

〔報文〕 湿度制御温風処理における殺虫効果判定法の開発

小峰 幸夫・佐藤 嘉則・原田 正彦^{*1}・北原 博幸^{*2}・
木川 りか^{*3}・藤井 義久^{*4}

1. はじめに

湿度制御温風処理とは、対象物を処理する空間の湿度を調節しながら昇温や降温を行うことで、対象物の状態変化を最小限に抑えて内部に生息する昆虫を熱によって死滅させる殺虫方法である。

2013年に日光社寺文化財保存会、京都大学大学院、トータルシステム研究所、文化財建造物保存技術協会、国立民族学博物館、千葉県立中央博物館、九州国立博物館、東京文化財研究所の専門家からなる研究チームが湿度制御温風処理の国内での技術開発に着手し、2017年に栃木県日光市にある日光山輪王寺飛地境内（中禅寺）の愛染堂（以下、愛染堂とする）（未指定、処理容積約350 m³）で、歴史的木造建造物としては国内初となる湿度制御温風処理の実施に至った^{1,2)}。このとき、湿度制御温風処理の殺虫効果判定に用いる供試虫として、人工飼育が確立されている木材害虫の一種、アフリカヒラタキクイムシ *Lyctus africanus* を選定した。本来であれば、日光の歴史的木造建造物で実際に被害を及ぼしているシバンムシ類を殺虫効果判定の供試虫として用いるべきであるが、人工飼育が確立していないことと、野外の生態が不明であり安定して入手できる虫ではないことが理由でアフリカヒラタキクイムシを選定した。前報³⁾では、アフリカヒラタキクイムシの卵と幼虫が含まれるように調整した人工飼料をケヤキ角材の内部に封入し、それを愛染堂内に設置して湿度制御温風処理を行ったところ、処理後に一定期間飼育した人工飼料からは成虫が発生しなかったため、殺虫効果判定法として一定の実用可能性を見出すことができた。また、愛染堂の処理の際には、処理の前年と処理の翌年に捕虫テープによる捕獲調査を行い、実際に建物を加害しているシバンムシ類の捕獲数の変化も調査したところ、湿度制御温風処理前に多数捕獲されていたアカチャホソシバンムシ *Oligomerus japonicus* が、処理後には捕獲されなかったという結果を得た³⁾。アフリカヒラタキクイムシを用いた殺虫効果判定法では、人工飼料中の卵や幼虫が熱に曝されるが、この系における本種の上限致死温度と処理時間に関する詳細な情報は不足しており、供試虫として実用化を進めるための課題である。また、捕虫テープによる捕獲調査においても、殺虫処理の効果判定を目的として用いられた事例が乏しいため、湿度制御温風処理の前後での調査を再度実施し、有用性を評価することが課題である。

そこで、本研究では湿度制御温風処理における殺虫効果判定法の確立を目指して、アフリカヒラタキクイムシを用いた殺虫効果判定法における本種の上限致死温度と処理時間について調査を行った。また、2018年に日光山輪王寺飛地境内（中禅寺）の鐘楼（以下、鐘楼とする）（未指定、処理容積約1,200 m³）で国内2例目となる湿度制御温風処理が行われる際に、再び愛染堂と同様の方法で捕虫テープによる捕獲調査を行い殺虫効果判定の有用性について評価を

*1日光社寺文化財保存会 *2トータルシステム研究所 *3九州国立博物館

*4京都大学大学院

行ったのであわせて報告する。

2. 調査方法

2-1. アフリカヒラタキクイムシの上限致死温度と処理時間の調査

2-1-1. 種付人工飼料の作成

アフリカヒラタキクイムシ（以下、本種）は2016年に京都大学生存圏研究所から譲り受けて、東京文化財研究所にて人工飼料 {50% (w/w) 可溶性デンプン、和光純薬工業；24% (w/w) ビール酵母粉末、自然健康社；26% (w/w) 粉末セルロース、バルプスター} を用いて累代飼育している個体を用いた。実験に用いた人工飼料は、あらかじめ直径3 cm 高さ2 cm に成形して十分に乾燥させたものを使用した。人工飼料への種付けは、本種成虫のオス10個体、メス10個体を選別し、合計20個体を底部にろ紙を敷いた直径10 cm、高さ8 cm のガラス製の腰高シャーレに入れて、2個の人工飼料に15日間接触させて産卵させた。その後成虫を取り除き人工飼料を16日間飼育後、再び別の成虫のオス10個体、メス10個体を入れて10日間産卵させた。その後成虫を取り除き、これを「種付人工飼料」とした。すなわち、種付人工飼料に卵と幼虫の両方が含まれるように成虫の接触を2度行った。途中の飼育期間は、本種に近縁なヒラタキクイムシ *L. brunneus* の生態として、卵期7日間前後、幼虫期45日から60日⁴⁾を参考にして設定した。

2-1-2. 上限致死温度と処理時間の調査

種付人工飼料に含まれる本種の卵と幼虫の上限致死温度と処理時間の関係を調査するため、次の試験を行った。まず、種付人工飼料を各温度に設定した恒温恒湿器（エスベック社製）に10個ずつ設置して、経過時間ごとに種付人工飼料を取り出して別の容器に移して25℃、55%RHで飼育した。処理31日後から10日ごとに羽化した成虫の個体数を計数し、101日経過後まで行った。

温度は40℃から60℃まで2℃毎とし、処理時間は0.5時間から5時間まで0.5時間毎に設定した。40℃から48℃の試験は1回、50℃から60℃までの試験は繰り返し3回実施した。なお、湿度はいずれの処理においても83%RHで行った。

2-2. 鐘樓の湿度制御温風処理における殺虫効果判定の検証

2-2-1. アフリカヒラタキクイムシを用いた殺虫効果判定

種付人工飼料は、2-1-1で示した方法で作成した。あらかじめ30 cm × 30 cm × 30 cm のケヤキ角材の末口を上にして中央部から中心部にむけて深さ16 cm（直径3 cm）の穴を開け、穴の底部に種付人工飼料を入れた。その後、長さ14 cm 直径3 cm のケヤキ材の丸棒を穴に入れて栓をした。栓をした加工部分から熱が伝わらないように、30 cm × 30 cm × 10 cm のポリスチレンフォームの断熱材（スタイロフォーム、ダウ加工）を被せてアルミテープ（スーパーアルミテープVH、共同技研化学）でケヤキ角材との接触面を塞ぎ、これを殺虫効果判定試験材とした。殺虫効果判定試験材の作成は、前報³⁾と同一にした。

2018年9月11日から9月22日の12日間、鐘樓の湿度制御温風処理が行われた（図1）。その間の処理温度と湿度の推移は次のとおりである。処理開始時は24℃、77%RHで、その後4日間をかけて60℃、84%RHにまで昇温・加湿し、60℃、84%RHに到達後3日間温湿度を保持し、そこから4日間をかけて20℃、76%RHまで降温・除湿した。なお、鐘樓の湿度制御温風処理の詳細は別に報告⁵⁾があるため、ここでは概要を述べるに留めた。

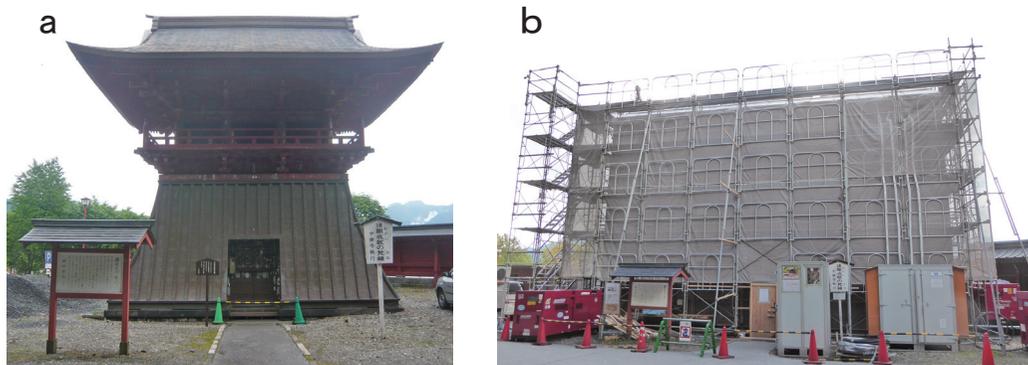


図1 中禅寺鐘楼(a)と湿度制御温風処理時の様子(b)

殺虫効果判定試験材は、湿度制御温風処理前の9月11日に鐘楼内部に設置した(図2)。その後、9月22日の処理終了後に殺虫効果判定試験材の内部にある種付人工飼料を取り出して飼育容器に移し、25℃、55%RHで101日間飼育して羽化した成虫の個体数を計数した。また、対照として同じ方法で作成した殺虫効果判定試験材を処理期間と同等の18日間25℃に維持した室内に置いて、羽化した成虫の個体数を計数した。



図2 中禅寺鐘楼内部に設置した殺虫効果判定試験材

2-2-2. 捕虫テープによる捕獲調査
湿度制御温風処理の前年(2018年)と翌年(2019年)の同一期間に、捕虫テープを設置して捕獲される木材害虫の種類と個体数について調査して、湿度制御温風処理の殺虫効果の評価を行った。捕虫テープは市販のハエ取り紙を使用し、鐘楼の内部(小屋裏、上層、下層)に合計216本設置した(図3)。その後回収した捕虫テープに捕獲された昆虫の同定と個体数の集計を行った。設置期間は湿度制御温風処理前にあたる2018年は、4月6日から8月30日、湿度制御温風処理後にあたる2019年は、4月6日から8月30日までとした。

3. 結果と考察

3-1. 上限致死温度と処理時間

各温度と処理時間における本種の成虫の累積羽化個体数を表1に示した。累積羽化個体数は、10日ごとに計数し101日までに羽化した個体の総数を示した。なお、予備試験において、54℃で0.5時間処理をしたときに101日経過後に成虫の羽化が確認されたものが飼育期間の最長であり、151日経過後まで計数を行ったが101日経過後からあらたに羽化する個体はいなかったため、飼育期間の上限を101日経過後とした。40℃から48℃においては101日以降もあらたに羽化する個体が認められるが、これは羽化した成虫が取り除かれる前に産卵した2世代目以降の個体と考えられる。

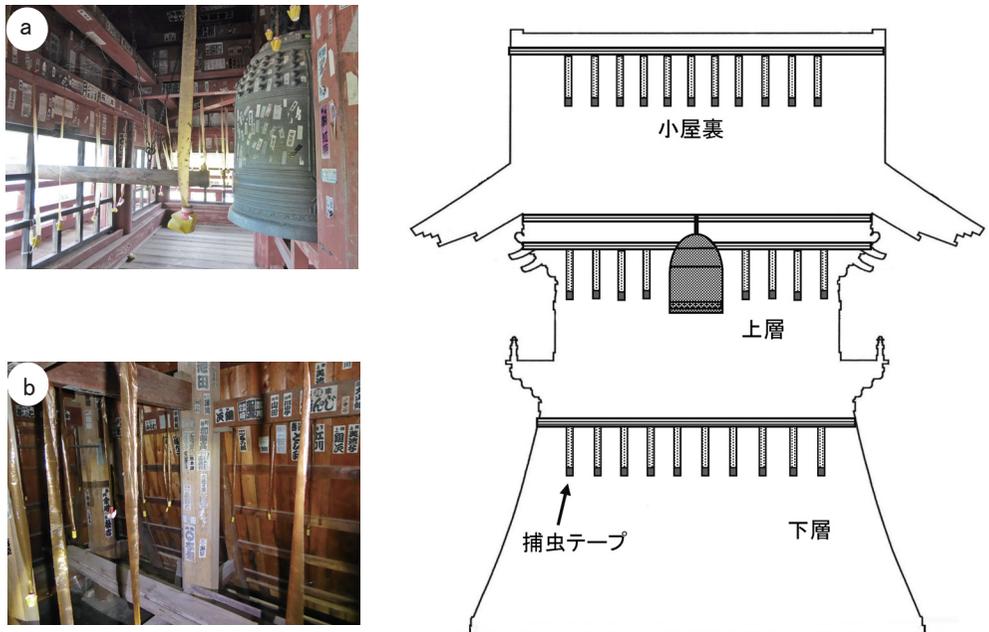


図3 中禅寺鐘楼内部の捕虫テープの設置箇所と上層(a)と下層(b)の様子

まず、40℃から48℃の各温度の結果を見ると5時間処理しても成虫の羽化が確認された。温度処理をしていない場合(25℃, 55%RH)では、101日間飼育すると羽化する成虫の累積個体数が平均92個体(種付人工飼料15個で行った試験の平均値)であったことから、40℃から48℃の温度域では5時間の処理では本種は大きな影響を受けないと考えられる。

50℃では処理時間3時間から100%の致死となる処理区があり、3反復の試験ですべて100%致死に至ったのは3.5時間以上の処理区であった。さらに、52℃では処理時間1時間で100%致死となる処理区があり、1.5時間以上では3反復の試験ですべて100%致死に至った。そして56℃, 58℃, 60℃では0.5時間の処理で100%致死に至った。

現在、薬剤による燻蒸処理の殺虫効果判定に用いられている、人工飼育が容易なコクゾウムシ *Sitophilus zeamais* は、熱に弱く45℃に4時間以上さらすと多くの幼虫が死亡することが報告⁶⁾されている。また、他の木材害虫における上限致死温度と処理時間の試験では、ヨーロッパ原産の木材害虫であるイエシバンムシ *Anobium punctatum* は、46℃から54℃で処理した場合、46℃で2.5時間、47℃で1.5時間、48℃で1時間、52℃では5分で幼虫が100%致死に至ったこと⁷⁾が報告されている。

これらのことから、人工飼育の容易さと熱に対する耐性という点において、湿度制御温風処理の殺虫効果判定にアフリカヒラタキクイムシを用いることは妥当であると考えられ、本研究で明らかにした上限致死温度と処理時間の詳細な調査結果は本種の熱耐性の基礎情報として有用であると考えられる。

3-2. 鐘楼の湿度制御温風処理における殺虫効果

3-2-1. アフリカヒラタキクイムシを用いた殺虫効果判定

鐘楼の湿度制御温風処理後に殺虫効果判定試験材から種付人工飼料を取り出して101日間飼

表1 アフリカヒラタキクイムシを含む種付人工飼料の処理温度と処理時間と累積羽化個体数*

処理温度** (°C)	処理時間 (時間)									
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
40	98	111	122	104	116	116	110	101	122	85
42	128	110	88	124	96	95	129	105	115	108
44	88	117	113	136	123	134	101	112	94	101
46	71	65	79	75	49	77	60	76	88	68
48	89	100	61	74	81	78	70	61	71	57
50	75	85	97	54	41	5	0	0	0	0
	36	71	31	26	4	0	0	0	0	0
	28	27	19	7	2	0	0	0	0	0
52	87	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	7	0	0	0	0	0	0	0	0
54	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*. 数値は処理後101日までに発生した成虫の累積個体数を示す。

**, 各温度における相対湿度は83%RHとした。

育し、羽化する成虫を確認した結果、羽化する成虫は確認されなかった(図4 a)。一方、対照とした種付人工飼料からは31日経過後ですでに合計49個体の成虫の羽化が確認された(図4 b)。このことから、鐘楼の湿度制御温風処理では、内部に設置した30 cm × 30 cm × 30 cmのケヤキ角材の中心部分まで本種が100%致死に至る温度と処理時間が与えられたと考えられる。

3-2-2. 捕虫テープによる捕獲結果

捕虫テープによる捕獲調査の結果を表2に示す。湿度制御温風処理前にあたる2018年の調査では、シバンムシ類ではエゾマツシバンムシ *Hadrobregegmus pertinax* が合計で47個体、アカチャホソシバンムシが合計で1個体捕獲されたが、湿度制御温風処理後にあたる2019年の調査では、シバンムシ類はエゾマツシバンムシが1個体のみの捕獲であった。エゾマツシバンムシの成虫の捕獲数(47個体)から推測すると2018年は建物の部材に生息していたエゾマツシバンムシの幼虫が羽化して捕虫テープに捕獲された可能性が高いと考えられる。一方、2019年は湿度制御

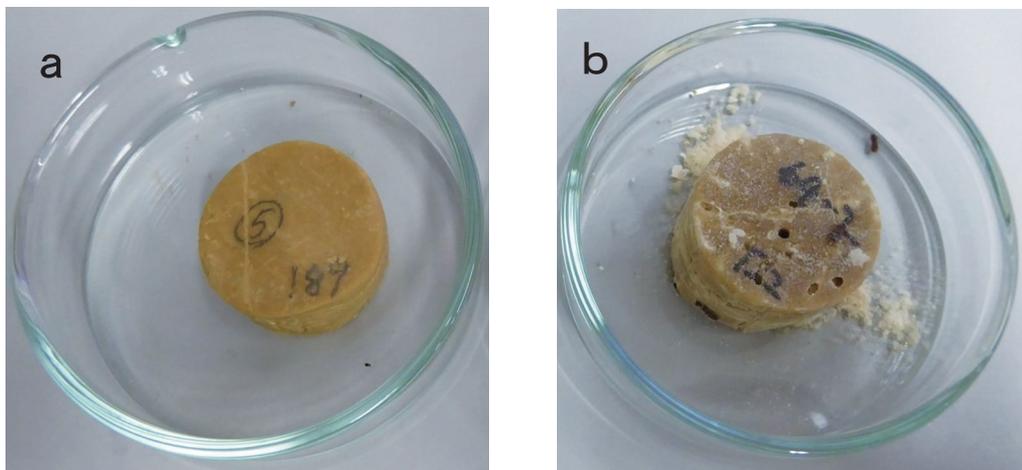


図4 湿度制御温風処理区(a)と対象区(b)の飼育中の種付人工飼料の様子

表2 捕虫テープによる捕獲調査の結果

設置場所 (鐘楼)	設置本数	2018年4月6日から8月30日(処理前)				2019年4月6日から8月30日(処理後)			
		シバンムシ類	(個体数)	その他甲虫	(個体数)	シバンムシ類	(個体数)	その他甲虫	(個体数)
小屋裏	40	-		コメツキムシ科 (1) ハナノミ科 (4) キクイムシ科 (1)		エゾマツシバンムシ (1)	ジョウカイボン科 (2) ハナノミ科 (4)		
上層	108	エゾマツシバンムシ アカチャホソシバンムシ	(21) (1)	ゴミムシ科 (1) コメツキムシ科 (1) カツオブシムシ科 (3) ハナノミ科 (1)	-		ゴミムシ科 (3) コメツキムシ科 (2) ジョウカイボン科 (13) ゴミムシダマシ科 (1) ハナノミ科 (3) ハムシ科 (1)		
下層	68	エゾマツシバンムシ	(26)	ゴミムシ科 (1) ジョウカイボン科 (1) カツオブシムシ科 (3) ハナノミ科 (1) ハムシ科 (1)	-		コメツキムシ科 (3) ジョウカイボン科 (1) ハナノミ科 (5)		

温風処理により部材内部に生息するエゾマツシバンムシの幼虫が死滅(あるいは減少)したため捕獲数が1個体となったと考えられる。処理後に捕獲された1個体のエゾマツシバンムシは、建物の構造や処理状況によって、湿度制御温風処理が行き届かずに生残した幼虫が羽化した個体であるか、屋外から侵入した個体であるかは本調査からは判別ができない。この点については今後の検討課題である。現時点においては、捕虫テープによる捕獲調査とアフリカヒラタキクイムシを用いた殺虫効果判定とあわせて総合的に殺虫効果判定を行う必要があることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、アフリカヒラタキクイムシを含む種付人工飼料での上限致死温度と処理時間との関係について調査を行い、2018年に鐘楼の湿度制御温風処理を行った際の殺虫効果を、アフリカヒラタキクイムシを用いた判定法と捕虫テープによる捕獲調査から判定した。

アフリカヒラタキクイムシは人工飼育の容易さと熱に対する耐性という点において、湿度制御温風処理の殺虫効果判定に用いる利点があり、本研究で得られた上限致死温度と処理時間の

詳細な調査結果は、本種の熱耐性の基礎情報として有用である。しかし、アフリカヒラタキクイムシは、日光の歴史的木造建造物においては実際に被害を及ぼしているシバンムシ類とは異なるため、熱耐性などの性状が一致しない可能性がある点が課題であり、これらのシバンムシ類の人工飼育を確立し、上限致死温度に関する調査を進める必要がある。

捕虫テープによる捕獲調査では、建物外からの侵入個体が捕獲される可能性があることや設置した場所のすべての昆虫を捕獲することができないという課題があるため、本法のみで殺虫効果判定を行うことが出来ないことが本研究によって示された。しかしながら、実際に被害を及ぼしていると考えられるエゾマツシバンムシの有意な減少が確認されたことは重要な点である。現時点においては、湿度制御温風処理の殺虫効果判定には両方の調査を行い、総合的に殺虫効果判定を行う必要があると考える。

謝辞

本稿をまとめるにあたり日光山輪王寺の関係者の皆様には現地調査を始め多大なるご協力を賜りました。東京藝術大学大学院生の中村舞氏と英国レスター大学大学院の池田華衣氏には、試験全般にご協力いただきました。また、片山葉子客員研究員には有益なご助言を賜りました。本研究は、JSPS 科研費18K01096「DNA 塩基配列情報に基づく文化財害虫の新規データベース構築」(研究代表者：佐藤嘉則)の助成を受けたものです。以上、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 原田正彦：現場レポート 栃木県日光二社一寺建造物保存—湿度制御した温風処理による新たな殺虫方法の検討—, 文建協通信, 130, 120-122 (2017)
- 2) 藤井義久, 原田正彦, 北原博幸, 藤原裕子, 木川りか, 佐藤嘉則, 小峰幸夫, 犬塚将英, 古田嶋智子, 日高真吾, 斉藤明子, 福岡憲：湿度制御した温風処理による甲虫類の駆除—社寺建築における効果の検証—, 文化財保存修復学会第40回研究発表要旨集, 46-47 (2018)
- 3) 小峰幸夫, 佐藤嘉則, 原田正彦, 北原博幸, 木川りか, 藤井義久：湿度制御した温風処理における殺虫効果の検証, 保存科学, 58, 21-28 (2019)
- 4) 岩田隆太郎：ヒラタキクイムシの生態と飼育 (1) 生態, 家屋害虫, 12 (2), 143-148 (1990)
- 5) 藤井義久, 原田正彦, 北原博幸, 藤原裕子, 木川りか, 佐藤嘉則, 小峰幸夫, 犬塚将英, 古田嶋智子, 日高真吾, 斉藤明子, 福岡憲：湿度制御した温風処理による甲虫類の駆除—社寺建築における効果の検証・続報—, 文化財保存修復学会第41回大会研究発表要旨集, 292-293 (2019)
- 6) 岩田泰幸：殺虫処理効果判定用テストサンプルの高温耐性の検討, 文化財の虫菌害, 74, 21-26 (2017)
- 7) Hansen LS, Jensen KMV : Upper Lethal Temperature Limits of the common furniture beetle *Anobium punctatum* (Coleoptera: Anobiidae). Int Biodeterior Biodegrad 37, 225-232 (1996)

キーワード：湿度制御温風処理 (humidity-controlled warm-air treatment)；殺虫効果 (Insecticidal effect)；歴史的木造建造物 (historic wooden buildings)；アフリカヒラタキクイムシ (*Lyctus africanus*)；上限致死温度 (upper lethal temperature)

Development of an Evaluation Method for Insecticidal Effects in Humidity-Controlled Warm-Air Treatment

KOMINE Yukio, SATO Yoshinori, HARADA Masahiko^{*1},
KITAHARA Hiroyuki^{*2}, KIGAWA Rika^{*3} and FUJII Yoshihisa^{*4}

The present study investigated the upper lethal temperature of *Lyctus africanus* using artificial feeds containing *Lyctus africanus* eggs and larvae. Using the feeds, the insecticidal effect was evaluated during the examination of the humidity-controlled warm-air treatment in historic wooden buildings. Concurrently, trap investigation using sticky tapes was conducted before and after the application of insecticidal treatment. Thus, construction of an evaluation method of two different procedures was inevitably necessary for this study.

During the examination of the upper lethal temperature, artificial feeds with eggs and larvae were placed under the room temperature of 40 - 60 °C for 0.5 - 5.0 hours. As a result, the insects did not annihilate in temperatures under 48 °C, but completely annihilated in temperatures over 56 °C, even if they were exposed for only 0.5 hour. During the humidity-controlled warm-air treatment in historic wooden buildings, feeds were placed in the center of zelkova lumber. Annihilation was confirmed after nurturing for a certain amount of time. The results from the trap investigation showed that *Hadrobregmus pertinax*, wood-boring insect, was present before the treatment, but hardly any was caught after the treatment. The methodologies conducted in this research are possibly effective in evaluating insecticidal effects during humidity-controlled warm-air treatment.

*1 Association for the Preservation of the Nikko World Heritage Site and Temples

*2 Total System Laboratory *3 Kyushu National Museum *4 Kyoto University