

塗装したスギ直交集成板（CLT）の耐候性評価と継時非破壊観察

Weather Resistance Evaluation and Successive Non-destructive Observation
of Coated Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) Cross-laminated Timber (CLT)

谷岡晃和*、井口皓介**、孕石剛志***

Akikazu Tanioka, Kousuke Iguchi, Takeshi Haramiishi

*電子・有機素材研究所 有機材料グループ、**株式会社鳥取CLT、***銘建工業株式会社

塗装したスギ直交集成板（Cross Laminated Timber、以下「CLT」と呼ぶ）の耐候性の評価を目的として、促進耐候性試験と屋外暴露試験を実施し、試料の変色等を評価するとともに、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて継時的な非破壊観察と解析を行った。耐候性を評価し、塗装による変色、退色防止効果を確認した。継時非破壊観察により、ラミナの幅はぎ接着の有無という製法上の違いにより CLT に生じる劣化、割れの進行が異なることを明らかにした。幅はぎ接着された CLT では、製材の乾燥割れと同様の表面割れが発生、進行した後、幅はぎ部の開きが生じた。一方、幅はぎ接着のない CLT では目地部の開きが発生、進行した後、製材の乾燥割れと同様の表面割れが生じた。

To evaluate the weather resistance of coated sugi cross-laminated timber (CLT), its discoloration and other factors were assessed using accelerated weathering and natural weathering. Additionally, successive non-destructive observations and analyses were performed using a microfocus X-ray computed tomography device. The weather resistance as well as discoloration and fade prevention effects of the coating were evaluated and confirmed. Through successive non-destructive observations, it was determined that the deterioration of the CLT and its development of checks varied depending on the manufacturing method used; specifically, whether edge gluing was applied. In CLT with edge gluing, surface checks similar to lumber drying checks appeared first and the checking progressed over time. Eventually, the glued edge area opened up. Conversely, in CLT without edge gluing, the joint area opened up first and surface checks similar to lumber drying checks eventually appeared.

1. はじめに

SDGs やカーボンニュートラルといった社会的要請を背景に公共建築物等木材利用促進法が改正され、「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用促進に関する法律」が施行(2021.10.1)され、鉄骨やコンクリートから木材へ替える“ウッドチェンジ”を促進し、脱炭素社会・持続可能な社会の実現を目指すことが示された。

ウッドチェンジの促進の中で、直交集成板（Cross Laminated Timber、以下「CLT」と呼ぶ）を用いた建築

の施工拡大が進められている。

CLT を用いた建築では、CLT が構造材と内装、外装を兼ねる特徴を持つ。木質建材を外装として長期間使っていくためには、塗装や薬剤注入による耐久性、耐候性向上が必要とされる。しかし、CLT を用いた建築では部材が大型となるため、薬剤注入は現実的ではなく、保護塗料の使用が対策として採用されている。そのため塗装した CLT の耐候性、劣化を評価する必要があるが、その手法は現状では表面観察が主であり、内部への割れの進行については評価できていない。現在、

内部性状を評価するには切断した後、断面観察が行われており、その場合、試料の切断時点の観察でしかなく、それまでの経過は把握できない。また、試料を切断するためその時点で劣化試験を終了せざるを得ないことから、同一試料について非破壊で継続的な観察が求められている。

そこで、本研究では塗装したスギ CLT の耐候性の評価を目的に、促進耐候性試験と屋外暴露試験を実施し、試料の変色等を評価するとともに、マイクロフォーカス X 線 CT 装置（以下、「X 線 CT 装置」と呼ぶ）を用いた継続的な非破壊観察と解析を行ったので、その内容について報告する。

2. 実験方法

2.1 促進耐候性試験と耐候性評価

2.1.1 試験体

厚さ 36 mm のスギ CLT パネル（以下、「CLT-36」と呼ぶ）、厚さ 90 mm のスギ CLT パネル（以下、「CLT-90」と呼ぶ）。CLT-90 の接着されていない幅はぎ部を以降、「目地」と呼ぶ）から試験体を作製した。CLT パネルの構成等を表 1 に示す。元のパネル表面を試験面とし、試験面寸法が縦 150 mm、横 70 mm の試験体を切り出した。試験面の縦方向は表層ラミナの長手方向とし、試験面には CLT-36 では幅はぎ部が 1 ヶ所、CLT-90 では目地部とフィンガージョイント部が 1 ヶ所ずつ配置される

表 1 CLT パネルの構成等

構成等		製造
CLT-36	厚さ 12mm のラミナの 3 層構造	株式会社鳥取 C L T
	ラミナはたて継ぎなし	
	ラミナ幅はぎ接着あり	
CLT-90	厚さ 30mm のラミナの 3 層構造	銘建工業株式会社
	ラミナは継ぎあり（フィン	
	ガージョイントによる）	
	ラミナ幅はぎ接着なし	

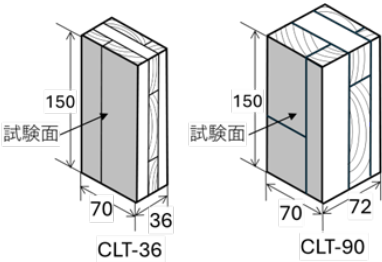


図 1 促進耐候性試験体の形状

よう木取りを行った。試験体の厚みは CLT-36 は製品厚みのまま厚みを 36 mm とした。CLT-90 は、促進耐候性試験機内の試験体取り付け部の寸法的な制約から、試験体の裏面を削り、厚みを 72 mm とした。また、試験体の取り付けのため、試験体裏面に固定用のスリットを設ける等の加工を行った。試験体の形状は図 1 のとおり。

2.1.2 塗装

試験体の表面（試験面）に刷毛塗りにて塗装を行った。塗料は市販塗料より表 2 に示す 3 種類の塗料を選定した。（以下、それぞれ「塗料 1 クリア」、「塗料 2 ライトグレー」、「塗料 3 ライトモスグリーン」と呼ぶ）なお、試験体は工場出荷時に養生塗装されており、その上に塗装を行った。試験体数は各塗料 3～8 個とし、計 42 個の試験体を作製した。比較のため、養生塗装のみの試験体（以下、「無塗装試験体」と呼ぶ）も準備した。

2.1.3 促進耐候性試験

優良木質建材等認証（AQ）「塗装木質建材－耐候性塗料木質建材」の品質性能評価法 JIS K 5600-7-7 の促進耐候性試験（キセノン灯ウェザーメータ）の方法 1、標準放射照度で 2 時間あたり水噴霧 18 分のサイクル A に基づき、キセノン灯ウェザーメータ（スガ試験機製スーパーキセノンウェザーメーター SX75）を用いて

表 2 選定した塗料

色調等（呼称）	塗料の種類等	推奨用途
塗料 1 クリア	水性木材保護塗料（水性・造膜タイプ）	屋内外木部用全般着色塗料
塗料 2 ライトグレー	水性木材保護塗料（水性・造膜タイプ）	屋内外木部用全般着色塗料
塗料 3 ライトモスグリーン	木材浸透型保護着色塗料（油性、浸透タイプ）	屋内木部用全般着色塗料

実施した。

2.1.4 耐候性評価、非破壊観察

デジタルカメラによる試験面の撮影と分光測色計（コニカミノルタ社製 分光測色計 CM-3700）による測色を行った。測色は片岡らの方法²⁾にならい、CIELAB 色空間における L^* （明度）、 a^* （正：赤方向、負：緑方向）、 b^* （正：黄色方向、負青方向）を測定した。測色条件は、正反射光込み、光源 D65、視野角 10 度、測色部の直径 8 mm とし、試験面の定位 3 ヶ所の測定値を平均して測定結果とした。

非破壊観察は X 線 CT 装置（島津製作所製 InspeXio SMX-225CT）により行った。撮像は X 線管電圧 95kV、管電流 100 μ A、画素サイズ 0.180mm/voxel の条件で行った。試験面撮影、測色、試験体の非破壊観察は促進耐候性試験開始前と 500 時間、1000 時間、1500 時間、2000 時間、3000 時間経過時に行った。

2.2 屋外暴露試験と耐候性評価

2.2.1 試験体

材料、作製方法等は 2.1.1 に同じ。試験面は縦 300 mm、横 300 mm、厚みは製品寸法のままとした。試験面には CLT-36 では幅はぎ部が 2~3 ヶ所、CLT-90 では目地部が 2~3 ヶ所とフィンガージョイント部 1 ヶ所が配置されるよう木取りを行った。試験体の形状は図 2 のとおり。

2.2.2 塗装

使用塗料、塗装方法は 2.1.2 に同じ。試験体数は各塗

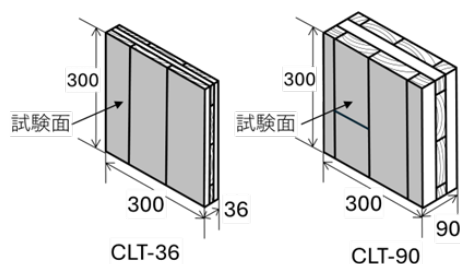


図 2 屋外暴露試験体の形状

料 3~8 個とし、CLT-36、CLT-90、各 14 個、計 28 個の試験体を作製した。比較のため、無塗装試験体も準備した。

2.2.3 屋外暴露試験

銘建工業株式会社 CLT 工場（岡山県真庭市）敷地内において、JIS K 5600-7-6 塗料一般試験方法 第 7 部：塗膜の長期耐久性 第 6 節：屋外暴露耐候性 試験方法に準じて、2022 年 8 月から実施した。

2.2.4 耐候性評価、非破壊観察

2.1.4 に同じ。ただし、測色は試験面の定位 4 ヶ所で行い、測定値を平均し測定結果とした。

また、X 線 CT 装置による撮像は、装置の仕様上の制約と、試験体の寸法を考慮し、撮像領域は試験体中央の直径約 99 mm の領域とした。撮像は X 線管電圧 130kV、管電流 40 μ A、画素サイズ 0.098mm/voxel で行った。

なお、試験面撮影、測色、試験体の非破壊観察は屋外暴露試験開始前と、3 ヶ月経過時、11 ヶ月経過時に行った。試験体の移送及び撮影、測色、非破壊観察に時間を要したため 11 ヶ月経過時の実質累計暴露期間は 10 ヶ月であり、本報告においては、以降、暴露期間は 10 ヶ月として扱う。

3. 結果と考察

3.1 促進耐候性試験と観察、解析

3.1.1 試験面性状

CLT-36、CLT-90 の試験面性状の観察例を図 3、4 に示す。観察例は試験体の中でも塗装面の割れが大きなものである。無塗装試験体は 500 時間経過時に白色化が認められた。これは木材中のリグニンの光分解による低分子化と噴霧された水による流出によるものである¹⁾。また、試験面には細かな割れが全面にわたって生じた。塗装試験体では塗料 1 クリア試験体で部分的に白色化が観察された。塗料 2 ライトグリーン、塗料 3 ライトモスグリーンといった有色塗装ではその傾向は

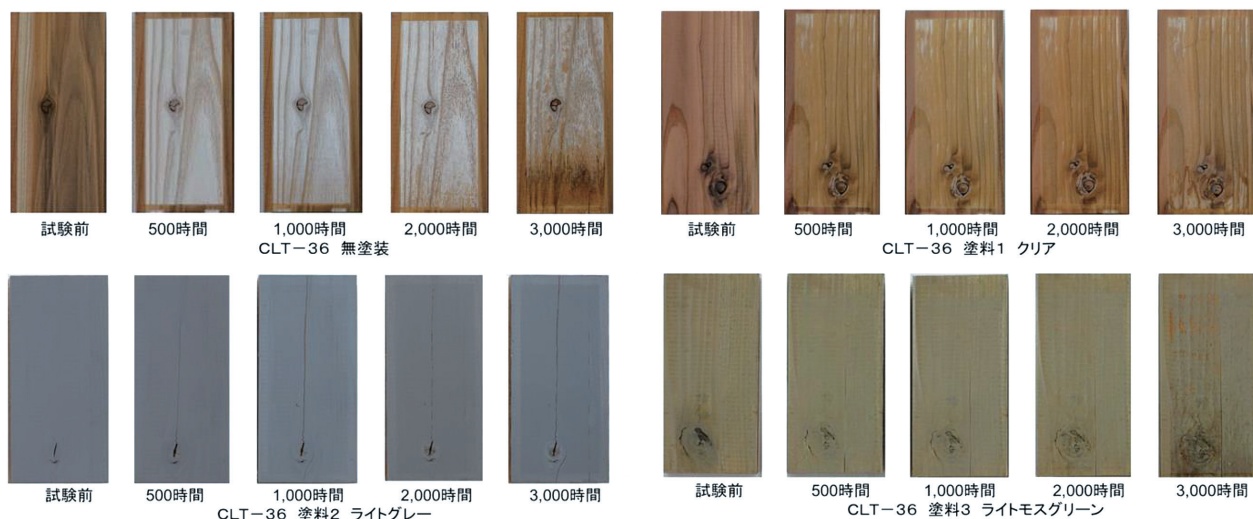


図3 促進耐候性試験における試験面性状の変化 (CLT-36)



図4 促進耐候性試験における試験面性状の変化 (CLT-90)

みられなかった。

割れについてみると、CLT-36 では 1500 時間経過時に半数程度の試験体でラミナの板目中央や節周辺に製材の乾燥割れと同様の割れが発生し、試験時間の経過につれて、割れが伸長、増加した。また、塗料 1 クリア試験体については、節周辺の劣化が他の塗装に比較して顕著にみられた。

CLT-90 では、目地部の開きが発生し、進行した。これは、ラミナ幅はぎ部が接着されていないことに起因するものと考えられる。また、フィンガージョイント部を起点とする劣化がみられた。

3.1.2 試験面の色の变化

CLT-36、CLT-90 の試験時間 2000 時間までの a^* (正：赤方向、負：緑方向)、 b^* (正：黄方向、負：青方向) の経過を図 5、6 に示す。無塗装試験体では経過時間 500 時間時点で a^* 、 b^* とも大きく低下し、その後の増減はみられなかった。塗料 1 クリア試験体では 500 時間時点で a^* の低下、 b^* の増加がみられたが無塗装試験体に比較して変化は小さかった。また、塗料 2 ライトグレー試験体、塗料 3 ライトモスグリーン試験体では 2000 時間にいたるまで a^* 、 b^* の増減は無塗装に比較しても小さいものであった。塗料 3 ライトモスグリーンは屋内木部用全般着色を用途とする浸透型塗料であったが、造膜タイプの塗料 1 クリアに比較しても変色、

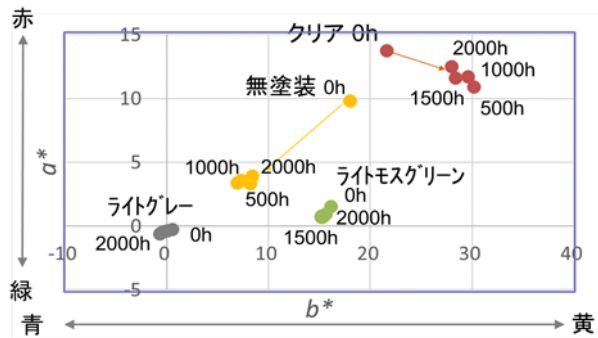


図5 促進耐候性試験における a^* 、 b^* (CLT-36)

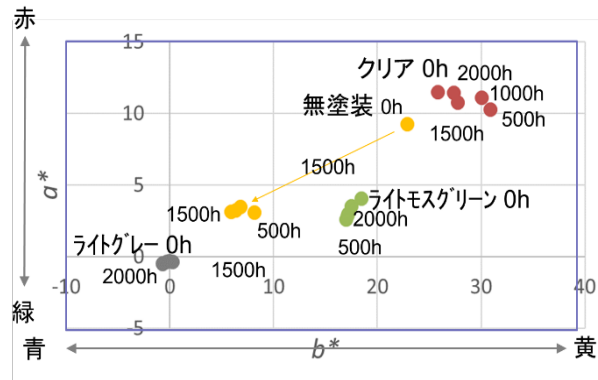


図6 促進耐候性試験における a^* 、 b^* (CLT-90)

退色の程度は小さかった。これらのことから、塗装による変色、退色防止効果が確認された。さらに、有色塗装においてその効果は大きかった。

3.1.3 X線CT装置による非破壊観察

CLT-36の観察例を図7に示す。観察例は試験体の中でも試験面の割れが大ききものである。断面A、B、Cとも促進耐候性試験の時間経過とともに試験面に割れが発生し、1000時間経過時には表層、中層のラミナ間の接着層に達するほどの深さとなった。ただし、割れは接着層でとどまった。それに対して幅はぎ部への隙間、割れの発生はみられなかった。その他の試験体について観察したところ、試験面の割れは、製材の乾燥割れ、劣化進行と同様にラミナ板目中央や節周辺部にみられた。また、幅はぎ接着部に開き（隙間）が生じている試験体もあったが、X線CT装置で観察したところ、ごく浅いものであった。

CLT-90の観察例を図8に示す。観察例は目地部分に注目したものである。断面Bでは目地部分の開き（隙間）は、2000時間経過時には表層、中層のラミナ間の接着層に達していた。ただし、開きは接着層でとどま

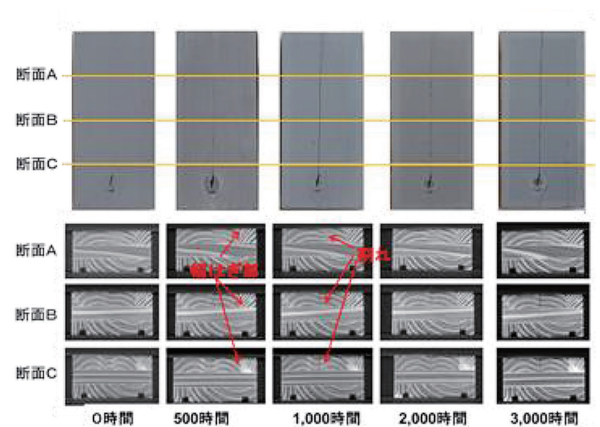


図7 X線CT装置による観察像の例 (CLT-36)
観察位置と断面像

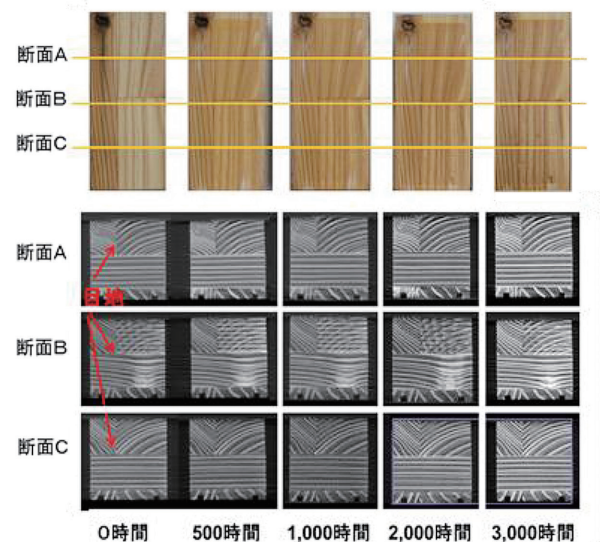


図8 X線CT装置による観察像の例 (CLT-90)
観察位置と断面像

った。目地の開きは、CLTを屋外ベンチ等を使用した際の水の侵入を招くことから、実環境における劣化、腐朽進行の初期段階と合致する内容であった。

幅はぎ接着の有無という製法上の違いによりCLTに生じる劣化、割れの進行が異なることが明らかとなった。幅はぎ接着されたCLT-36では、表面割れは製材の乾燥割れと同様のものがそのほとんどであり、幅はぎ部の開きはごくわずかであった。一方、幅はぎ接着のないCLT-90では目地部の開きが発生、進行し、製材の乾燥割れに似た表面割れはみられなかった。

3.2 屋外暴露試験と観察、解析

3.2.1 試験面性状

CLT-36の試験面性状、外観の観察例を図9に示す。

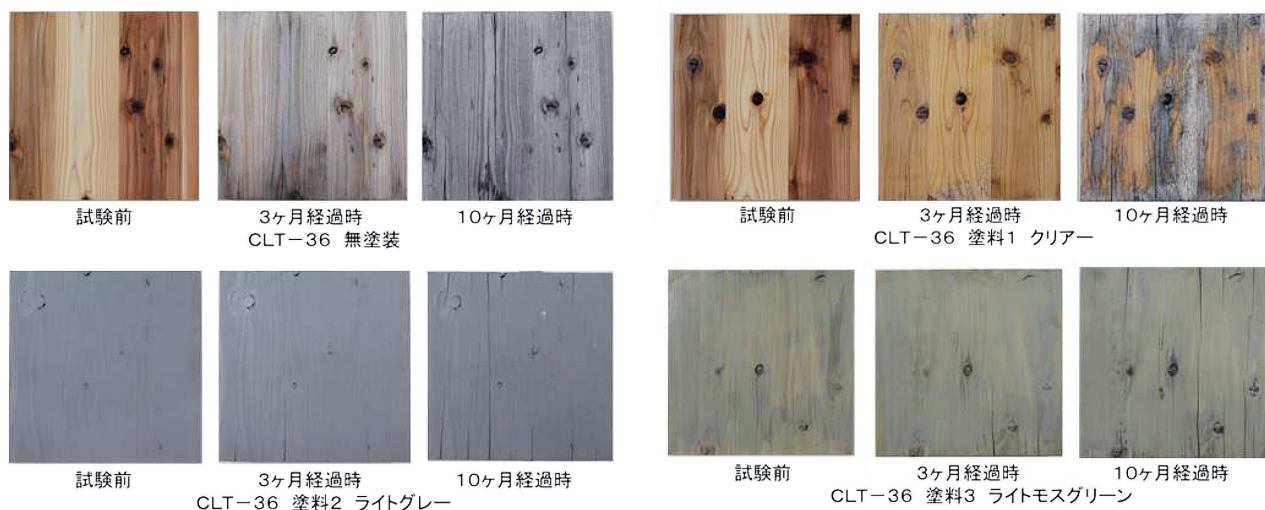


図9 屋外暴露試験による試験面性状の変化 (CLT-36)



図10 屋外暴露試験による試験面性状の変化 (CLT-90)

図に示すものは試験体の中でも試験面の割れが大きなものである。無塗装試験体は3ヶ月経過時までに材色が灰色に変色した。各試験体とも3ヶ月経過時にはラミナの端部、木口からの割れが発生し、10ヶ月経過時には割れの進行の他、幅はぎ部の一部に開きが生じていた。

塗料1クリア試験体では、他の試験体に比較して大きな材面の変色、劣化がみられた。10ヶ月経過時にはラミナの端部、木口を起点とする割れの進行の他、幅はぎ部の開きと、その部分からの塗膜の割れ、剥がれ、カビの発生がみられた。塗料2ライトグレー、塗料3ライトモスグリーン試験体では塗膜の剥がれ等は生じなかったものの3ヶ月経過時にはラミナの端部、木口からの割れが発生し、10ヶ月経過時にはそれらの進行

と幅はぎ部の一部に開きがみられた。

CLT-90の試験面性状、外観の観察例を図10に示す。図に示すものは試験体の中でも試験面の割れが大きなものである。CLT-36と同様に無塗装試験体は3ヶ月経過時までに材色が灰色に変色した。各試験体とも3ヶ月経過時に目地部に開きが生じ、10ヶ月経過時にはそれらの進行と、次いでラミナの端部、木口を起点とした表面割れがみられた。特に塗料1クリア試験体では、他の試験体に比較して大きな変色、劣化がみられた。10ヶ月経過時には目地の開いた箇所と端部、木口を起点とした表面割れ部分から塗膜の割れ、剥がれ、カビの発生がみられた。

促進耐候性試験では、試験面のみが光照射、水噴霧の暴露条件にさらされるのに対し、屋外暴露試験では

試験面以外の面も実際の屋外の環境条件にさらされる。そのため、促進耐候性試験ではみられなかった表層ラミナの端部、木口を起点とする割れが発生したものと考えられる。

3.2.2 試験面の色の变化

CLT-36、CLT-90の屋外暴露10ヶ月までの a^* （正：赤方向、負：緑方向）、 b^* （正：黄方向、負：青方向）の経過を図11、12に示す。無塗装試験体では3ヶ月の屋外暴露により a^* 、 b^* とも大きく低下した。塗料1クリア試験体で a^* 、 b^* の低下がみられたが無塗装試験体に比較して変化は小さかった。

塗料2ライトグレー試験体、塗料3ライトモスグリーン試験体では a^* 、 b^* の増減はさらに小さく、塗装による変色、退色防止効果が確認された。そして、有色塗装においてその効果は大きかった。

また、無塗装、塗料2ライトグレー、塗料3ライトモスグリーン各試験体の a^* 、 b^* の経過は促進耐候性試験と同様の傾向を示した。一方、塗料1クリア試験体については経過が異なった。開始時の a^* 、 b^* が大きく異なっていることと、促進耐候性試験ではみられ

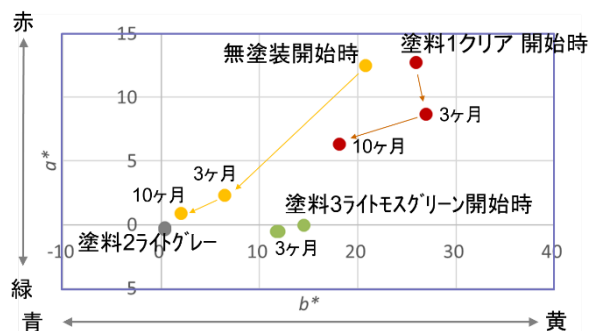


図11 屋外暴露試験における a^* 、 b^* (CLT-36)

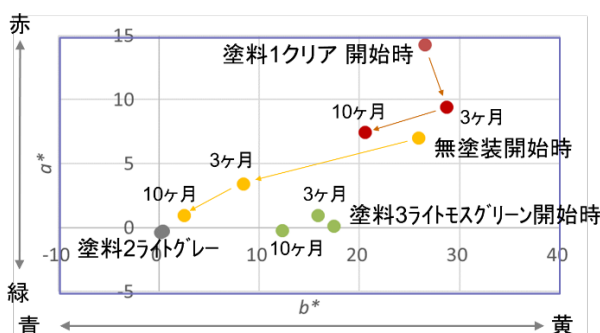


図12 屋外暴露試験における a^* 、 b^* (CLT-90)

なかった表層ラミナの端部、木口を起点とする割れの発生に伴う塗膜の割れ、剥がれ、屋外における塵や、カビの影響によるものと考えられる¹⁾。

3.2.3 X線CT装置による非破壊観察

CLT-36の観察例を図13、14に示す。無塗装試験体、塗料3ライトモスグリーン試験体ともX線CT装置の観察領域に表面割れがみられた。割れは表面では大きくみえるものの、断面観察したところ、割れはごく浅いものであった。また、幅はぎ部の開き、割れ、試験体内部に割れ、隙間の発生はみられなかった。

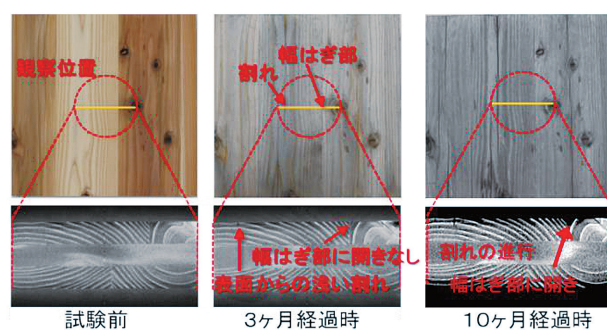


図13 X線CT装置による観察像の例 (CLT-36 無塗装)
観察位置と断面像

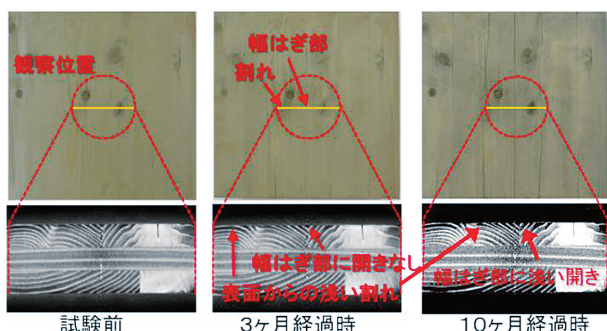


図14 X線CT装置による観察像の例 (CLT-36 塗料3)
観察位置と断面像

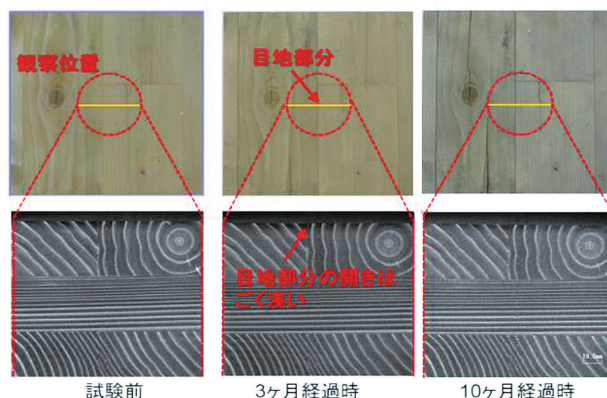


図15 X線CT装置による観察像の例 (CLT-90 塗料3)
観察位置と断面像

CLT-90 の観察例を図 15 に示す。観察領域の試験面の目地部分に開き、隙間の発生がみられたが、断面観察したところ、開き、隙間はごく浅いものであった。試験体内部に割れ、隙間の発生はみられなかった。促進耐候性試験の初期と同様の劣化、割れ等が発生していると考えられる。

3.2.4 屋外暴露試験と促進耐候性試験の比較

石川らの方法³⁾にならい、屋外暴露試験期間に生じた塗装面の色差と促進耐候性試験において生じたそれとの比較を行い、促進倍率を求めた。

図 16 に示すように、屋外暴露試験 10 ヶ月後の CLT-36、CLT-90 各試験片の色差 (ΔE^*ab) を横軸に、促進耐候性試験 500、1000、1500、2000 時間後の同データを縦軸にプロットし、各試験時間について近似直線を求めた後、近似直線の傾きが 1 に近い時間を探索した。

その結果、1000 時間後の傾きが 0.97 と最も 1 に近く、今回、岡山県真庭市において実施した屋外暴露試験 10 ヶ月に相当する促進耐候性試験時間は約 1000 時間と推定された。10 ヶ月を 300 日、7200 時間とすると、促進耐候性試験の屋外暴露試験に対する促進倍率は 7.2 と推定された。

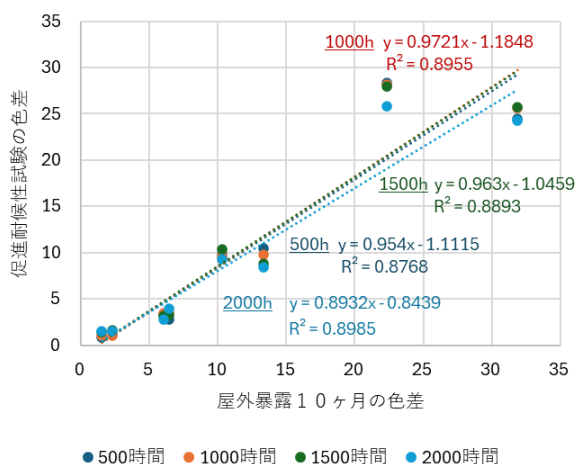


図 16 屋外暴露試験と促進耐候性試験の比較

4. おわりに

塗装したスギ CLT の耐候性の評価を目的として、促進耐候性試験と屋外暴露試験を実施し、試料の変色等を評価するとともに、X 線 CT 装置を用いた継時的な非破壊観察と解析を行ったところ、今回の試験条件下では以下のことが示された。

- 1) 促進耐候性試験、屋外暴露試験により、塗装による変色、退色防止効果を確認した。その効果はクリア塗装に比較して有色塗装の方が大きかった。
- 2) ラミナの幅はぎ接着の有無という製法上の違いにより CLT に生じる劣化、割れの進行が異なることが明らかとなった。幅はぎ接着された CLT では、表面割れは製材の乾燥割れと同様の表面割れが発生、進行した後、幅はぎ部の開きが生じた。一方、幅はぎ接着のない CLT では目地部の開きが発生、進行した後、製材の乾燥割れと同様の表面割れが生じた。
- 3) 促進耐候性試験条件下では割れ、目地の開きは深いものであっても表層、中層のラミナ間の接着層でとどまっていた。10 ヶ月の屋外暴露試験では、試験体の中央部の観察領域において表面では大きな割れ、目地の開きであってごく浅いものであった。
- 4) 促進耐候性試験の屋外暴露試験に対する促進倍率は色差の結果から、7.2 と推定された。

本報告の一部は日本木材学会中国・四国支部第 35 回研究発表会（広島、2024 年）にて発表を行った。

文 献

- 1) 屋我嗣良ら;木材科学講座 12 保存・耐久性,海青社, p. 166-167 (1997)
- 2) 片岡厚ら;水性木材保護塗料の耐候性能評価 (I) 屋外暴露 2 年間の保護性能,木材保存, vol.35-5, p.204-214 (2009)
- 3) 石川敦子ら;塗装木材に関する屋外暴露試験と促進耐候性試験の相関,木材保存, vol.40-2, p.55-63 (2014)