

塗装木材における塗膜の内部応力

今 村 浩 人⁽¹⁾

Hiroto IMAMURA: Internal Stress in Paint Film Coated on Wood

要 旨: 塗膜の内部応力は塗膜の木材への付着力を低下させる主要因子の一つであるが、内部応力の発生現象が複雑であり、また適当な測定方法がないため未解決の問題が多い。本研究は、内部応力の発生に関連する諸条件について検討を加えたものである。塗膜の内部応力は塗膜と木材との伸縮の差によって発生し、硬化応力、膨潤応力および熱応力に大別される。開発した断面偏光法によれば、塗膜断面の応力分布を詳細に観測できるため、塗膜—木材の界面応力の決定が可能となる。界面における硬化応力を検討した結果、塗膜および木材からの溶剤の揮散の速さが内部応力の大きさに重要な影響を与えることが判明した。また、木地表面に開口した道管付近での硬化応力は、道管断面積と直線関係にあり、塗膜の収縮による道管の変形で説明できる。放射組織付近での硬化応力にも特異な現象がみられる場合がある。半径方向において、早材部上では晩材部上より硬化応力が小さい。これは溶剤揮散による木地の収縮の影響である。溶剤揮散による木地の収縮を、硬化応力を小さくするために積極的に利用することが考えられる。吸湿にともなう内部応力の変化を3種類の塗料を用いて検討した。塗装材が吸湿、乾燥する場合、道管付近の応力は道管断面積と直線関係にあり、早・晩材の膨潤・収縮と道管の変形で説明される。まさ目面の放射組織上の半径方向の応力は早・晩材の膨潤・収縮の影響を大きく受ける。吸湿によって早材部上には圧縮応力が、晩材部上には大きな引張応力が発生する。硬化応力、膨潤応力とも目止め処理により低減する傾向にある。したがって目止め剤の物性の研究が望まれる。

目 次

緒 言	158
I 塗膜内部応力の検討方法—断面偏光法	159
1. 試料の作成	159
2. 偏光顕微鏡による応力測定	160
3. しま次数と内部応力	161
II 硬化応力と塗膜の条件	162
1. 実 験 法	162
2. 塗膜厚さ	163
3. 溶 剤 量	165
4. 塗料の種類	165
III 硬化応力と木地の表面構造	168
1. 実 験 法	168
2. 広葉樹材の道管	170
3. 広葉樹材の放射組織	172
4. 針葉樹材の早材部と晩材部	173
IV 吸湿による内部応力の消長	173
V 膨潤応力と木地の表面構造	178
1. 実 験 法	178
2. 広葉樹材の道管	179
3. 広葉樹材の放射組織	184
4. 針葉樹材の早材部と晩材部	184

VI 内部応力の発生機構	185
VII ま と め	187
文 献	188
Summary	190

緒 言

塗装された木製品を長期間使用する場合、塗膜のふくれ、はがれ、割れなどが発生し問題になることがしばしばある。従来よりこれらの主な発生原因の一つとして、塗膜の内部応力が指摘されていたが、不明な点が多く解明が望まれていた。

内部応力は、ぬれ、吸着とならび木材—ポリマー系における特異な相互作用であり³²⁾、ぬれおよび吸着とは反対に、木材とポリマーの結合にマイナスに作用する。すなわち、内部応力は塗膜付着力の実験値と理論計算値¹⁹⁾との差の一因とみなされ、事実、内部応力の増加は付着力の低下を意味する²⁾³⁾⁴⁸⁾⁴⁶⁾。

塗膜の内部応力はその発生原因により種々に分けられるが⁹⁾、大きく分けると 1) 塗膜の硬化過程で発生する応力、2) 木材の膨潤による応力、および 3) 塗膜と木材の線熱膨張係数の差による応力となる。1) は塗液の溶剤の揮散、重合および縮合反応による硬化のさいの体積収縮に基づく応力であり、硬化応力といわれる。2) は木材の膨潤率が塗膜のそれより大きいことに基づく応力であり、これを膨潤応力とよぶ。3) は熱応力である。これらのうち熱応力は福山ら⁷⁾によって、4 種類の代表的塗膜の線熱膨張係数がいずれも木材の半径方向のそれにほぼ等しく、1°C 当たりの塗膜熱応力は木材の接線方向で 0.1~0.8 kg/cm²、繊維方向で 1.2~3.1 kg/cm² であり、塗膜の付着性に対してほとんど問題にならないことが明らかにされている。

塗装木材における塗膜の内部応力に関して、則元ら (1965~1969)^{35)~39)}および福山ら (1966~1970)^{6)~9)}の成果があり、これより早い時期の研究例は少ない⁸⁾¹⁵⁴⁾。しかしながら、この研究分野ではいまだに未解決の問題が多く、これは木材が他材料にくらべて複雑な天然材料であること、塗膜と木材の界面における応力分布を求めるのに適当な方法がないことなどによる。

そこで本研究は、塗膜の内部応力にみられる諸現象のうち、とくに木材が木材であるために生じる現象を把握して解明すること、ならびにこのために必要な新しい界面応力の測定方法を確立することを目的とした。

一般に塗料を用いる研究では常に塗料の多様性が問題になるが、本研究ではこれを避ける目的でエポキシ樹脂 (エピコート 828)⁴¹⁾を用いた。エポキシ樹脂は塗料としても使用されているが、これにポリサルファイドポリマーを加えて弾性率および光弾性感度に変化を与えること⁴⁹⁾、および溶剤の添加が可能であり、さらに常温でも硬化するなどの幅広い物性をもちうる。

本研究を行うにあたり、上村 武場長 (前木材部長)、中村 章氏 (前材質改良科長)、岩下 睦林産化学第三科長 (前材質改良研究室長)、加納 孟木材部長、阿部 寛材質改良科長、高木 純材質改良研究室長、川村二郎技官、大黒昭夫技官の皆様のご指導、ご協力をいただいた。また田中辰五郎氏 (前強度研究室員) には試験体を作製していただいた。ここに厚く感謝いたします。

I 塗膜内部応力の検討方法—断面偏光法

塗膜内部応力の測定法は、1) 木地のひずみを測定する方法、2) 塗膜のひずみまたは応力を測定する方法の2つに分けられる。既往の研究例をみると、1) について、福山ら⁶⁾⁸⁾⁹⁾は帯状のアルミ板および木材の表面に塗膜を形成させ、その際の試験体のそりから硬化応力を求め、さらに湿度変化による応力を測定している。井上ら⁸⁾および DANNENBERG⁵⁾ も同じ方法を用いた。一方、則元ら^{35)~37)39)}は試験体にそりを生じさせないために必要な荷重から応力を求めた。2) の方法には、はく離法、応力塗膜法および偏光法がある。中戸ら³¹⁾は塗膜をガラス板からはく離し、さらにこれを水に浸漬してエネルギー弾性ひずみとエントロピー弾性ひずみを求め、木材付着塗膜の水による内部ひずみを検討した。高橋ら⁵⁰⁾は応力塗料を用いて光弾性用の比較的厚い皮膜の厚さ方向のひずみ分布を測定した。偏光法では、井上ら¹⁸⁾はガラス板上のエポキシ樹脂板の断面での熱応力の分布を光弾性装置で測定し理論解との一致をえた。また、ソ連では試験体の一点を通過した偏光の位相差を、光の強さの電氣的決定で求め、これによって内部応力を求めている⁴⁵⁾。

木地のひずみを測定する方法は、塗布直後から応力を測定できることが長所であるが、木地の弾性率が大きい場合には測定精度が低下するため、木地の繊維方向に発生する塗膜の内部応力を求めるには適当でない。また、はく離法は簡便な方法であるが、塗膜を木地からはく離することが困難であることに問題がある。さらに、これら2つの方法では、塗膜断面での応力分布がえられない。これに対し、応力塗膜法および光弾性装置による偏光法はこれが可能であるが、塗膜のように薄い試験体では精度上で不適当である。偏光の位相差の電氣的決定による方法は、塗膜の一点での測定に適するが、応力分布をえることは困難である。

以上のように、これらの方法では、木材繊維の方向と塗膜の内部応力の関係および塗膜断面での応力分布についての検討が十分になしえない。

ここで述べる断面偏光法とは、塗装材の断面を切断して薄い試験体をえて、これの塗膜部分の内部応力を偏光顕微鏡を用いて決定する方法であり、つぎの長所をもつ。すなわち、1) 木地木材の半径方向、接線方向および繊維方向の塗膜の応力が測定できる。2) 塗膜断面全体の応力分布が観測できる。3) 塗膜と木材の境界面での応力分布が詳細に観察できる。4) 偏光顕微鏡がそのまま利用でき、測定が手軽であるなどである。特に木地表面の局所的な組織構造と塗膜の内部応力との関係を検討しうることが本法の特徴である。

これに対し短所は、1) 不透明塗膜には使用できない。2) 等色線しま次数から垂直応力とせん断応力への変換が簡単でない場合がある などである。1) については、不透明塗膜が木材に使用されることは少なくなる傾向にあり、2) については主応力線図を作製して近似的な垂直応力を求めることができる。

1. 試料の作成

塗膜の内部応力は3次元であるが、いま Fig. 1 の木口試験体を例にとると、図のように塗装材の断面を切断してえた試験体の $x-y$ 断面に垂直に偏光を透過させると、内部応力は x 軸、 y 軸の平面応力として観察できる。

木地表面が平滑で、ある程度均質であれば、 $x-y$ 面の主応力線図 (Fig. 2) からわかるように、主応力 σ_1 , σ_2 の方向は端部から中央部に向かうにしたがって、それぞれ x 軸および y 軸に平行となり、端部

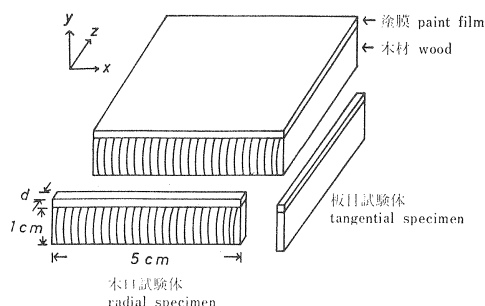


Fig. 1 試験体の形状
Shape of specimen.

Fig. 3 塗膜の等色線 (エポキシ樹脂塗膜)
Isochromatic line in paint film
(epoxy resin paint film).

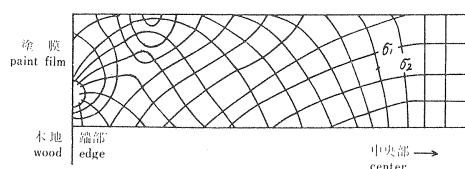
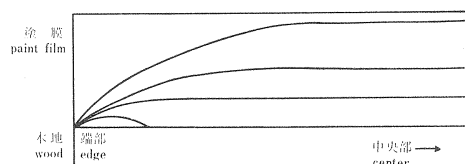


Fig. 2 塗膜の主応力線図 (エポキシ樹脂塗膜)
Principal stress line in paint film
(epoxy resin paint film).



ではせん断応力が現れるが、中央部では $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_y$, また塗膜の厚さ方向で応力は作用せず $\sigma_y = 0$ であるため、 $(\sigma_1 - \sigma_2) = \sigma_x$ となる。この端部の影響は塗膜厚さの 2 倍程度の距離におよぶ¹⁸⁾。また Fig. 3 に示すように、等色線は端部に集中するが、中央部では x 軸に平行となり、厚さ方向のしま次数は自由面から界面に向かうにしたがって大となる。なお、塗膜の厚さ方向の応力傾斜は、木材の z 方向の圧縮による x 方向ののびに関するポアソン比が塗膜のそれと異なることが原因とされ⁴⁴⁾、このことはエポキシ樹脂塗膜、アミノアルキド樹脂塗膜などにみられる。本研究では、端部の影響のない中央部について検討した。塗装材の z 軸に垂直な切断を z 軸方向の端部を避けた中央部で行ってえられた試験体では、 $x-y$ 面での応力はすべて等しい。試験体の切断は卓上バンドソーで行った。

試験体の厚さはしま次数と比例するため、塗膜の光弾性感度も考えに入れて 0.3~1.0 mm とした。また 400 番から 1000 番のサンドペーパーで断面を研磨して平滑にした。

なお本研究では Fig. 1 のように試験体は、木口試験体と板目試験体とし、まさ目面塗布の場合、試験体の長さ方向は木口試験体では木材の半径方向、板目試験体では繊維方向となる。

2. 偏光顕微鏡による応力測定

偏光顕微鏡は顕微鏡本来のレンズ系のほかに、試験体の前後に直交する偏光子 P_1 と検光子 P_2 をもつ。いま波長 λ の単色光を考え、 P_1 の振動面と主応力 σ_1 との角度を ϕ とすると、 P_2 通過後の光の強さはつぎようになる⁵¹⁾。

$$I = A^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで δ は位相角、 A は定数である。また δ と主応力差は BREWSTER の法則によりつぎの関係をもつ。

$$\delta = 2\pi\alpha d(\sigma_1 - \sigma_2) \dots \dots \dots (2)$$

ここで α は波長 λ のときの試験体の光弾性感度、 d は試験体の偏光透過方向の厚さである。光弾性装置の 2 枚の 1/4 波長板は (1) 式の ϕ の影響を消き次式の関係

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \dots \dots \dots (3)$$

をえるためであるが、偏光顕微鏡では $\phi = \pi/4$ 、すなわち σ_1 および σ_2 がそれぞれ P_1 または P_2 と $\pi/4$ の角度において測定することによって (3) 式の関係がえられる。(3) 式によれば $\delta = 2\pi N$ のとき I はゼロ、すなわち暗視野になり、(2) 式は次式のようになって主応力差が求められる。

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N}{\alpha \cdot d} \dots\dots\dots (4)$$

ここで N は整数で等色線しま次数といわれる。このように ϕ を $\pi/4$ に固定して主応力差を求め、 ϕ を変化させて主応力方向が一定の線、すなわち等傾線を求めることができる。

本研究では、光源に白色光を用いたため、(3) 式の I は各波長についての和となり、等色線は Photo. 1 のように色しまとなる。この場合、 $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ の単色光を用いたときの黒しまは紫色のしまにほぼ相当する。Photo. 1 では 1 次以上のしま次数がみられるが、低感度の塗膜では、1 次以下となる。しま次数の測定にはすべてバビネコンペンセーターまたはベレクコンペンセーターを使用した。これらは、2 枚または 1 枚の 1 軸性の結晶板よりなり、偏光が結晶板を通過する距離を $1/1000 \text{ mm}$ の精度で読みとれる。コンペンセーターでしま次数を 1 次だけ増加あるいは減少させるに要する読みが数 mm にされているため、しま次数は小数点以下第 3 位まで測定できる。なお内部応力の決定には、(4) 式に示されるように、光弾性感度 α が必要であるが、これは光弾性装置を用い単離塗膜に荷重を与え、しま次数を求めて (4) 式から決定した。また (4) 式からわかるように、主応力差は N/d に比例する。そこで本研究では N/d をしま次数とした。

ポリマーの光弾性現象は複屈折によるものであるが、これはガラス状態では原子間距離、原子価角のひずみに、ゴム状態では分子鎖の配向による光学的異方性に基づくと考えられ⁴²⁾、ガラス状態では原子オーダーのひずみ、ゴム状態では分子オーダーのひずみの度合を表わすものと考えられるが、ガラス状ポリマーに対してはガラスについて発見された BREWSTER の法則が適用され、ゴム状ポリマーについても屈折率とエントロピー弾性の関係から BREWSTER の式が導かれ、ともに主応力差と主屈折率差の関係が同じ式で表わされる⁵¹⁾。したがって、等色線しま次数からは、ひずみでなく応力が決定されることになる。

応力測定への偏光顕微鏡の利用は、異方性板の応力分布の測定⁵¹⁾、最近ではこれに 2 枚の $1/4$ 波長板を加え接着層の応力測定⁴⁰⁾などにみられる。

3. しま次数と内部応力

硬化塗膜を木材から単離すると、しま次数はその一部が瞬間的に減少し、その後はほぼ一定の値を保つかあるいは徐々に減少する。ここで瞬間的に回復するしま次数は主として塗膜がガラス状になってからのエネルギー弾性的な応力によるものであり、光弾性感度が低いため単位しま次数あたりの応力は大きい。これにに対しほとんど回復しないしま次数はゴム状領域で発生した応力の一部がガラス状領域において凍結して生じた安定な分子配向によるものと考えられ、ゴム状領域では光弾性感度が高いため単位しま次数あたりの応力は小さい。徐々に回復するしま次数の単位あたりの応力はこれらの中間的な大きさを示すであろう。したがって、塗膜の内部応力の近似的な値は塗膜の本地からの単離のさいに瞬間的に消滅するしま次数から求められると考えられる。本地からの塗膜の単離はカミソリ刃を用い、界面に沿って本地側より徐々に切断し、顕微鏡下で仕上げ状態を確認した。試験体の厚さ (Fig. 1 の d) が薄いため、単離作業は比較的容易である。単離塗膜のしま次数の決定は、これを 2 枚のスライドガラスの端部ではさみ偏光顕微鏡下で行った。

II 硬化応力と塗膜の条件

塗膜が硬化応力に影響を及ぼす条件は、1) 塗料の種類による本質的なものと、2) 塗装条件による二次的なものに分けられるであろう。そこで本研究では、先に2つの条件のうちとくに重要な溶剂量と塗膜の厚さの影響について、ついで1)の条件である塗料の種類の影響について検討を加えた。

塗膜厚さおよび溶剂量の影響はエポキシ樹脂を用いて検討した。既述のようにエポキシ樹脂は光弾性感度が良好であり、さらに溶剤の添加が自由であるなどの点で本実験の目的に適している。また塗料の種類の影響をみるために、木材用塗料として一般的であるニトロセルロースラッカー、不飽和ポリエステル樹脂塗料およびアミノアルキド樹脂塗料を用いた。

1. 実験法

硬化過程における内部応力と塗膜の厚さの関係を検討するための実験方法はつぎのとおりである。すなわち、界面応力を木材の側から求める目的で、木材に市販の光弾性実験用のエポキシ樹脂板(厚さ 6 mm, 弾性係数 $E=2.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)を用いた。これに、エポキシ樹脂 100 部に溶剤としてメチルエチルケトン 40 部 (28.57%) を添加した塗液を 20°C, 75% RH 下で塗布し、この塗膜厚さを 0.14~0.66 mm とし偏光透過方向の厚さ 5 mm の試験体を作成した。試験体作製のためのきり断は塗膜がこれに耐えうる程度に硬化したときに行った。この厚さを 5 mm としたのは、エポキシ樹脂板のしま次数精度を適度にするためと、溶剤の揮散が主として塗膜の自由面から行われるようにすることによる。なお、塗料として用いたエポキシ樹脂(エポコート 828)の分子量は約 350, エポキシ当量は 180~195 であり⁴¹⁾, 硬化剤としてエポキシ樹脂(100 部)に対し 8 部のジエチレントリアミンを用いた。

また、このエポキシ樹脂試験体と比較するため、厚さ 1 cm のヒノキまき目面をとの粉のみで目止め処理を施し、エポキシ樹脂を同様に塗布してえた木口試験体と板目試験体を供試した。偏光透過方向の厚さは約 1 mm である。

塗液の溶剂量が硬化応力に与える影響を知る目的で、エポキシ樹脂に対するメチルエチルケトンの割合を変えた塗液をヒノキの無処理のまき目面上で硬化させ、約 200 日後におけるしま次数および内部応力を求めた。本実験は断面偏光法を開発する過程で行ったものであり、木口試験体の形状も既述のものよりも大きく、測定は光弾性装置によった。木材の大きさは、0.1~0.3 cm (L) $\times$ 8 cm (R) $\times$ 5 cm (T)である。

塗料の種類と硬化応力の関係を検討するために用いた木材用塗料は、ニトロセルロースラッカー、不飽和ポリエステル樹脂塗料およびアミノアルキド樹脂塗料である。ニトロセルロースラッカーはニトロセルロースと等量のアルキド樹脂および芳香族炭化水素系溶剤、エステル系溶剤、アルコール系溶剤、ケトン系溶剤を含み、不飽和ポリエステル樹脂塗料はポリエステルワニスに対し 1%のメチルエチルケトンパーオキシドを硬化剤として添加、アミノアルキド樹脂塗料においてはアミノ樹脂とアルキド樹脂は等量、アミノアルキドクリヤーに対し硬化剤としてパラトルエンスルホン酸を 5%添加、芳香族炭化水素系溶剤、アルコール系溶剤を含む。これらの塗料の不揮発分は、ニトロセルロースラッカー 76.97%, 不飽和ポリエステル樹脂塗料 100% およびアミノアルキド樹脂塗料 36.37% であり、また硬化および応力測定時の条件、20°C, 65% RH の下での光弾性感度は、それぞれ 0.058 cm/kg, 0.047 cm/kg および 0.124 cm/kg である。ヒノキの無処理のまき目面にこれらの塗料を塗布して、既述のような木口試験体と板目

試験体をえた。なお内部応力の測定は塗布後 280~290 日目に行った。

2. 塗膜厚さ

SHREINER ら¹⁾は2枚のガラス板の間でゼラチン膜が乾燥するさい、界面の収縮応力が塗膜厚さによって直線的に増加することを見いだした。この直線関係は他の研究例³⁾²⁵⁾⁵⁷⁾⁴⁸⁾⁵⁴⁾にもみられるが、興味あることは薄い塗膜では圧縮応力が発生していることである⁵⁴⁾。しかもこのことは石綿セメント板、およびパーティクルボード、合板などの木質材料などの多孔質材料の場合にみられ、これに反して木質材料でも目止め処理を施したものおよび木材縦断面の繊維方向の界面応力についてはみられない。薄い塗膜の圧縮応力の発生原因として、最近 CHERVINSKY⁴⁾は塗液による木材の膨潤をあげている。このように木地が木材および木質材料の場合は塗膜厚さの変化にともなって他の材料にはみられない特異な現象が現われる。

Fig. 4 はエポキシ樹脂板上の厚さがそれぞれ 0.14, 0.28, 0.40 および 0.66 mm の塗膜の、木地との界面付近におけるしま次數の経過を示す。図示のように、しま次數の経時変化は塗膜の厚さによって著しく異なる。その理由として塗膜厚さによる溶剤揮散速度の相違が考えられる。すなわち、厚い塗膜では溶剤の揮散がおそく硬化がゆるやかに進行するため、薄い塗膜よりも硬化にともなうしま次數の増加段階に長時間を要し、大きいしま次數に達する。このことは木地樹脂板の界面での圧縮応力によるしま次數の経時変化からみると、つぎのとおりである。木地の圧縮応力は塗膜の引張応力と界面において必ずしも等しくはないが、塗膜の内部応力の発生状態を知るうえで重要である。Fig. 5 から明らかなように、木地のしま次數は付着している塗膜が薄いほど大きい傾向を示すが、これは塗膜の硬化の程度が塗膜厚さによって

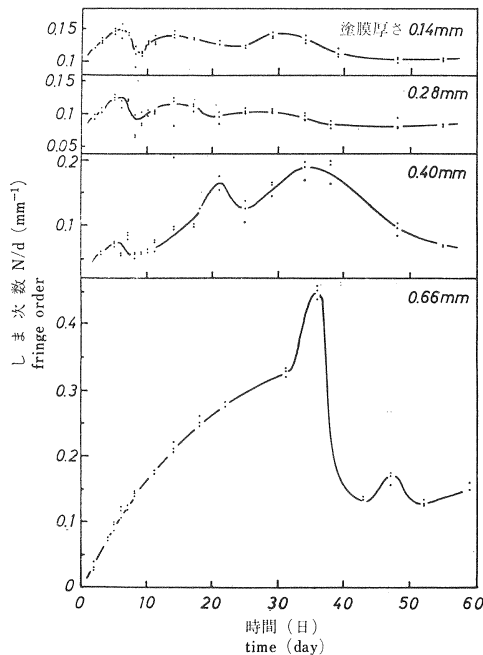


Fig. 4 硬化過程の塗膜のしま次數
(木地: エポキシ樹脂板)

Fringe order in curing paint film
(substrate: epoxy resin plate).

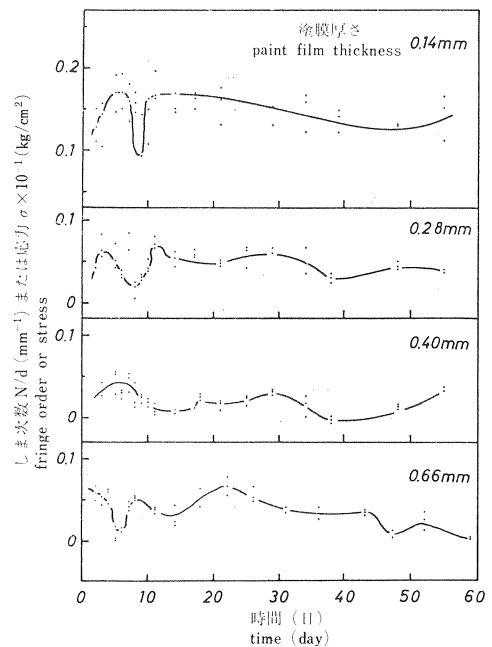


Fig. 5 塗膜の硬化過程における木地のしま次數と応力 (木地: エポキシ樹脂板)

Fringe order and stress in substrate during curing of paint film (substrate: epoxy resin plate).

異なるためと考えられる。特に厚さが 0.14 mm の塗膜は、しま次数が木地における値に近いことから、木地と同程度にまで硬化が進んでいるといえる。これに対して厚さが 0.66 mm の塗膜は、未硬化であるために光弾性感度が高く¹¹⁾、しま次数は大であるが木地の応力は小さい。

つぎに木地がヒノキまさ目板の木口試験体の結果を Fig. 6 に示す。ヒノキの表面は目止め処理を施しているが、目止め剤はとの粉のみであるため木材側への溶剤の浸透は可能であり、溶剤の揮散は塗膜の両面から行われ、木地がエポキシ樹脂板の場合と比較して塗膜厚さによる差は少ないことが予測される。また偏光透過方向の厚さが薄いことから、塗膜断面からの溶剤の揮散が促進され、エポキシ樹脂板の試験体におけるよりも木材のときの塗膜の硬化は進んでいると考えられる。しかし実験結果 (Fig. 6) は木地がエポキシ樹脂板の場合と同様の関係を示す。

Fig. 7 に板目試験体についての結果を示す。しま次数はいずれの塗膜厚さにおいても、測定開始後長期間にわたり低下するが、これは試験体の溶剤含有量が高い時点で切断したため、木地中の溶剤の揮散による収縮に基づく圧縮応力によると考えられる。このことは溶剤揮散の容易な木口試験体で、初期のしま次数の低下期間が短いことでも裏付けられる。なおこの結果は、一般の塗装木材の場合、木地木材からの溶剤の揮散に相当長期間を要することを示すものと考えられる。本実験の測定期間は、塗布後 60 日以内であったが、塗膜の硬化応力はさらに変化を続けることが明らかである。一般に塗膜厚さが溶剤の揮散速度に与える影響は極めて大きく³⁴⁾⁵⁸⁾、溶剤を含有する塗料において塗膜厚さと内部応力の関係を研究する場合は長期間にわたる溶剤の役割に注目しなければならない。

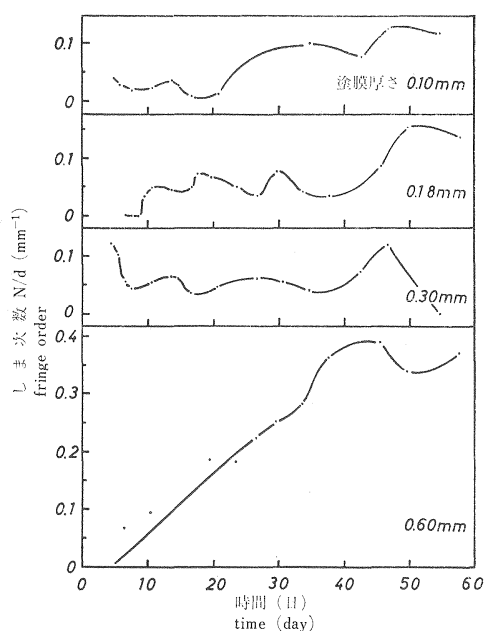


Fig. 6 木口試験体における塗膜の硬化過程のしま次数 (木地: ヒノキまさ目板)

Fringe order in curing paint film on radial specimen (substrate: Hinoki).

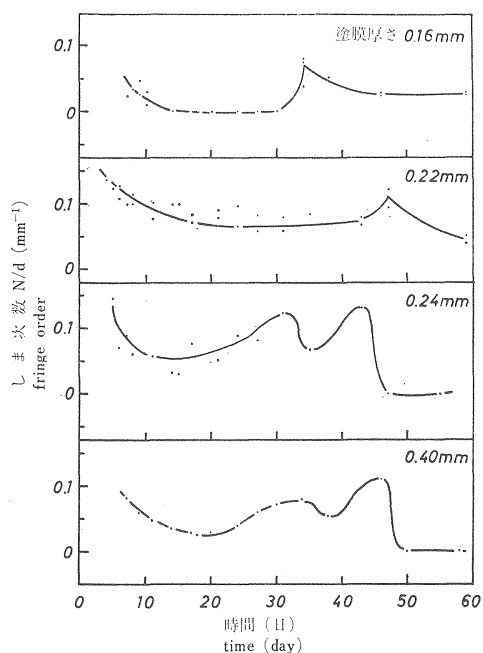


Fig. 7 板目試験体における塗膜の硬化過程のしま次数 (木地: ヒノキまさ目板)

Fringe order in curing paint film on tangential specimen (substrate: Hinoki).

3. 溶 剤 量¹¹⁾

塗膜と木材の界面でのしま次数を、塗膜厚さの関数として、溶剤率との関係を示すと Fig. 8 のようになる。ここで溶剤率とは、エポキシ樹脂 100 部に対する溶剤の重量部を示す。図から明らかなように、溶剤率の大きい塗膜ほどしま次数は大きい。Table 1 に塗膜の木材からの単離にさいして消滅したしま次数の単離前のそれに対する百分率、および内部応力を示す。

Table 1 から、内部応力もまた溶剤率が高いほど大きく、また溶剤を含まない場合を除くと、全しま次数の 17% から 20% がエネルギー弾性的な内部応力によることがわかる。なお同表の塗膜厚さに相違があるが、塗膜が厚くなればしま次数が一定値に達する傾向があることから (Fig. 8)、この結論は 6～8 mm 厚さの塗膜についても可能であると考えられる。

一般に溶剤の効果として、木材の膨潤、塗膜の可塑化および体積収縮が考えられる。このうち木材の膨潤の効果は、膨潤が有限であるため溶剤量が一定量を越えれば木材の収縮の開始および終了の時期をおそくする効果のみとなるであろう。しかしこれについては本実験では明らかではない。可塑化の効果とは、硬化過程での内部応力による分子の再配列を容易にし、硬化後の安定な分子配向の増加を意味する。これらに対して体積収縮は内部応力の発生の最も基本的な原因である。この点から本実験結果をみれば、溶剤率が大であるほどしま次数は増加し、これとともに安定な分子配向および内部応力も増加しているが、これは溶剤率の増加による塗膜の可塑化の効果と体積収縮の効果がともに著しくなることによるものである。

4. 塗料の種類¹²⁾

Fig. 9 にニトロセルロースラッカー塗膜の界面でのしま次数を塗膜厚さとの関連において示す。この塗膜の複屈折は塗膜厚さ方向の分子の配列の度合いによってその程度が異なる。木地からの塗膜の単離にさいして、木口試験体ではしま次数が増加して Fig. 10 に示す圧縮の内部応力をもつこととなるが、板目試験体ではしま次数の変化がみられない。これは溶剤による木材の膨潤および収縮と塗膜の硬

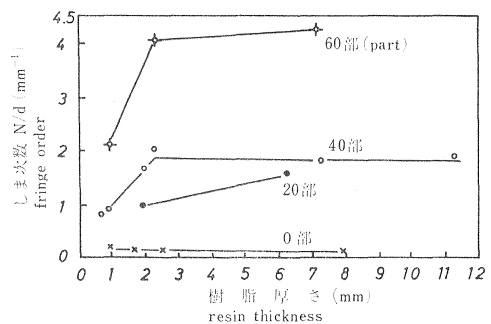


Fig. 8 エポキシ樹脂のメチルエチルケトン含有率としま次数（木口試験体）

Effect of methyl ethyl keton content in epoxy resin on fringe order (tangential specimen).

Table 1 溶剤率と木地—塗膜界面における内部応力
（ヒノキ木口試験体）

Internal stress in paint film at the boundary surface
(Hinoki radial specimen)

溶剤率 (部) Solvent content (part)	厚 さ Thickness (mm)	単離で消滅した しま次数 Fringe order disappeared on separation (%)	内 部 応 力 Internal stress (kg/cm ²)
0	8.00	0	0
20	6.25	20.00	18.24
40	11.25	17.14	51.10
60	7.25	17.14	86.22

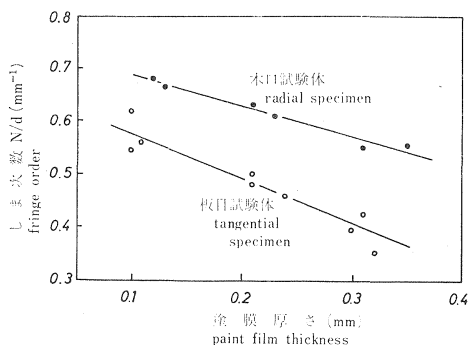


Fig. 9 ニトロセルロースラッカー塗膜のしま次数と厚さ (木地: ヒノキまさ目板)

Relation between fringe order and thickness of nitro cellulose lacquer film (substrate: Hinoki).

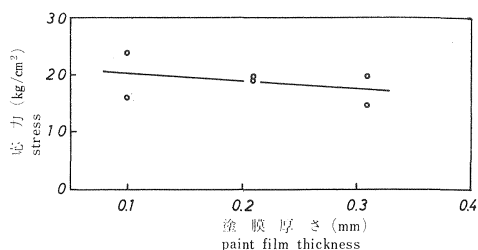


Fig. 10 木口試験体におけるニトロセルロースラッカー塗膜の硬化応力と厚さ (木地: ヒノキまさ目板)

Relation between curing stress and thickness of nitro cellulose lacquer film of radial specimen (substrate: Hinoki).

化速度との関係によって説明される。すなわち、ニトロセルロースラッカーは溶剤揮散型の硬化の速い塗料であり、塗膜の硬化がゴム状態からガラス状態に移行する時点で、木材はまだ溶剤による膨潤状態にあると考えられる。そのため塗膜に生じた引張応力の凍結によって配向した分子は木材の収縮によって圧縮応力を受けることになる。引張応力による分子配向は安定性が高く、これを緩和するには極めて長期間の圧縮応力を要する。したがって Fig. 10 に示すように塗膜を単離した時点でなおかなりの圧縮応力を示すこととなる。また板目試験体で応力がみられないことは、繊維方向の収縮率が小さく、エネルギー弾性的な内部応力を打ち消すにとどまったことによるものと考えられる。

Fig. 11 は不飽和ポリエステル樹脂塗膜の界面でのしま次数と塗膜厚さの関係を、Fig. 12 は内部応力と塗膜厚さの関係を示す。これらの図からわかるようにしま次数および内部応力は塗膜厚さに対して一定であり、また木地の木理方向による差もみられない。この塗液は木材表面から 1～2 細胞の深さまで浸透するが、溶剤を含まないため塗液による木材の膨潤および収縮は小さく、したがって内部応力も小さいと考えられる。

前記 2 種類の塗膜では、しま次数および内部応力が塗膜厚さ方向に均一に分布しているのに対し、アミ

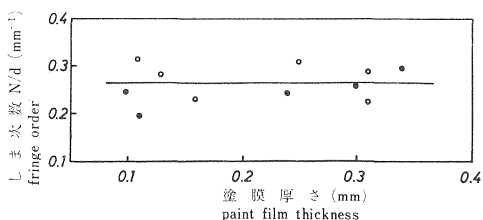


Fig. 11 不飽和ポリエステル樹脂塗膜のしま次数と厚さ (木地: ヒノキまさ目板)

Relation between fringe order and thickness of unsaturated polyester resin paint film (substrate: Hinoki).

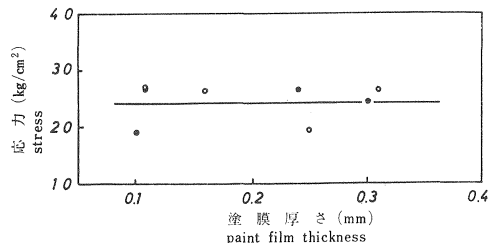


Fig. 12 不飽和ポリエステル樹脂塗膜の硬化応力と厚さ (木地: ヒノキまさ目板)

Relation between curing stress and thickness of unsaturated polyester resin paint film (substrate: Hinoki).

○: 木口試験体
radial specimen

●: 板目試験体
tangential specimen

○: 木口試験体
radial specimen

●: 板目試験体
tangential specimen

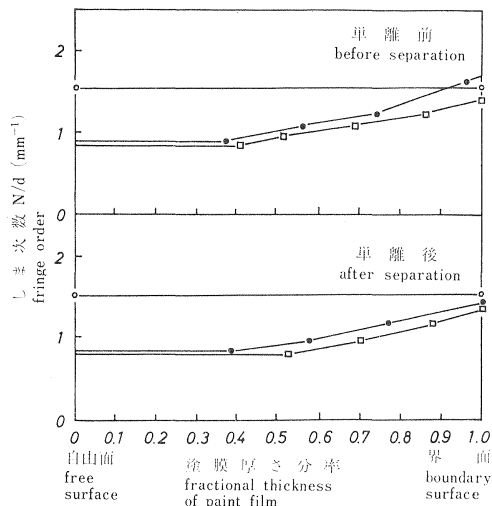


Fig. 13 木口試験体におけるアミノアルキド樹脂塗膜の単離前後のしま次数分布（木地：ヒノキまさ目板）

Fringe order distribution in amino alkyd resin paint film of radial specimen before and after separation (substrate: Hinoki).

塗膜厚さ paint film thickness
○ : 0.88 mm ● : 0.27 mm □ : 0.29 mm

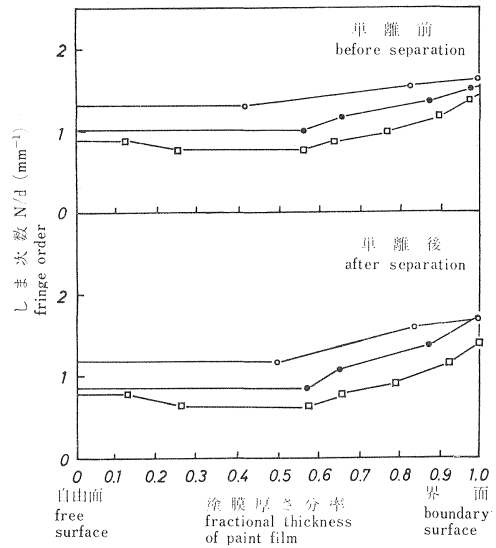


Fig. 14 板目試験体におけるアミノアルキド樹脂塗膜の単離前後のしま次数分布（木地：ヒノキまさ目板）

Fringe order distribution in amino alkyd resin paint film of tangential specimen before after separation (substrate: Hinoki).

塗膜厚さ paint film thickness
○ : 0.12 mm ● : 0.23 mm □ : 0.38 mm

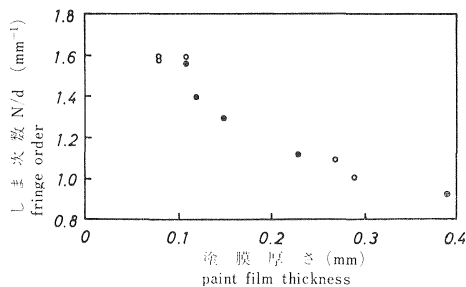


Fig. 15 アミノアルキド樹脂塗膜のしま次数と厚さ（木地：ヒノキまさ目板）

Relation between fringe order and thickness of amino alkyd resin paint film (substrate: Hinoki).

○ : 木口試験体 radial specimen
● : 板目試験体 tangential specimen

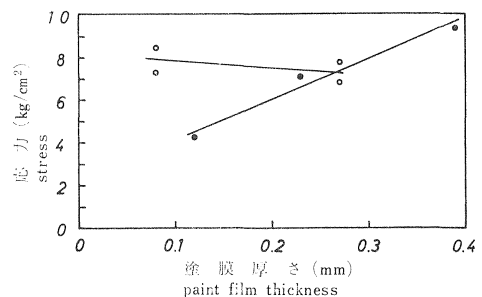


Fig. 16 アミノアルキド樹脂塗膜の硬化応力と厚さ（木地：ヒノキまさ目板）

Relation between curing stress and thickness of amino alkyd resin paint film (substrate: Hinoki).

ノアルキド樹脂塗膜のしま次数は Fig. 13 および Fig. 14 に示すように単離の前後とも厚さ方向において均一に分布しない。なお Fig. 13, Fig. 14 の横軸の塗膜厚さ分率は塗膜厚さ方向の部位を表わす。塗膜と木材の界面でのしま次数および内部応力と塗膜厚さについては明確な関係がえられないが、塗膜厚さ方向について平均したしま次数および内部応力と塗膜厚さとの関係は、それぞれ Fig. 15 および Fig. 16 に示すとおりである。本実験で用いたアミノアルキド樹脂塗料は溶剤率も高く、この塗料自体が硬化のおそい塗料といわれていることから、内部応力の測定時点では塗膜の硬化および木材の収縮が完了した状態ではなかったと考えられ、えられた結果の説明が容易でない。

本実験で作成した試料は 1 年後にも供試したが (第 IV 参照)、そのさいの内部応力の測定では、アミノアルキド樹脂塗膜の木口試験体については圧縮応力になっており、板目試験体では引張応力であった。これは本実験でニトロセルロースラッカー塗膜についてえた結果と同様の現象であり、アミノ樹脂、例えば尿素樹脂、メラミン樹脂などの硬化が常温ではおそいため、この塗料はニトロセルロースラッカーよりも硬化がおそい⁸⁾と考えられるが、浸透した溶剤が多いため木材の収縮がさらにおそくなったことが原因であると説明できる。

III 硬化応力と木地の表面構造

木材表面が形態的および材質的に変化に富んだ組織の集合体であるため、この上に塗膜を形成させるとき各所に内部応力が集中することが予想されるが、これについての研究例は全くない。木地の表面構造の問題点としては、広葉樹材では木地表面に開口した道管および放射組織、また針葉樹材では早材部と晩材部であり、これらが塗膜の硬化応力に与える影響を検討した。

1. 実験法

道管付近のしま次数を、つぎの方法で検討した。すなわち、木材はクリの無処理およびとの粉とポリ酢酸ビニル樹脂 (との粉と等重量) による目止め処理をしたものを供試した。エピコート 828 (100 部) にポリサルファイド (チオコール) 67 部を加えたエポキシ樹脂を 20°C, 65% RH の条件下で、木材のまき目面に塗布して 16 日間硬化させたのち、さらに 105°C で 48 時間加熱硬化させた。しま次数測定に供する試料は木口試験体とし、測定は加熱硬化冷却後、シリカゲル乾燥状態で行った。したがって塗膜の内部応力は木材の収縮による応力がある程度含むものと考えられる。しかし、この塗膜の最終的な硬化が全乾状態で行われたこと、およびエポキシ樹脂板の一端に半円形の孔をあけて道管の断面模型を作り、この部分で溶剤を含むエポキシ樹脂を常温硬化させてえた別の試料のしま模様が道管付近のそれと類似していることから、本実験では木材の収縮による応力は無視できる。

Fig. 17 に道管付近のしま次数分布および主応力線図の 1 例を示す。しま次数読み取り位置は図に示すように、道管近くの木部繊維上でしま次数の高い部位 (1) (樹心に近い側を 1-i, 反対側を 1-o), 木地面上の道管内こう中央部 (2) および道管内壁上 (3) とした。またこれらの部位の近辺である程度のせん断応力が発生するが、これは主応力方向の x 軸および y 軸に対する角度が小さく、さらに各部位では主応力方向が x 軸と y 軸に等しいことからしま次数は σ_x に比例した値を表わすものとみなした。

各部位のしま次数との関係を検討するための道管断面積 S (mm²) をつぎのように決定した。すなわち、Fig. 18 に示すように道管を円弧とみなし、道管の木地表面での幅 a (mm), 深さ b (mm) から次式で S (mm²) が求められる。

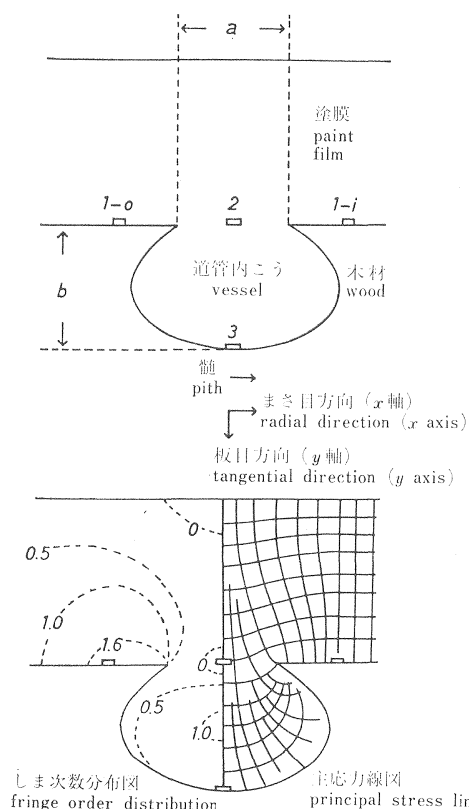


Fig. 17 道管付近におけるしま次数の測定部位, しま次数分布および主応力線図 (木口試験体)
Schematic diagram of principal stress line, positions for measurement of stress and dimensions of vessel (radial specimen).

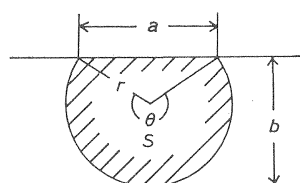


Fig. 18 道管断面積 S の決定
Determination of cross-sectional area S of vessel.

$$S = \frac{1}{2} r^2 \theta + \frac{1}{2} a(b-r) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに曲率半径 r (mm) は

$$r = \frac{a^2}{8b} + \frac{b}{2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

中心角 θ (ラジアン) は

$$\theta = 2 \sin^{-1} \frac{a}{2r}, \quad \frac{a}{2} \geq b \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta = 2\pi - 2 \sin^{-1} \frac{a}{2r}, \quad \frac{a}{2} < b \quad \dots\dots\dots (8)$$

放射組織が硬化応力に与える影響を, つぎの試料で検討した。すなわち, エポキシ樹脂には, 1) エポキシ樹脂 100 部に対しポリサルファイド 67 部を加え溶剤を含まないもの, および 2) ポリサルファイドを含まずエポキシ樹脂 100 部に対し, 40 部のメチルエチルケトン溶剤を含むものを用いた。硬化条件は 1) で 105°C, 48 時間, 2) で 20°C, 75% RH, 約 2 週間である。ミズナラは, まさ目面に 1) および 2) の樹脂を塗布し木口試験体とした。放射組織は木口面では, まさ目面に対して 8~12 度傾き, まさ目面であらふ模様を呈する。なお, 道管の影響を少なくするため既述の目止め剤で道管部のみを目止めした。ウラジロガシは目止めせず板目面に 2) の樹脂を塗布し, 木口および板目試験体とした。木口試験体では放射組織の幅方向の, 板目試験体では高さ方向の応力分布を検討することとなる。以上の試験体の塗膜厚さは, 0.32~0.50 mm である。

早材部と晩材部の影響を検討するために、IIの3で述べたものと同寸法のカラマツおよびスギの木口試験体を供試した。樹脂は前記2)を用い、硬化条件は20°C, 65% RH, しま次数の測定は塗布後約200日目に行った。なお、目止め処理はとの粉で行った。

本章では、硬化過程で発生した内部応力の程度を示す尺度として、しま次数のみを問題にした。

2. 広葉樹材の道管

クリは環孔材であり、道管は前年度晩材部の外側に集中する。ここでは、乾湿くり返し試験(Vの2)において行ったのと同様に、一年輪内の道管を前年度晩材部に隣接する道管と、隣接しない道管とに分けて考えた。

無処理道管、目止め処理道管ともに1-iと1-oの部位に応力の集中がみられるが、これは木地表面が道管部分で不連続になるため、塗膜の端部において応力集中が発生する(Fig. 3)のと同様の原因によるものと考えられる。

Fig. 19は無処理道管の1-iおよび1-oの部位のしま次数と道管断面積 S との関係を示す¹⁷⁾。図からわかるように、1)しま次数の1-iと1-oの部位での差異、道管の1年輪内での位置による差異は認めがたく、2)しま次数は S の大きい道管ほど大きい傾向がある。これは、つぎのように考えられる。すなわち、1)については、供試塗料が溶剤を含まないため、木地の膨潤は小さいと考えられる。したがって、早材部と晩材部の膨潤率の差に基づく1年輪内での道管の位置の影響は認められない。2)については、

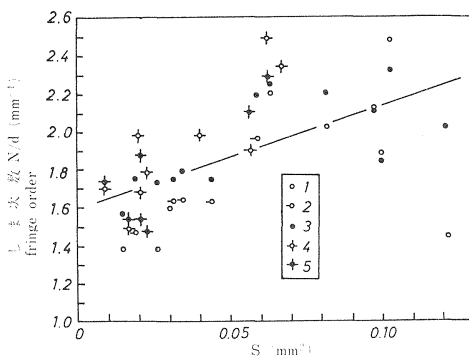


Fig. 19 1-i と 1-o の部位におけるしま次数と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between fringe order at position 1-i or 1-o and cross-sectional area S of vessel (non-treated Kuri radial specimen).

- 1 : 前年度晩材部に隣接する道管の 1-i の部位(早材部)
 - 2 : 同道管の 1-i の部位 (晩材部)
 - 3 : 同道管の 1-o の部位
 - 4 : 前年度晩材部に隣接しない道管の 1-i の部位
 - 5 : 同道管の 1-o の部位
- 1 : at position 1-i (early wood), the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
 - 2 : at position 1-i (late wood), the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
 - 3 : at position 1-o, the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
 - 4 : at position 1-i, the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.
 - 5 : at position 1-o, the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.

道管内この塗料の収縮応力の主応力方向は、内壁に垂直および平行であり (Fig. 17), 道管断面を収縮させる方向にあるが、この収縮力が開口部 (Fig. 17 の a) を小さくする方向に作用する力は、 S の大きい道管ほど大きく、1-i および 1-o の部位の木部繊維が 2 の部位の方向に引っ張られるためと考えられる。

Fig. 20 は、無処理道管の 2 の部位のしま次数と S の関係を示す。しま次数は S の大きい道管ほど小さいが、これは、前記の道管内この樹脂の収縮力が開口部を縮小させることのほか、道管の深さ b が大になるほど道管の中心軸上の塗膜の自由面近くの低い応力領域が中心軸上で下がることによると考えられる。

無処理道管の 3 の部位のしま次数と S の関係を Fig. 21 に示す。測定値のちらばりが大きい、しま次数の S に対する変化は小さい。しま次数の平均値 1.14 は、晩材中央部の木部繊維上での 1.09~1.28 (平均 1.17) と近似している。これは、道管内こうでは塗膜厚さが大になるが、3 の部位での応力は、木地表面での界

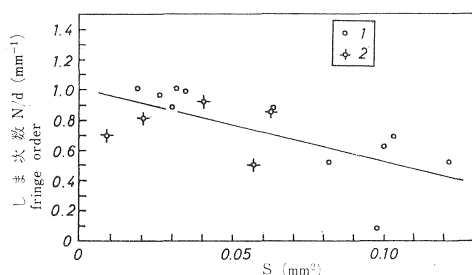


Fig. 20 2の部位におけるしま次数と道管断面
積 S （無処理クリ木口試験体）

Relation between fringe order at position 2
and cross-sectional area S of vessel
(non-treated Kuri radial specimen).

- 1：前年度晩材部に隣接する道管
- 2：前年度晩材部に隣接しない道管
- 1：the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
- 2：the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.

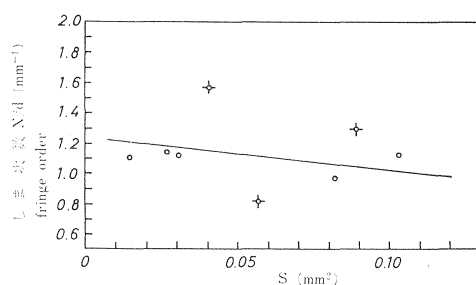


Fig. 21 3の部位におけるしま次数と道管断面
積 S （無処理クリ木口試験体）

Relation between fringe order at position 3
and cross-sectional area S of vessel
(non-treated Kuri radial specimen).

符号は Fig. 20 と同じ
Symbols are explained in Fig. 20.

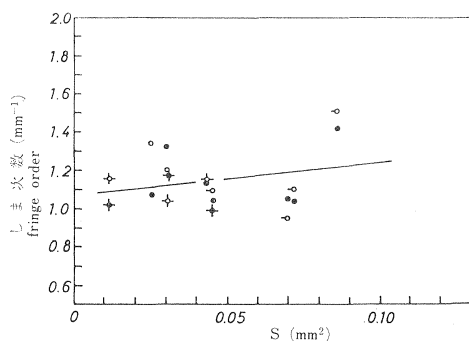


Fig. 22 1-i と 1-o の部位におけるしま次数と
道管断面積 S （目止め処理クリ木口試験
体）

Relation between fringe order at position 1-i
or 1-o and cross-sectional area S of vessel
(Kuri radial specimen treated with wood
filler).

符号は Fig. 19 と同じ
Symbols are explained in Fig. 19.

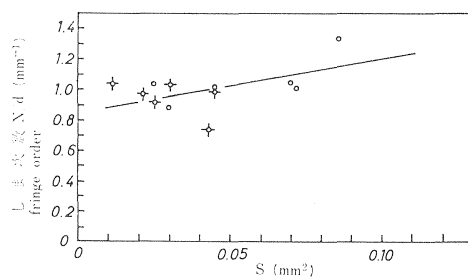


Fig. 23 2の部位におけるしま次数と道管断面
積 S （目止め処理クリ木口試験体）

Relation between fringe order at position 2
and cross-sectional area S of vessel (Kuri
radial specimen treated with wood filler).

符号は Fig. 19 と同じ
Symbols are explained in Fig. 20.

面応力とはほぼ等しいことを示している。

目止め処理道管の 1-i および 1-o の部位のしま次数は、Fig. 22 のように無処理道管のそれより小さく、 S に対する変化も小さい¹⁷⁾。これは、目止め処理道管では、塗膜硬化時に道管内こうでの塗料収縮がないため、道管の変形の影響がないことによると考えられる。

目止め処理道管の 2 の部位のしま次数は、Fig. 23 に示すように、 S に対する変化は比較的小さい。これについても道管の変形の影響がないことが原因と考えられる。

目止め処理試験体の晩材中央部の木部繊維上のしま次数は 0.99～1.16（平均 1.08）であり、無処理試験体のそれ（平均 1.17）より若干小さい。

3. 広葉樹材の放射組織

ミズナラ木口試験体では、Ⅲの 1 で既述した 1) の溶剤を含まないエポキシ樹脂および 2) の溶剤を含むその塗膜において、放射組織上とこれに隣接する木部繊維上でしま次数の差異がみられない。この理由はつぎのように説明される。すなわち、中戸によれば⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾、放射組織の収縮異方性は大きくミズナラの放射組織の細胞長軸方向の収縮率は木材の半径方向における木部繊維の収縮率より小さく、放射組織の高さおよび幅方向の収縮率は木部繊維の接線方向の収縮率より大きい。したがって、ここで用いた試験体の塗布面まき目方向における放射組織の膨潤率あるいは収縮率はその細胞長軸方向における値よりやや大きい程度と推定される。したがって、塗液による放射組織と木部繊維の膨潤、収縮量の差異は大きいと推定される。しかし本試験体の乾湿くり返し試験 (V の 3) の結果では、木地表面の放射組織の膨潤はその周辺の木部繊維のそれに追従し、収縮量は木部繊維のそれと近似する。したがって、本試験体では、塗液による放射組織と木部繊維の膨潤、収縮率の差異が内部応力に影響を与えなかったものと考えられる。

ウラジログシ木口試験体での塗膜部の主応力線図および木地との界面に沿ったしま次数の分布を Fig. 24 に示す。放射組織およびその近辺の部分の主応力方向は、 x 軸および y 軸に対し 45 度に近い角度で傾くため、 σ_x , σ_y は非常に小さく、主としてせん断応力が存在することとなる。このような主応力線図を招いた原因として、放射組織への塗液の浸透が考えられる。この試験体においてこのことが考えられる根拠は、1) 先に述べた放射組織の収縮異方性からこの試験体の場合、塗液による放射組織の幅方向、すなわち膨潤の大きい方向に相当すると思われること、さらに 2) Fig. 24 の主応力線図が塗液の放射組織への浸透の様子を示していること、これに関してはポリスチレン樹脂製品の成形のさいの樹脂の流れの方向が、製品の凍結ひずみによる主応力の方向の一つとほぼ一致すること⁽⁵¹⁾ が知られている。3) 放射組織上の塗膜の自由面には、塗液の浸透によって局部的に塗膜が厚くなるために生じる、いわゆる ひけマーク (Sink mark) がしばしばみられることなどによる。

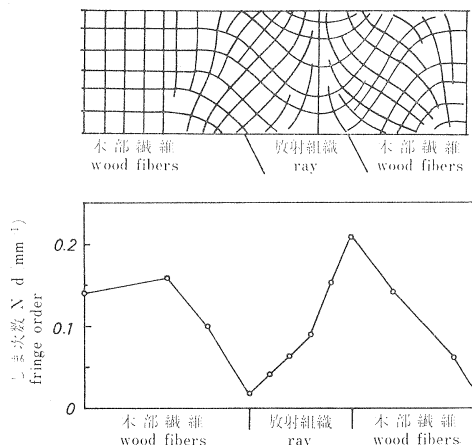


Fig. 24 ウラジログシ板目面における放射組織と塗膜の主応力線図およびしま次数 (木口試験体)

Principal stress line and fringe order in paint film near and on ray of the tangential surface of Urajirogashi (radial specimen).

ウラジログシの板目試験体においては放射組織の影響がみられない。これは、放射組織への塗液の浸透は、これに関係する放射組織自体の構造が先の木口試験体の場合と同じであっても、板目試験体の長さ方向が繊維方向であるため、浸透に必要な膨潤が隣接する木部繊維によって抑制される結果であると考えられる。

以上放射組織の硬化応力への影響については広放射組織についてのみ検討を行った。このほかレッドラワンのミクロトームでスライスした木口試験片についても特異性が認められる⁽¹²⁾が測定精度上の理由から詳細は明らかでない。また針葉樹材の放射組織については、塗液の浸透が容易であると報告されているが⁽²⁴⁾⁽²⁶⁾、本実験の測定精度では問題にできない。

4. 針葉樹材の早材部と晩材部¹³⁾

カラマツおよびスギの木口試験体について、えられたしま次数分布を Fig. 25 に示す。塗膜厚さはカラマツ試験体で 6 mm、スギ試験体で 8 mm である。図から次のことがわかる。すなわち、1) 早材部におけるしま次数は 晩材部におけるしま次数より大きい。2) カラマツの早材部の界面におけるしま次数を除けば、目止め処理によってしま次数が低下する傾向がある。1) については、硬化過程でしま次数の増加が著しい時期の後に木材中の溶剤の揮散による収縮が起こり、そのためしま次数は減少するが、その場合に晩材部は早材部より収縮率が大きいためと考えられる。2) の原因については、無処理の木材表面では塗料の浸透層が木材の収縮をある程度拘束するとみられ、これに対して目止めされた表面では細胞内壁で直接樹脂が接触せず、木材の収縮がより自由であることが考えられる。無処理表面での塗料の浸透の深さは早材部においてカラマツ 1～2 細胞、スギ 6～20 細胞であり、両者の晩材部では 1～2 細胞にとどまる。カラマツの早材部では仮道管内こうの大きさがほぼ均一であり、このため塗料の浸透および塗膜の木材との界面付近でのしま次数の分布も一様となるが、スギの早材部では一年輪内で仮道管内こうが大きくなるにしたがって塗料の浸透も 6～20 細胞におよび浸透の深い部分ではしま次数はより低い傾向がうかがわれ、目止め処理によってしま次数の分布も一様になることが明らかである。

このように早材部と晩材部の収縮率、および細胞内こうの大きさに基づく塗料の浸透深さの差異が、塗膜の硬化応力に大きな影響を与えることが理解される。なお、ヒノキ材についても 1 年輪内の早材部内でも浸透深さが一様でないが、カラマツおよびスギなどと比較して年輪幅が小さく、したがって 1 年輪内のしま次数の分布の変化も顕著ではない。

IV 吸湿による内部応力の消長¹⁴⁾

塗装材が吸湿するとき、木地木材と塗膜の膨潤率の差によって塗膜に引張応力が発生するが、一方、硬化応力は水によって緩和すると考えられる。これらの応力の消長は、温湿度の変化などの外的条件だけでなく、塗膜側および木地側の多数の条件が相互に関連し、非常に複雑な現象である。そのためこれに関する既往の研究も非常に少ないが⁹⁾⁸¹⁾、この問題は親水性木地である木材の塗装において避けることのできない重要な問題である。

塗装木材が吸湿するさいの塗膜のしま次数は、模式的に Fig. 26 のように考えられる。木地付着塗膜の応力は膨潤応力と硬化応力の和であり、膨潤応力をえるには硬化応力の緩和曲線（これを表すしま次数は図中の破線）が必要であるが、この決定は困難である。したがって本研究では膨

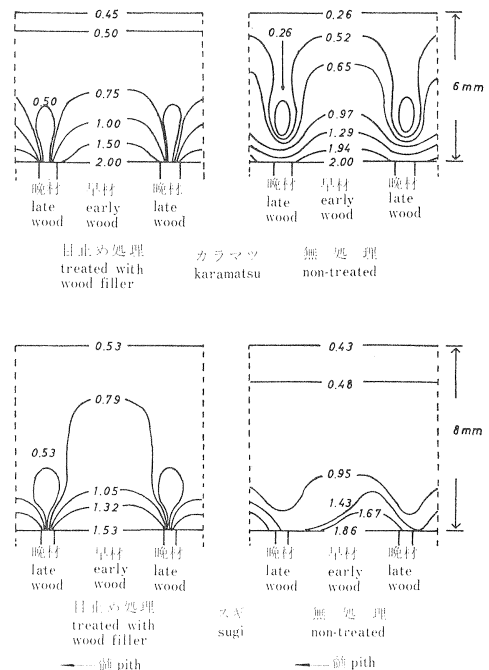


Fig. 25 木地の早材部上および晩材部上における塗膜の硬化によるしま次数分布（木口試験体）

Fringe order distribution on early wood and late wood, set up during curing of paint film (radial specimen).

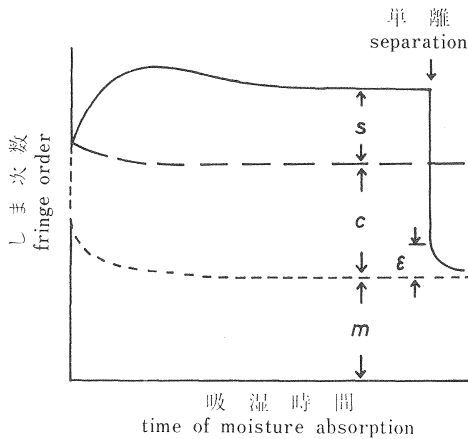


Fig. 26 塗膜の吸湿としま次数の模式図
Schematic explanation for fringe order changing during moisture absorption of paint film.

——: 木地付着塗膜のしま次数
- - -: 木地付着塗膜の硬化応力によるしま次数
.....: 単離吸湿塗膜のしま次数
 s, c, m, ϵ はそれぞれ膨潤応力, 硬化応力, 安定な分子配向, 遅延的に回復する応力によるしま次数
——: fringe order in paint film on wood.
- - -: fringe order in paint film on wood, caused by curing stress.
.....: fringe order in separated paint film.
 s, c, m, ϵ are fringe order caused by swelling stress, stable molecular orientation and stress recovering in retard, respectively.

潤応力と硬化応力の和を検討することとする。これには安定な分子配向によるしま次数の決定が必要であり、膨潤応力がほとんどエネルギー弾性的応力であるとする、安定な分子配向は硬化時に発生したものである。塗膜を木地から単離して吸湿させると、しま次数は Fig. 26 の点線で示すように瞬間的および遅延的に減少して一定値に達し、安定な分子配向によるしま次数は m で表わされる。ここで、(4) 式の光弾性感度は単離塗膜に瞬間荷重を加えて求めるため、厳密な意味では木地付着塗膜のしま次数から m を減じて決定する応力はエネルギー弾性的応力であることが必要となる。したがって、本法では、吸湿した木地付着塗膜を単離したさい、しま次数が瞬間的に m の値まで減少し、遅延的に減少するしま次数 (Fig. 26 の ϵ) が無視しうる程度であることが望ましい。そこでつぎのような実験を行った。すなわち、20°C, 65% RH で調湿した塗装試験体および同条件下で木地より単離した塗膜を 20°C, 90% RH で吸湿させた。これらの温湿度条件下における木材および塗膜の含水率は Table 2 に示すとおりである。塗膜厚さは 0.2~0.3 mm である。木地からの塗膜の単離法は I の 3 で述べた。なお、供試した試験体は約 1 年前に作成し、II の 4 で述べた実験で使用したものと同じである。

Fig. 27 に木口試験体のニトロセルロースラッカー塗膜についての結果を示す。65% RH での塗膜の木地からの単離にさいして、既述硬化応力測定の場合と同様に、圧縮応力の除去によってしま次数は増加し、これを吸湿させるとき若干の減少を示す。一方、木地付着塗膜のしま次数は木材の膨潤による圧縮応

Table 2 木材および塗膜の平衡含水率 (%)
Equilibrium moisture content of wood and paint films

	20°C, 65% RH	20°C, 90% RH
ヒノキ Hinoki	11	19
ニトロセルロースラッカー塗膜 Nitro cellulose lacquer film	0.62	5.19
不飽和ポリエステル樹脂塗膜 Unsaturated polyester resin paint film	0.31	1.07
アミノアルキド樹脂塗膜 Amino alkyd resin paint film	1.83	3.57

力の消滅のために増加し、単離吸湿塗膜のしま次数とほぼ等しい値で一定値に達する。90% RH 下で 24 日目に木地付着塗膜を単離すると、しま次数はわずかに 0.015 だけ増加し、これは 2.67 kg/cm^2 の圧縮応力に相当する。

Fig. 28 はニトロセルロースラッカー塗膜の板目試験体のしま次数変化を示す。これも先の測定結果と同様 65% RH では応力は認められず、90% RH 下で 24 日目の単離においてもしま次数は変化を示さず膨潤応力は存在しない。これは、木地が軸方向で膨潤量が小さく、これとほぼ同程度の塗膜膨潤であることによると考えられる。

木口試験体の不飽和ポリエステル樹脂塗膜のしま次数の変化を Fig. 29 に示す。65% RH での測定値は 1 年前に比較してしま次数は増加し、内部応力も 24.3 kg/cm^2 から 72.0 kg/cm^2 に増加している。木地付着塗膜は 90% RH 下での 1 日目にしま次数の極端な低下をみせるが、これはこの塗膜の弾性率が高くまた水分拡散係数および吸湿速度が小さい³¹⁾ことから木材の膨潤は追従できず、試験体のそりを招き塗膜に圧縮応力を生じたと考えられる。この時点で木地付着塗膜を単離すると、しま次数は 0.136 であり、単離吸湿塗膜のしま次数に近似している。吸湿開始後 23 日目で木地付着塗膜を単離するとしま次数は 0.143 となり、これは単離吸湿塗膜のしま次数と近い値であることがわかる。この時点の内部応力は 7.2 kg/cm^2 である。

Fig. 30 は板目試験体の不飽和ポリエステル樹脂塗膜についての結果を示す。65% RH での測定値も 1 年前と異なり、内部応力は認められない。吸湿開始後 23 日目で木地付着塗膜を単離すると、しま次数は 0.19 となり、これは単離吸湿塗膜の値に近似している。なお内部応力は 12.4 kg/cm^2 である。

つぎにアミノアルキド樹脂塗膜について、Fig. 31 に木口試験体の塗膜と木地の界面におけるしま次数の変化を示す。65% RH での応力が 1 年前と異なり圧縮応力になっていることについては II の 4 で述べた。しかしながら圧縮応力は界面および自由面の近辺のみであり、溶剤揮散の遅れる塗膜厚さ方向の中央部では引張応力がみられ、単離にさいして塗膜は 1.1% の収縮を示す。Fig. 31 において木地付着塗膜は 90% RH 下の 3 日目で、木材の膨潤が原因と考えられるしま次数の急激な増加を示し、その後低下して安定した状態をみせている。これに関連する塗膜厚さ方向しま次数分布は Fig. 32 のようになる。また Fig. 33 には 76 日目で単離した塗膜、単離吸湿塗膜および木地付着塗膜の厚さ方向のしま次数の分布を示す。図からわかるように、76 日目で単離された塗膜のしま次数は単離吸湿塗膜のしま次数より全厚さにわたって大きい値を示す。

アミノアルキド樹脂塗膜の板目試験体の界面におけるしま次数の変化を Fig. 34 に示す。木地付着塗膜のしま次数分布 (Fig. 35) は吸湿とともに厚さ方向の全体にわたりほぼ均一に減少する。76 日目で単離された塗膜のしま次数の分布を Fig. 36 に示す。これからわかるように、板目試験体についてもしま次数は単離吸湿塗膜のそれと一致しない。

本実験で用いた 3 種類の塗膜について、硬化応力の変化を伴う膨潤応力の決定を試みたが、結果はつぎのようになる。すなわち、しま次数の変化の大きい吸湿初期を除いて考えると、ニトロセルロースラッカー塗膜と不飽和ポリエステル樹脂塗膜については、吸湿過程で単離した塗膜のしま次数が単離吸湿塗膜のそれとほぼ等しいため、内部応力の決定が可能であった。一方、アミノアルキド樹脂塗膜では、単離吸湿塗膜のしま次数が一定値に達するに長期間を要し、一定値に達したと思われる 76 日目においても、木地付着塗膜の単離後のそれと近似せず、内部応力の決定は困難であった。この結果は、アミノアルキド樹脂塗膜

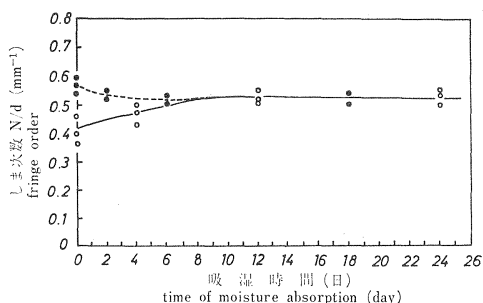


Fig. 27 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (ニトロセルロースラッカー塗膜, 木口試験体)
Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (nitro cellulose lacquer film, radial specimen).

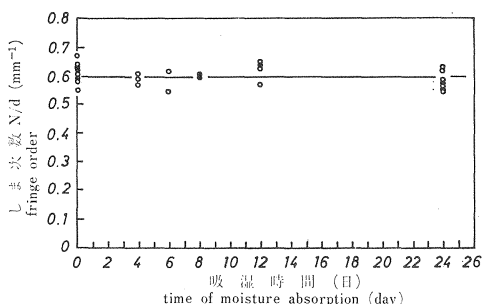


Fig. 28 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (ニトロセルロースラッカー塗膜, 板目試験体)
Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (nitro cellulose lacquer film, tangential specimen).

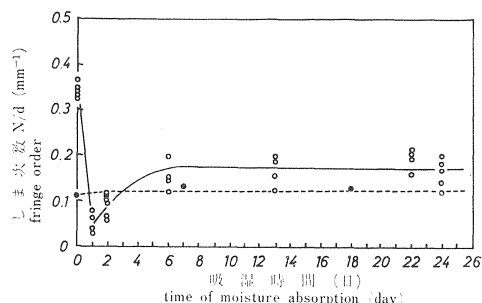


Fig. 29 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (不飽和ポリエステル樹脂塗膜, 木口試験体)
Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (unsaturated polyester resin paint film, radial specimen).

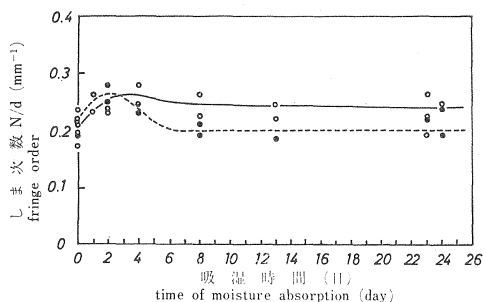


Fig. 30 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (不飽和ポリエステル樹脂塗膜, 板目試験体)
Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (unsaturated polyester resin paint film, tangential specimen).

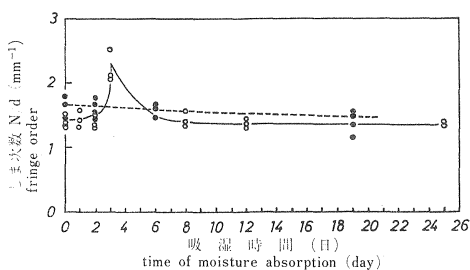


Fig. 31 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (アミノアルキド樹脂塗膜, 木口試験体)
Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (amino alkyd resin paint film, radial specimen).

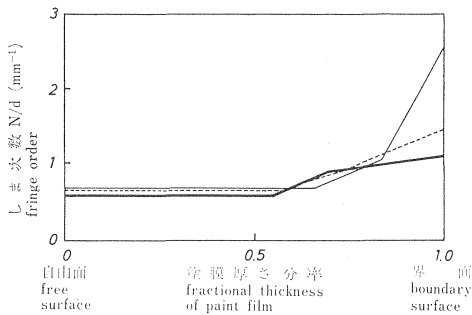


Fig. 32 アミノアルキド樹脂塗膜の厚さ方向のしま次数分布 (木口試験体)

Fringe order distribution in thickness direction of amino alkyd resin paint film (radial specimen).

-----: 0日目 at 0 day, —: 3日目 at 3 days, —: 76日目 at 76 days.

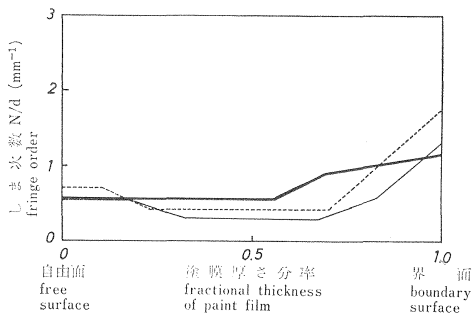


Fig. 33 アミノアルキド樹脂塗膜の76日目の単離としま次数分布 (木口試験体)

Fringe order distribution in amino alkyd resin paint film separated on 76 days (radial specimen).

-----: 76日目で単離した塗膜 separated on 76 days.
—: 単離吸湿塗膜 initially separated.
—: 木地付着塗膜 on wood.

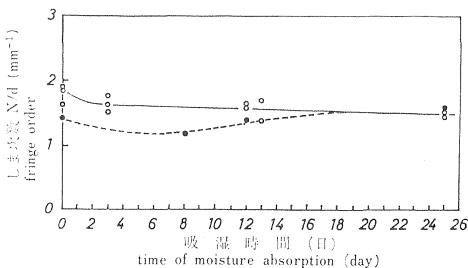


Fig. 34 木地付着塗膜 (○) および単離吸湿塗膜 (●) の吸湿時間としま次数 (アミノアルキド樹脂塗膜, 板目試験体)

Fringe order in coated (○) and separated (●) paint film (amino alkyd resin paint film, tangential specimen).

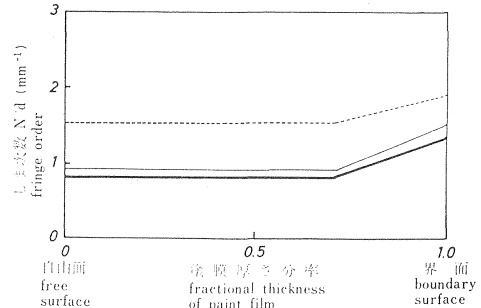


Fig. 35 アミノアルキド樹脂塗膜の厚さ方向のしま次数分布 (板目試験体)

Fringe order distribution in thickness direction of amino alkyd resin paint film (tangential specimen).

-----: 0日目 on 0 day.
—: 25日目 on 25 days.
—: 76日目 on 76 days.

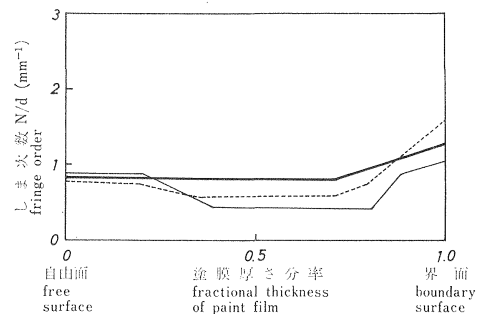


Fig. 36 アミノアルキド樹脂塗膜の76日目の単離としま次数分布 (板目試験体)

Fringe order distribution in amino alkyd resin paint film separated on 76 days (tangential specimen).

-----: 76日目で単離した塗膜 separated on 76 days.
—: 単離吸湿塗膜 initially separated.
—: 木地付着塗膜 on wood.

には、エネルギー弾性的内部応力と安定な分子配向との中間的な緩和時間をもつ内部応力がかなり存在していることを意味し、つぎに述べるように、この塗膜が硬化に長時間を要することが原因と考えられる。

樹脂の硬化過程に関する内部応力の式は、金丸²⁰⁾、則元³⁸⁾らによって提案されているが、内部応力の発生はモデル的につぎのように考えられる。すなわち、いま硬化過程にある塗膜内で溶剤の揮散、分子の縮合反応などにより微細な空隙が生じようとし、このひずみに対応した内部応力が発生すると、この応力の緩和時間はその時における弾性率と粘性率によって決定される。ある時間での硬化応力は、このようにして発生した応力のうち、この時間までに緩和しなかった応力の総和であり、微細な空隙の発生率は硬化の進行とともに減少するため、硬化応力の発生の経過は飽和曲線型を示す。このように硬化のおそい塗膜ほど緩和時間の分布が広がるため、硬化後の木地付着塗膜、単離塗膜ともに応力の緩和平衡に達するまでの時間がながくなると考えられる。

V 膨潤応力と木地の表面構造¹⁵⁾¹⁶⁾

塗装材が吸湿および乾燥するさい、広葉樹材では木地表面の道管および放射組織、また針葉樹材では早材部と晩材部が塗膜の内部応力に与える影響を検討する。

湿度変化をともなう塗装材の耐候性試験において、塗膜割れが組織構造と密接な関係にあることが知られている¹⁰⁾²²⁾。その原因が組織構造に関係して生じる塗膜の内部応力にあることは、木材の表面割れが組織構造に関係する²¹⁾⁵²⁾ことから容易に理解される。しかしながら、組織構造と塗膜の内部応力の関係を直接に研究した例は全くない。

1. 実験法

道管付近の内部応力を検討するために、既述(Ⅲの1)のクリの無処理および目止め処理試験体を供試した。Fig. 17の主応力線図は、吸湿および乾燥を通じて同じタイプを示した。放射組織についての検討は、既述(Ⅲの1)のとらふ模様を呈するミズナラの木口試験体を、また早材部と晩材部についての検討は、カラマツのまさ目面塗布の木口試験体を供試して行った。塗料はいずれもエポキシ樹脂 100 部に対しポリサルファイド 67 部を加えたもので、硬化条件は 105°C、48 時間である。吸湿および乾燥実験は試験体を、(Ⅰ)シリカゲル乾燥状態から(Ⅱ)塩化ナトリウム飽和水溶液による 20°C、75% RH を経て(Ⅲ)飽湿状態までの吸湿させる過程と、全く逆の順序(Ⅱ、Ⅰ)で乾燥する過程とよりなる。各条件下での日数はクリ試験体では 14 日間であるが、ミズナラ、カラマツ試験体では若干異なる。

内部応力の決定にあたり、塗膜は加熱硬化されているため、硬化のさいに生じた等色線は安定した状態にあって、吸湿および乾燥中に生じたしま次数はエネルギー弾性的な内部応力によるものとみなした。エポキシ樹脂の光弾性感度は、(Ⅰ)、(Ⅱ)、および(Ⅲ)の各条件下での 14 日目、それぞれ 0.0496 cm/kg、0.1217 cm/kg および 0.1670 cm/kg であり、内部応力の算出は次式によった。

$$\sigma(t) = \frac{\Delta N(t)}{\alpha(t) \cdot d} \dots \dots \dots (7)$$

ここに $\sigma(t)$ および $\alpha(t)$ はそれぞれ時間 t における応力および光弾性感度。 $\Delta N(t)$ は時間 t におけるしま次数の変化量すなわち $N(t) - N(0)$ 。 d は試験体の偏光透過方向の厚さである。なお塗膜厚さは 0.32 ~ 0.50 mm である。

2. 広葉樹材の道管

エポキシ樹脂塗装試験体が吸湿および乾燥するさい、(5)式から決定した道管断面積 S が 0.024 mm^2 , 0.082 mm^2 および 0.100 mm^2 の道管付近の塗膜のしま次数は Fig. 37, Fig. 38 および Fig. 39 のようになる。Fig. 40 は道管からはなれた晩材中央部の木部繊維上でのしま次数を示す。1つの道管について各部位のしま次数に差異がみられ、飽湿状態での等色線の様子は Photo. 2 のようになる。

内部応力の決定は、飽湿状態および最終の乾燥状態について行った。このさいのしま次数は、飽湿状態における 1-i と 1-o の部位については最大値、2 と 3 の部位については最小値、最終の乾燥状態における 1-i と 1-o の部位については最小値、2 と 3 の部位については最大値を用いた。

飽湿状態での応力をみると、1-i と 1-o の部位の応力と S の関係は Fig. 41 のようになる。前年度晩材部に隣接する道管の 1-i の部位が早材部にあるとき、引張応力は S とともに増加し、晩材部にあるときは S による変化がほとんどない。これらの道管の 1-o の部位では、 S が 0.04 mm^2 より小さい範囲で引張応力となり、これより大きい範囲で圧縮応力となって S とともに増加する。

前年度晩材部に隣接しない道管の 1-i の部位および 1-o の部位ではそれぞれ引張応力および圧縮応力となるが、 S の増大でこれらの応力は増加する傾向がある。

これらの応力に関連する試験体が吸湿するさいの木地表面の膨潤について、つぎのように考えられる。すなわち、いま前年度晩材部に隣接する道管と、前年度早材部にあつて晩材部に隣接しない道管にはさまれた木地表面について考えると、この部分の半径方向の膨潤は2つの道管内こうに充てんされた塗料によってある程度抑制される。この道管が木部繊維を抑制する効果は、 S とともに大きくなると考えられる。

Fig. 37 断面積 $0.024 \text{ (mm}^2\text{)}$ の道管付近における塗膜のしま次数変化(無処理クリ木口試験体)

Change in fringe order in paint film on the vessel of $S=0.024 \text{ mm}^2$ (non-treated Kuri radial specimen).

—○—: 部位 1-i, at position 1-i.
 ---○---: 部位 1-o, at position 1-o.

—●—: 部位 2, at position 2.

---●---: 部位 3, at position 3.

I: シリカゲル乾燥状態, dry condition.

II: 20°C , 75% RH, air dry (75% RH) condition.

III: 飽湿状態, wet condition.

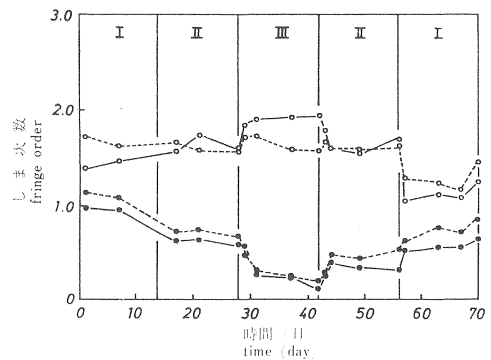
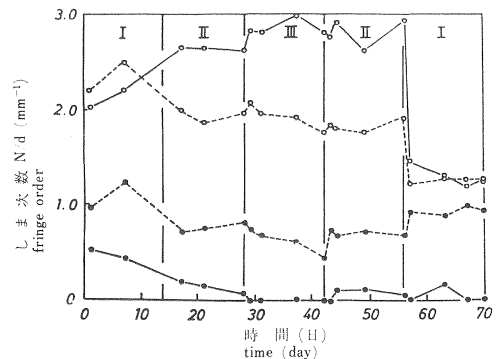


Fig. 38 断面積 $0.082 \text{ (mm}^2\text{)}$ の道管付近における塗膜のしま次数変化(無処理クリ木口試験体)

Change in fringe order in paint film on the vessel of $S=0.082 \text{ mm}^2$ (non-treated Kuri radial specimen).

しま次数測定部位と湿度条件は Fig. 37 と同じ

Symbols are explained in Fig. 37.



前年度晩材部は、隣接する道管との接点で道管を圧縮しながら前年度早材部の方向へ膨潤するが、この道管の 1-i の部位が早材部にある場合、 S が小さい道管では晩材部が道管内こうの方へも膨潤するため、1-i の部位の木部繊維が引張られて引張応力が発生する。 S が大きいとき、1-i の部位は晩材部の前年度早材部の方向への膨潤によって引っ張られて引張応力が発生する。1-i の部位が晩材部にあるときは、晩材部の潤膨によって引張応力が発生する。このため、前年度早材部の道管の 1-o の部位には圧縮応力が発生する。

前年度晩材部に隣接する道管の 1-o の部位と、同一年輪内の晩材部に隣接しない道管の 1-i の部位については、両道管の S が小さいとき早材部の木部繊維は道管内こうに向って膨潤するためわずかな引張

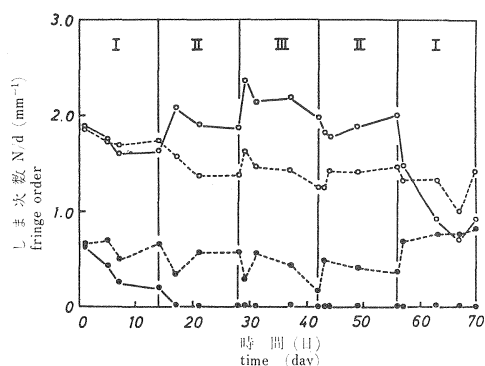


Fig. 39 断面積 0.100 (mm²) の道管付近における塗膜のしま次数変化(無処理クリ木口試験体)

Change in fringe order in paint film on the vessel of $S=0.100$ (mm²) (non-treated Kuri radial specimen).

しま次数測定部位と湿度条件は Fig. 37 と同じ
Symbols are explained in Fig. 37.

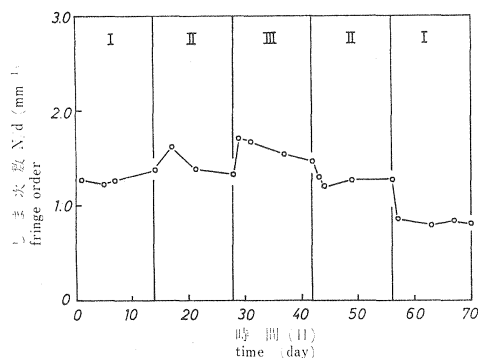


Fig. 40 道管から離れた晩材中央部の木部繊維上の塗膜のしま次数変化(無処理クリ木口試験体)

Change in fringe order in paint film on wood fibers at the middle part of the late wood (non-treated Kuri radial specimen).

湿度条件は Fig. 37 と同じ

Moisture conditions are explained in Fig. 37.

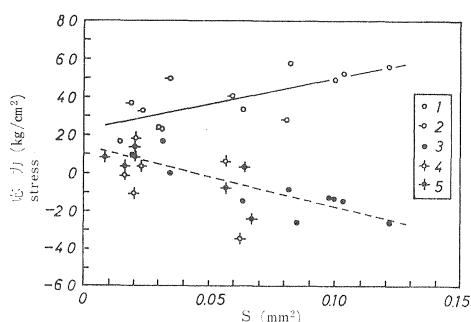


Fig. 41 飽湿状態における 1-i と 1-o の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 1-i or 1-o and cross-sectional area S of vessel under wet condition (non-treated Kuri radial specimen).

- 1 : 前年度晩材部に隣接する道管の 1-i の部位 (早材部)
- 2 : 同道管の 1-i の部位 (晩材部)
- 3 : 同道管の 1-o の部位
- 4 : 前年度晩材部に隣接しない道管の 1-i の部位
- 5 : 同道管の 1-o の部位
- , ---- : 前年度晩材部に隣接する道管のそれぞれ 1-i と 1-o の部位

- 1 : at position 1-i (early wood), the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
- 2 : at position 1-i (late wood), the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
- 3 : at position 1-o, the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.
- 4 : at position 1-i, the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.
- 5 : at position 1-o, the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.
- , ---- : at position 1-i and 1-o of the vessel adjacent to the late wood of the preceding year, respectively.

応力、 S が大きいとき膨潤が抑制されて圧縮応力となると考えられる。

2 の部位の応力を Fig. 42 に示す。2 の部位には圧縮応力が発生し、 S が小さくなるほど増加する。この原因は、道管に隣接する木部繊維の膨潤と、これにともなう道管内こうの変形によると考えられる。すなわち、木部繊維の膨潤によって道管内こうは圧縮力を受けるが、 S の小さい道管では膨潤を抑制する効果が小さいため、2 の部分はより大きな圧縮力を受けると考えられる。

3 の部位の応力を Fig. 43 に示す。圧縮応力は S が小さいほど大きい。これは、木部繊維の膨潤によって道管が圧縮されるため、3 の部位に圧縮応力が発生し、 S が小さい道管ほど木部繊維の膨潤を抑制する効果が小さく、道管内壁の変形が大きくなったものと思われる。

最終の乾燥状態での応力をみると、1-i と 1-o の部位の応力は Fig. 44 に示すようになる。図からわかるように、前年度晩材部に隣接する道管および隣接しない道管の 1-i と 1-o の部位の圧縮応力は S とともに増加する。前年度晩材部に隣接する道管の 1-i の部位が早材部の場合、1-i の部位の木部繊維自身が収縮するうえに、飽湿状態で晩材部の膨潤によって与えられた引張ひずみが回復するため、収縮が大きくなり圧縮応力が発生すると考えられる。1-i の部位が晩材部にあるときは、飽湿状態での晩材部の膨潤が抑制されたため収縮が大きく、圧縮応力が発生する。前年度晩材部に隣接しない道管の 1-i と 1-o の部位についても、飽湿状態での膨潤が抑制されたため収縮が大きく、圧縮応力が発生すると考えられる。

2 の部位の応力は Fig. 45 に示すように、圧縮応力は S とともに増加する。これは、飽湿状態での木地表面の膨潤が抑制されたため、2 の部位も圧縮応力となるが、 S の小さい道管ほど木部繊維の収縮によって引張られるため圧縮応力が小さくなると考えられる。

3 の部位の応力を Fig. 46 に示す。飽湿状態での圧縮応力は最終の乾燥状態では減少し、 S の大きい範囲で引張応力となる。これは、飽湿状態で道管に隣接する木部繊維の膨潤が抑制されたため収縮が大きくなり、道管内こうに引張力を加えたことによると考えられる。

なお、道管からはなれた木部繊維上の応力はつぎのようである。晩材中央部では、飽湿状態で $35.34 \sim 62.65 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 45.69 kg/cm^2 の引張応力、最終の乾燥状態で $44.15 \sim 61.30 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 51.61 kg/cm^2 の圧縮応力、2 つの道管にはさまれた早材部の中央では、飽湿状態で 9.95 kg/cm^2 と 30.52 kg/cm^2 、平均 20.24 kg/cm^2 の引張応力、最終の乾燥状態で 44.46 kg/cm^2 と 46.03 kg/cm^2 、平均 45.25 kg/cm^2 の圧縮応力である。このように、飽湿状態での引張応力、最終の乾燥状態での圧縮応力はともに晩材部上の方が早材部上より大きい。

つぎに目止め処理道管であるが、飽湿状態についてみると、1-i と 1-o の部位の応力は Fig. 47 のようになる。無処理道管と異なりすべて引張応力となり、前年度晩材部に隣接する道管の 1-i の部位の応力は S とともに増加し、1-o の部位の応力は S とともに減少する傾向にある。目止め処理道管は無処理道管と比較して、木部繊維の膨潤を抑制する程度が小さく、木部繊維は道管内こうの方向に膨潤するため、1-i と 1-o の部位に引張応力が発生すると考えられる。Fig. 47 のように S が 0.05 mm^2 より小さい道管では、前年度晩材部に隣接する道管、および隣接しない道管の 1-i と 1-o の部位は早材部にあり、両部位の木部繊維の膨潤率が近似するため引張応力も近似している。 S が大きい範囲では、1-i の部位は道管に隣接する前年度晩材部にあり、木部繊維は道管内こうの方向へ大きく膨潤するため、引張応力が大きい。このため、1-o の部位では木部繊維の膨潤が抑制され、引張応力が小さくなったと考えられる。

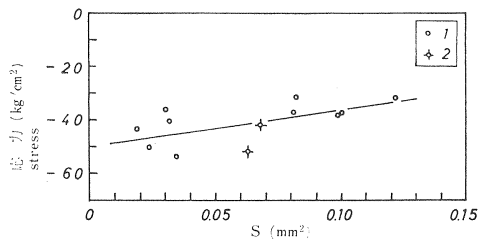


Fig. 42 飽湿状態における 2 の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 2 and cross-sectional area S of vessel under wet condition (non-treated Kuri radial specimen).

1 : 前年度晩材部に隣接する道管

2 : 前年度晩材部に隣接しない道管

1 : the vessel is adjacent to the late wood of the preceding year.

2 : the vessel is not adjacent to the late wood of the preceding year.

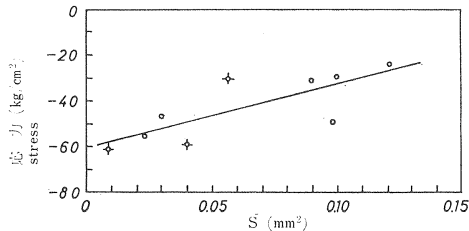


Fig. 43 飽湿状態における 3 の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 3 and cross-sectional area S of vessel under wet condition (non-treated Kuri radial specimen).

符号は Fig. 42 と同じ

Symbols are explained in Fig. 42.

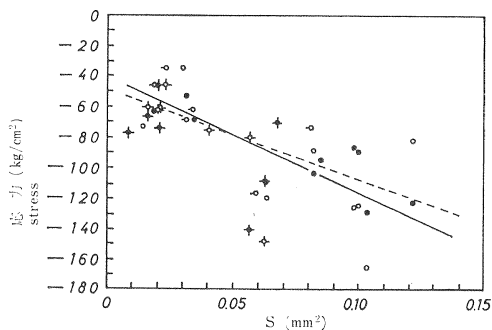


Fig. 44 乾燥状態における 1-i と 1-o の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 1-i or 1-o and cross-sectional area S of vessel under dry condition (non-treated Kuri radial specimen).

符号は Fig. 41 と同じ

Symbols are explained in Fig. 41.

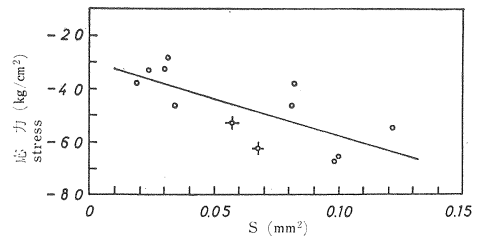


Fig. 45 乾燥状態における 2 の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 2 and cross-sectional area S of vessel under dry condition (non-treated Kuri radial specimen).

符号は Fig. 42 と同じ

Symbols are explained in Fig. 42.

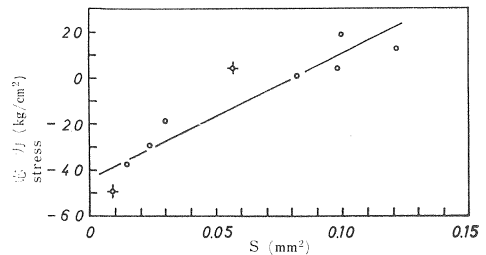


Fig. 46 乾燥状態における 3 の部位の応力と道管断面積 S (無処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 3 and cross-sectional area S of vessel under dry condition (non-treated Kuri radial specimen).

符号は Fig. 42 と同じ

Symbols are explained in Fig. 42.

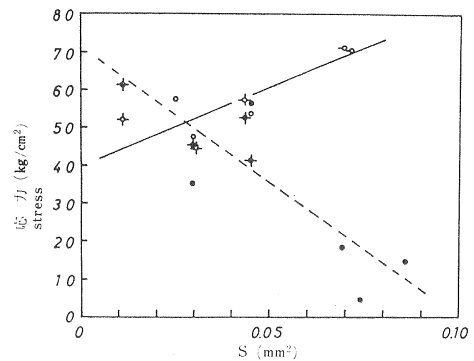


Fig. 47 飽湿状態における 1-i と 1-o の部位の応力と道管断面積 S (目止め処理クリ木口試験体)

Relation between stress at position 1-i or 1-o and cross-sectional area S of vessel under wet condition (Kuri radial specimen treated with wood filler).

符号は Fig. 41 と同じ

Symbols are explained in Fig. 41.

— : 1-i の部位, at position 1-i.

----- : 1-o の部位, at position 1-o.

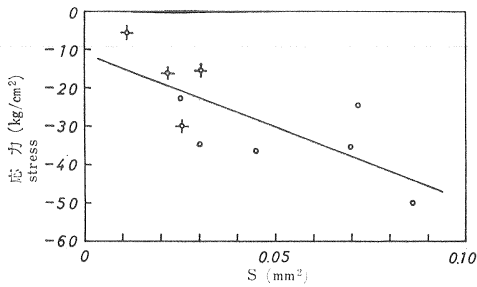


Fig. 48 飽湿状態における 2 の部位の応力と道管断面積 S (目止め処理クリ木口試験体)
Relation between stress at position 2 and cross-sectional area S of vessel under wet condition (Kuri radial specimen treated with wood filler).

符号は Fig. 42 と同じ
Symbols are explained in Fig. 42.

Fig. 48 に 2 の部位の応力を示す。図からわかるように、圧縮応力は S が大きいほど大きい。木部繊維の道管内こうへの膨潤によって、2 の部位に圧縮応力が発生するが、 S が大きい道管ほど木部繊維の膨潤で圧縮されやすいために圧縮応力が大きいと考えられる。

最終の乾燥状態では、1-i と 1-o の部位の応力は Fig. 49 のように圧縮応力となる。 S が 0.05 mm^2 より小さい道管では両部位とも早材部であり、飽湿状態での膨潤がある程度抑制されたため収縮が大きく、圧縮応力となる。 S の大きい道管の 1-i の部位（晩材部）は飽湿状態で道管内こうへ比較的自由に膨潤したため、収縮も比較的小さく圧縮応力も小さい。1-o の部位の木部繊維は飽湿状態での膨潤の抑制が大であったが、乾燥状態で 1-i の部位（晩材部）の収縮によって引張を受けるため、圧縮応力は S の小さい道管についての値と大差がなくなったと考えられる。

Fig. 50 に 2 の部位の応力を示す。飽湿状態（Fig. 48）と比較して S の小さい範囲で圧縮応力は増加し、大きい範囲で若干減少している。これは、飽湿状態で木地表面の膨潤がある程度抑制されたため、収縮が大きく 2 の部位も圧縮応力は増大するが、 S の大きな道管ほど隣接の木部繊維の収縮によって変形されやすいため、2 の部分に引張力が加わり、飽湿状態におけるよりも圧縮応力が多少減少したものと考えられる。

なお、目止め処理試験体では、道管からはなれた晩材中央部における応力は $13.98 \sim 35.78 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 24.01 kg/cm^2 の引張応力、最終の乾燥状態では $34.89 \sim 47.56 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 39.90 kg/cm^2 の圧縮応

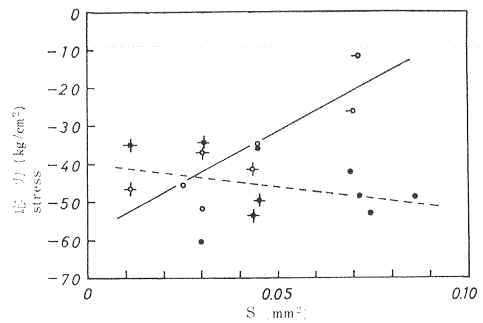


Fig. 49 乾燥状態における 1-i と 1-o の部位の応力と道管断面積 S (目止め処理クリ木口試験体)
Relation between stress at position 1-i or 1-o and cross-sectional area S of vessel under dry condition (Kuri radial specimen treated with wood filler).

符号は Fig. 41 と同じ
Symbols are explained in Fig. 41.

— : 1-i の部位, at position 1-i.
- - - : 1-o の部位, at position 1-o.

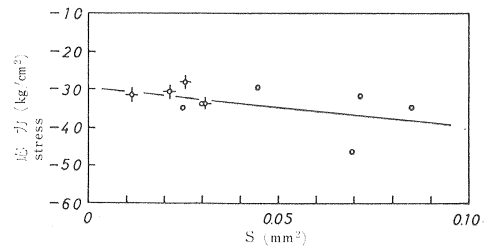


Fig. 50 乾燥状態における 2 の部位の応力と道管断面積 S (目止め処理クリ木口試験体)
Relation between stress at position 2 and cross-sectional area S of vessel under dry condition (Kuri radial specimen treated with wood filler).

符号は Fig. 42 と同じ
Symbols are explained in Fig. 42.

力となり、無処理試験体の場合と比較して、飽湿状態での引張応力、最終乾燥状態での圧縮応力ともに小さい。これは、目止め処理によって細胞内こうに塗料が浸透しないため細胞が変形を受けやすく、塗膜による拘束下での巨視的な膨潤、収縮量を減少させることによると考えられる。

3. 広葉樹材の放射組織

ミズナラ木口試験体についての測定結果は、測定値の変動が大きく、放射組織上の応力と木部繊維上のそれとの差異が明らかでなかった。しかしこの原因はミズナラの年輪構造の影響を考えることによって解明できた。すなわち、放射組織上の内部応力は、その放射組織の断面が木地表面の年輪構造のどの部分で現われているかによって著しく異なる。Fig. 51 に木地表面上で放射組織が早材部に位置する場合と晩材部に位置する場合の塗膜の内部応力、および早材部、晩材部の木部繊維上の内部応力についての 1 例を示す。図から明らかなように、飽湿状態では、晩材部の放射組織上に引張応力が、早材部の放射組織上に圧縮応力が発生し、最終の乾燥状態ではともに圧縮応力となり、その値は晩材部の放射組織上の方が早材部の放射組織上より小さい。この現象について、つぎのように考えられる。吸湿過程において、晩材部の放射組織は晩材部の木部繊維の大きな膨潤によって、本来の膨潤以上に引張されたと考えられ、早材部の放射組織は、早材部の木部繊維の膨潤が晩材部のそれによって抑制されるため、早材部と晩材部の木部繊維の膨潤の影響を受けて収縮が大きくなったと考えられる。最終の乾燥状態では、吸湿過程での木地表面の

膨潤が塗膜によって抑制されるため、すべての部分で圧縮応力が発生する。晩材部の放射組織は、晩材部の木部繊維の収縮が大きいため、本来の収縮より大きく縮小したと考えられ、早材部の放射組織は、吸湿過程で圧縮されたためかなり大きく収縮するところであるが、早材部の収縮によって抑制されるため、早材部の放射組織の収縮も抑制を受けていると考えられる。

4. 針葉樹材の早材部と晩材部

木材の早材部と晩材部での比重は著しく異なり、例えば針葉樹では晩材の比重は早材の比重の 1.7~3.4とされている。そのため早材部と晩材部での膨潤および収縮率の差は当然大きく、例えばカラマツ材の半径方向の収縮率についての晩材部と早材部の比は 2.3 である²⁸⁾。したがって塗装材が吸湿あるいは乾燥する場合には、早材部上と晩材部上の塗膜の内部応力は異なることが予想され³²⁾、また事実、晩材部上の塗膜に破損が生じやすく、これが塗膜の内部応力によることは確かであろう¹⁰⁾。しかしながらこれに関する塗膜の内部応力が実際に測定された例はない。本研究において、早材部と晩材部の差異が内部応力に与える影

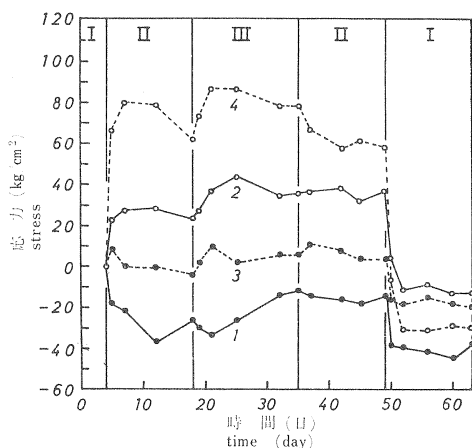


Fig. 51 放射組織上および早材部上と晩材部上の塗膜の内部応力 (目止め処理ミズナラ木口試験体)

Internal stress in paint film on ray, early wood and late wood (Mizunara radial specimen treated with wood filler).

1 : 早材部の放射組織上

2 : 晩材部の放射組織上

3 : 早材部の木部繊維上

4 : 晩材部の木部繊維上

I, II, III : Fig. 37 と同じ

1 : on ray in early wood.

2 : on ray in late wood.

3 : on early wood.

4 : on late wood.

I, II, III : explained in Fig. 37.

響は塗膜の硬化過程で発生した内部応力の分布、吸湿にともなって発生する道管付近および放射組織上の内部応力について検討されてきた。

Photo. 3 は、カラマツ木口試験体におけるエポキシ樹脂塗膜の等色線を示す。しま次数の測定はそれぞれ明確な早材部および晩材部の上で行った。塗膜での主応力の方向の詳細は明らかではないが、測定箇所においては σ_1 は塗膜の界面に対して $0 \sim 10$ 度の範囲で傾いているため、近似的に $\sigma_1 = \sigma_x$ と考えた。結果は Fig. 52 に示すとおりであり、ミズナラ材についての結果 (Fig. 51) と類似する。図から明らかなように、飽湿状態では晩材部上で約 200 kg/cm^2 の引張応力が発生し、これは一般の木材塗装用塗膜の応力—ひずみ曲線についての既往の結果³¹⁾³³⁾から推察すると、破壊をもたらす危険のある大きさである。これに対し早材部では、晩材部の膨潤で圧縮を受けるため圧縮応力となる。最終の乾燥状態の晩材部では、吸湿過程の膨潤が塗膜で抑制されたため収縮が大きく、かなり大きい圧縮応力となる。早材部では、収縮が晩材部のそれに抑制されるため、圧縮応力は晩材部上より小さくなったと考えられる。

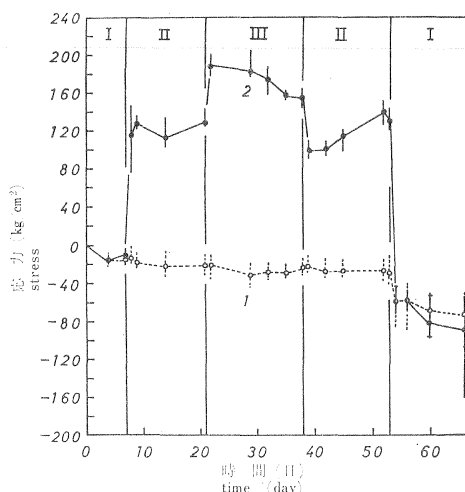


Fig. 52 早材部 (1) と晩材部 (2) における塗膜の内部応力 (無処理カラマツ木口試験体)

Internal stress in paint film on early wood (1) and late wood (2) (non-treated Karamatsu radial specimen).

I, II, III : Fig. 37 と同じ
explained in Fig. 37.

VI 内部応力の発生機構

II から V にかけて検討してきた結果から、塗膜の硬化応力と膨潤応力およびこれらの応力に対する木地の表面構造の影響について考察し、内部応力の特異な発生機構の解明を試みる。

まず II では硬化応力を塗膜の側から検討を加えたが、塗膜厚さと溶剤量の 2 因子は、塗膜厚さが大きいほど溶剤の揮散が困難になることから密接な関連をもつ。すなわち、II の 2 では、木地としたエポキシ樹脂板の応力を測定することによって、硬化過程の界面における応力は塗膜厚さが大きいほど小さくなることが判明した。

また溶剤の木材への浸透は木材の膨潤および収縮をもたらす、木材の膨潤および収縮異方性と関連して当然塗膜の内部応力に影響を与える。実験結果によれば、II の 2 でのヒノキの木口試験体および板目試験体では、試験体作製のための切断の時期が早いために起こる溶剤の揮散による木材の収縮の影響はみられたが、塗膜厚さが $0.1 \sim 0.66 \text{ mm}$ の場合、揮散の完了が 60 日間ではなされたかどうかは明らかではなかった。また、II の 4 で述べたように、塗布後 280～290 日での木材半径方向の内部応力は、ニトロセルロースラッカー塗膜では圧縮応力が測定され、またより溶剤率の高いアミノアルキド樹脂塗膜では同時期に半径方向に引張応力が測定されたが、約 1 年後では圧縮応力になっていた。以上のことから、溶剤による木材の膨潤および収縮が塗膜の硬化応力に与える影響について、つぎの結論をえた。すなわち、溶剤による

木材の膨潤は短時間に起こり、その時点では塗膜構成分子のマクロブラウン運動もなお盛んであるため、内部応力への影響は無視できる。重要なことは、木材が膨潤している期間に塗膜の硬化がゴム状領域からガラス状領域に進んでいるかどうかであり、ガラス状領域に進んでいれば木材の収縮にともなって引張応力が減少するかあるいは圧縮応力が発生する。ニトロセルロースラッカー塗膜およびアミノアルキド樹脂塗膜の場合がこれに該当する。アミノアルキド樹脂塗料は元来硬化のおそい塗料とされているが、溶剂量が多いことによって木材の収縮の方がさらにおそくなるものと考えられる。これらと同様の現象は、Ⅲの 4 で述べた早材部と晩材部の差異のみられた硬化応力の発生にも認められる。

塗装材が吸湿する場合の塗膜の膨潤応力について考える。Ⅳに述べた単離塗膜と木地付着塗膜のしま次数を比較する方法によって、塗装材が吸湿する場合のニトロセルロースラッカー塗膜と不飽和ポリエステル樹脂塗膜のエネルギー弾性的応力を求めたが、アミノアルキド樹脂塗膜ではこれを求めることが困難であった。その原因は、アミノアルキド樹脂塗膜を木地から単離したのちの内部応力の遅延回復が大きいことにあった。このように本実験では塗膜の外部条件に対する応答の速さが問題となった。えられた結果に基づく考察では、一般に塗装木材が吸湿する場合、木材の膨潤ひずみに対する塗膜の応答の速さおよび硬化応力の水による緩和の速さは、塗料本来の物性のほかに 2 次的な条件に基づく硬化速度と密接な関係があるように思えた。すなわち、ニトロセルロースラッカー塗膜のように硬化が速く、その後も安定した状態にある塗膜は、木材の膨潤ひずみおよび水に対する応答が速く、また新たな条件に対して速やかに安定した状態を示すが、硬化に長時間を要するアミノアルキド樹脂塗膜の場合はこれと全く対照的である。この理由として、木材の膨潤ひずみおよび水に対する塗膜の応答は、クリープおよび応力緩和の現象と考えられ、硬化に長時間を要した塗膜ほど遅延時間および緩和時間の分布が大きくなるためであると考えた。

木地の組織構造上の不均一性に由来する塗膜の内部応力について考察すると、本研究では組織構造の 1) 形態的、2) 浸透性および 3) 膨潤、収縮能における不均一が内部応力に影響する因子としてあげられる。これらの因子は相合に関連するが、1) の典型的な例は塗布面に開口した道管である。塗膜の硬化過程で道管付近に発生する応力集中の 1 例は、Ⅲの 1 の Fig. 17 であり、測定に選んだ 3 部位のしま次数と道管断面積との間に直線性があることが明らかになった。この直線関係はⅤの 2 で述べた膨潤応力についてもみられた。よりミクロな例として、木地表面で切断された木部繊維細胞および仮道管細胞も内部応力に影響すると考えられるが、測定が困難である。浸透性の不均一はⅢの 3 で述べたウラジログシンの板目面の放射組織およびⅢの 4 のカラマツとスギのまさ目面の早材部と晩材部においてみられたとおりで、とくに塗膜の応力分布への影響が著しい。また膨潤、収縮能における不均一についてはⅤの 3 のミズナラおよびⅤの 4 のカラマツのまさ目面の早材部と晩材部に顕著な例がみられた。晩材部の膨潤が大きいので、早材部は晩材部の膨潤応力に対する緩衝材に似た作用を示すが、この早材部と晩材部の力学的な関係は道管付近(Ⅴの 2) およびまさ目面の放射組織上(Ⅴの 3) の塗膜の内部応力にまで不均一さを付加するような影響をおよぼす。

ところでこのような組織構造上の不均一性を解消する目的で従来より目止め処理が行われ、本研究においてもこの処理が、カラマツとスギの木口試験体における早材部と晩材部の硬化応力、クリ木口試験体では、道管付近の木部繊維上の部位(Fig. 17 の 1-i と 1-o の部位)における硬化応力と飽湿状態からの乾燥で発生する圧縮応力、晩材中央部における飽湿状態での引張応力、乾燥状態での圧縮応力を低くする効果があることが明らかとなった。

Ⅶ ま と め

塗装木材における塗膜の内部応力の研究は、塗膜の損傷発生の防止および耐久性の向上などの意味から重要である。本研究でえられた結果の概要はつぎのとおりである。

溶剤が揮散して硬化する溶剤タイプの塗料では、塗膜の表面付近から硬化が進み塗膜の内部の硬化がおくれる。したがって、厚い塗膜ほど硬化が困難になり、内部応力の発生がおくれることになる。厚さが一定であれば、硬化後の応力は溶剤量の多いものほど大である。塗料はその種類によって硬化のしくみが異なり、これが内部応力に影響を与えるが、とくに塗料が溶剤を含み木地に木材が使用される場合では、溶剤による木材の膨潤および収縮が量的にも内部応力に大きな影響を与える。

木材の木口面からみた硬化応力は道管付近で不均一となり、応力は道管断面積と直線関係にある。道管断面積の影響は、目止め処理道管よりも無処理道管の場合の方が大きい。溶剤を含む塗料の場合、広放射組織上の塗膜の硬化応力は、塗布面（まさ目面、板目面）および応力の方向によって付近の木部繊維上の応力との差異が生じることがある。木材の半径方向では、早材部上の塗膜の硬化応力は晩材部上のそれより大きく、目止め処理によりこれらの応力は小さくなる傾向がある。

塗装材が吸湿する場合の塗膜に発生するエネルギー弾性的応力について検討した。ニトロセルロースラッカー塗膜と不飽和ポリエステル樹脂塗膜ではエネルギー弾性的応力が無視できる程度に小さいのに対して、アミノアルキド樹脂塗膜ではこれがかなり大きい。このことはアミノアルキド樹脂塗膜の硬化に長時間を要することにより、応力の緩和時間の分布幅が大になることと関係があると考えられる。

塗装材が乾湿くり返しを受けるとき、飽湿状態および乾燥状態での道管付近の塗膜には木材の半径方向に引張応力あるいは圧縮応力が発生し、その大きさは道管断面積と直線関係にある。この現象は、木地表面での早材部と晩材部の木部繊維の膨潤・収縮挙動と、これに対する塗料で充てんされた道管または目止め処理された道管の変形挙動とから説明される。

まさ目面での広放射組織上の塗膜の木材半径方向の内部応力は、放射組織が晩材部にあるときは晩材部木部繊維の膨潤・収縮の影響を、早材部にあるときは晩材部と早材部の木部繊維の膨潤・収縮の影響を受ける。

針葉樹材のまさ目面上の木材半径方向における塗膜の内部応力は、早材部上と晩材部上で著しく異なる。すなわち、飽湿状態では早材部上に圧縮応力が発生し、晩材部上には大きな引張応力が発生する。

つぎに、えられた結果から今後の研究および実用上の興味ある問題点について述べる。1) 溶剤揮散タイプの塗膜では、塗膜厚さが大きいほど硬化がおそくなり、そのため内部応力の発生もおそく値は小さい。したがって硬化過程において塗膜厚さと内部応力の関係を検討する場合は、異なった硬化状態における内部応力を比較することになる。2) 常温では、塗膜あるいは木材からの溶剤の揮散にはかなりの時間を必要とするため、内部応力の観測には長時間を費さねばならない。3) 塗膜がゴム状領域にあるときに発生した内部応力は、ガラス状領域に達するときに凍結し緩和には極端に長い時間を要するが、ガラス状領域において発生する応力（主としてエネルギー弾性的応力）と比較して値は小さい。したがって内部応力を小さくし塗膜の付着耐久性の向上をはかるにはエネルギー弾性的応力を小さくすればよい。溶剤を含む塗料では木地は浸透した溶剤で膨潤し、その後収縮する。膨潤は短時間で起こり、収縮は徐々に進むため、木地が膨潤状態にあるときに塗膜の硬化はある程度進行する。以上の理由から塗膜のエネルギー弾性

的応力を小さくするためには、塗膜がゴム状領域からガラス状領域へ転移する時期に木材の収縮が始まり、ガラス状領域での硬化が完了する時期に木材の収縮が終るような溶剤の量あるいは混合比を塗装の作業性および塗料のポットライフなどの関連において検討することが望まれる。4) 硬化の速さによって硬化後の塗膜の粘弾性的な物性が異なると考えられる。すなわち、ゆるやかに硬化した塗膜は外的条件の変化に対する応答がゆるやかであり、このことは塗膜の耐久性と密接な関係にあることが推測される。5) 目止め処理によって硬化応力が軽減する研究例はあるが²⁷⁾⁵⁴⁾、本研究でも硬化応力および膨潤応力が低下する結果がみられた。しかし、内部応力の低下は塗膜の木材への付着力の減少に基づく場合もあると考えられるため、目止め剤自体のより綿密な研究が必要である。6) 一般に塗膜の内部応力は引張応力であると受けとられているが、木材塗装においては、木材からの溶剤の揮散あるいは水分の乾燥による木材の収縮があるため、塗膜に圧縮応力が発生することがある。とくに自然条件におけるように乾湿サイクルがくり返される場合では、水分非定常状態下での木材の異常収縮が累積され、乾燥状態での塗膜の圧縮応力は塗膜の破損あるいははく離をもたらし程度の大きさになることが予想される。したがって塗膜の圧縮に対する物性の研究も必要である。

文 献

- 1) BIKERMAN, J. J.: The Science of Adhesive Joints, 107~108, Academic Press (1961)
- 2) ボユッキー：接着と自着, P. 155, 高分子刊行会, (1967)
- 3) CHISTIAKOV, A. M., L. A. SUKHAREVA, L. M. KOVALICHNIK and M. R. KISILEV: Plast Massy No. 1, 57~59, (1964)
- 4) CHERVINSKY, V. A.: Derevoobratyvjushchaja Promyshchlenosti, No. 7, 11~12, (1970)
- 5) DANNENBERG, H.: SPE Journal, 21, 669~675, (1965)
- 6) 福山萬治郎：京府大学報・農, 18, 78~87, (1966)
- 7) ————・佐道 健：京府大学報・農, 18, 88~91, (1966)
- 8) ————・浦上弘幸：京府大学報・農, 19, 65~75, (1967)
- 9) ————：京府大学報・農, 22, 52~62, (1970)
- 10) HASLAM, J. H. and S. WERTHAN: Ind. Eng. Chem. 23, 226~233, (1931)
- 11) IMAMURA, H.: 木材誌, 16, 168~172, (1970)
- 12) 今村浩人：第 20 回日本木材学会大会要旨, P. 50, (1970)
- 13) IMAMURA, H.: 木材誌, 19, 89~93, (1973)
- 14) ————：木材誌, 19, 393~398, (1973)
- 15) ————：木材誌, 22, 325~330, (1976)
- 16) ————：木材誌, 22, 331~336, (1976)
- 17) 今村浩人：木材工業, 31, 289~293, (1976)
- 18) 井上幸彦・小島陽之助：工化誌, 61, 1108~1111, (1958)
- 19) ————：塗料及び高分子, P. 257, 誠文堂新光社, (1963)
- 20) 金丸 競：高分子, 17, 838~848, (1968)
- 21) 金田 弘・満久崇磨：木材誌, 19, 157~164, (1973)
- 22) 川村二郎：第 21 回日本木材学大会要旨, P. 83, (1971)
- 23) ————：カラマツ材の利用技術の開発に関する研究, P. 147~148, 林業試験場木材部資料 49-2. (1975)
- 24) 貴島恒夫・林 昭三：木材誌, 6, 205~210, (1960)

(*castanea crenata* SIEB. et ZUCC.) of radial specimen. The paint was Epoxy resin without solvent. Fig. 17 illustrates a typical example of the fringe order, the principal stress lines and the positions for the measurement of the stress in the paint film near the vessel. The fringe order at each position had a linear relationship with cross-sectional area (S) of the vessel (Figs. 19~21). The linear relationships were also found at the positions 1-i, 1-o and 2 of the vessels treated with wood filler. These phenomena were explained in relation to the shrinking force of the paint film and the slight deformation of the vessel.

The fringe order in the paint film (Epoxy resin with solvent) on the early wood was higher than on the late wood of radial specimen of Karamatsu (*Larix leptolepis* GORD.) and Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) (Fig. 25). This was explained by the effect of the solvent which was mentioned before. In this case, the swelling and the shrinkage of the early wood was smaller than those of the late wood.

When painted wood absorbs moisture, the curing stress tends to relax, while the swelling of the wood induces the tensile stress in the paint film. In order to obtain the stress capable of instant recovery in the paint film of the moistened specimen, the fringe order in the paint film on the wood was compared with the one in the paint film separated before sorption. This method was founded on the following hypothesis: In the equilibrium state of the higher moisture condition, the fringe order in the paint film separated before sorption is based mainly upon the stress which needs an extremely long time to relax, while the fringe order in the paint film on the wood is based mainly upon this stress and the one capable of instant recovery. This method was suitable to the nitrocellulose lacquer film (Figs. 27 and 28) and the unsaturated polyester resin paint film (Figs. 29 and 30). However, the fringe order in the amino alkyd resin paint film continued changing for a long period, probably because of the widely ranged relaxation time.

The swelling stress in the paint film near the vessel was measured. Radial specimen of Kuri coated with Epoxy resin without solvent were conditioned under dry condition (silica gel), 75%RH, wet condition (saturated water), 75%RH and dry condition (silica gel) in succession for 14 days in each condition at 20°C. The stresses at the positions mentioned before (Fig. 17) were measured under the wet condition and the final dry condition. The linear relationships were also found between the stress at these positions and the cross-sectional area (S) of the vessels (Figs. 41~50). The phenomena were explained in the difference of the swelling or the shrinkage ability between the early wood and the late wood which were in a clamped state of their swelling or shrinkage caused by paint-filled vessels connected with the paint film. The restriction on the swelling or the shrinkage of the wood fibers by the vessel was supposed to become larger with S of non-treated vessel, but smaller with S of the vessel treated with wood filler. In many cases, wood filler treatment contributed to the reduction of the tensile or the compressive stresses in the paint film near the vessel.

The stress in the paint film (Epoxy resin without solvent) on the ray of radial specimen of Mizunara (*Quercus crispula* BLUME.) was influenced by the swelling or the shrinkage of the early wood and the late wood (Fig. 51). The difference between the swelling or the shrinkage of the early wood and that of the late wood was observed in the stress in the paint film of radial specimen of Karamatsu (Fig. 52). The swelling of the late wood was so large that it compressed the early wood and induced the compressive stress on the early wood under the wet condition. Since the swelling of the wood surface took place under some restriction, the amount of the shrinkage became larger than that of the swelling. Therefore, if dry-wet-dry cycle goes on, the compressive stress is supposed to increase.

塗膜

木材

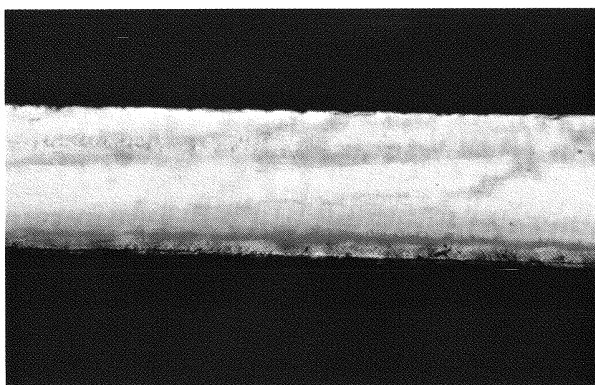


Photo 1 塗膜断面の等色線 (エポキシ樹脂塗膜, ヒノキ板目試験体)

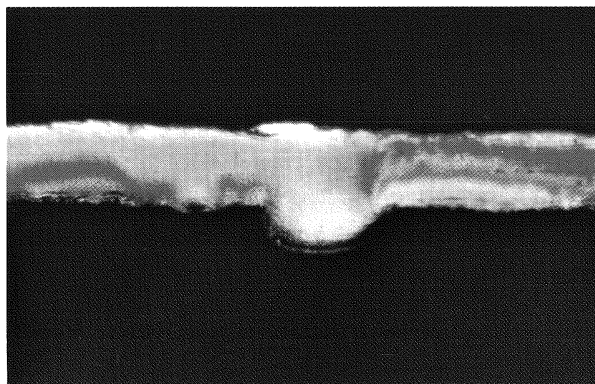
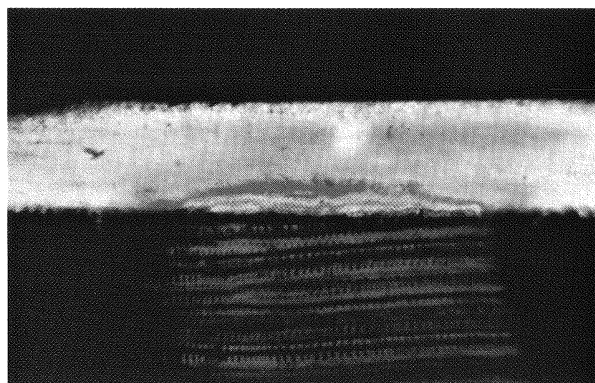


Photo 2 飽湿状態での道管付近の等色線 (無処理クリ木口試験体)



早材部 → | ← 晩材部 → | ← 早材部

Photo 3 早材部上と晩材部上の等色線 (無処理カラマツ木口試験体)