

画像処理による再生砂（天然砂・人工砂）の判別

伊藤恭祐*, 樋尾勝也*, 赤田英里*

Image Processing-Based Discrimination between Natural and Artificial Sand in Recycled Sand

Kyosuke ITO, Katsuya HIO and Eri AKADA

For controlling recycled sand (composed of natural and artificial sand), image processing-based quantification of the mixing ratio between natural and artificial sand is considered valuable. In this study, we examined a way of integrating three measures that provide information on the mixing ratio: the three measures were a circular roundness, elliptic roundness, and aspect ratio. The circular roundness is defined as the ratio of a practical area to the circumference-equivalent circular area; the elliptic roundness, the ratio of an equivalent ellipse circumference to a practical circumference; and the aspect ratio, the ratio of a short to long side of a circumscribing rectangle. As a result, it was confirmed that the proposed way of integration almost successfully discriminates between natural and artificial sand of in the recycled sand.

Keywords: Recycled Sand, Natural Sand, Artificial Sand, Image Processing, Mixing Ratio

1. はじめに

鋳物は、砂を固めて作った鋳型に、溶けた鉄を流し込んで作られる。使用される鋳型には、天然砂であるけい砂、ベントナイト及び水等を混練して造型する生型と呼ばれるものがある。その生型ラインへのけい砂の補給は、新砂、中子砂などから行われる。最近では環境問題から廃棄物を最小限にするために新砂補給を極力少なくして、中子砂から補給することが多くなってきている。中子砂の再生は自工場で行う場合もあるが、多くは専門の再生工場に委託し再利用を図っている¹⁾。

中子に使用される人工砂は不良対策として用いられ²⁾、今後も人工砂は増える傾向にある。中子として使用した人工砂は再生され、生型の中に混入し、天然砂と人工砂が混ざった状態になるため、生型で使用しても問題にならないことを確認する

必要がある。混入してくる人工砂の量を確認する方法として、X線回折及び蛍光X線分析による方法があるが、実際の現場でそのような装置を利用できるケースは少なく、拡大鏡、実体顕微鏡あるいはマイクロスコープで砂を拡大して定性的に混入量を把握している。

人工砂はその製法から、基本的に球形度が高く、真球に近い形をしている。一方、天然砂は球形度が低く、凹凸のある表面であるため、実体顕微鏡等で画像解析することで、再生砂中の天然砂・人工砂の比率を把握することができる。画像による形状認識は様々な分野で検討されている³⁾が、人工砂は比較的新しいものであるため、天然砂と人工砂の判別を試みた報告は見当たらない。

再生砂（天然砂・人工砂）を管理する上では、形状を活かした数値化が望ましいと考えられ、本研究では画像処理を適用することによる再生砂中の天然砂と人工砂の混合割合を定量化するにあた

* 金属研究室

り、天然砂と人工砂を判別するのに有用な特徴量について検討したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 再生砂

画像処理に使用する再生砂は、再生工場で再生された鋳物砂を用いた。再生工場からの聴き取りにより再生砂の構成は天然砂と人工砂が混ざった状態であることを確認した。再生砂の処理履歴としては磁選・乾燥、ふるい分けの工程を経て700°Cで焼成したものを、磨鋳して分級により粗目、細目に分別している。図1(a)に人工砂の電子顕微鏡写真を、図1(b)に天然砂の電子顕微鏡写真を示す。天然砂は角ばっていて凸凹であり、人工砂は球体で、おおむね平滑であることが確認された。

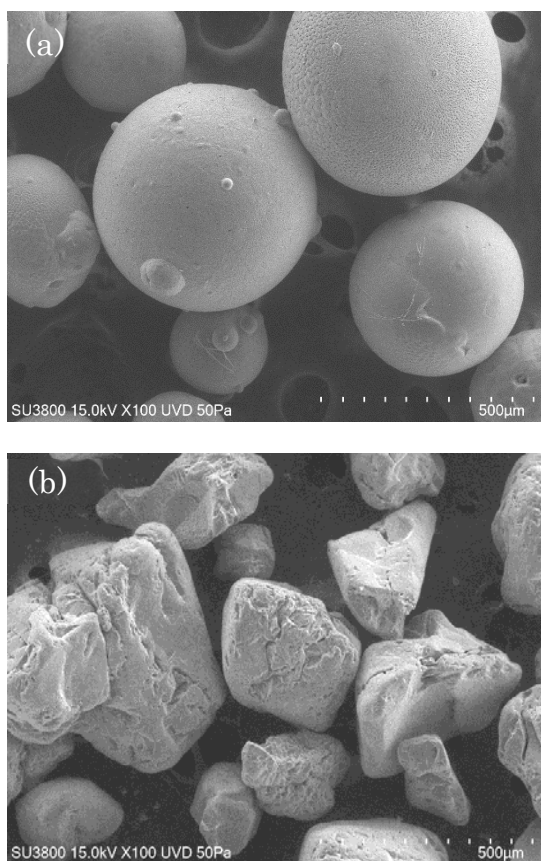


図1 (a)人工砂及び(b)天然砂の電子顕微鏡写真

2. 2 分散方法

再生砂を撮影するにあたり、砂を分散させる必要があるため、ダストサンプラー（NTT製DSW-01）（以下、サンプラー）を用いた。これは工業部

品、食品、製薬工場等の一般室からクリーンルーム（ISOクラス6～8）まで、幅広いエリアで使用できるものである。加えて、対象物の数量が確認でき、可視物をモニタリングするための調査用検査シートである。対象物の現物保存が可能で、対象物をサンプリングするホルダーとしても使用できる⁴⁾。

分散の手順としては、図2に示したようにサンプラーを水平に置き、透明の表面保護フィルムを剥がし、薬さじで上から再生砂をサンプラーに落として、粘着面に固定させた。



図2 再生砂を分散させたサンプラー

2. 3 画像処理

再生砂を撮影する装置はデジタルマイクロスコープ（株式会社キーエンス社製VHX-1000）を用いた。倍率は100倍とし、10視野の撮影を行い、その中の100粒程度解析した。図3に撮影した写真を示す。あらかじめ、撮影した砂粒を目視にて人工砂と天然砂に砂種を分けた。画像撮影後、画像解析ソフト（ImageJ^{5,6)}）を用い、砂粒の面積 $s\mu\text{m}^2$ 、周囲長さ $l\mu\text{m}$ 、長軸径 $a\mu\text{m}$ 、短軸径 $b\mu\text{m}$ 及び三原色RGBを測定した。なお、今回用いた画像処理システムでは、長軸径 a 、短軸径 b は対象の砂粒と同じ面積のだ円を描き、いわゆるだ円近似により求めている。だ円近似とは、画像から抽出した点列にだ円を当てはめる手法である最小二乗法⁷⁾が知られているが、今回の画像解析ソフトは、最小二乗法を反復的に改善するTaubin法⁷⁾を用いてだ円に当てはめている。また、RGBとは色の表現法であり、赤・緑・青の各要素の輝度で記述することができるので、各要素の値を赤 r 、緑 g 、青 b とし、それぞれ256階調で記述した。なお、視野から一部でもはみだした砂粒について

は測定の対象外とした。



図3 再生砂のデジタルマイクロスコップ写真

画像処理で得られた値から再生砂中の天然砂と人工砂を仕分けする特徴量として式(1)により円らしさ C , 式(2)によりだ円らしさ E , 式(3)により短軸径/長軸径 R , 式(4)により三原色 RGB の濃度 D を算出した。

$$C = \frac{4\pi S}{l^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{\pi(a+b)}{2l} \quad (2)$$

$$R = \frac{b}{a} \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}}{255\sqrt{3}} \quad (4)$$

円らしさとは、円との対比での砂粒の凸凹度合いを表し、円の場合 $C=1$ であり、1より小さくなるほど凸凹が大となる。だ円らしさとは円の場合 $E=1$ 、だ円の場合も $E=1$ に限りなく近づき、だ円から離れていくと小さくなる特徴量であり、1より小さくなるほど、円も含めた広義のだ円との対比との意味で不規則形状といえる。また、短軸径/長軸径 R はいわゆるアスペクト比（縦横比）であり、粒子の場合にはつぶれ度を直接的に評価する特徴量であり、砂粒の面積を用いた評価値である円らしさとは異なった観点で判別に貢献することが期待される。その一方で、短軸径/長軸径は円だけでなく、正方形であっても $R=1$ となり、丸みを評価する機能は含まれていない。このように、短軸径/長軸径と円らしさは判別に対して異なった形で役立つと期待される。なお、だ円らし

さは円も含む広義の楕円において限りなく1になるものであるが、“面積 S ” は用いずに“周囲長 l ” の観点でだ円らしさを評価しているという意味で、円らしさとは異なった形で判別に役立つと期待される。また、三原色 RGB の濃度とは1に近いほど濃い色調を示すものである。

3. 実験結果と考察

3.1 画像処理による測定及び算出結果

3.1.1 円らしさと短軸径/長軸径の関係

図4に円らしさと短軸径/長軸径の関係を示す。円らしさの範囲は、天然砂が0.38~0.85, 人工砂が0.77~0.88となった。短軸径/長軸径の範囲は、天然砂が0.37~0.98, 人工砂が0.90~0.99となった。いずれの特徴量においても天然砂の方が人工砂よりもばらつきが大きい結果であった。円らしさと短軸径/長軸径の関係については天然砂、人工砂を通じて相関が高いことが確認されたが、一部で天然砂と人工砂の分布が重なった結果となったため、円らしさと短軸径/長軸径の特徴量のみで天然砂と人工砂を仕分けするには不十分であると考えられる。

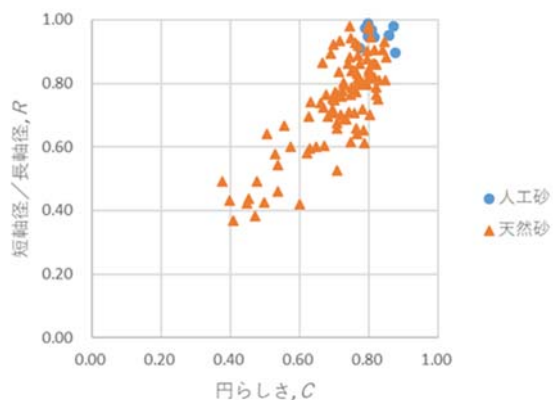


図4 円らしさと短軸径/長軸径の関係

3.1.2 だ円らしさと短軸径/長軸径の関係

図5にだ円らしさと短軸径/長軸径の関係を示す。だ円らしさの範囲については天然砂が0.65~0.93となり、人工砂が0.88~0.94となった。だ円らしさと短軸径/長軸径の関係についても、相関が高いことが確認された。ただし、だ円らし

は前述の円らしさに比して人工砂において範囲が狭まってばらつきも小さく、より 1 に近い分布となった。しかしながら、天然砂についても同様のことが言え、天然砂と人工砂の分布が一部重なっていることもあり、だ円らしさと短軸径／長軸径の特徴量のみで仕分けることは難しいと考えられる。

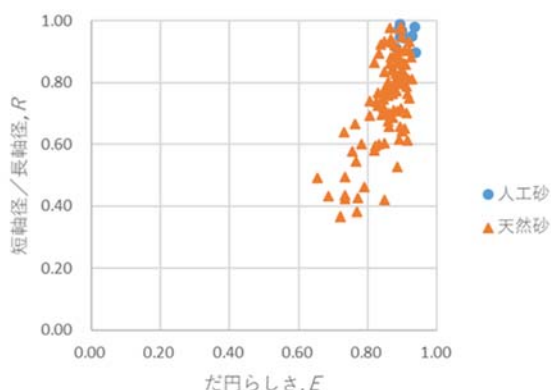


図 5 だ円らしさと短軸径／長軸径の関係

3. 1. 3 三原色 RGB の濃度と短軸径／長軸径の関係

図 6 に三原色 RGB の濃度と短軸径／長軸径の関係を示す。濃度の範囲は天然砂が 0.26～0.65 となり、人工砂が 0.54～0.70 となった。濃度は人工砂について前述の円らしさ、だ円らしさと比べて最も範囲が広くばらついているが、天然砂と人工砂の分布が重なり合う範囲は少ないように思われる。三原色 RGB の濃度と短軸径／長軸径の関係については天然砂、人工砂を通じて相関関係がなく、互いに独立した特徴量であり、それぞれが相補的に判別に役立つ可能性が認められた。

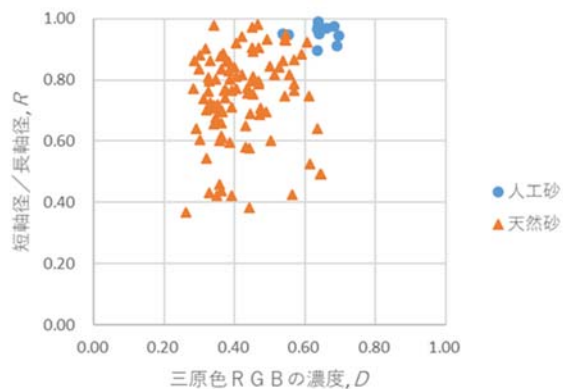


図 6 三原色 RGB の濃度と短軸径／長軸径の関係

3. 1. 4 特徴量の相加平均

円らしさ、だ円らしさ、三原色 RGB の濃度と短軸径／長軸径のそれぞれを単独、または 2 種の組み合わせとしても、天然砂、人工砂の仕分けは難しいと考えられるため、評価する視点が比較的異なっている 3 つの特徴量であるだ円らしさ、短径／長径、三原色 RGB の濃度（円らしさとだ円らしさは要素が似ているため人工砂で範囲の狭かっただ円らしさを採用）を用いて式(5)により相加平均 A_m を算出した。

$$A_m = \frac{E+R+D}{3} \quad (5)$$

相加平均の特徴は 3 つの特徴量の影響をそれぞれ均等に受ける性質がある。

図 7 に個々の粒子の 3 つの特徴量の相加平均を列挙したグラフを示す。目視により砂種を分け、1～11 までが人工砂であり、12 以降が天然砂である。人工砂の相加平均の最低値が 0.798 となり、その値で線引きすると、天然砂 96 個中 2 個が人工砂と判別された。



図 7 特徴量の相加平均

3. 1. 5 特徴量の相乗平均

次に、だ円らしさ、短軸径／長軸径、三原色 RGB の濃度の 3 つの特徴量の相乗平均 G_m を式(6)により算出した。

$$G_m = 3\sqrt{ERD} \quad (6)$$

相乗平均の特徴は 3 つの特徴量のいずれかが、天然砂・人工砂間で他に比べて顕著な主張をしたとき、その特徴量が判別結果に対して支配的な影響を及ぼしてしまう性質がある。支配的な影響を

及ぼす特徴量が真に有用なものであれば、この相乗平均の枠組みが相加平均の枠組みより有効であると期待される。

図8に個々の粒子の3つの特徴量の相乗平均を列挙したグラフを示す。前述したように1~11までが人工砂であり、12以降が天然砂である。人工砂の相乗平均の最低値が0.776となり、その値で線引きすると、天然砂96個中2個が人工砂と判別され、相加平均と同じ結果となった。



図8 特徴量の相乗平均

3. 2 正確度、感度及び特異度

正確度とは正解率のことであり、正答のもの数を全体の数で割った値である。これにより、人工砂を人工砂と判定し、天然砂を天然砂と判定した結果の正解率がわかる。前述の相乗平均、相加平均の結果から正確度 A_c を式(7)により算出することができる。ここで、人工砂で人工砂と判定したものを $n_{art.t}$ 、天然砂で天然砂と判定したものを $n_{nat.t}$ 、全体の砂粒数を T とする。

$$A_c = \frac{n_{art.t} + n_{nat.t}}{T} \times 100 \quad (7)$$

本研究で用いた再生砂では、 $n_{art.t}=11$ 、 $n_{nat.t}=94$ 、 $T=107$ であることから $A_c=98\%$ となった。

一方、感度及び特異度とは病気を診断する際の尺度として用いられる用語⁸⁾であり、人工砂を判定する観点から言うと感度は人工砂を人工砂と判定する割合であり、特異度は天然砂を天然砂と判定する割合である。感度 S_e について前述の相乗平均、相加平均の結果から式(8)により算出することができる。ここで、人工砂で天然砂と判定したものを $n_{art.f}$ とする。

$$S_e = \frac{n_{art.t}}{n_{art.t} + n_{art.f}} \times 100 \quad (8)$$

本研究で用いた再生砂では、 $n_{art.t}=11$ 、 $n_{art.f}=0$ であることから $S_e=100\%$ となった。

特異度 S_p についても式(9)により算出することができる。ここで、天然砂で人工砂と判定したものを $n_{nat.f}$ とする。

$$S_p = \frac{n_{nat.t}}{n_{nat.t} + n_{nat.f}} \times 100 \quad (9)$$

本研究で用いた再生砂では、 $n_{nat.t}=94$ 、 $n_{nat.f}=2$ であることから $S_p=98\%$ となった。

以上より、相乗平均、相加平均を正確度、感度及び特異度で評価したところ、天然砂と人工砂を仕分ける特徴量としては十分適用できるものであると考える。また、再生砂に含まれる天然砂と人工砂の割合は、おおよそ天然砂9割、人工砂1割であることが分かった。

4. 結論

本研究では画像処理による天然砂と人工砂の判別、さらには判別結果に基づいた混合割合の推定を目指し、判別に用いる特徴量について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 画像処理で得られた値から再生砂中の天然砂と人工砂を仕分けする特徴量として、円らしさ、だ円らしさ、短軸径/長軸径、三原色 RGB の濃度を算出した。そして、二つの特徴量を組み合わせることにより、天然砂、人工砂の分布を調べた結果、両砂の分布が一部で重なり合っており、判別性能が不十分であることがわかった。
- 2) 要素の違う3つの特徴量として、だ円らしさ、短軸径/長軸径、濃度を用い、それらの相加平均、相乗平均を算出して両砂の分布を比較した。その結果、いずれの特徴量も感度および特異度が概ね98%以上へと大きく改善し、天然砂と人工砂を仕分ける特徴量として適用できることが確認できた。
- 3) 本実験で用いた再生砂においては、それに含まれる天然砂と人工砂の割合は、おおよそ天然砂9割、人工砂1割であることが分かった。

参考文献

- 1) 佐藤和則：“誰でも分かる鋳物基礎講座”．公益社団法人日本鋳造工学会関東支部ホームページ，<http://www.j-imonono.com/column/daredemo/31.html>
- 2) 黒川豊：“人工砂の特性”．鋳造工学，89，p464-469 (2017)
- 3) 千葉昌彦：“画像による形状認識”．青森県産業技術開発センター
- 4) NTT-AT クリエイティブ株式会社：“ダスター®，ダストサンプラー”．NTT-AT クリエイティブ株式会社ホームページ，<https://www.ntt-atcr.co.jp/item/cleanproducts/item03.html>
- 5) Rasband, W.S., ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, (1997-2012)
- 6) Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". Nature Methods, 9, p671-675 (2012)
- 7) 横田健太ほか：“楕円当てはめの制度比較：最小二乗法から超精度くりこみ法まで”．電子情報通信学会技術研究報告，111，p75-82(2012)
- 8) 阿部真一：“Q&A 感度・特異度・精度”．医学図書館，51(4)，p387-388 (2004)

(本研究は、産業廃棄物抑制型産官共同研究推進事業において実施し、産業廃棄物税を財源としています。また、公益財団法人 JKA による 2019 年度公設工業試験研究所等における機械設備拡充補助事業で導入された「分析機能付熱電子型走査電子顕微鏡」を活用して実施しました。)