

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300329

研究課題名（和文）

ミリ波イメージング技術による木質文化財の生物劣化の非破壊診断装置の開発

研究課題名（英文）Development of non-destructive diagnosing device to detect biodegradation in wooden historical properties using millimeter wave imaging

研究代表者

藤井 義久 (FUJII YOSHIHISA)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：10173402

研究成果の概要（和文）：100GHz のミリ波の発信および検出装置を試作し、様々な木材および木質の文化財に対するミリ波の透過および反射特性を評価し、材質や内部劣化のイメージングの可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：An non-destructive testing apparatus to evaluate inner quality and deterioration of wood and wooden historical properties, using millimeter wave imaging technology, was developed. Dielectric properties of wood at 100GHz was also clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

研究分野：文化財科学

科研費の分科・細目：保存科学

キーワード：ミリ波、文化財、生物劣化、非破壊診断

## 1. 研究開始当初の背景

木質の文化財（社寺建築などの文化財建造物や仏像などの美術工芸品）の保存修復にさいしては、木材に発生する生物劣化（虫害や腐朽）を非接触、非破壊かつ高精度で検出する装置や手法が長年望まれている。特に建造物では、材料や構造の内部が可視化できるもののうち、現場で使用できる小型で反射型の装置が望まれてきた。

## 2. 研究の目的

木質の文化財に発生する生物劣化を非接触、非破壊かつ高精度で検出する装置と、それを用いた診断手法を開発すること。

## 3. 研究の方法

この目的を達成するために、本研究ではマイクロ波より短波長で、テラヘルツ波より長波長のミリ波（30GHz から 300GHz の周波

数帯の電磁波）を用いた反射型で非接触・非破壊の診断装置を開発する。

研究では 2, 3 の簡単な検出系を試作し、木材中でのミリ波の伝搬特性や反射特性に関する基礎的項目を検討した上で、反射ミリ波による木材の内部構造や劣化の可視化を試みた。またこれらの実験の知見を基に実用的な検出系の設計要件を検討した。

## 4. 研究成果

100GHz のミリ波の発信および検出装置を試作し、様々な木材に対するミリ波の透過および反射特性を評価し、材質や内部欠点のイメージングの可能性を明らかにした。

平成 21 年度は、診断装置の基本部分を構築し、木質に対するミリ波の透過および反射特性を把握した（図 1）。木材の材質や生物劣化の検出性能の評価の際には、検出波の強度だけでなく、位相情報も合わせて評価するこ

とでよりレベルの高いイメージングが可能になることが明らかになった。これを受けて既存のミリ波伝搬の光学系の分解能を高めながら強度・位相情報の検出装置を付加し、さらに測定データの解析手法を改良した。

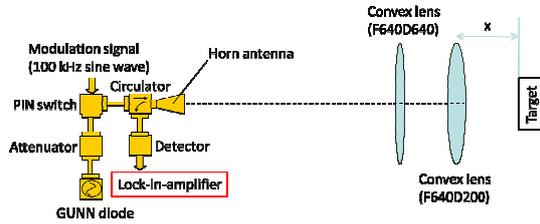


図 1 試作したミリ波検出装置の模式図

ガン発振装置から発生した 100GHz のミリ波は、減衰器を経て、低周波発振装置から発生した PIN スイッチによって制御されたゲート信号と同期してアンテナから対象に向けて発信される。対象からの反射波は、検出装置を経てロックインアンプで増幅される。

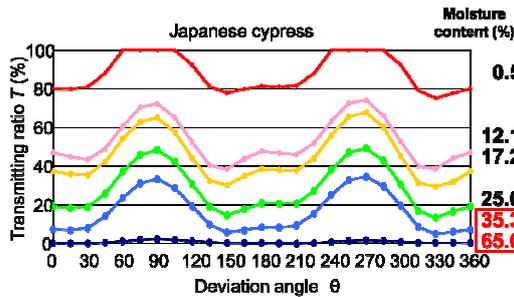


図 2 透過系のミリ波検出装置で評価した、透過強度の木材繊維依存性の結果

電場方向と繊維のなす角度に依存して透過強度は周期的に変化すると同時に、木材の含水率によって透過強度は低下する。

平成 22 年度には引き続き改良した装置の性能を明らかにしながら、透過強度と位相と木材の繊維走行などの材質との関係を明らかにした (図 2)。実験の結果、ヒノキ材に対するミリ波の透過系における検出波から求めた位相係数はおよそ  $2.5 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$  であり、この値は年輪構造の影響はほとんど受けず、木材の接線方向の透過係数と放射方向のそれとは殆ど同じ値であった。また繊維走行方向の位相係数は繊維直交方向 (放射・接線方向) より大きかった。その他透過系における木材中のミリ波の遅れを明らかにした。

より高分解能で鮮明な反射画像を得るために、アンテナ部分を切り離し導管としたり、その先端に細長いテフロン棒を挿入したりするなどの工夫を行った。

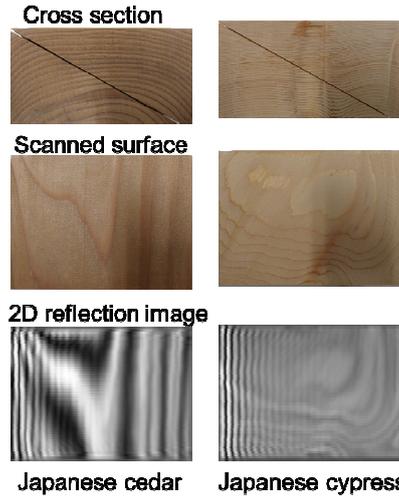


図 3 ミリ波の浸透深さの検証実験結果

直方体の試料をその対角面で切断し、切断面にアルミ箔を挿入したり、空隙を設けたものに対して、ミリ波を照射し、切断面での反射強度を評価した。

平成 23 年度は、実際の劣化材について反射型の診断装置で走査 (スキャニング) 装置との併用による 2 次元イメージングの可能性を明らかにした。さらに実用化に向けて、装置の小型化、分解能や測定速度の向上の可能性やレンズ系を最適化と遠隔対象物の診断の可能性も検討した。また木材中のミリ波の伝搬特性のうち、減衰係数や位相係数の密度依存性、繊維走行 (誘電特性の異方性) や年輪構造依存性、含水率依存性をより詳しく明らかにした (図 3)。また熱処理した木材の物性とミリ波伝搬特性も明らかにした。100GHz のミリ波を用いて乾燥した木材の場合や表層から 20 mm 程度まで可視化できること、漆や塗装した面の表層直下の木目、欠点や補修の痕跡などをイメージングできることなどを明らかにし (図 4、5)。

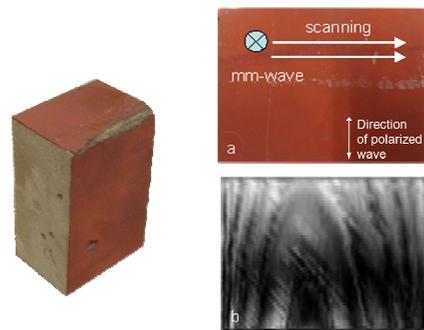


図 4 漆塗りの寺院部材のミリ波画像 (右下)。漆下地の木部の木目や欠点が可視化されている。

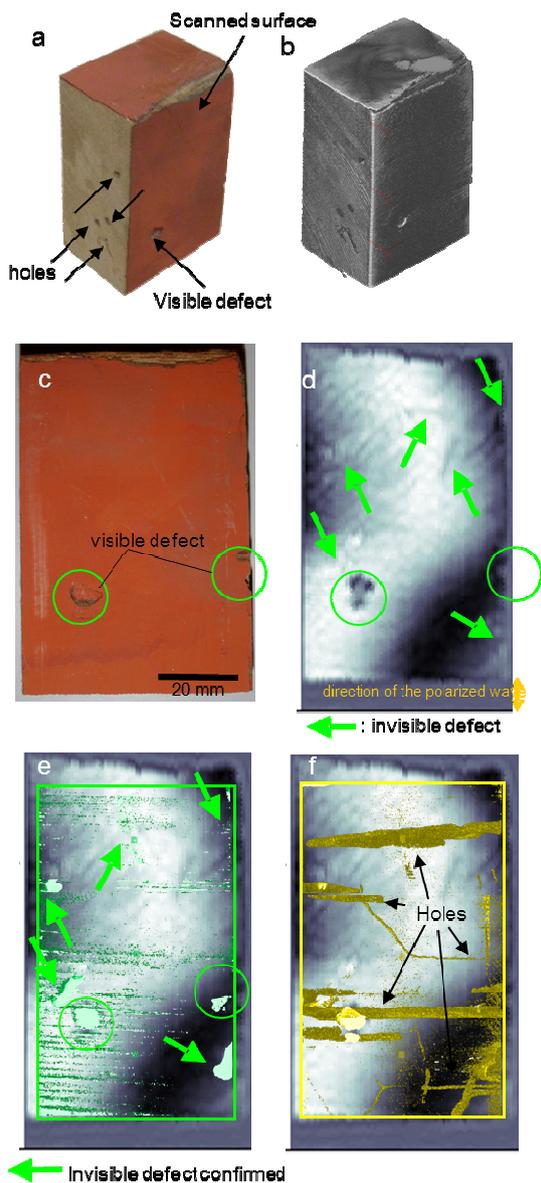


図5 内部欠点のある試料のミリ波反射画像とX線CTによる断層画像との比較

上図左は試料画像、上図右はCTによる断層画像による再構成画像。中段左は走査した試料表面画像、中段右はミリ波反射画像。下段左はミリ波画像に試料表面近くの断層画像を重ね合わせたもので、右は試料奥部の断層が層を重ねたもの

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

①藤原裕子・藤井義久、木川りか、こけら屋根に用いた銅板の防腐効果について、保存科学、査読有、51、2012、313-319

②藤井義久、藤原裕子、木川りか、川野邊渉、

永石憲道、中嶋啓二、ガンマ線を用いた木製円柱の内部劣化の検出、保存科学、査読有、48、2011、185-190

③永妻忠夫、都甲浩芳、望月章志、久々津直哉、藤井義久、ミリ波の構造物診断技術への応用計測技術、査読無、38、2011、8-13

④S. Tanaka, Y. Fujiwara, Y. Fujii, S. Okumura, H. Togo, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, Effect of grain direction on transmittance of 100 GHz millimeter-wave for hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) Journal of Wood Science, 査読有, 57, 2011, 189-194, DOI 10.1007/s10086-010-1160-z

⑤小峰幸夫、原田正彦、野村牧人、木川りか、山野勝次、藤井義久、藤原裕子、川野邊渉、日光山輪王寺本堂におけるオオナガシバンムシ発生状況に関する調査について、保存科学、査読有、49、2010、173-182

⑥原田正彦、木川りか、小峰幸夫、藤井義久、藤原裕子、川野邊渉、輪王寺本堂の虫害破壊について、保存科学、査読有、49、2010、165-172

⑦藤井義久、藤原裕子、原田正彦、木川りか、小峰幸夫、川野邊渉、穿孔抵抗測定法を用いた文化財建造物の構造部材の虫害評価に関する一考察(第2報) - 日光輪王寺における虫害を事例として -、保存科学、査読有、48、2010、183-190

⑧藤井義久、ミリ波を用いた木材および木造建築の非破壊診断技術、検査技術、査読無、14(12)、2009、37-43

⑨藤井義久、歴史的建造物における生物劣化の診断技術の課題と展望、文化財の虫害害、査読無、57、2009、3-8

[学会発表] (計13件)

①Y. Fujiwara, Y. Fujii, S. Tanaka, S. Okumura et al. Feasibility of imaging technology using micro- and millimeter wave for nondestructive inspection of wooden buildings, Advanced Electro magnetics 2012 (AES2012), 2012.4.16-19, フランステレコム (パリ市)

②島川孝敏、田中聡一、藤原裕子、藤井義久、奥村正悟、他、100GHzにおけるヒノキの誘電特性の熱処理温度依存性、日本木材学会、2012.03.14-17、北海道大学 (札幌市)

③金 旻貞、高妻洋成、福永 香、藤原裕子、藤井義久、木造文化財における彩色の劣化機構に対する電磁波の応用(2)、日本文化財科学会第 28 回つくば大会、2011.6.11-12、筑波大学 (つくば市)

④藤井義久、藤原裕子、原田正彦、木川りか、小峰幸夫、川野邊渉、穿孔抵抗測定法を用いた文化財建造物の構造部材の虫害評価に関する一考察/日光輪王寺における虫害を事例として、文化財保存修復学会第 33 回大会、2011.06.04-05、奈良県新公会堂 (奈良市)

⑤福永 香、高妻洋成、金 旻貞、藤井義久、藤原裕子、建造物彩色部のミリ波・テラヘルツ波・近赤外イメージング、文化財保存修復学会第 33 回大会、2011.06.04-05、奈良県新公会堂 (奈良市)

⑥田中聡一、藤原裕子、藤井義久、奥村正悟、都甲浩芳、望月章志、久々津直哉、100 GHz のミリ波のビーム特性に及ぼす木材の年輪構造の影響、第 61 回日本木材学会大会、2011 年 3 月 18-20 日、京都大学 (京都市)

⑦ Y. Fujii, Y. Fujiwara, S. Tanaka, S. Okumura, H. Togo, A. Mochizuki, N. Kukutsu, Feasibility of millimeter wave imaging as tool for nondestructive inspection of wood and wooden structures, 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 6-10 Sep. 2010, Roma

⑧金 旻貞、藤原裕子、藤井義久、福永 香、高妻洋成、木造文化財における彩色の劣化機構に対する電磁波の応用、日本文化財科学第 27 回大会、2010 年 6 月 26-27 日、関西大学 (吹田市)

⑨高妻洋成、金 旻貞、福永 香、碓 智文、脇谷草一郎、降旗順子、藤原裕子、藤井義久、ミリ波およびテラヘルツ波の文化財への応用 I - 層構造調査へのテラヘルツ波イメージング技法の基礎研究 -、日本文化財科学第 27 回大会、2010 年 6 月 26-27 日、関西大学 (吹田市)

⑩藤原裕子、田中聡一、藤井義久、奥村正悟、都甲浩芳、望月章志、久々津直哉、ミリ波を用いた木材加害昆虫による食害部位の非破壊検出の試み、第 26 回日本木材保存協会年次大会、2010 年 6 月 26 日、メルパルク等京 (東京)

⑪福永 香、高妻洋成、金 旻貞、藤井義久、藤原裕子、テラヘルツ波イメージングの文化

財建造物調査への応用、文化財保存修復学会第 32 回大会、2010 年 6 月 12-13 日、長良川国際会議場 (岐阜市)

⑫藤原裕子、田中聡一、藤井義久、奥村正悟、都甲浩芳、久々津直哉、永妻忠夫、94GHz のミリ波に対する木材の反射特性 反射波強度分布で検出できる木材内部欠点の表面からの深さ、第 60 回日本木材学会大会、2010 年 3 月 17 - 19 日、宮崎

⑬田中聡一、藤原裕子、藤井義久、奥村正悟、都甲浩芳、久々津直哉、永妻忠夫、100 GHz のミリ波を用いた木材の誘電特性の測定～位相係数の決定方法～、第 60 回日本木材学会大会、2010 年 3 月 17 - 19 日、宮崎

[その他]

代表研究者の URL

<http://h3news1.kais.kyoto-u.ac.jp/index-j.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 義久 (FUJII YOSHIHISA)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：10173402

### (2) 研究分担者

永妻 忠夫 (NAGATUMA TADAO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：00452417

木川 りか (KIGAWA RIKI)

東京文化財研究所・保存修復科学センター・室長

研究者番号：40261119

奥村 正悟 (OKUMURA SHOGO)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：40109046

吉村 剛 (YOSHIMURA TSHUYOSHI)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：40230809

築瀬 佳之 (YANASE YOSHIYUKI)

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：00303868

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：