HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道産各種広葉樹材による集成材の研究(第1報)：ダケカンバ，シナノキ，ヤマハンノキ，およびハルニレ材による通直集成材
Author(s)	矢沢，亀吉；宮島，寛；大戸，進 他
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告，23(1)，45-82
Issue Date	1964-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20832
Type	departmental bulletin paper
File Information	23(1)_P45-82.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道産各種広葉樹材による集成材の研究 (第1報)

ダケカンバ，シナノキ，ヤマハンノキおよびハルニレ材による通直集成材

矢沢亀吉*
宮島寛
大戸進
神田栄夫
和泉田満

Studies on the Laminated Woods Made from Various Hardwoods Grown in Hokkaido (Report 1)

Straight Laminated Wooden Beams Made from Dakekanba (*Betula* sp.), Shinanoki (*Tilia* sp.), Yamahan-noki (*Alnus* sp.) and Harunire (*Ulmus* sp.)

By

Kamekichi YAZAWA, Hiroshi MIYAJIMA,
Susumu OTO, Hideo KODA
and Mitsuru IZUMIDA

目　次

緒　言 …… 46
材料および方法 …… 47
1. ラミナの調製 …… 47
2. ラミナの曲げヤング係数の測定および組合せ …… 49
3. 集成材の製造 …… 51
4. 小型無欠点試験片の強度試験 …… 51
5. 集成材の強度試験 …… 51
結果および考察 …… 52

* 矢沢亀吉　北海道大学農学部林産学科　教授　林学博士
宮島　寛　北海道大学農学部林産学科　助手　林学博士
大戸　進　三井木材工業株式会社名古屋工場次長 (当時 同砂川工場次長)
神田栄夫　三井木材工業株式会社砂川工場 (当時 北海道大学農学部林産学科学生)
和泉田満　三菱商事株式会社 (当時 北海道大学農学部林産学科学生)

1. 小型無欠点試験片の強度試験結果 …… 52
2. 集成木材梁の中立軸の位置およびヤング係数の計算 …… 53
3. 集成材の強度試験結果 …… 55
4. ヤング係数における計算値と実験値の比較 …… 63
5. 集成材の比重と強度との関係 …… 65
6. ヤング係数による強度推定 …… 67
結　　言 …… 71
文　　献 …… 72
Summary …… 73
付　　錄 …… 76
1. 小型無欠点試験片の強度試験結果 …… 77
2. ラミナの性質 …… 79

緒　　言

本道は過去の乱伐のため優良大径木がいちじるしく減少するとともに，最近は皆伐法の採用によりいわゆる低質小径の広葉樹材が多額に生産されつつある。しかるに本道ではこの種の広葉樹材についての材質ならびに各種加工利用方法に関する研究は充分なされているとはいえない。それで著者らはこれら広葉樹材の適切な合理的利用を推進するための基礎的指針の一助とするためこの研究に着手した次第である。

ここに報告するのは，上述の研究の一部として，昭和36年度に行なった広葉樹材による通直集成材に関するものである。この研究において，強度の比較的小さいものとしてシナノキ，ヤマハンノキ，強度の大きいものとしてダケカンバ，またその偏異の大きいものとしてハルニレをえらび，各単一樹種のみの集成材，強度の大きいダケカンバ材を表面材とした集成材およびハルニレ材ではヤング係数の大きいものを表面材としたものを作製して，それぞれ曲げおよび圧縮試験を行なった。

この研究において，集成材作製前に各ラミナについて，一枚ずつ中央部を手さげ式ばねばかりで引張り，たわみを与えるという極めて簡易な方法で，曲げヤング係数を測定して，集成材作製の組合せをきめた。またそのヤング係数から，集成材梁としておよび集成材短柱としてのヤング係数を計算で求め，それぞれの実験値との比較を行なった。さらにその計算値によって集成材の曲げ強さ，圧縮強さの概略を知りうるかどうかも検討した。

ここに試験した集成材は三井木材工業株式会社砂川工場の設備をつかって作製したもので，その際，同工場長尾藤一行氏，製材加工課長野田祐一氏，集成材課長清野喜久弥氏，研究室後藤康方氏らの助言と協力をえた。ここに謝意を表する。

なお，この論文は昭和36年度に文部省科学試験研究費補助金を受けた「北海道産低質小径広葉材の材質ならびにその加工利用法に関する研究」業績の一部である。

材料および方法

1. ラミナの調製

集成材製造に用いたラミナはつぎの4樹種であり，本文中での記号も合せ示す。

和　名	学　名	記　号
ダケカンバ	*Betula ermani* CHAM.	B
シナノキ	*Tilia japonica* SIMK.	T
ヤマハンノキ	*Alnus hirsuta* TURCZ.	A
ハルニレ	*Ulmus davidiana* PLANCHON var. *japonica* NAKAI	U

これらの原木はすべて道有林青山事業区19林班産で，末口直径30 cm以下のものである。ラミナ原板は三井木材工業株式会社砂川工場において床板原板として製材されたもののなかから欠点の少ない優良なものを選んだ。これらを人工乾燥によって集成材製造前の含水率を9～12%とした。人工乾燥スケジュールの1例としてハルニレ材乾燥の場合を図1に示す。他樹種材についても乾燥スケジュールはほぼ同じである。集成材製造前の含水率として小型無欠点試験片(後述する)の含水率を，また集成材の強度試験終了直後の含水率として各ラミナについて求めたものを一括して表1にかかげる。

この表の平均値についてみると，製造前と試験後の含水率はそれぞれ平均11.2%，11.6%で大差がないことがわかる。なお最大値においては試験後の方がわずかに大きいがこの含水率14～15%のラミナはほとんど表面にはられたものでその含水率がやや大きい原因は製造後の吸湿(集成材の製造は1961年8月上旬，試験は同年10月)によるということも考えられる。

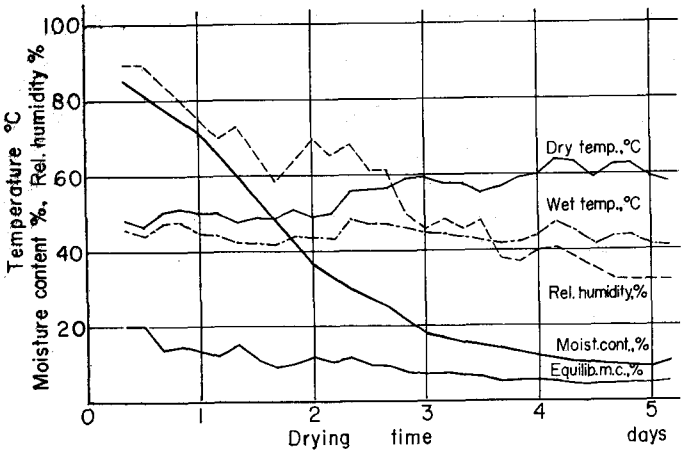

図1.　人工乾燥スケジュール (ハルニレ材)

Fig. 1.　Kiln drying-schedule (*Ulmus* sp. wood)

表1. 小型無欠点試験片（集成材製造前）とラミナ（試験後）の含水率

Table 1. Moisture content of small clear specimens (before the fabrication) and laminae (after the test) in percent of dry weight

Species	M.C. of small specimens, %			M.C. of laminae, %		
	Min.	Av.	Max.	Min.	Av.	Max.
Dakekanba	11.5	12.4	14.1	9.8	12.0	14.2
Shinanoki	8.8	9.9	11.1	9.4	11.0	12.2
Yamahan-noki	11.1	12.6	13.0	9.0	12.2	15.2
Harunire	9.5	10.4	10.9	9.3	11.1	14.9
All	8.8	11.2	14.1	9.0	11.6	15.2

乾燥終了後の材を幅12 cmに縦挽し，それを自動かんな盤で厚さ20 mmに仕上げた。使用した自動かんな盤は太平製作所製で切削幅600 mm，4枚刃のものである。機械の性能からナイフマークは1インチ当り約50と計算されるが，実際に仕上げた板についてチョークをぬり，測定した結果ではナイフマークは1インチ当り18以上で，その数の測定が困難なものも多かった。ナイフマーク数を18（ナイフマークの幅1.41 mm）とし，これが4枚刃のうちの2枚の刃によるとしても，ナイフマークの高さ（h_0）はつぎの近似式（木材工業ハンドブック[3], p. 312）によれば

$$h_0 = \frac{e^2}{4D}\left\{1-\frac{4e}{\pi CD}\right\} \fallingdotseq 0.004 \text{ mm}$$

となる。

ここでeはナイフマークの幅，Dは切削円直径（125 mm），Cは刃数（2）である。ナイフマークの高さが上記の程度であれば接着作業には影響はないと考えられる。

自動かんな盤で仕上げたラミナの厚さは表2に示すとおりである。全体の平均値が2.024 cmで，わずか厚く仕上がった。しかし標準偏差は0.009～0.017 cmで変化係数にして1%以下であり，良好な仕上がりといえる。

かんな削り終了後ラミナの長さを170 cmにそろえた。

表2. ラミナの仕上り厚さ（cm）

Table 2. Thickness of laminae after final surfacing (cm)

Species	Number	Min.	Av.	Max.	Standard deviation	Coefficient of variation, %
Dakekanba	45	1.980	2.020	2.060	0.015	0.74
Shinanoki	32	2.010	2.030	2.050	0.009	0.42
Yamahan-noki	30	1.965	2.024	2.050	0.017	0.84
Harunire	53	2.010	2.034	2.075	0.017	0.84
All	160	1.965	2.024	2.075	0.015	0.74

2. ラミナの曲げヤング係数の測定および組合せ

仕上げたラミナについて1枚ずつスパンを150 cmとし，中央集中荷重により1 cmのたわみを与え，これから次式により曲げヤング係数(E_b)を求めた。

$$E_b = \frac{Pl^3}{4ybh^3} \text{ kg/cm}^2$$

ここで，Pは1 cmのたわみを与える荷重(kg)，lはスパン(150 cm)，yはたわみ(1 cm)，bはラミナの幅(cm)，hは同厚さ(cm)である。ラミナの曲げヤング係数を樹種別の平均値で示せば表3のとおりである。

表3. ラミナの曲げヤング係数の総括 (10^3 kg/cm^2)

Table 3. Summary of moduli of elasticity of laminae in bending, 10^3 kg/cm^2

Species	Number	Min.	Av.	Max.	Standard deviation	Coefficient of variation, %
Dakekanba	45	115	149	204	22	15
Shinanoki	32	82	114	154	19	17
Yamahan-noki	30	59	103	125	14	14
Harunire	53	51	107	163	25	23

ヤング係数は平均値においてはダケカンバ材が149×10^3 kg/cm^{2}で最も大，以下シナノキ，ハルニレ，ヤマハンノキ材の順となるが，その分布範囲はハルニレ材が最も大きく，変化係数は23%である。他の3樹種では変化係数は14～17%で比較的小さい。また最小値についてみるとダケカンバ材は115×10^3 kg/cm^{2}であり，本樹種のラミナのすべてが，かなり大きい値を示すことがわかる。シナノキ材においてもその最小値は82×10^3 kg/cm^{2}で，木構造設計規準[2]における普通構造材広葉樹II類のヤング係数80×10^3 kg/cm^{2}より大である。しかしヤマハンノキおよびハルニレ材には59および51×10^3 kg/cm^{2}という小さい値のものが含まれていた。

ラミナのヤング係数測定後，それによってラミナを分類し，集成材製造の組合せをきめた。今回の集成材はすべて5枚のラミナから構成したが，まず各樹種ともヤング係数の上のみ，中のみ，下のみのものそれぞれ5枚を組合せて，同一樹種の集成材を3個，またハルニレ材についてはそのほかに異強度ラミナの組合せによるもの5個作製した。この他ダケカンバ材を表面材とし，芯材(3枚)には他の3樹種材を用いたものを各5個作製した。すなわち樹種別の集成材の製作数およびそれらの記号はつぎのとおりである。

表面材	芯材	個数	記号
ダケカンバ	ダケカンバ	3	BB 1～3
シナノキ	シナノキ	3	TT 1～3
ヤマハンノキ	ヤマハンノキ	3	AA 1～3
ハルニレ	ハルニレ	8	UU 1～8
ダケカンバ	シナノキ	5	BT 1～5
ダケカンバ	ヤマハンノキ	5	BA 1～5
ダケカンバ	ハルニレ	5	BU 1～3 BU(T)4～5

合計32本である。これらのうち，ダケカンバとハルニレの組合せにおいてハルニレのラミナが2枚不足したため，芯材にシナノキを1枚ずつ用いたものが2個ある。これらの記号はBU(T)4～5とした。集成材の仕上げ寸法は10×10×160 cmとしたが，幅において1 cm程度不足するものもできた。また組合せに際してはできるだけ各ラミナの木表と木表，木裏と木裏が相接するようにした。これらの木口の略図を図2に示す。

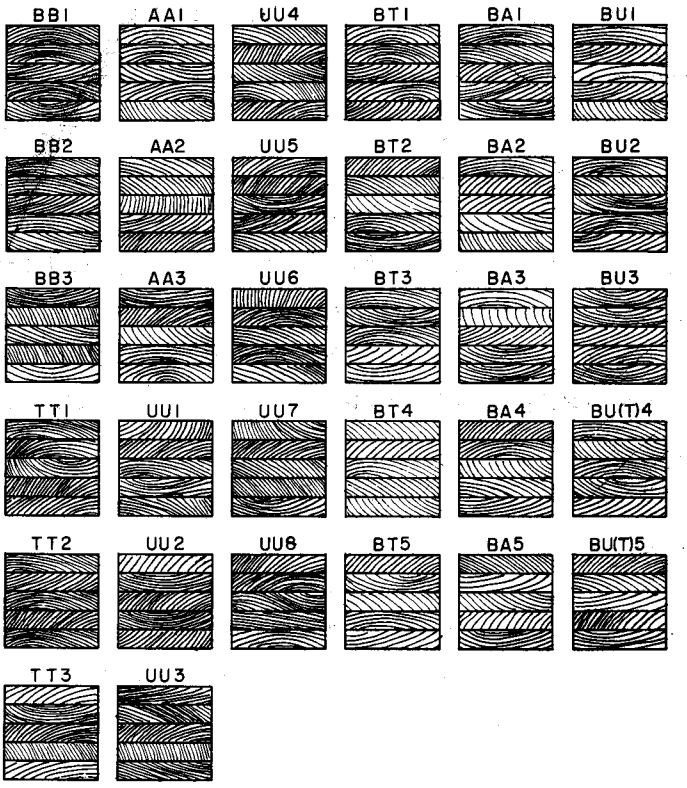

図2. 集成材の断面

Fig. 2. Cross section of laminated wooden beam.

3. 集成材の製造

上述の組合せをきめたラミナ5枚を接着し，10×10×160 cm の通直集成材を作製した。接着剤は東洋高圧製ユーロイド120＃（尿素・メラミン・石炭酸共縮合樹脂，樹脂分70±2%，比重1.31±0.05）でこれに硬化剤として塩化アンモン0.6%を加えた。塗布量は1 g/100 cm² を基準とし，接着する面の片面にブラシで塗布した。圧締には5個の締め具を35 cm 間隔におき，集成材5～6個分を一群として圧締した。圧締圧力はトルクレンチを用いて10～12 kg/cm² になるよう調整した。この圧締したもの全体をカンバスで被覆し，55°C を15時間以上保った。接着終了した集成材の接着層の表われている面を手押しかんな盤および自動かんな盤で切削し仕上げた。この集成材の製造は1961年8月上旬に行なった。

4. 小型無欠点試験片の強度試験

集成材製造前に各樹種のラミナから2×2×30 cm の小型無欠点試験片を各20本作製し，曲げおよび圧縮試験を行なった。両試験とも東京衡機製手動式4トンアムスラー型試験機を使用した。曲げ試験は荷重能力を400 kg に切換えスパンを24 cm とし，中央集中荷重により行なった。この際荷重の10 kg ごとに試験片の中央部のたわみをダイヤルゲージ（ストローク30 mm，読み1/100 mm）で測定した。曲げ試験終了後，直ちに無破壊部から長さ4 cm の材片を切り取って，これについて平均年輪幅，比重，含水率および縦圧縮強さを求めた。曲げおよび圧縮試験において荷重速度は毎分それぞれ150および100 kg/cm² を標準とした。この試験は1961年9月下旬～10月上旬に行なったが，同8月上旬に三井木材砂川工場でラミナを調製後，試験時まで含水率に変化を起させぬように試験片を気密なガラス容器に入れて保存しておいた。

5. 集成材の強度試験

上述のように製造した10×10×160 cm の通直集成材についての強度試験の種類は前項の小型試験片の場合と同じく曲げおよび縦圧縮試験である。両試験ともアムスラー会社製150トン材料試験機を使用し，荷重能力は曲げ試験の場合15×10³ kg，縦圧縮試験の場合100×10³ kg とした。

まず，スパンを150 cm とし，中央集中荷重による曲げ試験を行なった。この際荷重の200 kg ごとに試験片中央下部におけるたわみを同試験機付属のてこ式たわみ計（ストローク80 mm，最小読み1/100 mm）により，また図3に示すように試験片のラミナの中央にはりつけたストレンゲージ（共和電業製，K-13-1，抵抗値約60 Ω，ゲージ率約2.1，標点距離31 mm，単軸，薄和紙ベース上薄紙）の変形を共和電業製SM-4Jストレンメーターインジケーターおよび SS-24J 同スイッチボックスを使用し測定した。荷重速度は小型試験片の場合より遅く，毎分20～30 kg/cm² である。

曲げ試験終了後，無破壊箇所から長さ20 cm の短柱をきりとり，これについて縦圧縮

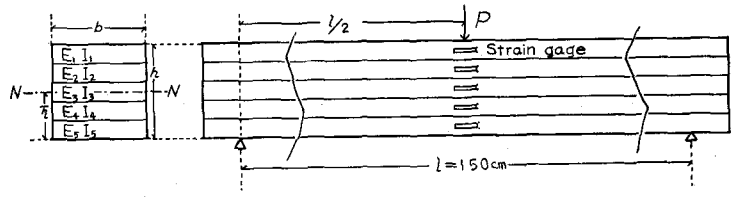

図3. 梁の断面とストレンゲージの位置

Fig. 3. Cross section of a laminated beam and location of 5 strain gages pasted on its side.

試験を行ない，また同時に曲げ試験による破壊に近い部分から長さ5 cmをきりとり，これを各ラミナごとに切断して平均年輪幅，比重，含水率を求めた。

縦圧縮試験においては試験片の中央部に標点距離を10 cmとし，マルテンス鏡式エッキステンソメーターをとりつけ，荷重の2,000 kgごとに変形を測定した。この際，試験片の相対する2面にとりつけた両鏡によるスケールの読みの和が変形の1,000倍になるように鏡とスケールの距離を調整した。荷重速度は毎分15～20 kg/cm²とした。

この曲げおよび圧縮両試験において，試験前に試験片の重量，寸法を測定しそれから試験時比重を求めた。平均年輪幅および含水率は前述の長さ5 cmにきりとった部分のラミナについての測定値によることにした。

この集成材の曲げ試験は1961年10月上旬～下旬，圧縮試験は同10月下旬～11月上旬に行なった。この期間の試験時の室温および湿度は曲げ試験時14～18°C，50～68%，圧縮試験時12～13°C，55～75%であった。

結果および考察

1. 小型無欠点試験片の強度試験結果

集成材の強度に関する基礎資料をうるため各供試樹種について，2×2×30 cmの小型無欠点試験片を20本ずつ作製し，曲げ試験を行ない，その終了後，長さ4 cmを切りとっ

表4. 小型無欠点材の試験結果の総括（平均値）

Table 4. Summary of test results for small clear specimens (average value)

Species	Average width of annual rings (mm)	Moisture content (%)	Specific gravity at test	Bending test			Max. crushing strength (kg/cm²)
				Stress at prop. limit (kg/cm²)	Modulus of rupture (kg/cm²)	Modulus of elasticity (10³ kg/cm²)	
Dakekanba	1.1	12.4	0.68	589	1,269	124	676
Shinanoki	2.4	9.8	0.47	315	709	71	421
Yamahan-noki	2.4	12.6	0.52	321	798	79	381
Harunire	1.1	10.4	0.45	286	617	51	385

て縦圧縮試験を行なった。その試験結果のすべてを付録1に，その総括（平均値）を表4に示す。

これらの数値についてみると，ダケカンバ材がとくに強度的性質がすぐれていることがわかる。すなわち，曲げ比例限度 589 (510～670) kg/cm²，曲げ強さ 1,269 (1,142～1,392) kg/cm²，曲げヤング係数 124 (112～172)×10³ kg/cm²，圧縮強さ 676 (640～730) kg/cm² で，その各最小値においても他樹種の各最大値より大である。このことから，強度の小さい樹種材からなる集成材の補強材としてダケカンバ材を用いるのが合理的であるといえるので本試験において，ダケカンバ材を表面材とする集成材を作製し，その強度試験を行なったものである。

なおここに試験した材は必ずしも集成材のラミナの性質を代表するものではない。とくに，ハルニレ材の場合，年輪幅の狭いものが多く，集成材の製造に用いたラミナの平均値（ヤング係数―表3）よりかなり低い値となっている。なお，付録1について本樹種をみるとその各数値の偏異が全樹種中最も大きいことが認められる。この偏異はハルニレ材が環孔材であるためで，ミズナラ，ヤチダモ，ハリギリなどについても同様のことがいえる。このように偏異の大きい樹種材を集成材などにする場合は，その強度数値を推定し，それを組合せのさいには考慮するようにしなければならない。

2. 集成木材梁の中立軸の位置およびヤング係数の計算

多層の断面をもつ集成木材梁において，その中立軸の位置は次式で求められる。

$$\bar{\eta} = \frac{\sum (E_i \int \eta_z \, dA_i)}{\sum (E_i A_i)} = \frac{\sum (E_i \eta_i A_i)}{\sum (E_i A_i)}$$

ここで

$\bar{\eta}$：集成材の横断面において下縁から中立軸までの距離 (cm)

η_z：集成材の横断面において下縁から任意点までの距離 (cm)

η_i：集成材の横断面において下縁から各ラミナの断面重心までの距離 (cm)

E_i：各ラミナの曲げヤング係数 (kg/cm²)

A_i：各ラミナの横断面積 (cm²)

ここに試験した集成材においては表2に示したように用いたラミナの厚さにおける変化係数は1% 以下であるので，1集成材を構成するラミナがすべて厚さが等しいとみなせば5枚構成集成材の中立軸の位置（梁の高さに対する割合）はつぎのように簡単になる。

$$\frac{\bar{\eta}}{h} = \frac{9E_1+7E_2+5E_3+3E_4+E_5}{10(E_1+E_2+E_3+E_4+E_5)}$$

各集成材梁について求めた $\bar{\eta}/h$ の値を表5に示す。集成材作製にあたって，ラミナの組合せはできるだけ上下対称となるようにしたので，そのほとんどは 0.5 に近い値である。

表5. ラミナのヤング係数

Table 5. Modulus of elasticity of lamina

Beam No.	Modulus of elasticity, 10^3 kg/cm^2							$\frac{\bar{y}}{h}$ ***
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	$E_{cal.}$*	$E_{av.}$**	
BB 1	185	157	159	172	180	179	171	0.499
2	148	138	137	143	142	144	142	0.502
3	120	120	115	121	127	123	121	0.495
TT 1	154	125	117	134	148	146	136	0.501
2	110	107	108	104	121	113	110	0.493
3	90	97	99	92	89	91	93	0.503
AA 1	112	103	116	115	116	113	112	0.493
2	99	110	99	99	101	101	102	0.503
3	69	93	90	96	59	70	81	0.508
UU 1	142	132	131	138	136	138	136	0.502
2	113	99	97	99	101	105	102	0.511
3	61	63	74	58	51	57	61	0.516
4	145	116	115	116	150	141	128	0.497
5	150	68	72	75	165	139	106	0.486
6	133	91	92	89	145	128	110	0.492
7	126	91	87	82	117	114	101	0.511
8	125	90	76	73	121	114	97	0.510
BT 1	204	125	128	142	191	148	158	0.502
2	165	123	106	107	161	153	132	0.507
3	155	130	119	135	155	150	139	0.499
4	135	108	114	113	142	132	122	0.494
5	121	111	82	98	136	123	110	0.476
BA 1	186	108	100	90	203	174	137	0.495
2	158	108	100	122	157	148	129	0.496
3	148	117	97	117	151	142	126	0.498
4	128	101	97	119	122	122	113	0.498
5	125	120	117	125	124	124	122	0.499
BU 1	151	119	121	114	163	148	134	0.494
2	150	101	85	96	154	140	117	0.499
3	149	126	126	125	157	147	137	0.496
(T) 4	138	110	112	118	138	133	123	0.497
(T) 5	130	110	110	99	125	123	115	0.507

* $E_{cal.} = \sum (E_i I_i)/I$, where E_i is the modulus of elasticity of lamina i, and I_i and I are the moments of inertia of the cross sectional areas of the same lamina and the laminated beam about the neutral axis.

** $E_{av.}$ is the average value of the moduli of elasticity of the five laminae.

*** $\bar{y}$ is the distance of the neutral axis from the lowermost fiber of the beam, and h is the height of the beam.

梁の中立軸が求められれば，各ラミナのヤング係数から集成材の曲げヤング係数（$E_{cal.}$）が次式によって求められる。

$$E_{cal.}=\frac{\sum(E_i I_i)}{I}$$

ここで，

I_i：梁の中立軸に関する各ラミナの断面二次モーメント（cm^4）

I：中立軸に関する集成材梁の断面二次モーメント（cm^4）

ここに試験した集成材梁のラミナの曲げヤング係数，それより求めた梁の曲げヤング係数および平均値（$E_{av.}$，縦圧縮ヤング係数の推定に用いる）を表5にかかげる。

3. 集成材の強度試験結果

仕上げられた集成材について，まず梁としての曲げ試験を行ない，その終了後，長さ20 cmを切りとってこれについて短柱としての縦圧縮試験を行なった。その結果を表6および7に，またそれらの総括を表8に示す。

まず，表6および8の曲げ試験結果について考察する。ラミナの組合せにおいて述べたようにBB 1～3，TT 1～3，AA 1～3，UU 1～3において各1はラミナのヤング係数の大きいもののみ，2はその中程度のもののみ，3はその小さいもののみを組合せたものである。これら集成材梁の曲げヤング係数（E_b）はラミナの条件（ヤング係数）をよく表わし，各樹種ごとに同一順序を示す。曲げ比例限度（σ_{bp}）および曲げ強さ（σ_b）の値はBB 2がBB 3よりわずか小さいが，これを除けばそれらの値もヤング係数の順序と同一である。これら各樹種3個のなかの偏異を樹種間のそれとすれば，ダケカンバ材においてはE_bは$107\sim160\times10^3$ kg/cm²とかなり差があるが，σ_{bp}およびσ_bにおいてはそれぞれ498～626および1035～1205 kg/cm²であって強度性質が安定していることを示し，小型無欠点試験片についての結果と同様である。シナノキ材ではTT 1はTT 3に対しσ_{bp}が1.7倍，σ_bとE_bが1.5倍である。ヤンハンノキ材ではAA 1はAA 3に対し，σ_{bp} 1.3倍，σ_b 2.1倍，E_b 1.2倍であってσ_bにおける差が大きい。ハルニレ材ではUU 1はUU 3に対しσ_{bp} 1.6倍，σ_b 2.2倍，E_b 2.6倍である。以上の樹種中ではヤマハンノキ集成材の曲げ強さ，ハルニレ集成材の曲げ強さおよびヤング係数においてとくに大きい差が認められる。

同一樹種においてヤング係数の異なるラミナを組合せたハルニレ集成材UU 4～8についてみると，つぎのようにいえる。UU 4は表面材にヤング係数が145および150×10^3 kg/cm²，芯材には$115\sim116\times10^3$ kg/cm²というラミナを用いたが，このσ_{bp}およびσ_bはそれぞれ685および1210 kg/cm²で，全集成材中最も大である。しかもダケカンバ材のみからなるBB 1に比較して，その強度がまさるにもかかわらず，比重（r_u）はBB 1の0.70に対し0.62で，1割以上も小さく，最もすぐれた集成材といえる。UU 5は表面材にヤング係数

表6. 集成材梁の曲げ試験結果

Table 6. Results of bending test for laminated wooden beams

Beam No.	Sp. gr. at test r_u	Stress at prop. limit σ_{bp} (kg/cm²)	Modulus of rupture σ_b (kg/cm²)	Modulus of elasticity E_b (10^3kg/cm²)	$\frac{\sigma_{bp}}{\sigma_b}$	$\frac{E_b}{E_{cal.}}$	$\frac{y_p{}^*}{y_{max}}$	$\frac{\sigma_b}{r_u}$	$\frac{E_b}{10^3 r_u}$
BB 1	0.70	626	1205	160	0.52	0.89	0.31	1720	228
2	0.70	498	1035	131	0.48	0.91	0.27	1478	187
3	0.66	507	1100	107	0.46	0.87	0.27	1666	162
TT 1	0.52	484	778	127	0.62	0.87	0.34	1495	244
2	0.50	336	672	113	0.50	1.00	0.29	1344	226
3	0.45	288	529	85	0.55	0.95	0.31	1176	189
AA 1	0.52	437	910	98	0.48	0.87	0.29	1750	188
2	0.54	436	703	88	0.62	0.87	0.43	1301	163
3	0.51	335	436	80	0.77	1.14	0.44	855	157
UU 1	0.62	428	990	132	0.44	0.96	0.17	1597	212
2	0.54	413	846	96	0.54	0.92	0.35	1568	178
3	0.47	276	460	51	0.60	0.90	0.48	979	109
4	0.62	685	1210	137	0.57	0.97	0.26	1951	221
5	0.56	482	920	119	0.52	0.86	0.22	1641	212
6	0.59	400	859	122	0.47	0.95	0.25	1455	206
7	0.54	386	828	102	0.47	0.90	0.31	1532	189
8	0.54	413	883	96	0.47	0.84	0.25	1635	178
BT 1	0.64	597	1010	160	0.59	0.87	0.28	1578	250
2	0.55	533	945	136	0.56	0.89	0.26	1718	247
3	0.58	653	1010	142	0.64	0.95	0.34	1740	244
4	0.56	369	657	124	0.56	0.96	0.37	1190	222
5	0.52	408	738	111	0.55	0.90	0.28	1419	214
BA 1	0.61	805	1031	147	0.78	0.84	0.34	1690	241
2	0.61	736	970	147	0.76	0.99	0.40	1589	241
3	0.60	367	804	140	0.46	0.99	0.21	1338	233
4	0.58	356	712	120	0.50	0.98	0.34	1228	207
5	0.58	451	895	108	0.50	0.87	0.34	1541	186
BU 1	0.65	602	983	140	0.61	0.95	0.41	1511	215
2	0.59	504	717	129	0.70	0.92	0.54	1215	218
3	0.62	627	1000	145	0.63	0.99	0.30	1612	234
(T) 4	0.62	529	961	115	0.55	0.87	0.40	1550	185
(T) 5	0.57	524	916	130	0.57	1.06	0.32	1608	228

* y_p: Deflection at proportional limit. y_{max}: Deflection at maximum load.

表7. 集成材短柱の縦圧縮試験結果

Table 7. Results of compression test for laminated wooden short columns.

Beam No.	Sp. gr. at test r_u	Stress at prop. limit σ_{cp} (kg/cm²)	Max. crushing strength σ_c (kg/cm²)	Modulus of elasticity E_c (10^3kg/cm²)	$\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_c}$	$\frac{E_c}{E_{av.}}$	$\frac{\sigma_c}{r_u}$	$\frac{E_c}{10^3 r_u}$
BB 1	0.70	351	637	171	0.55	1.00	911	244
2	0.70	310	591	134	0.53	0.94	844	191
3	0.65	291	545	111	0.53	0.92	838	171
TT 1	0.51	352	450	149	0.70	1.10	882	292
2	0.50	260	440	105	0.59	0.96	880	210
3	0.45	238	382	100	0.63	1.07	850	222
AA 1	0.52	305	472	127	0.65	1.13	906	244
2	0.55	245	456	114	0.54	1.12	840	210
3	0.52	218	406	86	0.54	1.06	781	165
UU 1	0.62	336	547	133	0.61	0.98	882	214
2	0.54	241	448	99	0.56	0.97	830	183
3	0.46	228	360	64	0.64	1.05	783	139
4	0.64	273	537	121	0.51	0.95	840	189
5	0.56	258	444	97	0.58	0.92	793	173
6	0.60	283	523	122	0.54	1.11	871	204
7	0.54	236	455	98	0.54	0.97	842	181
8	0.53	270	432	90	0.63	0.93	815	170
BT 1	0.62	354	582	159	0.61	1.01	939	256
2	0.56	341	518	123	0.66	0.93	926	220
3	0.57	285	516	128	0.55	0.92	905	226
4	0.57	320	518	111	0.64	0.91	909	195
5	0.52	274	470	108	0.58	0.98	904	208
BA 1	0.62	342	582	142	0.59	1.04	940	229
2	0.61	338	520	129	0.63	1.00	852	211
3	0.59	316	548	131	0.58	1.04	930	222
4	0.58	286	517	122	0.54	1.08	891	210
5	0.59	274	496	109	0.55	0.89	840	184
BU 1	0.64	329	576	137	0.57	1.03	900	214
2	0.59	289	513	114	0.56	0.97	870	194
3	0.63	349	541	150	0.64	1.10	859	238
(T) 4	0.61	323	550	131	0.59	1.07	901	214
(T) 5	0.57	264	469	104	0.56	0.90	822	182

表8. 集成材の試験結果の総括 (平均値)

Table 8. Summary of test results for laminated wooden beams and columns (average value)

Species* face	Species* core	Sp. gr. at test	Bending test: Stress at prop. limit (kg/cm²)	Bending test: Modulus of rupture (kg/cm²)	Bending test: Modulus of elasticity (10^3kg/cm²)	Compression test: Stress at prop. limit (kg/cm²)	Compression test: Max. crushing strength (kg/cm²)	Compression test: Modulus of elasticity (10^3kg/cm²)	Number of specimens
B	B	0.68	544	1113	133	317	591	139	3
T	T	0.49	369	660	108	283	424	118	3
A	A	0.53	402	512	89	256	445	109	3
U	U	0.56	435	850	107	266	468	103	8
B	T	0.57	512	872	135	315	521	126	5
B	A	0.60	543	882	132	311	432	127	5
B	U (T)	0.61	557	915	132	311	530	127	5

* B: Dakekanba, T: Shinanoki, A: Yamahan-noki, U: Harunire.

150 および 165×10^3 kg/cm², 芯材にはその 1/2 程度の $68\sim75\times10^3$ kg/cm² というラミナを用いたものであるが, σ_{bp} 483 kg/cm², σ_b 920 kg/cm² とかなり大きい値を示した。その比重 (r_u) は 0.56 で小さいので, 表6にも示すとおり σ_b/r_u の値はかなり大きい方である。UU 5～8 は表面材のヤング係数を前2者よりやや小さくし, 芯材のそれを前2者の中間としたものである。E_b においてはやや差がみられるが, σ_{bp} および σ_b は3個とも近似した値を示す。このハルニレ材の UU 4～8 について総括すると, 表面材にヤング係数の大きいものをもってくれば強度性質が安定した集成材をつくりうるといえる。このハルニレ材の場合, UU 3 のように表面材にヤング係数が $51\sim61\times10^3$ kg/cm² という小さいものを用いると, 曲げ強さも 460 kg/cm² と小さいものになるので, 材質に偏異の多い樹種を取扱うには, ここに用いたヤング係数測定法のような非破壊試験による材質検査を行ない集成材作製の場合, ラミナの組合せをきめる必要がある。

強度性質のすぐれたダケカンバ材を表面材として芯材にシナ, ヤマハンノキおよびハルニレ材を用いた集成材の強度性質は前述のヤング係数の異なるハルニレ材の組合せの場合と似た傾向を示す。すなわち BT 1～5, BA 1～5, BU 1～5 の数値が示すように, それらにおける最小値は σ_{bp} 356 kg/cm², σ_b 657 kg/cm², E_b 108×10^3 kg/cm² で, 芯材の樹種のみからなる集成材の最小値よりいずれも大きい。とくに, 芯材の比重が比較的小さいため σ_b/r_u および $E_b/(10^3 r_u)$ の値は単一樹種のものより大きい傾向を示す。

曲げ試験結果の各群ごとの平均値について, ダケカンバ材のみのもの (BB) とダケカンバ材を表面材としたもの (BT, BA, BU) を比較してみると, 曲げ比例限度およびヤング係数は両者近似した値であり, 曲げ強さのみはダケカンバ材のみのものがすぐれてい

る。このことから比例限度までの応力，たわみは表面材の性質に強く影響されているといえる。破壊強さには芯材の剪断強さの影響が大きいと考えられるが，ここに試験した集成材においては芯材の剪断破壊のみによって破壊したものはなかったので，この程度の梁高さとスパンの比（1：15）での中央集中荷重試験ではこれらの広葉樹材を芯材とする場合，それらの剪断力の影響はあまり大きくないといえる。

ここに試験した値を林業試験場集成材研究班の行なった結果[6]と比較すると，ダケカンバ集成材（BB）の曲げ強さは1035～1205 kg/cm² で林試のマカンバ集成材（σ_b 754～1233 kg/cm²）よりすぐれている。ハルニレ集成材は特に弱いUU 3を除けば σ_b は823～1210 kg/cm² で，林試のヤチダモ集成材（σ_b 586～773 kg/cm²），ミズナラ集成材（σ_b 576～1168 kg/cm²）よりすぐれた強度をもつといえよう。

つぎに，曲げ試験終了後，その無破壊部から切り取った長さ20 cmの短柱についておこなった縦圧縮試験結果について論ずる。縦圧縮比例限度（σ_{cp}），同強さ（σ_c）においては曲げ比例限度および同強さの場合より偏異は少ない。すなわち，曲げ試験の場合と同じく，同一樹種による集成材について比較すれば，各No. 1はNo. 3に対し，ダケカンバ集成材で1.17倍，シナ集成材で1.18倍，ヤマハンノキ集成材で1.16倍，ハルニレ集成材で1.52倍である。ハルニレ材のヤング係数の異なるラミナからなる集成材UU 4～8においては σ_{cp} 236～283 kg/cm²，σ_c 432～537 kg/cm² で，とくに大きな差は認められない。ダケカンバ材を表面材とし他樹種を芯材としたものでは σ_{cp} 264～354 kg/cm²，σ_c 469～582 kg/cm² の範囲にあり，すなわち最小値においてはシナ，ヤマハンノキ，ハルニレ材のみの集成材のそれよりやや大きいが，曲げ強さの場合にみられるような強度の著しい向上はみられない。これは曲げ試験においてはラミナの配列が非常に大きな役割をもつが，縦圧縮にはその影響がほとんどないと考えられるので当然であろう。この試験における集成材のラミナには節などの欠点が非常に少なく，したがってこれから切り取った長さ20 cmの短柱はほとんどが無欠点であり，縦圧縮試験結果は上述のように比較的安定したものとなった。

なお，曲げ試験の際，図3に示したように各ラミナにストレンゲージをはり，それによって変形の発達経過を測定した。これを図4に示す。この図における各線は荷重400 kgごとの各ラミナの測定位置における変形量を直線で結び，それをさらに上下の外縁まで延長したものである。圧縮側（Comp.）から引張側（Tens.）まで集成材の中立軸で0となる直線で表わされるのが理想型であるが，個々の場合には必ずしもこのようにならなかった。また図示されている中立軸の位置も，計算によって求めた表5に示す η/h の値とは必ずしも一致しなかった。しかし上下の表面材の変形における比例限度は曲げのたわみにおける比例限度と大体において一致した。この比例限度時における変形の位置を図中では△印で示す。またいずれの場合にも比例限度を超えてから，次第に中心部の変形は（－）となり，

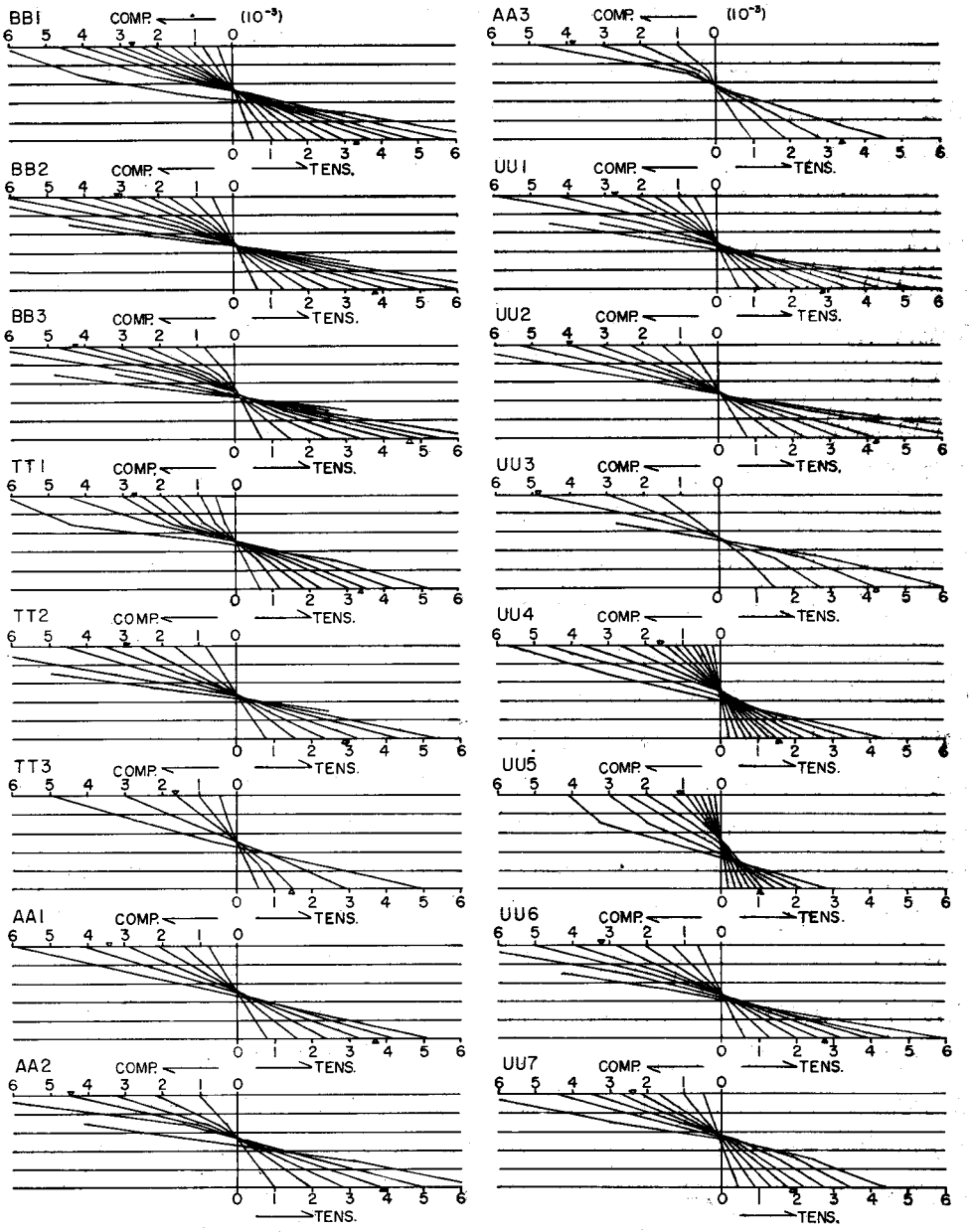

図4. 集成材梁における歪の発達経過

Fig. 4. Development of the strain in glued laminated beam. Each line shows the strain of each lamina at 400 kg load increments. Symbol "△" shows the strain at proportional limit in bending.

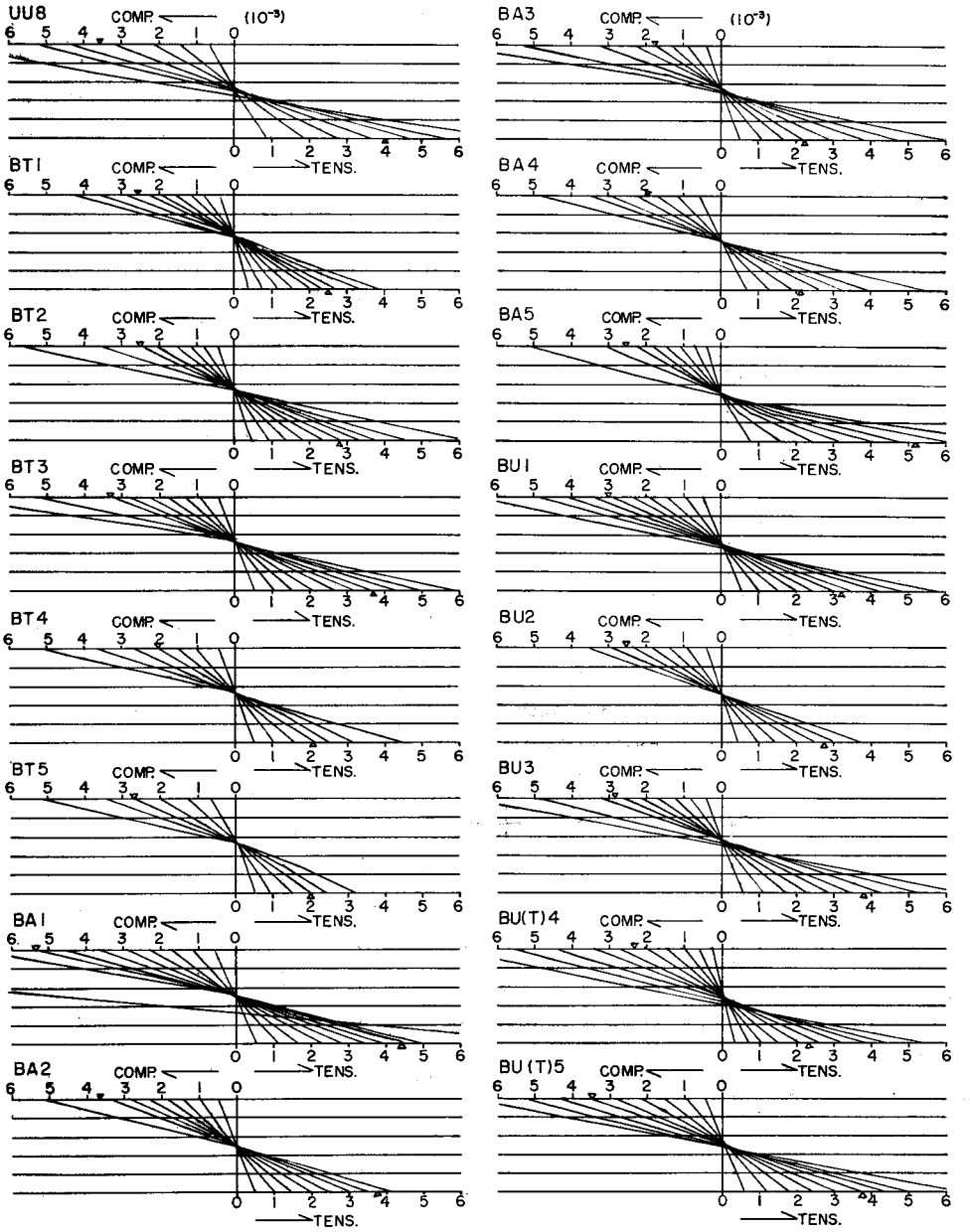

図4. 続　き

Fig. 4. Continued.

中立軸が引張側へ移行するのが確められた。さらに変形が進めば，下から2枚目のラミナの引張変形も減少する場合がみられた。これらの測定結果から，少なくともこの測定中(破壊に近くなると変形が大き過ぎ，測定が不可能となる場合が多い)においては，各ラミナ間の接着層における滑りは認められず，接着は充分であったといえる。破壊時に接着層の部分に剝離がみられたのはBA4のみで，これにおいては下から1枚目と2枚目の接着

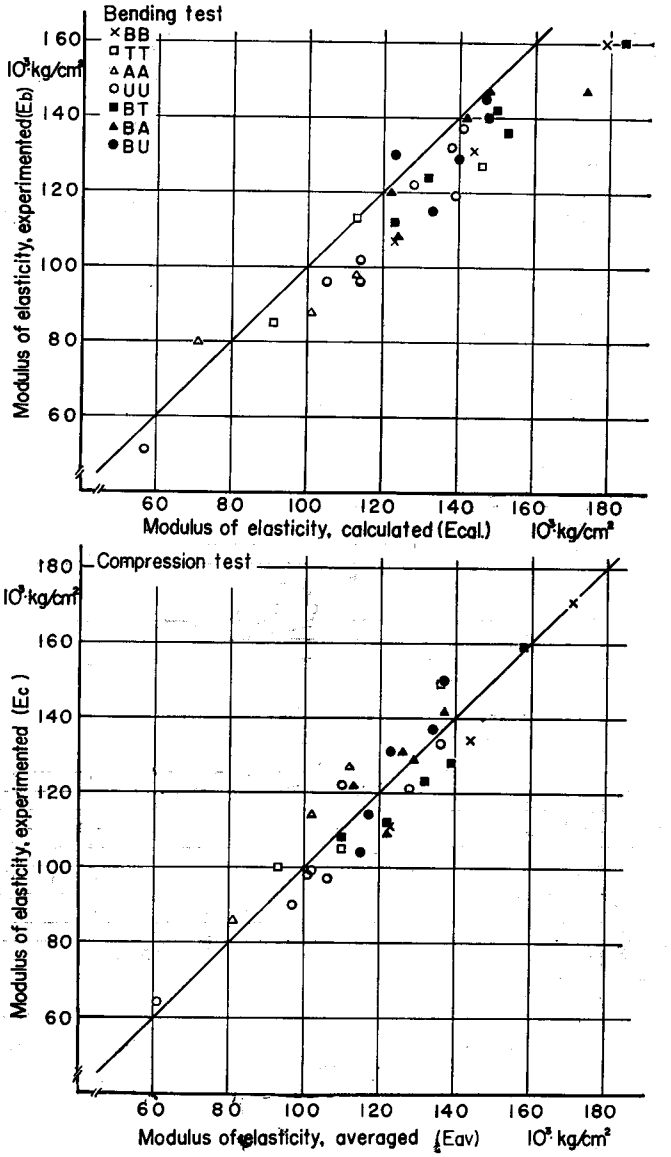

図5.　ヤング係数おける計算値と実験値の比較

Fig. 5.　Comparison of the experimental value to the calculated one in the moduli of elasticity.

層の一部が剝離した。その曲げ強さは 712 kg/cm² で，大きい方ではないが，この原因はラミナの剝離によるものではなく，引張表面材における繊維の傾斜によるものと認められた。

4. ヤング係数における計算値と実験値の比較

ここに試験した集成材はラミナの組合せをきめるため，その曲げヤング係数 (E_i) を測定したが，これから集成材梁としての曲げヤング係数 ($E_{cal.}$) を，さきに述べたように，$E_{cal.}=\sum(E_iI_i)/I$ によって計算した。一方集成材短柱の縦圧縮ヤング係数についてのラミナからの計算値として各ラミナの曲げヤング係数の平均値 ($E_{av.}$) を用いた。これらを実験値と比較すると表6の $E_b/E_{cal.}$，表7の $E_c/E_{av.}$ および図5に示すようになる。

まず，曲げヤング係数についてみると，実験値は一般に計算値より小さく，$E_b/E_{cal.}$ の値の平均は 0.93 で，最大 1.14，最小 0.84 である。これは曲げ試験において測定したたわみが実際よりわずか大きく出て，これを補整しなかったことも一因であるが，さらに曲げ試験におけるたわみには剪断変形によるたわみが付加されていることが最も大きい原因と考えられる。この剪断変形による梁のたわみは理論的につぎのようにして求められる (湯浅[9]による)。

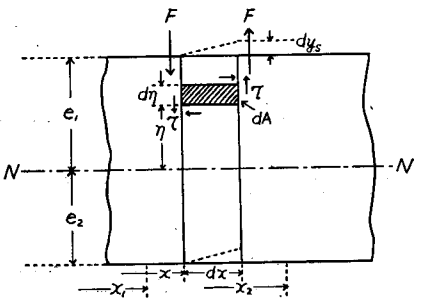

図6. 剪断変形による梁のたわみ

Fig. 6. Deflection of beam with reference to shear deformation.

図6において，任意の断面から x の距離のところにある断面上において，中立軸から η のところに作用する剪断応力を τ とすれば，その部分の体積に貯えられる剪断弾性エネルギーは $\frac{1}{2}\cdot\frac{\tau^2}{G}$ である。ここで G は材料の剪断弾性係数。したがって，この断面に作用する剪断力 F によって梁の微小長さ dx 間に生ずるたわみを dy_s とおけば，この剪断力によって梁の長さ dx に対してなされる仕事 $\frac{1}{2}F\,dy_s$ と dx 中に貯えられる剪断弾性エネルギーとを等しく置き，つぎの式をうる。

$$\frac{1}{2}F\,dy_s=\frac{1}{2}\,dx\int\frac{\tau^2}{G}\,dA$$

あるいは

$$dy_s=\frac{dx}{FG}\int\tau^2\,dA=\frac{dx}{FG}\int_{-e_2}^{e_1}\tau^2 z\,d\eta\,.$$

ここで，dA と z はそれぞれ剪断応力 τ が作用する点における微小横断面積と梁の幅である。

したがって梁の長さ x_1 と x_2 の間において剪断応力によって生ずる関係的たわみを y_s

とすれば上式を x_1 から x_2 まで x について積分してつぎの式をうる。

$$y_s=\int_{x_1}^{x_2}\frac{\int_{-e_2}^{e_1}\tau^2 z\,d\eta}{FG}\,dx \qquad \cdots\cdots (1)$$

ここで

$$\tau=\frac{FS}{zI},\quad \text{また}\quad S=\int_{\eta}^{e_1}z\eta\,d\eta$$

であり，これを(1)式に代入すると，

$$y_s=\int_{x_1}^{x_2}\frac{F\int_{-e_2}^{e_1}\frac{S^2}{z}\,d\eta}{GI^2}\,dx \qquad \cdots\cdots (2)$$

となる。ここで I は中立軸に関する断面二次モーメントである。

いま，幅が b，高さが h の平等方形断面で，スパン l の梁に中央集中荷重 P が作用するとき，上式において

$$z=b,\quad I=\frac{bh^3}{12},\quad F=\frac{P}{2}$$

$$S=\int_{\eta}^{\frac{h}{2}}b\eta\,d\eta=\frac{b}{2}\left(\frac{1}{4}h^2-\eta^2\right)$$

である。これを(2)式に代入すれば

$$y_s=\frac{18P}{Gbh^6}\int_0^{\frac{l}{2}}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\left(\frac{1}{16}h^4-\frac{1}{2}h^2\eta^2+\eta^4\right)d\eta\,dx$$

$$=\frac{3Pl}{10Gbh}$$

また梁の曲げ応力のみによるたわみ y_b は

$$y_b=\frac{Pl^3}{48EI}=\frac{Pl^3}{4Ebh^3}$$

で与えられるから，梁のたわみ y は

$$y=y_b+y_s=\frac{Pl^3}{4Ebh^3}\left\{1+\frac{6}{5}\cdot\frac{E}{G}\cdot\left(\frac{h}{l}\right)^2\right\}$$

となる。この試験においては $h/l=1/15$ である。しかし G は測定されていないので，既往の文献を参考にする。山井[8]によれば E_L/G_{LT} の値はブナ 15.7，マカバ 17.0，ヤチダモ 11.3，ミズナラ 13.7，ケヤキ 13.1，また E_L/G_{LR} はブナ 11.9，ミズナラ 10.5，ケヤキ 8.9 である。これらの範囲はおよそ 9〜17 となり，この値を用いると

$$\frac{6}{5}\cdot\frac{E}{G}\cdot\left(\frac{h}{l}\right)^2 \fallingdotseq 0.048\sim0.091$$

となる。したがって，ここに試験した集成材梁においても，そのたわみは曲げ応力によるものより，その5～9%程度大きく，そのたわみから求めたヤング係数は実際の値の92～95%となる。一方ラミナのヤング係数測定の場合は $h/l=1/75$ であるので，

$$\frac{6}{5}\cdot\frac{E}{G}\cdot\left(\frac{h}{l}\right)^2 \fallingdotseq 0.002\sim0.004$$

となり，剪断変形によるたわみを無視できる。

さきに述べたようにこの試験における曲げヤング係数の実験値/計算値の平均は0.93で，梁のたわみに剪断変形を付加した上述の理論値とほぼ一致する。

つぎに表6において $E_b/E_{cal.}$ の値が平均値より大きくはなれているものを検討してみる。まずその値が1.14のAA 3はそのラミナのヤング係数が上から69, 93, 90, 96, 59×10^3 kg/cm^{2}で，表面材より芯材の方が大きく，その曲げヤング係数の実験値は計算値 ($E_{cal.}$) よりも平均値 ($E_{av.}$) に近い値となった。一方，実験値/計算値がかなり小さいもの，すなわちUU 5 (0.86), UU 8 (0.84), BT 1 (0.87), BA 1 (0.84) についてみると，いずれも芯材のヤング係数が表面材のそれよりかなり小さいものである。このようにラミナの曲げヤング係数から曲げ応力のみによって集成材のヤング係数を求める場合，とくに表面材と芯材のヤング係数に大きな差がある場合は芯材の影響——これはその剪断弾性係数 G による影響と考えられる——が大きいといえる。

いずれにしても，この試験において梁の曲げヤング係数の実験値/計算値が0.84～1.14の間にあったことは梁のヤング係数の推定がかなり正確に可能であることを示すものである。さらにラミナの剪断弾性係数をヤング係数などに関連させて推測しうれば，それを考慮に入れて梁のたわみをなお一層正確に計算しうることになろう。

つぎに短柱の縦圧縮試験の場合について考察する。縦圧縮ヤング係数はラミナの配列にはあまり影響されないと考えられるので，ラミナの曲げヤング係数の平均値 ($E_{av.}$) と実験値 (E_c) を比較した。表7および図5に示すように，この両者の値はよく一致し，$E_c/E_{av.}$ の平均は1.00，最大1.13，最小は0.89であった。このように縦圧縮ヤング係数もラミナの曲げヤング係数から推測しうる。

5. 集成材の比重と強度との関係

一般に材料おいて，強度/比重の値が大きい程すぐれているといえる。それでこの試験結果についても上述の値を検討してみよう。すなわち表6に σ_b/r_u, $E_b/(10^3 r_u)$, 表7に σ_c/r_u, $E_c/(10^3 r_u)$ を示し，また図7～9に比重と強度およびヤング係数との関係を示す。

まず曲げ試験の結果についてみると，各群ごとの σ_b/r_u の平均値はBB 1621, TT 1338, AA 1302, UU (1～3) 1381, UU (4～8) 1643, BT 1529, BA 1477, BU 1499となり，単一樹

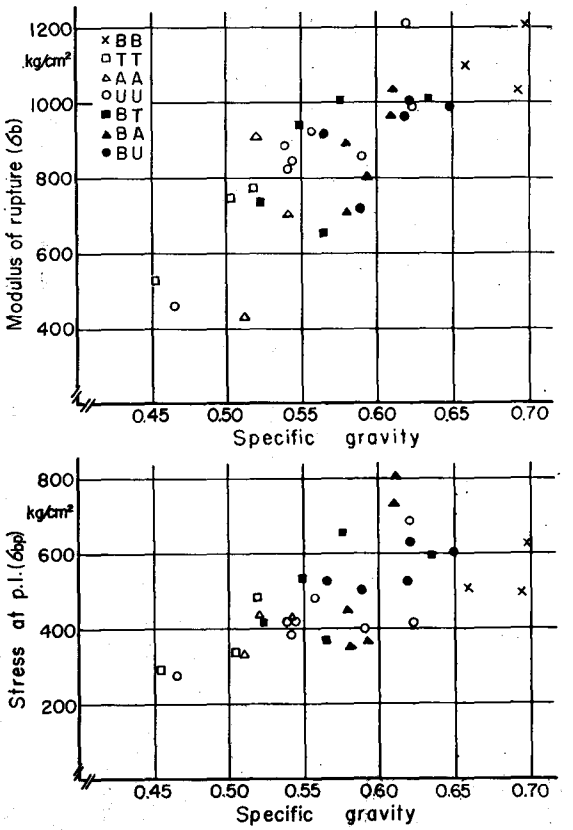

図7. 集成材の比重（試験時）と曲げ強さとの関係

Fig. 7. The relation of bending strength to specific gravity for laminated wooden beams (specific gravity ; at time of test).

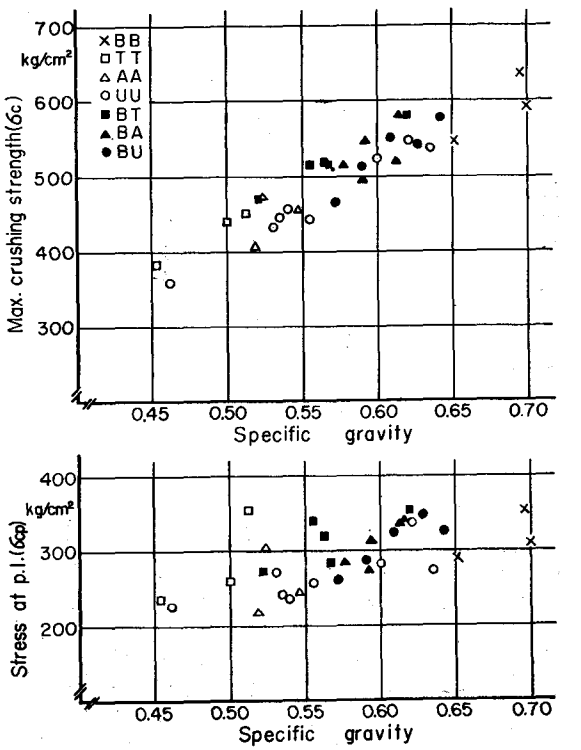

図8. 集成材短柱の比重と圧縮強さとの関係

Fig. 8. The relation of compressive strength to specific gravity for laminated wooden short columns.

種（各1～3）のものではダケカンバ材（BB）の集成材がもっともすぐれている。またハルニレ集成材では似たヤング係数を組合せたUU 1～3よりもヤング係数の大きいラミナを表面材としたUU 4～8の方が明らかにすぐれている。このことはダケカンバ材を表面材としたものについても同様で，TT，AA，UU 1～3に対し，BT，BA，BUの値の方がいずれも大きい。ヤング係数については，シナ材のみ（TT）および2樹種組合せのものが $E_b/(10^3 r_u)$ のが値大きい。ハルニレ材の場合は曲げ強さと同じく，UU 4～8の方がUU 1～3よりすぐれている。

すべての樹種について，ヤング係数の小さいものは σ_b/r_u，$E_b/(10^3 r_u)$ はともに小さい値となっている。

縦圧縮試験の場合は，BB，TTの σ_c/r_u の値が比較的大きく，したがって，この両樹種を組合せたBTがすぐれた結果を示す。また2樹種組合せのものはそれぞれの芯材樹種のみのものより σ_c/r_u は向上している。圧縮ヤング係数についてはTT（シナ材のみ）がすぐれ，UU（ハルニレ材のみ）がよくない。しかしこのハルニレ材も表面材にダケカンバを用いることにより $E_c/(10^3 r_u)$ の値は向上する。

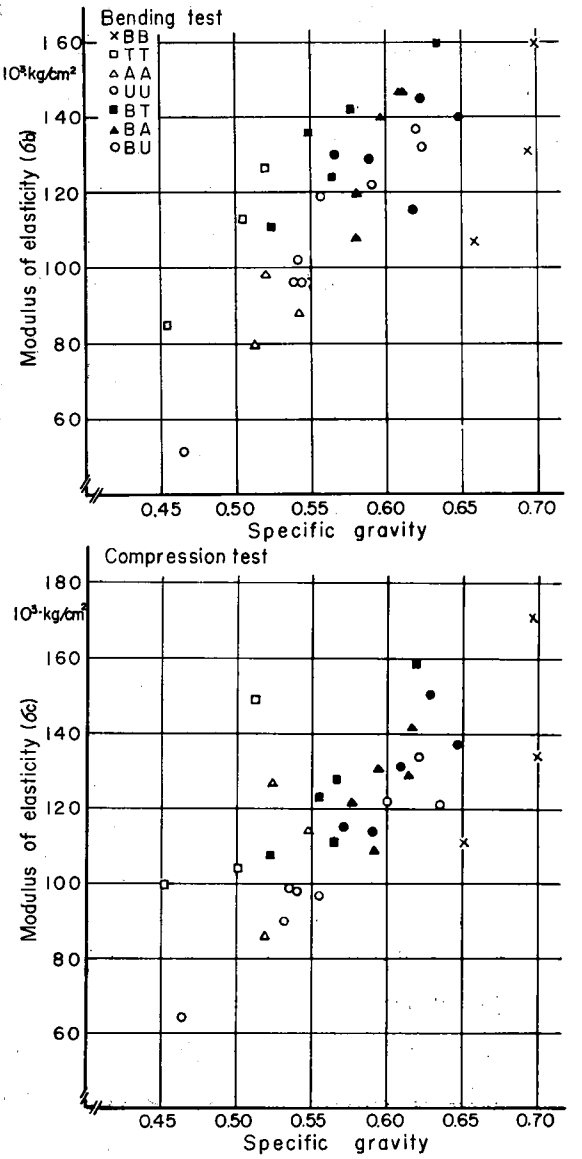

図9. 集成材の比重とヤング係数との関係

Fig. 9. The relation of modulus of elasticity to specific gravity for laminated wood.

以上の曲げおよび圧縮両試験の結果についてみると，ともにヤング係数の大きいものを表面材とすれば比重に対する強度性質の関係は向上するといえる。

6. ヤング係数による強度推定

一般に木材を構造用材として用いる場合，木構造設計基準[2]では許容応力度がつぎの

ようにきめられている。すなわち，ここに使用した樹種はその基準の広葉樹II類にはいるので，その数値をあげれば，長期応力に対する普通構造材の繊維方向の許容応力度(単位：kg/cm²)は圧縮($_Lf_c$)70，引張り($_Lf_t$)および曲げ($_Lf_b$)100，剪断($_Lf_s$)10であり，短期応力に対する値はそれぞれ2倍となり，$_sf_c$ 140，$_sf_t$ および $_sf_b$ 200，$_sf_s$ 20となる。ただしこの場合，ナラ，ケヤキ（環孔材の意と思われる）では平均年輪幅1mm以上ときめられている。これはこの試験におけるハルニレ材にも適用されるもので，同材のラミナにおいて平均年輪幅1mm以下のものはUU 3の表面材，BU 2の芯材の計2枚であり，これを除くすべてに上記の普通構造材の規格が適用できる。さらに広葉樹材の場合，品質優良なことが確認されたもの（同解説では広葉樹II類に対し比重0.8以上となっているが，ここに使用したラミナの試験時比重が0.8以上のものはBU 2の表面材に用いたダケカンバのラミナ1枚のみであり，比重からいえば品質優良なことが確認されるものはわが国の広葉樹では極めてまれであると考えられる）に対しては上級構造材として上述の値の1.3倍をとることができる。上級構造材に対する繊維方向の短期許容応力度は $_sf_c$ 182，$_sf_t$ および $_sf_b$ 260，$_sf_s$ 26となる。

ここで，上述の値は

短期許容応力度＝無欠点材の強度×2/3×欠点係数

として求められたもので，式中の2/3は圧縮・曲げにおける比例限度，引張・剪断においてはほぼ破壊強度の2/3を意味する。欠点係数は普通構造材の場合，圧縮0.63，曲げ0.43，引張0.385，上級構造材の場合はそれぞれ0.67，0.56，0.47である。いま欠点も含む大型試験体について破壊試験を行なった場合，上式から逆算して，各強度は無欠点材の強度×欠点係数に相当するから，この値が $_sf$×3/2 より大きければよいことになる。さらに集成材の場合，無欠点材のみからつくられた5枚構成のものでは，上級構造材の許容応力度の圧縮1.2倍，引張および曲げ1.4倍の値をとることができる。一方ヤング係数は広葉樹II類に対し，普通材 80×10³ kg/cm²，上級材 90×10³ kg/cm² ときめられている。$_sf$×3/2 を基準強度値とし，広葉樹II類についての値をまとめればつぎのようになる。

	短期許容応力度 (kg/cm²)		基準強度値 (kg/cm²)		ヤング係数
	圧縮	引張・曲げ	圧縮	引張・曲げ	(10³·kg/cm²)
普通構造材	140	200	210	300	80
上級構造材	182	260	273	390	90
無欠点ラミナによる集成材(5枚)	218	364	327	546	90

ここの試験に用いた樹種による集成材では上述の値以上の強度・ヤング係数をもっていても，上述の値として評価される。実験値（表6および7）をみると，曲げ強さの最小値 436 kg/cm² (AA 3)，最大値 1210 kg/cm² (UU 4) であり，最小値においても上級構造材の曲

げ強さの基準値 (390 kg/cm²) より大で，最大値は無欠点ラミナからなる集成材の基準値 (546 kg/cm²) の 2.2 倍，普通材のそれの 4 倍である。この試験においては 546 kg/cm² 以下になったのは 3 個で，これらは各シナ，ヤマハンノキ，ハルニレ材単樹種のそれぞれにおけるヤング係数の小さいもののみを組合せたものである。またヤング係数においては 80×10^3 kg/cm² 以下が 2 個 (UU 3, AA 3) で他は全部 90×10^3 kg/cm² 以上あり，その最大値は 160×10^3 kg/cm² (BB 1) である。一方，縦圧縮試験の結果では圧縮強さの最小値は 360 kg/cm² (UU 3) で，これを含むすべてが，無欠点ラミナからなる集成材の基準値 (327 kg/cm²) 以上である。その最大値は 637 kg/cm² (BB 1) で最大基準値の約 2 倍，普通材のそれの 3 倍である。またヤング係数は 80×10^3 kg/cm² 以下が 1 個 (UU 3)，$80\sim90\times10^3$ kg/cm² が 1 個で，最大値は 171×10^3 kg/cm² (BB 1) である。このようにすぐれた強度数値をもっていても実際に使用される場合は上述の基準値によらねばならない。しかも広葉樹材の場合上級構造材の規定が明確でなく，とくに，前述したように設計基準の解説の比重 0.8 以上を適用すれば，ここに試験した集成材はすべて普通構造材の基準値に評価されることになる。

木材の一般的性質として，その数値の偏異が大きいために，実際に構造材として使用される場合には上述のように評価されるわけである。一方，最近の研究において，木材，とくに木材梁の強度を理論計算する方法が試みられ，それが実験上から確認されるようになった (例えば沢田[5])。また集成材についてもその梁としての曲げ比例限度，破壊係数などに関して理論計算がなされている。この場合，集成材を構成するラミナの圧縮・引張・剪断強さなどの独立強度数値を基礎とするもの (例えば W. T. CURRY[1]，沢田[4]，集成材研究班[6]) およびラミナの曲げ強さを基礎とするもの (例えば渡辺・又木[7]) がある。これらの方法によるときは既往の文献に示されるように相当正確な計算がなされる。しかし，いずれの場合にも集成材を構成するラミナに接続する部分から小型試験片を作製し，その破壊試験を行ない，その数値がラミナのそれと一致しなければならない。一般的な工場生産の場合，このような試験片の採取による試験は行ないにくいし，またラミナには欠点が含まれるので，小型無欠点試験片についての強度数値をそのまま適用することもできない。

以上の理由から，もっと簡単に，概略的な曲げ強さ，圧縮強さを知る方法をつぎのように試みた。前述のようにこの試験に用いた集成材ではその製作にあたり，ラミナの曲げヤング係数を測定し，それから集成材の梁および短柱としてのヤング係数をかなりの精度で計算しうることを確めた。これによって集成材のヤング係数は求められるし，さらにこのヤング係数に関連させて集成材の強度を推定しうるかどうかを確めるため両者の関係を求めてみた。これを図 10 および 11 に示す。

まず図 10 において，曲げ強さ (σ_b) とヤング係数の計算値 ($E_{cal.}$) との間には

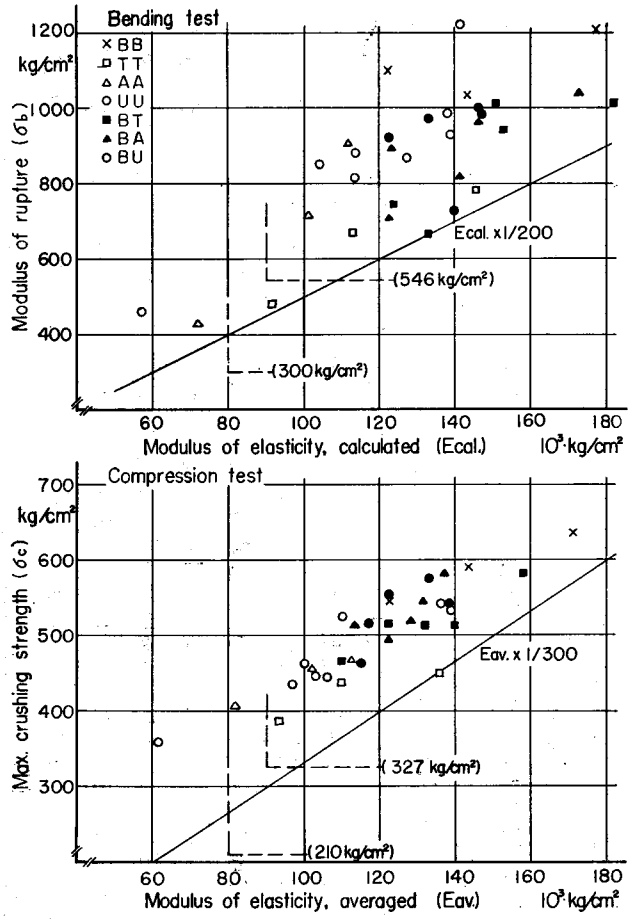

図10. ヤング係数(計算値)と強度との関係

Fig. 10. The relation between modulus of elasticity and strength limit.

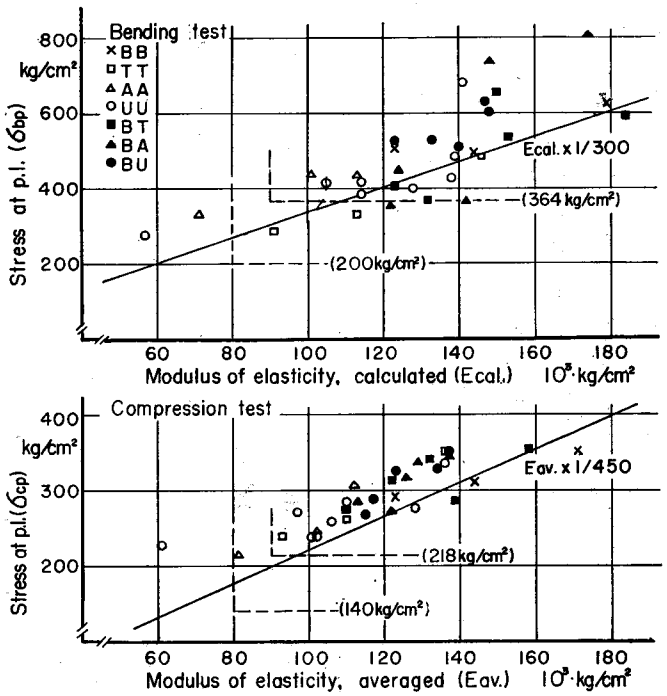

図11. ヤング係数(計算値)と比例限度応力との関係

Fig. 11. The relation between modulus of elasticity and stress at proportional limit.

$$\sigma_b > E_{\text{cal.}} \times \frac{1}{200}$$

という不等式がなりたつ。一方，圧縮強さ（σ_c）とヤング係数（$E_{\text{av.}}$）との間には

$$\sigma_c > E_{\text{av.}} \times \frac{1}{300}$$

という不等式がなりたつ。以上の関係を用いれば集成材の強度は簡単に，有効にまた安全性をもって評価しうる。

一方，比例限度についてみると，前述の木構造設計基準では，圧縮および曲げにおける比例限度をその破壊強度の 2/3 としているが，実験結果における比例限度の破壊強度に対する割合は大体において 2/3 より小さく，このため，図11に示すように，上述の値の 2/3，すなわち $E_{\text{cal.}} \times 1/300$，$E_{\text{av.}} \times 1/450$ よりも比例限度（σ_{bp} および σ_{cp}）が低いものがあった。

この方法をもっと数多くの実験によって検討すれば，より一層確実な数値を求めうることになろう。

結　　言

直径 30 cm 以下の北海道産ダケカンバ，シナノキ，ヤマハンノキおよびハルニレの丸太を原木とし，これらから厚さ 2 cm のラミナを作製した。このラミナについて曲げヤング係数を測定して組合せをきめ，単一樹種およびダケカンバ材を表面材として 3 枚の芯材には他樹種を用いたそれぞれ 5 枚積層の 10×10×160 cm の通直集成材 32 個を製作して，その強度試験を行なった。結果の概要はつぎのとおりである。

1) ダケカンバ材だけから作った集成材は強度およびヤング係数においてもっともすぐれていた。表面材にダケカンバ材を，芯材（3 枚）には，他樹種を用いたものは比重はダケカンバ材より小さいにもかかわらず，曲げ比例限度，圧縮比例限度，ヤング係数，すなわち比例限度内の諸性質はダケカンバ材のみからなる集成材とほとんど等しい値を示した。またこれらをシナノキ，ヤマハンノキおよびハルニレの各単一樹種による集成材に比べれば，表面材にダケカンバ材を用いた集成材の強度およびヤング係数は向上し，かつ安定したものとなった。

2) ハルニレ材による集成材ではその強度およびヤング係数にばらつきが大きいが，ヤング係数の大きいラミナを表面材とすることによって，その性質が安定したものとなった。

3) ラミナの曲げヤング係数から計算した集成材の曲げヤング係数（$E_{\text{cal.}}$）とその実験値（E_b）を比較すると，前者の方がやや大きく，実験値/計算値 は平均 0.93，最大 1.14，最

小0.84であった。

4) ラミナの平均ヤング係数(計算値, $E_{av.}$)と集成材の縦圧縮ヤング係数(E_c)はよく合致し，実験値/計算値は平均1.00，最大1.13，最小0.89であった。

5) ヤング係数(ラミナからの計算値，$E_{cal.}$および$E_{av.}$)と曲げ強さ(σ_b)および縦圧縮強さ(σ_c)との間には密接な関係は認められないが，全体として

$$\sigma_b > E_{cal.} \times \frac{1}{200}$$

$$\sigma_c > E_{av.} \times \frac{1}{300}$$

という不等式が成立した。

6) 木構造設計基準における広葉樹II類普通構造材の短期許容応力度は曲げ200 kg/cm², 圧縮140 kg/cm²であり，同じく無欠点ラミナからなる5枚構成の集成材の短期許容応力度は曲げ364 kg/cm², 圧縮218 kg/cm²である。ここに試験した集成材の曲げ強さは前者の2.2～6.1倍，後者の1.2～3.3倍，圧縮強さは前者の2.6～4.6倍，後者の1.7～2.9倍であった。

文　　献

1) CURRY, W. T.: Laminated beams from two species of timber, theory of design. For. Prod. Res. Special Rept. No. 10, Dept. Sci. Ind. Res. *London* 1955.
2) 日本建築学会：木構造設計規準・同解説. 日本建築学会, 1961.
3) 林業試験場編：木材工業ハンドブック. 丸善, 1958.
4) 沢田　稔：木材梁に関する研究(第2報). 矩形断面集成材梁の曲げ破壊係数. 林試報, 71, 81–119, 1954.
5) 沢田　稔：木材の強度特性に関する研究. 主として，その木材梁への適用. 林試報, 108, 116–224, 1958.
6) 集成材研究班：集成材に関する研究(第1報). 通直集成材の製造およびその材質試験について. 林試報, 101, 101–176, 1957.
7) 渡辺治人・又木義博：二樹種集成梁に関する研究(1). 表板と芯板の割合と修正係数との関係. 九大演報, 36, 87–96, 1962.
8) 山井良三郎：木材の圧縮異方性に関する研究. 林試報, 113, 57–110, 1959.
9) 湯浅亀一：材料力学. 山海堂, 1939.

Summary

In this paper, the mechanical properties of laminated wooden beams and short columns made from two-species of hardwood were investigated in comparison with those from single-species. For this study, the following four species of hardwoods grown in Hokkaido were provided as material for fabricating the laminated wood:

Japanese name	Botanical name	Mark in this paper
Dakekanba	(*Betula ermani* CHAM.)	B
Shinanoki	(*Tilia japonica* SIMK.)	T
Yamahan-noki	(*Alnus hirsuta* TURCZ.)	A
Harunire	(*Ulmus davidiana* PLANCHON var.*japonica* NAKAI)	U

In these hardwoods, Dakekanba has the highest strength properties and specific gravity, Shinanoki and Yamahan-noki are slightly weaker and lighter species, and the strength properties of Harunire vary over a very wide range. In the case of fabricating two-species laminated wooden beams, therefore, the laminae of Dakekanba wood were used for the face material. Thickness of the lamina was about 2.00 cm.

Before the fabrication, the modulus of elasticity of each lamina was calculated in the following way: At the mid-point of the span ($l = 150$ cm), a lamina was deflected by a roll mounted on a portable spring balance. When the deflection attained to 1 cm the load applied (P kg) was measured by the balance. The modulus of elasticity (E_b) was calculated by the following equation,

$$E_b = \frac{Pl^3}{4ybh^3} \text{ kg/cm}^2$$

where, y is the deflection (1 cm), b and h are the width and height of the lamina in cm, respectively.

The laminated wooden beams were made from five horizontal laminations that were glued to each other using a kind of urea-formaldehyde resin under pressure of 10–12 kg/cm^2 for 15 hours or more at about 55°C. temperature. The size of the beam was 10×10×160 cm. The combination of species in fabricating the beams, number of the beams and their marks are as follows:

Species		No. of beams	Mark	
Face	Core			
Dakekanba (*Betula* sp.)	Dakekanba	3	B B 1–3	
Shinanoki (*Tilia* sp.)	Shinanoki	3	T T 1–3	
Yamahan-noki (*Alnus* sp.)	Yamahan-noki	3	A A 1–3	
Harunire (*Ulmus* sp.)	Harunire	8	U U 1–8	
Dakekanba	Shinanoki	5	B T 1–5	
Dakekanba	Yamahan-noki	5	B A 1–5	
Dakekanba	Harunire	5	B U 1–3	B U (T) 4–5
	(Total)	32		

For the fabricated laminated wood, tests of static bending and compression parallel to the grain were made by using the Amsler testing machine with 150,000 kg capacity.

In the static bending test, the load was applied at the mid-point of 150 cm span and the deflection of the beam and the strain of each lamina in it were measured at 200 kg load increments. After the bending test, a 20 cm-long short column was cut from the non-destructive part of the beam tested, and the test of compression was made. In this test, the strain was measured by a set of mirror extensometer with 10 cm gage length mounted on the central part of the specimen at 2000 kg load increments. Also the annual increment of growth ring, specific gravity, and moisture content of each lamina were measured by using a 5 cm-long piece cut from the beam tested.

The results of tests are summarized as follows:

1) The laminated beams consisting entirely of Dakekanba wood showed the highest values in the mechanical properties and specific gravity. The stresses at proportional limit and the moduli of elasticity for the beams made from two-species of wood, Dakekanba for the face material and the other species for the core, were very similar to those for the beams made from single-species of Dakekanba although the specific gravity was less. The beams made from two-species noted above were superior in the mechanical properties to the beams made from single-species of Shinanoki, Yamahannoki and Harunire.

2) The properties of the laminated beams made from Harunire varied over a very wide range: the moduli of rupture were 460 to 1210 kg/cm^2, and the moduli of elasticity were 51 to 137×10^3 kg/cm^2. In these beams, improvements in the strength characteristics could be obtained by gluing the laminae with relatively high stiffness to a core consisting of the weaker laminae: the moduli of rupture and elasticity of these beams (UU 4-8) were 859 to 1210 kg/cm^2 and 96 to 137×10^3 kg/cm^2, respectively.

3) In general, the theoretical value ($E_{\text{cal.}}$) of the modulus of elasticity for the laminated beams was slightly larger than the experimental value (E_b): the average of the value of ratio $E_b/E_{\text{cal.}}$ was 0.93, the maximum was 1.14 and the minimum 0.84. In this case, the theoretical value ($E_{\text{cal.}}$) was calculated by the following equation,

$$E_{\text{cal.}} = \sum (E_i\ I_i)/I \text{ kg/cm}^2$$

where, E_i and I_i are the modulus of elasticity of lamina-i and the moment of inertia of the same lamina about the neutral axis of the beam. I is the moment of inertia of the beam.

4) The average value ($E_{\text{av.}}$) of the moduli of elasticity of five laminae of a beam agreed generally with the experimental value (E_c) of the modulus of elesticity in compression for the short column cut from the beam: the average of the value of ratio $E_c/E_{\text{av.}}$ was 1.00, the maximum was 1.13 and the minimum 0.89.

5) Relations of the modulus of rupture (σ_b) of the beam and the maximum crushing strength (σ_c) of the short column to the theoretical values of the moduli of elasticity in bending and compression ($E_{\text{cal.}}$ and $E_{\text{av.}}$) were shown as follows:

$$\sigma_b > E_{\text{cal.}} \times \frac{1}{200}$$

$$\sigma_c > E_{\text{av.}} \times \frac{1}{300}$$

6) In Japan, the allowable stress intensities under short-time service and the moduli of elasticity for structural lumber of hardwoods (II) such as *Betula*, *Tilia*, *Alnus*, *Ulmus* species are as follows:

	Compression parallel to grain (kg/cm^2)	Bending and tension parallel to grain (kg/cm^2)	Modulus of elasticity ($10^3\ kg/cm^2$)
Standard lumber	140	200	80
High grade lumber	182	260	90
5-ply laminated wood made from clear laminae	218	364	90

The moduli of rupture of the laminated beams tested in this paper were about 220 to 610 per cent of the allowable stress intensity for the standard lumber and about 120 to 330 per cent of that for the laminated wooden beams made from clear laminae. The values of the maximum crushing strength of the short columns tested to the allowable stress intensities noted above were about 260 to 460 per cent and 170 to 290 per cent, respectively.

付　　錄

1. 小型無欠点試験片の強度試験結果
2. ラミナの性質

(記　　号)

R_w: 平均年輪幅 (mm)
r_n: 試験時比重
u: 含　水　率 (%)
σ_{bp}: 曲げ比例限度 (kg/cm²)
σ_b: 曲　げ　強　さ (kg/cm²)
E_b: 曲げヤング係数 (10^3 kg/cm²)
σ_c: 縦圧縮強さ (kg/cm²)
B: ダケカンバ
T: シナノキ
A: ヤマハンノキ
U: ハルニレ

APPENDIX

1. Results of mechanical tests for small clear specimens
2. Properties of lamina

(Marks)

R_w: Average width of annual rings (mm)
r_u: Specific gravity based on weight and volume at the time of test
u: Moisture content in percent of oven-dry weight
σ_{bp}: Stress at proportional limit in bending (kg/cm²)
σ_b: Modulus of rupture (kg/cm²)
E_b: Modulus of elasticity in bending (10^3 kg/cm²)
σ_c: Max. crushing strength (kg/cm²)
B: Dakekanba (*Betula ermani*)
T: Shinanoki (*Tilia japonica*)
A: Yamahan-noki (*Alnus hirsuta*)
U: Harunire (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)

付録 1. 小型無欠点試験片の強度試験結果

APPENDIX 1. Results of mechanical tests for small clear specimens

(1) Dakekanba (*Betula ermani*)

No.	R_w	r_u	u	σ_{bp}	σ_b	E_b	σ_c
1	1.0	0.68	12.1	518	1292	127	680
2	1.2	0.69	12.1	601	1215	138	660
3	1.1	0.69	14.1	565	1343	133	700
4	0.9	0.68	12.9	562	1279	127	640
5	1.2	0.67	12.4	574	1252	118	649
6	1.2	0.67	12.2	588	1279	120	650
7	0.9	0.68	12.3	555	1291	125	674
8	1.0	0.68	12.8	562	1308	132	649
9	1.0	0.68	11.9	678	1358	130	713
10	1.1	0.67	12.0	595	1142	128	678
11	1.0	0.69	11.6	510	1271	120	698
12	1.2	0.67	11.5	670	1338	121	682
13	1.3	0.66	12.3	630	1202	131	664
14	0.8	0.68	13.1	640	1236	117	649
15	1.0	0.67	12.1	605	1211	127	668
16	1.2	0.66	12.2	540	1286	116	645
17	0.9	0.69	12.7	610	1312	138	672
18	1.1	0.68	12.4	570	1210	112	660
19	0.9	0.68	12.5	690	1392	172	730
20	1.0	0.68	12.5	610	1171	117	684
Av.	1.1	0.68	12.4	589	1269	124	676

付録 1. (続き)

APPENDIX 1. (Continued)

(2) Shinanoki (*Tilia japonica*)

No.	R_w	r_u	u	σ_{bp}	σ_b	E_b	σ_c
1	4.2	0.40	10.0	280	589	54	348
2	1.8	0.46	9.8	295	719	70	418
3	1.6	0.49	9.7	300	771	78	456
4	1.5	0.47	9.7	335	816	80	433
5	1.9	0.49	10.4	345	782	77	446
6	1.3	0.48	9.5	375	822	79	435
7	1.5	0.45	8.8	340	738	65	420
8	3.2	0.48	10.0	300	730	72	432
9	5.0	0.43	10.2	250	627	69	337
10	3.1	0.44	10.9	291	661	64	380
11	3.9	0.47	9.8	390	785	68	425
12	2.4	0.49	9.7	340	752	75	465
13	4.0	0.49	11.1	375	836	88	447
14	1.4	0.45	9.5	295	698	61	400
15	1.6	0.41	9.6	310	618	57	340
16	1.2	0.48	9.6	340	890	78	464
17	1.2	0.49	9.5	345	711	71	443
18	3.3	0.47	10.6	345	736	76	384
19	4.0	0.49	10.9	400	800	98	408
20	2.2	0.45	9.4	240	592	58	310
Av.	2.4	0.47	9.8	315	709	71	421

付録 1. (続 き)

APPENDIX 1. (Continued)

(3) Yamahan-noki (*Alnus hirsuta*)

No.	R_w	r_u	u	σ_{bp}	σ_b	E_b	σ_c
1	1.3	0.48	11.6	300	735	77	345
2	2.5	0.55	12.9	400	871	74	426
3	2.5	0.50	11.6	345	859	85	394
4	1.7	0.51	12.7	300	830	78	382
5	1.5	0.51	12.9	340	856	84	378
6	2.5	0.52	12.7	225	621	62	323
7	3.0	0.50	12.5	300	744	71	379
8	2.5	0.57	11.2	386	859	83	501
9	2.2	0.54	12.2	387	863	76	440
10	1.9	0.49	13.0	345	751	74	374
11	3.4	0.54	11.4	360	939	94	445
12	1.5	0.50	12.6	345	825	77	408
13	2.5	0.50	11.5	300	770	78	425
14	1.3	0.53	12.6	230	671	56	299
15	3.0	0.58	12.7	350	894	96	393
16	2.4	0.53	11.1	315	783	98	425
17	2.5	0.53	11.5	335	835	79	405
18	1.8	0.53	12.7	305	762	73	335
19	2.7	0.52	12.4	380	886	76	412
20	3.1	0.53	12.8	365	883	79	351
Av.	2.4	0.52	12.6	321	798	79	381

付録 1. (続 き)

APPENDIX 1. (Continued)

(4) Harunire (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)

No.	R_w	r_u	u	σ_{bp}	σ_b	E_b	σ_c
1	1.6	0.56	10.8	350	874	78	500
2	1.6	0.55	10.9	430	876	76	509
3	0.9	0.43	9.5	305	525	43	328
4	1.0	0.44	10.3	295	515	42	335
5	1.7	0.55	10.9	340	809	68	499
6	1.3	0.54	10.9	390	803	68	402
7	1.2	0.41	9.7	166	438	33	342
8	1.2	0.40	10.3	210	467	38	305
9	1.5	0.52	10.4	326	616	58	461
10	1.1	0.43	10.4	300	575	50	372
11	1.4	0.51	10.4	326	596	52	440
12	0.9	0.43	10.5	220	522	49	326
13	1.5	0.56	10.7	395	874	80	495
14	0.9	0.43	10.6	260	515	46	320
15	1.1	0.47	10.6	270	678	55	371
16	1.3	0.53	10.3	290	749	64	422
17	1.3	0.44	9.9	255	553	49	338
18	1.1	0.53	10.4	295	713	65	415
19	1.0	0.45	9.7	250	540	45	399
20	1.1	0.43	10.0	280	573	40	306
Av.	1.1	0.45	10.4	286	617	51	385

付録 2. ラミナの性質
APPENDIX 2. Properties of lamina

Beam No.	(Species)	Lamina No.	R_w	r_u	u	E_b
BB 1	(B)	1	1.3	0.77	12.3	185
	(B)	2	1.5	0.71	12.9	157
	(B)	3	2.2	0.68	12.5	159
	(B)	4	1.6	0.70	13.1	172
	(B)	5	1.4	0.72	13.3	180
BB 2	(B)	1	2.4	0.67	12.5	148
	(B)	2	1.3	0.71	12.0	138
	(B)	3	1.4	0.69	13.5	137
	(B)	4	3.0	0.68	12.2	143
	(B)	5	2.1	0.60	12.2	142
BB 3	(B)	1	1.6	0.65	12.3	120
	(B)	2	1.4	0.67	12.4	120
	(B)	3	1.5	0.61	11.8	115
	(B)	4	1.8	0.69	12.1	121
	(B)	5	3.2	0.65	11.6	127
TT 1	(T)	1	1.5	0.54	11.1	154
	(T)	2	1.8	0.52	9.4	125
	(T)	3	2.5	0.42	12.0	117
	(T)	4	3.0	0.49	12.2	134
	(T)	5	2.2	0.55	11.9	148
TT 2	(T)	1	2.3	0.48	11.2	110
	(T)	2	2.3	0.44	10.8	107
	(T)	3	2.1	0.55	11.7	108
	(T)	4	2.1	0.52	11.2	104
	(T)	5	1.3	0.51	11.0	121
TT 3	(T)	1	2.1	0.47	11.0	90
	(T)	2	2.0	0.48	11.5	97
	(T)	3	2.8	0.44	10.8	99
	(T)	4	2.0	0.46	11.3	92
	(T)	5	3.6	0.45	11.5	89
AA 1	(A)	1	2.5	0.51	11.4	112
	(A)	2	3.0	0.53	12.0	103
	(A)	3	1.5	0.55	11.5	116
	(A)	4	2.4	0.55	11.3	115
	(A)	5	1.8	0.50	10.8	116
AA 2	(A)	1	2.6	0.50	13.0	99
	(A)	2	2.4	0.47	13.1	110
	(A)	3	2.2	0.45	15.1	99
	(A)	4	3.4	0.52	12.4	99
	(A)	5	2.0	0.49	12.0	101
AA 3	(A)	1	1.3	0.54	12.5	69
	(A)	2	3.3	0.53	14.2	93
	(A)	3	3.8	0.57	10.5	90
	(A)	4	2.9	0.56	12.9	96
	(A)	5	3.1	0.65	15.2	59
UU 1	(U)	1	2.3	0.66	14.9	142
	(U)	2	2.3	0.60	11.4	132
	(U)	3	1.8	0.52	11.1	131
	(U)	4	2.1	0.67	10.3	138
	(U)	5	1.5	0.63	10.8	136

付録 2. (続 き)

APPENDIX 2. (Continued)

Beam No.	(Species)	Lamina No.	R_w	r_u	u	E_b
UU 2	(U)	1	5.4	0.59	11.5	113
	(U)	2	1.1	0.51	10.6	99
	(U)	3	1.2	0.50	10.9	97
	(U)	4	1.2	0.54	11.3	99
	(U)	5	1.7	0.55	12.0	101
UU 3	(U)	1	0.8	0.44	14.7	61
	(U)	2	1.4	0.50	11.7	63
	(U)	3	2.0	0.52	11.6	74
	(U)	4	1.7	0.44	12.8	58
	(U)	5	1.1	0.41	11.0	51
UU 4	(U)	1	3.3	0.68	11.3	145
	(U)	2	2.1	0.61	9.3	116
	(U)	3	3.6	0.57	10.6	115
	(U)	4	2.1	0.67	11.1	116
	(U)	5	2.8	0.70	11.2	150
UU 5	(U)	1	2.5	0.65	12.6	150
	(U)	2	1.1	0.57	10.9	68
	(U)	3	1.0	0.52	11.7	72
	(U)	4	2.1	0.47	11.1	75
	(U)	5	2.5	0.68	11.5	165
UU 6	(U)	1	2.0	0.61	10.2	133
	(U)	2	1.5	0.58	12.1	91
	(U)	3	2.0	0.56	12.6	92
	(U)	4	1.0	0.49	10.2	89
	(U)	5	3.5	0.63	11.2	145
UU 7	(U)	1	1.8	0.57	10.2	126
	(U)	2	1.6	0.46	11.2	91
	(U)	3	1.8	0.51	9.6	87
	(U)	4	1.2	0.52	10.5	82
	(U)	5	1.1	0.57	10.4	117
UU 8	(U)	1	4.0	0.67	10.8	125
	(U)	2	1.8	0.50	10.4	90
	(U)	3	1.3	0.50	10.4	76
	(U)	4	1.7	0.47	10.2	73
	(U)	5	3.6	0.56	10.9	121
BT 1	(B)	1	1.3	0.70	14.2	204
	(T)	2	1.6	0.57	11.3	125
	(T)	3	2.4	0.63	9.8	128
	(T)	4	1.9	0.54	10.7	142
	(B)	5	2.8	0.70	12.7	191
BT 2	(B)	1	1.3	0.67	13.9	165
	(T)	2	2.5	0.50	11.3	123
	(T)	3	3.2	0.44	10.0	106
	(T)	4	1.3	0.50	12.1	107
	(B)	5	1.7	0.67	12.9	161
BT 3	(B)	1	1.3	0.66	12.3	155
	(T)	2	2.0	0.55	10.6	130
	(T)	3	2.2	0.55	11.4	119
	(T)	4	5.0	0.44	11.1	135
	(B)	5	3.6	0.64	11.7	155

付録 2. (続 き)

APPENDIX 2. (Continued)

Beam No.	(Species)	Lamina No.	R_w	r_u	u	E_b
BT 4	(B)	1	2.0	0.66	10.2	135
	(T)	2	2.7	0.51	11.0	108
	(T)	3	2.1	0.48	10.1	114
	(T)	4	3.2	0.46	10.6	113
	(B)	5	1.7	0.66	11.5	142
BT 5	(B)	1	1.2	0.64	12.4	121
	(T)	2	1.9	0.42	10.4	111
	(T)	3	4.6	0.45	10.4	82
	(T)	4	2.3	0.43	9.4	98
	(B)	5	2.4	0.51	12.0	136
BA 1	(B)	1	2.2	0.72	10.9	186
	(A)	2	2.2	0.52	12.9	108
	(A)	3	2.5	0.48	9.0	100
	(A)	4	2.2	0.52	12.6	90
	(B)	5	1.0	0.72	12.5	203
BA 2	(B)	1	0.9	0.77	12.6	158
	(A)	2	2.2	0.54	13.4	108
	(A)	3	2.2	0.55	13.9	100
	(A)	4	2.1	0.54	12.3	122
	(B)	5	1.7	0.71	14.2	157
BA 3	(B)	1	4.8	0.67	12.5	148
	(A)	2	2.8	0.51	13.6	117
	(A)	3	2.0	0.54	11.8	97
	(A)	4	2.0	0.52	11.6	117
	(B)	5	1.3	0.69	13.5	151
BA 4	(B)	1	1.5	0.68	12.0	128
	(A)	2	2.3	0.52	12.3	101
	(A)	3	2.0	0.52	13.8	97
	(A)	4	2.2	0.53	12.2	119
	(B)	5	1.3	0.58	12.7	122
BA 5	(B)	1	1.0	0.60	11.2	125
	(A)	2	2.7	0.69	12.7	120
	(A)	3	2.2	0.48	12.8	117
	(A)	4	2.0	0.49	12.4	125
	(B)	5	1.1	0.51	10.8	124
BU 1	(B)	1	1.8	0.64	11.6	151
	(U)	2	1.7	0.63	10.5	119
	(U)	3	7.5	0.62	9.9	121
	(U)	4	1.6	0.59	10.3	114
	(B)	5	2.0	0.72	12.7	163
BU 2	(B)	1	1.3	0.82	12.1	150
	(U)	2	1.1	0.53	11.4	101
	(U)	3	0.8	0.51	10.4	85
	(U)	4	2.1	0.63	12.0	96
	(B)	5	1.6	0.70	12.1	154
BU 3	(B)	1	1.7	0.62	12.7	149
	(U)	2	2.2	0.58	10.6	126
	(U)	3	2.1	0.60	11.9	126
	(U)	4	2.5	0.67	12.0	125
	(B)	5	1.5	0.65	11.8	157

付録 2. (続 き)

APPENDIX 2. (Continued)

Beam No.	(Species)	Lamina No.	R_w	r_u	u	E_b
BU (T) 4	(B)	1	2.0	0.62	10.6	138
	(U)	2	2.1	0.49	11.3	110
	(T)	3	1.8	0.50	11.8	112
	(U)	4	1.5	0.59	10.0	118
	(B)	5	2.7	0.73	13.1	138
BU (T) 5	(B)	1	1.7	0.68	12.3	130
	(U)	2	2.0	0.64	11.0	110
	(T)	3	2.0	0.45	11.6	110
	(U)	4	2.8	0.51	10.5	99
	(B)	5	1.8	0.61	9.8	125