

乾式タワーミル粉碎機の開発と粉碎特性に関する研究

柴山 敦,* 新田 幸人,**
森 祐行,*** 藤田 豊久*

Studies on Comminution Mechanism and Development
for Dry Tower Mill Pulverizer

Atsushi SHIBAYAMA†, Sachihito NITTA††
Sukeyuki MORI††† and Toyohisa FUJITA†

Abstract

To define the comminution mechanism and achieve a high recovery of fine particles, dry tower mill KD-1 and KD-2 have been developed and modified into KD-3. In this study, grinding tests were carried out on limestone to clarify the comminution mechanism in the KD-3.

A particular attention was paid to important factors such as size of the grinding media (steel balls of $\phi 10$ mm, $\phi 13$ mm, $\phi 16$ mm, $\phi 20$ mm), the speed of the stirring screw (from 1.08 s^{-1} (65 rpm) to 1.58 s^{-1} (95 rpm)) and the role of nets in the classifying column. The study has revealed an optimum efficiency for steel balls of $\phi 20$ mm size and stirring screw rotating at 1.58 s^{-1} (95 rpm). Besides, the maximum particle diameters of products were indicated by the corrected curve which is estimated by the assumption of Stoke's law. The relationship between maximum and 50% particle diameters was proportionally and by using the columns provided with nets, the overflow products were classified by high classifying efficiency.

Key Words: Tower Mill, Comminution Mechanism, Grinding Media Size, Stirring Screw Speed, Classifying Efficiency

1. 緒言

現在、鉱工業界で使用されている多種多様な粉碎機の中に、立型の媒体攪拌式粉碎機として位置づけられるタワーミル粉碎機（以下、タワーミル）がある。

タワーミルは、戦後、日本人の独創的な研究によって開発、実用化された粉碎機であり、国内外を問わず多くの鉱山で再摩砕用粉碎機として使用されてきた¹⁾⁻⁸⁾。その後、金属・鉄鋼業や製紙業などで使用され、近年では火力発電所等の排煙脱硫用粉碎機として利用されるなど新規用途の実績も数多く残している。

ここで、タワーミルが実用化されるまでの経緯を簡単に紹介する。タワーミルは戦後3人の日本の民間人によって発明された粉碎機である。元々は、水中で表面粉碎を行いながら反応を進行させる浸出（リーチング）装置として考案されていた。ところが、最初に製作された試作機が当初の計画以上に粉碎能力

に秀でた装置であったため、微粉碎機として誕生することになったのである。その後、幾多の試行錯誤の末、昭和28年（1953）、実用化第一号機が銅鉱石を微粉碎する必要に迫られていた日室鉱業(株)（現(株)ニッチツ）の土倉鉱業所に導入された⁹⁾。この一号機を皮切りにタワーミルはその微粉碎能力が認められ、各種鉱工業の他、中和用石灰石の微粉碎機、乾式脱硫用微粉碎機など広く使用されるようになった¹⁰⁾⁻¹²⁾。これまでの実績は、海外15カ国を含め合計240台以上が販売されている⁹⁾。

以上のような経緯を持つタワーミルではあるが、前述のように日本人によって発明、商品化されたことが理由の一つとなり、国際的に見てもこれまで研究報告されたことが非常に少なかった。加えて、タワーミルの粉碎原理は解明されていない点が多く残されており、粉体を取り扱う分野から解明を望む声も聞かれていた。そのため著者等は、乾式タワーミルの粉碎原理を解明する研究に取り組み、乾式タワーミルVD-1型機をはじめとして、微粉碎用の乾式タワーミルKD-1型機、同KD-2型機、KD-3型機を開発した。最新のKD-3型機では、一層の微粉碎が可能となり、その特有の構造によってタワーミル自体が持つ粉碎機構が明らかになってきた¹³⁾⁻¹⁸⁾。

そこで本研究では、KD-3型機の粉碎特性、特に微粉碎を行うための効果的な条件について検討を行った。具体的には、KD-3型機を用いて石灰石の粉碎試験を行い、粉碎媒体である粉碎用ボールのサイズ、媒体攪拌用のスクリーアの回転速度、粒子の分級を行う分級部の内部構造の各条件が粉碎産物にどのような影響を及ぼすのかを調べ、その検討を行った。

平成12年5月15日受付

* 秋田大学工学資源学部環境物質工学科

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

** (株)クボタ リサイクルプラント技術部

〒277-0805 千葉県柏市大青田字八両野719-1

*** 九州大学大学院工学研究科 地球資源システム工学専攻

〒812-8501 福岡市東区箱崎6-10-1

† Department of Materials-process Engineering & Applied Chemistry for Environments, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Akita, 010-8502, Japan

†† Waste Recycle Plant Engineering Department, KUBOTA Corp.

††† Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University.

E-mail: shibayama@ipc.akita-u.ac.jp

2. 実験方法

2.1 実験装置および実験方法

乾式タワーミルKD-3型機の模式図をFig. 1に示す。図では装置内の空気の流れと産物粒子が気流によって運ばれる状態を模式的に示している。また、KD-3型機は装置内の主要構成部分を機能別に、鉱物の粉砕を行うAの解砕部(Comminuting Section)、粉砕された粒子の分級を行うBの分級部(Classifying Section)、分級部から送られてくる粒子を捕集するCの捕集部(Collecting Section)と明確に区分したことが最大の特徴になっている。模式図中では、A、B、Cの各部分を点線で囲んで表示している。

タワーミルKD-3型機による粉砕方法は、まず、タワー上部の駆動装置③(Motor)にバイエル・サイクロ可変減速機が接続され、攪拌スクリュー②(Stirring screw, 外径140 mm, 羽根部分のみの高さ600 mm, 羽根の厚さ6 mm, ピッチ75 mm)が回転するようになっている。一方、攪拌スクリューを回転させながら、解砕部セル①内(Comminuting cell, 高さ600 mm, 内径255 mm)に粉砕媒体のスチールボールを充填する。次いで、試料である石灰石を給鉱口⑥(Inlet of feed)から投入すると、石灰石はボールとの相互摩擦作用を受けて砕かれる。砕かれた産物粒子は、送風機⑨(Electric blower)よりスクリューシャフトの中空軸パイプ(内径39 mm, 外径49 mm, 長さ1350 mm)を通して解砕部底部に送り出される空気によって吹き上げられ、カラム④(Classifying column)に達する。カラム内では、空気の上昇速度より速い沈降速度を持つ粗粒子が、アンダーフロー粒子としてカラム底部の水平部分に落下沈積し、2次的な産物として回収される。この産物を分級部内で回収される産物であることから分級部捕集産物と呼ぶ。一方、空気の上昇速度より遅い沈降速度を持つ微粒子は、オーバーフロー粒

子としてカラム上部の連結管からサイクロン⑦(Cyclone)に送られる。サイクロンに達した空気と粒子は、粒子のみがサイクロン捕集産物として捕集される。分離された空気は、サイクロン外へ排出されダクト(内径110 mm)を通った後、系外に出ることなく、再び送風機に戻り装置内を循環するようになっている。一方、装置内を循環する空気の流れは、送風機の回転数を変化させることによって、流速を調整することができる。この流速は、ダクト⑧[Airflow meter (orifice)]を気流が通過する際に、ダクト内部に取り付けたオリフィスによりダクト差圧(Pd)として測定され、この時の流速をダクト内流速として算出することができる。

KD-3型機で行った粉砕方式は、60分間×2回の回分式粉砕である。本方式は、1 kgの試料をFigure 1中⑥の給鉱口より給鉱した後、60分間の粉砕を行う。その後、運転を一旦停止し、粉砕産物を回収する。回収した粉砕産物の合計重量と同じ重量の試料を給鉱し、再度60分間の粉砕を行った後、粉砕産物を再回収する。但し、後述の粉砕結果の項目で示す粉砕産物重量とは、前半60分間の粉砕で得られた産物と後半60分間の粉砕で得られた産物の合計粉砕産物重量である。

2.2 実験条件

今回の実験は、粉砕媒体である粉砕用スチールボールの直径を10 mm, 13 mm, 16 mm, 20 mm, 攪拌スクリューの回転速度を 1.08 s^{-1} (65 rpm), 1.25 s^{-1} (75 rpm), 1.42 s^{-1} (85 rpm), 1.58 s^{-1} (95 rpm)に変えて行った。これら二つの条件は、解砕部セル内で行われる粉砕に直接関与している要因として考えられる。なお、粉砕媒体であるスチールボールに関する条件をTable 1に示す。このスチールボールのサイズは、実際に鉱工業界で使用されるタワーミルでは通常20 mm以下のボールが使用されているため、本研究では実操業に対応できるよう20 mm以下のボールサイズに着目し、上記4種類のボールサイズを研究対象にした。また、分級部の内部構造については、分級部カラム内に取り付ける気流整流用の網の取り付け状態を変えて実験を行った。カラム内部には内部の上昇気流を整流するための整流板⑤(Baffle plate, 185 mm×335 mm×5 mm, 6枚)が設置されている。この整流板の上下にTable 2に示す目開きの異なるS1, S2, S3の3種類の網をそれぞれ異なる条件で取り付けられた。もともと本KD-3型機では、カラム内の気流を整流するために経験的に網を取り付けてきた。ところが、カラム内で効果的に分級を行い、微粒子を回収するためにはカラム内に取り付ける網が粉砕産物にどのような影響を及ぼしているのか検討する必要が生じてきた。そこで、Figure 2に示す網の取り付け方が異なる計4種類のカラムを用い、粉砕産物に対する網の役割と影響を調べた。図で示すように、網を取り付けてない通常分級部カラムをCLA0と呼ぶことにする。その他に、CLA1は、整流板の上部全面にS3網を1枚、整流板下部全面にS1網を1枚取り付けられている。CLA2は、整流板の上部全面にS1網を1枚、S1網のすぐ上にS3網を1枚取り付けられている。このS3網は、カラム中心からカラム直径の半分の距離までに設置し、中心部付近の網の目が密になるようにS1網の上に重ねて取り付けられている。こうすることで、KD-3型カラム内に発生する中心部付近に偏る流れを解消でき、空気の流れが左右均等に広がると考えられる。最後にCLA3は、整流板の上下に取り付ける網を、上下とも中心部が密になるように重ねて設置

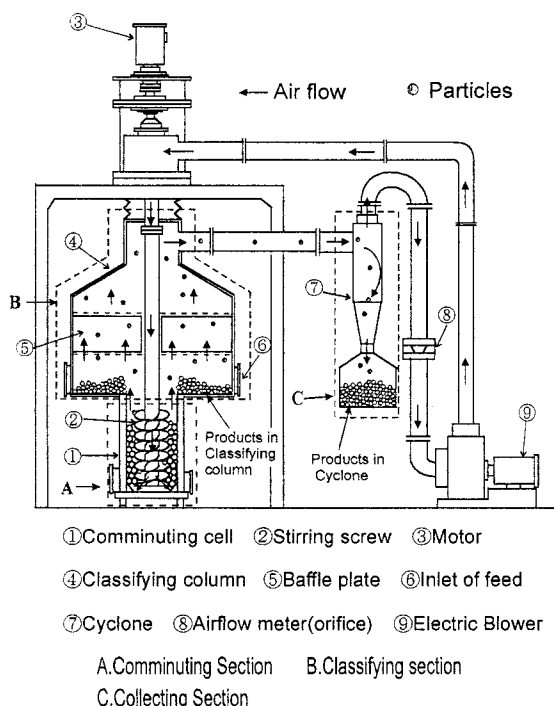


Figure 1 Schematic view of the dry tower mill KD-3

Table 1 Sizes and conditions of each grinding media

| Diameter (mm) | Weight of a ball (kg) | Density (kg/m ³) | Load Mass (kg) |
|---------------|-----------------------|------------------------------|----------------|
| 10 | 0.004 | 7.95×10 ³ | 40 |
| 13 | 0.009 | 7.76×10 ³ | 40 |
| 16 | 0.017 | 7.95×10 ³ | 40 |
| 20 | 0.035 | 7.56×10 ³ | 40 |

Table 2 Kind of sieves using in column of KD-3; S1, S2, S3

| Types of nets | Opening (mm) | Diameter of line (mm) |
|---------------|--------------|-----------------------|
| S1 | 5.0 | 0.75 |
| S2 | 3.5 | 1.00 |
| S3 | 1.0 | 0.20 |

した。整流板の下部は、S1網を全面に1枚取り付け、その下に解砕部セルの半径と同じ距離の分だけS3網を取り付けた(面積が解砕部セルの断面積と同じ)。整流板の上部は、S1網を全面に1枚取り付け、その上にカラム半径の2/3の距離までにS2網を取り付け、さらにその上にカラム半径の1/3の距離までにS3網を重ねて取り付けた。このように中心部付近の網の目が密になるように取り付けることで、分級部カラム内の中心部に偏る流れを左右均等に分散させることができ、均一な上昇流に整流できることが期待できる。なお、粉碎用ボールサイズおよび攪拌スクリューの回転速度に関する粉碎実験の際は、このCLA3を用いて実験を行った。

給鉍試料の石灰石は、(株)戸高鉍業社戸高津久見鉍山産の

塊状石灰石をジョークラッシャーで破碎し、JISの標準ふるいを用いて3.36 mm (6 mesh)~420 μm (36 mesh)に整粒したものをを用いた。また、この給鉍試料用石灰石の密度は2.70×10³kg/m³であった。

回収した粉碎産物のうち、後半60分間の粉碎で得られたサイクロン捕集産物と分級部捕集産物を沈降天秤式粉体粒度分布測定装置により粒度分析を行った。得られた各粒径毎の粒度分布から、最大粒子径、50%粒子径を求めた。なお、本粒度分析では、液相中における分散剤として水ガラス(2g/l)を使用し、懸濁液調整法として超音波分散法を採用しているため、粒度分布測定時の産物粒子は一次粒子の状態で測定されていると考えられる^{19)~20)}。

3. 結果および考察

3.1 粉碎用ボールのサイズによる影響

本実験では攪拌スクリューの回転速度を1.42 s⁻¹ (85 rpm)に設定し、KD-3型機内を流れる空気の流れ、つまりダクト内流速が一定流速を保つように調節して120分間の粉碎試験を行った。なお、このときの分級部カラムはFigure 2のCLA3を使用している。

3.1.1 粉碎用ボールのサイズが粉碎産物重量に及ぼす影響

サイクロンで捕集された産物重量とダクト内流速の関係はFigure 3(a)に示す。図中の凡例は(本節の全てのグラフで同じ)、φ10 mm ボールを■印、φ13 mm ボールを▲印、φ16 mm ボールを◆印、φ20 mm ボールを●印で示す。ダクト内流速が0.5 (m/s)以下の小さい流速域では、ボールサイズによる捕集産物重量への影響は見られないが、ダクト内流速が0.5 (m/s)以上になるとボールサイズによる影響が現れている。産物重量が多い順に並べると、φ20 mm ボール(●印)、φ16 mm ボール(◆印)、φ13 mm ボール(▲印)、φ10 mm ボール(■印)の順になる。

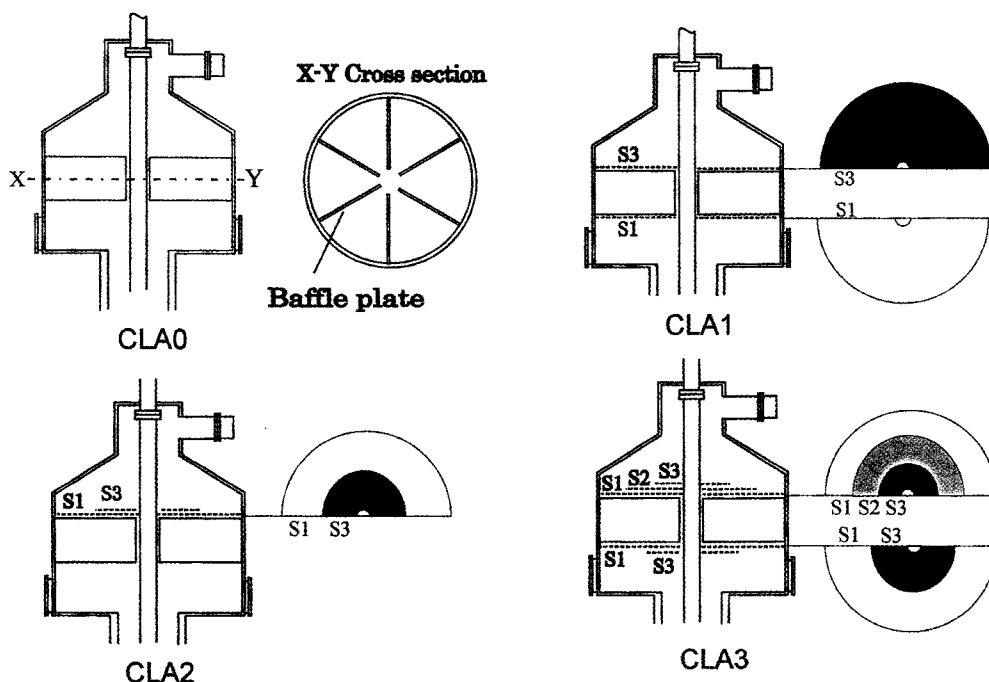


Figure 2 Schematic view of the different column of KD-3: CLA 0, CLA 1, CLA 2, CLA 3

ル(■印)となっており、直径の大きなボールを使用した方が粉砕は効果的に進行し、捕集産物重量も急激に増加していることがわかる。しかも、 $\phi 10\text{ mm}$ ボールでは、他の径のボールに比べて著しく産物重量が少なく、粉砕能力が低いことが示されている。このとき、 $\phi 20\text{ mm}$ ボールと最大で4倍以上の差が生じた。この点については次のように考えることができる。すなわち、粉砕はボールとの接触により進行する。この接触時にボールが十分なエネルギーを持っていなければ、粒子に亀裂や破壊が生じない。つまり、ボール一個に適度な重量が必要であると考えられ、KD-3型機では $\phi 20\text{ mm}$ ボールを使用することで粉砕が効果的に進行し、粉砕能力が高くなったと考えられる。もちろん、この現象は粉砕対象物の性状・粒度によって変

化するため、被粉砕物が変わる場合は、別途検討する必要があると考えられる。一方、産物重量を示す各線はダクト内流速が $0.7\text{ (m/s)}\sim 1.0\text{ (m/s)}$ 付近を境に最大値を示していることがわかる。これは以下の二点が理由として考えられる。すなわち一点目として、ダクト内流速が大きくなるとサイクロンでの圧力損失が大きくなり、結果的にサイクロン内での流速が上昇しきれず、サイクロンで捕集される産物重量が一定値もしくは減少に転じる。二点目として、ダクト内流速が大きくなると解砕部から吹きあがる粒子のうち、粉砕が十分に進行していない粒径の大きな粗粒子の占める割合が大きくなる。ところが、分級部カラムで粒子が分級されると、粗粒子はカラム底部に落下沈積し、サイクロンへ送られる微粒子はほとんど増加することがない。この二点が理由として考えられ、図ではこれらの現象が相乗したことにより捕集産物重量が最大値をとったものと考えられる。

次に、分級部捕集産物におけるダクト内流速と粉砕産物重量の関係を Figure 3 (b) に示す。サイクロン捕集産物と同じく、ダクト内流速が大きくなるにつれ、 $\phi 20\text{ mm}$ ボール(○印)を用いた場合の捕集産物重量が最も多く、以下、 $\phi 16\text{ mm}$ ボール(◇印)、 $\phi 13\text{ mm}$ ボール(△印)、 $\phi 10\text{ mm}$ ボール(□印)の順で少なくなっている。特に、 $\phi 20\text{ mm}$ ボール、 $\phi 16\text{ mm}$ ボール、 $\phi 13\text{ mm}$ ボールは、ダクト内流速とともに産物重量も増加傾向を示しているが、 $\phi 10\text{ mm}$ ボールは、ほとんど増加せず、最大でも 0.035 kg 程度しか回収できなかった。これらのことから、今回の条件では、 $\phi 10\text{ mm}$ ボールの粉砕能力は他のボールに比べ著しく低いことが示された。

3. 1. 2 粉砕用ボールのサイズが粉砕産物の最大粒子径に及ぼす影響

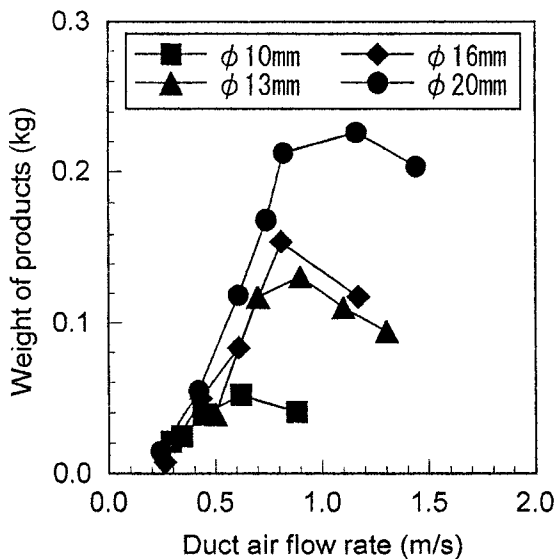
サイクロン捕集産物におけるダクト内流速と最大粒子径の関係を Figure 4 (a) に示す。図よりダクト内流速と各ボールサイズの最大粒子径との関係は明確に確認できず、約 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ から $14.5\text{ }\mu\text{m}$ の比較的広い範囲に分布している。また、各ボールサイズの間にも相関関係は生じなかった。このことから、粉砕用スチールボールのサイズは粉砕産物の最大粒子径を規定する要因ではないと考えられる。言い換えると、粉砕産物の最大粒子径を規定するのは、粒子を製造する部分の粉砕用ボールのサイズより、産物粒子自体を分級・捕集する分級部カラムや捕集用サイクロンなどの構造にあると考えられる。

次に、分級部捕集産物におけるダクト内流速と最大粒子径の関係を Figure 4 (b) に示す。図より、ダクト内流速が大きくなるにしたがって、全てのボールサイズで最大粒子径が大きくなっている。これは、カラム底部で回収される分級部捕集産物は、解砕部の流速により吹き上がってきた粒子であるため、粒子径は解砕部内流速に比例した直径をもつことに起因していると考えられる。しかしながら、サイクロン産物の最大粒子径の場合と同様、粉砕用ボールのサイズによる影響は確認されなかった。

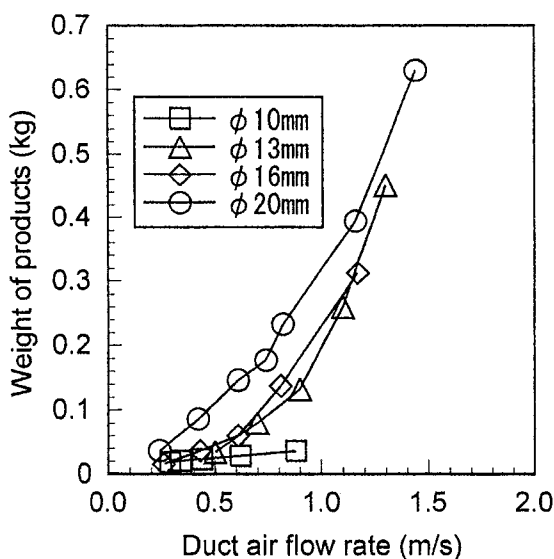
3. 2 攪拌スクリューの回転速度が粉砕産物に与える影響

本実験では、前節の結果を考慮し、粉砕媒体として $\phi 20\text{ mm}$ の粉砕用スチールボールを用いて120分間の粉砕試験を行った。なお、このときの分級部カラムは Figure 2 の CLA 3 を使用している。

3. 2. 1 スクリュー回転速度によるダクト内流速と粉砕産物重量の関係



(a) Products in cyclone

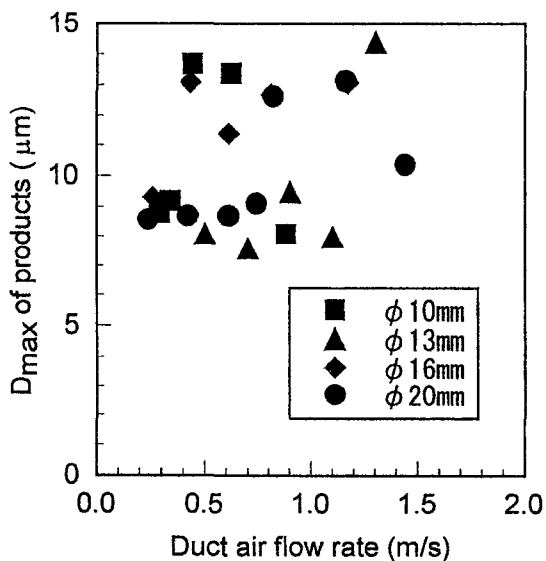


(b) Products in classifying column

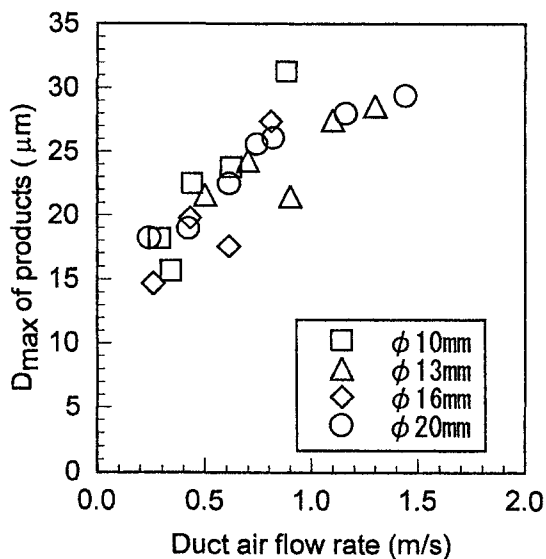
Figure 3 Weight of products (cyclone and column) at different duct air flow rates, (with screw speed 1.42 s^{-1} (85 rpm) and CLA 3)

サイクロン捕集産物におけるダクト内流速と粉碎産物重量の関係を図5(a)に示す。1.08 s⁻¹ (65 rpm) の回転速度で粉碎した場合の結果を■印, 同じく1.25 s⁻¹ (75 rpm) の場合を▲印, 1.42 s⁻¹ (85 rpm) の場合を◆印, 最後に1.58 s⁻¹ (95 rpm) の場合を●印で示している。図に示されるように, 各回転速度においてダクト内流速が増加すると捕集産物重量は増加した。攪拌スクリーアの回転速度が速くなると産物重量は増加し, 回転速度1.58 s⁻¹ (95 rpm, ●印) において, 最も多く産物を得ることができた。これは, スクリューの回転速度を速くすることにより, 給鉱試料が速くかつ大量に砕かれるため, 捕集できた粉碎産物の量が増加したと考えられる。また, ダクト内流速

が約0.7 (m/s) 以上において, 攪拌スクリーアの回転速度による影響が明確に現れており, 回転速度が速いほど捕集産物重量が多くなった。ダクト内流速が0.7 (m/s) 以下では回転速度による産物重量への影響は明確ではなく, 各回転速度ともほぼ同じ産物重量となった。これは, ダクト内流速が小さい場合では, 解砕部内に大量の微粒子が存在しても, それらを全部吹き上げるだけの流速に達していないため, このように回転速度による産物重量の差は生じなかったと考えられる。一方で, ダクト内流速が0.7 (m/s) 以上になると, 産物重量は一定値または最大値をとる傾向が確認される。これは, 前節「3.1 粉碎用ボールのサイズが粉碎産物重量に及ぼす影響」で述べた理由と同じ

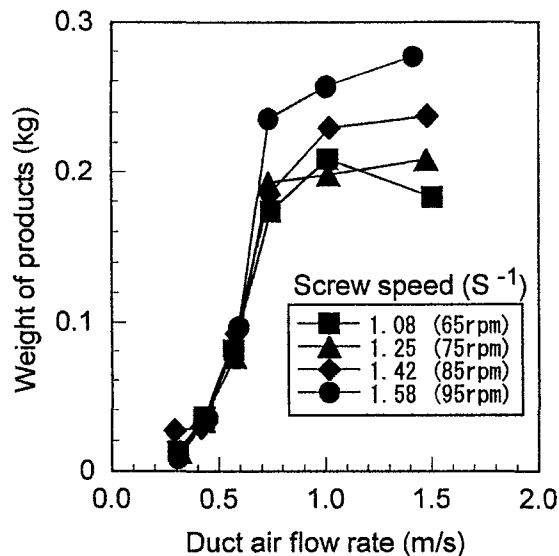


(a) Products in cyclone

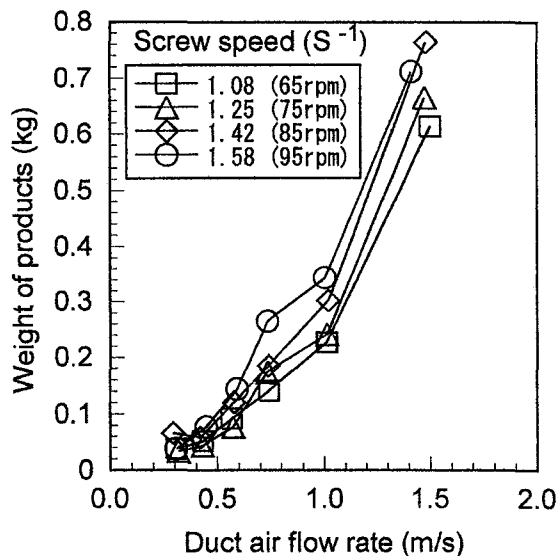


(b) Products in classifying column

Figure 4 Maximum particle diameters (D_{max}) of cyclone products and column products at versus duct air flow rates, (with screw speed 1.42 s⁻¹ (85 rpm) and CLA 3)



(a) Products in cyclone

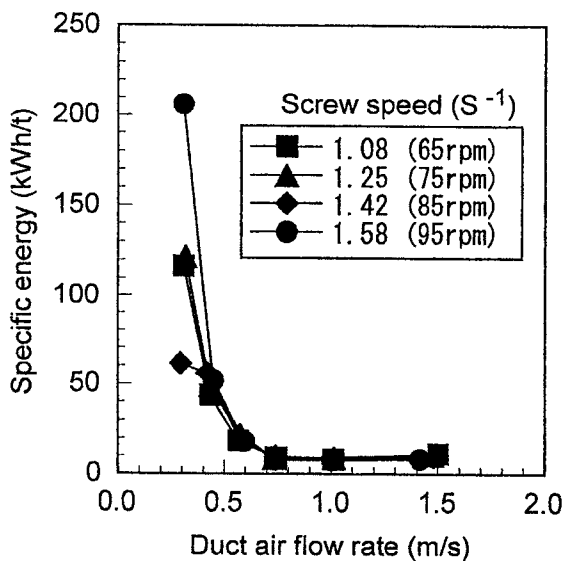


(b) Products in classifying column

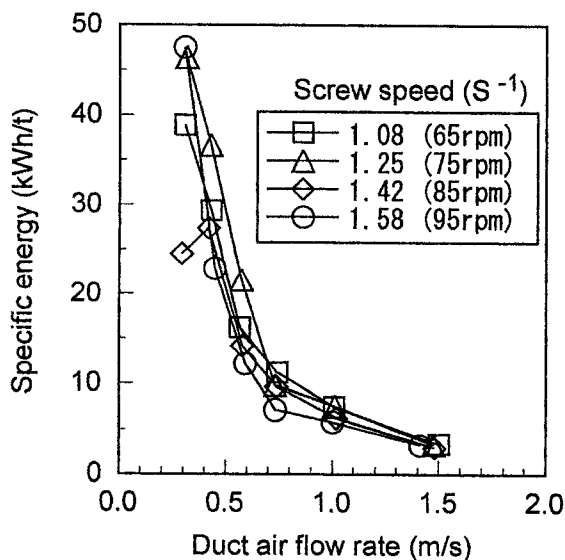
Figure 5 Weight of products collected in cyclone and column at different duct air flow rates, (with φ 20mm balls and CLA 3)

で、ダクト内流速が大きくなると、サイクロン内の圧力損失も大きくなり産物の回収が効果的に行われないこと、粗い粒子は大量に吹き上がる反面、サイクロン産物として捕集される微粒子自体はほとんど変化しないことが理由として考えられる。

次に、分級部捕集産物におけるダクト内流速と粉砕産物重量の関係を図5(b)に示す。図中の凡例は、 1.08 s^{-1} (65 rpm)で粉砕した場合の粉砕結果を□印、同じく 1.25 s^{-1} (75 rpm)の場合を△印、 1.42 s^{-1} (85 rpm)の場合を◇印、 1.58 s^{-1} (95 rpm)の場合を○印で示している。サイクロン捕集産物の場合と同様に、ダクト内流速が増加すると産物重量も増加した。また、攪拌スクリーの回転速度が大きいほど産物重量が増加し、ほぼ一定の増加傾向を示した。



(a) Products in cyclone

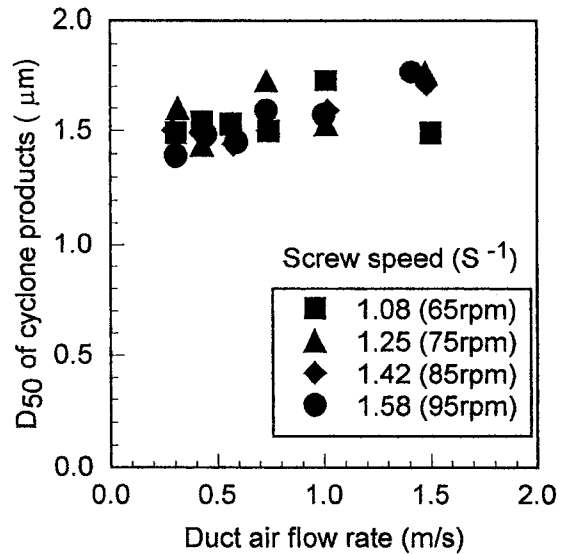


(b) Products in classifying column

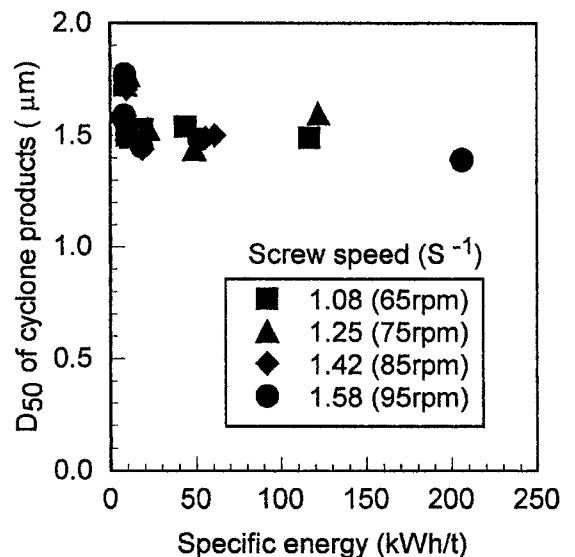
Figure 6 Specific energy (kWh/t) at various duct air flow rates.
(with $\phi 20$ mm balls and CLA 3)

3. 2. 2 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

サイクロン捕集産物、分級部捕集産物におけるダクト内流速と粉砕仕事量 (=単位エネルギー: 攪拌モータと送風機モータの合計消費電力より算出) の関係をそれぞれ Figure 6 (a), (b) に示す。両図の単位エネルギーは、ダクト内流速が小さい場合に回転速度 1.58 s^{-1} (95 rpm) が最大となり、ダクト内流速が大きい場合は回転速度によらず一定値を示した。これは、スクリーの回転速度とダクト内流速を大きくすることで、単位エネルギーを増加させることなく処理量が増加することを示



(a) D50 versus duct air flow rates



(b) D50 versus specific energy

Figure. 7 Median particle diameter (D50) of cyclone products at versus duct air flow rates and specific energy (kWh/t).
(with $\phi 20$ mm balls and CLA 3)

している。

3. 2. 3 スクリュー回転速度による粉碎産物の50%粒子径への影響

ここでは、粉碎産物の平均粒径を表す50%粒子径について考察を行う。サイクロン捕集産物におけるダクト内流速と50%粒子径の関係を Figure 7 (a) に、単位エネルギーと50%粒子径の関係を Figure 7 (b) に示す。Figure 7 (a) では、ダクト内流速が大きくなるにしたがい、50%粒子径も若干大きくなる傾向が確認される。しかし、攪拌スクリーウの回転速度による影響は認められなかった。このことから、ダクト内流速は産物の50%粒子径に対して影響を及ぼすが、攪拌スクリーウの回転速度は産物の50%粒子径を規定する要因ではないと考えられる。

一方、Figure 7 (b) で示す単位エネルギーとサイクロン産物の50%粒子径の関係においても、50%粒子径は単位エネルギー(粉碎仕事量)に関係なくほぼ一定の値を示し、スクリーウの回転速度による影響がみられなかった。

これらの現象は、粉碎産物の最大粒子径についても確認され、しかも、分級部捕集産物も全く同様の結果が得られた。以上のことから、攪拌スクリーウの回転速度は、粉碎産物の粒度構成を規定する要因ではないと考えられる。

3. 3 分級部カラム内の網が粉碎産物に及ぼす影響

本節では分級部カラム内の内部条件として、産物粒子の分級という点に着目し、カラム内の網が粉碎産物の粒子径にどのような影響を与えるのか考察を行った。但し、粉碎媒体のスチールボールは $\phi 20$ mm を使用し、攪拌スクリーウの回転速度は、 1.42 s^{-1} (85 rpm) である。

3. 3. 1 ダクト内流速、カラム内流速および解砕部内流速と粉碎産物の最大粒子径の関係

本項目では粉碎産物の最大粒子径を検討するために、装置内

の気流の流速として、分級部カラム内の流速(カラム内流速)と解砕部内の流速(解砕部内流速)を求め、各流速にストークスの式を適用することで、産物粒子とどのような関係にあるのか検討した。なお、カラム内流速と解砕部内流速の求め方は、本KD-3型機では送風機より送られた空気の流れは、装置内を循環するため常に一定と考えられる。よって、ダクト内流速を元にカラムおよび解砕部の各断面積から換算して求めた流速をカラム内流速、解砕部内流速とする。但し、この換算流速自体は熱線式風速計を用いて実測した両流速とほぼ同数値を示していた。

次に、各流速と粉碎産物の最大粒子径の考え方として、まず、KD-3型機におけるサイクロン捕集産物の最大粒子径がカラム内流速に規定され、粒子は1次粒子として存在すると考える。しかも粒子はストークスの自由沈降の法則に従うと仮定する。このとき、カラム内で U_p (m/s) なる沈降速度を持つ粒子の粒子径が D_p (m)、カラム内流速 U_c (m/s) が $U_p = U_c$ である場合、サイクロン捕集産物の最大粒子径 $D_{cy,max}$ はストークスの式より以下のように表現することができる。

$$D_{cy,max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)} \times U_c} \right) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 η : 20°C, 1 atm における空気粘性率
 $= 17.98 \times 10^{-8}$ (Pa·s)

ρ_m : 石灰石の密度 $= 2.704 \times 10^3$ (kg/m³)

ρ_a : 20°C, 1 atm における空気密度
 $= 0.001205 \times 10^3$ (kg/m³)

g : 重力加速度 $= 9.8$ (m/s²)

(1)式は、 U_p なる沈降速度を持つ粒子、つまりサイクロン捕集

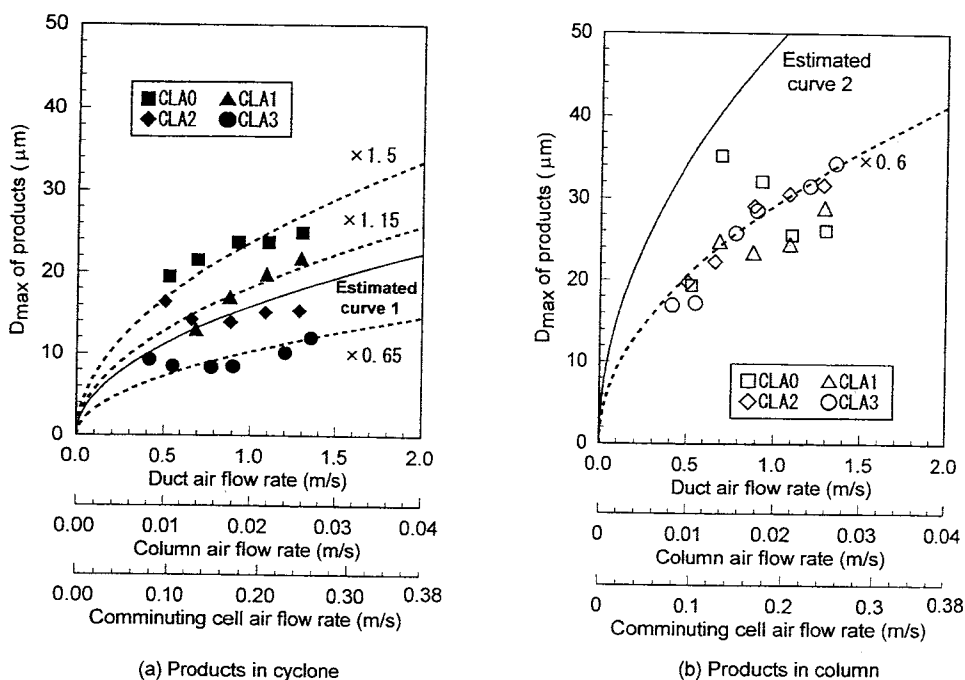


Figure 8 Maximum particle diameter (D_{max}) collected in cyclone and column at versus duct, column and comminuting cell air flow rates.

(with $\phi 20$ mm balls, screw speed 1.42 s^{-1} (85 rpm) and CLA 0, CLA 1, CLA 2 and CLA 3)

産物中の最大粒子径 ($D_{cy,max}$) を推定する式であり、カラム内流速に対応して描かれる曲線を推定曲線1 (Estimated Curve 1) として取り扱う。この推定曲線1と実際にサイクロンで捕集された産物の最大粒子径の関係を示したものが Figure 8 (a) である。図では、横軸にダクト内流速、カラム内流速、解砕部内流速を示すとともに、推定曲線1を1.5倍に補正した曲線 (破線)、1.15倍に補正した曲線 (破線)、0.65倍に補正した曲線 (破線) を示している。推定曲線を1.5倍に補正した曲線は、CLA 0の最大粒子径の分布にほぼ等しい曲線を描いているのがわかる。同じく、推定曲線を1.15倍に補正した曲線はCLA 1の最大粒子径に、推定曲線自身はCLA 2の最大粒子径に、推定曲線を0.65倍に補正した曲線はCLA 3の最大粒子径にそれぞれ等しい曲線を描いている。

以上のことから、上記の Figure 8 (a) 中の各補正式 (CLA 0, CLA 1, CLA 2, CLA 3の各場合) は次式のように表すこ

とができる。

CLA 0の場合、

$$D_{cy,max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)} \times U_c} \right) \times 1.5 \quad \dots\dots (2)$$

CLA 1の場合、

$$D_{cy,max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)} \times U_c} \right) \times 1.15 \quad \dots\dots (3)$$

CLA 2の場合、

$$D_{cy,max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)} \times U_c} \right) \times 1 \quad \dots\dots (4)$$

CLA 3の場合、

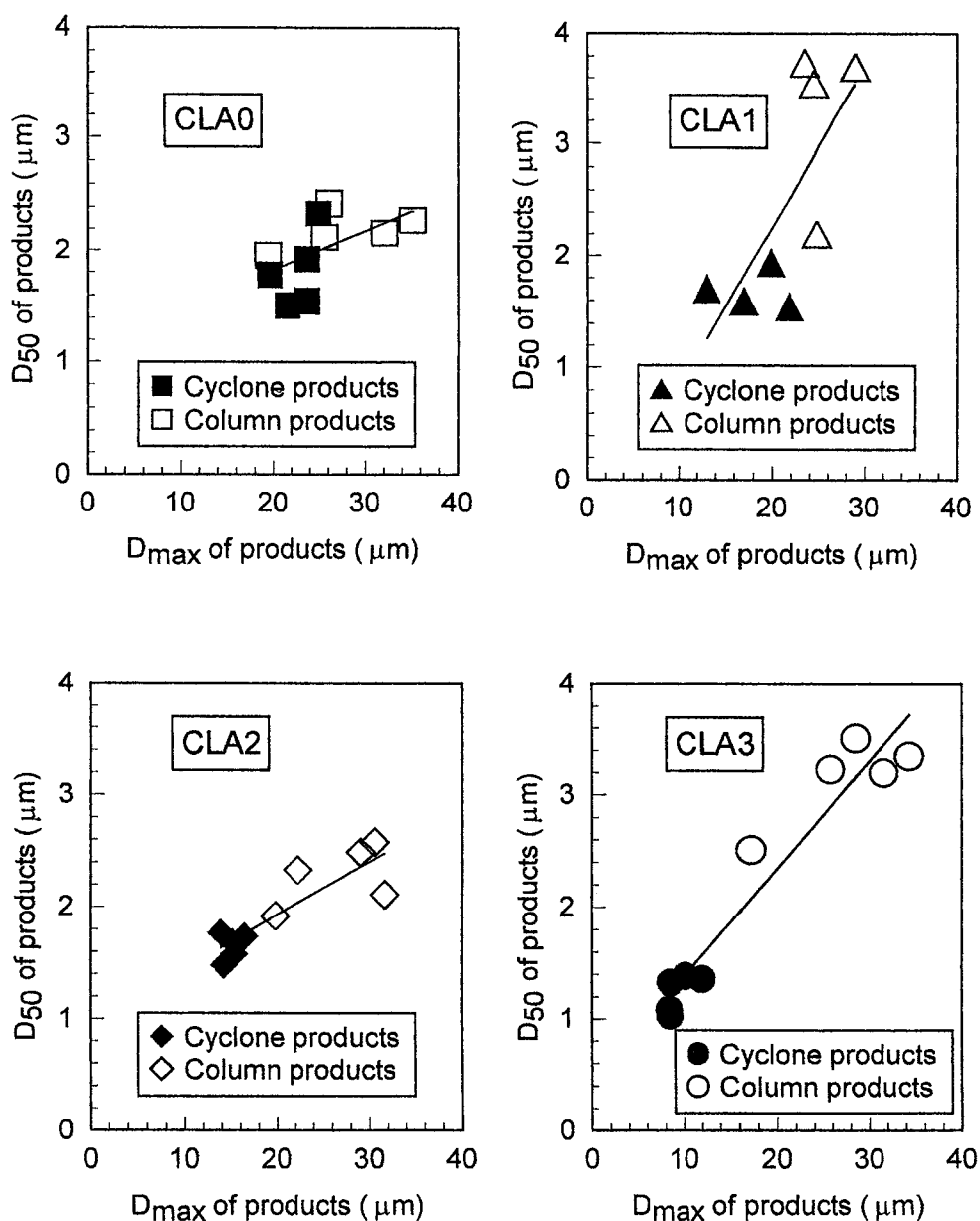


Figure 9 Relationship D_{50} and D_{max} of collected products in cyclone and column. (case of CLA0, CLA1, CLA2 and CLA3, with $\phi 20\text{mm}$ balls and screw speed 1.42 s^{-1} (85rpm))

$$D_{cy-max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)}} \times U_c \right) \times 0.65 \quad \dots\dots (5)$$

つづいて、実際の最大粒子径が、推定曲線1から外れる理由を考える。まず、前提としておかなければならないのは、(1)式は粒子を1次粒子として扱った場合に成り立つ関係式である。ところが、実際は解砕部やカラム内の空気中に存在する粒子のうち、多くの粒子が粒子同士で2次粒子を形成していると考えられる。これによって、粒子を1次粒子として扱っている推定曲線と実際の最大粒子径は完全に合致するわけではないと考えられる。この点を前提として各カラムの産物を具体的にみると、CLA0およびCLA1では推定曲線1よりも大きくなっている。これは、実際の観察でも確認された現象だが、カラム内（特にCLA0）では中心部分に偏る空気の流れが発生し、この流れによって大量の粒子が吹き上げられていた。その結果、2次粒子も含めた多くの粗い粒子がサイクロンに運ばれ、最大粒子径は推定曲線よりも大きくなったと考えられる。一方で、CLA2とCLA3では中心部分が密になるように網を取り付けている。こうすることで、中心部に偏った流れを抑制することができ、均一で一様な上昇流に整流できたと考えられる。カラム内では推定曲線に従った分級が行われ、最大粒子径は推定曲線と同じ傾向を示す分布となったと推察される。また、CLA3は推定曲線1より小さい粒子径になっているが、これは、カラム内中心部に網を重ねて取り付けた結果、網を通過する際の粒子が他の粒子と極めて接近した状態になり、粒子同士の凝集、つまり2次粒子の形成が促進されたと考えられる。しかも、網の目開きは網を通過する粒子の直径を規定していることから、形成された2次粒子はそのまま分級され、サイクロンで捕集されたと考えられる。この結果、実際の産物最大粒子径は推定曲線よりも小さい値になったと考えられる。

一方、解砕部内流速を U_k (m/s) とし、分級部捕集産物の最大粒子径 D_{cl-max} が解砕部内流速に規定されると仮定すると、

D_{cl-max} を表す曲線は(1)式と同様に次式で求められる。

$$D_{cl-max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_a)}} \times U_k \right) \quad \dots\dots (6)$$

この式は、ストークスの式と解砕部内流速より分級部捕集産物中の最大粒子径 (D_{cl-max}) を推定する式であり、推定曲線2

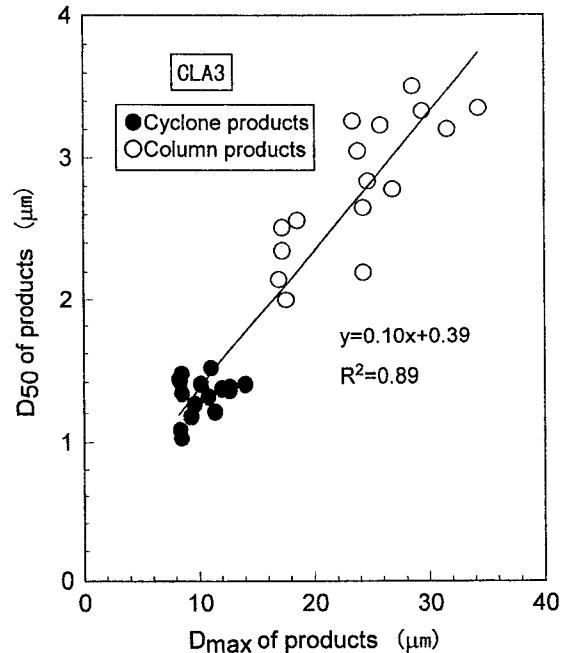


Figure 10 Relationship between D50 and D_{max} of cyclone and column products in the case of CLA3. (with $\phi 20$ mm balls, screw speed 1.42 s^{-1} (85 rpm) and duct air flow rate from 0.3m/s to 1.5m/s)

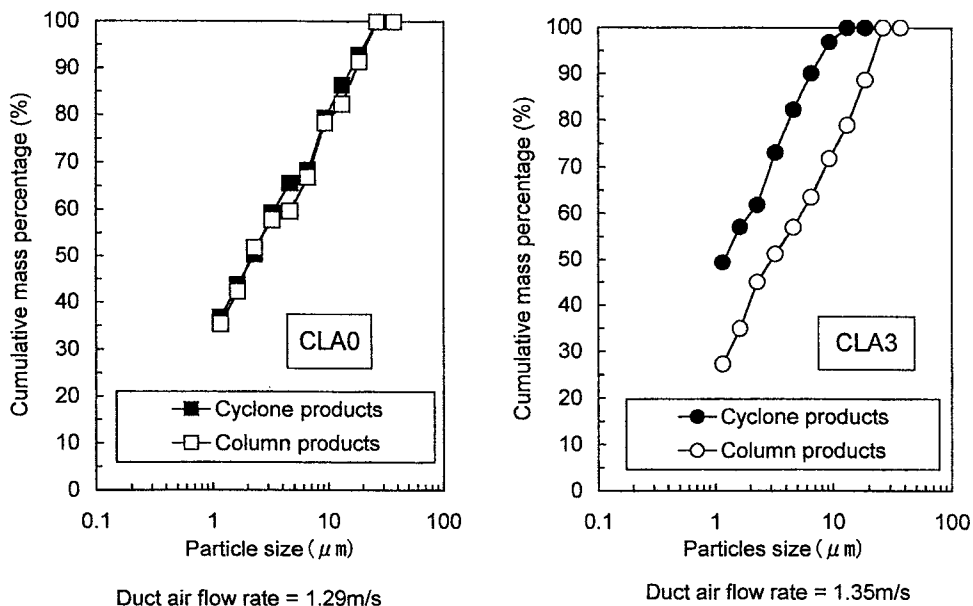


Figure 11 Particle size distribution of cyclone column products (CLA0 and CLA3). (with $\phi 20$ mm balls, screw speed 1.42 s^{-1} (85 rpm))

(Estimated Curve 2) として取り扱う。(6)式より求まる推定曲線2と分級部捕集産物の最大粒子径を示した図が Figure 8 (b) である。図で示されるように、各カラムで得られた分級部捕集産物の最大粒子径は、ほぼ全ての粒子が推定曲線2を0.6倍に補正した曲線(破線)で表すことができる。

$$D_{cl-max} = \left(\sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_m - \rho_s)}} \times U_c \right) \times 0.6 \quad \dots\dots (7)$$

この原因としては、分級部捕集産物の最大粒子径が解砕部内流速に規定されると仮定していること、さらにアンダーフローとしてカラム底部に沈積する多くの粒子が、カラム内では2次粒子の形で存在していたことが原因として考えられる。

以上の内容をまとめると、KD-3型機のカラムは、粉碎によって生成した粒子を粒径によって分級する立型カラム分級機の役割を果たしていることが明らかになった。さらに、カラム内の粒子に対してストークスの自由沈降の法則を適用し、補正係数として0.6~1.5を掛け合わせることで、粉碎産物の最大粒子径を予測できることが示された。

3. 3. 2 粉碎産物における最大粒子径と50%粒子径の関係

各カラムを用いた場合に回収された粉碎産物の最大粒子径と50%粒子径の関係を Figure 9 に示す。図には、CLA 0, CLA 1, CLA 2 および CLA 3 毎にサイクロン捕集産物(■印, ▲印, ◆印, ●印)と分級部捕集産物(□印, △印, ◇印, ○印)の両産物を表示し、最小自乗法で一次近似した直線も示している。

各カラムで捕集されたサイクロン捕集産物と分級部捕集産物の最大粒子径および50%粒子径を比較すると、すべての最大粒子径は50%粒子径と比例関係にあることがわかる。次いで、カラム別に見ると、CLA 0 のサイクロン捕集産物と分級部捕集産物の両粒子径は重なりがあるのに、CLA 1, CLA 2, CLA 3 では、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物の最大粒子径、50%粒子径は重複していない。これは、CLA 0 ではカラム内に網を取り付けていないため、中心部付近を速く吹き上げる気流が発生し、カラム内での分級効果が低かったと考えられる。

一方、CLA 1, CLA 2 および CLA 3 は、カラム内での分級作用が微細な粒子に対しても良好に働いたため、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物との間に最大粒子径の境界が存在しているのがわかる。この傾向は、横軸の50%粒子径から見ても同様に確認される。以上のことから、カラム内に網を取り付けることで、カラム内の気流整流作用に加えて、産物を粒子径別にサイクロン捕集産物と分級部捕集産物とに分級する分級作用の役割を果たすことがわかった。特に、CLA 3 では最大粒子径が約 $8.0\mu\text{m}$ ~ $12\mu\text{m}$ 、50%粒子径が $1.0\mu\text{m}$ ~ $1.5\mu\text{m}$ に分布し、極めて微細な粒度を示している。

次いで、この現象を確認するためにカラム CLA 3 で別に行った粉碎試験結果を Figure 10 に示す。本図は、Figure 9 と同様に最小自乗法で求めた近似直線と重相関係数 R^2 (0.89) を示している。また、ダクト内流速は 0.3 (m/s) ~ 1.5 (m/s) に行った。図で示すように、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物は明確に分級された状態となっている。しかも、最大粒子径からみると約 $15\mu\text{m}$ 付近にサイクロンと分級部の両産物の境界が存在し、同じく50%粒子径からみると、約 $1.7\mu\text{m}$ 付近に境界が存在している。このことから CLA 3 では非常に高い分級作用が働いていることが確認される。

以上述べた内容を確認するための方法として、粉碎産物の粒度分布の1例を Figure 11 に示す。図は、CLA 0 と CLA 3 を用いた場合に、ダクト内流速をそれぞれ 1.29 (m/s) と 1.35 (m/s) と両者ほぼ同じ流速に調整した実験での粒度分布を示している。両図を比較すると、CLA 0 を用いた場合のサイクロン捕集産物と分級部捕集産物の粒度分布はほとんど重なっており、同じ粒度分布をもった産物であることがわかる。言い換えると、分級部カラムでの分級作用が微細な産物粒子に対してほとんど働いておらず、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物を粒子径別に分級していないことを示している。一方、CLA 3 の粒度分布は、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物が明らかに違う分布を取っており、サイクロン捕集産物の方が微粒な粒径部分が多くなっている。このことから、CLA 3 は、カラム内の分級作用が良好に働き、粒子を粒径別にサイクロン捕集産物と分級部捕集産物とに分級していることがわかる。

4. まとめ

乾式タワーミル KD-3 型機において、粉碎媒体のスチールボールのサイズ、攪拌スクリュウの回転速度、分級部カラム内の網が粉碎産物に与える影響を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 粉碎用スチールボールのサイズについては、直径の大きいボールの方が産物重量は多くなり、粉碎能力が高かった。また、粉碎産物の最大粒子径には、粉碎用スチールボールのサイズによる明確な影響が現れず、ボールサイズは最大粒子径を決定する要因ではないことが示された。
 - (2) 攪拌スクリュウの回転速度は、回転速度が大きくなるにつれ、サイクロン捕集産物重量および分級部捕集産物重量がともに増加した。一方、単位エネルギー(粉碎仕事量)は、サイクロン捕集産物および分級部捕集産物の両者とも、攪拌スクリュウの回転速度が変化しても増大することなくほぼ一定の値を示すことが明らかになった。
- また、粉碎産物の粒度構成には、攪拌スクリュウの回転速度による明確な影響がみられず、スクリュウ回転速度は粉碎産物の粒度構成を規定する要因とは認められなかった。
- (3) 分級部カラムは、粉碎によって生成した粒子を分級する立型カラム分級機の役割を果たし、産物の粒子径を規定していることが明らかになった。しかも、カラム内の粒子に対してストークスの自由沈降の法則を適用することにより、粉碎産物の最大粒子径が予測できることを示した。

また、捕集産物の最大粒子径と50%粒子径は比例関係にあり、カラム内に網を取り付けることで気流の整流作用が働くことがわかった。その結果、サイクロン捕集産物と分級部捕集産物の最大粒子径、50%粒子径がそれぞれ明確に分離された。

5. 謝辞

本装置の製作にご協力戴いた元クボタタワーミル(株)と資料を提供して戴いた(株)戸高鉱業社の方々に厚くお礼申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 河端重勝 (1955) : 「塔式摩砕粉砕機について」, 化学工業, 7月号, p. 620-622
- 2) 土屋茂雄 (1955) : 「塔式粉砕機の其の後の成績について」, 浮選, Vol. 3-秋季号, p. 28-34
- 3) 河端重勝 (1956) : 「新しい摩砕粉砕機について (第一報)」, 日本機械学会論文集, Vol. 22, No. 118, p. 443-449
- 4) 河端重勝 (1959) : 「乾式塔式摩砕粉砕機について」, 日本鉱業会誌, Vol. 75, p. 563-565
- 5) 河端重勝 (1961) : 特集-最近の微粉砕機-「微粉砕機としての塔型摩砕粉砕機」, ケミカル・エンジニアリング, 6月号, p. 617-626
- 6) 河端重勝 (1969) : 「タワーミルについて」, 粉体と工業, 3月号, p. 53-56
- 7) 河端重勝 (1972) : タワーミル, (株)粉体と工業社
- 8) 河端重勝 (1977) : 「混合機としてのタワーミル-実操業例-」, 粉体と工業, Vol. 9, No. 5, p. 63-66
- 9) 柴山敦・森祐行 (1999) : 「タワーミル粉砕機の生まれと育ち」, 資源処理技術, Vol. 46, p. 24-30
- 10) 矢野昭文 (1998) : 「タワーミルの新用途例 “活性水酸化マグネシウムの製造方法”」, 資源処理技術, Vol. 40, p. 114-117
- 11) 新田幸人 (1998) : 「タワーミル (KW-1500) による排煙脱硫用石灰石の微粉砕」, 資源処理技術, Vol. 45, p. 22-24
- 12) 新田幸人 (1998) : 「排煙脱硫 (F. G. D) 用石灰石粉砕湿式タワーミル」, 資源処理技術, Vol. 45, p. 209-210
- 13) 麻生欣次郎・森祐行・原剛・河本徳 (1982) : 「石灰石の微粉化に関する研究」, 浮選, Vol. 29, p. 168~177
- 14) 森祐行・原剛 (1986) : 「タワーミルによる石灰石の微粉砕」, 資源処理技術, Vol. 33, p. 50~57
- 15) 森祐行・原剛・辻吾一 (1992) : 「タワーミル KD-1 型粉砕機による石灰石の微粉化に関する研究」資源と素材, Vol. 108, p. 579~583
- 16) 森祐行・原剛・辻吾一・浜田国揮 (1994) : 「タワーミル KD-2 型粉砕機による石灰石の微粉化に関する研究」, 資源と素材, Vol. 110, p. 733~737
- 17) 森祐行・原剛・辻吾一・浜田国揮・岡田美洋 (1995) : 「分級部を改良した新しいタワーミル粉砕機 (KD-3 型) の開発」, 資源と素材, Vol. 111, p. 323~328
- 18) Sukeyuki MORI, Atsushi SHIBAYAMA and Tsuyoshi HARA (1997) : 「Development of a tower mill for fine grinding」, Proceedings of the XX International Mineral Processing Congress, (Aachen, GERMANY), Vol. 2, p. 61-69
- 19) 原剛・森祐行 (1990) : 「沈降天秤による石灰石微粉砕産物の粒度分布測定」, 資源処理技術, Vol. 37, p. 138~146
- 20) 原剛・森祐行 (1994) : 「沈降天秤式粉体粒度分布測定法における沈積曲線の数値解析」資源と素材, Vol. 110, p. 581~586