

# 実大曲げ試験による接着重ね材の強度評価

## - 組み合わせ応力に基づくスギ・ヒノキ材の検討 -

古田 久盛

### 1. はじめに

九州圏内の木材資源の活発化を目的に、接着重ね材（以下、GBM: Glued Build-up Member）が開発され、既に建築材料として複数の実績がある他、2019年1月には日本農林規格（以下、JAS）が制定された<sup>1)</sup>。このような規格化により今後の全国的な展開が本材料には期待される他、国交省主導の下、建築材料として利用する上での特性値、例えばヤング係数や強度が定められる予定となっている。

本研究は、これら GBM の強度評価に着目したもので、既往研究で検討された組み合わせ応力の考え方<sup>2)</sup>に基づき、これまで実施したスギ・ヒノキ製材および両樹種の GBM の試験体、合計約 117 体に対する曲げ試験の結果を整理したものである。整理にあたり、本研究では木材の曲げ・引張強度の変遷を調査し、その調査結果を踏まえて強度評価の妥当性を検討した。なお、本研究で対象とする GBM は、エポキシ樹脂系接着剤により製材を接着したものを指し、その段数は 2 段、3 段、5 段である。

表 1 試験体情報

series	$w$	$h$	$n_t$	$H$	$S$	$a$	$l$	$n_s$
S 105 × 105	105	-	-	105	5.7 D	5.7 D	17.0 D	20
H 105 × 105	105	-	-	105	5.7 D	5.7 D	17.0 D	20
S 120 × 120	120	-	-	120	6.0 D	6.0 D	18.0 D	4
S 120 × 360	120	-	-	360	5.7 D	5.7 D	17.0 D	3
SBP 105 × 210	105	105	2	210	5.7 D	5.7 D	17.0 D	10
					5.7 D	6.7 D	19.0 D	10
					5.7 D	5.7 D	17.0 D	10
SBP 120 × 360	120	120	3	360	6.0 D	6.0 D	18.0 D	8
					4.1 D	5.6 D	15.3 D	6
HBP 150 × 300	150	150	2	300	4.7 D	6.7 D	18.0 D	10
HBP 150 × 450	150	150	3	450	3.6 D	6.4 D	16.4 D	6
HBP 150 × 750	150	150	5	750	1.3 D	5.0 D	11.3 D	10

$w$ : 幅 [mm]  $h$ : 構成製材の断面せい [mm]  $n_t$ : GBM の構成製材の本数  $H$ : 断面せい [mm]  $a$ : 荷重支持点間距離 [mm]  $S$ : 荷重点間距離 [mm]  $l$ : 支点間距離 [mm]  $n_s$ : 試験体数

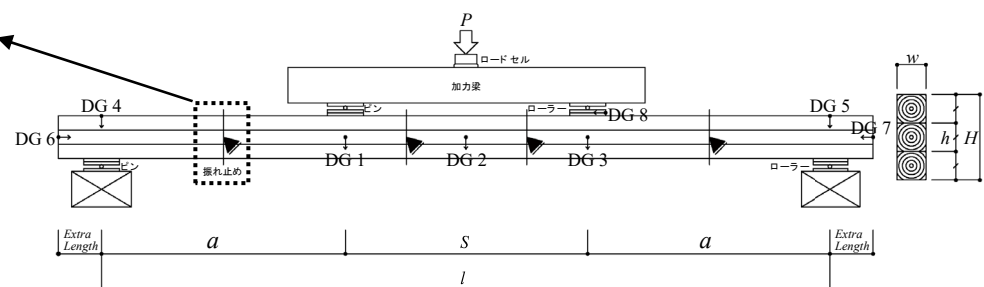
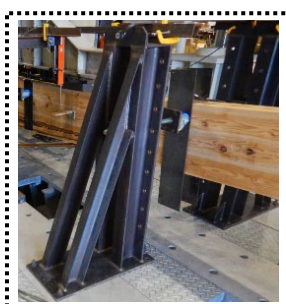


図 1 試験体のセッティングと計測方法

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体の概要

試験体は、製材または製材を 2 段、3 段、5 段に重ねてエポキシ樹脂系接着剤を用いて接着した GBM であり、樹種はスギもしくはヒノキである。詳細を表 1 に示す。

試験シリーズの区別のため、(S: スギ製材, H: ヒノキ製材, SBP: スギ GBM, HBP: ヒノキ GBM)  $(w) \times (H)$  というルールに基づいて名称をつけている。

#### 2.2 実験方法および計測方法

実験方法は二点荷重の曲げ試験である。支持点および加力点はピンおよびローラーとし、材軸方向の拘束が無いよう配慮している。これらの詳細を図 1 に示す。ローラーは鋼板間にテフロンシートを 2 枚重ねて挟んでおり、この部分の滑動は目視および荷重点側の変位計測によって確認した。この他、断面の幅方向のずれや振れが懸念される場合には、材軸方向 2 ~ 4 箇所振れ止めを設置した。試験はすべてのシリーズで曲げ破壊となるように、支点荷重点間距離  $a$  を  $(6.0 \pm 1.5) H$  として試験を実施した<sup>2)</sup>。一方で、試験体制作の都合上、荷重点間距離  $S$  が基準<sup>2)</sup>となる  $(6.0 \pm 1.0) H$  より短い試験体も存在しており、試験結果に少なからず影響を与えていると考えられる。

荷重は手動またはフィードバック制御による自動加力で、十分な時間をかけて破壊に至るよう、荷重速度に配慮している。荷重  $P$  はロードセルによって計測し、20% 以上の荷重低下が認められた時点で実験を終了した。変位は荷重点直下 (DG 1, 3)、支点間中央 (DG 2) 及び支持点直上 (DG 4, 5) では荷重方向に、木口面 (DG 6, 7) 及び荷重点側ローラー機構 (DG 8) では材軸方向に変位計を設置して計測した。中央たわみは、DG 2 から DG 4, 5 の平均値を差し引くことで、支持点におけるめり込みの影響を除去している。

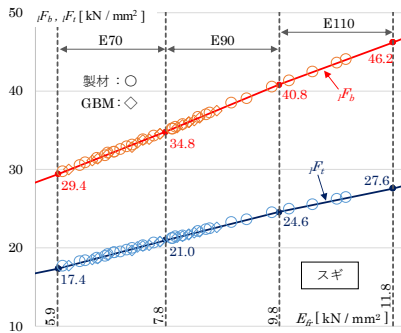


図 2 基準強度の線形補間

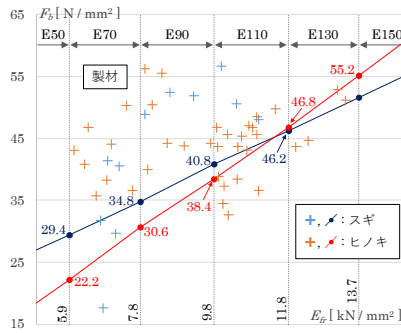


図 3  $F_b - E_b$

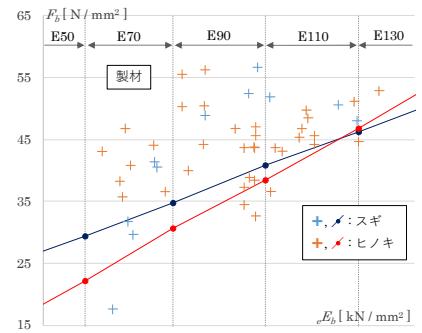


図 4  $F_b - eE_b$

### 2.3 実験結果

本研究で用いている製材及び GBM の構成材はすべて JAS 認定製材であり、試験体製作時に縦振動法によりヤング率を計測している。GBM の  $i$  段目の構成材の曲げヤング率を  $E_{fi}$ 、断面上端から中立軸までの距離を  $\lambda$  とすると、GBM の断面を一樣とみなした場合のヤング率  $E_b$  (製材についても同様に  $E_b$  で表す) は以下の式で表される。

$$E_b = \frac{4}{n^3} \left\{ 3 \sum_{i=1}^n E_{fri} \left( \frac{\lambda}{h} \right)^2 - 3 \sum_{i=1}^n (2i-1) E_{fri} \left( \frac{\lambda}{h} \right) + \sum_{i=1}^n (3i^2 - 3i + 1) E_{fri} \right\} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (2i-1) E_{fri} h}{2 \sum_{i=1}^n E_{fri}} \quad (2)$$

(1) 式により算定された曲げヤング率を基に、平成 12 年国土交通省告示第 1524 号<sup>3)</sup> の木材の曲げ強度と曲げヤング率の関係から線形補間により基準強度  $F_b$  を算出して (図 2)、以下の (3) 式を用いて実験結果から算定した強度  $F_b$  を評価する (図 3)。なお、引張基準強度  $F_t$  は 3 章以降の考察で用いるため、図 2 中に併せて示している。

$$F_b = \frac{3\alpha P_{\max}}{wH^2} \quad (3)$$

図 3 では、製材、GBM とともにスギ材よりもヒノキ材で基準強度を下回る試験体が多く、GBM では 8 割以上の試験体で基準強度を下回っている。ヒノキ GBM に着目すると、E110 において顕著であるように、線形補間を行わない従来の評価法<sup>3)</sup> では基準強度を上回っている試験体も多い。

また、試験結果から得られる荷重および変位の増分を用いて算定した曲げヤング率  $eE_b$  と  $F_b$  の関係を図 4 に示す。 $E_b$  よりも  $eE_b$  が大きい試験体は僅かなため、 $eE_b$  を基に  $F_b$  を評価すると基準強度を上回る試験体は増加するものの、ヒノキ GBM では依然 4 割程度の試験体で基準強度を下回っている。製材の試験結果や製造管理体制を考えると、GBM を一樣断面と見做す方法では曲げ強度を十分に評価し得ないと考えられる。

### 3. 組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価

田上らは、製材を積層する GBM では各製材に生じる垂直応力度を曲げ成分と軸方向成分の組み合わせ応力として評価する手法を提案し、その適用性について検討している<sup>2)5)</sup>。集成材についての同様の研究では、曲げ成分と軸方向成分の単純和および二乗和を用いる手法が検討されており、GBM についてもその適用性を検討した結果、単純和を用いることが適当であるとしている<sup>6)</sup>。GBM は軸方向成分が支配的な集成材と異なり、曲げ成分の割合が比較的大きく、本研究で最も多く用いている 2 段重ねの GBM ではその割合は 50%<sup>6)</sup> となる。

そこで、本研究では 2.3 節で行った曲げ応力のみで評価した場合と組み合わせ応力を単純和で評価した場合について同様の検討を行う。曲げ及び引張基準強度は図 2 に示した線形補完により求めた強度を用いるものとし、最下段製材縁に生じる曲げ及び引張応力度は田上らが示す簡易 GBM モデル<sup>5)</sup> に対して式 (4)~(8) によって算定される値を用いる。これらの式から得られる曲げ応力のみで評価した場合の算定結果を図 5、組み合わせ応力により算定した結果を図 6 にそれぞれ示す。

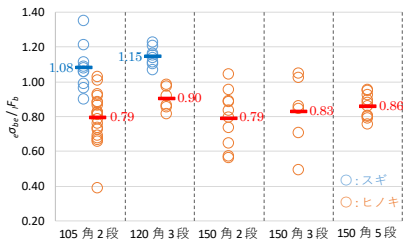


図 5 曲げ応力のみ -  $\sigma_b$

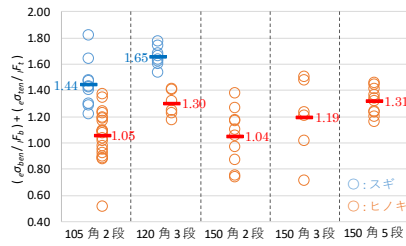


図 6 組み合わせ応力 -  $\sigma_b, \sigma_t$

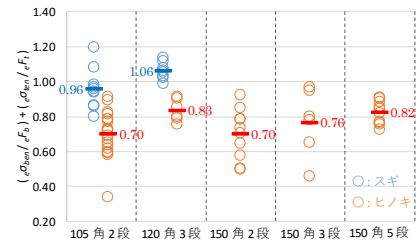


図 7 組み合わせ応力 -  $\sigma_b, \sigma_t$

$$\Phi = M / (EI)_e \quad (4)$$

$$\varepsilon_{bn} = d\Phi / 2 \quad (5) \quad \varepsilon_{bn} = g_n \Phi \quad (6)$$

$$\sigma_{ben} = E_n \cdot \varepsilon_{bn} \quad (7) \quad \sigma_{ten} = E_n \cdot \varepsilon_{tn} \quad (8)$$

ここで、 $\Phi$ : 曲率  $(EI)_e$ : GBM 断面の等価曲げ剛性

$\varepsilon_{bn}, \varepsilon_{tn}$ : 最下段製材芯位置に生じる曲げ, 引張成分によるひずみ

$\sigma_{ben}, \sigma_{ten}$ : 最下段製材縁に生じる曲げ, 引張応力度

$g_n$ : 中立軸から最下段製材芯までの距離

$E_n$ : 最下段製材の曲げ弾性係数 である

どちらの場合もスギ GBM では田上らの結果<sup>6)</sup>と概ね同様のものが得られているが、同研究では検討されていないヒノキ GBM ではスギ GBM と比較して、 $\sigma_{be} / \sigma_b$  が概ね低い値を示している。組み合わせ応力の場合、105 角 2 段の GBM の  $\sigma_{ben} / \sigma_b + \sigma_{ten} / \sigma_t$  は、同一断面であるものの、樹種により約 0.4 の差があり、ヒノキ材に対して同等の計算を行うのは適当でない可能性が示唆される。

また、同研究では「木構造振興(株)」が公開する試験結果を基にモデル化した曲げ強度  $\sigma_b = 1.3 \sigma_b$  及び引張強度  $\sigma_t = \sigma_t$  を用いた場合、実験結果を比較的精度良く評価できている。これらの強度を用いて算定した結果を図 7 に示す。スギ GBM では概ね良い結果が得られている一方、ヒノキ GBM では樹種間の差異に多少の改善は見られるものの、依然過小評価となっていることが分かる。

#### 4. ヒノキ GBM の強度評価手法の検討

##### 4.1 木材の曲げ・引張強度の変遷

木材は曲げ強度、引張強度共に安全率等の考慮によって実際の強度よりも小さく設定されており、その設定の根拠も経験に基づく部分が大きいと考えられる。そこで、両強度の変遷をまとめ、現行の基準強度の位置付けを把握した上で、ヒノキ GBM の適切な強度評価手法を検討する。なお、本研究と許容応力度の値に直接的な関係はないが、時代によって基準強度を当時の低減率を用いて許容応力度から逆算して求めているため、許容応力度についても同様にまとめる。

我が国において木材の許容応力度が初めて示されたのは、1920 年に制定された市街地建築物法施行規則である。当時、圧縮、引張、曲げそれぞれの強度値  $F_c, F_t, F_b$  は法令毎に異

なる値、単位が用いられるなど制定の根拠が曖昧で、同法律では十分な安全率をもって許容応力度  $f_c, f_t, f_b$  がその 1/10 に設定されていた。

その後、 $f_c$  は 1937 年に低減が図られ、 $f_b$  との相関は現在と近いものになったが、1987 年に建築基準法が改正され  $f_t = 0.6 f_b$  となるまでの 67 年間、 $f_t$  と  $f_b$  は等しいとされてきた。この点について、「最近行われるようになった実大材の強度試験結果からは  $f_t = f_b$  の関係が妥当であるとはいえない(中井孝 1982)」との指摘が為されている<sup>7)</sup> ことから分かるように、実大材の試験結果に基づく強度の検討が行われ始めたのは比較的最近のことである。また、この改正から無欠点材の樹種群に対するばらつきを考慮して、実験結果の平均値に 4/5 を乗じた値を材料強度としている。以降、積極的に実大試験による知見が取り込まれているものの、スギの実大試験の知見が全樹種に適用されている点、 $F_c, F_t, F_b$  の相関は無欠点小試験体の強度試験による結果から得られた関係を踏襲している点等、曖昧な点が多く、ヒノキ GBM の強度評価における問題はこれらに起因していると考えられる。以上の変遷を  $F_b = 1.00$  として、表 2 にまとめる。

表 2 基準強度の変遷

西暦	規格もしくは書籍	区分	$F_c, F_t, F_b$ の相関			$E$ kN/mm <sup>2</sup>
			$F_c$	$F_t$	$F_b$	
1913	東京市建築条例案		0.78	1.00	1.00	-
1920	市街地建築物法施行規則		1.00	1.00	1.00	-
1937	市街地建築物法施行規則		0.70	1.00	1.00	-
1948	日本建築規格「建築物の構造計算」		0.70	1.00	1.00	-
1961	木構造設計規程・同解説	普通	0.81	0.99	1.00	5.5
		上級	0.64	0.90	1.00	6.3
1980	建築基準法施行令		0.54	1.00	1.00	-
1987	建築基準法施行令		0.80	0.60	1.00	-
1988	木構造計算規程・同解説	普通	0.80	0.60	1.00	5.5
		上級	0.79	0.58	1.00	6.3
1992	針葉樹の構造用製材の取扱について	E50	0.80	0.60	1.00	3.9
		E70	0.79	0.58	1.00	5.9
		E90	0.78	0.61	1.00	7.8
		E110	0.78	0.59	1.00	9.8
		E130	0.77	0.58	1.00	11.8
		E150	0.80	0.60	1.00	13.7
2000	木材の基準強度 $F_c, F_t, F_b$ 及び $F_b$ を定める件	E50	0.80	0.60	1.00	3.9
		E70	0.80	0.59	1.00	5.9
		E90	0.81	0.60	1.00	7.8
		E110	0.79	0.60	1.00	9.8
		E130	0.81	0.60	1.00	11.8
		E150	0.80	0.60	1.00	13.7

##### 4.2 ヒノキ GBM の強度評価手法の検討

現行の基準強度は 5th percentile 値であり、曲げ強度と引張強度の比率も各 5th percentile 値の比率に基づいている<sup>8)</sup>。しかし、試験結果の適切な評価には 5th percentile 値ではなく平均値を用いる方が適当だと考えられる。そこで、現行の基準強度が平均値に 4/5 を乗じて 5th percentile 値相当の値としていることから、逆算的に機械等級区分毎の

強度平均値を算定する。ここで、強度の平均値は機械等級区分毎の曲げ弾性係数のおよそ中央値に相当する強度と仮定する。以上の通り算定した強度平均値をそれぞれ直線で結び、新たな曲げ、引張基準強度  $aF_b$ ,  $aF_t$  を得る ( 図 8 )。  $aF_b$ ,  $aF_t$  を用いて単純和で評価した結果を図 9 に示す。同図より、図 5 ~ 7 に示した評価方法と比べて、精度良く実験結果を評価していることが分かる。一方、試験体数が少なく、構成製材の断面、重ねた段数に依らず、他の評価法と比較して標準偏差が大きくなっていることなどから、追加で実験を行い、検討・改良を行うことは必須であると考えられる。

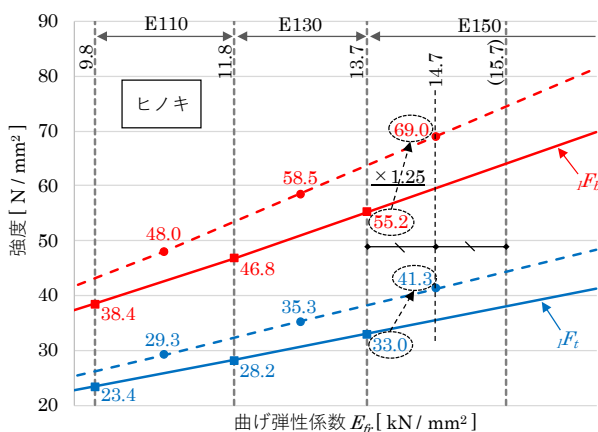


図 8 割増基準強度  $aF_b$ ,  $aF_t$  の線形補間

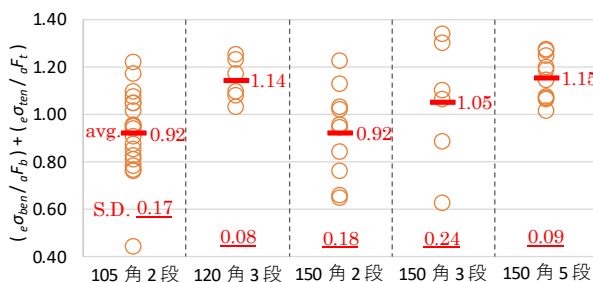


図 9 組み合わせ応力 - 基準強度  $aF_b$ ,  $aF_t$

また、 $aF_b$  の値を正とした場合、単純和が 1.0 となる時の  $F_t/aF_b$  の値を試験体毎に算定し、結果を図 10 にまとめる。

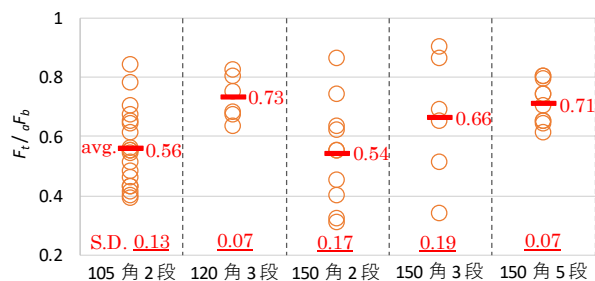


図 10 曲げ強度と引張強度の関係

断面の条件によってばらつきはあるものの、すべての試験体で平均を取ると 0.62 となり、スギ製材に対して行われた既往研究で得られた中央値における曲げ、引張強度の比率と等しくなる。このことから、ヒノキ材に対してスギ材と同様に  $F_t/F_b=0.6$  と考えることは適切であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では GBM の強度評価に着目し、その妥当性を検討することを目的に、既往研究で検討された組み合わせ応力の考え方にに基づき、これまで実施したスギ・ヒノキ製材および両樹種の GBM の試験体の曲げ試験の結果を整理した。また木材の曲げ・引張強度の変遷を調査し、それを踏まえて強度評価の妥当性を検討した。以下に得られた知見を示す。

- ① 図 5 ~ 7 の強度評価手法について検討した結果、いずれの場合もスギ GBM では既往研究と概ね同様の結果が得られた。一方、ヒノキ GBM ではスギ GBM と比較して、強度は全体的に低い値を示しており、ヒノキ GBM の組み合わせ応力はスギ GBM と比較して約 0.4 小さいことから、ヒノキ材に対してスギ材と同等の計算を行うのは適当でないと考えられる。
- ② 20 世紀初頭から現在に至るまで、安全率等を加味した強度が提案されてきたが、スギの実大試験の知見が全樹種に適用されている点や、 $F_b$ ,  $F_t$ ,  $F_b$  の相関は無欠点小試験体の試験結果の知見を踏襲している点がヒノキ GBM の強度評価の精度が低い要因と考えられる。
- ③ 試験結果の評価には現行の基準強度に用いられる 5th percentile 値ではなく、平均値を用いる方がよいと考え、現行の基準強度から逆算的に機械等級区分毎の強度の平均値を算定した後に、各機械等級区分の平均値を線形補間することで、新たな基準強度を提案した。組み合わせ応力の単純和と提案した基準強度を用いて強度評価を行った場合、図 5 ~ 7 の強度評価手法と比較して精度良く実験結果を評価することが分かった。
- ④  $aF_b$  の値を正とした場合、単純和が 1.0 となる時の  $F_t/aF_b$  の平均値は 0.62 となり、スギ製材の既往研究で得られた中央値における曲げ、引張強度の比率と等しくなる。以上より、ヒノキ材に対してスギ材と同様に  $F_t/F_b$  と考えることは適切であると考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 農林水産省：接着重ね材の日本農林規格, JAS 0006, 2019. 01
- 2) 田上誠 他：スギ製材を 2 ~ 5 段積層した接着重ね材の実大曲げ試験 心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ性能 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 754 号, pp. 1821 - 1831, 2018. 02
- 3) 国土交通省：木材の基準強度  $F_c$ ,  $F_t$ ,  $F_b$  及び  $F_s$  を定める件, 国土交通省告示第 1524 号, 2007. 11
- 4) (公財) 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. 9 - 10, 2011. 03
- 5) 田上誠 他：心持ち製材を積層した接着重ね材の組み合わせ応力による曲げ耐力の評価, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2019. 03 (発表予定)
- 6) 田上誠 他：心持ち製材を積層した接着重ね材の構造力学的性質, 構造工學論文集 Vol. 65B, 2019. 03 (掲載予定)
- 7) 井道裕史：我が国の製材規格と許容応力度の変遷, 森林総合研究所研究報告 Vol.17 No.1 (No.445) 1 - 33, 2018. 03
- 8) 日本建築学会：木構造設計規準・同解説, 1961
- 9) 日本木材学会：構造用木材 - 強度データの収集と分析, 1988. 03