

木材の狂いに関する研究

特に板目板の反りについて

井 阪 三 郎⁽¹⁾

梅 原 誠⁽²⁾

緒 言

木材の狂いやすいことは、腐りやすい、燃えやすい等とともに、最も大きな欠点の一つであることは、木材を利用するすべての人が、経験し、その改良についても、種々の考案がなされているが、なお、完全な方法が見出されない現状では、狂いの現象を把握して、最も効果的に木材を利用することが大切である。

木材の狂いは、木材が不均質である上に、外界の空気条件により含水率が変動し、収縮膨脹を起し変形することで、狂いを完全に防ぐためには、木材中の水分の移動を防ぐか、水分の移動があつても、収縮膨脹を起させないようにする以外になく、狂いを少なくするためには、木取法を良くし、乾燥を良くし、外界の空気条件の変化に対する、収縮膨脹を最小限度にとどめることが行われている。乾燥における水分のむらによる狂いは、乾燥を適当に行えば、これを防ぎうるが、板目板の組織のむらによる狂いは、乾燥を適当に行つても、これを防ぐことは困難で、木取を考えることによりある程度防ぎうるので、今回は狂いに対する年輪の影響につき種々実験を行い、その一部が纏つたので、大方の御批判を仰ぎ今後さらに研究を進めていく指針をえたいと考え、この報告を公表する次第である。

その1 収縮後の歪みについて

従来は、狂いといえば、一方向の収縮膨脹すなわち、一次元的な狂いでその大小を判断していたので、ここでは収縮後の歪み、変形、すなわち二次元的な狂いを考えてみることにした。

I. 試験材の木取

水上営林署産のブナを、伐採後丸太のまま試験場に搬入、5 cm 厚さの円盤を Fig. 1 のごとく木取り、最終的には 5 cm 角、1 cm 厚さの試験片を用いた。

II. 試験片の処理

測定開始時の含水率は平均 61.2 % であつたので一応生材と見なし、

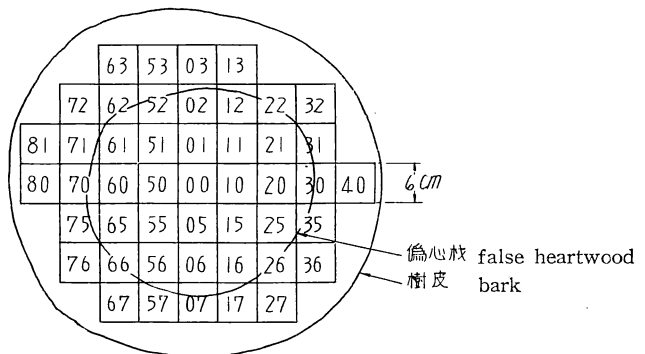


Fig. 1 歪角測定用試験片木取図
Specimen No. for the test of distortion.
mean diameter at right angle with each other. 53.5 cm.
mean diameter of false-heartwood. 32.3 cm.

(1) 木材部材料科組織研究室長 (2) 木材部材料科物理研究室

試験片の各辺に平行な、互に直角をなす二中心線の長さを測定後、室内乾燥し重量の減少がなくなつた時ふたたび測長し、最後に恒温器中で 60°C で 24 時間乾燥した後、100°C で絶乾させて測長した。

III. 試験結果

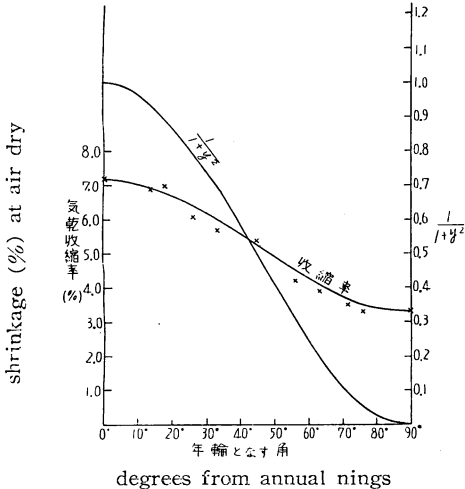
1. 切線、半径両方向の収縮率

Fig. 1 における試験片番号 01, 02, 03, 05, 06, 07, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 の 14 個の二方矩試験片を用い、算術平均をもつて切線、半径両方向の収縮率を求め Table 1 を得た。

Table 1. 収 縮 率
Shrinkage percentage.

| | from green to air dry | from green to oven dry |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|
| radial shrinkage α_r | 3.3% | 5.8% |
| tangential shrinkage α_t | 7.2% | 11.3% |

mean bulk specific gravity 546 kg/m
mean moisture content at green 59.7%
mean moisture content at air dry 13.0%



degrees from annual rings
Fig. 2 年輪と或る角をなす方向の収縮率
The shrinkage of the direction which declines θ degrees from annual rings, and the coefficient to calculate it.

2. 年輪とある角をなす方向の収縮率

年輪と θ なる角をなす方向の収縮率 α は

$$\alpha = 1 - \sqrt{(1 - \alpha_t)^2 \cos^2 \theta + (1 - \alpha_r) \sin^2 \theta} \dots \dots \dots (1)$$

で表わされ、また $\tan \theta = y$ とすると

$$\alpha = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + y^2} \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる (帝林北試彙報 4 号参照) ので、

試験片番号 00 を除くすべての試験片を用い、年輪とある角をなす方向の収縮率を求め、Table 2 および Fig. 2 をえた。

Fig. 2 に見るごとく実験値と計算値とはよく一致しており、理論式を用いることによりいかなる方向の収縮率をも求めることを確めた。

ゆえに Table 3 および Fig. 2 のごとく y による $\frac{1}{1+y^2}$ の変化を求めておけば、(2) 式を用い、 y に相当する $\frac{1}{1+y^2}$ に $(\alpha_t - \alpha_r)$ を掛け、 α_r を加えることにより任意の方向の収縮率を簡易に求められる。

3. 収縮率のむら

円盤上のある位置における互に直角をなす任意の方向の収縮率を、それぞれ α_1, α_2 とすると、(2) 式により

Table 2. 年輪と或る角をなす方向の収縮率

The shrinkage of the direction which declines θ degrees from annual rings at air dry. (%)

| | 0°00' | 14°02' | 18°26' | 26°34' | 33°41' | 45°00' | 56°19' | 63°26' | 71°34' | 75°58' | 90°00' |
|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| specimens | 14 | 1 | 8 | 8 | 7 | 16 | 7 | 8 | 8 | 1 | 14 |
| measured | 7.2 | 6.9 | 7.0 | 6.1 | 5.7 | 5.4 | 4.2 | 3.9 | 3.5 | 3.3 | 3.3 |
| calculated | 7.2 | 7.0 | 6.8 | 6.4 | 6.0 | 5.3 | 4.5 | 4.1 | 3.7 | 3.5 | 3.3 |

Table 3. 年輪とある角をなす方向の収縮率を求める係数
The coefficient to calculate the shrinkage of the direction which declines θ degrees from annual rings. (see Formula 2)

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| y | 0.000 | 0.176 | 0.364 | 0.577 | 0.839 | 1.000 | 1.192 | 1.732 | 2.748 | 5.671 | ∞ |
| θ | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| $\frac{1}{1+y^2}$ | 1.00 | 0.97 | 0.88 | 0.75 | 0.59 | 0.50 | 0.41 | 0.25 | 0.12 | 0.03 | 0.00 |

$$\alpha_1 = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + y^2} \quad \alpha_2 = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + \left(\frac{1}{y}\right)^2}$$

となり、その和は

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_r + \alpha_t \dots\dots\dots (3)$$

となり一定値となる。ゆえに円盤上の収縮率のむらと比較するために、各位置における互に直角をなす二方向の収縮率の和のむらをもつて示すことができ、その実験結果は Fig. 3 のごとくだった。

すなわち、辺材部が収縮率が小さいが全体的にはあまり大きなむらは見られなかった。

4. 歪角の測定

Fig. 1 のごとく木取つた場合に、生材の時正方形をなしていた試験片が、収縮後平行四辺形をなすことはよく知られており、収縮後大きさが小さくなるほか、歪むので、さらに直角に仕上げる必要を生じ、歩止りは一層小さくなる。必要以上に歩出して製材することはもちろんのこと、乾燥後必要な大きさに仕上がらず、廃品をだすことは、木材利用合理化の点から慎まなければならないので、必要にしてかつ充分な、すなわち経済的な歩出しをするために、いかなる位置でいかほど歪むかを検討してみた。

Fig. 4 のごとく、円盤の中心 O から a だけ離れた板 MC の、中心 M から ay 離れた A 点における垂線 BA が、収縮後傾く角は次のごとくして求めえられる。

AD は半径方向で、BD, CD は切線方向であるから、
 $A'D = AD(1 - \alpha_r)$ $B'D = BD(1 - \alpha_t)$ $C'D = CD(1 - \alpha_t)$
 であり、また一方

$$BD = AD \tan \theta = AD \times y$$

$$CD = AD \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = AD \times \frac{1}{y}$$

である。ゆえに

$$\tan \angle B'A'D = \frac{B'D}{A'D} = \frac{BD(1 - \alpha_t)}{AD(1 - \alpha_r)} = \frac{ADy(1 - \alpha_t)}{AD(1 - \alpha_r)} = y \cdot \frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r}$$

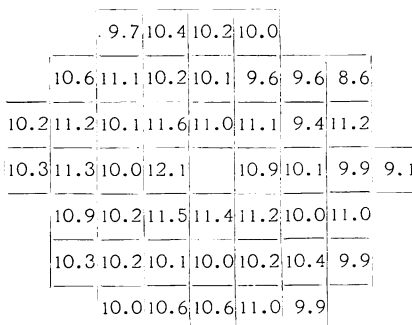


Fig. 3 収縮率のむら ($\alpha_r + \alpha_t$ で示した) Irregularity of shrinkage ($\alpha_r + \alpha_t$) in disk.

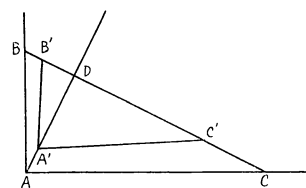
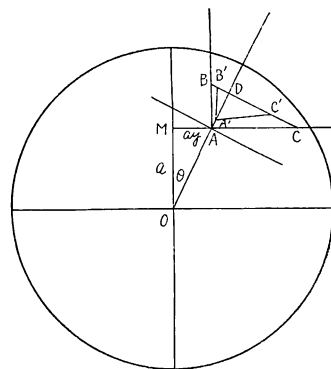


Fig. 4

$$\tan \angle C'A'D = \frac{C'D}{A'D} = \frac{CD(1-\alpha_t)}{AD(1-\alpha_r)} = \frac{AD \cdot \frac{1}{y} (1-\alpha_t)}{AD(1-\alpha_r)} = \frac{1}{y} \cdot \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r}$$

となり、

$$\angle B'A'C' = \tan^{-1} \left(y \cdot \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1}{y} \cdot \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right)$$

となるから、歪角 γ は

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(y \cdot \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{y} \cdot \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right) \dots \dots \dots (4)$$

で表わすことができる。

次に 5 cm 角の試験片が、収縮後歪む角を測定することが困難であつたので、二辺および二対角線を測

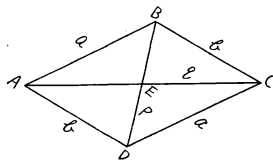


Fig. 5

定し次の計算式から求めた。

すなわち、Fig. 5 において $\triangle ABD$ から

$$\cos \angle BAD = \frac{a^2 + b^2 - p^2}{2ab}$$

また、 $\triangle ABC$ から

$$\cos (\pi - \angle ABC) = -\frac{a^2 + b^2 - q^2}{2ab}$$

をえて、その平均値をもつて収縮後の角と見做した。よつて歪角 γ は次式により求めた。

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{\frac{a^2 + b^2 - p^2}{2ab} - \frac{a^2 + b^2 - q^2}{2ab}}{2} \right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{q^2 - p^2}{4ab} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

以上のごとく (4) 式に y を代入して求めた γ と、(5) 式に実測した a, b, p, q を代入して求めた γ とを求めると Table 4 および Fig. 6 のごとくなり、実測値と計算値とがよく一致しているといふ。

なお、(4) 式を変形すると

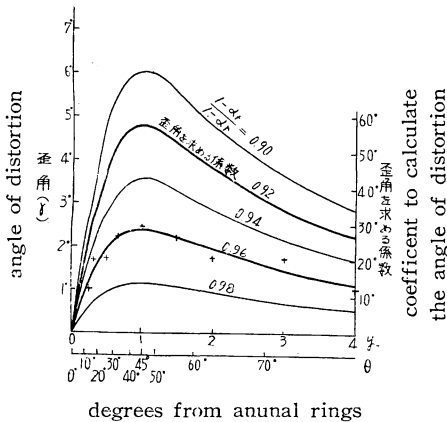


Fig. 6 一辺が年輪と或る角をなす正方形が乾燥により歪む角 Relations among y (or θ), $\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r}$, and γ . (see Formula 4. and 6.)

Table 4. 一辺が年輪とある角をなす正方形が乾燥により歪む角 The angle of distortion (γ°) which the square at green becomes diamond shaped at air dry.

| | | | | | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| y | 0 | 0.250 | 0.333 | 0.500 | 0.667 | 1.000 |
| | ∞ | 4.000 | 3.000 | 2.000 | 1.500 | |
| θ | 0° | $14^\circ 29'$ | $19^\circ 28'$ | $30^\circ 00'$ | $41^\circ 49'$ | $45^\circ 00'$ |
| | $90^\circ 00'$ | $75^\circ 31'$ | $70^\circ 32'$ | $60^\circ 00'$ | $48^\circ 11'$ | |
| specimens | 14 | 1 | 8 | 8 | 7 | 8 |
| measured | $0^\circ 00'$ | $1^\circ 01'$ | $1^\circ 42'$ | $1^\circ 43'$ | $2^\circ 14'$ | $2^\circ 29'$ |
| calculated | $0^\circ 00'$ | $1^\circ 07'$ | $1^\circ 26'$ | $1^\circ 55'$ | $2^\circ 13'$ | $2^\circ 22'$ |

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \right) y - \tan^{-1} \left(1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \right) \frac{1}{y} \\ &= \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\left(1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \right) \frac{1+y^2}{y}}{1 - \left(1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \right)^2} = \cot^{-1} \frac{1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r}}{2 \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} - \left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \right)^2} \cdot \frac{1+y^2}{y} \\ &\doteq \cot^{-1} \frac{1 - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r}}{\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r}} \cdot \frac{1+y^2}{2y} = \cot^{-1} \frac{1 - \alpha_t}{\alpha_t - \alpha_r} \cdot \frac{1+y^2}{2y} \\ &= \tan^{-1} \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_t} \cdot \frac{2y}{1+y^2} \\ \therefore \tan \gamma &\doteq \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_t} \cdot \frac{2y}{1+y^2} \end{aligned}$$

しかるに

$$1 - \alpha_t \doteq 1 \quad \frac{2y}{1+y^2} \leq 1 \quad \alpha_t - \alpha_r \ll 1$$

であるから

$$\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_t} \cdot \frac{2y}{1+y^2} \ll 1$$

となり、

$$\gamma \doteq (\alpha_t - \alpha_r) \cdot \frac{1}{1 - \alpha_t} \cdot \frac{2y}{1+y^2} \dots \dots \dots (6)$$

となり、歪角 γ は $(\alpha_t - \alpha_r)$ にほとんど比例することとなり、Fig. 6 のごとくである。すなわち、(6) 式における y と $\frac{2y}{1+y^2}$ の関係を Table 5 および Fig. 6 のごとく求めておけば、歪角 γ はその係数に $\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_t}$ を掛けることにより求めることができる。

Table 5. 歪角を求むる係数
Coefficient to calculate the angle of distortion (see Formula 6.)

| | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|
| y | 0.000 ∞ | 0.176 5.671 | 0.364 2.748 | 0.577 1.732 | 0.839 1.192 | 1.000 | |
| θ | 0° 90° | 10° 80° | 20° 70° | 30° 60° | 40° 50° | 45° | |
| $\frac{2y}{1+y^2}$ | radian | 0.000 | 0.342 | 0.642 | 0.866 | 0.985 | 1.000 |
| | degree | 0°00' | 19°36' | 36°49' | 49°37' | 56°26' | 57°18' |

つぎに 5 cm 角のブナ生材を乾燥させた時の仕上り寸法は、最も歩止りの少ない場合 (四方桁の場合) には次のごとくなる (気乾までの収縮率として $\alpha_t = 7.2\%$, $\alpha_r = 3.3\%$ を用いた)。

収縮後の菱形の一辺の長さ l は

$$l = 5 \times \left(1 - \frac{0.072 + 0.033}{2} \right) = 4.738 \text{ cm}$$

歪角 γ は

$$\gamma = 90^\circ - 2 \tan^{-1} \frac{1 - 0.072}{1 - 0.033} = 2^\circ 20'$$

であるから、正方形に仕上げることにより一辺の長さ L は

$$L = 4.738 - 2 \times 4.738 \sin 2^\circ 20' = 4.35 \text{ cm}$$

すなわち、歩止り B は

$$B = \frac{4.35^2}{5^2} = 75.7\%$$

という非常に小さな値となる。

その 2 収縮による板目板の反りについて

板目板が乾燥後木表側に反ることはよく知られているが、はたしてこの樹種の、この位置から取った板は、どれだけ反るかという、具体的な問題については、未だ検討されていなかったため、反り防止の第一段階として反りの量を測定、種々考察を加えてみた。

I. 試験材の木取

(その 1) の試験に用いた円盤に隣りあつた円盤を用い、樹心を界として両側に 2 cm 間隔にだら挽き、10 cm 巾、1.5 cm 厚さに仕上げ、耳の部分は切り落して用いた。

II. 試験片の処理

(その 1) の試験片が生材と見做したので、この試験片も生材であると思ふし、試験片作製直後に板

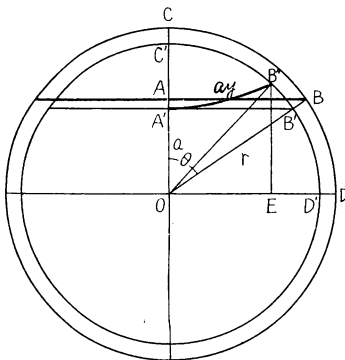


Fig. 7

の長さを測り、室内乾燥にて重量が平衡に達した後再び測長し、同時に板の中央部における反りの矢高を測定した。

III. 試験の結果

1. 板全体の収縮率

板全体の収縮率 A は、板全体の巾が Fig. 7 のごとく板の樹心からの距離の $2y$ 倍とした時に

$$A = \alpha_r + (\alpha_t - \alpha_r) \frac{\tan^{-1} y}{y} \dots \dots \dots (7)$$

で表わされる(帝林北試彙報 4 号)ので、実験値と計算値の関係を求め Table 6 をえた。

Table 6. 板の巾の収縮率

The mean wide shrinkage percentage of board.

| specimen No. | distance from the center of disk to the board a (cm) | width of board | | mean wide shrinkage of board | |
|---------------|--|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|
| | | at green $2ay$ (cm) | at air dry $(2ay)'$ (cm) | calculated (%) | measured (%) |
| 2.15 | 1 | 51.00 | 49.20 | 3.5 | 3.5 |
| 16 | 3 | 51.70 | 49.62 | 3.9 | 4.0 |
| 17 | 5 | 51.72 | 49.53 | 4.3 | 4.2 |
| 18 | 7 | 51.14 | 48.81 | 4.7 | 4.6 |
| 19 | 9 | 50.31 | 47.85 | 5.0 | 4.9 |
| 20 | 11 | 49.16 | 46.63 | 5.3 | 5.2 |
| 21 | 13 | 47.51 | 44.95 | 5.6 | 5.4 |
| 22 | 15 | 44.90 | 42.32 | 5.9 | 5.8 |
| 23 | 17 | 41.90 | 39.30 | 6.1 | 6.2 |
| 24 | 19 | 38.31 | 35.86 | 6.4 | 6.4 |
| 25 | 21 | 34.22 | 32.00 | 6.6 | 6.5 |
| 26 | 23 | 29.12 | 27.19 | 6.8 | 6.6 |
| 27 | 25 | 20.21 | 18.96 | 7.0 | 6.2 |
| 28 | 27 | 12.13 | 11.32 | 7.2 | 6.7 |
| total or mean | | 573.33 | 543.54 | 5.25 | 5.2 |

Table 6 にみるごとく、辺材部から取られた試験片 2.27, 2.28 は、Fig. 3 のごとく収縮率が辺材で小さいことを無視して計算したので、実測値が計算値より小さい収縮率を示したが、その他はよく実験値と計算値とが一致した。

ゆえに (7) 式の y のかわりに、樹心から板までの距離を半径で割った値 z で表わすと

$$z = \frac{a}{\sqrt{a^2 + a^2 y^2}} \quad y = \frac{\sqrt{1 - z^2}}{z}$$

となり、(7) 式は

$$A = \alpha_r + (\alpha_t - \alpha_r) \frac{z \cos^{-1} z}{\sqrt{1 - z^2}} \dots \dots \dots (8)$$

で表わされ (帝室北試彙報 4 号)、 z に対する $\frac{z \cos^{-1} z}{\sqrt{1 - z^2}}$ を Table 7 および Fig. 8 のごとく求めておけば、その値に $(\alpha_t - \alpha_r)$ を掛け、 α_r を加えることにより、任意の位置の板の収縮率を簡単に求めることができる。

Table 7. 板の巾の収縮率を求める係数
Coefficient to calculate the mean wide shrinkage of board. (see Formula 8.)
 $z = \frac{\text{distance from center of disk to board}}{\text{radius of disk}}$

| z | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{z \cos^{-1} z}{\sqrt{1 - z^2}}$ | 0.000 | 0.148 | 0.280 | 0.398 | 0.506 | 0.605 | 0.695 | 0.780 | 0.858 | 0.967 | 1.000 |

また、だら挽きした板全部の平均した収縮率 \bar{A} は

$$\bar{A} = \frac{\alpha_r + \alpha_t}{2} \dots \dots \dots (9)$$

で表わされ (帝林北試彙報 4 号)、Table 6 のごとく計算値と実験値とはよく一致した。

2. 板の反り

板の反りを計算するにあたっては、次の三方法が考えられたので、種々検討を加えてみた。

i) 板の上下面の収縮率の差から求める法

Fig. 7 のごとく厚さ b で、樹心から a だけ離れた板の中心から ay の位置の板の上下面の収縮率は (2) 式により

$$\text{木裏側の収縮率} = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + \left(\frac{ay}{a}\right)^2}$$

$$\text{木表側の収縮率} = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + \left(\frac{ay}{a+b}\right)^2}$$

となり、その位置における曲率半径を R とすると

$$\frac{1 - (\text{木裏側の収縮率})}{1 - (\text{木表側の収縮率})} = \frac{R+b}{R}$$

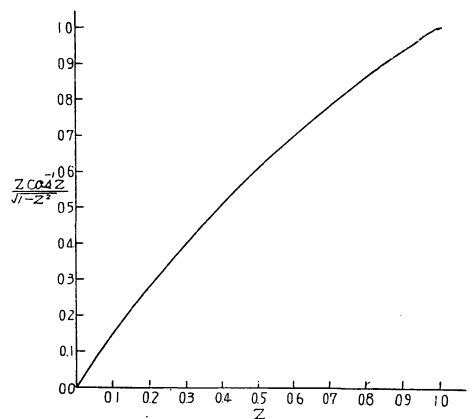


Fig. 8 板の巾の収縮率を求める係数
Coefficient to calculate the mean wide shrinkage of board. (see Formula 8.)

となるので、

$$R = \frac{\{(a+b)^2(1-\alpha_t) + a^2(1-\alpha_r)y^2\} \sqrt{1+y^2}}{(2a+b)(\alpha_t - \alpha_r)y^2}$$

で表わされ、板の反りがゆるやかである場合には、曲率半径を二度積分することにより板の曲線が求められる。すなわち、矢高 δ は

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{\frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} - 1}{(a+b)^2 - a^2 \frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t}} \left[a(2a+b)(a+b) \sqrt{\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r}} y \tan^{-1} \left(\frac{a}{a+b} \sqrt{\frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t}} y \right) \right. \\ & - \frac{(2a+b)(a+b)^2}{2} \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \log \left\{ 1 + \frac{a^2}{(a+b)^2} \frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} y^2 \right\} - a^2(2a+b)y \tan^{-1}y \\ & \left. + \frac{a^2(a+b)}{2} \log(1+y^2) \right] \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

となる。

しかしこの考え方は、各位置における収縮率から求めたものであるが、収縮後の位置における曲率半径の変化でなかつた点と、板の反りがゆるやかであるとして近似計算した点、および歪角の測定の際検討したとおり、もと真上にあつた点に変形後真上でなくなる点から誤差が出たもので、実験値より過小の値を示した。

ii) 板の各位置の歪角から求める法

板の各位置における歪角は(4)式で表わされるので、歪角を二度積分することにより板の曲線が求められる。すなわち矢高 δ は

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} - \frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} \right) y + \left\{ y^2 - \left(\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right)^2 \right\} \tan^{-1} \left(\frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} y \right) \right. \\ & - \left\{ y^2 - \left(\frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} \right)^2 \right\} \tan^{-1} \left(\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} y \right) + \frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} y \log \left\{ 1 + \left(\frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \right)^2 y^2 \right\} \\ & \left. - \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} y \log \left\{ 1 + \left(\frac{1-\alpha_r}{1-\alpha_t} \right)^2 y^2 \right\} \right] \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

となる。

しかし、この考え方は、前項と同じく収縮前の位置における歪角で計算したもので、収縮後の位置における歪角でなかつた点から誤差が出たもので、実験値より過小の値を示した。

iii) 円盤の上に引いた直線が、円盤の収縮によつて変化する曲線から求める法

Fig. 7 の符号のように、円盤の中心 O から板 AB までの距離 OA を a とし、AB を ay、OB を r、 $\angle AOB$ を θ としたとき、

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}y & r &= a\sqrt{1+y^2} \\ OB' &= r(1-\alpha_r) = a(1-\alpha_r)\sqrt{1+y^2} \\ \widehat{B'C'} &= r(1-\alpha_r)\theta = a(1-\alpha_r)\sqrt{1+y^2} \tan^{-1}y \\ \widehat{B''C'} &= r\theta(1-\alpha_t) = a(1-\alpha_t)\sqrt{1+y^2} \tan^{-1}y \\ \angle B'OB'' &= \frac{\widehat{B'C'} - \widehat{B''C'}}{r(1-\alpha_r)} = \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1-\alpha_r} \tan^{-1}y \\ \angle B''OE &= \frac{\pi}{2} - \theta - \angle B'OB'' = \frac{\pi}{2} - \frac{1-\alpha_t}{1-\alpha_r} \tan^{-1}y \end{aligned}$$

$$B'E = r(1 - \alpha_r) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) = a(1 - \alpha_r) \sqrt{1 + y^2} \cos\left(\frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right)$$

$$OA' = a(1 - \alpha_r)$$

よつて矢高 δ は

$$\delta = B'E - OA' = a(1 - \alpha_r) \left\{ \sqrt{1 + y^2} \cos\left(\frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) - 1 \right\} \dots\dots\dots (12)$$

で表わされることとなる。

ゆえに(その1)の実験で求めた α_r, α_t を用いて, 三円盤からえられた各板の板巾を樹心から板の中心までの距離の2倍で割つた値, すなわち y により (12) 式から $\frac{\delta}{a}$ を求めてみると Table 8 のごとくであり, Fig. 9 のごとく, 測定矢高とよく一致した。

Table 8. 板の位置と反りの関係

Relations between y and δ (amount of warping deflection) ÷
 a (distance from center of disk to board) (when $\alpha_r = 3.3\%$, $\alpha_t = 7.2\%$) (see Formula 12.)

| disk | | | | | | | | |
|-------|----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|------------|
| No. 1 | | | No. 2 | | | No. 3 | | |
| y | measured | calculated | y | measured | calculated | y | measured | calculated |
| 24.98 | 1.40 | 1.47 | 25.51 | 1.62 | 1.49 | 25.50 | 1.40 | 1.49 |
| 8.21 | 0.367 | 0.45 | 8.65 | 0.470 | 0.48 | 8.62 | 0.533 | 0.48 |
| 4.80 | 0.216 | 0.25 | 5.21 | 0.200 | 0.27 | 5.17 | 0.250 | 0.27 |
| 3.33 | 0.171 | 0.17 | 3.69 | 0.146 | 0.18 | 3.65 | 0.129 | 0.18 |
| 2.49 | 0.101 | 0.11 | 2.82 | 0.121 | 0.13 | 2.80 | 0.0667 | 0.13 |
| 1.95 | 0.0646 | 0.082 | 2.26 | 0.118 | 0.10 | 2.24 | 0.102 | 0.10 |
| 1.52 | 0.0462 | 0.059 | 1.86 | 0.0615 | 0.079 | 1.83 | 0.0692 | 0.078 |
| 1.24 | 0.0600 | 0.042 | 1.53 | 0.0593 | 0.059 | 1.50 | 0.0467 | 0.055 |
| 1.01 | 0.0477 | 0.030 | 1.27 | 0.0659 | 0.042 | 1.23 | 0.0401 | 0.042 |
| 0.79 | 0.0090 | 0.020 | 1.04 | 0.0258 | 0.033 | 1.01 | 0.0211 | 0.030 |
| 0.61 | 0.0162 | 0.013 | 0.85 | 0.0057 | 0.024 | 0.81 | 0.0048 | 0.020 |
| 0.44 | 0.0087 | 0.008 | 0.67 | 0.0174 | 0.015 | 0.63 | 0.0113 | 0.013 |
| 0.23 | 0.0040 | 0.003 | 0.46 | 0.0000 | 0.009 | 0.40 | 0.0076 | 0.007 |
| | | | 0.27 | 0.0045 | 0.004 | 0.22 | 0.0037 | 0.002 |

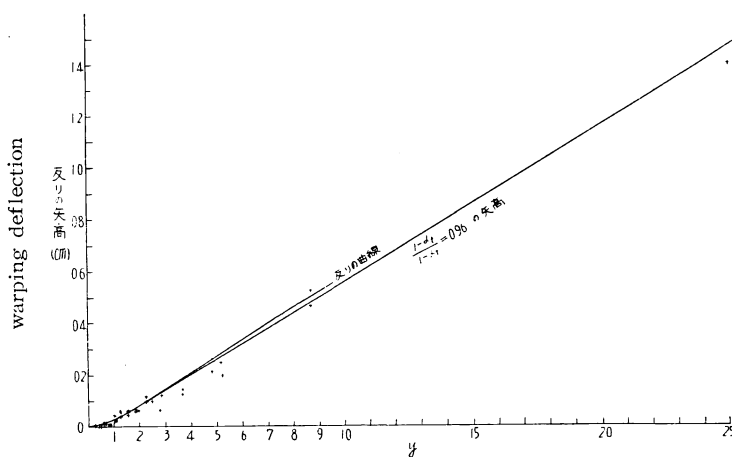


Fig. 9 反りの曲線および板の位置と反りの関係
 Relations between y and δ , when $\alpha_r = 3.2\%$, $\alpha_t = 7.3\%$,
 and $a = 1$ at Formula 12. × measured warping deflection

Table 9. 収縮後の板の曲線
および見掛けの収縮率
Faked tangential shrinkage α_t'
which includes the component
of α_r by curvature of annual
rings. (see Formula 13.)

| ay | (ay)' | δ | α_t' |
|------|-------|----------|-------------|
| 0.2 | 0.186 | 0.002 | 7.1 |
| 0.4 | 0.372 | 0.006 | 7.0 |
| 0.6 | 0.559 | 0.012 | 6.7 |
| 0.8 | 0.748 | 0.021 | 6.6 |
| 1.0 | 0.936 | 0.029 | 6.4 |
| 2.0 | 1.887 | 0.083 | 5.7 |
| 4.0 | 3.815 | 0.198 | 4.6 |
| 6.0 | 5.735 | 0.320 | 4.4 |
| 8.0 | 7.660 | 0.442 | 4.3 |
| 10.0 | 9.595 | 0.558 | 4.1 |

すなわち、板の反りの矢高のみを考える時は、 y と δ の値そのものでよいが、板の反つた後の曲線は ay の収縮変形後の水平距離 $(ay)'$ と δ との関係から求めなければならない。すなわち

$$(ay)' = r(1 - \alpha_r) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \\ = a(1 - \alpha_r) \sqrt{1 + y^2} \sin\left(\frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \dots \dots (13)$$

となり、 $a=1$, $\alpha_r=3.3\%$, $\alpha_t=7.2\%$ を用い $(ay)'$ と δ との関係および反つた状態における板巾から求めた見掛けの収縮率 α_t' との関係を求めると Table 9 および Fig. 9 のごとくである。

Table 9 の見掛けの収縮率 α_t' をみると、 $y=0.2$ の時に、

真の収縮率 $\alpha_t=7.2\%$ と比べ小数点以下一桁目に誤差を生じ、それ以上ではますます誤差が大きくなる。例をとると、一辺の長さ $2ay=5\text{cm}$ の収縮試験片では $a=12.8\text{cm}$ すなわち樹心から 10.3cm と 15.3cm の 5cm から試験片を取つた時にすでに誤差が生ずることが判る。

ゆえに切線方向の収縮率を % で表わした場合に、小数点以下一桁の数字に信頼をおくためには

$$\alpha_t - \alpha_t' = \alpha_t - \frac{ay - a(1 - \alpha_r) \sqrt{1 + y^2} \sin\left(\frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right)}{ay} \\ = (1 - \alpha_r) \frac{\sqrt{1 + y^2}}{y} \sin\left(\tan^{-1} y - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) - (1 - \alpha_t) \\ = (1 - \alpha_r) \frac{\sqrt{1 + y^2}}{y} \left\{ \sin \tan^{-1} y \cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \right. \\ \left. - \cos \tan^{-1} y \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \right\} - (1 - \alpha_t) \\ = (1 - \alpha_r) \frac{\sqrt{1 + y^2}}{y} \left\{ \frac{y}{\sqrt{1 + y^2}} \cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) - \frac{1}{\sqrt{1 + y^2}} \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \right\} \\ - (1 - \alpha_t) \\ = (1 - \alpha_r) \cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) - (1 - \alpha_r) \frac{1}{y} \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) - (1 - \alpha_t) < 0.001$$

でなければならない。しかるに

$$1 - \alpha_r \approx 1 \quad \tan^{-1} y \leq \tan^{-1} \infty = 1.57 \quad \alpha_t - \alpha_r < 0.1$$

であるから

$$\cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \approx 1 \\ \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y\right) \approx \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y$$

となり、

$$\alpha_t - \alpha_t' \approx (1 - \alpha_r) - \frac{1 - \alpha_r}{y} \cdot \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1} y - (1 - \alpha_t) \\ = (\alpha_t - \alpha_r) \left(1 - \frac{\tan^{-1} y}{y}\right) < 0.001 \dots \dots (14)$$

よつて、

$$\frac{\tan^{-1}y}{y} > 1 - \frac{0.001}{\alpha_t - \alpha_r} \dots \dots \dots (15)$$

となり、 y と $\frac{\tan^{-1}y}{y}$ の関係を Fig. 10 のごとく求めておけば $(\alpha_t - \alpha_r)$ がいくらの時は、 y がいくら以下でなければ、収縮率を % で表わした時に小数点以下一桁に誤差を生ずるかが判る。すなわち、 $\alpha_t = 0.10$, $\alpha_r = 0.05$ の場合は $\alpha_t - \alpha_r = 0.05$ となり、

$$\frac{\tan^{-1}y}{y} > 1 - \frac{0.001}{0.05} = 0.98$$

で Fig. 10 から y は 0.25 以下、すなわち 5 cm 角の試験片の場合は樹心から半径 7.5 cm 以内の部分は用いないか、次式で α_t を修正する必要がある。修正式は (14) 式を變形して

$$\alpha_t = \alpha_r + (\alpha_t' - \alpha_r) \frac{y}{\tan^{-1}y} \dots \dots \dots (16)$$

となり、Fig. 10 の y と $\frac{y}{\tan^{-1}y}$ の関係から簡単に修正することができる。

以上により理論式の適合性が判明したので理論式により種々の場合を検討してみることにした。

a) α_r, α_t, a が一定の場合

すなわち一枚の板で、板の反つた時の曲線は Table 9 および Fig. 9 に示すとき曲線を示し、 y と矢高との関係は Table 10 および Fig. 9 のごとくである。

b) α_r, α_t, y が一定の場合

すなわち、中心からの距離の一定倍数の長さを有する場合には、中心からの距離 a が離れている板ほど矢高は比例的に大きくなる。

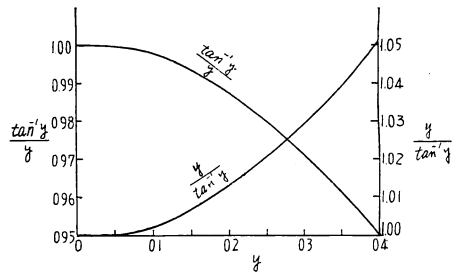


Fig. 10 α_t の修正係数
Relations between y and $\frac{\tan^{-1}y}{y}$
(see Formula 14, 16.)

Table 10. y と矢高との関係
Relations between y and δ (warping deflection of flat-grain board)
(when $a=1, \alpha_r=5\%, \alpha_t=10\%$.) (see Formula 12.)

| | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| y | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 6.0 | 8.0 | 10.0 |
| δ | 0.001 | 0.008 | 0.016 | 0.026 | 0.038 | 0.108 | 0.259 | 0.416 | 0.676 | 0.729 |

c) a, y が一定の場合

すなわち、収縮率の異なる材で、丸太の同じ関係位置からとつた2枚の板は $\alpha_t - \alpha_r$ の値が大きければ大きいほど比例的に反りの矢高は大きくなる。なんとすれば、(12) 式は次のごとく変形される。

$$\begin{aligned} \delta &= a(1 - \alpha_r) \left\{ \sqrt{1 + y^2} \cos \left(\frac{1 - \alpha_t}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y \right) - 1 \right\} \\ &= a(1 - \alpha_r) \left\{ \sqrt{1 + y^2} \cos \left(\tan^{-1}y - \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y \right) - 1 \right\} \\ &= a(1 - \alpha_r) \left[\sqrt{1 + y^2} \left\{ \cos \tan^{-1}y \cdot \cos \left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y \right) + \sin \tan^{-1}y \cdot \sin \left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y \right) \right\} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$= a(1 - \alpha_r) \left\{ \cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y\right) + y \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y\right) - 1 \right\}$$

しかして $(1 - \alpha_r)$ は 1 にほとんどひとしく $(\alpha_t - \alpha_r)$ は 0~0.1 で変数, $\tan^{-1}y$ は y が 0~ ∞ の場合に 0~1.57 であるから

$$\cos\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y\right) \doteq 1$$

$$y \sin\left(\frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y\right) \doteq y \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 - \alpha_r} \tan^{-1}y$$

となり,

$$\delta \doteq a(\alpha_t - \alpha_r)y \tan^{-1}y \dots\dots\dots(17)$$

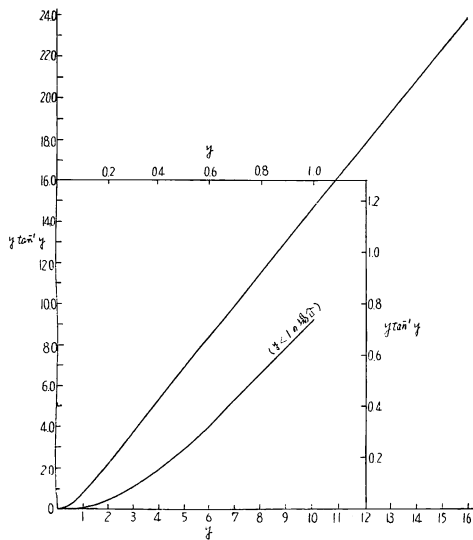


Fig. 11 反りの矢高を求める係数
Coefficient to calculate the amount of warping deflection (see Formula 17.)

すなわち, δ は $(\alpha_t - \alpha_r)$ に比例することとなる。

d) 板の厚さと反り

理論式は, 板の厚さに無関係に求められるので, 同一材料の同一関係位置から取った板は, 厚さが異つても, 反りの矢高は同一である。

以上のことから, 任意の樹種の任意の位置から取られた板の反りの矢高は, y に対する $y \tan^{-1}y$ の値を Fig. 11 から求め, $a(\alpha_t - \alpha_r)$ を掛けることによつて求めえられる。

以上種々検討した結果, 反りの大小が切線半径両方向の収縮率の差に比例することが判つたので Fig. 12 のごとく $\alpha_t - \alpha_r$ が同じである線を引き各樹種の既応の研究結果によりえられた数値を代入してみると, ナラ, アカダモ, トド, ブナ, ハンノキ等は狂いやすく, ヒノキ, ケヤキ, ツガ, クルミ, アカマツ, エゾマツ, ホオ, カツラ, ス

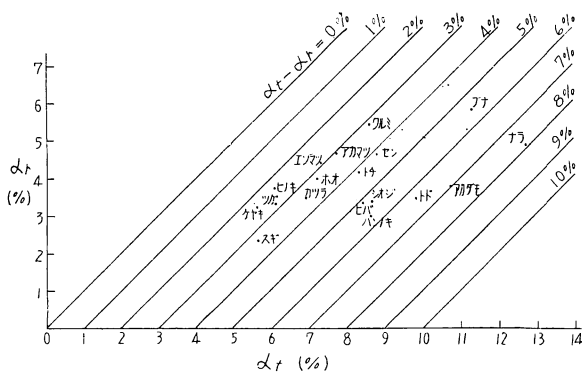


Fig. 12 各樹種間の歪の程度の比較
Grade of distortion in several Japanese woods.
(see Formula 17.)

ギ等は, 狂いにくいこととなり, 一般に経験的にいわれてきた事実を, 数的にいい表わすことができるようになった。

結 論

半径方向の収縮率 α_r

切線方向の収縮率 α_t

樹心より板の中心までの距離 a

耳付板目板の全巾 $2ay$

とした時,

1. 年輪とある角をなす方向の収縮

率は

$$\alpha = \alpha_r + \frac{\alpha_t - \alpha_r}{1 + y^2}$$

で表わされ、 y と $\frac{1}{1+y^2}$ の関係を求めておけば直ちに求めえられる (Fig. 2 参照)。

2. 互に直角をなす任意の二方向の収縮率の和は

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_r + \alpha_t$$

となり、一定である。

3. 乾燥により正方形が菱形になるその歪む角は

$$\gamma = (\alpha_t - \alpha_r) \frac{1}{1 - \alpha_t} \cdot \frac{2y}{1 + y^2}$$

で表わされ、 y と $\frac{2y}{1+y^2}$ の関係を求めておけば直ちに求められる (Fig. 6 参照)。 y が 1 すなわち四方柱の時最大であり $\alpha_t - \alpha_r$ の大小に比例する。

4. 耳付板全体の収縮率は

$$A = \alpha_r + (\alpha_t - \alpha_r) \frac{\tan^{-1}y}{y}$$

で表わされ、また樹心から半径の z 倍の位置から取られた板では

$$A = \alpha_r + (\alpha_t - \alpha_r) \frac{z \cos^{-1}z}{\sqrt{1-z^2}}$$

で表わされるから、 z と $\frac{z \cos^{-1}z}{\sqrt{1-z^2}}$ の関係を求めておけば、直ちに求めえられる (Fig. 8 参照)。

5. 一本の丸太からたら挽きした板全部の平均収縮率は

$$\bar{A} = \frac{\alpha_r + \alpha_t}{2}$$

で表わされる。

6. 板目板の木表の方向に反る矢高は

$$\delta = a(\alpha_t - \alpha_r)y \tan^{-1}y$$

で表わされ、板の厚さに無関係で、 a および $\alpha_t - \alpha_r$ に比例する。ゆえに y と $y \tan^{-1}y$ の関係を求めておけば、それに $a(\alpha_t - \alpha_r)$ を掛けることによりいかなる樹種のいかなる位置から取った板でも直ちに反りの矢高を求めることができる (Fig. 11 参照)。

7. 収縮試験片をあまり樹心に近くから取ると、切線方向の収縮率は、実際の α_t より小さくなり、その差は

$$\alpha_t - \alpha_t' = (\alpha_t - \alpha_r) \left(1 - \frac{\tan^{-1}y}{y} \right)$$

で表わされ、その修正式は

$$\alpha_t = \alpha_r + (\alpha_t' - \alpha_r) \frac{y}{\tan^{-1}y}$$

となり、 y と $\frac{y}{\tan^{-1}y}$ の関係を求めておけば直ちに修正できる (Fig. 10 参照)。

参 考 文 献

藤林 誠：板の巾の収縮に就て，林学会誌 9巻1号（1927）。

Greenhill, G. L. : The shrinkage of Australian Timbers. Part I. A new method of determination shrinkages and shrinkage figures for number of Australian species. Commonwealth of Australia, Council for Scientific and Industrial Research. Pamphlet No. 67. (1936).

井阪三郎：板の巾の収縮，帝室林野局北海道林業試験場彙報 第4号 昭和18年。

Keylwerth, R. : Das Schwinden und seine Beziehungen zu Rohwichte und Aufbau des Holzes, Holz. 7 Jahrgang, Heft 1/3 1944/45.

Kollmann, F. : Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band. Zweite Auflage. (1951).

田丸節郎，安藤 暹：木材の物理化学的研究 I 湿度による木材の各方向の膨脹，化学会誌 52巻8号（1931）。

田中勝吉：本邦産主要樹種収縮試験，北海道林業会報 25巻 12号

Saburo ISAKA and Makoto UMEHARA: Distortion of Wood.
 Particularly on warping deflection of flat-grain boards at seasoning.

Résumé

Timber has weak points against water, fungus, and fire. When the board is dried well, the square at green condition becomes diamond-shaped at air dry, and the board warps toward out-side of disk. When we use the timber for construction, to predict the amount of distortion and warping is important. In this report, we examined the distortion which occurred due to the existance of annual rings.

Let a_r = radial shrinkage, a_t = tangential shrinkage, a = distance from the center of disk to the flat-grain board, and $2ay$ = width of the flat-grain board, then,

1. The shrinkage of the direction which declines θ degrees from annual ring is given by

$$a = a_r + \frac{a_t - a_r}{1 + y^2}$$

(see Formula 2. Table 2, 3. Fig. 2.)

2. The sum of shrinkage percentage at right angle with each other is given by

$$a_1 + a_2 = a_r + a_t = \text{constant.}$$

(see Formula 3. Fig. 3.)

3. The angle of distortion which the square becomes diamond-shaped by seasoning is given by

$$\gamma = \frac{a_t - a_r}{1 - a_t} \cdot \frac{2y}{1 + y^2}$$

and it shows maximum at $y=1$. (see Formula 4, 5, 6, Table 4, 5, Fig. 4, 5, 6, 12,)

4. The mean wide shrinkage percentage of board is given by

$$A = a_r + (a_t - a_r) \frac{\tan^{-1} y}{y}$$

Let $z = \frac{\text{distance from the center of disk to the board}}{\text{radius of disk}}$

$$\text{then, } A = a_r + (a_t - a_r) \frac{z \cos^{-1} z}{\sqrt{1 - z^2}}$$

(see Formula 7, 8, Table 6, 7, Fig. 7, 8,)

5. The mean shrinkage percentage of the total boards from the log is given by

$$\bar{A} = \frac{a_r + a_t}{2}$$

(see Formula 9, Table 6.)

6. The amount of warping deflection of flat-grain board is given by

$$\delta = a(a_t - a_r)y \tan^{-1} y$$

and has no connection with the thickness of the board. (see Formula 10. 11. 12. 17. Table 8. 9. 10. Fig. 9. 11. 12.)

7. If the specimens for shrinkage test are adopted at close distance from the center of the disk, the measured tangential shrinkage a_t' includes the component of a_r by curvature of annual rings and is smaller than real tangential shrinkage a_t .

The relation between a_t and a_t' is given by

$$a_t - a_t' = (a_t - a_r) \left(1 - \frac{\tan^{-1}y}{y} \right)$$

or

$$a_t = a_r + (a_t' - a_r) \frac{y}{\tan^{-1}y}$$

(see Formula 13, 14, 15, 16, Table 9, Fig. 10.)