

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06169

研究課題名(和文)木材の組織構造における可視光光路モデルの作成

研究課題名(英文) Analyzing the internal light scattering and its transmission in the tissue structure of wood

研究代表者

杉元 宏行 (SUGIMOTO, Hiroyuki)

愛媛大学・農学研究科・准教授

研究者番号：70425742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：繊維傾斜が可視光全透過率・全反射率に及ぼす影響について調べるため、細胞を角筒形状とした単純構造を仮定し、材料内の光路を考慮したモデルを作成し、実験結果と比較した。その結果、繊維角と光特性の関係の数値解析結果と実験値は良い一致が見られ、各界面における透過率・反射率は繊維傾斜の影響を強く受けることが明らかとなった。また、塗料や水が木材に浸透することによる複雑な色変化が、自由水や塗料が内腔へ浸透することによる界面構成の変化が原因と推定し、簡易的な光学モデルで検討した結果、その原因となる反射率は、材料内部の反射界面の影響を受けた単調な変化であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材は、その高い意匠性から、表面材料として利用されることが多いことから、見た目についての研究が数多くなされてきた。しかし、そのほとんどは材料の最表面の状態について考察されたものであり、材料内部に浸透する光の影響についてはあまり議論されてこなかった。特に、明度・色におよぼす材料内部の組織構造の影響は、細胞壁の光吸収によるもののみ議論されてきた。しかし、数多くの例外が存在することから、吸収以外の理由が疑われてきている。本研究では、木材の可視光反射・透過について、木材の持つ異方性と複雑な組織構造の影響について調べ、木材の組織構造における可視光光路モデルを作成し、明度・色に与える関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the effect of fibre inclination on the total transmittance and total reflectance of visible light, a model was developed assuming a simple structure with cells in the form of a square cylinder, taking into account the light paths in the material, and compared with experimental results. The results showed good agreement between the numerical results of the relationship between fibre angle and optical properties and the experimental results, indicating that the transmittance and reflectance at each interface were strongly influenced by fibre inclination. The complex color change due to the penetration of paint and water into the wood material was estimated to be caused by the change in the interface configuration due to the penetration of free water and paint into the lumen, and a simple optical model was used to investigate the cause, which revealed that the reflectance was monotonically affected by the reflective interface inside the wood material.

研究分野：木材物理

キーワード：木材 光透過 組織構造 光路 屈折率

1. 研究開始当初の背景

近年、木材は、人間との高い心理的親和性や持続的利用可能性から、高級自動車内装や携帯電話等の弱電製品の外装など、従来用いられてこなかった意匠面での用途に幅広く用いられ始めている。そのため、木材製品の見た目についての知見はますます重要になってきており、木目が人間に与える影響の心理的側面からの調査や、木目の美しさの一つである照りに関しての研究など、木材の意匠に関する研究が活発になされてきた。しかし、ほとんどの研究は、木材組織の最表面の状態のみに着目したものであり、材料内部の組織構造が色や明度に与える影響について検討された例は少ない。定説では、材料内部の組織構造が明度に与える影響としては、密度の高い木材ほど暗い傾向にあるとされている。材料内部の細胞壁構成成分によって光が吸収され、残りが反射に寄与するというものである。このことは、重い木ほど暗く見えるという経験から、感覚的にもとても理解しやすい。しかしながら、例外も多く存在する。例えば、シラカシなどは比重 0.8 程度と高密度であるが、その名の通り、白く明るい。また、図 1 のクヌギの写真では、板目面での放射組織は黒く見えるが、木口面での同一組織は、同様の密度であるにもかかわらず白く見える。こういった背景から、材料密度以外の、可視光反射の予測手法が求められている。



図 1 クヌギ板目面で観察される放射組織（左）、同試料木口面で観察される放射組織（右）

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、光反射に及ぼす、材内部の構造の影響について明らかにすることを目的とする。最近、報告者らは、木材の明度を決定する因子として、材料内での透過の程度が重要であることを明らかにしている。具体的には、スギを半径方向に圧縮・高密度化した際に、可視光の中・長波長域において半径方向の光透過性が増加するとともに、反射率が低下する結果を得た。この結果から、これらの波長域では、透過と反射が密接な関わりを持つことがわかる。そこで、木材の材料内部に、屈折率の異なる相からなる界面がいくつか存在し、その内部界面で拡散反射が生じ、各界面での反射の積算が材料の反射となると推定し、モデルを作成した。ここで、入射光は、細胞壁の相と内この空気相の界面において透過・反射する。細胞壁の屈折率を 1.6 とし、光が材料に対して垂直に入射し、吸収が無いと仮定した場合、各界面で、入射光の約 95% が透過し、残りの約 5% が反射する。界面の数を n とすると、材料の透過率 (T) は、 $T=0.95^n$ で表すことができ、また、反射率は各界面での反射の積算で表すことができる。半径方向の界面の数を、細胞の直径を $30\ \mu\text{m}$ と仮定することで、大まかに決定することができる。このモデルによって、スギ半径方向の可視光長波長域での透過、反射率ともうまく説明可能であった。この波長域では、細胞壁による吸収が少なく、材料内での反射界面の存在が、材料の透過・反射率にとって重要といえる。一方で、可視光短波長域ではこのモデルが合わなかった。これは、この波長域の光が細胞壁構成成分に吸収されているためと考えられる。このように、透過・反射に及ぼす組織の影響には、波長依存性がある。なお、光の吸収は細胞壁内を透過する光路の長さ依存すると考えられ、材料内部での反射と吸収を案分する方法、例えば単純に密度による規格化などでは、吸収量を説明できない。このことが、明度や色が材料密度によって決定できなかった理由だろう。したがって、その予測のためには、細胞壁内を通過する光路長を考慮に入れたモデルが必要である。さらに、上述の報告者のモデルは、細胞壁に対して垂直に光が入射することを前提としているため、木口面試料などではモデルが機能しない。以上から、異方性や年輪・各種組織構造を考慮した可視光光路モデルの作成が求められる。

3. 研究の方法

以上の目的を鑑み、本研究では、木材の組織構造での光拡散を考慮に入れた、木材の色・明度を予測する可視光光路モデルの作成を目指す。より詳細には、X線 CT などの観察により組織構造を特定した種々の試料に対して、組織内での光路モデルの作成を行い、各種分光光度計により得られた透過・反射率に適用・比較し、モデルを洗練させていく。

繊維方向に対する角度の影響を加味した木材試料の作製とその光透過率と反射率の測定：既往のモデルでは、木口面試料で逸脱が見られた。これは、既往のモデルが、細胞壁に対して垂直に入射した場合を仮定して作られたからと考えられる。斜入射した場合、その入射角に応じて、

界面における反射・透過率は変化する。本項目では、幾つかの特徴的な組織を持つ樹種に対して、5段階以上に木理を傾斜させ、かつ、種々の厚さの試料を作製し、その透過率および反射率を測定し、モデル作成につなげる。さらに、上述のモデルを利用し、塗装など材料の内部構造が変化した場合の色変化についても考察する。

4. 研究成果

4-1. 成果概要：

繊維傾斜が、可視光の全透過率、全反射率に及ぼす影響として、中・長波長領域では、吸収の影響が少なく、細胞壁厚さおよび繊維傾斜の増加とともに、全透過率は減少し、全反射率は増加する、構造の影響が認められた。そこで、細胞を角筒形状とした単純構造を仮定し、可視光の全光透過率および反射率の測定に関して、木材の繊維方向と可視光の入射方向からなす角が影響することを示し、その後、細胞構造内の光路を考慮したモデルを作成し、繊維角と光特性の関係を算出し、実験結果と比較した。初めに検討したモデルについては、最大で20%程度の誤差が生じており、モデルのいくつかの前提条件の問題が疑われた。それらの前提条件のひとつとして、材料内の各反射界面で生じる透過・反射の内、大きい方のみを選択していた。この部分を修正するため、可能な限り考えうる光路をモデルに入れ、積算する手法を用いた。界面数が大きくなるほど計算量が増大するため、ある程度の閾値を用いて計算した。このモデルによる光路の考察から、各界面における透過率と反射率は繊維傾斜の影響を強く受け、また、入射する場所によっても光路が著しく異なることが導かれた。また、本モデルによる数値解析結果と実験値は良い一致が見られた。また、上記検討において、自由水や塗料が内腔へ浸透した部位で界面構成が変わることが推定された。そこで、その浸透の程度を定量化するとともに、光学特性のモデル化を行い、測定結果との比較を行って、内部の組織構造が木材の見えにどの程度影響しているのか検討した。その結果、塗料や水が内腔部に浸透するほど、全透過率は上がり、全反射率は下がる結果が得られた。

4-2. 繊維傾斜について：

図2に、サンプル厚さと全透過率の関係を示したグラフを示す。どのサンプル厚さであっても、が大きくなるほど全透過率が下がり、全反射率が上がっていることが分かる。また、どの繊維傾斜角でも、サンプル厚さが厚くなるほど、全透過率の値は下がり、全反射率の値は上がっていることが分かる。

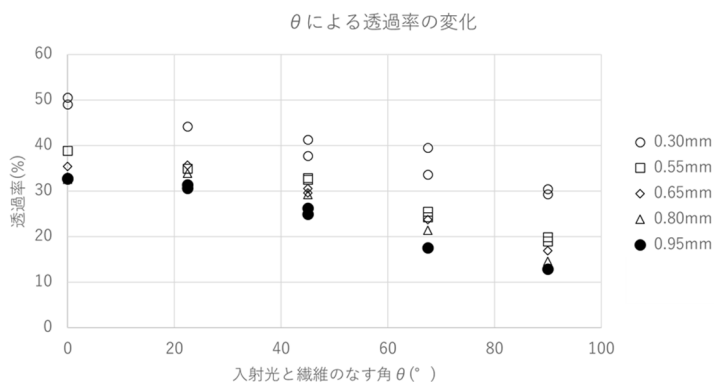


図2 種々の厚さのサンプルの と透過率の関係

4-3. 木材層内の光透過のモデル

上述の結果を説明するモデルについて考える。今回のモデルにおいては、反射界面の数を幾何学的に求めるが、その際の計算を複雑にしないために、細胞壁仮道管を四角筒と仮定した。また、四角筒の大きさは、細胞壁仮道管の半径方向(以下 R 方向とする)を、早材は 40 μm、晩材は 10 μm、接線方向(以下 T 方向)を、早材・晩材ともに 30 μm、繊維方向(以下 L 方向)を 4mm、細胞壁厚さを、早材 2 μm、晩材 3.5 μm と仮定した。また、実験によって計測したサンプルの早材率を 0.964、晩材率を 0.036、以下の式 1 によって求めたサンプル表面の早材の細胞壁率を 0.22、内腔率を 0.78、晩材の細胞壁率を 0.77、内腔率を 0.23 とする。

$$Cr = \frac{2drtc + 2dttc - 4(tc^2)}{drdt}$$

この時、Cr は 1 細胞の細胞壁率、dr は細胞の半径方向の長さ、tc は細胞壁の厚さ、dt は細胞の接線方向の長さである。

図5は、細胞壁仮道管を、半径方向の細胞壁(以下 R 壁)で切った場合の、縦断面図である。サンプルに入射した光は、図のように、内腔部を一度も通ることなく細胞壁仮道管と一度目の をな

す光 a 光、内腔部から細胞壁仮道管と一度目の をなす b 光、細胞壁仮道管に一度も光が当たらない c 光の 3 つにわけることができる。c 光は、今回の光透過モデルにおいて、繊維傾斜が生じた時点で存在しなくなるため考慮しなかった。

モデルの考え方

細胞壁仮道管を四角筒と仮定した時の縦断面図

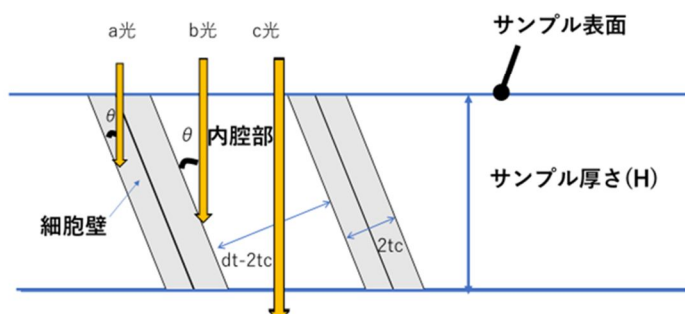


図3 仮道管への入射光位置によるモデル縦断面図

また、一般に、光には偏光があり、電界が光の入射面に平行(parallel)に振動する波と、電界が光の入射面に対して垂直(senkrecht)に振動する波に分けられる。それぞれ p 波と s 波と呼ばれる。p 波と s 波それぞれが、屈折率 n_1 の媒質 1 から屈折率 n_2 の媒質に斜めに入射したときの 1 界面あたりのエネルギー反射率 R および透過率 T の式は以下の通りである。

$$\eta_{js} = n_j \cos \phi_j$$

$$\eta_{jp} = \frac{n_j}{\cos \phi_j}$$

ただし $j=1,2$ 、 $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$ 以下、導出は省略。

$$R = |\rho|^2 = \left[\frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \right]^2$$

$$T = \frac{\eta_2}{\eta_1} |\gamma|^2 = \frac{4\eta_1 \eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2}$$

細胞壁の屈折率を 1.6、空気の屈折率を 1.0 と仮定して計算した。その結果、 8° の時は反射が優位であり、 $>8^\circ$ の時は透過が優位であることが確認できた。界面数を求める際、反射が優位である場合と透過が優位である場合では幾何学的な考え方が異なることがわかった。

4-3. 内腔内容物と可視光光学特性について：

X 線 CT による、塗料 0.1g を塗布した柁目面の縦断面組織画像結果について考察した。塗布面に、塗料の層を目視により確認できるものの、細胞内腔に塗料を示す輝度の部分は確認できなかった。塗布量 0.05g でも同様に細胞内腔に塗料の存在が確認されなかったことから、柁目面では塗料が内部に浸透していないと考えられる。図 4 a~f に、種々の量の塗料を塗布した木口面の組織画像をそれぞれ示す。それぞれ、塗布量 0.05 g (a,d), 0.10 g (b,e), 0.20 g (c,f)であり、a~c は、塗布面から 200 μm (以下、 f_{200})、d~f は塗布面から 800 μm (以下、 f_{800})の横断面図である。細胞内腔を目視で確認した結果、塗料を示す輝度の部分が確認できることから、木口面では塗料が材料内部に浸透していることが分かった。内腔への塗料の浸透を評価するために、図 5 に、それぞれの木口面横断面図の、内腔断面積に対する塗料の部分の割合(以下 A 比)と塗料の塗布量の関

係を示す。塗布量が増加することによって、 f_{200} 、 f_{800} 共に A 比の値が増加していることから、各画像の面積における細胞壁断面積の比率が等しく、かつ、塗料が細胞壁を膨潤しないとそれぞれ仮定すると、塗布量が増加することによって、細胞内腔に塗料が充填する細胞数が増加し、かつ、深さ方向への塗料の浸透が増加することがわかった。モデルより、これらの結果は、空気/細胞壁という界面から亜麻仁油/細胞壁という界面に変化したことにより、1 界面あたりの透過率が増加し、細胞壁に入射する光のエネルギーが増加したことによることが明らかとなった。

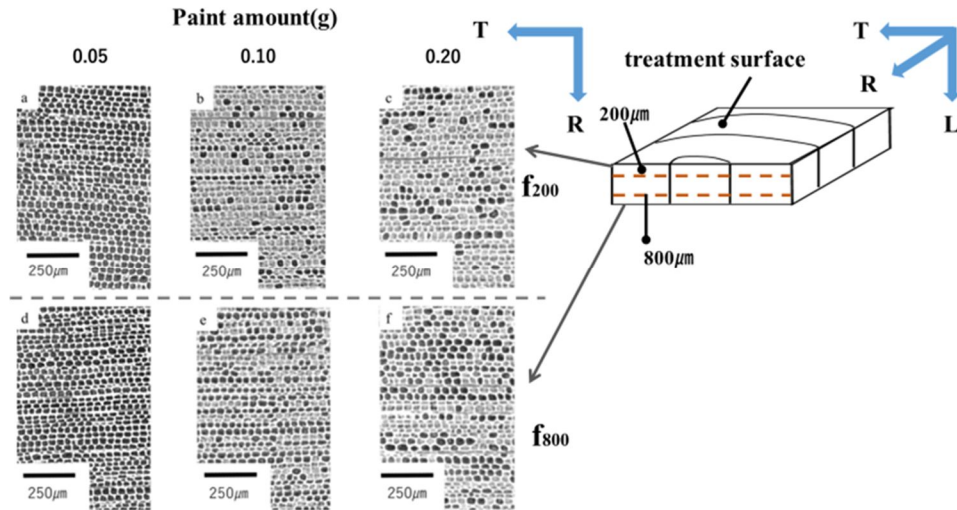


図4 X線CTによる木口面サンプルの横断面図の観察。a～fは内腔の白い部分が塗料で、 f_{200} はサンプル塗布面から $200\mu\text{m}$ の地点での断面図、 f_{800} はサンプル塗布面から $800\mu\text{m}$ の地点での断面図

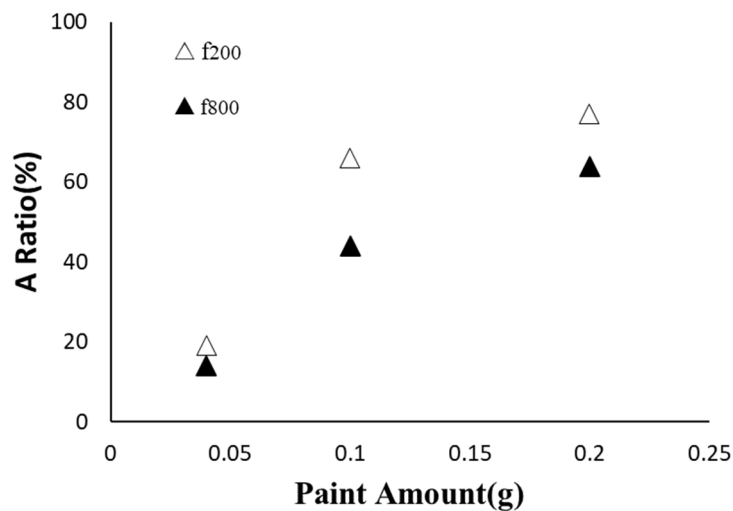


図5 A比と塗料量の関係。A比は、木口面サンプルの f_{200} 、 f_{800} 断面の内腔断面積に対する塗料部分の割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohshima Kazushi, Sugimoto Hiroyuki, Sugimori Masatoshi, Sawada Emika	4. 巻 46
2. 論文標題 Effect of the internal structure on color changes in wood by painting transparent	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Color Research & Application	6. 最初と最後の頁 645 ~ 652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/col.22649	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 杉元 宏行	4. 巻 3
2. 論文標題 任意部位の光透過性を向上させた木材の製造	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ぶらすとす	6. 最初と最後の頁 268 ~ 271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32277/plastos.3.29_268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohshima Kazushi, Sugimoto Hiroyuki, Sugimori Masatoshi, Sawada Emika	4. 巻 66
2. 論文標題 Effect of Painting Treatment on Visible Light Reflection Considering Cellular Structure Inside Wood	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mokuzai Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 202 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2488/jwrs.66.202	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazushi Ohshima, Hiroyuki Sugimoto, Masatoshi Sugimori, Emika Sawada
2. 発表標題 Effect of painting treatment on color change considering cellular structure Inside of wood.
3. 学会等名 the International Colour Association (AIC) Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉元宏行、大嶋一史、杉森正敏、Joseph GRIL、Tancrede ALMERAS
2. 発表標題 繊維傾斜が可視光全透過率と全反射率に及ぼす影響
3. 学会等名 第71回 日本木材学会大会（2021年，東京）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉元宏行
2. 発表標題 湿潤状態における木質材料の誘電緩和挙動と木材組織構造の影響
3. 学会等名 第69回高分子討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉元宏行
2. 発表標題 フランスLMGCにおける木材・木質系材料の研究活動と日本の木材物理研究の今後について
3. 学会等名 日本材料学会 木質材料部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Sugimoto Kazushi OHSHIMA, Masatoshi SUGIMORI, Joseph GRIL
2. 発表標題 Effect of Grain Angle on Reflection and Transmission of Visible Light in Wood
3. 学会等名 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉元宏行、大嶋一史、杉森正敏、Joseph GRIL、Tancrede ALMERAS
2. 発表標題 繊維傾斜が可視光全透過率と全反射率に及ぼす影響
3. 学会等名 第70回 日本木材学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大嶋 一史、杉元 宏行、杉森 正敏、澤田 笑華
2. 発表標題 木材内部の細胞構造を考慮した可視光反射に及ぼす塗装の影響
3. 学会等名 第70回 日本木材学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	杉森 正敏 (SUGIMORI Masatoshi) (20196760)	愛媛大学・農学研究科・教授 (16301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------