横型ビーズミルによる炭酸カルシウムの粉碎性能の評価

石井利博^{*,†}・橋本和明^{**}

^{*}アシザワ・ファインテック(株) 千葉県習志野市茜浜1-4-2 (〒275-8572)

^{**}千葉工業大学 工学部 生命環境科学科 千葉県習志野市津田沼2-17-1 (〒275-0016)

[†]Corresponding Author, E-mail: ishii@ashizawa.com

(2011年7月5日受付；2011年11月9日受理)

要 旨

製紙業界における紙塗工用の重質炭酸カルシウムの湿式粉碎においては、微細化が必要になっているため、エネルギー消費量が格段に大きくなっている。このため、省エネルギーを主体にした動力原単位の低減が強く望まれている。本研究では、ビーズミルを使用した重質炭酸カルシウムの粉碎工程の効率化を行い、動力原単位の低減、および粉碎装置の小型化を目的とした実験を行った。この結果、ビーズミルで炭酸カルシウムの粉碎を行う場合、横型ビーズミルを使用し、最適なビーズ径であれば、単位時間当たりに投入する動力をより大きくすることで動力原単位の低下が可能となり、処理量も向上することがわかった。単位時間当たりの投入動力をより大きくするためには、粉碎室容量当たりに投入することができるエネルギーを大きくすることが必要となり、より大きなモーターが必要となるが、動力制御を行うことで、モーターを小さくすることができ、装置の小型化も可能になることがわかった。

キーワード：動力原単位、投入動力、湿式粉碎プロセス、ビーズミル、重質炭酸カルシウム

1. 緒 言

製紙原料（紙料）には、木材パルプのほかにクレーやタルクなどの無機粉末（白色度、不透明性、印刷性の向上のため）、サイズ剤（インキ、水の浸透性の抑制）、紙増強剤（強度の改善）、歩留まり向上剤（金網からの原料流失制御）、染料、顔料などがある。

紙の印刷特性を向上させるためには平面を平滑にする顔料コーティングを行う。ここで用いる塗工液（コーティングカラー）は、顔料に水を加えてスラリーを作り、さらに接着剤や補助薬品を加えたものである。固形分中の質量分率70～80 mass %は白色顔料の粉末で、おもにカオリンや炭酸カルシウムが使われる¹⁾。とくに炭酸カルシウムの白色度はカオリンのそれに比べて高いので、炭酸カルシウムは白色度の高い塗被紙を製造するうえで欠かすことのできない顔料である。

炭酸カルシウムは代表的な白色無機フィラーの一つで、石灰石を原料に製造される。日本では高品位の石灰石を多く産出することから、古くから石灰工業が発達している。炭酸カルシウムには石灰石を機械的に粉碎した天然炭酸カルシウム（重質炭酸カルシウム）と、石灰石を原料に化学合成した合成炭酸カルシウム（軽質炭酸カルシウム）がある²⁾。

重質炭酸カルシウムは軽質炭酸カルシウムと比較して非常に安価であり、流動性が良いため、高濃度での塗工が可能であり、乾燥に要するエネルギーを節約できるので、塗工用顔料の用途で使用量が増加傾向にある。塗工液中の配合率を高くすることで白色度や不透明度は向上するが白色光沢度は低下する。この白色光沢度を向上させるためには湿式粉碎によって微粒子化する必要がある。しかし、微粒子化するためには、粉碎時間が長くなり、さらには、分散剤の添加量が増えることから製造

コストが高くなるという問題が発生する。

微粉の重質炭酸カルシウムは、一般に粗品質石灰石を回転衝撃式粉碎機で微粉碎し、空気分級機で分級する乾式法と、フレットミルあるいは、振動ミルなど水系で微粉碎し、分級精製する湿式法がある³⁾。現在、製紙業界における重質炭酸カルシウムの湿式粉碎には、主力として堅型ビーズミルが使用されているが、省スペース化やメンテナンス性の観点から横型ビーズミルの検討が行われている⁴⁾。さらには、製紙業界はエネルギー消費量が格段に大きく、大量電力消費業界でもあるので、地球環境保全の面から、環境への影響力を考慮し、省エネルギーを主体にした動力原単位の低減が強く望まれているのも現状である。そのため、粉碎工程の効率化による電力消費量の削減が強く求められている。

そこで本研究では、重質炭酸カルシウムの粉碎工程での効率化による動力原単位の低減および粉碎装置の小型化を目的として、横型ビーズミルを用いて実験したので報告する。

2. 実験方法

実験試料として、重質炭酸カルシウム（SS#80日東粉化工業、密度2700 kg/m³）を固形分濃度75 mass %、高分子系分散剤（アロンT50、東亜合成）を粉体に対し固形分濃度0.5 mass %とを水にて調整し、スラリー化したものを用いた。粒子径の測定には「マイクロトラックMT3300」（日機装）を用いた。実験に使用した重質炭酸カルシウムの粒子径を測定したところ、メディアン径X_{0.5}は7.51 μmであった。

実験装置は、横型の湿式ビーズミルである「大流量循環運転専用スターミルLMZ2」（アシザワ・ファインテック）を用いた。実験装置の構造を模式的にあらわしたFig. 1に示す。

ビーズミルは、メディアであるビーズが充填されたベッセル

と呼ばれる円筒容器内にスラリーをポンプで送液する。ベッセル内では攪拌部材であるアジテータを高速回転させ、その強力な力でビーズを攪拌し、このビーズがスラリー中の粒子を捕捉し、ビーズによる摩擦、衝突、せん断力などでこの粒子を微細化する。微細化された粒子を含むスラリーは、ベッセルの出口でセパレータによってビーズと分離され、スラリーのみが吐出される仕組みの装置である。

ビーズミルの構造の違いによる粉碎性能の比較として、「スターミルLMZ2」と粉碎機構が異なり、従来型と同じ粉碎室構造の「スターミルLME4」（アシザワ・ファインテック）をパス運転で使用した。

「スターミルLMZ2」での運転条件の違いによる粉碎性能の調査には、粉碎メディアであるビーズに、ビーズ径0.5 mmのジルコニア（イットリア部分安定化ジルコニア）球を用いた。また、ビーズ径の違いによる粉碎性能の比較のため、ビーズ径が、0.8 または0.3 mmのビーズも使用した。アジテータの周速は、10, 12または14 m/sとし、ベッセル内に充填するビーズの見掛け充填率は、80, 85または90 vol %とした。スラリーのビーズミルへの供給量は、約230, 450または680 kg/hとした。実験条件をTable 1に示す。

ビーズミルの運転方法としては循環方式で実施した。循環方

Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment.

Table 1 Experimental conditions.

Grinding chamber volume / dm ³	1.65 (LMZ2)
Density (materials) of bead / $\times 10^{-3}$ kg/m ³	6.00 (Zirconia)
Bead diameter / mm	0.3, 0.5, 0.8
Filling rate of beads / vol%	80, 85, 90
Agitator peripheral speed / m/s	10, 12, 14
Circulating flow rate / kg/h (L/min)	ca. 230 (2.0), 450 (4.0), 680 (6.0)
Solids concentration of slurry / mass%	75

Fig. 2 Schematic diagram of experiment equipment set-up.

式はタンクで攪拌されたスラリーをポンプによりビーズの充填された粉碎室に圧送し、粉碎室より吐出したスラリーを同一タンクに戻し循環する方式である。また、スラリーの温度上昇を防ぐためにプレート式熱交換器を使用した。フロー図をFig. 2に示す。

実験で得た粉碎後の重質炭酸カルシウムの粒子径測定用のサンプルは、スラリー1 gを50 gの精製水に添加し、40 kHz, 20 Wの超音波バスで1 min超音波を照射しながら攪拌して作製した。また、サンプリングと同時に消費電力量を測定し、動力原単位を算出した。

紙塗工用には、平均粒子径1 μm 以下の均一な炭酸カルシウムが使用される^{5,6)}ことから、本実験では、重質炭酸カルシウムの粉碎後の目標メディアン径 $X_{0.5}$ を1 μm とした。

3. 実験結果および考察

3.1 粉碎室構造の違いによる粉碎効率の比較

粉碎室構造の違いとビーズミルの運転方法の違いが動力原単位と粉碎効率とに与える影響を調査した。今回の実験で使った「スターミルLMZ」は、ピンタイプと呼ばれる粉碎室構造となっているが、一般的に重質炭酸カルシウムの粉碎に使用されている従来型のビーズミルはディスクタイプと呼ばれる粉碎室構造となっている。そこで、従来型と同じ粉碎室構造をもつパス運転専用ビーズミル「スターミルLME」を使用し実験した。アジテータ形状の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ と動力原単位の間関係をFig. 3に示す。ここでの実験条件は、ビーズにビーズ径0.5 mmのジルコニア球を用い、ビーズの見掛け充填率を80 vol %とし、アジテータの周速を12 m/sとした。運転方法は、「スターミルLME」はパス運転、「スターミルLMZ」は循環運転で行った。

「スターミルLME」を用いた実験では、粉碎処理中にスラリーの流動性がなくなり、1 μm までの粉碎した結果は得られなかった。そのため、メディアン径 $X_{0.5}$ が約1.2 μm における動力原単位の比較を行った。このときの動力原単位は、「スターミルLME」が0.285 kWh/kgであった。また、メディアン径 $X_{0.5}$ が約1.2 μm のときの「スターミルLMZ」の動力原単位は、0.193 kWh/kg

Fig. 3 Relationship between median diameter $X_{0.5}$ and specific energy for different agitator shape.

Fig. 4 Relationship between median diameter $X_{0.5}$ and specific energy for grinding media of different size.

Fig. 6 Relationship between median diameter $X_{0.5}$ and specific energy for different operating conditions.

Fig. 5 Relationship between amount of raw materials and median diameter $X_{0.5}$ for grinding media of different size.

Fig. 7 Relationship between amount of raw materials and median diameter $X_{0.5}$ for different operating conditions.

であった。この結果から、ディスク形状とピン形状とを比較すると、ピンタイプのビーズミルを使用することで、ディスクタイプのビーズミルより、動力原単位を約3割削減できることがわかった。

3.2 運転条件の違いによる粉砕効率の比較

(1) ビーズ径の効果

ビーズ径の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ の変化と動力原単位との関係を調べるために、動力原単位の少ない「スターミルLMZ」を用いて実験を行った。実験条件として、ビーズ径を0.3, 0.5または0.8 mmとし、ビーズの充填率を80 vol %, アジテータの周速を14 m/s, スラリーの供給量を680 kg/hとした。ビーズ径の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ と動力原単位との関係をFig. 4に示す。また、ビーズ径の違いによる処理量とメディアン径 $X_{0.5}$ の関係をFig. 5に示す。Fig. 4からビーズ径の違いによる動力原単位を比較すると、ビーズ径0.3 mmと0.5 mmとはほぼ同等の動力原単位であり、それらと比較し、0.8 mmの動力原単位は大きくなることがわかった。Fig. 5から、メディアン径 $X_{0.5}$ が

同じ場合、スラリーの処理量は、ビーズ径が $0.5 > 0.3 > 0.8$ mmの順に大きくなることがわかった。この結果から、本実験に用いた重質炭酸カルシウムの初期粒子径では、ビーズ径0.5 mmのビーズを使用した場合に動力原単位は0.8 mmビーズより小さく0.3 mmと同等となり、さらには、メディアン径 $X_{0.5}$ が同じ場合、スラリーの処理量がほかのビーズ径よりも大きかったため、粉砕効率が良かったのではないかと考察した。

(2) 運転条件の効果

運転条件の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ の変化と動力原単位との関係を調べるために、「スターミルLMZ」を用いて実験を行った結果をFig. 6に示す。また、運転条件の違いによる処理量とメディアン径 $X_{0.5}$ の関係をFig. 7に示す。

(3) スラリー供給量の影響

ビーズ径0.5 mmのビーズを使用し、ビーズの充填率を80 vol %, アジテータの周速を14 m/sとし、スラリー供給量を230, 450または、680 kg/hに変化させ実験した。Fig. 6から、スラリー供給量を230, 450または、680 kg/hと変化させても動力原単位はほ

Fig. 8 Relationship between median diameter $X_{0.5}$ and specific energy for different number of pegs.

Fig. 9 Relationship between amount of raw materials and median diameter $X_{0.5}$ for different number of pegs.

ば同等になることがわかった。Fig. 7から、供給量が多いほうがスラリーの処理量が大きくなることがわかった。これらの結果より、大流量で循環運転を行うビーズミルにおいては、高いスラリー供給量のほうが粉砕効率が良くなることがわかった。

(4) 周速の影響

ビーズ径0.5 mmのビーズを使用し、ビーズの充填率を80 vol %とし、スラリー供給量を680 kg/hとした条件で、アジテータの周速を10, 12または、14 m/sに変化させ実験した。Fig. 6から、動力原単位はアジテータの周速の影響をほとんど受けないことがわかった。この結果から、 $X_{0.5}$ は動力原単位に依存すると考えられる。Fig. 7から、アジテータの周速が速いほうが処理量は多くなることがわかった。

(5) ビーズ充填率の影響

ビーズ径0.5 mmのビーズを使用し、アジテータの周速を14 m/s、スラリー供給量を680 kg/hとし、ビーズの充填率を80または、85 vol %に変化させ実験した。ビーズ充填率が90 vol %のときはモーターが過負荷になり実験することができなかった。よって結果は、80および85 vol %の場合とした。Fig. 6から、動力原単位はビーズ充填率の影響をほとんど受けないことがわかった。アジテータの周速と同様にメディアン径 $X_{0.5}$ は動力原単位に依存すると考えられる。また、Fig. 7から、処理量はビーズ充填率が高いほうが大きくなることがわかった。

以上の結果から、「スターミルLMZ」での高濃度の重質炭酸カルシウムの粉砕においては、アジテータの周速が速く、ビーズ充填率が高い条件において、運転時間が短くなり、粉砕効率は向上することがわかった。

このことから、ベッセル内の粉砕室におけるエネルギー密度が粉砕効率に関係していると考えられるので、粉砕効率を向上させるためには、単位時間当たりの投入動力が高くなる運転条件を設定する必要があると考えられる。よって、さらに粉砕効率を向上させるためには、高エネルギー密度を投入することができるビーズミルの構造を検討することも必要である。

3.3 ビンの本数の違いによる粉砕効率の比較

高エネルギー密度を投入することができるアジテータ形状として、ピンの本数を増やした場合の粉砕効率を調査した。「スターミルLMZ」は、アジテータに4段×3列の12本、ベッセル側に3段×3列の9本のピンが設置されているが、実験に用いたビーズミル (TEST 1) には、アジテータに6段×3列の18本、ベッセル側に5段×3列の15本のピンを設置した。これらのビーズミルを使用して、ビーズ径0.5 mmのビーズを使用し、アジテータの周速を14 m/s、ビーズ充填率を80 vol %, スラリー供給量を680 kg/hとした場合のピンの本数の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ と動力原単位との関係をFig. 8, 処理量とメディアン径 $X_{0.5}$ との関係をFig. 9に示す。Fig. 8から、動力原単位はピンの本数に影響されないことがわかる。Fig. 9から、ピンの本数が多いほうがわずかであるが処理量は多くなることがわかった。

3.4 スクリーンの設置位置による粉砕効率の比較

スクリーンの設置位置を変えることで、ベッセル内のスラリーの流れとビーズの動きが変化すると考えられるため、スクリーンの設置位置を変えて、粉砕効率と動力原単位の違いを調べた。スクリーンの設置位置は、スラリー入口側 (TEST 2) Fig. 10 (a), 中央 (TEST 3) Fig. 10 (b), 出口側 (TEST 4) Fig. 10 (c) とした。スクリーンの設置位置の違いによるメディアン径 $X_{0.5}$ と動力原単位の関係をFig. 11, 処理量とメディアン径 $X_{0.5}$ の関係をFig. 12に示す。Fig. 11から、スクリーンが出口側にある構造のビーズミルのTEST 4で、動力原単位が低い結果となった。Fig. 12から、処理量もスクリーンが出口側にあるTEST 4が多い結果となった。スクリーンが出口側 (スラリーの流れ方向) にあることで動力原単位の削減が可能となり処理量が多くなることがわかった。しかし、TEST 4は、供給量が680 kg/hでは過負荷となってしまい実験が続けられなかったため、450 kg/hで行った。供給量を上げるためにはモーター容量をさらに大きくする必要がある。この結果からも、単位時間当たりに投入できる動力が高いほうが、粉砕効率は向上することがわかった。

Fig. 10 Different setting position of the screen.

Fig. 11 Relationship between median diameter $X_{0.5}$ and specific energy for different setting position of the screen. Fig. 13 Relationship between grinding time and median diameter $X_{0.5}$ and power input for different methods of power input control. Fig. 12 Relationship between amount of raw materials and median diameter $X_{0.5}$ for different setting position of the screen.

3.5 動力の制御による粉砕効率の比較

循環方式で運転するビーズミルでは、通常、アジテータの周速を一定に設定する。しかし、この運転方法では粉砕初期に大きな動力を消費し、粉砕が進行するとともに動力が低下することがある。この動力低下が、粉砕効率の低下の原因とも考えられる。そこで、粉砕中に動力低下が起らないようにアジテータの周速を制御し、動力が一定での粉砕効率を調べ、アジテータの周速を一定とした場合の粉砕効率と比較した。実験は、ビーズ径0.5 mmのジルコニアビーズを使用し、ビーズ充填率を80 vol %, スラリー供給量を680 kg/hとし、動力を15 kW一定に制御した場合 (TEST 5) とアジテータの周速を14 m/sに設定した場合 (TEST 6) を行った。運転時間とメディアン径 $X_{0.5}$ および動力の関係をFig. 13に示す。Fig. 13から、アジテータの周速を14 m/sで運転した場合、運転初期に約22 kWになり、その後徐々に動力が減少していくことがわかった。また、アジテータの周速を14 m/sで運転した場合、メディアン径 $X_{0.5}$ が1 μm に到達した時間と動力を15 kW一定の場合、1 μm に到達した時間を比較すると動力15 kW一定のほうが約0.05 h短くなった。処理量は、アジテータの周速を14 m/sに設定した場合には57 kg/h、動力を15 kW一定にした場合には67 kg/hになった。これらの結

果から、動力を制御することで粉碎効率の向上が可能となり、さらには、モーターの容量を小さくできることがわかった。

以上のことから、粉碎室容量あたりに投入することができるエネルギーを大きくすることで、動力原単位を低くすることができ、さらには、処理量を多くすることができるとわかった。さらには、動力を制御することで、粉碎効率の向上とモーター容量を小さくできる可能性があることがわかった。

4. 結 言

本研究において、ビーズミルで炭酸カルシウムの粉碎を行う場合、単位時間あたりに投入できる動力をより多くかけることで動力原単位の低下が可能となり、処理量も向上することがわかった。しかし、動力をかけるためには、粉碎室容量あたりに投入することができるエネルギーを大きくすることが必要となり、より大きなモーターが必要となる。また、動力が高いとスラリーの温度も高くなるため、スラリーの冷却が必要となり、ビーズミルでのスラリーの冷却やホールディングタンクでの冷

却や熱交換器を使用するなどの外部冷却が重要となる。そこで、動力を制御することで、モーターを小さくすることができ、粉碎効率やスラリー温度などもコントロールできると考えている。さらなる粉碎効率の向上や動力原単位を削減するためには、ビーズミルの構造に適した運転方法と対象物にあった運転条件を明確にし、発熱などのスラリーに与える影響も考慮する必要があることがわかった。

文 献

- 1) 門屋 卓：“新しい紙の機能と工学”，p.44，日本材料科学会出版委員会（2001）。
- 2) 筒井昌一，高木浩二：“各種フィラーの構造・スベック・機能【データ集】”，p.165，技術情報協会（2008）。
- 3) 白石工業㈱：炭酸カルシウム，カタログ（2006）。
- 4) 山際 愛，針谷 香，石井利博，石川 剛：色材研究発表会講演要旨集，42（2006）。
- 5) 特開2001-19427。
- 6) 特開2006-327914。

Evaluation of Grinding Characteristics of Calcium Carbonate by Horizontal Bead Mill

Toshihiro ISHII^{*,†} and Kazuaki HASHIMOTO^{**}

^{*}Ashizawa Finetech Ltd., 1-4-2 Akanehama, Narashino, Chiba 275-8572, Japan

^{**}Department of Life and Environmental Sciences, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology,
2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

[†] Corresponding Author, E-mail: ishii@ashizawa.com

(Received July 5, 2011; Accepted November 9, 2011)

Abstract

The wet grinding of heavy calcium carbonate needed to obtain a fine particle size for paper coatings for the paper manufacturing industry requires a high consumption of energy. Therefore a reduction in specific energy is desirable. The purpose of this study was to promote the efficiency of the grinding of heavy calcium carbonate in a bead mill by reducing the specific energy and miniaturizing the grinding equipment. As a result we found that optimizing the size of the beads and using a high power input per unit time led to a reduction in specific energy and an increase in raw material throughput when using a horizontal bead mill. Generally a large motor is necessary to achieve a high power input but control of the power enabled the use of a smaller motor and the miniaturization of the bead mill.

Key-words: Specific energy, Power input, Wet grinding process, Bead mill, Heavy calcium carbonate