

木材の長期使用戦略

—地球温暖化防止と住まいの長寿命化—*

今村 祐嗣**

1. はじめに

世界最古の木造建築物である法隆寺の五重塔、それを 1400 年以上にわたって支えてきたのは、木材の驚異的な耐久性である。数百年前以上にわたり神社仏閣に使用されてきた木材を、新しく伐採された木材と比較しても、強度低下はほとんどないことは良く知られていることである¹⁾。各種の建築材料のうち、石材やその他の無機材料を除いて、人類の歴史のなかで千年以上の耐久性を誇るのは木材が唯一であろう（図 1）。

しかし、木材の主要な用途である木造住宅を例にとってみても、年数がかなりたってもそこに使われている木材にはほとんど劣化がみられないことがある反面、わずかな数年で家を建て替えねばならなくなるほど劣化が進行することもある。木材に劣化を引き起こす主要なものは腐朽やシロアリといった生物劣化である。木材はセルロースやリグニンといった樹木がつくった生分解性の高分子化合物からできていることから、こういった生き物による劣化作用を受ける。しかし、その発生・進行には温度と水分と酸素が必要な因子であり、このうちどれが欠けても劣化は進まない。このうち、温度条件は地域や気候、あるいは使用環境によって影響を受けるとはいえ、通常 15℃ 以上になれば腐朽菌やシロアリの活動が活発になるため、人為的にこれをコントロールして劣化を防止するのは容易ではない。酸素条件についても土中深く使用されてきた杭や遺跡から出土する木材にみられるように、それが欠乏したところでは生物劣化は進行しないが、通常の使用状態では劣化生物が必要とする酸素は十分備わっている。一方、水分条件は住宅を例にとっても、意匠や設計、あるいは住まい方によって支配されることが多いため、工夫によって劣化の危険性を低減させることも可能である。

建立から永い歴史をもっている日本の寺社建築では、耐久性のある樹種の使用とともに、水の影響を考えた工夫が随所に取り入れられている。例えば清水寺の舞台ではデッキに勾配をつけ、高欄の接合も水が溜まるのを防ぐ構造に、床下の貫の木口には木製の覆い板が取り付けられている。また、古い木造の文化財建造物では、大修理、中修理、小修理と繰り返されてきた十分な保守管理

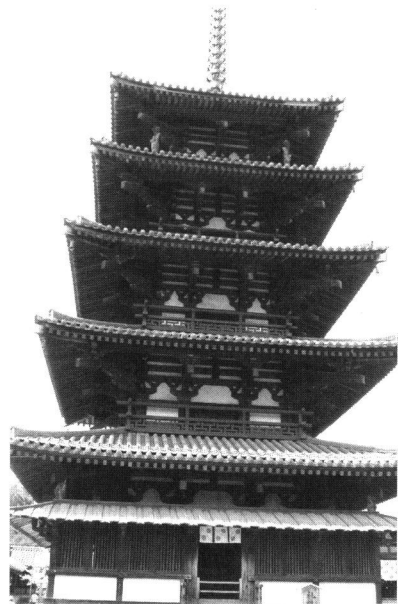


図 1：世界最古の木造建築物—法隆寺の五重塔

* 2008 年 10 月 1 日作成

** 〒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: imamura@rish.kyoto-u.ac.jp

によって耐久性が確保されてきた。しかし、最近の住宅では住みやすさをより重視することから、水まわり箇所の分散化や高気密性によって、耐久性が二次的に位置付けられている傾向にある。また、大壁工法の増加によって劣化の早期発見も困難になってきている。使用される樹種の多様化や各種の木質材料の出現、釘や金物接合の多用、デッキや木橋など日射や雨水のかかる屋外使用の拡大など、むしろ劣化を促進する要因が増加しているのが実状である。

2. 劣化生物の概要

一般的に木材は、条件に合った水分と温度が与えられると、変色菌やカビ、腐朽菌あるいは細菌類が木材の表面あるいは内部に繁殖し、汚染または劣化の原因となる。このうち、変色菌やカビは木材にわずかに含まれるデンプンやタンパク質のみを利用して生長するため、木材の強度を低下させることはほとんどない。木材の微生物劣化で最大の被害を引き起こすのは担糸菌類による腐朽であり、セルロースやリグニンという木材実質を分解する。木材を屋外で使用すると、腐朽菌の孢子あるいは菌糸が多く存在し、水分と酸素が十分供給される地際部がもっとも腐りやすい。住宅部材のように木材と土との接触がない場合では、すでに腐朽した木材から菌糸が伸びてきて腐朽が始まったり、また、空中を飛散していた孢子が木材表面に付着し発芽して菌糸となり、内部へ伸長して腐朽が始まる。

木材腐朽菌は褐色腐朽菌と白色腐朽菌に大別される。このうち褐色腐朽菌は建築物等の主要な劣化微生物であり、針葉樹材を特に劣化させ、セルロースを選択的に分解することから、質量減少が小さ

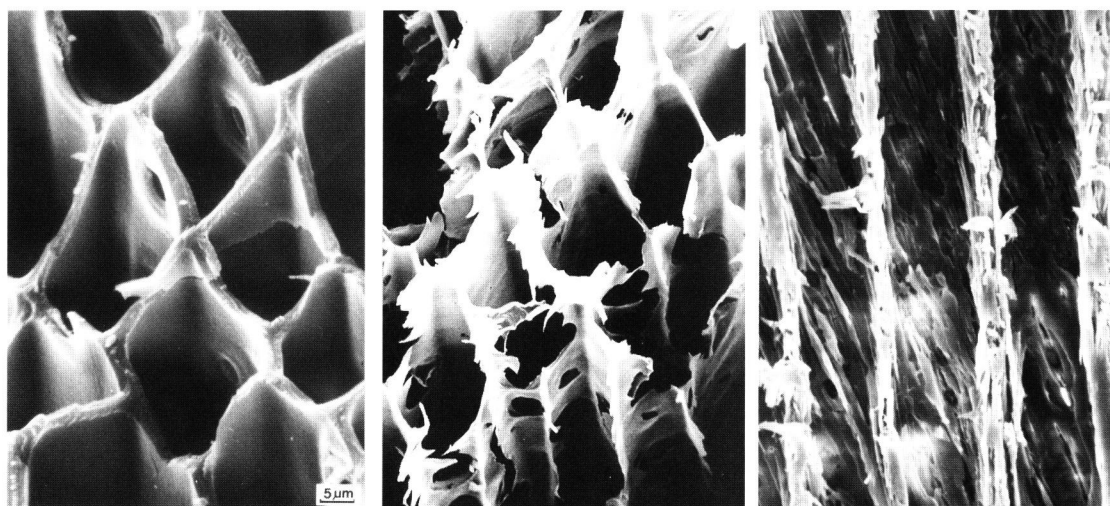


図2：左から、褐色腐朽菌、白色腐朽菌、軟腐朽菌によって劣化した木材（スギ）

い段階であっても大きな強度低下を引き起こす²⁾。白色腐朽菌はセルロースとリグニンを同時に分解するため強度低下に与える影響は褐色腐朽菌よりも小さいが、屋外では一般的に認められる菌類である（図2）。軟腐朽菌は水分状態がかなり高い状態であっても活動し、表面から軟化するなど特有の劣化現象を示す。土中に埋まっていた木質文化財によく見られる腐朽形態である。

木材に劣化を起こすもう一つの主要な生物はシロアリである³⁾。シロアリは通常、温暖で高湿度の環境を好むが、腐朽の進行と関係なく単独で木材を加害する場合と、腐朽と並行して食害を生じる場合がみられる。日本には20種くらいのシロアリの生息が報告されているが、経済的に重要な種類はイエシロアリとヤマトシロアリである。イエシロアリは地中に巣を構築し、土の中に蟻道と呼ばれるトンネルをつくって移動し、ひとつのコロニーの個体数は100万頭を越えるといわれている。世界のシロアリの仲間でも住宅などに大きな被害を及ぼしている暴れ者で、その分布は南西諸島から沖縄、九州、四国、瀬戸内地域から近畿南部、東海、関東の太平洋岸となっているが、いまや太平洋を渡り

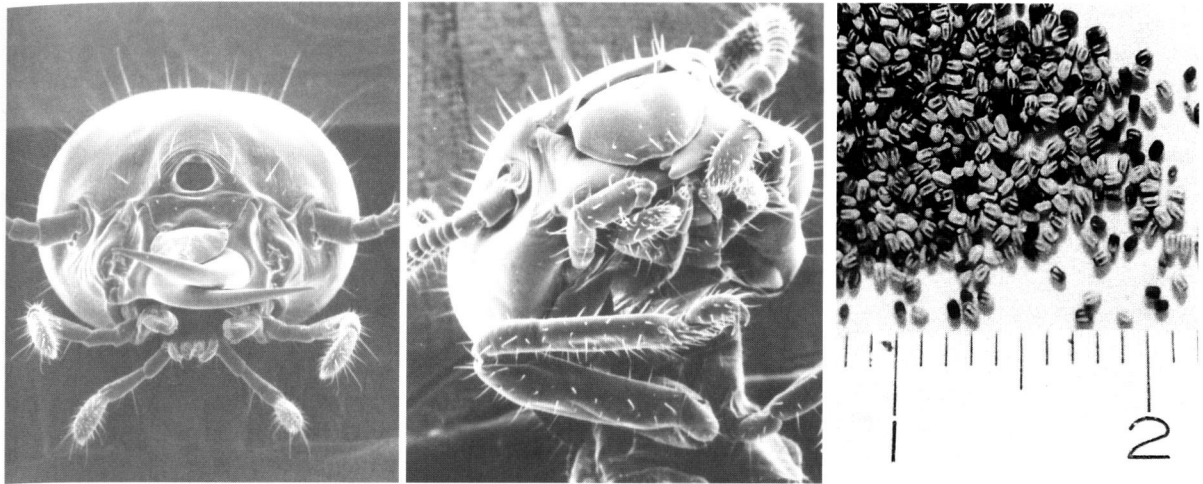


図3：左から、イエシロアリの兵蟻、職蟻とアメリカカンザイシロアリの乾いた糞

アメリカでも猛威をふるっている（図3）。

ヤマトシロアリは木材の中に巣をつくり近くのものを食害するが、個体数はイエシロアリより少なく1コロニーあたり数千から1万頭くらいである。このシロアリは、世界でもっとも北まで分布しているグループであるが、わが国では本州以外にも北海道の旭川市でその生息が確認されたのを皮切りに、最近ではさらに北上し名寄市においても発見されている⁴⁾。イエシロアリと異なり水分に対する依存度が高く、通常は腐朽と並存することが多い。

イエシロアリとヤマトシロアリは地下生息性シロアリと称されるグループに属するもので、いずれも土の中をおもな生息場所としている。場合によっては、枯死木や住宅の壁の中に巣をつくることがあっても、土中を移動の経路にし、特に水分供給を地下に求めている。しかし、最近わが国で、変わり者のシロアリによる被害が増えてきた。このシロアリは木材中でのみ生息し、生存に必要な水分も気乾状態にある木材から求めている乾材（カンザイ）シロアリである⁵⁾。

この乾材シロアリは、もともとわが国には生息していなかった種類で、「アメリカカンザイシロアリ」と名付けられているアメリカ原産のものである。乾材シロアリの一番大きな特徴は、まず乾燥材を食害し、そこに含まれている水分のみで生活し、外に水分補給を求める必要がまったくないということである。このシロアリによる被害の発見は、柱や梁、あるいは家具などから外に向かって大量に排出されている、大変細かい粒状の木粉がきっかけになることが多い。これはカンザイシロアリの糞で、長さ0.5mm前後のきわめて形が整った俵状の形をしている。色は白～茶～褐色であるが、食材によって異なるようだ。からからに乾いた糞であるが、このシロアリが乾燥した木材を餌とし、そこに含まれる水分をしぼり取っていることを考えれば、しごく当然のことであろう（図3）⁶⁾。

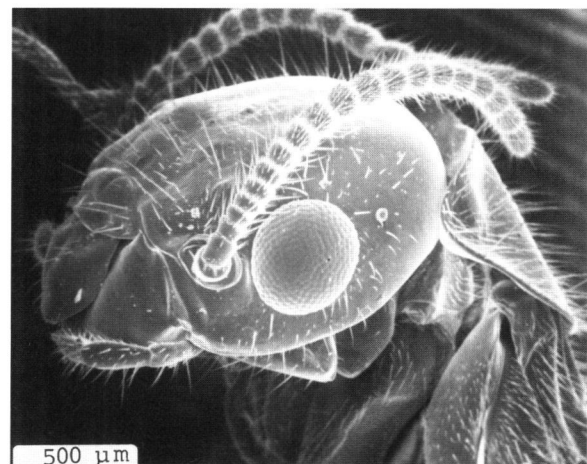


図4：イエシロアリの羽蟻の頭部（職蟻、兵蟻では眼は退化しているが、羽蟻では複眼をもち走光性を示す。）

3. 木材保存処理の動向

3.1 木材の防腐・防蟻処理

元々腐れやシロアリに対する抵抗性のある樹種は蓄積量が少ないことが多く、造林樹種ではむしろ耐朽・耐蟻性の低いものが多い。それらに耐久性を付与するために保存薬剤の注入が行われてきた。

従来、銅・クロム・ヒ素を成分とする CCA が、水溶性であることから使いやすく、木材に注入されると固着し高い防腐・防蟻性を与えることから、世界的に広く使用されてきた。特にわが国では、1970 年代以降の住宅土台の主要な処理薬剤であった。しかし、工場における排水の課題以外に、焼却廃棄時において有害物質が発生すること大きな社会的問題となり、1995 年以降代替薬剤への移行が急速に進み、CCA 処理木材はわが国においてはほとんど生産されなくなった。また、かつては鉄道枕木に主に用いられてきたクレオソートにおいても悪臭、皮膚刺激、発癌性成分の存在が問題となり、現在では新しいタイプのクレオソートに代わってきている。

薬剤を用いる保存処理においては、劣化を防ぐことによる利点と健康や環境への危険性のバランスシートにのっていることはいうまでもない。とくに最近、保存処理木材が、デッキや遊具あるいはウォーターフロントの部材など、屋外の景観材料として用いられる場合が増加してきている。これらの使用条件においては、日射の暴露と雨水によって部材表面から木材成分の分解と割れが発生するだけでなく（図 5）、長期間にわたって土壌や雨水に接することが多いため、周囲の環境を汚染する危険性が高い。また、人体が直接処理木材に接触する頻度も高い。これらの点から、環境や安全性への配慮がとくに求められ、“環境にやさしい”保存処理が従来にも増して模索されてきている。



図 5：日射に曝された木材表面（細胞間層において顕著な成分分解が生じている。）

最近、ISO の木材保存分科会では、保存処理木材の用途、すなわち劣化が発生する度合によって使用環境を区分し、それぞれについて用いる材料や処理レベルを細かに規定し、性能評価の方法も分けていこうという方向が検討されている。すなわち、接地か非接地か、暴露状態か外界から保護されているかに分類する。この劣化の等級区分は、使用環境からの要求度に対し信頼性の高い材料を提供するという目的以外に、適材を適所に用いることによって環境に対しても負荷を少なくするという効果も有している。住宅部材の適切な保存処理についても、今後この観点からの取り組みが進んでいくものと予測される。

3.2 木材の化学修飾

木材の細胞壁の非晶部分には活性な水酸基が数多く存在しており、外からの水分がここに吸着して木材の寸法変化を引き起こす。もしこの水酸基をほかの安定な官能基で置き換えると、水分子がくっつく余地が無くなって吸水や吸湿による寸法変化が抑えられ、また、腐朽菌の分泌する酵素の攻撃に対しても、その作用を受けない分子構造になる。したがって、性能の発現は毒性に基づく殺菌効果によるのではなく、木材そのものの分子構造が合目的に改質されたことによる^{7)エラー！ 参照元が見つかりません。}

アセチル化処理木材はどの腐朽菌に対してもほぼアセチル化率が 20%を越えると、劣化による質量減少が認められなくなる。しかし、シロアリに対する抵抗性は加害するシロアリの種類によって異なり、ヤマトシロアリはほとんどこれを食害しないが、イエシロアリは無処理木材に比べると少ないものの、これを食害する。しかし、アセチル化木材だけを食餌とした場合は、イエシロアリといえども日を経るにしたがい死亡する。特に興味深いのは、スターベーション（食餌を与えない）の場合と同



図6：化学修飾木材はノンアルコール・ビール（ビールみたいだけど、飲んでも、飲んでも酔わない）、右はシロアリ腸内の原生動物（撮影：吉村 剛）

様な生存個体の減少傾向を示すことである。

イエシロアリの腸内には3種類の原生動物が共生しており、セルロースの分解にはこれらの原生動物が関与しているといわれている。しかし、スターベーションの場合もアセチル化木材を食害した場合も、腸内に原生動物が全く認められない状態になった。シロアリは当初アセチル化木材を食餌として錯覚して食害するが、原生動物がこれを分解代謝できないため、原生動物の消失→食物補給の遮断→餓死へと至るのであろう（図6）。

一方、熱処理木材とはその言葉の意味するとおり、温度や雰囲気など処理条件は色々あるにしても、要するに加熱処理した木材のことである。木材を100～200度、場合によってはそれ以上の温度で処理した製品で、応力や狂いが除去されていることや、寸法安定性や耐久性、あるいは耐候性が向上していることがセールスポイントとなっている。

ヨーロッパにおける熱処理木材の動向については以前から知られており、また、わが国においても独自の手法や目的をもって取り組まれ、材の着色手段として、あるいは木材の圧縮処理の固定法として応用されてきた経緯もある。しかし、熱処理木材の耐久性、すなわち耐腐朽性や耐シロアリ性など生物劣化に対しては、筆者を含めわが国の研究者はかなり懐疑的であった。というのは、熱による木材成分の分解によって強度低下が引き起こされるのはもちろん、心材抽出成分やヘミセルロースの変性・分解によってむしろ抵抗性が低下することを懸念したことによっている。一方、加熱処理で木材成分中の遊離の水酸基が架橋することにもとづいて吸着される水分量が低下し、それによる性能向上は期待されてはいた。

しかし、処理工程における木材中の水分の有無や周囲の条件、あるいは加熱温度によって得られる物性は大きく異なるものの、防腐性能については200℃以上ではかなり向上するという結果が得られている。また、シロアリ、特に攻撃力の激しいイエシロアリに対しては食害を抑制することは困難であるにしても、分解代謝系に影響を与えているようで、このあたりの挙動については、まさにアセチル化処理のような化学修飾木材に共通する点が多々みられる。

熱処理木材も化学修飾木材と同様に、殺菌ではなく木材自身が腐りにくい状態で、しかも寸法や材色の安定性が向上している。強度はやや低下しているが、使用には十分耐えることができる。そういった処理技術である。熱処理木材が目指しているのは弱点が適度に改良され、「用途に適合する程度に」向上した材料ではないだろうか。

3.3 シロアリ被害の防除

木造住宅のシロアリ対策、いわゆる防蟻処理については、ヤマトシロアリとイエシロアリというわが国に生息する主要なシロアリが地下生息性の種類であるため、床下の土壌表面に薬剤を散布処理することで住宅内部への侵入を防止する方法がとられてきた。すなわち床下土壌の表面に薬剤のバリアー層あるいは接触層をつくり、地下の蟻道から布基礎や束を這い上がろうとするシロアリを防ごうとするものである(図7)。ケミカル(化学)バリアーである。防蟻薬剤としては、かつては有機塩素系薬剤のクロルデンが、その後は有機リン系化合物使用されていたが、それぞれ高い残留性や住宅内でのVOCなどの理由で禁止されあるいは使用量が減り、最近ではピレスロイド系、カーバメイト系、クロロニコチル系やフェニールピラゾール系薬剤などに移行してきた。また薬剤の形状もマイクロカプセルで包み込んだり、粒剤の形状にしたりして室内への揮散性を抑止したり作業面の安全性を高める様々の工夫が行われている。

最近に至り、薬剤の使用量を減らしたり(レスケミカル)、薬剤そのものに依存しない防除法(ケミカルフリー)を求める消費者の声も高まっている。土壌への薬剤散布のかわりに、遅効性の薬剤を餌と一緒に摂食させて巢内に持ち帰らせ、シロアリの習性を利用して薬剤効果を健全個体へ伝播させてコロニー全体をやっつけるベイト法や、薬剤を含浸させたプラスチックシートを床下に敷設したり、薬剤を含んだ塗料を基礎部分に塗布することによってシロアリの侵入や這い上がりを防ぐ方法などで、これらは薬剤使用量を減らせるということでレスケミカルな方法といえる。さらに、薬剤を使用しないケミカルフリーの物理的防除法が話題に上がっている。もちろん、床下環境を積極的に改善することを目的に、基礎と土台に間に隙間をつくったり、さらに調湿剤を床下に敷設したり、あるいは換気扇などと併用することによって床下の湿度を下げ、間接的にシロアリの被害を防ぐ手段も薬剤だけに依存しないパッシブな防蟻法も実施されている。

ところで、シロアリが通過できないメッシュサイズの金属製の網を布基礎と土間コンクリートの接合部や配管まわりなどに配置する方法や、シロアリが貫通できない一定の粒度(粒径が効力に影響する重要な因子で、重なった際の隙間がシロアリの通過を防ぐほど小さく、かつそれぞれが口に挟んで運べないほどの大きさ—2mm 前後)の砂を床下土壌に敷き詰める方法がハワイやオーストラリアで実用化され、わが国でも試みられている。こうなると、まさにフィジカル(物理)バリアーである(図8)。

もちろん、金属板や防蟻性のある木製板を土台や束まわりに一定の角度で取り付ける伝統的な蟻返しや、柱の根本の周囲に溝をほり水や油を溜めておく方法も古典的フィジカルバリアーということができ、歴史的にシロアリ被害に悩まされてきた沖縄や南九州などでは古くから様々な工夫が取り入れたられてきた。近頃でも束に取り付ける金属製の防蟻板や、立ち上がり配管の周囲をプラスチック板で囲む新た



図7：住宅床下の基礎表面につくられたシロアリの蟻道(中央部)



図8：ガラスビーズの貫通試験(シロアリは下部の土壌中で蟻道をつくって活動しているが、上部のガラスビーズには侵入できない) 提供：築瀬佳之

な蟻返しも提案されている。また最近の木造住宅にはコンクリートのべた基礎の普及が広がっているが、適切な配筋と不同沈下を防ぐ土固めがしてあればこれも物理的にシロアリの侵入を防ぐ有力な手段である。

しかし、蟻返しや防蟻シートにおいては土台や基礎周りへの取り付け部分に留意したり、床下コンクリートも長期にわたり割れ目が生じないように注意する必要がある。隙間が生じるとむしろシロアリの侵入を誘い込むことになりかねない。まだ十分に使用実績の乏しいフィジカルバリヤーでシロアリの加害から住宅を完全に守るには、ある程度リスクを仮定した上で診断とメンテナンスを組み合わせるなりして、施工とチェックとを同時にシステム化しておくことが不可欠である。

4. 住まいの劣化診断

さて、住まいの劣化をチェックするポイントは、腐朽菌やシロアリの侵入の生理・生態をよく理解し、未然の防止と早期発見につとめることにある。また、住まいのどこが劣化しやすいかを考え、そこに注意を注ぐ必要がある。特に、腐れについては、土台、柱脚、筋交いなどの下部の含水率の上昇、窓枠やモルタル内部への雨仕舞いの不良、雨水の通路の不具合、給排水管やサッシなど金属に接する部位での結露などが留意すべき箇所である。また、釘や接合金物に起因する鉄汚染や藻類や草などの発生も、木質部材の水分状態が高くなっていることの指標として考えられる。

しかし、住宅構造の密閉化や大壁方式の普及により、住宅の劣化診断はより困難なものになってきている。腐朽や虫害など生物的な劣化では、あらかじめその進行を予測することは容易なことではない。また、部材の表面から劣化が進むとは限らず、むしろ腐朽やシロアリの被害も内部で生じることが多く、その検出を一層困難にしている。

住宅の劣化あるいは老朽度の診断法としては、現状においては目視、打音診断が主なものであるが、経験を要したり、診断が主観的にならざるを得ない。正確に劣化診断を行うには適切な治具を利用する必要がある。しかし、pHの変化をみる化学的な識別法、あるいは木材内部への物理的なボーリング方法（ピロデインやレジストメーター）、音響伝播を利用する手法等々が試みられているが、安定した判断を下せるまでには至っていない⁸⁾。

一方、シロアリが木材を加害する場合、表面から順次食害することはほとんどなく、部材内部に穿孔して、いわゆる蟻道を作りながら食害領域を拡大する。そのため、被害を早期の段階で検出するのはきわめて困難とされてきた。一方で、シロアリ防除は今後、土壌や木部の駆除的な薬剤処理ですませるのではなく、総合的な住宅の保守管理システムへと移行すると考えられる状況にある。この点か

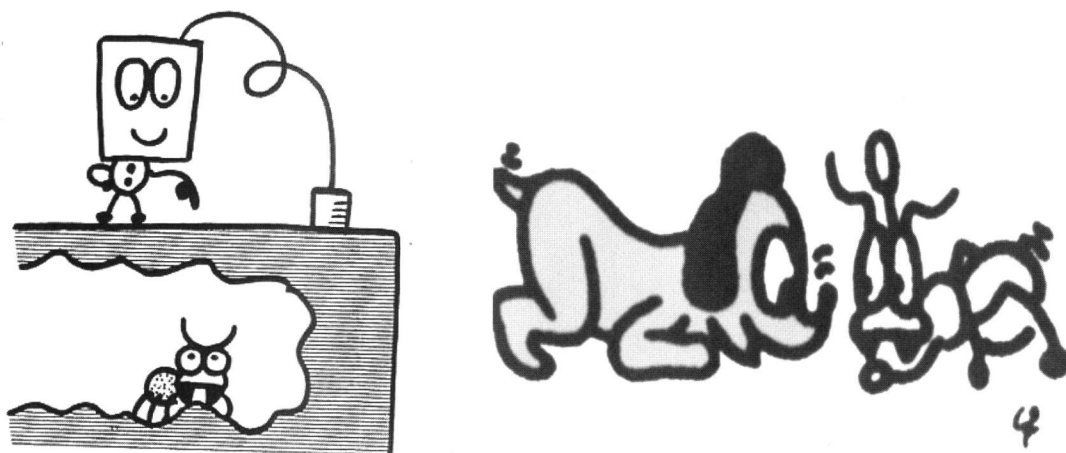


図9：左：シロアリの食害で発生するAE波の検出、右：シロアリを“匂い”で検出（左右の図とも築瀬佳之作画）

らも加害探知法の確立の必要性はますます増大するといえる。

ところで、シロアリは口器に相当する大顎を噛み合わせて、木材を小片として体内に取り込む。これはまさしく木材の微小破壊そのものではなかろうか。そうすれば必ず木材からエネルギーが解放され、弾性波が生じてAEとして検出されるに違いない(図9)。もし食害活動に対応してAEが発生しそれを測定できれば、シロアリ被害を非破壊的に検出する有効な手段になろう。これがAEをシロアリの食害活動を検出する手法として利用する理由である。またこの手法は、外力を加えてAEを発生させるものではなく、材料中に生息する昆虫が引き起こす微小破壊に基づくAEを捕捉するという意味で、まさしく生物学的な現象を利用するというユニークな手法といえる⁸⁾。

一方、発見が困難な地下生菌類であるトリュフを探すのには牝のブタが活躍するが、これはよく似た事例で犬が地中に巣をつくり生活しているシロアリを見つけたという。われわれはこのビーグル犬にならない、匂いによるシロアリ探査を試みている。そこで、シロアリに由来する代謝ガスに注目し、実際に実験を行った結果、シロアリが活動することによって水素、二酸化炭素、メタンの濃度が上昇することを明らかにした。住宅の床下などの構造上主要で、かつ腐れやシロアリ被害などが発生しやすい箇所に『マルチにおい検出センサ』を取り付け、そこから発信する劣化情報を集中管理して、きわめて早期に、かつ信頼度の高い劣化診断を判定するシステムを構築することを頭に描いている。

5. おわりに

われわれ日本人は本当に自分の住まいを大切にしているのであろうか。中古住宅の市場が確立している米国の事情と単純に比べることはできないが、新築後は一方的に下落して行く住宅価値、物理的耐用年数のはるか以前に取り壊される住宅、最近はほとんど意識の外に置かれた劣化チェックや保守、など考えさせられることは多い。

優良な社会ストックとして住宅の耐用年数を延ばすことは、炭素固定の点から地球の温暖化防止につながる。また、住宅の耐用年数を長くすることは解体時期を延ばすことであり、すなわち建築物からの廃棄物を減少させ、炭素の放出をできるかぎり抑制することでもある。

しかし、住まいの長い年月の中で、劣化の発生と住み手の求める機能性に対応した変更は避けることができない。そのためには、当初の十分な耐久設計はもちろんであるが、適切な増改築施工にあわせた維持管理と、補修を想定した設計行為とその実行が重要な課題である。耐久性能の付与と適切なメンテナンスによって、木造住宅や木造建築物の良さが耐久性の面からも新しい視点で見直されるように思われる。

参考文献

- 1) 西岡常一、小原二郎、「法隆寺を支えた木」、日本放送出版協会、143pp., 1978.
- 2) 高橋旨象、「きのこ木材」、築地書館、64pp., 1989.
- 3) 今村祐嗣、角田邦夫、吉村 剛、「住まいとシロアリ」、海青社、174pp, 2000.
- 4) 今村祐嗣、しろあり軍団北上中、「木のびっくり話100」、日本木材学会編、講談社、132pp., 2005.
- 5) Indrayani, Y., T. Yoshimura, Y. Fujii, Y. Yanase, Y. Okahisa and Y. Imamura, Survey on the infestation of houses by *Incisstermes minor* (Hagen) in Kansai and Hokuriku areas, *Jpn. J. Environ. Entomol Zool.*, 15, 261-268 (2004).
- 6) 宮田光男、「シロアリ驚異の世界(第4巻)」、東京農大出版会、32pp., 2005.
- 7) 今村祐嗣、ノンコンベンショナルな木材の保存処理、木材工業技術短信、24, 1-12, 2006
- 8) 今村祐嗣、木材および木質構造物の劣化診断、環境管理技術、19, 177-186, 2001