

塗装木材の内部応力に関する研究 I

木材用塗料塗膜の収縮応力について

福 山 萬 治 郎

MANJIRO FUKUYAMA: Studies on the internal stresses in finished wood.

1. On the shrinking stresses in paint films for wood coating.

摘要 塗装木材において、塗膜内部に発生する内部応力は塗膜の密着性を不安定にして剝離やクラックの危険を増大させるばかりでなく、塗装木材のその原因にもなる。

本研究はこれら内部応力を明らかにすることを目的として、4種の一般木材用塗料を用い、まず硬化中に発生する塗膜の収縮応力を乾燥条件、塗装回数、塗膜厚さとの関連において検討した。

ポリエステルならびにポリウレタン樹脂塗料の収縮応力は乾燥条件(温度: 60°C, 関係湿度: 5~50%)によって差異がなく (Table 3), 塗装回数や塗膜厚さの増加にともなって減少する傾向が認められる (Table 4, Fig. 9)。

アミノアルキッド樹脂塗料の収縮応力は、60°C, 30%の乾燥条件において著しく大きく (Table 3), 塗装回数や塗膜厚さによる差異が認められない (Table 4, Fig. 10)。

他方、ラッカー塗料では関係湿度が低くなるほど、しかも塗装回数が少なく、塗膜厚さが薄いほど収縮応力は明らかに増大する (Table 3, 4, Fig. 10)。

I 緒 言

木材塗装は木材の2次ないしは3次加工における最も重要な最終仕上げ工程であり、その良否ならびに仕上げ精度は製品の価値および品質を左右すると言っても過言ではない。しかし、これら塗装製品にはしばしば塗膜のクラックや剝離、その他そり、ふくれなどの各種欠点が発生し、重大な支障をまねくことがある。この原因は、主として塗装木材の塗膜内部に発生する内部ひずみ、すなわち両界面に発生する応力差(内部応力)に起因すると考えられる。しかも、この内部応力は、さらに、(1) 塗装の際の塗料の膨潤成分にもとづく木材の膨潤応力と塗料硬化の際の容積収縮にもとづく収縮応力、(2) 硬化温度から室温にまで冷却する際の塗膜および木材の線熱膨張係数の差にもとづく熱応力、ならびに (3) 塗装木材の吸・放湿の際の塗膜および木材の膨潤、収縮率の差にもとづく膨潤または収縮応力、などに区別することができる。

本研究は、木材塗料として一般に使用される4種類の塗料を用い、塗装木材の塗膜内部に発生する内部応力を明らかにすることを目的として、まず塗膜の収縮応力について検討したので、それらの結果を報告す

る。

なお、本研究は文部省科学研究費、木材塗装に関する基礎的研究、(総合研究)の分担課題、塗膜および塗装木材の内部応力に関する研究の一部として行なったものであることを付記し、ここに深甚なる謝意を表する。

II 収縮応力の測定原理ならびに計算式

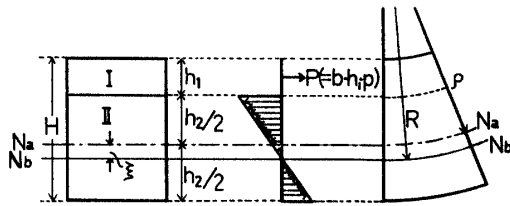
1. 塗膜の収縮応力

塗膜の収縮応力は、帯状の薄いアルミ板の片面に均一な厚みの塗膜を形成し、両端支持梁にして硬化中におけるスパン中央の最大たわみ量の変化を測定することにより、力学的に次式から求めることができる¹⁾²⁾³⁾。

(1) 塗膜の曲げ剛性を無視する場合

塗膜の曲げ剛性 ($=E_1 I_1 / (1-\nu_1^2)$, (5)式参照) がアルミ板のそれ ($=E_2 I_2 / (1-\nu_2^2)$, (5)式参照) に比較して極めて小さいとして無視する場合には、Fig. 1のようにアルミ板 (II) は偏心距離 $(h_1+h_2)/2$ の位置に荷重 $P (=bh_1p, b: 塗装片の幅, p: 収縮応力)$ をうけて彎曲する。

すなわち、アルミ板 (II) の圧縮応力 (σ) は、



I: Paint film II: Aluminium strip
Na: Neutral axis of aluminium Strip only
Nb: Neutral axis of coated strip
ξ: Shift of neutral axis

Fig. 1

$$\sigma = -P/A_2 = -bh_1 p/bh_2 = -p \cdot h_1/h_2 \dots\dots\dots(a)$$

また、アルミ板IIの曲げ応力(σ')は、

$$\sigma' = \pm M \cdot y/I_2 = \pm P \cdot (h_1 + h_2) \cdot 12 \cdot h_2/2 \cdot bh_2^3 \cdot 2 \\ = \pm 3 \cdot p \cdot h_1(h_1 + h_2)/h_2^2 \dots\dots\dots(b)$$

したがって、組み合わせ応力の最大値は、両式から

$$\text{引張側 (+)}: \sigma + \sigma' = 3 \cdot p \cdot h_1(h_1 + h_2)/h_2^2 \\ -p \cdot h_1/h_2 = (2 + 3h_1/h_2) \cdot p \cdot h_1/h_2 \dots\dots\dots(c)$$

$$\text{圧縮側 (-)}: \sigma + \sigma' = -3 \cdot p \cdot h_1(h_1 + h_2)/h_2^2 \\ -p \cdot h_1/h_2 = -(4 + 3h_1/h_2) \cdot p \cdot h_1/h_2 \dots\dots\dots(d)$$

全断面における応力の総和が0という条件から、

$$h_1 p + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{h_2}{2} - \xi \right) \left(2 + \frac{3h_1}{h_2} \right) p \cdot \frac{h_1}{h_2} - \left(\frac{h_2}{2} + \xi \right) \left(4 + \frac{3h_1}{h_2} \right) \cdot p \cdot \frac{h_1}{h_2} \right] = 0 \dots\dots\dots(e)$$

また、外からの曲げモーメントが応力のモーメントの総和に等しいという条件から

$$\frac{bh_1(h_1 + h_2)p}{2} = \int_{\left(\frac{h_2}{2} - \xi\right)}^{\left(\frac{h_2}{2} + \xi\right)} \frac{bE_2}{R} \cdot y^2 \cdot dy = \frac{bE_2}{3R} \cdot \left[\left(\frac{h_2}{2} + \xi \right)^3 + \left(\frac{h_2}{2} - \xi \right)^3 \right] \dots\dots\dots(f)$$

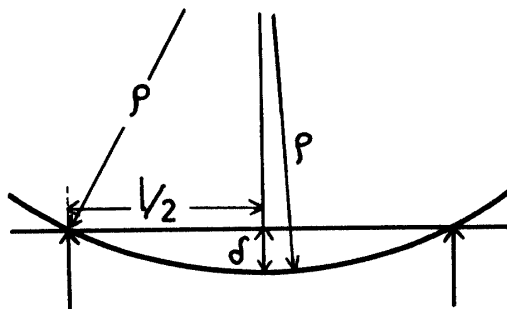
が得られ、(e)式より

$$\xi = h_2^2/6(h_1 + h_2) \dots\dots\dots(g)$$

収縮応力 p は、(g)を(f)に代入することにより次式で与えることができる。

$$p = \frac{1}{6h_1(h_1 + h_2)} \cdot \frac{E_2 h_2^3}{R} \cdot \left[1 + \frac{h_2^2}{3(h_1 + h_2)^2} \right] \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(1-a)$$

ここに、 $R = \rho + \xi$, $\rho = \frac{l^2}{8\delta} + \frac{\delta}{2}$ (Fig. 2), E_2 はアル



δ: Deflection ρ: Radius of curvature

Fig. 2

ミ板のヤング係数である。

なお、塗装片に初期曲率 R_0 が存在する場合には、 $1/R$ の代わりに $(1/R - 1/R_0)$ を用い、次式のようになる。

$$p = \frac{E_2 h_2^3}{6h_1(h_1 + h_2)} \cdot \frac{R_0 - R}{RR_0} \cdot \left[1 + \frac{h_2^2}{3(h_1 + h_2)^2} \right] \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(1-b)$$

(2) 塗膜の曲げ剛性を考慮する場合

(1)式は塗膜の曲げ剛性を無視した場合の近似式であるが、塗膜の曲げ剛性を考慮する場合には、曲げモーメントMは、

$$M = P(h_1 + h_2)/2 = E_1 I_1/R + E_2 I_2/R \dots\dots\dots(h)$$

となり、(1)式と同様に応力の総和が0、外からの曲げモーメントが応力のモーメントの総和に等しいという条件から次式が得られる。

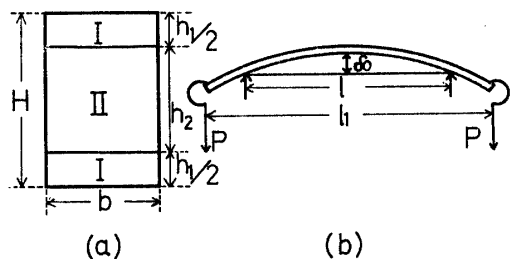
$$P = \frac{E_2 h_2^3}{6Rh_1(h_1 + h_2)} \cdot \frac{\{(1 - m\beta)^3(1 - m) + [m\beta(\beta + 2) + 1]^3 + m(m\beta^2 + 2\beta + 1)^3\}}{2(1 + m\beta)^3} \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $m = E_1/E_2$ (E_1 : 塗膜のヤング係数),

$\beta = h_1/h_2$, $R = \rho + \xi$, $\xi = h_1 h_2 (E_2 - E_1)/2(E_1 h_1 + E_2 h_2)$ である。

2. アルミ板および塗膜のヤング係数

(1)および(2)式におけるアルミ板のヤング係数(E_2)はFig. 3-bの負荷方式を用いると、 $Mx = P(l_1 - l)/2$,



I: Paint film II: Aluminium strip
δ: Deflection

(a) Cross section of coated strip
(b) Coated strip with equal concentrated load at the both ends.

Fig. 3

弾性線の方程式より、 $E_2 I_2 \frac{d^2 \delta x}{dx^2} = P(l_1 - l)/2$,

したがって、 $x = l_1/2$ で $d\delta x/dx = 0$, $x = (l_1 - l)/2$ で $\delta x = 0$, の2条件から次式で与えることができる。

$$E_2 = \frac{3P(l_1 - l)l^2}{4\delta_0 b h_2^3} \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(3)$$

本実験条件60°Cにおける供試アルミ板 ($b = 1.5\text{cm}$, $h_2 = 0.01\text{cm}$, $l_1 = 15\text{cm}$) のヤング係数は $6.44 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ で、既往の値⁴⁾に比較するとほぼ妥当であることが認められる (Fig. 4)。

また、(2)式における塗膜のヤング係数(E_1)は、帯

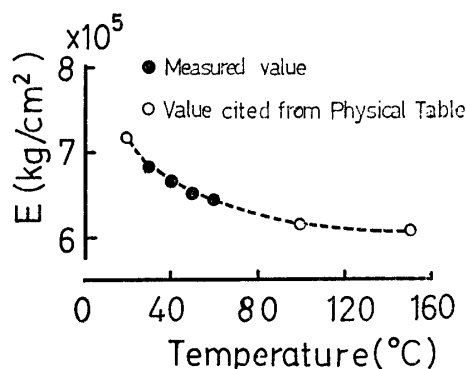


Fig. 4 Relation between Young's modulus and temperature of aluminium strip.

状の薄いアルミ板(Ⅱ)の両面に均一な厚みの硬化塗膜(Ⅰ)を形成し(Fig. 3-a),前記同様に Fig. 3-bの負荷方式を用い,この塗装片に BERNOLLI-EULERの仮定が成立すると考えると,

曲げモーメント M は, $M=P(l_1-l)/2$,

塗膜の曲げモーメントを M_1 ,アルミ板のそれを M_2 とすると,塗装片全体の曲げモーメント(M)は曲げの力学から $M=M_1+M_2=(E_1I_1+E_2I_2)/\rho$,しかも, $I_1=(H^3-h_2^3)/12$, $I_2=bh_2^3/12$,したがって,

$$E_1 = \frac{1}{I_1} (M \cdot \rho - E_2 I_2) = \frac{12}{b(H^3 - h_2^3)} \left\{ \frac{P(l_1 - l)}{2} \cdot \rho - \frac{E_2 b h_2^3}{12} \right\} (\text{kg/cm}^2) \quad (4-1)$$

もし,塗装片に初期曲率 ρ_0 が存在する場合には,

$$E_1 = \frac{12}{b(H^3 - h_2^3)} \left\{ \frac{P(l_1 - l)}{2} \cdot \frac{\rho_0 \rho}{\rho_0 - \rho} - \frac{E_2 b h_2^3}{12} \right\} (\text{kg/cm}^2) \quad (4-2)$$

で与えることができる²⁾. 上式の ρ は(1)式のそれと同様にして求められる. 本実験条件(温度:60°C, 関係湿度:5, 30, 50%)における塗膜の平均のヤング係数は Table 1 の通りである. この値は乾燥単離塗膜の引張ヤング係数⁶⁾のそれよりもやや大きい,試験の性質上本実験ではすべてこの値を用いて検討することにした.

前記のように,塗膜の収縮応力は(1)または(2)式で求めることができるが,試みに本実験条件 60°C の場合

Table 1. Percentage of bending stiffness of paint films to wood.

($b=1.5\text{cm}$, $h_2=0.01\text{cm}$, $E_2=6.44 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)

Kind of paint	h_1 (cm)	E_1 (kg/cm ²)	x (%)
		$\times 10^4$	
Polyurethane resin paint	0.0034	6.38	0.44
Polyester resin paint	0.0023	5.05	0.11
Amino alkyd resin paint	0.0024	5.98	0.15
Nitrocellulose lacquer	0.0014	15.34	0.07

について塗膜とアルミ板の曲げ剛性比 x (%)を計算してみると Table 1 のようになる.

$$x = \frac{E_1 I_1 / (1 - \nu_1^2)}{E_2 I_2 / (1 - \nu_2^2)} \times 100 (\%) \quad (5)$$

ここに, $E_1 I_1$ および $E_2 I_2$ は塗膜およびアルミ板の曲げ剛性(E :ヤング係数, I :断面2次モーメント,添字1および2は塗膜およびアルミ板をあらわす), ν_1 および ν_2 は塗膜およびアルミ板のポアソン比($\nu_1=0.46$, $\nu_2=0.34$)⁴⁾である.

Table 1によると,塗膜の曲げ剛性はアルミ板のそれよりも著しく小さいので無視しても差し支えないと考えられる. 実際に(1)および(2)式を用いて収縮応力を計算してみると,(2)式の値は2~3%程度低い値を示すのみであるので,本実験では収縮応力の計算にすべて(1)式を用いることにした.

III 供試材料および実験方法

供試塗料は,木材塗料として一般に使用される付加重合硬化型のポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料,共縮合硬化型のアミノアルキッド樹脂塗料ならびに溶剤揮散硬化型のニトロセルロース・ラッカー塗料の4種で,各塗料の組成および配合比は Table 2 の通りである.

また,供試アルミ板の寸法は,幅:1.5cm,厚さ:0.01cm,長さ15cmで,予備実験においてできるだけ初期曲率やヤング係数の等しい板を抽出し,ベンゼンとアセトンの等量混合液で塗装面を清拭したのち,前記各塗料をドクター・ブレイドを用いてアルミ板の片面にできるだけ均一に塗布し,スパン8cmの両端支持梁にして塗布直後から硬化完了時までのたわみ量の経時的変化を読取顕微鏡(精度1/100mm)で測定した. たわみ量がほぼ一定に達したときを硬化完了時とみなし,再び同じ操作を繰り返えし,2回および3回塗装の測定を行なった. ただし,2回および3回塗装の場合には,後述(IV-2)の理由でたわみ量の測定点や塗装片の支持点を1回塗装のそれにできるだけ正確に一致させるようにし,収縮応力は1回塗装の測定開始時を基準にしたたわみ量と総塗膜厚さから計算することにした.

なお,本実験では塗膜の収縮応力を次の2系列の場合について検討した.

(1) 収縮応力の乾燥条件による変化

塗装回数:1回,塗装厚さ:3 mil 一定とし,塗膜の乾燥条件は,温度:60°C 一定,関係湿度:5, 30, 50%の3条件とした.

(2) 収縮応力の塗装回数,塗膜厚さによる変化

塗装回数:1~3回,塗装厚さ:3 milおよび6 mil,乾燥条件は,温度:60°C 一定,関係湿度:30%一定

Table 2. Composition and mixing ratio of paints used in this experiment.

Kind of paint	Composition		Mixing ratio	Nonvolatile matter(%)
Polyester resin paint	Polyester varnish	unsaturated polyester resin64.5 paraffin.....0.1 styrene35.4	100	100
	Polyester varnish diluent	styrene100.0	10	
	Curing agent	peroxide.....60.0 ketone solvent40.0	0.5	
	Accelerator	octenic acid paint drier7.8 aromatic hydrocarbon solvent.....92.2	1.5	
Polyurethane resin paint	Polyurethane clear base	polyester resin.....44.0 cellulose derivative1.1 polyurethane thinner.....54.9	100	44
	polyurethane curing agent	polyisocyanate45.7 polyurethane thinner.....54.3	100	45
Amino alkyd resin paint	Amino alkyd clear	butylated urea resin16.4 melamine resin.....10.9 alkyd resin.....27.2 alcohol solvent18.3 aromatic hydrocarbon solvent.....27.2	100	52.5
	Amino alkyd curing agent	hydrochloric acid.....25.0 alcohol solvent.....75.0	10	0
Nitrocellulose lacquer	Nitrocellulose lacquer clear	nitrocellulose16.1 50%-alkyd resin16.0 plasticizer8.0 ester solvent28.0 alcohol solvent7.9 aromatic hydrocarbon solvent.....24.0	100	32
	Nitrocellulose lacquer thinner	ester solvent25.0 alcohol solvent3.0 ketone solvent7.0 aromatic hydrocarbon solvent.....65.0	50	0

とした。

IV 実験結果および考察

1. たわみ量の経時的変化

Fig. 5 および Fig. 6 は、以上の方法で測定した塗装片の乾燥過程中におけるたわみ量の経時的変化の一例を、供試塗料、塗装回数、塗装厚さならびに乾燥条件などについて示したものである。

ポリエステルおよびアミノアルキッド樹脂塗料の1回塗装の場合には、初期の硬化反応が緩慢であるために、図のようにたわみ量の増加も比較的僅少であるが、その後はラッカー塗料やポリウレタン樹脂塗料の場合と同様に時間の経過によってもたわみ量が放物線的に増加し、徐々に一定値に達する。

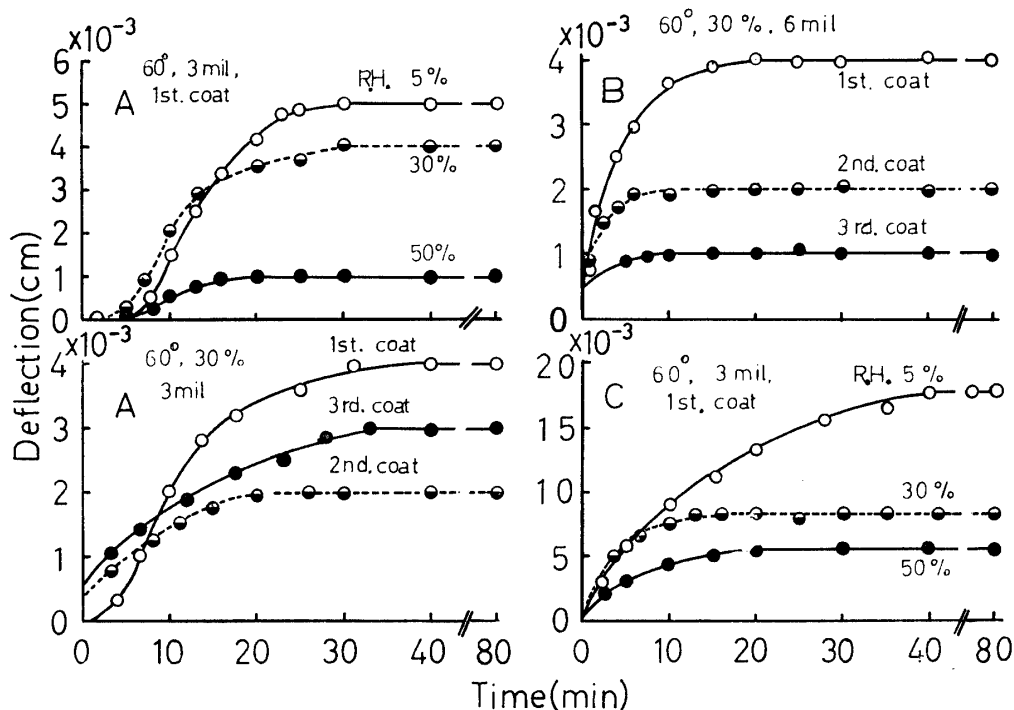
このたわみ量の増加の傾向を乾燥条件について比較してみると、図の一例のように、ポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料、ならびにラッカー塗料の場合

には、いずれもR.H. 5%の場合が最も著しく、R.H. 30%と50%では塗装片によって異なる傾向が認められて明らかな差異がなく、アミノアルキッド樹脂塗料の場合には、R.H. 30%が最も著しく、R.H. 5%と50%では明らかな差異の傾向が認められない。

また、たわみ量の増加の傾向を塗装回数について比較してみると、ポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料、ならびにラッカー塗料では、いずれも1回塗装の場合が最も著しく、2回および3回塗装間では異なる傾向が認められて差異が明らかでなく、アミノアルキッド樹脂塗料の場合には、塗装回数に比例してたわみ量の増加する傾向が認められる。

2. 収縮応力の経時的変化

前記のように、塗膜の収縮応力は(1)式を用いて近似的に計算することができるが、厳密にいうと本式は1回塗装の場合ならびにラッカー塗料のように既存の硬化塗膜が新たに塗布した塗料の溶剤によって溶解する



A : Polyester resin paint B : Polyurethane resin paint C : Nitrocellulose lacquer

Fig. 5 Examples of deflection-time curves.

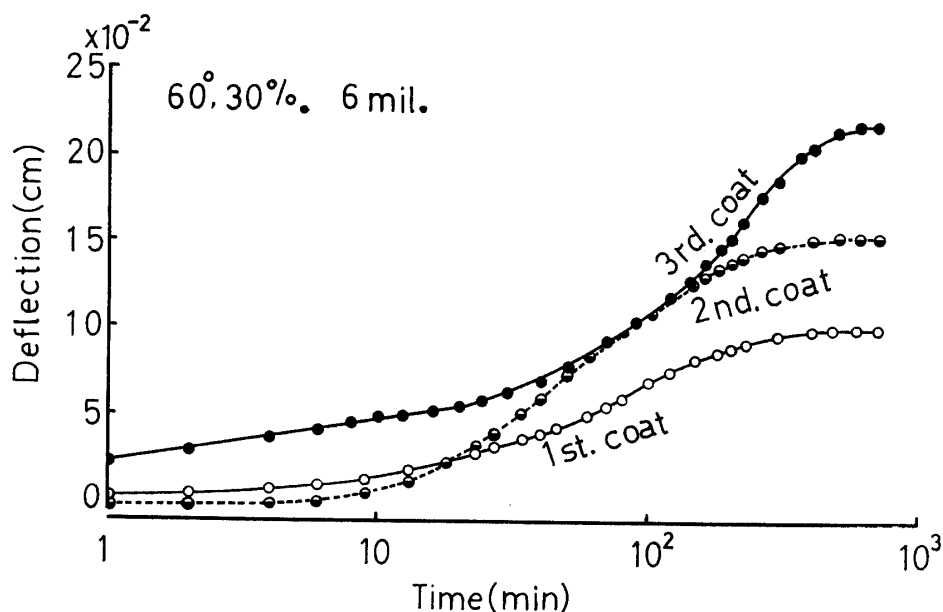
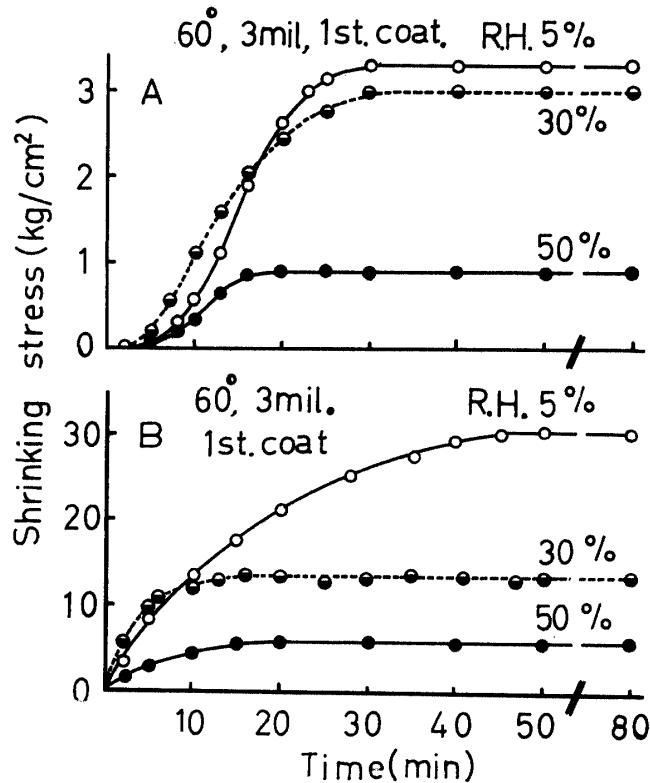


Fig. 6 Deflection-time curves for amino alkyd resin paint.

場合にのみ適用することができ、重縮合硬化型塗料の2回および3回塗装にみられるように既存の硬化塗膜の残留応力や曲げ剛性が影響する場合には、(1)式を用いて2回および3回塗装の収縮応力を正確に求めることは困難である。しかし、本実験では前記のように塗装片の支持点やたわみ量の測定点を1回塗装のそれとできるだけ正確に一致させるようにし、1回塗装の測定開始時を基準にしたたわみ量と総塗膜厚さから収縮応力を求め検討することにした。

Fig. 7 および Fig. 8 は、この方法で求めた3塗料の収縮応力の経時的一例を Fig. 5 および 6 に対応させて示したものである。図のように、ポリエステル樹脂塗料ならびにラッカー塗料の収縮応力の経時的一変化はたわみ量のそれにほぼ類似するが、アミノアルキッド樹脂塗料の塗装回数と収縮応力との関係では、とくに既存の硬化塗膜の残留応力、曲げ剛性ならびに塗膜厚さなどが影響するために、たわみ量のそれとは全く異なる傾向が認められる。



A: Polyester resin paint

B: Nitrocellulose lacquer

Fig. 7 Examples of shrinking stress-time curves.

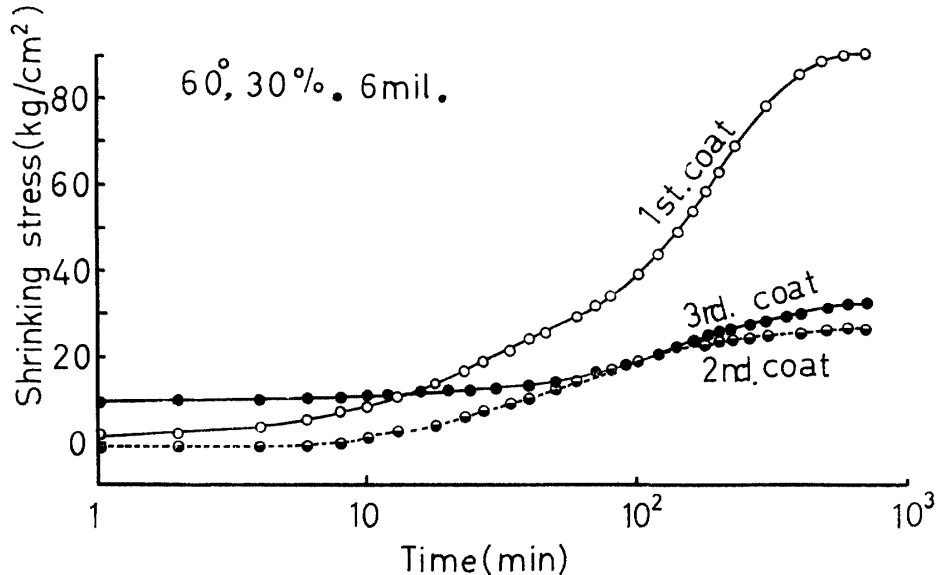


Fig. 8 Shrinking stress-time curves for amino alkyd resin paint.

3. 乾燥条件と収縮応力

Table 3 は各供試塗料について、硬化終了時における塗膜の収縮応力と乾燥条件との関係を示したものである。前記のように供試アルミ板には初期曲率やヤング係数のできるだけ等しいものを選び、しかも塗膜厚さがなるべく均一になるように規制したにもかかわらず、表によるとかなり大きなバラツキが認められる。

まず乾燥条件と収縮応力との関係をポリウレタン樹

脂塗料の場合についてみると、R. H. 50%の収縮応力は R. H. 5%のそれよりもやや低い両者の差異は僅少であり、またポリウレタン樹脂塗料の場合も各関係湿度における収縮応力には差異が認められない。この原因は、ポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料は付加重合硬化型の塗料で、硬化に際して前者では溶剤の揮散や脱水が行なわれず、また後者では溶剤の揮散と同時に重合反応が開始されるために、関係湿度の

Table 3. Changes of shrinking stress in paint films at various relative humidities.

(Number of coating: First coat, Thickness of coating: 3mil, Temperature: 60°C)

Kind of paint	Relative humidity (%)	Thickness of paint film (cm)	Shrinking stress (kg/cm ²)
Polyester resin paint	5	0.001~0.002~0.003	3.13~ 4.40~ 6.14
	30	0.001~0.002~0.003	2.85~ 4.28~ 5.78
	50	0.002	0.86~ 1.93~ 3.01
Polyurethane resin paint	5	0.003	3.84~ 4.84~ 5.40
	30	0.001~0.002~0.003	0.57~ 2.22~ 4.77
	50	0.002~0.004~0.007	3.03~ 3.12~ 4.42
Amino alkyd resin paint	5	0.003~0.004~0.007	5.56~ 7.19~ 8.82
	30	0.002~0.003~0.004	38.59~80.85~119.69
	50	0.003~0.004~0.005	4.07~ 5.83~ 8.11
Nitrocellulose lacquer	5	0.002	21.42~27.64~ 33.87
	30	0.002	11.62~12.62~ 14.99
	50	0.003	4.39~ 5.98~ 8.28

影響が強くあらわれなかったことに起因すると考えられる。

これに対して、ラッカー塗料の場合には明らかに関係湿度の低下にともなって収縮応力が増大する。本来

ラッカー塗料は溶剤揮散硬化型であるため、関係湿度が低いほど溶剤の揮散も著しく、それにともなって収縮応力も大きくあらわれたものと考えられる。

他方、アミノアルキッド樹脂塗料の場合には R. H.

Table 4. Changes of shrinking stress in paint films with thickness and number of coating.

(Drying condition: 60°C, 30%)

Kind of paint	Thickness of coating	Number of coating					
		First coat		Second coat		Third coat	
		Thickness of paint film (cm)	Shrinking stress (kg/cm ²)	Thickness of paint film (cm)	Shrinking stress (kg/cm ²)	Thickness of paint film (cm)	Shrinking stress (kg/cm ²)
Polyester resin paint	3mil	0.003 (0.002~0.003)	4.28 (2.85~5.78)	0.004 (0.003~0.005)	3.24 (1.53~5.19)	0.006 (0.004~0.008)	2.77 (1.41~4.38)
Polyurethane resin paint	3mil	0.002 (0.001~0.003)	2.22 (0.57~4.77)	0.004 (0.003~0.005)	1.07 (0.31~2.21)	0.005 (0.004~0.006)	0.81 (0.21~1.71)
	6mil	0.002 (0.002~0.003)	2.28 (0.54~4.22)	0.005 (0.003~0.006)	0.94 (0.27~1.96)	0.007 (0.004~0.008)	0.67 (0.12~1.43)
Amino alkyd resin paint	3mil	0.003 (0.002~0.004)	80.85 (38.59~119.69)	0.004 (0.002~0.005)	75.72 (71.50~92.34)	0.006 (0.004~0.007)	70.92 (51.89~84.28)
	6mil	0.003 (0.002~0.004)	83.81 (44.63~138.81)	0.006 (0.004~0.007)	56.12 (22.89~86.86)	0.007 (0.006~0.008)	48.65 (25.71~82.52)
Nitrocellulose lacquer	3mil	0.002	12.92 (11.62~14.99)	0.002 (0.001~0.002)	1.80 (0~4.84)	0.003 (0.002~0.003)	1.29 (0.66~2.41)
	6mil	0.002 (0.002~0.003)	2.55 (2.28~3.05)	0.005	0.47 (0~0.88)	0.006 (0.005~0.007)	0.48 (0~0.80)

5%と R. H. 50%の収縮応力には差異が認められないが、R. H. 30%のそれは著しく大きい。この原因については現在なお不明であるが、この塗料は成分としてブチル化尿素樹脂を含有し、硬化の際に脱水縮合反応をおこすので、水蒸気の影響が硬化反応になんらかの影響を及ぼしたのではないかと考えられる。これらの点についてはさらに検討する予定である。

4. 塗装回数と収縮応力

Table 4 は、温度60°C、関係湿度30%の一定条件における塗膜硬化終了時の収縮応力を、塗装厚さ(3 mil および 6 mil) ならびに塗装回数(1~3回)について示したものである。Table 3 で述べたように収縮応力のバラツキはかなり大きい、各塗料および塗装厚さそれぞれの平均値についてみると、収縮応力はいずれの場合も塗装回数の増加にともなって減少する傾向を示す。

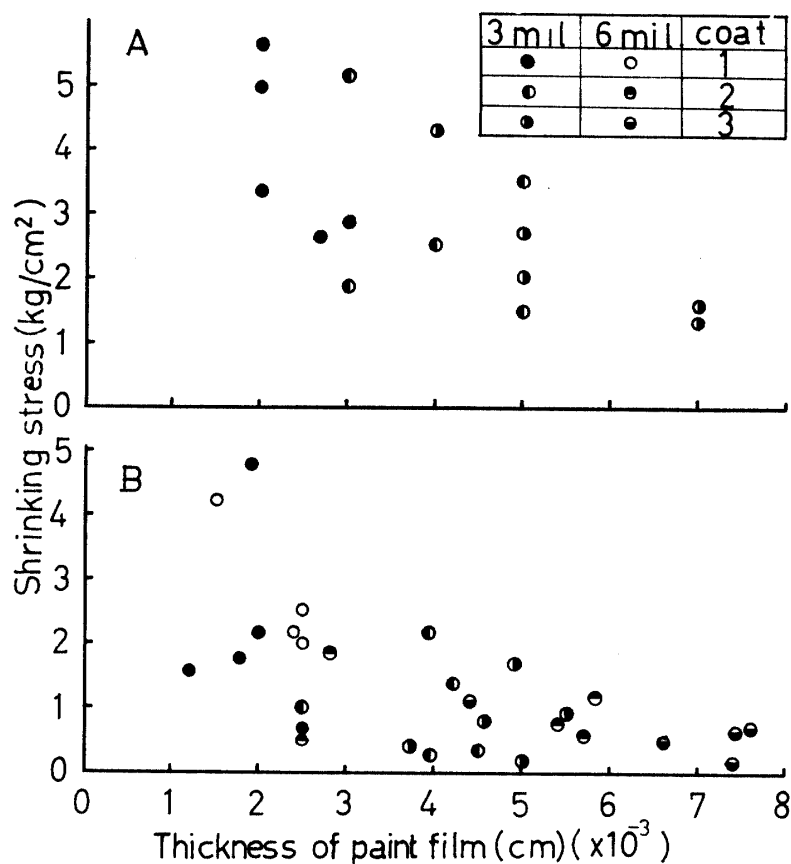
しかし、収縮応力のバラツキを考慮して塗装回数による差異を検討してみると、3 mil および 6 mil いずれの場合にもラッカー塗料の1回塗装と2回塗装間、および1回塗装と3回塗装間のみ差異があり、その他の場合には差異が認められない。

ラッカー塗料において塗装厚さ 3 mil および 6 mil

それぞれの場合に2回および3回塗装間の収縮応力に差異が認められないのは、Fig. 10 から推測されるように両者間の塗膜厚さの差異が1回塗装と2回塗装間、ならびに1回塗装と3回塗装間のように明瞭にあらわれなかったこと、およびラッカー塗料の場合には既存の硬化塗膜が新たに塗布された塗料の溶剤によって溶解されるために塗装回数の増加、したがって塗膜厚さの増加にともなって塗膜面に局部的硬化があらわれ収縮応力が減少したことなどに起因すると考えられる。他方、重縮合硬化型の塗料の場合に塗装回数による収縮応力に差異が認められないのは、塗膜の曲げ剛性がアルミ板のそれよりも著しく小さいとはいえ、この既存硬化塗膜の曲げ剛性が新たに塗布された塗料の収縮応力に抵抗したこと、ならびに2回および3回塗装の場合には硬化の終了した塗装片を室内に取り出し、室温下で塗装して再び実験を継続したために、塗装片に熱収縮や熱膨張があらわれたこと、などに起因すると考えられる。しかし、アミノアルキッド樹脂塗料を除いては、Fig. 9 のように塗装回数の増加にともなって収縮応力の減少する傾向が認められる。

5. 塗膜厚さと収縮応力

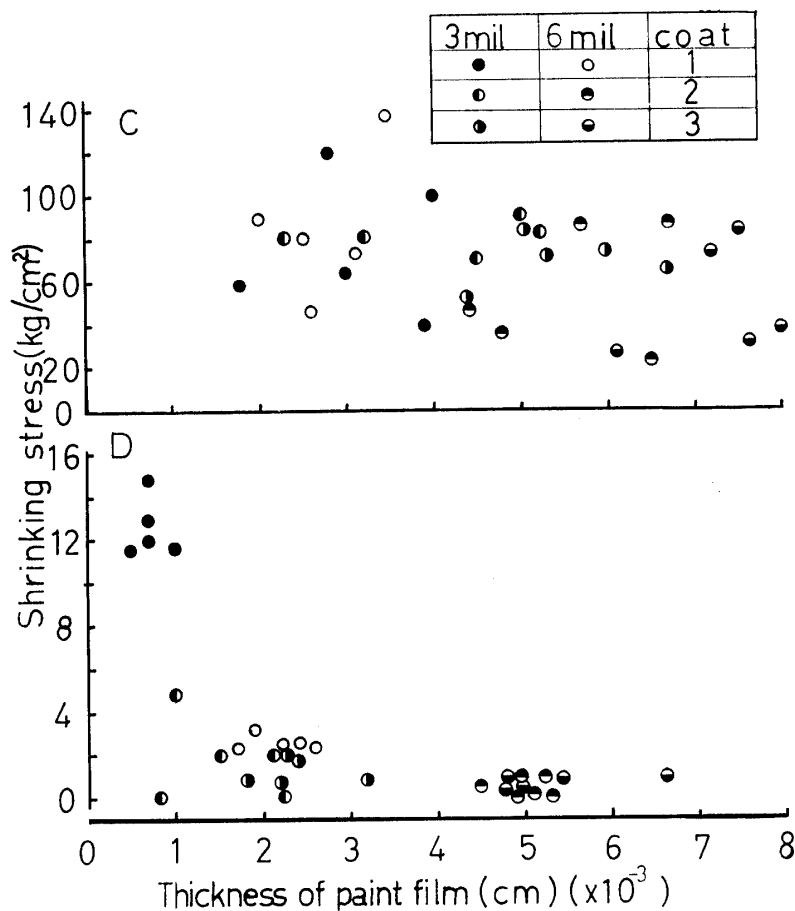
供試塗料それぞれについて各塗装回数における塗装



A: Polyester resin paint

B: Polyurethane resin paint

Fig. 9 Relation between shrinking stress and thickness of paint film.



C: Amino alkyd resin paint.

D: Nitrocellulose lacquer

Fig. 10 Relation between shrinking stress and thickness of paint film.

厚さ 3 mil および 6 mil 間の収縮応力の差異を比較してみると, Table 4 から明らかなようにラッカー 1 回塗装の場合にのみ両者の収縮応力に差異が認められるが, これらの関係をさらに実際の塗膜厚さについて検討してみると Fig. 9 および Fig. 10 の通りである. 図は塗膜厚さと収縮応力との関係を塗膜厚さならびに塗装回数別に一括図示したもので, 各塗料いずれの場合にもかなりのバラツキが認められるが, 塗膜厚さや塗装回数の区別を考慮外においても, また塗膜厚さ 3 mil および 6 mil それぞれの場合についてみても, ポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料ならびにラッカー塗料の場合には塗膜厚さの増加にともなって収縮応力の減少する傾向が認められ, アミノアルキッド樹脂塗料ではこの傾向が明瞭でない. しかし, 前記 3 塗料の場合についても, 塗膜厚さと収縮応力との関係はラッカー塗料の極端に薄い塗膜の場合を除いては有意性に乏しく, その原因は塗装回数に関連して 3 で述べたことがらに起因すると考えられる.

6. 塗料と収縮応力

硬化終了時における収縮応力の大きさを供試塗料について比較してみると, Table 3 および Table 4 か

ら明らかなように温度 60°C, 関係湿度 30%の乾燥条件におけるアミノアルキッド樹脂塗料の収縮応力が各塗膜厚さ, 塗装回数いずれの場合においても最も大きく, 次いでラッカー塗料の 60°C, 5%における 1 回塗装の収縮応力, さらに同塗料の 60°C, 30%における 1 回塗装の収縮応力で, その他の場合には同一塗装回数に関する限り各塗料における収縮応力には著しい差異が認められない.

このような塗料による収縮応力の差異は, 各塗料の硬化方式に起因すると考えられる. 前記のようにアミノアルキッド樹脂塗料はブチル化尿素樹脂を成分として含有し, 硬化の際に脱水縮合反応をおこすので, とくに 60°C, 30%の硬化条件がこの反応の進行になんらかの影響を及ぼしたのではないかと考えられる. またラッカー塗料はアルキッド樹脂を成分として含有し, 硬化中に多量の溶剤を揮散するので, 関係湿度が低くなるほど, しかも前記 3 の理由で塗装回数が少なくなるほど収縮応力が大きくあらわれたものと思われる.

他方, ポリエステルおよびポリウレタン樹脂塗料はいずれもエステル樹脂を共通の成分とする付加重合硬化型の塗料であり, 後者の場合には溶剤の揮散も若干

加わるとはいえ、収縮応力がほぼ同程度にあらわれたものと考えられる。

引用および参考文献

- 1) 井上幸彦(1943): 工化誌 46: 148.
- 2) 井上幸彦(1949): 工化誌 52: 334.

- 3) 高分子学会編(1961): 高分子材料試験法 共立.
- 4) 芝 亀吉(1948): 物理常数表 岩波.
- 5) 中戸・白石・梶田(1963): 木材誌 9: 217.
- 6) 中戸・青山・鈴木(1966): 木材誌 12: 85.
- 7) 井上幸彦(1963): 塗料と高分子 誠文堂新光社.

Summary

The various defects such as crack and peeling of paint films are due to the internal stress developing in the paint films of finished wood. Standing on this point of view the author has planned a series of studies on the internal stress in finished wood.

The present paper is concerned primarily with the determination of the shrinking stress developing during the drying process of paint films for wood coating, especially the stress in connection with drying condition, number of coating, and thickness of paint films.

The deflection of the aluminium strip coated with the paint on one side was measured throughout the drying process. From the results the shrinking stress in the paint film was calculated by Eq. 1. The paints used in this experiment were polyester, polyurethane, amino alkyd resin and nitrocellulose lacquer (Table 2).

The differences of shrinking stress among the

drying conditions as indicated in Table 3 are not recognized in the films of polyester, and polyurethane. Also the stress tends to decrease with increasing the number of coating and thickness of paint films (Table 4 and Fig. 9). In the case of amino alkyd resin the shrinking stress occurring in the film under the drying condition of 60°C and 30% R. H. shows the considerably large value in comparison with those under the other drying conditions, although the causes have not been clear as yet.

However it is clear from Table 4 and Fig. 10 that the stress is not affected by the number of coating and the thickness of this paint film. On the other hand, the shrinking stress in the paint film of nitrocellulose lacquer increases obviously with decreasing the relative humidity, number of coating and thickness of paint film (Table 3 and 4, and Fig. 10).