

(続紙 1)

京都大学	博士（農学）	氏名	田中聡一
論文題目	A Fundamental Study on Transmission of 100 GHz Millimeter Waves through Wood (木材における 100 GHz ミリ波の透過に関する基礎研究)		
(論文内容の要旨) 木材・木質材料の欠点検出や材質評価のために様々な非破壊試験法が開発されてきている。その中で、周波数 3～30GHz のマイクロ波は比較的古くから非破壊試験に導入されているが、最近になって周波数 30～300GHz の電磁波を扱うミリ波技術が目覚ましい発展を遂げ、木材へも応用できる段階に進みつつある。ミリ波は、マイクロ波よりも高分解能の透過像を与えるが、その透過像から木材の物理特性を定量的に評価するまでには至っていない。これは、ミリ波の透過に及ぼす木材の組織構造などの影響が明らかになっていないためである。このような背景から、本論文は木材を透過した 100GHz ミリ波の挙動に及ぼす木材の微視的および巨視的構造の影響について検討した一連の研究の成果を取りまとめたものであり、4 章から成る。 第 1 章では、木材の微視的構造と誘電異方性の関係、木材の異方性が透過電磁波の挙動に及ぼす影響について既往の研究を総括するとともに、木材の誘電異方性は木材を構成する細胞の内腔に相当する孔隙の配列に起因するとの認識に基づき、木材における電磁波の透過率と木理走行の関係を定式化した。さらに、透過波の挙動に及ぼす年輪などの巨視的構造の影響を理論的に考察するため、木材におけるミリ波の直線伝搬と回折理論を組み合わせた回折モデルを構築した。 第 2 章では、ミリ波の透過率と木理走行の関係を明らかにするため、ヒノキの木口、柾目、および板目試料（厚さ 2～20mm、含水率 8%）について、自由空間法に基づくミリ波測定システムを用い、ミリ波の偏波平面が試料の繊維方向となす角度（繊維偏角）および接線方向となす角度（年輪偏角）を変えて透過率を測定した。その結果、試料の厚さと透過率の比例関係から求めた減衰係数は、繊維直交方向と比べて繊維方向の方が大きく、木材はミリ波についても繊維方向と繊維直交方向の間で誘電異方性を有することが明らかになった。透過率は、木口試料については年輪偏角が変化しても一定であったが、柾目および板目試料については繊維偏角の変化に伴い周期的に変動した。これらの関係は、第 1 章で定式化した理論的關係で良好に説明できた。これは、ヒノキにおけるミリ波の透過率が繊維方向に依存し、その依存性はヒノキの誘電異方性に起因することを示唆していると結論した。 第 3 章では、ミリ波領域における木材の誘電異方性と木材構造の関係を明らかにするため、針葉樹材（ヒノキ、スギ、アカマツ）、広葉樹環孔材（キリ、クリ、ケヤキ）、広葉樹散孔材（トチノキ、ブナ、イスノキ）から作製した含水率 0 および 11% の板目試料（厚さ 2～8mm）の誘電パラメータを、偏波平面が木材の繊維方向および接線方向に平行な場合について自由空間法を用いて測定するとともに、半径方向に平行な場合の誘電パラメータを、既往の近似理論を用いて算出した。その結果、誘電パラメータは接線方向と半径方向についてはほぼ等しく、繊維方向で最も大きいこと、すべての誘電パラメータは密度に伴って増加し、含水率 11%の方が 0%よりも大きいこと、繊維方向と繊維直交方向の誘電パラメータは繊維方向に伸びる孔隙と木材実質から成る誘電混合体モデルに基づく回帰曲線によって良好に説明できることなどが明			

らかになった。このような知見から、100GHz ミリ波における木材の誘電異方性は孔隙の配列に起因するが、木材の解剖学的構造にほとんど影響を受けないとの結論を得るとともに、板目試料を用いた誘電パラメータの測定について、自由空間法が有効であることを確認した。

第4章では、木材を透過したミリ波の挙動に及ぼす年輪の影響を明らかにするため、種々の年輪構造を有する針葉樹材（ヒノキ、スギ、アカマツ）と広葉樹材（キリ、ケヤキ、トチノキ）から厚さ 2mm、含水率 11%の板目および柾目試料を作製し、それらの密度分布を X 線透視法により測定するとともに、試料を透過したミリ波の複素振幅を測定した。ここで、複素振幅は試料中央部の繊維直交方向の直線上で測定し、振幅と位相の一次元分布として評価した。その結果、透過波の振幅および位相の分布の形は、すべての板目試料と密度変動が小さいか早材幅がミリ波の波長（3mm）より狭い柾目試料では試料がない場合とほぼ同じであるが、密度変動が大きくかつ早材幅が約 3mm 以上の柾目試料では試料がない場合に比べて大きく乱れること、このような結果は第1章で構築した回折モデルによって良好に説明できることなどが明らかになった。このような知見から、ミリ波は試料の密度分布の影響を受けて変形された後、回折によって波長より短い周期の変形成分を失うと結論した。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

木材・木質材料の欠点や材質を非破壊で検出・評価するため、弾性波や電磁波を用いた種々の試験法が開発されてきている。しかし、検出精度、空間分解能、放射線防護、コストなどの点で一長一短があり、実用化されている試験法はそう多くない。周波数 3～30GHz のマイクロ波は比較的古くから非破壊試験に導入されているが、透過像の空間分解能にやや劣る。最近になって、周波数 30～300GHz の電磁波を扱うミリ波技術が目覚ましい発展を遂げ、マイクロ波より高い分解能をもった非破壊試験法として木材に応用できる段階に進みつつあるが、木材の物理特性を定量的に評価するまでには至っていない。本論文は、木材を透過した周波数 100GHz のミリ波の挙動に及ぼす木材の微視的および巨視的構造の影響について検討したものであり、評価すべき点は以下の通りである。

1. これまで知見が少なかった木材におけるミリ波の透過挙動について、ミリ波の減衰は繊維直交方向と比べて繊維方向の方が大きく、木材はミリ波についても繊維方向と繊維直交方向の間で誘電異方性を有すること、透過率は木口試料については常に一定であるが、柾目および板目試料についてはミリ波の偏波平面と繊維方向のなす角度に応じて周期的に変動することなどを明らかにした。
2. ミリ波領域における木材の誘電パラメータは接線方向と半径方向についてはほぼ等しく、繊維方向で最も大きいこと、すべての誘電パラメータは密度に伴って増加し、含水率 11%の方が 0%よりも大きいこと、繊維方向と繊維直交方向の誘電パラメータは繊維方向に伸びる孔隙と木材実質から成る誘電混合体モデルに基づく回帰曲線によって良好に説明できることを明らかにした。
3. ミリ波の波長は年輪幅と同等であるため、木材を透過したミリ波は年輪の影響を受けることが予想される。このことを、種々の年輪構造を有する試料を用い、試料に照射するミリ波の特性を明らかにした上で、透過したミリ波の振幅・位相について実証するとともに、この結果がミリ波の試料による減衰・位相遅れと回折を考慮したモデルによって説明できることを明らかにした。
4. 一連の研究で採用した自由空間法によるミリ波周波数帯の誘電パラメータ測定について、年輪の影響を受けない板目試料では有効であることを、理論値と実験値の比較によって明らかにした。

以上のように、本論文は木材を透過したミリ波に及ぼす木材の誘電異方性および年輪の影響を、理論モデルによる考察も含めて明らかにしたものであり、林産加工学、木材工学の発展のみならず、木材・木質材料や農産物の新しい非破壊試験法の開発にも寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成 25 年 2 月 8 日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。
要旨公開可能日： 年 月 日以降