

マイクロ波殺虫とシロアリ

柳川 綾^{1*}

Microwave heating on termites

Aya Yanagawa^{1*}

概要

害虫管理には、一般的には薬剤が利用されてきている。しかし、環境汚染が問題になる中で、汚染物を排出しない害虫管理法の需要は高い。シロアリに対するマイクロ波加熱駆除は、利用例は多くないが、諸外国で化学薬剤に依存しない害虫管理の一つとしてカンザイシロアリを対象にして実施されている。我が国では、カンザイシロアリ侵入が、比較的近年であることもあり、研究例はあるが実用化はされていない。また、産業面における実用的な効果が重視されてきたため、昆虫生理・生体への影響やその作用機構についてはあまり研究されていない。本稿では、シロアリ管理における木材のマイクロ波加熱処理の現状について、原理および作用機構と合わせて解説する。

1. はじめに

シロアリは、世界的な木材害虫である¹⁻³⁾。一般的に、シロアリの駆除には化学薬剤が使用されているが、薬剤耐性個体の出現が報告^{4,5)}されるようになり、近年では、化学薬剤に依存しない害虫管理が研究・開発されるようになった。こうした流れの中で、マイクロ波を利用した木材・木質材料を対象とした加熱処理によるシロアリを含めた木材害虫の駆除が試みられるようになった⁶⁾。

2. シロアリを標的害虫としたマイクロ波殺虫

マイクロ波や遠赤外線・赤外線あるいは高周波(RF: Radio Frequency)などの電磁波は、使用に際して遵守すべき法律がある。例えば、国際的なものとしては、国際非電離放射線防護委員会(the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection : ICNIRP、1992年設立)が定める規制が存在し、さらに我が国の電波法(1950年制定)のように各国がそれぞれに遵守している。これらの法令により外部への電波の漏洩が規制されていることや、害虫駆除に使用するにはある程度閉じられた空間での使用が効果的なことなどから、マイクロ波殺虫はIPM(統合的害虫管理)の一つとして、ポストハーベストなど閉鎖的空間での利用が研究されている⁷⁾。

2.1 一般的な現状

材木は通常加熱乾燥処理されて市場に出荷される。本来木材害虫にとって、心材部は摂食しづらいため、多くの場合この段階で、内部に潜んでいた木材害虫も駆除される。しかし、オーブンや熱風などを利用した高温加熱処理ではどうしてもエネルギー消費量が多く、太い材木では、内部まで高温になりきらない、また表面変色が生じるなどの課題もある。内部まで昇温しきれなかった場合には、木

2019年6月13日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 居住圏環境共生分野。

* E-mail: ayanagawa@rish.kyoto-u.ac.jp.

造建築物や木製家具など、比較的加工処理過程の少ない木材において、木材害虫問題が発生した事例もある。こうした問題は主に海外から輸入される乾燥済みの木材製品や、第三国を経由した加工品で深刻で、これらの製品を食害する乾材害虫類、ヒラタキクイムシ類、ナガシクイ類およびシバンムシ類、ならびにカンザイシロアリ類などが、わが国では近年侵入害虫として問題となりつつある。マイクロ波加熱処理は、部分的に高温となる場所が生じるホットスポットなどの問題はあるものの、電磁波の性質上、木材内部まで加熱することが可能であり、また、短時間処理が可能であるという研究報告もあり、これまでの高温加圧処理とは違う利点を持つ⁸⁻¹⁰⁾。輸入材にはそもそも加熱処理が行われていない生丸太なども多いので、輸入木材における諸問題に関しては、楽観を許さない状況であるが、インドネシアなど、東南アジアの新興国の中には、マイクロ波加熱を含めた木材加熱処理を行う国も現れた。一方、日本もまた木材を利用して様々なものを造り上げてきた文化を持つ。大きな木材および木質材料の加熱処理にマイクロ波を利用する技術もすでに商業化されている。また、その簡便さから、木材の性質を利用した木材の曲げ加工や木工品の乾燥にマイクロ波加熱を利用するという、比較的小規模な活用法の研究やその技術を応用した商品開発が行われている¹¹⁻¹⁴⁾。一般に、害虫管理におけるマイクロ波殺虫は、害虫が潜伏する製品・材料の金属や水分含量に合わせた、適切な使用が必要であるため、多くの国で正式には特殊なケースで適用する手法の一つとして規定されていることが多い。

2.2 マイクロ波殺虫の原理と研究事例

電磁波は、物体に照射・吸収されることによって、発熱作用を引き起こすという特性を持つ。電磁場が発生すると、物質の中には、構成している荷電粒子が微視的に変位するだけで、巨視的には移動しない性質をもつものがあり、こうした性質を誘電性という。物質の中には導電性よりも誘電性が有意なものもあり、誘電性を示す物質を誘電体という。誘電体にはプラスチックやガラスなどがあり、金属など電流を通す物質は導電体と呼ばれる。電磁場を用いた誘電体への加熱では、被照射物は内部から加熱される。誘電体の電磁波による発熱のしやすさを示す係数を誘電損失係数という。通常、物体内の荷電体は互いに作用し合って自由に移動しない。このため、荷電体の移動による電流の発生はないのだが、被照射物内では分極が生じる。マイクロ波による分極は、永久双極子が電界によって回転運動を行いながら電界方向に整列する配向分極で、この双極子回転による分子摩擦によって発熱が生じる。電磁波の中でも周波数が低いマイクロ波や RF は、周波数が高い遠赤外線・赤外線に比べて物質へ浸透しやすく、浸透に伴う熱量への変換もゆっくりであることから、内部加熱と言う現象をより有効に生かした害虫駆除が可能であるといわれている^{15,16)}。このため、歴史的にはマイクロ波と RF を用いた加熱による殺虫が良く研究されている。RF による加熱は、マイクロ波に比べ、浸透深さや半減深度が長いが、マイクロ波は熱変換効率がよく、発熱量は RF より大きい¹⁷⁻²¹⁾。このため、誘電損失係数が大きく熱伝導性も悪い穀物や木材における加熱処理では、マイクロ波処理の方が向いているとされる。また、マイクロ波は、物体の誘電損失に依存した内部加熱によって被照射物そのものを発熱体とする性質を持つ。このため、加熱に必要なエネルギー消費量を条件次第では抑えることが可能となる¹⁸⁾。農産物のポストハーベスト的利用に加えて、食品へのマイクロ波殺虫および殺菌は、許可申請の不要な電子レンジレベルの処理で済むことから、産業的な利用もすでに行われている²¹⁾。

被照射物自体が発熱源となるマイクロ波加熱では、対象物と対象害虫の分子的性質を考慮することが重要となる¹⁵⁾。そのため、一般的に加熱対象物及び標的害虫ごとに、マイクロ波照射条件を検討する必要があるといわれている^{16,22)}。加えて、害虫の種類だけではなく、成長段階、温度耐性、相対湿度なども検討すべき事項として挙げられる²³⁾。シロアリでは、マイクロ波処理加熱が、木材ボードにおいて、蟻道内にいるシロアリを効率的に殺虫することが示されており²⁷⁾、こうした性質を考慮することの重要性は大きい。いずれにしても、マイクロ波加熱を含むすべての電磁波を利用した加熱殺虫機構で、殺虫に関して最も重要な要素は被照射物の温度である²⁴⁻²⁶⁾。昆虫は一般的に高温に対する耐性は低く、ほとんどの害虫が、55 度以上で 1 時間も処理すれば死亡する。このため、マイクロ波によ

って木材内部まで短時間で適切に昇温することができれば、マイクロ波加熱は騒音や熱気、排ガスを生じないクリーンな木材加熱処理に貢献する。

2.3 木材のマイクロ波加熱

マイクロ波を含む高周波による木材加熱処理に関する研究は、接着、乾燥あるいは可塑化を目的とした木材加工の分野では比較的長い歴史を持つ⁸⁾。一方で、木材の熱処理を目的としたものは比較的新しく、ここ20年ほどで産業化へと発展を遂げた^{26, 28-34)}。とはいえ、こうした研究が、木材加工技術の中で得られた知見をもとに行われてきたことは想像に難くない。マイクロ波加熱処理に影響を与える木材の性質としては、木材が持つミネラルや精油などの分子的性質および密度や繊維方向などその物理的性質がある。バイオマス資材として有用物質の抽出などを行う場合は別途考慮する必要があるが、木材を材木として利用する限りでは、分子的特性は、照射エネルギー量の調整で克服できることが多い。一方で、物理的構造は、水分含有率や吸湿・放湿性などにも関与する。木材を製品加工するための研究では、繊維方向をはじめとする組織構造や吸湿性^{35, 36)}が重要な特性とされる。木材は誘電損失係数が大きく熱伝導性も悪いことがすでに既知の事実として知られ、マイクロ波殺虫を目的とした木材の加熱処理では、多くの場合、材木にマイクロ波を照射した際に必要な昇温時間や内部の害虫の死亡率調査などの応用的研究が多い。

分子的特性の課題について、照射エネルギー量で調節可能であると前述したが、マイクロ波加熱を行う際に重要な指標となる誘電率を決めるには、分子的特性もやはり重要である。マイクロ波は水分子の加熱に適した周波数であるので、分子的特性の中で加熱効率に影響を与えるのは、主に水分含量とその化学組成となる。以下にその理由と原理を説明する。木材に電場が作用していないとき、木材の化学組成を形成する原子全体は電氣的に安定した状態である。そこに電場が作用すると、誘電率に誘起されて、電子、原子核で分極が生じる。これが電子分極である。また、分子内では電子が対照的に分配されていないので、電場の作用によって原子分極が生じる。さらに分子構造によっては配向分極および界面分極が誘起される。マイクロ波加熱に使用される周波数2.45GHzは電子分極および原子分極の固有周波数である 10^{15}Hz や $10^{12}\sim 10^{13}\text{Hz}$ と比べるとはるかに低い。その一方で、配向分極と界面分極は 10^{12}Hz 以下で生じることが報告されている。木材の誘電率には、この二つの分極を誘起する物質が関与している。加えて、木材特有の物質として、マンナン、非結晶セルロースおよびリグニンが挙げられる³⁷⁾。木材中の永久双極子の配向分極の起こる周波数は電磁場の周波数に近い場合が多く、マイクロ波のような電磁場照射下では、永久双極子の配向は電磁場に追従できず、位相のずれを生じる。このずれから、摩擦によって交流損失が生じ、電気エネルギーの一部が熱に変換され、誘電体は発熱する³⁸⁾。このため、マイクロ波加熱による木材の乾燥・加熱処理では、木材内部の温度が表層よりも高くなることが認められている^{9, 10)}。

木材や木質材料を対象とした加熱処理は、従来、蒸気、電気ヒーター、熱風による加熱が行われてきており、木材の熱伝導性、放射や対流の効率を上げることが課題であった。処理木材のサイズや低い熱伝導率が課題解決に向けた要因となるが、マイクロ波加熱では、木材そのものが発熱体となるという利点があり、このことが木材における短時間・均一加熱を可能とする⁸⁾。また、木材害虫が死亡する50~60℃の温度域は、木材に乾燥や加熱によるダメージを与えることも少ない。しかし、マイクロ波加熱では昇温パターンが従来の加熱乾燥法と異なることもあり、処理後の木材の割れなどの諸問題が報告されている^{9, 39)}。過熱機構に適した処理方法の一層の改良が望まれる。

2.4 シロアリの電磁波感受性

2.2で述べたように、マイクロ波殺虫に関して最も重要な要素は被照射物の温度である。マイクロ波に照射されることによる昆虫体への影響としては、水分子の加熱による身体的な損傷および成長不全⁴⁰⁾や、生殖能力の低下¹⁵⁾が報告されている。木材の加熱処理に利用されるマイクロ波の強さは一般的に4kW-5kWと強く、害虫駆除においては、昇温のみならず電磁波そのものによる影響もある程度期待できる。しかし、シロアリのような寿命の長い昆虫では、生命活動に多少の影響があったとしても、

加熱以外の作用は致命的にはなり得ず、木材・木質材料を守ることにつながらない。このため、殺虫を目的としたマイクロ波加熱の利用にあたっては、致死的な影響を与えることを目的に、害虫と被照射物間の水分含有量の違いが、一般的には考慮される^{16,41)}。とはいえ、実際には、カンザイシロアリ *Incisitermes minor*、ヤマトシロアリ *Reticulitermes speratus* およびイエシロアリ *Coptotermes formosanus* の3種のシロアリを用いた実験では、100W/m²の強いマイクロ波の直接照射であっても昆虫そのものを被照射体とした際には、致死損傷は与えられないことが明らかになっている⁴²⁾。こうした背景から、マイクロ波がシロアリの生体に、致死に至らないレベルでは、どのような影響を与えているかという研究はほとんどない。

シロアリは、眼が退化しているため、振動や化学物質によるコミュニケーションを取りながら、暗闇で超個体と呼ばれるほど精密な集団生活を営む⁴³⁾。こうした生活様式から、位置情報として、地磁場を感じるマグネトロンと呼ばれる器官を有するといわれることもある^{44,46)}が、研究室レベルの試験ではその能力および器官の有無はいまだ明らかとは言えない。我々は以前の研究で、イエシロアリ *C. formosanus* を用いて、2.45GHzの電磁場を電場と磁場に分け、シロアリが電場あるいは磁場を感知できるか歩行試験によって調べたことがある。結果は陰性で、電場であろうと磁場であろうと、そしてその強弱に関わらず、シロアリが人為的に発生している電磁場を感じて前進をやめるということとはなかった。電場や磁場を感知することなく前進を続けたシロアリは、当然ながら電磁場発生アリーナにぶつかる。この際、電場ではシロアリ体内で内部発熱が生じ、供試虫は直ちに死に至った。その際おそらく体液の水分子に起因する発熱であろうと思われる組織の膨張や破裂が認められた。一方で磁場では、磁氣的になんらかの反応が体内で生じ、シロアリは磁場アリーナに接触すると直ちに歩行困難に陥ったが、内部発熱は認められず、目視では組織損傷は認められなかった。磁場を切った時点で、ふらふらしながらも再び起き上がり、その後も死亡することはなかった。磁場におけるこの現象は、マイクロ波発振器の出力が50Wでも300Wでも同様であった⁴⁷⁾。このことは、主に熱効果だけが利用されてきた電磁場照射には、実際には熱以外の生体作用も存在することを意味する。シロアリを歩行困難に陥らせた生体物質が、今日までその存在が探され続けているマグネトロン器官の存在をサポートするものであるのか、それとも単に神経や筋肉に含まれる常磁性物質に作用するものであったのか、興味深いところである。

3. おわりに

その他多くの害虫を対象とした時と同様に⁴⁸⁾、シロアリを標的としたマイクロ波殺虫技術でも、重要なのは、害虫が潜む被照射物の温度をどのように効率的に上げていくか、同時に熱から被照射物を保護できるよう調節していくか、ということがカギとなる。被照射物そのものの内部から発熱するマイクロ波加熱の仕組みは、木材内部に潜伏する木材害虫処理としては、薬剤による注入処理や表面処理あるいは燻蒸処理などよりも、熱で殺すというシンプルさから、その後の使用環境に一番影響の少ない殺虫機構と言える。前述しているが、熱風やオープンによる加熱処理よりも内部深くに潜む害虫を駆除できるという利点もある。一方で、その発熱機構が従来のものと大きく異なることから、その後木材に生じうる割れやひずみの影響では、研究は進むものの十分なデータがあるとは言えない状況で、まだ何にでも応用していけるというわけではないのが現状である^{9, 40, 49)}。しかし木材自身が、ある程度マイクロ波加熱に向けた性質を持っているという点で、本手法が大きな可能性を秘めていることは間違いない^{24, 50, 51)}。例えば、曲げ木などですすでに行われているが、大きな材木であっても、水分を十分に含ませた木材に適用すれば、時間短縮及び省エネとなる加熱殺虫を実施できる可能性は高い。加熱乾燥と同時進行で殺虫処理も行え、省エネな殺虫法となり得るであろう。ただ、水分を利用したマイクロ波加熱は、前述のマイクロ波加熱のメカニズムから、被照射物内部の分子的性質によってはホットスポットと呼ばれる一部分からの内部発熱が起こり得て^{52, 53)}、食品における加熱処理において

はその加熱不均一性が大きな問題となっている^{52, 54)}。木材は食品^{55, 56)}と比較すれば均一な組成であり、研究事例においても比較的均一な昇温が可能であることが報告されている³⁹⁾。それでもそのような性質が木材の質にどのような影響を与えるか、というのは課題の一つである。昆虫は、木材を加熱加圧乾燥処理するのに必要な温度よりずっと低温で死に至る。現在研究によって、重要木造文化財に使用された樹木の種類や性質が明らかとなっている。55 度という温度は、木材にとっては高温処理には当たらず、非破壊的な処理ができることから、木製の彫刻や器など、シロアリ被害を受けている重要木質文化財に、それぞれの材の性質に適した処理を行っていけば、完全なシロアリの駆除をすることも可能だと思われる(表 1)。マイクロ波加熱で一番問題となるのは、エネルギー消費量の大きいことであるが^{6, 57)}、その点でもその潜在能力は高い。またマイクロ波に限定しなくても、それぞれの標的害虫および被照射物に、熱エネルギーとして吸収されやすい電磁場域が存在する可能性もある。マイクロ波の良さは身近なところにある。マイクロ波加熱の面白いところは、被照射体の性質によって、その加熱効率が大きく変わることである。金属面に対しては反射することも、マイクロ波の利用にあたっての重要な性質である。さらに研究が進めば、こうした特徴をうまく生かした簡便で効果的な殺虫技術となり、我々の生活の質の向上に一層貢献すると期待される。

樹種	材木温度(℃)	加熱乾燥による損傷			
		割れ		ハニカム構造	
		辺材部	心材部	辺材部	心材部
ブナ	30	無し	無し	無し	無し
	40	無し	無し	無し	無し
	50	無し	無し*	-	微小
	30-50	-	無し		無し
トウヒ	30	-	無し		無し
	40	-	無し		無し
	50	-	無し*		無し
	60	-	無し*		無し
カキ	30	-	無し		無し
	40	-	無し		無し
	50	-	無し*		無し
	60	-	無し*		無し

表 1：マイクロ波加熱で昇温した際に認められた木材への損傷

*は加熱過程で影響が認められたが、最終的に形状が回復したものを示す(抜粋：谷口および西尾 1992)

参考文献

- 1) Evans, T.A., Forschler, B.T., Grace, K.J. Biology of invasive termites: a worldwide review. *Annual Review of Entomology*, **58**, 455-474, 2013.
- 2) Qasim, M., Lin, Y., Fang, D., Wang, L. Termites and microbial biological control strategies. *South Asia Journal of Multidisciplinary Studies* **1**, 1-27, 2015.
- 3) Govorushko, S. Economic and ecological importance of termites: A global review. *Entomological Science*, **22**, 21-35, 2019.
- 4) Cao, G.C., Han, Z.J. Tebufenozide resistance selected in *Plutella xylostella* and its cross-resistance and fitness cost, *Pest Management Science*, **62** (8), 746-751. 2006.
- 5) Endersby, N.M., Morgan, W.C. Alternatives to Synthetic Chemical Insecticides for Use in Crucifer Crops. *Biol. Agr. Horticult.*, **8**, 33-52, 1991.
- 6) Vincent, C., Weintraub, P., Hallman, G., Lessard, F. Insect management with physical methods in pre- and post-harvest situations, "Integrated Pest Management", edited by Radcliffe, E.B., Cambridge University Press, 2008, pp309-323.
- 7) 柳川 綾・吉村剛 第6章1節 1.6.2. マイクロ波殺虫剤, 最新 マイクロ波エネルギーと応用技術, 産業技術サービスセンター, 666-670, 2014.
- 8) 井上雅文, 山本泰司, 木材工業におけるマイクロ波・高周波加熱の応用, *Technical Report of IEICE*, **16**, 35-40, 2003.
- 9) 谷口義昭, 西尾 茂, 温度制御による木材のマイクロ波加熱減圧乾燥, *材料*, **41(461)**, 176-182, 1992.
- 10) 浜野義昭, 西尾茂, 木材のマイクロ波加熱減圧乾燥-1- マイクロ波加熱と減圧との組み合わせによる新しい乾燥法について, *日本木材学会誌*, **34 (6)**, 485-490, 1988.
- 11) 飯田生穂, 則元京, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工 —横方向のクリープ—, *日本レオロジー学会誌*, **9**, 162-168, 1981.

- 12) 飯田生穂, マイクロ波照射家庭における木材繊維直角方向の曲げクリープ特性, *京都府立大学学術報告*, **41**, 71-76, 1989.
- 13) 今村祐嗣, マイクロ波加熱を利用した曲木の組織構造, *木材学会誌*, **28(2)**, 743-749, 1982.
- 14) 今村祐嗣, 則元京, 林昭三マイクロ波加熱による曲木の細胞壁の変形, *木材研究・資料*, **17**, 268-277, 1983.
- 15) Nelson, S.O., Review and Assessment of Radio-frequency and Microwave Energy for Stored-grain Insect Control, *Transaction of the ASAE*, **39(4)**, 1475-1484, 1996.
- 16) Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A. Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., Wang, Y., Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments, *Biosystems Engineering*, **85(2)**, 201-212, 2003.
- 17) Webber, H.H., Wagner, R.P., Pearson, A.G. High frequency electric fields as lethal agents for insects, *Econ. Entomol.*, **39**, 487-498, 1946.
- 18) Nelson, S.O. Possibilities for controlling storedgrain insects with RF energy, *J. Microwave Power*, **7**, 231- 237, 1972.
- 19) Vadivambal, R., Jayas, D.S., White, N.D.G. Wheat disinfestation using microwave energy, *J Stored Products Res.*, **43**, 508-514, 2007.
- 20) Halverson S.L., Burkholder, W.W., Bigelow, T.S., Nordheim, E.V., Misenheimer, M.E. High power microwave radiation as an alternativeinsect control method for stored products, *J. Econ. Entomol.*, **89**, 1638- 1648, 1996.
- 21) 鈴木実, 阿部重春, 宮川孝夫, 山口聡, マイクロ波を利用した食品製造技術の開発と実用化, *日本食品保蔵科学会誌*, **25**, **6**, 327-337, 1999.
- 22) Guo, W., Wu, X., Zhu, X., Wang, S., Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4500 MHz, *Biosystems Engineering*, **110**, 340-347, 2011.
- 23) Field, P.G., The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures, *J. Stored Prod. Res.*, **28(2)**, 89-118, 1992.
- 24) Massa, R., Migliore, M.D., Panariello, G., Pinchera, D., Schettino, F., Caprio, E., Griffio R. Wide Band Permittivity Measurements of Palm (Phoenix Canariensis) and Rhynchophorus ferrugineus (Coleoptera Curculionidae) for RF Pest Control, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **48 (3)**, 158-169. 2014.
- 25) Sadeghi, R., Moghaddam, R. M., Seyedabadi, E. Microwave Use in the Control of Ephestia kuehniella (Lepidoptera: Pyralidae) in Dried Fig and Raisin and Effects on Fruit Sensory Characteristics, *J. Econ. Entomol.*, **111(3)**, 1177-1179, 2018.
- 26) Hoyer, C., Pfützte, C., Plarre, R., Trommler, U., Steinbach, S., Klutzny, K., Holzer, F., Rabe, C., Höhlig, B., Schmidt, D., Roland, U., Chemical - Free Pest Control by Dielectric Heating with Radio Waves and Microwaves: Thermal Effects, *Chemical Engineering Technology*, **41 (1)**, 108-115. 2017.
- 27) Lewis, V.R., Haverty, M.I., Lethal effects of electrical shock treatments to the western drywood termite (isopteran: kalotermitidae) and resulting damage to wooden test boards, *Sociobiology*, **37**, 163-183, 2000.
- 28) Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Shramkov, S., Daian, M. Measuring the dielectric properties of wood at microwave frequencies, *Wood Science and Technology*, **39 (3)**, 2005, pp. 215-223.
- 29) Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Daian, M., Shramkov, S., Modeling the dielectric properties of wood, *Wood Science and Technology*, **40 (3)**, 237-246, 2006.
- 30) Torgovnikov, G. I. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer-Verlag, Carifornia, 1993, pp. 196.
- 31) Rattanadecho, P. The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size, *Chemical Engineering Science*, **61 (14)**, 4798-4811, 2006.
- 32) Patrascu, M., Radoiu, M., Pruna, M. Microwave Treatment for Pest Control: Coleoptera Insects in Wooden Objects, *Studies in Conservation*, **63(3)**, 155-162.
- 33) Martínez Lluch, A., Vegas, L.-M. F. Mileto, C., Diodato, M. Microwaves as a Remedial Treatment of Wood. *Advanced Materials Research*, **778**, 620-627, 2013.
- 34) Nzokou, P., Tourtellot, S., Pascal, D.P., Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (Agrilus planipennis Fairmaire)(Coleoptera: Buprestidae), *Forest Products Journal*, **58 7/8**, 68-72, 2008.

- 35) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工 : 横方向曲げ処理材の水分・熱回復, *木材研究・資料*, **17**, 99-111, 1983.
- 36) 青木務, 則元京, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工:繊維方向曲げ加工材の水分回復, *木材研究・資料*, **17**, 88-98, 1983.
- 37) Norimoto, M., Dielectric Properties of Wood, *WoodResearch*, **59/60**, 106-152, 1976.
- 38) 則元京, マイクロ波による木材の塑性曲げ加工, *木材研究資料*, **14**, 13-26, 1979.
- 39) 藤本登留, 森田裕資, 大内毅, 林翰謙, 大橋兼廣, 近藤和幸, マイクロ波加熱によるスギ丸太の乾燥, *材料*, **54(4)**, 371-376, 2005.
- 40) Olsen RG., Constant - dose microwave irradiation of insect pupae, *Radio Sci.*, **17-5S**, 145-148, 1982.
- 41) Jiao S., Johnson JA., Tang J., Tiwari G. and Wang S., Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments, *Biosystems Engineering*, **108**, 280-291, 2011.
- 42) Nakai, K., Mitani, T. Yoshimura, T., Shinohara, N., Tsunoda, K., Imamura, Y. Effects of Microwave Irradiation on the Drywood Termite *Incisitermes minor* (Hagen), *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.*, **20(4)**, 171-184, 2009.
- 43) 安部琢磨, シロアリの生態, 東京大学出版, pp140, 1989.
- 44) Maher, B.A., Magnetite biomineralization in termites. *Proceedings of the Royal Society London B*, **265**, 733-737, 1998.
- 45) Alves, O.C., Wajnberg, E., Oliverira, J.F.-de, Esquivel, D.M.S., Magnetic material arrangement in oriented termites: a magnetic resonance study, *Journal of Magnetic Resonance*, **168**, 246-251, 2004.
- 46) Oliverira, J.F.-de, Alves, O.C., Esquivel, D.M.S., Wajnberg, E. Ingested and biomineralized magnetic material in the prey *Neocapritermes opacus* termite: FMR characterization, *Journal of Magnetic Resonance*, **191**, 112-119, 2008.
- 47) Yanagawa, A., Kashimura, K., Mitani, T., Shinohara, N., Yoshimura, T., Influence of Powerful Microwaves on the Termite *Coptotermes formosanus* -Impact of Powerful Microwaves on Insects in Processing and properties of advanced ceramics and composites VI / edited by J.P. Singh (Ceramic transactions , v. 249), 2014, pp367-374.
- 48) Johnson, J.A. Wang, S., Tang, J. Thermal Death Kinetics of Fifth-instar *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae), *J. Econ. Entomol.*, **96(2)**, 519-524, 2003.
- 49) 木村志郎, 横地秀行, 竹中佐恵, くさび型刃物による圧入切削-1-切削抵抗主分力および割れにおよぼすマイクロ波加熱の影響, *木材学会誌*, **30(4)**, 301-308, 1984.
- 50) Henin, J.-M., Charron, S., Luypaert, P. J., Jourez, B., Hebert, J. Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15, *Forest Products Journal*, **58**, 75-81, 2008.
- 51) Lee, S.H., Ashaari, Z., Lum, W.C., Halip, J.A., Ang, A.F., Tan, L.P., Chin, K.L., Tahir, P.M. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, *Construction and Building Materials*, **181**, 408-419, 2018.
- 52) Ho, Y.C., Yam, K.L., Effect of meatal shielding on microwave heating uniformity of a cylindrical food model, *Journal of Food Processing and Preservation*, **16(5)**, 337-359, 1992.
- 53) Campañonea LA. and Zaritzky NE., Mathematical analysis of microwave heating process, *Journal of Food Engineering*, **69-3**, 359-368, 2005.
- 54) Vadivambal, R., Jayas, D.S., Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials—A Review, *Food and Bioprocess Technology*, **3(2)**, 161-171, 2010.
- 55) Cheng, Y., Sakai, N., Hanzawa, T., Effects of Dielectric Properties on Temperature Distributions in Food Model during Microwave Heating, *Food Science and Technology International Tokyo*, **3(4)**, 324-328, 1997.
- 56) Lee, D.S., Shin, D.-H., Yam, K.L., Improvement of temperature uniformity in microwave - reheated rice by optimizing heat/hold cycle, *Food Service Technology*, **2(2)**, 87-93, 2002.
- 57) Fleurat-Lessard, F., Control of Insects in Post-Harvest: Radio Frequency and Microwave Heating, edited by Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F., Physical Control Methods in Plant Protection, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, pp162-173.

著者プロフィール



柳川 綾 (Yanagawa Aya)

＜略歴＞ 2004 年九州大学農学部卒業／2009 年九州大学生物資源環境科学府博士後期課程修了 博士(農学)／同年京都大学生存圏研究所にて日本学術振興下位特別研究員(PD)／2012 年京都大学生存圏研究所助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞昆虫病理学・生態系との調和、自然界と人の暮らしを大切にする生存圏科学。＜趣味など＞読書・散歩・お茶会。