(色材, 53 [6] 353-361. 1980)

木材の材質と塗膜との関係

——素地の物性および組織構造と塗膜のかかわりあい、特に塗膜耐久性について——

川 村 二 郎*

1. 緒 言

木質材料の表面処理法としてもっとも一般に行われているのが塗装である。塗装は製品の用いられ方、塗料、塗装方法などと木材自体の性質との関連で検討される必要がある。

木材塗装のもろもろの技術の根底をなすものは、木材自身の性質、塗料の性質、ならびにこの両者間の相互作用であることは当然である。

塗装素地となる木材は、非常に複雑な構造を持つ不均一な材質、高分子的な成分に由来する界面化学的な性質、多孔性をもたらす浸透性および微量な抽出成分が塗料との間に起こす化学反応などの諸問題をかかえている。そのため、塗装工程が複雑になり、塗装がむずかしくなり、塗装効果の持続が困難になる。一方、塗装を困難にしている組織構造は、形、寸法、配列、色などによって木理、模様、肌合などを形成し、木材の美しさ、魅力を生みだしている。

木材塗装は、素地が備えている自然の美しさを塗装によって倍加させ、決して損うことがあってはならない。ここに塗装のむずかしさがある。

上記の諸問題を克服するには、第一に素地となる木材の各種性質を十分に知り、完全に使いこなすことが必要である。第二に塗装材の知識を高め、塗装技術を修得することである。

2. 木材の膨張、収縮性と塗膜の関係

木材の膨張、収縮すなわち動きは塗膜の耐久性、特に塗膜割れ、はがれ、ふくれなどに直接かつ大きく影響する。一般に塗膜と素地木材の膨張、収縮率の差にもとづく内部応力（応力差）が発生するためである。

木材の動きは熱による膨張、収縮、水分による膨潤、収縮、外力による曲げや引張り応力による変形に大別できる。

2.1 熱による膨張、収縮

木材の温度が θ_1 より θ_2 に変化したときの長さが l_1 より l_2 に変化する。

$$l_2 = l_1 [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]$$

α を線膨張係数という。同様に体積膨張は

$$v_2 = v_1 [1 + \beta(\theta_2 - \theta_1)]$$

β を体積膨張係数という。

Stamm によれば線膨張係数は、木材の繊維方向では比重と関係がなく、

$$\alpha_t = 1.7 \sim 2.5 \times 10^{-6}$$

接線方向（板目）および半径方向（まさ目）は比重と比例的な関係がある。針葉樹および軽い広葉樹では、

$$\text{接線方向}(t) \alpha_t = 45 r_0 \times 10^{-6}, \quad \text{半径方向}(r) \alpha_r = 31 r_0 \times 10^{-6}$$

重い広葉樹では、

$$\alpha_t = 32 r_0 \times 10^{-6}, \quad \alpha_r = 25 r_0 \times 10^{-6}$$

である。

一方、ポリエステル樹脂、ポリウレタン樹脂、アミノアルキド樹脂およびニトロセルロース各塗膜の $\alpha_t^{1)}$ は、 $23 \sim 34 \times 10^{-6}$ で木材の接線および半径方向のそれとほぼ等しい。それゆえ、熱による塗装材の膨張、収縮によって塗膜内に応力を発生することはほとんどない。

木材の熱による変形は水分による変形に比べるかに

昭和 55.2.5 受理

Influence of Physical and Anatomical Properties of Wood on Film Performance

Jiro KAWAMURA

* 農林水産省林業試験場

茨城県稲敷郡茎崎村松の里 1 (〒 305)

表-1 細胞壁を構成する化学成分の量的割合 (%)

	セルロース	ヘミセルロース		リグニン	樹脂	灰分
		キシラン	グルコマンナン			
針葉樹 (ソフトウッド)	40~50	6~10	5~10	27~30	2~5	0.2~0.5
広葉樹 (ハードウッド)	45~50	15~20	0~	20~25	2~	0.5

少ない。そのうえ大気の温度変化があれば一般に相対湿度もそれに伴って変化し、その結果、木材の含水率が変わり膨潤、収縮する影響のほうがはるかに大きいので、一般に塗装材の場合実用的に無視される。

2.2 水分による膨潤、収縮

木材塗装では親水性の木材素地の上に塗膜が形成されているので、塗膜の透過、透水性にもとづいて素地と塗膜の膨潤、収縮率の差に起因する内部応力が発生し、塗膜に対し悪影響を及ぼし塗膜割れや付着力低下の大きな原因となる。

2.2.1 水分による木材の膨潤、収縮機構

木材の細胞壁を構成する化学成分はセルロース、ヘミセルロース (多糖類)、リグニンである。木材を鉄筋コンクリートにみたとするとセルロースは鉄筋に、リグニンはセメントに、ヘミセルロースは鉄筋とセメントのなじみをよくする小骨的な針金にたとえることができる。

これらの化学的成分の量的割合を表-1 に示す。

セルロースは木材中に最も多量に存在し、細胞壁中で結晶と非結晶の状態をとっている。そしてマイクロフィブリルを形成している。ヘミセルロースは非晶領域のセルロース分子と並んで存在し、非結晶である。リグニンは細胞間にあって細胞と細胞を接着するとともに、その70% 以上は細胞壁中において、マイクロフィブリル間隙に沈着している。

木材中の水分には結合水 (吸着水) と自由水 (遊離水) の2種類がある。このうち膨潤、収縮を起こすのは結合水である。

前に述べた化学成分の非結晶領域の極性基、すなわち、 $-OH$ 、 $-O$ 、 $-COOH$ に極性の強い水分子が図-1 のように吸着²⁾ し、おそらく単分子の固着水層を極性的に配列しながら作り、さらにその電場により新たな水分子を次々と吸着する。初めに浸入してきた水分子は結合していない極性基に吸着し、ネットワーク構造を拡大し、相互に結合していた極性基を離すことにより新しい活性吸着点を生み、そこに水分子が更に吸着していく。

木材の初期湿潤熱の平均は水1モル当たり 5.4 kcal と測定され³⁾、水素結合の結合エネルギー 4.5~8 kcal/mol とよく値が一致していることから、結合水は水素結

図-1 水分子の吸着予想図

合によって結合していると推察されている。

水の分子が結晶領域には浸入できないことは、X線の研究により判明している。それゆえ、木材は有限膨潤でネットワーク構造が部分的に破壊されるにとどまり、水に溶解することはない。

乾燥した木材を飽和水蒸気中に放置すれば最初は水分を結合水の形で吸収していき、これ以上蒸気の間では吸収できない極限に到達する。このときの木材含水率を繊維飽和点という。繊維飽和点は樹種により異なり 25~35% である。繊維飽和点までは、水分が木材実質に吸着されるために、木材の物理的および機械的性質が水分量とともに著しく変化し、木材の膨潤、収縮の原因となる。

繊維飽和点以上の水分は細胞内腔および細胞間隙などの空隙の部分に浸入する。この水分はミセルに直接接合しておらず、ミセルのけん引力の範囲外にあるから移動および蒸発が拘束されず自由におこなえる。これを自由水という。自由水の量の変化は木材の重量を増減させるが、物理的、機械的性質、膨潤、収縮には影響をおよぼさない。

細胞壁中への結合水の吸、脱着が細胞壁の膨潤、収縮を起こし、細胞相互がかたく結合しているので木材片の外寸法変化となって現われる。これが木材の膨潤、収縮である。

2.2.2 膨潤、収縮の異方性

木材の膨潤、収縮は異方性を示す。膨潤、収縮は接線方向 (板目) が最大で、半径方向 (まさ目) がこれに次

ぎ、繊維方向が最小で、これらの比は10:5:1~0.5である。この方向による膨潤、収縮の相違は、木材の構造からくる本質的なもので温度などの環境条件によって消えるものではない。この異方程度はかなり大きい。

塗膜割れは引張りおよび収縮の応力方向に対し垂直方向に起こるのが普通である。木材上の大部分の塗膜割れの方法は、繊維方向と平行である。この原因が木材の持つ膨潤、収縮の異方性である。また、使用する木材の表面木理、すなわち、板目かまさ目かは製品のデザイン上深い意味を持つほか塗膜耐久性に大きく影響する。木材含水率の同一変化に対して、まさ目は板目の約半分の膨潤、収縮率を示すため当然まさ目上の塗膜耐久性が板目のそれよりも優っている。

図-2の中に塗膜割れにおよぼす木理の影響を示してある(図-2参照)。

2.2.3 木材比重と膨潤、収縮

木材は細胞腔や道管孔のような孔を沢山有している。これらの孔を取り去った部分を細胞壁の実質という。この比重を真比重といい、樹種によらず、現在は1.50を用いている。

木材の気乾または全乾状態の重量をその容積で割った値を気乾比重(気乾容積重)、全乾比重(全乾容積重)といい、一般に多く用いられている。

カシとキリの比重が著しく違うように、木材の比重は樹種により大きい差異がある。

木材の機械的および物理的性質は比重によって大きく

変化する。当然、木材の動きも比重によって影響を受け、容積膨潤または容積収縮の量は、比重の増加によって直線的に増大することとなる。比重と膨潤、収縮の平均的關係は、

$$\text{最大容積収縮率(\%)} = \text{繊維飽和点(\%)} \times \text{容積密度}$$

$$\text{最大容積膨潤率(\%)} = \text{繊維飽和点(\%)} \times \text{全乾比重}$$

素地の動きと塗膜耐久性の間には強い関係があり、同じ塗膜であれば素地の動きが大きいほど塗膜耐久性が劣る傾向がある。

木材比重と塗膜割れの関係を図-2⁴⁾に示す。木材比重が高くなるに従い、塗膜割れが直線的に増加している。この原因は同じ破壊伸びを有する塗膜であれば、素地の膨潤、収縮率が大きいものほど塗膜割れが多くなるのは当然である。Brown⁵⁾や鈴木⁶⁾らもこれと同じ結果を報告している。

上記は樹種の比重の違いによる塗膜耐久性に与える影響であったが、1本の木材の中にも組織構造の相違による比重の違いがある。たとえば、春材と夏材、辺材と心材などである。

年輪は春材(早材、春の環境の良いときに形成された細胞)と夏材(晩材、夏から秋に形成された細胞)によって構成され、春材細胞は形が大きくその壁が薄い。一方、夏材のそれは形が小さく壁が厚い。それゆえ、比重は春材よりも夏材のほうが高い。年輪が比較的明瞭な針葉樹の比重は、夏材では春材の1.7~3.4倍もある。したがって、木材含水率の等しい変化に対応する膨潤、収縮ポテンシャルが異なり、両材の間に内部応力が発生する。内部応力が大きいほど塗膜耐久性に悪い影響を与える。

針葉樹の塗膜耐久性は、夏材面積の占める割合が高い素地ほど低くなる傾向がある⁷⁾。これは比重と膨潤、収縮率の関係からうなずける結果である。

春、夏材の間にあるような問題がまた辺材および心材にもある。

2.2.4 木材の含有水分

木材の含水率のあらわし方は次の式による。

$$\text{含水率(\%)} = \frac{W_u - W_0}{W_0} \times 100$$

W_u はある水分を含んでいるときの重さ、 W_0 は W_u を100~105℃で乾燥し恒量に達したときの重さで全乾重量という。全乾重量は木材に含まれる水分が完全に取り去られたものではない。スプルス材の場合、単分子層の水が吸着されたときの含水率が4.8%⁷⁾であるとする報告があるが、含水率の出し方が問題である。別の報告⁸⁾では全乾常態にしても木材中の極性基と水分子の水

図-2 木材比重(r_0)と塗膜割れの関係

表-2 各使用場所における木製品の平衡含水率とその場所で使うための最適含水率

使用場所, 用途	平衡含水率 (%)	乾燥終了時含水率の目安 (%)	コンディショニング終了時含水率 (%)
アメリカ西部向け家具	6~8	5	5~6
完全冷暖房された室内家具	7~9	6	6~8
昼のみ冷暖房された室内家具	8~12	7	7~10
一般の家具	9~14	8	8~12
倉庫内の内張り板	11~15	10	8~14
雨のかからない家具, 外材料	13~17	12	9~17
電気配電盤	9~12	7	7~9
機器箱	8~12	7	7~9
航空, 自動車用木部	9~12	8	7~10
造船ギ装用とびら, わく	9~13	8	8~11
室内運動具	9~13	9	8~12
室外運動具	11~15	11	10~15

素結合が強いから、単分子層の水分（約 1%）は残っているとしている。

木が生育しているときの含水率は非常に高く 200% を超すこともしばしばある。生材の含水率は樹種、立地、季節、木材内の部分によって異なる。このような高い含水率の木材も大気中に放置しておけば次第に乾燥し、湿、湿度に応じた平衡状態に達する。逆に全乾状態の木材を大気中に放置すると、水蒸気を吸湿し上と同じように平衡になる。これは木材周囲の水蒸気圧と木材中に含まれた水に基づく水蒸気圧とが等しくなり、水の移動がなくなるためである。このような状態にある木材の含水率を平衡含水率という。平衡含水率はすべての樹種についてほぼ等しい。

木材を実際に使用する場合、周囲の湿、湿度が常に変化しているため、平衡含水率もこれに応じて変化している。わが国の室内での平衡含水率の範囲は、11~19% であり、場所、季節を通じて平均した気温、湿度を想定して標準含水率を 15% とし、ヨーロッパおよびアメリカでは 12% としている。

2.2.4.1 素地の適正含水率

塗装材の含水率をなるべく変化させないほうが当然、塗膜耐久性がよくなるが、実際の使用条件ではそれは不可能である。毎日の大気条件の変化に伴い塗装材は膨潤、収縮を繰り返して塗膜劣化の一原因となっている。

製品の塗装時含水率と使用時のそれとの差が小さいほど塗膜耐久性が良いので、もし、使用場所が定まっていたら、そこの年間平均平衡含水率が素地の適正含水率であるが、素地含水率が低いほど塗膜の仕上がりが良く、そ

表-3 木材の平衡含水率によぼす加熱処理の影響 (%)

乾燥方法	ナラ			ブナ		
	8月	9月	10月	8月	9月	10月
人工	11.01	11.77	11.22	7.83	8.51	7.97
天然	13.22	14.04	13.20	14.11	14.70	14.28

人工乾燥時の最高温度 100°C

して塗装トラブルが少ないので、標準含水率より 2~3% 低い値が一般的な塗装に適する含水率である。

各使用場所における木製品の平衡含水率とその場所で使うための最適素地含水率を表-2⁹⁾ に示す。

2.2.4.2 人工乾燥の必要性

前に述べたように生材の含水率が高いので、そのまま加工するには不相当である。それゆえ、乾燥が必ず必要である。一般に使用されている乾燥方法を大別すると天然乾燥と人工（強制）乾燥である。

天然乾燥は木材を長期間天然に放置し、含水率を下げ、「枯らし」といって膨張、収縮を少なくするために古くからおこなわれてきた。しかし、長い乾燥期間を必要とするので表面割れ、変色などが出やすく、資本の長い固定、所望の含水率が得られないなどの欠点がある。

現在は天然乾燥と天然乾燥の欠点を改善した人工乾燥の併用が最も多く使われている。人工乾燥の際の加熱処理によって木材の吸湿性が減少すると同時に膨潤、収縮率を減少させる利点を持っている。この原因は、加熱によるセルロース結晶領域量の増加、無定形親水性のヘミセルロースの著しい角質化などである。

木材の平衡含水率によぼす加熱処理の影響を表-3 に示す。

木材素地における加熱処理の効果は寸法安定性の向上に寄与する。そのため、水分による素地の動きが減少し、塗膜にかかる膨張、収縮応力が少なくなり、結果的に塗膜耐久性が向上する。

木材に寸法安定性を付与する処理方法は、加熱処理のほか、木材を構成する物質中の -OH 基を疎水性のアセチル基やブチル基で置換するエステル化、エーテル化、γ線照射および樹脂注入などがある。

2.2.4.3 木材中の水分の移動

木材中の水分がどのような方法によって移動するかは木材の乾燥および塗料中の溶剤の挙動などにとって重要な問題である。

木材中の水分の移動通路と考えられるのは細胞内腔（広葉樹材の道管）、細胞間隙（針・広葉樹ともに存在

し、特に放射組織に多い) 壁孔などで、これらの直径は道管のように数 100 μm のものから壁孔の 10~20 μm 、小さいものでは分子が1個通過できる程のフィブリル間隙まである。このように多種多様の通路が直列、または、並列に各種の組合せて複雑な毛管系を木材中で作っている。

木材中の水の状態は液状、気状、木材と結合したものがある。移動様式は濃度差にもとづく拡散、圧力差による毛管中の移動、気・液界面で蒸発、凝縮、細胞壁表面での吸脱着に分けられる。木材中の水はこれらの組合せによって移動するものと考えられている。繊維飽和点以下の水の移動は拡散による。木材中の水の拡散係数は木材比重、含水率、温度および拡散方向によって異なる。

拡散係数は木材比重が高くなるにしたがい減少する。2.2.3 で同含水率では木材の膨潤、収縮量は比重が高くなるにしたがい増大すると述べた。大気湿度は毎日変化し、それに併い平衡含水率が変わるが、木材の比重が高く水分拡散係数が小さければ、含水率や膨潤、収縮の急激な変化が少なく、塗膜耐久性に対して有利である。温度が上昇すれば分子運動が盛んになるので拡散係数が増大する。木材中へ各種処理剤を浸透させたいとき、温度を上げれば早く、良く浸透する。

拡散係数は水の拡散方向で異なり、繊維方向が最大で繊維直角方向の2~10倍である。

繊維飽和点以上の自由水の移動は圧力差による。拡散係数の大きさが上記の諸因子によって違ったと同様な傾向が自由水の移動速さにもある。

木材中の移動の速さは樹種(比重)、方向、心・辺材、春・夏材によって異なる。液体の主要通路は針葉樹では仮道管、広葉樹では道管である。移動速さは低比重>高比重、辺材>心材、春材>夏材、繊維方向>繊維直角方向となる。

針葉樹を例にとり、移動速さの差が生ずる原因を調べると通路の直径にある。仮道管の内径は10~40 μm 、絞孔の最大直径は心材で40~110 μm 、辺材で11,000 μm であり、繊維と直角方向に通るときは繊維方向に通るときよりも単位長さ当たり多数の壁孔を通過しなければならないためである。夏材仮道管は春材のそれより細く、壁が厚い。壁孔径も春材のそれより小さく数も少ないために春・夏材間に移動速さの差が生じる。

塗料の浸透速さも上記と同じ傾向を示すので、辺材と心材、春材と夏材などで差があり、着色剤による色むら、塗膜厚さむら、光沢むらを生ずる。この塗装欠陥を防ぐために目止め、ウッドシーラーの塗布などがおこなわれる。

3. 木材の多孔性と塗膜の関係

木材を構成している木繊維や仮道管などはすべて細胞からなっている。細胞は袋のような内容物を含んだ細胞壁をもち、内容物は細胞質、核、細胞液と栄養物を含む腔胞である。細胞分裂により生じた細胞は樹木の生活上の機能を都合よく果たすため、種々の形に変化する。すなわち、栄養分を貯蔵する柔細胞、樹液の通路となる針葉樹の仮道管、広葉樹の道管および放射組織、木材に強さを与える仮道管や木繊維などである。

生きている細胞は原形質という液体を含んでいるが、死ぬとこれが消え、空の内腔をもった細胞壁だけになってしまう。直径が数 100 μm の道管孔、10~55 μm の仮道管など細胞内腔を多数もつポーラスな材料を木材塗装では素地としている。

木材の孔の割合を表すのに空隙率を用いている。空隙率は次式により求められる。

空隙率(%) = $100 - \text{木材の実質率} = (1 - r_0 / 1.50) \times 100$
 r_0 は全乾比重。

3.1 針葉樹の孔

針葉樹の場合、広葉樹より表面が平滑で、肌目が精で均質である。広葉樹が麻布なら針葉樹は絹織物である。その原因は細い仮道管が木材の約 90% をしめているからであり、そして進化した広葉樹に比べ組織が単純だからである。

スギ、ヒノキの仮道管直径は、春材で30~50 μm 、夏材で10~40 μm 。仮道管の壁厚は、春材で2~3 μm 、夏材で3~7 μm 、各仮道管直径から壁厚を減じた26~44 μm 、4~26 μm の径の孔がそれぞれある。放射組織も広葉樹のそれに比べ小さい。

3.2 広葉樹の孔

塗装素地として一般に使われている主要広葉樹の板目の空隙面をみると、アカガン(全乾容積重約 0.84)で33%、レッドラワン(全乾容積重約 0.61)で80%ある。内容物の多い放射組織の内腔を除いても、まだアカガン20%、レッドラワン68%もある。管孔空隙面の割合は道管孔に当然比例する¹⁰⁾。これらをみると広葉樹素地面は孔がいかに多く、凹凸が多いかが分かる。特に道管孔は他組織の孔より大きいので塗装上問題が多い。このような素地面に塗料を直接塗布するとこれらの管孔に浸透し、または、たまって厚さが不均一になる。この欠陥を防止するために従来より目止め処理やウッドシーラーの塗布などがおこなわれている。

野田¹¹⁾は木材のクリーヤー塗装で最重要視される材面模様の鮮明度と研摩条件の関係について実験をおこない、

表-4 塗装後の材面模様の鮮明度と研摩布・紙粒度の関係

材面 粒度	ブ			ナ			マ カ ン バ			ケ ヤ キ			ミ ズ ナ ラ			ヤ チ ダ モ		
	材面 模様	放射 組織	道管	材面 模様	放射 組織	道管	材面 模様	放射 組織	道管	材面 模様	放射 組織	道管	材面 模様	放射 組織	道管	材面 模様	放射 組織	道管
# 80	×	△	×	×	△	×	×	△	△	×	△	△	×	△	△	×	△	△
# 120	×	△	×	△	○	△	×	○	△	×	○	△	×	△	△	×	△	△
# 150	△	○	×	○	○	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○
# 180	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○
# 240	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
# 280	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：鮮明である △：やや鮮明である ×：不鮮明である
研削面にウッドシーラー1回塗り

樹種に対する研摩布・紙粒度の選択基準を明らかにした。結果を表-4に示す。

仕上げ研摩適性粒度は道管径と関係がある。道管径の大きい環孔材のヤチダモ、ミズナラ、ケヤキらは150～180番、マカンバは180番で美しい材面模様の表面を形成できる。小さい道管径のブナは240～280番の粒度が良い。ちなみに、上記樹種の道管径を調べるとヤチダモ250～400 μ m、ミズナラ200～350 μ m、ケヤキ200～400 μ m、マカンバ70～120 μ m、ブナ40～100 μ mである。

3.3 道管と塗膜割れ

道管孔における塗膜形成状態は塗料の種類、粘度、塗布量、硬化条件などによって異なる。塗膜の形成状態が耐久性に与える影響が大きいものと考えられる。

目止めなしで鏡面仕上げをしたときの塗膜状態の一例を写真-1に示す。塗料が道管孔を充填し、塗膜割れが生じている。

広葉樹の早期に発生する塗膜割れを塗膜の破壊伸びによって検討した著者の実験がある¹²⁾。アミノアルキド樹脂塗料を使い、塗膜の形成状態はほぼ写真-1のようであった。結果を要約すると、木材上の塗膜割れはブリキ板上の塗膜破壊伸びの約1/5で発生した。塗膜の破壊伸びとはほぼ一致する膨潤率の塗装木材を集め、塗膜割れ数(y)と道管面積割合(x) (図-3)の関係は、 $y=0.363x+0.948$ となり $x=0$ の点(道管がない)へ外推すると約1本の塗膜割れとなる。この結果は、道管がなければ平滑なブリキ板上の塗膜とは近い塗膜破壊伸びとなることを証明していると考えられる。なぜ道管上の塗膜は弱いかを考えると、第一は、道管部の塗膜が他組織上のものより厚くなる点がある。塗膜と素地界面における収縮応力は塗膜厚さの増加にしたがい直線的に増大する¹³⁾。塗膜が厚くなるほど応力集中の原因となるよう欠陥(たとえばピンホールなど)が多くなり、厚膜になるほど塗膜の破壊伸びが小さくなる。

Crack

Film

写真-1 道管部に発生した塗膜割れ

図-3 道管面積割合 (APV) と塗膜割れの関係

上図：塗装材膨潤率 5.00～6.99%

下図：塗装材膨潤率 3.00～4.99%

図-4 道管面積割合 (APV) と塗膜の透水しゃ断性 (RWP) との関係

道管部上の塗膜にピンホールなどの欠陥が多いことを確かめるために塗装木材の吸水試験をおこなった。その結果を図-4 に示す。塗膜の透水しゃ断率は道管面積割合の増加に従い直線的に低下し、両者の間に高い相関が認められた。塗膜中の水透過量は、Michals の実験式¹⁴⁾により塗膜の拡散係数に比例し、膜厚に反比例する関係がある。

塗膜の内、外の圧力差 (または濃度差) が木材組織によらないと仮定すれば、膜厚だけが関係する。しかるに道管上の塗膜は他の組織上のものより厚い場合が多いにもかかわらず図-4 のごとき結果になったことは、道管部の塗膜にピンホールなどが多く存在するものと考えられる。

ピンホール発生の難易は塗料の種類に関係し、アミノアルキド樹脂塗料 (この実験に使用)、および厚膜になるほどピンホールの発生が多いと植木¹⁵⁾は記している。第二は、内部応力である。今村¹⁶⁾は素地表面に開口した道管部で表面が不連続となり、塗膜端部のように応力集中がおこる。また、表面に開口した道管壁付近の収縮および膨潤応力は、道管断面積と正の直線関係があると報告している。

目止め処理により道管孔を充填すると塗膜割れが減少する。

図-5 に外装用ハウスペイントの屋外ばくろによる塗

図-5 木材比重 (r_0) と塗膜耐久性の関係 (エナメル塗装の (C) のみ目止め処理をした)

表-5 乾湿繰り返し時の素地表面に開口した道管径

		1 サイクル		5 サイクル	
		乾燥 (μm)	湿潤 (μm)	乾燥 (μm)	湿潤 (μm)
合	板	250.2	232.9	258.5	241.3
素 材	板 目 面	250.3	251.4	224.7	227.1
	ま さ 目 面	280.9	281.4	297.6	285.6

樹種：マヤビス、道管 102~190 個の平均値

膜耐久性を示す⁹⁾。木材比重が高くなるにしたがい塗膜耐用年数は短くなる。広葉樹 (Hard wood) の場合、同じ木材比重なら道管径の大きいものは小さいものより塗膜耐用年数が短い。

上記のように道管孔は一般に塗膜耐久性に悪い影響を与える。それゆえ、道管孔部にどのような塗膜を形成させるかが問題である。問題解決のために素地としての木材の性質、塗装デザイン、塗装工程を十分考慮し、そして塗装技術の向上をはからなければならない。

3.3.1 表面に開口した道管径の変化

水分の吸脱着により木材が膨潤や収縮を繰返すとき、素地表面に開口している道管径がどのような挙動を示すかを測定した。結果を表-5 に示す¹⁷⁾。

素材の道管径は膨潤時と収縮時でほとんど同じ値を示すのに対し、合板の道管径は約 7% 変化する。素材に比

べ合板では寸法変化が道管に集中して表われる。

合板は単板(ベニヤ)の繊維方向を直交させて接着し、板全体としての寸法変化を抑制しているので、膨潤、収縮によって道管径が変化する。塗膜割れ数は素材よりも合板の方が多い傾向がある。その一原因が合板道管径の動きである。

4. 塗料の木材への吸着

塗料が木材実質、すなわち細胞壁中に浸透するか否かは木材表面の各種物性に強く影響し、しいては塗膜耐久性にも強い影響を与える。

塗料は溶剤を含有している。木材塗装では塗料の挙動、木材の挙動、木材と塗料の相互作用などと用いられる溶剤の性質が密接な関係がある。

ベンゼンや脂肪族炭化水素などは木材を膨潤させない溶剤である。各種細胞内腔、膜孔など外部表面と接触するのみで、細胞壁中へ浸入することがない。しかし、毛細管力によって塗料成分をこれら表面へ運搬することができる。一方、低級アルコール類、アセトン、水、エステル類は膨潤性であり、塗料成分を伴って細胞壁内部へ浸入し、木材実質部に変化を与える可能性がある¹⁸⁾。

木材表面に塗料を塗布すると、(1) まず木材表面をぬらし、(2) 肉眼でも識別できるような毛細管(たとえば道管孔や細胞内腔)に浸透する。(3) これと同時に細胞壁へ溶剤の選択吸着がおこる。そのため、塗料の粘度が上昇し浸透が止るので木材表面に塗料が残り、塗膜が形成される。

木材中の各種内部表面は穴の大きさが違う。そのため、塗料の吸着にあずかる表面は、塗料(ポリマー)の種類や分子量、溶剤の種類などにより異なる。

たとえば壁孔膜の小孔で連結されている内部の内腔壁面が吸着有効表面となるには、ポリマー分子が細胞壁または壁孔膜を通過しなければならない。細胞壁または壁孔膜の通路の直径は、水での膨潤状態で前者が15~50 Å、後者が100~1,000 Åである。

水で湿潤状態の細胞壁中へポリエチレングリコール(PEG)は拡散によって入り、浸透極限分子量は3,000であることがTarkowら¹⁹⁾の実験でわかった。

木材表面へ塗装をおこなうと塗料が大きな細胞内腔を充滿する粗浸透がまずおこる。次に細胞壁のミクロフィブリルやラメラ間領域へ塗料が、またはその一成分かそれ以上の成分が浸透する細胞壁浸透がおこる。粗浸透は光学顕微鏡で容易に観察できるが、細胞壁浸透の観察はなかなか困難である。しかし、蛍光顕微鏡、電子顕微鏡および走査型電子顕微鏡などにより研究されている。

結果の一例として、CôtéらおよびSchneider²⁰⁾はウレタン変性アルキド樹脂塗料は細胞壁へは浸透せず、溶剤のみが浸透した。それゆえ、溶剤の唯一の機能は塗料粘度をコントロールすることにあり、木材-塗膜系の強度には直接関与しない。Smithら²¹⁾はメタプロモフェノール・ホルムアルデヒド樹脂では細胞壁に浸透していることを認めている。

上記の現象は染料溶液でもしばしば認められる²²⁾。液体が浸透しうる通路を持っている木材に染料溶液を浸透させようとしても、染料が選択的吸着をおこし、表面と内部の染色度合が異なる。激しく選択吸着が生じたときは染料は木材表面のみを染色し、木材内部には水や溶剤のみが浸透する。

選択的吸着は水溶液の場合は激しくおこり、有機溶剤では少なく、浸透が良い場合がある。ヒノキ、モミ、シナに対しSuminol fast blue(酸性染料)を使い、水では0.05%でも木材内部への浸透が悪いが、溶媒をエタノールにすると0.5%でもよく浸透する。

5. 塗膜耐久性に与える素地木材の寸法安定化処理

塗膜耐久性特に塗膜割れの発生および成長、塗膜付着力の低下などは素地の水分による膨潤、収縮に影響されることが大きい。それゆえ、素地の動きを減少させる寸法安定化処理、および素地の膨潤、収縮によって生ずる応力を緩和させる処理などを施し、その上に塗装をおこなえば、当然塗膜耐久性が向上することが予想される。

古来から漆器では素地の膨潤、収縮応力を緩和させて塗膜の割れ、ふくれを防ぐため素地に布を練り付けたのち、砥の粉、錆土などと水の系を主材料として、それをパテ状に塗布する素地形成がなされてきた(もち論うしが素地へ浸透するのを防ぐ目的もある)。

3.3で目止めをすることによりピンホールなどの塗膜欠陥がでにくくなり塗膜割れ数が減少することを述べた。さらに小島は素地ひずみの緩衝作用としての目止めを研究した²³⁾。目止め剤のひずみ緩衝効果は体質顔料の種類によって異なり、山科砥の粉やカオリンでは石英粉を添加することにより増大する。また、目止め剤の付着量が多いものほどその効果が大きい。

布着せの原理を応用した木製品が何種類も市場に出回っている。数量の多いところでは紙貼りプリント合板およびレジンシートオーバーレイ合板である。

初期のプリント合板は目止めおよび下塗りをおこない、その上に木目をプリントし、上塗りをしていた。しかし、塗膜割れやはがれが発生しやすく、工程が複雑、

コストが高いなどの理由で現在では合板の上にプリントされた紙を貼り、上塗りを2回位施した紙貼りプリント合板が市場の大勢を占めている。紙を貼ることにより合板の膨潤、収縮ひずみを緩和させて、塗膜耐久性を著しく向上させている。

レジンシートを合板上にオーバーレイすることにより、合板の膨潤、収縮応力を緩和し、そして均一化させることができる。さらに透水性を低下させるので塗膜耐久性を向上させる手段として非常に有効である^{24,25)}。

普通の合板は単板の繊維方向を直交して接着するので板全体としての寸法は安定している。しかし、表面に開口している道管の大きな動き、単板に存在する裏割れなどが影響するので塗膜耐久性の向上につながらない¹⁷⁾。

Tarkow ら²⁶⁾は木材の寸法安定化処理として、木材を水溶性フェノール樹脂に短時間浸セキして木材表面を寸法安定化する方法と同樹脂を加圧注入する方法をおこない、油変性ポリウレタン樹脂を塗装して屋外ばくろをおこなった。前記の処理では1年後の塗膜割れ数が無処理のものより90%も少なかった。後記処理のものでは2年後でも塗膜割れが完全に減少した。

フェノール樹脂の場合、素地の寸法安定化効果と同時に素地が紫外線により劣化するのを防ぐ効果がある。フェノール樹脂のように紫外線を吸収する性質のものは木材の劣化を防ぐ代りに、樹脂自体は変質する。

ポリエチレングリコールは木材の寸法安定化に効果がある。この上に塗装をおこない塗膜耐久を向上させることができる。しかし、この場合研磨紙の目詰まりがでやすいが、ポリエチレングリコールの末端基をメタアクリレートで置換したものを使えば、この点が改善される。

6. お わ り に

塗装素地が木材の場合、塗膜耐久性が他の素材のときより悪い。その主原因が水分の吸脱による素地の大きな動きおよび複雑な組織構造からくる多孔性である。木材の膨潤、収縮のメカニズムや各種の孔の様子などなるべくわかりやすく述べたつもりである。

木材塗装にたずさわる方が塗装、塗膜耐久性に深く関係する素地木材の性質を知り、今後の塗装に生かして頂

ければ幸いです。

文 献

(参考文献)

梶田 茂編：木材工学，養賢堂（1961）

川村二郎：これからの木材塗装，楨書店（1977）

(引用文献)

- 1) 福山万次郎・佐道 健：京府大学報・農，18，88（1966）
- 2) 北原覚一：木材物理，p.31，森北出版（1966）
- 3) A. J. Stamm, W. K. Loughborough：J. Phys. Chem., 39, 121（1934）
- 4) 川村二郎：林試研報，[234]，131（1971）
- 5) F. L. Brown：Organic Protective Coating, p. 226, Reinhold Publishing Co., New York（1953）または文献 6）
- 6) 鈴木正治：塗装の技術，12 [2]，8（1977）
- 7) A. J. Stamm：Tappi：40，761（1957）
- 8) 渡辺治人：木材理学総論，p.208，農林出版（1978）
- 9) 相沢 正：木材塗装の設計，p.31，理工出版（1969）
- 10) 中戸莞二：色材，37 [1]，17（1964）
- 11) 野田 茂：木材の研削加工表面に関する研究，p. 64（1979）
- 12) 川村二郎：第30回木材学会発表要旨，p. 169（1980）
- 13) A. M. Chistjakov, L. A. Sukhareva：Plast Massy, [1]，57（1964）
- 14) A. S. Michals：Official Digest, [6]，639（1965）
- 15) 植木憲二：塗料物性入門，p.161，理工出版（1967）
- 16) 今村浩人：林試研報，[296]，170（1977）
- 17) 中村 章，川村二郎：林試研報，[176]，187（1965）
- 18) 横田徳郎：木材工業，25，[9]，13（1970）
- 19) H. Tarkow, W. C. Feist, C. F. Southerland：Forest Prod. J., 16, [10]，61（1966）
- 20) M. H. Schneider, P. C. Chang：J. Paint Technol., 44, [564]，111（1972）
- 21) L. A. Smith, W. A. Côté：J. Paint Technol., 44, [564]，71（1972）
- 22) 堀池 清，基太村洋子：木材工業，29，[5]，188（1974）
- 23) 小島正文：色材，51，[10]，16（1978）
- 24) 中村 章，川村二郎：林試研報，[148]，125（1963）
- 25) 川村二郎：林試研報，[182]，149（1965）
- 26) H. Tarkow, S. H. Ishaq：Forest Prod. J. [11]，203（1961）