スギ枠組壁工法用製材の力学的性能と強度等級区分評価*1

椎葉 淳*2, 荒武志朗*2, 藤元嘉安*3, 小田久人*2, 松元明弘*2

Mechanical Performance of Sugi (*Cryptomeria japonica*)
Wooden Frame-Construction Lumber
and Evaluation of Stress Grading*1Atsushi SHIIBA*2, Shiro ARATAKE*2, Yoshiyasu FUJIMOTO*3,
Hisato ODA*2 and Akihiro MATSUMOTO*2

Various strength performances (bending, tensile, compression and shearing) of wooden frame-construction lumber (204, 206) sawn from sugi logs grown in southern Miyazaki were examined. Based on the result, stress grading using modulus of dynamic elasticity was conducted, and its necessity and effectiveness were compared with visual grading. With visual grading, select structural amounted to 80% in 204, and to 93.3% in 206. Also, the 5% lower limit of sugi exceeded the characteristic value of S-P-F second class, which mainly consist of dimension lumber, except for tensile strength of 206. Moreover, it was suggested that the stress grading method should be more effective than visual grading. It is thought that the structural calculation can be adapted to sugi by this scrutinized method equally to S-P-F. Therefore, if members which are adapted to the stresses of each location can be used effectively, it will be expected to increase the use of sugi significantly.

Keywords : sugi, wooden frame-construction, mechanical performance, stress grading.

宮崎県南部地域産スギ丸太から得られた枠組壁工法用製材（204材，206材）について，各種強度性能（曲げ・引張り・圧縮・せん断）を評価するとともに，縦振動ヤング係数による機械等級区分を行い，目視等級区分と比較してその必要性及び有効性を検討した。目視等級区分の結果，204材では80%，206材では93.3%を特級が占めた。強度については，206材の引張り強さを除いて，5%下限値が現在の枠組材の主流となっているS-P-F甲種2級の基準強度を上回っていることが分かった。また，機械等級区分による方法が目視等級区分による方法よりも有効である可能性が示唆された。この方法を精査することで，スギがS-P-Fと同等に構造計算へ適応できると考えられる。それにより，各箇所の応力に見合った部材を効率的に使用できれば，スギの枠組壁工法への利用拡大が期待できる。

1. 緒 言

我が国における木材自給率は平成21年時点で27.8%であり，最も低かった平成14年（18.2%）を境に回復傾向を示している¹⁾。しかし，長期にわたる材価低迷などによる森林所有者の林業への意欲の低下に伴い，森林の適正な管理に支障を来すことが危惧され，このことが木材利用拡大に影響し，再び自給率の低下を招くことも懸念される。このような状

*1 Received June 27, 2011; accepted November 11, 2011.

*2 宮崎県木材利用技術センター Miyazaki Prefectural Wood Utilization Research Center, Miyakonojo 885-0037, Japan

*3 宮崎大学教育文化学部 Miyazaki University Faculty of Education and Culture, Miyazaki 889-2192, Japan

況の中、政府は平成21年に「森林・林業再生プラン」を作成した。それによれば、持続的な森林経営の確立及び国産材安定供給体制の構築などにより、2020年までに木材自給率50%を目指すとしている²⁾。ここで木材需要に目を向けると、林野庁の試算では、国内における木材需要の約4割、国産材需要の約55%が建築用材とされていることから³⁾、住宅を含めた建築分野での需要拡大が自給率向上に大きく寄与するものと考えられる。

一方、平成22年の住宅着工数を見ると、木造住宅約46万戸のうち、桝組壁工法住宅いわゆる2×4住宅は約9.6万戸で2割を占めており⁴⁾、木造住宅全体が伸び悩む中では安定している。その理由として、2×4住宅は在来軸組住宅と同程度の価格帯に分布しているが、特に都市部においては大工職の高齢化及び熟練工の不足により、在来軸組住宅では緊結金物などによる工数増加とコスト増加になっていることから、相対的に2×4住宅建築費が低下し、価格競争力で有利になっていることが挙げられる⁵⁾。また、低炭素社会づくりに向け資源循環を考えた場合、材料が規格化されておりリユースに向いている、仕口・継ぎ手が単純なバットジョイントで断面欠損が少ないなど他工法にないメリットもある⁶⁾。このような状況にあるにも関わらず、2×4工法における使用部材を見てみると、そのほとんどが輸入材で占められている³⁾。2×4工法は外国から導入された工法であることから、材料及び規格がスプルスなどの北米産材を基準に定められている。このため、桝組壁工法用製材の日本農林規格⁷⁾（以下「桝組JAS」）では、国産材はこれらの基準強度より低く見積もられ、スギの場合は主要樹種であるS-P-Fより1ランク下のW.Cedarに位置付けられており、その数値で運用する必要があることが使用に結びつかない主な原因と考えられる。また、これらの基準強度は目視により等級区分されるが、この区分により構造計算に対応可能な材料を選択することになるため、強度特性値はさらに重要な意味を持つ⁸⁾。しかしながら、節や年輪幅の測定などは熟練を要し、個人差も大きいと考えられることから、等級格付けが強度性能に正確に反映されているか否かは不明である。したがって、桝組壁工法用製材としての国産材の強度性能を明らかにするとともに、それらを目視よりも正確な等級区分法で格付けすることが出来れば、各部材の利用範囲が広がることにより2×4工法への使用割合が増加し、需要拡大及び自給率向上につながるものと期待される。

そこで本研究では、宮崎県南部地域産スギ丸太か

ら得られた桝組壁工法用製材（204材、206材）について、桝組JASによる目視等級区分を行うとともに、各種強度性能（曲げ・引張り・圧縮・せん断）を調べ、現行の基準強度と比較した。また、各試験体の強度について縦振動ヤング係数（ E_d ）を用いて機械等級区分を行い、目視等級区分と比較し、その必要性及び有効性を検討した。

2. 実 験

2.1 供試材の製材及び等級格付け

実験には、宮崎県南部地域産スギ丸太（元口径20.5～42.2 cm、末口径18.4～31.3 cm、長さ約400 cm）、86本（1番玉14本、2番玉72本）を供した。樹齢は概ね50年以上である。まず、丸太の長さ、末口径、元口径、最大矢高を測定した後、粗挽き寸法（204材：45 mm×105 mm、206材：48 mm×155 mm）でだら挽き及び桝挽きによる製材木取りを行い、人工乾燥（温湿度条件は、乾球温度60～80℃、乾湿球温度差2～23℃、乾燥日数8日）を施した後、プレーナーにより最終寸法（204材：38 mm×89 mm、206材：38 mm×140 mm）に仕上げた。

その後、各部寸法測定と含水率計（ケット科学研究所 HM-520）による含水率測定を行い、乾燥後の曲がりやねじれが大きい供試材を除き、最終的に204材180本、206材60本、合計240本を選定した。これらについて、桝組JASの甲種桝組材の規格に従い等級格付けを行った結果、204材については特級が全体の80%で、2級以上を含めると98.9%を占めた。また等級落ち（1級以下に格付け）の主因子としては、節が全体の82.5%であった。これに対し206材については、特級が全体の93.3%で更に高い比率を示した。2級以上を含めると98.3%となり、204材とほぼ同様の傾向であった。等級落ちの主因子は、丸身が40%、節と割れがそれぞれ20%であった。

2.2 試験体製作、材質測定及び試験方法

供試材の等級格付け後、等級分布に偏りが生じないように、204材、206材とも2グループに区分した。このうち1つのグループ（204材92本、206材28本）からは、曲げ・圧縮・せん断試験体を製作した。なお、曲げ試験体を材中央部から採取した後、圧縮試験体を末口側、せん断試験体を元口側から採取するよう位置を統一した。また、もう1つのグループ（204材88本、206材32本）からは引張り試験体を製作した。

まず、各試験体について寸法、重量、年輪数等の材質測定を行い、気乾密度（ ρ ）、平均年輪幅（ARW）、繊維傾斜（SG）を求めた。ARWについ

ては、両側木口面上で年輪にほぼ垂直方向の長さを測定し、年輪数で除して求めた。SGについては、長さ方向の1 m間における繊維走向の傾斜の高さの最大値を測定した。また、せん断試験体以外については、最大節径(MKD)と集中節径(CKD)をそれぞれ材縁部と中央部で測定した。なおこの時の測定区間は、曲げ試験体においては荷重点間、引張り試験体においてはチャック間、圧縮試験体においては全長とした。さらに曲げ試験体と引張り試験体については、FFTアナライザ(RION製SA-74)を用いて縦振動法による三次固有振動数(F_3)を測定し、 E_d を求めた。

次に各試験体を強度試験に供した。試験終了後、曲げ試験体及び引張り試験体については両端約20 cmの位置、圧縮試験体については中央部、せん断試験体については未破壊部分からそれぞれ試験片を採取し、全乾法により含水率(MC)を求めた。以下に各試験体別の詳細と試験方法を示す。

2.2.1 曲げ試験体

試験体の長さは、枠組壁工法建築物構造用計算指針の「材料及び接合部の許容応力度等を定める試験・評価方法」⁹⁾(以下「指針」)に示された寸法により決定した。すなわち、スパンを材せいの21倍とした上で、試験時の支点部の張り出しを考慮し、長さを材せいの23倍(204材: 2047 mm, 206材: 3220 mm)とした。

試験は、はじめに静ヤング測定機(飯田工業製T-018)を用い、(財)日本合板検査会の「構造用集成材の適正製造基準」に示された「ラミナのヤング係数検査」¹⁰⁾に準じて、フラットワイズの曲げ試験を実施した。すなわち、スパンを204材に合わせて1869 mmとし、分銅によりスパン中央に初期荷重を加えイニシャルをとった後、これより10 kg重い分銅により最終荷重を加え、たわみを変位計(東京測器研究所製CDP-50)を用いて中央下部において測定した。この時のたわみと荷重から静的曲げヤング係数(E_b)を求めた。次に実大曲げ試験機(東京衡機製造所製WU-1000・TK21)を用い、指針に示された試験方法に従いエッジワイズの曲げ試験を実施した。具体的には、スパンを材せいの21倍、荷重点間距離を材せいの7倍とし、荷重点の移動速度がほぼ一定となるように荷重を加えた。最大荷重に達するまでの時間は、およそ1分30秒から3分30秒であった。変位は試験体の下面中心部で巻込型変位計(東京測器研究所製DP-1000C)を用いて測定した。これらの試験結果から、曲げ強さ(MOR)及び曲げヤング係数(MOE)を求めた。なお、206材

については横倒れを防止するためにラテラルサポートを用いた。また、試験体の上下(引張り側と圧縮側)の配置については無作為とした。

2.2.2 引張り試験体

試験体の長さは、指針に示された寸法により決定した。すなわち、試験機のチャック間距離を断面長辺の9倍以上とした上で、両端チャック部の長さ($L=600\text{ mm}\times 2=1200\text{ mm}$)を加え、204材を2200 mm, 206材を2460 mmとした。

試験は、実大引張試験機(前川試験機製HZS-100-LB4)を用い、指針に示された試験方法に従い縦引張り試験を実施した。具体的には、チャック間距離を上記の長さ設定し、チャック切れを防止するためのあて木とともに試験体を固定し、チャックの移動速度がほぼ一定となるように荷重を加え、縦引張り強さ(F_t)を求めた。最大荷重に達するまでの時間は、すべての試験体で1分以上であった。なお、チャック切れにより破壊した試験体(204材, 206材各8本)については試験結果から除外した。

2.2.3 圧縮試験体

試験体の長さは、指針に示された寸法により決定した。すなわち、断面長辺の2~3倍の範囲内において、座屈の影響を考慮して細長比(λ)を30以下(204材: 225 mm ($\lambda=20.5$), 206材: 325 mm ($\lambda=29.5$))とした。

試験は、実大圧縮試験機(前川試験機製A-200-B1)を用い、指針に示された試験方法に従い縦圧縮試験を実施した。この場合、球座による加圧盤が傾かないよう中央部に試験体をセットし、荷重ヘッドの移動速度がほぼ一定となるように荷重を加え、縦圧縮強さ(F_c)を求めた。最大荷重に達するまでの時間は、すべての試験体で1分以上であった。

2.2.4 せん断試験体

試験体については、JIS Z 2101の「木材の試験方法」¹¹⁾(以下「JIS試験法」)に示されたイス型ブロック(寸法: 20 mm×20 mm×30 mm, せん断面: 20 mm×20 mm)とし、せん断面が桁目となるように製作した。

試験は、万能試験機(島津製作所製AG-I)を用い、JIS試験法に示された試験方法に従いブロックせん断試験を実施した。この場合、イス型ブロックせん断治具を用いて、試験体切り欠き部に平均速度が毎分5.88 N/mm²以下となるように荷重を加え、せん断強さ(F_s)を求めた。最大荷重に達するまでの時間は、すべての試験体で1分以上であった。

3. 結果と考察

3.1 曲げ性能

曲げ試験体の材質測定及び試験結果を204材、206材別に Table 1 に示す。破壊形態は204材の81.5%、206材の71.4%が節によるものであった。また、すべての試験体が荷重点間で破壊した。まず E_d と E_b を比較すると、204材、206材ともに E_d が約6%高い値を示した。これは、これまでのスギラミナによる研究結果¹²⁾ とほぼ同様の傾向である。次に E_d と MOE を比較すると、204材では E_d が約9%高い値を示したのに対し、206材ではその差は約2%しかなく、両者は異なる傾向を示した。ここで、 E_d と E_b の関係を Fig. 1 に、 E_d と MOE の関係を Fig. 2 に示す。これらのうち Fig. 1 をみると E_d と E_b の

間には204材、206材ともに相関係数が0.9以上と極めて高い相関があることが分かる。それに対して、Fig. 2 における E_d と MOE では、206材については0.9以上の高い相関を示したが、204材では危険率1%で有意ではあるが、相関係数は0.7と低くなった。Fig. 2 から分かるように、204材の中には MOE が E_d に比べて著しく低い試験体が数体みられる。これらの試験体のほとんどは、材縁と中央のどちらかもしくは両方の節径が平均値の2~3倍あり、試験終了後の写真からも、引張り側材縁部の大きな節や流れ節による繊維の分断及び断面欠損が起因して破壊に至っていることがうかがえた。この結果、MOE の平均値が下がり、前述の E_d との差につながったものと考えられる。以上のことから、204材のような材せいの小さい材を曲げ部材として使用す

Table 1. The properties of bending specimens.

		ρ (g/cm ³) ^{a)}	MC (%) ^{b)}	ARW (mm) ^{c)}	MKD (mm) ^{d)}		CKD (mm) ^{e)}		E_d (kN/mm ²) ^{f)}	E_b (kN/mm ²) ^{g)}	MOE (kN/mm ²) ^{h)}	MOR (N/mm ²) ⁱ⁾
					edge	middle	edge	middle				
204	Average	0.40	12.2	4.6	9.6	10.6	18.4	8.8	7.91	7.49	7.27	46.6
(n=92)	CV (%) ^{j)}	9.9	34.6	45.5	84.6	48.0	84.5	106.8	21.9	21.4	22.0	27.7
206	Average	0.40	11.3	5.8	7.2	13.3	17.9	21.4	7.61	7.18	7.44	42.1
(n=28)	CV (%)	10.2	52.5	39.2	98.0	47.4	107.0	57.0	19.4	19.0	16.2	25.5
Total	Average	0.40	12.0	4.8	9.1	11.2	18.3	11.7	7.84	7.42	7.31	45.6
	CV (%)	9.9	38.9	44.9	87.6	48.8	89.6	97.2	21.4	20.9	20.7	27.5

a) Density. b) Moisture content. c) Average annual ring width. d) Maximum knot diameter. e) Centerd knot diameter. f) Modulus of elasticity due to longitudinal vibration. g) Modulus of elasticity in bending for flat wise. h) Modulus of elasticity in bending for edge wise. i) Modulus of rupture in bending. j) Coefficient of variation.

Fig. 1. Relationships between E_d and E_b .
Legend: E_d and E_b : See Table 1, **: Marks indicate 1% levels of significance.

Fig. 2. Relationships between E_d and MOE.
Legend: E_d and MOE: See Table 1, **: See Fig. 1.

る場合は、特に引張り側材縁部の節の大きさや位置・形状に十分注意する必要があると言える。

次にMORを比較すると、204材が206材より約11%高い値を示した。ここでMOR/MOEをみてみると、204材が0.64で206材が0.57であり、スギ等による過去の研究では、同一樹種内では材せいが大きくなるほどこの比の値が小さくなる傾向があるとの報告があり¹³⁾、本研究でも同様の傾向がうかがえた。MOEとMORの関係をFig. 3に示す。これを見ると、204材では危険率1%の相関が得られたが、206材では危険率5%でやや低い相関であった。スギによる過去の研究では、204材のような材せいの小さいサイズの方がMOEとMORの相関が高いとの報告が

Fig. 3. Relationships between MOE and MOR.
Legend: MOE and MOR: See Table 1, *: Marks indicate 5% levels of significance, **: See Fig. 1, —: 5% lower limit of Sugi 204, — —: 5% lower limit of Sugi 206, ·····: Characteristic value of S-P-F 204 second class, - ·····: Characteristic value of S-P-F 206 second class.

あり¹⁴⁾、また、シベリア産カラマツによる過去の研究では、材せいによって回帰直線の傾きには差が認められ、同一ヤング係数でも材せいの増加に伴ってMORが低下する傾向があるとの報告もある¹⁵⁾。本研究でスギも同様の傾向があることが分かり、これらの結果から、スギでは同一の材幅で材せいが増加した場合、MOEの増加に伴うMORの増加割合は小さくになると考えられる。

またFig. 3には、スギの5%下限値を実線で、現在の枠組壁工法用製材の主流となっているS-P-F甲種2級の基準強度を破線で、それぞれ204材と206材別に示している。なお5%下限値については、各試験結果から得られた強度分布を正規分布と仮定し、信頼水準75%における95%下側許容限界値とした。S-P-F甲種2級の206材については、木質構造設計基準・同解説の「枠組壁工法用製材の日本農林規格」目視等級製材およびたて継ぎ材の繊維方向特性値に寸法効果係数¹⁶⁾を乗じて求めた（以下Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6も同様）。これを見ると、スギ（204材：23.2 N/mm², 206材：18.3 N/mm²）がS-P-F（204材：21.6 N/mm², 206材：18.1 N/mm²）を上回っている。先述のとおり、スギの目視等級区分結果は80%以上を特級が占めたものの、この実験結果からは、スギはS-P-F甲種2級と概ね同等の曲げ強さを有していると考えられる。

3.2 引張り性能

引張り試験体の材質測定及び試験結果を204材、206材別にTable 2に示す。破壊形態は204材の88.8%、206材の83.3%が節によるものであった。 E_d を比較すると両者に差はほとんどなかったが、 F_t は206材が204材より約12%高く、曲げ試験とは異なる結果となった。またカラマツによる過去の研究においても、材せいが大きくなるほど引張り強さが低下するとの結果が報告されており¹⁷⁾、今回はそれとも異なる結果となったため、以下にこの原因について考察を行った。各試験体の強度に対するそれぞれの

Table 2. The properties of tensile specimens.

		$(g/cm^3)^a)$	MC (%) ^{b)}	ARW (mm) ^{c)}	MKD (mm) ^{d)}		CKD (mm) ^{e)}		E_d (kN/mm ²) ^{f)}	F_t (N/mm ²) ^{g)}
					edge	middle	edge	middle		
204 (n=80)	Average	0.41	12.6	5.3	9.4	10.6	16.4	7.6	7.53	26.6
	CV (%) ^{h)}	10.5	38.9	46.5	90.4	49.8	83.3	128.9	20.9	26.0
206 (n=24)	Average	0.41	11.5	6.1	13.3	10.6	26.8	14.1	7.45	29.8
	CV (%)	9.6	29.0	44.0	106.8	47.3	83.7	65.2	23.4	33.0
Total	Average	0.41	12.3	5.5	10.3	10.6	18.8	9.1	7.51	27.3
	CV (%)	10.2	37.2	46.0	98.5	49.0	88.1	109.9	21.4	28.4

a), b), c), d), e), f), h) See Table 1. ^{g)} Tensile strength parallel to grain.

因子の関係を単相関係数で表したものを Table 3 に示す。 F_t と各節径との関係をみると、 F_t の値が高い206材の方が高い相関を示し、204材はいずれも相関がなかった。一方、破壊形態別に F_t の平均値を比較してみると、節に起因するものは204材が26.2 N/mm²、206材が26.4 N/mm² とほぼ同じであった。これに対し、節以外の健全部で破壊したものは、それぞれ29.9 N/mm²、46.8 N/mm² と大きな差であった。このうち204材で F_t が平均値を下回った試験体の状況を見ると、 E_d が平均の6～7割、ARW が平均の2.4倍、破壊箇所近傍の集中節が平均の2倍以上あり繊維の乱れが大きいなど、いずれにも強度低下につながる因子が認められた。これに対し、206材では健全部で破壊した4本中3本がチャック間はほぼ無節であり、節径合計の平均値を比較すると204材の半分であった。またこれらが全体に占める割合は、204材の約11%に対して206材は約17%と高かった。結果としてこれらが平均値の差につながり、寸法効果が認められなかったのではないかと考えられる。また204材、206材ともに ARW との負の相関が高かったが、これは過去のスギ平割材の引張り試験結果¹⁸⁾と同様であった。

E_d と F_t の関係を Fig. 4 に示す。これを見ると、204材、206材ともに危険率1%の相関が得られている。ただし204材では前述の結果を反映して相関係数はやや低い値であった。また、5%下限値を基準強度と比較してみると、204材はスギ (14.1 N/mm²) が S-P-F (11.4 N/mm²) を上回ったが、206材はスギ (9.0 N/mm²) が S-P-F (9.6 N/mm²) をわずかに下回った。206材の引張り試験体については、チャック切れにより除外したものが8本で全体の25%にもなり試験体数が大幅に減少したことに加え、バラツキも大きかったことなどが影響している

と考えられる。試験に当たっては、あて木をこまめに交換するなどチャック切れの防止には配慮したが、これらを想定して出来るだけ多くの試験体を準備しておくなどの対策が必要である。

3.3 圧縮性能

圧縮試験体の材質測定及び試験結果を204材、206材別に Table 4 に示す。破壊形態は204材については、節が50%、健全部及び不明瞭なものがそれぞれ25%、206材については、節が64.3%、健全部が21.4%、不明瞭なものが14.3%であった。 F_c を比較すると、204材が206材よりわずかに高い値であった。Table 3 において ARW との関係を見ると、引張り試験体と同様に、204材、206材ともに危険率1%の負の相関を示した。

Fig. 4. Relationships between E_d and F_t .
Legend: E_d : See Table 1, F_t : See Table 2, **: See Fig. 1, —, — —, ·····: See Fig. 3.

Table 3. Relationships between strength and each factor (simple correlation coefficient).

		$\rho^a)$	ARW ^{b)}	SG ^{c)}	MKD ^{d)}		CKD ^{e)}		$E_d^f)$	$E_b^g)$	MOE ^{h)}
					edge	middle	edge	middle			
MOR ^{j)}	204	0.094	-0.453**	0.218*	-0.157	-0.206*	-0.333**	-0.135	0.549**	0.553**	0.668**
	206	—	-0.182	-0.202	-0.103	-0.280	-0.273	-0.196	0.379*	0.458*	0.463*
$F_t^j)$	204	0.175	-0.545**	-0.298*	0.076	0.070	0.089	-0.052	0.586**	—	—
	206	0.274	-0.534**	-0.072	-0.318	-0.619**	-0.511**	-0.618**	0.720**	—	—
$F_c^k)$	204	0.125	-0.352**	-0.044	-0.265*	-0.210*	-0.287**	-0.069	0.737**	—	—
	206	0.192	-0.590**	-0.455*	-0.158	-0.280	-0.185	-0.194	0.826**	—	—
$F_s^l)$	204	0.736**	-0.347**	-0.143	—	—	—	—	-0.187	—	—
	206	0.552**	0.133	-0.369	—	—	—	—	-0.079	—	—

a), b), d), e), f), g), h), i) See Table 1. c) Slope of grain. j) See Table 2. k) Compression strength parallel to grain. l) Shear strength.

*: See Fig. 3. **: See Fig. 1.

Table 4. The properties of compression specimens.

		$\rho(\text{g/cm}^3)^{\text{a)}}$	MC(%) ^{b)}	ARW(mm) ^{c)}	MKD(mm) ^{d)}		CKD(mm) ^{e)}		$F_c(\text{N/mm}^2)^{\text{f)}}$
					edge	middle	edge	middle	
204 ($n=92$)	Average	0.41	16.3	4.3	2.5	6.1	5.4	2.6	40.4
	CV(%) ^{g)}	10.6	76.5	42.4	172.9	93.5	173.3	230.1	19.3
206 ($n=28$)	Average	0.40	11.7	5.5	7.0	9.5	15.5	7.5	40.2
	CV(%)	13.6	55.0	33.5	142.8	59.9	132.9	170.5	18.5
Total	Average	0.41	15.3	4.6	3.5	6.9	7.8	3.7	40.3
	CV(%)	11.4	75.5	41.3	179.9	85.0	173.4	222.0	19.0

a), b), c), d), e), g) See Table 1. f) See Table 3.

次に E_d と F_c の関係を Fig. 5 に示す。なお、ここで示す E_d は、圧縮試験体と同じ供試材から採取した曲げ試験体での値を用いている。これを見ると、204材、206材ともに危険率 1% の相関が得られている。また、スギの 5% 下限値 (204材: 26.3 N/mm^2 , 206材: 25.1 N/mm^2) が S-P-F 甲種 2 級の基準強度 (204材: 17.4 N/mm^2 , 206材: 16.7 N/mm^2) を大きく上回っていることから、圧縮強さにおいては、

Fig. 5. Relationships between E_d and F_c .
Legend: E_d : See Table 1, F_c : See Table 3, **: See Fig. 1, —, —, —, —: See Fig. 3.

スギは S-P-F 甲種 2 級と概ね同等以上の性能を有していると考えられる。

3.4 セン断性能

せん断試験体の材質測定及び試験結果を 204 材、206 材別に Table 5 に示す。 F_s の値は、206 材が 204 材より 5% 程度高かった。Table 3 において各因子との相関を見てみると、MOR, F_t 及び F_c は E_d との相関が高かったのに対し、 F_s は E_d (ここでは曲げ試験体の値) との相関はみられず、 ρ との間に危険率 1% の高い相関が得られた。これは、過去のスギラミナのブロックせん断試験において ρ が F_s を最も支配する因子であることが確認されており¹⁹⁾、それと同様の結果であった。

次に ρ と F_s の関係を Fig. 6 に示す。同図をみるとスギの 5% 下限値 (204材: 4.7 N/mm^2 , 206材: 5.2 N/mm^2) が S-P-F 及び W. Cedar の基準せん断強度 (1.8 N/mm^2) を大きく上回っていることから、スギはせん断強さにおいて十分な性能を有していることが確認された。なお、204 材のうち 1 体の F_s がやや低くなっているが、これはこの試験体の ARW が 10.5 mm と最大であり、平均値 (4.4 mm) と比較して 2 倍以上であったことが原因と考えられる。

3.5 強度等級区分による評価

過去に実施された甲種枠組み材曲げ試験において、目視による等級区分と強度による等級区分とでは強度分布が著しく異なり、MOE と MOR との高い相関を利用すれば、目視による測定因子と比較し

Table 5. The properties of shearing specimens.

		$\rho(\text{g/cm}^3)^{\text{a)}}$	MC(%) ^{b)}	ARW(mm) ^{c)}	$F_s(\text{N/mm}^2)^{\text{d)}}$
204 ($n=92$)	Average	0.39	9.4	4.4	8.39
	CV(%) ^{e)}	10.5	18.6	38.2	24.3
206 ($n=28$)	Average	0.39	9.1	4.5	8.81
	CV(%)	12.0	16.4	35.1	21.5
Total	Average	0.39	9.3	4.5	8.49
	CV(%)	10.8	18.1	37.3	23.6

a), b), c), e) See Table 1. d) See Table 3.

Fig. 6. Relationships between ρ and F_s .
 Legend: ρ : See Table 1, F_s : See Table 3, **: See Fig. 1, —, —: See Fig. 3, ---: Characteristic value of S-P-F.

てより高い精度で区分が可能であるとの報告がされている²⁰⁾。そこで、本研究でも同様の傾向が見られるか検証を行った。Table 3において各強度と測定因子の関係をみてみると、MORについては、204材では E_d 、 E_b 及びMOEはいずれも目視などによる他の因子よりも相関係数が高く、危険率1%で高い相関を示している。一方、206材では危険率5%で204材より相関は低かったものの、他の因子とMORとの間には相関があるものは認められなかった。また、 F_t 、 F_c については、204材、206材ともに E_d との間には危険率1%の相関があり、いずれも他の因子より高い相関係数を示した。これらの結果から、等級区分を行う指標としては E_d が他の測定因子よりも有効であることが確認された。これに基づき、曲げ・引張り・圧縮試験体の強度について、木質構造設計基準・同解説の「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級製材の繊維方向特性値²¹⁾に示されたスギの基準弾性係数に従って機械等級区分を行い、目視等級区分と比較することにより、その必要性を検討した。

まず、実験で得られた E_d を基準弾性係数に従って等級区分を行った。等級構成比は、曲げ及び圧縮試験体については、204材ではE110が14.1%、E90が42.4%、E70が30.4%、E50が12.0%、規格外が1.1%で、206材ではE110が3.6%、E90が46.4%、E70が35.7%、E50が14.3%であった。また引張り試験体については204材ではE110が8.8%、E90が35.0%、E70が38.8%、E50が17.5%で、206材ではE110

が8.3%、E90が33.3%、E70が37.5%、E50が20.8%であった。節などの視覚的な因子による目視等級区分とヤング係数による機械等級区分は、直接的には対応していないため単純な比較はできないが、目視等級区分においては204材では80%以上、206材では90%以上を特級が占めることを考慮すると、目視等級区分と機械等級区分で等級ごとの強度分布にかなり違いがあることが推測できる。

次に、各強度について枠組JASによる目視等級、針葉樹構造用製材JASによる E_d を用いた機械等級にそれぞれ区分したものを、MOR、 F_t 及び F_c 別にFig. 7～Fig. 9に示す。なお、目視等級区分の実線はS-P-Fの204材、破線はS-P-Fの206材、機械等級区分の実線はスギ製材の基準強度である。これらの図をみると、目視等級区分では等級の上下に関わらず概ね一定の強度を示している。これに対し、機械等級区分では、すべての強度及び材種において概ね等級の低下に伴って強度も低下していることが分かる。ここで、機械等級区分において各等級間の母平均の差の検定を行った。その結果、MORでは204材のE70とE90、206材のE50とE70（ともに $P < 0.000$ ）、 F_t では204材のE70とE90（ $P < 0.000$ ）、206材のE70とE90（ $P = 0.030$ ）、 F_c では204材のE70とE90（ $P < 0.000$ ）、204材のE90とE110、206材のE70とE90（ともに $P = 0.001$ ）との間にそれぞれ有意差があったが、それ以外の等級間では有意差がなかった。これらの試験体数を比較してみると、有意差があった等級間の方が有意差がなかった等級間よりも多い傾向であった。また5%下限値をみると、 F_c では概ねスギ製材の基準強度を上回っていたが、MORと F_t ではすべて下回った。なお目視等級区分においては、すべての等級間で有意差はなかった。

以上のことから、本研究では、スギ枠組壁工法用製材の等級区分については、目視等級よりも機械等級による方法の方が正確である可能性が示唆された。ただし、等級ごとの試験体数が少なかったことや偏りがあったことで、有意差がなく下限値も低くなった等級が多かったことから、今後試験体を増やして精査する必要がある。これにより製材と同様に樹種毎の機械等級区分が可能になれば、前節の目視等級区分結果と合わせて構造計算への適正な対応が可能となることから、各箇所の応力に見合った部材を効率的に使用することで、スギの枠組壁工法への利用拡大が期待できよう。

Fig. 7. Difference of strength distribution between visual grading and stress grading using E_d in MOR.

Legend: MOR: See Table 1, —: Characteristic value of S-P-F 204, ---: Characteristic value of S-P-F 206, —·—: Characteristic value of Sugi lumber, Error bars: Standard deviation, Under grade: Strength is less than 3rd in visual grading, and one is less than E50 in stress grading using E_d .

Fig. 8. Difference of strength distribution between visual grading and stress grading using E_d in F_t .

Legend: F_t : See Table 2, —, ---, —·—, Error bars: See Fig. 7.

Fig. 9. Difference of strength distribution between visual grading and stress grading using E_d in F_c .

Legend: F_c : See Table 3, —, ---, —·—, Error bars, Under grade: See Fig. 7.

4. 結 論

宮崎県南部地域産スギ丸太から得られた桝組壁工法用製材（204材，206材）について目視等級区分を行った後，曲げ・引張り・圧縮・せん断試験体采取了，その強度性能を調べた。また， E_d による機械等級区分を行い，目視等級区分と比較してその必要性及び有効性を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

1. 目視等級区分の結果，204材では特級が全体の80%，206材では特級が93.3%を占めた。
2. 204材については，曲げ及び引張り部材として使用する場合は，応力が生じる部分の節の場所や大きさ・形状，並びにそれぞれの位置関係に注意する必要がある。
3. MOR, F_t , F_c 及び F_s について，204材ではいずれも5%下限値が現在格付けされている W. Cedar より1ランク上の S-P-F 甲種2級の基準強度を上回っていることから，本実験結果からは，概ねこれと同等以上の強度性能を有していることが分かった。206材では F_t の5%下限値が基準強度をわずかに下回った。
4. E_d を用いた機械等級区分を行った結果，目視等級区分による強度分布との間にかなり違いがあることが推測された。また，機械等級区分ではすべての強度及び材種において，概ね等級の低下に伴って強度も低下していることから，スギ桝組壁工法用製材の等級区分については，目視等級よりも機械等級による方法が有効である可能性が示唆された。

謝 辞

本研究の一部は，林野庁平成21年度補正予算第二号事業（地域利用加速化緊急支援事業2×4住宅部材の開発事業）によって実施した。

また今回の実験は，木脇産業株式会，外山木材株式会社，持永木材株式会社，山佐木材株式会社の方々に協力を得て実施することが出来た。ここに深く謝意を表します。

文 献

- 1) Forestry Agency : http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/22hakusho/pdf/h22hakusyo_5-1.pdf. Accessed June 1, 2011.
- 2) Forestry Agency : <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/saisei/pdf/saisei-plan-honbun.pdf>. Accessed June 1, 2011.
- 3) Forestry Agency : http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/22hakusho/pdf/h22hakusyo_1-2.pdf. Accessed June 1, 2011.
- 4) 国土交通省：“建築着工統計調査報告平成22年計”2011, pp.2-13.
- 5) 山田 稔：木材情報 166, 21-23 (2005).
- 6) 河合 誠：木材工業 60, 143-147 (2005).
- 7) “桝組壁工法用製材の日本農林規格”，農林水産省告示第1084号 (2007).
- 8) 渋谷龍也：木材工業 65, 489-494 (2010).
- 9) 日本ツーバイフォー建築協会：“2002年桝組壁工法建築物構造計算指針”，工業調査会，東京，2002, pp.220-222.
- 10) 日本合板検査会：“平成7年度食品等適正製造基準作成事業報告書・構造用集成材”，2000, pp.41-43.
- 11) 高橋 徹，中山義雄：“木材科学講座3物理”，海青社，大津，1995, pp.148-149.
- 12) たとえば，荒武志朗，森田秀樹：木材学会誌 45, 111-119 (1999).
- 13) 農林水産技術会議事務局：“桝組壁工法のための建築用木材の強度等級区分法確立に関する研究”，1978, p.20.
- 14) 坂田和則：徳島林総研報 29, 48-67 (1992).
- 15) 飯島泰男：富山木試研報 1, 1-36 (1983).
- 16) 日本建築学会：“木質構造設計規準・同解説”，丸善，東京，2006, p.397.
- 17) 日本住宅・木材技術センター：“住宅部材国産化緊急対策事業報告書(1)「桝組壁工法住宅部材国産化」”，1992, p.50.
- 18) 田中 洋，荒武志朗，椎葉 淳：第17回日本木材学会九州支部大会講演集，福岡，2010, pp.15-16.
- 19) 森田秀樹，藤元嘉安，村瀬安英：木材工業 61, 52-57 (2006).
- 20) 杉山正典，平岡厚雄，臼井征雄，長谷川良一，香川紘一郎：岐阜林研報 21, 41-84 (1993).
- 21) 日本建築学会：“木質構造設計規準・同解説”，丸善，東京，2006, p.396.

- 1) Forestry Agency : <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/22hakusho/pdf/h22>