

# 木材の本物らしさに関わる画像特徴量

2016年1月

桂 重仁

(千葉大学審査学位論文)

# 木材の本物らしさに関わる画像特徴量

2016年1月

桂 重仁

# 目次

<b>第1章</b>	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	質感についての諸研究	2
1.3	木材の質感についての諸研究	4
1.4	天然木材と木目印刷の特徴	6
1.4.1	天然木材の構造的特徴	6
1.4.2	天然木材試料	7
1.4.3	木目印刷の特徴	10
1.4.4	木目印刷試料	10
1.5	論文の目的	13
1.6	論文の概要	13
<b>第2章</b>	実験1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響	14
2.1	実験の目的	14
2.2	木材試料の空間周波数分析	14
2.2.1	撮影環境	15
2.2.1.1	カメラキャリブレーション	16
2.2.2	木材試料	20
2.2.3	空間周波数分析	21
2.2.3.1	二次元離散フーリエ変換	21
2.2.3.2	木材試料の空間周波数特性	21
2.3	天然木材・木目印刷の識別実験	30
2.3.1	観察環境と木材試料	31
2.3.2	木材試料と呈示距離	31
2.3.3	評価方法と被験者	31
2.3.4	実験結果	33
2.4	考察	39
2.5	結論	49

<b>第3章</b>	実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響 .....	50
<b>3.1</b>	実験の目的 .....	50
<b>3.2</b>	木材試料の本物らしさ評価 .....	50
3.2.1	実験環境と木材試料 .....	50
3.2.2	評価方法と被験者 .....	51
3.2.3	評価結果 .....	52
<b>3.3</b>	木材試料の測色的分析 .....	53
3.3.1	CIELAB 色空間を用いた分析 .....	53
3.3.2	画像統計量 .....	54
3.3.3	画像統計量を用いた分析 .....	56
<b>3.4</b>	画像評価実験 .....	63
3.4.1	実験環境 .....	64
3.4.2	テスト画像 .....	64
3.4.3	評価方法 .....	66
3.4.4	実験結果 .....	67
3.4.5	考察 .....	71
<b>3.5</b>	総合考察 .....	72
<b>3.6</b>	結論 .....	74
<b>第4章</b>	論文全体の総合考察 .....	75
<b>第5章</b>	結論 .....	81
<b>5.1</b>	各章のまとめ .....	81
<b>5.2</b>	応用と今後の課題 .....	83
要旨	.....	85
参考文献	.....	86
研究業績	.....	90
謝辞	.....	92
付録	.....	94

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

- 質感
1. 材料の性質の違いから受ける感じ.
  2. その材料が本来もっている感じ. (広辞苑 第六版)

質感とは上記の意味のように、ある材質から視覚的、触覚的に得られる感じである。そのため、質感は物体の物理的特性と関連がある特徴であり、大抵の場合材質が異なれば質感も異なる。一言で質感といっても、私たちの身の回りには、実に多くの質感が溢れている。私たちは日常生活において、質感から様々な情報を得ている。例えば、光沢のないマットな表面を見たときにざらざらな表面であることを想起し、生鮮食品の新鮮さを目視によって判断することができる。このように、私たちは質感を知覚することで、その材質の性質や状態を認識することができる。そのため質感研究には、質感に着目し材質表面を解析する物理的側面と、質感知覚に着目し脳がどのように質感を認識するかを考える心理的側面の2つの考え方がある。

近年、質感は多くの研究者が注目する研究分野である。質感は上で述べたように、複合的な要素に関わる複雑な分野であり、従来の知見では説明できないことも多い。例えば、金属色である金色や銀色は、従来の測色計では黄色や灰色とあまり差のない結果になってしまう。これは、測色計が光沢を計測できていないためである。質感に関わる様々な事項が解明されれば、さらなる技術発展が望めることは想像に難くない。そのためにも、工学、心理物理学、脳神経科学といった分野の研究者が一丸となって研究を進めることは重要であるといえる。

質感研究の素材には、様々なものが考えられる。本論文では、木材を対象としている。木材は昔から家屋、家具や小物に使用される、非常に馴染みのある

## 第 1 章 序論

---

素材の 1 つである。自宅やオフィスにおいても、木目が見える製品が少なくとも 1 つはあるだろう。木材は、人間にとって、さらに我々日本人にとって好まれている素材である。また近年、コンピュータ・グラフィックス (CG) や建材では木目を表す場合がある。これらは、本物の木材を使用せずに木材らしさを表現する必要がある。建材の場合、高価格製品はより本物らしい質感であることを謳い文句にしており、本物に近い質感が求められているといえる。木質感が解明されることにより、効率的に木材らしさを表現することが可能になり、より質感のよい CG や製品ができると考えられる。また、木質感に関わる要素を解明することは、質感知覚の一端を解明することにほかならない。本論文においても、他研究から多くのヒントや着想を得ることによって木質感の解明に至っている。本論文で得られた知見も、必ずや他の質感研究に活かされると考えられる。

次節では、本論文におけるキーワードである質感と木材に関する諸研究を紹介する。

### 1.2 質感についての諸研究

質感研究を大別すると、材質表面の物理特性を詳細に調べる研究と、質感知覚に注目した研究がある。

材質表面の物理特性に注目した研究は、計測した物理特性、光学過程を再現することにより質感を再現するという考えである。物体の質感は、光がその物体表面に当たり、物体の表面構造により複雑に反射された光が視覚系に入り、脳によって認識される。この複雑な過程において、反射光には物体の質感情報が含まれているため、この光を正確に再現することができれば質感を再現することができる。Dana *et al.* は、質感を表現するために、物体表面の詳細な測定方法と計算方法を提案しモデル化した[1]。彼らは、モデルの有効性が高いことも示した。Yu *et al.* は、物体表面の光学的レンダリングに用いられる複数のパラメータ推定が必要な双方向反射率分布関数のパラメータ推定において、効率的な推定方法を示すとともに、実験によって提案方法の有効性も示した[2]。これらの研究に共通して言えることは、物体表面の見えを CG によって詳細に表

## 第 1 章 序論

---

現することが可能ではあるが、非常に計算が複雑である。光線情報から質感を、つまり物体表面の情報を読み解くためには、非常に複雑な計算を行う必要がある。しかし、人間は実物のみならず画像からも瞬時に質感を認識できることから、複雑な計算ではなくより単純な方法によって質感を認識している可能性がある。

質感知覚に注目した研究は、脳は比較的簡単な情報によって質感を認識しているのではないかという考えを元にしてしている。Motoyoshi *et al.*は、画像統計量である歪度と光沢感の関係について調べた[3]。彼らは、画像実験により物体表面がもつ輝度ヒストグラムの歪度を変化させることで、物体の光沢感が大きく変化することを発見し、輝度ヒストグラムの歪度が光沢知覚のメカニズムに寄与している可能性を示した。Wada *et al.*は、キャベツの葉の鮮度知覚について調べた[4]。彼らは、時間経過に伴い新鮮さが変化していくキャベツの葉を複数撮影した。撮影した画像のうち最も新鮮な画像の輝度ヒストグラムを、より時間の経過した画像の輝度ヒストグラムにマッチングする手法により輝度ヒストグラムのみが異なる画像を複数作成した。撮影画像と変調画像に対し鮮度評価を行った結果、撮影画像では時間経過に伴う鮮度低下を正しく評価できていたこと、変調画像ではマッチング元の画像の時間経過に従い鮮度を低く評価することが示された。このことから、輝度ヒストグラムが鮮度知覚に影響していることが示唆された。しかし、撮影画像と変調画像の鮮度評価には一部乖離が見られたことから、時間経過に伴う空間的なパターンの変化も影響していることが示唆された。Arce-Lopera *et al.*は、キャベツの葉の鮮度知覚についてさらに詳しく調べた[5]。Wada *et al.*と同様の手法でキャベツの葉を撮影し、そのカラー画像と輝度情報のみを用いたグレースケール画像の 2 種類の画像に対し新鮮さの評価を行った。結果は、2 種類の画像における新鮮さの評価値は同程度であり、どちらも正確に新鮮さを評価できていた。また、輝度ヒストグラムを変調した画像を用いた場合も、鮮度知覚は輝度ヒストグラムの変化に関連があることが示唆された。これらの結果は、時間経過に伴う空間的なパターンの変化を考慮するためのバンドパスフィルタと輝度ヒストグラムの画像統計量を用いたモデルによって説明できることが示唆された。Arce-Lopera *et al.*は、イチゴに対しても鮮度評価を行った[6]。キャベツの葉と同様に、時間経過に伴い新鮮さが変化していくイチゴを撮影し、そのカラー画像を用いて新鮮さを評価した。結果は、イチゴの新鮮さを正しく評価できた。このとき、新鮮さの評価値は輝

## 第 1 章 序論

---

度と色情報に相関が見られた。新鮮さに対する輝度の影響を明らかにするために、新鮮さの評価値が高かった画像の輝度ヒストグラムを、評価値の低い画像の輝度ヒストグラムにマッチングし新鮮さを変化させたカラー画像と、そのグレースケール画像に対し新鮮さの評価を行った。その結果、評価値と輝度に相関があったことから、色情報から独立した輝度情報が鮮度評価において重要であることを示した。Arce-Lopera *et al.*は、さらに日本人女性の顔の肌の知覚的年齢と画像統計量との関連を調べた [7]。結果は、 $L^*$ 、 $b^*$ の平均値が実年齢と知覚的年齢の両方に相関が見られたことから、日本人女性の肌は加齢に伴いより暗く黄色みがかかる変化が起こり、これらの変化に対して敏感であることを示した。また、 $L^*$ の標準偏差は、高齢の肌で大きく若齢の肌で小さいことがわかった。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 全ての歪度は知覚的年齢に対して高い相関が見られた。

以上のように、複数の研究により、画像から得られる情報を用いることで、質感を知覚できることが示されている。さらに、これらの研究では、質感と関連のある画像パラメータを操作することで質感知覚が変化することも示している。このとき、質感に対して輝度情報が非常に重要な要素であることが示唆されているが、色情報の影響は不明確である。

### 1.3 木材の質感についての諸研究

木材は、インテリアなど生活空間で多用される素材であるため、人間に与える影響、好ましさや印象などが調べられている。生理的影響を示した研究として、Sakuragawa *et al.*は、ヒノキの壁と白い鋼板の壁を観察した場合の印象と血圧の関係を調べた[8]。結果は、ヒノキの壁を観察したときに好きと評価した被験者群の血圧は有意に低下し、嫌いと評価した被験者群では有意な増加は見られなかった。しかし、白い鋼板の壁を観察したときに嫌いと評価した被験者群では有意な血圧の上昇が見られた。Tsunetsugu *et al.*は、床や壁に使用する木材比率が異なる部屋内部を被験者に観察させた時の印象と脈拍、血圧、脳活動を測定した[9]。木材比率が 0%の場合、拡張期血圧は有意に低下したが自律神経活動の変化は小さかった。この原因として、自然な印象や安らかな印象の評価が低いことがあげられた。木材比率が 45%の場合、拡張期血圧の有意な減少

## 第1章 序論

---

と脈拍の有意な増加が観察された。この部屋は適度な木材量であったために、快適な印象と安らかな印象の評価が最も高かった。木材比率が90%の場合、収縮期血圧と拡張期血圧の有意な減少を引き起こしたが、木材比率が高すぎたために脳活動が減少し、観察後に脈拍増加を示していた。

木材の好ましさを調べた研究として、Jonssone *et al.*は、木材の好みに与える要因として、自然さ (naturalness)、木材らしさ (wood-likeness)、滑らかさ (smoothness)、生きた印象 (living impression)、価値 (value) であることを示した[10]。このとき、見た目が木材らしい材料であると好まれやすいことを示した。Høibø *et al.*は、デッキ材に使われる木材の性質と仕上げ方法が好みに与える影響を調べ、均質性が高いデッキ材が好まれることを示した[11]。このとき、均質性に与える要因として、木材の節やヒビ割れ、染色仕上げによる色汚れがあげられた。

印象に与える要因を調べた研究として、伊藤らは、アクセントカラーに着目した実験を行った[12]。アクセントカラーとは、配色においてアクセントとなる小面積の色のことで、周囲と対比するような色が用いられる。例えば、木材が多く利用されている内装はあたたかい印象となる場合が多いが、ここにアクセントカラーとなる青色の物体を配置した場合に、あたたかい印象を与えにくい可能性がある。彼らは、木質内装のあたたかい印象にアクセントカラーが及ぼす影響を調べた。木質内装の複数の画像の印象と画像の色情報から、アクセントカラーを考慮した木質内装のあたたかさを効果的に表す有効色相指標値を提案した。増田らは、木材の色に注目した、印象評価実験を行った[13]。彼らは、木目を印刷したパネルを用い、印象を表す言葉17種類と各パネルの明度、色相、彩度との関連を調べた。結果から、明度は、明るい、すっきりした、重厚な、深みのある、渋い、落ち着いた印象との相関があった。色相は、あたたかい、豪華な印象と相関があった。彩度は、派手な、渋い印象と相関があった。このように、各色情報と木材の印象との関連が明らかになった。

仲村らは、色彩だけではイメージしがたい、木材と自然石の「木らしさ」「石らしさ」や、木材の見た目の「かたさ」に影響する要因を調べた[14][15]。結果は、「木らしさ」や「石らしさ」といった印象に強く影響する要因は、色情報ではなくパターンであることがわかった。また、明度、局所的な光沢、コントラスト比から得られる回帰式により木材の「かたさ」のイメージを予測できることを示した。増田らは、木材の色とその色から想起されるような印象との関係を

## 第 1 章 序論

---

調べたが[13], 色から想起されないような「木らしさ」や「かたさ」といったイメージは, 木目パターンや明度情報と関連があることがわかった.

木目パターンに関する研究として, 仲村らは CG で作製した様々な柾目パターン画像における滑らかな明暗変化が, 自然さに与える影響を調べた[16]. 結果は, 自然な-不自然なイメージは, 仲村らが定義した局所コントラストに関連していることが示唆された.

以上のように, 木材に関して様々な研究が行われている. これらの研究から, 木材らしいものは好まれること, 色彩情報は主に美しい, 派手な, 上品なといった装飾的印象に影響していること, 木らしさ, かたさ, 自然さといった本質的印象は木目パターンや明度・輝度情報に影響を受けることがわかった.

### 1.4 天然木材と木目印刷の特徴

本項では, 天然木材と木目印刷の, 基本的な特徴を説明する

#### 1.4.1 天然木材の構造的特徴

天然木材の構造的特徴を紹介する.

##### ○辺材と心材

樹の幹の横断面の構造は, 外側から樹皮, 形成層, 木部, 髄となっている. さらに, 木部は辺材と心材に分けることができる. 辺材は, 樹木の成長, つまり細胞分裂を担っている形成層のすぐ内側にある層である. そのため, 辺材には生活細胞である柔細胞が含まれ, でんぷん, 脂肪, 糖類などを貯蓄し, 生理機能を担っている. 心材は辺材のさらに内側にある層で, 死細胞の集まりである. 辺材に貯蓄されていた物質は, 心材成分に変化している. そのため, 一般的に濃色を示す場合が多い. 着色される原因は, 死細胞となる心材化で生じた色素等が沈着したためだと考えられている. 心材は, 木材としての価値が高い部分である[17].

## 第 1 章 序論

---

### ○早材と晩材

木材の特徴と言える年輪は、早材と晩材と呼ばれる部分から成っている。早材とは成長期の初めの時期に形成された部分、晩材とは成長期の後半の時期に形成された部分である。早材部分は、木材の成長が大きく進む時期に形成されるため、細胞サイズが大きく、色は薄くなる。逆に、晩材部分は、成長が遅い時期であり細胞サイズは小さく、色は濃くなる。年輪は、細胞サイズの異なる早材と晩材が交互に現れるため、樹齢推定の手がかりとなる特徴である[17]。木材を板状に加工した際、早材と晩材の見えが、いわゆる木目として扱われる。

### ○環孔材と散孔材

道管とは、水分が通る通路で樹木において重要な組織である。道管は針葉樹にはなく、広葉樹に特有の組織である。道管には、いくつかの特徴的な配列がある。代表的な2つのタイプとして、環孔材と散孔材がある。環孔材は、年輪に沿って直径の大きい道管が環状に配列している。この部分は早材部分に相当する。また、小さい道管が晩材部分に分布している。散孔材は、年輪全体に大きさがほぼ等しい道管が均等に分布している。このタイプの道管の分布が最も多い[17]。

### ○板目と柾目

樹木から製品として切りだされた木材板には、板目・柾目と呼ばれる木目の現れ方がある。板目とは、丸太の直径に対し直角に木材を切り出したときに見られる、山状の木目のことである。柾目とは、丸太の中心付近を直径に沿って木材を切り出したときに見られる、多数の平行な木目のことである。これらは、年輪がはっきり現れている丸太を切り出した場合に、よく見られる特徴である[18]。

## 1.4.2 天然木材試料

ここでは、第 2 章、第 3 章に記す実験で使用した天然木材試料を説明する。表 1.1 に天然木材試料の一覧、図 1.1 に天然木材試料の画像を示す。この表は、前述した天然木材の特徴を各樹種についてまとめた。また、画像名とは第 2 章、第 3 章の実験で各樹種を説明するときに用いた名前、図 1.1 にも対応してい

# 第1章 序論

る。木目の状態とは、試料として用いた木材板が板目か柾目かを示している。

天然木材は、販売店で購入でき、家具などに使用される樹種を選んだ。また、全て無垢木を用い、表面をヤスリを用いて滑らかにした以外の加工は施していない。

表 1.1 天然木材試料一覧[18][19]

樹種名	学名	科	産地	用途
アルダー	<i>Alnus rubra</i>	カハバキ科	アラスカ南部、カリフォルニア北部	家具、ドア、細工物
ホワイティアッシュ	<i>Fraxinus americana</i>	モクセイ科	五大湖周辺から大西洋岸の北米東部に二六分布	家具、床材、バット
ブラックビーン	<i>Castanospermum australe</i>	マメ科	パプアニューギニア、オーストラリア、ニューカレドニア	彫刻、キャビネット、パネル、象眼、ろくろ細工
イエローバーチ	<i>Betula alleghaniensis</i>	カハバキ科	カナダのニューファンドランド南東部、メイン州、	家具、ベニヤ判、
ブピンガ	<i>Guibourtia spp.</i>	マメ科	西アフリカ熱帯雨林、コンゴ、コートジボワール	美術家具、キャビネット、スライドベニヤ、象眼
イエローシーダー	<i>Chamaecyparis nootkatensis</i>	ヒノキ科	アラスカ州南東部、オレゴン州	建築土台、ポート、細工、家具
ブラックチェリー	<i>Prunus serotina</i>	バラ科	カナダ大西洋岸からバハマに至る東部	家具、キャビネット、楽器、高級家具、床板、鏡床、
クリ	<i>Castanea crenata</i>	ブナ科	北海道南部、本州、四国、九州	建築(土台、装飾)、家具、器具、車輻、旋作、枕木、土木
西南樺	<i>Betula alnoides</i>	カハバキ科	中国西南部雲南省	家具、床板、内装材、楽器
ケハンス	<i>Scaphium macropodium</i>	アオギリ科	タイ、マレーシア、インドネシア	家具、合板材
ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>	ニレ科	本州、四国、九州、朝鮮、中国	建築、家具、田、杵、電柱腕木、太鼓の胴、器具、彫刻
ホンジュラス・マホガニー	<i>Swietenia macrophylla king</i>	センダン科	ボリビア、メキシコ、南部アメリカ	家具、彫刻
ハードメープル	<i>Acer saccharum</i>	カエデ科	カナダ東部、アメリカ中西部、北東部	製材品、床板、家具、ボウリングのアレイ、器具柄
モングリナラ	<i>Quercus mongolica</i>	ブナ科	中国東北部、モンゴル、ロシア	ウイスキー樽、化粧合板、家具、
ホワイトオーク	<i>Quercus alba</i>	ブナ科	南カナダ東部フロリダ北部	家具、床板、船舶、ウイスキー樽
ハードオーク	<i>Pterocarpus macrocarpus</i>	マメ科	インド	家具、器具、楽器
イエローポプラ	<i>Liriodendron tulipifera</i>	モクレン科	米国東部	内装用、建具、ドア、玩具、合板
スプルース	<i>Picea sitchensis</i>	マツ科	シトカ周辺	ピアノの響板、ヴァイオリンギター
ヤチタモ	<i>Fraxinus mandshurica</i>	モクセイ科	北海道、本州北・中部、朝鮮、中国、サハリン、シベリア	家具、器具、合板、内部装飾
チャーク	<i>Tectona grandis</i>	クマツヅラ科	インド、ミャンマー、タイ、インドネシア	家具、キャビネット、造船
ブラックウォールナット	<i>Juglans nigra</i>	クルミ科	米国東部、カナダ東部	家具、キャビネット、楽器、鏡床、

樹種名	画像名	葉系	道管の配列	木目の状態	辺材	心材
アルダー	Alder	広葉樹	散孔材	板目	赤褐色	淡黄色 or 赤褐色
ホワイトアッシュ	Ash	広葉樹	環孔材	板目	淡色 or 白色	褐色
ブラックビーン	Bean	広葉樹	散孔材	板目	淡黄白色	濃黒褐色 or チョコレート色
イエローバーチ	Birch	広葉樹	散孔材	板目	赤褐色	淡黄色
ブピンガ	Bubinga	広葉樹	散孔材	板目	灰白色	棕色 or 鮮やかな赤色 or 赤褐色
イエローシーダー	Cedar	針葉樹	散孔材	板目	黄白色	鮮やかな黄色
ブラックチェリー	Cherry	広葉樹	散孔材	板目	淡桃色	赤褐色 or 赤色
クリ	Chestnut	広葉樹	環孔材	板目	褐色を帯びた灰白色	褐色
西南樺	Kaba	広葉樹	散孔材	板目	乳白色	淡紅褐色
ケハンス	Kebeans	広葉樹	散孔材	板目	淡色	淡黄褐色
ケヤキ	Keyaki	広葉樹	環孔材	板目	帯黄白色 or 淡黄褐色	黄褐色 or 赤褐色
ホンジュラス・マホガニー	Mahogany	広葉樹	散孔材	板目	灰白色	紅褐色
ハードメープル	Maple	広葉樹	散孔材	板目	灰白色	淡赤褐色
モンゴリナラ	Nara	広葉樹	環孔材	板目	淡灰白色	淡銀褐色
ホワイトオーク	Oak	広葉樹	環孔材	板目	白色	灰褐色 or 褐色
パドック	Padouak	広葉樹	散孔材	板目	淡黄白色	紫色を帯びた赤褐色
イエローポプラ	Poplar	広葉樹	散孔材	板目	白色	オリーブグリーン
スプルース	Spruce	針葉樹	環孔材	板目	乳白色	帯黄淡紅白色
ヤチタモ	Tamo	広葉樹	環孔材	板目	淡黄白色	褐色
チャーク	Teak	広葉樹	散孔材	板目	黄白色	金褐色 or 褐色 or 赤褐色
ブラックウォールナット	Walnut	広葉樹	散孔材	板目	淡色	チョコレート or 紫赤色 or 紫黒色



図 1.1 天然木材試料の画像一覧

### 1.4.3 木目印刷の特徴

木目印刷とは、その名の通り木目を様々な基材に印刷した製品の総称である。木目印刷の製造は、木目の元となる木（原木）を決定するところから始まる。原木決定後、撮影を行い画像化する。ここでフォトレタッチソフトを用いて、原木の気になる部分（節、キズ等）の修正、画像の円筒化を行う。画像の円筒化とは、印刷用版が円筒形であるため、画像の両端を継ぎ目が無いように繋げることである。このように円筒化した画像を元に、版を作成し印刷を行う。印刷方法は、グラビア印刷またはスクリーン印刷で行う。一般的に、印刷物の解像度はスクリーン線数 (lpi) で表記する。木目印刷のような、特殊印刷は、300 lpi で印刷されることが多い[20]。

木目印刷の利点は、天然木材を使わないことによる環境負荷の軽減、製品の均一性、コスト軽減、デザイン性の向上といったことがあげられる[21]。

### 1.4.4 木目印刷試料

ここでは、第 2 章、第 3 章に記す実験で使用した木目印刷試料を説明する。表 1.2 に使用した木目印刷試料の一覧、図 1.2 に木目印刷試料の画像を示す。表 1.2 の画像名とは第 2 章、第 3 章の実験で各樹種を説明するときに用いた名前である。木目の状態とは、木目印刷が板目か柾目かを示している。本論文では、14 種類（5 種類、株式会社サンゲツ；5 種類、リンテック株式会社；4 種類、3 M）の木目印刷を使用した。木目印刷は、塩化ビニール素材の表面に木目が印刷されており、裏面は粘着剤が塗布されている。これを、スチレンボードに貼り付けて試料とした。

木目印刷の選定は、製造会社による品質への影響を避けるため複数社から購入すること、一般的な手段によって入手可能な製品であること、天然木材試料と比較するためにできる限り樹種を揃えること、樹種が特定されている製品であること、以上の 4 つを基準とした。最初の 2 つの基準を満たすために、オンラインショップから購入できる 3 社から、樹種が重複しないよう枚数が同程度になるように購入した（3M からは 2015 年 12 月現在購入できなくなっている）。後半 2 つの基準を満たすために、樹種名が明記されている製品を購入した。各

## 第 1 章 序論

---

製造会社による，具体的な印刷方法は不明であるが，実験の際に行った分析では明確な差は見られなかった．この内容は，第 2 章，第 3 章に記す．

表 1.2 木目印刷試料一覧

製造元	型番	樹種名	木目の状態	基材	画像名
3M	WG-115	ナラ	柾目	塩化ビニル樹脂	F_Nara
	WG-663	ブビンガ	板目		F_Bubinga
	WG-839	アッシュ	柾目		F_Ash
	WG-947	タモ	柾目		F_Tamo
リンテック	WHG+573	チーク	柾目		F_Teak
	WHG-968	バーチ	柾目		F_Birch
	POW-588	チェリー	板目		F_Cherry
	PWO-746	アルダー	板目		F_Alder
	WSP-540	ウォルナット	板目		F_Walnut
サンゲツ	RW-7046	ポプラ	柾目		F_Poplar
	RW-7069	マホガニー	柾目		F_Mahogany
	TC-7113	チェスナット	柾目		F_Chestnut
	TC-7156	オーク	柾目		F_Oak
	TC-7188	メープル	板目		F_Maple



図 1.2 木目印刷試料の画像一覧

### 1.5 論文の目的

「木質感」とは、木材全体の漠然とした質感を表現しており、見た目の美しさや木らしさなど研究者が注目する対象によって、意味合いが様々に変化する。本論文では、この木質感を「本物らしさ」と定義した。CG や建材のような人工的に作った木材をより本物らしく見せるために、木材の本物らしさに影響を与える特徴量を明らかにすることを目的とした。その方法として、木材表面から得られる情報、特に空間周波数特性と画像統計量から検討を行った。

### 1.6 論文の概要

本論文の第 2 章では、本物らしさについて空間周波数特性に着目した検討を行った。第 3 章では、画像統計量、特に輝度ヒストグラムの歪度と尖度に注目し、画像評価実験を行い本物らしさの検討を行った。第 4 章では、2 つの実験から得られた知見を元に、総合的な考察を行い本物らしさに影響を与える要因を示した。第 5 章は結論として、本論文のまとめを示した。

## 第2章 実験 1：

### 空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

#### 2.1 実験の目的

第 1 章で示したように，天然木材と木目印刷の最小の構成要素は細胞と網点であり，それぞれの構成要素が木材の特徴である木目を作り出している．木目の見えは，木材の「木らしさ」や「自然さ」に影響することが示唆されている [14][16]．

木目の特徴を表す方法の 1 つに，空間周波数分析がある．この方法では，木目の輝度変化を様々な周波数の波の合成として表すことができ，主に木目の周期性を調べられる．天然木材と木目印刷の構成要素が異なることから，高空間周波数における周期性が異なると考えられる．そこで，天然木材と木目印刷の本物らしさの違いが，空間周波数特性の違いに現れていると考えた．本章では，どのような空間周波数特性が木材の本物らしさに影響を与えるかを明らかにすることを目的とした．

#### 2.2 木材試料の空間周波数分析

本項では，天然木材と木目印刷の空間周波数特性にどのような違いがあるかを明らかにすることと，その違いを定量的に表す指標を提案することを目的とした．

## 2.2.1 撮影環境

木材試料の撮影に使用した撮影ボックスの概略図を、図 2.1 に示す。撮影ボックス内の灰色ボード（マンセル値 N5 相当）に 6.5 cm 四方の木材試料を設置した。木材試料は、昼白色蛍光灯（TOSHIBA FL20S N-EDL, 相関色温度 4800 K,  $R_a = 98$ ）を用い、垂直面照度が 1000 lx になるように照明した。事前にキャリブレーションを行ったカメラ（NIKON D800: レンズ, AF-s Micro NIKKOR 60 mm f/2.8G ED）を用いて、できる限り高解像度の撮影を行うために、22 cm 離れた場所から木材試料を 3640×3640 pixels で撮影した。

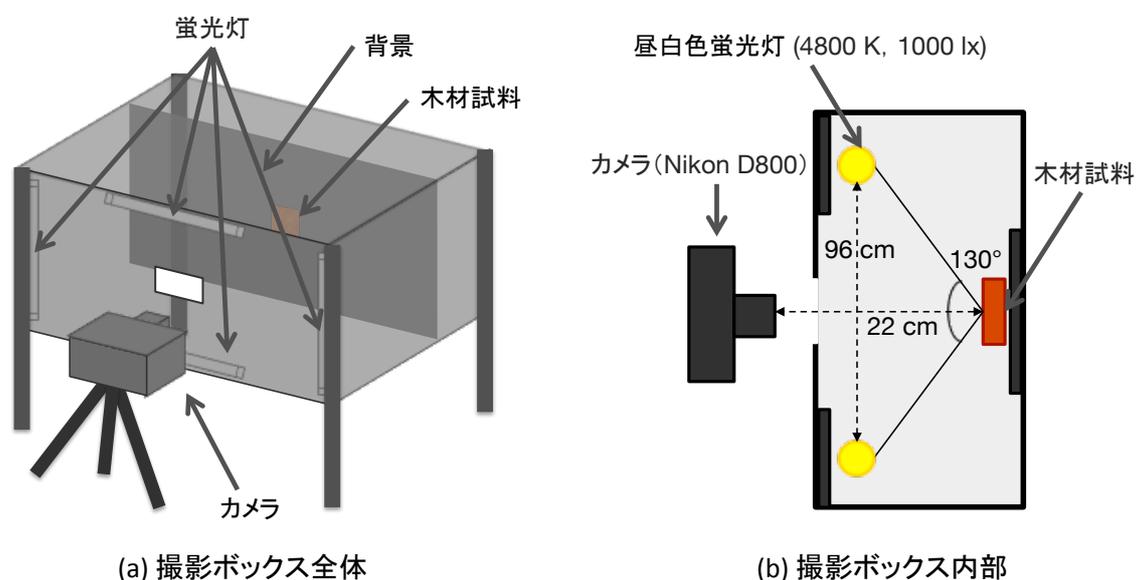


図 2.1 撮影ボックスの概略図

### 2.2.1.1 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションは、図 2.1 に示した木材試料撮影と同様の環境で行った。撮影には、NIKON D800 を使用し、測色には分光放射輝度計 CS-2000 (ユニカミノルタ株式会社) を使用した。また、カメラのレンズには、AF-s Micro NIKKOR 60mm f/2.8G ED を使用し、絞りは f5.6 で撮影した。ターゲットには、図 2.2 に示すカラーチャート (X-Rite ColorChecker Passport : ビデオジェット・エックスライト株式会社) を使用した。このカラーチャートには、無彩色 6 色、有彩色 18 色が含まれている。表 2.1 に、撮影したカラーチャートのカメラの RGB 値と測色値  $L_v$ ,  $x$ ,  $y$  を示す。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響



図 2.2 X-Rite ColorChecker Passport

表 2.1 カラーチャート各色の RGB 値と測色値

データ名	1 (dark skin)	2 (light skin)	3 (blur sky)	4 (foliage)	5 (blue flower)	6 (bluish green)
Lv (cd/m <sup>2</sup> )	41.24	125.88	64.16	50.73	86.73	146.23
x	0.43	0.43	0.28	0.38	0.31	0.29
y	0.38	0.37	0.31	0.45	0.30	0.39
R	139.3	231.3	100.1	105.3	159.1	125.7
G	94.2	176.9	151.9	127.6	157.5	213.3
B	78	168.1	190.8	69.5	206.5	203.9
データ名	7 (orange)	8 (purplish blue)	9 (moderate red)	10 (purple)	11 (yellow green)	12 (orange yellow)
Lv (cd/m <sup>2</sup> )	121.05	45.13	77.42	27.32	167.56	175.47
x	0.53	0.24	0.51	0.34	0.40	0.50
y	0.41	0.22	0.33	0.26	0.49	0.45
R	255	69	246.3	108.6	203.7	255
G	146.6	110.8	108.4	66.6	216.9	187.7
B	49	210.1	120.5	125.4	101.7	22.9
データ名	13 (blue)	14 (green)	15 (red)	16 (yellow)	17 (magenta)	18 (cyan)
Lv (cd/m <sup>2</sup> )	24.42	91.95	50.28	228.67	80.70	72.18
x	0.22	0.33	0.56	0.47	0.43	0.22
y	0.19	0.50	0.34	0.47	0.28	0.31
R	0.8	84.7	225.5	255	236.8	0
G	76.2	187.5	68.5	217.8	105.1	168.3
B	181.4	98	71.6	44.6	188.6	204.6
データ名	white	n8	n6.5	n5	n3.5	n2 (Black)
Lv (cd/m <sup>2</sup> )	339.93	222.29	139.42	68.86	35.90	13.89
x	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
y	0.37	0.36	0.36	0.37	0.36	0.36
R	240.7	221.7	192.2	145	92	44.9
G	240.3	223.7	196.9	147.7	96	47.1
B	239.9	225.2	199.3	149	98.4	49.7

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

この値を元に、カメラの RGB 値から CIE1931XYZ 三刺激値へ変換するマトリクスを求める。最初に、カメラの RGB 値は輝度との対応が非線形であるため、これを線形化する。図 2.3 に、RGB の各値が輝度に対して非線形であることを示す。

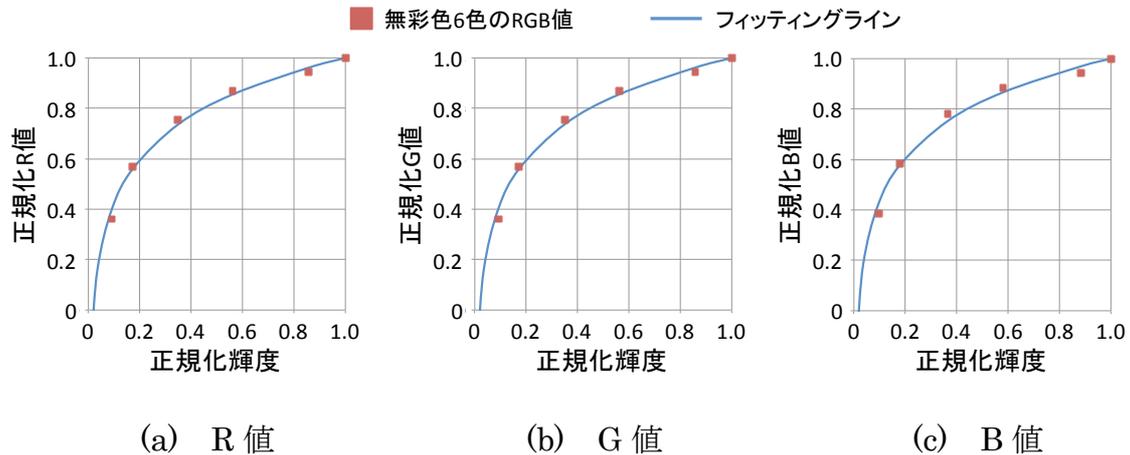


図 2.3 無彩色 6 色の RGB 値と輝度の関係

横軸は無彩色 6 色の輝度 ( $L_v$ ) を white の輝度で正規化した値，縦軸は無彩色 6 色の各 RGB 値を white の RGB 値で正規化した値を表している。青線は、 $y = a \log_e(x) + b$  でフィッティングした結果を表している。フィッティングは、決定係数  $R^2$  で 0.99 以上である。フィッティングした関数の逆関数  $x = e^{(y-b)/a}$  を用い、線形化した。線形化後の RGB 値を、それぞれ  $R_{linear}$ ,  $G_{linear}$ ,  $B_{linear}$  とし、図 2.4 に線形化した結果を示す。

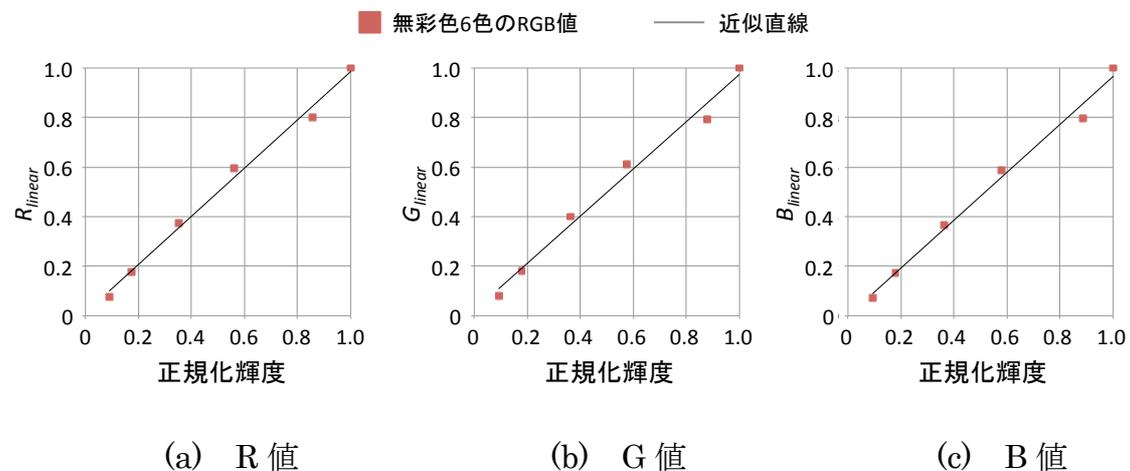


図 2.4 無彩色 6 色の線形化した RGB 値と輝度の関係

## 第 2 章 実験 1 : 空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

横軸は図 2.3 と同様の値, 縦軸は線形化後の RGB 値を表している. どの値も, 正規化した輝度の値と線形関係になっていることが確認できる. これにより, カメラの出力画像の RGB 値から輝度を得ることができる.

次に, RGB 値から得られた輝度を用いて, CIE1931XYZ 三刺激値を求める. カラーチャートの 24 色の測色値  $L_v, x, y$  から XYZ を算出する. このとき輝度  $Y$  は, white の値で正規化を行った. この XYZ を目標値として, 以下の計算により変換するマトリクスを算出する.

$$\begin{pmatrix} X_1 & \cdots & X_{24} \\ Y_1 & \cdots & Y_{24} \\ Z_1 & \cdots & Z_{24} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & \cdots & d_1 \\ a_2 & \cdots & d_2 \\ a_3 & \cdots & d_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{linear1} & \cdots & R_{linear24} \\ G_{linear1} & \cdots & G_{linear24} \\ B_{linear1} & \cdots & B_{linear24} \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

この式に, 右辺の線形化した RGB の行列の逆行列を乗算することで, 変換マトリクスが求まる. ここで, 線形化した RGB の行列は正方行列ではないため, 逆行列を求めるには擬似逆行列を用いる. これは, 逆行列を求める方法を一般化した方法である [22]. この方法により求めた変換マトリクスを用いると, 線形化した RGB から XYZ は次のように求めることができる.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3358 & 0.4383 & 0.1838 \\ 0.1913 & 0.7060 & 0.0994 \\ 0.0185 & 0.1032 & 0.6154 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{linear} \\ G_{linear} \\ B_{linear} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

式 (2.2) を用いて, RGB 値から変換した XYZ と測色によって得られた XYZ の CIELAB 色空間における色差を算出した. その結果, 24 色の色差の平均は 0.487, 最大は 1.134 となった. また, 計算値と測色値の誤差は, XYZ のいずれも 1%前後であった.

以降, カメラ出力の RGB 値を式 (2.2) を用い, XYZ に変換し分析に利用した.

## 2.2.2 木材試料

第 1 章で説明した天然木材試料，木目印刷試料から，それぞれ 14 種類ずつを用いた．図 2.5 には，本実験で使用した木材試料の画像一覧を示す．



(a) 天然木材試料



(b) 木目印刷試料

図 2.5 使用した天然木材試料，木目印刷試料一覧

### 2.2.3 空間周波数分析

本節では、天然木材と木目印刷の空間周波数特性の分析を行う。最初に、空間周波数を算出するため、二次元離散フーリエ変換について説明する。

#### 2.2.3.1 二次元離散フーリエ変換

任意の画像において、画像サイズが  $H \times W$ 、座標  $(x, y)$  の画素値が  $f_{xy}$  であるとき、二次元離散フーリエ変換は次式で表せる[23]。

$$F_{uv} = \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W f_{xy} \exp \left\{ -\frac{2\pi j(xu + yv)}{HW} \right\} \quad (2.3)$$

空間面における座標  $(x, y)$  は二次元離散フーリエ変換により、周波数面における座標  $(u, v)$ 、つまり空間周波数となる。周波数面から空間面に変換する二次元離散逆フーリエ変換は、次式により表せる。

$$f_{xy} = \frac{1}{HW} \sum_{v=1}^H \sum_{u=1}^W F_{uv} \exp \left\{ \frac{2\pi j(xu + yv)}{HW} \right\} \quad (2.4)$$

空間面における画素値  $f_{xy}$  は実数であるのに対し、周波数面におけるフーリエスペクトル  $F_{uv}$  は複素数となる。そのため、周波数面を評価するためには、 $|F_{uv}|^2$  として表せるパワースペクトル画像を用いる。パワースペクトル画像は、画像の中心部が低空間周波数、外縁部が高空間周波数を表している。また、水平方向の周波数は空間面において縦縞、垂直方向の周波数は空間面において横縞を表している。

#### 2.2.3.2 木材試料の空間周波数特性

撮影した画像を CIE1931XYZ 三刺激値に変換し、 $Y$  の値を用いて輝度画像とした。この輝度画像を二次元離散フーリエ変換し、パワースペクトル画像を得た。図 2.6 に代表例として天然木材試料 (Alder, Ash, Bubinga)、木目印刷試料 (F\_Alder, F\_Ash, F\_Bubinga) の視距離 60 cm におけるパワースペクトル画像を示す (その他の樹種については付録参照)。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

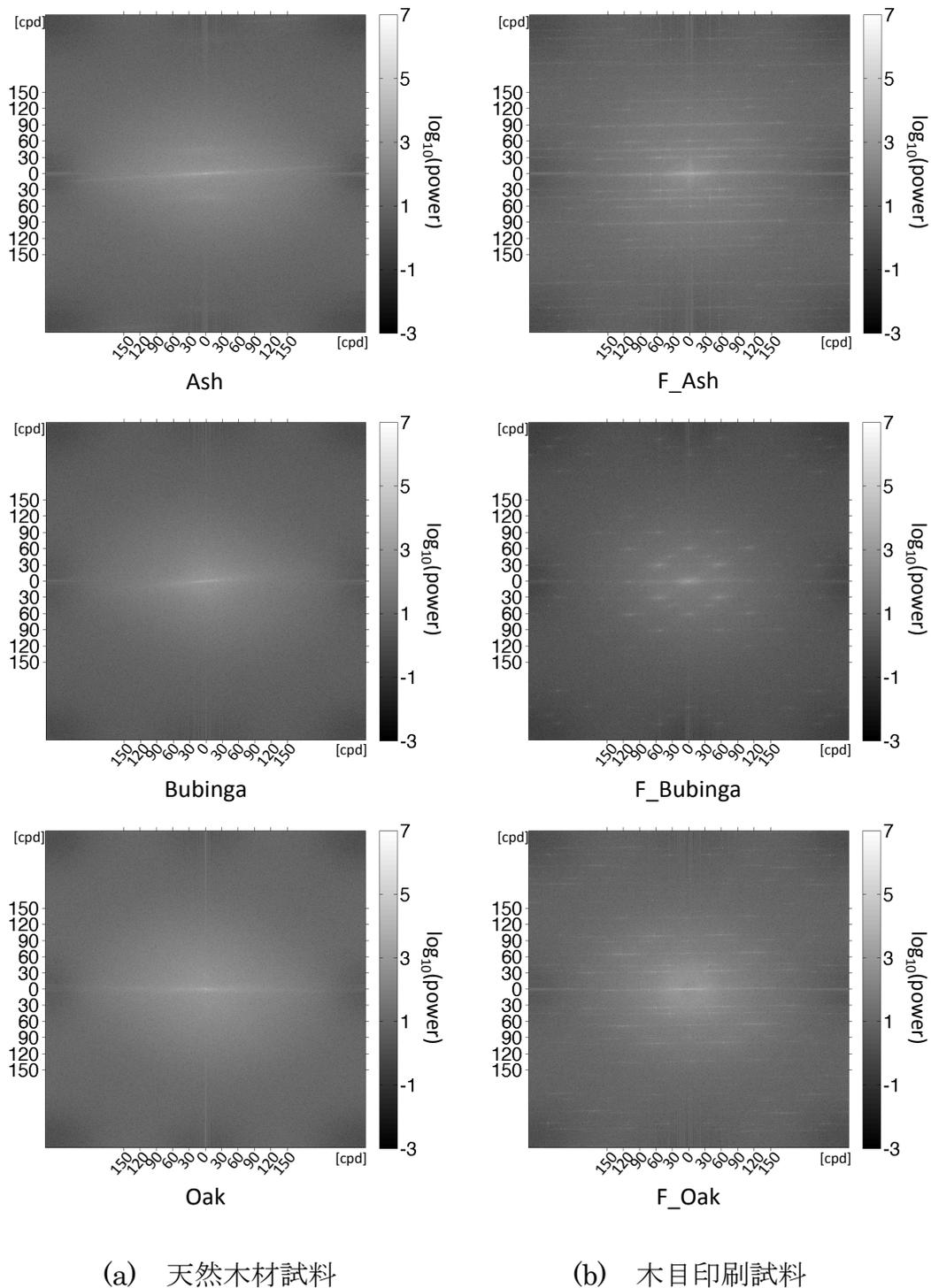


図 2.6 木材試料のパワースペクトル画像

画像の縦軸と横軸は、空間周波数 (cycle/degree) を表している。グレースケールは各空間周波数の強度の対数値を表している。図 2.6 (a) の天然木材試料

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

の空間周波数は、水平方向に高い強度であることを示す部分が広がっている。また、低空間周波数領域の強度が比較的高く、高空間周波数領域では強度が低くなっている。図 2.6 (b) の木目印刷試料では、周期的な印刷網点特有のパターンが見られる。すなわち、網点の空間周波数に合致し、天然木材試料には見られない強度の高い箇所が複数分布していることがわかる。また、水平方向に強度の高い部分が広がっており、比較的低空間周波数領域の強度が高いことがわかる。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

木材試料は図 2.5 に示すように、木目の方向を垂直方向、つまり縦縞になるように揃えて撮影した。縦縞の空間周波数は、パワースペクトル画像において水平方向に高い強度として現れる。このことから、木目の特徴を得るために、図 2.6 のパワースペクトル画像の中心から水平方向、つまり 0 度方向の強度変化を図 2.7 に示す（その他の樹種については付録参照）。

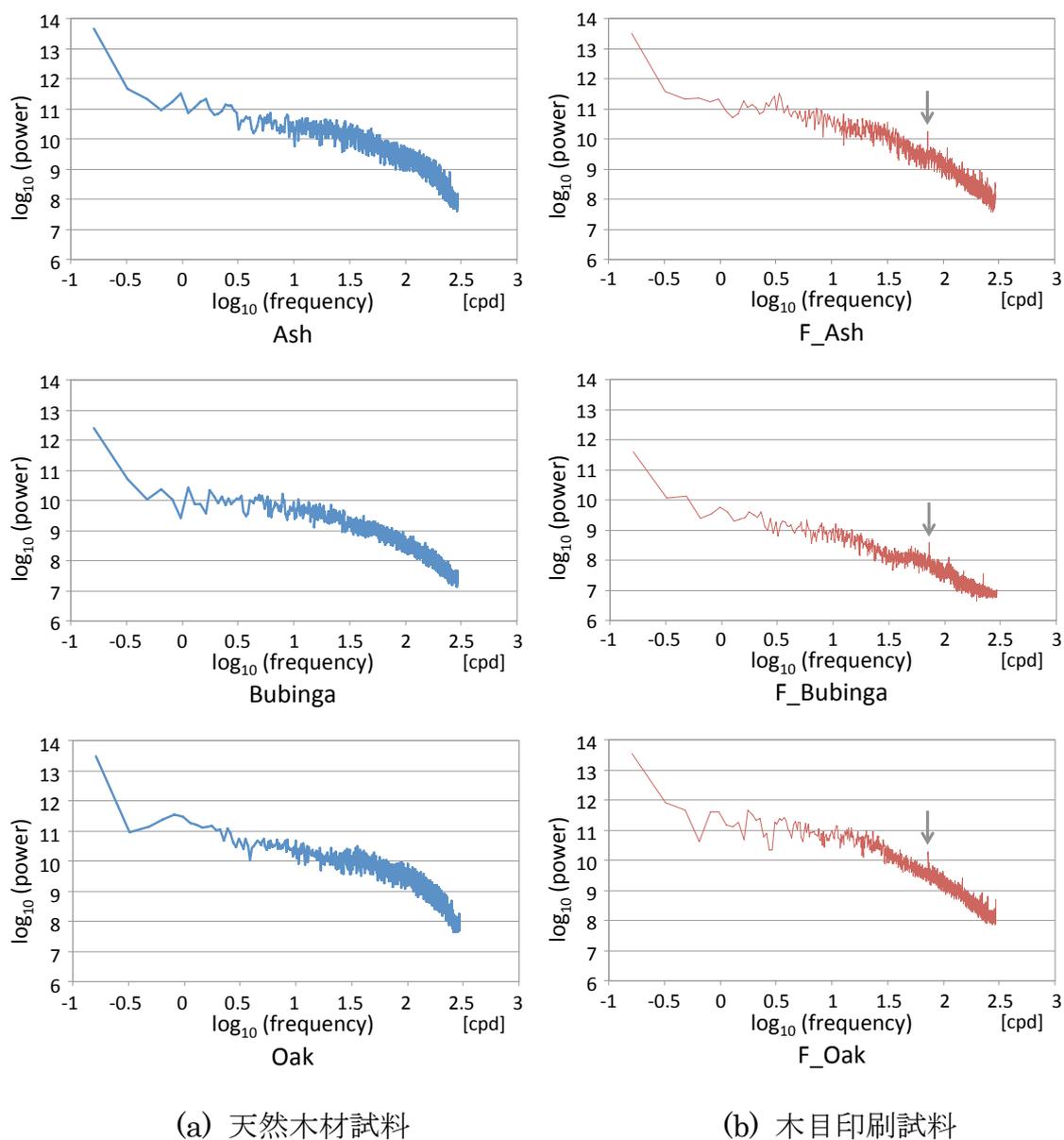


図 2.7 天然木材試料と木目印刷試料の水平方向の強度変化（矢印はスパイク）

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

縦軸は空間周波数の強度の対数値、横軸は空間周波数 (cpd, cycle/degree) の対数値を表している。図 2.7 (a) の天然木材試料の強度変化は、高空間周波数において曲線的な減衰が見られる。図 2.7 (b) 木目印刷試料は、低空間周波数から高空間周波数へ直線的に強度が減衰している。また、高空間周波数に強度のスパイクが見られる。

この 6 つの木材試料で得られた傾向が、木材試料全体でも現れるかどうかを確かめるために、他の木材試料も同様に強度変化を求めた。図 2.8 には求めた各樹種の強度変化を平均した値を示す。

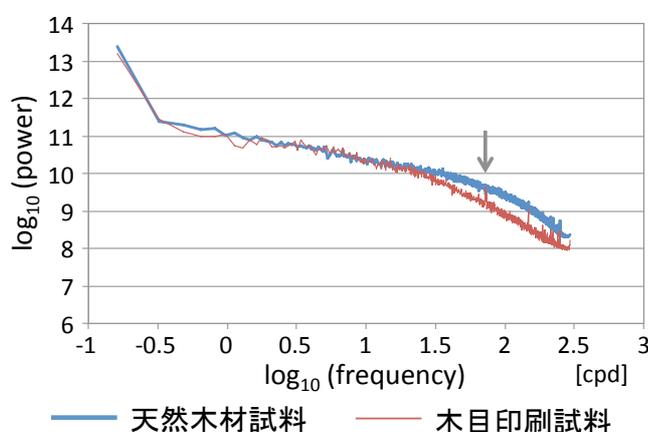


図 2.8 天然木材試料と木目印刷試料の平均の強度変化 (矢印はスパイク)

青線 (太線) が天然木材試料、赤線 (細線) が木目印刷試料の強度変化を表している。平均の強度変化でも、天然木材試料には高空間周波数における曲線的な強度の減衰が見られる。また、木目印刷試料の強度変化にも直線的な減衰と、高空間周波数におけるスパイクが見られる。

天然木材試料と木目印刷試料の最小の構成要素は、それぞれ細胞と網点である [17][21]。図 2.7, 2.8 に示した、天然木材試料と木目印刷試料の強度変化における高空間周波数域の差異は、この構成要素の違いを捉えていると考えられる。そこで、高空間周波数域に注目し分析する。

木目印刷試料の空間周波数特性には、高空間周波数域に強度のスパイクがあった。この特性は、木目印刷特有のものであり天然木材にはみられない。よって、この強度スパイクは網点の影響であると考えられる。そこで、各木目印刷画像から網点間の距離を計測し、網点の空間周波数を算出した。表 2.2 に視距離 60 cm における網点の水平方向の空間周波数を示す。網点の空間周波数の平均

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

値は 65.4 cpd, 常用対数をとると 1.8 となる. この値は, 図 2.8 に示した木目印刷試料の平均強度変化で見られた, 高空間周波数における強度のスパイクと一致する. また, 一般的なスクリーン線数である 300 lpi は, 視距離 60 cm の場合, 61.9 cpd に相当する. この値は, 実測により求めた網点の空間周波数とほぼ一致しており, 木目印刷は 300 lpi 程度で作製されていることがわかる.

表 2.2 視距離 60 cm における木目印刷試料 (視角, 6.2 deg) の網点の空間周波数

画像名	空間周波数(cpd)	画像名	空間周波数(cpd)
F_Alder	65.16	F_Maple	58.71
F_Ash	73.39	F_Nara	83.87
F_Birch	58.71	F_Oak	83.87
F_Bubinga	58.71	F_Poplar	39.19
F_Cherry	73.39	F_Tamo	73.39
F_Chestnut	58.71	F_Teak	58.71
F_Mahogany	65.16	F_Walnut	65.16
平均	65.44		

図 2.8 に見られるように, 天然木材試料と木目印刷試料の高空間周波数域における差異の特徴として, 強度変化があげられる. そこで, 高空間周波数域の強度変化の形状を二次関数でフィッティングすることにより定量化を行った.

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

図 2.9 に、天然木材試料と木目印刷試料の平均強度変化の交点と高空間周波数領域を示す。交点の空間周波数より大きい周波数の領域、つまり二次関数でフィッティングする範囲を高空間周波数領域と呼ぶことにする。

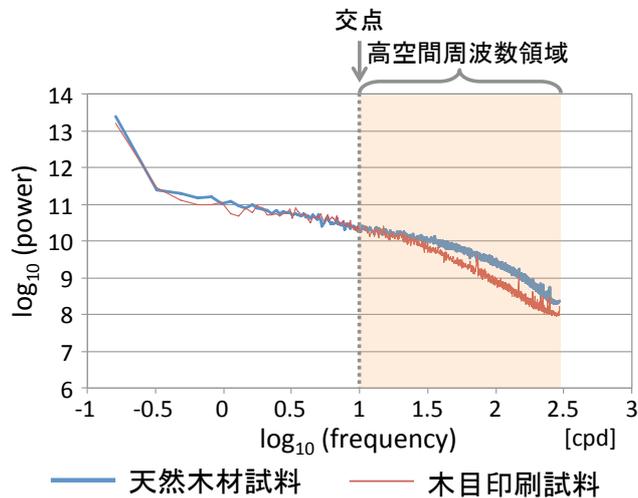


図 2.9 天然木材試料と木目印刷試料の平均の強度変化における交点と高空間周波数領域

また、表 2.3 に各視距離における交点の空間周波数と高空間周波数領域の最大空間周波数を示す。

表 2.3 各視距離における交点の空間周波数と高空間周波数領域の最大空間周波数

視距離 (cm)	空間周波数 (cpd)	
	交点	最大
140	23.31	684.21
125	20.81	610.74
110	18.29	536.87
95	15.82	464.29
80	13.33	391.40
70	11.65	342.11
60	10.00	293.55
50	8.33	244.62
40	6.67	195.91
30	5.01	147.13
15	2.54	74.44

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

図 2.9 は、図 2.8 に示した天然木材試料と木目印刷試料の平均の強度変化に対し、2 つの強度変化の交点の空間周波数と高空間周波数領域を図示している。表 2.3 は、図 2.9 に示した交点の空間周波数と高空間周波数領域の最大空間周波数を、各視距離ごとに示している。次に、高空間周波数領域における強度変化に対し、二次関数  $f(x) = ax^2 + bx + c$  でフィッティングを行った。このときの二次の項の係数の絶対値 ( $|a|$ ) を、高空間周波数領域の湾曲度とした。この値が大きくなると、強度の曲線的な減衰を表しており、0 に近づくほど直線的な減衰を表している。つまり、天然木材の場合は大きな値となり、木目印刷の場合は小さな値になると予想される。このように、二次関数でフィッティングすることにより、高空間周波数領域の強度変化を簡単な数値として表すことができる。図 2.10 には、例として視距離 60 cm における天然木材試料 (Cherry) と木目印刷試料 (F\_Bubinga) の強度変化に対し、高空間周波数領域に対し二次関数によるフィッティングを行った結果を示す。

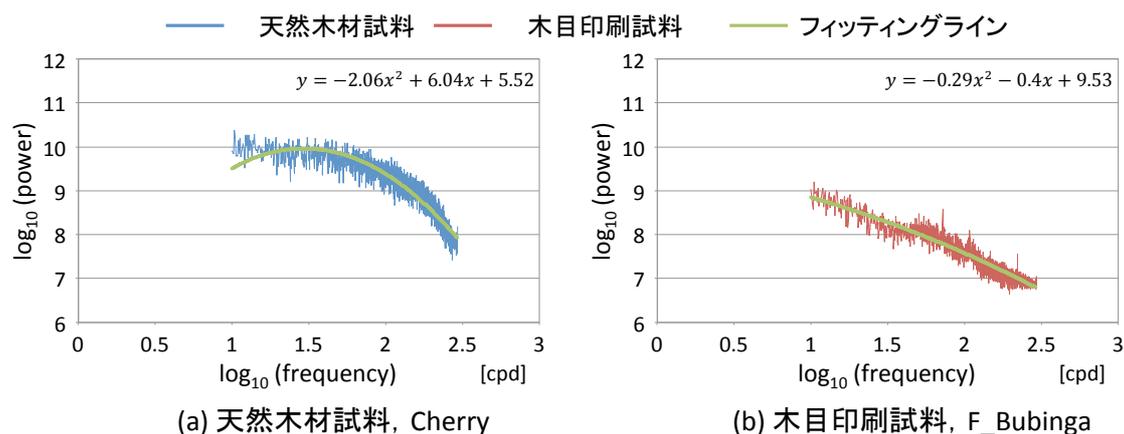


図 2.10 各木材試料の高空間周波数領域に対するフィッティング結果

図 2.10 から、天然木材試料は湾曲状に、木目印刷試料は直線状にフィッティングされていることがわかる。

フィッティングは、頂点座標を固定しない二次関数で行った。頂点座標を固定しない場合、頂点座標によっては想定している湾曲度が得られない可能性がある。例えば、大きな値の  $|a|$  であるが、頂点座標がデータ点から離れている場合、データ点は二次関数の頂点から離れた場所、つまり直線的な部分でフィッティングされる。このとき、 $|a|$  が大きいからといって強度変化が曲線的であるとは言えない。このようなフィッティングがされていないことを確かめるため

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

に、二次関数の頂点座標  $x$  と湾曲度  $|a|$  との関係を図 4.6 に示す。

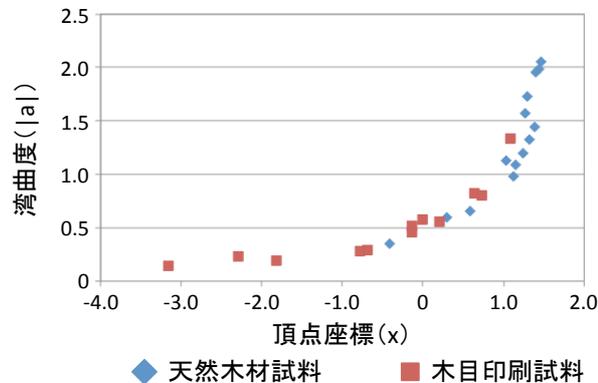


図 2.11 湾曲度 ( $|a|$ ) と頂点座標 ( $x$ ) の関係

横軸に頂点座標  $x$ ，縦軸に湾曲度  $|a|$  を表している。また、フィッティングするデータ点の左端は、 $x = 1.0$  にある。木目印刷試料の  $F\_Birch$  (61.62, 0.01) と  $F\_Maple$  (147.28, 0.00) は、頂点座標  $x$  が他の試料と比較し大きく異なるため、同一レンジでグラフに表すのは不適切であると判断しプロットしていない。頂点座標  $x$  と湾曲度の関係は指数関数状である。湾曲度が大きい場合、湾曲度はばらつくが  $x$  座標はほぼ一定である。また、湾曲度が 0.5 未満では、湾曲度のばらつきは小さく  $x$  座標が大きくばらつく。しかし、この場合、湾曲度は小さく二次関数は直線的であるため、 $x$  座標が異なっても問題ないものとした。湾曲度が大きい場合は、最も湾曲している頂点部分がデータ点付近にあり、湾曲度が小さい直線の場合は、頂点座標がデータ点から離れている。これは、湾曲度が強度変化の具合を想定通りに表していると言える。表 2.4 に各天然木材試料、各木目印刷試料とその平均強度の高空間周波数領域における強度変化に対して算出した湾曲度と、フィッティング関数の頂点座標  $x$ ， $y$  を示す。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

表 2.4 各木材試料の高空間周波数領域の湾曲度 ( $|a|$ ) と  
フィッティング関数の頂点座標 ( $x, y$ )

天然木材試料				木目印刷試料			
	$ a $	$x$	$y$		$ a $	$x$	$y$
Alder	1.44	1.39	9.89	F_Alder	0.19	-1.81	11.83
Ash	1.58	1.27	10.26	F_Ash	0.82	0.64	10.65
Birch	1.98	1.43	10.21	F_Birch	0.01	61.62	-35.12
Cherry	2.06	1.47	9.96	F_Bubinga	0.29	-0.69	9.67
Kaba	0.98	1.12	10.18	F_Cherry	0.28	-0.78	10.78
Kembas	1.72	1.29	10.56	F_Chestnut	0.52	-0.14	11.54
Mahogany	1.13	1.04	9.65	F_Mahogany	0.56	0.20	9.54
Maple	1.32	1.33	10.12	F_Maple	0.00	147.28	-88.22
Nara	0.60	0.30	11.01	F_Nara	0.23	-2.29	13.03
Oak	1.96	1.40	10.16	F_Oak	0.57	0.00	11.54
Poplar	1.20	1.24	10.29	F_Poplar	0.80	0.72	10.05
Tamo	0.35	-0.41	11.50	F_Tamo	1.33	1.09	10.24
Teak	0.66	0.59	10.35	F_Teak	0.46	-0.14	10.73
Walnut	1.09	1.15	9.49	F_Walnut	0.14	-3.16	11.54
平均強度	1.23	1.18	10.25	平均強度	0.41	-0.38	11.24

平均強度における湾曲度は、天然木材試料は 1.23、木目印刷試料は 0.41 となり、形状を定量的に表すことができている。頂点座標  $y$  のばらつきも大きいですが、これは各強度変化の平均に影響を受ける値であり、強度変化の特徴には関係しないと考えられる。

### 2.3 天然木材・木目印刷の識別実験

この実験は、どのような空間周波数特性が木材の本物らしさに影響するかを調べるために行った。そのために、木材試料を観察する距離を変化させ、それぞれの観察距離において木材試料の本物らしさを評価した。木材試料面の空間周波数特性を任意に変化させることができれば、より直接的に空間周波数特性の影響を調べられる。しかし、実物を用いて評価するため、この方法を用いることはできない。そこで、観察距離を変化させることで、知覚される空間周波数を変化させる方法を用いた。

### 2.3.1 観察環境と木材試料

木材の観察には、図 2.1 に示した撮影ボックスを使用した。撮影ボックス内の灰色ボード（マンセル値 N5 相当）に円形枠（直径 65 mm）を付し木材試料を設置した。照明条件は、試料撮影時と同様である。また実験には、図 2.5 に示した木材試料と同様のものを使用した。

### 2.3.2 木材試料と呈示距離

被験者の眼前から木材試料までの距離を 140, 125, 110, 95, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 15 cm の計 11 段階に変化させて呈示した。このとき、観察される円形枠を付した木材試料の直径の視角は、2.66～24.45 degree の範囲で変化した。呈示は一番距離の遠い 140 cm から順に 15 cm まで行い、逆順は行わないものとした。また、ある視距離での応答が他の視距離での応答に影響を与えないように、実験は被験者 1 名につき 1 日で最高 2 つの視距離までとした。被験者の頭部を顎台で固定することにより、一定の視距離で観察できるようにした。

### 2.3.3 評価方法と被験者

被験者は実験が始まる前に、応答に使用する言葉の説明を受けた。このとき実験では使用しない木材試料を呈示することで具体的な説明を行った。「本物」とは、天然木材のことであり、表面加工を施していない無垢木のことで、「偽物」とは印刷によって木目が表現されている製品であることを説明した。

最初に被験者は呈示された木材試料を観察し、その試料が「本物」であるか「偽物」であるかを応答した。その後、応答の自信の具合を確信度とし、3 段階で評価した。3 は非常に自信がある、2 はまあまあ自信がある、1 はあまり自信がないとした。木材試料は、天然木材と木目印刷をランダムな順番で呈示した。ただし、全被験者で同様の呈示順とした。各樹種に対して 1 回の応答とし、ある視距離に対し計 28 応答した。このとき被験者には、天然木材と木目印刷がそれぞれ何種類あるかという情報は、一切知らせなかった。

被験者は、色覚正常の男性 10 名（平均年齢  $23.6 \pm 0.8$ ）で、裸眼または矯正

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

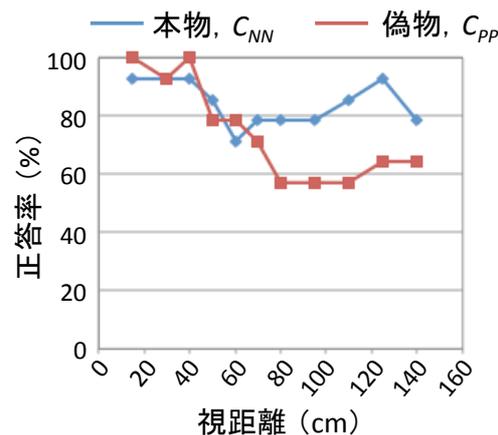
により，左眼視力  $1.1 \pm 0.4$ ，右眼視力  $1.1 \pm 0.3$ ，両眼視力で 1.0 以上を保持していた．また，木材に対する専門的知識を有していなかった．

### 2.3.4 実験結果

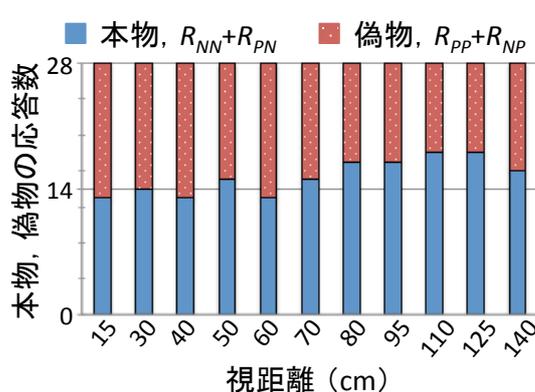
ある視距離のときの応答として，天然木材試料に本物と応答 ( $R_{NN}$ )，天然木材試料に偽物と応答 ( $R_{NP}$ )，木目印刷試料に本物と応答 ( $R_{PN}$ )，木目印刷試料に偽物と応答 ( $R_{PP}$ )，以上の 4 種類が考えられる．被験者 1 名につき総応答数は  $R_{NN}+R_{NP}+R_{PN}+R_{PP}=28$  となる．また，天然木材の試料数を  $S_N$ ，木目印刷の試料数を  $S_P$  とすると， $S_N=S_P=14$  となる．天然木材試料の正答率  $C_{NN}$ ，木目印刷試料の正答率  $C_{PP}$  は次式で表される．

$$C_{NN} = \frac{R_{NN}}{S_N} \quad \text{または} \quad C_{PP} = \frac{R_{PP}}{S_P} \quad (2.5)$$

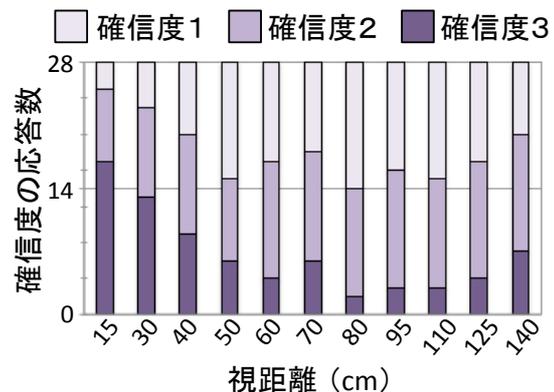
図 2.12 に被験者 HT の正答率，応答数，確信度の結果を示す．



(a) 本物と偽物の正答率



(b) 本物と偽物の応答数



(c) 確信度の応答数

図 2.12 被験者 HT の実験結果

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

縦軸に各項目の値，横軸に視距離を表している．天然木材試料に対する正答率  $C_{NN}$  は，どの視距離においても比較的高い．しかし，最も近距離である 15 cm の場合でも 100%にはなっていない．木目印刷試料に対する正答率  $C_{PP}$  は，遠距離の 60%付近から，視距離が短くなると上昇し，最短距離では 100%になっている．この傾向は，被験者全員に共通して見られた．応答数の変化は，遠距離では本物と応答した回数が多いが，近距離では同数か偽物と応答した回数がやや多い．被験者全体では，遠距離のとき偽物応答の回数が多い被験者や，偽物・本物応答の回数がほぼ同数の被験者も見られた．近距離では，偽物応答の回数が多い被験者が大半であった．確信度は，遠距離のとき最も自信のある確信度 3 の応答回数が少なく，確信度 1 と 2 の応答がほぼ同数である．確信度 3 の応答回数が，確信度 1 と 2 を上回るのは視距離 30 cm, 15 cm の 2 条件のみであった．この傾向は，半数の被験者でみられた．他の被験者は，近距離における確信度 3 が他を上回らなかったが，近距離においても回数が上昇する傾向は一致していた．

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

図 2.13 に全被験者，全樹種の応答を総合した正答率変化，応答数変化，確信度変化を示す。

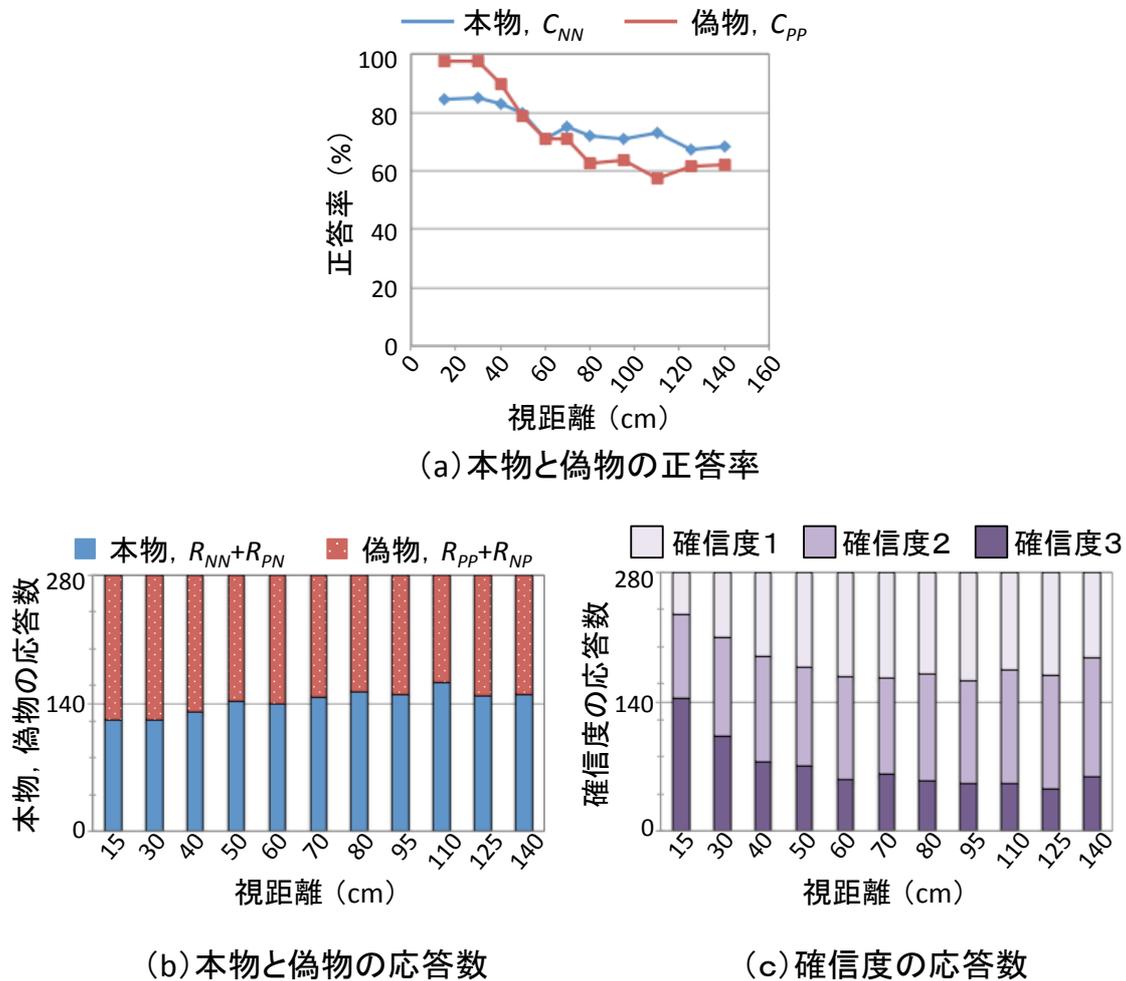


図 2.13 全被験者，全樹種総合の実験結果

縦軸に各項目の値，横軸に視距離を表している。正答率は，式 (2.5) における各パラメータを次のように置き換え算出した。 $S_N$  (または  $S_P$ ) を，試料数に被験者数を掛けた値，つまり 140 とした。また， $R_N$  (または  $R_P$ ) は，全樹種に対する被験者全員の本物 (偽物) と応答した回数とした。正答率は視距離が短くなるほど，天然木材試料，木目印刷試料ともに高くなっている。混合要因分散分析 (樹種間，2 要因 14 水準：樹種内，1 要因 11 水準) により，視距離による主効果 ( $F_{(10,260)}=19.7365, p < 0.001$ )，と交互作用 ( $F_{(10,260)}=3.7496, p < 0.001$ ) は認められた。遠距離の場合，天然木材，木目印刷共に視距離が変化しても正答率があまり変化しない傾向がある。天然木材は視距離が短くなると徐々に正

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

答率が高くなるが、最短の 15 cm の場合でも 100%に満たない。木目印刷の場合は視距離が 60 cm より短くなると急激に正答率が高くなり、最高で 98%になっている。また、遠距離における最も低い正答率でも 57%あり、チャンスレベルの 50%より大きいことがわかる。多重比較検定 (Tukey 法, 5%水準) でも、視距離の影響は天然木材の正答率より、木目印刷の正答率に対して有意に大きいことが示された。

応答数は、視距離が 140 cm から 70 cm まで本物に偏っている。60, 50 cm でほぼ同数の応答になり、それ以下では偽物に偏っている。つまり、視距離が長いときに木材試料は本物に見えやすく、視距離が短くなると偽物に見えやすくなっていることがわかる。

確信度は、視距離が長い場合には、確信度 1 と 2 の応答回数が多いが、視距離が 40 cm 以下で確信度 3 の応答回数が増えている。しかし、確信度 3 の応答回数が他の確信度の応答回数より多くなるのは、視距離が 15 cm のときだけであり、このとき応答回数は 140 を超えている。つまり、視距離が 15 cm の場合に限り、半数以上の木材試料に対し自信をもって応答していることがわかる。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

図 2.14 に天然木材試料，木目印刷試料それぞれ樹種別の結果の一部を示す。

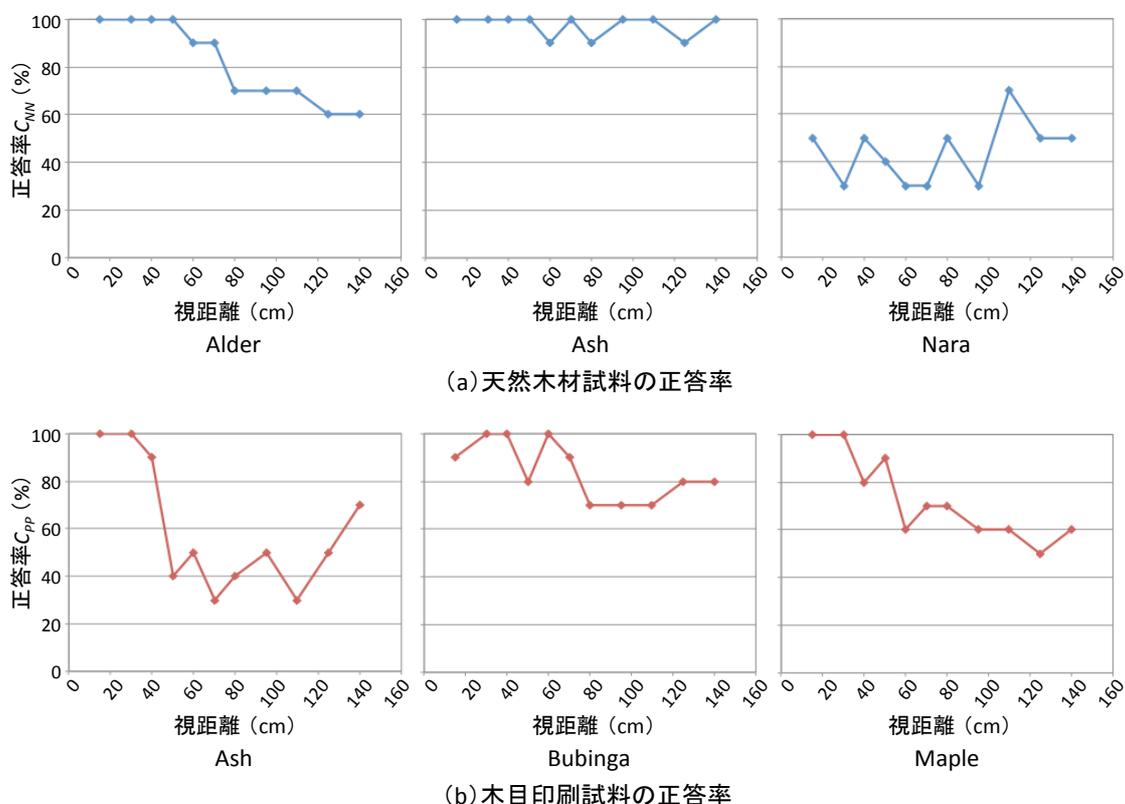


図 2.14 樹種別の正答率変化

天然木材試料の結果は，正答率が 100%に到達する樹種から，全く到達しない樹種などばらつきがあることがわかる．木目印刷試料の結果は，ほぼ全ての樹種で正答率が 100%に達し，グラフの形状が似ていることがわかる．

視距離を短くすると，天然木材試料，木目印刷試料ともに正答率が高まることがわかった．しかし，図 2.13 に示すように，本物，偽物の応答数には視距離によって差がある．そこで，応答数の違いによるバイアスを除去したうえで，どの程度天然木材と木目印刷を分離しているかを知るため，正答率の代わりに信号検出理論における  $d'$  を導入する[24]． $d'$  は，ノイズ分布と信号+ノイズ分布の平均値がどの程度離れているかを表す指標である．つまり， $d'$  が大きいほど 2 つの分布は離れており，ノイズと信号をよく分離できているといえる．天然木材試料の平均正答率は 100%に大きく満たないが，木目印刷試料の平均正答率はほぼ 100%に達する．このことから，木目印刷試料にある特徴を利用することで，

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

分離していると考えられる。そこで、信号を「木目印刷を偽物と判断する手がかり」とすると、hit は木目印刷試料を偽物と応答する率 ( $C_{PP}$ )、miss は木目印刷試料を本物と応答する率 ( $C_{PN}$ )、false alarm は天然木材試料を偽物と応答する率 ( $C_{NP}$ )、correct rejection は天然木材試料を本物と応答する率 ( $C_{NN}$ ) となる。 $d'$ は次式で求めることができる。

$$d' = Z(C_{PP}) - Z(C_{NP}) \quad (2.6)$$

ここで、 $Z(x)$ は  $x$ を  $Z$ 変換した値とする。 $d'$ を各視距離ごとに算出し、視距離と  $d'$ の関係を調べる。

図 2.15 に  $d'$ と視距離の関係を示す。

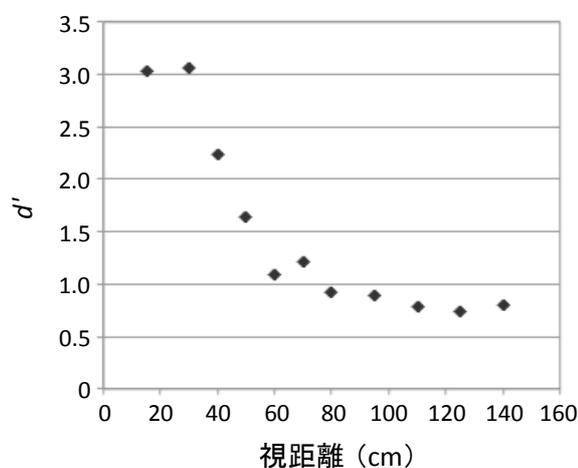


図 2.15 視距離と  $d'$ の関係

縦軸は  $d'$ 、横軸は視距離を表している。視距離が 60 cm までは、 $d'$ はほぼ横這いであるが、それより短い視距離になると急激に  $d'$ の値が大きくなっていることがわかる。つまり、視距離が 60 cm 程度から利用できる特徴を手がかりとして、木目印刷試料を天然木材試料から見分けているといえる。逆に考えると、この手がかりは、木材の本物らしさを低下させる特徴であると考えられる。

### 2.4 考察

天然木材試料と木目印刷試料の判別では、木目印刷試料は視距離の影響を強く受けることがわかった。Li *et al.*が示したように、テクスチャとの視距離が近い場合は、テクスチャの局所的特徴に注目することが知られている[25]。木目印刷試料は近距離での正答率が高いことから、木目印刷試料の局所的特徴、つまり網点を木目印刷試料の識別の手がかりとして利用できていたかどうかを考察する。

知覚された空間周波数特性を調べるために、コントラスト感度関数を導入する。コントラスト感度関数とは、正弦波状のグレーティング刺激を用い様々な周波数とコントラストから求めた、コントラスト閾値の逆数の関数である。輝度に対するコントラスト感度関数の特徴は、帯域通過型で十分に明るい環境では 3~5 cycles/degree 付近にピークがあり、60 cycles/degree 付近がカットオフ周波数になると考えられている[26] [27]。赤緑、黄青反対色軸に対するコントラスト感度関数は、低域通過型で 10~12 cycles/degree 付近がカットオフ周波数となる。赤緑、黄青反対色軸のカットオフ周波数に大きな違いはないが、赤緑反対色のほうが感度は高いとされている。高空間周波数に対する感度は、カットオフ周波数から、赤緑、黄青反対色軸よりも輝度のほうが高い。このことは、天然木材と木目印刷の本物らしさの違いが、構成要素にあると考えている本実験において重要な点である。

コントラスト感度関数はモデル化されており、本論文で使用したモデルを示す[28]。

$$csf(f) = a \cdot f^c \cdot e^{-b \cdot f} \quad (2.7)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ はコントラスト感度曲線の形状を表す係数で、それぞれの値を増加させると、 $a$ はピークを高くし、 $b$ はピークを左側に移動させ、 $c$ はピークを右側へ移動させる。コントラスト感度関数は輝度などの観察条件に依存するが、ここでは  $a = 75$ 、 $b = 0.2$ 、 $c = 0.8$  としている。変数  $f$ は空間周波数である。この関数は、帯域通過型を示す輝度に対するコントラスト感度関数である。

図 2.16 に視距離が変化したときにおける、木目印刷試料の空間周波数の平均強度変化と人間の輝度に対するコントラスト感度関数[28]を示す。

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

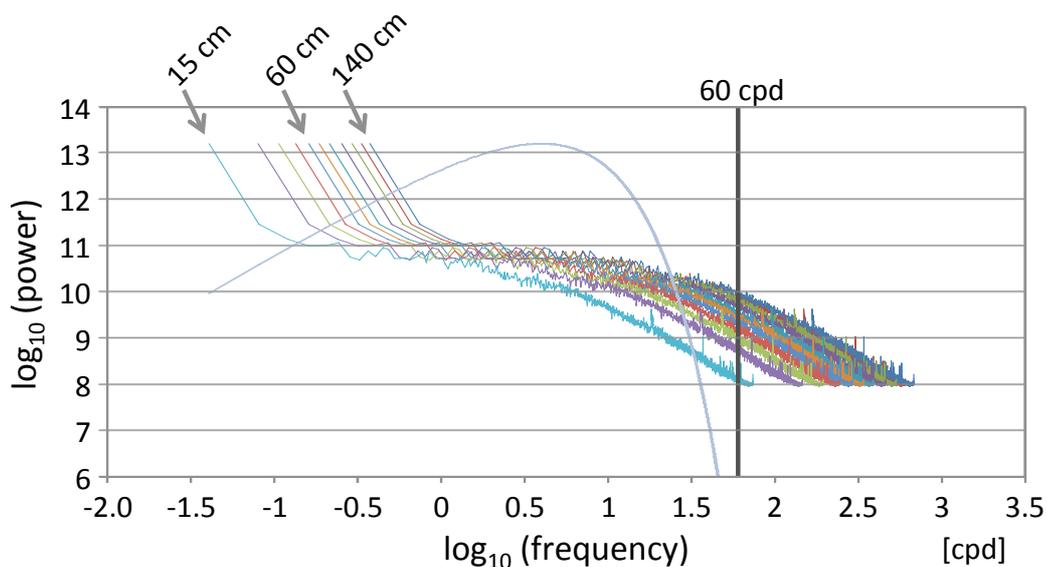


図 2.16 視距離変化と木目印刷試料の空間周波数特性との関係

横軸に空間周波数，縦軸は強度を最大値で正規化した値を示している．人間の輝度に対するコントラスト感度関数は，3～5 cpd で感度が最大となり，約 60 cpd がカットオフ周波数であると考えられている[26][27]．つまり，比較的 low 空間周波数に感度のピークがあること，60 cpd 以上の濃淡変化を捉えることは難しいことがいえる．表 2.2 に示すように，木目印刷試料の網点の大きさは，視距離 60 cm のとき平均で 65.44 cpd である．この空間周波数は，視距離 50 cm のとき 54.53 cpd となり，60 cpd 未満になる．図 2.15 に示したように  $d$  が急激に大きくなる視距離 50 cm～60 cm は，網点が原因と考えられる空間周波数のスパイクが 60 cpd 前後になる視距離である．空間周波数のスパイクがコントラスト感度関数のカットオフ周波数未満になる視距離と，木目印刷の検出率が上昇する視距離が一致していることから，空間周波数のスパイクを木目印刷の手がかりとして利用していたと考えられる．つまり，空間周波数のスパイクは木材の本物らしさを低下させる要因と考えられる．この原因として，空間周波数のスパイクは，網点に代表されるようなある周期で繰り返されるパターンによって引き起こされる．特に高空間周波数のスパイクは天然木材には存在しておらず，木目印刷特有である．このことから，高空間周波数の特定の周期をもつパターンが知覚されることにより，本物らしさが低下する原因であると考えられる．そのため，周期性をもつパターンがどのような視距離においても知覚され

## 第2章 実験1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

ないほど十分に小さい場合は、空間周波数のスパイクの影響を無視でき、本物らしさを低下させる要因とはならないと考えられる。

図 2.14 に示したように、樹種によって正答率の変化に違いが見られた。そこで、湾曲度を基準として樹種をグループ分けし、正答率の変化を調べた。

天然木材試料と木目印刷試料の正答率の変化を、それぞれ2つのグループに分けた。それぞれ湾曲度の平均値を基準として、平均値より大きいグループと小さいグループに分けた。図 2.17 に天然木材試料，図 2.18 に木目印刷試料の正答率変化をグループ分けした結果を示す。

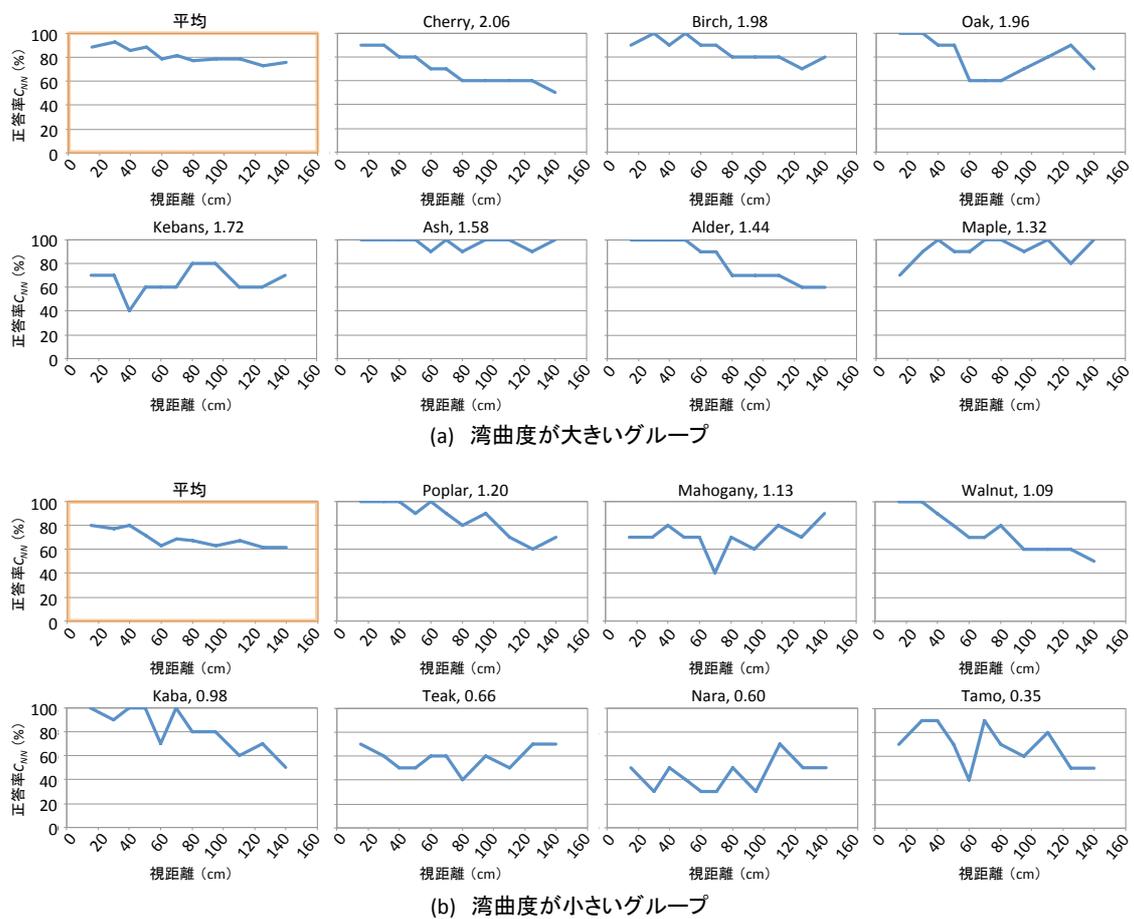


図 2.17 天然木材試料の正答率変化のグループ分け

## 第2章 実験1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

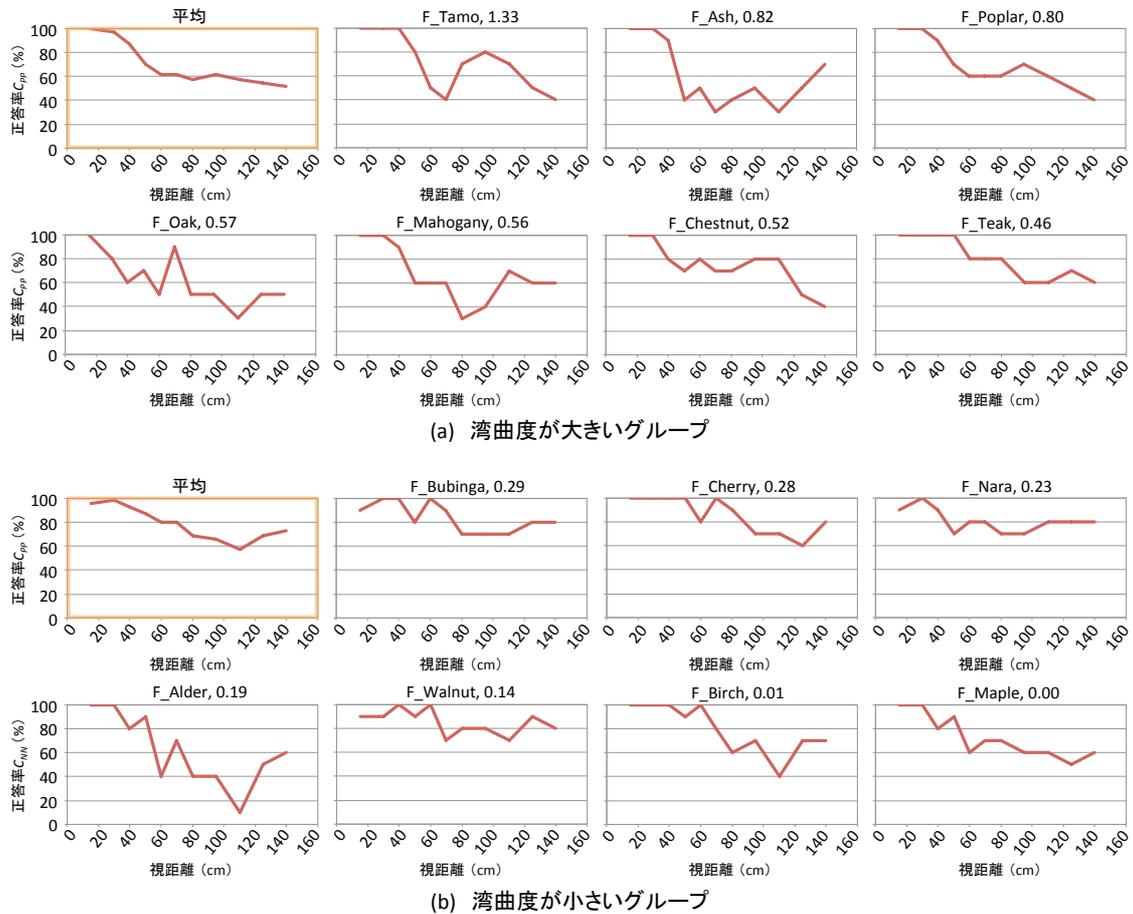


図 2.18 木目印刷試料の正答率変化のグループ分け

縦軸に正答率，横軸に視距離を示している．各グラフ上部に樹種名と湾曲度を示している．また，各グループの平均正答率変化を，オレンジ色の枠で囲い，左上に示している．天然木材試料の湾曲度が大きいグループは，正答率が 100% に達している樹種が多い．しかし，Kebans のように正答率が低く変動している樹種もある．湾曲度が低いグループは，正答率が 100% に達しない樹種が多いが，例外も含まれている．平均正答率を比較すると，グラフ形状は似ているが，湾曲度が大きいグループのほうが，全体的に正答率が高くなっている．このように，グループ間に若干の差は見られるが，それぞれのグループ内に例外が多く明確な差はわからない．木目印刷試料のグループも同様に，グループ間の差は明確ではない．

以上のように，樹種別の正答率変化には様々なバリエーションがみられ，今回用いた試料数では，グループを明確に定義することは難しい．そこで，樹種

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

ごとではなく，天然木材試料と木目印刷試料の樹種をそれぞれまとめた分析を行う．

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

高空間周波数領域における湾曲度と各木材試料の正答率の関係を考察する。図 2.19 に、視距離変化に伴う木材試料の正答率と高空間周波数領域の湾曲度の関係を示す。

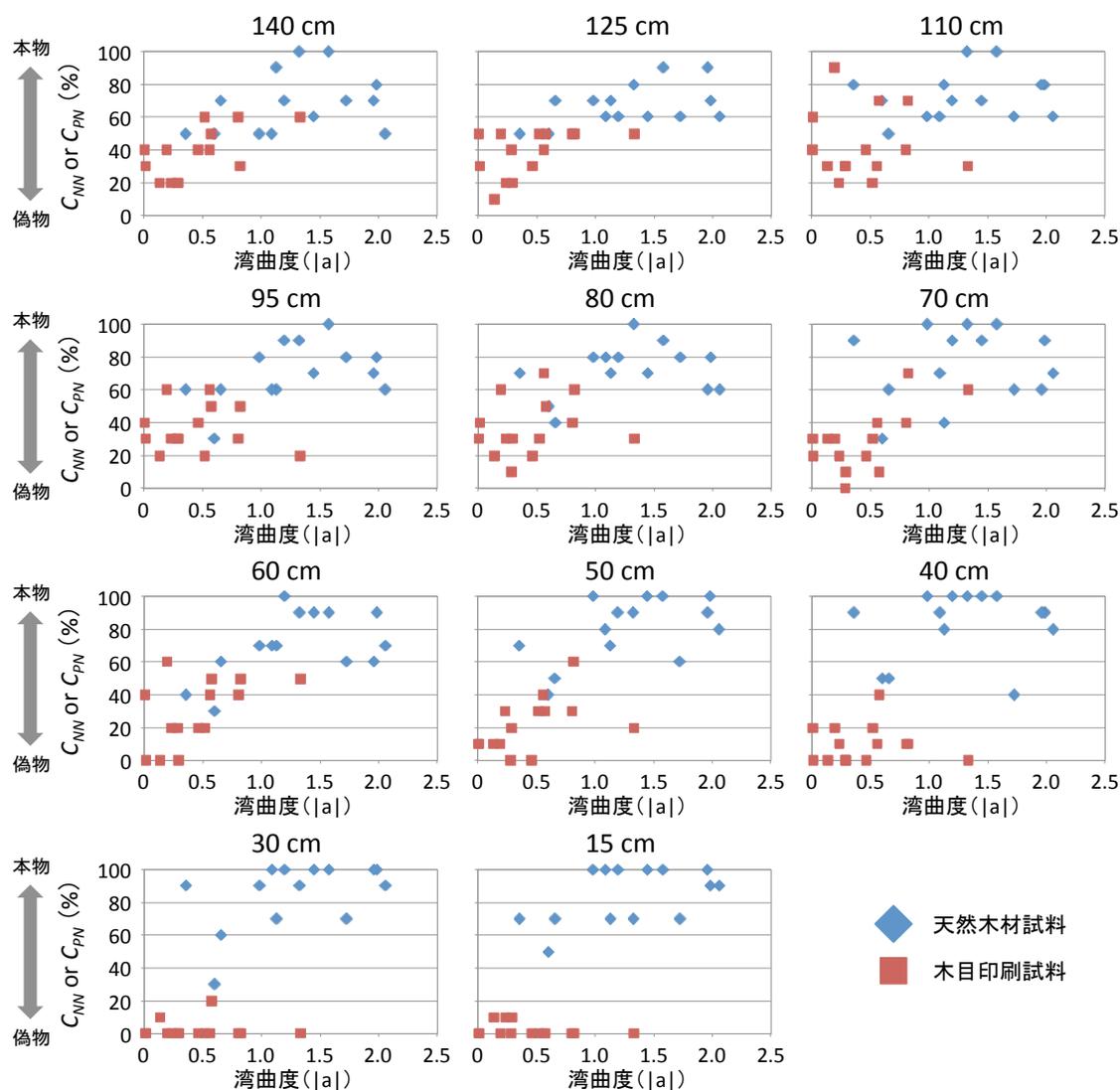


図 2.19 湾曲度 ( $|a|$ ) と正答率  $C_{NN}$ ,  $C_{PN}$  (%) の関係

横軸は湾曲度 ( $|a|$ ) を示している。縦軸は、天然木材試料の場合は  $C_{NN}$ 、木目印刷試料の場合は  $C_{PN} = 1 - C_{PP}$  とした。つまり、木材試料に対して本物と応答した割合を示しており、ある木目印刷試料に対し被験者全員が偽物と応答した場合、0%となるようにした。どのグラフにおいても右上がりの傾向が見られる。

## 第2章 実験1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

ここで、応答時における確信度を考慮に入れる。本物と応答したときの確信度を正、偽物と応答したときの確信度を負として平均確信度を計算する。確信度は、被験者の応答に対する自信の程度を表しているため、正答率よりも詳細な本物らしさを表していると考えられる。そこで、平均確信度を各木材試料がどの程度本物らしく見えているかを表す指標、本物度として定義する。

図 2.20 に本物度と湾曲度の関係を示す。

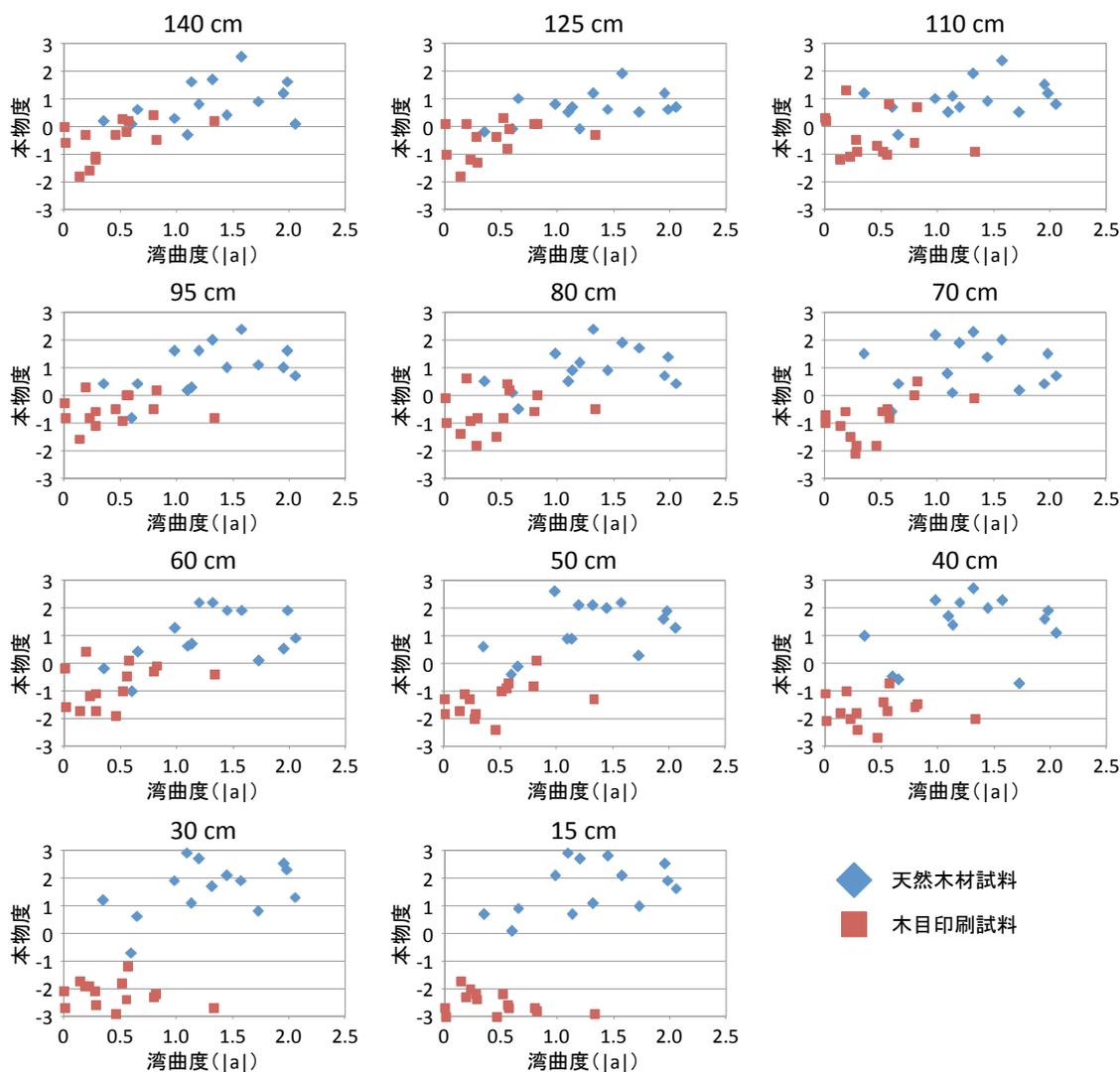


図 2.20 湾曲度 ( $|a|$ ) と本物度の関係

横軸は湾曲度 ( $|a|$ )。縦軸は本物度を表している。シンボルは、図 2.19 と同様である。全体的な傾向は、どの視距離においても右上がりのグラフであり、湾曲度が大きいと本物度が高いといえる。また、天然木材試料と木目印刷試料

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

のそれぞれの傾向にも，右上がりの傾向が見える．これを確かめるために，表 2.5 には，湾曲度と本物度の相関係数をまとめた．また，図 2.21 には表 2.5 の散布図を示す．

表 2.5 湾曲度と本物度の相関係数 ( $r$ )

視距離 (cm)	湾曲度と本物度の相関係数 ( $r$ )	
	天然木材試料	木目印刷試料
140	0.40	0.52
125	0.46	0.37
110	0.32	-0.15
95	0.49	0.18
80	0.41	0.20
70	0.08	0.57
60	0.45	0.35
50	0.45	0.44
40	0.29	-0.03
30	0.43	-0.20
15	0.45	-0.39

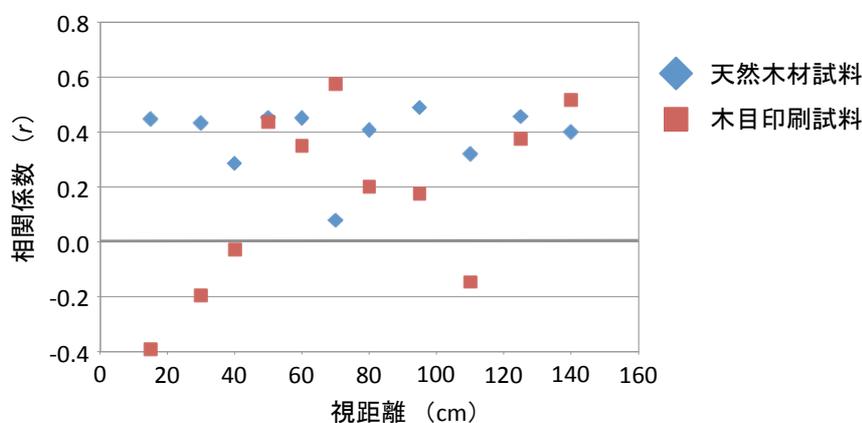


図 2.21 視距離変化に伴う相関係数の変化

天然木材試料の湾曲度と本物度の相関係数は，視距離 70 cm で低下 (0.08) しているが，全体的には 0.4 前後の中程度の相関が見られる．木目印刷試料の場合は，視距離 110 cm で低下 (-0.15) しているが，視距離 50 cm 以上で 0.2～0.5 のやや弱い相関から中程度の相関が見られる．また，視距離 50 cm 未満では，負の相関に転じている．図 2.20 から，本物度が理論的限界である -3 に近くなることで，本物度のばらつきが小さくなり，本物度の微小な差により負の相関に

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

なつたと考えられる。実際に、本物度の標準偏差の平均は視距離 50 cm 以上で 0.67 であるが、視距離 50 cm 未満では 0.45 と小さくなっている。

仲村らは、木材を模した縦縞のパターンを作り、このパターンが自然か不自然かの印象調査を行った[16]。このとき、観察距離は 135 cm～150 cm で行った。結果は、空間周波数に肩（ショルダー）が現れているパターンは自然な印象で、ショルダーがないパターンは不自然な印象であるとしている。ショルダーがあるとは、本研究において高空間周波数の強度変化が曲線的に変化していることである。つまり、湾曲度では大きな値をとる天然木材試料のことである。また、木目印刷試料の多くはショルダーがなく、湾曲度も小さかった。よつて、自然な印象と不自然な印象を与える空間周波数特性と、本物に見えるか偽物に見えるかの空間周波数特性が一致しているといえる。

しかし、遠距離の場合、高空間周波数領域における強度変化は、図 2.16 に示すように、輝度に対する最大のコントラスト感度より高い周波数である。He et al.は、最大のコントラスト感度以上の高コントラストへの順応後に、残効が生じることを示した[29]。彼らの結果は、見えないほどに細かい刺激でも信号は皮質まで到達しており、意識的な認識がなくても神経上に表現されていることを示唆している。このことから被験者は、天然木材試料と木目印刷試料の高空間周波数領域における強度変化の違いを意識することなく感じ取り、両者を判断していた可能性が示唆される。

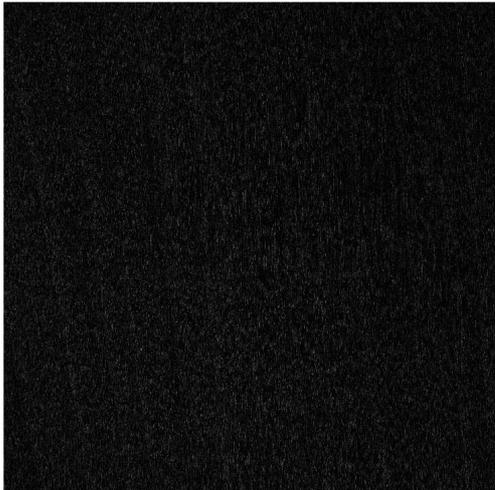
木目印刷試料の湾曲度と本物度の相関は、遠距離の場合は天然木材試料と同様に中程度の相関を示すが、近距離の場合は相関が低くなっている。これは、図 2.16 を用いて説明したように、近距離では空間周波数のスパイクが知覚されたことで本物らしく感じなかったためだと考えられる。つまり、空間周波数のスパイクが知覚されない場合は、天然木材と同様に湾曲度によつて本物らしさが変化すると考えられる。そのため、空間周波数のスパイクが近距離においても知覚されないほど高空間周波数であれば、天然木材と同様に木目印刷も湾曲度によつて本物らしさを評価できる可能性がある。

最後に、高空間周波数領域の強度変化が画像領域において、どのような意味を持っているのかを考える。図 2.22 に高空間周波数未満の周波数をカットした、ハイパス画像を示す。天然木材試料から Cherry と Tamo、木目印刷試料から F\_Maple と F\_Tamo の画像を示した。これらの画像は、天然木材試料、木目印刷試料それぞれにおける、最大、最小の湾曲度の試料である。各画像名と同時

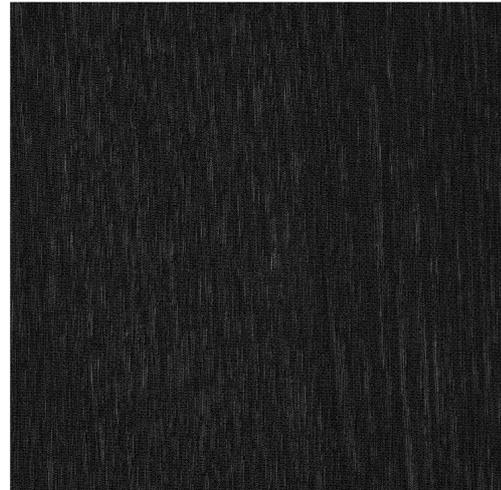
## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

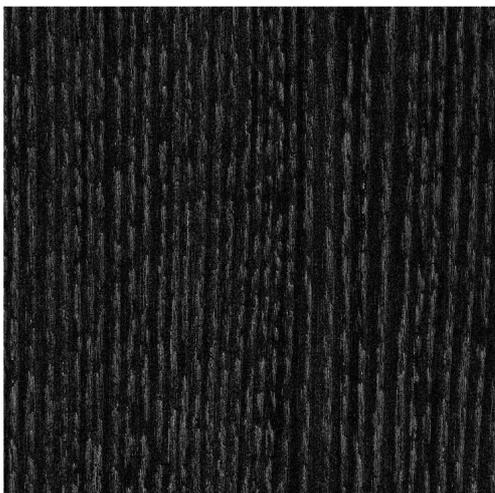
に、湾曲度も示している。各画像は、ハイパス画像であるため画像のエッジ部分、つまり木目が現れているのがわかる。比較的高い周波数であるため、どの画像も細かい木目のように見える。本物度と湾曲度の相関から、被験者は、このような木目により木材の本物らしさを判断していたと考えられる。しかし、湾曲度が、木目の見えにどのような違いを生み出しているかは、今後さらなる検討が必要である。



Cherry 湾曲度:2.06



F\_Tamo 本物度:1.33



Tamo 本物度:0.35



F\_Maple 本物度:0.00

図 2.22 湾曲度の違いと各画像の木目の見え

## 第 2 章 実験 1：空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響

---

以上、木材試料の空間周波数特性が本物らしさに与える影響をまとめると次のようになる。高空間周波数領域の湾曲度は、木材の本物らしさを表す指標となる。湾曲度が大きいと木材は本物らしく見え、小さい場合は本物らしく見えない。また、高空間周波数にスパイクがある場合は、本物らしさを低下させる要因となる。特に視距離が近い場合、木目印刷に見られる空間周波数のスパイクの影響は大きく、湾曲度の大小にかかわらず木材試料は本物らしく見えない。しかし、空間周波数のスパイクが知覚されないほど十分に高空間周波数にある場合は、どのような視距離でも天然木材と同様に高空間周波数領域の湾曲度によって本物らしさを評価できる可能性が示唆された。

### 2.5 結論

天然木材と木目印刷の空間周波数特性を解析し、それらを判別できるかどうかの視感評価実験を行った。空間周波数分析では、高空間周波数領域において天然木材は強度が曲線的に変化し、木目印刷は強度が直線的に変化するという差があった。また、木目印刷には網点が原因と考えられる空間周波数の強度のスパイクも見られた。木材試料との視距離を変化させ、天然木材か木目印刷かを判別する視感評価実験により、どのような空間周波数特性が本物らしさに影響を与えるかを調べた。結果から、高空間周波数領域における強度変化が曲線的であると本物らしく見え、直線的であると本物らしく見えないことが示唆された。また、ある一定のパターンに由来する高空間周波数のスパイクは、本物らしさを低下させる原因であった。この影響は、視距離が近い場合に強くなり、強度変化が曲線的であるかどうかにかかわらず本物らしく見えないことが示唆された。しかし、ある一定のパターンが十分に小さい場合は、この影響を無視することができ、強度変化が曲線的であるかどうかによって本物らしさが変化する可能性が示唆された。

## 第3章 実験 2 :

### 画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

#### 3.1 実験の目的

本実験の目的は、木材の本物らしさについて画像統計量を用いて検討を行うことであった。最初に、木材試料の本物らしさの数値化を試みた。次に、木材試料の特徴を捉えるために、二次元色彩輝度計による測色を行った。木材試料の測色的特徴と本物らしさとの関連を調べ、画像評価実験により測色的特徴が本物らしさに影響しているかどうかを検討した。

#### 3.2 木材試料の本物らしさ評価

この実験は、木材試料の本物らしさを数値化するために行った。木材試料として天然木材と、印刷により木目が表現された木目印刷の実物を用いた。本物らしさは、天然木材に見えやすいか木目印刷に見えやすいかを基準とした。

##### 3.2.1 実験環境と木材試料

実験環境を図 3.1 (a) に示す。被験者は、評価ブース内に設置した木材試料から 41 cm 離れ、評価ブース内を覗く方法により木材試料を観察、評価した。木材試料は 65×65 mm (9° × 9°) の大きさを提示し、木材試料の周りには、参照白色帯として視角 1°、マンセル値 N9 相当の枠を付帯した。評価ブース内には、色評価用昼白色蛍光ランプ (TOSHIBA FL20S N-EDL, 4800 K,  $R_a = 98$ )

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

を設置し、木材試料の垂直面照度が 1000 lx になるように照明した。背景は、視角  $20^{\circ} \times 34^{\circ}$ ，マンセル値 N5 相当の灰色とした。被験者からは、木材試料と背景以外は見えないようにした。図 3.1 (b) に、被験者から見た刺激の概略図を示す。

木材試料には、図 1.1，図 1.2 に示した天然木材試料 21 種類と木目印刷試料 14 種類の全てを使用した。

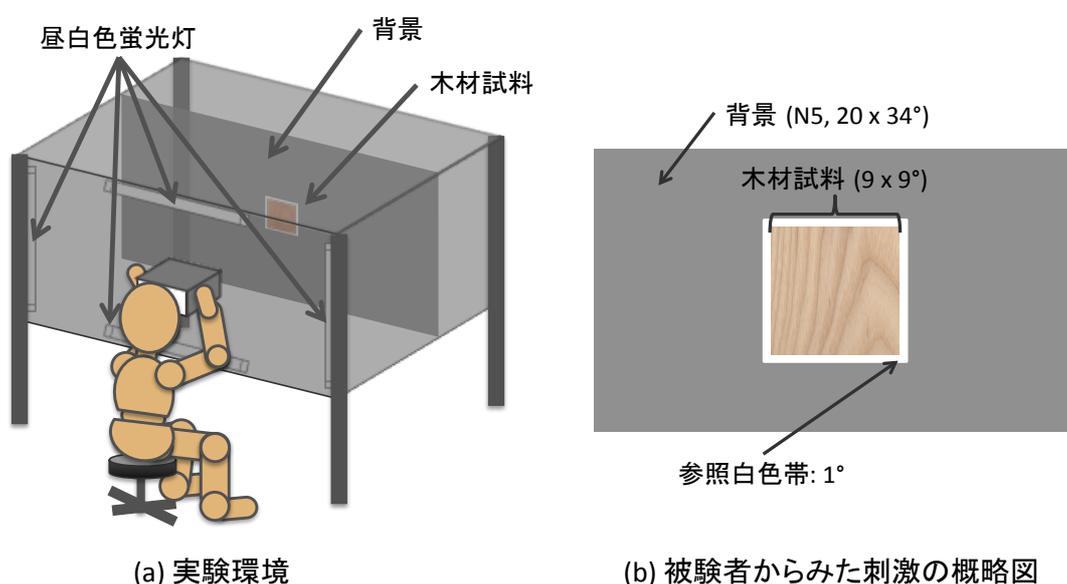


図 3.1 実験環境の概略図

#### 3.2.2 評価方法と被験者

木材試料の評価は、第 2 章 2.3.3 に記した内容と同様の方法を用いた。

被験者は、色覚正常の男女 30 名（平均年齢  $22.5 \pm 1.1$ ）で、裸眼または矯正視力により十分な視力は確保していた。また、どの被験者も木材に対する専門的知識を有していなかった。

### 3.2.3 評価結果

図 3.2 に天然木材試料，木目印刷試料の樹種ごとに正答率を示す．正答率は，グラフ左軸に示している．天然木材試料，木目印刷試料のどちらにも，正答率が低い樹種がある．これらの樹種は，多くの被験者にとって，天然木材試料であれば偽物に，木目印刷試料であれば本物に見えやすいことを示している．天然木材試料と木目印刷試料の平均正答率と試料間の標準偏差は，0.65 (SD = 0.21) と 0.72 (SD = 0.19) であった．どちらもチャンスレベルの 0.5 より高かった．

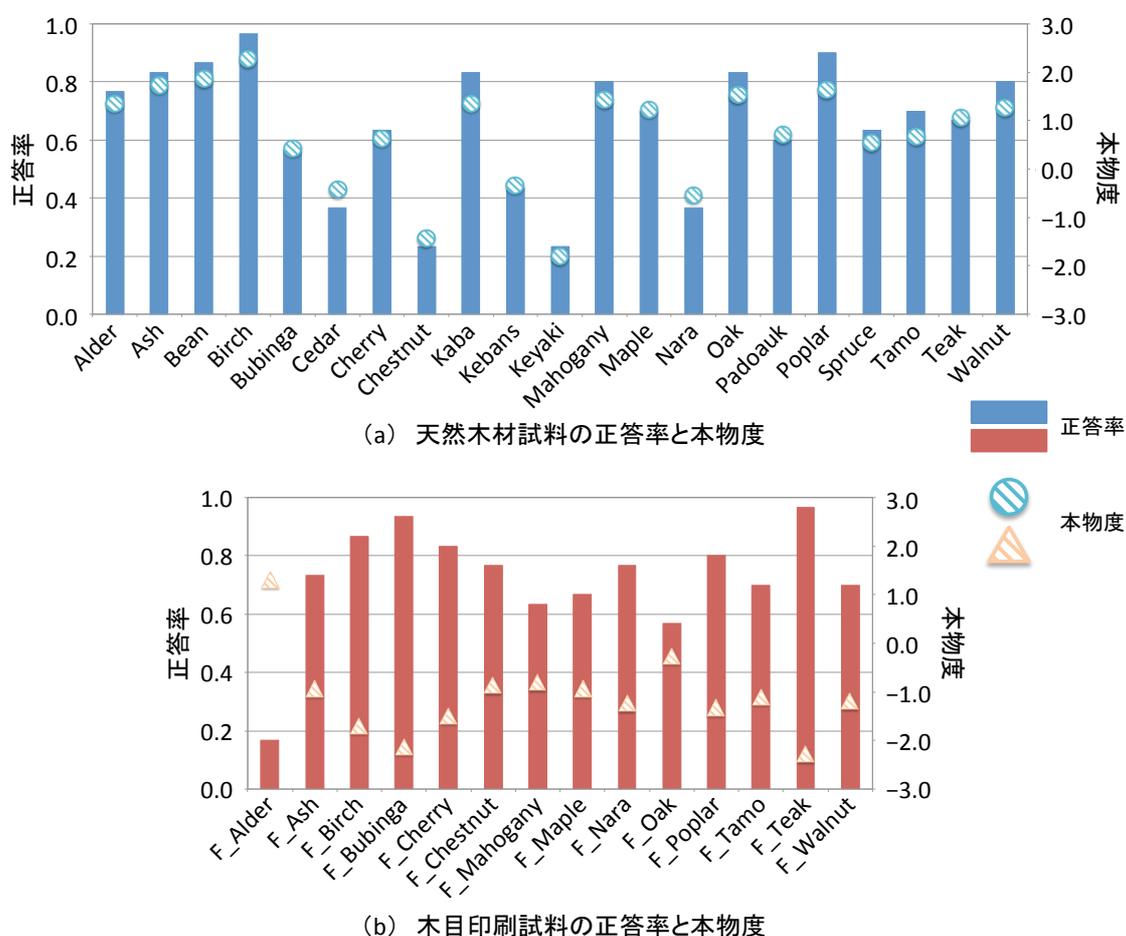


図 3.2 各木材試料の正答率と本物度

また，図 3.2 には第 2 章と同様に本物度を算出し，円形と三角形プロットで示している．本物度は，グラフ右軸で示している．本物度の平均は，天然木材試料 0.72，木目印刷試料-1.07 である．天然木材試料と木目印刷試料の本物度が

### 第3章 実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

大きく異なる傾向は、第2章の図2.20で示した視距離40cmにおける本物度の平均（天然木材試料：1.31，木目印刷試料：-1.70）と同様である。求めた本物度と測色的特徴の関係を調べることで、どのような特徴が木材の本物らしさに影響を与えているかを明らかにする。

## 3.3 木材試料の測色的分析

木材試料の測色的特徴を得るために、木材試料の表面を二次元色彩輝度計（KONIKA MINOLTA: CA-2000A）を用いて測色し、CIE 1931 XYZ 三刺激値を得た。測色環境は、図3.1に示した環境と同様のものを使用した。二次元色彩輝度計は、57×57mmの範囲を570×570pixelsの解像度で測色した。

### 3.3.1 CIELAB 色空間を用いた分析

最初に、色評価に一般的に用いられるCIELAB色空間の各指標と本物度との関係を調べる。図3.3に本物度と $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $h_{ab}$ 、 $C_{ab}^*$ の関係、表3.1に本物度と各指標との相関係数( $r$ )を示す。各指標は、全面素の平均値を用いて算出した。このとき、 $h_{ab}$ 、 $C_{ab}^*$ はCIELAB色空間における色相と彩度にあたる、メトリック色相角とメトリッククロマである。以下に計算式を示す。

$$h_{ab} = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3.1)$$

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.2)$$

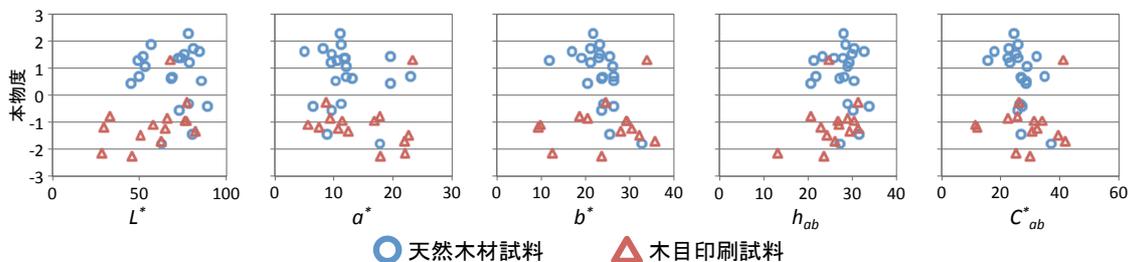


図3.3 本物度とCIELAB色空間における各指標の関係

表 3.1 本物度と CIELAB 色空間における各指標の相関係数

	相関係数( $r$ )				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$h_{ab}$	$C_{ab}^*$
天然木材試料	-0.10	-0.11	-0.57	-0.17	-0.49
木目印刷試料	0.40	-0.03	0.26	0.31	0.17

図 3.3 は、横軸に各指標の値、縦軸に本物度を示している。横軸に注目すると、天然木材試料と木目印刷試料の値は重なっており、木材の色としては区別できないことがわかる。表 3.1 から、天然木材試料と  $b^*$  の中程度の相関 ( $r = -0.57$ ) が最も高い相関であることがわかる。CIELAB 色空間の指標では、総じて高い相関は得られない。また、各指標は全画素の平均値を用いて算出しており、二次元色彩輝度計による測色で求められた色分布を考慮していない。そこで、色の分布を考慮できる画像統計量との関係を調べる。

### 3.3.2 画像統計量

画像統計量は、画像の全画素値を用い統計的に扱うことで特徴を表す特徴量である。ここでは、画像統計量として基本的な平均、標準偏差、分散、歪度、尖度について説明する。

#### ○平均値 (mean)

任意の画像において、画像サイズが  $H \times W$ 、 $(i, j)$  の画素値が  $I_{ij}$  であるとき、平均  $m$  は次のように表される。

$$m = \frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_{ij} \quad (3.3)$$

この値は、算術平均と呼ばれている。平均は、画素値の中にノイズなど周辺から大きく逸脱した値が含まれる場合、その値に強く影響をうける。

### 第 3 章 実験 2 : 画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

#### ○標準偏差 (standard deviation) と分散 (variance)

標準偏差と分散は、どちらも画素値のばらつきの程度を表す指標である。標準偏差  $\sigma$  と分散  $V$  は次式により求められる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (I_{ij} - m)^2} \quad (3.4)$$

$$V = \sigma^2 \quad (3.5)$$

輝度ヒストグラムの標準偏差は、自然画像におけるコントラストに対応することが知られている[30]。また、画像における RMS コントラストは、標準偏差と同じ値である。分散は標準偏差の 2 乗であるため、画素値との単位が異なる。そのため、一般的に画素値のばらつきを示す場合には、標準偏差が使用される。

全画素値の分布に対し、平均値を中心としてどのような形状になっているかを評価する値は、次数によって定義している。これは、 $k$  次の中心モーメントと呼ばれており[23]、次のように表せる。

$$M_k = \frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (I_{ij} - m)^k \quad (3.6)$$

$k=2$  のとき、つまり二次の中心モーメントとは分散のことである。分散は、平均値を中心として、分布の広がり具合を表しており、値が大きくなるほど平均値から離れた値の多い、分布の裾が広い形状となっている。

#### ○歪度 (skewness)

歪度は、三次の中心モーメントであり、平均値を中心として分布の偏りを表す指標[23]である。歪度は次のように表せる。

$$s = \frac{M_3}{\sigma^3} \quad (3.7)$$

歪度が負の場合、平均より左側に分布の裾、テールが広がっている。同様に、正の場合は、右側に広がる。また、0 の場合は、平均値を中心として左右に偏りのない線対称な形状となる。

### ○尖度 (kurtosis)

尖度は、4 次の中心モーメントであり、平均値を中心として分布の尖り具合を表す指標[23]である。尖度は次のように表せる。

$$t = \frac{M_4}{\sigma^4} \quad (3.8)$$

正規分布のとき、尖度は 3 になる。尖度が 3 より大きい場合、分布は鋭いピークを持ち、それを中心に裾が広がる形状である。また尖度が 3 より小さい場合は、分布は平坦な形状になり裾はあまり広がらない。

### 3.3.3 画像統計量を用いた分析

各木材試料の色の分布、つまりヒストグラムを示す。ヒストグラムは ATD 色空間の各値を用いて算出する。これは、CIE1931XYZ 三刺激値から CIELAB 色空間に変化する場合、非線形変換を伴うため、評価したヒストグラムの形状とは異なってしまふ。そのため、線形変換のみで輝度と色に分離することができる ATD 色空間を用いて評価する。

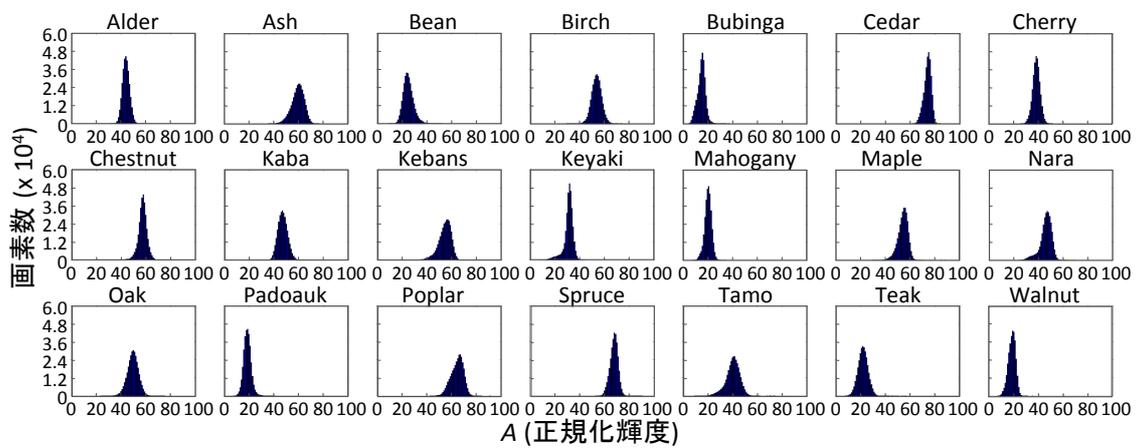
ここで ATD 色空間とは、Guth の色モデル[31]を元に定義した空間である。CIE1931XYZ 三刺激値を式 (3.9)、(3.10) によって、ATD 色空間へ線形変換が可能である。

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

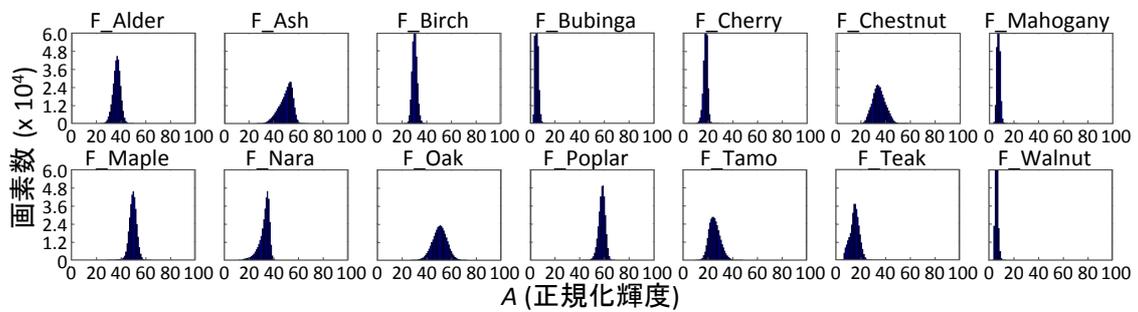
$$\begin{pmatrix} A \\ T \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3710 & 0.6291 & 0.0 \\ 1.0 & -1.0 & 0.0 \\ 0.3710 & 0.6291 & -1.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

式 (3.9) は、Hunt-Pointer-Estevéz[32]により提案された変換マトリクスを用いて、CIE1931XYZ 三刺激値から LMS 錐体刺激値へ変換する。また式 (3.10) は、等エネルギー白色  $X = Y = Z$  のとき  $T = D = 0$  を満たす行列である。A は輝度 Y と同様の値である。T は赤緑反対色軸、D は黄青反対色軸を表している。この色空間は、輝度軸と色軸が分離されており、色軸である T と D は 0 を無彩色とした赤緑、黄青反対色軸である。

図 3.4, 3.5, 3.6 に、天然木材試料と木目印刷試料の A, T, D それぞれのヒストグラムを示す。



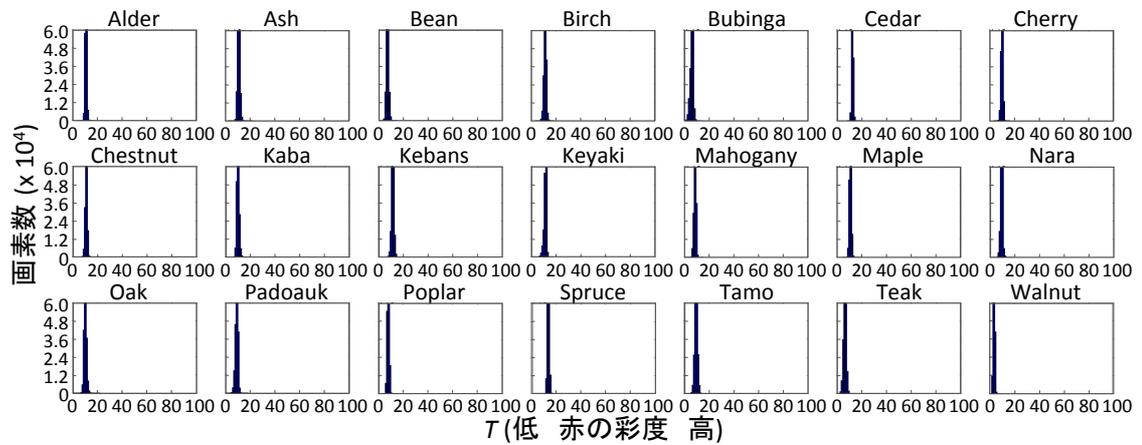
(a) 天然木材試料



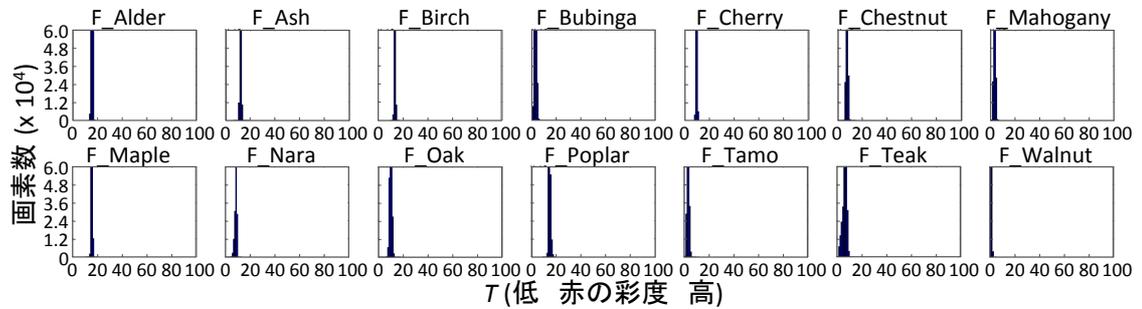
(b) 木目印刷試料

図 3.4 木材試料の A のヒストグラム

第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響



(a) 天然木材試料



(b) 木目印刷試料

図 3.5 木材試料の  $T$  のヒストグラム

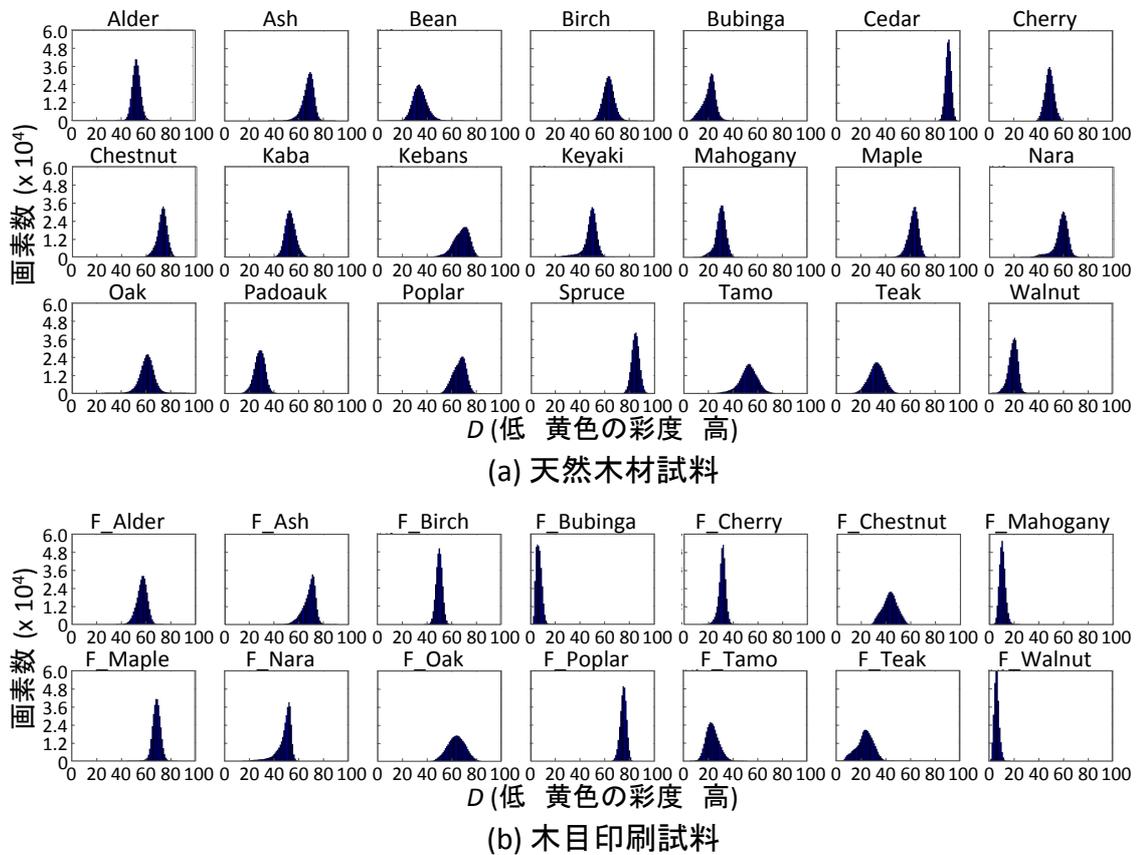


図 3.6 木材試料の  $D$  のヒストグラム

### 第3章 実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

各図は、横軸に  $A$ ,  $T$ ,  $D$  それぞれの値、縦軸に画素数をとっている。また  $A$  の横軸は、最大輝度である白が 100 になるように正規化をしている。全てのヒストグラムで、単峰性の分布を示した。 $A$  と  $D$  の分布は比較的分散が大きいが、 $T$  の分布は小さくなっている。また、天然木材と木目印刷の分布を比較すると、 $A$  と  $D$  の木目印刷の分布において、一部分散が小さい樹種も見られるが、全体的に天然木材と木目印刷を明確に分類できるような分布の差は見られない。

分布の形状を詳細に評価するために、 $A$ ,  $T$ ,  $D$  それぞれの分布から平均、標準偏差、歪度、尖度を算出した。3.3.1 では、これらの画像統計量の説明を行う。

図 3.7 に  $A$ ,  $T$ ,  $D$  それぞれの上記の画像統計量と本物度との相関を示す。また、表 3.2 には本物度と各画像統計量との相関係数 ( $r$ ) を示す。

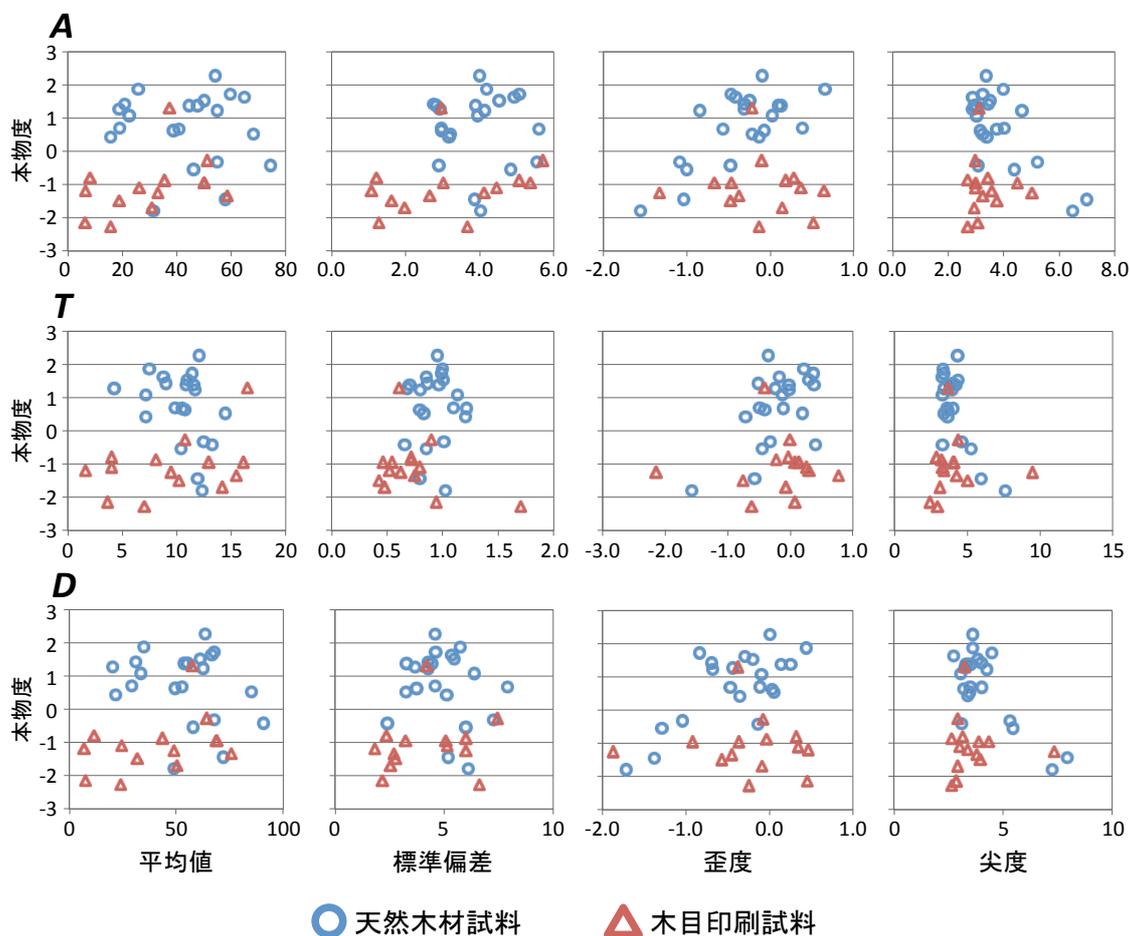


図 3.7 ATD 各ヒストグラムの画像統計量と本物度の関係

### 第3章 実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

表 3.2 ATD 各ヒストグラムの画像統計量と本物度の相関係数 ( $r$ )

		相関係数( $r$ )			
		平均	標準偏差	歪度	尖度
天然木材試料	A	-0.10	-0.02	0.71	-0.75
	T	-0.35	0.04	0.57	-0.71
	D	-0.23	-0.20	0.70	-0.74
木目印刷試料	A	0.38	0.26	-0.12	0.00
	T	0.40	-0.36	0.02	0.07
	D	0.39	0.18	-0.08	0.00

横軸に各画像統計量の値，縦軸に本物度を表している．青色円形シンボルが天然木材試料，赤色三角シンボルが木目印刷試料を表している．グラフ全体の傾向として，本物度によって天然木材試料と木目印刷試料が分けられているのがわかる．表 3.2 より，天然木材試料の場合，平均値，標準偏差には，本物度との強い相関が見られなかった．しかし，歪度と尖度に関しては， $A, T, D$  のヒストグラム全てに中程度以上の相関が見られた．また，木目印刷試料の場合，平均値，標準偏差には弱い相関が見られるものの，歪度と尖度に関しては，相関がみられない．

ここで，いずれの要素の影響が大きいかを考える．質感知覚に対する影響は，数々の先行研究によって，輝度ヒストグラムの影響が大きいことが示唆されている[3-7]．このことから，輝度つまり  $A$  の値に注目する．天然木材試料の場合，本物度と歪度，尖度の間に高い相関がみられる．しかし，木目印刷試料の場合，相関が見られない．この原因として，第 2 章の実験では，視距離 40 cm における木目印刷試料の本物らしさには，網点由来と考えられる空間周波数のスパイクが大きく影響していることを示した．この影響により，木目印刷試料に本物らしさを感じにくくなっていた．同様の手法を用いたこの実験においても，木目印刷試料の本物度は小さくなる同様の傾向を示している．このことから，木目印刷試料の本物度は，空間周波数のスパイクの影響により全体的に小さい値に収束し分散が小さくなったため，歪度と尖度に対し相関が得られなかったと考えられる．以上の理由により，本物らしさに影響を与える可能性がある歪度と尖度について，天然木材試料に注目した分析を行う．

天然木材試料の本物度は，輝度ヒストグラムの歪度と尖度に対し高い相関を示した．歪度と尖度は独立した統計量であるが，共に本物度と同程度の高い相関を示したことから，歪度と尖度の間に関係性があると考えられる．そこで，

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

図 3.8 に、本物度，歪度，尖度の 3 つのパラメータの関係を示す。

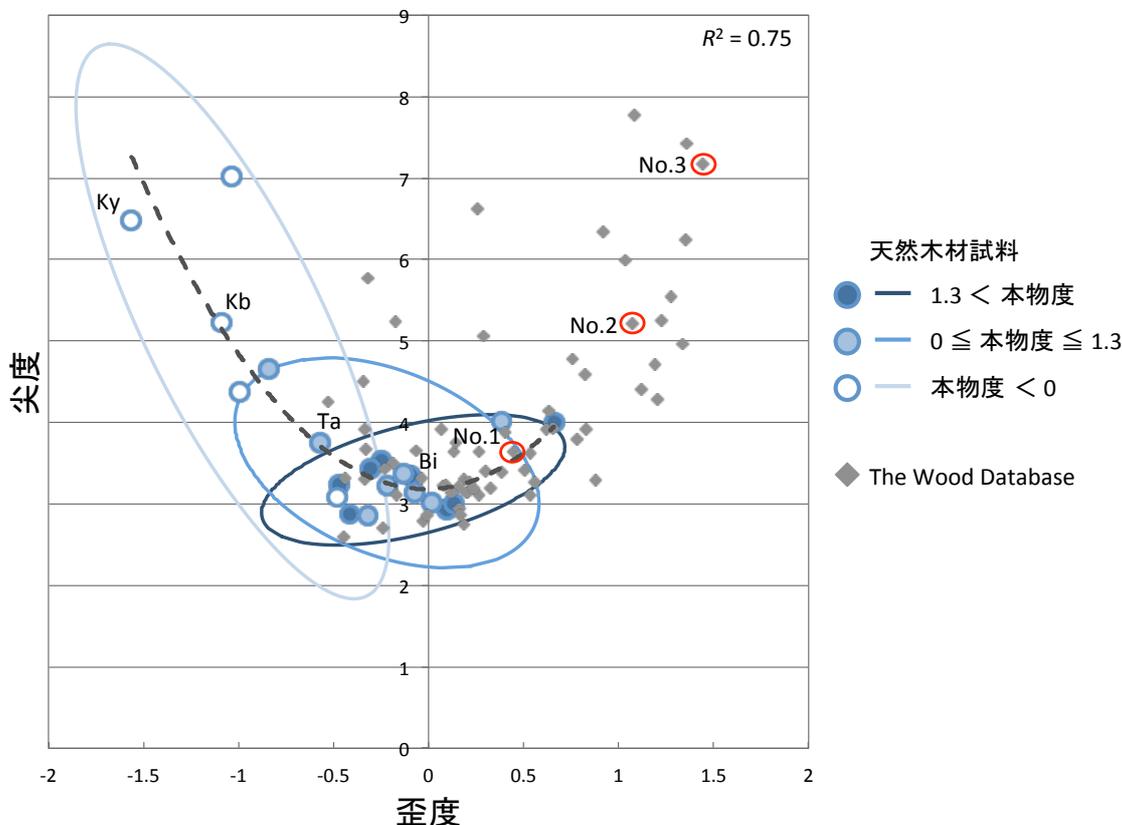


図 3.8 天然木材試料の本物度，歪度，尖度の関係

横軸に輝度ヒストグラムの歪度，縦軸に輝度ヒストグラムの尖度を表している。円形シンボルが天然木材試料を表しており，シンボルの塗りつぶしにより 3 段階に分けた本物度の違いを表している。歪度と尖度の分布は，歪度が負に偏っており，歪度が正の樹種は少ない。木材の試料数を増やした場合に，歪度と尖度の関係がどのようなになるかを調べるために，木材に特化した画像データベースである the Wood Database[33]から 66 枚の木材画像を取得した。灰色の菱形は，the Wood Database から得られた木材画像の輝度ヒストグラムの歪度と尖度の関係を表している。データベースの画像の多くは，スキャナによって画像化されているが使用機器は不明である。データベースの菱形のプロットは，測色値から計算した天然木材試料の円形プロットと，歪度が 0 付近で重なり，歪度が正の方向に大きく伸びている。これは，輝度ヒストグラムは樹種によっては，歪度が正の場合も有り得ることを示唆している。以上より，木材の輝度

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

ヒストグラムの歪度と尖度の関係は、歪度が正負の両方に広がると考え、天然木材試料のプロットに対し、二次関数によるフィッティングを行った。その結果を、図中に点線で示す。フィッティングの結果は、決定係数  $R^2 = 0.75$  と高い値であった。このように、本来独立した統計量である歪度と尖度が二次関数状に分布する関係は、木材の輝度ヒストグラムの特徴であるといえる。

次に、シンボルの塗り分けにより 3 段階に分けた本物度に注目する。本物度の分布は、本物度が高い場合は歪度が 0 付近、尖度は 3 付近にあり、本物度が低くなると歪度は小さく、尖度は大きくなるように分布している。この傾向は、図 3.7 の歪度と本物度に正の相関、尖度と本物度に負の相関があることから確認できる。歪度、尖度、本物度の 3 つのパラメータの関係をさらに鮮明にするため、3 段階に分けた本物度のそれぞれに、90%信頼楕円を描いた。最も本物度が高いグループ（本物度  $> 1.3$ ）は、座標系の中心に集中しており、本物度が低いグループは、歪度が負の方向へ分散が大きく広がっている。最も本物度が高いグループの楕円の中心座標は、(歪度, 尖度) = (-0.08, 3.30) となり、このグループに含まれるプロットの平均値 (歪度, 尖度) = (-0.08, 3.29) にほぼ一致する。しかし、この座標は、図 3.8 から読み取れる外れ値 (歪度, 尖度) = (0.66, 4.00) の影響を強く受けている。このグループの中央値を計算すると (歪度, 尖度) = (-0.17, 3.30) となる。これらの結果から、木材の輝度ヒストグラムの歪度が 0 よりも僅かに負、且つ尖度が 3.3 付近である場合に、木材は本物らしく見える可能性が示唆される。

### 3.4 画像評価実験

木材試料の本物らしさ評価と分析から、本物らしい木材には適切な歪度と尖度の値があることが示唆された。これを確かめるために、木材画像を用いた画像評価実験を行った。この実験では、木材画像の輝度ヒストグラムの歪度と尖度を変化させ、本物らしさが変化するかどうかを評価した。

### 3.4.1 実験環境

実験は、暗室ブース内に設置した ViSaGe (Cambridge Research Systems Co. Ltd.)によりコントロールされた 21 インチ CRT モニタ (Sony GDM-F500) に画像を呈示して行った。被験者は 125 cm 離れた場所から頭部を顎台に固定し観察した。モニタの背景輝度は  $18 \text{ cd/m}^2$  (マンセルバリューで N5 相当) とした。

### 3.4.2 テスト画像

画像サイズは、 $570 \times 570 \text{ pixels}$ 、視角  $8.0 \times 8.0^\circ$  ( $0.31 \text{ mm/px}$ ,  $71 \text{ px/deg}$ ) とした。この大きさは、 $57 \times 57 \text{ mm}$  の実物を 41 cm 離れて観察した場合と同等のサイズである。テスト画像は、二次元色彩輝度計により得られた測色値を用い、輝度ヒストグラムの形状を系統的に変化させることで作成した。変調方法は、ヒストグラム特定化を使用した。ヒストグラム特定化は、ヒストグラムを用いた画像処理において一般的な方法である[34]。

ヒストグラム特定化は、次の3つの式で構成される。

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)dw \quad (3.11)$$

$$s' = G(z) = \int_0^z p_z(t)dt \quad (3.12)$$

$$z = G^{-1}(s') = G^{-1}(s) = G^{-1}\{T(r)\} \quad (3.13)$$

式 (3.11) は入力値、つまり形状を変化させたいヒストグラムを入力する。右辺の  $p_r(w)$  に任意のヒストグラムの確率密度関数を入力し、積分をすることで累積密度関数  $T(r)$  が得られる。このとき  $s$  は、任意の  $r$  の値に対して一定の値となる、平滑化された値である。ターゲットとなるヒストグラムに対しても同様に式 (3.12) を用いて計算すると、 $G(z)$  と平滑化された値  $s'$  が得られる。 $s = s'$  が成り立つため、式 (3.13) のように逆関数を用いることで、任意のヒストグラムにおける入力値  $r$  からターゲットとなるヒストグラムの値  $z$  へ変換することができる。

ヒストグラム特定化には、base 画像のヒストグラム ( $p_r(w)$ ) と target 画像のヒストグラム ( $p_z(t)$ ) が必要となる。base 画像として天然木材試料から Birch (Bi), Tamo (Ta), Kebans (Kb), Keyaki (Ky) の 4 種類, target 画像として base 画像の

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

4 種類と、the Wood Database から No. 1, No. 2, No. 3 の 3 種類、計 7 種類の画像を用いた。これらの画像は、図 3.8 に示した 3 つのパラメータの関係を基準に選んだ。base 画像の 4 種類は、回帰曲線に沿って本物度が最も高かった Birch から Keyaki まで本物度が下がり、且つ歪度が等間隔になるような天然木材試料を選んだ。また、歪度が正の場合の影響も調べるために、target 画像には、回帰線に沿い歪度が等間隔になるような画像を、the Wood Database から 3 種類を選んだ。図 3.8 には、選択した 7 種類の画像の記号を示す。

画像変調は、CIE1931XYZ 三刺激値に対して行った。base 画像の輝度  $Y$  のヒストグラムを target 画像の輝度ヒストグラムに一致させた。輝度ヒストグラムの標準偏差は、自然画像におけるコントラストに対応することが知られているため[30]、base 画像とテスト画像の標準偏差が異なると、印象が大きく異なってしまう。そのため、変調後の輝度ヒストグラムの平均値と標準偏差は、base 画像の値に一致させた。 $X$ と $Z$ については、変調した $Y$ を基準として base 画像の色度が保たれるように変調した。図 3.9 にテスト画像と各パラメータの値を示す。図中における画像の赤枠は、base 画像と target 画像が一致している画像、つまり変調を行っていない画像を示している。

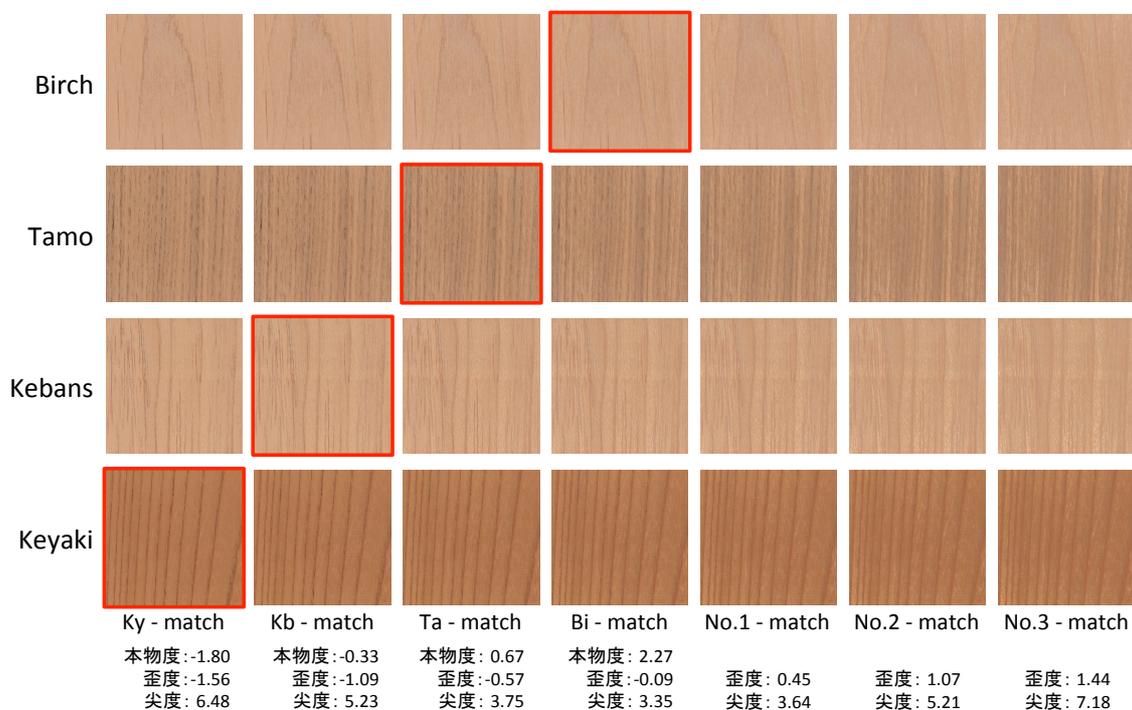


図 3.9 テスト画像とその画像のパラメータ

### 3.4.3 評価方法

テスト画像の評価には，サー斯顿の一対比較法を用いた．テスト画像の比較は，同じ base 画像同士のみで行ったため，4 種類の base 画像それぞれに対する 21 種類のペア，計 84 ペアを順不同で CRT モニタに呈示した．被験者は，左右に呈示された 2 枚の木材画像を比較し，より本物らしい方の画像を選択した．画像の観察時間，選択時間は無制限とした．画像選択後，背景と同じ灰色をブランクとして 2 秒間呈示した後，次の画像ペアが呈示された．

画像評価実験には，3.2 の木材試料の本物らしさ評価に参加した，20 代男女 10 名が参加した．

### 3.4.4 実験結果

テスト画像のパラメータは、二次関数状に分布する輝度ヒストグラムの歪度と尖度を基準として決定した。そこで、最初にテスト画像の歪度と尖度に対する評価結果の、3つのパラメータを用いた結果を図 3.10 に示す。

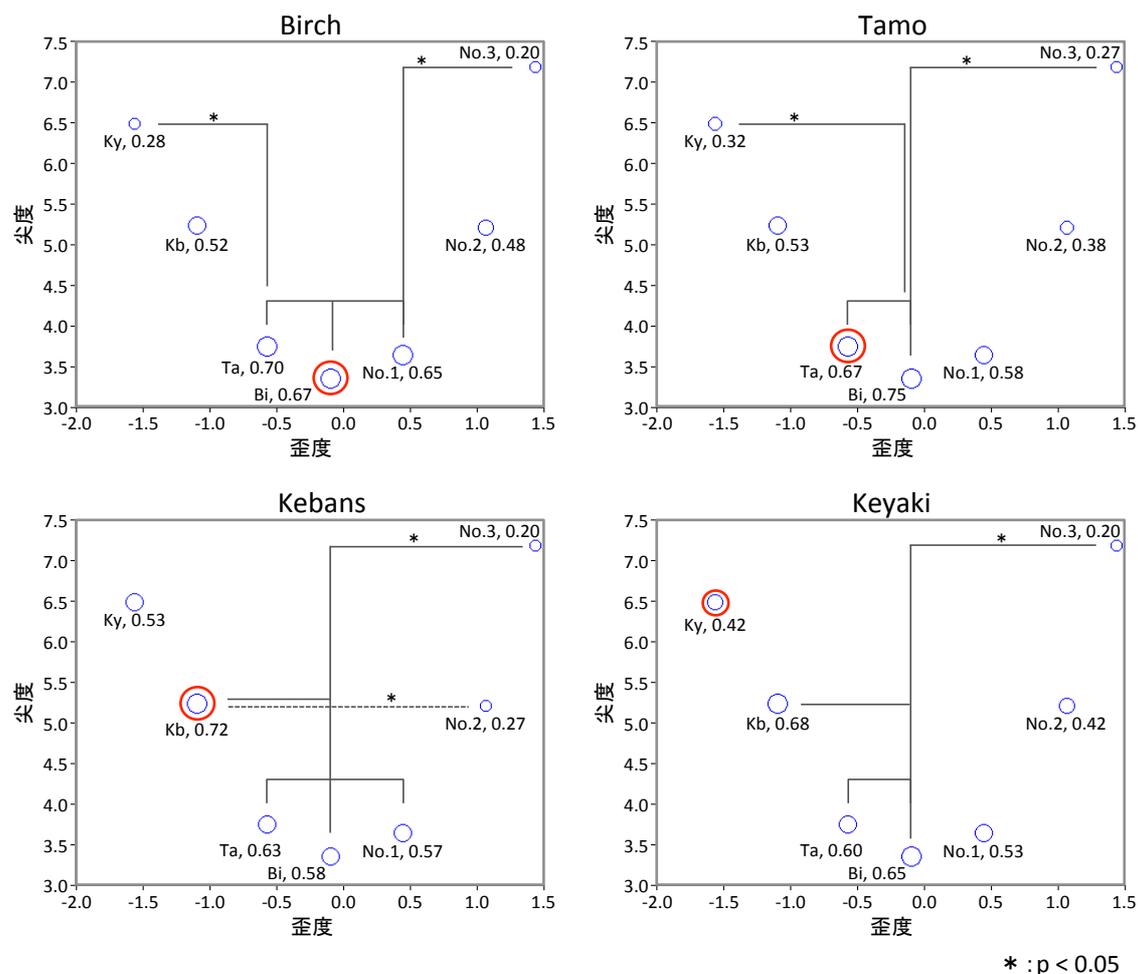


図 3.10 標準偏差一定のときの歪度，尖度と本物らしさの関係

各グラフは、各 base 画像の全被験者応答の平均を示している。横軸にテスト画像の歪度，縦軸に尖度を示している円形プロットの大きさは、評価結果である本物らしいと応答した確率を表しており、直径が大きいほど確率が高い、つまり本物らしいことを意味している。ここでは、この確率を本物らしさとする。グラフ中に各プロットに対応するテスト画像の、target 画像の記号と本物らしさを数値として示している。赤丸は、base 画像と target 画像が等しい画像の結

### 第3章 実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

果を示している。有意差については後述する。円形プロットの大きさが、歪度が0よりも僅かに負、且つ尖度が3.3付近である、target画像がBiやTaの場合に、大きくなっていることがわかる。この傾向は、図3.8と同様である。しかし、このグラフからでは、評価結果である本物らしさの量的関係が把握しづらい。そこで、本物らしさに対する歪度と尖度を別々に表したグラフを次に示す。

まず、図3.11にテスト画像の輝度ヒストグラムの歪度と本物らしさの関係を示す。

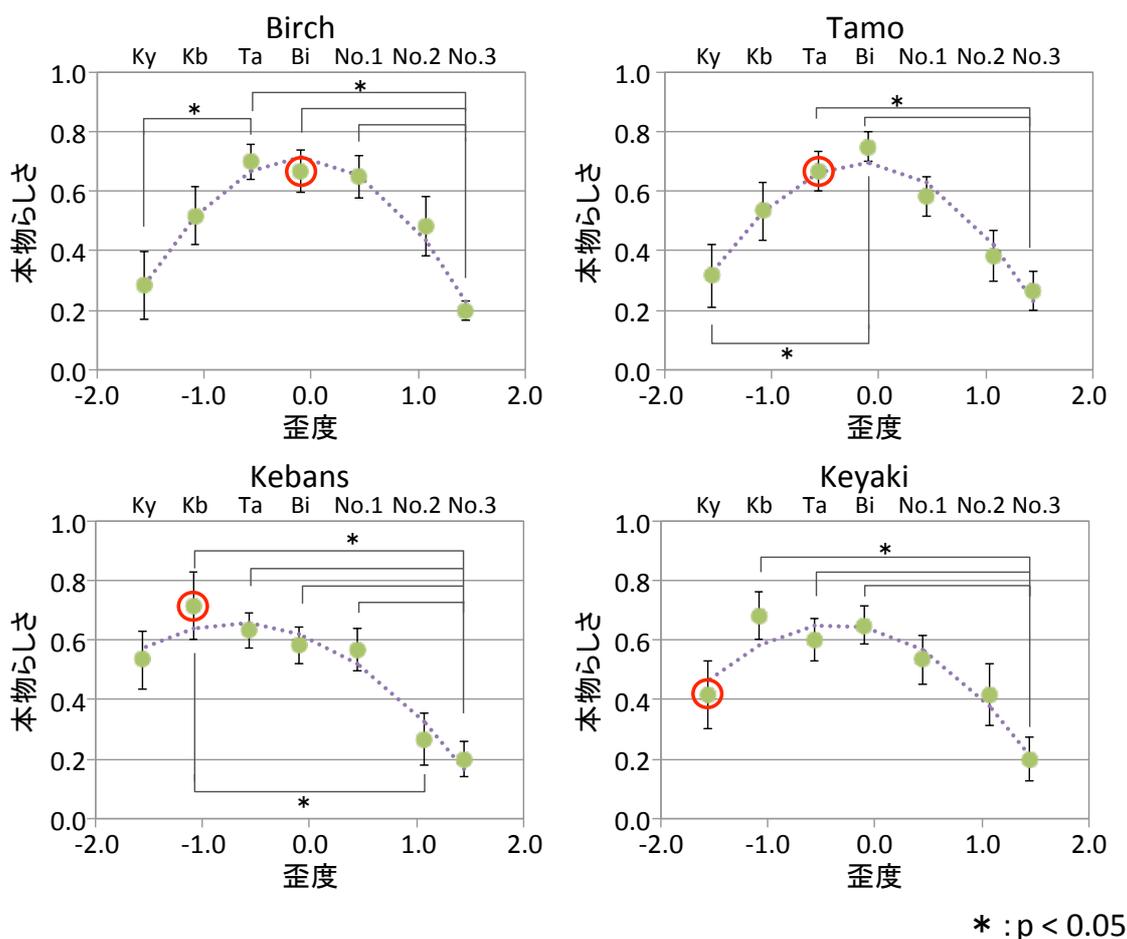


図 3.11 標準偏差一定のときの歪度と本物らしさの関係

横軸はテスト画像の歪度、縦軸は本物らしさを表している。エラーバーは、標準誤差を表している。グラフ中の赤丸は、base画像とtarget画像が等しい、つまり変調を行っていない画像の結果を示している。実験結果に対して、二次関数によるフィッティングを行い、点線で示している。どのbase画像においても、全体的に中央付近にピークのある山型になっている。フィッティング関数

### 第3章 実験2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

のピーク，つまり頂点の歪度の平均は-0.33 (Birch, -0.10; Tamo, -0.15; Kebans, -0.68; Keyaki, -0.37) であった。本物らしさは，歪度が±2付近で低下している。また，比較的中央付近のエラーバーの長さが短いのに対し，外側に行くほど長くなっている。被験者別の結果を見ると，歪度が0付近の画像に対しては安定して高めの本物らしさであるが，歪度が±2付近では，本物らしさを高くする被験者と低くする被験者の両方が存在していた。base画像別に見ると，Kebans以外は，変調を行うことで本物らしさが高まる画像があることを示している。

1 要因の反復測定分散分析を行った結果，1%の水準でどのbase画像においてもグループ間に有意差があった (Birch,  $F_{(6, 54)} = 4.79$  : Tamo,  $F_{(6, 54)} = 4.50$  : Kebans,  $F_{(6, 54)} = 4.78$  : Keyaki,  $F_{(6, 54)} = 3.33$ ,  $p < 0.001$ )。これは，歪度が各base画像の本物らしさに影響を与えていたといえる。有意差は，多重比較検定 (Ryan法, 5%水準) の結果を図示している。base画像がBirchの場合，Kb~No.2 (歪度, -1.09~1.07) の5画像間で差はなかったが，Ta~No.1 (歪度, -0.57~0.45) の3画像はNo.3 (歪度, 1.44) に，TaはKy (歪度, -1.56) に対して有意差があった。Tamoの場合，Kb~No.2の5画像間で差はなかったが，Bi (歪度, -0.09) はKy, No.3 (歪度, -1.56, 1.44) に，Ta (歪度, -0.57) はNo.3に対して有意差があった。Kebansの場合，Ky~No.1の5画像に差はなかったが，KbはNo.2, No.3に，Ta, Bi, No.1はNo.3に対して有意差があった。Keyakiの場合，Ky~No.2の6画像間で差はなかったが，Kb~Biの3画像はNo.3に対して有意差があった。これらの結果と，フィッティング関数の頂点から考えると，歪度は0より僅かに負である場合に本物らしさが高まると考えられる。

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

次に，図 3.12 にテスト画像の輝度ヒストグラムの尖度と本物らしさの関係を示す。

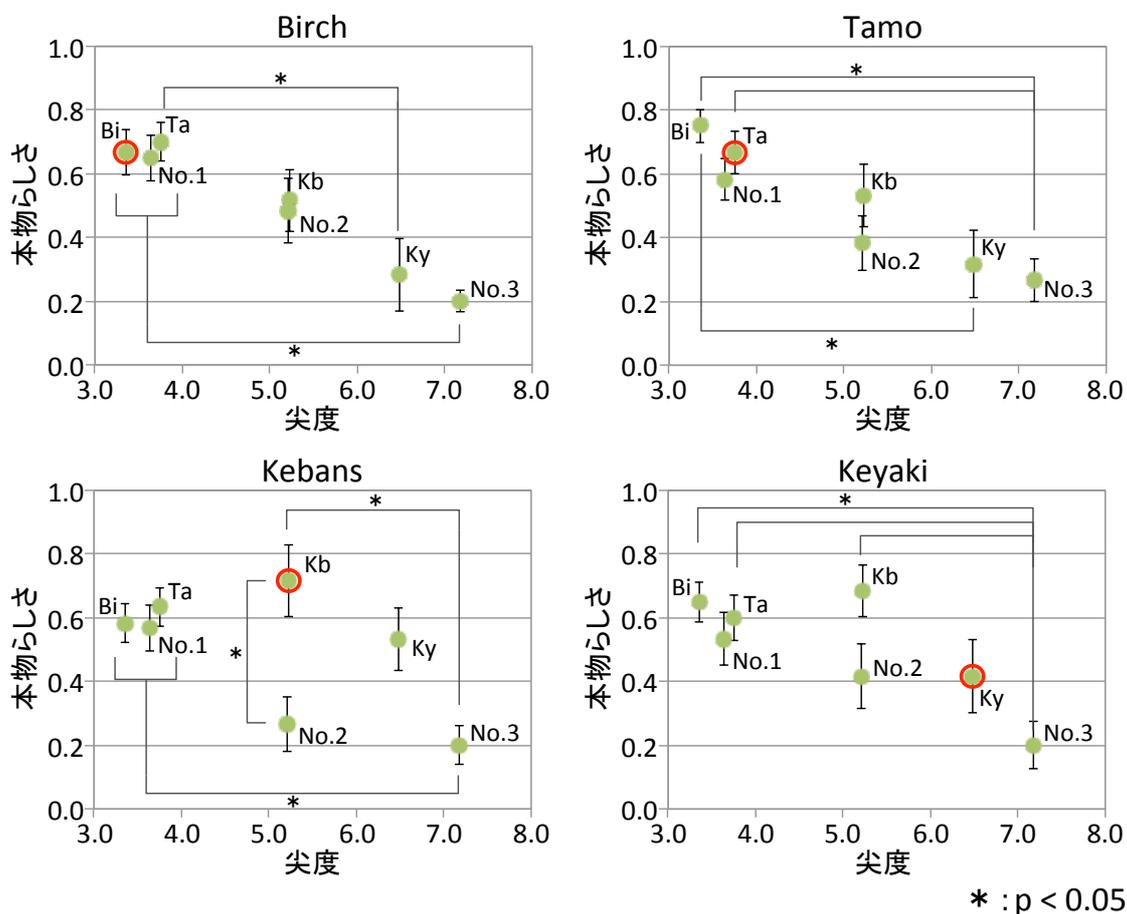


図 3.12 標準偏差一定のときの尖度と本物らしさの関係

横軸にテスト画像の尖度，縦軸に本物らしさを表している．エラーバーは，標準誤差を表している．赤丸は，base 画像と target 画像が等しい画像の結果を示している．全体的傾向として，尖度と本物らしさには負の相関があり，正規分布の尖度より僅かに大きいときに本物らしく，さらに尖度が大きくなると本物らしく見えていない．base 画像が Kebans や Keyaki では，尖度が中程度のときは本物らしさに差がある．図 3.10 で示したように，テスト画像の歪度と尖度の関係が二次関数状であるため，尖度によって一意的に本物らしさが決まらないことがわかる．

### 3.4.5 考察

画像評価実験において、輝度ヒストグラムの歪度と尖度が木材の本物らしさに与える影響を調べた。結果として、base 画像の歪度と尖度を変調することで、本物らしさが変化することがわかった。これは、本物らしい木材画像を得るためには、適切な歪度と尖度があることを示唆している。

輝度ヒストグラムの歪度と尖度の変化が、木目の見えにどのような変化を与えているかを考察する。本物らしさが変化した原因として、多くの被験者から受けた内観報告から、テスト画像の歪度と尖度の変化により木目の暗線部分の見えが特に変化していたことがあげられる。これを確かめるために、テスト画像の木目の輝度変化を調べる。

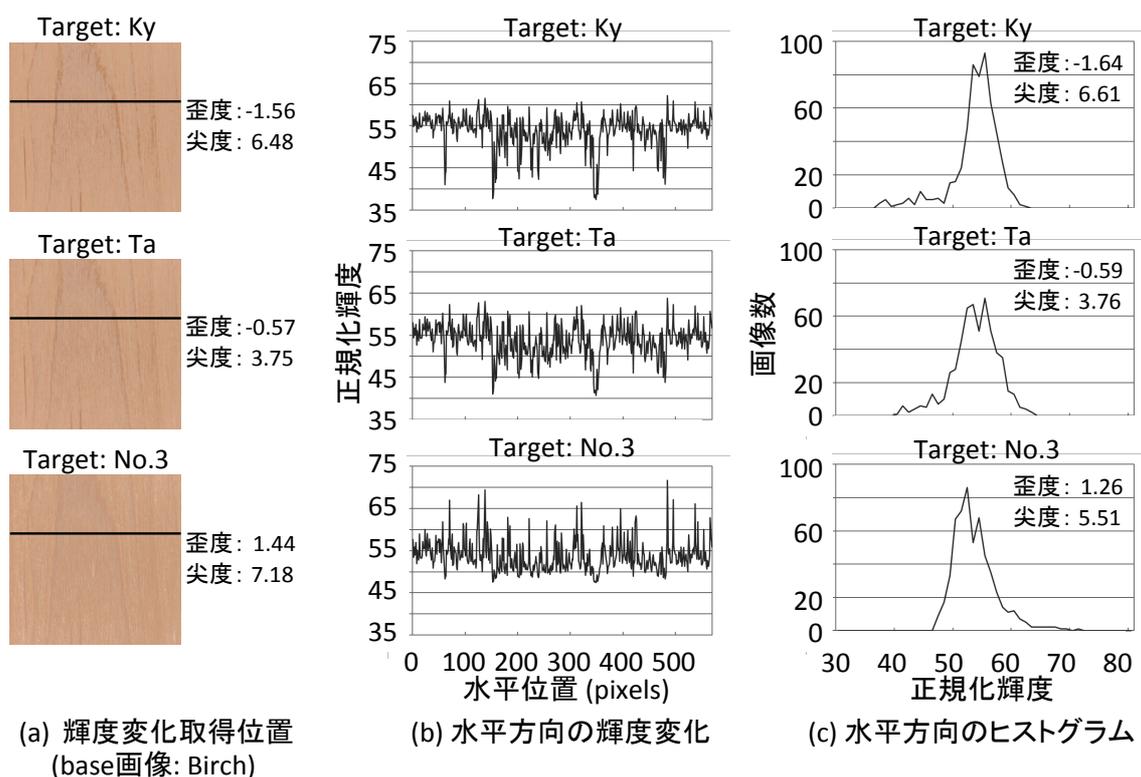


図 3.13 テスト画像の水平方向の輝度変化とそのヒストグラム

図 3.13 に、base 画像が Birch であるテスト画像の、歪度と尖度変化に伴う木目の輝度変化を示す。図 3.13 (a) は、実験結果の本物らしさが最も高かったテスト画像 (target 画像: Ta) と、本物らしさが低かったテスト画像 (target 画

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

像, Ky, No. 3) を示している. 各テスト画像の黒い水平線部分の輝度変化を, 図 3.13 (b) に示す. 図 3.13 (b) は, 横軸に水平方向の画素位置, 縦軸に正規化した輝度値を表している. target 画像が Ky であるテスト画像のピークの輝度変化は, target 画像が Ta であるテスト画像の輝度変化よりも, 低輝度方向に伸びている. 一方, target 画像が No. 3 の場合は, 高輝度方向に伸びている. この水平線部分の輝度のヒストグラムを, 図 3.13 (c) に示す. 各ヒストグラムの歪度と尖度も, 同時に示している. ここで求められた歪度と尖度は, テスト画像の一部であるにも関わらず, テスト画像全体から求めた歪度の値と大きな違いはない. つまり, 画像全体においても木目の暗線部分に変化していたと考えられる. このことから, 歪度と尖度の変化は木目の暗線部分の輝度変化を反映していると考えられる.

輝度ヒストグラムの歪度と尖度変化により, 木材画像の本物らしさが変化した理由として, 木目の暗線部分の輝度変化のバランスが崩れたことがあげられる. 仲村らは, 人工的に作製した柁目画像の滑らかな明暗変化が, 自然さに与える影響を調べた[16]. 彼らは, 木目が自然な印象を与えるには, 適切な明度コントラストが存在することを明らかにした. 本実験においても, 歪度と尖度が木目の輝度バランスを変化させる要素である可能性を示した. さらに, 歪度と尖度には木材が本物らしく見える適切な値があることを示唆した.

以上のことから, 輝度ヒストグラムの形状は, 光沢感[3]や新鮮さ[4-6]といった質感知覚に重要な要素であることが示唆されてきたが, 木材画像の本物らしさにも影響を与える要素であると考えられる.

## 3.5 総合考察

最初に, 実物を用いた木材試料の本物らしさ評価と, 画像評価実験の関係を考察する. 実物評価で得られた本物度は, 木材の輝度ヒストグラムの歪度が僅かに負, 且つ尖度が 3 より僅かに大きい場合に高くなった. 画像評価実験では, 実験結果にフィッティングした二次関数の頂点を考慮すると, 本物らしさが最大となるのは, base 画像にある程度依存するものの, 歪度が僅かに負のとき, 且つ尖度が 3~4 のときであった. このように, 実物評価と画像評価の結果は一

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

致している。このことから、実物の木材、または木材画像のどちらにおいても、輝度ヒストグラムの歪度が僅かに負、且つ尖度が 3 より僅かに大きい場合に、本物らしく見える可能性が示唆される。

実物を用いた実験では本物らしさの絶対評価であったが、画像を用いた実験では 2 つの画像を比較する相対評価であった。画像実験の評価方法を、実物実験と同様に絶対評価とした場合は、実物実験の結果とは異なる可能性が考えられる。なぜならば、実物を画像化することで様々なパラメータが変化するため、実物とは同じになり得ない。しかし、歪度と尖度に限定し変調した画像を用いた相対評価の場合も、実物を用いた絶対評価と同様の傾向を示した。評価方法が異なるが、どちらの実験においても歪度と尖度が本物らしさに影響を与える要因であることが示唆された。このことから、歪度と尖度のみが異なる実物を作成し、画像評価と同様の相対評価を行った場合も、画像評価の結果と同様になることが予想される。

他研究においても示唆されている輝度の画像統計量が質感に与える影響を、本実験でも確認することができた。輝度ヒストグラムの歪度と尖度を変調するという簡単な方法により、木材画像の本物らしさを向上させることができる可能性が示唆された。このことは、光沢感[3]や新鮮さ[4-6]といった物理的な状態と関係の深い質感だけではなく、本物らしさのような心理的な側面のある評価に対しても、輝度の画像統計量が影響を与えていると考えられる。輝度の画像統計量の変化による木材の本物らしさへの影響は、木目の見えの変化に関連していると考えられるが、これについてはさらなる研究が必要である。

画像の見えに影響を与える要素として、RMS コントラストつまり標準偏差の影響を考える。補足実験として、輝度の平均値を中心に線形変換によって base 画像の標準偏差を変化させ、テスト画像を作成した。実験は、これまでと同様の方法で行った。結果は、base 画像本来の標準偏差から離れるにつれ、本物らしく見えなくなった。この結果は、標準偏差の変調では base 画像以上に本物らしい木材画像を作ることはできないことを意味している。しかし、標準偏差の変調により本物らしさが低下したことは、標準偏差が木材画像の本物らしさに影響を与えているといえる。つまり、当然標準偏差も本物らしさには重要な要素である。しかし、元々の画像よりも本物らしい木材画像を作ることができる歪度と尖度は、木材の本物らしさにより影響力のある要素であると考えられる。

画像統計量の歪度と尖度は、独立したパラメータであるにも関わらず、木材

### 第 3 章 実験 2：画像統計量が木材の本物らしさに与える影響

---

の輝度ヒストグラムから算出した歪度と尖度には、図 3.8 に示すように二次関数状に分布する関係が見られた。これは、算出した歪度と尖度が互いに独立ではないことを意味している。画像評価実験では、変調方法にヒストグラムマッチングを用いたため、この歪度と尖度の関係は変調画像においても保たれていた。このため、実験結果である本物らしさも歪度と尖度の両方に相関が見られ、歪度と尖度の個別の本物らしさへの影響はわからなかった。これらを確認するためには、歪度と尖度のどちらかを一定にしたまま、片方のパラメータを自在に変調させる方法が必要である。この方法を用いた実験を行うことで、歪度と尖度の影響をより明確にすることができると考えられる。

## 3.6 結論

木材の本物らしさに影響を与える要素を、測色的特徴から調べた。最初に、木材の本物らしさを実物の木材試料を用い評価し、木材の本物らしさを表す本物度を定義した。また、木材試料を測色し、木材の測色的特徴を得た。本物度と測色的特徴の関係を調べたところ、本物度は輝度ヒストグラムの歪度と尖度に相関があることがわかった。この関係を調べるために、画像評価実験を行った。歪度と尖度を系統的に変化させた木材画像を用い、木材画像の本物らしさを評価した。結果として、輝度ヒストグラムの歪度と尖度は、木材画像の本物らしさに影響を与えていた。木材の本物らしさには輝度ヒストグラムの歪度と尖度が重要な要素であり、適切な値にすることで人工的な木材製品の本来らしさを向上させる可能性がある。

## 第4章 論文全体の総合考察

この章では、第2章、第3章で得られた結果を総合し、木材試料の物理的特性である湾曲度と歪度、尖度が、心理量である木材の本物らしさに与える影響を考察する。

第2章では、空間周波数特性が木材の本物らしさに与える影響を検討した。結果は、高空間周波数領域における強度変化が本物らしさに影響していることが示唆された。また、空間周波数のスパイクは本物らしさを低下させることが示唆された。第3章では、視距離41 cmにおいて、輝度ヒストグラムの歪度と尖度が、木材の本物らしさに影響を与えることが示唆された。

これらの結果を統合し、様々な視距離において、輝度ヒストグラムの歪度と尖度が木材の本物らしさに影響を与えるかどうかを考察する。

最初に、図2.20に示した湾曲度 ( $|a|$ ) と本物度の関係が、湾曲度を輝度ヒストグラムの歪度と尖度に変更するとどのようになるかを示す。図4.1(a), (b)に、視距離変化に伴う木材試料の本物度と輝度ヒストグラムの歪度、尖度の関係をそれぞれ示す。ここでは、本物度と歪度、尖度の量的関係を把握しやすくするため、別々のグラフに示す。

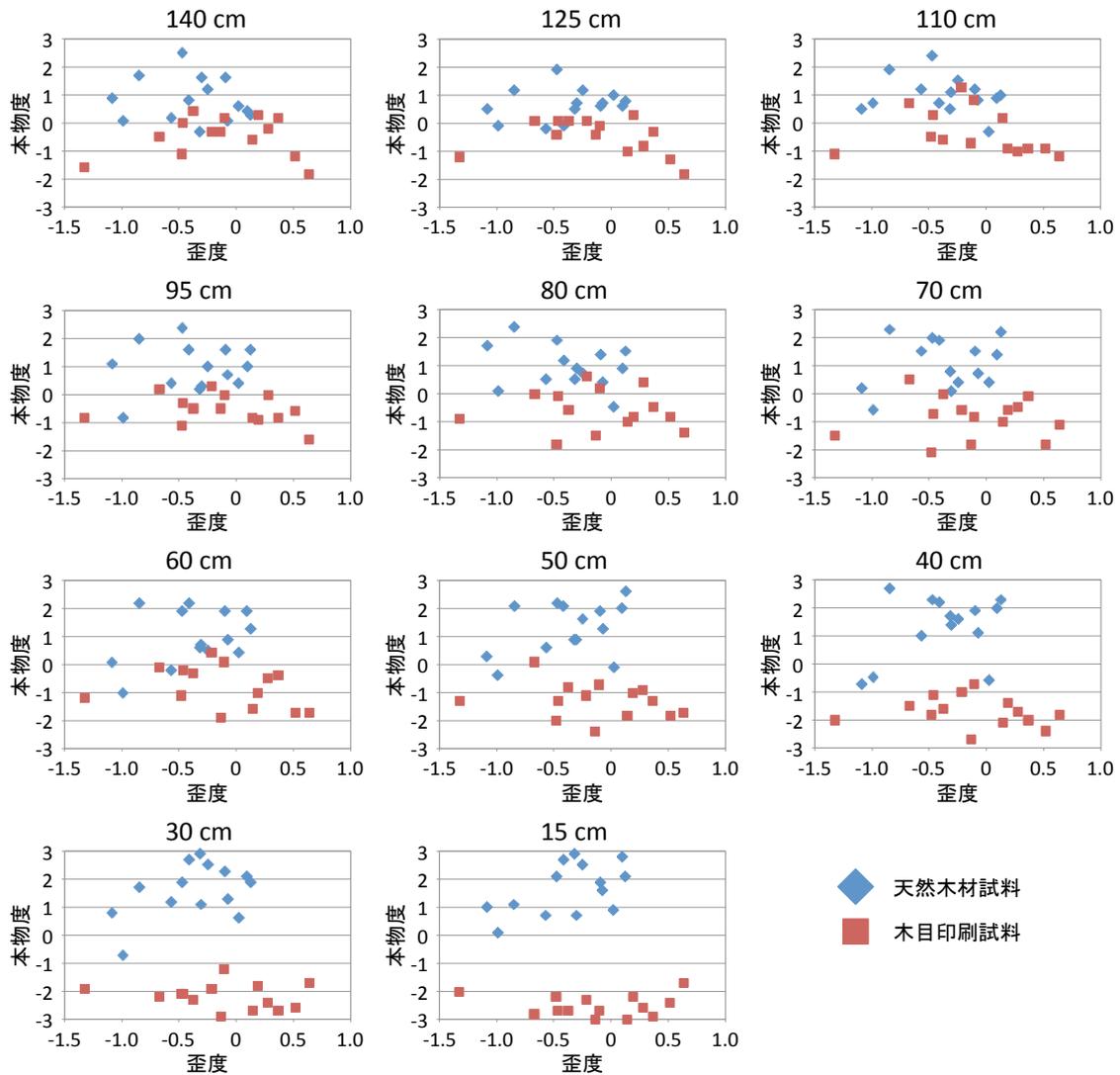


図 4.1 (a) 輝度ヒストグラムの歪度と本物度の関係

## 第4章 論文全体の総合考察

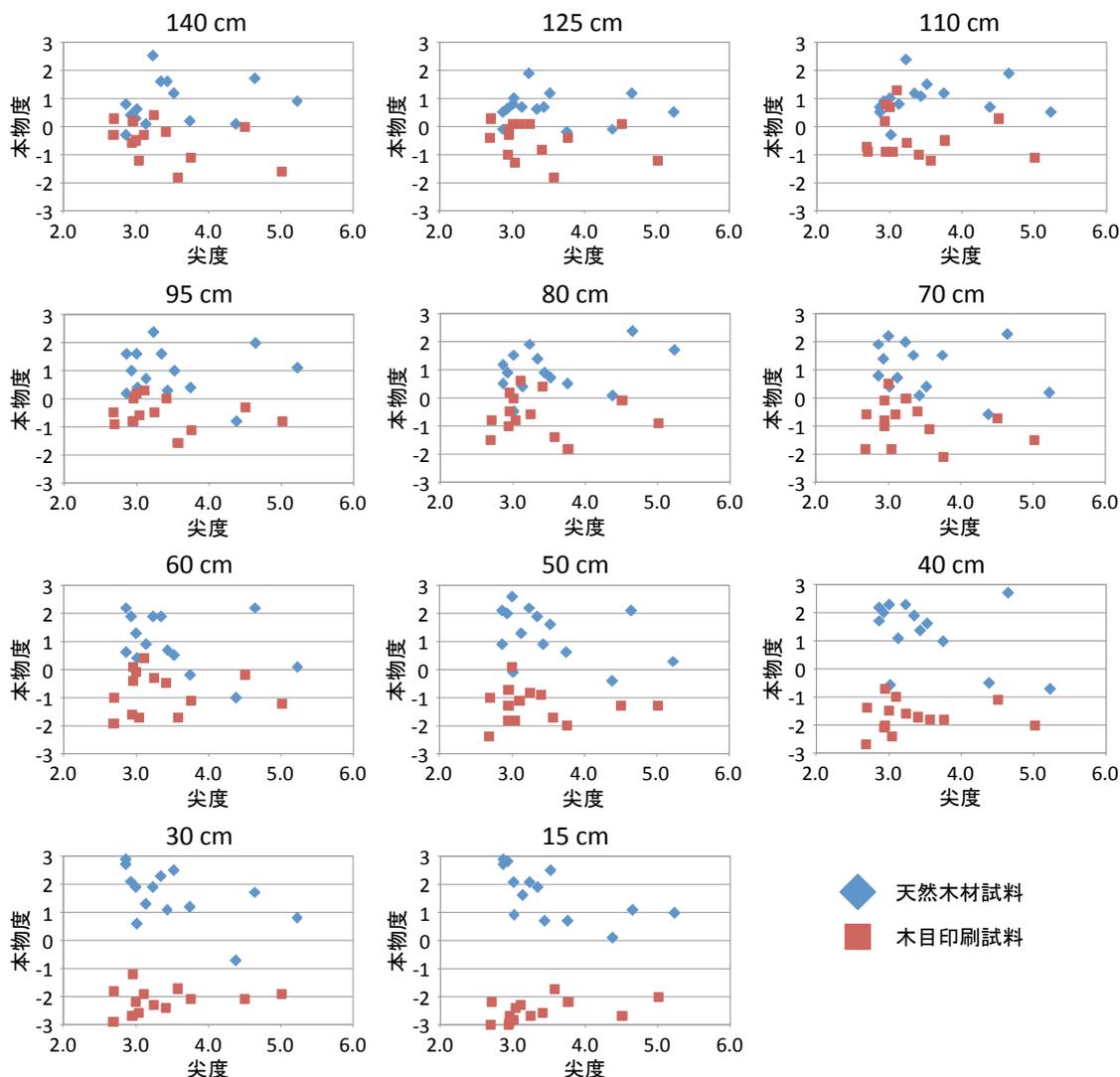


図 4.1 (b) 輝度ヒストグラムの尖度と本物度の関係

横軸に輝度ヒストグラムの歪度または尖度，縦軸に第 2 章 2.4 で説明した本物度を，視距離ごとにグラフで表している．シンボルは，青い菱形が天然木材試料，赤い四角が木目印刷試料を表している．木目印刷試料は，視距離が近くなるにつれて，歪度や尖度にかかわらず全体的に本物度が低く，つまり偽物として認識されているのがわかる．天然木材試料は，視距離が遠い場合は歪度や尖度との相関がみられない．しかし，視距離が近くなると，第 3 章で示したように歪度や尖度との相関があるように見える．

## 第 4 章 論文全体の総合考察

図 4.1 (a), (b) に見られた傾向を明確に示すために、表 4.1 (a), (b) に、本物度と歪度、尖度の相関係数をまとめ、図 4.2 (a), (b) には表 4.1 (a), (b) の散布図を示す。

表 4.1 視距離変化に伴う本物度と輝度ヒストグラムの歪度、尖度の相関係数

(a) 本物度と歪度の相関係数

視距離 (cm)	本物度と歪度の相関係数 ( $r$ )	
	天然木材試料	木目印刷試料
140	-0.14	0.08
125	0.22	-0.30
110	-0.17	-0.26
95	0.14	-0.27
80	-0.29	-0.05
70	0.26	-0.01
60	0.38	-0.28
50	0.42	-0.26
40	0.36	-0.18
30	0.45	-0.19
15	0.53	-0.01

(b) 本物度と尖度の相関係数

視距離 (cm)	本物度と尖度の相関係数 ( $r$ )	
	天然木材試料	木目印刷試料
140	0.18	-0.46
125	-0.09	-0.27
110	0.13	-0.17
95	-0.07	-0.18
80	0.35	-0.07
70	-0.27	-0.24
60	-0.37	0.01
50	-0.38	-0.05
40	-0.42	0.10
30	-0.53	0.25
15	-0.62	0.44

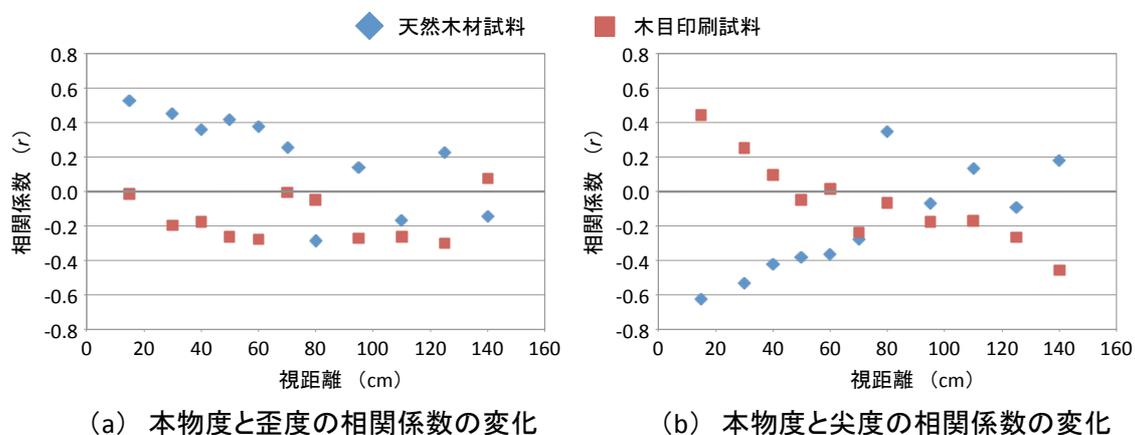


図 4.2 視距離変化に伴う相関係数の変化

図 4.2 は横軸に視距離、縦軸に相関係数を表している。シンボルは、青い菱形が天然木材試料、赤い四角が木目印刷試料を表している。本物度と歪度の相関係数は、木目印刷試料の場合 $-0.3\sim 0.0$ 付近で変化している。視距離の変化に伴う相関係数の一定の変化が見られないことや、相関係数の平均が $-0.16$ であることから、木目印刷試料の本物度は歪度による説明はできないと考えられる。尖度との相関係数は、 $\pm 0.45$ の範囲で変化している。140 cm と 15 cm で中程度

## 第 4 章 論文全体の総合考察

---

の相関が見られるが、歪度と尖度に二次関数状の関係があること、歪度には本物度との明確な相関関係が見られないこと、最長距離と最短距離の二箇所のみの中程度の相関が見られることから、尖度もまた歪度と同様に本物度を説明できるパラメータではないと考えられる。天然木材試料の場合は、本物度と歪度の相関係数は  $0.53 \sim -0.29$  の範囲で変化している。特に視距離が  $60 \text{ cm}$  以下では中程度の相関が見られる。また、本物度と尖度の相関係数は、 $0.35 \sim -0.62$  の範囲で変化している。歪度の場合と同様に、視距離が  $60 \text{ cm}$  以下では中程度の相関が見られる。第 3 章 3.3 では、本物度と歪度、尖度の相関係数が  $0.71$ ,  $-0.75$  であることを示した。このときの視距離は、 $41 \text{ cm}$  であった。表 4.1 の視距離  $40 \text{ cm}$  と比較すると約 2 倍の開きがある。第 3 章での実験は、天然木材試料を 21 種類使用しており、第 2 章での実験より 7 種類多い。この天然木材試料 7 種類の本物度と歪度、尖度の相関係数は、 $0.97$ ,  $-0.72$  と強い相関である。よって、これらの樹種を使用していた第 3 章の実験では相関が強くなったと考えられる。

以上、視距離変化に伴う本物度と輝度ヒストグラムの歪度の関係をまとめると、視距離が遠い場合、天然木材と木目印刷の本物らしさは歪度と尖度の影響を受けないが、視距離が近い場合、天然木材のみ本物らしさは歪度と尖度の影響を受けることが示唆される。

木目印刷には、天然木材にみられた近距離における本物度と歪度、尖度との相関が見られなかった。この原因として、空間周波数の特徴の 1 つである強度変化のスパイクが、コントラスト感度関数の最大感度の周波数である  $60 \text{ cpd}$  以下になると、他の要因を凌駕する程に強く影響し、本物らしさを低下させる要因となることが考えられる。しかし、強度スパイクの空間周波数が、十分に高空間周波数となる遠距離においては、天然木材と同じように湾曲度と本物度に相関があった。このことから、どのような距離においても、コントラスト感度関数を基準として、強度スパイクの空間周波数が高空間周波数となれば、強度スパイクの影響を排除することができると考えられる。強度スパイクは網点由来と考えられるため、実験で使用した試料より高解像度で印刷した木目印刷は、天然木材と同じような傾向を示す可能性がある。これについては、高解像度の木目印刷を用いて、さらなる検証が必要である。

天然木材において、近距離の場合のみに歪度、尖度と本物度に相関が見られた。図 3.13 に示したように、歪度と尖度の違いは、木目の暗線部分の輝度変化のバランスに影響していると考えられる。視距離の違いにより、歪度、尖度と

## 第 4 章 論文全体の総合考察

---

本物度との相関が変化することから、歪度と尖度の違いも空間周波数に関連している可能性がある。木目は様々な空間周波数の縞によって構成されているため、歪度と尖度の違いが影響を及ぼす空間周波数には帯域幅があると考えられる。ここで、強度変化のスパイクと同様に考えると、近距離にのみ相関が見られたことから、高空間周波数に特徴があると考えられる。高空間周波数における天然木材と木目印刷の特徴は、湾曲度によって示した。つまり、歪度と尖度の変化の影響は、湾曲度として表した高空間周波数領域の位相に変化を与えている可能性がある。木材の本物らしさについて画像統計量と空間周波数を用いた検討を行ったが、結果的にはある高空間周波数帯域における強度と位相が木材の本物らしさに影響を与える要因である可能性が示唆される。

第 2 章、第 3 章、第 4 章で得られた知見から、実物を使用した際、木材の本物らしさに影響を与える特徴をまとめる。木材の本物らしさが向上する方法として、天然木材と木目印刷ともに、高空間周波数領域の強度が曲線的に変化していると、本物らしく見えることが示唆された。天然木材は、高空間周波数領域の強度変化の影響のみならず、輝度ヒストグラムの歪度が僅かに負、且つ尖度が 3 より僅かに大きい場合に、本物らしく見える可能性が示唆される。木目印刷は、空間周波数の強度変化のスパイクが本物らしさを低下させる要因となるため、その原因となる網点のサイズが知覚できないほど十分に小さい場合に、本物らしさの向上が見込まれる。今回使用した木目印刷試料では、網点のサイズが大きかったため、この影響を確認することができなかった。しかし、視距離が遠く、網点のサイズが相対的に小さい場合に、天然木材と同じ要素が本物らしさに影響していた。このことから、網点のサイズが小さければ、天然木材と同じ振る舞いをする可能性は十分にあると考えられる。

## 第5章 結論

質感を研究するうえで、対象とする素材には様々なものがある。本論文では、身近な素材であり、多くの人が好んで使用する木材を対象とした。近年、技術の発達により、天然木材を利用することなく人工的に木材を表現しているものが増えてきている。例えば、木目を印刷によって表している木目印刷は、床や壁、机やドア、車の内装など、様々な場所で利用されている。また、仮想空間上に CG による木材の表現もされている。こうした流れの中で、人工的な木材には、より本物らしい木材の表現が求められている。本論文では、天然木材のように見える木材を本物らしい木材とし、木材の本物らしさに影響を与える画像特徴量について論じ、その要因を明らかにした。

以下に、前章までに述べてきた内容をまとめ、総括する。

### 5.1 各章のまとめ

第 1 章では、質感研究と木材研究の既往研究を紹介し、本論文の位置づけを明確にし、目的を記した。また、実験で使用する天然木材と木目印刷の特徴をまとめた。

第 2 章では、天然木材と木目印刷の空間周波数特性の差異が、木材の本物らしさに影響を与えているかを明らかにすることを目的とした。天然木材と木目印刷の空間周波数特性には、高空間周波数領域における強度の変化に違いが見られた。天然木材の場合は強度が曲線的に変化し、木目印刷の場合は直線的に変化するという差があった。また、木目印刷の空間周波数には、網点による強度のスパイクが見られた。天然木材と木目印刷の高空間周波数領域における強度変化の差異を表す指標として、湾曲度を導入した。どのような空間周波数特

## 第 5 章 結論

---

性が木材の本物らしさに影響するかを調べるために、視距離を変化させることで、知覚される空間周波数を変化させる方法を用い、天然木材か木目印刷を判別する評価実験を行った。得られた結果から木材の本物らしさを表す心理的尺度である本物度を算出し、空間周波数特性との関連を調べた。結果として、天然木材は視距離にかかわらず、湾曲度と本物度の相関には中程度の相関が見られた。木目印刷は、視距離が遠い場合、湾曲度と本物度に中程度の相関が見られたが、視距離が近い場合は網点の影響が見られた。つまり、高空間周波数領域の強度変化が曲線的な場合に天然木材と木目印刷は本物らしく見え、直線的な場合に本物らしく見えないことが示唆された。また、空間周波数にスパイクがある場合は、本物らしさを低下させる要因となり、特に視距離が近い場合、空間周波数のスパイクの影響は大きく、湾曲度の大小にかかわらず木目印刷は本物らしく見えない可能性が示唆された。

第 3 章では、様々な研究により質感への影響が示唆されている画像統計量を用いて、木材の本物らしさに与える影響を明らかにすることを目的とした。視感評価実験として天然木材と木目印刷の実物を用い、どのような木材試料が本物らしく見えるかを調べた。得られた結果から本物度を算出し、天然木材と木目印刷の測色値から算出した画像統計量との関係を調べた。結果は、天然木材の輝度ヒストグラムの歪度、尖度と本物度に相関があることがわかった。より詳細に歪度と尖度が木材の本物らしさに与える影響を調べるために、木材画像の歪度と尖度を系統的に変化させた画像を用い画像評価実験を行った。結果から、歪度と尖度が適切な値であるとき、木材の本物らしさが高まることが示唆された。

第 4 章では、2つの実験により得られた知見を総合し、木材の本物らしさに影響を与える画像特徴量を明らかにした。高空間周波数領域における強度変化が曲線的である場合、本物らしく見える可能性が示唆された。さらに、天然木材の場合は、輝度ヒストグラムの歪度と尖度が本物らしさに影響することを示唆したが、木目印刷ではこの傾向は見られなかった。これは、歪度と尖度が本物らしさに与える影響より、空間周波数の強度変化のスパイクによる本物らしさの低下が影響していると考えられる。

## 第 5 章 結論

---

以上、木材の本物らしさに影響を与える画像特徴量として、歪度、尖度と空間周波数特性を取り上げ、その影響を明らかにした。

### 5.2 応用と今後の課題

最後に、本論文で得られた知見を元に考えうる応用と今後の課題について述べる。

本論文で述べてきたことは、本物らしい木材が備えている画像特徴量についてである。そして最大の関心は、その特徴量を工業的に応用することで、現在の人工的な木材製品をより本物らしい製品にできるのかということである。

木目印刷については、使用する場所が重要な要素になるのではないかと考える。使用者との距離が遠い場合は、高空間周波数領域の強度変化が重要であり、距離が近い場合は網点のサイズが重要である。しかし、空間周波数特性が印刷という工程を経たうえで、狙い通りの空間周波数特性を得られるかが問題である。また、網点のサイズは、現在よりもさらに小さくしなければ、近距離で本物らしいと思わせるのは困難である。いずれにしろ、印刷の工程が「本物らしい木目印刷」を作るうえで、非常に重要な要素となり得る。

CG では、網点の要素がないため、画像実験と同様に画像統計量による本物らしさの向上が望める。しかし、空間周波数特性による本物らしさの向上はあまり期待できない。なぜならば、ディスプレイの特性を表す MTF (Modulation Transfer Function) は、高空間周波数の再現が良くないのが一般的だからである。これを考慮に入れなければ、目標とする空間周波数特性を出力するのは難しい。

最後に課題として存在しているのが、対象との角度の問題である。本論文で得られた本物らしさの特徴は、正面から見た場合に得られたものである。この特徴が、角度をつけて見た場合でも有効であるかどうかについては、さらなる検証が必要である。また、このとき重要になるのが光沢の問題である。木材には、独特な光沢感があり、天然木材と木目印刷を比較した場合に、重要な要素となり得る。

## 第 5 章 結論

---

以上のように，製品への応用を考えると，克服すべき技術的な課題や研究課題がある．しかし，本論文により明らかにした，木材の本物らしさに影響を与える要素は，質感研究の一端として，多少なりとも人工的な木材製品製造技術に寄与することができたといえる．

---

# 要旨

木材は、身近にあり親しみ深い素材の 1 つである。近年、技術の発達により、印刷や CG など実物を使うことなく木材を表現している製品が増えてきている。これらの製品は、より本物らしい木材に見せることが重要である。本論文では、画像から得られる情報を用い、木材の本物らしさに影響を与える特徴量を明らかにすることを目的とした。木材の本物らしさを調べるうえで、木目パターンに関連のある空間周波数と輝度ヒストグラムに注目した。空間周波数特性に注目した実験では、実物の木材試料を視距離を変えて観察し、本物らしさの評価を行った。また、人間の視覚系の感度との関係を調べることで、どのような空間周波数特性が重要であるかの検討を行った。結果は、高空間周波数の強度変化と強度スパイクの有無が本物らしさに影響していることがわかった。輝度ヒストグラムに注目した実験では、実物を評価して得られた各木材試料の本物らしさと、輝度ヒストグラムの歪度と尖度に関連があることが示唆された。その 2 つの関係を確かめるために、輝度ヒストグラムの歪度と尖度を系統的に変化させた木材画像を用い、画像評価実験を行った。結果は、歪度と尖度を適切な値にすることで、木材画像の本物らしさが向上することを示唆した。これら 2 つの実験から、高空間周波数領域の強度変化を曲線的に、輝度ヒストグラムの歪度と尖度を適切な値にすることで木材の本物らしさが向上することを示唆した。また、空間周波数の強度スパイクは、本物らしさを著しく低下させることを示唆した。

## 参考文献

- [1] Dana, K. J., Cula, O. G., Wang, J.: Surface detail in computer models, *Image and Vision Computing*, 25, pp.1037-1049, 2007.
- [2] Yu, C., Seo, Y., Lee, S. W.: Global optimization for estimating a multiple-lobe analytical BRDF, *Computer Vision and Image Understanding*, 115, pp.1679-1688, 2011.
- [3] Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., Adelson, E. H.: Image statistics and the perception of surface qualities, *Nature*, 447, pp.206-209, 2007.
- [4] Wada, Y., Arce-Lopera, C., Masuda, T., Kimura, A., Dan, I., Goto, S., Tsuzuki, D., Okajima, K.: Influence of luminance distribution on the appetizingly fresh appearance of cabbage, *Appetite*, 54, pp.363-368, 2010.
- [5] Arce-Lopera, C., Masuda, T., Kimura, A., Wada, Y., Okajima, K.: Luminance distribution as a determinant for visual freshness perception: Evidence from image analysis of a cabbage leaf, *Food Quality Preference*, 27, pp.202-207, 2013.
- [6] Arce-Lopera, C., Masuda, T., Kimura, A., Wada, Y., Okajima, K.: Luminance distribution modifies the perceived freshness of strawberries, *i-Perception*, 3, pp.338-355, 2012.
- [7] Arce-Lopera, C., Igarashi, T., Nakao, K., Okajima, K.: Image statistics on the age perception of human skin, *Skin Research and Technology*, 19, e273-278, 2013.

## 参考文献

---

- [8] Sakuragawa, S., Miyazaki, Y., Kaneko, T., Makita, T.: Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses, *Journal of Wood Science*, 51, pp.136-140, 2005.
- [9] Tsunetsugu, Y., Miyazaki, Y., Sato, H.: Physiological effects in humans induced by the visual stimulation of room interiors with different wood quantities, *Journal of Wood Science*, 53, pp.11-16, 2007.
- [10] Jonsson, O., Lindberg, S., Roos, A., Hugosson, M., Lindstrom, M.: Consumer perceptions and preferences on solid wood, wood-based panels, and composites: a repertory grid study, *Wood and Fiber Science*, 40, pp.663-678, 2008.
- [11] Høibø, O., Nyrud, A. Q.: Consumer perception of wood surfaces: the relationship between stated preferences and visual homogeneity, *Journal of Wood Science*, 56, pp.276-283, 2010.
- [12] 伊藤潤子, 仲村匡司, 増田稔: 木質内装の印象に及ぼす色彩の影響 —アクセントカラーを考慮した画像解析法の適用について—, *材料*, 55, pp.373-377, 2006.
- [13] 増田稔: 木材のイメージに与える色彩および光沢の影響, *材料*, 34, pp.78-84, 1985.
- [14] 仲村匡司, 増田稔, 平松靖: 木材および自然石の素材イメージに寄与する視覚的要因, *木材学会誌*, 40, pp.364-371, 1994.
- [15] 仲村匡司, 坂井崇俊, 増田稔: 木材の見た目の「かたさ」に影響する因子の抽出, *材料*, 51, pp.398-403, 2002.

## 参考文献

---

- [16] 仲村匡司, 増田稔: まさ目パターンの濃淡むらの視覚特性, 木材学会誌, 41, pp.301-308, 1995.
- [17] 古野毅, 澤部攻 編: 木材科学講座 2 組織と材質 第2版, 海青社, pp.31, 33, 62, 63, 2011.
- [18] 上村武 編: 木材活用事典, 産業調査会 事典出版センター, pp.157, 610-652, 1995.
- [19] 村山忠親: 増補改訂 原色 木材大辞典 185種, 誠文堂新光社, pp.45-170, 2013.
- [20] ぷりんとぴあ 6: 生活空間を演出する印刷, (社) 日本印刷産業連合会, 1997.
- [21] 高橋正実 + デザインの現場編集部: 工場へ行こう!! デザインを広げる特殊印刷の現場, 美術出版社, pp.18-21, 2008.
- [22] 伊理正夫, 韓太舜: 線形代数 行列とその標準形, 教育出版株式会社, pp.241-243, 1977.
- [23] 高井信勝: 「信号処理」「画像処理」のための MATLAB 入門, 工学社, pp.116, 131, 151, 2000.
- [24] Snowden, R., Thompson, P., Troscianko, T.: BASIC VISION and introduction to visual perception Revised edition, Oxford university press, pp.389, 390, 2012.
- [25] Li, L., Asano, A., Asano, C.M., Okajima, K.: Statistical quantification of the effects of viewing distance on texture perception, J. Opt. Aoc. Am. A, 30, 7, pp.1394-1403, 2013.

## 参考文献

---

- [26] Van Nes, F. L., Bouman, M. A.: Spatial Modulation Transfer in the Human Eye, *Journal of the Optical Society of America*, 57, pp.401-406, 1967.
- [27] Fairchild, M.D.: *Color Appearance Models*, 2nd edn, p.26, Wiley, Rochester, 2015.
- [28] Movshon, J. A., Kiorpes, L.: Analysis of the development of spatial contrast sensitivity in monkey and human infants, *Journal of the Optical Society of America A*, 5, pp.2166-2172, 1988.
- [29] He, S., MacLeod, D. I. A.: Orientation-selective adaptation and tilt after-effect from invisible patterns, *Nature*, 411, pp.473-476, 2001.
- [30] Moulden, B., Kingdom, F., Gatley, L. F.: The standard deviation of luminance as a metric for contrast in random-dot images, *Perception*, 19, pp.79-101, 1990.
- [31] Guth, S. L., Lodge, H. R.: Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model, *Journal of the Optical Society of America*, 63, pp.450-462, 1973.
- [32] Luo, M. R., Hunt, R. W. G.: The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM97s), *Color research and application*, 23, pp.138-146, 1998.
- [33] The Wood Database, 2013. Wood Image Database. <http://www.wood-database.com/>
- [34] Gonzalez, R. C., Woods, R. E.: *Digital Image Processing Third Edition*, Pearson Education, Inc., p.130, 2008.

## 研究業績

○ 原著論文

Katsura, S., Mizokami, Y., Yaguchi, H.: Perceived quality of wood images influenced by the skewness of image histogram, *Optical Review*, 22, 4, pp.565-576, 2015.

桂重仁, 溝上陽子, 矢口博久: 天然木材と印刷木材の識別に空間周波数特性が与える影響, *日本感性工学会誌* (2016 年第 15 巻 3 号掲載予定)

○ 国際学会発表

Katsura, S., Mizokami, Y., Yaguchi, H: Effects of histogram configuration on the perceived quality of wood images, *The Asia Pacific Conference on Vision (APCV)*, (2008 July, Brisbane)

Katsura, S., Mizokami, Y., Yaguchi, H: Statistical and Colorimetric Analysis of the Perceived Quality of Wood Images, *ICC Chiba Color Experts' Day*, (2010 March, 千葉)

Katsura, S., Mizokami, Y., Yaguchi, H: Perceived quality of wood images influenced by the ratio of skewness to kurtosis of image histogram, *The 1st Asia Color Association Conference, Proc.*, 86-89. (2013 December, Thanyaburi Pathum Thani)

○ 国内学会, 研究会発表

桂重仁, 溝江静, 溝上陽子, 矢口博久: 自然素材画像のヒストグラムの形状が本物らしさに与える影響. *日本色彩学会第 39 回全国大会, 日本色彩学会誌*, 32, Supplement, 6-7. (2008 May, 福岡)

## 研究業績

---

桂重仁, 溝上陽子, 矢口博久: 木材の認識の手がかりとなる木目パターンの特性. 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 2010 年度第 1 回研究発表会, 25-28. (2010 May, 岐阜)

桂重仁, 溝上陽子, 矢口博久: 木材画像の質感とパワースペクトルの  $1/f$  特性の関係. 日本視覚学会 2011 年夏季大会, Vision 23, 173 (172p175) (2011 August, 福岡)

桂重仁, 溝上陽子, 矢口博久: 輝度ヒストグラムの尖度と歪度の割合が木材画像の本物らしさに与える影響. Young Perceptionists' Seminar (YPS) 2013, Program, (S4-1). (2013 September, 日光)

桂重仁, 溝上陽子, 矢口博久: ヒストグラムの尖度と歪度が木材画像の本物らしさに与える影響. 日本色彩学会画像色彩研究会 2013 年度研究発表会, 10-13. (2014 March, 東京)

## 謝辞

本研究は、著者が 2008 年～2015 年に千葉大学大学院融合科学研究科後期博士課程在学中に、矢口博久教授、溝上陽子准教授の指導のもとに行ったものです。長期間に渡り、矢口先生、溝上先生には丁寧な指導をしていただき厚くお礼申し上げます。矢口先生には、4 年生のときからご指導いただきありがとうございました。ご退官の年になるまで論文をまとめることができず、ご心労をお掛けし大変申し訳ありませんでした。なんとかここまで論文をまとめ上げられたのも、矢口先生の的確なご指導のおかげです。溝上先生には、研究の方針から論文指導まで幅広くきめ細かいご指導をいただきありがとうございました。修士からご指導いただいた学生として、溝上先生にとっては初の博士ですが、大変多くのご心配やご苦労をお掛けし大変申し訳ありませんでした。直接研究指導をしていただいたお二人の先生には、感謝の言葉も見つからないほどです。

木村英司教授には、主査を引き受けていただきありがとうございました。修士までは専攻の関係上、関わりが多くはありませんでしたが、博士課程になってからは視覚研究会等で顔を合わせるたびに、声をかけて頂きありがとうございました。先生からいただいたご指摘のおかげで、博士論文の完成度をより高くすることができました。

堀内隆彦教授には、副査を引き受けていただきありがとうございました。先生には学部生のときからお世話になりました。本論文においても、私のあまり得意ではない数学的な箇所について、的確なご指導をいただき、論文の質を高めることができました。

眞鍋佳嗣教授には、副査を引き受けていただきありがとうございました。先生には佐倉で行われた研究会で質問をしていただいたのを覚えています。千葉大に赴任される以前から、興味を持って研究を聞いてアドバイスをいただきありがとうございました。先生の関西弁の利いたご指導は的確で、本論文を完成させるにあたり大変参考になりました。ありがとうございました。

小林裕幸元教授にも感謝申し上げます。先生には学部生のときから、学生生

活や研究について親身に相談にのっていただきました。先生のご退官前に論文をまとめることができなかつたことは、非常に悔いが残ります。

被験者として実験に快く参加していただいた多くの学生の皆様にも感謝申し上げます。博士論文に載せることができなかつた実験にも、多くの被験者に参加していただきました。多くの被験者を集めることができたのも、研究室や年齢という垣根を超えて、多くの学生の方々が仲良くしてくれたおかげです。特に、勝俣祐輝君、太田尚君、米山亨君、田川暖君には深くお礼申し上げます。四人は、結構年齢が離れているにもかかわらず、気さくに話しかけてくれ、研究相談や飲み会、気晴らしに遊ぶなど、積極的に私と関わりをもってくれました。四人のおかげで、楽しい研究生生活になっただけではなく、友人としてもいい刺激を与えてくれる存在でした。

博士課程満期退学後の私を、学術研究員として雇用していただいた須長正治准教授も矢口研究室の OB であり、今の私の進路があるのも矢口溝上研究室に所属していたおかげです。所属が九州大学となった 2015 年は、須長先生にも論文の内容についてアドバイスをいただきありがとうございました。また、学位論文提出時における書類に関して、長瀬太郎君にはご尽力いただき感謝しています。

最後に、長期間に渡り経済的、精神的に支えてくれた家族に感謝申し上げます。この論文が完成に至るまでに、本当に多くの人に支えられてきました。誰が欠けても完成には至らなかつたと思います。改めて、皆様に感謝申し上げます。

これで、やっと研究者としてのスタートラインに立てました。博士での研究を進めるにあたり、研究の方向性や手法など多くのことで悩み考えてきました。決して優秀な学生だったとは言えませんが、諦めずに考え苦手な分野も積極的に学んできたおかげで、こうして論文をまとめることができました。これからの研究生生活でも様々な悩みを抱えるとは思いますが、自分の持ち味である諦めない心、どんな時でも前向きな姿勢を活かし、乗り切っていきたいと思います。色彩学の知識や自分なりの視点から、多くの人の生活を豊かになるような研究を目指し、これからも邁進していく所存です。

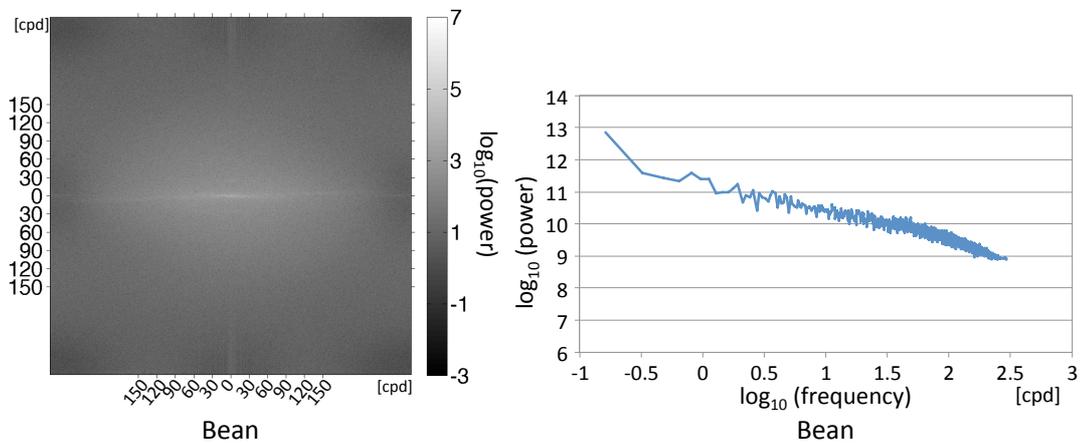
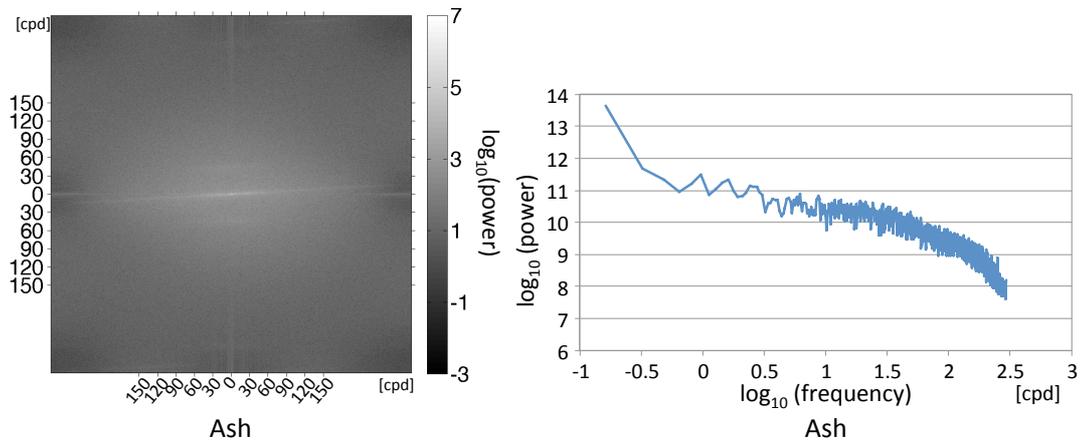
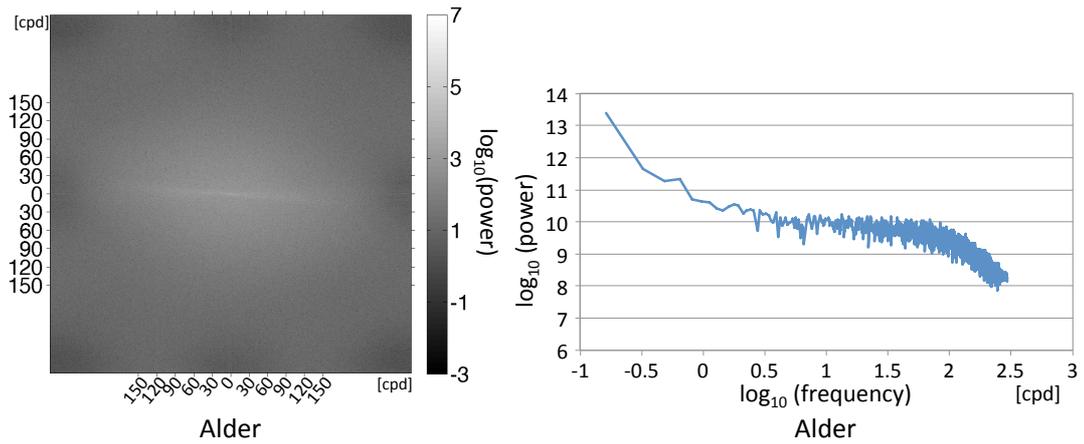
2016 年 1 月

桂 重仁

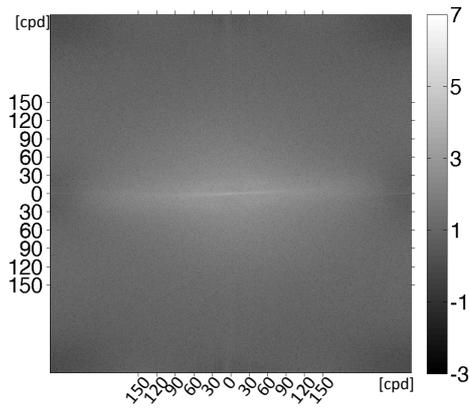
---

# 付録

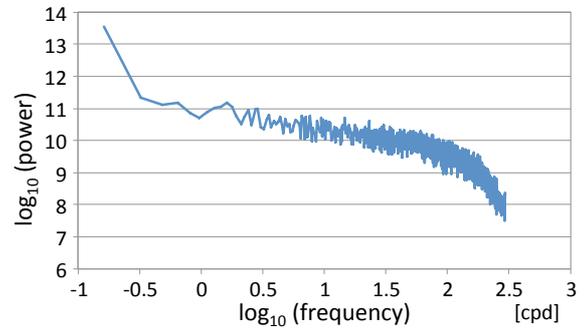
- 天然木材試料のパワースペクトル画像と水平方向の強度変化 (pp.94-100)
- 木目印刷試料のパワースペクトル画像と水平方向の強度変化 (pp.101-105)



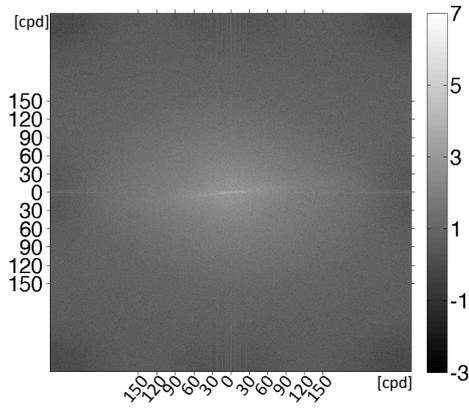
付録



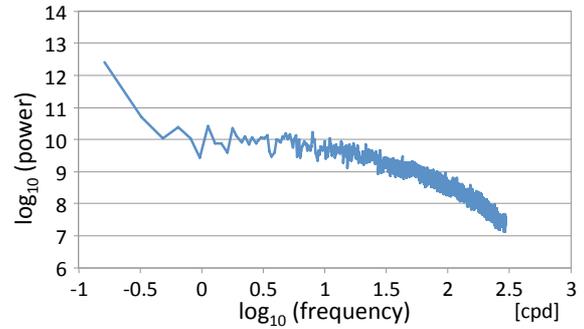
Birch



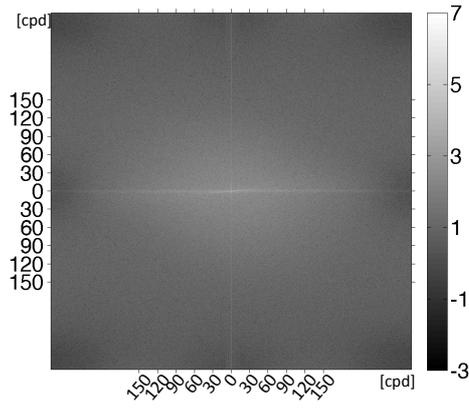
Birch



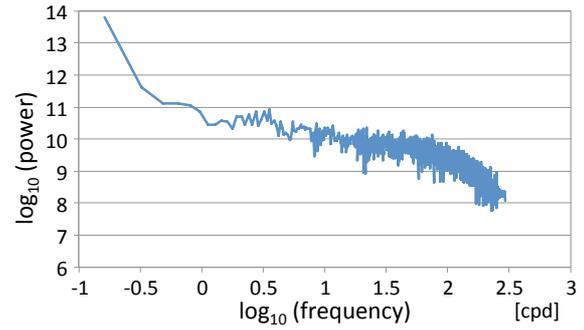
Bubinga



Bubinga

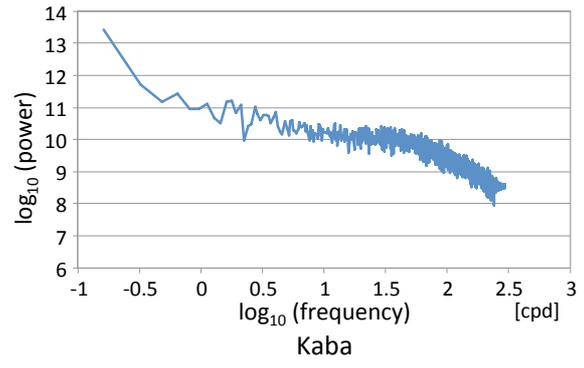
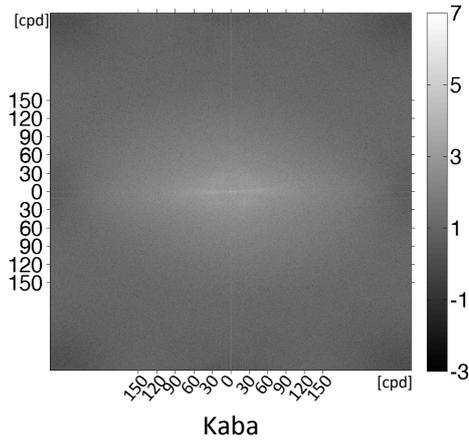
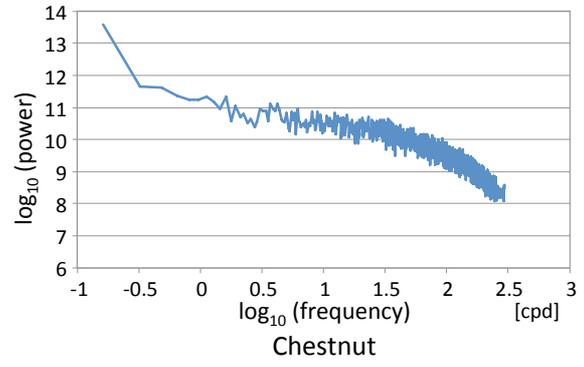
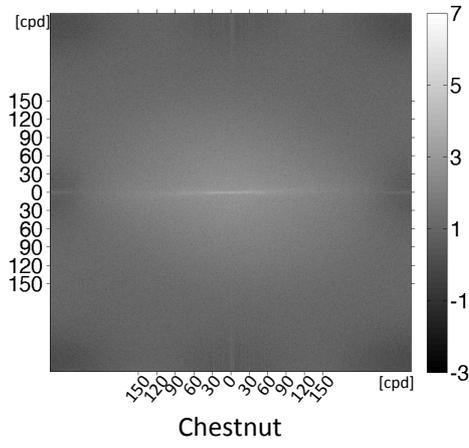
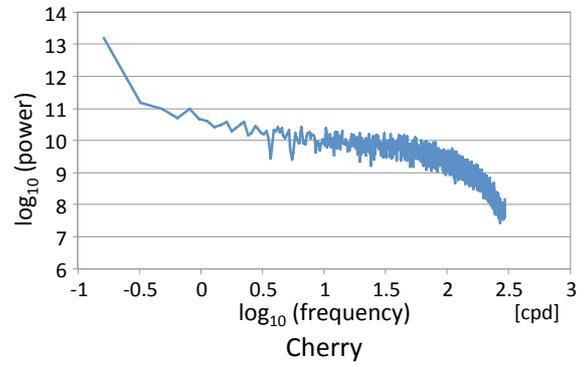
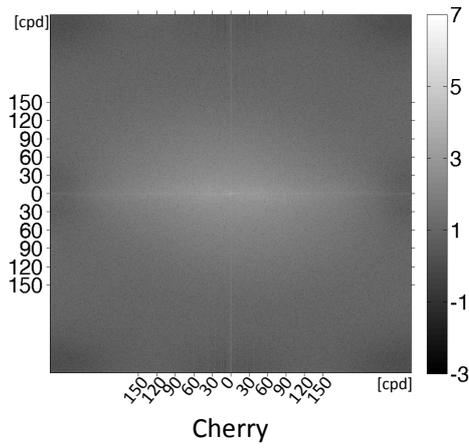


Cedar

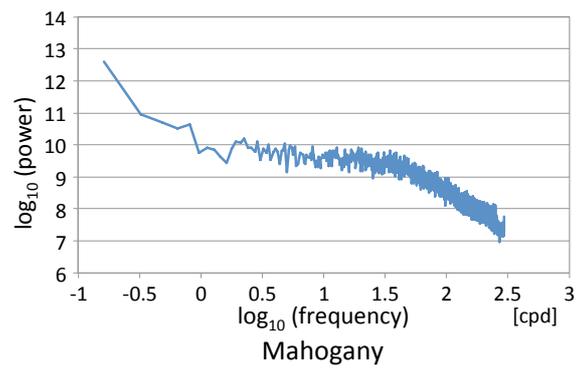
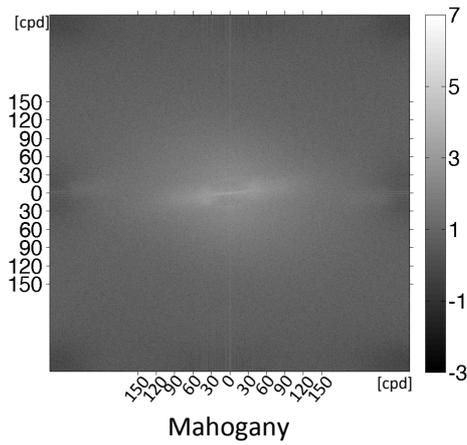
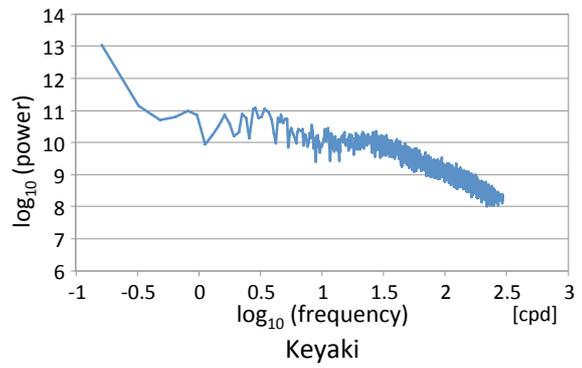
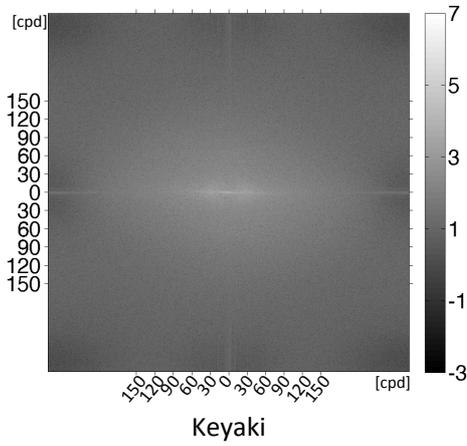
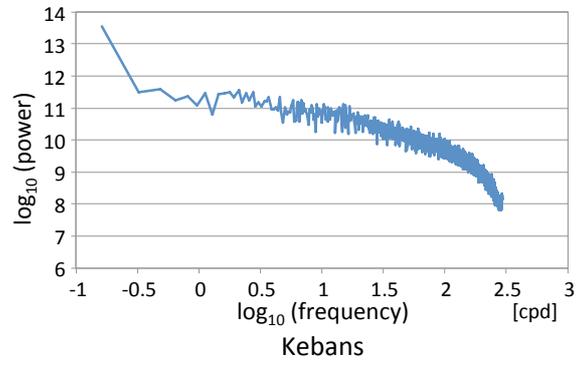
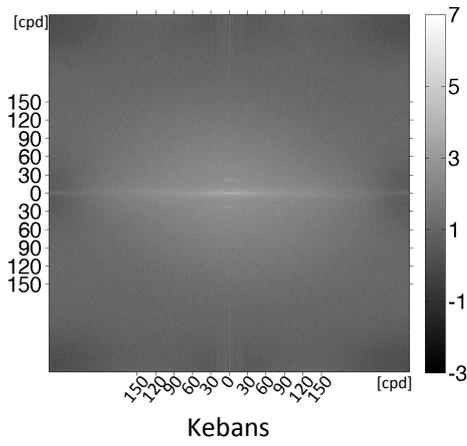


Cedar

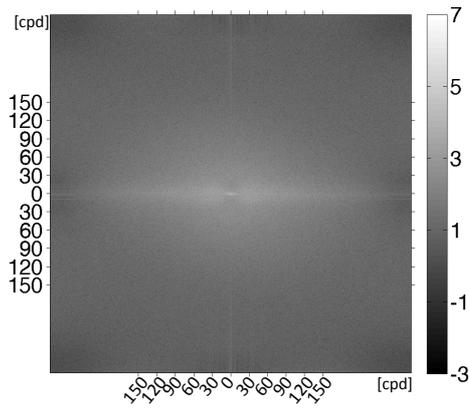
付録



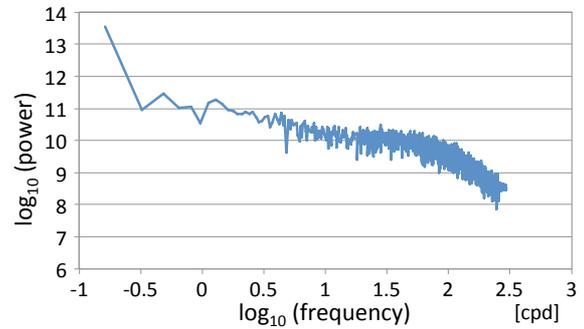
付録



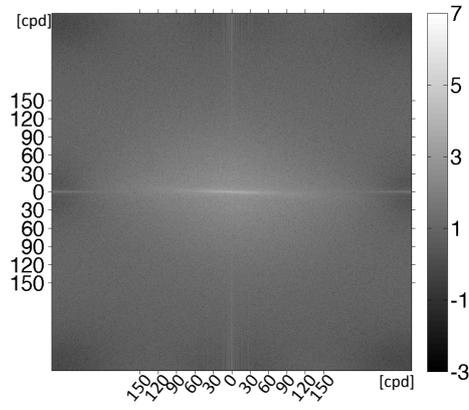
付録



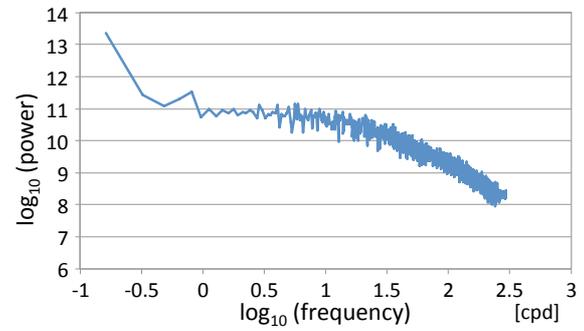
Maple



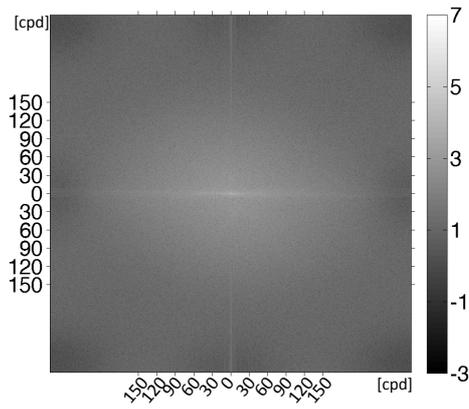
Maple



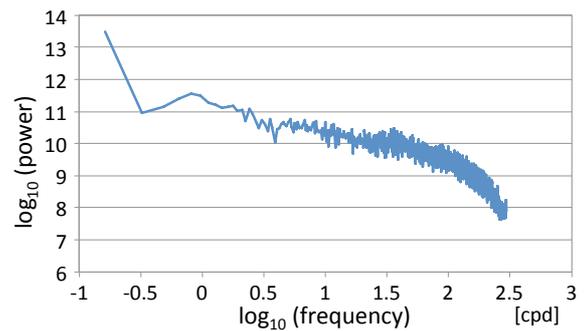
Nara



Nara

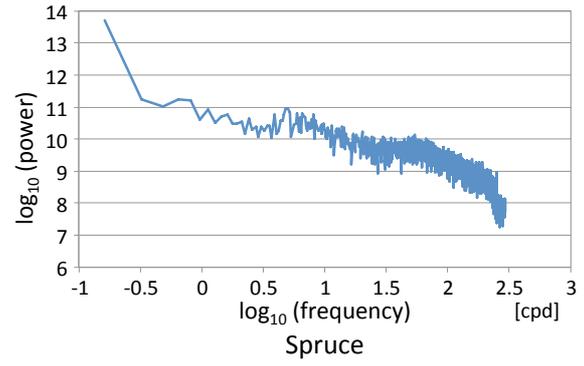
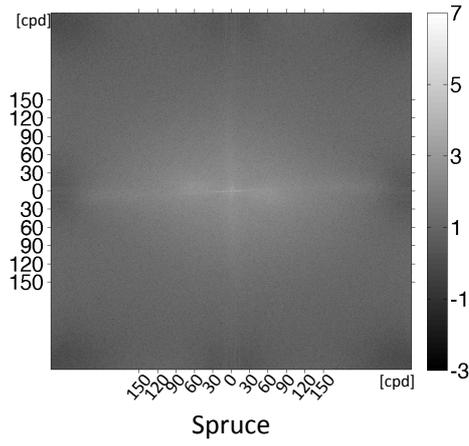
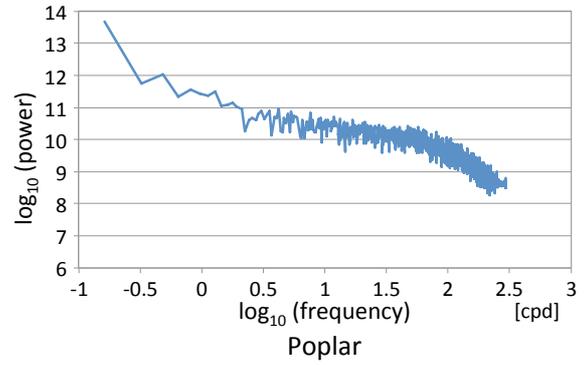
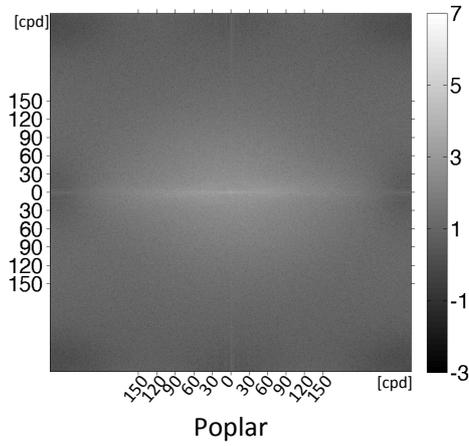
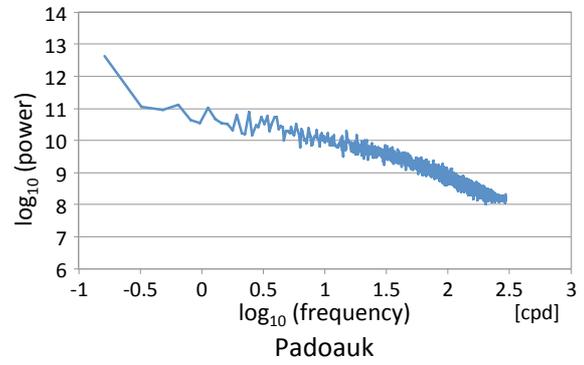
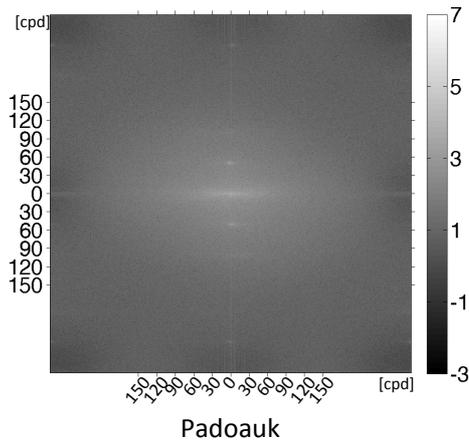


Oak

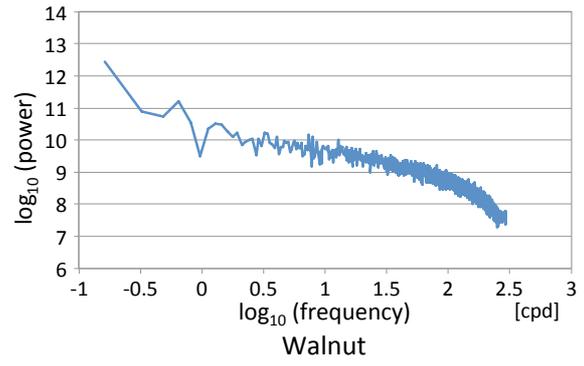
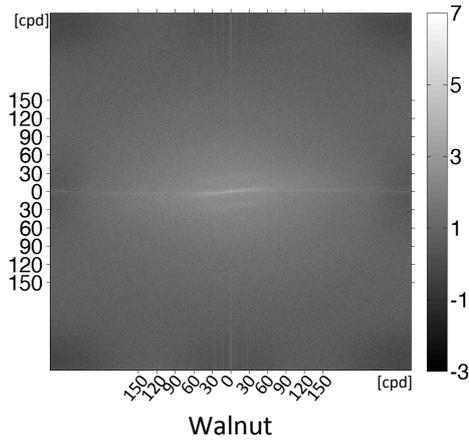
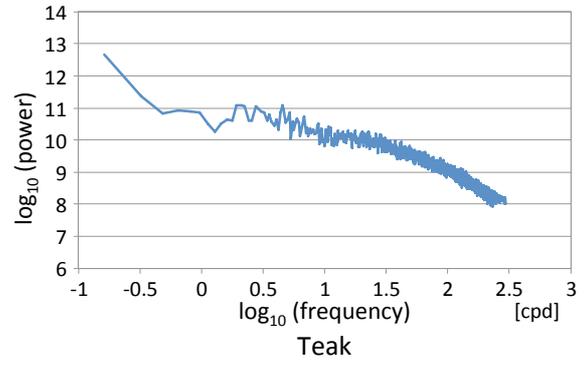
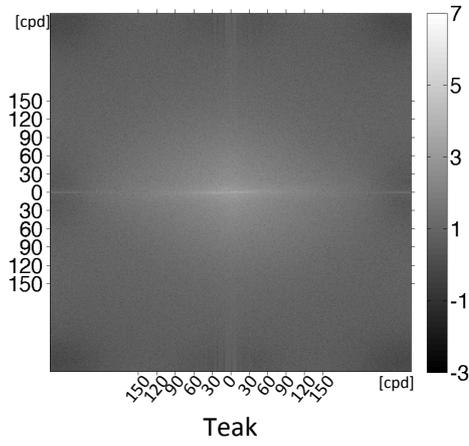
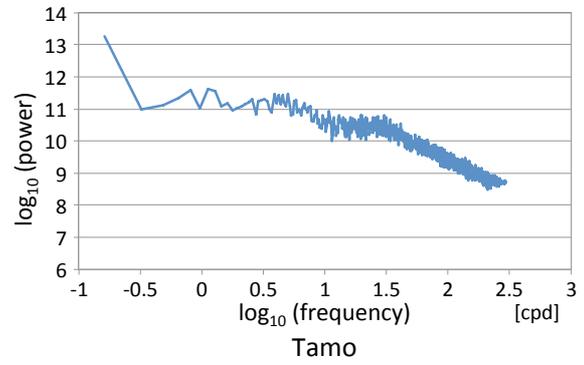
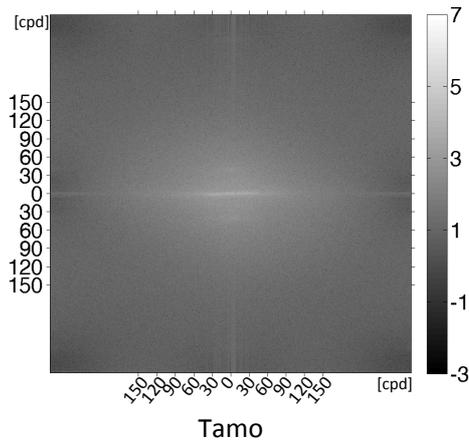


Oak

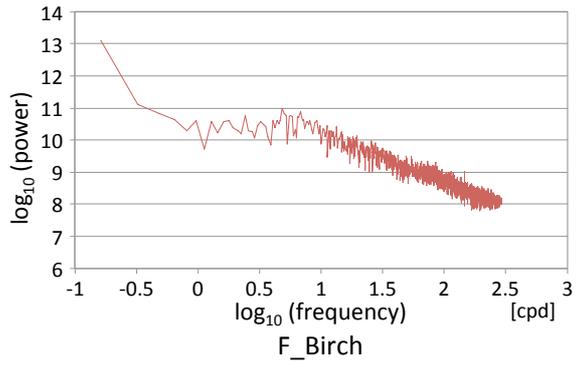
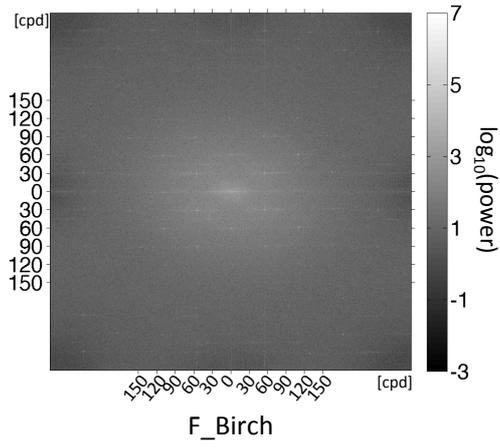
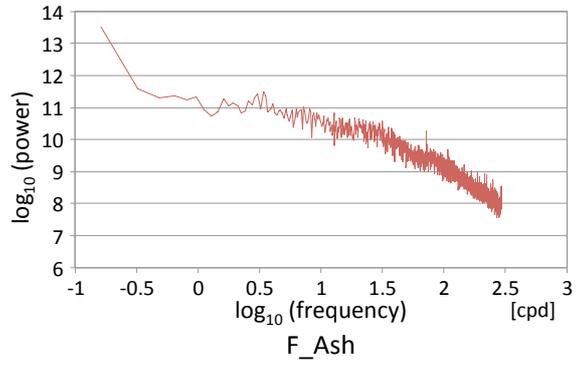
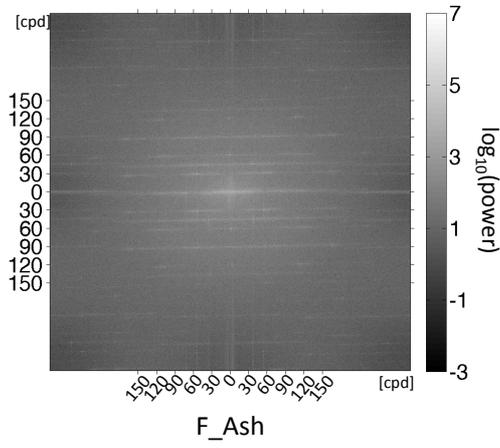
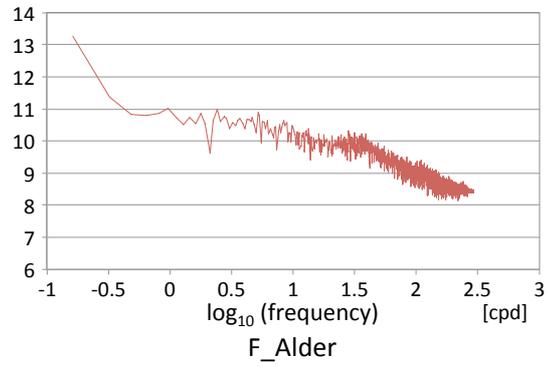
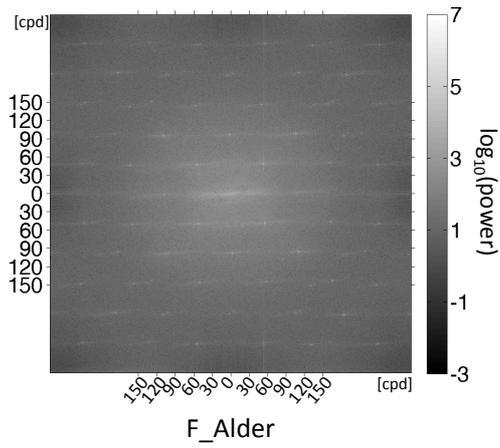
付録



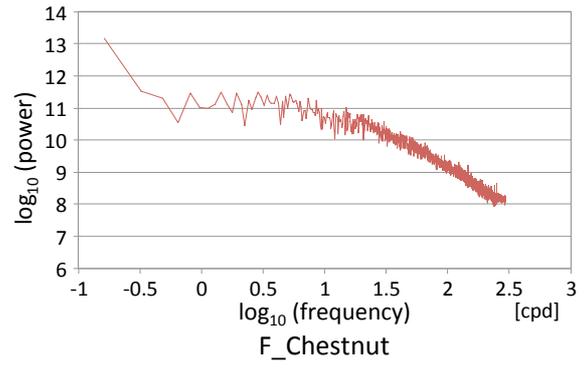
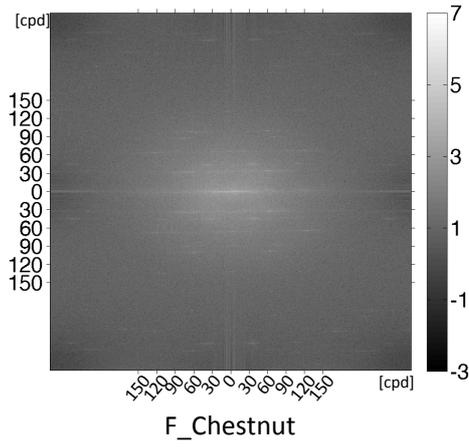
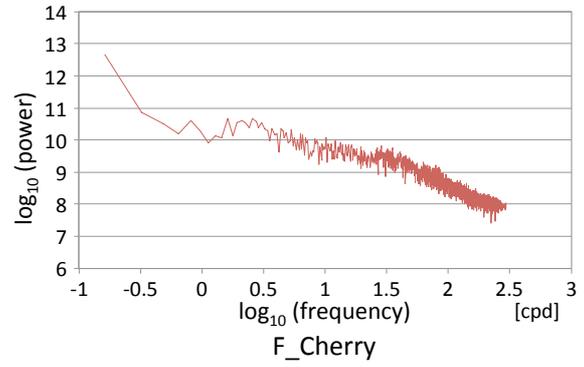
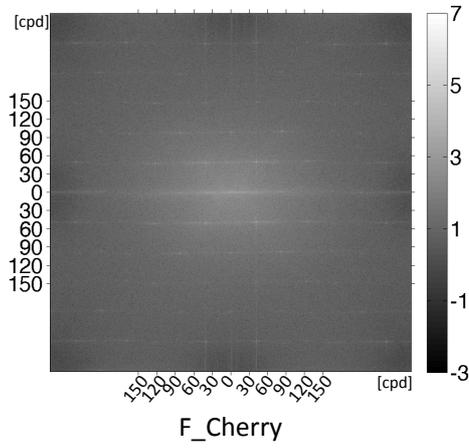
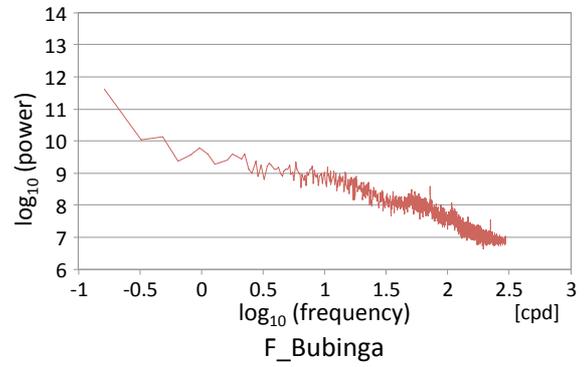
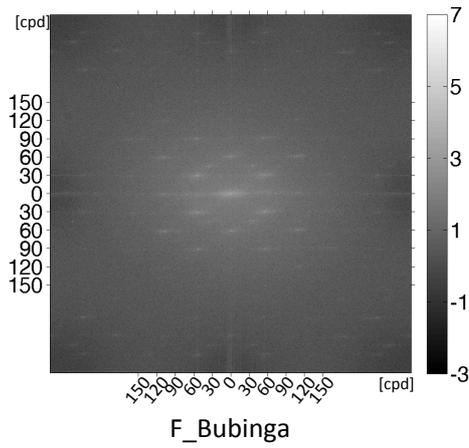
付録



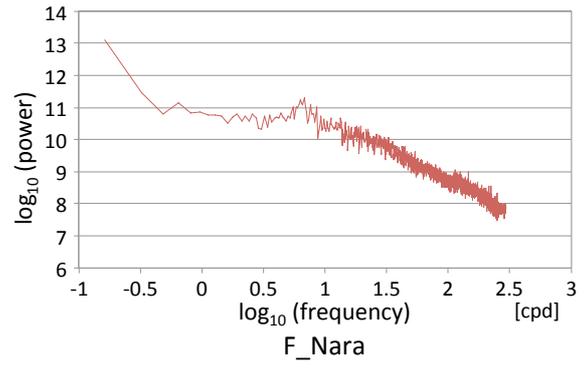
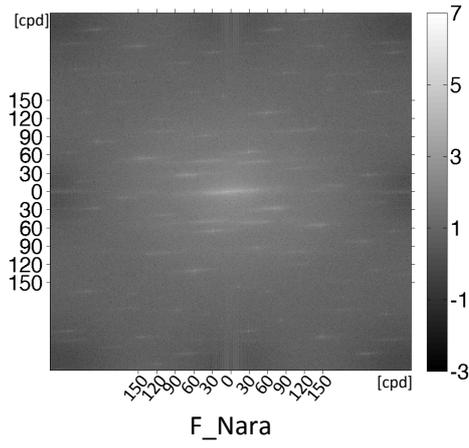
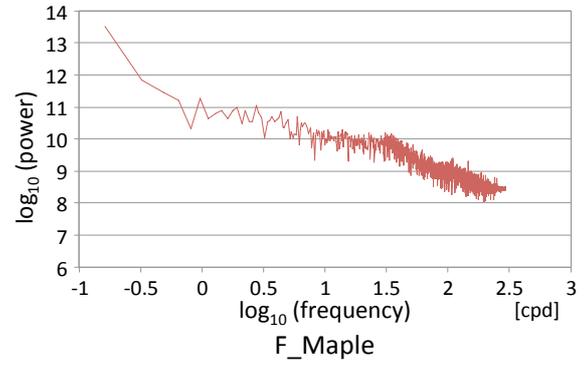
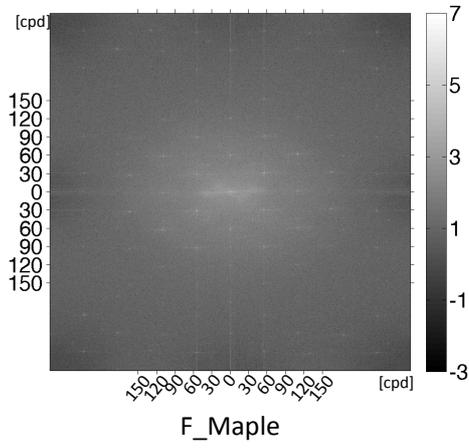
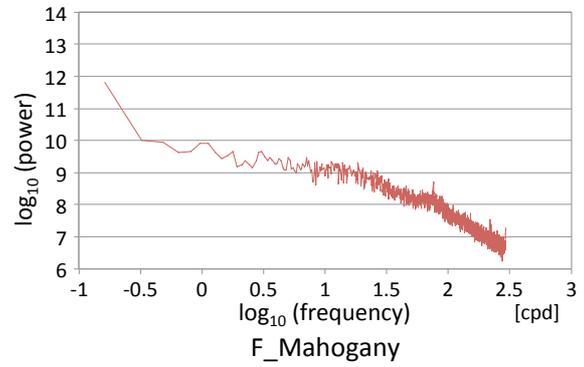
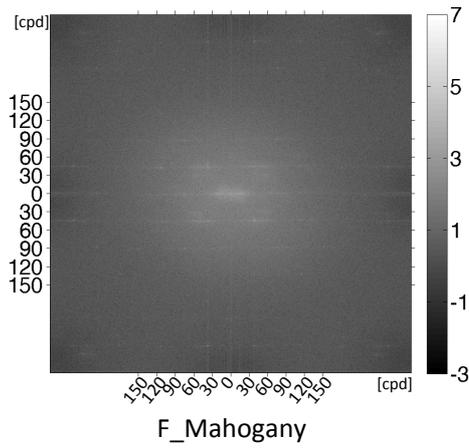
付録



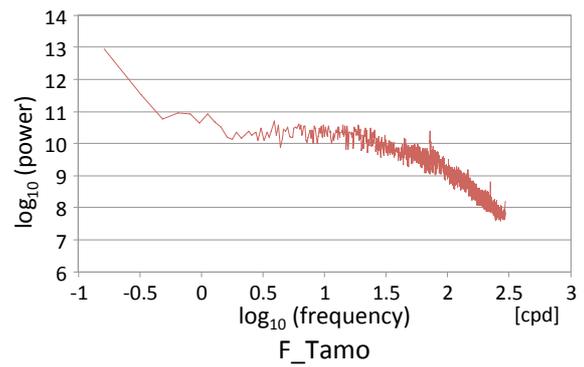
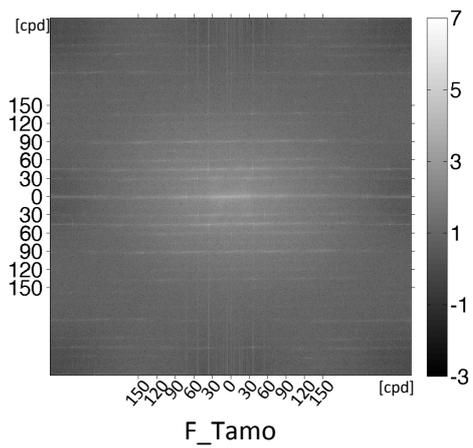
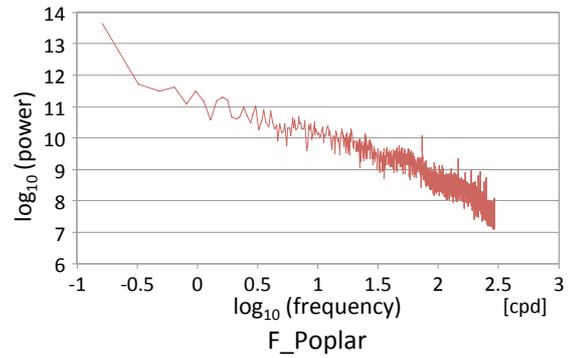
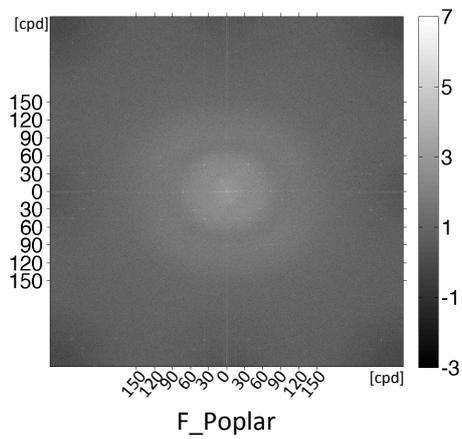
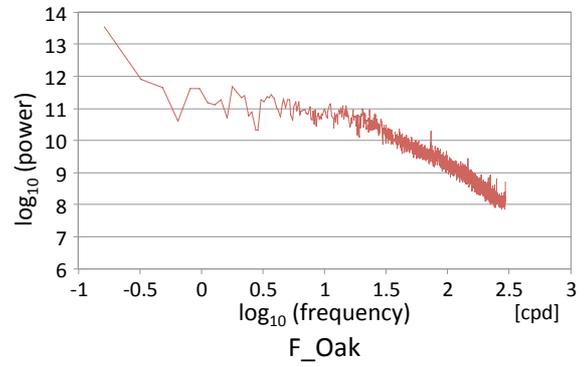
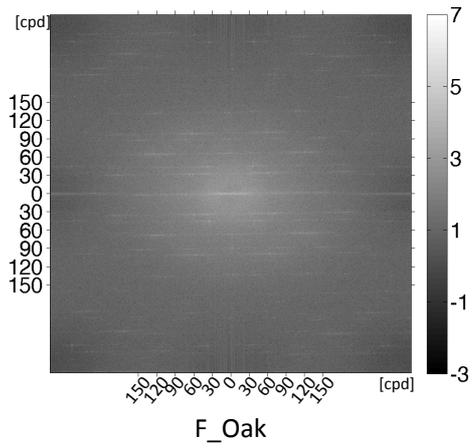
付録



付録



付録



付録

