

【原著論文】

ケヤキにおける材質育種の可能性

アグン プラセティオ^{1,2}・遠藤 良太³・高島 有哉⁴・石栗 太^{*,1}・
田邊 純¹・相蘇 春菜^{1,2}・亀山 雄擗⁵・大塚 紘平⁵・大島 潤一¹・
飯塚 和也¹・横田 信三¹

Possibility of tree breeding for wood quality in keyaki (*Zelkova serrata*)

Agung Prasetyo^{1,2}, Ryota Endo³, Yuya Takashima⁴, Futoshi Ishiguri^{*,1}, Jun Tanabe¹, Haruna Aiso^{1,2},
Yuusaku Kameyama⁵, Kouhei Ohtsuka⁵, Jyunichi Ohshima¹, Kazuya Iizuka¹, and Shinso Yokota¹

要旨：本研究では、ケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino) における材質育種の可能性を検討するために、千葉県内に植栽された11系統の20年生ケヤキより得られた丸太の材質特性を調査した。生材含水率、容積密度、丸太の曲げヤング率および曲げ強さの全系統の平均値は、それぞれ56.3%、0.61 g/cm³、6.43 GPaおよび73.5 MPaであった。系統を要因とした一元配置の分散分析の結果、含水率を除くすべての材質特性において、比較的高いF値が認められ、選抜育種による材質の改良の可能性が示唆された。また、胸高直径と曲げ強さを除くすべての材質特性の間に有意な相関関係は認められなかったことから、成長の良好な個体であっても必ずしも材質特性が劣らない可能性が明らかとなった。さらに、樹幹の応力波伝播速度を計測することによって、高い強度を有する家系が選抜できることが明らかとなった。

キーワード：生材含水率、容積密度、曲げヤング率 (MOE)、曲げ強さ (MOR)

Abstract: To evaluate the possibility of tree breeding for wood quality in keyaki (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino), wood quality of logs was investigated for 11 strains of 20-year-old trees planted in Chiba, Japan. Mean values of moisture content, basic density, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) were 56.3%, 0.61 g/cm³, 6.43 GPa, and 73.5 MPa, respectively. Relatively higher F-values in analysis of variance test were found in all characteristics, except for moisture content, suggesting that wood quality of keyaki could be improved by selection of superior trees through tree breeding programs. No significant correlations were observed between stem diameter and wood quality, except for MOR. It is considered that, in keyaki, the trees with higher growth rate do not always have lower

* E-mail: ishiguri@cc.utsunomiya-u.ac.jp

¹ 宇都宮大学農学部 Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya, Tochigi 321-8505, Japan

² 東京農工大学大学院連合農学研究科 United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

³ 千葉県農林総合研究センター森林総合研究所 Forest Research Institute, Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center, Sanmu, Chiba 289-1223, Japan

⁴ 森林総合研究所林木育種センター Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Hitachi, Ibaraki 319-1301, Japan

⁵ 栃木県林業センター Tochigi Prefectural Forestry Research Center, Utsunomiya, Tochigi 321-2105, Japan

2016年7月22日受付、2016年12月1日受理

wood quality. Furthermore, stress-wave velocity of stem was positively correlated with MOE and MOR of logs, indicating that stress-wave velocity is one of the useful indicators to select the trees with higher strength properties of wood in keyaki.

Keywords: moisture content in green condition, basic density, modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR)

はじめに

ケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino) は、本州、四国および九州に生育する落葉広葉樹で、その材は、建築用材、家具、椀木地など、様々な用途に古くから利用され、また、比較的高値で取引されている (橋詰 1988; 原口 1992; 伊東ら 2011)。

これまでにケヤキにおいて、多くの選抜育種が試みられている (橋詰 1988; 原口 1992; 小平 1993; 遠藤ら 1998; 竹内ら 1999; 森ら 2004; 吉野ら 2006; 木戸口ら 2010)。竹内ら (1999) は、関東、関西および九州地方の 14 林分 62 本から収集した、種子由来の 2 年生苗木の苗高、根元径および分岐性を調査し、家系間差が認められることを報告している。また、森ら (2004) は、熊本県および福岡県から得られた優良ケヤキ 6 家系について、胸高直径、幹長および枝下高を計測し、いずれの形質においても有意な家系間差が認められることを明らかにしている。このように、胸高直径、樹高などの成長形質に関しては、家系間変異が存在し、改良が可能である事が指摘されている (遠藤ら 1998; 竹内ら 1999; 森ら 2004; 吉野ら 2006)。一方、前報 (Agung et al. 2015, 2016) では、ケヤキにおける木材性質の家系間変異を明らかにするために、千葉県内に植栽された 4 年生次の成長形質に家系間差が認められている家系について (遠藤ら 1998)、20 年生次の樹幹の応力波伝播速度および組織学的特徴の家系間変異を調査し、これらの形質において、家系間で有意な差が認められることを明らかにした。しかしながら、一般に流通しているケヤキ材を対象とした木材性質に関する報告 (中井・山井 1982; 藤田 1987; 森林総合研究所 2004; 井道ら 2012) と比較すると、選抜された家系の木材性質を調査し、家系間変異を明らかにした例は少なく (Agung et al. 2015, 2016)、さらに調査が必要である。

本研究では、ケヤキにおける材質育種の可能性を検討するために、千葉県農林総合研究センター森林研究所上総試験園のケヤキ密度管理試験林に植栽された、11 系統の 20 年生ケヤキから得られた丸太の材質特性を調査した。

材料と方法

材料は、千葉県農林総合研究センター森林研究所上総試験園 (北緯 35°20'、東経 140°02') に設定された、ケヤキ密度管理試験林より得た。この試験林は、1993 年に、千葉県君津市内の面積約 1 ha のケヤキが優占する広葉樹林から樹高、胸高直径などを基準として選抜したケヤキ 9 個体から得られた 9 家系、千葉県木更津市で得られた在来、埼玉県および茨城県内で育成され市場で購入の 3 実生集団、1 クローン (むさしの 1) の合計 13 系統を用いて、初期植栽間隔 1.1 × 1.1 m (8250 本/ha)、1.3 × 1.36 m (5500 本/ha)、2.0 × 1.8 m (2750 本/ha) で造成された (小平 1993)。また、試験林は、3 反復の中に前述した 3 つの密度区分があり、合計 9 プロットで構成され、各プロットの中に、これらの家系等が各 1 ~ 複数列配置されている (遠藤ら 1998)。この検定林における 1 ブロック内の 3 つの初期植栽間隔から、8 家系 (表-1 の A ~ H、1 家系は、残存本数が少なく伐採することができなかった) およびクローンを除く 3 実生集団 (表-1 の I ~ III) の合計 11 系統について各 1 本ずつ、合計 33 本を 2013 年 5 月に伐採した。なお、伐採前に、胸高直径、樹高および樹幹の応力波伝播速度を、既報 (Agung et al. 2015) に準じて測定した (表-1)。伐採後、地上高 1.2 m から上部に向かって長さ 2 m の丸太を、地上高 1.2 m 部位から下部に向かって厚さ 5 cm の円盤をそれぞれ採取し、以下の実験に供した。

本研究では、生材含水率、容積密度、生材状態での丸太の静的曲げヤング率および曲げ強さを測定した。生材含水率および容積密度を測定するために、地上高 1.2 m 部位より得られた円盤から、中心角 30° の扇形試験片を作製した。試験片の生材重量を測定後、浮力法により生材容積を測定し、その後 105 °C に設定した乾燥機中で全乾状態とし、全乾重量を測定した。生材含水率は、生材重量および全乾重量から、容積密度は、生材容積および全乾重量から、それぞれ求めた。静的曲げ試験は、生材状態の丸太について、万能試験機 (エー・アンド・デイ、RTC-2410A) を用いて、スパン 1,000 mm、荷重速度 20 mm/min、中央集中荷重方式で行った。得られた荷重-たわみ曲線から、曲げヤング率および曲げ強さを求めた。なお、丸太の断面直径は、末口と元口の平均直径とした。

表-1 供試木の胸高直径、樹高および応力波伝播速度

系統	n	D (cm)		TH (m)		SWV (km/s)	
		平均	SD	平均	SD	平均	SD
A	3	6.2	1.5	9.8	4.7	3.05	0.01
B	3	7.4	1.7	9.6	1.2	3.19	0.25
C	3	8.3	1.0	9.6	0.3	3.07	0.04
D	3	5.8	0.8	7.6	1.2	3.13	0.10
E	3	9.5	0.8	10.6	1.1	3.18	0.02
F	3	7.6	1.2	8.6	0.5	3.01	0.21
G	3	7.8	0.3	7.6	1.8	3.00	0.02
H	3	7.2	0.7	9.2	1.2	3.23	0.06
I	3	4.0	0.2	5.1	0.6	2.95	0.14
II	3	5.8	1.4	6.6	1.6	2.44	0.24
III	3	8.4	1.6	9.6	1.4	3.06	0.07
全体	33	7.1	1.8	8.5	2.4	3.03	0.25

n: 個体数、D: 胸高直径、TH: 樹高、SWV: 樹幹の応力波伝播速度、SD: 標準偏差。

丸太材質の系統間差は、統計ソフト R Version 3.2.1 (R Core Team 2015) を用いて、系統を要因とした一元配置の分散分析により求めた。

結果と考察

表-2 に、丸太の材質特性を示す。全系統の生材含水率および容積密度の平均値は、56.3% および 0.61 g/cm³ であった。木材工業ハンドブック (森林総合研究所 2004) によれば、ケヤキの心材および辺材の生材含水率は、78 および 87% であり、容積密度は、492 ± 52.2 kg/m³ (0.49 ± 0.05 g/cm³) と報告されている。本研究における全系統の平均値は、これまでの報告と比較して、生材含水率では低い値を示し、容積密度では高い値を示した。一方、曲げヤング率および曲げ強さの全系統の平均値は、6.43 GPa および 73.5 MPa であった。これまでに、無欠点小試験片の曲げヤング率および曲げ強さは、含水率 11 ~ 15% において、それぞれ 8.0 ~ 12.0 GPa、70 ~ 110 MPa であることが報告されている (中井・山井 1982; 藤田 1987; 森林総合研究所 2004; 井道ら 2012)。本研究では、生材状態で丸太の曲げヤング率および曲げ強さを測定したため、これまでに得られている無欠点小試験片での値から、含水率 28% 時の値を推定した (高橋・中山 1995)。その結果、上述した、無欠点試験片で得られた曲げヤング率および曲げ強さは、それぞれ 6.15 ~ 9.23 GPa および 41.2 ~ 55.0 MPa であった。欠点の有無や断面寸法の違いを考慮して、これまでに得

られている無欠点試験片での値と比較すると、本研究で得られた結果は、曲げヤング率ではほぼ同等の値であり、曲げ強さはやや高い値を示すと考えられる。

これまでに、ケヤキにおいては、成長形質に家系間差が認められることが報告されている (遠藤ら 1998; 竹内ら 1999; 森ら 2004; 吉野ら 2006)。遠藤ら (1998) は、本研究で対象とした林分において、4 年生次に千葉県内で選抜された 12 家系の胸高直径、樹高、枝張りおよび幹曲がりについて調査した結果、いずれの形質においても家系間差が認められたことを報告している。同様に、12 年生の兵庫県内で選抜された 10 家系においても、胸高直径、樹高、枝張り、幹曲がりおよび枝下高に家系間差が認められている (吉野ら 2006)。また、樹幹の応力波伝播速度においては、20 年生の千葉県内で選抜された 8 家系 (本報告の A ~ H) において、家系間差が認められている (Agung et al. 2015)。本研究では、千葉県内で選抜された 8 家系 (A ~ H) について家系を要因とした一元配置の分散分析を行った結果、いずれの材質特性においても有意な家系間差は認められなかった。しかしながら、8 家系に 3 在来実生 (I ~ III) を加えた 11 系統で一元配置の分散分析を行ったところ、調査した材質特性のうち、含水率を除くすべての材質特性において、比較的高い F 値が得られた (表-2)。従って、ケヤキにおいては、胸高直径や樹高などの成長形質、幹曲がりなどの外観上の形質に加えて、材密度やヤング率、曲げ強さについても、育種による改良が可能であることが示唆された。

表-3 に、胸高直径と樹高、応力波伝播速度および丸

表-2 丸太の材質特性

系統	n	MC (%)		BD (g/cm ³)		MOE (GPa)		MOR (MPa)	
		平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
A	3	54.8	1.5	0.61	0.01	6.51	0.20	71.9	6.2
B	3	54.4	5.1	0.62	0.02	7.02	1.60	85.0	9.3
C	3	56.5	4.6	0.60	0.02	7.99	2.08	85.9	12.8
D	3	55.5	4.9	0.64	0.01	7.60	0.35	80.0	4.5
E	3	58.6	5.5	0.61	0.02	5.03	0.30	83.9	3.4
F	3	54.4	4.8	0.63	0.03	7.12	0.34	80.9	6.6
G	3	59.0	1.9	0.62	0.03	6.76	0.70	78.2	4.4
H	3	54.6	2.5	0.65	0.05	6.31	0.84	73.3	5.6
I	3	51.7	4.2	0.61	0.04	6.21	1.08	60.5	9.4
II	3	63.5	4.4	0.57	0.02	4.73	0.19	42.1	7.0
III	3	56.7	6.2	0.56	0.02	5.48	0.79	67.0	2.8
全体	33	56.3	5.3	0.61	0.04	6.43	1.37	73.5	14.4
8家系のF値(p値)		0.411 (0.88)		0.723 (0.66)		1.527 (0.23)		1.042 (0.44)	
11系統のF値(p値)		1.024 (0.46)		2.086 (0.07)		2.256 (0.05)		6.716 (0.00)	

n: 個体数、MC: 含水率、BD: 容積密度、MOE: 曲げヤング率、MOR: 曲げ強さ、SD: 標準偏差。

太の材質特性との相関関係を示す。胸高直径と樹高および丸太の曲げ強さを除く、すべての形質の間で有意な相関は認められなかった。このことから、含水率、容積密度や曲げヤング率のような材質特性は、肥大成長とは独立した形質であると考えられる。このことは、これまでに針葉樹やケヤキ以外の広葉樹において認められている傾向や (小泉ら 1990 ; 池田・有馬 2000 ; Ishiguri et al. 2012 ; 石栗ら 2013 ; 倉持ら 2014)、ケヤキにおける胸高直径と応力波伝播速度の間に、有意な相関関係が認められないとする報告 (Agung et al. 2015) と一致する。一方、胸高直径と丸太の曲げ強さとの間に、有意な正の相関関係が認められた (表-3)。ケヤキにおいては、年輪幅の増加に伴って、縦圧縮強さが増加する傾向が認められている (橋詰ら 1987)。ケヤキは、環孔材であり、年輪幅の増加は、孔圏外における、機械的支持機能を有する木繊維量の増加を意味しており、本研究において認められた、胸高直径と丸太の曲げ強さとの間の正の相関関係は、年輪幅の増加に伴う木繊維量の増加による圧縮強さの増加によって生じたのかもしれない。いずれにせよ、ケヤキにおいては、肥大成長の良好な個体が、必ずしも強度などの材質特性が劣る個体とは限らず、成長と材質の優れた個体を選抜できる可能性が示唆された。

図-1 に示したように、本研究では、応力波伝播速度と曲げヤング率または曲げ強さとの間に、正の相関関係が認められた。針葉樹においては、樹幹の応力波伝

表-3 胸高直径との相関関係

要因	相関係数 (n = 33)
TH	0.740 **
SWV	0.254 ns
MC	-0.036 ns
BD	-0.080 ns
MOE	-0.094 ns
MOR	0.444 **

n: 個体数、TH: 樹高、SWV: 樹幹の応力波伝播速度、MC: 含水率、BD: 容積密度、MOE: 曲げヤング率、MOR: 曲げ強さ、**: 1% 水準で有意、ns: 非有意。

播速度は、丸太のヤング率や製材の曲げヤング率などと正の相関関係にあるため (名波ら 1993 ; 池田・有馬 2000 ; 井城ら 2006 ; 石栗ら 2006)、スギやトドマツでは、精英樹の評価に用いられてきている (井城ら 2006 ; 三嶋ら 2011)。一方、針葉樹においては、樹幹の応力波伝播速度と板材の曲げ強さの間の相関係数は、曲げヤング率のそれと比較すると、やや低い値を示すことが多い (たとえば、石栗ら 2006)。本研究では、応力波伝播速度と曲げ強さの間で得られた相関係数は、曲げヤング率との間で得られた相関係数よりも高い値を示し、針葉樹において得られる傾向と異なる傾向が認められた。このことから、ケヤキにおいては、樹幹の応力波伝播速度から板材の曲げヤング率も推定可能であるが、曲げ強さをより精度よく推定できる可能性が示唆され、

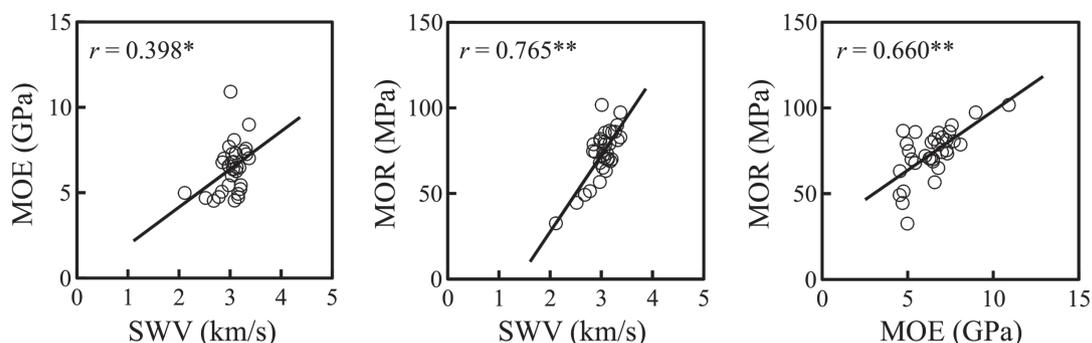


図-1 樹幹の応力波伝播速度、丸太の曲げヤング率および曲げ強さの相関関係。n = 33、SWV: 樹幹応力波伝播速度、MOE: 曲げヤング率、MOR: 曲げ強さ、r: 相関係数、*: 5% 水準で有意、**: 1% 水準で有意。

樹幹の応力波伝播速度を指標として、曲げヤング率や曲げ強さの高い個体を選抜できることが明らかになった。

一般に、実大材において、曲げヤング率と曲げ強さの間には高い正の相関関係が認められる(丸山ら 1983 ; 井道ら 2012)。例えば、丸山ら (1983) は、気乾状態のスギ正角材 (断面 105 × 105 mm) 50 本について曲げ試験を行った結果、曲げヤング率と曲げ強さとの間の相関係数は、0.76 であったことを報告している。同様に、ケヤキ材においても、断面 240 × 240mm の材 30 本における両者の決定係数は、0.46(相関係数に換算すると 0.68) であることが報告されている (井道ら 2012)。本研究においては、図-1 に示したように、丸太の曲げヤング率と曲げ強さの間に正の相関関係 ($r=0.660$) が認められた。従って、木材を構造用材として利用する際に重要な指標である、曲げ強さを推定する場合、曲げヤング率を利用する事が可能であり、また、曲げヤング率の高い系統を選抜することによって、より強度性能の優れたケヤキ材生産が可能となると考えられる。

まとめ

本研究では、ケヤキにおける材質育種の可能性を検討するため、千葉県木更津市に植栽された 11 系統の 20 年生ケヤキから得られた丸太の材質特性を調査した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 全系統の生材含水率および容積密度の平均値は、56.3% および 0.61 g/cm³ であった。また、曲げヤング率および曲げ強さの全系統の平均値は、6.43 GPa および 73.5 MPa であった。
- 2) 8 家系および 3 実生集団の合計 11 系統について、系

統を要因とした一元配置の分散分析の結果、調査した材質特性のうち、含水率を除くすべての材質特性において、比較的高い F 値が認められた。従って、ケヤキにおいては、材密度やヤング率などについても、成長特性と同様に、育種による改良が可能であることが示唆された。

- 3) 胸高直径と、樹高、樹幹の応力波伝播速度および丸太の材質特性との間の相関関係を調査した結果、樹高および丸太の曲げ強さを除く、すべての特性の間で有意な相関関係は認められなかった。このことから、ケヤキにおいては、肥大成長が良好な個体が、必ずしも強度などの材質特性が劣る個体とは限らず、成長と材質の優れた個体を選抜できる可能性が示唆された。
- 4) 樹幹の応力波伝播速度と丸太の曲げヤング率および曲げ強さとの間に、有意な正の相関関係が認められた。特に、曲げ強さとの間に高い相関係数が得られた。同様に、丸太の曲げヤング率と曲げ強さとの間にも、正の相関関係が認められた。これらのことから、樹幹の応力波伝播速度やヤング率を計測することによって、ヤング率のみでなく破壊時の強さを含む、高い強度性能を持つケヤキ品種を選抜できる可能性が明らかとなった。

引用文献

- Agung P, Endo R, Takashima Y, Aiso H, Hidayati F, Tanabe J, Ishiguri F, Iizuka K, Yokota S (2015) Variations in growth characteristics and stress-wave velocities of *Zelkova serrata* trees from eight half-sib families planted

- in three different initial spacings. *Journal of Forest and Environmental Science* 31: 235–240
- Agung P, Endo R, Takashima Y, Ishiguri F, Tanabe J, Aiso H, Hidayati F, Ohshima J, Iizuka K, Yokota S (2016) Anatomical characteristics in 20-year-old *Zelkova serrata* trees from eight half-sib families. *Journal of Wood Science* 62: 472–476
- 遠藤良太・小平哲夫・明石孝輝 (1998) 千葉県におけるケヤキ優良家系の諸形質. 千葉県林業試験場研究報告 9: 1–4
- 藤田晋輔 (1987) 南九州地域に生育する広葉樹材の利用開発 (VII) ケヤキ樹幹内における機械的性質の変動. 鹿児島大学農学部学術報告 37: 225–235
- 原口雅人 (1992) ケヤキ育種の現状と問題. 林木の育種 165: 27–32
- 橋詰隼人 (1988) ケヤキの生長、材質の特性と育種について. 林木の育種 147: 1–5
- 橋詰隼人・古川郁夫・作野友康・大森裕司 (1987) ケヤキの利用材積と材質について. 広葉樹研究 4: 49–59
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2012) ケヤキ実大材の曲げおよび縦圧縮強度. 木材学会誌 58: 144–152
- 池田潔彦・有馬孝禮 (2000) 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (第2報) 応力波伝播速度によるスギ林分の評価と平角製材製造への適用. 木材学会誌 46: 189–196
- 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信 (2006) トドマツ精英樹等クロウンの動的ヤング率における樹高方向の変動と立木非破壊評価. 木材学会誌 52: 344–351
- 石栗太・川島麻里・飯塚和也・横田信三・吉澤伸夫 (2006) 27年生ヒノキにおける立木の応力波伝播速度と材質の関係. 材料 55: 576–582
- 石栗太・川島麻里・飯塚和也・横田信三・吉澤伸夫 (2013) 27年生ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) における肥大成長速度と木材性質の関係. 宇都宮大学農学部附属演習林報告 49: 9–14
- Ishiguri F, Takeuchi M, Makino K, Wahyudi I, Takashima Y, Iizuka K, Yokota S, Yoshizawa N (2012) Cell morphology and wood properties of *Shorea acuminatissima* planted in Indonesia. *IAWA Journal* 33: 25–38
- 伊東隆夫・佐野雄三・安部久・内海泰弘・山口和穂 (2011) カラー版 日本有用樹木誌. 海青社, 大津
- 木戸口佐織・蓬田英俊・神山博希 (2010) ケヤキ優良木の選抜と見本林の造成. 岩手県林業技術センター研究報告 18: 1–6
- 小平哲夫 (1993) 育成天然林施業に関する研究, ケヤキの密度管理試験林造成. 平成4年度千葉県林業試験場業務報告 27: 11
- 小泉章夫・高田克彦・上田恒司・片寄麟 (1990) カラマツ精英樹の肥大生長と材質 (第1報) つぎ木クロウンの肥大生長、容積密度数および樹幹ヤング係数. 木材学会誌 36: 98–102
- 倉持海音・相蘇春菜・サピットディロクスムブン・田邊純・大島潤一・石栗太・高島有哉・飯塚和也・横田信三・逢沢峰昭・大久保達弘 (2014) タイ東北部に植栽された5年生 *Eucalyptus camaldulensis* の成長とパルプ特性に関連した木材性質の家系間変異. 森林遺伝育種 3: 146–152
- 丸山則義・有馬孝禮・岡崎光・早村俊二 (1983) 国産造林木の応力等級に関する基礎的研究. 静岡大学農学部演習林報告 7: 39–44
- 三嶋賢太郎・井城泰一・平岡裕一郎・宮本尚子・渡辺敦史 (2011) 関東育種基本区におけるスギ精英樹クロウンの立木材質の評価. 木材学会誌 57: 256–264
- 森康浩・宮原文彦・大長光純・平岡裕一郎 (2004) 有用広葉樹としてのケヤキの育種—優良ケヤキ次世代の初期成長とクワカミキリ被害—. 九州森林研究 57: 207–209
- 中井孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要35樹種の強度的性質. 林業試験場研究報告 319: 13–46
- 名波直道・中村昇・有馬孝禮・大熊幹章 (1993) 応力波による立木の材質測定 (第3報) 林分としての立木材質評価. 木材学会誌 39: 903–909
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (2015年7月21日アクセス)
- 森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック. 丸善, 東京
- 高橋徹・中山義雄 (1995) 木材科学講座3 物理. 海青社, 大津, p174
- 竹内寛興・栗延晋・千吉良治・宮田増男 (1999) ケヤキ諸形質の遺伝変異 (I) 産地別、家系別の成長と遺伝率. 日本林学会九州支部研究論文集 52: 47–48
- 吉野豊・前田雅量・谷口真吾 (2006) ケヤキ選抜母樹系統の次代検定—植栽12年後の生育状況—. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 (森林林業編) 53: 52–55