

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26292079

研究課題名(和文)音響トモグラフィによる樹木の非破壊腐朽診断法の高精度化

研究課題名(英文)Improvement of nondestructive decay testing by sonic tomography

研究代表者

山田 利博(YAMADA, Toshihiro)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授

研究者番号：30332571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：樹木円板に人工的な空洞を作成し音の伝播速度を用いた音響トモグラフィで診断したところ、不整形の空洞では空洞面積は過大評価された。しかし、個々の測定値を精査することで空洞面積や形状の補正は多少は可能であると判断された。

樹木心材の試験材に腐朽菌を接種し、重量減少、超音波伝播速度低下、強度低下の関係を調べた。腐朽の進行により重量と超音波伝播速度の低下は直線的な関係を示したが、重量や超音波伝播速度がわずかに低下した段階で強度は急激に低下した。

これらの結果を考慮することで非破壊腐朽診断の正確性を高めることが可能である。

研究成果の概要(英文)：The sonic tomography, two dimensional images of velocity distribution, was applied on wood disks with artificially chiseled cavities. As cavity area increased, the sound velocity shifted to a lower side and the estimated decay-area increased. Irregular shapes of cavities caused overestimation of cavity area.

Reduction of wood weight, sound velocity and wood strength was measured after inoculating wood decay fungi on test pieces of heartwood. During the progress of wood decay, reduction of sound velocity correlated linearly with weight loss. However, especially in early stage, wood strength was greatly reduced than weight and sound velocity.

Consideration of these results improve the accuracy of nondestructive decay testing using sonic tomography.

研究分野：樹木医学

キーワード：樹木 材腐朽 腐朽危険度診断 非破壊検査 音響波 共振周波数 材強度 人工腐朽

## 1. 研究開始当初の背景

樹木材内に腐朽等の欠陥があると、樹木の倒壊や枝の落下が起きる危険性が高まる。実際に人身事故や天然記念物を含む貴重な樹木の喪失も生じている。森林や公園、街路樹等の樹木の高齢化と管理や植栽環境の劣化、気候変動、林業における長伐期化による腐朽の増加から、今後こうした倒木被害が増加することが予想され、管理の指針を得るために精度の高い腐朽診断手法が求められている。倒木等の危険度の診断(多くは腐朽診断)は、外観診断に加え機器診断を組み合わせ実施されており、自治体によっては数十万本の樹木が診断対象になっている。診断機器として、放射線・レーダーを始めとする電磁波や音波を利用した非破壊機器、また電気抵抗や機械的な特性を利用した穿孔を伴う半非破壊機器の開発が進められてきた。

現在多用されている貫入抵抗を測る半非破壊機器は直接的な診断が可能であるが、小さいながら深い傷害を伴い、腐朽菌が侵入し材腐朽を招く危険性や、精度を上げるには多点の測定 = 傷が避けられないことから、まったく傷をつけずに行うことのできる非破壊手法の確立が求められる。

しかし、非破壊手法は間接的な方法であり、樹木自身だけでなく内部の腐朽の形状、構造が不均一なことから診断に誤差を生じやすい。これまで非破壊手法として、打撃による共振周波数や、線の透過率や打音の伝播速度を用いた簡易 CT (トモグラフィ) が開発された。われわれは線腐朽診断について樹種等による適用上の問題を検討するとともに、これらの手法の比較を行ってきた。こうした成果の蓄積からおおまかな腐朽・空洞の推定が可能になってきているが、複雑な形状の樹木や腐朽ではまだ不十分である。

## 2. 研究の目的

打音に代わり音響波の伝播速度を指標にして非破壊的に樹木内部の腐朽・空洞を診断する手法の精度を高めることを目的とする。同時に、樹木倒壊等の危険度診断に役立てるため材強度などの物性値との関連を明確にする。

そこで、腐朽被害木、人工空洞円板、腐朽菌を接種した人工腐朽材片を組み合わせ用い、

(1) 音響波伝播速度を指標とした診断条件を確立するために樹木診断に適切な発振周波数などのパラメータを明らかにする。腐朽被害木と人工空洞円板を用いる。

(2) 音波は腐朽・空洞部があるとそこを迂回し、見かけの伝播速度が低下するとされる。伝播速度が音の周波数や、腐朽・空洞の形状・大きさなどによりどう変化するかを明らかにする。主に人工空洞円板を用いる。

(3) 実際の危険度判定に必要な腐朽部の密度低下や特に強度低下と伝播速度との関連を明らかにする。主に人工腐朽材を用いる。

## 3. 研究の方法

### (1) 人工空洞円板の測定

#### 音響トモグラフィ

ケヤキ、オオシマザクラ、スギを用い、形状(4種類:真円、三日月形、中心スリット、辺縁スリット)や大きさ(3~4段階)を変えた人工空洞円板を用い、音響波(疑似ランダム波という伝達性に優れた特殊な波形を使用)の伝播速度を指標としたトモグラフィによる非破壊腐朽診断の結果を解析した。空洞の形状や大きさによる診断結果の違いを明らかにするとともに、発振周波数(10~40 kHz)などの測定パラメータを変えてその影響を調べた。

#### 横打撃共振法

音響トモグラフィと同じ材料を用い、簡便な非破壊検査法である横打撃共振法という打撃による共振振動の周波数を指標とした腐朽診断の特性を明らかにするため、樹種、空洞の形状、大きさを変えて測定を行った。

本法では、樹種(材質)が同じなら、直径(D)と横打撃による共振周波数(Fr)の積(D・Fr)は一定であり、腐朽・空洞があるとD・Frは低下する。

### (2) 自然腐朽被害木の測定

自然の腐朽被害木で音響トモグラフィの適切な測定周波数およびパラメータを明らかにするため、樹種や直径の異なる腐朽被害木を音響波腐朽診断器で発振周波数を変えて測定し、適切な測定条件を調べた。

### (3) 人工腐朽試験

スギ、ケヤキ心材を用いた人工腐朽試験によって、腐朽程度(密度)、強度(曲げ、圧縮)と超音波伝播速度との関係を求めた。心材の軸方向曲げ試験体、軸方向・接線方向・放射方向の3種類の圧縮試験体にJIS規格で決められた2種の腐朽菌(褐色腐朽菌 オオウズラタケ FFPR1 0507、白色腐朽菌 カワラタケ FFPR1 1030)を接種し、経時的に採取、材重量、強度(曲げ、圧縮)、超音波伝播速度(超音波音速測定器 Pundi t7 を使用)を測定し、相互の関係を比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 人工空洞円板

#### 音響トモグラフィ

発振周波数(10~40 kHz)や信号を捉える閾値であるノイズ偏差を変えてその影響を調べ、両者の適切な値を明らかにした。

また、空洞の形状や大きさが診断結果に及ぼす影響については、ある程度大きさの円形の空洞が中央にある場合にはかなり高い精度で空洞の形状や空洞率を推定することができるが、スリット形や三日月形など不整形の形状の場合には大幅に過大評価された(図1)。

また、材の乾燥に伴う音響波伝播速度の分

布の変化や診断結果に及ぼす影響についても検証を行った。乾燥に伴って、健全木の円板では伝播速度がやや低下し、人工空洞円板では診断結果がぼやける傾向が認められた。

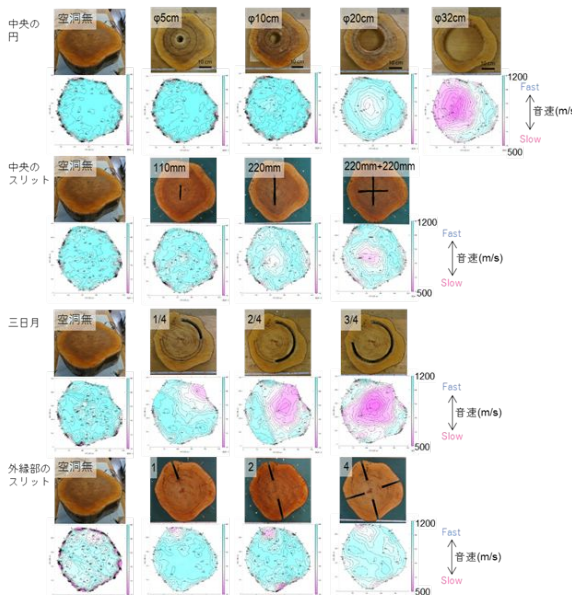


図1 ケヤキ人工空洞円板において音響トモグラフィで測定した音速のコンター図

#### 横打撃共振法

円形空洞では、樹種によって  $D \cdot Fr$  の低下と空洞面積率との関係曲線はやや異なったが、いずれの樹種も滑らかな曲線関係が得られた(図2)。

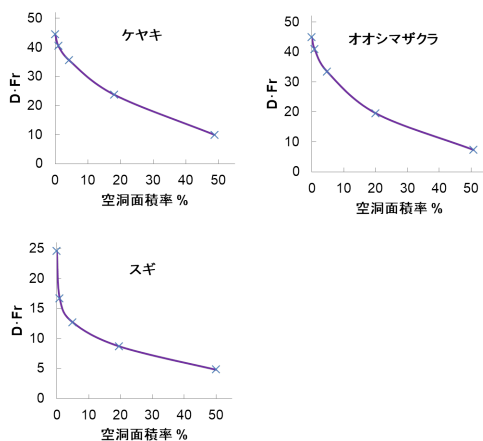


図2 中央円形空洞の空洞面積率と  $D \cdot Fr$  との関係

円形以外の空洞については、実際の空洞面積の増加に対し  $D \cdot Fr$  の低下が著しく、円形空洞に比べ空洞面積率が大幅に過大評価され、音響トモグラフィと似た特性を示した。過大評価の程度は特に三日月形空洞で顕著であった。また、円形以外の空洞では打撃位置によって測定周波数や各ピークの大きさのばらつきが大きく正確な  $D \cdot Fr$  の取得が困難な場合が多かった。

#### (2) 自然腐朽被害木

針葉樹(サワラ) 広葉樹(クヌギ)で発

振周波数を変えて腐朽被害木の診断および伐採による結果の検証を行い、容積密度を腐朽程度の指標として、密度の低下と音響波伝播速度、診断結果との関係を明らかにした。

(1)人工空洞円板および(2)自然の腐朽被害木の測定結果を総合して、発振周波数については、直径30~60cm程度の材で20~30kHzが適切で、高周波では特に健全木で材の中心部を通して伝達しにくくなるとともにノイズが大きくなり、低周波では実際より空洞腐朽が大きく推定される傾向があることが明らかになった。

また、音響波の周波数が高くなるほど信号の伝播距離が低下したが、小さな空洞は低周波では検知が困難だが高周波では容易であること、高周波では推定される空洞部の位置や大きさが低周波より正確になる傾向も確認された。

スリット状の空洞に対しては高周波の方が推定空洞面積は大きくなる傾向があった。また、各センサー間の伝播速度を精査することで円形の空洞とスリット状の空洞とを区別できる場合があることが示された。このように、異なる周波数を組み合わせることや診断画面に表示されない波形、伝播速度のデータを活用することで、通常の診断手順では検出できない情報を得ることができることが示された。

#### (3) 人工腐朽試験

##### スギ心材

カワラタケによる腐朽はほとんど進行せず、オオウズラタケ接種の結果のみを解析した(図3)。重量が減少すると超音波伝播速度も減少し、超音波伝播速度の低下は半径および接線方向、特に半径方向で顕著であったが、軸方向では腐朽の不均一性のため重量減少率に比べて小さかった。圧縮試験体では重量減少に伴って圧縮強度が低下したが、わずかな重量減少により強度は大きく低下した。超音波伝播速度がわずかに低下した試験体で圧縮強度は大きく低下した。

##### ケヤキ心材

接線方向と半径方向の試験体ではカワラタケを接種した試験体で、軸方向の試験体ではオオウズラタケを接種した試験体でより劣化し、重量が大きく減少したが、それ以外の試験体では重量減少は大きくなく、腐朽の進行は限られていた。超音波伝播速度についても重量減少と同様の傾向が得られた。

腐朽が進行したカワラタケ接種試験材の接線方向と半径方向では、重量減少に伴って超音波伝播速度は減少し、横圧縮強度は低下した。また、超音波伝播速度の減少に伴って横圧縮強度は低下した。重量や超音波伝播速度の減少に伴う横圧縮強度の急激な低下はみられなかった。

オオウズラタケ接種試験材の軸方向では、腐朽初期では重量減少の割に超音波伝播速

度はあまり変化しなかったが、後半では超音波伝播速度は急激に低下した。縦圧縮強度は腐朽初期において重量減少や超音波伝播速度減少の割に急激に低下した

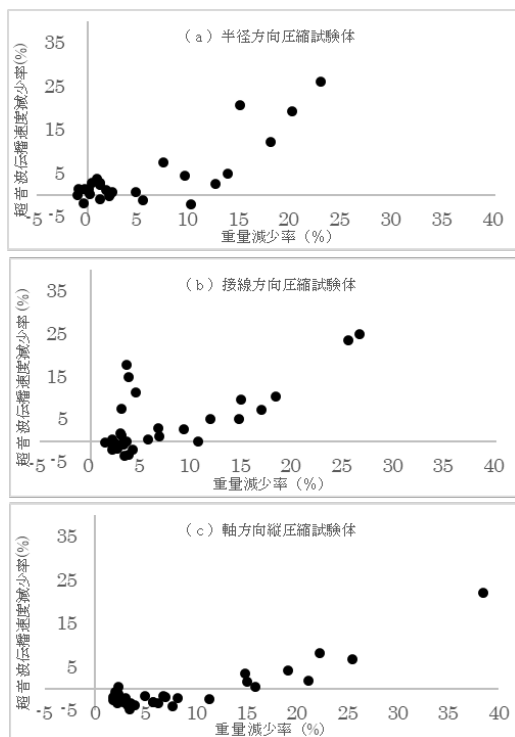


図3 スギ試験体における腐朽による重量減少率と超音波伝播速度低下率との関係

以上の人工腐朽材の試験結果から、腐朽により重量や超音波伝播速度がわずかに低下した段階で強度が大きく低下することが多い傾向が明らかになり、腐朽診断で異常が検出された部位では強度が期待できないと判断すべきだと考えられた。

#### 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 13 件)

山田利博、山下香菜、太田祐子、3 樹種の人工空洞円板を用いた横打撃共振法の特性検討、樹木医学研究、査読有、2018、Vol. 22、2018 (印刷中)

山田利博、平尾聡秀、シラカシのボタン材と腐朽材中の菌類群集組成、樹木医学研究、査読有、Vol. 21、2017、pp.138-139

峯宇 巧、太田祐子、山下香菜、井道裕史、山田利博、スギ人工腐朽材における腐朽の度合いと音の伝わり方、樹木医学研究、査読有、Vol. 21、2017、pp.144-145

原口竜成、平尾聡秀、山田利博、東京大学秩父演習林におけるサワラ腐朽被害の発生状況、関東森林研究、査読有、Vol. 68、2017、pp.181-184

山田利博、治療事例の蓄積と活用、グリーンエージ、査読無、No.528、2017、pp.8-12

山下香菜、太田祐子、米沢 洋、徳江 泉、山田利博、ドクターウッズによる人工空洞の検出、樹木医学研究、査読有、Vol. 20、2016、pp.143-144

Ota Y、Kimura KK、Hattori T、Miyuki Y、Endo R、First report of trunk rot caused by *Fomitiporia torreyae* in Kyoto prefecture on cultivars of Japanese cedar with no relatedness to 'Sanbu-sugi'、Journal of Forest Research、査読有、Vol.21、2015、pp.105-109

DOI:10.1007/s10310-015-0512-3

山田利博、非破壊で生立木の腐朽をはかる、森林科学、査読無、No.74、2015、pp.34-35

Yamashita K、Yamada T、Ota Y、Yonezawa H、Tokue I、Detecting defects in standing trees by an acoustic wave tomography with pseudorandom binary sequence code: simulation of defects using artificial cavity、USDA Forest Service General Technical Report FPL-GTR (Proceedings- 19<sup>th</sup> International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium)、査読無、No.239、2015、pp.542-546

幸由利香、寺嶋芳江、太田祐子、服部 力、佐橋憲生、金子洋平、スギ精鋭樹等の苗木を用いた非赤枯性溝腐病に対する抵抗性評価、関東森林研究、査読有、Vol.65、2014、pp.245-247

山下香菜、第 18 回木材の非破壊検査に関する国際研究集会に参加して、木材工業、査読有、Vol.69、2014、pp.163-166

徳江 泉、米沢 洋、安部鉄雄、池田朋弘、小野寺佳郎、後藤直樹、高島知晴、中田玲子、羽切俊勝、長谷川芳男、平野達也、山田利博、ドクターウッズによる診断と伐採後の観察事例 - 横浜市瀬谷第 2 公園のサクラ -、樹木医学研究、査読有、Vol.19、2015、pp.46-47

山田利博、水ストレス下で傷害を与えた苗木における水分分布と反応帯形成、樹木医学研究、査読有、Vol.19、2015、pp.56-57

[学会発表](計 18 件)

山下香菜 他、スギ心材の腐朽進行段階における超音波伝播速度と強度との関係、日本木材学会、2018

山田利博 他、シラカシボタン材中の菌類群集組成、日本森林学会、2018

市原 優 他、スギ辺材のチャアナタケモドキ感染部位に集積した抗菌物質、日本森林学会、2018

岩上和磨 他、ケヤキ人工腐朽材における腐朽の度合いと音の伝わり方、樹木医学会、2017

山田利博 他、3樹種の人工空洞円板を用いた横打撃共振法の特長検討、樹木医学会、2017

原口竜成 他、ナミダタケモドキによる根株心腐が立木の成長に与える影響の検討、日本森林学会、2017

峯宇 巧 他、スギ人工腐朽材における腐朽の度合いと音の伝わり方、樹木医学会、2016

山田利博 他、シラカシのボタン材と腐朽材中の菌類群集組成、樹木医学会、2016

原口竜成 他、東京大学秩父演習林におけるサワラ腐朽被害の発生状況、関東森林学会、2016

山田利博 他、ナミダタケモドキによるサワラ根株心材腐朽における腐朽の進展と菌の分布との関係、日本菌学会、2016

林 詳悟 他、倒木危険領域のスクリーニング評価に関する検討、土木学会、2016

山田利博 他、ドクターウッズによる非破壊腐朽診断 - 人工空洞の形状と周波数の影響、日本森林学会、2016

Yamashita K 他、Detecting defects in standing trees by an acoustic wave tomography with pseudorandom binary sequence code: simulation of defects using artificial cavity、19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium、2015

Yamada T 他、Detecting defects in standing trees by an acoustic wave tomography with pseudorandom binary sequence code: effect of frequency、19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium、2015

山下香菜 他、ドクターウッズによる人工空洞の検出、樹木医学会、2015

服部 力 他、辺材腐朽菌3種のスギへの接種 - 接種菌の再分離と分布状況 -、日本森林学会、2015

山田利博 他、辺材腐朽菌3種のスギへの接種 - 材変色の比較 -、日本森林学会、2015

羽井佐冨彦 他、ケヤキおよびクスノキ枝剪定後の巻き込みおよび材変色に対する塗布剤や剪定方法の影響、樹木医学会、2014

#### 〔図書〕(計3件)

山田利博(分担)、樹木診断調査法(分担: 樹木の病害虫・傷害に対する防御機構、機器等を使った樹木の健康診断と危険度診断の方法)、講談社、2014、343pp(分担64-83、286-298)

山田利博・渡辺直明(分担)、日本緑化センター、樹木医の手引き 改定4版(分担: 樹木の精密診断、幹の外科技術)、2014、700pp(分担180-194、212-248)

山田利博(分担)、樹木医学会、樹木医学の基礎講座(分担: 微生物の感染と樹木の反応)、2014、248pp(分担190-201)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山田 利博 (YAMADA, Toshihiro)  
東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授  
研究者番号: 30332571

##### (2) 研究分担者

太田 祐子 (OTA, Yuko)  
日本大学・生物資源科学部・教授  
研究者番号: 60343802

山下 香菜 (YAMASHITA, Kana)  
国立研究開発法人森林総合研究所・木材加工・特性研究領域・主任研究員  
研究者番号: 60353900

伊藤 進一郎 (ITO, Shin-ichiro)  
三重大学・生物資源学研究科・招へい教授  
研究者番号: 90092139