

〔報告〕 アコースティック・エミッションによる木材害虫の非破壊検出 —ケプトヒラタキクイムシの食害を受けた木製民芸品における一事例—

渡辺 祐基*

1. はじめに

美術工芸品、民俗資料、教育参考資料などの博物館資料が生きた文化財害虫によって被害を受けている場合、殺虫処理を施す必要がある。木製の博物館資料には、甲虫類をはじめとする木材害虫が発生している危険性がある。これらの木材害虫は、通常木材内部で生活するため目視での発見が困難であり、殺虫処理の必要性の判断に苦慮する場合が多い。

上記の理由から、木製の博物館資料内部の害虫を非破壊的に検出できる手法が必要である。一例として、X線コンピュータ断層撮影（CT）を用いて木材害虫を検出することは原理的には大いに有効である^{1,2)}が、X線CT装置は高価で大型であり、撮影が容易に行えない場合もあり、害虫の診断には必ずしも実用的とはいえない。他の手法の一例として、アコースティック・エミッション（AE）モニタリングの適用が考えられる。AEモニタリングとは、AE波、すなわち材料の微細な変形や破壊に伴うひずみエネルギーの解放によって発生する弾性波を検出することで、材料内部の欠陥等を非破壊的に評価する手法である。AE波は、シロアリおよび甲虫が木材を食害する際にも発生することが知られている^{3,4)}。AE計測器は小型で、比較的安価な装置もあり、一般住宅および文化財建造物におけるシロアリ食害の検出にも使用されている^{5,6)}。さらに、AEモニタリングは各種文化財における亀裂などの物理的劣化の監視手法としても使用されることがあり、そのためのガイドライン⁷⁾も近年公開されている。しかし、博物館資料における害虫検出へ適用した事例、または適用可能性を検討した事例は、Le Conte et al.による報告⁸⁾の他には少ない。

本研究では、木材害虫の1種であるケプトヒラタキクイムシの食害が発生した木製民芸品を擬似的な博物館資料に見立て、これに対してAEモニタリングを実施した。併せて、同民芸品内部の虫の分布をX線CT撮影によって特定し、AEモニタリングによる木材害虫検出の有効性ならびに実際の博物館資料に適用する際の課題について考察した。

2. 実験方法

AE計測の対象とした民芸品は、2019年にインドネシアで土産品として購入されたジャンベ太鼓（図1）である。寸法は最大直径160 mm、高さ（胴の深さ）295 mmであり、胴は無垢の広葉樹材を削り抜いて作られている。2019年11月10日より甲虫の成虫の脱出が確認された。脱出した甲虫は、その形態から、ケプトヒラタキクイムシ（*Minthea rugicollis*, ナガシクイムシ科ヒラタキクイムシ亜科）と同定した^{9,10)}（図2）。AE計測を行った2020年1月9日までに、11頭の成虫が脱出していた。ヒラタキクイムシ類は一般に木材表面に露出した導管などに産卵管を差し込んで産卵する。太鼓の外側表面にはニスが施されていたが、内側にはニスが無く、内側中央のくびれ付近に導管が露出していたため、ここに成虫が産卵し、虫害が発生したと考

*九州国立博物館

えられた。太鼓が現地で購入された時点で、既に産卵されていた可能性がある。

予備実験として、2019年12月25日に太鼓の AE 計測を行った。この時は、温度約 22℃ の条件で、後述の方法により5箇所程度の点で AE 計測を行ったが、いずれから AE 事象は検出されなかった。その原因として、計測直前まで太鼓が温度約 10℃ の倉庫内で保管されていたため、虫の活動が抑制されていたことが考えられた。そのため、温度約 20℃ の室内で数日間保管してから再度計測を行った。

内部のケプトヒラタキクイムシの分布を可視化するため、2020年1月9日に、AE 計測に先立って太鼓の X 線 CT 撮影を行った。撮影は文化財用 X 線 CT スキャナ (Y. CT Modular, エクスロン・インターナショナル株式会社) を使用し、太鼓をビニール袋に密封した状態で行った。撮影条件は、管電圧 140 kV、管電流 0.9 mA、プロジェクション数 1080、積分時間 400 ms とし、1.5 mm の厚さのアルミニウムフィルタを使用した。得られる CT 画像の分解能は 0.11 mm/pixel とした。CT 画像の解析は AE 計測終了後に行った。画像解析ソフト VGStudio Max 3.2 (ポリュームグラフィックス社) を使用して CT 画像を表示し、生存していると考えられるケプトヒラタキクイムシ各個体の位置を表す座標と、像の形から推定される成長段階を記録した。なお、CT 画像中において、乾燥し、薄くまたは小さく縮んでいるように見える個体は死骸と判断し、死骸以外を生存個体と見なした。また、分解能の関係から蛹と成虫を明確に区別することは困難であったため、成長段階は「幼虫」および「蛹または成虫」のいずれかで判別した。各個体の座標は、各 AE 計測点との直線距離、すなわち AE センサ (正確には AE センサ受圧面の中心) と各個体の直線距離を算出する際に使用した。

図1に示す太鼓の表面上の No. 1~22の計測点において、共振周波数約 150 kHz の共振型 AE センサ (AE144S, 株式会社富士セラミックス) をシリコングリスを介して固定し (図3), AE 計測を行った。なお、AE センサの受圧面は直径 15 mm の円形である。ほとんどの計測点表面は丸みを帯びていたが、シリコングリス

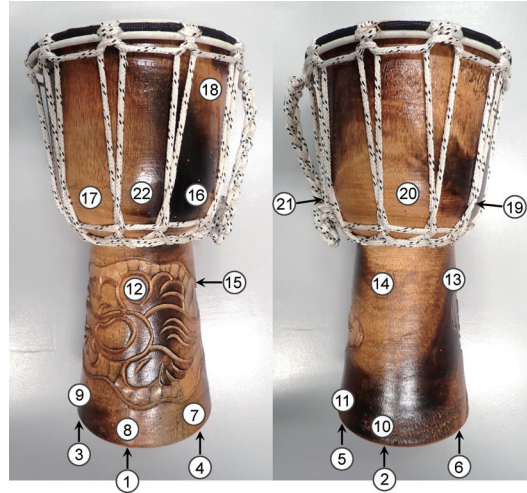


図1 AE 計測を実施したジャンベ太鼓。数字は AE 計測点 (センサ設置位置) を表す。なお、計測点 No. 1~6では、センサは木口面に設置した



図2 太鼓から脱出したケプトヒラタキクイムシ成虫。マス目は一辺 1 mm

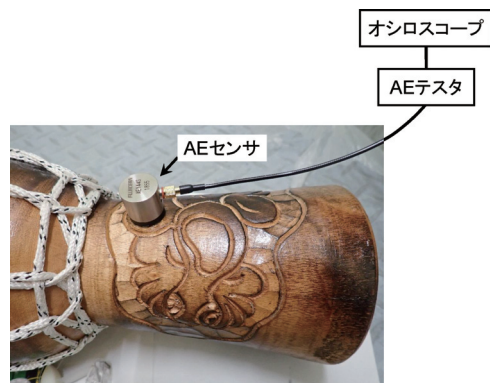


図3 AE 計測系の概略

によって AE センサの受圧面との間には一定の音響的接続が確保されていたと考えられる。検出された AE 信号は、AE テスタ (AE9501A, 株式会社エヌエフ回路設計ブロック) において 100 kHz のハイパスフィルタでろ波し、400 倍 (52 dB) 増幅し、トリガレベル 700 mV を越えた波形をオシロスコープ (DS1074Z, RIGOL Technologies Inc.) に表示させた (図3, 4)。表示された各波形のうち、立ち上がりが鋭く持続時間が短いことから電磁ノイズと判断される波形以外を AE 事象とした (図4)。時間的な制約およびオシロスコープのメモリサイズの制約などから、1計測点における連続計測は5分間とし、この間に検出された AE 事象数を計数した。なお、No. 1~16の点は CT 撮影と同日に AE 計測を行い、No. 17~22の点は、時間の都合上、翌日に AE 計測を行った。AE 計測を行った部屋の環境は温度約 22℃、相対湿度 40~50% であった。

AE 計測終了後の 2020 年 1 月 22 日に、太鼓をビニール袋に密封した状態で、恒温器 (PV-331, エスバック株式会社) 内にて温度 60℃ で 5 時間保持することで殺虫処理を行った。熱処理から 10 日後、太鼓表面上の 5 箇所の計測点 (No. 4, 5, 8, 16, 20) において、前述と同様の計測条件で再度 AE 計測を行った。

3. 結果と考察

CT 撮影の結果、生存していると考えられるケプトヒラタキクイムシが 67 頭確認され、うち幼虫 53 頭、蛹または成虫が 14 頭であった。

計測点によって異なる数の AE 事象が記録された。オシロスコープ上で波形を観察すると、ケプトヒラタキクイムシの活動に由来すると考えられる図 4a のような突発型の波形が主に検出された他、まれに電磁ノイズ (図 4b) と考えられる波形も検出された。表 1 に、各計測点において 5 分間に検出された AE 事象数と電磁ノイズ数、および CT 画像より計数した各計測点 (すなわち AE センサ受圧面の中心) から直線距離で 10~60 mm 以内のケプトヒラタキクイムシの個体数を示す。AE 事象数が多く検出された点ほど、付近に多くの虫が存在する傾向が認められた。例えば、5 分間の AE 事象数と計測点から直線距離で 40 mm 以内 (すなわち半径 40 mm の半球内) の幼虫・蛹・成虫の合計数の間には、図 5 のように高い正の相関関係が認められた。なお、半径 30 mm 以内、50 mm 以内、60 mm 以内の場合でも比較的高い相関関係があったが、半径 40 mm 以内の場合が最も相関係数が大きくなった。熱処理後には、計測を行った 5 計測点のいずれからも 5 分間に AE 事象は検出されなかった。したがって、AE 計測により本種の活動を非破壊的に検出できたと考えられる。

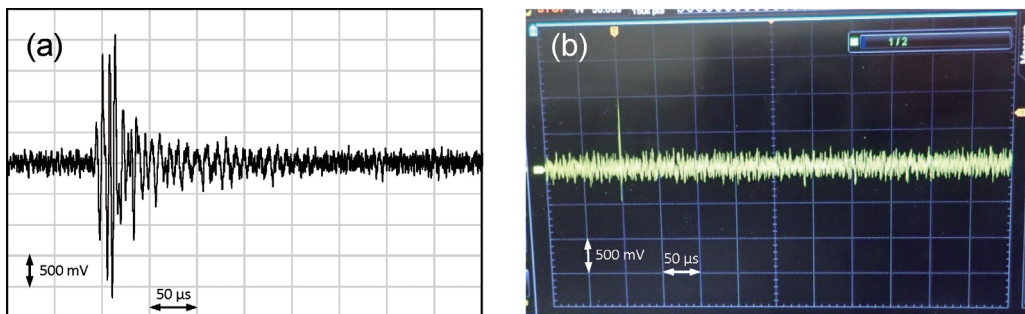


図 4 ケプトヒラタキクイムシの活動に由来すると考えられる突発型 AE 波形 (a) および電磁ノイズと考えられる波形 (b)。なお、(b) はオシロスコープの画面を撮影した写真

一方で、付近に虫がいるにも関わらず、AE 事象が検出されない点もあった。特に、No. 22では、半径10 mm 以内に幼虫が1頭、20 mm 以内に幼虫5頭が確認されたにも関わらず、AE 事象は検出されなかった(表1)。他に、No. 17では半径30~40 mm に幼虫2頭がおり、No. 3, 9, 21では半径30~40 mm にそれぞれ幼虫1頭がいたものの AE 事象は検出されず、No. 18では半径10~20 mm に幼虫1頭がいたが5分間に1事象のみ検出された(表1)。この原因

として、CT 画像において死骸を生存個体と誤認した可能性もあるが、幼虫が何らかの理由で不活性であるために検出できなかった可能性も考えられる。

また、付近に虫がいないにも関わらず、AE 事象が検出される点もあった。特に、No. 19では半径60 mm 以内に1頭も虫が確認されなかったにも関わらず5分間に4事象が検出された(表1)。また、No. 5では、半径50 mm 以内には虫は確認できず、半径50~60 mm に幼虫が2頭おり、5分間に8事象が検出された(表1)。本実験では、オシロスコープ上で目視により電磁ノイズと判断した波形は除外したものの、何らかの理由で発生した機械的ノイズを除外できなかった可能性もある。ただし、前述の通り、熱処理後には AE 事象は全く検出されなかったことから、機械的ノイズの発生は少なかったと考えられ、No. 19や No. 5で検出された AE 事象は遠くの虫の振幅の大きな AE 波に由来した可能性も十分にある。なお、No. 5では、センサは木口面に設置された(図1)。No. 1と No. 8, および No. 4と No. 7をそれぞれ比較すると、計測点に近い場合、木口面にセンサを設置した方がより多くの AE 事象を検出できる傾向にあることが分かる(図1, 表3)。したがって、No. 5では、付近の No. 11では検出できなかった遠くの虫の AE を検出している可能性が高い。

以上から、本実験では、概ねセンサから半径30~40 mm 以内に虫が存在する場合に AE モニタリングにより検出可能であったといえる。

以下、AE モニタリングを博物館資料等の診断に適用する際の課題について考察する。

まず、害虫が不活性の場合には AE 事象が検出できないという問題点がある。温度が低いなどの外的(環境的)要因によって害虫が不活性になる場合と、脱皮に伴う、もしくは卵や蛹の段階にあるなどの内的(生理的)要因による場合が考えられる。前者の対策として、Creemers¹¹⁾は木材の温度が10℃以上の時に AE 計測を行うことを推奨している。本実験では、前述の通り、計測開始まで太鼓が数日間温度約10℃で保管されていた際は AE 事象が検出されなかったため、約20℃で数日間保管してから再度計測を行い、ケプトヒラタキクイムシの活動に由来すると考えられる AE 事象を検出できた。害虫種によっても温度に対する応答は異なるであろうが、室温(約20℃)下に一定期間置くことで問題なく AE 事象を検出できると思われる。後者の対策としては、AE 事象が検出されなくとも、時間をあけて再度 AE 計測を実施することが有効と考えられる。筆者らのチビタケナガシクイ(*Dinoderus minutus*)に関する調査の結果、脱皮に伴い幼虫は約2日間活動を停止すること、および前蛹から羽化までの非摂食期間は約6日であることが示された¹²⁾。これらの期間は害虫種や環境条件などによって

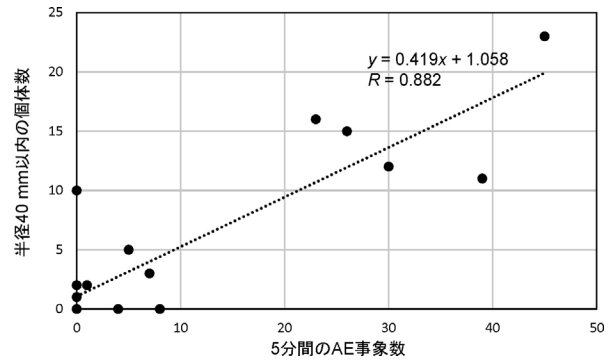


図5 5分間の AE 事象数と計測点から半径40 mm 以内のケプトヒラタキクイムシ個体数の関係

表1 各計測点で検出された AE 事象数と電磁ノイズ数, および各計測点から半径10~60 mm 以内のケプトヒラタキクイムシ個体数

計測点 No.	殺虫処理前の AE 計測結果		CT 撮影に基づく, 計測点から以下の各範囲内のケ プトヒラタキクイムシの幼虫・蛹・成虫の合計個体 数 (括弧内の数値はうち幼虫の個体数)						殺虫処理後の AE 計測結果	
	5 分間 の AE 事象数	5 分間 の電磁 ノイズ 数	半径10 mm 以 内	半径20 mm 以 内	半径30 mm 以 内	半径40 mm 以 内	半径50 mm 以 内	半径60 mm 以 内	5 分間 の AE 事象数	5 分間 の電磁 ノイズ 数
1	30	0	0	2(1)	9(7)	12(9)	16(12)	23(17)	-	-
2	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
3	0	0	0	0	0	1(1)	1(1)	6(5)	-	-
4	39	0	0	2(1)	7(5)	11(8)	17(11)	24(17)	0	0
5	8	0	0	0	0	0	0	2(2)	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
7	23	0	1(1)	4(3)	9(6)	16(10)	22(15)	26(19)	-	-
8	26	0	3(2)	6(4)	10(8)	15(12)	23(17)	26(20)	0	0
9	0	0	0	0	0	1(1)	3(3)	7(6)	-	-
10	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
11	0	0	0	0	0	0	0	2(2)	-	-
12	7	0	0	0	2(2)	3(3)	7(7)	19(19)	-	-
13	0	1	0	0	0	0	0	1(1)	-	-
14	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	5	0	0	0	1(1)	5(5)	8(8)	16(14)	-	-
16	45	0	0	2(2)	10(7)	23(16)	26(19)	29(22)	0	0
17	0	0	0	0	0	2(2)	5(5)	10(9)	-	-
18	1	0	0	1(1)	1(1)	2(2)	4(4)	6(5)	-	-
19	4	1	0	0	0	0	0	0	-	-
20	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	1(1)	7(3)	11(5)	-	-
22	0	0	1(1)	5(5)	8(7)	10(9)	16(15)	19(18)	-	-

も変わると考えられるが, AE 事象が検出されない場合, 2~6日の間隔をあけて再度計測を行うこと, もしくはカウンタ (AE 事象を自動で計数する装置) を用いて, 数時間~数日間連続計測することが望ましいといえる。Creemers¹¹⁾は, 木材害虫の一種であるオウシュウイエカミキリ (*Hylotrupes bajulus*) の幼虫の活動には最大30分間の活動休止期間が存在することを確認し, AE 事象が確認されない場合は少なくとも30分計測を継続することを推奨している。

一般に, AE モニタリングにおいては, 電磁ノイズ, 機械的ノイズなどの存在が問題となる。電磁ノイズの対策としては, アースを取る, シールドを行う, オシロスコープによる波形観察を行うことが一般的に推奨されている^{13,14)}。一方, 機械的ノイズの対策としては一般的にはハイパスフィルタによるろ波が有効であるが¹³⁾, 木材害虫の AE 検出においては, 木材の亀裂の発生や進行などに伴う, 害虫の活動とは関係のない AE が機械的ノイズとして発生する可能性が考えられる (木材が湿潤している場合, 乾燥によっても AE が発生するが, 博物館資料

においてはあまり想定されない状況であろう)。波形観察などによってこれらの AE の発生源を区別するのは容易ではないため、亀裂の発生や進行などが想定され、害虫由来の AE と区別する必要がある場合には、X線 CT など別の検出手法が必要となる。

また、AE モニタリングの博物館資料への適用において、カップリング剤の選定が特に重要な課題になると考えられる。シロアリ等木材害虫の活動の AE モニタリングでは、AE センサと対象物の音響的接続のために、シリコングリスや接着剤などのカップリング剤^{5,6,12,14)}、もしくはニードル型ウェーブガイド^{6,14)}が主に使用されてきた。文化財建造物において、シリコングリスが使用された実績もある⁵⁾。また、本実験でも、扱いやすさの観点から、シリコングリスを使用した。しかし、実際の博物館資料に対しては、不可逆的な汚損や微破壊の原因となる上記のカップリング剤およびウェーブガイドの使用は原則として不可能といえる。Le Conte et al.⁸⁾は、AE モニタリングによる木製文化財内部の木材害虫（甲虫類）の検出において、室温で昇華するシクロドデカンがカップリング剤として有効であることを示し、先述のガイドライン⁷⁾では、文化財の AE モニタリングにおいて粘土状物質を使用することなどを推奨しているが、今後、本手法の適用可能性を探るうえでは、材質への影響や AE 波の透過率などを考慮し、適切なカップリング剤を検討する必要がある。

AE モニタリングによる木材害虫の検出の際、木材中の AE 波の減衰も問題となる。減衰に対処するために、実用的な範囲内で AE センサ設置間隔を短くとる必要がある。一般住宅におけるシロアリ探知では、AE センサの監視範囲は概ね半径500 mm 以下とされている^{14,15)}が、気乾材中のヒラタキクイムシ類などの検出において、AE センサの監視範囲に関する報告は筆者の知る限りない。本実験では、AE センサから半径30~40 mm 以内に虫が存在する場合に AE モニタリングにより検出可能であったと考えられた。このことから、ケプトヒラタキクイムシのような小型の甲虫類の場合、シロアリと比べ監視範囲が大幅に短くなる可能性も示唆される。なお、今回観察されたように、付近に甲虫がいても AE 事象が検出されない場合もあるため、検出漏れを防ぐためには計測点の間隔をより短くとることが理想的である。AE センサの監視範囲は、害虫種の他に、計測対象の材質や状態、使用する AE 計測装置の特性や計測条件など様々な要因に左右されると考えられるが、本実験のようなケーススタディを蓄積することで、害虫種と AE センサの監視範囲の関係を経験的に明らかにすることができると考えられる。

謝辞

本研究において実験を補佐していただいた（旧所属）九州国立博物館の富松志帆氏、ならびに本稿に関して貴重な助言を賜った九州国立博物館の木川りか氏に謝意を申し上げます。本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K13426、JP22K13244 の助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 木川りか, 鳥越俊行, 今津節生, 本田光子, 原田正彦, 小峰幸夫, 川野邊渉: X線 CT スキャナによる虫損部材の調査, 保存科学, 48, 223-231 (2009)
- 2) Watanabe, H., Yanase, Y., Fujii, Y.: Evaluation of larval growth process and bamboo consumption of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* using X-ray computed tomography, Journal of Wood Science, 61(2), 171-177 (2015)
- 3) Matsuoka, H., Fujii, Y., Okumura, S., Imamura, Y., Yoshimura, T.: Relationship between the type

- of feeding behavior of termites and the acoustic emission (AE) generation, *Wood Research*, 83, 1-7 (1996)
- 4) Watanabe, H., Yanase, Y., Fujii, Y.: Relationship between the movements of the mouthparts of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* and the generation of acoustic emission, *Journal of Wood Science*, 62(1), 85-92 (2016)
 - 5) 藤井義久, 築瀬佳之, 今村祐嗣, 奥村正悟, 岡 信治: AE モニタリングによる木造建物内のシロアリ食害の検出—土蔵内のヤマトシロアリ食害の検出事例—, *環動昆*, 9(3), 101-105 (1998)
 - 6) 築瀬佳之, 藤井義久, 奥村正悟, 今村祐嗣, 甲崎峯男: AE モニタリングによる木造建築のシロアリ食害の検出—木質パネル構法住宅における検出事例—, *環動昆*, 10(4), 160-168 (1999)
 - 7) Lukomski, M., Bratasz, L., Hagan, E., Strojecki, M., Beltran, V. L.: *Acoustic Emission Monitoring for Cultural Heritage*, Getty Conservation Institute, Los Angeles (2020)
 - 8) Le Conte, S., Vaiedelich, S., Thomas, J.-H., Muliava, V., de Reyer, D., Maurin, E.: Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument, *Journal of Cultural Heritage*, 16(3), 338-343 (2015)
 - 9) Gerberg, E. J.: A revision of the New World species of powder-post beetles belonging to the family Lyctidae, *Technical Bulletin (United States Department of Agriculture) No. 1157*, 55 p. (1957)
 - 10) 上田 功: 輸入植物検疫で発見されたヒラタキクイムシ科, *植物防疫所調査研究報告*, 26, 105-111 (1990)
 - 11) Creemers, J.G.M.: Use of acoustic emission (AE) to detect activity of common European dry-woodboring insects: practical considerations, *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing Civil Engineering (NDTCE 2015)*, Berlin, Germany (2015)
 - 12) Watanabe, H., Yanase, Y., Fujii, Y.: Continuous nondestructive monitoring of larval feeding activity and development of the bamboo powderpost beetle *Dinoderus minutus* using acoustic emission, *Journal of Wood Science*, 64(2), 138-148 (2018)
 - 13) 株式会社エヌエフ回路設計ブロック: AE の応用例 https://www.nfcorp.co.jp/files/aetech_2.pdf (2022年11月1日参照)
 - 14) 藤井義久: アコースティック・エミッション (AE) によるシロアリ食害の検出—住宅における計測技術のポイント—, *ベストコントロール*, 106, 32-38 (1999)
 - 15) 吉村 剛, 板倉修司, 岩田隆太郎, 大村和香子, 杉尾幸司, 竹松葉子, 徳田 岳, 松浦健二, 三浦 徹編: 『シロアリの事典』, 海青社, 大津 (2012)

キーワード: 木材害虫 (wood-boring insects); ケプトヒラタキクイムシ (*Minthea rugicollis*); アコースティック・エミッション (acoustic emission); X線 CT (X-ray computed tomography)

Nondestructive Detection of Wood-Boring Insects Using Acoustic Emission: A Case Study of a Wooden Craft Object Infested with *Minthea rugicollis*

WATANABE Hiroki*

It is difficult to visually find an active infestation of wood-boring insects in museum collections and other related objects. In this study, acoustic emission (AE) monitoring was used to nondestructively detect an infestation of *Minthea rugicollis* (Coleoptera: Bostrichidae) in a wooden craft object, a drum bought in Indonesia, which simulated a museum object. The drum was also subjected to X-ray computed tomography (CT) scanning to visualize the distribution of *M. rugicollis* individuals inside, and the efficacy of AE monitoring for detecting wood-boring insects was discussed.

First, the drum was scanned using an X-ray CT scanner. Then, AE measurement was conducted at 22 spots on the surface of the drum using a resonance model AE sensor. After the drum was heat-treated to eradicate the insects, AE measurement was conducted again at five spots.

AE events that were estimated to result from the activities of *M. rugicollis* were detected from the drum before heat treatment. The number of the AE events detected on the surface of the drum was highly correlated with the number of *M. rugicollis* individuals, which was counted using the CT data, near (e.g. within 40 mm from) the measurement spot. After the heat treatment, no AE events were detected at any of the five measurement spots. The results suggested that, in the measurement conditions employed in this study, the AE sensor could detect the presence of beetles mostly within approximately 30-40 mm from the center of its face. For application of AE monitoring to actual museum objects, further examinations on such issues as the choice of appropriate coupling materials will be necessary.

*Kyushu National Museum