

# 画像処理による粒度分布測定技術の開発

## Development of particle size distribution measurement technology using image processing

横谷建一郎\* 久保田聡志\* 永井研志\* 林 謙太\*

Kenichiro Yokotani Satoshi Kubota Kenji Nagai Kenta Hayashi

AI 画像処理技術を活用して骨材の粗さを表す指標である粒度分布測定技術の開発を行った。本技術を開発することによって、従来は測定結果を得るまでに数時間要していたことが瞬時に測定結果を得ることができる。またこのデジタルデータを活用し破砕機の制御装置である PLC (Programmable Logic Controller) との連携をはかることで制御技術にも活用できる。社内での実証試験においては画像処理技術の一つであるインスタンスセグメンテーションを活用することで画像の中から骨材領域を検出し、更にはマハラノビス距離を用いた補正処理を行うことで、従来から行っている測定方法 (JIS A 1102 (2014) 骨材のふるい分け試験方法) と同等の測定精度であることが確認できた。また砕石プラントにおけるフィールドテストにおいても多量の骨材から偏りなく骨材を採取・撮影する縮分撮影装置の開発を行い、従来からのふるい分け実測値と同等の精度であることが確認された。現在は当社の主力製品であるプレジコン® の制御技術への活用について技術的検証を行っている。

We have developed a technology for measuring particle-size distribution, an indicator of aggregate roughness, using AI image-processing technology. By developing this technology, measurement results can be obtained instantaneously, whereas it used to take several hours in the past. This digital data can also be used for control technology by linking with a programmable logic controller. During in-house verification tests, we used instance segmentation, an image processing technology, to detect aggregate areas in the image. We then corrected the image using the Mahalanobis distance to confirm that the measurement accuracy was equivalent to the conventional measurement method (JIS A 1102 [2014] aggregate sieving test method). In field tests in quarry environments, we have also developed a sample splitting and photographing device to collect and photograph aggregates from a large amount of aggregates without segregation, and we have confirmed that the accuracy is equivalent to conventional sieving measurements. Currently, we are conducting technical verification of its use in the control technology of our flagship product, the PREGÉ CONE®.

## 1 はじめに

コンクリートの原料として使われる砕石・砕砂を生産・供給する砕石業界において、オペレータの高齢化や労働力不足の問題を背景として、生産性の効率化に対するニーズが高まっている。また従来の骨材の品質管理 (粒度分布測定) は「骨材の採取」→「乾燥」→「ふるい分け」→「計測」のプロセスを経ることを必要とし、測定結果を得るまでに数時間の時間を要する。

一方、近年では AI 画像処理技術も広く普及してきており、これらの技術を活用すれば瞬時に粒度分布に関する情報を得ることができ、またデジタルデータとして扱うことでソフトウェアや破砕機の制御装置である PLC (Programmable Logic Controller) との連携・活用も期待できる。

そこで本報では AI 画像処理技術を活用した骨材粒度分布測定技術の開発に取り組んだ事例を紹介する。

## 2 当社での実証試験

### 2.1 測定の基本原理

測定の基本原理はインスタンスセグメンテーションという画像処理技術を活用した。本技術は画像内の物体領域を検出・認識する技術であり、この技術を活用することで画像に映し出された骨材領域を認識する処理を行った (図 1)。また認識した骨材領域のピクセル数を計測し、骨材面積を算出することと併せて、骨材領域に外接する正方形を抽出し、正方形一辺の長さを疑似のふるい目とみなした (図 2)。この疑似のふるい目における面積頻度を、骨材領域の総面積で除する演算処理によって粒度分布を算出することを測定の基本原理とした。

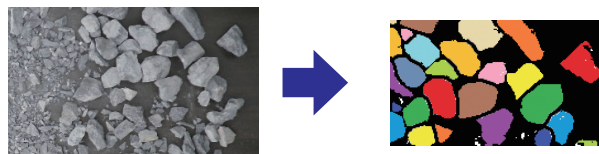


図 1 インスタンスセグメンテーション (骨材領域)

## 2.2 社内での技術実現性検証

### 2.2.1 実験方法

前項で検討した測定の基本原理が粒度分布測定として技術的に可能であるかを検証するために、社内で行った。

撮影方法はコンベヤから落下する骨材に正対する位置にカメラ・照明を設置し撮影を行った。コンベヤは幅 250 mm の機材を用い、撮影する骨材は当社の主力製品であるコンクラッシャの破碎サンプルを 15 t/h の搬送量でコンベヤから落下させて撮影した。撮影枚数は学習用データセット 100 枚、評価用データセットとして 300 枚 (50 枚 × 2SET、100 枚 × 2SET) の撮影を行った。

画像処理によって得られた粒度分布が従来から行っている測定方法と比較して同等の測定精度であるかの検証も行った。測定方法はコンベヤ上のサンプルを回収し、JIS A 1102 (2014)「骨材のふるい分け試験方法」によって骨材の基準となる粒度分布を測定した(『ふるい分け実測値』と称する)。一方でこれら基準となる「ふるい分け実測値」に対して、前述の評価用データセットにより画像処理によって求められた粒度分布を出力し、「ふるい分け実測値」との比較を行い測定精度の検証を行った。

試験設備の模式図、外観を図 3、図 4 に示す。



図2 骨材領域に外接する正方形 (疑似ふるい目)

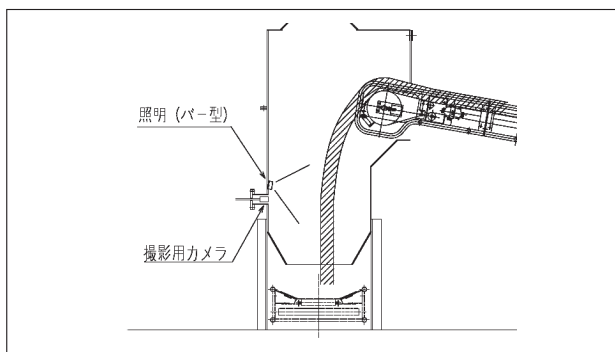


図3 試験設備の模式図



図4 社内での実験設備外観

### 2.2.2 実験結果

実験で撮影した画像を図 5 に示す。

撮影で得られた画像において骨材領域の検出は可能であり、また骨材に外接する正方形の大きさも算出できていることが確認できた。

次に画像処理で出力した粒度分布 (評価データ 1~4) と従来の手ふるいによるふるい分け実測値の比較を行い測定精度の検証を行った。粒度分布図を図 6 に示す。

測定精度検証の結果、20 mm よりも小さい粒度区分においては、従来のふるい分け実測値と画像処理による粒度分布測定 (評価データ) については大きな乖離は見られなかった。

一方で 20 mm より大きなサイズにおいては評価データ 1~4 のいずれにおいても、ふるい分け実測値に比べて粗い粒度であると認識された。

この原因については骨材の形状が不均一であることが考えられる。

一般に骨材は辺の長い順から「長辺 × 中辺 × 短辺」の 3 次元で表される (図 7 参照)。この 3 つの辺で成す骨材に対して、最もふるいが通過しやすい面は「中辺 × 短辺」で成す平面 (図 7 面 C) であり、この平面がふるいに留まる最小サイズが骨材の粒度として定義される。

従ってこの「中辺 × 短辺」で成す平面を骨材領域として画像で捉えることが出来れば従来のふるい分け実測値と相違ない結果が得られると考えられるが、実際には撮影する骨材姿勢によっては「長辺」を捉えることも考えられる。

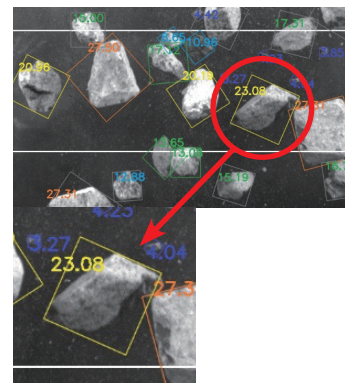


図5 撮影した画像

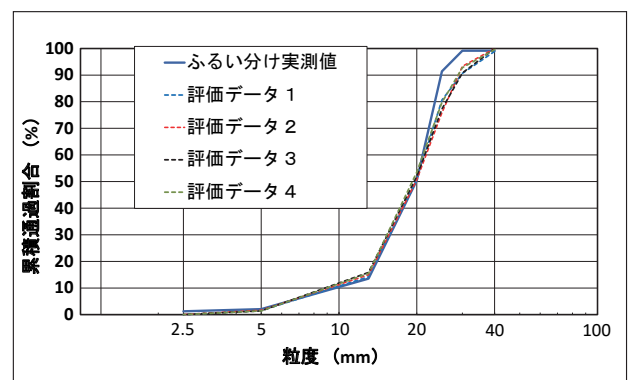


図6 粒度分布図 (測定精度の検証)

またこの時「長辺」で成す平面（図7 面A、面B）を捉えると、実際のふるい目（図7 面Cの外接正方形）よりも大きめのふるい目として認識し、結果としてふるい分け実測値よりも粗い粒度であると認識されることも充分にあり得る。特に粒度の粗い区分は長辺と他辺との差分（mm）が大きい為、従来の手ふるいの結果に対してより粗い演算結果となったと考えられる。

これらの原因によって20 mmよりも大きいサイズにおいては評価データの方がふるい分け実測値よりも粗いと認識したと考えられた。そこでこの現象に対して統計的な手法によって補正処理を行い、その測定精度向上に関して検証を行った。

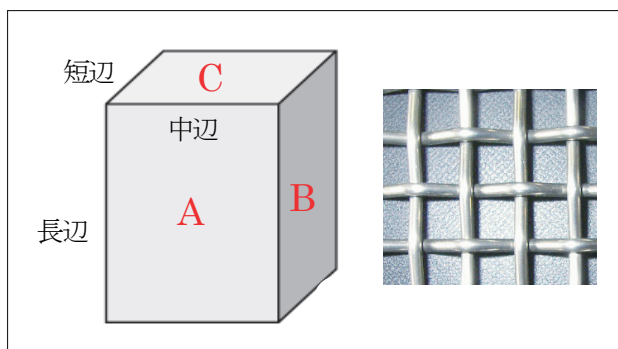


図7 骨材の長辺・中辺・短辺とふるい目の関係

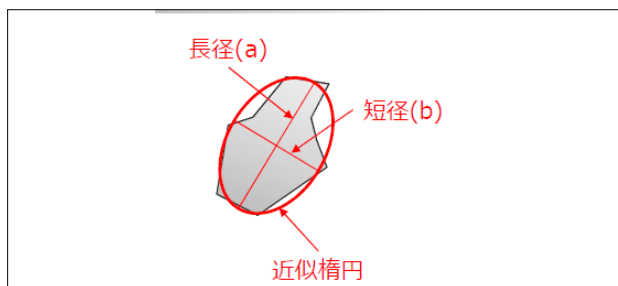


図8 骨材と近似楕円（長径×短径）

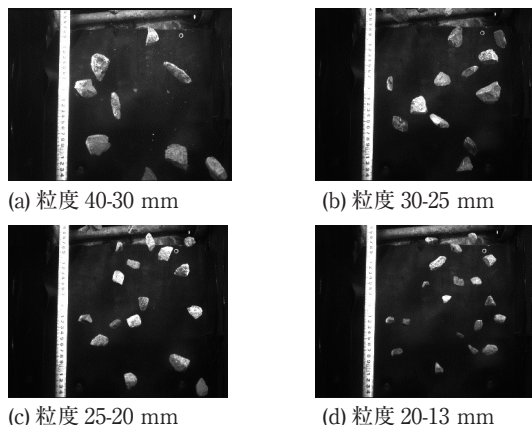


図9 データ群生成のための骨材撮影（粒度区分が既知の骨材を撮影）

### 2.2.3 マハラノビス距離による補正

マハラノビス距離とは、ばらつきをもったデータ群に対して任意の点がどの程度離れているかを表す距離のことである。本技術では「予め粒度区分が分かっているデータ群」に対して「粒度区分が未知の骨材」がどの程度距離が近いのかを演算することによって補正処理を行うことを試みた。

具体的な手法としては、骨材を近似楕円として模式的に表し、楕円における長径と短径の2軸グラフとして骨材形状を表した（図8参照）。その上で予め粒度区分が分かっている骨材を事前に撮影しておき、各粒度区分における長径・短径のデータ群を2軸グラフに表す。

次に測定対象となる「粒度区分が未知の骨材」を同じグラフに表し、既知の粒度区分のデータ群とのマハラノビス距離を求め、そのマハラノビス距離の近さに応じて粒度区分が未知の骨材がどの粒度区分に属するのかを統計的に補正処理を行った。

図9に粒度区分が既知の骨材を撮影した様子（データ群の生成）、図10にマハラノビス距離による補正処理のイメージを示す。またマハラノビス距離による補正処理の精度検証結果について図11に示す。

補正処理を行う前（図11青線）に比べてマハラノビス距離による補正処理を行った後（図11赤線）の方が、従来のふるい分け実測値（図11黒点線）により近い値となった。

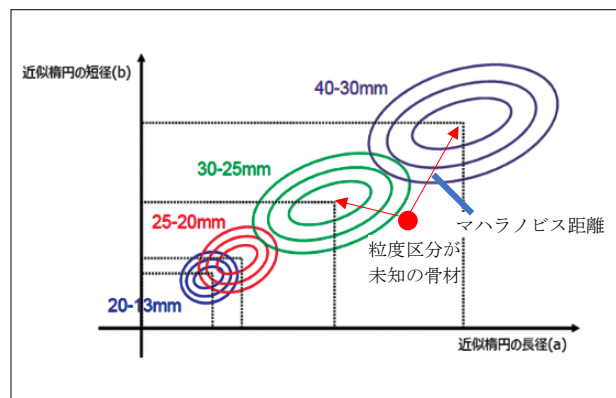


図10 マハラノビス距離による補正処理

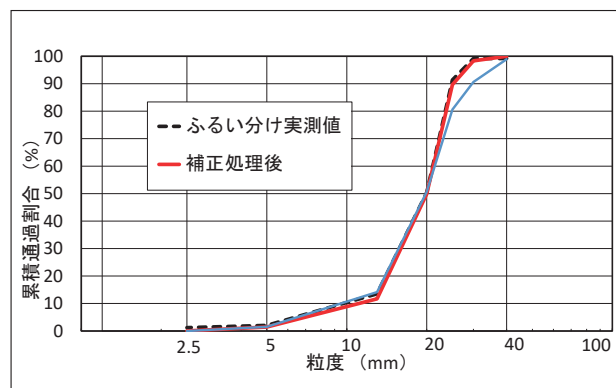


図11 マハラノビス距離補正による粒度分布図

これらの結果により、画像処理技術による粒度分布測定が技術的に実現可能であることが確認された。この工場内での試験結果を踏まえて、次のステップとして碎石場でのフィールドテストを行った。

### 3 碎石場でのフィールドテスト

フィールドテストは近畿地区 A 社の碎石場で試験を行った。試験は当社の新型コンクラッシャ（プレージコン）で破碎したサンプルを対象にフィールドテストを行った。

#### 3.1 縮分撮影装置について

当社での実証試験は 15 t/h で搬送される骨材を撮影したが、フィールドテストでは 300 t/h 以上で搬送される骨材が撮影対象となる。これら多量の骨材を撮影する場合、骨材同士の重なりによって骨材領域が正しく認識されなかったり、また表層の骨材に隠れた裏側の骨材を視認することが不可能となる。

そこでフィールドテストにおいては「縮分撮影装置」を開発し骨材の一部を偏析なく抜き取り、撮影する改良を加えた。縮分撮影装置のイメージを図 12、13 に示す。

縮分撮影装置とはコンベヤから落鉱する骨材に対して

穴の開いた「スリット板」を設置し、穴を通過した骨材のみをカメラ側に落鉱させる装置である。このカメラ側に落鉱した骨材のみ撮影することによって、コンベヤで搬送される骨材の一部のみを偏析なく撮影することが可能となる。

またこのスリット板を支持している軸端には電動シリンダを締結し、スリット板を可動式にしている。このようにすることで非撮影時にスリット板と骨材の衝突を回避し、スリット板の摩耗を低減することを目的としている。

縮分撮影装置を設置する前と設置した後の比較画像を図 14 に示す。

左側の画像が縮分撮影装置設置前の画像であり、骨材が非常に密集しているのが分かる。一方右側の画像が縮分撮影装置設置後の画像であり骨材が分散し撮影されている。これらの改良を踏まえて、碎石場環境における粒度分布測定の結果を図 15 に示す。

「ふるい分け実測値」はコンベヤ上のサンプルを回収し、社内での実証試験と同じく JIS A 1102 (2014) にて測定したデータである。この「ふるい分け実測値」(黒点線) に対して画像処理で得られた粒度分布を赤線で示す。フィールドテストの結果、従来の測定方法である「ふるい分け実測値」と近い粒度のデータが得られた。

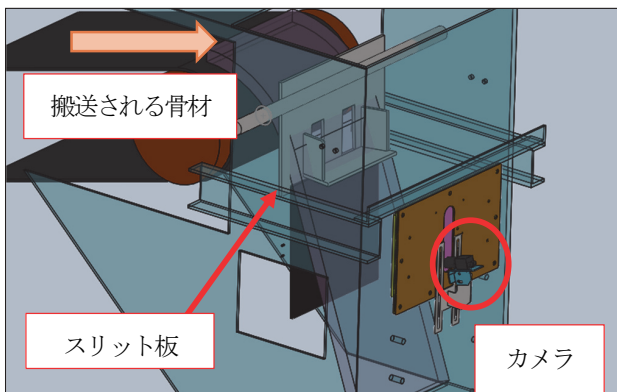


図 12 縮分撮影装置 外観イメージ

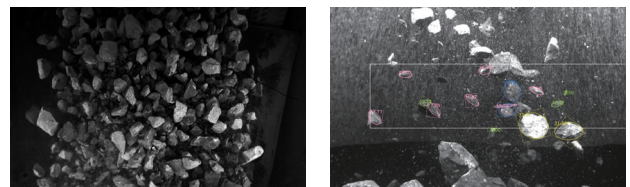


図 14 縮分撮影装置 設置前後の比較 (左：設置前の画像、右：設置後の画像)

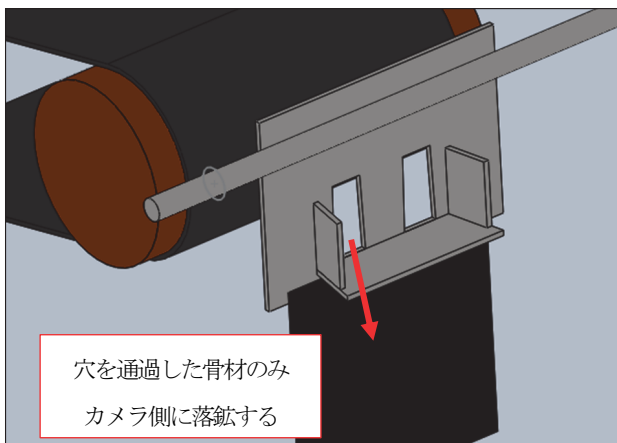


図 13 縮分撮影装置 内部イメージ

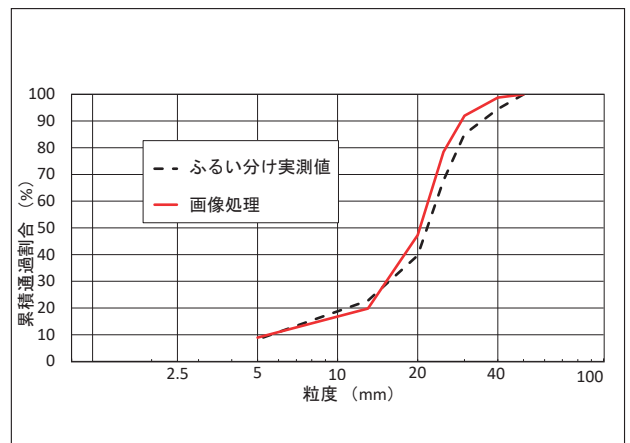


図 15 フィールドテストでの粒度分布測定精度検証

#### 4 本技術を活用した制御技術の検討

本技術を商用的に活用する方法としては幾つか考えられるが、現在はプレージコーンの制御に活用することを検討している。当社の主力製品であるプレージコーンは環状油圧シリンダによってバウルライナを上下させ、運転中の破碎間隙を調整することを可能としている(図16参照)。

破碎間隙の調整を制御しているPLCと画像処理で得られた粒度分布データを連携させる事によって、例えば所望する粒度よりも粗い産物が生産された場合、破碎間隙を狭めることによって所望する粒度分布に近づけることが可能となる。現在はフィールドテストにおいて本制御方法が実現可能であるかの検証を行っている。

コーンクラッシャ制御技術活用における構成機器を図17に示す。

#### 5 まとめ

当社での実証試験では、画像処理技術の一つであるインスタンスセグメンテーションを利用することで骨材領域を認識し、粒度分布を測定することが可能である事が確認できた。またその測定精度については、マハラノビス距離による補正処理を行うことで従来から行っているJIS A 1102 (2014) と同等の測定精度であった。

碎石場環境におけるフィールドテストでは、多量に搬送される骨材を偏りなく抜き取り撮影する「縮分撮影装置」を開発し撮影試験を行った。測定精度としては従来から行っているJIS A 1102 (2014) と同等の測定精度であった。

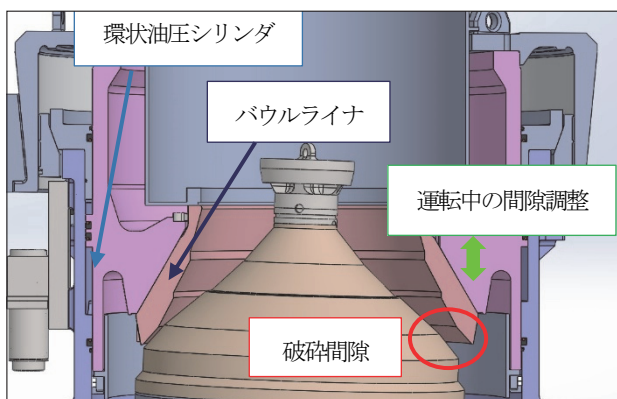


図16 コーンクラッシャ断面構造

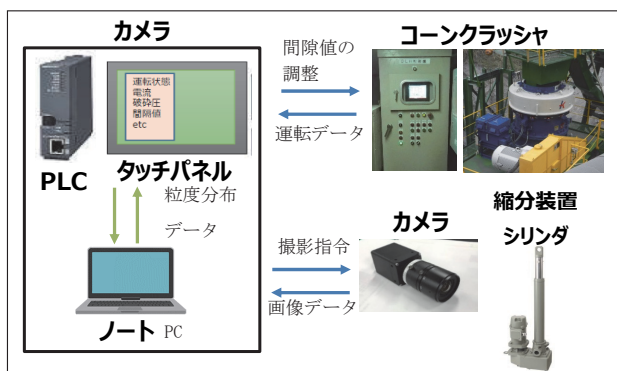


図17 コーンクラッシャ制御技術活用における構成機器

#### 6 おわりに

本技術の活用方法の一つとして、プレージコーンの間隙値制御への適用が挙げられる。現在はプレージコーンの制御装置であるPLCとの連携を行い、フィールドテストでの技術的検証を行っている。

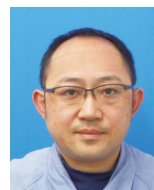
執筆者：

横谷建一郎

技術士(機械部門)

2004年入社

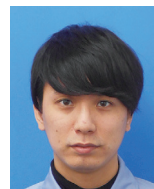
破碎機、浚渫ポンプの設計・開発に従事



久保田聡志

2020年入社

破碎機、搬送機の設計・開発に従事



永井研志

2014年入社

電気計装の設計・開発に従事



林 謙太

2022年入社

電気計装の設計・開発に従事

