

腐朽処理した木材の超音波伝播速度及び部分圧縮強度の変化 超音波伝播速度の低下と残存強度との関係*1

後藤崇志*2, 富川康之*2, 中山茂生*2, 古野 毅*3,4

Changes of Propagation Velocity of Ultrasonic Waves and Partial Compression Strength of Decay-treated Woods Relationship between decrease of propagation velocity of ultrasonic waves and remaining strength*1

Takashi GOTO*2, Yasuyuki TOMIKAWA*2,
Shigeo NAKAYAMA*2 and Takeshi FURUNO*3,4

The decay durability of the sapwood and heartwood of sugi (*Cryptomeria japonica*), hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), akamatsu (*Pinus densiflora*) and konara (*Quercus serrata*), and the sapwood of buna (*Fagus crenata*) grown in Shimane Prefecture was examined according to the JIS (JIS Z 2101 (1994)) using the brown-rot fungus, *Fomitopsis palustris*, and the white-rot fungus, *Trametes versicolor*. In addition, wood samples of these species, square pillar-shaped, were provided to measure the propagation velocity of ultrasonic waves and to test the partial compression strength after decay treatments with *F. palustris* and *T. versicolor*. After decay treatment of the wood samples, values of 3.2% to 12.9% mass loss were recorded for the sapwood of all species and the heartwood of akamatsu when testing with *F. palustris*. The propagation velocities of ultrasonic waves along with the thickness directions for decayed-wood samples decreased most in the vicinity of the cross section directly contacting the culture medium during the decay test. Further, the partial compression strengths of $\sigma_{e5\%}$ and $\sigma_{e10\%}$ (at 5% and 10% deformations of the sample thickness, respectively) for the decayed-wood samples also decreased. The ratios of $\sigma_{e5\%}$ and $\sigma_{e10\%}$ to the control were 0.36 to 0.85 in the test with *F. palustris*. For the decayed-wood samples, statistically significant ($P < 0.01$) negative correlations were recognized between the decrease of propagation velocity of ultrasonic waves and the remaining strength of $\sigma_{e5\%}$.

Keywords: decay durability, mass loss, ultrasonic propagation velocity, partial compression strength, remaining strength.

島根県産スギ、ヒノキ、アカマツ、コナラそれぞれの辺材と心材及びブナの辺材を供試し、オオウズラタケ (*Fomitopsis palustris*) とカワラタケ (*Trametes versicolor*) による素材の耐朽性試験 (JIS Z 2101 (1994)) を行った。さらに、柱状試験体にオオウズラタケとカワラタケによる腐朽処理を施した後、超音波伝播速度の測定と部分圧縮試験を行った。腐朽処理した柱状試験体では、オオウズラタケによって腐朽した全ての樹種の辺材とアカマツの心材について3.2~12.9

*1 Received February 21, 2011; accepted June 3, 2011. 本報告の概要は、日本木材学会中国・四国支部第21回研究発表会 (2009年9月, 松江) 及び日本木材学会中国・四国支部第22回研究発表会 (2010年9月, 高知) において発表した。

*2 島根県中山間地域研究センター Shimane Prefectural Mountainous Region Research Center, Iinan 690-3405, Japan

*3 島根大学総合理工学部 Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

*4 文化財調査コンサルタント(株) Archaeological Research Consultant, Inc., Matsue 690-0822, Japan

%の質量減少率が認められた。これら腐朽材の厚さ方向での超音波伝播速度は、腐朽処理時に培地と接触していた木口面近傍が最も低下していた。また、腐朽材の部分圧縮強度 $\sigma_{e5\%}$ 及び $\sigma_{e10\%}$ (それぞれ辺長の5%及び10%における値)もコントロールに対する比で0.36~0.85となった。腐朽材では超音波伝播速度の低下率と $\sigma_{e5\%}$ の残存率との間に統計的に有意な($P<0.01$)負の相関関係が認められた。

1. 緒 言

林業と木材産業の活性化、ひいては低炭素社会の実現に貢献するため、建築物や土木構造物に多くの木材を使用し、長期にわたって使い続けることが社会的に強く求められている¹⁾。木材を長期間使用するための条件の一つとして、木材の耐朽性と腐朽による劣化現象を把握する必要がある²⁾。

木材の耐朽性については、これまでに比較耐朽性試験³⁾、野外杭試験^{4,5)}そしてこれら両試験の関係^{6,7)}などのデータが報告されている。一方、腐朽による劣化現象については、木材の強度は腐朽の進行に伴って低下する^{8,9)}ため、構造物の安全性に関わる大きな問題であると認識されている¹⁰⁻¹²⁾。これまでに腐朽と縦圧縮強度¹³⁻¹⁵⁾あるいは曲げ強度¹⁶⁻²¹⁾との関係、腐朽と接合部の強度性能との関係²²⁻²⁴⁾など、腐朽による質量減少と各種の強度性能との関係が明らかになりつつある。さらに、劣化現象を的確に診断することも重要であると認識されており²⁾、非破壊評価法として腐朽材でのピロディン打ち込み深さと各種の強度性能との関係^{15, 16, 24-28)}、腐朽材での超音波伝播速度の測定²⁹⁻³¹⁾及び腐朽前後での超音波伝播速度の変化³²⁻³⁴⁾などの検討が重ねられている。

しかし、複数の樹種について、実験室レベルで比較的大きな寸法の試験体を供試し、それら試験体の耐朽性、腐朽による強度性能の変化、さらに非破壊評価の適用を併せて検討した資料は見られない。

そこで、本研究では複数の鳥根県産樹種を供試して柱状試験体を作製し、日本工業規格(JIS)の木材の試験方法³⁵⁾に準じて腐朽処理を施した。そして、柱状試験体の質量減少率を、JISに準じて行った耐朽性試験から求めた素材の質量減少率と比較した。さらに、腐朽した柱状試験体で超音波伝播速度の測定と部分圧縮試験を行い、超音波伝播速度の変化と残存強度との関係について検討した。

2. 試験方法

2.1 供試材料

鳥根県飯石郡内より調達したスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、アカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)

及びブナ(*Fagus crenata* Blume)の丸太各2本と、鳥根県浜田市内より調達したコナラ(*Quercus serrata* Thunb.)の丸太4本を供試した。丸太は全て1番玉であり、末口直径は31~34 cm、長さは2.1~3.1 m、生材密度はヒノキの589 kg/m³~コナラの1213 kg/m³、樹齢は44~92年であった。なお、これらの丸太の材面には、節や腐れなどは全く見られなかった。

まず、素材の耐朽性試験用のひき板は厚さ30 mmに製材した。柱状試験体用のひき板は、コナラを除き厚さ35 mmに製材した。コナラについては乾燥に伴って幅反りが生じるため、厚さ40 mmに製材した。

製材後、各ひき板は天然乾燥あるいは人工乾燥を行って含水率を15%以下に調整した。スギ、ヒノキ及びアカマツのひき板は、蒸気式乾燥機により乾球温度60~70℃、乾湿球温度差3~13℃の乾燥スケジュール³⁶⁾で約1週間人工乾燥を行った。コナラのひき板は製材直後に木口面に割れ防止剤(旭化成ケミカルズ(株)製 ランバーメイト)を塗布し、除湿式乾燥機により乾球温度40~60℃、乾湿球温度差2~18℃の乾燥スケジュール³⁷⁾で約1ヶ月人工乾燥を行った。ブナのひき板は製材後に約1ヶ月天然乾燥を行った後、素材の耐朽性試験用のひき板は恒温恒湿器によりコナラ材とはほぼ同じ乾燥スケジュール³⁷⁾で約2週間人工乾燥を行った。ブナの柱状試験体用のひき板は屋内で約1年保管して含水率を調整した。

2.2 素材の耐朽性試験

2.2.1 試験体

試験体は、コナラの辺材を除き各樹種の辺材と心材について同一の丸太を製材して得られたひき板から調製した。コナラの辺材については2本の丸太から得られたひき板を用いた。試験体の形状は辺長20 mmの二方柱立方体であり、無欠点のものを供試した。

調製した試験体は温度20℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室内で1週間調湿した後、質量と寸法を測定して気乾密度を算出し、併せて片側木口面で平均年輪幅を測定した(Table 1)。1供試菌当たりの試験体数は、スギ、ヒノキ及びアカマツについては辺材は各15体、心材は各24体とし、コナラについては辺

Table 1. Wood qualities for each test sample.

Species	Decay durability test ^{a)}			Decayed-wood sample test ^{b)}			
	ρ_a (g/cm ³)	ARW (mm)	<i>n</i>	ρ_a (g/cm ³)	ARW (mm)	<i>n</i>	
Sapwood	Sugi	0.36 (3.0)	2.2 (10.8)	42	0.34 (10.9)	2.9 (15.5)	96
	Hinoki	0.39 (1.6)	1.7 (15.8)	42	0.41 (6.4)	2.1 (11.4)	96
	Akamatsu	0.62 (2.4)	4.1 (10.6)	42	0.50 (3.7)	4.9 (21.9)	96
	Konara	0.80 (4.7)	3.0 (19.5)	48	0.74 (3.1)	3.3 (18.3)	96
	Buna	0.63 (0.9)	3.1 (7.1)	42	0.63 (3.5)	2.9 (18.6)	96
Heartwood	Sugi	0.35 (4.0)	4.1 (10.7)	60	0.38 (4.0)	2.9 (40.7)	96
	Hinoki	0.45 (2.2)	1.7 (11.9)	60	0.42 (3.7)	2.3 (16.5)	96
	Akamatsu	0.47 (3.6)	6.5 (18.6)	60	0.45 (7.9)	5.8 (13.5)	96
	Konara	0.94 (6.7)	3.9 (17.0)	48	0.84 (4.8)	4.0 (15.1)	96

Notes: ^{a)}: Decay durability tests were conducted according to the Japanese Industrial Standards (JIS Z 2101 (1994)). The dimensions of test samples were 20 mm × 20 mm × 20 mm.

^{b)}: Decayed-wood sample test was investigated by measuring propagation velocity of ultrasonic waves and by partial compression strength test with wood samples decayed by *F. palustris* and *T. versicolor*. The dimensions of test samples were 30 mm × 30 mm × 90 mm.

ρ_a : Density in air-dry, ARW: Average annual ring width, *n*: Total number of samples in each experiment.

Each value in parentheses is the coefficient of variation (%).

材と心材それぞれ18体、ブナの辺材については15体とした。また、後述する質量補正用の試験体は、各樹種の辺材と心材それぞれ12体とした。試験体の各試験区への振り分けは、気乾密度の平均値と分散が等しくなるように行った。

2.2.2 腐朽処理

オオウズラタケ腐朽区、カワラタケ腐朽区及び腐朽に起因しない質量変化を補正するための質量補正試験区の3試験区を設定した。供試菌のオオウズラタケ (*Fomitopsis palustris* (Berk. et Curt.) Gilbn. et Ryv. (MAFF 番号420001)) とカワラタケ (*Trametes versicolor* (L.: Fr.) Pilát (MAFF 番号420002)) は、(独)農業生物資源研究所遺伝資源センターから購入した菌を用いた。

供試菌の接種、培養及び試験体の腐朽処理は以下の手順で無菌的に行った。培養基は、容積500 ml ガラス瓶に石英砂250 gを入れ、培養液(グルコース40 g, ペプトン3 g, 麦芽エキス乾燥粉末15 g, 蒸留水1000 ml, pH 5.6~5.8)を80 ml分注し、高圧蒸気滅菌を120℃で30分間行って調製した。各供試菌は、事前に、前述の培養液1000 mlにスギ辺材風乾木粉(0.149 mm目のふるいを通過したもの)3 gを添加した培養液で振とう培養(室温26℃)しておき、各ガラス瓶(培養基)に培養液ごと3 mlを接種した。

各供試菌の培養は恒温恒湿器を用いて温度26℃、相対湿度70%の条件下で行った。培養10日目、供試菌が培地上面に蔓延したことを確認した上で試験体を設置した。試験体は木口面が培地と接触するように繊維方向を垂直にし、1個のガラス瓶中に3体ずつ設置して60日間の腐朽処理を施した。なお、腐朽処理中の雑菌汚染を防止するため、試験体は予め換気用フィルターの付いた耐熱性ポリプロピレン袋に入れて高圧蒸気滅菌を120℃で50分間行って滅菌処理を施した。

腐朽処理の前後、各試験体を60℃で48時間乾燥した時の質量を測定し、腐朽前の質量に対する腐朽後の質量減少率(以下、 Δm_d と略記する)(%)を算出した。なお、腐朽処理後の試験体は表面に付着した菌糸及び石英砂を丁寧に取り除き、20時間風乾後に前述の条件で乾燥し、質量を測定した。質量補正試験区は、供試菌が未接種であること以外の調製条件を前述の通りとし、質量補正試験体の質量変化率(以下、 Δm_0 と略記する)(%)を算出した。そして、 Δm_d の平均値から Δm_0 の平均値を減じて得られる補正質量減少率(以下、MLと略記する)(%)と、同様に求めたブナ辺材のMLから耐朽比((100-各樹種の辺材または心材のML)/(100-ブナ辺材のML))を算出した。併せて、各試験体の Δm_d から Δm_0 の平均値を減じて各試験体の補正質量減少率

(以下, ML_s と略記する) (%) を求め, 解析に用いた。

2.3 腐朽材の超音波伝播速度の測定と部分圧縮試験

2.3.1 柱状試験体

試験体は, コナラを除き各樹種の辺材と心材について2本の丸太を製材して得られたひき板から調製した。コナラについては4本の丸太から得られたひき板を用い, 全ての樹種の心材については髓付近の未成熟材を含むひき板を除いて試験体を調製した。試験体の形状は木材の試験方法³⁵⁾の部分圧縮試験に従い, 横断面は一辺の長さが30 mmの正方形で長さは90 mmの直方体に調製し, 無欠点のものを供試した。

柱状試験体は, 温度20℃, 相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内で1週間調湿した後, 質量と寸法を測定して気乾密度を算出し, 併せて両木口面の平均年輪幅を測定した (Table 1)。オオウズラタケ腐朽区, カワラタケ腐朽区, 質量補正試験区及び超音波伝播速度の測定と部分圧縮試験において比較対照としたコントロール区それぞれの試験体数は, 各樹種とも辺材, 心材それぞれ24体とした。柱状試験体の各試験区への振り分けは, 気乾密度の平均値と分散が等しくなるように行った。

2.3.2 柱状試験体の腐朽処理

腐朽処理は, 2.2.2項の素材の耐朽性試験での腐朽処理と同じ手順で無菌的に行った。培養基は容積900 mlのガラス瓶を用いて調製し, 各供試菌の振とう培養, 各ガラス瓶 (培養基) への接種, 各供試菌の培養, 柱状試験体の事前の滅菌処理などの方法は2.2.2項の通りである。柱状試験体は, これらの一端の木口面を培地に接触させ, 繊維方向を垂直にしてガラス瓶 (培養基) へ設置した。そして, 60日間の腐朽処理後, オオウズラタケ腐朽区とカワラタケ腐朽区のMLを算出した。併せて, 各柱状試験体の ML_s を求め, 部分圧縮強度との関係を検討した。

2.3.3 超音波伝播速度の測定

超音波伝播速度はオオウズラタケ腐朽区, カワラタケ腐朽区及びコントロール区について測定し, 試験体数は各試験区24体である。腐朽処理後の柱状試験体は, 温度20℃, 相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内で約1ヶ月間調湿した。調湿後に全乾法で求めた含水率は約11%であった。

超音波伝播速度の測定は, シルバテスト Duo (CBT S. A. Switzerland 製, 周波数22 kHz) を用いて恒温恒湿室内で部分圧縮試験前に行った。超音波伝播速度の測定位置3箇所を Fig. 1 に示す。超音

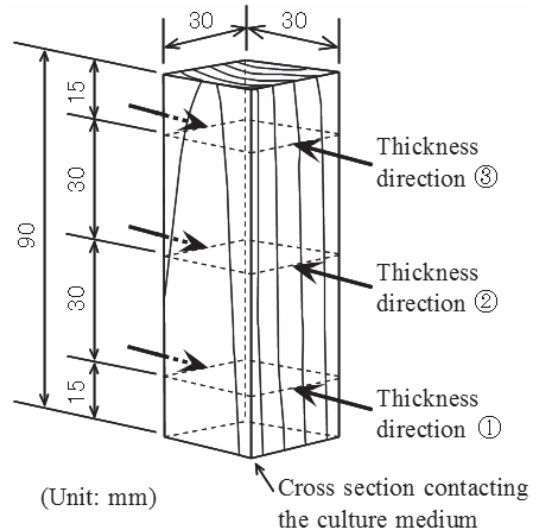


Fig. 1. Measuring directions of propagation velocities of ultrasonic waves with square pillar-shaped wood samples.

波伝播方向は柱状試験体の厚さ方向とし, 部分圧縮試験での加圧方向と一致させた。厚さ方向①と③は各木口面から15 mm離れた位置であり, 厚さ方向②は長さ方向中央部である。センサーの接触位置は柱状試験体の表裏の幅方向中央部とし, 発信センサーと受信センサーをそれぞれ人手により強く押し当てて接触させ, 測定した。そして, シルバテスト Duo に表示された超音波伝播速度を読み取り, 記録した。

2.3.4 部分圧縮試験

部分圧縮試験は, 木材の試験方法³⁵⁾の部分圧縮試験に準じ, 引張圧縮試験機 (ミネベア (株) 製 AL-100 kNB 型) を用いて温度20℃, 相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内で行った。

載荷部は, 腐朽処理によって最も強度が低下したと考えられる培地に接触していた木口面近傍の材端部とした。この部位は超音波伝播速度を測定した厚さ方向①の部分と一致する (Fig. 1)。載荷方向は接線方向とし, 追衿の場合は木表側から載荷した。鋼板 (厚さ10 mm × 幅45 mm × 長さ30 mm) を載荷部に設置し, 載荷速度を1 mm/分として試験体の変形量が3.5 mmに達するまで荷重を加えた。そして, 得られた荷重-変形曲線から変形量が1.5 mm及び3.0 mm時の荷重を求め, 載荷部の表面積 (厚さ方向①の部分の幅 (mm) × 鋼板の長さ30 mm) で除して辺長5%及び10%の部分圧縮強度を算出した (以下, それぞれ $\sigma_{e5\%}$ 及び $\sigma_{e10\%}$ と略記する)。

3. 結果と考察

3.1 素材の耐朽性試験での ML と耐朽比

各樹種の辺材と心材それぞれの ML を Fig. 2 に示す。辺材について、オオウズラタケ腐朽区の ML はコナラの21.5% (標準偏差 (以下, S.D. と略記する) 11.2) からブナの54.0% (S.D. 3.8) の範囲内に分布し、カワラタケ腐朽区の ML はアカマツの11.7% (S.D. 3.6) からブナの22.0% (S.D. 4.0) の範囲内に分布した。樹種別にオオウズラタケとカワラタケそれぞれ

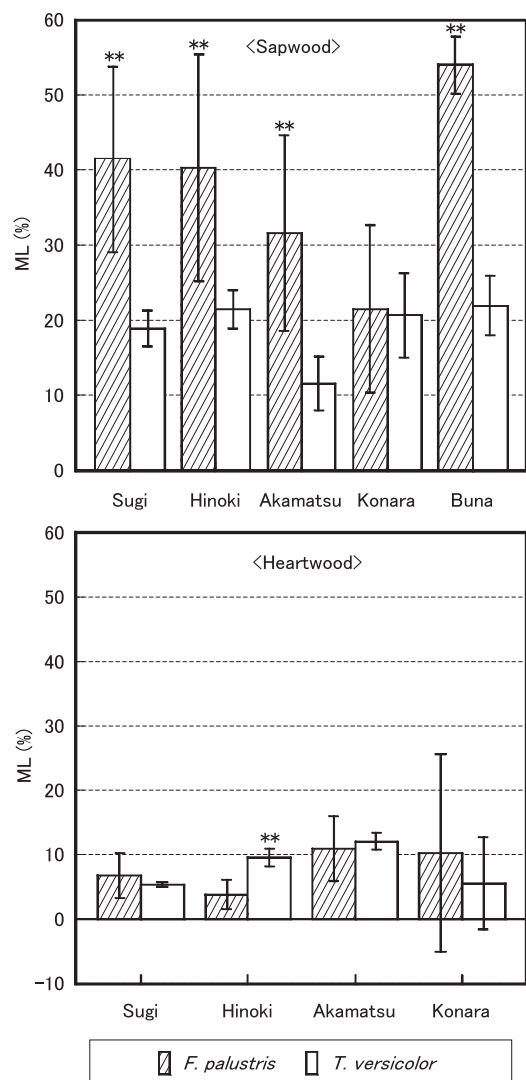


Fig. 2. Mass loss (ML) of sapwood and heartwood of each species after the decay durability test.

Note: **: Significant at 1% level. Error bars represent standard deviations.

れの腐朽区での ML_S を比較して統計的仮説検定 (分散: F 検定, 平均: t 検定) を行った。その結果, スギ, ヒノキ, アカマツ及びブナでは危険率 1% 水準で平均値に差が認められ, オオウズラタケ腐朽区の ML_S が大きかった。

一方, 心材については, オオウズラタケ腐朽区の ML はヒノキの 3.9% (S.D. 2.2) からアカマツの 11.0% (S.D. 5.1) の範囲内に分布し, カワラタケ腐朽区の ML はスギの 5.4% (S.D. 0.3) からアカマツの 12.1% (S.D. 1.3) の範囲内に分布した。樹種別にオオウズラタケとカワラタケそれぞれの腐朽区での ML_S を比較して統計的仮説検定を行った結果, ヒノキでは危険率 1% 水準で平均値に差が認められた。

各樹種の辺材と心材の耐朽比を Table 2 に示す。辺材と心材を比較すると, 心材の耐朽比の値は全体的に辺材よりも大きかった。各樹種について, オオウズラタケとカワラタケそれぞれの腐朽区ごとに辺材と心材の ML_S を比較して統計的仮説検定を行った。その結果, アカマツのカワラタケ腐朽区を除き, コナラのオオウズラタケ腐朽区では危険率 5% 水準で, その他の樹種の辺材と心材では危険率 1% 水準で平均値に差が認められ, 心材の ML_S が小さかった。この結果から, 心材は耐朽性が高い^{38, 39)} ことが確かめられた。

3.2 腐朽材の超音波伝播速度の測定と部分圧縮試験

3.2.1 柱状試験体の ML 及び素材の ML との比較

腐朽処理後の柱状試験体について, 質量減少が明らかに認められた条件は, 全ての樹種の辺材とアカマツの心材でのオオウズラタケ腐朽区であった (Fig. 3)。オオウズラタケ腐朽区の辺材の ML はコナラの 4.3% (S.D. 3.1) からスギの 12.9% (S.D. 2.3) の範囲内に分布し, アカマツの心材の ML は 3.2%

Table 2. The ratios of decay durability for woods grown in Shimane Prefecture compared with buna sapwood.

	Species	The ratio of decay durability	
		<i>F. palustris</i>	<i>T. versicolor</i>
Sap-wood	Sugi	1.27	1.04
	Hinoki	1.30	1.01
	Akamatsu	1.49	1.13
	Konara	1.71	1.02
	Buna	1.00	1.00
Heart-wood	Sugi	2.03	1.21
	Hinoki	2.09	1.16
	Akamatsu	1.94	1.13
	Konara	1.95	1.21

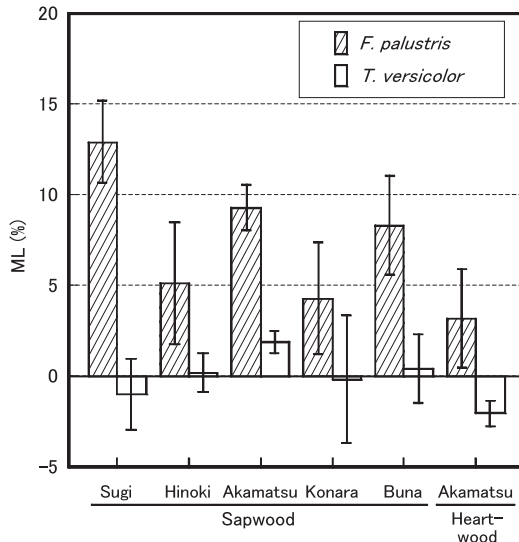


Fig. 3. Mass loss (ML) of square pillar-shaped wood samples after decay treatment with *F. palustris* and *T. versicolor*.

Note: Error bars represent standard deviations.

(S.D. 2.7)であった。この他のスギ, ヒノキ, コナラなどの心材では, MLが-5~0%の範囲内に分布し, 明確な質量減少は認められなかった。藤平ら²⁰⁾は, 20 mm角のスギとヒノキの心材について木口面を被覆してオオズラタケにより腐朽させた時, 質量減少率はスギの心材では腐朽処理60~120日間で15~40%, ヒノキの心材では腐朽処理60~135日間で1~35%であったと報告している。本研究で供試した柱状試験体は断面寸法が大きく, 長さも長いことから, 素材の耐朽比 (Table 2) が高かったスギやヒノキなどの心材が腐朽するのに60日間の腐朽処理では十分でなかったと考えられる。

柱状試験体のMLと素材の耐朽性試験から求めたML (Fig. 2)を比較すると, 柱状試験体のMLが小さかった。腐朽は繊維方向が支配的であり⁴⁰⁾, 腐朽処理中には柱状試験体の側面のみならず上端木口面からの菌糸の成長も確認できた。しかし, 柱状試験体のMLが小さかったことから, 柱状試験体全体が一様に腐朽していなかったと考えられる。

3.2.2 腐朽区とコントロール区での超音波伝播速度の比較

各樹種の辺材と心材について, オオズラタケ腐朽区, カワラタケ腐朽区及びコントロール区での超音波伝播速度の平均値を Fig. 4に示す。なお, 厚さ方向①, ②及び③は, 腐朽処理時に培地と接触していた木口面側から高さ方向へ順に①, ②, ③と示し

ている (Fig. 1)。辺材について, 全ての樹種のオオズラタケ腐朽区ではコントロール区と比較して超音波伝播速度が低下しており, 特に培地近傍の厚さ方向①は著しく小さい傾向が認められた。腐朽処理によるMLが比較的大きかったスギ, アカマツ及びブナのオオズラタケ腐朽区での厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値は, コントロール区と比較してスギでは61%, アカマツでは48%, ブナでは58%小さかった。一方, ヒノキとコナラのそれらは, コントロール区と比較してそれぞれ26%, 29%小さかった。樹種別にオオズラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値を比較して統計的仮説検定 (分散: *F*検定, 平均: *t*検定)を行った。その結果, 全ての樹種について危険率1%水準で平均値に差が認められ, オオズラタケ腐朽区での厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値が小さかった。

心材については, アカマツのオオズラタケ腐朽区で超音波伝播速度が低下しており, 厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値はコントロール区と比較して34%小さかった。アカマツの心材について, オオズラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値を比較して統計的仮説検定を行った。その結果, 危険率1%水準で平均値に差が認められ, オオズラタケ腐朽区での厚さ方向①の超音波伝播速度の平均値が小さかった。

これらの結果より, 超音波伝播速度の平均値は, 腐朽処理によるMLが比較的大きかった全ての樹種の辺材とアカマツの心材でのオオズラタケ腐朽区について, 培地近傍の厚さ方向①の部分で小さくなる傾向が認められた。角谷³²⁾は, スギの辺材をオオズラタケにより腐朽させて超音波伝播速度を測定した結果, 質量減少に伴って超音波伝播速度は著しく低下したと報告している。また, 前田ら⁴¹⁾はスプルース材に腐朽処理を施して引張強度を測定した結果, オオズラタケにより腐朽した材では培地に近い部分の引張強度が最も小さかったと報告している。本研究での結果はこれらと同様な傾向を示しており, オオズラタケによって腐朽した柱状試験体の培地近傍の部分が最も腐朽していたと考えられる。また, 厚さ方向②と③の超音波伝播速度の平均値は厚さ方向①と比較して若干大きい傾向があり, 柱状試験体の長さ方向で腐朽の程度に差異があることを裏付けていると考えられる。

3.2.3 腐朽材の $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ 及びMLと部分圧縮強度との関係

各樹種の辺材と心材について, オオズラタケ腐

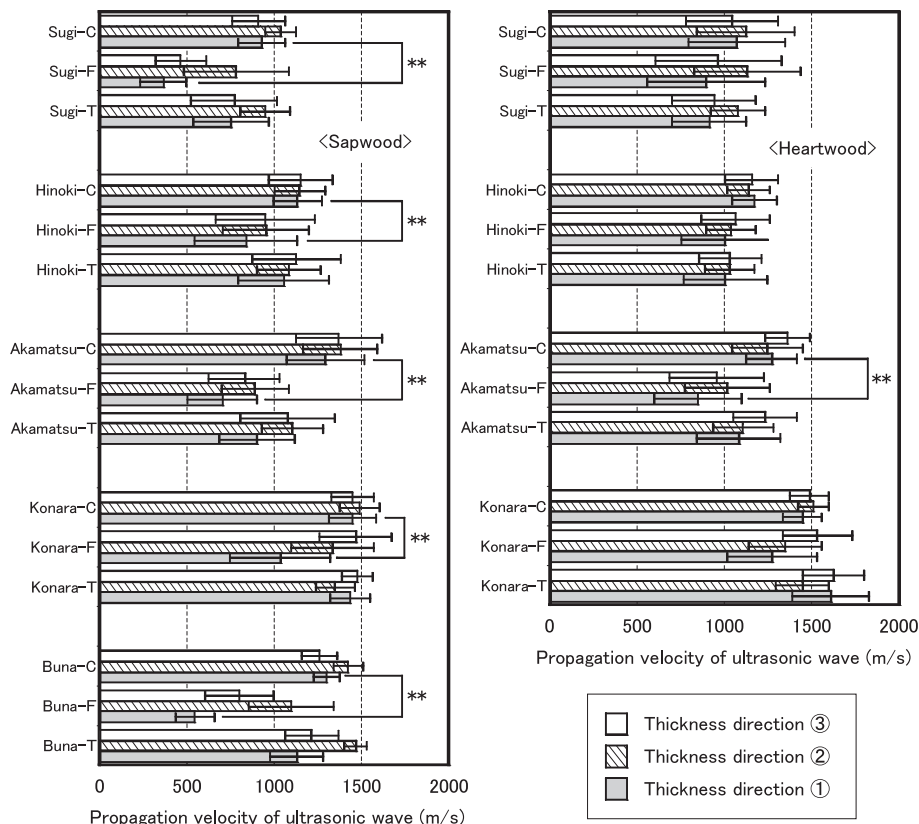


Fig. 4. The propagation velocities of ultrasonic waves along with the thickness directions of sapwood and heartwood for each species after decay treatment.

Notes: C: Control, F: *F. palustris*, T: *T. versicolor*, **: Significant at 1% level. Thickness directions of ①, ②, and ③ are the same as in Fig. 1. Error bars represent standard deviations.

朽区、カワラタケ腐朽区及びコントロール区での $\sigma_{e5\%}$ 、 $\sigma_{e10\%}$ の平均値と変動係数、さらにオオウズラタケとカワラタケそれぞれの腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ のコントロール区に対する比 ($R_{F/C}$ 、 $R_{T/C}$) を Table 3 に示す。辺材について、オオウズラタケ腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値は、コントロール区と比較して小さかった。樹種別にオオウズラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値を比較して統計的仮説検定 (分散: F 検定, 平均: t 検定) を行った。その結果、スギ、アカマツ、コナラ及びブナでは危険率 1% 水準で平均値に差が認められ、オオウズラタケ腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値が小さかった。スギ、アカマツ及びブナの $R_{F/C}$ の値は 0.36~0.50 となっており、これらの ML は 8~13% であった (Fig. 3) ことから、オオウズラタケによる腐朽によって著しい部分圧縮強度の低下が生じたと考えられる。ヒノキとコナラについて

も、ML は 4~5% であり (Fig. 3)、 $R_{F/C}$ の値はそれぞれ 0.82 と 0.85、0.63 と 0.68 であることから、腐朽による部分圧縮強度の低下が生じたと考えられる。カワラタケ腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値は、コントロール区と比較してアカマツ、コナラ及びブナで小さかった。樹種別にカワラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値を比較して統計的仮説検定を行った。その結果、アカマツでは危険率 5% 水準で、コナラとブナでは危険率 1% 水準で平均値に差が認められ、これらの $R_{T/C}$ は 0.79~0.92 であった。

心材については、アカマツのオオウズラタケ腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値は、コントロール区と比較して小さかった。オオウズラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値を比較して統計的仮説検定を行った結果、危険率 1% 水準で平均値に差が認められ、オオウズラタケ腐朽区での

Table 3. Results of partial compression strength tests for woods decayed by *F. palustris* and *T. versicolor*.

Species	Control		<i>F. palustris</i>				<i>T. versicolor</i>				
	$\sigma_{e5\%}$ (N/mm ²)	$\sigma_{e10\%}$	$\sigma_{e5\%}$	$\sigma_{e10\%}$	$R_{F/C}$		$\sigma_{e5\%}$	$\sigma_{e10\%}$	$R_{T/C}$		
			(N/mm ²)				(N/mm ²)				
Sap-wood	Sugi	2.56 (16.8)	3.16 (15.8)	0.97** (22.3)	1.13** (23.4)	0.38	0.36	2.65 (16.1)	3.26 (15.8)	1.03	1.03
	Hinoki	5.58 (26.6)	6.27 (23.9)	4.57 (43.6)	5.31 (38.2)	0.82	0.85	6.12 (24.8)	6.82 (22.5)	1.10	1.09
	Akamatsu	9.16 (15.6)	10.27 (13.5)	4.40** (27.6)	5.09** (26.2)	0.48	0.50	8.07* (18.2)	9.41* (16.3)	0.88	0.92
	Konara	13.10 (9.9)	16.07 (12.7)	8.30** (34.7)	10.93** (31.5)	0.63	0.68	10.33** (12.1)	13.01** (11.2)	0.79	0.81
	Buna	10.74 (8.8)	13.05 (9.7)	4.17** (23.5)	5.55** (24.5)	0.39	0.43	9.15** (13.6)	11.58** (13.5)	0.85	0.89
Heart-wood	Sugi	5.13 (20.9)	5.71 (18.9)	4.75 (21.0)	5.37 (23.3)	0.93	0.94	5.36 (18.5)	5.98 (16.2)	1.05	1.05
	Hinoki	5.36 (16.3)	6.12 (15.6)	5.74 (21.6)	6.51 (20.0)	1.07	1.06	5.55 (13.3)	6.33 (12.7)	1.04	1.03
	Akamatsu	8.00 (18.0)	8.97 (16.7)	4.36** (38.1)	5.24** (35.8)	0.54	0.58	6.85** (19.5)	7.75** (18.8)	0.86	0.86
	Konara	16.38 (11.3)	20.42 (12.6)	14.65** (14.6)	19.29 (11.8)	0.89	0.94	15.58 (11.0)	20.01 (12.3)	0.95	0.98

Notes: $\sigma_{e5\%}$: Partial compression strength at 5% deformation of sample thickness.

$\sigma_{e10\%}$: Partial compression strength at 10% deformation of sample thickness.

$R_{F/C}$: Ratio of partial compression strength of *F. palustris* to control.

$R_{T/C}$: Ratio of partial compression strength of *T. versicolor* to control.

*: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

Each value in parentheses is the coefficient of variation (%).

$\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値が小さかった。この $R_{F/C}$ はそれぞれ0.54, 0.58であり, MLは3.2%であった (Fig. 3) ことから, オオウズラタケによる腐朽によって部分圧縮強度の低下が生じたと考えられる。カラタケ腐朽区での $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の平均値は, コントロール区と比較してアカマツの心材のみ小さかった。これらの結果から, 全ての樹種の辺材とアカマツの心材のオオウズラタケ腐朽区では明らかに腐朽によって部分圧縮強度が低下し, その値はコントロール区に対する比で0.36~0.85になったと考えられた。

$\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ を比較すると, 全ての樹種の辺材と心材について $R_{F/C}$ 及び $R_{T/C}$ における $\sigma_{e5\%}$ と $\sigma_{e10\%}$ の値に著しい差異は認められなかった。また, 辺材5樹種と心材4樹種それぞれの $\sigma_{e5\%}$ あるいは $\sigma_{e10\%}$ の値と気乾密度との関係について, オオウズラタケ腐朽区, カラタケ腐朽区及びコントロール区それぞれで強い相関関係⁴²⁾が認められた ($r=0.76\sim0.98$)。

腐朽による質量減少, 超音波伝播速度の低下及び部分圧縮強度の低下が認められた条件は, 全ての樹種の辺材とアカマツの心材でのオオウズラタケ腐朽区であった。これらについて, ML_S と $\sigma_{e5\%}$ との関係を図5に示す。なお, 回帰曲線はオオウズラ

タケ腐朽区とコントロール区それぞれの値を合わせて示した。 ML_S と $\sigma_{e5\%}$ との関係について, $\sigma_{e5\%}$ は圧縮強度^{24, 43)} あるいは曲げ強度^{17-20, 43)} などと同様に, ML_S が大きくなるのに伴って指数関数的に低下する傾向が認められた。

柱状試験体の ML_S はスギの辺材では9~17%の範囲内に, その他の樹種では0~13%の範囲内に分布している。しかし, 柱状試験体のMLは素材の耐朽性試験から求めたMLよりも小さく, 超音波伝播速度の平均値は培地地面からの距離によって差異が認められた。従って, 載荷部分の質量減少は柱状試験体全体の質量減少より大きい可能性もあり, 今後, 載荷部分の質量減少と部分圧縮強度との関係についてより定量的な検討を要する。

3.2.4 超音波伝播速度の低下率と $\sigma_{e5\%}$ の残存率との関係

オオウズラタケによる腐朽によって超音波伝播速度と $\sigma_{e5\%}$ の低下が生じた全ての樹種の辺材とアカマツの心材について, 厚さ方向①の部分における超音波伝播速度の低下率 (%) と $\sigma_{e5\%}$ の残存率 (%) との関係を Fig. 6 に示す。ここで, 超音波伝播速度の低下率は $\{(\text{コントロール区の平均値} - \text{オオウズラタケ腐朽区各値}) / \text{コントロール区平均値}\} \times$

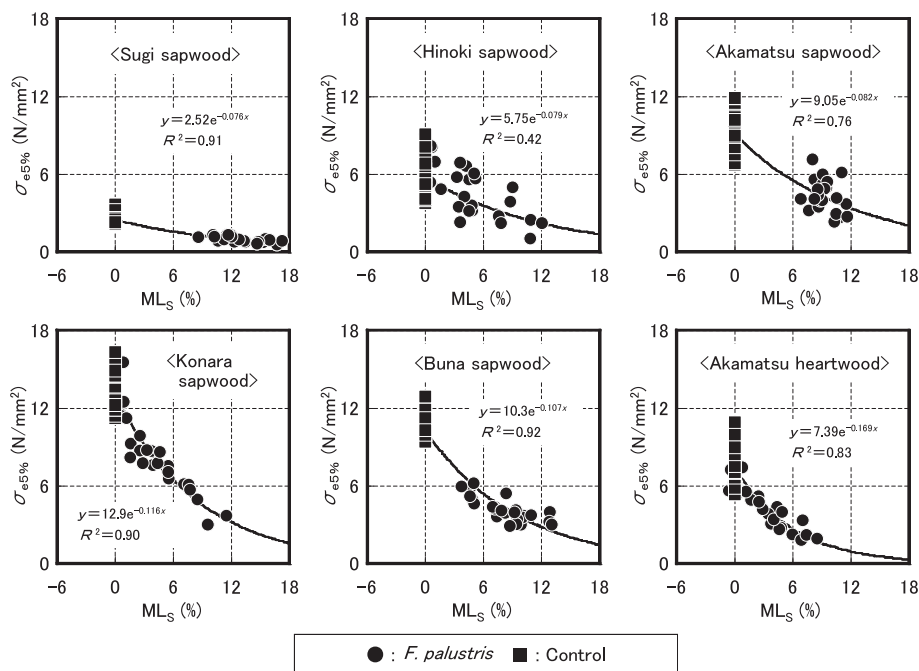


Fig. 5. Relationship between mass loss of each sample (ML_S) and partial compression strength at 5% deformation of sample thickness ($\sigma_{e5\%}$) for decay treatment with *F. palustris* and control.

Note: Regression equations represent relationships between ML_S and $\sigma_{e5\%}$ for *F. palustris* and control. Data of $\sigma_{e5\%}$ were examined at the area of thickness direction ① (see Fig. 1).

100]により算出し、 $\sigma_{e5\%}$ の残存率は{(オオウズラタケ腐朽区の各値/コントロール区の平均値)×100]により算出した。なお、回帰直線はオオウズラタケ腐朽区とコントロール区それぞれの値を合わせて示した。超音波伝播速度の低下率と $\sigma_{e5\%}$ の残存率との関係について、両者の間には強い負の相関関係が認められ、統計的仮説検定(無相関検定)の結果、危険率1%水準で有意であった($r = -0.77^{**} \sim -0.97^{**}$)。従って、超音波伝播速度の低下率によって、腐朽した柱状試験体での部分圧縮強度の残存率を予測できると考えられる。

井道ら⁴⁴⁾は、超音波伝播速度の値は部材のめり込み(部分圧縮)性能を評価するのに適したと報告している。本研究での結果から、超音波伝播速度の値は腐朽した部材の部分圧縮性能の評価にも適用することが可能であり、残存強度の予測に役立つと考えられる。

4. 結 論

スギ、ヒノキ、アカマツ、コナラそれぞれの辺材と心材及びブナの辺材から柱状試験体(厚さ30 mm

×幅30 mm×長さ90 mm)を作製して本研究に供試した。柱状試験体に実験室レベルでJISに準じた腐朽処理を施し、全ての樹種の辺材とアカマツの心材ではオオウズラタケによる腐朽が認められた。腐朽の程度は柱状試験体の長さ方向で差異が見られたが、これら腐朽材の厚さ方向の超音波伝播速度と部分圧縮強度($\sigma_{e5\%}$, $\sigma_{e10\%}$)は、腐朽処理時に培地と接触していた木口面近傍で著しく低下していた。

各腐朽材の培地近傍の材端部における超音波伝播速度の低下率と $\sigma_{e5\%}$ の残存率を求めて解析した結果、両者の間には危険率1%水準で有意な強い負の相関関係($r = -0.77^{**} \sim -0.97^{**}$)が認められた。従って、超音波伝播速度は腐朽材での部分圧縮強度の残存率の予測に適用できると考えられた。

文 献

- 1) Yuko, T., Mario, T.: *J. Wood Sci.* **56**, 339-344 (2010).
- 2) 平井卓郎: 木材学会誌 **53**, 117-126 (2007).
- 3) 松岡昭四郎, 庄司要作: 林試研報 **123**, 137-152 (1960).

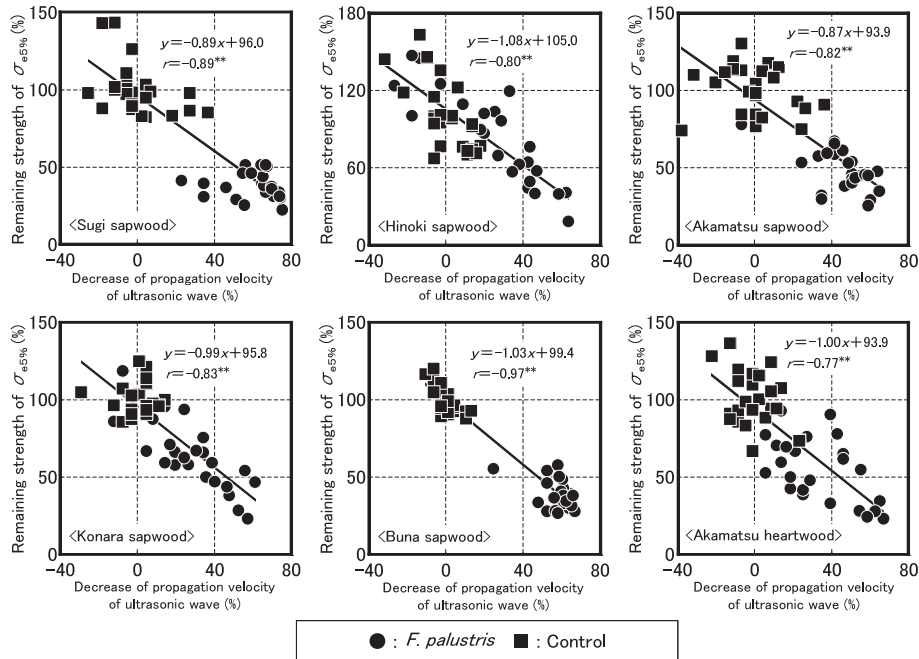


Fig. 6. Relationship between decrease of propagation velocity of ultrasonic waves and remaining partial compression strength at 5% deformation of sample thickness ($\sigma_{e5\%}$) for decay treatment with *F. palustris* and control.

Note: Regression lines represent relationships between decrease of propagation velocity of ultrasonic waves and remaining strength of $\sigma_{e5\%}$ for *F. palustris* and control. Data in this figure were examined at the area of thickness direction ① (see Fig. 1). **: Significant at 1% level.

- 4) 松岡昭四郎, 雨宮昭二, 庄司要作, 井上 衛, 阿部 寛, 内藤三夫: 林試研報 232, 109-135 (1970).
- 5) 酒井温子: 材料 58, 271-279 (2009).
- 6) 松岡昭四郎, 雨宮昭二: 木材工業 28, 108-111 (1973).
- 7) 中村嘉明: 木材保存 17, 17-25 (1991).
- 8) 今村祐嗣: 木材保存 13, 167-173 (1987).
- 9) 高橋旨象: “きのこの生物学シリーズ-6 きのこと木材”, 築地書館, 東京, 1989, pp. 63-65.
- 10) 疋田洋子, 中村嘉明, 東実千代, 木村菜美: 木材保存 21, 178-186 (1995).
- 11) 飯島泰男, 高橋旨象: “木造住宅の耐震”, 日本木材学会地震プロジェクトチーム編, 日本木材学会, 東京, 1996, pp. 53-90.
- 12) 鈴木憲太郎, 軽部正彦, 宮武 敦, 加藤英雄: 木材工業 55, 78-81 (2000).
- 13) 雨宮昭二: 林試研報 150, 143-156 (1963).
- 14) 雨宮昭二, 松岡昭四郎, 庄司要作, 井上 衛, 阿部 寛, 内藤三夫: 林試研報 230, 105-142 (1970).
- 15) 森 満範, 藤原拓哉, 宮内輝久, 杉山智昭: 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, p. 147.
- 16) 田中俊成, 中井 孝: 第33回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 1983, p. 223.
- 17) 福田清春, 原口隆英: 東京農工大農演報 11, 25-29 (1974).
- 18) 土居修一, 西本孝一: 木材学会誌 32, 724-729 (1986).
- 19) Imamura, Y., Fujii, Y., Noguchi, M., Fujisawa, K., Yukimune, K.: *Mokuzai Gakkaishi* 37, 1086-1090 (1991).
- 20) 藤平真紀子, 中村嘉明, 磯田憲生, 疋田洋子: 木材学会誌 43, 589-594 (1997).
- 21) 藤田 誠, 村口良範, 飯島泰男: 木材学会誌 48, 32-37 (2002).
- 22) 滝内 浩, 澤田 圭, 佐々木貴信, 岡崎泰男, 土居修一, 飯島泰男: 木材学会誌 53, 46-51 (2007).

- 23) Sawata, K., Sasaki, T., Doi, S., Iijima, Y.,: *J. Wood Sci.* **54**, 356-361 (2008).
- 24) 戸田正彦, 森 満範, 大橋義徳, 平井卓郎: 木材学会誌 **56**, 41-47 (2010).
- 25) 田中俊成, 中井 孝: 第34回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 1984, p. 32.
- 26) 田中俊成, 中井 孝: 第35回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 1985, p. 330.
- 27) 森 満範, 宮内輝久, 三浦真由己, 藤原拓哉, 杉山智昭: 第52回日本木材学会大会研究発表要旨集, 岐阜, 2002, p. 416.
- 28) 長尾博文, 井道裕史, 軽部正彦, 原田真樹, 加藤英雄, 鈴木憲太郎: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 近畿, 2005, pp. 143-144.
- 29) 有田紀史雄, 三谷 進, 酒井英雄, 富川義朗: 木材工業 **41**, 370-375 (1986).
- 30) 田中俊成, 松岡昭四郎: 第37回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 1987, p. 20.
- 31) 田中俊成: 第38回日本木材学会大会研究発表要旨集, 旭川, 1988, p. 122.
- 32) 角谷和男: 木材研究 **34**, 22-36 (1965).
- 33) 加藤英雄, 鈴木憲太郎, 長尾博文, 井道裕史: 木材保存 **31**, 12-19 (2005).
- 34) 黄 元重, 朴 英蘭, 金 珍暎, 李 東治: 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, 宮崎, 2010, p. 159.
- 35) JIS Z 2101: “木材の試験方法”, 日本規格協会 (1994).
- 36) 黒田尚宏: “わかりやすい樹種別乾燥材生産の技術マニュアル”, 全国木材組合連合会編, 全国木材協同組合連合会, 東京, 2004, pp. 29-30.
- 37) 寺澤 眞: “木材乾燥のすべて”, 海青社, 大津, 2004, pp. 231-238.
- 38) 松岡昭四郎: 木材工業 **29**, 495-499 (1974).
- 39) 福田清春: “木材保存学入門 改訂2版”, 日本木材保存協会編, 日本木材保存協会, 東京, 2005, pp. 48-49.
- 40) 松岡昭四郎: 林試研報 **188**, 175-183 (1966).
- 41) 前田 啓, 太田正光, 桃原郁夫: 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, p. 146.
- 42) 北原覺一: “実用木材加工全書 別巻 木材物理”, 森北出版, 東京, 1969, pp. 137-138.
- 43) 原口隆英: “木材保存学”, 日本木材保存協会編, 文教出版, 大阪, 1982, pp. 52-53.
- 44) 井道裕史, 加藤英雄, 長尾博文: 木材工業 **65**, 448-451 (2010).