

豪雪地に建つ伝統的木造民家の 古材の強度特性

STRENGTH CHARACTERISTICS OF OLD TRADITIONAL FOLK HOUSE STRUCTURAL TIMBERS IN HEAVY SNOWFALL AREA

濱崎 賢 — * 1 仲摩裕加 — * 2
井田秀行 — * 3

Satoshi HAMASAKI — * 1 Yuuka NAKAMA — * 2
Hideyuki IDA — * 3

キーワード：
古材, 曲げ強さ, 曲げヤング係数, 伝統的木造民家, プナ

Keywords:
Old timber, Bending strength, Bending Young's modulus, Traditional wooden house, Beech

The modulus of rupture and elasticity in bending of the old structural timbers for a traditional folk house located in Japanese snowbelt were measured. We investigated four woody species (beech, oak, horse chestnut and cedar) as samples. Old beech timber specimens in the bending strength were higher than current ones. Additionally, old beech and oak specimens in the bending Young's modulus were higher than current ones. These findings suggested that the beech specifically would have been enhanced their strength and increased tolerance to snow pressure by having passed through long time.

1. はじめに

地域文化の保全, 伝承, 新たな特色の創出といった点から現在, 伝統的木造民家(以下, 古民家)の価値が再認識されてきている¹⁾。他方, 古民家の構成材(以下, 古材)は, 長期間にわたり二酸化炭素を固定することから, 地球環境保全の意味においても重要な役割を持つと言える。古民家や古材を地域資源や木材資源として今後, 持続的に活用していくためには, 材の強度特性を把握しておく必要がある。そこで本研究では, 雪深い地域に建つ古民家の構造材に使われている樹種の強度特性を明らかにすることを目的とした。

古材には使用部位に応じて様々な樹種がみられるが, こうした樹種の違いに着目して強度特性を評価した事例はほとんどない。また, 雪深い地域では, 家屋に対し強い積雪荷重が加わるため, 構造材の強度維持が極めて重要となるが, 雪深い地域の古民家に使用されている材の強度特性について調べられた事例もない。このような, 特に自然環境の厳しい地域において古材の強度評価を行うことは, 日本の多様な風土に応じた古民家の保存・維持管理や古材の再利用のあり方を検討するうえで大きな意義を持つ。

本研究では, 解体された古民家から採取した4樹種(ブナ, コナラ属, トチノキ, スギ)の古材を対象に, 曲げ試験を行い, その結果を新材の標準的な数値(文献値)と比較することで各樹種の強度特性を評価した。

2. 方法

2.1 試験片への加工

古材は, 長野県飯山市桑名川区に建つ住宅(写真1)より採取した。当該地域は, 気象庁のメッシュ気候値2010のデータによると最

大積雪深230 cmであり, 日本有数の豪雪地帯に属する。当住宅は, 中門造りの茅葺き民家で近世末期から近代初期(1850年~1900年)の建造と推定され, 2013年7月に飯山市の「空き家等の適正管理に関する条例」により解体された。

解体直後, 主要な構造材として使用されていた大径材(断面積250~912 cm²)を複数選び出し, チェーンソーを用いて長さ1~2 mに切断した部材を研究室に持ち帰った。これらは木材組織の観察²⁾により, ブナ(*Fagus crenata*), コナラ属(ミズナラないしコナラ:*Quercus* sp.), トチノキ(*Aesculus turbinata*) スギ(*Cryptomeria japonica*)の計4樹種に同定された(表1)。このうちブナ, コナラ属, スギを主要構造材に用いた古民家は飯山市内の他地区でも認められている³⁾。

研究室に持ち帰った部材は, 以下3点に留意し試験片に加工した。

1) 試験片は強度に影響を与えうる損傷・腐朽・大きな節等を含まない無欠点材とする, 2) 部材から木取りする際, 木目に対して平行に採取し, 木口面において年輪が試験片端部の四角形に対してなるべく平行, もしくは垂直になるように加工する, 3) 部材の表層部と中心部は外して試験片を採取する。



写真1 解体前の調査対象住宅外観

¹⁾ 筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻 修士課程

²⁾ 信州大学大学院理工学系研究科建築学専攻 修士課程

³⁾ 信州大学教育学部 准教授・博士(学術)
(〒380-8544 長野県長野市西長野6-0)

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Environmental Science, Faculty of Life and Environmental Sciences, Tsukuba Univ.

²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ.

³⁾ Assoc. Prof., Faculty of Education, Shinshu Univ., Ph. D.

曲げ試験に使用した試験片の大きさは 20 mm×20 mm×320 mm の直方体に統一した。曲げ試験後、試験片端部より 20 mm×20 mm×20 mm の含水率測定用試験片を 1 試料当たり 3 つ以上採取した。以上の加工には、バンドソー（日立工機 CB100FA）、昇降盤（エバタ工機 SB450D）、手押し鉋盤（松岡鉄工所 MNT-300）を用いた。

表 1 古民家より採取した部材（切断後）の樹種と形状

樹種と部材識別記号	サイズ (mm)	断面積 (cm ²)
ブナ-A	180×140×1380	252
ブナ-B	290×200×1920	580
コナラ属-A	320×285×1770	912
コナラ属-B	280×250×1930	700
トチノキ	265×215×1450	570
スギ	185×135×1195	250

2.2 曲げ試験

曲げ試験は、木材の試験方法（JIS Z 2101）に準じて行った。古材強度評価の試料は通常、実大材と無欠点小試験片の 2 つに大別できる。実大材は通常、割れ、切り欠き、腐朽といった欠点を含むため、その結果の一般化による他の古材への応用は難しく⁴⁾、また、本研究では新材の標準的な数値と比較することで強度や剛性の経年変化を樹種ごとに推定することが目的であるため、試料には無欠点小試験片を選択した。曲げ試験は万能材料試験機（50kN）（島津製作所 AG-50KNI M2）を用いて行った。室温を 20±2℃ に調整したうえで、支点間距離を 270 mm に設定した台の上に試験片を設置し、4 点曲げの形式で試験片に上部より 1 分間 5 mm のストロークスピードで荷重を加え、破断した所で測定を中止した（図 1）。その際に測定された最大荷重から曲げ強さ σ_b を次式により求めた。

$$\sigma_b = \frac{P_m L}{6Z} \quad (2.1)$$

σ_b : 曲げ強さ (N/mm²)

P_m : 最大荷重 (N)

L : 支点間距離（ここでは 270 mm）

Z : 断面係数 $Z = a^3/6$

a : 試験片端の辺長さ（ここでは 20 mm）

また、曲げヤング係数 E_{b-ap} を次式により算出した。

$$E_{b-ap} = \frac{\Delta PL^3}{48I\Delta y} \quad (2.2)$$

E_{b-ap} : 曲げヤング係数 (kN/mm²)

L : 支点間距離（ここでは 270 mm）

I : 断面 2 次モーメント $I = a^4/12$

ΔP : 弾性領域における上限荷重と下限荷重との差 (N)

Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ (mm)

a : 試験片端の辺長さ（ここでは 20 mm）

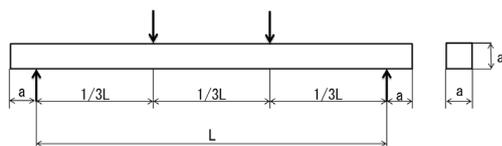


図 1 曲げ試験の模式図

曲げ試験により得た古材の各数値は統計解析ソフト R ver. 3.2.2⁵⁾ を用いて、一標本 t 検定により新材の標準的な数値⁶⁾ と比較した。

2.3 強度の補正

含水率による強度の差を補正するため、アメリカ材料試験協会のデータ調整法（ASTM D1990-07）を使用し⁷⁾、曲げ強さおよび曲げヤング係数を、気乾密度（木材を大気中に放置し、吸湿量と放湿量とが等しくなった状態、すなわち含水率 15% の状態での密度）での値に調整した。

含水率の測定は、木材の試験方法（JIS Z 2101）に準じた。試験片を質量一定になるまで乾燥したときの質量減少量を測定し、乾燥後の試験片の質量に対する質量減少量の割合（%）を試験片の含水率とした。あらかじめ作成しておいた含水率測定用試験片を乾燥装置（東京理科機械株式会社 送風定温乾燥機 WF0-420）を用いて 103±2℃ で乾燥させ、電子天秤（エー・アンド・デイ 分析用電子天秤 GR-202）で質量を測定した。なお、6 時間の間隔を置いた測定で、質量変化が 0.5% 以下であれば全乾状態であるとみなした。含水率の算出は次の式による。

$$u = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.3)$$

u : 試験片個々の含水率 (%)

m_1 : 乾燥前の試験片の質量 (g)

m_2 : 乾燥後の試験片の質量 (g)

含水率により補正した曲げ強さと曲げヤング係数はそれぞれ次式 2.4 と 2.5 による。なお、以下の補正対象の試験片は含水率 10~23% のものとした。

$$S_2 = S_1 + \frac{S_1 - B_1}{B_2 - M_1} \times (M_1 - M_2) \quad (2.4)$$

$$S_2 = S_1 \frac{B_1 - B_2 M_2}{B_1 - B_2 M_1} \quad (2.5)$$

S_1, S_2 : それぞれ、含水率 M_1, M_2 における特性値

M_1, M_2 : それぞれ、含水率 1, 含水率 2

B_1, B_2 : それぞれ、表 2 に掲げる含水率定数

表 2 ASTM D 1990-07 における含水率定数⁷⁾

特性値	B_1	B_2
曲げ強さ	16.6	40
曲げヤング係数	1.875	0.0237

これらの含水率の補正に加え、本研究では以下に示すように古材と新材の密度の差も考慮した。平嶋らの行ったモンテカルロシミュレーションによる密度差の補正の方法⁴⁾ を参考に、古材密度が新材の密度分布と同じ分布を持つと仮定した場合での値を用いた比較を次の手順で行った。まず、古材の密度を独立変数、強度を従属変数とした回帰直線式と、古材の強度の標準偏差を求めた。次に、中井ら（1982）の新材データ⁸⁾ より新材密度の累積頻度曲線を用意した。0 から 1 の範囲内で乱数を発生させ、その値に対応する累積頻度を

求めた。乱数の発生には、表計算ソフト Excel (マイクロソフト社製 Microsoft Excel 2010) の RAND () 関数を用いた。さらに、先に用意した累積頻度曲線からこの累積頻度に対応する密度を任意の一つ求め、これを A とした。次に、最初に古材密度と強度を用いて算出した回帰直線式より、A に対応する古材強度を求め、これを B とした。最後に、回帰残差を任意に抽出し、これを B に加えて、求めたい古材強度の値とした。回帰残差は正規分布に従うと仮定し、残差の標準偏差は密度に関わらず一定で $S\sqrt{1-r^2}$ (ここで、S は事前に求めた古材強度の標準偏差、 r^2 は古材密度と古材強度の回帰直線の決定係数とする) とした。回帰残差は標準正規分布に従う確率変数を発生させて任意に抽出した。確率変数は中心極限定理を用いた複数の乱数による方法⁹⁾により求め、乱数の数は 12 とした¹⁰⁾。この一連の手順を樹種毎に 5002 回行い、その平均値を補正值とした。

3. 結果

古材の無欠点小試験片の曲げ試験により求めた気乾密度、曲げ強さ、曲げヤング係数、含水率と密度を用いて補正した曲げ強さおよび曲げヤング係数を、それぞれ新材の標準的な数値と比較した (表 3)

古材の気乾密度は高い順に、コナラ属 $0.85 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ 、ブナ $0.80 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ 、スギ $0.57 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$ 、トチノキ $0.41 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ であった (図 2 a)。トチノキのみ古材に比べ新材の方が高い値を示したが、他の樹種の値はいずれも古材の方が高かった (表 3)。

古材の曲げ強さは高い順に、ブナ $110.8 \pm 14.3 \text{ N/mm}^2$ 、コナラ属 $91.0 \pm 12.6 \text{ N/mm}^2$ 、スギ $56.4 \pm 13.7 \text{ N/mm}^2$ 、トチノキ $53.9 \pm 16.6 \text{ N/mm}^2$ であった (図 2 b)。新材の数値と比べるとブナの古材のみが有意に高く、他の樹種はいずれも古材の方が低くなっていた (表 3)。さらに含水率と密度によって曲げ強さを補正すると、ブナ $116.1 \pm 9.6 \text{ N/mm}^2$ 、コナラ属 $92.3 \pm 11.9 \text{ N/mm}^2$ 、スギ $54.3 \pm 13.7 \text{ N/mm}^2$ 、トチノキ $52.3 \pm 16.5 \text{ N/mm}^2$ となり、補正無しの場合と同様にブナのみが新材よりも古材の方が高くなっていた (図 2 c, 表 3)。

曲げヤング係数は高い順に、ブナ $17.9 \pm 2.4 \text{ kN/mm}^2$ 、コナラ属 $15.4 \pm 1.7 \text{ kN/mm}^2$ 、トチノキ $8.9 \pm 3.2 \text{ kN/mm}^2$ 、スギ $7.6 \pm 1.2 \text{ kN/mm}^2$ であり (図 2 d)、新材と比べ、ブナおよびコナラ属において有意に高い値を示した。トチノキおよびスギは、古材と新材の間で有意な差は認められなかった (表 3)。補正曲げヤング係数は高い順に、ブナ $17.6 \pm 2.2 \text{ kN/mm}^2$ 、コナラ属 $14.5 \pm 0.9 \text{ kN/mm}^2$ 、トチノキ $8.1 \pm 2.5 \text{ kN/mm}^2$ 、スギ $7.5 \pm 1.1 \text{ kN/mm}^2$ となり (図 2 e)、補正無しの場合と同様にブナおよびコナラ属において古材の方が新材よりも有意に高く、トチノキおよびスギは古材と新材との間で有意な差は認められなかった (表 3)。

表 3 古材の曲げ試験結果と新材の標準的な数値⁶⁾との比較

樹種	古材測定値：平均±標準偏差 (試料数)					新材の標準的な数値 ⁶⁾		
	気乾密度 (g/cm ³)	曲げ強さ (N/mm ²)	補正曲げ強さ (N/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	補正曲げヤング係数 (kN/mm ²)	気乾密度 (g/cm ³)	曲げ強さ (N/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)
ブナ	0.80±0.04(43)***	110.8±14.3(44)***	116.1±9.6(26)***	17.9±2.4(44)***	17.6±2.2(26)***	0.65	100.0	12.0
コナラ属	0.85±0.04(19)***	91.0±12.6(23)**	92.3±11.9(12)*	15.4±1.7(23)***	14.5±0.9(12)***	0.68	100.0	10.0
トチノキ	0.41±0.05(29)***	53.9±16.6(30)***	52.3±16.5(21)***	8.9±3.2(30) ^{ns}	8.1±2.5(21) ^{ns}	0.52	75.0	8.0
スギ	0.57±0.07(30)***	56.4±13.7(30)**	54.3±13.7(19)**	7.6±1.2(30) ^{ns}	7.5±1.1(19) ^{ns}	0.38	65.0	7.5

*** : $p < 0.0001$, ** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, ^{ns} : $p \geq 0.05$ (一標本 t 検定による新材の標準的な数値との比較)

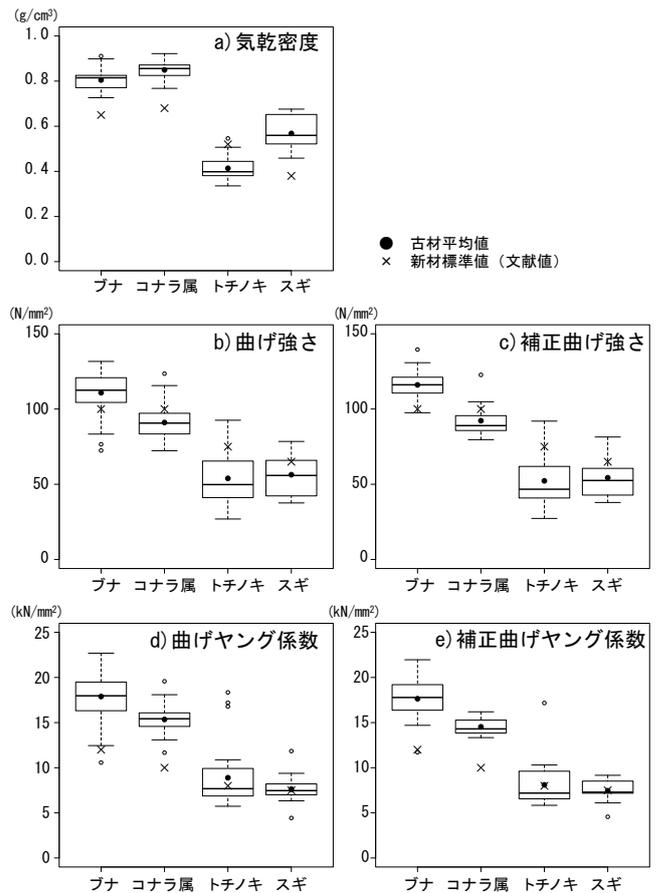


図 2 古材の曲げ試験結果

4. 考察

近世末期から近代初期に建てられたと推定される伝統的木造民家の構造材から採取した 4 樹種 (ブナ、コナラ属、トチノキ、スギ) の古材を対象に行った曲げ強さの検討結果から、ブナのみが経年により強度が上昇した可能性を示した。また、曲げヤング係数の検討結果からは、ブナとコナラ属において経年による強度上昇の傾向が示唆された。古材強度の先行研究によると、経年による強度変化は樹種により異なり、例えば、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)^{11) 12) 13) 14)}、アカマツ (*Pinus densiflora*)^{12) 14) 15)}、ツガ (*Tsuga sieboldii*)¹⁶⁾、ノルウェートウヒ (*Picea abies*)¹⁷⁾、クリ (*Castanea crenata*)¹⁸⁾ では経年による強度上昇の傾向が示唆され、一方、ケヤキ (*Zelkova serrata*)^{14) 19) 20)} は減少傾向を示したことが報告されている。古材の強度は密度の上昇にともない増加するとの指摘もあることから^{19) 21)}、本研究で示されたブナおよびコナラ属の古材での強度上昇傾

向には、気乾密度の高さが関与している可能性もある。密度と含水率の影響を除いた場合も同様の傾向を示したが、本研究ではこの要因を明らかにすることはできなかった。しかし先行研究では、セルロースやリグニンといった組織成分や結晶化度の増減といった木材の質的变化が強度に影響を及ぼすことが指摘されており^{13) 22) 23)}、こうした木材の質的な経年変化がブナやコナラ属の強度上昇に寄与した可能性はある。

ブナとコナラ属（ミズナラおよびコナラ）は、当該地域の周辺で現在、広く森林を形成している²⁴⁾。民家が建てられた当初、建材は周辺の森林から調達されていたと考えられるため、同様の森林が成立していた当時、これらの樹種を選択し民家に用いた可能性は高い。とりわけブナは雪深い地域に優占林を形成する樹種であり²⁵⁾、ブナ生木は他の樹種よりも耐積雪圧に優れていることがその要因として示唆されている²⁶⁾。このことは、本研究でブナ古材が新材や他の樹種よりも強度の高い傾向が示されたこととも関連していると考えられる。以上から伝統的木造民家へのブナ材の使用は、豪雪環境下での理にかなった木材利用形態の一つであると推察された。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、筑波大学生命環境系の廣田充准教授、信州大学工学部の土本俊和教授ならびに梅干野成央准教授、信州大学教育学部および工学部の学生諸氏、長野県飯山市の関係の皆様、筑波大学アイソトープ環境動態研究センターの飯島秀夫様、栃木県産業技術センターの手島和典様、茨城県工業技術センターの寺門秀人様に多大なる御協力をいただきました。また本稿の査読においては3名の方に有益なコメントをいただきました。深く感謝を申し上げます。本研究は基盤研究(C)課題番号25340107(代表者:井田秀行)の補助を受けたものである。

参考文献

- 1) 藤川昌樹: 地域の文化的資源としての古民家とその再生, 農村計画学会誌, 32, pp.108~112, 2013
- 2) 仲摩裕加, 土本俊和, 梅干野成央, 井田秀行: 伝統的木造民家の構成樹種の同定方法, 信州大学教育学部附属志賀自然教育研究施設研究業績, 51, pp.17~20, 2014
- 3) 庄司貴弘, 井田秀行, 土本俊和, 梅干野成央: 豪雪地帯における民家の形態とその構成樹種—長野県飯山市柄山の農家の事例, 日本建築学会技術報告集, 16, pp.387~392, 2010
- 4) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 古材の強度特性 (第1報) ケヤキおよびアカマツの引張強度特性, 木材学会誌, 50, pp.301~309, 2004
- 5) R Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>, 2015
- 6) 日本木材加工技術協会: 日本の木材, 東京, 1984
- 7) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, pp.89, 2011
- 8) 中井孝, 山井良三郎: 日本産主要35樹種の強度的性質, 林業試験場研究報告, 319, pp.13~46, 1982
- 9) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 東京, pp.83~85, 1986
- 10) 平嶋義彦, 堀江和美, 佐々木康寿: 木造トラスの信頼性解析, 木材学会誌, 48, pp.78~106, 2002
- 11) Yokoyama M., Gril J., Matsuo M., Yano H., Sugiyama J., Clair B., Kubodera S., Mitsutani T., Sakamoto M., Ozaki H., Imamura M.,

Kawai S.: Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, Comptes Rendus Physique, pp.601-611, 2009

- 12) 小原二郎: 木材の老化に関する研究 (第1報) 法隆寺建築古材の機械的性質, 西京大学学術報告 (農学), 2, pp.116~131, 1952
- 13) 小原二郎: 木材の老化に関する研究 (第6報) ヒノキ材の強度の変化, 西京大学学術報告 (農学), 6, pp.164~174, 1954
- 14) 大岡優, 棚橋秀光, 伊津野和行, 鈴木祥之, 土岐憲三: 伝統的木造建築物で用いられた古材の強度・めり込み特性, 構造工学論文集 B, 57, pp.335~342, 2011
- 15) Noguchi T., Obataya E., Ando K.: Effects of aging on the vibrational properties of wood, Journal of Cultural Heritage, 13, pp.21-25, 2009
- 16) 山崎真理子, 平嶋義彦, 佐々木康寿: 建築解体木材の強度性能, 日本建築学会構造系論文集, 588, pp.127~132, 2005
- 17) Kránitz K., Markus D., Peter N.: Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices, Materials and structures, 47, pp.925-936, 2014
- 18) Sousa H.S., Jorge M.B., Paulo B. L.: Assessment of strength and stiffness variation within old timber beams, Structural Analysis of Historical Constructions, pp.2079-2087, 2012
- 19) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 古材の強度特性 (第3報) ケヤキおよびアカマツの静的曲げ強度特性および衝撃曲げ強さ, 木材学会誌, 51, pp.146~152, 2005
- 20) 大岡優, 安里祐二, 伊津野和行, 土岐憲三: 伝統木造建築物に用いられた古材の強度劣化および劣化非破壊検査法, 歴史都市防災論文集, 2, pp.133~140, 2008
- 21) 疋田洋子: 解体材の再利用・循環型社会をめざして, 木材保存, 26, pp.4~16, 2000
- 22) 小原二郎: Studies of Japanese Old Timbers, 材料試験, 10, pp.894~899, 1961
- 23) 小原二郎, 岡本一: 木材の老化に関する研究 (第11報) 古材繊維素の結晶領域の変化, 日本林学会誌, 37, pp.392~395, 1955
- 24) 井田秀行, 庄司貴弘, 後藤彩, 池田千加, 土本俊和: 豪雪地帯における伝統的民家と里山林の構成樹種にみられる対応関係, 日本森林学会誌, 92, pp.139~144, 2010
- 25) Shimano, K.: Differences in beech (*Fagus crenata*) regeneration between two types of Japanese beech forest and along a snow gradient, Ecological Research, 21, pp.651-663, 2006
- 26) Homma, K.: Effects of snow pressure on growth form and life history of tree species in Japanese beech forest, Journal of Vegetation Science, 8, pp.781-788, 1997

[2015年2月18日原稿受理 2015年7月13日採用決定]