

スギ実大材曲げ性能への木材材質指標の影響[†]

雉子谷 佳 男* 北 原 龍 士*

Effects of Basic Wood Properties on Strength and Stiffness in Bending of *Cryptomeria japonica* Timbers

by

Yoshio KIJIDANI* and Ryushi KITAHARA*

The effect of basic wood properties on strength and stiffness of timber as a full-size member is very different from that of small clear specimen. Recently a number of mechanical tests with timbers have been done. However the aims of those investigations are to get the mechanical data of timbers. Therefore which basic wood property is most effective parameter for the mechanical properties of timbers remains unclear. Especially the effects of anatomical properties of *Cryptomeria japonica* (sugi) timbers have not been studied. In this study, the effect of basic wood properties on strength and stiffness in bending of the timbers (l : 400cm, b : 12cm, h : 21, 24 or 27cm) from sugi trees grown at three different sites in miyazaki district was investigated. Air-dry specific gravity, maximum knot ratio, juvenile wood ratio and ring width in juvenile and mature wood had slight effect or no effect on the mechanical properties of timbers. On the other hand, latewood tracheid length and S₂ microfibril angle strongly affected the mechanical properties of timbers.

Key words : *Cryptomeria japonica*, Timbers, Strength, Stiffness, Tracheid length, S₂ microfibril angle

1 ま え が き

構造用材の許容応力度についてより信頼性の高い数値をもとめるために、実大材の力学試験が北米を中心とした諸外国で盛んに行われてきた。わが国でも、実用的な場面での必要性から、実大材の力学試験が重要であると認識され、一般に市場で流通している製材品などの実大材の力学データが蓄積されつつある。¹⁾

実大材の力学的性能を明らかにすることの重要性は1970年代に Madsen によって指摘され、その際無欠点小試験片の力学的挙動と実大材のそれとは別物である²⁾との考え方が示された。それ以来、北米を中心とする諸外国やわが国でも、その考え方は広く認められてきた。すなわち、実大材では、力学的性能への含水率の影響が小さいことや³⁾視覚的な材質指標にもとづく等級区分が正確にあてはまらない⁴⁾などのことが示された。これらのことは、わが国のスギ実大材でも同様の結果^{5)~10)}が得られている。

ところで、これまでのスギ実大材での研究では、実用場面で必要とされる力学データそのものが重用視されてきた。また、木材材質指標が力学的性能に与える影響については、現場での測定における作業性を重視して、比重や目視での測定が可能な節径比、年輪幅、木理の走行などが主に検討されてきた。その一方で、木材が本来もつ組織・構造的な指標と実大材の力学的性能との関連性については、十分に検討されているとは言い難い。

この研究では、宮崎県産のオビスギ実大材を対象にし

て、それらの力学的性能および各種材質指標を調べるとともに、実大材の力学的性能に影響を与える材質指標を明らかにする。

2 実 験

2・1 供試材

宮崎県内の北部を代表して小丸川流域、中央部の一つ瀬川流域、そして南部の北郷町の3地域で生育した45~46年生のオビスギ品種系の人工造林木から、合計154本の2番玉生材丸太を任意抽出した。これらの生材丸太から、実用場面での利用を考慮に入れて、長さ(繊維方向)約400cm、幅(接線方向)12cm、そしてはりせい(放射方向)を径級によって21、24および27cmの3種類として、心持ち平角材を作製した。製材後、人工乾燥を行い、曲げ試験に供した。試験材154本のうち、6本は人工乾燥の進行を調べるために、全乾法による含水率の測定を行ったので、曲げ試験に用いられた試験材は合計148本であった。試験時の平角材の平均含水率は、21.7%であった。

2・2 力学試験

樹皮付きの生材丸太および乾燥前後の平角材の動的縦ヤング率を、縦振動法(打撃法)で求めた。曲げ試験は木材実大強度試験機(容量50t)で行った。載荷方法は、4点荷重方式で、全スパンを360cm、中央の荷重点間の距離を80cm、そして両支点からそれぞれの荷重点までの距離を140cmとした。スパン中央のたわみ量を測定し、せん断の影響を含んだみかけの曲げヤング率を算出

[†] 原稿受理 平成16年7月14日 Received July 14, 2004

* 正 会 員 宮崎大学農学部森林科学講座 〒889-2192 宮崎市学園木花台西, Dept. of Forest Sci., Miyazaki Univ., Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki, 889-2192

した。また、中央荷重区間のたわみ量の測定から、せん断の影響を含まない真の曲げヤング率を求めた。さらに、曲げ破壊係数およびねばり強さの指標となるテトマイヤー係数を算出した。このテトマイヤー係数は、Table Iに示すように、面積OPCDに対する面積OBCDの比から求めた。なお、曲げ試験の結果には、含水率およびはりせいによる補正を行わなかった。

2・3 材質指標の測定

曲げ試験前に、供試材の木口面で未成熟材部と成熟材部の平均年輪幅を、また中央荷重区間で最大節径比を測定した。なお、未成熟材部は髄から10年輪目までとした。曲げ試験後に、中央荷重区間で破壊の程度が小さい箇所から材質指標の測定のための試料を切り出した。これは中央荷重区間が、試験片の中間部に位置して試験片全体の平均的な材質指標が得られること、そして純粋曲げが行われる区間でもあることを考慮した。それらの試料について、未成熟材率、気乾比重、早材および晩材仮道管の二次壁中層(S₂層)マイクロフィブリル傾角、晩材仮道管長さを測定した。なお、S₂層マイクロフィブリル傾

角と晩材仮道管長さの測定は、供試材30個体のみについて行った。これらの供試材には、みかけの曲げヤング率にもとづいてその値が上位であるもの、中位のもの、下位となるものをそれぞれ10個体、合計30個体を選び出した。そのうち、各産地別の個体数は、一ツ瀬川12個体、小丸川9個体、北郷町9個体であった。S₂層マイクロフィブリル傾角の測定にはヨウ素法を用い、また仮道管長さは解繊処理後、それぞれに6年輪目から木部最外層年輪まで6年ごとに測定を行った。

3 結果と考察

3・1 実大材の曲げ性能

オビスギ丸太材および平角材の力学試験によって得られた結果を、産地別に、Table Iに示す。実大材の力学性能値の結果は、この表に示すように、各産地間でわずかながら差異が認められた。すなわち、みかけの曲げヤング率は、一ツ瀬川流域産材が最も大きな値を示し、つづいて小丸川流域産材、北郷町産材となる。真の曲げヤング率、丸太の動的縦ヤング率でも、同じような傾向が認められた。曲げ破壊係数は、小丸川流域産材が最も大

Table I. Strength, stiffness and basic wood properties of timbers and logs.

Districts	MOR (MPa)	MOEa (GPa)	MOEt (GPa)	DMOE	TM	r	K(%)	PJ(%)	WJ (mm)	WM (mm)	TL (mm)	MFA(L) (degree)	MFA(E) (degree)
Hitotsuse													
Mean	27.4	5.78	6.97	6.08	0.51	0.39	19.9	54.2	7.5	5.0	3.01	17.2	21.5
Max	36.9	7.94	10.31	7.87	0.65	0.46	33.3	70.4	9.4	7.2	3.41	22.7	24.7
Min	14.4	4.05	4.78	4.56	0.42	0.33	9.3	19.1	3.9	3.4	2.84	13.6	17.0
SD	6.1	0.86	1.33	1.11	0.04	0.03	5.7	13.1	1.1	1.0	0.15	2.6	2.4
n	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	12	12	12
Omaru													
Mean	28.3	5.66	6.62	5.58	0.56	0.35	11.9	56.3	7.4	4.7	2.61	17.7	23.5
Max	39.3	7.66	9.67	7.09	0.69	0.39	29.3	73.5	8.8	6.4	3.03	21.8	28.6
Min	20.0	4.33	5.25	4.38	0.47	0.31	4.2	4.1	1.8	3.5	2.18	15.2	17.3
SD	5.0	1.06	0.83	0.63	0.05	0.003	5.8	11.0	1.1	0.8	0.26	2.3	3.7
n	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	9	9	9
Kitago													
Mean	24.9	5.37	6.32	5.37	0.51	0.37	19.5	55.0	7.5	4.3	2.48	20.3	25.6
Max	34.1	6.50	8.43	6.55	0.59	0.42	33.3	67.6	9.3	7.3	3.05	23.4	29.3
Min	17.8	4.21	4.69	4.29	0.45	0.33	0	41.6	6.1	3.0	2.16	13.3	19.7
SD	3.6	0.81	1.10	0.72	0.03	0.02	5.9	6.5	0.7	0.8	0.27	3.2	2.9
n	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	9	9	9
Overall													
Mean	27.0	5.52	6.68	5.73	0.52	0.37	17.1	55.1	7.4	4.7	2.73	18.3	23.3
Max	39.3	7.94	10.31	7.87	0.69	0.46	33.3	73.5	9.4	7.3	3.41	23.4	29.3
Min	14.4	4.05	4.69	4.29	0.42	0.31	0.0	4.1	1.8	3.0	2.16	13.3	17.0
SD	4.4	0.76	1.00	0.71	0.05	0.03	6.9	10.0	1.0	0.9	0.32	2.9	3.4
n	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	30	30	30

MOR: Modulus of rupture, MOEa: Apparent modulus of elasticity,

MOEt: True modulus of elasticity, DMOE: Dynamic modulus of elasticity of logs,

TM: Tetmajer's modulus, TM was calculated by the method shown in right figure,

r: Specific gravity of air-dried wood,

K: Ratio of maximum size of knots, PJ: Percentage of juvenile wood,

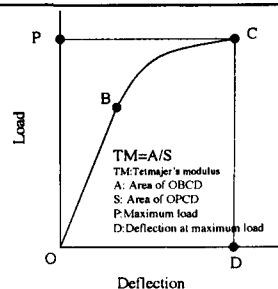
WJ: Ring width of juvenile wood, WM: Ring width of mature wood,

TL: Latewood tracheid length, MFA(L): Microfibril angle of S₂ layer of latewood tracheid,

MFA(E): Microfibril angle of S₂ layer of earlywood tracheid, SD: Standard deviation.

Notes: all properties except DMOE are those of timbers.

TL and MFA are mean value of the rings (ring numbers 6, 12, 18, 24) in selected thirty timbers according to MOEa.



きく、一ツ瀬川流域産材、北郷町産材とつづく。また、ねばり強さを示すテトマイヤー係数でも、小丸川流域産材が最も大きく、一ツ瀬川流域産材と北郷町産材は、同じ値を示した。各産地間の曲げ性能値について有意差検定を行ったところ、曲げヤング率は、一ツ瀬川流域産材と北郷町産材との間に、有意な差が認められた(1%水準)。また、曲げ破壊係数およびねばり強さでも、小丸川流域産材と北郷町産材との間に、有意差が認められた(1%水準)。

以上の結果から、オビスギ平角材の曲げ性能値には、産地によってわずかながらも違いがあることがわかった。とくに、オビスギ品種育成の中心的な地域である北郷町産材では、力学的性能値が小さかった。これに関連して、宮崎県では、一般的に県北産のスギ材が最も強く、ついで県央、そして県南材が弱いと言われている。上述の実験結果は、これを裏付けるものであった。その要因として、同じオビスギ品種系のスギ材でありながら、各産地間での生育環境の違いあるいはオビスギ品種間の材質の差異¹¹⁾などが考えられた。

ところで、丸太の動的縦ヤング率と製材品の静的曲げヤング率との間には高い相関関係が認められることから、丸太の非破壊試験によって製材品の力学的性能値が推定されている。^{7)~10)}この研究で用いた試験材でも、北郷町産材を除く各産地材では、生材丸太の動的縦ヤング率と製材品の静的曲げヤング率との間に、Fig. 1に示すように、高い相関関係を認めた。ところが、同図に示すように、北郷町産材では、その相関関係が極めて低く、丸太

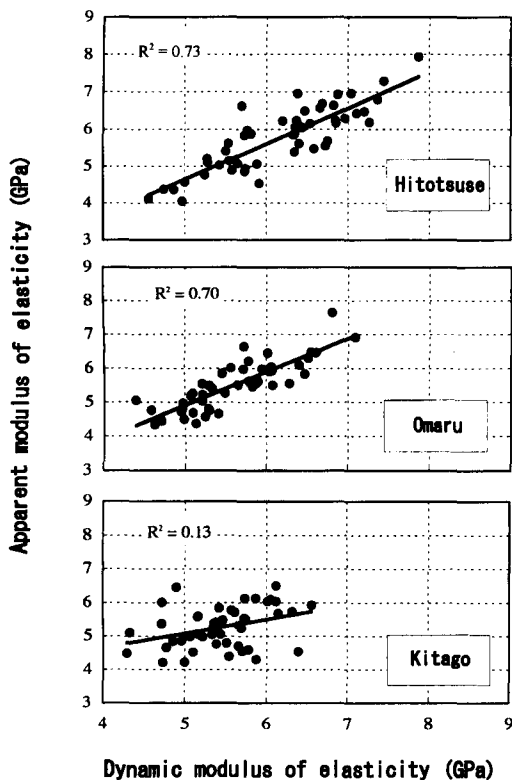


Fig. 1. Relationship between dynamic moduli of elasticity of logs and apparent moduli of elasticity of timbers.

の動的縦ヤング率から平角材の精度の高い曲げ性能値の推定は困難であった。この要因として、つぎのようなことが考えられる。オビスギ15品種について、髓から木部最外層へと至る放射方向での縦圧縮ヤング率の変動を調べた結果によると、急激に変動する品種やゆるやかに変動する品種が存在した。¹¹⁾これら異なるタイプの品種材を丸太から平角材へ製材すると、成熟材部がそのまま残るものと、その一部が切り落とされるものとに別れ、そのときの木材の力学的指標値の現れ方は品種によって大きく異なることが予想された。つまり、丸太からの製材品の木取りの仕方によって、製材品の力学的性能が大きく影響を受ける可能性がある。したがって、異なるタイプの品種が混在する場合には、木取りの仕方によって、丸太の動的縦ヤング率から平角材の曲げヤング率を正確に予測することが困難な場合がある。

3・2 曲げ性能への各種材質指標の影響

前節(3・1節)で得られた実大材曲げ性能値に、どのような材質指標が最も影響を与えるかを検討するために、オビスギ平角材の各種材質指標を産地ごとに調べ、その結果をTable Iに示す。さらに、比重、最大節径比、未成熟材率、成熟および未成熟材部の年輪幅と平角材の力学的性能との関係を、148本すべての試験材について検討を加え、Table IIに示す。

曲げヤング率には気乾比重と成熟材部の平均年輪幅が関与し、ねばり強さには気乾比重と最大節径比が影響を与えているようである。しかし、力学的性質への関与が認められる比重や成熟材部年輪幅、最大節径比では統計的に有意な関係が認められるものの、その決定係数の値が極めて小さかった。それゆえ、前節で明らかになった産地間での力学的性能の違いを、これらの材質指標で明確に説明するには至らなかった。なお、曲げ破壊係数には、相関関係が認められる材質指標が存在しなかった。

ところで、実大材では、これまでも曲げ強さへの含水率の影響が小さい³⁾ことや、目視によって等級区分された実大材の力学性能に違いが認められない⁴⁾ことが報告されてきた。また、断面の大きなスギ平角材でも、曲げ強さへの含水率の影響が小さかった。⁵⁾無欠点小試験片では強度と密度との相関関係が高いものの、実大材では欠

Table II. Coefficient of correlation between mechanical properties and basic wood properties of timbers.

	MOR	MOEa	TM
r	0.08(0.01)	0.26(0.07)	-0.23(0.05)
K	-0.09(0.01)	0.00(0.00)	-0.31(0.10)
PJ	0.03(0.00)	0.02(0.00)	0.18(0.03)
WJ	-0.11(0.01)	-0.19(0.03)	0.05(0.00)
WM	0.01(0.00)	-0.23(0.05)	-0.01(0.00)

Note: MOR, MOEa, TM, r, K, PJ, WJ, WM are the same as Table I.

Coefficient of correlation were obtained in all tested timbers(148samples).

Frame lines mean significant at 1% level.

Squares of coefficient of correlations are also shown in parentheses.

点などの影響で相関が低い⁶⁾加えて、年輪幅や最大節径比は、スギ丸太動的縦ヤング率および製材品の力学的性能との間に、統計的に有意な相関関係が認められるものの、それほど緊密な関係は得られていない^{7)~10)}

以上のことから、上述のこれまでの実大材研究と同様に、比重、節径比、未成熟材率、そして年輪幅などの材質指標が、平角材の力学的性能に与える影響は小さかった。

そこで、つぎに実大材の力学的性能に、組織・構造的な指標の影響が認められるか否かを検討した。2・3節で述べたスギ実大材30個体について、晩材仮道管長さおよびS₂層マイクロフィブリル傾角を測定し、その結果をTable Iに示す。北郷町産材では、他の産地材にくらべて、仮道管長さが短く、しかも早・晩材仮道管のS₂層マイクロフィブリル傾角も大きいことが明らかになった(1%水準)。

さらに、晩材仮道管長さおよびS₂層マイクロフィブリル傾角をはじめとして他の材質指標(30個体分)と力学的性能との関係を、Table IIIに示す。力学的性能への気乾比重、最大節径比、そして成熟材部年輪幅の影響は、相関係数が小さく統計的に有意な関係が認められなかった。一方、仮道管長さおよびS₂層マイクロフィブリル傾角の影響は、相関関係のみならず決定係数の値も大きく、力学的性能に与える極めて重要な因子であることが判明した。とくに、どの材質指標とも相関関係が認められなかった曲げ破壊係数には、早材仮道管S₂層マイクロフィブリル傾角が関与した。

上述の結果から、北郷町産材の曲げ性能値が他産地材に比べて小さかったことの要因として、仮道管長さが短く、しかもS₂層マイクロフィブリル傾角が大きな値を示したことが挙げられる。加えて、このような組織・構造的指標は、オビスギ品種によって大きく異なるために、他の産地材と北郷町産材では植栽されたオビスギ品種が異

なる可能性がある。宮崎県南部地域を中心に植栽されているオビスギ15品種については、筆者らによってすでにその組織・構造的指標が品種ごとに解明されている¹¹⁾すなわち、オビスギ15品種のうち、とくにオビアカやヒダリマキでは晩材仮道管が短く、S₂層マイクロフィブリル傾角が大きい特徴を示した¹¹⁾オビアカは、肥大成長が良好で材色が美しいことからオビスギ品種の代表的な品種であり、北郷町では好んで植栽された可能性が高い。

以上のことがらを勘案すると、オビスギ実大材では、その力学的性能に、節、年輪幅、そして比重などの指標よりも、仮道管長さやマイクロフィブリル傾角など、個々の木材が本来備えている組織・構造的指標の関与が大きかった。加えて、それらの組織・構造的な指標は、実大材の力学的性能値の各産地間でのわずかな差異にも、敏感に影響を与える因子でもあった。

4 結 論

この研究では、宮崎県産オビスギ実大材(平角材)を対象に、各産地ごとに曲げ力学的性能および各種材質指標を調べるとともに、実大材の力学的性能にどのような材質指標が最も影響を与えるか検討を加えた。

各種材質指標のうち、気乾比重、最大節径比、未成熟材率、未成熟材部および成熟材部年輪幅は、実大材の力学的性能に影響を与える主要な因子ではなかった。その一方、組織・構造的指標のうち、晩材仮道管長さおよびS₂層マイクロフィブリル傾角は、実大材の力学的性能に明らかに影響を与えた。

なお、製材品の木取りの仕方によっては、丸太の動的縦ヤング率から製材品の曲げヤング率を正確に予測することが困難な場合もあることが判明した。

参 考 文 献

- 1) 加藤英雄, 木材工業, **57**, 263 (2002).
- 2) B. Madsen, "Structural behaviour of timber", p.1 (1992) Timber Engineering Ltd..
- 3) B. Madsen, Forest Products Journal, **25** (5), 33 (1975).
- 4) B. Madsen, Forest Products Journal, **28** (4), 42 (1978).
- 5) 長尾博文, 木材工業, **51**, 505 (1996).
- 6) 祖父江信夫, 木材工業, **47**, 507 (1992).
- 7) 小泉章夫, 飯島泰男, 佐々木貴信, 川井安生, 岡崎泰男, 中谷 浩, 木材学会誌, **43**, 46 (1997).
- 8) 飯島泰男, 小泉章夫, 岡崎泰男, 佐々木貴信, 中谷 浩, 木材学会誌, **43**, 159 (1997).
- 9) 池田潔彦, 小野和博, 有馬孝禮, 木材工業, **54**, 591 (1999).
- 10) 荒武志郎, 森田秀樹, 木材学会誌, **45**, 111 (1999).
- 11) 雉子谷佳男, 北原龍士, 材料, **52**, 336 (2003).

Table III. Coefficient of correlation between mechanical properties and anatomical wood properties of selected thirty timbers.

	MOR	MOEa	TM
r	0.00(0.00)	0.27(0.07)	-0.30(0.09)
K	-0.11(0.01)	0.28(0.08)	-0.39(0.15)
PJ	-0.22(0.05)	0.08(0.01)	0.11(0.01)
WJ	-0.28(0.08)	-0.10(0.01)	-0.05(0.00)
WM	-0.18(0.03)	-0.38(0.15)	0.31(0.10)
TL	0.25(0.06)	0.72(0.52)	-0.27(0.07)
MFA(L)	-0.35(0.13)	-0.61(0.38)	-0.02(0.00)
MFA(E)	-0.49(0.24)	-0.81(0.66)	0.16(0.02)

Notes: MOR, MOEa, r, K, JP, RW(J), RW(M), TL,

MFA(L), MFA(E) are the same as Table I.

Coefficient of correlation were obtained in selected thirty timbers according to MOEa. Frame lines means significant at 1% level.

Squares of coefficient of correlations are also shown in parentheses.