

# 接着された木質材料中の内部応力 第1報

## 挽板間の膨張収縮差によって集成材中に 生ずる内部応力および内部応力と剝離促 進試験結果との関係

椋 代 純 輔<sup>(1)</sup>

### 1. 緒 言

近年、接着技術の進歩とともに、種々な構成の木製品が出現しているが、これら製品のうちには、接着される材料の組合せ方が不適当であるために、狂い、化粧単板等の表面割れ、剝離などの欠点が生ずる場合が非常に多いことは周知のことからであろう。これらの欠点は、筆者がすでに報告<sup>10)</sup>したように接着時に生ずる残留応力とともに、接着後における平衡含水率の変化によって被接着材間の膨張収縮差のために生ずる内部応力、あるいは材中の含水率傾斜のために生ずる内部応力に原因する。したがって、これら欠点を起こす原因となる内部応力の発生状態を究明しなければならないことはもちろんである。接着された木製品の場合もっとも注目されるのは、接着された材間の膨張収縮差による内部応力の発生状態であろう。

本報告は木材—木材接着の集成材において平衡含水率の変化をうけた場合、膨張収縮差によって生ずる内部応力の発生状態を明らかにし、さらに先に筆者が同様な構成の試片について行なった剝離試験の結果との関連について考察を加えたものである。

本研究を行なうに当たって種々ご指導、ご援助をいただいた上村 武木材部長、加納 孟材料科長、蕪木 自輔物理研究室長、中村 章材質改料科長、菅野養作接着研究室長、その他部内関係者に謝意を表する。

### 2. 実 験 方 法

#### (A) 応力計算方法

本実験では、ミズナラ—エゾマツ—ミズナラの3層積層構成の集成材が、平衡含水率変化を受けたとき、ミズナラ外層材とエゾマツ内層材との膨張収縮差によって、エゾマツ内層材中に生ずる内部応力状態を知ることを目的とした。

Fig. 1 において材の板目、あるいは柁目方向が  $X$ - $Y$ -軸に一致したとき、

$X$  軸方向の変位量を  $v$ ,  $Y$  軸方向の変位量を  $u$ ,  
 $X$  軸方向の自由な状態における膨張収縮率を  $\alpha_x$ ,  
 $Y$  軸方向の自由な状態における膨張収縮率を  $\alpha_y$ ,  
含水率変化を  $m$ ,  
膨張収縮にともなうて生ずる応力に相当する歪

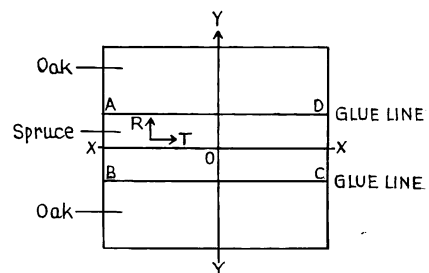


Fig. 1 試 片 Specimen

(1) 木材部材料科物理研究室

を  $X$ -,  $Y$ - 軸方向についておのおの  $\varepsilon_X$ ,  $\varepsilon_Y$  とする。

しかるとき,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} &= \varepsilon_X + \alpha_X m \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \varepsilon_Y + \alpha_Y m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

板目, 柁目方向が  $X$ -,  $Y$ - 軸に一致している場合には, 膨張収縮によるひきは生じないので, せん断応力による歪  $\gamma_{XY}$  は,

$$\gamma_{XY} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

一方,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} (\varepsilon_X + \mu_{YX}\varepsilon_Y) \\ \sigma_Y &= \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} (\varepsilon_Y + \mu_{XY}\varepsilon_X) \\ \tau_{XY} &= G_{XY}\gamma_{XY} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$\sigma_X$ :  $X$ 軸方向の,  $Y$ 軸に垂直な応力

$\sigma_Y$ :  $Y$ 軸方向の,  $X$ 軸に垂直な応力

$\tau_{XY}$ :  $XY$ 面内のせん断応力,  $E_X$ :  $X$ 方向のヤング係数,

$E_Y$ :  $Y$ 方向のヤング係数,  $G_{XY}$ :  $XY$ 面内でのせん断弾性係数

$\mu_{XY}$ ,  $\mu_{YX}$ : ポアソン比

(3)式へ(1), (2)式の $\varepsilon_X$ ,  $\varepsilon_Y$ ,  $\gamma_{XY}$ を代入すれば,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \alpha_X m + \mu_{YX} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \alpha_Y m \right) \right) \\ \sigma_Y &= \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} - \alpha_Y m + \mu_{XY} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \alpha_X m \right) \right\} \\ \tau_{XY} &= G_{XY} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

一方応力の釣合いより,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_X}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{YX}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_Y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(5)式へ(4)式を代入すれば,

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu_{YX} \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right) + G_{XY} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right) &= 0 \\ \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \mu_{XY} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right) + G_{XY} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

したがって(6)式を与えられた  $u$ ,  $v$  に関する境界条件によって解き, 各点の  $u$ ,  $v$  を(4)式に代入して各点の応力は求められる。

この境界条件としては, 測定時のエゾマツの周辺における変形量をとればよい。しかしながら Fig. 1 における両端面  $AB$ , および  $DC$  辺においては外力がないので,

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = 0 \\ \tau_{xy} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

なる境界条件が満足されねばならない。

前記 (6) 式の解を求め、さらに (4) 式によって応力を求めるに当たっては、差分法による数値解析法 (Relaxation method) で行なった。

Y-軸方向に 6 等分、X-軸方向に 11 等分、したがって X-, Y-軸方向におおの 3 mm に等分して Mesh point をとったが、X- 軸、Y- 軸に対して  $v$ ,  $u$  は 0、または対称となるので、計算は 1/4 部分について行なえばよいこととなる。

本実験では、後記のようにすべて湿潤状態のエゾマツ材の応力状態を解析したのであるが、エゾマツ材の湿潤状態における弾性常数の決定に当たっては、適当なデータがないため、木材工業ハンドブック<sup>11)</sup>に記載されている気乾時の値をもとにして、HEARMON, R. F. S: The Elasticity of wood and plywood<sup>8)</sup>中に示されている Sitka spruce の含水率変化による弾性常数の変化率を参考として次のごとくきめた。

$$E_T; 2.2 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_R; 4.2 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mu_{TR}; 0.48$$

$$\mu_{RT}; 0.91$$

$$G_{TR}=G_{RT}; 0.12 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

その結果 (4) 式および (6) 式はおおの次の差分方程式によって示される。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x(t,j) = 6.5 \times 10^8 \times [(v(t,j+1) - v(t,j-1)) - \alpha_{xm} + 0.91 \times \{u(t+1,j) - u(t-1,j) - \alpha_{ym}\}] \\ \sigma_y(t,j) = 12.5 \times 10^8 \times [(u(t+1,j) - u(t-1,j)) - \alpha_{ym} + 0.48 \times \{(v(t,j+1) - v(t,j-1)) - \alpha_{xm}\}] \\ \tau_{xy}(t,j) = 0.2 \times 10^8 \times [(u(t,j+1) - u(t,j-1)) + (v(t+1,j) - v(t-1,j))] \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)'$$

$$\left. \begin{array}{l} -15154.8 u(t,j) + 7457.4(u(t+1,j) + u(t-1,j)) + 120.0(u(t,j-1) + u(t,j+1)) \\ + 924.9(v(t+1,j+1) - v(t-1,j+1) + v(t-1,j-1) - v(t+1,j-1)) = 0 \\ -8052.6 v(t,j) + 120.0(v(t+1,j) + v(t-1,j)) + 3906.3(v(t,j+1) + v(t,j-1)) \\ + 918.7(u(t+1,j+1) - u(t-1,j+1) + u(t-1,j-1) - u(t+1,j-1)) = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)'$$

境界条件としては、Fig. 1 における AD、および BC 辺では測定された変位量  $u$ ,  $v$  で与えられ、Center line X-X、および Y-Y 辺では  $u$ ,  $v$  はおおの 0 で与えられる。AB、および DC 辺では前記のように (7) 式が満足されねばならない。

Fig. 2 のように Mesh point をとり、9 点、3 点において測定変位量  $v_8$ ,  $v_9$  を与えられるとする。

1 点においては、

$$\tau_{xy} = 0, \text{ したがって差分式は}$$

$$v_9 - v_0 + u_5 - u_8 = 0 \dots\dots\dots (a)$$

0 点においては、

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \text{ なる条件を与えるるので}$$

$$4(v_1 + v_3 - 2v_0) + (u_5 - u_6 + u_7 - u_8) = 0$$

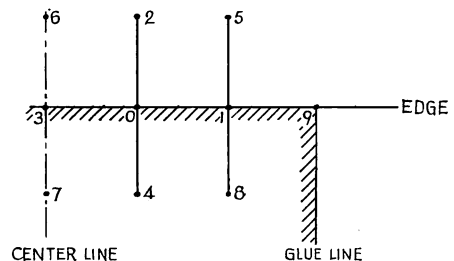


Fig. 2 端面における Mesh point  
The diagrams illustrating the mesh point at the edge.

ここで  $u_6 = u_7 = 0$  , したがって

$$4(v_1 + v_3 - 2v_0) + u_5 - u_8 = 0 \dots\dots\dots(b)$$

0点においては,

$\tau_{XY} = 0$  , したがって

$$v_1 - v_3 + u_2 - u_4 = 0 \dots\dots\dots(c)$$

3点においては,

$\frac{\partial \tau_{XY}}{\partial y} = 0$  , したがって

$$4(2v_0 - 2v_3) + 2u_2 - 2u_4 = 0 \dots\dots\dots(d)$$

(a), (b), (c), (d)式より

$$\left. \begin{array}{l} 9v_0 = v_9 + 8v_8 \\ 2v_1 = 8v_0 - 6v_3 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

上式により 0 点の  $v_0$  , 1 点の  $v_1$  が決められる。

次に  $\sigma_X = 0$  なる条件は仮想点の値を含むため、条件式として用いることができない。9, 0, 1 点の  $u$  は測定値を用い、3 点の  $u$  には 0 を与えることとした。

以上の方法によって境界条件が定められて Relaxation を行なえば、Mesh point の  $u, v$  が求められ、(4) 式によって  $\sigma_X$  ,  $\sigma_Y$  ,  $\tau_{XY}$  が決められる。

端面においては  $\sigma_X = 0$  ,  $\tau_{XY} = 0$  とし、 $\sigma_Y$  の値は  $\sigma_X = 0$  なる条件より求めた。

すなわち、たとえば Fig. 2 の 1 点では、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_X = 0 \text{ より, } v_5 - v_8 - \alpha_X m + 0.91 \{ (u_9 - u_0) - \alpha_Y m \} = 0 \\ \sigma_Y = 12.5 \times 10^3 \times \{ u_9 - u_0 - \alpha_Y m + 0.48 \{ (v_5 - v_8) - \alpha_X m \} \} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

の 2 式より求めた。

接着面における応力は、曲線の勾配が (5) 式を満足するように外挿法によって求めた。

境界線上の変位量を境界条件として、含水率変化によって生ずる内部応力を求めるには、自由な状態での収縮膨張による変形およびレオロジー的な塑性変形を除いた弾性変形のみを境界条件として求めねばならない。このためには、内部応力を求めようとする試片（本実験の場合にはエゾマツ内層材）を測定時に  $X$ —,  $Y$ — 方向に薄くスライスして、スライス片のスライス前とスライス後の長さの変化量を境界線上における  $X$ —,  $Y$ — 方向の弾性変位量  $v, u$  とし、この境界線上の変位量  $v, u$  を境界条件として、上記の (1) ~ (8) 式中の  $\alpha_X m = \alpha_Y m = 0$  とした場合の式から、上記と同様の方法で、より簡単に求めることができると考えられる。

しかしながら、このスライス法によって変位量を求めるには、ある程度の大きさの試片でないと、弾性変位量を求めることは測定技術上きわめて困難である。

本実験の場合、エゾマツ内層材の厚さは、1.8cm、長さ 6.6cm の小試片であったため、このスライス法は不適当であったので、やむをえず上記の方法をとった。

## (B) 実験方法

応力解析を次の 3 つの場合について行なった。

i) ミズナラ板目—エゾマツ板目—ミズナラ板目の 3 枚構成の集成材が飽水状態にされて、ミズナラ材

の膨張量がエゾマツ材のそれより大きいために、エゾマツ材が板目方向（試片の幅方向）に引張られている場合。

- ii) ミズナラ柾目—エゾマツ板目—ミズナラ柾目の構成の集成材が飽水状態にされて、エゾマツ材の膨張量がミズナラ材のそれより大きくて、エゾマツ材が板目方向に圧縮されている場合。
- iii) ミズナラ柾目—エゾマツ板目—ミズナラ柾目の構成の集成材が飽水状態にされた後、ミズナラ材のみが乾燥されて、エゾマツ材がさらに圧縮されている場合。

これらのおおのの場合について試片、および実験方法を次に記すこととする。

- i) ミズナラ板目—エゾマツ板目—ミズナラ板目構成の集成材が飽水状態にされて、エゾマツ材が板目方向に引張られている場合

Fig. 3 (A)のようにレゾルシノール共縮合樹脂接着剤（日本ライヒホールド化学工業株式会社製 plyophen 6000）を用いて完全な接着が行なわれるようにして製作した。

各挽板の材質は次のとおりであった。

ミズナラ (*Quercus crispula* BLUME, Japanese white Oak)

木目；板目（両端でやや追柾となる）

気乾比重（含水率12%）；0.73

気乾時（M.C 12%）より飽水時までの板目方向の平均膨張率；8.0%

エゾマツ (*Picea jezoensis* CARR., Japanese Ezo spruce)

木目；板目

気乾比重（含水率12%）；0.36

年輪密度；7

気乾時（M.C 12%）より飽水までの膨張率

板目方向；4.3%

柾目方向；1.3%

5 mm厚さの試片を繊維方向に相隣る位置より連続して6枚採取した。

エゾマツ材の接着層上では約3 mm，両側辺では約2.3mmごとにつけられた測点のX—，Y—軸方向の位置を気乾時において，5/1000 mm 読度マイクロメーター付き拡大投影機，および1/100 mm 読度ダイヤルゲージにて測定した。

その後真空注入装置によって飽水状態とし，注入後2日目にふたたび前記の方法にて各測点の位置を測

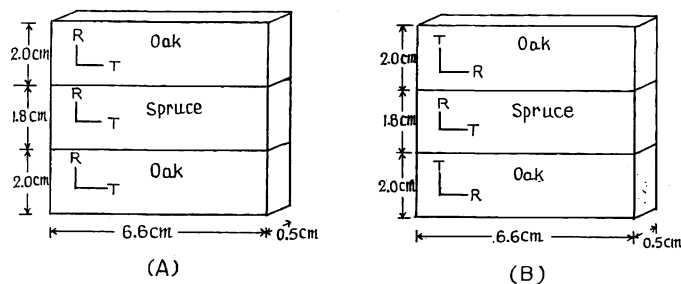


Fig. 3 試片の大きさ，および木目の組合せ方

The dimension of the specimen and combination of the grain.

定した。

測定は 1 試片について 3 回ずつ 6 試片について行なった。

各測点の位置は試片によって、また  $X$ —,  $Y$ — 軸の上下, 左右によってことなっているの、これらの測定値を 6 試片について単純に平均することはできない。そこで測定値を次のように整理した。

各試片の各測定点について変位を求め、この変位量の示す傾向に従って曲線を引き、各測点の変位はこの曲線上にあるとした。 $X$ —,  $Y$ — 軸の上下, 左右による差異は、この曲線で示される値を平均して、試片の  $X$ —,  $Y$ — 対称軸によって区切られるエゾマツ材の 1/4 部分における接着面および端面の変位を求めた。

これを 6 試片について行なって平均値を求めて境界条件とした。ただし、端面において(8)式によって求める値については、計算値を境界条件にとった。そして、測定値と比較して見たがその差は僅少であった。

一方、接着されていないエゾマツ材のみの気乾時から飽水状態までの膨張率が、同一条件の材について板目方向、柃目方向についておのおの測定された。

ii) ミズナラ柃目—エゾマツ板目—ミズナラ柃目構成の集成材が飽水状態にされて、エゾマツ材の膨張率がミズナラ材のそれより大きくて、エゾマツ材が板目方向(試片の幅方向)に圧縮されている場合

Fig. 3 (B) のように (i) の場合と同様にして接着された。

各挽板の材質は次のとおりであった。

ミズナラ

木目; 柃目

気乾比重 (含水率12%) : 0.66

気乾時 (M.C 12%) より飽水時までの柃目方向の膨張率; 2.7%

エゾマツ

木目; 板目

気乾比重 (含水率12%) : 0.38

年輪密度; 9

気乾時 (M.C12%) より飽水までの膨張率

板目方向; 4.7%

柃目方向; 1.3%

試片を相隣る位置より 2 枚採取した。

変位の測定およびデーターの整理は (i) の場合と同様にして行なった。

iii) ミズナラ柃目—エゾマツ板目—ミズナラ柃目構成の集成材が飽水状態にされた後、ミズナラ材のみ

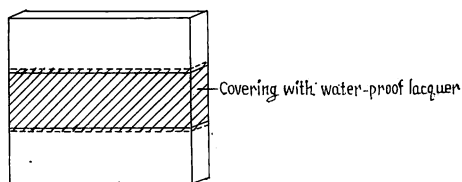


Fig. 4 試片の被覆状態  
Covering on the specimen.

が乾燥されてエゾマツ材がさらに圧縮されている場合

(ii) の場合と同じ試片を、(ii) の測定後, Fig. 4 のようにエゾマツ材部分およびミズナラ材の接着層側の約 3 mm 部分をアルミ微粉入塗料で被覆した後、30°C, R. H. 35% の条件で 8 時間ミズナラ材部分を乾燥, 20°C, R. H. 75% の条件で 1 日間調湿, さらに

塗料を2 mm剥離して、20°C、75%で12時間乾燥した。その結果、ミズナラ材の被覆されていない部分全体の平均含水率は約12%に、またエゾマツ材の接着層と接着層より内側約3 mmの間の平均含水率は約80%になった。しかしながら、接着層付近のエゾマツの含水率はこの値より低く30~40%程度になっていたと思われる。

この状態で塗料を剥離した後、変位を測定した。変位量のデーターの整理は前記のとおりである。

### 3. 内部応力の解析結果および考察

i), ii), iii) のおおのの場合について変位  $u$ ,  $v$  の状態はおおの Fig. 5. A~C, Fig. 6. A~C, Fig. 7. A~Cに示すとおりであった。

この値を境界条件とし、前記の方法で応力状態を解析した結果をエゾマツ内層材の1/4部分について、それぞれ Fig. 8. A~C, Fig. 9. A~C, Fig. 10. A~Cに示す。

図中において、 $Y$ はエゾマツ材の厚さの1/2の長さ  $H$ と  $X$ 軸からの距離との比、すなわち Fig. 8~10.

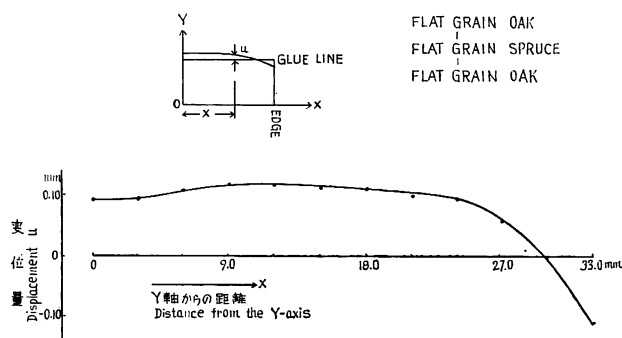


Fig. 5-A 飽水後エゾマツ材の接着面上における  
 $Y$ 方向への変位量  $u$   
Displacement  $u$  on the glued boundary of spruce  
inner lamination after water-impregnating.

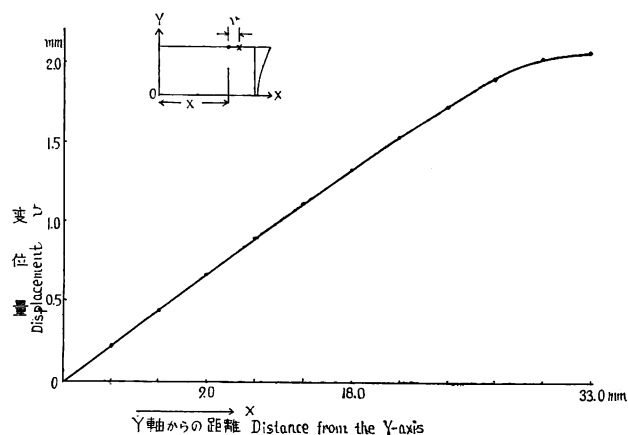


Fig. 5-B 飽水後のエゾマツ材の接着面上における  
 $X$ 方向の変位量  $v$   
Displacement  $v$  on the glued boundary of spruce  
inner lamination after water-impregnating.

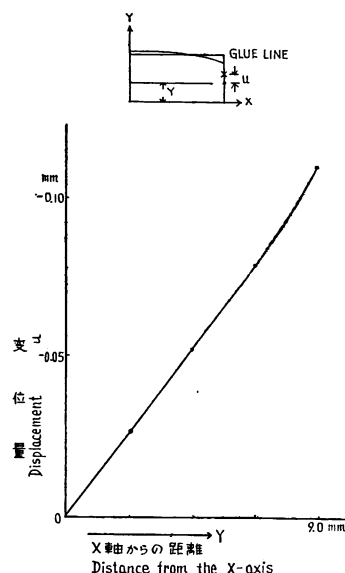


Fig. 5-C 飽水後のエゾマツ材の端  
面における  $Y$ 軸方向の変位量  $u$   
Displacement  $u$  on the edge  
boundary of spruce inner  
lamination after water-impregnating.

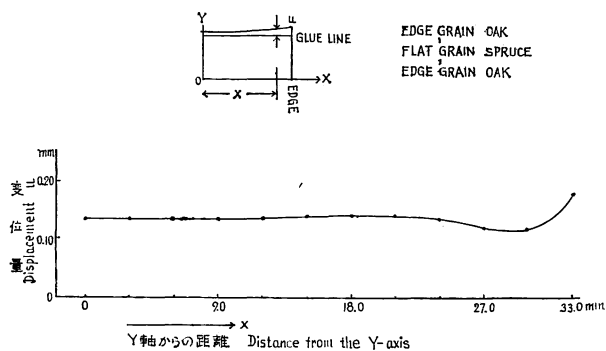


Fig. 6-A 飽水後のエゾマツ材の接着面上における  
Y方向への変位量  $u$   
Displacement  $u$  on the glued boundary of spruce  
inner lamination after water-impregnating.

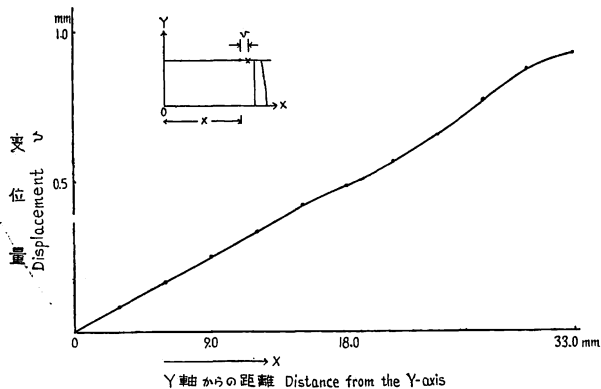


Fig. 6-B 飽水後のエゾマツ材の接着面上における  
X方向の変位量  $v$   
Displacement  $v$  on the glued boundary of spruce  
inner laminating.

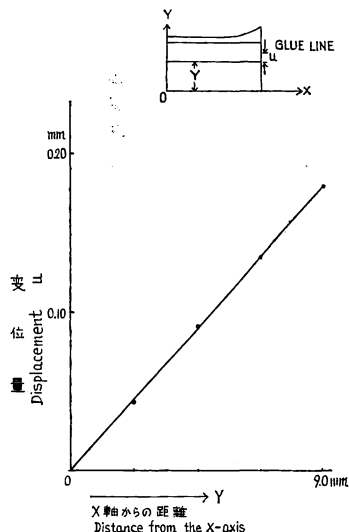


Fig. 6-C 飽水後のエゾマツ材の端  
面における Y 軸方向の変位量  $u$   
Displacement  $u$  on the edge  
boundary of spruce inner  
lamination after water-impregnating.

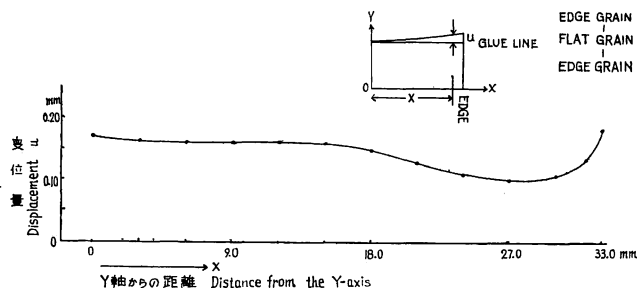


Fig. 7-A ミズナラ材の乾燥後エゾマツ材の接着面上にお  
ける Y 方向への変位量  $u$   
Displacement  $u$  on the glued boundary of spruce inner lami-  
nation at the time when oak outer laminations were dried  
after water-impregnating.



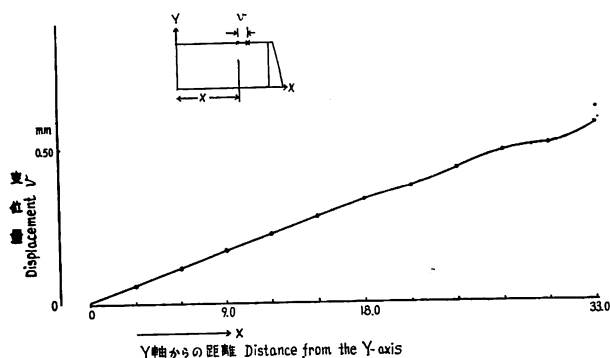


Fig. 7-B ミズナラ材の乾燥後エゾマツ材の接着面上における  $X$  方向への変位量  $v$

Displacement  $v$  on the glued boundary of spruce inner lamination at the time when oak outer laminations were dried after water-impregnating.

Aにおける  $y/H$  で表わしている。  $X$  は中心からの距離を表わす。

まず、変位量  $u$ ,  $v$ , について考察しよう。

i) と ii) の場合について比較しよう。

接着界面における  $Y$  軸方向の変位  $u$  について見れば、i)

の場合のミズナラ板目—エゾマツ板目—ミズナラ板目の構成の場合には、比較的スムーズな曲線をえがくが、ii) のミズナラ板目—エゾマツ板目—ミズナラ板目の場合には、端面付近でエゾマツ側に凸状となった部分があり、iii) の場合には特に著しく、明らかに異なった状態を示している。さらに特色ある点は、端面において前者の場合はマイナス、すなわちエゾマツ材が圧縮されるような変位をしているのに対し、後者の場合は変位がプラス、すなわち引張られているような変位を示す。

端面における  $u$  は、Fig. 5-C, Fig. 6-C, Fig. 7-C に示すように、i), ii) の場合には、ほぼ直線であって、iii) の場合には下方に凹状となる。

以上に記したような相違は応力についてもはっきりと示されていることは当然である。

Fig. 8~10 に示す応力値そのものについては、前記あるいは後記のように問題点があるので、考察については定性的な比較にとどめよう。

i) の場合  $\sigma_x$  は当然引張応力となり、ii), iii) の場合には圧縮応力となって試片中央において最大値を示す。i) の場合にはこの引張応力のために、厚さ方向の割れを生ずる原因となるだろう。

$\sigma_y$  について見れば、i) の場合には端面において比較的高い圧縮応力を示し、端面より比較的に内方で引張応力に転じている。

ii) の場合にはこれに反し、端面で引張応力となり、急勾配で下がって圧縮応力となり、そのやや内方で0に近づいている。

iii) の場合には端面においてさほどの引張応力は示さず、接着層側へ向かって次第に減少しているが、他の点では ii) の場合と類似する。

$\tau_{xy}$  について見れば、i) の場合には端面に最高値は現われないで、比較的に内方で最高値を示す。

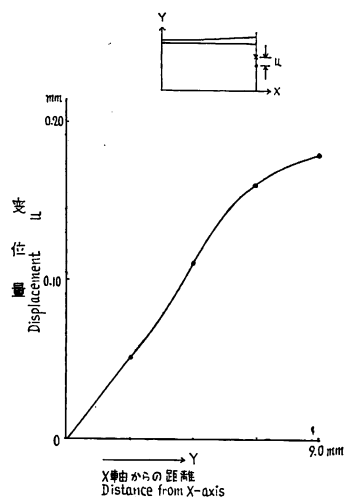


Fig. 7-C ミズナラ材の乾燥後のエゾマツ材の端面における  $Y$  軸方向の変位量  $u$

Displacement  $u$  on the edge boundary of spruce inner lamination at the time when oak outer laminations were dried after water-impregnating.

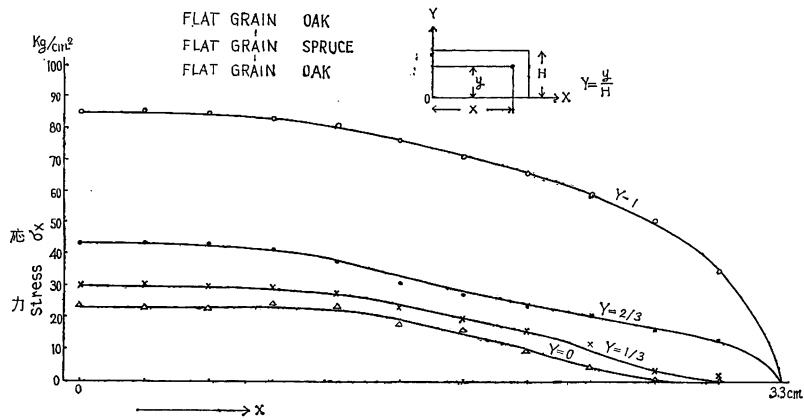


Fig. 8-A 飽水後のエゾマツ材中におけるX方向の応力 $\sigma_x$   
Stress  $\sigma_x$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

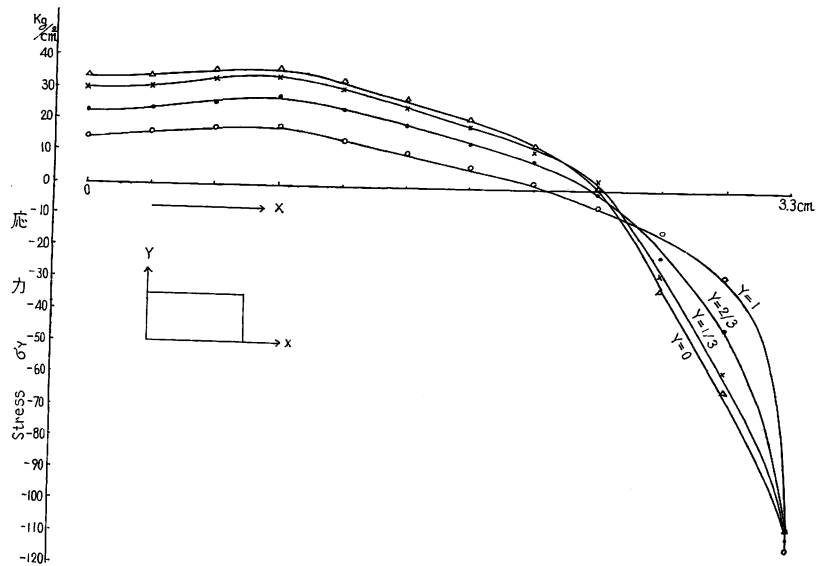


Fig. 8-B 飽水後のエゾマツ材中におけるY方向の応力 $\sigma_y$   
Stress  $\sigma_y$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

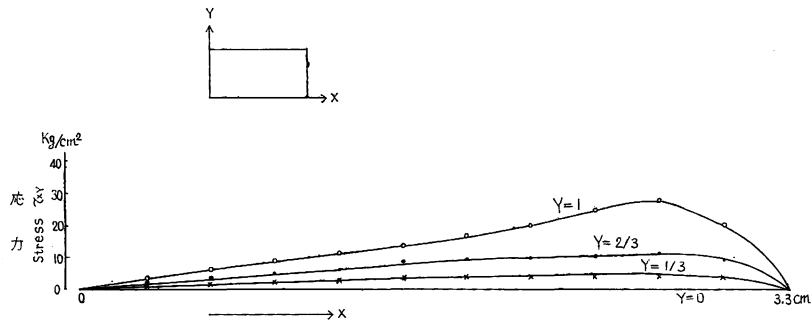


Fig. 8-C 飽水後のエゾマツ材中における剪断応力  $\tau_{xy}$   
Shear stress  $\tau_{xy}$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

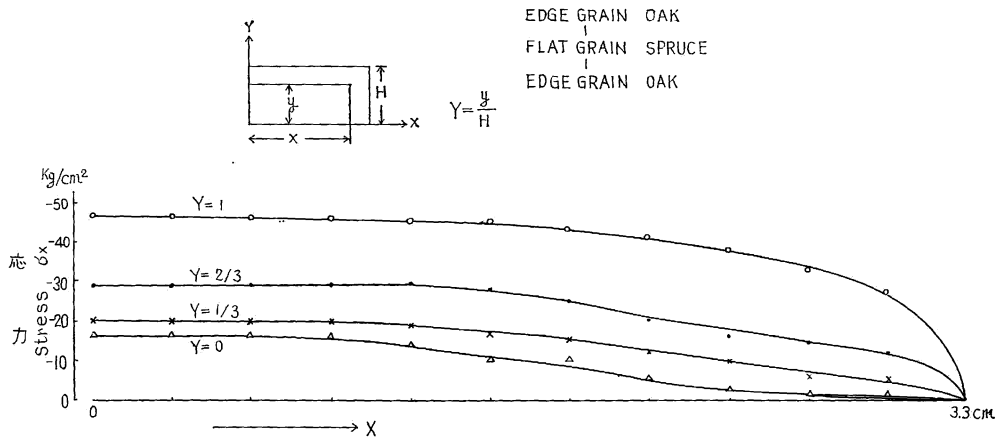


Fig. 9-A 飽水後のエゾマツ材中における  $X$  方向の応力  $\sigma_x$   
Stress  $\sigma_x$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

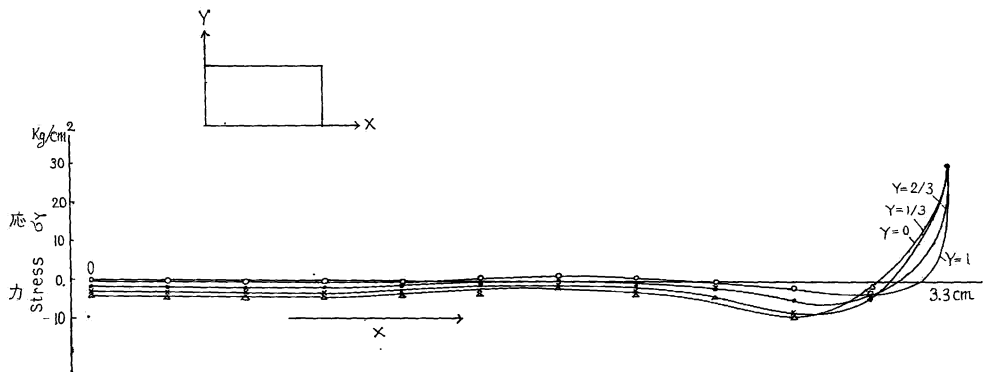


Fig. 9-B 飽水後のエゾマツ材中における  $Y$  方向の応力  $\sigma_y$   
Stress  $\sigma_y$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

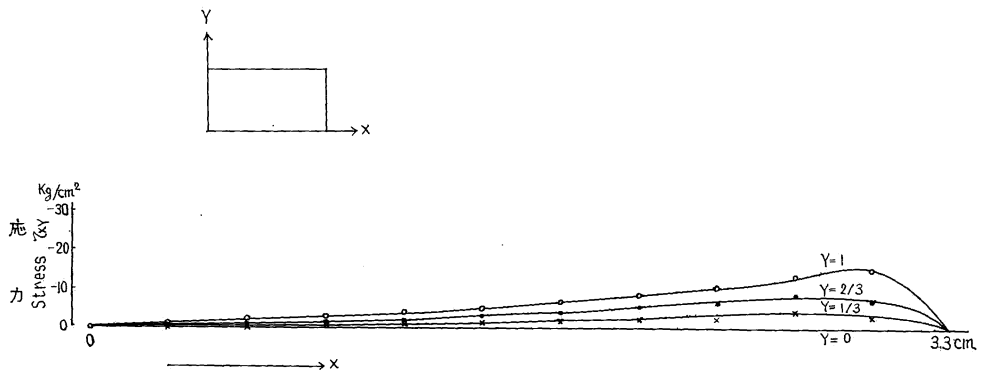


Fig. 9-C 飽水後のエゾマツ材中における剪断応力  $\tau_{xy}$   
Shear stress  $\tau_{xy}$  in the spruce inner lamination after water-impregnating.

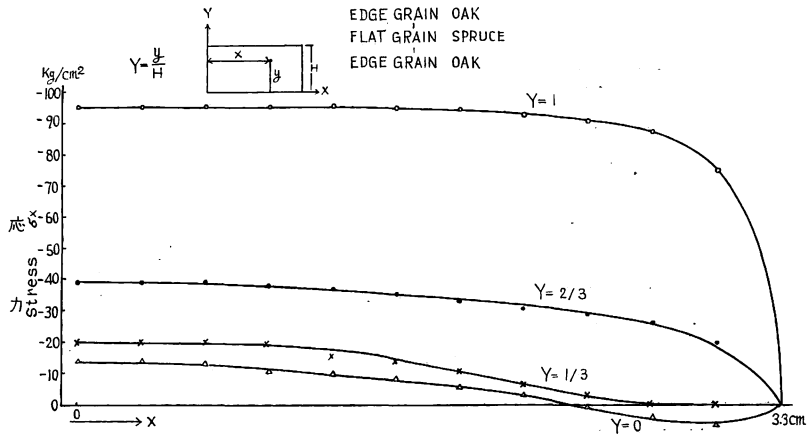


Fig. 10-A ミズナラ材乾燥後のエゾマツ材中における  $X$  方向の応力  $\sigma_x$   
Stress  $\sigma_x$  in the spruce inner lamination at the time when oak  
outer laminations were dried after water-impregnating.

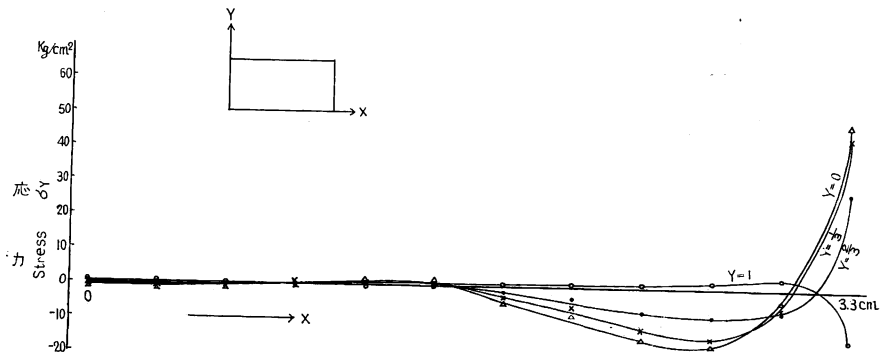


Fig. 10-B ミズナラ材乾燥後のエゾマツ材中における  $Y$  方向の応力  $\sigma_y$   
Stress  $\sigma_y$  in the spruce inner lamination at the time when oak  
outer laminations were dried after water-impregnating.

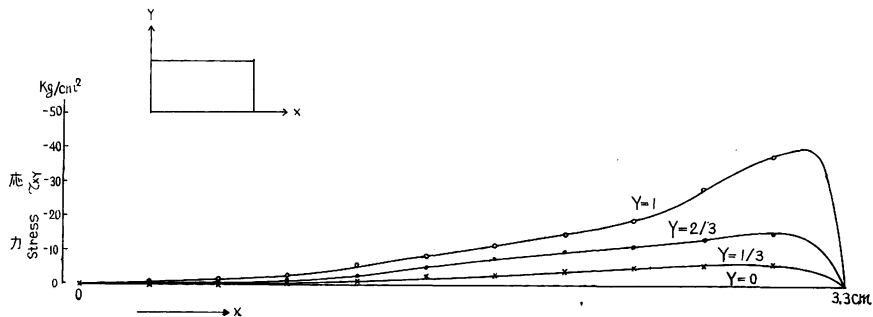


Fig. 10-C ミズナラ材乾燥後のエゾマツ材中における剪断応力  $\tau_{xy}$   
Shear stress  $\tau_{xy}$  in the spruce inner lamination at the time when oak  
outer laminations were dried after water-impregnating.

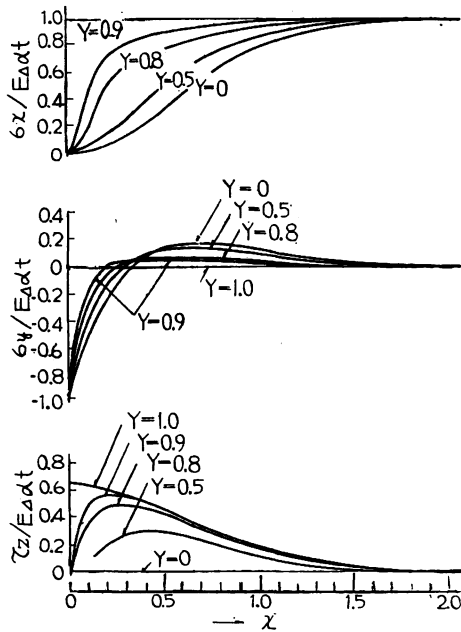


Fig. 11 内層材の端面近辺の応力分布  
Stress distribution in plastic lamination  
of 3 ply material composed of metal-plasticmetal. (by KOBATAKE and INOUE)  
 $\sigma_x$ ; Stress perpendicular to  $y$  axis.  
 $\sigma_y$ ; Stress perpendicular to  $x$  axis.  
 $\tau_{xy}$ ; Shear stress on  $x y$  plane.

$Y$  shows  $\frac{y}{h}$

$X$  shows  $(b-x)/2h$   $b = \frac{l}{h}$

$Y=0$  at center in thicknesswise.

$Y=1$  at glue line.

$X=0$  at edge of plastic lamination.

$b \gg 1$

$h$ ; Thickness of plastic lamination

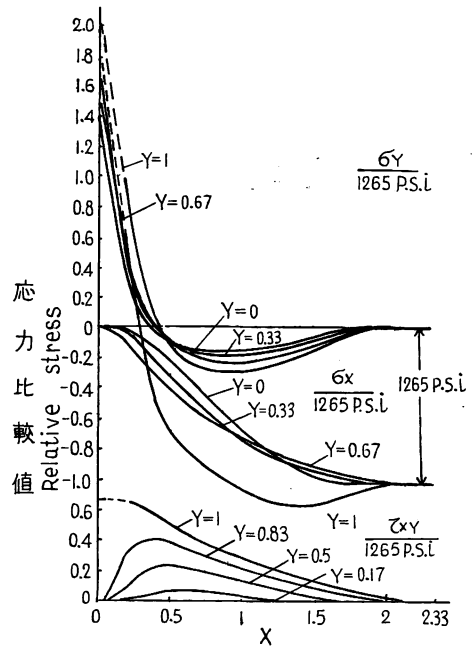
$l$ ; Width of plastic lamination/2

中に生ずる応力を解析した結果を Fig. 11のように示している。

また, A. P. SCHNIEWIND<sup>12)</sup> は木材の表面割れが放射組織と, これに接する組織との収縮膨張差にもとづいて生ずる応力によって起こるとの考えより, California black oak 材の間にプラスチック板を接着して oak を乾燥し, プラスチック板中の応力状態を光弾性実験により求め, Fig. 12 のような結果を示している。

注目すべき相違点は, 最高剪断応力が常に端面あるいは端面のきわめて近くに現われるか否かという点にある。

本実験においては端面で  $\tau_{xy} = 0$  という境界条件を入れ, Mesh point を比較的あらくとったために最高剪断応力がやや内方に現われた可能性があるとはいえ, 次のようなことが原因で異なったとも考えられる。



$X, Y$  の表現は Fig. 11 と同じ。  
Fig. 12 oak 材間に接着されたプラスチック中に生ずる応力値 (A. P. SCHNIEWIND による)

The stress in plastic plate glued between two oak laminations.

ii) の場合には比較的に端面に近い部分に現われ, iii) の場合には高い最高値が端面の近くに現われている。

すなわち, ミズナラ柾目—エゾマツ板目—ミズナラ柾目の場合, ミズナラとエゾマツの膨張量差が大きくなれば, 高い剪断応力が端面に現われる。

小島・井上<sup>4)</sup> は, 加熱後の冷却による収縮差によって剛体 (金属体) 間に接着された弾性体 (合成樹脂板)

前者の研究の場合には、剛体に接着されているため、また後者の研究では、プラスチック板を接着しているため、本実験の Fig. 5-A, 6-A, 7-A に示されている変位  $u$  のような端面付近の曲線を示さず、前者の場合は完全に直線、後者の場合も比較的それに近い状態であるため、端面に最高剪断応力が生じたと思われる。

これに反して、木材—木材接着においては、上記のように接着面の  $u$  が端面付近で曲線となるため、iii) のように膨張量差が大きくならなければ、剪断応力は端面の近くで最高値を示さないのではなかろうか。

他の点については、比較的よく類似する。なお Fig. 12 において接着層の  $\sigma_x$  が端面で高い引張応力になると推測しているが、 $\sigma_x = 0$  となるのではなかろうか。

小島・井上は  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_y$  の値の指標として  $\sigma_x$  をとっているように、 $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_y$  と  $\sigma_x$  が比例関係にあると考えられる。

本実験の場合についてみると、 $\sigma_y$  は  $\sigma_x$  の状態から考えて、iii) の場合が最も大きく、エゾマツ端面における  $\sigma_y$  はもっと高い引張応力になると考えられる。

実験結果とのこの相違は、一つにはミズナラ材の弾性特性の板目、柎目による相違に原因すると考えられるが、もう一つにはミズナラ材の接着層付近における高い引張応力  $\sigma_x$  によって、ミズナラ材の接着層付近における組織が坐屈を起こし、これに接するエゾマツ材の組織が圧潰されて接着層における変位  $u$  が、iii) の場合には端面でエゾマツ側に対して極端に凸状となって、i) の場合とちょうど反対のような曲線を示さないことにも原因すると思われる。

このように、 $\sigma_x$  と  $\sigma_y$  との関係はさほど明りょうではなく、むしろ、 $\sigma_x$  が引張であるか、あるいは圧縮であるかによって大きな差異が見られる。 $\tau_{xy}$  は  $\sigma_x$  とほぼ比例関係にあると推測される。

#### 4. 内部応力と剥離促進試験結果との関係についての考察

筆者らは、さきに本実験における試片と同様な構成の試片について剥離促進試験を行なって、その結果を報告<sup>9)</sup>した。

この剥離促進試験の剥離結果と本実験で解析した応力状態との関係について考察してみよう。

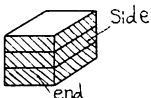

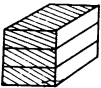
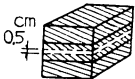
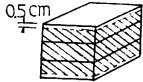


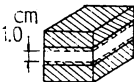
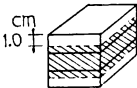

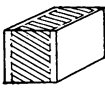
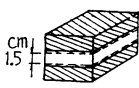
この剥離促進試験の方法は、ASTM 1101—53 に準拠した方法による水の注入—乾燥のサイクルによる剥離試験であるが、乾燥時に試片に Table 1 のような被覆を行なって、試片表面からの乾燥を種々に規制することによって内部応力の状態を変化させて行なった。

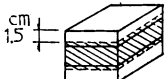
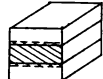
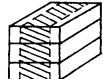
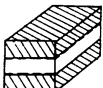
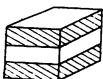
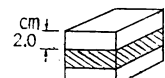
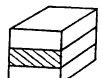

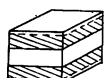
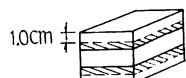
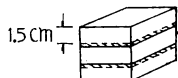
この試験のうち本実験の場合と同様な構成のミズナラ板目—エゾマツ板目—ミズナラ板目のものと、ミズナラ柎目—エゾマツ板目—ミズナラ柎目のものの剥離の結果を示せば、Table 2<sup>9)</sup> のようである。

ただし、ここでいう剥離は、接着層中や接着界面における破壊による剥離ではなく、エゾマツ材の接着層に接した組織の破壊による剥離であって、この剥離は試片端面（エゾマツ板目を内層材とした場合は、多くの場合端面における接着層付近の早材と晩材の境界）において発生し、しだいに内方に向かって進行することが認められた。

この Table 2 において、No. 4 処理試片、すなわち飽水にした後ミズナラ材を被覆してエゾマツ材のみを乾燥させた試片では剥離を全然生じなくて、No. 1 試片すなわち飽水後エゾマツ材を被覆してミズナラ材を乾燥させたときには、乾燥終期に剥離を生じている。本実験においては、エゾマツ材のみを乾燥させる場合について、エゾマツ材の中央部分に厚さ方向の割れを生ずるために、応力解析はできなかった。

Table 1. 各試片の乾燥条件  
Drying condition of accelerated delamination test specimen.

乾燥日程 Period of drying(day)	試片の処理番号 No. of cover treatment of specimen			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
1	<p>木口および側面の全面を被覆し、上下面は被覆せず。 Whole area of end and side face of specimen was covered, and top and bottom face was not covered.</p> 	<p>木口の全面を被覆し、上下面、側面は被覆せず。 Whole area of end face was covered, top and bottom face and edge face was not covered</p> 	<p>木口および上下面の全面を被覆し、側面は被覆せず Whole area of end and top and bottom face was covered, edge face was not covered.</p> 	<p>エゾマツのコア材の木口および側面の中央部分 0.5 cm のみ被覆せず。 Center parts of 0.5 cm length at spruce core was not covered.</p> 
2	上に同じ Do.	上に同じ Do.	上に同じ Do.	上に同じ Do.
3	<p>木口および側面で上下面より0.5cm被覆をとる。 Cover of 0.5cm length from top and bottom side was taken off.</p> 	<p>木口面で上下面より0.5cm被覆をとる。 Cover of 0.5cm length from top and bottom side was taken off.</p> 	<p>木口および上下面で側端面より0.5cm被覆をとる。 Cover of 0.5cm length from edge side at end and top and bottom face was taken off.</p> 	<p>コア中央の木口面および側面で1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length at center of core was taken off.</p> 
4	<p>上下面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from top and bottom side was taken off.</p> 	<p>上下面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from top and bottom side was taken off.</p> 	<p>側端面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from edge side was taken off.</p> 	<p>コア中央の木口面および側面で1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length at center of core was taken off.</p> 

乾燥日程 Period of drying(day)	試片の処理番号 No. of cover treatment of specimen			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
5	上下面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from top and bottom side was taken off. 	上下面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from top and bottom side was taken off. 	側端面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from edge side was taken off. 	コア中央の木口および側面で2.0cm被覆をとる。 Cover of core was taken off. 
6	上に同じ Do.	上に同じ Do.	上に同じ Do.	上下面の被覆をとる。 Cover over top and bottom face was taken off. 
7	上下面より2.0cm被覆をとる。 Cover of 2.0cm length from top and bottom side was taken off. 	上下面より2.0cm被覆をとる。 Cover of 2.0cm length from top and bottom side was taken off. 	側端面より2.0cm被覆をとる。 Cover of 2.0cm length from edge side was taken off. 	木口および側面で上下面より0.5cm被覆をとる。 Cover of 0.5cm length from top and bottom side was taken off. 
8	—	—	—	上下面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from top and bottom side was taken off. 
9	—	—	—	上下面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from top and bottom side was taken off. 

注：処理条件 No.1, No.2, No.3 の試片では第1サイクルは第6日で終了し、第2サイクルは第7日で終了。各サイクルの終了時に剝離を測定した。処理条件 No.4 の試片では第1サイクル、第2サイクルともに第9日で終了し、その時に剝離を測定した。

Remarks : Drying of specimens of treatment number No.1, No.2, No.3 was ended on 6th day at 1st cycle and ended on 7th day at 2nd cycle. Drying of specimens of treatment number No.4 was ended on 9th day at 1st and 2nd cycle. Delamination was measured at end of each cycle. Drying condition was based on ASTM D 1101—53.



Table 2. 剝離試験結果

The results of accelerated delamination test.

	試片記号 Marks of specimen	木理の 組合せ <sup>1)</sup> Combina- tion of grain	比重 Specific gravity	No. 1 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 1 specimen				No. 2 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 2 specimen				No. 3 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 3 specimen			
				1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle	
				剝離までの 乾燥日数 <sup>3)</sup> Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剝離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剝離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剝離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剝離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剝離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剝離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )
Series I	TTA 1	NT ET NT	0.52 0.43 0.51		0		0	5	60		190		0		0
	TTB 1	NT ET NT	0.64 0.45 0.64		0	7	40		0	5	70		0		0
	TTC 1	NT ET NT	0.73 0.43 0.73		0	7	30	3	450		750		0		0
	RTA 1	NR ET NR	0.67 0.45 0.67	5	175		215	2	1090		1540	2	865		1260
	RTB 1	NR ET NR	0.76 0.45 0.77	5	45		70	1	1165		1420	1	1125		1175
Series II	TTA 2	NT ET NT	0.50 0.45 0.48		0		0		0	5	80		0		0
	TTB 2	NT ET NT	0.59 0.45 0.59		0		0	5	75		380		0		0
	TTC 2	NT ET NT	0.63 0.45 0.63		0		0		0	5	60		0		0
	TTD 2	NT ET NT	0.67 0.44 0.67		0		0	5	25		85		0		0

Table 2. (つづき) (Continued)

	試片記号 Marks of specimen	木理の 組合せ <sup>1)</sup> Combination of grain	比重 Specific gravity	No. 1 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 1 specimen				No. 2 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 2 specimen				No. 3 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 2 specimen			
				1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle	
				剥離までの 乾燥日数 <sup>3)</sup> Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 Amount of delami- nation (mm <sup>2</sup> )
Series II	TTE 2	NT ET NT	0.70 0.45 0.70		0		0	5	75		195		0		0
	TTF 2	NT ET NT	0.76 0.45 0.77		0		0		0	5	90		0		0
	RTA 2	NR ET NR	0.49 0.44 0.52		0		0		0		0	3	70		90
	RTB 2	NR ET NR	0.67 0.45 0.67		0		0		0		0		0		0
	RTC 2	NR ET NR	0.74 0.45 0.72	5	85		90	1	750		950	1	1125		1150
Series III	TTA 3	NT ET NT	0.59 0.35 0.59		0		0	4	120		350		0		0
	TTB 3	NT ET NT	0.60 0.35 0.63		0		0	4	10		180		0		0
	TTC 3	NT ET NT	0.68 0.35 0.68		0		0	4	140		560		0		0
	TTD 3	NT ET NT	0.76 0.36 0.74		0	5	560	4	140		875		0		0

Series	RTA 3	NR ET NR	0.59 0.35 0.59		0		0		0	2	320		0	2	50
	RTB 3	NR ET NR	0.62 0.35 0.61		0		0		0	1	130		0	1	70
	RTC 3	NR ET NR	0.65 0.34 0.65		0		0		0	3	10		0		0
	RTD 3	NR ET NR	0.72 0.35 0.71		0		0		0	1	150			1	103
Series I	RRA 1	NR ER NR	0.57 0.40 0.57		0		0		0		0		0		0
	RRB 1	NR ER NR	0.63 0.39 0.64		0	7	15		0	4	15		0		0
	RRC 1	NR ER NR	0.66 0.39 0.66		0	7	5		0		0		0		0
	RRD 1	NR ER NR	0.72 0.39 0.72		0		0		0		0		0		0
	RRE 1	NR ER NR	0.74 0.39 0.74		0		0	4	15		30		0		0
	TRA 1	NR ER NR	0.53 0.40 0.54		0		0		0		0		0		0
	TRB 1	NT ER NT	0.68 0.38 0.67		0		0		0		0		0		0
	TRC 1	NT ER NT	0.73 0.37 0.73		0		0		0		0		0		0
Series II	RRA 2	NR ER NR	0.59 0.39 0.59		0		0		0		0		0		0
	RRB 2	NR ER NR	0.73 0.37 0.73		0		0		0	2	30		0		0

Table 2. (つづき) (Continued)

	試片記号 Marks of specimen	木理の 組合せ <sup>1)</sup> Combi- nation of grain	比重 Specific gravity	No. 1 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 1 specimen				No. 1 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 2 specimen				No. 3 処理試片 <sup>2)</sup> Treatment No. 3 specimen			
				1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle		1 cycle		2 cycle	
				剥離までの 乾燥日数 <sup>3)</sup> Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )	剥離までの 乾燥日数 Period of drying required to delami- nation (days)	剥離量 of delami- nation (mm <sup>2</sup> )
Serie II	TRA 2	NT ER NT	0.63 0.39 0.63		0		0		0	4	20		0		0
	TRB 2	NT ER NT	0.68 0.39 0.68		0		0		0	4	25		0		0
	TRC 2	NT ER NT	0.71 0.38 0.71		0		0		0		0		0		0

No. 4 処理試片で剥離したものはなかった。 Delamination of treatment No. 4 specimen was not recognized.

Remarks 1) NT ; Oak, flat grain, ET ; Spruce, flat grain, NR ; Oak edge grain, ER ; Spruce, edge grain.

2) Reference Table 1.

3) The period of drying from start of drying to development of delamination in each cycle.

しかしながら、i) の場合の応力状態から、No. 4 処理試片の応力状態が推察されうるし、またiii) の場合が No. 1 処理試片の応力状態に相当すると考えてよいだろう。

No. 1 処理試片では、iii) の場合の応力状態と対応してみると、 $\sigma_y$  は端面においてさほど高い引張応力を示していないので、端面に生じている最高剪断応力が剥離に大きく影響したと考えられる。

No. 4 処理試片では i) の場合に見られるように、端面に生ずる最高応力は  $\sigma_y$  の圧縮応力のみで、この圧縮応力はエゾマツ材の細胞組織を圧潰する役割は演じても直接に剥離せしめる原因にはならないと考えられる。エゾマツ材のみ乾燥したときの剪断応力の状態を推測するに、試片の端部におけるミズナラ材がエゾマツ材の乾燥状態に応じてエゾマツ側に彎曲するため、端部に最高剪断応力は生じないと考えられる。さらに乾燥が進めばエゾマツ材の中央部において、引張応力  $\sigma_x$  の増加のために厚さ方向の割れを生じて応力は解放される。

このような応力状態になるために、No. 4 処理試片では全く剥離を生じなかったのであろう。

実際の使用条件下では、含水率傾斜によって端面に接着層に垂直な応力が現われるので、以上のような端面における剪断応力のみならず、接着層に垂直な応力  $\sigma_y$  が、引張応力であるか、圧縮応力であるかによって剥離に及ぼす影響はかなり異なってくるものと考えられる。

Table 2 によれば、内層材にエゾマツ柾目を用いた場合と、板目を用いた場合の比較では、板目を用いた場合に剥離は非常に多い。これはエゾマツに板目を用いた場合端面において、晩材と早材の膨張収縮による本実験結果と類似の応力集中があるために板目の場合生じやすかったと思われる。

以上に記したように、本実験で求められた内部応力状態の傾向は、かなりよく現実の剥離現象と関係づけられる。しかしながら、前記のように本方法で内部応力を求めるに当たって、最も問題とされる点は、

1. 応力計算に当たって、レオロジー的変形が差し引かれていないこと。
2. 上記のような変形が差し引かれて、弾性変形のみが得られたとしても、外力を与えて行なわれた試験から得られた弾性常数が、大きく変形をこう束されて生ずる内部応力と、上記の弾性変形から計算されて得られる弾性常数に等しいかどうか。

の2点であろうと考えられる。これらに関連した点については、R. KEYLWERTH<sup>6)7)8)</sup>の研究があるが、この問題は、それ自身が大きな研究課題であって、今後解明されていかなければならない点であろう。

## 5. 摘 要

ミズナラ—エゾマツ—ミズナラの3枚積層集成材について、平衡含水率変化があったとき、挽板間の膨張収縮差によって生ずる内部応力状態を解析した。その結果のうち、おもな事項は次のごとくであった。

1. 外層材によって、内層材の収縮が抑制されているような状態の場合、すなわち内層材の幅方向の応力  $\sigma_x$  が引張応力であるような応力状態の場合には、接着層に垂直な応力  $\sigma_y$  は端面で圧縮応力になる。これと反対に、内層材の膨張が抑制されているような状態の場合、すなわち、内層材中の  $\sigma_x$  が圧縮応力の場合には、 $\sigma_y$  は端面で引張応力となる。

2. 内層材中の  $\sigma_x$  が圧縮応力の場合、接着層における最高剪断応力  $\tau_{xy}$  は比較的端面近くに現われ、反対に  $\sigma_x$  が引張応力の場合には、比較的内方に現われる。

3. 内層材中の  $\sigma_x$  が圧縮応力の場合、内層材の接着層における  $\sigma_x$  の最高値と、接着層における剪断応力  $\tau_{xy}$  の最高値は、ほぼ比例関係にあると推測される。 $\sigma_x$  と  $\sigma_y$  との関係は明らかでない。

このように、挽板の膨張収縮差によって内層材に現われる内部応力の状態は、内層材の膨張が抑制されている状態と、反対に収縮が抑制されている状態との間に大きな差異が認められ、剝離促進試験による結果でも、この2者の場合の間で明りょうな差異となって現われていることが認められる。

## 文 献

- 1) BIKERMAN, J. J.: The science of adhesive joints. N. Y., (1961)
- 2) DIETZ, A. G. H., Henry GRINSFELDER, Eric REISNER: Glue line stresses in laminated wood. A. S. M. E., 5, (1946)
- 3) HEARMON, R. F. S.: The Elasticity of wood and plywood; For. prod. Res. special report, 7, (1948)
- 4) KOBATAKE, Y. and Y. INOUE: Mechanics of adhesive joints, part I. Appl. Sci. Res., 6, (1957)
- 5) KOBATAKE, Y. and Y. INOUE: Mechanics of adhesive joints, part II, Appl. Sci. Res., 7, (1958)
- 6) KEYLWERTH, R: Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz, Erste Mitteilung, Holz als Roh- und Werkstoff., 20, (1962)
- 7) KEYLWERTH, R: Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz, Zweite Mitteilung, Holz als Roh- und Werkstoff., 20, (1962)
- 8) KEYLWERTH, R: Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz, Dritte Mitteilung, Holz als Roh- und Werkstoff., 21, (1963)
- 9) 椋代純輔・森屋和美: 集成材に関する研究, 第10報, 集成材の異樹種接着, 林試研報, 153, (1963)
- 10) 椋代純輔: 接着によって生ずる合板中の内部応力, 林試研報, 155, (1963)
- 11) 林業試験場編: 木材工業ハンドブック, 丸善, (1957)
- 12) SCHNIEWIND, A. P.: Mechanism of check formation, For. prod. Journal, 13, (1963)

**The Internal Stresses in Glued Wood Products. Report 1**  
**Analysis of internal stresses in laminated wood resulting from difference of**  
**swelling or shrinkage between laminations and relations between internal**  
**stresses and results in accelerated delamination test.**

Junsuke MUKUDAI

(Résumé)

This test was carried out on the analysis of the internal stress in the laminated wood, glued wood to wood, resulting from difference between the swelling or shrinkage of inner lamination and outer lamination, when the equilibrium moisture content was changed.

The specimens used in this test, were 3-ply laminated wood composed of two Japanese oak outer laminations and a Japanese spruce inner lamination.

Internal stresses in the spruce inner lamination of the laminated wood mentioned above were analyzed under the following condition.

I) Internal stress in the flat grained spruce inner lamination stretched widthwise by the flat grained oak outer lamination after water impregnation, because of more swelling of the oak lamination.

II) Internal stress in the flat grained spruce inner lamination restrained its swelling and contracted widthwise by the influence of the edge grained oak lamination after water impregnation, because of more swelling of spruce lamination.

III) Internal stress in the flat grained spruce inner lamination, which, after water impregnation only the edge grained oak lamination was dried and the spruce lamination was covered to prevent it from drying, the swelling of the spruce lamination was more restrained and more contracted than in the case II) mentioned above.

Furthermore, the relation between these internal stresses and the results of an accelerated delamination test carried out previously with the same specimens by the author was considered.

**Test method**

A) Method of analysis of internal stress.

For calculating the internal stress resulting from moisture changes by equations expressed by displacement  $u$ ,  $v$ , as in this method mentioned later, only the elastic displacement on the boundary, excepting rheological, plastic deformation (such as the stress relaxation) and swelling or shrinkage deformation under free condition, must be obtained as the boundary condition.

The elastic displacements on the boundary can be obtained by the slicing method, which after cutting off thin slices from the specimen in  $X$ - and  $Y$ - direction the strain recovery are measured.

Then, the internal stress can be calculated in the same manner by the equations obtained by substituting zero for  $\alpha_x m$ ,  $\alpha_y m$  in Eqs. (1)~(8) mentioned later. But, in order to obtain the elastic displacement on the boundary by the slicing method, the specimen needs some dimension, because of difficulty for measuring of strain recovery.

As the dimension of spruce inner lamination used in this test was small, thickness 1.8cm and width 6.6cm, we were unable to apply the slicing method.

Therefore, the following method was applied for analysis of internal stress, in this test.

In Fig. 1, when the  $X$ —, and  $Y$ — direction coincide with the flat grain — and edge grain — direction of the lamination,

the displacement in  $X$ — direction;  $v$

the displacement in  $Y$ — direction;  $u$

the swelling or shrinkage percentage in  $X$ — direction and  $Y$ — direction;  $\alpha_X, \alpha_Y$

the changes of moisture contents;  $m$

the strain relating to the stress set up due to swelling or shrinkage in  $X$ — and  $Y$ — direction;

$\varepsilon_X$  and  $\varepsilon_Y$ .

Then,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} &= \varepsilon_X + \alpha_X m \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \varepsilon_Y + \alpha_Y m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

when the flat grain direction and the edge grain direction coincide with  $X$ —,  $Y$ — direction, the distortion of the angle between two directions due to swelling or shrinkage does not take place.

Therefore, shearing strain  $\gamma_{XY}$  is

$$\gamma_{XY} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

On the other hand,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} (\varepsilon_X + \mu_{YX} \varepsilon_Y) \\ \sigma_Y &= \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} (\varepsilon_Y + \mu_{XY} \varepsilon_X) \\ \tau_{XY} &= G_{XY} \gamma_{XY} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

Substituting  $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \gamma_{XY}$  obtained from Eqs. (1) and (2) for these strains in Eqs. (3)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} - \alpha_X m + \mu_{YX} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \alpha_Y m \right) \right\} \\ \sigma_Y &= \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} - \alpha_Y m + \mu_{XY} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \alpha_X m \right) \right\} \\ \tau_{XY} &= G_{XY} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Differential equations of Equilibrium are

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_X}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_Y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{YX}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

Substituting  $\sigma_X, \sigma_Y, \tau_{XY}$ , of Eqs. (4) for these stresses in Eqs. (5), the following two formulas are obtained

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_X}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu_{YX} \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right) + G_{XY} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right) &= 0 \\ \frac{E_Y}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \mu_{XY} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right) + G_{XY} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

The displacement  $u, v$  of each point in the lamination are obtained by finding the solution of Eqs. (6), which satisfies the boundary condition shown in the displacement  $u, v$ . Substituting the displacement  $u, v$ , of each point obtained by the solution of Eqs. (6) for these displacements in Eqs. (4), the stresses of each point are obtained.



The displacement  $u$  and  $v$  on the glued boundary of the inner lamination at the time of measuring, was taken as the boundary condition on the glued boundary.

The boundary conditions on edge boundary of inner lamination are

$$\sigma_X = 0 \quad \tau_{YX} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

because there is, no external force acting on the free edge.

The solution of Eqs. (6) was obtained by the "Relaxation Method".

The distance between the node was 3.0 mm in  $X$ - direction and  $Y$ - direction.

It was assumed that the elastic properties of Japanese spruce under the wetting condition are as follows.

$$E_T: 2.2 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_R: 4.2 \times 10^8 \quad "$$

$$\mu_{TR}: 0.48$$

$$\mu_{RT}: 0.91$$

$$G_{TR}=G_{RT}: 0.12 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

The boundary condition  $\tau_{XY}=0$  in Eqs. (7) was given as follows: In Fig.1, AB, DC show the edge surface and AD, BC show the glued surface. Mesh points 1, 0, 3 were taken on the edge line. The displacements  $v_9, v_3$  at the point 9, 3 were given by measuring.

Then,

$\tau_{XY}=0$  at the point 1, therefore, finite-difference approximations are as follows :

$$v_9 - v_0 + u_5 - u_8 = 0 \quad \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{\partial \tau_{XY}}{\partial y} = 0 \text{ at the point 0, therefore}$$

$$4(v_1 + v_3 - 2v_0) + (u_5 - u_6 + u_7 - u_8) = 0 \quad \text{where } u_6 = u_7 = 0$$

$$4(v_1 + v_3 - 2v_0) + (u_5 - u_8) = 0 \quad \dots\dots\dots (b)$$

$\tau_{XY}=0$  at the point 0

$$v_1 - v_3 + u_2 - u_4 = 0 \quad \dots\dots\dots (c)$$

$$\frac{\partial \tau_{XY}}{\partial y} = 0 \text{ at the point 3}$$

$$4(2v_0 - 2v_3) + 2(u_2 - u_4) = 0 \quad \dots\dots\dots (d)$$

From Eqs. (a), (b), (c), (d)

$$\left. \begin{array}{l} 9v_0 = v_9 + 8v_3 \\ 2v_1 = 8v_0 - 6v_3 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

The other boundary condition of edge, Eqs.  $\sigma_X=0$ , was not used for determining the boundary condition  $u, v$  of edge, because the finite-difference approximation contained fictitious displacements  $u, v$  of fictitious points.

Therefore, the boundary condition  $u$  of the edge was given by measured displacement  $u$ .

The stress  $\sigma_Y$  on the edge was obtained from Eqs.  $\sigma_X=0$ .

For example, on the point 1 shown in Fig.2, from  $\sigma_X=0$ ,

$$v_5 - v_8 - \alpha_X m + 0.91 \{(u_9 - u_0) - \alpha_Y m\} = 0 \quad \dots\dots\dots (a)'$$

on the other hand,

$$\sigma_Y = 12.5 \times 10^8 \times \{u_9 - u_0 - \alpha_Y m + 0.48 \{(v_5 - v_8) - \alpha_X m\}\} \quad \dots\dots\dots (b)'$$

The stress  $\sigma_Y$  on the point 0 was obtained from Eqs. (a)', (b)' mentioned above.

On the other hand, the swelling or shrinkage percentage  $\alpha_X m, \alpha_Y m$  of the same spruce specimen under the free condition were measured.

B) Method of test

1) The test specimen and method of measuring of displacement on the boundary, for analysis of internal stress in the flat grained inner lamination stretched widthwise by the flat grained oak outer lamination after water impregnation, because of more swelling of oak lamination (reference to Fig. 3. A).

adhesive : resorcinol resin

outer lamination

Japanese oak

grain : flat

specific gravity : 0.73

Swelling percentage from air dry (M. C 12%) to water-impregnated : 8.0%

inner lamination

Japanese spruce

grain : flat

specific gravity : 0.36

Swelling percentage from air dry (M. C 12%) to water-impregnated : tangential : 4.3%

radial : 1.3%

Displacements  $u$ ,  $v$  of the point marked on the boundary were measured with shadowgraph attached 5/1000mm micrometer from air dry to water impregnated.

On the other hand, the swelling percentages of the same spruce specimen were measured from air dry to water impregnation under the free condition.

II) The test specimen and method of measuring of displacement on the boundary, for analysis of internal stress in the flat grained inner lamination restrained the swelling and contracted widthwise by the edge grained oak lamination after water impregnation, because of more swelling of spruce lamination (reference to Fig.3. B).

adhesive : resorcinol resin

Outer lamination

Japanese oak

grain : edge

specific gravity : 0.66

Swelling percentage from air dry to water-impregnated : 2.7%

inner lamination

Japanese spruce

grain : flat

specific gravity : 0.38

Swelling percentage from air dry to water impregnated

tangential : 4.7%

radial : 1.3%

The method of measuring of displacement  $u$ ,  $v$  was the same as the one mentioned above.

III) The test specimen and the method of measuring of displacement on the boundary, for analysis of internal stress in the flat grained inner lamination, which, after water impregnation only the edge grained oak lamination was dried and the swelling of spruce lamination was more restrained than in the case II) mentioned above (reference to Fig.3.B).

The spruce lamination and the parts of oak laminations from glued face to 1 mm thick-

nesswise, of the same specimen used in the case II), were covered with waterproof lacquer and oak laminations were dried to moisture content 12%, so that the parts of spruce neighboring the glued face were about M. C 80% (reference to Fig. 4).

The measuring method of displacements was the same as the one mentioned above.

### Results

Displacements  $u$ ,  $v$  on the boundary are shown in Figs. 5~7. Distribution of the stresses of the spruce lamination are shown in Figs. 8~10 (because of symmetry, stresses for only one-quarter of the spruce lamination are shown).

In Figs. 8~10,  $Y$  shows the ratio of the distance  $y$  from the  $X$ -axis to the point to half thickness  $H$  of spruce lamination.  $X$  shows the distance from the  $Y$ -axis to the point.

It is considered that, although the absolute magnitude of these stresses is of limited significance for the reason mentioned above, the characteristic of the distribution of these stresses are shown exactly in some respects. As might be expected, in the case I), the stress  $\sigma_x$  shows the maximum tensile stress at the widthwise center of the specimen which higher stress may cause cracking of the spruce lamination.

In the cases II), and III), the stress  $\sigma_x$  shows the maximum compressive stress at the widthwise center of the specimen. According to Figs. 8-B, 9-B, 10-B, in the case I), the stress  $\sigma_y$  normal to glue line is relatively highly compressive at the free edge and changes tensile at the distance of about 9mm from the free edge.

In the cases II) and III), the stress  $\sigma_y$  is tensile at the free edge and decreases steeply and changes compressive at the distance of about 3mm from the free edge, then approaches to zero.

In the case I), shearing stress  $\tau_{xy}$  reaches the maximum at the distance of about 6mm from the free edge, and at the distance of about 3mm in the case II).

In the case III), shearing stress  $\tau_{xy}$  attains the higher maximum, nearly at the free edge.

Although it is considered that the relations between the stress  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  and the stress  $\sigma_x$  are probably proportional, according to Figs. 8, 9 and 10, the relation between the stress  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  are not clearly recognized.

In the case III), the normal stress  $\sigma_y$  shows a low value, compared with the high compressive stress  $\sigma_x$ , presumably because of the following causes.

The cells of the spruce neighboring the glue line were crushed in  $Y$ -direction, because of the buckling of cells of the oak neighboring glue line and glue layer in  $X$ -direction which arose by the high tensile stress  $\sigma_x$  in the oak lamination consequent upon the high compressive stress  $\sigma_x$  in the spruce lamination.

Therefore, the displacement  $u$  at the free edge shows a small value as shown in Fig. 7-A.

The relation between the internal stress in the inner lamination and the results of accelerated delamination test.

The author has carried out previously the accelerated delamination test with the same 3-ply laminated wood as in this test, composed of two species of Japanese oak and one of Japanese spruce. In the delamination test based on ASTM D1101-53, test specimens were dried under condition that various faces of specimens were covered to prevent drying, as shown in Table 1, after water impregnation.

The results of the above mentioned delamination test are shown in Table 2<sup>9)</sup>. All delamination developed at the edge, and progressed towards the inside.

Delamination tended to develop in No. 1 cover treatment specimen in which after water impregnation only the oak outer laminations were dried and the spruce lamination was covered and consequently swelling of the spruce lamination was restrained and the lamination contracted, while one was not entirely developed in No. 4 cover treatment specimen, as after water impregnation only the spruce lamination was dried and oak laminations covered and consequently the spruce lamination was stretched widthwise.

The state of distribution of the internal stress of No. 1 cover treatment specimen can be conjectured from the state of one of the case III) mentioned above.

And, although the internal stress in the spruce lamination of the specimen in which the spruce was dried and was more stretched could not be analyzed due to the crack that developed in it as drying progressed, the state of the internal stress of No. 4 cover treatment specimen can be conjectured from the state of one of the case 1).

According to Figs. 8 and 10, it is considered that, in the No. 4 cover treatment specimen, as oak laminations bend at the edge in proportion to progression of drying, maximum shearing stress is not set up near the therefore delamination does not develop.

Delamination of No. 1 cover treatment specimen depended on the shear stress set up at the edge.

Distinct difference between the amount of delamination developed in laminated wood composed of flat grained spruce inner lamination and composed of edge grained spruce inner lamination, resulted from such stress concentration as clarified in this test, which was set up by the difference between the shrinkage or swelling of late wood and that of early wood. In fact the delaminations that developed in many laminated specimens composed of flat grained spruce inner lamination came about by the failure of boundary between late wood and early wood being near the glue line of the edge face.

Although the absolute magnitude of these stresses is of limited significance for the reason mentioned in the Test method paragraph, the characteristic of the state of distribution of inner stress explains precisely the development of delamination tendency in the accelerated delamination test, as stated above.