

氏名	陶山 大志
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博乙第7号
学位授与年月日	平成26年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項
文部科学省報告番号	乙第308号

学位論文題目 横打撃共振法による樹木の材質診断技術の実用化に関する研究
(Practical application of non-destructive diagnostic technique for wood qualities inside standing trees using lateral impact vibration method)

論文審査委員	主査	島根大学教授	中尾 哲也
		島根大学教授	上原 徹
		島根大学教授	臼杵 年
		島根大学准教授	中井 毅尚

論文内容の要旨

立木の幹内部の材質を非破壊的に診断する手法が従来から研究・開発されている。しかし、これらの手法は機器が重厚で高価である、計測時に時間がかかる、あるいは幹に傷をつける一などの問題点があり、課題を残している。これに対して、横打撃共振法は打撃された樹幹の振動の横打撃共振周波数を診断の指標としており、測定が極めて簡易で非破壊の診断法である。また、計測に必要な機器は携帯性に優れており、また安価に構築できる。このため、一定の精度が得られれば、本法は立木の材質診断法として実用化される見込みが高いと考えられる。そこで、本法の実用化を目指してつぎの1～4)の研究を行った。

1) 横打撃共振周波数検出に及ぼすハンマー重量の影響

本法は樹幹を木製ハンマー等で打撃して、その時の樹幹の振動・音の周波数スペクトルから診断指標となる横打撃共振周波数 F_r を同定する。しかし、得られた周波数スペクトルには F_r 以外にも複数の周波数ピークが出現することから、 F_r は他の周波数と比較して大きな電圧として検出されることが好ましい。とくに、大径木では F_r を検出しにくいことが経験的に知られている。そこで、 F_r を誤りなく検出する目的で、打撃するハンマーの質量に着目して、 F_r の検出に及ぼすハンマー質量の影響を調査した。調査は胸高直径 58～107cm の9樹種大径木 21本を対象とし、質量の異なる8種類 (101～3250g) の木製ハンマーを用いてこれらを打撃した。質量の大きいハンマーでは低周波側の周波数ピークが発生しやすい傾向であった。ハンマー質量と共振周波数 F_r の検出力の関係を検討したところ、ハンマー質量が増加するにつれ F_r の検出力が高くなる傾向であった。大径木においては質量の大きいハンマーで F_r を検出しやすいことが示された。さらに、質量の大きいハンマーを使用することで、すべての供試木の F_r を検出できたことから、大径木においても本法による診断が可能であることが示された。また、ハンマーの軽量性と F_r の検出力の両面を考慮した実用的なハンマー質量について考察した。

2) 横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定

スギの心材の色は赤系～黒色系と差異が大きいですが、黒色系の丸太は材価が低い。このため、黒色系のものは早期に間伐することが林業経営上好ましい。そこで、本法を用いてスギ心材色の推定できるか、つぎの仮定に基づいて行った。本法の材質の診断指標として樹幹直径 D と横打撃共振周波数 F_r との積 DF_r を用いた。 DF_r が低いと心材含水率 M_c は高くなり、 M_c が高いと心材の明度 L^* は低くなる、それゆえ DF_r が低いと L^* は低くなる可能性がある。本法によって700本を測定し、うち74本を伐採し心材色を調査した。 DF_r は D が大きくなるにつれ、低下する傾向が認められた。このことを考慮して、伐採木の D と DF_r の回帰直線に対する各個体の DF_r の増減率 $R(\%)$ を算出し、 R を L^* を推定する指標とした。その結果、 R と M_c および M_c と L^* に負の相関が、 R と L^* に正の相関 ($r = 0.53$) が認められた。 R と L^* の相関係数は高くなかったが、 R によって心材の明度 L^* を3階級にグループ分けすることが可能であることが分かった。

3) 腐朽・空洞面積率の推定 (予備研究)

①本法では、あらかじめ把握しておいた欠点のない健全木の測定値 (DF_r) と比較して、診断木の腐朽・空洞面積率を推定する。そこで、健全木の DF_r の範囲と分布についてヒノキを対象にして調査を行った。ヒノキ16林分において約1500本を測定したのち、計4林分において約120本を伐倒して、材質を調査し、健全木の DF_r の範囲を明らかにした。その結果、 DF_r は13~46cmkHzと広範に及んだが、健全木99本の DF_r は30~42cmkHzに分布し、林分や個体によってばらつきがあることが分かった。②空洞や腐朽の大きさが DF_r に及ぼす影響を予備的に調査するため、人工的に作製した空洞円板と自然の被害木から作製した腐朽円板を用いて、円板の空洞・腐朽面積率と DF_r の関係を調査した。その結果、空洞・腐朽面積率の増加につれ DF_r は曲線的に減少し、円板では DF_r は空洞や腐朽の面積率を精度よく捉えていた。 DF_r によって腐朽・空洞面積率を推定できる可能性が示された。

4) クロマツにおける腐朽・空洞面積率の推定

クロマツ240本について本法によって樹幹内部の腐朽・空洞面積率を推定した。あらかじめ(1)クロマツ健全木30本について本法の測定と伐採調査を行い、診断基準となる健全木の DF_r の平均値を明らかにした。(2)同健全木の円板を用いて空洞面積率と DF_r の減少率の関係を明らかにした。(3)本公園の調査木について本法の測定を行い、(1)(2)の情報に基づき推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} を求めた。本法の精度を評価するため、27本についてレジストグラフを使用した貫入抵抗法によって推定腐朽・空洞面積率 R_{rg} を求め、3本については伐採して地上高ごとに実測腐朽・空洞面積率 R_{am} を計測した。 R_{iv} は R_{rg} ($r = 0.88$) と R_{am} ($r = 0.80$) の両者との間に高い正の相関が認められたことから、本法によって樹幹内部の腐朽・空洞面積率を推定できることが示された。

以上の1~4)の研究によって、樹幹の大きさに応じてハンマーの重量を大きくすることで横打撃共振周波数を検出しやすくなることを示し、本法による大径木の診断を可能とした。ついで、スギ立木の心材色を3段階で推定できることを示し、林業における本法の用途を拡大させた。さらに、樹幹内部の腐朽・空洞面積率を推定できることを明らかにし、間伐の選木での利用や街路樹・公園木の倒伏危険度の診断に本法が利用できることを示した。これらの研究によって本法の実用性は飛躍的に向上したと考えている。

論文審査結果の要旨

生立木の幹内部の材質を非破壊的に診断する様々な手法が従来から研究・開発されている。しかし、これらの手法は機器が重厚で高価である、計測に時間がかかる、幹に傷をつけるなどの問題点がある。これに対して、横打撃共振法は打撃された樹幹の振動の横打撃共振周波数を診断の手法としており、測定が極めて簡易で非破壊の診断法である。また、計測に必要な機器を安価に構築できる。このため、一定の精度が得られれば、本法は生立木の材質診断法として実用化が完成される見込みが高いと考えられる。そこで、申請者は以下のような研究結果を得た。

精度よく明瞭に横打撃共振周波数を測定するには周波数測定機器の性能よりは、打撃に用いるハンマーの材質が重要となる。そこで、申請者は101から3250 gまでの8種類の木製ハンマーを用い、様々な検討を行った。その結果、最適な汎用のハンマー質量を見出し、従来診断が困難であった大径木でも、精度の良い診断が可能となった。

スギの心材色は赤系から黒系と差異が大きいが、黒系の丸太は材価が低い。このため、黒系のものは早期に間伐することが林業経営上好ましい。そこで、本法の材質の診断指標である、樹幹直径 D と横打撃共振周波数 F_r との積 DF_r を用いた。700本の立木の DF_r 値を求め、うち74本を実際に伐倒して心材色を測定した。その結果、 DF_r 値が大きくなるにつれ、心材の明度は低くなり、黒系になることが分かった。この関係を用いて、 DF_r 値の増減率 R を定義し、心材の明度を3階級に大別する、生立木段階での心材の赤系—黒系の識別法を開発した。

これまでの研究は上記の結果を含めスギに関するものが多いが、他の代表的な造林木であるヒノキ、クロマツについても検討を進めた。ヒノキ1500本、クロマツ270本について横打撃共振周波数を測定し、この内ヒノキ120本、クロマツ30本を実際に伐倒し、診断基準となる DF_r 値のそれぞれに対する健全木適正值を求め、実用化を確立した。さらに、これらから、人工的に作成した空洞材、及び、実際の腐朽材を用いて、空洞・腐朽面積率と DF_r 値との関係を明らかにし、これらの代表的樹種についても横打撃共振法による診断技術を確立した。

以上のことから、提出された論文は、実験手法の精密さ、解析の有用性、解析された結果の重要性いずれをとっても優れたものである。