上面および全面被覆式による伐倒くん蒸処理での MITC 濃度の経過と マツノマダラカミキリ幼虫の殺虫効果

江崎功二郎^{*・1}・川口エリ子²・中村 克典³・前原 紀敏⁴・相川 拓也³
小澤 壮太³・米森 正悟²

マツノマダラカミキリを駆除するための伐倒駆除では、上面被覆式が広く普及している一方で、全面被覆式を採用している地域もある。本研究では、被覆方式の違いによるくん蒸処理の効果を評価するために、土壌条件が異なる 4 試験地を設置し、被覆内の MITC 濃度を測定するとともに、割材調査によって本種幼虫の死亡率を調査した。その結果、くん蒸剤投入後の MITC 濃度の時間変化は試験地や被覆方式の違いに関係なく、投入 2 時間後または 1 日後にピークに達し、15 日後にかけて徐々に減少した。また、本種幼虫の死亡率は、試験地や被覆方式に因らず高い水準を示した。ごく少数ながら材内で生存した幼虫は、坑道に木くずが詰められた蛹室内で発見され、それらの蛹室は相対的に他のものに比べて深い位置に作られていた。これらの結果から、全面および上面被覆式のどちらも十分な駆除効果があることが確認された。

キーワード：被覆、くん蒸処理、マツノマダラカミキリ、MITC 濃度、殺虫効果

Kojiro Esaki,^{*・1} Eriko Kawaguchi,² Katsunori Nakamura,³ Noritoshi Maehara,⁴ Takuya Aikawa,³ Sota Ozawa,³ Shogo Yonemori² (2021) Temporal Changes in the MITC Gas Concentration and Mortality of the Pine Sawyer Beetle (*Monochamus alternatus*) Following Fumigation Treatment of Pine Logs Using the Top Covering and Complete Wrapping Methods. J Jpn For Soc 103: 186–191 In the eradication of the pine sawyer beetle (*Monochamus alternatus*), two types of covering methods are used for the fumigation of infested pine logs: the top covering method, which is widely used in Japan; and the complete wrapping method, which has been adopted in limited areas. To elucidate the effectiveness of the two covering methods, we measured the temporal changes in the MITC gas concentration in the coverings and evaluated the mortality of the insect larvae in the treated logs at four study sites with different soil conditions. The MITC gas concentrations peaked from 2 h to 1 day following the initiation of treatment and gradually declined toward 15th day when we terminated the census, regardless of the covering method and/or study site. High levels of larval mortality were recorded in all of the treated logs. A few larvae were found to be alive in pupal chambers plugged with tightly stuffed wood fibers in the galleries. Such chambers were formed at relatively deep positions from the wood surface. From these results, we concluded that both fumigation methods have equivalent effectiveness for eradicating the pine sawyer beetle.

Key words: covering methods, fumigation treatment, methyl isothiocyanate gas concentration, *Monochamus alternatus*, larval mortality

I. は じ め に

マツノマダラカミキリ *Monochamus alternatus* (以下、本種) は、マツ材線虫病の病原体であるマツノサイセンチュウ *Bursaphelenchus xylophilus* (以下、サイセンチュウ) の主要なベクターである (Mamiya and Enda 1972; 森本・岩崎 1972)。材線虫病の防除では、主要なベクターである本種を駆除するための手法として伐倒駆除があり、くん蒸処理が全国の被害地で実施されている (例えば、吉田ら 1997; 吉田 2006; Kamata 2008; 中村 2019)。伐倒くん蒸処理は伐倒・玉切りした被害材をポリエチレンのシートなどで被覆し、ガス化する殺虫剤 (くん蒸剤) を投入して、被害材内に生息する本種幼虫を死滅させる方法である。くん蒸処理では被覆シートで一定期間、被害材を密閉する必要があり、シートの剥がれや破損があった場合には駆除

効果が低下する (井ノ上ら 1989; 齊藤ら 2001)。

伐倒くん蒸処理では、被害材の集積後に上面からシートで被覆し、シートの裾を土中に埋設する施工法が広く普及している (田畑ら 1997)。この方式を上面被覆式 (以下、上面式) とする。底面をシートで覆わない上面式では、投入したくん蒸剤が部分的に土壌に浸透・逸出してしまうことで駆除効果が低下するという問題点が提起されてきた。これに対して、あらかじめシートを地面に広げてその上に被害材を集積し、シートの裾を持ち上げて被害材の全面を包み込む全面被覆式 (以下、全面式) が一部の地域で採用されている。

本種幼虫の駆除を目的としたくん蒸剤には、カーバムアンモニウム剤およびカーバムナトリウム塩剤の 2 種類が農薬登録されている (田代 2006; 農林水産消費安全技術センター 2020)。これらのくん蒸剤は被覆シート内で速やか

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: esaki@pref.ishikawa.lg.jp <https://orcid.org/0000-0003-2595-046X>

¹ 石川県農林総合研究センター林業試験場 〒920-2114 石川県白山市三宮町ホ 1 (Ishikawa Agriculture and Forestry Research Center, Forestry Experiment Station, 1 Ho, Sannomiya, Hakusan, Ishikawa 920-2114, Japan)

² 鹿児島県森林技術総合センター 〒899-5302 鹿児島県姶良市蒲生町上久徳 182-1 (Kagoshima Prefectural Forestry Technology Center, 182-1 Kamigyutoku, Kamou Aira, Kagoshima 899-5302, Japan)

³ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25 (Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0123, Japan)

⁴ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan) (2020 年 12 月 28 日受付; 2021 年 3 月 11 日受理)

©2021 一般社団法人日本森林学会: この著作はクリエイティブ・コモンズのライセンス CC BY-NC-ND (引用を表示し、改変せず、非営利目的に限定) の条件の元で再配布・二次利用が可能なオープンアクセスです。 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>

に酸化分解し、メチルイソチオシアネート（以下、MITC）ガスとなって材内部に浸透し、殺虫効果を発揮する（斉藤ら 2001；川上ら 2012）。したがって、被覆シート内の MITC 濃度は殺虫効果、あるいは被覆の破損や薬剤の土壌への逸失等があった場合の殺虫率の変動などを考える上で必須の情報である。しかし、伐倒くん蒸処理における薬剤投入後の MITC 濃度については、斉藤ら（2001；2002）による投入数時間後の MITC 濃度の報告があるのみで、くん蒸処理期間を通じての MITC 濃度の挙動や異なる気象、土壌条件下での変動については十分に明らかにされていない。

本研究では、上面式と全面式という被覆方式の違いがくん蒸処理の效果に及ぼす影響を明らかにするために、石川県および鹿児島県において土壌条件が異なる試験地を設置し、これら2種類の被覆方式によって試験丸太のくん蒸処理を実施した。そして、処理期間を通じた MITC 濃度を測定するとともに、試験丸太の割材調査によって本種幼虫の死亡率を調査し、被覆方式の違いが殺虫率に与える影響を明らかにした。さらに、くん蒸処理後に生存した幼虫について、その生息場所の特徴を検討した。

II. 材料と方法

1. 試験丸太

2019年7月に、石川県輪島市および小松市の健全なアカマツを伐採し、幹を長さ1mに玉切って石川県農林総合研究センター林業試験場へ運んだ。また、同年6月から7月に、鹿児島県始良市の鹿児島県森林技術総合センター構内の健全なクロマツを伐採し、1mに玉切りした。石川県、鹿児島県のそれぞれで、中央径5~25cmの丸太60本を選び、大きい順に20本ずつ、大中小の3階級（石川県：大、中央径15~20cm；中、10~15cm；小、5~10cm；鹿児島県：大、12~25cm；中、8~12cm；小、5~8cm）に区分し試験丸太とした。伐採から1週間以上経過した試験丸太を野外網室に収容し、脱出後、3週間以上個体飼育して性成熟させた本種成虫を順次放虫して、2~4カ月の間、産卵に曝した。石川県のメスおよびオスの供試虫数はそれ

ぞれ257および90個体で、鹿児島県はそれぞれ153および125個体であった。産卵期間中、網室にはアカマツまたはクロマツの新鮮な枝条を置いて本種の後食餌とした。また、試験丸太は適宜回転させて、丸太表面が一様に産卵されるようにした。

2. くん蒸処理

石川県の試験地は、加賀市片野町の海岸マツ林（以下、加賀試験地）および羽咋郡志賀町火打谷の緑化センタークロマツ採種園（以下、志賀試験地）に設置した。加賀試験地は海岸砂丘上の水はけが良い砂地で腐食層はなく、志賀試験地は褐色森林土が分布する日当たりが良く、部分的に降雨後の滞水がみられる場所であった。各試験地において、全面式および上面式で被覆した各5集積山を交互に2m以上の間隔を置いて設置した。全面式では透明ポリエチレンシート（0.1mm厚、3.6×4.0m）を地面に広げ、その中央に約0.5m³の玉切り丸太を四角推台型に集積し、シートの裾を持ち上げて上面をホチキスで留めた後、側面をヒモで縛って密閉した（図-1左）。上面式では地面に直接丸太を集積してシートをかぶせ、集積山の底面に沿って地面に溝（約20cm深、約10cm幅）を掘って、シートの裾を押し入れた後、径10cm程度の坑木で固定して、土を埋め戻し踏み固めた（図-1右）。1集積山当たり大、中、小各1本の試験丸太をはい積みの中心部に配置した。試験丸太以外の集積材にはアカマツまたはクロマツの当年枯死木やそれ以前に伐採され林内に放置されていた古い丸太を用いた。志賀試験地では2019年11月1日、加賀試験地では11月6日に、被覆内容積1m³当たり500mLのカーバムアンモニウム剤（液剤）（商品名：ヤシマNCS）を投入し、21日間密閉を維持してくん蒸期間とした。なお、被覆内容積は集積山の体積を四角推台近似し算出した値を用いた。被覆後、シートにたるみがないように点検し、破損個所は布テープなどで補修を行った。

鹿児島県の試験地は、鹿児島市桜島横山町のクロマツ疎林（以下、桜島試験地）および始良市蒲生町の鹿児島県森林技術総合センター苗畑（以下、始良試験地）に設置した。桜島試験地は火山放出物が堆積する水はけが良い未熟土で

図-1. 加賀試験地における全面被覆式（左）および上面被覆式（右）による伐倒くん蒸処理

腐食層はなく、始良試験地は褐色森林土由来の客土により造成され、部分的に降雨後の滞水がみられる場所であった。これらの試験地において、石川県の各試験地と同様にして材の設置、被覆を行った。被覆シートには、茶色の生分解シート（商品名：ビオフィレックス、0.075 mm 厚；4.0×4.5 m）を使用した。桜島試験地では2019年11月19日、始良試験地では11月26日に、被覆内容積1 m³当たり750 mLのカーバムナトリウム塩剤（液剤）（商品名：キルパー40）を投入し、15日間のくん蒸期間を設けた。被覆内容積の算出は石川県と同様に行った。

それぞれの試験地において各くん蒸期間、試験丸太3本（大、中、小）を被覆せず直接地面に横に並べて配置し、無処理での死亡率を調査した。

3. 被覆内温度

各試験地において、くん蒸処理期間の外気温および被覆内温度を温度センサー一体型データロガー（商品名：サーモクロンGタイプ）を用いて測定した。被覆内温度は、全面式と上面式の全ての集積山の中心付近にこのデータロガーを1個設置し、くん蒸剤投入直後から15日後まで自動計測した。外気温は各試験地の周囲に生育する樹木に日よけとともにデータロガー1個を設置し（地上高約1 m）、被覆内温度と同様に計測した。外気温と被覆内温度を比較するために、くん蒸翌日から14日間にわたる1時間ごとのデータによって、集積山ごとの平均値を求めた。

4. ガス濃度

被覆内のMITC濃度の経過を調査するため、北川式ガス採取器にMITC検知管（商品名：245UM）を装着し、全ての集積山について薬剤投入2時間、1日、3日、7日および15日後の5回、MITC濃度の計測を行った。集積山の側面から検知管の先端を被覆シート内に貫通させて試験丸太付近の気体を採取し、検知管の仕様にしたがって測定を行った。MITC濃度は測定時の被覆内温度値に基づいて補正し、濃度値を確定した。

各試験地における被覆方式間のMITC濃度の差をMann-WhitneyのU検定により比較した。被覆内温度とMITC濃度の関係を明らかにするために、カーバムアンモニウム剤を施用した志賀および加賀試験地（以下、志賀・加賀試験地）とカーバムナトリウム塩剤を施用した桜島および始良試験地（以下、桜島・始良試験地）のそれぞれについて、投入後2時間の集積山ごとの被覆内温度とMITC濃度値をプロットし、線形回帰を行った。また、投入後2時間～1日の間での集積山ごとの濃度変化の特性を解析するため、志賀・加賀試験地と桜島・始良試験地のそれぞれについて、MITC濃度の平均値をt検定により比較し、さらに集積山ごとの薬剤投入2時間後の濃度値と、2時間後と1日後の濃度値の差をプロットし、線形回帰を行った。

5. 幼虫の生死

くん蒸期間終了後、割材調査までに試験丸太の粗皮を剥皮して、樹皮下幼虫の生死を調査した。不動で、体色が黒化および軟化した個体を死亡個体と判定した。

剥皮調査後、試験丸太表面に出現した本種幼虫の穿入孔を油性ペンなどでマークし、割材調査を行った。加賀およ

び志賀試験地の割材調査は2019年12月3日～6日、桜島および始良試験地は12月17日～19日に実施した。割材調査によって出現した幼虫は、木くずが詰められていない穿入坑道から出現した幼虫と穿入坑道に木くずが詰められていた蛹室内から出現した幼虫に区分し、それぞれ坑道幼虫、蛹室幼虫とした。幼虫の切断などによって生死を確認できなかった個体は調査頭数から除いた。無処理の試験丸太を除いた蛹室幼虫については、岸ら（1982）および江崎（1993）を参考に、蛹室の深さと坑道長を測定した。すなわち、蛹室の深さは材表面から蛹室までの最短距離であり、坑道長は蛹室を含む坑道の繊維方向の距離とした。幼虫の生死の確認は材から取り出した直後に外見を観察するのみでは困難であったため、20～25℃で24時間以上維持した後、体色が黒化した個体および冷水に浸水して刺激を与えて反応しなかったものを死亡個体と判定した。

III. 結 果

1. MITC 濃度の時間変化

各試験地においてMITC濃度を測定した期間の平均外気温は9.2～14.6℃であり、被覆内の平均気温はそれより0.2～5.9℃の範囲で高くなった（表-1）。4試験地の集積山ごとのMITC濃度は、被覆方式にかかわらず投入2時間後または1日後に最高値に達し、15日後にかけて徐々に減少した（図-2、J-STAGE電子付録付表-1および2）。

カーバムアンモニウム剤によってくん蒸処理した志賀試験地の全面式および上面式の投入2時間後の平均MITC濃度（平均値±標準偏差）は、それぞれ4.6±0.8 g/m³および3.7±0.6 g/m³であった（図-2、J-STAGE電子付録付表-1）。この後、これらは時間の経過とともに低下し、15日後にはそれぞれ0.7 g/m³未満に低下した。2時間後から15日後まで、両者に有意な差は認められなかった（ $p>0.05$, U検定）。一方、加賀試験地の全面式および上面式の薬剤投入2時間後のMITC濃度は、それぞれ3.2±0.6 g/m³および2.3±0.3 g/m³であり、両者に差が認められた（ $p=0.016$, U検定）（図-2、J-STAGE電子付録付表-1）。しかし、1日後の濃度はそれぞれ2.8±0.6 g/m³および2.8±0.7 g/m³

表-1. 外気温と被覆内温度との差

試験地	測定場所	平均値（℃）*	外気温との差（℃）
志賀試験地	外気温	10.3	—
	被覆内温度	全面被覆式	11.9～16.2
		上面被覆式	11.1～14.8
加賀試験地	外気温	12.5	—
	被覆内温度	全面被覆式	13.8～15.8
		上面被覆式	12.7～15.8
桜島試験地	外気温	14.6	—
	被覆内温度	全面被覆式	15.0～17.8
		上面被覆式	15.0～17.6
始良試験地	外気温	9.2	—
	被覆内温度	全面被覆式	9.7～11.4
		上面被覆式	10.2～12.5

*志賀試験地は2019年11月7日～11月20日、加賀試験地は11月2日～11月15日、桜島試験地は11月20日～12月3日、および始良試験地は11月27日～12月10日のくん蒸翌日から14日間にわたる1時間ごとの測定値に基づいて、集積山ごとの平均値を算出した。

と両者に差がなくなり ($p=0.548$, U 検定), 時間の経過にともない 15 日後までにはそれぞれ 0.8 g/m^3 未満に低下した。7 日後の濃度では上面式が全面式より高くなった ($p=0.032$, U 検定)。

カーバムナトリウム塩剤によってくん蒸処理した桜島試験地の全面式および上面式の投入 2 時間後の平均 MITC 濃度は、それぞれ $2.9 \pm 1.3 \text{ g/m}^3$ および $2.7 \pm 1.6 \text{ g/m}^3$ であった (図-2, J-STAGE 電子付録付表-2)。この後、これらは時間の経過にともない低下し、15 日後にはそれぞれ 0.3 g/m^3 未満に低下した。この試験地における 3 日後および 7 日後における上面式の濃度は全面式より有意に高くなった (どちらも $p=0.008$, U 検定) (図-2, J-STAGE 電子付録付表-2)。15 日後の測定時には、両被覆方式の全ての集積山で被覆シートの一部にカラスによると思われる破損が確認された (J-STAGE 電子付録付表-2)。一方、始良試験地の全面式および上面式の薬剤投入 2 時間後の MITC 濃度は、それぞれ $1.6 \pm 0.6 \text{ g/m}^3$ および $2.4 \pm 1.3 \text{ g/m}^3$ で、その後時間の経過にともない低下し、15 日後にはそれぞれ 0.4 g/m^3 未満にまで低下した (図-2, J-STAGE 電子付録付表-2)。この試験地では一貫して上面式の濃度が全面式を上回り、1 日後、3 日後および 7 日後にはその差は有意であった (それぞれ $p=0.008$, $p=0.008$, $p=0.024$, U 検定)。

志賀・加賀試験地および桜島・始良試験地のそれぞれにおいて、投入 2 時間後の被覆内温度が高いと MITC 濃度も

高くなる関係が認められた (線形回帰, 志賀・加賀試験地: $n=20$, $y=0.28x-2.06$, $r^2=0.74$, $p<0.001$; 桜島・始良試験地: $n=20$, $y=0.25x-2.13$, $r^2=0.40$, $p<0.01$)。MITC 濃度の平均値はいずれの調査地でも投入 2 時間後と 1 日後で有意な差を示さなかったが (t 検定, 志賀・加賀試験地: $p=0.061$; 桜島・始良試験地: $p=0.613$), 投入 2 時間後に相対的に高い濃度を示した集積山では 1 日後に大きく減少し、低い濃度を示した集積山では 1 日後に増加する傾向を示した (線形回帰, 志賀・加賀試験地: $n=20$, $y=-0.65x+1.85$, $r^2=0.64$, $p<0.001$; 桜島・始良試験地: $n=20$, $y=-0.68x+1.53$, $r^2=0.75$, $p<0.001$) (図-3)。

2. 死亡率

くん蒸後に試験丸太で確認された本種幼虫の死亡率は、全ての試験地、被覆方式を通じて非常に高く、樹皮下幼虫と坑道幼虫では 100% であった。ただし、蛹室幼虫では少数の生存個体が確認され、それらは志賀試験地の上面式、加賀試験地の上面式、始良試験地の全面式と上面式に各 1 頭であった (表-2, 3, J-STAGE 電子付録付表-3, 4)。この結果、これら四つの「試験地-被覆方式」における本種死亡率は、それぞれ 99.4, 99.4, 99.3, 99.3% となった。一方、無処理の試験丸太において樹皮下および蛹室での死亡幼虫は出現しなかったが、坑道の一部で死亡幼虫が出現した。

割材調査で確認された 4 頭の生存幼虫のうち、志賀試験地の上面式、始良試験地の全面式および上面式において幼虫が出現した位置は、それぞれ深さ 34, 37 mm および 35 mm であった。これらの蛹室は相対的に深い位置にプ

図-2. 2 種類の被覆方式における MITC 濃度の時間変化

志賀および加賀試験地では被覆内容積 1 m^3 当たり 500 mL のカーバムアンモニウム剤を、桜島および始良試験地では 750 mL のカーバムナトリウム塩剤を投入した。 $*p<0.05$, $**p<0.01$ (U 検定)。

図-3. くん蒸剤投入 2 時間後と 1 日後の MITC 濃度の関係

志賀および加賀試験地では被覆内容積 1 m^3 当たり 500 mL のカーバムアンモニウム剤を、桜島および始良試験地では 750 mL のカーバムナトリウム塩剤を投入した。

図-4. マツノマダラカミキリ生存幼虫が生息した蛹室の特徴

○, 生存個体; ●, 死亡個体。蛹室の深さは、材表面から蛹室までの最短距離を示す。

ロットされたが、これより深い位置の蛹室で死亡した個体も少数ながら存在した（図-4）。加賀試験地の上面式から出現した個体は当初死亡個体に区分されていたため、出現した丸太や蛹室の位置の記録がなく（J-STAGE 電子付録付表-3）、解析に含めることができなかった。

IV. 考 察

本種の駆除を目的としたカーバムアンモニウム剤やカーバムナトリウム塩剤を使ったマツ材線虫病被害材の伐倒くん蒸処理が30年以上の間、全国の被害地域で実施されてきた（例えば、吉田ら、1997）。この処理では被害材に生息する本種個体に対して100%の高い殺虫率が期待されている（Kamata 2008；中村 2019）が、くん蒸剤の投入量不足（井ノ上 1989；川上ら 2012）、および上面式における不完全な埋設やカラスなどによるシートの破損（斉藤ら 2001）を原因とした MITC 濃度の低下により殺虫率が低下することが知られている。さらに、上面式では底面がシートで被覆されていないため、投入したくん蒸剤が土壌に浸透・逸失し、MITC 濃度や殺虫率の低下をもたらすことも懸念されてきた。

くん蒸剤は温度が高いほど MITC ガス化が速やかに進行する（市原ら 2016）が、被覆内容物への吸着などにより、その濃度は投入初期から急激に低下する特徴が知られている（川上ら 2012）。本研究における各試験地のくん蒸後2週間の平均外気温は9.2～14.6℃で、平均被覆内温度は外気温より6℃以内の範囲で高くなる傾向があった。この温度条件下では、くん蒸剤投入後の MITC 濃度の時間変化は試験地や被覆方式に関係なく共通しており、投入2時間後または1日後にピークに達し、15日後にかけて徐々に減少した（図-2）。

カーバムアンモニウム剤、およびカーバムナトリウム塩剤のいずれの施用においても、投入2時間後には、被覆内

温度が高いと MITC 濃度も高くなる関係が認められたことから、投入直後の被覆内温度はガス化の進行に影響すると考えられた。これらの投入2時間後と1日後の MITC 濃度の平均値にほとんど違いはなかったが、2時間後に濃度が高かった山では1日後には低下し、低かった山では高くなるという明瞭な関係が見られた（図-3）。この原因として、速やかにガス化が進行した集積山では MITC ガスが被覆内容物に吸着され（市原ら 2016；川上ら 2012）、1日後には濃度が急低下したのに対し、緩やかにガス化が進行した山では1日後にピークが現れたことが考えられた。MITC 濃度のピークとその持続時間はくん蒸処理における殺虫効果と密接な関連があると考えられるので、投入初期のガス濃度変化についてはより詳細な測定に基づく検証が必要になる。

本研究において唯一の砂地の試験地であった加賀試験地での上面式における薬剤投入2時間後の MITC 濃度は全面式と比較して低かったが、1日後にはむしろ増加し、全面式との差がなくなった（図-2）。桜島試験地の火山性未熟土も砂地と同様に水はけがよい土壌型であるが、加賀試験地のような傾向は見られなかった。結局、本研究において、土壌条件によって上面式で被覆内 MITC 濃度が低下することは確認されなかった。

本研究における本種幼虫の死亡率は、試験地、被覆方式によらず、高い水準を示した（表-2, 3）。カーバムナトリウム塩剤を投入した始良試験地の一山（aa5）では、MITC 濃度のピーク（薬剤投入2時間後および1日後）が1.08 g/m³と本研究の中で最も低い値を示したが、処理後の幼虫死亡率は100%であった（J-STAGE 電子付録付表-2, 4）。この結果は、投入2時間後または1日後の MITC 濃度が1.0 g/m³以上であれば、被害材に生息する幼虫を殺虫できることを示唆した。斉藤ら（2001）は気温5℃条件下で上面式を実施し、投入3時間後の被覆内 MITC 濃度測定値が80 ppm および

表-2. 志賀および加賀試験地におけるくん蒸処理後のマツノマダラカミキリ幼虫死亡率

試験地	被覆方式	樹皮下幼虫			坑道幼虫			蛹室幼虫			計		
		調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*
志賀試験地	全面被覆式	107	0	100.0	9	0	100.0	50	0	100.0	166	0	100.0
	上面被覆式	98	0	100.0	7	0	100.0	50	1	98.0	155	1	99.4
	無処理**	6	6	0.0	7	3	57.1	23	23	0.0	36	32	11.1
加賀試験地	全面被覆式	58	0	100.0	12	0	100.0	64	0	100.0	134	0	100.0
	上面被覆式	67	0	100.0	10	0	100.0	61	1	98.4	138	1	99.3
	無処理**	13	13	0.0	5	0	100.0	11	11	0.0	29	24	17.2

*幼虫死亡率（(調査数-生存数)/調査数）×100を示す。 **無処理は試験丸太を被覆しないで地面に直接配置した。

表-3. 桜島および始良試験地におけるくん蒸処理後のマツノマダラカミキリ幼虫死亡率

試験地	被覆方式	樹皮下幼虫			坑道幼虫			蛹室幼虫			計		
		調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*	調査虫数	生存虫数	死亡率 (%)*
桜島試験地	全面被覆式	32	0	100.0	2	0	100.0	108	0	100.0	142	0	100.0
	上面被覆式	29	0	100.0	6	0	100.0	102	0	100.0	137	0	100.0
	無処理**	4	4	0.0	0	0	—	15	15	0.0	19	19	0.0
始良試験地	全面被覆式	23	0	100.0	2	0	100.0	149	1	99.3	174	1	99.4
	上面被覆式	22	0	100.0	3	0	100.0	135	1	99.3	160	1	99.4
	無処理**	4	4	0.0	0	0	—	12	12	0.0	16	16	0.0

*幼虫死亡率（(調査数-生存数)/調査数）×100を示す。 **無処理は試験丸太を被覆しないで地面に直接配置した。

150 ppm (被覆内温度を5℃として換算すると0.26 g/m³ および0.48 g/m³) であり、処理2週間後の本種幼虫の死亡率は100%であったことを示した。斉藤ら(2001)は継続した濃度測定を行っていないが、この調査のMITC濃度のピークは本研究の1.08 g/m³よりも低くなっていたことが推察できる。そのため、被害材に生息する幼虫を完全殺虫できる被覆内濃度のピークの下限値はさらに低くなる可能性がある。

一方、本研究ではくん蒸処理された丸太からごく少数ながら生存幼虫が発見された(表-2, 3)。井ノ上ら(1989)は、木くずが詰められている穿入坑道内に生息するマツノマダラカミキリの幼虫は駆除効果が低下する場合があることを、川上ら(2012)は天幕くん蒸において加害材の奥深くに生育しているナガキクイムシやゾウムシでは殺虫率が低かったことを報告している。本研究でも、材内で生存した幼虫は木くずが詰められた蛹室で発見され、それらの蛹室は相対的に深い位置に作られていた(図-4)。このことは、材の深部では幼虫を死亡させる濃度のMITCが届きにくく、また木くずが蛹室へのMITC拡散の障害となって幼虫が生存する場合もあることを示している。ただし、これらの生存幼虫が翌年まで生存し、正常に発育できたかどうかは不明である。

本種幼虫の駆除を目的としたくん蒸剤には、カーバムアンモニウム剤およびカーバムナトリウム塩剤の2種類が農薬登録されており、使用量やくん蒸期間は異なる(田代2006; 農林水産消費安全技術センター2020)。本研究では、被覆内容積1 m³ 当たり500 mLのカーバムアンモニウム剤および750 mLのカーバムナトリウム塩剤を施用した。前者は農薬登録の最小投入量であり、後者は最大投入量である。この薬剤の種類や投入量の違いはMITC濃度の挙動に影響を及ぼすことがなく、幼虫の殺虫率も十分に高かった。マツ材線虫病により全国で毎年30万 m³ 以上の枯死木が発生し(林野庁2019)、大量の被害木がくん蒸処理されているが、使用する薬剤の種類や投入量は地域により大きく異なっている(未発表データ)。マツ材線虫病対策における薬剤使用への制約が高まる中で(中村2019)、伐倒くん蒸処理においても被覆方式や薬剤投入量を再検討し、低コストで最適なくん蒸処理法を提案することが重要であろう。

本研究においては、上面式と全面式の間で殺虫率に差はなかった。すなわち、マツ材線虫病防除で用いられる伐倒くん蒸処理は、全面式、上面式のいずれによっても、適切に施工されれば十分な駆除効果があることが確認された。上面式は現状で全国的に普及している方法であるが、密封するために被覆シートの裾を埋設することが必須であるため、溝の掘れない岩場や土壌の薄い場所では実施が困難である。また地域によっては、冬季の強風によりシートがめくり上げられる被害も確認されている(斉藤ら2001)。全

面式は、シート1枚当たりの被覆量が上面式より少なくなるものの、施工場所を選ばないという大きな利点があり、作業工程も上面式と同程度である(未発表データ)。マツ材線虫病防除で求められる徹底駆除を実現するために(吉田2006)、場所の条件に応じた方法でくん蒸処理が実施されることが望まれる。

謝 辞

本研究の実施に際して、山形大学農学部(元山形県森林研究研修センター)の斉藤正一博士、山口県岩国農林水産事務所の杉本博之氏および山口県農林総合技術センターの千葉のぞみ氏には、供試虫の飼育やMITC濃度の測定について貴重なご助言をいただいた。厚くお礼申し上げる。本研究は(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号201902)により実施した。

引用文献

- 江崎功二郎(1993) オガサワラビロウドカミキリの生態。昆虫と自然 28(5): 38-42
- 市原 勝・野村 誠・清遠亜沙子・佐藤篤彦(2016) 高知県施設栽培における土壌くん蒸剤のリスク削減技術の現地実証に関する研究(日本型農業環境条件における土壌くん蒸剤のリスク削減と管理技術の開発 part 2). http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h27/pdf/5-1303_2.pdf (参照: 5-1303-76-94, 2020年12月17日確認)
- 井ノ上二郎・金森弘樹・周藤靖雄(1989) カーバム剤のくん蒸によるマツノマダラカミキリ駆除試験。島根林技研報 41: 51-57
- Kamata N (2008) Integrated pest management of pine wilt disease in Japan. In: Pine wilt disease. Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y (eds). Springer, 304-322
- 川上房男・阿部 豊・芳村健治(2012) 木材害虫用メチルイソチオアネートくん蒸剤(エコヒューム)。植物防疫 66: 524-528
- 岸 洋一・早坂義雄・横溝康志・武田丈夫(1982) マツノマダラカミキリ蛹室の深さの変異。日林誌 64: 239-241
- Mamiya Y, Enda N (1972) Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* (Nematoda: Aphelenchoididae) by *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). Nematologica 18: 159-162
- 森本 桂・岩崎 厚(1972) マツノザイセンチュウ伝播者としてのマツノマダラカミキリの役割。日林誌 54: 177-183
- 中村克典(2019) マツ枯れ防除技術の現状と展望。(森林保護と林業のビジネス化。中村克典・大塚生美編, 日本林業調査会)。97-107
- 農林水産消費安全技術センター(2020) 農薬登録情報。 <http://www.acis.famc.go.jp/searchF/vtllm000.html> (2020年12月17日確認)
- 林野庁(2019) 全国の松くい虫被害量(被害材積)の推移。 <https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hogo/attach/pdf/191018-1.pdf> (2020年12月17日確認)
- 斉藤正一・佐藤豊治・高橋幸治(2001) 環境保全のための生分解性シートを用いたマツ材線虫病丸太のくん蒸処理。林業と薬剤 158: 1-10
- 斉藤正一・高橋幸治・石山新一郎(2002) 環境保全のための分解性シートを用いたマツ材線虫病丸太のくん蒸処理。林業と薬剤 161: 1-10
- 田畑勝洋・島津光明・埴田 宏(1997) 防除対策。(松くい虫(マツ材線虫病)一沿革と最近の研究一。全国森林病虫獣害防除協会)。122-167
- 田代定良(2006) 臭化メチル代替農薬の効果と普及。野菜茶業研究集報 3: 21-28
- 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
- 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)一沿革と最近の研究一。全国森林病虫獣害防除協会)。95-121