

木質住宅における生物劣化の非破壊診断技術に関する研究

主査 藤井 義久^{*1}

委員 今村 祐嗣^{*2}, 吉村 剛^{*3}, 奥村 正悟^{*4}, 築瀬 佳之^{*5}

本研究では木造戸建住宅における腐朽や虫害等の生物劣化部位を非破壊で検出し、それらの分布や程度を評価する手法について、基礎研究および実用化のための開発研究を行った。アコースティック・エミッション(AE)による木造建築物内のシロアリや他の木材加害昆虫の非破壊検出の試験と、レーダ探査技術を用いた木材内部の腐朽や空洞などの欠点の検出する手法の基礎研究により、住宅における生物劣化を総合的に評価・診断することについて検討した。

キーワード : 1)木質住宅, 2)生物劣化, 3)非破壊診断, 4)シロアリ, 5)木材加害昆虫, 6)腐朽
7)アコースティック・エミッション(AE), 8)レーダ探査技術

A STUDY OF THE TECHNIQUE FOR THE NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF BIODETERIORATION IN THE WOODEN HOUSE

Ch. Yoshihisa Fujii

Mem. Yuji Imamura, Tsuyoshi Yoshimura, Shogo Okumura and Yoshiyuki Yanase

In this study, the development of technique for the non-destructive detection of the bio-degradation of wood by decays or insect attacks in wooden houses, and for evaluation of the distribution and degree of the bio-degradation were proposed. Using acoustic emission (AE) monitoring to detect termites and other wood-infesting insects in wooden constructions, and a radar technique to detect inner defects of wood caused by decay, total evaluation and diagnosis of the bio-degradation in wooden houses was investigated.

1. はじめに

1.1 研究の目的

昨今、既存住宅の性能評価方法の確立をめざした活動が、住宅の生産や流通関連の業界や関連団体で活発になりつつある。そこでは初期不良を含めて住宅の劣化程度を評価する手法が、建築関係の専門家の間で検討されている。しかし依然として課題となるのが、腐朽や虫害等の生物劣化の判定や評価である。生物劣化のうち住宅での腐朽やシロアリ食害の診断は、現場での目視検査に依存するところが大きい。生物劣化の有無、種類や程度、住宅強度との関連、被害が痕跡か進行性かの判断などには、高度な知識と経験が必要である。またこれらの判断は、定性的な所見の形態をとるものが殆どで、被害程度を客観的に数量化したり、住宅の強度性能や寿命への影響を定量的に評価できるものではない。これらの課題や問題点を背景とし、AE (アコースティック・エミッション) 法とレーダ探査方法の2種類の技術を利用し、木質住宅における腐朽や虫害等の生物劣化部位を非破壊で検出し、評価することを検討する。

1.2 研究概要

AE 法とは、材料科学の分野で発達してきた手法で、材料内部で起きる破壊の進行過程を連続的そして非破壊的に監視する方法である。AE 計測では、破壊によって生じる振動である AE 波を高感度センサで検出する。AE 波の最も最近な例は地震波であり、AE 計測は地震計による地震波の検出を材料レベルにまでスケールダウンしたものと云える。内部に亀裂などの欠点のある材料に荷重をかけると、健全材料に比べてより低い荷重で AE が発生するため、AE の消長から材料の強度特性の評価や品質管理が可能になる。また、ガスタンクや橋梁など大型の構造物ではその安全性評価に AE 計測を用いたり、AE の連続計測に基づく保守点検が行われている例がある。林産学の分野でも AE を用いた材質評価や破壊機構の検討がなされている^{*2}。著者らはシロアリなど木材内部を穿孔する害虫が、その口器で木材を噛み砕いたり、食いちぎったりする現象も一種の破壊であると考え、それに伴って発生する AE 波の検出実験を行ってきた。

^{*1} 京都大学大学院 助教授
^{*4} 京都大学大学院 教授

^{*2} 京都大学木質科学研究所 教授
^{*5} 京都大学大学院 助手

^{*3} 京都大学木質科学研究所 助教授

また、AE モニタリングによるシロアリ食害の非破壊的な検出の可能性を明らかにし、実用化に向けた研究開発を行ってきた^{2,3)}。

一方、木造住宅の腐朽及びシロアリ等の虫害による被害の診断をする上で、木材内部の腐朽や虫害による空洞部分の程度を非破壊的に把握する必要がある。本研究では AE 法と併行して、反射型のレーダ探査機の基礎実験及び木造建築物での実用化を考慮した試験を行い、その可能性についても検討した。

2. AE モニタリングによる木造建築物のシロアリ食害検出

2.1 現場用 AE 計測装置の概要

本研究のグループは、AE モニタリングによるシロアリ食害の検出を、とりわけ既存住宅での食害の非破壊検出方法として検討し、写真 2-1 のような専門の小型 AE 検出装置を開発してきた (AE 検出器 AE510, 丸和バイオケミカル社製)。この装置は本体、AE センサ、センサケーブルからなっている。センサは高感度の振動センサで、ゴムバンドとピン、あるいは接着剤などを使って木材に固定する。センサで検出された AE 信号はケーブルを介し、本体で計測される。本体では予め設定した時間での検出 AE 信号をカウントし、表示する。それぞれの計測点でのカウント数を記録し、最終的にカウント数の多い場所を検出することによって、シロアリ食害部分を決定する。この現場用 AE 計測装置を用い、実際のシロアリ被害を受けた木造建築物での食害位置の把握を目的とした AE 計測調査について紹介する。

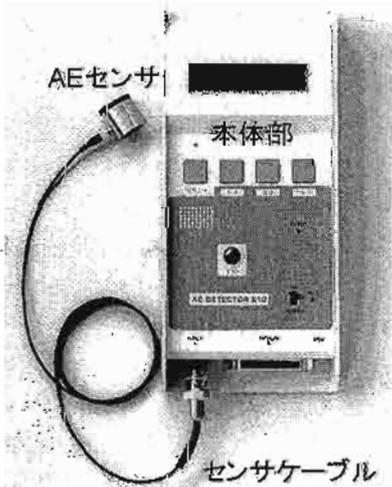


写真 2-1 現場用小型 AE 検出装置(AE510)

2.2 和歌山県西牟婁郡すさみ町 W 氏邸

2.2.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅では、今回の調査の 5,6 年前から砂粒状の虫害が確認され、主に乾燥材を食害するアメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes Minor* (Hagen)) による食害が進行して

いると推定された。予備調査の結果、玄関扉の枠材、屋根の垂木、破風板、和室の床下部材、窓枠、雨戸、および天井裏の部材などで虫糞または食害痕が発見されたが、シロアリは見つからなかった。しかし、本住宅では床下、一階部さらに屋根部にまでアメリカカンザイシロアリの食害が進行しているものと推定された。

虫糞や食害痕が発見された床下では土台、大引き、根太を中心に、また玄関の枠材、屋根の垂木、破風板、窓の枠材、雨戸、戸袋、および天井裏の部材などについても AE 計測を試みた。AE が検出された部位については最終的に生物シロアリ駆除剤 (バイオプラスト, 丸和バイオケミカル(株)) による注入処理を行った。

2.2.2 AE 計測結果と考察

AE が検出された和室の南側壁面の柱、および床下の根太、土台についての計測結果を図 2-1 に示す。●は AE が検出された測定点を表し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数 (AE 事象率) を、×は AE 事象率が 10 以下であった測定点を示す。また矢印はその方向へ AE センサを取り付けて計測した AE 測定点を示し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数を示す。柱 C3 での 3 分間当りの AE 事象数 (以下 AE 事象率とする) は、最も大きい部分で 371 であったことから、この近傍でシロアリの食害が起こっていると推定した。さらにその周辺部分で計測した結果、AE 事象率 371 の計測点から距離が長くなるにつれて、184、50、16 と AE 事象率は減少し、オシロスコープによる波形の同時観察より、事象率 371 の計測点付近で発生した AE が柱中を伝搬して、他の部分でも検出されていることが確認された。

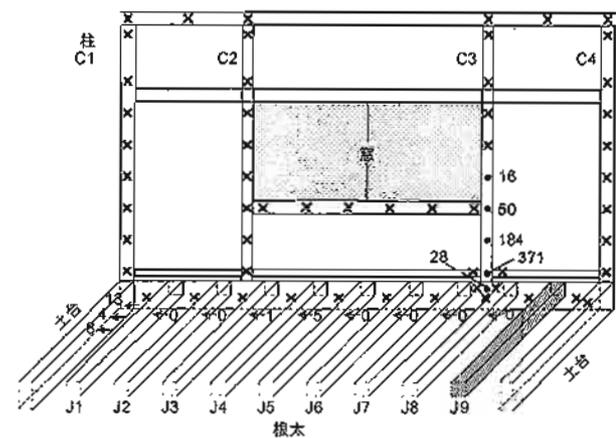


図 2-1 和室における AE 計測結果

また、根太 J9 (気乾スギ材、断面 55×55 mm、繊維方向長さ 3000 mm) については、他の根太と比べて、きわめて AE 事象率が大きく、この根太についての計測結果は別に図 2-2 に示す。図の示すように、根太 J9 の端部から中央に向かって AE 事象率が大きくなり、中心部位で

の食害活動が活発であると考えられる。また、根太 J9 に接する大引、土台とも AE 計測を行ったが、AE は検出されず、根太 J9 の中に一つのコロニーが存在し、その中で食害活動が行われていると推定された。AE 計測後根太 J9 を取り外し、観察した結果、多くのアメリカカンザイシロアリが確認された。AE 計測後、AE 事象率の大きかった部分については薬剤による穿孔注入処理を行った。薬剤処理後約 1 ヶ月の 9 月 1、2 日に再度 AE 計測を行った結果、前回の測定で AE が検出された計測点では、AE 事象率はほとんど 10 以下であった。このことから、AE が検出された部分については薬剤処理によってアメリカカンザイシロアリは死滅したと判断した。

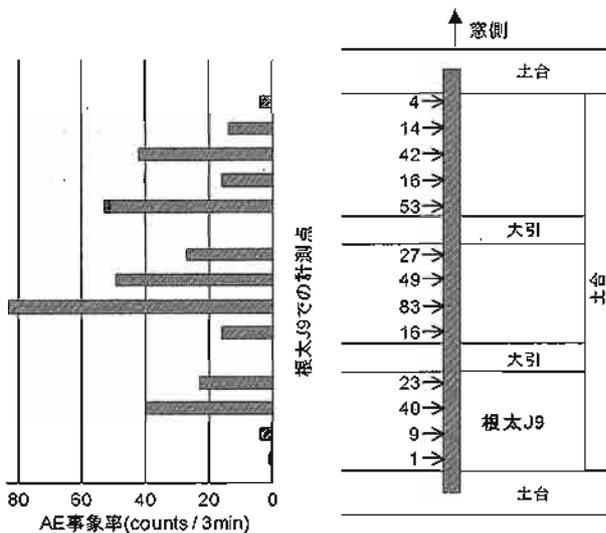


図 2-2 根太 J9 における AE 事象率の分布

家屋の外壁、窓等、特に南、東面側についての AE 計測結果を図 2-3 と 2-4 に示す。南側では、窓 A の戸板の枠材 (AE 事象率 6, 20), および窓 B の上部 (AE 事象率 14, 26) において AE が検出された。窓 A の戸板については、計測後に戸袋から取り出して計測した結果、戸板の枠材全体から AE が検出され、また材中にシロアリも確認された。また、窓 B の上部で AE が検出された部分を穿孔した結果、内部に蟻道が確認されたが、シロアリは確認できなかった。その後薬剤注入処理をし、約 1 ヶ月後に再度計測を行ったが、AE は検出されなかった。

また東側の窓 C についても、戸板の枠材の 3 箇所でも 10 以上の AE 事象率となった。この窓についても戸板以外からは AE はほとんど検出されず、戸板の中でひとつのコロニーが生息していると推定された。この戸板についても、戸袋から取り出し、再度枠材を計測した結果、全体で AE が検出され、シロアリの存在も確認された。

今回の調査では、天井裏、店舗内、和室等でも計測を行ったが、ほとんど AE が検出されなかった。また、AE が検出された部分のみ少量の薬剤で穿孔注入処理を行い、

その部分について約 1 ヶ月後に再度計測を行ったが、AE は検出されず、薬剤の効果も確認できた。AE 計測を行った部分については、アメリカカンザイシロアリの食害活動を検出し、その被害の分布も把握できた。

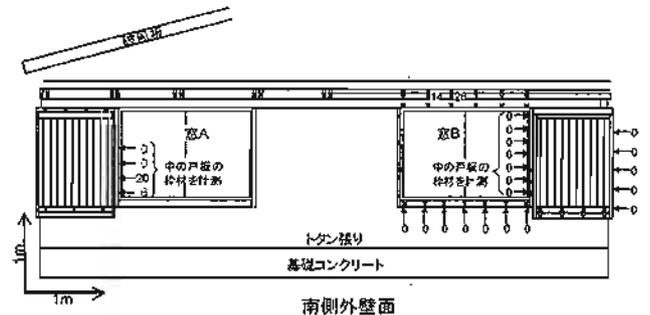


図 2-3 窓 A, B 周辺における AE 計測結果

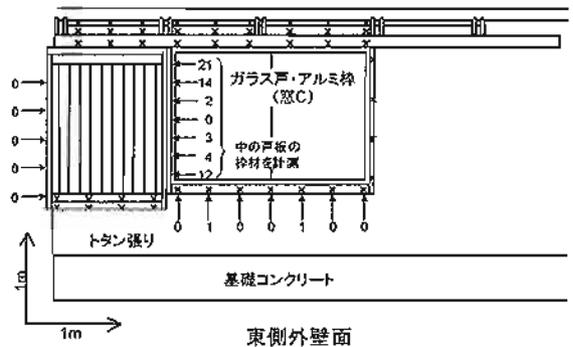


図 2-4 窓 C 周辺における AE 計測結果

2.3 和歌山県那賀郡貴志川町 K 氏邸

2.3.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅は二階建ての戸建住宅 (図 2-5) で、2000 年の 7 月に浴室で羽アリの群飛が確認された。予備調査の結果で、住宅の外壁面などに蟻道が発見され、一階和室の柱材、脱衣場側の壁面 (浴室との隔壁)、二階北東の洋室の柱等についてはイエシロアリ (*Copoterms formosanus* Shiraki) による被害が確認された。

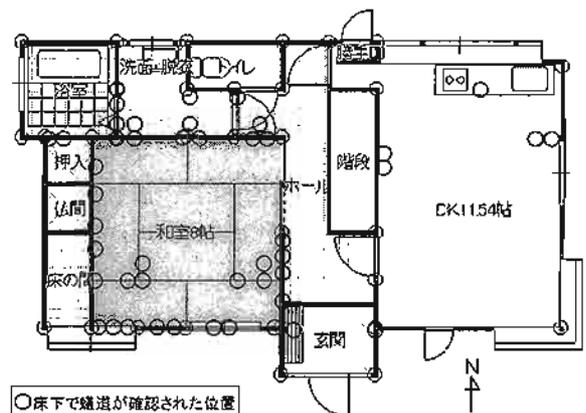


図 2-5 和歌山県那賀郡貴志川町 K 邸 (一階平面図)

さらに図 2-5 のように床下において、特に和室、脱衣場、浴室周辺で約 50 の蟻道が発見され、蟻道内にはシロアリの存在も確認された。浴室周辺を中心として、水平方向には脱衣所、和室に向かって、さらには二階へと食害が進行していると推定された。調査建物について、AE 計測を行い、計測後、AE が検出された部分を中心に薬剤による防除処理を行った。

2.3.2 AE 計測結果と考察

図 2-6 は床下での AE 計測の結果を示す。●は AE が検出された測定点を表し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数 (AE 事象率) を、×は AE 事象率が 10 以下であった測定点を示す。図中の点線で囲まれた領域 A (浴室と脱衣場周辺)、B (和室の南側)、C (玄関上がり框周辺) では 3 分間あたりの AE 事象数がそれぞれ最大 475、141、810 であった。これらの領域内における計測点での AE 事象率は、他の計測点と比較して明らかに高く、この近傍でシロアリの食害が起こっていると推定した。床下において、広範囲に渡って蟻道とシロアリの存在が確認されたが、AE 計測の結果、特にシロアリの食害活動が激しい部分は図中の領域 A、B、C であることがわかり、一階の柱等について、これらの領域 A-C の近傍を中心に AE 計測を行った。

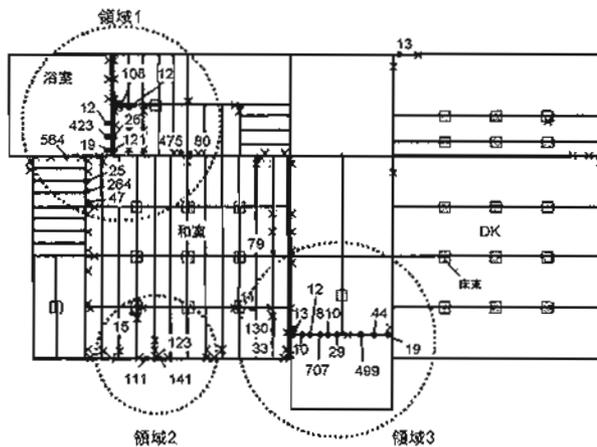


図 2-6 床下部材での AE 計測結果

図 2-7 は和室の柱等における AE 計測結果を示す。浴室、脱衣場に面する押入周辺の柱 1、2 および壁面において最大 492 の AE 事象率が検出された。また図 2-6 の領域 B 内の柱 3 の下部において最大 109 の AE 事象率が検出され、また床下では AE が検出されなかった領域に含まれる柱 4 についても最大 372 の部分を中心に多くの AE が検出され、激しい食害活動が起こっていると考えられる。さらに柱 1-4 以外の柱についても蟻土や被害が確認されているが、ほとんど AE は検出されず、食害活動が激しくないと推測された。

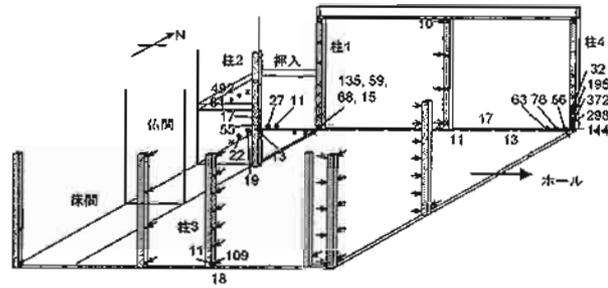


図 2-7 一階和室の柱等における AE 計測結果

図 2-8 は脱衣場の壁面 (浴室との隔壁を含む) における AE 計測結果を示す。壁面内の部材はニードル型ウェーブガイドを用いて計測した。南側、北側の壁面においてはほとんど AE は計測されなかったが、浴室との隔壁である西側の壁面では、浴室入り口周辺の部材で最大 368 の AE が検出された。計測後、図中の点線で囲まれた部分の壁を剥がし、壁内を観察した結果、中は巣状になっていることが確認された。すべての計測後、薬剤による土壌処理、および AE が検出された柱等へ穿孔注入処理を行い、約 1 ヶ月後に再度 AE 計測を行った結果では、AE はほとんど計測されず、シロアリは死滅したと判断した。

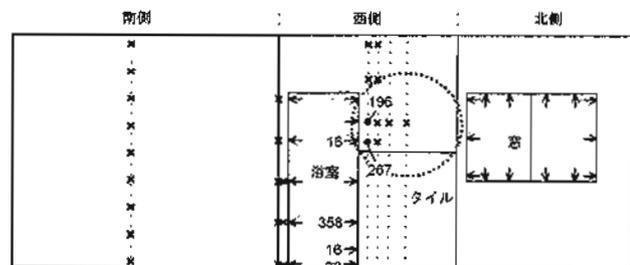


図 2-8 脱衣場側の壁面 (浴室との隔壁) における AE 計測結果

2.4 兵庫県宝塚市 T 氏邸

2.4.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅は数年前からアメリカカンザイシロアリの羽アリが発見されており、被害が進行していると推察されている。予備調査の結果、一階、二階の天井裏の小屋組材、一階南東の板間の柱、二階寝室南側の壁面内の間柱、南側軒先の鼻隠材など、特に建物の南面において、アメリカカンザイシロアリの被害や虫糞が多数確認された。調査建物において、被害や虫糞が発見された部分を中心に AE 計測を行い、食害部位の検出を行った。

2.4.2 AE 計測結果と考察

図 2-9 は一階南東の板間 A の柱等における AE 計測の結果を示す。図中の数字は 3 分間当りの AE 事象発生数を示し、下線の数字は薬剤処理後 1 日経ってからの計測結果を示す。柱 1 の下部に虫糞が発見され、また柱 3 に

については、すでに食害痕が目視でき状況であった。柱1-3と周辺の部材を中心に計測を行った結果、柱2で3分間に最高46のAE事象が検出された。またその部分を中心に柱の上下方向で10以上のAE事象が検出されたことから、柱2にアメリカカンザイシロアリのコロニーが存在すると推定された。さらに柱1, 3についても10以上のAE事象が検出された部分があった。特に10以上のAEが検出された部位を中心に薬剤の穿孔注入を行い、薬剤の効果をみるために、翌日再度AE計測を行った。柱2で最高46のAE事象が検出された部分では、ほとんどAEは検出されなかった。また柱1, 3についても前日10以上のAEが検出された部分で再度AEが検出されることはなく、薬剤処理によってシロアリが死滅したと考えられる。しかし、前日ほとんどAEが検出されなかった窓の下枠部材で10以上のAEが検出されたため、部材を取り外して内部を観察した結果、アメリカカンザイシロアリが確認された。

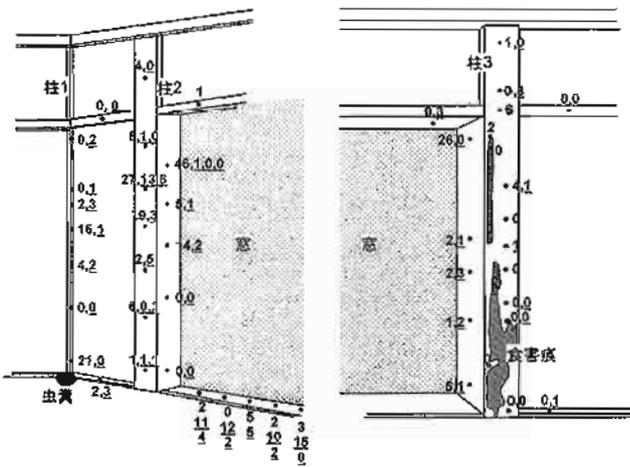


図 2-9 一階の板間における AE 計測結果

さらに、本住宅において、一階、二階の天井裏の小屋組材、二階寝室の南側壁面内の間柱、南側軒先の鼻隠材などについても AE 計測を行ったが、10以上のAE事象が検出された部分はほとんどなかった。

2.5 岡山県倉敷市 M 氏邸

2.5.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅はすでにイエシロアリによる被害がひどく、住居者はいないという状態で、解体を前提とし、その前にシロアリの駆除を行う必要があった。駆除方法として、近年レスケミカル工法として利用されているベイト工法を採用した。写真 2-2 のように建物周辺にベイトステーション（餌木を入れたカップ上の容器）を埋設し、そのうち 10 箇所のステーションについては、それぞれ容器内の餌木 1 本に AE センサを取付け、定期的にステーション内へのシロアリ侵入をモニタリングした（図 2-10）。最終的にステーションに遅効性薬剤を投入し、浴室下部

にある巣まで薬剤を運搬させ、巣全体を死滅させる方法を行った。この際、巣の死滅を確認するため、薬剤投入後もベイトステーション内において、AE モニタリングを行った。

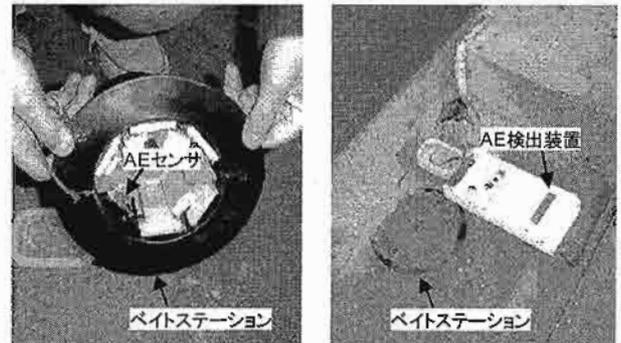


写真 2-2 ベイトステーションと AE センサの設置

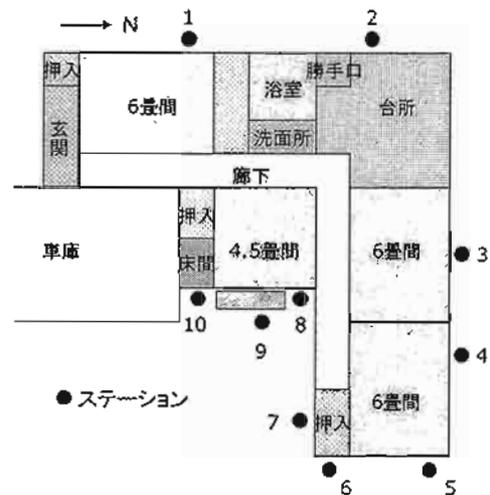


図 2-10 家屋周辺のベイトステーション設置箇所

2.5.2 AE 計測結果と考察

表 2-1 に、各ステーションにおける約 1 ヶ月ごとに定期計測（計 8 回の計測）した 3 分間当りの AE 事象発生数を示す。表中の下線の数字は計測後の目視によって、ステーションへのシロアリの侵入が確認されたことを示している。1~3 回目の計測までは、AE が全く検出されず、計測後の目視調査でもステーションへのシロアリの侵入は確認されなかった。4 回目の計測では 6 つのステーションで AE が検出され、どのステーションにもシロアリの侵入が確認されたが、シロアリが侵入しているにもかかわらず、AE が検出されなかったステーションが 2 つあった。ステーション内のシロアリの頭数が少ないことから、AE センサが 1 本の餌木にのみ取り付けられていることから、AE が検出されなかったと考えられる。5 回目の計測に関しては全てのステーションでシロアリが確認され、さらにシロアリの食害が激しく、センサを取り付けた餌木がほとんど食害されてしまったため、AE 検出が困難な状態のものもあり、再度餌木の追加、センサの付け直

しを行った。6 回目以降はシロアリの侵入が確認されたステーションが3 つにまで減少し、検出された AE 事象数も減少した。現在別のステーション3 つに速効性薬剤を投入し、シロアリに対する薬剤の効果を AE によって評価するため、定期計測を継続中である。

表 2-1 各ステーションにおける3 分間当りの AE 事象発生数

センサ No.	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回
1	0	0	0	5	264	12	0	3
2	0	0	0	61	51	30	4	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	32	4	0	0	0
8	0	0	0	2	0	0	0	0
9	0	0	0	25	1	0	0	0
10	0	0	0	17	13	0	0	4

2.6 山口県下関市功山寺仏殿(国宝)

2.6.1 調査建築物の概要と目視検査結果

須弥壇土台(内側)、来迎壁・来迎柱の脚元、来迎壁上端の梁とその周囲部材、須弥壇北側の柱の下端および礎盤について、現在進行中の食害およびシロアリは確認されなかったが、古い食害痕および蟻道が認められた(写真 2-3)。また一部腐朽を伴った上で相当食害が進行していた。目視検査の結果より、AE によるシロアリ食害検出と礎盤については打診・触針によって、劣化の程度を判定した。

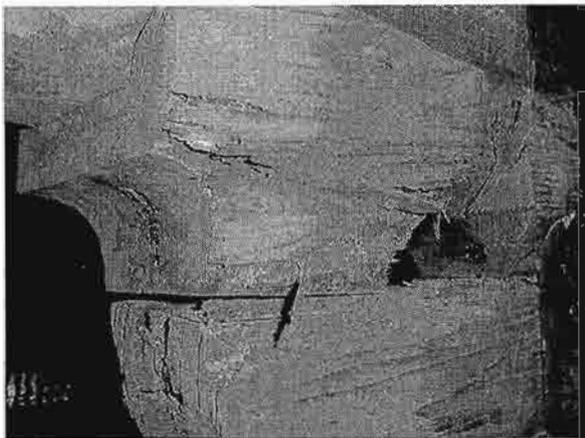


写真 2-3 シロアリによる巻斗などの被害

2.6.2 AE 計測によるシロアリ食害の検出結果

図 2-11 のように、仏殿内の礎盤及び柱下部の四方位から AE センサを取付け、それぞれの測定点で 3 分間 AE 計測を行った計測した結果を表 2-2 に示す。全ての計測

点について、AE が検出された部分が 2 箇所で見られたが、再度計測すると AE は検出されず、電気的なノイズ等を計測していたと推定した。したがって、シロアリの食害活動と関連付けられる AE は検出されず、シロアリの食害痕は目視調査によって確認されたが、現在進行するシロアリの食害ではないと判断した。

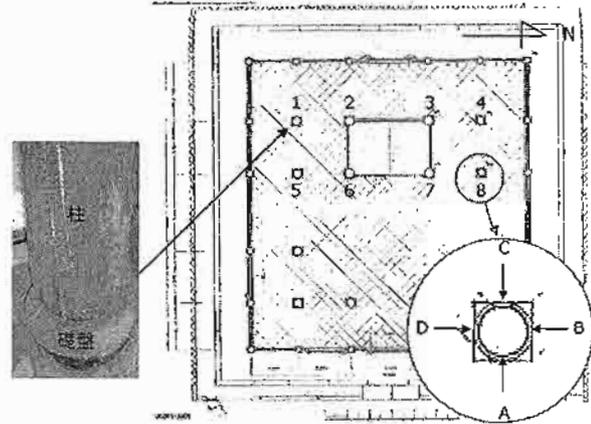


図 2-11 各柱の礎盤及び柱下部における AE 計測部分

表 2-2 各柱の礎盤、柱下における 3 分間あたりの AE 事象数

		A	B	C	D
		柱 1	礎盤	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 2	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 3	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 4	礎盤	0	0	1,0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 5	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 6	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 7	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 8	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	2,0	0

図 2-12 に須弥壇及び周囲壁の土台、周囲柱の礎盤、扉の軸を受けるわら座での AE 計測結果を示す。×は AE 計測点を示し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数を示す。3 分間に 10 以上の AE 事象数を示した部分は見られず、シロアリの食害はないと推測される。目視調査の結果と合わせると、仏殿内で、食害痕や蟻道等が確認されたが、これらは以前にシロアリの被害があった痕跡であり、進行中のシロアリ食害は確認されなかった。

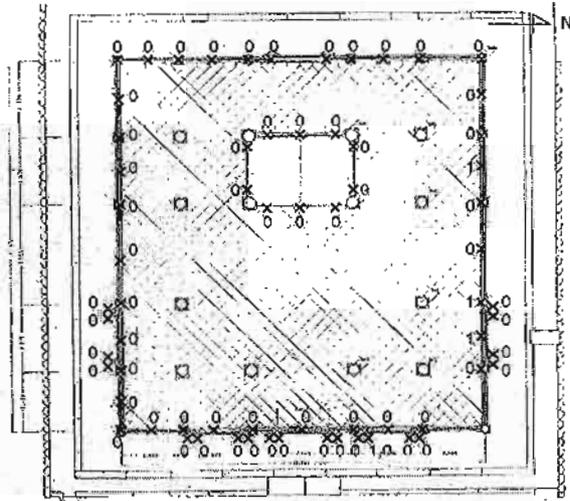


図 2-12 須弥壇の土台、仏殿周囲の礎盤、わら座の AE 計測結果

2.6.3 腐朽等による劣化の打診・触針判定

礎盤の劣化を目視および打診・触針により診断し、腐朽の程度を 4 段階で評価した結果を図 2-13 に示す。礎石の結露等によって含水率が上がり、礎盤の下端から腐朽が進行したものと考えられる。一部須弥壇周囲の柱ではシロアリ食害と併行して腐朽が進行し、礎盤が圧縮変形し、柱が沈んでいるものが認められた。

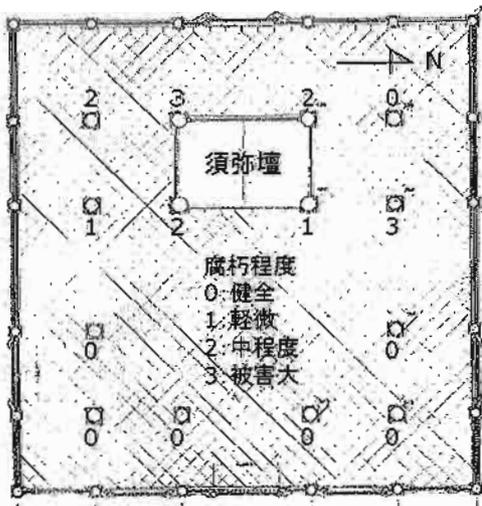


図 2-13 仏殿内の礎盤の劣化の目視および打診・触針判定

2.6.4 本建物の生物劣化低減の措置

今回の目視調査及び AE 計測によるシロアリ食害の検出結果、進行中のシロアリ被害は見られなかったが、礎盤の腐朽進行が確認され、これを抑制する必要が認められた。

その対策としては、

- 1) ホウ酸スティックの打ち込み法が対策として考えられる。
- 2) 樹脂の注入は強度補強としての効果が期待できるが、

その場合でも残った木部の腐朽の抑制措置が望まれる。

- 3) 礎盤を取替える場合にも、何らかの防蟻処理を施した材料を用いることが望まれる。外壁下の土台、礎盤についても腐朽が相当進行しているので、シロアリ食害の予防を含めた防蟻処理が望まれる。

3. AE によるシロアリ食害の非破壊診断方法の確立

前章では建物内でのシロアリの被害を非破壊的に検出する手法としての AE モニタリング技術を紹介してきた。小型の AE 検出器を活用することによって、既存の建物における進行中のシロアリ被害を、効率よくかつ定性ならびに定量的に評価することが可能である。またシロアリ駆除後に AE 計測を行うことによって、駆除効果を評価することもできる。さらに AE 計測は、駆除後の定期的な点検やメンテナンスのためのツールとしても活用できる。昨今では、ペイト工法に見られるように定期的な点検業務を伴うような防除方法が一般化しつつある。しかし新旧いずれの防除工法でも、定期的な点検や監視を伴った形態での防除の必要性が認識されつつある。本章では、定期点検の重要性が認識されつつある背景を探りながら、検出手段というよりはむしろ点検や監視手段としての AE モニタリングの可能性を検討する。

3.1 理想的なシロアリ防除

理想的なシロアリ防除とは、以下のような条件を満たしていなければならない。

- 1) 建物へのシロアリ被害を十分抑止できること。
被害のない建物については十分な予防効果があり、加害されている建物については、そこに生息するシロア리를速やかに駆除できることが望まれる。
- 2) 人や環境・生態系への影響がないこと。
シックハウス症候群、VOC、化学物質過敏症や環境ホルモンなどとの関連で、昨今最も関心注目されている点である。化学薬剤を床下に散布したり、建物の部材に吹付け・塗装や穿孔注入した際に、揮発して発生する成分、周囲の土壤に浸潤・流出する成分の人体や環境への影響が懸念されている。これらを背景として、より毒性の低い化学薬剤を限定的に使用する方法や、化学薬剤に依存しない防除方法等が検討され、実用化されつつある。
- 3) 上記の 2 項目が持続的に実現できること。

住宅の性能保証との関連で、シロアリ防除の効果がより長期にわたって持続することが望まれている。しかし化学薬剤による防除方法では、即効性、確実性、残効性や持続性のある薬剤ほど、一般的には人や環境への影響が憂慮される傾向にあり、安易に「性能・効果」の高い薬剤によって長期にわたる防除効

果を実現することは期待できない。これらを背景として、定期点検を伴った維持管理による実質的な長期の住宅性能の確保や、それを可能ならしめるための家づくり、すなわち点検しやすい構造や材料、修復やリフォームのし易い構造や材料の必要性が認識されつつある。これらにより、食害の早期発見・早期処置が可能になり、例え「性能・効果」の低い化学薬剤による防除でも、住宅の実質的な高耐久化が実現できる。

4) 経済的であること。

対費用効果の優れた防除方法であることが望まれる。

3.2 バイト工法とAE モニタリング

近年新規な防除工法としてバイト工法が普及しつつある。防除対象となる建物の周囲土壤に、ステーションと称する容器を複数埋設し、これを利用してシロアリを駆除する。容器にはシロアリが入り出できる空隙や穴を設けておき、容器内には、餌（バイト）となる木材・木粉や誘引物質を入れ、シロアリを誘引し、誘引できたところで順次餌を駆除剤入りの餌に置き換える方法である。シロアリに取り込まれた駆除剤は、シロアリどうしの接触や栄養補給を通じて順次コロニー内に伝わり、最終的には巣を中心とするコロニー全体を壊滅させる。駆除剤には、脱皮阻害剤など、遅効性の薬剤が使用される。この方法は、大量の薬剤散布を行わない、特にイエシロアリの駆除で課題となる巣の駆除について、その位置を知らなくても駆除できる、マニュアル化が容易である、などの利点がある。しかし、ステーションの設置位置や方法が適切でないとシロアリを誘引できない、駆除に時間がかかる、駆除効果を確認し難いなどの欠点もある。とりわけ問題となるのが餌の交換時期を知るため、ステーションを定期的に点検する必要があることで、そのために作業員が複数回現場に足を向けなければならない点である。餌の交換のためには現場に出向かなければならないが、点検にかかる時間と費用は相当な量になると考えられる。これを解決する方法の一つに、ステーション内へのシロアリの侵入、摂食行動、ステーション内の環境を遠隔地から自動的に監視する手法であり、そのためにAE モニタリングが活用できる。

3.3 インターネット対応型 AE モニタリング

AE モニタリングを用いた人工的な餌場におけるシロアリの摂食行動の連続監視については、すでに本研究のグループが電力事業所におけるシロアリ監視技術としてその原型となる手法を確立している。また同様の手法を樹木内のイエシロアリのコロニーに適用しコロニー内の環境やシロアリ生態の研究に活用している。そこではAE データだけでなく、コロニー内の温度などのデータ

も計測している。これらの方法では、小型のAE 計測器や温度センサからのデータを、現場に設置した記録計やデータロガーなどに蓄積し、それを後日回収し分析・評価することになっていた。それを発展させる形で、データを無線信号として発信したり、電話回線を通じて収集することが考えられる。本研究では、現時点で最も汎用性および発展性が高く、また普及速度の速いインターネットを介した AE データの収集システムを考案し、そのプロトタイプを設計・試作した。

3.3.1 インターネット対応型 AE モニタリングの基本仕様

図 3-1 に本研究で開発、試作したシステムの概要を示す。住宅の現場には、AE センサおよびセンサからの信号処理装置を最大 4 セット設置できる。信号処理装置は前章までで紹介した小型の AE 検出器である。これら装置からの AE 事象信号は AE イベントアダプタおよび現場用 CPU を経て、インターネットに流すことができる。現場用 CPU では、各装置からのイベント信号を計数して、一定時間毎の AE 発生率データとして保存し、そのデータを転送するためのソフトウェアが起動している（図 3-2）。データの転送は、インターネットを介して、サーバコンピュータに自動転送されるが、転送手段は、設定した一定時間毎に自動的に FTP または電子メールでの転送となっている。サーバに蓄積されたデータは、インターネットにつながった別のコンピュータや携帯端末でアクセスが可能である。当然複数の現場からのデータもサーバ上で区別して管理されるため、一度に多数の現場での AE 監視が可能であるし、それをどこからでも見ることができる。

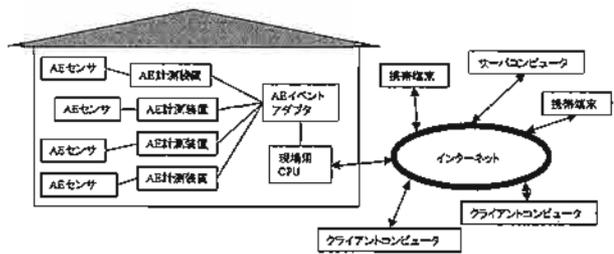


図 3-1 インターネット対応型 AE モニタリングシステム

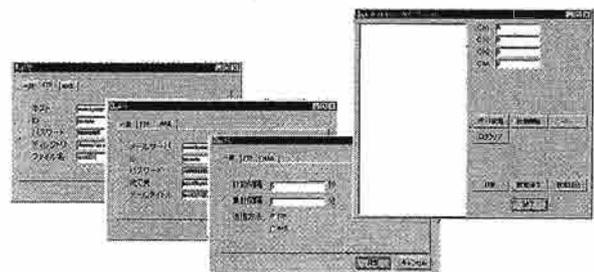


図 3-2 AE データ収集ソフトウェアの制御画面の例

3.3.2 システムの利用方法の例

本システムが適用想定される現場には、主にペイト工法が適用される住宅などが想定される。ステーション内の餌木に AE センサをつけておき、センサからの信号を住宅内に設置したイベントアダプタや CPU で処理する。従来のような薬剤によるシロアリ駆除が適用されるような現場でも、比較的遠隔地にあつて、薬剤処理の前後で長期の監視が必要な場合にも適用できる。

3.3.3 今後の改善点

本研究で開発した AE 監視システムは実際の現場での使用に耐えるが、改善すべき点もある。以下にそれらを列挙する。

- 1) 後述するが、収集するデータとして AE 計測値の他に、温度や湿度などの観測を加えることによってより正確で信頼性の高い食害の監視が可能である。
- 2) 試作システムにおける、現場用の装置をさらに専門化、カスタム化することによってより小型で、多様な現場に対応可能なシステムとすることができる。
- 3) データ収集および監視のソフトウェアについて、現場の管理やデータの分析などの機能を付与することによって、より実面的で能率的なシステムとすることができる。

3.4 モニタリング技術の将来展望

3.4.1 安価な AE センサについて

本研究で主に採用した AE センサは、圧電性セラミックスである PZT を用いたセンサである。しかし、このセンサは高価で、量産に向かない。センサメーカーによっては、スローアウェイ（使い捨て）方式の比較的廉価なセンサを提供しているところもあるが、それでも量産には向かない。これを解決する方法の一つに圧電性のポリマーをセンサとして使うことが考えられる。その代表がポリフッ化ビニリデン (PVDF) で、PZT に比べて圧電定数が低く、センサとしての感度は 1 桁ほど低い、薄いフィルム状の AE センサとして、木材に接着したり、木材と木材の接合部に挿入して使うことができる。また PZT とは異なり、フィルム状で広い面積を監視できるため、センサとしての実質的な感度は PZT と比べてそれほど遜色はない。本研究のグループは、その基本性能を検討し、シロアリ食害検出用のセンサとして使用できることを確認している。また PVDF センサは、基本的には量産に向き、PZT よりも安価である。今後、PVDF をはじめとする圧電性ポリマーのセンサとしての可能性をさらに検討する必要がある。

3.4.2 AE 以外の監視量について

本研究では、ペイトステーションなどでのシロアリ食

害を AE モニタリングで検出する方法についても述べてきた。しかし、ステーション内にシロアリが侵入して発生する変化には、餌木の食害による AE 発生以外に温度や湿度の変化や、シロアリの代謝によって生じるガス濃度の変化もある。本研究のグループでは、メタン、水素やニオイ選択性のセラミックガスセンサを用いたシロアリの代謝ガスの検出について、その可能性を明らかにしている。温度センサとなる熱電対やサーミスタと並んで、ガスセンサも比較的安価で量産が可能である。AE センサと並んでこれらのセンサを組み合わせることで、ペイトステーション内でのシロアリの活動をより正確に知ることができるといえる。

4. レーダ探査による住宅部材の内部劣化の非破壊診断

木材内部の腐朽や虫害による加害部分を非破壊的に検出する方法として、本研究では反射型のレーダ探査機の可能性を検討した。

4.1 反射型レーダ探査装置

4.1.1 検出原理

木材の表面に接触したレーダ探査機の発信アンテナから電磁波を発信すると、その一部は表面で反射するとともに、一部は木材内部に伝搬する。木材内部に誘電率の境界面（比重の異なる領域どうしの境界面など）が存在すると電磁波はそこで反射する。木材内部に存在する空洞や高含水率部（欠陥部）は、健全な部分（健全部）と比べて誘電率が低いあるいは高いので、これらと健全部との境界面で電磁波は反射し、反射波は受信アンテナに受信される（図 4-1a）。反射の大きさ（反射係数 R ）は次式で表されるように、木材の誘電率と欠陥部の誘電率の差が大きいほど大きくなる。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad \dots(1)$$

ここで ϵ_{r1} は木材の誘電率、 ϵ_{r2} は欠陥部の誘電率である。なお、木材中を伝わる電磁波の速度 v および減衰率 α は次式で表される。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad , \quad \alpha = \frac{60\pi}{\rho} \times \sqrt{\epsilon_r} \quad \dots(2)$$

ここで ϵ_r は木材の誘電率、 c は光の速度 (3×10^8 m/s) で、 ρ は木材の比抵抗である。よって、木材の誘電率が高い場合、つまり含水率が高い、あるいは比重が大きいと電磁波の速度は遅くなりかつ減衰しやすくなる。

4.1.2 検出波形の処理と表示

レーダ探査機の受信アンテナで受信された反射波（受信信号）を表示したものを A スコープと呼ぶ。健全部で

の受信信号はレーダ装置底面での反射成分と表面での反射成分からなる信号が検出される（木材内部に達した電磁波成分は木材を透過してしまうので検出されない）。一方、レーダ装置で欠陥部付近を走査すると、前述の波形成分に欠陥部での反射成分を含んだ受信信号が表れ、その変化は健全部での波形信号に対して、その振幅や位相の変化として表れる。

また、この受信信号の振幅を高さ毎に色分けして、受信した順番に並列表示したものが B スコープである。B スコープにより欠陥部の位置や深さをより明確に視覚化できる（図 4-1b）。

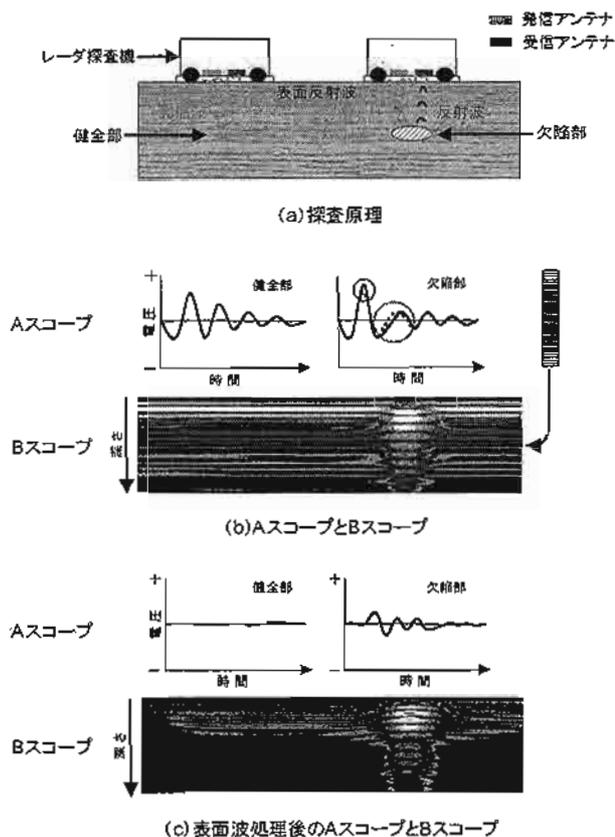


図 4-1 レーダの探査原理とデータ

4.1.3 表面波処理後のデータ

表面波処理とは、受信信号の中から任意に 1 つ受信信号を選び、これを基準信号として、受信信号から基準信号を差し引くことである。健全部の受信信号を基準信号としてこの処理を行うと、健全部では処理後の信号はほぼ平坦になり、欠陥部では欠陥部での反射成分のみの信号となる。よって、欠陥部の存在がより明確に表れる（図 4-1c）。

本研究で使用したレーダ探査機は、レーダ探査機 1G（株）コス製、センシオンプロ、発信周波数 1GHz、発信出力は 10mW）及びレーダ探査機 450M（同、センシオンβ1、発信周波数は 450MHz、発信出力は 10mW）である。

4.2 木質材料内の擬似欠点（空洞）の検出

4.2.1 実験

木材の腐朽が進行すると、組織が分解され、密度が低下し、最終的には、空洞などの組織の欠落部位が発生する。レーダ探査による木材内部の空洞の検出性を調べるために、積層したパーティクルボードの内部に形成した大きさの異なる空洞の検出を試みた。900mm 角、厚さ 15.5mm のパーティクルボード（気乾比重約 0.73）を 60 枚積み上げ、上面から種々の深さに、中央に正方形の穴をあけたパーティクルボードを 1 から 3 枚挿入しこれを空洞とした。空洞の面積は 625 mm² (25mm 角)、2500 mm² (50mm 角)、10000mm² (100mm 角) の 3 種類、高さはパーティクルボードの枚数に応じて 15.5、31.0、46.5mm の 3 種類とした（図 4-2）。

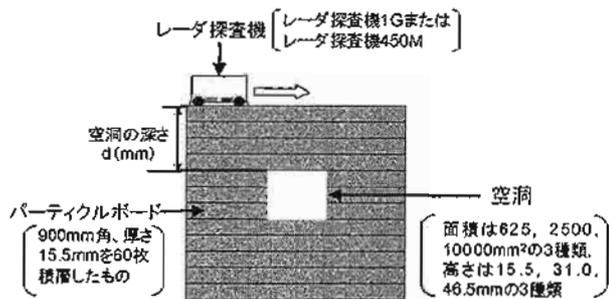


図 4-2 擬似空洞の検出実験

4.2.2 結果と考察

図 4-3 に面積が 10000mm²、高さが 15.5、31.0、46.5mm の空洞の検出結果を B スコープで示す。結果はすべて表面波処理したものを示す。空洞の処理信号の大きさは厚さ 1mm の鋼板をボード間に挿入した場合の 10%程度であった。これは乾燥したパーティクルボードと空洞の誘電率の差が、パーティクルボードと鋼板の誘電率の差よりも小さく、電磁波が反射しにくかったためと考えられる。また背の高い空洞ほど検出性は高く、高さ 46.5mm の空洞は約 160mm の位置まで検出できた。レーダ探査機 450M で用いている長波長の電磁波は、より深くまで木材内部に入るので、深い位置の空洞を検出できると考えられる。しかし空洞のない部分での処理信号と空洞のある部分での処理信号の差が小さく、到達深度は不明確であった。

レーダ探査機 1G を用いた場合、ピーク電圧は空洞の位置が深くなるにしたがって低下した。また空洞が浅い位置では高い空洞ほどピーク電圧は大きい、深くなるにつれてその差は小さくなった。レーダ探査機 450M では、この傾向は見られなかった。ピークの発生時刻は高さにかかわらず空洞の位置が深くなるにしたがって直線的に遅れた。

また空洞の面積は、大きい面積の空洞ほど、電磁波を

反射する面積が大きく、検出性は高かった。面積が10000mm²の空洞は約160mmの位置まで、2500mm²の空洞は約90mmの位置まで検出できた。一方625mm²の空洞は、一番浅い位置の31mmでも検出できなかった。

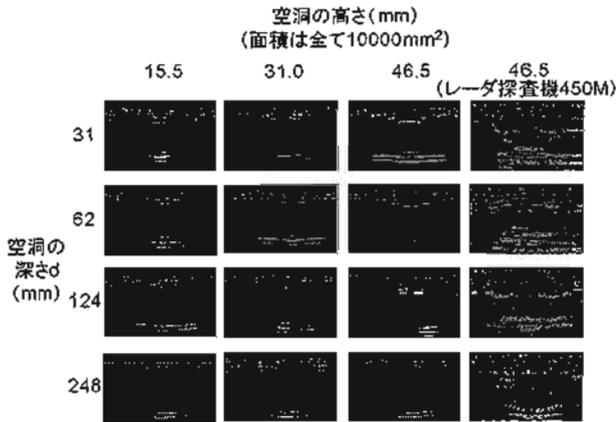


図 4-3 擬似空洞の検出結果(B スコープ)

4.3 高含水率部の検出

4.3.1 実験

木材内部で、腐朽菌が成長する領域は、その生育条件の一つである水分が豊富であり、含水率の高い部位である。従って、空洞と並んでレーダ探査によって高含水率部位を検出することによって、進行中の内部の腐朽部位や、今後腐朽が進行する可能性のある領域を検出できる。レーダによる高含水率部の検出性を調べるため、積層した乾燥パーティクルボードに高含水率のパーティクルボード片を挿入し、これを検出することを試みた。900mm角、厚さ15.5mmのパーティクルボード(気乾比重0.73)を60枚積層し、上面から種々の深さに、中央に100mm角の高含水率ボードをはめ込んだボードを1枚挿入して、これを高含水率部とした。積層したパーティクルボードの含水率は10%で、高含水率部の含水率は21, 30, 34, 45, 73%の5種類とした。

4.3.2 結果と考察

図4-4に高含水率部の検出結果をAスコープおよびBスコープで示す。結果はすべて表面波処理したものを示す。含水率21%の高含水率部は今回実験した一番浅い位置の31mmでも検出されなかった。それより高い含水率のものは検出され、含水率が高いものほど検出性は高かった。ピーク電圧は高含水率部の位置が深くなるにしたがって低下した。また含水率が高いほどピーク電圧は大きく、位置が深くなるにつれて含水率によるピーク電圧の差は小さくなった。ピークの発生時刻は含水率にかかわらず、高含水率部の深さに対して直線的に遅れた。レーダ探査機450Mを用いた場合、ピーク電圧は1Gよりも緩やかに低下した。

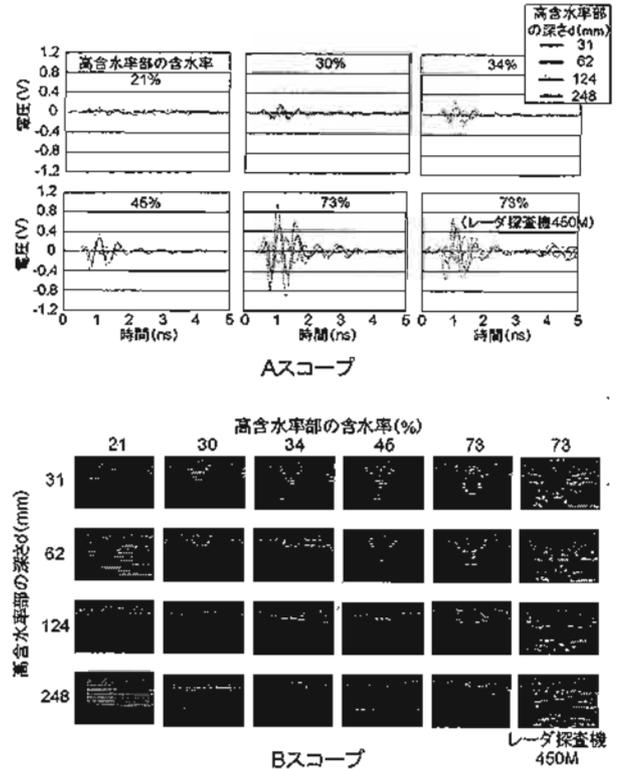


図 4-4 高含水率部の検出結果

4.4 欠陥の種類別の区別

これまで積層したパーティクルボードに、鋼板、空洞および高含水率部といった擬似的な内部欠陥を発生させ、レーダ探査によってそれらの検出の可能性を確かめてきた。いずれの欠陥もある程度の検出性を示したが、得られた結果のうち、とりわけBスコープでは、欠陥の存在は知りえても、その種類までは判別できない。しかしAスコープでは、媒質(木材)よりも、誘電率が高いか低いかによって、検出波形の性質が異なる。3種類の欠陥部での処理信号を比較したところ、パーティクルボードより誘電率が高い鋼板や高含水率部の処理信号の初動部分には正のピークが現れ、誘電率が低い空洞では負のピークが現れた。したがって、処理信号の初動部分の極性により、欠陥部の種類をある程度区別できることがわかる。図4-5は、3種類の欠陥の誘電率と処理信号の始めに現れるピーク電圧の関係を表したものである。図中の破線はパーティクルボードの誘電率の値を示す線である。パーティクルボードより誘電率が高い鋼板や高含水率部のピーク電圧は正に、誘電率が低い空洞のそれは負になっていることがわかる。

上述の基礎的実験から、用いた小型レーダ探査装置によって、木材内部に発生した空洞や高含水率部をある程度検出できることが確認できた。

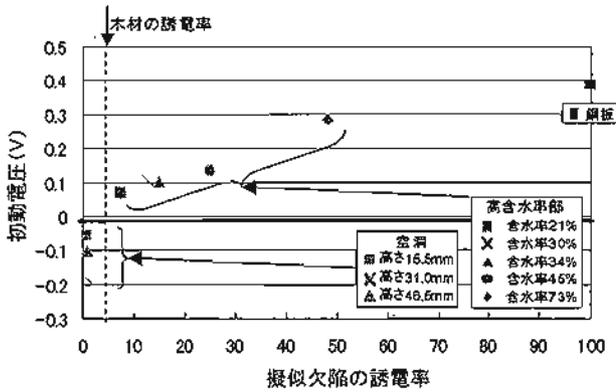


図 4-5 擬似欠陥の誘電率と処理信号の初動電圧変化との関係

5. おわりに

住宅の高寿命化を背景として、今後は住宅の点検や診断が必要となってくるものと考えられる。一方でシロアリ及び腐朽に対する薬剤処理については、昨今の環境や健康問題という背景のもと、必要な種類の薬剤を必要最低限量だけ、必要な時に必要な場所にだけ施工することが求められることとなり、生物劣化の早期発見が必要不可欠となる。従来が目視などに依存した劣化調査に対して、本研究で考究した AE モニタリングおよびレーダ探査技術は、木質住宅における生物劣化を非破壊的に評価する一つの有効な診断技術といえる。AE モニタリングに関しては、実際の住宅におけるシロアリ食害検出が可能であることが確認され、大きな成果を得ることができた。またレーダ探査技術に関しては、基礎的な試験結果をもとに、現在、様々な劣化診断調査を行っている段階であり、今後さらに問題点の抽出とレーダ探査器の改良を検討しながら、実用化に向けて試験を行っていく必要がある。

<参考文献>

- 1) 藤井義久：林産研究への AE モニタリングの適用，木材学会誌，Vol.43，No.10，pp.809～818，日本木材学会，1997.10
- 2) 藤井 義久，築瀬 佳之，今村 祐嗣，奥村 正悟，岡 信治：1998 AE モニタリングによる木造建築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，Vol.9，No.3，pp.101～105，日本環境動物昆虫学会，1998.8
- 3) 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，Vol.10，No.4，pp.160～168，日本環境動物昆虫学会，1999.10

<研究協力者>

平成 13 年度

- 藤原 裕子 京都大学大学院博士後期課程
 柴田 素子 京都大学大学院修士課程（当時）
 黒田 朋未 京都大学大学院修士課程