

# コボール・ミルの粉碎特性

## Investigation of the Grinding Behaviour of CoBall-Mill

(化)技術部 技術第2課  
谷 口 十 一  
Toichi Taniguchi  
田 中 英 美  
Hidemi Tanaka  
技術開発本部  
平 尾 俊 策  
Shunsaku Hirao

CoBall-Mill, the new generation of stirrer ball mills, is getting reputation in several industries for ultrafine grinding of crystalline solids and dispersion of agglomerate particles.

Up to now, few results of investigation on stirrer ball mills are available which reveal relationships existing between the operating variables and grindabilities.

In this paper, we try to do it. Grinding tests of CoBall-Mill were carried out and reported as parameters of solid concentration, flow rate, circumferential speed of rotor, filling rate of media and media size etc.

### えがき

ボール・ミルはアニューラー・タイプの媒体攪拌ミルのである。近年の高速型媒体攪拌ミルは、1952年にアメリカの Du Pont 社により発表された塗料製造用サンド・インダーを端緒とし、その後各社により改良改善が実現、現在では塗料業界のみならず、化学、医薬、食品などの分野においても凝集粒子の分散や固体粒子の粉砕に広く利用されている。

しかしながら、媒体攪拌ミルはプロセスの重要部分で使われることが多く、その使用方法や機能については各社ノウハウとしてのみ蓄積されており、一般にはほとんどされていない。報告された研究例としては、N. Stehr 一連のもの<sup>1,2</sup>が目につく程度である。

ボール・ミルは粉碎室を狭いアニューラー形状にて構成し、粉碎室に一樣な高エネルギーを与え、効率良い粉砕を行う新しいタイプの媒体攪拌ミルであり、従来型媒体攪拌ミルとは機能において、かなり異なる傾向を持つと考えられる。前報<sup>3</sup>でコボール・ミルについてのを試みたので、本報では当社におけるテスト結果を中海外での研究結果を含め、コボール・ミルの粉砕特性を報告する。

### コボール・ミルの構造と特長

ボール・ミルの概形を第1図に示す。断面が逆三角形の環状の容器の内部を、回転軸に取り付けられた同じ形状のロータが回転している。ロータの最大径における速度は  $10\sim 15\text{ms}^{-1}$  程度である。容器とロータの隙間が室となり、ここに粉砕メディアが充てん率50~80%で充てんされる。粉碎室の幅は、メディアが自由に運来する最小の間隙を選んでいる。このため粉碎室のギャップ幅は、選定したメディアの大きさにより決められる。メディアの大きさは直径0.5~3mmの範囲で選定され

スポンジは、ミル下部の入口からポンプにより送り、入口ギャップを経て粉碎室へ入る。W形をした粉砕室で固体粒子が粉砕、または分散される。処理されたスポンジは、ギャップ・セパレータにてメディアと分離、ミルから排出される。

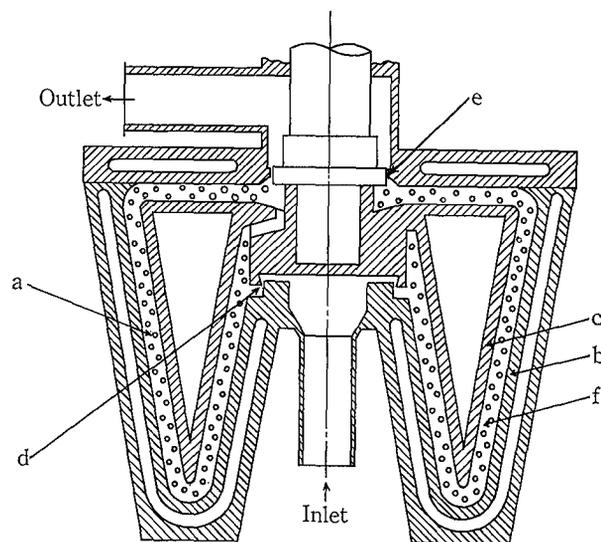
メディアはW形の粉碎室を遠心力の作用により順次移動し、ロータ・ハブ部のメディア循環用の孔から再びミル内のサスペンション入口に戻り、循環する。

粉碎室をこのように独特の形状をした狭い隙間で構成することにより、

- 1) 粉碎室のエネルギー密度が高く、しかも均一となるため、微粉砕が可能である。
- 2) サスペンション粒子の粉碎室内ショート・パスが無く、製品の粒度分布がシャープになる。
- 3) 粉碎室容積に対する冷却表面積の比が大きいため、冷却効果が優れ、温度コントロールが容易である。
- 4) メディアが粉碎室内を循環し、サスペンション粘度の高低にかかわらず自由に運動出来るため、高粘度域のサスペンションの処理が可能である。

などの特長があり、二次的には、粉碎室の構造が極めて簡単で、容積が小さいため

- 5) 洗浄が簡単である。



第1図 コボール・ミル概形図

Fig. 1 CoBall-Mill; a grinding chamber; b stator; c rotor; d inlet gap; e gap separator; f media

6) 品種替えの場合の製品ロスが少ない。  
などがあげられる。

## 2. コボール・ミルの流動特性

コボール・ミルは、第1図に示すように、形状の特異性から、槽形状の従来タイプの媒体攪拌ミルに比べて、ショート・パスが無く、シャープな粒度分布をもつ粉砕が出来る優れた特長がある。この現象は、ミル内の流体がプラグ・フロー的にW形の流路を進むことが期待出来る構造であり、さらに、粉碎室を二重円錐とみなした場合、そこにテラー渦の形成が想定出来るなど、定性的に説明が加えられていた。<sup>3)</sup>

ここでは、コボール・ミルを一つの流通装置と考え、装置内における流体の流れおよび混合の機構を定量的に評価することを目的として、滞留時間分布を求め、装置内の流れをモデル化することを試みた。<sup>4)</sup>

### 2.1 実験方法

実験はMS-18型コボール・ミルを用い、パルス信号によるインパルス応答を測定する方法をとった。流体としては、水飴水溶液を用い、コボール・ミルに定常状態で送液し、瞬間的にミル入口部で、トレーサとしての食塩水を注入し、ミル出口部で流体の電導度を、流通形電導度セル(TOA製CG-801PL)および電導度計(TOA製CM-6A)にて測定した。この測定された電導度より、出口濃度Cを得、濃度～時間曲線を求めた。

### 2.2 滞留時間分布曲線

測定実時間tにおける装置内での滞留時間分布をあらわす出口寿命分布値E(t)は、

$$E(t) = \frac{C}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (1)$$

となる。ここに、分母は入りこんだトレーサの全濃度である。また、平均滞留時間 $\bar{t}$ は

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (2)$$

で表わされ、無次元化された時間 $\theta$ を

$$\theta = t / \bar{t} \quad (3)$$

で定義すると、

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = \int_0^{\infty} E d\theta = 1 \quad (4)$$

より、無次元時間での出口寿命分布値Eは、次式により実験的に求められる。

$$E = \bar{t} E(t) \quad (5)$$

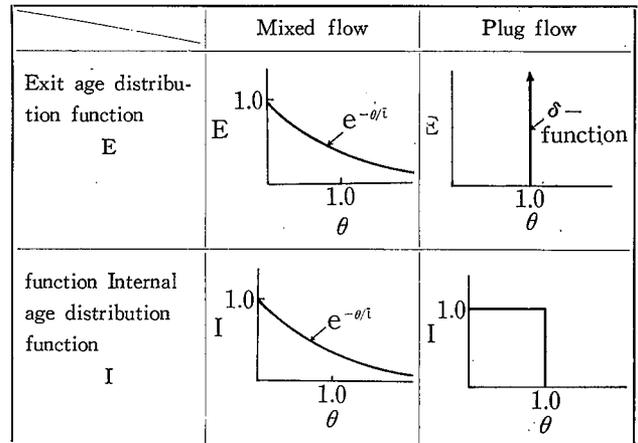
このE~ $\theta$ 曲線は、出口寿命分布曲線(第2図参照)と呼ばれる。

またトレーサを投入して $\theta$ 時間後に、まだ装置内にどれだけ残存しているかを示す関数である器内寿命分布関数Iは、積分分布関数であり、微分分布関数であるEに対し、

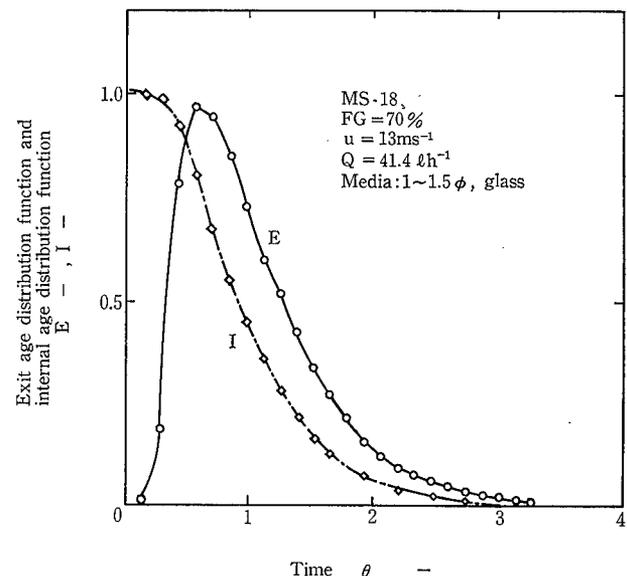
$$I = 1 - \int_0^{\theta} E d\theta \quad (6)$$

で表わされI~ $\theta$ 曲線は器内寿命分布曲線(第2図参照)と呼ばれる。

コボール・ミルの流通実験で得られた、E~ $\theta$ 曲線およ



第2図 流通装置内の流れの様式とトレーサー応答  
Fig. 2 Schematic model of flow and impulse response



第3図 コボール・ミルの滞留時間分布曲線  
Fig. 3 Distribution of residence time on CoBall-Mill; liquid treated is millet jelly,  $\nu=140cp$

びI~ $\theta$ 曲線の一例を第3図に示す。第3図を、理想的な完全混合流れおよび押し出し流れ(プラグ・フロー)の様式を示す第2図<sup>5)</sup>と比較すると、コボール・ミル内の流れは、完全混合流れよりも、はるかにプラグ・フローに近いといえる。

### 2.3 流れのモデル

一般に流通装置内の不完全混合流れの状態を表わすのに各種の混合モデルが提案されている。ここでは、コボール・ミルに完全混合槽列モデル<sup>6)</sup>を適用した。

j個の槽列を考え、各槽の容積をV、流体の体積流通速度を $v$ とすると、i番目の槽についてのトレーサの物質収支は次のようになる。

$$vC_{i-1} = vC_i + V \frac{dC_i}{dt} \quad (7)$$

ここでCはトレーサの濃度であり、左辺はi番目に入ってくるもの、右辺第1項は出てゆくもの、第2項は変化する分である。(7)式を適正な境界条件のもとに解いて、

$$E = C/C_0 \quad (8)$$

からEを求め、さらに分散を求めると

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (\theta - 1)^2 E d\theta = 1/j \quad (9)$$

なる。この分散 $\sigma^2$ は、出口寿命分布曲線Eにおいて、その平均値における分布の幅を意味している。(9)式から完全混合槽の相当段数jを求めることが出来る。

コポール・ミルの完全混合槽相当段数を、理想流体の粘度域に対してプロットしたのが第4図である。この実験範囲においては、相当段数jはほぼ流体粘度に比例しており、粘度が100 cp以上であれば、jは3.5以上の値をとっている。これは、従来タイプの媒体攪拌ミルでのj=1~2程度と比べてみると、ミル入口および出口間でのショート・パス現象の防止の点で、コポール・ミルは優れた機構を有しているといえる。

### コポール・ミルの粉碎特性

MS-18型を使用してコポール・ミルの粉碎特性を調べた。MS-18型の主要諸元は、

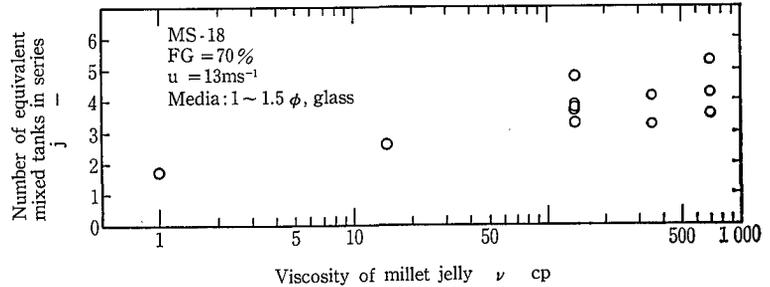
粉碎室容積	1ℓ
粉碎ギャップ幅	6.5 mm
ロータ最大径	180 mm
ロータ周速	10および 13 m·s <sup>-1</sup>
入口および出口ギャップ	0.3 mm
冷却面積	ロータ側 0.06 m <sup>2</sup> ステータ側 0.12 m <sup>2</sup>
モータ動力	12.6 kw
メディア径	1~1.5 mm
メディア材質	ジルコン (充てん密度 2.4 kg·ℓ <sup>-1</sup> ) ガラス ( " 1.7 kg·ℓ <sup>-1</sup> ) スチール ( " 4.5 kg·ℓ <sup>-1</sup> )

である。ただし、使用メディア径は上記のほか、0.75~1 mm, 1.5~2 mm の範囲でも実験を行ったが、この場合はロータを取り替えるため、粉碎ギャップ幅も上記の6.5 mmから4.5および8.5 mmに変化し、粉碎室容積もそれぞれ0.8および1.4ℓとなる。

粒度分布の測定は、光透過式遠心沈降粒度分布測定装置(島津製作所製SA-C P2)により行った。

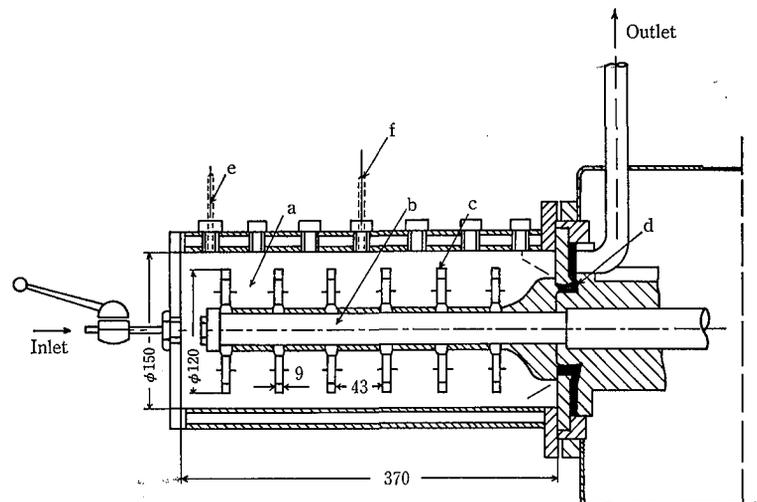
なお、西ドイツ Braunschweig 工科大学の Schwedes 研究室で行われた実験データを引用したが、これらはMS 12型によりテストされており、ロータ最大径120 mm, 粉碎室容積0.5ℓのもので、平均粒径1 mm, 比重2.89 g·cm<sup>-3</sup>のガラス・メディアを使用し、ロータ周速10および13, 16 m·s<sup>-1</sup>にて行われた<sup>7)</sup>。

また、コポール・ミルの粉碎特性と比較するため、従来タイプの攪拌媒体ミルの実験データを引用したが、これらも Schwedes 研究室にて行なわれたものである。実験装置は第5図<sup>1)</sup>に示すように横型の媒体攪拌ミルで、粉碎室に冷却用のジャケットを付けている。大きさは直径150 mmで長さ370 mm, 有効容積5.5ℓである。攪拌軸には孔



第4図 コポール・ミルの完全混合槽相当段数と流体粘度

Fig. 4 Number of equivalent mixed tanks in series as a function of viscosity of liquid to be treated



第5図 従来タイプの媒体攪拌ミル

Fig. 5 Conventional stirrer ball mill;

a grinding chamber; b stirrer shaft; c perforated disk; d collecting chamber; e temperature measurement; f sample probe

のあいた6枚のディスクが付いており、粉碎室内のメディアを攪拌流動させる。メディアは平均粒径1 mm, 比重2.89 g·cm<sup>-3</sup>のガラス製のものが使用されている。

Schwedes 研究室で行われたコポール・ミル、横型媒体攪拌ミルのテストは、いずれも同一砕料として、メディア径42 μm, 真比重2.7 g·cm<sup>-3</sup>の炭酸カルシウムが用いられ、粒度分布はX線透過式粒度分布測定装置(マイクロメリティックス社製セディグラフ5000D)により測定されている。

### 3.1 メディア充てん率

直径1~1.5 mmのジルコン・メディアを用いて、メディア充てん率がコポール・ミルに与える影響について調べたのが第6図である。

砕料として軽質炭酸カルシウム(メディア径 $d_{50}=24 \mu\text{m}$ , 真比重 $\rho=2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )を使用し、水に固体濃度 $C_v=0.5\%$ にて分散し、このスラリー溶液をギア・ポンプでコポール・ミルに一定流量 $Q \ell\cdot\text{h}^{-1}$ 送液し、ワン・パスにて粉碎した。

充てん率30%では、ほとんど粉碎作用が行われておらず、流量Qを小さく、すなわち、ミル内の平均滞留時間を大きくしてはじめて若干の粉碎効果が認められるにすぎない。

充てん率を50%にすると、MS-18型の適正な処理流量30~80 $l \cdot h^{-1}$ の範囲では、メディア径で4 $\mu m$ 以下に粉碎され、効果が大きい。

さらに、充てん率を70%にあげると、粉碎効果も大きくなっており、50~80%程度のメディア充てん率の範囲では  
(粉碎性能の比)  $\propto$  (メディア充てん率の比)<sup>2</sup>  
の傾向が認められた。

コボール・ミルでは、前報<sup>3)</sup>で示したように、メディア充てん率が80%を超えると、メディアのミル内循環時間が急増し、メディアのスムーズな運動が阻害される。したがって、コボール・ミルのメディア充てん率としては、碎料の種類、濃度Cv、処理速度などによって、50~80%で適正な点を選定する必要がある。標準的には70%程度を目処としている。

### 3.2 ロータ周速

コボール・ミルの粉碎性能に対してロータ周速が大きな影響をもつのは、第5図に示す従来タイプの媒体攪拌ミルと同様であり、この傾向は第6図よりもうかがえる。

ロータ周速と粉碎性能の関係をMS-12型コボールを用いて調べたのが第7図<sup>7)</sup>である。

実験はメディア充てん率を50%とし、碎料のミル内平均滞留時間を一定とし、ロータ周速を10, 13, 16 $m \cdot s^{-1}$ の3段階に変化させている。

ロータ周速の増加に伴い、メディアの運動も激しくなり、ロータ側に近いメディアと、ステータ側に近いメディアの相対速度が大きくなるため、作用するせん断力が強くなる。したがって、ロータ周速に比例してミルの粉碎能力もあがっている。

第7図の場合、メディア径でみると、 $u=16 m \cdot s^{-1}$ は $u=10 m \cdot s^{-1}$ の半分以下の粒径となっており、粒度分布もよりシャープとなっている。

第7図を同一碎料を用いて、従来タイプの媒体攪拌ミルについて実験した第9図と比較してみると、コボール・ミルの粒度分布の方が、従来タイプの媒体攪拌ミルよりもシャープである。

### 3.3 平均滞留時間

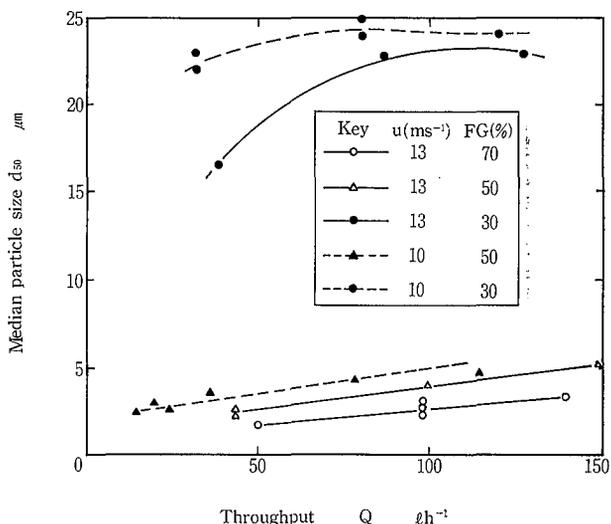
ミル内の平均滞留時間 $\tau$ は次式により計算する。

$$\tau = \frac{V - V_{med}}{Q} \quad (10)$$

ここで、Qは処理するサスペンションの流量を単位時間当たりの体積で表わしたものであり、Vは粉碎室の有効容量、 $V_{med}$ は粉碎メディアの実容積である。 $V_{med}$ は、メディアのみかけの容積から、充てんメディア間の空間容積を引いた値である。

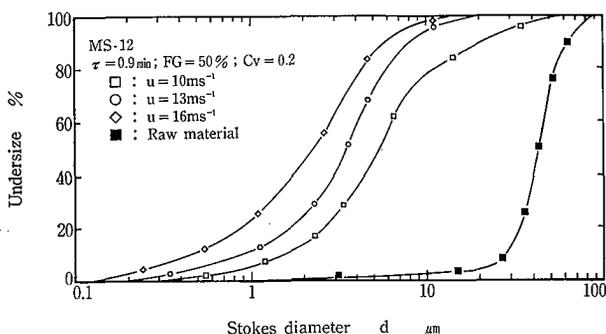
第6図よりも類推されるように、平均滞留時間が大きくなるにつれ、メディア径も減少し、粉碎能力は、平均滞留時間に反比例する。

第8図は、粒度分布曲線でみた例であり、MS-12型により、メディア充てん率50%、ロータ周速10 $m \cdot s^{-1}$ としてテストした結果である。平均滞留時間が $\tau=0.7$ 分と短い場合には、メディア径で4 $\mu m$ であり、10 $\mu m$ 以上の粗粒子がまだかなり残っているが、約2倍の $\tau=1.36$ 分の滞留時間をとると、10 $\mu m$ 以上の粗粒子が少なくなり、メディア径も2.5 $\mu m$ 程度と小さくなっている。



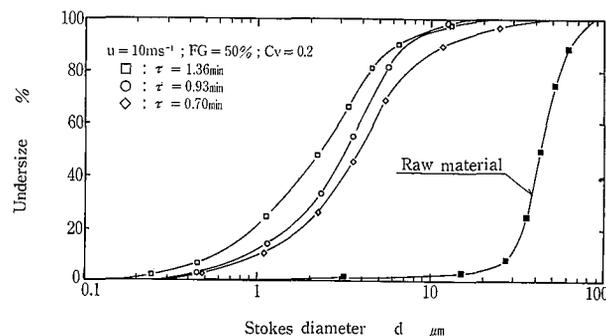
第6図 メディア充てん率の影響

Fig. 6 Grindability of CoBall-Mill as a function of media filling rate; solid concentration  $C_v=0.5$ ; material  $CaCO_3$ ; media 1~1.5mm, zircon



第7図 ロータ周速の影響

Fig. 7 Particle size cumulative distribution for 3 circumferential speed of rotor  $u$  on CoBall-Mill; mean residence time  $\tau=0.9$ min; solid concentration  $C_v=0.2$ ; filling rate of media  $FG=50\%$ ; material  $CaCO_3$ ; media 1mm, glass



第8図 平均滞留時間の影響

Fig. 8 Particle size cumulative distribution for 3 residence time  $\tau$ ; circumferential speed of rotor  $u=10$  $m \cdot s^{-1}$ ; solid concentration  $C_v=0.2$ ; filling rate of media  $FG=50\%$ ; material  $CaCO_3$ ; media 1mm, glass

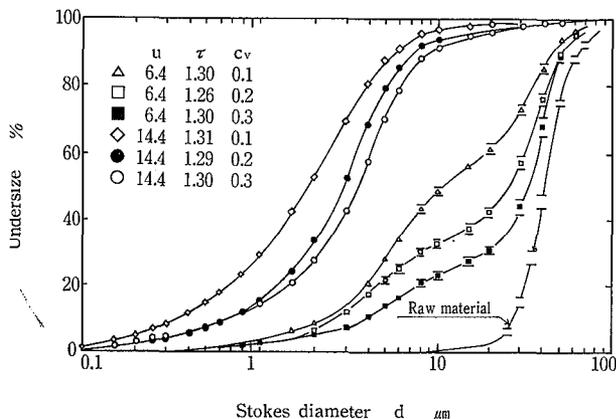
従来タイプの媒体攪拌ミルのデータ<sup>1)</sup>では、同一砕料に対し、 $\tau=1.26$ 分の場合、ディスク周速を  $12.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  に上げても、メディア径で  $3.2 \mu\text{m}$  程度である。

#### 4 スラリー濃度

従来タイプの媒体攪拌ミルについて、粉碎能力に与えるスラリーの固体濃度の影響が Stehr らによって研究され、第9図として紹介されている<sup>1)</sup>。炭酸カルシウム・スラリーのミル内滞留時間をほぼ一定とし、ディスク周速を  $6.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  および  $14.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  にとり、固体濃度  $C_v$  をパラメータとして10%から30%に変化させている。粉碎製品の粒度分布は、ディスク周速の差により、明らかに異なる分布曲線を描いている。ディスク周速がおそい場合には、砕料によく似た粒度分布をもち、粉碎が十分に行われていない。しかしながら、いずれのディスク周速でも、固体濃度が增加すると分布曲線は粗い方向に寄り、粉碎効果が悪くなっている。

同様の実験を、コボール・ミル MS-18 型に行った結果が第10図である。この実験では、ロータ周速を  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  一定とし、炭酸カルシウム・スラリーのミル内滞留時間を  $0.6$  分と  $0.8$  分にとり、固体濃度  $C_v$  を  $40\%$  および  $50\%$  に変じさせた。スラリーのミル内滞留時間  $\tau$  が  $0.8$  分の場合には、スラリー濃度による差はほとんど認められないが、 $\tau=0.6$  分の場合には、スラリー濃度の濃い方が粉碎効果がいまいという、従来タイプの媒体攪拌ミルとは反対の傾向を示した。

これは  $\tau$  が短い、すなわち処理流量が大きく、またスラリー濃度が濃く粘度が高い場合に、従来タイプの媒体攪拌ミルでメディアがミルの出口側に偏在し、ディスクと半まわりしたり、逆にディスクの回転に追随せず、動きが悪くなる傾向があるのに対し、コボール・ミルでは、メディアがミル内を循環するため、スラリーの粘度が高くてもメディアの動きを拘束することが少なく、スラリー濃度が高い方が、メディアの粒子捕捉確率が上がるためであると考えられる。



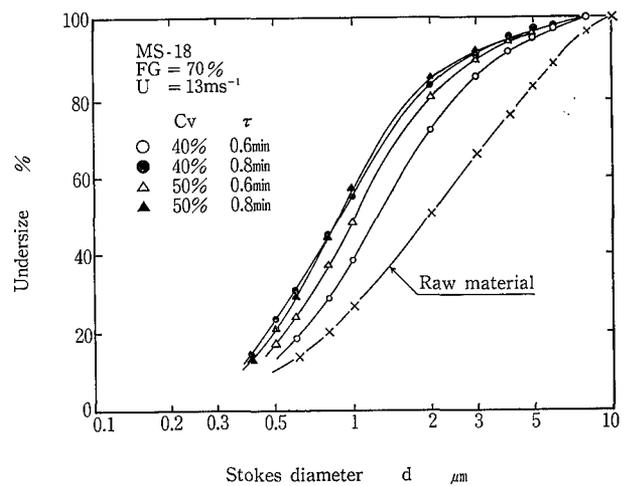
第9図 従来タイプのミルにおける粉碎粒度とスラリー濃度  
Fig. 9 Particle size cumulative distribution for 3 solid concentrations  $C_v$  on conventional stirrer ball mill; mean residence time  $\tau \approx 1.30$  min; circumferential speed of disks  $u=6.4$  and  $14.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; filling rate of media  $FG=80\%$ ; material  $\text{CaCO}_3$ ; media  $1 \text{ mm}$  glass

染料の粉碎や塗料の分散においても、コボール・ミルではある程度までビシクルの濃度を高くし、みかけの粘度をあげた方が好結果を得る場合が多い。

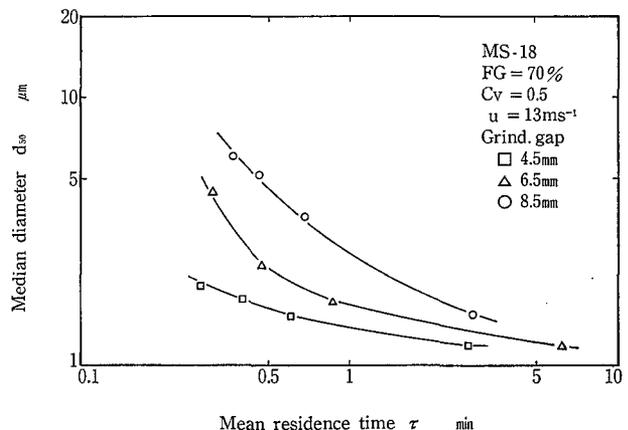
#### 3.5 粉碎室のギャップ幅

コボール・ミルは前報<sup>4)</sup>で述べたように、粉碎室のギャップ幅をメディア4ヶ分の大きさとしている。この有効性を調べるために、同一粒径範囲のメディアを用い、ロータを替えることによりギャップ幅を変化し、炭酸カルシウム・スラリーの粉碎実験を行った。ただし、メディアの充填率はそれぞれの場合に対し70%一定とした。結果を第11図に示す。

使用メディアの粒径は  $0.75 \sim 1 \text{ mm}$  であるため、粉碎室ギャップ幅が  $4.5 \text{ mm}$  でメディア4個ならび、ギャップ幅  $6.5$  および  $8.5 \text{ mm}$  では、それぞれメディア6個、8個ならびと考えられる。第11図より、4個ならびが最も粉碎効果が



第10図 スラリー濃度の影響  
Fig. 10 Particle size cumulative distribution for 2 solid concentrations  $C_v$  on CoBall-Mill; mean residence time  $\tau=0.6$  min and  $0.8$  min respectively; circumferential speed of rotor  $u=13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; filling rate of media  $FG=70\%$ ; material  $\text{CaCO}_3$ ; media  $0.75 \sim 1 \text{ mm}$ , zircon



第11図 粉碎室ギャップ幅の影響  
Fig. 11 Mean particle size  $d_{50}$  as a function of mean residence time at 3 lengths of grinding gap on CoBall-Mill; solid concentration  $C_v=0.5$ ; filling rate of media  $FG=70\%$ ; circumferential speed of rotor  $u=13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; material  $\text{CaCO}_3$ ; media  $0.75 \sim 1 \text{ mm}$ , zircon

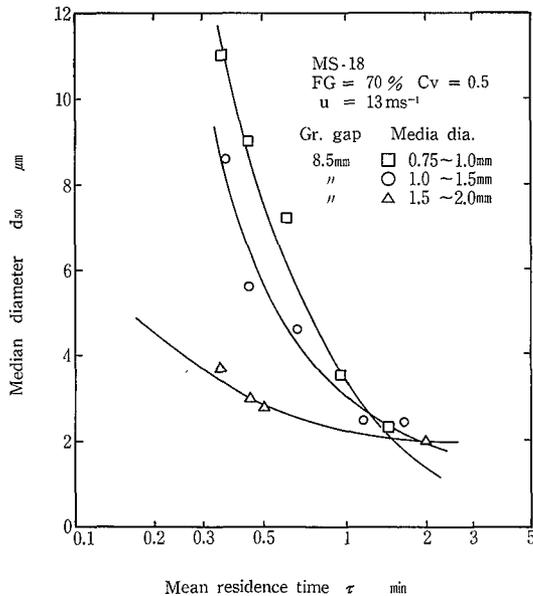
高く、ギャップの幅が大きくなるほど粉砕効果が低下していることがわかる。

また、ギャップ幅の影響は、ミル内平均滞留時間が短いほど顕著である。

この実験においてはいつれの場合も、その消費電力にほとんど差がなかったことから、粉砕室のギャップ幅が小さいほど、粉砕室に与えられるエネルギー密度が高くなり、粉砕性を向上させている。

第12図も同様な実験結果であるが、この例では、粉砕室のギャップ幅を8.5mmに一定とし、そこに充てんするメディアの粒径を変化させることにより、メディア4個、6個、8個ならびとした。なおメディア充てん率はそれぞれ一定とした。この結果も4個ならびが最も粉砕効果がよく、メディアのならび数がふえるに従い、粉砕性能が低下している。このテストはメディアが摩耗等により小さくなると、容量的に同じだけ充てんしても粉砕効果が出ないことを示している。ただし、これらのデータは、ミル内平均滞留時間が長くなると曲線が交差しており、ミル内滞留時間をパス回数を重ねるなどにより長くしていった場合、メディア径の小さいものほど最終到達粒度も細くなる可能性があることを示唆している。

第11図および第12図のいつれの結果においても、粉砕室のギャップ幅にならぶメディアの数が少ない方が粉砕効果が良い。ギャップ幅をある一断面でみた場合、ロータおよびステータに接するメディアの回転速度は、ロータ周速が一定であれば、どちらの場合もほとんど一定と考えられ、ギャップ幅での速度勾配がほぼ同一となるため、メディア数が少ないほど隣合うメディアの相対速度が大きくなり、せん断力が強く作用し、粉砕性能を高める結果となっている。



第12図 メディア径の影響

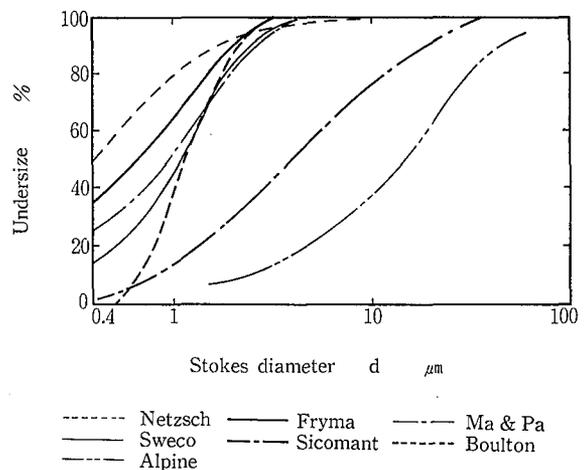
Fig. 12 Mean particle size  $d_{50}$  as a function of mean residence time at 3 diameters of media on CoBall-Mill; grinding gap 8.5mm; solid concentration  $C_v = 0.5$ ; filling rate of media  $FG = 70\%$ ; circumferential speed of rotor  $U = 13\text{m/s}$ ; material  $\text{CaCO}_3$ ; media zircon

### 3.6 他形式の粉砕機との比較

コボール・ミルによる粉砕製品の粒度分布を、他の形式の微粉砕機によるものと比較して示したのが第13図である。これは、スウェーデンのLuleå工科大学のK.S.E. Forsbergらによって行われた興味ある研究結果<sup>8)</sup>である。砕料としては $0 \sim 150 \mu\text{m}$ の粒度範囲にある石灰石を用い、7種類の微粉砕機により粉砕テストを行い、セディグラフにより粉砕製品の粒度分布を求めた。7種類の微粉砕機は、媒体攪拌ミルとして、アニューラー・タイプのコボール・ミル(Fryma社製MS-18)と、円筒形ミル(Matter & Partner社製RSK 22.5/36)<sup>9)</sup>、従来タイプの横形アジテータ・ミル(Netzsch社製LME 20)<sup>10)</sup>、振動ミルとしてスウェコ振動ミル(SWECO社製M45)<sup>11)</sup>、ボールドン振動ミル(Boulton社製12")<sup>12)</sup>が湿式のミルとして選ばれ、乾式のミルとしては衝撃式ミル(Sicomant社製S 200)およびジェット・ミル(Alpine社製CW 250)<sup>13)</sup>が実験された。

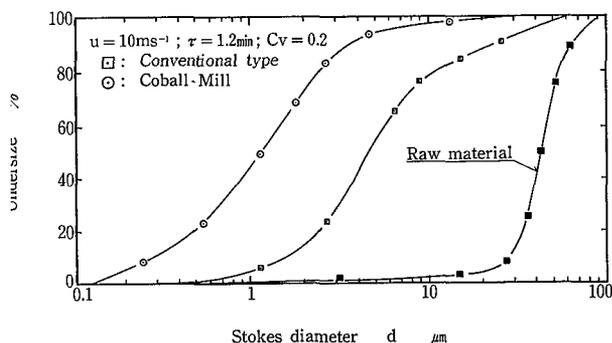
粒度分布をみると、振動ミルが最もシャープな分布となり、乾式の衝撃式ミルおよびジェット・ミルがフラットな分布を示している。媒体攪拌ミルはこの中間にあり、アニューラー・タイプのコボール・ミルは、従来タイプのミルに比べると、振動ミルに近いシャープな分布を示している。この傾向は、砕料をドロマイトやマスコバイトにしても同じであった。この実験から微粉砕に対して、湿式で粉砕メディアを使用する粉砕機構を有するミルが効果的であることがいえる。Forsbergらは、粉砕メディアの大きさや、材質、したがってメディアの比重を変えることによって、粒度分布の幅をコントロールすることが可能であると報告している。

Schwedes研究室でのテスト結果により、コボール・ミルと従来タイプの媒体攪拌ミルを比較した一例が第14図である。従来タイプのミルでは、 $10 \mu\text{m}$ 以上の粗粒子が20%も残存しているのに対し、コボール・ミルでは2%程度であり、メディア径も従来タイプ $4.7 \mu\text{m}$ に対し $1.2 \mu\text{m}$ とかなりの差が生じている。

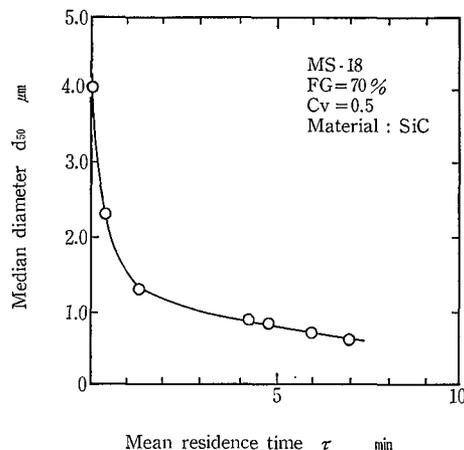


第13図 各種微粉砕機の比較

Fig. 13 Particle size cumulative distribution for various fine grinding mill; material limestone



第14図 コボール・ミルと従来タイプの媒体攪拌ミルの比較  
 Fig. 14 Comparison of grindability between CoBall-Mill and conventional stirrer ball mill; solid concentration  $C_v = 0.2$ ; circumferential speed of rotor or disk  $u = 10\text{ms}^{-1}$ ; mean residence time  $\tau = 1.2\text{min}$ ; material  $\text{CaCO}_3$ ; media 1mm, glass



第15図 SiCの粉砕  
 Fig. 15 Mean particle size  $d_{50}$  as a function of mean residence time on CoBall-Mill; solid concentration  $C_v = 0.5$ ; filling rate of media  $FG = 70\%$ ; circumferential speed of rotor  $U = 13\text{ms}^{-1}$ ; material SiC; media 1mm, steel

### 7 コボール・ミルの応用例

コボール・ミルにより炭化ケイ素を粉砕した例を第15図<sup>14)</sup>に示した。炭化ケイ素を濃度50%にて水に分散し、パス回数を数回繰り返して、スチール製メディアにて粉砕した。第15図では、パス回数をミル内平均滞留時間で示した。τ = 7分程度で70%近くをサブミクロンに粉砕出来ることがわかる。

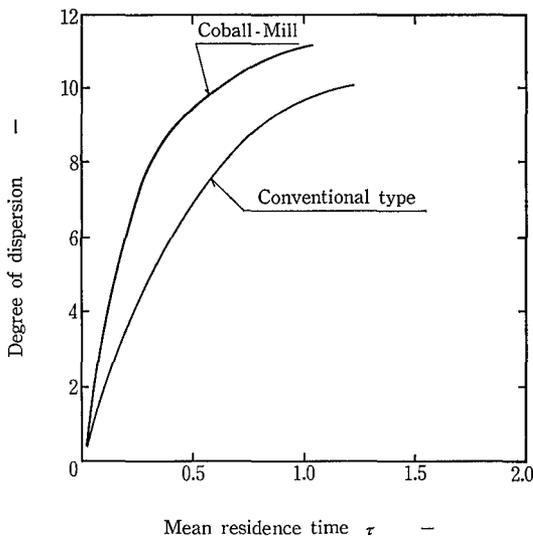
コボール・ミルは、その強いせん断作用を利用して、従来タイプのミルでは非常に分散が困難であったケースにも応用されており、その代表的なものが第16図に示したオーディオ、ビデオ用テープに用いる磁性塗料の分散である。第16図では、ミル内平均滞留時間に対し、分散の度合いを定性的に示したが、同一分散レベルに到達する時間を比較すると、従来タイプのミルの1/2以下であり、業界で高い評価を得ている。また到達可能な最高の分散レベルにおいて、従来タイプのミルを凌駕する場合が多い。

### おすび

新しい形式の微粉砕および分散機として、アニュラー・タイプの媒体攪拌ミルの一種であるコボール・ミルについて実験結果を中心に、その流動特性および粉砕特性について報告した。前報<sup>3)</sup>でコボール・ミルについて概略的な紹介を行って以来約1年半が経過したが、この間当社社工易技術開発センターに設置したテスト機にて、ユーザ各位の引合実験を消化するかわら、コボール・ミルの粉砕特性に関する基本的な実験を続けた結果である。媒体攪拌ミルについての報文が極めて少ない現状で、このささやかな報告が読者各位に資するところがあれば幸甚である。今後さらに研鑽を積み、より工学的なアプローチを続ける。

#### 【参考文献】

- 1) N. Stehr, J. Schwedes: Ger. Chem. Eng., Vol. 6, (1983) p. 337
- 2) N. Stehr: Chem. Eng. Process., Vol. 18, (1984) p. 73
- 3) 谷口: 神鋼ファウダー技報, Vol. 28, No. 2, (1984) p. 5
- 4) 谷口, 平尾, 田中: 粉体工学会誌, Vol. 22, (1985) p. 377



第16図 磁性塗料の分散  
 Fig. 16 Degree of dispersion for magnetic compound as a function of mean residence time

- 5) 化学工学協会: 化学工学便覧, 1461, 丸善 (1978)
- 6) 井本立也: 反応工学, 212, 日刊工業新聞社 (1972)
- 7) P. Raussendorf: Verfahrenstechnische Untersuchung einer neuartigen Rührwerkskugelmuehle, TU Braunschweig (1985)
- 8) K.S.E. Forssberg, B. Andreasson, U. Ruong: Studies on ultra-fine grinding of minerals, Luleå Univ. of Technology (1985)
- 9) Matter & Partner 社: カタログ
- 10) Netzsch 社: カタログ
- 11) 谷口: 粉体と工業, Vol. 15, No. 4 (1983) p. 45
- 12) Boulton 社: カタログ
- 13) Alpine 社: カタログ
- 14) 谷口: 粉体と工業, Vol. 16, No. 12, (1984) p. 53