

## クロスジェットミルの大型化とセラミックス化

宮地光雄\*

Some difficulties for CROSS-JET MILL to scale it up and to make it of ceramics.

M. MIYAJI

Ultra-fine products can be produced by use of the SHARP-CUT SEPARATOR.

But a large scale separator can not produce the equal powder of small one.

The CROSS-JET MILL is of contamination-free type.

But only a cage wheel is a wearing part.

By our continuous efforts, those things are solved and became sales-points in the market.

## 1. 緒言

近年、粉体の微粉化はあらゆる分野において、要望されており、既実現されたものも、これから開発を進めていくものもある。微粉化といっても、その内容は一様ではなく、含有される最大粒子径をきらうもの、粒度分布における微粉域の粒子をきらうもの、粒度分布のシャープさを要求するものなど様々である。

微粉化のために最もよく使用されるミルはジェットミルである。これにも、いくつかの型式があり、原理的に分級限界があつて、微粉化とともに処理能力が極端に減少するものもある。今日、ジェットミルはますます大型化している。大型化をむつかしくしている要因はスケールアップによる分級性能の悪化である。

一方、微粉化によって粉砕ノズルやセル、分級機構などが著しく摩耗する。これによるメンテナンス費用の増加や摩耗材がコンタミとなつて、粉体の品質を劣化させるなどの問題が発生する。この解決策として摩耗部品のセラミックス化が行なわれている。本稿では、クロスジェットミルの分級機にポイントをおいて大型化とセラミックス化について説明する。

## 2. 分級機の大型化

(2-1) 多板円筒型ロータを高速回転させることによって、微粉の分級をするのであるが、いかなる計算式によって算出できるか検討してみる。

粒子がストークス領域の渦流中に存在すると仮定して、遠心力と向心力（空気抵抗）とのバランスから分級点  $dc$  は次の如く求められる。

$$3\pi \cdot \mu \cdot dc \cdot Ur = \frac{\pi}{6} \cdot dc^3 (\rho_s - \rho) R \cdot W^2$$

ここで  $\mu = 0.0000182 \text{ kgf/m} \cdot \text{s}$

(20°Cにおける空気の粘度) として

$$\therefore dc = \frac{0.069}{R \cdot H^+} \cdot \frac{(Q/\rho_s)^+}{N} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

但し

 $dc$  : 粒子径 (m) $R$  : ロータ半径 (m) $H$  : ロータ幅 (m) $N$  : ロータ回転数 (rpm) $\rho_s$  : 粒子の真密度 (kgf/m<sup>3</sup>) $Q$  : 処理風量 (m<sup>3</sup>/s) $Ur$  : 向心速度 (m/s) $\omega$  : 角速度 (S<sup>-1</sup>) $\rho$  : 空気の真密度 (kgf/m<sup>3</sup>)

①式においては、粒子は球体であると仮定している。粉体は、さまざまな粒子により、なりたっている。その大きさと形状は、さまざまであり、全く同一のものが、存在することはないであろう。

分級とはこれらの粒子を、おおまかに“わける”操作であると思われる。空気中では粒子は、それぞれ単一で存在することは、まれである。特に付着性のある粉体では、いくつかの小さい粒子が大きい粒子に付着して弱い凝集体を形成している。従つて凝集体の大きさが分級点を左右していることになる。また①式においては固気比は関係していない。しかし、遠心力場での粒子の運動は粒子濃度に左右される。特にミルに分級機を内蔵した場合、ミルとして必要な風量が分級機の循環量を大きくする側に作用し内部の固気比を高め分級をむつかしくすることがある。

本稿において ( $d_{50}$ ) は体積平均径を、( $d_{max}$ ) は体積最大粒子径を示す。粒子の大きさは、大きいものならばフルイで測れるが、小さいものは物理的原理にもとづく測定器によって測るしかない。同一粉体でも測定器により粒子径は異なる。ゆえに ( $d_{50}$ ) ( $d_{max}$ ) は何で測ったかを明示しなければ無意味である。

(2-2) 実験による検証

- KJ200ジェットミルでタルクを粉碎した時に得られるデータと①式の比較をすると図1となる。

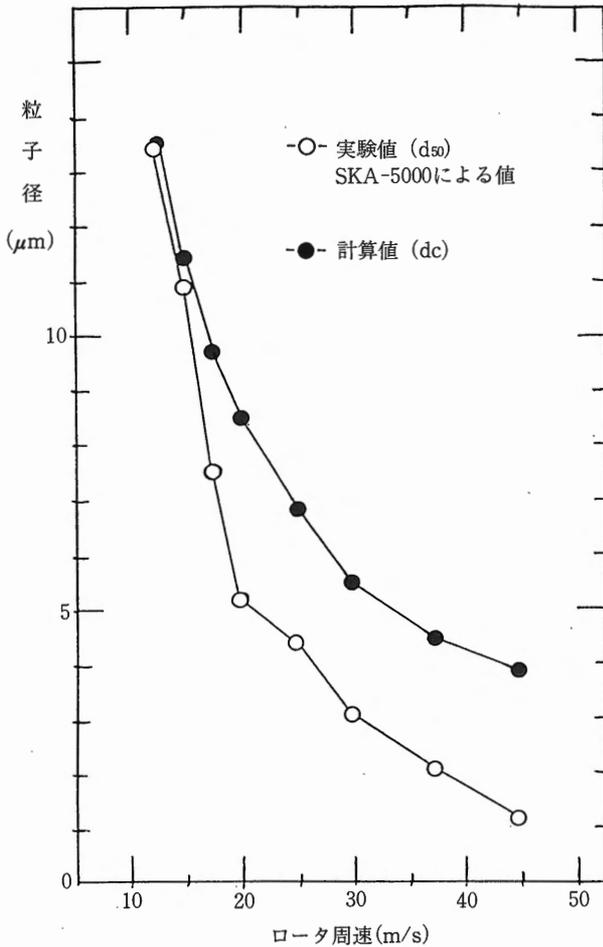


図1. ロータ周速による分級点の変化  
Fig.1 Relation between Product Dia. and Rotational Speed of Rotor.

- KA50シャープカットセパレータでタルクの分級テストをした時に得られるデータと①式の比較すると図2となる。
- KJ1000ジェットミルでコークスを粉碎した時に得られるデータと①式の比較すると図3となる。
- KJ50とKJ1500ジェットミルでタルクを粉碎した時に得られるデータを比較すると図4となる。
- ジェットミルと型型VXミルでタルクとタンカルを粉碎した時に得られるデータをまとめたものが表1である。

以上のデータを考察すると

1. 図1、2、4はタルクによる実験データである。タルクは“アスペクト比”が大きく“球”と大きく異なる。

る。図1と図2、4の粒度測定器は原理が異なり、図2、4の測定器では、その粒子の最大寸法を測ることになっている。従って (d<sub>50</sub>) と (dc) が、ほぼ同じような数値になるものと思われる。

2. ①式では (dc) ∝ (1/N) である。図1~4の如く実験値も、これに似た傾向で変化している。
3. 図2のデータとは別に2次空気量を多くすると、微粉回収率はよくなるが、回収率をあげていくと最大粒子径が大きくなる。これは①式の関係よりも固気比による影響と思われる。即ち分級点の粒子は常にぐるぐるロータの回りを円運動しており、固気比が大きくなると相互干渉の度合いが大きくなり、分級が乱れるのであろう。

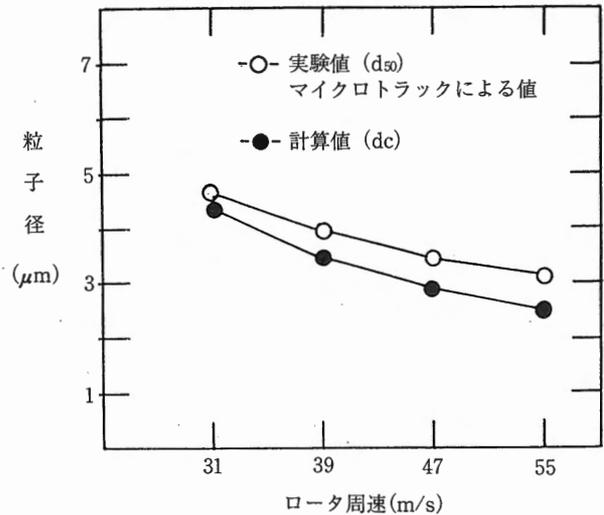


図2. ロータ周速による分級点の変化  
Fig.2 Relation between Product Dia. and Rotational Speed of Rotor.

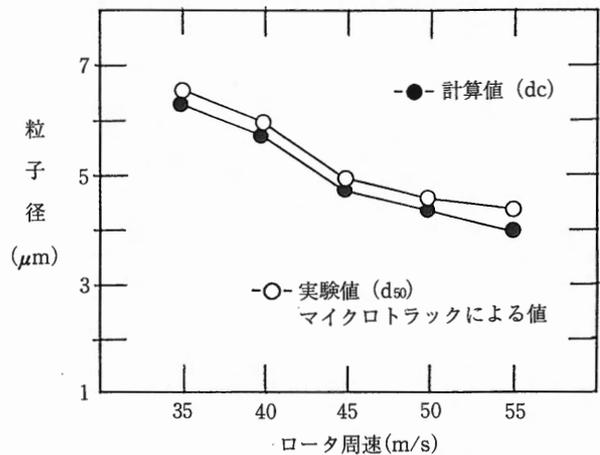


図3. ロータ周速による分級点の変化  
Fig.3 Relation between Product Dia. and Rotational Speed of Rotor.

ロータ直径 m/m		200	250	600	600	600	950	950	950
ロータ周速 m/s		37	33	25	35	25	35	58	58
風 量 m <sup>3</sup> /min		15	26	200	140	200	430	430	325
粒子径 マイクロトラック	(B) 平均径 μm	4.40	5.26	9.74	7.97	7.40	5.44	5.48	4.47
	(A) 最大径 μm	21.1	21.1	62	62	62	42.2	21.1	21.1
(A)/(B)		4.8	4.0	6.4	7.8	8.4	7.8	3.9	4.7
粉 碎 物		タルク	タルク	タルク	タルク	タルク	タンカル	タンカル	タンカル

表 1. ロータ直径による分級点の変化

Table. 1 Relation between Product Dia. and Rotor Dia.

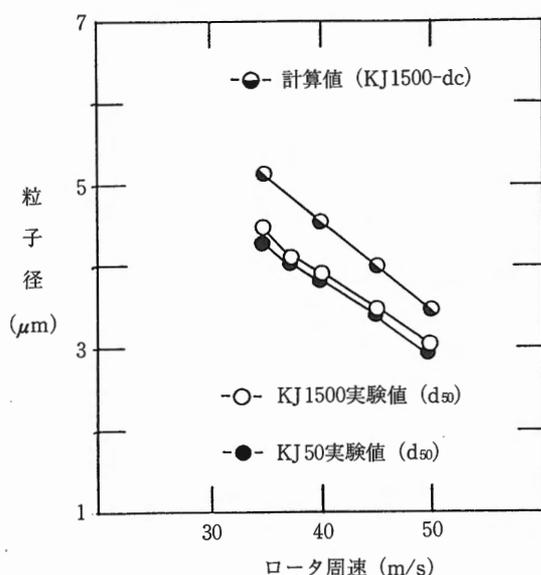


図 4. ロータ周速による分級点の変化

Fig. 4 Relation between Product Dia. and Rotational Speed of Rotor.

- φ50、φ200、φ250ロータのそれぞれの分級点 (dc) は大きく異なるが、図 3、4 から、実験値は、ほぼ同じになっている。これはφ250迄のロータ直径のスケールアップにあつては、φ50のデータをそのまま使用してよいことを意味している。
- 表 1 によれば大径ロータでは同周速の小径ロータと比較して得られる粉体の最大粒子径が大きくなる。

(2-3) シングルトラックミルとの比較

シングルトラックミルはジェットミルが開発された初期の型式であり、非常に多くの現場で使用されている。ここではクロスジェットミルに比して分級性能が劣る理由を考えてみる。

シングルトラックミルは図 5 から明らかな通り、構造が簡単でスケールアップしやすい。

粉体製品の粒子径 (dc) は次式により求められる。

$$d_o = \left( \frac{18\mu \cdot V_i}{(\rho_s - \rho) \cdot (U_i^2 / \gamma_i)} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots ②$$

但し

$\gamma_i$ : 出口管半径 (m)

$U_i$ : 出口管における周速度 (m/s)

$V_i$ : 出口管における向心速度 (m/s)

しかしながら

- ベンチュリ管により原料を供給するため、2次空気を吸引する。
  - ミル出口管における風速 ( $U_i$ ) を一定とすると ( $U_i^2 / \gamma_i$ ) はスケールアップにより小さくなる。
  - 供給量をあげると (固気比を大きくすると) 風速 ( $U_i$ ) が減速する。
- などにより、分級性能が悪化する。特に最大粒子径をき

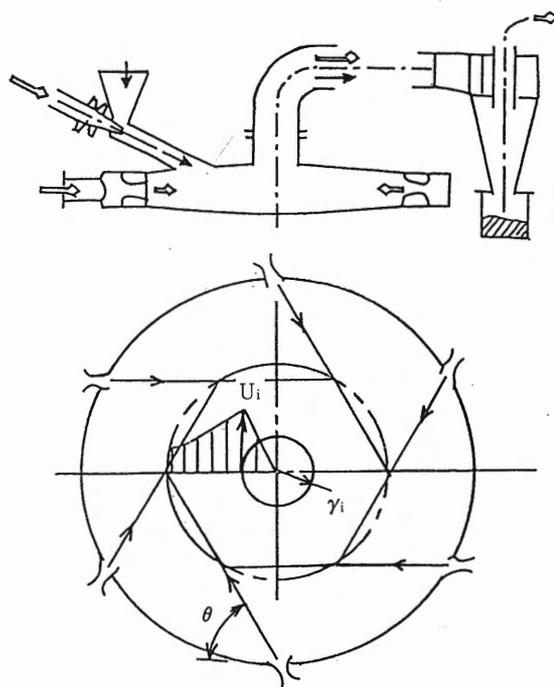


図 5. シングルトラックミルの構造

Fig. 5 Schematic drawing of Single-track mill.

びしくする場合の大型化は不可能である。(大きい粒子ほど迷走しやすいからである。)

図6によれば適正なノズル角 ( $\theta$ ) は60~75度となり図7は②式と実験値を比較したものである。図8は固気比 ( $K$ ) の増大が周速度 ( $U_i$ ) を低下させることを示している。 ※1

(2-4) 大型化の方策

実験による検証からも明らかな如く、分級ロータの大型化は分級性能の悪化をもたらすため、別の方法を考える必要がある。考えられる方策としては

1. 小径ロータを複数個内臓した分級機とする。 ※2  
設計上は4~6個のものが考えられるが、実績としては2個である。分級ロータが相互に干渉しないように、隔壁を設けるなどの工夫が必要である。また、ロータの配列のしかたによってはメンテナンスと精度維持がむつかしくなり、所定の能力が得られなくなる。  
図9は4個のものを示す。写真1は $\phi 200 \times 2$ 個KJ1500ジェットミルを示す。
2. ロータの幅と直径の比を大きくして処理能力の向上をはかる。幅を大きくすることによる分級性能の悪化は理論上はない。

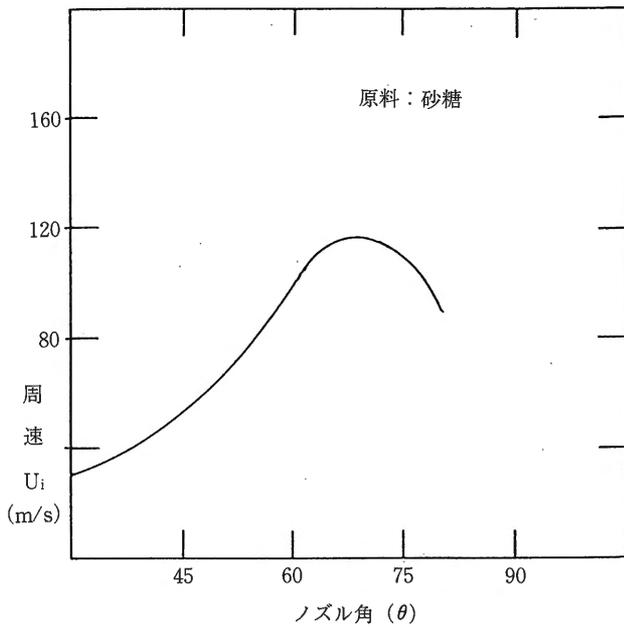


図6. ノズル角による周速の変化  
Fig. 6 Relation between Rotational Speed of Air and Nozzle Injection Angle.

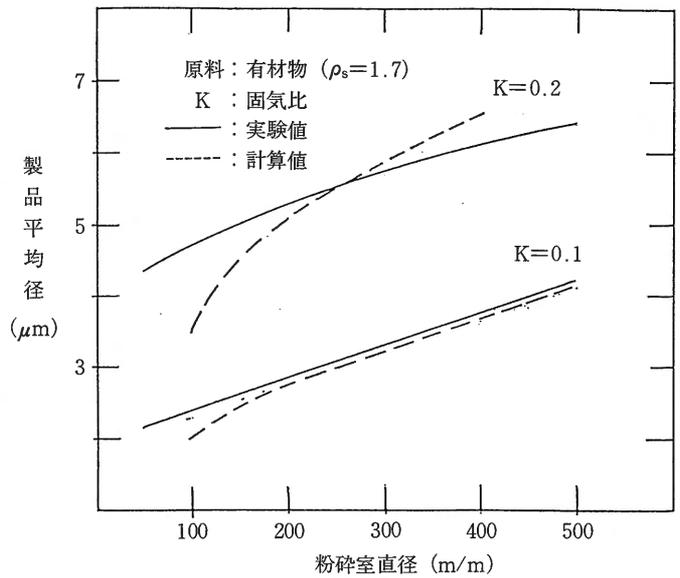


図8. 供給量による周速の変化  
Fig. 8 Relation between Rotational Speed of Air and Feed Rate.

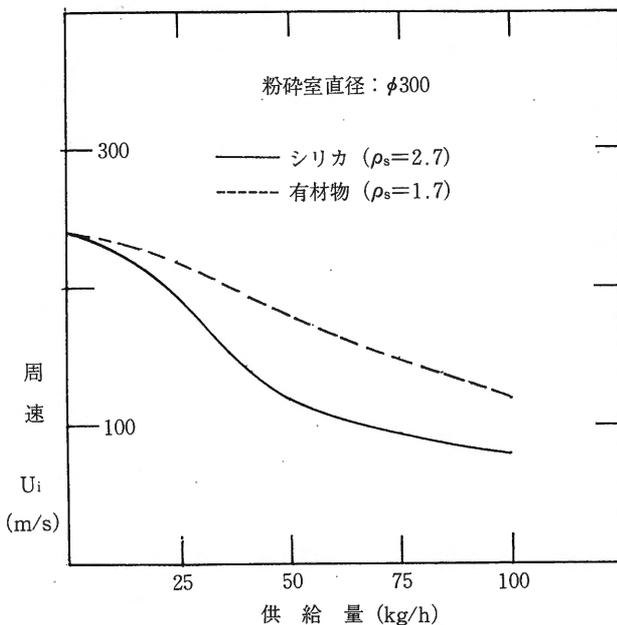


図7. ミルサイズによる分級点の変化  
Fig. 7 Relation between Product Dia, and Grinding Chamber Dia.

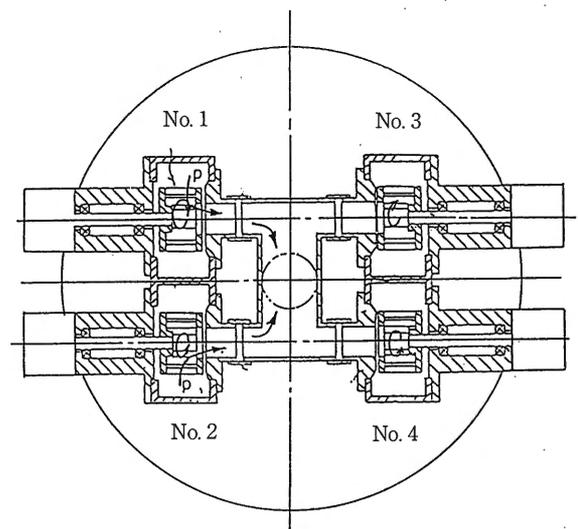


図9. 4ロータ分級機の概略図  
Fig. 9 Outline of Air Separator with 4-Rotors.

3. 大径ロータを使用の場合にロータの内側にスリーブを入れて分級性能の向上をはかる。スリーブの直径と長さにより性能が変化する。製品中の最大粒子径は改善される。図10はその一例を示す。 ※3
4. 分級機内部の気流の速度分布を平滑化して（即ち空間容積を大きくする）粗粒子を事前分級するような構造と寸法にする。これは粉碎機の要因が分級に悪影響する場合に有効となる。例えば有機物など真密度の小さい、しかも原料粒度の細かいものに対して効果がある。

### 3. 分級機のセラミックス化

#### (3-1) 経過

分級ロータをセラミックス化することの目的は

- ① メンテナンスフリーに近づけて、費用とロスを少なくする。
  - ② 摩耗材によるコンタミをPPMオーダにする。
  - ③ 摩耗による製品粒度の乱れを防止する。
- ②③が粉体の品質価値の核となるから、セラミックス化は絶対条件である。分級ロータは高速回転するからセラミックスにすることによって破損の危険度が高くなる。セラミックス化のポイントは
- ① 内部気泡やクラックのない良質のセラミックスが得

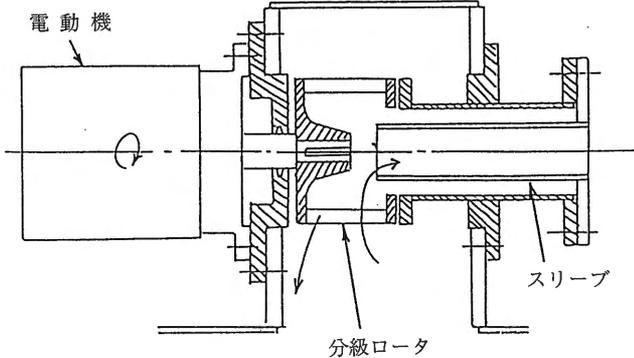


図10. スリーブによる改良案

Fig. 10 Improvement idea based on Inner Sleeve.

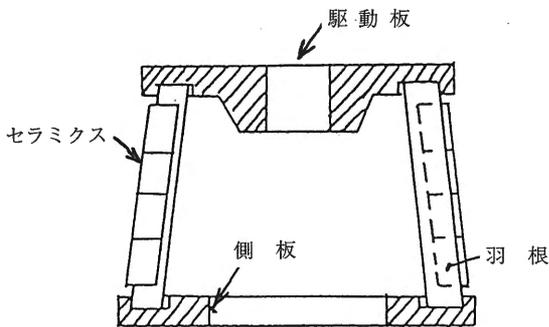


図11. セラミックス板を接着した分級ロータ  
Fig. 11 Cage Wheel Fastened Ceramics Plate with adhesive.

- られるか
- ② 強度的にどこまで高速回転できるか
  - ③ 動的バランスをどこまで上げられるか
- の3点である。現在一体成形方式で製作しているが、ここに至る経過は次の通りである。
- ① 従来の金属製ロータの羽根にセラミックス板を接着する。図11はこれを示す。
  - ② 次に羽根、駆動板、側板のそれぞれをセラミックスで作り、組立後、接着する。
  - ③ 次にセラミックス素材を加工し一体成形する。

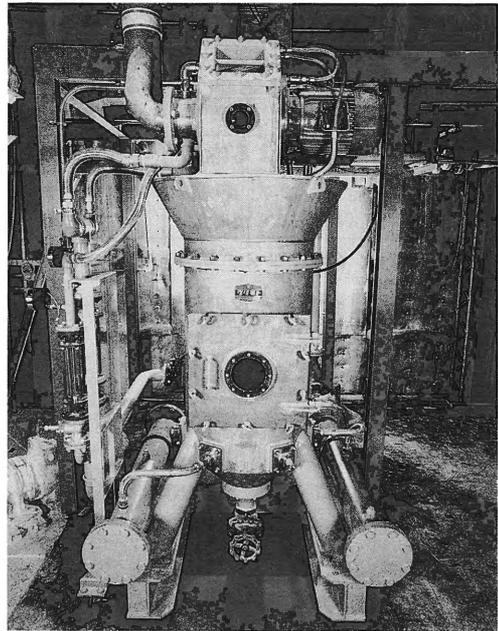


写真1. 2×200φ ロータ付 KJ-1500 ジェットミル  
Photo. 1 KJ-1500 Jet Mill with 2×200φ Rotors

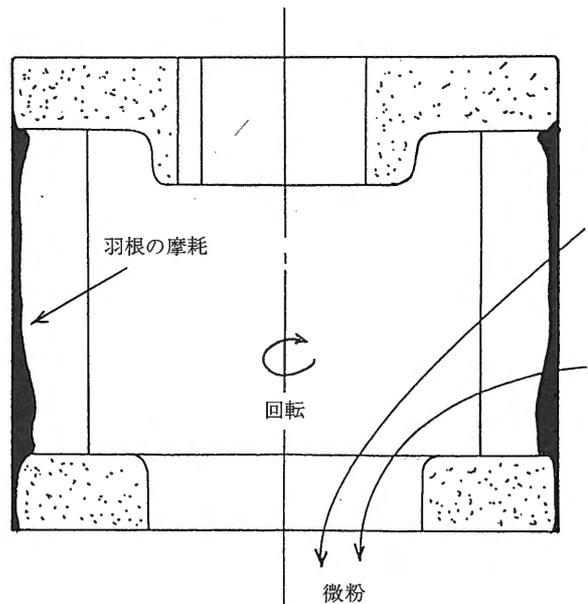


図12. 分級ロータの摩耗度  
Fig. 12 Wearing Portion of Cage Wheel.

一体成形でなければ高速回転させるとはできないが、それほど、きびしい条件でなければセラミックス板を接着する方法でもよい。図12は円筒型ロータの摩耗度を示す。

### (3-2) 強度計算

羽根の強度は遠心力による曲げモーメントより求めた。駆動板及び側板は回転による応力と羽根の遠心力が作用するときの応力を合算して求めた。

但し、計算式はティモシェンコ著“材料力学”から引用した。計算応力は表2の通りである。

羽 根	曲げ応力	$\sigma_M=573\text{kgf/cm}^2$
駆動板及側板	回転による応力	$\sigma_{r1}=3.4\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{t1}=97\text{kgf/cm}^2$ (99…内周)
	遠心力による応力	$\sigma_{t2}=219\text{kgf/cm}^2$
	合算した応力 (内周にてmax)	$\sigma_{t3}=99+219$ $=318\text{kgf/cm}^2$

但し、 $\phi 250$ アルミナロータをmax4000rpmさせる

表2. 分級ロータの計算応力値

Table. 2 Calculated Stress of Cage Wheel.

次に許容最高回転数と冷しばめ応力を計算する。

#### ① 許容最高回転数

$\phi 250$ セラミックスロータについて求める。

安全係数 $K_1=3$ とすると許容引張応力は $620\text{kgf/cm}^2$ となり、 $(\sigma_{t3})=620$ となる回転数 $N_c$ は

$$N_c = (620/318)^{1/2} \times 4000 = 5583 \text{ (rpm)}$$

また、この時の羽根に生ずる曲げ応力 ( $\sigma_M$ ) は

$$\sigma_M = 572 \times \left( \frac{5583}{4000} \right)^2 = 1116 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

となり、安全係数 ( $K_2$ ) は

$$K_2 = 3100/1116 = 2.78 (\approx 3) \text{ となる。}$$

ゆえに ( $N_c$ ) max  $\approx 5600$  (rpm)

#### ② 冷しばめ応力

自由状態で $5\mu\text{m}$ の半径差のあるものを冷して、はめ合わせた時生ずる応力 ( $\sigma_c$ ) を求める。

$$(\sigma_c)_{\text{max}} = \frac{Po(a^2+c^2)}{(c^2-a^2)} \dots\dots ③$$

$\phi 250$ ロータについて求めると

$$(\sigma_c)_{\text{max}} = 630 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

しかしながら、軸のハマアイに適当なスキマを与えないと現実には上記以上の応力が生ずると考えられる。

なぜならば、ボスの長さが大きくなると両端の孔径に $5\mu\text{m}$ 以上の差が生ずるからである。

### (3-3) 運転実績

$\phi 250-2$ 台、 $\phi 200-6$ 台、 $\phi 100-1$ 台、 $\phi 50-4$ 台が稼働中である。周速 $52\text{m/s}$ でもトラブルなしに、運転している。振動を少なくするには動バランスをきびしくチ

ェックしなければならない。修正のための加工工数が多く、ダイヤモンドカッタの損耗も大きいので、次のような工夫が大切である。

- ① あらかじめ、修正面にマシナブルセラミックスを接着しておき、この部分を修正加工する。
- ② あらかじめ、修正面に孔をあけておき、修正位置の孔に金属板を、うめこみ、その上にセラミックス板をかぶせて接着する。 ※4

## 4. 結言

目的とする粉体の仕様がきびしくなればなるほど、それを生産する設備機器もきびしく設計、製作、検査しなければならない。設備機器のもつ精度と特質がそのまま粉体の物性に投影されるからである。更に改良を加え、ユーザーの御要求にこたえていきたいと思っている。

## 参考文献

- 1) Herrn Prof. Dr. K. Hansen : Chemie-Ing. Techn. 42. Jahry, 1970/Nr. 1
- 2~4) 筆者による特許考案

## 執筆者

宮地 光雄

Mitsuo Miyaji

昭和35年4月入社

粉碎機の設計を経て、現在微粉碎機の設計に従事

