

令和元年度 学位論文

透明なアクリル樹脂板を対象とした
視覚のテクスチャー評価システムに関する研究

拓殖大学

大学院工学研究科

機械・電子システム工学専攻

G7D2032017

若林 祐次

目次

第1章 緒論

1.1	高付加価値化のための工業製品の質感	1
1.2	テクスチャー評価に関する先行研究	6
1.3	自己組織化マップを用いたパラメーター評価	8
1.4	自己組織化マップに関する先行研究	10
1.5	本研究の目的	11
1.6	本論文の構成	14

第2章 視覚のテクスチャー評価パラメーター

2.1	緒言	27
2.2	表面粗さ（表面性状）	27
2.2.1	表面粗さ（表面性状）パラメーターの概説	27
2.2.2	本研究で使用した表面粗さ（表面性状）パラメーター	31
2.2.3	表面粗さ（表面性状）パラメーターの測定方法	37
2.3	光沢度の測定方法	38
2.4	表面色の測定方法	38
2.5	曇り度（ヘーズ）の測定方法	41
2.6	試験片の材料と加工方法	42
2.6.1	試験片の材料	42
2.6.2	試験片の加工方法	42
2.7	結言	43

第3章	片面に加工を施した透明アクリル樹脂板の表面性状が透過率及び曇り度（ヘーズ）に及ぼす影響	
3.1	緒言	62
3.2	実験方法	62
3.2.1	試験片の作製	62
3.2.2	測定方法	63
3.3	実験結果及び考察	63
3.3.1	三次元表面性状パラメーターによる凹凸形状の定量化	63
3.3.2	表面性状が透過率と曇り度(ヘーズ)に与える影響	65
3.4	結言	66
第4章	片面及び両面に加工を施した透明なアクリル樹脂板の表面性状が透過率，曇り度（ヘーズ）及び光沢度に及ぼす影響	
4.1	緒言	73
4.2	実験方法	73
4.2.1	試験片の作製	73
4.2.2	測定方法	74
4.3	実験結果及び考察	74
4.3.1	三次元表面性状パラメーターによる片面及び両面の凹凸形状の定量化	74
4.3.2	片面及び両面の表面性状が透過率と曇り度(ヘーズ)に与える影響	77
4.3.3	片面及び両面の表面性状が光沢度に与える影響	79
4.4	結言	80
第5章	自己組織化マップによる透明なアクリル樹脂板のテクスチャー評価方法	
5.1	緒言	91

5.2	予備実験	92
5.2.1	自己組織化マップによる解析方法	92
5.2.2	自己組織化マップを用いた正の相関関係の評価方法	95
5.2.3	自己組織化マップを用いた負の相関関係の評価方法	96
5.3	実験方法	97
5.3.1	試験片	97
5.3.2	視覚のテクスチャー構成パラメーター	98
5.3.3	自己組織化マップの作成	99
5.4	表面性状が曇り度(ヘーズ), 光沢度及び明度に与える影響	99
5.5	結言	101
第6章 結論		120
附録		127
附録A 視覚因子による金属メッキ表面のテクスチャー評価		
A.1	緒言	129
A.2	実験方法	129
A.2.1	試験片の作製	129
A.2.2	測定方法	130
A.2.2.1	表面性状の測定	130
A.2.2.2	表面色の測定	130
A.2.2.3	正反射率の測定	130
A.3	実験結果及び考察	131

A.3.1	試験片表面の拡大図	131
A.3.2	測定方向が表面色に及ぼす影響	131
A.4	結言	132
附録 B	金属表面のテクスチャー評価	
B.1	緒言	139
B.2	実験方法	139
B.2.1	試験片の作製	139
B.2.2	表面性状の測定方法	139
B.3	実験結果及び考察	140
B.3.1	三次元表面性状	140
B.3.2	算術平均高さ S_a と表面性状パラメーターとの比較	140
B.3.3	算術平均高さ S_a と表面色との関係	141
B.3.4	算術平均高さ S_a と明度及び正反射率との関係	141
B.3.5	算術平均高さ S_a と負荷曲線パラメーター	141
B.4	結言	142
附録 C	自己組織化マップによるアルミニウム合金のテクスチャー評価方法	
C.1	緒言	148
C.2	自己組織化マップ	149
C.2.1	アルゴリズム	149
C.2.2	自己組織化マップの重みの分布	150
C.3	自己組織化マップを用いた因子の評価方法	150
C.4	自己組織化マップを用いたアルミニウム合金のテクスチャー評価	152

C.4.1	試験片及び測定方法	153
C.4.2	算術平均高さ Sa と表面性状パラメーターとの比較	153
C.4.3	算術平均高さ Sa と明度及び正反射率との関係	154
C.4.4	自己組織化マップによるテクスチャー評価	154
C.5	結言	156
	謝辞	170

第1章 緒論

1.1 高付加価値化を実現する工業製品の質感

日本はかつて“Japan as Number One”¹⁾と呼ばれ、日本のものづくり企業は1960年代から80年代にかけて画期的な新しい工業製品を次々と開発した。自動車や家電を始めとする“Made in Japan”の工業製品は、高品質・高性能及び信頼性の高い製造展開を競争優位の源泉(Core Competence)とし、欧米やアジアへ数多く輸出されてきた²⁾。しかし1990年代以降、バブル崩壊により日本経済が長期にわたり低迷する中、中国、韓国及び東南アジアなど新興国のものづくり技術が向上したこと、またデジタル化やモジュール化による工業製品のコモディティ化が進展したことによって、激しい価格競争が引き起こされ、単なるものづくりから得られる工業製品の付加価値が急速に低下した。さらに最近では、IoT (Internet of Things) の進展、人工知能 (AI) の登場・普及に伴ういわゆる「第四次産業革命」が到来する中、デジタル化はCAD (Computer Aided Design)、CAM (Computer Aided Manufacturing)、CAE (Computer Aided Engineering) 及び CAT (Computer Aided Testing) などの計算機援用ツール³⁻⁵⁾に止まらず、付加製造 (Additive Manufacturing) と呼ばれる3Dプリンターなどの革新的な生産技術にまで波及し、日進月歩の発展を遂げている。例えば、かつて職人技としてもものづくりの現場に暗黙知として蓄積されてきた製造技術やノウハウがデジタル技術によってプログラムとしてソフトウェア内に内蔵され、形式知化している。そして、そのソフトウェアを使用し、デジタル制御された3Dプリンターやマシンニングセンターなどの製造設備で工業製品が生産されるため、世界中の様々な場所で品質レベルの高い類似の工業製品が簡単に作り出せるようになった。そのため、日本の高い品質・性能と信頼性の高い製造展開といった競争優位性が薄まるとともに、コモディティ化により一般的な工業製品の希少性が薄まっている⁶⁻⁸⁾。この現状を打破し、日本のものづくり企業

が自社の競争優位性を高めるには、人間の感性に訴えかける特徴のある工業製品を開発し、他社製品との差別化を図る必要がある。その例として、Bang & Olufsen (Bang & Olufsen) のオーディオ用リモコンを Fig.1.1 に示す⁹⁾。Bang & Olufsen は、工業製品の機能美を追求するブランドとして高い評価を獲得し、ニューヨーク近代美術館に 18 種類の製品がパーマネントコレクションとして選ばれている。一般的なオーディオ用リモコンの価格が数百円～数千円であるのに対し、Bang & Olufsen のリモコンは 5 万円台という極めて高い価格で販売されている¹⁰⁾。これは、オーディオ機器を操作するというリモコンの基本的な機能だけではなく、見た目のスリムでシンプルな形状、シルバーと黒のシックな色合い及びアルミニウム合金の素材から感じる重厚感や光沢感などから受けるシャープでスタイリッシュな印象、さらには持ち上げた時の手触り感や重量感から感じるクールな心地よさなど、人間の感性に訴えかける高い質感を Bang & Olufsen のリモコンが有しているためである。すなわち、特徴のある工業製品を開発するためには、消費者の感覚や感性によって認識される工業製品の質感を如何に高めるかが重要なポイントとなる¹¹⁻¹³⁾。

質感は、凹凸感、光沢感や透明感など、人間がものに対して感じる視覚的、触覚的な感覚である。広辞苑には、「質感」として、①材料の性質の違いから受ける感じ、②その材料が本来持っている感じという 2 つの意味が書かれている¹⁴⁾。すなわち、ものを構成する材料・素材の違いとそれ自体によって生じる印象が「質感」とであると定義されている。しかし、ものから受ける印象は、その材料・素材からだけではなく、加工の方法、特に表面の加工状態に大きく影響される。同じ透明なプラスチック材料から作られた製品であっても、Fig.1.2(a) に示すように切削加工のみで透明度の低い曇った表面と Fig.1.2(b) に示すサンドペーパーやバフなどによって磨き上げられた透明度の高い表面とでは、消費者が受ける印象は大きく異なる。したがって、「質感」とは、「ものの材料・素材やその表面の状態から受ける感じ」と定義することができる^{15,16)}。さらに、ものの質感を人間は日常的に視覚や触覚などの様々な感覚を通して認識しているため、質感の認識は、「視覚や触覚などの刺激からものの材料・

素材やその表面の状態を推定する機能」と位置付けることができる¹²⁾。この質感の認識機能は、ものが何でできているかという材料・素材を認識する働きやその認識した結果を活用する働きとともに、嗜好や情動などを通して価値判断や意思決定とも密接に関わっている。例えば、高い質感をもつ骨董品、彫刻や絵画などの貴重な文化財を鑑賞したとき、人間は強い印象や豊かな満足感を得ている¹⁷⁾。Fig.1.3 に示す骨董品の表面の状態、すなわち表面の凹凸形状や釉薬が作る微妙な色合い、光沢などから、人間は陶器の材料・素材などを推定し、認識するとともに、「素晴らしい・みすばらしい」などの情動を感じ、その骨董品の値打ちといった価値を判断している。すなわち、ものの表面の状態は、視覚や触覚などの感覚を通して、質感として認識されるとともに、嗜好や情動反応により価値判断や意思決定に影響を与えている¹⁵⁾。そのため、人間の感性に訴えかける特徴のある製品で他社製品との差別化を図るためには、嗜好や情動反応を通じて価値判断や意思決定に影響を与えるものの表面、すなわち質感の高いものの表面の状態を工業製品の研究開発現場において設計する必要がある。実際、工業製品の表面に加工を施すことで、機械加工時における切削刃物目などの加工跡や製品使用時に付く傷跡を目立ちにくくするとともに、つや感や重厚感などの視覚的要素やソフト感や粗さ感などの触覚的要素を付与することができる。この人間の感性に訴えかける感覚的な要素は、工業製品における外観品質の向上、さらには製品の付加価値を高める重要な要素とされている¹⁸⁾。このように消費者の高い満足感を実現するために、工業製品を研究開発する現場において、高い質感とそれを実現するデザインが求められている¹⁹⁻²¹⁾。このデザインを重視する傾向は、研究開発の現場に止まらず、企業経営においても求められている^{22,23)}。

質感の認識は、視覚や触覚を通して心理的な現象として起こるが、それを理解するためには、視覚や触覚に影響を及ぼす物理的なプロセスを理解する必要がある¹⁵⁾。視覚については、ものからの反射及び透過する光の光学的な特性の理解と材料・素材とその表面の状態といった物理的な特性の理解である。例えば、プラスチック、金属、革や木などの材料・

素材は、それぞれ特有の光学的特性をもち、光を反射及び透過している。また、材料・素材の表面は加工跡や皮革、木目のように三次元の凹凸形状を表面にもち、その凹凸形状によって材料・素材固有の光沢や陰影が生じる。これらの光学的特性によって複雑な質感が生み出されている。質感を把握するためには、ものの表面の状態と光学的特性との関係を明らかにする必要がある。

ものの表面の状態は、一般的に、テクスチャー(Texture)と呼ばれている。テクスチャーは、色彩 (Color)、形状(Shape)と並び工業製品の外観を構成する主要要素である²⁴⁾。近年では、工業製品の付加価値を高める因子の一つとして、このテクスチャーが注目されている¹⁵⁾。テクスチャーは、材料・素材の組織や構成部分の配列状態を表現する言葉であり、狭義には表面性状、特に表面の凹凸形状を表す言葉である²⁵⁾。国際標準化機構規格(以下、ISO規格という。)及び日本産業規格(以下、JIS規格という。)では、ものの表面における凹凸形状によって人間の視覚や触覚といった感覚に影響を及ぼす材質、表面構造や表層として定義されている。例えば、JIS規格には、JIS Z 8144:2004「官能評価分析—用語」にテクスチャーに関する規定がある。まず、「d)触覚」の項目に「(表面の)テクスチャー (4006)」として、「材質、表面構造などによって生じる、物体表面に関する触覚の属性」と規定されている。次に、「e)視覚」の項目に「(視覚の)テクスチャー (5012)」として、「材質、表面構造などによって生じる物体表面に関する視覚の属性」と定められている。また、JIS L 0212-1:2010「繊維製品用語(衣料を除く繊維製品)—第1部:繊維製床敷物」には、「5 使用面に関する用語」の項目に「テクスチャー加工した表層」が定義され、「タフティング、エンボス、多様なニードリング加工などによって変化が生じた表層(4100)」と定められている。これは、テクスチャーが Fig.1.4 に示したテキスタイル(Textile:織物、編み物)を語源とし、このテキスタイルの構造、組織やパターンなどの表層の凹凸形状などをテクスチャーとして定義したものと考えられる²⁶⁾。さらに、テクスチャーを構成する「材質、表面構造などによって生じる物体表面に関する」凹凸形状は、製品の幾何特性仕様(Geometrical

Product specification [GPS])として ISO 規格や JIS 規格において定められている。例えば、輪郭曲線方式（二次元方式とも言う。）の規格として、ISO4287:1997 や JIS B 0601:2013 に「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ー」が，三次元方式の規格として ISO25178-2:2012 や JIS B 0681-2:2018 に「製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状：三次元—第 2 部：用語，定義及び表面性状パラメーター」が定められている。このようにテクスチャーは，ISO 規格や JIS 規格に，ものの表面における凹凸形状によって人間の感覚に影響を及ぼす材質，表面構造や表層として，また数値化された表面性状パラメーターとして定義されている。一方，「物体表面に関する」人の感覚的な要素である視覚や触覚の属性については，表面の凹凸感，ざらざら感，つや感，重厚感や風合いなどといった形容詞やオノマトペなどの感覚的，主観的な言語によって表現される要素を総合して得られる。また，製品の外観評価方法については，光沢度，色や曇り度などの光学特性の評価量が ISO 規格や JIS 規格で規定されている。例えば，光沢度については JIS Z 8741:1997「鏡面光沢度—測定方法」で，表面の色については JIS Z 8781-4:2013「測色」で，曇り度については JIS K 7136:2000「プラスチック—透明材料のヘーズの求め方」で測定装置や評価量などが定められている。しかし，感覚的，主観的な言語によって得られる物体表面の特徴を客観的に把握し，定量化することは極めて困難である。また，光学特性である光沢度，色や曇り度など人間が認識する属性と表面の凹凸形状を評価する表面性状パラメーターとの因果関係が自明でない場合が多い¹²⁾。数値化された表面性状パラメーターと光学特性の評価量を相互に関連付けた評価システムに関する研究は少なく，製品設計や製造の場面において，「色彩」や「形状」は色見本や図面などを用いた数値による設計指示が可能なのに対し，「テクスチャー」に関しては設計者と技術者との間に共通する設計指針がない。そのため，設計者が意図したテクスチャーを技術者に正確かつ迅速に伝えることは難しい²⁷⁾。現状では，設計者が意図したテクスチャーを再現するには，試作を繰り返し，目視などによって確認する経験的プロセスによらざるをえない。例えば，試作段階において

は、各種レンズカット形状による光の反射、透過や拡散の違いを確認するために Fig.1.5(a) に示す透明なアクリル樹脂板サンプルを用いる。また、プラスチックに金属メッキした場合やアルミニウム合金に陽極酸化処理を施した場合の色合いの選択のために Fig.1.5(b), (c) に示す加飾処理を行ったサンプルを用いている。

今日、工業製品の付加価値を向上させ、差別化を図る手段として、テクスチャーの重要性が高まっている。すなわち、経験的プロセスではなく、テクスチャーを数値でコントロールし、設計者の意図を正確かつ迅速に再現するための客観的なテクスチャーの設計指針の確立が重要になっている。また、近年では3Dプリンターなどの生産技術の発展により、設計から最終工程までをデジタルデータで一貫管理するようになってきている。例えば、Fig.1.6(a), (b) に示したCADデータのように設計段階でシボ形状などのテクスチャーを反映する場合がある。また、Fig.1.6(c), (d)は、Carbon社の3Dプリンターで作製することのできるDigital Texture データとそれを適用した造形サンプルである。この3Dプリンターでは、製品の質感を向上させるため、複数種類のデジタルテクスチャーが提供されており、CAM上で3Dモデルにテクスチャーを貼り付け、造形することができる。すなわち、従来、ものづくりの後工程である仕上げにおいて職人の技量に依存してきたテクスチャーの質感が設計段階や生産の初期段階において決定するようになり、生産工程のシフトが生じつつある²⁸⁻³⁰⁾。この生産技術の発展による生産工程シフトの面からも、設計者の意図を正確かつ迅速に再現するための客観的なテクスチャー設計指針の重要性が増している。

1.2 テクスチャー評価に関する先行研究

テクスチャー評価に関する先行研究は、感性工学の分野における感覚量評価がほとんどであり³¹⁻³³⁾、定量的評価の多くは物理的に凹凸形状を評価している³⁴⁻³⁸⁾。例えば、内藤ら³⁴⁾は彩度一定の色票を用いて明度の塗装質感に及ぼす影響について報告している。宮川ら³⁵⁾は塑性加工表面の形状評価について報告している。安達ら³⁶⁾は半導体レーザーを用い、

表面の形状計測手法について報告している。西川ら³⁷⁾は光波干渉法による微細表面形状の測定法について報告している。小豆島ら³⁸⁾はレーザーを用いた表面検査について報告している。また、テクスチャーの特徴を定量化する方法は種々検討されているが、多くはバーチャルリアリティやコンピューターグラフィックスなどのテクスチャー画像をパターン化する画像処理の研究である^{39,40)}。

テクスチャーの定量的評価指標として、米原らはこれまでに表面粗さ、光沢度及び表面色の3因子を組み合わせた指標を提案している⁴¹⁻⁵³⁾。柳澤らも、視覚に影響を与える物理的要因として、物体表面の粗さ、光沢度及び明度などの表面属性を取り上げている¹²⁾。キャノン株式会社は、Fig.1.7に示したヨハネス・フェルメール作「真珠の耳飾りの少女」の質感取得とその再現を行う文化財未来継承プロジェクト（綴プロジェクト）において、油絵の質感を再現するため、質感情報として、絵画の色情報に加えて、画材の塗り重ねによって生じた表面の凹凸形状や反射特性を測定・解析し、利用している¹⁷⁾。また、米原らは工業製品の外観における定量的な再現性の向上方法として、輪郭曲線方式の算術平均粗さ Ra のみならず、他の表面性状パラメーターを併記する必要性を述べている。すなわち、人間の視覚に関係するものの表面粗さを表す場合、高さパラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターを必要に応じて併記することを提示している。この併記方法により、ショットブラスト加工や陽極酸化処理などを施した金属加工面のテクスチャーの詳細な評価が可能なことを示している⁴¹⁻⁵¹⁾。

また、プラスチック材料に関するテクスチャーの定量的評価指標として、米原らはシボ加工を施したABS樹脂の表面評価を行い、表面性状パラメーター、光沢度及び表面色の物理指標の相関関係を評価している⁵²⁻⁵⁴⁾。プラスチック材料は、機械的・化学的性質に優れ、特に大量生産に適しているため、工業用材料としてあらゆる分野で用いられている。その一方で、素材としての質感は金属、木材、皮革などと比べて低く評価されがちである。そのため、質感が重視される一般消費者向け製品では多くの場合、ショットブラスト加工、シボ加工や

めっき・塗装などの質感改善を目的とした表面加飾加工が施されることが多い²⁸⁻³⁰⁾。特に、透明なアクリル樹脂は、水族館の水槽パネル、自動車用ランプカバー、浴槽、文具、家電部品、看板、照明など広く利用されている⁵⁵⁾。アクリル樹脂に関する様々な報告は、耐候試験や光照射による機能劣化のメカニズム及びその対策方法、劣化及び破損に対する解析手法等について検討されたものが多い⁵⁶⁻⁶¹⁾。一方、透明なアクリル樹脂板の表面を加飾のためにショットブラスト加工などを施した場合や使用環境により砂や小石等が接触した場合には、その透明性が失われ、光の透過率が変化する。この現象は、透明なアクリル樹脂板の表面に細かい凹みやキズなどが付くことにより物理的な表面の凹凸形状が発生し、それに起因して光が反射や透過する際に散乱するためである。このような透明なアクリル樹脂板の表面に生じた凹凸形状の違い、とくに質感を高めるために施されるショットブラスト加工で生じる僅かな凹凸形状の違いを目視により判断することは熟練した技術を要する作業である。透明なアクリル樹脂の表面に生じた凹凸形状と見た目との関係に関する研究は、例えばアクリルモノマーにナノ分子を混合させて化学的に表面粗さを変化させた際の曇り度との関係についての検討が報告されている⁶²⁾。しかし、透明なアクリル樹脂板の表面に生じた物理的な凹凸形状に関する定量的かつ系統的な報告はほとんど見当たらない。

1.3 自己組織化マップを用いたパラメーター評価

先に述べたように、質感の高い製品を開発するためには、視覚のテクスチャーの定量的評価指針を確立する必要がある。そして、テクスチャーの定量的評価指標を検討するためには、表面性状パラメーターを用いて表面の凹凸形状を特徴づける必要がある。また、それらの表面性状パラメーターが視覚のテクスチャーに与える影響、すなわち相関性を明確にする必要がある。一方、ISO規格やJIS規格で規定された表面性状パラメーターは数多く存在している。輪郭曲線方式（二次元方式）の表面性状パラメーターで約50種類、三次元方式の表面性状パラメーターで約40種類のパラメーターが規定されている。これまでの研究^{27,41-}

^{54,63)}では、単回帰分析を行っていたため、それらのパラメーターを比較検討する準備作業として、各表面性状パラメーターの組み合わせを二次元グラフに描写する必要があり、非常に多くの手間と時間がかかっていた。そのため、この準備作業の手間と時間を短縮する方法が求められる。今後、研究範囲をオノマトペで表現される感性評価にまで広げた場合、分析対象となるパラメーターの次元数及びデータ量は膨大になる。さらに、感性評価で使用する不特定多数の人に対して行った心理測定データは、複雑かつ多様であり非線形構造がデータに存在すると予想される⁶⁴⁾。そのため、このような数式では表せない数理モデルにも対応できる分析手法の選択が重要となる。

従来、大量のデータから有用な情報を抽出するデータマイニング技術として多変量解析が用いられてきた。多変量解析は、多変量（多次元）データの低次元化など様々な形での情報圧縮によるデータの解析を目的とし、単回帰分析、重回帰分析、主成分分析、因子分析、数量化理論 I 類～IV類、クラスター分析など数多くの手法が用いられてきた。ただ、これらの手法を用いて生成されるグラフでは、全ての次元を平面マップ上に一度に表すことができない⁶⁵⁾。また、データ解析において頻繁に用いられている主成分分析（Principal Component Analysis : PCA）では^{66,67)}、多次元データについて相関を考慮した重み付けを行い、新しい合成変数によってデータを整理する手法であるが、線形変換を基礎にしているため、非線形構造データに適用すると誤った結果を導く可能性がある^{64,68)}。近年では、カーネル主成分分析といった非線形変換の方式も開発されているが、可視化には 2 つの主成分を軸に選び、複数の二次元グラフを作成する必要がある⁶⁴⁾。

そこで本研究では、数式では表せない数理モデルを扱う手法として、近年著しい発展を遂げている機械学習の手法を取り入れ、表面性状パラメーターとその相関関係がテクスチャーに与える影響を検討した。機械学習とは、大量のデータを反復学習し、そこに潜むパターン（特徴）を見つけ出すことデータ解析技術である⁶⁹⁾。その手法として、教師あり学習と教師なし学習に大別される。教師あり学習は、既知の入力データとそれに対する結果（出力）

を用いてモデルの訓練を行い、新たな入力データに対応する結果（出力）を合理的に予測する学習方法である。教師あり学習では、サポートベクターマシンなどの分類アルゴリズムや決定木などの回帰アルゴリズムの手法を用いて予測モデルを作成する。一方、教師なし学習は、入力データの中に存在する隠れたパターンや固有の構造を見出す学習方法であり、クラスタリングが最も一般的な手法である。クラスタリングのアルゴリズムとして、k平均法やニューラルネットワークがある。本研究では、教師データの無い多次元データを入力データとして扱うため、教師なし学習のニューラルネットワークに分類される自己組織化マップ（Self-Organizing Maps）を用いた⁷⁰⁾。自己組織化マップは、線形、非線形問わず多次元の観測データを反復学習することにより、教師データを必要とせずにデータのパターン抽出を自動的に行い、そのパターンの位相を保った状態で二次元平面上に写像する。そのため、大量の教師なしデータの中から、特徴量を自動的に抽出しクラスタリングに利用することができ、また特徴量の位相を保った二次元平面を比較検討することでパラメーターの評価に利用することができる。

1.4 自己組織化マップに関する先行研究

自己組織化マップは様々分野で活用されている。例えば、霜村ら⁷¹⁾は、ドローンの最適設計を行う際、複数の設計変数と目的変数の組み合わせから生じる膨大な数の設計候補の選抜に自己組織化マップを使用した。通常、設計の最適化には、膨大なパラメーターと計算コストの高いシミュレーションによる評価が必要となるが、自己組織化マップを用いることでコストの大幅な削減を図った。畑中ら⁷²⁾は、三菱リージョナルジェット（Mitsubishi Regional Jet）の設計知見の抽出に自己組織化マップを用い、多変量データを瞬時に二次元マップに圧縮・表示することで各評価個体のグループ化が可能となったことを紹介している。徳高ら⁷³⁾は、自己組織化マップを使って視覚的に血管の状態を把握する診断用ソフトウェアを開発した。加藤ら⁷⁴⁾は、個人の様々な表情画像を用いて画像の特徴抽出の基本と

なるテンプレート群を自動的に作成し、顔部分画像の特徴抽出を行う方法として、自己組織化マップを用いた手法を提案している。川村ら⁷⁵⁾は、自己組織化マップが気候システムに内在する非線形現象などへの適用可能性が高いことを指摘し、気象学分野への応用が盛んに行われていることを紹介している。徳永ら⁷⁶⁾は、自己組織化マップと放射基底関数ネットワークを取り入れ、魚肉の脂肪含有量および歯ごたえの量を、超音波信号から定量的かつ非破壊的に評価する方法を提案している。高橋ら⁷⁷⁾は、自己組織化マップを用いて鳥取県内の湖山池の水質状況の分類を行い、赤潮発生時における水質状況の予測を行った。小山⁷⁸⁾は、道路防災総点検により得られた道路斜面の安定度調査表を基に、自己組織化マップを用いて、変状のモニタリング・計測、補強・補修などの対策を優先的に施すべき道路斜面の抽出を行った。神野ら⁷⁹⁾は、自己組織化マップを使用して、福岡市水道局が実施した水に関するアンケート調査の分析を行い、福岡市民が持っている節水意識の特性を二次元平面上で総合的に把握できることを示した。川名ら⁸⁰⁾は、全国スーパーマーケットの大規模ID-POSデータを自己組織化マップで学習し、顧客の購買行動と店舗の販売傾向を類型として抽出した。北島ら⁸¹⁾は、東証二部に上場している4業種の企業を対象に社是が企業の利益(企業パフォーマンス)に与える影響について自己組織化マップを用いて分析した。

以上述べてきたように、自己組織化マップは、工学、医工学、気象学、土木分野のみならず、アンケート調査やマーケティング分析、社是とパフォーマンスとの影響分析など経営学の分野においても活用されている。しかし、視覚のテクスチャーである表面性状、光沢度、表面色及び曇り度の相関関係評価において、自己組織化マップを活用した事例はあまり見当たらない。

1.5 本研究の目的

本研究は、透明なアクリル樹脂板を素材として、視覚のテクスチャーの定量的な評価と自己組織化マップを用いた視覚のテクスチャーの相関関係を簡易に評価するシステムの提案

を目的としている。

まず、透明なアクリル樹脂板の視覚のテクスチャーの定量的評価方法の検討を行った。テクスチャーの「物体表面に関する」人間の感覚的な要素である触覚や視覚の属性のうち、視覚に着目した。消費者は「見てから触る」という視覚から触覚への感覚モダリティの時系列での切り替えを無意識的に行っていること¹²⁾や視覚から対象物の手触りを想像し、心地よさ・不快感といった情動的反応や触りたい・触りたくないといった対象物への接触行動に関する動機付け的反応を行う⁸²⁾。すなわち、視覚は工業製品の外観における見栄えの向上に大きく貢献するとともに、人間がものを認識する第一歩である。また、ISO1302:2002を翻訳したJIS B 0031:2003「製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状の図示方法」の「附属書D（参考）あいまいさのない表面機能の管理に必要な指示」に、「すべての表面性状パラメーターが、表面機能と普遍的で強い関係をもつとは限らないが、あるパラメーターは表面性状の構造及び/又は表面機能に密接に関係する」と記載されている。そして、「表面性状パラメーターと表面機能との関係がどの程度か、どのパラメーターが表面の特別な機能の管理に適切であるかの知見は、技術文献又は経験から得なければならない」としている。さらに、Fig.1.8に示すJIS B 0631:2000「製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状：輪郭曲線方式—モチーフパラメーター」の「附属書B（参考）モチーフパラメーターと表面機能との関係 表1」において、要求する表面機能とその機能を実現するために必要なモチーフパラメーターの情報が示されている。ここで、表面の機能とは、表面が有している「はたらき。相互に関連し合って全体を構成している各要素や部分が有する固有の役割」¹⁴⁾である。したがって、「材質、表面構造などによって生じる物体表面に関する」触覚や視覚の属性であるテクスチャーも、工業製品における外観を構成し、表面の凹凸感、つや感、重厚感や風合いなど製品に対するイメージとしての役割を担っているため、表面機能の一つとなる。そして、本研究において検討する表面性状パラメーターと光沢度、表面色、曇り度（ヘーズ）及び透過率などの表面機能「との関係がどの程度か、どのパラメーターが表面の特別な機能の管理

に適切であるか」を明らかにすることは、「あいまいさのない表面機能の管理に必要な指示」として重要な知見となる。

試験片の材料には、プラスチック材料である透明なアクリル樹脂板を用い、その表面にショットブラスト加工を施した。先に述べたように透明なアクリル樹脂板が様々な工業製品の材料・素材として使用されているにもかかわらず、その表面に生じた物理的な凹凸形状を起因とする視覚のテクスチャーに関する定量的かつ系統的な報告がほとんど見当たらない。そこで、ショットブラスト加工を施した透明なアクリル樹脂板を試験片とすることで、光が透過する素材における視覚のテクスチャーの定量的評価を試みた。すなわち、ショットブラスト加工により物理的な凹凸形状の表面を有する透明な素材の場合、透過する光がどのように影響を受けるか、具体例には米原ら^{27,41-54}が提案した表面粗さ、光沢度及び表面色の3因子に加え、曇り度（ヘーズ）及び透過率を用いて視覚のテクスチャーを定量的に評価する。ここで、Fig.1.9 に透明な素材の視覚のテクスチャーである表面粗さ、光沢度、表面色及び曇り度の関係の模式を示す。さらに、米原ら^{27,41-54}の提案では表面粗さの評価が二次元の輪郭曲線方式の表面性状パラメーターを使用していた。しかし、光沢度、表面色、曇り度（ヘーズ）及び透過率は面評価となるため、本研究では表面粗さについても面評価である三次元方式の表面性状パラメーターを用いることで、それらの整合性を高める⁵¹）。

次に、自己組織化マップを用いた表面性状パラメーターと視覚のテクスチャーと相関関係を簡易に評価するシステムの検討を行う。表面性状パラメーターと視覚のテクスチャーとの定量的評価を行うための指標を検討するためには、各パラメーター間の相関関係を明らかにする必要がある。しかし、ISO規格やJIS規格で規定されている表面性状パラメーターと視覚のテクスチャーにかかわるパラメーターは数多く存在している。これらのパラメーターを詳細に比較検討するには、非常に多くの手間と時間がかかる⁷⁰）。そこで、比較検討作業の簡便化を図るために、機械学習の手法を取り入れ、各パラメーター間の相関関係を評価するシステムの検討を行う。すなわち、多次元の表面性状パラメーターと視覚のテクス

チャーにかかわるパラメーターを自己組織化マップのアルゴリズムで反復学習することにより、教師データ設定など事前の準備を必要とせずにデータのパターン抽出を自動的に行うことができる。そして、パターンの位相を保った状態で二次元平面上に写像する自己組織化マップの特徴を利用した評価システムの検討を行う。

1.6 本論文の構成

本論文は6章で構成され、第2章以降の内容は以下のとおりである。

第2章では、視覚のテクスチャーを定量的に評価するためにパラメーターとして使用する表面粗さ、光沢度、表面色及び曇り度（ヘーズ）の概要と測定方法について示す。また、本研究で主に試験片として使用する透明なアクリル樹脂板及び本研究で試験片を加工するために用いたショットブラスト加工の概要も併せて示す。

第3章では、透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャーの設計指標について検討するため、表面の算術平均高さ Sa が $1.0\mu\text{m}$ 以下の微小な凹凸領域を対象として、表面の凹凸が視覚のテクスチャーに与える影響について調べる。まず、三次元表面性状パラメーターを用いて、アクリル樹脂板の片面に付与した凹凸形状の定量化を検討する。次に、各三次元表面性状パラメーターが視覚のテクスチャーの一つである透過率及び曇り度（ヘーズ）に与える影響について調査する。これらの結果を基に、微小凹凸が付与された透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャー評価指標について検討する。

第4章では、表面の算術平均高さ Sa が約 $1.0\mu\text{m}$ 以下となる微小凹凸領域を対象として、片面または両面にショットブラスト加工を施し、種々の表面粗さを付与した透明なアクリル樹脂板の試験片表面の凹凸形状が視覚のテクスチャーに与える影響について調べる。まず、アクリル樹脂表面の凹凸形状を定量化するため、三次元表面性状パラメーターを用いて検討する。次に、各三次元表面性状パラメーターが透過率、曇り度（ヘーズ）及び光沢度に与える影響について調査する。これらの結果を基に、微小凹凸が付与された透明なアクリル

樹脂板における視覚のテクスチャー評価指標について検討する。

第 5 章では、パラメーター間の相関関係を評価するため、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルの 1 つである自己組織化マップを用いた評価方法の導入を検討する。まず、自己組織化マップを用いたパラメーター間の相関関係を評価する方法について、その評価方法の有効性を示すために、任意の関数を用いて予備的な検証を行う。そして、第 3 章で使用した透明なアクリル樹脂板にショットブラスト加工を施した試験片を用いて、視覚のテクスチャーである曇り度（ヘーズ）、光沢度及び表面色に影響を及ぼす表面性状パラメーターについて自己組織化マップを用いて調べる。

第 6 章では、本論文の各章で得られた結果を統括し、結論を述べる。

参考文献

- 1) エズラ ヴォーゲル：ジャパンアズ ナンバーワン,TBS ブリタニカ(1979).
- 2) 小坂田宏造：日本塑性加工学会,第 8 回材料加工戦略会議「海外技術戦略」,1-16(2010).
- 3) 加瀬究：精密工学会誌,79(2),144-147(2013).
- 4) 加瀬究：精密工学会誌,79(3),223-226(2013).
- 5) 加瀬究：精密工学会誌,79(4),309-313(2013).
- 6) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2015 年度版ものづくり白書, 195(2013).
- 7) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2013 年度版ものづくり白書, 3/86/93/99(2013).
- 8) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2012 年度版ものづくり白書, 46(2012).
- 9) <https://www.bang-olufsen.com/ja/collection/apps-and-accessories/beoremote-one>
- 10) https://gigaplus.makeshop.jp/beostorejp/pc/data/file/pricelist_2019.pdf
- 11) 伊東誼：日本塑性加工学会 第 8 回材料加工戦略会議「海外技術戦略」,31(2010).
- 12) 柳澤秀吉, 勇木徳仁：日本機械学会論文集 C 編,78(789),1913-1924(2012).
- 13) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2014 年度版ものづくり白書,133(2014).

- 14) 新村出編：広辞苑第7版(2018).
- 15) 小松英彦：映像情報メディア学会誌,66(5),331-337(2012).
- 16) 西田眞也：日本画像学会誌,57(2),189-196(2018).
- 17) 井下智加, 平林純, 加藤成樹, 木村純子：日本画像学会誌,57(2),225-230(2018).
- 18) 伊東誼：生産文化論,日科技連,215-220(1997).
- 19) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2011年度版ものづくり白書,288-289(2011).
- 20) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2012年度版ものづくり白書,92/153(2012).
- 21) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：2013年度版ものづくり白書,163(2013).
- 22) 経済産業省・特許庁：産業競争力とデザインを考える研究会 デザイン経営宣言(2018).
- 23) 鷺田祐一：マーケティングジャーナル,38(1),4-6(2018).
- 24) 工業デザイン全集編集委員会編：工業デザイン全集 第3巻 設計方法,日本出版サービス,74-106(1983).
- 25) 槇究, 赤松摩耶, 佐竹明子：日本建築学会環境系論文集,72(614),17-23(2007).
- 26) 森俊夫：日本家政学会誌,64(9),529-541(2013).
- 27) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 木原幸一郎, 杉林俊雄：日本金属学会誌,78(6),439-445(2009).
- 28) 相澤淳平, 上條正義：日本感性工学会論文,18(3),171-178(2019).
- 29) 相澤淳平, 平出信一郎, 北野哲彦, 檜山剛士, 上條正義：日本感性工学会論文誌,14(4),457-464(2015).
- 30) 相澤淳平, 檜山剛士, 上條正義：日本感性工学会論文誌,16(1),163-169(2017).
- 31) 李沅貞, 佐藤昌子, 阿佐見徹, 大藪泰, 富永昌治：日本色彩学会誌,26(4),236(2002).
- 32) 相沢正, 渡辺哲夫, 西条博之, 川上元郎：製品科学研究所報告,63,23(1970).
- 33) 金正周, 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ：デザイン学研究,46,1(1999).
- 34) 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ：デザイン学研究,47,25-34(2000).

- 35) 宮川松男, 小豆島明, 山中薫: 伸銅技術研究会誌,19,155-164(1980).
- 36) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸: 精密工学会誌,65,418-422(1999).
- 37) 西川尚之, 高安拓郎, 岩田耕一: 精密工学会誌,57,1633-1638(1991).
- 38) 小豆島明, 岸輝男, 宮川松男: 塑性と加工,284,765(1984).
- 39) 西田眞也: 光学,43(7),307-311(2014).
- 40) 澤山正貴, 岡部誠, 西田眞也, 土橋宜典: 基礎心理学研究,36(1),56-65(2017).
- 41) 川邊和宏, 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄: 銅と銅合金,46(1),248(2007).
- 42) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 吉森茂, 杉林俊雄: 銅と銅合金,42(1),340(2003).
- 43) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄: 軽金属,54(2),45(2004).
- 44) M.Yonehara, T.Masui, K.Kihara, H.Isono, A.Kijima and T.Sugibayashi: Mater.Trans. JIM,45(4),1019 (2004).
- 45) M.Yonehara, T.Masui, K.Kihara, H.Isono, A.Kijima and T.Sugibayashi: Mater.Trans, JIM,45(4),1027(2004).
- 46) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄: 軽金属,55(1),15(2005).
- 47) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘: 軽金属,55(12),668(2005).
- 48) M.Yonehara, K.Kihara, Y.Kagawa, H.Isono, and T.Sugibayashi: Mater.Trans, JIM,46(10),2197(2005).
- 49) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘: 軽金属,56(8),429(2006).
- 50) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 木原幸一郎, 杉林俊雄: 銅と銅合金,55(1),1(2016).
- 51) 吉田瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 磯野宏秋, 香川美仁, 杉林俊雄: 軽金属,61(5),187(2011).
- 52) 米原牧子: 精密工学会誌,82(11),944-947(2016).
- 53) 米原牧子, 樹野淳也, 中村一美, 竹原伸: 近畿大学次世代基盤技術研究所報告,3,73-

- 33,(2012).
- 54) 米原牧子, 吉田瞬, 磯野宏秋, 杉林俊雄: 人間工学特別号,51,264-265(2015).
- 55) 岸本祐一郎: 計測分科会誌,18(1),24-28(2010).
- 56) 岡本慎吾: J.Jpn.Soc.Colour Mater.,62,404(1989).
- 57) 鳥飼章子: マテリアルライフ学会誌,17,121(2005).
- 58) 矢部政実, 田桐澤根, 岡本好広: 塗料の研究,146,8(2006).
- 59) 松井智隆, 森泰彦, 森義和, 中島建夫: 品質工学,18,945(2010).
- 60) “高分子の劣化・変色メカニズムとその対策および評価方法”,193,R&D 支援センター
(2014).
- 61) “プラスチック製品の事故原因解析手法と実際の解析事例について”,(独)製品評価技術
基盤機構(2014).
- 62) Vinod Kanniah, Eric A.Grulke, Thad Druffel: The Solid Films,539,170(2013).
- 63) 杉林俊雄: 天田財団研究概要報告書,24,149-154(2012).
- 64) 杉本興運, 飯塚遼: 観光科学研究,5,59-69(2012).
- 65) 榊原瑞穂, 蓮見孝, 山中敏正: 日本デザイン学会研究発表大会概要集,47,50-51(2000).
- 66) 吉川大弘: システム／制御／情報,52(7),232-238(2008).
- 67) 松尾豊: 情報・システムソサイエティ誌,19(1),12-13(2014).
- 68) 阿部貴志, 金谷重彦, 池村淑道: 日本化学会情報化学部会誌,26(2),31-33(2008).
- 69) The MathWorks, Inc.編: 機械学習のご紹介(2016).
- 70) T.kohonen: Self-Organizing Maps, Springer Verlag, 1995.
- 71) 霜村瞭, 延原肇: 農業情報研究,27(4),83-94(2018).
- 72) 畑中圭太, 森野裕行, 竹中啓三, 大林茂, 鄭信圭, 熊野孝保: 可視化情報学会誌,27(2),167-
170(2007).
- 73) 徳高平蔵, 柿原俊幸, 倉田将史, 藤村喜久郎, 権田英功, 馬庭芳朗, 山本雅司, 李仕剛,

- 大北正昭：バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌,11(1),49-56(2009).
- 74) 加藤綾子, 福井康裕：医用電子と生体工学,40(4),214-221(2002).
- 75) 川村隆一, 井芹慶彦：天気, 58(9),37-38(2011).
- 76) 徳永憲洋, 佐伯千尋, 谷口真市, 中野新太, 太田博光, 中村誠：日本知能情報ファジィ学会 ファジィシステムシンポジウム講演論文集,34,388-392(2018).
- 77) 高橋慎之介, 権田英功, 宮田仁志, 前田晃弘：日本知能情報ファジィ学会 ファジィシステムシンポジウム講演論文集,34,628-630(2018).
- 78) 小山倫史：社会安全学研究,6,147-155(2016).
- 79) 神野健二, 横田いずみ, 井芹慶彦, 井料隆太：地下水学会誌,51(2),151-162(2009).
- 80) 川名純平, 諏訪竜也, 関庸一：日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌,61, 23-44(2018).
- 81) 北島良三, 上村龍太郎：日本知能情報ファジィ学会 ファジィシステムシンポジウム講演論文集,30,838-843(2014).
- 82) 岩佐和典, 小松孝徳：人工知能学会論文誌,30(1),265-272(2015).



Fig.1.1 Remote controller of Bang & Olufsen (BeoRemote One).⁹⁾



(a) Untreated surface

Fig.1.2 Surface of transparent acrylic resin.



(b) Treated surface

Fig.1.2 Surface of transparent acrylic resin.



Fig.1.3 Tea Bowl (Hon'ami Koetsu).
The Metropolitan Museum of Art Collection

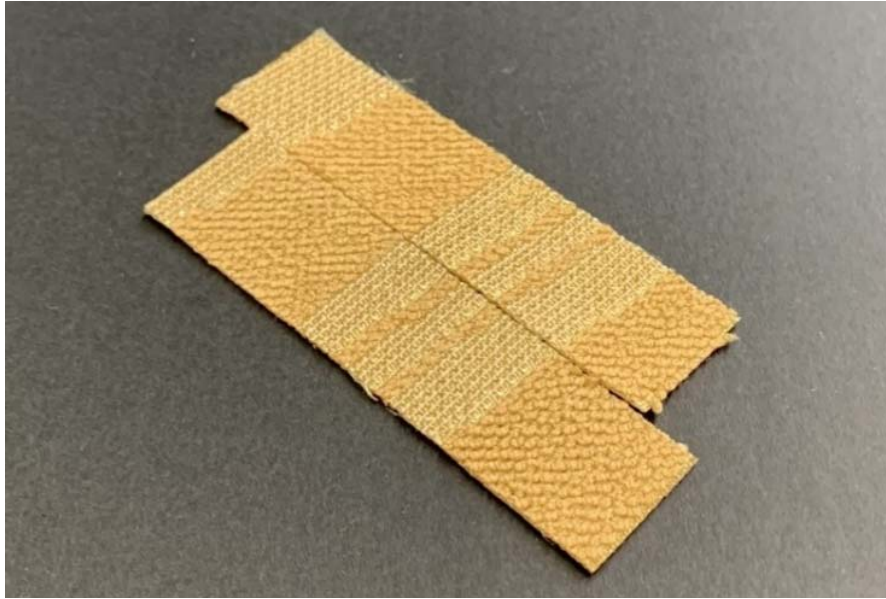
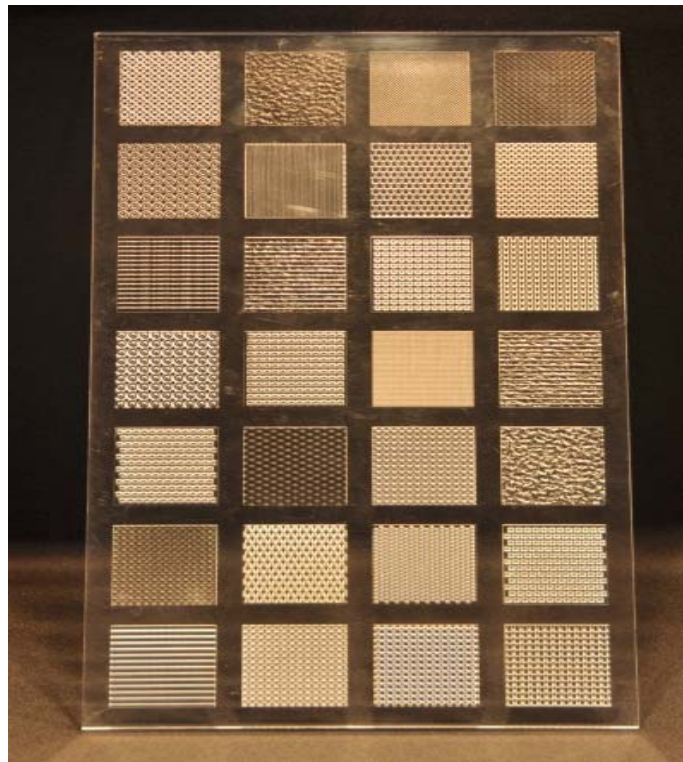


Fig.1.4 Picture of Textile.



(a) Sample of the processed transparent acrylic resin.

Fig.1.5 Picture of Samples.

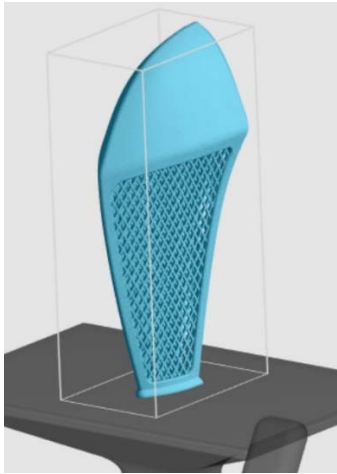


(b) Sample of the plated resin.

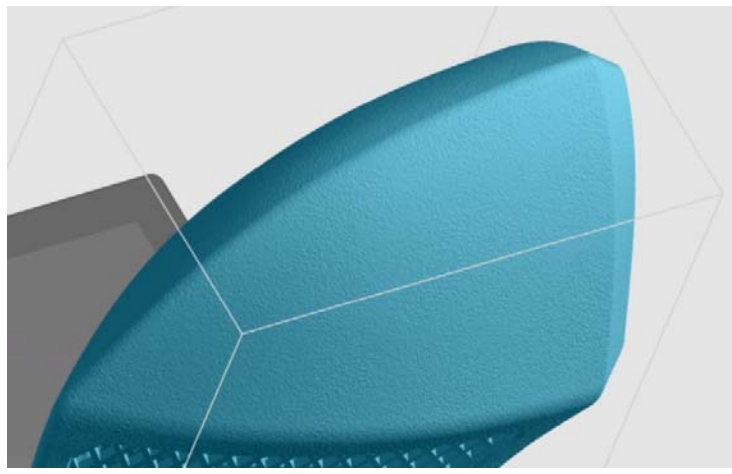


(c) Sample of the anodically oxidized aluminum alloy.

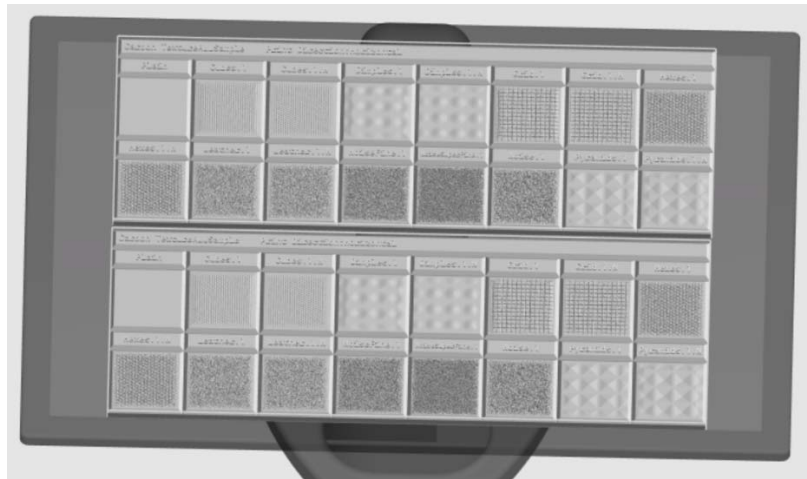
Fig.1.5 Picture of Samples.



(a) Overall view



(b) Enlarged view



(c) Digital texture Data



(d) Digital texture sample printed with 3D printer.

Fig.1.6 Surface of digital texture.



Fig.1.7 The reproduction print of the “Girl with a pearl Earring (Johannes Vermeer).¹⁷⁾

附属書 B (参考) モチーフパラメータと表面機能との関係

附属書 B 表 1 は、表面機能に従って指定するモチーフパラメータを情報として示す。

附属書 B 表 1

表面	表面機能		パラメータ									
			粗さモチーフ パラメータ			うねりモチーフ パラメータ				断面曲線 パラメータ		
			項目	記号*	R	Rx	AR	W	Wx	Wte	Aw	Pt
接触 2 表面	相対運 動をす る場合	潤滑下の滑り	FG	●			≦0.8R			○		●
		乾燥摩擦	FS	●		○		●		○		
		転がり	FR	●			≦0.3R	●		○		○
		衝撃抵抗	RM	○		○	○			○		●
		流体摩擦	FF	●		○				○		
	動的シー リング	ガスケット有	ED	●	○	○	≦0.6R	●		○		
		ガスケット無		○	●		≦0.6R					●
	相対運 動をし ない場 合	静的シー リング	ガスケット有	ES	○	●		≦R		○	○	
			ガスケット無		○	●		≦R	●			
		接触	AC	○								●
単 独 表 面	応力大 の場合	切削工具 (切刃面)	OC	○		○	●			●		
		疲れ強度	EA	○	●	○						○
	応力が ない場 合	耐腐食	RC	●	●							
		ペンキ塗装	RE			○				○		
		電気めっき	DE	●	≦2R	●						
		測定寸法	ME	●			≦R					
外観	AS	●		○	○			○				

備考 ●：最も重要なパラメータ：少なくとも一つは指示をする。
○：副次的なパラメータ：部品機能にとって必要な場合に指示する。
≦0.8Rの表示：例えば、FGの場合、Wが指示されていないならば、Wの上限値は、Rの上限値の0.8倍とする。

注* 記号 (FG など) は、フランス語による名称の頭文字である。

Fig.1.8 JIS B 0631:2000 Annex B

“Relation between motif parameters and function of surfaces”.

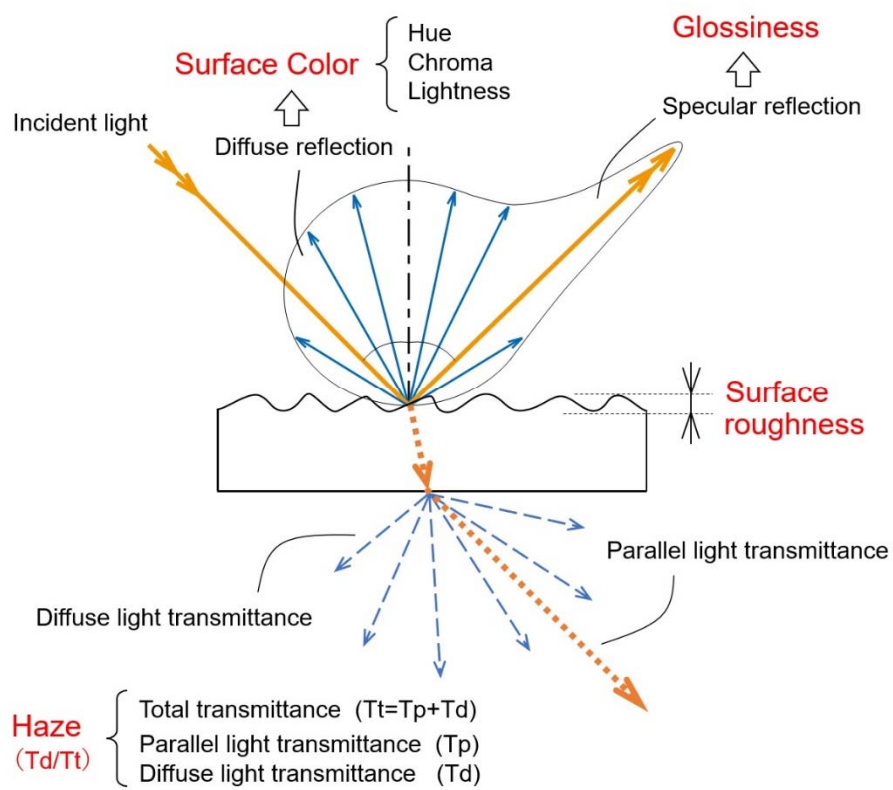


Fig.1.9 Pattern diagram of reflectance and transmittance.

第2章 視覚のテクスチャー評価パラメーター

2.1 緒言

本研究では、視覚のテクスチャーを定量的に評価するパラメーターとして、先に述べた表面粗さ、光沢度、表面色及び曇り度（ヘーズ）を用いる。本章では、これらのパラメーターの概要と測定方法について示す。また、本研究で主に試験片として使用する透明なアクリル樹脂板及び本研究で試験片を加工するために用いたショットブラスト加工の概要も併せて示す。

2.2 表面粗さ（表面性状）¹⁻⁴⁾

2.2.1 表面粗さ（表面性状）パラメーターの概説

加工した表面の凹凸形状が加工表面の品質や機能、さらには最終製品の性能に大きな影響を与える。そのため、表面の微細な凹凸形状を数値化し、管理する必要がある。すなわち、表面の凹凸形状を測定し、管理することで最終製品の高い性能を維持することが可能である。表面の凹凸形状、キズ、スジ目といった表面の形状的な特性を総称して表面性状と呼び、それらを定量化し数値化したものが表面性状パラメーターである。表面性状パラメーターには、大別して輪郭曲線方式と三次元方式の二種類がある。輪郭曲線方式は、表面の凹凸形状が切断面に現れる曲線である輪郭曲線を用いて表面性状パラメーターを定義し、古くから用いられてきた。この方式の正式名称は輪郭曲線方式であるが、慣習的に線粗さと呼ばれてきた。輪郭曲線方式は、機械的な接触で表面をトレースするため、測定データの信頼性が高いというメリットがあり、これまでの利用実績も豊富である。輪郭曲線方式の代表的なものとして工業会において最も広く使われる表面性状パラメーターが算術平均粗さ Ra である。算術平均粗さ Ra は、基準長さ(l)における高さ $Z(x)$ の絶対値、すなわち平均線からの

高低差の平均を表し、次式で求める。

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |Z(x)| dx$$

しかし、輪郭曲線方式は測定時に機械的な接触を伴うため、測定対象物の表面に傷をつける可能性があること、柔らかいものは測定できないというデメリットがある。また、表面の一つの断面形状の情報だけから表面の凹凸形状を評価するため、必ずしも表面全体の凹凸形状の特徴を捉えられていると限らないというデメリットもある。一方、三次元方式は、表面性状パラメーターを二次元的な曲線から求めるのではなく、より情報量の豊富な面方向に広がりを持った三次元的な表面の凹凸形状のデータから求める方式である。この方式は、慣習的に二次元の線粗さに対し面粗さと呼ばれている。また、三次元方式では、光学的な手法を使った非接触測定機が用いられている。そのため、表面に傷を付けることなく、柔らかいものも測定することができる。また、一つの断面だけではなく、三次元的に広がりを持った凹凸形状データから表面の特徴を捉えるため、キズやスジ目の方向といった輪郭曲線方式では評価が困難であった特徴についても把握することが可能である。例えば、Fig.2.1 のように表面にキズがある場合、輪郭曲線方式では表面の凹凸形状を線で評価するため、測定した凹凸形状が粗さ曲線なのか、傷によるエラーかを判断することは困難である。それに対して、三次元方式は表面の凹凸形状を面として評価するため、キズとして判断し、エラーと認識することができる。また、Fig2.2 のように方向性を有する表面を測定する場合、輪郭曲線方式は線評価であるため、測定方向の影響が大きく、凹凸形状の方向性を認識することが困難である。一方、三次元方式では、面評価を行うため、凹凸形状の方向性を認識することが可能である。さらに、三次元方式は、情報量が豊富なため、耐摩耗性、固体間の密着性、潤滑油の保持能力といった表面に求める機能と表面性状パラメーターを関連付けることにも効果的な方法といえる。

線評価である輪郭曲線方式の表面性状パラメーターについては多くの研究がなされてい

る。たとえば、吉田は、輪郭曲線方式の表面性状パラメーターの測定方法などについて解説している⁵⁻⁸⁾。齋藤ら⁹⁾はコンクリート表層部の劣化評価、青木ら¹⁰⁾は歯科用レジンの摩擦による表面性状の変化、岸本¹¹⁾は歯科用レジンのアルカリ環境下での表面性状の変化、松本ら¹²⁾はショットピーニング処理した金型の表面性状の特徴評価について、輪郭曲線方式の算術平均粗さ Ra を用いて調べている。また、石田ら¹³⁾は、鋼板の表面の粗さを触針式測定機で行い、輪郭曲線方式の表面性状パラメーターで評価している。そして、線評価である輪郭曲線方式の限界と問題点をあげ、表面性状の三次元表示システムを提案している。一方、面評価である三次元方式の表面性状パラメーターについては、パラメーター解説が多く、三次元表面性状パラメーターを活用した研究は少ない。柳ら¹⁴⁾は、国際評価機構 (ISO) における三次元表面性状パラメーターの検討状況について報告している。増田¹⁵⁾は、触針式の粗さ測定機と光学式の白色干渉計を用いて線及び面粗さの測定を行い、装置の測定値がほぼ同等であることを確認した。児野¹⁶⁾は、三次元表面性状パラメーターの紹介とともに、その活用の一例として体積パラメーターの使用方法を例示している。平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書¹⁷⁾では、プレス加工されたアルミニウム合金板の表面評価を三次元方式の算術平均高さ Sa で行っている。平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書¹⁸⁾では、ショットブラスト加工したチタン合金棒の表面評価に算術平均高さ Sa を使用している。吉田ら¹⁹⁾は、接着面の算術平均高さ (Sa) が加熱硬化型エポキシ系接着剤の接着継手強度に及ぼす影響はほとんどないことを示した。水呉ら²⁰⁾は、シアノアクリレート系接着剤の接着強度増加が展開面積比 (Sdr) によって評価できることを示した。

本研究では、先に述べたように、視覚のテクスチャーのうち光沢度、表面色及び曇り度が面評価であるため、表面粗さについても面評価である三次元方式の表面性状パラメーターを用いた評価を行う。Table 2.1 は、ISO25178-2:2012 で定義された三次元表面性状パラメーターの一覧である。ISO25178-2:2012 は、2018 年に日本語に翻訳され、日本産業規格 JIS B 0681-2:2018 「製品の幾何特性仕様 (GPS) — 表面性状：三次元 — 第二部：用語、定義

及び表面性状パラメータ」として規定された。ただ、ISO25178-2:2012 において新たに導入されたパラメータ群である Feature parameter の定義、Geometrical feature に関する用語の定義、Fractal methods の定義、Feature characterization に関する用語の定義については、算出方法、用語の定義などが確立しておらず、次回の国際規格改訂時に大幅な修正が予定されていることから、JIS B 0681-2:2018 には規定されなかった。

ISO25178-2:2012 に定義された三次元表面性状パラメータは次の 6 種類に分類され、約 40 種類のパラメータが規定されている。ここで、分類ごとの概略をまとめる²¹⁾。

(1) 高さパラメータ (Height parameters)

高さパラメータは、表面の凹凸形状の高さをもとに得られる各種表面性状の特徴を表すパラメータである。代表的なパラメータとして、算術平均高さ (S_a) や最大高さ (S_z) などがある。これらは二次元パラメータを三次元に拡張したものであり、工業会において最も広く使われているパラメータの一つである。

(2) 空間パラメータ (Spatial parameters)

空間パラメータは、平面方向(波長方向)に着目したパラメータで、表面の凹凸形状の異方性や等方性の方向依存性(スジ目)を示すパラメータである。例えば、空間パラメータを用いることで、ヘアライン仕上げのスジ目を目視による定性的な評価から定量的な評価へ転換することが可能である。

(3) 複合パラメータ (Hybrid parameters)

複合パラメータは、高さ方向と平面方向(波長方向)の両方、すなわち表面積に着目したパラメータであり、表面の凹凸形状の細かさを表現する間接的なパラメータとして利用できる。

(4) 機能と関連するパラメータ (Functions and related parameters)

機能と関連するパラメータには、表面の凹凸形状の持つ機能性を表したパラメータが定められている。これらは、二次元パラメータのプラトー構造表面パラメータ

を三次元に拡張したパラメーターである。例えば、ベアリングやピストンヘッドなどにおける潤滑油保持の評価や自動車の駆動部品の摩擦評価などに使用される。また、フラクタル法を三次元表面性状の解析に応用したパラメーターも規定されている。これらは、従来の二次元パラメーターにはなく、三次元方式で新たに提案されたパラメーターである。しかし、フラクタル法については先に述べたように JIS B 0681-2:2018 には定義されていない²²⁾。

(5) その他パラメーター (Miscellaneous parameters)

その他パラメーターには、表面凹凸形状の方向性（スジ目の向き等）を角度で表す輪郭曲面のテクスチャーの方向 (*Std*) が規定されている。

(6) 形体パラメーター (Named feature parameters)

形体パラメーターには、輪郭面の山や谷といった形状要素を利用したパラメーターが規定されている。しかし、形体パラメーターは先に述べたように JIS B 0681-2:2018 には定義されていない。

2.2.2 本研究で使用した表面粗さ（表面性状）パラメーター

次に、ISO25178-2:2012 及び JIS B 0681-2:2018 に基づき、本研究において主に使用した表面性状パラメーターについて個別に説明を行う。

(1) 高さパラメーター (Height parameters)

高さパラメーターは、表面の凹凸形状の高さをもとに得られる各種表面性状の特徴を表すパラメーターである。本研究では、算術平均高さ S_a 、二乗平均平方根高さ S_q 、最大高さ S_z 、最大山高さ S_p 、最大谷深さ S_v 、スキューネス S_{sk} 及びクルトシス S_{ku} を用いた。

A) 算術平均高さ S_a

算術平均高さ S_a は、表面の粗さを表す代表的な二次元パラメーターである線粗さの算

術平均粗さ Ra を三次元拡張したパラメーターであり、基準領域(A)における高さ $Z(x,y)$ の絶対値の平均、すなわち平均面からの高低差の平均を表している。Fig.2.3 に算術平均高さ Sa の概略図を示す。算術平均高さ Sa はキズ、ゴミや測定上のノイズ等の外乱の影響を受けにくく、安定した結果を得ることができる。算術平均高さ Sa は次式で算出する。ここで、 $Z(x,y)$ は、直交座標系における任意の点(x,y)における高さの値であり、 A は測定領域を表している。

$$Sa = \frac{1}{A} \int \int_A |Z(x,y)| dx dy$$

B) 二乗平均平方根高さ Sq

二乗平均平方根高さ Sq は、二次元パラメーターの二乗平均平方根高さ Rq を三次元拡張したパラメーターであり、基準領域(A)における高さ $Z(x,y)$ の二乗平均平方根、すなわち高さ分布の標準偏差を表している。Fig.2.4 に二乗平均平方根高さ Sq の概略図を示す。二乗平均平方根高さ Sq は、統計的な取り扱いが容易かつキズ、ゴミや測定上のノイズ等の外乱の影響を受けにくいいため、安定した結果を得ることができる。二乗平均平方根高さ Sq は次式で算出する。

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \int \int_A Z^2(x,y) dx dy}$$

C) 最大高さ Sz , 最大山高さ Sp , 最大谷深さ Sv

最大高さ Sz は、二次元パラメーターの最大高さ Rz を三次元拡張したパラメーターであり、基準領域(A)における凹凸形状の山頂の高さの最大値(最大山高さ Sp)と谷底の深さの最大値(最大谷深さ Sv)を足し合わせた値である。Fig.2.5(a)に最大高さ Sz , (b)に最大山高さ Sp , (c)に最大谷深さ Sv の概略図を示す。最大高さ Sz は、ピーク値を利用するため、キズ、ゴミや測定上のノイズ等の外乱の影響を受けやすい性質を持っている。最

大高さ S_z , 最大山高さ S_p , 最大谷深さ S_v は次式で算出する。

$$S_z = S_p + S_v$$

$$S_p = \max_A Z(x, y)$$

$$S_v = \left| \min_A Z(x, y) \right|$$

D) スキューネス S_{sk}

スキューネス S_{sk} は、二次元パラメーターのスキューネス R_{sk} を三次元拡張したパラメーターであり、高さ分布のヒストグラムの偏り具合、すなわち歪度を表すパラメーターである。Fig.2.6 にスキューネス S_{sk} の概略図を示す。スキューネス S_{sk} により平均面に対する凹凸形状の偏りを評価でき、滑り面の摩擦や潤滑用の油溜まりの評価に利用することができる。また、スキューネス S_{sk} の値によって凹凸形状の高さの分布の偏りを次のように評価することができる。例えば、スキューネス $S_{sk} < 0$ の場合、凹凸形状の高さの分布が平均面に対して上側、すなわち山側に偏っている。スキューネス $S_{sk} = 0$ の場合、山と谷の高さの分布が平均面に対して対称に存在している。スキューネス $S_{sk} > 0$ の場合、高さの分布が平均面に対して下側、すなわち谷側に偏っている。スキューネス S_{sk} は、二乗平均平方根高さ S_q の三乗によって無次元化した基準領域(A)における $Z(x, y)$ の三乗平均で、次式で算出する。

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3 A} \int \int_A Z^3(x, y) dx dy$$

E) クルトシス S_{ku}

クルトシス S_{ku} は、二次元パラメーターのクルトシス R_{ku} を三次元拡張したパラメーターであり、高さ分布のヒストグラムのとがり具合、すなわち尖度を表すパラメーターである。Fig.2.7 にクルトシス S_{ku} の概略図を示す。クルトシス S_{ku} により凹凸形状の山部

や谷部の先端形状に関するパラメーターで、二つの物体の接触状態の解析に利用することができる。クルトシス Sk_u の値によって凹凸形状の高さの分布のヒストグラムのとがりが具合を次のように評価することができる。クルトシス $Sk_u < 3$ の場合、凹凸形状の高さの分布がつぶれているような形状になり、つぶれていた形状の山が多く存在している。クルトシス $Sk_u = 3$ の場合、山と谷の高さの分布が正規分布になっており、尖っている形状とつぶれている形状が混在している。クルトシス $Sk_u > 3$ の場合、高さの分布が尖っており、突出した尖った形状の山が多く存在している。クルトシス Sk_u は、二乗平均平方根高さ Sq の四乗によって無次元化した基準領域(A)における $Z(x,y)$ の四乗平均で、次式で算出する。

$$Sk_u = \frac{1}{Sq^4 A} \int \int_A Z^4(x,y) dx dy$$

(2) 空間パラメーター(Spatial parameters)

空間パラメーターは、平面方向(波長方向)に着目したパラメーターで、表面の凹凸形状の異方性や等方性の方向依存性を示すパラメーターである。本研究では、自己相関長さ Sal とテクスチャーのアスペクト比 Str を用いた。

F) 自己相関長さ Sal

自己相関長さ Sal は、表面の凹凸形状の自己相関関数 $f_{ACF}(tx, ty)$ が相関値 s に減衰する最も近い横方向の距離として定義されている。相関値 s は $0 \leq s < 1$ の間で設定され、通常 0.2 が用いられる。Fig.2.8 に自己相関長さ Sal の概略図を示す。自己相関長さ Sal は、表面の凹凸形状の横方向への大きさや複雑さを評価するパラメーターで、次式で算出する。

$$Sal = \min_{tx, ty \in R} \sqrt{tx^2 + ty^2}$$

$$R = \{(tx, ty): f_{ACF}(tx, ty) \leq s\}$$

なお、自己相関関数 $f_{ACF}(tx, ty)$ は、基準領域(A)において、ある表面性状曲面と、その表面

性状曲面を (tx, ty) だけ移動した表面性状曲面との間の相関関係を示す関数であり、次式で算出する。

$$f_{ACF}(tx, ty) = \frac{\iint_A Z(x, y)Z(x - tx, y - ty)dxdy}{\iint_A Z(x, y)Z(x, y)dxdy}$$

G) テクスチャーのアスペクト比 Str

テクスチャーのアスペクト比 Str は、自己相関関数 $f_{ACF}(tx, ty)$ が相関値 s に最も早く減衰する方向の長さ（自己相関長さ Sal に相当）と最も遅く減衰する方向の長さの比率であり、0 から 1 の値をとる。相関値 s は $0 \leq s < 1$ の間で設定され、通常 0.2 が用いられる。

Fig.2.8 にテクスチャーのアスペクト比 Str の概略図を示す。テクスチャーのアスペクト比 Str によって、表面の凹凸形状が有している方向依存性、すなわち表面のスジ目を評価することができるため、ヘアライン加工の評価パラメーターとして利用することができる。テクスチャーのアスペクト比 Str の値が 1 の場合は表面の凹凸形状が等方性を有し、0 の場合は異方性を有した表面となる。通常、テクスチャーのアスペクト比 $Str > 0.5$ の場合、強い等方性を示し、テクスチャーのアスペクト比 $Str < 0.3$ の場合、強い異方性を示している。テクスチャーのアスペクト比 Str は、次式で算出する。なお、自己相関関数 $f_{ACF}(tx, ty)$ は、先に述べた自己相関長さ Sal を算出する際に用いる関数と同じである。

$$Str = \frac{\min_{tx, ty \in R} \sqrt{tx^2 + ty^2}}{\max_{tx, ty \in Q} \sqrt{tx^2 + ty^2}}$$

$$R = \{(tx, ty): f_{ACF}(tx, ty) \leq s\}, Q = \{(tx, ty): f_{ACF}(tx, ty) \geq s\}$$

(3) 複合パラメーター (Hybrid parameters)

複合パラメーターは、高さ方向と平面（波長）方向の両方、すなわち表面積に着目したパラメーターであり、表面の凹凸形状の目の細かさを表現する間接的なパラメーターとして利用できる。本研究では、二乗平均平方根勾配 Sdq 、及び展開界面面積率 Sdr を用いた。

H) 二乗平均平方根勾配 Sdq

二乗平均平方根勾配 Sdq は、二次元パラメーターの二乗平均平方根傾斜 Rdq を三次元拡張したパラメーターであり、表面の凹凸形状の局所的な勾配（傾斜）の平均的な大きさを表す。Fig.2.9 に二乗平均平方根勾配 Sdq の概略図を示す。二乗平均平方根勾配 Sdq により表面の凹凸形状の険しさを数値化することができ、その値が大きいほど、急峻な凹凸形状を有する表面である。二乗平均平方根勾配 Sdq は、次式で算出する。

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

I) 展開界面面積率 Sdr

展開界面面積率 Sdr は、表面積の増加割合であり、測定対象領域における凹凸形状の表面積がその測定対象領域を xy 平面に投影した面積に対してどれだけ増加したかの割合を表す。Fig.2.10 に展開界面面積率 Sdr の概略図を示す。表面の凹凸形状が緻密で起伏が激しいほど、展開界面面積率 Sdr は大きくなる。接着面積が増大することによって接着強度が向上する粘着剤の指標に適したパラメーターである。また、同じ算術平均高さ Sa であっても、表面積の違いを展開界面面積率 Sdr で評価することによって、光沢感の違いを定量的に評価することが可能である。展開界面面積率 Sdr は、次式で算出する。

$$Sdr = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]} - 1 \right) dx dy \right]$$

(4) 機能と関連するパラメーター (Hybrid parameters)

J) プラトー構造表面の輪郭曲面パラメーター

プラトー構造表面の輪郭曲面パラメーターとして、コア部のレベル差 Sk 、突出山部高さ Spk 、突出谷部深さ Svk 、突出山部とコア部を分離する負荷面積率 $Smr1$ 、突出谷部と

コア部を分離する負荷面積率 $Smr2$ が規定されている。輪郭曲面パラメーターの概略図を Fig. 2.11 に示す。負荷曲面上での輪郭曲面パラメーターの算出方法は輪郭曲線方式と同様であり、負荷曲線の 40%に相当する区間の傾きが最も小さくなる直線（等価直線）からコア部のレベル差 Sk , 突出山部とコア部を分離する負荷面積率 $Smr1$, 突出谷部とコア部を分離する負荷面積率 $Smr2$ を求める。また、コア部のレベル差 Sk の幅で分断された負荷曲線の突出部分の面積と等しくなるような三角形を考え、この三角形から突出山部高さ Spk , 突出谷部深さ Svk を求める。

2.2.3 表面粗さ（表面性状）パラメーターの測定方法

試験片の表面粗さの測定には Fig.2.12 に示す超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。測定機の概略図を Fig.2.13, 測定機の仕様を Table 2.1 にそれぞれ示す。測定方式は光学方式の白色光干渉方式である。

本測定機は Fig.2.13 に示す上部ビームスプリッターにより、光源からの光を対物レンズに向ける。次に、対物レンズを内蔵ビームスプリッターにより光を2方向に分割する。このとき光は、それぞれ別々の経路を通り、一方は対物レンズ裏面の基準ミラーへ、他方は試料表面へと照射される。この光は反射・再結合され、干渉縞を形成する。なお、干渉縞を形成する方式は、使用する対物レンズにより異なる。倍率×10, ×20 及び×50 のレンズを使用する場合は Fig.2.14(a)に示す Mirau 方式を用いる。また、倍率×2.5, ×5 のレンズの場合には、Fig.2.14(b)に示す Michelson 方式を用いる。そして、CCD カメラを用いて、得られた干渉縞パターンをパソコンに取り込む。本測定機は、広帯域光源を使用しているため、光の干渉はそれぞれの経路が等しくなった時だけ生じる。そのため、対物レンズを上下に移動し、CCD カメラのピクセル毎に干渉が最も強くなる点をコヒーレント・コリレーションアルゴリズムにより検出し、試料表面の三次元データを形成する。測定した画像の解析は Talymap Gold version 4.1.1(アメテック株式会社製)を用いた。なお、測定回数は各試験片

に対して3回とし、測定値はその平均値とした。

本研究では、測定倍率を20倍とし、Mirau方式を用いた。また、測定面積は $0.865 \times 0.865 \text{mm}^2$ 、画素数は 1048×1048 とし、三次元表面性状パラメーターの値を算出する際の面積は測定面積中央部の $0.81 \times 0.81 \text{mm}^2$ とした。三次元表面性状パラメーターの値は、ISO 25178-2:2012で定義されている高さパラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターを用いた。

2.3 光沢度の測定方法

光沢度の測定には、光沢度計 GM-268(コニカミノルタホールディングス株式会社製)を用いた。測定器の外観写真を Fig.2.15、測定器の概略図を Fig.2.16、測定器の仕様を Table 2.3 にそれぞれ示す。光沢度計の光源は、補助イルミネラント C の分光特性を有する白色光源とした。この光源は平均的な昼の太陽光に近く、紫外線を除いた白色光源であり、目視環境下に近い条件で測定することが可能である。

光沢度は、反射の法則に基づき、入射角 θ から試験片表面に入射した光の θ で表された正反射方向の光の強度で表す。光沢度は屈折率 $n=1.567$ であるガラス（石英あるいは硬質ガラス）面の反射率を光沢度 100%として相対的に表した値である。従って、基準面の光沢度は入射角に関係なく 100%と定義する。また、日本産業規格において、入射角度 60° で測定したときの光沢度の値が 70 を超える表面は 20° で測定し、10 以下の表面は 85° で測定するのが適すると規定している²³⁾。本研究では、入射角度を 60° として測定した。

2.4 表面色の測定方法²⁴⁾

物体の表面色は、表色系で表される。表色系とは、色を定量的に表すための体系であり、現在、工業会で用いられている主な表色系として、XYZ表色系と $L^*a^*b^*$ 色空間の2種類の

混色系表色法がある。本研究では、試験片の表面色を数値化するため、現在多くの分野で使用されている $L^*a^*b^*$ 色空間を用いる。

$L^*a^*b^*$ 色空間は、知覚的にほぼ均等な歩度を有する色空間、いわゆる均等色空間として、1976年に国際照明委員会（CIE）で規格化され、CIE1976($L^*a^*b^*$)色空間（CIELAB）と呼ばれている。日本においても、CIE1976($L^*a^*b^*$)色空間は、日本産業規格 JIS Z 8729:2004 に規定され、2013年に JIS Z 8781-4:2013 として改訂された。 $L^*a^*b^*$ 色空間では、明度を L^* 、色相と彩度を示す色度を a^* 及び b^* で表し、それぞれ JIS Z 8781-4:2013 に基づき次式より算出した。

$$L^* = \left\{ \frac{Y}{Y_n} \right\}^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = \left[\left\{ \frac{X}{X_n} \right\}^{\frac{1}{3}} - \left\{ \frac{Y}{Y_n} \right\}^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = \left[\left\{ \frac{Y}{Y_n} \right\}^{\frac{1}{3}} - \left\{ \frac{Z}{Z_n} \right\}^{\frac{1}{3}} \right]$$

ここで、 X 、 Y 及び Z は XYZ表色系の三刺激値である X 、 Y 及び Z の値である。また、 X_n 、 Y_n 及び Z_n は完全な拡散反射面において標準の光により得られた三刺激値を示し、 X/X_n 、 Y/Y_n 及び Z/Z_n は 0.008856(JIS Z 8781-4:2013)よりも大きいと規定されている。

$L^*a^*b^*$ 色空間の立体イメージを Fig.2.17 に示す。 $L^*a^*b^*$ 色空間立体イメージの水平断面図は a^*b^* 色度図と言われ、Fig.2.18 に明度 $L^*=50\%$ における a^*b^* 色度図を示す。 a^*b^* 色度図は a^* 軸と b^* 軸との直交座標からなり、 L^* 軸が a^*b^* 色度図の原点を垂直に通る。

明度を表す L^* 軸は色の明るさや暗さの度合いを示す指標であり、Fig.2.17 の最上部 $L^*=100$ のときに白、最下部 $L^*=0$ のときに黒となる。また、色度を示す a^*b^* 色度図の横軸 a^* は、正の値が大きいほど赤みが強く、負の値が大きいほど緑みが強いことを示す。一方、縦軸 b^* は、正の値が大きいほど黄みが強く、負の値が大きいほど青みが強いことを示している。

表面色の測定には、分光測色計 SD6000（日本電色工業株式会社製）を用いた。分光測色計の写真を図.2.19、分光測色計の仕様を Table 2.4、概略図を図.2.20 にそれぞれ示す。

本測色計は拡散照明（積分球）方式である。積分球とは光をほぼ完全に拡散反射する硫酸バリウム等の塗料を内面に塗布した球体である。この積分球により試験片をあらゆる方向から均等に照明することができる。本測色計では、積分球により完全拡散させた光を試料表面にあらゆる方向から均等に照明し、その反射光を 8°方向で受光する d/8 拡散照明方式である。反射光は平面回折格子を用いて分光され、波長ごとの反射率を CMOS リニアイメージセンサーにより受光する。測定波長範囲は 380nm から 780nm、測定波長間隔は 5nm である。さらに、本測色計は拡散反射光用と正反射光をコントロールする 2 種類の光源を有し、約 3 秒の測定時間において、これら 2 種類の光源が順次発光し計測するシステムである。そのため、各発光により得られた測定値を演算し、正反射光を含む測定値である SCI 方式と正反射光を除去した SCE 方式の測定値をそれぞれ得ることができる。SCI 方式により得られる測定値は正反射光を含む試料表面からの全反射光を測定するため、試料の表面状態からの影響が少なく、試料自体が持つ色を測定することができる。それに対して、SCE 方式により得られる測定値は、正反射光を除去しているため、試料の表面状態の影響を受けやすく、目視に近い測定結果となる。本研究では、測定方式に目視に近く、正反射光を除去した SCE 方式を用いた。

光源は正午の太陽光に近く紫外線を含む CIE 標準光源 D65、測定範囲は 25.5mm の円形とし、観察視野は 2°とした。ここで、標準光源とは任意の標準の光の分光特性を有する人工光源であり、標準の光は日常生活において多く用いられている照明光である。本研究では、昼光を代表する標準の光である相関色温度 6500K の D65 を用いた。表面色の測定位置は試験片の中央近傍、測定回数は 3 回とし、測定値はその平均とした。

2.5 曇り度（ヘーズ）の測定方法

曇り度（ヘーズ）は、物体の曇りの度合いであり、プラスチックやガラス、液体などの透明さの程度を表す。曇り度（ヘーズ）の値は、試験片を通過する透過光のうち、前方散乱によって、入射光から 0.044rad(2.5°)以上それた透過光の百分率であり²⁵⁾、拡散透過率、全光線透過率を分光ヘーズメーターで測定し、次式より計算で求める。

$$\text{Haze}(\%) = (T_d / T_t) \times 100$$

ここで、 T_d は拡散透過率、 T_t は全光線透過率を示す。曇り度（ヘーズ）の値は、完全な透明体の場合 0(%)で、曇り具合が増加するに従い高くなる。

曇り度（ヘーズ）の値の測定には、分光ヘーズメーターNDH5000（日本電色工業株式会社製）を用いた。測定器の外観写真を Fig.2.21、測定器の概略図を Fig.2.22、測定器の仕様を Table 2.5 にそれぞれ示す。本装置では、曇り度（ヘーズ）、全光線透過率、拡散透過率、平行透過率及び濁度の測定が可能である。また、測定光源用に白色 LED を採用しているため長期間にわたるランプ交換が不要となり、ランプ交換によるデータのズレがなく、測定開口窓の開閉作業がいらないためオープンの状態でも外光の影響を受けずに測定が可能となっている。光源部と受光部がセパレート式のため大型サンプルにおける面分布測定にも最適であり、補償開口を備えた $\phi 150\text{mm}$ 積分球の採用とダブルビーム方式により空気層にて連続 20 回の測定を行い標準偏差 0.03%以内の精度を実現している。測定に関する準拠規格は、JIS K 7136:2000 プラスチック-透明材料の曇り度（ヘーズ）の求め方 (ISO14782:1999)、JIS K 7361:1997 プラスチック透明材料の全光線透過率の試験方法 (ISO13468-1:1996) である。なお、本研究において、測定面の形状は直径 25.0mm の円形とした。

2.6 試験片の材料と加工方法

2.6.1 試験片の材料

本研究では、主に試験片の材料に透明なアクリル樹脂板(住友化学株式会社製)を用いた。アクリル樹脂は、優れた耐久性や耐候性を有するとともに高い透明性を持った素材である。この特性を活かして、さまざまな製品に使用されている。例えば、沖縄美ら海水族館の巨大水槽はアクリル樹脂で作られており、高い透明度を保ちながら、7500 トンもの水圧を高さ 8.2m、幅 22.5m、厚さ 60 cmのアクリル樹脂で受けている。同様に、水圧に対する高い耐久性から深海探索用の潜水艇の窓にも使用されている。アクリル樹脂が工業化されたのは 1930 年代であり、高い透明性と同時に高い耐久性や耐候性を持っている特性から軍用として利用が開始され、現在戦闘機などの風防（キャノピー）に使用されている。例えば、アメリカの代表的な戦闘機 F-15 のキャノピーにもアクリル樹脂が使われている。この戦闘機での使用から派生し、今でも多くの航空機の窓に使用されている。また、身近な製品として、ボールペンやコップなどの日用品、窓材や照明器具などの建材、自動車用の内装部品、電子部品、道路標識などの産業用資材などあらゆるものに使用されている^{26,27)}。

2.6.2 試験片の加工方法

本研究では、透明なアクリル樹脂板の表面に物理的な凹凸形状を再現するために、ショットブラスト加工を用いて、試験片の表面に任意の凹凸形状を付与した。

ショットブラスト加工の歴史は古く、1860 年代後半にアメリカで考案された。当時は、蒸気によって砂を噴射して石材やガラスなどの切断加工を行っていた。投射材に自然の砂を使用していたのでサンドブラストと呼ばれており、その名残は今でも残っている²⁸⁾。日本においても、昭和 20 年代には鋼船の建造において、鋼板表面の見るスケールを除去するために利用されていた³⁰⁾。ショットブラストの主な目的は、サビ取り、バリの除去などの

機械加工後の不要な部位を取り除くために用いるとともに、表面の質感を向上させるための梨地表面加工などである。また、加工が容易なため、Fig.2.23 に示すように観光地での手作り記念品などの加工方法としても使用されている。

ショットブラスト加工を施した試験片の表面の凹凸形状は、投射材の粒度、距離、圧力や時間などの関係によって形成される。本研究では、試験片表面の物理特性を定量的に得るために、加工者の技術に左右されにくく、より再現性の高い算術平均高さ Ra の結果を目標とした。試験片材料として透明なアクリル樹脂板、投射材として球状のガラスビーズを用い、投射材の投射量と吹付圧力などを任意に変化させ、算術平均粗さ Ra が $0.1\sim 1.2\mu\text{m}$ の範囲で段階的に変化するようにショットブラスト加工を施した。そして、片面のみにショットブラスト加工を施した試験片と両面に加工を施した試験片の 2 種類を製作した。なお、両面に加工を施す場合の加工条件は表面、裏面とも同一条件とした。

2.7 結言

本章では、本論文においてテクスチャーの定量的評価指標として用いる「表面粗さ」、「光沢度」、「表面色」及び「曇り度（ヘーズ）」の概要と測定方法について示した。また、本論文で主に試験片として使用する透明なアクリル樹脂板及び本論文で試験片を加工するために用いたショットブラスト加工の概要を示した。

参考文献

- 1) オリンパス株式会社編：表面粗さ測定入門書(2018).
- 2) 小野田有吾：The Hitachi Scientific Instrument News, 59(2),5217-5226(2016).
- 3) 中島秀郎，藤井岳直：九州大学中央分析センターニュース,122,1-8(2013).
- 4) 佐藤敦：精密工学会誌,81(10),922-925(2015).

- 5) 吉田一朗：精密工学会誌,78(4),301-304(2012).
- 6) 吉田一朗：精密工学会誌,79(5),405-409(2013).
- 7) 吉田一朗：精密工学会誌,80(12),1071-1075(2014).
- 8) 吉田一朗：精密工学会誌,82(2),142-147(2016).
- 9) 齋藤憲寿, 徳重英信：土木学会論文集 E2,74(1),53-65(2018).
- 10) 青木春美, 宮坂平, 石田祥己, 青柳有祐, 三浦 大輔：日本歯科理工学会誌,37(2),109-117(2018).
- 11) 岸本崇史：日本歯科保存学雑誌,58(6),482-495(2015).
- 12) 松本良, 甲斐信宏, 富田雄人, 梶岡彰, 森章司, 宇都宮裕：塑性と加工,56(656),793-797(2015).
- 13) 石田次雄, 高橋英生：金属表面技術,34(7),361-370(1983).
- 14) 柳和久,原精一郎：精密工学会誌,69(8),1057-1060(2003).
- 15) 増田直也：平成 29 年度群馬県立産業技術センター研究報告,19-24(2017).
- 16) 児野武郎：長野県工技センター研報, 8,29-30(2013).
- 17) 財団法人滋賀県産業支援プラザ：平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「精密三次元鏡面に資する金属プレス加工技術の開発」研究開発成果等報告書(2010).
- 18) 財団法人滋賀県産業支援プラザ：平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「切削加工プロセスと電気分解を組み合わせた人工骨表面への多孔質加工法の開発」研究開発成果等報告書(2013).
- 19) 吉田瞬, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄：日本接着学会誌,49(6),197-203(2013).
- 20) 水呉亘, 古杉美幸, 吉田瞬, 川端康介, 杉林俊雄：日本接着学会誌,55(1),20-25(2019).
- 21) 藤井章弘：光学式表面性状測定機を対象とした応答特性の評価法及び輪郭形状の計測限界に関する研究,長岡技術科学大学博士論文(2014).
- 22) JIS B 0681-2(2018)附属書 JA.

- 23) JIS Z 8741(1997).
- 24) コニカミノルタ センシング株式会社編：色を読む話,16-17(1998).
- 25) JIS K 7136(2000).
- 26) 岸本祐一郎：計測分科会誌,18(1),24-28(2010).
- 27) 堀島涛平, 鶴田裕, 田沢栄一, 星野親房：コンクリートジャーナル,10(11),24-31(1972).
- 28) 原田泰典：表面技術,67(1),2-7(2016).
- 29) 関西造船協会：纜（らん）,15,88-96(1992).

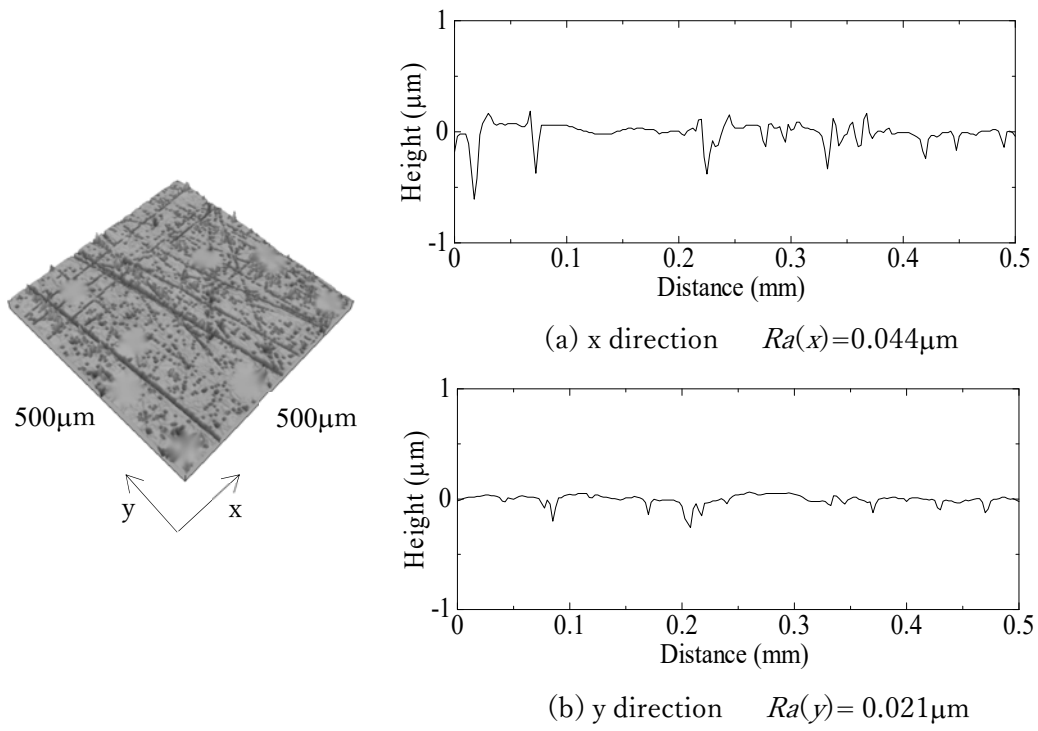


Fig.2.1 Image of scratched surface

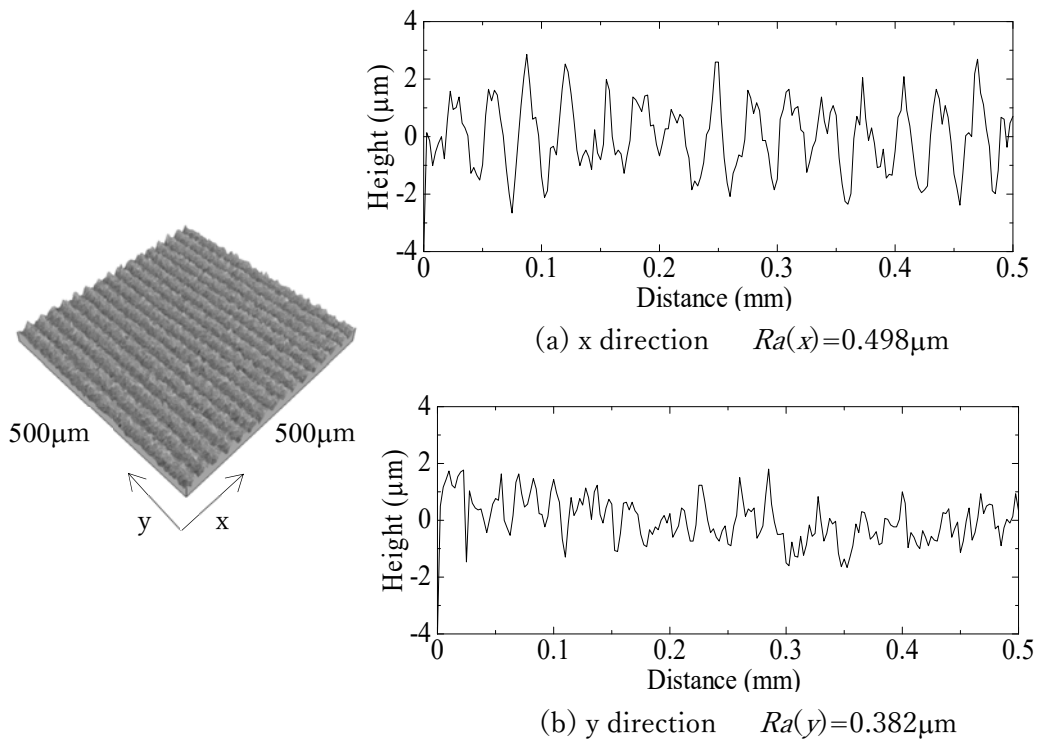


Fig.2.2 Image of directional surface.

Table 2.1 Surface texture parameters (ISO25178-2:2012)

Sections	Parameters	
4.1	Height parameters 高さ方向のパラメーター	—
4.1.1	root mean square height of the scale-limited surface 輪郭曲面の二乗平均平方根高さ	Sq
4.1.2	skewness of the scale-limited surface 輪郭曲面のスキューネス, わい (歪) 度	Ssk
4.1.3	kurtosis of the scale-limited surface 輪郭曲面のクルトシス, せん (尖) 度	Sku
4.1.4	maximum peak height of the scale limited surface 輪郭曲面の最大山高さ	Sp
4.1.5	maximum pit height of the scale limited surface 輪郭曲面の最大谷深さ	Sv
4.1.6	maximum height of the scale-limited surface 輪郭曲面の最大高さ	Sz
4.1.7	arithmetical mean height of the scale limited surface 輪郭曲面の算術平均高さ	Sa
4.2	Spatial parameters 空間パラメーター	—
4.2.1	autocorrelation length 自己相関長さ	Sal
4.2.2	texture aspect ratio テクスチャーのアスペクト比	Str
4.3	Hybrid parameters 複合パラメーター	—
4.3.1	root mean square gradient of the scale-limited surface 輪郭曲面の二乗平均平方根勾配	Sdq
4.3.2	developed interfacial area ratio of the scale-limited surface 輪郭曲面の展開界面面積率	Sdr
4.4	Functions and related parameters 機能と関連するパラメーター	—
4.4.1	areal material ratio function of the scale-limited surface 輪郭曲面の負荷曲線	—
4.4.2	areal material ratio of the scale-limited surface 輪郭曲面の負荷面積率	$Smr(c)$
4.4.3	inverse areal material ratio of the scale-limited surface 負荷面積率に対応する輪郭曲面の高さ	$Smc(mr)$

4.4.4	areal parameter for scale-limited stratified functional surfaces プラトー構造表面の輪郭曲面パラメーター	—
4.4.4.1	core surface 輪郭曲面コア部	—
4.4.4.2	core height コア部のレベル差	Sk
4.4.4.3	reduced peak height 突出山部高さ	Spk
4.4.4.4	reduced dale height 突出谷部深さ	Svk
4.4.4.5	material ratio コア部の負荷面積率	$Smr1$
4.4.4.6	material ratio コア部の負荷面積率	$Smr2$
4.4.4.7	areal material probability curve 正規確率紙上の輪郭曲線の負荷曲線	—
4.4.4.8	dale root mean square deviation Svq パラメーター	Svq
4.4.4.9	plateau root mean square deviation Spq パラメーター	Spq
4.4.4.10	material ratio Smq パラメーター	Smq
4.4.5	void volume 輪郭曲面の空間体積	$Vv(p)$
4.4.5.1	dale void volume of the scale-limited surface 輪郭曲面の突出谷部空間体積	Vvv
4.4.5.2	core void volume of the scale-limited surface 輪郭曲面のコア部空間体積	Vvc
4.4.6	material volume 輪郭曲面の実体体積	$Vm(p)$
4.4.6.1	peak material volume of the scale-limited surface 輪郭曲面の突出山部実体体積	Vmp
4.4.6.2	core material volume of the scale-limited surface 輪郭曲面のコア部実体体積	Vmc
4.4.7	peak extreme height 輪郭曲面の切断レベル差	Sxp

4.4.8	gradient density function 勾配密度関数	—
4.4.9*	Fractal methods	—
4.4.9.1*	volume-scale function	$Svs(c)$
4.4.9.2*	relative area function	$Srel(c)$
4.4.9.3*	length scale of observation	—
4.4.9.4*	volume fractal complexity	$Svfc$
4.4.9.5*	areal fractal complexity	$Safc$
4.4.9.6*	crossover scale	—
4.4.9.7*	smooth-rough crossover scale	$fSRC$
4.4.9.8*	Threshold	Th
4.5	Miscellaneous parameters その他のパラメーター	—
4.5.1	texture direction of the scale-limited surface 輪郭曲面のテクスチャーの方向	Std
6.8*	Named feature parameters	—
6.8.1*	density of peaks	Spd
6.8.2*	arithmetic mean peak curvature	Spc
6.8.3*	ten-point height of surface	$S10z$
6.8.3.1*	five-point height of surface	$S5p$
6.8.3.2*	five-point pit height	$S5v$
6.8.4*	mean dale area	$Sda(c)$
6.8.5*	mean hill area	$Sha(c)$
6.8.6*	mean dale volume	$Sdv(c)$
6.8.7*	mean hill volume	$Shv(c)$

Note ; Sections のナンバーは、ISO25178-2:2012 に準拠した。

下段は、JIS B 0681-2:2018 による日本語訳定義に準拠した。

グレーで示した項目は、6 種類の分類項目を表している。

*:「4.4.9 Fractal methods」及び「6.8 Named feature parameters」は JIS B 0681-2:2018

に定義されていない。

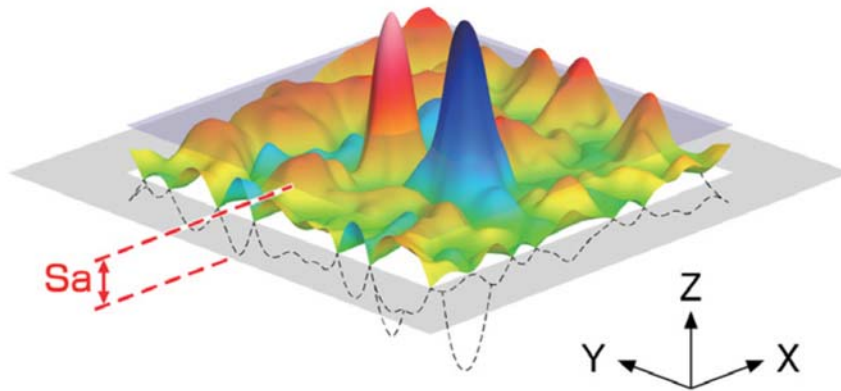


Fig.2.3 Pattern diagram of arithmetic mean height S_a .¹⁾

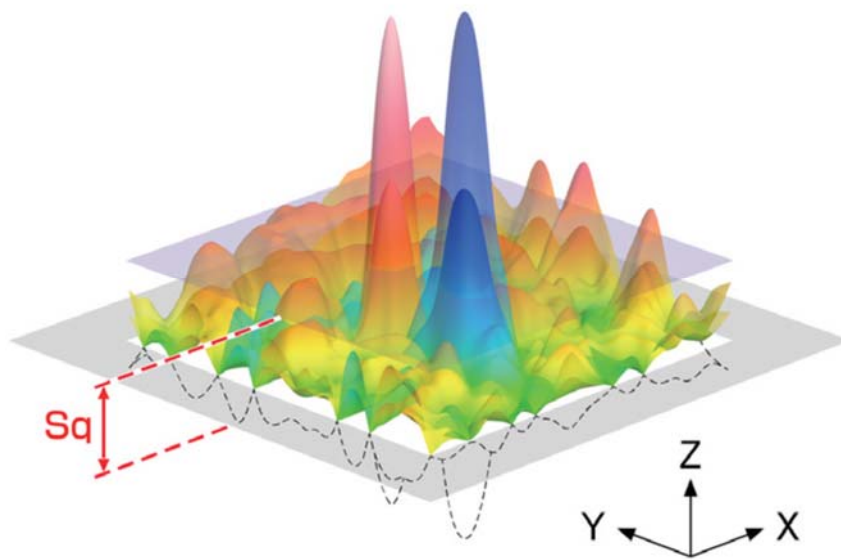
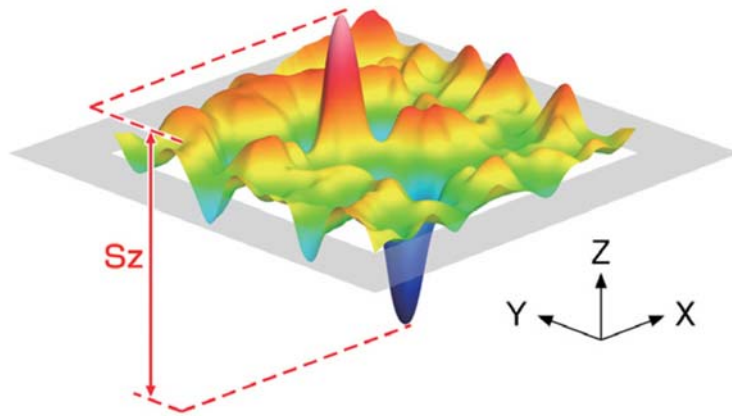
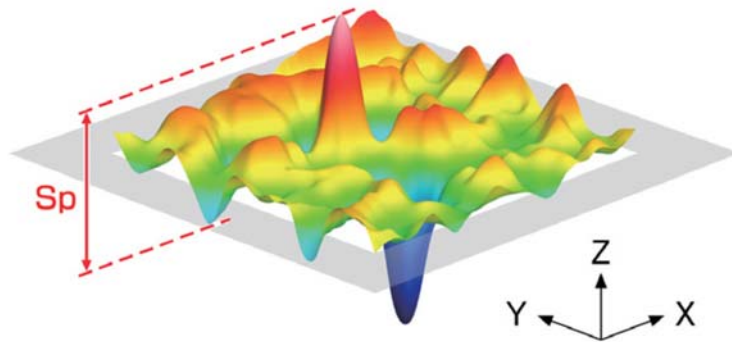


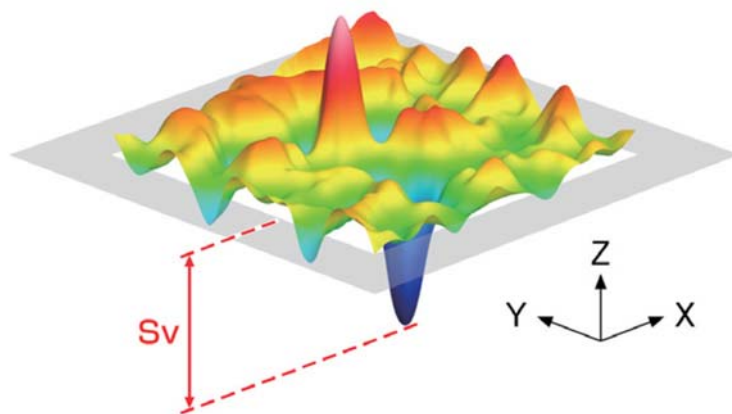
Fig.2.4 Pattern diagram of root mean square height S_q .¹⁾



(a) Maximum height S_z



(b) Maximum peak height S_p



(c) Maximum pit height S_v

Fig.2.5 Pattern diagrams of maximum height S_z , maximum peak height S_p , and maximum pit height S_v .¹⁾

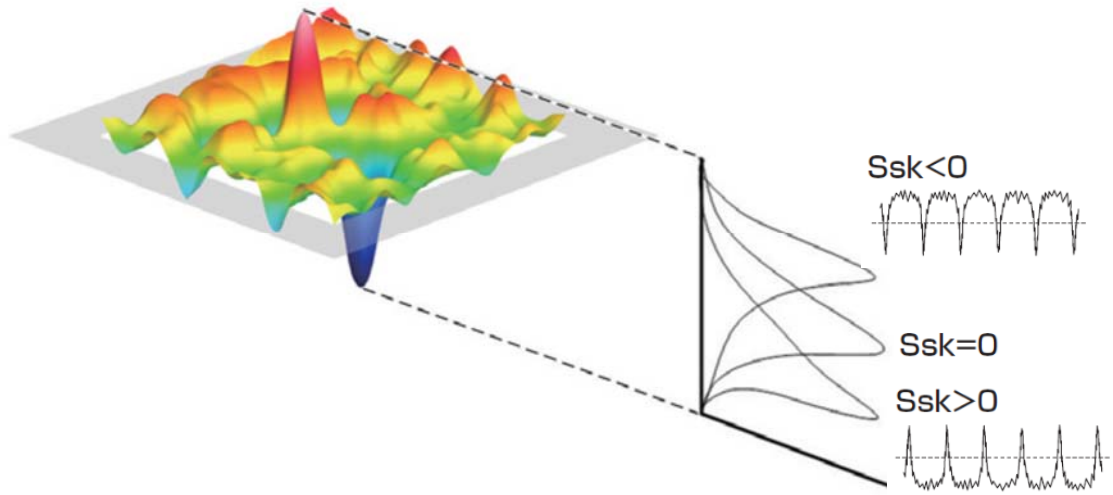


Fig.2.6 Pattern diagram of skewness Ssk .¹⁾

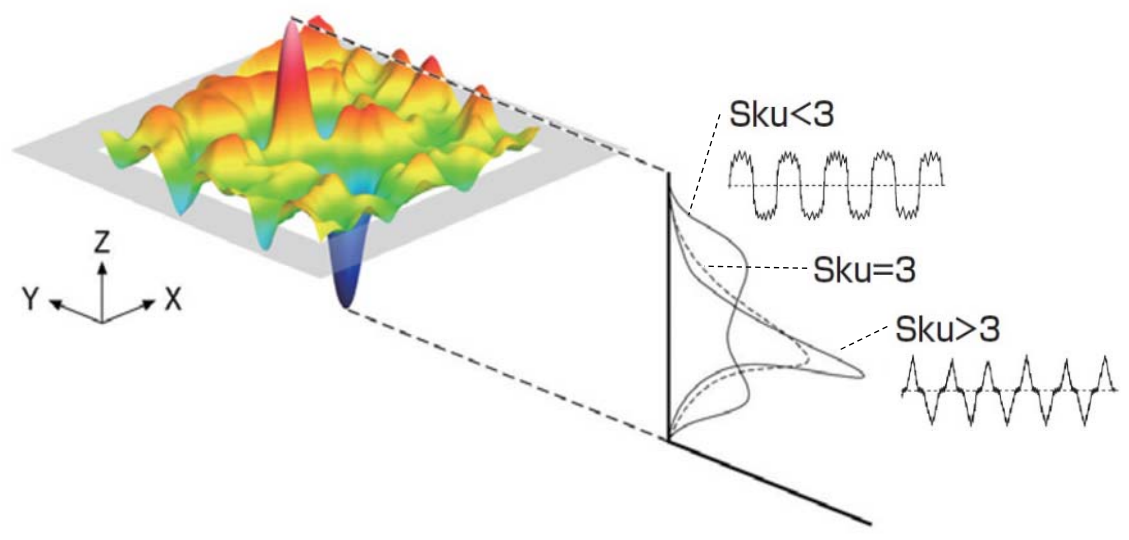


Fig.2.7 Pattern diagram of kurtosis Sku .¹⁾

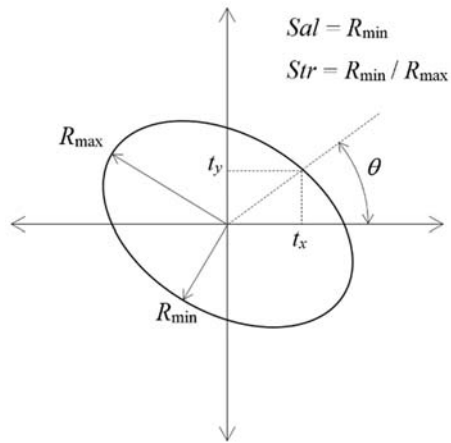


Fig.2.8 Pattern diagram of autocorrelation length S_{al} and texture aspect ratio S_{tr} .¹⁾

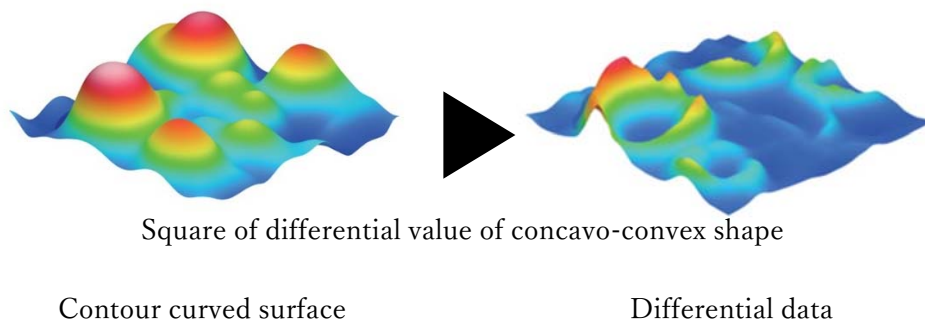


Fig.2.9 Pattern diagram of root mean square gradient S_{dq} .¹⁾

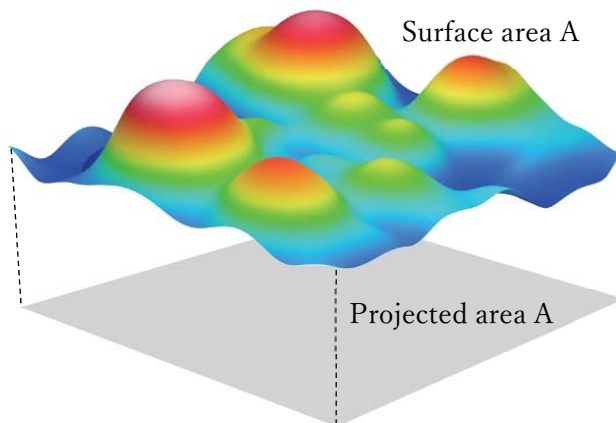


Fig.2.10 Pattern diagram of developed interfacial area ratio S_{dr} .¹⁾

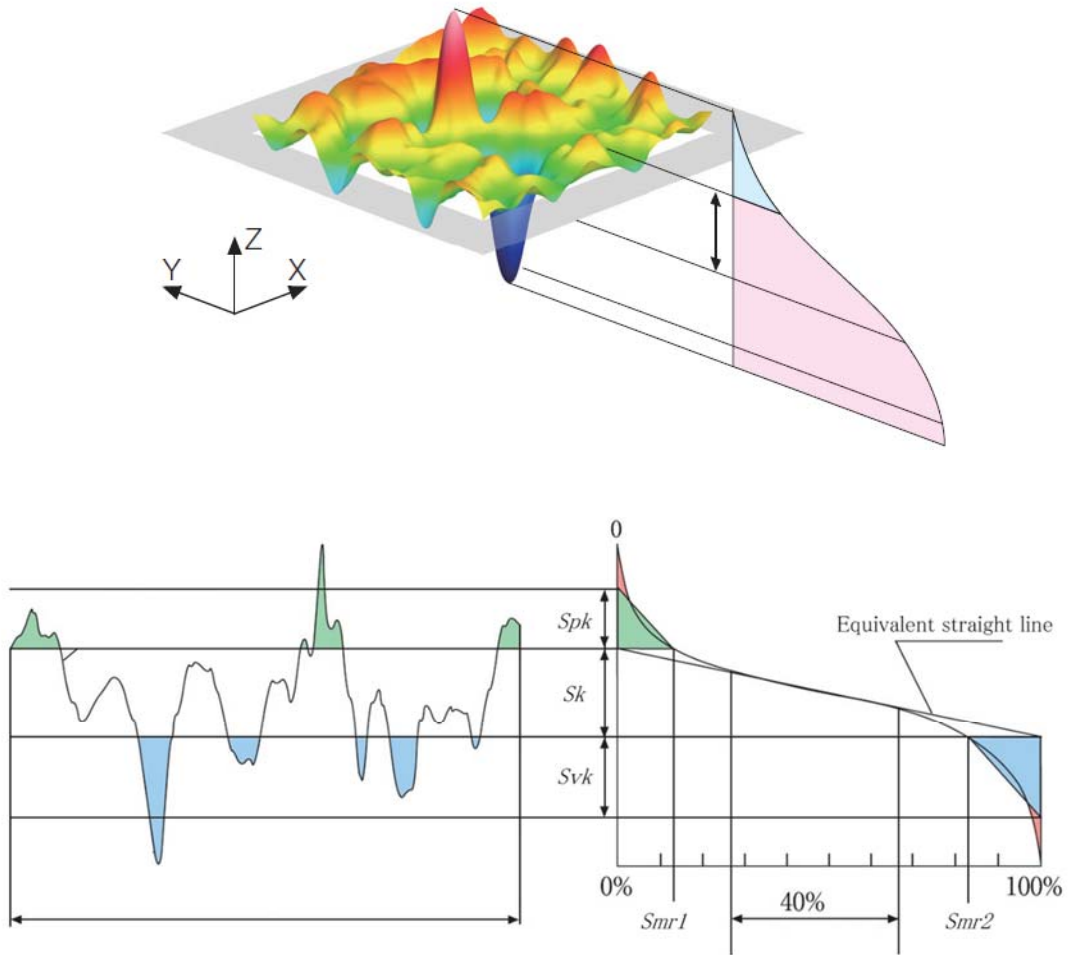


Fig.2.11 Pattern diagram of areal parameter for scale-limited stratified functional surfaces.¹⁾



Fig.2.12 Photograph of Talysurf CCI-MP.

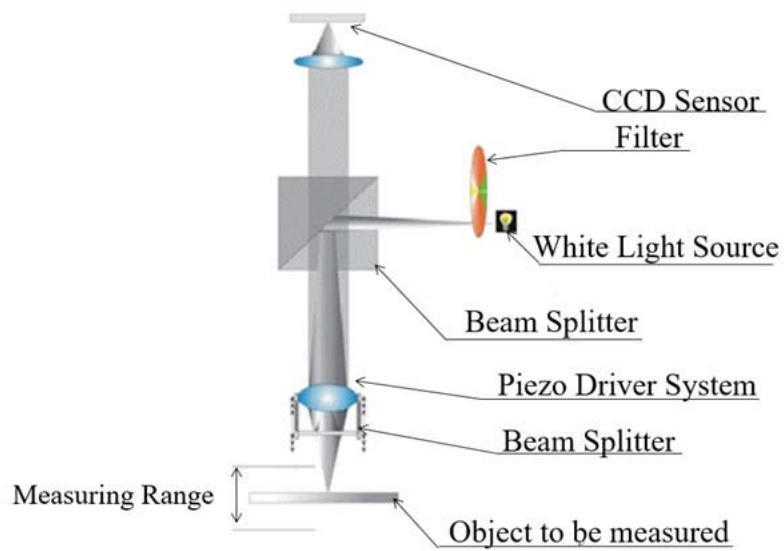


Fig.2.13 Schematic of optical head in Talysurf CCI-MP.

Table 2.2 Optical specifications.

Magnification	$\times 2.5$	$\times 5$	$\times 10$	$\times 20$	$\times 50$
Numerical aperture	0.075	0.13	1.3	0.4	0.55
Working distance [μm]	10.3	9.3	7.4	4.7	3.4
Optical resolution [μm]	7.2	3.6	1.8	0.9	0.4-0.6
Maximum slope [degrees]	2.0	4.0	7.7	14.6	27.7
Measurement area [mm]	7.0×7.0	3.6×3.6	1.8×1.8	0.9×0.9	0.36×0.36
Lateral sampling resolution [μm]	7.0	3.5	1.75	0.88	0.35

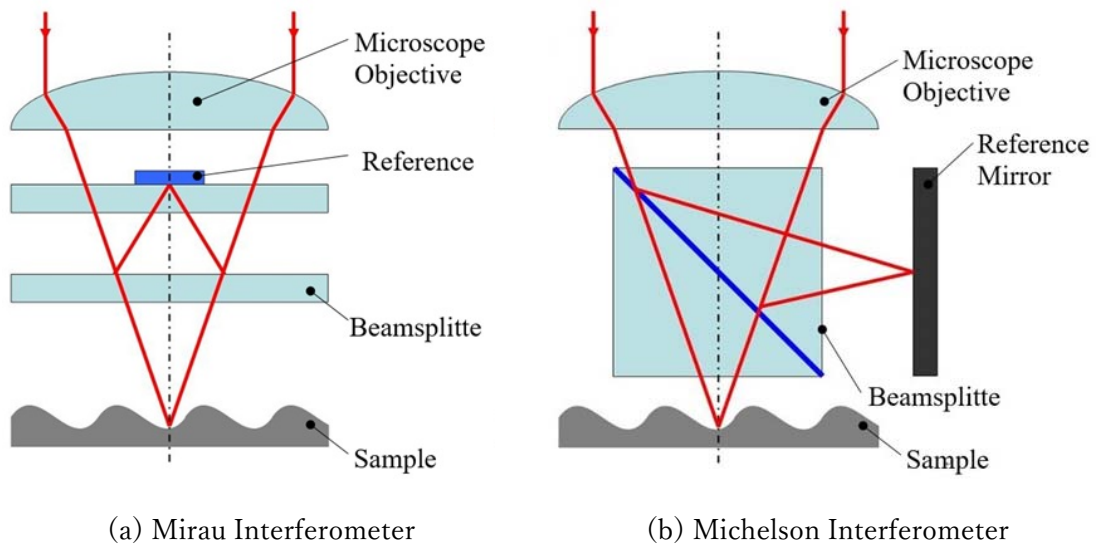


Fig.2.14 Schematic of interferometric system.



Fig.2.15 Photograph of glossmeter GM-268.

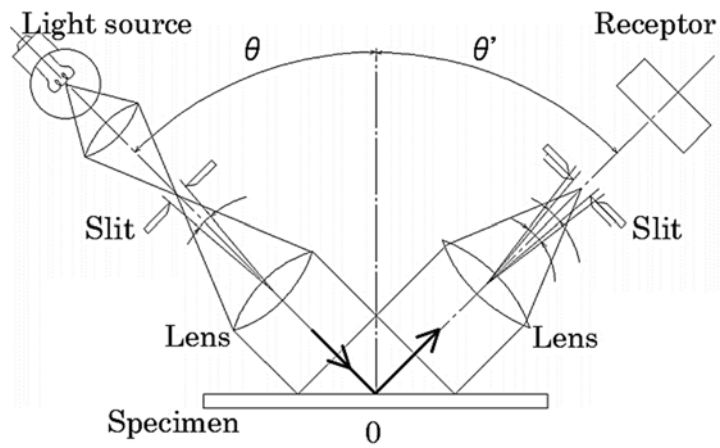


Fig.2.16 Pattern diagram of glossiness.

Table2.3 Specification of glossmeters.

Measurement angle	60°
Measurement area	9 × 15mm ²
Light source	Tungsten filament lamp
Optical receiver	Silicon photo diode
Spectroscopic characterization	CIE Standard source C

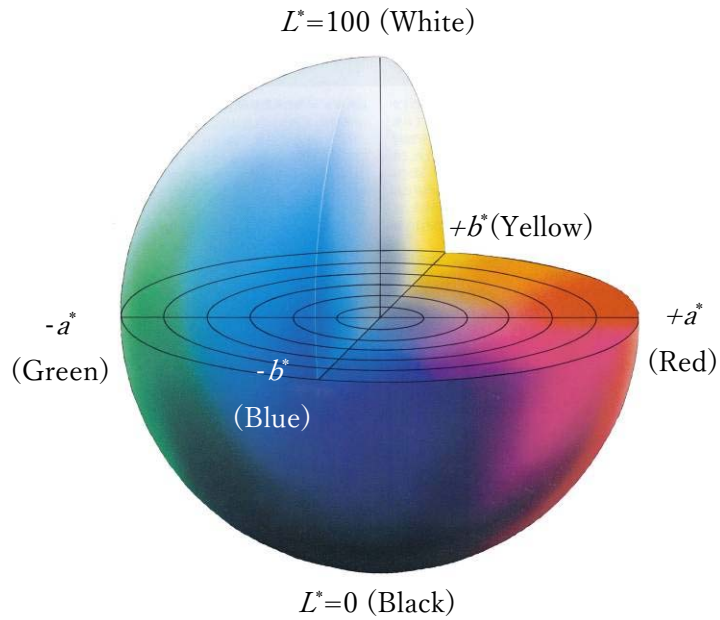


Fig. 2.17 Representation of color solid for $L^*a^*b^*$ color space²⁴⁾.

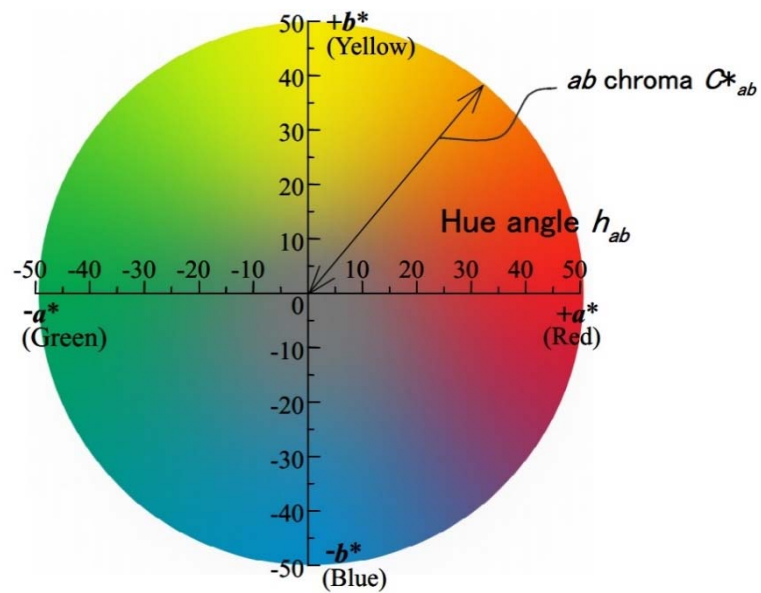


Fig.2.18 a^*b^* chromaticity diagram for $L^*a^*b^*$ color space²⁴⁾.



Fig.2.19 Photographs of spectral colorimeter SD6000.

Table 2.4 Specification of SD6000.

Illumination	d/8 (Diffuse illumination, 8-degree viewing)
Wavelength range	380nm to 780nm
Wavelength	Pitch 5nm
Measuring system	SCI / SCE
Light source	Pulsed xenon lamps

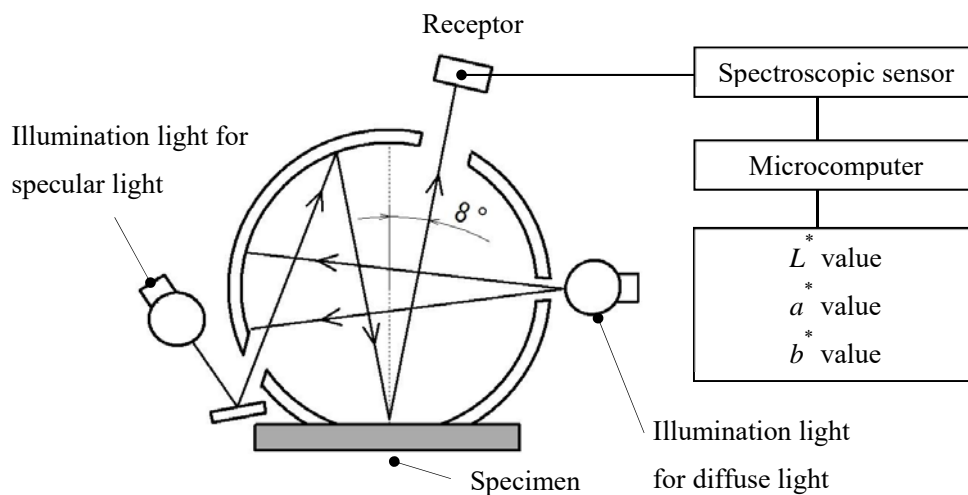


Fig.2.20 Pattern diagram of SD6000.



Fig.2.21 Photograph of hazemeter NDH5000.

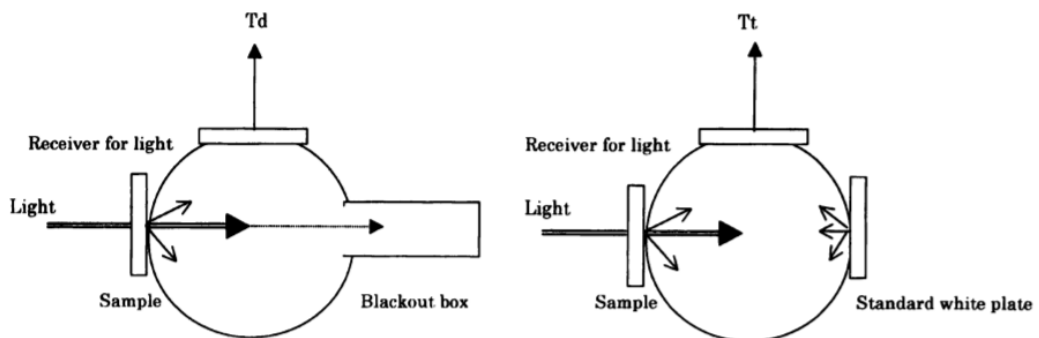


Fig.2.22 Pattern diagram of haze.

Table2.5 Specification of hazemeters.

Measurement method	Integrating sphere with compensatory opening and Double beam method
Specimen dimension	30mm × 30mm to 210mm × 297mm
Light source	white LED
Optical receiver	Silicon photo diode



Fig.2.23 Photographs of Shot blasted glass.

第3章 片面に加工を施した透明アクリル樹脂板の表面性状が 透過率及び曇り度（ヘーズ）に及ぼす影響

3.1 緒言

本章では、透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャーの設計指標について検討するため、表面の算術平均高さ S_a が $1.0\mu\text{m}$ 以下の微小凹凸領域を対象として、表面の凹凸が視覚のテクスチャーに与える影響について調べる。まず、アクリル樹脂表面の凹凸形状を定量化するため、面領域の評価が可能な三次元表面性状パラメーターについて検討する。次に、各三次元表面性状パラメーターが視覚のテクスチャーを構成するパラメーターのうち透過率及び曇り度（ヘーズ）に与える影響について調査する。そして、これらの結果を基に、微小凹凸が付与された透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャー評価指標について検討する。

3.2 実験方法

3.2.1 試験片の作製

試験片材料は透明なアクリル樹脂板(住友化学株式会社製)とし、試験片形状は $70\times 70\text{mm}^2$ の正方形、板厚は 5mm とした。試験片表面には任意の凹凸を付与するため、ショットブラスト加工を施した。ショットブラスト加工で使用するメディアはガラスビーズとした。加工の際、凹凸の再現性を考慮し、メディアの投射量と吹付圧力を任意に変化させ、算術平均粗さ R_a が $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ の範囲で段階的に変化するよう凹凸加工を施した。

3.2.2 測定方法

表面性状の測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。面空間分解能は $0.3\sim 5.4\mu\text{m}$ 、高さ方向の分解能は 10pm で微細な粗さを高精度に測定することが出来る。測定面積は $0.865\times 0.865\text{mm}^2$ 、画素数は 1048×1048 とし、三次元表面性状パラメーターの値を算出する際の面積は測定面積中央部の $0.81\times 0.81\text{mm}^2$ とした。三次元表面性状パラメーターの値は、ISO 25178-2:2012 で定義されている高さパラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターを用いた。

透過率及び曇り度(ヘーズ)の測定には白色LEDを光源とする分光ヘーズメーターNDH5000(日本電色工業株式会社製)を用いた。測定面の形状は直径 25.0mm の円形とした。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 三次元表面性状パラメーターによる凹凸形状の定量化

三次元表面性状パラメーターのうち、高さパラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターを用いて、ショットブラスト加工面における凹凸の特徴付けを行った。

まず、測定した試験片表面のうち、代表的な外観写真、表面性状の測定画像と鳥瞰図、 x 方向に平行な断面から得られた粗さ曲線をそれぞれ Fig.3.1 に示す。Fig.3.1(a)は算術平均高さ Sa の値が最小、(c)は最大、(b)はその中間の値を有する試験片表面をそれぞれ示した。表面性状の測定画像より、各表面性状における凹凸は円弧状の形状となっていた。これは、ショットブラスト加工に用いたメディアの形状が球体であるため、メディアを投射した際にアクリル樹脂表面が塑性変形し、転写されたような凹凸形状が表出したと考えられる。従って、算術平均粗さ Ra を変化させても、メディアの種類は同じであるため凹凸の形状は相似形であると推察される。そこで、凹凸の形状を評価するスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku の値を調べた。算術平均高さ Sa とスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku の関係を Fig.3.2

に示す。図より、スキューネス Ssk 及びクルトシス Sku の値がほぼ一定であることを確認した。また、ショットブラスト加工のメディアをガラスビーズとした場合、面領域の粗さを評価する三次元表面性状パラメーターで表すと、スキューネス Ssk の値は約 0、クルトシス Sku の値は約 6 となることを示した。

次に、高さパラメーターである算術平均高さ Sa と最大高さ Sz の関係を Fig. 3.3 に示す。これらのパラメーターは、触針式輪郭曲線方式で得られる算術平均粗さ Ra 及び最大高さ Rz を三次元に拡張したものである。図より、算術平均高さ Sa が大きくなるに従い最大高さ Sz の値も増加し、これらは直線的な関係にあることを確認した。そこで、高さ方向における三次元表面性状パラメーターの代表値を算術平均高さ Sa の値として、空間パラメーター及び複合パラメーターとの相関関係から表面性状の特徴について検討した。

空間パラメーターである最小自己相間長さ Sal は表面の凹凸周期を示す。また、テクスチャーのアスペクト比 Str は 0~1 の範囲において、 $Str > 0.5$ は強い等方性を示し、 $Str < 0.3$ は強い異方性を示す。最小自己相間長さ Sal 及びテクスチャーのアスペクト比 Str と算術平均高さ Sa との関係を Fig. 3.4 に示す。本実験で用いた試験片の最小自己相間長さ Sal は約 0.002~0.02mm の周期からなる凹凸形状で構成されている。さらに、算術平均高さ Sa と最小自己相間長さ Sal 間に相関性が見られ、 Sa の値が大きくなるに従い、 Sal の値も増加する傾向を示した。それに対して、テクスチャーのアスペクト比の値 Str は算術平均高さ Sa の値に関わらず 0.5 以上の値となり、ショットブラスト加工面は強い等方性を有する凹凸形状であることを示した。

また、複合パラメーターである二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr を用いて表面性状の特徴について調べた。二乗平均平方根勾配 Sdq は表面の傾きを示す。例えば、完全に平坦な面は $Sdq=0$ となり、45°の勾配成分からなる平面の場合は $Sdq=1$ となる。展開面積比 Sdr は定義領域の展開面積(表面積)が、定義領域の面積に対してどれだけ増大しているかを示す。例えば完全に平坦な面の場合、 $Sdr=0$ となり、表面に凹凸があると展開面積

比 Sdr は大きくなる。

二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr と算術平均高さ Sa との関係を Fig. 3.5 に示す。二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr の値は、算術平均高さの値が増加するに従って高くなる傾向が見られた。

以上より、ショットブラスト加工面における凹凸形状の特徴を各種の三次元表面性状パラメーターを用いて総合的に評価すると、テクスチャーのアスペクト比 Str が 0.5 以上となり、等方性を有する凹凸形状であることを明示した。また、算術平均高さ Sa が大きくなるに従い、最大高さ Sz 、二乗平均平方根勾配 Sdq 及び凹凸周期を示す最小自己相関長さ Sal は増加する傾向が得られた。一方、二乗平均平方根勾配 Sdq や凹凸周期を示す最小自己相関長さ Sal の増加に伴い展開面積比 Sdr の値も大きくなった一因として、算術平均高さ Sa 、すなわち凹凸の高さ方向の増加が大きいためと考えられる。

3.3.2 表面性状が透過率と曇り度（ヘーズ）に与える影響

算術平均高さ Sa と全光線透過率、平行透過率及び拡散透過率との関係を Fig. 3.6 に示す。算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下の場合、全光線透過率は 90% を超えており、一般的なアクリル樹脂の光学特性と一致している。このときの平行透過率は約 80%、拡散透過率は約 10% であった。さらに、算術平均高さ Sa の値が増加するに従い平行透過率は低下し、拡散透過率は増加する傾向が見られた。これは、入射した光が凹凸に依存して拡散透過されたためであり、算術平均高さ Sa が約 $0.7\mu\text{m}$ のときに、拡散反射率は約 65% まで増加した。

一方、全光線透過率は算術平均高さ Sa の増加に従って、わずかであるが低下する傾向が見られ、算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下から約 $0.7\mu\text{m}$ まで大きくなると、全光線透過率は約 8% 低下した。すなわち、全光線透過率は、平行透過率と拡散透過率の和であるが、表面に凹凸が付与されることにより一定値とならなかった。この要因として、凹凸を付与したためアクリル樹脂表面で拡散反射する光が影響したと考えられる。

また、Fig. 3.7 に示す最小自己相間長さ Sa_l 、Fig. 3.8 に示す二乗平均平方根勾配 Sdq についても透過率との関係を調べた結果、同様の傾向が見られた。とくに、凹凸の勾配を示す二乗平均平方根勾配 Sdq と全光線透過率、平行透過率及び拡散透過率との関係は、算術平均高さ Sa や最小自己相間長さ Sa_l と比べて相関係数 r が約 0.98 の高い値を示した。これは、斜面に入射した光が凹凸の角度に応じて屈折し、種々の方向へ拡散するためであり、凹凸の高さや周期より勾配の影響が強いことを定量的に示した。

次に、曇り度（ヘーズ）に与える算術平均高さ Sa 、最小自己相間長さ Sa_l 及び二乗平均平方根勾配 Sdq の関係について調べた。曇り度（ヘーズ）は次式より算出する。

$$\text{ヘーズ} = (\text{拡散透過率}/\text{全光線透過率}) \times 100 [\%]$$

曇り度（ヘーズ）の値は全光線透過率に対する拡散透過率の比として求める。従って、Fig. 3.5~3.7 で示した拡散透過率と同様の傾向を示すと考えられる。そこで、算術平均高さ Sa 、最小自己相間長さ Sa_l 及び二乗平均平方根勾配 Sdq に対する曇り度（ヘーズ）との相関係数 r を求めた。その結果、算術平均高さ Sa の場合に相関係数は $r=0.941$ 、最小自己相間長さ Sa_l では $r=0.935$ 、二乗平均平方根勾配 Sdq では $r=0.982$ となった。そこで Fig. 3.9 に、相関係数の最も高かった二乗平均平方根勾配 Sdq と曇り度（ヘーズ）の関係を示す。 Sdq が大きくなるに従い曇り度（ヘーズ）も増加し、白っぽく変化していくことを示した。

以上の結果より、ショットブラスト加工面は、凹凸の高さ、周期及び勾配が大きくなるに従い曇り度（ヘーズ）も増加し曇り具合が大きくなった。さらに、透過率や曇り度（ヘーズ）の値は凹凸の傾きを示す二乗平均平方根勾配 Sdq に対する相関性が高いことを示した。

3.4 結言

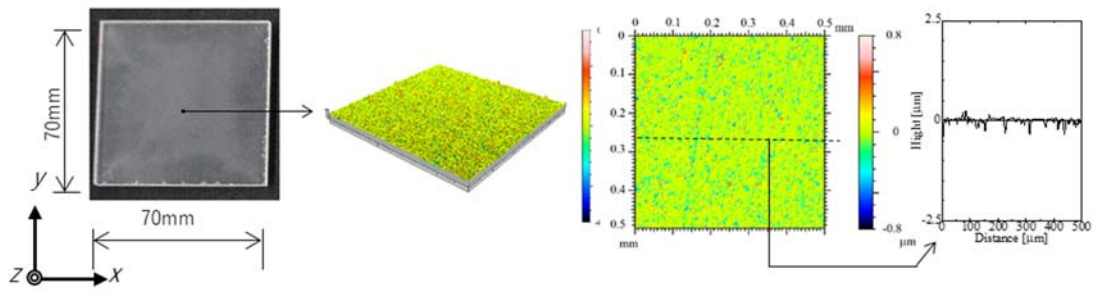
本章では工業製品の外観材や遮音材等に多用されている透明なアクリル樹脂板を試験片材料として取り上げ、算術平均高さ Sa が $1.0\mu\text{m}$ 以下の微小な凹凸領域において、表面凹凸

が透過率及び曇り度（ヘーズ）に与える影響を実験的に調べた。

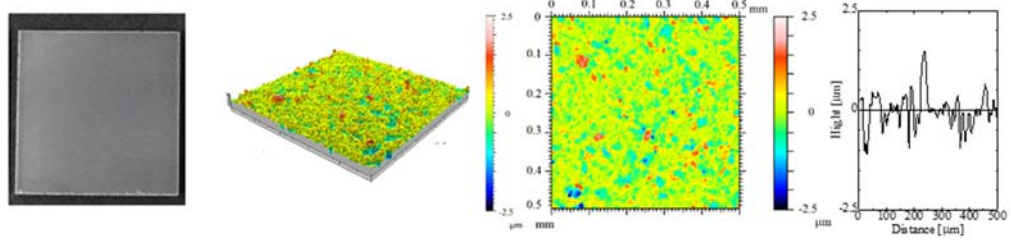
まず、アクリル樹脂板の表面をショットブラスト加工により、表面の凹凸が段階的に異なる試験片を準備し、面領域の表面性状を数値化するために ISO25178-2:2012 に準拠した面領域の粗さ評価が可能な三次元表面性状パラメーターを用いてショットブラスト加工面における凹凸形状の定量化を行った。次に、試験片の全光線透過率、平行透過率、拡散透過率及び曇り度（ヘーズ）と相関の高い三次元表面性状パラメーターについて検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) ガラスビーズをメディアとしたショットブラスト加工面におけるスキューネス Ssk は約 0, クルトシス Sku は約 6 となった。また、テクスチャーのアスペクト比 Str は 0.5 以上となり、等方性を有する凹凸形状であることを示した。
- 2) 算術平均高さ Sa が大きくなるに従い、最大高さ Sz , 二乗平均平方根勾配 Sdq だけでなく、凹凸周期を示す最小自己相関長さ Sal も増加した。
- 3) 透明アクリル樹脂の表面に付与した凹凸形状が算術平均高さ $Sa \leq 0.1\mu\text{m}$ の場合、全光線透過率は約 90% となり、平行透過率は約 80%, 拡散透過率は約 10% で構成されていた。
- 4) 透明アクリル樹脂表面の凹凸が算術平均高さ Sa の値を約 $1.0\mu\text{m}$ まで大きくすると、拡散反射率が約 65% となり、曇り度（ヘーズ）の値も増加し白っぽい色へと変化することを示した。
- 5) 透過率及び曇り度（ヘーズ）の値は凹凸の勾配を示す二乗平均平方根勾配 Sdq との相関が高く、相関係数は約 0.98 を示した。そして、二乗平均平方根勾配 Sdq が 0.07 から 0.25 の範囲で、曇り度（ヘーズ）が約 15% から 65% に直線的に増加した。

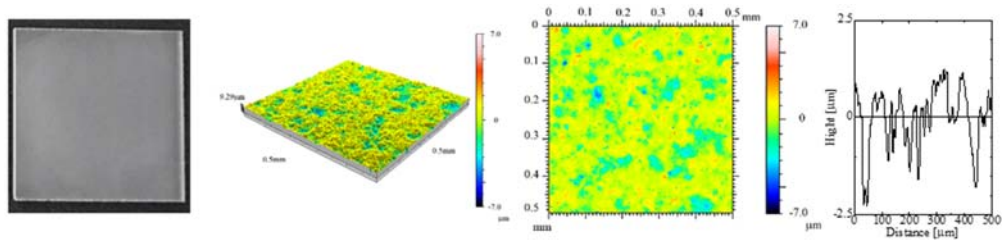
以上より、透明アクリル樹脂における視覚のテクスチャーのうち透過率は、三次元表面性状パラメーターを用いて定量化が可能なことを示した。



(a) $S_a = 0.07\mu\text{m}$



(b) $S_a = 0.31\mu\text{m}$



(c) $S_a = 0.67\mu\text{m}$

Fig. 3.1 3D surface texture of acrylic resin.

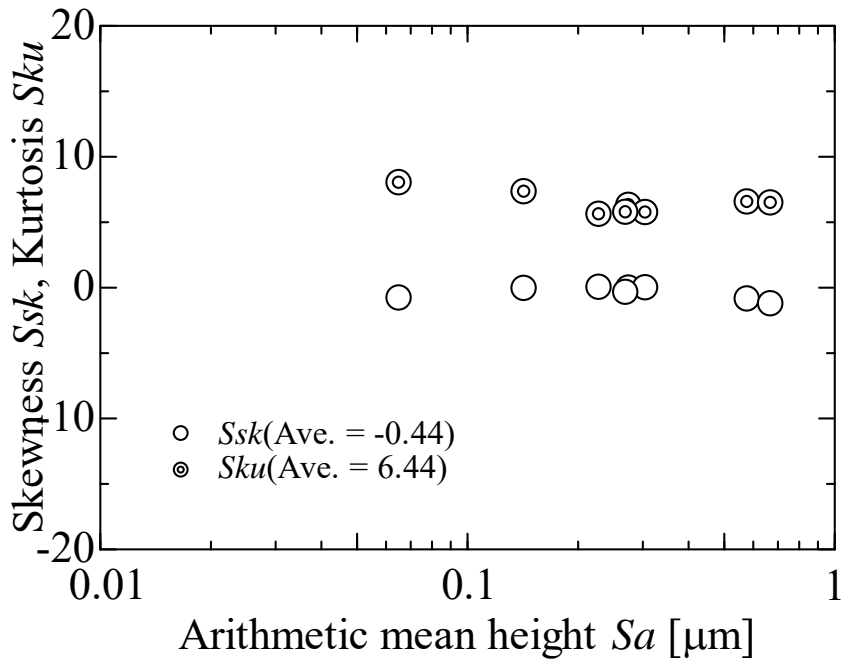


Fig.3.2 Relation among arithmetic mean height Sa , skewness Ssk and kurtosis Sku .

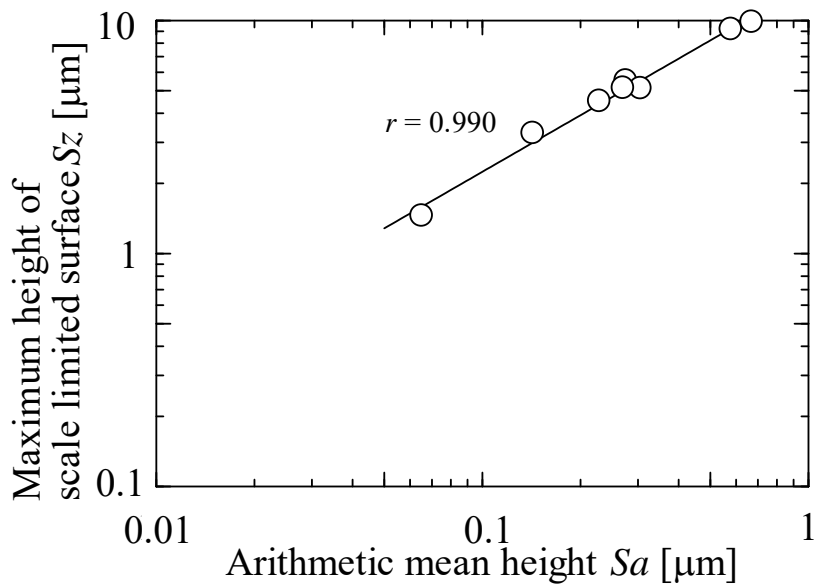


Fig. 3.3 Relation between arithmetic mean height Sa and maximum height of scale limited surface Sz .

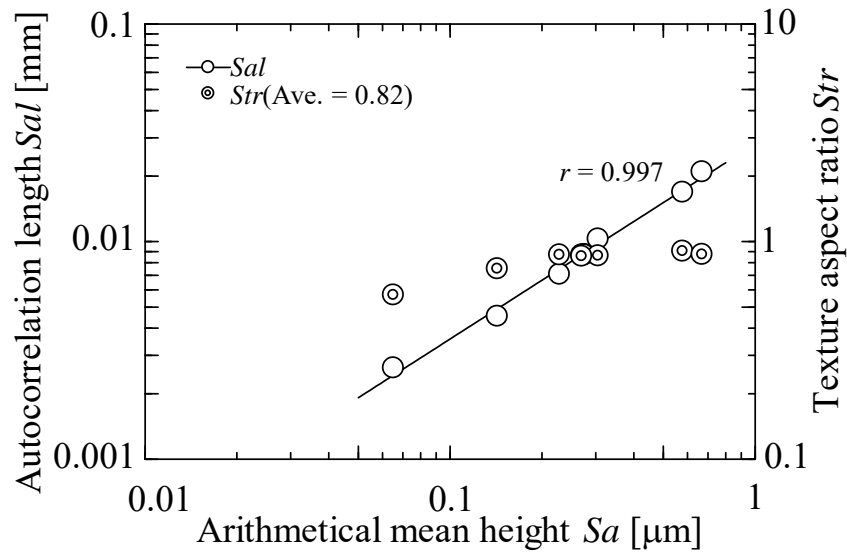


Fig. 3.4 Relation among arithmetic mean height S_a , autocorrelation length S_{al} and texture aspect ratio S_{tr} .

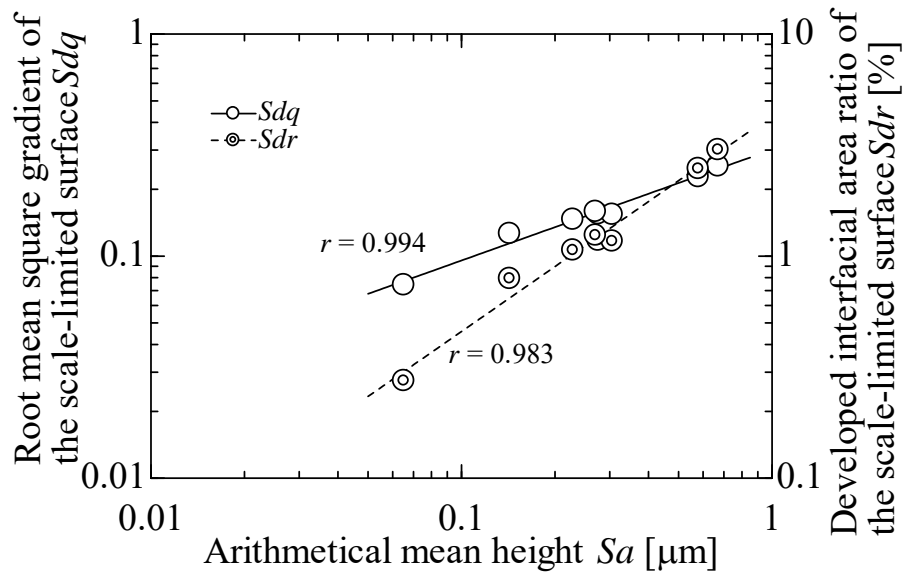


Fig. 3.5 Relation among arithmetic mean height S_a , root mean square gradient of the scale-limited surface S_{dq} and developed interfacial area ratio of the scale-limited surface S_{dr} .

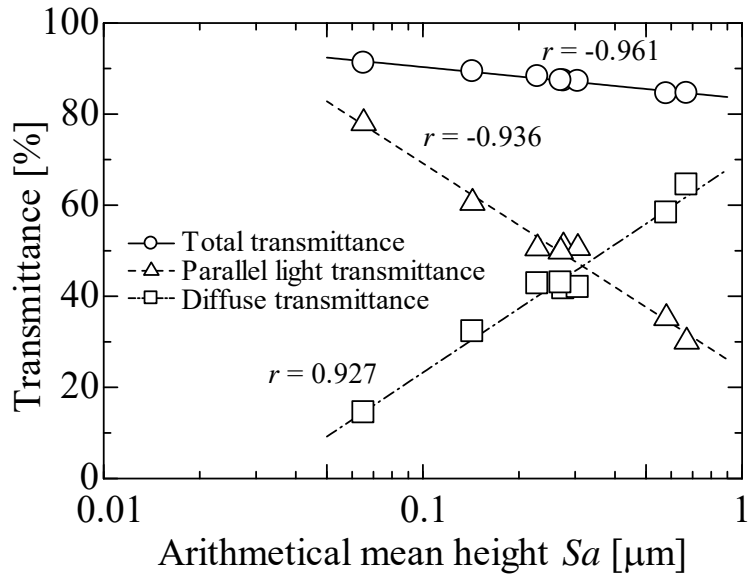


Fig. 3.6 Relation between arithmetic mean height Sa and transmittance.

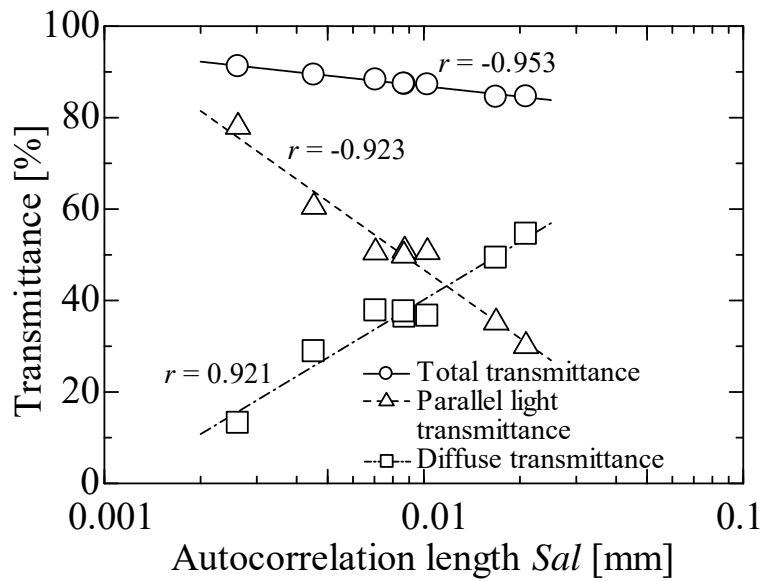


Fig. 3.7 Relation between autocorrelation length SaI and transmittance.

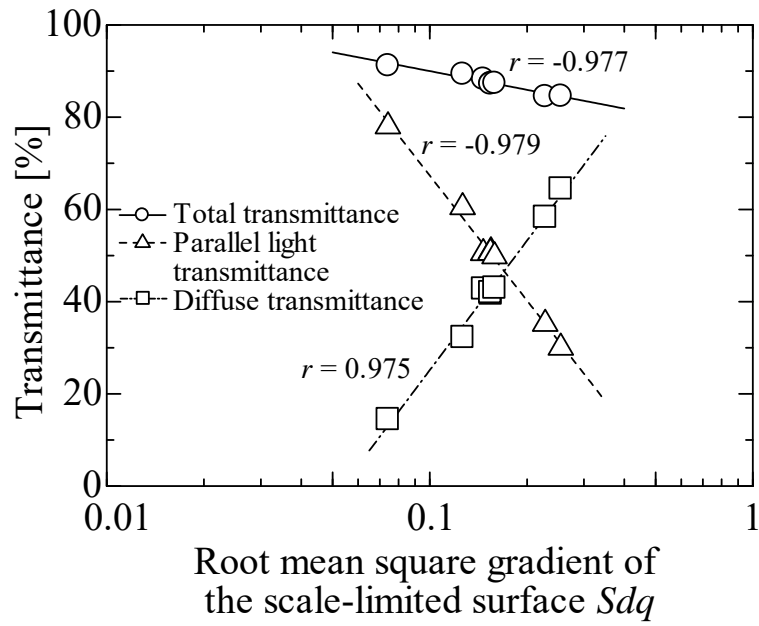


Fig. 3.8 Relation between root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq and transmittance.

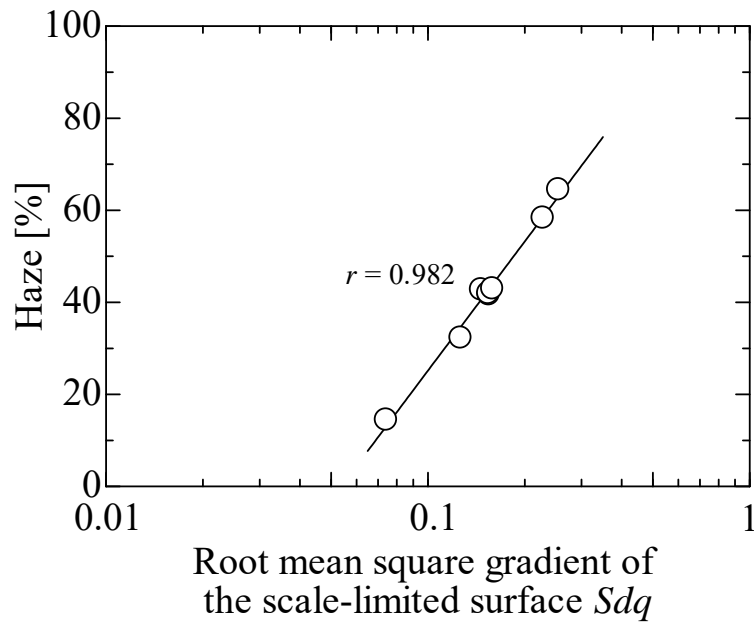


Fig. 3.9 Relation between root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq and haze.

第4章 片面及び両面に加工を施した透明なアクリル樹脂板の

表面性状が透過率, 曇り度(ヘーズ)及び光沢度に及ぼす影響

4.1 緒言

本章では, 透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャーの設計指標について検討するため, 表面の算術平均高さ Sa が約 $1.0\mu\text{m}$ 以下となる微小凹凸領域を対象として, 表面の凹凸が視覚のテクスチャーに与える影響について調べ, 前章では, 透過率及び曇り度(ヘーズ)と相関の高い三次元表面性状パラメーターが二乗平均平方根勾配 Sdq であることを示した。そこで, 本章では, 表面の算術平均粗さ Ra が $0.05\sim 1.0\mu\text{m}$ の範囲となる微小凹凸領域を対象として, 片面または両面にショットブラスト加工を施し, 種々の表面粗さを付与した試験片の凹凸形状が視覚のテクスチャーに与える影響について調べる。まず, アクリル樹脂表面の凹凸形状を定量化するため, 面領域の評価が可能な三次元表面性状パラメーターについて検討する。次に, 各三次元表面性状パラメーターが視覚のテクスチャーを構成するパラメーターのうち透過率, 曇り度(ヘーズ)及び光沢度に与える影響について調査する。これらの結果を基に, 微小凹凸が付与された透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャー評価指標について検討する。

4.2 実験方法

4.2.1 試験片の作製

試験片材料は透明なアクリル樹脂板(住友化学株式会社製)とし, 試験片形状は $70\times 70\text{mm}^2$ の正方形, 板厚は 5mm とした。試験片表面には任意の凹凸を付与するため, 片面及び両面にショットブラスト加工を施した。ショットブラスト加工で使用するメディア

はガラスビーズとした。ガラスビーズの投射量と吹付圧力を任意に変化させ、算術平均高さ Ra が $0.1\sim 1.2\mu\text{m}$ の範囲で段階的に変化するよう凹凸加工を施した。なお、両面に加工する際、表面と裏面の加工条件は同一とした。

4.2.2 測定方法

表面性状の測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。測定方式は白色光干渉方式である。面空間分解能は $0.3\sim 5.4\mu\text{m}$ 、高さ方向の分解能は 10pm で微細な粗さを高精度に測定することが出来た。倍率は 20 倍とし、Mirau 方式を用いた。測定面積は $0.865\times 0.865\text{mm}^2$ 、画素数は 1048×1048 とし、三次元表面性状パラメーターの値を算出する際の面積は測定面積中央部の $0.81\times 0.81\text{mm}^2$ とした。三次元表面性状パラメーターの値は、ISO 25178-2:2012 で定義されている高さパラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターを用いた。

透過率及び曇り度(ヘーズ)の測定には白色 LED を光源とする分光ヘーズメーター NDH 5000(日本電色工業株式会社製)を用いた。測定面の形状は直径 25.0mm の円形とした。なお、未加工の亚克力樹脂における透過率は、全光線透過率=92.15%、平行透過率=90.42%、拡散透過率=1.73%、ヘーズ=1.88%であった。

光沢度の測定には光沢度計 GM-268(コニカミノルタホールディングス株式会社製)を用いた。測定光源は CIE 標準光源 C の分光特性を有する白色光とした。光源入射角は 60° とし、正反射光を測定した。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 三次元表面性状パラメーターによる片面及び両面の凹凸形状の定量化

三次元表面性状パラメーターのうち、高さパラメーター、機能パラメーター、空間パラメ

ーター及び複合パラメーターを用いて、ショットブラスト加工面における凹凸の特徴付けを行った。

まず、測定した試験片表面のうち、代表的な外観写真、表面性状の測定画像と鳥瞰図、x方向に平行な断面から得られた粗さ曲線をそれぞれ Fig.4.1 に示す。各試験片は算術平均高さ Sa の値が $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ であり、(a)及び(b)は片面のみを加工し、(c)は両面を加工している。なお、(c)の両面を加工した試験片の表面性状パラメーターは表面と裏面で値がほぼ等しいため、ここでは表面の値を用いる。表面性状の測定画像より、各表面性状における凹凸は円弧状の形状となっていた。これは、ショットブラスト加工に用いたメディアの形状が球体であるため、メディアを投射した際にアクリル樹脂表面が塑性変形し、転写されたような凹凸形状が表出したと考えられる¹⁾。

次に、凹凸の形状を把握するスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku の値を調べた。スキューネス Ssk 及びクルトシス Sku と算術平均高さ Sa との関係を Fig.4.2 に示す。凹凸形状の対称性を評価するスキューネス Ssk の値は、すべての試験片において約 0 となり、表面凹凸の高さ分布が平均線に対して対称であることを示した。一方、クルトシス Sku の値は、片面加工及び両面加工の試験片ともに一定ではなかった。なお、これ以降の図には、前章で用いた試験片の結果も比較のために、クルトシス Sku の値がほぼ一定の群を $\text{One side } Sku = \text{Const.}$ として図中に表示する。本章及び前章の試験片ともに、クルトシス Sku の値は 3 以上であり、表面の凹凸の高さ分布が尖っていることを示している。これは、突出した山部または谷部が多いことを意味する。

高さパラメーターである最大高さ Sz と算術平均高さ Sa との関係を Fig.4.3、二乗平均平方根高さ Sq と算術平均高さ Sa との関係を Fig.4.4 にそれぞれ示す。図より、算術平均高さ Sa の値が大きくなるに従い最大高さ Sz の値、二乗平均平方根高さ Sq の値ともに増加し、これらは直線的な関係にあることを確認した。

そこで、高さ方向における三次元表面性状パラメーターの代表値を算術平均高さ Sa の値として、機能パラメーター、空間パラメーター及び複合パラメーターとの相関関係から表面性状の特徴について検討した。

機能パラメーターは摩耗や潤滑性の評価等に使用されるパラメーターである。突出山部高さ Spk は負荷曲線から突出山部の平均高さを示し、突出谷部深さ Svk は負荷曲線から突出谷部の平均深さを示す。突出山部高さ Spk 及び突出谷部深さ Svk と算術平均高さ Sa との関係を図.4.5 に示す。算術平均高さ Sa と突出山部高さ Spk 及び突出谷部深さ Svk 間に相関性が見られ、 Sa の値が大きくなるに従い、突出山部高さ Spk 及び突出谷部深さ Svk の値も増加する傾向を示した。とくに、突出谷部深さ Svk の値は、突出山部高さ Spk の値に比べて大きく増加した。

空間パラメーターである最小自己相間長さ Sal 及びテクスチャーのアスペクト比 Str と算術平均高さ Sa との関係を図.4.6 に示す。本章で用いた試験片の最小自己相間長さ Sal は約 0.002~0.03mm の周期からなる凹凸形状で構成されていた。さらに、算術平均高さ Sa と最小自己相間長さ Sal 間に相関性が見られ、 Sa の値が大きくなるに従い、 Sal の値も増加する傾向を示した。それに対して、テクスチャーのアスペクト比 Str の値は 0.5 以上となり、ショットブラスト加工面は高い等方性を有する凹凸形状であることを示した。

また、複合パラメーターである二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr を用いて表面性状の特徴を調べた。二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr と算術平均高さ Sa との関係を図.4.7 に示す。二乗平均平方根勾配 Sdq 及び展開面積比 Sdr の値は、算術平均高さ Sa の値が増加するに従って高くなる傾向が見られた。

以上より、本章で用いたショットブラスト加工面における凹凸形状の特徴を各種の三次元表面性状パラメーターを用いて総合的に評価すると、スキューネス Ssk の値から表面凹凸の高さ分布が平均線に対して対称であり、クルトシス Sku の値から凹凸形状の高さ分布が尖っていた。また、テクスチャーのアスペクト比 Str が 0.5 以上で等方性を有する凹凸形

状であった。

算術平均高さ Sa 、二乗平均平方根高さ Sq や最大高さ Sz から、ガラスビーズの投射量と吹付圧力を任意に変化させることでショットブラスト加工面による表面の凹凸形状の高さが増加した。そして、算術平均高さ Sa を基準とした場合、その増加に伴い突出山部高さ Spk 、突出谷部深さ Svk 、二乗平均平方根勾配 Sdq や展開面積比 Sdr の値も増加する傾向が得られた。つまり、凹凸形状の高さの増加に伴い、突出した山や谷、勾配及び展開面積が増加した試験片であった。さらに、最小自己相関長さ Sal より、凹凸形状の高さが大きくなるに従い凹凸形状の周期も大きくなった。これは、球体である投射材の形状が表面に転写され凹凸形状が高くなるに従い凹凸形状の山と谷の間隔が広がったことによると考えられる。

4.3.2 片面及び両面の表面性状が透過率と曇り度（ヘーズ）に与える影響

算術平均高さ Sa と全光線透過率との関係を Fig.4.8 に示す。算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下の場合、片面、両面に関わらず、全光線透過率は 90% を超えており、一般的なアクリル樹脂の光学特性と一致している。また、算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以上の場合、その値の増加に従って、片面及び両面とも全光線透過率が低下した。これは、Fig.4.5 で示した突出谷部深さ Svk の増加による影響、つまり拡散透過光の一部が谷の内部で多重反射を繰り返した結果光が大きく減衰したためと考えられる。さらに、両面については算術平均高さ Sa の値が約 $1.0\mu\text{m}$ において、全光線透過率は約 20% 低下し、片面の場合の約 2 倍の低下を示した。これは、両面加工した試験片において、表面と裏面の凹凸形状によって二重に光が拡散したためであると考えられる。

算術平均高さ Sa と平行透過率との関係を Fig.4.9 に示す。算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下の場合、片面は約 80% であり、両面は約 65% であった。また、算術平均高さ Sa の増加に従って片面及び両面に関わらず、低下する傾向が見られた。この時、片面、両面の近似直線はほぼ同じ傾きとなった。

算術平均高さ Sa と拡散透過率との関係を Fig.4.10 に示す。算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下の場合、片面は約 10%であり、両面は約 25%であった。また、算術平均高さ Sa の増加に従って、片面及び両面に問わず、拡散透過率は増加する傾向が見られた。この時、片面、両面の近似直線はほぼ同じ傾きとなった。

次に、算術平均高さ Sa 及び二乗平均平方根勾配 Sdq と曇り度（ヘーズ）との関係及び加工面及び未加工面が曇り度（ヘーズ）に及ぼす影響について調べた。算術平均高さ Sa と曇り度（ヘーズ）との関係を Fig.4.11(a)及び(b)にそれぞれ示す。片面の場合、算術平均高さ Sa の増加に従って、曇り度（ヘーズ）の値も増加する傾向が見られた。それに対して、両面は算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下の場合、片面より約 10%高い値となり、算術平均高さ Sa の値が $1.0\mu\text{m}$ 以上の場合、片面より約 15%高い値となった。これは、曇り度（ヘーズ）の値が全光線透過率に対する拡散透過率の比として求めるため、Fig.4.8 で示した全光透過率の低下による影響であると考えられる。また、片面にショットブラスト加工を施した試験片の未加工面から測定した曇り度（ヘーズ）の値と加工面から測定した曇り度（ヘーズ）の値はほぼ同じ値となった。これは、透過を測定しているため、測定面の違いが透過率及び曇り度（ヘーズ）の値にほとんど影響を及ぼさないことを示している。すなわち、未加工の亚克力樹脂における拡散透過率は 1.73%、曇り度（ヘーズ）は 1.88%と極めて低いため、加工面から測定を行うと表面の凹凸形状によって光は拡散するが、未加工面から測定を行うと光の拡散がほとんど生じないためであると考えられる。また、スキューネス Ssk の値が 0 で表面の凹凸形状の山と谷が平均面に対して対称に存在しているため、測定面の違いが透過率及び曇り度（ヘーズ）の値に影響しないためである。

二乗平均平方根勾配 Sdq と曇り度（ヘーズ）との関係を Fig.4.12 に示す。二乗平均平方根勾配 Sdq の増加に従って、曇り度（ヘーズ）の値も増加する傾向が見られた。すなわち、凹凸の傾きが増加するとともに曇り度（ヘーズ）の値も増加することを示している。二乗平均平方根勾配 Sdq と曇り度（ヘーズ）の相関係数は、算術平均高さ Sa よりも高い値を示す傾

向がみられた。これは、斜面に入射した光が凹凸形状の角度に応じて屈折し、種々の方向へ拡散するためであり、凹凸形状の高さより勾配の影響が大きいことを示している³⁾。また、本章で用いた試験片では、クルトシス Sk_u の値が透過率及び曇り度（ヘーズ）に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

4.3.3 片面及び両面の表面性状が光沢度に与える影響

一般的に表面性状が粗くなるとともに光沢度は低下する。そこで、算術平均高さ Sa を用いて評価した。

算術平均高さ Sa と光沢度との関係を Fig.4.13(a), (b) にそれぞれ示す。ここで片面加工した試験片のうち、Fig.4.13(a)はショットブラスト加工面から測定した値、(b)は未加工面から測定した値である。両面加工した試験片については、Fig.4.13(a), (b)とも加工面から測定した値であり、ほぼ同じ値を示している。加工面から測定した場合、片面加工及び両面加工に関わらず、算術平均高さ Sa の値が増加するとともに、光沢度の値は急激に低下する傾向が見られた。これは、金属の場合²⁻¹³⁾と同じ傾向である。それに対して、Fig.4.13(b)に示す片面加工した試験片を未加工面から測定した場合、光沢度の値は算術平均高さ Sa の値が $0.1\mu\text{m}$ 以下において、約 99%となり、算術平均高さ Sa の値が増加しても、光沢度の低下はわずかであった。すなわち、未加工面はほぼ平滑であるため、片面に加工を施していても、光沢度の値は測定面における凹凸の状態による影響が大きいことを示した。

以上の結果より、加工面を直接測定するか、未加工面を通して測定するかによって、曇り度（ヘーズ）及び光沢度の値に影響を及ぼすことを実験により示した。すなわち、片面の表面性状を同じとし、もう一方の面の表面性状を変化させることによって、一定の光沢度を保持しながら曇り度（ヘーズ）の値のみを変えることが可能であることを示した。

4.4 結言

本章では工業製品の外観材や遮音材等に多用されている透明なアクリル樹脂板を試験片材料として取り上げ、算術平均高さ Sa が $1.0\mu\text{m}$ 以下の微小な凹凸領域において、表面凹凸及び加工面が透過率、曇り度（ヘーズ）及び光沢度に与える影響を実験的に調べた。得られた結果を以下に示す。

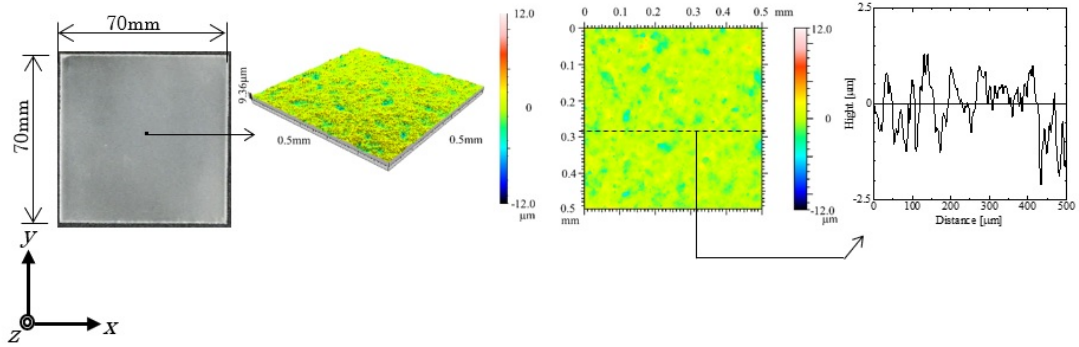
- 1) 片面にショットブラスト加工を施した試験片と両面に加工を施した試験片において、算術平均高さ Sa の増加に伴う全光線透過率の低下の度合いは異なる傾向を示す。一方、曇り度（ヘーズ）の増加の度合いは両試験片ともほぼ同じ傾向であった。
- 2) ショットブラスト加工を片面にのみ施した場合、曇り度（ヘーズ）の値は加工面から測定しても、未加工面から測定してもほぼ変化が見られない。しかし、測定面の違いは光沢度の値に大きく関与する。すなわち、曇り度（ヘーズ）は透過光を強く反映し、光沢度は測定面の散乱光を強く反映している。したがって、曇り度（ヘーズ）は光の入射面に対して、その面の加工・未加工にかかわらず、加工した面の表面性状に依存し、光沢度は光の入射面の表面性状に依存していた。以上の結果より、表側と裏側の加工条件を変化させることによって、例えば光沢度の値を一定に保ちつつ、曇り度（ヘーズ）の値のみを変化させることが可能である。

以上の結果は、透明なアクリル樹脂板を外観材として用いる際、その表面性状の変化に起因する光の透過や反射を活用した意匠性向上を設計する指針となりえる。

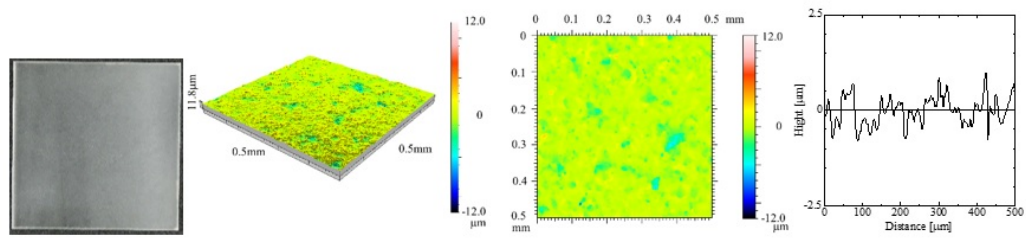
参考文献

- 1) 若林祐次, 米原牧子, 山辺秀敏, 吉田瞬, 杉林俊雄: 色材協会誌, 92, 131 (2019).
- 2) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 吉森茂, 杉林俊雄: 銅と銅合金, 42, 340 (2004).
- 3) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄: 軽金属, 54, 45 (2004).

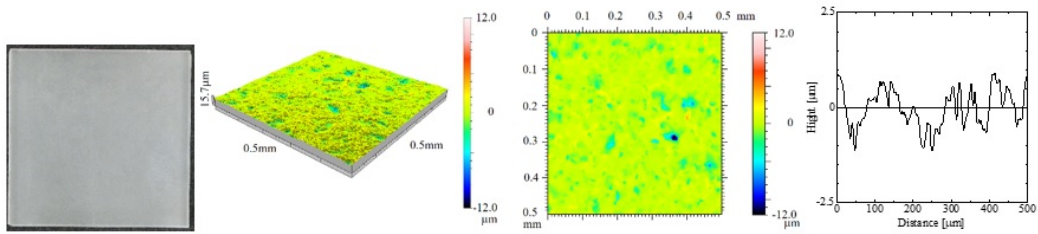
- 4) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘 : 軽金属,55,668(2005).
- 5) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄 : 軽金属,55,15(2005).
- 6) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄 : 軽金属,55,15(2005).
- 7) 川邊和宏, 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,46,248(2007).
- 8) M. Yonehara, T. Masui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi :
Mater.Trans,JIM,45,1019(2004).
- 9) M. Yonehara, T. Masui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi:
Mater.Trans,JIM,45,1027(2004).
- 10) M. Yonehara, K. Kihara, Y. Kagawa, H. Isono, and T. Sugibayashi :
Mater.Trans,JIM,46,2197 (2005).
- 11) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘 : 軽金属,56,429(2006).
- 12) 吉田瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 磯野宏秋, 香川美仁, 杉林俊雄 : 軽金属,61,187(2011).
- 13) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 木原幸一郎, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,55,1(2016).



(a) One side $Sa = 0.58\mu\text{m}$, $Sku = 6.52$



(b) One side $Sa = 0.50\mu\text{m}$, $Sku = 11.00$



(c) Both sides $Sa = 0.56\mu\text{m}$, $Sku = 27.40$

Fig.4.1 3D surface texture of acrylic resin.

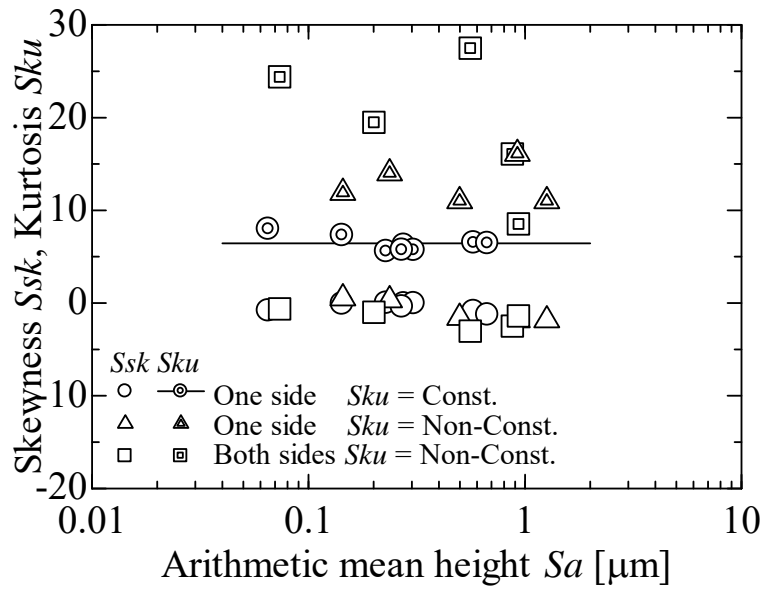


Fig.4.2 Relation among arithmetic mean height Sa , skewness Ssk and kurtosis Sku .

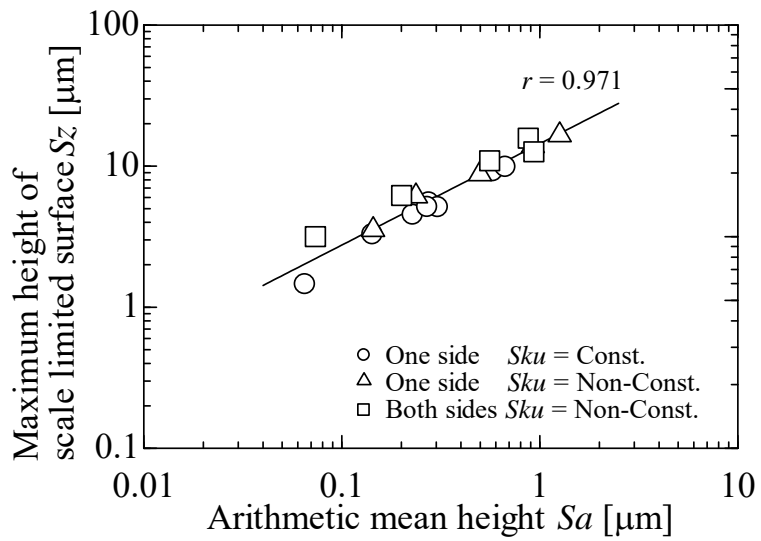


Fig.4.3 Relation between arithmetic mean height Sa and maximum height of scale limited surface Sz .

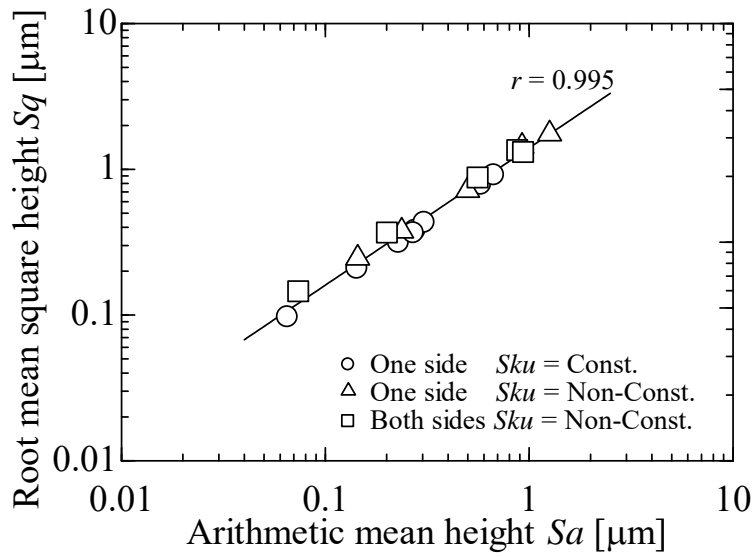


Fig.4.4 Relation between arithmetic mean height S_a and root mean square height S_q .

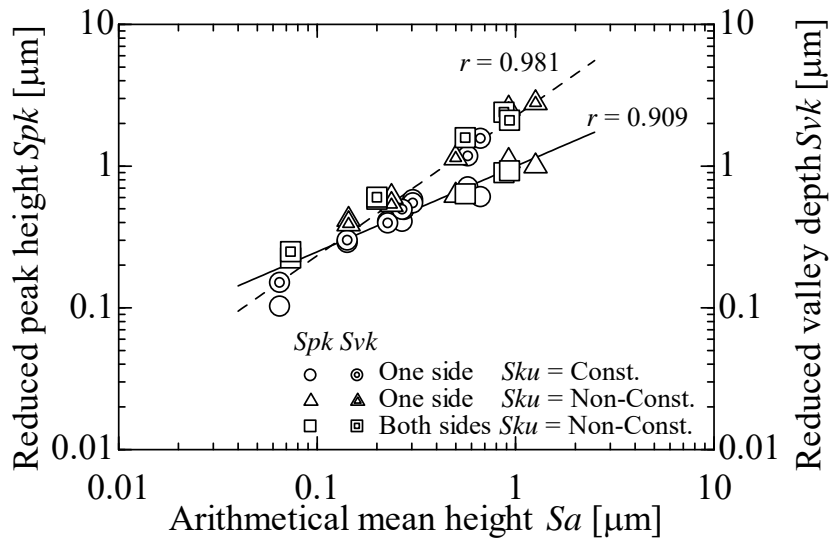


Fig.4.5 Relation among arithmetic mean height S_a , reduced peak height S_{pk} and reduced valley depth S_{vk} .

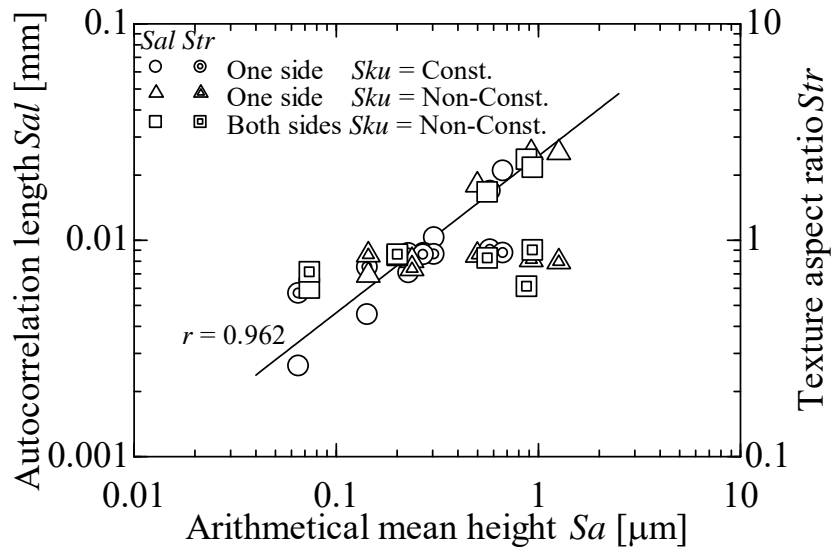


Fig.4.6 Relation among arithmetic mean height Sa , autocorrelation length SaI and texture aspect ratio Str .

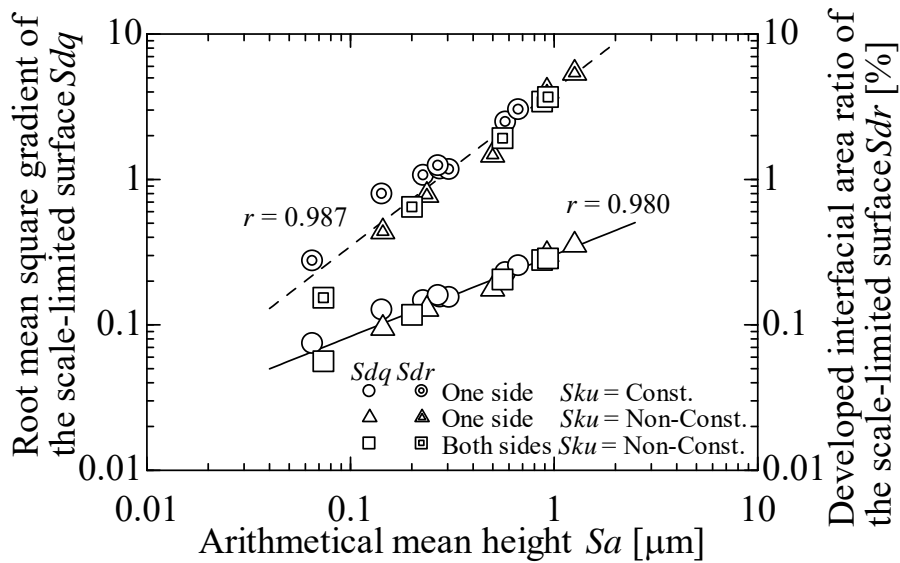


Fig.4.7 Relation among arithmetic mean height Sa , root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq and developed interfacial area ratio of the scale-limited surface Sdr .

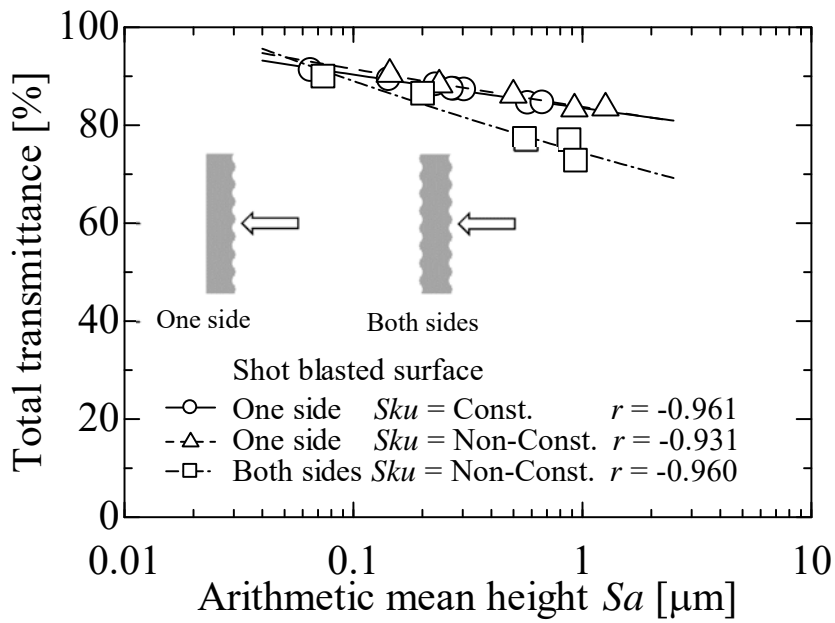


Fig.4.8 Relation between arithmetic mean height Sa and total transmittance.

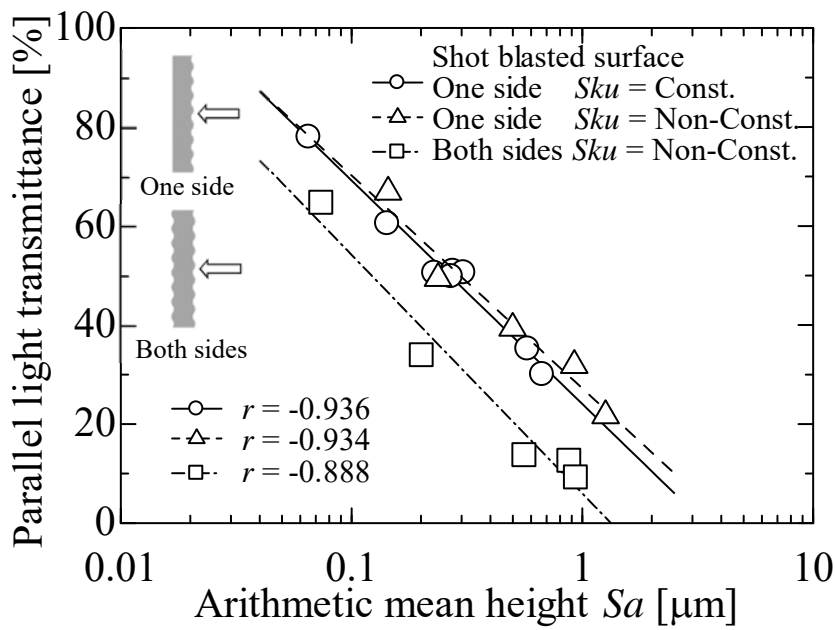


Fig.4.9 Relation between arithmetic mean height Sa and parallel light transmittance.

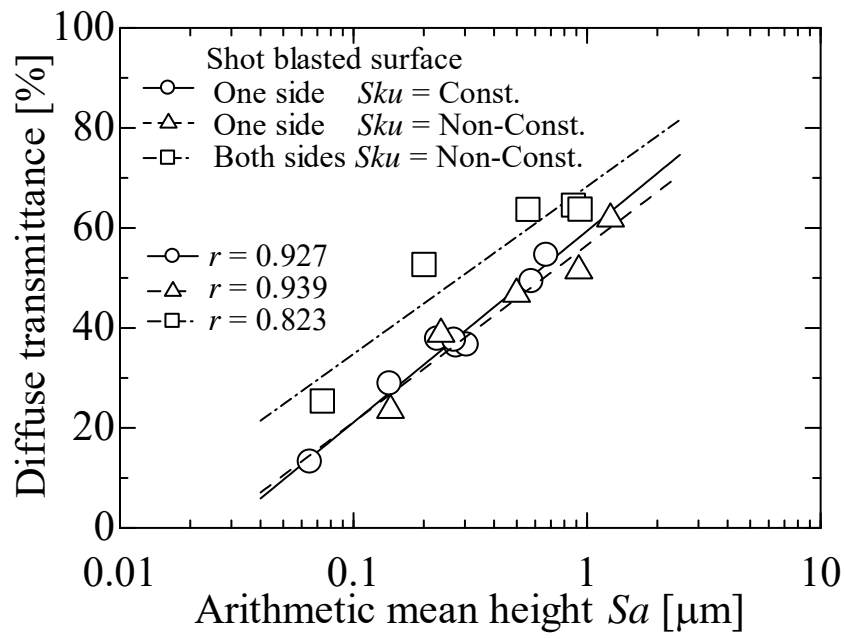
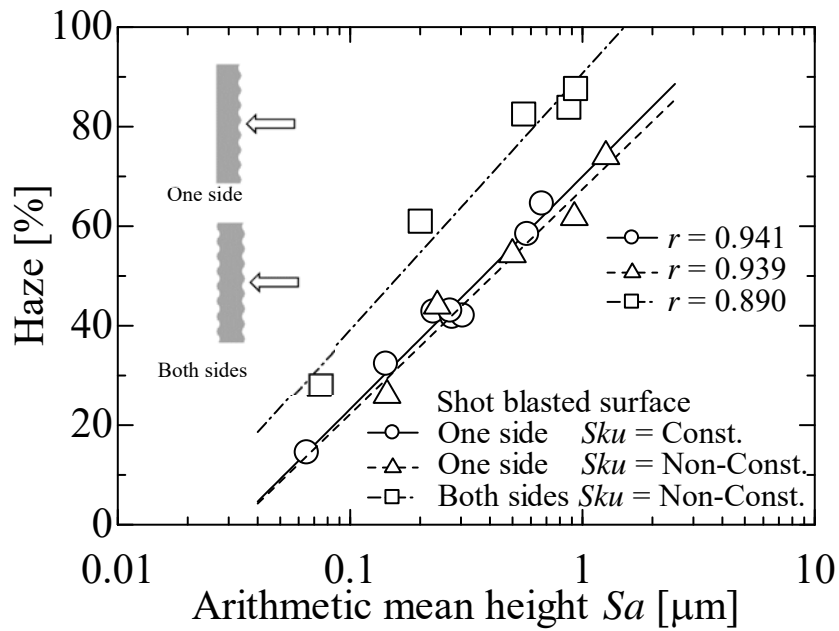
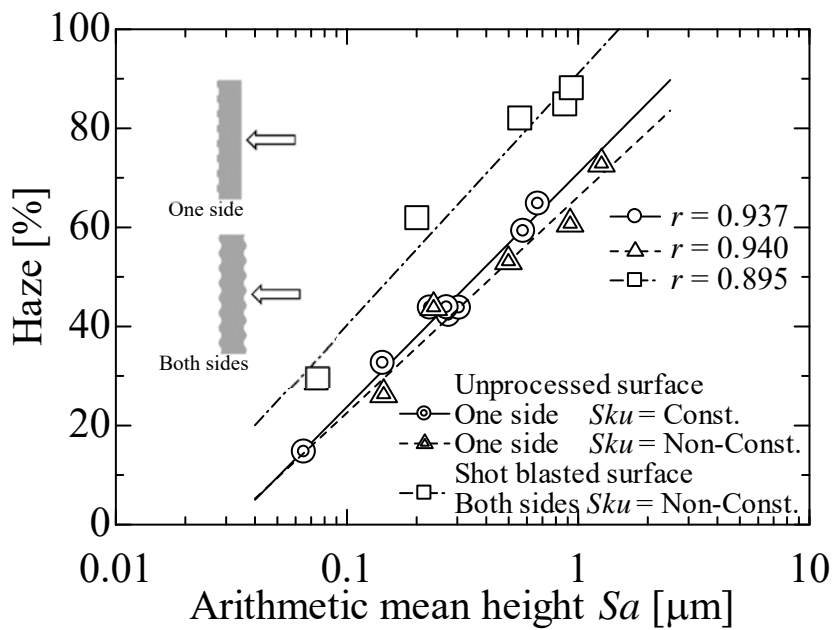


Fig.4.10 Relation between arithmetic mean height Sa and diffuse transmittance.



(a) Shot blasted surface



(b) Unprocessed surface

Fig.4.11 Relation between arithmetic mean height S_a and haze.

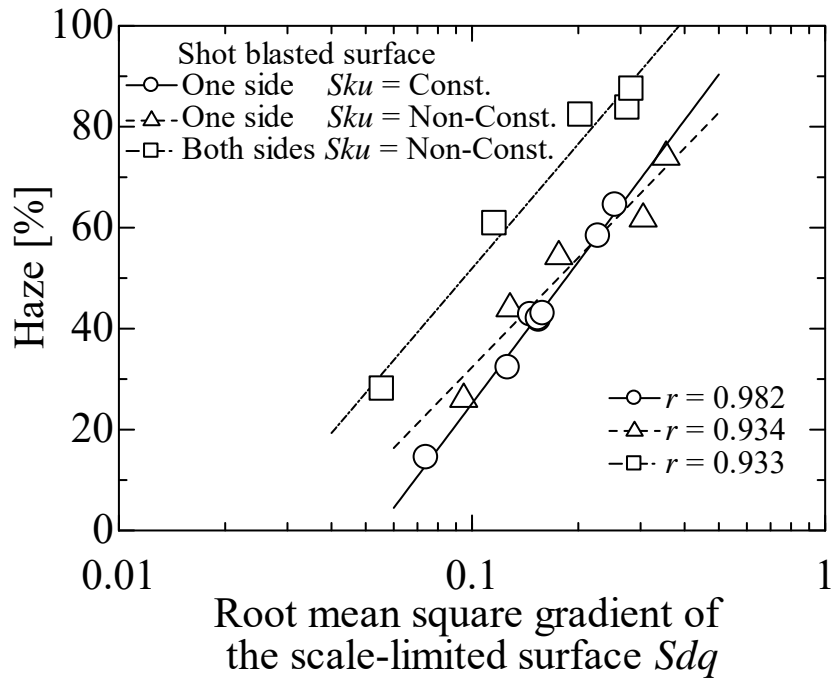
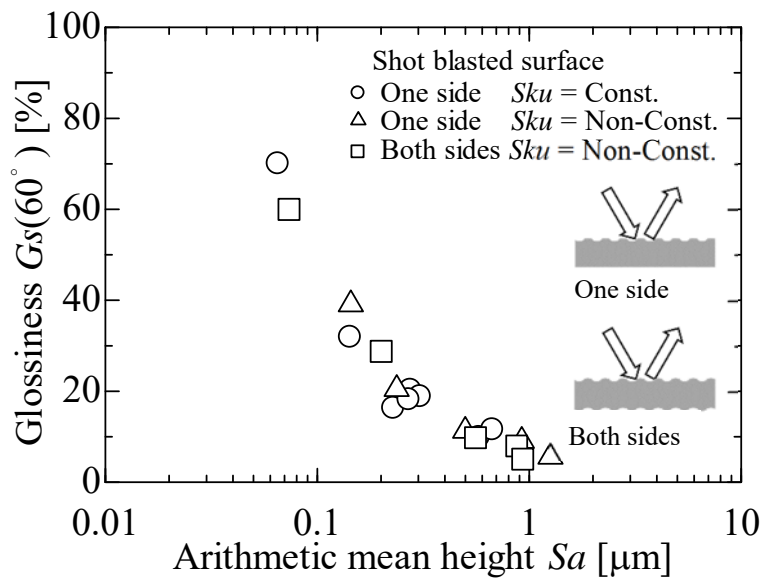
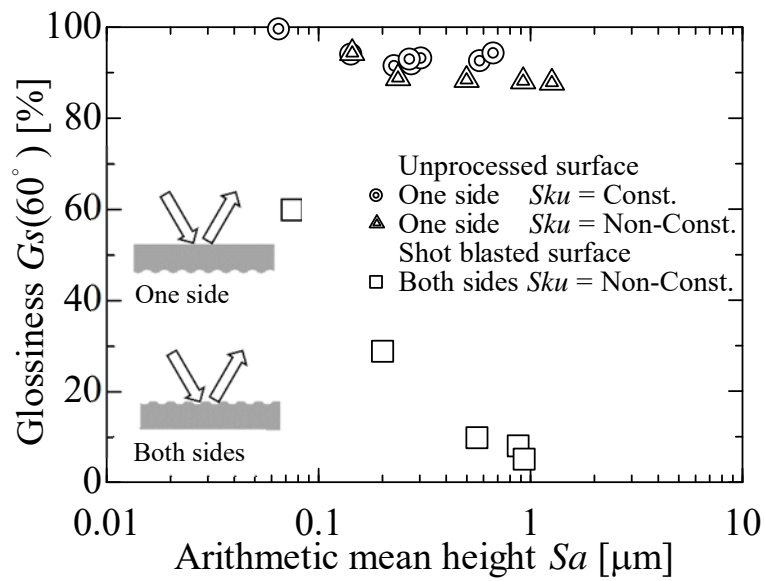


Fig.4.12 Relation between root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq and haze.



(a) Shot blasted surface



(b) Unprocessed surface

Fig.4.13 Relation between arithmetic mean height Sa and glossiness $G_s(60^\circ)$.

第5章 自己組織化マップによる透明なアクリル樹脂板の テクスチャー評価方法

5.1 緒言

先に述べたように現在の工業製品には、製品に求められる本来の機能のみならず、その表面のデザイン性や触覚、つまり、外観の“見栄え”や“触り心地”等をも同時に考慮した高付加価値化が要求されている¹⁻⁵⁾。この要求を実現するためには、視覚のテクスチャーである製品の表面の凹凸形状、曇り度、光沢度や表面色等のパラメーターを同時に考慮した設計が必要となる。そして、これらのパラメーター、とくに表面の凹凸形状を数値化した表面性状パラメーターが曇り度、光沢度や表面色に及ぼす影響を把握し、それらの相関関係を明らかにする必要がある。しかし、表面性状パラメーターには多くの種類のパラメーターが規定されているため⁶⁻²⁹⁾、表面性状パラメーターと曇り度、光沢度及び表面色を比較検討することは容易ではない。

そこで本章では、パラメーター間の相関関係を評価するため、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルの1つである自己組織化マップを用いた評価方法の導入を提案する^{30,31)}。まず、自己組織化マップを用いたパラメーター間の相関関係を評価する方法について、その評価方法の有効性を示すために、任意の関数を用いて予備的な検証を行う。そして、第3章³²⁾で使用した透明なアクリル樹脂板にショットブラスト加工を施した試験片を用いて、視覚のテクスチャーである曇り度（ヘーズ）、光沢度及び表面色に影響を及ぼす表面性状パラメーターについて自己組織化マップを用いて調べる。なお、本章において「相関関係」とは、各パラメーター間において「どの程度直線的な関係があるか」を意味し、「相関関係が高い」とは直線的な関係が成り立っている場合を、「相関関係が低い」とは直線的な関係が成り立っていない場合をいう。

5.2 予備実験

5.2.1 自己組織化マップによる解析方法

自己組織化マップは、Kohonen によって開発された教師なし学習を行うニューラルネットワークモデルである³³⁾。自己組織化マップは、教師データのない多次元データを反復学習することでパターン抽出を行い、多次元データ間の位相を保ったまま抽出したパターンを二次元平面上に写像し、その結果を色などの分布で示すモデルであるため、多次元データのクラスタリングやパラメーター評価に利用することができる。

本研究では、自己組織化マップの特徴である二次元平面上に写像された結果の色（重み）に着目し、パラメーター評価を行った。つまり、自己組織化マップが多次元データの位相を保ったまま二次元表面に写像するという性質を利用して、二次元平面上の色（重み）とその領域形状から、パラメーター間の相関関係を調査した。

本研究で用いる自己組織化マップの概略図を Fig.5.1 に示す^{34,35)}。まず、入力層には分析対象となる n 次元の入力ベクトルに対応する n 個の入力ニューロンを考え、 j 番目の入力ベクトルを $\mathbf{x}_j(x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}, \dots, x_{jn})$ とする。次に、出力層には k 個の出力ニューロンを考え、各出力ニューロンは全ての入力ニューロンと接続をもつ。なお、出力ニューロン間の隣接関係としては、上下左右間のみ考える正方構造や六方向を考慮するハニカム構造などがあるが、説明のための本概略図においては正方構造とした³⁶⁾。ここで、出力層における任意の出力ニューロンは入力層の全ての入力ニューロンと重みを介して接続している。自己組織化マップにおいて重みとは、通常のニューラルネットで入力の重み付けを行う重みとは異なり、入力ベクトルと比較する参照パターンの各要素値を意味する。これらを参照ベクトルと呼ぶこともあるが、通常のニューラルネットの用語を用いて単に重みと呼ぶ場合も多い。本研究でも以下ではこれらを単に重みとし、ベクトルとして指す場合は重みベクトルと呼ぶこととする。

初期段階において各入力ニューロンから i 番目の出力ニューロンの間には、乱数によって重みベクトル $\mathbf{m}_i(m_{i1}, m_{i2}, m_{i3}, \dots, m_{in})$ がそれぞれ与えられている。 \mathbf{x}_j が n 次元の入力からなる j 個目の入力ベクトルであるならば、 i 番目の出力ニューロンに接続する重みベクトル \mathbf{m}_i も同じ n 次元の要素を持つ。学習によって作成されるマップの形状は初期値に依存するが、入力間のトポロジーは保存される³⁴⁾。また、初期化の方法についての検討の報告もある^{37,38)}。

自己組織化マップの学習は、以下の①~④の手順で行われる。

- ① 式(1)を用いて入力ベクトル \mathbf{x}_j と、出力層の全ての出力ニューロン i の重みベクトル $\mathbf{m}_i(t)$ を比較する。ここで、 t は学習回数である。そして、入力ベクトルとの出力ニューロンの重みが最も類似している出力ニューロンを選択し、その出力ニューロンを勝者ニューロン c とし、これに接続する重みベクトルを $\mathbf{m}_c(t)$ とする。

$$\mathbf{m}_c(t) = \min_i \{ \|\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_i(t)\| \} \quad \dots (1)$$

- ② 勝者ニューロン c 及びその近傍にあるニューロンの重みベクトル $\mathbf{m}_i(t)$ を式(2)によって更新し、入力ベクトルに近づける。ここで $h_{ci}(t)$ は近傍関数と呼ばれ、通常、勝者ニューロンを中心としたガウス関数が用いられる。 N_c は勝者ニューロンの近傍領域を表している。一般に、近傍関数を学習回数 t とともに減衰させ、近傍領域 N_c を縮小していく。

$$\mathbf{m}_i(t+1) = \begin{cases} \mathbf{m}_i(t) + h_{ci}(t) [\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_i(t)], & i \in N_c \\ \mathbf{m}_i(t) & , \quad i \notin N_c \end{cases} \quad \dots (2)$$

- ③ 全ての入力ベクトル \mathbf{x}_j に対して、①~②の計算を実行し、重みベクトル $\mathbf{m}_i(t)$ の更新を行う。この処理を所定の回数だけ繰り返すことによって、自己組織化マップの学習を行う。

- ④ 反復学習の結果は重みベクトル m_i の要素値の分布として得られる。着目する入力ニューロンから出力ニューロンへの重みベクトルのパターンを視覚化するために、対応する出力ニューロンに色付け等をして図示される。

例として、出力層の出力ニューロンが 16 ニューロンで、入力層の入力ベクトルが一次元からなる自己組織化マップ ニューラルネットワークを考える。このネットワークに、任意の値 10 個を入力・学習して得た重みの分布を Fig.5.2 に示す。厳密には、この重みの分布は入力ニューロンからの重みに現れるパターンであるが、本研究では出力層の色と表現する。出力層の構造は隣接するニューロンが等距離で多くなる六方最密構造の正六角形からなるハニカム構造とした³⁶⁾。出力層の縦軸及び横軸は出力ニューロンの位置座標を示している。出力層に色で表された重みの分布の意味は、色が暗いほどニューロンの重みの値が大きいことを表し、色が明るいほど重みの値が小さいことを表している。なお、出力層の作成には、MatlabR2019b ニューラルネットワーク クラスタリング ツールを使用した。

本研究では、自己組織化マップの特徴である出力層のニューロンの色（重み）とその領域形状の類似性に着目し、入力間の相関関係を評価する。その検証のために、出力層 16 ニューロン、入力層九次元からなる自己組織化マップ ニューラルネットワークに典型的な関数から得られた値を入力・学習した出力層を用いて予備実験を行った。入力ベクトルは Table 5.1 に示す 9 種類の任意の関数から得た値とし、入力数は 10 個とした。そして、出力層 16 ニューロン、学習回数 200 回の自己組織化マップの出力層を作成した。ここで、作成した出力層を Fig.5.3 に示す。また、Fig.5.4 に X と代表的な関数との相関係数を示す。出力層には、入力より得られた重みの分布が色とその領域形状で表され、それらを比較することで、出力層の類似性を視覚的かつ直感的に確認することが可能である。

5.2.2 自己組織化マップを用いた正の相関関係の評価方法

相関係数が一致する正の相関関係の場合における出力層の色（重み）とその領域形状について調べた。例えば，入力を x 及び $y=x$ としたときの出力層の結果を Fig.5.3(a)と(b)に示す。すなわち，Fig.5.3(a)と(b)に用いた入力の値は等しく，Fig.5.4(I)に示すように相関係数は $r=1.000$ である。このとき得られた出力層の色（重み）とその領域形状は完全に一致している。また，Fig.5.3(c)に示す出力層の入力は， X を最小値 0，最大値 1 として正規化したものであり，式(3)で算出した。

$$A = \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin} \quad \dots (3)$$

この入力と X との相関係数も $r=1.000$ である。従って，これらの出力層である Fig.5.3(a)と(c)の色（重み）と領域形状も一致する。以上の結果より，相関関係が一致する相関係数 $r=1.000$ の場合，Fig.5.3(a)，(b)と(c)に示すように出力層の色（重み）と領域形状は完全に一致した。

次に，相関係数が変化した場合の出力層の色（重み）と領域形状について調べた。ここでは，Fig.5.3(a)で用いた X と Fig.5.3(d)，(e)及び(f)で用いた関数との相関関係について調べた。Fig.5.4(II)に示すように(a)と(d)の相関係数は $r=0.952$ である。また，(a)と(e)の相関係数は $r=0.795$ ，(a)と(f)は $r=0.711$ と徐々に低下している。このとき，Fig.5.3(d)，(e)及び(f)で示した出力層の色（重み）と領域形状は， X との相関係数が低くなるに従い Fig.5.3(a)の出力層との類似性も徐々に低下している。

さらに，相関係数が低い場合の出力層の色（重み）と領域形状について調べた。Fig.5.3(a)で用いた X と Fig.5.3(g)で用いた関数との相関係数は Fig.5.4(III)に示すように $r=-0.171$ と非常に低い。そのため，それらの出力層の色（重み）と領域形状に類似性は見られない。

以上の結果より、正の相関関係にある入力については、本手法が有効であることを示唆している。

5.2.3 自己組織化マップを用いた負の相関関係の評価方法

相関関係が負の関係にある場合における出力層の色（重み）とその領域形状について調べた。Fig.5.3(a)と(h)で用いた X と Z の相関係数は Fig.5.4(IV)に示すように $r=-1.000$ で完全な負の相関関係にある。これらの出力層の色（重み）と領域形状を比較すると、最上段右端と最下段左端のニューロンの色（重み）が逆転している。しかし、この特徴だけを判断基準として、負の相関関係を推論することは非常に困難である。そこで、自己組織化マップを用いた負の相関関係の評価方法について提案する。

本手法では、関数の正規化した値を減じた値（以下、正規化剰余値とする。）を入力として用いた。まず、Fig.5.3(h)で使用した関数 Z について評価するため、1 から Fig.5.3(h)で使用した関数 Z の正規化した値を減じた値（以下、正規化剰余値 Z とする。）を式(4)で算出し、入力として用いた。

$$B=1-\frac{Z-Z_{min}}{Z_{max}-Z_{min}} \quad \dots (4)$$

正規化剰余値 Z と Fig.5.3(a)で使用した関数 X の相関係数は、Fig.5.4(IV)に示すように $r=1.000$ となり、Fig.5.3(h)で使用した関数 Z と X との相関関係と比べ、その関係が逆転している。そのため、Fig.5.3(a)と(i)の出力層を比較したとき、それらの出力層の色（重み）と領域形状が完全に一致した。すなわち、正規化剰余値を用いることで、正の相関関係のみならず、負の相関関係も視覚的に把握することが可能であることを示唆している。

以上の結果より、自己組織化マップの出力層の色（重み）とその領域形状の類似性について、以下の①~④のように比較することで、入力の相関関係を視覚的、直感的に評価できる

ことを示した。

- ① 入力の間関係が一致する場合, 出力層の色(重み)とその領域形状は完全に一致する。
- ② 間関係が高いと出力層の類似性も高いが, 間関係の低下に伴い出力層の類似性も低下する。
- ③ 間関係が低いと, 出力層に類似性がなくなる。
- ④ 負の間関係がある場合, 正規化剰余値を用いることで上述①~③と同様の評価が可能である。

5.3 実験方法

本研究では, ショットブラスト加工を施した透明なアクリル樹脂を試験片として, 表面性状パラメーターと視覚のテクスチャーである曇り度(ヘーズ), 光沢度 $G_s(60^\circ)$ 及び表面色を測定した。そして, これら測定値を入力ベクトルとして自己組織化マップの出力層を作成し, 入力間の間関係の評価した。

5.3.1 試験片

試験片材料は透明なアクリル樹脂板(住友化学株式会社製)とし, 試験片形状は $70 \times 70 \text{mm}^2$ の正方形, 板厚は 5mm とした。試験片表面には任意の凹凸を付与するため, ショットブラスト加工を施した。ショットブラスト加工で使用するメディアはガラスビーズとした。加工の際, 凹凸の再現性を考慮し, メディアの投射量と吹付圧力を任意に変化させ, 算術平均粗さ R_a が $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で段階的に変化するよう凹凸加工を施し, 8 枚の試験片を得た。

5.3.2 視覚のテクスチャー構成パラメーター

表面性状の測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。測定面積は $0.865 \times 0.865 \text{mm}^2$ 、画素数は 1048×1048 とし、三次元表面性状パラメーターの値を算出する際の面積は測定面積中央部の $0.81 \times 0.81 \text{mm}^2$ とした。三次元表面性状パラメーターの値は、ISO 25178-2:2012⁸⁾で定義されている高さパラメーター及び複合パラメーターを用いた。

曇り度(ヘーズ)の測定には白色LEDを光源とする分光ヘーズメーターNDH 5000(日本電色工業(株)製)を用いた。測定面の形状は直径25.0mmの円形とした。

光沢度の測定には光沢度計 GM-268(コニカミノルタホールディングス(株)製)を用いた。測定光源はCIE標準光源Cの分光特性を有する白色光とした。光源入射角は 60° とし、正反射光を測定した。

透明アクリル樹脂板の表面色の測定は分光測色計SD6000(日本電色工業(株)製)を用いる。測定光源は標準イルミナントD65で観察視野を 2° とし、測定面の形状は直径25.5mmの円形とした。また、試験片が透明であるため、背景色には白色校正板を使用した。測色値の算出には $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた。明度 L^* は色の明暗を表し、 $L^*=100$ で白色、 $L^*=0$ で黒色をそれぞれ示している。色度 a^* は正の値が大きいほど赤みが強く、負の値が大きいほど緑みが強いことを示す。また、色度 b^* は正の値が大きいほど黄みが強く、負の値が大きいほど青みが強いことをそれぞれ示す。なお、本研究では、試験片が無彩色であるため、明度 L^* に着目した。

視覚のテクスチャーである曇り度(ヘーズ)、光沢度及び明度の相関関係をFig.5.5に示す。光沢度が低下するとともに、その表面は曇り、表面色は僅かに白くなる傾向が見られた。そこで、これら曇り度(ヘーズ)、光沢度及び明度色に影響を及ぼす表面性状パラメーターについて、自己組織化マップの重み分布を用いて調べた。

5.3.3 自己組織化マップの作成

自己組織化マップの作成には、MatlabR2019b ニューラルネットワーク クラスタリング ツールを使用し、16 ニューロン、学習回数 200 回の出力層を得た。入力ベクトルには、視覚に影響を与える表面性状パラメーターとして紹介³⁹⁾されている算術平均粗さ Ra やクルトシス Rku 等を三次元展開した表面性状パラメーターとして、前報で使用した算術平均高さ Sa 、クルトシス Sku 、最大高さ Sz 及び二乗平均平方根勾配 Sdq ³²⁾ と最大山高さ Sp 、テクスチャーのアスペクト比 Str の 6 種類を用いた。また、視覚のテクスチャーとして曇り度 (ヘーズ)、光沢度 $Gs(60^\circ)$ 及び明度 L^* の 3 種類を用い、合計 9 種類のパラメーターを基に式(3)で正規化した値を入力として用いた。さらに、負の相関性を確認するため、曇り度 (ヘーズ)、光沢度 $Gs(60^\circ)$ 及び明度 L^* の 3 種類を式(4)で算出した正規化剰余値を入力として用いた。これら 12 種類の入力ベクトルの値を Table 5.2, 入力ベクトルを基に作成した出力層を Fig.5.6 に示す。なお、Fig.5.6(j)~(l)のパラメーター名の前に▲印を付した出力層は、正規化剰余値を用いた出力層である。これら出力層を用いてパラメーター間の相関関係について調べた。

5.4 表面性状が曇り度(ヘーズ)、光沢度及び明度に与える影響

自己組織化マップの重み分布をもとに表面性状パラメーターと曇り度 (ヘーズ)、光沢度 $Gs(60^\circ)$ 及び明度 L^* との関係について調べた。まず、曇り度 (ヘーズ) に及ぼす影響について調べた。曇り度 (ヘーズ) の出力層は、Fig.5.6(g)及び負の相関関係を把握するために正規化剰余値で作成した(j)である。これら出力層と表面性状パラメーターの出力層である Fig.5.6(a)~(f)を比較した。その結果、Fig.5.6(c)クルトシス Sku と (e) テクスチャーのアスペクト比 Str の出力層は、明らかにその色 (重み) と領域形状の類似性が低い。これは、曇り度 (ヘーズ) との関係において、クルトシス Sku とテクスチャーのアスペクト比 Str の相

関関係が低いことを意味している。一方、それ以外のパラメーターに関しては、出力層の色（重み）と領域形状が類似した。特に、Fig.5.6(d)最大高さ S_z と (f) 二乗平均平方根勾配 S_{dq} の出力層の類似性が極めて高い。そこで、これらの相関関係について調べた。Fig.5.7 に最大高さ S_z と二乗平均平方根偏差 S_{dq} 及び曇り度（ヘーズ）との関係を示す。最大高さ S_z 及び二乗平均平方根勾配 S_{dq} が増加するとともに、曇り度（ヘーズ）の値は上昇し、その表面は曇ることを示している。曇り度（ヘーズ）が上昇した一因として、最大高さ S_z の増加及び二乗平均平方根勾配 S_{dq} の増加、すなわち表面凹凸形状の高さ及び勾配が増加することでより多く斜面に光が当たるため、光の屈折が増加し、種々の方向へ拡散して透過したためであると示唆される。

次に、光沢度 $G_s(60^\circ)$ について調べた。上述と同様に、光沢度 $G_s(60^\circ)$ の出力層である Fig.5.6(h) 及び負の相関関係を把握するために正規化剰余値で作成した(k)を (a)~(f)と比較した結果、負の相関関係を把握するために正規化剰余値で作成した出力層(k)と(e) テクスチャーのアスペクト比 Str との出力層が特に類似した。そこで、これらの相関関係について調べた。Fig.5.8 にテクスチャーのアスペクト比 Str と光沢度 $G_s(60^\circ)$ との関係を示す。テクスチャーのアスペクト比 Str の増加とともに、光沢度 $G_s(60^\circ)$ は減少した。すなわち異方性を有した表面から等方性を有した表面に変化し、規則性を持たない表面となったため、光の正反射が減少し、表面の光沢が失われたと示唆される。

さらに、明度 L^* について調べた。上述と同様に、明度 L^* の出力層である Fig.5.6(i) 及び負の相関関係を把握するために正規化剰余値で作成した出力層(l)を (a)~(f)と比較した結果、Fig.5.6(b)最大山高さ S_p 、(d)最大高さ S_z 及び(f) 二乗平均平方根勾配 S_{dq} の出力層が類似した。そこで、これらの相関関係について調べた。ここでは相関係数の高い最大山高さ S_p 及び二乗平均平方根勾配 S_{dq} と明度 L^* との関係を Fig.5.9 に示す。最大山高さ S_p 及び二乗平均平方根勾配 S_{dq} の増加とともに、わずかではあるが明度 L^* は減少した。すなわち、表面凹凸形状の山部及びその勾配が増加するとともに、その表面が白くなる。これは、曇り度

(ヘーズ)の上昇に伴い表面が白くくすむためであると示唆される。

最後に、視覚のテクスチャーである曇り度(ヘーズ)、光沢度 $G_s(60^\circ)$ 及び明度 L^* 同士の出力層を比較した。その結果、Fig.5.6(g)に示す曇り度(ヘーズ)と(l)に示す明度 $\blacktriangle L^*$ の出力層の色(重み)と領域形状の類似性が高い。曇り度(ヘーズ)と明度 L^* との関係を Fig.5.10 に示す。曇り度(ヘーズ)が増加する、すなわち表面が曇るとともに表面が白くくすむことを示している。

以上の結果より、自己組織化マップの出力層の色(重み)と領域形状との類似性を比較検討することで、パラメーター間の相関関係を評価できることを示した。従来の方式、例えば9パラメーターを相互に評価する場合には、36枚の二次元グラフを製作し、比較検討する必要があった。それに対して、本研究で提案した手法では12枚の出力層を作成し、それらを視覚的、直感的に比較検討することで、相関関係を評価することが可能である。すなわち、自己組織化マップによる評価方法は、従来の方式に比べ効率的な評価システムであることを示唆している。特に、検討対象となるパラメーター数が増えるほど、その有用性は高まると言える。

5.5 結言

本章では、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルである自己組織化マップによるパラメーターの相関関係の評価方法を提案した。

- 1) 得られた重み分布の類似性が高い場合、入力との相関関係も高くなる。さらに、重み分布が一致している場合、入力との相関関係も一致する。それに対して、重み分布の類似性が低い場合、入力との相関関係も低くなる。すなわち、自己組織化マップの重み分布の色(重み)とその領域形状との類似性を視覚的に評価することで正の相関関係を評価できることを示した。
- 2) 入力の値を正規化し、1から減じた値を用いることで、負の相関関係についても、

重み分布を比較することで評価できることを示した。

- 3) 自己組織化マップの重み分布を評価した結果、本研究で使用した試験片、すなわち表面の算術平均高さ Ra が約 $1.0\mu\text{m}$ 以下となる微小凹凸領域を有する透明なアクリル樹脂板の曇り度 (ヘーズ)、光沢度 $G_s(60^\circ)$ 及び明度 L^* に対して主に影響を及ぼしていると考えられる表面性状パラメーターは複数あり、最大高さ S_z 、最大山高さ S_p 、二乗平均平方根勾配 Sdq 及びテクスチャーのアスペクト比 Str であった。

参考文献

- 1) 小坂田宏造：日本塑性加工学会,第8回材料加工戦略会議,1-16(2010).
- 2) 経済産業省,厚生労働省,文部科学省：2017年度版ものづくり白書,96(2017).
- 3) 伊東誼：日本塑性加工学会,第8回材料加工戦略会議,31-54(2010).
- 4) 日経BP社：日経デザイン,5,66-71(2003).
- 5) 伊東誼：生産文化論,日科技連,1-19(1997).
- 6) ISO4287,Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters(1997).
- 7) JIS B 0601,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ー(2013).
- 8) ISO25178-2, Geometric Product Specifications (GPS) - Surface texture: areal(2012).
- 9) JIS B 0681-2, 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ー(2018).
- 10) 相沢正, 渡辺哲夫, 西条博之, 川上元郎：製品科学研究所報告,63,23-32(1970).
- 11) 金正周, 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ：46(3),1-8(1999).
- 12) 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ：47(1),25-34(2000).
- 13) 宮川松男, 小豆島明, 山中薫：伸銅技術研究会誌,19,155-164(1980).

- 14) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸 : 精密工学会誌,65(3),418-422(1999).
- 15) 西川尚之, 高安拓郎, 岩田耕一 : 精密工学会誌,57(9),1633-1638(1991).
- 16) 小豆島明, 岸輝男, 宮川松男 : 塑性と加工,25(284),765-771(1984).
- 17) 川邊和宏, 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,46(1),248-252(2007).
- 18) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 吉森茂, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,42(1),340-344(2003).
- 19) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄 : 軽金属,54(2),45-50(2004).
- 20) M. Yonehara, T. Matsui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi, : Mater.Trans.JIM,45(4),1019-1026(2004).
- 21) M. Yonehara, T. Matsui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi, : Mater.Trans.JIM,45(4),1027-1032(2004).
- 22) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄 : 軽金属,55(1),15-19(2005).
- 23) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘 : 軽金属,55(12),668-672(2005).
- 24) M. Yonehara, K. Kihara, Y. Kagawa, H. Isono, and T. Sugibayashi : Mater.Trans.JIM,46(10),2197-2203(2005).
- 25) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘 : 軽金属,56(8),429-434(2006).
- 26) 吉田瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 磯野宏秋, 香川美仁, 杉林俊雄 : 軽金属,61(5),187-191(2011).
- 27) 米原牧子, 吉田瞬, 磯野宏秋, 杉林俊雄 : 人間工学特別号,51,264-265(2015).
- 28) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 木原幸一郎, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,55(1),1-5(2016).
- 29) 米原牧子 : 精密工学会誌,82(11),944-947(2016).
- 30) Y.Wakabayashi, K.Chanthasen, S.Yoshida, Y.Kawabata, T.Ogawa and T.Sugibayashi, : The 20th International Conference on Artificial Intelligence ICAI'18,289-292(2018).

- 31) 吉田瞬, 若林祐次, 小川毅彦, 杉林俊雄: 拓殖大学理工学研究報告,16(1),3-10(2019).
- 32) 若林祐次, 米原牧子, 山辺秀敏, 吉田瞬, 杉林俊雄: J.Jpn.Soc.Colour Mater.,92,131(2019).
- 33) T.kohonen: Self-Organizing Maps, Springer Verlag (1995).
- 34) T.コホネン: 自己組織化マップ改訂版,丸善出版,114-117(2012).
- 35) 大北正昭, 徳高平蔵, 藤村喜久郎, 権田英功: シュプリンガー ジャパン,1-5(2008).
- 36) 亀岡瑤, 宗像昌平, 八木圭太, 山本義郎: 計算機統計学, 29(2),181-188(2016).
- 37) Mu-Chun Su, Ta-Kang Liu and Hsiao-Te Chang: Tamkang Journal of Science and Engineering,5(1),35-48(2002).
- 38) 三好力: 知能と情報,19(2),167-175(2007).
- 39) 株式会社キーエンス: “表面粗さ測定の必要性”
<https://www.keyence.co.jp/ss/products/microscope/roughness/basics/necessity.jsp>

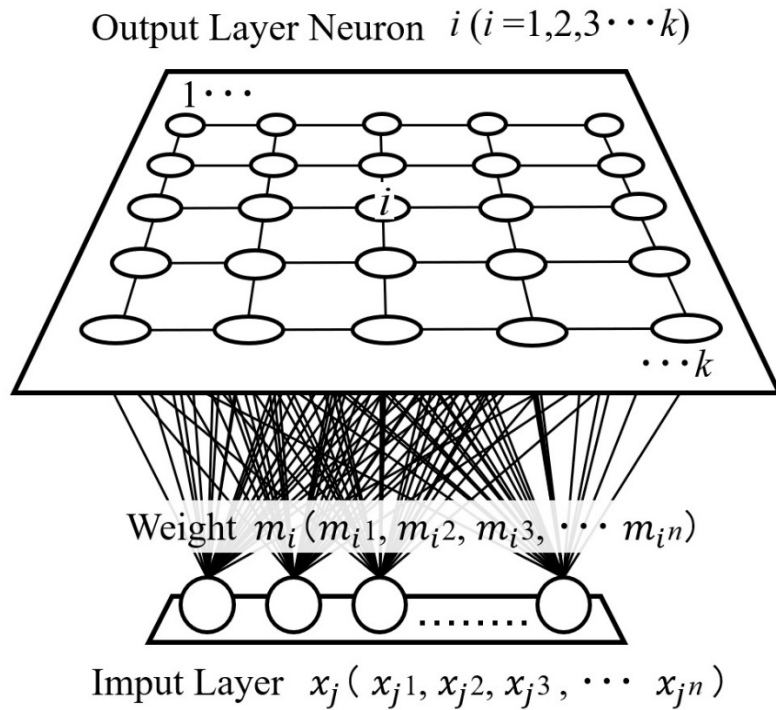


Fig.5.1 Structure of Self-Organizing maps.

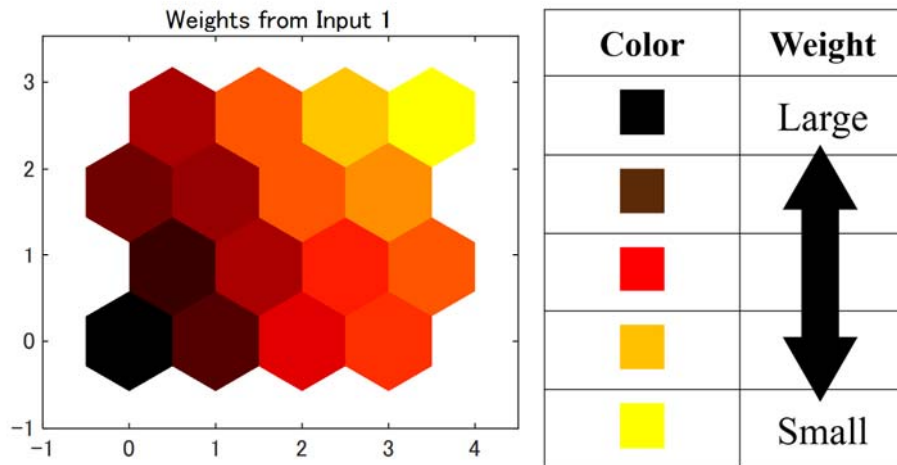


Fig.5.2 Output Layer on Self-Organizing maps.

Table 5.1 Input vector for verification.

Input1	X	1.00	2.00	...	9.00	10.00
Input2	$Y=X$	1.00	2.00	...	9.00	10.00
Input3	$Y=A$	0.00	0.11	...	0.89	1.00
Input4	$Y=\log(X)$	0.00	0.30	...	0.95	1.00
Input5	$Y=\log(X^{10})$	0.00	1.30	...	1.95	2.00
Input6	$Y=\log(X^{100})$	0.00	2.30	...	2.95	3.00
Input7	$Y=\sin(X)$	0.84	0.91	...	0.41	-0.54
Input8	Z	10.00	9.00	...	2.00	1.00
Input9	$Y=B$	0.00	0.11	...	0.89	1.00

Notes

$$A = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

$$B = 1 - \frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}}$$

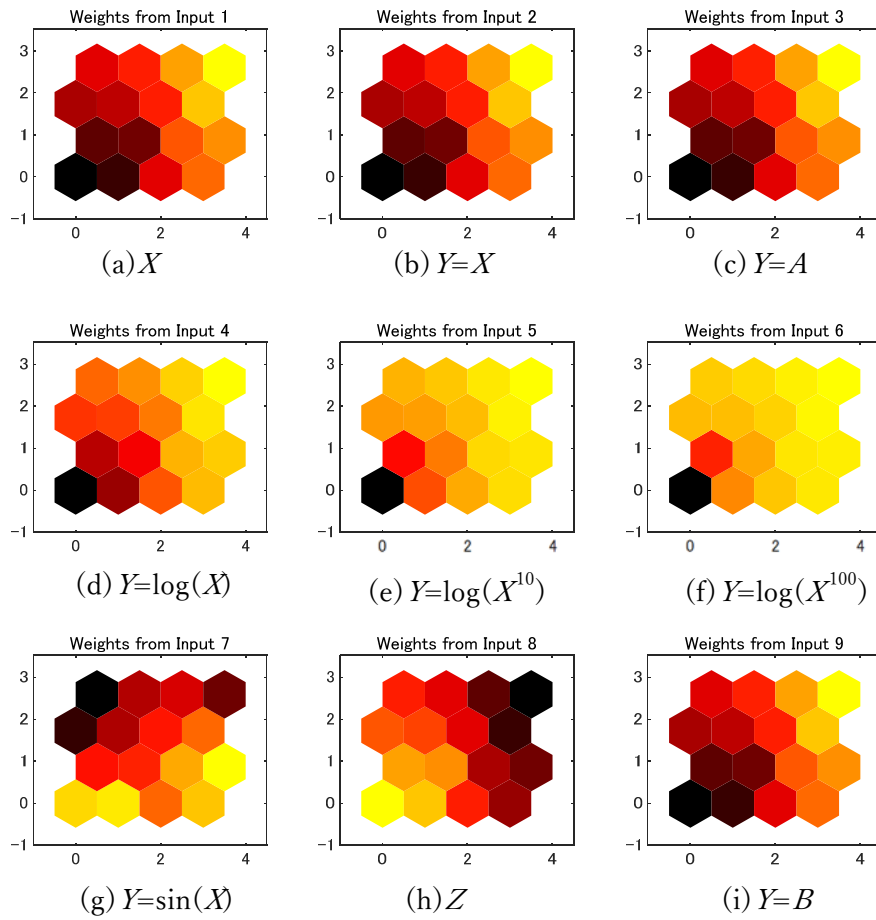


Fig.5.3 Weight distribution on Self-Organizing maps for verification.

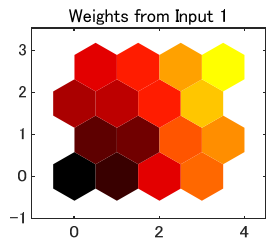


Fig5.3 (a) X

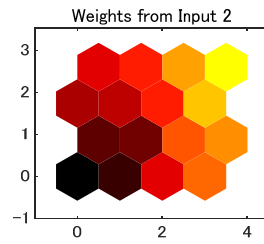
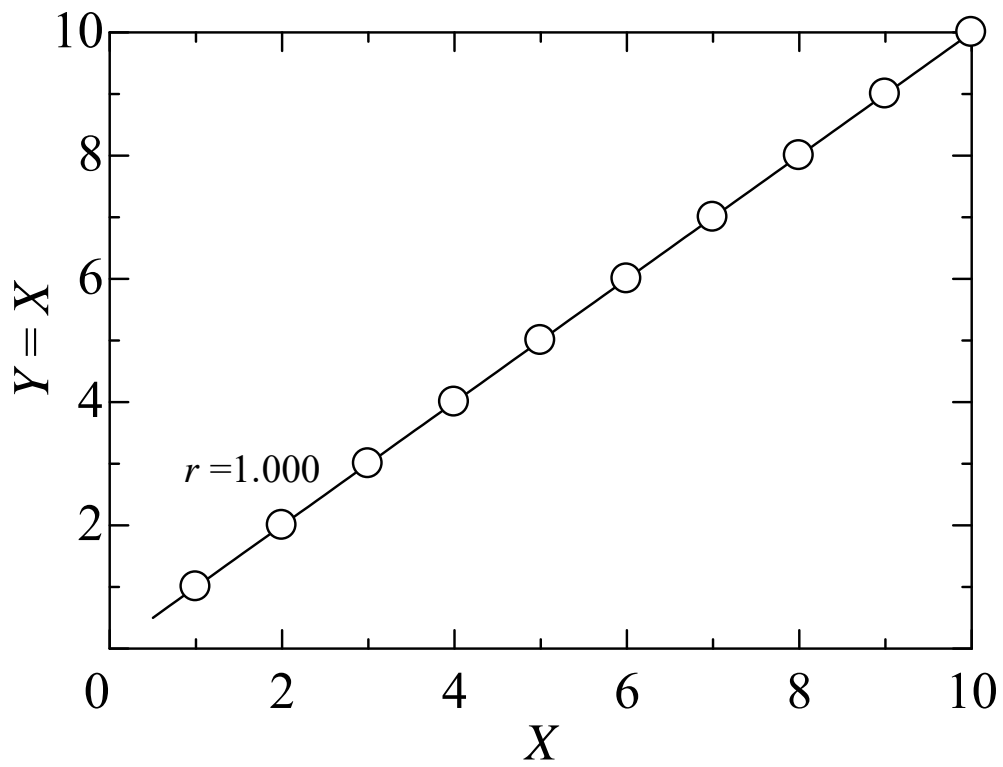


Fig5.3 (b) $Y=X$



(I) $Y=X$

Fig.5.4 Comparisons of weight distribution on Self-Organizing maps in Fig.5.3.

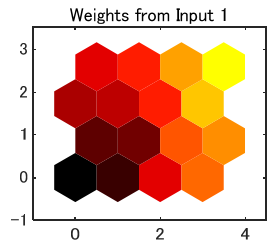


Fig5.3 (a) X

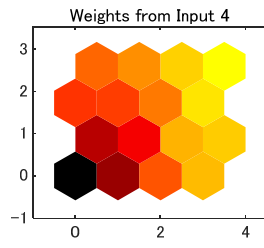
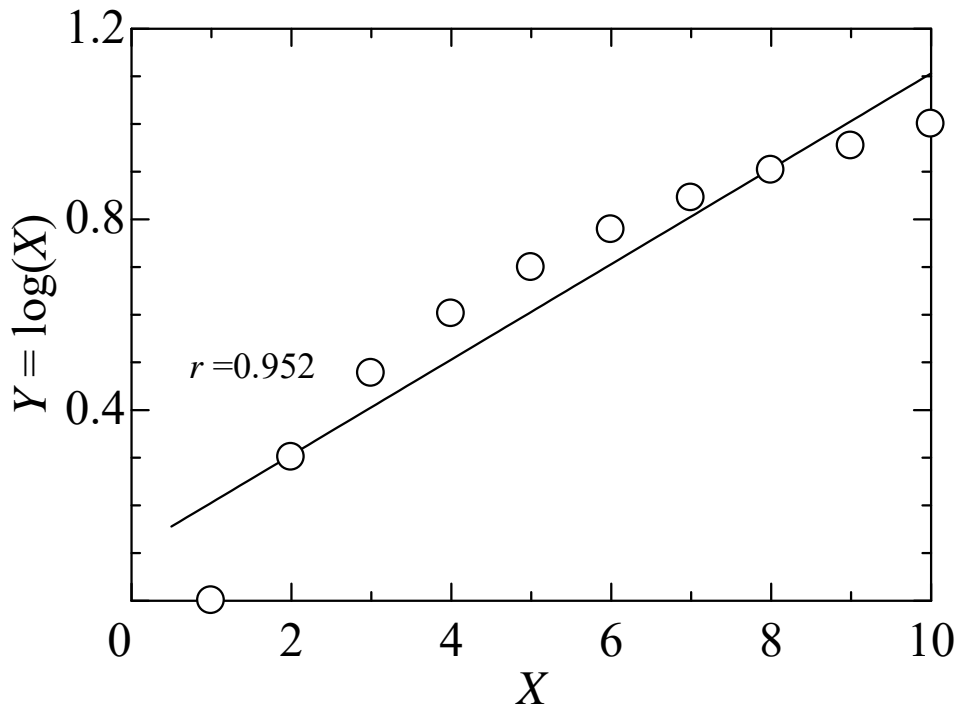


Fig5.3 (d) $Y=\log(X)$



(II) $Y=\log(X)$

Fig.5.4 Comparisons of weight distribution on Self-Organizing maps in Fig5.3.

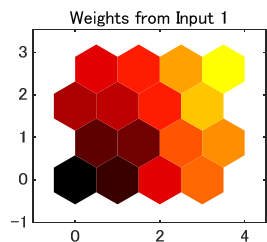


Fig5.3 (a) X

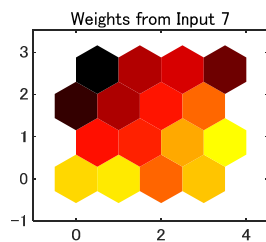
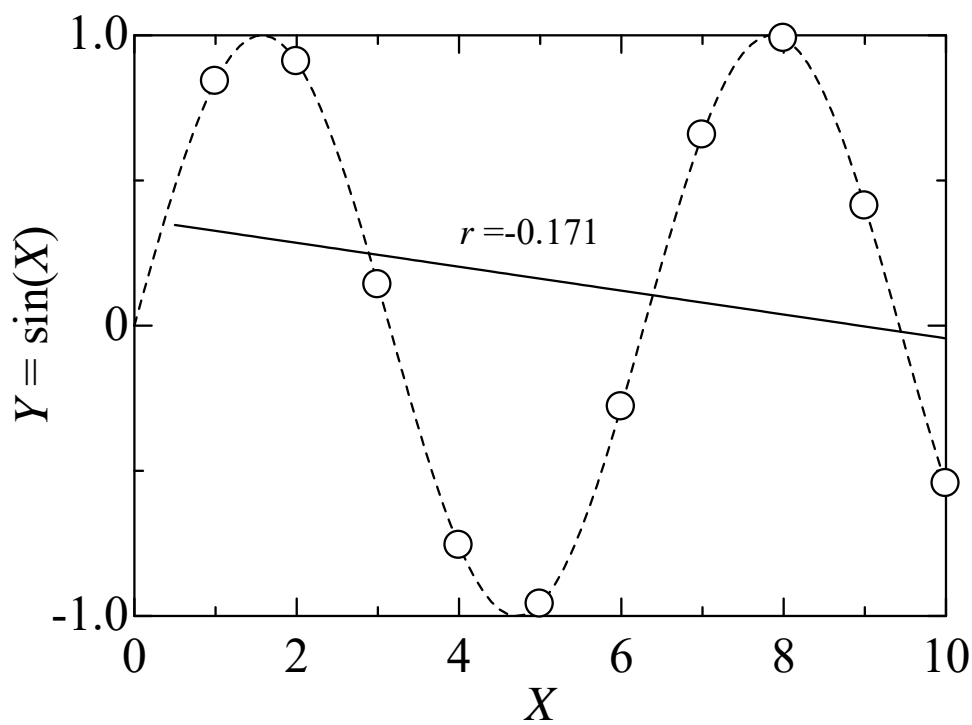
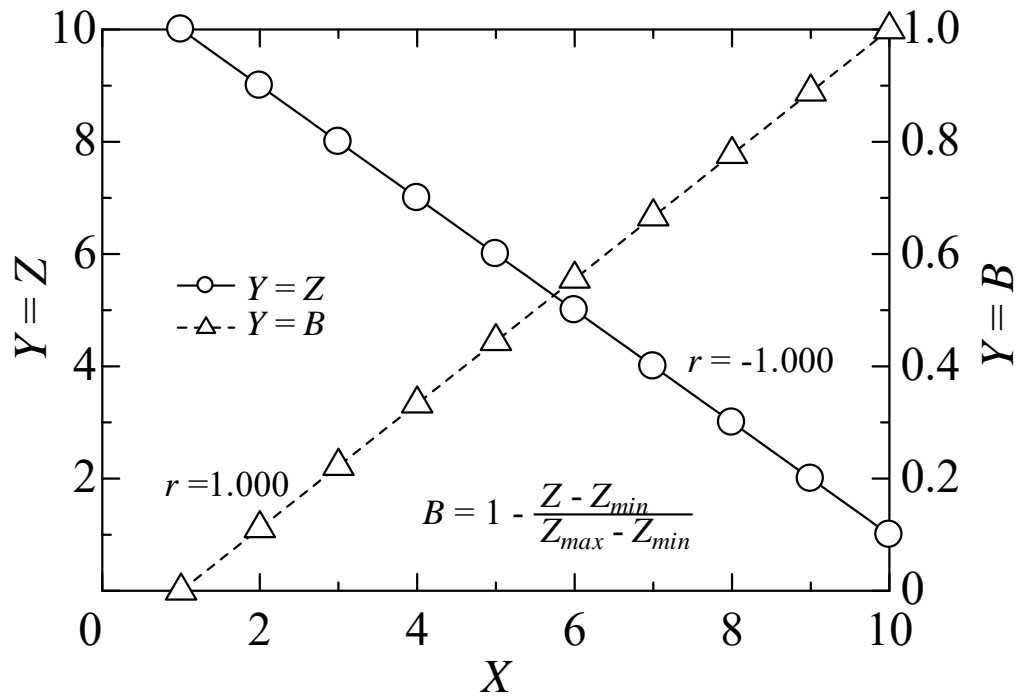
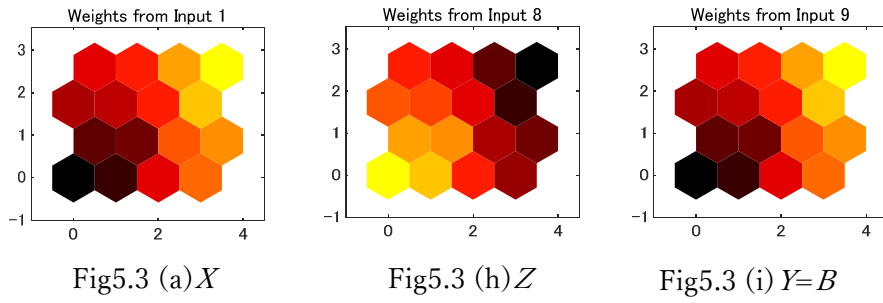


Fig5.3 (g) $Y=\sin(X)$



(III) $Y=\sin(X)$

Fig.5.4 Comparisons of weight distribution on Self-Organizing maps in Fig5.3.



(IV) $Y=Z$ and $Y=B$

Fig.5.4 Comparisons of weight distribution on Self-Organizing maps in Fig5.3.

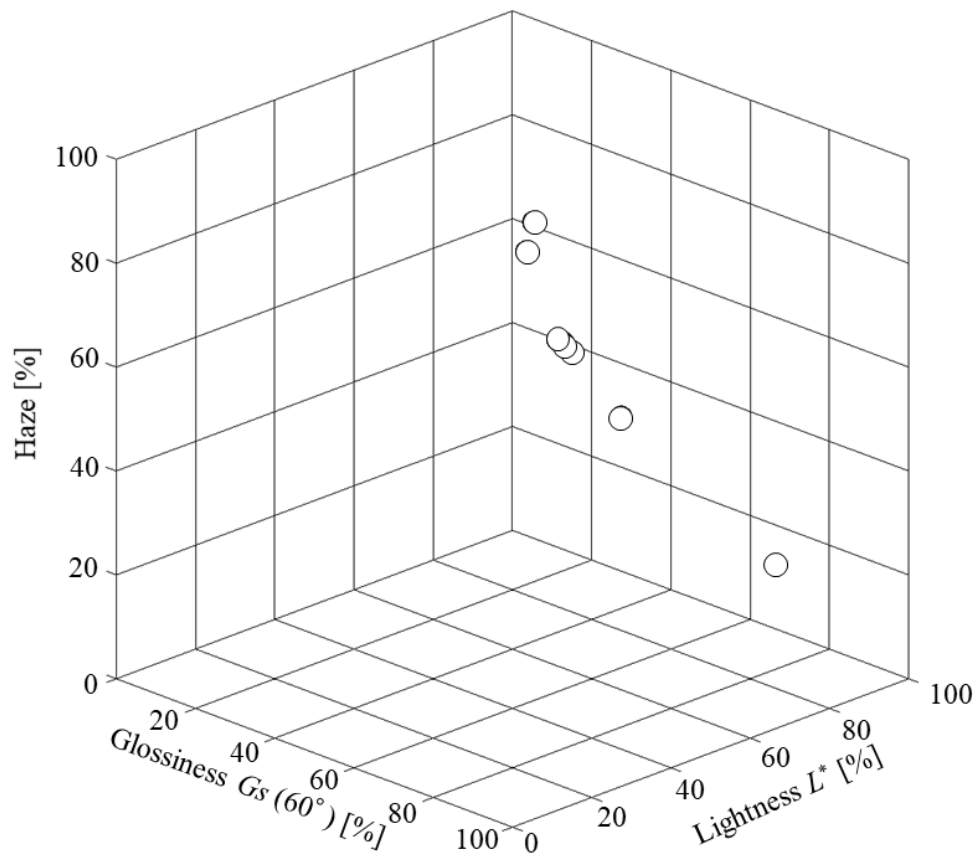


Fig.5.5 Relation among glossiness $G_s(60^\circ)$, lightness L^* and Haze.

Table 5.2 Input vector for visual texture.

Specimen	A	B	C	D	E	F	G	H
S_a	0.00	0.13	0.27	0.34	0.35	0.40	0.85	1.00
S_p	0.00	0.35	0.58	0.61	0.73	0.69	1.00	0.96
S_{ku}	1.00	0.72	0.00	0.06	0.29	0.06	0.39	0.36
S_z	0.00	0.22	0.36	0.44	0.48	0.44	0.92	1.00
S_{tr}	0.00	0.54	0.90	0.86	0.89	0.87	1.00	0.91
S_{dq}	0.00	0.29	0.40	0.47	0.45	0.44	0.85	1.00
$Haze$	0.00	0.36	0.57	0.57	0.54	0.55	0.88	1.00
$G_s(60^\circ)$	1.00	0.37	0.11	0.14	0.17	0.15	0.00	0.03
L^*	1.00	0.69	0.52	0.36	0.43	0.39	0.00	0.01
▲Haze	1.00	0.64	0.43	0.43	0.46	0.45	0.12	0.00
▲ $G_s(60^\circ)$	0.00	0.63	0.89	0.86	0.83	0.85	1.00	0.97
▲ L^*	0.00	0.31	0.48	0.64	0.57	0.61	1.00	0.99

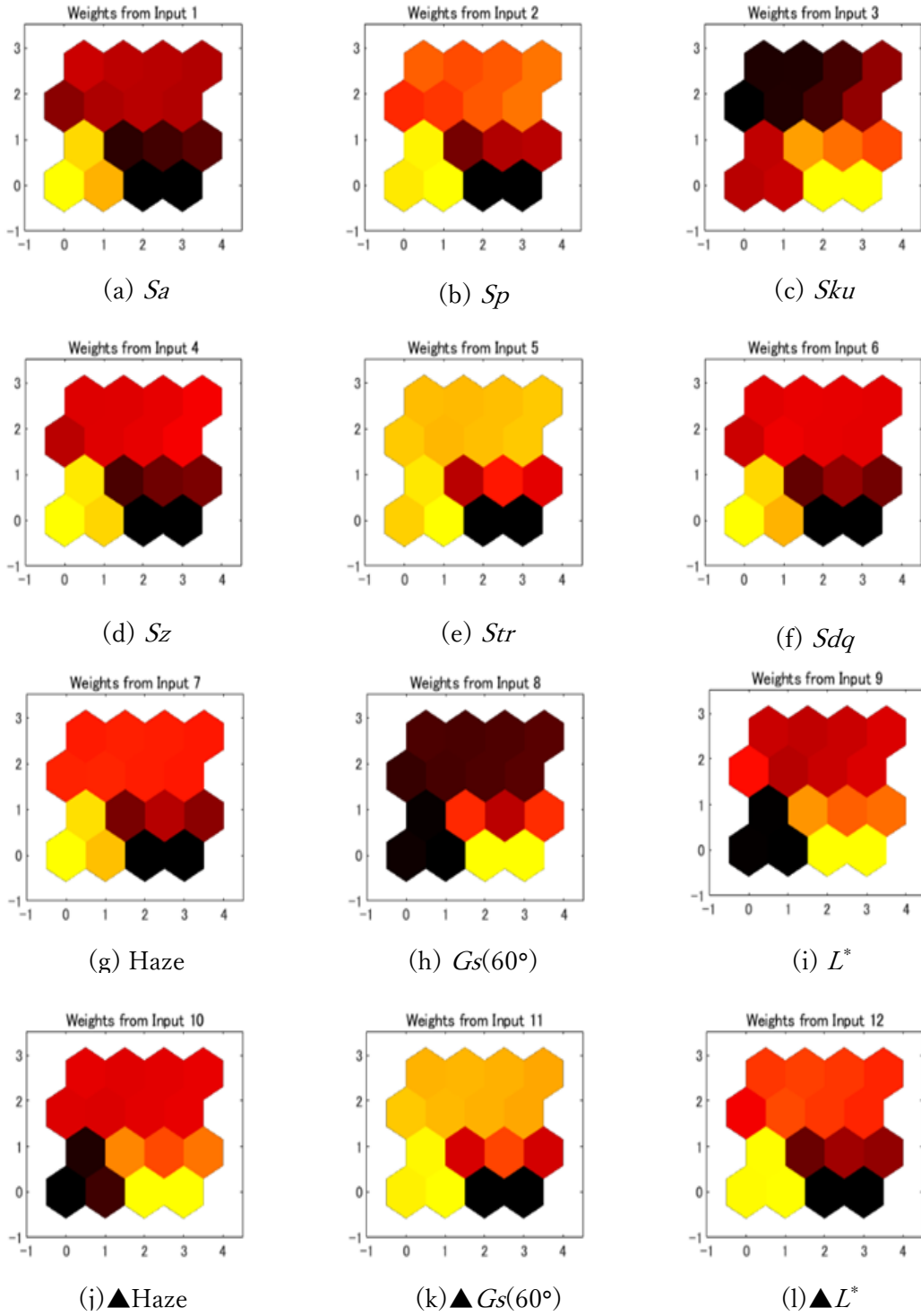
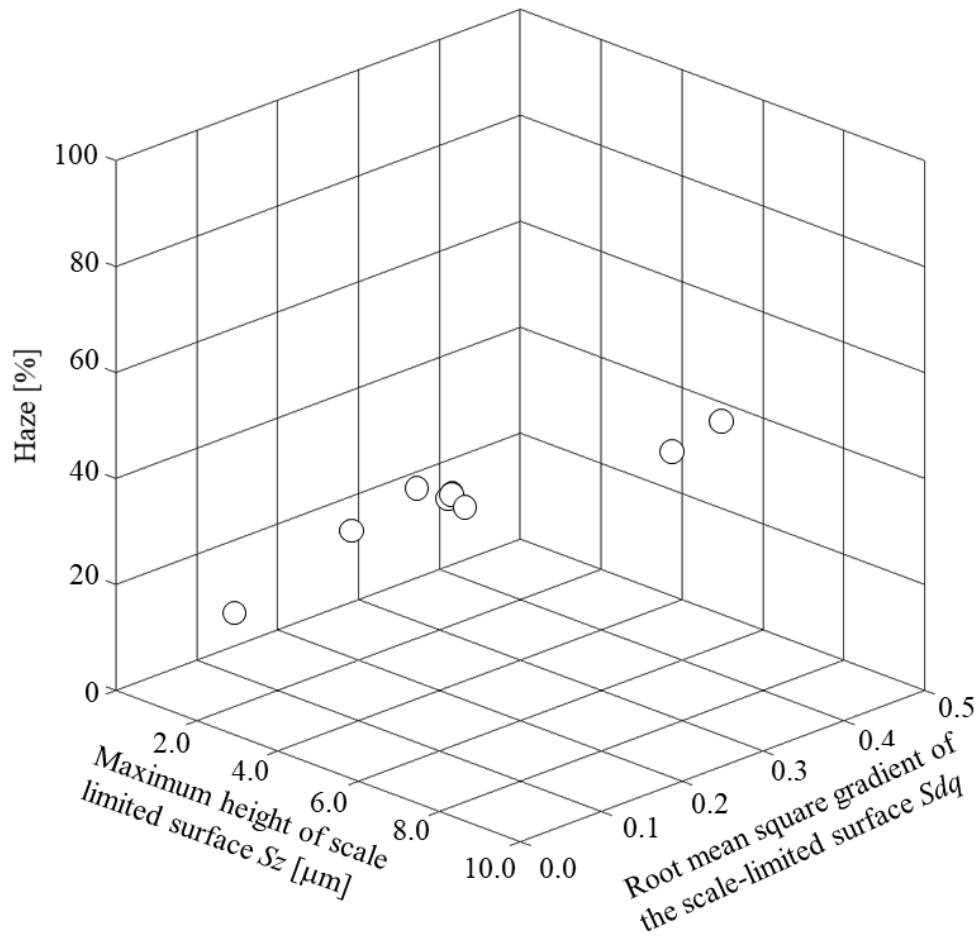
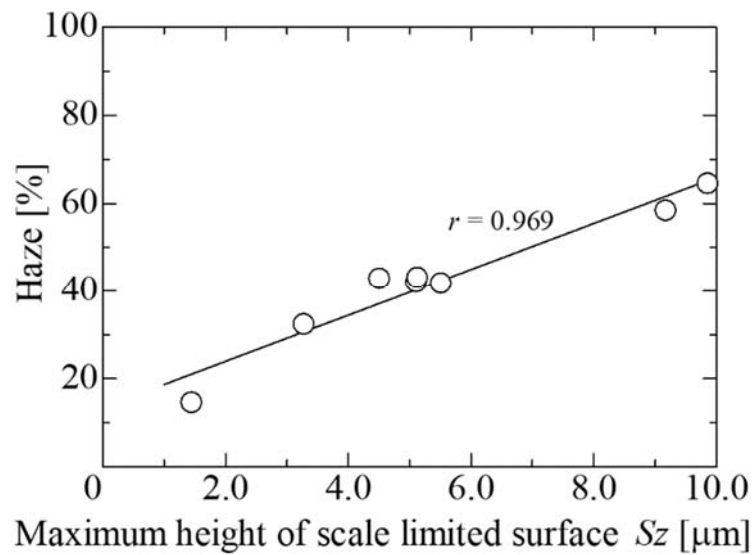


Fig.5.6 Weight distribution on Self-Organizing maps for surface texture.

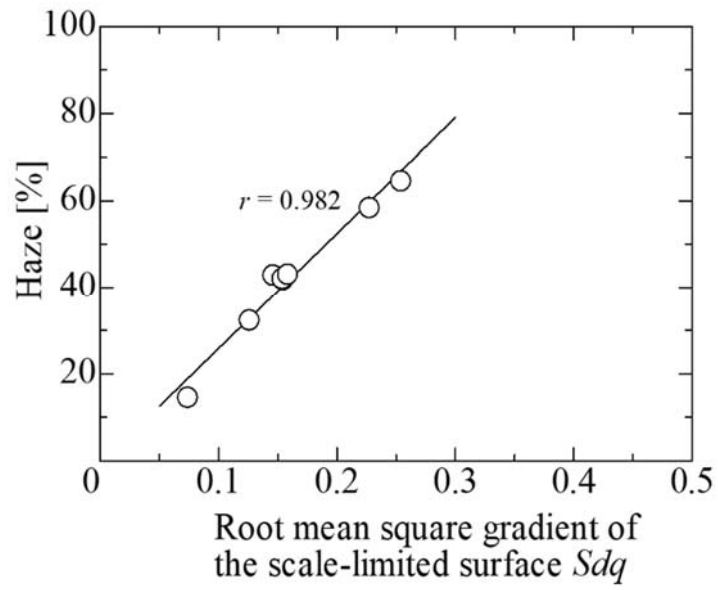


(a) S_z - S_dq - Haze

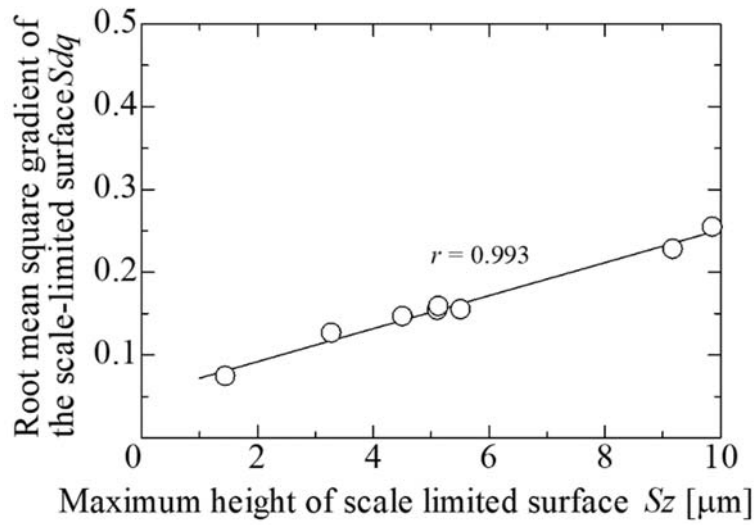


(b) S_z - Haze

Fig.5.7 Relation among maximum height of scale limited surface S_z , root mean square gradient of the scale-limited surface S_dq and haze.



(c) Sdq - Haze



(d) Sz - Sdq

Fig.5.7 Relation among maximum height of scale limited surface Sz , root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq and haze.

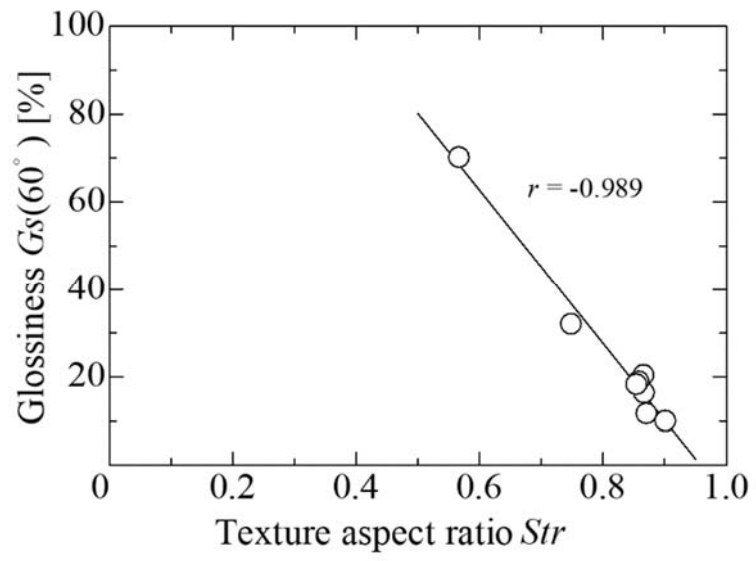
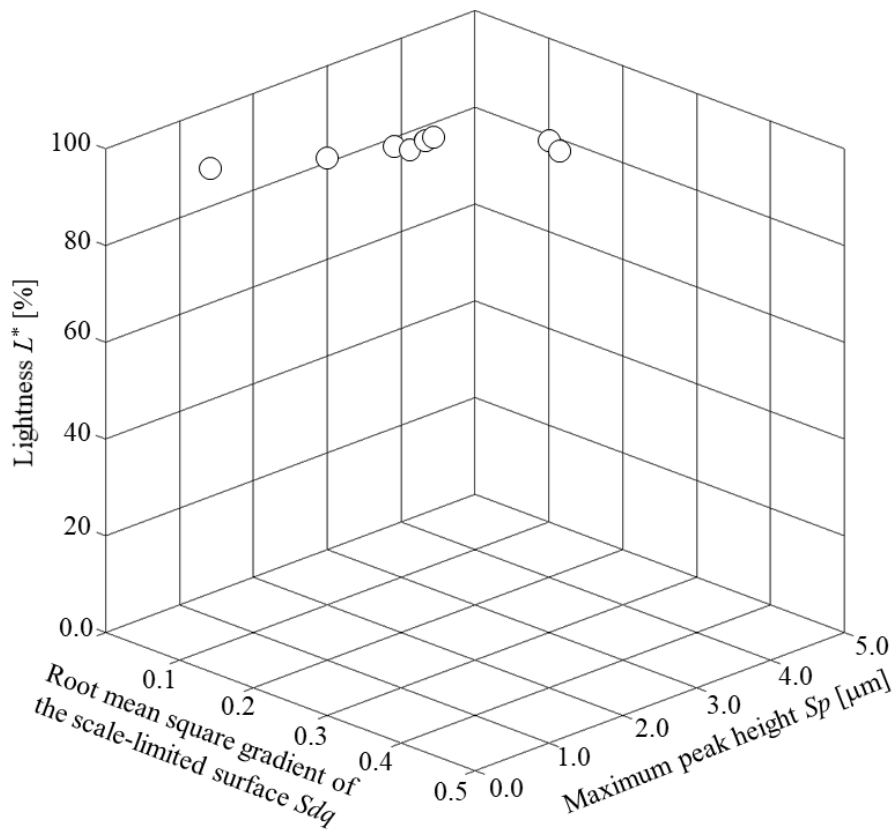
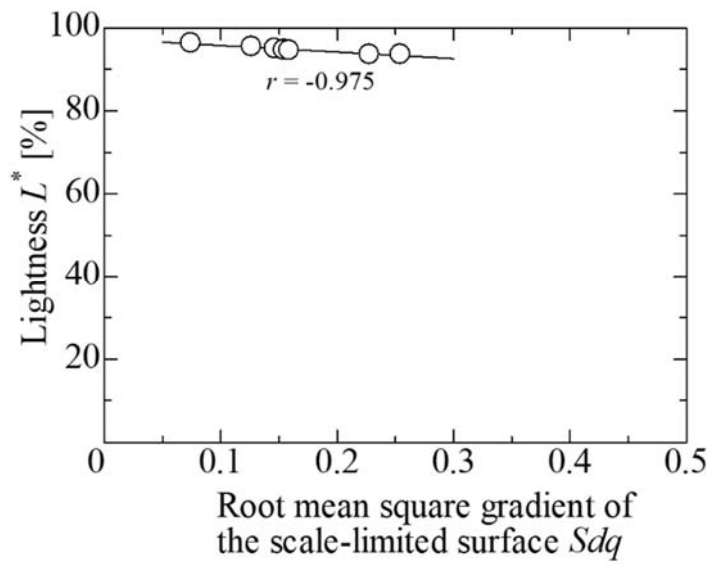


Fig.5.8 Relation between texture aspect ratio Str and glossiness $G_s(60^\circ)$.

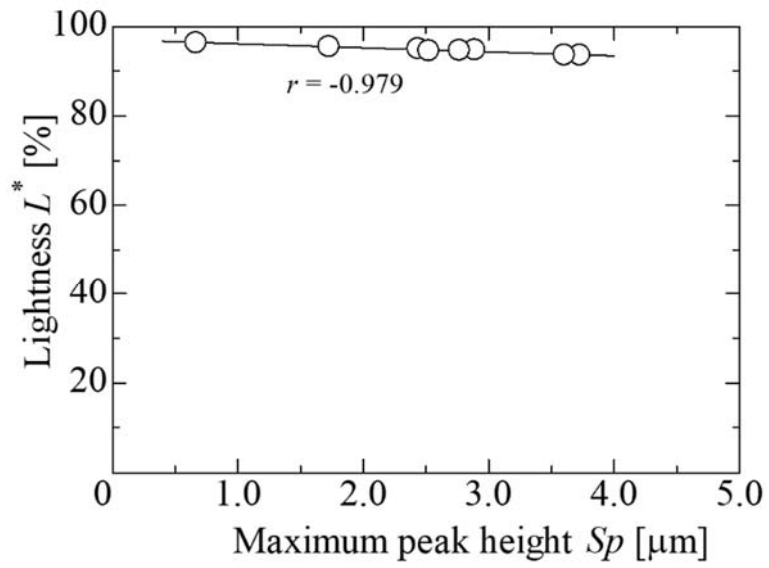


(a) $Sdq - Sp - L^*$

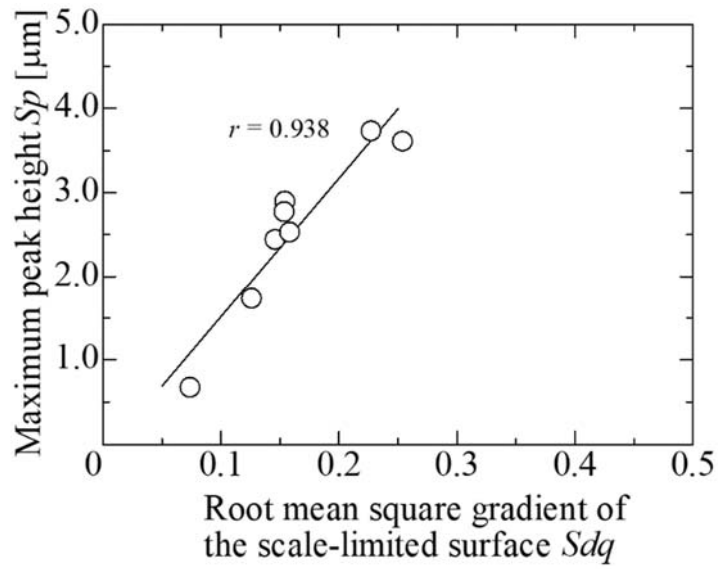


(b) $Sdq - L^*$

Fig.5.9 Relation among root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq , maximum peak height Sp and lightness L^* .



(c) $S_p - L^*$



(d) $Sdq - S_p$

Fig.5.9 Relation among root mean square gradient of the scale-limited surface Sdq , maximum peak height S_p and lightness L^* .

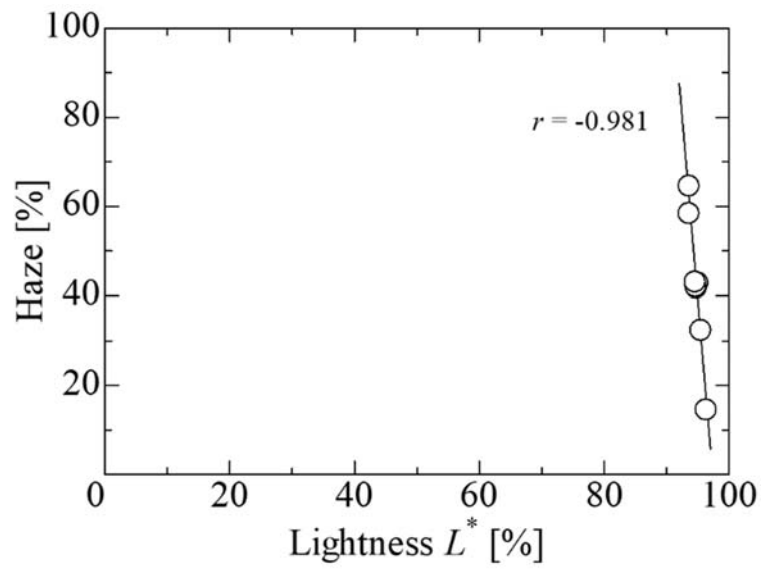


Fig.5.10 Relation between lightness L^* and haze.

第6章 結論

近年、デジタル化やモジュール化による工業製品のコモディティ化が進展したことによって、激しい価格競争が引き起こされ、単なるものづくりから得られる工業製品の付加価値が急速に低下した。さらに最近では、IoT（Internet of Things）の進展、人工知能（AI）の登場・普及に伴ういわゆる「第四次産業革命」が到来する中、デジタル化は付加製造（Additive Manufacturing）と呼ばれる3Dプリンターなどの革新的な生産技術にまで波及し、日進月歩の発展を遂げている。かつて職人技としてもものづくりの現場に暗黙知として蓄積されてきた製造技術やノウハウがデジタル技術を通じてソフトウェアに内蔵され、形式知化している。そして、そのソフトウェアを使用し、デジタル制御された3Dプリンターやマシンングセンターなどの製造設備で工業製品が生産されるため、世界中の様々な場所で品質レベルの高い類似の工業製品が簡単に作り出せるようになった。そのため、日本の高い品質・性能と信頼性の高い製造展開といった競争優位性が薄まるとともに、コモディティ化により一般的な工業製品の希少性が薄まっている。この現状を打破し、日本のものづくり企業が自社の競争優位性を高めるには、人間の感性に訴えかける特徴のある工業製品を開発し、他社製品との差別化を図る必要がある。そして、そのためには消費者の感覚や感性によって認識される工業製品の「質感」を如何に高めるかが重要なポイントとなる。「質感」は、「ものの材料・素材やその表面の状態から受ける感じ」と定義され、この質感の認識は、「視覚や触覚などの刺激からものの材料・素材やその表面の状態を推定する機能」と位置付けられる。質感の認識は、視覚や触覚を通して心理的な現象として起こるため、それを理解するには視覚や触覚に影響を及ぼす物理的なプロセスを理解する必要がある。視覚について言えば、ものからの反射及び透過する光の光学的な特性の理解と材料・素材とその表面の状態といった物理的な特性の理解が必要となり、質感を把握するためには、ものの表面の状態と光学的特性との関係を明らかにする必要がある。ものの表面の状態は、一般的に、テクスチャー

(Texture)と呼ばれている。テクスチャーは、色彩 (Color)、形状(Shape)と並び工業製品の
外観を構成する主要要素であり、工業製品の付加価値を高める因子の一つとして近年注目
されている。しかし、感覚的、主観的な言語によって得られる物体表面の特徴を客観的に把
握し、定量化することは極めて困難である。また、光学特性である光沢度、色や曇り度など
人間が認識する属性と表面の凹凸形状を評価する表面性状パラメーターとの因果関係が自
明でない場合が多い。製品設計や製造の場面において、「色彩」や「形状」は色見本や図面
などを用いた数値による設計指示が可能なのに対し、「テクスチャー」に関しては設計者と
技術者との間に共通する設計指針がなく、設計者が意図したテクスチャーを技術者に正確
かつ迅速に伝えることは難しい。また、近年では3D プリンターなどの生産技術の発展に
より、設計から最終工程までをデジタルデータで一貫管理するようになっている。従来、仕
上げ工程で職人の技量に依存してきたテクスチャーの質感が設計段階において決定するよ
うになり、生産工程のシフトが生じつつある。この生産技術の発展による生産工程シフトの
面からも、設計者の意図を正確かつ迅速に再現するための客観的なテクスチャー設計指針
の重要性が増している。また、テクスチャーの定量的評価指標を検討するためには、表面性
状パラメーターを用いて表面の凹凸形状を特徴づける必要がある。また、それらの表面性状
パラメーターが視覚のテクスチャーに与える影響、すなわち相関性を明確にする必要があ
る。一方、ISO 規格や JIS 規格で規定された表面性状パラメーターは数多く存在している。
そのため、パラメーターを比較検討する準備作業として、各表面性状パラメーターの組み合
わせを二次元グラフに描写する必要があり、非常に多くの手間と時間がかかっていた。そこ
で、この準備作業の手間と時間を短縮する方法が求められる。

本論文では、透明なアクリル樹脂板を試験片材料として、視覚のテクスチャーの定量的な
評価と自己組織化マップを用いた視覚のテクスチャーの相関関係を簡易に評価するシステ
ムの提案を行った。以下に、本論文の各章で得られた成果を示す。

第 2 章では、本論文においてテクスチャーの定量的評価指標として用いる「表面粗さ」、

「光沢度」, 「表面色」及び「曇り度（ヘーズ）」の概要と測定方法について示した。また、本論文で試験片として使用する透明なアクリル樹脂板及び本論文で試験片を加工するために用いたショットブラスト加工の概要を示した。

第 3 章では、透明なアクリル樹脂板を試験片材料として取り上げ、表面の算術平均高さ S_a が $1.0\mu\text{m}$ 以下となる微小な凹凸領域において表面凹凸が透過率及び曇り度（ヘーズ）に与える影響を実験的に調べた。まず、アクリル樹脂板の表面をショットブラスト加工により、表面の凹凸が段階的に異なる試験片を準備し、面領域の表面性状を数値化するために ISO25178-2:2012 に準拠した三次元表面性状パラメーターを用いてショットブラスト加工面における凹凸形状の定量化を行った。次に、試験片の全光線透過率、平行透過率、拡散透過率及び曇り度（ヘーズ）と相関の高い三次元表面性状パラメーターについて検討した。その結果、本論文において使用した試験片のガラスビーズをメディアとしたショットブラスト加工面におけるスキューネス S_{sk} は約 0, クルトシス S_{ku} は約 6 となった。また、テクスチャーのアスペクト比 S_{tr} は 0.5 以上となり、等方性を有する凹凸形状であることを示した。そして、算術平均高さ S_a が大きくなるに従い、最大高さ S_z , 二乗平均平方根勾配 S_{dq} だけでなく、凹凸周期を示す最小自己相関長さ S_{al} も増加した。また、透明アクリル樹脂の表面に付与した凹凸形状が算術平均高さ $S_a \leq 0.1\mu\text{m}$ の場合、全光線透過率は約 90% となり、平行透過率は約 80%, 拡散透過率は約 10% で構成されていた。透明アクリル樹脂表面の凹凸が算術平均高さ S_a の値を約 $1.0\mu\text{m}$ まで大きくすると、拡散反射率が約 65% となり、曇り度（ヘーズ）の値も増加し白っぽい色へと変化することを示した。さらに、透過率及び曇り度（ヘーズ）の値は凹凸の勾配を示す二乗平均平方根勾配 S_{dq} との相関が高く、相関係数は約 0.98 を示した。そして、二乗平均平方根勾配 S_{dq} が 0.07 から 0.25 の範囲で、曇り度（ヘーズ）が約 15% から 65% に直線的に増加した。以上より、透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャーのうち曇り度（ヘーズ）は、三次元表面性状パラメーターを用いて定量化が可能なことを示した。

第4章では、表面の算術平均高さ Sa が約 $1.0\mu\text{m}$ 以下となる微小凹凸領域を対象として、片面または両面にショットブラスト加工を施し、種々の表面粗さを付与した試験片の凹凸形状が視覚のテクスチャーに与える影響について調べた。まず、アクリル樹脂表面の凹凸形状を定量化するため、面領域の評価が可能な三次元表面性状パラメーターについて検討した。次に、各三次元表面性状パラメーターが視覚のテクスチャーを構成するパラメーターのうち曇り度（ヘーズ）及び光沢度に与える影響について調査した。これらの結果を基に、微小凹凸が付与された透明なアクリル樹脂板における視覚のテクスチャー評価指標について検討した。その結果、片面にショットブラスト加工を施した試験片と両面に加工を施した試験片において、算術平均高さ Sa の増加に伴う全光線透過率の低下の度合いは異なる傾向を示した。一方、曇り度（ヘーズ）の増加の度合いは、両試験片ともほぼ同じ傾向であった。次に、ショットブラスト加工を片面にのみ施した場合、曇り度（ヘーズ）の値は加工面から測定しても、未加工面から測定してもほぼ変化が見られなかった。しかし、測定面の違いは光沢度の値に大きく関与した。すなわち、曇り度（ヘーズ）は透過光を強く反映し、光沢度は測定面の散乱光を強く反映していた。したがって、曇り度（ヘーズ）は光の入射面に対して、その面の加工・未加工にかかわらず、加工した面の表面性状に依存し、光沢度は光の入射面の表面性状に依存していた。以上の結果より、加工面の表側と裏側の加工条件によって、例えば光沢度の値を一定となるよう設定し、曇り度（ヘーズ）の値のみを変化させることが可能であることを示した。以上の結果より、透明なアクリル樹脂板を外観材として用いる際、その表面性状の変化に起因する光の透過や反射を活用した意匠性向上を設計する指針となりえることを示した。

第5章では、パラメーター間の相関関係を評価するため、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルの1つである自己組織化マップを用いた評価方法の導入を提案した。まず、自己組織化マップを用いたパラメーター間の相関関係を評価する方法について、その評価方法の有効性を示すために、任意の関数を用いて予備的な検証を行った。その結果、得ら

れた自己組織化マップの重み分布の類似性が高い場合、入力ベクトルの相関関係も高くなる。さらに、重み分布が一致している場合、入力ベクトルの相関関係も一致する。それに対して、重み分布の類似性が低い場合、入力ベクトルの相関関係も低くなる。すなわち、自己組織化マップの重み分布の色（重み）とその領域形状との類似性を視覚的に評価することで正の相関関係を評価できることを示した。また、入力ベクトルの値を正規化し、1から減じた値を用いることで、負の相関関係についても、重み分布を比較することで評価できることを示した。そして、第3章で使用した透明なアクリル樹脂板にショットブラスト加工を施した試験片を用いて、視覚のテクスチャーである曇り度（ヘーズ）、光沢度及び表面色に影響を及ぼす表面性状パラメーターについて自己組織化マップを用いて調べた。その結果、本章で使用した試験片の曇り度（ヘーズ）、光沢度 $G_s(60^\circ)$ 及び明度 L^* に対して主に影響を及ぼしていると考えられる表面性状パラメーターは複数あり、最大高さ S_z 、最大山高さ S_p 、二乗平均平方根勾配 Sdq 及びテクスチャーのアスペクト比 Str であった。さらに、従来の方式、例えば9パラメーターを相互に評価する場合には、36枚の二次元グラフを製作し、比較検討する必要があるのに対して、本章で提案した手法では12枚の重み分布を作成し、それらを視覚的、直感的に比較検討することで、複数の相関関係を評価することが可能であった。すなわち、自己組織化マップによる評価方法は、従来の方式に比べ効率的な評価システムであった。特に、検討対象となるパラメーター数が増えるほど、その有用性が高まることを示した。

第6章では、本論文の各章で得られた結果を総括した。すなわち、これまで述べてきたように各章において、透明なアクリル樹脂板を素材として、視覚のテクスチャーの定量的な評価と自己組織化マップを用いた視覚のテクスチャーの相関関係を簡易に評価するシステムの提案を検討した。本研究で得られた知見は、JIS B 0031:2003 附属書 D に規定された「あいまいさのない表面機能の管理に必要な指示」として重要な知見となるとともに、他社との差別化を図るために高い質感が必要になる一般消費材やその消費財を魅力的に演出するデ

ディスプレイなどを開発する際の設計指針になりうると考えられる。例えば、商品を飾るディスプレイ用ショーケースを考えたとき、ケースを透過する光を如何に制御するかが重要になる。その際、本研究で得た表面粗さと透過率及び曇り度（ヘーズ）との相関関係が役立つと考えられる。また、加工面と未加工面を有効に使うことで、曇り度（ヘーズ）と光沢度の関係を使った付加価値の高いショーケースの開発が可能である。さらに、現在、筆者の属する株式会社アトラスでは、外観仕上げとその評価が重要な課題になっている。特に、透明な樹脂製品は、第1章で述べたように切削加工のみでは透明度が低く曇っているため、サンドペーパーやバフなどによる研磨処理やトップコート塗布などの二次処理を行い、透明度を高めている。二次処理を行う際には、下地となる切削面の表面性状が非常に重要となる。すなわち、切削加工された表面には回転する切削工具の軌跡である刃物跡が残るため、方向性をもった凹凸形状の表面性状となっている。そして、光が透過する際、その表面性状が光の屈折に影響を与えるため、凹凸形状の方向性がスジとして見えてしまう。そこで、透明度をあげる二次処理を行う前に下地処理として凹凸形状の方向性を除去する研磨作業を行っている。この表面性状の方向性はテクスチャーのアスペクト比 Str によって評価することができる。また、本研究の成果から、曇り度（ヘーズ）を制御するには二乗平均平方根勾配 Sdq の把握が必要であることが分かった。今後、これらの知見を活かし、テクスチャーのアスペクト比 Str や二乗平均平方根勾配 Sdq を管理パラメーターとして、下地処理に関する工程改善を行い、生産性向上、収益性向上を図っていきたい。また、製品の質感に大きな影響を与える外観品質を考えると、これまでは十把一絡げに表面粗さを捉えていた。今後、求められる表面の機能とそれに関連する表面性状パラメーターを把握し、適切なパラメーターを用いて外観品質の改善を行っていきたい。

今後、質感の高い製品を開発するためには、視覚のテクスチャーと感覚量、すなわち感性評価との整合性を高める必要がある。しかし、第1章で述べたように感性評価にまで分析対象を広げた場合、パラメーターの次元数及びデータ量が膨大になるとともに、感性評価で使

用する不特定多数の人から得た心理測定データは、複雑かつ多様であり非線形な構造が測定データに存在していると予想される。本研究で検証した自己組織化マップによる相関関係の評価方法は、このような高次元でデータ量が多く、数式では表せない数理モデルにも対応が可能な分析手法である。すなわち、自己組織化マップは、線形、非線形を問わず多次元データを反復学習することにより、教師データを必要とせずにデータのパターン抽出を自動で行う。そして、抽出したパターンの位相を保った状態でデータの傾向性を二次元平面上に写像する。この性質を利用することで、視覚のテクスチャーと感性評価との整合性を効率的に高めることができる。

本研究での検討結果が、人間の感性に訴えかける質感の高い工業製品を開発する際の助となることを期待する。

附録

本論文では、透明なアクリル樹脂板を中心に視覚のテクスチャーの定量的評価とその評価方法について議論してきた。筆者の勤務する会社では、第1章 緒言の Fig1.5 で示したように試作の場面において、金属メッキやアルミニウム合金にカラー陽極酸化処理を施したサンプルを用いて、設計者と技術者の意思伝達を行っている。そこで、本研究を行う中で、金属メッキ等についても検討を行った。その結果を附録として収録する。

まず、附録Aでは、プラスチック製品の外観、耐摩耗性や耐腐食性など表面機能向上のために多用されている金属メッキ処理を行った表面について検討する。プラスチック表面に鏡面加工、ヘアライン加工及びショットブラスト加工を有するABS樹脂に種々の金属メッキ処理を施した試験片を取り上げ、視覚パラメーターによるテクスチャー評価を行う。

工業製品の外観材料には前章まで述べてきた樹脂材料のほかにアルミニウム合金などの金属材料も多用されている。そこで附録Bでは、身の回りにある工業製品の外観材料として使用されている金属材料の中から、アルミニウム合金 A2017、洋白 C7541 及びステンレス鋼 SUS304 を用いて、表面性状パラメーターと光沢度及び表面色との整合性を高めることを検討する。そして、3種類の金属表面の表面性状、表面色及び光沢度について従来の評価方法を拡張した三次元領域における評価指標による特徴付けを行う。

附録Cでは、パラメーター間の相関関係を評価するため、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルの1つである自己組織化マップを用いた評価方法の導入を提案する。最初に、自己組織化マップによるパラメーター間の相関関係について、評価の可能性を示すために、任意の関数を用いて定量的な検証を以下の手順で行う。まず、任意の関数をもとに自己組織化マップの学習を行い、各関数に対応する自己組織化マップの重み分布を作成した。次に、自己組織化マップの重み分布の類似性を定量的に判断するため、重み分布同士の類似性を数値化するとともに、各パラメーターの相関係数との関係について提示する。さらに、

上記で検証した自己組織化マップによる評価方法を用い、材料のテクスチャー評価への適用を提案する。本章では、工業製品の外観材等に多用されているアルミニウム合金を試験片材料として取り上げ、その表面にショットブラスト加工を用いて段階的に異なる表面性状を付与した。そして、上記で検証した自己組織化マップによる相関関係の評価方法を用いて、ショットブラスト加工を施したアルミニウム合金のテクスチャー評価を行い、提案する評価方法の妥当性を検証する。

附録 A 視覚因子による金属メッキ表面のテクスチャー評価¹⁾

A.1 緒言

工業製品に用いられている外観材料の表面にはヘアライン加工やショットブラスト加工等、意匠性や触覚因子を付加する加工方法がある。また、プラスチック表面の場合、耐摩耗性の向上や腐食及び劣化を防止する金属メッキ処理が施されているが、金属メッキ処理した表面のテクスチャー評価に関する報告は見当たらない。本章では、プラスチック表面に鏡面加工、ヘアライン加工及びショットブラスト加工を有する ABS 樹脂に種々の金属メッキ処理を施した試験片を取り上げ、視覚因子によるテクスチャー評価を行う。

A.2 実験方法

A.2.1 試験片の作製

試験片材料は工業製品の外観材等に用いられている ABS 樹脂とした。試験片は射出成形機で成形し、鏡面加工面、ヘアライン加工面及びショットブラスト加工面をそれぞれ施した金型を用いて試験片表面に転写した。その後、金属メッキ処理を施した。金属メッキ処理は、硬度と耐食性に優れる六価クロムメッキと 99%純度の金メッキの 2 種類とした。試験片寸法は 40mm×60mm×3mm とし、最外層メッキの皮膜厚さは約 0.2 μ m とした。六価クロムメッキを施した試験片表面を Fig.A.1(a), (b)及び(c) , 金メッキを施した試験片表面を Fig.A.1 (a), (b)及び(c)に示す。なお、すべての測定は直前に試験片表面に付着した油分や汚れを中性洗剤にて除去し、試験片表面を冷風で乾燥した後に暗室内で行った。

A.2.2 測定方法

A.2.2.1 表面性状の測定

表面性状の測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。測定面積は $1.8 \times 1.8 \text{mm}^2$ 、画素数は 1048×1048 とし、実際に表面性状パラメーターを算出する際に用いた面積は測定面積中央部の $1.0 \times 1.0 \text{mm}^2$ とした。

A.2.2.2 表面色の測定

表面色の測定には、分光測色計 CM-2600d (コニカミノルタホールディングス株式会社製)を用いた。測定光源は標準イルミナント D65 とし、観察視野を 2° とした。測定方式は正反射光を含む SCI 方式とした。SCI 方式は表面状態の影響を受けにくく、物体色を測定することができる。表色系には、定量的な色彩評価ができると共に、工業界において多用されている $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた²⁾。明度(L^*)は色の明暗を表し、 $L^*=100$ で白色、 $L^*=0$ で黒色をそれぞれ示している。色度(a^*)は正の値が大きいほど赤みが強く、負の値が大きいほど緑みが強いことを示す。また、色度(b^*)は正の値が大きいほど黄みが強く、負の値が大きいほど青みが強いことをそれぞれ示す³⁾。

A.2.2.3 正反射率の測定

正反射率の測定には、光沢度計 mirror-TRI-gloss (BYK-Gardner 製)を用いた。測定光源は、補助イルミナント C の分光特性を有する白色光源とし、光源の入射角度は 60° とした。なお、光沢度は屈折率 $n = 1.567$ であるガラス面の反射率を光沢度 100%として相対的に表した値である。従って、基準面の光沢度は入射角に関係なく 100%と定義する⁴⁾。すなわち、基準面であるガラス面よりも光沢がある表面を測定した場合、光沢度の値は 100%以上となる。正反射率は光源入射角を 60° として測定した光沢度 $G_s(60^\circ)$ を 10 で除して算出した。

A.3 実験結果及び考察

A.3.1 試験片表面の拡大図

表面性状測定機で測定した鏡面加工面，ヘアライン加工面及びショットブラスト加工面の鳥瞰図を Fig.A.2(a)~(c)にそれぞれ示す。鏡面加工面は，表面が滑らかであるのに対して，ヘアライン加工面は，筋目状の表面性状となり，ショットブラスト加工面は，投射材によるショットブラスト加工の転写が確認できた。

A.3.2 測定方向が表面色に及ぼす影響

本章で用いた試験片は見る方向によって色が異なる。そこで，測定方向が表面色に及ぼす影響を調べた。測定方向を Fig.A.3 に示す。測定方向と明度 L^* との関係を Fig.A.4(a)，(b)に示す。鏡面加工面及びショットブラスト加工面は測定方向による明度への影響はほとんど見られなかった。それに対して，ヘアライン加工面は，メッキの種類に関わらず，測定方向によって明度が低下した。測定方向と色度 a^* との関係を Fig.A.5(a)，(b)に示す。測定方向による色度 a^* への影響はほとんど見られなかった。測定方向と色度 b^* との関係を Fig.A.6(a)，(b)に示す。六価クロムメッキを施した試験片は測定方向による色度 b^* への影響はほとんど見られなかった。それに対して，金メッキを施したショットブラスト加工面とヘアライン加工面は，測定する方向によって黄色みが増加した。算術平均粗さ Ra と正反射率との関係を Fig.A.7 に示す。算術平均粗さ Ra が小さくなるに従い，正反射率の値は高くなった。さらに算術平均粗さ $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ において正反射率の値は急激に上昇した。これは算術平均粗さが小さくなるに従い，その表面が粗面から鏡面に近づくため，ほぼ全ての入射光が正反射方向に反射するためである⁵⁾。

A.4 結言

本章では射出成形用の金型により鏡面加工面，ヘアライン加工面及びショットブラスト加工面を転写した ABS 樹脂を取り上げ，その表面に金属メッキを施した。そして，視覚因子を用いたテクスチャー評価を行った。その結果，金メッキを施したショットブラスト加工面とヘアライン加工面は，測定する方向によって黄色みが増加することを実験的に示した。さらに，メッキ表面が鏡面に近づくと正反射率は上昇することを実験的に示した。

参考文献

- 1) 吉田瞬，若林祐次，米原牧子，杉林俊雄：自動車内装材とインテリアの快適性向上,技術情報協会,234-242(2019).
- 2) JIS B 0601(2013).
- 3) JIS Z 8729(2004).
- 4) JIS Z 8741(1997).
- 5) 米原牧子：金属表面におけるテクスチャーの定量的評価方法に関する研究,東京工業大学博士論文(2007).

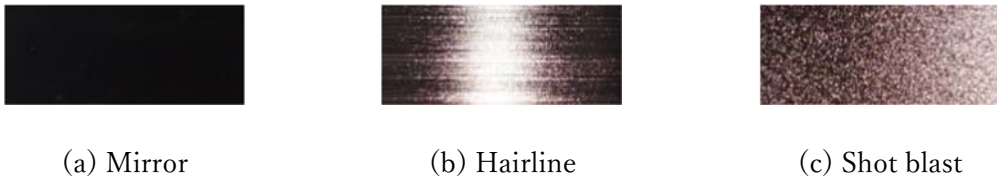


Fig.A.1 Sample surfaces (Hexavalent Chromium).

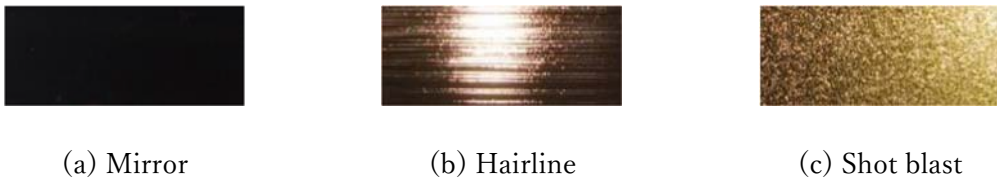
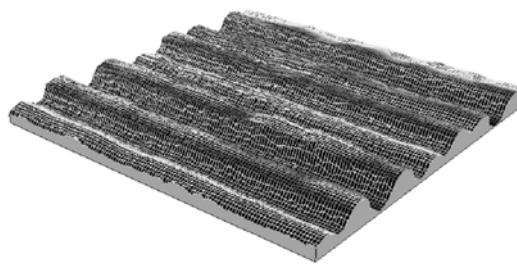


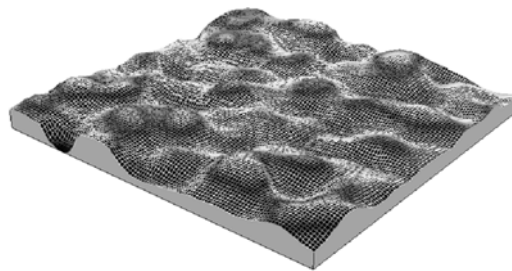
Fig.A.1 Sample surfaces (99 % Gold).



(a) Mirror surface



(b) Hairline surface



(c) Shot blast surface

Fig.A.2 Typical 3D Surfaces of plating.

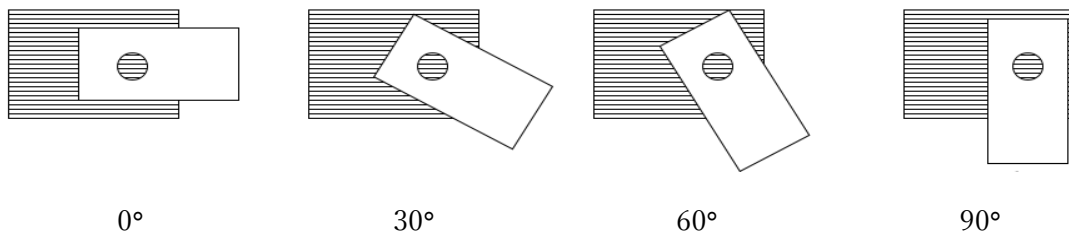
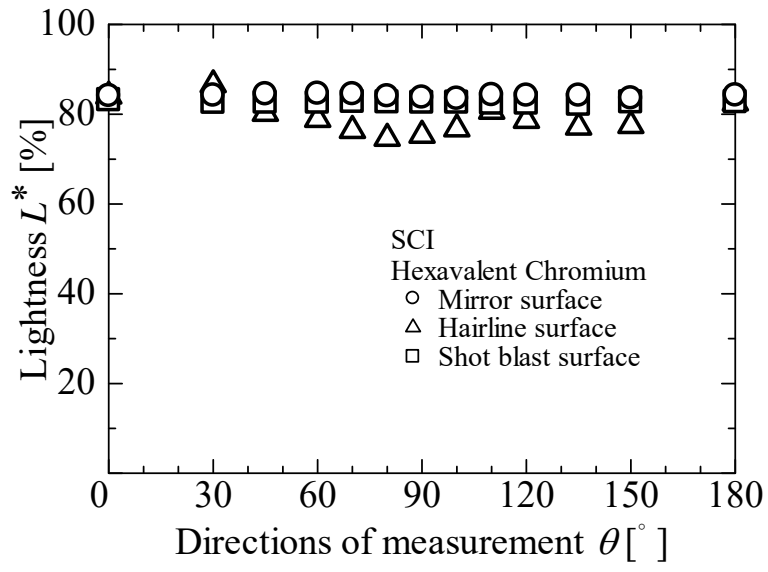
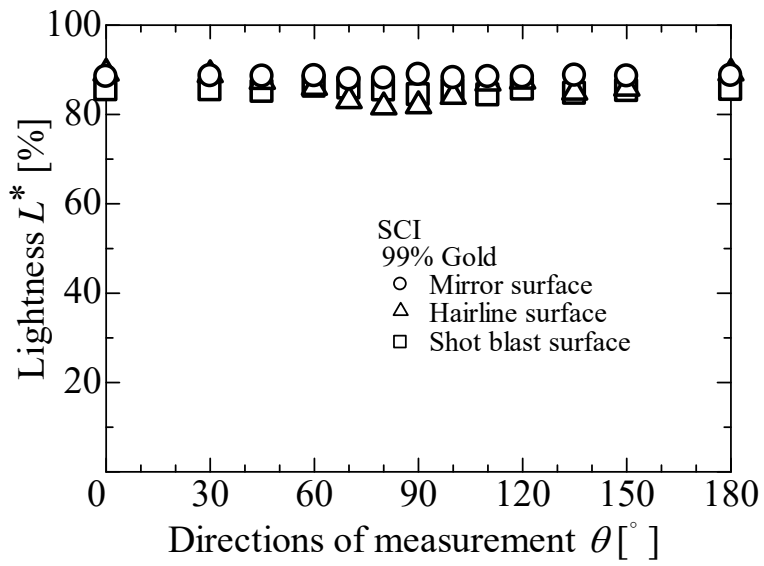


Fig.A.3 Directions of measurement.

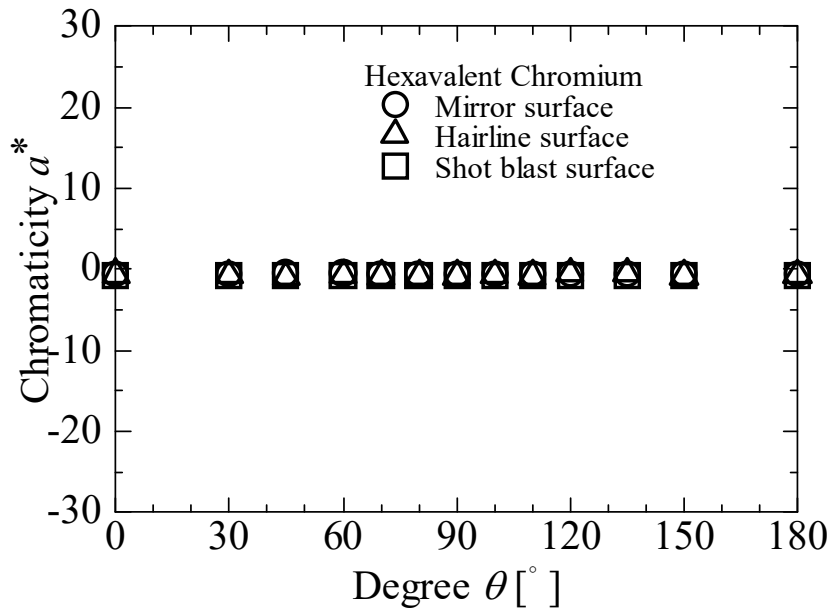


(a) Hexavalent chromium

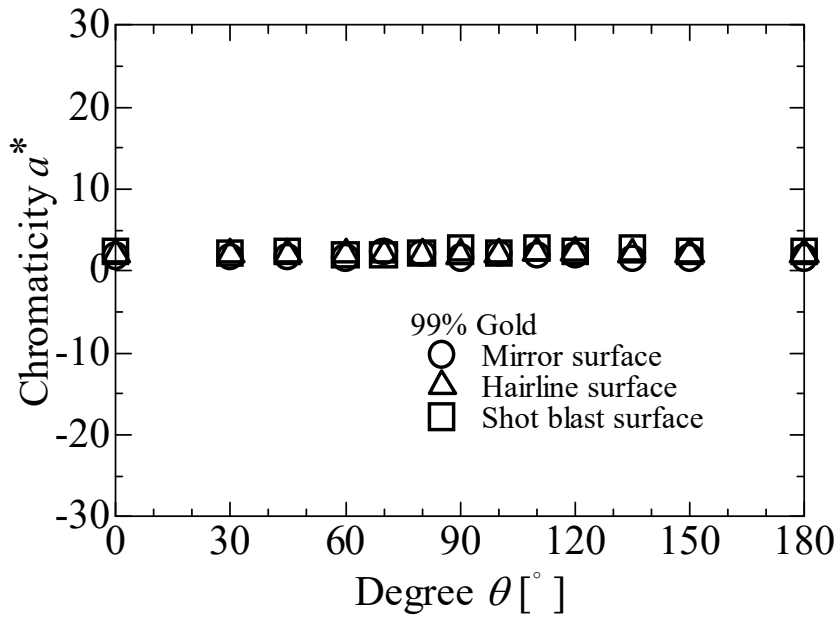


(b) 99% Gold

Fig.A.4 Relation between directions of measurement θ and lightness L^* .

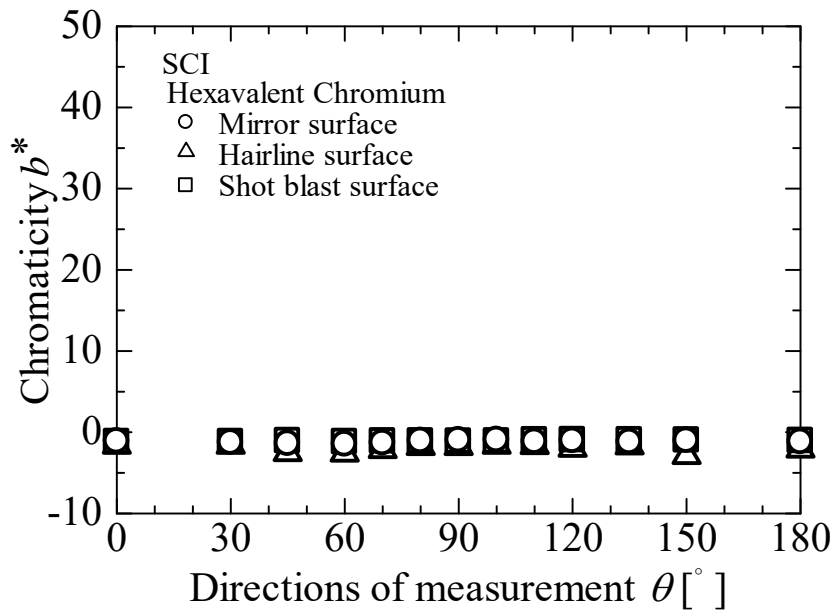


(a) Hexavalent chromium

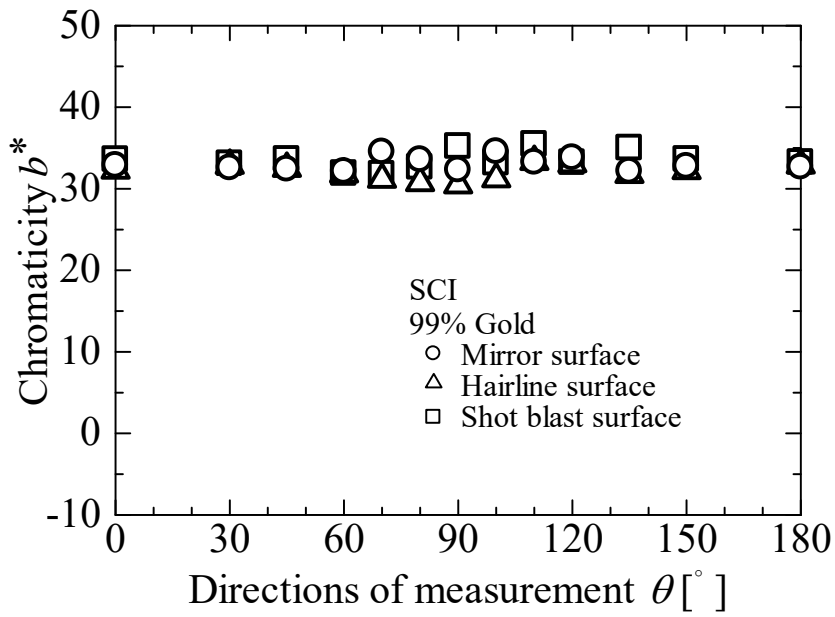


(b) 99% Gold

Fig.A.5 Relation between directions of measurement θ and chromaticity a^* .



(a) Hexavalent chromium



(b) 99% Gold

Fig.A.6 Relation between directions of measurement θ and chromaticity b^* .

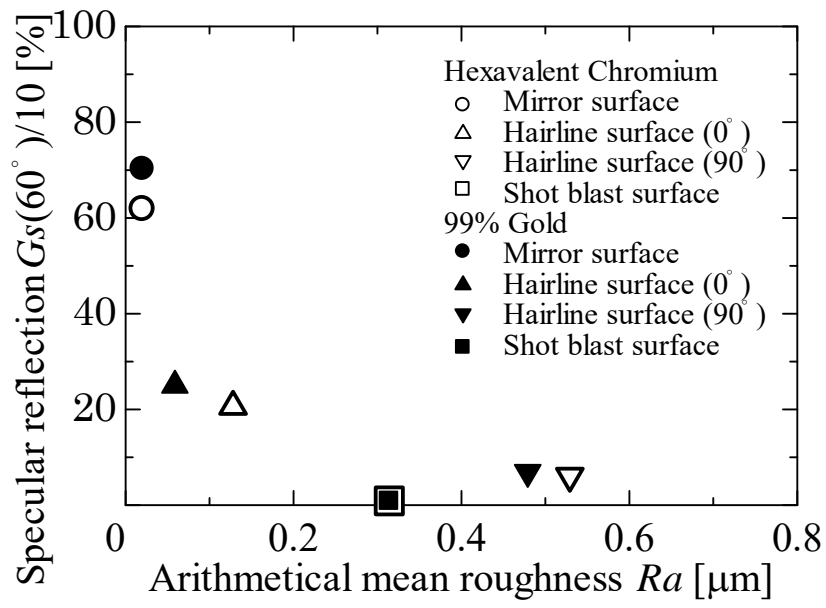


Fig.A.7 Relation between arithmetical mean roughness Ra and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

附録 B 金属表面のテクスチャー評価¹⁾

B.1 緒言

工業製品の外観材料にはこれまで述べてきた樹脂材料のほかにアルミニウム合金などの金属材料も多用されている。そこで本章では、身の回りにある工業製品の外観材料として使用されている金属材料の中から、アルミニウム合金 A2017、洋白 C7541 及びステンレス鋼 SUS304 を用いて、表面性状パラメーターと光沢度及び表面色との整合性を高めることを検討する。そして、3 種類の金属表面の表面性状、表面色及び光沢度について従来の評価方法を拡張した三次元領域における評価指標による特徴付けを行う²⁾。

B.2 実験方法

B.2.1 試験片の作製

試験片は、A2017、C7541 及び SUS304 の板材から切り出した。試験片の寸法は、70×70×3mm とし、表面には工業製品のバリ取りや装飾等で使用されているガラスビーズを投射材としたショットブラスト加工を施した。このとき、ショットブラスト加工時の粒度、投射圧等の加工条件を調整することにより、算術平均粗さ Ra が 0.1~1.0 μm の範囲で段階的に異なる表面にした。なお、各々の測定直前には試験片表面の汚れや油分を除去するため、アセトンで洗浄した。

B.2.2 表面性状の測定方法

表面性状の測定方法は、触針式と光切断方式、光干渉方式等の光学式とに大別される。本章では、従来の評価方法である線評価を拡張した面評価を行うため、光干渉方式の測定機を

用いて測定した。測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アマテック株式会社製)を用いた。測定方式は白色光干渉方式である。0.9×0.9mm を 1024×1024 画素で走査して測定し、解析には Talymap Gold version 4.1.1 を用いた。

B.3 実験結果及び考察

B.3.1 三次元表面性状

ショットブラスト加工を施した A2017, C7541 及び SUS304 の三次元表面性状を Fig.B.1 に示す。全ての試験片において、表面に投射材の形状が転写され、梨地加工が施されていることが確認できる。しかし、A2017 及び C7541 は投射材による加工痕が深いのに対し、SUS304 は加工痕が滑らかである。これは A2017 及び C7541 に対して SUS304 は硬いため、加工痕が深くなりにくいことを示している。

B.3.2 算術平均高さ Sa と表面性状パラメーターとの比較

試験片表面の特徴付けを行うため、ISO25178-2:2012³⁾で定義された算術平均高さ Sa と表面性状パラメーターとを比較した。例として Sa とスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku との関係を図 B.2 に示す。 Ssk は二次元パラメーターである Rsk を三次元に拡張したパラメーターで、平均面を中心とした対称性を示す。また、 Sku は二次元パラメーターである Rku を三次元に拡張したパラメーターで、表面の鋭さを表し、高さ分布を特徴付ける。なお、 Rsk 及び Rku は共に無次元化した値である⁴⁾。従って、三次元に拡張した Ssk 及び Sku も無次元化した値となる。全ての供試材において、 Sa に関らず、 $Ssk \doteq 0$ 、 $Sku \doteq 3$ となった。これらは、凹凸高さ分布が平均面に対して対称、かつ正規分布であることを示している。

B.3.3 算術平均高さ Sa と表面色との関係

表面色の評価には、 $L^*a^*b^*$ 表色系⁵⁾を用いた。算術平均高さ Sa と色度 a^* 及び b^* との関係を Fig.B.3 に示す。色度 b^* は Sa が変化してもほぼ一定値を示すが、供試材毎に大きく異なるため、各金属の特徴付けが可能である。それに対して色度 a^* は Sa 及び金属種の影響を受けずほぼ一定である。すなわち A2017, C7541 及び SUS304 の表面色は色度 a^* による評価は困難である。

B.3.4 算術平均高さ Sa と明度及び正反射率との関係

算術平均高さ Sa と明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ との関係を Fig.B.4 に示す。正反射率の値は入射角 60° のとき⁶⁾の光沢度計における基準面(屈折率 1.567 のガラス面)の正反射率 10%が光沢度 $G_s(60^\circ)=100\%$ となることより、光沢度 $G_s(60^\circ)$ の値を 10 で除して算出した。3種類の金属において Sa の低下に伴い、 L^* も低下する傾向がある。それに対して、 $G_s(60^\circ)/10$ に与える Sa の低下及び金属種の影響は小さい。しかし、 Sa が $0.2\mu\text{m}$ 程度より小さくなると $G_s(60^\circ)/10$ は急激に増加する⁷⁾。

B.3.5 算術平均高さ Sa と負荷曲線パラメーター

負荷曲線パラメーターを用いて表面色及び正反射率の評価を詳細に行う。負荷曲線パラメーターとして、JIS で定義されている二次元パラメーター⁴⁾ではなく ISO 13655-2: 1996 で定義された三次元パラメーター⁷⁾を用いた。負荷曲線は、負荷長さ率を横軸、測定曲線の高さを縦軸とし、振幅分布曲線の横軸を上から累積して表す。本章では、初期摩耗により削られる領域である山部と表面に塗布した液体が溜まる領域である谷部を評価する負荷面積率 $Smr1$ 及び $Smr2$ を用いた。

算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr1$ 及び $Smr2$ との関係を Fig.B.5 に示す。A2017 と

C7541 がそれぞれ正の相関関係を示している。それに対して、SUS304 では Sa が増加しても $Smr1$ 及び $Smr2$ はほぼ一定値となっている。すなわち、SUS304 のショットブラスト加工表面は滑らかな表面を意味し、Fig.B.1 の三次元表面性状と同様の特徴を表している。 b^* と $Smr1$ 及び $Smr2$ との関係を Fig.B.6 に示す。A2017 と C7541 がそれぞれ正の相関関係を示している。それに対して、SUS304 では b^* が増加しても $Smr1$ 及び $Smr2$ はほぼ一定値となっている。 $Gs(60^\circ)/10$ と $Smr1$ 及び $Smr2$ との関係を Fig.B.7 に示す。A2017 と C7541 がそれぞれ正の相関関係を示しているのに対して、SUS304 では負の相関関係となっている。すなわち、 $Smr1$ 及び $Smr2$ を用いることにより、 Sa だけでは評価できなかったショットブラスト加工表面の特徴を詳細に表すことが可能である。

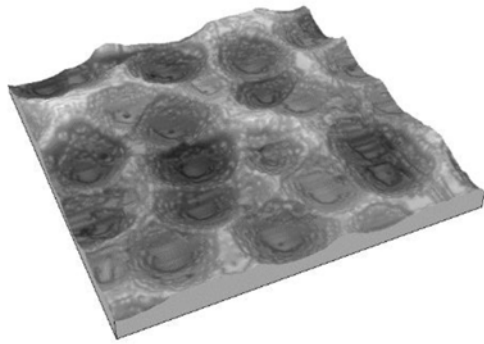
B.4 結言

本章では、アルミニウム合金 A2017、比較材料として洋白 C7541 およびステンレス鋼 SUS304 を取上げた。そして、ショットブラスト加工を施した表面について、表面性状、表面色および光沢度に関する三次元領域に拡張した評価指標による特徴付け、さらに、負荷曲線パラメーターを用いた評価方法の実験的検討を行った。その結果、ショットブラスト加工を施した加工表面における投射材の転写性を評価する指標として、負荷面積率 $Smr1$ 及び $Smr2$ が有効であることを示した。

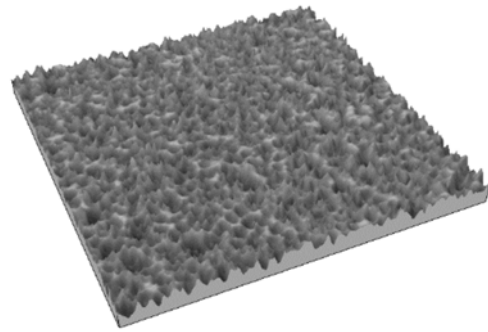
参考文献

- 1) 吉田瞬, 若林祐次, 米原牧子, 杉林俊雄: 自動車内装材とインテリアの快適性向上, 技術情報協会, 234-242(2019).
- 2) 吉田瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 磯野宏秋, 香川美仁, 杉林俊雄: 軽金属, 61(5), 187(2011).
- 3) ISO 25178, Geometric Product Specifications (GPS) - Surface texture: areal (2012).

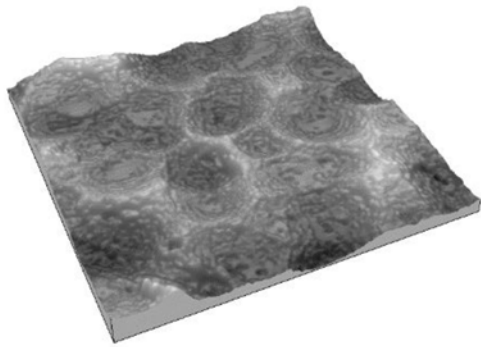
- 4) JIS B 0601(2013).
- 5) JIS Z 8729(2004).
- 6) JIS Z 8741(1997).
- 7) 米原牧子：精密工学会誌,82(11),944-947(2016).
- 8) ISO 13565-2, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture : Profile method ; Surfaces having stratified functional properties Part 2 : Height characterization using the linear material ratio curve (1996).



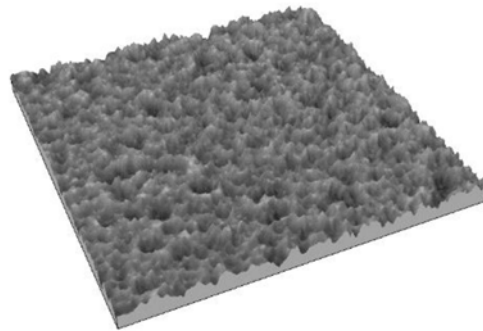
A2017 ($S_a=0.176\mu\text{m}$)



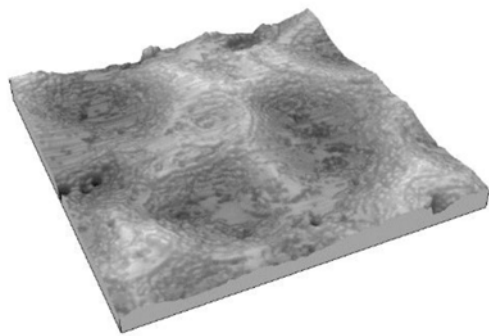
A2017 ($S_a=0.964\mu\text{m}$)



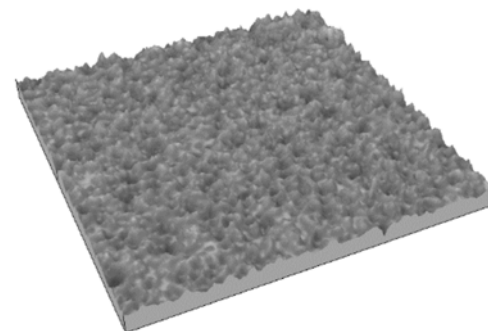
C7541 ($S_a=0.193\mu\text{m}$)



C7541 ($S_a=0.902\mu\text{m}$)



SUS304 ($S_a=0.198\mu\text{m}$)



SUS304 ($S_a=0.965\mu\text{m}$)

Fig.B.1 3D surface texture for the surface of the A2017, C7541 and SUS304 specimens shot blasted.

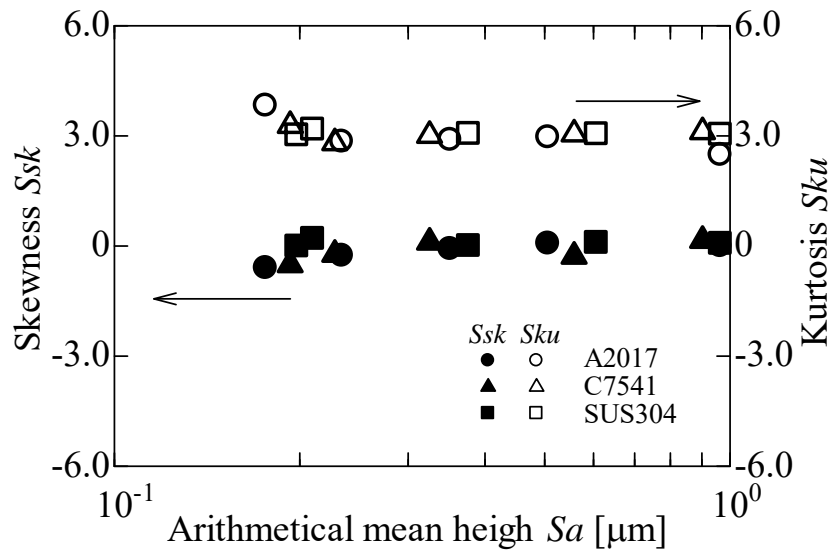


Fig.B.2 Relation among arithmetical mean height Sa , skewness Ssk and kurtosis Sku .

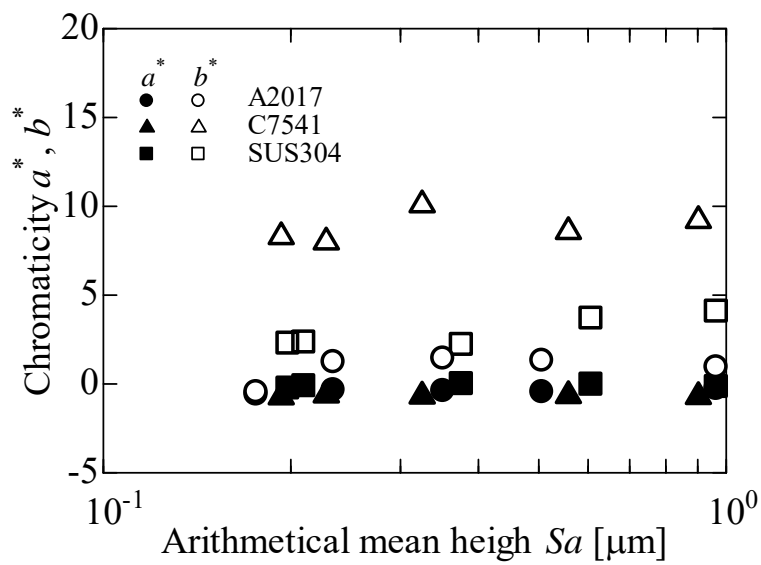


Fig.B.3 Relation among arithmetical mean height Sa , Chromaticity a^* and b^* .

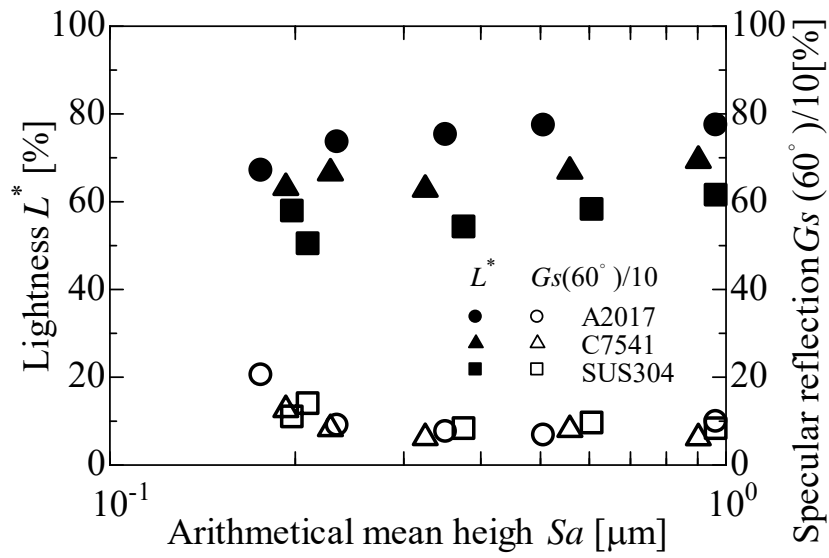


Fig.B.4 Relation among arithmetical mean height Sa , lightness L^* and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

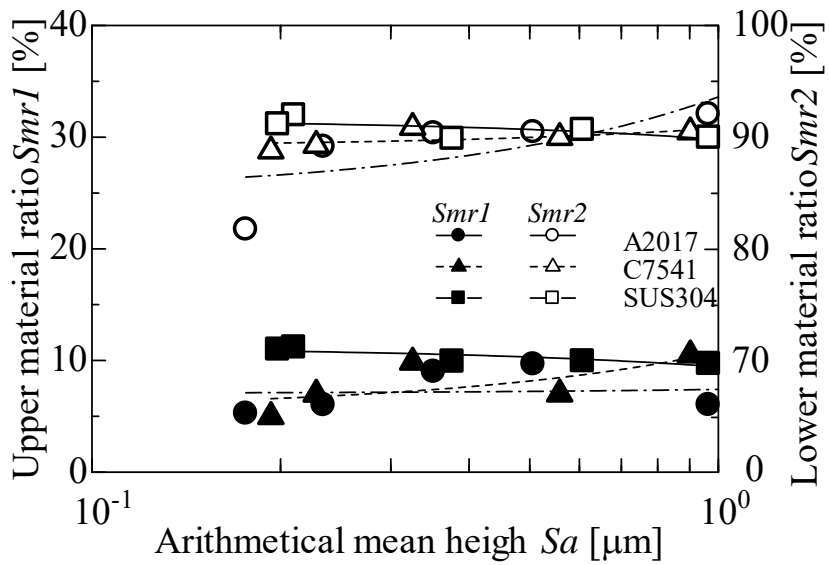


Fig.B.5 Relation among arithmetical mean height Sa , upper material ratio $Smr1$ and lower material ratio $Smr2$.

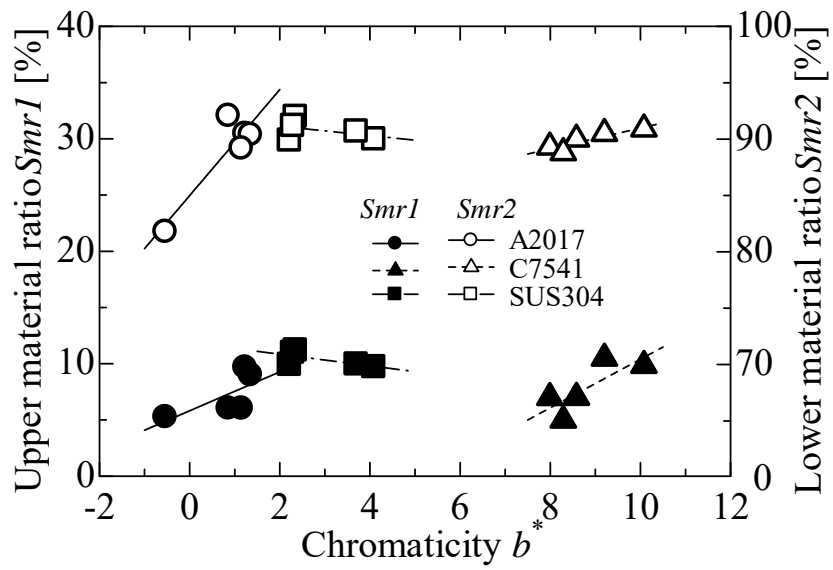


Fig.B.6 Relation among chromaticity b^* , upper material ratio $Smr1$ and lower material ratio $Smr2$.

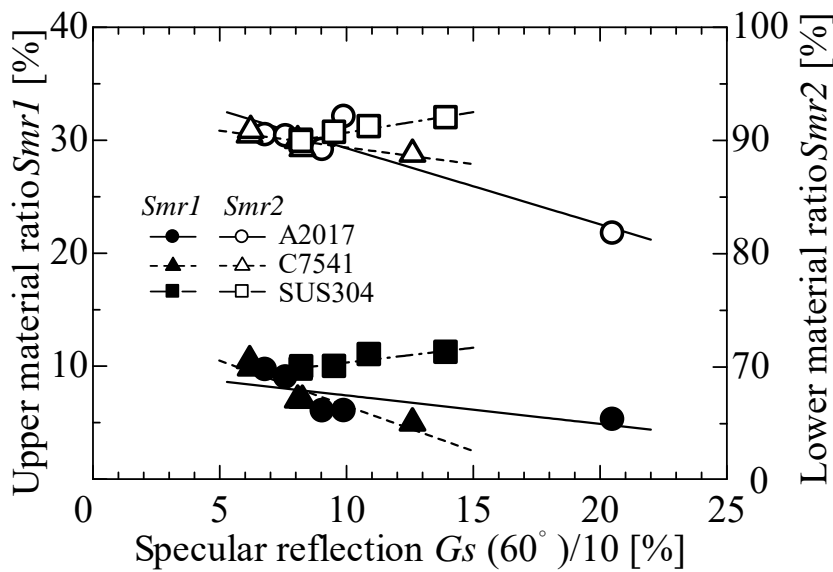


Fig.B.7 Relation among specular reflection $G_s(60^\circ)/10$, upper material ratio $Smr1$ and lower material ratio $Smr2$.

附録 C 自己組織化マップによるアルミニウム合金の テクスチャー評価方法¹⁾

C.1 緒言

外観材の表面を設計する際、他社との差別化を図るため、表面の凹凸形状のみならず、表面色や光沢度等の因子を同時に考慮した高付加価値化が要求されている²⁻⁵⁾。しかし、表面の凹凸形状を変更すると、その表面色や光沢度、曇り度等も変化する。すなわち、外観設計を行うためには、種々の因子の相関関係についても考慮する必要がある。そのため、工業製品の設計・製造における外観材の決定には多くの時間や労力を費やさなくてはならない。外観設計の再現性を高めるためには、構成因子個別の関与、さらには各因子間の相関性を明確にする必要があるが、その因子は多数ある⁶⁻²⁵⁾。

そこで本章では、因子間の相関関係を評価するため、ニューラルネットワークの教師なし学習モデルの1つである自己組織化マップを用いた評価方法の導入を提案する²⁶⁾。最初に、自己組織化マップによる因子間の相関関係について、評価の可能性を示すために、任意の関数を用いて定量的な検証を行う。まず、任意の関数をもとに自己組織化マップの学習を行い、各関数に対応する自己組織化マップの重み分布を作成した。次に、自己組織化マップの重み分布の類似性を定量的に判断するため、重み分布同士の類似性を数値化するとともに、各因子の相関係数との関係について提示する。さらに、上記で検証した自己組織化マップによる評価方法を用い、材料のテクスチャー評価への適用を提案する。本章では、工業製品の外観材等に多用されているアルミニウム合金を試験片材料として取り上げ、その表面にショットブラスト加工を用いて段階的に異なる表面性状を付与した。そして、上記で検証した自己組織化マップによる相関関係の評価方法を用いて、ショットブラスト加工を施したアルミニウム合金のテクスチャー評価²²⁾を行い、提案する評価方法の妥当性を検証する。

C.2 自己組織化マップ

自己組織化マップは、Kohonen²⁷⁾によって開発された教師なし学習を行うニューラルネットワークモデルである。自己組織化マップは、多次元の観測データ(入力ベクトル)を反復学習することにより教師なしでパターン抽出を行い、二次元平面上の出力ニューロン群に写像する。すなわち、多次元データをデータ間の位相を保ったまま二次元平面に写像できるため、教師なしデータのクラスタリングやパラメーターの評価が可能となる。

C.2.1 アルゴリズム

本章で用いる自己組織化マップの概略図を Fig.C.1 に示す。入力層に入る k 回目の入力ベクトルを $\mathbf{x}_k=(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn} : k=1, 2, \dots, K)$ とする。 n は入力ニューロン数、 K は入力データ組数である。また、出力層の出力ニューロン $y_{ij}(i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J)$ は、入力層すべてのニューロンと重み $\mathbf{m}_{ij}=(m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijn})$ を介して接続されている。 i, j は二次元に配置した出力ニューロンの位置であり、 I, J はそれぞれ行と列の最大値である。そして、この自己組織化マップは以下の①~⑤の手順で学習する。

- ① 重み \mathbf{m}_{ij} の初期値を乱数で与える。
- ② 式(1)を用いて、入力ベクトル \mathbf{x}_k と重み \mathbf{m}_{ij} との距離 L を計算し、両者が最も類似している、すなわち距離 L が最小となる出力ニューロン y_{ij} を探す。このニューロンを勝者ニューロン $m_c(t)$ とする。ここで $t(t=1, 2, \dots, T : T$ は予め設定した回数)は学習回数である。

$$L = \min_{i,j} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_{ij}\| \quad \dots \quad (1)$$

- ③ 勝者ニューロン及びその近傍にあるニューロンの重み \mathbf{m}_{ij} を式(2)によって、入力ベクトル \mathbf{x}_k との差が小さくなるように更新する。ここで、 $hc_{ij}(t)$ は近傍関数であり、勝者ニューロン $m_c(t)$ を中心とするガウス関数で与える。

$$\mathbf{m}_{ij}(t+1) = \mathbf{m}_{ij}(t) + hc_{ij}(t)\{\mathbf{x}_k(t) - \mathbf{m}_{ij}(t)\} \quad \dots \quad (2)$$

④ 全ての入力 \mathbf{x}_k に対して、②、③を繰り返す。以上が1回目の学習である。

⑤ ②~④を設定した学習回数 T 回繰り返す。

結果として、出力ベクトル \mathbf{y}_{ij} と各入力ニューロンに対する重み \mathbf{m}_{ij} が得られ、重みや出力ベクトルは視覚化のため色付けして出力ニューロンに図示される。

C.2.2 自己組織化マップの重みの分布

例として、 5×5 の25ニューロンに任意の値10個を入力して得た自己組織化マップの重み分布を Fig.C.2(a)~(d)にそれぞれ示す。自己組織化マップの重み分布は色が濃いほど、重みの値が大きいことを表している。なお、入力値が全て同じ値である Fig.C.2(b)及び(c)では重み分布が一色となる。また、Fig.C.2(d)の入力値は Fig.C.2(a)で用いた入力値と逆相関の関係にあるため、Fig.C.2(d)の自己組織化マップの重み分布は Fig.C.2(a)の自己組織化マップの重み分布を回転した場合の配色と類似している。

C.3 自己組織化マップを用いた因子の評価方法

本章では、自己組織化マップの特徴である出力ニューロンの色(重み)と領域形状の類似性に着目し、因子間の相関係数との関係について評価する。自己組織化マップの学習および重み分布の作製には MatlabR2016b を用いた。入力データは Table C.1 に示す任意の関数とし、入力数は100とした。そして、出力層25ニューロン、学習回数200回の自己組織化マップをそれぞれ作成した。学習を行って作成した自己組織化マップの重み分布を Fig.C.3 に示す。入力した値によって重み分布の領域形状の類似性が直観的に確認できる。

自己組織化マップでは、入力パターン間の距離を保存した写像が行われる²⁷⁾。そこで自己組織化マップによる写像結果を表す重み分布の類似性を定量的に評価し、各入力データとの相関関係について調べた。ここで、重み分布の類似性を与える指標として、得られた重

み分布をそれぞれ画像として捉え、他の画像と対応するピクセル毎の色の違いを数値化した値(以下、Image difference とする。)を用いることとする。Image difference が小さい時(最小値は1)、2つの画像の類似性が高い、すなわち出力ニューロンの色(重み)と領域形状の類似性が高いことを意味する。そこで Fig.C.3 から2組を選んで比較した結果を Fig.C.4 に示す。Fig.C.4(a)は、Fig.C.3(a)と(c)の比較である。図の上部が自己組織化マップの重み分布、下部が2組の入力データの関係を示している。この図では、入力した値が等しいため、入力データ間の相関係数 $r=1.00$ である。また、自己組織化マップの色(重み)と領域形状も一致しているように見える。このとき Image difference =1 であることから、両分布は完全に一致していると言える。次に、Fig.C.3(a)と(d) (x と $y=x^2$ で得られる値を入力データとした結果)の比較を Fig.C.4(b)に示す。入力データ間の相関係数($r=0.97$)は前述に示した Fig.C.4(a)の相関係数($r=1.00$)に比べてやや小さいだけであるが、Image difference=35 と明らかに大きくなっており、この値の違いが入力データ間の相関係数のわずかな違いを明確に表現していることが分かる。一方、入力データ間の相関係数が小さい場合として、Fig.C.4(c)及び Fig.C.4(d)に、 x と $y=\sin(x)$ 、 x と $y=1/x$ で得られる値を入力データとした結果を示す。それぞれ、相関係数 $r=-0.05$ に対して Image difference=448、 $r=-0.48$ に対して Image difference=536 である。これらの結果より、入力データ間の相関係数が小さい場合、Image difference は非常に大きくなることが分かる。Fig.C.5 に Fig.C.3 で示した重み分布の全ての2組について、入力データ間の相関係数と重み分布の Image difference との関係を示す。全ての組において、入力データの相関係数 r が1に近くなるとともに Image difference は1に近づく。逆に、相関係数 r が小さくなると Image difference は非常に大きな値を取ることが分かる。このことから、自己組織化マップの重み分布の Image difference を用いることにより、入力データ間の相関を明確に判断できると言える。しかし、逆相関の場合($r<0$)も Image difference は非常に大きくなるため、自己組織化マップの重み分布を回転して比較する必要がある。

Image difference による入力データ間の相関の判断例を、Fig.C.3 に示した入力データを用いて示す。Fig.C.6(a)及び Fig.C.6(b)に、 $y=x^2$ と $y=\log(x)$ 、 $y=x^{0.5}$ と $y=\log(x)$ で得られる値を入力した結果を示す。自己組織化マップの重み分布の Image difference はそれぞれ 161, 86 とどちらもその値は小さいことから、それぞれの入力データ間に相関関係があると言える。さらに、Fig.C.6(b)の関係は Fig.C.6(a)と比較して、Image difference が小さいため、より強い相関を示していることが分かる。このことは、各図に示した入力データ間の相関係数 r と同じ結果である。

本章では、自己組織化マップの重み分布の類似性を Image difference という 1 つの値にして入力データ間の相関を調べている。したがって、Image difference を使うことの優位性は高くないが、この値に加え、重み分布の様子、すなわち回転すると一致する重み分布や重み分布の偏りなどを考慮することによって、入力データ間における負の相関や特異な類似性について調べる有効な指標になると考えられるため、Image difference の大きさと相関度に関する検討に合わせて進めていく。

以上の結果より、ニューラルネットワークの教師なし学習である自己組織化マップによる因子の相関関係について評価可能であることを示した。

C.4 自己組織化マップを用いたアルミニウム合金のテクスチャー評価²²⁾

外観設計の再現性を高めるためには、構成因子個別の関与、さらには各因子間の相関性を明確にする必要がある。例えば、表面の凹凸形状を評価する表面性状パラメーター^{31,32)}は約 40 種類あるため、相関関係を全て把握することは困難である。そこで自己組織化マップを用い、各表面性状パラメーターの相関関係及び表面色、光沢度との関係について調べた。

C.4.1 試験片及び測定方法

試験片にはアルミニウム合金 A2017 を用いた。試験片の寸法は $70 \times 70 \times 5 \text{mm}^3$ とし、表面には工業製品のバリ取りや装飾等で使用されているガラスビーズを投射材としたショットブラスト加工を施した。このとき、投射材の粒度を #80, #150, #300, #600 及び #800 と変え、さらにショットブラスト加工時の加工圧及び投射距離を調整することにより、算術平均粗さ Ra が $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で段階的に異なる表面にした。なお、各々の測定直前には試料表面の汚れや油分を除去するため、アセトンで洗浄した。表面性状パラメーターの測定には、超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI-MP(アメテック株式会社製)を用いた。測定面積は $0.865 \times 0.865 \text{mm}^2$ とした。表面色の測定には、分光測色計 CM-2600(コニカミノルタホールディングス株式会社製)を用いた。測定径は 3mm とし、光源入射角を 8° 、光源は白色光常用光源 D65 とした。測定方式は、正反射光を除去し、表面状態の影響を受けやすく、目視に近い測定結果を得ることが可能である SCE 方式とした。表面色の評価には、 $L^*a^*b^*$ 表色系³³⁾を用いた。正反射率の測定には、光沢度計 mirror-TRI-gloss(BYK-Gardner 社製)を用いた。光源の入射角度は 60° とした。なお、正反射率の値は入射角 60° のとき³⁴⁾の光沢度計における基準面(屈折率 1.567 のガラス面)の正反射率 10% が光沢度 $G_s(60^\circ) = 100\%$ となることより、光沢度 $G_s(60^\circ)$ の値を 10 で除して算出した²¹⁾。

C.4.2 算術平均高さ Sa と表面性状パラメーターとの比較

表面の凹凸形状の特徴付けを行うため、一般的に使用される算術平均粗さ Ra を三次元に拡張したパラメーターである算術平均高さ Sa と表面性状パラメーターとを比較した。まず、算術平均高さ Sa とスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku との関係を Fig.C.7 に示す。 Ssk は平均面を中心とした対称性を示す。また、 Sku は表面の鋭さを表しており、高さ分布を特徴付ける。 Sa の値が増加するとともに Ssk は僅かに増加し、 $Ssk \approx 0$ となった。それに対し

て、 Sk_u は Sa の値が増加するとともに僅かに減少し、 $Sk_u \approx 3$ となった。すなわち、表面の凹凸形状の高さ分布が平均面に対して対称、かつ正規分布であることを示している。

次に、負荷曲線パラメーター³²⁾を用いて凹凸形状の特徴付けを行った。負荷曲線パラメーターを用いることで、初期摩耗により削られる領域と表面に塗布した液体が溜まる領域について評価可能である。本章では、負荷面積率 $Smr1$, $Smr2$ を用いた。 Sa と $Smr1$ 及び $Smr2$ との関係を Fig.C.8 に示す。 $Smr1$ は Sa と共に増加し、 $Sa=0.4\mu\text{m}$ 以降はほぼ値が収束した。それに対して、 $Smr2$ は Sa と共に増加し、 $Sa=0.5\mu\text{m}$ 以降は低下する傾向が見られた。

C.4.3 算術平均高さ Sa と明度及び正反射率との関係

算術平均高さ Sa と明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ との関係を Fig.C.9 に示す。 Sa の低下に伴い、 L^* も低下する傾向がある。すなわち、表面の粗さが小さくなるとともに暗くなることを示唆している。それに対して、 $G_s(60^\circ)/10$ に与える Sa の低下による影響は小さいが、 $Sa=0.2\mu\text{m}$ 程度より小さくなると $G_s(60^\circ)/10$ は増加する傾向が見られた²⁵⁾。

C.4.4 自己組織化マップによるテクスチャー評価

自己組織化マップの特徴である出力ニューロンの色(重み分布)と領域形状の類似性に着目し、実験により得られた各パラメーターの相関関係について調べた。自己組織化マップは出力層 25 ニューロン、学習回数 200 回とした。学習を行って作成した自己組織化マップの重み分布を Fig.C.10 に示す。

まず、Fig.C.7 に示した算術平均高さ Sa 、スキューネス Ssk 及びクルトシス Sk_u との関係について、Fig.C.10(a),(b)及び(c)に示す自己組織化マップの重み分布を比較した。 Sa と Ssk では Image difference=294、算術平均高さ Sa とクルトシス Sk_u では Image difference=538 となり、自己組織化マップによる重み分布の類似性は低いため、因子間の相関は低い。この

とき、算術平均高さ Sa とスキューネス Ssk との相関係数は $r = -0.71$ 、 Sa とクルトシス Sku との相関係数は $r = 0.67$ であり、両者とも相関係数が低い。

次に、Fig.C.8 に示した算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr1$ 及び $Smr2$ との関係について、Fig.C.10(a),(d)及び(e)に示す自己組織化マップの重み分布を比較した。算術平均高さ Sa と $Smr1$ は Image difference=498 となり、自己組織化マップによる重み分布の類似性は低いため、因子間の相関は低い。このとき算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr1$ との相関係数は $r = 0.06$ と極めて低い。それに対して、算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr2$ は Image difference=307 となり、自己組織化マップによる重み分布の類似性は高く、因子間の相関も高い。このとき算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr2$ との相関係数は $r = 0.87$ と高い。

さらに、Fig.C.9 に示した算術平均高さ Sa と明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ との関係について、Fig.C.10(a),(f)及び(g)に示す自己組織化マップの重み分布を比較した。算術平均高さ Sa と明度 L^* では Image difference=319 となり、自己組織化マップによる重み分布の類似性は高いため、因子間の相関は高い。このとき算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Smr2$ との相関係数は $r = 0.97$ と極めて高い。それに対して、算術平均高さ Sa と正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ は Image difference=495 であるため、自己組織化マップによる重み分布の類似性は低く、因子間の相関は低い。しかし、算術平均高さ Sa と正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ との相関係数は $r = -0.92$ と極めて高い負の相関関係である。そこで、自己組織化マップによる重み分布を回転させて類似性を調べると、Image difference=240 となり、自己組織化マップによる重み分布の類似性は高くなる。すなわち、逆相関の関係の場合、自己組織化マップによる重み分布を回転させることで重み分布の類似性は高くなる。

最後に、明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ と相関の高い因子を自己組織化マップによる重み分布の類似性を用いて調べた。まず、明度 L^* の自己組織化マップによる重み分布と類似性の高い因子はスキューネス Ssk (Image difference=93) 及び負荷面積率 $Smr2$ (Image difference=54) であった。すなわち、自己組織化マップによる重み分布の類似性が極めて高

く、因子間の相関が高いことを示している。このとき、相関係数 r はそれぞれ 0.98 及び 0.97 と極めて高い正の相関関係が見られた。また、正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ とスキューネス S_{sk} は Image difference=564, 正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ と負荷面積率 S_{mr2} は Image difference=609 であった。これらは自己組織化マップによる重み分布を回転させることによりそれぞれ Image difference=398, 429 となる。このとき、相関係数 r はそれぞれ -0.90 及び -0.92 と極めて高い負の相関関係が見られた。

スキューネス S_{sk} 及び負荷面積率 S_{mr2} と明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ の関係を Fig.C.11 及び 12 にそれぞれ示す。スキューネス S_{sk} が負の値から 0 に近くなる、すなわち細かい谷が多い表面から高さ分布が上下に対称な表面になるとともに、その表面色は明るくなるが、正反射率は低下する。また、負荷面積率 S_{mr2} が高くなる、すなわち、谷部の面積が増加するとともに、その表面色は明るくなるが、正反射率は低下する。このように、種々の表面性状パラメーターを用いることによって、ショットブラスト加工表面の特徴を詳細に表すことが可能である。

以上の結果より、自己組織化マップの重みの分布の類似性を評価することで、各因子の相関関係が評価可能であることを示した。

C.5 結言

本章では、ニューラルネットワークの教師なし学習である自己組織化マップによる因子間の相関関係の評価方法を提案した。まず、既知の関数で得られる数値を入力データとした自己組織化マップの重み分布を複数の関数について作成した。次に、得られた重み分布について、2 組ずつ分布間の類似性を示す数値(Image difference)を算出し、この数値とそれぞれの入力データ間の相関係数を比較した。その結果、Image difference によって入力データ間の相関が明確に評価できることを明らかにした。さらに、本手法がショットブラスト加工を施したアルミニウム合金のテクスチャー評価因子の相関にも適用できることを例証した。

参考文献

- 1) 吉田瞬, 若林祐次, 小川毅彦, 杉林俊雄: 拓殖大学理工学研究報告,16(1),3-10(2019).
- 2) 小坂田宏造: 日本塑性加工学会,第8回材料加工戦略会議「海外技術戦略」,1-16(2010).
- 3) 伊東誼: 日本塑性加工学会,第8回材料加工戦略会議「海外技術戦略」,31-54(2010).
- 4) 日経BP社: 日経デザイン,5,66-71(2003).
- 5) 伊東誼: 生産文化論,日科技連,1-19(1997).
- 6) 相沢正, 渡辺哲夫, 西条博之, 川上元郎: 製品科学研究所報告,63,23-32(1970).
- 7) 金正周, 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ: デザイン学研究,46(3),1-8(1999).
- 8) 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ: デザイン学研究,47(1), 25-34(2000).
- 9) 宮川松男, 小豆島明, 山中薫: 伸銅技術研究会誌,19,155-164(1980).
- 10) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸: 精密工学会誌,65(3),418-422(1999).
- 11) 西川尚之, 高安拓郎, 岩田耕一: 精密工学会誌,57(9),1633-1638(1991).
- 12) 小豆島明, 岸輝男, 宮川松男: 塑性と加工,284,765-771(1984).
- 13) 川邊和宏, 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄: 銅と銅合金,46(1),248-252(2007).
- 14) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 吉森茂, 杉林俊雄: 銅と銅合金,42(1),340-344(2003).
- 15) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋彰, 杉林俊雄: 軽金属,54(2),45-50(2004).
- 16) M. Yonehara, T. Matsui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi : Mater.Trans.JIM,45(4),1019-1026(2004).
- 17) M. Yonehara, T. Matsui, K. Kihara, H. Isono, A. Kijima and T. Sugibayashi : Mater.Trans.JIM,45(4),1027-1032(2004).
- 18) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄: 軽金属,55(1),15-19(2005).
- 19) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘: 軽金属,55(12), 668-672(2005).

- 20) M. Yonehara, K. Kihara, Y. Kagawa, H. Isono, and T. Sugibayashi : Mater.Trans.JIM, 46(10),2197-2203(2005).
- 21) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘 : 軽金属,56(8),429-434(2006).
- 22) 吉田瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 磯野宏秋, 香川美仁, 杉林俊雄 : 軽金属,61(5),187-191(2011).
- 23) 米原牧子, 吉田瞬, 磯野宏秋, 杉林俊雄 : 人間工学特別号,51,264-265(2015).
- 24) 米原牧子, 熊井真次, 磯野宏秋, 木原幸一郎, 杉林俊雄 : 銅と銅合金,55(1),1-5(2016).
- 25) 米原牧子 : 精密工学会誌,82(11),944-947(2016).
- 26) Y.Wakabayashi, K.Chanthesen, S.Yoshida,Y.Kawabata, T.Ogawa and T.Sugibayashi : The 20th International Conference on Artificial Intelligence ICAI'18,289-292(2018).
- 27) T.kohonen : Self-Organizing Maps,Springer Verlag(1995).
- 28) T.コホネン : 自己組織化マップ改訂版,丸善出版,114-117(2012).
- 29) 大北正昭, 徳高平蔵, 藤村喜久郎, 権田英功 : シュプリンガー ジャパン,1-5(2008).
- 30) 亀岡瑤, 宗像昌平, 八木圭太, 山本義郎 : 計算機統計学,29(2),181-188(2016).
- 31) ISO 25178, Geometric Product Specifications (GPS) - Surface texture: areal(2012).
- 32) ISO 13565-2, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture : Profile method ; Surfaces having stratified functional properties Part 2 : Height characterization using the linear material ratio curve (1996).
- 33) JIS Z 8741(1997).
- 34) JIS B 0671-2(2001).

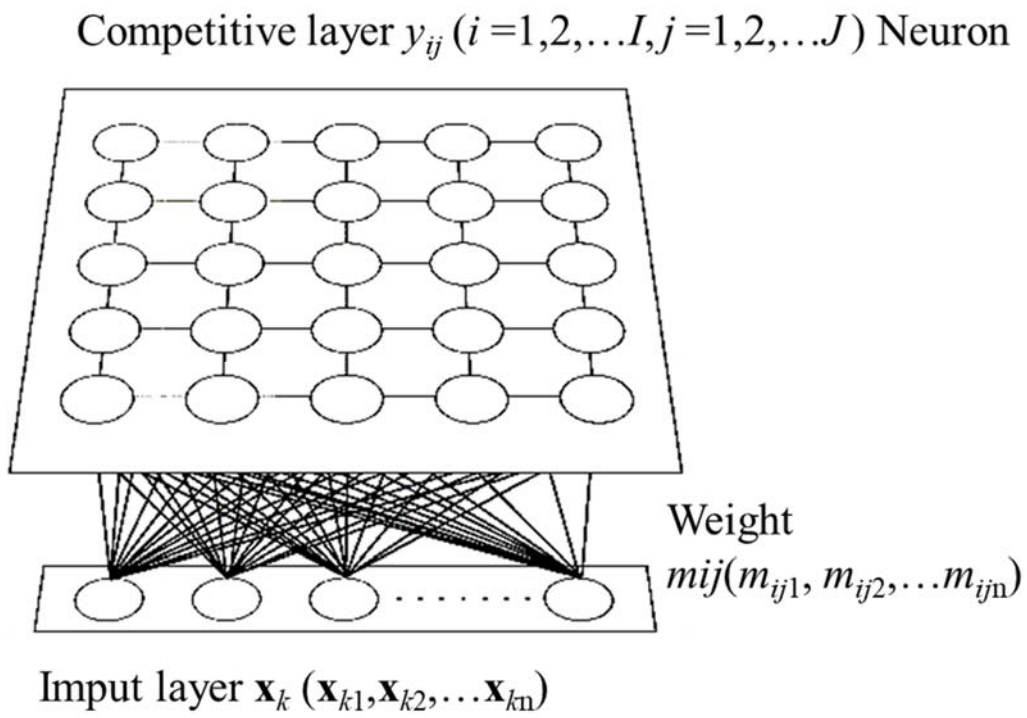
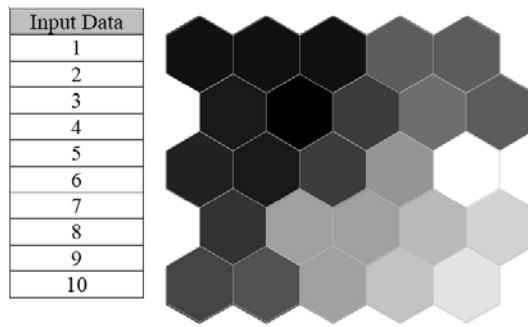
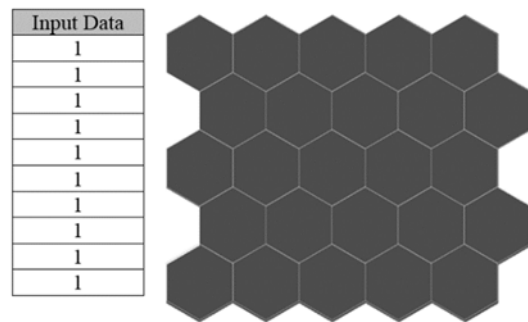


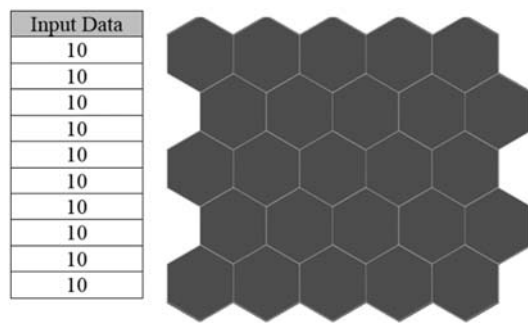
Fig.C.1 Structure of Self-organizing maps.



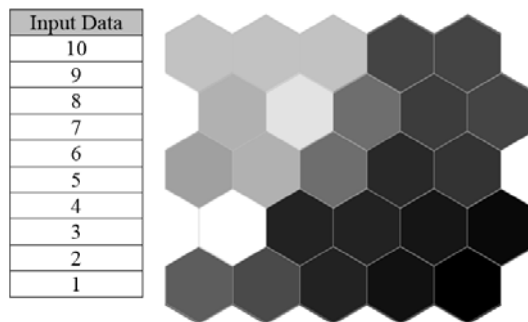
(a) Sample 1



(b) Sample 2



(c) Sample 3



(d) Sample 4

Fig.C.2 Self-Organizing maps.

Table C.1 Input Data.

Input 1	x	1	2	...	100
Input 2	$y = 1$	1	1	...	1
Input 3	$y = x$	1	2	...	100
Input 4	$y = x^2$	1	4	...	10000
Input 5	$y = x^{0.5}$	1	1.41	...	10
Input 6	$y = \sin(x)$	0.84	0.91	...	-0.51
Input 7	$y = \cos(x)$	0.54	-0.41	...	0.86
Input 8	$y = \tan(x)$	1.56	-2.19	...	-0.59
Input 9	$y = \log(x)$	0	0.30		2
Input 10	$y = 1/x$	1	0.5	...	0.01
Input 11	$y = e^x$	2.71	7.39	...	2.69E+43
Input 12	$y = 100$	100	100	...	100

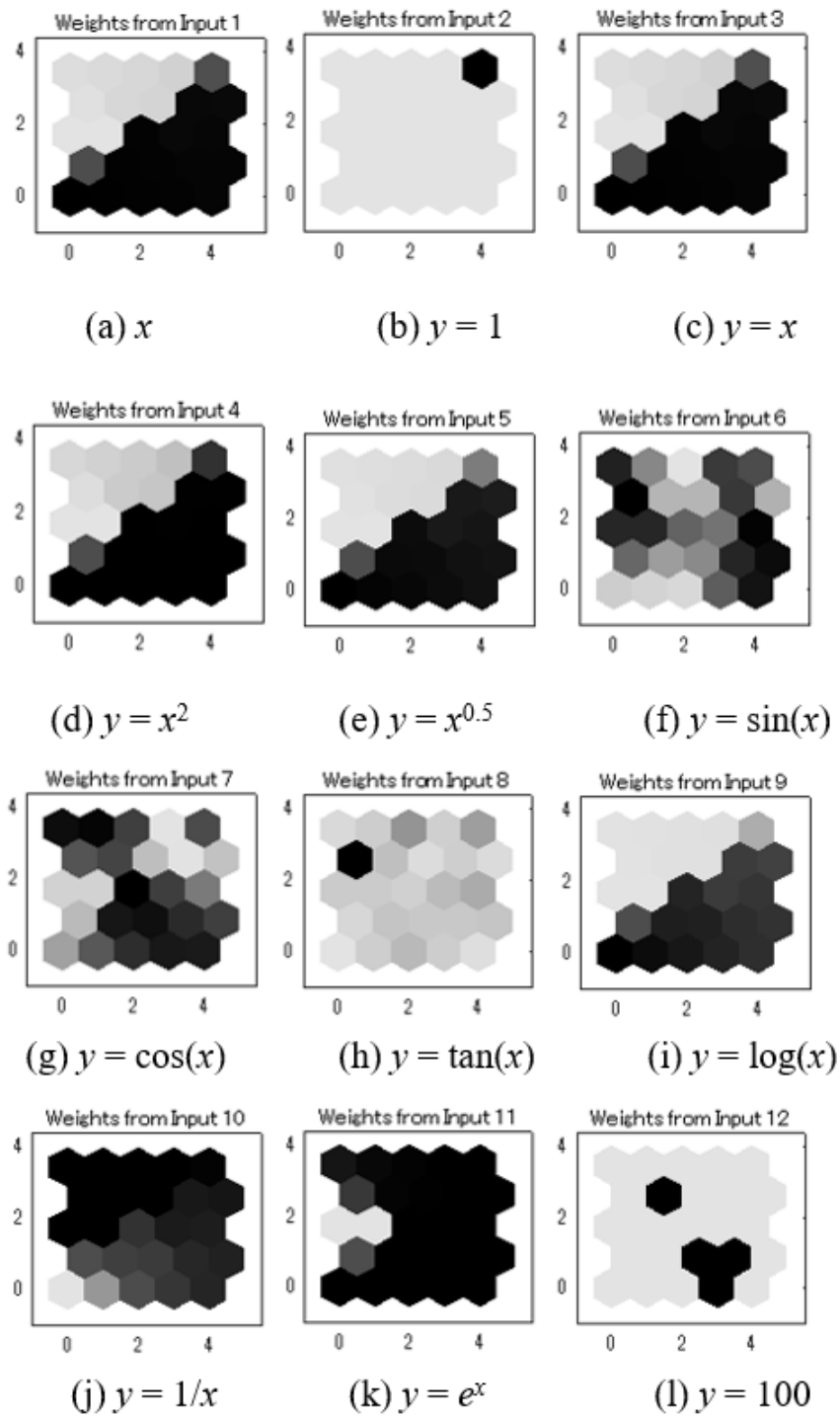


Fig.C.3 Self-Organizing maps for Input Data.

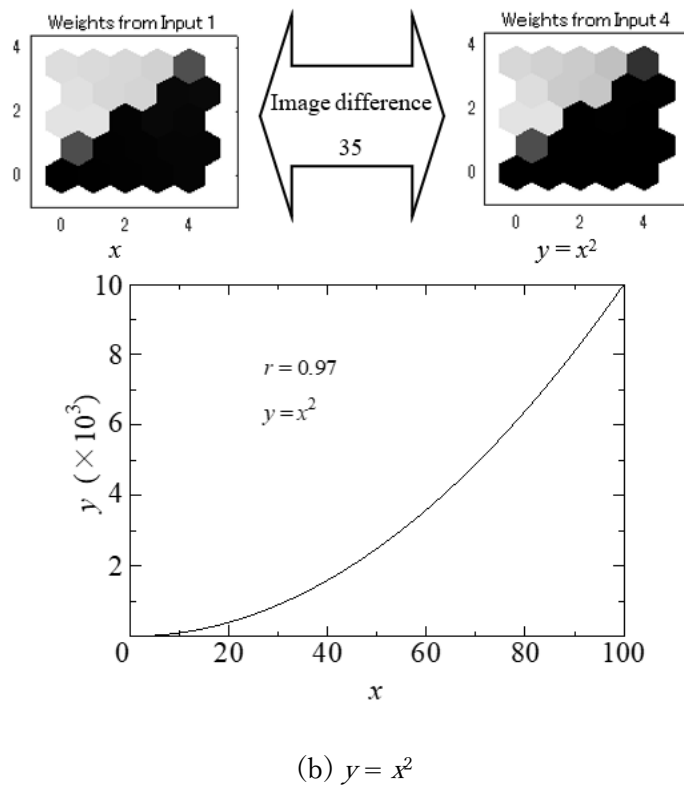
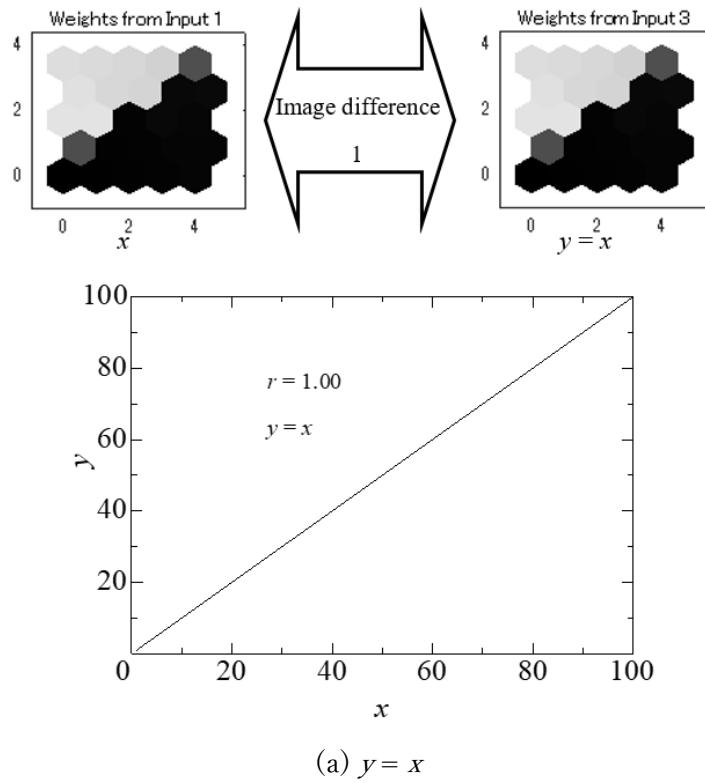
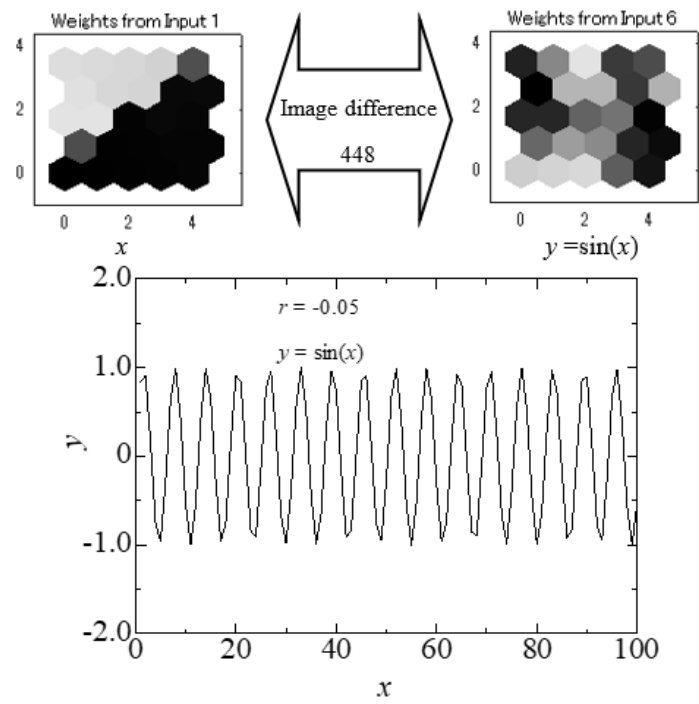
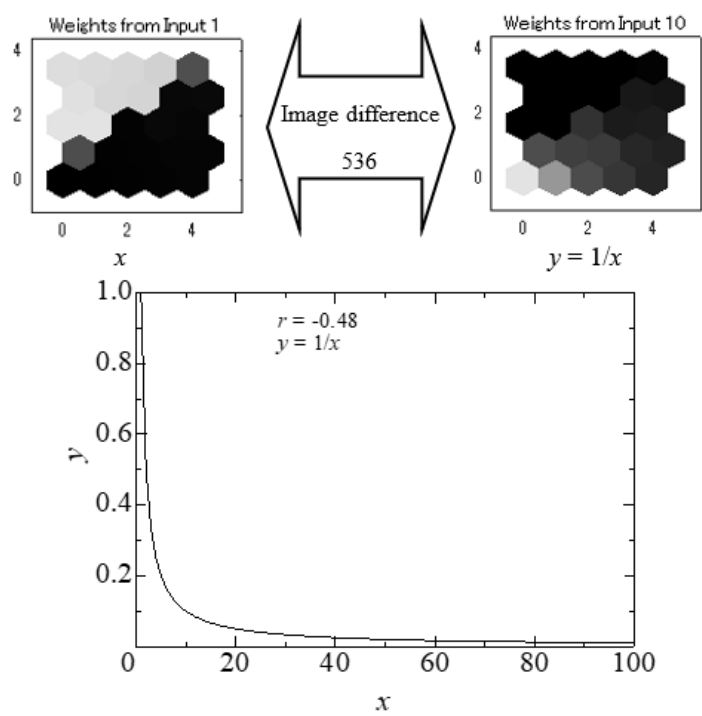


Fig.C.4 Comparisons of Self-Organizing maps in Fig.C.3.



(c) $y = \sin(x)$



(d) $y = 1/x$

Fig.C.4 Comparisons of Self-Organizing maps in Fig.C.3.

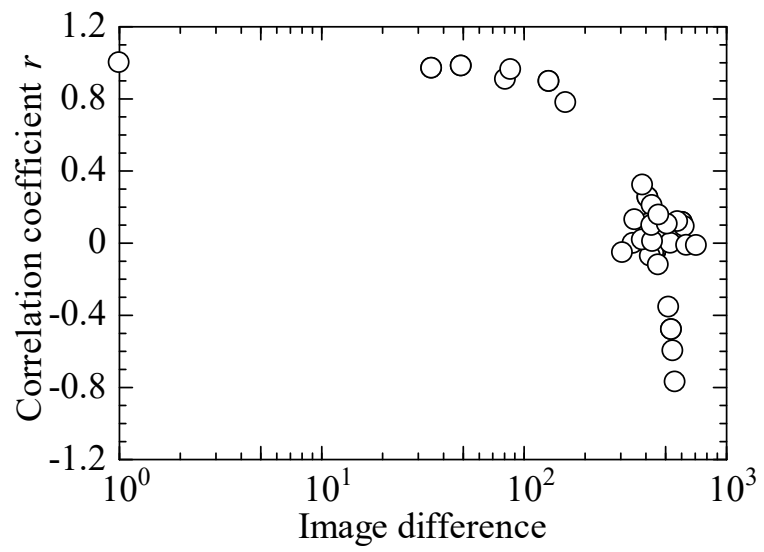
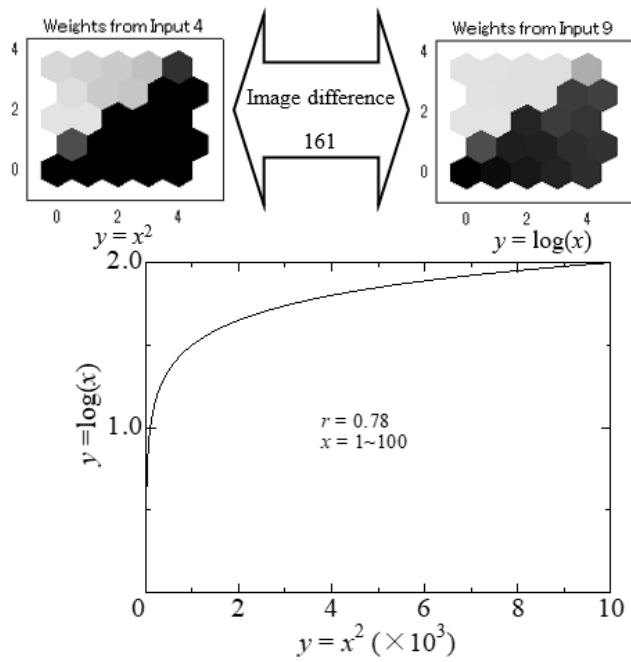
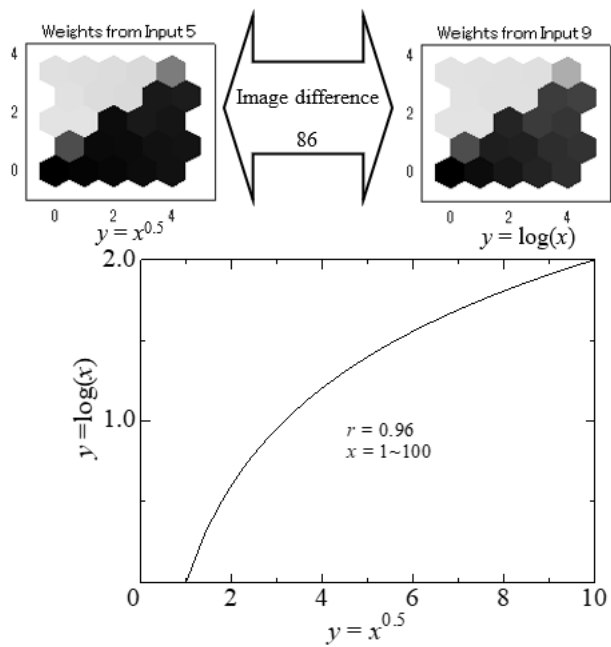


Fig.C.5 Relationship between image difference and correlation coefficient r .



(a) $y = x^2$ and $y = \log(x)$.



(b) $y = x^{0.5}$ and $y = \log(x)$.

Fig.C.6 Correlation between two data groups by Self-Organizing maps.

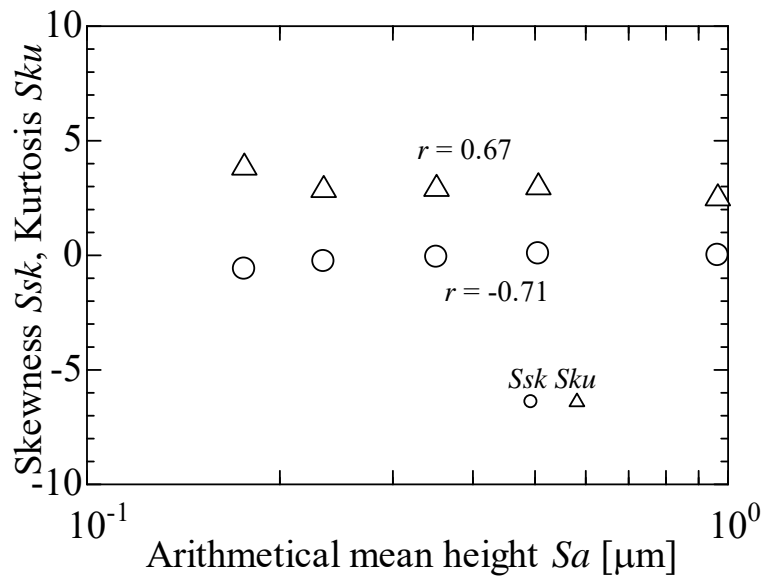


Fig.C.7 Relation among arithmetic mean height Sa , skewness S_{sk} and kurtosis S_{ku} .

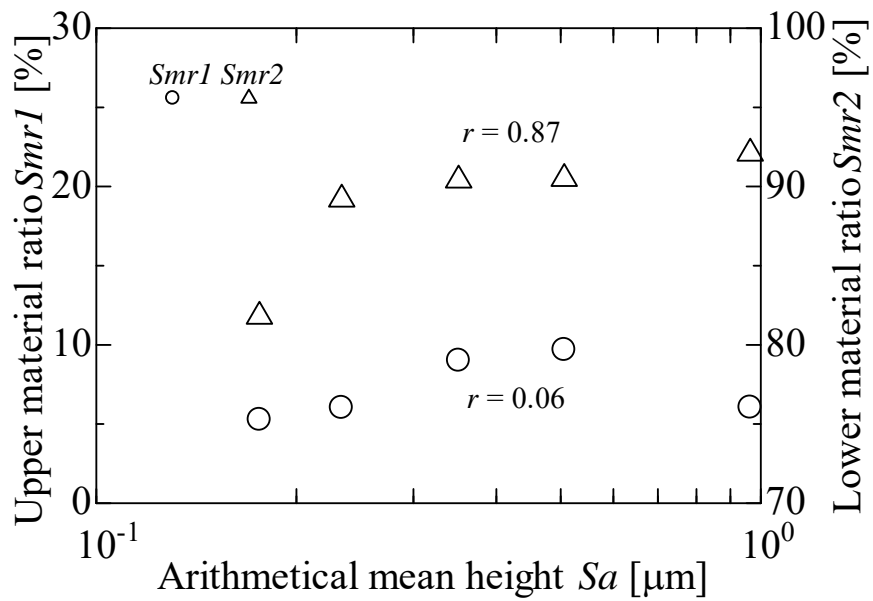


Fig.C.8 Relation among arithmetic mean height Sa , upper material ration $Smr1$ and lower material ration $Smr2$.

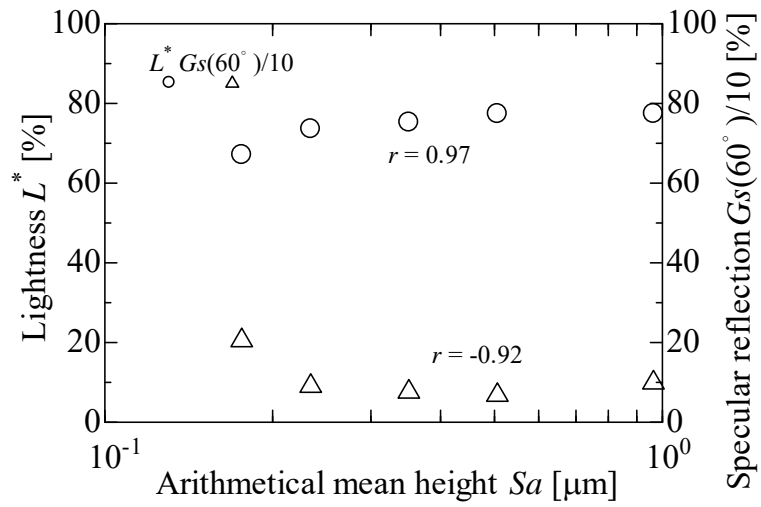


Fig.C.9 Relation among arithmetic mean height Sa , lightness L^* and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

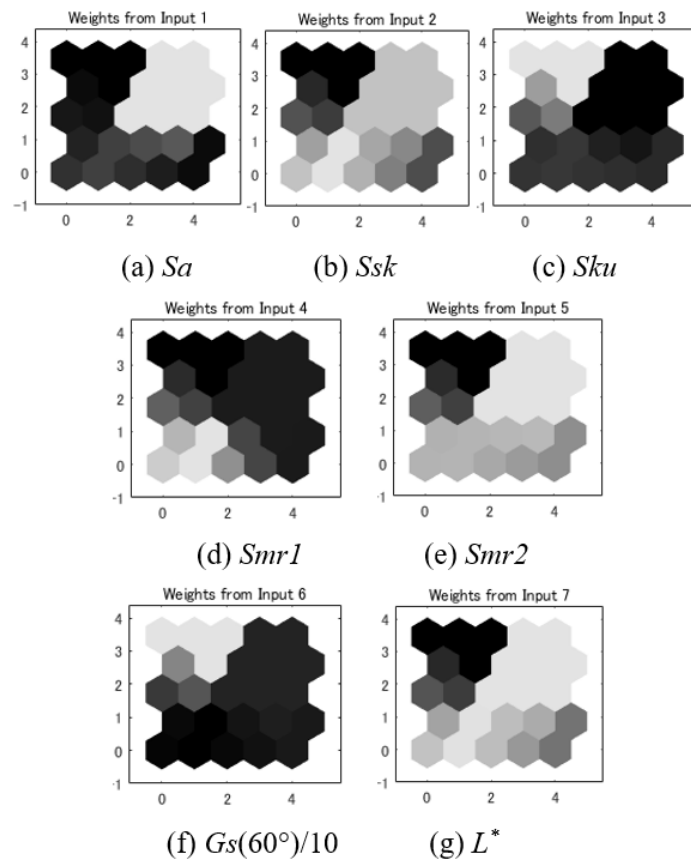


Fig.C.10 Self-Organizing maps for surface texture.

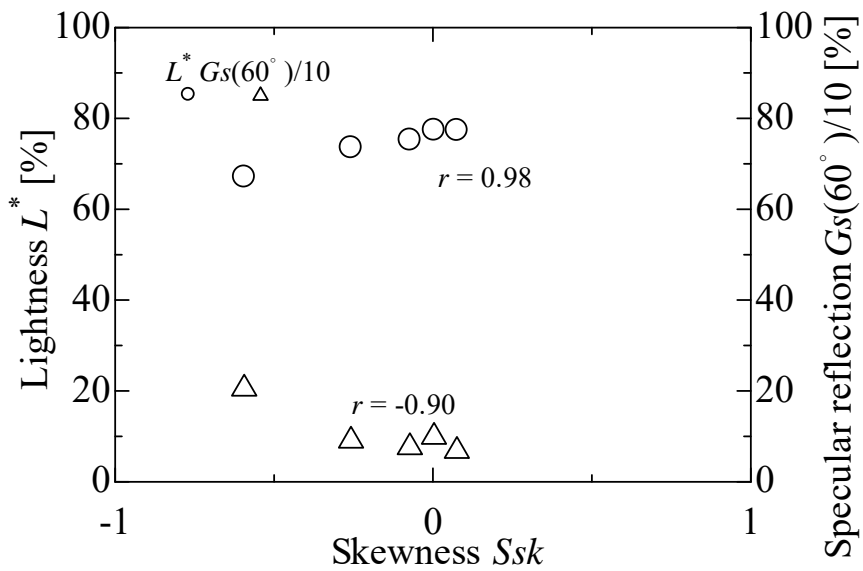


Fig.C.11 Relation among skewness Ssk , lightness L^* and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

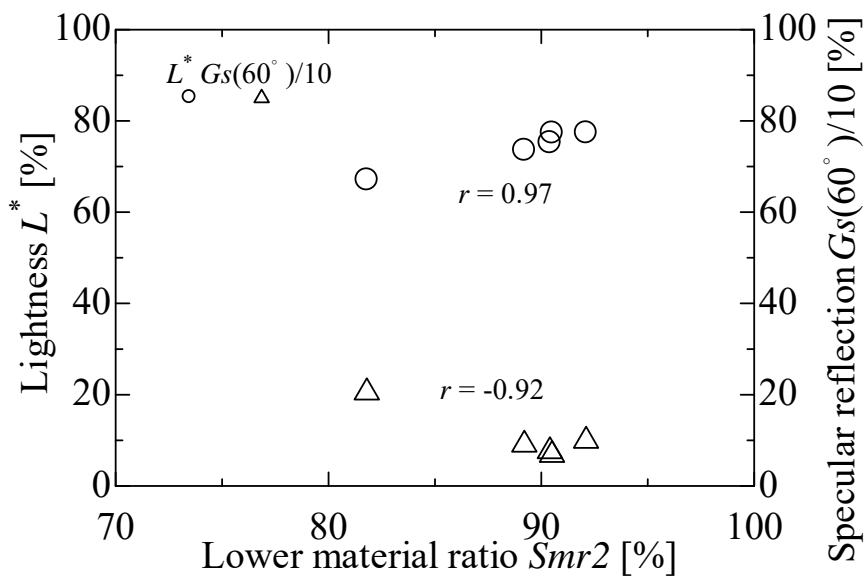


Fig.C.12 Relation among lower material ration $Smr2$, lightness L^* and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大な御支援と御指導を頂いた拓殖大学 大学院工学研究科 杉林俊雄教授に深く感謝すると共に厚く御礼申し上げます。本論文の審査並びに貴重な御討論，御意見を賜りました拓殖大学 大学院工学研究科 機械・電子システム工学専攻 機械システム工学コース 松永直樹教授，香川美仁教授，木原幸一郎教授の各先生方には広い視点から多くの有益なアドバイスを頂きました。また，拓殖大学 大学院工学研究科 機械・電子システム工学専攻 電子システム工学コース 小川毅彦教授には，ニューラルネットワーク 自己組織化マップの理論及びその実験・検証につきまして，終始有益な御指導及び御助言頂きました。さらに，近畿大学 次世代基盤技術研究所 米原牧子研究員，職業能力開発総合大学校 吉田瞬助教には，本研究を進めるにあたり終始多大な御指導及び御助言を頂きました。ラスベガスにおける国際会議での口頭発表や報文の作成において，元拓殖大学 工学部 川端康介氏に御指導及び御助言頂きました。深く感謝すると共に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，新東工業株式会社及びアメテック株式会社テラーホブソン事業部に御高配頂きました。

社会人博士課程への入学を快く許可して頂いた株式会社アトラス 代表取締役 青木孝夫社長，私の研究活動に対する御理解と御支援を頂いた取締役 神谷芳郎工場長，藤井一彦名古屋事業所長はじめ株式会社アトラスのすべての社員の皆様に心より感謝いたします。

最後に，2015年に他界した父をはじめ研究生活を陰に陽に支えて頂きました相模原及び讃岐の家族にお礼を申し上げます。

2020年1月2日

若林 祐次