

論文 (Original Article)

スギとベイツガをたて継ぎしたフィンガージョイント材の曲げ・引張強度特性

林 知行^{1)*}・宮武 敦²⁾

Bending and Tensile Strength Properties of Finger-Jointed Lumber Composed of Sugi and Western hemlock

HAYASHI Tomoyuki^{1)*} and MIYATAKE Atushi²⁾

Abstract

To investigate the strength properties of finger-jointed lumber composed of two species of lumber, bending and tensile tests were made on Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don), Western hemlock (*Tsuga heterophylla* Sarg.) and their composite specimens. After measuring the modulus of elasticity (MOE), each lumber was cross-cut at the center, and the divided parts were finger-jointed (Homogeneous specimens). After testing in tension and bending for the homogeneous specimens, the damaged parts of the specimens were cut and removed. Then new specimens composed of the two parts with different species (Composite specimens) were prepared and tested in the same way. Strength properties of composite specimen were lower than the average of two kinds of homogeneous specimen in modulus of rupture and tensile strength. "Average model" assuming that the strength properties of composite specimen were an average of the two data, could not be used to account for such strength property. Thus, we proposed "Equivalent linear regression line model" converting the test data of Western hemlock to equivalent Sugi's data. This probabilistic model estimated the average of strength properties of composite specimen properly.

Key words : finger-joint, bending strength, tensile strength, sugi, western hemlock

要旨

異なった2樹種をフィンガージョイントした材の強度特性を検討するため、スギとベイツガをたて継ぎしたフィンガージョイント材の曲げ・引張強度試験を行った。曲げヤング係数(MOE)を測定した後、各試験体を中央で切断し、両部材を再びフィンガージョイントした(等質試験体)。この試験体を曲げ・引張試験した後、破壊した部分を削除した。その後、2種類の樹種をフィンガージョイントし(異樹種試験体)、同様に試験した。異樹種試験体の曲げ強度(MOR)と引張強度は、2種類の等質試験体の平均値より低かった。異樹種試験体の強度が2種類の等質試験体の平均となると仮定した「平均値モデル」はその現象を説明することができなかった。そこで、ベイツガのデータを等価なスギのデータに置き換える「等価回帰直線モデル」を提案した。この確率モデルは、異樹種試験体の強度分布の平均値を上手く予想することができた。

キーワード : フィンガージョイント、曲げ強度、引張強度、スギ、ベイツガ

1 緒言

フィンガージョイントの主な目的は、短尺材を長尺にすること、節などの欠点を除去すること、ねじれや曲りを矯正することである(林, 1998)。一般に、接合される2材は同種の材であるが、異樹種同士の接合にもフィンガージョイントは適用可能である。例えば、家具構

造における部材接合にフィンガークットされた木製のコネクターを使う場合(渡辺ら, 1981)などはこれに相当する。

このような異樹種接合の技術は、スギのように強度特性の比較的低い材の補強や高付加価値化に応用が可能である。例えばトラスでめり込みの生じやすい部分のみを他樹種に置き換えたり、間柱の下部のみを防腐処理木材

原稿受付:平成16年1月8日 Received Jan. 8, 2004 原稿受理:平成16年4月23日 Accepted Apr. 23, 2004

* 森林総合研究所構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: tomoyuki@ffpri.affrc.go.jp

1) 森林総合研究所構造利用研究領域 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所複合材料研究領域 Department of Wood-Based Materials, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

やヒバに置き換えたりといったように、様々な応用方法が考えられる。

ただ現在までのところ、異樹種接合の応用例は少なく、必然的にその強度発現機構はほとんど検討されていない。

星、林は、前報（星ら、1991）および前々報（星ら、1993）で、異なる *MOE*（曲げヤング係数）をもつ材をフィンガージョイントした材の曲げおよび引張試験を行い、その強度特性が両者の中間的な値となることを明らかにした。また、盛田らも異なる *MOE* をもつラミナをフィンガージョイントした材の引張試験を行い、同様の結果を得ている（盛田ら、2001）。しかしながら、これらはいずれも同樹種の材同士をフィンガージョイントした場合の結果であって、強度特性の異なる異樹種を接合した場合も同様の傾向を示すかどうかは明らかではない。

そこで本研究では、スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) とベイツガ Western hemlock (*Tsuga heterophylla* Sarg.) をフィンガージョイントでたて継ぎした接合部について曲げ・引張試験を行い、その強度特性を検討した。また同時に、もともと1本であった材を切断した後にたて継ぎした試験体（同質試験体）の強度特性データから、異樹種を接合した試験体の強度分布を予測するための確率モデルについても検討した。なお、試験体には前報（星ら、1991）および前々報（星ら、1993）で使用した材から破壊部分を除去したものをを用いた。このため、前報および前々報で得られた同質試験体のデータも、本研究の考察に用いた。

2 強度特性モデル

先に述べたように、同樹種で異なる *MOE* をもつ材をフィンガージョイントした接合部では、*MOE* のみならず、*MOR*（曲げ強度）や *TS*（引張強度）も、接合した2材の中間的な値となる（星ら、1991）。この接合部の強度特性は、単純な直列の最弱リンクモデルでは説明できない。なぜなら、実大フィンガージョイントの破壊モードは単純ではなく、歯の付け根の破壊、フィンガーの抜け、晩材部みの抜け、フィンガージョイント中央部の破壊などが複雑に組み合わされ、特にスギでは早晚材の差が大きいことや年輪傾角などの影響もあって、破壊のモードと強度との関係が明確でないからである。

もちろん、単純な歯の付け根の破壊のみというような破壊形態も観察されるが、いずれにしても、破壊のモードが単一でなく複合的であるため、単純な最弱リンクモデルの適用は困難である。そこで、この特性を説明する力学モデルとして次のような非常に単純な平均値モデルが提案されている。

異なる *MOE* をもつ材をフィンガージョイントした接合部の強度特性が、接合した2材の中間的な値となる

という現象を巨視的に説明するメカニズムとしては、強度特性の低いフィンガー部が強度特性の高いフィンガー部によって補強され、その結果たて継ぎ材としての強度特性が両者の中間的な値になるというモデルが考えられる。このため、前報および前々報では、接合されたフィンガージョイント部の強度は接合される両者の平均値に近似すると仮定した平均値モデルが提案された (Fig.1)。

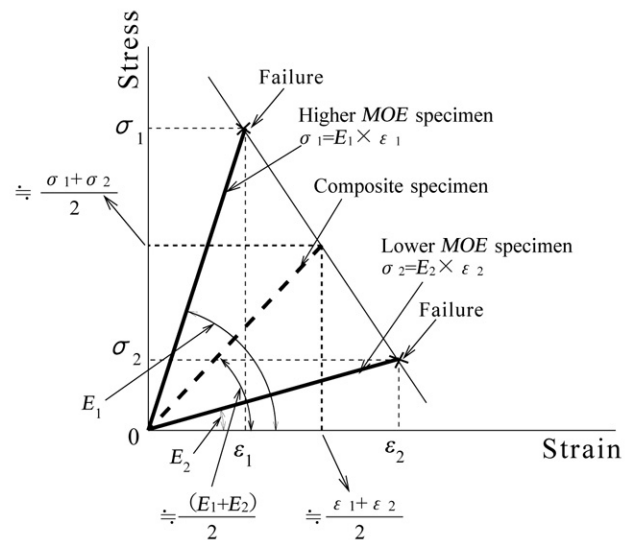


Fig.1 Schematics of an average model for the strength of finger joint composed of two members with different *MOE*.

先にも説明したようにフィンガージョイントの破壊形態は単純ではなく、付け根の破壊、フィンガーの引き抜けあるいはその両者の複合形といったように様々であるが、上で述べたように応力 (σ) - ひずみ (ϵ) 曲線は破壊寸前に至るまで線形を示すものが多い（星ら、1991）。したがって、同一の *MOE* を有する2材を接合した場合（同質材と呼ぶ）、応力 (σ) とひずみ (ϵ) の関係はヤング係数 (E) を傾きとした1次式で表される。

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (1)$$

なお、 E が高いほど破壊ひずみは小さくなる傾向にある（星ら、1991）。

異なる *MOE* を有する2材を接合した場合（異質材と呼ぶ）、フィンガージョイント部近辺のヤング係数 (E) は両者の平均値に近似し、

$$E \approx (E_1 + E_2) / 2 \quad (2)$$

となる。なお、添え字は接合される2材のどちらかであることを意味する。

平均値モデルでは、たて継ぎ材の最大ひずみ (ϵ_{\max}) が、

$$\epsilon_{\max} \approx (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2 \quad (3)$$

の時に破壊し、その強度（最大応力： σ_{\max} ）は

$$\sigma_{\max} \approx (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 \quad (4)$$

となると仮定するものである。

3 実験方法

3・1 供試材

供試材には人工乾燥された茨城県産スギ平割材とベイツガの2×4ディメンションランバーを用いた。まず、小荷重法によりフラットワイズ方向の曲げヤング係数(MOE)を求めた。次に、MOEの小さい方から順位を付け、奇数番号の試験材を引張試験用、偶数番号を曲げ試験用とした。なお試験材の平均気乾比重は0.38(スギ)および0.44(ベイツガ)、含水率は10～12%であった。

この試験体(長さ400cm)から大きな欠点を含まないよう考慮しながら端部を切除した後、中央でクロスカットしてたて継ぎを行なった。

この試験体を同質試験体と呼ぶ。この同質試験体を曲げ・引張試験した後、破壊部分を削除して、再度フィンガー加工を行った。次いでMOEの異なるもの同士をたて継ぎし(異質試験体)、これを同様に曲げ・引張試験した(ここまでの前報および前々報)。

その後さらに同様の加工を行ない、スギとベイツガをランダムに組み合わせてたて継ぎを行った。

試験体の作成手順と試験手順はFig. 2に示すように、同質試験体作成→同質試験体の試験→破壊箇所除去→異質試験体作成→異質試験体の試験(ここまでの前報および前々報)→破壊箇所除去→異樹種試験体作成→異樹種試験体の試験の順とした。

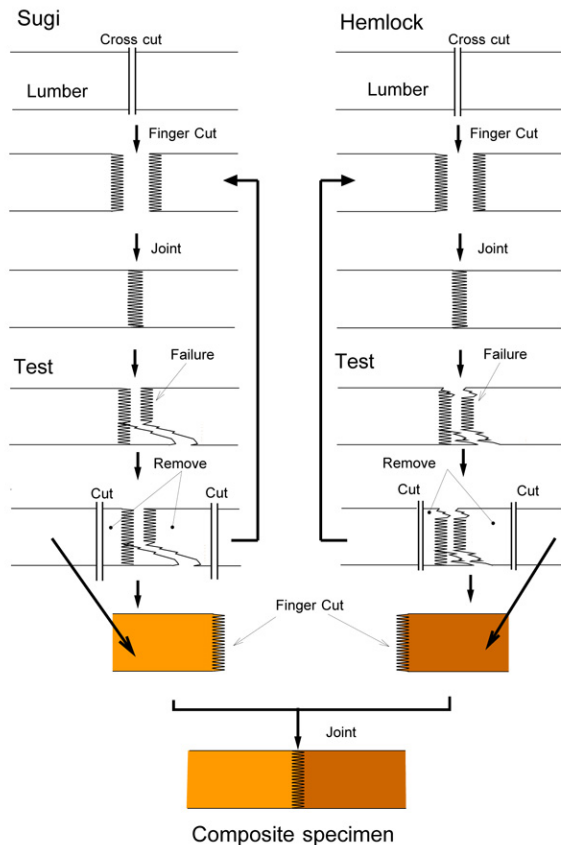


Fig.2 Schematics of specimen preparation

なお、異樹種試験体の寸法は厚さ35mm、幅80mm、長さ1350mm(曲げ用)、1800mm(引張用)であった。また試験体数は、曲げ(57体)、引張(49体)であった。

3・2 たて継ぎ

フィンガーの形状および寸法をFig. 3に示す。このカッターは構造材用で $t_1 = 0.85$ 、 $t_2 = 0.65$ 、 $p = 5.0$ 、 $l = 17.5$ mm、 $\theta = 1/10$ に設定されている。フィンガー加工機の条件は、主軸回転数3000rpm、超硬付刃4枚刃スパイラルセット、送り速度約10m/min、垂直型加工(材幅の広い面に歯型が見えるもの)とした。接合条件は、レゾルシノール樹脂接着剤+硬化剤(15%) + 増量剤(5%)、両面塗布、エンドプレッシャー70kgf/cm²、養生期間は1週間以上とした。

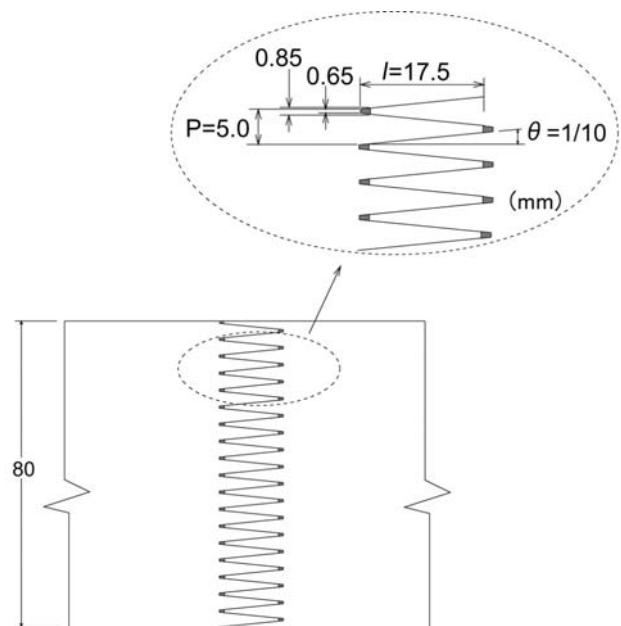


Fig.3 Schematics of a finger joint

3・3 強度試験

1) 曲げ試験、容量10tonの万能試験機を用いて、スパン126cm、3等分4点荷重でフラットワイズ方向の曲げ試験を行ない、供試材の曲げ強度(MOR)と全スパン(支点間)の曲げヤング係数(MOE)を求めた。なお破壊までに要した時間は2～4分であった。

2) 引張試験、容量40tonの引張保証荷重試験機(チャック間距離120cm)を用いて、引張試験を行ない、引張強度(TS)を求めた。本試験機では機構上、荷重の方式が荷重速度一定あるいは変形速度一定のどちらでもなく、また歪量の正確な測定も困難であるため、引張のヤング係数については測定を行なわなかった。なお破壊までに要した時間は1～2分であった。

4. 結果と考察

4・1 同質試験体の結果

まず、前報および前々報で明らかになった同質試験体の強度特性をまとめて Table 1 に示す。ただし、この結果にはジョイント以外で破壊した試験体のデータは含まれていない。

Table 1. Strength properties of homogeneous specimens

	Sugi		W. hemlock	
	Ave.	CV	Ave.	CV
MOE (GPa)	8.36	17.7%	13.1	17.5%
MOR (MPa)	37.5	16.3%	61.6	17.5%
TS (MPa)	28.5	22.3%	47.4	25.4%

Ave.:Average, CV:Coefficient of variation

Number of specimens:75

この表から明らかなように、ベイツガは曲げヤング係数 (MOE)、曲げ強度 (MOR)、引張強度 (TS) のいずれにおいても、スギより高い値を示した。平均値でみるとベイツガの方が MOE については約 60%、MOR と TS については約 70%、それぞれスギよりも大きな値を示した。ただし変動係数はスギとほぼ同等であった。なお TS と MOR の平均値の比 (TS / MOR) は、ベイツガで 76.9%、スギで 76.0% となり、一般的な素材のそれに比べて比較的高い値となった。

なお、曲げの場合ほとんどの試験体がフィンガージョイント部分で破壊を生じた。一方、引張では全体の 2 割程度の試験体で節や目切れから破壊が生じた。

4・2 異樹種試験体の曲げ試験結果

異樹種試験体の曲げ試験における試験体の破壊はすべてスギ側のフィンガージョイントが関与した形態であっ

た。ジョイント以外で木部のみが破壊する形態は観察されなかった。

応力-ひずみ曲線における比例限度力は明確ではなかったが、破壊応力のおよそ 80~95% 程度の値となった。ただ、比例限を越えても曲線の傾きが大きく減少することはなく、最大荷重に近いところまで線形に近い関係を示すものがほとんどであった。

異樹種試験体の MOE を、たて継ぎ前におけるスギおよびベイツガの MOE の平均値と比較すると、平均値で 96.2% 変動係数 8.73% となった。この結果は前報、前々報の結果と同様であり、たて継ぎによる MOE の変化はわずかであった。

同質試験体および異樹種試験体の MOR の一覧を Table 2 に示す。なおこの中で同質試験体の値が Table 1 とわずかに異なっているのは、同質試験体のうち、過去の実験の荷重履歴の影響を受けて節近辺にわれなどが生じているものを除外したため、すなわち同質試験体のすべてを異樹種試験体に利用しなかったためである。

Table2. Summary of the modulus of rupture

	(MPa)		
MOR	Sugi	W. hemlock	Composite
Average	37.6	60.0	41.3
SD	6.61	9.32	7.41
CV	17.6%	15.5%	17.9%

SD:Standard deviation, CV:Coefficient of variation

Number of specimens:57

Table 2 から明らかなように異樹種試験体の MOR の平均値は 41.3 MPa であり、スギとベイツガの中間的な値を示してはいるものの、両者の平均値 (48.8 MPa) よりも明らかに低い。したがって、異樹種試験体に平均値

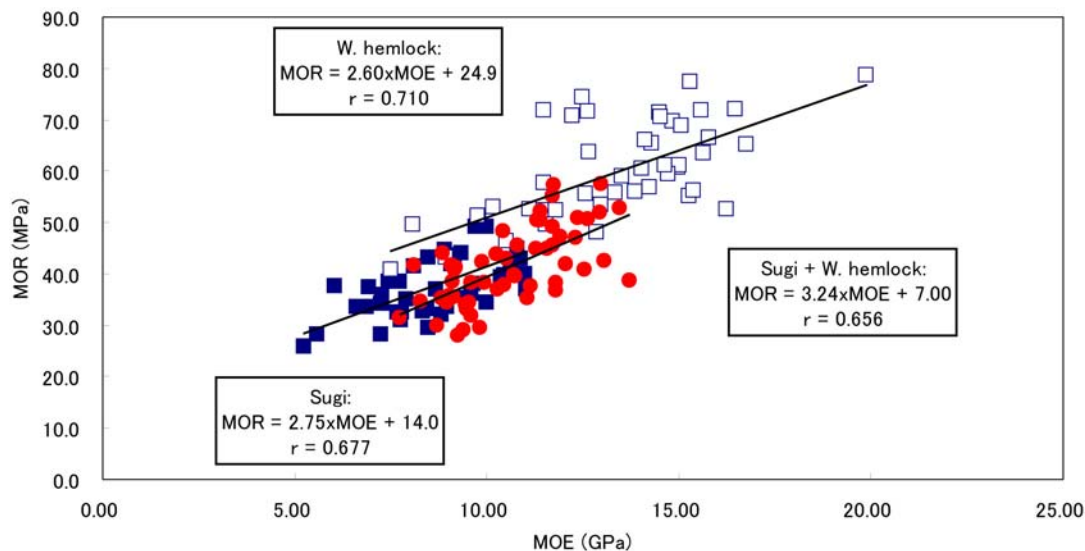


Fig.4 Relationship between modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) for the specimens
Legend: ■ :Sugi, □ : W. hemlock, ● : Composite

モデルを適用することができないことは明らかである。

Fig. 4 に異樹種試験体の *MOE* と *MOR* の関係を示す。なお、図中には比較のために前報および前々報で得られたスギとベイツガの同質試験体のデータも図示した。

図から明らかなように、ベイツとスギの回帰直線は明らかに異なっているが、スギと異樹種試験体のそれとはよく似た傾向を示している。

4・3 異樹種試験体の引張試験結果

引張試験の破壊形態も曲げの場合と同様に、スギ側のフィンガージョイントが関与した形態で生じ、ジョイント以外の木部のみでの破壊は生じなかった。

同質試験体および異樹種試験体の *TS* の一覧を Table 3 に示す。曲げの場合と同様に異樹種試験体の *TS* の平均値は 33.3 MPa であり、スギとベイツガの中間的な値を示しているが、両者の平均値 (38.5 MPa) よりも明らかに低い。したがって平均値モデルを適用できないことも曲げの場合と同様である。

Table 3. Summary of the tensile strength

	(MPa)		
TS	Sugi	W. hemlock	Composite
Average	28.9	48.1	33.3
SD	6.04	12.2	6.30
CV	20.9%	25.3%	18.9%

SD:Standard deviation, CV:Coefficient of variation
Number of specimens:49

Fig. 5 に異樹種試験体の *MOE* と *TS* の関係を示す。なお、*MOE* は小荷重法により求めたスギおよびベイツガの平均値である。

回帰直線の傾向は、曲げの場合と同様に、ベイツと

スギの回帰直線が明らかに異なっているが、スギと異樹種試験体のそれとはよく似た傾向を示し、スギの回帰直線の延長線上に異樹種試験体のそれが重なるような傾向を示している。

4・4 等価回帰直線モデル

上のことから、異樹種試験体においては、*MOE* に関して平均値モデルが適用できるが、*MOR* と *TS* に関しては、前報や前々報における異質試験体のように、平均値モデルを適用することができないことが明らかになった。すなわち、Fig. 6 の a) のように、異質体ではそれぞれ、平均値モデルを適用することが可能であるのに、Fig. 6 の b) のように、異樹種では不可能となるわけである。

強度の予測に適用できるモデルがなければ、異質体の *MOR* と *TS* を大まかにでも予測することができない。また、逆に求められる強度特性が得られるまで、実大実験を何度も行って、試行錯誤を繰り返さなければならなくなる。

そこで、品質管理によく用いられる同質試験体の統計データから異質体の *MOR* と *TS* を推測できるようなモデルを検討した。ここでは、Fig. 6 の c) に示すように、ある *MOE* におけるベイツガ同質体のデータを同じ *MOE* をもつスギ同質体のデータに換算して等価強度値を求め、同じ樹種同士の接合と等価にすれば、平均値モデルが適用できるのではないかと考えた。もちろん、2節で述べたように ϵ_{\max} は樹種やフィンガージョイントの加工法など様々な因子によって異なるとともに、同一条件下でも大きなバラツキを持った確率変数である。したがって、データの換算には、バラツキを考慮しなければならない。このため、回帰直線を利用し、次のような方法でベイツガの ϵ_{\max} を同じ *MOE* をもつスギの ϵ_{\max} に換算し、ベイツガのスギに対する等価強度値を求めた。

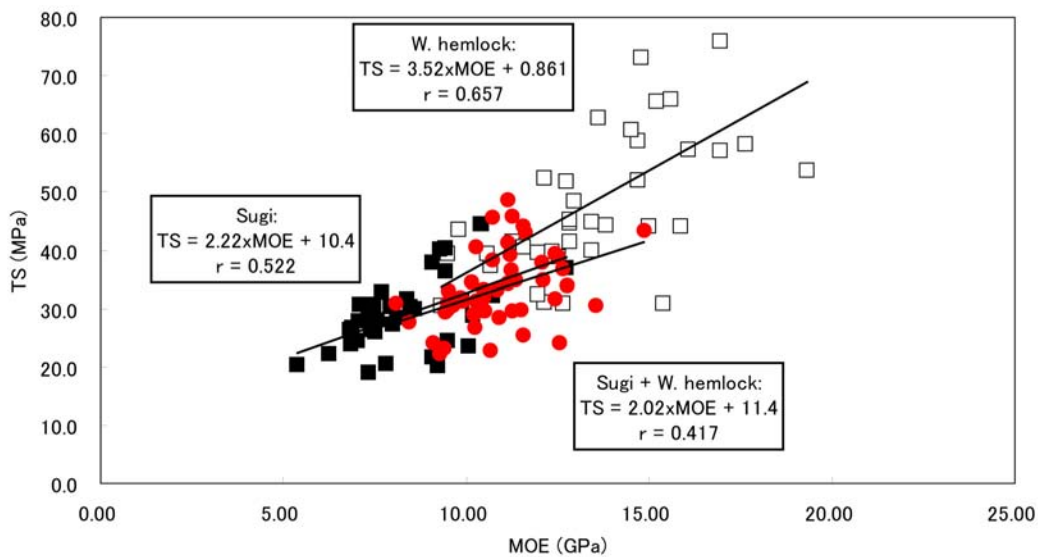


Fig.5 Relationship between modulus of elasticity (*MOE*) and tensile strength (*TS*).
Legend: ■ :Sugi, □ : W. hemlock, ● : Composite

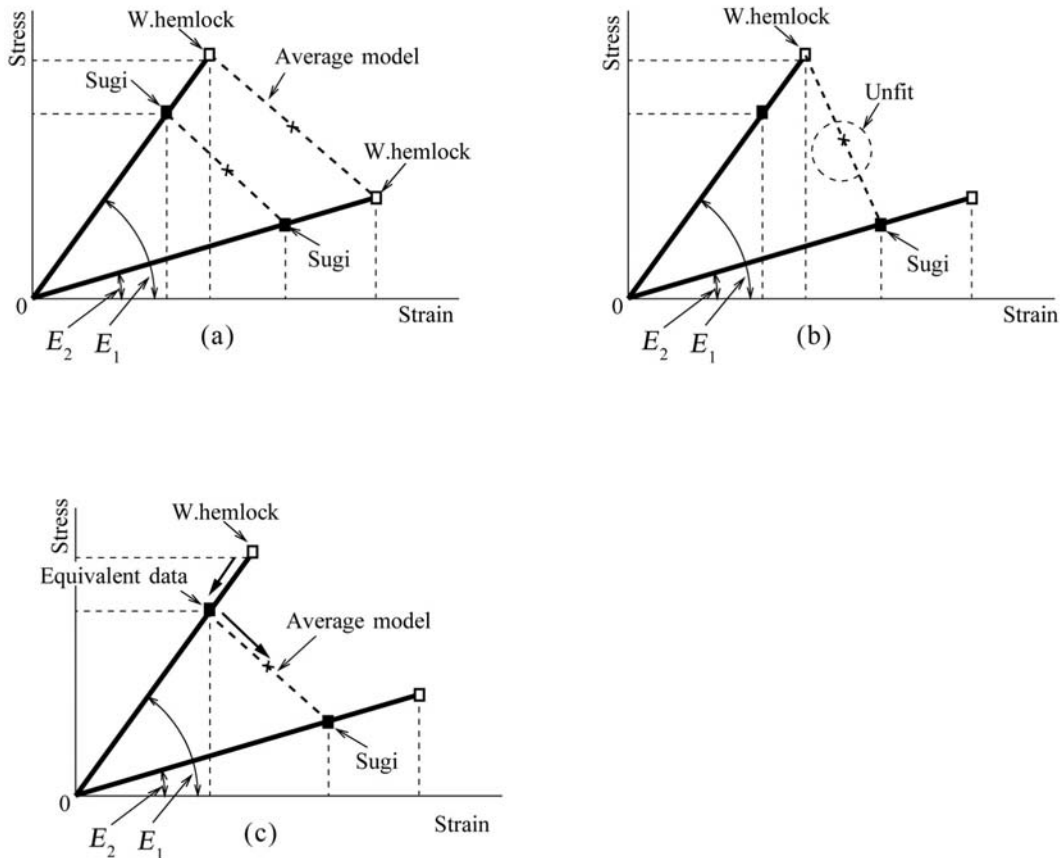


Fig.6 Schematics of an conversion of real data to the equivalent data, and application of an average model.

- ①スギおよびベイツガそれぞれについて一般的な回帰式をあてはめ、回帰式の標準誤差 (S_e) を求める (Fig. 4 および Fig. 5)。ここで、スギの S_e を S_{es} 、ベイツガのそれを S_{eh} とする。
- ②ベイツガの各プロット (E_i, σ_i) において、回帰直線との距離 (誤差: e_h) を求め、ベイツガの標準誤差 (S_{eh}) との比 (e_h / S_{eh}) を計算する。
- ③ E_i をスギの回帰式に代入し、スギの σ_i を求める。
- ④スギの標準誤差 S_{es} に、先に求めた (e_h / S_{eh}) を乗じた値をスギの誤差 e_s とする。この値をスギの σ_i に、加算し、これをベイツガのスギに対する等価強度値とする。

この関係を模式図で表すと、Fig. 7 のようになる。図からも明らかなように、この換算方法はベイツガのすべてのプロットをスギの相関図上に移動することを意味している。

このようにして得られたベイツガの等価強度値データとスギのデータに平均値モデルを適用して、異樹種試験体の強度をシミュレートした。ただし、MOE の平均値が予測値の 96.2% であったことを考慮して強度値をモデルで得られた値の 96.2% にそれぞれ補正した。以上のモデルを等価回帰直線モデルと呼ぶ。

実際の試験結果と等価回帰直線モデルによりシミュレーションした結果を Table 4 に示す。

この表からも明らかなように両者の平均値はほぼ近似

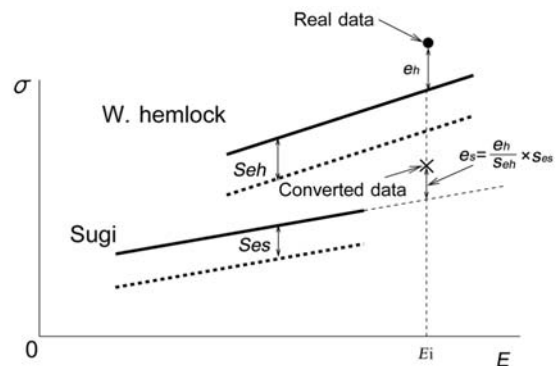


Fig.7 Data conversion in the equivalent linear regression line model

- e_h : Error from the regression line of W.hemlock
- e_s : Error from the regression line of Sugi
- S_{eh} : Standard error of W.hemlock specimen
- S_{es} : Standard error of Sugi specimen

Table4. Comparison of the testing data and simulated data obtained by the equivalent linear regression line model.

	(MPa)			
	MOR	Simulated MOR	TS	Simulated TS
Ave.	41.3	42.7	33.3	33.7
SD	7.41	4.79	6.30	4.59
CV	17.9%	11.2%	18.9%	13.6%

しているが、モデルによる予測の方が幾分小さいバラツキを示している。

このモデルの適用性については、今後いくつかの樹種の組み合わせについて検討する必要があるが、一般に品質管理によく用いられる同質試験体の統計データがあれば、実大実験を繰り返さなくても異樹種試験体の強度分布特性を予測できることは、工程管理上意義深いと言える。

5. 結言

スギとベイツガをフィンガージョイントでたて継ぎした接合部について曲げ・引張試験を行ない、その強度特性を検討した。異樹種試験体の *MOE* については、単純な平均値モデルが適用できるが、*MOR* と *TS* については、値が強度の低いスギの方に近づくため、単純な平均値モデルが適用できないことが明らかになった。

そこで、回帰直線を利用して、ある *MOE* におけるベイツガの破壊ひずみを、同じ *MOE* をもつスギの破壊ひ

ずみに換算し、その後、平均値モデルと同様の処理を行う等価回帰直線モデルを考案し、シミュレーションを行った。

その結果、この等価回帰直線モデルは強度特性分布の予測手法としては幾分バラツキを小さく予測するものの、平均値をほぼ正確に予測することができるため、異樹種同士をフィンガージョイントするときの強度予測に用いることが可能であることが明らかになった。

参考文献

- 林 知行 (1998) “高信頼性木質建材「エンジニアードウッド」”, 日刊木材新聞社, p.83.
渡辺 昇・関谷 武 (1981) 木材工業, **36**, 190-193.
星 通・林 知行 (1991) 木材学会誌, **37**, 194-199.
星 通・林 知行 (1993) 木材工業, **38**, 118-121.
盛田貴雄・藤田和彦・吉村秀幸・五島千津子・林 知行・飯島泰男 (2001) 日本木材加工技術協会年次大会要旨集, 36-37.