

信州大学審査学位論文

樹脂製ドットパターンテクスチャにおける  
寸法と触感の関係に関する研究

2019年9月

相澤 淳平



## 目次

第1章 緒論 .....	1
1.1 背景 .....	2
1.1.1 工業製品における触感の位置付け .....	2
1.1.2 本研究で対象とする素材 .....	2
1.1.3 触感の階層構造 .....	6
1.1.4 シボ加工 .....	11
1.1.5 デジタルシボ .....	13
1.1.6 触感に関する先行研究 .....	14
1.2 目的 .....	17
1.2.1 本研究の目的 .....	17
1.2.2 対象とする触感因子 .....	19
1.2.3 対象とするテクスチャパターン .....	19
1.2.4 ドットパターンを定義する寸法要因 .....	21
1.3 研究体制 .....	23
1.4 論文の構成 .....	24
第2章 ドット間隔・ドット直径と粗さ感の関係 .....	25
ー視触覚の感覚モダリティによる印象の違い	
2.1 緒言 .....	26
2.2 実験方法 .....	27
2.2.1 試料 .....	27
2.2.2 【実験Ⅰ】触察による触感評価実験 .....	31
2.2.3 【実験Ⅱ】目視による触感評価実験 .....	36
2.2.4 テクスチャ面の輝度分布測定 .....	41
2.3 結果および考察 .....	42
2.3.1 【実験Ⅰ】触察による触感評価実験結果 .....	42
2.3.2 【実験Ⅱ】目視による触感評価実験結果 .....	42
2.3.3 官能検査結果の因子分析 .....	46
2.3.4 テクスチャ面の輝度分布測定結果 .....	49
2.3.5 感覚量と物理的特徴量の関係 .....	52

2.3.6	触察における粗さ感の決定要因	55
2.3.7	目視における粗さ感の決定要因	56
2.4	結言	58
第3章	ドット間隔・ドット高さとの粗さ感の関係 ー平面部への底付き状態の推定と皮膚変形量の測定	60
3.1	緒言	61
3.2	実験方法	63
3.2.1	接触状態と粗さ感のモデル	63
3.2.2	【実験Ⅲ】粗さ感分布の官能検査実験	66
3.2.3	【実験Ⅳ】底付き閾値の検証実験	69
3.2.4	【実験Ⅴ】触察時の皮膚変形量の計測	70
3.3	結果および考察	78
3.3.1	【実験Ⅲ】粗さ感の分布についての官能検査実験結果	78
3.3.2	感覚量による底付き状態の推定	80
3.3.3	【実験Ⅳ】底付き閾値の検証実験結果	84
3.3.4	【実験Ⅴ】触察時の皮膚変形量の計測結果	86
3.3.5	寸法パラメータと接触状態, 粗さ感の関係	89
3.4	結言	90
第4章	ドット間隔・ドット曲率との粗さ感の関係 ー2次元寸法パラメータに対する感覚量探索方法の提案	91
4.1	緒言	92
4.2	インクジェット式3Dプリンタによるドット形成の原理	94
4.2.1	微小凸点の形成実験	94
4.2.2	造形物の寸法測定結果	97
4.2.3	積層工程のモデリング	99
4.2.4	モデルと実形状の比較	103
4.2.5	検証実験	105
4.2.6	まとめ	111
4.3	実験方法	112
4.3.1	ドットパターンにおける粗さ感のモデル	112

4.3.2	【実験VI】官能検査実験 .....	114
4.3.3	3Dプリンタによる試料の製作 .....	117
4.4	結果および考察 .....	119
4.4.1	試料の形状 .....	119
4.4.2	【実験VI】官能検査結果と粗さ感の等高線 .....	121
4.4.3	等高線の値付け .....	123
4.4.4	粗さ感の推定式 .....	127
4.4.5	個人差の検討 .....	130
4.4.6	本実験結果の適用範囲 .....	133
4.5	結言 .....	134
第5章	結論 .....	135
5.1	各章の検討結果 .....	136
5.2	本研究結果の活用の可能性 .....	141
5.2.1	本研究結果の位置付け .....	141
5.2.2	本研究結果の適用範囲と応用の可能性 .....	141
参考文献	.....	144
本研究に関する発表論文等	.....	151
謝辞	.....	153

## 目次

### 第 1 章 緒論

図 1-1	射出成形工程の流れ .....	4
図 1-2	素材／テクスチャの触知覚に対する 5 次元の触感因子 .....	8
図 1-3	触感の階層構造 .....	8
図 1-4	触感因子に関わるモノ側・ヒト側の要因 .....	9
図 1-5	モノ側の物理量と触感因子の関係 .....	9
図 1-6	本研究の対象範囲 .....	18
図 1-7	ドット配列の例 .....	20
図 1-8	ドットパターンの寸法パラメータ .....	22
図 1-9	ドットパターンの寸法パラメータと本研究の構成 .....	22
図 1-10	第 2 章, 第 3 章の研究体制 .....	23

### 第 2 章 ドット間隔・ドット直径と粗さ感の関係

図 2-1	試料寸法とテクスチャ寸法パラメータ .....	28
図 2-2	ドット配置模式図 .....	28
図 2-3	実験 I, 実験 II で使用した試料の外観例 .....	29
図 2-4	レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例 .....	29
図 2-5	レーザ顕微鏡 (オリンパス(株)製 LEXT OLS-4100) .....	30
図 2-6	実験 I の実験時の状態 .....	33
図 2-7	樫山金型工業(株)における実験風景 .....	33
図 2-8	実験 I の質問用紙の例 .....	35
図 2-9	実験 II の実験時の状態 .....	38
図 2-10	目視による官能検査実験時の試料・光源の配置果 .....	38
図 2-11	実験 II の質問用紙の例 .....	40
図 2-12	輝度分布測定時の輝度計・光源の配置 .....	41
図 2-13	【実験 I】触察による官能検査結果 .....	44
図 2-14	【実験 II】目視による官能検査結果 .....	45
図 2-15	触察粗さ感と目視粗さ感の関係 .....	48
図 2-16	輝度分布測定例 (部分拡大図) .....	50
図 2-17	輝度分布の模式図 .....	50
図 2-18	ドット直径とコントラストの関係 .....	51

図 2-19	ドット間隔とコントラストの関係 .....	51
図 2-20	触察・目視粗さ感と寸法・コントラストの関係 .....	53
第 3 章	ドット間隔・ドット高さと粗さ感の関係	
図 3-1	ドット高さと底付きの関係 .....	65
図 3-2	ドット高さと底付きの関係 .....	65
図 3-3	実験Ⅲで使用した試料の外観例 .....	67
図 3-4	レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例 .....	67
図 3-5	皮膚変形測定装置外観 .....	72
図 3-6	皮膚変形測定装置の使用方法 .....	72
図 3-7	測定部の構造 .....	73
図 3-8	変位検出部の校正結果 .....	75
図 3-9	荷重検出部の校正結果 .....	75
図 3-10	荷重に対するベース変位量 .....	76
図 3-11	【実験Ⅲ】各試料の平均嗜好度（粗さ感） .....	79
図 3-12	【実験Ⅲ】ドット高さと粗さ感の関係 .....	79
図 3-13	【実験Ⅲ】ドット間隔と粗さ感の関係 .....	79
図 3-14	ドット間隔・ドット高さと進入深さ・進入比 .....	80
図 3-15	モデルに基づく底付き／底浮き推定結果 .....	82
図 3-16	ドット間隔・高さと底付き／底浮き推定結果 .....	83
図 3-17	底付き／底浮き推定結果とドット間隔・粗さ感の関係 .....	83
図 3-18	【実験Ⅳ】粗さ感識別実験結果 .....	85
図 3-19	粗さ感識別実験の正答数 .....	85
図 3-20	接触力と皮膚変位の測定例（時系列変化） .....	87
図 3-21	接触力と皮膚変位の測定例（図 3-20 の度数分布） .....	87
図 3-22	接触力と皮膚の変位量の平均値（被験者 10 名） .....	88
第 4 章	ドット間隔・ドット曲率と粗さ感の関係	
図 4-1	高さ違い造形実験の寸法パラメータ .....	96
図 4-2	形成されたドットの形状測定例（メッシュ表示） .....	97
図 4-3	設計データ高さと造形高さの関係 .....	98
図 4-4	設計データ高さと直径の関係 .....	98

図 4-5	設計データ高さと曲率半径の関係 .....	98
図 4-6	樹脂の積層モデル .....	100
図 4-7	注目点と周囲の吐出目標点 .....	100
図 4-8	$\sigma$ の想定を変えた場合の断面形状計算結果の変化 .....	102
図 4-9	モデルによる予測値と 3 例の測定値の比較 .....	104
図 4-10	曲率半径の予測値と測定値 .....	104
図 4-11	データ角寸と造形高さの関係 .....	107
図 4-12	データ角寸と曲率半径の関係 .....	107
図 4-13	楕円ドットの造形例 .....	110
図 4-14	X 方向のデータ寸法と X,Y 各方向の曲率半径 .....	110
図 4-15	寸法パラメータの変化と粗さ感の変化の関係 .....	113
図 4-16	2 次元空間における粗さ感の等高線 .....	113
図 4-17	官能検査実験方法 .....	115
図 4-18	実験VIで使用した試料の外観例 .....	118
図 4-19	レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例 .....	118
図 4-20	試料の寸法測定結果 .....	120
図 4-21	試料の系列と選択されたドット間隔の平均値の関係 .....	122
図 4-22	粗さ感の等高線 (全被験者平均値) .....	122
図 4-23	等高線から描いた粗さ感の 3 次元分布 .....	124
図 4-24	等高線から予想されるドット間隔と粗さ感の関係 .....	125
図 4-25	等高線から予想されるドット曲率と粗さ感の関係 .....	125
図 4-26	対数軸で表示した等高線 (全被験者平均値) .....	126
図 4-27	対数軸の空間における粗さ感分布のイメージ .....	128
図 4-28	推定式から描いた等高線と実験値の比較 .....	128
図 4-29	被験者グループによる等高線パターンの違い .....	131
第 5 章	結論	
図 5-1	本研究成果の範囲 .....	142



## 表目次

第 2 章	ドット間隔・ドット直径と粗さ感の関係	
表 2-1	寸法パラメータの組合せ	28
表 2-2	実験 I の官能検査における質問語	34
表 2-3	実験 II の官能検査における質問語	39
表 2-4	【実験 I】触察における上位 3 因子の固有値と寄与率	47
表 2-5	【実験 I】触察における因子項目と因子負荷量	47
表 2-6	【実験 II】目視における上位 3 因子の固有値と寄与率	47
表 2-7	【実験 II】目視における因子項目と因子負荷量	47
表 2-8	コントラストと最大・最小・平均輝度	50
表 2-9	触察粗さ感の重回帰分析結果	54
表 2-10	目視粗さ感の重回帰分析結果	54
第 3 章	ドット間隔・ドット高さと粗さ感の関係	
表 3-1	【実験 III】ドット間隔・ドット高さの組合せ	66
表 3-2	【実験 IV】ドット高さの組合せ	89
表 3-3	底付き／底浮きの推定と進入比 C の範囲	82
表 3-4	接触力に対する皮膚変位量の 1 次回帰式の係数	88
第 4 章	ドット間隔・ドット曲率と粗さ感の関係	
表 4-1	高さ違い造形実験の設計寸法	96
表 4-2	曲率違いドット形成実験の設計寸法	105
表 4-3	楕円ドット形成実験の設計寸法	108
表 4-4	ドットパターンの名称と寸法値（設計値）	117
表 4-5	被験者グループによる回帰係数の違い	131



# 第1章

## 緒論



## 1. 1 背景

### 1. 1. 1 工業製品における触感の位置付け

工業製品のデザインは、製品の機能の一部であるとともに、消費者に対しその製品の性能や理念等を表現し伝えるものでもある。機器の電子化・自動化が進み性能の差が目に見えにくくなることで、その役割はより重要になっている。

身体への接触を伴う製品においては、外観の形・色に留まらず、表面の質感・触り心地（触感）もデザインの一部分といえる。例えば化粧品を例にとると、容器のデザインが購入を判断する大きな要因になると考えられており、「さらさら」や「しっとり」等、快適さや高級感を感じさせる触感が求められる。化粧品容器は製品の入れ物に過ぎないが、内容物の価値に見合う高級感やターゲットとする年齢層、製品の方向性等を表現できるよう、非常な注意を払ってデザインされている。これは化粧品自体の性能が可視化できないため、容器の見た目と触感が、製品の特長を伝える媒体として機能していると考えられる。同様の例は、スマートフォンに代表される情報機器や自動車内装等、身の回りの多くの製品に見出される。このように、市場が成熟した製品分野においては、付加価値の向上や競合製品との差別化を図るうえで、触感の向上は重要なテーマである。

### 1. 1. 2 本研究で対象とする素材

工業製品は大量生産を前提にしている点が特徴で、材料や加工法は機能（機械物性、化学的特性）やコスト、製造の難易度により選択され、品質は結果の均質さによって測られる。このような理由から機械的・化学的性質に優れ、特に大量生産に適するプラスチックが工業製品の素材として多用されている。触感が求められる用途も、化粧品容器やデジタルカメラのような高品位で精密なものから自

動車内装のような大型品まで多岐にわたる。本研究では工業製品の素材として最も一般的に用いられ、以下に示すように長野県産業における技術ニーズが高い、プラスチック射出成型品をテーマにその質感について考える。

### (1) 射出成形法と金型技術

射出成形法はプラスチック成形法の代表的なもので、生産性が高く高品質な製品が得られる。図 1-1 に示すように、高温で溶かした熱可塑性プラスチックを高压（数十～100MPa）・高速で金型に流し込み、型内で冷やし固める方法で、金型の形状を反転・転写したものが製品形状となる。熱可塑性プラスチックのほとんどがこの方法で製造されている[1]。

産業としてみると、最終的なプラスチック製品の生産だけでなく、成形機や周辺装置、金型等、多くの機械系の製造業が関わっている。特に金型は射出成形法におけるマザーツールであり、製品の品質や生産性を左右する重要な要素である。射出成形用の金型は、取り出し時に金型面を部分的にスライドさせて退避させる機構や、成形品を押し出すピン（エジェクタ）等、他の金型に比べ可動部が多い複雑な構造になっており、それらが段差や樹脂の漏れ出す隙間を生じないように正確に組み合わされる必要がある。加工と組立・調整に高い精度が求められ、材料まで含めた総合力が要求されるため、従来から日本の競争力が高い分野である。このため成形工程の中心がコストの低い諸外国に移った後も、金型や成形機は日本国内で生産されてきた。しかし近年では金型についても中国や韓国との競争が激しくなっており、日本のメーカーは高い技術力を生かした、より高精度・高機能で付加価値の高い製品の開発を求められている。

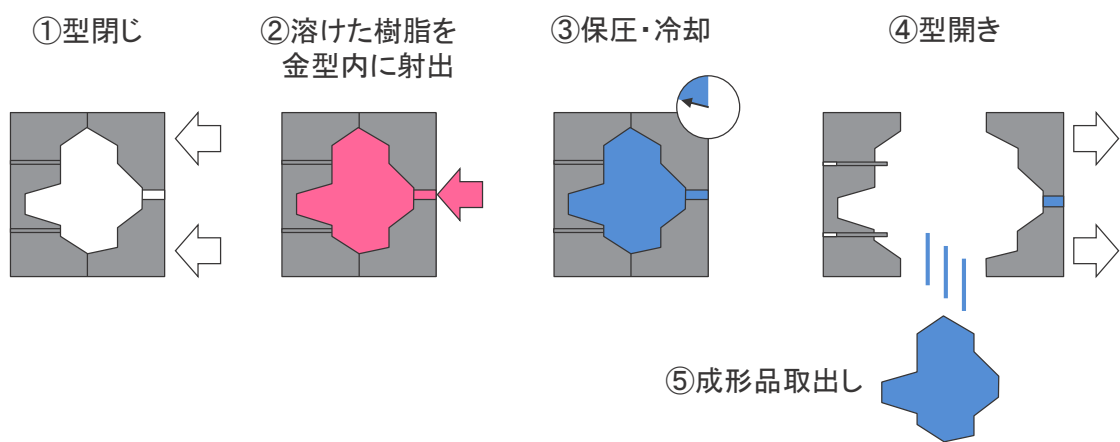


図 1-1 射出成形工程の流れ

## (2)長野県におけるプラスチック金型技術の重要性

筆者は長野県の技術職員として製造業の技術支援に当たっている。長野県において、プラスチックの射出成形品及び関連産業は重要な位置を占めている。この地域では製糸業の隆盛や戦時中の工場疎開を背景に、古くから精密加工分野を中心に加工・下請型産業が集積してきた。時代と共に産業の中心は精密機械から情報機器・電子機器に移り、平成 29 年度の工業統計によると製造品出荷額は情報通信機器と電子部品で全国 5 位、電気機械で全国 7 位となっている[2]。産業中分類別の特化係数でみると、情報 7.8、電子 2.6 と、県内の他分野に比べ突出している[3]。

プラスチック製品についても、板やフィルム等の素材生産が少ない一方、精密加工を要する射出成型に関する産業が集積している。複数の射出成型機メーカーが立地し、射出成型機の出荷台数が全国の 45%を占めるのをはじめ、プラスチック用金型の出荷額は全国 6 位、電気機器用プラスチック製品の出荷額は全国 9 位である[2]。

特にプラスチック用金型は、県の品目別の出荷額で 2,407 品目中 45 位 (247 億円, 94 事業所) であり、重要な技術分野である[4]。国際競争が激化する金型産業では、従来の加工下請型から川上企業に対し提案力を持つ研究開発型企业への転換が求められている。檜山金型工業(株) (現(株)コガネイモールド) のように後述のデジタルシボの実用化に取り組む先進的な企業等も存在し、製品の視・触感への効果に着目した高付加価値化の提案等がなされている。このような取り組みの中で、長野県においても視覚・触覚におけるヒトの感性を取り込んだ新しい設計技術が求められている。



### 1. 1. 3 触感の階層構造

一般にイメージされる「つるつる」「ざらざら」といった言語化された触感は、皮膚変形に伴う受容器からの様々な情報が脳皮質の触覚野で処理されることで触感として意識される [5]。触感が評価される過程は階層構造を持つと考えられており、例えば Chen ら [6,7] は、素材の物理的性質の知覚である材質感の層と上位の感性の層に分けられるとしている。岡本ら [8] は、過去に行われた研究を分析し、材質感を構成する独立した知覚の種類（材質感次元）について調査した。この結果図 1-2 に示す 5 つの触感因子（ファイン粗さ感・マクロ粗さ感・硬軟感・摩擦感・温冷感）が抽出され、材質感はこの 5 次元空間で表現されるとした。以上から、触感の意味的階層構造のイメージは図 1-3 のようになる。材質感のアウトプットに製品の特性や個人の嗜好などが加えられて感性の層の判断がなされ、最終的な触感が評価される。感性の層の構造は製品分野や製品の指向性、個人差等、個別の条件に左右されるため、対象とする製品毎に異なる。通常の製品開発の過程で行われる官能評価は、特定の製品群を対象に印象決定に関わる設計因子等を明らかにすることが目的のため、「高級感」「親しみやすさ」「触り心地」といった上位の階層を対象に評価が行われることが多い。

ここで、モノ側の表面の状態からプリミティブな触感因子が生じる過程について考える。ヒトによる触動作を含めると、触感因子の決定に関わる要因として図 1-4 のようなものが挙げられる。図中「モノ側の要因」は表面に固有の性質とみなされるものである。「ヒト側の要因」はヒトに固有のもので、個人差に関わる。「接触条件」はモノとヒトが接触することによって生じる状態である。

モノ側の要因については図 1-5 のように考えることができる。モノ側の条件には素材に固有のものと設計・加工により付与されるものがある。各種の物性値が前者にあたり、テクスチャ（表面の凹凸パターン）が後者にあたる。物性値から直接的に表面の振舞いが決定するのではなく、素材の物性とテクスチャの組合せ

によって決まる表面の物理特性が触感因子の要因になると考えられる。例えば温冷感には素材の熱伝導率だけでなく、テクスチャとの組合せで決まる伝熱特性が影響する。テクスチャはまた、粗滑感をはじめとして触感因子の知覚に直接的に作用する要因でもある。製品開発の場面においては、設計者は素材の選択とテクスチャの調整とにより、触感をより望ましいものに変更していると考えられることができる。

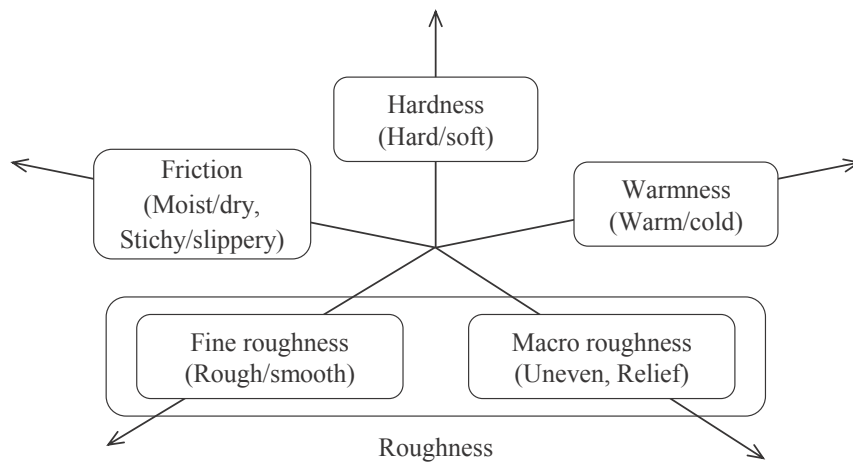


図 1-2 素材/テクスチャの触知覚に対する 5 次元の触感因子[8]  
 (Five psychophysical dimensions of tactile perception for materials/textures)

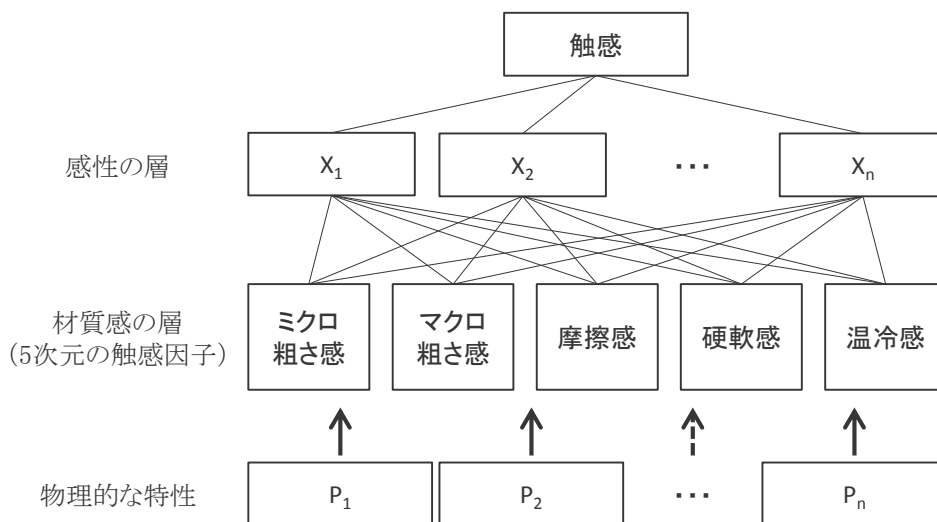


図 1-3 触感の階層構造

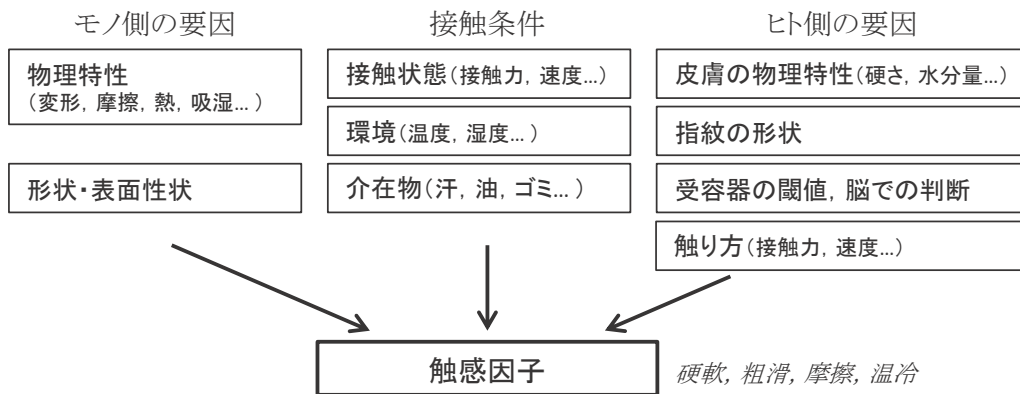
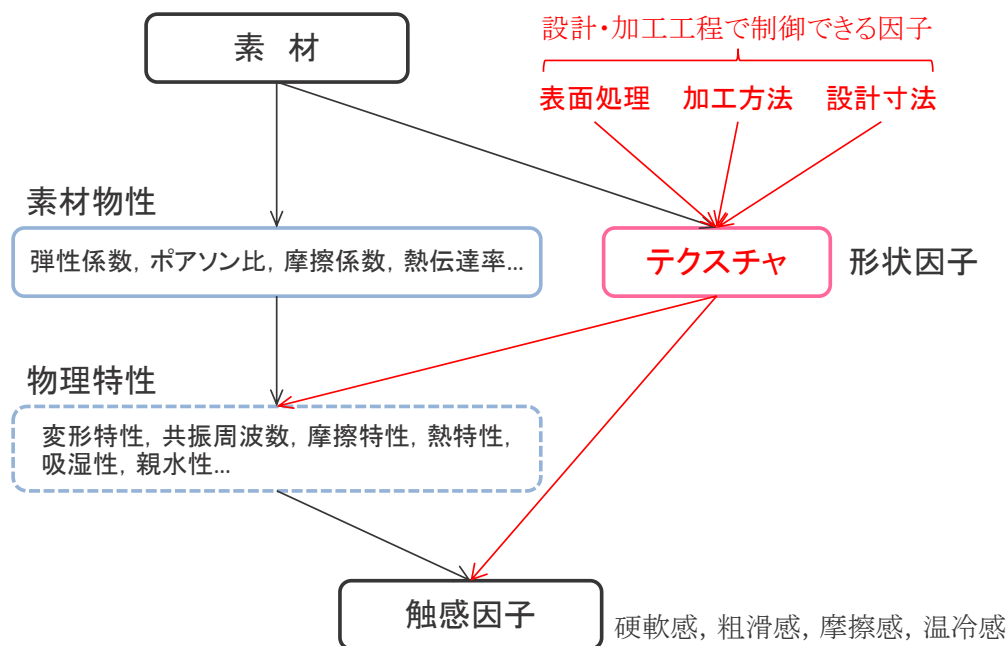


図 1-4 触感因子に関わるモノ側・ヒト側の要因



- ・設計・加工は形状の変更に関するものを指し、物性値を変更する処理は想定しない
- ・皮革や繊維等の自然物由来の素材の場合、テクスチャにも素材固有の構造が影響する
- ・塗装、鍍金等付加的な加工では物性値が変化する場合がある

図 1-5 モノ側の物理量と触感因子の関係

## (2)プラスチック製品における触感表現

プラスチック表面の特徴は、素材固有のテクスチャが存在しない点である。木材や皮革・繊維・紙等、自然物に由来する材料はそれぞれ素材に固有のテクスチャを持ち、素材と質感とが直接的に結びついている。テクスチャは加工法にも依存し、金属の場合、切削時に生じる周期的な工具痕や、表面仕上げによるブラスト面やヘアライン等、加工条件と質感とが結びついている。これに対し、型を用いた成形加工で作られるプラスチックでは、素材や製造法に由来するテクスチャが存在せず、人為的に付与されたテクスチャにより質感が表現される。素材や加工法とテクスチャの間に関連性がないという点で、その他の素材と大きく異なっている。プラスチック製品の触感を考える上では、素材や加工法から独立した自由度の高いテクスチャをどのように設計するかが課題となる。

プラスチックにより表現できる触感の範囲は、素材の物性値とテクスチャ形状の限界により制約を受ける。物性値については、樹脂の弾性係数や熱伝導率は金属に比べ大幅に小さい。また形状は射出成形で製造可能な範囲に限られる。具体的には、金型の微細なすき間に樹脂が入り込む転写性の限界により形成できる凹凸の幅や深さが限られる。また型抜きの際の制約により抜き方向に対するオーバーハングや中空構造を作ることができない。このためガラスや金属の冷たさ、木のような柔らかさや温かみ、紙や布の繊細さ等を表現することは難しい。このように触感因子によって制御可能な幅は異なり、粗さ感や摩擦感はテクスチャ形状による制御が容易である一方、硬軟感や温冷感の制御が困難であると予想される。

## 1. 1. 4 シボ加工

### (1)プラスチックの表面加飾技術

テクスチャ形成をはじめ、樹脂成形品の質感の向上を企図した表面加工は加飾処理と総称される。実施されるタイミングにより、成形時に金型内で行われる一次加飾と成形後に行われる二次加飾に分類され、それぞれテクスチャ付与の他、鍍金・蒸着等の成膜、塗装・着色、シート・フィルム・箔の貼付け等の加工法がある[9]。テクスチャを付与するシボ加工は、この中で最も一般的に用いられる方法である。シボ加工は、副次的な資材や工程を必要とせず、成形と同時に意匠性や機能性を付加できる点で加飾処理の中でも特異的といえる。金型にシボパターンを形成する以外は未処理の場合とコストが変わらず、塗装や鍍金等の下地を整える際にも使われるため、製品分野を問わず広く採用されている。シボ加工は意匠性や触感の改善の他、次のような目的のために使用される[10]。

- ・すべり防止などの機能性の付与
- ・ウェルドライン、フローマーク等、成形による外観ムラを目立たなくする
- ・反り・ヒケ等、成形による形状不良を目立たなくする
- ・加工後のキズ付きを防ぐ
- ・塗装工程の省略

### (2)シボに用いられるパターン

シボに用いられるパターンとしては、研磨によるヘアラインやブラストによる梨地等、金型の表面仕上げによるものをはじめ、ドットや格子のような幾何学的パターンや、木材や皮革等、自然物を模したパターンが一般的である。研磨された「つるつる」「つやつや」した表面に対し、梨地の粗さによって「すべすべ」「さらさら」「ざらざら」といった質感が、より大きいパターンにより立体感や重厚感などが表現される。自然物を模したものでは、革張りのシワだけでなく縫製の糸

まで再現するなど、素材を誤認させるような精巧な表現も可能である。例えば自動車内装では低コスト化と軽量化、衝突安全性等の理由から室内に露出する部分はほとんどがプラスチック製であり、ほぼ全ての面に意図的にテクスチャが付与されている。部位に応じて革張りを模したものや幾何学模様の繰返し、梨地等、多様なパターンが選択され、1台の自動車の内装に数十種類のパターンが使用されることも珍しくない。

### (3) 金型へのシボパターンの形成方法

シボの凹凸は成形時に金型表面の凹凸を転写することで作られる。金型面にシボパターンを形成する方法としては、金属表面を加工液内で溶解除去するエッチング法が主流である。この他、機械切削法、手掘り法、押込み加工法、放電加工法、電解加工法、精密鋳造法、電気鋳造法、溶射法、サンドブラスト法などがパターンに応じて選択される[11]。最近では別体のシートにシボパターンを形成し、これを金型に貼り込む方法なども用いられている[12]。エッチング技術の高度化により細密なシボ表現が可能になっており、マスクを多層化する技術や、精度よく転写するための高転写成形等の成形技術が開発されている[13]。高品位なシボ加工が可能になったことで、塗装レスによるつや消し面等も実現されている。

### (4) エッチング法の課題

エッチング法は化学的な腐食処理によるため、除去深さの制御などに専門的なノウハウが必要である。パターンのライブラリも必要なため、国内でシボ加工を行えるのは高度なノウハウと膨大なマスクパターンを持つ少数のメーカーに限られている。工程の8割が手作業といわれ、仕上がりはマスクパターンを貼り込む作業者の技量や熟練度に依存する部分が多い。手作業のため模様を位置を厳密に揃えることや、パターンの拡大・縮小が困難であるなど、再現性やパターンの再利用性などの点で課題がある。その他、化学処理による作業が危険を伴う点や、工程から生じる廃液による環境負荷が懸念される。

### 1. 1. 5 デジタルシボ

近年、設計・加工工程で急速にデジタル化が進んだのに伴い、シボ加工についてもパターンのデザインから金型作成までの一連の作業を全てデジタルプロセスで行うワークフローが提案されている[14-16]。これらは従来のエッチング法によるシボと対比して「デジタルシボ」と呼ばれる。これはシボの3次元パターンを生成するシステムや、製品形状にテクスチャの凹凸を統合した大規模な3次元設計データを作成するシステム、点群座標で記述された大容量データを扱うことのできる Computer Aided Manufacturing (CAM)ソフトウェア等で構成され、最終段の加工工程では数値制御された多軸加工機による切削加工やレーザ加工[17]によりシボパターンを形成することができる。設計から加工まで一貫してデジタルデータで管理されるため、Computer Graphics (CG)による外観チェックや3Dプリンタによる試作とも親和性が高い。エッチング法の課題である繰り返し再現性やデータの再利用性に優れる他、金型メーカーが既存の工作機械を用いて仕上げ工程まで行うことができる[18]。

デジタルシボはパターンの微細形状までが3次元CADデータの形で管理できるため、パターンの拡大／縮小はもとより、離型性に影響する微細なオーバーハングを修正することや、多数個取りの金型においてランダムにみえる革シボのシワの位置・高さまで厳密に揃えること等が可能になる。これにより従来は外注仕上げの出来栄に依存していた製品表面の状態までが管理でき、設計者の視点からは応用範囲の広い技術といえる。設計技術についてはCAD・CAMと共にパターンの生成法の分野でもデジタル化が進んでおり、自然物から採取した小面積の計測データから連続的に繰り返す大面積データを自動的に生成する手法[19]や、フラクタル理論を応用して皮革のような自然な印象を持つパターンを計算機のアルゴリズムにより自動生成する手法[20-22]が提案されている。

金型メーカーにとっては、デジタルシボにより自社で機能性の高いテクスチャの



開発や品質管理を行えるようになり、川上企業に対する提案力や高付加価値化による競争力の強化につなげることが期待できる。

### 1. 1. 6 触感に関する先行研究

触感については19世紀におけるWeberによる二点識別域閾等の研究や解剖学的な感覚点や触覚受容器の発見に始まり、主に神経生理学・精神物理学の分野で感覚が認識される構造について明らかにされてきた。近年では数値解析により受容メカニズムを明らかにするアプローチなどがみられる。これらの知見に基づき、ロボット工学の分野では素材を識別するような触覚センシング技術、バーチャルリアリティ研究の分野ではヒトに触覚を提示する触覚ディスプレイ技術についてデバイスの開発等が進められている。

精神物理学や神経生理学の分野では、テクスチャの凹凸が人の感覚に与える影響について多くの研究が行われ、特に粗さ感の要因として空間的要素と時間的要素がどう関わるかについて議論されている。Lederman[23]は、溝パターンについて接触力や速度を変えた場合の粗さ感を調査し、粗さ感には溝幅と接触力の影響が大きく速度の影響が小さいことを示し、刺激の時系列的な変化の効果は小さいとした。これに対しCascio [24]は、樹脂製溝パターンを用い、周波数を基準に相対速度を与えるなどした実験により、周波数情報が粗さ知覚に影響することを示した。これらはいずれも指を固定して試料を動かす受動的な触運動（パッシブタッチ）によるものである。Hollinsら[25]は、研磨紙を用いた実験により、100  $\mu\text{m}$  以下の粗さの識別には指とテクスチャの相対運動が必要なことを示し、粗い表面では凹凸の高さ・周期等、空間的要素に基づくメカニズム、密な表面では皮膚に生じる振動の周波数等、時間的変動に基づくメカニズムが用いられることを明らかにし、周期の寸法領域の違いによる知覚メカニズムの違いを示した。これに対しJonsonらは、神経生理学の視点で行った一連の研究[26-28]において、様々なパターンの粗さ刺激を用いてサルとヒトの触覚受容器の応答をヒトによる官能検査結

果と比較することで、粗さ感を神経活動の面から明らかにする実験を行い、周期 0.1mm 以上の粗さ感が、受容野が狭く順応の遅い SA1 型のユニットの発火頻度の空間的变化により説明でき、振動情報は不要であるとしている。Yoshioka ら [29]は溝幅 1mm 以下の溝パターンを対象に SA1 によるメカニズムで粗さ感が説明できることを示した。

計算機を用いた数値解析によるアプローチとして、前野、小林、白戸、昆陽ら [30-36]による有限要素法による触覚受容部の機械的構造に関する数値シミュレーションや、皮膚内部の機械刺激から触感が認識される知覚構造の数値シミュレーションによる一連の研究が挙げられる。ここでは指断面の精密な有限要素モデルにより、接触時に皮膚内部の受容器の位置に生じるひずみエネルギーの時系列分布と受容器のインパルス発射特性が一致することなどを示し、受容器によって粗さや摩擦感が知覚される過程がシミュレーションにより再現できることなどが示されている。これらの研究により、ヒトがどのような情報に基づいて粗さ感を知覚しているかが明らかにされてきた。

本研究の目的は知覚機構そのものの解明ではなく、これらの研究で示された知覚機構を通し、具体的なテクスチャの寸法パラメータが触感因子とどのような関係になるかを実験的に示すことである。このような観点からは、本研究が想定する寸法より間隔・直径ともかなり大きな凹凸パターンではあるが、試料の寸法パラメータと粗さ感の関係が示された Connor [26]や Meftah[37] らによる実験が参考になると思われる。Connor はドットパターンのドット間隔を 0.8~6.5mm の範囲で変化させた実験から、粗さ感はドット間隔が 3.2mm で最大になり、それ以上では逆に減少するとした。一方 Meftah らは、ドット間隔を 1.5~8.5mm の範囲で変化させた実験を行い、粗さ感はドット間隔により単調増加し、Connor らが示した粗さ感のピークは生じないとした。この違いの原因として、ドット配置や触察方法の能動性の違いの他、Connor らの実験ではドット高さが低い (0.35mm)ため指が平面部に底付きしている可能性に言及している。Blake ら

[28]は円錐台形のドットパターンを用い、粗さ感はドット高さに従って増加し、直径に従ってより減少することを示した。これらの結果から、固定された表面を自由に触る（アクティブタッチ）場合、粗さ感は凹凸の間隔や深さの影響をそれぞれ受けると予想される。実際のテクスチャの設計指針を作成するには、混在する様々な寸法要因（周期・高さ・曲率等）の相対的な影響力の違いや、寸法領域による効果の違いについてさらに具体的に明らかにする必要がある。

本研究と同様に樹脂製品を開発する視点から検討した事例として、伴ら[38]による硬軟感のコントロールを企図したソフトフィールシボの開発や、川堰ら[39-43]による微細溝パターンの触感評価、米原ら[44]による凹凸のグラデーションをなぞり動作の位置決め精度の向上に利用した例が挙げられる。伴の例は自動車内装を対象に、ドットパターンとは逆に窪み形状を配置したテクスチャを考案し、この寸法値により硬軟感の因子が操作できることを示したものである。川堰の例は 0.1mm 以下の非常に細密なパターンについて高次の印象まで拡大して質感（風合い）を検討している。単体の凸点を対象とした例として、豊田ら[45]は、携帯電話のキーに付けられた凸点の高さと先端の曲率半径が操作性に及ぼす影響について具体的な寸法パラメータとの関係を示した。シボ加工以外の方法でテクスチャを付与したものとして、須田ら[46,47]によるフィラー（充填剤）により凹凸を形成し、このテクスチャの質感について印象の官能評価を行った例がある。しかしながら、テクスチャの微細寸法と触感との間の定量的な関係を示した例は未だ少数である。

## 1.2 目的

### 1.2.1 本研究の目的

前節に示したように、デジタルシボ技術によりテクスチャの設計・加工・管理の自由度が拡大した。この技術を活用することで、テクスチャの設計値によって表面の機能性や質感をコントロールできるのではないかと期待されている。要素技術が確立し、3次元的なテクスチャを設計・加工できる環境が整った一方、これを触感表現に活用する上では課題も多い。最大の問題は、様々な設計パラメータと触感の関係が定量的に定まっていない点である。このため現状のテクスチャ開発は依然として試作と官能評価を繰り返す試行錯誤的な手順を踏まざるを得ない。型設計の現場では、「どの寸法を変えると触感がどう変化するか」といった設計パラメータと触感の関係について、設計の指針となる基礎的な知見が求められている。

1.1.3節で示した触感の階層モデルに倣い、設計値によって触感をコントロールする試みについても、モノの物理特性と触感因子の関係を明らかにする下位の部分と、具体的な製品の高次の印象の決定構造を明らかにする上位の部分とに分けて考えることができる。図1-6に模式図を示す。下位の部分は物理量と感覚量の対応付けを行う技術であり、高次の触感をコントロールする前提として必要となる基礎的な知見である。上位の部分の構造は、評価対象の製品によって異なるため、製品ごとに個別に検討されるべき内容である。

本研究では、製品に依存しない基礎的なテクスチャ設計指針を示すため、下位の部分、すなわちテクスチャの設計寸法とプリミティブな触感因子の関係について明らかにすることを目的とする。個々の触感因子と寸法パラメータの関係を示す形で設計指針が整備されることで、設計者はどのような方法(寸法パラメータ)により各触感因子を変化させればよいか知ることができ、これが複数の設計者

間・工程間・企業間で共有されることにより、規格化された手順に従って設計を進めることが可能になると期待される。さらに、原理的には、個別の製品について上位の感覚の構造が明らかになれば、より高次の触感を寸法パラメータにより表現することが可能になる。

ただし、これら全てを網羅的に明らかにするのは困難である。本研究では次項以下に示すように、対象とする触感因子とテクスチャを選択して実験を行う。このため全体に対し限定的な範囲ではあるが、触感をコントロールする定量的な指針を示すことを目指した。

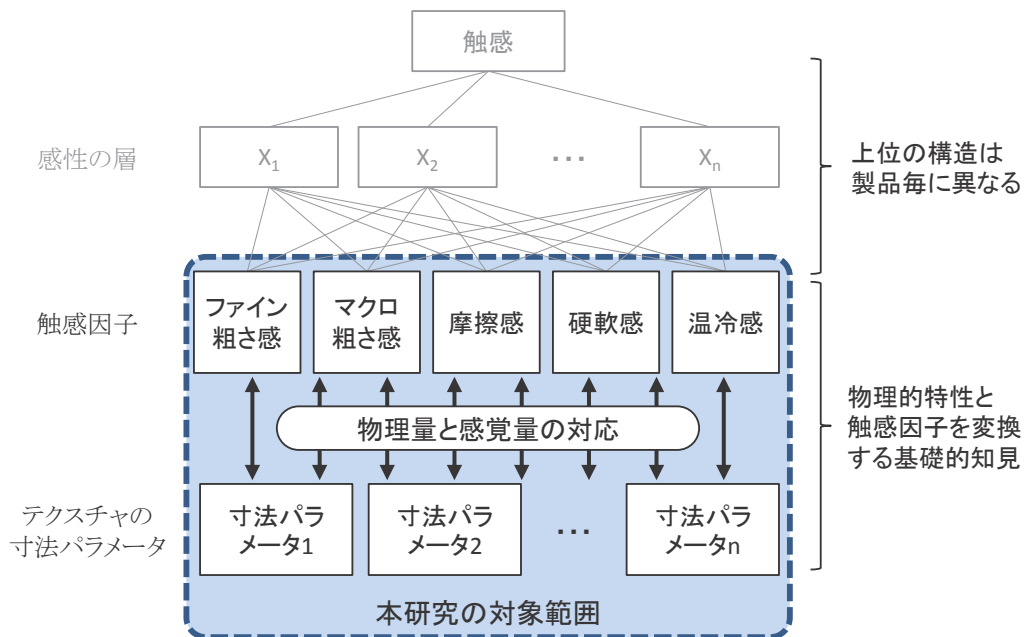


図 1-6 本研究の対象範囲

### 1. 2. 2 対象とする触感因子

対象とする触感因子の種類については、前節に挙げた先行研究でも多く取り上げられ、実験の過程でもテクスチャ形状の影響が大きいことが明らかになったことから、粗さ感を中心に検討を行った。

「粗い」は水平方向のきめの細かさと、垂直方向の凹凸の大きさの両方を含む多義的な語である。このため「粗い／なめらか」という単一の感覚として認識される粗さ感には、水平方向・垂直方向それぞれの形状要素の影響が含まれ、これらが総合的に判断された結果決まると考えられる。独立した寸法要因の影響を分離して評価することで、粗さ感の概念を構成する構造を明らかにできる可能性がある。また、粗さ感因子にはファイン粗さとマクロ粗さがあるが、これらは振動情報を必要とするか否か等、受容メカニズムの違いにより分けられ、周期 0.1mm～1mm にその境界があるとされる[48]。本研究で対象とする切削加工の寸法領域はこれと重なるため、触感因子としては両者が混在した状態が対象になると思われる。

### 1. 2. 3 対象とするテクスチャパターン

テクスチャの設計パラメータと触感の関係を検討するにあたり、本研究では対象として、幾何学的要素で構成される最も単純でかつ一般的なパターンであるドットパターンを選択した。ドットパターンの特徴は、平面方向の配列周期のパラメータと、ドット単体の高さや形状のパラメータが独立している点で、このため前項で挙げた粗さを構成する寸法因子を独立に評価することができる。選択にあたっては、製品に応用する際の用途の汎用性が広いことや、意匠への影響が小さいこと、触動作に対する方向性の偏りが無いこと、加工が容易なこと等も考慮した。ドット間隔が狭い場合は外観が均一なため、より低周波のベースパターンに

重ねて使用することも可能である。

ドットの配列方法については、代表的なパターンとして、図 1-7 に示すように隣接するドットが縦・横 4 方向に配置されるパターンや (格子状配列), 6 方向に配置されるパターン (最密配列) をはじめ, ランダムな配列まで含めると無限のパターンが考えられる。本研究では 1 方向へ触察する場合に刺激の入力間隔が一定になるよう, 格子状配列を選択した。ドット間隔は縦・横同一で (格子形状は正方形), パターン全域で均一であるものとした。

個々のドット形状については, 先行研究では円柱形状や円錐台形状のものもドットパターンに含めている例 ([28]など) があるが, 本研究では微小なドットを形成する上でドット単体の形状をできるだけ単純にする必要があったこと, 加工時のツールとして微小 R のボールエンドミルを想定したことなどから, 球面若しくはそれに近い形状に限定した。

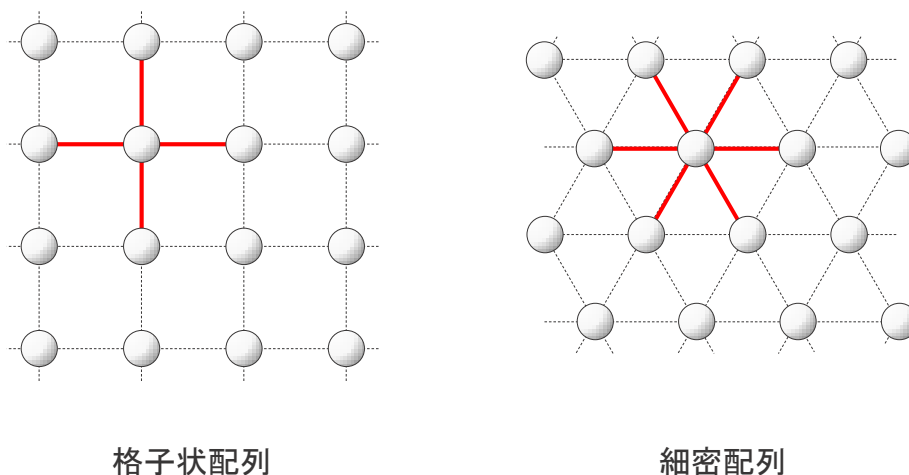


図 1-7 ドット配列の例

#### 1. 2. 4 ドットパターンを定義する寸法要因

ドットパターンを定義する寸法パラメータは図 1-8 のようなものである。これを整理すると図 1-9 のように、大きくはドットの配置に関するものと、個々のドットの形状に関するものに分けられる。

ドットの配置に関するパラメータとしては配列とドット間隔が挙げられる。配列については上述のように縦横均一な格子状配列に固定したため、ドットの配置に関する寸法パラメータはドット間隔のみである。

ドットの形状に関するパラメータとしては、上述のようにドットが球面もしくはそれに近い形状の場合、直径・高さ・曲率が挙げられる。このうち直径については曲率と高さの組合せから副次的に決まるため、ドットの形状に関する独立した寸法パラメータは高さ・曲率の 2 つである。

図 1-9 に示すように、本研究ではここに挙げた寸法パラメータについて順次、触感（粗さ感）との関係を調査することで、ドットパターンの各寸法値が粗さ感にどのように作用するかを明らかにした。第 2 章ではドット間隔・ドット直径と、見た目の印象および触感の印象との関係を調査した。ここではドット形状を曲率半径と高さが等しい半球形としたため、曲率・高さ・直径は連動して変化し、それぞれ 1 対 1 で対応している。第 3 章ではドット間隔・ドット高さと粗さ感との関係を調査した。ここでは曲率を一定とし、高さの影響のみを抽出した。第 4 章ではドット間隔・ドット曲率と粗さ感との関係を調査した。ここでは高さを一定とし、曲率の影響のみを抽出した。



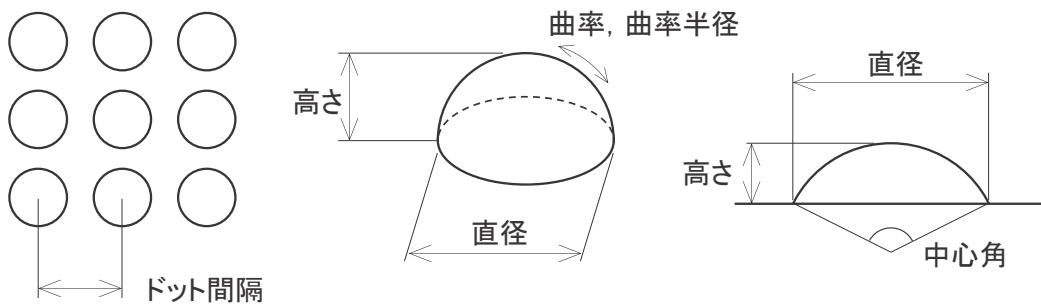
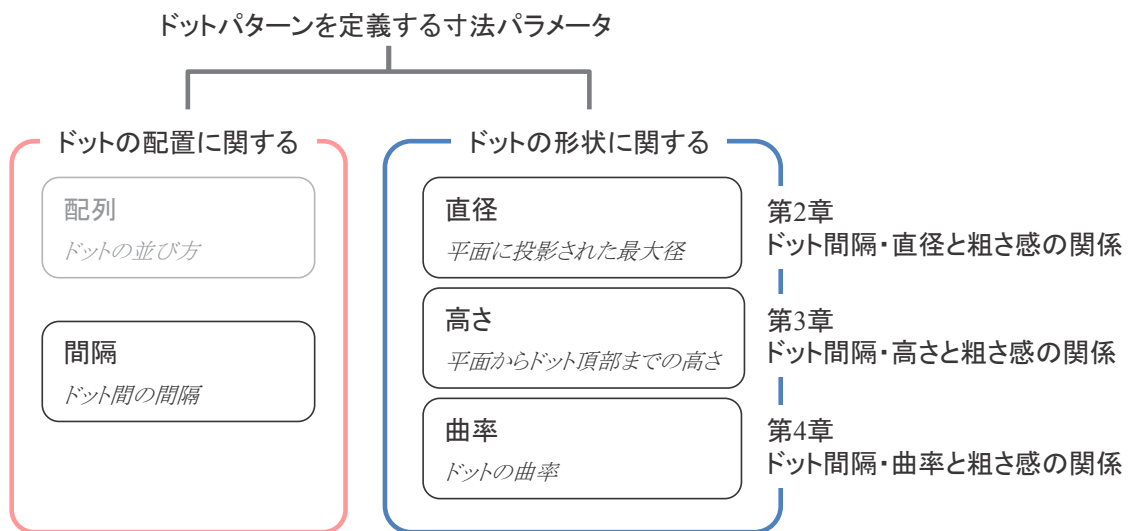


図 1-8 ドットパターンの寸法パラメータ



- ドットパターンの寸法パラメータは上記で網羅される
- 第2～4章では、ドット配置に関する「間隔」と、ドット形状に関する「直径」・「高さ」・「曲率」のいずれかの組合せに対する2次元的な粗さ感の分布を調査
- ドットの配列は格子状配列に固定

図 1-9 ドットパターンの寸法パラメータと本研究の構成

### 1.3 研究体制

本研究の第2章、第3章は榎山金型工業(株) (現(株)コガネイモールド) の協力を得て実施した。第2章、第3章では実験用試料を実製品と同様に射出成形により製作した。(株)コガネイモールドは大規模 STL データからの精密切削等の技術を持ち、(株)デジタルアルティザンが提案するデジタルシボ技術の一つである d3 テクスチャ®事業において金型製造および成形工程を担っている。本研究では、榎山金型工業(株)において d3 テクスチャ®と同様の方法を用いて金型を切削加工し、ABS 樹脂を射出成形して製作した実験用試料の提供を受けた。また、官能検査実験においても被験者として榎山金型工業(株)社員の協力を得た。研究体制のイメージを図 1-10 に示す。

第4章では長野県工業技術総合センターの3Dプリンタを用いて試料を作成し、実験についても長野県工業技術総合センター単独で実施した。

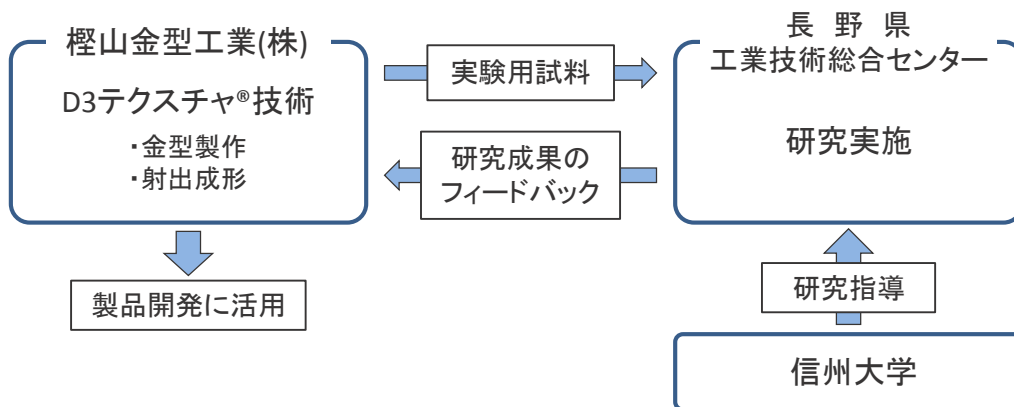


図 1-10 第2章、第3章の研究体制

## 1.4 論文の構成

本論文は5章から構成される。第2章から第4章では、ドットパターンの寸法パラメータと粗さ感の関係について順次検討した結果を示す。

第2章では、ドットの間隔と直径（高さと曲率）を変化させ、触感との関係について検討した。触察により判断される触感に加え、目視のみで判断される質感の印象についても調査し、それぞれを決定するテクスチャの寸法要因について考察した。

第3章では、ドット高さによる接触状態の違いに着目し、ドットパターンの間隔と高さを変化させた場合の粗さ感の変化について検討した。第2章の結果を踏まえ、高さが感覚に影響する前提として平面部への皮膚の底付きが必要であるという仮説に基づき、高さが影響する寸法領域を狙った各種の実験によりこれを検証した。両寸法パラメータと粗さ感の関係を示すとともに、指表面の底付きを含めた高さ方向の接触状態と粗さ感の関係について考察した。この結果から底付きする高さを推定し、さらに詳細な判別実験によりこれを確認した。また、触察状態での指表面の変形量について定量的に裏付けるため、レーザ変位計を用いた測定装置を製作し、触察時の皮膚表面の変形を実測した。

第4章ではドット曲率の違いに着目し、同等の粗さ感を示すドット間隔・曲率の組合せを探索する実験を行うことで、ドット間隔とドット曲率の平面上に粗さ感の等高線を描いた。これにより粗さ感におけるドット曲率の影響を明らかにし、粗さ感の決定過程における両寸法パラメータの影響について考察した。ここでは3DプリンタによりR面を持つ微小凸点を形成したが、その形成過程についても実験により詳しく検討した。

第5章ではこれらの検討結果をまとめ、結論と今後の課題について述べた。



## 第2章

### ドット間隔・ドット直径と粗さ感の関係

— 視触覚の感覚モダリティによる印象の違い —



## 2.1 緒言

本章では、ドットパターンの寸法パラメータのうちドット間隔・ドット直径を取上げ、触感の関係について検討する。また本章では触察／目視の2通りの感覚モダリティを対象とする。

第1章で述べたように、ドット単体の形状を決定する独立した寸法パラメータは曲率と高さの2つである。本章では、完全な半球形（中心角が $180^\circ$ ）を基本形状とし、この形状を相似形に拡大・縮小させる形でドット形状を変化させた。この場合ドット高さと曲率半径が等しいため形状の自由度は1つになり、パターンはドット間隔とドット直径（あるいは曲率、高さ）の2つで定義される。これら2つの寸法パラメータを対象に、印象との関係について調査した。寸法領域は切削加工により量産可能な最小サイズ付近（直径 0.1～0.3mm，間隔 0.13～0.33mm）を対象とした。量産品と同様に射出成形により試料を製作し、触察のみによる官能評価（実験Ⅰ）と、目視のみによる官能評価（実験Ⅱ）により、視覚・触覚の評価を独立に行った。また、視覚的な刺激を定量化するため、試料面における反射光の輝度分布を測定した。

実験の結果、触察時と目視時とで粗さ感の評価基準が異なることが明らかになった。粗さ感は触察時には凸点の間隔と、目視時には凸点単体の直径や反射光のコントラストとそれぞれ高い相関がみられ、触察時の粗さ知覚には主に凹凸周期が、目視時の粗さ知覚には主にドット形状に由来する光学的特徴が手掛かりとなることが示唆された。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 試料

本章で用いたテクスチャパターンは、突起の形状が半球形のもので、突起の高さは球の半径に等しい。図 2-1 に試料寸法を示す。寸法パラメータの範囲は通常使用される範囲の最小ツール径 (R0.05) を参考に決定し、ドットの直径と間隔を表 2-1 のように組合せた 6 種類のパターンを選定した。図 2-2 に 1×1mm 範囲のドット配置の模式図を示す。通常の樹脂製品同様に切削加工により射出成形金型を製作し、成形品を得た。切削加工にはドットの球面と一致するサイズのボールエンドミルを用い (例：φ0.1 に対し R0.05)、刃物の球面を転写する形で金型を切削した。この方法は金型製作のための時間とコストがかかるが、実製品と同等の品質で均質な試料を大量に得ることができる。

図 2-3 に製作した試料の例を示す。素材は黒色 ABS 樹脂とした。また図 2-4 にレーザ顕微鏡 (オリンパス(株) LEXT OLS-4100) (図 2-5) で拡大観察したドット形状の例を示す。



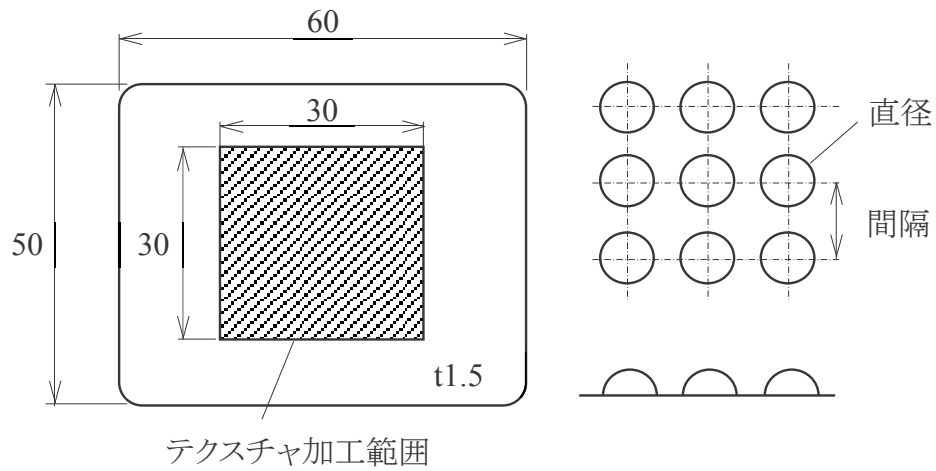


図 2-1 試料寸法とテクスチャ寸法パラメータ

表 2-1 寸法パラメータの組合せ (mm)

	①	②	③	④	⑤	⑥
ドット直径	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
ドット間隔	0.13	0.2	0.3	0.23	0.3	0.33

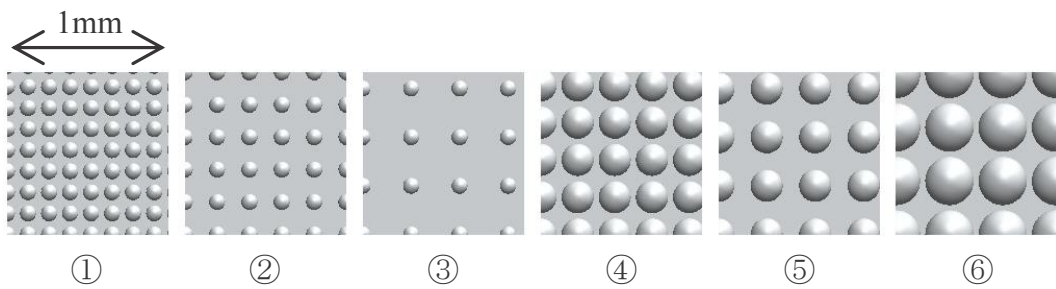


図 2-2 ドット配置模式図

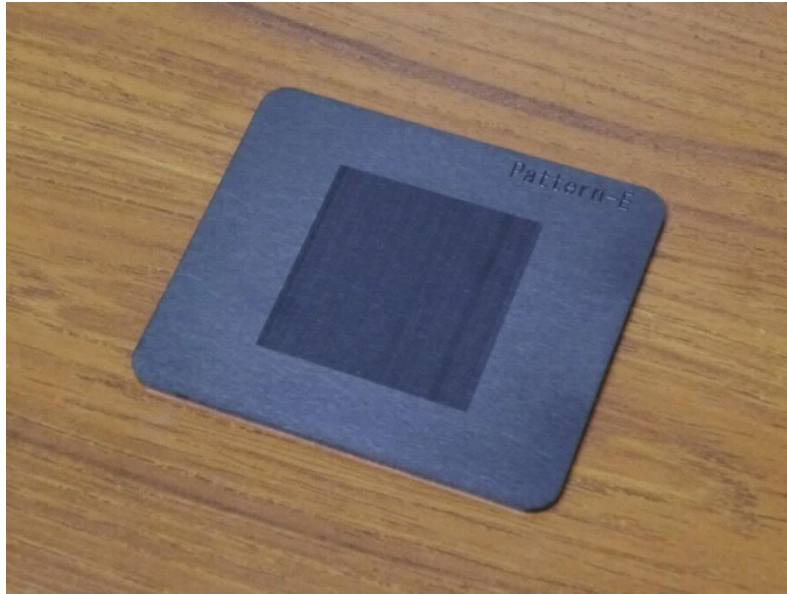


図 2-3 実験 I， 実験 II で使用した試料の外観例

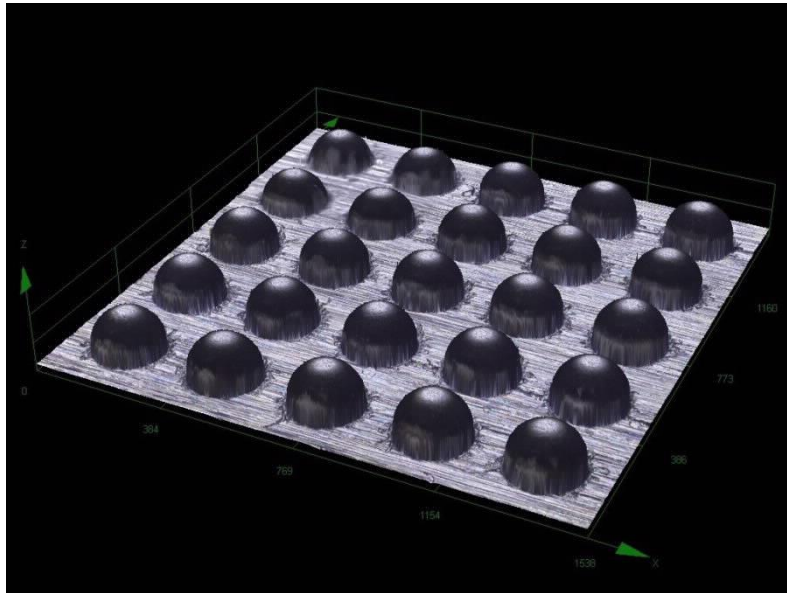


図 2-4 レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例  
(ドット間隔 0.3mm, 直径 0.2mm)

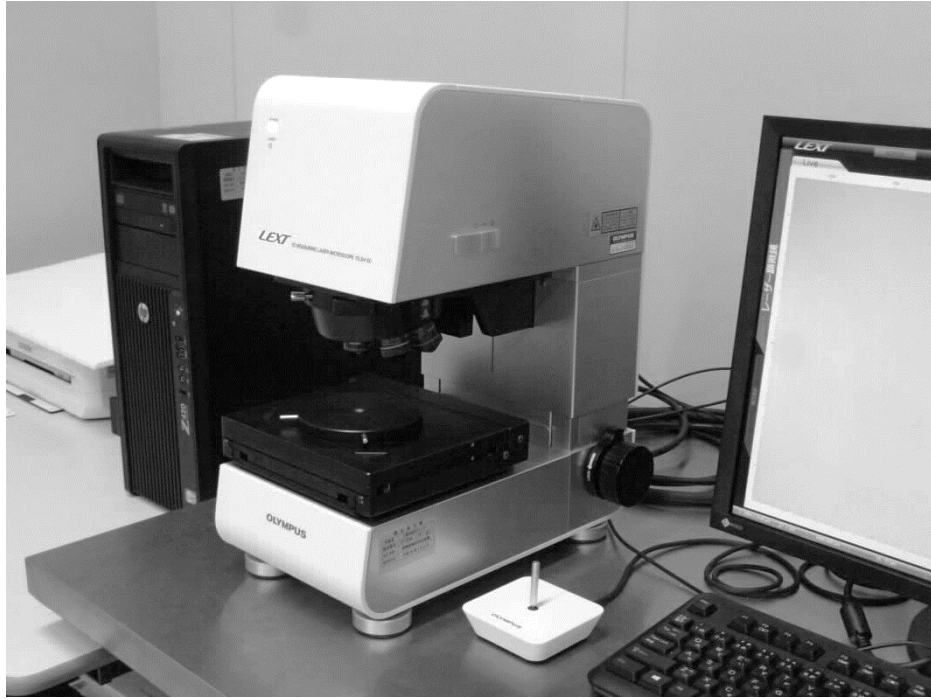


図 2-5 レーザ顕微鏡 (オリンパス(株)製 LEXT OLS-4100)

## 2.2.2 【実験Ⅰ】触察による触感評価実験

### (1)実験方法

触察による触感を評価するため、目で見ずに試料表面に触れた印象を評価する官能検査実験を行った。実験は檜山金型工業株式会社と長野県工業技術総合センターにおいて、それぞれ社員、職員を被験者として実施した。

実験手法はシェッフエの一対比較法（中屋の変法）に従った[49]。試料が6種類のため、比較する組合せの数は15組である。

図2-6に実験時の状態を示す。視覚の影響を除くため、試料表面が直接見えないうような手元の視界を遮る目隠しを設置し、この下に2枚1組の試料を提示した。被験者は手探りで2枚の試料を触察して触感を比較し、質問用紙に従って8種類の質問語の印象が左右どちらの試料により当てはまるかを回答した。これを試料の組合せを変えながら15組繰返した。

触察方法については、被験者が最も違いを感じ易い条件で評価できるよう、示指の腹で触れ、擦る方向を試料の短辺に平行に往復させるよう指示した以外、擦過速度や接触力等は拘束しなかった。回答までに試料間を往復する回数や時間についても自由とした。

試料の組合せの提示順と各組における左右の並び順は乱数を用いてランダムに設定した。質問の順序は全被験者で同一とした。最初に練習用に5組のダミー試行を挿入した。

実験用の試料と資材は10セット用意し、最大10名の実験を同時に行えるようにした。図2-7に檜山金型工業(株)における複数人による実験風景を示す。

### (2)質問項目と質問用紙

本実験は最初の検討に当たり、ドットパターンの触感がどのような印象を持つか不明なため、質問項目の幅を広く取り、選定に当たっては既知の触感因子（粗

滑感・硬軟感・摩擦感・温冷感) を一通り含むようにした。被験者を含まない 3 名で事前検討を行い、解釈を迷わずに回答可能と思われる質問として表 2-2 左列に示す 8 項目を決定した。粗滑感, 硬軟感, 摩擦感, 温冷感にそれぞれ対応する語として, 「なめらか」, 「硬い」, 「しっとりしている」, 「ひんやりしている」を挙げた。また, 物理パラメータとして変化させたドット配置と形状の違いが独立に知覚されるか否かを確認するため「目が粗い」と「凹凸が大きい」を加えた。さらに, 滑り止め機能を評価する「滑りにくい」と嗜好を評価する「触り心地が良い」を追加した。質問語の解釈のばらつきを小さくするため, 実験時には各質問語の対義語が表 2-2 右列の語であることを口頭で被験者に説明した。

回答には図 2-8 のような質問用紙を用い, 各質問語に対し左右どちらの試料がより当てはまるかを, 「左の方が当てはまる」/ 「右の方が当てはまる」に程度を表す「はっきり」, 「やや」, 「どちらともいえない」を組合せた 5 段階の相対評価で回答させた。

### (3)被験者

被験者は長野県工業技術センター職員と檜山金型工業(株)社員の中から選定した, いずれも触感評価についての専門家でない 33 名 (男性 20 名, 女性 13 名) で, 年齢構成は 20 代 4 名, 30 代 9 名, 40 代 17 名, 50 代 3 名であった。

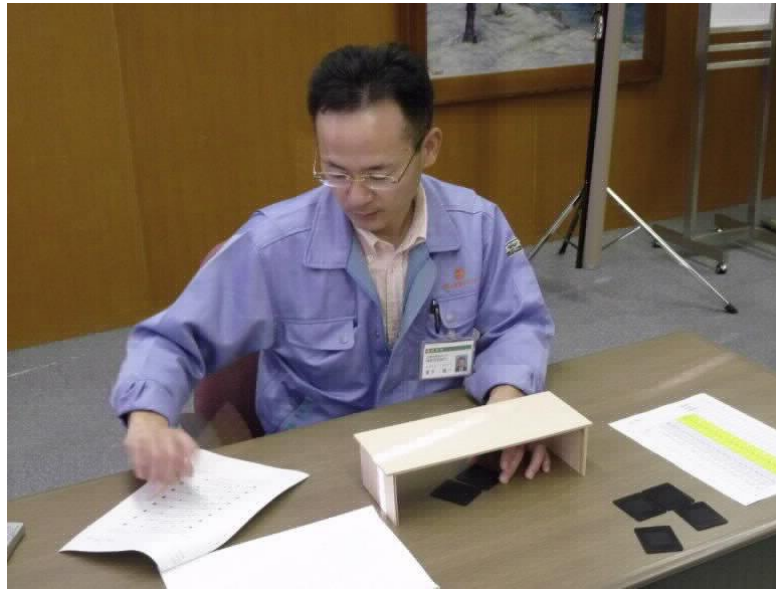


図 2-6 実験 I の実験時の状態



図 2-7 榎山金型工業(株)における実験風景

表 2-2 実験 I の官能検査における質問語

	質問語	対義語
I-1	なめらか	ざらざら
I-2	目が粗い	目が細かい
I-3	凹凸が大きい	凹凸が小さい
I-4	滑りにくい	滑りやすい
I-5	しっとりしている	かさかさしている
I-6	触り心地がよい	触り心地が悪い
I-7	硬い	柔らかい
I-8	ひんやりしている	温かみがある

実験番号 5  
 試行番号 6  
 被験者番号 21

パターン番号 36

提示順 1 / 20

	左の方が当てはまる				右の方が当てはまる
	はっきり	やや	どちらともいえない	やや	はっきり
	Q1 なめらか				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q2 目が粗い				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q3 凹凸が大きい				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q4 滑りにくい				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q5 しっとりしている				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q6 硬い				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q7 ひんやりしている (冷たく感じる)				
	●—————●—————●—————●—————●				
	Q8 触り心地がよい				
	●—————●—————●—————●—————●				
	はっきり	やや	どちらともいえない	やや	はっきり
	左の方が当てはまる				右の方が当てはまる

図 2-8 実験 I の質問用紙の例



## 2. 2. 3 【実験Ⅱ】目視による触感評価実験

### (1)実験方法

実験Ⅰとは対称的に、目視のみで触感の印象を評価する官能検査実験を行った。実験Ⅰと同様にシェッフエの一対比較法（中屋の変法）に従った。実験Ⅰと同様に比較する組合せの数は15組である。

図2-9に実験時の状態を示す。図のような試料台を用意し、この上に2枚1組の試料を並べて提示した。被験者は試料台上の2枚の試料を観察し、質問用紙に従って8種類の質問語の印象が左右どちらの試料により当てはまるかを回答した。これを試料の組合せを変えながら15組繰り返した。試料の交換時には、照明は消さず、回答済みの試料を試料台から除去した上で次の1組の試料を提示した。

視覚による評価に当たっては、照明の配置や観察時の距離・角度等が影響する可能性があるため、照明・観察条件についてはJIS L 0801 : 2011「染色堅ろう度試験通則」[50]に定める視感法の条件（試験片を45°に保持し、上方から照明して試料に対し90°の方向から観察する）を参考に、光源・試料・被験者を図2-10のように配置し、光学的な条件を統一した。照明には常用光源D65（JIS Z 8720）蛍光灯を使用した。観察距離は約350mmで、ドット間隔の空間周波数は約19～47 cycle/degreeに相当する。観察位置からの試料の外観は、試料面が暗いため個々のドット形状はわからず、各ドットに照明が映り込んで生じる輝点が周期的に並ぶのが見える。ドット間隔が小さい場合には輝点の識別がやや難しい状態であった。

試料の組合せの提示順と各組における左右の並び順は乱数を用いてランダムに設定した。質問の順序は全被験者で同一とした。最初に練習用に5組のダミー試行を挿入した。

## (2) 質問項目と質問用紙

質問項目は実験 I の項目を一部変更し、表 2-3 の左列に示す 8 項目を使用した。実験 I で使用した「硬い」、「ひんやりしている」は視覚では解釈の統一が難しいと考えられたため除外した。製作した試料の視覚的な特徴として、テクスチャ加工領域と周囲の無地面とで明るさが異なって見えることから、これを評価する「加工面が目立つ」を加えた。またドット間隔による空間周波数の違いが凸点の知覚し易さに影響する（空間周波数が高すぎると平滑な面に見えてしまう）可能性を考慮し、「凹凸を感じやすい」を加えた。質問語の解釈のばらつきを小さくするため、実験時には各質問語の対義語が表 2-3 右列の語であることを口頭で被験者に説明した。視覚では直接的に知覚できない項目（触り心地等）については手で触ったときの質感を推定するように指示した。回答には図 2-11 のような質問用紙を用いた。

## (3) 被験者

被験者は長野県工業技術総合センター職員から、実験 I の被験者に含まれる、いずれも視覚評価についての専門家でない 11 名（男性 9 名、女性 2 名）を選定した。年齢構成は 20 代 1 名、30 代 1 名、40 代 6 名、50 代 3 名であった。

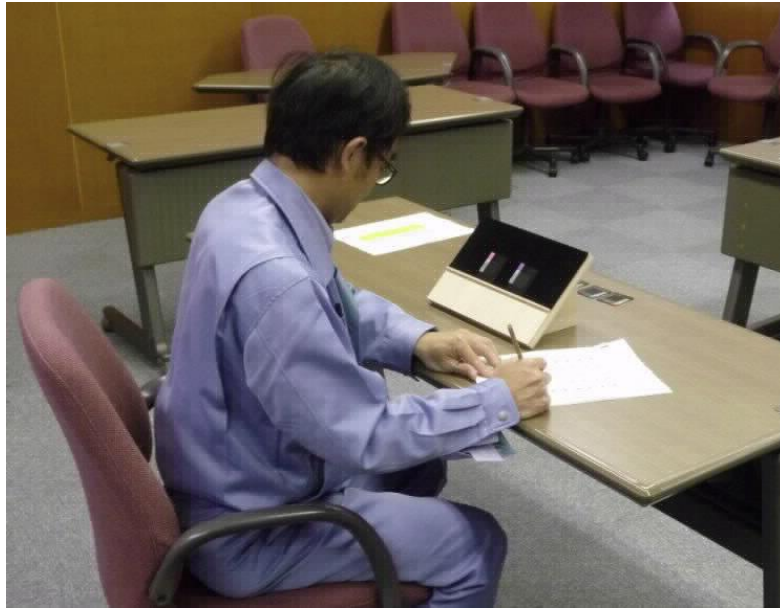


図 2-9 実験Ⅱの実験時の状態

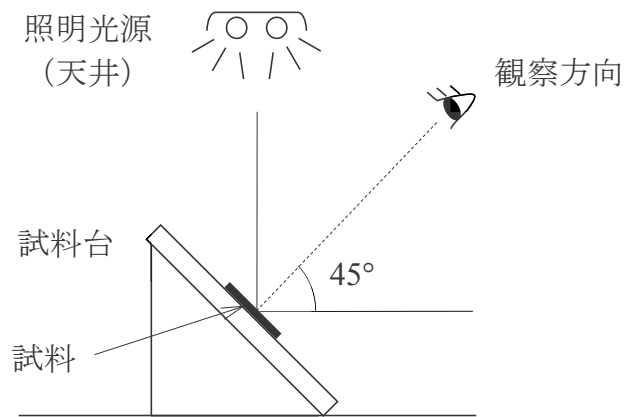


図 2-10 目視による官能検査実験時の試料・光源の配置

表 2-3 実験Ⅱの官能検査における質問語

	質問語	対義語
Ⅱ-1	なめらか	ざらざら
Ⅱ-2	目が粗い	目が細かい
Ⅱ-3	凹凸が大きい	凹凸が小さい
Ⅱ-4	滑りにくい	滑りやすい
Ⅱ-5	しっとりしている	かさかさしている
Ⅱ-6	触り心地がよい	触り心地が悪い
Ⅱ-7	加工面が目立つ	加工面が目立たない
Ⅱ-8	凹凸を感じやすい	凹凸を感じにくい

実験番号 2601  
試行番号 4  
被験者番号 2604

4 EI  
パターン番号 4

提示順 1 / 20

左の方が当てはまる  
はっきり やや どちらともいえない やや はっきり  
右の方が当てはまる

Q1 加工面が目立つ

Q2 なめらか

Q3 目が粗い

Q4 凹凸が大きい

Q5 凹凸を感じやすい

Q6 滑りにくい

Q7 しっとりしている

Q8 触り心地がよい

はっきり やや どちらともいえない やや はっきり  
左の方が当てはまる 右の方が当てはまる

図 2-11 実験 II の質問用紙の例

## 2. 2. 4 テクスチャ面の輝度分布測定

目視による印象を決定するテクスチャの外観を定量的に評価するため、加工面の輝度分布を測定した。輝度校正されたデジタルカメラ（2次元色彩輝度計）を使用し、図 2-12 の配置で測定した。照明光源には 400lx のハロゲンランプを 2 基用いた。輝度測定時には照明が近く、1 方向では輝度の傾斜分布が生じるため、これを相殺し均一な分布を得る必要から照明を 2 方向とした。実験 II とは照明の数が異なるが、入射角・反射角は同一であり、後述するコントラストの相対比較への影響は比較的小さいと考えられる。官能検査に使用した 6 種のドットパターン試料に無地の試料を加えた 7 種類の試料を測定した。

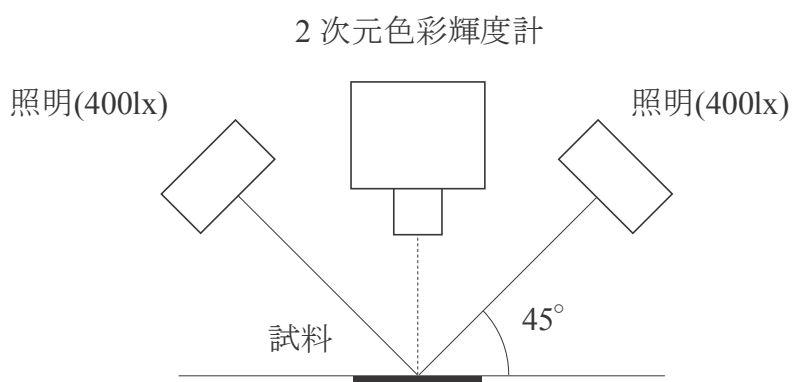


図 2-12 輝度分布測定時の輝度計・光源の配置

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 【実験Ⅰ】触察による触感評価実験結果

文献[49]に従い、官能検査の回答を -2～ +2 の 5 段階で得点化した上で、質問毎に各試料の平均嗜好度を算出し、ヤードスティック距離によってサンプル間の有意差を検定した。図 2-13 に各質問に対する各試料の平均嗜好度を示す。試料間の得点傾向はどの質問でも似通っており、ほぼ一定の順位 (①→②→④→③→⑤→⑥) になった。粗滑感に係る「なめらか」、「目が粗い」、「凹凸が大きい」と、「しっとり」、「触り心地がよい」については試料間の得点差が大きく、多くの試料間で有意差がみられた。これらの触感は形状の違いによる差が生じやすいといえ、なめらかなものほどしっとりして触り心地がよいと評価される傾向にある。総合的な粗さを問う「なめらか」と、より具体的な物理的特徴量と結びつけた粗さを問う「目が粗い」(ドット配置の粗密)と、「凹凸が大きい」(高さ方向の粗さ)とで得点傾向に違いがみられなかった。本試料の範囲ではこれらの寸法要因の違いは独立して知覚されず、単一の「粗さ感」として評価されていることがわかる。「硬い」、「ひんやり」についても試料間の順位は粗滑感や摩擦感と似通っているが、他の質問に比べ得点差が小さい。これらの因子は弾性係数や熱伝導率等、素材物性の影響が大きいものであるため、形状の違いによる差が生じにくかったものと考えられる。しかし得点順位の傾向は他の質問と同様で、粗いものほど硬く、温かみがあると判断されている。

### 2.3.2 【実験Ⅱ】目視による触感評価実験結果

実験Ⅰと同様に各試料の平均嗜好度を算出した。図 2-14 に各質問に対する各試料の平均嗜好度を示す。試料間の得点傾向はどの質問でも概ね一致するが、実験Ⅰにくらべると順位の入替わりが多く生じている。実験Ⅰと同様に粗滑感を

問う「なめらか」、「目が粗い」、「凹凸が大きい」については試料間で大きな差がみられる一方、実験 I で明確な差がみられた「触り心地がよい」については試料間の差が小さくなった。「なめらか」「目が粗い」などは表面性状を表す上で視覚・触覚に共通して使われる表現であり、視覚情報から直接的に評価でき、被験者間で解釈の差も小さいため試料間の違いが明確に現れたのに対し、「触り心地がよい」は視覚情報から触察体験を推定する必要があるため、個人間のばらつきが大きくなったと考えられる。また、「加工面が目立つ」については他の質問と異なる傾向がみられた。



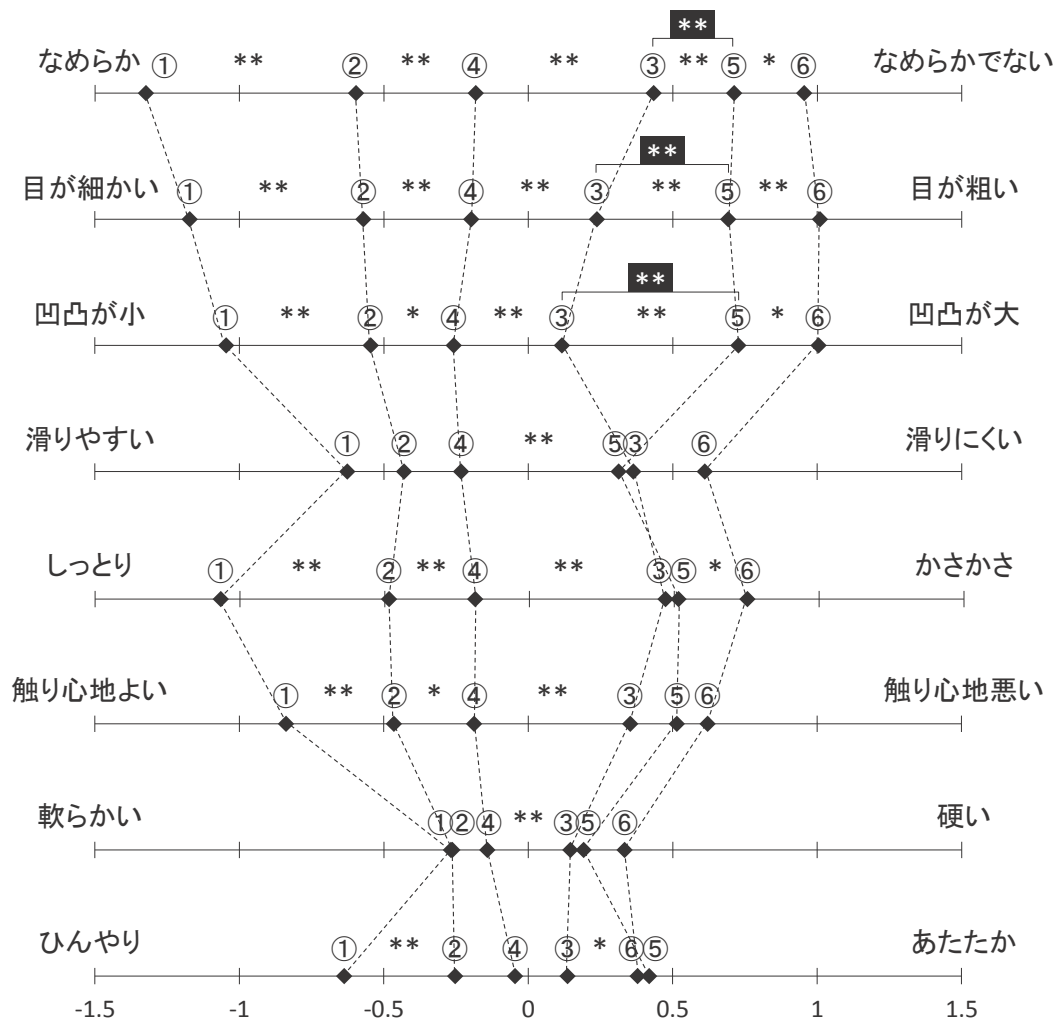


図 2-13 【実験 I】 触察による官能検査結果 (\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

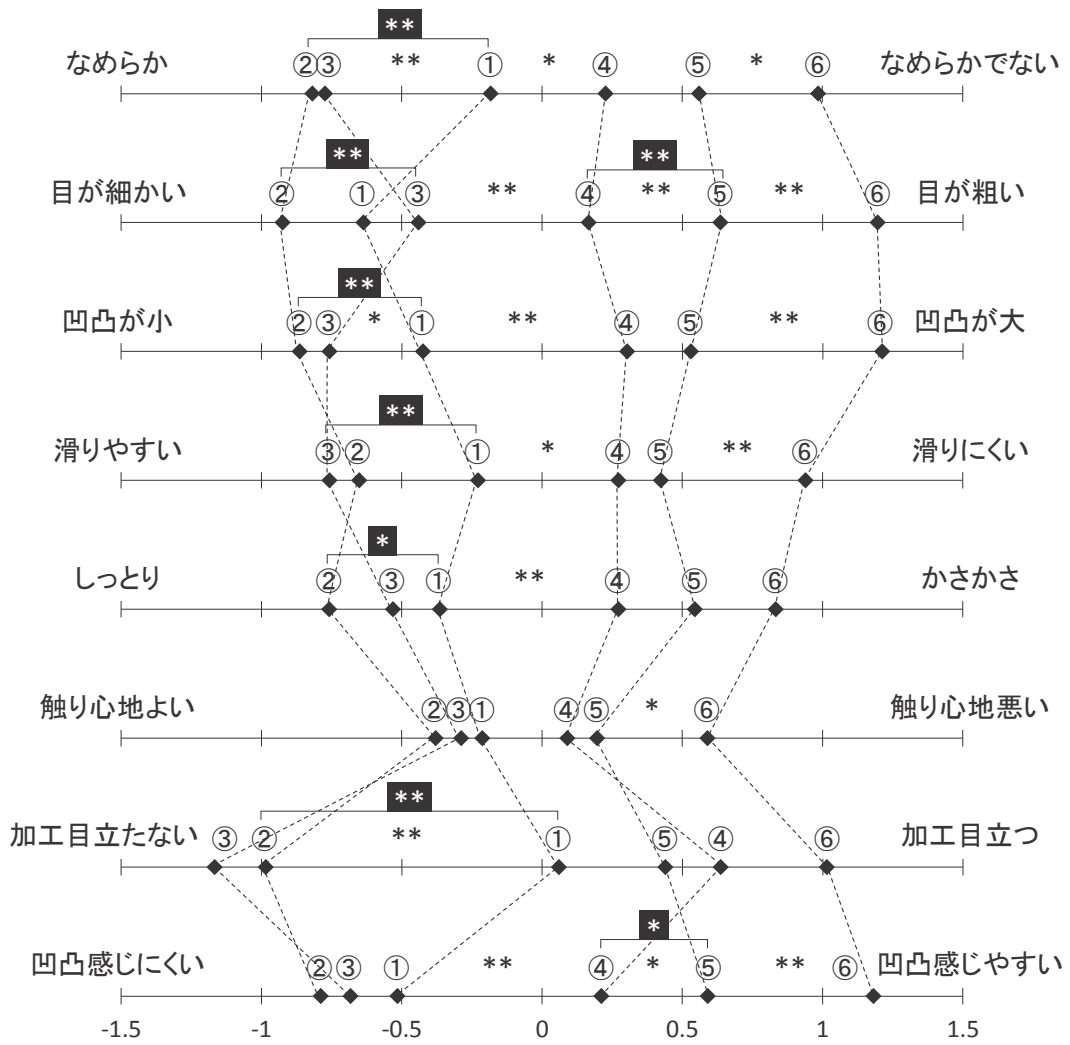


図 2-14 【実験Ⅱ】目視による官能検査結果 (\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

### 2.3.3 官能検査結果の因子分析

図 2-13, 2-14 の結果では質問項目間で得点傾向が似通っており, 質問項目間の相関が高いと考えられる. 質問項目間の関係を整理するため, 因子分析 (バリマックス回転) により共通因子を抽出することとした. 解析対象は被験者毎の嗜好度得点とした. 分析にはエクセル統計 (株社会情報サービス) を使用した.

分析結果を表 2-4~2-7 に示す. 実験 I, 実験 II のいずれにおいても固有値が 1 を超える因子は 1 つしか抽出されなかった. 第 1 因子の寄与度はそれぞれ実験 I では 72%, 実験 II では 85% と高かった. 実験 I の第 1 因子の負荷量は「なめらか」「目が粗い」「凹凸が大きい」といった粗滑感で大きくなっており, この因子は主に粗さ感を表すと考えられる. 実験 II の第 1 因子の負荷量は「凹凸が大きい」「凹凸を感じやすい」等の因子負荷量が大きいことから, この因子も同様に粗さ感を表すと考えられる. 触察・目視のどちらでも抽出された共通因子が粗さを中心とする 1 因子のみのため, 以下の検討ではこの因子に注目し, 実験 I における各試料の因子得点を「触察粗さ感」, 実験 II におけるそれを「目視粗さ感」と定義した.

触察粗さ感と目視粗さ感の散布図は図 2-15 のようになった. 「触察粗さ感」と「目視粗さ感」の間には相関がみられないことから, 触察時と目視時とでそれぞれ異なる基準により粗さ感が評価されていると考えられる.

表 2-4 【実験 I】 触察における上位 3 因子の固有値と寄与率

因子	固有値	寄与率	累積寄与率
1	5.7775	72.22%	72.22%
2	0.7431	9.29%	81.51%
3	0.4778	5.97%	87.48%

表 2-5 【実験 I】 触察における因子項目と因子負荷量

変数	因子1
なめらか	0.955
目が粗い	0.943
凹凸が大きい	0.934
しっとりしている	0.904
触り心地がよい	0.819
ひんやりしている	0.739
滑りにくい	0.701
硬い	0.543

表 2-6 【実験 II】 目視における上位 3 因子の固有値と寄与率

因子	固有値	寄与率	累積寄与率
1	6.8292	85.37%	85.37%
2	0.5176	6.47%	91.84%
3	0.2406	3.01%	94.84%

表 2-7 【実験 II】 目視における因子項目と因子負荷量

変数	因子1
凹凸が大きい	0.988
凹凸を感じやすい	0.985
滑りにくい	0.937
目が粗い	0.927
なめらか	0.915
しっとり	0.910
加工面が目立つ	0.862
触り心地がよい	0.738

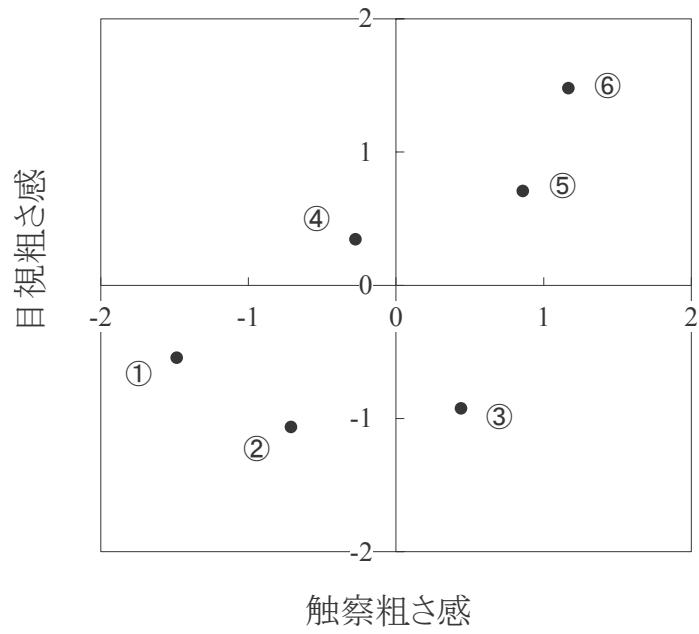


図 2-15 触察粗さ感と目視粗さ感の関係

## 2.3.4 テクスチャ面の輝度分布測定結果

一般的にドットパターンにおける輝度分布は、図 2-16 のようにドット部に生じた輝点が等間隔に並ぶパターンとなる。輝度の高い部分はドットの球面部に光源が写り込んだもので、ドットのない無地試料では全面が暗い均一な分布になる。輝度分布を評価する特徴量として、視覚刺激における代表的な特徴量であるマイケルソンコントラスト（コントラスト）を算出した。コントラスト算出における輝度分布の模式図を図 2-17 に示す。コントラスト  $m$  は平均輝度  $L_{\text{mean}}$  に対する最大輝度  $L_{\text{max}}$  と最小輝度  $L_{\text{min}}$  の差で定義され、 $m = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / L_{\text{mean}}$  で表される。ここでは測定領域内の上位 1% の平均値を  $L_{\text{max}}$ 、下位 1% の平均値を  $L_{\text{min}}$  とみなして算出した。表 2-8 に各試料のコントラストおよび  $L_{\text{max}}$ 、 $L_{\text{min}}$ 、 $L_{\text{mean}}$  の値を示す。平面部に現れる  $L_{\text{min}}$  は試料間の差が小さく、コントラストの違いは主に輝点の  $L_{\text{max}}$  の違いにより生じていると考えられる。コントラストと寸法パラメータとの関係について、図 2-18、2-19 にドット直径・ドット間隔とコントラストの散布図を示す。コントラストはドット直径と高い相関を示す一方、ドット間隔との相関は小さくなった。輝点は照明光がドット面で反射したもので、その明るさは反射面の曲率に依存するため、輝点の輝度  $L_{\text{max}}$  はドット直径（曲率）に従って変化する。このためドット直径によりコントラストが決定するものと考えられる。

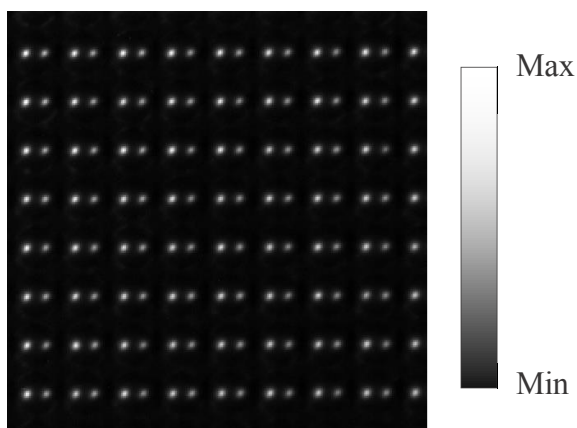


図 2-16 輝度分布測定例（部分拡大図）

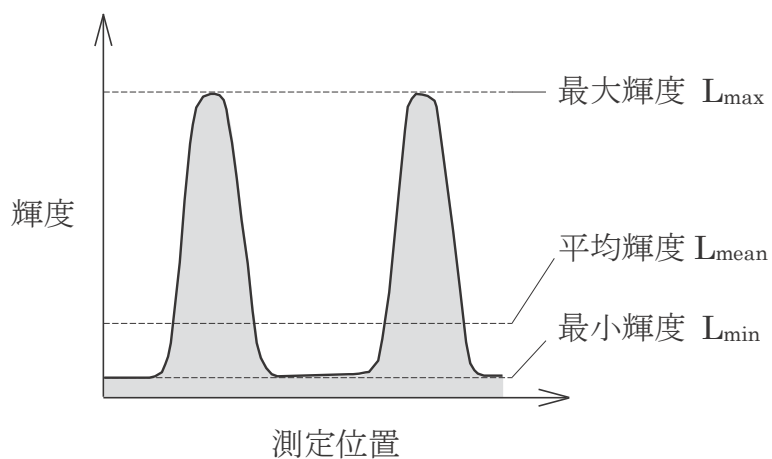


図 2-17 輝度分布の模式図

表 2-8 コントラストと最大・最小・平均輝度 (cd/m<sup>2</sup>)

	①	②	③	④	⑤	⑥	無地
コントラスト	4.09	3.33	4.94	7.55	7.49	10.43	0.68
$L_{max}$	19.94	13.59	19.06	38.20	33.23	44.00	3.87
$L_{min}$	1.73	2.05	2.34	1.78	2.01	0.97	2.02
$L_{mean}$	4.45	3.47	3.38	4.83	4.17	4.12	2.70

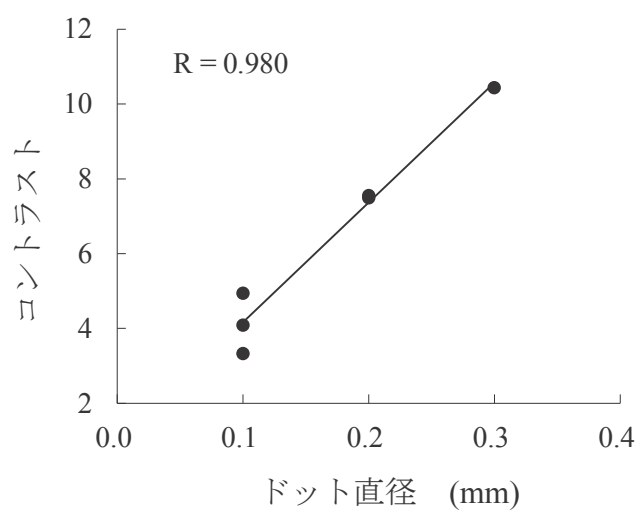


図 2-18 ドット直径とコントラストの関係

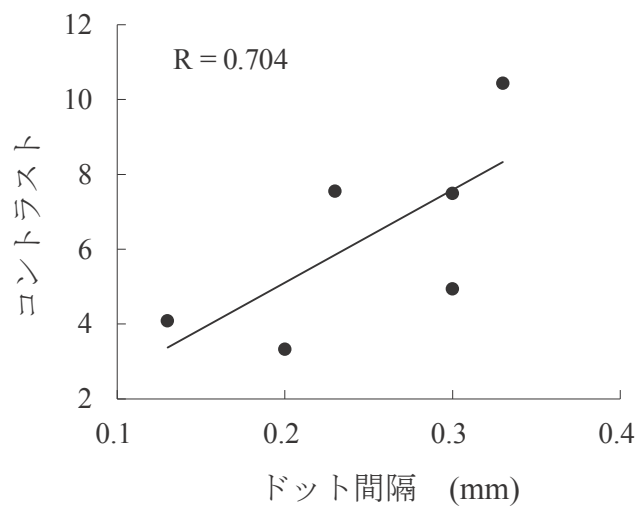


図 2-19 ドット間隔とコントラストの関係



## 2.3.5 感覚量と物理的特徴量の関係

以下では 2.3.3 節で定義した触察粗さ感と目視粗さ感に絞り，これらを決定する物理的要因について検討する。

### (1) 相関係数による検討

触察粗さ感・目視粗さ感と，ドット直径・ドット間隔・コントラストの間の関係は図 2-20 のようになった。触察粗さ感はドット間隔との間に高い相関 ( $p < 0.01$ ) がみられ，ドット直径とは相関がみられなかった。これとは対称的に，目視粗さ感はドット直径およびコントラストとの間に高い相関 ( $p < 0.01$ ) がみられ，ドット間隔とは相関がみられなかった。

### (2) 重回帰分析による検討

粗さ感の決定に係る各寸法パラメータの影響を評価するため，粗さ感を目的変数，ドット直径・ドット間隔を説明変数とする重回帰分析を行った。

結果を表 2-9, 2-10 に示す。VIF の値からドット直径とドット間隔の間に多重共線性は認められない。標準偏回帰係数および P 値から触察粗さ感の決定にはドット間隔が支配的であり，目視粗さ感の決定にはドット直径が支配的であることがわかる。

上記 (1), (2) より，本試料の粗さ感は触察時には主にドット間隔から決まり，目視時には主にドット直径から決まるといえる。

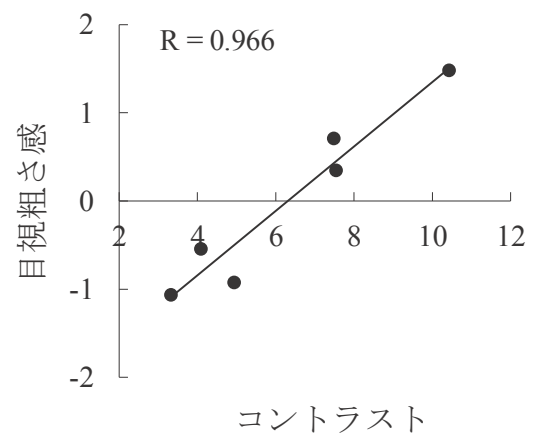
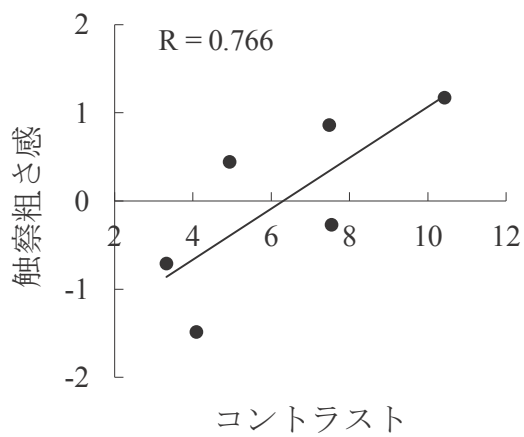
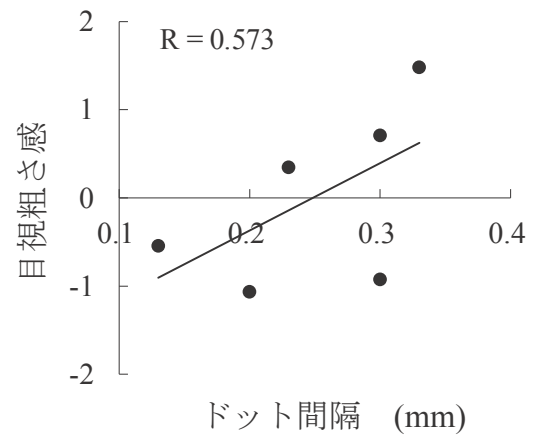
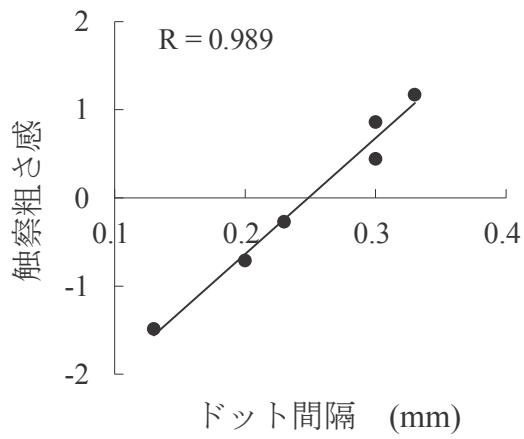
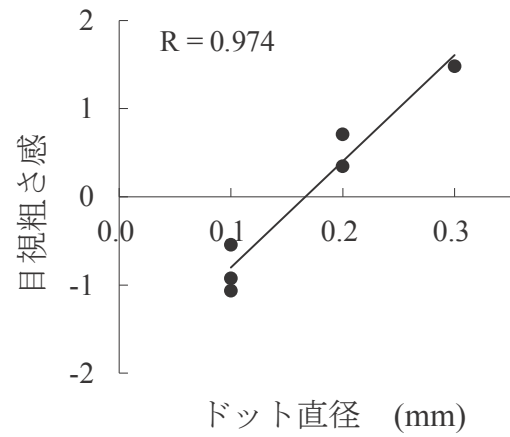
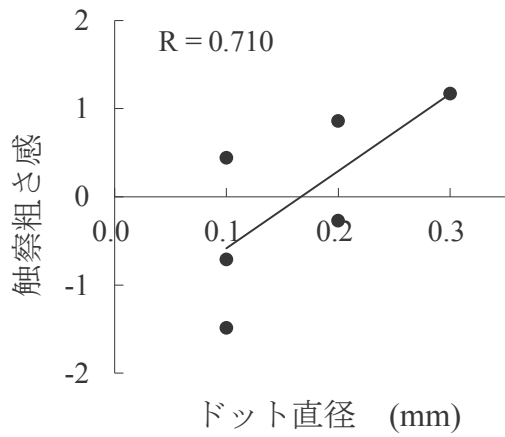


図 2-20 触察・目視粗さ感と寸法・コントラストの関係

表 2-9 触察粗さ感の重回帰分析結果

自由度修正済み決定係数  $R^2 = 0.982$

変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	F値	P値	VIF
ドット直径	1.68	0.14	3.1	0.177	1.679
ドット間隔	12.01	0.90	136.2	0.001	1.679
定数項	-3.26		253.9	0.001	

表 2-10 目視粗さ感の重回帰分析結果

自由度修正済み決定係数  $R^2 = 0.920$

変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	F値	P値	VIF
ドット直径	12.65	1.02	38.8	0.008	1.679
ドット間隔	-1.04	-0.08	0.2	0.668	1.679
定数項	-1.85		18.1	0.024	

## 2.3.6 触察における粗さ感の決定要因

2.3.5 節のように触察時の粗さ感は基本的にはドット間隔により決まると考えられる。粗さ感がドット間隔に応じて増加することは先行研究[23,26,27,37]と一致するが、ここでは Blake ら[28]が示したようなドットの直径（もしくは高さ）の影響はみられなかった。

触察時の粗さ感がドット間隔により決定する理由については以下のように考えることができる。対象に対する能動的な触動作を伴うアクティブタッチにより微細な粗さを知覚する機械的な要因として、受容器に対する入力刺激の時間的変化（周波数）と大きさ（振幅）が考えられる。このうち刺激の時間的変化については、本試料のドット間隔により生じる振動は触察時の指の動作速度を 40mm/s とした場合 121~308Hz に相当し、FA II ユニットの感度域の範囲内で十分識別可能と考えられる。一方、刺激の大きさについては、本試料の寸法域ではドット間隔が狭く、皮膚との接触にドット頂部しか関与しないため、平面部からの高さや曲率といったドット単体の形状要素の違いが実質的な刺激の違いに反映しにくかったと考えることができる。このためドット間隔に起因する刺激の時間的変化の違いがより敏感に知覚され、粗さ評価の手掛かりとして積極的に利用されている可能性がある。

図 2-13 の官能検査結果を詳細にみた場合、一部でドット間隔以外の影響がみられる。図 2-13 にドット間隔が等しい試料③-⑤間で生じた有意差を白抜き文字で示す。例えば、粗さ感がドット間隔のみで決まるとすると、試料③-⑤間で有意差は生じないはずであるが、「なめらか」「目が粗い」「凹凸が大きい」で有意差がみられ、⑤の方が「粗い」と判断されている。Blake らの実験結果では、ドット直径が小さい領域では高さの影響が強く表れる（ドット直径が 0.25mm では粗さ感 は ドット 高さ に ほぼ 比例 する）。粗さ感が③<⑤となる結果はこの傾向と一致するが、Blake らの実験はドット間隔が十分広い（3.5mm）のに対し、本稿で

はドット間隔が狭く皮膚の接触条件が異なると考えられることから、同一の理由によるものかは不明である。また、③と⑤以外では確認できないため、要因を特定するのは困難である。いずれにしても、本稿の条件ではドット間隔に比べその影響はわずかであることから、一部にドット間隔以外の効果が含まれるものの、全体としてはドット間隔が支配的になったと考えられる。

### 2.3.7 目視における粗さ感の決定要因

3.5 節のように目視時の粗さ感は基本的にはドット直径により決まると考えられる。目視粗さ感・ドット直径・コントラストは相互に相関が高いことから、ドット直径から決まるコントラスト等の光学的特徴量が面の粗さ感を判断する手掛かりになっていると考えられる。上條ら[51]はコントラストチャートを用いた実験により、コントラストが視覚による粗さの判断基準になることを示している。赤川ら[52]は、正弦波による縞模様のコントラスト(0.1~1.0)と空間周波数(0.504~27.7 cycle/degree)を変化させた画像の粗さ・なめらかさを調査し、コントラストが高いほど粗く・空間周波数が高いほどなめらかに感じられることを示している。本実験においても同様の知覚機構により、被験者は試料表面のコントラストを凹凸の大小と解釈し、粗さを推定している可能性がある。また、ドット間隔が粗さ感に影響しないことから、視覚的には輝点の数や密度といった平面的な配置は粗さと結びつきにくいと考えられる。

一方、図2-14の官能検査結果ではドット直径以外の影響もみられる。図2-14ではドット直径が等しい試料①-②-③および④-⑤間で生じた有意差を白抜き文字で示している。これらは順位と有意差の生じる位置により、次の2つのパターンに分けられる。

#### (1)一般的なパターン(「目が粗い」以外)

「なめらか」、「凹凸が大きい」をはじめ多くの質問で②=③に対し①が有意に大きく、間隔が狭い①が粗く評価されている。この傾向は「加工面が目立つ」で

顕著に表れることから、①では加工部と未加工部の外観の違いが粗さ感に影響している可能性がある。目視時に②、③は格子状の隙間をもつ周期的パターンに見えるのに対し、①はドットの密度が高いため、凹凸が隙間なく敷き詰められたように見える。空間周波数が高くドットが分離できないことで、加工部の目立ち方や粗さ感に交互作用が生じた可能性がある。

## (2) 「目が粗い」パターン

「目が粗い」については他の質問と異なり、相対的に③の順位が高く、②-③間と④-⑤間に有意差が生じ、直径が等しい場合にドット間隔の広いものがより粗いと判断されている。これは平面的な粗密を問う質問であるためにドット間隔の違いがそのまま反映したと考えることができる。②-③、④-⑤では空間周波数が 30 cycle/degree 以下と比較的粗いため、これが官能検査結果の差に表れたと考えられる。空間周波数について赤川ら [43] の結果を当てはめると、空間周波数が同じ範囲にある試料②~⑥ (19 ~ 30 cycle/degree) についてはドット間隔が粗さ感の増加に寄与すると予想される。一方、本実験結果では上述の「目が粗い」以外ではこの傾向はみられず、空間周波数の影響は明らかでない。ドット面での反射光がスパイク状であることや、空間周波数の差 (約 1.6 倍) が小さいことがこの違いを生じた可能性がある。試料①については空間周波数が高いにも関わらず粗さ感が大きくなっており、前述のような交互作用の影響が考えられる。

## 2.4 結言

量産品と同様の工程で製造したドットパターンサンプルについて、触察のみによる触感評価実験と目視のみによる触感評価実験を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 粗さ感と寸法値との間に線形の関係がみられ、現行技術で設計値により粗さ感の調整が可能であることを確認した。触察と目視とでは粗さ感に結びつく寸法要因が異なることから、樹脂製品製造の視点からこれを製品の印象制御に応用し得る可能性がある。設計値を個別に設定することで、見た目と触れた際の印象を任意に調整するなどの活用が期待できる。
- (2) 触察時の粗さ感は基本的にはドット間隔により決まり、部分的にドット直径（高さ）の影響を受けることがわかった。この理由として、本試料の寸法域ではドットの密度が高く、ドット高さの違いが接触状態の違いに反映されにくいことが考えられる。
- (3) 目視時の粗さ感にはドット直径およびコントラストと高い相関を持つことがわかった。目視による粗さ感には主にドット直径から決まるコントラスト等の光学的特徴を手掛かりに判断されると考えられる。また空間周波数の影響は明らかでなく、平面的な配置の様態は“目の粗さ”には影響するものの視覚的な粗さ感には結びつきにくいと考えられる。

以上の結果は先行研究とも整合するものであり、現行のデジタルシボ技術でこの領域の粗さ感を寸法により制御できることと、この寸法領域における寸法要因と視覚・触覚による粗さ感の間の相互関係を示すことができた。

本章では視覚・触覚の感覚モダリティにおいて粗さ感に結びつく寸法要因がそれぞれ異なることが明らかになった。樹脂製品におけるテクスチャ設計の立場からは、これを製品表面の印象制御に応用し得る可能性がある。触察と目視とで粗

さ感の要因が独立していることから，個別に設計値を設定することで，見た目と触れた際の印象を任意に調整するなどが期待できる．両パラメータの組合せにより，例えば意匠の異なる表面の粗さ感を揃えたり，見た目の予想を裏切ることで触感の印象を強調したりするなどの展開が考えられる．本稿ではドットパターンを用いているが，触刺激の周期や視覚的なコントラスト等の光学的特徴量に注目することで，その他のテクスチャパターンにも適用できる可能性がある．



## 第3章

### ドット間隔・ドット高さ と粗さ感の関係

— 平面部への底付き状態の推定と皮膚変形量の測定 —



### 3. 1 緒言

第2章の実験では触感因子のうち硬軟感や温冷感には試料間で大きな違いが表れなかったことから、本章以降では違いが明らかな粗さ感に絞って検討する。

本章ではドットの高さが粗さ感に与える影響について検討する。粗さ感におけるドット高さの影響については、凸点が高くなることで粗さ感が大きくなることは経験的に自明といえる。また機械加工における表面仕上げの指定などに用いられる表面粗さ（JIS, ISO における Ra, Rz 等）では、パラメータのほとんどが高さの変動から定義されており[53]、摺動性や潤滑性に影響するため、古くから設計・加工の現場ではこの粗さ値が大きいほど粗面として扱われている。このため、設計者と仕上げ工程との間で情報交換する場面等でも、工業的な表面粗さがそのまま仕上げ面の触感の粗さと混同されて用いられることも多い。また、シボ加工においては、視覚的には見分けにくい同一のマスクパターンでも、エッチング処理の深さにより粗さ感を変化させることができる。粗さ感を考える上では、垂直方向の形状の効果の検討は不可欠と考えられる。

しかしながら、第2章の実験では垂直方向のドット高さの違いの影響が明らかにできなかった。これについてはドット高さの影響の検出感度の問題ではなく、ドット高さの影響が生じるか否かの寸法範囲の問題であると考えられる。本章ではドット高さの違いに注目し、ドット間隔・ドット高さとの粗さ感の関係について検討した。本章ではドット高さの影響をドット間隔の影響と対比させる形で調査した。間隔と高さの影響のみを抽出するため、曲率半径が一定の試料を用いた。第2章の結果から、高さの影響は限定的な寸法条件のもとで現れる可能性があるため、その寸法範囲についても考察した。

触察時にドットパターンに触れる皮膚の表面は、ドット間のすき間に入り込む形で微視的に変形する。粗さの探索は能動的な触動作を伴うアクティブタッチによるため、触察中この変形は高い周波数で変動している。この際に皮膚内に生じ

る歪みが触覚受容器で検出され、その時間的・空間的な分布から粗さ感が知覚される[54]。皮膚の変形はドット間の平面部に接触（底付き）することで制限され、ドット高さによって皮膚が変形できる量が決定する。このためドット高さの違いは皮膚内の歪みの振幅に影響すると予想される。

第2章の実験でドット高さの影響が現れなかった原因として、使用した試料の寸法ではドット間隔に対してドット高さが大きく、底付きが生じなかったことが考えられる。そこで本章では第2章よりドット間隔を広く、高さを低く設定した9種類のドットパターンを用い、官能検査により間隔・高さに対する粗さ感の分布を調査した(実験Ⅲ)。実験の結果、ドットが低い領域では粗さ感は高さに従い、ドットが高い領域では粗さ感がそれ以上増大しない「粗さ感の飽和」と名付けた現象が確認できた。これについてさらに詳しく検証するため、粗さ感が飽和する境界付近においてより感度の高い実験を行い、これを確認した(実験Ⅳ)。また触察時を再現した状態で皮膚の変形量を計測する装置を製作し、ドット間に皮膚が入り込む量を実験的に明らかにした(実験Ⅴ)。これらの実験により、皮膚の底付きと粗さ感の関係について考察した。

## 3. 2 実験方法

### 3. 2. 1 接触状態と粗さ感のモデル

指が平面部に接触（底付き）するか否かという視点から，ドット高さと粗さ感の関係について以下のようなモデルを想定した．ドットパターンの寸法パラメータとして，ドットの曲率半径，ドット間隔，ドット高さが挙げられる．このうち曲率半径とドット間隔を固定し，ドット高さのみを変化させた場合を考えると，テクスチャ表面と皮膚の位置関係は図 3-1 のように変化する．ここでは触察方法として，表面性状を探索する能動的な触動作を伴うアクティブタッチを想定しており，時系列的には，皮膚表面の位置は触動作に伴って皮膚に生じる振動や指紋の凹凸等によって高い周波数で振動していると考えられる．このため図中の皮膚表面は，テクスチャ側を基準として，皮膚表面が存在する位置を時間的に平均した形状を模式的に示したものである．図 3-1b, c はドットが高いため皮膚が平面部に接しない状態（底浮き状態）を表している．この場合，両者の皮膚の変形状態に違いはなく，ドット高さの違いは知覚できない．一方，図 3-1a のように皮膚が平面部に接した状態（底付き状態）では，ドット高さにより変形状態に違いが生じ，ドット高さの違いを知覚できる可能性がある．このように，高さの違いを知覚するには，皮膚の一部が平面部に接することが必要条件であるといえる．このことから，粗さ感は，底付き状態の場合のみドット高さの影響を受け，底浮き状態ではドット高さの影響を受けないと考えられる．また，ドットが高くなるのに従って触察中に皮膚が平面へ接触する頻度は減少すると考えられることから，底付きの範囲内であっても底付きの限界付近では高さの影響は不明瞭になる中間的な遷移領域が存在する可能性がある．以上を模式的に示すと図 3-2 のようになる．以下，皮膚が底付きしなくなり，粗さ感が一定となる状態を「粗さ感の飽和」と表現する．底付き限界のドット高さはドット間隔によって変化すると考えられ

るため、これら 3 つの状態はドット間隔とドット高さにより規定されると予想される。また、ヒト側の要因として皮膚の物理特性や触察方法（接触力，速度）等に起因する個人差も想定される。

この仮定を実験的に検証するため、次節以降に示す 3 種類の実験を実施した。

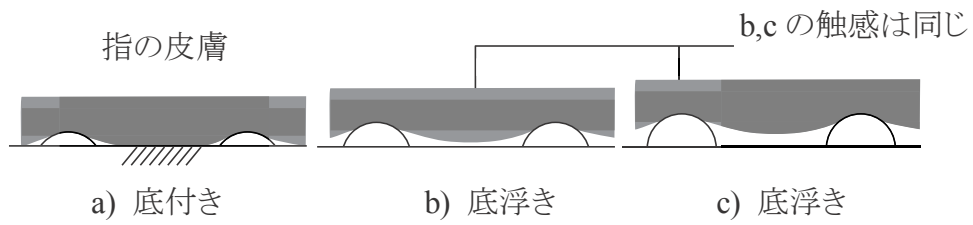


図 3-1 ドット高さと底付きの関係

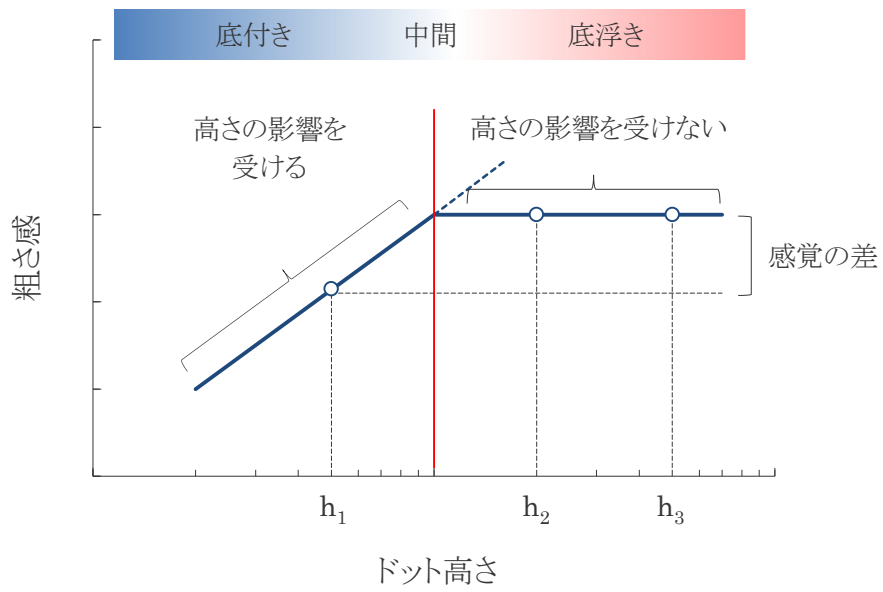


図 3-2 ドット高さと底付きの関係

### 3. 2. 2 【実験Ⅲ】粗さ感分布の官能検査実験

前節のモデルを踏まえ、粗さ感がドット高さに対してどのように変化するかを明らかにするため、ドット間隔と高さを変化させた 9 種類の試料を用いて粗さ感の分布を調査する実験を行った。

#### (1) 試料

ドットの曲率半径を R0.3mm (曲率  $3.33\text{mm}^{-1}$ ) に固定し、高さと同隔を各 3 水準変化させて 9 種類のパターンを定義した。表 3-1 に試料の設計値と、レーザ顕微鏡 (オリンパス(株) LEXT OLS-4100) で測定した寸法を示す。外寸は第 2 章の試料と同様、 $50 \times 60 \times 1.5\text{mm}$  の板状で、中央部の  $30 \times 30\text{mm}$  の範囲にテクスチャを形成した。製作方法は量産工程と同様に、小径エンドミルで切削加工した金型を使用し、ABS 樹脂を射出成形した。

図 3-3 に製作した試料の例を示す。また図 3-4 にレーザ顕微鏡で拡大観察したドット形状の例を示す。

表 3-1 【実験Ⅲ】ドット間隔・ドット高さの組合せ

試料名	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
ドット間隔(mm)	0.4			0.6			0.8			
ドット高さ ( $\mu\text{m}$ )	低	中	高	低	中	高	低	中	高	
	設計値	13	25	50	13	25	50	13	25	50
	測定値	7	32	42	9	25	45	8	23	45





図 3-3 実験Ⅲで使用した試料の外観例

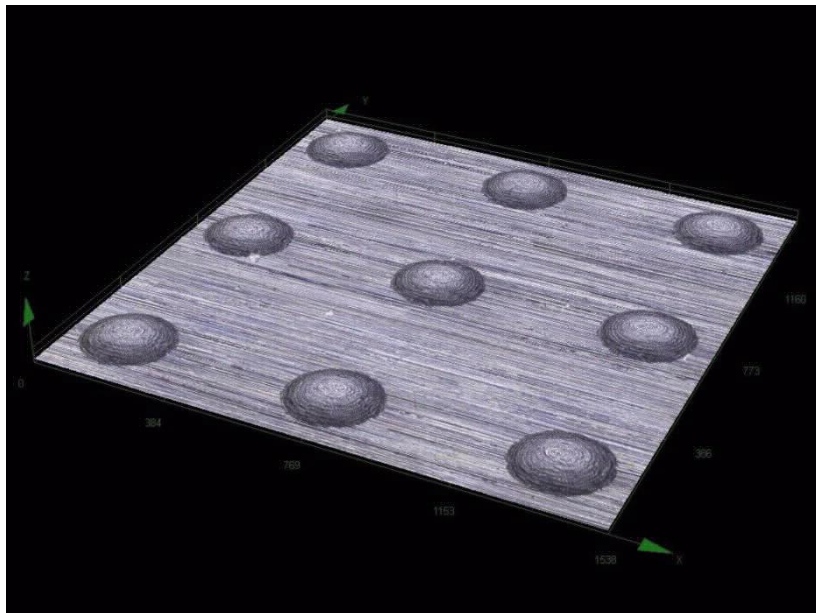


図 3-4 レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例  
(ドット間隔 0.6mm, 高さ  $25\mu\text{m}$ )

## (2) 実験方法

9 種類の試料について、触察時の粗さ感を評価する官能検査実験を行った。実験手法はシェッフエの対比較法で、2 枚の試料を同時に提示するため、順序効果を考慮しない中屋の変法を用いた。被験者はいずれも触感評価についての専門家でない 20～50 代の 15 名（男性 12 名，女性 3 名）である。質問項目は「粗い」1 項目で、5 段階で相対評価させた。全 36 通りの提示順と左右の並び順は乱数を用いてランダムに設定した。外観の影響を排除するため、手元に視界を遮る簡易な箱を置き、その中で示指により横方向に触察するよう指示した。皮膚の変形量は接触力の影響を受けると考えられるが、ここでは一般的な条件下での試料の粗さ感の値付けを目的としたため、触察の回数・時間・接触力は任意とし、触り方の違いも含めた全被験者による平均嗜好度を検討対象とした。

### 3. 2. 3 【実験Ⅳ】底付き閾値の検証実験

実験Ⅲの結果，3.2.1 節のモデルで説明される粗さ感の飽和がみられたため，閾値付近での飽和の発生状況を確認する実験を行った．あるドット高さの試料をより高い試料と比較した場合に，両者を識別できなければ粗さ感の飽和が生じているといえる．このため高さの異なる 2 枚の試料の識別の可否を調べることで，その被験者の閾値を推定できる．実験Ⅲの結果，試料⑤（ドット間隔 0.6mm，高さ 25  $\mu\text{m}$ ）の付近で粗さ感の飽和が生じると考えられたため，検討対象をこの寸法域に絞り，表 3-2 に示す 2 組の試料について粗さの識別の可否を検査した．

両組の識別の難易度を一定にするため，検査対象の高さ（検査高さ）と比較対象の高さ（対照高さ）の差は 20  $\mu\text{m}$  に統一した．微妙な違いに対する検出感度を高めるため，実験手法には 2 点識別法を用い，左右どちらの試料をより粗く感じるかを選択させた．被験者はいずれも触感評価についての専門家でない 20～50 代の 15 名（男性 14 名，女性 1 名，実験Ⅲと一部重複）である．判定回数は 1 組につき 16 回とし，A 組と B 組をランダム順に提示した．左右の並び順についてもランダムに設定した．皮膚の変形量は接触力の影響を受けると考えられるが，被験者が最も識別しやすい条件で比較させるため，触察の回数・時間・接触力は任意とした．

表 3-2 【実験Ⅳ】ドット高さの組合せ（ $\mu\text{m}$ ）

	A組	B組
対照高さ	35	45
検査高さ	15	25
ドット間隔	0.6mm	

### 3. 2. 4 【実験 V】触察時の皮膚変形量の計測

#### (1) 皮膚変形量計測装置

官能検査から推定される皮膚の変形状態について、触察時の皮膚表面がドット間にどの程度入り込むかを実測により検証するため、触察時を再現した状態で皮膚表面の変位量を計測する装置を製作した。多くの先行研究において、触感の決定要因として接触時の皮膚の変形が挙げられているが、触察時の皮膚の接触状態を実際に計測した例としては、指とアクリル板の接触時に発生するせん断方向の固着・滑り現象を高速度カメラにより計測した例[55]などがみられるものの、高さ方向の変形を計測した例はみられない。

##### i) 装置の構造

皮膚は接触部で受ける力に応じて変形しながらテクスチャの凹凸に入り込むと考えられるため、接触力も同時に評価する必要がある。そこで触運動中の試料面でこれらを計測できる装置を製作した。図 3-5 に装置の外観を、図 3-6 に使用方法を、図 3-7 に変位測定部の構造を示す。本装置はレーザ変位計 ((株)キーエンス LT-8010) と歪ゲージによる荷重センサを組み合わせることで、レーザ光軸上の皮膚の変位量と、試料面全体に対する接触荷重 (圧縮方向) を測定する。

皮膚の変形量については、試料面に設けた  $\phi 0.5\text{mm}$  の貫通孔を通して裏側から変位測定用のレーザ光 (スポット径  $\phi 2\mu\text{m}$ ) を通すことで、レーザ光軸上の 1 点における皮膚表面の位置を取得する。ドットパターンの場合、ドット間の平面部に穴を開けることで、触運動しながら皮膚の変位量を測定できる。試料は交換可能で、試料裏面の磁石によりセンサに固定する。試料面の大きさは  $20\times 20\text{mm}$  で、ドットパターン面の他、平面に円孔を開けたものなど、任意のパターンで実験することができる。レーザ変位計の出力はアナログ出力端子間の電圧により取得する。

荷重センサは試料を固定した平板を薄板状の起歪体で支持する構造で、歪ゲージにより荷重を検出する。起歪体は両端を固定端支持された構造のため、起歪体下面の引張・圧縮ひずみが生じる4箇所歪ゲージを貼付した。4枚ゲージ法によりブリッジを構成し、動歪アンプ（三栄測器（株）N4523）により電圧出力を得る。変位・荷重の出力はデータロガー（（株）キーエンス NR-2000）を経由して計測用コンピュータで収集する。計測時には接触力により起歪体が撓むため試料面自体の位置が変化するが、この際の変位量は後述のように荷重に対して線形性が高いため、接触力の値からこれを補正することで試料面(ドット頂部)を基準とした皮膚表面の位置を算出することができる。

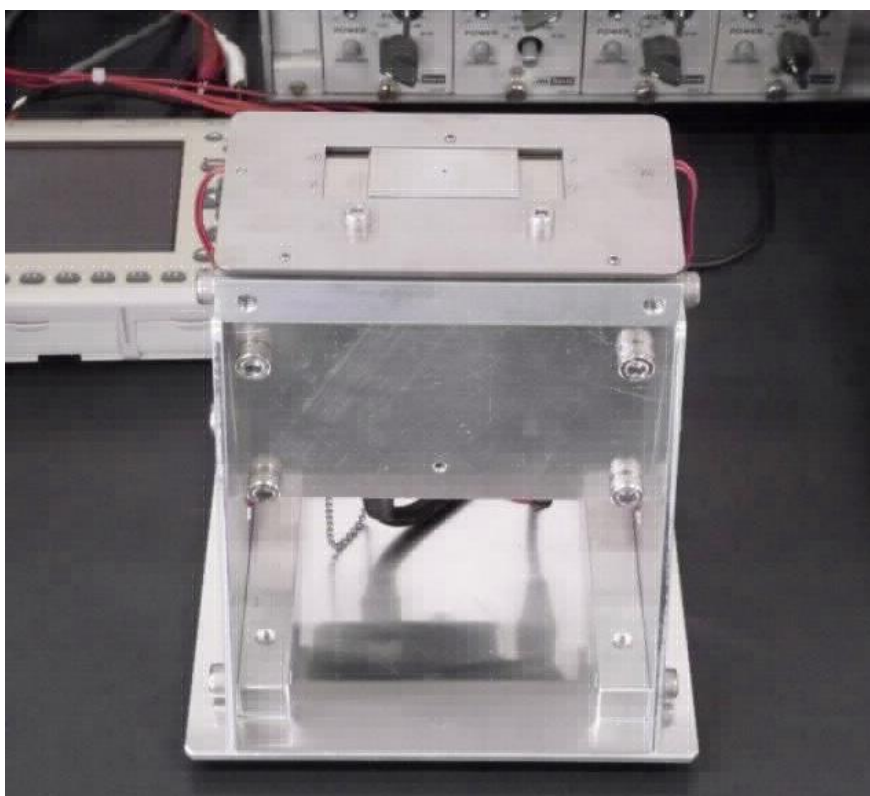


図 3-5 皮膚変形測定装置外観

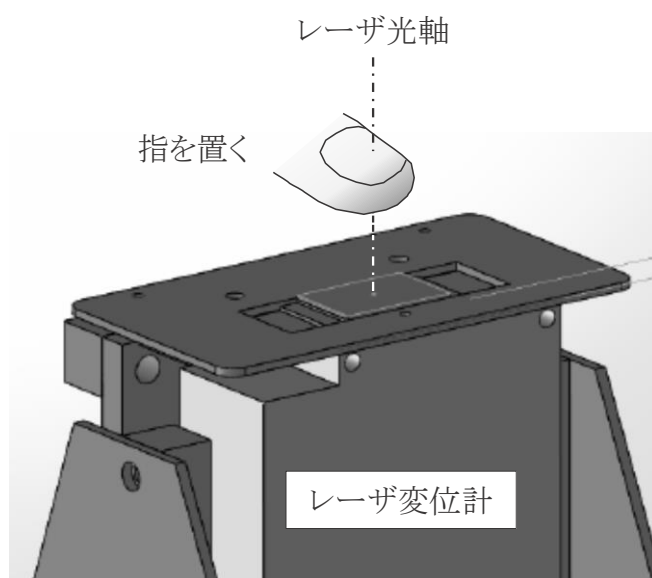


図 3-6 皮膚変形測定装置の使用方法

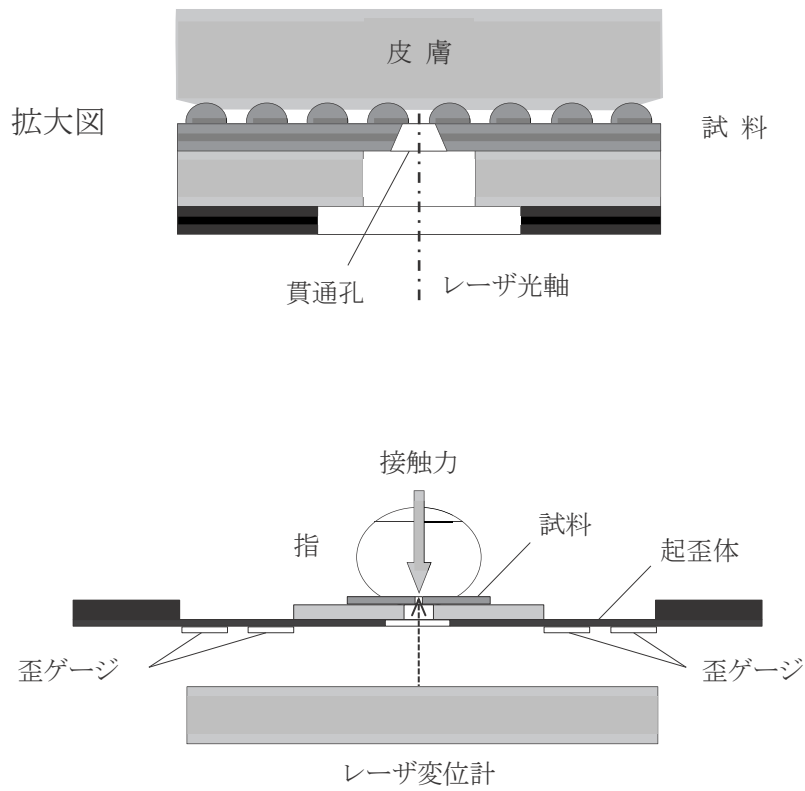


図 3-7 測定部の構造

## ii) 装置の校正

### ・変位検出部の校正

レーザ変位計の出力電圧から変位量を得るための校正を行った。校正にはデプスマイクロメータ（ミットヨ(株)DMS60-25）を使用した。測定面に設置したデプスマイクロメータを順次繰り出し、マイクロメータの読みと出力電圧を記録した。測定結果の例を図 3-8 に示す。この校正值による測定誤差は約 $\pm 3\mu\text{m}$ であった。

### ・荷重検出部の校正

荷重検出部の出力電圧から変位量を得るための校正を行った。測定面に錘を載せ、動歪アンプとレーザ変位計の出力電圧を記録した。測定結果の例を図 3-9 に示す。この校正值による測定誤差は約 $\pm 0.01\text{N}$ であった。

### ・荷重に伴う測定面移動量の校正

前述のように接触力により起歪体が撓み、試料面自体の位置が変化(ベース変位)するため、試料面に対する皮膚の相対的な位置(真変位)を検出するには、荷重値に対するベース変位量を校正する必要がある。荷重に対するベース変位量は図 3-10 のようになり、ほぼ線形の関係になった。この結果からレーザ変位計の出力値から接触力に伴うベース変位を補正して皮膚変位量を得る校正式(式 3-1)を得た。

$$D = 98.67 \times V_1 - 13.45 \times V_2 \quad (\text{式 3-1})$$

ただし、D：皮膚変位量( $\mu\text{m}$ )， $V_1$ ：変位センサ出力(V)， $V_2$ ：荷重センサ出力(V)



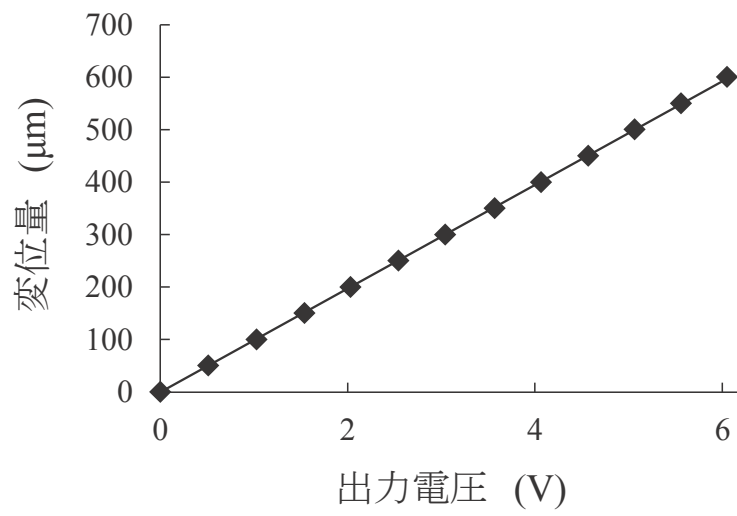


図 3-8 変位検出部の校正結果

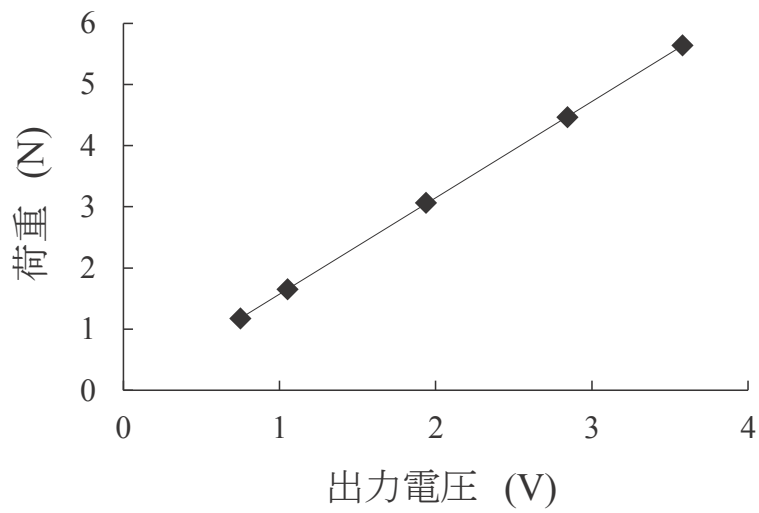


図 3-9 荷重検出部の校正結果

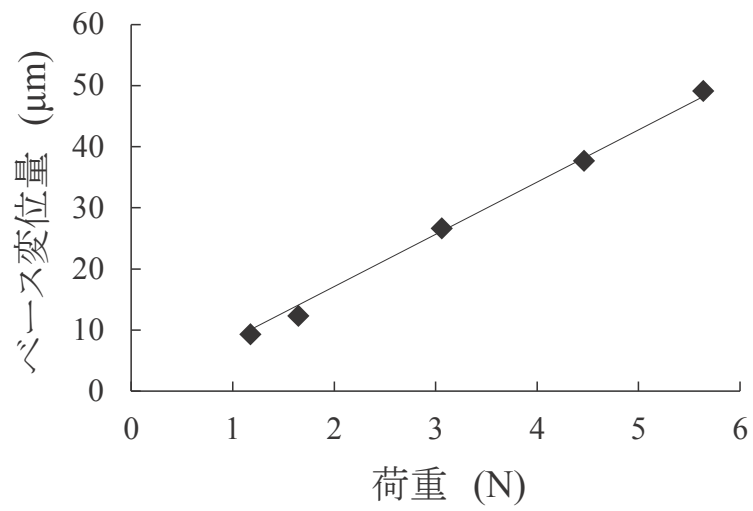


図 3-10 荷重に対するベース変位量

## (2) 皮膚変形量計測実験

(1)の装置を用いて触運動中の皮膚の変位を収集した。被験者は20～50代の10名（男性9名，女性1名）で，口頭の指示により接触力を変えて1名につき10試行計測した。1試行は数秒間で，試行中は接触力を計測用コンピュータのモニタに逐次グラフ表示して被験者にフィードバックした。被験者には試行毎におおよその接触力の目標レベル（0.1N～1N以上）を設定した他，「できるだけ強く」擦るよう指示した。触察中は接触力を概ね一定に保つよう指示した。

### 3.3 結果および考察

#### 3.3.1 【実験Ⅲ】粗さ感の分布についての官能検査実験結果

文献[49]に従い、回答を-2～+2の5段階で得点化した上で各試料の平均嗜好度を算出し、ヤードスティック距離によってサンプル間の有意差を検定した。図3-11に各試料の平均嗜好度と検定結果を示す。

##### (1) ドット高さと粗さ感の関係

ドット高さと粗さ感の関係は図3-12のようになった。ドット高さに応じて粗さ感が大きくなる傾向がみられたが、ドット間隔0.4mmと0.6mmの場合にはドット高さ中と高の間に有意差がみられず、グラフが水平に折れる形になった。ドット間隔0.8mmの場合には全域でドット高さ（対数値）と概ね線形的な関係がみられた。

##### (2) ドット間隔と粗さ感の関係

ドット間隔と粗さ感の関係は図3-13のようになった。ドット高さ：低では全域で粗さ感が小さく、ドット間隔による有意差はみられなかった。ドット高さ：中ではドット間隔0.6mmと0.8mmの間に有意差がみられずグラフが水平に折れる形になった。ドット高さ：高の場合には全域でドット間隔と線形の関係がみられた。

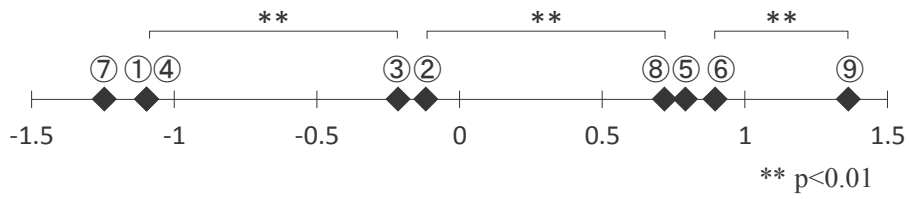


図 3-11 【実験Ⅲ】 各試料の平均嗜好度（粗さ感）

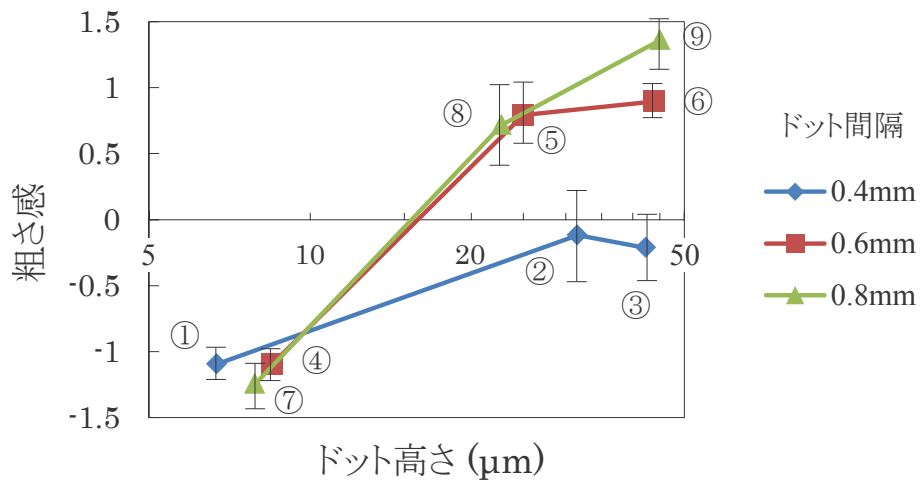


図 3-12 【実験Ⅲ】 ドット高さと粗さ感の関係

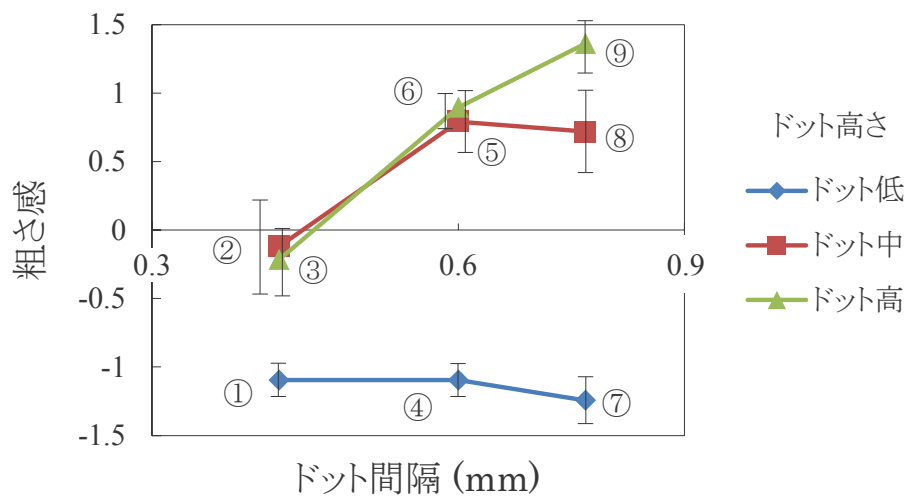


図 3-13 【実験Ⅲ】 ドット間隔と粗さ感の関係

### 3.3.2 感覚量による底付き状態の推定

#### (1) 底付き状態の推定方法

3.2.1 節で想定したモデルに従うと、あるドット間隔に対して、3.2.1 節の図 3-2 においてドット高さ  $h_1$ ,  $h_2$  の間で粗さ感に有意差がみられ、 $h_2$ ,  $h_3$  の間で有意差がみられない場合、 $h_1$  では底付きしており、 $h_2$ ,  $h_3$  では底付き状態にあると推定することができる。

底付きが生じる幾何学的条件については次のように考えることができる。図 3-14 のようにドット間隔  $p$  においてドット間に皮膚が入り込む深さを進入深さ  $d$  とすると、ドット高さ  $h$  が  $d$  を下回る場合に底付きが生じる。指表面には指紋などの凹凸があるが、ここでは触運動中の平均値として考える。ここで進入深さ  $d$  はドット間隔  $p$  に概ね比例するものとしてこの比  $d/p$  を進入比  $C$  と定義すると、底付きが起きる条件は、 $h < C \times p$  で表される。

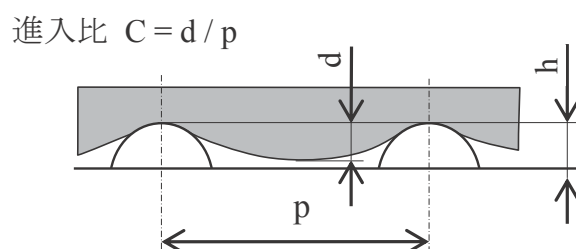


図 3-14 ドット間隔・ドット高さと進入深さ・進入比

## (2) 実験結果からの底付き推定

(1)の推定を図 3-12 の実験結果に当てはめることで、各試料の底付き／底浮きの状態を推定することができる。推定結果を図 3-12 上に示すと図 3-15 のようになった。

さらにこの推定結果を用いて、上記  $d$ 、 $C$  の値の範囲についても推定することができる。表 3-3 はこの方法で高さ水準間の有意差の有無から推定した底付き状態と、その場合に  $d$ 、 $C$  が取り得る範囲を整理したものである。さらに、仮にこの寸法範囲では  $C$  が大きく変わらないと考え  $C$  を定数とすると、すべての試料の判定結果を満たす  $C$  の範囲は、 $1/35 < C < 1/24$  に限られる。このように、感覚量から確実に底付きすると思われる範囲の閾値は、ドット高さとドット間隔の比で表現すると、 $1/35 \sim 1/24$  の範囲にあると考えることができる。以上の推定結果をドット間隔・ドット高さの散布図上に示すと図 3-16 のようになる。試料⑤は境界付近にあると考えられ、感覚の上で底付きが生じる平均的な閾値は、ドット間隔 0.6mm において概ね  $25 \mu\text{m}$  程度と考えることができる。

## (3) 底付きの有無とドット間隔、粗さ感の関係

ドット間隔と粗さ感の関係を示す図 3-13 に、(2)で得られた  $C$  から各試料の底付きを推定した結果を重ねると、図 3-17 のようになった。底浮きと推定される②と⑥と⑨の間と、境界付近の⑤と③の間で有意差がみられ、ドット間隔に従って粗さ感は大きくなる傾向がみられる。底付きしない場合にはドット間隔により粗さ感が決まると考えられ、これは第 2 章の結果とも整合する。

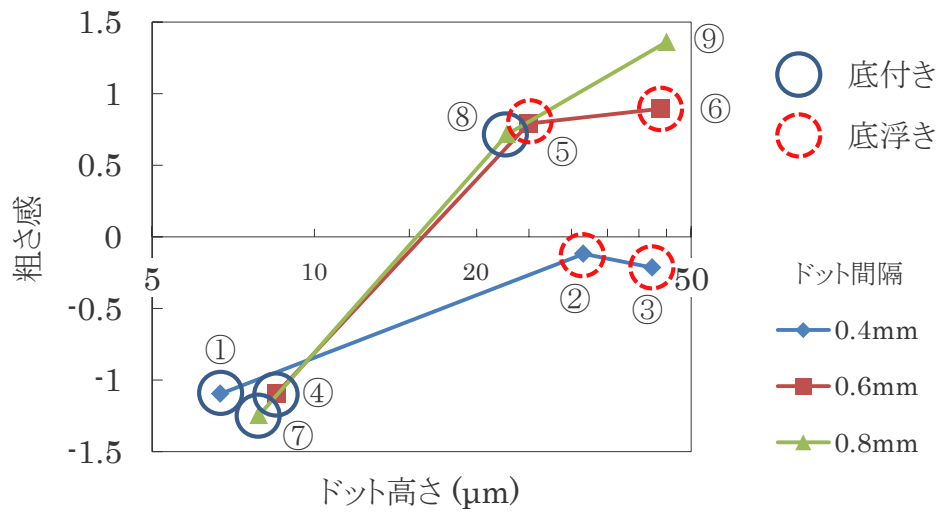


図 3-15 モデルに基づく底付き／底浮き推定結果

表 3-3 底付き／底浮きの推定と進入比 C の範囲

ドット間隔 (mm)		0.4	0.6	0.8
高さ間の 有意差	中－高	なし	なし	あり
	低－中	あり	あり	あり
ドット高さ ( $\mu\text{m}$ ) ／底付き推定	高	42／浮き	44／浮き	45／不明
	中	32／浮き	25／浮き	23／底付
	低	7／底付	9／底付	8／底付
進入深さd ( $\mu\text{m}$ )		$7 < d < 32$	$9 < d < 25$	$23 < d$
進入比C		$1/60 < C < 1/13$	$1/71 < C < 1/24$	$1/35 < C$



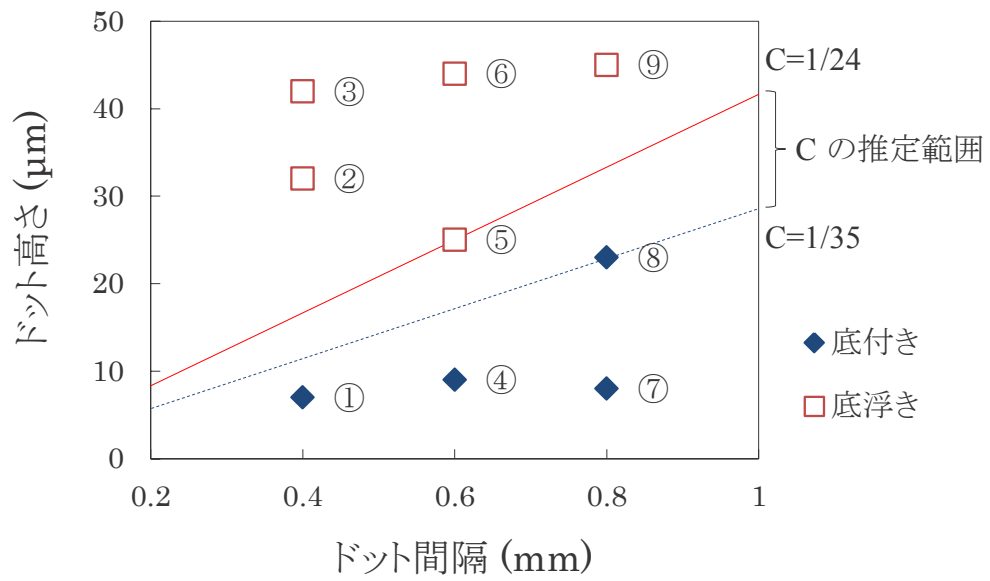


図 3-16 ドット間隔・高さ と底付き／底浮き推定結果

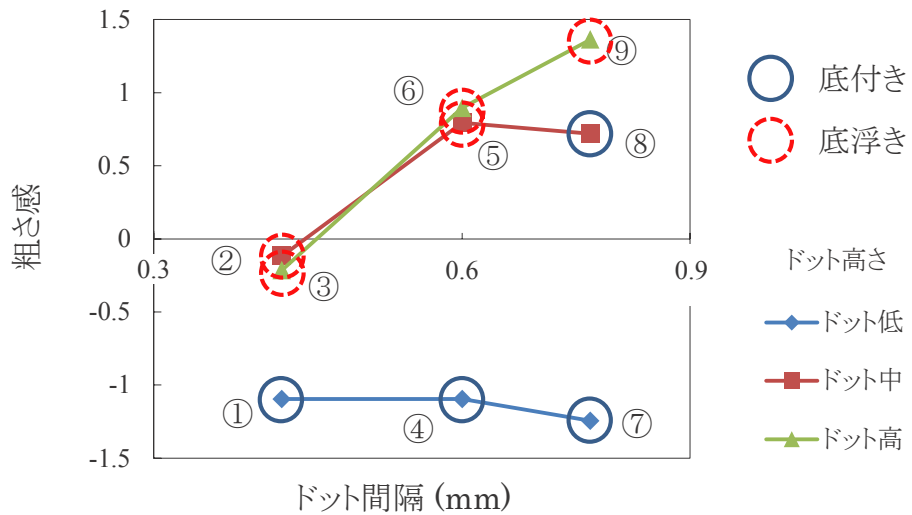


図 3-17 底付き／底浮き推定結果とドット間隔・粗さ感の関係

### 3. 3. 3 【実験Ⅳ】底付き閾値の検証実験結果

文献[56]に従い、16回のうち粗い試料を正しく識別できた回数により識別の可否を判定した（12回正答： $p < 0.05$ ，14回正答： $p < 0.01$ ）． $p > 0.05$ を有意差なしとみなして判定結果を3段階のレベルに分けた場合に、各組に該当する被験者の割合を図3-18に示す．ドット高さ $15/35\mu\text{m}$ のA組では $p < 0.01$ が過半数であるが、ドット高さ $25/45\mu\text{m}$ のB組では有意差なしと拮抗しており、A組では容易に識別できるものがB組では困難になっているといえる．各被験者の正答率は図3-19のようになり、B組では正答率が低下する傾向がみられた．ドット高さ $25\mu\text{m}$ では一部の被験者で粗さ感の飽和が生じるものの、半数以上の被験者が識別できていることから、平均的な閾値は $25\mu\text{m}$ よりやや高いと考えることができる．

以上のように実験Ⅲでみられた粗さ感の飽和は、異なる実験方法でも近い位置に再現されることが確認できた．閾値が実験Ⅲで示した $25\mu\text{m}$ より高くなった理由として、実験Ⅲでは判別しにくい場合に「どちらともいえない」を選択できるのに対し、実験Ⅳではどちらかを選択しなくてはならないため、わずかな違いに対しても検出感度が高い点が挙げられる．また、A組でも識別できない被験者や、B組でも容易に識別できる被験者がいることから、粗さ感の飽和が生じる高さについては個人差が大きい．これらを考慮すると、ドット間隔 $0.6\text{mm}$ の場合に粗さ感が飽和する平均的な高さは、通常感覚では概ね $25\mu\text{m}$ 付近、厳密に比較する場合にはそれより高い位置にあり、個人差による幅を持って分布すると考えられる．本稿では粗さ感の飽和を検証することが主目的のため、A,B2組の比較のみ実施したが、同種の実験を多数の組について実施することで、飽和の発生状況をより詳しく示すことが可能と思われる．

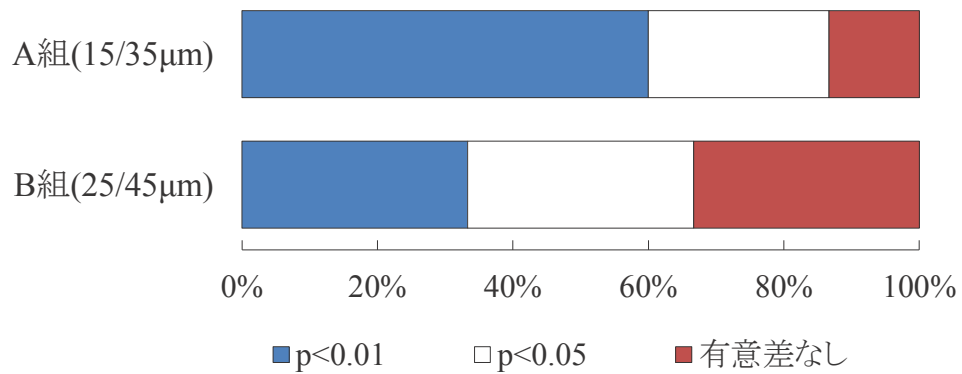


図 3-18 【実験Ⅳ】粗さ感識別実験結果

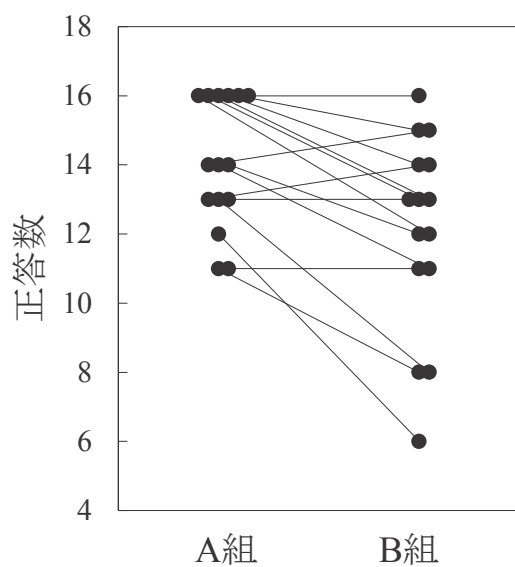


図 3-19 粗さ感識別実験の正答数

### 3.3.4 【実験V】触察時の皮膚変形量の計測結果

図 3-20 に触運動中の接触力と皮膚の変位量の計測例を示す。接触力の測定結果は、周期約 0.5 秒の低周波の変動に、それより高周波の変動が重畳している。低周波の変動は指の往復運動に伴うもので、折返し時に力を抜くため、折返し付近で小さくなっている。高周波の変動は摩擦力の変動などの外乱に対して接触状態を維持するために、接触力を細かく制御しているためと考えられる。皮膚の変位量は接触力より高周波の成分を含み、数  $10\mu\text{m}$  の振幅で変動している。これは指紋やシワなどの皮膚表面の凹凸や、スティックスリップなど動的な接触による振動等の影響が表れていると考えられる。この測定例では変位量のヒストグラムと累積相対度数は図 3-21 のようになる。変位量のばらつきは正規分布に近い形になる（平均  $16.4\mu\text{m}$ 、標準偏差  $7.6\mu\text{m}$ ）。累積相対度数は触察動作中に皮膚表面がこの深さに到達する頻度を表している。平均深さに達する頻度は約 50%で、頻度は平均深さの前後で急激に減少することがわかる。

図 3-22 に 10 名×10 試行の計測で得られた接触力と皮膚の変位量の平均値の散布図と、被験者毎の回帰直線を示す。平均値については皮膚の変位は接触力に概ね比例している。被験者毎の回帰直線の傾きと決定係数は表 3-4 のようになり、全被験者 10 名の係数の平均は  $29.9\mu\text{m}/\text{N}$  であった。回帰直線の傾きは、決定係数の低い被験者を除いても  $13\sim 39\mu\text{m}/\text{N}$  と 3 倍程度の違いがあり、個人差が大きい。各被験者について最も接触力が大きかった試行についてみると、接触力は  $0.6\sim 2.0\text{N}$ （平均  $1.3\text{N}$ ）で、変位量は  $20\sim 57\mu\text{m}$ （平均  $37\mu\text{m}$ ）であった。このことからドット間隔  $0.6\text{mm}$  の場合、平均値でみると皮膚の変位は接触力  $0.84\text{N}$  で  $25\mu\text{m}$  に達し、接触力が大きい場合には  $37\mu\text{m}$  程度まで届くといえる。ドット間隔に対する比率で表すと、 $1/16$  程度まで届くことになり、3.3.2(2)節で求めた進入比  $C$  ( $1/35\sim 1/24$ ) より大きい値となった。

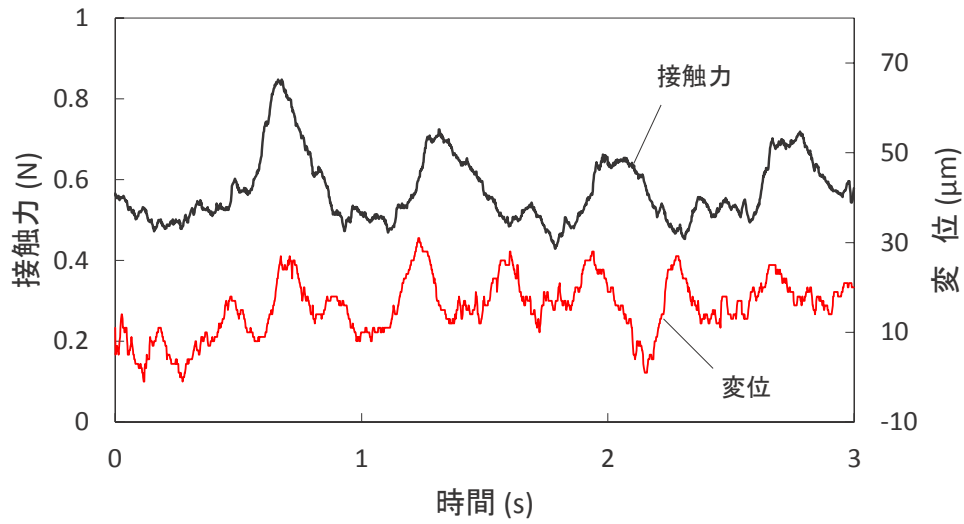


図 3-20 接触力と皮膚変位の測定例（時系列変化）

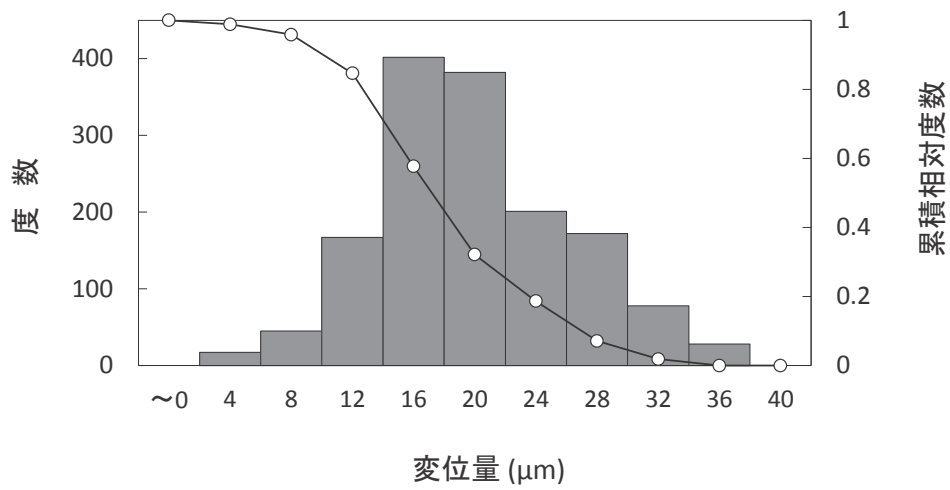


図 3-21 接触力と皮膚変位の測定例（図 3-20 の度数分布）

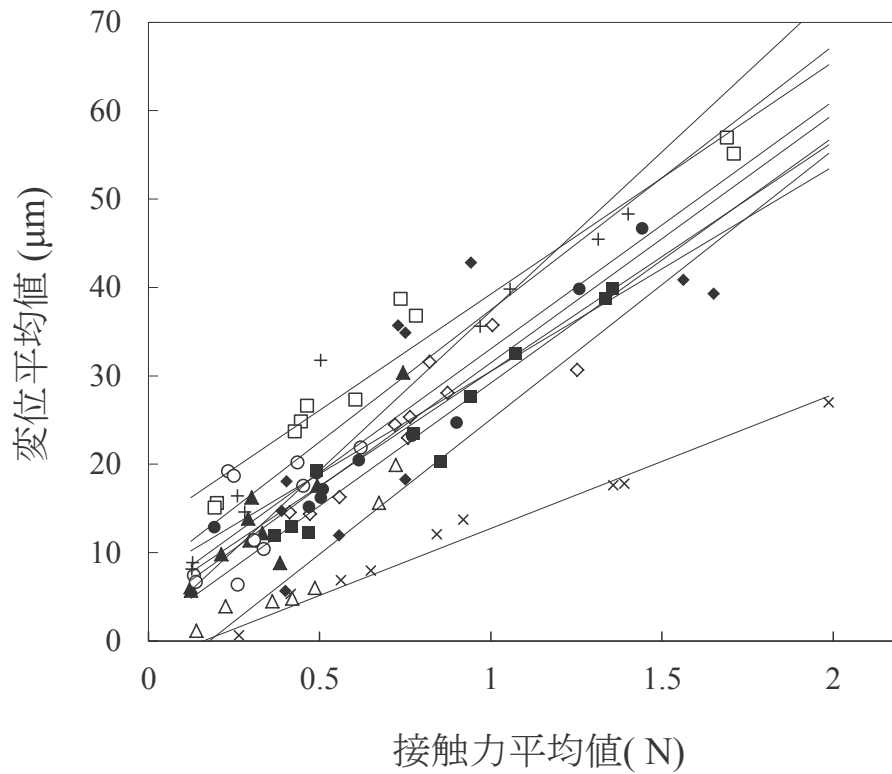


図 3-22 接触力と皮膚の変位量の平均値 (被験者 10 名)

表 3-4 接触力に対する皮膚変位量の 1 次回帰式の係数

被験者	係数( $\mu\text{m}/\text{N}$ )	$R^2$
1	13.1	0.940
2	19.1	0.726
3	23.2	0.591
4	29.3	0.948
5	31.4	0.727
6	31.8	0.932
7	37.3	0.857
8	38.1	0.662
9	39.1	0.840
10	41.2	0.351

### 3.3.5 寸法パラメータと接触状態, 粗さ感の関係

実験Ⅲより, 粗さ感はドット高さの影響を受ける寸法領域ではドット高さから決定し, 受けない領域ではドット間隔から決定する傾向がみられる. 感覚受容器が微細な凹凸を知覚するメカニズムについては, 前野, 小林ら[31-33]は有限要素法解析により動的触察時の詳細な指モデルの解析を行い, 凹凸面との接触によってメルケル小体およびマイスナー小体の近傍に生じる皮膚のひずみエネルギー密度の時空間分布を示し, 受容器の応答特性を説明できることを示した. 本実験に当てはめると, 底浮きした状態ではドット間隔による時系列情報の違いが粗さ感の手掛かりになり, 底付き時にはドット高さによるひずみエネルギーの大きさの違いが粗さの手掛かりになったと考えることができる. 底付き時のドット間隔の影響については, 本実験ではドット高さの影響が大きいため明らかではない. 底付きする場合, 平面に接触する底付き部分のひずみエネルギーは一定になるため, Connor ら[26]の実験のようにドット間隔が広く周波数成分が利用されない寸法領域では, ドット間隔が広がることで粗さ感が減少する可能性も考えられる.

実験Ⅴでは皮膚は最大  $37\mu\text{m}$  程度変位していることから, 実験Ⅳの閾値 (約  $25\mu\text{m}$ ) 付近では多くの被験者で物理的な接触が起きると推定される. 両者に  $10\mu\text{m}$  程度の違いがあるが, これは 3.2.1 項の②に挙げたような底付きが粗さ感に表れない中間的な領域が存在するためと考えられる. 3.3.4 項に示したように, 皮膚変位の平均値は 50%の頻度で到達する高さであり, 底付きを感覚の差として知覚するにはそれより高い頻度で平面部に接触する必要があると考えられる.

以上の考察は被験者全体の平均値を対象にしたものであり, 個人については単純に皮膚の変形特性から感覚上の底付き高さが決まるとは限らない. 皮膚の変形特性の他, 指を接触させる強さや刺激に対する感度にも個人差がある. 実験Ⅳでみられた粗さ感の識別能力の個人差は, これらの個人的要因が重畳した結果と考えられ, 皮膚の変形が大きくても粗さの識別能力が低い場合も考えられる.

### 3.4 結言

ドットの曲率半径が一定 (R0.3mm) で、ドット間隔が 0.4~0.8mm で、底付きが生じる寸法領域のドットパターンについて、官能検査実験と皮膚の変形量を計測する実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 実験Ⅲにより、粗さ感がドット高さに従う寸法領域と、粗さ感がそれ以上増加しない「粗さ感の飽和」が生じる領域が明らかになった。後者では粗さ感 はドット間隔に従う傾向がみられた。この境界は(ドット高さ/ドット間隔) の値で  $1/35 \sim 1/24$  の範囲にあると推定された。
- (2) 実験Ⅳにより、ドット間隔 0.6mm では粗さ感の飽和が生じるドット高さが  $25 \mu\text{m}$  よりやや大きい値と推定された。
- (3) 実験Ⅴにより、ドット間隔 0.6mm では、強い力で触れた場合、皮膚表面はドット中央部で平均  $37 \mu\text{m}$  程度変位することがわかった。ドット高さ  $25 \mu\text{m}$  付近から  $37 \mu\text{m}$  付近までは底付きが生じていても感覚上は粗さ感の頭打ちが生じている可能性がある。この領域では底付きの頻度・接触面積・力が減少するため感覚上は違いが感じられないと考えることができる。

本検討によりドット高さが影響する条件が明らかになり、実測される皮膚の変形量についてもこの仮定を支持する結果が得られた。これらの幾何学的条件や皮膚の変形についての知見は、テクスチャの設計指針の一つとして活用できると考える。ここで考察したのは特定の寸法領域のドットパターンについてであるが、様々なパターンにおける皮膚の変形特性を調べることで、より一般化した知見に拡張できる可能性がある。凹凸に接する皮膚側（触る側）の特性を明らかにすることで、凹凸高さによる質感表現が可能な範囲や、粗さ感を最大化するために必要な凹凸高さを知ることができる他、同様のメカニズムによって底付きの影響が生じると思われる摩擦による滑り止め効果等にも適用できる可能性がある



## 第4章

### ドット間隔・ドット曲率と粗さ感の関係

— 2次元寸法パラメータに対する感覚量探索方法の提案 —



## 4. 1 緒言

第2章、第3章でドット間隔とドット高さの影響が明らかになったため、未知の寸法パラメータはドット曲率のみである。本章ではドットパターンの寸法パラメータのうちドット間隔・ドット曲率と粗さ感の関係について検討する。高さの影響を除くため、底付きしない十分な高さとする。また、本章では2つの寸法パラメータの組合せを変化させた場合の感覚量の分布を効率よく調査する方法として、新たな実験手法を提案する。

粗さ感の知覚は、触動作を必要とせず、接触面の圧力分布によって知覚されるマクロな粗さ知覚と、触動作に伴って皮膚表面に生じる振動によって知覚されるミクロな粗さ知覚に分けられる。両者は刺激の周期により切り替わり、その境界は数百マイクロメートルから1mm程度とされている[48]。本研究で対象としているドット間隔が1mm以下のドットパターンについては、ミクロとマクロの両方の粗さ知覚が混在すると考えられる。ミクロ的には皮膚の振動の振幅と周波数が、マクロ的には皮膚表面に生じる圧力の大きさとその分布密度が粗さ感の判断材料になると考えられ、いずれの場合においてもドットパターンの形状要素としては（ドット高さが無視できる領域では）ドットの形状とドット間隔の2つが決定要因になり得る。我々がひとつの触感として評価している「粗さ」は、この両者が何らかの重み付けをもって評価された結果と考えることができる。

粗さ感を構成する多次元構造に着目した例として、野呂ら[57,58]は、旋削加工面を対象に、表面粗さ( $R_q$ )、ピッチ、うねり、先端角度の4種の物理量を組み合わせた18種の試料による官能検査実験を行い、多次元尺度構成法を適用することで、物理的測度から1次元の粗さ感が決定する構造とその個人差を明らかにした。三縞ら[59]は、同様に表面粗さ( $R_z$ )とピッチを変化させた旋削加工面を対象に官能検査を行い、 $R_z$ とピッチの両方によって粗さ感は増加するが、 $R_z$ の影響が強い被験者とピッチの影響が強い被験者にタイプが分かれ、多くはピッチを優

先ずるタイプであることを示した。また、 $R_z$  の変化量に相当するピッチの変化量についても示している。

本章では 3D プリンタを使用することで、ドットの形状（曲率）とドット間隔の組合せが異なる多種類のドットパターンを作成し、これらの中から同等の粗さ感を示す組合せを探索する方法で、ドット曲率とドット間隔の 2 次元空間における粗さ感の等高線を求めた。これを手掛かりに 2 つのパラメータと粗さ感の関係を推定した。一対比較法の場合、試料数が増えると比較対が急激に増大するため、限られた被験者で多水準の実験を行うことは事実上困難である。この方法は多水準の試料を用いる場合に、感覚量の分布を少ない試行数で容易に把握できることが特長である。本手法によりドット間隔 0.4~0.9mm, ドット曲率 2~8mm<sup>-1</sup> 程度の寸法領域において、粗さ感とドット曲率・ドット間隔との間の定量的な関係を示すことができた。

インクジェット式 3D プリンタによって半球状のドットが形成される過程については、4.2 節に造形実験の結果と考察を示す。

## 4.2 インクジェット式 3D プリンタによるドット形成の原理

第2章、第3章では射出成形により試料を作成したが、本章では多種類の試料を用いるため、インクジェット式 3D プリンタにより試料を作成した。微細なノズルから液状の樹脂を吐出して硬化・積層するインクジェット式 3D プリンタは、他の方式に比較して造形解像度が高く、細かい形状の造形や面の平滑性などに優れている。形状の微細な表現力が高まったことで、構造・機構の試作検証からシボパターンのような意匠性や質感が求められるものの試作や製品においても 3D プリンタが使用されるようになってきている[60,61]。シボ等のテクスチャの評価では触感も検討対象となるが、ヒトの手指の感覚は鋭敏であり、例えば凸点の間隔などでは  $10\ \mu\text{m}$  程度の違いも質感の違いとして知覚される。このため 3D プリンタによる試作品が最終製品をどの程度模擬できるかについては、視覚においては同等と見なせる場合においても、触感においてはなお注意が必要である。微細領域で 3D プリンタを活用するには設計データと造形形状の違いを知ることが必要で、また両者の関係を把握することで造形形状を事前に予測できる可能性がある。

本節では、本研究で使用する実験試料を作成することを念頭に、微細な寸法領域において設計データと実際の造形形状にどのような差異が生じるかについて検討する。実験的に微小なドット形状を形成し、この結果から樹脂が積層される工程を考慮して設計データと造形形状の関係を単純な数学的モデルで説明することを試みた。さらにこのモデルを用いて造形形状を予測する検証実験を行い、狙い通りの高さ・曲率を持つドットパターンを形成できることを確認した。

### 4.2.1 微小凸点の形成実験

一般的に 3D プリンタで微小な凸点(ドット)を造形すると、設計データが直方体であっても造形形状はなだらかな丘状になる。平面上に等間隔で凸点を配置したドットパターンを形成し、造形形状の寸法測定結果から樹脂が積層される過程を

推定した.

### (1) 3Dプリンタと造形条件

使用した3Dプリンタの主な仕様と材料を以下に示す.

- ・機種 : Stratasys 社 EDEN260VS
- ・造形範囲(X×Y×Z) : 255×252×200 mm
- ・造形解像度 X,Y軸 : 600dpi Z軸 : 1600 dpi
- ・造形精度 : 最大 0.2mm (フルサイズ造形時)
- ・造形樹脂 : VeroWhitePlus RDG38 (硬質アクリル系)

ドット表面が上になる姿勢で, 表面にサポート材を付けない条件で造形した.

### (2) 造形対象物の形状

触感評価用サンプルを想定し, 造形対象物は外寸が 56×56mm で厚さ 2mm の板形状とし, 中央の 26×36mm の矩形範囲に次節に示す微小なドットを等間隔の格子状に配置した.

### (3) 設計データ

ドットを形成するために与える設計データは, 図 4-1 に示すように断面が正方形の直方体とし, これを縦横に等間隔に配置した. 3Dプリンタの造形解像度が, 水平 1/600 インチ (42.33  $\mu$ m), 積層 1/1600 インチ (15.88  $\mu$ m) のため, 寸法がこの解像度の整数倍となるよう, 断面の辺長 (角寸) を 254×254  $\mu$ m (解像度×6), 間隔を 635  $\mu$ m (解像度×15) とした. ドット形成範囲には 2,400 点 (縦 40×横 60) のドットが配置される. 直方体の高さは, 図中 h を 16  $\mu$ m から 208  $\mu$ m まで 16  $\mu$ m 間隔で変化させ, 表 4-1 に示す全 13 種類のサンプルを作成した.

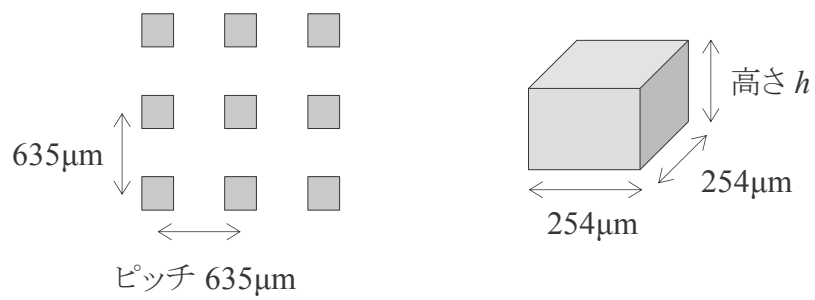


図 4-1 高さ違い造形実験の寸法パラメータ

表 4-1 高さ違い造形実験の設計寸法 (μm)

試料番号	データ角寸	データ高さ
1	254	16
2	254	32
3	254	48
4	254	64
5	254	80
6	254	96
7	254	112
8	254	128
9	254	144
10	254	160
11	254	176
12	254	192
13	254	208

#### 4. 2. 2 造形物の寸法測定結果

形成されたドットの寸法をレーザ顕微鏡（オリンパス(株) LEXT OLS-4100）を用いて測定した。ランダムに選んだ5ヶ所のドットについて、高さ、直径、曲率半径を測定した。測定された形状の例を図4-2に示す。寸法測定結果（5点の平均値）を図4-3～図4-5に示す。ドットの高さはデータ高さにはほぼ比例している一方、直径はドット高さの影響を受けない。曲率半径はドット高さに従って変化している。この結果から、設計データが高くなるのに従いドットが高く、より尖った形状に変化するといえる。

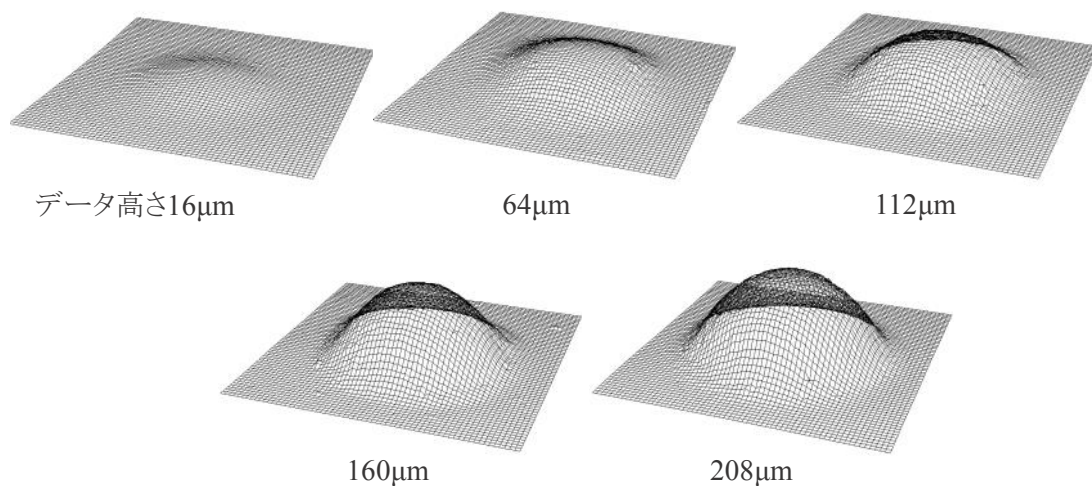


図4-2 形成されたドットの形状測定例（メッシュ表示）



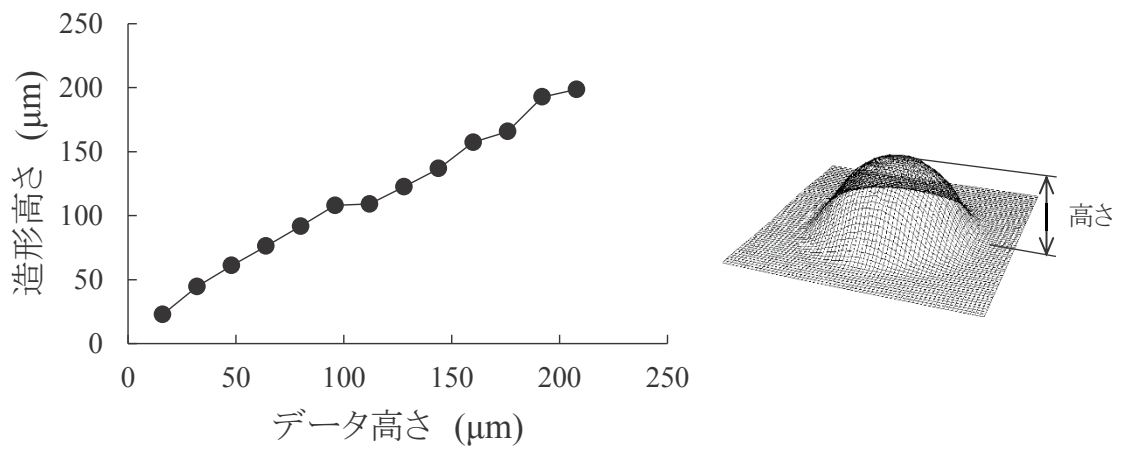


図 4-3 設計データ高さと造形高さの関係

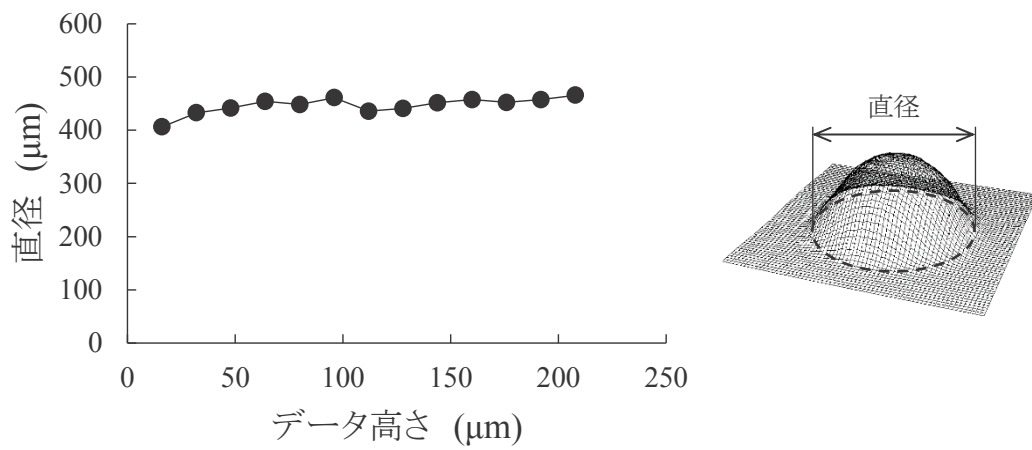


図 4-4 設計データ高さと直径の関係

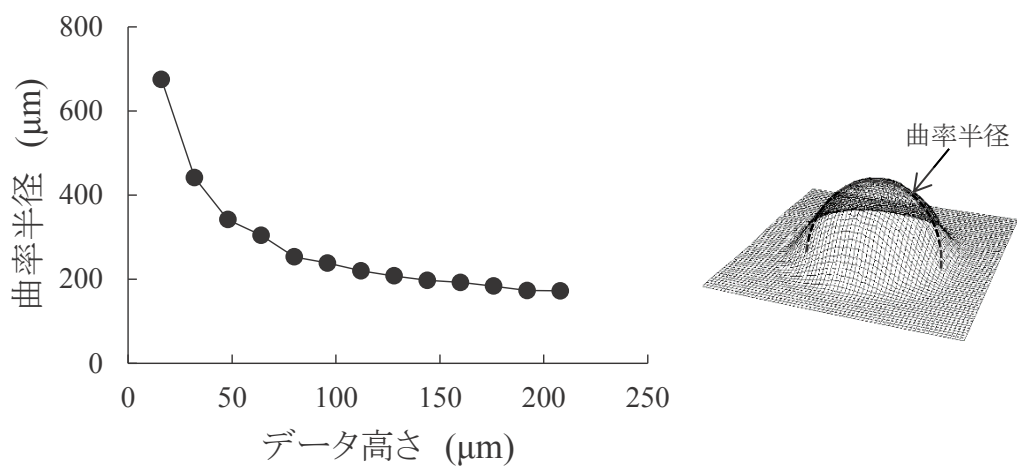


図 4-5 設計データ高さと曲率半径の関係

### 4. 2. 3 積層工程のモデリング

インクジェット式 3D プリンタにおいて、直方体の設計データに対し実際の樹脂がなだらかな丘状に積層される過程を説明するため、次のような着弾点のばらつきを考慮したモデルを仮定した。

前提 1 樹脂の液滴は造形解像度の間隔で格子状に配置された吐出目標点に向かって吐出される。

前提 2 吐出された液滴は目標点を中心にばらつきをもって着弾する。

前提 3 着弾した液滴は一様分布状あるいは中央が高い丘状に堆積する。

これらの前提から、以下のことが仮定される。

#### (1) 単独の吐出目標点への積層

図 4-6(a)に示すように、ある目標点を狙って複数回吐出された液滴は、中心極限定理のため前提 3 で想定する分布の如何によらず目標点を中心に正規分布状に積層する。

#### (2) 有限領域への積層

ある領域に対して積層する場合、図 4-6(b)に示すように、造形範囲に含まれる全ての吐出目標点に対する(1)の正規分布を足し合わせた形状に積層される。(1)の正規分布の広がり造形解像度に対し十分な大きさをもつ場合、設計データが直方体であっても形成されるドットは滑らかな丘状になる。

着弾がばらつく原因として、液滴が吐出される方向の他、ヘッドの位置制御の繰り返し誤差や、ヘッドの運動に伴う慣性力や気流の影響など様々な要因が考えられる。ここではこれら全てが複合した結果を一つのばらつきとして想定している。

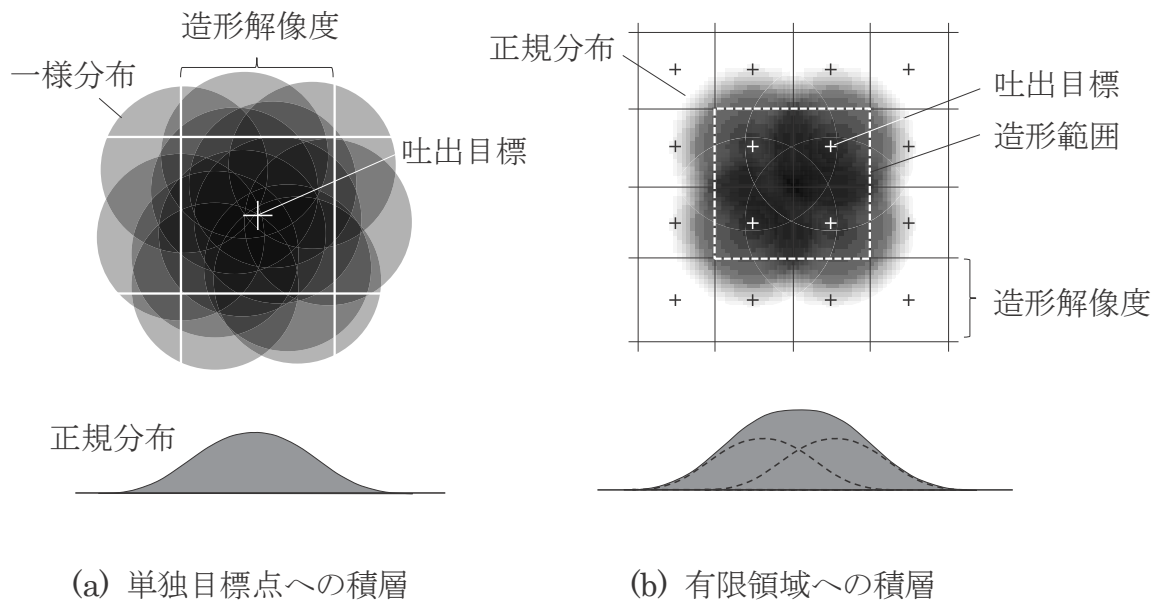


図 4-6 樹脂の積層モデル

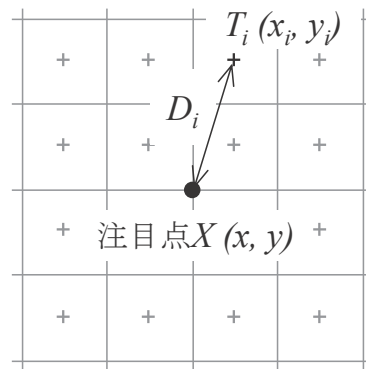


図 4-7 注目点と周囲の吐出目標点

本モデルに従う場合，図 4-7 のようにある吐出目標点  $T_i(x_i, y_i)$  を狙った樹脂が距離  $D_i$  だけ離れた点  $X(x, y)$  に積層される確率  $P_i$  は， $T_i$  を中心とする正規分布の確率密度関数に従うため，分布の標準偏差  $\sigma$  と距離  $D_i$  により式 4-1 のように表される．

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{式 4-1}$$

点  $X$  に積層される樹脂の厚さは，近傍の  $n$  個の吐出目標点からの  $P_i$  の和に比例するので，式 4-2 のようになる．

$$(x, y) = a \sum_{i=1}^n P_i \quad (a \text{ は定数}) \quad \text{式 4-2}$$

実験で造形した  $254 \mu\text{m}$  角の直方体の場合，対象となる吐出目標点は  $6 \times 6$  の 36 点程度と推定される．目標点を 36 点とした場合，中心を通る断面上の  $\sum P_i$  の分布は  $\sigma$  の値により図 4-8 のように変化する．本モデルはデータ高さに比例して高さ方向の倍率のみが変化するため，ここではドット中心の高さで正規化した値で表している．

これに測定結果を重ね合わせると， $\sigma = 60 \mu\text{m}$  程度で計算結果と測定値がよく一致する．

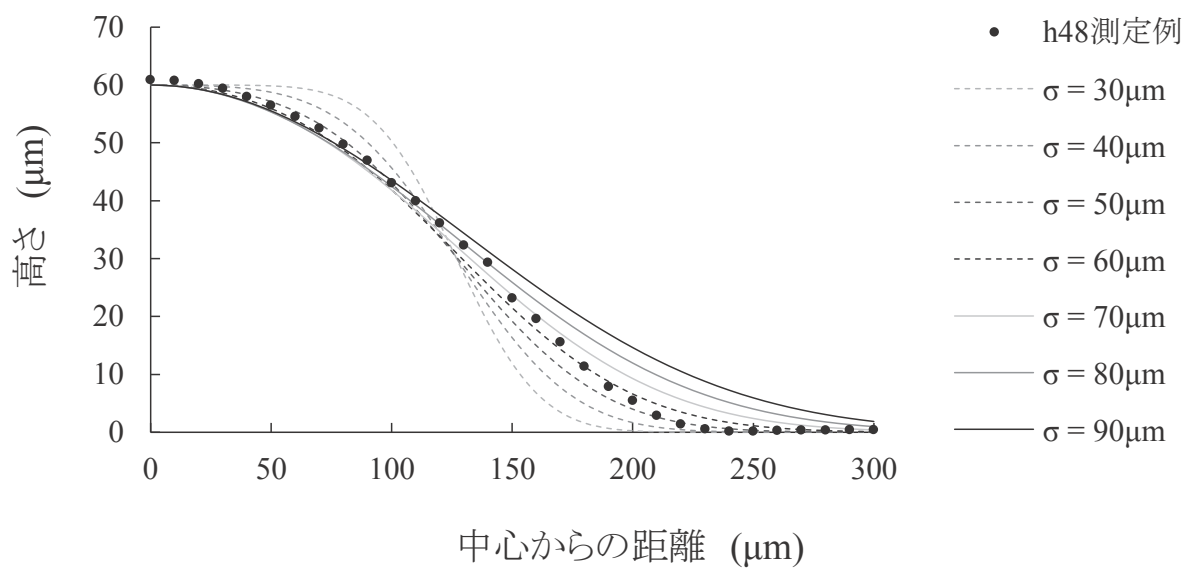


図 4-8  $\sigma$  の想定を変えた場合の断面形状計算結果の変化

## 4. 2. 4 モデルと実形状の比較

### (1) 断面形状

図 4-9 に本モデル( $\sigma = 60 \mu\text{m}$ )による断面形状の予測値と、3種類のデータ高さにおける測定例を、ドット中心の高さで正規化した値で示す。高さが異なる場合でも、正規化された断面曲線は互いに似通っていることがわかる。予測値は測定値に近く、本モデルにより積層状態が概ね表現されていると考えられる。また、測定値では高さが大きくなるに従い幅が広くなる傾向がみられ、単純化した本モデルには含まれない要因が影響している。

### (2) 曲率半径

図 4-10 に造形高さから計算される中心付近の曲率半径について、ばらつきの想定を変えた場合の予測値と、測定結果の比較を示す。 $\sigma$ の想定により理論値は変化するが、 $\sigma = 60 \mu\text{m}$ 付近で両者の結果がよく一致した。

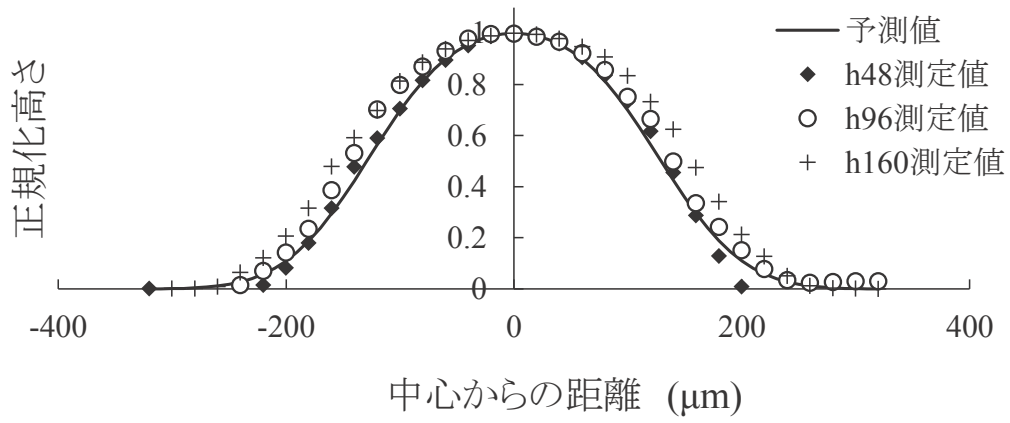


図 4-9 モデルによる予測値と 3 例の測定値の比較

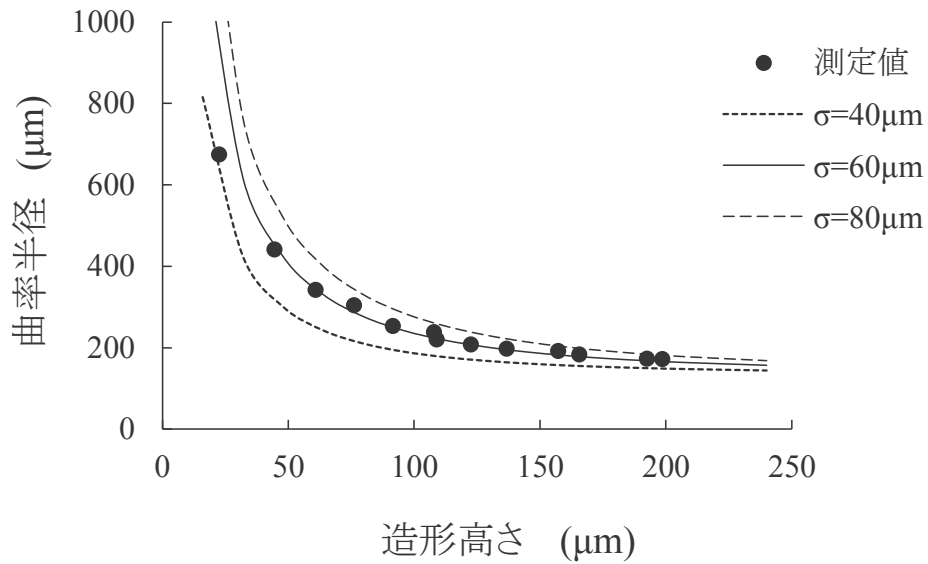


図 4-10 曲率半径の予測値と測定値

## 4. 2. 5 検証実験

### (1) 曲率違いドット形成実験

本モデル( $\sigma = 60 \mu\text{m}$ )の妥当性を検証するため、異なる設計データにおいても本モデルが適用できることを確認する実験を行った。本モデルから、設計データの角寸を変えることでドットの曲率を変化させることができると予想される。そこで高さが同一で曲率が異なるドットパターンを形成する実験を行った。

#### i) 設計データ

設計データの寸法を表 4-2 に示す。角寸は  $85 \sim 423 \mu\text{m}$  の 9 段階に変化させた。高さについては、着弾のばらつきが吐出点の間隔に対して大きいため、角寸が小さい場合に造形高さはデータ高さより著しく低くなると予想される。そこで計算結果から逆算し、造形高さが  $160 \mu\text{m}$  になるようデータ高さを補正した。

表 4-2 曲率違いドット形成実験の設計寸法 ( $\mu\text{m}$ )

試料番号	データ角寸	データ高さ	曲率半径予測値
14	85	544	100
15	127	288	105
16	169	208	132
17	212	176	151
18	254	160	181
19	296	160	210
20	339	160	238
21	381	160	266
22	423	160	293



## ii) 寸法測定結果

4.2.2 節と同様の方法で造形形状の寸法を測定した。寸法測定結果（5 点の平均値）を図 11，図 12 に示す。ドット高さはほぼ狙い値の  $160\ \mu\text{m}$  程度になった。角寸  $85\ \mu\text{m}$  では狙い値の 3 倍以上の設計データを与えているが，ほぼ正確に補正できている。曲率についても表 1 に示した予測値に沿った結果となり，狙い通り，高さ一定で曲率半径を約 3 倍の範囲で変化させたサンプルを作成できた。

以上のように角寸が小さい場合に造形高さが設計値より小さくなる状態も含め，造形形状は本モデルによる予測とよく一致することから，本モデル及び想定したパラメータは妥当であると考えられる。

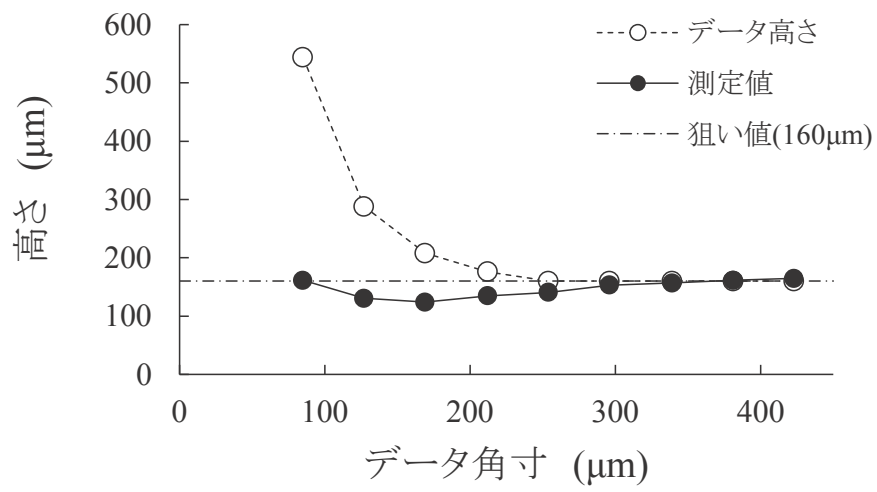


図 4-11 データ角寸と造形高さの関係

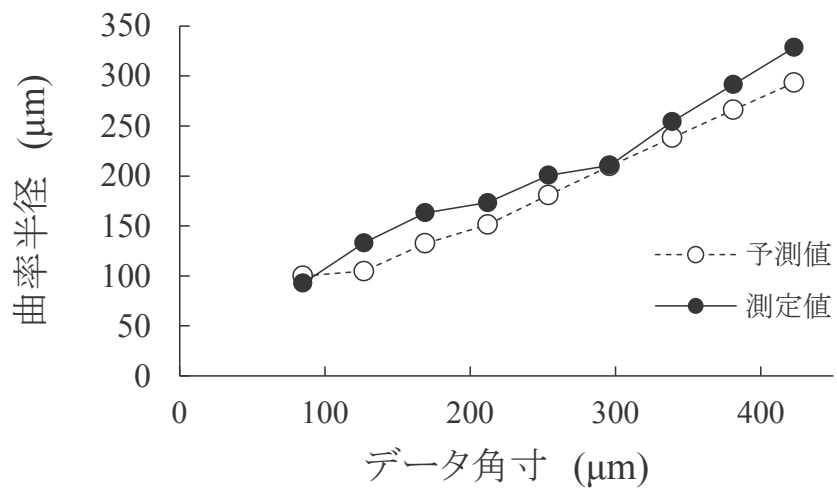


図 4-12 データ角寸と曲率半径の関係

## (2) 楕円ドット形成実験

設計データの角柱形状の縦・横の寸法を変えた場合、造形されるドットは楕円形になると予想される。これを利用することで触察する方向により触感が異なるパターンを作成できる可能性がある。そこで縦・横の曲率が異なる楕円形ドットについても、本モデルが適用できることを確認する実験を行った。

### i) 設計データ

設計データは、データの Y 方向の寸法を  $254\mu\text{m}$  で一定とし、X 方向の寸法を  $85\sim 423\mu\text{m}$  の 5 段階に変化させた。データ高さは造形高さが  $160\mu\text{m}$  になるよう本モデルによる計算結果を用いて補正した。設計値と本モデルから予測される X, Y 各軸方向の曲率を表 4-3 に示す。

表 4-3 楕円ドット形成実験の設計寸法 ( $\mu\text{m}$ )

試料番号	データ角寸		データ高さ	曲率半径予測値	
	X	Y		X	Y
23	85	254	304	100	181
24	169	254	192	132	181
25	254	254	160	181	181
26	339	254	160	238	181
27	423	254	160	293	181

## ii) 寸法測定結果

縦長(試料 23)と横長(試料 27)の形状の例を図 4-13 に, X, Y 各軸方向の曲率半径の測定結果 (5 点の平均値) を図 4-14 に示す. X 軸方向の曲率半径はデータ寸法に応じて変化し, 予測値とよく一致した. これは曲率違いドット形成実験の結果とも一致している. Y 軸方向の曲率半径は試料 23 のみやや小さくなった以外は概ね予測値と一致した. ドット高さはほぼ狙い値の  $160\ \mu\text{m}$  程度になった. X, Y のいずれの方向についても本モデルの予測に近い形状が作成できており, このようなケースにおいても本モデルが適用可能であることが確認できた.

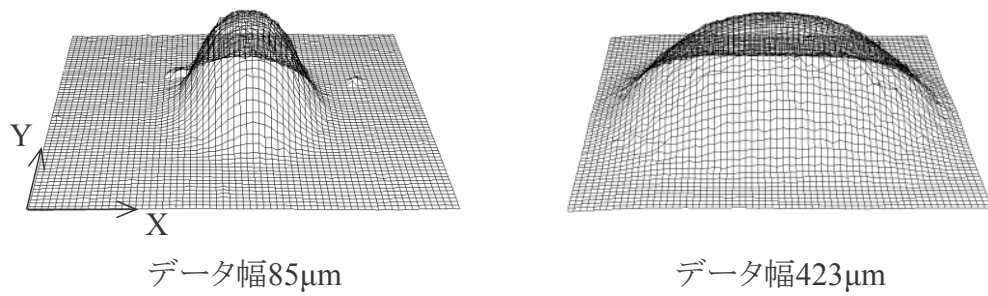


図 4-13 楕円ドットの造形例

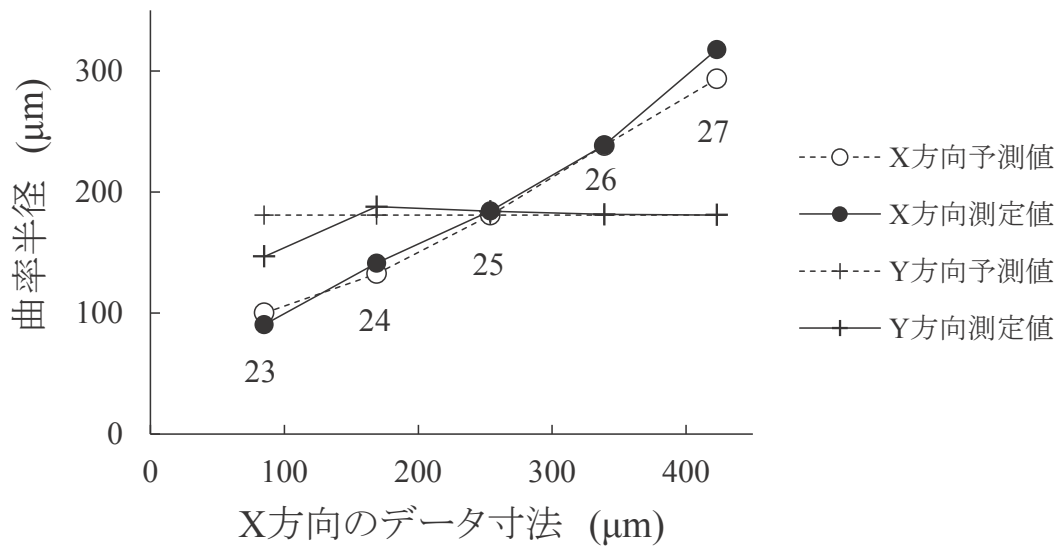


図 4-14 X方向のデータ寸法と X,Y各方向の曲率半径

#### 4. 2. 6 まとめ

インクジェット式 3D プリンタにおいて、造形解像度に近い寸法領域で樹脂が積層される過程について検討した。微小なドット形状における積層形状を調査し、この結果から樹脂が吐出目標点を中心とする正規分布の確率密度関数に従って積層されるモデルを仮定したところ、以下のような結果が得られた。

- (1) 着弾位置のばらつきを  $\sigma = 60 \mu\text{m}$  と見込むことで本モデルと実験結果が一致することがわかった。
- (2) 本モデルに従って設計パラメータを設定することで、狙い通りの高さ・曲率を持つドットパターンが形成されることを確認した。

本節で推定した着弾位置のばらつきは、造形形状の高周波成分が失われるローパスフィルタの効果を持つ。実験で明らかになったように、微細領域では造形形状は設計データの形状から乖離したものとなる。プリンタを使用する上で、仕様上の「造形解像度」とは樹脂を吐出する最小間隔を表すものであり、この間隔で造形形状の凹凸が分離できるという意味ではないことに注意が必要である。樹脂の着弾位置のばらつきを考慮すると、本稿の機種と樹脂の場合、例えば 2 つの凸点を分離して表現するには仕様上の造形解像度の数倍の間隔が必要である。

着弾位置のばらつき大きさから凹凸表現の解像度が推定できることから、この値は微細領域における表現力を示す指標のひとつとして利用できる可能性がある。プリンタの機種や樹脂毎に値が明らかになれば、製品間の性能比較が可能になる。また、この値により形状のダレを見込んだ造形シミュレーションが可能になるため、意匠性の高いテクスチャを造形する場合に、微細形状の再現性や仕上がりの印象を事前に **Computer Graphics** で確認するなどの活用が考えられる。

なお、3D プリンタでは、樹脂の吐出量やピッチの調整等、複雑な制御が行われている可能性があるが、その内容はユーザにとってブラックボックスである。本稿の単純なモデルでは推定できない要素が多く含まれる点に注意が必要である。

## 4.3 実験方法

### 4.3.1 ドットパターンにおける粗さ感のモデル

第2章、第3章の結果から、ドット間隔を広げれば粗さ感は増加する。また、ドットを尖らせた場合に粗さ感が増加することも自明といえる。図4-15において、あるパターン(O)を起点に、ドット間隔を広げた場合(A)とドットを尖らせた場合(B)のどちらでも粗さ感は増大する。逆にドット間隔を狭めた場合(a)とドットを鈍らせた場合(b)のどちらでも粗さ感は減少する。これらを組み合わせると、ドット間隔を広げドットを鈍らせた場合(Ab)と、ドット間隔を狭めドットを尖らせた場合(aB)に、元のパターン(O)と同等の粗さ感が得られる組合せが存在するはずである。何らかの方法で粗さ感が同等となる組み合わせを探索できれば、図4-16のようにドット間隔とドット曲率の2次元のパラメータ空間における粗さ感の等高線を描くことができると考えられる。この等高線は、粗さ感を判断する過程で2つのパラメータがどのような重み付けをもって評価されるかを表すといえる。さらにこれまで不明だったドットの形状（曲率）と粗さ感の関係を知る手がかりとなる。

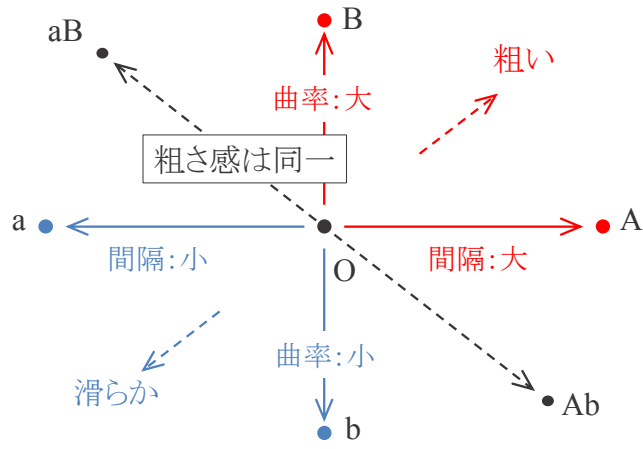


図 4-15 寸法パラメータの変化と粗さ感の変化の関係

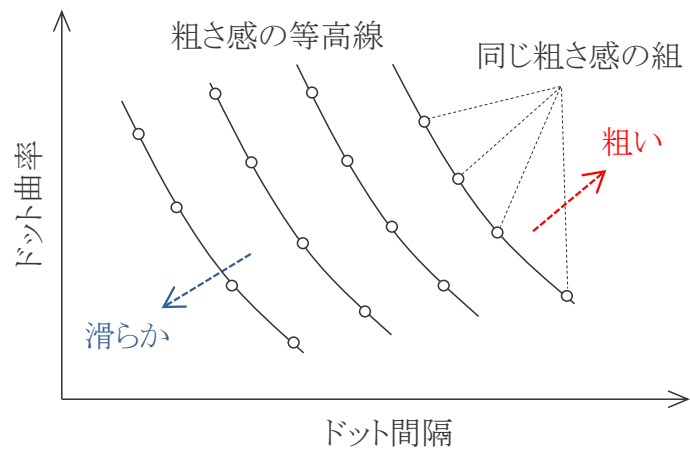


図 4-16 2次元空間における粗さ感の等高線



#### 4. 3. 2 【実験Ⅵ】官能検査実験

##### (1) 粗さ感の等高線の探索

寸法値と感覚量の関係を定量的に示すには、対象となる寸法領域を網羅的に探索する必要がある。しかしながら多種類の試料で一対比較法により感覚量を測定するのは実用上難しい。そこで本研究ではより簡易に全体像を捉える方法として、3D プリンタで製作した寸法パラメータの異なる多種類の試料の中から、同等の粗さ感を持つドット間隔・ドット曲率の組み合わせを選び出すことで、感覚量の等高線を描く方法を試みた。図 4-17 のようにドット間隔が異なる 4 種の試料（以下、基準試料とする）と、これとは異なる曲率を持つ比較対象群（以下、対象試料とする）を用意し、対象試料の中から基準試料と同等の粗さ感を持つ試料を選択させた。対象試料は曲率を変えて 4 セット作成し、それぞれ A 系列、B 系列、C 系列、D 系列とした。曲率は基準試料を含め 5 水準となり、1 つの基準試料から等高線上に位置する 5 点のドット間隔・曲率の組が得られる。基準試料が 4 水準であれば、4 本の等高線が得られる。等高線の数や対象試料の水準を増やすことで探索範囲を容易に拡大できる。

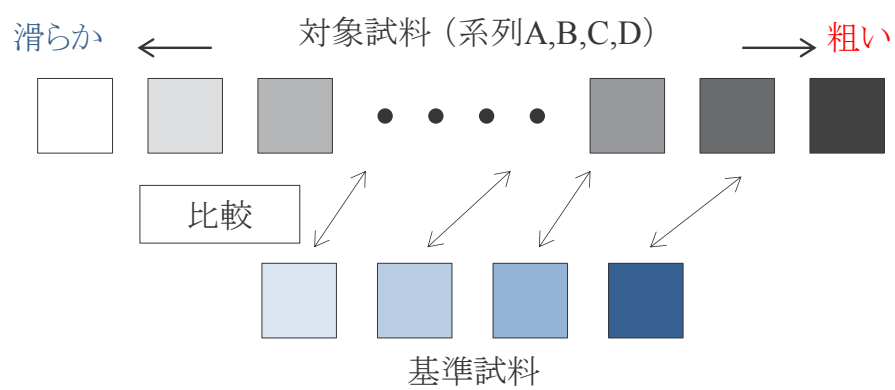


図 4-17 官能検査実験方法

## (2) 実験手順

基準試料 4 枚を左から右に向かって粗くなるようドット間隔順に並べた。その手前に対象試料を左から右に向かって粗くなるようドット間隔順に並べた。被験者に試料を触察して比較させ、4 枚の基準試料の粗さ感がそれぞれ対象試料のどれに最も近いかを回答させた。2 枚の対象試料の中間の回答も認めた。これを A 系列から D 系列まで 4 回繰り返した。右手示指で左右に擦るよう指示した以外は、回数、時間、接触力等は任意とし、被験者が最も比較しやすい方法で触察させた。

すべての回答に要した時間は 5~15 分間程度だった。被験者は 20~50 代の男女 30 名（男性 23 名，女性 7 名）だった。

試料を見ながら触れる場合、テクスチャの視覚的特徴が粗さ感の評価に影響する可能性がある。柳澤ら[62,63]は、試料表面に異なるテクスチャの画像を合成した状態で触感を評価する実験により、視覚が粗さ感に及ぼす期待効果を定量的に評価し、視覚による予測と触感との差が大きいほど、粗さがより強く感じられることを示している。本稿では、物体表面を見ながら手に取る一般的なコンシューマ向け製品を想定したため、視覚については制限しなかった。

### 4. 3. 3 3D プリンタによる試料の製作

4.2 節の方法で曲率の異なる試料を製作した。ドット単体の設計データは、一辺の長さが造形解像度（水平方向 0.0423mm，高さ方向 0.016mm）の整数倍の四角柱とした。データの角柱の太さ（データ幅）によって頂部の曲率を変化させた。ドット高さは、皮膚がドット間の平面に接触しないよう造形後に 0.16mm となるよう設計した。ドット間隔も造形解像度の整数倍とした。基準試料についてはデータ幅を造形解像度の 8 倍 (0.338mm)，ドット間隔を造形解像度の 12, 14, 16, 18 倍の 4 種類とし、それぞれ R<sub>12</sub>, R<sub>14</sub>, R<sub>16</sub>, R<sub>18</sub> と呼称した。対象試料はデータ幅を 4, 6, 10, 12 倍とした。データの角柱間の隙間が小さい場合、隣接するドットの影響を受けてドット高さや曲率が減少するため、造形可能な最小のドット間隔はデータ幅の制約を受ける。本造形例では、データ間の隙間が 0.085mm 以下では形状の崩れが大きくなった。表 4-4 に実験に使用したドットパターン の設計値を示す。試料全体の形状は 48×48mm，厚さ 2.5mm の板で，中央部の 22×34mm の領域にドットパターンを形成した。4.2.1 節と同様の機種・樹脂を用いて造形を行った。

図 4-18 に製作した試料の例を示す。また図 4-19 にレーザ顕微鏡（オリンパス (株) LEXT OLS-4100）で測定したドット形状の例を示す。

表 4-4 ドットパターンの名称と寸法値（設計値）

	ドット幅 (mm)	ドット間隔 (mm)												
		0.38	0.42	0.47	0.51	0.55	0.59	0.63	0.68	0.72	0.76	0.8	0.85	0.89
A系列	0.17	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>13</sub>	A <sub>14</sub>	A <sub>15</sub>	A <sub>16</sub>	A <sub>17</sub>	A <sub>18</sub>	A <sub>19</sub>	A <sub>20</sub>	
B系列	0.25		B <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	B <sub>17</sub>	B <sub>18</sub>	B <sub>19</sub>	B <sub>20</sub>	
基準試料	0.34				R <sub>12</sub>		R <sub>14</sub>		R <sub>16</sub>		R <sub>18</sub>			
C系列	0.42				C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>20</sub>	
D系列	0.51						D <sub>14</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>17</sub>	D <sub>18</sub>	D <sub>19</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>21</sub>



図 4-18 実験VIで使用した試料の外観例

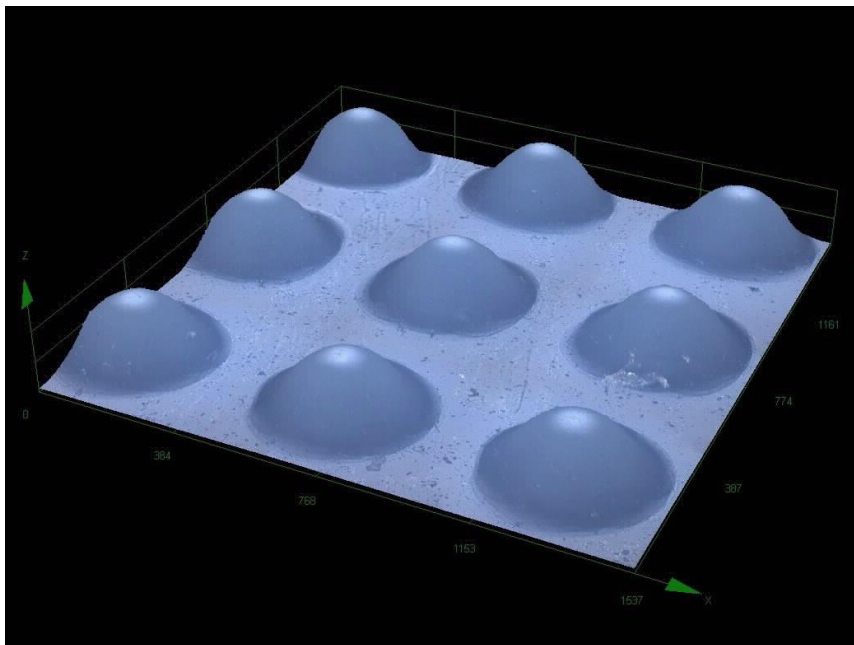
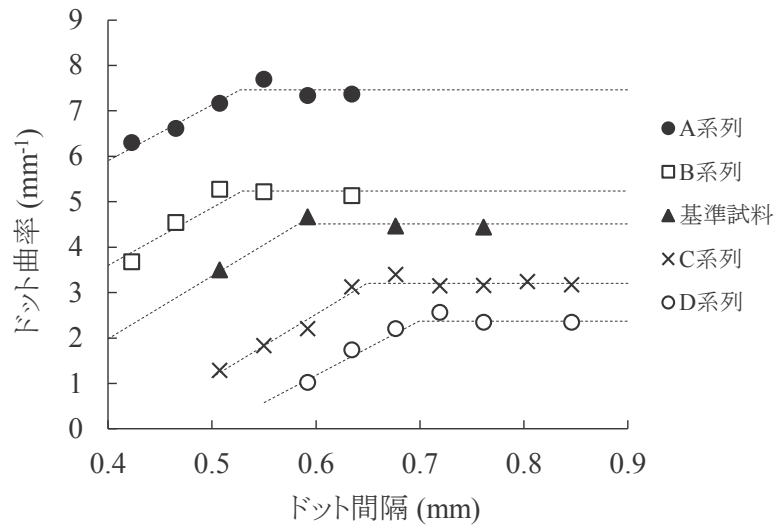


図 4-19 レーザ顕微鏡によるドット形状の測定例  
(ドット間隔  $0.68\text{mm}$ , 曲率  $3.2\text{mm}^{-1}$ )

## 4. 4 結果および考察

### 4. 4. 1 試料の形状

レーザー顕微鏡（オリンパス(株) LEXT OLS-4100）で測定したドット頂部付近（直径の 1/3 程度）の曲率を図 4-20 に示す。ドット間隔が狭い場合，隣接するドットの影響を受けて曲率は小さくなる。この影響はドット間隔に対し線形に現れるため，影響を受ける範囲については曲率は線形近似式に従うものとみなした。影響を受けない範囲については平均値で近似した。以下，各系列の曲率としてこの近似値を用いた。



ドット曲率の近似式

A系列 :  $12.3x + 0.98$  ( $x < 0.527$ ),  $7.46$  ( $x > 0.527$ )

B系列 :  $12.7x - 1.48$  ( $x < 0.529$ ),  $5.24$  ( $x > 0.529$ )

基準試料 :  $13.8x - 3.54$  ( $x < 0.583$ ),  $4.51$  ( $x > 0.583$ )

C系列 :  $13.9x - 5.82$  ( $x < 0.649$ ),  $3.20$  ( $x > 0.649$ )

D系列 :  $12.0x - 6.02$  ( $x < 0.699$ ),  $2.37$  ( $x > 0.699$ )

$x$  = ドット間隔

図 4-20 試料の寸法測定結果

#### 4. 4. 2 【実験VI】官能検査結果と粗さ感の等高線

図 4-21 に全被験者 30 名による官能検査結果の平均値を示す。これは各対象試料において基準試料と粗さ感が同等とされたドット間隔の平均値である。基準試料より曲率が大きい系列(A, B)では基準より小さな間隔が選択され、基準試料より曲率が小さい系列(C, D)では基準より大きな間隔が選択された。2.1 節の予想通り、同等の粗さ感を得るためにドット曲率の変化がドット間隔の変化により補償されたことがわかる。

A~D の 4 系列および基準試料の 5 群の回答結果の平均値に有意差があるか否かを検定するため、 $R_{12} \sim R_{18}$  のドット間隔別に 5 群間の多重比較検定を行った。この結果、図中 n.s. で示す 3 つの群間で有意差 ( $P < 0.05$ ) がみられなかった以外は、全ての群間で  $P < 0.01$  の有意差がみられた。

図 4-21 の各プロットについて、図 4-20 の近似式によりドット曲率を求めることで、同等の粗さ感を示すドット間隔とドット曲率の組合せが得られ、これを平面上に配置したものが等高線図になる。この方法で作成した全被験者平均値による等高線は図 4-22 のようになった。等高線上の点の配置は湾曲した形状になり、曲率が大きい領域では縦縞、小さい領域では横縞になる傾向がみられた。多重比較検定において 3 カ所で有意差がみられなかった理由は、曲率の変化に対するドット間隔の変化が小さい領域で、かつ 2 群間の曲率が近かったためと考えられる。



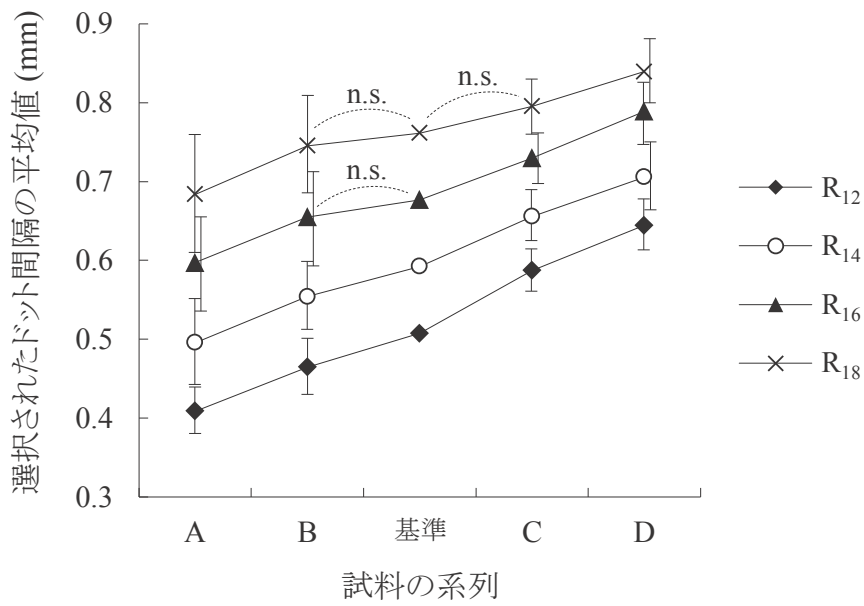


図 4-21 試料の系列と選択されたドット間隔の平均値の関係

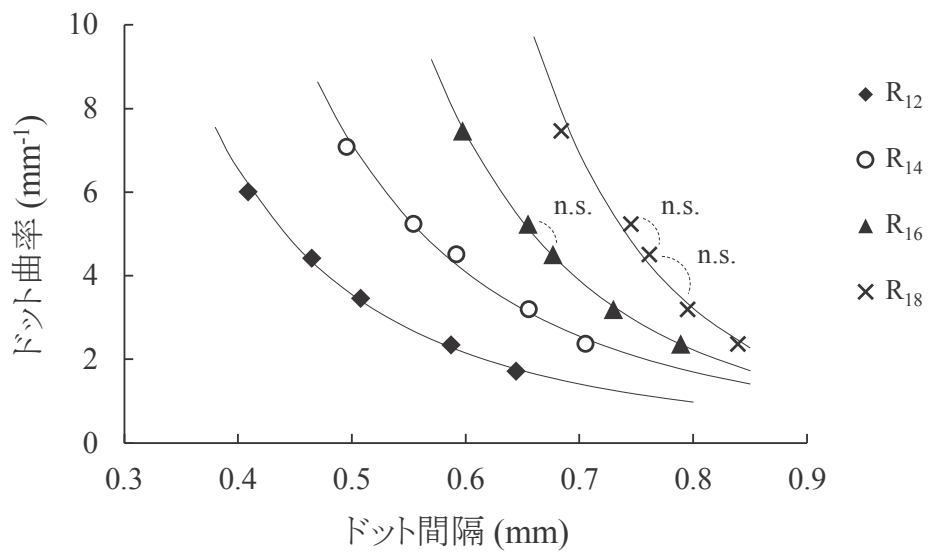


図 4-22 粗さ感の等高線 (全被験者平均値)

### 4. 4. 3 等高線の値付け

上記により等高線の形状は得られるが、各等高線が示す粗さ感の大きさ（等高線の高さ）がわからなければ3次元的な分布はわからない。第3章の結果では、曲率が一定の場合、粗さ感はドット間隔の対数値に比例する傾向がみられた。これに従い、本実験の基準試料においても粗さ感がドット間隔の対数値に比例すると仮定すると、基準試料のドット間隔から  $R_{12} \sim R_{18}$  の4本の等高線の粗さ感の大きさを決めることができる。そこで各等高線の粗さ感の値を基準試料（曲率  $4.51\text{mm}^{-1}$ ）のドット間隔（単位 mm）の対数値で値付けすることとした（便宜的にドット間隔  $\times 10$  の対数値とした）。このように値付けした粗さ感の分布を3次元的に表すと、図 4-23 のようになった。より正確に値付けするには、一対比較法等により基準試料について粗さ感を確定することが望ましい。

#### (1) ドット間隔と粗さ感の関係

曲率別にドット間隔と粗さ感の関係を示すと図 4-24 のようになった。ここでは横軸のドット間隔を対数軸で示している。基準試料と異なる曲率でも、粗さ感とはドット間隔の対数値と概ね線形の関係になった。

#### (2) ドット曲率と粗さ感の関係

同様にドット間隔別にドット曲率と粗さ感の関係を求めると図 4-25 のようになった。横軸のドット曲率は対数軸である。ドット間隔と同様に、粗さ感とは対数値と概ね線形の関係になった。このことから、間隔が一定の場合には粗さ感とはドット曲率の対数値に比例すると予想される。

#### (3) 対数軸による等高線表示

(1), (2)を踏まえ、図 4-22 の等高線を対数軸で表示すると、図 4-26 のように、等高線上の点はほぼ直線状に並び、一次近似式は実験値と高い相関がみられた。図中にこの近似式による近似曲線を示す。

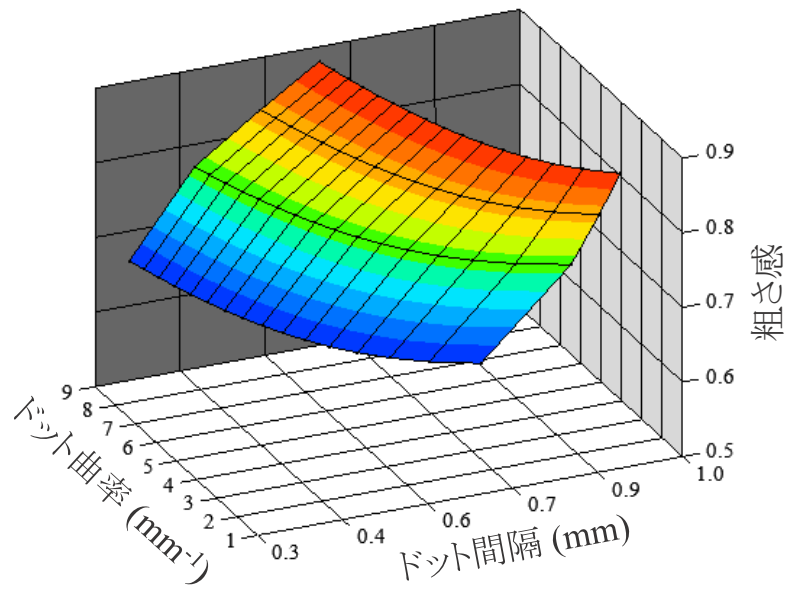


図 4-23 等高線から描いた粗さ感の 3 次元分布

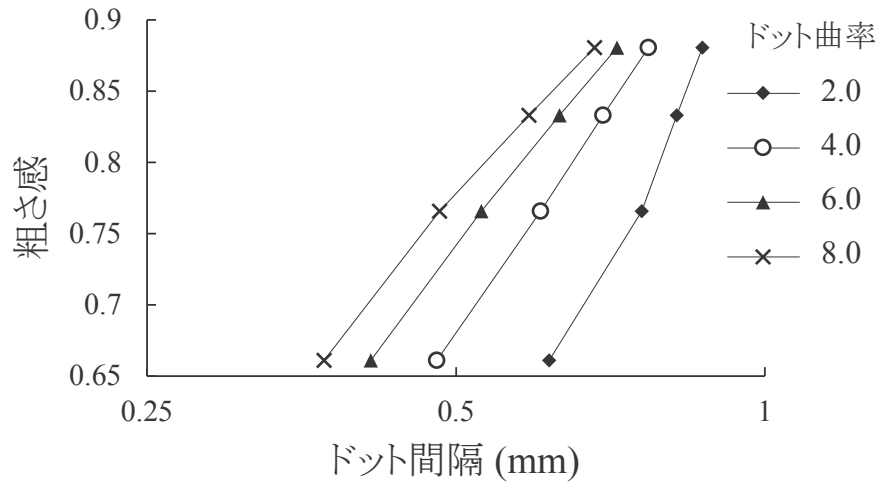


図 4-24 等高線から予想されるドット間隔と粗さ感の関係

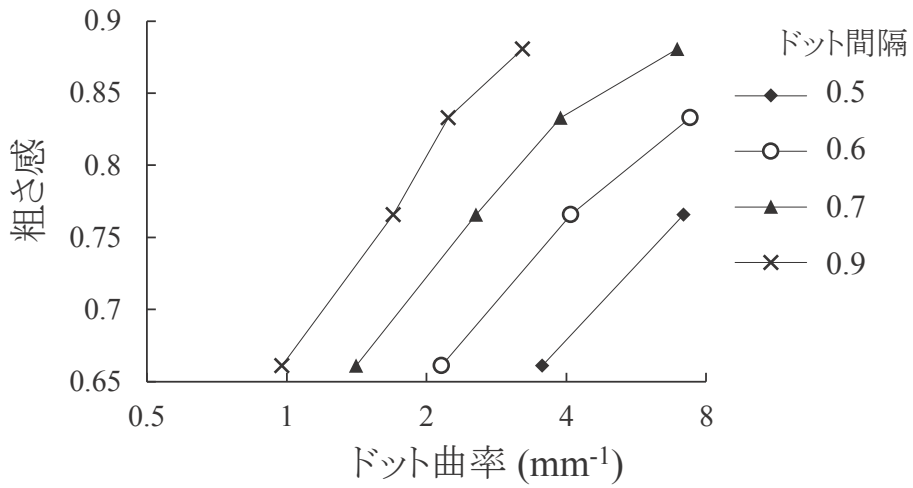


図 4-25 等高線から予想されるドット曲率と粗さ感の関係

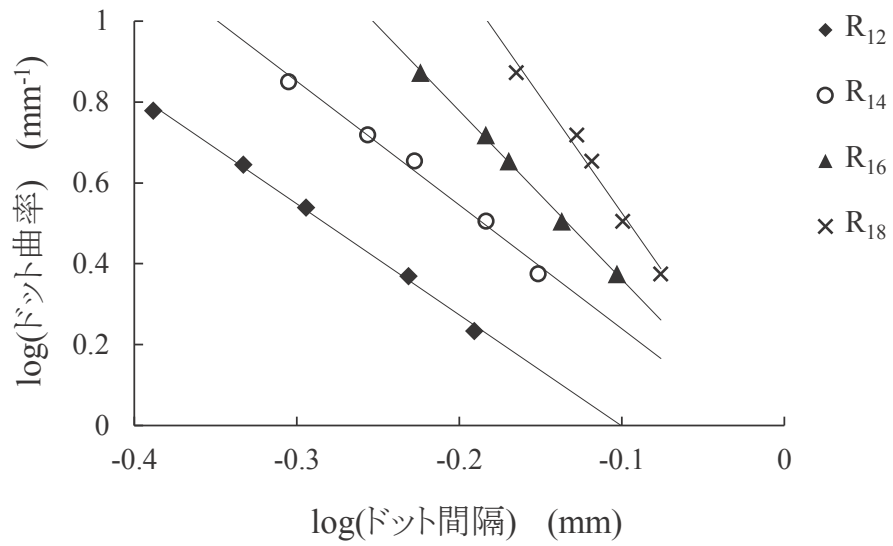


図 4-26 対数軸で表示した等高線 (全被験者平均値)

#### 4.4.4 粗さ感の推定式

図 4-24 から 4-26 の結果を踏まえると、図 4-23 に示した粗さ感の曲面はドット間隔（対数）・ドット曲率（対数）・粗さ感を 3 軸とする 3 次元空間では図 4-27 のような平面に近い姿であると予想される。したがってこの平面の近似式を求めることで、ドット間隔とドット曲率から粗さ感を推定することができる可能性がある。平面の場合、 $z$  は  $x, y$  の線形和の形で表されるため、ドット間隔（対数）とドット曲率（対数）の実験値に対して重回帰分析を行い、粗さ感の推定式（式）を得た。

Roughness sensation

$$= 1.06 \times \log(\text{Dot spacing}) + 0.30 \times \log(\text{Dot curvature}) + 0.82 \quad \text{式 4-3}$$

この式で粗さ感を定数とすると等高線の式が得られる。推定結果の等高線を実験結果と重ねると図 4-28 のようになった。両者は概ね一致するものの  $R_{18}$  など一部で推定結果に偏りが生じている。このずれは、推定に用いた平面近似の誤差を表している。

式(1)に従うと、実験結果の図 4-24、図 4-25 はいずれも平行な直線になるはずであるが、図 4-24 は上部の間隔が下部より狭くなっており、図 4-25 は若干湾曲する傾向がみられる。また対数値で示した図 4-26 において、等高線は平行ではなく、粗さ感が大きくなるに従って傾きが大きくなっている。このことから、ドット間隔とドット曲率の影響力のバランスは常に一定ではなく、粗さ感の大きさや寸法領域によって変化することが示唆される。このように詳細にみた場合、粗さ感単独の線形和とはいえず、推定精度を上げるにはより複雑な近似曲面が必要になる。しかしながら、前項での粗さ感の値付けの精度や、実験結果の個人差が大きいことなど、推定に用いた値の精度を考慮すると、これ以上の詳細な検討は難しいと思われる。

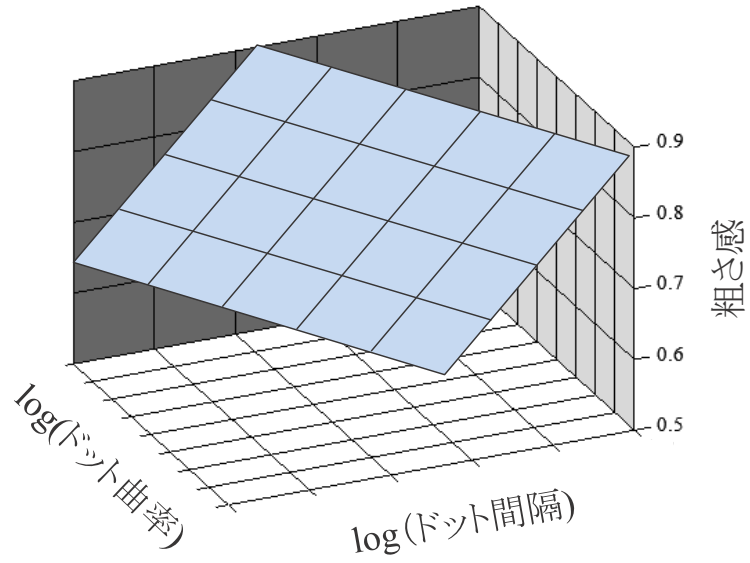


図 4-27 対数軸の空間における粗さ感分布のイメージ

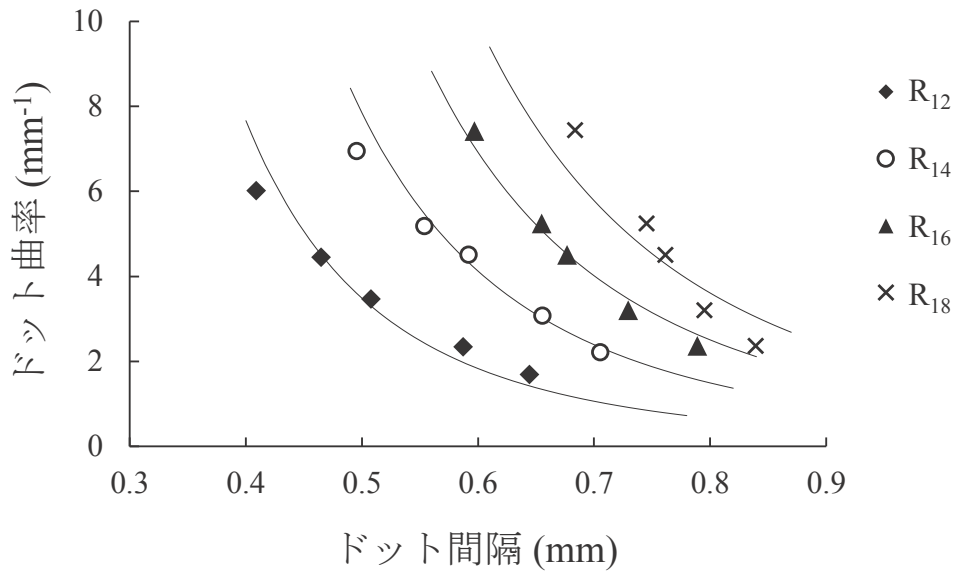


図 4-28 推定式から描いた等高線と実験値の比較

この結果について既知の知見との関連性を検討する。触覚受容器による粗さ知覚に関する先行研究は多く、刺激の時系列変化に対する各受容器の応答特性などが明らかにされている。近年の例では、田中ら[64]は、指腹部に振動子を当て、振幅や周波数を変化させる実験により、粗さ感のピークがマイスナー小体の感度域（50Hz 前後）とパチニ小体の感度域（200Hz 前後）に現れることを示すとともに、ピークが現れる帯域は被験者により異なり（前者のみ/後者のみ/両方）、粗さの判断に個人差があることを示した。また田中ら[65-67]は、受容器の応答に似た高周波の圧電効果をもつポリフッ化ビニリデンフィルムによる触感センサを開発し、これを布の評価に適用した実験[68]では、マイスナー小体の応答に相当する 20~100Hz（波長 0.75~3.75mm に相当）のパワースペクトル密度の大きさが、粗さの官能評価結果と強い相関をもつことを示した。数値計算によるアプローチとして、白戸ら[35,36]は、有限要素法により触察時に皮膚内に生じるひずみエネルギーの分布を求め、触覚受容器の位置におけるその時空間分布パターンから、低周波の凹凸情報はメルケル小体、凹凸パターンはマイスナー小体、高周波の粗さや摩擦振動はパチニ小体によって検出されることを示した。このモデルで入力する周波数を変化させた場合、本稿の実験範囲が含まれる数 10~100Hz の帯域では凹凸を感じるマイスナー小体の応答が周波数の対数値に対して線形に減少する。

本実験結果を刺激の時系列変化の視点から検討すると、周波数はドット間隔と逆数の関係になるため、式 4-3 においては係数の正負が逆転し、粗さ感はずり周波数の対数値に対し負の線形性を持つことになる。これは上記解析によるこの帯域のマイスナー小体の応答特性と一致する。また定量的な評価は難しいが、ドット曲率は皮膚表面の変形を通して振動の振幅に影響すると考えられ、式 4-3 における各項は、受容器への物理的入力としては、それぞれ周波数成分と振幅成分に対応すると考えられる。

以上のように、線形で近似したことによる誤差が含まれるものの、本実験の範



囲においては、ドット頂部の曲率とドット間隔のそれぞれ対数値の線形和の形で粗さ感の概形は表現できると考えられる。

#### 4.4.5 個人差の検討

被験者により回答結果に差がみられ、ドット曲率の違いに対してドット間隔が大きく変化する被験者と、変化が小さい被験者、さらに回答の傾向にばらつきがみられる被験者があった。そこで全ての回答結果によりクラスター分析を行い、被験者を4つのグループに分類した。グループ別に平均値の等高線を求めると図4-29のようになった。グループにより等高線の形状が異なり、グループA(8名)は曲率変化に対してドット間隔の変化が小さいグループ、グループC(5名)は曲率変化に対してドット間隔の変化が大きいグループ、最も人数の多いグループB(10名)はAとCの間と考えられる。グループD(7名)については回答結果が不規則で、対象試料の系列間の順位が逆転が多くみられた。これは粗さ感の決定基準が安定していないものと考えられる。A, B, Cの違いはパラメータの重み付けの違いによると思われる、グループAは粗さ感を評価する過程でドット間隔の違いを重視する間隔重視型、それに対しグループCはドット曲率を考慮する形状重視型、グループBはその間の中間型と考えることができる。大まかな人数比は、間隔主導型と中間型がそれぞれ約3割、形状主導型が約2割で、残りの約2割が不安定型である。同じドットパターンであっても異なった基準で粗さが知覚されていると考えられ、これがより上位の触感評価の個人差につながる可能性がある。

この傾向の違いを数値で表すため、各グループの平均値について前項と同様の方法で粗さ感の重回帰式を求めたところ、各項の係数は表4-5のようになった。ドット間隔の係数がどのグループもほぼ1であるのに対し、ドット曲率の係数はグループA<B<Cの順に変化している。これらの値からも、粗さ感が決定する過程で、グループCはグループAよりドット曲率を重視していると考えること

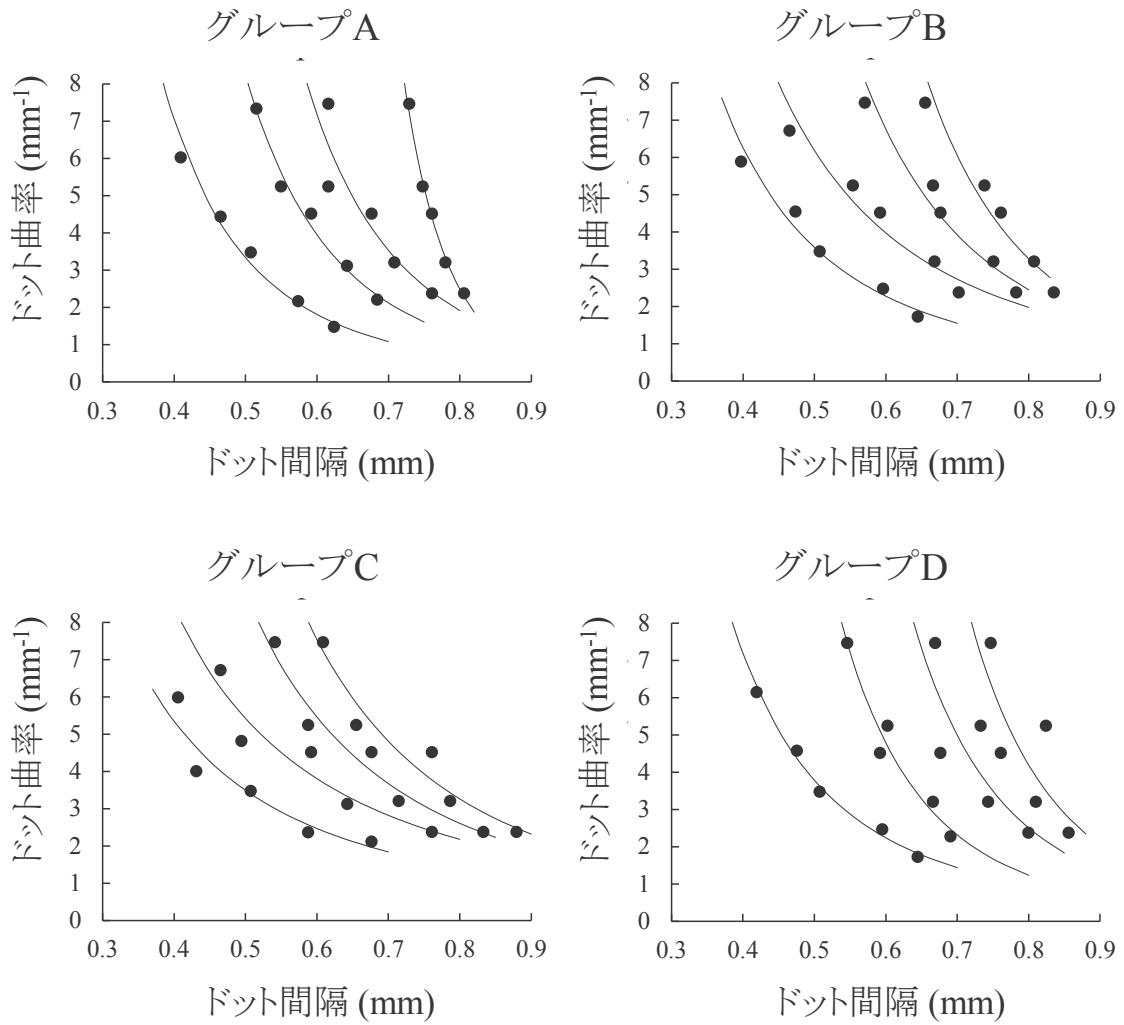


図 4-29 被験者グループによる等高線パターンの違い

表 4-5 被験者グループによる回帰係数の違い

	Aグループ	Bグループ	Cグループ
ドット間隔	1.02	1.02	1.01
ドット曲率	0.23	0.33	0.42
定数項	0.86	0.8	0.75

ができる。この違いは、曲率の違いを検知できる能力の個人差による可能性も考えられる。

本実験では同一被験者による繰り返しを行っていないため、ここでみられた被験者間の違いが試行毎のばらつきに起因するものか、被験者固有のものかは判断できない。被験者固有の要因としては、皮膚の物理的特徴（厚さ、指紋の形状、柔軟性等）の違いが前項に挙げた皮膚表面における感覚受容メカニズムに与える影響や、田中らが示した粗さ感の判断基準となる周波数の違い、触察方法（接触力、速度）による接触条件の違いなどが考えられる。本稿では検出感度を重視して触察方法は自由としたが、接触力や速度により寸法パラメータが粗さ感に与える影響力が異なる可能性もある。被験者間の違いの要因については今後の検討課題である。

#### 4. 4. 6 本実験結果の適用範囲

本実験結果が適用できる条件について、触察方法の能動性と、感覚モダリティの観点から検討する。

刺激の周期が粗さ感に及ぼす効果については、触察方法が能動的（アクティブタッチ＝指を動かす）か受動的（パッシブタッチ＝試料側を動かす）かにより異なったものになる。速度が一定であれば両者の差は小さいとされる[69]が、速度を変えた場合、前者では速度に応じて粗さ感が変化する一方、後者では異なる速度でも同一の粗さとして知覚できる[70]。これはアクティブタッチでは速度に伴う振動パワーの変化が自己受容感覚により補正されるためと考えられている。本稿では指と触察方向以外は制約しなかったため、結果の適用範囲はアクティブタッチに限定される。パッシブタッチにおいてはドット間隔だけでなくドット曲率の効果も速度の影響を受ける可能性があるため、パッシブタッチで同様の実験を行った場合、等高線パターンには接触力、速度等に依存した偏りが生じる可能性がある。

感覚モダリティの観点からは、本実験は視覚＋触覚の条件に当たり、視覚による期待効果が含まれるため、異なる感覚モダリティには直接適用できない。視覚の影響の大きさについては、試料が透過性のある乳白色のため実験環境では外観の差がほとんど感じられなかったことや、基準試料と対象試料とを往復しながら比較したことを考慮すると、比較的小さいと推定される。このため視覚を遮断した実験でも近い結果になると考えられる。試料の外観や視覚の影響が制御された実験方法を採用することで、等高線パターンの上でも視覚の効果を示せる可能性がある。

## 4.5 結言

3D プリンタで製作した多種類の試料を用いて、これらの中から同等の粗さ感をもつ試料を選び出し、寸法パラメータの空間上に粗さ感の等高線を描く方法で、ドット間隔とドット曲率を変化させた場合の粗さ感の分布を調査した。実験から以下の結果が得られた。

- (1) ドットの曲率が異なる試料群から粗さ感が同等のものを選び出す実験により、同等の粗さ感を持つドット曲率・ドット間隔の組合せが複数得られ、2軸のパラメータ空間上に粗さ感の等高線を描くことができた。
- (2) 粗さ感を基準試料のドット間隔の対数値により値付けしたところ、ドット曲率の対数値と粗さ感とが線形の関係になることがわかった。ドット間隔・ドット曲率のそれぞれ対数値から粗さ感を推定する重回帰式が得られた。
- (3) 等高線の形には大きな個人差がみられ、被験者によりドット曲率の重み付けが異なることがわかった。被験者を3グループに分類したところ、グループ間で寸法パラメータ間の重み付けに違いがみられた。

本検討により、ドット間隔とドット曲率の組合せがどのような粗さ感を生じるかを明らかにできた。ここで得られた知見は、ドットパターンやこれに類似するテクスチャの設計指針として活用できると考えられる。



## 第5章

### 結 論





## 5.1 各章の検討結果

本章では本論文の成果をまとめ、結論と今後の展望について述べる。本研究では樹脂表面テクスチャの質感制御に資する設計指針を示すため、テクスチャの物理的寸法とプリミティブな触感因子との関係を知る必要があるという考えに基づき、ドットパターンを対象にテクスチャの寸法パラメータと触感、特に樹脂面で支配的となる粗さ感との関係を明らかにすることを目的に各種の実験的検討を行った。ドットパターンの粗さ感の決定要因となる寸法パラメータについて順次実験し、以下に示す関係を明らかにした。

- ・第2章 ドット間隔・直径と粗さ感の関係
- ・第3章 ドット間隔・高さと粗さ感の関係
- ・第4章 ドット間隔・曲率と粗さ感の関係

第2章では本研究における最初の検討として、樹脂製のドットパターンテクスチャにおいてどのような触感表現が可能かを調査するため、基本的な触感因子(粗滑感・硬軟感・温冷感・摩擦感)の全てを対象に官能検査を行った。寸法パラメータのうちドット間隔・ドット直径を変化させ、各触感因子との関係を調査した。本章では、触察/目視の2通りの感覚モダリティを対象とし、モダリティによる決定要因の違いについて検討した(実験I, II)。試料として6種類のドットパターンを用いた。試料は通常のデジタルシボによる製品と同様に、切削加工によりパターンを形成した金型を用い、ABS樹脂を射出成形して製作した。粗滑感・硬軟感・温冷感・摩擦感に相当する8項目の質問について一対比較法により感覚量を求めた。実験の結果、いずれの実験でも粗滑感については試料間で明確な違いがみられた一方、硬軟感や温冷感といった素材物性に依存する因子では差が小さかった。因子分析の結果、被験者は粗滑感を軸とする単一の印象に従って回答していることが確認された。このため以後は因子分析の第1因子をそれぞれ「触

察粗さ感」「目視粗さ感」として粗さ感について検討を行った。両者の間には相関は見られなかった。次にそれぞれの粗さ感と寸法パラメータや物理量の関係について検討した。目視における刺激を定量化するため、2次元色彩輝度計により試料表面の詳細な輝度分布を測定した。この結果からマイケルソンコントラストをはじめとする特徴量を算出した。これらの結果から、触察粗さ感はドット間隔と、目視粗さ感はドット直径およびコントラストと高い相関を持つことがわかった。触察時の粗さ感についてはドット間隔を手掛かりに判断されると考えられる。ここではドット直径（高さ・曲率）の影響はみられなかったが、これは本実験の寸法領域が、ドット高さに対してドット間隔が密な領域に偏っていたために、高さや曲率の影響が現れなかった可能性がある。目視による粗さ感については、主にドット直径から決まるコントラスト等の光学的特徴を手掛かりに判断されると考えられる。また空間周波数の影響は明らかでなく、平面的な配置の様態は“視覚的な粗さ感には結びつきにくいと考えられる。これらの結果は先行研究の知見とも一致する。本章の実験により粗さ感と寸法値の間に線形の関係がみられ、現行技術で設計値により粗さ感の調整が可能であることが確認できた。触察と目視とでは粗さ感に結びつく寸法要因が異なることから、設計値を個別に設定することで、見た目と触れた際の印象を任意に調整するなど、樹脂製品製造の視点からこれを製品の印象制御に応用し得る可能性がある。

第3章では、第2章の結果を踏まえ、高さの影響に絞って検討した。触察時に物体に押付けられた指の皮膚表面は、ドット間のすき間に入り込む形で変形し、この際に皮膚内に生じる歪み分布が触覚受容器への入力刺激となる。皮膚の変形はドット間の平面部に接触（底付き）することで制限され、ドットが高くなり皮膚表面が平面部に届かなくなるとドット高さの影響を受けなくなる（粗さ感が飽和する）と予想される。第3章ではこのモデルを実験により検証し、ドット高さの影響や底付きが生じる寸法条件を具体的に示すことを目的に行った。試料は第2章と同様に金型を製作し、ABS樹脂を射出成形して製作した。曲率の影響を除

くため、ドットの曲率半径は R0.3mm に固定し、ドット間隔・高さを変化させた 9 種類のドットパターン試料を作成した。官能検査は触察による粗さ感のみとし、一対比較法により粗さ感の感覚量を評価した (実験Ⅲ)。実験の結果、ドット高さが低い領域ではドット間隔に従って粗さ感が増加する一方、ドットが高い領域では粗さ感が頭打ち状態になり、予想された底浮きによる粗さ感の飽和が確認された。底付きが生じる領域と生じない領域とで粗さ感の決定要因が異なり、底付きする領域では粗さ感はドット高さに従い、底付きしない領域ではドット間隔に従って変化することがわかった。各試料について底付きの有無を判定したところ、ドット高さ/間隔の比が  $1/35 \sim 1/24$  の寸法領域を境界に底付きが発生すると推定された。これをさらに詳しく検証するため、2 点識別法による実験Ⅳを行った。実験Ⅲの結果、ドット間隔 0.6mm では高さ  $25 \mu\text{m}$  付近で底付きが生じると考えられたため、検討対象をこの寸法域に絞り、ドット高さが  $15 \mu\text{m}/35 \mu\text{m}$  と  $25 \mu\text{m}/45 \mu\text{m}$  の 2 組の試料を用意し、それぞれについて粗さの識別の可否を検査した。その結果、ドット高さ  $15 \mu\text{m}/35 \mu\text{m}$  の組では過半数の被験者が判別できた ( $p < 0.01$ ) 一方、ドット高さ  $25 \mu\text{m}/45 \mu\text{m}$  の組では判別できた被験者と有意差なしの被験者が拮抗しており、ドットが高い組では識別が困難になることがわかった。このことからドット間隔 0.6mm では底付きが生じるドット高さが概ね  $25 \mu\text{m}$  付近にあることが確認できた。さらに、触察時の皮膚変形量の視点から、以上の実験結果の妥当性を検証するため、ドット間に入り込む皮膚の変位量を測定できる装置を製作し、触察動作中の皮膚の変形量を直接計測する実験 (実験Ⅴ) を行った。実験の結果、皮膚の変位量が接触荷重に対し線形に増加することや、被験者によりその傾きに 3 倍程度の違いがあることがわかった。10 名の平均値により、ドット間隔 0.6mm では、皮膚表面はドット中央部で最大  $37 \mu\text{m}$  程度変位することがわかった。これは実験Ⅲ、Ⅳで推定した値より  $10 \mu\text{m}$  程度大きく、多くの被験者ではドット高さ  $37 \mu\text{m}$  以下で物理的な底付きが生じると推定される。この差については、ドット高さ  $25 \mu\text{m}$  付近から  $37 \mu\text{m}$  付近では底付

きの頻度・接触面積・力が減少するため、物理的には触れていても感覚上は違いが感じられないと考えることができ、感覚量からの底付きの推定結果と物理測定による皮膚の変形量の測定結果とは概ね整合すると結論した。

第4章では、第2章、第3章で明らかでなかったドット曲率の影響について検討した。ここでは試料の作成にインクジェット式3Dプリンタを使用した。3Dプリンタでは多種類のパターンを容易に作成できるため、この特長を活かして新たな実験方法を試みた。寸法領域は底付きが生じない範囲とし、ドット間隔とドット曲率を変化させた場合の粗さ感の分布を実験的に求めた(実験VI)。実験方法として、数段階のドット曲率について、ドット間隔を僅かずつ変化させた多数の試料を用意し、曲率の異なるグループの中から基準として示した試料と同等の粗さ感を示すものを選択させる官能検査を行った。この実験では粗さ感の変化を補償するため、曲率が大きくなるほど選択されるドット間隔が小さくなると予想される。本手法によりドット間隔・ドット曲率を2軸とする平面上に粗さ感の等高線を描くことができる。実験の結果、曲率が大きいほど選択されるドット間隔が小さくなる傾向が明確にみられ、予想通りドット曲率の変化がドット間隔により補償されることが確認できた。ドット間隔・ドット曲率の平面上では、等高線は大きく湾曲する形になった。粗さ感を基準試料のドット間隔の対数値により値付けしたところ、ドット曲率の対数値と粗さ感とが線形の関係になることがわかった。重回帰式によりドット間隔・ドット曲率のそれぞれ対数値から粗さ感を推定する推定式を求めたところ、これによる実験結果と概ね一致する等高線パターンが得られた。このことからドット間隔とドット曲率の組合せによる粗さ感は、それぞれの対数値の線形和の形で表されると考えられる。等高線の形には大きな個人差がみられた。被験者を3グループに分類したところ、グループ間で寸法パラメータ間の重み付けに大きな違いがみられ、粗さ感を判断する過程でドット間隔を重視する者とドット曲率を考慮する者がいることがわかった。この違いは、曲率の違いを検知できる能力の個人差による可能性も考えられる。同一被験者による線

り返しを行っていないため、ここでみられた被験者間の違いが試行毎のばらつきに起因するものか、被験者固有のものかは判断できなかった。被験者固有の要因としては、皮膚の物理的特徴（厚さ、指紋の形状、柔軟性等）の違いが前項に挙げた皮膚表面における感覚受容メカニズムに与える影響や、触察方法（接触力、速度）の違いなどが考えられる。接触力や速度により寸法パラメータの重みづけが変化する可能性もある。これらの条件の違いの要因については今後の検討課題である。

## 5.2 本研究結果の活用の可能性

### 5.2.1 本研究結果の位置付け

本研究における一連の検討により、ドットパターンについて寸法パラメータを網羅する形で寸法パラメータと粗さ感の関係について明らかにすることができた。第1章で述べた触感の階層構造に対応させると、本成果の位置付けは図5-1のように示される。水平方向の配置間隔、ドット高さ、ドット曲率の3種類の寸法要因に分解して考えることで、それぞれの寸法が触感に与える影響や、触感が判断される過程における寸法間の重み付けの違いなどを明らかにできた。触感が決定する全体の構造に対しては限定的な範囲ではあるが、これらの一つひとつがテクスチャパターンの設計指針になるといえる。今後、他の触感因子や、高次の触感が決定する製品個別の構造などの知見を蓄積することで、触感のコントロールの範囲が拡大することを期待される。

### 5.2.2 本研究結果の適用範囲と応用の可能性

本研究結果はドットパターンによるものであるが、これとは異なるパターンについても、凹凸の周期、高さ、先端形状といった形状特徴についてある程度の範囲で一般化が可能であると考えられる。これについては例えば皮革パターンから寸法特徴量を抽出し、粗さ感との関係について明らかにするなどの検証実験が望まれる。テクスチャに規則的な周期性がない場合、水平方向の周期についてはJISの粗さ規格における要素の平均長さ(RSm)、高さについては算術平均粗さ(Ra)等の粗さパラメータを利用して特徴量を抽出するなどの方法が考えられる。素材の違いに対しては、金属における周期的な切削痕や、木材における木目等、皮膚に対して弾性率が十分に大きく、変形が無視できるものについては形状要因が本研究と同様に作用すると考えられ、粗さ感の類推が可能と予想される。

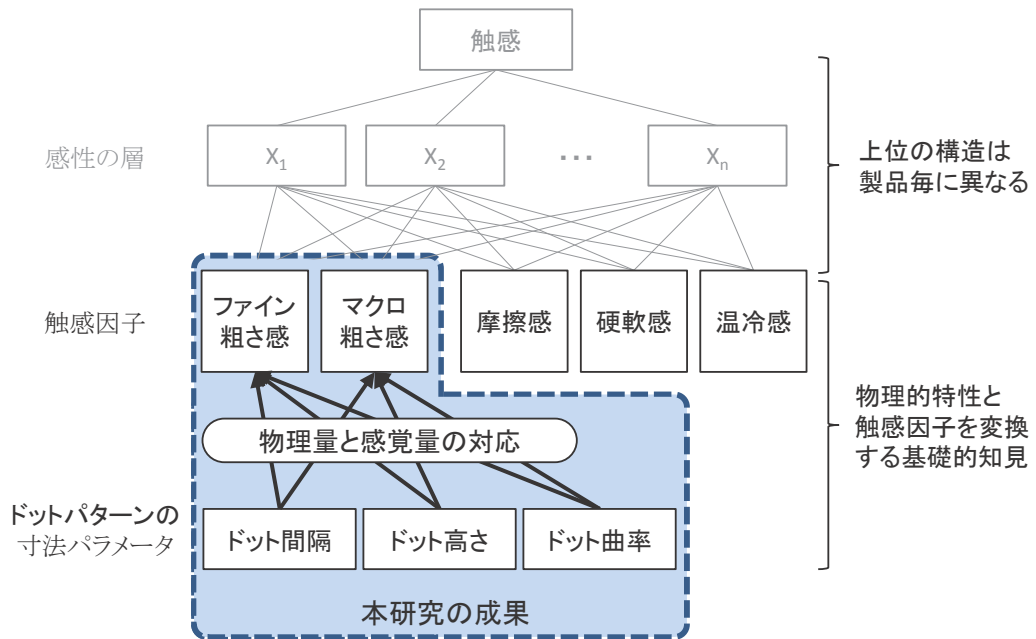


図 5-1 本研究成果の範囲

本研究で明らかになった寸法と粗さ感の関係から、感覚量を物理量で表現する粗さ感標準を作ることができる。例えば粗さ感と相関の高いドット間隔は、粗さ感を示す物理的尺度として活用できる。第4章の実験のように、ドット間隔のみを変化させた一連のドットパターンを粗さの基準として用意し、対象テクスチャとの触感を比較することで粗さ感の値付けが可能である。従来の工業規格による面粗さに代わり、感覚量を物理的な基準に落とし込んだ粗さ感の標準(モノサシ)を介することで、設計者間・工程間・企業間で粗さ感について定量的な意思疎通が可能になると期待される。

第4章で用いた、等高線によるパラメータの重み付けの評価方法は、複数のパラメータに対する平均的な応答やその個人差を簡易な実験で評価する手段として、今後の触感研究に活用できる。



## 参考文献

- 1 日精樹脂インジェクション研究会：知りたい射出成形，ジャパンマシニスト社，pp. 15-16（1986）
- 2 経済産業省：平成 29(2017)年工業統計表 品目別統計表データ，1. 製造品に関する統計表，（2017）
- 3 長野県企画振興部情報政策課統計室：平成 29 年(2017 年)工業統計調査結果報告書，pp. 25（2018）
- 4 長野県企画振興部情報政策課統計室：平成 29 年(2017 年)工業統計調査結果報告書，pp. 105（2018）
- 5 前野隆司：触覚のモデリングと有限要素解析，日本バーチャルリアリティー学会論文誌，Vol. 9, No. 2, pp. 72-77（2004）
- 6 X.Chen, C.J.Barnes, T.H.C Childs, B. Henson and F. Shao：Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design design, Materials and Design, Vol. 30, pp. 4299-4310（2009）
- 7 X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs and B. Henson：Exploring Relationships between Touch Perception and Surface Physical Properties, International Journal of Design, Vol. 3, No. 2, pp. 67-76（2009）
- 8 S. Okamoto, H. Nagano and Y. Yamada: Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 6, No. 1, pp. 81-93（2012）
- 9 秋元英郎：プラスチックの加飾技術，表面技術，Vol. 67, No. 5, pp. 232-236（2016）
- 10 伊藤英樹：金型づくりを考慮したプラスチック設計 第 9 回 表面性状，型技術，Vol. 33, No. 3, pp. 94-97（2018）

- 11 青山英樹：射出成形品表面に意匠性を付与するための金型仕上げの技術動向，型技術，Vol. 25， No. 6， pp. 18-29 (2010)
- 12 曾我部三志，青田久男：成形用金型へのセラシボ加工技術，型技術，Vol. 28， No. 2， pp. 23-27 (2013)
- 13 秋元英郎：加飾しない加飾 シボ加工による加飾技術と高転写成形技術，型技術，Vol. 28， No. 2， pp. 18-22 (2013)
- 14 三浦憲二郎，臼杵深：デジタルデータに基づくシボ加工技術と ModelingNano プロジェクト，精密工学会誌，Vol. 82， No. 11 (2016)
- 15 鈴木宏正，原雄司，瀬戸康史，森田修史：革シボのデザイン及び加工のデジタル化に関するフィージビリティスタディ，2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp. 161-162 (2010)
- 16 檜山剛士，D3 テクスチャーを利用した新しいモノづくり：型技術，Vol. 28， No. 2， pp. 32-35 (2013)
- 17 古瀬雄也：5 軸レーザー加工機によるシボ加工のデジタル化，電気加工学会誌，Vol. 45， No. 108， pp. 86-90 (2011)
- 18 三浦憲二郎：デジタルデータを用いたシボ加工システム，型技術，Vol. 28， No. 2， pp. 28-31 (2013)
- 19 上端純平，大竹 豊，鈴木宏正：テクスチャ合成を用いた絞デザインの合成に関する研究，2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2009)
- 20 青山英樹，中塚暁志：デジタルスタイルデザインに関する研究ーシボ(テクスチャ)デザインシステムの開発，精密工学会誌，Vol. 75， No. 7， pp. 847-852 (2009)
- 21 中塚暁志，青山英樹：シボ(テクスチャ)デザインシステム基礎開発，2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp. 27-28 (2006)
- 22 中塚暁志：シボデザインシステムの開発基礎研究，型技術，Vol. 20， No. 15， pp. 10-11 (2005)

- 23 S. J. Lederman : Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure, *Perception & Psychophysics*, Vol. 16, No. 2, pp. 385-395 (1974)
- 24 C. J. Cascio and K. Sathian : Temporal Cues Contribute to Tactile Perception of Roughness, *Journal of Neuroscience*, Vol. 21, No. 14, pp. 5289–5296 (2001)
- 25 M. Hollins and S. R. Risner : Evidence for the duplex theory of tactile texture perception, *Perception & Psychophysics*, Vol. 62, No. 4, pp. 695-705 (2000)
- 26 C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips and K. O. Johnson : Tactile Roughness: Neural Codes That Account for Psychophysical Magnitude Estimates, *Journal of Neuroscience*, Vol. 10, No. 12, pp. 3823-3838 (1990)
- 27 C. E. Connor and K. O. Johnson : Neural Coding of Tactile Texture: Comparison of Spatial Temporal Mechanisms for Roughness Perception, *Journal of Neuroscience*, Vol. 12, No. 9, pp. 3414-3426 (1992)
- 28 D. T. Blake, S. S. Hsiao and K. O. Johnson : Neural Coding Mechanisms in Tactile Pattern Recognition: The Relative Contributions of Slowly and Rapidly Adapting Mechanoreceptors to Perceived Roughness, *Journal of Neuroscience*, Vol. 17, No. 19, pp. 7480–7489 (1997)
- 29 T. Yoshioka, B. Gibb, A. K. Dorsch, S. S. Hsiao and K. O. Johnson : Neural Coding Mechanisms Underlying Perceived Roughness of Finely Textured Surfaces, *Journal of Neuroscience*, Vol. 21, No. 17, pp. 6905–6916 (2001)
- 30 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿 : ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, *日本機械学会論文集(C編)*, Vol. 63, No. 607, pp. 881-888 (1997)
- 31 小林一三, 前野隆司: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第2報), *日本機械学会論文集(C編)*, Vol. 64, No. 628, pp. 4798-4805 (1998)

- 32 小林一三, 前野隆司: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第3報), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 65, No. 636, pp. 3321-3327 (1999)
- 33 前野隆司, 山田大介, 佐藤英成: 人指紋形状の力学的意味, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 71, No. 701, pp. 245-250 (2005)
- 34 昆陽雅司, 中本雅崇, 前野隆司, 田所諭: ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 3-10 (2006)
- 35 白土寛和, 前野隆司: ヒト指の構造と触覚認識機構のモデリング, 計測と制御, Vol. 45, No. 12, pp. 1005-1009 (2006)
- 36 白土寛和, 昆陽雅司, 前野隆司: ヒトの触感認識機構のモデル構築, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 733, pp. 2514-2522 (2007)
- 37 E. M. Meftah, L. Belingard and C. E. Chapman: Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch, *Exp Brain Res*, Vol. 132, pp. 351-361 (2000)
- 38 伴アカネ, 田村谷誠, 竹内貴司, 姜蓮伊, 藤本英雄, 佐野明人, 望山洋, 武居直行, 田中由浩: 特許第 5253103 号 車両用内装部品 (2010)
- 39 川堰宣隆, 藤井美里, 清水孝晃, 関口徳朗, 住岡淳司, 土肥義治: マイクロ加工を応用した風合いを有するプラスチック成形品の開発, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 81-82 (2012)
- 40 川堰宣隆, 藤井美里, 清水孝晃, 関口徳朗, 住岡淳司, 土肥義治: マイクロ加工を応用した風合いを有するプラスチック成形品の開発(第2報), 2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 325-326 (2013)
- 41 川堰宣隆, 藤井美里, 清水孝晃, 関口徳朗, 住岡淳司, 土肥義治: マイクロ加工を利用したプラスチック成形品の触覚制御ー各種テクスチャの特性評価ー, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 7, pp. 692-698 (2014)

- 42 N.Kawasegi, M. Fujii, T. Shimizu, N. Sekiguchi, J. Sumioka and Y. Doi :  
Evaluation of the human tactile sense to microtexturing on plastic  
molding surfaces, Precision Engineering , Vol. 37, No. 2, pp. 433-442(2013)
- 43 N.Kawasegi, M. Fujii, T. Shimizu, N. Sekiguchi, J. Sumioka and Y. Doi :  
Physical properties and tactile sensory perception of microtextured  
molded plastics, Precision Engineering , Vol. 8, No. 2, pp. 292-299(2014)
- 44 米原牧子, 樹野淳也, 中村一美, 竹原伸, 藤井隆志, 福本知輝 : グラデーシ  
ョンパターンがなぞり動作の位置精度に与える影響, 人間工学, Vol. 49, No.  
6, pp. 279-288 (2013)
- 45 豊田航, 齋藤健太郎, 土井幸輝, 藤本浩志 : 凸点の高さと先端部の曲率半径  
が携帯電話の操作性に及ぼす影響, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 78, No.  
794, pp. 3495-3503 (2012)
- 46 須田高史, 鴨居明子, 上田エジウソン, 寺内文雄, 久保光徳 : シリコーン樹  
脂とフィラーの複合によるテクスチャ表現, デザイン学研究, Vol. 61, No. 6,  
pp. 85-92 (2015)
- 47 須田高史, 鴨居明子, 上田エジウソン, 寺内文雄, 久保光徳 : 不飽和ポリエ  
ステルとフィラーの複合による質感表現, デザイン学研究, Vol. 62, No. 2,  
pp. 47-54 (2015)
- 48 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 : 触覚認識メカニズムと応用技術 (増  
補版), S&T 出版, pp. 12-15 (2014)
- 49 日科技連官能検査委員会 : 新版 官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, pp.  
379-385 (1973)
- 50 日本産業標準調査会 : JIS L0821: 2011 染色堅ろう度試験方法通則, 日本規  
格協会 (2011)
- 51 上條正義, 細谷聡, 高寺政行, 佐渡山亜兵, 眞野倅一, 清水義雄 : 粗さ感を  
発現する視対象物体の幾何学的特徴の抽出, 繊維学会予稿集, Vol. 57, No. 2,

pp. 1 (2002)

- 52 赤川悠哉, 石川智治, 篠田一馬, 乾滋, 佐々木和也, 宮武恵子, 阿山みよし : 布地を想定した提示画像の粗さ・なめらかさの評価～コントラスト・空間周波数・輝度の変化～, 第10回日本感性工学会春季大会予行論文集 (2015)
- 53 日本産業標準調査会 : JIS B0601: 2013 製品の幾何特性仕様(GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式-用語, 定義及び表面性状パラメータ, 日本規格協会 (2013)
- 54 内川恵二 : 講座<感覚・知覚の科学>3 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, pp. 102-105 (2008)
- 55 昆陽雅司, 山内敬大, 岡本正吾, 日高佑, 前野隆司, 田所諭 : 複数の触感因子を伝えるマスタ・スレーブ型触力覚伝達システム, 第15回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 541-547 (2010)
- 56 佐藤信 : 統計的官能検査法, 日科技連出版社, pp. 1-35 (1985)
- 57 野呂影勇, 犬飼幸男, 斉藤幸子 : 表面粗さ感における個人差の解析, 人間工学, Vol. 12, No. 6, pp. 227-234 (1976)
- 58 野呂影勇 : 表面粗さ感覚計測における個人内情報処理, 精密機械, Vol. 43, No. 5, pp. 530-535 (1977)
- 59 三縞育雄, 中野健一 : 機械的計測を基本とした感覚的な表面粗さの解析, 精密機械, Vol. 42, No. 12, pp. 1102-1108 (1976)
- 60 鈴木宏正, 原雄司, 瀬戸康史, 森田修史 : 革シボのデザイン及び加工のデジタル化に関するフィージビリティスタディ, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2010S(0), pp. 161-162 (2010)
- 61 横山清子, 楯千弘, 藤巻吾朗, 安藤敏弘 : グリップ表面の凹凸形状の握り心地評価, 人間工学, Vol. 52, No. 4, pp. 165-171 (2016)
- 62 柳澤秀吉, 高辻賢司 : 視覚による事前予測の影響を考慮したテクスチャの感性評価手法, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 78, No. 796, pp. 3830-3841 (2012)

- 63 柳澤秀吉, 高辻賢司 : テクスチャの触感における視覚的期待効果の抽出法 (プラスチック・シボの粗さ感における視覚の期待効果), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 79, No. 807, pp. 4028-4038 (2013)
- 64 M. Tanaka, D. Tsuchimi and T. Okuyama : Mechanism of Haptic Perception – Influence of Amplitude and Frequency for Smoothness –, Proceedings of the Tohoku University Global Center of Excellence Programme, pp. 368–377 (2012)
- 65 田中由浩, 田中真美, 長南征二 : 手触り感計測用センサシステムの開発, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 724, pp. 3818-3825 (2006)
- 66 田中真美, 長南征二, 江鐘偉, 中島英貴 : 触覚感性の計測 (人間の触感と PVDF センサの出力の対比) : 日本機械学会論文集(C編), Vol. 65, No. 631, pp. 114-120 (1999)
- 67 田中真美 : 触覚・触感のメカニズムの解明とセンサシステムの開発に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 82, No. 1, 20-25 (2016)
- 68 田中由浩, 田中真美, 長南征二 : 手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 727, pp. 169-176 (2007)
- 69 S. J. Lederman : The perception of surface roughness by active and passive touch, Bulletin of the Psychonomic Society, Vol. 18, No. 5, pp. 253-255(1981)
- 70 T. Yoshioka, J. C. Craig, G. C. Beck and S. S. Hsiao : Perceptual constancy of texture roughness in the tactile system, Journal of Neuroscience, Vol. 31, No. 48, pp. 17603-17611(2011)





## 本研究に関する発表論文等

### 学会誌論文

- 1 相澤淳平, 平出真一郎, 北野哲彦, 檜山剛士, 上條正義: 射出成形金型設計のための樹脂表面テクスチャにおける目視と触察による粗さ感評価, 日本感性工学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.457-464 (2015)  
doi: 10.5057/jjske.TJSKE-D-15-00016
- 2 相澤淳平, 檜山剛士, 上條正義: 射出成形金型設計のための樹脂表面テクスチャにおける粗さ感と接触状態の関係, 日本感性工学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.163-169 (2017)  
doi: 10.5057/jjske.TJSKE-D-16-00068
- 3 相澤淳平, 上條正義: ドットパターンにおける凸点の形状・間隔と粗さ感の関係: 日本感性工学会論文誌, Vol.18, No.3, pp.171-178 (2019)  
doi: 10.5057/jjske.TJSKE-D-18-00086

### 学会発表

- 1 相澤淳平, 平出真一郎, 北野哲彦, 檜山剛士, 上條正義: 樹脂表面テクスチャのなめらかさについての触感評価, 第16回日本感性工学会大会 企画セッション, 東京, 2014年9月
- 2 相澤淳平, 平出真一郎, 北野哲彦, 檜山剛士, 上條正義: 樹脂表面テクスチャにおける目視と触察による粗さ感評価, 第10回日本感性工学会春季大会 一般セッション, 京都, 2015年3月
- 3 相澤淳平, 檜山剛士, 上條正義: 樹脂表面テクスチャにおける指表面の底付き状態と粗さ感の関係, 第17回日本感性工学会大会 一般セッション, 東京, 2015年9月

- 4 相澤淳平, 榎山剛士, 上條正義: 射出成形金型設計のための樹脂表面テクスチャにおける粗さ感と接触状態の関係, 第18回日本感性工学会大会 査読セッション, 東京, 2016年9月
- 5 相澤淳平, 榎山剛士, 上條正義: ドットパターンにおける凸点の形状・間隔と粗さ感の関係, 第14回日本感性工学会春季大会 査読セッション, 長野, 2019年3月

## 紀要

- 1 相澤淳平, 榎山剛士, 上條正義: 樹脂表面テクスチャにおける目視と触察による粗さ感評価, 長野県工業技術総合センター研究報告 Vol.10, pp.M29-M33 (2015)
- 2 相澤淳平, 榎山剛士, 上條正義: 樹脂表面テクスチャにおける粗さ感と皮膚の接触状態, 長野県工業技術総合センター研究報告 Vol.11, pp.M18-M22 (2016)
- 3 相澤淳平, 上條正義: 触察中の皮膚変形量の測定, 長野県工業技術総合センター研究報告 Vol.12, pp.M23-M26 (2017)
- 4 相澤淳平, 滝沢龍一: 3Dプリンタによって形成される微細凸形状の特徴, 長野県工業技術総合センター研究報告 Vol.13, pp.M51-M55 (2018)

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり，終始かわらぬ激励と懇切丁寧なご指導を賜りました信州大学大学院総合工学系研究科教授 上條正義博士に対し，謹んで深く感謝申し上げます。

本研究のテーマである樹脂表面テクスチャの触感表現については，樫山金型工業株式会社（現 株式会社コガネイモールド）より研究の端緒を与えていただき，その後の試料の製作や官能検査実験等，研究の推進にあたり多大なご協力をいただきました。同社の益々のご発展をお祈りするとともに，当時の代表取締役社長（現 エムケーカシヤマ(株)代表取締役社長）樫山剛士氏，執行役員 中澤健一氏をはじめ，ご協力いただいた多くの社員の皆さまに厚く御礼申し上げます。

本学博士課程での研究の機会を与えてくださり，研究活動に対する深いご理解とご協力をいただきました長野県工業技術総合センターの宮嶋隆司所長をはじめ，宮澤勉次長，北沢俊二材料技術部門長，風間武設計支援部長，ならびに歴代の各職の皆さまに感謝申し上げます。特に北沢材料技術部門長には当時の設計支援部長として博士課程へのきっかけを作っていただき進学にご尽力いただいたこと，宮嶋所長には様々な立場から常に研究遂行のためのご助言と暖かい激励をいただいたことに深く感謝申し上げます。また，博士課程での研究活動に対するご理解とご支援をいただきました長野県産業労働部長をはじめ，同部ものづくり振興課関係職員の皆さまに感謝申し上げます。

長野県工業技術総合センター環境・情報技術部門の北野哲彦主任研究員，平出真一郎元専門研究員には共同研究者として官能検査実験や試料の試作等に多大なご協力をいただきました。また同部門の滝沢龍一主任研究員には 3D プリンタを利用した試料作成法に関して多大なご協力をいただきました。官能検査実験にあたっては，同センター職員の皆さまに被験者として繰り返し実験にご協力いただきました。皆さまに心より厚く御礼申し上げます。

ここに，ご協力いただきました全ての皆さまに心から深く御礼申し上げます。

最後に，博士課程への進学を応援してくれた父相澤亮平，母照子，日々私を支えてくれている妻郁恵と綾香，光平に心より感謝する。