑草の原生地から病原菌を導入するのは後者である。また病原菌の接種後の発病・進展を自然にまかせる方法と、人工的に大量増殖した病原菌を、高密度に接種して人為的に大発生の状態を起こさせる方法とがある。前者は営利には結びつき難いが、後者は微生物除草剤として、除草剤による化学的防除にとって代る戦略になり得る。第5表に微生物除草剤として開発が期待される植物病原菌の例をあげたが、これは主として外国の例であって、我が国の場合は上述のように、地道な雑草病原菌の探索から始めなければならないという夜明け前の研究分野である。そのような中であって、最近、鈴木は水田の多年生雑草クログワイの防除に有効な病原菌を発見し、現在実用化のための試験が進められている。

外国ではすでに、第6表に例示するように微生物除草剤の一部は農薬登録され、実用化の段階に到達している。

微生物除草剤は、それが合成除草剤にとって代るにはかなり大きな弱点をもっている。第1に、雑草が衰弱するのに時間を要し、しかも枯死させにくいことがあげられる。第2に、宿主特異性が高く、標的外植物に影響を与えないことがあげられる。この点は微生物除草剤本来の特性であるが、温帯多雨地帯の我が国のように雑草種が極めて多様である場面では、そのまま欠点となる。その上、第3の弱点として、作物の病害防除の目的で施用する殺菌剤が、雑草の病害発生を目的とする微生物除草剤にとっては（もちろん殺菌剤の種類と雑草病原菌の種類によるが）阻害的に働く可能性がある。上記のような弱点をもつ微生物除草剤が、完全防除でなければ納得しない現場で、合成除草剤にとって代る日が来るのであろうか。

Ⅲ 微生物農薬をめぐる問題点と将来展望

わが国における病害虫・雑草防除について論じるとき、諸外国に比類ない農業の超集約性を無視することはできない。超集約農業のもとでは、労働集約的かつ資本集約

的な、きめ細かい防除技術の適用が可能となり、その集積による高度な防除もなり立ち得る。これはあらゆる技術が広さに耐えることを求められる欧米諸国の粗放農業の場合とは大いに事情を異にした有利な点であり、近未来においては、上に紹介したような様々な病害虫・雑草の微生物による防除技術が開発され、合成農薬にとって代ってあるいは合成農薬と手をたずさえて実用化されることであろう。ただしそれには、研究、行政、普及の面でそれぞれに越さねばならない高いハードルがある。

第1（研究）のハードルは、微生物農薬と合成農薬との調和の問題である。病害虫・雑草防除のすべてを微生物農薬と置き換えることは、夢のまた夢である。とすれば、天敵微生物や拮抗微生物、雑草病原菌と合成殺菌剤という互に相容れ難い防除技術をいかに調和させていくかという難問を克服する必要がある。微生物農薬と合成殺菌剤による防除とを組合わせて互の干渉を避ける体系防除を行うか、殺菌剤耐性の天敵微生物や拮抗微生物、雑草病原菌を育成するかなど様々な方法が考えられよう。微生物農薬との調和を前提とした合成殺菌剤の開発が同時に求められるのはいうまでもない。

第2（行政）のハードルは、農薬の登録に関わる評価システムの問題である。農薬取締法に則った現行のシステムは、合成農薬すなわち「モノ」を評価する目的で作られている。この評価基準で、天敵微生物や拮抗微生物、雑草病原菌のような「生キモノ」を評価するのは無理がある。微生物農薬（制度上はまだない）独自の評価システムの確立が急務である。幸いにも農水省では、平成4年度から、「微生物農薬検査基準確立対策事業」を実施して、ガイドラインの設定を行うこととなった。微生物農薬の評価に当たっては、合成農薬における毒性の評価にもまして重要な、大量かつ高密度に野外に放出した場合の人畜に対する病原性と生態系への影響の評価に重点が置かれなければならない。大切なことは、いたずらに安全性を強調する余り、「角を矯めて牛を殺すの愚」を犯さぬよう、risk と benefit とのバランスの上に立った大局的判断が必要である。ゆめゆめ「官僚の（ための）安全性評価基準」が設定されることのないよう望むところである。

第3（普及）のハードルは、日本人の感性に根ざす問題である。日本人の鋭い感性は、古来、多くの優れた伝統芸術や独自の食文化を生み出した。ところが近年、その感性は食生活の向上に伴い、農産物の品質に対して、味や日持ちのような実質的な点ばかりでなく、色、つや、かたちといった視覚的な点にまで際限なく高度なものを求めるようになってきた。そのような欲求（それは消費者自身が自発的なものというより、む

しろ消費者の欲求の代弁者を以て自ら任じる流通機構によって形成される部分が多い)は、今日まで専ら合成農薬によって充たされてきたといっても過言ではない。その上、この欲求に応えるため、農家は経済性を無視してまで完全防除を追求することになる。微生物農薬の効果は兎角、合成農薬のそれに比べマイルドである。微生物農薬がこのような完全主義的欲求に果して応えられようか。これを可能にするには、多少の虫食いや病斑があってもよしとする国民的合意がその前提として必要になるのではなかろうか。

科学技術庁が先年発表した技術予測の中で、生物農薬は2005年には防除体系の中で普及段階にあるとした。その時点で上記のようなハードルを越えて実用化レベルに到達する微生物農薬が果してどれだけあろうか。

参考文献

1. 農業有用微生物——その利用と展望—— (1990) 梅谷・加藤編、養賢堂刊。592 pp .
2. バイオ農薬・水産薬の開発と利用 (1991) 江草・駒田・岩花監修、シーエムシー刊。334 pp .
3. 病害防除の新戦略 (1992) 駒田・稲葉ほか編、全国農村教育協会編、313 pp .
4. 桐谷圭治 (1990) 生物的防除と害虫管理。天敵の生態系、東海大学出版会：151～166.
5. Whipps, J. M. (1992) Status of Biological Disease Control in Horticulture. *Biocontrol Science and Technology* : 3～24.
6. 山田昌雄 (1992) 植物病原微生物による雑草の防除。農業技術47：1～7 .

第1表 微生物による園芸作物病害防除の成功例 (拮抗機作別に分類)

(Whipps 1992を一部改変)

拮抗生物	病原菌	研究者、発表年
○病原菌の栄養菌系への寄生または捕食		
・動物		
Amoebae	<i>Thielaviopsis basicola</i>	Old & Patrick, 1976
Nematodes	<i>Fusarium solani</i>	Barnes <i>et al.</i> , 1981
	<i>Pythium arrhenomanes</i>	Rhoades & Linford, 1959
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Barnes <i>et al.</i> , 1981
Micro-arthropods	<i>Botrytis cinerea</i>	Hanlon, 1981
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Curl & Harper, 1990
・細菌・放線菌		
<i>Aerobacter</i> spp.	<i>Pythium debaryanum</i>	Mitchell & Hurwitz, 1965
<i>Bdellovibrio bacteriovorus</i>	<i>Pseudomonas syringae</i>	Starr & Baigent, 1966
・糸状菌		
<i>Acremonium alternatum</i>	<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	Malathrakis, 1985
<i>Ampelomyces quisqualis</i>	<i>S. fuliginea</i>	Phillip, 1985
<i>Gliocladium catenulatum</i>	<i>Fusarium</i> spp.,	Huang, 1978
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	
<i>Olpidiopsis gracilis</i>	<i>Phytophthora</i> spp.,	Pemberton <i>et al.</i> , 1990
	<i>Pythium</i> spp.	
<i>Pythium acanthicum</i>	Numerous	Deacon, 1976
<i>Pythium nunn</i>	Numerous	Lifshitz <i>et al.</i> , 1984
<i>Pythium oligandrum</i>	Numerous	Laing & Deacon, 1990
<i>Stephanoascus</i> spp.	<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	Jarvis <i>et al.</i> , 1989
<i>Talaromyces flavus</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	McLaren <i>et al.</i> , 1986
<i>Trichoderma hamatum</i>	<i>Pythium</i> spp.,	Chet <i>et al.</i> , 1981
	<i>Rhizoctonia solani</i>	
<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Rhizoctonia solani</i> ,	Elad <i>et al.</i> , 1983
	<i>Sclerotium rolfsii</i>	
<i>Tricothecium roseum</i>	<i>Puccinia horiana</i> ,	Hijwegen & Buchenauer, 1984
	<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	
○病原菌の繁殖器官 [※] への寄生または捕食		
・動物		
Amoebae	<i>Thielaviopsis basicola</i>	Anderson & Patrick, 1978
Micro-arthropods	<i>Fusarium oxysporum</i>	Curl & Harper, 1990
・細菌・放線菌		
<i>Actinoplanes</i> spp.	<i>Phytophthora megasperma</i>	Filinow & Lockwood, 1985
<i>Bacillus</i> spp.	<i>Sclerotium cepivorum</i>	Backhouse & Stewart, 1989
<i>Serratia marcescens</i>	<i>Sclerotium rolfsii</i>	Ordentlich <i>et al.</i> , 1988
・糸状菌		
<i>Coniothyrium minitans</i>	<i>Botrytis cinerea</i> ,	Turner & Tribe, 1976
	<i>Sclerotinia</i> spp.,	
	<i>Sclerotium cepivorum</i>	
<i>Gliocladium</i> spp.	Numerous	Whipps, 1991
<i>Nectria inventa</i>	<i>Alternaria brassicae</i>	Tsuneda & Skoropad, 1978a
<i>Sporidesmium sclerotivorum</i>	<i>Botrytis cinerea</i> ,	Ayers & Adams, 1981
	<i>Sclerotinia</i> spp.,	
	<i>Sclerotium cepivorum</i>	
<i>Talaromyces flavus</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Boosalis, 1956
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Su & Leu, 1980
<i>Teratosperma oligocladium</i>	<i>Sclerotinia</i> spp.	Whipps, 1991
<i>Trichoderma</i> spp.	Numerous	Whipps, 1991
<i>Verticillium biguttatum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	van den Boogert <i>et al.</i> , 1989
<i>V. chlamydosporium</i>	<i>Phytophthora capsici</i>	Sutherland & Papavizas, 1991
<i>V. lecanii</i>	<i>Uromyces dianthi</i>	Spencer & Atkey, 1981

第1表 その2

拮抗生物	病原菌	研究者、発表年
○抗生物質産生		
・細菌・放線菌		
<i>Agrobacterium radiobacter</i>	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Kerr & Tate, 1984
<i>Bacillus subtilis</i>	Numerous	Swinburne <i>et al.</i> , 1975
	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Filippi <i>et al.</i> , 1987
	<i>Monilinia fruticola</i>	Pusey & Wilson, 1984
<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Phytophthora cactorum</i>	Gupta & Utkhede, 1987
<i>E. cloacae</i>	<i>Pythium ultimum</i> ,	Howell <i>et al.</i> , 1988
	<i>Rhizoctonia solani</i>	
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	Wisniewski <i>et al.</i> , 1989
<i>Erwinia herbicola</i>	<i>Fusarium culmorum</i>	Kempf & Wolf, 1989
<i>Pseudomonas cepacia</i>	<i>Rhizoctonia solani</i> ,	Homma <i>et al.</i> , 1989
	<i>Verticillium dahliae</i>	
<i>P. fluorescens</i>	<i>Pythium ultimum</i>	Howell & Stipanovic, 1980
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Howell & Stipanovic, 1979
<i>Streptomyces griseoviridis</i>	<i>Alternaria brassicicola</i> ,	Lahdenperä <i>et al.</i> , 1991
	<i>Rhizoctonia solani</i>	
	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Rattink, 1989
<i>Streptomyces ochraceiscleroticus</i>	Numerous	Türhan, 1981
・糸状菌		
<i>Gliocladium virens</i>	<i>Pythium ultimum</i> ,	Howell & Stipanovic, 1983;
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Roberts & Lumsden, 1980
<i>Geomyces pannorum</i>	<i>Pythium ultimum</i>	Danielson & Wolffhechel, 1991
<i>Penicillium frequentans</i>	<i>Monilinia laxa</i>	Melgarejo <i>et al.</i> , 1989
<i>Talaromyces flavus</i>	<i>Verticillium dahliae</i>	Fravel <i>et al.</i> , 1987
<i>Penicillium oxalicum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>conglutinans</i>	Reyes, 1984
<i>Trichoderma</i> spp.	Numerous	Papavizas, 1985
<i>Acaligenes</i> sp.	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Yuen & Schroth, 1986
<i>Enterobacter</i> spp.	<i>Pythium</i> spp.	Nelson <i>et al.</i> , 1986
<i>Pseudomonas putida</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Scher & Baker, 1982
<i>Pseudomonas</i> spp.	<i>F. oxysporum</i>	Kloepper <i>et al.</i> , 1980; Elad & Baker, 1985
	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cucumerinum</i>	Sneh <i>et al.</i> , 1984
	<i>Fusarium solani</i>	Elad & Baker, 1985
	<i>Pythium aphanidermatum</i>	Elad & Chet, 1987
<i>Fusarium oxysporum</i> (non-pathogenic)	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cucumerinum</i>	Paulitz <i>et al.</i> , 1987
<i>Fusarium</i> spp. (non-pathogenic)	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>melonis</i>	Alabouvette, 1986
<i>Pythium nunn</i>	<i>Pythium ultimum</i>	Paulitz & Baker, 1988
<i>P. oligandrum</i>	<i>Pythium ultimum</i>	Martin & Hancock, 1986
<i>Rhizoctonia solani</i> (non-pathogenic)	<i>Rhizoctonia solani</i>	Sneh <i>et al.</i> , 1989
<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>F. oxysporum</i> ff. sp. <i>melonis</i> and <i>vasinfectum</i>	Sivan & Chet, 1989

※卵孢子、厚膜孢子、菌核、厚膜菌糸等

第1表 その3

拮抗生物	病原菌	作物	研究者、発表年
○交差防御、誘導抵抗性			
・ウイルス			
Tobacco necrosis virus	<i>Colletotrichum lagenarium</i>	Cucumber	Jenns & Kuć, 1977
Tomato mosaic virus race M II-16	Tomato mosaic virus	Tomato	Fulton, 1986
Mild tristeza virus	Tristeza virus	Citrus	Fulton, 1986
・細菌			
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Fusarium roseum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Carnation	Aldrich & Baker, 1970
<i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>Hemileia vastatrix</i>	Coffee	Roveratti <i>et al.</i> , 1989
<i>Pseudomonas syringae</i>	<i>Colletotrichum lagenarium</i>	Cucumber	Caruso & Kuć, 1979
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Cucumber	van Peer & Schippers, 1991
<i>Serratia liquefaciens</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i>	Carnation	Sneh <i>et al.</i> , 1985
・糸状菌			
<i>Colletotrichum lagenarium</i>	<i>Colletotrichum lagenarium</i> , numerous others	Cucumber	Dean & Kuć, 1985
<i>C. lindemuthianum</i> (non-pathogenic)	<i>C. lindemuthianum</i>	Bean	Skipp & Deverall, 1973
<i>Didymella bryoniae</i>	<i>Didymella bryoniae</i>	Cucumber	Descalzo <i>et al.</i> , 1990
<i>Fusarium oxysporum</i> (avirulent)	<i>Fusarium oxysporum</i>	Sweet potato	Ogawa & Komada, 1985
<i>Phytophthora parasitica</i>	<i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>P. citricola</i>	Avocado	Dolan <i>et al.</i> , 1986
<i>Verticillium albo-atrum</i> (avirulent)	<i>Verticillium albo-atrum</i>	Tomato	Matta & Garibaldi, 1977

第2表 農薬登録された天敵ウイルス (岡田 1990)

害虫名	病原体	製品名	対象害虫名	実施国
<i>Heliothis zea</i> (bollworm, corn earworm, tomato fruit moth)	NPV	Biotrol VHZ, Elcar, Viron H	ヨトウムシノ一種	アメリカ
<i>Hiliothis virescens</i> (tomato budworm)	NPV	Biotrol VHZ, Elcar, Viron H	ヨトウムシの一種	アメリカ
<i>Spodoptera exigua</i> (beet armyworm)	NPV	Biotrol VSE	シロイチモジヨトウ	アメリカ
<i>Trichoplusia ni</i> (cabbage looper)	NPV	Biotrol VTN Viron T	イラクサギンウワバ	アメリカ
<i>Orgyia pseudotsugata</i> (douglas-fir tussock moth)	NPV	TM Biocontrol-1 Virtuss	ドクガの一種	アメリカ カナダ
<i>Lymantria dispar</i> (Gypsy moth)	NPV	Gypchek Virin-Ensh	マイマイガ	アメリカ ソ連
<i>Dendrolimus spectabilis</i> (pine caterpillar)	CPV	マツケミン	マツカレハ	日本
<i>Pieris rapae</i> (imported cabbageworm)	GV	Virin-GKB	モンシロチョウ	ソ連
<i>Neodiprion sertifer</i> (pine sawfly)	NPV	Neochek-S Virin-Diprion	マツノキハバチ	アメリカ ソ連
<i>Neodiprion lecontei</i> (red-headed pine sawfly)	NPV	Lecontvirus	ハバチの一種	カナダ

第3表 主要な昆虫病原糸状菌とその性状 (河上 1991)

菌種	宿主昆虫の種類	宿主域	培養
<i>Aschersonia aleyrodis</i>	ミカンコナジラミ	狭い	可
<i>Aschersonia</i> sp.	コナジラミ類	狭い	可
<i>Beauveria bassiana</i>	りん翅目, 蝻翅目	比較的広い	可
<i>B. brongniartii</i> (= <i>B. tenella</i>)	蝻翅目	狭い	可
<i>Hirsutella thompsonii</i>	サビダニ類	狭い	可
<i>Metarhizium anisopliae</i>	りん翅目, 蝻翅目	比較的広い	可
<i>Nomuraea rileyi</i>	りん翅目	狭い	可
<i>Paecilomyces farinosus</i>	りん翅目, 蝻翅目	比較的広い	可
<i>P. fumosoroseus</i>	りん翅目, 双翅目	比較的広い	可
<i>Verticillium lecanii</i>	コナジラミ・アブラムシ	狭い	困難
Entomophthoraceae	りん翅目, 直翅目	狭い	
(<i>Basidiobolus</i> , <i>Massospora</i> , <i>Conidiobolus</i> , <i>Entomophthora</i> , <i>Erynia</i> , <i>Entomophaga</i> など)			
<i>Culicinomyces clavosporus</i>	ボウフラ類	狭い	困難
<i>Lagenidium giganteum</i>			
<i>Coelomomyces</i> spp.			
<i>Dactyella</i> ; <i>Arthrobotrys</i> , <i>Monacrosporium</i> など	線虫類	狭い	可

第4表 天敵微生物の長所・短所の比較 (桐谷、1990)

	ウイルス	細菌	糸状菌	原生動物	線虫
効果 (潜伏期間)	遅い (2~8日)	速い(Bt)~ 遅い(乳化病)	非常に遅い (1週間以上)	遅い (高濃度で速い)	速い(共生細菌) ~遅い
寄生範囲	特異的 そしゃく型昆虫	広い	広い 吸汁・そしゃく型	やや特異的	特異的~広い
感染方式	経口	経口	経皮	経口	経皮・経口
伝播様式	水平・垂直	水平	水平	水平・垂直	水平
利用上の 問題点と 長所・短 所	紫外線で失活する。 特異性の少ないウイルスが注目されている。 湿度の影響は少ない。 若齢幼虫に病原性高い。 自然感染による流行病をもたらす場合あり。 遺伝子操作可能。	有望種少ない。 大量生産容易。 遺伝子操作可能。 農薬の利用(結晶性毒素は安定)。 乳化病以外は自然感染流行は稀。	高湿条件を要求する。 培養可能な不完全菌類のみ利用。 自然感染流行は稀。 エントモフトラは流行病を起こすが培養、長期保存が困難。	生細胞が必要のため大量生産困難。 ウイルスや糸状菌よりは流行病が起こりやすい。	系統分離が困難。 乾燥に弱い。 寄生探索能力をもつ。 線虫、共生細菌とも培養が可能。 土壌害虫に利用が中心。 細菌より有望なもの多いがウイルス・糸状菌に比べると少ない。

第5表 微生物除草剤として開発が期待される植物病原菌の例 (山田 1992)

病原菌	雑草種
<i>Alternaria crassa</i>	<i>Datura stramonium</i> (ヨウシュチョウセンアサガオ)
<i>A. eichhorniae</i> ,	<i>Eichhornia crassipes</i> (ホテイアオイ)
<i>Cercospora piaropi</i> ,	
<i>C. rodmanii</i>	
<i>A. helianthi</i>	<i>Xanthium strumarium</i> (オナモミ)
<i>A. macrospora</i>	<i>Anoda cristata</i> (spurred anoda, あおい科)
<i>A. tenuissima</i> f. sp. <i>euphorbiae</i>	<i>Euphorbia esula</i> (leafy spurge, とうだいぐさ科)
<i>Alternaria</i> sp.	<i>Carduus pycnocephalus</i> (Italian thistle, きく科)
<i>Ascochyta caulina</i> ,	<i>Chenopodium album</i> (アカザ)
<i>Cercospora chenopodii</i>	
<i>A. pteridis</i> ,	<i>Pteridium aquilinum</i> (ワラビ)
<i>Phoma aquilina</i>	
<i>Bipolaris setariae</i> ,	<i>Eleusine indica</i> (オヒシバ)
<i>Pyricularia grisea</i>	
<i>B. sorghicola</i>	<i>Sorghum halepense</i> (johnsongrass, いね科)
<i>Chondrostereum purpureum</i>	<i>Prunus serotina</i> (black cherry, ばら科)
<i>Colletotrichum coccodes</i>	<i>Abutilon theophrasti</i> (velvetleaf, あおい科)
<i>C. dematium</i>	<i>Ipomoea purpurea</i> (tall morning glory, ひるがお科)
<i>C. d. f. sp. crotalariae</i> ,	<i>Crotalaria spectabilis</i> (showy chlotalaria, まめ科)
<i>Fusarium udum</i> f. sp. <i>crotalariae</i>	
<i>C. gloeosporioides</i> f. sp. <i>jussiaeae</i>	<i>Jussiaea decurrens</i> (winged waterprimrose, あかばな科)
<i>C. malvarum</i>	<i>Sida spinosa</i> (pickly sida, あおい科)
<i>Colletotrichum</i> sp.	<i>Desmodium tortuosum</i> (Florida beggarweed, まめ科)
<i>Colletotrichum</i> sp.	<i>Xanthium spinosum</i> (オナモミ)
<i>Curvularia lunata</i>	<i>Echinochloa crusgalli</i> (イヌビエ)
<i>Dichotomophthora indica</i>	<i>Portulaca oleracea</i> (スベリヒユ)
<i>Fusarium lateritium</i>	<i>Abutilon theophrasti</i> (velvetleaf, あおい科)
	<i>Ambrosia trifida</i> (ブタクサ属)
<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cannabis</i>	<i>Cannabis sativa</i> (marijuana, くわ科)
<i>F. solani</i> f. sp. <i>cucurbitae</i>	<i>Cucurbita texana</i> (Texas gourd, うちり科)
<i>Phyllachora cyperi</i>	<i>Cyperus rotundus</i> (ハマスゲ)
<i>Pyricularia grisea</i>	<i>Digitaria sanguinalis</i> (メヒシバ)
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	<i>Cirsium arvens</i> (エゾノキツネアザミ)
<i>Septoria silybi</i>	<i>Silybum marianum</i> (blessed milkthistle, きく科)
<i>Septoria tritici</i> f. sp. <i>avenae</i>	<i>Avena fatua</i> (wild oat)

第6表 既登録微生物除草剤

製剤 (登録企業)	病原微生物	対象雑草 (一般名)
Devine(Abott) USA	Phytophthora palmivora	Morrenia odorata(Stranger vine)
Collego(Ecogen) USA	Colltotrichum gloeosporioides	Aeschynomene virginica (northern joint vetch)
BioMal(PhilomaBios) Canada	Coetotrichum gloeosporioides f.sp.malvae	Malva pusilla(round-leavel mallow) [Abutilon theophrasti]
Casst(Mycogen) USA	Alternaria cassiae	Cassia obtusifolia