

半炭化された木材の断熱性と強度*1

関野 登*2, 田名部功幹*2,3, 姜 卓秋*4

Thermal Insulation and Strength Properties of Semi-carbonized Wood*1

Noboru SEKINO*2, Katsumi TANABE*2,3 and Zhuoqi JIANG*4

Assuming the use of semi-carbonized chips under the floor for thermal insulation, wood (Douglas fir heartwood) was semi-carbonized (torrefied) at heating temperatures of 270 to 300 °C and oxygen concentrations of 1 to 4%. Changes in thermal insulation capacity, hygroscopicity, strength properties, and so on were investigated using the mass loss caused by semi-carbonization as an index. The thermal conductivity decreased linearly as the mass loss increased, and the rate of decrease was about 0.75% per 1% mass loss. The main cause of the decrease in thermal conductivity was the increase in porosity due to the decrease in density. However, the heat transfer model analysis revealed that the thermal conductivity of the substance (heat bridge) decreased by up to 5% due to the decreases in hygroscopicity and substance density. Although the compressive strength and shear strength decreased to about 1/4 when the mass loss reached 40%, the pulverization rate due to repeated drop impacts remained below 10%. Assuming that a mass loss of 20% or more ensures decay resistance, the semi-carbonization condition that achieves both thermal insulation and impact resistance was judged to be in the range of 20 to 40% in terms of mass loss.

Keywords : semi-carbonization (torrefaction), mass loss, thermal conductivity, hygroscopicity, strength properties.

半炭化チップの床下敷設利用（断熱資材）を想定し、加熱温度270~300 °C、酸素濃度1~4%で半炭化させた木材（ベイマツ心材）について、質量減少率を指標に断熱性、吸湿性、強度性能などの変化を調べた。熱伝導率は質量減少率の増加につれて直線的に低下し、その低下率は質量減少率1%あたり約0.75%であった。熱伝導率低下の主要因は密度低下による空隙率の増加であったが、熱橋となる実質の熱伝導率も吸湿性低下と真密度低下によって最大5%低下することが熱伝導モデル解析から明らかとなった。質量減少率が40%に達すると圧縮強度およびせん断強度は1/4程度に低下したが、繰り返し落下衝撃による粉化率は10%以下に留まった。耐朽性が確保される質量減少率20%以上を前提とすれば、断熱性と耐衝撃性を両立させる半炭化条件は、質量減少率で20~40%の範囲と言える。

*1 Received April 1, 2021; accepted June 14, 2021.

*2 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020-8550, Japan

*3 現在：東京農工大学大学院農学府 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509, Japan

*4 岩手大学大学院連合農学研究科 The United Graduate School of Agricultural Science, Iwate University, Morioka 020-8550, Japan

Corresponding author : N. Sekino (sekino@iwate-u.ac.jp)

1. 緒 言

木材を無酸素雰囲気下で加熱すると、60~200℃で熱減成（高分子の低分子化）、160~450℃で熱分解、260~800℃で木炭化、600~1800℃で炭素化、1600~3000℃で黒鉛化が生じる¹⁾。国際エネルギー機関（IEA）がトレファクション（torrefaction）と呼ぶ200~300℃の熱処理は、“半炭化”または“低温炭化”とも呼ばれる。この温度域は熱分解の初期段階に相当し、発熱量と耐水性が増す一方で粉砕動力が減少するため、半炭化チップを粉砕してペレット燃料化する試みが欧州で盛んに実施されてきた²⁾。一方、マテリアル用途では、半炭化温度の前半域である250℃程度以下の熱処理木材が欧州で開発され、寸法安定性に優れ、防腐効果のある外構部材として我が国でも流通している³⁾。同じく半炭化温度の前半域の実用化例として、吉田²⁾は半炭化チップを骨材とする木質舗装材の製造方法と性能を検討し、骨材の耐朽性と強度の両立には、質量減少率で18~20%となる半炭化が適切と指摘した⁴⁾。その根拠は、質量減少率20%程度以下では部分圧縮の比例限度応力の低下が1割以下に留まったという増田⁵⁾の報告および質量減少率18%以上で木材保存剤と同等の耐朽性が発揮されたという伊藤ら⁶⁾の報告などである。

さて、半炭化チップの用途には、木炭と同様な床下敷設も想定できる。床下への木炭敷設は幾つかの国内住宅メーカーで実施されており⁷⁾、その主目的は吸着機能に基づく空気質の改善である。また、床下空間の調湿による結露防止も期待できる。中野ら⁸⁾は木炭による木造住宅の床下湿度の変動抑制は、木炭の吸湿性と断熱性に起因することを指摘した。栗本⁹⁾も同様に、木炭敷設による地盤面の断熱効果を床下調湿効果の一因に挙げている。地盤面の断熱には敷設する木炭層の厚さや粒度などが影響するが、基礎となるのは木炭自体の熱伝導率である。関野ら¹⁰⁾は、木材を300~750℃の範囲で炭化して熱伝導率の変化を調べ、熱伝導率の低下率は450℃炭化で最大（約48%）になると報じた。また、300℃炭化は熱伝導率の低下率が約36%で450℃炭化に比べて劣るが、質量減少率は約28%で耐朽性が十分に期待できるレベルにあり、かつ、体積収縮率が約13%と小さいために木炭層の厚さを得やすく、床下敷設資材の炭化温度として有望と指摘した。

半炭化の温度域での熱伝導率測定として、豊野ら¹¹⁾は237℃における1~5時間処理でスギ材の熱伝導率が15~35%低下したと示した。これは半炭化

温度の前半域にあたるが、後半域の半炭化材を対象とした測定例は殆ど見当たらない。そこで本研究では、270~300℃程度で木材を半炭化させて熱伝導率の変化を調べた。同時に、質量減少、体積収縮、密度変化、吸湿性（平衡含水率）を調べ、熱伝導率との関係を考察するとともに、熱伝導モデルを適用して実質の熱伝導率を試算した。また、床下敷設資材を想定した強度の基礎資料を得るため、圧縮強度、せん断強度、耐衝撃性を調べた。一方、久保島ら¹²⁾は半炭化チップ生産の管理手法として色彩測定による質量減少率の推定可能性を示したが、その実現に向けて、本研究でも半炭化後の質量減少率と色彩値の関係を調べた。

2. 実験方法

2.1 供試木材

ベイマツ気乾材（含水率：11~13%）の心材部より、寸法98 mm (L) × 102 mm (R) × 15 mm (T)の熱伝導率測定用の柁目板の試験体および寸法29 mm (T) × 29 mm (R) × 48 mm (L)の強度測定用の試験体を多数採取した。これらの試験体より密度および平均年輪幅が中庸なものを抽出し、熱伝導率測定用の試験体では1グループ5個からなる10グループに、強度測定用の試験体では1グループ18個からなる9グループに分配した。分配は各グループの平均密度がグループ間で同等となるように行い、熱伝導率測定用ではいずれのグループも密度 $0.53 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ （平均±標準偏差, $n = 5$ ）、同様に強度測定用では密度 $0.55 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ （平均±標準偏差, $n = 18$ ）となった。平均年輪幅は各グループの平均値が熱伝導率測定用で7.0~8.9 mmの範囲に、強度測定用では5.5~7.4 mmの範囲にあり、グループ間で有意差はなかった。上記グループのうち、8グループを半炭化処理に供し、残りは未処理（対照）とした。

2.2 半炭化条件と加熱装置

半炭化の処理条件には、加熱温度、加熱時間、酸素濃度などがある。酸素濃度に関して、筆者らが既報¹⁰⁾で行った300℃炭化（半炭化温度の上限付近）では、推定約1%であった。一方、例えば燃焼排気ガスを用いて工業的に半炭化を行う場合、低酸素濃度の雰囲気もあり得る。そこで本研究では、酸素濃度を1~4%に設定した。加熱温度に関して、耐朽性が期待できる質量減少率18%程度以上⁶⁾を短時間で付与するにはある程度の高温が必要と考えて、その下限を270℃とし、以下に示す8条件の加熱温度と酸素濃度の組み合わせを設定した。昇温速度など

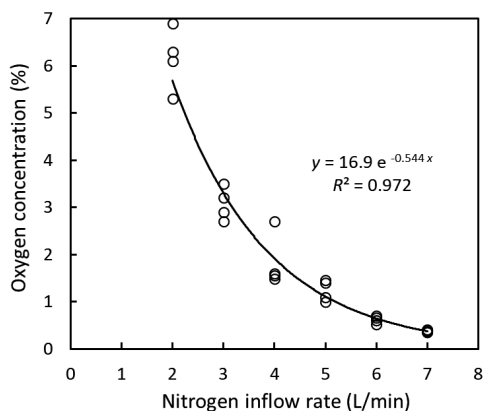


Fig. 1. Relationship between nitrogen inflow rate and oxygen concentration in the furnace.

の加熱スケジュールは、次項で示す。

270℃：酸素4%

280℃：酸素3%, 4%

290℃：酸素1%, 2%, 3%, 4%

300℃：酸素1%

加熱装置には、不活性ガス導入の流量計が装備された小型電気炉 (DRM420DE, 炉内寸法: 幅150 mm × 高さ110 mm × 奥行250 mm, (株) 東洋製作所) を用いた。Fig.1は低濃度酸素濃度モニター (JKO-O2LJD3, (株) イチネンジコー) を用いて測定した常温における窒素ガス流量と炉内の酸素濃度の関係である。Fig.1で示した回帰式が加熱時にも成立すると仮定し、酸素濃度1, 2, 3, 4%に対して、流量をそれぞれ5.2 L/min, 3.9 L/min, 3.2 L/min, 2.6 L/min に設定して加熱処理を行った。

2.3 半炭化の手順と測定項目

試験体は予め105℃で24時間乾燥され、全乾質量 (0.001 g 精度) と全乾体積 (T, R, L 辺の中央を0.001 mm 精度で測定) が測定された。常温・全乾の試験体を炉内に入れて扉を閉めた後に窒素流入を開始し、炉内雰囲気定常に達したのち (概ね5分後)、昇温速度5℃/分で設定温度まで加熱した。設定温度到達と同時に加熱を停止し、窒素流入を継続しながら自然放冷させた。炉内温度100℃以下で試験体を取り出し、乾燥剤入りのデシケータ中で常温まで放冷した。続いて全乾質量と全乾体積を処理前と同様の方法で測定し、全乾基準での質量減少率と体積収縮率を求めた。なお、熱伝導率測定用の試験体では上記の加熱・放冷操作を2回繰り返した (強度測定用に比べて体積が大きく、質量減少率が半分程度であったため)。

以上が半炭化手順の概要であるが、1回の加熱処

理で炉内に入れる試験体の数は、個々の試験体が炉内の左右壁面 (ヒーター内蔵) からの輻射熱を直接受けるように、強度測定用では6個 (縦列3個 × 上下2段)、熱伝導率測定用では2個または1個とした。また、熱電対1本 (JIS K タイプ: 線径0.3 mm) を試験体の表面に接触させ、得られた測温値をその加熱バッチにおける試験体温度と扱った。半炭化後の試験体は、3~4週間程度、実験室内 (冬季、温湿度変動の概略: 15~25℃, 20~40% RH) で気乾状態まで養生された後、熱伝導率および強度測定に供試された。

2.4 熱伝導率の測定

熱伝導率は日本産業規格 (JIS A 1412-2:1999) に規定される平板比較法¹³⁾で測定した。その原理は、熱伝導率と厚さが既知の標準板と厚さが既知で熱伝導率が未知の試験体を重ねて高温板と低温板の間に挟み、鉛直下向き熱流を与えて熱流が定常状態に達したとき、標準板と試験体を貫通する熱流が等しいことに基づくもので、試験体の熱伝導率 λ (W/mK) は式 (1) で算出される。

$$\lambda = \lambda_0 \times \frac{d}{d_0} = \frac{(t_1 - t_2)}{(t_2 - t_3)} \quad (1)$$

ここで、 λ_0 は標準板の熱伝導率 (W/mK)、 d と d_0 はそれぞれ試験体と標準板の厚さ (m)、 t_1 , t_2 , t_3 はそれぞれ、標準板の高温側表面温度 (K)、標準板と試験体の接触面の温度 (K)、試験体の低温側表面温度 (K) である。測定装置の詳細は既報¹⁴⁾ に示した通りであり、高温板を40.0℃、低温板を20.0℃に設定し、試験体温度 (上下面の平均値) 約23℃における T 方向の熱伝導率を測定した。測定に際し、試験体は予め上下面が平滑・平行で、かつ、厚さ12.0 ± 0.1 mm となるよう円盤カンナ盤で整形された。熱伝導率の測定は1試験体につき、上下面を裏返して2回行った。また、測定終了時に試験体質量を測定し、続いて全乾質量を求めて試験時の含水率を算出した。

2.5 強度試験

強度試験として、圧縮、せん断、耐衝撃性の3種類を行った。各条件で半炭化された18個の試験体を、圧縮用5個、せん断用8個、耐衝撃性用5個に分配した。ただし、質量減少率の平均値が3種の試験でほぼ同等になるように分配した。また、対照試験体18個は、平均密度がほぼ同等となるように圧縮用10個、せん断用8個に分けた。

圧縮試験とせん断試験は、万能試験機 (AX-Xplus50kN, (株) 島津製作所) を用い、JIS Z 2101:2009¹⁵⁾ に準拠して行った。両試験とも荷重速度を0.5

mm/分とし、圧縮試験ではL方向荷重で縦圧縮強度を、せん断試験ではせん断面をLR面とするせん断強度を求めた。試験に先立ち、圧縮試験体では上下荷重面が平行となるよう整形し、せん断試験体はいす型に加工した。なお、対照の圧縮試験体は破壊荷重が50 kN以内に収まるように荷重面を25 mm×25 mmに縮小して供試した。また、試験体質量および試験後の全乾質量を測定して、試験時の含水率を算出した。

耐衝撃性の評価には、木質ペレットの国際規格¹⁶⁾で規定される機械的耐久性評価装置を用いた。これは速度50 rpmで回転する内寸300 mm×300 mm×125 mmの亚克力製の容器で、投入した試料には回転落下衝撃が付与される。試料は強度試験体をチップ状に加工して用いた。まず、各条件5個×8条件、計40個の試験体を質量減少率10%未満、10%以上20%未満、20%以上30%未満、30%以上40%未満、40%以上50%未満の5グループに再区分し、これに対照（圧縮試験終了後の試験体）を加えた6グループを準備した。これらを鉋で割裂し、床下敷設材料を想定した寸法（幅20～28 mm程度×長さ36～46 mm×厚さ7～10 mm）のチップ試料を得た。その量は1グループにつき約200 g、質量減少率40%以上では約120 gである。精秤（0.01 g精度）したチップ試料（質量： m_a ）を回転容器に投入し、10分間の回転落下衝撃を付与した。取り出されたチップ試料は、目開き4 mmの篩で微粉が除去された後、質量（ m_b ）が測定された。耐衝撃性の評価には木質ペレットの機械的耐久性の評価と同様に、式（2）で定義される指標 DU を用いた。

$$DU = (m_b/m_a) \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

2.6 平衡含水率（EMC）の測定

耐衝撃性試験終了後のチップ試料を手動クラッシャーで粉砕し、篩で目開き4 mmパス、1 mmオンの粉砕試料を作製した。秤量ビンに約10 gの試料を入れ、これを質量減少率6グループのそれぞれで6個準備した。熱風乾燥（105℃、24時間）により各試料の全乾質量（0.1 mg精度）を測定した後、各グループ2個を飽和塩で湿度調整された3種類のデシケータ（20℃、 $MgCl_2$:33%RH、 $Mg(NO_3)_2$:54%RH、KCl:85%RH）中で恒量に達するまで約4週間静置し、吸湿平衡後の試料質量を測定してEMCを算出した。

2.7 熱伝導モデル

実質の熱伝導率（ λ_s ）の推定に用いた熱伝導モデルをFig. 2に示す。このモデルは、繊維直交方向の伝熱において対称形の細胞を4分割し、実質と空隙

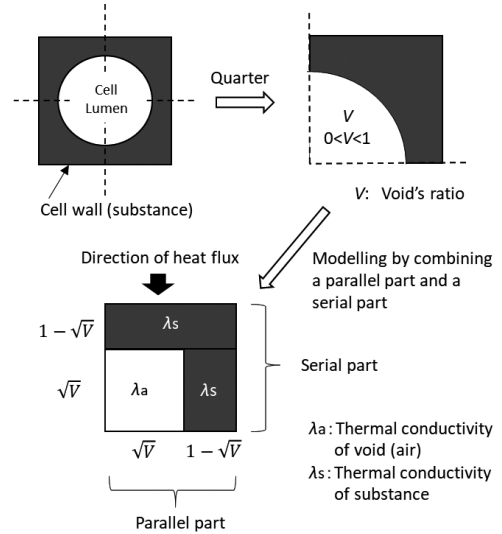


Fig. 2. A heat transfer model applied to the direction perpendicular to the fiber.

の矩形の2要素を考え、熱流方向に対して空隙と実質が並列する部分、その並列部が実質と直列する構成となっている。モデル全体の熱伝導率 λ は、並列部と直列部の熱抵抗の加和則を用いて、式（3）で示される（式の誘導の詳細は既報¹⁰⁾を参照）。なお、式中の V は空隙率（ $0 < V < 1$ ）、 λ_p は並列部の熱伝導率、 λ_a は空隙の熱伝導率である。

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{\frac{(1-\sqrt{V})}{\lambda_s} + \frac{\sqrt{V}}{\lambda_p}} \\ &= \frac{1}{\frac{(1-\sqrt{V})}{\lambda_s} + \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{V}\lambda_a + (1-\sqrt{V})\lambda_s}} \\ &= \frac{\lambda_s\{\sqrt{V}\lambda_a + (1-\sqrt{V})\lambda_s\}}{\lambda_s(1+V-\sqrt{V}) + \lambda_a(\sqrt{V}-V)} \end{aligned} \quad (3)$$

2.9 色彩値の測定

ハンディ型分光色差計（NF555, 光源 D65, 視野角10度, 測色径8 mm, (株)日本電色工業）を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系における明度 L^* および色度 a^* と b^* を測定した。測色は対照および処理後の強度測定用試験体（各18個）のTL面で行った。試験体1個につき任意の5か所を測定し、それらの平均値をその試験体の測定値（ L^* , a^* , b^* ）とした。

3. 結果および考察

3.1 到達温度と質量減少率

Fig. 3に炉内温度（電気炉表示）と試験体温度の測定例を示す。強度測定用の試験体を280℃酸素3

%および300℃酸素1%で加熱した例である。炉内温度（破線）の直線的な上昇と設定温度以降の降下が見てとれる。全乾試験体の加熱のため、水分蒸発潜熱に由来する100℃付近での温度停滞は観察されず、試験体温度は炉内温度に呼応して上昇した。そして、図中の300℃加熱に見るように、試験体温度は炉内温度を頻繁に上回った。これは熱分解に伴う発熱が要因と考えられ、岸本ら¹⁷⁾、伊藤ら⁶⁾も炭化実験の温度測定で同様の指摘をしている。試験体温度の最高値（以下、到達温度）をTable 1に示す。各条件の測定数（ n ）は強度試験体加熱3バッチと熱伝導率試験体加熱4～5バッチの計7～8であ

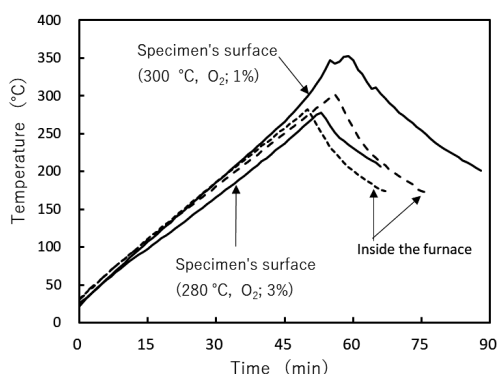


Fig. 3. Examples of temperature history during heating.

る。到達温度の平均値は、270℃設定では設定温度とほぼ同等であったが、280℃設定では8～9℃、290℃設定では11～17℃、300℃設定では37℃ほど上回った。また、280℃と290℃設定において、異なる酸素濃度間で到達温度の平均値に有意差は認められなかった。なお、各加熱条件で到達温度のバラツキは大きい、その要因には各試験体の熱分解の程度の差、試験体表面への熱電対の接触状態のバラツキによる測温誤差などが考えられる。

質量減少率の測定結果をTable 2に示す。上段は強度の試験体グループ（18個）、下段は熱伝導率の試験体グループ（5個）の結果である。同一条件内でもバラツキはかなり大きい、その平均値は設定温度が高いほど大きかった。一方、酸素濃度の影響はあまり明瞭ではなく、質量減少率の平均値に有意差が認められたのは強度試験体グループの一部であった。なお、290℃酸素4%は酸素3%以下と比べて平均値は有意に低かったが、その原因は不明である。以下、既報の知見より酸素濃度の影響を考察してみる。三浦ら¹⁸⁾はトドマツ材の熱質量分析のTG曲線を示したが、300℃での質量減少率は窒素気流中すなわち無酸素状態で約25%、空気気流中すなわち酸素濃度約21%で約30%と読み取れる。すなわち、酸素濃度0%と21%で質量減少率の比は5:6であるから、雰囲気中に酸素が約21%含有されると質量減少率は2割増しになる。この知見より、本研究で行

Table 1. The maximum temperature (°C, mean \pm std) observed at the specimen's surface.

Temperature inside the furnace (°C)	Oxygen (%)			
	1	2	3	4
270	—	—	—	271 \pm 13 ($n=7$)
280	—	—	288 \pm 11 ($n=8$)	289 \pm 8 ($n=7$)
290	311 \pm 19 ($n=8$)	317 \pm 19 ($n=8$)	324 \pm 40 ($n=8$)	315 \pm 15 ($n=8$)
300	337 \pm 32 ($n=8$)			

Table 2. Mass loss (% , mean \pm std) of the specimens for each heating condition.

Temperature inside the furnace (°C)	Oxygen (%)			
	1	2	3	4
270	—	—	—	7.4 \pm 4.2 7.1 \pm 1.6
280	—	—	8.1 ^a \pm 3.1 14.4 ^A \pm 1.4	13.1 ^b \pm 7.2 11.0 ^A \pm 1.9
290	25.3 ^c \pm 12.7 19.2 ^B \pm 3.6	21.6 ^c \pm 8.2 25.3 ^B \pm 6.6	27.0 ^c \pm 10.4 20.3 ^B \pm 3.2	15.7 ^d \pm 8.5 22.3 ^B \pm 5.1
300	39.3 \pm 8.5 34.3 \pm 7.9			

The upper and lower rows show the values for the strength measurement test pieces ($n=18$) and the thermal conductivity measurement test pieces ($n=5$), respectively. In each test piece group means with different letters are significantly different at $P=0.05$.

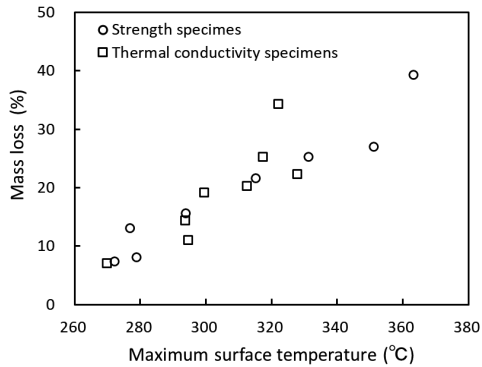


Fig. 4. Relationship between the maximum temperature on the specimen's surface and mass loss.

った酸素濃度1~4%という小さい変化ではその違いが質量減少率にほとんど影響しなかったことは妥当と考えられる。

Fig. 4に到達温度と質量減少率の関係を示す。プロットのX, Y座標はそれぞれ、各加熱条件における到達温度の平均値、質量減少率の平均値であり、強度と熱伝導率の試験体でプロットを区別した。寸法の大きな熱伝導率の試験体は2回の繰り返し加熱を受けたが、図を見る限り強度の試験体とほぼ同レベルの質量減少が生じたと言え、全体として質量減少率は到達温度に呼応してほぼ直線的に増加した。到達温度280℃で質量減少率は10%程度、300℃では18%程度、320℃では24%程度、340℃では30%程度であった。ただし、この結果は到達温度の継続時間が数分程度 (Fig. 3参照) という条件つきである。

質量減少率は半炭化の程度の指標となるため、以後、半炭化による物性値の変化は質量減少率を指標に用いて検討する。

3.2 体積収縮率, 密度低下率, 吸湿性の変化

Fig. 5に質量減少率と体積収縮率の関係 (両者とも全乾基準) を示す。強度と熱伝導率の試験体グループでプロットを区別したが、両グループともに体積収縮率は質量減少率の増加につれて同じような傾向で増大した。そこで、全プロットを用いて回帰式 (原点を通る2次曲線) を求め、図中に示した。体積収縮率の値は質量減少率の4割強となり、回帰式を用いると、例えば、質量減少率20%, 30%, 40%に対する体積収縮率は、それぞれ、8.0%, 13.1%, 19.0%となる。このように質量減少率の方が体積収縮率よりも大きいため、試験体の密度は半炭化によって低下した。その低下率 (全乾基準) を質量減少率との関係で示したのが Fig. 6である。強度と熱伝導率の試験体グループでプロットを区別したが、両

プロット群は混在したため、全プロットを用いて回帰式 (原点を通る直線) を求め、図中に示した。この回帰式を用いると、例えば、質量減少率20%, 30%, 40%に対する密度低下率は、それぞれ、13.0%, 19.6%, 26.1%となる。なお、式 (4) は質量減少率 α_w (%), 体積収縮率 α_v (%), 密度低下率 α_d (%) の3者間に成立する理論式¹⁰⁾ であるが、例えば $\alpha_w = 30$, $\alpha_v = 13.1$ を代入すると $\alpha_d = 19.4$ となり、上記の回帰式上の値とほぼ一致した。

$$\alpha_d = \left(1 - \frac{100 - \alpha_w}{100 - \alpha_v}\right) \times 100 (\%) \quad (4)$$

Table 3にEMCの測定結果 (1条件2試料の平均値) を示す。対照のEMCに対する比率をカッコ内に示すが、それらは59~70%の範囲にあった。すなわち半炭化によって吸湿性は3~4割低下した。

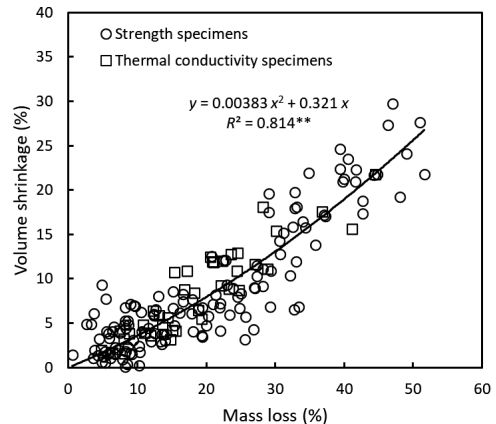


Fig. 5. Relationship between mass loss and volume shrinkage.

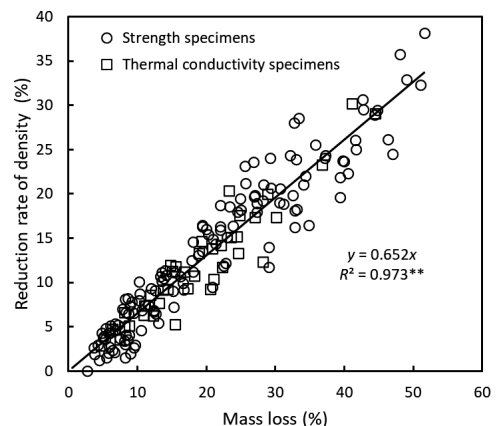


Fig. 6. Relationship between mass loss and rate of density reduction.

Table 3. Equilibrium moisture content (EMC : %) measured at 20 °C.

Relative humidity	Control	Mass loss (%)				
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
33%	5.60	3.77 (67)	3.57 (64)	3.60 (64)	3.62 (64)	3.79 (68)
54%	8.19	5.61 (68)	5.24 (64)	5.11 (62)	5.25 (64)	5.36 (65)
85%	13.20	9.29 (70)	8.41 (64)	7.95 (60)	7.76 (59)	7.81 (59)

Values in parenthesis are percentage to the control value.

ただし、質量減少率10%未満では他4グループに比べて低下の程度は若干小さかった。酒井ら¹⁹⁾は、窒素素雰囲気下240℃で24時間処理したスギ辺材の吸着等温線(27℃)を調べ、未処理に対してEMCがほぼ半減すると報じた。本研究と比べて処理温度が低い割には吸湿性低下が大きい、それは処理時間の長さが要因であろう。一般に吸湿性の低下は吸着サイトの減少と換言できるが、熱処理の場合はその温度に応じた木材主要成分の変化に起因する。上記の酒井らの報告¹⁹⁾にある250℃以下すなわち半炭化温度の前半領域では、吸湿性に富むヘミセルロースの分解やセルロース非晶領域における水酸基の選択的減少²⁰⁾が吸湿性低下の主要因と考えられる。一方、本研究で対象とした半炭化の後半領域ではセルロースの急激な熱質量減少の初期段階にあたり²⁰⁾、セルロースの分解による吸着サイトの減少も示唆される。

3.3 熱伝導率の低下

Fig. 7に熱伝導率と質量減少率の関係を示す。×印のプロットが測定値であるが、測定時含水率は対照試験体で7.8~11.8%の範囲に、半炭化試験体で2.4~3.5%の範囲に分布した。熱伝導率に及ぼす半炭化の影響を検討する際、同一の温湿度環境下の含水状態における熱伝導率の比較が望ましい。そこで、測定値を20℃54%RHのEMC(Table 3の値)における熱伝導率に補正して○印のプロットで示した。補正には式(5)を用い、含水率増加1%あたりの熱伝導率の増加率(%)を示す係数 k は、対照および半炭化試験体とも1.25とした^{21, 22)}。なお、式(5)の u_1 と λ_1 は補正前の含水率と熱伝導率、 u_2 と λ_2 は補正後の含水率と熱伝導率である。補正プロットの回帰式をFig. 7中に示すが、それを变形すると式(6)となり、質量減少率1%増加で約0.75%の熱伝導率低下が生じる。例えば質量減少率10%、20%、30%、40%に対応する熱伝導率の低下率は、それぞれ、約7.5%、約15%、約22%、約30%となる。

$$\lambda_2 = \lambda_1 \{1 - k(u_1 - u_2)/100\} \quad (\text{W/mK}) \quad (5)$$

$$y = 0.0690 \{1 - (0.746/100)x\} \quad (6)$$

質量減少に伴う熱伝導率の低下を密度低下の観点から考察するため、Fig. 8に試験体の密度低下率と

熱伝導率低下率の関係をプロットした。ただし、半炭化前の個々の試験体の熱伝導率は不明のため、Y座標は対照の平均値0.0673 W/mK (EMC補正後)を基準に算出された。また、X座標は気乾密度の低下率であり、半炭化前の試験体の気乾密度と熱伝導率測定時の気乾密度を用いて算出した。プロット群には有意な正の相関が認められ、回帰直線(実線)を用いると、密度低下率10%、20%、30%に対する

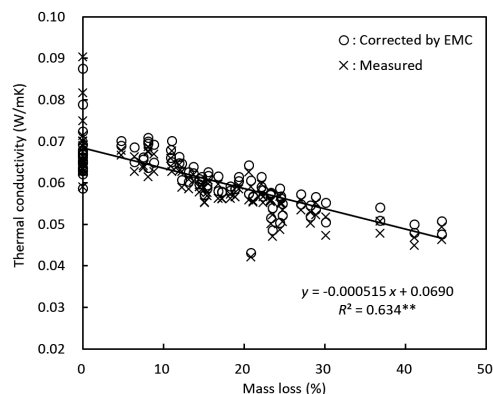


Fig. 7. Relationship between mass loss and thermal conductivity.

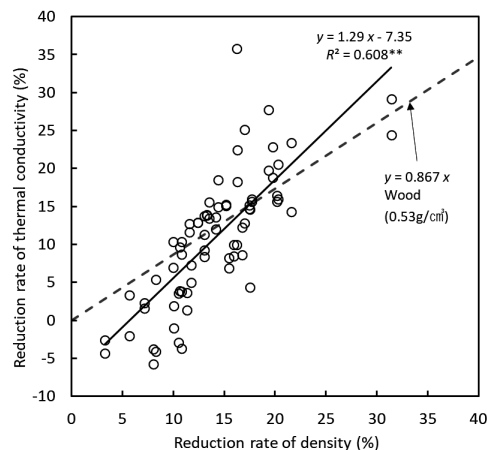


Fig. 8. Relationships between density reduction and thermal conductivity reduction.

熱伝導率低下率は、それぞれ、約6%、約18%、約32%となった。

一方、Fig. 8中の破線は木材における密度低下率と熱伝導率低下率の関係であり、以下の手順で得た。既報¹⁰⁾では気乾木材（密度範囲0.3~0.8 g/cm³）のT方向熱伝導率を本研究と同一の装置と温度条件で測定し、密度 x (g/cm³)と熱伝導率 y (W/mK)の関係として、 $y=0.147x+0.012$ が得られている。回帰式 $y=ax+b$ において、 x の低下率を α ($0<\alpha<1$)、 y の低下率を β ($0<\beta<1$)とすれば、 $\beta=\{ax/(ax+b)\}$ となるから、 x に本研究の試験体の平均密度0.53 g/cm³を代入すると、破線の勾配 $\beta=0.867$ が得られる。さて、プロット群の回帰直線(実線)と破線の位置関係に着目すると、両者は一致せずに交差した。その要因には上述の試験体の熱伝導率低下の推定誤差もあろうが、半炭化における熱伝導率の変化には密度低下以外の要因も働くことを示唆する。

3.4 熱橋(実質)の熱伝導率

前項に記した“密度低下以外の要因”は、木材中の熱の通り道である細胞壁(以下、熱橋)の質的变化と換言できる。そして、木材と比べて密度低下の割に熱伝導率低下が大きいケースでは、実質密度(真密度)の低下および吸着水分の減少に起因して、熱橋自体の熱伝導率低下が生じたと考えられる。真密度に関して、豊野ら¹¹⁾は237℃・1時間の真空熱処理でスギ材の真密度が1.512 g/cm³から1.473 g/cm³へと約3%低下したと報じた。また、関野ら¹⁰⁾は数種の木材の真密度が質量減少率約28%の半炭化により1.517 g/cm³から1.471 g/cm³へと約3%低下し、質量減少率約63%の炭化(450℃)では1.384 g/cm³へと約9%低下したと報じた。したがって、Fig. 7に示す質量減少率40%程度までに、最大4~5%の真密度低下が生じていると考えられる。一方、

水の熱伝導率(20℃)は0.589 W/mKで木材実質の熱伝導率と同等以上であるため²²⁾、半炭化による吸湿性低下(Table 3参照)も熱橋の熱伝導率低下をもたらす。そこで、Fig. 2の熱伝導モデルを用い、以下に熱橋自体の熱伝導率を試算する。

Table 4は、試算に用いた諸値および試算結果の一覧である。試算は質量減少率0%、10%、20%、30%、40%の5水準で行った。まず、式(3)の計算では質量減少率ごとに気乾状態(含水率 MC)の空隙率 V を決定する必要がある。以下の手順で決定した。①全乾密度 ρ_o を対照の値0.503 g/cm³とFig. 6の回帰式から決定する。②真密度 ρ_s を対照で1.517 g/cm³とし、質量減少率10%ごとに ρ_s を1%低減させ、 $V_o=(1-(\rho_o/\rho_s))$ より V_o を決定する。③木材の全体積膨潤率 $28\rho_o$ が全吸着水分の体積比率となること²¹⁾を根拠に、含水率 MC における吸着水分の体積比率 S_w を、 $S_w=28\times\rho_o\times(MC/FSP)/100$ より決定する。ただしFSPは繊維飽和点であり、対照では28%とし、半炭化後も単位含水率あたりの膨潤率は対照と同等と仮定する。④気乾状態の空隙率 V は吸着水分の体積比率に応じて全乾状態の空隙率 V_o よりも低くなり、 $V=V_o/(1+S_w)$ なる関係が成立するため、この式より V を決定する。続いて、式(3)の λ_a に静止空気(23℃)の熱伝導率0.026 W/mK、 V に上記で得た値を代入し、実質熱伝導率 λ_s をパラメータとして0.001 W/mK刻みで変化させてモデルの熱伝導率 λ を求め、それがFig. 7の回帰式上の熱伝導率 λ と最も良く一致するときの λ_s を得た。試算された λ_s は質量減少率0%(対照)で0.273 W/mK、質量減少率10%と20%では対照と同等であるが、30%では約2%の低下、40%では約5%の低下となった。このように若干ではあるが熱橋自体の熱伝導率が低下し、熱橋に質的な変

Table 4. Calculation of thermal conductivity of substance (λ_s).

Mass loss (%)	Density without water (g/cm ³)		Void's ratio $V=V_o/(1+S_w)$				Thermal conductivity (W/mK)		
	Bulk	Substance	V_o ¹⁾	MC	S_w ²⁾	V	Bulk	Substance	
	ρ_o	ρ_s		(%)			λ ³⁾	λ ⁴⁾	λ_s
0	0.503	1.517	0.669	8.2	0.041	0.642	0.0690	0.0691	0.273 (100%)
10	0.470	1.502	0.687	5.4	0.025	0.670	0.0639	0.0638	0.276 (101%)
20	0.437	1.487	0.706	5.2	0.023	0.690	0.0587	0.0586	0.272 (100%)
30	0.405	1.471	0.725	5.2	0.021	0.710	0.0536	0.0536	0.267 (98%)
40	0.372	1.456	0.745	5.3	0.020	0.730	0.0484	0.0483	0.260 (95%)

¹⁾ $V_o=(1-\rho_o/\rho_s)$.

²⁾ Volume increase of substance due to bound water.

³⁾ Values on the regression line in Fig. 7.

⁴⁾ Values calculated using Eq. (3).

化が生じたと考えられる。その一方で、Table 4 の空隙率 V に着目すると、対照の64.2%から徐々に増加して質量減少率40%では73.0%に達した。これより、熱伝導率低下の主要因が熱橋の量的な変化（減少）であることが再確認できる。

3.5 強度劣化

圧縮強度と質量減少率の関係を Fig. 9 (A) に示す。試験時含水率は対照で平均11.5%（分布範囲：11.4~11.9%）、半炭化で平均4.1%（分布範囲：3.5~5.6%）であった。両者の含水率は Table 3 の EMC から見て同一温湿度環境下とは言えないが、質量減

少に伴う強度低下が大きいため、ここでは水分補正せずに考察を進める。対照の圧縮強度は平均64.0 MPa（標準偏差4.6 MPa, $n=10$ ）で、質量減少率20%で圧縮強度はほぼ半減した。質量減少率20%は約13%の密度低下（Fig. 6 参照）を伴うため、密度低下も強度低下の一因であるが、熱分解による木材実質の脆弱化が主要因と考えられる。既報値との比較では、増田⁵⁾ は過熱蒸気処理によるスギ辺材の部分圧縮強度が質量減少率20%で約4割低下したと報じたが、部分圧縮のため本研究の強度低下よりも若干小さい。一方、せん断強度と質量減少率の関係を Fig. 9 (B) に示すが、圧縮強度と比べてバラツキが大きかった。試験時含水率は対照で平均11.2%（分布範囲：10.9~11.7%）、半炭化で平均4.1%（分布範囲：3.3~4.5%）であり、圧縮の場合とほぼ同等であった。対照のせん断強度は平均7.1 MPa（標準偏差2.2 MPa, $n=8$ ）である。質量減少率が20%程度に達するとせん断強度は半減したが、この傾向は圧縮と類似している。

耐衝撃性の試験結果を Table 5 に示す。試料は回転容器内で最大落差30 cm の衝撃を受け、1回転につき1~2回の落下のため、衝撃回数は1~2回×50 rpm×10分=500~1000回となる。このような衝撃に対して、対照の DU は99.8%で、これは粉化した質量が投入量の0.2%に過ぎないことを示す。 DU は質量減少率の増加と共に徐々に低下したが、例えば DU 90%以上すなわち粉化率10%以下が望ましいとすれば、質量減少率は40%程度まで許容できる。その場合、圧縮強度とせん断強度は半炭化前の約1/4となる（Table 5 参照）。しかし、床下敷設では荷重負担が殆ど不要で、搬送上の粉化防止が優先される。質量減少率40%の場合、前述のように約30%の熱伝導率低下が期待できる。一方、伊藤ら⁶⁾ の報告より、耐朽性が期待できる質量減少率の下限は20%程度である。したがって、床下敷設資材として断熱性と強度（耐衝撃性）を両立させる半炭化は、質量減少率20~40%の範囲と言える。

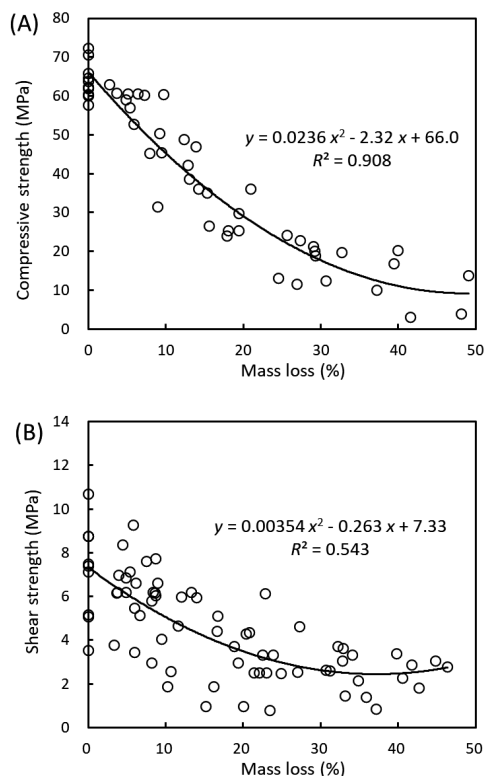


Fig. 9. Relationships between mass loss and compressive strength (A) and between mass loss and shear strength (B).

Table 5. Results of impact strength test and retentions of compressive and shear strengths.

Retention of strength (%)	Control	Mass loss (%)				
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Impact ¹⁾	99.8	98.2	96.5	93.9	90.6	86.3
Compression ²⁾	100	88.6	56.4	34.9	26.0	11.3
Shear ²⁾	100	56.5	35.8	29.9	24.0	22.9

¹⁾ DU values defined by eq. (2).

²⁾ Retentions obtained using data plots shown in Fig. 9 (A) and (B) for each class of mass loss.

3.6 質量減少率と色彩値の関係

$L^*a^*b^*$ 表色系は、明度 L^* 、色度 a^* (緑色から赤色へ)、色度 b^* (青色から黄色へ) の直交3軸で構成される色空間である。対照の測定結果 (平均±標準偏差, $n=18$) は、 L^* が 63.3 ± 2.5 、 a^* が 13.2 ± 1.1 、 b^* が 24.2 ± 1.3 であった。基太村²³⁾ が報じたベイマツ心材の色彩値は、 L^* が72、 a^* が8~9、 b^* が26~29であり、これと比べて本研究のベイマツ心材は明度が少し低く、赤味が多少強く、黄味が多少弱い色合いと言える。

質量減少率と色彩値の関係を Fig. 10(A) ~ (F) に示す。まず (A) を見ると、 L^* は僅かな質量減少率で急激に30程度まで減少し、その後緩やかに低下した。(B), (C) に示すように、 a^* と b^* は質量減少率の増加とともに低下したが、バラツキはかなり大きかった。(D) に示す C^* は、 $(a^*)^2 + (b^*)^2$ の平方根で定義されるメトリック彩度で、 a^*b^* 平面における L 軸からの距離を意味するが²⁴⁾、 a^* または b^* 単独の場合と同様にかなりのバラツキがあった。久保島ら¹²⁾ は、 L^* と a^* の和および L^* と b^* の和が質量減少率と相関したと報じており、本研究でもその指標を (E) と (F) に示した。ただし、対照の色彩値は除外してある。

前項では、質量減少率20~40%の範囲を、“床下敷設資材として断熱性と強度 (耐衝撃性) を両立させる条件”と判断した。そこで、質量減少率20~40%を色彩値から判定したいが、(A) ~ (F) のどれが適するであろうか。(A) の L^* は質量減少率との相関が低く、 L^* のみでの推定は難しい。そこで、色度の加味が必要となる。例えば、(F) の L^*+b^* では質量減少率20%、40%に対応する回帰式上の値は、それぞれ、30.5、26.8となる。同様に (E) の L^*+a^* では、それぞれ29.7、26.9となり、 L^*+b^* の方が差は大きい。久保島ら¹²⁾ はスギ材の半炭化の程度を示す指標として、 L^* 、 L^*+a^* 、 L^*+b^* のいずれも適すると報じたが、本研究のベイマツ心材では、 L^*+b^* を用いた推定が適切と言えよう。一方、(D) を見ると、 C^* の値は質量減少率20%では10以下に、質量減少率40%では5以下に集中しており、 C^* を用いた質量減少率の推定も可能と考えられる。ただし、色彩変化は樹種にも依存するため、今後は様々な樹種での検討が必要である。

4. 結 言

木材 (ベイマツ心材) を酸素濃度1~4%、設定温度270~300℃で半炭化させた結果、発熱による材温上昇も作用して、質量減少率で最大50%の熱分

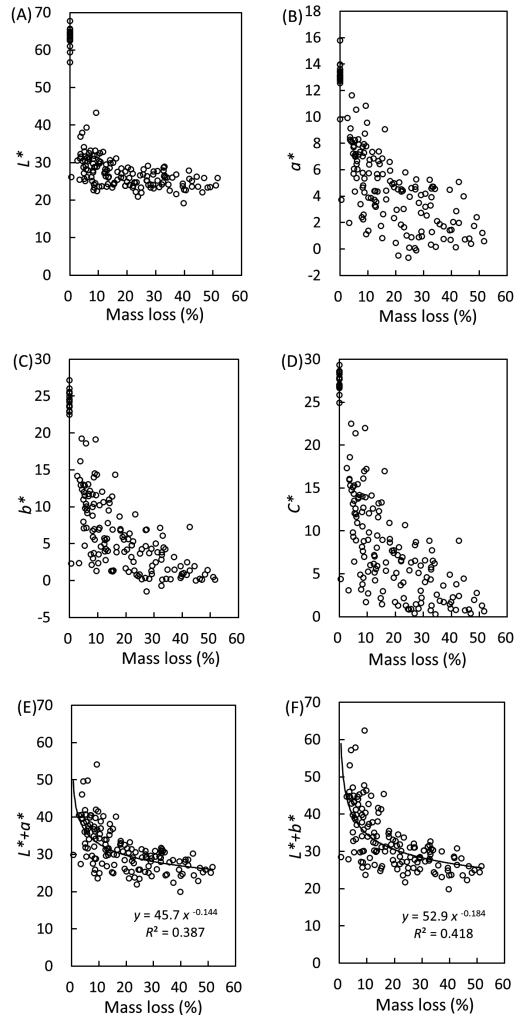


Fig. 10. Relationships between mass loss and color data. (A) L^* , (B) a^* , (C) b^* , (D) C^* , (E) L^*+a^* , (F) L^*+b^* .

解が生じた。ただし、質量減少率に及ぼす酸素濃度の影響はほとんど認められなかった。半炭化による物性値の変化を質量減少率との関係から整理すると、以下ようになる。

1. 体積収縮率は質量減少率の4割強の値となり、結果として密度は低下した。全乾密度の低下率 (y) は質量減少率 (x) と直線関係にあり、 $y = 0.652x$ となる関係が得られた。
2. EMC (20℃ : 33%RH, 55%RH, 85%RH) は半炭化前と比較して約3~4割低下した。質量減少率10%以上での低下率は32~41%であったが、同10%未満では若干少なく30~33%であった。
3. 熱伝導率は質量減少率の増加につれて直線的に

低下し、その低下率は質量減少率1%あたり約0.75%であった。熱伝導率低下の主要因は密度低下による空隙率の増加であった。ただし、熱橋となる実質の熱伝導率は吸湿性低下と真密度低下によって最大5%低下することが熱伝導モデル解析で示され、熱橋自体の熱伝導率低下も若干影響したと考えられる。

4. 質量減少率が40%に達すると圧縮強度およびせん断強度は半炭化前の1/4程度に低下したが、繰り返し落下衝撃による粉化率は10%以下に留まった。

以上の知見より、床下敷設の断熱資材として半炭化チップを製造する場合、耐朽性が確保される質量減少率20%以上を前提とすれば、断熱性と耐衝撃性を両立させる条件として質量減少率20~40%の範囲が適切と判断された。また、この範囲を色彩値から推定する際、ベイマツ心材に対しては L^*+b^* あるいは C^* が利用可能と考えられた。

謝 辞

供試木材をご提供頂いた有限会社マルヒ製材(岩手県久慈市)に厚く御礼申し上げます。本研究はJSPS科研究費(JP19K06162)の一部として行った。

文 献

- 石原茂久：木質系炭素材料素材開発の新しい展開. 木材学会誌 42(8), 717-723 (1996).
- 吉田貴紘, 佐野哲也, 大原誠資：トレファクションによる高性能木質ペレット「ハイパー木質ペレット」の技術開発. 木材工業 67(12), 560-565 (2012).
- 岡野 健 監修：“新世代 木材・木質材料と木造建築技術”. エヌ・ティー・エス, 東京, 2017, pp. 101-106.
- 吉田貴紘：半炭化処理による高性能木質舗装材の製造・利用技術開発, 木材工業 73(9), 346-351 (2018).
- 増田勝則：半炭化木チップ舗装における木材の熱処理条件の検討. 奈良県森林技術センターだより No. 124, 2-3 (2017).
- 伊藤貴文, 増田勝則：過熱蒸気処理による木材への耐朽性付与. 奈良県森林技術センター研究報告 38, 45-51 (2009).
- 例えば, フジ住宅：炭の家, <https://www.fujie.com/kodawari/> 2021年1月27日参照.
- 中野達夫, 葉石猛夫, 水野徹哉, 武田孝志, 徳本守彦：木炭による木造住宅床下の湿度及び部材の含水状態の改善－木炭の吸湿性, 吸水性及び熱伝導率－. 木材工業 51(5), 198-202 (1996).
- 栗本康司：木炭の調湿機能. 木質炭化学会誌 9(1), 2-9 (2012).
- 関野 登, 姜 卓秋：炭化による木材の熱伝導率の変化とそのメカニズム. 木質炭化学会誌 16(1), 13-23 (2019).
- 豊野まなみ, 斎藤幸恵, 信田 聡：スギ熱処理材の熱伝導率, 木材工業 64(10), 467-471 (2009).
- 久保島吉貴, 柳田高志, 吉田貴紘, 木口 実：色彩測定によるトレファクション木材チップの半炭化の程度の推定. 木材学会誌 63(4), 176-182 (2017).
- JIS A 1412-2：熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法, 附属書A平板比較法. 日本規格協会 (1999).
- 佐々木紫乃, 関野 登：カンナ屑マットの熱伝導率に及ぼす原料サイズの影響. 岩手大演報 46, 21-36 (2015).
- JIS Z 2101：木材の試験方法. 日本規格協会 (1999).
- ISO 17831-1：Solid biofuels－Determination of mechanical durability of pellets and briquettes－Part 1：Pellets, ISO, Geneva, Switzerland (2016).
- 岸本定吉, 杉浦銀治：熱処理木材の防腐効果, 木材工業 18(7) 323-326 (1963).
- 三浦正勝, 西崎寛樹, 田中龍太郎, 夜久富美子：木材熱分解の基礎的研究. 木材学会誌 28(10), 649-645 (1982).
- 酒井温子, 岩本頼子, 伊藤貴文, 佐藤敬之：窒素雰囲気下で熱処理された木材の腐朽性, 耐犠牲および吸湿性. 木材保存 34(2), 69-79 (2008).
- 河本晴雄：セルロースの熱分解反応と分子機構. 木材学会誌 61(1), 1-24 (2015).
- 越島哲夫, 杉原彦一, 浜田良三, 福山万次郎, 布施五郎：“新訂 基礎木材工学”. フタバ書店, 東大阪, 1979, p. 59, 88.
- 関野 登：木材および木質系断熱材の伝熱性状. 日本接着学会誌 53(7), 256-261 (2017).
- 基太村洋子：内外産有用木材の測色値. 林業試験場研究報告 No347, 203-239 (1987).
- 石丸 優, 古田裕三, 杉山真樹 編：木材科学講座3 木材の物理. 海青社, 大津, 2017, pp. 88-89.