

イメージング分光法による材色分布の特徴抽出[†]

田代智子* 仲村匡司**

Characterization of Colors Distributed on Lumber Surface by Imaging Spectroscopy

by

Tomoko TASHIRO* and Masashi NAKAMURA**

Warm color distributed on lumber surface is one of the most important visual characteristics of wood, and would affect aesthetics of various wood products. The objective of this study is to characterize the wooden colors quantitatively by imaging spectroscopy. Twelve different specimens of coated and uncoated fancy veneer overlaid plywood of six species were prepared. These surfaces were scanned by the imaging spectroscope system, and color values of metric lightness (L^*), chroma (C^*) and hue (H°) were measured in every pixel. Resolution of the image was approximately 0.20mm /pixel. Results were summarized as follows. (1) In comparison with the same species, the coated specimen became darker than the uncoated specimen, because spectral reflectance in the visible light of the coated was lower than the uncoated. And by the coating, decrement of the reflectance of dark spots in the surface, for example latewood, tended to be greater than light spots such as earlywood. (2) Histograms of L^* , C^* and H° were constructed by counting every pixel. By the coating, peak positions of L^* and C^* histograms shifted to lower (darker) and upper (more saturated) sides, respectively. (3) Multi-resolution contrast analysis (MRCA) was applied to images with the three color attributes, and revealed that the color difference, especially contrast of the lightness and the chroma, were enlarged by the coating.

Key words: Change in appearance, Imaging spectroscopy, Multi-resolution contrast analysis, Visible light, Wooden color

1 緒 言

木材表面には、暖色に分類される色彩、千差万別の木目パターン、まろやかな光沢など、生物由来の材料に特有の様々な外観の特徴が現れている。これらは、しばしば建材や家具など様々な木製品の意匠を決定づける要因となり、見た目の印象に大きく影響する。材面の特徴と印象の関係について、例えばBroman¹⁾やNordvikら²⁾は、材面のどのような特徴が製品に対する「好み (preference)」につながるのかについて、有節材や木質フローリングなどを対象に調査を行っている。ただし、欧米で行われているこれらの類例研究では、その多くが材面の特徴を定性的に記述するに留まっており、マーケティング・リサーチに重点が置かれている。³⁾

材面の特徴を数値として客観的に表すために従来からよく行われてきたのが、測色計を用いた材色の測定である。材面に熱処理や紫外線照射処理などを施したときの色変化に関する最近の報告^{4)~7)}においても、従来どおり、測色計による直径数 mm ~ 数 cm のスポット測定が頻用されている。さらに、色彩値の表現には $L^*a^*b^*$ 表色系が多用され、各種処理の効果をメトリック色差 ΔE^* や、赤みの指標としての a^* 値および黄色みの指標としての b^* 値の増減で評価する場合が多い。

一方、人が材色の良し悪しなどの意匠性を評価する場合、測色計のようにある 1 点の色情報に基づくのではな

く、材面の 2 次元的な色彩の分布を見て判断していると考えられる。しかし、スポット測定では、ある 1 点の色の変化を追うことはできても、色の分布を捉えることは難しい。そこで本研究では、材色を面的に測定することにより、材色分布の特徴を定量的に評価することを試みた。その際、人の色知覚が明度、彩度、色相の三属性に依存していることを考慮し、 $L^*a^*b^*$ 表色系から導出される明度 (L^* 値)、彩度 (C^* 値)、色相 (H° および H^* 値) で色彩値を表現した。

2 実験方法

2・1 試料

Table 1 に示す 6 樹種の化粧合板を後述の画像入力に供した。これらの化粧合板は、家具や建装材などとして多用されていることを目安に、針葉樹材および広葉樹材 (環孔材、散孔材) から選択された。また、筆者らが既報⁸⁾ で用いたものも一部含んでいる。樹種による材色分布の相違や、透明塗装による材色の変化を調べるために、各樹種について、表面が無塗装のものとアミノアルキド樹脂による透明塗装仕上げのものを用意した。この塗料に着色剤やステインが含まれていたかは不明だが、同一樹種では塗装の有無による色相角の差が小さく (Table 1, ただしローズウッドは無彩色に近く、実際の色相の変化は小さい)、仮に着色剤が含まれていたとしても、その影響はわずかと考えられる。化粧用の突き板は、樹種ごと

[†] 原稿受理 平成 24 年 7 月 31 日 Received July 31, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

* 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Graduate School of Agr., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

** 正 会 員 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Div. of Forest and Biomaterials Sci., Graduate School of Agr., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

Table 1 Colorimetric properties of specimens.

Specimen name	Scientific name	No.	Surface finish	Color					Standard deviation			Skewness		
				L^*	a^*	b^*	C^*	H°	L^*	C^*	H°	L^*	C^*	H°
Asada (Japanese hop hornbeam)	<i>Ostrya japonica</i>	1	Uncoated	57.20	12.76	23.71	26.93	61.71	1.60	0.89	1.25	0.23	-0.08	0.08
		2	Clear coated	48.57	18.07	30.87	35.78	59.65	1.95	1.45	1.41	-0.19	-0.28	0.22
Beihi (Lawson cypress)	<i>Cupressus lawsoniana</i>	3	Uncoated	72.89	2.90	23.82	24.00	83.07	0.99	1.84	1.83	-0.83	0.51	-0.17
		4	Clear coated	69.65	3.67	32.07	32.29	83.47	1.42	1.56	1.85	-0.09	0.36	-0.34
Tamo (Ash)	<i>Frazinus mandshurica</i>	5	Uncoated	70.04	5.86	22.60	23.37	75.47	1.96	1.81	2.72	-0.17	0.02	-0.05
		6	Clear coated	62.99	8.02	28.74	29.87	74.41	2.07	1.41	2.50	0.13	-0.11	0.25
Manggasinoro	<i>Shorea</i> spp.	7	Uncoated	70.41	5.17	25.58	26.12	78.58	1.77	1.54	1.94	-0.76	0.26	-0.16
		8	Clear coated	65.02	6.44	31.99	32.66	78.61	1.87	1.61	2.23	-0.20	0.27	0.08
Beimatsu (Douglas fir)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	9	Uncoated	70.98	7.28	30.78	31.69	76.69	1.83	1.52	3.33	-0.44	0.43	-0.12
		10	Clear coated	66.64	9.09	39.87	40.96	77.16	1.87	2.80	3.27	-0.58	0.04	-0.29
Rosewood	<i>Dalbergia latifolia</i>	11	Uncoated	39.00	9.88	12.98	16.36	52.73	3.09	2.29	4.36	-0.12	0.17	-0.34
		12	Clear coated	20.73	12.17	11.92	17.11	44.41	3.71	3.60	5.98	0.42	0.15	1.22

Note: Color values were measured with imaging spectrometer and presented based on CIELab color system.

に同一フリッチから連続してスライスされており、無塗装材と塗装材の木目模様はほぼ同一とみなせた。Fig. 1に例として3樹種の化粧合板の無塗装材（上段）および塗装材試料（下段）の様子を示す。この図において、各画像の左上の数字はTable 1の試料番号に対応している。試料の寸法は約540mm × 140mm × 6mmで、表面の突き板の厚さは約0.3mmであった。

2・2 試料面の画像入力

2・2・1 イメージング分光システム 本研究では、材面の色彩測定にイメージング分光システム（JFEテクノロジーリサーチ、ImSpector V8E）を使用した（Fig. 2）。この装置は一種のラインスキャナである。試料面を捉えるレンズとモノクロ CCD カメラの間に、スリットとプリズム・グレーティング・プリズム（PGP）が組み込まれた鏡筒が設置されている。試料は1自由度の可動テーブルに載せられて、レンズの直下を一定速度で移動する。このとき、レンズが捉えた試料面上の線状エリアからの反射光をスリットが平面光として通過させ、これをPGPが分光し、モノクロカメラのCCDセンサの上下方向に展開する。CCDセンサの左右方向は線状エリアを構成する各点の位置に、上下方向は分光された光の波長（380～780nmの

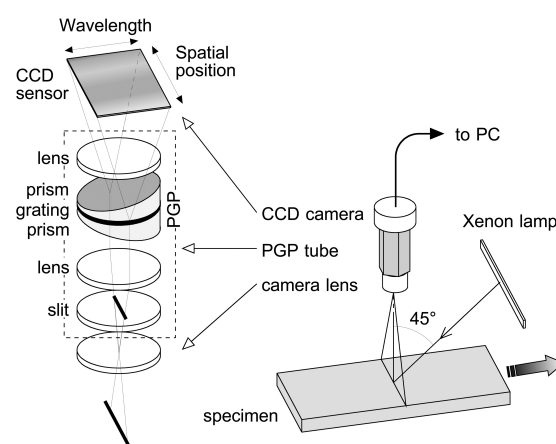


Fig. 2 Schematic diagram of color measurement using imaging spectrometer. Reflected light from a line area on a specimen is dispersed into spectrum within the visible light by PGP. The spectrum was projected on a CCD sensor and a spectroscopic image corresponding to the line area was captured.

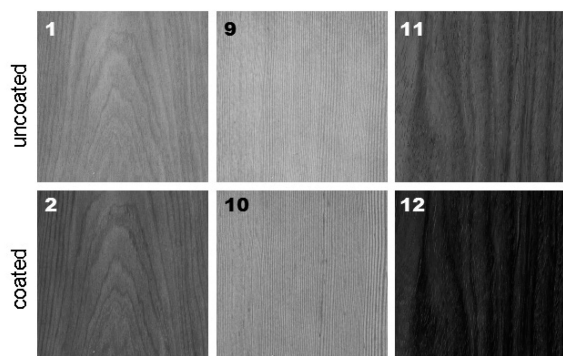


Fig. 1 Examples of specimen images (100mm × 100mm). Figures at the upper left of each image are specimen numbers shown in Table 1.

可視光域）に対応しており、任意の線状エリアの分光スペクトルが画像として得られる。1ラインずつ CCD カメラに画像として捉えられた分光スペクトルは、システムを制御するコンピュータに蓄積される。こうして試料面全域について1画素ごとに、可視光域の分光スペクトルが得られる。画素の大きさは撮影距離やレンズの画角を操作することにより任意に変更できる。このようにイメージング分光システムは、直径数 mm ～数 cm のスポット測定を行う従来の分光測色計よりも細かい領域の測色も、面的な広範囲の測色も、同時に行える。

本研究と同様の直進光学系を用いたイメージング分光法を木材に適用した報告として、Nyström らによるあて材の検出⁹⁾があげられる。また、Butler ら¹⁰⁾や Hagman¹¹⁾も、同様の分光法によって材面の欠点検出を試みた。ただし、これらの先行研究はいずれも非破壊検査を目的としており、材色やその分布に着目していない。イメージング分光法によって1画素ごとに可視光域の分光スペクトル

ルが得られるので, 本研究ではここから XYZ 表色系や $L^*a^*b^*$ 表色系など, 任意の表色系に従う色彩値を画素単位で算出し, 後述の画像解析に供した. なお, 波長ごとの分光強度は, システムの校正に用いた標準白色板の反射強度に対する比, すなわち分光反射率として表される.

2・2・2 画像の取得 暗箱内に設置されたイメージング分光器を使用して, 試料面の約 100mm × 100mm の範囲を解像度約 0.20mm/pixel で走査した. ここでは各画素の分光強度を 400 ~ 750nm の可視光域において 5nm おきに取得した. 木理が可動テーブルの移動方向 (副走査方向) と平行になるように試料を設置したため, 照明の入射方向は繊維方向と平行となった. 以上の操作を, 1 試料につき 4 か所ずつ場所を変えて行った.

2・3 画像解析

2・3・1 分光スペクトルの取得 上述のように, 本研究では 0.2mm 角の微小領域の分光スペクトルが得られる. この大きさは, 材面に現れている木理, 例えば, 針葉樹材の晩材部や環孔材の道管開孔部などよりも小さいため, それらの特徴部とそれ以外の領域とを分けて測色できる. この利点を活かし, ここでは, 各試料の暗部 (晩材部や縞杣など) と明部 (早材部など) にそれぞれ 5 か所ずつ, 3 × 3pixel (約 0.6mm 角) の矩形領域を目視で設定し, 明部と暗部それぞれの平均分光スペクトルを求めた. これらの計算にはイメージング分光システム付属のソフトウェアを用いた.

2・3・2 色属性別ヒストグラムの構成 画素単位で取得された分光スペクトルより, JIS Z 8701 に従って, 測色の基本となる三刺激値 XYZ を 1 画素ずつ求め, さらに, JIS Z 8729 に基づいて $L^*a^*b^*$ 値を求めた. 本研究ではこの $L^*a^*b^*$ 表色系の色彩値を用いて, 各画素のメトリック明度 L^* , メトリック彩度 C^* およびメトリック色相角 H^* を算出し, 色属性ごとにヒストグラムを作成して, 色彩分布のヒストグラム解析に供した. ヒストグラムの作成および解析には自作の Fortran プログラムを用いた.

2・3・3 コントラストスペクトルの導出 各画像の色彩値 (L^* , a^* , b^* , C^*) を用いて, 色属性別に多重解像度コントラスト解析 (Multi-resolution contrast analysis; MRCA)^{8), 12), 13)}を行った. MRCA は Nakamura らによって考案された画像解析法である. この手法では, 画像 M 内の領域 m に大きさ k の平滑化フィルタをかけて画像をモザイク化する ($M \geq m \geq k$). あるモザイクブロックと, それを取り囲む 8 つの近傍ブロックとの色彩値の差 (これを局所コントラストと呼ぶ) を領域 m 内の全モザイクブロックについて求めていく. 領域 m を画像 M 内で 1 画素ずつずらししていくことにより, 画像全域にわたって局所コントラスト値を求めることができる. その結果, 任意のフィルタサイズ k において多数の局所コントラスト値が得られ, しかもそれらの値は分布を有する. その分布の上側 10 パーセント点をフィルタサイズ k でのコントラスト値とした. 以上の操作をさまざまなフィルタサイズについて行うことにより, フィルタサイズに対応する一連のコントラスト値, すなわちコントラストスペクトル

ルが得られる. コントラストスペクトルは, ある大きさの特徴の目立ちぐあいを表す特性曲線である. 本研究では, 平滑化フィルタの大きさを 1 ~ 128pixel, すなわち約 0.2 ~ 25mm に設定し, 色差 ΔE^* , 明度差 ΔL^* , 彩度差 ΔC^* , そして色相差 ΔH^* に相当するコントラストスペクトルをそれぞれ求めた. これらの $L^*a^*b^*$ 表色系で表されたコントラスト値はそれぞれ以下のように定式化される.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

$$\Delta L^* = |L_T^* - L_N^*|$$

$$\Delta C^* = |C_T^* - C_N^*|$$

$$\Delta H^* = \sqrt{\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}}$$

ここで,

$$\Delta a^* = |a_T^* - a_N^*|$$

$$\Delta b^* = |b_T^* - b_N^*|$$

$$C_T^* = \sqrt{a_T^{*2} + b_T^{*2}}$$

$$C_N^* = \sqrt{a_N^{*2} + b_N^{*2}}$$

であり, 添字 T はモザイク化された画像中の注目ブロックを, N は T の近傍ブロックを表す. 一連の計算には自作の Fortran プログラムを使用した.

3 結果および考察

3・1 分光スペクトル解析

材面全体の分光スペクトル, および, 2・3・1 項で材面に設定した約 0.6mm 角の明部と暗部それぞれ 5 か所の平均分光スペクトルを, アサダを例に Figs. 3a, 3b に示す. Fig. 3a に示されているように, 一般的な傾向として, 木材色の分光反射率は, 短波長側で小さく, 赤色寄りの長波長側で大きくなる. また, 塗装材の分光反射率は可視光域全体にわたって無塗装材よりも小さい. このことは透明塗料によって材面がいわゆる「濡れ色」の暗色になったことに対応する. 材面の明部と暗部を比較した Fig. 3b では, 当然のことながら明部の方が暗部よりも可視光全域にわたって反射率が大きい.

Fig. 3c には, 無塗装材に対する塗装材の分光反射率の比を, 3 樹種の明部と暗部について示している. いずれの樹種においても塗装による分光反射率の低下は短波長側でより顕著であり, このことが濡れ色による明度低下の主要因であると考えられる. 明部と暗部で比較すると, ペイマツでは 400 ~ 600nm において暗部の反射率が明部よりも特徴的に低下している. また, ローズウッドではほぼ可視光全域において暗部の反射率は明部よりも小さい. すなわち, これらの 2 樹種においては, 塗装によって材面が全体的に暗くなったなかで, 暗部がより暗くなったことになる. 他の 4 樹種においては, Fig. 3c に示したアサダと同様に, 無塗装材と塗装材の分光反射率の比に明部と暗部で大きな差異は認められなかった.

3・2 ヒストグラム解析

無塗装材と塗装材におけるメトリック明度 L^* , メトリック彩度 C^* , およびメトリック色相角 H^* のヒストグラムの典型例として, ペイマツの場合を Fig. 4 に示す. また, Table 1 にヒストグラムの形状パラメータに相当する平均値, 標準偏差, 歪度を色属性別に示す. Table 1 の色彩値は, 1 試料につき 4 か所ずつ設定した測定範囲

(それぞれ100mm × 100mm)の平均値であり、ヒストグラムのピーク(最頻値)の位置とほぼ等しい。したがって、無塗装材および塗装材のヒストグラムにおいて両者のピーク位置が異なっていることは、塗装によって色彩の平均値が変化したことを意味する。

Fig. 4において、明度ヒストグラムは塗装によって低明度側にシフトしている。Table 1の明度値からも明らかのように、このことはいずれの樹種においても同様であり、透明塗装によって材面が全体的に暗くなったことに対応する。また、明度の標準偏差が塗装材の方が無塗装材よりも大きい傾向にあり、当然のことながら明度ヒストグラムも塗装材の方が無塗装材よりも分布の裾野が広い(ただし、Fig. 4のベイマツにおける差異は今回の

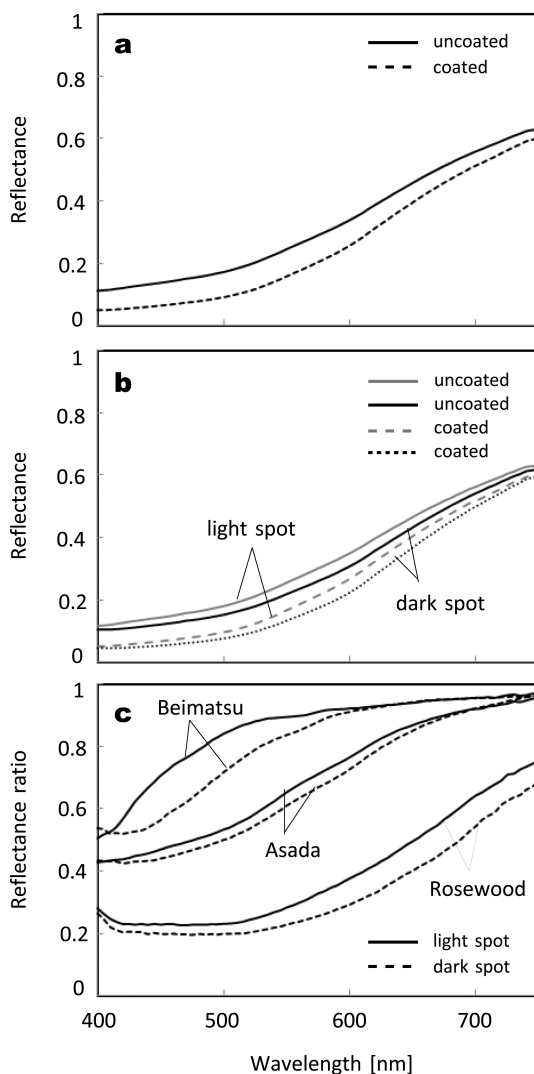


Fig. 3 Spectral reflectance curves. (a) Whole area of specimens No. 1 (uncoated, solid line) and No. 2 (coated, broken line). (b) Mean of light spots in specimens No. 1 (gray and solid line) and No. 2 (gray and broken line), and of dark spots in specimens No. 1 (black and solid line) and No. 2 (black and broken line). (c) Reflectance ratio between uncoated and coated spots in specimens No. 1, 2, 9, 10, 11 and 12. Specimen numbers were shown in Table 1.

Beimatsu

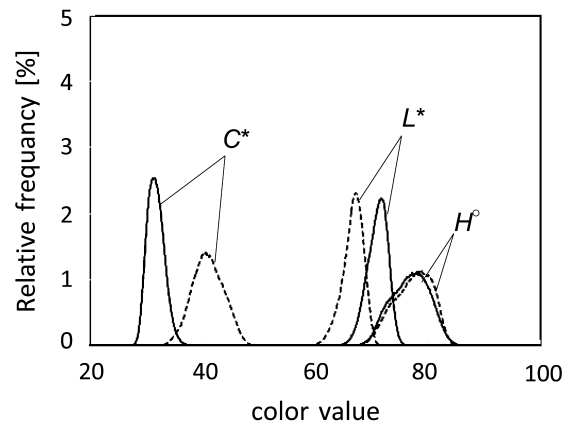


Fig. 4 Typical example of histograms of lightness (L^*), chroma (C^*) and hue angle (H°) for uncoated (specimen No. 9, solid lines) and coated (specimen No. 10, broken lines) specimens.

6 樹種の中で最も小さい)。このことは、塗装によって材面全体の明度コントラストが増大したことを示している。

Fig. 4において、彩度ヒストグラムは塗装によって高彩度側にシフトするとともに、分布が広がっている。Table 1によれば、塗装によって彩度が増すことはいずれの樹種においても同様であるが、ヒストグラムが広がるか狭くなるか(標準偏差が大きくなるか小さくなるか)は樹種によって異なる。ただし、歪度はいずれの樹種においても減少しており、塗装によってヒストグラムの高彩度側の裾野が短くなるか、低彩度側の裾野が伸びたものと考えられる。

一方、無塗装材と塗装材における色相角の差異はいずれの樹種においてもわずかであり(Table 1), Fig. 4のベイマツの2つの色相角ヒストグラムはほぼ重なっている。今回の塗料は色相の変化をほとんど生じさせなかったといえる。

3・3 多重解像度コントラスト解析 (MRCA)

ヒストグラム解析において、塗装材では無塗装材に比べて材面の明度のレンジが広がり、コントラストが増大していることを指摘した。MRCAでは、どのくらいの大きさの特徴において明度差が大きくなったのかを具体的に示すことができる。Fig. 5はMRCAによって得られるコントラストスペクトルの例で、タモ、ローズウッド、ならびに、ベイマツにおける色差、明度差、彩度差、色相差のスペクトルを示す。なお、これらのスペクトルは1試料につき4か所ずつ設定した測定範囲の平均スペクトルである。色差スペクトルは、隣接するある大きさのブロック領域間の色差を表しており、明度、彩度、および、色相のコントラストスペクトルはその内訳に相当する。Fig. 5のローズウッドとベイマツの色差は無塗装材よりも塗装材の方が大きい。この傾向はタモを除く他の樹種でも同様であった。一方、タモは塗装によって無塗装材よりも色差がむしろ抑制された。

Fig. 5に示したローズウッドの色差スペクトルは、塗

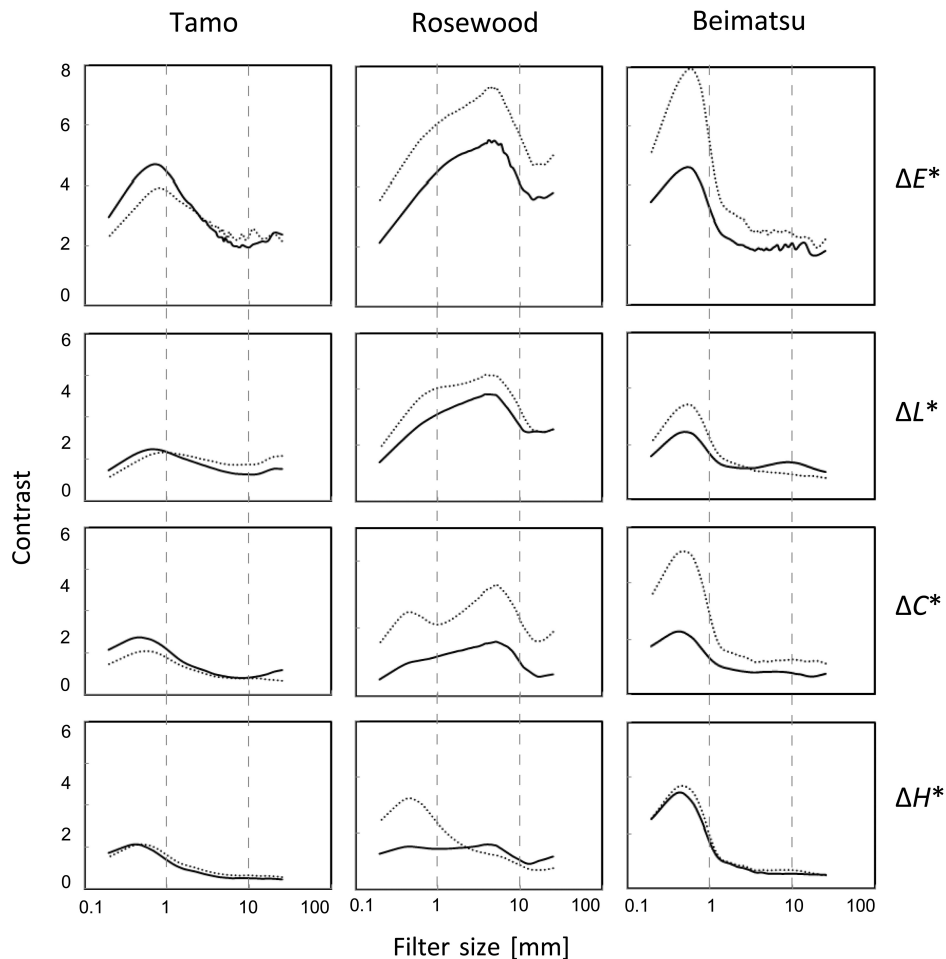


Fig. 5 Four kinds of contrast spectra (ΔE^* , ΔL^* , ΔC^* and ΔH^*) derived by multi-resolution contrast analysis. Uncoated specimens (No. 5, 9 and 11) and coated specimens (No. 6, 10 and 12) are distinguished by solid lines and dotted lines, respectively.

装によってスペクトルが上側に平行移動して色差が増しており、細かなテクスチャも、大柄な縞杢も、塗装によって目立つようになったことを示唆している。塗装による同様の色差スペクトルの変化はアサダにも認められた。ローズウッドの無塗装材の色差スペクトルの内訳を見ると、明度差の寄与が圧倒的に大きく、色相差の寄与は小さい。一方、塗装材の場合には、明度コントラストの概形は無塗装材のスペクトルが上側に平行移動したものであるのに対し、彩度コントラストはフィルタサイズ0.5mm付近に、無塗装材には見られなかったスペクトルのピークが現れている。また、フィルタサイズ5mm付近のピークも無塗装材に比べて明瞭になっている。前者は道管要素などテクスチャの彩度の変化に起因するピーク、後者は縞杢と周囲材との彩度差の増大に由来するピークと考えられる。さらに、色相コントラストにおいても、塗装材ではフィルタサイズ0.5mm付近に特異的なピークが現れており、細かな特徴の色相変化が際立っていることを示している。

一方、Fig. 5のベイマツの塗装材の色差スペクトルでは、無塗装材のスペクトルが上側に平行移動したという

よりも、フィルタサイズ0.6mm付近のピークレベルが特異的に大きくなっている。また、無塗装材および塗装材ともに、明度差、彩度差、色相差いずれのコントラストスペクトルにも、色差スペクトルと同様に、フィルタサイズ0.6mm付近にピークが現れている。この0.6mmという寸法はベイマツの晩材幅に対応していると考えられる。明度と彩度ではこのフィルタサイズにおいて塗装材のコントラストが増大しているのに対し、色相差は無塗装材と塗装材でほとんど差がない。

このように、材面を塗装することによるコントラストスペクトルの変化、言い換えると「見え」の変化は、明度、彩度、色相の色属性が一律に変化して生じるのではないことがMRCAによって示された。また、塗装によるコントラスト変化の大小には、樹種特有の木理が影響することも示唆された。特に、今回の塗料の場合、塗装による材面内の色差の増大には明度差だけでなく彩度差の寄与が大きかった。木材を塗装すると濡れ色になり、全体的に暗くなる反面、木目模様が明瞭になることが多い。このことには塗装による彩度コントラストの増大も影響していると考えられる。

4 結 言

本研究では、木材表面の色彩分布をイメージング分光法と画像解析によって定量的に評価することを試みた。得られた結果は今回使用した透明塗料の特性や、使用した6樹種の樹種特性に限定される可能性はあるものの、以下のような知見が得られた。すなわち、塗装によって材面全体の明度が低下する一方で彩度が増加すること、無垢材を塗装すると濡れ色になって材面の明度は下がるが木目模様が際立つ理由として、塗装によって材面内の色差が大きくなり、とりわけ明度および彩度コントラストが大きくなること、さらに、塗装によるコントラストの増加はベイマツやローズウッドで顕著であったが、これは晩材や縞杣などの暗い部分が明るい周囲よりも一層暗くなることに起因すること、などである。

このような定量的な解析が行えたのは、材面を画素単位で測色することにより、従来の直径数 mm ～数 cm のスポット計測では捉えられなかった面的な色彩分布の特徴を、明度、彩度、色相の色の三属性に応じて抽出したからである。本研究で用いた画像解析法は、塗装や熱処理など、表面加工によって様々に変化する木材の意匠性を客観的に評価するための指標を提供しうると考えらえる。画像特徴量と材面の見た目の印象との対応関係については、主観評価による検討が今後必要である。

最後に、実験結果のとりまとめに際しご助言いただいた中野隆人教授（京都大学大学院農学研究科）に、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) N. O. Broman, "Aesthetic properties in knotty wood surfaces and their connection with people's preferences", *Journal of Wood Science*, Vol.47, pp.192-198 (2001).
- 2) E. Nordvik, S. Schütte and N. O. Broman, "People's perceptions of the visual appearance of wood flooring : A kansei engineering approach", *Forest Products Journal*, Vol.59, No.11/12, pp.67-74 (2009).
- 3) M. Nakamura, "Appearance of wood and wooden interior", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.58, No.1, pp.1-10 (2012).
- 4) B. Esteves, A. V. Marques, I. Domingos and H. Pereira, "Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood", *Wood Science and Technology*, Vol.42, pp.369-384 (2008).
- 5) K. Mitsui, H. Takada, M. Sugiyama and R. Hasegawa, "Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color", *Holzforschung*, Vol.55, pp.601-605 (2001).
- 6) M. Matsuo, M. Yokoyama, K. Umemura, J. Gril, K. Yano and S. Kawai, "Color changes in wood during heating : kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method", *Applied Physics A*, Vol.99, pp.47-52 (2010).
- 7) M. Matsuo, M. Yokoyama, K. Umemura, J. Sugiyama, S. Kawai, J. Gril, S. Kubodera, T. Mitsutani, H. Ozaki, M. Sakamoto and M. Imamura, "Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment", *Holzforschung*, Vol.65, pp.361-368 (2011).
- 8) M. Nakamura, M. Matsuo and T. Nakano, "Determination of the change in appearance of lumber surfaces illuminated from various directions", *Holzforschung*, Vol.64, pp.251-257 (2010).
- 9) J. Nyström and O. Hagman, "Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies*", *Journal of Wood Science*, Vol.45, pp.30-37 (1999).
- 10) D. A. Butler, C. C. Brunner and J. W. Funck, "Wood-surface feature classification using extended-color information", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol.59, pp.475-482 (2001).
- 11) O. Hagman, "Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol.55, pp.377-382 (1997).
- 12) M. Nakamura, M. Masuda and K. Shinohara, "Multiresolutional image analysis of wood and other materials", *Journal of Wood Science*, Vol.45, pp.10-18 (1999).
- 13) M. Nakamura, Y. Miyake and T. Nakano, "Effect of image characteristics of edge-grain patterns on visual impressions", *Journal of Wood Science*, 10.1007/s10086-012-1284-4 (2012).