

福岡県農業総合試験場特別報告

第12号

イチジクを加害するキボシカミキリの昆虫病原性
糸状菌による防除に関する研究

平成11年3月

福岡県農業総合試験場

(福岡県筑紫野市大字吉木)

SPECIAL BULLETIN
OF
THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

NO.12

Study on Microbial Control of the Yellow Spotted Longicorn Beetle,
Psacotha hilaris (PASCOE), by an Entomogenous Fungus,
Beauveria brongniartii, in Fig Tree Fields

by

TSUTSUMI Takafumi

THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

Chikushino, Fukuoka 818, Japan

March 1999

イチジクを加害するキボシカミキリの昆虫病原性
糸状菌による防除に関する研究

堤 隆 文

1999

*九州大学審査学位論文

序

本県では、イチジクの栽培面積が都市近郊を中心に増加し、現在全国2位の産地となっている。しかし、キボシカミキリの加害が近年になって増加し、安定的な生産に支障をきたしている。現在、本種に対して薬剤防除と成・幼虫の捕殺が実施されているが必ずしも効果をあげていない。キボシカミキリは多発すると樹が枯死するためイチジク農家からは最も恐れられている害虫であり、効果的な防除法を早急に確立し、生産の安定化を図る必要がある。加えて、近年、農産物の安全性と環境保全に対する社会的な関心が高まり、出来るだけ化学農薬を使用しない環境保全型防除技術の確立が求められている。

以上のような背景を基に、本報告では、土着の昆虫病原性糸状菌である *Beauveria brongniartii* を用いたキボシカミキリの微生物的防除法を明らかにした。この防除法は、使用菌が天敵類やミツバチなどの有用昆虫類に病原性が極めて低いため、安全性が高く、環境負荷が少ない等の特性を有することから、将来の望ましい害虫管理法の一つになることが考えられる。

なお、本報告は福岡県農業総合試験場において1991年から1993年まで3年間、鹿児島、大分、沖縄、熊本の5県と共同で実施した地域重要新技術確立事業「地域特産果樹のカミキリムシ類に対する昆虫病原糸状菌による生物的防除法の確立」に関連する試験成績を中心に取りまとめたものである。

本研究の遂行および、取りまとめに当たって、終始懇切なるご指導、ご助言を頂いた九州大学農学部教授河原畑勇博士に厚く御礼申し上げますとともに、福岡県農業総合試験場病害虫部職員一同の協力により達成された成果であることを付記し、関係各位に努力に深謝する。

平成11年3月

福岡県農業総合試験場場長

吉 村 大三郎

目 次

緒 言	1
第1章 キボシカミキリ成虫に対する <i>Beauveria brongniartii</i> の病性	3
第1節 キボシカミキリ成虫に対する <i>B. brongniartii</i> GSES 株の病原性	3
第2節 菌の感染経路	5
第3節 配偶行動による分生子の伝播	6
第4節 飛散分生子による感染	8
第5節 有用昆虫に対する安全性	10
考 察	13
第2章 イチジク圃場におけるキボシカミキリ成虫の発生生態	15
第1節 樹上における行動と生息部位	15
第2節 発生消長	20
第3節 個体群動態	24
考 察	27
第3章 イチジク圃場におけるキボシカミキリ成虫防除試験	28
第1節 菌の施用形態と殺虫効果	28
第2節 菌培養ウレタンフォームシートの圃場施用試験	32
第3節 菌培養不織布シートの圃場施用試験	34
第4節 菌培養不織布シートの広域施用試験	39
考 察	41
総合考察	43
摘 要	46
Summary	48
引用文献	51

緒 言

イチジク *Ficus carica* (L.) は、我が国では東北地方南部以南で広く栽培されている。イチジクは収益性が高いため、福岡県では1970年代より栽培面積が増加し、愛知県に次ぐ国内第2位の産地となっている。1995年の栽培面積は164ha、粗生産額は約8億円である（福岡県，1997）。福岡県では地域特産果樹としてイチジクの栽培を奨励し、生産増加を図っているが、単位面積当たりの収量が少なく、収量の増加が課題となっている。収量を低下させている原因の一つにカミキリムシ類（キボシカミキリ *Psacotha hilaris* (Pascoe)、クワカミキリ *Apriona japonica* (Thomson)）の加害による樹勢の低下がある。また、カミキリ類の被害により放棄される圃場もあり面積の拡大が計画通りに進んでいない。なかでも、キボシカミキリの被害は大きく、本種幼虫の食入が全く認められなかったイチジク園（5a：12樹）においても管理を放棄すると2年後には250頭の成虫が羽化し、全樹の1/3が枯死した例もある。本種のイチジクへの寄生は古くから報告されている（横山，1929）が、全国で被害が目立ち始めたのは1970年頃からである（伊庭・井上，1970）。福岡県においても1980年代に入ると主要産地である行橋市周辺でキボシカミキリの被害が問題になるようになった。キボシカミキリの寄主植物としてイチジク、クワ類 *Morus* spp.、ミカン類 *Citrus* spp.などが記録されている（小島・中村，1986）が、経済的被害を受けているのはクワ類とイチジクである。少なくとも福岡県では本種によるミカン類の被害の報告はない。

現在、イチジクのキボシカミキリ防除用として登録されている唯一の化学農薬であるジメトエート剤（商品名：カミキリン）は幼虫に対する樹幹散布のみが認められており、成虫への適用はない（トモノアグリカ'96製品カタログ）。しかも、本剤は葉や果実に付着すると葉害を生じるため実際に使用されるケースは少ない。ジメトエート剤の樹幹散布以外の本種に対する防除法としては成虫および幼虫の捕殺があるにすぎず、一旦発生した園では防除が困難である。そのため、現地からは新しい防除法の開発が要望されている。しかし、クワでの調査結果（伊庭，1963）からキボシカミキリ成虫の発生時期は2ヶ月以上におよび、幼虫は枝幹部深く食入するものと推測される。したがって、成虫に対し既存の化学殺虫剤による防除を行うとすれば散布回数的大幅な増加が必要であり、幼虫に対しては浸透性を増すため高濃度での使用が必要になるため現実性に乏しい。また、化学農薬の多用は多くの作物でハダニ類などのリサーチェンスや害虫類の薬剤抵抗性の発達などの弊害を引き起こしている（Debach and Rosen, 1991）。さらに、近年の傾向として、農作物に散布された化学農薬の健康への影響を懸念する消費者から農薬の使用回数を極力少なくする要望が強い。特に、イチジクは「健康によい果物」として販売戦略を組んでいるため、化学農薬の多用は消費量の減少につながるおそれがある。

果樹のカミキリムシ類に対する化学農薬以外の防除法として、Adachi and Korenaga (1989) は、カンキツ樹幹部をワイヤーネットなどによって覆いゴマダラカミキリの産卵を防止する方法を報告している。しかし、キボシカミキリの産卵習性はゴマダラカミキリと異なるのでこの方法は適用できない。また、キボシカミキリでは有力な天敵昆虫も知られていない。一方、河上 (1978) は、キボシカミキリから分離した昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* が同種に強い病原性を持つことを報告しており、本菌を利用した微生物的防除がイチジクのキボシカミキリに対して最も有望な対策と思われる。

微生物による害虫防除の研究は欧州で19世紀後半に始まり、我が国においても多くの害虫で試みられている（鮎沢，1973；福原，1979；河上，1985）。中でも果樹は、永年性作物であるため栽培環境が安定しており微生物による害虫防除に好適な条件を備えているものと思われ、果樹害虫に関する研究は比較的多い。糸状菌に限っても *Paecilomyces fumosoroseus* によるモモシンクイガの防除（関口，1955，1959）、*Paecilomyces lilacium* によるクワコナカイガラムシおよびイセリアカイガラムシの防除（森本ら，1961）、*Aschersonia aleyrodalis* によるミカンコナジラミ

の防除(於保・佐藤, 1966; Oho, 1968), *Beauveria bassiana*によるミカンネコナカイガラムシの防除(森本ら, 1959a,b, 1960a,b), *B. brongniartii*によるゴマダラカミキリの防除(柏尾・氏家, 1988; 橋元ら, 1989, 1991, 1992; 柏尾ら, 1989; 柏尾・堤, 1990; 堤ら, 1990)などがある。また, *B. brongniartii*は, クワ園のキボシカミキリに対する防除試験にも用いられている(河上・島根, 1986; 石々川ら, 1988; 吉井, 1991)。しかし, クワとイチジクでは樹体の大きさや栽培形態の違いから, クワ園における防除法はイチジクでは適用できないものと考えられた。さらに, 本菌によるイチジクのキボシカミキリの防除試験も本研究と並行して数例行われているが(柴尾・田中, 1993; 松浦ら, 1997), 防除法の開発を試みた報文はない。

本研究では, イチジクのキボシカミキリに対する *B. brongniartii*を用いた微生物的防除法の開発を試みた。キボシカミキリ成虫の生態に関しては, 伊庭(1963, 1982), 伊庭ら(1976)などの報文があるが, 野外圃場での行動に関する報文はない。野外での生態に関する報文の多くはクワ園での発消長を調査したものである(石井ら, 1963, 1964; 伊庭, 1976; 伊藤, 1979)。また, イチジクでは, 山下(1980)が兵庫県における発消長を報告している程度で, 樹上での生態などは全く未知であった。さらに, 九州におけるキボシカミキリの発生生態に関する報文はクワ園での事例を含めても見あたらなかった。本研究では, イチジクにおけるキボシカミキリの発生生態の解明を行いながら菌による防除法について検討した。

本研究は次の3章で構成される。第1章では主に使用する菌株のキボシカミキリに対する病原性, 鞘翅目に属する天敵類および有用昆虫であるミツバチなどに対する安全性, 施用方法を決定する上で重要な要因となる菌の感染経路, 圃場での波及効果が期待できる成虫間の分生子の伝播, 空中飛散分生子による感染を明らかにした。第2章では, 圃場への菌の施用時期および施用場所を決定するためにイチジクにおけるキボシカミキリの発消長および後食, 交尾, 産卵などの行動にともなう樹上での生息場所の変化を明らかにした。第3章では, 第1章および第2章の結果をもとにウレタンフォームまたは不織布で培養した菌のキボシカミキリ成虫に対する効果を明らかにし, これら培養菌を用いて野外イチジク圃場での防除試験を実施した結果を記した。

本文に入るに先立ち, 本論文をまとめることをおすすめ下さり, 取りまとめにあたって終始懇切なるご指導, 論文のご校閲を賜った九州大学農学部教授河原畑 勇博士に深甚の謝意を表する。

また, 本稿は九州大学農学部教授湯川淳一博士, 同助教授大庭道夫博士にもご校閲いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

本研究を実施する端緒は, 農林水産省果樹試験場口之津支場(現, 農林水産省野菜・茶業試験場久留米支場)柏尾具俊氏および鹿児島県果樹試験場橋元祥一氏に与えていただいた。農林水産省蚕糸・昆虫農業技術研究所長河上 清博士, 同研究所伊庭正樹博士には研究上有益な多くの助言をいただいた。農林水産省果樹試験場カンキツ支場芦原 亘博士にはJolly-Seber法の計算でお手を煩わせた。農林水産省果樹試験場口之津支場(現, 農林漁業金融公庫)氏家 武博士, 同支場(現, 農林水産省果樹試験場カキ・ブドウ支場)駒崎新吉博士, 福岡県農業総合試験場山田健一氏, 山中正博氏には多くのご便宜と研究のご指導をいただいた。また, 福岡県農業総合試験場病害虫部の諸兄には研究遂行の過程で数々の示唆をいただいた。皆様に心より感謝申し上げる。

試験に用いたウレタンフォームシートおよび不織布シートを提供していただいた日東電工株式会社樋口俊男氏博士, 供試虫の採集に協力していただいた鹿児島県大隅蚕業指導所および愛媛県蚕業試験場の職員の皆様, 現地試験の実施にあたってお骨折りいただいた福岡県京都農業改良普及所(現, 京都地区農業改良普及センター)中山哲雄氏, 多いときは年間千頭以上におよぶカミキリムシの個体飼育を愛情をもって管理し, 本研究の底辺を支えてくれた行武美幸さん, 木本エミ子さん, 山内則子さんに厚くお礼を申し上げます。最後になったが, 本研究をまとめるには, 中学校教師と家事を掛け持ちで忙しいなか夫の無理をきいてくれた妻 亨子の協力があつたことを忘れない。

第1章 キボシカミキリ成虫に対する *Beauveria brongniartii*の病原性

昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* にはコガネムシ寄生系統とカミキリムシ寄生系統がある (島津, 1993)。キボシカミキリから分離された *B. brongniartii* カミキリムシ寄生系統はキボシカミキリ成虫に強い病原性をもつことが報告されている (河上, 1978)。本研究で主に用いた GSES 株は群馬県で採集されたキボシカミキリ病死体から分離されたものである。本菌株はキボシカミキリ成虫に対し病原性を有するが、既知の菌株と比較されたことがない。そこで、GSES 株の病原性を *B. brongniartii* カミキリムシ寄生系統の代表的な菌株と比較した。

昆虫病原性糸状菌は経皮感染が一般的であるが、口器や肛門が感染経路となる場合もある (有賀, 1973)。菌による害虫防除を行う場合、有効な感染経路の探索は施用方法を定める上で不可欠である。また、スギカミキリでは本菌株を接種した成虫との交尾行動で健全虫が感染したことが報告されている (Shibata and Higuchi, 1988)。さらに、サナギタケ菌はブナシャチホコ幼虫に空中伝染することが知られている (Sato et al., 1997)。キボシカミキリ成虫でもこれらの現象が起これば、圃場に施用した菌と直接接触しなくとも感染が起きることが期待できる。そこで、キボシカミキリ成虫における *B. brongniartii* の感染経路、交尾行動による分生子の伝播および飛散分生子による空中感染を明らかにした。

カミキリムシ寄生系統の天敵類や有用昆虫に対する安全性については、カイコに対する病原性が極めて低い (河上, 1978; 島根・河上, 1993) ことが明らかになっている以外には知られていない。そこで、GSES 株の有用昆虫のミツバチ (西洋ミツバチ)、鱗翅目害虫などの捕食性天敵のオオオサムシおよびヒメオサムシ、自然界における「分解者」の1種であるオオヒラタシデムシに対する接種試験を実施した。

第1節 キボシカミキリ成虫に対する *Beauveria brongniartii* GSES 株の病原性

B. brongniartii カミキリムシ寄生系統の GSES 株は、本研究の成果などを基に開発された我が国初の糸状菌分生子を成分とする微生物農薬 (商品名: バイオリサ・カミキリ) としてイチジク、クワのキボシカミキリおよびカンキツのゴマダラカミキリの防除に使用されている (樋口ら, 1993)。しかし、GSES 株は、 LC_{50} 値など他の菌株と病原性を比較する指標値が明らかになってない。そこで、GSES 株の分生子懸濁液をキボシカミキリ成虫に接種し LC_{50} 値を求め、既知の菌株の値と比較した。

材料と方法

キボシカミキリ成虫は、1992年6月8日に愛媛県大洲市の桑園で採集した個体を供試した。供試虫は、採集直後から試験開始まで、塩化ビニル製カップ (径12cm, 高さ9.5cm) に1個体ずつ収容し、イチジクの新梢を餌として与え、23℃で飼育した。

Beauveria brongniartii GSES 株は、不織布シートに培養したものを日東電工株式会社生物化学研究所より分与を受けた。菌を培養した不織布シートは、Tween 20を0.05%添加した滅菌水500mlとともに電気ミキサーで粉碎した。粉碎液をテトロングースでろ過後、超音波洗浄器で2分間処理し、分生子の拡散を行い浮遊液を作成した。浮遊液は、血球計算盤 (Thoma, 1/400) で1ml当たりのみかけの分生子を計数後、デジタルピペットを用いて0.75mlを直径9cmのプラスチック

シャーレ内の素寒天培地（寒天2%）に塗布し、25℃、48時間培養後、約200個の分生子について光学顕微鏡下で発芽の有無を調査した。発芽管長が分生子短径の1/2以上進展したものを正常発芽とみなし、正常発芽率と培養前のみかけの分生子数から生存分生子数を算出した。

生存分生子数を $1.0 \times 10^7/\text{ml} \sim 1.0 \times 10^3/\text{ml}$ に階段希釈した浮遊液にキボシカミキリ成虫を約5秒間浸漬した。1濃度当たりの接種虫数は18～20頭で雌雄の割合は同数とした。菌を接種した成虫は風乾後イチジクの新梢を餌として与え、供試前と同一の塩化ビニル製カップで23℃、自然日長で飼育し、接種後30日間、原則として毎日生死を観察した。なお、死亡虫は虫体上の菌糸の叢生の有無を記録し、菌糸を叢生した個体のみの死亡率（純死亡率）を算出した。

結果と考察

表1 *Beauveria brongniartii* のキボシカミキリ成虫に対する病原性

処 理	供試菌株	浮遊液濃度 (分生子数)	総死亡率(%)	純死亡率(%) ¹⁾
分生子浮遊液 浸 漬	GSES	$1.0 \times 10^7/\text{ml}$	100	100
		$1.0 \times 10^6/\text{ml}$	80	80
		$1.0 \times 10^5/\text{ml}$	35	30
		$1.0 \times 10^4/\text{ml}$	15	10
		$1.0 \times 10^3/\text{ml}$	10	0
	SES769 ²⁾	$1.3 \times 10^7/\text{ml}$	95	95
		$1.3 \times 10^6/\text{ml}$	90	70
		$1.3 \times 10^5/\text{ml}$	60	35
		$1.3 \times 10^4/\text{ml}$	30	15
		$1.3 \times 10^3/\text{ml}$	5	0
無 処 理	—	—	0	0

1) 死後、虫体上に白色菌糸を叢生した個体のみの死亡率。

2) 堤 (未発表)。

表2 昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* 数菌株の
キボシカミキリ成虫でのLC₅₀値

菌株No.	LC ₅₀ 値 ¹⁾	出 典
GSES	$\leq 2.8 \times 10^5/\text{ml}$	
SES677	$\leq 4.5 \times 10^5/\text{ml}$	島根 (1993)
SES769	$\leq 2.5 \times 10^5/\text{ml}$	堤 (未発表)
SES863	$\leq 2.9 \times 10^4/\text{ml}$	島根 (1993)
SES866	$\leq 1.4 \times 10^5/\text{ml}$	"
SES879	$\leq 5.5 \times 10^4/\text{ml}$	"
SES899	$\leq 1.6 \times 10^4/\text{ml}$	"
SES910	$\leq 2.6 \times 10^4/\text{ml}$	"

1) 純死亡率で計算した。

分生子浮遊液に浸漬したキボシカミキリ成虫の純死亡率は、 $1.0 \times 10^7/\text{ml}$ では100%、 $10^6/\text{ml}$ では80%と高かったが、 $10^5/\text{ml}$ になると急激に低下し35%となった。 $10^4/\text{ml}$ および $10^3/\text{ml}$ では15%、10%と低かった。これらの結果から、キボシカミキリ成虫に対する*B. brongniartii* GSES株の LC_{50} 値を算出すると $2.8 \times 10^5/\text{ml}$ となった。島根(1992)は、キボシカミキリ成虫に強い病原性を持つ*B. brongniartii* 6菌株の分生子浮遊液に成虫を浸せし、菌接種後25日目までの病死率から LC_{50} 値を算出した。各菌株の LC_{50} 値は、SES677株 $\leq 4.5 \times 10^5/\text{ml}$ 、SES863株 $\leq 2.9 \times 10^4/\text{ml}$ 、SES866株 $\leq 1.4 \times 10^5/\text{ml}$ 、SES879株 $\leq 5.5 \times 10^4/\text{ml}$ 、SES899株 $\leq 1.6 \times 10^4/\text{ml}$ 、SES910株 $\leq 2.6 \times 10^4/\text{ml}$ であった。また、石々川ら(1988)がクワ園のキボシカミキリ防除試験で使用し、高い感染率を得た菌株であるSES769株の LC_{50} 値は $2.5 \times 10^5/\text{ml}$ であった(堤、未発表)。以上の結果から、GSES株のキボシカミキリ成虫に対する病原性はこれら7菌株に劣らないことが示唆された。

第2節 菌の感染経路

菌の施用方法を決定する上で標的とする害虫における菌の感染経路は重要な要因の一つである。昆虫病原性糸状菌は一般的に経皮感染するが(有賀, 1973)、キボシカミキリ成虫における*B. brongniartii*の感染経路については河上(1978)の大まかな報告があるにすぎない。そこで、分生子浮遊液の局部接種により感染経路を明らかにした。

材料と方法

キボシカミキリ成虫は、前節と同じく愛媛県大洲市の桑園で採集した個体を供試し、同条件で飼育した。

B. brongniartii GSES株を供試した。供試菌は、不織布シートに培養したものを日東電工株式会社生物化学研究所より分与を受けた。菌を培養した不織布シートから前節と同じ方法で浮遊液を作成し、生存分生子数を算出した。

キボシカミキリ成虫の脚、腹部、触角または口器に生存分生子数 $7.1 \times 10^7/\text{cm}^2$ に調製した浮遊液を塗布した。各部位当たりの接種虫数は18~20頭で雌雄の割合は同数とした。菌を接種した成虫は、風乾後供試前と同条件で飼育し、接種後30日間、原則として毎生死を観察した。なお、死亡虫は、第1節同様、菌糸の叢生の有無により総死亡率と純死亡率を算出した。

結果と考察

分生子を接種した部位により成虫の死亡率に差が認められた。触角、脚および腹部に分生子を接種した成虫は70~95%が死亡し、接種部位間で差がなかったが、口器に接種した成虫の死亡率は30%と他の部位と比較して有意に低かった。接種後、致死までの平均日数は触角接種区が最も短く18日であった。脚接種区の致死日数は、触角と有意な差は認められなかったものの、腹部および口器接種区では、23~25日とさらに長くなり、触角および脚と有意な差が認められた。これらの結果を分生子浮遊液に浸漬し全身に分生子が付着した個体(第1節)と比較すると、触角、脚および腹部へ菌を接種した成虫の死亡率はこれと差がないものの、致死日数が長かった。付着分生子数が少ないと感染から致死までの期間が長くなることが報告されており(後述、第3章)、局部接種では接種菌量が少なかったため致死日数が長くなったものと考えられた。有賀(1973)は、一般に、糸状菌は経皮的に宿主体内への侵入するが、その場合、環節間膜からの侵入が他の部位に比べ

表3 昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* を局部接種した
キボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	接種部位	供試虫数	総死亡率 (%) ⁴⁾	純死亡率 (%) ¹⁾	死亡までの日数(日) ²⁾³⁾
接 種	触 角	20	95 ^A	75	18±5.3 ^a
	脚	18	83 ^A	60	20±2.8 ^a
	腹 部	20	70 ^A	50	23±3.2 ^b
	口 器	20	30 ^B	20	25±5.0 ^b
無接種	—	20	0	0	—

1) 表1に同じ

2) 平均値±S.D.

3) 異符号間に有意差がある (Mann-WhitneyのU検定: $p < 0.05$)。

4) 異符号間に有意差がある (Fisherの正確確率検定: $p < 0.05$)。

てはるかに容易であるとしている。本研究で、*B. brongniartii* を接種すれば高率に感染することが判明した脚、腹部および触角には多くの環節間膜が存在し、

有賀(1973)の記述と一致する。また、河上(1978)は、本菌をキボシカミキリ成虫の触角及び脚部に接種するとほぼ100%、胸腹部への接種でも50%が感染することを報告しており、本菌はこれらの体節間膜に付着した場合、虫体に侵入する確率が高いものと考えられた。これらの結果から、イチジクでは施用した菌の上をキボシカミキリ成虫が歩行し、脚、触角、腹部に分生子が多く付着するよう樹への処理方法を工夫する必要がある。

第3節 配偶行動による分生子の伝播

昆虫病原性糸状菌では感染虫体内で増殖した菌による二次感染の報告はない。しかし、Shibata and Higuchi(1988)は、*B. brongniartii* を接種したスギカミキリ成虫と交尾した非接種成虫が100%死亡したことを報告している。そこで、キボシカミキリ成虫における交尾行動による分生子の伝播を明らかにした。

材料と方法

キボシカミキリ成虫は第1節の実験と同様に1992年6月8日に愛媛県大洲市の桑園で採集した個体を供試し、採集直後から試験開始まで同条件で飼育した。

供試菌は、第1節と同様に不織布シートに培養された*B. brongniartii* GSES株を用いた。

雌雄各10頭の供試虫に、直径30cmのガラスシャーレ内に並べた生存分生子数 $3.9 \times 10^7/\text{cm}^2$ の不織布シート上を60秒間歩行させることにより菌を接種した。菌接種2時間後および1日～5日後に毎日1回(計6回)、毎回新しい非接種虫と接触させた。菌接種成虫1頭を塩化ビニル製カップ(径12cm、高さ9.5cm)に収容後、それぞれ異性の非接種成虫1頭を放飼し、雌雄一対とした。雄のマウント行動が確認されてから30分後にそれぞれを新しいカップに回収した。回収した成虫は供試前と同一条件で40日間飼育し、原則として毎日生死を調査した。また、試験終了後の菌接種成虫および対照として供試群から任意に選んだ雌雄各10頭も同一条件で飼育した。なお、死亡虫は、第1節同様、菌糸の叢生の有無により総死亡率と純死亡率を算出した。

表4 *Beauveria brongniartii* を接種したキボシカミキリ成虫と交尾した
未接種成虫の死亡率

処 理	処理後の 経過日数	性	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 (%) ¹⁾	死亡までの 日 数 (日) ²⁾
菌接種虫と 交 尾	0 ³⁾	♂	10	100	60	13±4.7
		♀	10	100 ^{a4)}	50	13±1.3
	1	♂	10	100	60	13±2.3
		♀	10	80 ^a	50	15±4.8
	2	♂	10	80	70	15±4.7
		♀	10	70 ^a	60	15±5.2
	3	♂	10	100	70	16±8.8
		♀	10	50 ^b	10	14±5.3
	4	♂	10	70	60	15±4.0
		♀	10	50 ^b	20	18±8.7
	5	♂	10	60	60	19±4.2
		♀	10	40 ^b	30	14±3.7
無処理	—	♂	10	0	0	—
		♀	10	0	0	—

1) 表1に同じ

2) 表2に同じ

3) 菌接種2時間後に交尾した。

4) 異符号間に有意差がある (Fisherの正確確率検定: $p < 0.05$)。

結果と考察

供試した菌接種成虫は接種後約10日で全個体が死亡したものの、接種5日後までは正常に交尾行動を行い、雌雄の全組み合わせでマウント行動が観察された。接種2時間後の初回の交尾行動により菌接種成虫と接触した非接種成虫は、雌雄ともに全個体が死亡した。キボシカミキリ成虫は触角、脚または腹部に*B. brongniartii*の分生子を接種すると高率に死亡する(第2節; 河上, 1978)。また、交尾行動中に雄成虫は雌成虫のholdingや触角による接触を行う(Fukaya and Honda, 1992)。これらのことから、非接種成虫は菌接種成虫との交尾行動において触角や脚または腹部などに分生子が付着して感染したものと考えられた。

菌接種成虫の交尾回数が増加すると共に、これと接触した非接種成虫の死亡率は徐々に低下したが、5日後の6回目の交尾においても菌接種成虫は他個体に菌を伝播する能力を維持していた。本実験において菌接種後5日目の成虫と交尾した非接種成虫の死亡率が40～60%に留まっているのに対し、Shibata and Higuchi(1988)のスギカミキリを用いた実験では、本実験と同様の方法で菌を接種して7日経過した成虫と交尾した非接種成虫は100%死亡している。Shibata and Higuchi(1988)では接種7日後が第1回の交尾であったのに対し、本実験では6回目の交尾であった。種が異なるため直接の比較は出来ないが、両種とも本菌に対する感受性は高いので、菌接種成虫の交尾回数が雌雄間の菌の伝播に影響を及ぼしている可能性が高い。交尾行動の繰り返しによって菌接種成虫に付着していた分生子が剥落し、伝播する分生子数が減少したため、菌接種虫と接触した非接種成虫の死亡率が徐々に低下したものと考えられる。しかし、菌接種成虫の分生子伝播能力には雌雄差がみられた。菌接種成虫と接触した非接種成虫の死亡率は、雄では5日間有意差がなかったのに対し、雌の死亡率は1回目の交尾(接種2時間後)と比較して4回目(接種3日後)以降有意に低下した。この原因として、菌接種時の分生子付着量の差が考えられたが、不織布シート

上を歩行した成虫に付着する分生子量に雌雄で差はない（後述、第3章）ので、交尾行動の繰り返しにより菌接種成虫に付着していた分生子の剥落量が異なったのではないかと考えられる。交尾行動において雄成虫の活動はより能動的で、そのぶん分生子の剥落が多いものと思われる。また、菌接種成虫と接触した非接種成虫の感染から死亡までに要した期間は、不織布シート上を歩行した成虫に比べると長くなった。このことは、交尾行動により非接種虫に伝播する分生子数はかなり少ないことを示唆している。したがって、菌接種成虫に付着している分生子のうち交尾行動で伝播するものはごく一部であるものと考えられた。

圃場での観察によれば、キボシカミキリ雄成虫はイチジクの樹幹部で雌を待ち受け、1日に複数の雌と交尾する（堤、未発表）。本菌を接種したゴマダラカミキリ *Anoplophora malasiaca* (Thomson)は死亡する2～3日前まで正常に活動する（柏尾・氏家、1988）。キボシカミキリにおいても同様の結果が報告されている（津田・山中、1995）。これらのことから、野外のイチジク圃場では菌に感染した成虫からの分生子の伝播が個体群内の感染の広がりにより一定の役割を果たしているものと考えられた。

第4節 飛散分生子による感染

前節までの実験で、*B. brongniartii*の分生子がキボシカミキリ成虫の触角、脚および腹部に付着すると高率に感染すること。また、菌接種虫との交尾行動で非接種虫が感染することを明らかにした（第2節、第3節）。一方、柏尾・堤（1990）はカンキツのゴマダラカミキリ成虫を用いた野外網ケージ試験において*B. brongniartii*を培養したフスマ培地から飛散した分生子により成虫が感染した可能性を指摘している。また、サナギタケ菌では空中伝染が報告されている（Sato et al., 1997）。これらのことから、圃場に本菌を培養した不織布シートなどを施用した場合、菌培養シートから飛散した分生子が虫体または周囲の葉などに付着し、これによってキボシカミキリ成虫が感染する可能性がある。そこで、飛散分生子による感染の可能性について検討した。

1. 不織布シートから飛散した分生子による感染

材料と方法

鹿児島県肝属郡松山町の桑園で採集した成虫を供試した。供試虫は採集直後から試験開始までの期間、前節と同一条件で飼育した。

分生子の飛散源としては前節同様、本菌 GSES 株を培養した不織布シート（日東電工製造）を用いた。

調製後5℃で保存していた未使用の不織布シートをビニール製アミ籠（8×15×10cm）に入れ、イチジク樹の高さ1mに設置した。不織布シートの水平方向50cmに、キボシカミキリ成虫を1頭入れた同型のビニール製アミ籠を設置し、菌に汚染されていないイチジク新梢を与えて7日間飼育した。成虫はその後回収し、イチジク新梢を与えて塩化ビニル製カップ（径12cm、高さ9.5cm）で23℃、自然日長で30日間飼育し、原則として毎日死亡状況を観察した。なお、死亡虫は、第1節同様、菌糸の叢生の有無により総死亡率と純死亡率を算出した。

結果と考察

表5 菌培養物から飛散した分生子により感染したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	供試虫数	死 亡 虫 数				累積純死亡率 (%) ¹⁾
		処理～10日	11～15日	16～20日	21～30日	
処 理 ²⁾	9	0	7	0	2	100
無処理	10	0	0	0	0	0

1) 表1に同じ

2) 菌を培養した不織布シートから50cm離れた網カゴで飼育した。

柏尾・堤(1990)は、野外大型網ケージ内のカンキツ樹に *B. brongniartii* を培養したフスマ培地を入れたビニル製虫籠を吊るして、ゴマダラカミキリ成虫の放飼を行い、成虫が高率に感染したことを報告している。しかし、試験中に少量の培地の脱落を認め、飛散分生子による感染についてはさらに詳細な検討が必要であるとしている。また、Sato et al.,(1997)は、サナギタケ *Cordyceps militaris* Link がブナの葉を食害するブナアオシャチホコ幼虫 *Quadricarifera punctatella* (Motschulsky) に空中伝染することを報告している。

不織布シートを設置したイチジク樹で隔離飼育したキボシカミキリ成虫は、隔離飼育中に死亡しなかったものの、回収後に全個体が死亡した。死体上には菌糸の叢生が認められ、糸状菌による病死であることが明らかであった。

これらの結果は、本菌を施用した場合、菌体と接触しなくとも空中飛散した分生子によってキボシカミキリ成虫が感染することを示唆した。

2. 分生子が飛散した葉との接触による感染

材料と方法

愛媛県大洲市の桑園で採集した成虫を前節同様飼育し、供試した。

福岡県糸島郡志摩町の野外イチジク圃場5a(品種・樹齢：榊井ドーフィン13年生)においてイチジクの新梢上に紙製トレイ(直径23cm)で遮光した不織布シートを各樹1本吊り下げて施用した(第3章、写真2)。不織布シートは1992年6月16日に施用し、10日、22日および31日後の3回、シート斜め下方30cm～50cmの葉を採集した。葉は葉柄をハサミで切断し、他の葉と接触しないように1枚ごとに塩化ビニル製カップ(径12cm、高さ9.5cm)に収容して持ち帰った。葉を収容したカップにキボシカミキリ成虫を1頭放飼し、24時間後に回収した。回収した成虫は前試験と同様に個体飼育を行い、死亡状況を調査した。キボシカミキリ成虫は、1回の試験には雌雄合計19～20頭を供試した。なお、死亡虫は、第1節同様、菌糸の叢生の有無により総死亡率と純死亡率を算出した。

結果と考察

フトカミキリ亜科(Lamiinae)のカミキリムシは、体の発育や性成熟のため植物体の一部を摂食して栄養を補給する習性があることが知られている(Linsley, 1959)。同亜科に属するキボシカミキリは羽化直後からイチジクの葉を後食する。本菌の分生子は成虫の触角、腹部、脚および口器から感染する(第2節)ので、葉の後食のため葉上を歩行する成虫は感染する可能性が高いと考え

表6 菌施用圃場のイチジク葉と接触したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	葉の採集時期 (菌施用後日数)	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 (%) ¹⁾	死亡までの 日 数 (日) ²⁾
菌施用	10	20	30	10	18±5.0
	22	20	40	15	25±6.8
	31	19	37	5	13±4.6
無施用	—	20	5	0	5

1) 表1に同じ

2) 表2に同じ

られた。

不織布シート施用圃場で採集した葉と接触した成虫の総死亡率は30%～40%、純死亡率は5%～15%であり、葉の採集日の違いによる有意な差はなかった。死亡までの日数は長く個体間のばらつきも大きかった。虫体に付着する分生子数が減少すると死亡までの日数は遅延し個体間のバラツキが大きくなる（後述、第3章）ので、葉への分生子の飛散量は少ないものと思われた。しかし、飛散分生子と接触した成虫は低率ながら感染しており、葉上の分生子も菌の伝播経路の1つとなるものと考えられた。

第5節 有用昆虫に対する安全性

キボシカミキリ成虫由来の*B. brongniartii*カミキリムシ寄生系統は、キボシカミキリ、クワカミキリおよびゴマダラカミキリに強い病原性を有することが報告されている（河上，1978；滝口，1981）。また、同系統のGSES株を主成分とする微生物農薬（商品名：バイオリサ・カミキリ）は、カンキツ、クワおよびイチジクで使用されている。バイオリサ・カミキリが大量に使用された場合、圃場内外に生息する天敵類や有用昆虫に悪影響を与える可能性がある。しかし、カミキリムシ寄生系統の*B. brongniartii*の天敵類や有用昆虫に対する病原性については、河上（1978）および島根・河上（1993）がカイコ *Bombyx mori* (L.) に対する病原性がきわめて低いことを報告しているに過ぎない。そこで、カイコとならぶ重要な有用昆虫であるミツバチ（西洋ミツバチ）*Apis mellifera* (L.)、カミキリムシ科と同じ鞘翅目に属し、半翅目、鱗翅目害虫などの捕食性天敵であるオオサムシ科のオオオサムシ *Apotomopterus dehaani* Chaudior、ヒメオサムシ *Apotomopterus japonicus* Motschulsky および動物死骸の分解者であるシテムシ科のオオヒラタシテムシ *Eusilpha japonica* Motschulsky に対する病原性を検討した。

1. 西洋ミツバチに対する病原性

材料と方法

西洋ミツバチは、働きバチを供試した。ミツバチの巣箱1箱（約6000頭）を1992年4月に鹿児島市の養蜂業者から購入し、供試（7月20日）まで鹿児島県垂水市の鹿児島県果樹試験場内の露場に置いた。

*B. brongniartii*はGSES株を供試した。分生子浮遊液の作成および生存分生子数の算出は第1節と同様の方法で行った。

働きバチを網カゴ(10×10×10cm)に収容し、階段希釈により生存分生子数を約10⁸/ml～10⁴/

mlに調製した浮遊液をハンドスプレーを用いて噴霧接種した。菌を接種したミツバチは風乾後、32℃で7日間ハチミツを与え、網カゴのまま飼育した。この間に死亡した個体は25℃の湿室に置き菌糸の叢生の有無を記録した。

結果と考察

昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* は *B. bassiana* の異名である *B. tenella* と記載されていた時期がある(島津, 1993)。Prest et al., (1974) は西洋ミツバチ(働きバチの蛹)から *B. tenella* を分離している。ミツバチから分離された菌がコガネムシ寄生系統、カミキリムシ寄生系統のどちらに含まれるかは明らかでないが、本菌株もミツバチに病原性を有している可能性があった。

供試したハチの総死亡率は各分生子浮遊液散布区で9~40%とやや高かったものの、浮遊液中の分生子濃度とハチの総死亡率に相関はなかった。また、殺菌水を散布した区でも12%が死亡した。さらに、全ての死亡個体は加湿後も菌糸を叢生しなかった。以上の結果から、カミキリムシ寄生系統の *B. brongniartii* GSES 株は西洋ミツバチ成虫に病原性がないものと考えられた。

2. オオサムシ類に対する病原性

材料と方法

キボシカミキリ由来のカミキリムシ寄生系統 *B. brongniartii* の代表的な菌株の一つである SES879 株(農林水産省蚕糸・昆虫農業技術研究所より分与)および GSES 株を供試した。

オオオサムシおよびヒメオサムシは、1992年5月に福岡県筑紫野市で採集した成虫を供試した。供試虫は、採集から供試までの期間、パーク堆肥を約2cmの厚さに敷いた塩化ビニル製カップ(径12cm, 高さ9.5cm)に1個体ごとに収容し、魚肉チクワと水を与え、自然日長下、23℃で飼育した。

B. brongniartii SES879 株は、酵母エキス加用サブロー培地を用いて3日間、25℃で振とう培養後、同寒天培地上で10日間培養した。得られた分生子を滅菌水(Tween 20, 0.05%添加)に浮遊し2分間超音波洗浄器にかけて分生子の拡散を行い分生子浮遊液を作成した。GSES 株は前試験と同様の操作で分生子浮遊液を作成した。これらの分生子浮遊液の生存分生子数の算出は前試験と同様に行った。

表7 *Beauveria brongniartii* GSES株の西洋ミツバチに対する病原性

処 理	浮遊液濃度 (分生子数)	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 ¹⁾ (%)
分生子浮遊液 散 布	$1 \times 10^8 / \text{ml}$	209	25	0
	$1 \times 10^7 / \text{ml}$	229	10	0
	$1 \times 10^6 / \text{ml}$	176	9	0
	$1 \times 10^5 / \text{ml}$	167	16	0
	$1 \times 10^4 / \text{ml}$	169	40	0
滅菌水散布	—	123	12	0

1) 表1に同じ

分生子浮遊液は生存分生子数を約 $10^7/\text{ml}$ に調製し、ハンスプレーを用いて供試虫へ噴霧接種した。菌を接種した個体は風乾後、供試前と同条件で30日間個体飼育した。死亡虫は湿室に置き、菌糸を叢生した個体は菌の分離を行い、本菌の感染の有無を確認した。

結果と考察

鱗翅目幼虫などの捕食天敵であるオサムシ類は、ヨーロッパでは重要な天敵のひとつとして高く評価されている。供試したヒメオサムシは日本全土および周辺の島嶼に分布し、もっとも普通にみられるオサムシ類の1種である。また、オオオサムシは本州中部以南の山麓部で普通にみられる種類である（中根ら、1960）。福岡県の果樹園は主に山麓～山間部にあるため両種は園内で普通にみられる。現在までにオサムシ類に病原性を有する糸状菌として *Metarhizium anisopliae* および *Tilachlidiopsis nigra* が報告されているが³、*B. brongniartii* の報告はない（国見、1993）。しかし、本菌は多くの種類の昆虫から分離されており、欧米および日本では *B. brongniartii* または *B. tenella* の宿主昆虫として鞘翅目、鱗翅目、双翅目、半翅目、膜翅目、直翅目などに属する昆虫が記録されている（Charles, 1941; Steinhaus and Marsh, 1962; De Hoog, 1972; Prest et al., 1974; 国見, 1993）。しかも、本菌株は鞘翅目のカミキリムシ科昆虫に強い病原性があり、同じ目に属するオサムシ科昆虫に病原性がある可能性がある。また、菌を培養した不織布シートなどを樹上に施用した場合、分生子の降雨による流亡や剥落により地表が菌に汚染される可能性が高い。オオオサムシおよびヒメオサムシは地上徘徊性であるため、病原性があれば高率に感染するものと思われた。

分生子浮遊液散布の結果、本菌に感受性のキボシカミキリ成虫の純死亡率は、SES879株では100%、GSES株では80%であったのに対し、オオオサムシでは総死亡率が各菌接種区20～35%、無接種区15%、純死亡率は全ての区で0%であった。ヒメオサムシの総死亡率は各菌接種区で11～29%、無接種区で34%であった。ヒメオサムシでは菌接種区および非接種区で各1頭菌糸を叢生した個体がみられたが³、菌を分離、同定した結果いずれも *B. bassiana* であった。これ

表8 *Beauveria brongniartii* の数種鞘翅目昆虫に対する病原性

処 理	供試株名	供試虫名	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 (%) ¹⁾
分生子浮遊液 散 布 ²⁾	SES879	ヒメオサムシ	35	29	0
		オオオサムシ	25	20	0
		キボシカミキリ	10	100	100
	GSES	ヒメオサムシ	35	11	0 ³⁾
		オオオサムシ	20	35	0
		オオヒラタシデムシ	15	67	0
無 処 理	—	キボシカミキリ	10	80	80
		ヒメオサムシ	35	34	0 ³⁾
		オオオサムシ	20	15	0
		オオヒラタシデムシ	5	40	0
		キボシカミキリ	10	0	0

1) 表1に同じ

2) 散布濃度: SES879株 $1.5 \times 10^7/\text{ml}$, GSES株 $1.4 \times 10^7/\text{ml}$

3) 但し *Beauveria bassiana* による死亡虫が各1頭みられた

らの結果から、カミキリムシ寄生系統の *B. brongniartii* GSES 株および SES879 株はオオオサムシおよびヒメオサムシに病原性がないものと考えられた。

3. オオヒラタシデムシに対する病原性

材料と方法

B. brongniartii GSES 株を供試した。

オオヒラタシデムシは、1992年5月に福岡県筑紫野市で採集した成虫を供試した。供試虫の飼育、分生子浮遊液の作成及び調製、菌の接種、感染調査はオサムシ類と同様に行った。

結果と考察

動物死骸などの分解者であるシデムシ類は農業害虫の天敵ではないが「分解者」として生態系の中で重要な役割をはたしている。供試したオオヒラタシデムシは日本全土に分布し（中根ら、1960）、福岡県ではもっとも普通にみられるシデムシ類の1種である。本種からは *Beauveria bassiana* が分離されているが、*B. brongniartii* の報告はない（津田ら、1996）。しかし、本種はオサムシ類と同じく地上徘徊性であるため本菌に感受性である場合には影響が大きいと考えられる。

分生子浮遊液散布の結果、本菌に感受性のキボシカミキリ成虫の純死亡率は、GSES 株 80% であったのに対し、オオヒラタシデムシの純死亡率は 0% であった。したがって、*B. brongniartii* カミキリムシ寄生系統の GSES 株はオオヒラタシデムシに病原性がないものと考えられた。

第1章の考察

キボシカミキリ成虫由来の *B. brongniartii* GSES 株のキボシカミキリ成虫に対する病原性は、島根(1993)の選抜した強病原性系統 6 菌株および石々川ら(1988)がクワの圃場試験で高い感染率を得た SES769 株と同等であった。したがって、本菌株をキボシカミキリの微生物的防除に用いることについては病原性の面からは問題がないものと思われた。

キボシカミキリ成虫は、分生子が虫体の一部（触角、脚または腹部）に少量付着することによっても高率に感染死したことから、菌体との接触は、高い殺虫効果が期待できる。また、菌体と接触しなくとも、既に感染した成虫との交尾行動により感染すること、あるいは、施用した菌体から飛散した分生子によっても感染することが判明し、菌を圃場へ施用した場合、効果は施用場所のみならず広範囲に及ぶことが示唆された。しかし、これらの方法で感染した成虫は、菌体との接触による感染虫と比べ、死亡までの期間が長くなった。

本菌によるキボシカミキリ防除は成虫を殺すことによる産卵防止効果を目的としたものである。キボシカミキリの産卵前期間は約 10 日であり（伊庭、1982）、この間に死亡すれば産卵しない。一方、本菌の感染から死亡までに要する日数は、高濃度感染（例えば $10^7/\text{ml}$ 以上の分生子浮遊液に浸漬）でも 10 日を要し、感染成虫は死亡 2 日前から正常に産卵しなくなる（津田・山中、1995）。そのため、産卵を完全に防ぐには羽化後 2 日以内に高濃度感染させる必要がある。また、キボシカミキリ雌成虫は健全であれば 70～90 日間産卵を継続する（伊庭、1982）が、低濃度感染であっても途中で死亡するため産卵抑制効果は期待できるものと思われた。

B. brongniartii の宿種範囲は広く、鞘翅目、鱗翅目、双翅目、半翅目、膜翅目、直翅目などに属

する昆虫から記録されている (Charles, 1941 ; Steinhaus and Marsh, 1962 ; De Hoog, 1972 ; Prest et al., 1974 ; 国見, 1993)。しかし, *B. brongniartii* GSES株は, 宿主として記録されている有用昆虫のミツバチ (膜翅目) (Prest et al., 1974), 捕食性天敵のオオオサムシおよびヒメオサムシ (鞘翅目), 死骸分解者のオオヒラタシテムシ (鞘翅目) に病原性がなかった。また, カイコ (鱗翅目) に対する病原性も極めて低かった (河上, 1978 ; 島根・河上, 1993)。これらの結果は, GSES株を野外に大量に施用した場合も安全性が高いことを示唆した。

以上の結果から, イチジクのキボシカミキリ成虫防除における *B. brongniartii* GSES株の利用は, 高い殺虫効果が期待できるうえ, 標的とする害虫以外の有用昆虫および天敵などに対する安全性も高いものと予想された。しかし, 菌体の分生子数が減少すると接触した成虫の感染から死亡までの日数が長くなり, 産卵防止効果が低下するので, 菌の圃場への施用に当たっては産卵防止効果が最も高い施用時期の解明および施用方法の開発が必要である。そのためには, イチジク圃場におけるキボシカミキリ成虫の生態解明が不可欠であるものと思われた。

第2章 イチジク圃場におけるキボシカミキリ成虫の発生生態

第1章において、*Beauveria brongniartii* GSES株は、キボシカミキリ成虫に対して強い病原性を持ち、触角、脚、腹部および口器から体内に侵入すること。交尾行動により虫体に付着した分生子が他個体に伝播すること。空中飛散した分生子による空気感染や葉上に飛散した分生子による感染が起こること。また、ミツバチおよびオサムシ類などに安全性が高いことを明らかにした。しかし、圃場に菌を施用し、防除を実施するにはキボシカミキリ成虫の発生生態にあった施用法の開発が必要である。第2章では本菌による防除法を確立するうえで重要なキボシカミキリ成虫の圃場における発生生態の解明を行った。

まず、菌の施用場所を決定するためには樹上におけるキボシカミキリ成虫の生息部位を知る必要がある。しかし、イチジク樹上におけるキボシカミキリの生息部位に関する報文はみあたらない。また、生息部位は行動の変化にともなって替わるものと考えられる。伊庭（1963）の室内試験の結果からキボシカミキリの行動には日周性があるものと思われる。また、羽化後、成熟にともない行動内容が変化することが報告されている（伊庭，1982）。そこで、成虫の摂食および生殖行動に伴う樹上の生息部位の日周的变化および季節的变化を調査した。

また、菌の施用時期を決める上で発消長は重要な要因である。クワ園におけるキボシカミキリの発消長は、関東、中部、関西地区で多くの報告があり、地区により異なった消長を示すことが明らかになっている（伊庭ら，1976；米山・小沢，1980；米山・市川，1981）。しかし、イチジク圃場におけるキボシカミキリの発消長は、兵庫県における事例（山下，1980）が報告されているにすぎない。また、クワ園での事例を含めても九州におけるキボシカミキリの発消長に関する報文はない。そこで、九州のイチジク圃場における発消長を明らかにした。同時に、標識再捕法により圃場内の個体群動態についても調査した。

第1節 樹上における成虫の行動と生息部位

キボシカミキリは羽化後性成熟のため葉の後食を必要とする（伊庭，1982）。交尾は、ほとんどの場合、産卵に適した主枝および幹などの太い枝上でみられる。このように、行動内容が異なれば樹上における生息部位も異なる。また、伊庭（1963）の結果から、キボシカミキリ成虫の行動には日周的变化および時期的変化があると予想される。そこで、樹上におけるキボシカミキリ成虫の行動部位を明らかにし、菌体の施用場所を決定するための資料を得る必要がある。

1. 樹上での行動および生息部位の日周的变化

材料と方法

調査は殺虫剤無散布のイチジク露地圃場において1984年6月20～21日（成虫発生盛期）に行った。福岡県行橋市の放任圃場（5a、蓬莱柿、25年生）を供試し、任意に選んだ3樹の全個体について樹上での後食、産卵、交尾行動および生息場所を2時間間隔で24時間観察した。

結果と考察

1樹あたりの雄成虫数は、最少時7.3頭、最多時12.3頭とあまり変動しなかった。これに対し、雌成虫数は約6倍の変動を示し、最も多かった17時には19.7頭となった。成虫全体としては、調

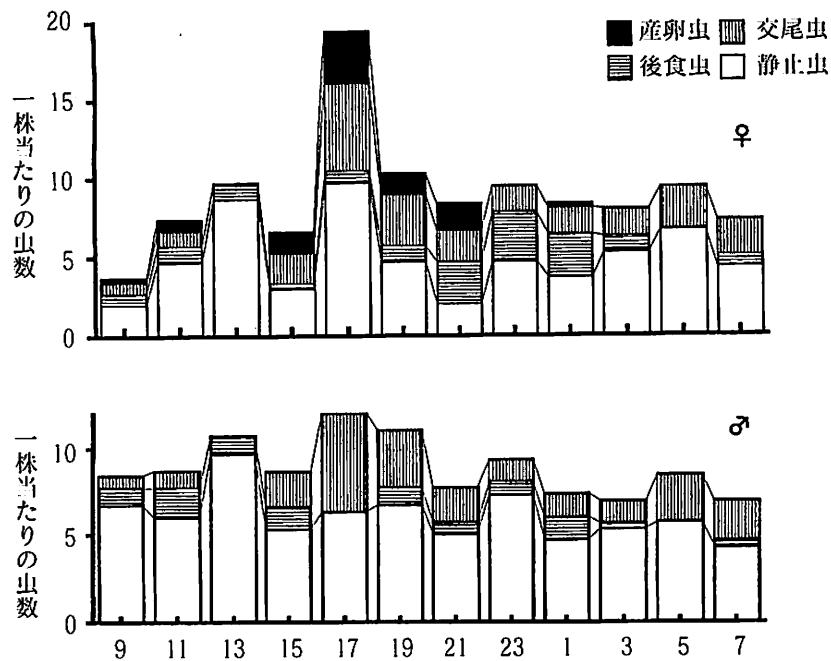


図1 イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の日周行動

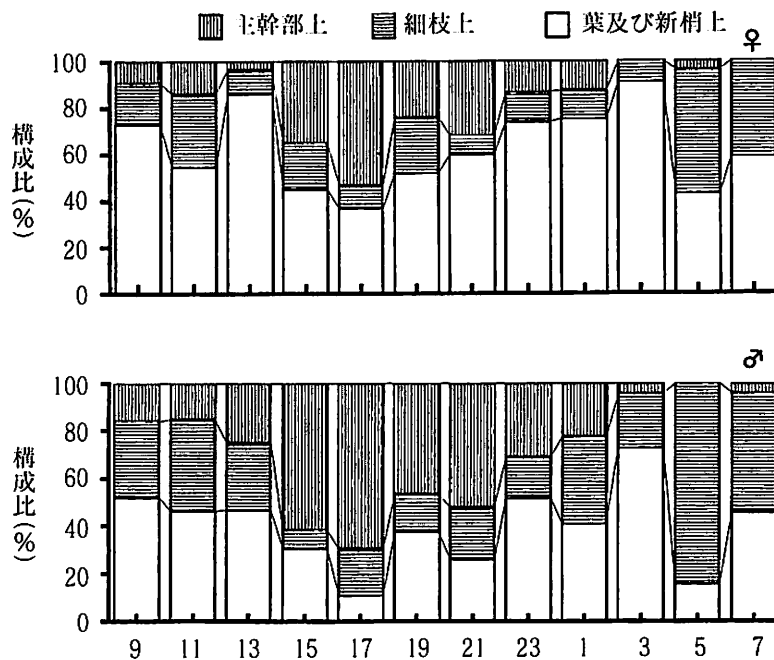


図2 イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の生息部位の日周変化

査を開始した9時から徐々に増加し始め13時に一旦ピークとなった後15時にかけて減少した。17時に再び増加して最大のピークとなった後急激に減少し、翌朝7時まで増加しなかった。

イチジク樹上では葉裏や新梢に静止している成虫が多く、何らかの活動をしている個体は約半数であった。雌雄別では雄の方が静止個体の割合が高かったが、活動個体の割合の日周的な消長は雌雄ほぼ同じ傾向を示した。17時から21時には行動する個体の割合が高くなり活動が活発であったが、9時から13時にかけては樹上で静止している成虫が多かった。行動の種別にみると、葉の後

食は1日中みられたが21時から1時にかけてやや多かった。産卵は15時から21時の間に集中的に行われ、他の時間帯にはほとんど観察されなかった。交尾行動は15時から19時

および翌朝5時から7時に多かった。特に、15時から17時にかけて交尾虫数は急増した。この時間帯は雄の行動が活発になり、雌をめぐる雄どうしの闘争、雌の探索、追尾行動が頻繁に観察された。一般的に、キボシカミキリが属するフトカミキリ亜科の成虫は暗条件で活動が活発になる(Linsley, 1959)。キボシカミキリの産卵について伊庭(1963)は室内でクワ枝を用いた試験を行い、産卵は昼夜をとわず行われるが午後から夕刻に最も多く、また、明条件下より暗条件下で促進されると報告している。今回の調査においても15時から21時に成虫が主幹部に集まり活発に産卵または交尾を行うことが観察されており、伊庭(1963)の結果とほぼ一致した。

成虫の生息場所はその行動と関連していた。静止虫はほとんどの場合葉裏および新梢で見いだされた。後食行動が活発な時間帯には必然的に多くの個体が葉上に集まるが、交尾および産卵が多い17時には葉上の個体数が減少し産卵場所である主幹部上の個体数が増加した。5時から7時は交尾行動のみが認められたが、この時間帯は例外的に多くの個体が細枝上でみられた。一日を通してみると、キボシカミキリ成虫は葉および新梢上にとどまる時間が長い³が、15～21時頃には主幹部に集まり活発に交尾、産卵行動を行うことが明らかになった。

2. 交尾、産卵行動および生息部位の時期的変化

材料と方法

1982年および1983年の2年間福岡県行橋市の殺虫剤無散布のイチジク露地圃場において調査した。1992年は6月4日から10月28日まで、1983年は5月17日から10月27日まで圃場内から任意に選んだ10樹について、葉および新梢、細枝、主枝および主幹部に分け、部位別に成虫数を5～10日間隔でみとり調査した。同時に交尾対数も記録した。また、1982年は産卵数を以下の方法で調査した。5月下旬、圃場内から任意に選んだ3樹の主枝にマジックで10×50cmの範囲をマークし、6月4日から8月下旬まで5～10日間隔でマーク内の産卵痕数を数えた。なお、これらの調査は毎回、樹上での行動が活発化する15時～17時の間に行った。

結果と考察

交尾行動は、両年共に、6月上旬から調査を終了した10月下旬まで観察された。伊庭(1982)はキボシカミキリ新成虫の50%初交尾の日齢を約5日と推定している。本調査における交尾の初見時期は、前節で述べた圃場における成虫初見時期から5～7日遅れ、伊庭(1982)の推定からの予想と一致した。1982年の交尾対数は、6月中旬から7月下旬に最盛となった後減少するが、10月にも再びわずかに増加する二峰型であった。1983年は、前年と同様に6月中下旬と9月中旬～10月下旬の二峰型を示したが、2つのピークの大きさはほぼ同じか、むしろ秋期が大きかった。前節で述べた成虫数の消長と比較すると、1982年は秋期を除く全期間、1983年は全期間、ほぼ一致した。

キボシカミキリ雌成虫の産卵能力について伊庭(1963, 1982)は、産卵前期間は約10～12日で、70～90日間に300～500卵を生む。産卵最盛期は産卵開始後10～30日間、50日目以降は産卵数が低下することを報告している。これらのことから、産卵数は羽化よりやや遅れる消長を示すことが予想された。イチジクでの日当たり産卵数は6月中旬と7月下旬にピークを持つ二峰型の消長を示した。これは、交尾消長と類似したパターンを示したが、最盛期は7月下旬で交尾最盛

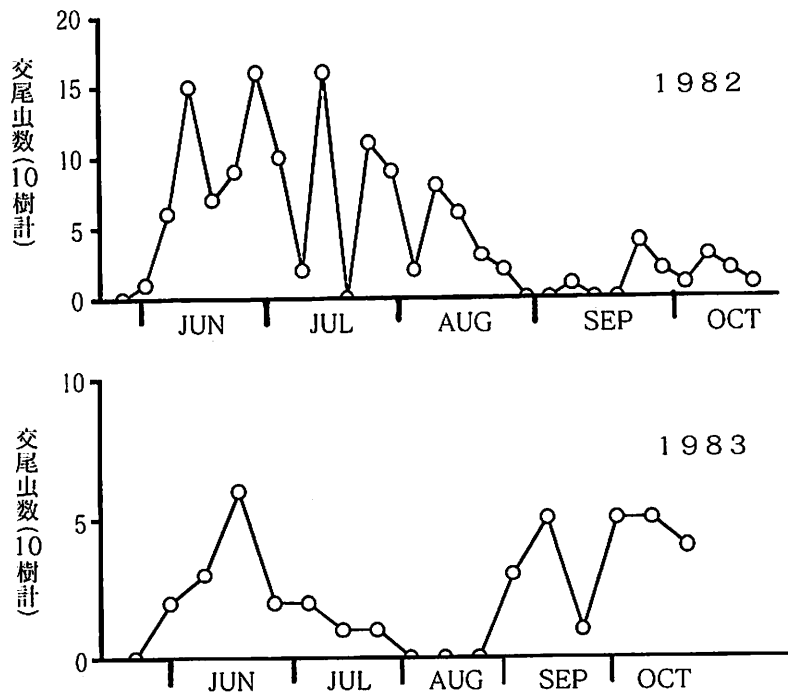


図3 イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の交尾数の推移

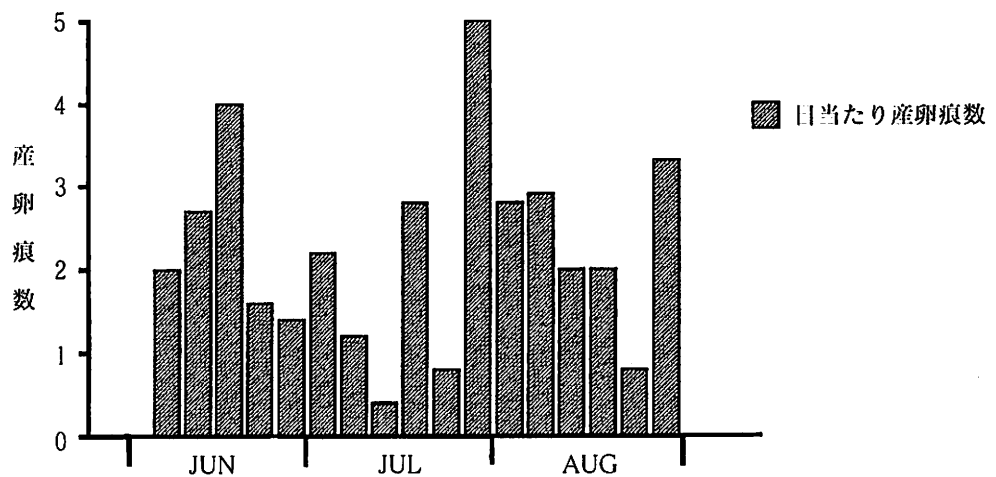


図4 イチジク樹上におけるキボシカミキリ産卵痕数の推移(1982)

期より約10日遅れた。また、交尾対数が減少した8月下旬まで産卵数は多かった。これらの結果は、羽化消長（後述、第2節）および伊庭（1963, 1982）のデータから予想した結果とほぼ一致した。なお、8月末の時点でマークした部分には隅なく産卵痕が形成されたのでこれ以降の調査は中止した。

成虫の生息数の多い部位は時期により変化した。1982年は、成虫発生初期の6月上旬は成虫の多くが葉および新梢上でみられたが、6月中旬～8月下旬には主幹部での割合が増加した。その後主幹部上の成虫の割合は減少するが、10月以降は再びほとんどの個体が主幹部上でみられるようになった。また、雌雄を比較すると全期間を通じて雄は主幹部上でみられることが多く、雌は葉上でみられることが多かった。1983年は1982年と同じような消長を示したが全体的に主幹部上の

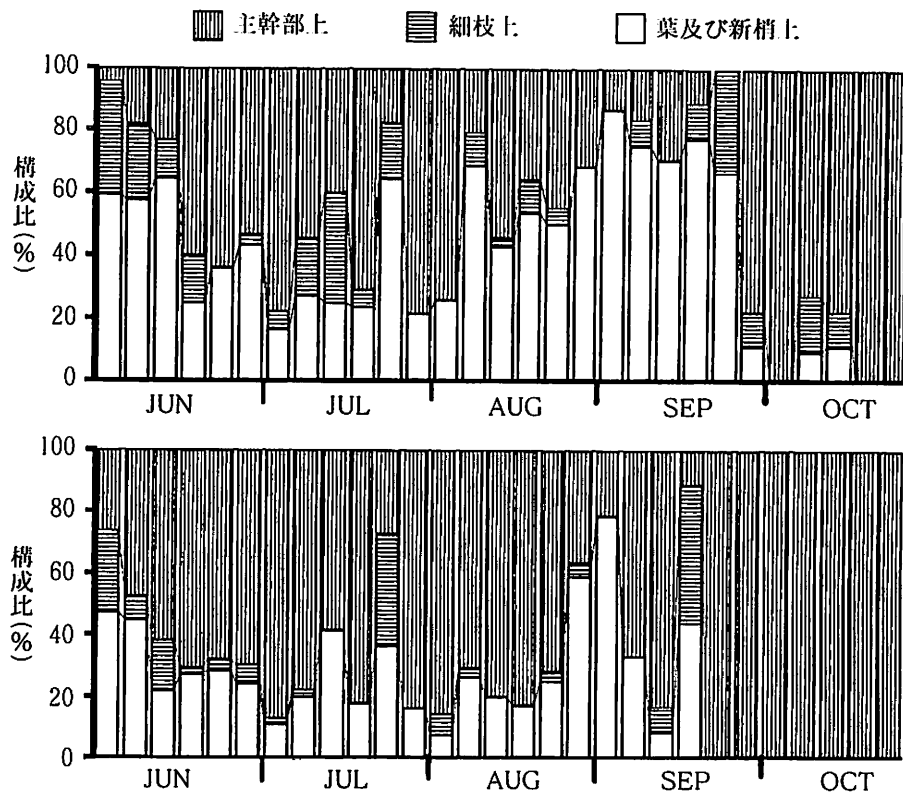


図5 キボシカミキリ成虫の生息部位の時期的変化(1982)

上段: ♀, 下段: ♂

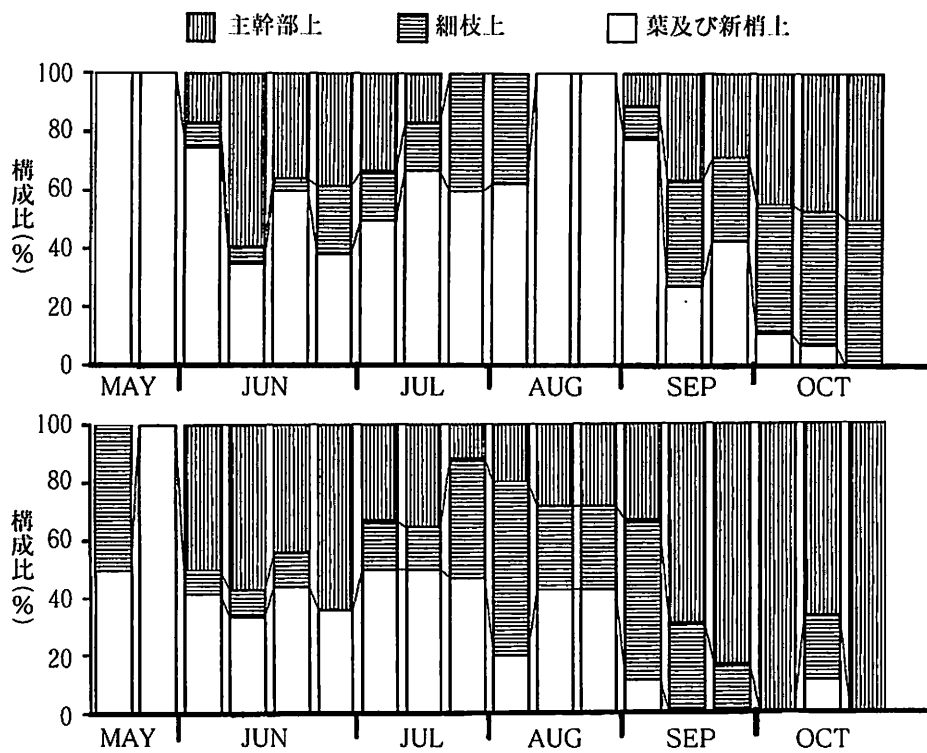


図6 キボシカミキリ成虫の生息部位の時期的変化(1983)

上段: ♀, 下段: ♂

割合が低く、葉および新梢上の割合が高かった。

生息部位と成虫の活動は密接な関係がある。キボシカミキリ成虫は羽化後、成熟のため餌植物の葉を後食しなければならない（伊庭，1982）。そのため、両年とも成虫発生初期においては、葉および新梢上でみられる割合が高いものと考えられる。キボシカミキリは主幹部などの枝の太い部分にのみ産卵するため、交尾および産卵が活発になる6月中旬以降は主幹部でみられる割合が増加するものと考えられる。また、年によって若干異なるものの8月から9月にかけて一時的に葉および新梢上の成虫の割合が増加するのは第2世代成虫の羽化に伴うものと考えられた。

第2節 発生消長

菌の施用時期および回数を決定する上で重要な要因である発生消長は地区により異なることが知られている（伊庭ら，1976；米山・小沢，1980；米山・市川，1981）。キボシカミキリ成虫の発生消長について、伊庭ら（1976）は、関東（東京都日野市および神奈川県津久井町）では初秋にピークとなる一峰型の発生であるのに対し、関西（京都府綾部市）では初夏に大きなピークを持ち、秋期にも小さなピークができる二峰型の消長を示すことを報告している。しかし、九州におけるキボシカミキリの発生消長の報告はみあたらない。そこで、九州におけるイチジクの主要産地である福岡県行橋市およびその周辺の地域において圃場から採集した幼虫食入枝からの羽化消長、イチジク露地圃場における羽化消長および樹上の成虫の消長を調査した。

1. 幼虫食入枝からの羽化消長

材料と方法

1991年、1992年および1993年の3年間、毎年、3月下旬から5月上旬の間に福岡県行橋市のイチジク露地圃場でキボシカミキリ幼虫が食入した主枝を採集した。採集枝は、筑紫野市において露地に設置した網ケージ（80×80×100cm）に収容し、5月中旬から9月下旬まで、原則として毎日羽化脱出虫数を調査した。

結果と考察

被害枝からの成虫の羽化消長は3年間ほぼ同じような消長を示した。また、1991年のみの調査であるが羽化脱出消長に雌雄差はみられなかった。伊庭ら（1976）の報告でも羽化脱出消長に雌雄間差はみられておらず、キボシカミキリの羽化脱出消長に雌雄間差はないものと考えられた。羽化は5月下旬に始まり8月上旬に終息したが、大部分の成虫は7月下旬までに羽化した。羽化ピークは6月上旬と7月中旬～下旬の2回見られた。この結果は、兵庫県のイチジクにおける山下（1980）の報告と概ね一致した。6月から7月にかけて2回のピークがみられるため、一見この間に世代交代があったようにみうけられるが、成虫は調査のつど除去しており産卵した可能性はない。また、キボシカミキリ幼虫の生育期間（伊庭，1976）から考えても、この間に卵から成虫まで発育することは不可能であり、6～7月の成虫は同一世代であると考えられた。1991年および1992年は、6～7月のピークの大きさがほぼ同じであったのに対し、1993年は7月のピークが小さく、多くの成虫が6月中旬までに羽化脱出した。1993年は幼虫の休眠が明ける3月以降が比較的高温条件であったため幼虫の成長が早く進み、6月の羽化脱出数が多くなったものと考えられた。以上の結果から北部九州におけるキボシカミキリの羽化は5月下旬から始まり、6～7月にピークとなることが判明した。

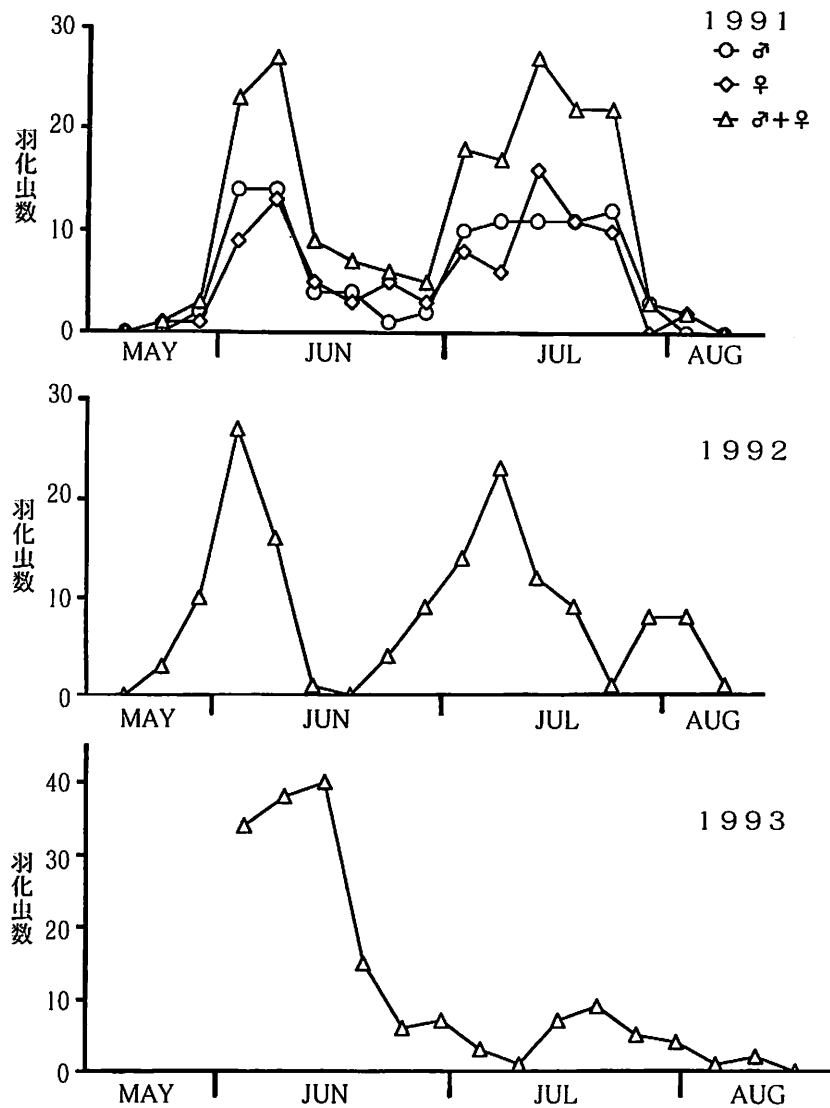


図7 幼虫食入枝からのキボシカミキリの羽化消長

2. 露地圃場における羽化消長

材料と方法

行橋市の3圃場において1993年5月26日から9月27日まで圃場内の全樹の羽化脱出孔数を5～10日間隔で調査した。

結果と考察

イチジク露地圃場におけるキボシカミキリ成虫の羽化は3圃場ともほぼ同様な消長を示した。羽化は、5月下旬に始まり8月中旬で一旦終了した後、9月上旬から調査終了時の9月下旬かけて少数ではあるが再びみられた。C圃場は羽化数が少なくはっきりしたピークがなかったが、羽化数の多かったA、B圃場では6月上旬～中旬に大きな羽化ピークがみられ、その後は、だらだらと羽化が続いた。

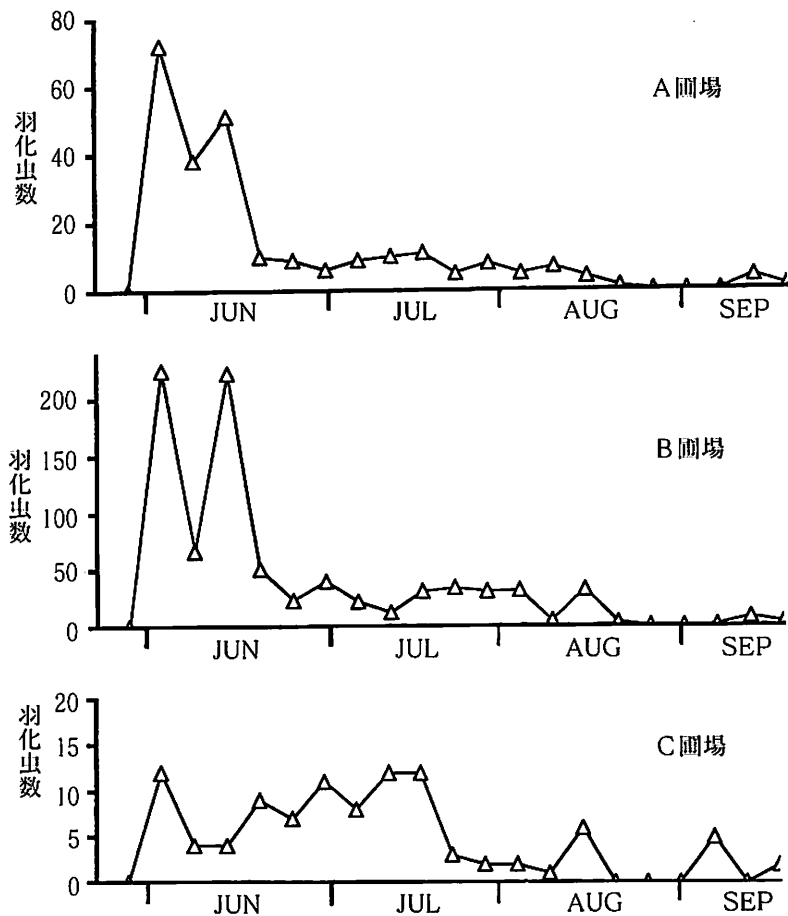


図8 野外イチジク圃場におけるキボシカミキリの羽化消長(1993)

圃場での羽化消長を被害枝からのもの（前述）と比較すると8月下旬まではほぼ同様の消長を示したが、被害枝ではみられなかった9月の羽化が認められた。伊庭ら（1976）は、京都府綾部市での調査で6～7月の産下卵に由来する幼虫の一部が当年の8～9月に羽化することを報告している。被害枝からの羽化調査では毎回成虫を除去したため、9月の羽化成虫がみられなかったものと考えられた。したがって、9月の羽化成虫は、6～7月に羽化した成虫の産下卵に由来する第2世代である可能性が高い。

3. 圃場における成虫数の消長

材料と方法

1982年、1983年および1993年の3年間福岡県行橋市で、それぞれ異なる殺虫剤無散布のイチジク露地圃場において調査を行った。1982年は6月4日から10月28日まで、1983年は5月17日から10月27日まで圃場内から任意に選んだ10樹について、1993年は5月26日から9月27日まで圃場内の全樹（25本）について5～10日間隔で成虫数をみとり調査した。なお、これらの調査は毎回15時～17時の間に行った。

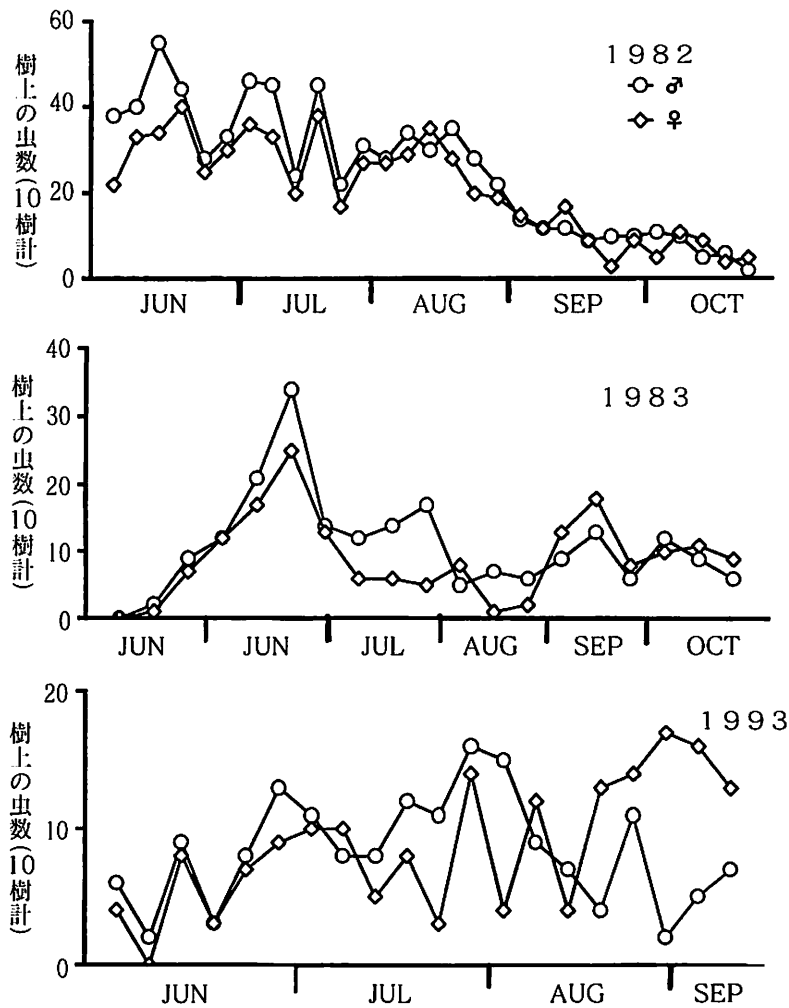


図9 野外イチジク園場におけるキボシカミキリ成虫数の推移

結果と考察

伊庭ら(1976)は京都府綾部市の同一クワ園内においてキボシカミキリ成虫数のみとり調査を6年間実施し、西日本における成虫の発生は、5月下旬に始まり6月中下旬に最盛となり、8月中旬から9月上中旬にわずかながら再び増加する二峰型の消長を示すことを報告している。本調査では、園場における成虫初見時期は毎年ほぼ一致したが、その後の成虫数の推移は年により異なった。1982年は調査を開始した6月上旬に既に多くの成虫がみられた。成虫数は6月中旬にピークとなった後、徐々に減少したが、調査を終了した10月下旬まで成虫がみられた。1983年は5月下旬より成虫が認められ、6月中下旬に大きなピークを、9月中旬に小さなピークを形成する二峰型の消長を示し、伊庭ら(1976)の結果と一致した。1993年は5月下旬から成虫が認められたが9月下旬まで明確なピークを形成せず推移し、8月以降生息数が増加する傾向にあった。

前述したように被害枝からの羽化消長は、枝の採集園場および消長調査年次が異なるにも関わらず概ね一致したのに対し、成虫数の消長は園場および年次間差が大きかった。羽化数と園場内の生息数に一定の関係がないことは、園場内の成虫個体群が移入虫で形成されている可能性を示唆しているものと考えられた。

第3節 個体群動態

第2節において、羽化消長と圃場における成虫数の消長には一定の関係が見いだせず、圃場内の成虫個体群が移入虫で形成されている可能性が示唆された。しかし、クワ園を含めても、キボシカミキリの個体群動態が報告されたことはない。そこで、行橋市の放任イチジク圃場で1992年および1993年の2年間成虫の標識再捕を行い、圃場における動態を明らかにした。

材料と方法

福岡県行橋市の放任イチジク圃場（面積：5a、品種：蓬萊柿、7年生成木および3年生幼木混植）を供試した。圃場は供試の前年まで地域の慣行栽培法にしたがい管理されていたが、園主の都合により供試年から放棄された。1992年は6月5日から8月3日まで3～15日間隔で、1993年は6月4日から10月26日まで5～10日間隔で圃場内の成虫を採集し、個体識別できるようペイントマーカーで標識した後、放逐した。得られた再捕データはJolly-Seber法(Jolly, 1965; Seber, 1965)により解析した。

結果と考察

Jolly-Seber法で推定した成虫個体数の季節的変動は、1992年と1993年では大きく異なった。1992年は雄成虫が6月中旬にピークとなりその後減少したのに対し、雌成虫の増加はやや遅れ、6月下旬から7月上旬にピークとなった。1993年は雌成虫が6月下旬にピークとなったのに対し、雄成虫のピークは8月上旬であった。ピーク時の推定個体数は、1992年の雄43.5頭、雌31.3頭に対し1993年は雄84.7頭、雌67.5頭であった。

1992年の調査圃場における羽化数はわずか4頭であった。従って、圃場内でみられた成虫はほとんどが移入虫であった。これに対し1993年の羽化数は251頭であった。羽化は調査終了時の9月下旬まで認められたが、多くは6月上旬から中旬に集中した。

推定加入虫数から羽化虫数を引いて算出した推定移入数は推定成虫個体数の変動とよく似た消長を示した。1992年の推定移入数のピークは雄が6月中旬、雌が6月下旬であった。1993年は雄が7月下旬、雌が6月下旬であった。

1992年の日当たり生存率は、調査期間を通じて0.8以上と高く、ほぼ一定であった。1993年は、6月中旬まではやや低かったものの、6月下旬には上昇し1992年と差がなくなり、10月下旬まで低下しなかった。

以上の結果から、圃場内の個体群が移入個体で形成されていた1992年は、日当たり生存率に季節的変動がなく、死亡率に変動がなかったと仮定すると、移入個体はほぼ一定の割合で移出していたものと考えられた。1993年は、6月18日までに全羽化数の約68%に当たる171頭が羽化した。6月18日の推定成虫数は9.3頭と少なく、大部分の羽化成虫が圃場外へ移出したものと考えられた。また、18日の推定加入数は5.6頭と14日～18日の羽化数を下回り、この時点では圃場内の個体群の大部分が羽化成虫で構成されていたものと思われた。その後は、羽化数が減少したにもかかわらず推定成虫数は増加し、圃場内の個体群の大部分が移入虫によって占められていたことが示唆された。

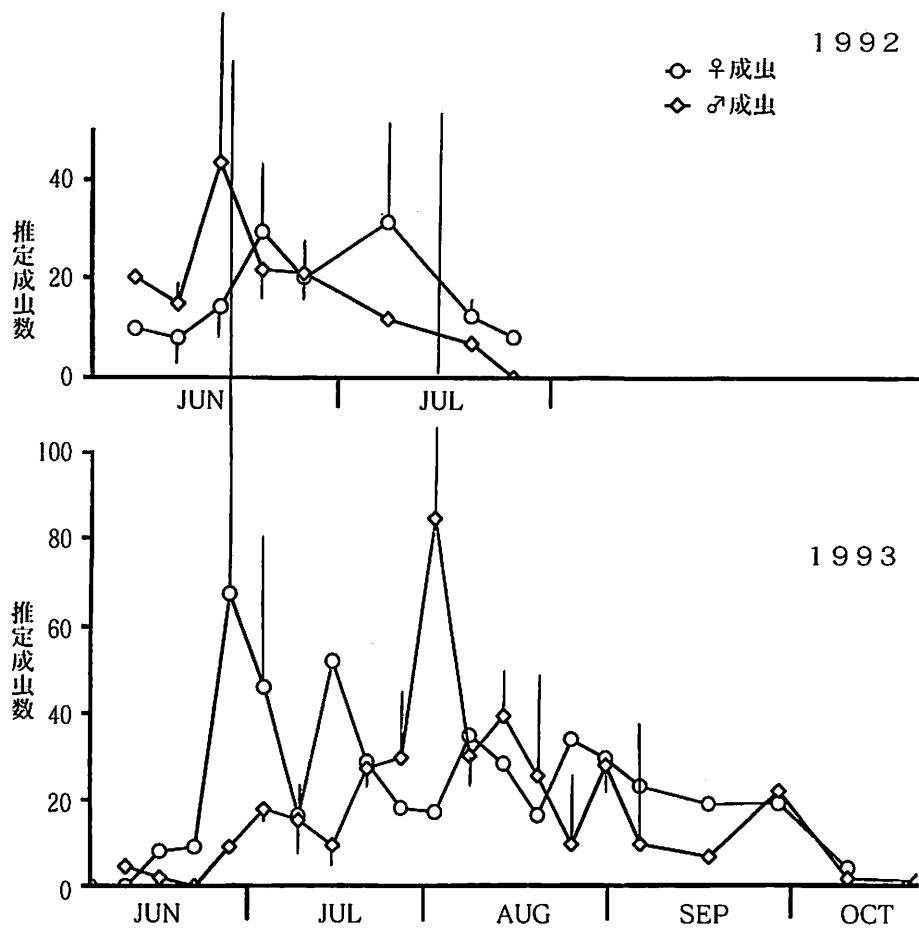


図10 J-S法で推定した圃場内のキボシカミキリ成虫数
図中の縦線はS.D.を表す。

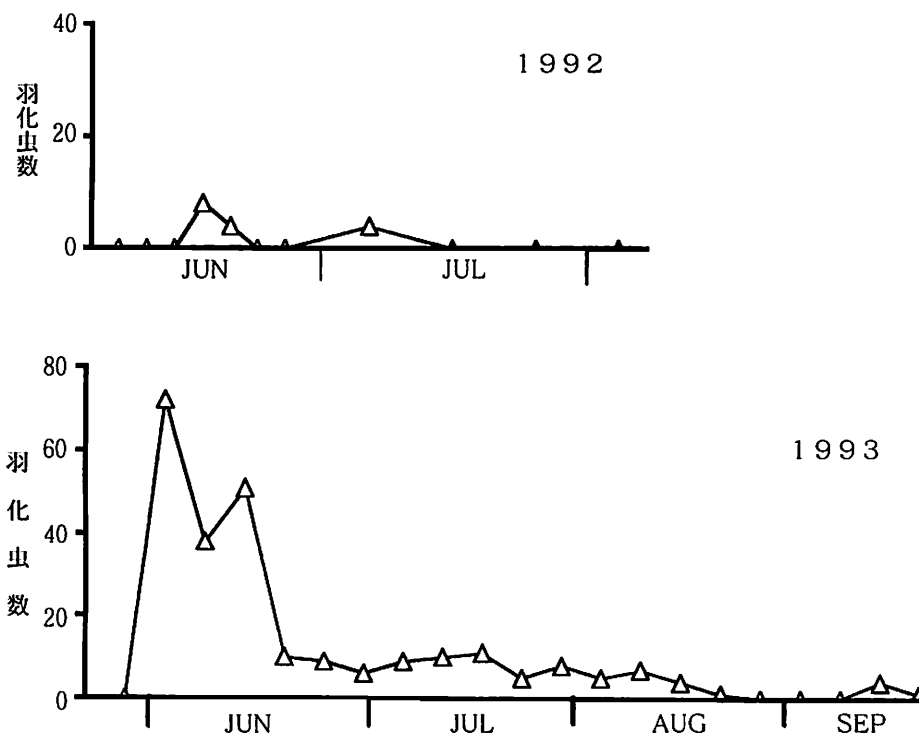


図11 圃場内でのキボシカミキリの羽化消長

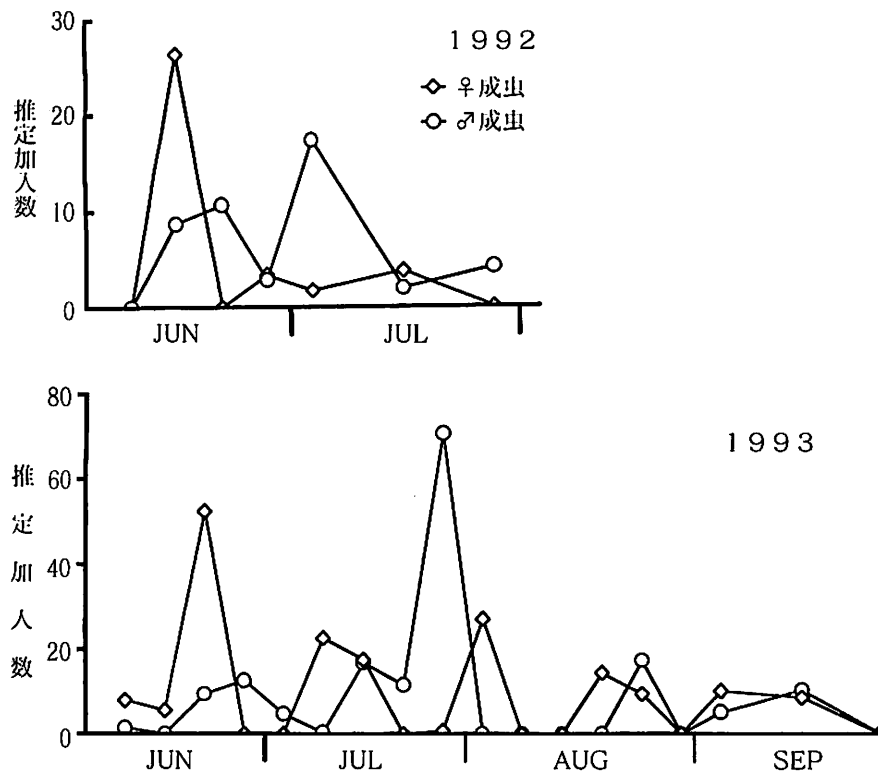


図12 J-S法で推定したキボシカミキリ成虫数の加入数

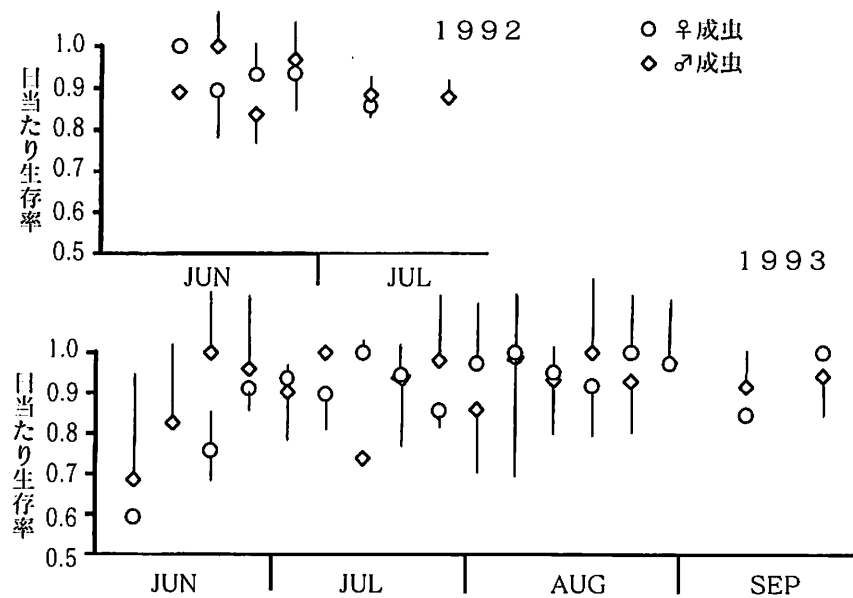


図13 J-S法で推定したキボシカミキリ成虫の日当たり生存率
図中の縦線はS.D.を表す。

第2章の考察

フトカミキリ亜科のカミキリムシ成虫は幼虫期の食樹の生葉を摂食する習性がある(Linsley, 1959)。キボシカミキリ成虫も例外ではなくクワおよびイチジクの葉を後食する習性をもっている。また、キボシカミキリの交尾は、ほとんどの場合産卵に適した主枝および幹などの太い枝上でみられる。樹上での行動には日周性があり、夜半から日中には全ての行動が不活発であったが午後から夜間には活発化した。後食行動は1日中みられたが、21時から1時にかけてやや多くなった。産卵または交尾行動は15時から21時に主幹部で多く観察された。キボシカミキリの産卵については伊庭(1963)は室内でクワ枝を用いた試験を行い、産卵は昼夜をとわず行われるが午後から夕刻に最も多く、また、明条件下より暗条件下で促進されると報告している。本調査の結果は伊庭(1963)の結果とほぼ一致した。

キボシカミキリ成虫は羽化後、成熟のため必ず餌植物の葉を後食する(伊庭, 1982)。そのため羽化直後の個体は葉上に集まることが予想された。本調査においても発生初期は、大部分の成虫が葉および新梢上でみられ、予想と一致した。交尾行動が活発になる6月中旬以降は主幹部でみられる個体数が増加した。また、年によって若干異なるものの、8月から9月にかけて一時的に葉および新梢上の成虫の割合が増加するのは第2世代成虫の羽化に伴うものと考えられた。以上のことから、キボシカミキリ成虫は葉上または幹および主枝上で活動する時間が長く、これらの場所に菌を施用することにより成虫が施用菌と接触する頻度が高くなることが期待される。

菌の施用時期を決める上で発消消長は重要な要因である。圃場内の成虫数の推移は発消消長とは一致せず、発消消長の把握には圃場から採集してきた幼虫食入枝または圃場の被害樹からの羽化消長を調査する必要がある。クワ圃のカミキリ成虫の発消消長について、伊庭ら(1976)は、関東(東京都日野市および神奈川県津久井町)では初秋にピークとなる一峰型の発生であるのに対し、関西(京都府綾部市)では初夏に大きなピークを持ち、秋期にも小さなピークができる二峰型の消長を示すことを報告している。また、伊庭(1976)は、イチジク枝またはクワ枝を与えて飼育したキボシカミキリの羽化時期に差がないことを報告しており、野外においてもイチジクとクワの樹種の違いにより発消消長が異なることはないと考えられた。福岡県におけるキボシカミキリ成虫の発消消長は、6月～7月と9月にピークを持つ二峰型の消長を示し、伊庭ら(1976)の報告した関西における消長と概ね一致した。9月のピークは6～7月に出現した成虫に由来するため、防除を必要とする時期は6月上旬～8月上旬の約2ヶ月間であるものと考えられる。

標識再捕法により推定した圃場内の成虫数は羽化消長と異なる推移を示した。その原因は、羽化成虫の多くが早い時期に移出し、6月下旬以降になると圃場内の個体群は主に移入個体により構成されるためであった。したがって、菌による成虫防除を考えた場合、広域施用により防除効果が向上するものと考えられた。

第3章 イチジク圃場におけるキボシカミキリ防除試験

第1章では *Beauveria brongniartii* GSES株のキボシカミキリ成虫に対する病原性、有用昆虫および天敵類に対する安全性を、第2章ではイチジクにおけるキボシカミキリ成虫の発生生態を明らかにした。第3章では1, 2章の結果に基づき圃場における防除試験を行った。*B. brongniartii* は多くのカミキリムシ類に病原性を持つため、キボシカミキリ (河上・島根, 1986; 石々川ら, 1988; 吉井, 1991; 米山・渡辺, 1992; 柴尾・田中, 1993; 松浦ら, 1997), ゴマダラカミキリ (柏尾ら, 1988; 橋元ら 1989, 1991, 1992; 堤ら 1990), クワカミキリ (堤・山田, 1990), ブドウトラカミキリ (堤・山田, 1991), スギカミキリ (Shibata and Higuchi, 1988, 1992; Shibata et al., 1991), センノカミキリ (片野田, 1994) などの種に対し、本菌を用いた防除試験が行われている。また、圃場への菌の施用方法として、菌を培養したフスマの地表散布 (河上・島根, 1986; 石々川ら, 1988), 菌培養ウレタンフォームシート (橋元ら, 1989; 堤ら, 1990) または菌培養不織布シート (Shibata and Higuchi, 1988, 1993; Shibata et al., 1991; 吉井, 1991; 米山・渡辺, 1992; 柴尾・田中, 1993; Shimazu, 1994) の樹上つり下げ、主枝バンド処理などが試験されている。しかし、イチジク圃場でのキボシカミキリ防除試験は少なく、本研究以外では柴尾・田中(1993)および松浦ら(1997)の不織布シートを用いた主枝バンド処理試験の報告があるにすぎない。第3章ではイチジクでは不適と考えられるフスマの地表散布を除き、ウレタンフォームシートまたは不織布シートの圃場における効果を検討した。

第1節 菌の施用形態と殺虫効果

昆虫病原性糸状菌を施用する最も普通の方法は分生子浮遊液の散布である。しかし、糸状菌の分生子は日光の直射を2〜3時間受けると不活化することが知られており、散布された浮遊液中の分生子も野外では短期間に不活化するものと考えられる。菌の活性を持続させる方法としてフスマ培地で菌を培養し、培地ごと圃場に施用する方法がある (河上・島根, 1986)。その後、フスマより長い殺虫活性の維持を目的とした菌培養資材としてウレタンフォームシート (柏尾・氏家, 1988) および不織布シート (樋口ら, 1993) が開発された。第1節ではこれらの資材で培養した菌のキボシカミキリ成虫に対する殺虫効果を分生子浮遊液と比較する。

1. 分生子浮遊液の効果

材料と方法

キボシカミキリ成虫に対する病原性が *B. brongniartii* GSES株とほぼ同程度である SES879株 (第1章) を供試した。供試株は酵母エキス加用サブロー培地を用いて3日間、25℃で振とう培養後、同寒天培地上で10日間培養した。得られた分生子を滅菌水 (Tween 20, 0.05% 添加) に浮遊し2分間超音波洗浄器にかけて分生子の拡散を行い分生子浮遊液を作成した。浮遊液中の生存分生子数の算出は第1章の試験に準じて実施した。

キボシカミキリは、福岡県志摩町のイチジク圃場で1988年6月30日に採集した成虫を供試した。供試虫は福岡県筑紫野市の福岡農総試の野外網ケージでイチジクの新梢を与えて飼育した。

1988年7月4日、網ケージ (1×1×1.2m) 内のイチジク幼木に生存分生子数 $1.4 \times 10^7/\text{ml}$ に調製した分生子浮遊液を葉から液が滴り落ちるまで散布した。散布1日および15日後にキボシカミキリ成虫を10頭放飼し、48時間後に回収した。成虫はイチジクの新梢を餌として与え、塩化ビ

ニル製カップ（径12cm，高さ9.5cm）で25℃，自然日長で飼育し，接種後約30日間，2～3日間隔で生死を観察した。

結果と考察

散布後1日目の分生子浮遊液は，1ml当りの分生子数がほぼ同数の浮遊液への虫体浸漬処理（第1章）と同等の高い殺虫効果を示した。放飼虫は放飼後10日目までは死亡しなかったものの，11～15日目の間に80%が死亡し，34日目までの累積死亡率は90%に達した。死亡虫は湿室に置くと糸状菌による病死虫の特徴的症状である菌糸の叢生がみられた。これに対し，散布後15日目の放飼虫は1頭死亡したが菌糸の叢生はみられなかった。

表9 *Beauveria brongniartii* 分生子浮遊液を散布したイチジク幼木に放飼したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	成虫放飼日 (処理後日数)	供試虫数	死 亡 虫 数			累積純死亡率 (%) ¹⁾
			放飼～10日	11～15日	16～34日	
浮遊液散布	1	10	0	8	1	90
	15	10	1	0	0	0
無 処 理	1	10	0	0	0	0
	15	10	1	0	0	0

1) 表1に同じ

2. 菌を培養したウレタンフォームシートの効果

材料と方法

菌培養ウレタンフォームシートは，昆虫病原菌培養用の培地を混入後発泡成型させ *B. brongniartii* GSES株を培養したものである（日東電工より分与）。実験に用いたシートはイチジク圃場に暴露後回収したものを使用した。回収シートはTween 20を0.05%添加した滅菌水500mlとともに電気ミキサーで粉碎し二重ガーゼでろ過後，超音波洗浄器で10分間処理し，分生子の拡散を行い浮遊液を作成した。浮遊液は，血球計算盤(Thoma, 1/400)で1ml当たりの分生子数を計数し，シート1cm²当たりの分生子数を算出した。キボシカミキリは，人工飼料（島根・河上，1985）を用い25℃で飼育した成虫（7～14日齢）を供試した。供試虫は，羽化後イチジク新梢を与えて25℃で個体飼育した。供試虫を菌培養シートの一部（3×2cm）を収容した塩化ビニルカップ（径12cm，高さ9.5cm）内に放飼し，48時間後に回収した。供試後，キボシカミキリは供試前と同条件で30日間飼育し，死亡状況を調査した。

結果と考察

分生子数 $1.2 \times 10^8/\text{cm}^2$ および $7.0 \times 10^7/\text{cm}^2$ のウレタンフォームシートと接触したキボシカミキリ成虫は全個体が10日以内に病死し，高い殺虫効果を示した。前節で行った $1.4 \times 10^7/\text{ml}$ の分生子浮遊液の散布も90%が死亡し高い効果があったが，感染から病死までに要する日数はウレタンフォームシートの方が短く，虫体に付着した分生子数が多かったことが示唆された。これらのこ

とから、ウレタンフォームシートは分生子数が $10^7/\text{cm}^2$ 以上あればキボシカミキリ成虫に高い殺虫効果を発揮するものと考えられた。

表10 菌培養ウレタンフォームシートの接触したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 置	シート上の 分生子数 (cm^2)	供試虫数	死 亡 虫 数			累積純死亡率 (%) ¹⁾
			放飼～10日	11～15日	16～34日	
48時間接触	1.2×10^8	5	5	—	—	100
	7.0×10^7	5	5	—	—	100
無 処 理	—	10	0	0	0	0

1) 表1に同じ

3. 菌を培養した不織布シートの効果

1) 不織布シート上を歩行したキボシカミキリ成虫の分生子付着数

材料および方法

キボシカミキリは愛媛県大洲市の桑園で採集した成虫を1処理あたり雌雄各10頭供試した。供試虫は採集直後から供試まで23℃の実験室内でイチジク新梢を餌とし、塩化ビニルカップ（径12cm、高さ9.5cm）で個体飼育した。

不織布シートは、野外圃場に暴露後回収したものの中から外観上分生子の残存数が異なるとみられる3本を選び、前述の方法で生存分生子数を調査した後に供試した。

適当な長さに切断した不織布シートを直径30cmのガラスシャーレ底面に並べ、成虫を1頭放飼し、シート上を60秒間歩行させた。歩行後の成虫は、Tween 20を0.05%添加した滅菌水20mlを入れた容量30mlのプラスチック製サンプル瓶に1頭ごと収容し、2分間超音波洗浄器にかけて虫体に付着した分生子の滅菌水中への遊離を図った。処理後、成虫を取り出し、残液中の分生子数を血球計算盤を用いて算出した。なお、残液中の分生子数が少ない場合は寒天濃縮法(梅本ら、1989)により濃縮後、算出を行った。

結果と考察

供試した不織布シート上の分生子数はそれぞれ、 $1.1 \times 10^8/\text{cm}^2$ 、 $5.7 \times 10^6/\text{cm}^2$ 、 $3.4 \times 10^5/\text{cm}^2$ であった。 $1.1 \times 10^8/\text{cm}^2$ のシートを歩行した成虫の観察では触角、口器、脚および腹部に白色の分生子塊が認められた。シートを歩行した成虫への分生子の付着数は個体間の差異が大きかったが、不織布シート上の分生子数が $10^8/\text{cm}^2$ の場合、約 $10^7/\text{頭}$ で、雌雄および接触時間による差はなかった。また、 $10^6/\text{cm}^2$ および $10^5/\text{cm}^2$ の不織布シートの場合、それぞれ約 10^5 および $10^4/\text{頭}$ であった。

表11 菌培養不織布シートを歩行したキボシカミキリ成虫に付着した分生子

シート上の 分生子数 (/cm ²)	歩行時間 (秒)	性	供試虫数	分生子 付着数 (/頭)
1.1×10 ⁸	5	♂	10	(1.1±0.47)×10 ⁷
		♀	10	(0.9±0.60)×10 ⁷
	60	♂	10	(1.8±0.77)×10 ⁷
		♀	10	(1.6±0.54)×10 ⁷
5.7×10 ⁶	60	♂	10	(0.7±0.71)×10 ⁵
		♀	10	(2.2±2.10)×10 ⁵
3.4×10 ⁵	60	♂	10	(4.3±2.22)×10 ⁴
		♀	10	(6.0±6.05)×10 ⁴

2)不織布シート上の生存分生子数と感染率

材料および方法

キボシカミキリは前試験と同じく愛媛県大洲市で採集した成虫を用いた。供試までの飼育条件も同じであった。不織布シートも同様に、野外圃場に暴露後回収したものの中から選んで供試した。供試後、前述の方法でシートの生存分生子数を調査した。

適当な長さに切断した不織布シートを直径30cmのガラスシャーレ底面に並べ、成虫を1頭放飼し、シート上を5秒または60秒間歩行させた後ピンセットを用いて回収した。また、5cm×5cmに切断した不織布シートを塩化ビニルカップ（径12cm、高さ9.5cm）に収容し、キボシカミキリ成虫を1頭放飼した。2時間または48時間後に成虫を回収し、供試前と同様に個体飼育した。なお、回収用のピンセットは先端を滅菌したものと1頭ごとに取り替えた。

結果と考察

供試した不織布シート上の生存分生子数はそれぞれ、 $5.0 \times 10^7/\text{cm}^2$ 、 $1.6 \times 10^7/\text{cm}^2$ 、 $2.5 \times 10^6/\text{cm}^2$ であった。不織布シート上の生存分生子数が $1.6 \times 10^7/\text{cm}^2$ 以上であれば、5秒間の歩行によっても、成虫は感染後約10日で高率に死亡した。生存分生子数が $2.5 \times 10^6/\text{cm}^2$ に減少した不織布シートの場合は、総死亡率に差はなかったものの、感染から致死までの期間が約25日間と有意に遅延した。また、シートとの接触時間を48時間まで延ばしても致死までの期間は短縮せず、分生子のキボシカミキリ虫体への付着数は増加しなかったものと思われる。

不織布シート上の生存分生子数とキボシカミキリ成虫の感染の関係について樋口ら(1993)は、シート上の生存分生子数が $10^7/\text{cm}^2$ 以下に減少すると殺虫活性が急激に低下することを報告している。しかし、本研究において、キボシカミキリ成虫は生存分生子数 $2.5 \times 10^6/\text{cm}^2$ の不織布シート上を歩行した場合でも高率に死亡し、樋口ら(1993)の結果と異なった。この結果の差異は、樋口ら(1993)が死後虫体に菌糸を叢生させた個体のみを病死虫として取り扱っているのに対し、本研究では無処理区の成虫の死亡状況から、死後虫体に菌糸を叢生しなかった個体も本菌による死亡として評価したことが原因と考えられる。本菌による死亡虫は必ずしも虫体に菌糸を叢生しない場合

表12 菌培養不織布シートを歩行したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	シート上の 分生子数 (/cm ²)	歩行時間 (秒)	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 (%) ¹⁾	死亡までの日数 (平均±S.D.)
歩 行	5.0×10 ⁷	60	20	100	40	11±1.9
		5	20	90	45	12±2.3
無処理	—	—	20	0	0	—
歩 行	1.6×10 ⁷	60	20	100	80	9±1.0
		5	19	100	63	10±1.1
無処理	—	—	20	0	0	—
歩 行	2.5×10 ⁷	60	20	85	35	23±7.7
		5	20	85	25	26±5.5
無処理	—	—	20	5	0	20

1) 表1に同じ

表13 菌培養不織布シートと長時間接触したキボシカミキリ成虫の死亡率

処 理	シート上の 分生子数 (/cm ²)	接触時間 (時間)	供試虫数	総死亡率 (%)	純死亡率 (%) ¹⁾	死亡までの日数 (平均±S.D.)
接 触	1.6×10 ⁷	48	19	100	78	9±1.2
		2	19	100	74	10±3.3
無処理	—	—	20	0	0	—
接 触	2.5×10 ⁶	48	20	100	30	22±14.6
		2	20	95	35	24± 6.1
無処理	—	—	20	5	0	20

1) 表1に同じ

があるため、樋口ら(1993)は、不織布シートの殺虫活性を実際より低く評価している可能性がある。

キボシカミキリ成虫はイチジク樹上を迅速に歩行する。成虫が不織布シートと長時間接触することは稀であろうと予測される。したがって、感染は極めて短時間の接触で起こらなければならない。本実験では、生存分生子数 2.5×10^6 個/cm²以上の不織布シート上を5秒間歩行した成虫は高率に死亡した。このことは、実際のキボシカミキリ成虫防除を考えた場合、成虫が頻繁に歩行する部位に不織布シートを施用することにより高い殺虫効果が期待できることを示唆している。

第2節 菌培養ウレタンフォームシートの圃場施用試験

前節の試験において菌培養ウレタンフォームシートはキボシカミキリ成虫に対する高い殺虫活性があり、圃場でも長期間活性を維持しているものと推測された。本節ではイチジク圃場に施用したウレタンフォームシート上の分生子数の推移およびシート施用圃場における成虫の感染率を明らかにするため圃場試験を行った。

材料と方法

福岡県京都郡豊津町のイチジク露地圃場（面積、25a；品種、蓬莱柿；樹齢、11年生；植栽樹数97本）の内の10a（35樹）で試験を行った。キボシカミキリ成虫発生初期である1990年6月3日、菌を培養したウレタンフォームシート（5×30×500mm）を1樹当たり2本、主枝に施用した。菌施用後10、20、31日目に試験圃場からキボシカミキリ成虫を採集し、イチジク新梢を餌に25℃で30日間個体飼育して死亡状況を調査した。この間死亡した個体のうち、硬化死したものおよび虫体に菌糸を叢生したものを病死虫として数えた。また、成虫の採集時および菌施用後45日目に、圃場に施用したウレタンフォームシートから任意に5本を選び、その一部（3×2cm）を切り取って持ち帰り、前述の方法で生存分生子数を算出した。

結果と考察

圃場に施用した菌培養ウレタンフォームシート上の分生子数は、施用前 $1.4 \times 10^8/\text{cm}^2$ 、施用後31日目 $1.2 \times 10^8/\text{cm}^2$ 、45日目 $7.0 \times 10^7/\text{cm}^2$ と安定していた。残存分生子数と第1節の結果から、45日目のシートも高い殺虫効果を維持していたものと考えられた。また、試験圃場から採集したキボシカミキリ成虫の病死率は、菌施用後10日目62%、20日目54%、31日目75%と低下しなかった。さらに、堤ら(1990)は複数のカンキツ園で菌培養ウレタンフォームシートを施用し、ゴマダ

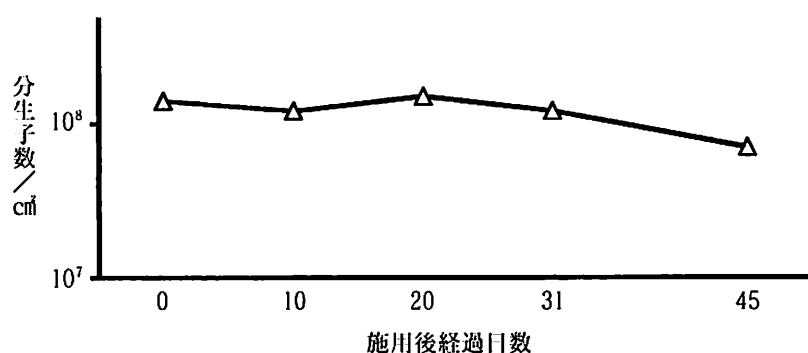


図14 圃場に施用したウレタンフォームシート上の分生子数

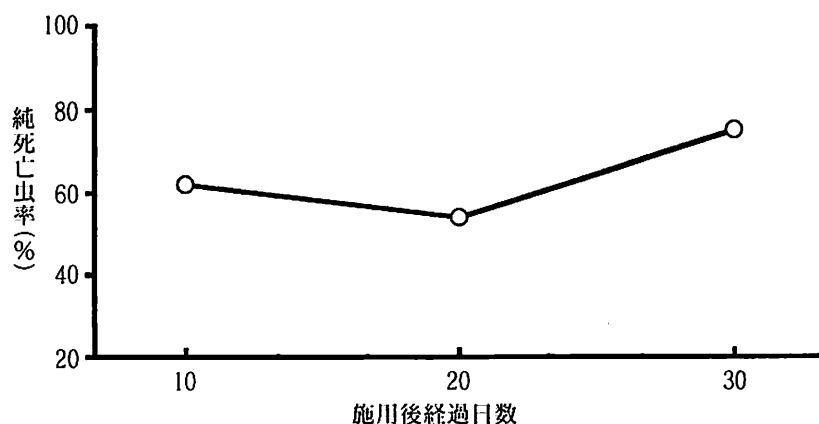


図15 ウレタンフォームシート施用圃場で採集した成虫の死亡率

ラカミキリ成虫に対する殺虫活性が30日間以上持続することを報告している。以上のことから菌培養ウレタンフォームシートはイチジク圃場において長期間の効果が期待できるものと考えられた。

第3節 菌培養不織布シートの圃場施用試験

第2節で述べたように、菌培養ウレタンフォームシートはイチジク圃場において長期間の効果が期待できるものと考えられた。しかし、ウレタンフォームシートは製造コストが高く、しかも、圃場では分解しないため施用したシートを回収する必要もあり、実用性に問題があった。そこで、より低コストで自然分解性の天然パルプ繊維を主体とした不織布シートが開発された（樋口ら，1993）。菌を培養した不織布シートは室内試験でキボシカミキリ成虫に高い殺虫活性を示した（第1節）。本節では、イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の生息部位（第2章）から菌を施用すれば感染が起こりやすいであろうと推測された主幹部または樹冠部へ菌培養不織布シートを施用し、圃場における効果を明らかにする。

1.不織布シートの主幹部バンド処理試験

材料と方法

福岡県行橋市、京都府豊津町および犀川町のイチジク圃場（面積はそれぞれ10a～30a）に、調製後5℃で保存した未使用の不織布シートを1992年6月5日に施用した。10a当たり50本のシートを主幹部に巻き付け、両端をステープラーで止めた（写真1）。なお、試験圃場間のキボシカミキリ成虫の移動が試験結果に影響をおよぼすことがないように、各圃場は互いに直線距離で2km以上離れているものを選んだ。各試験圃場からは、不織布シート施用後3回、約10日間隔で、1回当たり20～30頭の成虫を採集し、個体飼育を行った。なお、飼育中に死亡した成虫は菌糸の叢生の有無を記録し、菌糸を叢生した個体のみの死亡率（純死亡率）と総死亡率を算出した。また、成虫採集時に不織布シート上の分生子数を調査した。任意に選んだ圃場内の5カ所からシートの一部（5cm×5cm）を回収し、回収したシート片は各圃場ごとにまとめてTween 20を0.05%添加した滅菌水500mlと共に電気ミキサーで1分間粉碎し、テトロンゴースでろ過した。ろ液は2分間超音波処理を行い、分生子を拡散させた。分生子浮遊液は血球計算盤（Thoma, 1/400mm）を用いて1ml当たりのみかけの分生子を計数後、デジタルピペットを用いて0.75mlを直径9cmのプラスチックシャーレ内の素寒天培地上（寒天2%）に塗布し、25℃、48時間培養後、約200個の分生子について光学顕微鏡下で発芽の有無を調査した。発芽管長が分生子短径の1/2以上進展したものを正常発芽とみなし、正常発芽率と培養前のみかけの分生子数から生存分生子数を算出した。

結果と考察

施用後10日目採集虫の総死亡率は $84 \pm 1.9\%$ 、純死亡率は $77 \pm 3.6\%$ と高かった。20日目の総死亡率は $83 \pm 3.4\%$ 、純死亡率は63%であった。31日目には総死亡率は $62 \pm 7.6\%$ 、純死亡率は $42 \pm 10.7\%$ とやや低下し、純死亡率の標準偏差が大きくなった。

施用直前の不織布シート上の分生子数は、みかけ上で 1.2×10^8 個/cm²、生存数で 3.9×10^7 個/cm²であった。不織布シート上のみかけの分生子数は徐々に減少したものの、31日目においても 10^7 個/cm²以上の分生子が認められた。生存分生子数は施用後20日目までほとんど減少しなかったが、31日目には分生子の生存率が低下したため 10^6 個/cm²に減少した。また、シート上の生存分生



写真1 主幹部にバンド処理した菌培養不織布シート

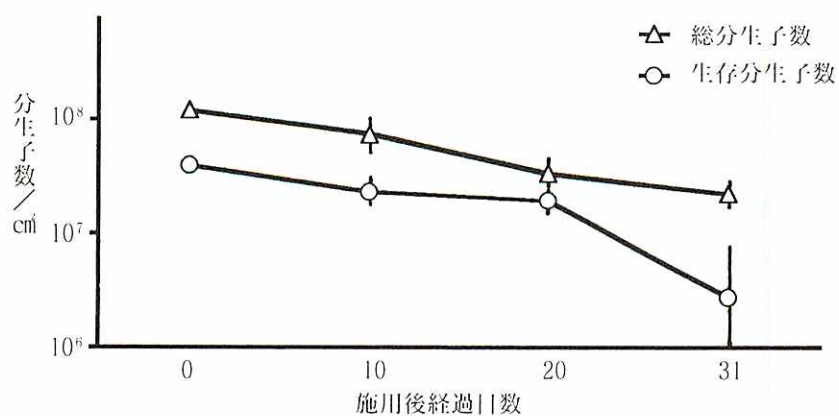


図16 圃場に施用した不織布シート上の分生子数
図中の縦線はS. D.を表す。

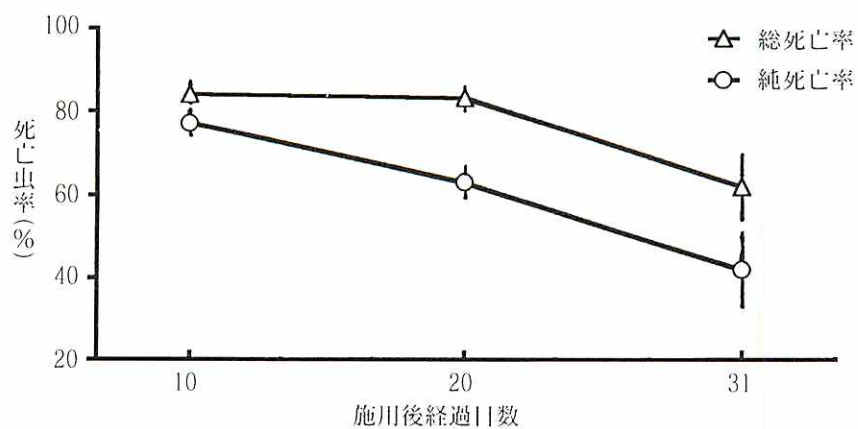


図17 不織布シート施用圃場で採集した成虫の死亡率
図中の縦線はS. D.を表す。

子数の圃場間差も大きくなった。以上の結果から、施用後31日目の成虫死亡率の低下は生存分生子数の減少が主な原因であったと考えられる。

柴尾・田中(1993)は、イチジクのキボシカミキリ成虫防除のための不織布シートの施用場所としては主幹部を選定している。主幹部は、イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の生息部位(第2章)から推測された高率の感染が見込まれる菌施用場所である。前述したように主幹部に不織布シートを施用した圃場で採集したキボシカミキリ成虫は高率に死亡し、主幹部は不織布シートの施用部位として適当であると考えられた。しかし、一方では主幹部に施用した不織布シートがナメクジ類、ウスカワマイマイおよびオカダンゴムシにより摂食され殺虫活性が著しく低下した例があり(堤, 未発表)、この点は今後の残された問題である。

野外圃場における不織布シートの殺虫活性の維持期間について、柴尾・田中(1993)は野外イチジク樹に施用した不織布シートの殺虫活性が施用後約1ヶ月で消失したことを報告している。しかし、吉井(1991)は桑園において、不織布シート施用後35日目に採集したキボシカミキリも菌に感染していたことを報告している。また、橋元ら(1991)は野外圃場のウンシュウミカンに施用後回収した不織布シートとゴマダラカミキリ成虫を塩化ビニル製カップ内で24時間接触させ、シートの殺虫活性の検定を行った結果、施用後20日目のシートとの接触では100%、35日目では50%の病死虫率を得ている。本研究において、野外圃場のイチジク樹の主幹部に施用した不織布シート上の生存分生子数は施用後20日目まで $10^7/\text{cm}^2$ 以上であり、高い殺虫活性を維持していたものと考えられた。これは、この間に圃場で採集した成虫が高率に感染していたことから推察される。また、施用後31日目においても不織布シート上には 10^6 個/ cm^2 の生存分生子が存在し、不織布シート上の歩行による感染試験の結果からは、シートの殺虫活性が維持されているものと考えられた。それは、同日に採集した成虫の総死亡率が62%、純死亡率が42%であったことから推測される。しかし、各調査時の総死亡率および純死亡率の標準偏差から、31日目は殺虫活性の圃場間差が大きくなっており、施用後約1カ月経過すると圃場条件によっては殺虫効果が大きく低下する場合があることを示している。このことが柴尾・田中(1993)と吉井(1991)および橋元ら(1991)との結果の差異の原因のひとつとなっているものと考えられる。したがって、樹幹部に施用した不織布シートの殺虫活性は、施用後約1ヶ月で不安定化するものと思われる。

2. 不織布シートの新梢吊り下げ処理試験

材料と方法

福岡県志摩町の野外イチジク圃場5a(一文字整枝の榊井ドーフィン13年生)においてイチジクの新梢上に紙製トレイ(直径23cm)で遮光した不織布シート(写真2)を各樹1本(10a当たり100本)吊り下げた。施用には新梢を誘引するため樹上に張り巡らされている針金を利用し、下端部が新梢と接触しないよう主枝から50cm以上離して設置した。1992年6月16日に施用し、施用後10日、22日および31日目の3回、圃場内のキボシカミキリ成虫を採集した。成虫は前述の塩化ビニル製カップで23℃、自然日長で30日間飼育し、原則として毎日死亡状況を観察した。なお、死亡虫は虫体上の菌糸の叢生の有無を記録し、純死亡率と総死亡率を算出した。また、前試験と同様に不織布シート上の分生子数の推移を約10日間隔で5回調査した。

結果と考察

フトカミキリ亜科(Lamiinae)のカミキリムシは、羽化後体の発育や性成熟のため植物体の一部

を摂食して栄養を補給する習性があることが知られている(Linsley, 1959)。同亜科に属するキボシカミキリは羽化直後からイチジク樹の葉を後食するため不織布シートを施用した新梢に集まる習性がある(第2章)。さらに、キボシカミキリ成虫の行動には日周性があり、日没前から夜間にかけては交尾や産卵行動のため主幹部で多くみられるが日中は葉上で活動することが多い(第2章)。以上のことから、不織布シートを吊り下げた圃場では、キボシカミキリ成虫がシートと直接接触することは少なく、多くの場合は新梢で後食などの活動を行ううちに虫体に分生子が付着し、病死に至るものと考えられる。

飛散分生子の直接付着試験(第1章)では全供試虫が死亡したものの、隔離飼育を始めた日から計算した死亡までの日数が $1.6 \times 10^7/\text{cm}^2$ の不織布シート上を5秒間歩行させた成虫より遅延した。また、飛散分生子が付着した葉と接触させた成虫の死亡率は低かった。これらのことは、虫体に付着した生存分生子が必ずしも多くないことを示唆している(第1章)。

不織布シート施用圃場から採集したキボシカミキリ成虫の死亡率は施用後10日目～31日目までの間、採集日の違いによる死亡率に有意な差はなく、総死亡率は57%～91%、純死亡率は29%～36%であった。前述の主枝バンド処理における死亡率と比較すると、純死亡率はやや低かったものの、総死亡率は大差なかった。

施用前の不織布シートの全分生子数は $2.8 \times 10^8/\text{cm}^2$ であった。このうち、生存分生子数は $2.2 \times 10^8/\text{cm}^2$ であった。全分生子数は施用後30日目に施用前の約1/10に減少したものの、施用後55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上を維持した。生存分生子数は施用後10日目で $3.6 \times 10^7/\text{cm}^2$ に低下したものの、その後の減少は少なく施用後55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上を維持した。

分生子が不活化する原因の一つに紫外線の影響がある(Ingles et al., 1995)。しかし、主幹部に巻き付けた不織布シートに比べて吊り下げ施用したシートの方が紫外線の影響が少ないとは考えにくい。吊り下げ施用したシート上には55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子が存在した原因の一つは、不織布シートの特性、すなわち、シートには培地が浸含されているため、乾燥と湿潤を繰り返すことにより分生子を再生産する機能を有する(樋口ら, 1993)ことに起因するものと思われる。シートを施用した6月は梅雨期に当たり雨が多い時期である。吊り下げ施用した不織布シートは主幹部にバンド処理したシートに比べ降雨後の乾燥が早いと培地の消耗が少なく、分生子再生産機能が長く維持されたためであろうと考えられた。また、これまでに行われた不織布シートによるイチジクのキボシカミキリ成虫の防除試験において、主幹部に施用したシート上の菌がナメクジ類、ウスカワマイマイおよびオカダンゴムシに摂食され菌量が減少した結果、その後の感染率が低下した事例がみられた。試験圃場の地表や主幹部には多くのナメクジ類がみられたが、吊り下げた不織布シートではナメクジ類などによる食害痕は観察されなかった。不織布シートを吊り下げて施用することによりこれらの生物による摂食を回避することができたことも大きな要因であると思われる。

以上のように、不織布シート吊り下げ施用は主幹部への巻き付け施用と比較して、キボシカミキリへ付着する分生子数が少ないため、感染から死亡までの期間が遅延する。施用圃場で採集した成虫の純死亡率が低いなどの問題点がある。しかし、シートの分生子再生産機能が長く維持される、ナメクジ類、ウスカワマイマイおよびオカダンゴムシによる菌の摂食が起こらないなどの利点があるため、感染力維持期間が長くなる可能性がある。



写真2 新梢上に吊り下げ処理した菌培養不織布シート

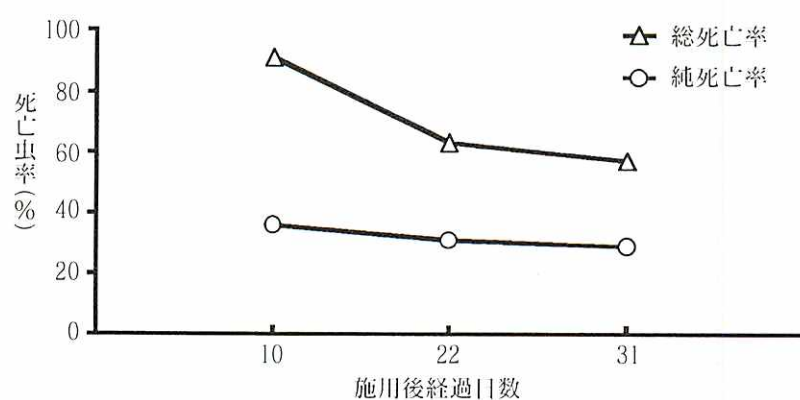


図18 不織布シート吊り下げ施用圃場で採集した成虫の死亡率

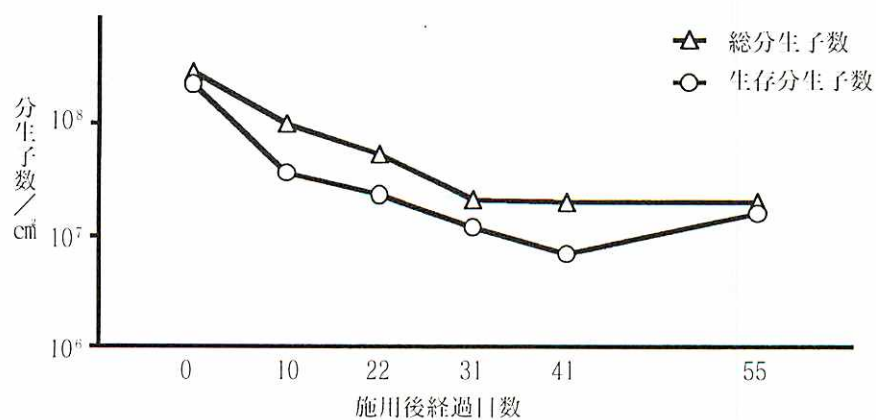


図19 圃場に吊り下げ施用した不織布シート上の分生子数

第4節 菌培養不織布シートの広域施用試験

イチジク圃場ではキボシカミキリ成虫の移出入が活発であった（第2章）。そのため、一圃場への施用試験では殺虫効果を低く評価している可能性がある。そこで、移出入による攪乱を避けるため菌培養不織布シートを広域に施用して殺虫効果を検討した。

材料と方法

福岡県行橋市の稗田地区において、約60haの範囲に点在する13カ所のイチジク圃場（延べ60a）に10a当たり50本の不織布シートを施用した。シートは1993年6月3日（成虫羽化初期）および、施用後約1カ月経過した7月6日の2回、イチジクの主幹部にバンド処理した。広域施用区内の圃場で6月18日から8月18日まで約5～10日間隔で不織布シートおよびキボシカミキリ成虫を採集し、前試験と同様にシート上の生存分生子数と採集虫の死亡状況を調査した。

結果と考察

6月3日に施用した不織布シートの生存分生子数は $2.1 \times 10^8/\text{cm}^2$ であった。施用後20日目までは $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子が認められ、30日目においても $10^6/\text{cm}^2$ を維持していた。しかし、不織布シート施用圃場から採集した成虫の死亡率は低く、施用後15日目の採集虫の総死亡率は55%にとどまり、30日目には20%まで低下した。この原因は分生子数の減少ではなく、施用時および翌日の強い風雨により、不織布シートの多くが樹上から脱落したことによると考えられた。7月6日に施用したシートの生存分生子数は $3.1 \times 10^8/\text{cm}^2$ であった。施用後20日目までは $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子が認められたが、30日目には $10^6/\text{cm}^2$ に減少した。さらに、40日目には $10^4/\text{cm}^2$ に減少し殺虫活性は著しく低下したものと思われた。施用圃場から採集した成虫の総死亡率は、施用後22日目の採集虫で80%、32日目以降はやや低下したが43日目においても50%が死亡した。この死亡率は、広域施用しなかった第3節の試験とほぼ同等であった。設計段階においては、菌施用地域

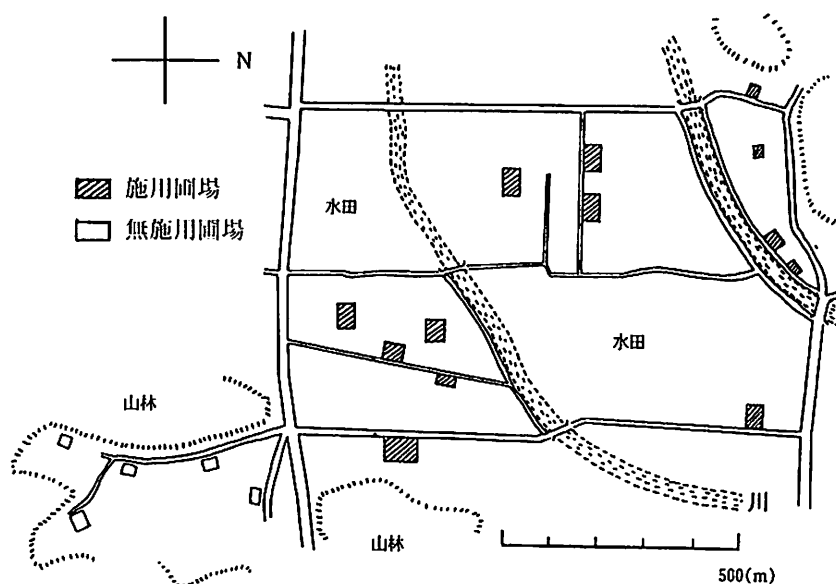


図20 不織布シートの広域施用状況

が約60haと広い上に最も近接した多発生圃場とも約500m離れており、周囲には他の多発生圃場は無いため、菌施用地域内でみられる成虫の多くはの中で羽化したものになり、感染率が高まると考えられていた。しかし、予想に反し感染率は向上しなかった。この原因として、①イチジク圃場以外でのキボシカミキリの発生量が多かった。②キボシカミキリ成虫の移動距離が予想をはるかに上回り、遠方の圃場から飛来した可能性が考えられた。キボシカミキリ幼虫の食樹はイチジク以外にクワ類、コウゾ、イヌビワ、ミカン類、ヤツデ、カクレミノ、クサギなどが知られている（小島・中村，1986）が、試験地域内にはイチジク以外の食樹はほとんど見当たらなかったのも①の可能性は低い。したがって、②の可能性が高く、このことは以下の事象からも推察される。①菌施用地域から約500m離れた圃場において施用菌によると思われる病死虫が認められている（堤，未発表）。②キボシカミキリは苗による移動の可能性がないにも関わらず、周辺1km以内にはイチジクがない犀川町の圃場で多発生していた（第3節の供試圃場の一つ）。以上のことから、移入虫による効果の攪乱を避けるには周囲数km以内にイチジクがない圃場を選ぶか、周囲数km以内の全発生圃場に菌を施用する必要があるものと推測された。

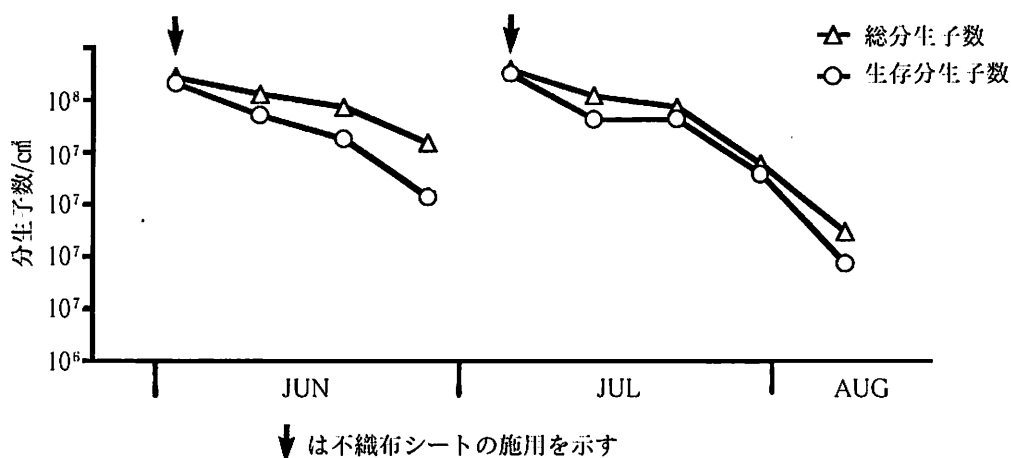


図21 広域施用した不織布シート上の分生子数

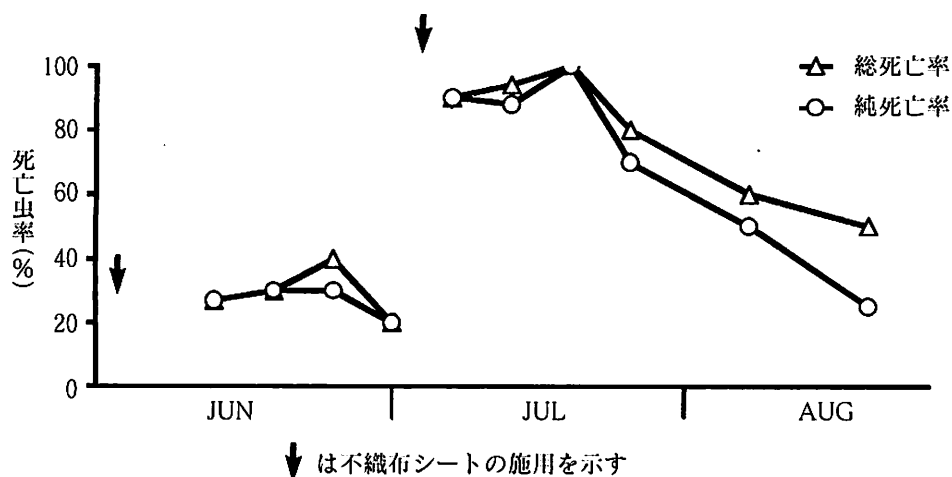


図22 不織布シートを広域施用した地域で採集したキボシカミキリ成虫の死亡率

第3章の考察

イチジク幼木に散布した本菌の分生子浮遊液は散布後1日目には高い殺虫効果を示したが15日目には不活化していた。昆虫病原性糸状菌の分生子は、日光の直射を2～3時間受けると不活化することが知られており、Ingris et al.,(1995)は、*Beauveria bassiana*分生子は15分間の紫外線照射により96%が不活化したことを報告している。したがって、野外に散布した分生子浮遊液の殺虫効果の持続は長くとも数日間であると考えられる。また、殺虫剤のDMTP乳剤は、ゴマダラカミキリに対し高い活性があるが、同剤の圃場での残効期間は短い。Komazaki and Sakagami (1989)およびAdachi(1990)は、DMTP乳剤を散布したカンキツ園のゴマダラカミキリの個体群動態を調査し、DMTP乳剤の散布は個体群の生存率にほとんど影響を与えないことを報告している。ゴマダラカミキリ同様羽化期間が長いキボシカミキリでは、残効の短い分生子浮遊液の散布では圃場の成虫個体群の生存率に影響を与えない可能性が高い。圃場内の個体群の生存率に影響を与えるためには高い殺虫活性を長期間維持させる必要があるものと考えられた。

河上・島根(1986)は本菌によるクワのキボシカミキリ防除の研究において、フスマで培養した菌を培養物のまま圃場の地表に施用することにより約20日間殺虫効果を維持させた。しかし、イチジクはクワに比べて樹体のはるかに大きく菌を地表に散布してもクワほど効果が得られないものと思われた。また、フスマ培養菌は雨による流亡やオカダンゴムシによるフスマの摂食により残効性が不安定であることが指摘されている(橋元ら, 1989)。そこで、樹体に施用でき、野外において菌の効果を長期間安定的に維持するための培養素材としてウレタンフォームシートおよび不織布シートがみいだされた。菌を培養したこれらの資材は、圃場に暴露後回収したにも関わらず室内試験でキボシカミキリ成虫に高い殺虫活性を示し、圃場でも長期間の殺虫活性を維持する可能性が高いものと思われた。

柏尾・堤(1990)は、ポリウレタンフォームシート培養菌を用いたカンキツのゴマダラカミキリに対する網ケージ試験で、様々な施用方法を比較している。その中で本試験の施用方法に近い「樹幹バンド法」と「枝吊り下げD法」はいずれも効果が高く、両処理間で差がなかった。本試験において*B. brongniartii* GSES株を培養した不織布シートは、イチジク主枝へのバンド処理または新梢部への吊り下げ処理でキボシカミキリ成虫に対する高い殺虫効果を施用後30日以上持続した。試験圃場から採集した成虫の死虫率は、吊り下げ処理区で純死亡率がやや低い傾向にあったものの、総死虫率は差がなかった。

バンド処理した不織布シート上の生存分生子数は、施用後約30日目まで $10^6/\text{cm}^2$ を維持した。吊り下げ処理では生存分生子の減少が少なく、55日目まで $10^7/\text{cm}^2$ を維持した。これらの生存分生子数は、調査時点でシートが高い殺虫効果を維持していることを示している(第1章)。柏尾・堤(1990)も、「枝吊り下げD法」の分生子数の減少が他の施用法に比べて少ないことを報告しており、本試験の結果と一致する。吊り下げ処理の試験事例は少なく、さらに例数を重ね安定性を検討しなければならないが、吊り下げ処理はバンド処理に比べ活性維持期間が長くなる可能性が示唆された。

イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の生態(第2章)から導き出された菌の施用場所である枝幹部または新梢部に菌培養ウレタンフォームシートまたは不織布シートを処理して圃場試験を実施した。菌施用圃場から採集したキボシカミキリ成虫の総死亡率は施用後約20日目まで約80%、30日目まで約60%と高かった。これらの結果はウレタンフォームシートおよび不織布シート培養菌が*B. brongniartii*のフスマ培養物の地表散布(河上・島根, 1986; 石々川ら 1988)より優れた残効性を持つことを示している。

菌培養ウレタンフォームシートおよび不織布シート上に $10^6/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子があれば、シートと接触したキボシカミキリ成虫のほとんどが感染する。 $10^7/\text{cm}^2$ 以上であればほとんどの成虫

が約10日間で死亡する。イチジク枝幹部にバンド処理した菌培養ウレタンフォームシートおよび不織布シートは、圃場施用後約20日を経ても $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子数を維持し、施用前と変わらない高い殺虫活性があった。また、約30日後においても $10^6/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子数があり、高い殺虫活性を維持していた。分生子の減少および不活化の原因として降雨による流亡、紫外線の影響 (Ingris et al., 1995), あるいはオカダンゴムシおよびナメクジ類による摂食などが考えられている (橋元ら, 1989)。これらの被害を軽減するため紙皿で被いをした不織布シートを新梢部へ吊り下げた。今回の施用方法では紫外線の影響は排除できなかったものと思われるが、適度な乾湿の繰り返しにより不織布シートの特徴である分生子再生産機能が長期間維持されたことおよびナメクジ類などの生物の影響を排除した結果、不織布シートは、55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子数を維持し続けていた。今回行った吊り下げ方法は不織布シート以外に保護のための紙皿、吊すための針金を必要とし、さらに、試験終了後に回収する手間も必要であるためあまり実用的ではないが、シートの施用方法しだいでは約2ヶ月の残効性が維持できる可能性を示唆した。

約60haの範囲に点在する全イチジク圃場 (約60a) に菌を施用した広域施用試験では期待された病死率の向上がみられなかった。これは、菌施用圃場外からの移入虫が減少しなかったことが原因と考えられた。また、キボシカミキリ成虫の移動範囲は数kmにおよぶものと考えられ、広域施用による効果の向上をねらうためにはさらに広い範囲での施用が必要なものと思われた。

総 合 考 察

昆虫病原性糸状菌 *Beauveria brongniartii* (Sacc.) Petch は、*B. bassiana* のシノニムである *B. tenella* とよばれていた時期がある (島津, 1993)。本菌の宿種範囲は広く、鞘翅目、鱗翅目、双翅目、半翅目、膜翅目、直翅目、等翅目などに属する多くの昆虫から記録されている (Charles, 1941; Steinhaus and Marsh, 1962; De Hoog, 1972; Prest et al., 1974; 国見, 1993; 杉山ら, 1997)。本菌にはコガネムシ類に強い病原性を持つコガネムシ寄生系統とカミキリムシ類に強い病原性を持つカミキリムシ寄生系統がある (島津, 1993)。河上 (1978) は、硬化病に感染死したキボシカミキリ成虫から分離した *B. brongniartii* (形態的特徴からカミキリムシ寄生系統と思われる) がキボシカミキリに強い病原性を持つことを報告している。同系統の菌は、クワカミキリ (河上, 1978)、ゴマダラカミキリ (滝口, 1981)、ハラアカコブカミキリ *Moechotypa diphysis* (Pascoe) (大長光, 1982)、スギカミキリ *Semanotus japonicus* Lacordaire (Shibata and Higuchi, 1988)、ブドウトラカミキリ *Xylotrechus pyrrhoderus* Bates (堤・山田, 1991) センノカミキリ *Acalolepta luxuriosa* (Bates) (片野田, 1994)、マツノマダラカミキリ *Monochamus alternatus* Hope (Shimazu, 1994)、トラフカミキリ *Xylotrechus chinensis* (Chevrolat) (堤, 未発表)、イチョウヒゲビロードカミキリ *Acalolepta ginkgovora* Makihara (堤, 未発表) などの農林害虫に病原性があることが判明している。

B. brongniartii によるカミキリムシ類の微生物的防除に関する研究は、クワのキボシカミキリ (河上・島根, 1986; 石々川ら, 1988; 吉井, 1991; 米山・渡辺, 1992; 小林・酒寄, 1993)、カンキツのゴマダラカミキリ (柏尾・氏家, 1988; 橋元ら, 1989, 1991, 1992; 柏尾ら, 1989; 柏尾・堤, 1990; 堤ら, 1990) ヒノキのスギカミキリ (Shibata and Higuchi, 1988, 1993; Shibata et al., 1991)、イチジクのクワカミキリ (堤・山田, 1990) などで実施されている。また、イチジクのキボシカミキリに対しても数例の防除試験の報文がある (柴尾・田中, 1993; 松浦ら, 1997)。本研究は、これらの既往の報文を参考にしながら *B. brongniartii* によるイチジクのキボシカミキリの微生物的防除法の開発を目指した。

本研究では、最初に供試菌株のキボシカミキリ成虫に対する病原性の程度およびその感染経路を明らかにすると同時に、有用昆虫や天敵類への安全性を評価した。次に、イチジクにおけるキボシカミキリ成虫の生態を明らかにした。さらに、菌を培養したウレタンフォームシートおよび不織布シートの殺虫効果を明らかにし、これらシート培養菌を用いた圃場での防除試験を実施した。

島根 (1993) はキボシカミキリに対する強病原性菌株として 6 菌株を選抜し、それぞれ 1.4×10^4 ~ 4.5×10^5 /ml の LC_{50} 値を算出している。また、石々川 (1988) がクワのキボシカミキリ防除試験に用いて高い効果を認めた SES769 株の LC_{50} 値は、 2.5×10^5 /ml であった。一方、本研究で主に供試した *B. brongniartii* GSES 株のキボシカミキリ成虫に対する LC_{50} 値は、 2.8×10^5 /ml で SES769 株と同等であり、島根 (1993) の強病原性株の値の範囲内であった。これらのことから、GSES 株はキボシカミキリ成虫に対し強い病原性を持ち、防除試験に本菌株を用いることに問題はないものと思われた。なお、圃場に本菌を施用した場合、病害防除のために散布される殺菌剤の影響が懸念されるが、甲斐ら (1989) および植原ら (1992) の結果から圃場レベルでの影響はないものと思われる。

本菌に感染した成虫との交尾により健全虫が病死すること。また、本菌を培養した不織布シートから飛散した分生子によって感染が起こることが明らかになった。また、米山・渡辺 (1992) は病死虫上に生じた分生子により二次感染が起こることを報告している。これらの方法で感染した成虫は菌培養物と接触した成虫に比べて死亡までに長期間を要し、死亡率が低いなどの問題があり、菌

培養物との接触にくらべると防除効果はやや劣った。しかし、菌培養物と接触しなくとも感染が起こることは、1カ所に菌を施用することによって周囲にも波及効果が期待できる可能性を示唆している。また、イチョウヒゲビロードカミキリのように、大きな被害を出すか、個体数が少ないため、菌培養物を施用しても接触の機会が少ないと思われる種の防除対策としては、交尾行動による分生子の伝播をねらった菌接種成虫の放飼が効率的かもしれない。

Prest et al.,(1974)は、*B. brongniartii*を西洋ミツバチの蛹から分離している。しかし、*B. brongniartii* GSES株は西洋ミツバチに対して病原性をしめさなかった。キボシカミキリと同じ鞘翅目に属するオオオサムシ、ヒメオサムシおよびオオヒラタシデムシにも感染が認められなかった。これまでに行われた接種試験の結果、カミキリムシ類以外でGSES株の感染が確認された種はミカンナガタムシ *Agris auriventris* E.Saunders(行徳, 未発表)、イエシロアリ *Coptotermes formosanus* Shiraki(杉山ら, 1997)のみである。また、島津(1995)は、カミキリムシ寄生型(系統)の*B. brongniartii*は、これまで自然状態ではカミキリムシ類の成虫以外に寄生しているものは発見されていないと述べている。さらに、カミキリムシ類においても感受性に種間差があり、マツノマダラカミキリ、ブドウトラカミキリ、センノカミキリ、ブドウトラカミキリでは感染が確認されているものの、病原性は弱く、シロスジカミキリ *Batocera lineolata* Chevrolatは感染例がない(滝口, 1981)。以上のようにカミキリムシ寄生型(系統) *B. brongniartii*は木材加害性害虫以外には感染事例がなく、寄主範囲が狭い菌の可能性がある。したがって、前述の西洋ミツバチから分離された*B. brongniartii*は本系統とは異なる可能性が高いものと思われる。これらのことから、*B. brongniartii* GSES株の野外圃場への大量施用が標的とする害虫以外の昆虫に悪影響を及ぼす可能性は少ないものと思われる。

イチジク樹上でのキボシカミキリ成虫の生息場所は日周的に変化し、昼間は葉上でみられることが多いが、夕刻から夜間には主幹部に集まる。行動が活発になるのは夕刻から夜間で、この間に主幹部で交尾や産卵がみられる。それ以外の時間帯には葉裏や新梢上で静止する成虫が多い。また、羽化直後の成虫は成熟のため葉を後食しなければならず(伊庭, 1982)、羽化初期の6月上旬の成虫はもっぱら葉上でみられる。さらに、主幹部は成虫の羽化場所でもある。以上のことから菌の施用場所としては主幹部または葉上が適しているものと思われる。

キボシカミキリ成虫の羽化は5月下旬に始まり約2カ月におよんだ。本菌による防除は、成虫を殺し産卵数を減少させることにより被害を軽減することを目的としている。そのためには羽化した成虫を速やかに感染させて産卵前に死亡させる必要がある。キボシカミキリ雌成虫には約10日間の産卵前期間があり(伊庭, 1982)、また、感染虫は死亡2日前から産卵をしなくなる(津田・山中, 1995)。一方、 $10^7/\text{mL}$ 以上の濃度の分生子浮遊液を散布された成虫、 $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子がある菌培養ウレタンフォームシートまたは不織布シートと接触した成虫は約10日で死亡した。野外に放置した昆虫病原性糸状菌の分生子は紫外線の影響などにより短時間で不活化する(Inglis, et.al., 1995)ため分生子浮遊液の残効は期待できないが、菌培養ウレタンフォームシートまたは不織布シートは、シート上で分生子の再生産ができるので長期間の残効が期待できる。これらのシートが約2カ月間 $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子を維持できれば高い産卵防止効果が期待できる。生存分生子数が $10^6/\text{cm}^2$ に低下すると致死日数が20~25日と遅延するが、死亡率は低下しないため、キボシカミキリの産卵特性(伊庭, 1982)から推測して、ある程度の産卵防止効果が期待できる。野外試験の結果、イチジク主幹部にバンド処理した菌培養ウレタンフォームシートおよび不織布シートは、30日程度高い殺虫活性を維持しており、6月上旬と7月上旬の2回施用すれば全羽化期間をカバーできるものと思われる。さらに、試験例は少ないが、吊り下げ施用した不織布シートは55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子を維持していた。また、柏尾・堤(1990)も本試験に類似した方法で吊り下げ施用した不織布シートの分生子数の減少が少ないことを報告しており、

施用法によっては、不織布シートの活性を約2ヶ月間維持させることができる可能性が示唆された。

Jolly-Seber法で推定したイチジク圃場におけるキボシカミキリ成虫個体群の動態から、圃場内での羽化成虫のほとんどが短期間で移出し、羽化盛期を過ぎると圃場内の個体群は主に移入虫によって構成されることが示唆された。試験圃場に施用した菌により感染した羽化成虫の多くは圃場外で死亡するものと思われる。また、圃場内で産卵する雌成虫の多くは外部からの飛来虫であるものと推測された。したがって、高い産卵防止効果をあげるためには広域的な菌の施用が必要となるものと思われる。本研究における広域施用試験では、約60haの地域内にあるイチジク圃場に菌を施用したものの、成虫の感染率は1圃場に菌を施用した試験と変わらず期待された効果がなかった。このことから、キボシカミキリ成虫の移動範囲をカバーするにはさらに広域な施用が必要であるものと考えられた。一見これには膨大な量の培養菌を必要とし、コストが大きすぎるようにみえるが、イチジク圃場は広い地域に点在しており1圃場の面積は小さい。また、キボシカミキリが羽化する圃場は限られており、広域施用においても菌の施用は羽化がみられる圃場に限定して行えばよいため、非現実的なことではない。

これまで述べてきたことから *Beauveria brongniartii* によるキボシカミキリ成虫の微生物的防除法としては以下のことが必要であるものと考えられる。GSES株のようなキボシカミキリ成虫に対する病原性が強く、かつ寄主選択性が高い菌株を用いること。不織布シートなどで培養し、長期間の殺虫活性が期待される状態の菌をイチジクの主幹部または新梢上に6月上旬および7月上旬の2回施用すること。また、菌の施用は成虫の羽化がみられる圃場に限ってもよいが、なるべく産地全体で広域に実施することが望ましい。

本研究により *Beauveria brongniartii* によるキボシカミキリ成虫の微生物的防除法の基礎は確立されたものとする。しかし、今後とも防除法を改良する努力は必要であり、その素材としては交尾行動中に雌が放出する性フェロモン(Fukaya and Honda, 1992)などもある。また、キボシカミキリ幼虫に対しては昆虫寄生性線虫 *Steinernema carpocapsae* の効果が高いことが報告されており(小林ら, 1987; 堤・山田, 1995)、これと組み合わせた体系的な防除法の確立も今後の課題である。

イチジク害虫であるキボシカミキリの *Beauveria brongniartii* による微生物的防除法を確立するため、(1)成虫に対する病原性、(2)鞘翅目に属する天敵類および有用昆虫であるミツバチなどに対する安全性、(3)イチジクにおけるキボシカミキリの発生活長および後食、交尾、産卵などの行動にともなう樹上での生息場所の変化、および(4)ウレタンフォームまたは不織布で培養した菌の効果を明らかにした。また、これらの培養菌を用いて野外イチジク圃場での防除試験を実施した。その結果は以下の通りであった。

1. 純死亡率から算出したカミキリムシ寄生系統 *B. brongniartii* GSES 株のキボシカミキリ成虫における半数致死量濃度は $2.8 \times 10^5/\text{ml}$ と他の強病原性菌株に劣らぬ数値を示した。同菌株は有用昆虫の西洋ミツバチ、捕食性天敵のオオオサムシおよびヒメオサムシ、動物死骸の分解者のオオヒラタシデムシに対しては病原性がなかった。また、本菌のカミキリムシ寄生系統はカイコに対しても病原性が微弱であることが報告されている。以上の結果から、本菌株をイチジクのキボシカミキリ防除に使用することは標的害虫に対する病原性および非標的虫への安全性の面から問題ないものと思われた。
2. 本菌の分生子浮遊液をキボシカミキリ成虫の体の一部に塗布し、感染経路を調査した。触角、脚、腹部からは高率に感染が起こるが、口器からの感染率は低かった。
3. 本菌を接種した成虫と交尾した健全成虫は菌に感染した。菌を接種したキボシカミキリ成虫は、接種後5日目においても交尾した健全虫の約50%に分生子を伝播した。しかし、感染虫の菌伝播能力には雌雄間差があり、雄成虫の伝播能力は早く低下した。
4. 菌培養物から飛散した分生子によって空中伝染が起こった。菌培養物の水平方向50cmに設置した虫カゴで7日間隔離飼育したキボシカミキリ成虫はすべて病死した。また、菌培養物周辺の葉と接触した成虫も低率ではあるが死亡した。
5. イチジク樹上におけるキボシカミキリ成虫の行動には日周性があり、それにともない樹上の生息場所も変化した。夜半から日中は全体に活動が不活発で葉裏や新梢上に静止した個体が多く、他の部位では成虫があまりみられなかった。しかし、産卵、交尾行動が活発になる午後から夜間には主幹部で多くの成虫みられるようになった。
6. 羽化直後のキボシカミキリ成虫は性成熟のため葉を後食する必要がある。そのため、成虫発生初期の6月上旬には通常であれば主幹部で成虫が多くみられる時間帯であっても葉上に多かった。
7. 羽化消長は年次変動が少なかった。網ケージにいた幼虫食入枝からの羽化は5月下旬から8月上旬までみられたが、6~7月に集中した。圃場での調査では少数であるが9月に羽化が認められ、網ケージでの結果と異なった。これまでの報文から、9月の羽化成虫は7月までに産下された卵に由来するものと推測された。網ケージでは調査の都度、羽化成虫を除去しているため産卵がなく、9月に羽化しなかったものと思われた。
8. 圃場内の成虫数は羽化消長とは全く異なる消長を示し、年次間差、圃場間差が大きかった。また、多数の成虫が羽化した圃場においても、羽化がピークを過ぎた6月下旬以降は、圃場内個体群のほとんどが移入虫によって占められていた。
9. 菌を培養したウレタンフォームシートおよび不織布シートは、 $10^6/\text{cm}^2$ 以上の生存分生子があればキボシカミキリ成虫に強い殺虫活性があり、5秒間歩行した成虫は高率に死亡したが、死亡までに20日を要した。分生子数が $10^7/\text{cm}^2$ 以上であればさらに強い活性があり、約10日で死亡した。また、菌を培養した不織布シートを歩行した成虫に付着する分生子数は、シート

上が $10^8/\text{cm}^2$ であれば約 $10^7/\text{頭}$ 、 $10^6/\text{cm}^2$ および $10^5/\text{cm}^2$ の場合はそれぞれ約 $10^5/\text{頭}$ 、 $10^4/\text{頭}$ とシート上の分生子数に比例して増減した。

10. ウレタンフォームシート培養菌を主幹部にバンド処理した圃場における採集虫の純死亡率は、施用後30日目においても75%と高かった。さらに、回収したシート上の分生子数と接触試験の結果から、43日目においても高い殺虫活性を維持していた。
11. 不織布シート培養菌を主幹部にバンド処理した3圃場における採集虫の平均総死亡率は、施用後20日目において83%と高かったが、31日目には62%に低下した。純死亡率も総死亡率と同様の傾向を示し、20日目までは63%であったが、31日目には42%に低下した。シート上の生存分生子数は、20日目までは $10^7/\text{cm}^2$ 以上であったが、31日目には分生子の生存率が低下し $10^6/\text{cm}^2$ に減少した。また、31日目になると総死亡率、純死亡率、生存分生子数のいずれについても圃場間差が大きくなった。これらの結果を総合すると、圃場条件によっては、施用後1カ月程度経過するとシートの効果が大きく低下する可能性があることが判明した。
12. 不織布シート培養菌を樹冠部に吊り下げ処理した圃場における31日目までの採集虫の総死亡率は、31日目まで57~91%、純死亡率29~36%と主幹部バンド処理に比べて総死亡率はかわらなかったものの、純死亡率が低かった。しかし、シート上の生存分生子数は55日目においても $10^7/\text{cm}^2$ 以上を維持し、長期の殺虫活性が見込まれた。
13. 約60haの地域に点在する13ヶ所のイチジク園（計60a）に不織布シート培養菌を施用し、成虫を採集して感染率を調査したが、広域施用による感染率の向上はみられず、キボシカミキリ成虫の行動範囲が菌施用面積を上回っていることが示唆された。
14. これらの結果から、本菌によるイチジクのキボシカミキリ防除を実施するためには、以下の条件を満たした菌の施用が必要であるものと思われた。(1)キボシカミキリ成虫に強い病原性をもち、有用昆虫や天敵に悪影響を与えない *Beauveria brongniartii* カミキリムシ寄生系統を用いること。(2)成虫が羽化し、産卵、交尾のため集まる主幹部または葉の後食のため集まる樹冠部に菌を施用すること。(3)羽化が始まる6月上旬に菌を培養したウレタンフォームシートまたは不織布シートを施用し、さらに1ヶ月後に再度施用すること。これにより、菌処理圃場で発生したキボシカミキリ成虫を高率に感染死させることが可能になる。

なお、本研究の一部は既に日本応用動物昆虫学会誌（堤・山中，1995，1996，1997；堤ら，1998）、九州病害虫研究会報（堤，1984，1985；堤・山田，1991）、九州農業研究（堤・山田，1989）に公表している。

Summary

Study on Microbial Control of the Yellow Spotted Longicorn Beetle, *Psacotha hilaris* (Pascoe), by an Entomogenous Fungus, *Beauveria brongniartii*, in Fig Tree Fields.

by
TSUTSUMI Takafumi

The yellow spotted longicorn beetle, *Psacotha hilaris* (Pascoe), is one of the most serious pest of fig orchards in Japan. The beetle larva bore into tree limbs so deeply that chemical and manual control of the insect is very difficult. A conventional method we now adopt is to spray some chemicals and capture adult beetles to kill them, and prevent oviposition. In either case, however, treatments are not always effective. Meanwhile, an entomogenous fungus, *Beauveria brongniartii*, is pathogenic to adult *P.hilaris*. This study was established for the microbial control of *P.hilaris* using *B.brongniartii* in fig orchards. The results obtained follow.

1. Pathogenicity of *B.brongniartii* against adult *P.hilaris*

Pathogenicity of *B.brongniartii* GSES on *P.hilaris* adults were compared with other strains of this fungus in the laboratory. The LC_{50} of adults was 2.8×10^5 conidia/ml for dipping conidial suspensions of *B.brongniartii* GSES as well as other high pathogenicity strains of this fungus.

Infection routes of *B.brongniartii* on *P.hilaris* adults were investigated using conidial suspension of the fungus. The suspension of the fungus at a density of 7.1×10^7 conidia/ml was smeared on the antennae, ventral abdomen, tarsi and mouth of the adults. Regardless of the treated part, the adults were infected. However, application on the antennae, tarsi and ventral abdomen produced significantly higher mortality than on the mouth.

Transmission of the fungus by mating behavior was examined by allowing inoculated adults to mate with healthy ones for 30 min. An adult was allowed to mate once each day for five successive days after inoculation. The inoculated adults could transmit the fungus to non-inoculated ones for 5 days after inoculation. The transmission percentage was 100% for adults 2 h after inoculation, but 5 days after, it was decreased to 40 – 60%. There was a significant difference in transmission ability between inoculated males and females.

Aerial infection of adults by the fungus from the sheet was examined. Nine adults were reared individually, placed 50 cm from the sheet (about 10^8 conidia/cm²) for 7 days, mortality of the adults was 100%.

Polyurethane foam sheets and non woven fabric sheets containing *B.brongniartii* GSES are highly pathogenic to adult *P.hilaris*. When the adult *P.hilaris* were allowed contact for 48 hr with the polyurethane foam sheet containing *B.brongniartii* GSES with a density of $> 7.0 \times 10^7$ conidia/cm², the mortality was 100% within ten days after inoculation.

The mortality of adult beetles walking on the non woven fabric sheets containing *B.brongniartii* GSES was 100% and 85% at densities of 10^7 conidia/cm² and 10^6 conidia/cm², respectively. A walking time of 5 or 60 seconds did not affect mortality. Adult longevity was longer after walking on sheets with 10^6 conidia/cm² than on 10^7 conidia/cm². Quantities of 10^7 , 10^5 and 10^4 conidia/beetle were detected when beetles walked for 60 seconds on sheets containing the fungus with 10^8 , 10^7 and 10^5 conidia/cm², respectively.

2. The ecology of adult *P.hilaris* on fig orchards

Fig limbs damaged by larvae of *P.hilaris* were collected from fig fields in early spring. Newly-emerged adults were eliminated every day and seasonal prevalence of adult emergence was censused 3 years. Adults emerged from late May to early August, mostly from early June to late July. In 1991 and 1992, adult emergence showed two peaks, prevalent in mid June and mid July, but 1993 showed a peak in late June only.

Daily periodicity of changes to living sites and behavior of adult *P.hilaris* were censused on fig trees at 2-hour intervals from morning till night. Most adults were feeding on fig leaves from morning till afternoon. In the evening, adults migrated from the leaves to trunks. Adults mated and oviposited on trunks.

Seasonal fluctuations in the number of adult populations estimated by the Jolly-Seber method showed a similar pattern during 2 years. Adults began to emerge in early June, reaching a peak number from late June to late July; and thereafter decreased at a rather constant rate. Seasonal prevalence of adult emergence and the trend of estimated adult populations revealed that many adults immigrated from outside of the experimental field.

3. Field trials of *B.brongniartii*

Polyurethane foam sheets containing *B.brongniartii* GSES with 10^8 conidia/cm² were bound around the trunk of fig trees in early summer, resulting in 54 – 75% mortality of adult *P.hilaris* collected within 30 days after application. The conidial concentration on the sheets was maintained at 10^7 conidia/cm² for 45 days after application.

Non woven fabric sheets containing *B.brongniartii* GSES were bound around the trunk of fig trees to control *P.hilaris* adult in early summer. The conidial concentration on the sheets was 10^7 conidia/cm² for 20 days after application. Approximately 80% of the adult were infected and killed by the fungus. However, the conidial density decreased to 10^6 conidia/cm² after 31 days and the adult mortality fell to 60%.

The sheet covered with an opaque plate were hung on fig trees to control adults. The mortality of adult collected 10 days after application of the sheet was 90%, but decreased to 57% after 31 days. When adults were allowed contact with leaves contaminated by floating conidia from the sheet, mortality was 30 – 40%. Using more than 10^7 conidia/cm² infection of *P.hilaris* adults was detected for 55 days after the sheet was hung.

4. Safety of *B.brongniartii* GSES for non target insects

As hosts of *B.brongniartii* also known as *B.tenella*, Coleoptera, Lepidoptera, Diptera and Hymenoptera are recorded. However, *B.brongniartii* GSES did not infect several non target insects. Carabid beetles, *Apotomopterus japonicus*, *Apotomopterus dehaani* and

silphid beetle, *Eusilpha japonica*, which also belongs to Coleoptera as *P.hilaris* did not get infected by the fungi. Also, even though there is a report that *B.tenella* was isolated from a honeybee, they did not get infected, indicating that *B.brongniartii* GSES had a different host range from the reported strain of this fungus.

引用文献

- Adachi, I and R. Korenaga (1989) Control methods for *Anoplophora malasiaca* Thomson (Coleoptera: Cerambycidae) in citrus groves. I. Comparison of effects in several methods for preventing oviposition. Appl. Entomol. Zool. **24**: 315 – 318.
- Adachi, I. (1990) Population studies of *Anoplophora malasiaca* adults (Coleoptera: Cerambycidae) in citrus groves. Res. Popul. Ecol. **32**: 15 – 32.
- 鮎沢啓夫(1973) 日本における微生物殺虫剤の開発. 防虫科学 **38**: 114 – 124.
- 有賀久雄(1973) 昆虫病理汎論. 東京: 養賢堂, 466 p.
- Charles, V.K. (1941) A preliminary check list of the fungus of North America. U.S.D.A. Bur. Plant Ind. The Insect Pest Survey Bulletin **21**: 707 – 785.
- Debach, P. and D. Rosen (1991) Biological control by natural enemies. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 440 p.
- De Hoog (1972) The genera *Beauveria*, *Isaria*, *Tritirachium* and *Acrodontium* gen. nov. Studies in mycology, No. 1, 41 pp., C.B.S. (Baarn).
- Fukaya, M. and H. Honda, (1992) Reproductive biology of the yellow spotted longicorn beetle, *Psacotha hilaris* Pascoe (Coleoptera: Cerambycidae). I. Male mating behaviors and female sex pheromones. Appl. Entomol. Zool. **27**: 89 – 97.
- 福原敏彦(1979) 昆虫病理学. 東京: 学会出版センター, 218p.
- 福岡県(1997) 平成8年度福岡県農業の動向 (付属統計図表等), p. 44.
- 橋元祥一・柏尾具俊・堤 隆文(1989) 昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii* によるゴマダラカミキリの生物的防除に関する研究. 第2報. ウレタンフォーム培養菌の樹幹バンド処理の効果. 九病虫研会報 **35**: 129 – 133.
- 橋元祥一・柏尾具俊・堤 隆文・行徳 裕・甲斐一平(1992) *Beauveria brongniartii* によるゴマダラカミキリの防除の可能性. 植物防疫 **46**: 66 – 70.
- 橋元祥一・坂口徳光・柏尾具俊・行徳 裕・甲斐一平・植原 稔(1991) 昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii* の培養担体の検討. 九病虫研会報 **37**: 170 – 174.
- 樋口俊男・二宮保男・伊庭正樹(1993) カミキリムシ類防除のための天敵糸状菌 *Beauveria brongniartii* (Sacc.) Petch 培養製剤バイオリサ・カミキリの開発. 日東技報 **31**: 103 – 110.
- 伊庭正樹(1963) キボシヒゲナガカミキリ *Psacotha hilaris* Pascoe について. (2) 産卵習性. 蚕糸研究 **47**: 72 – 78.
- 伊庭正樹(1982) キボシカミキリの後食活動と性成熟および産卵との関係. 日蚕雑 **51**: 223 – 227.
- 伊庭正樹・井上昭司(1970) キボシカミキリのクワ, イチジク両樹種による生育の比較. 関西病虫害研報 **12**: 86 – 87 (講演要旨).
- 伊庭正樹・井上昭司・菊池 実(1976) キボシカミキリの生態学的研究. I. 成虫の発生消長にみられる地方的差異. 日蚕雑 **45**: 156 – 160.
- Inglis, G.D., M.S. Goettel and D.L. Johnson (1995) Influence of ultraviolet light protectants on persistence of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. Biol. Control **5**: 581 – 590.
- 石井五郎・江森 京・樋田幸夫(1963) キボシヒゲナガカミキリ *Psacotha hilaris* Pascoe について(1). 蚕糸研究 **46**: 39 – 47.
- 石井五郎・江森 京・樋田幸夫(1964) キボシヒゲナガカミキリ *Psacotha hilaris* Pascoe につい

- て(3). 蚕糸研究52:28-38.
- 石々川英樹・密田和彦・河上 清(1988)天敵糸状菌 *Beauveria tenella*によるキボシカミキリ防除試験. 応動昆32:230-231.
- 伊藤正広(1979)桑園におけるキボシカミキリの発生調査. 神奈川県蚕セ概要7:70-72.
- Jolly, G.M. (1965) Explit estimates from capture-recapture data with both death and immigration-stochastic model. Biometrika 52:225-247.
- 甲斐一平・榎原 稔・柏尾具俊・橋元祥一(1990)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*に及ぼす農薬の影響. 第1報. 数種殺菌剤の影響. 九病虫研会報36:177-180.
- 柏尾具俊・橋元祥一・堤 隆文(1989)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*によるゴマダラカミキリの生物的防除に関する研究. 第1報. ゴマダラカミキリ成虫に対する *B. brongniartii*の接種菌量及び接種方法と病死率. 九農研51:115.
- 柏尾具俊・堤 隆文(1990)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*によるゴマダラカミキリの生物的防除に関する研究. 第3報. 菌の施用方法と殺虫効果. 九病虫研会報36:169-172.
- 柏尾具俊・氏家 武(1988)キボシカミキリ由来の天敵糸状菌 *Beauveria tenella*のゴマダラカミキリに対する病原性と殺虫効果. 九病虫研会報34:190-193.
- 片野田逸朗(1994)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*のセンノカミキリに対する病原性について. 日林九支研論集 47:83-84.
- 河上 清(1978)キボシカミキリに寄生する *Beauveria tenella* (Delacroix) Siemaszko について. 蚕試報 27:445-467.
- 河上 清(1985)天敵微生物の探索と利用. 今月の農薬29:50-59.
- 河上 清・島根孝典(1985)キボシカミキリの大量飼育用人工飼料の改善. 日蚕雑54:315-320.
- 河上 清・島根孝典(1986)昆虫病原糸状菌 *Beauveria tenella*を利用したキボシカミキリの微生物的防除. 日蚕雑55:227-234.
- 小林益子・桐原重樹・尾崎幸三郎(1987)昆虫寄生性線虫のキボシカミキリ *Psacotha hilaris*に対する効力. 関東東山病虫研年報34:181-183.
- 小林則夫・酒寄健治(1993)*Beauveria brongniartii*菌製剤による桑園内のキボシカミキリ防除. 茨城農総セ蚕研研報1:62-64.
- 小島圭三・中村慎吾(1986)日本産カミキリムシ食樹総目録. 広島:比婆科学教育振興会, 336p.
- Komazaki, S. and Y. Sakagami (1989) Capture-recapture study on the adult population of the white spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Thomson) (Coleoptera: Cerambycidae), in a citrus orchard. Appl. Entomol. Zool. 24:78-84.
- 国見裕久(1993)日本産昆虫の天敵微生物目録. 天敵微生物の研究手法, 日本植物防疫協会:東京, pp.192-222.
- Linsley, E.G. (1959) Ecology of Cerambycidae. Annu. Rev. Entomol. 4:99-138.
- 松浦克彦・福井謙一郎・足立年一(1997)イチジクのキボシカミキリとクワカミキリに対する天敵糸状菌 *Beauveria brongniartii*のシート剤による防除効果. 兵庫農技研報(農業) 45:45-48.
- 森本徳右衛門・竹下正二・橋本博好(1961)紫赤きょう病菌による梨のコナカイガラムシおよび蜜柑のイセリアカイガラムシに対する駆除試験. 高知大研報10:17-21.
- 森本徳右衛門・竹下正二・岩川 孝・橋本博好(1959a)黄きょう病菌「(イネヨトウよりの分離系) *Isaria farinosa*」によるミカンネコナカイガラムシ「蜜柑根粉介殼虫(*Rhizoecus kondonis*)」の駆除試験(1). 異なった培地上における硬化病菌の発育ならびに病原性およびその処理土壌の病原性. 高知大研報8:1-6.
- 森本徳右衛門・竹下正二・岩川 孝・橋本博好(1959b)黄きょう病菌「(イネヨトウよりの分離系)

- Isaria farinosa*」によるミカンネコナカイガラムシ「蜜柑根粉介殼虫(*Rhizoecus kondonis*)」の駆除試験(2).黄きょう病菌培養家蚕蛹処理後における駆除効果の持続性並びに挿入の適期. 高知大研報8:7-10.
- 森本徳右衛門・竹下正二・岩川 孝・橋本博好(1960a)黄きょう病菌「(イネヨトウよりの分離系) *Isaria farinosa*」によるミカンネコナカイガラムシ「蜜柑根粉介殼虫(*Rhizoecus kondonis*)」の駆除試験(3).異なった培地上における黄きょう病菌の病原性並びにその挿入方法. 高知大研報9:13-17.
- 森本徳右衛門・竹下正二・岩川 孝・橋本博好(1960b)黄きょう病菌「(イネヨトウよりの分離系) *Isaria farinosa*」によるミカンネコナカイガラムシ「蜜柑根粉介殼虫(*Rhizoecus kondonis*)」の駆除試験(4).家蚕蛹上に培養した硬化病菌の生活力ならびに硬化病菌に対するネマトロン乳剤の影響. 高知大研報9:19-23.
- 中根猛彦・大林一夫・野村 鎮・黒沢良彦(1960)原色昆虫大図鑑II甲虫編.(改訂4版)東京:北隆館, 443p.
- 檜原 稔・甲斐一平・河野 務(1992)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii* に及ぼす農薬の影響. 第2報. 圃場における数種殺菌剤の影響. 九病虫研会報38:197-200.
- 於保信彦・佐藤靖男(1966)ミカンコナジラミの寄生菌 *Aschersonia* sp. について. 園試報A:179-192.
- Oho, N. (1968) Possible utilization of *Aschersonia aleyrodis* for control of citrus whitefly, *Dialeurodis citri* Ashmed. In "Proc. U.S.-Japan Seminar on Microbial Control of Insect Pests." pp.119-128, Fukuoka.
- 大長光 純(1982) *Beauveria* 菌によるカミキリムシの殺虫試験. 日林九支研論集35:153-154.
- Prest, D.B., M. Gilliam, S. Taber, III and J.P. Mills (1974) Fungi associated with discolored honey bee, *Apis mellifera*, larvae and pupae. J. invertebr. pathol. 24:253-255.
- Sato, H., N. Kamata and M. Shimazu (1997) Aerial infection of *Cordyceps militaris* Link (Clavicipitales: Clavicipitaceae) against larvae of *Quadricalcarifera punctatella* (Motschulsky) (Lepidoptera: Notodontidae). Appl. Entomol. Zool. 32:249-252.
- Seber, G.A.F. (1965) A note on the multiple-recapture census. Biometrika 52: 249-259.
- 関口昭良(1955) *Isaria fumosorosea* Wize によるモモシンクイガ防除に関する研究 I. 菌の同定および寄生性について. 東北農試研報 4: 152-153.
- 関口昭良(1959) *Isaria fumosorosea* Wize によるモモシンクイガ防除に関する研究. 第2報. 接種試験・菌の生態及び大量培養法について. 東北農試研報 16:89-93.
- 柴尾 学・田中 寛 (1993)天敵糸状菌によるイチジクのキボシカミキリの防除. 応動昆中国 35:13-16.
- Shibata E. and T. Higuchi (1988) Application of an entomogenous fungus, *Beauveria brongniartii* (Sacc.) Petch, for control of the adult sugi borer, *Semanotus japonicus* Lacordaire (Coleoptera: Cerambycidae). Appl. Entomol. Zool. 23:199-201.
- Shibata E. and T. Higuchi (1993) Fecundity of the adult sugi bark borer, *Semanotus japonicus* Lacordaire (Coleoptera: Cerambycidae), infected with entomogenous fungus, *Beauveria brongniartii* (Sacc.) Petch. Appl. Entomol. Zool. 28:249-250.
- Shibata E., Y. Yoneda, T. Higuchi and H. Ichinose (1991) Control method of the adult sugi borer, *Semanotus japonicus* Lacordaire (Coleoptera: Cerambycidae), using the non-woven fabric sheet with an entomogenous fungus, *Beauveria brongniartii* (Sacc.)

- Petch, in Japanese Cedar, *Cryptomeria japonica* D. Don, Stand. Appl. Entomol. Zool. **26**:587 – 590.
- 島根孝典 (1993) 鞘翅目昆虫病原性糸状菌を利用した桑害虫キボシカミキリの生物的防除に関する研究. 九州大学学位論文, 169 p.
- 島根孝典・河上 清(1993)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*の蚕およびマウスに対する安全性について. 日蚕雑 **62**:30-37.
- 島津光明(1993)天敵微生物の同定法 (天敵糸状菌). 天敵微生物の研究手法, 東京: 日本植物防疫協会, pp62 – 81.
- Shimazu, M. (1994) Potential of the cerambycid – parasitic type of *Beauveria brongniartii* (Ddeuteromycotina: Hyphomycetes) for microbial control of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). Appl. Entomol. Zool. **29**:127 – 130.
- 島津光明(1995) *Beauveria* 属糸状菌によるマツノマダラカミキリの防除に関する研究. 九州大学学位論文, 155p.
- Steinhaus, E. A. and G. A. Marsh (1962) Report of diagnoses of diseased insects 1951 – 1961. Hilgardia **33**:349 – 487.
- 杉山隆史・林 雅恵・雑賀 健・樋口俊男(1997)イエシロアリに対する昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*の病原性. 第41回応動昆講要, p.132
- 滝口義夫 (1981) 4種のカミキリムシ成虫に対する *Beauveria tenella*(Delacroix) Siemaszko の病原性について. 応動昆 **25**:194 – 195.
- 津田勝男・山中正博 (1995) *Beauveria brongniartii*に感染したキボシカミキリ雌成虫の産卵能力. 九病虫研会報 **41**:114-116.
- 津田勝男・吉岡哲也・堤 隆文・山中正博・河原畑 勇 (1996) 数種昆虫病原糸状菌のチャバネアオカメムシに対する病原性. 応動昆 **40**:318-321.
- 堤 隆文・柏尾具俊・橋元祥一・行徳 裕・甲斐一平・檜原 稔(1990) 昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*によるゴマダラカミキリの生物的防除に関する研究. 第4報. 圃場におけるウレタンフォーム培養菌の枝かけ処理の効果. 九病虫研会報 **36**:173 – 176.
- 堤 隆文・山田健一(1990) *Beauveria brongniartii*によるイチジクのクワカミキリ防除: 菌培養ポリウレタンフォームによる防除効果. 九農研 **52**:118.
- 堤 隆文・山田健一 (1992) 昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii*のブドウトラカミキリに対する病原性. 九農研 **54**:115.
- 堤 隆文・山田健一(1995) イチジクのキボシカミキリ幼虫に対する生物的防除資材としての昆虫寄生性線虫 *Steinernema carpocapsae* ALL 系統の評価. 福岡農総試研報 **14**:174 – 176.
- 梅本清作・村田明夫・長井雄治(1989)ニホンナシ黒星病菌分生子懸濁液の効率的濃縮法. 日植病報 **55**:309 – 314.
- 山下優勝(1980)イチジクのカミキリムシ類の発生と防除対策. 今月の農薬 **24**:70 – 73.
- 米山光郎・市川和規(1981)キボシカミキリの発生実態と防除に関する試験. 第3報. 混在型の発生様相. 山梨蚕試要報 **20**:23-27.
- 米山光郎・小沢和茂(1980)キボシカミキリの発生実態と防除に関する試験. 第2報. 産卵時期別による次世代成虫の羽化時期. 山梨蚕試要報 **19**:94-98.
- 米山光郎・渡辺常富(1992)天敵糸状菌 *Beauveria brongniartii* (= *B. tenella*) シート剤のキボシカミキリへの防除効果. 山梨蚕試要報 **31**:30-40.
- 横山桐郎(1929)最新日本蚕業害虫全書. 東京: 明文堂, 469p.
- 吉井幸子(1991)昆虫病原糸状菌 *Beauveria brongniartii* によるキボシカミキリの防除. 千葉県蚕業センター研究要報 **10**:46 – 51.

福岡県農業総合試験場特別報告
第12号

イチジクを加害するキボシカミキリの昆虫
病原性糸状菌による防除に関する研究

発 行 平成11年3月
福岡県農業総合試験場
(福岡県筑紫野市吉木)

著 者 堤 隆 文

印刷所 城島印刷有限会社