

簡易手法による奈良県産スギ丸太の強度測定とその製材品の強度予測

中晶平・森下真衣・寺西康浩*1・矢杉瑠美*2・長尾明*2

奈良県産スギを対象として、推定密度および余尺を0cmとみなした材長を用いた簡易手法により、丸太の縦振動ヤング係数を求めた。また、その丸太から製造された製材品のヤング係数との関係を調査した。その結果、両者には相関があり、本報で試みた手法は、丸太の段階でその丸太から得られる製材品（心持ち正角および平角）の強度等級を予測する際に活用できることが示された。

1. はじめに

令和3年10月、「脱炭素の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、民間建築物を含む建築物一般での木材利用を促進する動きが広がっている。令和7年には、「脱炭素社会の実現に資するための建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律の一部を改正する法律」が施行予定であり、木造建築物の建築確認検査や審査省略制度の対象が見直されることなどから、強度の明らかな構造材のニーズは今後より一層高まると考えられる。

丸太の強度区分は、素材の日本農林規格（JAS1052）¹⁾において、縦振動ヤング係数試験で得られる縦振動ヤング係数に基づいて定められている（表1）。また、製材品の機械等級区分は、製材の日本農林規格（JAS1083）²⁾において、曲げ試験により測定された曲げヤング係数に基づいて定められている（表2）。構造用製材品の強度測定は、製品として仕上がった後に行うものであるが、丸太の段階でその丸太から得られる製材品の強度等級を予測することができれば、木材流通における丸太調達ロスの削減や丸太の付加価値向上が期待される。丸太の段階での製材品の強度予測については、京都府産のスギおよびヒノキ丸太において、固有振動数と密度の回帰直線式から得られた推定密度を用いた手法が、簡便かつ有効であることが報告されている^{3,4)}。また、和歌山県では、丸太の密度を700 kg/m³と仮定した上で和歌山県産スギおよびヒノキ丸太の縦振動ヤング係数を測定し、丸太の強度分布の推定がなされている⁵⁾。

そこで、本報では、奈良県産スギを対象に、丸太の段階での強度区分を把握し、それら丸太から製造した製材品の強度等級と比較することで、丸太の段階での製材品の強度予測の確度を調査した。また、製材品の木取り（心持

表1 針葉樹丸太の縦振動ヤング係数の基準¹⁾

区分	縦振動ヤング係数 (GPa又は10 ³ N/mm ²)
Ef50	3.9以上 5.9未満
Ef70	5.9以上 7.8未満
Ef90	7.8以上 9.8未満
Ef110	9.8以上 11.8未満
Ef130	11.8以上 13.7未満
Ef150	13.7以上

表2 製材品の曲げヤング係数の基準²⁾

等級	曲げヤング係数 (GPa又は10 ³ N/mm ²)
E50	3.9以上 5.9未満
E70	5.9以上 7.8未満
E90	7.8以上 9.8未満
E110	9.8以上 11.8未満
E130	11.8以上 13.7未満
E150	13.7以上

ち正角および平角)が等級予測に及ぼす影響も調べた。その際、素材の日本農林規格に則った計測のみならず、推定密度とみなしの材長を用いた簡易手法も試み、得られた丸太の強度区分について表1を、製材品の強度等級は表2を活用することとした。

なお、本取り組みは、令和4年度奈良の木サプライチェーン構築事業（奈良の木ブランド課（現 県産材利用推進課））により実施した。

2. 材料と方法

2.1 供試木

*1 奈良県 環境森林部 フォレスターアカデミー

*2 奈良県 環境森林部 県産材利用推進課

県内製材工場で取り扱われていた奈良県産スギ丸太 202 本を供試木とした。素材の日本農林規格に基づく方法¹⁾で、末口径、元口径、材長および重量を測定し、次式により丸太の見かけの密度を算出した。

$$\rho = W / (D^2 \times \pi / 4 \times L \times 1 / 10000) \quad \dots \dots (1)$$

ρ : 見かけの密度 (kg/m³)、 W : 重量 (kg)、
 D : 両木口の最大径と最小径の平均を平均した値 (cm)、
 π : 3.14、 L : 材長 (m)

供試木の末口径別本数を表 3 に示す。なお、ここでは、材長が 3000mm 以上 4000mm 未満の供試木を「3m 材」、4000mm 以上 5000mm 未満のそれを「4m 材」と呼ぶ。

2.2 丸太の縦振動ヤング係数の算出

2.2.1 簡易型強度測定器

本研究では、縦振動の固有振動数を計測するにあたり、FFT アナライザーとして簡易型強度測定器(HG-2020sp、

株式会社エーティーエー製)を使用した。この装置は、構造用製材品および丸太のヤング係数の簡便な測定を目的として開発され市販されている。また、この装置は、材長および後述する「丸太の固有振動数と密度の回帰直線式」の係数をあらかじめ設定しておくことで、ハンマーで丸太の木口面を打撃して縦振動の固有振動数を測定すると同時に、付属する端末の画面でヤング係数および強度区分・等級が表示されるしくみである。

2.2.2 素材の日本農林規格に基づく算出方法

丸太の木口面をハンマーで打撃し、2.2.1 で述べた測定器を用いて一次の固有振動数を測定した(図 1)。丸太がはい積みされていた場合には、はい積みを崩し、個々の丸太が他の丸太と接触しないように、1 本ずつ輪木上に置いた状態で測定に供した。そして、素材の日本農林規格(JAS1052)に準じて¹⁾、2.1 で測定した材長と、算出した見かけの密度を用い、次式により丸太の縦振動ヤング係数を算出した。ここでは、2.2.3 で説明する簡易手法による値と区別するために、 E_{T-JAS} と表示することにした。

表 3 供試木の末口径別本数

供試木	末口径別本数(本)						計
	20cm未満	20cm以上 26cm未満	26cm以上 32cm未満	32cm以上 38cm未満	38cm以上 44cm未満	44cm以上	
3m材	55	32	0	0	0	0	87
4m材	39	10	26	21	13	6	115
計	94	42	26	21	13	6	202

※調査期間：令和 4 年 7 月 28 日～11 月 25 日

※末口径は最大径と最小径の平均値



図 1 固有振動数の測定

$$E_{fr-JAS} = (2 \times L \times f)^2 \times \rho / 10^9 \quad \dots \dots (2)$$

E_{fr-JAS} : 素材の日本農林規格に基づく縦振動ヤング係数 (GPa)、 L : 材長 (m)、 f : 固有振動数 (Hz)、 ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

2.2.3 推定密度を用いた簡易手法による算出方法

素材の日本農林規格に定められた方法では、密度を求めるために重量や材長の測定を行う必要があり、実際の現場ではそれらの作業は大きな負担となる。この負担を軽減するため、本報では、固有振動数から推定される密度と、みなしの材長を用いて丸太の縦振動ヤング係数を算出した。

具体的には、2.2.1 で述べた測定器を用いて測定した一次の固有振動数と 2.1 で算出した見かけの密度から、奈良県産スギ丸太における「固有振動数と密度の回帰直線式 (以下、密度推定式)」を求め、得られた推定密度 (ρ') と、余尺を 0cm とみなした材長 (L') を用いて、次式(3)により丸太の縦振動ヤング係数を算出した。本報ではこれを簡易手法と呼び、2.2.2 による値と区別するために、ここでは $E_{fr-handy}$ と表示する。

$$E_{fr-handy} = (2 \times L' \times f)^2 \times \rho' / 10^9 \quad \dots \dots (3)$$

$E_{fr-handy}$: 簡易手法を用いた場合の縦振動ヤング係数 (GPa)、 L' : 余尺を 0cm とみなした材長 (m)、 f : 固有振動数 (Hz)、 ρ' : 推定密度 (kg/m^3)

なお、丸太の材長は、実際には所定の寸法にいくらかの予備を加えて長めに調整されることが多いが、ここでは余尺を 0cm、つまり予備の長さを無視することとし、具体的には 3m または 4m とした。このため式(3)で算出される値は、2.2.2 による値 (E_{fr-JAS}) よりも小さくなる場合が多いと予想される。

2.3 製材品のヤング係数の計測

丸太の段階での強度区分を把握し、それら丸太から製造した製材品の強度等級を予測したときの確度を調べるため、縦振動ヤング係数を計測した丸太から製造された製材品のヤング係数を計測した。どの丸太から製造された製材品かを把握するため、製材前の丸太の木口面の中央に個体識別番号を付した。その後、県内 3 箇所の製材工場に協力いただき、丸太を製品段階まで追跡し、各製品のヤング係数の測定値を得た。製材木取りは、心持ち正角 (以下、正角) および心持ち平角 (以下、平角) とした。供試木 (丸太) 202 本のうち製材された本数は 181 本で

あり、その内訳は、正角 108 本 (3m 材 84 本、4m 材 24 本)、平角 73 本 (全て 4m 材) であった。乾燥方法は人工乾燥とし、目標含水率は 20% とした。製材品の断面寸法は、正角は 90~105mm 角、平角は幅 105~120mm、厚さ 150~420mm であった。

製材品のヤング係数 (E) の測定は、各製材工場が所有する (一社) 全国木材検査・研究協会認証の機械等級区分装置 (以下、グレーディングマシン) を用いて行い、製材品の強度等級を求めた。グレーディングマシンは、打撃振動式グレーディングマシンおよび曲げ荷重式グレーディングマシンを使用した。打撃振動式は、製材品の木口面をハンマーで打撃することにより発生する固有振動数と密度から縦振動ヤング係数を算出する方式であり、曲げ荷重式は、一定の曲げ荷重を負荷し、荷重とそれに対応するたわみから曲げヤング係数を算出する方式である⁶⁾。製材の日本農林規格 (JAS1083) では、曲げヤング係数を基準に等級の区分が行われているため、打撃振動式グレーディングマシンは、得られた縦振動ヤング係数を曲げヤング係数の値に変換する補正を行う必要がある。本研究で使用した打撃振動式グレーディングマシンでは、当センターでのこれまでのスギ正角製材品 ($n = 223$) の測定結果から得られた曲げヤング係数と打撃による縦振動ヤング係数との関係式 ($y = 0.9581x + 0.5208$) が補正に使用されている。また、グレーディングマシンに入力された寸法は、製材工場によって異なり、断面寸法はグレーディングマシンに投入した際の寸法、材長は「3m 材」は 3000mm もしくは 3100mm、「4m 材」は 4000mm もしくは 4100mm であった。

3. 結果および考察

3.1 密度推定式

簡易型強度測定器を用いて測定した丸太の固有振動数と見かけの密度の関係を 3m 材、4m 材ごとに図 2 に示す。3m 材、4m 材とも、既往の研究^{3,7)}と同様、丸太の固有振動数と見かけの密度には負の相関がみられた。3m 材の回帰直線式は $y = -1.4024x + 1524.8$ 、決定係数は $R^2 = 0.5821$ であった。4m 材の回帰直線式は $y = -1.2831x + 1228.2$ 、決定係数は $R^2 = 0.5142$ であった。本研究で得られた 4m 材の密度推定式は、岸ら³⁾により報告された、材長 4.03~4.46m の京都府産スギおよびヒノキ丸太における固有振動数と密度の回帰直線式 $y = -1.2x + 1246.2$ と近似していた。本研究では、今回得られた回帰直線式を、固有振動数から密度を推定するための密度推定式として利用することとする。

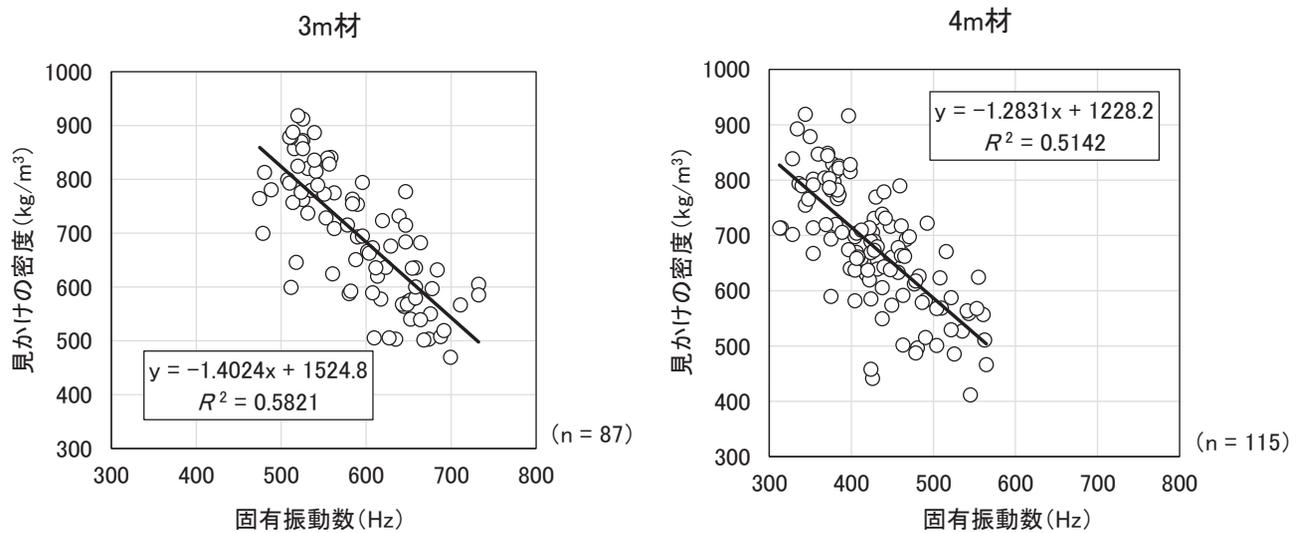


図2 丸太の固有振動数と見かけの密度の関係

3.2 丸太の縦振動ヤング係数と強度区分

202本の丸太に対して、素材の日本農林規格に基づいて得た縦振動ヤング係数 E_{fr-JAS} と、簡易手法を用いて得た縦振動ヤング係数 $E_{fr-handy}$ との関係を図3に示す。

E_{fr-JAS} と $E_{fr-handy}$ の間には正の相関が認められた。このことは、推定密度とみなしの材長を用いたヤング係数の計測方法が、素材の日本農林規格に基づくヤング係数の計測方法に代わる方法になり得ることを示している。しかし、 R は約0.70、 R^2 は約0.49であり、ややばらつきを有していることに留意が必要である。

次に、 E_{fr-JAS} および $E_{fr-handy}$ について、表1を用いて各強度区分の出現割合を図4に示した。図4からわかるように、算出方法の違いによって各強度区分の出現割合は異なった。 $E_{fr-handy}$ は E_{fr-JAS} よりも分布が左に寄っており、Ef110とEf130の割合が低下し、Ef50、Ef70およびEf90の割合が増加した。

さらに、縦振動ヤング係数の算出方法別の丸太の強度区分比較を図5に示す。ここでは、 E_{fr-JAS} により求めた区分と比較して、 $E_{fr-handy}$ による区分が1区分高く現れる場合は「1アップ」、1区分低く現れる場合は「1ダウン」、一致する場合は「一致」と表した。 $E_{fr-handy}$ により求めた区分は、 E_{fr-JAS} により求めた区分と比較して、44%の割合で一致するが、46%の割合で1区分低くなった。

このように、 E_{fr-JAS} による区分と比べて $E_{fr-handy}$ による区分は低くなる傾向にあるが、これは、実際の材長には余尺が含まれるが、 $E_{fr-handy}$ の算出では余尺を0cmと仮定したことも原因の1つと考えられる。このため、個々の丸太の強度をより正確に把握したい場合には、簡易手法を一部変更する、すなわち、材長を測定し、みなしの材長では

なく、実際の測定値を使うことで、 E_{fr-JAS} に近い値を得ることができると考えられる。

3.3 丸太の段階での強度区分と製材品の強度等級との関係

181本の製材品についてグレーディングマシン(余尺0もしくは10cmとして入力)で計測した製材品のヤング係数(E)と、算出方法が異なる丸太の段階での縦振動ヤング係数(E_{fr-JAS} および $E_{fr-handy}$)との関係を図6に示す。

E と E_{fr-JAS} および E と $E_{fr-handy}$ の間に、それぞれ正の相関が認められた。算出方法の異なる丸太の縦振動ヤング係数の中で、製材品のヤング係数と相関がより高いのは E_{fr-JAS} であるが、 $E_{fr-handy}$ も製材品のヤング係数の指標となり得ることを示している。

次に、丸太の強度区分ごとに、製材品の強度等級の出現割合を図7および図8に示す。丸太の強度区分は、図7では E_{fr-JAS} 、図8では $E_{fr-handy}$ を用いている。また、各図の中段が正角、下段が平角で、上段はそれらの合算である。

図7より、 E_{fr-JAS} では、丸太の段階でEf70であった場合の、製品段階の等級は、E70が76.5%、E90が17.6%であった。また、丸太の段階でEf90であった場合の、製品段階の等級は、E90が63.1%、E110が7.1%であった。このことから、Ef70の丸太を確保すれば94%の確率でE70以上の製材品を、Ef90の丸太を確保すれば70%の確率でE90以上の製材品を製造できることになる。

既往の研究⁸⁾において、素材の日本農林規格に基づいて等級区分されたスギ丸太から得られた平角について、一部を除き丸太の等級と同等もしくは1等級高い区分となることが報告されており、今回得られた結果も類似していた。

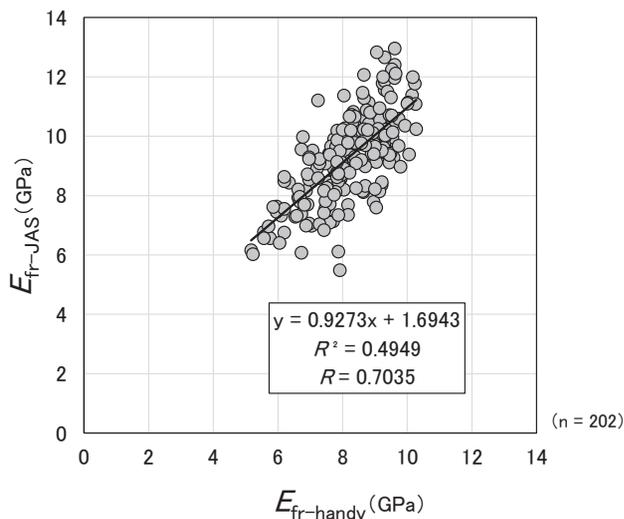
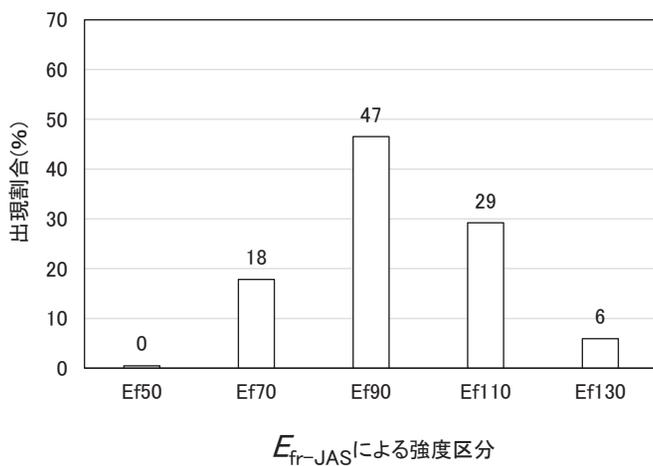
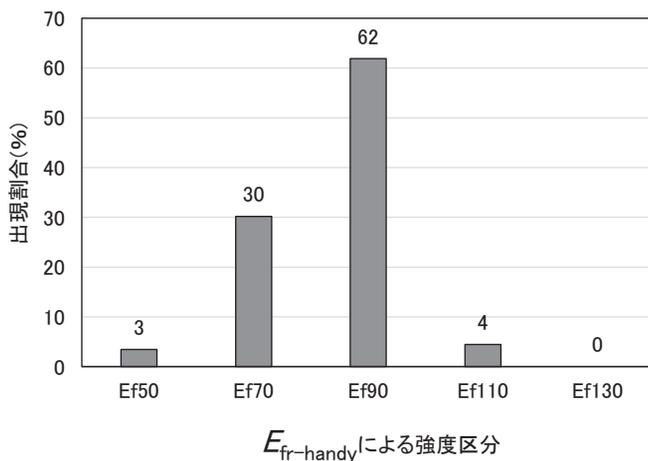


図3 E_{fr-JAS} と $E_{fr-handy}$ の関係

E_{fr-JAS} : 素材の日本農林規格に基づいて計測した丸太の縦振動ヤング係数
 $E_{fr-handy}$: 推定密度とみなし材長 (余尺 0cm) から算出した丸太の縦振動ヤング係数



E_{fr-JAS} による強度区分



$E_{fr-handy}$ による強度区分

図4 E_{fr-JAS} および $E_{fr-handy}$ により強度区分した丸太の出現割合

E_{fr-JAS} : 素材の日本農林規格に基づいて計測した丸太の縦振動ヤング係数
 $E_{fr-handy}$: 推定密度とみなし材長 (余尺 0cm) から算出した丸太の縦振動ヤング係数

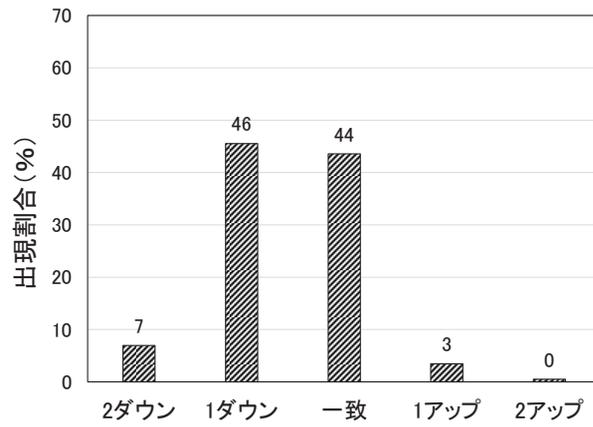


図5 E_{fr-JAS} による強度区分と $E_{fr-handy}$ による強度区分の比較

E_{fr-JAS} : 素材の日本農林規格に基づいて計測した丸太の縦振動ヤング係数

$E_{fr-handy}$: 推定密度とみなし材長 (余尺 0cm) から算出した丸太の縦振動ヤング係数

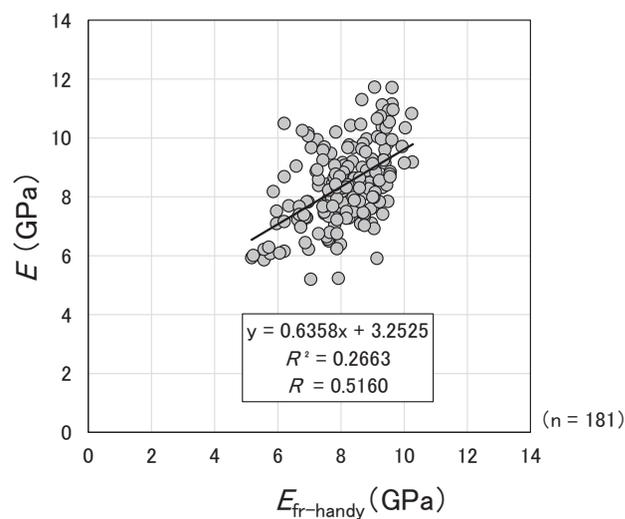
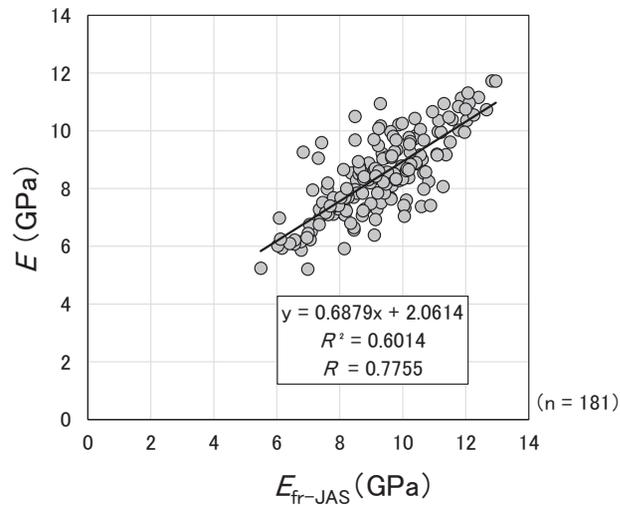


図6 製材品のヤング係数 (E) と丸太の縦振動ヤング係数 (E_{fr-JAS} 、 $E_{fr-handy}$) の関係

E_{fr-JAS} : 素材の日本農林規格に基づいて計測した丸太の縦振動ヤング係数

$E_{fr-handy}$: 推定密度とみなし材長 (余尺 0cm) から算出した丸太の縦振動ヤング係数

E : グレーディングマシン (余尺 0 もしくは 10cm として入力) で計測した製材品のヤング係数

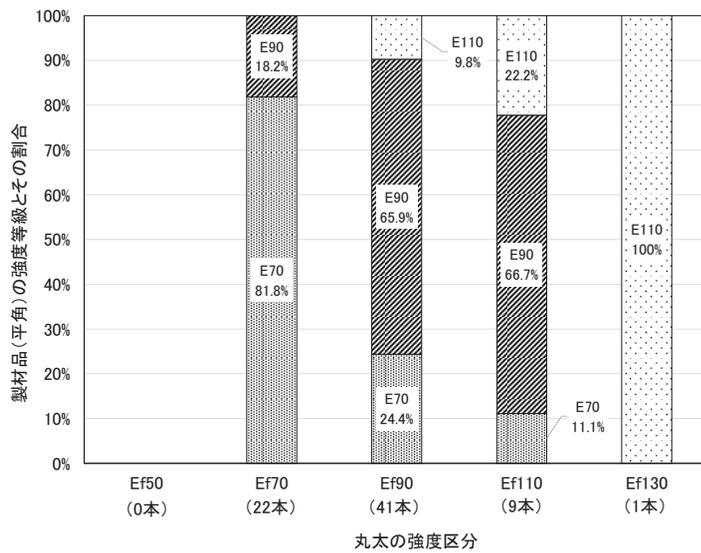
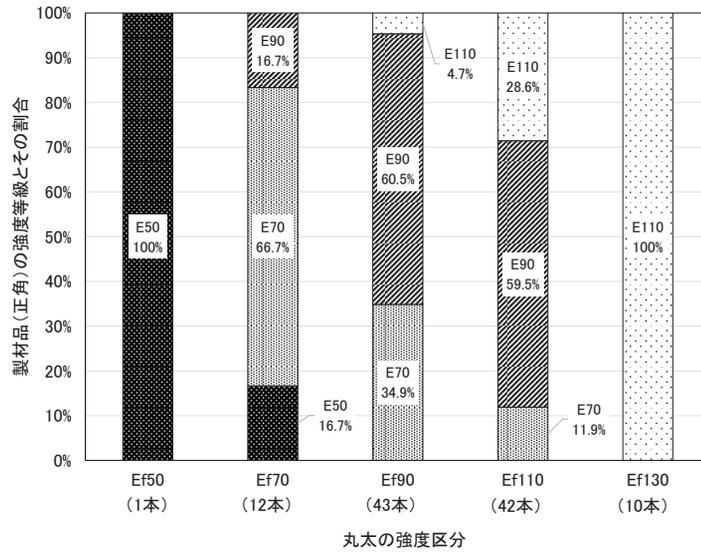
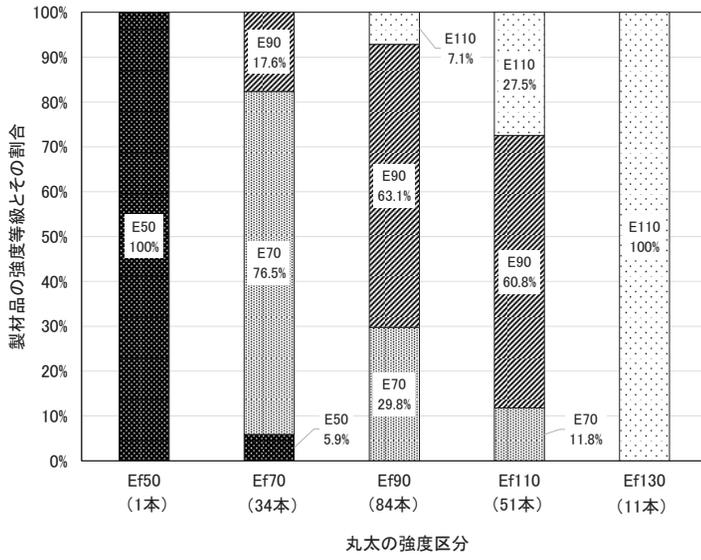


図7 丸太段階での強度区分 (E_{fr-JAS} による強度区分) と製材品の強度等級との比較

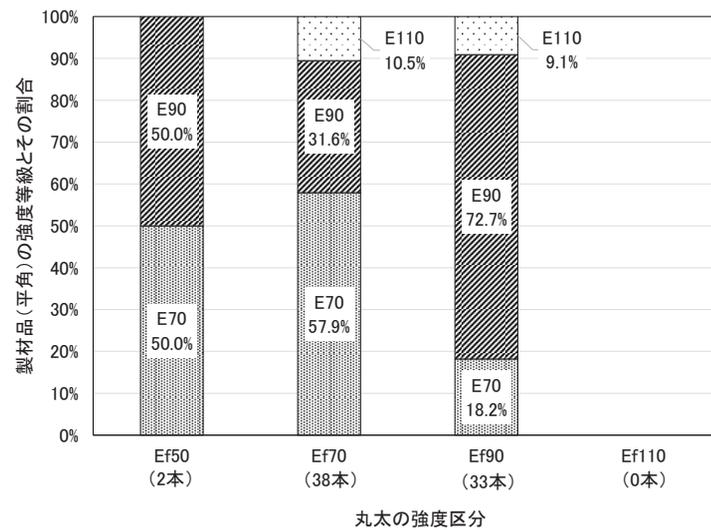
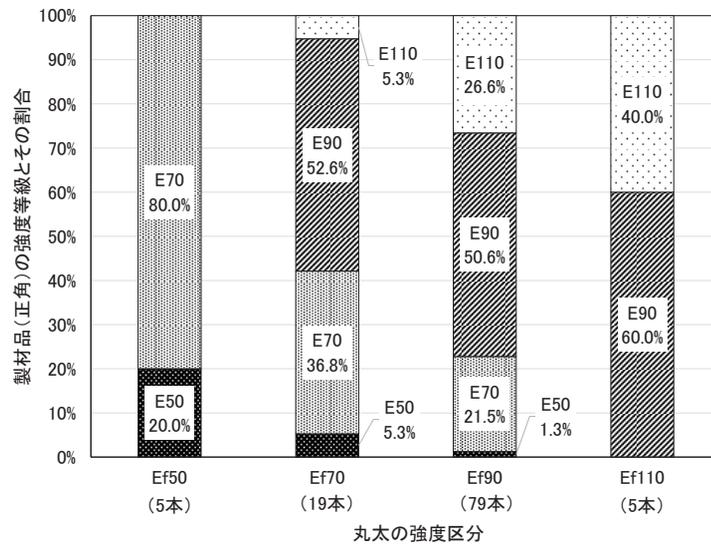
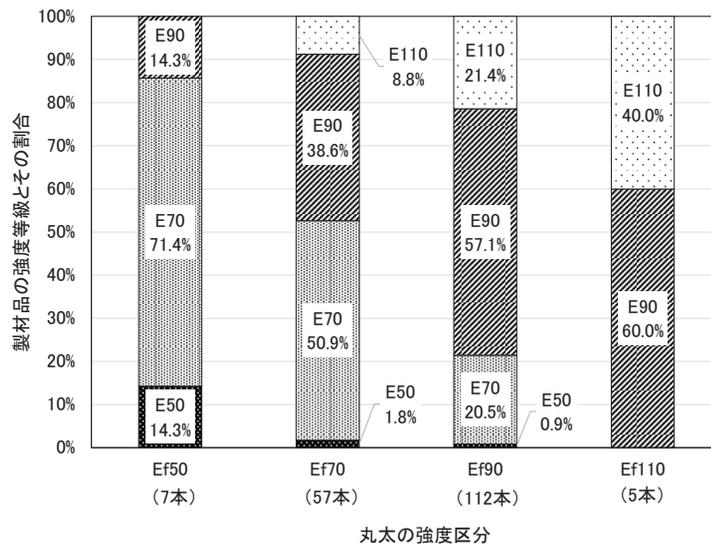


図8 丸太段階での強度区分 ($E_{fr-handy}$ による強度区分) と製材品の強度等級との比較

一方、図8より、 $E_{fr-handy}$ では、丸太の段階でEf70であった場合の、製品段階の等級は、E70が50.9%、E90が38.6%、E110が8.8%であった。また、丸太の段階でEf90であった場合の、製品段階の等級は、E90が57.1%、E110が21.4%であった。このことから、Ef70の丸太を確保すれば98%の確率でE70以上の製材品を、Ef90の丸太を確保すれば78%の確率でE90以上の製材品を製造できることになる。

以上から、 E_{fr-JAS} と $E_{fr-handy}$ はいずれを利用して、製材品の強度等級予測には大差がなく、むしろ $E_{fr-handy}$ は E_{fr-JAS} よりも値が小さくなる傾向にあることから、製材品の強度予測には安全側の判断ができる点で、 $E_{fr-handy}$ は実用上より有効といえる。

また、木取りによる影響については、 $E_{fr-handy}$ では、正角よりも平角の方が丸太段階と製品段階との等級が一致する割合が高く、平角では丸太段階でEf70であった場合、全ての製品がE70以上となった。

このように、心持ちの正角および平角について、丸太の段階から製材品の強度等級を簡易手法により予測できることが示された。本手法は、密度を算出するための重量測定を必要とせず、固有振動数と材長(3m材であるか4m材であるか)の測定のみで行うことができるため、実際の現場でも活用が期待できる。

4. まとめ

奈良県産スギ丸太を対象に、固有振動数と密度の回帰直線式を求めた。その結果、3m材の回帰直線式は $y = -1.4024x + 1524.8$ 、決定係数は $R^2 = 0.5821$ であった。また、4m材の回帰直線式は $y = -1.2831x + 1228.2$ 、決定係数は $R^2 = 0.5142$ であった。次に、素材の日本農林規格に基づく方法、および得られた回帰直線式を使った推定密度と余尺を0cmとしたみなしの材長(3mまたは4m)を用いた簡易手法により、丸太の段階での強度区分を把握し、それら丸太から製造した製材品の強度等級と比較した。その結果、いずれの方法でも製材品の強度等級予測には大差がなく、安全側の判断ができる点、かつ密度を算出するための重量測定を省略できる点で、簡易手法は実用性が高いと考えられた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、奈良県木材協同組合連合会には多大なご協力をいただきました。丸太および製材品の現地での調査においては、川上産吉野材販売促進協同組合、高田木材協同組合、十津川村森林組合木材加工流通センターの皆様にご協力をいただきました。また、上吉野木材協同組合、桜井木材協同組合、中吉野木材協同組合、奈良県銘木協同組合、西垣林業株式会社、吉野木材協同組合連合会の皆様にもご協力をいただきました。心より感謝いたします。

引用文献

- 1) 農林水産省：素材の日本農林規格 (JAS1052)，2022
- 2) 農林水産省：製材の日本農林規格 (JAS1083)，2019
- 3) 岸和実，神代圭輔，明石浩和，足立亘，淵上佑樹，田淵敦士，古田裕三：原木段階における製材品の強度等級予測－京都府産材を事例とした簡便な予測手法の開発－。木材工業，**74** (4)，140-145 (2019)
- 4) 岸和実，神代圭輔，明石浩和，足立亘，淵上佑樹，古田裕三：原木段階における製材品の簡便な強度等級予測手法の開発－京都府産原木からラミナを製造する場合における予測手法の有効性および原木測定コストの検証－。木材学会誌，**68** (3)，124-131 (2022)
- 5) 山裾伸浩：和歌山県令和3年度林業試験場成果発表会要旨，5-6 (2022)
- 6) 一般社団法人 全国木材検査研究協会：“「製材の日本農林規格 (JAS1083) 及び解説」”。一般社団法人 全国木材検査研究協会編，2020，239-240
- 7) 有馬孝禮，早村俊二，丸山則義，宮沢俊輔，古沢信：木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価。材料，**39** (444)，1228-1234 (1990)
- 8) 中田欣作，柳川靖夫：スギ丸太および製材品のヤング係数によるグレーディング。奈良県森林技術センター研究報告，**38**，27-34 (2009)

(2024年3月28日 受理)

