

原木等の材質選別技術の開発

田畑衛・柴田直明・吉野安里*・山内仁人・今井信・守口海**

乾燥に伴い生じるねじれと、強度と相関関係が高く構造用製材の強度等級区分にも用いられるヤング係数について、カラマツを対象に原木段階や製造工程の途中で選別する方法を検討した。ねじれは、剥皮丸太や心持ち材の製材後の段階において、材面の干割れが大きく傾いている場合、乾燥に伴い大きなねじれが生じる確率が高かった。ヤング係数は、丸太から乾燥後最終製品として心持ち正角に仕上げるまでの、各工程における決定係数を調べたところ、丸太と心持ち正角のヤング係数には正の相関が認められ、選別は可能であった。なお、曲げヤング係数の予測の精度を高めるためには、径の揃った丸太から1丁取りすることと、丸太材積をより正確に把握することが有効であると推察された。

キーワード：カラマツ，原木，選別，繊維傾斜度，曲げヤング係数

1 緒言

生物資源である木材は、個体ごとに材質や強度等のバラツキが大きい。一方、木材製品を製造する際には、原材料として均質性が要求され、材質等のバラツキは効率性の面で欠点として評価される。このため、丸太や製品の製造工程の途中で材質等を把握し用途に応じて選別することが出来れば、より効率的な使い方が可能となる。

本研究では、カラマツにおける乾燥に伴うねじれと曲げヤング係数による選別の可能性を検討した。ねじれについては、原木や製材の段階において、乾燥に伴い生じるねじれの予測が可能かを検討した。曲げヤング係数については、心持ち正角の最終的な製品段階における値を、丸太や製造の過程でどの程度の精度で予測出来るか、また、その精度を高めるための方法について検討した。

本研究は、2009～2012年度の県単課題として実施した。

2 乾燥に伴うねじれに関わる選別技術の検討

2.1 試験の方法

2.1.1 丸太の繊維傾斜とねじれの試験

長さ3mのカラマツ丸太40本(平均32年輪、平均直径19cm)を試験対象とした。丸太を外観から観察した後、剥皮して数日間放置後材面に現れた微細な干割れの、長軸に対する傾斜(樹幹繊維傾斜度:後述)を測定した。その後、各丸太から上下の木口面が平行となるよう厚さ(長さ方向)100mmの円板を1個ずつ採取した。樹心(髓)が曲がっている試験体が多いことから、図-1のとおり最初に髓を含む基準となる平面(測定基準平

面)を設定した。次に割裂法により測定基準平面に対する繊維の傾きの度合い(以下、繊維傾斜度)について、材面、最大、及び基準線と割裂線とがなす面積を測定した(図-2、図-3)。

なお、繊維傾斜度の定義を以下のとおりとした。
繊維傾斜度: 基準長さ100mmに対する傾斜長さの割合(単位:%)

樹幹繊維傾斜度: 剥皮丸太の材面に現れた干割れによる繊維傾斜の基準長さ100mmに対する傾斜長さの割合(単位:%)

材面傾斜度: 割裂法による丸太及び正角の材面における繊維傾斜度(単位:%)

最大傾斜度: 割裂法による同一円板中の繊維傾斜度の最大値(単位:%)

平均繊維傾斜度: 割裂法による基準線と割裂線とがなす面積を直径で除した値(単位:%)

次に、円板を採取した残りの部分から120mm×120mm×1,000mmの正角を製材し、屋内で10ヶ月間天然乾燥し、乾燥に伴うねじれを測定した。

ねじれは、図-4のとおり試験材を平面上に置き、一方の端を平面に接した時にもう一方の端に生じる平面との隙間の距離を測定し、材辺と平面がなす角度に換算した。

2.1.2 正角の繊維傾斜とねじれの試験

カラマツ145mm心持ち正角(4m材)50本を高温セット乾燥(ねじれ抑制用重石不載荷)した。養生後にねじれを測定し、ねじれ大(33mm/4m以上)、中(16～19mm/4m)、小(4mm/4m以下)の各5本を選定した。この15本をモルダで120mm正角に仕上げ、長さ100mmの無欠点試片を切り出した。実験室内で半年以上保管した後、丸太と同

*現諏訪地方事務所林務課 **現信州大学大学院総合工学系研究科

様の方法で割裂し、繊維傾斜による割裂面のずれを観察した。

2.2 結果と考察

2.2.1 丸太の繊維傾斜とねじれの試験

樹皮を肉眼で観察したところ、節の有無以外の、繊維傾斜や材内部の材質の差異を見出すことは不可能であった。一方、割裂面の観察からは、割裂線がS字（見る方向によっては逆S字）を描くように（写真-1 及び図-3）、傾斜度は髄からのある年輪数までに最大となり、それ以降では減少する

傾向にあった。この傾向については既往研究例¹⁾がある。材面傾斜度と最大傾斜度の計測結果を図-5に示す。図-5では、最大傾斜度と材面傾斜度の差の大から小へ順に並べた。最大傾斜度の発生部位は、髄からの年輪数が10以下に集中し（図-5上段）、材面よりも髄に近い年輪の位置で発生しているものが多かった。一方、材面傾斜度と最大傾斜度の差が小さい（最大傾斜度が材面又は材面近くで発生している）グループもあり、これらは概ね最大傾斜度も大きい傾向にあった。（図-5上・下段）。

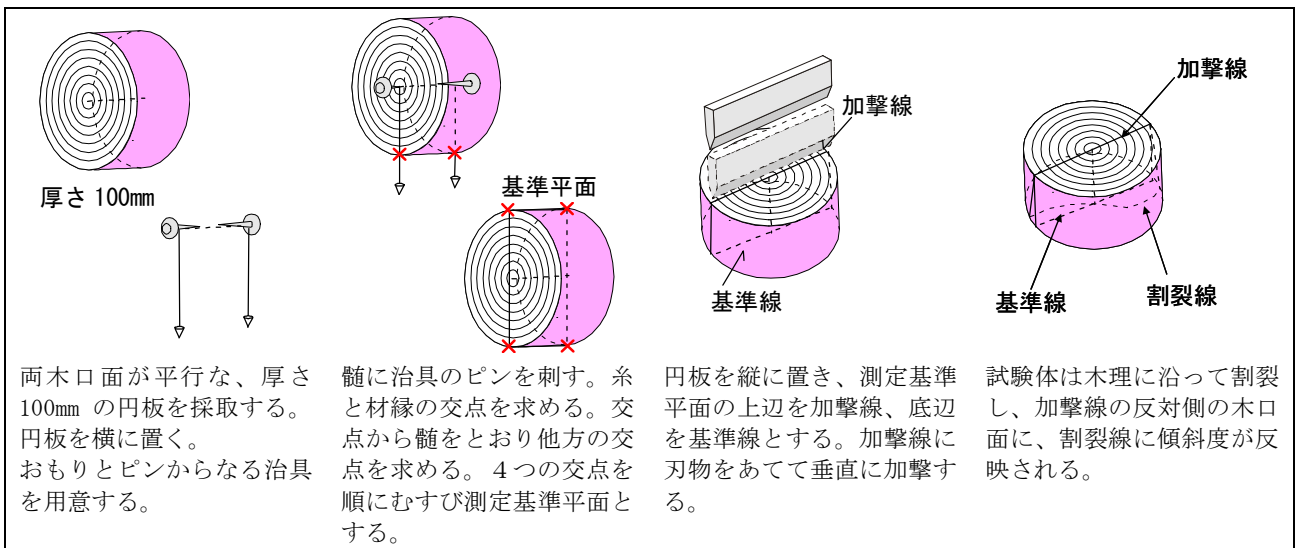


図-1 割裂試験の方法



（左：加撃側、右：測定側 点線が基準線）
写真-1 割裂試験

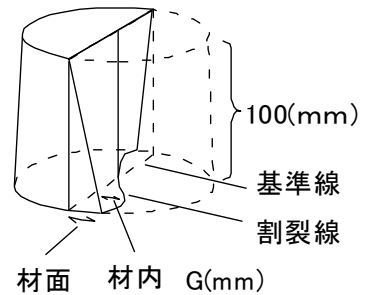


図-2 繊維傾斜度の測定

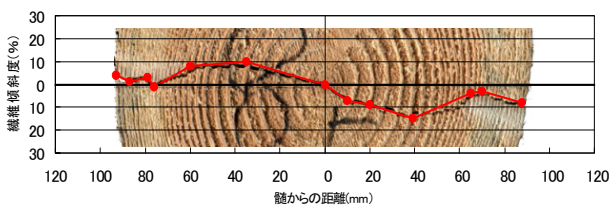
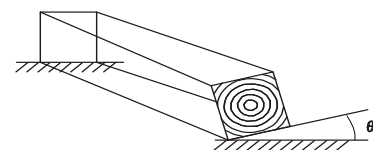


図-3 繊維傾斜測定結果の例



材長 1000mm あたりのねじれ角度を求めた。

図-4 ねじれの測定

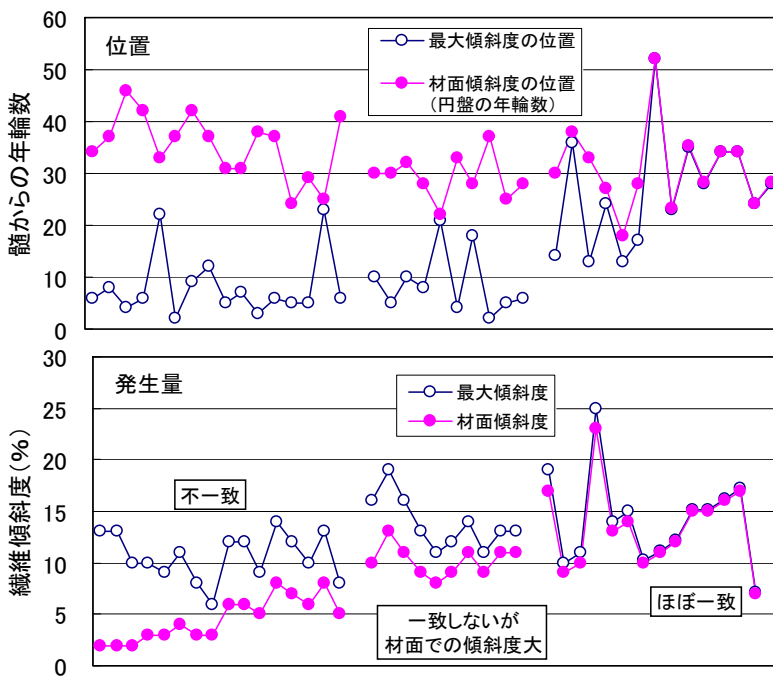
次に、樹幹繊維傾斜度及び平均繊維傾斜度と、正角における天然乾燥後のねじれとの関係を求めたところ、いずれも比例関係が認められた(図-6, 図-7)。

また、未成熟部材の存在は、ねじれの発生に強く影響すると考えられる。そこで、ねじれと丸太の平均年輪幅との関係を求めたところ、平均年輪幅の広い材(初期の肥大成長の大きい材)は、ねじれが大きい傾向が認められた(図-8)。平均年輪幅の広狭は未成熟部材の占める割合に大きく影響を受けていると考えられる。はい積み状態の丸太木口の観察により初期における成長の度合いの把握は可能であるので、ねじれに関する選別に有効な因

子であると考えられ、今後より多くの例から有効性を検討する必要がある。

2.2.2 正角の繊維傾斜とねじれの試験

120 mm 正角における割裂面のずれ(繊維傾斜の程度)を写真-4に示す。ねじれの大きかった材(33 mm/4m 以上)は、正角の外周部まで繊維傾斜の大きい状態が続いていた。これに対し、ねじれの小さい材(4 mm/4m 以下)は、正角外周部における繊維傾斜が小さくなる傾向が認められた。このことから、製材後の材面における繊維傾斜度は、乾燥に伴うねじれの発生量の推測に有効である可能性が示唆された。



順位化試験体
(上段：発生位置、下段：発生量)
* 上段と下段の試験体の順番は対応している

図-5 繊維傾斜度と発生位置



(左3列：通直、右3列：傾斜度大)
写真-2 剥皮された材面



写真-3 割裂線の例

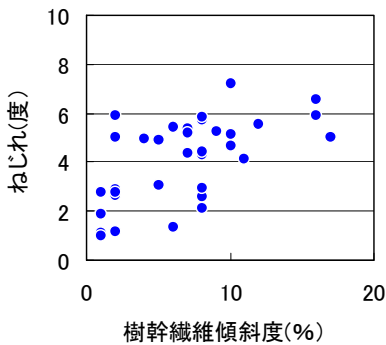


図-6 ねじれと樹幹繊維傾斜

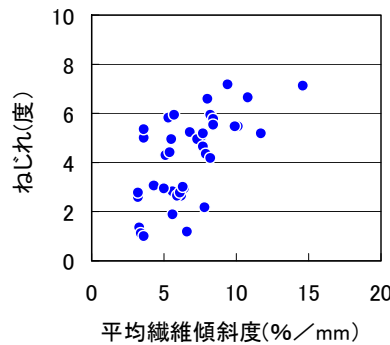


図-7 ねじれと繊維傾斜

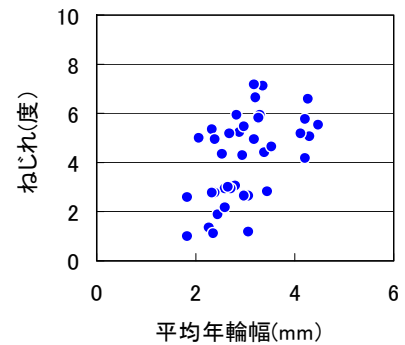


図-8 ねじれと平均年輪幅

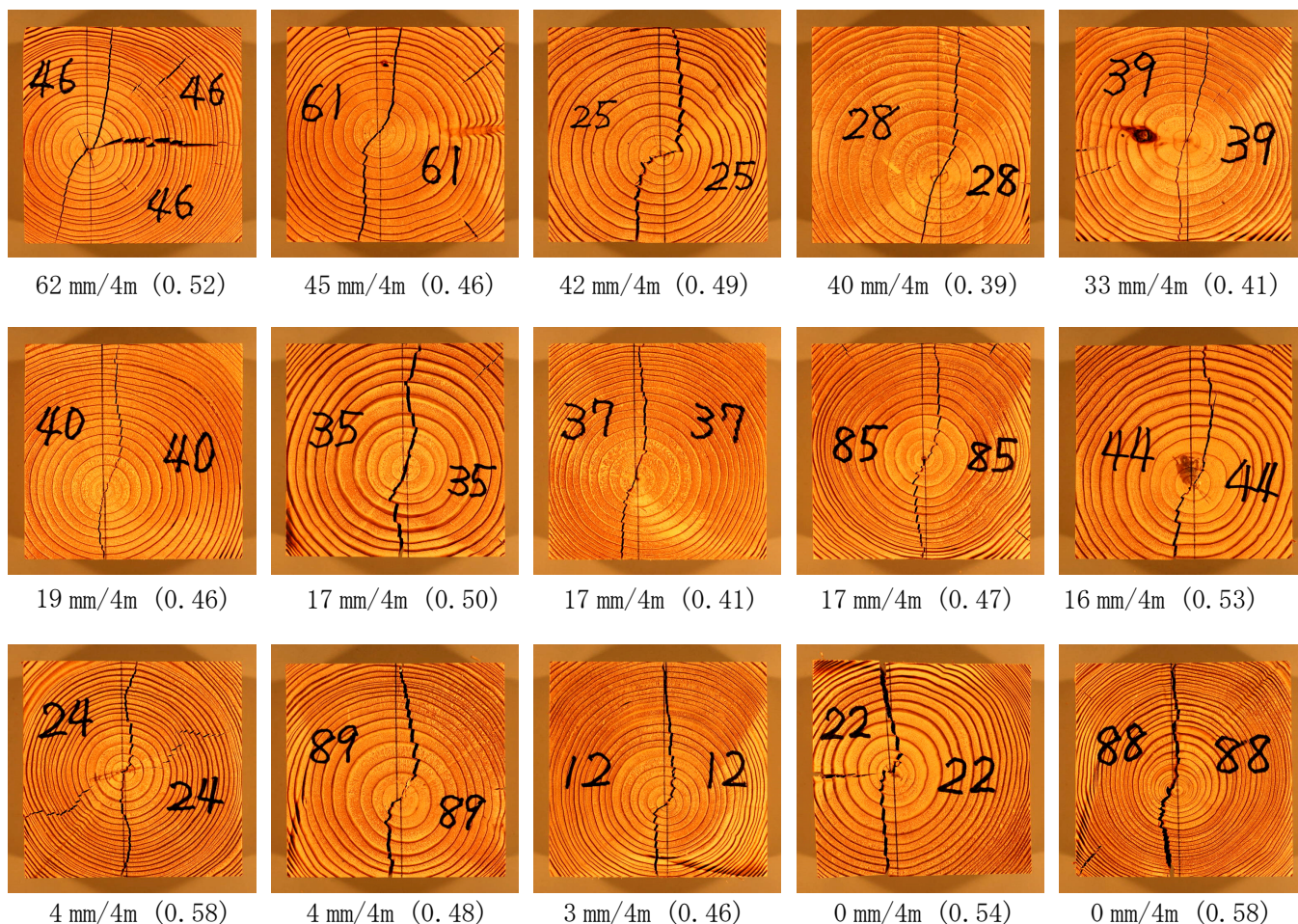


写真-4 製材の乾燥後のねじれと割裂面のずれとの関係 (上段：製材のねじれ大、中段：同 中、下段：同 小)
写真の木口面の数字は試験体No.，写真下のデータは製材のねじれ (mm/4m)，()内は密度 (g/cm³)

3 曲げヤング係数に関わる選別技術の検討

3.1 試験の方法

3.1.1 製造過程における変化

カラマツ 4 m 丸太 45 本について、末口短径と長さを mm 単位で、樹皮込み重量を kg 単位で測定した。また、ハンディグレーダ-HG-2001 を用いて丸太の縦振動数を Hz 単位で測定し、末口自乘法 (表-1 の末口自乘法 (実寸)) で求めた材積を用いて縦振動法による動的ヤング係数 (以下、Efr) を下式により求めた。

$$Efr = (2Lf)^2 \rho / 10^9$$

Efr：縦振動ヤング係数 (kN/mm²)，L：材長 (m)

f：縦振動数 (Hz)、ρ：密度 (kg/m³)

次に、145 mm 心持ち正角に製材し、蒸気式高温セット乾燥の前と後で Efr を測定した。さらに、120 mm 正角にモルダ仕上げし、2.4m 長に鋸断して Efr を測定するとともに、下部支点間距離 2,160 mm の 3 等分点 4 点荷重方式により静的曲げヤング係数 (以下、MOE) を測定した。

3.1.2 推定精度に関する検討

カラマツ 4 m 丸太 40 本について、末口木部の短径・長径、元口木部の短径・長径及び丸太の長さを mm 単位で、樹皮込み重量を kg 単位で測定した。前出のハンディグレーダを用いて丸太の縦振動数を Hz 単位で測定し、表-1 の 5 通りの方法で材積を算出し、Efr を求めた。

次いで、145 mm 心持ち正角に製材し、蒸気式高温セット乾燥の前と後で Efr を測定した。さらに、120 mm 正角にモルダ仕上げし、2.4m 長に鋸断して Efr を測定するとともに、下部支点間距離 2,160 mm の 3 等分点 4 点荷重方式により MOE を測定した。

3.2 結果と考察

3.2.1 製造工程における変化

丸太の寸法と重量、製材及び修正挽き後の寸法の測定結果を表-2 に、丸太及び製材の Efr と正角の Efr・MOE との関係を表-3 及び図-9 に示した。

表-1 動的ヤング係数算定に用いた丸太材積算出法の略称と算出方法

材積算出法の略称	算 出 方 法	
末口自乗法(括約)	$v=d^2L$	d: 2cm括約の末口短径 L: 公称長さ(4.0m)
末口自乗法(実寸)	$v=d^2L$	d: mm単位の末口短径 L: mm単位の長さ
円柱近似(2径)	$v=\pi d^2L/4$	d: mm単位の末口短径と元口長径の平均 L: mm単位の長さ
円柱近似(4径)	$v=\pi d^2L/4$	d: mm単位の末口短径・長径と元口短径・長径の平均 L: mm単位の長さ
円錐台近似	$v=\pi (d_1^2+d_1d_2+d_2^2)L/12$	d ₁ : mm単位の末口短径・長径の平均 d ₂ : mm単位の元口短径・長径の平均 L: mm単位の長さ

表-2 カラマツ丸太と製材・修正挽き後の寸法等

	丸太末口短径 (mm)	丸太長さ (mm)	丸太重量 (kg)	製材後幅厚* (mm)	試験体幅厚* (mm)
平均	250	4,149	232	147.86	120.15
最大	330	4,475	339	148.94	120.48
最小	185	4,050	139	146.17	119.95
標準偏差	36.2	85.3	58.5	0.52	0.08
変動係数(%)	14.5	2.1	25.2	0.30	0.10
試験体数	45				

※ 幅と厚さの計90測定値をまとめて記載した。

表-3 丸太 Efr から試験体 MOE までの測定結果と決定係数

測定項目	丸太Efr	製材後Efr	乾燥後Efr	試験体Efr	試験体MOE
	4 m材	145mm正角 4 m材	145mm正角 4 m材	120mm正角 2.40m長	120mm正角 2.40m長
平均 (kN/mm ²)	13.09	11.68	12.59	11.43	10.71
標準偏差 (kN/mm ²)	1.79	1.69	2.01	1.82	1.77
決定係数 R ²	0.459		0.905	0.915	0.910
	0.850			0.421	

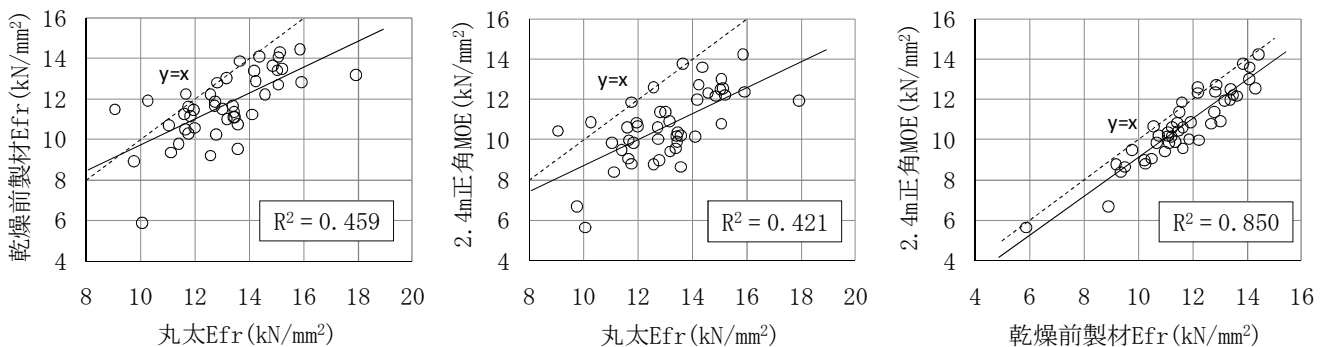


図-9 丸太及び製材の動的ヤング係数 (Efr) と正角の曲げヤング係数 (MOE) の関係

表-3 中の各決定係数の中で、丸太と乾燥前製材の Efr 間における決定係数が 0.459 と低かった。この原因としては、末口自乗法による材積計算の精度の他、丸太の末口短径のバラツキも考えられる。後者では、120 mm 正角を作製する際に太い丸太からは、細い丸太よりもヤング係数の高い成熟材部（丸太外周部）をより多く切削してしまうため、精度が低下すると考えられる。なお、乾燥前製材（4 m材）の Efr と 2.4m正角（モルダ仕上げ乾燥材）の MOE の間では、乾燥・モルダ仕上げ・鋸断の各工程を経ているものの、高い相関関係が確認された。

3.2.2 推定精度に関する検討

試験対象としたカラマツ丸太の諸データと、製材後及び試験体の幅厚データを表-4 に、丸太の Efr から試験体の MOE までの測定結果を表-5 に示した。表中の丸太 Efr は、前項と同様末口自乗法（実寸）で測定した材積から密度を求め、前出の式で算出したものである。丸太の Efr と製材後の Efr との決定係数は前項の 0.459 に対し、0.533 と高くなった。これは、丸太の末口短径の平均値は前項の試験とほぼ同じ（前項：250mm，本項：253mm）だが、本項では相対的にバラツキが少ない

丸太（前項：185～330mm，本項：230～288mm）であり、成熟材部の切削の状況が相対的に揃っていたためと推察される。また、末口短径を3段階に区分し、区分ごとに丸太の Efr の平均値と製材後の Efr の平均値の差を求めたところ（表-6）、切削部分の多い、径の大きいグループ程その差は大きくなる（Efr はより低下する）傾向を示した。このことから、切削条件が出来るだけ同じになるよう径の揃った丸太から一丁取りすることが推定精度を高めるうえで重要であることが示唆された。

また、表-1 の5通りの方法で求めた丸太材積を用いて算出した丸太の Efr と、製材後 Efr、及び試験体の MOE との決定係数を表-7 に示した。丸太 Efr と製材後 Efr の決定係数は 0.414 から 0.642 まで、丸太 Efr と試験体 MOE の決定係数は 0.301 から 0.538 まで大きな幅が生じた。今回の試験においては、円柱近似（4径）の決定係数がどちらも高い結果となったが、精度の高い丸太材積の算出方法は丸太の形状等により変わることが想定される。丸太の Efr から最終段階の製品である正角等の MOE の推定精度を高めるためには、丸太材積の測定精度を高めることも重要であると推察された。

表-4 試験対象とした丸太の諸データと製材後及び試験体の幅厚データ

	丸太末口径(mm)		丸太元口径(mm)		丸太長さ (mm)	丸太重量 (kg)	製材後幅厚 [※] (mm)	試験体幅厚 [※] (mm)
	短径	長径	短径	長径				
平均	253	265	286	304	4,124	192	145.88	120.45
最大	288	308	332	404	4,280	252	146.80	121.70
最小	230	235	253	270	3,995	157	143.67	120.01
標準偏差	15.7	18.4	24.6	32.3	70.4	23.6	0.55	0.25
変動係数(%)	6.2	6.9	8.6	10.6	1.7	12.3	0.40	0.20

※ 幅と厚さの計80測定値をまとめて記載した。

表-5 丸太 Efr から試験体 MOE までの測定結果と決定係数

測定項目	丸太 Efr	製材後 Efr	乾燥後 Efr	試験体 Efr	試験体 MOE	
	4 m材	145mm正角 4 m材	145mm正角 4 m材	120mm正角 2.40m長	120mm正角 2.40m長	
平均 (kN/mm ²)	11.60	9.62	10.87	9.62	9.66	
標準偏差 (kN/mm ²)	0.94	0.99	1.10	1.09	0.96	
決定係数 R ²	← 0.533 →		← 0.949 →		← 0.836 →	
			← 0.853 →		← 0.759 →	
			← 0.459 →			

表-6 末口短径と丸太・製材後 Efr

末口短径 (括約, cm)	試験 体数	A: 丸太Efr [※] (kN/mm ²)	B: 製材後Efr (kN/mm ²)	差(B-A) (kN/mm ²)
22	8	12.04	10.44	-1.60
24	19	11.64	9.73	-1.91
26	11	11.26	8.95	-2.31
28	2			

表-7 丸太材積算出法別の丸太材積・Efr とその後の Efr・MOR との決定係数 R²

材積算出法の略称	丸太材積(m ³)		丸太Efr(kN/mm ²)		丸太Efr-製材後Efr の決定係数R ²	丸太Efr-試験体MOE の決定係数R ²
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
末口自乘法(括約)	0.238	0.032	12.16	1.25	0.414	0.301
末口自乘法(実寸)	0.265	0.034	11.60	0.94	0.533	0.459
円柱近似(2径)	0.253	0.042	12.25	1.25	0.576	0.490
円柱近似(4径)	0.250	0.040	12.37	1.19	0.642	0.538
円錐台近似	0.250	0.040	12.35	1.20	0.636	0.534

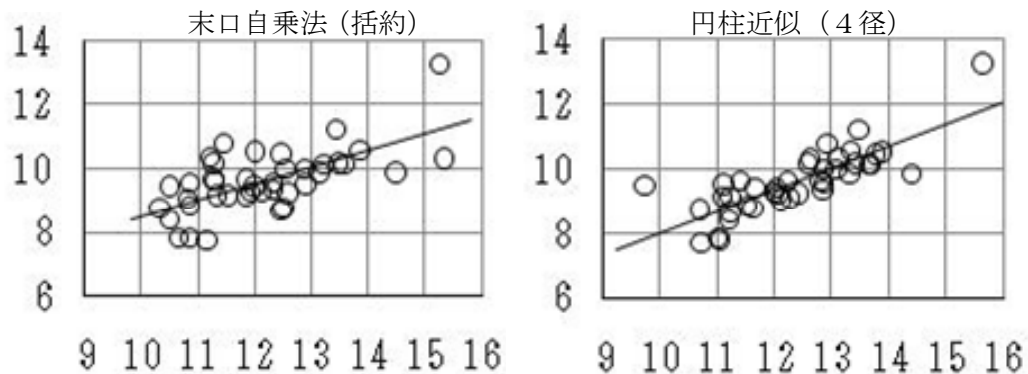


図-10 丸太 Efr(横軸)と製材後 Efr(縦軸)の関係

4 まとめ

原木や製品の製造過程において、乾燥に伴い生じるねじれと、最終的な製品の曲げヤング係数を予測し、用途に応じて選別する技術についてカラマツで検討した。

ねじれについては、剥皮丸太における繊維傾斜との関係を調べたところ、丸太表面の繊維傾斜が大きい場合は、心持ち正角のねじれも大きかった。また、人工乾燥した心持ち正角の表面における繊維傾斜が大きい場合も、ねじれが大きかった。丸太表面や心持ち正角表面における繊維傾斜が小さい場合は、材内部の繊維傾斜の大小によりねじれの大小が生じると推察される。この場合、表面からの判断は困難であるが、製材又は人工乾燥後に木口割れが発生している場合、樹心から15年輪位までの割れが傾いていると、ねじれる可能性が大きいと考えられた。

曲げヤング係数については、丸太の動的ヤング係数と心持ち正角の曲げヤング係数には正の相関が認められた。このため、丸太のヤング率による

選別は可能であると考えられる。なお、丸太を製材する段階で決定係数が大きく低下した。この原因は、製材時に曲げヤング係数の相対的に高い成熟材部を切削する割合が、丸太の径のバラツキにより異なるためと推察された。また、5通りの算出方法で求めた材積で丸太のEfrを算出し、製材後のEfr、及び正角に仕上げた試験体のMORとの相関を求めたところ、それぞれの決定係数に大きな差が生じた。

以上のことから、曲げヤング係数の推定精度を高めるためには、径の揃った適寸の丸太から1丁取りすることと、丸太材積をより正確に把握することが有効であると推察された。

引用文献

- 1) 大倉精二(1958): 樹幹における繊維回旋の現われ方, 信州大学農学部紀要, 第8号, 59-100pp
- 2) 吉野安里・山内仁人(2010): 原木等の材質選別技術の開発, 一丸太の材面繊維傾斜度と最大傾斜度との関係一, 長野県林業総合センター平成

21 年度業務報告 108-109pp

- 3) 吉野安里・山内仁人(2011)：原木等の材質選別技術の開発，一丸太の材面繊維傾斜度と最大傾斜度との関係一，長野県林業総合センター平成 22 年度業務報告 110-111pp
- 4) 柴田直明，今井信，守口海 (2012)：原木等の材質選別技術の開発，長野県林業総合センター平成 23 年度業務報告 96-97pp
- 5) 柴田直明，今井信，(2013)：原木等の材質選別技術の開発，長野県林業総合センター平成 24 年度業務報告 88-89pp
- 6) 柴田直明，吉田孝久，今井信，守口海 (2011)：安全・安心な乾燥材生産技術の開発(2)，長野県林業総合センター平成 23 年度業務報告 100-101pp
- 7) 柴田直明，今井信，吉田孝久 (2013)：各地域材の強度特性等の把握，長野県林業総合センター平成 24 年度業務報告，86-87pp