

廃ガラス粒子形状の評価手法に関する研究

島 悠太^{*1)}, 林田 平馬^{*1)}

Research on evaluation method of waste glass particle shape

SHIMA Yuta^{*1)}, HAYASHIDA Heima^{*1)}

近年、廃棄物の最終処分場の逼迫を緩和する等の目的から、中長期的に強靱な国内外の資源循環システムの再構築が求められており、経済産業省では2020年5月に「循環経済ビジョン2020」を策定するなど、資源循環市場の創出を目指している。ガラスびん業界では、廃ガラスびんを細かく砕いたカレットのリサイクルボトルへの再利用が進んでいる¹⁾。さらに、建設分野においても、砕砂の代替材として廃ガラス再生材の使用が進んできている²⁾³⁾。一方で、原料のガラスは材質の違い等により、粉碎時の粒子形状（鋭さや丸み等）にばらつきが生じるのではないかと疑問視されている。そこで本研究では、画像処理技術を用い、粒子形状を数値化する複数の手法を組み合わせ、廃ガラス再生材と、既存製品として広く一般的に流通している砕砂との形状比較を行い、両者が同等の形状であることを確認した。

1. 緒言

ガラスびんはケイ酸などの主原料に金属化合物を添加することで着色していることが多く、無色、茶色、その他に分別して回収されている。また、回収された無色と茶色のガラスびんの多くは、カレット使用率90%以上のガラスびんとして再利用され¹⁾、2022年のリサイクル率（再商品化量総計÷国内びん出荷量）は72%⁴⁾となっている。廃ガラスは砕砂の代替材にもなり、主に建設分野において様々な廃ガラス再生材が開発されているが、割れたガラスに鋭利な印象を持たれることが普及の妨げとなっている。

そこで本研究では、廃ガラス再生材と一般的に流通している砕砂の粒子形状を、画像処理技術を用いて比較検証した。検証対象の廃ガラス再生材はリサイクル品として一定量の入手が可能なBr（ブラウン系）、Bl（ブルー系）、LG（ライトグリーン系）の3色（以後Br、Bl、LGと表記）とした。検証方法としては、対象を撮影した画像から、外周形状を評価する6項目（アスペクト比、重心からの距離、最小角度、円形度、近似楕円マッチ度、頂点数）のデータを取得し、その分布を比較することにより、評価項目の傾向と、廃ガラス再生材と砕砂との形状の違いを調べた。

2. 実験方法

2.1 検証対象及び試料

本研究では、廃ガラス再生材の形状を評価するため、骨材などとして広く使用されており、自然石を破碎し得られる砕砂と、3色の廃ガラス再生材Br、Bl、LGを比較対象とした。

さらに、比較対象の加工状況による形状変化も検証するため、砕砂は自然石を砕いたものを「原料」、廃ガラスはハンマー等でガラスびんを荒く粉碎したものを「手割」とし、それらを粗く磨いたものを「一次加工」、「一次加工」をさらに磨き、製品レベルに仕上げたものを「二次加工」と分類した。以上の分類による各加工品から、長径が5mm以下、短径が2mm以上のもの（一般的に流通している砕砂の製品サイズに近いもの）を、測定用試料として抽出した。

2.2 実験の概要

光学カメラ（Ailipu Technologu Co.,Ltd, ELP-USB8MP02G-MFV）と照明（CCS 株式会社, TH2-160X120SW）を試料の背面に設置し、背面照射することで輪郭部を強調し、試料ごとにカラー画像（3264pix×2448pix）を可逆画像（BMP形式）で100枚撮影した。また、試料の撮影に際し、厚みがあり、透過性の高いガラス粒子の外周を安定して撮影するため、偏光フィルムを用いて光の向きを揃え、試料一点ずつについて目視でピントを調整した。試料の外周形状を多方面から捉えるため、試料を回転させるなどし、1試料から複数の画像を撮影した。図1に試料の撮影方法の概要を示す。

*1) デジタル技術支援科（当時：IoT推進グループ）

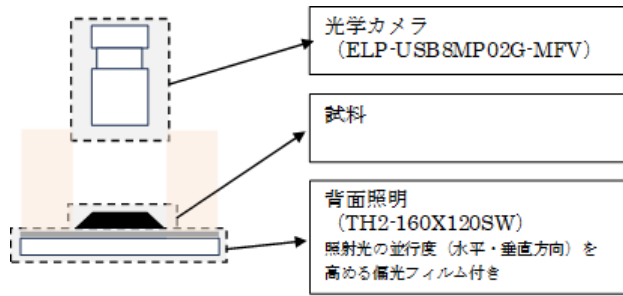


図 1 測定装置概要

2.3 画像処理を用いた輪郭抽出方法

プログラミング言語は Python (ver 3.9.13) を用い、オープンソースで提供されている画像処理ライブラリー OpenCV (ver4.8.78) にて撮影した画像をグレースケール化し、画像処理による輪郭点 (形状) の抽出が正しく得られることを目視で確認しながら二値化のための閾値を画像ごとに定め、輪郭点を取得した。その後、取得した輪郭点を OpenCV の fitEllipse 関数にて最小二乗法により楕円近似をし、得られた楕円の長辺が垂直になるように試料を回転させた。回転後の輪郭点を矩形で囲み、輪郭点から得られる形状の周囲 40pix を残しトリミングした。

2.4 評価項目

3色の廃ガラス再生材 (手割, 一次加工, 二次加工) および砕砂 (原料, 一次加工, 二次加工) について、100枚の画像から以下の項目を取得した。

2.4.1 アスペクト比

試料の歪さ (細長さ) を評価する指標で、試料の長径と短径の比率である。形状が細長いと球状に比べ、力がかかった際に割れやすい。

$$\text{アスペクト比} = \frac{\text{長径}}{\text{短径}}$$

2.4.2 重心からの距離

試料の歪さ (凹凸度合い) を評価する指標で、試料の重心から各輪郭点までの距離の平均値と試料の面積と等しい円の半径の比率である。アスペクト比と同様に、歪みが大きいと力がかかった際に割れやすい。

$$\text{重心からの距離} = \frac{\text{重心から輪郭点の平均距離}}{\text{試料の面積と等しい円の半径}}$$

2.4.3 最小角度

試料の先鋭度合いを評価する指標で、試料の外周を周囲長の 99.5%, 99.3%, 99.0% に近似し、近似後の輪郭点と隣り合う輪郭点の線分からなるなす角を、全輪郭点において算出し、算出されたなす角の最小値である。

最小角度

$$= \min(\text{各近似における輪郭と両端 2 点の 3 点のなす角})$$

2.4.4 円形度

試料の真円の度合いの指標で、試料の面積と等しい円の半径と試料の周囲長と等しい円の半径の比率である。

$$\text{円形度} = \frac{\text{試料の面積と等しい円の半径}}{\text{試料の周囲長と等しい円の半径}}$$

2.4.5 近似楕円マッチ度

試料の楕円度合いの指標で、2 指標からなる。試料の外接矩形に内接する近似楕円を基準に、近似楕円外にある試料の面積及び近似楕円の面積から近似楕円内の試料の面積を減算した各面積の比率である。

$$\begin{aligned} \text{近似楕円内面積} \\ &= \frac{\text{近似楕円の面積} - \text{近似楕円内の取得形状の面積}}{\text{近似楕円の面積}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{近似楕円外面積} \\ &= \frac{\text{近似楕円外の取得形状の面積}}{\text{近似楕円の面積}} \end{aligned}$$

2.4.6 頂点数

試料の輪郭点で構成される多角形を頂点数の少ない多角形に近似する。値が低くなる程、頂点数が少なく、三角形や四角形などの各数の少ない多角形形状に近い評価ができる指標となる。試料の外周を周囲長の 99.0% に近似した近似形状の頂点数である。

3. 結果と考察

3色の廃ガラス再生材 (手割, 一次加工, 二次加工) および砕砂 (原料, 一次加工, 二次加工) の計測結果を、箱ひげ図を用いた 6 項目 7 指標ごとの分布として図 2~8 に示す。さらに、基準とする砕砂の二次加工品の箱ひげ図における、第三四分位数及び第一四分位数を上限値及び下限値とする閾値を設定し、比較対象が閾値の範囲にあるか評価する。閾値を表 1 に示す。ただし、アスペクト比の下限値は長径を短径で除した値のため 1 以下にならないので評価対象としない。同様に重心からの距離も 1 以下にならないため下限値を、最小角度は大きくなれば先鋭度合いが和らぐため上限値を、円形度は大きくなる程丸みと帯びるため上限値を、近似楕円マッチ度は小さくなれば楕円に近づくため下限値を、頂点数は多い程角張が少ないため上限値を評価対象としない。

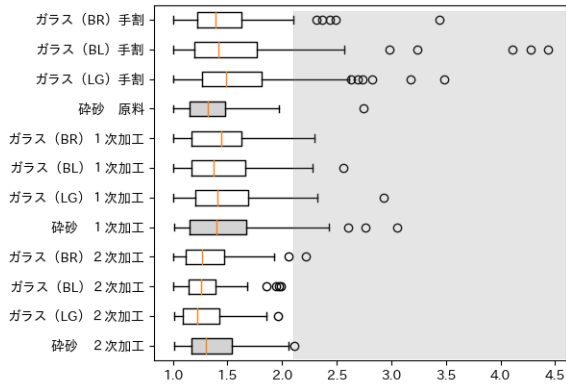


図 2 アスペクト比の分布

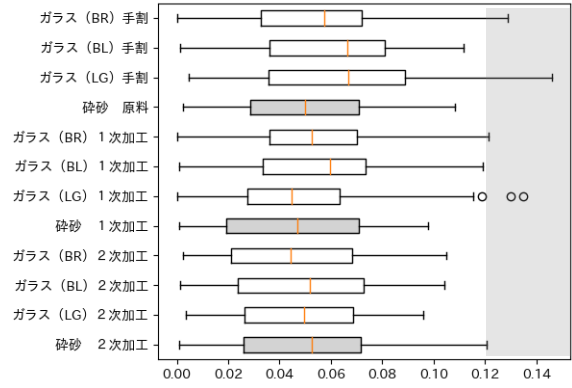


図 6 近似楕円マッチ度 (内面積) の分布

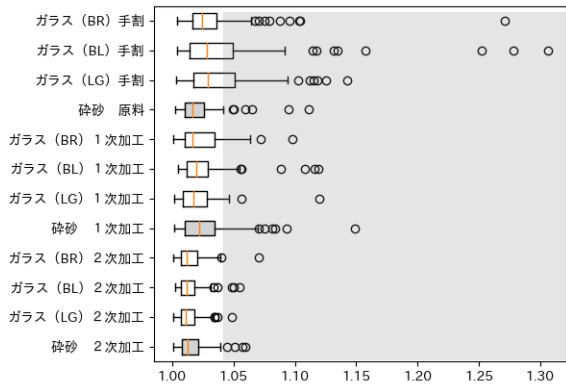


図 3 重心からの距離の分布

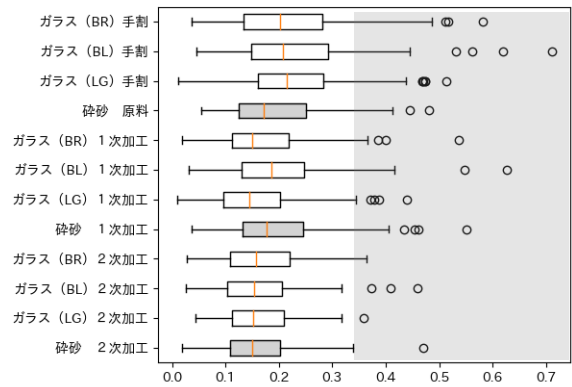


図 7 近似楕円マッチ度 (外面積) の分布

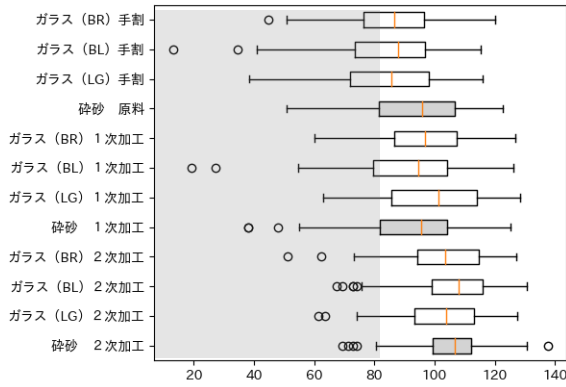


図 4 最小角度の分布

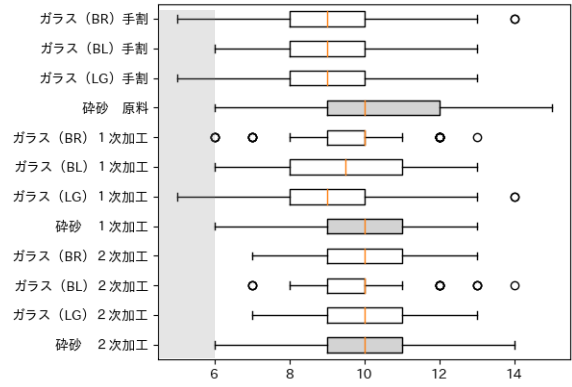


図 8 頂点数の分布

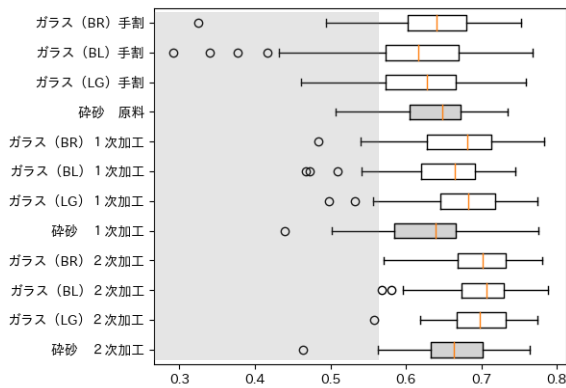


図 5 円形度の分布

表 1 砕砂の二次加工品の分布から得られた評価値

評価指標	下限値	上限値
アスペクト比	—	2.10
重心からの距離	—	1.04
最小角度	80.17	—
円形度	0.53	—
近似楕円マッチ度 (内面積)	—	0.34
近似楕円マッチ度 (外面積)	—	0.14
頂点数	6	—

表1を閾値として基準値外となった試料の数を表2に示す。二次加工品については、廃ガラス再生材の閾値外の試料数はBrで11個、Blで13個、LGで9個であり、砕砂の9個とほぼ同数であったことから、廃ガラス再生材と砕砂の二次加工品は同等の形状であることがわかった。

加工状況による変化については、廃ガラス再生材の手割、一次加工、二次加工の閾値外の試料数はBrで49個、29個、11個、Blで57個、34個、13個、LGで63個、28個、9個と、加工を加えることで減少する傾向を示し、砕砂の原料26個、二次加工9個と同様の傾向であった。

評価項目別にみると、重心からの距離、円形度及び頂点数については、廃ガラス再生材の二次加工品は砕砂の二次

加工品よりも閾値外の試料数が少なく、アスペクト比に関しては同数以下であった。円形度と頂点数の結果から、廃ガラス再生材の二次加工品は砕砂の二次加工品より丸みを帯びているといえる。また、アスペクト比で閾値外となった試料は、重心からの距離で閾値外となった試料に包含されていた。同様に円形度で閾値外となった試料は、重心からの距離もしくは近似楕円マッチ度の2項目で閾値外となった試料に包含されていた。結果、本研究で評価した6項目のうち重心からの距離、最小角度、近似楕円マッチ度、頂点数の4項目を評価することで、本研究で評価した項目全てを網羅できることがわかった。

表2 表1を閾値として基準値外となった試料の数

	アスペクト比	重心からの距離	最小角度	円形度	近似楕円マッチ度	頂点数	計 (重複除)
ガラス (Br) 手割	6	23	34	7	12	6	49
ガラス (Bl) 手割	12	37	38	16	14	6	57
ガラス (LG) 手割	15	38	38	8	15	6	63
砕砂 原料	1	7	22	4	9	2	26
ガラス (Br) 一次加工	3	19	13	1	5	4	29
ガラス (Bl) 一次加工	3	18	25	3	5	3	34
ガラス (LG) 一次加工	3	10	14	1	5	4	28
砕砂 1次加工	9	20	22	8	10	1	40
ガラス (Br) 二次加工	1	1	9	0	1	0	11
ガラス (Bl) 二次加工	0	3	11	0	3	0	13
ガラス (LG) 二次加工	0	1	7	0	1	0	9
砕砂 二次加工	1	4	4	1	1	1	9

4. 結言

本研究では画像処理技術を用い、粒子形状を数値化する6つの項目につき、3色の廃ガラス再生材および砕砂の加工状況ごとの分布を調べた。既存製品として広く一般的に流通している砕砂の二次加工品の分布から閾値を設定し、3色の廃ガラス再生材の二次加工品を4項目（重心からの距離、最小角度、近似楕円マッチ度、頂点数）で評価したところ、砕砂の二次加工品と同等の形状であることがわかった。

5. 謝辞

各加工工程における試料の提供に関しては、藤野興業株式会社にご協力いただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

なお、本研究において使用した画像検査装置は、公益財団法人 JKA の機械振興補助事業により導入・設置したものである。



参考文献

- 1) 日本ガラスびん協会, <https://glassbottle.org/ecology/eco/>
- 2) 日置和昭, 藤原照幸, 本郷隆夫, 山本剛一, 中岡明, 「サンドドレーン工法への廃ガラスカレットの適用性について」, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 34, p.15-22, 2023
- 3) 日置和昭, 小川恒郎, 岡本郁也, 吉原正博, 谷内建吾, 山本剛一, 「廃ガラスカレットを用いた気泡混合軽量土の提案」, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 33, p.204-214, 2022
- 4) ガラスびん 3R 促進協議会, https://www.glass-3r.jp/data/pdf/data_01c.pdf?20231201