

日本におけるアメリカカンザイシロアリの木造住宅被害の調査研究

— 木造住宅の被害程度と被害木材の残存耐力評価 —

主査 築瀬 佳之^{*1}

委員 森 拓郎^{*2}, 藤原 裕子^{*3}, 南 宗和^{*4}

近年、日本各地で被害範囲が拡大しているアメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes minor*) は、被害箇所が多岐にわたるため、加害部位の特定や被害の程度を把握することが困難である。そこで、本研究では、構造部材における被害の程度や位置、そして被害の進行経路などを明らかにするため、木造住宅の被害調査を実施するとともに、2種類の検出装置を用いた被害の非破壊的検出方法の検討、被害程度と残存耐力の関係についても検討した。被害調査では、アメリカカンザイシロアリの羽蟻が住宅の周囲から侵入し、住宅内に被害を及ぼすことが確認された。また、被害木材の空洞部分体積と残存強度には、ばらつきはあるものの負の相関が見られた。

キーワード : 1) アメリカカンザイシロアリ, 2) 生物劣化, 3) 非破壊診断, 4) 被害程度, 5) 残存耐力評価

INVESTIGATION OF DAMAGES BY DRYWOOD TERMITE IN JAPANESE WOODEN STRUCTURES

— Evaluation of Degree of Damage in Wooden Structures and Surviving Strength Properties of Damaged Wood —

Ch. Yoshiyuki Yanase

Mem. Takuro Mori, Yuko Fujiwara and Munekazu Minami

Recently, the damage of drywood termites *Incisitermes minor* has been extending in Japan. It is difficult to detect the damages by drywood termites, because they infest the wooden construction members and furniture. The damages of wooden constructions were investigated to find the degree, location and progression route of damages, two apparatus were applied for non-destructive detection of termite attack and the relationships between the degree of damage and the surviving strength were also discussed. It was revealed that the wooden constructions were invaded by alate from outside and were damaged intensely. It was also found that the surviving strength of the damaged wood decreased with increasing the degree of damage.

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

住宅の長寿命化に関わるニーズや地球環境問題の高まりから、高い耐久性を有する住宅が求められてきており、100 年を大きく超える年数において、住宅を使い続けることを目指した構法および材料などの様々な研究が立ち上がり進められてきている。この 100 年を超える期間、木造住宅の使用を妨げている要因の一つとして、シロアリや木材腐朽菌が引き起こす生物劣化による耐力低下が挙げられる。このような背景のもと、腐朽菌やシロアリによる生物劣化の診断・評価技術の確立および木造住宅の被害程度と残存強度の評価が早急の課題である中、近年、北米産の木材や家具の輸入などによるアメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes minor*) の日本への定着とともに、その被害が年々広がっているという現状がある。日本で主な防除対象であるイエシロアリやヤマトシロアリとは異なり、主に乾燥した木材を食害するため、床下の被害が中心とはならず、住宅における食害箇所を適切

に把握することが非常に困難である。さらに、土壌生息性のイエシロアリやヤマトシロアリの防除方法をそのままアメリカカンザイシロアリの防除に適用することも困難で、効果的な防除方法の開発も重要となっている。そのための情報としてアメリカカンザイシロアリの日本における分布、住宅内での被害状況や生息環境、さらに被害木材の残存強度など現時点ではほとんどわかってない。

そこで本研究では近年、日本各地で被害範囲が拡大しているアメリカカンザイシロアリを対象に、実際の被害木造住宅の調査、特に構造部材である柱や梁などの軸部材や面材などの調査を行い、構造部材における被害の程度や位置、そして被害の進行経路などを明らかにすることで、構造部材や接合部被害の検出方法や評価方法の確立、補修技術の開発などに有意義な情報提供が可能となる。また、食害様式が地下シロアリのイエシロアリやヤマトシロアリとは異なるため、被害材の残存耐力に及ぼす影響も異なると考えられる。

^{*1} 京都大学大学院農学研究科 助教

^{*2} 京大大学生存圏研究所 助教

^{*3} 京都大学大学院農学研究科 研究員

^{*4} 京大大学生存圏研究所 博士課程

これまでシロアリ食害材中の超音波伝搬速度と強度の関係¹⁾、食害材の断面欠損率と強度の関係²⁾については報告されているが、食害による空隙部分の体積と強度の関係についての報告はない。

本研究では、アメリカカンザイシロアリの食害材を X 線 CT 装置で撮像し、食害によってできた空隙の体積の測定を試みるとともに、撮像に供した食害材について曲げ試験を行い、食害材の空隙率と曲げ強度の関係について検討し、被害程度と残存耐力との関係を明らかにすることも試みた。

1.2 アメリカカンザイシロアリの特徴

アメリカカンザイシロアリは北米原産で、ワシントン州からカリフォルニア半島にかけての太平洋沿岸に沿った西部諸州に主として分布するカンザイシロアリで、建築物や家具類の害虫である³⁾。アメリカカンザイシロアリは北米産の木材や家具の輸入などによって、材内部に生息したまま日本へ移入して、定着したシロアリである。日本では 1976 年に東京都江戸川区で初めてアメリカカンザイシロアリの生息が報告され⁴⁾、現在に至るまでに 25 都府県で生息が確認されている。日本で主な防除対象であるイエシロアリやヤマトシロアリは地下シロアリと呼ばれ、地下（土壌中）に営巣し、土壌中を進みながら木造住宅や樹木に被害を与える。一方、アメリカカンザイシロアリは、乾材シロアリと呼ばれ、主に乾燥した木材を食害するため、土壌との関係がない。したがって地下シロアリを対象としたこれまでの床下中心の防除処理がアメリカカンザイシロアリに対してはほとんど効果をなさない。さらに地下シロアリと比べ、ほとんど水分を必要としないため、被害が水周りに集中することもなく、また一軒の住宅内で小さなコロニー（集団）が点在することから、シロアリの生息場所を発見することが非常に困難である。そのため、25 都府県以外でも既に被害が発生しているという考えが一般的になっており、今後さらに被害の報告が増えていくことと考えられる。

また地下シロアリのように土壌中を移動して、被害の範囲を拡大する手段を持たないため、基本的には、1) 被害材（木材や家具）の人為的な運搬、2) 羽蟻による新たなペアの形成と木材中への穿孔・営巣、によって被害の範囲を拡大していく。したがって、密集した住宅区域などでは、被害の拡大速度が速く、東京や横浜の住宅密集地域では、5 年間で被害範囲が 2 倍以上拡大していることもあり、できるだけ早い対策が必要となっている。

2. アメリカカンザイシロアリ被害住宅調査

2.1 被害調査方法

各地の調査建物について、本研究では基本的に被害調査方法を統一し、地域による被害の特徴を検討できるよ

うな調査を試みた。調査対象の建物は住居あるいは店舗として人が活動している建物であり、建て壊す予定の建物については、強度試験用の被害試料を採集するために利用した。

具体的な調査方法は、

- 被害住宅とその周辺の住宅の外観を目視によって被害調査を行った。あらかじめ周辺住宅を含む地図を用意し、被害の概要を記入していった。
- 調査可能な被害住宅については、目視、触診、打診による被害部位の確認とアメリカカンザイシロアリ特有の虫糞(写真 2-1)の堆積場所の確認を行い、被害部位の写真撮影および図面への記録を行った。

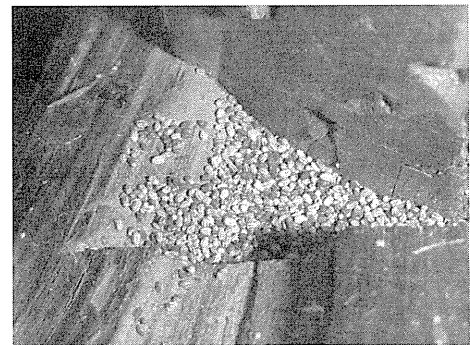


写真 2-1 アメリカカンザイシロアリの虫糞の堆積

- 被害部位を確認した後、非破壊検査法（アコースティック・エミッション(AE)検出装置⁵⁾およびマイクロ波シロアリ探知機（ターマトラック）⁶⁾を用いて、木材中でのアメリカカンザイシロアリの活動の探知を行った。(写真 2-2)

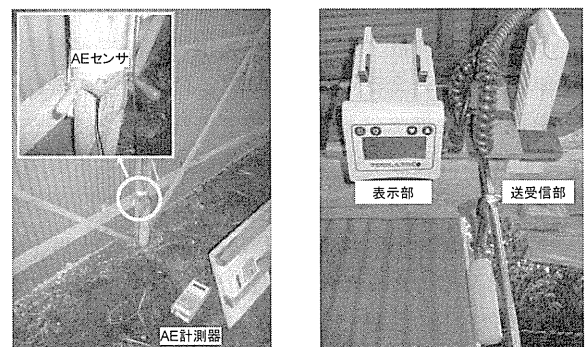


写真 2-2 AE 検出装置（左）とターマトラック（右）によるアメリカカンザイシロアリの検出

- 状況に応じて、非破壊検査法によってシロアリの生息が確認された部位については薬剤による駆除を行った。

2.2 和歌山県南部 K 町 T 地区集落

調査を行った 14 軒（寺院、集会所を含む）全 19 棟の

建物のうち、12 軒 17 棟でアメリカカンザイシロアリによる被害が発見された。図 2-1 に調査に際して作成した図面の一例を、図 2-2 に調査を行った 14 軒を①～⑭の番号で示し、そのうち被害の認められた 12 軒については○印を付けた。表 2-1 は、それぞれの建物について被害の発見された部位と総合的な被害程度についてまとめたものである。

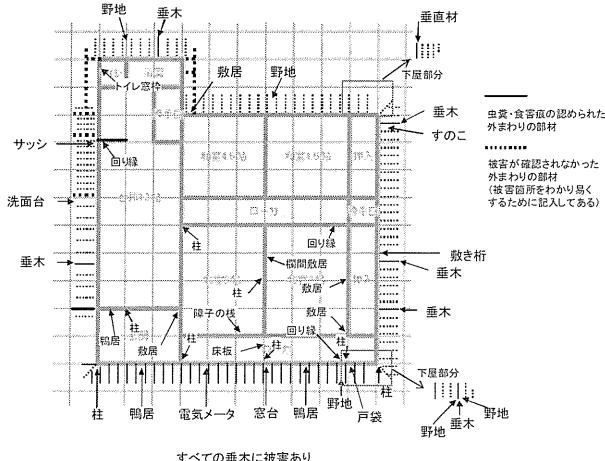


図 2-1 アメリカカンザイシロアリ被害調査図面の一例

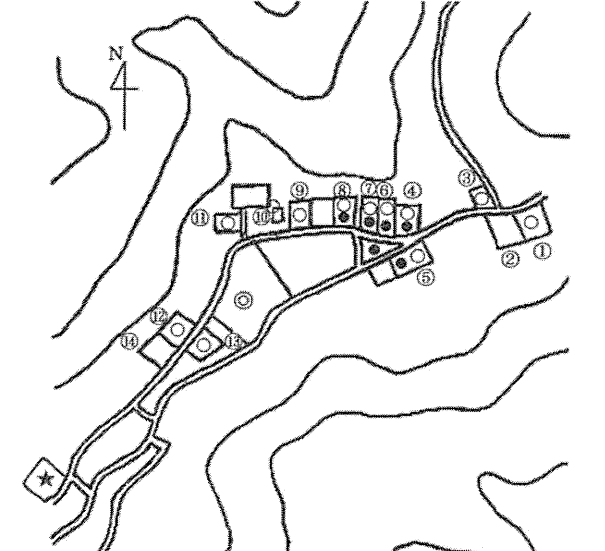


図 2-2 アメリカカンザイシロアリ被害調査区域（和歌山県）
○印は今回の調査で被害の確認された 12 軒を、●印は 1991 年の星野らの調査⁷⁾によって被害が報告された 6 軒を示す。◎は地区内にある工場、★は調査した中で最も西に位置する住宅である。

次に、住宅部材と被害の発生との関係について、17 棟の被害建物について被害部材の集計結果を表 2-2 にまとめる。全体的に見ると、屋根部材（軒下部材と小屋組）の被害が圧倒的に多く（写真 2-3）、次いで外構部材と室内部材が被害を受けていた。イエシロアリやヤマトシロアリの場合に最も頻繁に被害を受ける床下部材については、アメリカカンザイシロアリによる被害例は少なかった。イエシロアリやヤマトシロアリなど日本に広く分布するシロアリは、土中から床下部分を経由して住宅に侵入する。したがって、現在のシロアリ防除対策の基

本は、床下土壌や床下部材の薬剤処理であり、屋根部材や内装部材には何ら対策が行われていない。このことは、通常のシロアリ防除処理ではアメリカカンザイシロアリの被害拡大を阻止することは非常に困難であることを示している。



写真 2-3 母屋のアメリカカンザイシロアリ被害

上述したように、星野らによって行われた調査⁷⁾では、6 戸の住宅においてアメリカカンザイシロアリによる被害が報告されており（図 2-2 の●印）、本調査までに被害が大きく拡大したことが明らかとなった。アメリカカンザイシロアリにおける被害の拡大は、①被害材の人為的な運搬、及び②7 月から 9 月の日中に飛び立つことが多い羽蟻による新たなペアの形成と木材中への穿孔・営巣、によって行われると考えられる。住民の方からの情報では、本調査地区においても 9 月頃に羽蟻が発生し、集落の奥に向かって吹く風に乗って飛行することとであった。

表 2-1 和歌山県南部 K 町 T 地区におけるアメリカカンザイシロアリ被害調査住宅と被害の概要

調査建物 (図 2-2 参照)	被害のあった部位	総合的な被害程度
①住宅	垂木、横木、出窓、敷居、戸袋、桁、腕木、柱	中
②住宅		被害無し
③住宅・車庫	梁、天井野縁、小屋束、垂木、横木、棟木、出窓、戸袋、桁、腕木、筋交い、破風、柱、引き戸、床板、回り縁	中
④住宅・納屋	梁、桟木、垂木、野地板、横木、出窓、壁板、戸袋、桁、腕木、柱、敷居、鴨居、障子、回り縁、欄間敷居、窓枠、土台、大引、間柱、押入棚板、長押	大
⑤住宅・離れ	梁、桟木、垂木、野地板、横木、出窓、壁板、戸袋、桁、腕木、柱、敷居、鴨居、障子、回り縁、欄間敷居、窓枠、土台、大引、間柱、押入棚板、長押	大
⑥住宅	外部のみ調査：垂木、桁、戸枠、竹材	小
⑦住宅	外部のみ調査：垂木、母屋、横木、野地板、戸袋	小
⑧住宅	外部のみ調査：垂木、ひさし、ベンチ、横木、野地板、破風、胴差し、隅木	中
⑨住宅	外部のみ調査：垂木、桁、野地板、柱、戸板、窓枠	小
⑩寺院本堂・納屋	垂木、隅木、桁、破風、柱、横木、野地板、戸袋	中
⑪集会所	垂木、軒桁、柱、畳、床板	小
⑫住宅	サッシ受木	小
⑬住宅・納屋	垂木	小
⑭住宅		被害無し

表 2-2 アメリカカンザイシロアリ被害の部位別集計結果

部 位		比率
屋根部材	垂木、軒、野地板、梁、柱など	39%
外構部材	戸袋、雨戸、外壁、軒柱など	23%
室内部材	窓枠、戸枠、柱、障子など	20%
床部材	床板、畳など	10%
床下部材	根太、大引、束など	5%
家具		3%

星野らの報告によれば、最初に被害が発生した住宅は、住宅④と住宅⑤の間の現在空き地となっている区画にあったとのことである（⑥と⑦の住宅の下にある三角形の部分：●印）。両住宅で最も激しい被害が認められたことは、これを支持しているように思われる。一方、地区内にある工場（図 2-2 の◎）より西の住宅（⑫、⑬）においても軽微ながら被害が観察されたことは、被害が西に向かって拡大しつつあることを示している。アメリカカンザイシロアリの羽蟻は条件によっては 1km 程度飛行できることが知られており、風向きによっては、より広い地域が今後被害を受ける可能性がある。

なお、図 2-2 の最も西側にある住宅（★）についても、依頼により急遽建物外部と天井裏について簡単に調査を行ったが、被害は発見されなかった。したがって、現時点では、T 地区におけるアメリカカンザイシロアリ被害は、今回の調査区域内に留まっている可能性が高い。

それでは、今後地区全体としてどのような対策が行われるべきであろうか。上述したように、現時点では被害は T 地区内の調査区域内に留まっていると考えられることから、被害建築物全てを完全に駆除処理することによって、被害の根絶は可能であると考えられる。これには、ガス製剤を用いた燻蒸処理が適切であると考えられる。ガス燻蒸は、日本においては木製文化財の殺虫処理に多く用いられているが、米国等ではアメリカカンザイシロアリ対策にも広く応用されている⁸⁾。適切なガス燻蒸処理によって建築物内のシロアリを完全に死滅させることができるが、通常のシロアリ処理と比較して長い処理時間（3 日間）と高いコスト（最高数百万円程度）が必要である。またガス燻蒸処理は、薬剤の残効性がないため、一軒処理しただけでは、その後の周囲からのシロアリの侵入を防ぐ効果はなく、地区全体としての対策を行わない限り、本被害を根絶することはできない。また、被害区域内にある廃材置き場、ガレージ、農具置き場などにも被害は多発しており、これらについても対策が必要である。

2.3 宮崎県延岡市内住宅地

延岡市内の住宅地約 200m 四方（図 2-3）で、今回調査を行ったのは木造住宅 1 軒、木造店舗兼住宅 2 軒、RC

造の病院 1 軒の計 4 軒であり（図 2-3 中の①～④）、全ての建物内でアメリカカンザイシロアリによる被害が発見された。図 2-3 中の★はすでに被害が発見された建物または駆除を行った建物を示している。また周辺住宅の木製外構材等を目視調査した結果、200m 四方内でかなりの被害が観察され、羽蟻による新たなペアの形成と木材中への穿孔・営巣によって被害の範囲が拡大していることが示唆された。ただし、調査範囲内の住宅については、屋根部材が木材以外の材料でシールされている住宅が多く、外からの羽蟻の侵入が困難となり、小屋裏での被害が和歌山県南部 K 町 T 地区の集落と比較して少ないのではないかと推測された。これについては、調査を行った 4 軒について、小屋裏の被害が少なかったことから予測されるが、窓の枠材や戸袋や戸板への被害が激しく、そこから内部の柱などの部材へ被害が広がっていることが目視と各計測によってわかった。

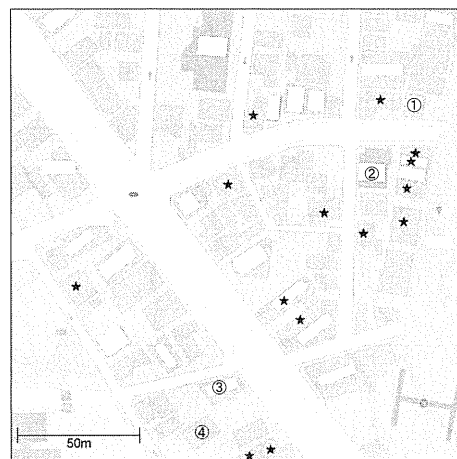


図 2-3 アメリカカンザイシロアリ被害調査区域（宮崎県）

★はすでに被害が発見された建物または駆除を行った建物を示している。

図 2-4 は、調査を行った 4 軒のうち、木造店舗兼住宅として利用されている建物（図 2-3 中の③）の調査結果の例を示す。目視調査で、1 階店舗の窓枠、窓台にアメリカカンザイシロアリの虫糞と被害が確認され、小屋裏では小屋束、梁、桁の被害が確認された。目視調査の後、シロアリの食害活動を非破壊的に検出するため、アコースティック・エミッション(AE)法を用いて計測を行った。AE はシロアリが木材を食害する際に発生する微弱な弾性波（超音波）であり、木材表面に取り付けた AE センサによって地震波のような振動を検出し、振動の事象数を計数することで、木材内部のシロアリの食害活動を検出することができる。通常、2 分間で 10 事象以上の AE 波が検出されると、木材内部でシロアリが活動していると判定する。AE 計測の結果、1 階の窓枠や窓台と、小屋裏の柱で、2 分間当たり 10 事象以上の AE が検出され、アメリカカンザイシロアリが木材中で食害活動をしていると判断した。同時に、シロアリの移動を検出するマイ

クロ波シロアリ探知機（ターマトラック）でもシロアリの活動が検出された。

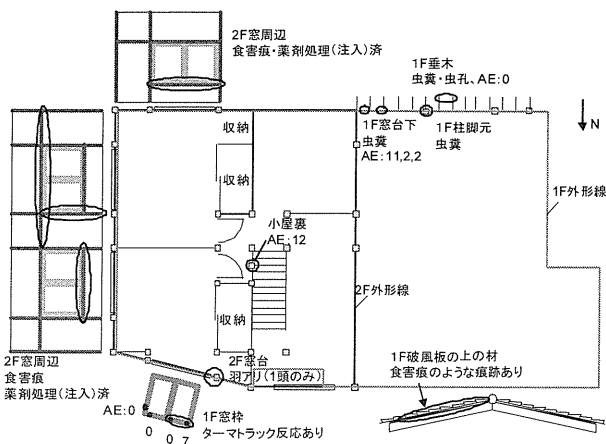


図 2-4 アメリカカンザイシロアリ被害住宅の調査結果の一例

住宅部材と被害の発生との関係について、4 軒の被害建物の被害部材の集計結果を表 2-3 にまとめる。和歌山県南部K町T地区の集落の被害部材と同様に、小屋裏の梁、桁、小屋束、柱の被害が見られたものの、被害の程度は小さかった。その理由として、棟木、母屋、垂木などの部材がトタン板などで外からシールされている建物が多く、羽蟻の侵入をある程度防ぐ効果があると推察された。また 4 軒全てで、木製の窓枠の被害が最も多く（写真 2-4）、羽蟻の侵入経路となっていると考えられる。本調査では建物内の調査をしていない周辺住宅については、木製の柵や門などの外構材を目視調査のみ行ったが、200m 四方では 50%以上でアメリカカンザイシロアリの被害が観察された。現在、延岡市のホームページ上でもアメリカカンザイシロアリの被害に対して、注意喚起が行われていることから、行政も含めて対策を講じていく必要がある。

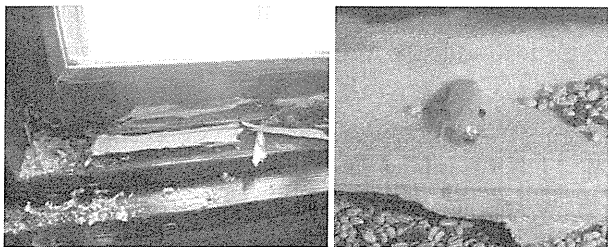


写真 2-4 木製窓枠の被害と窓枠内に生息する偽職蟻

2.4 島根県松江市内木造店舗

これまで島根県でのアメリカカンザイシロアリの被害報告はなかったが、松江市内の木造店舗 1 軒で、初めて被害が発見された。周辺の建物の外構部分等を目視調査した結果、アメリカカンザイシロアリの被害は見つからなかったため、おそらくこの木造店舗が被害の発生源であると推測された。2010 年 12 月に木造店舗内では、2F

作業場（写真 2-6）と小屋裏から虫糞の堆積と羽蟻が発見された（図 2-5）。建物の他の部分からは、目視調査では虫糞や被害は見られず、2F 作業場の上の小屋裏の部材にアメリカカンザイシロアリが生息していると考えられる。この木造店舗は築 100 年であるが、10 年前に天井のリフォーム等を行っており、おそらくその際に使用された木材にアメリカカンザイシロアリが生息していたのではないかと推察された。ただし、被害が 2F 作業場とその直上の小屋裏にのみ発見されたことから考えると、被害が発生してからそれほど広範囲に拡大してないと考えられ、小屋裏を中心に防除処理を行うことで早期に駆除が可能である。



写真 2-6 二階作業場と桁上で発見された虫糞

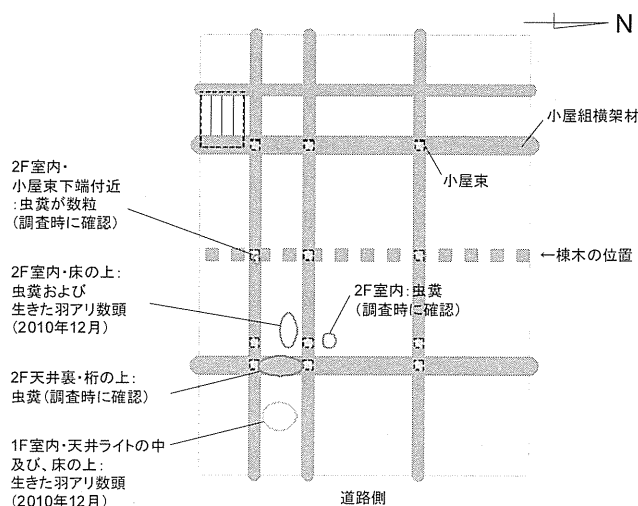


図 2-4 木造店舗二階作業場での被害調査結果

2.5 兵庫県宝塚市内住宅地

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。住宅密集地であることから、周辺の建物の外構部分等を目視調査した結果、アメリカカンザイシロアリの被害は見つからなかった。施主からの聞き取り調査の結果、本住宅の前持ち主がアメリカから入国した宣教師で、おそらく北米産の家具を持ち込んできたのではないかと話であった。周辺住宅に被害が無いことから本住宅が被害の発生源であり、その被害範囲は現在のところ拡大していないと推測された。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

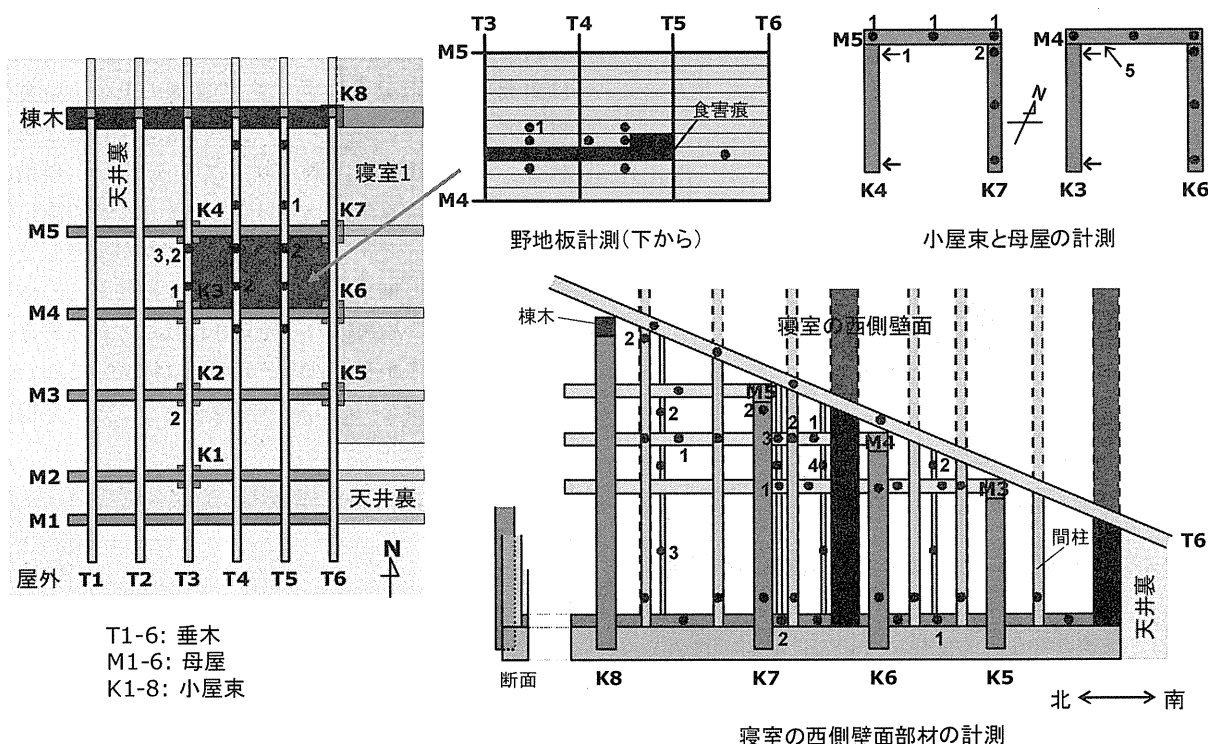


図 2-5 1 階天井裏の AE 計測結果

●および矢印は計測部分を示し、隣の数字は 2 分間あたりの AE 事象数を示す。

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。家具が接する柱等の木材にシロアリが侵入し、被害が拡大していったと考えられる。小屋組材や壁面内の間柱等の被害は、温度も高く、外乱が少ないため、シロアリが生息するには最適な環境であったと推察される。本調査では建物において、被害や虫糞が発見された部分を中心に AE 計測を行い、シロアリの生息場所を検出したのち、薬剤による穿孔注入処理を行った。

図 2-5 は一階天井裏の垂木、母屋、小屋束、野地板についての AE 計測結果を示す。図中の(●)および矢印は AE 計測点を、数字は 2 分間あたりの AE 事象発生数を示し、数字の記載がない測定点は、AE が検出されなかったことを示す。AE 事象発生数は、一階の柱等の計測では最大 46 の AE が検出されたのに対して、最大でも 5 程度と少なかった。アメリカカンザイシロアリは、イエシロアリやヤマトシロアリに比べて、1 コロニー内の個体数が少なく、通常 10 以上の AE 事象が検出された部分のみを評価するが、今回は AE が検出された全ての計測点でアメリカカンザイシロアリが食害活動をしていると判断した。計測後、AE が検出された計測点付近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、1 か月後に再度 AE 計測を行った。その結果、薬剤処理前に AE が検出された全ての計測点で、ほとんど AE は検出されず、薬剤処理によってシロアリが死滅したと考えられ

る。本調査住宅は、壁内の間柱や小屋裏の野地板等を全て目視によって調査することは困難であったため、全てのアメリカカンザイシロアリの駆除した結果にはならなかった。薬剤処理をしていない部材で、新たに虫糞や羽蟻が確認されたため、再処理が必要となった。しかし、駆除処理によってシロアリの頭数の減少にはつながっているため、数回にわたって駆除を行い、定期的な調査と組み合わせて、全体の駆除を行っていく必要がある。

2.6 被害調査における考察

本調査では、アメリカカンザイシロアリの被害が拡大する 2 つの住宅地域と、周辺住宅へは被害は拡大していないが、おそらく被害の発生源であると推察される 2 つの住宅、計 20 軒の木造建築物について、被害調査を行った。2 つの住宅地域においては、羽蟻の飛来によって、すでに被害範囲が拡大しており、住宅の外構材として使用されている木材から侵入して被害が進行していると考えられる。特に、和歌山県の住宅地域では、屋根部材（軒下部材と小屋組）の被害が圧倒的に多く、宮崎県の住宅地域では、木製の窓枠、戸板、戸袋の被害が多かった。その被害傾向の違いは、和歌山県の住宅地域では、屋根の部材（棟木、母屋、垂木、破風板等）が外に露出しているのに対し、宮崎県の住宅地域では、トタン板などで屋根の部材が外からシールされている木造建物が多かったことだと考えられる。アメリカカンザイシロアリは、地下シロアリのように土壌中を進行することはない

ため、羽蟻の飛来によって被害の拡大を防ぐことが最も重要であり、外に露出している木材に対しては、薬剤による予防処理が必要である。

一方、被害の発生源であると考えられる兵庫県および島根県の木造建築物については、今後の被害拡大を抑えるためにも、生息するアメリカカンザイシロアリの駆除が重要となる。この場合、最も効果的なのは、適切なガス燻蒸処理によって建築物内のシロアリを完全に死滅させることであるが、どちらも住宅密集地域にあるため、建物をシートで覆ってガス燻蒸処理することが困難である。その理由としては、ガス燻蒸処理の場合、隣家と離れていなければ、処理後の燻蒸薬剤を大気中に放出することも難しいし、建物全体をシートで完全に覆うことも困難である。そのため、現状考えられる有効な処理は、シロアリ被害部位を検出し、薬剤による穿孔注入処理（スポット処理）を行うことであると考えられる。ただし、地下シロアリの場合は、1コロニーで住宅1棟に被害を与えることが多いのに対し、アメリカカンザイシロアリは複数のコロニーが住宅1棟に点在して被害を与えるため、一度のスポット処理で、全てのコロニーを死滅させるのは困難である。したがって、コロニー数の減少を目的とした定期的な調査と駆除を繰り返し、最終的には全てのコロニーを根絶させていく必要がある。

すでに住宅密集地域で拡大しているアメリカカンザイシロアリの被害については、被害住宅1棟のみの駆除処理を行っても、再度羽蟻の侵入を許した場合、再発することが考えられる。地域全体での駆除を考えると、できるだけ全ての被害住宅を同時期に駆除処理することが最も重要となるが、莫大な費用が掛かり、個人だけでは対策は難しいため、やはり行政との連携が必要となる。宮崎県延岡市や東京都中野区では、ホームページ上で、アメリカカンザイシロアリの被害に対する注意喚起を行っており、このような行政の活動が今後増えて、地域全体での対策が実現することを期待している。

3. アメリカカンザイシロアリの非破壊検出方法の検討

3.1 実験方法

和歌山県南部 K 町 T 地区(図 2-2)の木造納屋の柱、梁、けた、母屋、胴縁等の部材を対象にアコースティック・エミッション(AE)及びターマトラック(写真 2-2)によるアメリカカンザイシロアリの検出を試みた。本木造納屋はすでにアメリカカンザイシロアリの被害を受けており、試験用のシロアリ採集の目的も兼ねているため、計測後、駆除をせずに、納屋を解体し、解体材を京都大学生存圏研究所に運搬した。

各部材表面に AE センサを約 1m 間隔で取り付け、アメリカカンザイシロアリの被害活動によって発生する AE を 2 分間計数した。センサの固定には押しピンとゴム短

冊を用い、センサの受圧面と測定部表面の音響的な密着性を確保するためにシリコングリスを用いた。またターマトラックの電磁波の送受信部を木材表面に設置し、約 1 分間、送受信部直下の木材中を移動するアメリカカンザイシロアリの検出を試みた。ターマトラックは設定感度が 6 段階であり、通常感度 3 で計測するが、今回はさらに最高感度 6 でも計測を行った。

AE 計測及びターマトラックによる検出は部材のほぼ同一箇所で行い、それぞれの計測で得られた結果を比較検討した。AE 計測では、測定点における 2 分間あたりの AE 事象数を AE 事象率として評価した。一方ターマトラックは、表示部に示される動く棒グラフの強さ(棒グラフが表示部を占める割合)を 5 段階の評価基準を設け、目視によって判定した。

判定基準は、

0: 最高感度 6 でも表示部に何も現れなかった

1: 最高感度 6 で、表示部にわずかに動きが現れた(棒グラフの表示部を占める割合 5%程度)

2: 感度 3 で、表示部にわずかに動きが現れた(棒グラフの表示部を占める割合 5%程度)

3: 感度 3 で、表示部に動きが現れた(棒グラフの表示部を占める割合 50%程度)

4: 感度 3 で、表示部に動きが現れた(棒グラフの表示部を占める割合 100%)

とした。

一方、AE 及びターマトラックによる検出結果と木材内のアメリカカンザイシロアリの頭数の関係について検討するため、納屋解体後の柱、胴縁、母屋、登り梁から、長さ 300mm の試験体を 64 体作製し、AE 及びターマトラックによる計測を行った。1 試験体について、AE センサを試験体中心部分に取り付けて 2 分間の AE 計測を 1 回行った。またターマトラックについては、マイクロ波の送受信部を試験体表面に設置し、約 1 分間測定した後、試験体の長さ方向に移動し、1 試験体につき計 4 点で計測を行った。AE 及びターマトラックの計測終了後、64 体全ての試験体を解体し、生息するアメリカカンザイシロアリの頭数を計数した。

3.2 結果および考察

1) 木造納屋における AE 及びターマトラックによるアメリカカンザイシロアリの検出

約 300 点で AE 計測を行った結果、ほとんどは AE が検出されなかったが、2 分間で AE 事象数が 10 以上検出された測定点として、柱で 44、棟木で 31、登り梁で 254 の AE が検出され、木材内部で被害活動が行われていると推定された部分もあった。一方、ターマトラックで約 200 点の計測を行った結果、全計測点うち、感度 3 で約 30% (5 段階評価で 2 以上)、感度 6 で約 60% (5 段階

評価で1以上)がアメリカカンザイシロアリの活動に対して反応したが、感度6はノイズレベルも増幅され、一概に検出感度が高まったとは言えず、環境ノイズの影響によって反応していることも考えられる。そこで、同一箇所でのAEとターマトラックによる検出結果(204箇所)について、各計測点でのAE事象率とターマトラックの5段階評価を比較し、その一例として、柱における2分間あたりのAE事象数とターマトラックの5段階評価を表3-1に示す。

表 3-1 柱での AE 事象率(AE 事象数/2minutes)とターマトラックにおける 5 段階評価の関係

		①	②	③
柱1	AE(event/2min)	1	0	0
	ターマトラック	3	0	0
柱2	AE(event/2min)	1	0	0
	ターマトラック	1	0	3
柱3	AE(event/2min)	6	0	0
	ターマトラック	0	0	0
柱4	AE(event/2min)	7	1	0
	ターマトラック	3	1	1
柱5	AE(event/2min)	0	0	0
	ターマトラック	1	0	2
柱6	AE(event/2min)	44	4	0
	ターマトラック	1	4	3
柱7	AE(event/2min)	1	0	0
	ターマトラック	0	0	3
柱8	AE(event/2min)	2	0	0
	ターマトラック	1	0	0
柱9	AE(event/2min)	0	0	0
	ターマトラック	0	0	0
柱10	AE(event/2min)	8	0	0
	ターマトラック	3	0	0
柱11	AE(event/2min)	2	0	0
	ターマトラック	3	0	3
柱12	AE(event/2min)	9	0	0
	ターマトラック	0	0	3
柱13	AE(event/2min)	0	0	0
	ターマトラック	1	0	3
柱14	AE(event/2min)	0	0	0
	ターマトラック	1	0	3

1) 測定位置: 柱の下端部から①100mm, ②1m, ③2m

	AEが検出されず、ターマトラックでも反応なし(0)
	AEが検出されず、ターマトラックで感度6で反応あり(1)
	AEが検出されず、ターマトラックで反応あり(2以上)
	AEが検出され、ターマトラックでは反応なし(0)
	AEが検出され、ターマトラックで感度6で反応あり(1)
	AEが検出され、ターマトラックで反応あり(2以上)

表 3-1 より、AE が検出された測定点で、ターマトラックによる反応も確認された測定点がみられる一方で、AE あるいはターマトラックのどちらかしか反応しない部分も見られた。これは、AE はシロアリの摂食活動によって発生するが、シロアリの走行(移動)などによってAEは発生しないこと、あるいはターマトラックでは、送受信部分から発信された電磁波が移動するシロアリによって反射し、受信部で検出されるが、摂食活動などの

移動が伴わない行動に対して検出が困難であることによって、AE とターマトラックの計測結果が同じ計測点で必ずしも一致しなかったと考えられる。また、AE 波は木材中を伝搬するため、一つのセンサの検出範囲が繊維方向で500mm程度、繊維直方向で200mm程度であるのに対し、ターマトラックは送受信部(約50×70mm)直下で約60mm深さまでの検出範囲であるため、同じ測定点でも検出範囲の違いが影響していると考えられる。

2) AE 及びターマトラックによる計測結果とシロアリ頭数の関係

納屋解体後の部材から長さ300mmの試験体を64体作製し、それぞれAEおよびターマトラックによる計測結果と試験体内に生息するアメリカカンザイシロアリの頭数を表3-2に示す。母屋から13本の試験体、胴縁から11本の試験体についての計測結果の一例であり、母屋からはアメリカカンザイシロアリの生息は確認されず、胴縁からは相当数のシロアリが各試験体で生息するのが確認された。表中のAEは2分間あたりのAE事象数を示し、ターマトラックについては、1試験体につき4箇所(Term. 1~4)で測定したので、各測定点における5段階評価を示す。なお、AEは職蟻の摂食活動によるのみ発生するため、表中の頭数(W)はアメリカカンザイシロアリの擬職蟻のみの頭数を示す。

表 3-2 柱での AE 事象率(AE 事象数/2minutes)とターマトラックにおける 5 段階評価の関係

	AE	Term. 1	Term. 2	Term. 3	Term. 4	頭数(W)
胴5-1	5	2	3	2	2	60
胴5-2	28	0	2	0	1	27
胴5-3	3	0	0	1	1	15
胴5-4	3	0	1	1	1	1
胴5-5	7	1	1	1	2	8
胴5-6	3.4	3	3	2	1	13
胴5-7	12	3	3	3	1	30
胴5-8	2	3	4	3	3	88
胴5-9	8	2	3	3	2	146
胴5-10	0	1	1	1	1	10
胴5-11	79	2	2	1	1	97
母屋8-1	0	1	1	1	1	0
母屋8-2	0	0	1	0	2	0
母屋8-3	1	1	1	1	1	0
母屋8-4	0	1	1	1	1	0
母屋8-5	0	1	1	1	1	0
母屋8-6	0	0	0	0	0	0
母屋8-7	0	1	0	0	0	0
母屋8-8	0	0	0	1	0	0
母屋8-9	0	0	0	0	0	0
母屋8-10	0	0	0	0	0	0
母屋8-11	0	0	0	0	0	0
母屋8-12	0	0	0	0	0	0
母屋8-13	0	1	0	0	0	0

	AEが検出されず、ターマトラックでも反応なし(0)
	AEが検出されず、ターマトラックで感度6で反応あり(1)
	AEが検出されず、ターマトラックで反応あり(2以上)
	AEが検出され、ターマトラックでは反応なし(0)
	AEが検出され、ターマトラックで感度6で反応あり(1)
	AEが検出され、ターマトラックで反応あり(2以上)

母屋については、どの試験体からも AE は検出されず、シロアリの生息も確認されなかったが、ターマトラックについては、シロアリが確認されなかったにもかかわらず、感度 6 で 5 段階評価の 1 と判定した測定点が多かった。他のシロアリが生息していない試験体でも同様な結果が得られたことから、感度 6 では、検出感度が上がるとともに、環境ノイズの影響もかなり受けるのではないかと推察された。一方、胴縁については、全ての試験体でシロアリの生息が確認され、1 試験体（胴 5-10）を除いて、AE は検出されたが、AE 事象率とシロアリの頭数の関係が、これまでの実験室実験のように、ある程度の正の相関はみられず、AE 事象率が 10 以下であっても、擬職蟻が 50 頭以上生息していた試験体も見られた。これについては、摂食活動があまり行われていなかったこと、試験体の食害が激しく、空洞化した部分が多く、木材中を AE 波が伝搬しにくかったことなどが考えられる。ターマトラックについては、5 段階評価の 0 と 1 が見られるものの、シロアリの頭数が多い試験体では、5 段階評価で 2 以上と判定した測定点が多く見られた。また 1 試験体で 4 箇所測定しているため、頭数が少ない試験体についても、シロアリが集団で生息している部分を検知していることも示唆された。

次に、試験体 64 本について、AE（計測点数 64）及びターマトラック（計測点数 256）の計測結果とシロアリの生息との関係をそれぞれ表 3-3、3-4 に示す。AE が検出され、シロアリの生息が確認されたのと、AE が検出されず、シロアリの生息が確認されなかった結果が約 90%を占めており、シロアリの摂食活動による AE 検出によって、アメリカカンザイシロアリの探知がかなりの精度で可能であることが示唆されたが、AE 事象率が 10 以下であっても、シロアリが 50 頭以上生息していた試験体が 17 体中 5 体あり、シロアリの活性（摂食活動）や、食害の程度（空洞の割合）による木材中での AE の伝搬特性のなどによる影響を受けることが考えられる。またターマトラックで、シロアリの反応がある（5 段階評価で 1 以上）と判断して、シロアリの生息が確認されたのと、シロアリの反応がなく（5 段階評価で 0）、シロアリが生息していなかったという結果が約 60%であった。ここで、評価 1 の場合、約 70%でシロアリが生息していなかったという結果となり、評価 2 の場合でも、約 50%でシロアリが生息していなかったため、誤った判定をする結果となった。仮に今回の測定について、ターマトラックで感度 3 のみで計測した場合、感度 6 で計測した測定点は全て 5 段階評価の 0 となるため、全体としての精度は約 80%という結果になった。したがって、感度 6 での反応は、そのほとんどが環境ノイズ等による影響ではないかと示唆されるものの、高感度に設定することによって、わずかなシロアリの移動を検出した結果も

得られたことから、実際に、ターマトラックを使用する場合、感度設定が検出性において重要であると考えられる。また計測中に送受信部にわずかな振動が加わるることによってもターマトラックは反応することがあるため、計測時における送受信部の固定方法等も更なる検討が必要である。

表 3-3 AE 検出結果とシロアリの生息との関係

	試験体数	割合(%)
AEが検出されず、シロアリが生息してなかった	41	64
AEが検出されず、シロアリが生息していた	3	5
AEが検出され、シロアリが生息してなかった	3	5
AEが検出され、シロアリが生息していた	17	26

表 3-4 ターマトラックの計測結果とシロアリの生息との関係

5段階評価		試験体数	割合(%)
0	シロアリが生息していた	5	2
	シロアリが生息していなかった	76	30
1	シロアリが生息していた	29	11
	シロアリが生息していなかった	71	28
2	シロアリが生息していた	26	10
	シロアリが生息していなかった	27	11
3	シロアリが生息していた	19	7
	シロアリが生息していなかった	2	1
4	シロアリが生息していた	1	0
	シロアリが生息していなかった	0	0

4. アメリカカンザイシロアリ被害材の残存耐力評価

4.1 実験方法

被害建物を解体し、解体後の胴縁、母屋から、木口断面約 40×50mm、長さ 1500mm のスギ試験体を 35 個作製し、X 線 CT 装置 (Y. CT Modular320 FPD, エクスロン・インターナショナル社) による断層撮像に供した(写真 4-1)。撮像条件は、管電圧 160kV、管電流 1.5mA、分解能 0.3mm とした。CT 画像は CT 画像解析ソフトウェア (VGStudio MAX 2.0, Volume Graphics 社)を用いて三次元化し、それぞれの試験体について、食害による空隙の体積を測定した(写真 4-2)。断層撮像後、曲げ試験に供するために、それぞれの試験体を長さ 1000mm に調整した。この試験体についてスパン 900mm で三等分点曲げ試験を行った(図 4-1)。試験時の測定項目は、荷重と中央たわみおよび支点のめり込み変位である。

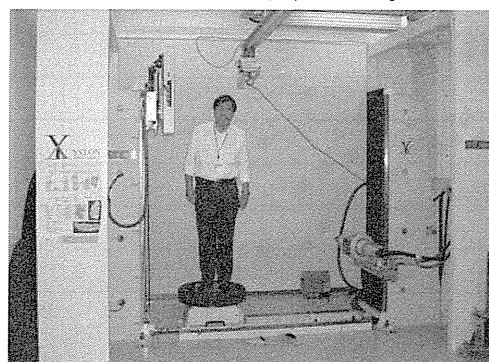


写真 4-1 大型 X 線 CT 装置(九州国立博物館所有)

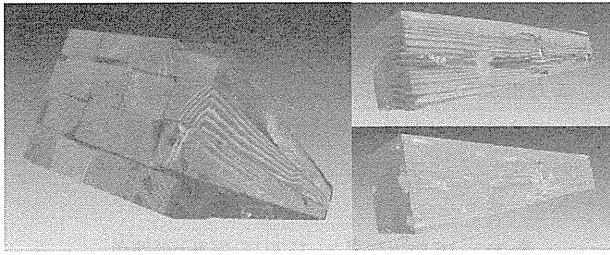


写真 4-2 被害材の三次元 CT 画像と食害による空隙体積の測定

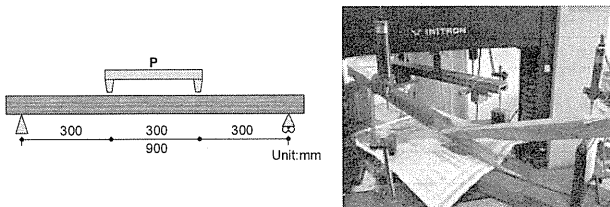


図 4-1 被害材の三等分点曲げ試験(スパン 900mm)

曲げ破壊試験に先立って、動的ヤング係数、容積密度、含水率、超音波伝搬速度（長さ方向、試験体中央部）、応力波伝搬速度の測定も行った。曲げ試験により、曲げ強度と曲げヤング係数を求めた。なお、試験時の含水率は約 14%であり、ばらつきはほとんどなかった。

4.2 結果および考察

35 個の試験体について、三次元画像より測定した空隙率（食害材の空隙体積／食害材全体の体積）はほとんどが 20%以下であり、食害が最も激しい試験体でも 34%程度であった。図 4-2 と図 4-3 は、空隙率と曲げ強度および曲げヤング係数の関係を示す。両者とも負の相関は見られるもののばらつきが大きく、空隙率のみで強度特性を評価することは難しいと考えられる。ただし、今回の体積測定においては、試験体内の空隙部分に堆積した虫糞を非食害部分と区別することが困難であったため、ばらつきが大きくなったと考えられる（写真 4-2）。また、1 個の試験体内での空隙の分布が均一でないことの影響も考えられるため、食害材内部での空隙の分布を評価し、強度との関係を検討する必要がある。

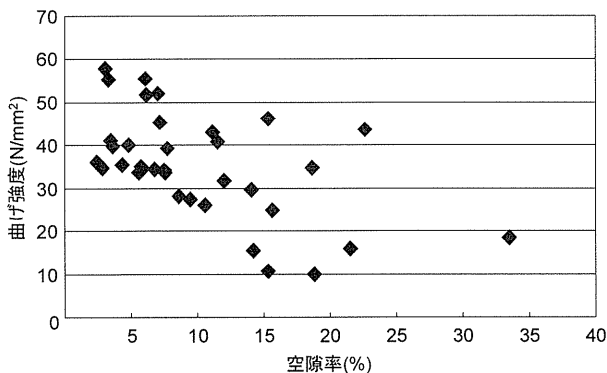


図 4-2 空隙率と曲げ強度の関係

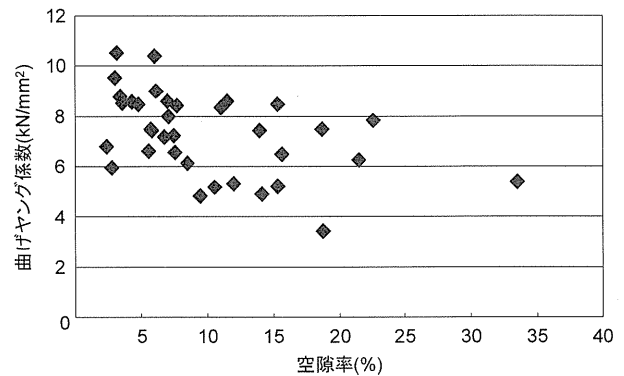


図 4-3 空隙率と曲げヤング係数の関係

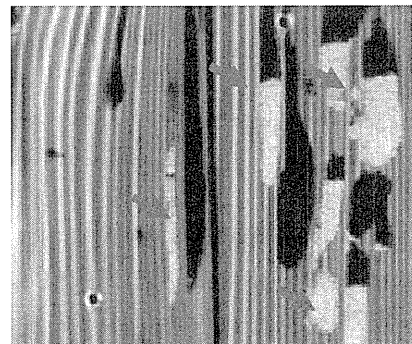


写真 4-2 空隙内に堆積した虫糞

図 4-4 に示すような実験時曲げヤング係数と強度の関係から、被害の無い健全な木材で一般的に見られるヤング係数と強度との正の相関が同様に見られた。

また、縦振動法により求めた曲げヤング係数と実験時曲げヤング係数との関係を図 4-5 に示す。この結果から、縦振動法によって求められるヤング係数と実験時曲げヤング係数は高い正の相関があることが看取され、シロアリ食害による空洞が存在する場合でも縦振動によるヤング係数の測定は有効であることがわかった。ただし、縦振動法を用いた測定は、他の部材が接合されている状態や応力が負荷されている状態では安定していないため、そのまま残存耐力評価に使用することは難しいが、被害住宅から木材を取り出して再利用する場合などには有効な評価手段であると考えられる。

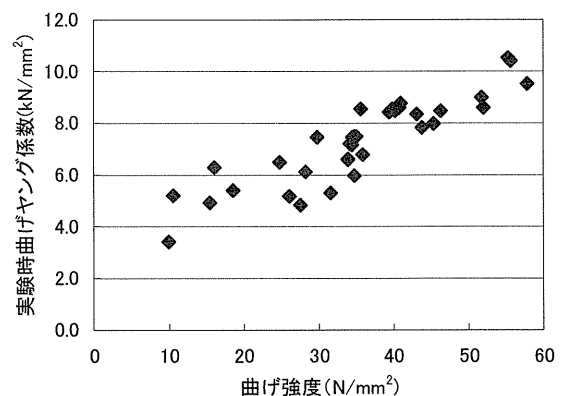


図 4-4 曲げ強度と実験時曲げヤング係数の関係

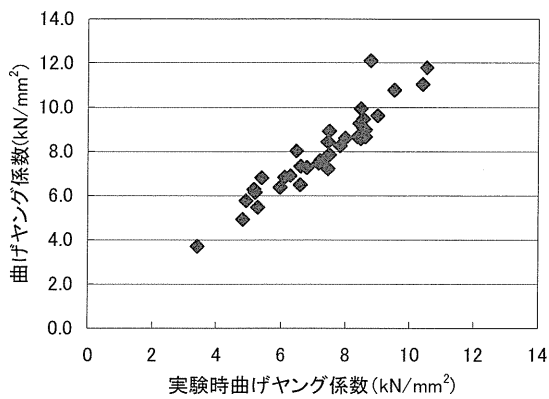


図 4-5 縦振動法と実験による曲げヤング係数の関係

次に、図 4-6、図 4-7 に容積密度と実験時曲げヤング係数および曲げ強度の関係を示す。両者とも正の相関は見られるもののバラツキが大きく、現時点では容積密度のみで強度特性を判断することは難しいと考えられる。これは、筆者らが実施しているイエシロアリによる食害材の試験状況とよく似ている^{*)}が、試料木材の外縁ではなくて内部を食害されているためか、容積密度の低下に対して、曲げ強度の低下が遅く、ある程度食害が進まない限り、強度低下しにくい傾向にあると考えられる。

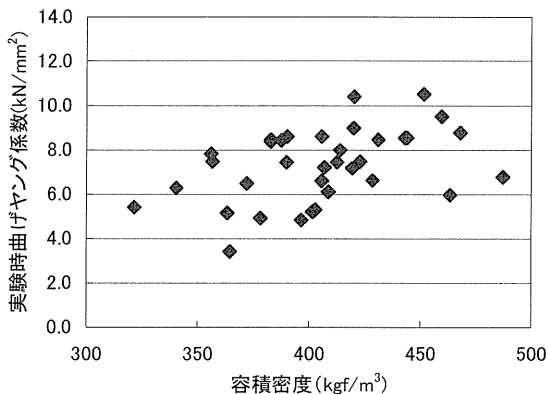


図 4-6 容積密度と実験時曲げヤング係数の関係

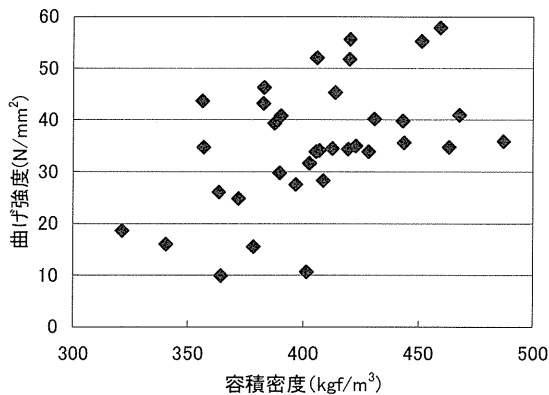


図 4-7 容積密度と曲げ強度の関係

次に、超音波伝搬速度と実験時曲げヤング係数および曲げ強度との関係を図 4-8、図 4-9 に、応力波伝搬速度

と実験時曲げヤング係数および曲げ強度との関係を図 4-10、図 4-11 に示す。二つの測定は良く劣化診断に用いられているが、両診断方法とも実験時曲げヤング係数については正の相関を示している。しかし、容積密度と同様に、曲げ強度については高い正の相関があるとはいえず、かなり大きなバラツキを持っていることがわかる。

木造建築に使用される木材で大きな曲げ応力が発生する木材は少なく（ラーメン構造や大きなスパンを有するものを除く）、実際に危険になるかどうかは建物によって異なる。しかし、大きな空洞を有する被害材も見られ、かなり大きな耐力低下を起こしていたため、これらの被害材を正確に選別する方法を考える必要がある。

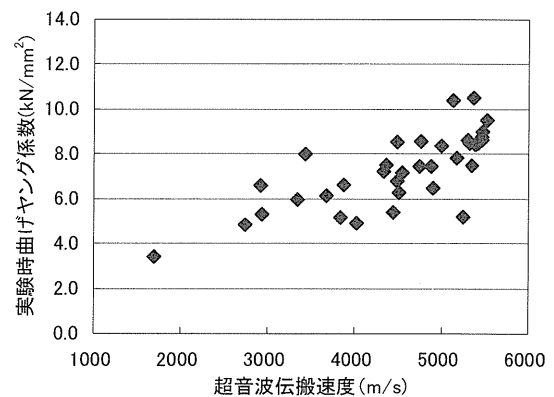


図 4-8 超音波伝搬速度と実験時曲げヤング係数の関係

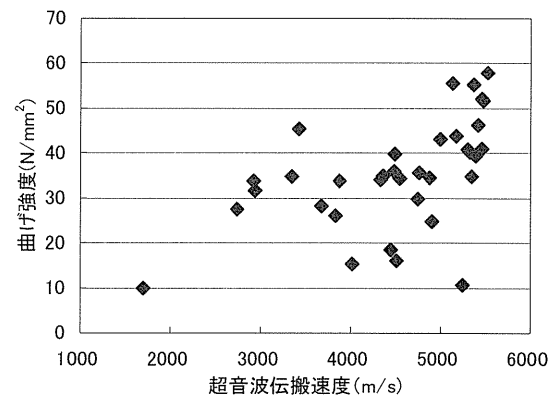


図 4-9 超音波伝搬速度と曲げ強度の関係

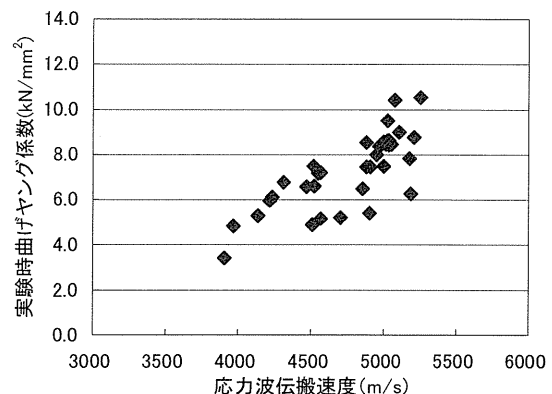


図 4-10 応力波伝搬速度と実験時曲げヤング係数の関係

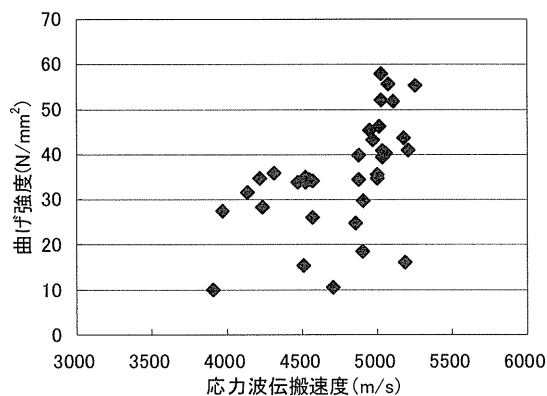


図 4-11 応力波伝搬速度と曲げ強度の関係

5. おわりに

本研究では、日本国内の 4 地域で計 20 軒の木造建築物について、アメリカカンザイシロアリの被害調査を行った。その結果、アメリカカンザイシロアリの被害は、羽蟻の飛来によって、住宅の外構材として使用されている木材から進行することがほとんどであることがわかった。そのため、屋根部材が外に露出している場合は、小屋裏の被害が圧倒的に多いことから、できるだけ露出している木材は、外からシールすることや、薬剤による予防処理することが必要である。

アメリカカンザイシロアリの駆除に関しては、適切なガス燻蒸処理が最も有効な手段であるが、住宅密集地域では建物全体を完全にシートで覆うことが困難であること、処理後の燻蒸薬剤を大気中に放出することも困難であること、処理費用が通常のシロアリ駆除の 10 倍ほどであること、などの理由で実際にはほとんど行われていない。そのため、現状考えられる有効な処理は、シロアリ被害部位を検出し、薬剤による穿孔注入処理（スポット処理）であると考えられる。また、シロアリの被害部位を非破壊的に検出する方法として、アコースティック・エミッション(AE)およびマイクロ波探知機（ターマトラック）を用いて、その検出性能について検討した結果、どちらの手法も約 80%以上の精度で、木材内部のアメリカカンザイシロアリの生息の有無を検出することができた。今後、適切な防除処理（スポット処理）をする上で、これまでの目視調査から非破壊的な手法へと移行する必要性があり、AE とターマトラックは有効な検出方法であると考えられる。

また、アメリカカンザイシロアリ食害材の X 線 CT 撮像によって、食害による空隙の体積測定を試み、食害材残存耐力との関係について検討した結果、バラツキはあるものの、空隙体積の増加とともに、曲げ強度が低下する傾向が見られた。同様に、食害材の動的ヤング係数、超音波および応力波伝搬速度、容積密度と曲げ強度の間にも、バラツキはあるものの正の相関が見られた。本研

究の結果をもとに、今後、より高い精度で被害の程度を評価する技術の確立によって、アメリカカンザイシロアリの被害住宅の残存耐力評価が可能になると考える。

<参考文献>

- 1) 森 拓郎, 香束章博, 築瀬佳之, 小松幸平: シロアリ食害材の強度特性と密度および超音波伝搬速度の関係, 材料, Vol. 59, No. 4, pp. 297~302, (社)日本材料学会, 2010. 4
- 2) 吉村 剛, 野口昌宏, 宮澤健二: シロアリ被害による実大材の強度低下とその補強, 第 57 回日本木材学会大会研究発表要旨集, (社)日本木材学会, 2007. 8
- 3) 山野勝次: アメリカカンザイシロアリの形態・生態と防除, しろあり, No. 132, pp. 7~14, (社)日本しろあり対策協会, 2003. 4
- 4) 森 八郎: アメリカカンザイシロアリ (新和名) の都内定着, しろあり, No. 27, pp. 45~47, (社)日本しろあり対策協会, 1976
- 5) 築瀬佳之, 藤井義久, 奥村正悟, 吉村 剛, 今村裕嗣: AE モニタリングによるアメリカカンザイシロアリの食害検出, 環動昆, Vol. 12, No. 2, pp. 53~67, 日本環境動物昆虫学会, 2001
- 6) B. C. Peters and J. W. Creffield: TermatracTM: microwave technology for non-destructive detection of insect pests in timber, IRG/WP02-20253, 2002
- 7) 星野伊三雄: 和歌山県南部で猛威を振るうアメリカカンザイシロアリ, しろあり, No. 89, pp. 3~9, (社)日本しろあり対策協会, 1991
- 8) Su N.-Y. and R. H. Scheffrahn: Termites as pests of buildings, Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology (Abe T., D. E. Bignell and M. Higashi eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 437-453, 2000

<研究協力者>

田中 聡一 京都大学大学院博士後期課程
兵道 健太 京都大学学部 4 回生