

X線イメージングによる木材穿孔性の文化財害虫の検出

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 渡辺, 祐基 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15021/00009983

X線イメージングによる木材穿孔性の文化財害虫の検出

渡辺 祐基
(九州国立博物館)

- | | |
|-------------------|--------|
| 1 はじめに | 4 X線CT |
| 2 代表的な木材害虫 | 5 おわりに |
| 3 X線透過撮影(レントゲン撮影) | |

1 はじめに

木材は人類が最も古くから利用してきた材料のひとつであり、現在に至るまで多種多様な用途に使用されてきた。そのため、人類の文化的活動の産物のうち歴史上等の観点から価値が認められる「文化財」には、木材で作られたものが数多く含まれる。日本においても建築物などの不動産文化財、あるいは彫刻や工芸品などの動産文化財として、数々の文化的所産や資料がその価値を認められ、保護されている。

これらの木質文化財の保全にあたっては、木材の劣化を予防することが特に重要である。木材の代表的な劣化要因のひとつに、昆虫がある。伐採後の木材を食べるなどして被害を与える昆虫およびその他の動物は木材害虫と呼ばれ、これらは文化財害虫の一群を成す。なお、木材害虫に含まれる個々の種およびグループについては次節にて述べることとする。木材害虫の大半は木材に穿孔して摂食したり、内部で生活したりする。そのため、木質文化財において、木材害虫やその被害を直接目視で発見することは困難な場合が多い。

総合的有害生物管理(Integrated Pest Management, IPM)の観点から、虫害を初期段階で精度良く検出し、殺虫処理などの適切な処置を施すことが望ましい。しかし、先述のように、木材害虫の被害を直接検出することは困難であるため、非破壊的な手法を用いて、文化財を傷つけることなく内部の虫害を診断する技術が必須である。さらに、効果的なIPMの実施のためには、対象種の生活史や生態を考慮した適切な処置が必要である。したがって、実験室において、木材中の木材害虫に対して外的刺激を与えることなく、その行動や発育過程を詳細に観察・解析するためにも非破壊的な手法が求められる。

木材害虫の非破壊検出手法としては、超音波診断装置等により食害に伴う木材中の空隙を検出する手法、ならびにアコースティック・エミッション、マイクロ波探知機等を用いて木材害虫の活動に直接由来する信号を検出する手法がある(吉村他編 2012)。X線を使用したイメージング技術によって、画像上で視覚的に木材と空隙を分離したり、場合によっては虫体そのものを検出したりすることも可能となった。本稿では、X線イ

メージング、すなわちX線透過撮影およびX線コンピュータ断層撮影(Computed tomography, CT)によって、木材害虫の食害や虫体などを検出・評価した事例(文化財分野に限らない)について総括し、文化財分野における今後の展望について述べる。

2 代表的な木材害虫

木材を食害する昆虫等の生物について、以下にまとめた(日本家屋害虫学会編 1995; 独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所編 2001; 屋我他編 1997)¹⁾。

シロアリ類(ゴキブリ目シロアリ科またはシロアリ目)は木材の最も重要な害虫といえる。日本において代表的なシロアリであるヤマトシロアリ(*Reticulitermes speratus*)およびイエシロアリ(*Coptotermes formosanus*)は、生態学的に地下シロアリに分類され、多湿な環境を好む。ただしイエシロアリは水を運ぶ能力が高いため、乾燥した木材にも被害を及ぼす。一方、乾燥材を中心に食害するシロアリは乾材シロアリと呼ばれ、移入種として有名なアメリカカンザイシロアリ(*Incisitermes minor*)などがこれに含まれる。

甲虫類(コウチュウ目)は昆虫の中で最大のグループで、その食性も多様であり、一部は木質を摂食する。このうち乾燥した木材・竹材を食害する種は乾材害虫と呼ばれている。ヒラタキクイムシ(*Lyctus brunneus*)に代表されるヒラタキクイムシ類(ナガシクイムシ科ヒラタキクイムシ亜科)、チビタケナガシクイ(*Dinoderus minutus*)をはじめとするナガシクイムシ類(ナガシクイムシ科(ヒラタキクイムシ亜科などを除く))、ケブカシバンムシ(*Nicobium hirtum*)などを含むシバンムシ類(ヒョウホンムシ科シバンムシ亜科またはシバンムシ科)といった主要な文化財害虫が乾材害虫に含まれる。カミキリムシ科の一部にも乾燥木材・竹材を食害する種がある。一方、伐採直後の高含水率の生材にはクイムシ科、ゾウムシ科、カミキリムシ科などの一部が穿孔し、まれにこれらの種が文化財から発見されることもある。

上記の他、ハチ目昆虫には、木材を摂食はしないものの建造物部材などに穿孔して営巣するクマバチ(*Xylocopa appendiculata circumvolans*)などの種や、生材を食害するキバチ科が含まれる。

また、昆虫ではないものの、海水中の木材を摂食する動物が存在し、これらは海虫と総称される。代表的なものとしてはフナクイムシ(*Teredo navalis*)などを含むフナクイムシ科の二枚貝、および昆虫と同様に節足動物門に属するクイムシ類が挙げられる。これらの動物は水中文化遺産等を管理する上で問題となる。

本稿では、上記の生物のうち、シロアリ類および乾材害虫に関する研究事例を主な対象としているが、必要に応じてその他の昆虫や海虫に関するものにも言及している。

3 X線透過撮影（レントゲン撮影）

X線透過撮影（レントゲン撮影）で得られるX線写真において木材内部の昆虫を検出しようとする試みは古くからある。Jones and Ritchie (1937) は、X線透過撮影によって薄板内部のヒラタキクイムシ属 (*Lyctus* sp.) の幼虫を可視化できることを報告した。さらに、分光写真によって、幼虫は木材中の無機塩を組織内に濃縮するためX線吸収が高いことを確認した。Fisher and Tasker (1940) は、薄板内部のシバンムシ類 (*Anobium punctatum* および *Xestobium rufovillosum*)、ヒラタキクイムシ属、およびカミキリムシ科の一種 (*Isotomus speciosus*) の存在や成長段階を検出できること、一定間隔を置いて撮影することで幼虫の行動を追跡できることを示した。Berryman and Stark (1962) は、樹木害虫であるキクイムシ科の数種 (*Dendroctonus brevicomis* など) を主な対象として、成長段階や穿孔行動、個体数の評価へのX線透過撮影の適用可能性を検討し、あわせて木材害虫であるカミキリムシ科、ヒラタキクイムシ亜科、タマムシ科、キバチ科の成長段階や食害も可視化できたと報告した。森他 (1979) は、ヒラタキクイムシが生息する合板を1~2ヶ月ごとに撮影し、幼虫の成長、変態の過程が観察できること、本種が1年1世代を経過することなどを確認した。また、海虫についても、フナクイムシの孔道、貝殻および軟体部を観察するため(屋我他編 1997; Tuente et al. 2002)、あるいは貝殻の直径から孔道の体積を推定するために (Guarneri et al. 2021) X線透過撮影が使用されている。近年では、Nowakowska et al. (2017) が試験用昆虫として頻繁に使用されるオウシュウイエカミキリ (*Hylotrupes bajulus*) の幼虫接種材のX線透過撮影を行い、試験に使用するのに十分な正確さで幼虫の体長を測定できることを示した。本手法は、今後も、厚みのない木質文化財の虫害診断や、木材の耐虫性評価を行う際の比較的簡便なツールとして活用できると期待される。

4 X線CT

X線撮影によって木材内部の孔道や昆虫を可視化できるのは試料・資料が小さいもしくは薄い場合に限られ、行動観察の際も薄板を使用する必要があり、二次的な情報が得られるのみであった。X線CTの開発および普及によって、より厚みのある木材における三次元的な被害様式および昆虫の移動・穿孔過程を解析できるようになった。

曾根他 (1995) は、「ナラ枯れ」の原因として有名な樹木害虫カシノナガキクイムシ (*Platypus quercivorus*) の生態調査にX線CTを応用した。本種が穿入した丸太をCT観察することで、複雑な孔道の全容が明らかになったが、分解能の関係から幼虫を検出することはできなかった。Jennings and Austin (2011) および Bélanger et al. (2013) は、それぞれクビナガキバチ科の一種 (*Rhysacephala warraensis*) およびカミキリムシ科の

一種 (*Monochamus scutellatus*) が産卵した丸太をCTスキャンによって経時的に観察し、幼虫の穿孔過程を追跡した。ただし、これらの研究は幼虫自体の可視化を試みたものではない。

近年では、X線CTはシロアリの食害等に関する研究にも活用されている。Fuchs *et al.* (2004) は、医療用CTスキャナによってレイビシロアリ科の乾材シロアリ *Cryptotermes secundus* の食害材内部の巣を可視化した。Himmi *et al.* (2014; 2016a; 2016b) は、文化財用CTスキャナを使用し、アメリカカンザイシロアリの巣および孔道の成長過程や木材の構造との関係を解析した。築瀬 (2016) は、マイクロフォーカスX線CT装置²⁾ によってアメリカカンザイシロアリ食害材内部の空隙および虫体を可視化した。木原他 (2013) はヤマトシロアリおよびオオシロアリ (*Hodotermopsis sjostedti*) が木材へ侵入および定着する過程を医療用CTスキャナによって観察した。また、築瀬他 (2014) は、アメリカカンザイシロアリ食害材を文化財用CTスキャナで撮像することで空隙の体積を測定し、食害材の空隙率と曲げ強度の関係を検討した。以上の解析の多くは、シロアリにより木材中に形成された空隙を主な解析対象としている。撮像条件によってはシロアリの虫体も可視化できる (Himmi *et al.* 2014, 2016a; 築瀬 2016) もの、シロアリが動くことによりノイズが発生することが示唆されている (築瀬 2016)。

一方、甲虫の幼虫は、社会性昆虫であるシロアリと異なり単独で行動し、動きも緩慢なため、X線CTによる個体別の観察に適していると考えられる。木川他 (2009) および鳥越他 (2010) はオオナガシバンムシ (*Priobium cylindricum* または *P. carpini*) の食害を受けた寺院の構造部材を文化財用CTスキャナで撮像することで、幼虫自体の像を捉えることに成功した。さらに、期間を空けて撮像を行うことで、幼虫の活動および殺虫処理の有効性を評価できることを示した。筆者他は、同じくオオナガシバンムシの食害材のCTスキャンを年間を通じて定期的に行い、幼虫期間が複数年に及ぶこと、幼虫は冬季にはほぼ活動しないことなどを示した (Watanabe *et al.* 2020a) (図1)。他に、シバンムシ類の食害材をマイクロCTスキャナ²⁾ で撮像し、CTデータより測定した食害材の密度減少量とねじ引き抜き強度およびせん断強度との関係を検討した研究もある (Parracha *et al.* 2019a; 2019b)。

さらに筆者他は、X線CTの特徴を活かし、竹材の代表的な食害昆虫であるチビタケナガシバの食害生態の解明を試みた。人工的に調整した食害材をマイクロフォーカスX線CT装置で撮像し、CT画像中にて虫体が孔道部分や虫粉と区別できることや、幼虫・蛹・成虫といった成長段階を識別できることを示した (図2) (Watanabe *et al.* 2015)。続いて、人工飼料より得た孵化直後の幼虫を竹材に個別に接種し、羽化するまで数日間隔でCT撮像を行うことで、幼虫の体長の変化および孔道長さや摂食量を定量化し (図3)、幼虫および蛹の発育期間を明らかにした (Watanabe *et al.* 2017a)。さらに、交尾後の雌が竹材内部にあけた産卵のための孔道 (母孔) 周囲を高倍率で撮像することで、

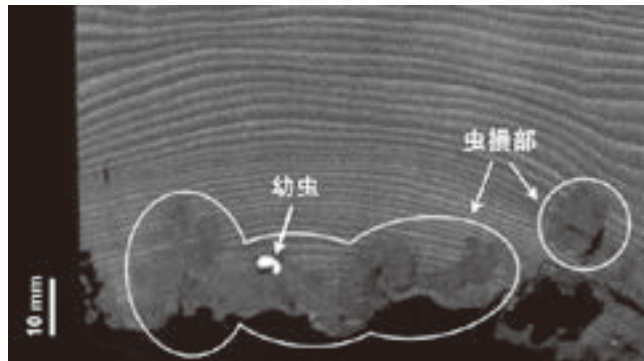


図1 X線CTで得られたオオナガシバムシ食害材の断面。幼虫および虫粉の詰まった虫損部が確認できる。(出典：Watanabe et al. 2020a より一部改変)

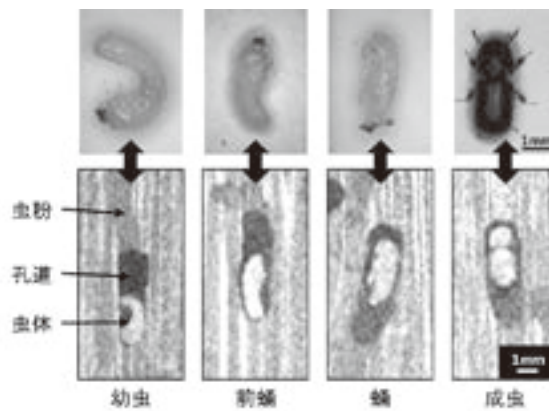


図2 CT画像におけるチビタケナガシクイの成長段階(下段)。上段は比較用の顕微鏡写真。(出典：Watanabe et al. 2015 より一部改変)

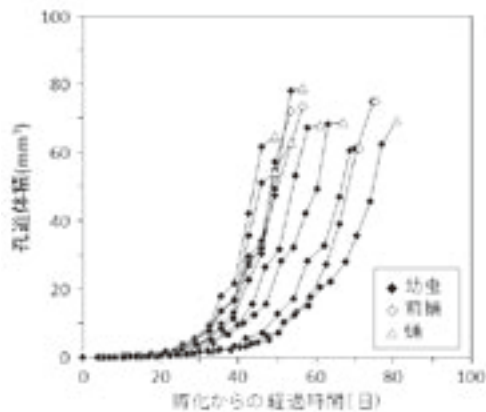


図3 チビタケナガシクイの孵化から蛹化までの孔道体積(すなわち摂食量)の推移(出典：Watanabe et al. 2017a より一部改変)

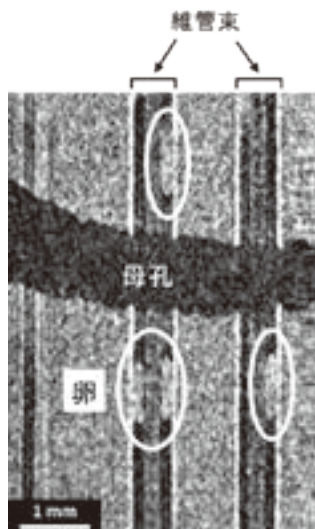


図4 CT画像におけるチビタケナガシクイの母孔および卵。卵は母孔に沿って、竹材の維管束にある導管内に産み付けられている。(出典：Watanabe et al. 2017b より一部改変)

産み付けられた卵を可視化することができ (図4), 雌1頭あたりの産卵数や母孔のサイズ (すなわち産卵に伴う被害量) を明らかにした (Watanabe et al. 2020b)。なお, X線照射が幼虫の発育に及ぼす影響が懸念されたが, 使用したX線の条件において, 幼虫の発育阻害および死亡は確認されなかった (Watanabe et al. 2017a)。X線CTによる断続的な観察では幼虫の脱皮の瞬間を特定することができないため, 幼虫の齢数を明らかにするにはアコースティック・エミッション法などの他の手法を使用する必要がある (Watanabe et al. 2017a; 2018) もの, これらの一連の成果によって, X線CTは甲虫の生活史および一生を通じた食害の特徴を解明する有効な手法であることが示された。

海虫についても, *T. naavalis* を含む複数種のフナクイムシ類による食害の進行過程および被害量の定量評価 (Charles et al. 2018) ならびに深海性二枚貝であるキクイガイ類の成長・食害速度の定量化 (Amon et al. 2015) などにX線CTが使用されている。また, 水中文化遺産保全の観点から, X線CTによってフナクイムシの穿孔様式を解析した事例もある (Eriksen et al. 2016)。

X線CTは調査室内における木材害虫の食害および生態の評価に有効である一方で, 現場における虫害の検出に使用された例はほとんどない。Cruvinel et al. (2003) は, 樹木害虫として世界的に知られるツヤハダゴマダラカミキリ (*Anoplophora glabripennis*) の食害を森林内で検出することを目指し, コガネムシ科の一種 (*Dichotomius anaglypticus*) の幼虫を入れた擬似食害材を携帯型CTスキャナによって撮像したが, 幼虫の像を検出することはできなかった。現段階では, 安全性および分解能の関係からX線CTを木造

建築物や移動不可の木彫像等に使用するのは困難と考えられる。

上記の他に、X線CTと原理的には異なるものの同様に物体の内部構造を観察できる技術である核磁気共鳴画像法（MRI）によって木材害虫の検出を試みた例もある（Nicosia et al. 2019）。MRIは核磁気共鳴（NMR）現象を利用し、人体等の内部構造を診断する手法である。Nicosia et al. (2019)は、MRIによって木材中のシバンムシの一種（*A. punctatum*）およびオウシュウイエカミキリの幼虫を可視化し、文化財への適用可能性を指摘した。

5 おわりに

木材内部における木材害虫の食害検出や行動解析にX線イメージングが使用されており、特にCTスキャンによって詳細な虫害調査が可能であることを紹介した。木質文化財についても、木造建築物等の現場調査への適用には課題が多いものの、運搬可能な動産文化財における虫害の規模や害虫個体数の評価に大いに有効と考えられる。近年、文化財用X線CTスキャナを導入する博物館等施設も増えており（鳥越 2018）、CTスキャンが文化財の虫害診断の手段として普及することも期待できる。さらに、筆者他のチビタケナガシンクイを用いた研究成果によって、X線CTは木材害虫種のライフサイクルを通じた生活史や食害様式の解明にも有効であることが示された。木材を食害する昆虫・小動物は多様で、近年は外来種の侵入・被害事例も増加している（吉村 2016）。木質文化財において効果的なIPMを実行するための基礎として、各種の生態および食害に関する情報を蓄積することは極めて重要であると筆者は考えている。今後、X線イメージングによってこれが実現し、文化財害虫研究の発展に寄与することを期待したい。

注

- 1) 分類は筆者独自の判断による。
- 2) 焦点（フォーカス）サイズがマイクロメートルオーダーのX線管を使用するX線CTはマイクロフォーカスX線CTやマイクロCTと呼ばれ、高分解能撮像が可能である。本稿では引用元に倣った表記を使用している。

参考文献

〈日本語〉

木川りか・鳥越俊行・今津節生・本田光子・原田正彦・小峰幸夫・川野邊沙

- 2009 「X線CTスキャナによる虫損部材の調査」『保存科学』48: 223-231。
木原久美子・山田明德・池原研・藤田一磨・木村信博・五十嵐敬幸・守屋繁春・本郷裕一
- 2013 「シロアリが丸太材へ侵入・定着する過程のCTスキャンを用いた非破壊観察」年次大会運営委員会編『日本木材保存協会第29回年次大会研究発表論文集』pp. 108-109, 東京: 公益社団法人日本木材保存協会。
- 曾根晃一・森健・井出正道・瀬戸口正和・山之内清竜
- 1995 「X線断層撮影法 (CTスキャン) のカシノナガキクイムシの坑道調査への応用」『日本応用動物昆虫学会誌』39(4): 341-344。
- 独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所編
- 2001 『文化財害虫事典』東京: クバプロ。
- 鳥越俊行
- 2018 「等身大の木彫像を対象とした大型文化財用X線CTスキャナの導入と調査事例について」『鹿園雑集』21: 1-5。
- 鳥越俊行・木川りか・原田正彦・小峰幸夫・今津節生・本田光子・川野邊渉
- 2010 「X線CTによる被害材の調査と害虫の活動検出への応用」『保存科学』49: 191-196。
日本家屋害虫学会編
- 1995 『家屋害虫事典』東京: 井上書院。
- 森八郎・熊谷百三・広川享子・町田和江
- 1979 「X線写真によるヒラタキクイムシの生態観察法」『家屋害虫』(3-4): 60-73。
- 屋我嗣良・河内進策・今村祐嗣編
- 1997 『保存・耐久性』(木材科学講座12) 大津: 海青社。
- 築瀬佳之
- 2016 「X線CT装置を用いたシロアリ食害の可視化および被害材の残存強度評価」『しろあり』165: 1-6。
- 築瀬佳之・森拓郎・吉村剛・藤原裕子・藤井義久・鳥越俊行・今津節生
- 2014 「アメリカカンザイシロアリ被害材の空隙率と残存曲げ強度の関係」『材料』63(4): 320-325。
- 吉村剛
- 2016 「新しい木材害虫から住宅を守る」『生存圏研究』12: 1-10。
- 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
- 2012 『シロアリの事典』大津: 海青社。

〈外国語〉

- Amon, D. J., D. Sykes, F. Ahmed, J. T. Copley, K. M. Kemp, P. A. Tyler, C. M. Young, and A. G. Glover
- 2015 Burrow Forms, Growth Rates and Feeding Rates of Wood-boring Xylophagidae Bivalves Revealed by Micro-computed Tomography. *Frontiers in Marine Science* 2: 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2015.00010/full> (2021年3月31日閲覧)
- Bélanger, S., E. Bauce, R. Berthiaume, B. Long, J. Labrie, L. F. Daigle, and C. Hébert
- 2013 Effect of Temperature and Tree Species on Damage Progression Caused by Whitespotted Sawyer (Coleoptera: Cerambycidae) Larvae in Recently Burned Logs. *Journal of Economic Entomology* 106(3): 1331-1338.

- Berryman, A. A. and R. W. Stark
1962 Radiography in Forest Entomology. *Annals of the Entomological Society of America* 55(4): 456-466.
- Charles, F., J. Coston-Guarini, J.-M. Guarini, and F. Lantoine
2018 It's What's inside That Counts: Computer-aided Tomography for Evaluating the Rate and Extent of Wood Consumption by Shipworms. *Journal of Wood Science* 64(9): 427-435.
- Cruvinel, P. E., J. d. M. Naime, M. Borges, Á. Macedo, and A. Zhang
2003 Detection of Beetle Damage in Forests by X-ray CT Image Processing. *Revista Árvore* 27(5): 747-752.
- Eriksen, A. M., D. J. Gregory, C. Villa, N. Lynnerup, K. Botfeldt, and A. R. Rasmussen
2016 The Effects of Wood Anisotropy on the Mode of Attack by the Woodborer *Teredo Navalis* and the Implications for Underwater Cultural Heritage. *International Biodeterioration & Biodegradation* 107: 117-122.
- Fisher, R. C. and H. S. Tasker
1940 The Detection of Wood-boring Insects by Means of X-rays. *Annals of Applied Biology* 27(1): 92-100.
- Fuchs, A., A. Schreyer, S. Feuerbach, and J. Korb
2004 A New Technique for Termite Monitoring Using Computer Tomography and Endoscopy. *International Journal of Pest Management* 50(1): 63-66.
- Guarneri, I., M. Sigovini, and D. Tagliapietra
2021 A Simple Method to Calculate the Volume of Shipworm Tunnels from Radiographs. *International Biodeterioration & Biodegradation* 156: 105109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830520310404> (2021年3月31日閲覧)
- Himmi, S. K., T. Yoshimura, Y. Yanase, M. Oya, T. Torigoe, and S. Imazu
2014 X-ray Tomographic Analysis of the Initial Structure of the Royal Chamber and the Nest-founding Behavior of the Drywood Termite *Incisitermes minor*. *Journal of Wood Science* 60(6): 453-460.
- Himmi, S. K., T. Yoshimura, Y. Yanase, T. Mori, T. Torigoe, and S. Imazu
2016a Wood Anatomical Selectivity of Drywood Termite in the Nest-Gallery Establishment Revealed by X-Ray Tomography. *Wood Science and Technology* 50(3): 631-643.
- Himmi, S. K., T. Yoshimura, Y. Yanase, M. Oya, T. Torigoe, M. Akada, and S. Imadzu
2016b Nest-gallery Development and Caste Composition of Isolated Foraging Groups of the Drywood Termite, *Incisitermes minor* (Isoptera: Kalotermitidae). *Insects* 7(3): 38. <https://www.mdpi.com/2075-4450/7/3/38> (2021年3月31日閲覧)
- Jennings, J. T. and A. D. Austin
2011 Novel Use of a Micro-computed Tomography Scanner to Trace Larvae of Wood Boring Insects. *Australian Journal of Entomology* 50(2): 160-163.
- Jones, S. R. and P. D. Ritchie
1937 Radiographic Detection of *Lyctus* Larvae *in situ*. *Technical Studies in the Field of Fine Arts* 5(3): 179-181.
- Nicosia, G., H. Mathieu, J. L. Roux, A. Wallens, and M. Dojat
2019 *LarvaTracing*: Imagerie RMN des infestations dans les œuvres d'art en bois et matériaux organiques. *In Situ*: 39. <https://journals.openedition.org/insitu/22094> (2021年3月31日閲覧)

- Nowakowska, M., A. Krajewski, and P. Witomski
 2017 The Relationship between the Mass of Old House Borer Larvae *Hylotrupes bajulus* (L.) and Their Lengths Measured Using Radiograph. *Drewno* 60(199): 81-88.
- Parracha, J. L., M. F. C. Pereira, A. Mauricio, J. S. Machado, P. Faria, and L. Nunes
 2019a A Semi-destructive Assessment Method to Estimate the Residual Strength of Maritime Pine Structural Elements Degraded by Anobiids. *Materials and Structures* 52: 54.
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-019-1354-9> (2021年3月31日閲覧)
- Parracha, J. L., M. F. C. Pereira, A. Mauricio, P. Faria, and L. Nunes
 2019b Validation by Micro-Computed Tomography of an Assessment Method to Measure the Residual Strength of Anobiids Infested Timber. In IRG Secretariat (ed.) *Proceedings IRG Annual Meeting 2019*, IRG/WP 19-20650, 15p. Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Tuente, U., D. Piepenburg, and M. Spindler
 2002 Occurrence and Settlement of the Common Shipworm *Teredo navalis* (Bivalvia: Teredinidae) in Bremerhaven Harbours, Northern Germany. *Helgoland Marine Research* 56(2): 87-94.
- Watanabe, H., R. Kigawa, Y. Fujiwara, and Y. Fujii
 2020a Analysis of Larval Development and Feeding of an Anobiid Beetle Using X-ray Computed Tomography. In IRG Secretariat (ed.) *Proceedings IRG Annual Meeting 2020*, IRG/WP 20-10961, 7p. Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Watanabe, H., Y. Yanase, and Y. Fujii
 2015 Evaluation of Larval Growth Process and Bamboo Consumption of the Bamboo Powderpost Beetle *Dinoderus minutus* Using X-Ray Computed Tomography. *Journal of Wood Science* 61(2): 171-177.
- 2017a Nondestructive Evaluation of Egg-to-adult Development and Feeding Behavior of the Bamboo Powderpost Beetle *Dinoderus minutus* Using X-Ray Computed Tomography. *Journal of Wood Science* 63(5): 506-513.
- 2017b Nondestructive Analysis of Oviposition of the Bamboo Powderpost Beetle *Dinoderus minutus* Using Acoustic Emission and X-Ray CT. In IRG Secretariat (ed.) *Proceedings IRG Annual Meeting 2017*, IRG/WP 17-10889, 8p. Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- 2018 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.
- 2020b Nondestructive Evaluation of Oviposition Behavior of the Bamboo Powderpost Beetle, *Dinoderus minutus*, Using X-Ray Computed Tomography and Acoustic Emission. *Journal of Wood Science* 66: 46. <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-020-01894-z>. (2021年3月31日閲覧)