

# 環境負荷低減に向けた ビーズミルによる粉砕操作

アシザワ・ファインテック(株) Tamura Takahiro 田村 崇弘

開発課  
〒275-8572 千葉県習志野市西浜 1-4-2 ☎047-453-8113

## はじめに

粉体がつ流動性や充填性、不連続面が増加することで生じる界面現象の顕在化、固体の活性化による反応性向上などはいずれも工業的利用価値が高く、粉体を得るための粉砕操作はさまざまな産業の分野で重要な役割を担っている。

粉体の生成は小さな粒子を成長させるビルドアップと、大きな粒子から小さな粒子を生成するブレイクダウンに大別され、ビルドアップは主に気相中、液相中での化学合成によって、ブレイクダウンは、粉砕機などを用いた機械的粉砕法により実現される。特に粉砕機を用いた機械的粉砕法は粒子生成の量産化が容易となるメリットがあり、多くの産業分野で活用されている。さらに近年では利用される粉体の粒子径はミクロンからナノサイズと従来に比べ微細化されており、これらを得るための粉砕操作が不可欠である。

一方で、粉砕機を用いた粉砕では、投入したエネルギーのほとんどは機械的および熱的に損失してしまい、粉砕に使用される正味のエネルギーは高くても全体の数%程度であると考えられている<sup>1), 2)</sup>。加えて、砕料が微細化することで、強度の増加<sup>3)</sup>、媒体の接触確率の低下、クッシュニング効果などが生じ、粉砕の進行にはより多くのエネルギーが必要となる。したがって、環境負荷低減のため省エネルギー化が求められる今日にとって、粉砕に要するエネルギーの削減は重要な課題であるとい

える。そこで、本稿では粒子の超微細化に適した粉砕機であるビーズミルについて、粉砕操作における特徴をエネルギー効率改善の観点から紹介する。

## ビーズミルの特徴

ビーズミルはビーズと呼ばれる5 mm以下の小さな媒体を用いた媒体攪拌型粉砕機であり、ベッセル(円筒型の部材)とアジテータ(攪拌部材)から構成されている。アジテータを備えたベッセル内部を粉砕室とし、ここに投入されたビーズがアジテータの回転により運動を与えられ、供給された砕料と接触する。この間に生じる衝撃、圧縮、摩擦などの複合作用により多段的な粉砕が進行し、出口付近に設けられた分離機構によりビーズと分離された砕成物(粉砕された砕料)が得られる原理となっている。ビーズミルは構造上、粉砕室容量に対し高いエネルギーを付与することができ、小さなビーズにもエネルギーを与えられる特徴を有するため、他の粉砕機に比べて高頻度、高エネルギー密度のもとでの粉砕が可能である。さらに、ビーズミルは、小さなビーズを使用することで凝集体と呼ばれる一次粒子の集合体を一次粒子の破壊をとまわずにほぐす分散という操作を行うための手段としても用いられている。

一般に粉砕操作は気相中で行う乾式粉砕と液相中で行う湿式粉砕とに大別され、ここから気相中で用いるビーズミルを乾式ビーズミル、液相中で

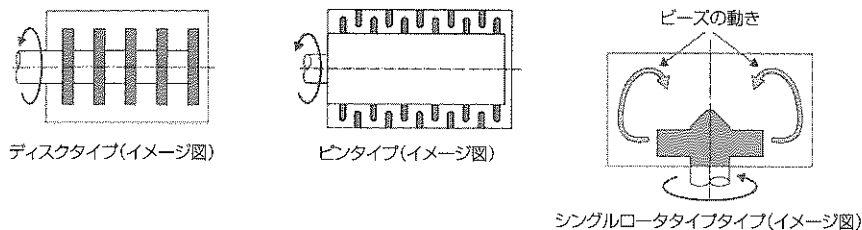


図1 アジテータ形状概略

用いるビーズミルを湿式ビーズミルと呼ぶ。

乾式ビーズミルは $\phi 1.5 \sim 5.0$  mmのビーズを使用のもと、アジテータ周速 $3 \sim 6$  m/s、ビーズ充填率を粉碎室容量の $50 \sim 80$  vol%の範囲で設定した運転が一般的である。さらに乾式粉碎では、微細化の促進や粉碎室内への粉体の固着抑制を目的として、粉碎助剤と呼ばれる添加剤を必要に応じて少量用いる。粉碎助剤は大きく分類して、気体、液体、固体があるが、液体や固体は粉碎時に粉碎室内で気体に変化した状態で作用する物質もある。さらに現在、粉碎助剤として確認されている物質は多種多様に存在するが、これらは界面活性剤系と化学的に不活性な固体助剤とに大別されている<sup>4)</sup>。

湿式ビーズミルでは、砕料と溶媒を混合したスラリーを粉碎室内へ供給することでスラリー中の砕料が粉碎される。この時、使用ビーズ $\phi 0.03 \sim 2.0$  mmもとで、アジテータ周速 $6 \sim 15$  m/s、ビーズ充填率を粉碎室容量の $70 \sim 90$  vol%の範囲で設定した運転が一般的である。乾式粉碎で粉碎助剤が用いられるのに対し、湿式粉碎では、砕成物の凝集抑制と溶媒中での分散安定性を主な目的として、分散剤が使用される。

### 粉碎室形状

ビーズミルの粉碎室はベッセル、アジテータ、分離機構から構成され、特にアジテータ形状が粉碎速度や粉碎のエネルギー効率に与える影響は大きい。このため、これまでにさまざまな形状が開発されている<sup>5)</sup>。

アジテータ形状は図1の概略に示すディスクタイプ、ピンタイプ、シングルロータタイプに大

別され、それぞれに特徴を有している。ディスクタイプはシャフトといくつかのディスクを組み合わせたシンプルな構造であり、大型化やセラミックス化が比較的容易であるため、汎用性が高い。

ピンタイプは断面が丸または短形のピンが複数取り付けられたアジテータおよびベッセルを有しており、ピンとの間にいくつものせん断域がある。これらピンとピンとの間隔を狭め、粉碎室容量あたりに大きなエネルギーを投入できる構造をアニューラー型と呼び、高硬度な砕料の粉碎や短時間処理に適している。一方でピンタイプのビーズミルは構造が複雑であり、セラミックス化は困難な場合が多い。

シングルロータタイプは粉碎室内の空間を大きくとり、ビーズを粉碎室内全体に循環させる構造のため、流体の流れがビーズに寄与する影響が大きく、粉碎室内にビーズの局所的な偏りが生じにくい。したがって、過剰な応力の発生を好まない砕料の粉碎や再凝集を抑制した分散操作に適した形状である。ビーズミルを用いた粉碎操作において、砕料の性質に適した粉碎室形状の選択は、エネルギー損失を招く要因となる未粉碎の砕料を低減し、過剰なエネルギーが投入されることで生じる再凝集の抑制に有効であり、粉碎のエネルギー効率の改善につながる。

### ビーズミルの運転方式

媒体を用いる粉碎機の運転方式はバッチ方式、パス方式、循環方式に大別される。ビーズミルを用いた粉碎操作における主な運転方式の概要を図2に示す。パス方式は砕料が連続でビーズミル内へ供給され、目標粒子まで粉碎された砕成物を

逐次得られるため、主として碎料を大量に粉碎する場合に用いられる。さらに、パス方式における粉碎操作にはビーズミル内の碎料滞留時間を碎料供給量により調整し、1パスで目標の粒子径に到達させる1パス方式(図2-a)やパス回数を調整し、目標粒子径に到達させる多重パス方式(図2-b)、多連パス方式(図2-c)がある。一方で、循環方式(図2-d)は主に湿式ビーズミルで用いられる運転方式であり、スラリー化した碎料をビーズミル、ポンプ、ホールディングタンクから形成される循環系で粉碎するため、粉碎時間を長く設けることができる。このため、粉碎時間を要する難粉碎性の碎料や超微細化を目的とした粉碎に用いられる。

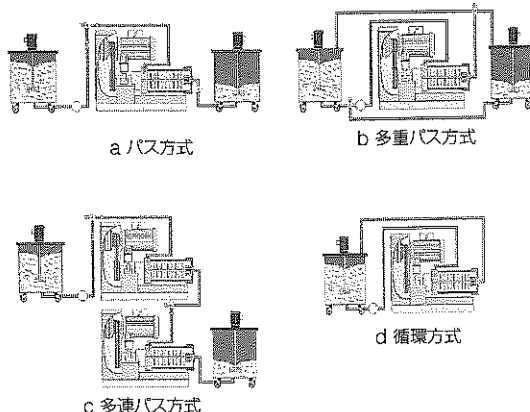


図2 ビーズミル運転方式概略

さらに、各運転方式の特性をあらわす例として、アルミナを粉碎した際の動力原単位と粒子径との関係を図3に示した<sup>5)</sup>。ここで、動力原単位は碎料単位質量あたりに加えられた動量をあらわし、 $D_{95}$ は体積基準の粒子径積算分布95%を与える粒子径で、碎成物に含まれる粗大側の粒子推移過程をみる際に用いられる。図3に示した動力原単位と $D_{95}$ との関係から、同じビーズミルを使用した粉碎操作であっても、運転方式によって粗大側粒子の微細化に必要なエネルギーが異なることがわかる。ここから、碎成物の粗大粒子が製品品質に大きく影響を与える産業の分野において、運転方式の選択はエネルギー効率の改善に向けた重要な要素であるといえる。

### 小径ビーズの効果

ビーズミルを用いた粉碎操作はビーズ径、ビー

ズ材質、粉碎室形状、粉碎室材質といったビーズミルの機械仕様とアジテータ周速、ビーズ充填率、碎料供給量など、ビーズミルの操作に起因する運転条件との組合せにより実現される。媒体を用いた粉碎では集合粉碎、単粒子破壊の観点から、粉碎媒体が粒子に衝突する確率のわずかな減少で粉碎のエネルギー効率は著しく低下する一方で、媒体を用いた粉碎機においては、粉碎に要する媒体速度は小さくて十分である考えられている<sup>6), 7)</sup>。したがって、ビーズミルを用いた粉碎において小径ビーズを使用することで碎料とビーズの接触頻度を向上させた粉碎は合理的である考えられる。

そこで、図4にパス方式の乾式ビーズミルを用いて1.5 mm、3.0 mm、5.0 mmのビーズを使用し、アジテータ周速を3~6 m/s、ビーズ充填率60~80 vol%の範囲で碎料供給量を変更したケイ砂の粉碎結果を示した。ここで、図中のメディアン径

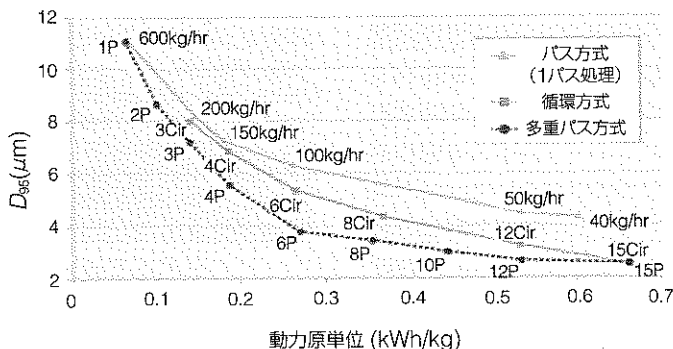


図3 運転方式違いによる動力原単位と $D_{95}$ との関係

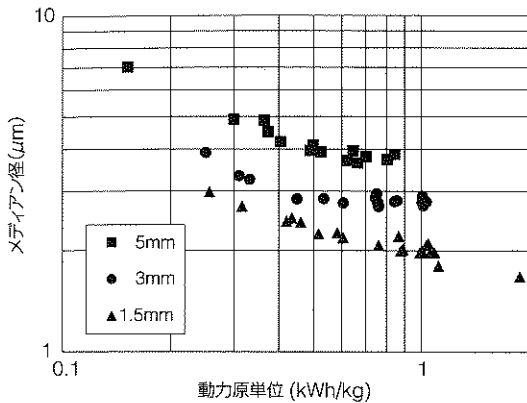


図4 異なるビーズ径を用いた乾式ビーズミルでの粉砕における動力原単位とメディアン径との関係

( $D_{50}$ )は体積基準の粒子径積算分布50%を与える代表粒子径である。同様に図5には循環方式の湿式ビーズミルを用いて0.3 mm、0.5 mm、1.0 mmを使用し、アジテータ周速、ビーズ充填率一定における重質炭酸カルシウムの粉砕結果を示した。図4、図5より、乾式粉砕、湿式粉砕ともに小さなビーズを用いることで、より少ないエネルギーで粉砕が進行していることが確認され、ビーズミルにおいて小径ビーズの使用は粉砕のエネルギー効率を高めるために有効であることがわかる。

さらに乾式ビーズミルを用いた粉砕操作において小径ビーズを使用し微細化することは、従来、湿式粉砕が必要な領域の粒子径に乾式粉砕で到達可能な期待がもてる。これは工業的観点においては乾燥工程の省略による消費エネルギー削減につながると思われる。

## おわりに

ビーズミルを用いた粉砕操作における粉砕のエネルギー効率改善に向けて、ここでは、粉砕室形状や運転方式と粉砕のエネルギー効率との関係および小径ビーズの効果について紹介した。ビーズミルを用いた粉砕操作では碎料の性質や粉砕の目的に適した粉砕室形状や運転方式を選択し、粉砕のエネルギー効率改善につなげることが重要である。一方、ビーズミルに小径ビーズを用いることで乾式、湿式ともに粉砕のエネルギー効率が向上

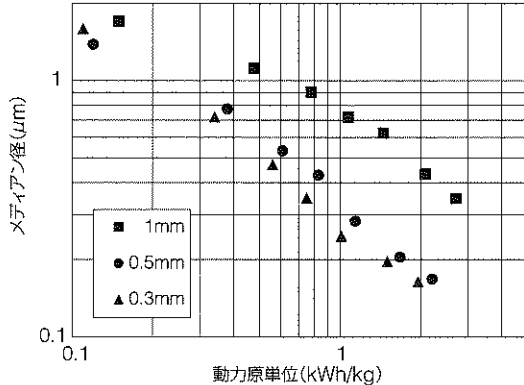


図5 異なるビーズ径を用いた湿式ビーズミルでの粉砕における動力原単位とメディアン径との関係

する。加えて、従来は湿式粉砕が必要であった領域の粒子径に乾式粉砕で到達することで、乾燥工程の省略によるエネルギー削減が期待される。

近年の産業において超微細化された碎成物の生成は必要不可欠である。一方で、脱炭素社会が望まれる今日とって、ビーズミルを用いた粉砕操作における粉砕のエネルギー効率改善への継続的な取り組みは重要であり、今後ますます大きな役割を担うと予想される。

## 参考文献

- 1) 日本粉体工業技術協会 粉砕分科会：省エネルギー型粉砕機～企業の取り組み、経験的アプローチから～、粉体技術、Vol.5、(2013)、pp.993～1001
- 2) 神保元二：粉砕操作とエネルギー、化学工学、Vol.35、(1971)、pp.286～289
- 3) 神田良照、八嶋三郎、下飯坂潤三：単一球形粒子の破碎における寸法効果とエネルギー法則、日本工業会誌、Vol.85、(1969)、pp.987～992
- 4) 奥山喜久夫、神田良照、斎藤文良、椿淳一郎：粉体の生成、(2005)、p.45、日刊工業新聞社
- 5) 中山勉：超微粒子・ナノ粒子をつくるビーズミル、(2011)、p.81、森北出版
- 6) <https://www.ashizawa.com/column/13.html>
- 7) 田中達夫：媒体を用いる超微粉砕機の最適媒体径の決定について、粉体工学会誌、Vol.31、(1994)、pp.25～31
- 8) 神田良照、八嶋三郎：超微粉砕に対する破壊力学と単粒子破壊からの一考察、東北大学選鉱製錬研究所彙報、Vol.45、(1989)、pp.30～38