

## AE モニタリングによる木材の劣化診断\*

今 村 祐 嗣\*\*

### Detection of Decay and Termite Attack in Wood Using AE Monitoring\*

Yuji IMAMURA\*\*

(平成2年8月1日受理)

#### 1. はじめに

セルロース・ミクロフィブリルが螺旋状に配列し、かつそれらがマトリックスで充填された状態で構成されている細胞壁の集合体である木材は、高度に力学設計された天然の複合構造体であり、材料機能的にみてもあるいは住環境材料としてもすぐれた特徴を備えた多機能性の材料であるといえる。しかし、一方において、天然の生物材料であるがゆえの際立った特質があり、そのうち代表的なのは腐る、虫に食われるという、いわゆる生物的な因子によって劣化作用を受けるといえることであろう。

こういった生物劣化を受けるとい性質は、自然の循環系の上では当然必要とされることであり、森林の生態系においては分解という重要な役目を担っている。しかし、材料として木材を利用していく際には、生物劣化の問題は住宅を長もちさせる、あるいは安全性を保つという点で重要な課題であり、また森林資源を守り大切に使う上でも必要なことである。このため劣化を制御し、高い耐久性を木材に付与する多くの取り組みが行われてきているが、また一方では材料として使用された場合の劣化の有無、あるいはその程度を的確に把握する技術も必要である。材料の劣化程度を正しく検出することは、効率的な保守を行うという点で安全性や経済性の向上に貢献するばかりでなく、実用上材料の耐用年数を予測するうえでも大切である。

ところで、腐朽や虫害など生物的な因子が原因となる場合は、他の劣化要因と異なり、その影響はドラスチックに生じ、従ってあらかじめその進行速度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行するとは限らず、むしろ腐朽の進行やシロアリの食害は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。

従来、木材表面をたたいた際の反響音を識別して内部の劣化を知ろうという職人的方法、あるいは電柱などの内部腐朽の検出には、ボーリングした試料を抜き取り目視によって腐朽程度を判定する方法が一般的に行われてきた。また腐朽によって木材の密度が低下し、鋼釘を打ち込む際の抵抗が変化することを利用して腐朽の進行を予測する装置も建築用材の劣化検出に実用化されている。さらに最近では、超音波の伝導を利用して非破壊的に劣化部分を検出する工夫も行われ、コンピューターを併用して画像に描かせる機器も開発

\* 第45回木研公開講演会（平成2年5月18日、大阪）において、『シロアリの行動を音で探る—木材食害活動のAEによる検出』と題して講演

\*\* 高耐久性木材開発部門（Research Section of High-Performance Wood Products）

Key Words: Non-destructive testing, Acoustic emission, Decay, Termite, Fracture, Biodegradation

されている。

われわれは、木材の劣化検出法としてアコースティック・エミッション（AE）を利用することを思い立ち、腐朽と虫害の両方について検討を加えてきた。ここでは、AE を使用する劣化検出法に関する取り組みを紹介し、さらにその研究過程でAE モニタリングが検出手段としてだけでなく、シロアリの行動生態の把握に有力な武器になりうるということが明らかにされてきているので、その点についても言及してみたい。

## 2. 木材劣化の検出法

木材の劣化を検出するため、従来検討されてきた手法を取り上げ、その問題点を考察する。

### 2.1 顕微鏡的および化学的手法

まず、顕微鏡的な手法あるいは化学的な分析に基づく検出法について述べる。

腐朽していると思われる部分から試料を切り出し、切片にして顕微鏡下で観察して、木材の細胞内腔中の菌糸の有無やその攻撃によって形成される細胞壁の穿孔（bore hole）の存在をみつけることから判断しようとするもので、腐朽を受けているか否かを正確に知ることができる<sup>1)</sup>。しかし、腐朽初期では菌糸は壁孔を通過して隣接細胞に広がっていき、穿孔はある程度腐朽が進行しないと出現しないため、それが観察されるのは腐朽の後期段階でないといふ困難である。また、たとえ劣化の様相がみられなかったとしても、たまたま観察部位がそれらの兆候を示さなかったということで、材料全体の健全性を意味するものではない。最近、腐朽菌糸に特異的に反応するレクチンをもちいて蛍光物質を結合させ、紫外線下で明瞭に菌糸の存在を観察する手法も開発されているが<sup>2)</sup>、技術的にはかなりの習練を要する。また蛍光顕微鏡を利用し、腐朽による木材成分の変化とアクリジンオレンジなど蛍光物質との反応から、色相の変化をもって腐朽の程度を分析する方法も開発されており、腐朽の進行に伴う構成成分の変化をとらえることに成功している<sup>3-5)</sup>。しかし、色相の変化を劣化の程度と相関させる上では十分ではない。

また、腐朽菌を培養してその有無を検出する方法もある。すなわち、サンプリングした木片を無菌的に培養して腐朽菌の有無を判断する方法で、手間を要する上培養に時間がかかりすぎる欠点がある。また材料の腐朽程度を知る的確な情報を得ることはできない。

一方、化学的な分析手段を応用した例では、木材が腐朽菌の攻撃を受けると重量減少が認められない段階でも、木材構成成分の変化・分解が生じていることに着目し、これを化学的に検出しようとするものがある。例えば腐朽材に特有な赤外吸収スペクトルでの $1730\text{ cm}^{-1}$ の吸収バンドの変化<sup>6)</sup>をとらえ、劣化の情報とする試みが行われている<sup>7)</sup>。分析手段としては通常のIR 以外にフーリエ変換IR を用いて、迅速に特性吸収バンドの変化を腐朽の指標とする研究もなされている<sup>8)</sup>。腐朽段階の異なる木材についてもデータが得られているが、褐色腐朽菌でのみ特徴が著しいこと、および木粉にする手間がかかることから実用的であるとはいえない。

また、上記の範疇には属さないが主として立木の樹病の検出法として開発された方法で、電気抵抗値の変化からその存在を知ろうとするものがあり、有名な Shigo meter もこの一つに含めることができる<sup>9)</sup>。この場合、被検体にドリルで小さな穴をあけ、その中にワイヤープローブを差し込み、先端よりパルス電流を流して抵抗値を測定する。健全な部分では値の変動は小さいが、腐朽したところでは大きく変化する。しかしあまり敏感な検出法ではなく、また供試材料の状態（含水率など）によって結果の変動が大きいのは否めない。

### 2.2 強度性能の把握を主たる目的とする手法

以上の手法は劣化の程度あるいは強度性能の変化を知ることができないため、情報量としては不十分で実用上あまり有効な方法であるとはいえない。そこで、劣化の進行程度と保持している強度性能をよりの確に

把握しようとする試みが行われてきた。

一般的には木材から直接試料を切り出し、強度的性質を測定する方法が上げられる。半径方向圧縮強さの場合、初期腐朽の段階で強度低下の度合いと重量減少率との間には高い相関があると報告されている<sup>10)</sup>。この場合、圧縮ひずみが5%に達したときの強度値で評価すると重量減少率との相関が高く、きわめて早い段階から強度低下の検出が可能であるとしている。この手段は適確なサンプリングができればより具体的な手段であるが、元々の木材に強度的なバラツキが大きいので、標準的な基準強度をどうとるかが難しいところである。

また、強度試験に供するのではないが、釘状のものを用いて木材表面から裂片を採取し、その性状を観察する pick test が現場での簡単な検出法として考案されている。この場合上に述べたように、強度的性質のうち靱性が腐朽の影響を著しく受けることを利用して、腐朽材では脆い裂片がみられることを劣化の指標とするものである。現場において腐朽を見いだすのに有効であると報告されているが<sup>11)</sup>、これも腐朽がかなり進行しないと検出法として用いることは困難である。

簡便にかつ部材が保持している強度を予測する機器としては、PYRODINE という名称で市販されているものがあり、釘を一定圧力で打ち込んだ深さが数字で表示されるようになっている。この釘の打ち込み深さと木材の曲げ強度とは高い相関関係があるとされており、劣化部位の確認と保持強度の予測に多く試みられている<sup>12)</sup>。

木材とくに電柱のような木柱では、しばしば腐朽菌やシロアリによって内部の劣化が引き起こされ、その位置によっては著しい強度低下が生じる(図-1)。したがって、木柱を安全にかつ経済的に利用していくには、これら劣化部分を検出し、正しく定量化することが必要である。穿孔スラスト式測定器は、木材にドリルで穴を開ける際のトルクの変化を測定し、反力を算出することから劣化部分を知ろうとするものである。この原理に共通する発想で、最近自動送り穿孔機を用い送り速度の変化から劣化部分を検出する装置が開発されている。すなわち、健全部ではゆっくりした一定速度で進み、腐朽部分あるいは蟻道などの脆弱ないし空洞部分に達すると急激に速度を増すことから、この速度変化を光センサーで感知し、マイクロプロセッサで演算して図示する仕組みになっている<sup>13)</sup>。

独立した柱を対象としたものでは、その自由端をハンマーなどでたたくと、健全な柱に比べて地際部が劣

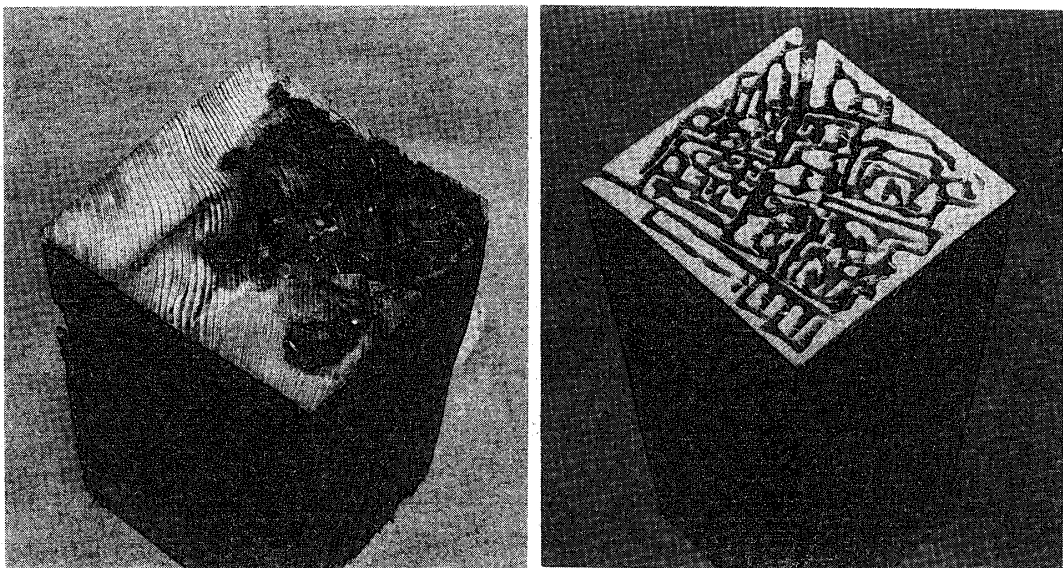


図1 木材の内部腐朽(左)とシロアリによる被害状況(右)

化したものではゆっくりと振動することから、その共振周波数を測定し剛性値を計算する劣化予測法が提案されている<sup>14)</sup>。その結果では、振動から求めた予測剛性値は実際に片持ちはりとして計測した静的剛性値とよく一致するということがあった。

### 2.3 非破壊的検出法

ところで、音（超音波）の伝播速度が材料の剛性波と相関していることを用いて、音速の測定により非破壊的に強度を予測しようと取り組みが従来から行われてきた<sup>15) 16)</sup>。腐朽による劣化は、セルロース鎖の切断あるいはリグニンの分解という初期の段階から細胞壁の崩壊に至る広い範囲で生じるため、劣化の程度は音の伝播とおおいに関連する。セルロース鎖の切断はヤング係数の減少となり、主として長軸方向の音波の伝播速度の低下となる。また、腐朽材では切断されたセルロース鎖の間隔が広くなり、かつ非晶部分も増加するため、減衰も増加する。

Dunlop は実大寸法の柱を水平にあるいは垂直に置き、受信器を木口面にゴムバンドとグリースで装着して、一方の木口面から振り子を用いて発信する手法を試み、音響パルスの反射波を用いる非破壊検査法を考案している。その結果、音の速度は効果的な因子ではなかったが、減衰値は腐朽部分の検出には有効であったと報告している<sup>15)</sup>。

超音波を用いるこれらの手法は、以前から木材の非破壊検査や強度のグレーディングに試みられてきたが、最近圧電素子を用いた高性能のセンサの開発とコンピュータによるデータ処理の進歩により、再びさかんに取り上げられるようになり、内部腐朽を画像上で検出する機器も実用化されている。わが国においても木柱の内部腐朽の検出を目的に、腐朽箇所での伝播時間の遅れを検量してその部分を包絡して表示する手法、あるいは送信子を固定して受信子を円柱の回りに回転させる操作を一周繰り返して、伝播時間を画素解析するコンピュータ・トポグラフィによる画像解析法が試みられている<sup>17)</sup>。前者の手法については、比較的簡便なため二、三実用化されている機器があるが、その原理は図-2に示すように送信子をAに固定し受信子を柱の周囲に順次移動させて伝播速度を測定し、これをB、Cで繰り返して、あらかじめ健全部で求めた値と比較して遅れの生じたポイント（実線）に近接するラインで囲まれる部分を腐朽部として画像化する方法に基づいている。

ところで、音波の伝播速度の腐朽による変化は木材の劣化がかなり進み、細胞壁が崩壊の段階に達して初めて明確に検出可能であること、不均一物体である木材を音が伝わる場合、信号としては最も速く伝わる経

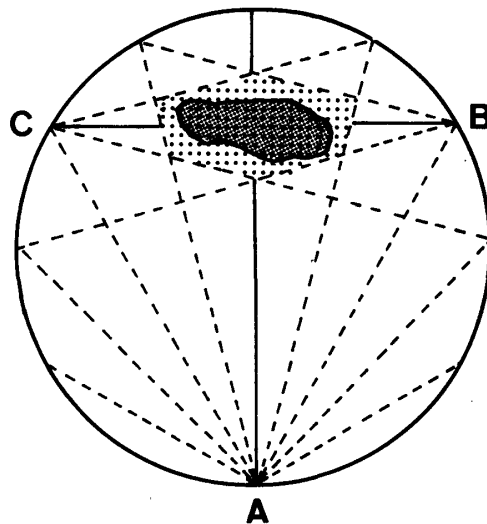


図2 超音波による木柱内部腐朽の検出手順

路を経るため必ずしも直線上を伝播しないこと<sup>17)</sup>、などの点で結果の信頼性に欠けるところがある。また、音速の変化を用いる方法は、木材の強度性能と相関があるとされている剛性と音の伝播速度との対応関係を利用しているが、腐朽材では重量減少率に対する剛性と破壊強さの低下傾向が異なり、破壊強さに比べて剛性の変化がより緩やかである。図-3は腐朽における曲げ性能の保持率の変化を、ヤング係数と強さとで比較したもので、実線で表した相対曲線に示されるように前者の低下の傾向に比べ後者の低下割合が大きい。これは剛性より破壊強さが材料中の欠点を反映する点で、より構造感性が高いことに基づくが、このことから音速と破壊強さが必ずしも対応しない場合が生じる。従って、音速よりむしろ音の減衰を測定するほうが腐朽の検出には正確な情報が得られるともいわれている<sup>15)</sup>が、現在満足すべき性能を備えた検出器の実用化までには至っていない。

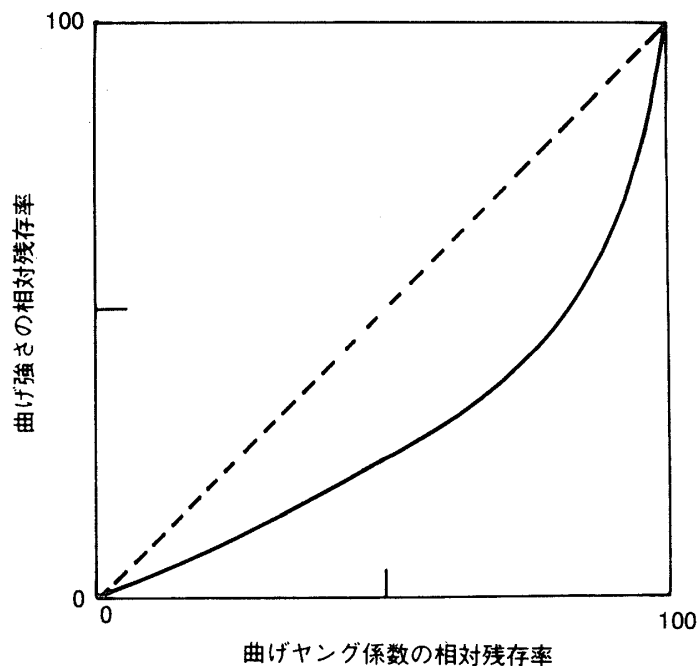


図3 オオウズラタケ腐朽材における曲げ強さ残存率と曲げヤング係数残存率との関係 (スギ辺材)

### 3. AE を利用した劣化現象の検出

#### 3.1 AE (アコースティック・エミッション)

アコースティック・エミッション、略してAEと呼ばれる現象は漢字に直せば『音響放射』ともいえるもので、材料から発生する弾性波であり、多くの場合その周波数は、人間の耳に聞こえる可聴周波数 (20 Hz - 20 kHz) より大きな範囲の超音波の領域にある。

この弾性波は、材料が破断する前でも外力によって永久変形が始まったり、材料の摩擦や亀裂の形成と進展などによって生じるものとされている。材料を破壊するとき、目に見える亀裂の成長や耳に聞こえる破壊音が出る前に、微小な圧壊や亀裂によって人間の耳には聞こえない音が発生している現象といえ良いであろうか。

この超音波を用いた材料評価法は、新しい非破壊検査法として近年注目をされてきている。木材関連分野においても、破壊現象の解明や接着信頼性試験に、あるいは木材乾燥の割れ防止のためのモニタリングや木材の等級区分であるストレス・グレーディングなどに試みられている。これら AE の開発の歴史や木材への

利用については、野口のまとまった総説に詳しく述べられている<sup>18)</sup>。

ところで、腐朽菌による劣化作用を受けると木材組織中には弱い部分が形成されており、外部から力が与えられるとわずかな荷重でAEが発生するはずで、これを測定することにより腐朽の有無やその程度が把握できると予想される。しかも他の手法では困難とされてきた初期段階の腐朽劣化であっても、もし構造的な弱点部が生じておれば、低い応力によってその個所からAEが発生するに違いない。

また、シロアリは木材の中に侵入して自分の口器で加害する。これはまさしく微小な材料の破壊そのものではなからうか。そうすれば、シロアリの食害行動によって木材からAEが発生し、これをモニタリングすれば加害現象を把握できるはずである。

前者の腐朽の探知は、いわば外から力をかけてAEを木材から発生させ追跡する方法、後者のシロアリの食害行動の把握は、木材中の昆虫が引き起こす破壊現象に基づいて発生するAEを計測する方法であるが、はたして木材劣化探知法としての可能性はどうであろうか。

### 3.2 AE を利用した腐朽検出法

#### 3.2.1 初期腐朽現象

木材の初期腐朽という、一般的には重量減少率(WL)が10%あるいは5%以下の段階の腐朽現象をさしている。何故初期腐朽に意味があるかという、外観的には何ら変化が認められないにもかかわらず、強度の低下がすでに著しいことである。したがって、この段階で腐朽の進行程度を正確に把握することは、使用されている木材の部材としての安全性を判断し、また交換や補修の必要性を知る上で大切である。

Wilcox<sup>19)</sup>は腐朽と強度に関する総説の中で、初期腐朽を10%以下の重量減少率の段階と規定した上で、腐朽による強度低下は作用する腐朽菌のタイプや対象となる木材の樹種によって異なるが、初期腐朽に限定すればある程度一般化できるとした。すなわち、強度低下に一番敏感なのは靱性及び衝撃強さで、10%重量減少率が生じた場合、60-80%、ついで曲げ強さで50-70%の強度低下が起きていると述べ、他の強度的性質はこれより低下割合は少ないが、縦圧縮では60%、横圧縮では40%、引張り強さでは50-60%の強度低下がみられ、せん断強さや硬度の低下は20%にとどまるとした。

図-4は、スギ辺材の褐色腐朽菌オオウズラタケ及び白色腐朽菌カワラタケによる曲げ強度の低下傾向を示したものである。丸太のほぼ同一部位から採取した試験片(1×1×16 cm)を腐朽菌に暴露し、適宜期間

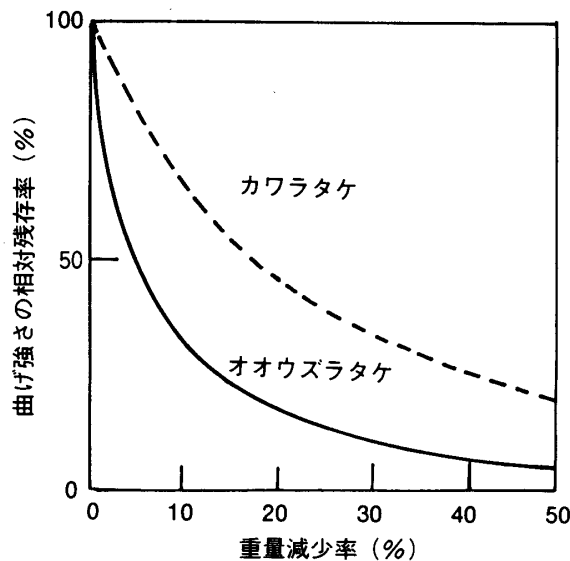


図4 腐朽による重量減少率と曲げ強さ残存率との関係 (スギ辺材 1×1×16 cm)

を変えて取り出した後気乾状態に調湿し、曲げ破壊係数 (MOR) を求め、健全材に対する強度残存率として示したものである。オオウズラタケの場合、腐朽初期から強度低下が著しく、WL=10%の段階で MOR は元の値の35%にまで低下している。WL が30%以上に達すると、材料の強度はほぼなくなっていると判断される。一方、カワラタケではオオウズラタケに比較すると強度低下の傾向は緩やかで、WL=10%で強度残存率は50%であった。このような腐朽による重量減少率と強度残存率との関係の様子は、従来からも一般的に指摘されているが<sup>20,21)</sup>、また、応力-歪み曲線を見ると腐朽材の場合塑性域がほとんどなくなり、破壊の仕事量が低下し、じん性が極端に低くなることが認められる。試料の破壊形状としては、曲げ破断の場合、健全材の圧縮側に一般的にみられる Compression failure は認められず、断面全体にわたって脆性的な破断状況が観察されるようになる。

ところで、腐朽菌による木材の劣化は、木材細胞中に侵入した菌糸の分泌する酵素が細胞壁を分解することによって進行する。褐色腐朽材では、細胞壁全体から多糖成分が選択的に分解・除去され、細胞形態は腐朽がかなり進むまでリグニンや未分解多糖によって維持されている<sup>22)</sup>。一方、白色腐朽菌によって劣化した木材では、多糖成分やリグニンなど各構成成分のすべてが侵されているだけでなく、この分解様式は局所的であるため、細胞壁に構成成分の分解によって生じた空洞や erosion がみられるようになる<sup>23,24)</sup>。

図-5に健全材および腐朽材の破断面の走査電子顕微鏡 (SEM) による写真を示す。重量減少率がかなり大きな腐朽材 (WL はほぼ40-50%) の曲げ破断面をみると、オオウズラタケの場合、細胞壁はささくれず、きわめて平坦な横断面が観察される。また破断した面以外の部分にも水平方向の切断線が走り、脆性破壊の特徴を表している (図-5 e, f)。一方、カワラタケにより腐朽した場合、細胞壁の薄化や崩壊あるいは壁孔周辺での空洞の形成が顕著で、破断面はオオウズラタケの場合のように平坦ではなく、入りくんだ様子を呈している<sup>25)</sup>。カワラタケにより腐朽した木材細胞壁で空洞が局在しているのは、壁の分解が菌糸周辺に限られるため、オオウズラタケのように酵素が壁内へ急速に浸潤しないためと考えられている。

さて、腐朽初期から著しく木材の強度を低下させる褐色腐朽菌では、菌糸から分泌された酵素はすみやかに細胞壁中に拡散・浸潤し、セルロースの重合度を急速に低下させる<sup>26)</sup>。図-5 c, d は重量減少率10%程度に腐朽したスギ辺材について、曲げ破断面の引張側をみたものである。健全材で一般的に認められる隣接細胞間での剥離や、細胞壁の破断先端における二次壁中層 S<sub>2</sub> のフィブリルに沿った裂け<sup>27)</sup>は観察されず、繊維方向に直交する壁破断が増加し平坦な切断破面がみられるようになる。しかしこの初期腐朽の場合には、e, f で示したような極端な脆性破断面に至ってはならず、フィブリルの形状を残して切断されている様子が認められる。とくに S<sub>2</sub> 層においてフィブリルの切断が明瞭に観察されるが、これは細胞壁の劣化が内腔に侵入した菌糸と離れて起こり、酵素は内層 S<sub>3</sub> を通過して S<sub>2</sub> へ拡散し、そこで集中的な分解が行われる褐色腐朽菌の攻撃様式の特徴<sup>28)</sup>と対応している。

また、このような腐朽の初期段階においては、褐色腐朽菌はもちろん白色腐朽菌においても、菌糸は壁孔を通して広がり、壁孔縁の薄化や劣化がしばしば生じ (したがって走査電子顕微鏡での検鏡時に壁孔周辺が帯電することが多い)、また壁孔口から S<sub>2</sub> のフィブリル方向に沿った小さなクラックがよく観察される (図-6)。このことは、腐朽の初期段階における菌糸の伸長に際し、壁孔周辺部が他の部分より先に分解の影響を受けるためと予想され、またクラックの形成については、孔口周辺での特異なマイクロフィブリル配向と壁層構造に起因するものと考えられる<sup>29)</sup>。

木材の細胞壁に小さな割れや裂け目がみられることは、重量減少率の低い初期腐朽材であっても、強度低下に影響する構造上の欠陥を数多くもっていることを示している。

### 3.2.2 AE を利用した初期腐朽の検出

材料が破壊するとき、蓄えられていたエネルギーが解放されて弾性波が生じる AE (アコースティック・エミッション) 現象は、変形及び破壊の微視的過程によく対応している。一方、腐朽した木材はその初期段

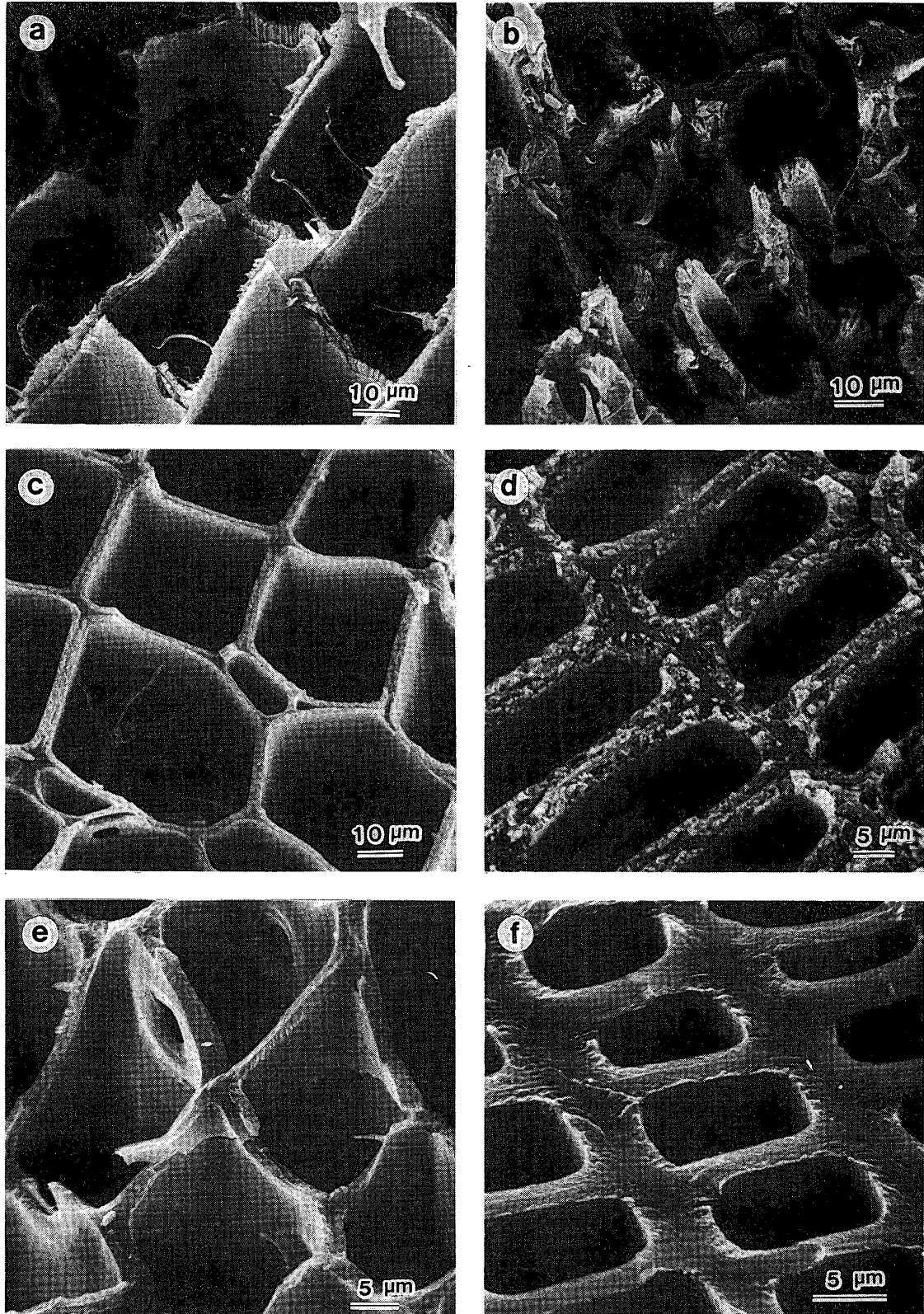


図5 スギ辺材の破断面 (a, b; 健全材, c,d; オオウズラタケによる初期腐朽材, e, f; オオウズラタケにより激しく劣化した材)<sup>25)</sup>



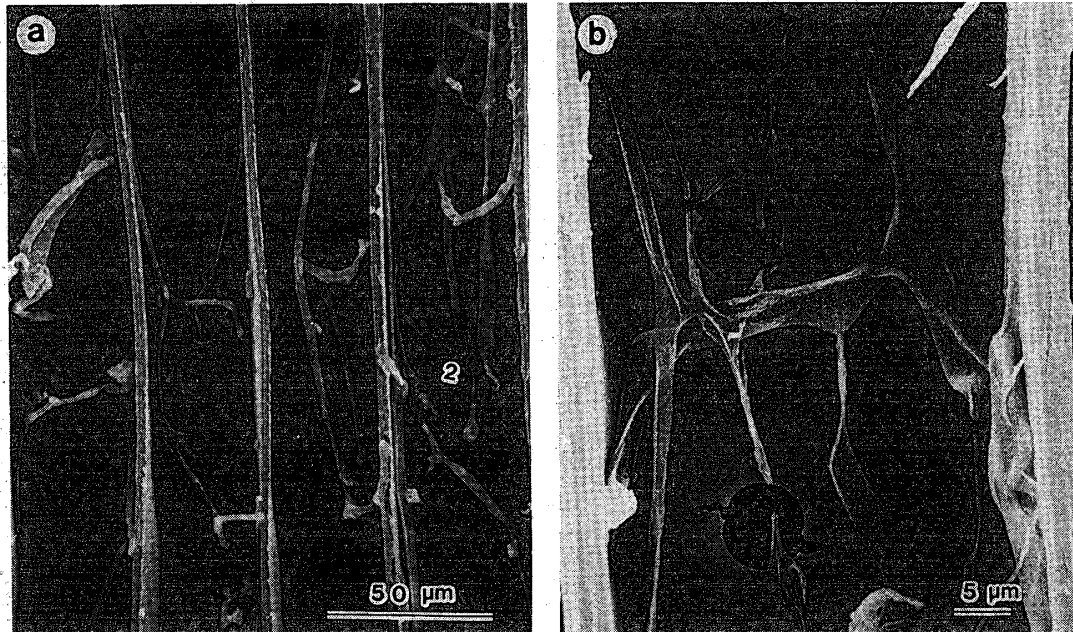


図6 オオウズラタケによる初期腐朽材の仮道管内腔表面（選択的に壁孔に侵入する菌糸 (a) および壁孔周辺の微小破壊 (b)）

階から強度を低下させる構造上の欠点を多く有しており、腐朽材に外力を与えると健全材の場合より低い応力から AE が発生すると考えられる。

外力の負荷方法としては、曲げ<sup>30)</sup>、部分圧縮<sup>31)</sup>、半径方向の横圧縮<sup>32)</sup>が検討された。筆者らの曲げ荷重方式の研究においては、断面 20 × 20 mm、長さ320 mm のベイツガ、スギの辺材、シナノキを供試材とし、褐色腐朽菌であるオオウズラタケ、白色腐朽菌のカワラタケならびに軟腐朽菌のケトミウムが生育した培地の上に置き、3—8週間腐朽させて劣化段階の異なる試料を調整したのち、スパン中央に荷重をかけて発生する AE を測定した。共振周波数が 150 kHz の AE センサを試料表面に荷重点から 6 cm 離して取り付け、増幅倍率 60 dB、しきい値 0.1 V を越えたものを AE 事象として弁別し、データとして取り込んだ。

結果の一例を図-7 に示すが、健全な木材では少なくとも破壊荷重の50%を越えないと AE が発生しなかったのに比べ、腐朽菌によって劣化した試料では、健全材よりかなり低い荷重域から AE が発生している様子が認められた。とくにオオウズラタケで腐朽した木材ではこの傾向が顕著で、重量減少率が1%未満のごく初期段階の腐朽材でもきわめて低荷重で AE の発生が検出された。また腐朽菌の種類によって AE の発生の様子は異なっていたが、本来重量減少率の変化に対して強度低下の緩やかなカワラタケによる腐朽材でも同様の AE の発生の傾向が観察された。試料を人為的に腐らせる場合、均一に進行させることがきわめて困難であるため、試料の重量減少率と発生した AE 事象数との間に相関を得ることはできなかったが、注目されることは AE の発生が初期の腐朽を検出する敏感な指標になり得るということであろう。

Beall らは 10 mm 角、半径方向 20 mm の小試験片を褐色腐朽菌 (*Polia placenta*) により腐朽させた後、横圧縮試験を行った結果、健全材では圧縮応力が弾性限度に至っても AE は発生しなかったのに対し、腐朽材では重量減少率が 1%程度でも健全材の場合より低応力から AE 総数が増加し、その増加のしかたは重量減少率の増加とともに急激に大きくなったと報告している<sup>32)</sup>。Beall らの実験では、共振周波数 175 kHz のセンサで検出し、90 dB 増幅後、しきい値 0.7 V を越えたものを AE 事象として計数している。

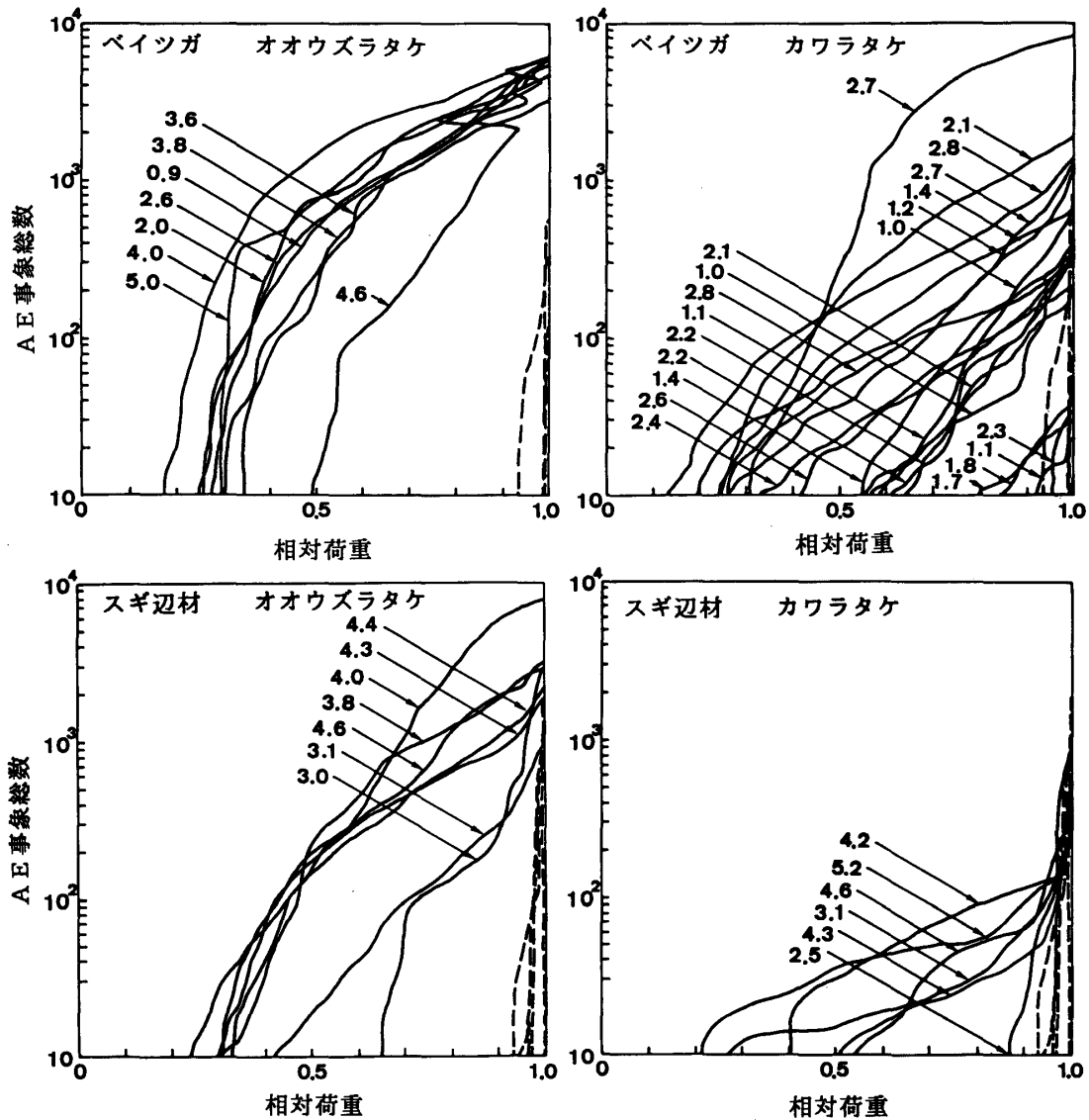


図7 腐朽材および健全材の曲げ試験時の AE (数字は重量減少率 (%), 破線は健全材を示し、荷重は破壊荷重に対する相対値を示す)<sup>33)</sup>

しかし、AE モニタリング法を実際の部材に適用する場合にはいくつかの課題が存在する。そのうちのひとつは荷重の負荷方法であろう。電柱のように一端固定の場合は、自由端を横方向に引っ張るなり押してみても負荷を与えるのも有効な一つの手段である。一方、住宅部材のように組み込まれた状態で露出された面に力がかかる場合は、部分圧縮のような方法を講じる必要がある。

30×30×300 mm の試験体を2等分し、一方を振とう培養で得た腐朽菌の培地上で腐らせ、数週間後に取り出して水洗、風乾し、他方は対照試料とした。図-8に示すように、中央部に部分圧縮荷重を速度 2 mm/min で JIS Z 2111 にならって負荷し、腐朽試験体はその培地側の面を台座側にして荷重した。AE の測定は、試験体側面につけたセンサで検出し、60 dB の増幅、0.1 V のしきい値に設定して発生する AE を取り込んだ。図-9に示した結果にみられるように、健全材では比例限度荷重を越え、700 kgf 以上に達しないと AE が発生しなかったのに比較して、腐朽した木材では 100 kgf より小さな荷重レベルで AE の発生が認められた。とくにオオウズラタケ腐朽材の場合、比例限度荷重に達する以前から AE が増加し始めた。

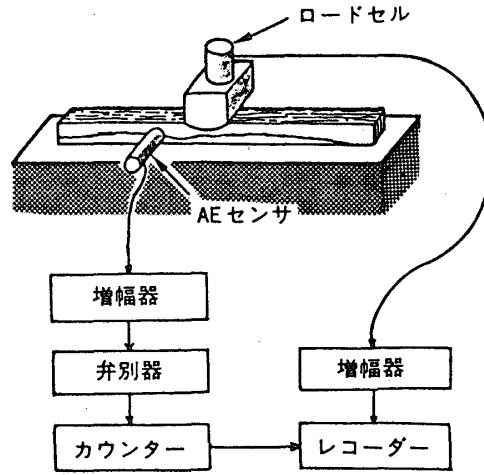


図8 部分圧縮試験における AE 計測の概略図

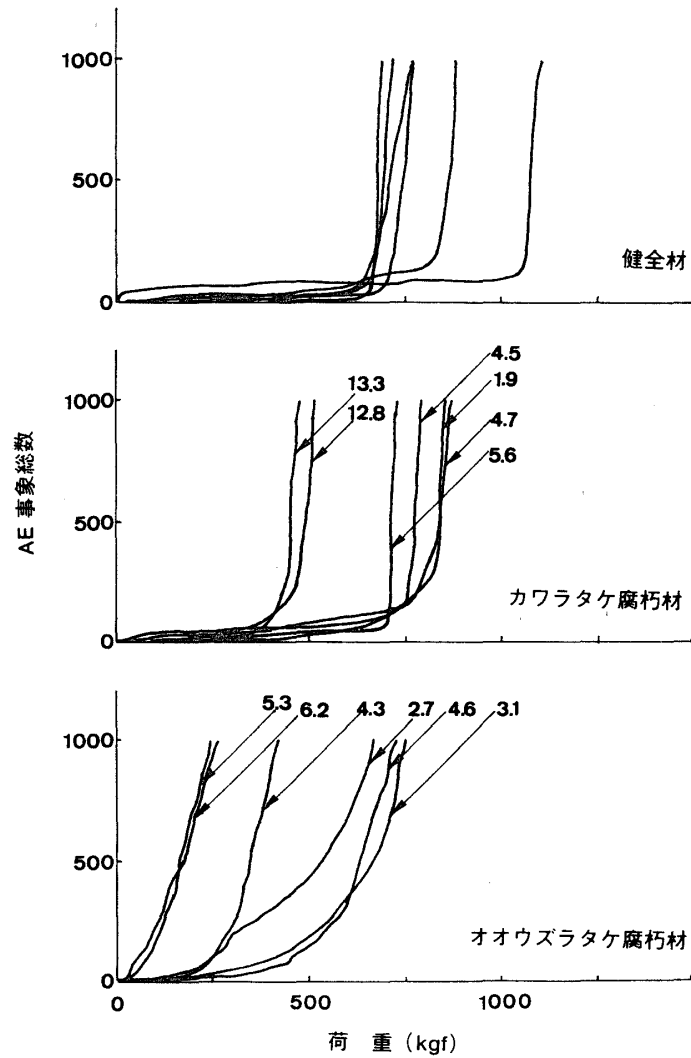


図9 部分圧縮時の AE 発生挙動 (ベイツガ、数字は重量減少率%)<sup>34)</sup>

また、同一荷重に対するめりこみ量は、腐朽した木材の場合健全な木材より1.5倍以上大きかったので、圧縮治具との接触面積を考慮した応力で表示すると両者の違いはより明確になると考えられる。この結果においてもいわゆる腐朽劣化の初期段階であってもきわめて低い応力でAEが発生することを明白に示している。また曲げ応力の負荷と異なり、部分圧縮の場合は組み込まれた状態での部材にも適用することができ、腐朽劣化の検出法として実用化が期待される。

このようにAEを初期腐朽の検出に用いる可能性が示されたが、AE発生総数と重量減少率との明確な相関が得られていないこと、AEの発生挙動が健全材であっても、樹種・荷重条件・AE計測条件によって変動することから、これを実際の建築部材に適用するにはまだ解決すべき問題点は多い。

### 3.3 AE モニタリングによるシロアリの木材食害活動の検出

#### 3.3.1 音響的手法によるシロアリ行動の検出法

木材を主たる食物とする数少ない昆虫の一つであるシロアリは、住宅の木質部材や木製家具を加害する生物でもある。わが国に広く分布し、木材に被害を与えている種は、ヤマトシロアリとイエシロアリの2種であり、いずれもが湿材シロアリの仲間に属している。

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(gallery)を作りながら食害領域を拡大し、被害がよほど進行しても表面層は残す習性をもっている。これは、摂食個所での乾燥を嫌い、自らの活動場所を外気から遮蔽するためであろう。したがって、住宅部材などのシロアリによる被害を非破壊的に、しかも早期の段階で検出するのはきわめて困難とされてきた。

シロアリの活動に伴う音や振動をマイクロフォン等を用いてひろい、増幅して聞き分け、その存在の有無を検出する試みはすでに内外の研究者によって試みられ、実用器も市販された経緯がある。森らは、シロアリ活動の有無を調査したり、最も多数のシロアリが活動している巣の所在を調べるために、シロアリ探知器Sonic Detectorを創案開発した<sup>35)</sup>。その原理は、シロアリの活動音をピックアップで捕捉し、この固体振動を電気振動に変換、増幅器で増幅し、さらにろ波器を用いてシロアリの活動音の主要部分を含む特殊の周波数以外の雑音をできるだけ除外した後、イヤホン、出力計、スピーカーなどによって、シロアリの活動音を聞く携帯用装置である。

かれらの測定によると、捕捉された音波の周波数は1kHzから5kHzまでで、いわゆる可聴周波数の領域にある。この装置にオシロスコープを連結して音の波形を描かせ、イエシロアリの巣の周囲をたたいたりすると、イエシロアリは非常に興奮して大騒ぎを起こして最も高いレベルの波形を示し、それからしばらくすると静かに落ち着いてきたという結果を報告している<sup>36)</sup>。

また古くは、1920年代に米国の研究者がシロアリの食害活動中の木材をカーボン粒の中に立て、電話の送信機を改造した装置で振動を電気信号に変えて増幅し、ヘッドフォンで聞くことに成功している<sup>37)</sup>。その装置を用いかれらは、*Reticulitermes flavipes*の兵蟻が頭部を打ち付け、その振動を仲間に伝える現象を音で聞くことができた。しかし、これら従来の研究対象となった音は、シロアリの蟻道内における走行音や刺激によって発生する警戒音である。シロアリは代表的な社会性昆虫の一つであり、相互の連絡をフェロモンなど化学的物質による以外に、上述のように頭部を床に打ち付けて振動させ情報を連絡するという手段をもっている。従来の測定のねらいはこれらの動作に伴う行動音であり、木材中のシロアリの存在や土中の巣を探索することなどを主たる目的としていた。そのため、これらの手法を実用に供する場合には、環境雑音の混入が大きな障害となるだけでなく、食害行為そのものに基づく音を区別して聞き分けることは困難で、現在進行中の木材食害の状況を検出するには至らなかった。

ところで、シロアリは、歯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(図-10)。これはまさしく木材の小破壊そのものではなからうか。そうであれば必ず木材からエネルギーが解放され、



図10 左；シロアリ頭部の口器（ヤマトシロアリ），右；シロアリの消化管中の木材片（矢印）

弾性波が生じて AE として検出されるに違いない。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。これが本研究を始める発想のきっかけであり、AE をシロアリの食害活動を検出する手法として利用しようとする理由である。

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 を捕捉するという点においてきわめてユニークな手法となる。

### 3.3.2 はたしてシロアリは AE を発生するか？

気乾のベイツガ材から木口 25 mm 角、長さ 45 mm の試験体を調製し、一方の木口面から直径 5 mm、深さ 25 mm の穴を 5 個開け蟻道を想定した。一端を石膏でシールしたアクリル樹脂製の円筒（内径 80 mm、高さ 60 mm）を用意し、そのシールをした底面中央に上記の試験体を設置した（図-11）。この容器の中に飼育巣から取り出したイエシロアリの職蟻および兵蟻を所定の頭数移入し、容器は水を含んだ脱脂面を敷いたケースの中に入れて、26℃の暗い部屋に静置した。

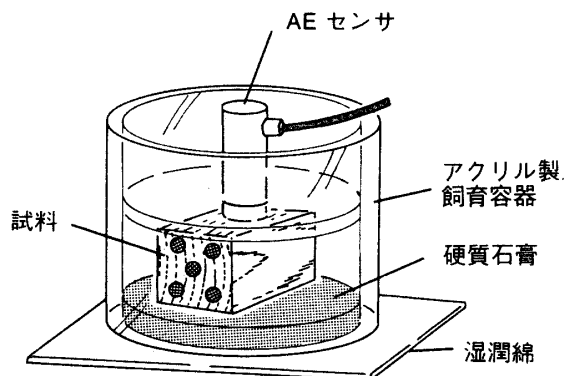


図11 容器内シロアリ食害実験の方法

共振周波数 150 kHz の AE センサを、試験体の上部表面の中央にホットメルト接着剤で固着した。センサからの信号は、遮断周波数 50 kHz のハイパスフィルタでろ波、70 dB 増幅後、しきい値 0.1 V を越え

たものを AE 事象として弁別し、その振幅、持続時間等のデータをデータチェンバ (NF-9640 S) に集め、磁気テープに記録してコンピュータで解析を行った。AE センサを取り付け静置して測定を開始すると、平均15分前後して AE の発生が始まった。図-12は検出された AE 波形の例を示したものであるが、シロアリを移入した木材からは、いわゆる典型的な突発型の AE 波が発生していることを示している。すなわち、微小破壊に特有の弾性波が伝わってきたことを意味する。この突発型の AE は、固体中の転移の運動などによって生じる連続型の AE と異なり、それより大きい変形であるひび割れや亀裂の発生などによって生じるもので、エネルギーレベルも高い。AE 事象の振幅は平均して 0.4 V 付近のものが多く、持続時間は 200  $\mu$ s 前後のものがほとんどであった。

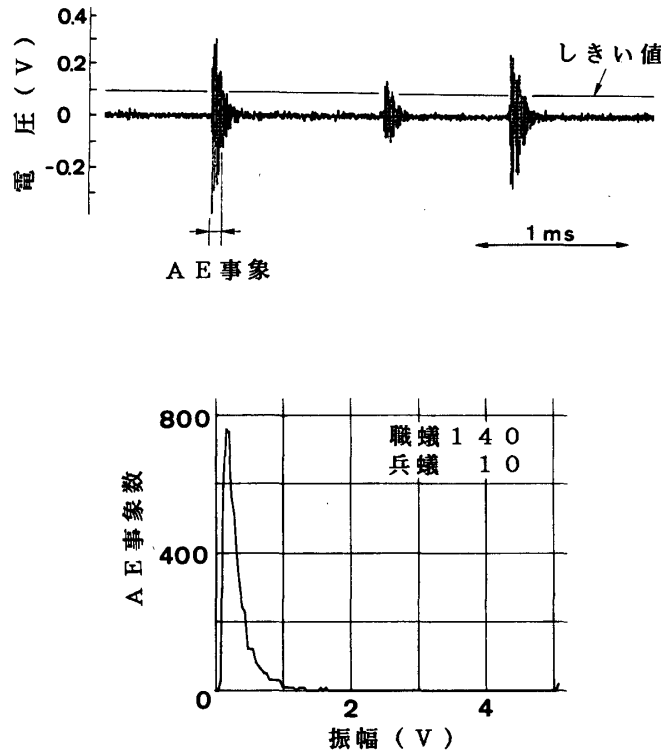


図12 シロアリの食害活動により発生する AE 信号の例 (上) と振幅分布 (下)

実際の測定では、容器を暗室に静置し、AE の発生が一定になってから約 10 分間データを取り込んだ。図-13に職蟻140頭、兵蟻10頭の試料についての結果を示す。AE の事象率は毎秒あたりの数で示されているため変動が大きい、全体としてみるとほぼ一定の割合で発生している様子が認められる。

次に、容器に移入するシロアリの頭数ならびに職蟻と兵蟻の割合を変えて食害実験を行った。シロアリは画然とした階級分化が行われているため、兵蟻は職蟻のように摂食活動ができず、職蟻に扶養されながら敵からの防衛にあたる。イエシロアリの一般的なコロニーでは、兵蟻は職蟻の1割程度でそのバランスは保たれているといわれている。職蟻と兵蟻の割合を変えたのは、階級構成比の食害活動への影響をみるためである。

表-1に試料別の結果を示すが、AE の発生は職蟻を移入した容器からのみ認められ、しかも職蟻の頭数が多いほど AE 事象率は高くなった。これは AE の発生頻度が食害活動の大小と対応していることを裏付けているが、さらに兵蟻のみの試料からは AE がまったく発生しなかったことは、食害の行為のみを AE として検出できたことを示している。140頭の職蟻と10頭の兵蟻を入れた試料からは、平均すると1分

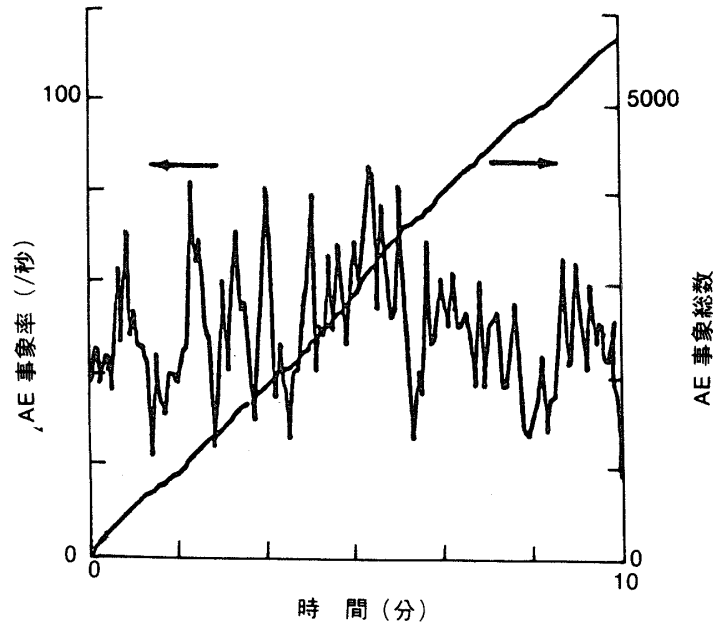


図13 食害中の木材から測定された AE 事象の例 (職蟻140頭, 兵蟻10頭)

表1 各試料における平均 AE 事象率

試料 番号	シロアリ頭数		平均 AE 事 象率 (/分)
	職 蟻	兵 蟻	
イ	5	145	28
ロ	75	75	332
ハ	140	10	561
ニ	150	0	280
ホ	75	0	240
ヘ	5	0	32
ト	0	150	0

AE 測定条件：増幅倍率 70dB, しきい値 0.1V

間に約 500 の AE が発生していたが、これは140頭の職蟻が1分間に 500 回木材をかじっていると短絡して解釈すべきものではなく、あくまで 0.1V のしきい値を超えて検出される AE を包絡線検波した結果、その数だけ発生しているという意味である。しかし、食害の頻度がまさしく AE の発生頻度に対応していると考えてよい。

兵蟻を入れず職蟻だけの試料ではむしろ AE の発生が低下する傾向があった。兵蟻は木材を食害せず職蟻から餌を与えられる関係にあるので、いわば扶養する相手がいる方が職蟻にとってより多くの木材を食害する必要が生じるのであろうか。

また、職蟻の頭数が少ないほど当然発生する AE も減少するが、極端に移入する頭数を少なくすると一頭あたりに換算した AE 事象数が減ってくる現象がみられた。シロアリは社会性昆虫であるため、集団として行動してのみ本来の行動様式を示すとも考えられる。

ところで兵蟻と職蟻を入れた試料に、空気を吹き付ける、振動を与えるなどの外部刺激を加えると、刺激の直後から AE の発生は急激に低下するが数分から十数分で発生率は回復した(図-14)。刺激によって

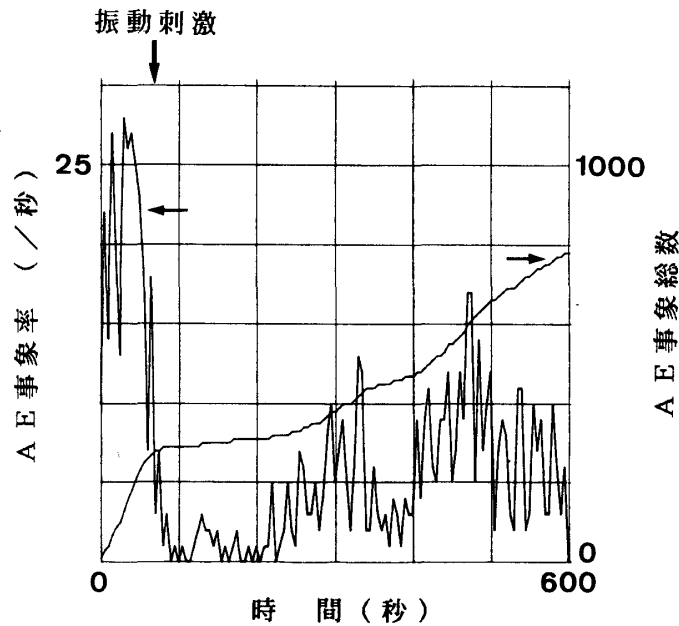


図14 振動刺激を与えた際の AE 発生率の変化

兵蟻は警戒音を出したり、走り回るはずであるので、本測定ラインではこれらの行動音を職蟻の食害による AE と区別して排除し、とらえられた AE はまさしく職蟻の木材摂食行動に起因するものと判断された。

### 3.3.3 シロアリ飼育巣上での測定

気乾のベイツガ材（木口断面 30 mm，長さ350 mm）19本を，イエシロアリ飼育巣の表層の砂上に木口端面または側面を下にして設置し，AE センサ（共振周波数 150 kHz）を試料側面中央部に取り付け AE の発生挙動を調べた。なお，2個の AE センサを試料側面上約 290 mm 離して取り付け，AE 発生源の一次元位置標定をも行った（図-15）。

一つの試験体については，巣上に設置後すぐに AE センサを取り付け，増幅 64 dB，しきい値 0.1 V で

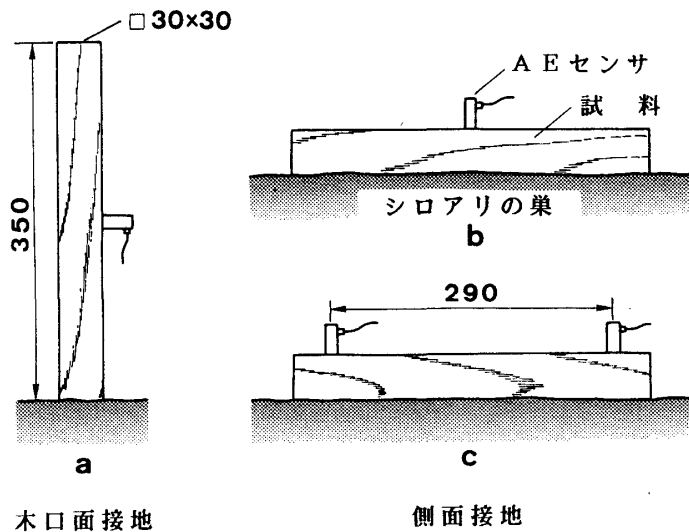


図15 飼育巣上の実験方法



AE の測定を開始したが、設置後 8 日目から AE が発生し始め、その後ほぼ一定の割合で AE 事象率が増加した結果、25 日目には毎分 27 の事象率になった (図-16)。このとき試料端面には蟻道が数本穿たれており、その内部に残存していた職蟻は 150 頭、木材食下量は 2.2 g であった。

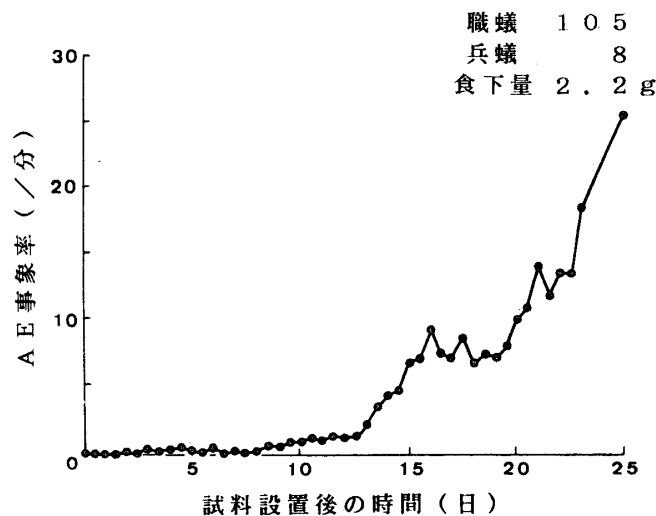


図16 試料設置後の AE 事象の発生傾向

他の試料は設置後60日目に、増幅 70dB、しきい値 0.1V で AE 測定を行った。AE 測定後、試料を取り出し食害状況と対比してみると、内部まで食害された試料からは高い事象率で AE の発生がみられ、また食害が試料内部にまで及ばないごく初期の段階でも AE が発生することがわかった。

位置標定は AE が木材中を伝わる速度を 5000 m/秒と仮定したうえで、2 個のセンサに到達する同一の AE の時間差から解析したが、その結果を図-17に示す。上は木口を下にして垂直に巣の上に乗せたもので、下は試料側面を巣上に接して置いた場合で、図中に示してある写真および図は、それぞれ軟 X 線で撮影した試料内部の蟻道の様子と設置面の加害状況である。AE 源の分布が、いずれの試料においても食害部分にはほぼ対応しており、しかも蟻道先端部 (シロアリの食害活動がもっとも活発と思われるところ) から頻繁に発生しているのが観察される。

そこで次に試料の断面および長さを大きくし、実大材について実験を行った。試料には気乾のベイツガ材 (気乾比重 0.44、長さ 1 m で断面が 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm, 10 cm 角の材、合計 17 本) を用い、イエシロアリの飼育巣に木口端面から約 10~15 cm の部分が砂に埋もれるように立てて設置し、設置後 4~6 カ月の間に AE 計測を行った。AE の計測システムおよび測定条件は、前記小試験体での実験と同様であるが、試料の長さ方向の 4 カ所にセンサを取り付け、食害によって生じる AE の伝播範囲などを検討したほか、センサ間距離を 23 cm から 76 cm まで変化させ、1 次元の AE 源の位置標定をも試みた。AE 計測後、試料内のシロアリ頭数および試料の横断面に現れる蟻道の面積率を試料の長さ方向 5 cm 毎に測定した。

AE 源である加害部分が試料下端付近に限られるごく初期の食害材について、AE 振幅や事象率の試料長さ方向の変化を検討した結果、食害部から離れるにつれ材中を伝わる AE 波の減衰により、計測される AE の数はほぼ指数関数的に減少し、その割合は試料寸法によらずほぼ一定であることがわかった。しかし、食害部付近のセンサに検出される AE には 2V 以上の大振幅のものが相当数含まれ、これらの多くは数十 cm 離れた試料上端部でも検出が可能であった (図-18)。

この食害部付近のセンサで検出された AE の中には 5V を起える超大振幅のものも含まれていた。シロアリは一般的に観察されるように、軟らかい早材部を好んで食害し年輪に沿って蟻道を構築するが、時には

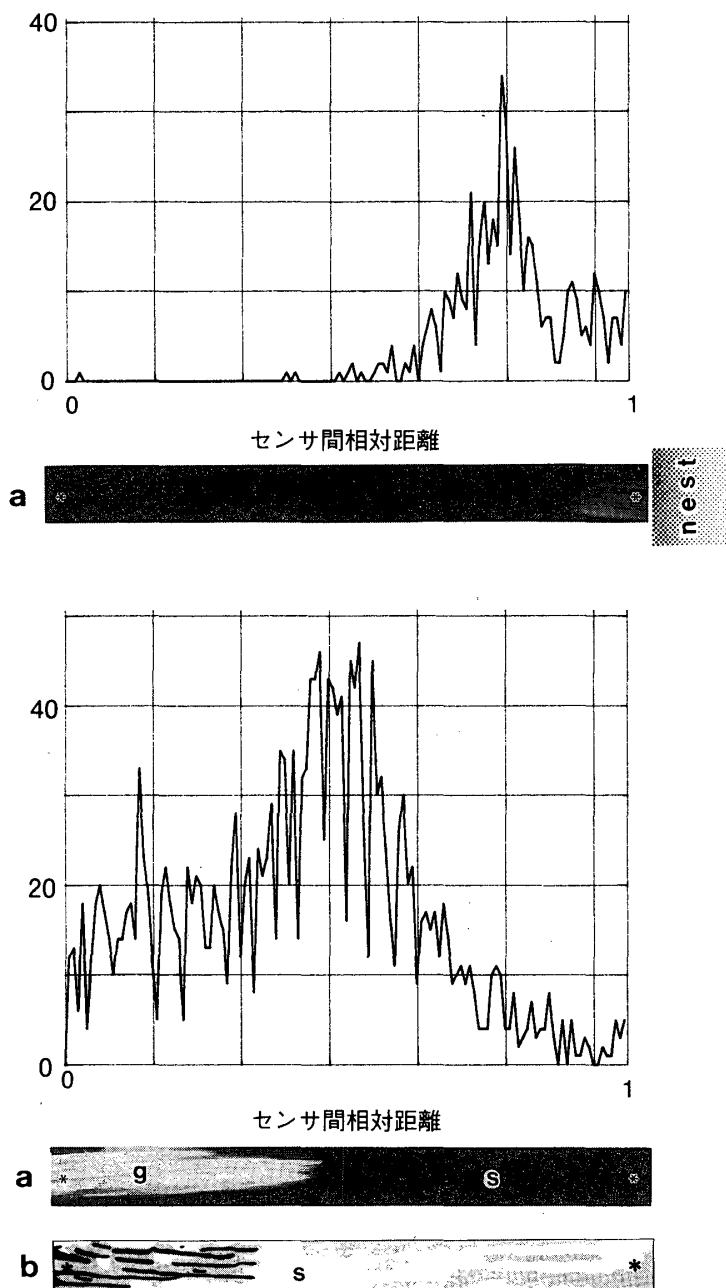


図17 鉛直に立てた試料（上，設置面は右木口）および水平に置いた試料（下）での AE 源の分布（aは軟X線写真で白い部分が蟻道、bは試料設置面の食害状況、gは蟻道、sは健全部）<sup>39)</sup>

年輪を横断して加害する。この硬い晩材部をかじる時にでも大きな AE が発生するのであろうか。

位置標定の結果，センサ間距離 30 cm 以下では，センサ間で発生した AE のうち約 1 割程度の発生位置が標定可能で，実際の食害位置と AE 源の位置との対応もある程度可能であった。しかし，センサ間距離がそれ以上離れると位置標定は不可能であった。

以上のように，実大材においても AE によってシロアリによる食害をそのごく初期段階で検出しうることで，食害によって発生する AE に含まれる振幅の大きなものを有効に検出することによって，食害部から

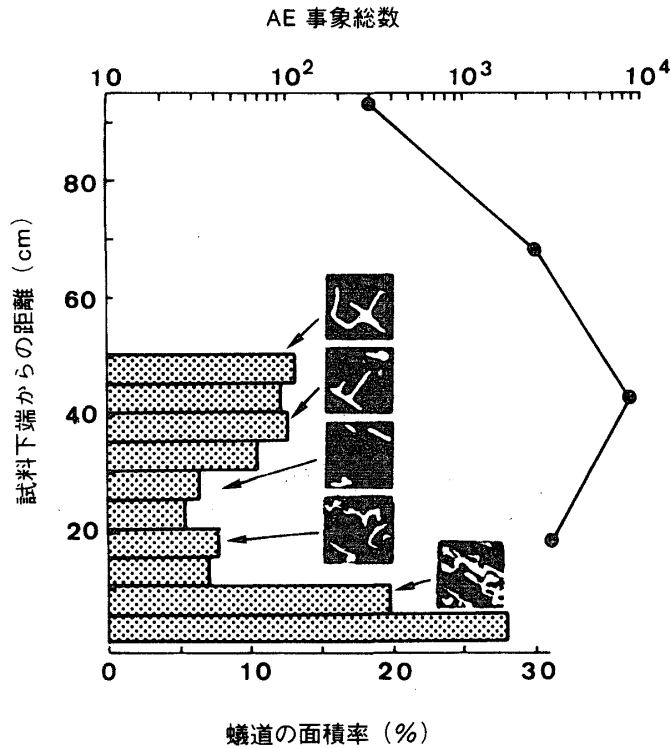


図18 実大材での食害状況とセンサ位置による検出 AE 事象総数 (10×10cm 角試料)<sup>40)</sup>

比較的離れた場所においても食害検出の可能性があることが明らかになった。

### 3.3.4 野外におけるシロアリ食害活動の検出

簡易的な AE 計測装置を用いて野外のシロアリ食害材について AE の検出を試みた<sup>41)</sup>。測定は1989年10月に鹿児島県日置郡吹上町の京都大学木材研究所シロアリ試験地で行った。現場はクロマツの生育する防潮林内で、シロアリの巣になっていると思われる木株の周囲に試験杭 (アカマツ, 断面 3 cm 角, 長さ 35 cm, 地上高約 5 cm) が打ち込まれている。これらの試験杭は設置後 1~2 年を経過したもので、食害程度は軽微なものから被害甚大なものまで種々の段階のものが含まれている。

AE 計測には共振周波数 150 kHz の NF 製 AE センサおよび同製 AE テスタ (AE 9501) を用い、実験では増幅倍率 64dB, しきい値 0.1 V とし、AE テスタからのイベント信号をカウンタで計数後、DA 変換回路を介して AE 事象総数をペンレコーダーに記録するとともに、オシロスコープによって AE 波の観察も行った。なお AE センサはシリコングリスを介してゴムバンドで杭頭部側面に取り付けた (図-19)。すなわち、簡易的には AE テスタの表示ランプの点灯頻度によって、AE の発生状況すなわちシロアリの食害活動をモニタリングすることができる。

AE 計測後杭を抜き取り、杭内シロアリ頭数、含水率および食害程度を調べた。食害程度は 5 段階で表示し、0; ほぼ健全で、わずかな食害痕跡がある, 1; 食害痕跡が明らかに認められる, 2; 蟻道が表面に散在する, 3; 蟻道がある面に密集して存在する, 4; 蟻道が全面に一樣に存在する, 5; 蟻道が杭の内部にまで及び、空洞化している、に従って目視でランクをつけた。

計測開始後数分以内にほぼ一定の発生率で突発型の AE の発生がみられた。杭内のシロアリ頭数と AE 事象率の関係をみると、ばらつきはあるにしても、シロアリ頭数の多い杭ほど AE の事象率は高くなる傾向がみられ、食害のない杭からは AE の発生は認められなかった (図-20)。杭の中のシロアリ種は、イエシロアリだけ、ヤマトシロアリだけ、イエシロアリとヤマトシロアリの両者が混在の 3 つの場合があっ

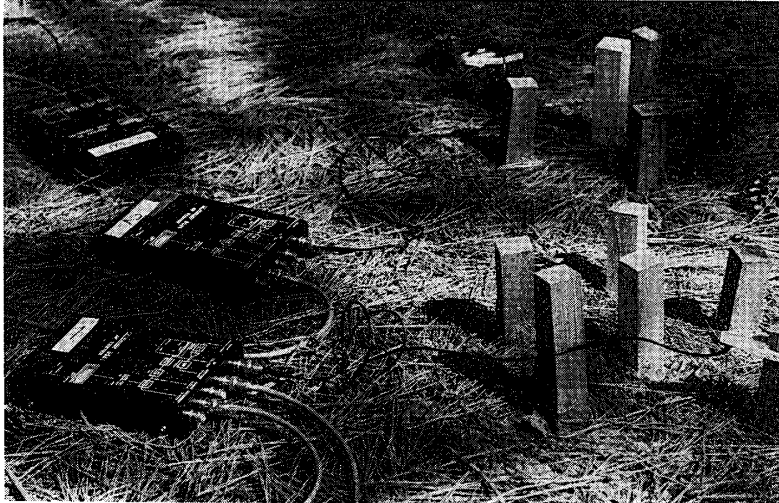


図19 野外における AE モニタリングの様子

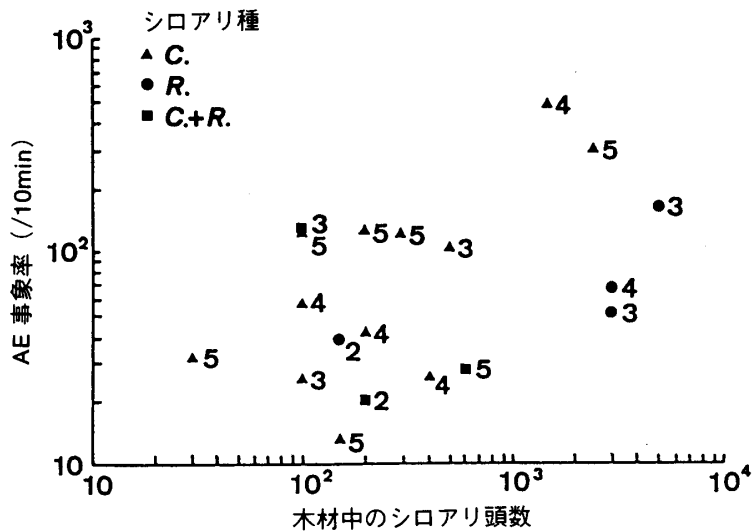


図20 杭内シロアリ頭数と AE 事象率との関係<sup>40)</sup> (図中の数字は5段階評価した食害程度で、大きい程食害が進んでいることを示す。シロアリ種のCはイエシロアリ、Rはヤマトシロアリ)

た。杭中のシロアリの頭数がほぼ同じであっても、ヤマトシロアリだけの場合は、ほかの2つのタイプに比べ AE 事象率がかなり低かった。両種類間における口器の構造の差や食害頻度の違いに起因するのではないと思われるが、今後検討が待たれるところである。

杭は直接土中に打ち込まれているため、含水率は30—70%ほどとかなり高くなっていた。したがって測定された AE はおもにセンサ近傍の食害部位からのものと推定される。しかし、食害を受けた杭を抜き取り新しい杭に交換して数時間放置して測定すると、すでに AE が発生しているのをモニタリングすることができ、ごく最初の段階の食害をも検出できることが示された。

杭の頭をハンマーで5、10、20、50回打撃して刺激を与えると、AE の発生は5回の場合はわずかの停止時間において、10回以上では数分の後ゆっくりと回復した。打撃の刺激によってシロアリは驚き、一斉に食害を停止したのであろうが、その後の回復速度は打撃回数が少ないほど大きかった(図21)。また杭内にいる

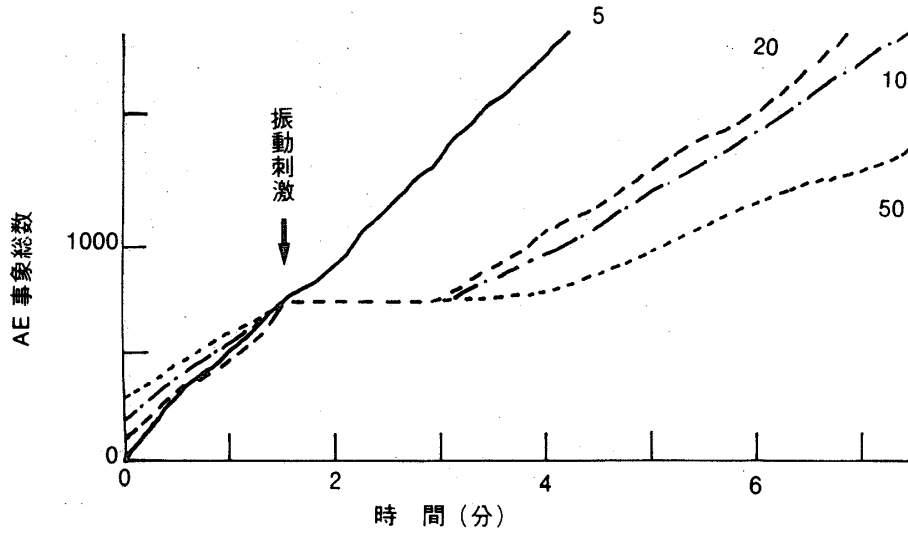


図21 食害杭打撃後の AE 発生挙動 (杭内のシロアリ頭数は約 1500 で、図中の数字は打撃回数を示す)

シロアリの頭数が多いほど早い時間内で回復した。

ところで、シロアリの食餌行動の日変化は昆虫生態の観点からも興味のあるところである。そこで、同一の杭について早朝、昼間、夜間の3回にわたり、AEを測定してみた。その結果、AEの発生率にはほとんど変化は認められなかった。一般に土中温度の日変化は小さいとされているので、杭のように土に打ち込まれた状態では食餌行動に差がないとも考えられる。

### 3.3.5 シロアリの食害行動解析への応用

シロアリによる木材の食害を非破壊的に検出することを目的に出発したわれわれの研究であるが、以上述

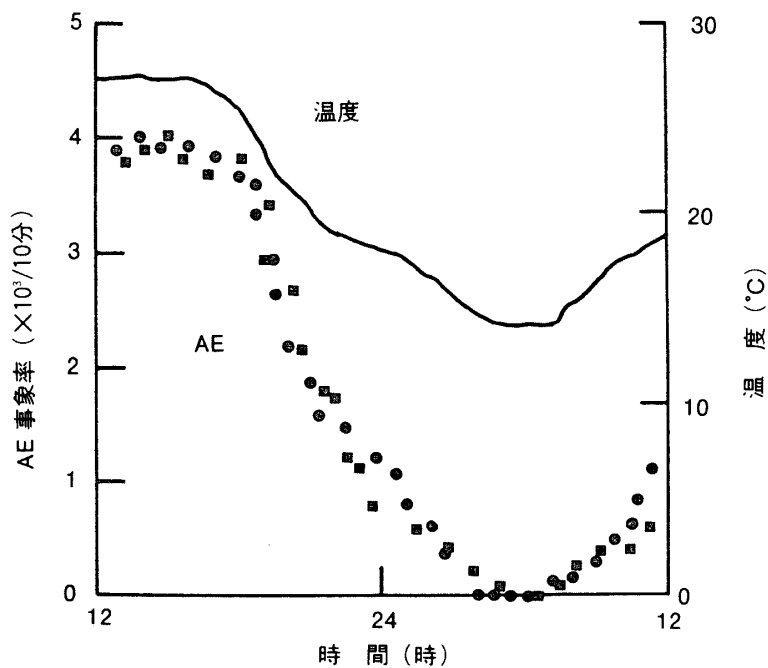


図22 環境温度とシロアリの食害から発生する AE の関係

べたように検出される AE の発生状況は如実に食餌行動に対応していた。そうすればこの手法を利用して、今までベールに包まれていたシロアリの食餌行動を明らかにできるのではないだろうか。

そこで、手初めに環境温度による食餌行動への影響を検討してみた。図-1と同様の容器にイエシロアリを移入し、容器ごと雰囲気温度が変化する環境に置いた。その結果、周囲の温度条件によって AE の発生頻度は大きな影響を受け、20~30℃の範囲では食餌行動はもっとも活発であるが、20℃から下がると AE の発生すなわち食餌の頻度は急速に低下し、14℃付近以下ではほとんど発生しなくなった。すなわち、これより低い環境温度の雰囲気下では、供試した飼育巣から取り出したイエシロアリの食餌行動はほぼ停止すると考えても良いであろう (図-22)。

またイエシロアリとヤマトシロアリを同じ頭数容器内に投入して発生する AE を測定してみた。すると予想通りイエシロアリの方が検出される AE の数が多く、前に野外試験に際して観測されたと同様の結果が得られ、種によって特有の食餌様式を示すものと考えられる。

このように、AE モニタリングの手法は、環境温度や階級構成比率の変化など周囲の条件による食餌行動への影響、食餌の対象となる木材の相違による行動の変化などシロアリの行動生態学の分野に多くの知見を提供するものと期待される。

#### 4. お わ り に

この AE モニタリングによる初期腐朽木材およびシロアリの食害活動検出の研究は、京都大学農学部野口昌巳教授の研究室との共同研究であり、同教授のほか藤井義久博士、大学院学生の大和田政勝君、それに当木材研究所の大学院生である所昌彦君らとともにやってきたものである。記して皆様に感謝申し上げる。

#### 引 用 文 献

- 1) W.W. WILCOX: U.S.D.A. For Serv. Res. Paper, FPL-70 (1986)
- 2) J.J. MORELL, D.G. GIBSON and R.L. KRAHMER: *Phytopathology*, **75**, 329-332 (1985)
- 3) R.L. KRAHMER, R.C. DEGROOT and E.L. LOWELL: *Wood Sci.*, **15**(2), 78-80 (1982)
- 4) 深沢和三, 今川一志, 土居修一: 北大農演報告, **33**(1), 101-114 (1976)
- 5) 出井利長, 吉沢伸夫, 渡辺譲治: 宇都宮大演報, No.19, 31-43 (1983)
- 6) 高橋旨象, 西本孝一: 木材研究, No.42, 1-12 (1967)
- 7) D.G. GIBSON, R.L. KRAHMER and R.C. DEGROOT: *Wood and Fiber Sci.*, **17**, 522-528 (1985)
- 8) D.D. NICHOLAS and T.P. SCHULTS: The Int. Res. Group on wood Preserv. Document, IRG/WP/No. 2275 (1986)
- 9) A.L. SHIGO and A. SHIGO: U.S.D.A. For Service Res. Paper NE 294 (1974)
- 10) S.M. SMITH and R.D. GRAHAM: *For Prod. J.*, **33**(6), 49-52 (1983)
- 11) W.W. WILCOX: *For. Prod. J.*, **33**(2), 29-30 (1983)
- 12) 田中俊成, 中井 孝: 第33回日本木材学会大会要旨集, p.223 (1983)
- 13) E.A. EATON and R.S. JOHNSTONE: The Int. Res. Group on Wood Preserv., IRG/WP/No. 2329 (1989)
- 14) M.M. MURPHY, D.E. FRANKLIN and R.A. PALYLYK: The Int. Res., Group on Wood Preserv. Document, IRG/WP/No. 2293 (1987)
- 15) J.I. DUNLOP: *Wood Sci. Technol.*, **15**, 301-310 (1981)
- 16) F. PELLERIN, R.C. DEGROOT and G.R. ESENTER: The Int. Res. Group on Wood Preserv., Document, IRG/WP/No. 2256 (1986)
- 17) 有田紀史雄, 三谷 進, 酒井英雄, 富川義朗: 木材工業, **41**, 370-375 (1986)
- 18) 野口昌巳: ニューランパーマン, No.52, 1-27; No.53, 1-14 (1984)
- 19) W.W. WILCOX: *Wood and Fiber*, **9**(4), 252-257 (1987)
- 20) 福田清春, 原口隆英: 東京農工大演報, No.11, 25-29 (1974)
- 21) 土居修一, 西本孝一: 木材学会誌, **32**, 724-729 (1986)

- 22) 高橋旨象：木材研究・資料，No. 22，19-36 (1986)
- 23) 福田清春，原口隆英：木材工業，**28**，266-268 (1973)
- 24) 福田清春，原口隆英：木材学会誌，**21**，43-46 (1975)
- 25) 今村祐嗣，高橋旨象：昭和61年度科学研究費補助金報告書 (総合 A—破壊と破壊形 佐伯 浩)
- 26) E.B. COWLING：U.S.D.A. Tech. Bull., No. 1258 (1961)
- 27) 佐伯 浩：電子顕微鏡，**19**(1)，25-31 (1984)
- 28) W.W. WILCOX：For. Prod. J., **15**(7)，255-259 (1965)
- 29) 古川郁夫：鳥取大農研報，**30**，171-179 (1978)
- 30) M. NOGUCHI, K. NISHIMOTO, Y. IMAMURA, Y. FUJII, S. OKUMURA and T. MIYAUCHI：For. Prod. J., **36**(4)，35-36 (1986)
- 31) M. NOGUCHI, Y. FUJII and Y. IMAMURA：Acoustics Letters, **9**(6)，79-81 (1985)
- 32) F.C. BEALL and W.W. WILCOX：For. Prod. J., **37**(4)，38-42 (1987)
- 33) 藤井義久，今村祐嗣，野口昌巳，安達香代子，十代清子：第36回日本木材学会大会要旨集，p. 370 (1986)
- 34) 藤井義久，今村祐嗣，石井竜一，奥村正悟，服部順昭，野口昌巳：第37回日本木材学会大会要旨集，p. 404 (1987)
- 35) 森 八郎：しろあり，No. 2，35-37 (1963)
- 36) H. MORI, M. KUMAGAI and K. HIROKAWA：Sci. Rep. of Hiyoshi Papers, Keio Univ., No. 3, 88-96 (1962)
- 37) A.E. EMERSON, and R.C. SIMPSON：Science, No. 69 (1799)，648-649 (1929)
- 38) Y. FUJII, M. NOGUCHI, Y. IMAMURA and M. TOKORO：The Int. Res. Group on Wood Preserve. Document, IRG/WP/No. 2331 (1989)
- 39) Y. FUJII, M. NOGUCHI, Y. IMAMURA and M. TOKORO：For. Prod. J., **40**(1)，34-36 (1990)
- 40) Y. FUJII, M. OWADA, M. NOGUCHI, Y. IMAMURA and M. TOKORO：The Int. Res. Group on Wood Preserve. Document, IRG/WP/No. 2355 (1990)
- 41) 今村祐嗣，所 雅彦，藤井義久，大和田勝，野口昌巳，遠矢良太郎：第40回日本木材学会大会要旨集，p. 434 (1990)