

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

2014年3月

島根大学総合理工学部

陶山大志

目 次

諸 言	3
横打撃共振法の原理	4
第 I 章 横打撃共振法による 9 樹種大径木の共振周波数の検出に及ぼすハンマ ー質量の影響	
1. はじめに	6
2. 試験方法	6
3. 試験結果	8
4. 考 察	12
5. まとめ	14
第 II 章 横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定	
1. はじめに	15
2. 試験方法	16
2.1 横打撃共振法による測定	16
2.2 心材の含水率と材色	16
3. 結 果	17
4. 考 察	21
5. まとめ	22
第 III 章 横打撃共振法によるヒノキ根株心材腐朽病の非破壊診断	
1. はじめに	24
2. 試験方法	25
2.1 測定林分	25
2.2 横打撃共振法による測定	25
2.3 3 林分での材質調査	26
2.4 検定林の材質調査	26
2.5 人工空洞円板の作製と測定	27
2.6 腐朽円板の作製と測定	27
3. 結 果	28
3.1 15 林分の測定	28
3.2 3 林分の材質調査	30
3.3 検定林の材質調査	32
3.4 円板の人工空洞・腐朽面積率と測定値	33
4. 考 察	35
4.1 DF_r の分布範囲	35
4.2 健全木の DF_r の林分・個体間での変動要因	35
4.3 円板の人工空洞・腐朽面積率と測定値の関係	36

5. おわりに	38
6. まとめ	38
第IV章 横打撃共振法によるクロマツ樹幹内部の腐朽・空洞面積率の推定	
1. はじめに	39
2. 調査方法	39
2.1 腐朽・空洞面積率の推定方法	39
2.2 クロマツ健全木の DF_r	40
2.3 空洞面積率と共振周波数の減少率	40
2.4 松江城山公園内クロマツの腐朽・空洞面積率の推定	41
2.5 横打撃共振法による地上高方向の測定	42
2.6 貫入抵抗法による腐朽・空洞面積率の推定	42
2.7 伐採調査	43
3. 結果	44
3.1 空洞面積率と共振周波数の減少率	44
3.2 クロマツ健全木の DF_r と公園内クロマツの腐朽・空洞面積率	44
3.3 横打撃共振法による地上高方向の測定	46
3.4 横打撃共振法と貫入抵抗法の推定面積率および実測面積率の比較	47
3.5 共振周波数の特定	49
4. 考察	50
5. まとめ	51
総括	53
引用文献	55
謝辞	57
関連論文	58

諸 言

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。γ線透過量，貫入抵抗，応力波・超音波伝播速度，エックス線CT（渡部，2000）を利用したものが開発されている。しかし，これら手法は計測機器が重厚で高価である，計測時に時間がかかるといった問題がある。また，センサーを差し込む，あるいはドリルを貫入させるなどの完全な非破壊とは言えないものもある。

これに対して横打撃共振法（小玉ら，1999；釜口ら，2000）は木製ハンマーなどで樹幹を打撃し，そのときの樹幹の振動・音の共振周波数から樹幹内部を診断する手法である。本法では幹を打撃すれば，速やかに診断指標となる共振周波数が得られことから，測定が短時間で行える。また，測定に必要な機器はFFTアナライザーと加速度ピックアップあるいはマイクロフォンの計2点のみであるため，装置が軽量であり安価に構築できる。さらに幹に直接傷を付けない非破壊診断法である。したがって，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，広く普及する見込みが高いと考えられる。そこで，本研究では横打撃共振法の実用化を目指したつぎの研究を行った。

1) 樹幹を打撃した場合，本法で診断指標となる横打撃共振周波数以外にも複数の周波数ピークが含まれる。このため，横打撃共振周波数を顕著に出現させる必要がある。また，大径木では横打撃共振周波数を特定しにくいことが経験的に知られている。そこで，打撃に使用する木製ハンマーの質量に着目し，大径木において横打撃共振周波数の検出に及ぼすハンマー質量の影響を調査した。

2) スギの心材色は赤色系～黒色系まで変化に富んでおり，心材色は材価に影響を及ぼす重要な因子である。横打撃共振法によってスギ心材含水率を推定することが可能であり，またスギ心材色は心材含水率と関連があることが知られている。そこで，この関係に基づいてスギ立木の心材色を本法によって推定できるか検討した。

3) 腐朽診断に向けた予備研究として，ヒノキ健全木において横打撃共振法による測定値の分布を明らかにした。腐朽・空洞円盤を用いて，その大きさと本法による測定値との関係を明らかにした。これらの研究によって，本法による腐朽・空洞の診断の可能性を検討した。

4) 横打撃共振法を用いてクロマツ立木240本について腐朽・空洞面積率を推定した。このうち数本を伐採し，実際の腐朽・空洞面積と本法による推定値を比較し，本法の精度を検証した。

横打撃共振法の原理

樹幹を木製ハンマーで打撃すると、樹幹は固有の共振周波数で振動する (Fig. 1)。このうち、本法の診断指標となる横打撃共振周波数 F_r は、樹幹断面方向の伸縮振動のうち 1 次共振周波数である (釜口ら, 2000)。なお、この振動のモード形状は樹幹断面の円周に 4 点の節と腹を有している (Fig. 2)。通常、打撃部の樹幹直径が概ね 20cm 以上の場合、0~25Hz のピークを除き、顕著に出現した周波数ピークのうち、最も低周波のものが横打撃共振周波数となることが経験的に知られている (Fig. 3)。

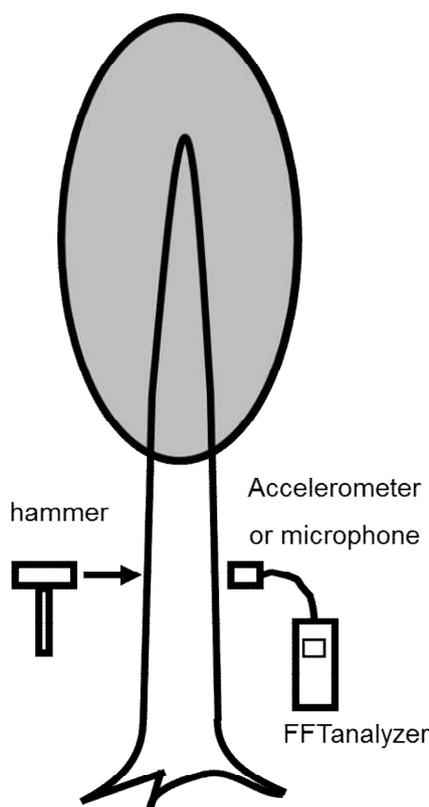


Fig. 1. Lateral impact vibration method.

横打撃共振周波数 F_r と樹幹直径 D の積 DF_r には次式が成り立つ (小玉ら, 1999 ; 釜口ら, 2000)。

$$DF_r = \sqrt{\frac{E}{\rho k}} \quad (1)$$

ここで、 D : 樹幹直径 (cm), F_r : 横打撃共振周波数 (Hz), E : 樹幹横断面方向のヤング率 (Pa), ρ : 見かけの密度 (g/cm^3), k : 形状係数。

一般的に密度が大きくなればヤング率も大きくなることから（北原，1967），材質の劣化・欠点のない健全木であれば， E/ρ はある一定の範囲に分布する。このため，（1）式から DF_r は同一樹種の健全木であれば一定の範囲に分布すると考えられる。これに対して，心材の含水率が高い木では密度 ρ が高く，（1）式から DF_r は低くなることから， DF_r を指標とすれば心材含水率の推定が可能である（釜口ら，2000；釜口ら，2001）。また，心材部が腐朽・空洞した木では DF_r が無空洞の値よりも低くなることが実験的に示唆されており（小玉ら1999，釜口1999）， DF_r を指標とすれば腐朽・空洞の有無を判定できる可能性がある。

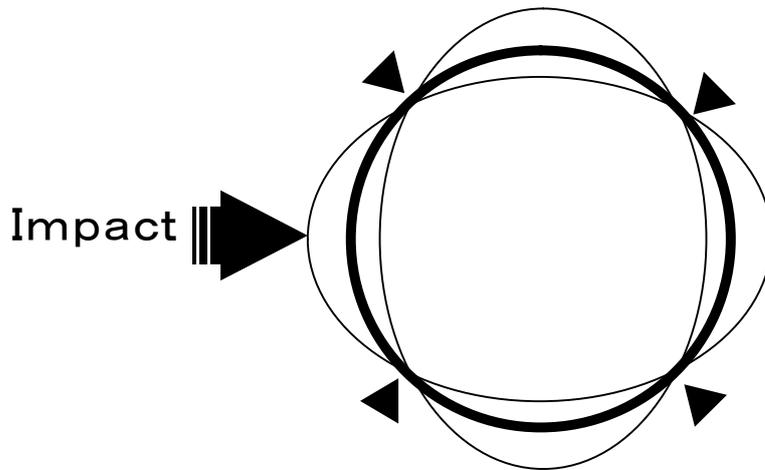


Fig. 2. Vibration mode of lateral-impact resonance frequency.

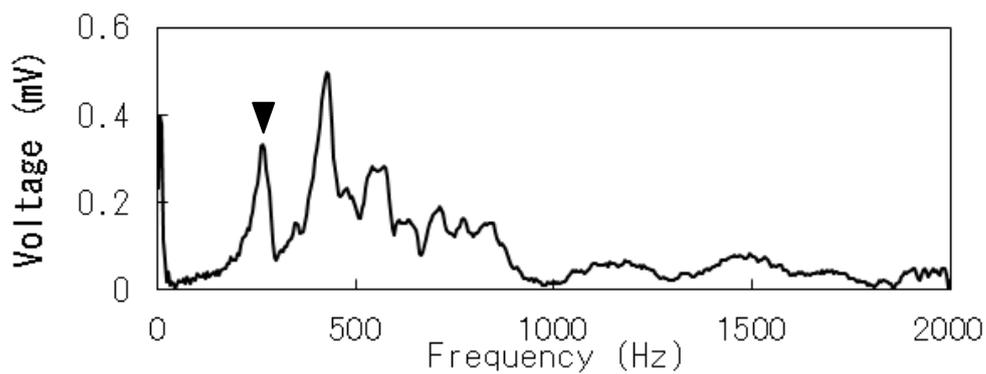


Fig. 3. Frequency spectrum.

Black triangle indicates lateral-impact resonance frequency.

第 I 章

横打撃共振法による 9 樹種大径木の共振周波数の検出に及ぼすハンマー質量の影響

1. はじめに

前述したように横打撃共振周波数 F_r は打撃時に発生する樹幹断面方向の伸縮振動の 1 次共振周波数である。しかし、打撃された樹幹の振動・音には本法で診断指標とする F_r 以外にも、通常複数の周波数が発生しているため、 F_r がほかの周波数ピークと比べて小さいと、 F_r を同定できない可能性がある。とくに、大径木では F_r を特定しにくいことが多いことから（陶山 2011）、 F_r を確実に検出する手法を開発することが重要な課題となっている。

本法において樹幹を打撃する際には木製ハンマーや樹脂製ハンマーを使用するが、これらのハンマーの材質、形状あるいは質量が打撃された樹幹の振動・音に及ぼす影響について詳細に検討された例はない。そこで、本研究ではハンマー質量に着目し、大径木においてハンマー質量が横打撃共振周波数 F_r の検出に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。大径木の 9 樹種 21 本に対して質量の異なる 8 種類の木製ハンマーで打撃し、マイクロフォンを使用してその時の樹幹の音の周波数スペクトルを計測した。そして、各ハンマーにおける F_r の検出の検出力を算出して、 F_r を検出しやすいハンマー質量を明らかにした。さらに、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. 試験方法

2011 年 8 月上旬～2012 年 3 月下旬、島根県内の各調査地において供試木を設定し、横打撃共振法による測定を行った（Table 1）。供試木は 9 樹種の計 21 本で、胸高直径が 57.5～107.0cm の大径木である。供試樹種はクロマツ（*Pinus thunbergii*）、モミ（*Abies firma*）、スギ（*Cryptomeria japonica*）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）、ケヤキ（*Zelkova serrata*）、タブノキ（*Machilus thunbergii*）、ソメイヨシノ（*Prunus × yedoensis*）、センダン（*Melia azedarach*）、クロガネモチ（*Ilex rotunda*）である。

地上高 1.2m において各供試木の樹幹を質量の異なる 8 種類の木製ハンマーで打撃した。この時の打撃音をマイクロフォン（小野測器製、MI-1431）が接続された携帯型の FFT アナライザー（同社製、CF-1200）で計測した。打撃方向と樹幹に向けたマイクロフォンの方向は互いに 90° とし、マイクロフォンは樹幹から 10cm 離して計測した。各供試木について樹幹の同一位置において、同一の力となるよう留意して 3 回打撃し、FFT アナライザーで算出された周波数スペク

Table 1. Sample trees.

Tree number ^{a)}	Species	Location ^{b)}	Stem diameter $d^c)$ (cm)	Height (m)	Resonance	
					frequency f (Hz)	$d \cdot f^d)$ (cm · kHz)
1	<i>Pinus thunbergii</i>	A	67.4	21.9	475	32.0
2		A	78.2	25.3	188	14.7
3		A	83.2	25.9	350	29.1
4	<i>Abies firma</i>	C	72.5	30.7	155	11.2
5		C	74.0	22.7	345	25.5
6		B	81.8	24.1	265	21.7
7	<i>Cryptomeria japonica</i>	C	69.5	27.0	320	22.2
8		B	76.3	22.2	320	24.4
9		C	97.8	33.4	210	20.5
10	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	D	58.3	26.8	610	35.6
11		D	62.5	29.1	500	31.3
12	<i>Zelkova serrata</i>	E	91.5	27.9	270	24.7
13	<i>Machilus thunbergii</i>	A	71.1	15.5	588	41.8
14		A	105.4	17.9	175	18.4
15	<i>Prunus × yedoensis</i>	A	57.5	9.5	525	30.2
16		A	75.5	8.4	525	25.4
17		F	84.5	7.7	300	25.4
18	<i>Melia azedarach</i>	G	107.0	16.4	65	7.0
19	<i>Ilex rotunda</i>	A	76.5	16.2	360	27.5
20		A	94.0	18.4	330	31.0
21		A	103.7	19.6	115	11.9

^{a)}The sample trees were arranged according to species and stem diameter d . ^{b)}All locations are in Shimane prefecture. A: Tonomachi, Matsue city (Matsue Jozan Park). B: Tamayu, Tamayu town, Matsue city. C: Nishi-kawatsuchou, Matsue city (Rakuzan Park). D: Shimo-kizima, Inan town. E: Kaga, Shimane town, Matsue city. F: Minami-tamachi, Matsue city.

^{c)}measured at breast height. ^{d)} $d \cdot f$ is the index of the degree of decay or hollowness inside a tree trunk.

トルを記録した。3回の平均スペクトルを求めて解析に供した。本法の診断指標となる横打撃共振周波数 F_r をこの平均スペクトルにおいて同定した。

FFTの解析条件は原則、サンプルデータ数：1024、周波数レンジ：1～2000Hz（本機器において、この設定では分解能：5 Hz、サンプリング間隔：195 μ sec.、サンプリング時間：200msec.となる。）に設定した。ただし、クロマツ、モチノキおよびソメイヨシノでは打撃音の減衰が大きく、前述の解析条件では共振周波数のピークが明瞭に出現しなかったことから、クロマツとタブノキでは周波数レンジ：5 kHz（分解能：12.5Hz、サンプリング間隔：78 μ sec.、サンプリン

グ時間：100msec.），ソメイヨシノでは周波数レンジ：10kHz（分解能：20Hz，サンプリング間隔：40 μ sec.，サンプリング時間：50msec.）とし，サンプリング間隔・時間を短くした。また，センダンでは横打撃共振周波数 F_r が 100Hz を下回ったため，周波数レンジ：1～1000Hz に設定し，分解能を 2.5Hz と高めた。

木製ハンマーは市販の 8 種類を使用し，No. 1～7 は（有）堂内製（兵庫県三木市），No. 8 は浅香工業（株）製（大阪府堺市）である。材種はいずれもカシ類製である。各ハンマーは打撃点が一点となるよう，ハンマー頭部片側の打撃面を切削して球面に加工した。これらの加工後，No. 1～8 の各ハンマーの質量はそれぞれ 101，208，256，449，710，837，1442，3250g であった。

横打撃共振周波数 F_r の検出力を評価するため，評価指標として比率 R_f を設定した。 R_f は測定された周波数スペクトル（スペクトル関数）の電圧の総合計（mV）に対する F_r （Hz）における電圧 V_f （mV）の比率として，次式によって算出した。

$$R_f = V_f / \sum g(k)$$

ここで， $g(k)$ ：スペクトル関数（mV）。 $k=5, 10, \dots, 2000$ （Hz），ただし，クロマツとタブノキでは $k=12.5, 25, \dots, 5000$ （Hz），ソメイヨシノでは $k=20, 40, \dots, 10000$ （Hz），センダンでは $k=2.5, 5, \dots, 1000$ （Hz）。

比率 R_f が小さい場合，周波数スペクトルに対して横打撃共振周波数 F_r は相対的に小さいため F_r は検出しにくいことを意味する。一方， R_f が大きい場合，同スペクトルに対して F_r は相対的に大きいため，検出しやすいと言える。

実際の診断現場において使用するハンマーは，周波数スペクトル上で横打撃共振周波数 F_r を確実に認識できると同時に，携帯する上で軽量であることが好ましい。そこで，実用的なハンマー質量の条件として，供試したハンマーの中で「周波数スペクトル上で F_r （Hz）を 1 番目あるいは 2 番目に大きい電圧として検出できるもののうち，最も軽量であるハンマー」と設定した。各供試木についてこの条件を満たすハンマー質量を求め，樹幹直径 DF_r および DF_r に対応する実用的なハンマー質量を検討した。

3. 試験結果

同一供試木を同一ハンマーで打撃した場合，3 回の周波数スペクトルにほとんど差はなかった（Fig. 4）。全供試木において横打撃共振周波数 F_r の検出が可能であった（Table 1）。供試木の DF_r は 7.0～41.8cm・kHz に及んだ。 DF_r が 15cm・kHz 未満と比較的低い個体が 4 本あった。供試木のうちモミとセンダンの周波数スペクトルを Fig. 5 に示す。モミにおける F_r はいずれの木製ハンマーにおいても共通して 265Hz に発生していた。しかし，質量の小さいハンマ

一では 500Hz 以上の周波数帯のピークが大きい傾向で、質量の大きいハンマーになるにつれ 500Hz 以下の周波数帯のピークが大きくなる傾向であった。とくに質量の小さいハンマーでは F_r の電圧は極めて小さかったが、質量の大きいハンマーになるほど大きくなる傾向であった。センダンにおける f は 65Hz に共通して発生していたが、質量の小さいハンマーでは微小であった。ほかの 8 樹種供試木 19 本においても同様で、質量の小さいハンマーでは高周波側の、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する傾向であった。

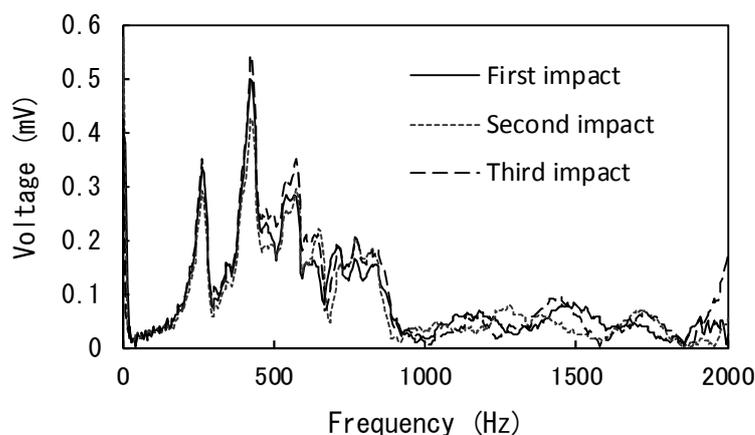


Fig. 4. Frequency spectrum after 3-time-consecutive impact in *Abies firma* by No.5 hammer.

ハンマー質量と比率 R_f の関係を樹種別に Fig. 6 に示す。全供試木においても、ハンマー質量が大きくなるにつれ、 R_f が大きくなる傾向だった。 R_f は 1442g または 3250g のハンマーで最大となった。ハンマー質量と R_f について 2 次式で回帰分析したところ、回帰曲線の決定係数は $R^2 = 0.54 \sim 0.99$ であったことから、回帰曲線は両者のデータと良く適合していることが示された。各回帰曲線について有意性を検討したところ (F 検定)、21 本中 18 本において $p < 0.05$ で有意性が認められた。

各供試木における実用的なハンマー質量と、樹幹直径 D 、横打撃共振周波数 F_r (Hz) および DF_r の関係を Fig. 7 に示す。 D が大きくなるにつれ、また F_r と DF_r が低くなるにつれ、実用的なハンマー質量は概ね指数関数的に大きくなる傾向であった ($R^2 = 0.20 \sim 0.47$, 下記の 2 本は除く)。なお、最も質量の大きい No. 8 (3250g) のハンマーでも F_r の電圧が最も大きくはならない供試木が 2 本あり、その樹幹直径は 91.5, 103.7 cm と大きかった。 F_r の電圧を 2 番目以上に大きくできる最も軽量のハンマーは、 d が 58~80cm では 208~1442g で、80

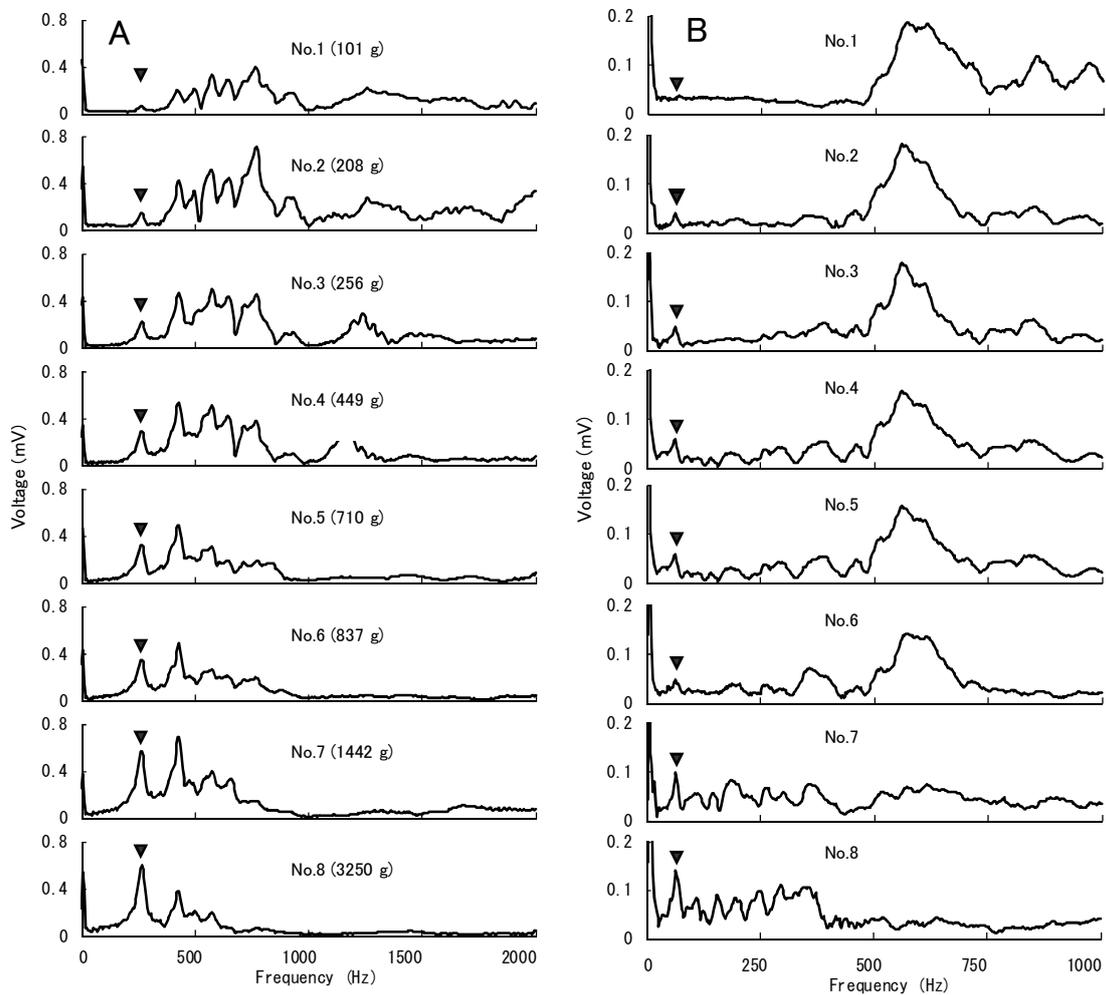


Fig. 5. Frequency spectrum in *Abies firma* (A) and *Melia azedarach* (B) upon impact with each hammer (No.1-8).

Legend: black triangles: resonance frequency F_r .

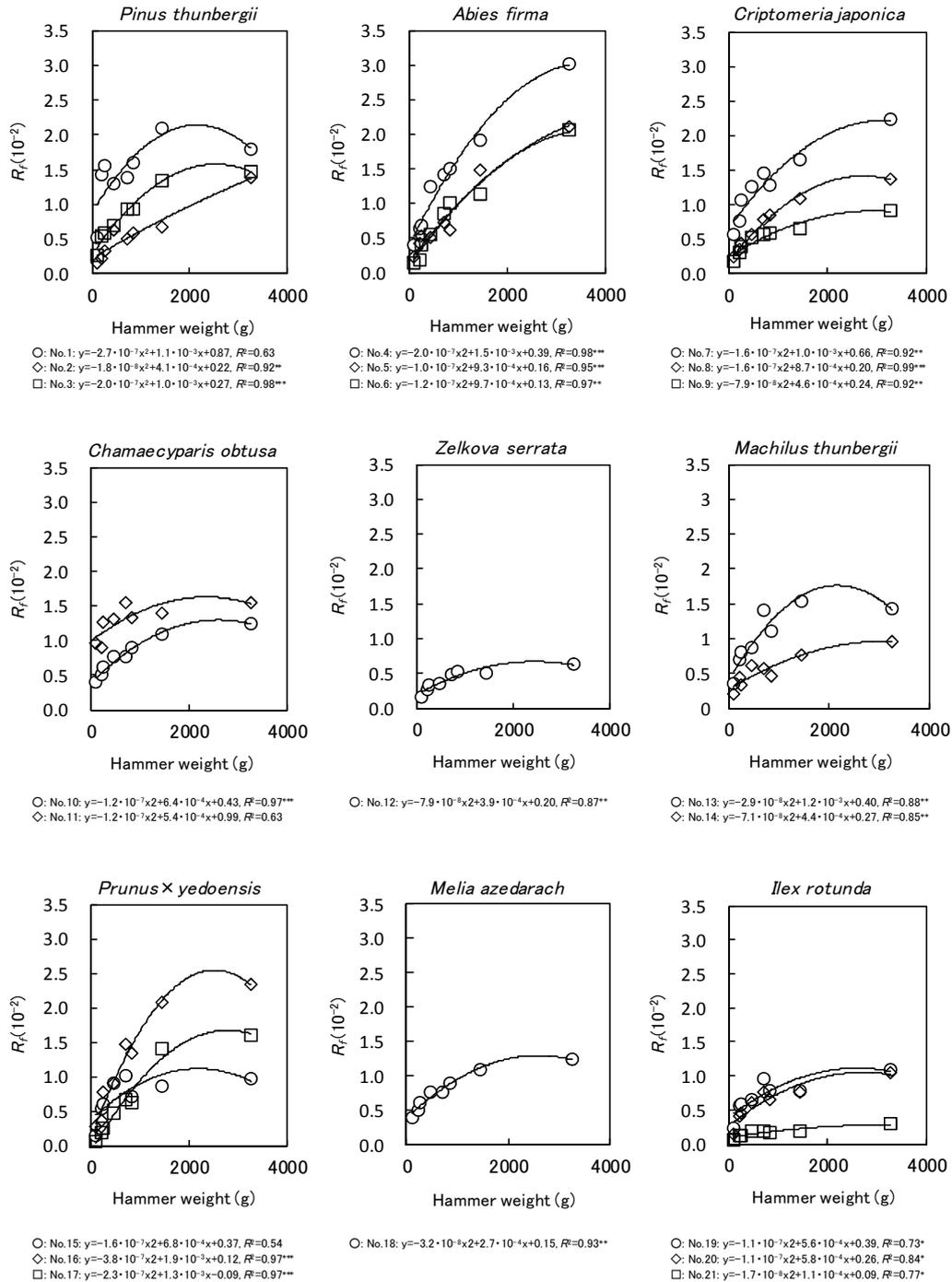


Fig. 6. Relationship between hammer weight and R_f in sample trees.

Note: R_f was calculated as the ratio of the voltage (mV) in f (Hz) to the sum of the voltages (mV) in the whole observed frequency spectrum. Each sample tree was impacted by 8 hammers of differing weights. * : Significant at 5% level, ** : Significant at 1% level, *** : Significant at 0.1% level.

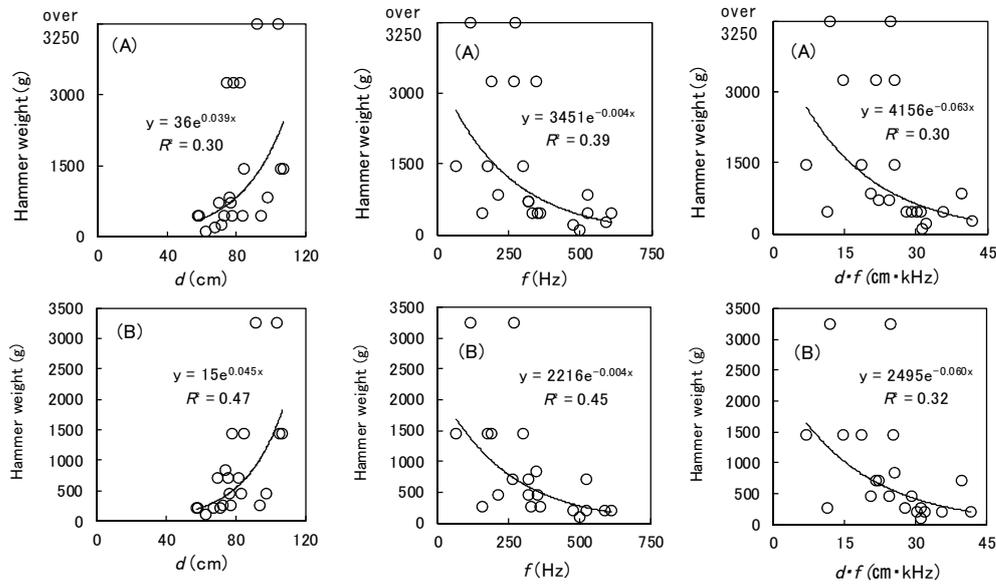


Fig. 7. Relationship of hammer weight for practical use to stem diameter D , resonance frequency F_r and DF_r . The conditions of the hammer weight for practical use are that the hammer should detect the resonance frequency as the largest (A) or second largest (B) voltage in a spectrum and that it should be the lightest.

4. 考察

本研究では胸高直径 58~107cm の 9 樹種の大径木 21 本について、質量 101~3250g の 8 種類の木製ハンマーで打撃して、その時の樹幹打撃音の周波数スペクトルを調査した。全供試木において横打撃共振周波数 F_r を検出できた。このことから、大径木においても DF_r を指標として本法による材質の診断が可能であることが示された。なお、 DF_r が 15cm·kHz 未満と低い個体が 4 本あった。健全木の DF_r の調査例ではクロマツ 30 本は 28.2~35.5 cm·kHz³⁾、ヒノキ約 100 本は 29.7~42.1cmkHz (陶山ら, 2010) に分布すると報告があることから、クロマツ No. 2 (14.7 cm kHz) は腐朽・空洞が発生していると考えられ、この他の 3 本についても腐朽・空洞が発生している可能性が高いことが推察された。

全供試木において質量の小さいハンマーでは高周波側の周波数ピークが発生し、ハンマー質量が大きくなるにつれ低周波側のピークが発生する傾向であった。供試木の中には、質量の小さいハンマーでは横打撃共振周波数 F_r の電圧が極めて小さく、 F_r の同定が困難な場合もあることが分かった。横打撃共振周波数 F_r の検出力を評価する比率 R_f を算出したところ、 R_f は全供試木においてハンマー質量が大きくなるにつれ、大きくなる傾向で ($R^2 = 0.54 \sim 0.99$), 1442g

または 3250g のハンマーで最大となった。したがって、本研究で調査した範囲の大径木を診断する場合、1442~3250g 程度の質量の大きいハンマーにおいて、横打撃共振周波数 F_r を最も検出しやすいことが示された。

コンクリートに剛球で衝撃を与えた場合、剛球の質量が大きいと、衝撃時の両者の接触時間が長くなり、この結果コンクリートからの衝撃音には低周波域が励起されることが報告されている（後藤，2010；岩野ら，1997）。樹幹を木製ハンマーで打撃した場合においても、ハンマー質量が大きくなるにつれ、ハンマーと樹幹の接触時間が長くなり、励起される周波数域が低くなると考えられる。横打撃共振周波数 F_r は健全木の場合、樹幹直径が大きくなるにつれ低下し（小玉ら，1999；釜口ら，2000）。含水率などの材質によって変動する（釜口ら，2000；釜口ら，2001；中田・田村，2006；井城ら，2010）。また、樹幹内部に腐朽・空洞が発生していると、 F_r は健全木の値よりも著しく低下することが分かっている（陶山ら，2012；陶山ら，2010）。すなわち、これら要因により F_r が低くなった個体において、 F_r の電圧を顕著に検出するには、質量の大きいハンマーを使用して F_r が含まれる低周波域を励起する必要がある。

ハンマーと樹幹の接触時間が長くするこの他の要因として、樹皮の影響が考えられる。樹皮が厚く軟質な場合、ハンマーと樹幹の接触時間が長くなり、軽量のハンマーでも低周波域が励起されやすくなることが考えられる。本研究では伐採調査を行っておらず樹皮の厚さや硬さを計測することはできなかったが、樹皮の影響については今後の検討課題である。また、ハンマーの打撃部をゴム製などの軟質な材料に変えることによって、接触時間を長くすることも可能と思われる。打撃部がゴム製のハンマーであれば質量の大きいハンマーでも打撃による樹幹の付傷に対して配慮できる。横打撃共振法の測定に適した材質・質量・形状のハンマーの開発が求められる。

軽量性と横打撃共振周波数 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検討したところ、供試木の樹幹直径 D が大きくなるにつれ、また F_r と DF_r が低くなるにつれ、実用的なハンマー質量は大きくなる傾向であった。腐朽・空洞などが生じて F_r あるいは DF_r が低い個体であるかどうかは診断前には分からないことから、はじめて診断する木では樹幹直径によって適当な質量のハンマーを選択するのが良いと考えられる。 F_r の電圧を 2 番目以上に大きくできる最も軽量のハンマーは D が 80cm 未満では質量 208~1442g のもの、80cm 以上では 256~3250g のものが適していた。この質量の範囲は広く、ハンマー選択の明確な基準とは言えないが、現場で診断する際の一つの目安になる。

本研究では大径木を対象としたが、本研究の結果から推察すると小~中径木では質量が小さいあるいは中庸のハンマーが適していることが推察される。今後はこれら小~中径木についても、横打撃共振周波数 F_r の検出に及ぼすハンマ

一質量の影響を明らかにする必要がある。

なお、本法と同様にハンマーで幹を打撃し、打撃音を人間の聴覚で聞き分けて腐朽・空洞の発生を診断する方法が、打診法と呼ばれている（小林，2008）。打診法の判定基準は共振周波数が低い場合、腐朽・空洞が発生していると判断されることから（陶山，2011）、打診法においても大径木では質量の大きいハンマーで打撃するなど、樹幹に応じて使用するハンマー質量を選択する必要があると考えられる。

5. まとめ

横打撃共振周波数 F_r の検出に及ぼすハンマー質量の影響を明らかにするため、胸高直径 58~107cm の 9 樹種大径木 21 本を、質量の異なる 8 種類(101~3250g)の木製ハンマーで打撃した。全供試木において F_r を同定することができ、大径木においても DF_r を指標として材質の診断が可能であることが示された。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くなる傾向であった。ハンマー質量と 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 ($R^2 = 0.54 \sim 0.99$)。このことから、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。また、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。

第Ⅱ章

横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定

1. はじめに

スギの心材は通常、淡紅色から赤橙色であり、これらは赤心と呼ばれる。これに対して黒褐色から黒色を帯びている場合があり、黒心と呼ばれている。赤心材は化粧性が高く、造作材や板類としての用途が高い。直径 30 cm未満の小・中径丸太は主として柱材として利用されるが、その丸太から製材した柱材の表面に心材が現れることは少ない。このため、同直径の大径の丸太は心材色によって価格差が生じることは少ない（農林水産省農林水産技術会議事務局，1997；駒木，1995）。一方、直径 30 cm以上の丸太は構造材や合板用材として利用されるほか、赤心であれば化粧性の高い造作材としての用途が加わる。このため、同直径の赤心の丸太は黒心と比較して高い価格で取引される場合が多い。さらに、黒心は含水率が高いため（農林水産省農林水産技術会議事務局，1997；森川ら，1996；藤原・岩神，1989；松山，1976），乾燥に時間・コストを要し，乾燥の仕上がりのぼらつきの原因にもなる。したがって，スギを長期間育成して化粧性の高い赤心の良質材を生産することを施業目標とする場合，黒心は価格差のない小・中径木のうちに選択的に間伐・利用し，主伐時に赤心材を収穫することは林業経営上の意義がある。

スギ心材の含水率と材色には関連があることが知られており，心材は含水率が高くなるにつれ， $L^*a^*b^*$ 表色系の明度 L^* が低くなり黒色を帯びることが報告されている（農林水産省農林水産技術会議事務局，1997；森川ら，1996；藤原・岩神，1989；松山，1976）。したがって，立木状態で心材含水率が推定できれば，推定した心材含水率から心材色を非破壊的に推定することが可能と考えられる。この原理に基づいた心材色の非破壊診断法として，電気伝導率，超音波伝播速度あるいは γ 線透過率を用いた手法が検討されている（農林水産省農林水産技術会議事務局，1997）。しかし，これら手法は測定に際して幹に傷を付ける，計測が長時間，精度が不十分あるいは計測機器が高額といった問題点から実用化には課題が残っている。これに対して横打撃共振法は簡易な心材含水率の推定法である（釜口ら，2000；釜口ら，2001）。そこで，1）本法によって心材含水率の推定が可能である，2）心材含水率が高くなるにつれ心材の明度 L^* は低下し黒色化する—という前提に基づけば，本法によってスギ立木の心材色を推定できる可能性がある。しかし，本法による心材色の推定が試みられた例はない。そこで，本研究では島根県内のスギ7林分において横打撃共振法による計測と伐採調査を行い，本法によってスギ立木の心材の明度 L^* を推定できるか検討した。そして，実際の施業において本法を用いて心材色を推定する実用上の意義について考察した。

2. 試験方法

2.1 横打撃共振法による測定

2008年1～2月および2012年6月、島根県内の樹齢33～56年生のスギ7林分を調査林分として設定した (Table 2)。調査木の胸高直径は12.1～69.5 cmで、平均28.3 cmであった。各調査林分において100本 (以下、測定木と呼ぶ。) を設定し、横打撃共振法による測定をつぎのようにして行った。調査木の地上高1.2mで樹幹の直径 D を計測し、同地上高で樹幹を木製ハンマーで打撃した。ハンマーは市販の小型木製ハンマー ((有) 堂内製, 頭部径: 4 cm, 重量: 180g, カシ類製) を使用した。この時の樹幹の振動を同地上高で加速度センサー (小野測器製 DP-4120) を用いて検出し、横打撃共振周波数をFFTアナライザー (同社製, CF-1200) によって読み取った。FFT (高速フーリエ変換) の解析条件はサンプル数: 256, 周波数レンジ1～2000Hz, 分解能: 20Hz に設定した。打撃方向とセンサーの位置は樹幹に対して互いに90° とした。

2.2 心材の含水率と材色

2008年3～4月および2012年6月、各調査林分において測定木のうち無作為に選抜した8～15本, 計74本 (以下、伐採木と呼ぶ。) を伐倒した。伐倒後、本法によって測定した地上高の1.2mで、厚さ5cmの円板を採取し、島根県中山間地域研究センターに持ち帰った。円板は計測時を除いてポリエチレン製の袋に密封し、冷暗所に保管して乾燥を防止した。なお、円板の木口面を観察したところ、被圧による枯死、スギカミキリの加害あるいは木部の腐朽が生じた円板が4個あり、これら円板を採取した木は調査対象の伐採木から除外した。

各円板について心材含水率と心材色を測定した。測定は円板の採取1週間以内に行った。円板から髄を含むようにして長径方向に幅2cm, 厚さ5cmのストリップを採取した。このストリップを心材と辺材に分割したのち、長さ2cm間隔で切断して円板断面方向に対して2 (幅) × 5 (厚さ) × 2 (長さ) cmの材片を採取した。各材片を105℃で48時間、乾燥したのち各材片の生材含水率を全乾法により算出した。各円板の心材の材片の平均含水率を算出し、これを各伐採木の心材含水率 M_c とした。

心材色はつぎの方法によって評価した。乾燥後の心材部各材片の1柁目面に対して分光式色彩計 (Spectro Color Meter SE-2000, 日本電色) を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系の各値 L^* , a^* , b^* を測定した。測定は1材片あたり3か所行い、その平均値を各材片の値とした。心材色は明度 L^* のほか、色相 b^*/a^* , 彩度 $(a^{*2}+b^{*2})^{0.5}$ についても算出した。

3. 結果

全測定木と全伐採木の DF_r は13.8～37.0cm・kHz, 14.3～34.2cm・kHz に及んだ。

測定木と伐採木の平均 DF_r は林分によって有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$) (Table 2)。全測定木と全伐採木の両者において樹幹直径 D と DF_r に負の相関がそれぞれ認められた ($r = -0.34$, $p < 0.01$; $r = -0.42$, $p < 0.01$)。

Table 2. Measurement values of sample trees in each stand.

Stands studied	Location	Tree age	DBH	Trees measured ^{a)}		Trees cutted		
				Average DF_r	r^d	n	Average DF_r	r^d
Misato1	Chihara, Misato-cho	35	16.6-47.5 (26.5) ^{b)}	30.2a ^{c)}	-0.67**	8	32.3a ^{c)}	-0.64
Misato2	Kami-kawado, Misato-cho	33	12.1-28.6 (19.5)	27.8b	-0.11	14	29.0b	-0.49*
Misato3	Yukakae, Misato-cho	33	14.0-35.4 (22.6)	27.9b	-0.25**	11	27.4b	-0.28
kawamoto1	Inbara, Kawamoto-cho	43	14.7-48.6 (28.5)	27.1c	-0.32**	14	28.0b	-0.59*
kawamoto2	Inbara, Kawamoto-cho	43	16.1-56.9 (30.3)	25.9d	-0.29**	8	27.1b	-0.30
Oda	Yamaguchi-cho, Oda city	43	18.0-53.5 (32.3)	28.1b	-0.21*	10	30.0ab	-0.63
Iinan	Shimokizima, Iinan-cho	56	22.4-69.5 (38.5)	24.0e	-0.05	9	23.4c	-0.35
Total			12.1-69.5 (28.3)	27.3	-0.34***	74	28.2	-0.42***

^{a)}One hundred trees were measured in each stand.

^{b)}Average diameter at breast height.

^{c)}Values with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ by Tukey's test.

^{d)}Coefficient of correlation between D and DF_r . *Significant at $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Fig. 8 に全測定木と全伐採木の樹幹直径 D と DF_r の分布を示す。全伐採木における D と DF_r の回帰直線は $y = -0.20x + 32.9$ ($r = -0.42$, $p < 0.01$) であり, D が大きくなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。また, 各林分の林齢と平均 DF_r の回帰直線は全測定木で $y = -0.19x + 35.2$ ($r = -0.81$, $p < 0.05$), 全伐採木で $y = -0.24x + 37.9$ ($r = -0.69$, $p > 0.05$) であり, 林齢が高くなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。

既往の報告では, 心材含水率の指標として $1/(DF_r)^2$ あるいは $1/DF_r$ が用いられている (釜口ら, 2000; 仲田・田村, 2006; 井城ら 2010)。前述したように DF_r も指標とすることができ, これら 3 つの指標は同義である。これらの指標は, 心材含水率などの材質が変化しなければ, 直径 D の大きさに依らず一定であることを前提としている。しかし, 本調査結果では D が大きくなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。 D と心材含水率 M_c には相関が認められなかったことから ($r = 0.11$, $p > 0.05$), 直径 D が大きくなるにつれ, M_c 以外のなんらかの材質が変化して, DF_r が低下したものと考えられる。このため, DF_r を指標とすれば, D に伴う DF_r の低下を考慮でき

ず、 M_c の推定誤差が大きくなる。そこで、この D と DF_r の関係を考慮するため、Fig. 7の回帰直線を基準にして各伐採木の DF_r の増減率 $R(\%)$ を次式によって算出し、 M_c を推定する指標とした。そして、 R を M_c および心材色の明度、色相、彩度と比較した。

$$R = \frac{DF_r - (-0.20D + 32.9)}{-0.20D + 32.9} \times 100(\%) \quad (2)$$

DF_r の増減率 R と心材含水率 M_c に負の相関が認められた ($r = -0.71, p < 0.01$) (Fig. 9)。 M_c と明度 L^* に負の相関が認められた ($r = -0.70, p < 0.01$) (Fig. 10)。 M_c と彩度 $(a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$ にやや低い負の相関が認められた ($r = 0.54, p < 0.01$)。 M_c と色相 b/a に相関は認められなかった ($r = 0.18$)。そして、Fig. 11に示すように、 R と L^* にやや低い正の相関が認められた ($r = 0.53, p < 0.01$)。

DF_r の増減率 R の階級別の心材含水率 M_c の出現割合を示す (Fig. 12)。4つ以上の R の階級で M_c を区分した場合には、階級間で M_c に有意な差のない組み合わせがあったことから、3つの階級に区分した。その結果、 R が $-50\% \sim -5\%$ の階級では M_c が $100 \sim 241\%$ と高い個体が約7割を占めたが、 $-5 \sim 5\%$ と $5 \sim 30\%$ の階級では M_c が $52 \sim 100\%$ と低い個体が7, 9割を占めた。 R の各階級の平均 M_c は階級が上がるにつれ、高くなる傾向で、各階級には有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$)。

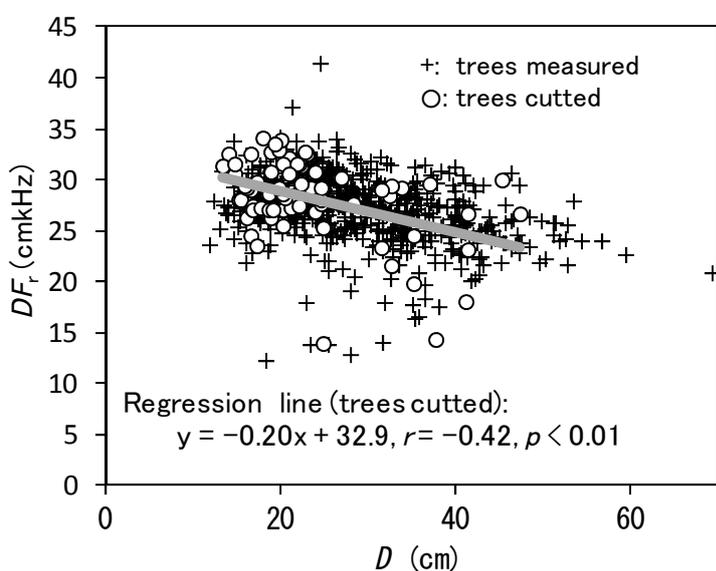


Fig. 8. Distribution of DF_r in trees measured and trees cut .

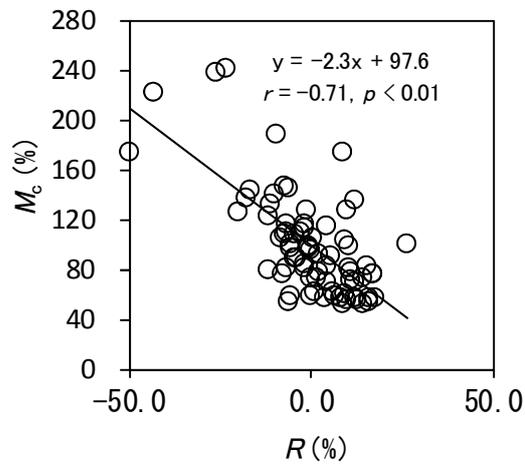


Fig. 9. Relationship between rate R of increase or decrease in DF_r and heartwood moisture content M_c .

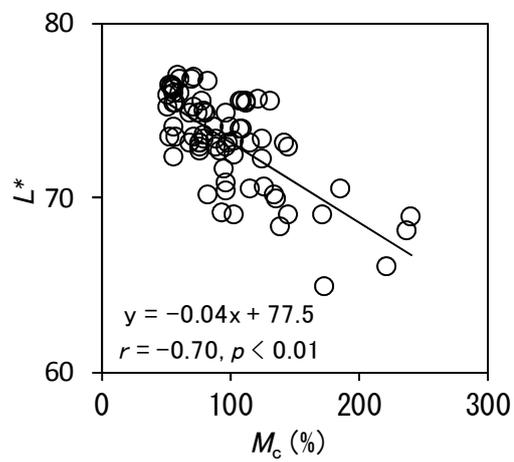


Fig. 10. Relationship between heartwood moisture content M_c and heartwood brightness L^* .

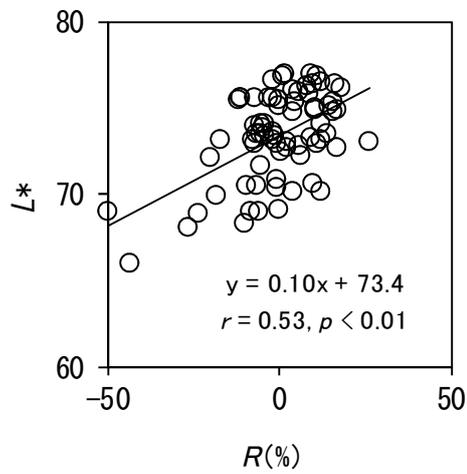


Fig. 11. Relationship between rate R of increase or decrease in DF_r and heartwood brightness L^* .

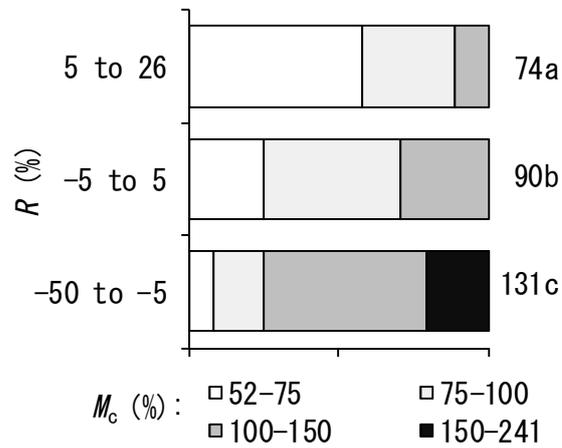


Fig. 12. Appearance proportion of heartwood moisture content M_c in each class of the rate R of increase or decrease in DF_r . Right panels indicate average M_c in each class of R ; different letters indicate significant differences (Tukey's test, $p < 0.05$).

DF_r の増減率 R の階級別の L^* の出現割合を示す (Fig. 13)。4 つの以上の R の階級で L^* を区分した場合には、階級間で L^* に有意な差のない組み合わせがあったことから、3 つの階級に区分した。その結果、 $-50 \sim -5\%$ の階級では明度 L^* が 66~70 と低い個体が約 3 割と多く、ほかの 2 つの階級では 65~70 の個体はないか、僅かであった。明度 L^* が 75~75 の個体は R の階級が上がるにつれ多くなる傾向であった。 R の各階級の平均 L^* は階級が上がるにつれ、高くなる傾向で、各階級には有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$)。

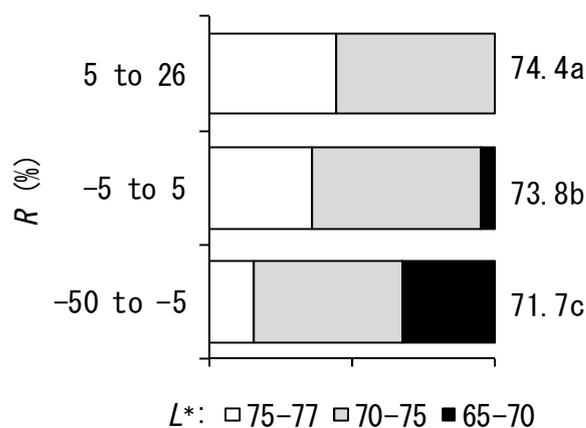


Fig. 13. Appearance proportion of heartwood brightness L^* in each class of the rate R of increase or decrease in DF_r .

Right panels indicate average L^* in each class of R ; different letters indicate significant differences (Tukey's test, $p < 0.05$).

4. 考 察

伐採木の DF_r の増減率 R と心材含水率 M_c には負の相関 ($r = 0.71$) が、 M_c と明度 L^* には負の相関 ($r = 0.70$) があることが確認された。そして、 R と L^* には正の相関 ($r = 0.54$) が認められた。 R と L^* の相関係数はあまり高くなく、 L^* の値そのものを推定するには誤差が大きいと考えられる。しかし、 R の値を 3 階級に分けると、 R の低い階級では L^* の低い個体の出現率が高かったのに対し、 R の高い階級では L^* の高い個体の出現率が高くなる傾向であった。また、 R の各階級の平均 L^* には有意な差があった。したがって、 DF_r の増減率 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は可能であると考えられた。

樹幹直径 D 、林齢と DF_r に負の相関が認められたが、これは樹幹の直径成長と林齢に伴って DF_r が低下すること意味している。このため、本研究では心材含水率を推定する指標として DF_r の値そのものではなく、 DF_r の増減率 R を採用した。しかし、既往の報告（釜口ら，2000；釜口ら，2001；中田・田村，2006）では D に伴って DF_r が低下する傾向は確認されていない。この原因としては、本研究の調査木の D は 30 cm 以上（樹齢：33～56 年生）が約 4 割を占めたのに対し、既往の報告（釜口ら，2000；釜口ら，2001；中田・田村，2006）ではほとんどの調査木が 30 cm 未満（樹齢：20～30 年生）と小さかったためと考えられる。

直径成長と林齢に伴って DF_r が低下することが示されたが、これは式 (1) から考えると、直径成長と林齢に伴って樹幹横断面方向のヤング率と見かけの密度の比 E/ρ が低下したものと考えられる。直径成長と林齢に伴う材質の変化を見かけの密度とヤング率に分けて考えてみる。見かけの密度についてであるが、直径成長と林齢に伴って辺材より含水率の低い心材の割合が増える。このため、この直径成長に伴う見かけの密度の変化は DF_r を高くする方向に働き、 DF_r を低下させる要因になっているとは考えられない。つぎにヤング率についてである。樹幹断面方向のヤング率には放射方向と接線方向のヤング率が主として関与するものと考えられる。放射方向と接線方向のヤング率は仮道管二次膜中層のマイクロフィブリル傾斜角 (MFA) が大きくなるにつれ、高くなることが報告されている (Qing, H., Mishnaevsky Jr., L., 2010)。また、MFA は髄で最大で外方へ向かうにつれ小さくなることが知られている (渡部, 1967)。したがって、直径が小さいうちは MFA が大きく樹幹断面方向のヤング率が高いが、直径成長と林齢に伴って MFA が小さくなり同方向のヤング率が低下し、その結果 DF_r が低下することが考えられる。ただし、樹幹の成長や樹齢に伴って DF_r が低下する原因については今後の詳細な検討が必要である。

本法を用いればスギ林を間伐する場合に、材色を考慮した選木が可能となる。さらに、冒頭で述べたように、心材含水率や腐朽・空洞の発生の有無も同時に診断することが可能である。ただし、林分の立木本数が多い場合は計測には相応の労力がかかる。人工林の施業方法のうち、主伐木をあらかじめ決定し、これを長期に育成したのち収穫する施業がある (藤森, 2013)。この施業では、主伐木は最終的な大きな収入になるため、その選木には細心の注意を払う必要がある。外観から形質の良いものを見つけたのち、本法によって樹幹内部の黒心などの材色を含む材質を判定した上で主伐木を決定することは林業経営上、意義があると考えられる。

5. まとめ

横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定が可能であるか、次の前提に基づいて検討した。1) 樹幹直径 D と打撃された樹幹の振動の共振周波数 F_r の積 DF_r が低くなるにつれ心材含水率 M_c は高くなる、2) M_c が高くなるにつれ心材

の明度 L^* は低くなる。3) したがって、 DF_r が低くなるにつれ心材の明度 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。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 ($r = 0.71$) および M_c と L^* ($r = 0.70$) 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った。そして、間伐施業において本法による心材色を推定する意義について考察した。

第Ⅲ章

横打撃共振法によるヒノキ根株心材腐朽病の非破壊診断

1. はじめに

林木の材質を侵す材質腐朽病は発病の有無と腐朽の程度を外観から診断することは困難である。このため、間伐や主伐によって林木を伐倒した際にはじめて被害に気付くことが多い。腐朽した材は著しく軟化しているため、収穫した丸太に腐朽が発生していると、その丸太は歩留まりが低下する、あるいは建築用材としては使えなくなる。近年、スギ・ヒノキ林では長伐期施業に移行する傾向があるが、長年育成しても本病による腐朽が拡大していれば、その損失は大きい。なかでも、根株心材腐朽病はもっとも材積が大きい1番玉に腐朽が現れるため、その被害が問題視されている。島根県のスギ・ヒノキ林では、被害率が20~40%の激害林もあることを報告されている(陶山ら, 2002)。

根株心材腐朽病の侵入門戸は根株や太根にできた傷、あるいは地下水位変動などによる根の枯死部である(伊藤, 1974)。これら侵入門戸の発生を人為的に防ぐことは困難であるため、本病を直接的に防除することはきわめて難しい。したがって、本病の被害を回避するには、被害木をなんらかの方法で早期に発見して、間伐することが最善策と考える。

横打撃共振法では診断する木の DF_r が健全木の値より低い場合に被害木と判定するが、健全木の測定値はある一定の範囲に分布すると考えられる。この範囲が広い場合、推定した腐朽面積の誤差も大きくなり、腐朽がわずかな被害木では被害を検出できなくなる。このため、本法の実用化を考えた場合、健全木の測定値の範囲を把握しておくことは不可欠と考える。

また、本法を用いた腐朽病診断に関する既往の報告(釜口ら, 2001b; 小玉ら, 1999)では、測定値と外観から判定した被害程度の比較に留まっており、実際に伐採して測定値が樹幹内部の腐朽発生を正しく捉えているか確認されていない。

そこで、ヒノキ根株心材腐朽病を対象にしてつぎの試験を行った。1) 健全木の測定値の分布を検討するため、島根県内のヒノキ16林分において約1500本を測定した。そして、検定林1林分を含む計4林分において約120本を伐倒して、材質劣化の有無を調査し、健全木の測定値の範囲を確認した。また、心材率や測定する樹幹の高さが測定値に与える影響を検討した。2) 空洞や腐朽の大きさが DF_r に及ぼす影響を明らかにするため、人工的に作製した空洞円板と被害木から作製した腐朽円板を用いて、円板の空洞・腐朽面積率と測定値との関係を検討した。

2. 試験方法

2.1 測定林分

2004年8月～2008年4月、島根県東部の樹齢27～68年生のヒノキ15林分(以下、15林分と呼ぶ。)と出雲市内の27年生の西島根37号精英樹ヒノキ次代検定林において(Table 3)、横打撃共振法による測定を行った。15林分において、小面積の林分では27～35本、大面積の林分では70～165本、計1391本を測定した。検定林は15家系が3区に反復されて植栽されており、このうち2区で測定した。1区につき各家系3本の計45本、2区で計90本を測定した。

測定は地上高1.2mで行なった。ただし、15林分のうち3林分(宍道、下来島-1および小田-3)では地上高0.5mでも測定を行い、地上高0.5mと1.2mで測定値を比較した。

Table 3. Stands studied

Stands studied	Ages of stands	The number of stands	Site ^{a)}	Altitude (m)	Investigation year	Investigation content
Shinzi	32	25	Shinzi-cho, Matsue City	30	2004	A ⁺
Ottachi	64	120	Ottachi-cho, Izumo City	180	2006	A
Kamikizima	30	35	Kamikizima, Inan-cho	350	2006	A
Shimokizima1	33	25	Shimokizima, Inan-cho	420	2004	A ⁺
Shimokizima2	37	80	Shimokizima, Inan-cho	420	2006	A
Shimokizima3	68	126	Shimokizima, Inan-cho	420	2006	A
Shimokizima4	27	110	Shimokizima, Inan-cho	610	2006	A
Oda1	46	25	Oda, Inan-cho	560	2004	A
Oda2	47	165	Oda, Inan-cho	740	2006	A
Oda3	61	100	Oda, Inan-cho	580	2004	A ⁺ BE
Oda4	63	90	Oda, Inan-cho	590	2006	A
Oda5	63	70	Oda, Inan-cho	620	2006	A
Yukakae	33	130	Yukakae, Misato-cho	150	2008	A
Chihara	35	100	Chihara, Misato-cho	200	2008	ABC
Yamaguchi	43	100	Yamaguchi-cho, Oda City	320	2008	ABC
test stand	27	90	Funazu-cho, Izumo City	30	2008	ABD

^{a)} All site is in Shimane prefecture.

A: Measured at 1.2m above the ground, A⁺: Also measured at 0.5m above the ground, B: Wood quality deterioration, C: Rate of heart wood, D: Moisture content, E: DF_r of decay disks.

2.2 横打撃共振法による測定

横打撃共振法による測定は次のようにして行った。まず、地上高1.2mあるいは0.5mにおいて樹幹直径 D を計測した。そして、同じ高さでFFTアナライザー(CF-1200, 小野測器, 神奈川)に接続した加速度センサー(NP-4110, 小野測器, 神奈川)を樹幹に押し当てながら、木製ハンマー(重量:180g, 長さ:30cm,

頭部径：4 cm) を用いて樹幹を打撃した。この時の樹幹の振動の周波数スペクトルが FFT アナライザーの画面上に瞬時に表示された。この画面上の周波数スペクトルには通常、複数の共振周波数が出現したが、このうち 1 次ピーク（最も低い共振周波数）を診断の指標とする横打撃共振周波数 F_r として記録した。横打撃共振周波数 F_r はほとんどの場合 1 回の打撃で計測できたが、1 次ピークが明瞭に出現しない場合があった。この場合は打撃位置を水平方向に変えて明瞭なピークが出現するまで数回計測した。

FFT（高速フーリエ変換）の解析条件はサンプル数を 256 個、周波数レンジは通常 2 kHz に設定したが（この場合、周波数分解能：20Hz）、樹幹直径が約 20cm 以下の木では共振周波数が 2 kHz を超える場合があり、周波数レンジは 5 kHz に設定した（周波数分解能：50Hz）。

2.3 3 林分での材質調査

15 林分のうち小田 - 3，千原および山口の 3 林分（以下、3 林分と呼ぶ。）において測定木を伐倒して材質劣化の有無を調査した。各林分においてそれぞれ 10, 11 および 10 本の計 31 本を伐倒し、測定した高さで厚さ 10cm の円板を採取した。これら円板の断面上において材部の腐朽・変色、スギカミキリの加害およびヒノキ漏脂病による材質の劣化の有無を調査した。これらの材質の劣化を認めなかったものを健全木とし、その DF_r の範囲を明らかにした。なお、小田 - 3 では根株心材腐朽病の被害木の本数が多かったため、本病の病原菌についても調査した。

千原と山口の健全木であった円板について、材部の直径に対する心材部の直径の割合を心材率（%）として次式によって算出し、心材率と DF_r の関係を検討した。

$$\text{心材率} = (\text{心材直径} / \text{材部直径}) \times 100 (\%)$$

ただし、材部直径：円板の長径方向でみた材部の直径、心材直径：同直径上の心材部の長さ。

2.4 検定林の材質調査

検定林では測定した 90 本すべてを伐倒し、測定した地上高 1.2m で厚さ 10cm の円板を採取した。これら円板断面上において、前項と同様の方法で材質劣化の有無を調査し、健全木の DF_r の範囲を明らかにした。

このうち 15 本の円板については材部の含水率を調査した。まず、円板の長径方向で材部を幅 2 cm に切断した。これを年輪に沿って辺材、白線帯および心材に分けた。辺材と心材の材片は、さらに年輪に沿ってそれぞれの部位を約 2 cm の長さに適宜分割した。各材片の含水率 u （%）は次式によって算出した。

$$\text{含水率 } u = (m - m_0) / m_0 \times 100 (\%)$$

ただし、 m : 乾燥前の質量、 m_0 : 105°C、48 時間で乾燥させた質量。

2.5 人工空洞円板の作製と測定

島根県飯南町の34年生ヒノキ1林分において、樹幹が通直で断面がほぼ正円の健全木3本を選定し伐倒した。1本につき地上高1.0~1.5mの範囲で、節など欠点を含まないようにして、厚さ10cmの円板1個を採取した。作製した計3個の円板の直径は20~25cmであった。円板は乾燥防止のため切削・測定時以外はポリエチレン製の袋に密封し、また共振周波数の測定は伐採後2日後までに行った。まず、3個の円板の共振周波数 F_r を無空洞で、樹皮の付いた状態で測定した。円板を軽く手で押さえ、側面を木製ハンマーで軽く打撃し、その反対の側面にセンサーを押し当てて F_r を計測した。つぎに、円板の断面中心に円形、直径10mmの空洞を切削し、 F_r を測定した。そして、空洞直径を同心円状に順次大きくし、空洞直径ごとに F_r を測定した。空洞直径は10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 および 150mmとし、これは円板材部の断面積に対して面積率0.2~56%の空洞であった。各空洞円板の DF_r 値の減少率(%)を無空洞円板の DF_r に対する比率として次式によって算出した。

$$DF_r \text{の減少率} = (I_N - I_F) / I_N \times 100 (\%)$$

ただし、 I_N ：無空洞円板の DF_r 、 I_F ：空洞円板の DF_r 。

そして、円板の材部における空洞面積率と DF_r の関係を検討した。

2.6 腐朽円板の作製と測定

小田-3で腐朽の発生を認めた3本(No. 25, 44, 45)を林内で1m間隔に玉切り、腐朽が到達した範囲の丸太を当センターに持ち帰った。これら3本の丸太は速やかに10cm間隔で玉切り、厚さ約10cmの円板に加工した。被害木1本あたり12~26個、計65個の腐朽円板を作製した。腐朽円板の中には腐朽部が脱落して空洞化した場合もあった。円板は前項と同様に乾燥防止の処置を行い、伐採後7日後までに測定した。各腐朽円板の直径 D と共振周波数 F_r を樹皮の付いた状態で前項と同様に計測し、 DF_r を算出した。円板材部と腐朽部の外周をトレースし、円板材部と腐朽部の面積を計測して、円板断面に占める腐朽面積率(%)を算出した。各腐朽円板の DF_r の減少率(%)を健全部円板の DF_r に対する比率として次式によって算出した。

$$DF_r \text{減少率} = (I_S - I_D) / I_S \times 100 (\%)$$

ただし、 I_S ：健全部円板の DF_r 、 I_D ：腐朽円板の DF_r 。

健全部円板は同じ被害木で腐朽が到達していない最初の円板を用いた。そして、腐朽円板の DF_r 減少率と腐朽面積率の関係を検討した。なお、3本のうち1本(No. 45)については円板の断面に対する健全部面積率を算出して、 DF_r 減少率との比較を行なった。

3. 結果

3.1 15 林分の測定

Fig. 14 に 15 林分の計 1391 本の, 地上高 1.2m で測定した DF_r の分布を示す。測定木の DF_r は 13.2~43.2 cm・kHz と広範に及んだが, 全個体の 96% は 27~40 cmkHz の範囲で帯状に分布した。一方, この帯状の分布より上にプロットされた個体が約 1%, 帯状の分布より明らかに下にプロットされた個体が約 3% あった。

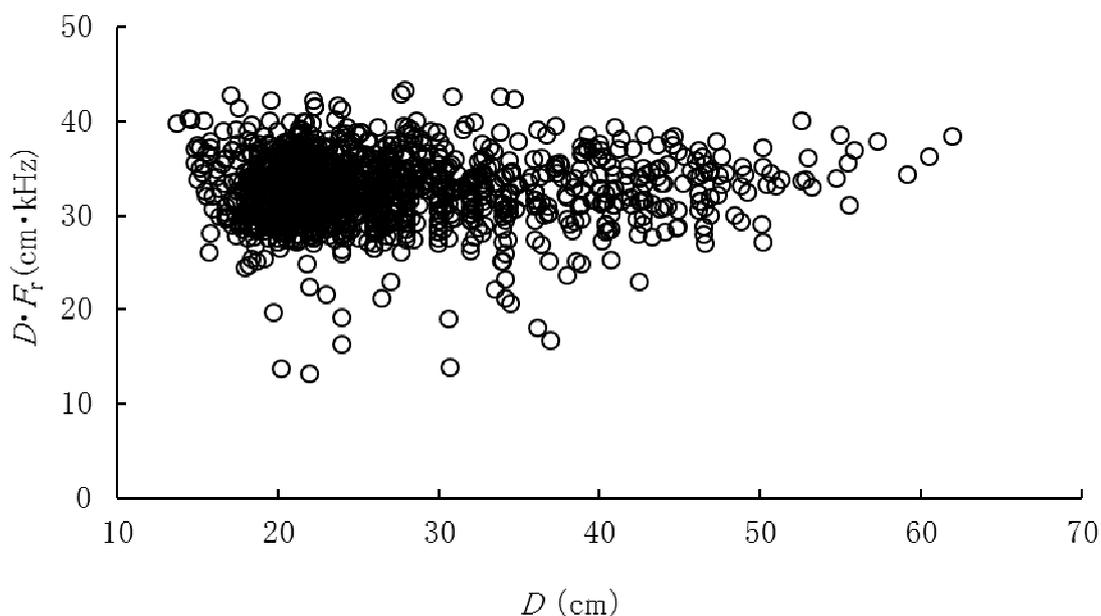


Fig. 14. Distribution of DF_r of trees studied (measured at 1.2m height).

Fig. 15 に林分別の DF_r の分布を示す。各林分の平均 DF_r は 29.2~34.8 cmkHz と林分によって差があり (Kruskal-Wallis 検定, $p \leq 0.001$), DF_r の分布の幅は 9~26 cmkHz と広がった。

地上高 0.5m と 1.2m とを比較すると, 前者が DF_r の分散が大きく (F 検定, $p < 0.01$), 平均値が約 3 cmkHz と高かった (t 検定, $p < 0.001$) (Fig. 16)。

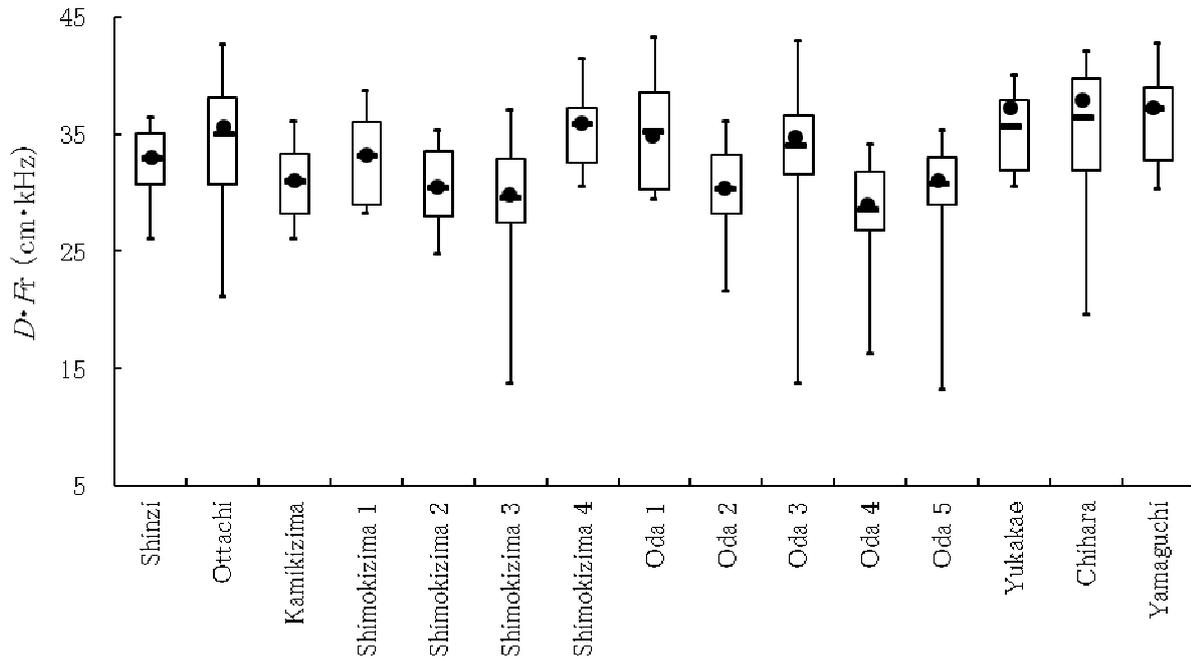


Fig. 15. Distribution of DF_r in 15 stands.

⊥ : minimum value, ⊤ : maximum value, □ : 10-90 percentail, ● : average, - : average of 10-90 percentail.

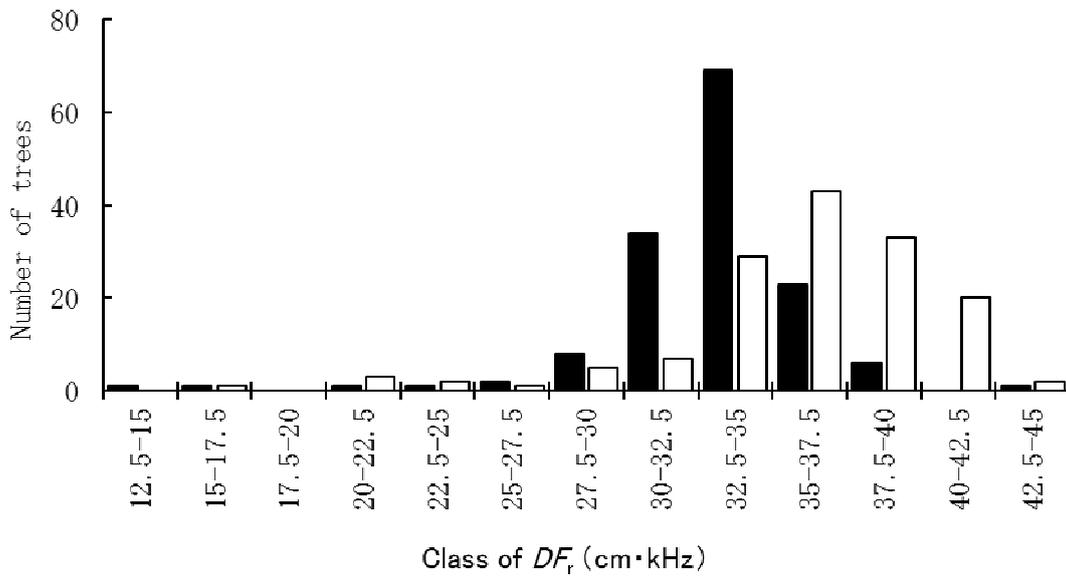


Fig. 16. Frequent distribution of DF_r .

□ : 1.2m height, ■ : 0.5m height. Average in 1.2m : 33.1cmkHz, Average in 0.5m : 35.9cmkHz, Variance in 1.2 m : $12.4(\text{cm} \cdot \text{kHz})^2$, Variance in 0.5m : $20.2(\text{cm} \cdot \text{kHz})^2$.

3.2 3 林分の材質調査

小田 - 3, 千原および山口で計 31 本の測定値と材質を比較した (Fig. 17)。小田 - 3 において地上高 1.2m で健全木 7 本の DF_r は 29.7~37.1 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ であった。腐朽の発生を認めた 3 本は 13.8~32.6 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ で、このうち No. 44 は 32.6 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ で健全木の範囲に含まれたが、腐朽面積率は 1.0% と低かった。地上高 0.5m では健全木 6 本の DF_r は 32.3~42.2 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ であった。これに対して、腐朽の発生を認めた 4 本は 16.8~29.8 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ と低かった。4 本の腐朽面積率は 1.2~26.7% で、 DF_r が低い木ほど腐朽面積率が大きくなる傾向があった。健全木 6 本の DF_r は地上高 0.5m と 1.2m で差があり (t 検定, $p < 0.01$) , 前者のほうが高かった。

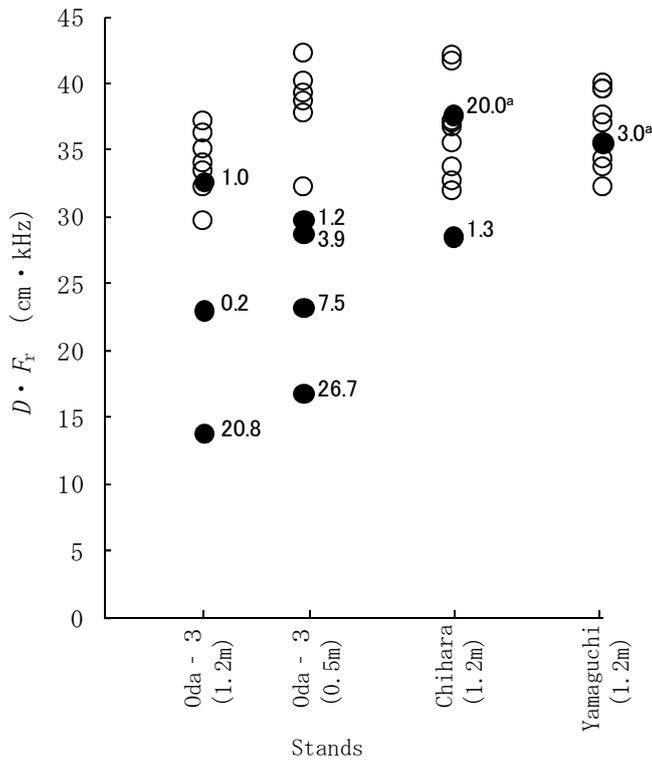


Fig. 17. DF_r of trees cut in three stands.

○ : healthy trees, ● : decayed trees. The numbers next to the black circles indicate decay area rates (%). ^a decay caused by fungal disease.

千原と山口では、 DF_r が 32.0~42.1 cm・kHz の 18 本では、腐朽など材質的な欠陥は認めなかった。腐朽は 28.5~37.6 cm・kHz の 3 本で発生していた。うち 2 本の DF_r は 37.6 と 35.5 cm・kHz で相対的に低くはなかった。この 2 本は漏脂病による被害木であり、幹が扁平し不整形に腐朽が拡大していた。

小田 - 3 の被害木 4 本のうち 3 本では腐朽は地際から地上高 0.6~1.5m まで到達していたが、1 本では 3.0m までと広範に伸長していた。被害木 4 本の腐朽部はいずれも黄白色、繊維状に軟化し、腐朽部が脱落して空洞化した場合もあった。被害木の近くの古い伐根にはキンイロアナタケの子実体の発生を確認した（日本大学阿部恭久氏同定）。また、この子実体と被害木の腐朽部から分離した培養菌そうが一致した。このことから、小田 - 3 で発生している腐朽被害の病原菌はキンイロアナタケであると考えられた。

千原と山口で健全木であった 18 本の円板について、心材率と DF_r を比較した (Fig. 18)。心材率は 62~90% であった。千原、山口とも心材率が高くなるにつれ、 DF_r が高くなる傾向があった。

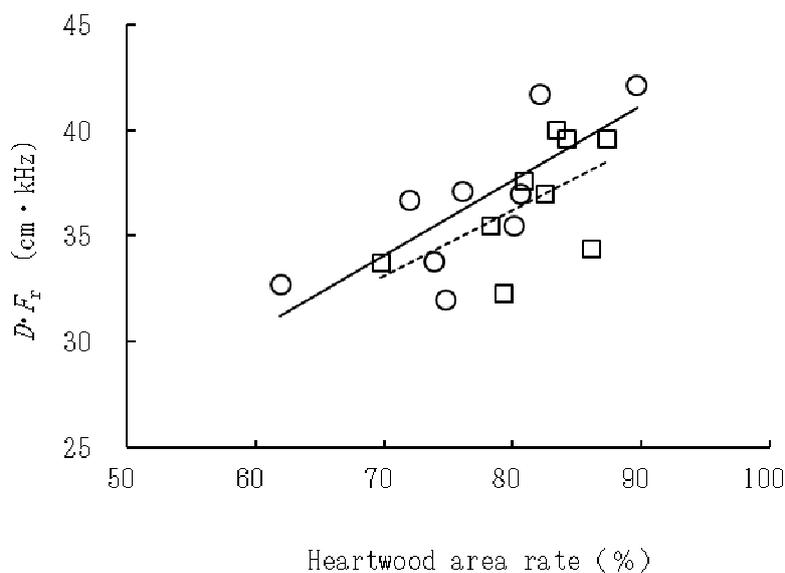


Fig. 18. Relationship between heartwood area rate and DF_r

○: Chihara, □: Yamaguchi.

— : Yamaguchi, $y = 0.36x + 9.13$, $R^2 = 0.59$,

- - - : Chihara, $y = 0.31x + 11.25$, $R^2 = 0.34$.

3.3 検定林の材質調査

Fig. 19 に検定林で測定した 90 本の DF_r の分布を示す。測定木の DF_r は 23.2 ~ 45.7 cmkHz と広範に及んだ。このうち、81 本は材質的な欠陥を認めず、 DF_r は 31.1 ~ 40.8 cmkHz に分布した。健全木の DF_r は系統によって差がある傾向であった。材質の劣化を認めたものはヒノキ漏脂病被害木 5 本、スギカミキリ被害木 2 本の計 7 本であった。また、緑葉は残っていたが、形成層が樹幹の全周にわたって枯死していたものが 2 本あり、これら 2 本は枯死木と判定した。漏脂病罹病木とスギカミキリ被害木は 36.6 ~ 45.7 cm · kHz で健全木より DF_r が高くなる傾向であった。漏脂病罹病木の円板は形成層が部分的に壊死し、この部分から傷害心材が形成されていた。スギカミキリ被害木は穿孔のみで、腐朽は発生していなかった。

検定林の 15 本の円板について含水率を調査した。各円板の辺材の含水率は 152 ~ 223 (%), 白線帯では 63 ~ 136% であった。心材の含水率は 31 ~ 60% で、辺材と比較して著しく低かった。

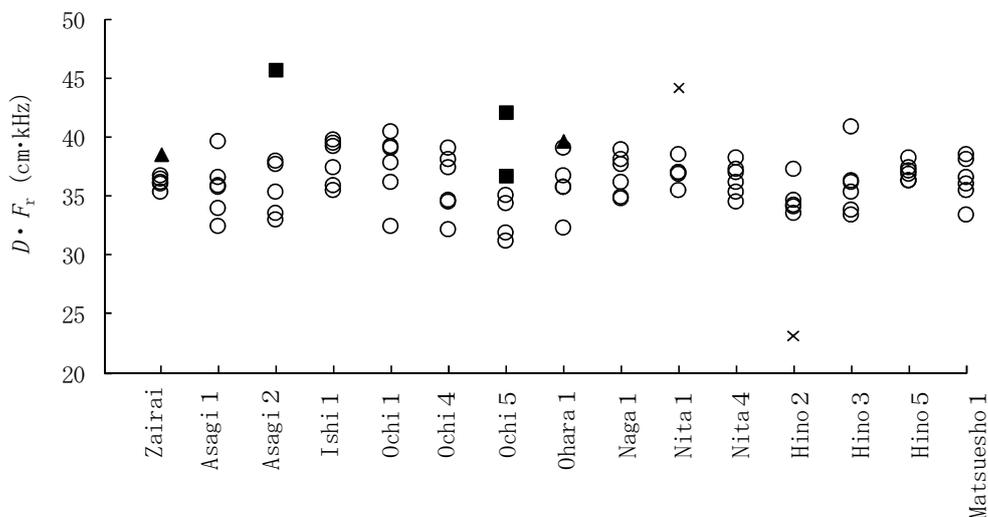


Fig. 19. Distribution of DF_r in a screening test stand.

○: healthy trees, ■: "Rooshi" resinous canker, ▲: *Semantotus japonicas*, ×: dead trees.

3.4 円板の人工空洞・腐朽面積率と測定値

人工空洞円板における空洞面積率と DF_r 減少率の関係を Fig. 20 に示す。円板の空洞面積率が大きくなるにつれ、 DF_r は曲線的に減少する傾向で、両者には高い関連性を認めた。また、空洞面積率が 10% と低率であっても、 DF_r は約 50% と大幅に低下した。

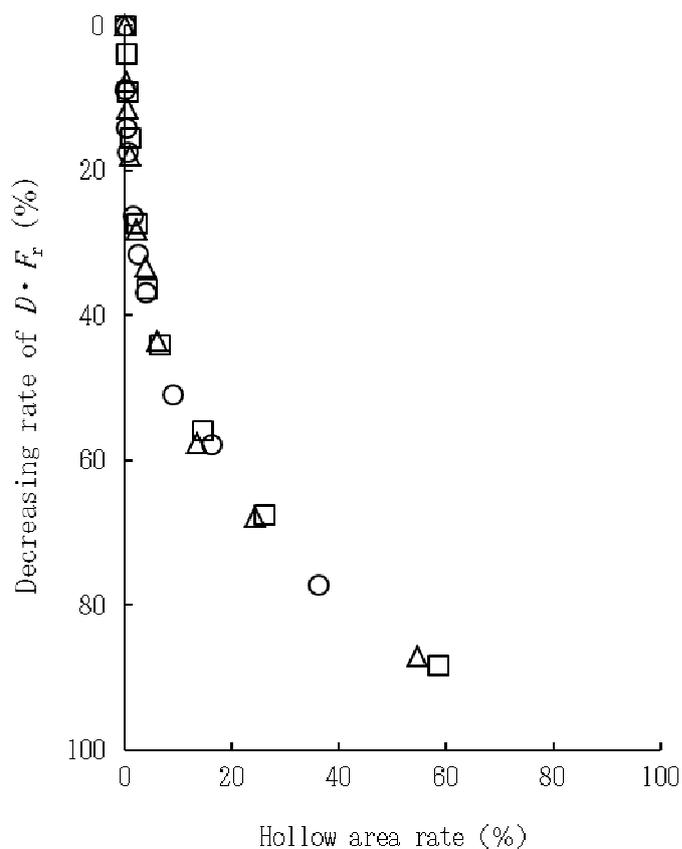


Fig. 20. Relationship between hollow area rates and decreasing rate of DF_r in artificially hollowed disks.

○: No.1, △: No.2, □: No.3

Fig. 21 に小田 - 3 の被害木円板の腐朽面積率と DF_r の減少率との関係を示す。腐朽面積率が高くなるにつれ、 DF_r が低くなる傾向であり、また人工空洞円板の減少傾向と近い位置にプロットされた。ただし、No. 45 の腐朽面積率 7 %

以下の円板では同じ面積の空洞円板の DF_r があまり低下していなかった。腐朽部の形状は腐朽面積率が 13% 以上の場合は、心材のほぼ中心で円形に形成されていた。一方、13% 未満では心材の中心付近に腐朽部が群状に分布していた。

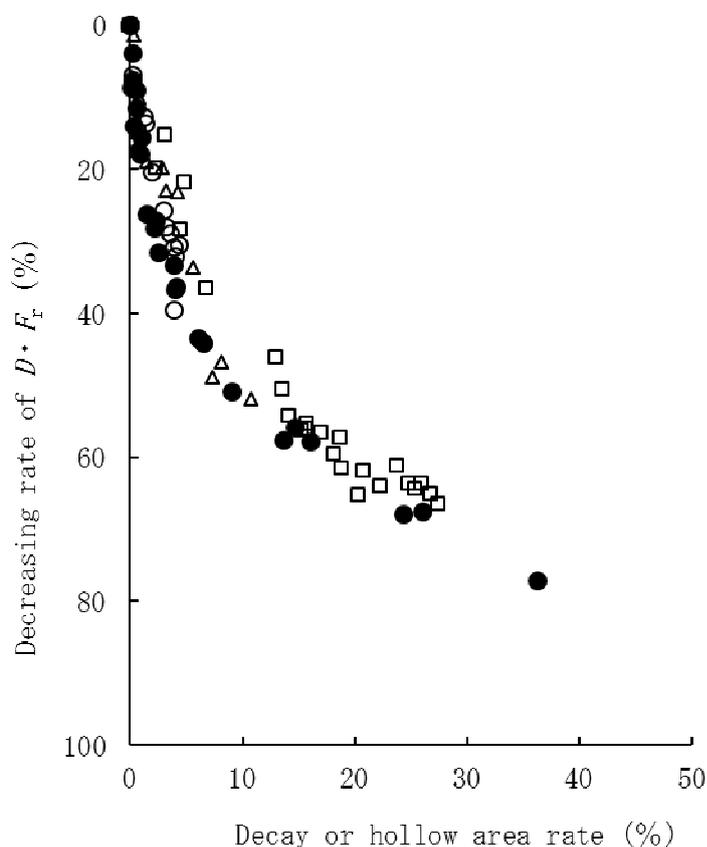


Fig. 21. Relationship between decay or hollow area rates and decreasing area rates of DF_r in artificially hollowed disks and naturally decayed disks.

○: Naturally decayed tree No.25, △: No.44, □:No.45.
●: Artificially hollowed disk (No.1-3)

Fig. 22 に被害木 No. 45 (小田 - 3) の地上高別の健全部面積率と円板状態で計測した DF_r の変化を示す。腐朽は地際部から地上高 3.0m まで到達していた。健全部面積率は地上高 0.5m で 73% と最も低く、 DF_r は地上高 0.5~1.3m で 11.8~13.2 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ と低かった。両者は地上高の増加に伴って増加する傾向で、それぞれ地上高 3.1m, 2.9m で最大に達した。地上高 3.1m 以上の健全部では、 DF_r は地上高の増加に伴い減少する傾向であった。

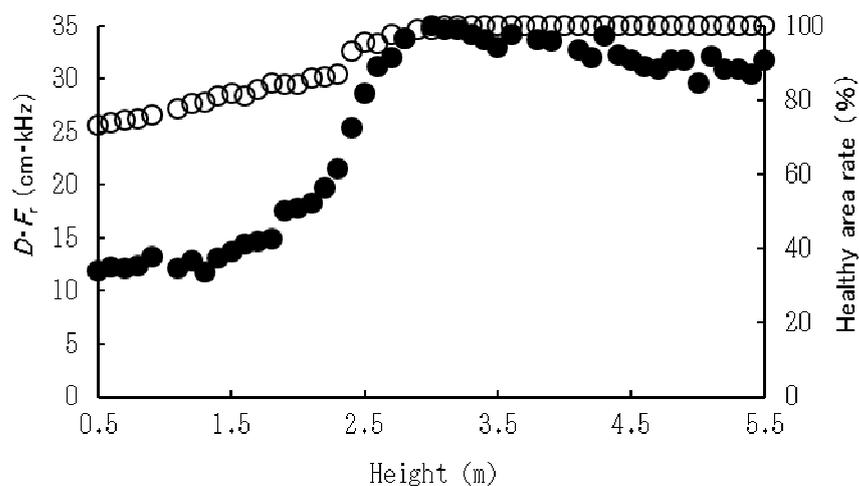


Fig. 22. Transition of healthy wood area (○)and DFr (●)depending on heights.
No. 45 tree studied of Oda3 stand.

4. 考察

4.1 DF_r の分布範囲

横打撃共振法によって地上高 1.2m で測定した DF_r は、15 林分と次代検定林の結果をあわせると 13.2~45.7cm・kHz と広範に分布した。また、15 林分では DF_r の分布が林分間で差があった。これは林分間で、健全木の DF_r に差があること（後述）と、腐朽の被害程度に差があることが原因と考えられる。

これに対して、3 林分と検定林の計 4 か所において地上高 1.2m で横打撃共振法による測定を行ったのち、伐倒調査を行った結果、健全木 99 本の DF_r は 29.7~42.1cm・kHz に分布することが分かった。健全木の DF_r の範囲を厳密に特定することは困難であるが、ヒノキ健全木の多くはこの範囲内に分布すると推察する。

4.2 健全木の DF_r の林分・個体間での変動要因

検定林において健全木の DF_r は家系間によって差がある傾向があった。また、同一林分や家系でも個体間によってもばらつきが生じた。ヒノキ健全木の DF_r は林分・個体間で変動することを確認した。この原因としてつぎのように考える。

打撃した樹幹の共振周波数は、打撃部付近の横断面方向に発生する伸縮振動の周波数であり（釜口ら，2000），（1）式から樹幹断面方向のヤング率と密

度によって決定される。

1) ヒノキ木部の密度については、品種・系統などによる遺伝的な要因、樹齢や生育条件、間伐や枝打ちなどの保育条件、あるいは樹幹内の場所によっても変動する（岩崎，2002；藤原ら，2004）ことが報告されている。とくに家系による差が大きいことが指摘されている（岩崎，2002）。

ヒノキ心材部の含水率は辺材部より低いことは一般的に知られており（北原，1967），本調査でも心材部の含水率は31～60%で辺材部の152～223%より著しく低かった。また，心材率は62～90%と個体間によってばらつき，心材率が高いと DF_r が高くなることが分かった。心材率は直径成長と関係があると報告されている（井原，1972；藤原・岩神，1988）。含水率の低い心材の割合が大きい場合，密度が低くなるため，この結果 DF_r が高くなるかと推察する。

2) 断面方向のヤング率について家系や生育条件によって比較した例は見あたらないが，繊維方向のヤング率はばらつきが大きく，生育環境や，とくに家系の違いによる差が大きい（池淵・錦織，2000；岩崎，2002）。断面方向のヤング率についても繊維方向と同様に家系，生育条件などによって変動すると推察する。

1)，2) から，共振周波数に關与する密度とヤング率は家系や生育条件によってばらつき，この結果ヒノキ健全木の DF_r は林分間，また個体間によって変動したと考える。

小田 - 3 の健全木 6 本では地上高 0.5m のほうが 1.2m より DF_r が高かった（Fig. 17）。また，円板状態で健全木の DF_r は地上高の増加に伴って低下する傾向であった（Fig. 22）。なお，ヒノキ健全木の DF_r は立木・円板状態ともに地上高の増加に伴って低下する傾向を確認している（陶山，未発表）。健全木では地上高の増加に伴って DF_r が低下することが示唆された。この原因として地上高の増加に伴って心材率が低くなること，ヤング率に大きな影響を及ぼす繊維傾斜角（則元，1987）が根元付近で大きくなること一が考えられるが，詳細については今後検討する必要がある。

なお，3 林分で地上高 0.5m と 1.2m の DF_r を比較すると 0.5m で高く，ばらつきが大きかった（Fig. 16）。0.5m でばらつきが大きかった原因の 1 つとして，1.2m より測定木の中に根株心材腐朽病の被害木が多く含まれていたためと考える。根株心材腐朽病は根株から被害が発生するため，初期の被害を検出するには地面に近い位置で測定することが望ましい。ただし，この場合，診断の基準となる健全木の DF_r が高くなることを考慮する必要がある。

4.3 円板の人工空洞・腐朽面積率と測定値の関係

人工空洞円板において，空洞面積率が大きくなるにつれ DF_r は曲線的に減少する傾向で，両者には高い関連性を認めた。供試した空洞円板のように円板中

心に円形の空洞が形成された場合、その空洞の情報は共振周波数に正確に反映されることが分かった。なお、空洞面積率と F_r の減少率の関係式については未検討であるが、数学的な手法により導くことができると考える。

腐朽円板においても、腐朽面積率と DF_r との関係はばらつきがあるものの人工空洞円板と概ね同様の傾向であった。また、高さ別の健全部面積率と DF_r の変化はよく対応していた (Fig. 22)。 DF_r は腐朽発生を感度よく捉えていることが円板状態で確認できた。ただし、腐朽円板において腐朽面積率 7% 以下の範囲では、 DF_r と腐朽面積率の関係にはばらつきが目立った。腐朽面積率 13% 以下の円板では腐朽部は心材部に群状に生じている場合が多かった。また、材質調査を行った調査木のうち千原と山口の 2 本 (Fig. 17) では腐朽が生じていたが DF_r は健全木より低くはなかった。両調査木とも漏脂病による被害木であり、形成層の壊死部から腐朽が拡大しており、腐朽部の形状は著しく不整形であった。陶山 (2005) は木口面の中心に円形に空洞が生じている場合と、不整形 (たとえば、木口面の一部に偏る) に空洞が生じている場合で共振周波数を比較し、不整形の空洞の場合には共振周波数が複数生じ、また診断の指標となる 1 次ピークの周波数が前者の場合よりも高くなることを指摘している。したがって、腐朽が群状あるいは不整形に生じていると、共振周波数による腐朽部の推定には誤差が大きくなる可能性がある。

人工空洞円板と腐朽が中心にある円板では空洞面積率が小さい範囲、例えば空洞面積率約 10% でも共振周波数は約 50% と大きく低下していた。これは、釜口ら (2000) が報告しているように、共振周波数が円板断面の周辺部より中心部の影響を受けやすいためと考える。中心部に形成された空洞・腐朽は小面積であっても共振周波数が顕著に減少することは、本法のひとつの特徴といえる。

前述したように、ヒノキ健全木 99 本の DF_r は 30~42 cmkHz であった。 DF_r が元々高い個体では腐朽が発生しても健全木の DF_r の範囲より低下しないと被害木として検出できない。本調査でも小田 - 3 の 1 本 (Fig. 17) は腐朽面積率 1.0%, 32.6 cm・kHz で健全木の範囲に含まれた。仮に、上限の 42cmkHz の個体に腐朽が生じた場合、この個体が被害木として確実に検出できるのは、腐朽部がある面積を超えて拡大して、 DF_r が健全木の下限値の可能性のある 30cmkHz より低下した場合である。空洞円板のデータから試算すると、この個体は腐朽部の面積率が約 3.5% を越えると腐朽木として検出できることになる。

本法は健全木の DF_r が一定の範囲に分布するが、この範囲は狭いとは言い難く診断上の誤差の要因となると考える。一方、腐朽部が小さい範囲でも DF_r が大幅に減少する傾向を確認し、これは被害木を検出する上での利点と言える。今後、立木状態で測定値と腐朽面積を比較する必要がある。

5. おわりに

横打撃共振法は健全木の材質のばらつきに起因する診断誤差があることが分かったが、多くの場合、円板での測定値は根株心材腐朽病による腐朽・空洞の状態を感度よく捉えており、また原理的に測定が簡易かつ短時間で行えるため、実用性の高い診断法のひとつと考える。今後、本調査で行わなかった立木状態での腐朽や空洞が測定値に及ぼす影響を検討する必要がある。また、測定する高さ別に健全木の測定値の範囲を把握しておくことも必要である。これらの課題を検討すれば、測定値から腐朽面積率とその精度を推定できると考える。

6. まとめ

ヒノキ根株心材腐朽病の被害木の検出法として横打撃共振法を試みた。27～68年生のヒノキ16林分において約1500本を測定した結果、 DF_r は地上高1.2mで13～46cmkHzと広範に及んだ。診断の基準となる健全木の DF_r の範囲を検討するため、121本を伐倒し材質を調査した結果、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った。人工空洞・腐朽の大きさと測定値との関係を、立木を玉切って作製した円板を用いて検討したところ、空洞・腐朽面積率の増加につれ DF_r が減少する傾向で、円板上で DF_r は空洞や腐朽の発生を感度よく捉えていることが分かった。

第IV章

横打撃共振法によるクロマツ樹幹内部の腐朽・空洞面積率の推定

1. はじめに

島根県松江市の松江城山公園にはクロマツ (*Pinus thunbergii*) 240 本が生育している。本公園のクロマツは景観上重要な樹木になっており、これらの中には推定樹齢 300 年を超える老木も存在している。しかし近年、本公園のクロマツには樹幹内部の腐朽を原因とする倒木の危険性が問題視されている。2006 年 1 月、同公園内の樹齢約 80 年生と 350 年生のクロマツ 2 本は根元近くの樹幹が折損して倒伏した。折損した樹幹の心材部には 2 本とも、根株からの腐朽が及んでいた。80 年生の 1 本の腐朽は伐根断面で面積の約半分に及び、地上高では約 3 m まで伸長していた。倒伏時には 14cm の積雪があったことから、倒伏した 2 本は腐朽の拡大と冠雪によって樹幹が樹体を支持しきれず折損したと考えられた。この倒木によって史跡の一部である石垣が破損した。また、生育するクロマツの周辺には重要な建造物などがあり、これらのマツが今後倒伏した時の危険性が危惧された。このため、本公園内のクロマツについて樹幹内部の腐朽実態を把握し、倒木の危険性を判定することが緊急の課題となった。

横打撃共振法によって立木の腐朽・空洞を判定する目的で実験・測定された例はあるが（小玉ら，1999；釜口ら，2001；陶山ら，2010），実際に立木状態で樹幹断面積に占める腐朽・空洞の面積率を推定した例や、伐採してその精度が確認された例はない。そこで本研究では松江城山公園のクロマツ 240 本について、横打撃共振法によって樹幹内部の腐朽・空洞面積率の推定を試みた。そして、本法の精度を評価する目的で、本法によって推定した腐朽・空洞面積率を、レジストグラフを使用した貫入抵抗法によって推定した腐朽・空洞面積率と、伐採調査によって実測した腐朽・空洞面積率と比較した。また、調査木によっては共振周波数を検出しにくい場合があったことから、その原因について検討し、さらに推定した腐朽・空洞面積率に基づいて公園内クロマツの倒伏の可能性についても考察した。

2. 調査方法

2.1 腐朽・空洞面積率の推定方法

横打撃共振法による樹幹断面積に占める推定腐朽・空洞面積率 R_{iV} を以下の手順によって求めた。（1）島根県隠岐の島町内においてクロマツ 31 本について本法による測定と伐採調査を行い、診断の基準となる健全木の DF_r の平均値と範囲を調査した。なお、本研究での健全木とは樹幹に腐朽・空洞の発生が認められないものとし、それ以外の傷害の発生の有無や樹勢の健全度については

考慮しなかった。(2) 同健全木から採取した円板 5 個について人工的に空洞を作製して、空洞面積率と DF_r の減少率 r_h の関係を明らかにした。(3) 松江城山公園内の全調査木 240 本について地上高 1m で本法によって測定した。(1) で求めた健全木の DF_r の平均値に対する、各調査木の DF_r の減少率 r_s を求めた。この各調査木の r_s を (2) の空洞円板の r_h にあてはめ、対応する空洞面積率を求め、これを横打撃共振法による推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} と定義した。

2.2 クロマツ健全木の DF_r

2011 年 6 月上旬、島根県隠岐の島町のクロマツ林において、調査木 31 本について横打撃共振法による測定を行ったのち、同年 6 月中旬に伐採調査を行った。調査木は樹齢が 61~64 年生、地上高 1.0m で樹幹直径が 20.0~47.2cm であった。本法による測定は次のようにして行った。地上高 1.0m で樹幹の直径 D を計測し、同地上高で樹幹をハンマーで打撃した。ハンマーは市販の小型木製ハンマー（（有）堂内製、頭部径：4 cm、重量：180g、カシ類製）を使用した。この時の樹幹の打撃音をマイクロフォン（小野測器社製、MI-1431）で検出し、同マイクロフォンに接続された携帯型 FFT アナライザー（同社製、CF-1200）で共振周波数を計測した。FFT（高速フーリエ変換）の解析条件はサンプル数：256、周波数レンジ 1~2000Hz、分解能：20Hz に設定した。マイクロフォンは樹幹から 10~30cm 離れた状態で計測し、打撃方向と樹幹に向けたマイクロフォンの方向は互いに 90° とした。強風時には風雑音の影響を緩和するためマイクロフォンの先端に球形の防風スクリーン（ ϕ 70mm、ポリウレタン製）を取り付けた。打撃音の周波数スペクトルには周波数ピークが複数出現したが、1 次ピーク（周波数ピークのうち最も低い周波数）を診断の指標とする横打撃共振周波数 F_r として記録した。測定後、各調査木の DF_r を算出した。

各調査木を伐採したのち、本法によって測定した高さと同じ地上高 1.0m で、厚さ 10 cm の円板を採取し、島根県中山間地域研究センターに持ち帰った。円板の木口面で木部の変色や腐朽の有無を調査したところ、1 本で腐朽が小面積で発生していたことから、この 1 本を除く 30 本を健全木とした。そして、これらの健全木の DF_r の範囲と平均値を求めた。なお、立木と円板の両状態の DF_r は一致した。

2.3 空洞面積率と共振周波数の減少率

2011 年 6 月下旬、センターに持ち帰った前項のクロマツ健全木の円板 5 個を用いて、空洞面積率と DF_r の減少率の関係を求めた。円板は木口面がほぼ正円で、直径が 19.8cm~33.2cm、 DF_r が 27.9~33.6cmkHz のものを供試した。試験は樹皮の付いた状態で行った。この円板断面の中心に、木部面積に対して面積率 0.3~80% の円形空洞を順次切削して、それぞれの空洞面積率ごとに横打撃共振周波数 F_r を測定した。円板は厚さ約 1cm に重ねられたタオルの上に置き、

円板の側面を木製ハンマー（前項と同じもの）で打撃した。測定はFFTの解析条件を除き前項と同様にして行った。FFTの解析条件は横打撃共振周波数 F_r の変化を精密に測定するため、サンプル数を1024個、周波数レンジ1~2000Hzに設定することで、分解能を5Hzに高めた。円板は伐採以降、切削・測定時を除きポリエチレン製の袋に密封し、冷暗所に保管して乾燥を防止した。各空洞円板の DF_r の減少率 r_h （%）を無空洞円板の DF_r に対する比率として次式によって算出した。

$$r_h = (F_0 - F_h) / F_0 \times 100 (\%)$$

ここで、 F_0 ：無空洞円板の DF_r 、 F_h ：各空洞面積率 h の円板の DF_r 。
 そして、5個円板の平均 r_h を算出して、空洞面積率と DF_r の減少率 r_h の関係図を作製した。

2.4 松江城山公園内クロマツの腐朽・空洞面積率の推定

2006年10月中旬および2007年9月下旬~10月上旬、島根県松江市の松江城山公園（35° 28' N, 133° 3' E, 標高5~20m, 面積17ha）のクロマツ240本について、横打撃共振法による測定を地上高1.0mにおいて行った。調査木240本の樹幹直径は地上高1.0mで平均50.4cmで、16~60cmの小・中径木が172本、60~121cmの大径木が68本を占めた（Table 4）。測定は「クロマツ健全木の DF_r 」の項と同様に行い、各調査木の DF_r を算出した。ただし、1本では共振周波数が100Hzを下回ったため、FFTの解析条件はサンプル数を1024個、周波数レンジ1~2000Hz、分解能5Hzに設定し、分解能を高めた。樹幹直径が大きい調査木では1次ピークが小さくなることがあったことから、1次ピークを検出しやすくする目的で、木製ハンマーは樹幹の直径に応じて概ね次のように使いわけた。

樹幹直径40cm未満：頭部径4cm, 重量180gの小型のハンマー（前述）。

樹幹直径40~80cm：同径6cm, 480gの中型のハンマー（（有）堂内製, カシ類製）。

樹幹直径80cm以上：同径9cm, 1460gの大型のハンマー。同上。

調査木の中には本法による測定を行っても、1次ピークが顕著に出現しない場合があった。この場合は1次ピークが顕著に出現するよう、マイクロフォンあるいは打撃位置を水平方向に少しずつ変えて測定を繰り返した。

各調査木の DF_r の減少率 r_s （%）をクロマツ健全木の DF_r の平均値に対する比率として次式によって算出した。

$$r_s = (F_a - DF_r) / F_a \times 100$$

ここで、 F_a ：クロマツ健全木の DF_r の平均値。

Table 4. Estimation of decay or hollow area rate of 240 Japanese black pines using lateral impact vibration method

Classification	$D \cdot F_1$ (cm · kHz)	Decreasing rate of $r_s^{b)}$ (%)	Stem diameter ^{a)} (cm)				Total
			16~40	40~60	60~80	80~121	
Healthy trees	38.6~28.2	-22.8~10.8	68 ^{c)}	73	35	15	191
Decayed trees 1~3%	28.2~24.5	10.8~22.5	7	7		1	15
3~10%	24.5~17.9	22.5~43.4	7	5	2	4	18
10~30%	17.9~11.3	43.4~64.2	1	2	3	1	7
30~59%	11.3~6.6	64.2~79.1		2	2	2	6
Unable to be estimated					3		3
Total			83	89	45	23	240

^{a)}Measured at 1.0 m height. ^{b)}Decreasing rate against average $D \cdot F_1$ of healthy Japanese Black pines (31.6cmkHz). ^{c)} number symbols indicate the number of trees.

2.5 横打撃共振法による地上高方向の測定

2007年10月上旬、松江城山公園の240本のうち、地上高1.0mで推定面積率が3%以上の31本と共振周波数を特定できなかった3本の計34本 (Table 4) について、地上高0.5~2.5m (数本については3.5mまで) において0.5m間隔で横打撃共振法による測定を行った。推定腐朽・空洞面積率 R_{iV} の地上高方向の推移について検討し、I型とII型に類別した。I型は R_{iV} が地上高0.5~1.5mで最も高く、地上高が高くなるにつれ減少するもの、II型は R_{iV} に特定の増減傾向が見られないものとした。

2.6 貫入抵抗法による腐朽・空洞面積率の推定

2008年1月下旬、前項の34本について貫入抵抗式樹木診断装置 (IML製, レジストグラフ M-300) を用いて貫入抵抗を計測した。測定は原則、地上高1.0mとしたが樹幹や地形条件によっては0.5~2.0mの範囲で複数箇所計測した場合もあった。地上高1.0mで計測できたものは27本であった。使用した電気ドリルは軸径1.5mm, 刃先径3mmであり、ドリルの貫入速度は40cm/min. に設定した。ドリルの長さは30cmで、1方向あたりこの深さまで計測した。樹幹断面上で互いに90°の4方向から貫入抵抗を計測した。専用用紙に記録された抵抗値データにおいて、抵抗のある部分を健全部、抵抗のない部分を腐朽・空洞部と判断して、腐朽・空洞部を模式図化した (Fig. 23)。なお、樹幹直径が60cm以上の木では、30cmを超える深さは計測できないが、いずれの調査木においても深さ20~30cmにおいて4方向ともに健全部、あるいは腐朽・空洞部が連

続いて続いていたことから、その状態が断面中心まで続くと推定した。ただし、これらの 60cm 以上の調査木は 60cm 未満のものとは区別して取り扱った。これらの模式図に基づいて腐朽・空洞面積を求め、次式によって推定腐朽・空洞面積率 R_{rg} (%) を算出した。木部半径は樹幹直径 D から抵抗のない樹皮部の長さを引いて算出した。

$$R_{rg} = S / \pi r^2 \times 100$$

ここで、 S : 腐朽・空洞面積 (cm^2) , r : 木部半径 (cm) 。

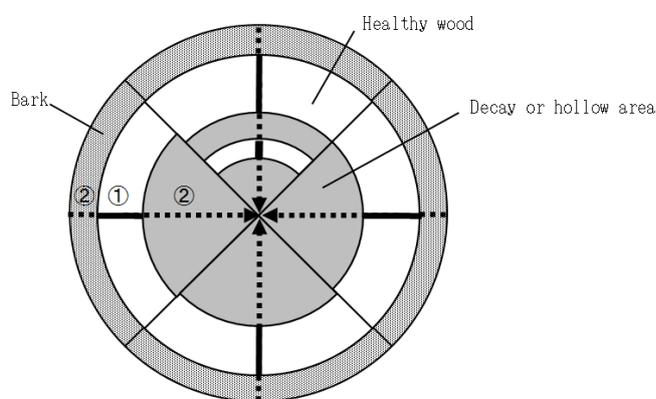


Fig. 23. Diagram of estimating decay or hollow area by using drilling resistance method.

- ①, Resistant (healthy wood)
- ... ②, non resistant (bark, decay or hollow area)

2.7 伐採調査

2010年3月下旬、松江市城山公園クロマツの240本のうち、地上高1.0mにおいて横打撃共振法で腐朽・空洞面積率31.0～45.5%と推定した3本を伐採し、根元から3mまでの丸太を島根県中山間地域研究センターに持ち帰った。これを本法で地上高方向に測定した位置(0.5m間隔)で鋸断し、各位置で厚さ10cmの円板を採取した。これら円板断面上で、木部周囲と腐朽・空洞部をトレースし、腐朽・空洞面積を計測した。そして、実測腐朽・空洞面積率 R_{am} (%) を $R_{am} = (\text{腐朽・空洞面積} / \text{円板木部の断面積}) \times 100$ によって算出した。

3. 結果

3.1 空洞面積率と共振周波数の減少率

Fig. 24 にクロマツ空洞円板の空洞面積率および DF_r と DF_r の減少率 r_h の関係を示す。空洞面積率が大きくなるにつれ、両者とも曲線的に減少する傾向であった。空洞のない状態での DF_r が異なっても、 r_h は円板による差はほとんどなかった。

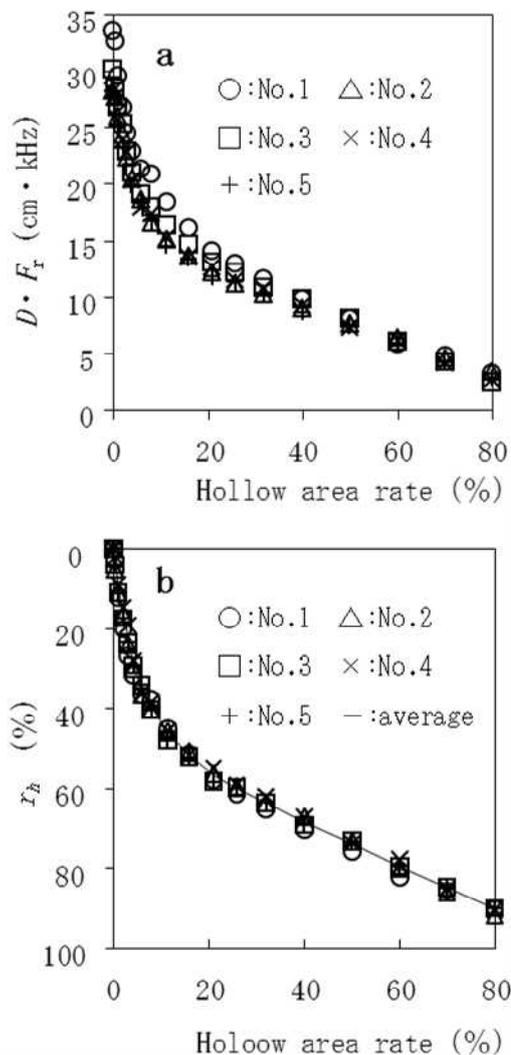


Fig. 24. Relationship between hollow area rates and, DF_r (a) and decreasing rate r_h (b) of DF_r in Japanese black pines.

3.2 クロマツ健全木の DF_r と公園内クロマツの腐朽・空洞面積率

Fig. 25 に島根県隠岐の島町のクロマツ健全木 30 本と、松江城山公園の調査木 237 本の DF_r の分布を示す。クロマツ健全木の横打撃共振周波数 F_r は 0.65

~1.6kHz で、 DF_r は 28.2~35.5 cm・kHz に分布し、平均値は 31.6 cm・kHz であつた。本公園の調査木の横打撃共振周波数 F_r は 0.065~2.0kHz で、 DF_r は 6.6~38.6 cm・kHz に及んだ。クロマツ健全木の DF_r と同じ範囲に、173 本、72% が分布した。 DF_r が健全木の下限值 (28.2cm・kHz) より低い木が 46 本 (19%) あり、これら調査木は腐朽・空洞木と判定した。なお、 DF_r が健全木の下限值 (28.2cm・kHz) に一致した調査木は、健全木の DF_r の平均値 (31.6 cm・kHz) に対して減少率 r_s が 10.8% で、対応する推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} は 1% であつた。健全木の上限值 35.5 cm・kHz より DF_r が高い木が 18 本 (8%) あつた。 DF_r は含水率の影響を受けることから、これら調査木は木部に含水率の低い変色部が生じている可能性があるが、腐朽・空洞自体は発生していないと考えられるため、健全木に含めた。

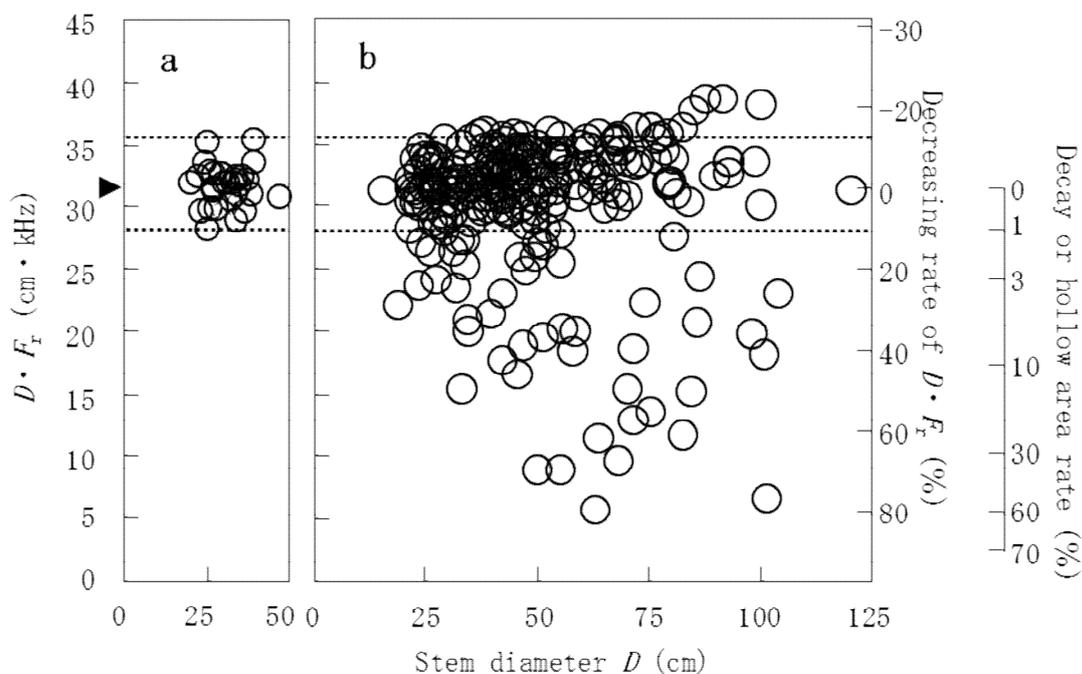


Fig. 25. Distribution of DF_r in 30 healthy Japanese black pines (a) and in 237 Japanese black pines in Matsue Jozan Park (b).

Double dotted lines indicate the range of DF_r (28.2-35.5cmkHz) in 30 healthy Japanese black pines. Black triangle indicates the average DF_r (31.6cmkHz) of 30 healthy Japanese black pines.

Table 4 に本公園内の調査木の地上高 1.0m における推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} を示す。健全木は 191 本 (80%)、腐朽・空洞木は 46 本 (19%) であつた。

このうち、 R_{iv} が1～30% (DF_r の減少率 r_s : 10.8～64.2%) は40本(17%)、 R_{iv} が30～59% (r_s : 64.2～79.1%) と大きいものは6本(3%)であった。樹幹直径が60cm未満の小・中径木では腐朽・空洞木が18%を占めたのに対し、60～121cmの大径木では26%で、大径木でその割合がやや高かった。

3.3 横打撃共振法による地上高方向の測定

調査木34本のうち、調査木周辺の地形条件や、樹幹の保護の目的で設置された資材が障害となり、推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} の地上高方向の推移が連続して求められたのは20本であった。これら20本について R_{iv} の地上高方向の推移を類別したところ、I型が11本、II型が9本であった (Fig. 26)。

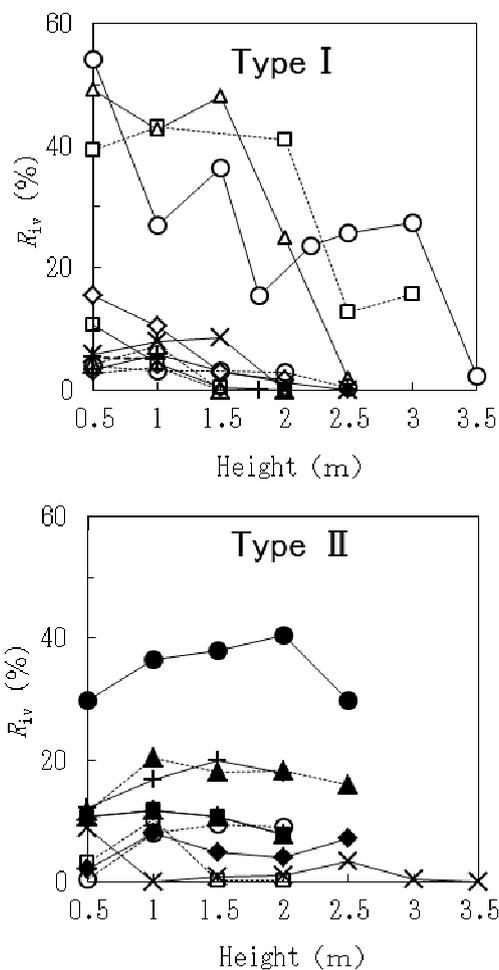


Fig. 26. Transition of estimated decay or hollow area rate R_{iv} with height. Type I: R_{iv} was highest in 0.5-1.5m height and tended to decrease with height.

Type II: No specific tendency was observed in R_{iv} .

3.4 横打撃共振法と貫入抵抗法の推定面積率および実測面積率の比較

Fig. 27 に地上高 1.0m で測定した横打撃共振法と貫入抵抗法の推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} , R_{rg} の比較結果を示す。 R_{iv} が高くなるにつれ R_{rg} が高くなる傾向で、両者には高い正の相関が認められた ($y=0.96x+3.19$, $r=0.88$, $P<0.001$)。

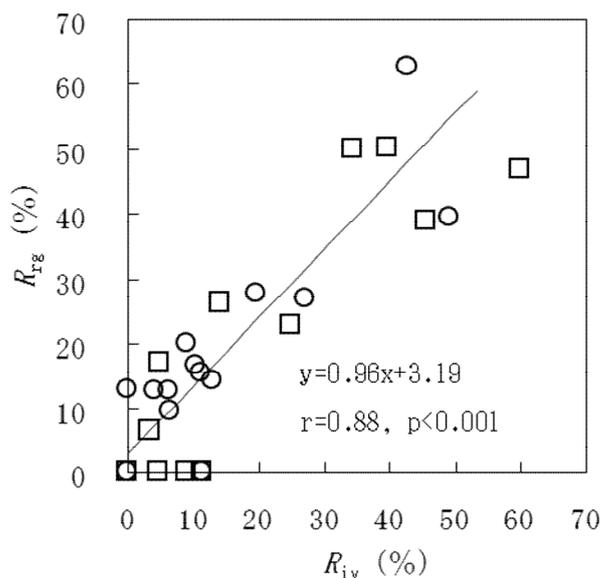


Fig. 27. Comparison of estimated decay or hollow area rates, R_{iv} and R_{rg} , by using lateral impact vibration method and drilling resistance method.

○: Less than 60cm in stem diameter, □: More than 60cm.

Fig. 28 に調査木 3 本における横打撃共振法と貫入抵抗法による推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} , R_{rg} , および伐採調査による実測腐朽・空洞面積率 R_{am} の比較結果を示す。3 本の 14 か所について (No. 6 地上高 0.5m を除く), R_{iv} と R_{am} を比較したところ, 両者には高い正の相関が認められた ($y=0.94x+8.18$, $r=0.80$, $P<0.001$.)。また, 3 本の 4 か所について R_{rg} と R_{am} を比較したところ, 両者には高い正の相関が認められ ($y=0.81x+12.0$, $r=0.99$, $P<0.01$), 両者は概ね一致した。No. 6 の地上高 0.5m では, R_{iv} は 54% であつたのに対し R_{am} は 3.4% で, 両者には大きな差があつた。No. 6 の地上高 0.5m の円板は年輪に沿つた筋状の腐朽が生じていた (Fig. 29)。円板の状態では共振周波数を 4 か所で測定したところ (測定法は前述の円板と同じ。), 100~137.5Hz と打撃位置で若干変化したが, 立木状態の 120Hz と概ね一致した。

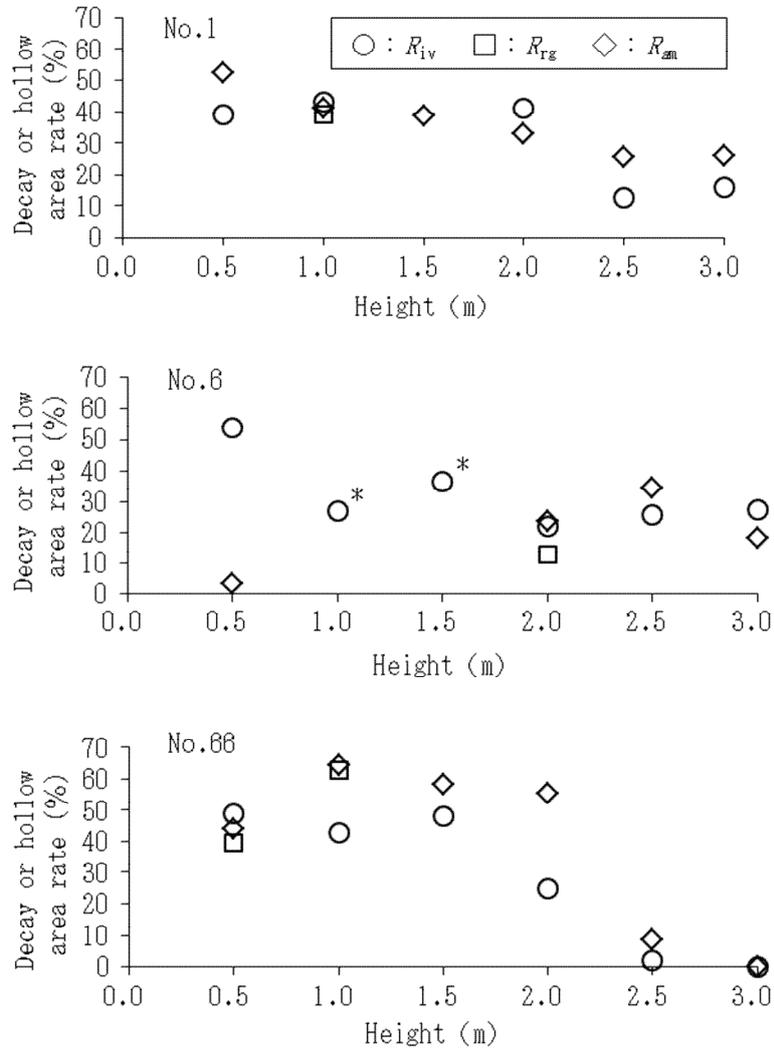


Fig. 28. Real decay or hollow area rates R_{am} , and estimated decay or hollow area rates, R_{iv} and R_{rg} , by using lateral impact vibration method and drilling resistance method in three trees studied. *Because decayed or hollowed wood was exposed, R_{am} was not able to be calculated.

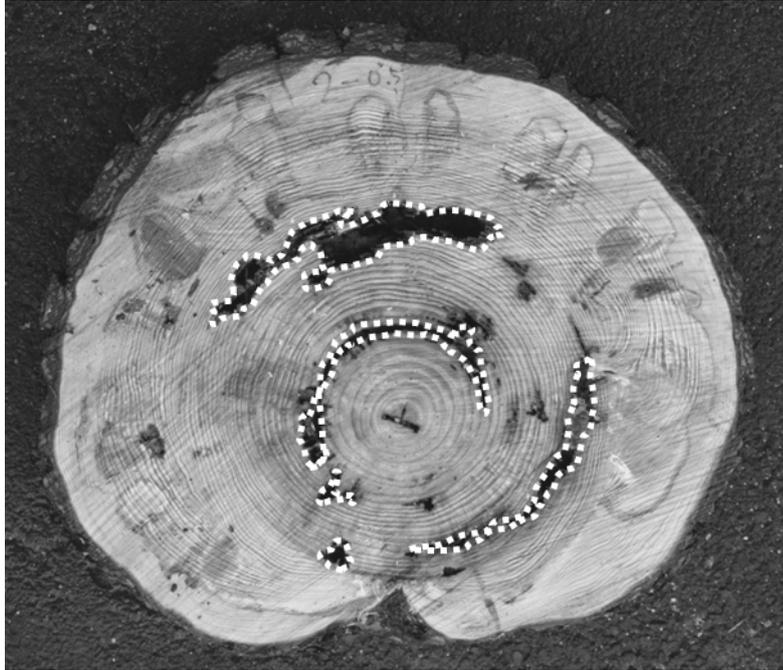


Fig. 29. Cross section of disk in No. 6 tree studied (0.5m height above the ground).

White dotted lines indicate decay or hollow area.

Many discolored wood areas were damaged portions by pesticide injection for pine wilt disease and the areas was not decayed.

3.5 共振周波数の特定

Fig. 30 に本公園で測定した調査木の周波数スペクトルの例を示す。調査木 No. 186 では 520Hz に顕著な 1 次ピークが出現していた。調査木の約 95% ではこのような周波数スペクトルが 1 回の打撃で得られ、共振周波数を容易に特定できた。調査木 No. 28 では複数の周波数ピークが混在しており、顕著な 1 次ピークが出現せず、このスペクトルからは共振周波数を特定できなかった。このような調査木は約 5% で認められ、測定を繰り返しても共振周波数を最終的に特定することができなかったものが 3 本あった。

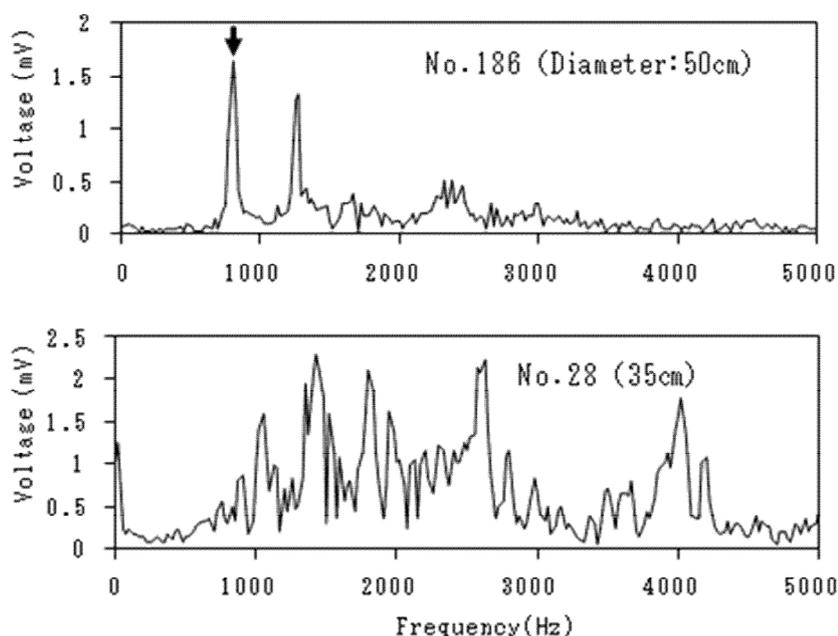


Fig. 30 Frequency spectrums of impact sounds in two trees. Arrow indicates the first peak. The first peak was observed in No.186. But, the first peak was not able to be indentified in No. 28.

4. 考 察

松江市城山公園におけるクロマツ 240 本について横打撃共振法によって判定した結果、健全木は 191 本（80%）、腐朽・空洞木は 46 本（19%）であった。このうち、推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} が 1~30%のものが 40 本（17%）であったが、 R_{iv} が 30~59%と大きいものが 6 本（3%）あった。

本法の精度を評価するため、27 本について貫入抵抗法によって推定腐朽・空洞面積率 R_{rg} を求め、このうち 3 本を伐採して実測腐朽・空洞面積率 R_{am} を求めた。その結果、横打撃共振法による R_{iv} は R_{rg} ($r=0.88, P<0.001$) と R_{am} ($r=0.80, P<0.001$) の両者と高い正の相関が認められた。ヒノキ円板を用いた既往の試験では、 DF_r と腐朽・空洞面積率に高い関連性があることが確認されているが（陶山ら，2010），本研究結果から横打撃共振法によって立木状態でも腐朽・空洞面積率を推定できることが示された。なお，調査木 No. 6 の地上高 0.5m では R_{iv}

と R_{am} に大きな差があったが、同地上高の円板には年輪に沿った筋状の腐朽が生じていた。このような形状の腐朽が発生している場合には、横打撃共振法によって推定した腐朽・空洞面積率と実際の面積率には大きな差が生じる可能性がある。

調査木のうち約 5%では1回の計測で顕著な1次ピークが出現せず、このうち3本では測定を繰り返しても共振周波数を最終的に特定することができなかった。これらの調査木について、外観からの樹幹の形状を調査したところ、①不特定の原因による木部や腐朽部の露出、②本公園内ではマツ材線虫病予防用の樹幹注入剤の不適切な注入による薬害が認められたが、その薬害に伴う木部や腐朽部の露出、③測定部付近に大きな枝がある、④樹幹直径が大きく、また外観から樹皮が明らかに厚い、⑤樹幹の縦方向に0.3~2.5mに及ぶ亀裂がある—といった特徴のいずれか、あるいは複数が認められた。樹幹円板を用いた試験では空洞が中心部から離れるにつれ、顕著な周波数ピークが発生しにくくなることが報告されている(陶山, 2006)。木部や腐朽部が露出している、あるいは亀裂がある場合などでは樹幹断面の形状が複雑なため、顕著な周波数ピークが発生しにくかったことが考えられる。今後、共振周波数が特定しにくい条件を明らかにし、その場合の対処方法を検討する必要がある。

横打撃共振法と貫入抵抗法による推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} と R_{rg} のいずれかが40%を超えたものが6本あった。黒田ら(1994)はカラマツ人工林で根株心材腐朽病による幹折れ被害を調査し、腐朽・空洞面積率が30%未満の木では5%が幹折れしていたのに対し、同面積率が30%以上の木では72%が幹折れしていたことを報告している。1200本の広葉樹と針葉樹の立木と折損木を調査した結果によれば(Mattheck and Breloer, 1994)、腐朽・空洞面積率が約46~49%を超えると腐朽部から折損し倒伏の危険性が高くなることが報告されている。腐朽・空洞面積率から倒伏の可能性を正確に予測することは困難であるが、これら既往の報告を参考にすると、 R_{iv} あるいは R_{rg} が40%を超えた6本は倒伏の危険性が高くなっていると考えられる。これら危険木については伐採する、支柱を設置する、あるいは樹高を低くするといった対策が必要である。

5. まとめ

簡易な材質診断法である横打撃共振法によって、松江城山公園のクロマツ240本について樹幹内部の腐朽・空洞面積率を推定した。本法の診断指標は樹幹直径 D と樹幹打撃音の横打撃共振周波数 F_r の積 (DF_r) である。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 の平均値と範囲を明らかにした。(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。本公園の調査木について

地上高 1mで本法の測定を行い、(1) (2) の情報に基づき推定腐朽・空洞面積率 R_{iv} を求めた。この結果、 R_{iv} が 1～30%は 40 本 (17%)、30～59%は 6 本 (3%) であった。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、本法によってクロマツ樹幹内部の腐朽・空洞面積率を推定できることが示された。

総括

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、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、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一。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。

引用文献

- 藤原 健・山下香菜・平川泰彦 (2004) 収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度及び気乾密度の樹幹内変動. 森総研報 3 : 341-348.
- 藤原新二・岩神正朗 (1988) 四国産スギ材の生長と材質 (第4報) -心材率及び辺材幅について-. 高知大農演報 15 : 17-27.
- 藤原新二, 岩神正郎 (1989) スギおよびヒノキ材の生材含水率と心材色の関係について. 高知大農演報 16, 19 - 23.
- 藤森隆郎編著: “将来木施業と径級管理—その方法と効果”, 全国林業普及協会, 東京, 2013, pp. 18-78.
- 後藤基芳 (2010) 京都大学地球工学科卒業論文 (<http://lakers.kuciv.kyoto-u.ac.jp/bachelor/goto.pdf>. Accessed July 24, 2012) .
- 井原直幸 (1972) 林木の心材の測樹学的研究. 九大農演報 46 : 1-129.
- 池淵 隆・錦織 勇 (2000) 島根県産ヒノキ材の材質特性と強度性能. 島根林技研報 51 : 47-54.
- 井城 泰一, 田村 明, 飯塚和也 (2010) 横打撃共振法によるトドマツの心材生材含水率の非破壊的評価. 木材学会誌 56, 33-40.
- 伊藤一雄 (1974) 樹病学大系Ⅲ. 405pp., 農林出版, 東京.
- 岩野聡史, 極檀邦夫, 埴 忠夫 (1997) 第24回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 618-619.
- 岩崎充則 (2002) ヒノキ精英樹の材質特性—家系と検定林の違いによるヤング率と容積密度数の変異—. 長崎総農林試研報 (林業部門) 32 : 17-22.
- 釜口明子・中尾哲也・小玉泰義 (2000) 横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊的推定. 木材学会誌 46 : 13-19.
- 釜口明子・中尾哲也・中井毅尚 (2001) 横打撃共振法を用いた生立木の非破壊的内部診断. 樹木医学研究 5 : 59-63.
- 釜口明子, 中尾哲也, 中井毅尚, 田村 明 (2001) 横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率の測定—含水率計との比較および各品種の高さ方向の分布. 木材学会誌 47, 235 - 241.
- 北原覺一 (1967) 木材物理. 226pp, 森北出版, 東京.
- 小林 元, 田代直明, 山内康平, 内海泰弘, 古賀信也, 大崎 繁, 鍛治清弘, 岡野哲郎 (2008) 樹木医学研究 12, 119-124.
- 小玉泰義・釜口明子・中尾哲也・原田照太 (1999) 横打撃共振法による樹幹内空洞の検出. 樹木医学研究 3 : 5-9.
- 黒田吉雄・大澤正嗣・勝屋敬三 (1994) カラマツ人工林内の根株心腐病による

- 幹折れ被害. 日林誌 76 : 157-159.
- 駒木高彰(1995)スギ黒心材の利用および施業. 日林東北支誌 47, 115 - 116.
- 松山将壮: 吉野スギの黒心材, 第26回日本木材学会研究発表要旨集, pp. 39 (1976).
- Mattheck, C. and Breloer, H. (1994) The body language of trees. 240pp, The Stationery Office, London.
- 森川 岳, 小田一幸, 松村順司, 堤 壽一(1996)スギ樹幹における黒心材形成と灰分(第2報)ースギ3品種心材の性質ー. 九州演報 74, 41-49.
- 中田了五, 田村 明(2006)スギ心材含水率の遺伝的改良への横打撃共振法の適用. 木材学会誌 52, 137-144.
- 則元 京(1987)針葉樹材の比ヤング率と材質. 木材学会誌 33 : 545-551.
- Qing, H., Mishnaevsky Jr., L. (2010) 3D multiscale micromechanical model of wood: From annual rings to microfibrils. International Journal of Solids and Structures 47, 1253-1267.
- 陶山大志(2006)横打撃共振法による樹幹人工空洞化円板の共振周波数分析ー空洞の形・大きさ・分布による周波数変化ー. 樹木医学研究 10 : 53.
- 陶山大志(2011)打撃音樹内腐朽簡易診断装置「ぼん太」. グリーンエージ 451 : 19-22.
- 陶山大志・河井美紀子・扇大 輔(2002)島根県におけるスギ・ヒノキ根株腐朽病の被害実態. 島根林技研報 53 : 1-8.
- 陶山大志(2011)樹幹内診断方法及び装置, 特許第4669928号.
- 渡辺借人: “樹幹丸太の特性”, 九大農木材理学教室, 福岡, 1967, p. 33.
- 渡辺直明(2000)野外現場で使用可能な樹木診断装置. 樹木医学研究 4 : 23-32.
- 山田利博(2003)樹木の診断治療技術の現状と課題. グリーンエージ 360 : 7-11.
- “品質管理型林業のためのスギ黒心対策技術の開発”, 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京, 1997, p93.

謝 辞

本研究の端緒を与えられ、さらに本稿を草するあたりご教示と激励を賜り、学位論文の主査をしていただいた島根大学総合理工学部中尾哲也教授に深く感謝する。島根大学総合理工学部、上原徹教授、臼杵年教授、中井毅尚准教授には学位論文の審査とご教示をいただき、感謝申し上げます。東京大学農学部山田利博教授には本研究について折に触れ有益なご教示をいただいた。島根県中山間地域研究センターの職員の皆様には試験を実施するにあたり、多大なご支援をいただいた。ここに感謝する。

関連論文

陶山大志（2014）横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定．木材学会誌 60 : 35-40

陶山大志・桐田龍一・物部英樹（2013）横打撃共振法による9樹種大径木の共振周波数の検出に及ぼすハンマー質量の影響．木材学会誌 59 : 105 - 111.

陶山大志・永石憲道・坂越浩一（2012）横打撃共振法によるクロマツ樹幹内部の腐朽・空洞面積率の推定．日本森林学会誌 94 : 161 - 166.

陶山大志・中尾哲也・富松祐樹（2010）横打撃共振法によるヒノキ根株心材腐朽病の非破壊診断．樹木医学研究 14 卷 : 83 - 91.