

阿蘇神社楼門における柱材（スギ、ケヤキ）の材料試験

- 種別：材料試験〔木材〕・煉瓦・鉄・コンクリート・その他〕、重量測定、要素試験〔接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他〕、補強性能試験〔接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他〕

- 基本情報

文化財名称：重要文化財 阿蘇神社楼門
所在地：熊本県阿蘇市一の宮町宮地
所有者：宗教法人阿蘇神社
構造形式：三間一戸二階二重門、入母屋造、一階正面軒唐破風付、銅板葺
建築年：嘉永2年（1849）
事業名称：重要文化財 阿蘇神社楼門 保存修理工事（災害復旧）
事業期間：2016年8月～2023年12月
工事種別：解体修理（災害復旧）
事業者：宗教法人阿蘇神社
設計監理：公益財団法人文化財建造物保存技術協会
実験計画者：(有)安芸構造計画事務所
実験機関：熊本県林業研究・研修センター
実験年月日：2022年7月～
引用・参考文献：

- 実験に至る経緯と目的

阿蘇神社楼門は熊本地震（2016年4月16日）で倒壊し、組物を取り付く柱頭部が大きく破損した。上層柱10本のうち隅柱は破損がひどく4本全てを新材に取り替え、2本は柱頭部を新材で継木した。初層柱12本のうち8本（スギ4本、ケヤキ4本）の柱頭部を新材で継木した。破棄された柱頭部を利用して、200年以上前の大径材の材料強度を確認することを目的として、小試験体を採取して材料試験を行った。



写真1 破棄された柱頭部と板材の採取

●姿図・寸法

【使用材料】新材に置き換えた柱 10 本のうち試験片が採取できそうな 6 本（スギ 2 本、ケヤキ 4 本）より、破棄された柱頭の中央部分から板材を採取した。

【試験体寸法】試験体寸法は JIS Z2101 に定める範囲内の寸法の大きさとした。

試験体	寸法	試験体数
曲げ試験体	20mmx20mmx320mm	スギ：21、ケヤキ：44
横圧縮試験体	20mmx20mmx50mm	スギ：4、ケヤキ：15
部分圧縮試験体	曲げ試験体の非破壊部分	スギ：16、ケヤキ：25

●概要

写真 2 に示すように、採取した板材から髄からの距離を測定ながら、20mmx20mm 角の小試験体を切り出し、曲げ試験体と横圧縮試験体、含水率確認用のピースを作成した。各試験体の動的ヤング係数を縦振動法で求めた後、万能試験機（島津製作所、最大容量 100kN）用いて加力試験を行った。曲げ試験後の試験体の非破壊部分を利用して、部分圧縮試験を実施した。



写真 2 小試験片の採取

●実験方法

(1) 曲げ試験

曲げ試験は試験体の支点間距離を 280mm とし、中央集中加力方式で荷重速度 5mm/分で加力し、試験体中央の変位を測定した。測定した最大荷重より曲げ強度を (1 式) より算出し、P-δ曲線より比例域における荷重とそれに対応する変位を求め、曲げヤング係数を (2 式) より算出した。

$$\cdot \text{曲げ強度} : \sigma_b (\text{N/mm}^2) = P_m \cdot L / (4 \cdot Z), \quad Z = bh^2 / 6 \dots \dots \dots (1)$$

$$\cdot \text{曲げヤング係数} : E_b (\text{N/mm}^2) = \Delta P \cdot L^3 / (48I \cdot \Delta y), \quad I = bh^3 / 12 \dots \dots \dots (2)$$

P_m : 最大荷重 (N)、 L : スパン (280mm)、 b : 試験体幅 (mm)、 h : 試験体高 (mm)

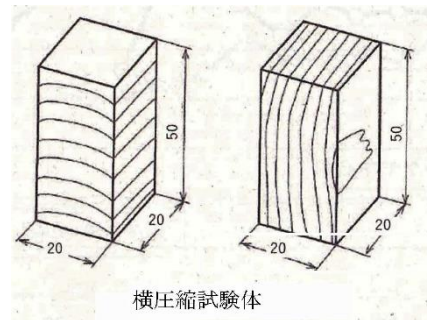
ΔP : 比例域における上限荷重 (0.4P) と下限荷重 (0.1P_m) の差

Δy : AP に対応するスパン中央のたわみ (mm)

(2) 繊維直交方向の全面及び部分圧縮試験

繊維直交方向の全面圧縮試験体（＝横圧縮試験体）は同じ採取位置から加力方向が接線方向と半径方向の試験体を採取した。部分圧縮試験体は曲げ試験の非破壊部を利用して、征目面を荷重面として、加圧用鋼板（幅 30x 厚 16mm）を試験体に直交して設置し、圧縮力は容量 20kN のロードセル（島津製作所）を用いて測定し、万能試験機のクロスヘッドの動きを加力盤と見なし

て、クロスヘッドの下面の動きを変位計で測定した。荷重速度は 0.7mm/分とし、試験体の縮み（めり込み）を測定した。測定した P-δ 曲線より試験体厚の 5 % に縮んだ時点の荷重を算出し、それを P_{5%} とし、(3) 式より算出した。また比例限度の荷重は試験体毎に作成した荷重変形曲線図より、弾性域に一致する直線と実測値から判断した。



$$\text{辺長(試験体高さ)5 \%の部分圧縮強度(N/mm}^2\text{)} = P_{5\%}/A \quad \dots (3)$$

P_{5%}; 縮みが辺長 5 % のときの荷重(N)、A ; 荷重面積(mm²)

(3) 含水率

105° C に設定した恒温乾燥機で試験体を乾燥し、その質量が恒量に達した時の全乾質量を測定し、(4) 式より 算出した。

$$\cdot \text{含水率(\%)} = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100 \quad \dots (4)$$

m₁ : 乾燥前の質量(g)、m₂ : 全乾質量(g)

(4) 密度

気乾時の質量及び体積を測定し、(5) 式より算出した。

$$\cdot \text{密度(g/cm}^3\text{)} = m / v \quad \dots (5)$$

m ; 試験体の質量(g)、v : 質量測定時の試験体の体積(cm³)

● 試験結果

表 1 にスギ材を、表 2 にケヤキ材の曲げ試験と部分圧縮試験の結果を、表 3 にスギ材を、表 4 にケヤキ材の全面圧縮の結果を示した。曲げ試験体については平均年輪幅前や密度、全乾法により求めた含水率、縦振動法による動的ヤング率の測定結果も示した。また、曲げ試験体と繊維直交の圧縮試験結果については密度を併記した。それぞれの全試験結果の平均値、標準偏差、変動係数、ばらつき係数より、信頼水準 75% の 95% 下

2301 阿蘇神社楼門における柱材（スギ・ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

限許容値の基準強度特性値、50%下限許容値のヤング係数を求めて表中に示した。但し、スギ材の全面圧縮については試験体数が2体のために平均値のみ記載した。さらに、「木質構造設計基準・同解説」日本建築学会1980年版に準じて、欠点低減係数、曲げ試験0.45、圧縮試験0.62を準じて基準強度特性値を算定した。併せて、現行建築基準法、告示平12建告第1452号の無等級製材の基準強度を示した。繊維直交方向の全面圧縮強度については、木質構造設計基準・同解説」日本建築学会2006改定の基準材料強度を記載した。

樹種&供試材番号	採取位置	曲げ試験							部分圧縮試験		
		平均年輪幅	密度	含水率	動的ヤング係数	見かけ曲げヤング係数	曲げ比例限度	曲げ強度	密度	比例限度	5%変位応力
		mm	kg/m ³	%	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
スギ1	+15	2.1	343	12.5		5.78	25.7	47.3	327	4.35	6.24
	+13.5	1.5	359	12.5	5.5	5.62	29.2	47.1			
	+12.0	3.8	380	12.6	5.9	5.40	28.9	50.6			
	+9	3.5	380	12.8	5.9	5.29	27.9	45.4	348	7.05	9.10
	+7	4.2	355	12.8	5.6	4.82	24.3	49.0	344	5.27	6.72
	+3	3.9	314	13.0	4.7	4.18	24.3	43.5	316	3.92	5.09
	0								344	5.38	7.80
	-2	6.1	360	13.0	6.1	4.46	18.5	49.6	402	4.99	5.18
	-5	6.1	382	12.8	5.7	5.28	24.4	56.7			
	-7	6.4	342	12.9	5.7	4.71	21.6	42.6			
	-10	4.3	374	12.7	5.2	5.66	18.4	54.7	368	6.80	7.80
	-13	5.5	367	12.8	6.4	5.80	28.9	57.0	351	5.05	7.91
	-15	6.0	377	12.8	6.2	7.22	29.8	55.3	353	5.46	8.08
	-18	2.7	379	12.8	6.2	5.82	28.6	60.2	376	4.54	6.09
	-20	3.2	364	12.7	6.8	6.56	36.4	62.9	351	4.21	4.96
スギ2	-8	3.7	385	12.7	5.6	7.05	33.8	64.1			
	-10	2.1	356	12.7	5.5	5.64	33.9	58.3	357	5.62	8.87
	-12	4.4	348	12.9	5.4	4.95	26.0	54.8	348	8.68	10.83
	-15	3.7	372	12.9	6.8	6.15	33.2	62.1	355	9.29	10.58
	-17	2.5	377	13.0	6.9	5.75	28.9	62.7	365	5.86	8.72
	-20	3.3	355	12.8	5.6	4.76	25.9	53.5	340	7.46	8.58
平均		3.8	346	12.2	5.9	5.3	26.1	51.3	353	5.87	7.66
標準偏差		1.42	17.30	0.14	0.56	0.78	4.71	6.57	18.96	1.53	1.76
変動係数(%) (Cv)		37.64	5.00	1.14	9.50	14.73	18.04	12.80	5.37	26.01	23.03
ばらつき係数:1-Cv・K					0.99	0.98	0.65	0.75		0.49	0.54
無欠点少試験体のヤング率、基準強度特性値					5.8	5.2		38.6		2.85	4.17
欠点低減係数								0.45		0.62	0.62
基準強度								17.4		1.77	2.59
基準強度(現行基準法、無等級)						7.0		22.2		4.80	6.00
* 髓部分は無視											
* 試験体数に応じ	曲げ強度	n=20 K=	1.932	部分圧縮	n=16 K=	1.977					信頼水準75%の95%下限許容値
	ヤング率	n=20 K=	0.154		n=16 K=	0.174					信頼水準75%の50%下限許容値
* 欠点低減係数は「木質構造設計基準・同解説」日本建築学会1980年版に準ずる。部分圧縮強度は圧縮強度に準じた。											

2301 阿蘇神社楼門における柱材（スギ・ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

表2 柱 ケヤキ材の曲げ強度、部分圧縮試験結果											
樹種&供試材番号	採取位置	曲げ試験							部分圧縮試験		
		平均年輪幅	密度	含水率	動的ヤング係数	見かけ曲げヤング係数	曲げ比例限度	曲げ強度	密度	比例限度	5%変位応力
		mm	kg/m ³	%	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
ケヤキ3	+9.5	3.2	724	11.6	13.6	11.8	51.4	103.4	705	15.60	17.87
	+7	4.2	718	12.0	11.5	11.0	46.5	93.2	690	15.69	17.57
	+2	5.1	763	12.3	11.6	11.6	41.6	97.3	764	19.93	25.27
	0	6.2	777	12.6	12.5	12.1	39.8	106.2	752	21.24	21.84
	-2.5	6.7	791	12.6	12.3	10.6	45.2	106.3	774	22.49	25.24
	-24.5	2.2	714	11.8	9.9	12.1	38.2	89.1	691	18.10	20.68
	-27.5	5.1	736	11.7	11.7	13.1	45.6	121.7	703	18.93	21.85
	-29.5	3.6	752	11.5	7.7	11.5	41.8	76.2	722	14.63	19.70
ケヤキ4	+17	3.2	654	11.3		10.0	44.6	101.0	636	10.19	19.67
	+15	2.5	661	11.5	8.0	9.8	41.9	94.5	657	12.21	20.40
	+12.5	2.5	704	11.6	10.6	12.7	46.7	123.0	646	14.35	21.63
	-8	2.3	690	12.5	12.5	10.9	52.3	100.9			
	-10	3.4	687	12.8	12.7	10.9	55.1	120.2			
	-15	3.1	682	11.9	12.3	11.7	51.0	129.6			
	-17.5	2.9	681	11.7	12.3	11.1	58.0	121.3			
	-20	3.0	668	10.2	10.9	10.3	52.2	109.5			
	-22.5	3.7	683	11.5	10.5	9.9	51.9	112.6			
	-23.5	3.6	689	11.2	10.7	10.9	58.2	118.9			
-27	2.1	631	10.8	9.7			103.9				
ケヤキ5	0	3.4	703	12.8		10.2	43.6	67.5			
	-2	2.7	702	12.8	11.2	10.6	65.5	98.2			
	-4.5	4.0	704	12.7	10.8	11.2	65.8	121.6			
	-7	3.6	700	12.9	11.5	11.1	63.7	129.0			
	-9	3.6	702	12.8	11.1	11.0	69.7	113.9	668	13.43	18.13
	-11.5	4.4	713	12.8	10.6	11.1	69.4	121.4			
	-14	4.1	685	12.6	10.6	10.5	54.6	118.1	649	11.85	20.61
	-16	6.0	694	12.5	11.0	10.4	59.4	114.2	657	15.12	21.53
	-18.5	3.4	675	12.5	11.6	11.1	61.0	127.3			
	-21	3.1	637	12.6	11.0	10.2	59.2	111.0	593	10.99	18.00
	-23	2.4	629	12.4	11.0	10.0	59.2	105.1	590	10.14	19.08
	-26	2.2	615	12.5	10.7	9.8	54.2	101.7	596	13.71	19.40
	-28	3.2	628	12.3	10.4	9.4	58.4	100.2	611	13.58	19.50
-30.5	3.0	621	11.9	10.2	9.3	56.2	98.9				
ケヤキ6	+7	1.7	706	12.3	12.8	11.8	52.0	106.6	667	14.96	20.89
	+9.5	2.9	690	12.1	12.2	11.0	50.3	108.4	665	13.93	20.02
	+12	3.1	686	12.0	13.6	11.6	53.0	105.9			
	+14	3.1	676	11.9	14.0	12.1	50.6	108.6	663	14.19	19.79
	+16.5	3.6	668	11.9	13.6	10.6	53.2	97.0	657	11.35	20.11
	+19	2.5	694	11.8	14.3	12.1	53.0	113.0	647	11.16	18.61
	+21	2.8	711	11.6	14.1	13.1	56.3	125.9	665	10.72	19.34
	+23.5	5.1	705	11.9	12.0	11.5	57.0	119.6	673	11.61	19.62
	+26	3.5	662	11.7	11.1	9.3	53.7	85.0			
	+30.5	4.3	677	11.3	11.3	10.8	58.7	112.2			
+33	2.3	650	11.1	12.2	10.3	57.3	107.5				
平均		3.5	689	12.0	11.5	11.0	53.4	107.9	670	14.40	20.25
標準偏差		1.10	38.24	0.60	1.42	0.93	7.61	13.33	47.69	3.37	1.89
変動係数(%) (Cv)		31.65	5.55	4.97	12.31	8.43	14.24	12.36	7.12	23.37	9.34
ばらつき係数:1-Cv・K					0.99	0.99	0.74	0.77		0.56	0.82
無欠点少試験体のヤング率、基準強度特性値					11.4	10.9		83.5		8.02	16.67
欠点低減係数*								0.45		0.62	0.62
基準強度								37.6		4.98	10.34
基準強度(現行基準法、無等級)						8.0		29.4		8.64	10.80
* 試験体数に応じ	曲げ強度 n=44 K=	1.825	部分圧縮 n=25 K=	1.895	信頼水準75%の95%下限許容値						
た係数: K	ヤング率 n=44 K=	0.103	n=25 K=	0.137	信頼水準75%の50%下限許容値						
*: 欠点低減係数は「木質構造設計基準・同解説」日本建築学会1980年版に準ずる。部分圧縮強度は圧縮強度に準じた。											

2301 阿蘇神社楼門における柱材（スギ・ケヤキ）の材料試験
文化財建造物構造実験データ集

表3 スギ材の繊維直交方向の全面圧縮試験結果							
試験体	密度	加力方向：R			加力方向：T		
		横圧縮強さ	比例限度応力	横圧縮ヤング係数	横圧縮強さ	比例限度応力	横圧縮ヤング係数
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
スギ1-120-T	353				2.4	1.5	0.14
スギ1-0-R	343	3.7	2.9	0.44			
スギ2-150-R	362	3.3	2.4	0.49			
スギ2-130-T	334				2.1	1.6	0.15
平均	348	3.47	2.65	0.47	2.22	1.53	0.14
標準偏差							
表4 ケヤキ材の繊維直交方向の全面圧縮試験結果							
試験体	密度	加力方向：R			加力方向：T		
		横圧縮強さ	比例限度応力	横圧縮ヤング係数	横圧縮強さ	比例限度応力	横圧縮ヤング係数
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
ケヤキ6-50-T	720				11.5	8.1	0.68
ケヤキ6-50-R	715	13.4	10.5	0.73			
ケヤキ6-150-R	702	14.1	11.0	0.83			
ケヤキ6-250-T	639				10.5	7.1	0.69
ケヤキ6-250-R	662	14.0	8.1	0.93			
ケヤキ3-90-T	783				13.0	9.0	0.78
ケヤキ3-90-R	790	16.4	11.6	1.01			
ケヤキ3-200-T	735				13.6	8.4	0.74
ケヤキ3-300-R	750	18.0	12.4	1.12			
ケヤキ3-300-T	750					9.3	0.82
ケヤキ5-100-T	705				13.0	8.9	0.62
ケヤキ5-210-T	622				10.7	6.4	0.58
ケヤキ5-180-R	676	13.1	8.4	0.93			
ケヤキ5-250-T	621				10.4	6.8	0.60
ケヤキ5-250-R	630	13.5	9.0	0.95			
平均	700	14.7	10.1	0.93	11.8	8.0	0.69
標準偏差		1.72	1.52	0.12	1.27	1.04	0.08
変動係数(%) (Cv)		11.71	15.02	12.43	10.72	12.98	11.84
ばらつき係数:1-Cv・K		0.74	0.66	0.97	0.76	0.72	0.97
無欠点小試験体のヤング率、基準強度特性値		10.79	6.71	0.90	8.97	5.72	0.67
欠点低減係数		0.62			0.62		
基準強度		6.69			5.56		
基準強度(日本建築学会全面圧縮強度)		4.2			4.2		
* 試験体数に応じた係数：K	圧縮強度：n=7(8) K=	2.251	2.189	信頼水準75%の95%下限許容値			
	ヤング率：n=7(8) K=	0.271	0.251	信頼水準75%の50%下限許容値			

●考察

髄からの距離と曲げ強度の分布をスギ材、ケヤキ材の試験体それぞれを図1に示す。また、静的加力試験の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度、縦振動法で測定した動的ヤング係数と曲げ強度の相関性を図2、図3に、密度と部分圧縮試験の5%変位応力の相関性を図4に示す。試験の結果より以下のことが確認できた。

- (1) スギ材のヤング係数、曲げ強度共に、現行基準法の基準強度に比べて低い値となった。ケヤキ材のヤング係数、曲げ強度、繊維直交方向の圧縮強度は共に大きな値となった。曲げ強度は低減係数0.42を乗じても現行法規の基準強度の1.28倍となった。
- (2) 髄からの距離に対する曲げ強度分布を見ると、スギ材は髄付近の強度低下が明確には現れたが、ケヤキ材は髄の強度低下は認められなかった。
- (3) 曲げ強度と見かけのヤング率や動的ヤング係数の相関性を見ると、スギ材に関しては $R^2=0.44$ 、 $R^2=0.35$ と比較的高い相関性が認められ、非破壊検査として動的ヤング係数から曲げ強度を推定することは可能と判断できる。ケヤキ材に関しては見かけのヤング率でも曲げ強度との相関性が低く、動的ヤング係数から曲げ強度を推定することは難しいと判断した。
- (4) 密度と5%変位応力との相関性はスギ材に関しては低いが、ケヤキ材に関しては $R^2=0.39$ と相関性は認められた。

スギ材の曲げ強度が現行基準法の基準強度よりも低いことについては、スギ材の平均密度が平均値で 365kg/m^3 と低いことが確認できたが、その原因を特定できていない。曲げヤング係数の平均値 $E_0=7.0\text{kN/mm}^2$ に対して5%下限値は $E_{0.05}=4.5\text{kN/mm}^2$ で、この試験結果の5%下限値を算定すると $E_{0.05}=3.8\text{kN/mm}^2$ と算定され、正規分布と想定すると約85%は $E=4.5\text{kN/mm}^2$ を超えていることが確認できる。

また、ここでは図示はできなかったが、ケヤキ材の繊維直交方向の全面圧縮試験の半径方向の加力の祭に、最大荷重付近に達すると潰れて除荷と加力の増加を繰り返しながら変形の進行が確認できた。スギ材に関してはそのような傾向は認められなかった。

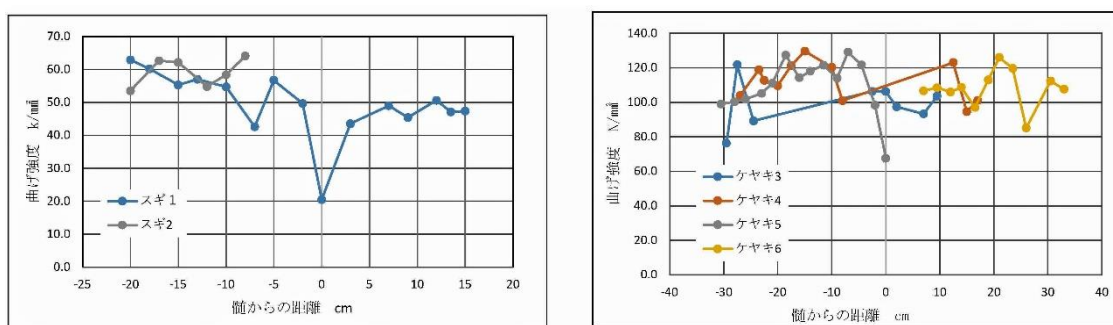


図1 髄からの距離と曲げ強度分布

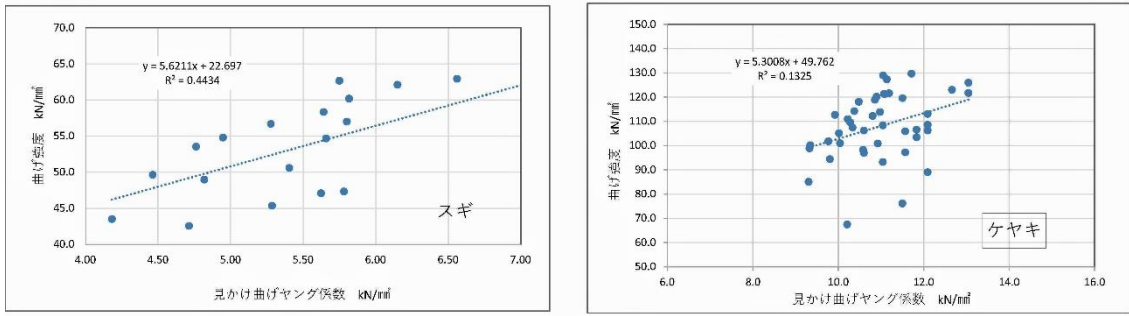


図2 曲げ強度と見かけ曲げヤング係数の相関性

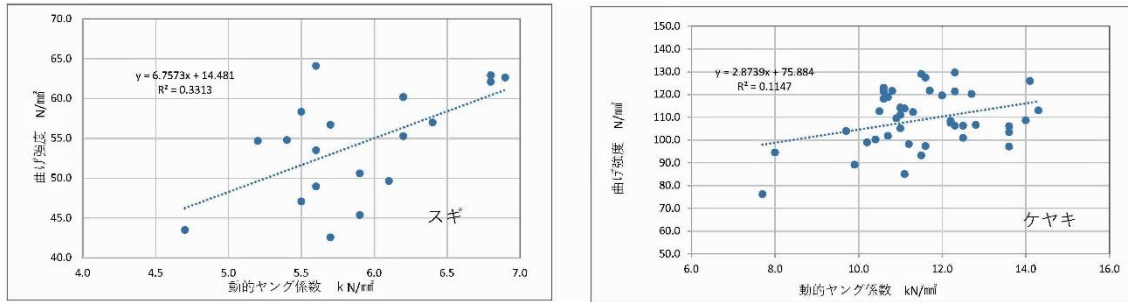


図3 曲げ強度と動的ヤング係数の相関性

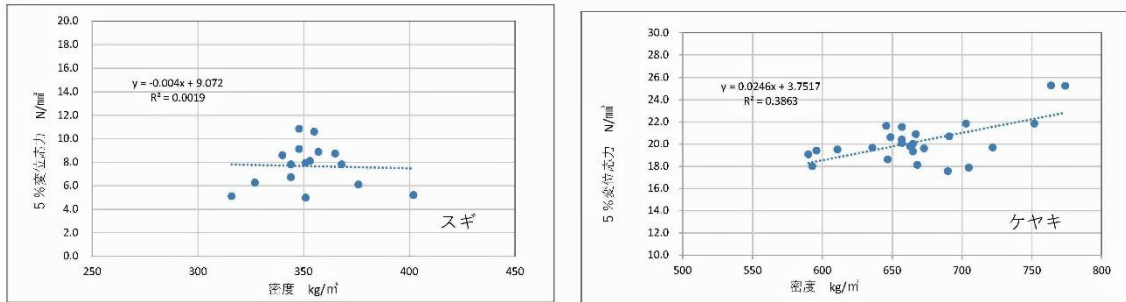


図4 繊維直交方向の端部圧縮強度と密度の相関性