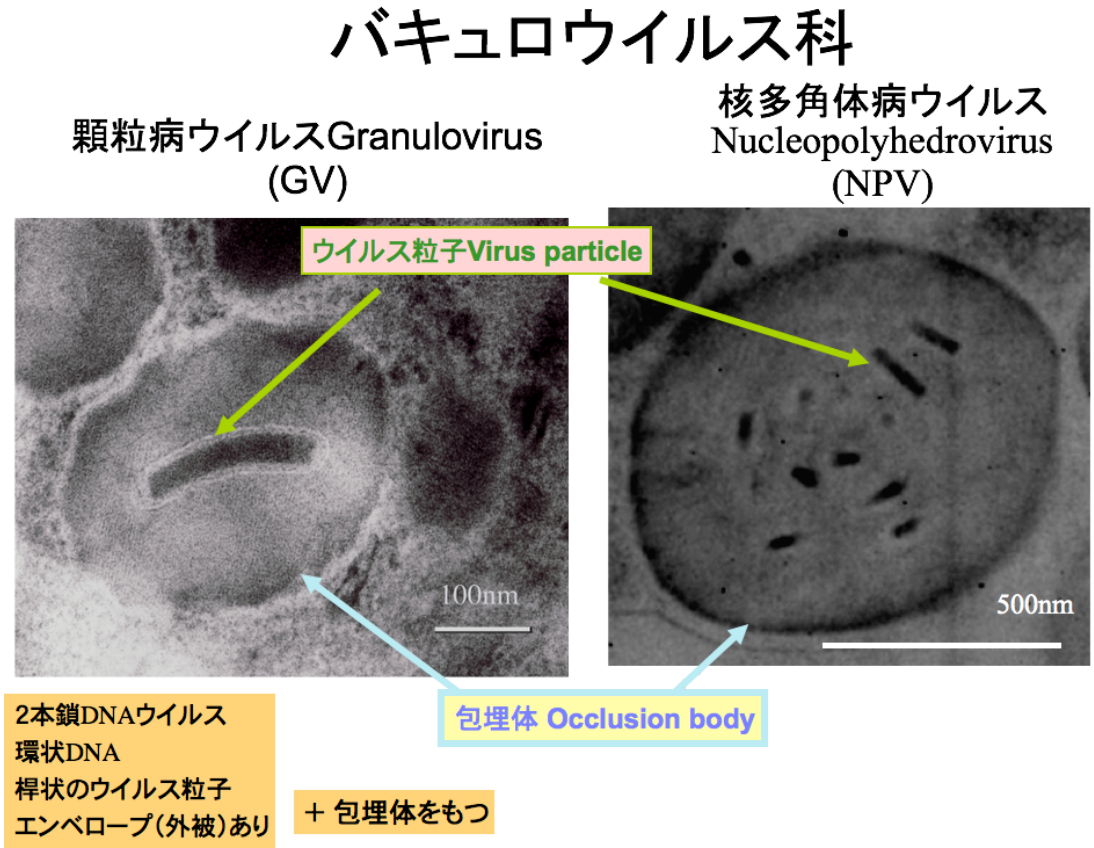
ウイルス殺虫剤のABC（基礎）-NPV, GVと生物・化学農薬との共生について-

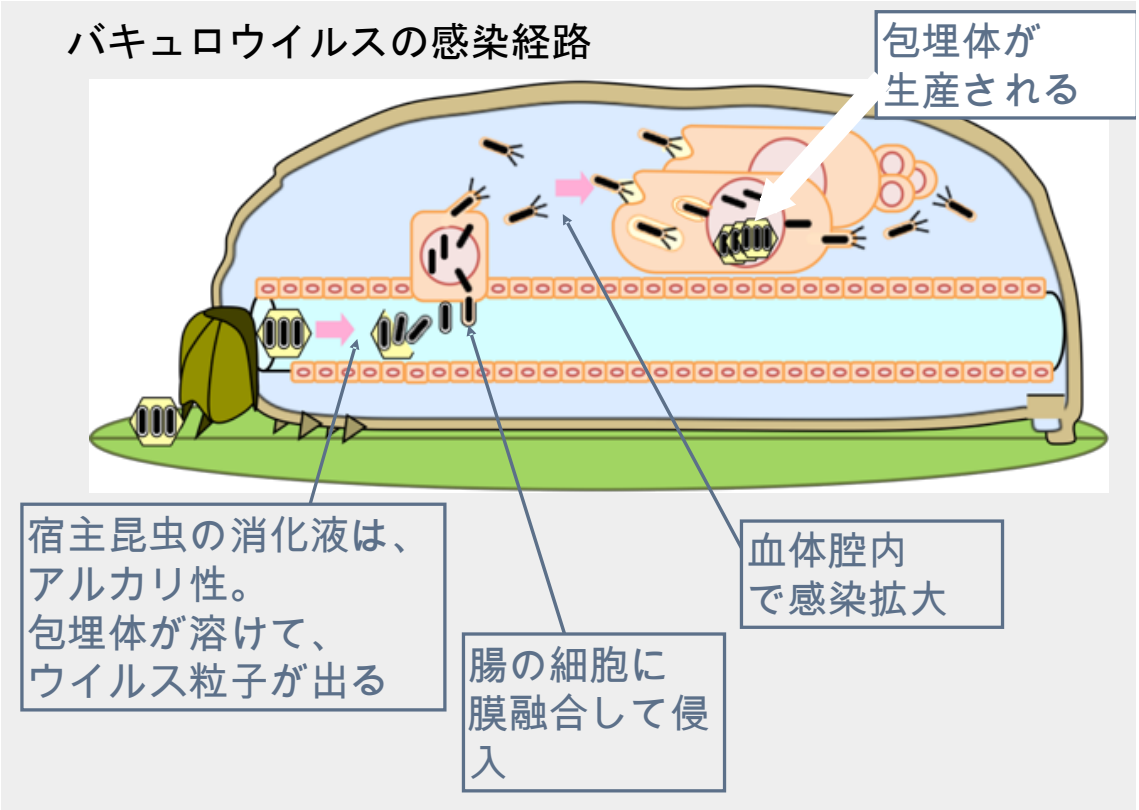
東京農工大学大学院　農学研究院　仲井まどか

昆虫の天敵には、捕食者、捕食寄生者、天敵微生物が含まれる。本講演では、天敵微生物の中でも昆虫に感染する昆虫ウイルスについて解説する。

【バキュロウイルスについて】

昆虫ウイルスで、ウイルス殺虫剤として使用されている代表例は、バキュロウイルスである。バキュロウイルスは、二本鎖DNAをゲノムとし、チョウ目、ハバチなどのハチ目、蚊などのハエ目に感染する。バキュロウイルスの形態的な特徴は、その桿状のウイルス粒子とそれらのウイルス粒子が包埋体というタンパク質の殻に包まれていることである。この包埋体が、野外でウイルス粒子を紫外線などから保護するためバキュロウイルスは昆虫の体外でも活性が落ちない。そのため、バキュロウイルスの包埋体は、害虫防除資材として使用されている。バキュロウイルスの中でも、１個のウイルス粒子が１個の包埋体に包まれているものを顆粒病ウイルス（Granulovirus: GV）、複数のウイルス粒子が１個の包埋体に包まれているものを核多角体病ウイルス（Nucleopolyhedrovirus: NPV）という　仲井・勝間, 2022





【バキュロウイルスの世界での使用例】

世界的には、50以上の国でバキュロウイルスが殺虫剤として登録されている（仲井, 2013　代表的な製剤としては、リンゴ害虫（コドリンガ）の防除にGVが、欧州（10万ha）と北米で使用されている（Lacey,　2017）。ブラジルでは、ダイズ害虫の*Anticarcia gemmatalis*（ヤガ科）の防除にNPVが使用されている（2002/2003年に200万ha）。また、中国のワタ害虫（オオタバコガ）の防除にNPVが968 t（2012年に40-80万ha相当　生産されている（Sun, 2015）。本講演では、コドリンガと*A. gemmatalis*について概説する。

コドリンガは、日本以外のほぼすべてのりんご栽培地域に生息するが、日本には生息しておらず、その侵入が厳しく警戒されている。コドリンガ顆粒病ウイルス（CpGV）は、コドリンガのウイルス殺虫剤として欧州では、1980年後期から使用されている。CpGVは、病原力が高く包埋体2個で孵化直後のコドリンガ幼虫１頭を感染致死させる。また、特異性も高く、コドリンガとその近縁種のみにしか感染しない　通常の防除では、CpGV製剤をリンゴに入る前のステージである孵化直後の幼虫が出現するタイミングで散布する。CpGVの散布により、70 - 90%の被害を軽減でき　リンゴの有機栽培にも使用されている。

ブラジルでは、ダイズは約100年前に日本からの移住者が入るまでは栽培されていなかったと言われているが、ダイズの栽培と同時に*A. gemmatalis*が害虫化し、ダイズの葉を食害するようになった。ブラジル政府の研究機関での基礎研究に基づき*A.　gemmatalis*　に感染するウイルス（AgMNPV）の製造方法や使用方法が確立された　その開発の経緯を概説すると、初期のパイロット圃場試験を経て、野外でのウイルス大量生産を行った。その後、民間会社が室内で感染に必要な幼虫を生産してAgMNPVを生産した　仲井, 2010　ブラジルでは、1982/83農年からウイルス防除が開始され2004/5農年までのプログラム実施により、2,300万ha以上のダイズ栽培農家全体で１億6100米ドル相当が節約できたとされて

いる（Moscardi, 2007）。また、その成功は、ブラジル以外の中南米の国にも波及しており、パラグアイでも10万haのAgMNPVが使用されており、メキシコでも使用が始まっている（Lacey, 2017）。生物的防除が成功した理由としては、NPV製剤の病原性が高かったこと、特異性が高かったこと、水平伝播すること 他に主要な害虫がいなかったこと、ダイズが比較的被害に耐えること 植物体の中に潜行せずに、葉など表面にいる虫だったこと、普及の過程で野外でウイルスを増殖できたこと、などが挙げられている（Moscardi博士私信）

【バキュロウイルスの日本での使用例】

茶は常緑多年草であり、数十年にわたり植え替えをする必要はほとんどない。栽培された茶樹は、摘採面には葉が密生しているが、内部にはほとんど葉がないというユニークな構造をしており、様々な害虫の生息場所であると同時に天敵の避難場所にもなっている(Kawai, 1997)。なかでも、ハマキガ（チャノコカクモンハマキとチャハマキ）は、様々な化学農薬に対して抵抗性の獲得が報告されている。このような状況で威力を発揮するのが、化学農薬と全く異なる作用機序をもつウイルス殺虫剤などの生物的防除資材である。

もともとヨーロッパでは、チャノコカクモンハマキに近縁のリンゴコカクモンハマキのGVが ウイルス農薬として登録されていた 日本でも、リンゴコカクモンハマキとチャハマキからそれぞれGVが分離され、農水省果樹試験場や静岡県立試験場において、茶害虫に対するGVの大規模な研究が行われ、大量生産、圃場への適用、他の天敵との相互作用、安全性の問題などが詳細に評価された(Nishi *et al.*, 1996)。GVの圃場での効果を調べる実験は、1985年に鹿児島県が国の補助を受けて開始した。1993年から鹿児島県は、化学農薬や桜島火山灰の問題から「クリーンなお茶の生産」に注力し、GVの散布による総合防除（IPM）を推進した。1990年から1992年にかけて、鹿児島に5つのGV大量生産施設が国の補助金で建設された。チャノコカクモンハマキとチャハマキのGVは、それぞれ交差感染性がないため、それぞれの幼虫を増殖させて、ウイルスを接種して幼虫体内でウイルスを生産し混合して使用した。GVは通常、ハマキガの初発生時に1回、最初の茶の収穫後の4月から5月に散布する。GVの散布時期は、各地域の県内の病害虫防除所が収集し、農家に公表した発生予測データから決定した。両種は多発性で、幼虫が年4 5回発生するが、春に1回GVを散布すると、通常年間を通じて散布したウイルスの効果が持続した。1995年の鹿児島県のGV散布面積は5,850haで、県内の茶畑の8割に相当する。

鹿児島でのGV散布の成功には、いくつかの要因がある。第一に、有効なウイルス剤が入手可能であり、効率的な散布プログラムが確立されていたこと。第二に、乗用型の散布機が県内全域によく行き渡っていたことである チョウ目の幼虫の多くは、成長するにつれてバキュロウイルスに対して感受性が低下する、いわゆる生育免疫と呼ばれる現象が見られるため、GVの散布が遅れると防除効果が低下してしまう。しかし、鹿児島県では、0.1haの茶樹をわずか10分間で散布することができたため、この地域でのGV散布の普及には、機械による効率的な散布が欠かせなかった。第三に、鹿児島には安定した茶業協同組合があったことである。これらの組織が主体となって、GVの生産と散布が効果的に運営されたといえる（鹿児島県茶業試験場・神崎康成氏私信）。2002年に農薬取締法が改正され、無登録の化学農薬の輸入や使用が規制されるようになった。ハマキガのGVは2003年に登録を受け、アリスタライフサイエンス株式会社によって生産されている

チャノコカクモンハマキとチャハマキには、性フェロモンによる防除が普及し 鹿児島県では2006年に3,000haで使用された。その一方で、GVの使用は減少している。日本の茶園でGVの使用量が減少している理由はいくつかあるが、そのひとつは他の害虫の発生パターンが変化したことがある 例えば、クワシロカイガラムシの防除がGV散布時期と重なり化学殺虫剤によりハマキガが死ぬためGVの効果が次世代に持続しないということがあった

さらに、鹿児島では10年以上GVを散布し、ハマキガの個体数を減少している。性フェロモンは昆虫の個体数が少ない方が効率的な防除策であるが、バキュロウイルスは宿主密度が高いほどより効果的な防除策である。現在、我が国ではチャのハマキガ防除には、GVと性フェロモンの両方が利用可能であることから、変動する害虫密度に対しても効果的に防除が行えるものと思われる（信越化学工業小川氏私信）

【バキュロウイルスの安全性に関する情報

世界で初めて農薬登録を取ったバキュロウイルスは、1973年にアメリカ合衆国における*Helicoverpa zea*（ヤガ科）に感染するNPVを基盤とした製剤（Viron/H™ および Elcar™)である。それ以来、動物実験をはじめとする多くの安全性試験が行われている。例えば、1967年に人体実験が行われている。10人の男女がNPVの包埋体を 6 ×10 個を 5 日間飲んだが、悪影響がなかった。6 人が26ヶ月間バキュロウイルス生産に従事したが悪影響がなかった。血液検査の結果から、バキュロウイルスとその抗原も抗体も検出されなかった。その他の情報として、野外におけるバキュロウイルスの検出した実験がある。その結果、野外から収穫されたキャベツの葉100cm^{2}に包埋体が 3 x10 個（通常時）～ 1 x10 個（大発生時）も含まれていた。このように、バキュロウイルスはどこにでもあって（ubiquitous）これまでも人体に取り込まれてきたであろうが感染症を引き起こすことがなかったことも安全性に関する情報のひとつとする主張がある（Black *et al.*, 1997

【バキュロウイルス製剤と化学農薬との併用に関する実験】

一般的に捕食者や寄生蜂などの天敵昆虫は、化学農薬等との併用が不可能であるが天敵微生物については化学農薬と併用することが可能な傾向にある。実際には、低濃度の化学農薬とバキュロウイルスを併用することにより殺虫効果が増進される場合がある。シロイチモジヨトウと*Spodoptera littoralis*(ヤガ科)幼虫に対してAutographa californica MNPV（AcMNPV）と低濃度のemamectin、metaflumizoneの施用は、殺虫効果を増進させる（Dader *et al.*, 2020）。AcMNPVについては、pyrethroid I (allethrin)、pyrethroid II (cypermethrin)、chlorinated hydrocarbon (DDT)、cyclodiene (endosulfan)、carbamate (methomyl)、有機リン剤 (profenofos)との併用について調査されたが、致死時間が早まり、感染致死数が単独施用に比べて少し減じる程度であった（McCutchen *et al.*, 1997 また、Anagrapha falcifera multiple nucleopolyhedrovirus (AfMNPV)と*Bacillus thuringiensis*（BT）製剤との混合施用についてトウモロコシの害虫であるヨーロッパアワノメイガ、*H. zea*、ツマジロクサヨトウ（*Spodoptera frugiperda*）に対する影響が調べられているが、BTとウイルスの混合物は、両病原体単独と比較して死亡率に影響を及ぼさないか、またはBTを添加するとウイルスによる死亡率が減少した（Pingel *et al.*, 1999 これらのことから、バキュロウイルス製剤の散布時に化学農薬を併用してもその効果が著しく減じることはないと考えられる。

【ウイルス農薬の長所と短所】

ブラジルなどでは大量生産されて広範囲に施用されているため、ウイルス農薬のコストが低い。一方、日本では需要が低いのでウイルス農薬の価格が高い。近年、我が国では捕食性のダニなどの節足動物天敵の需要が伸びているが、ウイルス資材の需要は多くない。以下の表にウイルス資材の特徴を挙げてみた。ウイルス農薬の特徴の一つである、特異性の高さから、多くの種類の害虫が発生する作物への施用には不向きである。一方で、チャのハマキガに見られるように、化学農薬に抵抗性を獲得してもウイルス農薬で防除が可能な点や、施用回数が少なくてすむなどの長所がある。また、前章で詳述したように化学農薬とある程度組み合わせて使用できる点など、節足動物天敵にない特徴がある。今後、コストの問題などがクリアできれば、作物によっては武器になる資材といえるだろう。

バイオ農薬の市場規模は世界で約30億ドルで、農薬市場全体のわずか5%を占めるにすぎない。欧州連合（EU）で登録されている生物農薬活性物質の数は、米国、インド、中国、に比べ少ない。これは、EUの登録プロセスが長く複雑であったためと言われていた（Damalas *et al.*, 2018　しかし、2022年にEUでも、Farm to Fork戦略（欧州版のみどりの食料システム戦略）の推進のために新しい規則が提唱された。新規則では、植物保護に使用される微生物資材の市場参入が促進され、これまで複雑であった登録のプロセスが、それぞれの微生物の生物学や生態学に基づき柔軟なものとなる。これにより、動物実験の回数が減り、動物実験の削減にもつながる。申請書類の簡素化やより直接的なリスク評価、欧州市場へのアクセスの時間短縮などが可能になるとされている（EU, 2022）。植物保護における安全性の評価は最優先課題であるが、今後、我が国においても微生物資材の利用を促進する方向性は検討すべきことであろう。

長所	特異性が高いため安全性が高い[1)] 化学農薬抵抗性の害虫にも効果がある 脊椎動物や植物には無害（残留毒性がない）環境汚染がない 他の天敵に影響がほとんどない[2)] 抵抗性が発達しにくい[3)]	他の生物防除資材や化学農薬との組み合わせが可能 製剤の有効期限が天敵昆虫に較べて長い 散布後環境中での生残性が高い 化学農薬のような散布作業ができる（作業がしやすい） 二次寄生者等天敵の問題がほとんどない
短所	殺虫スペクトラム（宿主範囲）が狭いことが多い[1)] 致死までに時間がかかる 生産コストが高い 製剤の有効期限が短い 環境要因により失活することを考慮しなければならない（紫外線、湿度、温度など）	生産コストが高い 抵抗性が発達した事例がある[3)] 植物の種類により効果に影響を受けることがある

[1)] 長所でも短所でもある．
[2)] 特異性が高いため化学農薬と較べて土着天敵など他の天敵に対する影響は少ないが、ウイルスに感染した宿主に寄生蜂などが寄生した場合等には悪影響がある．
[3)] 欧州で40年間同じ系統のコドリンガ顆粒病ウイルス剤を使用し続けたため抵抗性の個体群が発達したが、現在は抵抗性を克服するウイルス製剤が開発されている．

引用文献

仲井まどか, 勝間進 2022. In: バイオロジカルコントロール第二版, 朝倉書店.
仲井まどか, 2013. 昆虫ウイルスを利用した害虫防除資材の現状と展望. 化学と生物, 51, 693-701.
Nishi Y, Nonaka T. 1996. Biological control of the tea tortrix, using granulosis virus in the tea field. Agrochem Jpn, 69, 7-10.
Lacey L. 2017. In: Microbial Control of Insect and Mite pests, From theory to practice, Academic Press.
Sun X. 2015. History and Current status of development and uses of viral insecticides in China. Viruses, 7,

306-319.
仲井まどか2010. ブラジルにおける昆虫ウイルスを用いた生物的防除, バイオコントロール, 14, 49-59.
Moscardi F. 2007. In: Biological Control a global perspective (Ed. Vincent *et al.*), CAB International.
Kawai A. 1997. Prospect for integrated pest management in tea cultivation in Japan. JARQ, 31, 213-217.
Black *et al*. 1997. In: Baculoviruses, Plenum Press.
Dader *et al.* 2020. Synergy of lepidopteran nucleopolyhedroviruses AcMNPV and SpliNPV with insecticides. Insects, doi: 10.3390/insects11050316.
Mendez et al. 2002. Spinosad and nucleopolyhedrovirus mixtures for control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. Biological Control, 25, 195–206.
McCutchen *et al.* 1997. Interactions of recombinant and wild-type baculoviruses with classical insecticides and pyrethroid-resistant tobacco budworm. J. Econ. Entomol., 90, 1170-1180.
Pingel *et al.* 1999. Effect of *Bacillus thuringiensis*, Anagrapha falcifera multiple nucleopolyhedrovirus, and their mixture on three lepidopteran corn ear pests, J. Econ. Entomol., 92, 91-96.
Damalas *et al.* 2018. Current status and recent developments in biopesticide use, Agriculture, 8, 13, doi:10.3390/agiculture8010013.
EU 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_852

略歴

1987年 東京農工大学 農学部 卒業
1989年　筑波大学大学院医科学研究科修士課程修了
1989年-1992年　青年海外協力隊　スリランカ派遣
1997年 東京農工大学大学院連合農学研究科修了
現在　　東京農工大学大学院農学研究院　教授