

松くい虫の天敵利用技術の確立

牧本 卓史

Study of method of exterminate pine sawyer (*Monochamus alternatus* Hope)
by natural enemy, *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire)

Takushi MAKIMOTO

要 旨

牧本 卓史：松くい虫の天敵利用技術の確立 岡山県林試研報24：27～36(2008) マツノマダラカミキリの捕食寄生者であるサビマダラオオホソカタムシによる新たな松くい虫被害防除技術の確立を目的とした研究を行った。笠岡市のアカマツ林でマツ材線虫病により枯死し、マツノマダラカミキリが穿入したアカマツにサビマダラオオホソカタムシの成虫や卵を放飼し、マツノマダラカミキリの駆除効果を調べた。その結果、枯死木を伐倒せず、樹幹の2カ所に成虫を放飼した試験区でマツノマダラカミキリの生残率を10%に抑えられた。また、放飼時の被害木の処理条件を変えた卵放飼試験では、立木のまま、伐倒、伐倒・玉切り後集積という3つの条件で同様の放飼効果を示し、現地の条件に合わせて使用方法が選べることが明らかとなった。人工増殖試験では、寄主1頭（体重500mg程度のマツノマダラカミキリ幼虫）から7～9頭のサビマダラオオホソカタムシ成虫を羽化させるよう調整すれば、羽化翌年の産卵数を考慮した上で効率的であることがわかった。また、幼虫に人工飼料を与える場合、複数の被害寄主をまとめて人工飼料上に移動させることで効率的な増殖が可能となることがわかった。営繭及び羽化は、人工飼料を与える容器とは別の容器で調湿しながら管理する方法が、羽化率の向上に有効であることが明らかとなった。人工飼料は、ゲル状のものよりも液状のものの方がサビマダラオオホソカタムシにとって摂取しやすい物理性であることが示唆され、より栄養価の高い飼料の方が羽化翌年の産卵数が多くなる傾向が認められた。さらに、サビマダラオオホソカタムシ成虫を、果物や野菜の果実及び果樹そのものに放飼して、農作物への影響の有無を調べた。その結果、果実の品質、果樹の生育等に悪影響を及ぼす加害行動は認められなかった。

キーワード：マツノマダラカミキリ，サビマダラオオホソカタムシ，天敵防除，松くい虫

I はじめに

マツ材線虫病の防除は、病原体であるマツノザイセンチュウ (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle) を運搬するマツノマダラカミキリ (*Monochamus alternatus* Hope, 以下マダラカミキリという) を対象とした薬剤予防散布と伐倒駆除が主体となっている (吉田ら 1997)。一方で、薬剤に比べ環境への負荷が小さい天敵生物を利用したマダラカミキリ防除の開発を期待する声は近年高まっている。また、経費上の制約等から防除がなされない被害林分も多く、被害収束のためには防除実施率を向上させる簡便で低コストか

つ効果的な新しい防除技術の開発が求められている。

そこで本研究では、マダラカミキリの天敵として知られている (竹常 1982, 井上 1993) サビマダラオオホソカタムシ (*Dastarcus helophoroides* (Fairmaire), 以下ホソカタムシという) を活用した松くい虫防除技術の確立を目的に、実用化に向けて問題となるいくつかの点について検討した。

ホソカタムシは、鞘翅目ムキヒゲホソカタムシ科 (Bothrideridae) に属する捕食寄生性昆虫で、主にカミキリムシ類の幼虫及び蛹に寄生する。1年1化で7～9月に羽化し、成虫で越冬した後、翌年4月頃から樹皮

の隙間等に産卵する。孵化幼虫は樹幹の寄主孔道内に侵入し、寄主を麻痺させた後、寄主の体液及び組織を摂食する。寄生するとすぐに蛆虫型の2齢幼虫へと脱皮し、その後の移動能力は著しく低下する。寄主がマダラカミキリの場合、1個体の寄主に寄生し、羽化するホソカタムシ幼虫の数は1、2個体の場合が多いが、10個体前後まで寄生していることがある。成熟した幼虫は繭を作ってその中で蛹化し、成虫が羽化する。

岡本(1999)は、岡山県和気町のマツ林内で本種が枯死木樹幹内のマダラカミキリに50%以上という高率で寄生していることを確認しており、このことから、本種のマダラカミキリへの寄生能力が高いことが判る。しかし、ホソカタムシの生息が広い範囲で確認されている岡山県においても松くい虫被害量は他都道府県に比べて減少傾向にあるとは言えず、本種の土着個体群にマダラカミキリの繁殖を抑えるほどの能力はないと考えられる。

そこで、人工増殖したホソカタムシの成虫や産下卵を被害林分に放飼し、人工的に駆除圧を高める手法を検討する必要がある。しかし、マダラカミキリはマツの直接加害者ではなく病原体の運搬者にすぎないことから、増殖した天敵を林内に放飼したことによるマダラカミキリの殺虫率は枯損被害の減少率とは必ずしも結びつかない。仮にある林分内で大部分のマダラカミキリを駆除できたとしても、生き残った個体に高い線虫伝搬能力があればそれらのマダラカミキリが拡大源となって、翌年の被害は必ずしも減少しないと考えられるためである。また、当該林分が周囲の被害林からある程度隔離されていなければ、周囲から飛来したマダラカミキリによる被害が発生する。したがって天敵生物のみで被害を抑えるには、マダラカミキリをほぼ絶滅させるほどの捕食・寄生能力を持った生物が必要になると考えられている(吉田2006)。吉田(2002)は、松くい虫被害が比較的微害である場合でも、翌年の被害を横ばいに保つために必要なマダラカミキリの駆除率は少なくとも93%であると試算した。本研究では、この駆除率93%を超える放飼方法の確立を第一の目的とし、松くい虫被害林における放飼試験を行った。

本種は、中国でポプラなどの緑化木を食害するツヤハダゴマダラカミキリの防除に利用され、人工飼料を用いた大量増殖法の開発が進められた(小倉2000)。しかし、松くい虫防除に活用するためには、少なくとも現在主に行われている各種防除法のうち最も経費のかかる薫蒸処理に対抗できるコストで利用できることが求められ、そのためには、増殖方法の低コスト化と簡略化が必要であると考えられる。そこで、人工飼料の組成の再検討と増殖工程の簡素化を目的とした増殖試験を行った。

天敵防除資材が農薬に比べて優れている点として、自力で移動分散して増殖することと、一旦定着すればその

後はコストをかけずに効果の持続を期待できることが挙げられる。しかし、この移動分散、繁殖、定着といった特性は、適用地域の周辺環境に何らかの影響を及ぼす可能性がある。本研究では、いくつかの農作物とマツ林に棲息する昆虫類に対して、本種が悪影響を及ぼす可能性について検討した。

II 材料と試験方法

1 放飼試験

放飼試験は、岡山県笠岡市内のアカマツ林で実施した(図-1)。試験地は、平均年間降水量1084.1mm、年平均気温15.3℃(気象庁)、海拔高度約250m、西向き斜面でアカマツが優占する。

(1) 2006年放飼試験

2006年の放飼試験の目的は、高い位置や複数箇所に分

国土地理院承認 平14総研 第149号



図-1 試験地位置図

けて放飼した場合の駆除効果を検証することとし、次のとおり試験区を分けて設定した。2005年秋にマツ材線虫病で枯死したアカマツの中から2006年3月に40個体を選木し、この内20個体をホソカタムシ成虫放飼区、10個体を卵放飼区、残りの10個体を無放飼の対照区とした。

成虫放飼区は、①立木のまま胸高(地上高1.2m)付近にホソカタムシ成虫60頭を放飼(以下下放飼区という)、②立木のまま胸高と地上高5~10mの枝上にホソカタムシ成虫それぞれ30頭ずつを放飼(以下上下放飼区という)、③立木のまま地上高5~10mの枝上にホソカ

表-1 2006年の放飼試験に供した松くい虫被害木

放飼位置	成虫放飼区		卵放飼区		対照区	
	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)
下	13.1	19.6	14.3	17.3	10.3	9.7
	7.9	10.8	11.1	17.2	11.4	10.3
	17.5	19.8	10.9	18.7	14.2	12.7
	9.4	15.6	13.3	13.1	12.9	12.3
	10.3	18.0	10.1	12.8	11.5	15.8
上	9.8	16.7	13.2	14.2	8.6	17.5
	9.5	10.8	13.4	19.4	15.0	15.3
	13.0	13.0	12.2	11.5	15.5	15.1
	11.1	17.2	13.8	13.2	13.4	15.0
	12.4	15.6	10.0	10.7	13.6	16.9
上下	12.7	16.2				
	9.6	18.2				
	10.5	15.9				
	16.6	17.4				
	10.6	19.3				
伐倒	14.2	18.4				
	14.0	11.5				
	11.5	12.2				
	10.8	18.0				
	18.0	18.4				
平均	12.1	16.1	12.2	14.8	12.6	14.1
最大	18.0	19.8	14.3	19.4	15.5	17.5
最小	7.9	10.8	10.0	10.7	8.6	9.7

表-2 2007年の放飼試験に供した松くい虫被害木

被害木の 状態	放飼区		対照区	
	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)
立木	10.4	13.1	11.9	14.5
	8	11.5	7.1	9
	13.1	19.5	8.2	13.9
	12	17.5	10.3	10.2
	11.7	17.6	11.4	10.4
伐倒	10.9	17	14.3	16.2
	12.7	21.4	13.6	13.6
	7.4	10.3	11.5	13
	15.9	19.4	12.4	16.9
	9.7	15	14.1	19
集積	8.3	16.8	14.9	11.2
	11.7	16.3	15.8	15.9
	12.9	10.4		
	7.2	16		
	9.3	13.7		
平均	7.3	18		
	11	17.7		
	15	19.4		
	14.3	7.3		
	11	12.6		
最大	12	16		
	16.6	19.6		
	13	12.9		
	12.2	13.5		
	11.4	15.5	12.1	13.7
最小	16.6	21.4	15.8	19.0
	7.2	7.3	7.1	9.0

タムシ成虫60頭を放飼（以下上放飼区という）、④伐倒し、ホソカタムシ成虫60頭を3～4箇所に分けて放飼（以下伐倒区という）、の4試験区に細分し、各区5個体を供試した（表-1）。放飼したホソカタムシ成虫は全て2005年の夏～秋に羽化し、室内で常温飼育した1年生成虫とした。

卵放飼区は、実験室内で産ませた卵を用い、成虫放飼と同条件の①下放飼区（各5,000卵/個体）と②上下放飼区（胸高と上部にそれぞれ2,500卵/個体）の2試験区を設定し各区5個体を供試した（表-1）。放飼したホソカタムシ卵は全て2005年の夏～秋に羽化し、室内で常温飼育した成虫が産んだものとした。設置方法は、2

枚重ねのティッシュペーパーの隙間に産ませた卵を網でくみ、防水紙で作った封筒状の容器に封入して封筒の口が下向きになるようにガンタッカーで供試木に固定した。

放飼は、2006年5月1日から同5月15日数回に分けて行い、同年6月まで自然状態で放置した。同6月14日から6月28日に供試材を1mに玉切りし、林業試験場に持ち帰って剥皮・割材し、樹皮下及び材内のマダラカミキリの生死の別及び死亡要因を調査した。また、対照区の10個体については、6月1日に試験場に持ち帰り、同様に剥皮・割材調査を行った。

(2)2007年放飼試験

2007年の放飼試験の目的は、放飼時に最適な被害木の放飼前の処理方法を検討することとし、次のとおり試験区を分けて設定した。2006年秋にマツ材線虫病で枯死したアカマツの中から2007年3月に36個体を選木し、この内24個体を卵放飼区、残りの12個体を無放飼の対照区とした。

卵放飼試験区は、①立木のまま胸高（地上高1.2m）付近にホソカタムシ卵2,000卵を放飼（以下立木放飼区という）、②伐倒し、ホソカタムシ卵2,000卵を3～4箇所に分けて放飼（以下伐倒放飼区という）、③伐倒後2m長に玉切りし4個体分を1箇所に集積してホソカタムシ卵8,000卵を7～8箇所に分けて放飼（以下集積放飼区という）の4試験区に細分し、各区8個体を供試した（表-2）。放飼したホソカタムシ卵は全て2006年の夏～秋に羽化し、室内で常温飼育した成虫が産んだものとした。設置方法は、2006年の放飼試験（卵放飼区）と同様とした。

放飼は、2007年4月26日から同5月15日数回に分けて行い、同年6月まで自然状態で放置した。同6月29日に供試材を1mに玉切りし、林業試験場に持ち帰って2006年の放飼試験同様、剥皮・割材調査を行った。

また、対照区の12個体については、放飼と同時に放飼区①～③と同条件にして放置し、6月18日に試験場に持ち帰り、同様に剥皮・割材調査を行った。

割材調査では、マダラカミキリの生死の別及び脱出孔の確認を行った。マダラカミキリが死亡している場合、その原因をホソカタムシによる寄生、ホソカタムシ以外の捕食者（昆虫類に限る）による捕食、キツツキ類による捕食、菌類による死亡に分け、原因が特定できないものは原因不明として記載した。空の蛹室はその旨記載した。その結果に基づいて、ホソカタムシの放飼効果を評価するための指数として寄生率、致死率及び死亡率を次のとおり定義し、算出した。寄生率は、ホソカタムシによるマダラカミキリの被寄生個体数（以下被寄生個体数

という)を、マダラカミキリの生存個体数、脱出孔数、被寄生個体数、原因不明死亡数の和で除したものを、致死率は、被寄生個体数と原因不明死亡数の和を、マダラカミキリの生存個体数、脱出孔数、被寄生個体数、原因不明死亡数の和で除したものを、死亡率は、全ての原因によるマダラカミキリの死亡個体数を、全てのマダラカミキリの確認個体数で除したものとした。

2 人工増殖

(1) 増殖の工程

ホソカタムシの人工増殖は、孵化したホソカタムシを一旦寄主に寄生させて、2齢から3齢の幼虫を人工飼料上で肥育し、営繭、羽化させる。従って、増殖コストとしては寄主と人工飼料の原材料費及び人工飼料の製造や増殖工程そのものにかかる人件費が挙げられる。本研究では、コストの縮減を目的として、寄主の効率的な活用と増殖工程の簡略化について検討した。

人工増殖で用いた寄主は、釣具店等で市販されているハチノスツリガの幼虫(商品名バイオワーム、バイオブドウ虫等)及びマダラカミキリの幼虫とした。2006年は、この2種類の寄主にそれぞれホソカタムシの孵化幼虫を10頭及び30頭接種する試験区を設け、寄主1頭当たりの羽化数と羽化時の体重に及ぼす影響を調べた。孵化幼虫の接種は、濾紙を敷いたシャーレに寄主1頭を容れ、室温で孵化させたホソカタムシ孵化幼虫を濡らした面相筆で接種した。接種後3~4日後に概ね寄生が終了していることを確認して、約3gの人工飼料を容れた別のシャーレに寄主ごと移動させた。

寄主に寄生させた後、そのまま日数を経過すると寄主から離脱したホソカタムシ幼虫が成長できないまま死亡したり、寄主上で幼虫同士が共食したりする等して、寄主1頭から得られる老熟幼虫の数は漸減する。そこで、従来は寄主と人工飼料をより有効に活用するために、一旦寄主に寄生させたホソカタムシの幼虫を、寄主ごとと速やかに人工飼料上に移動させ、できるだけ人工飼料上で成長させるようにしていた。石井(2003)は、寄主1頭からの羽化数が増加すると、個体の平均体重が減少する傾向があることを指摘した。また、成長をどれだけ人工飼料に依存したかによって、羽化時の体重や翌春の産卵数、すなわち羽化した成虫の質に差が生じる可能性がある。そこで、ホソカタムシ幼虫を寄生させた寄主(以下被寄生寄主という)を1頭ずつ人工飼料上に移動させるもの(1頭区)と、被寄生寄主10頭を人工飼料上に並べるもの(10頭区)とで、羽化した成虫の質を比較した。

次に、営繭及び羽化に至る過程の作業の簡略化を目的として、増殖工程を再検討した。最も簡便な方法としては、寄生、人工飼料上の肥育、営繭、羽化を同一容器内で行うことが考えられる。しかし、人工飼料はカビ等で

腐敗が著しくなるとその容器の中のホソカタムシの死亡率が高まる傾向があった。また、これまで増殖を行った経験上、営繭は比較的乾燥した状態で、逆に羽化はある程度多湿な条件で行われやすい印象があった。そこで、寄生後人工飼料上に移してから羽化までを同一容器内で飼育する試験区と、人工飼料への移動後営繭、羽化までの過程で段階的に別の容器に変えて飼育する試験区を設け、成虫の羽化率と羽化した成虫の質を比較した。試験条件は、(イ)人工飼料を与えるシャーレの中で羽化させるもの、(ロ)人工飼料上で肥育後、調湿用の紙(JKワイパー)を敷いた角形スチロールケースに老熟幼虫を移して羽化させるもの、(ハ)人工飼料を与えるシャーレの中で営繭させた後、調湿用の紙を敷いた角形スチロールケースに繭を移して羽化させるもの、(ニ)人工飼料上で肥育後調湿用の紙を敷いた角形スチロールケースに老熟幼虫を移して営繭させ、営繭後ケースに水を浸漬させた脱脂綿を入れて湿度を上げて羽化させるもの、の4条件とした。

成虫の質は、羽化直後に体重や体長を調べることである程度評価できるが、防除資材としての質という点で考慮すると羽化翌春の産卵数が最も重要であると考えられる。そこで、防除に使用できる5月中旬までの産卵数を、2006年の羽化個体は2007年の春に、2007年の羽化個体は2008年の春に調査し、飼育条件や羽化時の体重による成虫の質の評価基準とした。産卵数は、雌雄を判別せずに20個体程度ずつの成虫を入れた容器の中の産下卵を週2回カウントし、性比を1:1と仮定して、産卵数を容器内の飼育頭数の半数で除した値を雌1頭当たりの産卵数として算出した。

(2) 幼虫用人工飼料

人工増殖では、できるだけ少ない寄主で効率的に幼虫を成長させるために、寄生後の幼虫に人工飼料を与えている。石井(2003)は、人工飼料の組成や使用の有無が人工増殖に与える影響について検討し、人工飼料を使用する有効性を実証し、組成の簡素化に成功した。しかし、組成の異なる人工飼料で羽化させたホソカタムシ成虫の翌年の産卵数についての調査を行っておらず、成虫の質を評価するには至っていない。そこで、本研究では人工飼料の組成を変えて増殖試験を行い、羽化した成虫の体重及び翌春の産卵数を比較して組成及び物理性の再検討を行った。

幼虫期に摂取した飼料の組成が、羽化翌春の産卵数に与える影響を調べるために、組成の異なる2種の飼料(表-3)を用いた増殖試験を実施した。飼料Aは、石井(2003)の飼料を若干変更したもので、秤量した原料を全てミキサーで混合するだけのものであり、製造にかかる作業時間は極めて短い。飼料Bは、小倉(2001)が

表-3 幼虫用人工飼料の組成

品目	添加量(g)	
	飼料A	飼料B
水	50	48
サッカロース	10	8
蚕蛹粉末	10	3
酵母抽出物	8	3.2
ラード	1	2
クエン酸	0.2	0.4
メチルパラベン	0.1	0.15
ソルビン酸	0.1	0.15
ミルクペプトン		6.4
乾燥酵母		3
寒天		0.5
プロピオン酸		0.15
鶏肝臓		25
テトラサイクリン		0.03
ストレプトマイシン		0.03

ホソカタムシ飼育用の人工飼料として開発したものとほぼ同じである。表中 I の部分を秤量後ミキサーで混合し、それを耐熱容器に入れて電子レンジで 1 分程度加熱した後、寒天が固まるまで冷却する。表中 II の内、生の鶏肝臓はハンドホモジナイザーで液状になるまで攪拌し、抗生物質と共に冷ました I に混合する。従って飼料 B は、翌春の産卵数を考慮し、栄養価に極力配慮した組成であるが、製造に時間と手間がかかる上に原材料費も嵩む。それぞれの飼料の原材料費は飼料 A が 1.4 円/g、飼料 B が 10.8 円/g であった。この 2 種の人工飼料を与えて 2006 年 5～8 月に増殖を行い、幼虫数に対する羽化数を羽化率として調査した。また、それぞれの羽化成虫をそれぞれ 50 頭ずつ（雌雄未判別）別の容器で飼育し、2007 年の初産日（4 月）から 5 月 15 日までの産卵数を比較した。

ホソカタムシがカミキリの幼虫に寄生した様子を観察すると、薄い体表を食い破って体液だけを摂食しているように見える。カミキリ幼虫の体液はやや粘性があるが、どのような物理性の飼料がよりホソカタムシの幼虫にとって摂食しやすいかを検討する必要があると考えた。そこで、飼料 A と飼料 A に約 1% の寒天を添加し、加熱、冷却してゲル状にした 2 種の飼料を用いた増殖試験を行った。この 2 種の人工飼料を与えて 2007 年 5～8 月に増殖を行い、幼虫数に対する羽化数を羽化率として調査した。また、それぞれの羽化成虫をそれぞれ 30 頭ずつ（雌雄未判別）別の容器で飼育し、2008 年の初産日（4 月）から 5 月 15 日までの産卵数を比較した。

3 環境影響評価

ホソカタムシを放飼した際に、放飼マツ林の周辺の農地にホソカタムシが移動し、農作物に悪影響を与える可能性を検討しておかなければならない。蔬菜や果物の果

実等を与える影響を調べるため、産卵期にある成虫を果実と同一容器内で飼育した。本種は昆虫に対する捕食寄生者であり、本来植物を餌としたり果実から吸汁することは考えにくい。そこで、この試験では餌と水を与えないホソカタムシ成虫を 2005 年 9 月 14 日にガラス製の腰高容器及び昆虫飼育箱に果実と共に各 10 頭（雌雄未判別）容れ（図-2）、同 10 月 3 日まで 1 週間毎に果実表面を観察して食害痕等加害の有無を確認した。調査途中でホソカタムシが死亡した場合、ホソカタムシ成虫を補充し常に容器内に 10 頭の成虫がいるようにした。調査に供した果実は、トマト、キュウリ、ナシ、ミカン、モモ、ブドウとした。

次に、特にモモやブドウなど岡山県特産の果物の生産に悪影響を及ぼさないかを調べるため、果樹そのものへの影響試験を行った。試験対象はモモ（清水白桃）、ブドウ（ピオーネ、マスカットオブアレキサンドリア）の



図-2 果実に対する加害試験の状況。ホソカタムシ成虫を 10 頭入れ、網蓋を載せる。



図-3 果樹に対する加害試験の状況。各網袋内にホソカタムシ成虫を 6 頭入れ、飼育した。

表-4 2006年放飼試験の結果

	マダラカミキリの状態							寄生率 (%)	致死率 (%)	死亡率 (%)
	生存		死亡							
	生存	脱出	被寄生	捕食虫	キツネ類	菌	原因不明			
対照区	183	29	199	92	90	1	79	40.6	56.7	68.5
成虫放飼区	109	143	860	223	7	13	245	63.4	81.4	84.3
下	14	54	230	66	4	4	69	62.7	81.5	84.6
上下	12	20	177	69	0	7	35	72.5	86.9	90.0
上のみ	39	37	192	28	1	2	26	65.3	74.1	76.6
伐倒	44	32	261	60	2	0	115	57.7	83.2	85.2
卵放飼区	112	56	341	72	25	5	97	56.3	72.3	76.3
下	48	24	234	51	9	2	57	64.5	80.2	83.1
上下	64	32	107	21	16	3	40	44.0	60.5	66.1

鉢付果樹各2本とした。果樹1本当たり2箇所の枝を網袋で覆い、網袋内で餌と水を与えないホソカタムシ成虫各6頭（雌雄未判別）を放飼した（図-3）。放飼は、モモの開花前の2006年4月7日に行い、モモについては果実の完熟を認めた同7月24日まで、ブドウについても果実の完熟を認めた9月26日まで、約2週間に1回、花や未成熟の果実に傷を付けるなどの加害がないか観察した。試験期間中にホソカタムシが死亡した場合、ホソカタムシ成虫を補充し常に一つの網袋内に6頭の成虫がいるようにした。

III 結果と考察

1 放飼試験

2006年の放飼試験の結果を表-4に示す。対照（無放飼）区の寄生率は40.6%、致死率は56.7%、死亡率は68.5%であった。この試験地は、土着のホソカタムシが確認されており、放飼区と対照区に供した試験木は最も近いところでも概ね200m程度の距離で離れていた。石井（2003）は、放飼当年の分散による近接木への寄生が認められなかったことを報告しており、これらのことから、対照区における寄生はこれら土着のホソカタムシによるものであると考えられた。以下、対照区と放飼区の土着ホソカタムシによる寄生密度等は同条件であるものと仮定して解析を進めた。

成虫放飼区全体の寄生率は63.4%、致死率は81.4%、死亡率は84.3%であり、それぞれ対照区との間に有意差があり（ χ^2 検定, $p < 0.01$ ）、放飼による駆除効果の上乗せが認められた。

卵放飼区全体の寄生率は56.3%、致死率は72.3%、死亡率は76.3%で、それぞれ対照区との間に有意差があり（ χ^2 検定, $p < 0.01$ ）、放飼による駆除効果の上乗せが認められた。

試験区別に見ると、成虫放飼で下放飼区の寄生率が62.7%、致死率が81.5%、死亡率が84.6%、上下放飼区の寄生率が72.5%、致死率が86.9%、死亡率が90.0%、上放飼区の寄生率が65.3%、致死率が74.1%、死亡率が76.6%、伐倒放飼区の寄生率が57.7%、致死率が83.2%、死亡率が85.2%であった。卵放飼では、下放飼区の寄生

率が64.5%、致死率が80.2%、死亡率が83.1%、上下放飼区の寄生率が44.0%、致死率が60.5%、死亡率が66.1%であった。いずれも対照区のそれぞれの値との間に有意差があり（ χ^2 検定, $p < 0.01$ ）、どの方法でも放飼による駆除効果の上乗せがあることがわかった。

試験区間で比較すると、成虫上下放飼区の寄生率及び死亡率最も高かった。また、上放飼区では、下放飼区よりも致死率と死亡率が若干低かったものの、寄生率は若干高かった（ χ^2 検定, $p > 0.05$ ）。高さ別の寄生率を比較すると、地上高10m以上の寄生率は上放飼区で有意に高く（ χ^2 検定, $p < 0.01$ ）成虫の場合高い位置に放飼することや数カ所に分けて放飼することで効果の向上が期待できることが示唆された。

一方、卵放飼では、下放飼区が上下放飼区よりも寄生率、致死率及び死亡率全てで高かった（ χ^2 検定, $p < 0.01$ ）。これは枝上に放飼した場合、降雨や風の影響を受けやすく放飼したホソカタムシの孵化率が低下したためではないかと推察された。しかし、卵下放飼区の寄生率は、成虫放飼区全体の寄生率とほぼ等しく、高さ別の寄生率を見ても2m以上の全ての高さで無放飼区の寄生率を上回ったことから、立木のままで卵を放飼する場合、胸高のみに放飼すれば十分駆除効果が期待できることが示唆された（表-5）。

2007年の放飼試験の結果を表-6に示す。対照（無放飼）区の寄生率は40.0%、致死率は57.9%、死亡率は66.9%であった。

放飼区全体の寄生率は51.4%、致死率は69.3%、死亡率は76.3%であった。

表-5 卵放飼区（下放飼区）と無放飼区の高さ別放飼結果

高さ (m)	寄生率		致死率		死亡率	
	卵放飼区	対照区	卵放飼区	対照区	卵放飼区	対照区
1	66.7	71.4	100.0	71.4	100.0	71.4
2	75.0	30.8	75.0	53.8	83.3	74.5
3	69.6	48.3	87.0	58.6	90.3	76.9
4	76.0	23.7	80.0	37.3	86.8	57.0
5	63.0	37.5	70.4	48.4	77.1	60.7
6	66.7	36.1	72.2	41.0	76.7	55.0
7	58.5	47.4	92.7	64.9	93.2	75.9
8	56.7	46.2	83.3	73.1	85.3	78.1
9	72.7	55.6	90.9	69.4	91.3	77.6
10	63.6	54.5	78.8	69.7	80.6	72.2
11	88.0	38.5	92.0	73.1	93.8	80.0
12	68.0	35.3	72.0	64.7	73.1	68.4
13	57.1	27.3	85.7	36.4	88.9	50.0
14	50.0	33.3	100.0	33.3	100.0	50.0

表-6 2007年放飼試験の結果

	マダラカミキリの状態							寄生率 (%)	致死率 (%)	死亡率 (%)
	生存		死亡							
	生存	脱出	被寄生	捕食虫	キツネ類	菌	原因不明			
対照区	160	119	265	83	57	39	119	40.0	57.9	66.9
立木	54	49	139	16	22	13	61	45.9	66.0	70.9
伐倒	33	36	92	49	26	16	25	49.5	62.9	75.1
集積	73	34	45	18	9	10	35	24.1	42.8	52.2
放飼区	174	284	768	272	112	57	267	51.4	69.3	76.3
立木	61	152	307	148	38	8	86	50.7	64.9	73.4
伐倒	33	68	168	44	44	15	87	47.2	71.6	78.0
集積	80	70	293	80	30	34	119	52.1	73.3	78.8

試験区別に見ると、立木放飼区の寄生率は50.7%、致死率は64.9%、死亡率は73.4%、伐倒放飼区の寄生率は47.2%、致死率は71.6%、死亡率は78.0%、集積放飼区の寄生率は52.1%、致死率は73.3%、死亡率は78.8%であった。各試験区間に有意差はなく (χ^2 検定, $p>0.05$)、少なくともこの試験で行った3種の被害木放飼前処理のいずれの方法でもほぼ同様の放飼効果を示すことが明らかとなった。このことは、実際の防除にホソカタムシを使用する際に、現地の条件に合わせて放飼前の被害木の処理方法を自由に選択できることを示すと考えられる。則ち、コスト削減を重視する場合は立木のままでの使用が最も効率的であり、景観や安全を考慮すべき場所では、伐倒したりそれを集積して使用することもできるということである。

2 人工増殖

2-1 増殖の工程

寄主1頭当たりのホソカタムシ孵化幼虫の接種頭数を変えた増殖試験の結果を表-7に示す。10頭接種の方が羽化時の平均体重32.3mg (最大54.0mg, 最小8.5mg)であったのに対し、30頭接種の方は27.3mg (最大49.0mg, 最小6.5mg)であった (t -検定, $p<0.01$)。しかし寄主1頭当たりの羽化数は、10頭接種の場合が2.4頭/1寄主に対し、30頭接種は6.7頭/1寄主となり、30頭接種区では2.8倍の成虫数が得られることがわかった。羽化

表-7 ホソカタムシ孵化幼虫の接種頭数を変えた増殖試験結果

	10頭接種区	30頭接種区
接種頭数/1寄主 (頭)	10	30
供試寄主数 (頭)	90	90
寄主平均体重 (mg)	512.3	491.1
寄生幼虫数 (頭)	461	1295
寄生率(対接種数) (%)	51.2	48.0
成熟幼虫数 (頭)	261	725
寄生率(対接種数) (%)	29.0	26.9
営繭数 (頭)	236	661
寄生率(対接種数) (%)	26.2	24.5
羽化数 (頭)	214	600
羽化率(対接種数) (%)	23.78	22.22
羽化時の平均体重 (mg)	32.3	27.3
最大 (mg)	54.0	49.0
最小 (mg)	8.5	6.5
羽化成虫の総体重 (mg)	6918.1	16400.8
羽化数/寄主1頭 (mg)	2.4	6.7
羽化数/寄主1g (mg)	4.6	13.6
羽化総体重/寄主1頭 (mg)	76.9	182.2
羽化総体重/寄主1g (mg)	150.0	371.1

時の平均体重と翌春の産卵数の関係を図-4に示す。このグラフに前述の両試験区の平均体重を当てはめて、推定産卵数を比較すると、10頭接種区の方が30頭接種区の約1.2倍の産卵数となった。則ち、30頭接種の場合は、羽化した成虫の翌春の産卵数が10頭接種区に比べて若干少ないものの、それを補うに十分な羽化数が得られていることから、増殖の効率としては高いと言えることがわかった。

人工飼料上に移動させる被寄生寄主の数を変えた試験結果を表-8に示す。1頭区の羽化時の平均体重が27.3mg (最大49.0mg, 最小6.5mg)であったのに対し、10頭区では23.6mg (最大44.3mg, 最小8.7mg)であった。寄主1頭当たりの羽化数は、1頭区の場合が6.7頭、10頭区の場合が7.8頭となり、10頭ずつの移動させる方が約1.2倍の成虫数が得られることがわかった。

被寄生寄主を1頭ずつ人工飼料上に移動すると、寄主から離脱したホソカタムシは寄主に戻ることはほとんどなく、人工飼料上で成長して、老熟する。一方、複数の被寄生寄主を人工飼料上に並べた場合、ホソカタムシの幼虫は始めに寄生した寄主から離脱しても、別の被寄生寄主を摂食する機会があるため、成長に係る寄主への依

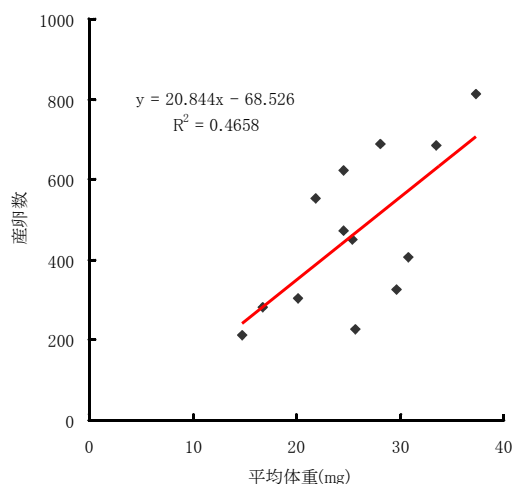


図-4 羽化時の平均体重と羽化翌春(初産日~5/15)の産卵数の関係。産卵数は、性比を1:1と仮定し、雌雄一対換算としたもの。

表-8 人工飼料に載せる被寄生寄主頭数を変えた増殖試験結果

	1頭ずつ	10頭ずつ
接種頭数/1寄主 (頭)	30	30
供試寄主数 (頭)	90	60
寄主平均体重 (mg)	491.1	463.6
寄生幼虫数 (頭)	1295	988
寄生率(対接種数) (%)	48.0	54.9
成熟幼虫数 (頭)	725	533
寄生率(対接種数) (%)	26.9	29.6
営繭数 (頭)	661	485
寄生率(対接種数) (%)	24.5	26.9
羽化数 (頭)	600	468
羽化率(対接種数) (%)	22.2	26.0
羽化時の平均体重 (mg)	27.3	23.6
最大 (mg)	49.0	44.3
最小 (mg)	6.5	8.7
羽化数/寄主1頭 (mg)	6.7	7.8
羽化数/寄主1g (mg)	13.6	16.8
羽化総体重/寄主1頭 (mg)	182.2	183.3
羽化総体重/寄主1g (mg)	371.1	395.4
羽化翌春の産卵数 (個)	358.5	659.1

存度が相対的に高まるといえる。このことが翌春の産卵数に与える影響を調べるために、それぞれの試験区で羽化したホソカタムシ成虫の翌春の産卵数を比較した。その結果、10頭区では659.1卵/対で、1頭区の358.5卵/対の約1.8倍となり、羽化成虫全体の産卵数で評価した場合、羽化数、産卵数共に多い10頭区が圧倒的に効率的であることが示唆された。また、作業時間当たりの羽化数を比較した場合、1頭ずつの試験区が20.1頭/hであったのに対し、10頭区で36.3頭/hとなり、作業効率の点でも10頭ずつ移動させた方が有効であることが明らかとなった。

ホソカタムシの発育ステージごとに容器を変える試験では、人工飼料上に移動させた老熟幼虫数に対する羽化率及び単位時間当たりの羽化数（以下作業効率という）を比較した（表-9）。羽化率は（ニ）の試験区が最も高く95.5%、次いで（ロ）の92.2%、（ハ）の79.5%、（イ）の67.2%の順となった。作業効率を比較すると、（イ）の35.7頭/hが最も多く、（ロ）の32.1頭/h、（ニ）の31.9頭/h、（ハ）の28.1頭/hの順となった。（イ）の試験区は人工飼料を容れたシャーレの中で羽化までさせるため作業時間が最も短く、作業効率としては高いことがわかったが、羽化率が低いということは相対的に資材コストが高くなることを表している。（ロ）及び（ニ）の方法は、営繭後に容器内の湿度を高めるか否かの違いだけであるが、この二つの方法については羽化

表-9 増殖工程別の増殖効率

	試験区			
	イ	ロ	ハ	ニ
人工飼料	*	*	*	*
容器 営繭	*	**	*	**
羽化	*	**	**	***
老熟幼虫数	186	167	156	178
羽化数	125	154	124	170
羽化率 (%)	67.2	92.2	79.5	95.5
総作業時間 (m)	210	288	265	320
作業効率(頭/h)	35.7	32.1	28.1	31.9

但し、各試験区の容器欄の同じマークは同一の容器を表す。作業効率は、作業時間1時間当たりの羽化数を表す。

率、作業効率共に大きな差はなかった。これらのことから、（ロ）の方法が最も効率的な方法であると考えられた。

これらの試験結果から、最も効率的な増殖工程の組み合わせを以下に示す。寄主に体重500mg程度のマダラカミキリ幼虫を使用する場合、まず1頭の寄主に30頭のホソカタムシ孵化幼虫を寄生させる。次に被寄生寄主を10頭ずつ人工飼料を敷いた別の容器に移し、数日発育させる。さらに発育した老熟幼虫を濾紙等を敷いた別の容器に移して営繭、羽化させる。ただし、この方法は、本研究で検討した条件のみを組み合わせたものである。増殖にかかるコストとして最も多くを占めると考えられるのは人件費であり、今後さらに簡易な工程を検討し、増殖コストを削減する必要があると考えられる。

2-2 幼虫用人工飼料

飼料A、Bを用いた増殖試験の結果を表-10に示す。

人工飼料上に移動させた幼虫数に対する羽化率を比較すると、飼料A区は42.3%であったのに対し、飼料B区は51.4%と高かった（ χ^2 検定、 $p < 0.01$ ）。その結果、寄主1頭当たりの羽化数も飼料A区の5.0頭に対し、飼料B区は5.7頭とやや多かった。一方、羽化時の平均体重は飼料A区の27.9mg（最大54.0mg、最小9.1mg）に対し、飼料B区では25.8mg（最大51.1mg、最小6.5mg）と、栄養価が高いものとして設定した飼料Bの方が低い結果となった。それぞれの試験区で羽化した成虫の翌年初産から5月15日までの産卵数を比較すると、飼料A区が446.1卵/対、飼料B区551.5卵/対であった。それぞれの飼料でホソカタムシ1頭の成虫を得るために必要な飼料原価は、飼料Aで0.08円、飼料Bで0.57円となった。

物理性を検討する増殖試験では、寒天を入れなかった液状の飼料（以下液状餌Aという）を用いた場合の羽化率が45.6%、寒天を入れた飼料（以下ゲル状餌Aという）を用いた場合の羽化率が25.2%となり、液状餌Aの方が高かった（表-11）。羽化時の平均体重でも液状餌A区の26.4mg（最大52.4mg、最小8.6mg）に対し、ゲル状餌A区では23.2mg（最大49.9mg、最小6.4mg）と小さい傾向が認められた。試験中の観察による印象では、ゲル状餌A区では人工飼料上での成長がやや悪く、小さい体サイズのまま営繭してしまうものが多かった。また、ホソカタムシの幼虫同士の共食も多いように見受けられた。このことから、ホソカタムシの幼虫にとってゲル状の飼料よりも液状の飼料の方が接種しやすいのではないかと推察された。

本研究では、物理性の検討を飼料Aのみで行い、液状の飼料の方が増殖効率が高いことが示唆された。飼料Bは寒天を含んだ飼料であり、同じ組成で寒天を添加しない液状飼料Bを増殖に使用すれば増殖効率も翌春の産卵

表-10 飼料別の増殖結果

	飼料A	飼料B
寄生幼虫数	1425	1319
羽化数	603	678
羽化率(%)	42.3	51.4
平均体重(mg)	27.9	25.8
最大(mg)	54.0	51.1
最小(mg)	9.1	6.5
羽化数/寄主1頭	5.0	5.7
羽化数/寄主1g	10.3	11.4
羽化翌春の産卵数	446.1	551.5

表-11 物理性を変えた飼料による増殖結果

	寒天なし	寒天あり
寄生幼虫数	562	620
羽化数	256	156
羽化率(%)	45.6	25.2
平均体重(mg)	26.4	23.2
最大(mg)	52.4	49.9
最小(mg)	8.6	6.4
羽化数/寄主1頭	4.8	3.7
羽化数/寄主1g	10.1	7.8

数(羽化した成虫の質)も向上させられる可能性がある。但し、飼料Bは、原料の25%(重量比)を占める鶏生肝臓がペースト状であるため完全な液状にするには多少の工夫が必要となる。また、原材料費が飼料Aの約7.7倍であり、製造にも手間がかかるため、両者の利点を折衷した新たな液状飼料の開発が今後の課題であると考えられる。

3 環境影響評価

果実加害試験に供した全ての果実において、摂食痕や吸汁痕といった加害の形跡は認められなかった。また、果実表面や皮下に産卵した形跡も認められなかった。

果樹加害試験においても、全ての供試木の網袋内で正常に開花及び結実が認められ、完熟に至るまで果実表面への加害等はなかった。

本種が積極的に植物体を採餌することは考えられないことは前に述べたが、農業生産の場合商品価値を著しく低下させる生産物への傷付けなども虫害の一形態として無視できない。試験を行った時期のホソカタムシは、多くの水分を要求することがわかっており、水分補給のための緊急避難的な加害の可能性も検討した。本研究では、水分と餌を与えないという、ホソカタムシにとって非常に厳しい条件で飼育実験を行ったにもかかわらず、水分の多い果実での吸汁も認められず、ホソカタムシが農作物を加害する可能性は極めて低いことが証明された。

石井ら(2004)は本種のカブトムシ幼虫に対する寄生試験を行い、寄生が認められなかったことを明らかにした。また、マダラカミキリの天敵であるオオコクヌストへの寄生がないことも報告している(石井 2003)。本研究でも、放飼試験に伴う剥皮・割材調査に際して、放飼区と無放飼区でホソカタムシ以外のマダラカミキリの天敵の出現状況を調べたところ、オオコクヌストや寄生

蜂、コメツキムシ類等、主要な天敵に対する寄生例は認められず、これらの天敵昆虫の出現頻度にも明確な差はなかった。さらに、枯れマツには主要なものだけでも数種類のカミキリムシが穿入しているが、ホソカタムシの寄生の大部分がマダラカミキリに集中していた。このことから、カミキリムシ類の中でも嗜好性に差があり、マダラカミキリを特に好んで寄生することが示唆された。これらのことから、マツ林に本種を放飼しても周辺農地の農作物や昆虫相などに大きな影響を及ぼすことはほとんどないと考えられた。

IV おわりに

本研究では、実際の松くい虫被害林分でホソカタムシの放飼試験を行い、単木的には高い駆除効果が得られるようになった。今後は、アカマツ林における松くい虫被害の拡大を防ぎ、収束に導くために必要な具体的な使用条件を決定していく必要がある。前述のとおり、吉田(2002)は、ある程度被害率の低いマツ林で、被害率の経年変化を横ばいか或いは減少傾向に導くためには、当該マツ林で被害マツに穿入したマダラカミキリの少なくとも93%以上を駆除する必要があると試算した。従って、単体で使用できる松くい虫防除資材としては、マダラカミキリの生残率を少なくとも平均で7%未満に抑えられるものでなければならない。ホソカタムシの放飼によるマダラカミキリの生残率は、単木的には0%の場合もあり、成虫を上下2箇所放飼した試験区では平均10%となった。しかし、卵放飼の結果も含めた駆除効果は、現在のところ生残率20~30%程度が平均的な成績であり、現時点で即座に防除資材とするにはやや不足であると考えられる。また、実用化の際には、製剤化が容易でよりコストが抑えられる卵の利用が現実的であると考えられるため、今後は卵を活用した放飼技術をさらに改良していく必要がある。また、ホソカタムシ単独で防除資材とするのが困難と考えられる場合でも、他の天敵や既存の防除技術と組み合わせることで、ホソカタムシの有効な活用を図ろうとする考えもある(浦野ら 2007)。これらの考えに基づいて実証的な試験を重ね、防除の低コスト化や効率化を図れるか否か、総合的に検討していくこともホソカタムシを活用する上で今後の重要な課題となる。

ホソカタムシは広く岡山県下のマツ林に棲息が確認されている甲虫であり、農薬取締法第2条第1項に規定される特定農薬に該当するため、採取したホソカタムシを岡山県内で使用する場合にあっては農薬登録を要しない。しかし、人工的に大量増殖し、事業的に使用しようとする場合は農薬登録が必要である。実用化のためには大量増殖は不可欠であることから、農薬登録に向けた取り組みも今後の課題である。

松くい虫被害防除にホソカタムシを活用することは、薬剤使用の不適地や従来の防除作業が困難な地域での防除を可能にするだけでなく、被害木を立木のまま、或いは伐倒だけして卵塊を設置する、といった軽作業で高い防除効果が得られることが最大の利点であるといえる。本県のマツ林における松くい虫被害の抑止に役立てるために、この技術を早期に確立し、活用体制を整える必要がある。

本研究に当たって、森林総合研究所関西支所の浦野忠久主任研究員から、ホソカタムシの増殖技術を細やかに御指導いただいた。また、浦野氏には笠岡市の放飼試験地で共に放飼試験を行い、本研究の遂行、解析等に一方ならぬ御指導と御協力を賜ったことを、末筆ながら深く感謝申し上げます。

参考文献

- 井上悦甫 (1993) マツノマダラカミキリの天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシについて. 森林防疫42: 171-175.
- 石井哲 (2003) マツ林の保全に関する総合研究—マツノマダラカミキリの天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの活用—. 岡山県林試研報19: 17-33.
- 石井哲, 守安昇平, 安東義朗, 中村学, 金田利之, 西澤絵奈 (2004) サビマダラオオホソカタムシ成虫及び卵のアカマツ野外枯死木への放飼試験. 岡山県林試研報20:19-31.
- 石井哲 (2004) マツノマダラカミキリ穿入丸太上でのサビマダラオオホソカタムシ放飼成虫の分散と寄生率. 森林応用研究13(1):43-48.
- 小倉信夫 (2000) 中国寧夏でのツヤハダゴマダラカミキリとサビマダラオオホソカタムシの飼育.
- 小倉信夫 (2001) 天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの産卵前期間. 日林関東支論53: 165-166.
- 岡本安順 (1999) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシの寄生状況と生態調査. 森林応用研究8:229-232.
- 竹常明仁 (1982) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシ. 森林防疫31: 228-230.
- 浦野忠久・中村克典・牧本卓史 (2007) サビマダラオオホソカタムシのマツノマダラカミキリ生物的防除への利用における展望. 森林防疫56: 224-232.
- 吉田成章・中村克典・埴田宏 (1997) 実用化された防除手法の評価とマツを取り巻く環境等の検証. 松くい虫(マツ材線虫病) —沿革と最近の研究—, pp. 95-121, 全国森林病虫獣害防除協会編.
- 吉田成章 (2002) 松くい虫被害の総合的防除法の確立. 松くい虫被害の生物的防除による総合的研究調査, pp. 45-53, (独)森林総合研究所編・発行.

吉田成章 (2006) 研究者が取り組んだマツ枯れ防除—マツ材線虫病防除戦略の提案とその適用事例—. 日林誌88:422-428.