

階層分析法 (AHP) を用いた積層造形物の感性評価

原 涼輔*

Kansei Evaluation of Additive Manufacturing Products Using Analytic Hierarchy Process Ryosuke Hara

1. 緒 言

近年、3Dプリンターの活用範囲は、デザイン試作でのモックアップや生産治具の造形のみならず、最終製品への適用事例にも広がっている。しかし、3Dプリンターで作製した造形物(以下、積層造形物)には、図1に示すような特有の造形痕(以下、積層痕)が生じる。この積層痕は、一般的な樹脂製品の品質イメージと比較して、マイナスの印象を与えることが多いとされている¹⁾。特に、ユーザーが知覚する部分に積層造形物を使用する場合、意匠面からも仕上げ処理が求められている。一方で、積層痕が人間の感性にどのような影響を与えるかを調査した事例は少ない。

そこで本研究では、AHP(Analytic Hierarchy Process)²⁻⁵⁾を用いて、積層造形物の表面状態が人間の感性に与える影響を定量的に評価した。AHPは、複数の選択肢を一对比較し、評価基準に基づいて順位付けを行う手法であり、これにより、仕上げ処理を施したモデルの中から、感性的に優れたモデルを客観的かつ定量的に特定することが可能となる。



図1 造形物の積層痕の例

2. 評価方法

2・1 AHPを用いた積層造形物の感性評価

評価モデルの判定を行うための評価基準として、価格(一定の価格設定におけるコストパフォーマンス)、外観(デザインや見た目の良さ)、触感(手触りや質感の良さ)の3つを設定し、選択対象の候補として未加工、研磨仕上げ、研磨仕上げ+塗装の3つを設定した。図2にAHPの階層図を示す。

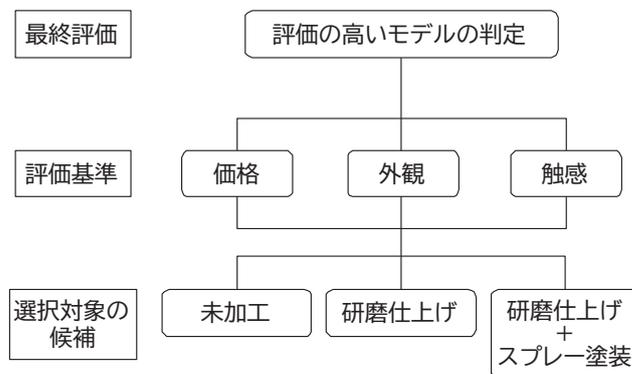


図2 AHPの階層図

所定のアンケート用紙を準備し、被験者が評価モデルから受ける印象を「言葉による一对比較」³⁾で評価した。また、評価尺度は7段階の強度で区分した。表1に評価基準間的一对比較アンケートの回答例を示す。被験者には、表の左側と右側の評価基準(選択対象の候補)同士でそれぞれ一对比較してもらい、その強度を記入してもらった。表2に表1を基に作成した一对比較表を示す。「価格」対「外観」の一对比較値が5の場合、「外観」対「価格」の一对比較値は、「価格」対「外観」で得た比較値の逆数を使用するため、1/5となる。また、「価格」対「価格」の一对比較値は1となる。

アンケートの対象者は山口県産業技術センターの職員およびその家族とし、37名(男性23名、女性14名)から回答を得た。

表1 評価基準間的一对比較アンケートの回答例

| | 左の方がかなり重要 | 左の方が重要 | 左の方がやや重要 | 左右は同じくらい重要 | 右の方がやや重要 | 右の方が重要 | 右の方がかなり重要 | |
|------|-----------|--------|----------|------------|----------|--------|-----------|----|
| 評価尺度 | 7 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | |
| 価格 | | ○ | | | | | | 外観 |
| 価格 | | | | | ○ | | | 触感 |
| 外観 | | | | | | | ○ | 触感 |

* 技術支援部製品技術グループ

表2 一対比較表の例

| 評価基準 | 価格 | 外観 | 触感 |
|------|-----|----|-----|
| 価格 | 1 | 5 | 1/3 |
| 外観 | 1/5 | 1 | 1/7 |
| 触感 | 3 | 7 | 1 |

2・2 評価モデルの作製

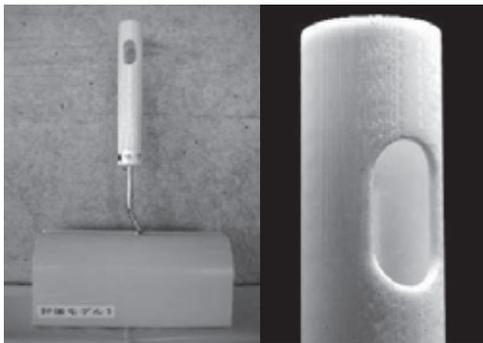
評価モデルの基本形状は、手に持って使用するもの(触覚から得られる影響が大きいもの)として「掃除器具の持ち手」を、見て楽しむもの(視覚から得られる影響が大きいもの)として「一輪差し」の2種類とした。基本形状の3Dモデル作成には3DCAD(Autodesk社製Fusion)を使用し、評価モデルの作製にはMEX方式の樹脂3Dプリンター(Stratasys社製Fortus400mc-L)を使用した。また、評価モデルの表面の仕上げ状態は、2・1で設定した通り、未加工、研磨仕上げ、

研磨仕上げ+スプレー塗装の3種類とした。研磨仕上げには仕上げ用研磨フィルム(Mipox社製Tuned3 BASIC, 番手: #240, #400, #2000)を使用し、スプレー塗装には下地処理スプレー(Holts社製スプレーパテ)とカラースプレー(アサヒペン社製クリエイティブカラーズスプレー, 57 マットホワイト)を使用した。2つの評価モデルには、それぞれ3種類の表面状態を準備した。作製した評価モデルを図3に示す。

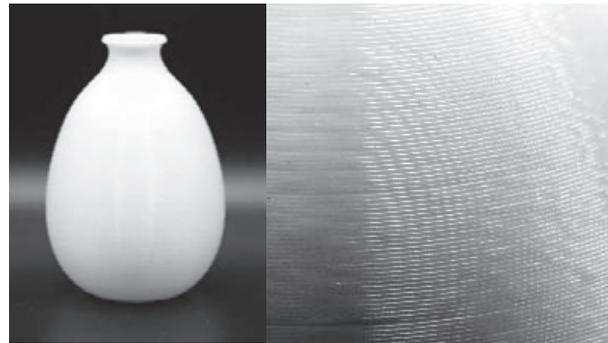
2・3 総合評価値の計算

アンケートから得られた回答結果に基づき、以下の手順で解析した。また、本研究では容易に計算可能な幾何平均法を用いた²⁻³⁾。

初めに、評価基準の重みの計算を行った。計算式を式(1)および式(2)に示す。 n は評価基準の項目数、 a は評価基準間の一対比較で得られた一対比較値をそれぞれ表している。また、 a_{ij} は $n \times n$ 個の一対比較表を i 行と j 列の行列で表した場合における、 (i, j) の一対比較値である。式(1)を用いて幾何平均値 $g1_i$ を求め、式(2)を用いて各幾何平均値を幾何平均値の総和で割り、正規化を行った。式(2)の計算で得られ



(a) 評価モデル 1(未加工)



(d) 評価モデル 4(未加工)



(b) 評価モデル 2(研磨仕上げ)



(e) 評価モデル 5(研磨仕上げ)



(c) 評価モデル 3(研磨仕上げ+スプレー塗装)



(f) 評価モデル 6(研磨仕上げ+スプレー塗装)

図3 作製した評価モデル

$$g1_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad i = 1 \dots n \quad (1)$$

$$w1_i = \frac{g1_i}{\sum_{i=1}^n g1_i} \quad i = 1 \dots n \quad (2)$$

た値が各評価基準の重み $w1_i$ となる。

次に、評価項目毎に評価モデルの重みの計算を行った。選択対象の候補の重みに関する計算式を式(3)および式(4)に示す。 n は評価基準の項目数、 m は選択対象の候補の項目数、 b は選択対象の候補間の一対比較で得られた一対比較値をそれぞれ表している。また、 b_{ikl} は評価基準 i における選択対象の候補間の一対比較表($m \times m$)を、 k 行と l 列の行列で表した場合における、(k, l)の一対比較値である。式(3)を用いて幾何平均値 $g2_{ik}$ を求め、式(4)の計算で得られた値が選択対象の候補の重み $w2_{ik}$ となる。

$$g2_{ik} = \left(\prod_{l=1}^m b_{ikl} \right)^{\frac{1}{m}} \quad i = 1 \dots n \quad k = 1 \dots m \quad (3)$$

$$w2_{ik} = \frac{g2_{ik}}{\sum_{k=1}^m g2_{ik}} \quad i = 1 \dots n \quad k = 1 \dots m \quad (4)$$

さらに、評価基準の重みと選択対象の候補の重みで加重和を取り、総合評価値を求めた。以下に総合評価値の計算式を式(5)、式(6)に示す。 n は評価基準の項目数、 m は選択対象の候補の項目数、 i は評価基準、 k は選択対象の候補、 $w1_i$ は各評価基準の重み、 $w2_{ik}$ は評価基準毎に求めた各選択対象の候補の重みをそれぞれ表している。式(5)を用いて、各評価基準の重みと各選択対象の候補の重みで積を取り、選択対象の候補毎に各評価基準の評価値 e_{ik} を求める。次に式(6)で、選択対象の候補毎に各評価基準の評価値の総和を取ることで、総合評価値 E_k となる。

$$e_{ik} = w1_i w2_{ik} \quad i = 1 \dots n \quad k = 1 \dots m \quad (5)$$

$$E_k = \sum_{i=1}^n e_{ik} \quad k = 1 \dots m \quad (6)$$

AHP のように一対比較で回答した場合、図4のように矛盾が生じてしまう場合がある。その為、回答結果に矛盾があるかを判定する手法として整合度(Consistency Index : 以下、C. I.)の評価を行った。C. I.の値は完全に整合性が取れている場合に0となり、整合性が取れていないほどその値は増加する。一般的に、C. I. = < 0.150 であれば許容できる²⁻³⁾。C. I.の計算式を式(7)、式(8)、式(9)に示す。 n は評価基準(選択対象の候補)の項目数、 a は評価基準(各評価基準における選択対象の候補)間の一対比較で得られた一対比較値、 w は評価基準(各選択対象の候補)の重みをそれぞれ

れ表している。また、 a_{ij} は $n \times n$ 個の一対比較表を i 行と j 列の行列で表した場合における、(i, j)の一対比較値である。式(7)、式(8)を用いて、推定固有値 λ を求め、式(9)の計算で得られた値がC. I.となる。

本研究では、C. I. = < 0.150 の回答者(掃除器具の持ち手 : 26名、一輪差し : 24名)を総合評価値の計算を行う評価対象とした。

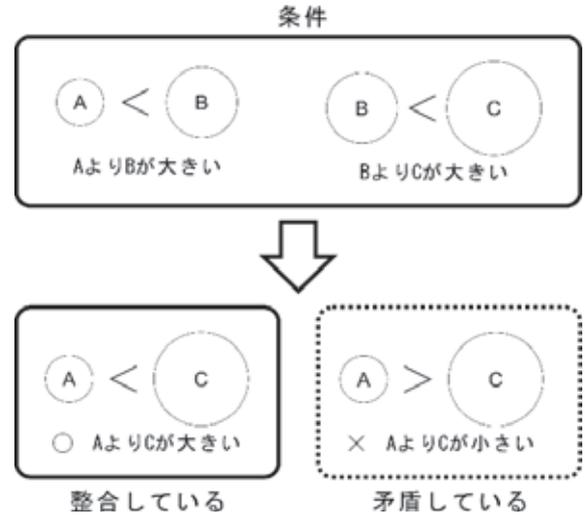


図4 一対比較の矛盾例

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} w_j)}{w_i} \quad i = 1 \dots n \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (8)$$

$$C. I. = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (9)$$

3. 評価結果および考察

3・1 AHPの結果

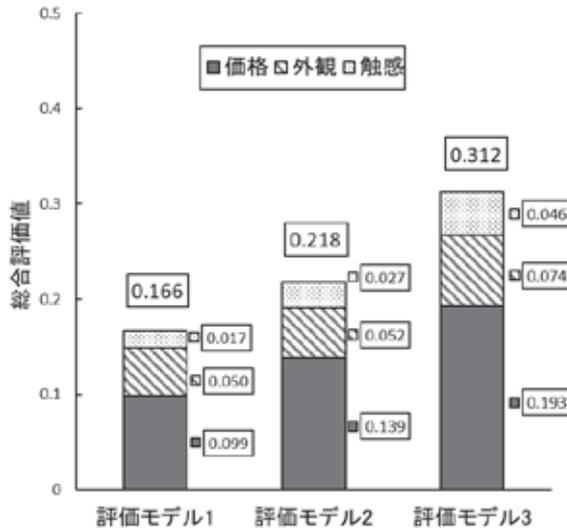
評価者毎に評価基準の重みと選択対象の候補の重みを計算し、それぞれの重みに対し幾何平均をとり、重みの統合を行った⁵⁾。統合した評価基準の重みと選択対象の候補の重みを重み集計表に集約し、各評価値と総合評価値の計算を行った。各評価値と総合評価値の計算に使用した重み集計表を表3に、各評価モデルに対する評価基準の評価値に各評価基準の重みをそれぞれ掛けた総合評価値を図5に示す。

表3に示すように各評価基準は、掃除器具の持ち手の場合は、価格が0.546、外観が0.213、触感が0.116となり、価格の重みが高いことから、回答者は外観や触感よりも価格を重要視している結果となった。一輪差しの場合は、価格が0.119、外観が0.462、触感が0.298となり、回答者は価格よりも外観や触感を重要視している結果となった。

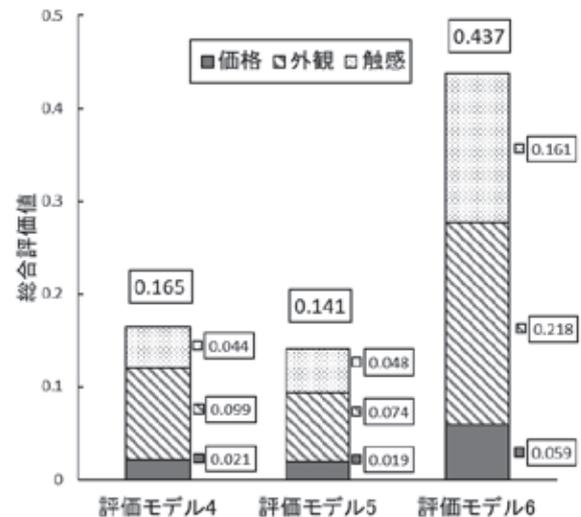
また、図5に示すように、掃除器具の持ち手の場合、価格では、評価モデル1が0.099、評価モデル2が0.139、評価モデル3が0.193、外観では、評価モデル1が0.050、評

表 3 重み集計表

| (a) 掃除器具の持ち手 | | | | (b) 一輪差し | | | |
|--------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| 評価基準 | 価格 | 外観 | 触感 | 評価基準 | 価格 | 外観 | 触感 |
| 重み | 0.546 | 0.213 | 0.116 | 重み | 0.119 | 0.462 | 0.298 |
| 評価モデル 1 | 0.181 | 0.236 | 0.149 | 評価モデル 4 | 0.177 | 0.214 | 0.149 |
| 評価モデル 2 | 0.254 | 0.246 | 0.233 | 評価モデル 5 | 0.163 | 0.161 | 0.160 |
| 評価モデル 3 | 0.353 | 0.348 | 0.393 | 評価モデル 6 | 0.493 | 0.471 | 0.540 |



(a) 掃除器具の持ち手



(b) 一輪挿し

図 5 総合評価値のグラフ

価モデル 2 が 0.052, 評価モデル 3 が 0.074, 触感では, 評価モデル 1 が 0.017, 評価モデル 2 が 0.027, 評価モデル 3 が 0.046 となり, いずれの評価基準でも評価モデル 3, 評価モデル 2, 評価モデル 1 の順で高い評価値となった. 一輪挿しの場合, 価格では, 評価モデル 4 が 0.021, 評価モデル 5 が 0.019, 評価モデル 6 が 0.059, 外観では, 評価モデル 4 が 0.099, 評価モデル 5 が 0.074, 評価モデル 6 が 0.218, 触感では, 評価モデル 4 が 0.044, 評価モデル 5 が 0.048, 評価モデル 6 が 0.161 となり, 価格と外観では評価モデル 4 より評価モデル 5 が低い評価値となり, 評価モデル 6 は評価モデル 4 より高い評価値となった. 触感では評価モデル 6, 評価モデル 5, 評価モデル 4 の順で高い評価値となった.

それぞれの選択対象の候補の各評価基準を合計した総合評価値で比較すると, 掃除器具の持ち手の場合, 評価モデル 1 が 0.166, 評価モデル 2 が 0.218, 評価モデル 3 が 0.312 となった. 評価モデルを平滑にすることで回答者から高い評価が得られた. 一輪差しの場合, 評価モデル 4 が 0.165, 評価モデル 5 が 0.141, 評価モデル 6 が 0.437 となった. 未加工の評価モデル 4 と研磨仕上げの評価モデル 5 を比較した場合, 研磨仕上げの影響はあまり見られない結果であった. 評価モデル 6 のように研磨仕上げ+スプレー塗装を施すことによって, 他の評価モデルよりも回答者から高い評価が得られた.

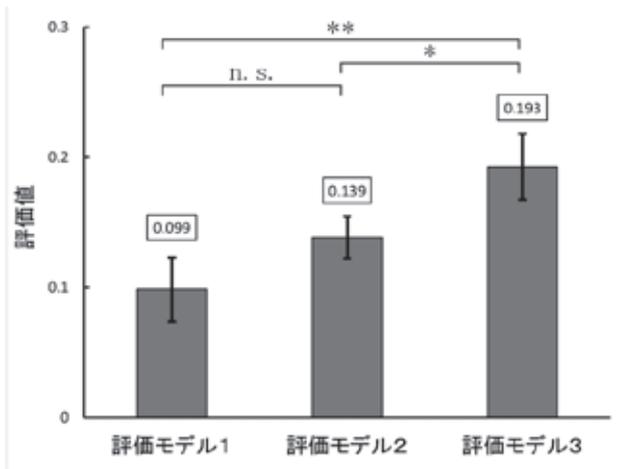
以上のことから, 掃除器具の持ち手と一輪差しの両方の

場合において, 研磨仕上げ+スプレー塗装を施した評価モデルの評価が高い結果となった.

3・2 有意差検定

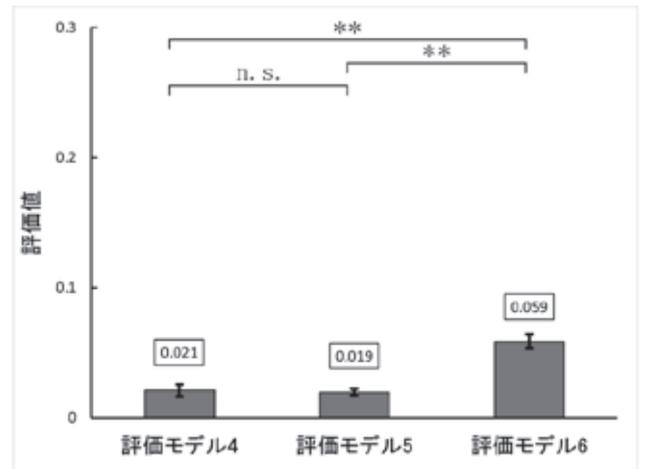
評価基準毎の評価値の有意差を確認するために, 各回答者の感性評価結果で得られた各評価基準の重みを標本として, 帰無仮説 H_0 (評価モデル X と評価モデル Y は評価値 t に差がない) と対立仮説 H_1 (評価モデル X と評価モデル Y は評価値に差がある) を立てて, Welch の t 検定 (分散が等しくないと仮定した 2 標本による検定) を行い, p 値を算出した⁶⁻⁷⁾. 有意差検定の結果を図 6, 7 に示す. なお, 図中のエラーバーは 95%信頼区間を示す. また, 各評価モデル間の評価値に対する有意差検定について, n. s. (Not Significant) は有意差なし ($p \geq 0.05$), * は 5%水準 ($p < 0.05$), ** は 1%水準 ($p < 0.01$) であることを示す.

掃除器具の持ち手の場合, 評価モデル 1, 2 間では, 価格 $p=0.63$, 外観 $p=0.81$, 触感 $p=0.19$ となり, どの評価基準においても, 有意差はなかった. 一方で評価モデル 1, 3 間では, 価格, 外観, 質感のいずれの評価基準でも $p < 0.01$ となり, 有意差があった. 同様に, 評価モデル 2, 3 間でも価格と触感が $p < 0.01$, 外観が $p=0.01$ であり, 有意差があった. 一輪差しの場合は評価モデル 4, 5 間では, 価格 $p=0.27$, 外観 $p=0.13$, 触感 $p=0.70$ となり, どの評価基準においても, 有意差が無かった. 一方で, 評価モデル 4, 6 間と評価モデル 5, 6 間いずれの評価基準でも $p < 0.01$ となり, 有意差があった.



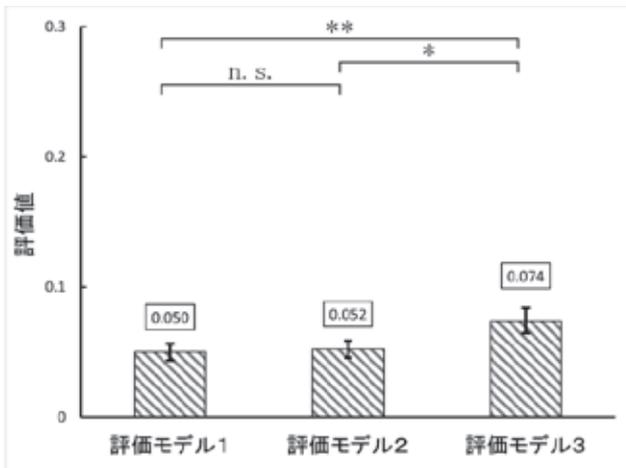
| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 1, 2 | p = 0.63 | n. s. |
| 評価モデル 1, 3 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 2, 3 | p = 0.01 | * |

(a) 価格



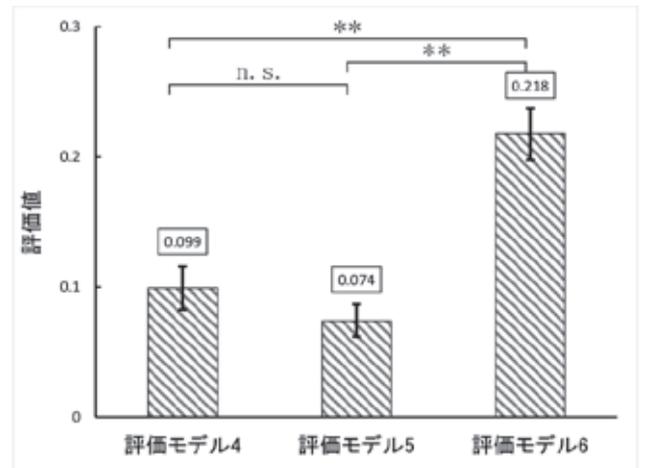
| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 4, 5 | p = 0.27 | n. s. |
| 評価モデル 4, 6 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 5, 6 | p < 0.01 | ** |

(a) 価格



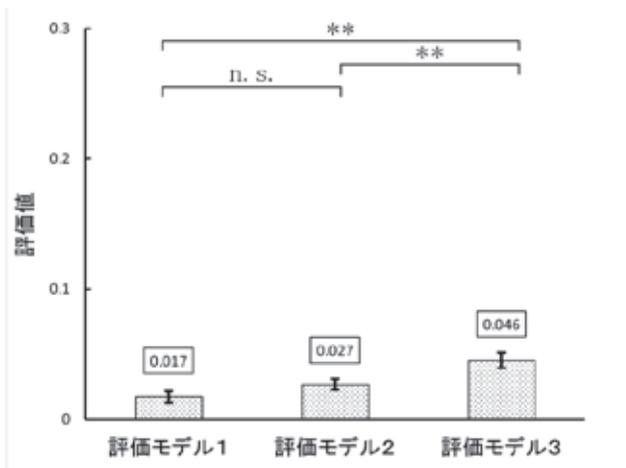
| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 1, 2 | p = 0.81 | n. s. |
| 評価モデル 1, 3 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 2, 3 | p = 0.02 | * |

(b) 外観



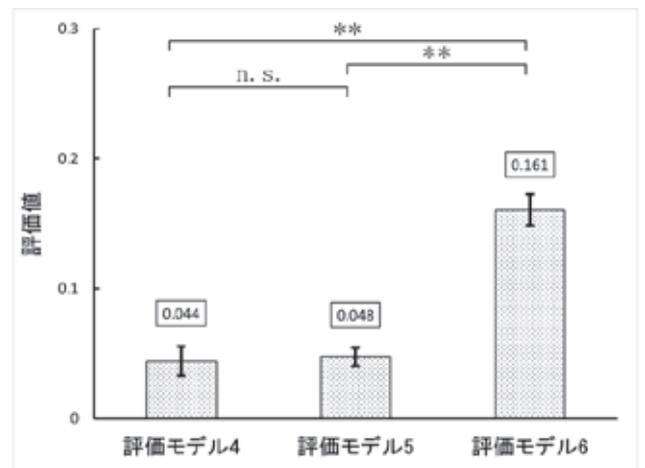
| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 4, 5 | p = 0.13 | n. s. |
| 評価モデル 4, 6 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 5, 6 | p < 0.01 | ** |

(b) 外観



| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 1, 2 | p = 0.19 | n. s. |
| 評価モデル 1, 3 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 2, 3 | p < 0.01 | ** |

(c) 触感



| | | |
|------------|----------|-------|
| 評価モデル 4, 5 | p = 0.70 | n. s. |
| 評価モデル 4, 6 | p < 0.01 | ** |
| 評価モデル 5, 6 | p < 0.01 | ** |

(c) 触感

図6 有意差検定グラフ(掃除器具の持ち手)

図7 有意差検定グラフ(一輪差し)

4. 結 言

本研究では、AHP を用いて積層造形物の表面状態が人間の感性に与える影響を調査した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 評価モデルの表面状態から被験者が受ける印象を価格、外観、触感の面から評価でき、どの因子が最も製品イメージに影響するのかを定量的に分析できることを確認した。
- (2) 掃除器具の持ち手と一輪差しのいずれの評価モデルにおいても、積層造形物の積層痕が有する凹凸形状をユーザーが知覚するか否かで、評価値に大きく影響した。仕上げ処理によってユーザーが凹凸形状を知覚できないレベルまで平滑化すれば、感性評価が向上すると推察される。
- (3) 積層造形物の積層痕が有する凹凸形状を知覚すると感性評価が低かったことから、緒言で示した、「積層痕は一般的な樹脂製品の品質イメージからすると、マイナスなイメージで捉えられることが多い」という指摘と一致することを確認した。
- (4) AHP による分析結果について、t 検定による有意差判定を行った結果、仕上げなしと研磨仕上げのモデル間の印象には有意な差がなく、研磨仕上げ+スプレー塗装を施した評価モデルは、他のモデルと比較した場合、モデル間の印象には有意な差がある結果となった。
- (5) AHP では一対比較により、どの評価モデルが優れてい

るかを定量的に評価できるが、得られた定量データに何かしらの意味があるかを判定するためには、今回の実験で用いた t 検定による有意差判定のように、統計解析手法を用いたデータ解析が必要である。

参考文献

- 1) 高岸賢輔, 梅津信二郎:3D プリンタ造形物改質処理の画像による評価, 日本画像学会, **56**(1), p. 10-15(2017).
- 2) 刀根薫:ゲーム感覚意思決定法-AHP 入門, 日科技連出版社.
- 3) 高萩栄一郎, 中島信之:Excel で学ぶ AHP 入門, オーム社.
- 4) 井上勝雄:感性デザイン-統計的手法(ラフ集合), 事例, I/F, マーケティング, エヌ・ティー・エス, p. 33-42.
- 5) 八巻直一, 関谷和之:複数の評価者を想定した大規模 AHP の提案と人事評価への適用, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **42**(4), p. 405-421(1999).
- 6) 富田豊, 内山孝憲:エクセルを使ったバイオメカニズムのための統計学(1), バイオメカニズム学会, **28**(2), p. 92-96(2004).
- 7) 富田豊, 内山孝憲:エクセルを使ったバイオメカニズムのための統計学(2), バイオメカニズム学会, **28**(3), p. 155-159(2004).