

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006年～2008年
 課題番号：18380106
 研究課題名（和文） ミリ波イメージングによる木質材料および劣化の非破壊検査
 研究課題名（英文） Nondestructive inspection of quality and deterioration of wood using millimeter wave
 研究代表者 藤井 義久 (FUJII YOSIHISA)
 京都大学・農学研究科・准教授
 研究者番号：10173402

研究成果の概要：

ミリ波帯の電磁波に対する木質材料の透過や反射特性を明らかにし、材質、欠点、劣化や含水率の非破壊評価の手法を明らかにした。100GHz のミリ波が厚さ 35mm 程度の気乾木材を透過し、その材質識別の空間分解能は 3mm 程度(波長オーダー)であった。また透過強度（減衰）は電場と繊維走行のなす角度の他、木材の密度や含水率に依存した。ミリ波の反射成分から、表面および表層の材質、表面の凹凸の評価、木材中のシロアリの検出ができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：農学

科研ひの分科・細目：林学・林産科学（木質工学）

キーワード：ミリ波、非破壊検査、木材、含水率、生物劣化

1. 研究開始当初の背景

木材・木質材料の材質、含水率分布、強度や内部欠点などを電磁波の透過や反射特性を用いて非破壊的に検出する方法はこれまでも検討されてきたが、分解能、検出感度などの面から十分実用に耐えるものがなかった。その主因としてこれまでは 30GHz 以下の波長の長いマイクロ波帯の電磁波を用いてきたことがある。

2. 研究の目的

電磁波を用いた非破壊検査においては、周波数を上げ、波長をミリ波やテラヘルツ波ま

で短くすれば分解能は向上することが知られているが、同時に透過性能が著しく低下することも予測される。本研究では、ミリ波帯の電磁波に対する木材および木質材料の透過や反射特性を明らかにした上で、材料や構造体の材質、内部欠点や劣化、水分分布などを非破壊的に評価する手法の可能性を検討し、実用化への道筋を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

試作、検討したミリ波の検出系を用いて以下の内容を検討した。

(1)透過型の発信および検出系における透過ミリ波の強度と材質との関連

厚さと木取の異なるヒノキ、スギ、ブナなどの板材に 100GHz のミリ波を照射し、その透過率から含水率および樹種ごとに木材中のミリ波の減衰係数を求め、密度および含水率が繊維方向および繊維直交方向の減衰係数に及ぼす影響について調べた。

図 1 に実験装置図を示す。100GHz のミリ波は Gunn 発振器によって発振され、PIN スイッチにおいて 100kHz の低周波信号(参照信号)によって変調された後、ホーンアンテナに送られ、そこから空气中に発信された。空气中に放射されたミリ波信号は片凸レンズによって平行にされて柾目板の試料に照射された。試料を透過したミリ波はもう一方の片凸レンズによって集められ、センサで受信された。受信されたミリ波は電圧信号として検出され、Lock-in アンプに送られた。Lock-in アンプにおいて、受信信号のうち低周波発振器からの参照信号と同期した成分をミリ波の強度として測定した。本実験で用いたミリ波は直線偏波であり、ホーンアンテナからは電場の向きが 1 つの方向に定まったミリ波を発信した。またセンサにおいてはホーンアンテナから発振されたミリ波の電場と同じ方向の電場成分を受信した。レンズ間に板材を置いたときのミリ波の強度をレンズ間に何も置かないときのミリ波の強度で除したものをミリ波の透過率と定義した。柾目板の試料の繊維方向とミリ波の電場の向きのなす角度を繊維偏角と定義した。試料は繊維偏角を変化させることができるように回転式のホルダに固定した。

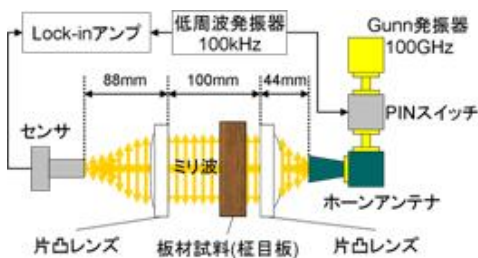


図 1 透過系での実験装置

(2)ミリ波の反射を利用した表面性状の評価

図 1 の実験系において、発信側にサーキュレータおよびセンサをとりつけ、木材からの反射波を計測した。その際、レンズを用いた集光系を用いての計測と、導波管を試料表面に近づけ、表面からの反射波を近接場において計測することも試みた。

(3)シロアリなど木材中に生息する昆虫の非破壊検出

木材に穿孔を設け、その中にシロアリを移入した状態で木材表面にミリ波を照射し、反

射波を計測した。木材の種類や木取のほか、水分状態、穿孔の位置、シロアリの頭数、木材表面の被覆材の状態の反射波への影響を検討した。

4. 研究成果

①透過型の発信および検出系における透過ミリ波の強度と材質との関連

柾目面について、繊維偏角 θ と透過強度の関係を図 2 に示す。グラフで縦軸は透過率 T (検出電圧 ($|E_{\text{detect}}|$) / 試料がないときの電圧 ($|E_{\text{in}}|$)) で示している (E_{in} は試料がないときの電圧 (=10.9V))。試料の厚さが約 2mm の時には、透過率は 0.7 前後で変化し、厚さが増すと共に透過率は低下した。いずれの厚さでも透過率は繊維偏角 θ とともに周期的に変化した。試料の厚さが 3 から 5mm の場合には、繊維偏角 θ の変化に応じて、透過強度は周期的に変化し、繊維方向と偏波の方向が直交するとき ($\theta = 90$ および 270°) に極大値をとり、平行になる時 ($\theta = 0$ および 180°) には極小値をとった。さらに試料の厚さが増すと、 θ が 90 および 270° の時だけでなく 0 および 180° の時にも極大値をとるようになり、 θ が約 $30, 150, 210$ および 330° の時に極小値をとった。また厚さが 15mm や 20mm の試料では θ が 0 および 180° の時の透過率の極大値は 0.2 から 0.3 であったのに対して、 90 および 270° では 0.3 から 0.5 程度であった。試料厚さが 20mm の場合には透過率の極小値はほぼ 0 となり、試料木材はミリ波をほとんど透過しなくなった。これらの傾向は板目面と柾目面での差はなかった。

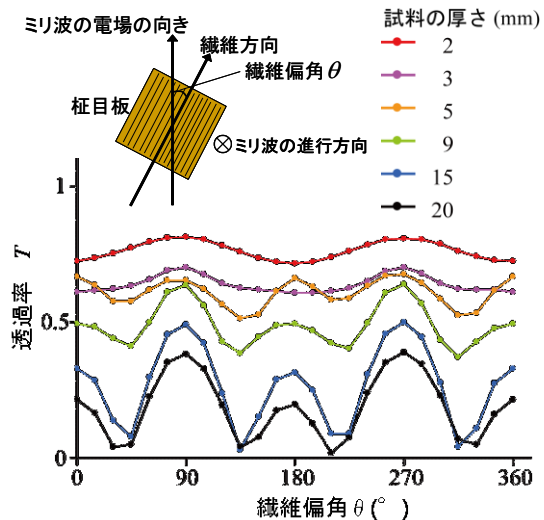


図 2 ミリ波の透過率の繊維偏角依存性

このようにミリ波の木材に対する透過特性のうちとりわけ偏波の透過強度の繊維走行依存性を明らかにし、これが異方性の誘電体における透過特性を表す理論式に合致することを確認した。またその結果をもとに、木材中のミリ波の減衰係数を求め、それが概

ね密度に依存するものの、年輪構造などの組織的特性の影響も受けていることを明らかにした(図3)。さらに減衰特性の異方向性が樹種に依存しないことを明らかにした。一方これらの透過特性が含水率の影響を受けることも明らかにした。繊維飽和点以上の含水率領域では、含水率の上昇とともに透過特性の異方向性は強くなる傾向を示すが、飽水状態に近づくと異方向性は低減する傾向を示すことがわかった。

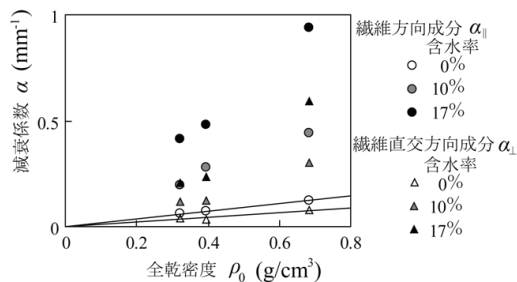


図3 木材の密度・含水率とミリ波(100GHz)の減衰係数との関係

②ミリ波の反射を利用した表面性状の評価

集光レンズ系を用いた反射波の検出では、固定した検出系に対して試料台を2軸テーブルによって移動させ、反射ミリ波の2次元マッピングを試みた。図4にその結果例を示す。反射強度はは表面に現れた密度分布や木理走行のパターンと概ね相関するが、空間分解能は高くなかった。これはレンズなどの精度などが原因と考えられる。またミリ波の透過を考慮すれば、反射波には表面だけでなく表層直下部分での材質(=誘電率分布)の影響が含まれると考えられる。このことは焦点の設定深さを調整することによって表層直下の状態を反射系で検出できることを意味する。

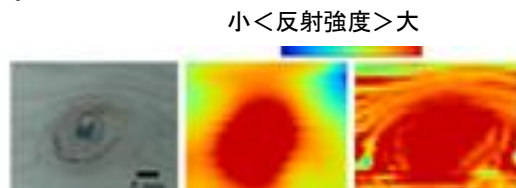


図4 表面反射ミリ波の2次元パターン
左：測定領域の画像、中：ホーンアンテナとレンズを用いた系、右：導波管を用いた近接場計測

続いて表面試料に近接した導波管からのミリ波と試料との相互インターアクションを利用した検出系を用いた材料のサーフェスおよびサブサーフェス情報の取得技術を検討した。図4の右は、集光系で測定した領域と同じ領域について反射波を測定した結果を示す。表面の材質の分布がよりよく識別

できていることがわかる。さらに近接反射並みによって木材表面の凹凸を評価できることがわかった。100GHzのミリ波を材料に導波管から直接照射し、反射成分を表面から数mm程度の距離で検出した場合の、凹凸の検出精度は約0.01mmであった。周波数や検出条件を最適化することで、特定のオーダーの凹凸が評価できることが明らかになったが、その一方で反射波の強度は材料の誘電特性にも依存するため、凹凸と表面・表層での誘電率分布との識別手法の開発が必要になることがわかった。

③木材中のシロアリの検出

シロアリの生息する木材(外見は健全で、内部の穿孔にシロアリを移入したもの)にミリ波を照射し、反射波を検出し、その変動を解析した。フィルタ処理などを行い、突発的な反射ミリ波を検波したところ、その変動はシロアリの頭数、木材中での生息位置、木材表面の化粧材の有無などによって特徴的に変化した。これは乾燥木材中に生息する水分を含んだシロアリが電磁波的な境界面となって反射したものと思われた。木材表面から深さ30mm程度の位置にいるシロア리를1頭単位で検出できる可能性が明らかになった。

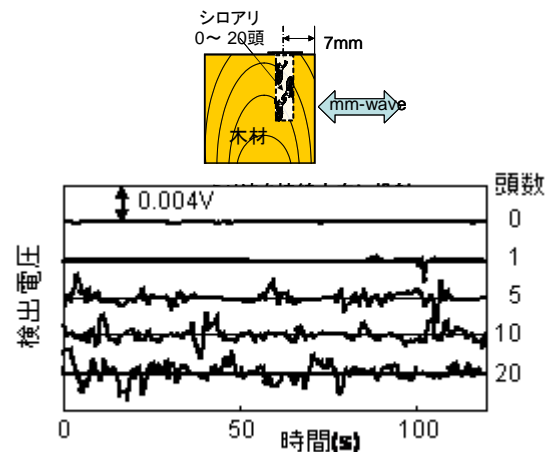


図5 反射ミリ波を利用した木材中のシロアリの検出結果の例

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- ① 藤井義久、社寺建築に見られる生物劣化の診断と維持管理、検査技術、No.5, 55-62, 2008, 査読無
- ② 藤井義久、木材の劣化診断技術の課題と展望、木材保存、34, 256-260, 2008, 査読無
- ③ 藤井義久、長寿命化住宅のための維持管理技術の展望、木材保存、34, 174-178, 2008, 査読無
- ④ Fujii, Y., Y. Fujiwara, Y. Yanase, S. Okumura,

K. Narahara, T. Nagatsuma, T. Yoshimura and Y. Imamura: Nondestructive detection of termites using a millimeter-wave imaging technique. Forst Products J., 57(10) ;75-79, 2007, 査読有

- ⑤ Indrayani, Y., T. Yoshimura, Y. Yanase and Y. Imamura: Feeding responses of the western dry-wood termite *Incisitermes minor* (Hagen) (Isoptera: Kalotermitidae) against ten commercial timbers. J. Wood Sci., 53; 239-248, 2007, 査読有
- ⑥ 藤井義久, 蟻害・腐朽の探知技術の開発動向、しろあり、No. 148、31-36、2007、査読無
- ⑦ 藤井義久, 社寺建築に見られる生物劣化と維持管理、建築研究協会誌、No. 14、8-15、2007、査読無
- ⑧ Fujii, Y., Y. Yanase, S. Okumura, T. Yoshimura and Y. Imamura, Non-destructive evaluation of biodegradation of wood and wooden structures using electromagnetic wave, The Japan-Hungary Joint Seminar of Cooperative Research Programs; pp6, 2006、査読無

〔学会発表〕(計 5件)

- ① 田中聡一、藤原裕子、藤井義久、奥村正悟、他、100GHz のミリ波に対する木材の透過特性 ～含水率の影響～、第 59 回日本木材学会大会、2009. 3. 15-17、松本
- ② 田中聡一、藤原裕子、藤井義久、奥村正悟、他、100GHz のミリ波に対する木材の透過特性 ～含水率および密度の影響～ (社)日本木材加工技術協会、第 26 回年次大会、2008.10.24、東京
- ③ 田中聡一、藤原裕子、藤井義久、他、100GHz のミリ波に対する木材の透過特性、第 58 回日本木材学会大会、2008. 3.17-19、つくば
- ④ 藤原裕子、田中聡一、藤井義久、奥村正悟、100GHz のミリ波に対する木材および木質材料の反射特性、繊維走向、節、割れの検出の試み、-第 58 回日本木材学会大会、2008. 3.17-19、つくば
- ⑤ 藤井義久、歴史的木造建造物の生物劣化の非破壊診断と維持管理技術、2007 東アジア文化遺産保存国際シンポジウム、2007.11.1-2、ソウル

〔その他〕アウトリーチ活動

以下の活動において本研究成果を公表した。

- ① 藤井義久: (財) 建築研究協会講演会「文化財建造物の耐震診断と維持管理技術の最前線」、2007 年 6 月 12 日、10 月 1 日
- ② 藤井義久: 東京文化財研究所平成 19 年度研究会「文化財の生物劣化対策の研究」、

2007 年 11 月 19 日

- ③ 藤井義久: 日本地震工学会「実例で示す木造建物の耐震補強と維持管理」、2007 年 11 月 20 日
- ④ 藤井義久: 兵庫県産木造住宅研修、2008 年 3 月 7 日
- ⑤ 藤井義久、(社) 日本木材保存協会、木材劣化診断士講習会、2007 年 9 月 16 日
- ⑥ 藤井義久、(社) 日本木材保存協会、木材劣化診断士研修会、2008 年 9 月 5 日
- ⑦ 藤井義久、(社) 日本木材保存協会、木材劣化診断士講習会、2008 年 9 月 17 日
- ⑧ 藤井義久: 東京文化財研究所平成 19 年度研究会平成 20 年度研究会「文化財の生物劣化対策の研究、屋外等の木質文化財の維持管理、問題点と今後」、2008 年 10 月 6 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 義久 (FUJII YOSIHIISA)
京都大学・農学研究科・准教授
研究者番号: 10173402

(2) 研究分担者

奥村 正悟 (SHOGO OKUMURA)
京都大学・農学研究科・教授
研究者番号: 40109046
澤田 豊 (SAWADA YUTAKA)
京都大学・農学研究科・助教
研究者番号: 80226076
築瀬佳之 (YANASE YOSIYUKI)
京都大学・農学研究科・助教
研究者番号: 00303868
今村祐嗣 (YUJI IMAMURA)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号: 70151686
吉村 剛 (TUYOSHI YOSIMURA)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号: 40230809