

熱間プレス処理を行った木材の硬さと疲労限度との関係

都城工業高等専門学校 機械工学科

教授 豊廣 利信

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021029-B3)

キーワード：針葉樹，広葉樹，熱間プレス，硬さ，疲労限度

1. 研究の目的と背景

平成 22 年に『公共建築物等における木材利用の促進に関する法律』が制定¹⁾された。国産木材が国内の駅、空港、競技場等の公共建築物内外装へ積極的に活用されたため、公共建築物の木造率（床面積ベース）は法制定当初の 8.3%から 9 年後の令和元年度には 13.8%に増加¹⁾した。また、令和 7 年 4 月に開幕する大阪・関西万博会場では、大屋根リング構造に国産スギないしヒノキが大幅に採用されている。とはいえ、非住宅分野や中高層民間建築物の木造率の伸びは低調状態が続いていた。そこで新たに、令和 3 年に『脱炭素社会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に促進に関する法律』が施行¹⁾され、公共建築物から建築物一般に法制化範囲を広げた。建築物の木造化・木質化を推進することは、木材が耕作循環型素材であるが故、SDGs に合致する。現在、都市部を中心とした高度土地利用の観点から、主に四階建て以上の国内中高層木造ビルの建築計画の増加傾向にある。一部企業は 11 階建ての高層純木造ビル²⁾を建設し話題となった。

ところで我が国は、国土の 3 分の 2 を森林が占める森林大国であり、その約 4 割が植林政策による人工林である³⁾。また人工林のほとんどがスギあるいはヒノキである。スギの伐採樹齢は 35 から 50 年、ヒノキのそれは 45 から 60 年とされ、丁度主伐期を迎えている。そのため、国産材の活用や利用技術について様々な議論が行われている⁴⁾。近年、国産木材の活用として直交集成板（CLT）材の日本農林規格（JAS）制定と建築基準法関連告示が施行され、公共建築物（学校・体育施設・遊具施設）や木造高層建築等に対し、CLT 材の適用・普及が期待されている。それに伴い、木造ビルの耐震構造解析が求められ、その解析のための基本特性として木材の疲労試験評価の重要性が高まっている。

他方、間伐材の有効利用や無垢木材の力学的性質改善を目的として、木材の圧密加工処理と処理材の各種特性の解明に関する研究^{5)~8)}が盛んである。今後、CLT 材に高硬度圧密材を適用することによって、寸法安定性の向上、強度等の特性変動の安定化、そして無垢木材由来 CLT を凌駕する構造特性が見込まれており、新たな木造耐震構造の開発指針誕生への期待が高まっている。しかしながら、無垢木材の疲労特性に関する研究は国内では今山の研究⁹⁾以外は十分でなく、熱間プレス処理を施した圧縮木材の疲労特性に関する研究報告は見当たらない。当然、無垢材と熱間プレス材はサンプルの硬さが異なるため、木材の硬さと疲

労特性との関係を明らかにすることができれば、従来からある木造構造設計に新たな活用指針を加えることができると考えられる。

そこで本研究では、予備実験に基づいて熱間プレス処理を公称プレス圧力 3.5~14.5MPa、熱間温度（プレス型温）150~240℃の範囲に選定し、熱間プレスによる欠陥や熱破損が生じない最大曲げ強さを示す条件を最適熱間プレス条件とし、最適条件を施した木材試験片を用いて、硬さ試験、疲労試験等の材料試験を実施した。木材の硬さ、引張強さ、疲労限度の関係、そして熱間プレス処理による機械的性質と木材組織の関連性に関して若干の考察を行った。なお、いずれの木材についても板目材が高需要、多生産となっているため、板目材の研究結果に特化して報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究で使用した樹種は、株式会社日南家具工芸社より提供を受けた針葉樹のオビスギ、ヒノキ（共に宮崎県日南

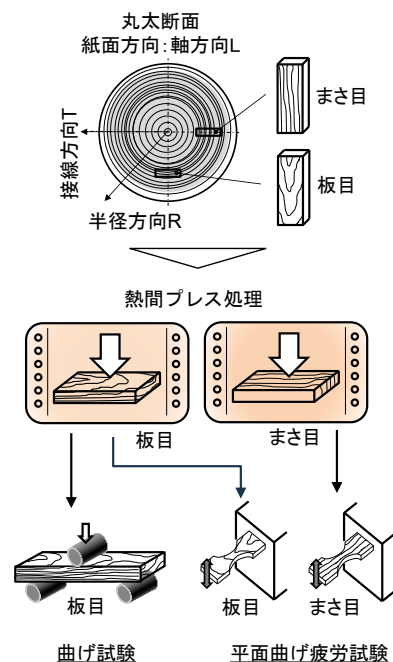


図1 サンプル採取，熱間プレス処理，各試験までのフロー図（針葉樹）

産で樹齢はおおよそ 40 年、幹径 300mm を越える大径材) そして広葉樹であるタモ(ロシア産で樹齢はおおよそ 100 年以上、幹径 600mm 以上の大径材) の 3 種である。図 1 は針葉樹丸太を事例とした板目材およびまさ目材の採取位置を示したものである。採取後、天日乾燥を十分施し、後述する各材料試験の試験片に加工した。それぞれの比重および含水率はオビスギで 0.37 および 12 から 14%, ヒノキは 0.49 および 12 から 13%, タモは 0.71 および 8 から 12% の範囲であった。いずれの試験片に対しても、最終仕上げとして表面プレーナー処理ないし耐水ペーパー仕上げを施し、算術平均粗さ $R_a \leq 3\mu\text{m}$ かつ最大高さ $R_{max} \leq 50\mu\text{m}$ とした。

2・2 熱間プレス処理

熱間プレス処理は、図 2 に示す熱間プレス機(アズワン製, AH2003, 容量 15 トン、型温 20~300℃) を用いて行った。3 つの木材の板目材を採取して各試験片に切削加工を行った後、すべてに対して一軸圧縮下で公称プレス圧力: 3.5~14.5MPa, 熱間温度(プレス型温) は 150~240℃ の範囲で熱間プレスを実施した。なお、適切なプレス保持時間は予備実験に基づいて適宜決定した。なお、熱間プレスを施したものを熱間プレス材、施していないものを未処理材と称することにする。ところで、公称プレス圧力、熱間温度、保持時間の組合せが適切でない場合の平面曲げ疲労試験片を図 3 に示す。矢印で示したように、局所的に強い熱炭化現象と型内で顕著な試験片の膨張と軟化流動を伴う破損が生じた。これらの試験片は実験から除外した。

2・3 反発硬さ試験, 引張試験, 三点曲げ試験および平面曲げ疲労試験方法

サンプル硬さは反発式衝撃硬さ試験¹⁰⁾(今井精機製,

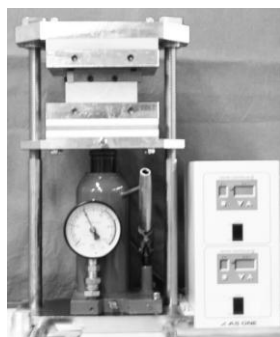


図 2 本研究で用いた熱間プレス機



図 3 不適切な熱間プレス処理材の事例(ヒノキ)

eNM3A10-1701) にて評価した。これは、直径 3mm の単一アルミナ球(重量 0.056g) を公称発射初速 10m/s でサンプルに衝突させ、式(1)によって反発係数 e を求め、その e をもって反発硬さとするものである。宮原¹¹⁾は反発係数 $e=1$ が弾性変形のみが生じたとする修正 Tabor モデルに基づいて、反発硬さ e が 0.108~0.868 の範囲で精度の良い硬さが評価できると述べている。ここで V_1 および V_2 は、速度センサーによって計測された衝突前速度および衝突後速度であり、 e 値が高いほど高硬度である。

$$e = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

求められた反発係数 e はロックウェル硬さ、ブリネル硬さ、ビッカース硬さおよびショア硬さ等の様々な硬度測定結果との相関を成す¹⁰⁾ことがわかっており、例えばビッカース硬さ HV300 は $e=0.640$, HV40 は $e=0.190^{10)}$ である。本研究では、線形近似に基づいて換算ビッカース硬さ HV^* が得られる式(2)を作成した。

$$HV^* = 578e - 70 \quad (2)$$

なお、試験前に鋼材標準硬さ試験片(30HRC および 60HRC) を用いて試験機精度を事前に確認した。さらに熱間プレス処理後の表面粗さがプレス前と同等であることを確認してから反発硬さ評価を行った。

次に引張試験方法を説明する。引張試験片未処理材の標点部位の寸法および形状は、長さ 30mm, 高さ(厚さ) $h=10\text{mm}$, 幅 $b=30\text{mm}$ の矩形とした。厚さ方向に熱間プレスを実施した後、高さ h および幅 b を測定した。引張負荷速度は 5mm/min であり、室温、大気中で試験を実施した。引張強さ σ_u は最大引張荷重を用いた公称応力で算出した。

最適な熱間プレス条件を得るために、三点曲げ試験を実施した。本研究では三点曲げ試験から得られる最大曲げ強さ $\sigma_{b,u}$ が最も高くなる熱間プレス処理を最適条件とした(後述の表 1)。三点曲げ試験片の未処理材の寸法および形状は、長さ 180mm, 高さ(厚さ) $h=6\text{mm}$, 幅 $b=30\text{mm}$ の矩形とした。スパン長さは $L=140\text{mm}$ である。最大曲げ強さ $\sigma_{b,u}$ は式(3)によって与えられる。

$$\sigma_{b,u} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (3)$$

ここで P_{max} は最大負荷荷重である。熱間プレス処理後は高さ h および幅 b が変化するため、それらを処理後に測定した。荷重負荷速度は 1mm/min であり、試験は室温、大気中で実施した。その結果、本研究で得られた最大曲げ強さ $\sigma_{b,u}$ を示す熱間プレス条件を表 1 に示す。

表 1 最適熱間プレス条件

木材	最大曲げ強さが得られた熱間プレス条件
オビスギ	240℃-4.5MPa
ヒノキ	220℃-9MPa
タモ	200℃-12.5MPa

疲労試験は図4に示す平面曲げ疲労試験機（東京衡機製，PBF-30B）を用いて実施した．試験の応力比 $R=0$ ，応力波形は正弦波とし，繰返し速度は 25Hz (1500cpm) とした．試験雰囲気は室温・大気中である．応力振幅（試験応力）は試験片の最小断面部の外表面における公称応力であり，20 から 80MPa までの範囲とした．試験途中で試験応力値が半減した時を破断とみなし，その時の繰返し数を記録した．また未破断のまま繰返し数 10^7 を越えたときは試験を停止させ，その試験応力を時間強さ，すなわち疲労限度とした．図5は平面曲げ疲労試験片の形状と寸法を示したものである．なお，試験片厚さは未処理材が 3mm，熱間プレス処理を施すものを 10mm とした．したがって熱間プレス条件ごとに試験片厚さが異なった．

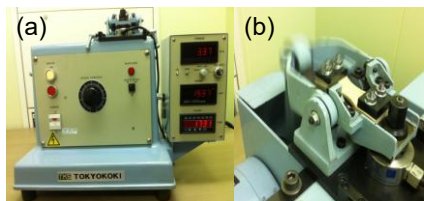


図4 (a)平面曲げ疲労試験機の外観と(b)稼働状況

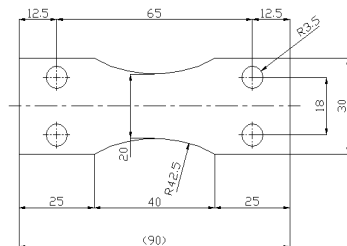


図5 平面曲げ疲労試験片の形状および寸法

3. 実験結果および考察

3・1 熱間プレス処理による機械的性質の向上

図6は表1の熱間プレス条件を施した各木材の最大曲げ強さ $\sigma_{b,u}$ を示したものである．すべての木材において，熱間プレス処理を施すことで最大曲げ強さの向上が認められた．オビスギ未処理材は，未処理のヒノキないしタモよりも低い最大曲げ強さであったのが，熱間プレス処理によって最大曲げ強さが他二種を上回った．

図7は各木材における換算ビッカース硬さ HV^* であり，いずれの木材においても熱間プレス処理による硬さの向上が認められた．特にオビスギでは熱間プレス処理によって硬さが 79% 向上した．図6の結果と合わせ，オビスギは機械的性質向上に対して顕著な熱間プレス処理効果を持ち合わせていると言える．

図8から図10は各木材における平面曲げ疲労試験の結果を示す S-N 線図である．繰返し数 10^7 で疲労限度を定

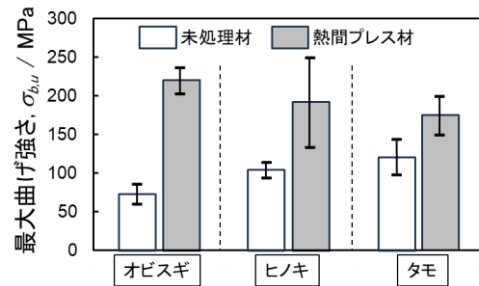


図6 各木材における未処理材と熱間プレス処理の最大曲げ強さ

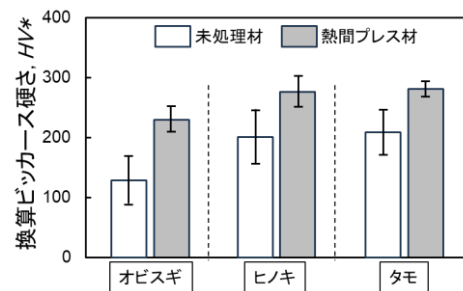


図7 各木材における未処理材と熱間プレス材の換算ビッカース硬さ

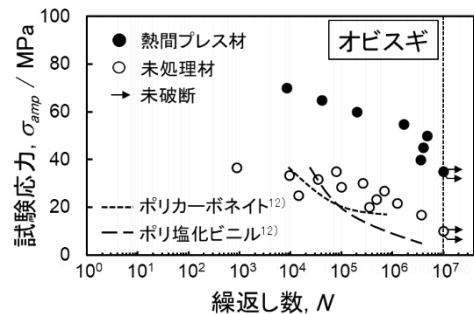


図8 オビスギ未処理材および熱間プレス材に関する S-N 線図

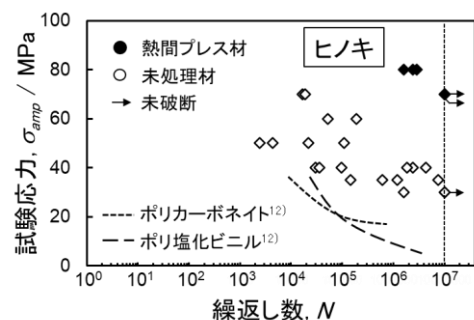


図9 ヒノキ未処理材および熱間プレス材に関する S-N 線図

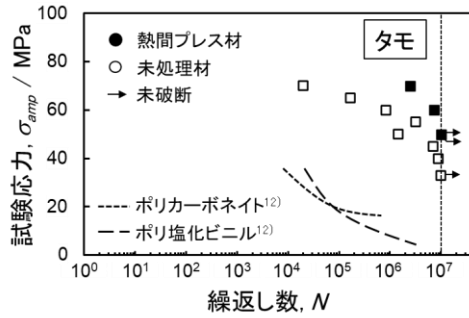


図 10 タモ未処理材および熱間プレス材に関する S-N 線図曲線

義したが、いずれも未破断(矢印)となった。比較のため、ポリカーボネイト¹²⁾およびポリ塩化ビニル¹²⁾の S-N 線図を掲載した。樹種および熱間プレス条件に関わらず、試験応力の低下と共に破断までの繰返し数が増大する一般的な S-N 関係を示した。また最も熱間プレス処理の効果が認められたのはオビスギであり、未処理材の疲労限度に対して熱間プレス材のそれは 2.5 倍となった。

3・2 木材の引張強さと硬さの関係

一般的な金属材料において、引張強さとビッカース硬さの比は 2.6 から 3.0¹³⁾あるいは 3.1 から 3.4¹⁴⁾の範囲であり、おおむね $\sigma_u = 3.0HV$ であるとして良い。図 11 は、本研究における木材の換算ビッカース硬さ HV^* と引張強さ σ_u の関係を示したものである。その結果、相関係数 $R=0.57$ と $\sigma_u = 0.34HV^*$ を得た。

3・3 木材の疲労限度と引張強さの関係

以前より、鉄鋼材料を中心にした疲労限度と引張強さに関する長大なデータ集¹⁵⁻¹⁷⁾が刊行されている。中沢¹⁸⁾は、構造用合金鋼 ($n=147$) の回転曲げ疲労限度 σ_w と引張強さ σ_u の関係を取りまとめており、おおむね $\sigma_w = 0.5\sigma_u$ であるとして良いとしている。図 12 は、本研究における木材の疲労限度 σ_w と引張強さ σ_u の関係を示したものである。その結果、相関係数 $R=0.78$ で $\sigma_w = 0.47\sigma_u$ となった。本研究で扱った試験片数は $n=6$ と少なく、相関係数も低いため信

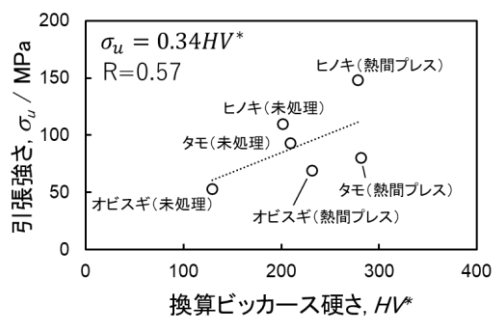


図 11 換算ビッカース硬さと引張強さの関係

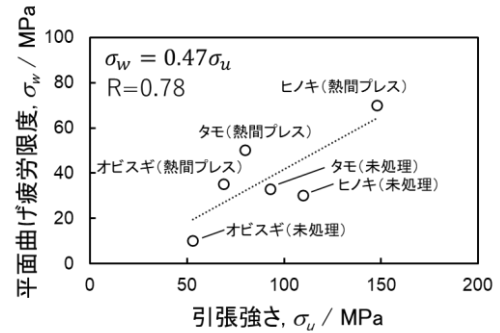


図 12 木材の疲労限度と引張強さの関係

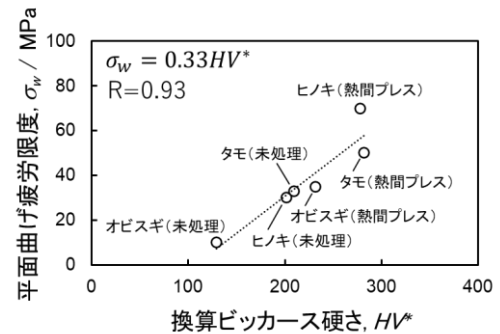


図 13 木材の硬さと疲労強度の関係

頼性は決して高くはない。しかし、これまで木材分野で取り扱われてこなかった新しい試み調査であり、興味深く調査を継続したい。

3・4 木材の疲労限度の関係

金属材料におけるビッカース硬さと疲労限度の関係は、 $HV400$ 以下の鉄鋼材料について $\sigma_w = 1.6HV^{19)}$ であることが報告されている。図 13 は、本研究における木材の換算ビッカース硬さ HV^* と疲労限度 σ_w の関係を示したものである。その結果、相関係数 $R=0.93$ および $\sigma_w = 0.33HV^*$ が認められた。

本研究の硬さ試験と平面曲げ疲労試験は、表面に負荷応力を付与した試験であるため、評価結果は表面性状に強く影響したものであると考えられる。木材に熱間プレス処理を施すことで、表面付近の化学成分、木質組織、密度、表面凹凸、残留応力等が木材硬さあるいは疲労限度に影響を与える事項であると思われる。図 11 から 13 までの結果、熱間プレスは機械的性質および疲労限度向上に寄与した。そのため熱間プレス材には強化された領域が存在すること、そしてそれが弱体化の要因を上回ったことを意味すると考えられる。

3・5 熱間プレス処理後の木材組織観察結果

熱間プレス処理を施したときの木材表層近傍の断面を観察した。図 14 から 16 は、オビスギ、ヒノキ、タモの板目材の観察結果であり、それぞれ(a)が未処理材、(b)は表

1の熱間プレス条件を施した熱間プレス材である。熱間プレス方向は紙面左右方向である。観察方向は図内に示す方向(図1参照)であり、L方向は木材成長方向を意味している。

図14はオビスギ(針葉樹)の観察結果を示したものである。図14(a)の未処理材は晩材および早材領域が明瞭であり、ハニカム構造を示す早材領域の仮道管細胞壁は、晩材のそれに比べ薄肉であった。一方、熱間プレス処理を施した図14(b)は、左右方向に仮道管が強く圧縮されており、早材領域は薄肉の細胞壁が圧縮座屈に類する変形を呈しながら折りたたまれていた。本研究では熱間プレス処理後の表層近傍の密度測定を行っていないが、早材領域の高密度化が高いレベルで進んだものと考えられる。

図15はヒノキ(針葉樹)の観察結果を示したものである。図15(a)の未処理材では、オビスギと同様に晩材および早材領域が明瞭であり、早材領域の仮道管壁は晩材に比べて薄肉であった。一方、熱間プレス処理を施した図15(b)は、早材の仮道管が強く圧縮されており、薄肉細胞壁がすき間なく柔軟的に折りたたまれた様相を示した。熱間プレス後の早材領域を比較すると、図14(b)のオビスギよりも密度が高いように思われる。晩材領域の仮道管は、熱間プレス後も空洞が残存していた。したがって晩材よりも早材領域で一定の高密度化が進行していると予想される。

図16はタモ(広葉樹)の観察結果を示したものである。図16(a)の未処理材では、T(接線)方向に伸長した楕円形の粗大な早材道管と道管間の木部繊維^{20)~22)}が観察された。また、オビスギおよびヒノキで認められた晩材および早材の境界を明確に示さない木質組織であった。図16(b)は、熱間プレス処理後の観察結果であり、粗大な道管が左右方向に圧縮されている様子が認められた。しかしながら圧縮後の道管はしっかりと閉口しておらず、且つその端部が鋭い形状となっていた。

以上のように木材表層部近傍の断面組織観察を行った結果、熱間プレス処理を施すことで最も高密度化を成し、且つ密度分布の偏りが抑制されていたのはヒノキであるといえる。そのため、図11から13までヒノキの熱間プレス材は最も高い値を示したと考えられる。またオビスギは未処理材の低密度、低強度の早材領域が、熱間プレス処理によって高密度化とそれに伴う高強度化を呈したために図6に示すような大幅な強化割合を示したものと予想される。タモは空隙径の大きい道管が目立つものの、全体の6%程度²³⁾であるため熱間プレス処理による高密度化の割合が低かったものと考えられる。いずれにしても、表層部近傍の密度測定が今後の課題である。

Takahashiらはオビスギ(無垢材)から採取した晩材について引張試験を行い、丸太中心からR(半径)方向に外皮に向かって発達する放射組織が優先的な引張損傷部位であろうと述べている²⁴⁾。本報告は板目材を中心に研究結果を述べているが、熱間プレス処理の圧縮方向が丁度R

方向と同調することになる。そのため、いずれの木材内部の放射組織は強い圧縮変形を受けていることになり、少なからず変形抵抗が低い脆弱な領域を形成する可能性があると考えられる。したがって、熱間プレス処理後の表層部近傍だけでなく、試験片内部の組織変容についての調査が求められる。タモの放射組織は全体の19%²³⁾を占めると言われており、オビスギとヒノキの2%²³⁾と比べて顕著である。もしも放射組織の損傷が著しいとなれば、試験片内部に破壊の起点などになり得る領域が形成しているであろうと考えられるため、図11および図12に示すようにタモの熱間プレス材の引張強さ σ_u が未処理材のそれよりも下回ったのは、熱間プレス処理後のタモ内部に分布したためと思われる。

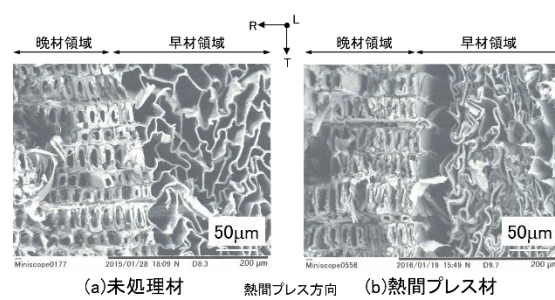


図14 オビスギの(a)未処理材と(b)熱間プレス材の表層部断面組織

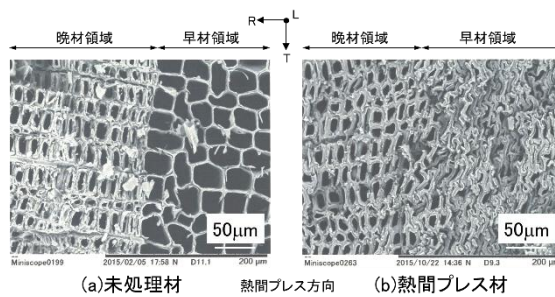


図15 ヒノキの(a)未処理材と(b)熱間プレス材の表層部断面組織

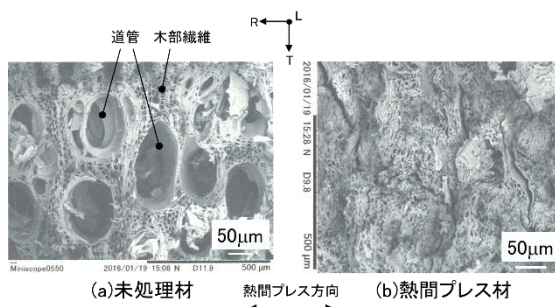


図16 タモの(a)未処理材と(b)熱間プレス材の表層部断面組織

4. 結言

本研究では、オビスギとヒノキ(針葉樹)およびタモ(広葉樹)の板目材を中心に、熱間プレス圧力 3.5~14.5MPa として熱間温度 150~240℃の熱間プレス条件の中で最大曲げ強さ $\sigma_{b,u}$ を示す最適熱間プレス条件を洗い出した。また最適条件を施した試験片を用いて反発硬さ e (換算ビッカース硬さ HV*)、引張強さ σ_u 、疲労限度 σ_w を調査し、木材の硬さと疲労限度との関係や熱間プレス後の試験片表層部断面組織を観察し、本研究結果に関する若干の考察を行った。本研究にて得られた結果を以下にまとめる。

1) 熱間プレス処理を行うことで、おおむね機械的性質の向上が認められた。これは早材領域の高密度化に伴う高強度化が達成されたためと考えられた。その中でもオビスギは機械的性質向上に対して顕著な熱間プレス処理効果を持ち合わせていた。一方、タモの熱間プレス材の引張強さ σ_u は未処理材のそれよりも下回る結果を得た。

2) 樹種 3 つの木材の硬さ(換算ビッカース硬さ HV*)と疲労限度 σ_w の関係について、未処理材と熱間プレス材を総合して評価した結果、相関係数 $R=0.93$ および $\sigma_w = 0.33HV^*$ が認められた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成(AF-2021029-B3)によって行われました。ここに付記し、財団および関係各位に深く感謝の意を表します。また都城工業高等専門学校高橋明宏教授、大岡優准教授、豊橋技術科学大学三浦博己教授そして小林正和教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 林野庁ホームページ(令和 7 年 4 月 14 日現在)
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/>
- 2) 株式会社大林組ホームページ(令和 7 年 4 月 2 日現在)
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news/20220520_1.html
- 3) 田中和博:森林計画学入門,(1996),16,森林計画学会出版局
- 4) 伊地知美智子,遠藤日雄:スギ大径材の有効利活用に関する研究,鹿児島大学農学部演習林研究報告,Vol.37,(2010),79-92.
- 5) 浅井将之,西村尚:圧縮木材の曲げ強度に及ぼす加工条件の影響,日本機械学会論文集(A編),Vol.67,(2001),267-272.
- 6) 関雅子,杉元宏行,三木恒久,金山公三,古田裕三:高圧力下における木材の摩擦特性に及ぼす含水率の影響,木材学会誌,Vol.58,(2012),302-308.
- 7) 大谷忠,久保島吉貴,松下清:圧縮木材の引張強度特性における圧縮量の影響と破断形態,木材学会誌,Vol.51,(2005),189-195.
- 8) 北守顕久,鄭基浩,森拓郎,小松幸平:圧縮木材の力学的性質の圧縮率依存性,木材学会誌,Vol.56,(2010),67-78.
- 9) 今山延洋,松本昂:木材の疲れに関する研究(第1報),木材学会誌,Vol.16,(1970),319-325.
- 10) 山本卓,山本正之,松橋雄一,宮原健介:くぼみ寸法形状から推定した微小球反発硬さ eNM3A10 の衝撃荷重,材料試験技術,Vol.67,(2022),136-139.
- 11) 宮原健介:微小球反発硬さ試験の弾塑性モデルと実験結果の比較,材料試験技術,Vol.68,(2023),13-18.
- 12) 材料強度学,(1993),135,日本材料学会編
- 13) 中村雅勇:硬さ試験の理論とその利用法,(2012),18,森北出版
- 14) 谷垣健一:金属材料実験の手引き,2-1-5 ビッカース硬さ試験,まてりあ,Vol.62,(2023),793-801.
- 15) 科学技術庁金属材料技術研究所編:金属材料技術研究所疲れデータシート,(1978)
- 16) 日本機械学会編:金属材料 疲労強度の設計資料 I 一般,寸法,切欠効果,(1982)
- 17) 日本材料学会編:金属材料疲労強度データベース,(1996)
- 18) 中沢一:鉄鋼の疲労強度のばらつき,鉄と鋼,Vol.66,(1980),717-723.
- 19) 村上敬宜:金属疲労 微小欠陥と介在物の影響,(1983),7,養賢堂
- 20) 佐伯浩:走査電子顕微鏡図説 木材の構造的性,(1982),日本林業技術協会
- 21) 今村祐嗣,川井秀一,則本京,平井卓郎編著:木材・木質材料学,(1999),26,東洋書店
- 22) 古野毅,澤辺攻:木材科学講座 2 組織と材質,(2004),海青社
- 23) 宮崎擴造,古野毅,井上裕之,番匠谷薫,石丸進:木材の性質と加工,(1998),開隆堂
- 24) A.Takahashi, N. Yamamoto, Y. Oooka, T. Toyohiro: Tensile Examination and Strength Evaluation of Latewood in Japanese Cedar, Materials, (2022), 15, 2347.