

表面模様からの木材硬さ推定に関する研究 (第2報)

関範雄*, 藤巻吾朗*, 山口穂高*, 三井勝也*

Estimation of Wood Hardness by Its Surface Pattern (II)

SEKI Norio*, FUJIMAKI Goroh*, YAMAGUCHI Hodaka*, MITSUI Katsuya*

針葉樹材の密度、近赤外線による木口面の表面観察から得られる晩材率 (LWP_{IR}) およびブリネル表面硬さの関係を検討した結果、これらには極めて強い相関関係が認められた。ブリネル表面硬さについては、木口面だけでなく柾目および板目面いずれの表面も密度や LWP_{IR} と極めて強い相関が認められた。またスギ材の繊維方向における圧縮 (縦圧縮) 強度と曲げ強度特性は極めて強い相関関係にあり、加えてこれらの強度特性は密度や LWP_{IR} とともに極めて強い相関が認められた。このような相関関係は、表面模様の指標である LWP_{IR} からスギ材の硬さだけでなく、圧縮強度および曲げ強度の推定を可能にした。

1. 緒言

木材を材料として利用する場合、木製品製造現場においてその機械特性は、木材の種類と木目模様から人の経験的判断に頼り評価されることが多い。木製品は金属やプラスチックなどに比べてばらつきが大きいにもかかわらず、その部材の特性判断は製品の作り手の経験と感覚に大きく依存する。そのため、木製品は時に選別部材の強度不足から不良が生じやすく、また製造過程における不良率が高くなる傾向にある。

品質の良い木製品を作るためには、木材の模様を的確に捉え、その機械特性を確度良く推定し、適切な部材を適切な箇所に利用することが重要である。また木材模様を的確に捉えることは、木材の無駄ない合理的な利用、木製品製造の生産性向上に繋がる。

本研究では、木材表面の情報から材料物性の簡易推定の可能性を探索している。その一環として本報では木材表面観察を通して得られる表面模様や年輪構造指標と木材の硬さその他の機械特性との関係について報告する。

2. 実験

2.1 材料

試験体には、図1に示す密度頻度分布を有するスギ (*Cryptomeria japonica*) 7個体、ヒノキ

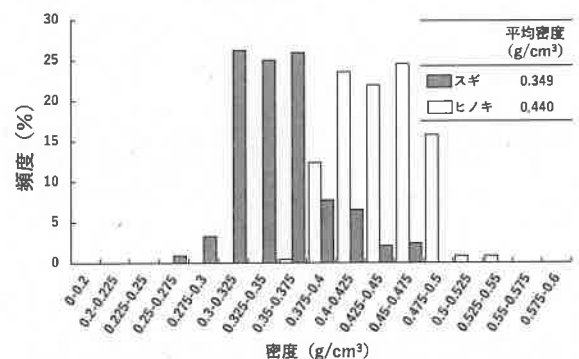


図1 密度の頻度分布

(*Chamaecyparis obtusa*) 11個体を用いた。一連の晩材率測定、硬さ、圧縮および曲げ強度の試験片は、同一個体の角材 (60mm×60mm) から調製された。晩材率計測および硬さ試験体寸法は40mm×40mm×40mmとした。圧縮試験体寸法は20mm×20mm×40mmとし、圧縮する断面積を400mm²とした。曲げ試験体寸法は20mm×20mm×320mmとした。

すべての試験体は温度20℃、湿度65%RHの雰囲気下の標準状態に調湿された後、各種測定に用いた。

2.2 赤外線観察による晩材率測定¹⁾

赤外線観察には赤外線カメラ (リコーイメージング株式会社製 PENTAX KP IR、型式:P-TTLフラッシュ内蔵TTL AE・AF一眼レフデジタルカメラ) およびレンズ (リコーイメージング株式会社製マクロレンズ、型式:HD PENTAX-DA 35mmF2.8

* 試験研究部

MACRO Limited)、LED赤外線照明(波長域:940~960nm(λ_{MAX} :950nm))を用い、カメラレンズおよび照明にはワイヤグリッド偏光フィルム(旭化成株式会社製WGF、型式:UC22N)フィルターを装着して、赤外線観察を行った。

赤外線観察によって撮影された試験体木口面の像からの晩材率測定には、オープンソースのコンピュータビジョン向けOpenCV 4.X系ライブラリの画像処理機能が応用された。まず赤外線観察によって撮影された画像を256階調グレースケール画像に変換後、試験体の早材部と晩材部のしきい値を決定した。具体的にはグレースケール画像の局所領域の中央値をしきい値とする適応的しきい値演算処理を行った。その後、それぞれの局所領域で演算して決定したしきい値に基づきグレースケール画像を白黒2階調画像に変換した。さらに白黒2階調画像から、モルフォロジー演算によりノイズ除去を行い、晩材部を抽出し晩材面積を求めた。晩材面積の全体像に占める割合を算出、これを晩材率(LWP_{IR})とした。

2.3 密度の測定

JIS Z2101²⁾の密度の測定方法に従い標準状態の試験体の質量および容積を測定し、密度を算出した。

2.4 硬さの測定

標準状態の試験体を用いて図2に示すように

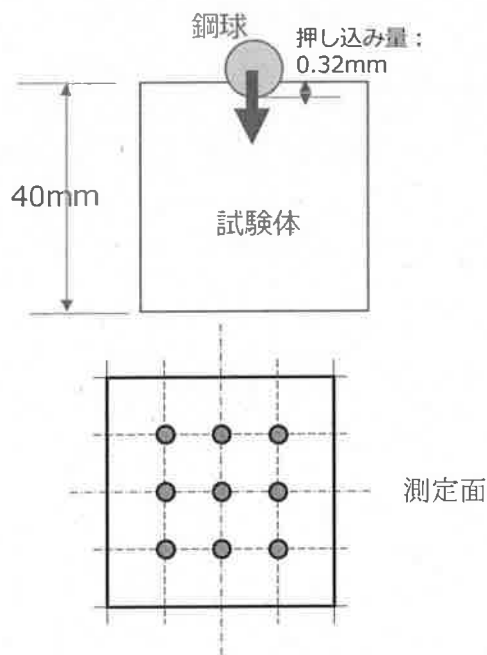


図2 ブリネル硬さ測定と測定箇所

JIS Z2101²⁾の表面硬さ測定方法に従い、ブリネル表面硬さを測定した。測定面の規定の9箇所に鋼球(直径10mm)を深さ $1/\pi$ mm(0.32mm)まで圧入したときの荷重 P (N)を測定した。

各測定箇所のブリネル硬さは次式から算出した。規定測定箇所の平均値を求めた。

$$\text{ブリネル硬さ, } HB = P/10 \quad (\text{N})$$

2.5 圧縮強度の測定

JIS Z2101²⁾の縦圧縮試験および横圧縮試験方法に従って、標準状態の試験体の繊維に平行に荷重速度1mm/minの圧縮荷重を破壊するまで加え、試験体の縮みを測定して繊維方向の縦圧縮ヤング係数($E_{\text{c-RT}}$)を求めた。また試験体の繊維方向に直交して荷重速度1.5mm/minの圧縮荷重を、ISO式比例限度を超えるまで加え、試験体の縮みを測定して横圧縮ヤング係数($E_{\text{c90-LR}}$ 、 $E_{\text{c90-LT}}$)を求めた。

それぞれの圧縮ヤング係数は次式から算出した。

$$E_{\text{c-RT}}, E_{\text{c90-LR}}, E_{\text{c90-LT}} = \Delta P / \Delta l / A$$

$E_{\text{c-RT}}$: 繊維方向の縦圧縮ヤング係数

$E_{\text{c90-LR}}$: 接線方向の横圧縮ヤング係数

$E_{\text{c90-LT}}$: 放射方向の横圧縮ヤング係数

A : 試験体の断面積 (mm^2)

ΔP : 比例限度領域における上限荷重と下限荷重との差 (N)

l : 標点距離 (mm)

Δl : ΔP に対応する縮み (mm)

2.6 曲げ強度の測定

JIS Z2101²⁾の曲げ試験方法に従い、3点曲げ試験を行った。標準状態の試験体に、荷重面を柾目面として、荷重速度2mm/minの曲げ荷重を破壊するまで加え、試験体のたわみを測定して見掛けの曲げヤング係数を次式から算出した。

$$E_{\text{b-ap}} = \Delta P l^3 / 48 I \Delta y$$

$E_{\text{b-ap}}$: 見掛けの曲げヤング係数 (GPa)

l : 支点間距離 (mm)

ΔP : 比例限度領域における上限荷重と下限荷重の差 (N)

I : 断面2次モーメント $I = a^4/12$

Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ縮み (mm)

なお、本報では見掛けの曲げヤング係数を曲げヤング係数として扱った。

3. 結果と考察

3.1 密度およびLWP_{IR}と表面硬さとの関係

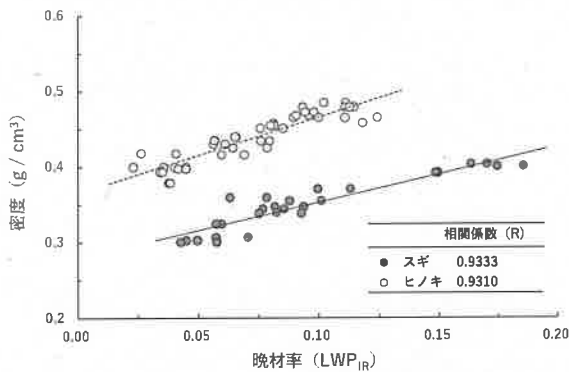
赤外線観察によって得られた晩材率、LWP_{IR}と密度との関係を図3に示す。スギ、ヒノキいずれもLWP_{IR}と密度には、相関係数0.9超の極めて強い相関関係が認められた。また密度と木口面ブリネル表面硬さにおいても、図4に示すように強い相関が認められた。さらに、LWP_{IR}と木口面ブリネル表面硬さは、図5のように極めて強い相関関係を示した。

スギのLWP_{IR}と木口・柾目・板目面ブリネル表面硬さとの関係を図6に示す。いずれの面においてもLWP_{IR}とブリネル表面硬さに相関があった。特にLWP_{IR}と繊維方向の硬さである木口面との相関が最も強い。

3.2 密度およびLWP_{IR}と圧縮強度との関係

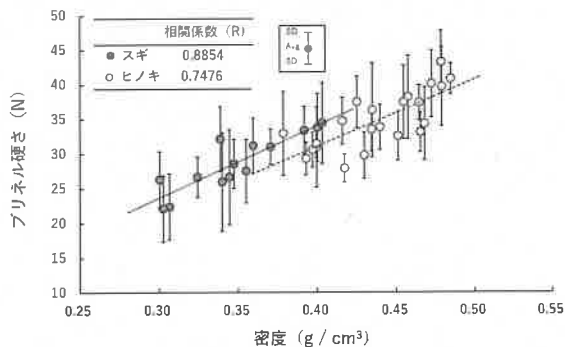
スギの密度と圧縮強度との関係を図7に示す。密度は縦圧縮強度、すなわち繊維方向の圧縮強度と強い相関関係があり、一方、横圧縮強度との相関関係は確認できなかった。

また繊維方向の圧縮強度には、木口表面硬さと



条件：材種；スギ、ヒノキ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図3 LWP_{IR}と密度の関係

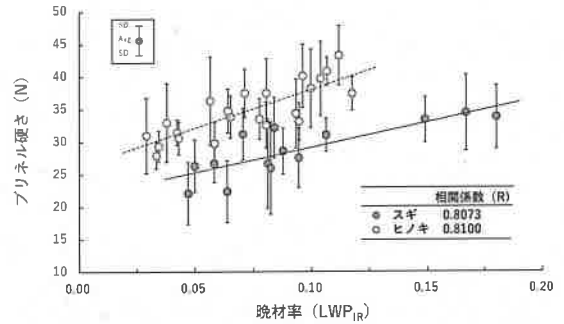


条件：材種；スギ、ヒノキ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図4 密度と木口面ブリネル表面硬さの関係

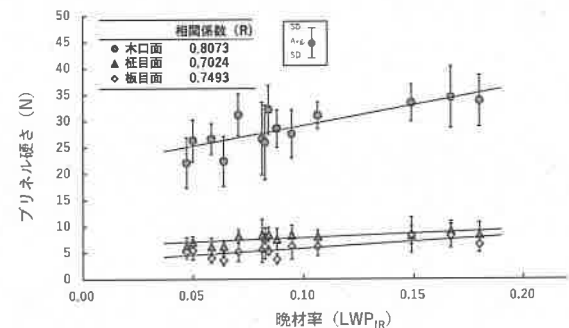
強い相関関係(図8)が認められた。この結果は、木口表面硬さと縦圧縮強度の関係は沢田らの研究³⁾に一致した。

スギのLWP_{IR}と圧縮強度は、図9に示すようにLWP_{IR}と繊維方向の圧縮強度には強い相関関係があった。



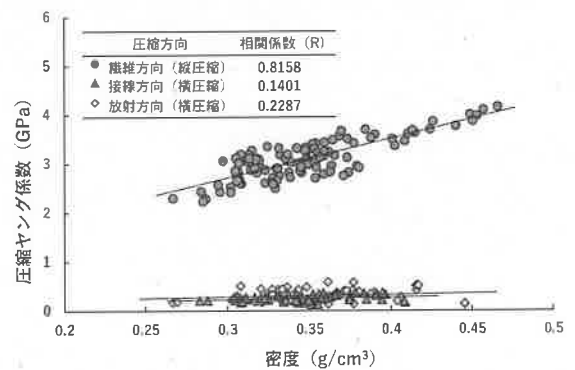
条件：材種；スギ、ヒノキ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図5 LWP_{IR}と木口面ブリネル表面硬さの関係



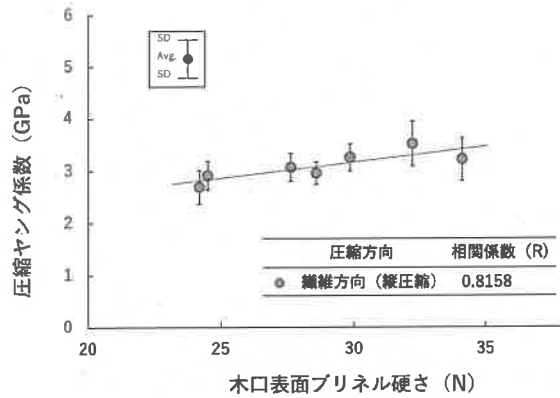
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図6 LWP_{IR}と木口・柾目・板目面ブリネル表面硬さの関係



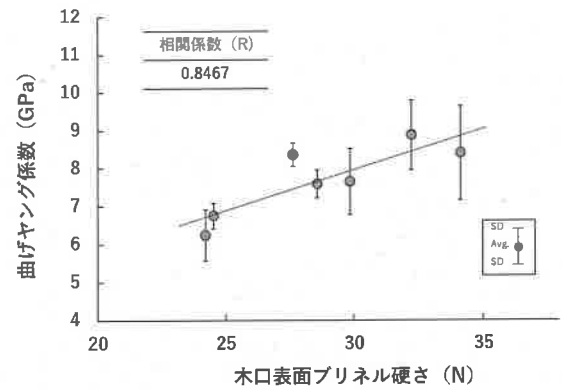
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図7 密度と圧縮強度の関係



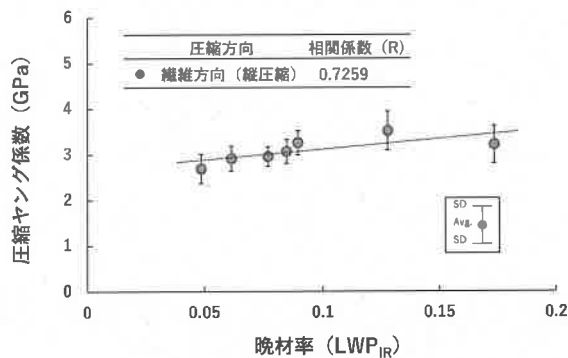
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 8 木口表面硬さと圧縮強度の関係



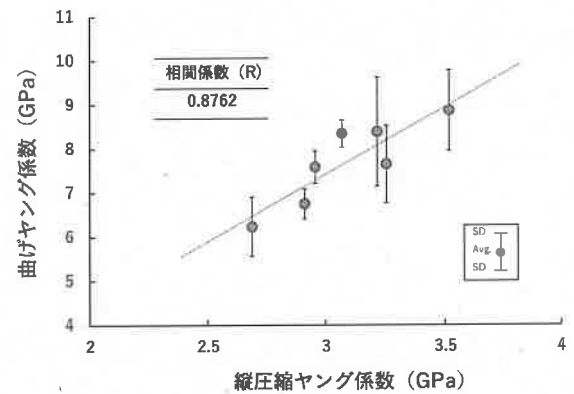
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 11 木口表面硬さと曲げ強度の関係



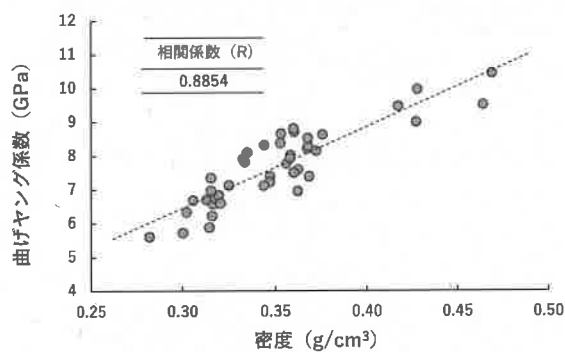
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 9 LWP_{IR}と圧縮強度の関係



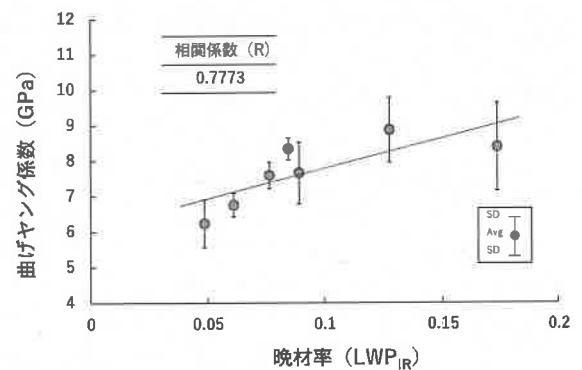
条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 12 圧縮強度と曲げ強度の関係



条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 10 密度と曲げ強度の関係



条件：材種；スギ、温度；20 °C、湿度；65 %RH

図 13 LWP_{IR}と曲げ強度の関係

3.3 密度およびLWP_{IR}と曲げ強度との関係

スギの密度と曲げ強度との関係を図10に示す。密度と曲げ強度には強い相関関係があった。また、図11に木口表面硬さと曲げ強度との関係、図12に

繊維方向の圧縮強度と曲げ強度との関係を示す。これらの結果から曲げ強度は、木口表面硬さや圧縮強度とも強い相関関係が認められた。スギのLWP_{IR}と曲げ強度との関係を図13に示す。

LWP_{IR}と曲げ強度との強い相関関係が明確になった。

4. まとめ

木材の表面模様、すなわち年輪は、年輪構造指標として、数値化することができる。近赤外線による木口面表面観察から得られる年輪構造指標である晩材率（LWP_{IR}）は、密度と極めて強い相関関係が認められた。

針葉樹材のスギおよびヒノキの密度は、その表面硬さ、圧縮強度および曲げ強度の機械特性に影響を及ぼし、表面硬さおよび圧縮強度については繊維方向の荷重に対して、曲げ強度については柁目面の荷重に対して、いずれも強い正の相関（R: 0.7超）を示した。

LWP_{IR}は、密度と同様に、繊維方向の表面硬さ、圧縮強度との強い正の相関関係を示し、柁目面荷重の曲げ強度と強い正の相関（R: 0.7超）を示した。

このようなLWP_{IR}と表面硬さ、圧縮強度および曲げ強度の機械特性、それぞれの両者の間の強い相関関係には、次のような線形回帰直線（推定式）（1）式によって示す関係が認められ、

$$HB_{RT}, HB_{LR}, HB_{LT}, E_{c_RT}, E_{b_ap} = a \cdot LWP + b \quad \dots\dots\dots (1) \text{ 式}$$

- HB_{RT}: 木口面ブリネル表面硬さ (N)
- HB_{LR}: 柁目面ブリネル表面硬さ (N)
- HB_{LT}: 板目面ブリネル表面硬さ (N)
- E_{c_RT}: 繊維方向の圧縮（縦圧縮）ヤング係数
- E_{b_ap}: 見掛けの曲げヤング係数 (GPa)
- LWP: 赤外線観察から得られる晩材率、LWP_{IR}
- a : 実験的に定まる係数
- b : 線形回帰直線の切片

実験的に定めた推定式の項を表1に示した。

以上のことから、標準状態に調整した針葉樹材の気乾材では、ブリネル表面硬さ、縦圧縮強度、曲げ強度を晩材率（LWP_{IR}）からおおよその推定が可能になった。

表 1 実験的に定めた機械特性の推定式の項

ブリネル表面硬さ		a	b	決定係数: R ²
スギ	H _{RT}	77.1	21.4	0.6518
	H _{LR}	15.8	6.2	0.4934
	H _{LT}	25.2	3.3	0.5614
	E _{c_RT}	4.6	2.7	0.5269
	E _{b_ap}	17.1	6.1	0.6042
ヒノキ				
	H _{RT}	118.9	26.2	0.6560

参考文献

- 1) 関範雄ほか: 表面模様からの木材硬さ推定に関する研究（第1報）, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 25, pp. 39-43, 2023.
- 2) JIS Z 2101: 木材の試験方法, 日本工業規格, 2009.
- 3) 沢田稔ほか: 木材のカタサと圧縮強度との関係（第1報）, 林業試験場研究報告, 78, pp. 149-174, 1955.