



Title	グリーンウッドワークにおける丸ほぞ収縮接合の性能評価
Author(s)	佃, 猛司; 小泉, 章夫; 澤田, 圭 他
Citation	北海道大学演習林研究報告, 70(1), 9-20
Issue Date	2015-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58296
Rights	Mechanical performance of shrink-fit joint for round mortise and tenon was evaluated. This joint is often used in making furniture from green wood. In this study, the evaluation was made with comparison to glued-fit joint. The effects of humidity cycle of the performance were also considered. The experiments were withdrawal test using T-type specimens, and bending-fracture tests using L-type specimens. Tested species were oak (<i>Quercus crispula</i>), elm (<i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>) and SPF lumber (mixture of spruce, pine and fir). It was found that withdrawal strength of shrink-fit joint was comparable with that of glued-fit joint, if the conditions of the partial bearing strength, the amounts of swelling and shrinkage, and the fit after the curing period were adequate. However, withdrawal strength of shrink-fit joint considerably decreased after a cycle of humidity change. On the other hand, bending strength and joint stiffness of shrink-fit joint were comparable with those of glued-fit joint. Furthermore, a cycle of humidity change did not affect the bending strength and joint stiffness.
Type	departmental bulletin paper
File Information	RBHUF70-1_002.pdf



グリーンウッドワークにおける丸ほぞ収縮接合の性能評価

佃 猛司¹, 小泉 章夫^{2*}, 澤田 圭², 佐々木 義久²

Evaluation of mechanical performance of shrink-fit joint for round mortise and tenon
in green woodwork

by

TSUKUDA Takeshi¹, KOIZUMI Akio^{2*}, SAWATA Kei², SASAKI Yoshihisa²

要 旨

生木によるものづくり「グリーンウッドワーク」において、家具製作に多用される丸ほぞ収縮接合の性能評価を行った。本研究では湿度変動を考慮した、接着接合に対する収縮接合の相対評価を行った。ミズナラ、ハルニレ、および SPF 製材を用い、T 型試験体による単調引抜試験と L 型試験体によるモーメント負荷（曲げ）試験を行った結果、収縮接合は、部材の部分圧縮強度、収縮率、および、かん合度の条件次第で接着接合に匹敵する引抜強度を発現する可能性が示唆された。しかし、湿度変動を経た試験体で、強度は大きく低下した。曲げ強さと接合部剛性に関しては、接着接合と収縮接合の間で有意差は認められなかった。

キーワード：グリーンウッドワーク、収縮接合、湿度変動、引抜強度、曲げ強度

2013 年 5 月 31 日受付, Received May 31, 2013

2014 年 11 月 4 日受理, Accepted November 4, 2014

1. 北海道大学大学院農学院木材工学研究室

Laboratory of Timber Engineering, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

2. 北海道大学大学院農学研究院木材工学研究室

Laboratory of Timber Engineering, Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

* akoizumi@for.agr.hokudai.ac.jp

1. 緒言

生木から手加工で小物や家具を製作するものづくりをグリーンウッドワーク (green woodwork) という (Fig. 1)。広義には、自然に囲まれた静かな環境の中で持続可能で豊かなライフスタイルを営む、またはそれを一般の人々に提供するという意味合いも含まれる。このような考え方は1980年代にイギリスで発祥したとされるが¹⁾、その製作手法、すなわち冒頭で述べた狭義のグリーンウッドワーク自体は18世紀の産業革命以前からイギリス以外の国でも存在していた。なぜなら、動力機械のない時代に木材を加工するには生木から加工するのが非常に合理的だったからである。現代のグリーンウッドワーカーには、当時の技術を純粋に再現することを目的としている者もいる²⁾。

生木から木材を加工することの利点として、製材後の乾燥が不要で、手間や乾燥装置のコストを省けること、また、生木は小さな力で加工できるため、容易に手加工できることが挙げられる。このような合理性から、日本でも昔から山を渡り歩きながら生木加工の旋盤木工を生業とする木地師が存在した。これらの利点は木工活動全般に要する消費エネルギーの大幅な軽減にも通じるため、グリーンウッドワークは環境負荷の小さなものづくりといえる。資源の有効利用という観点からいうと、グリーンウッドワークではどこにでも生えているような多種多様な雑木 (市場に流通しない木質資源) を有効利用できるともいえる。これら

の環境面での利点は、80年代にそれまでの「生木による木工」をグリーンウッドワークとしてリバイバルさせた要因の一つといえるだろう。

グリーンウッドワークは生木から加工するため、乾燥に伴って部材が収縮する。この現象を利用した「収縮接合 (shrink-fit joint)」と呼ばれる接手法が、グリーンウッドワークではよく用いられている。収縮接合は、金属加工分野で焼きばめとして知られているが、これは雄部と雌部からなる接合部材において、その素材のもつ膨張および収縮特性を生かし、組立後に雄部が膨張、雌部が収縮することで接合部耐力を発揮させるという接手法である。金属加工分野では比較的一般的な「収縮接合」も、木材加工分野ではその研究例が非常に少ない³⁻⁵⁾。また、木材の膨潤および収縮率は一般に接線方向 (T):半径方向 (R):繊維方向 (L) について、10:5:0.5~1とされ⁶⁾、接合部の収縮量は繊維方向によって異なる。従って、家具材のほぞ接合ではほぞ及びほぞ孔部材のT方向を揃えることで湿度変動に対して両部材が同程度T方向に膨潤および収縮するよう配慮する場合があるが、このようにして製作された接合部の耐力を定量的に評価した研究例はあまり知られていない。

本研究では、実際のグリーンウッドワークを想定して製作した収縮接合による丸ほぞ接合部の耐力を、接着接合と比較・評価することを目的として実験を行った。



Fig. 1. Examples of furniture and bowls made in the way of green woodwork.

2. 試験体の製作

使用樹種はミズナラ (*Quercus crispula*), ハルニレ (*Ulmus davidiana* var. *japonica*), SPF (Spruce-Pine-Fir) 製材 (以下, SPF) の計 3 種類を用いた。ミズナラは厚板 (断面 6×12 cm 程度), ハルニレは北海道大学キャンパス内に自生していた樹木の幹部 (直径 50 cm 程度), SPF は $2'' \times 4''$ 市販材から, 試験体を切り出した。なお, 今回の SPF ではマツ類 (*Pinus* spp.) は確認されず, トウヒ類 (*Picea* spp.) あるいはモミ類 (*Abies* spp.) であった。これらの樹種は比重や強度が小さく, 椅子などの部材には適していないが, 通常使われる広葉樹材の対照材として材料に加えた。

試験体タイプは Figs. 2, 3 に示す T 型 (引抜用) と L 型 (曲げ用) の 2 種類とし, 各々について収縮接合および接着接合の 2 種類の試験体を製作した。ここで, ほぞ部材とほぞ孔部材は二方柱木取りとし, 接線方向 (T 方向) を両部材で合わせるように製作した (Figs. 2, 3 参照)。

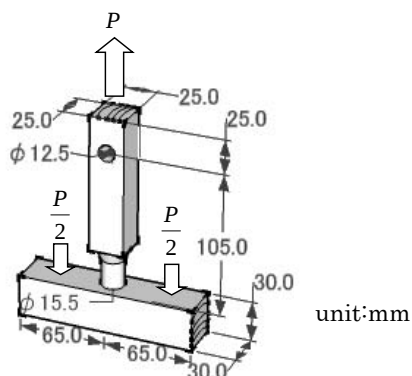


Fig. 2. T-type specimen for withdrawal test.

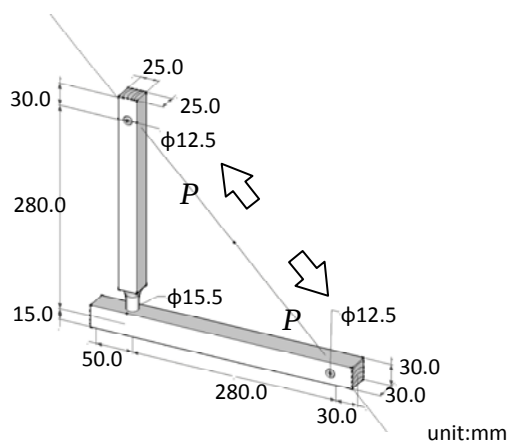


Fig. 3. L-type specimen for bending fracture test.

はじめに収縮接合用試験体の製作方法を記す。まず, 粗木取りした長さ 300 mm 程度の厚板を十分に浸水させた後, 湿潤状態で材せい $\times$ 材幅を 25×25 mm, および 30×30 mm の二方柱断面に仕上げ, それぞれほぞ部材, およびほぞ孔部材とした。次にほぞの加工には $5/8''$ Power Tenon cutter (Veritas 製, Fig. 4) を用い, ミズナラ, ハルニレ, SPF を各々平均直径 16.65, 16.71, 16.08 mm に加工した。その後, ほぞ部材を設定温度 30 の乾燥機に入れて乾燥・収縮させた。このとき, T 方向のほぞ径の平均値が 15.5 mm になるまで乾燥させる「ほぞ乾燥レベル A」と, さらに乾燥機の温度を 105 に上げて, ほぞが全乾状態になるまで乾燥させる「ほぞ乾燥レベル B」の 2 種類の乾燥レベルを設定した。

ほぞ孔部材には湿潤状態のままボール盤を用いて直径 15.5 mm のほぞ孔を開けた。また, ほぞ孔の横にボール盤で同径の円をけがいておき, ほぞ孔の自由な収縮量の測定に用いた。ほぞ部材を乾燥後, 湿潤状態のほぞ孔部材に挿入して試験体を組み立てた。その際, ほぞ部材とほぞ孔部材の T 方向を揃えた。その後, 実験室内で 1 ヶ月以上の養生 (乾燥) 期間を置き, 各実験を行った。すべての試験体は組立時および試験時に質量を測定し, 試験後, 試験体の両部材から小試片を採取して全幹法で含水率を計測した。各段階の部材含水率を示した Table 1 でほぞ乾燥レベル A のミズナラのほぞ部材の組立時の含水率が低いのは, ほぞ加工前の含水率が低かったミズナラ材をほぞ径が 15.5 mm になるまで乾燥させたためである。

接着接合用の試験体については, 気乾状態からほぞ加工後 (ほぞ径とほぞ孔径は 15.5 mm), 酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤 (コニシ(株)製,



Fig. 4. Cutting a tenon using a tenon cutter mounted on a horizontal drill press.

Table 1. Average moisture contents for shrink-fit specimens at the time of assembly and the time of test.

Tenon drying level	Species	Moisture contents (%)				
		Assembly	Test without humidity cycle		Test with a humidity cycle	
		Tenon	Tenon	Mortise	Tenon	Mortise
Level A	Oak	5.4	14.9	14.8	9.1	9.0
	Elm	13.1	13.4	13.5	8.6	8.6
	SPF	12.9	12.3	12.4	8.9	8.9
Level B	Oak	0	12.1	13.8		
	Elm	0	8.4	9.6		
	SPF	0	6.2	6.4		

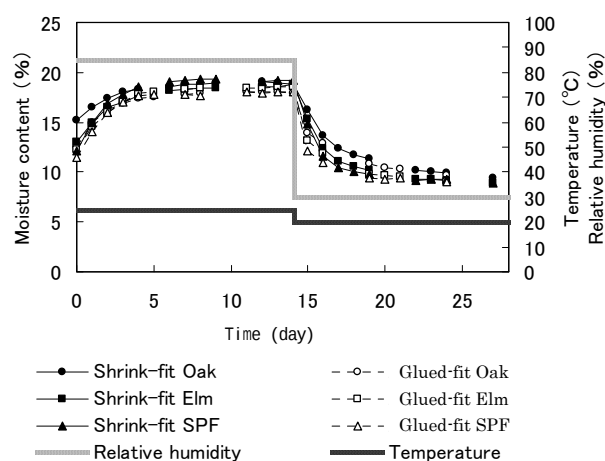
Notes: Tenon drying level A: Fits of joints for the tangential direction were close to 0 mm at the time of assembly.

Level B: Moisture contents of tenon members were close to 0% at the time of assembly. Oak: *Quercus crispula*, Elm: *Ulmus davidiana* var. *japonica*, SPF: Spruce-Pine-Fir dimension lumber. Moisture contents of mortise members at the time of assembly were over fiber saturation points after soaked in water.

#40007) を用いて接合した。接着後の養生期間は 36 時間以上とした。

ほぞ乾燥レベル A の収縮接合試験体および接着接合試験体については、製作後、一部の試験体に含水率変動履歴を付与した。それらの試験体は上記の製作過程を経た後、恒温恒湿槽（エスベック，LHU-123）を用いて 1 回の加湿・除湿サイクル（25℃，85%RH で 2 週間加湿した後，20℃，30%RH で 2 週間除湿）を付与した後，十分な養生期間を経て，実験した。試験体の含水率は加湿終了時点で約 18%，除湿終了時点で約 8%であった（Fig. 5）。

各条件別の試験体数を Table 2 に示す。T 型試験体の収縮接合ほぞ乾燥レベル B の試験体数が 2-3 体と少ないのは，湿度変動履歴を付与した実験を行わなかったためである。

**Fig. 5.** Moisture contents of the specimens under change of relative humidity.**Table 2.** Number of specimens for each condition of the tests.

Species	T-type specimens			L-type specimens		
	Shrink fit		Glued fit	Shrink fit		Glued fit
	Level A	Level B		Level A	Level B	
Oak	12	2	13	6	5	6
Elm	10	3	11	6	6	6
SPF	12	3	13	7	7	6

Note: See Table 1 as for tenon drying levels A and B.

3. 実験

3.1. 実験方法

油圧試験機を用いて T 型試験体で引抜試験（Fig. 6）, L 型試験体については仕口を開く方向に負荷することでモーメント負荷（曲げ）試験を行った（Fig. 7）。両試験体には、ほぞ部材の側面に変位計を取り付けて、それぞれ、引抜量と接合部の回転角を測定した。収縮接合のほぞ乾燥レベル B を除いて、湿度変動履歴を加えた試験体に対しても同様の実験を行った。



Fig. 6. Withdrawal test for T-type specimens.
Note: Arrows indicate locations of the displacement sensors.

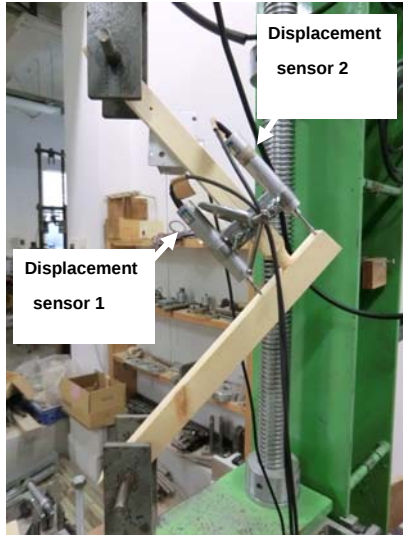


Fig. 7. Bending fracture test for L-type specimens.

3.2. 実験結果の整理方法

3.2.1. 組立および使用かん合度

ほぞ径からほぞ孔径を差し引いた値をかん合度という。本研究では、組立て後にほぞ孔が収縮

し、ほぞが膨潤することによる寸法変化を考慮したかん合度を「使用かん合度（ φ_u ）」と定義した。これは(1)式に示すように、組立て時から実験時にかけて自由に膨潤したほぞ径から乾燥過程で自由に収縮したほぞ孔径を差し引いて算出した。ここで、ほぞ孔部材の収縮率は、ほぞ孔の横にけがいておいた円の直径から算出した。これに対し、組立て時のかん合度を「組立かん合度」とした。これは(2)式に示すように、一般的なかん合度と同じ式となる。なお、かん合度は2方向（ほぞ部材の T 方向とほぞ孔部材の T 方向、およびほぞ部材の R 方向とほぞ孔部材の L 方向）について算出した。以下、それらの方向を「T-T 方向」ならびに「R-L 方向」と呼ぶことにし、各々に対するかん合度を「かん合度 T-T」ならびに「かん合度 R-L」とした。

$$\varphi_u = D_{ta} \times (1 + R_t \times 0.01 \times (U_{te} - U_{ta})) - D_{ma} \times (1 + R_m \times 0.01 \times (U_{me} - U_{ma})) \quad (1)$$

$$\varphi_a = D_{ta} - D_{ma} \quad (2)$$

ここで、 φ_u ：使用かん合度（mm）、 D_{ta} ：組立時ほぞ直径（mm）、 R_t ：含水率変化 1%あたりのほぞ寸法変化率（%）、 U_{te} ：実験時ほぞ含水率（%）、 U_{ta} ：組立時ほぞ含水率（%）、 D_{ma} ：組立時ほぞ孔直径、 R_m ：含水率変化 1%あたりのほぞ孔寸法変化率（%）、 U_{me} ：実験時ほぞ孔含水率（%）、 U_{ma} ：組立時ほぞ孔含水率（%）、 φ_a ：組立かん合度（mm）。

3.2.2. 曲げ性能

曲げ試験での接合部破壊形態の 95%以上がほぞ部の曲げ破壊だったため、接合部の曲げ強度は以下の式から得た。

$$MOR = \frac{M_{max}}{Z} \quad (3)$$

$$Z = \frac{\pi D^3}{32} \quad (4)$$

ここで、MOR：接合部曲げ強度（MPa）、 M_{max} ：最大曲げモーメント $P_{max} \times L \times \cos(\pi/4)$ （N mm）、 Z ：ほぞの断面係数（mm³）、 D ：ほぞ径の公称値（15.5mm）、 P_{max} ：最大荷重（N）、 L ：280mm（Fig. 3 参照）

接合部剛性 (K) は, Fig. 8 に一例を示した荷重変位曲線の $0.2 P_{\max}$ から $0.4 P_{\max}$ の区間を弾性域として, その区間のモーメント (M) と回転角 (θ) の比から(5)式に示したように定義した。

$$K = \frac{M}{\theta} = \frac{PL \cos(\pi/4)}{\tan^{-1}(\frac{\delta_1 + \delta_2}{a})} \quad (5)$$

ここで, K : 接合部剛性 (N mm/rad), δ_1 , δ_2 : 変位計 1 と 2 の変位の絶対値 (mm), a : 変位計間の距離 (mm)。

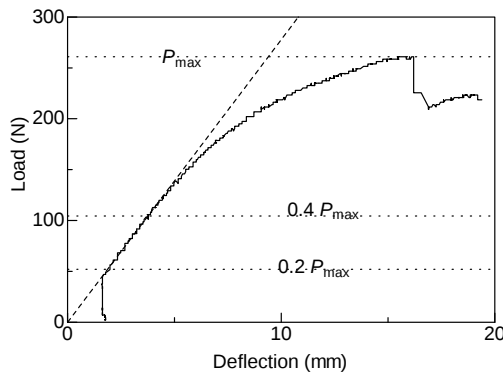


Fig. 8. An example of load-displacement curves obtained from bending test.

4. 結果と考察

4.1. 引抜試験

破壊形態はすべて, ほぞの引き抜けによるもので, 木部の破壊は見られなかった。

4.1.1. 引抜強度とかん合度の関係

湿度変動履歴を付与しなかった試験体に関する引抜強度と組立および使用かん合度の関係 (Fig. 9) から引抜強度の発現機構を考察する。

まず, 組立かん合度 (Fig. 9a,b) を見ると, 組立かん合度 T-T は負の値が, 組立かん合度 R-L は正の値が多かったことがわかる。次にほぞ部材の収縮とほぞ部材の膨潤後の使用かん合度はハルニレとミズナラで顕著に増加した。とくに, かん合度 T-T はミズナラとハルニレのレベル A で, それぞれ 1.43 と 1.48mm 増加した (Table 3)。

引抜強度と使用かん合度の関係では, Fig. 9c のハルニレと Fig. 9d の全樹種で有意な正の相関があった。これらの結果から, 部材の膨潤・収縮によるかん合度の増加によって引抜強度が増加することが確かめられた。

ミズナラでは乾燥によるかん合度の増加に伴って, 試験時に数体の試験体のほぞ孔部材に繊維方向の短い割裂が生じていた。ただし, 割裂による強度の低減は認められなかった。

かん合度が正の場合はほぞとほぞ孔で部分圧縮 (めり込み) 変形が生じていることを意味するため, 引抜強度に対して各樹種の部分圧縮強度に比例した摩擦抵抗が引抜強度に寄与すると考えられる。収縮率の小さな SPF では使用かん合度 T-T が 1mm 以下であり, また部分圧縮強度も小さいため, 収縮接合の引抜強度は 200N 以下と小さかった。ミズナラとハルニレの引抜強度を比較すると,

Table 3. Change in fit from the time of assembly to that of test. (unit: mm)

Species	Number of humidity cycle	T-T		R-L	
		Average	S.D.	Average	S.D.
Oak	0	1.43	0.31	0.33	0.16
	1	1.41	0.11	0.19	0.02
Elm	0	1.48	0.17	0.00	0.07
	1	1.46	0.66	-0.09	0.06
SPF	0	0.93	0.15	0.00	0.07
	1	1.02	0.13	-0.02	0.09

Note: Tenon drying level for the specimens were Level A; T-T: Considered directions are tangential for both the mortise and the tenon members; R-L: Directions are radial for the tenon member and longitudinal for the mortise member.

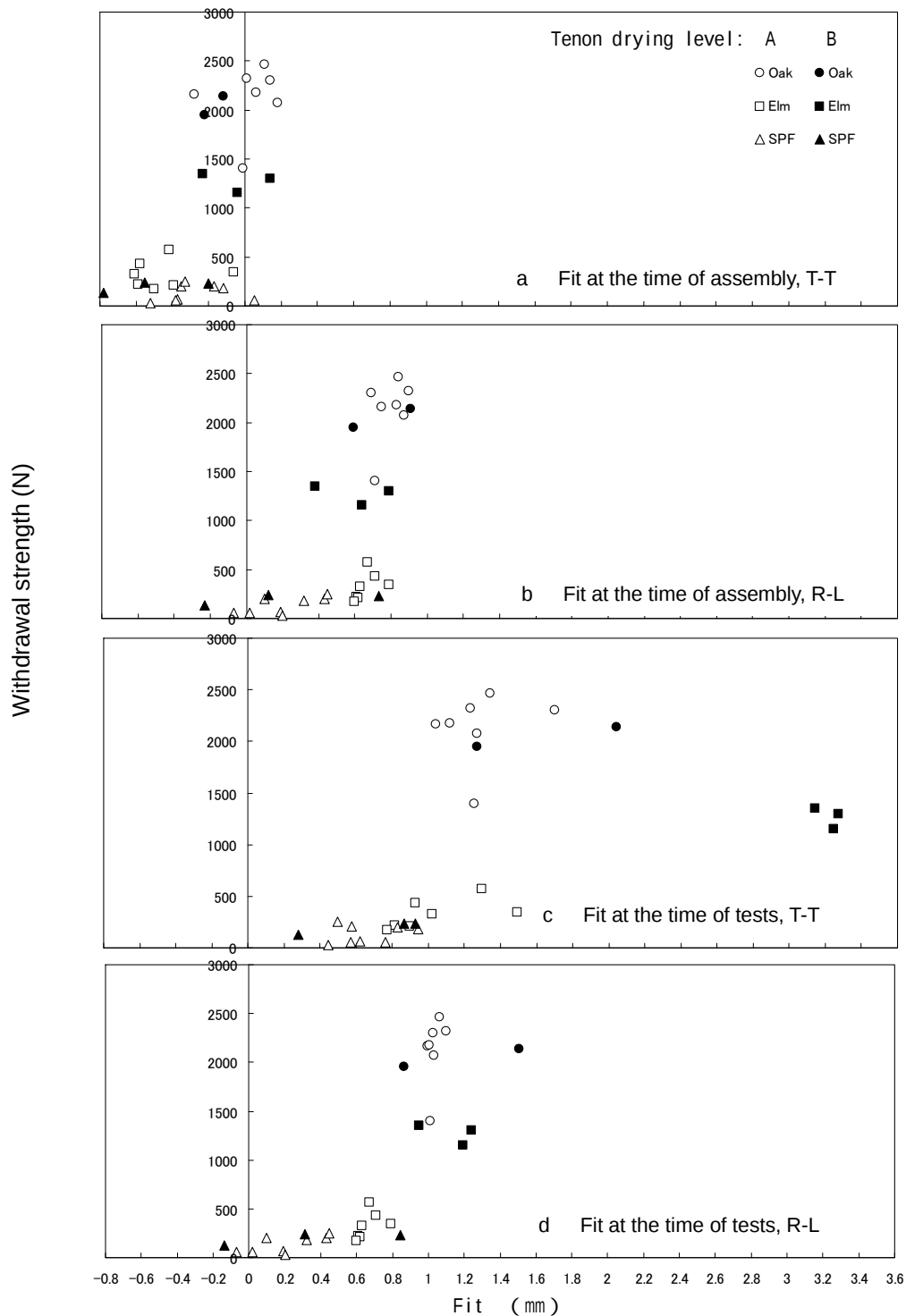


Fig. 9. Relationship between fit and withdrawal strength.

Notes: See Table 1 as for tenon drying levels A and B; See Table 3 as for fit directions T-T and R-L.

乾燥レベル A,B のいずれにおいてもミズナラの方が大きかった。ミズナラの板目面硬さはハルニレのそれより大きく⁷⁾, また, Teranishi *et al.*⁸⁾は硬さと部分圧縮強度の間に高い正の相関があることを報告している。これらのことから, 部分圧縮強

度が収縮接合の引抜強度の耐力発現要因の一つだと考えられた。

以上の結果から, 収縮接合の引抜強度には, 使用材料の部分圧縮強度, ほぞとほぞ孔の膨潤収縮量, 使用かん合度の3つの因子が大きな

役割を果たすことが示唆された。また、部材の含水率が摩擦係数に及ぼす影響や組立かん合度が大きすぎると接合部の割れを誘発することなども収縮接合を製作する上では重要な留意点だと考えられた。

4.1.2. 接合条件間の引抜強度の比較

引抜強度の一覧を Table 4 に、また、接着接合と収縮接合の引抜強度を比較した結果を Fig. 10 に示す。接着接合に対する収縮接合（ほぞ乾燥レベル A）の引抜強度比は、ミズナラ、ハルニレ、SPF で各々、0.79、0.13、0.04、ほぞ乾燥レベル B の強度比は、0.76、0.50、0.07 であった。ハルニレと SPF では接着接合に対し収縮接合の引抜強度が大きく減少したが、ミズナラの収縮接合は接着接合の 8 割程度の引抜強度を呈しており、両者に有意差は見られなかった。

続いて、湿度変動履歴の引抜強度に及ぼす影響について考察する（Fig. 11）。収縮接合（ほぞ乾

燥レベル A）について、湿度変動履歴のない試験体に対する湿度変動履歴のある試験体の引抜強度比は、ミズナラ、ハルニレ、SPF で各々 0.28、0.27、1.40 であった。一方、接着接合における同比は、各々 0.82、0.59、0.52 であり、収縮接合ほどではないが引抜強度の減少がみられた。なお、収縮接合の強度比で SPF の値が 1 以上と大きくなったのは、SPF の場合、もともと収縮接合の強度が低かったためと考えられた。

ミズナラ、ハルニレにおいて、湿度変動を経た収縮接合試験体で引抜強度が大きく低下した要因に、含水率変動による R-L 方向の加圧収縮が考えられる。すなわち、R-L 方向の膨潤および収縮では、ほぞ孔の L 方向に比べてほぞの R 方向の膨潤・収縮量が多いと考えられ、膨潤・収縮後にほぞが加圧収縮を引き起こした結果、嵌合度が減少して引抜強度が減少したと可能性がある。なお、T-T 方向の膨潤および収縮量はほぞとほぞ孔で同

Table 4. Withdrawal strengths for all conditions.

Species	Joint type	Tenon drying level	Number of humidity cycle	Oven-dry density (g/cm ³)	Withdrawal strength	
					Average (N)	C.V. (%)
Oak	Shrink-fit	A	0	0.65	2129	15
		B	0	0.65	2045	
		A	1	0.64	606	15
	Glued-fit		0	0.65	2694	18
			1	0.66	2220	28
Elm	Shrink-fit	A	0	0.58	325	40
		B	0	0.58	1266	
		A	1	0.56	87	41
	Glued-fit		0	0.55	2523	17
			1	0.55	1484	45
SPF	Shrink-fit	A	0	0.40	131	66
		B	0	0.40	199	
		A	1	0.40	184	111
	Glued-fit		0	0.47	2975	19
			1	0.47	1551	52

Notes: See Table 1 as for tenon drying levels A and B; C.V.s for withdrawal strengths for tenon drying level B are not presented because the numbers of those specimens were 3 or less.

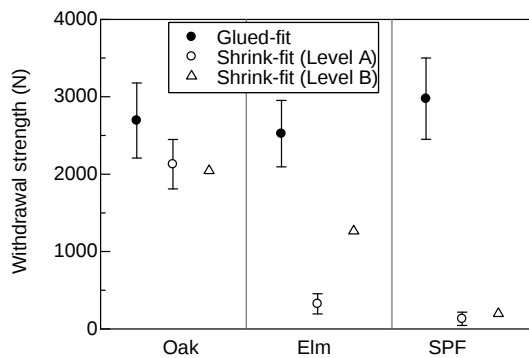


Fig.10. Comparison of withdrawal strengths between glued-fit and shrink-fit joint.

Notes: See Table 1 as for tenon drying levels A and B; Vertical bars denote standard deviations; Standard deviation for shrink-fit (Level B) are not shown because of small number of the samples.

じになるため、加圧収縮の影響は無視しうる。

接着接合において湿度変動履歴の有無で引抜強度に差が出たのも、R-L 方向の加圧収縮で接着層の一部が切れたためかもしれない。なお、ミズナラの強度比が 0.82 と比較的高かった理由はわからなかった。

以上のように、収縮接合は接着接合に比べて湿度変動による引抜強度の低下が大きかった。膨潤・収縮率の大きな樹種を用いると、湿度変動の大きな環境では耐力が低下する恐れがあるため、できるだけ湿度変動の少ない環境で使用するか、引抜力の負担が小さくなるような設計が求められるといえる。また、大きな湿度変動を経ない場合でも、収縮接合の組立直後にほぞ部材がほぞ孔部材の水分を吸収して一時的に平衡含水率以上になる場合には、ほぞ部材の含水率が平衡状態に移る過程でほぞの R 方向の加圧収縮が起こりうると考えられる。従って、組立前からほぞ孔部材の自由水を減らしておくなど、組立後のほぞの含水率の上昇、すなわち、ほぞの膨潤に伴う加圧収縮をある程度抑制することが有効かもしれない。

4.2. 曲げ試験

4.2.1. 曲げ破壊形態

曲げ破壊モードは全体の約 95%がほぞの曲げ破壊であった。一部の試験体では、ほぞのせん断破壊が見られた。せん断破壊はミズナラの比重の高い試験体で見られ、破壊発生過程としてはほぞ

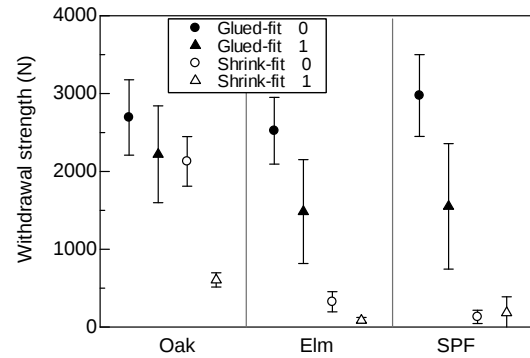


Fig. 11. Comparison of withdrawal strengths of the specimens without humidity cycle and those with a humidity cycle.

Notes: Tenon drying level of the specimens was level A; 0: Without humidity cycle; 1: With a humidity cycle; Vertical bars denote standard deviations.

が曲げ破壊に至らず、引抜ける過程で、ほぞ部材の孔圏部でせん断破壊が生じた。せん断破壊による曲げ性能への影響は見られなかった。

4.2.2. モーメント抵抗（曲げ）性能

実験から得られた曲げ強度と接合部剛性を Table 5 および Figs. 12, 13 に示す。

湿度変動履歴のない場合、接着接合に対する収縮接合の曲げ強度比はミズナラ、ハルニレ、SPF で各々 1.04, 0.92, 0.81 であり、接着接合と収縮接合で有意差はなかった (Fig. 12)。また、収縮接合の湿度変動履歴を付与した試験体の湿度変動を受けていない試験体に対する曲げ強度比はミズナラ、ハルニレ、SPF で各々 1.10, 1.08, 1.11 であった。接着接合を含めて、湿度変動履歴を受けた場合に強度が微増する傾向を示したが、これは湿度変動サイクル後半の除湿過程の結果、平均含水率が約 9%と湿度変動履歴のない試験体に比べて減少したため (Table 1)、ほぞの曲げ強さが増加した結果だと考えられた。

接合部剛性については、SPF についてのみ、接着接合の剛性が収縮接合に対して有意に大きかった (Fig. 13)。この原因として、接着剤を塗布したことにより、もともと部分圧縮強度の小さな SPF のほぞ接合面が強化された結果、接合部にモーメント負荷が加わったときの部分圧縮剛性が増加したためかもしれない。それ以外では、接着接合と収縮接合の違い、湿度変動履歴の影響のいず

れについても、はっきりした傾向は認められなかった。

以上のことから、今回のように引抜荷重成分がそれほど大きくないモーメント負荷試験では、接着剤を用いない収縮接合でも接着接合同程度

の曲げ強度及び接合部剛性を発揮することが示唆された。

Table 5. Moment resisting (bending) properties for L-type specimens.

Species	Joint type	Number of humidity cycle	Oven-dry density (g/cm ³)	MOR		Joint stiffness (<i>K</i>)	
				Average (MPa)	C.V. (%)	Average (Nm/rad)	C.V. (%)
Oak	Shrink-fit	0	0.65	107.1	18	754	14
		1	0.64	118.2	14	639	8
	Glued-fit	0	0.66	103.0	14	658	18
		1	0.67	118.9	20	556	21
Elm	Shrink-fit	0	0.54	79.9	14	367	14
		1	0.56	86.1	29	418	32
	Glued-fit	0	0.56	87.2	23	534	34
		1	0.59	108.5	23	612	32
SPF	Shrink-fit	0	0.41	75.1	9	466	13
		1	0.42	83.5	17	489	21
	Glued-fit	0	0.48	92.4	11	644	18
		1	0.47	93.1	16	603	16

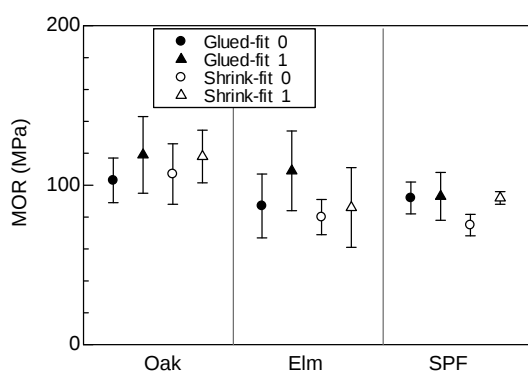


Fig. 12. Comparison of modulus of rupture (MOR) of the specimens without humidity cycle and those with a humidity cycle.

Notes: 0: Without humidity cycle; 1: With a humidity cycle; Vertical bars denote standard deviations.

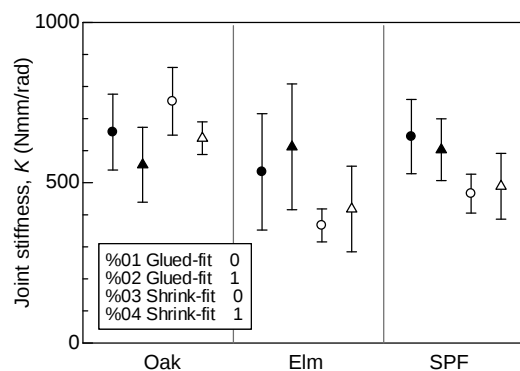


Fig. 13. Comparison of joint stiffness (*K*) of the specimens without humidity cycle and those with a humidity cycle.

Notes: 0: Without humidity cycle; 1: With a humidity cycle; Vertical bars denote standard deviations.

5. 総括

グリーンウッドワークにおける丸ほぞ収縮接合の性能評価をするため、T 型および L 型試験体を用いて引抜き、およびモーメント負荷（曲げ）試験を行った。それぞれの実験で、湿度変動サイクルを 1 回付与した試験体も作成して、湿度変動履歴の影響を検討した。結果を以下に要約する。

- 1) 収縮接合引抜き強度の発現要因として、部分圧縮強度、ほぞとほぞ孔の膨潤収縮量、使用かん合度、が主な要因と考えられた。
- 2) 接着接合に対する収縮接合の引抜き強度比は、ミズナラ、ハルニレ、SPF において、ほぞ乾燥レベル A で各々 0.79, 0.13, 0.04 であり、ほぞ乾燥レベル B では各々 0.76, 0.50, 0.07 であり、ミズナラでは接着接合の 8 割程度の引抜き強度を発現することがわかった。
- 3) 湿度変動履歴を受けていない試験体に対する湿度変動履歴を付与した試験体の引抜き強度比（ほぞ乾燥レベル A）は、ミズナラ、ハルニレ、SPF で各々 0.28, 0.27, 0.73 であり、湿度変動履歴によって大きく減少した。ただし、接着接合においても、引抜き強度比は、各々 0.82, 0.59, 0.52 と低下した。
- 4) 曲げ破壊形態は、およそ 95%以上がほぞの曲げ破壊であった。
- 5) 曲げ強度について、接着接合と収縮接合の間に有意差はなかった。
- 6) 接合部剛性については、SPF についてのみ、接着接合と収縮接合の間に有意差があった。SPF の接着接合が収縮接合に対し有意に大きかったのは接着剤塗布によってほぞ接合面が強化されたためと考えられた。
- 7) 曲げ強度と接合部剛性について、湿度変動履歴の影響は認められなかった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの関係者にご協力頂いた。とりわけ、恒温恒湿槽を貸して頂いた北海道大学樹木生物学研究室、グリーンウッドワークに関してご教授いただいた井丸富夫氏に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Abbott, M. (2002) Living wood –From buying a wood land to making a chair. Living Wood Books, Worcester, pp. 240.
- 2) Stone, S. (2005) Researching historical furniture. Woodwork Magazine, No.93, p.84.
- 3) Alexander, J. (1978) Making a chair from a tree: an Introduction to working green wood. Astragal Press, Mendham, pp.125.
- 4) Eckelman, C., Haviarova, E., Tankut, A., Denizli, N., Akcay, H. Erdil, Y. (2004) Withdrawal capacity of pinned and unpinned round mortise and tenon furniture joints. Forest Products J., 54 (12), 185-191.
- 5) Mougel, E., Segovia, C., Pizzi, A., Thomas, A. (2011) Shrink-fitting and dowel welding in mortise and tenon structural wood joints. J. Adhesion Science and Technology, 25, 213-221.
- 6) 日本木材学会編 (2008) 木質の物理. 文永堂出版, 東京, pp.301.
- 7) 林野庁林業試験場編 (1973) 木材工業ハンドブック. 丸善, 東京, pp1127.
- 8) Teranishi, M., Koizumi, A., Hirai, T. (2008) Evaluation of quality indexes of bending performance and hardness for hardwoods. J. Wood Science, 54, 423-428.

Summary

Mechanical performance of shrink-fit joint for round mortise and tenon was evaluated. This joint is often used in making furniture from green wood. In this study, the evaluation was made with comparison to glued-fit joint. The effects of humidity cycle of the performance were also considered. The experiments were withdrawal test using T-type specimens, and bending-fracture tests using L-type specimens. Tested species were oak (*Quercus crispula*), elm (*Ulmus davidiana* var. *japonica*) and SPF lumber (mixture of spruce, pine and fir). It was found that withdrawal strength of shrink-fit joint was comparable with that of glued-fit joint, if the conditions of the partial bearing strength, the amounts of swelling and shrinkage, and the fit after the curing period were adequate. However, withdrawal strength of shrink-fit joint considerably decreased after a cycle of humidity change. On the other hand, bending strength and joint stiffness of shrink-fit joint were comparable with those of glued-fit joint. Furthermore, a cycle of humidity change did not affect the bending strength and joint stiffness.

Keywords: green woodwork, shrink-fit joint, humidity cycle, withdrawal strength, bending strength.