タワーミルKD-1型粉碎機による 石灰石の微粉化に関する研究*

森 祐 行¹ 原 剛² 辻 吾 一³

A Study of Pulverization of Limestone by the Tower Mill (Type KD-1)

by Sukeyuki MORI¹, Tsuyoshi HARA¹ and Goichi TSUJI¹

1. Faculty of Engineering, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812

In Japan, limestone is one of the self-sufficient mineral resources, but is used mostly as a raw material for cement production. Other more valuable use for this resource must be found. We thought pulverization of limestone was the most important subject, so we pulverized it by the Tower Mill (Type KD-1) in dry semi-continuous systems, and examined factors affecting the weights or the particle diameters of the pulverized products. In every experiment, we made the weight of steel balls in the pulverizer and the number of revolutions of the screw constant, and varied the weights of limestone and the air flow rates (U_m) in the tower. We found that decreasing the value of U_m decreased the weight and the particle diameter of the pulverized product. We also found that the maximum value of the particle diameter (D_{max}) of the pulverized product was dependent on the value of U_m . We obtained the minimum value of D_{max} , 16 μm , when the weight of limestone was 1.0 kg and the value of U_m was 0.10 m/s.

KEY WORDS: Pulverization, Tower Mill Pulverizer, Limestone

1. はじめに

石灰石は我が国唯一の自給鉱物資源であるが、現在、そのほとんどはセメント用や鉄鋼用等、単価の安い用途に使われている。しかし、鉱床によっては良質の石灰石が得られるので、そのような鉱石は多少手を加えても付加価値を高くして利用することが望ましい。その一方法として、石灰石を微粉砕することによって、製紙用フィルターとしての利用が考えられ、著者らは1980年以来、乾式タワーミル粉碎機を用いた石灰石の微粉砕に関する研究を行っている^{1)~3)}。ところで、タワーミル粉碎機は、ボールミル等他の粉碎機に比べ処理量が多く、より微粉砕が可能であるなどすぐれた粉碎機であるが、そのメカニズムはいまだはっきりとは解明されていない。そこで、タワーミル粉碎機のメカニズムを明らかにするために、今回新しく開発された乾式タワーミルKD-1型粉碎機を用いて、タワー内を流れる空気の流れと試料の重量を変化させて石灰石の微粉砕実験を行い、粉砕産物の重量と粒子径に与える要因を調べた。

2. 実験装置

乾式タワーミルKD-1型粉碎機(クボタタワーミル(株)製)の模式図を図1に示す。タワーミルは、タワー①(内径255mm、高さ1,700mm)内でボールを用いて試料を摩砕する堅型の攪拌ミルである。タワー上部の駆動装置③(1.5kW、住友重機械工業

(株)製)によりスクリー②(外径142mm、羽根部分の高さ1,130mm、羽根の厚さ14mm、ピッチ75.4mm)を回転(85rpm)させながら、タワー内に粉碎媒体(スチールボール、直径20mm)を充填する。次いで、試料を給鉱口⑧から投入すると、試料はボールと試料間の相互摩擦作用によって碎かれる。碎かれた産物は、送風機⑤(西村電機(株)製)からスクリーの軸となっているパイプ(内径39mm、外径49mm、長さ1,400mm)の中を通

図1 乾式タワーミルKD-1型粉碎機の模式図

* 1991年12月5日受付 1992年5月8日受理 資源・素材学会平成3年度春季大会にて発表

1. 正会員 工博 九州大学教授 工学部資源工学科

2. 正会員 九州大学教務員 工学部資源工学科

3. 九州大学大学院 工学研究科資源工学専攻

キーワード: 微粉砕, タワーミル粉碎機, 石灰石

てタワー底部へ送り込まれた空気によって上昇し、そのうちの空気速度より遅い沈降速度を持つ微粒子のみがタワー上部出口から排出され、サイクロン④（内径180mmまたは75mm）で捕集される。この空気は、タワー内の整流板⑨（92mm×5mm×180mm, 3枚）によって整流され、送風機の回転数を変化させることによって、その速度を変えることができる。空気は、系外に出ることなく循環しており、サイクロンからダクト⑦（内径110mm）を通り送風機に送り込まれ、再びタワー底部へ流入される。空気がダクト内部を流れるときの速度（ダクト内流速）は、オリフィス⑥（径50mm）によりダクト差圧（ P_d ）として測定される。また、空気がタワーに送り込まれる前とタワー上部出口から排出されるときにの圧力差が、塔出入口差圧（ P_m ）として測定される。今回、粉碎媒体として使用したスチールボールの直径は20.2mm、1個当たりの重量は0.35kgであり、密度は、水中浮力法で測定した結果、 $7.56 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ であった。

また、サイクロンは、実験当初は内径が180mmのものを使用していたが、微粒子を効率良く捕集するためには内径を小さくすることによって遠心力を大きくする必要があった。そこで、途中で内径を75mmと小さくした。

粉碎産物の粒度分析には、光学顕微鏡（日本光学（株）製ニコンアポフォト）、走査電子顕微鏡および沈降天秤式粉体粒度分布測定装置（試作3号機）を使用した^{4)~6)}。

3. 試料

試料は次のようにして作製した。まず、塊状石灰石（（株）戸高鉱業社、戸高津久見鉱山産）をジョークラッシャーで破碎してJIS標準ふるい3.36mm（6 mesh）でふるい分けし、3.36mmふるい上産物は再破碎し、3.36mmふるい下産物は420 μm （36 mesh）ふるいでふるい分けした。これを数回繰り返して、3.36mm～420 μm （6～36 mesh）に整粒した産物を実験用の試料とした。密度は水中浮力法で5回測定して平均を求めた結果、 $2.70 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ であった。

4. 実験方法

4.1 粉碎条件

実験は、ボールの重量を一定（40kg）にして、試料重量とダクト差圧を変化させて、半連続式運転（10分毎に試料を給鉱する方法）で行った。この運転方法は、最初に試料を入れて10分間の粉碎を行い、サイクロン下部で捕集された産物と同じ重量の試料を給鉱してさらに10分間粉碎し、これで捕集された産物と同じ重量の試料を給鉱してさらに10分間粉碎するという方法である。この後、機械を止めずに30分間の連続運転を行い、全体で60分間の粉碎を1回の実験とし、60分間にサイクロンで捕集された産物の合計を粉碎産物重量とした。30分間の連続運転の給鉱量は、3回の10分間粉碎のうち後の2回で捕集された産物の重量を平均した量とし、スタート時、10分後、20分後の3回給鉱した。

4.2 ダクト内流速の計算法

ダクト差圧とダクト内流速の関係を調べるため、いろいろなダクト差圧 P_d （Pa）の値に対するダクト内流速 U_d （m/s）をそれぞれ測定し、最小二乗法でダクト差圧 P_d とダクト内流速 U_d との間の回帰曲線の係数を求めた結果、次のような値が得られた。

$$U_d = 0.23 \sqrt{P_d} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この関係を図2に示す。ダクト差圧 P_d は実験の間に測定されるので、(1)式を用いれば、その実験におけるダクト内流速を計算することができる。

4.3 消費電力の測定方法および計算方法

図2 ダクト差圧とダクト内流速の関係

各実験において、ボールを攪拌するためのスクレーパーを駆動するモータ（攪拌モータ）と、送風機を駆動するモータ（送風機モータ）の消費電力を、交流電力用トランスジューサ（横河電気（株）製 Type 2285-21）を通して記録計で記録して測定した。消費電力の計算は、横軸に時間（分）をとり、縦軸に1分毎の瞬間電力値（W）をとって最小二乗法で直線回帰し、この直線と縦軸、横軸、粉碎が終了した時間でかこまれてできる台形の面積を求めることによって積算電力（J）を求めた。

4.4 粒度分析の方法

粉碎産物の粒度分析については、実際の操業に近い状態であると考えられる30分間の連続運転で得られた産物について沈降天秤式粉体粒度分布測定装置を用いて粒度分布の測定を行い、粒度分布と最大粒子径および50%粒子径を求めた。なお、最大粒子径は37 μm をこえると沈降天秤で測定するのが困難なので、+37 μm の値が得られた産物については、37 μm （400 mesh）ふるいで15分間Lo-Tapシーカ（Tyler社製）にかけてふるい分けし、ふるい上産物を光学顕微鏡および走査電顕で写真撮影し、投影面積円相当径を求めた。

5. 結果および考察

5.1 粉碎時間と産物重量の関係

粉碎時間と産物重量との関係を図3に示す。図は試料重量が

図3 粉碎時間と粉碎産物重量の関係

図4 ダクト内流速と粉砕産物重量の関係

1.0 kg, ダクト差圧が42 Pa のときの例である。他の条件のときにも同じような結果が得られた。図に示されるように、産物重量と粉砕時間の間にはほぼ比例関係が成り立っている。

5・2 ダクト内流速と粉砕産物重量の関係

ダクト内流速と60分間の粉砕産物重量との関係を図4に示す。横軸の目盛りは(1)式で計算された値である。図において、○は試料重量が1.0 kg, △は3.0 kg, □は5.0 kg のときを表わしている。ダクト内流速が小さくなると、粉砕産物重量は減少する。また、試料重量の大小による粉砕産物の重量の差は見られなかった。

5・3 ダクト内流速と消費電力の関係

ダクト内流速と60分間の消費電力との関係を図5に示す(横軸の目盛り, 図中の印は図4と同じ)。図の下方から, 送風機モータの消費電力, 攪拌モータの消費電力, これを単純に合計した全体の消費電力(送風機モータ+攪拌モータ, ●=1.0 kg, ▲=3.0 kg, ■=5.0 kg)を示している。ダクト内流速が小さくなっても, 送風機モータ, 攪拌モータの消費電力はほぼ一定になり, 全体の消費電力もほぼ一定になる。また, 試料重量の大小による

図5 ダクト内流速と消費電力の関係

図6 ダクト内流速と粉砕産物単位重量当たりの消費電力の関係

消費電力の差は見られなかった。

5・4 ダクト内流速と粉砕産物単位重量当たりの消費電力の関係

ダクト内流速と粉砕産物単位重量当たりの消費電力との関係を図6に示す(横軸の目盛り, 図中の印は図4と同じ)。ダクト内流速が小さくなると, 試料重量には関係なく, 粉砕産物単位重量当たりの消費電力は双曲線カーブを描いて大きくなる。これは, ダクト内流速の小さい範囲で消費電力はほぼ一定であるにもかかわらず, 粉砕産物重量が非常に少ないためである。

5・5 ダクト内流速と-10 μm 粒子重量の関係

ダクト内流速と粉砕産物のうち粒子径が10 μm以下の粒子(-10 μm 粒子)の重量との関係を図7に示す(横軸の目盛り, 図中の印は図4と同じ)。ダクト内流速が小さくなると, -10 μm 粒子の重量は小さくなる。また, 試料重量の大小による-10 μm 粒子の重量の差はみられなかった。

5・6 ダクト内流速と-10 μm 粒子単位重量当たりの消費電力の関係

ダクト内流速と-10 μm 粒子単位重量当たりの消費電力との関係を図8に示す(横軸の目盛り, 図中の印は図4と同じ)。ダクト内流速が小さくなると, 試料重量には関係なく, -10 μm 粒子単位重量当たりの消費電力は双曲線カーブを描いて大きくなる。これは, 図5と同様に, ダクト内流速の小さい範囲で消費電力はほぼ一定であるにもかかわらず, -10 μm 粒子の重量が非常に少ないため

図7 ダクト内流速と-10 μm 粒子重量の関係

図8 ダクト内流速と $-10\mu\text{m}$ 粒子単位重量当たりの消費電力の関係

図9 ダクト内流速と50%粒子径の関係

である。

5・7 ダクト内流速と粉砕産物の50%粒子径の関係

ダクト内流速と粉砕産物の50%粒子径との関係を図9に示す(横軸の目盛り、図中の印は図4と同じ)。ダクト内流速が小さくなると、粉砕産物の50%粒子径は小さくなる。また、試料重量が5.0kg、3.0kgに比べ1.0kgのほうが粉砕産物の50%粒子径は小さくなる。

5・8 粉砕産物の最大粒子径を規定する要因

ダクト内流速と粉砕産物の最大粒子径との関係を図10に示す(横軸の上の目盛り、図中の印は図4と同じ)。ダクト内流速が小さくなると、粉砕産物の最大粒子径は小さくなる。

次に、粉砕産物の最大粒子径が何に規定されるかを知るために、①最大粒子径はタワー内の空気の流れ(タワー内流速)に規定され、②粒子はストークスの自由沈降の法則に従うと仮定して、タワー内流速と最大粒子径の関係を調べた。今回用いたタワーミルのタワー内とダクト内における空気の流れを模式的に描くと図11のように表わされる。タワー、ダクトの断面積をそれぞれ S_m (m^2)、 S_d (m^2)、タワー内、ダクト内の空気の流れをそれぞれ U_m (m/s)、 U_d (m/s)とし、タワー内の粒子の沈降速度を U_p (m/s)とする。今回の実験においては、タワーの内径は255mmであるが、タワー内部にはスクリーン(シャフトの外径49

図10 ダクト内流速と最大粒子径の関係

mm)と3枚の整流板(断面の幅5mm、長さ92mm)があるので、 S_m の値は、タワーだけの断面積からスクリーンの断面積と整流板の断面積をひいて計算し、 $S_m=47.8\times 10^{-3}\text{m}^2$ であった。また、 S_d の値は、ダクトの内径が110mmであるので、 $S_d=9.50\times 10^{-3}\text{m}^2$ となった。図において、 $U_p < U_m$ のとき粒子は外部に排出され、 $U_p > U_m$ のときは粒子はタワー底部に落下する。

ダクト流速 U_d にダクトの断面積 S_d をかけると、ダクト内を流れる空気の流量 Q_d (m^3/s)が計算できる。

$$Q_d = S_d \cdot U_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ところで、ダクト内の空気の流量 Q_d はタワー内の空気の流量 Q_m (m^3/s)に等しいので、

$$Q_m = Q_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

従って、タワー内流速 U_m は、次の式で求められる。

$$U_m = \frac{Q_m}{S_m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、(4)式に(3)式、(2)式を代入すると、 U_m と U_d の関係式が求められる。

$$U_m = \frac{Q_m}{S_m} = \frac{Q_d}{S_m} = \frac{S_d}{S_m} U_d \quad \dots\dots\dots (5)$$

今回の実験では、 $S_d=9.50\times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $S_m=47.8\times 10^{-3}\text{m}^2$ なので、(5)式は次のようになる。

図11 タワー内とダクト内における空気の流れの関係

$$U_m = 0.20 U_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

次に、タワー内で U_p なる沈降速度を持つ粒子の粒子径 D_p (m) は、ストークスの式より次のように表わされる。

$$D_p = \sqrt{\frac{18 \eta}{g (\rho_m - \rho_a)} U_p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで η : 20℃, 1 atmにおける空気の粘性率

$$= 17.98 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

$$\rho_m : \text{石灰石の密度} = 2.70 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_a : 20^\circ\text{C, 1 atmにおける空気の密度}$$

$$= 0.001205 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$g : \text{重力加速度} = 9.80 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

(7)式で $U_p = U_m$ とおくと、

$$D_p = \sqrt{\frac{18 \eta}{g (\rho_m - \rho_a)} U_m} \quad \dots\dots\dots (8)$$

横軸の目盛りを(6)式を用いてダクト内流速からタワー内流速に変換し、タワー内流速と最大粒子径の関係を表わしたものを図10の推定曲線として示す。この曲線は、最大粒子径がタワー内流速に規定され、粒子がストークスの自由沈降の法則に従う、と仮定して(8)式で計算された粒子径 D_p (μm) を示した曲線である。石灰石で、粒子径が約 $50 \mu\text{m}$ 以上ではストークスの法則は適用できないので、すべての粒子に対して言及することはできないのであるが、全体の傾向としてデータはこの推定曲線と同じような傾向を示しており、タワー内流速が最大粒子径を規定していると考えられる。なお、極端に数値の大きいデータもあるが、これは実験中に流速が一時的に大きくなったときがあったため、このときに大きい粒子がまぎれ込んだのではないかと考えられる。

6. ま と め

タワーミル KD-1 型粉砕機を用いて、タワー内流速と試料の重量を変化させて、石灰石を微粉砕する実験を行い、以下のことがわかった。

(1) タワー内流速が小さくなると、粉砕産物重量は減少し、微粒子(本実験では $-10 \mu\text{m}$ 粒子)の重量も減少する。また、試料重量の大小による粉砕産物の重量の差、および微粒子の重量の差

は見られなかった。

(2) タワー内流速によらず、攪拌モータ、送風機モータ、全体の消費電力はほぼ一定である。

(3) タワー内流速が小さくなると、粉砕産物の50%粒子径は小さくなる。また、流速が同じでも、試料重量が小さくなると粉砕産物の50%粒子径は小さくなる。

(4) 粉砕産物の最大粒子径はタワー内流速に規定され、タワー内流速が小さくなると小さくなる。最大粒子径と流速の関係は、粒子がストークスの自由沈降の法則に従うと仮定して計算した推定曲線と似たような傾向を示した。

(5) 今回行った実験の中で、最大粒子径が最も小さかった値は $16 \mu\text{m}$ で、このときの実験条件は、試料重量が 1.0 kg 、タワー内流速が 0.10 m/s であった。なお、このとき、粉砕産物重量は $66.7 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、 $-10 \mu\text{m}$ 粒子の重量は $58.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、50%粒子径は $3.5 \mu\text{m}$ 、全体の消費電力は $4.3 \times 10^6 \text{ J}$ であった。

謝辞 本装置を製作して戴いたクボタタワーミル(株)ならびに試料を提供して戴いた(株)戸高鉱業社の皆様に厚くお礼申し上げます。また、実験にご協力戴いた九州大学大学院工学研究科資源工学専攻 野中壮泰氏ならびに平成元年度の同大学工学部資源工学科学生 小寺 隆氏、藤田健二氏、脇坂 貴氏の各氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 麻生欣次郎・森 祐行・原 剛・河本 徳：浮選，29〔4〕，168～177，(1982)
- 2) 原 剛・森 祐行・河本 徳・麻生欣次郎：日本鉱業会誌，102〔1176〕，91～95，(1986)
- 3) 森 祐行・原 剛：資源処理技術(浮選)，33〔2〕，50～57，(1986)
- 4) 麻生欣次郎・森 祐行・堤 敦・久留秀蔵・中江保男・原 剛：浮選，26〔1〕，7～15，(1979)
- 5) 森 祐行・原 剛・高木博志・麻生欣次郎：日本鉱業会誌，102〔1180〕，365～368，(1986)
- 6) 原 剛・森 祐行：資源処理技術，37〔3〕，138～146，(1990)