

粉碎に関する若干の知見 (第3報)

小型ディスメンブレータによる穀粒粉碎所要エネルギーについて

宮地 豊房・杉本 俊夫

(農学部 機械工学研究室)

Study on Energy for Size Reduction of Grain

by Small Dismembrator

Toyofusa MIYADI and Toshio SUGIMOTO

Laboratory of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture

Abstract : On the practical rate of feed, we crushed unpolished rice by small dismembrator. Following results were obtained.

(1) Both more increasing the revolution of rotor and the smaller the diameter of screen hole, the smaller the size of products becomes. But we could not find the simple relation between size of feed, diameter of screen hole, rate of feed, revolution of rotor and specific surface.

(2) Screen has the function which limits the biggest size of products. The smaller the diameter of screen is, the more this function increase. In the case that diameter of screen hole is large, the distribution of products is wide, and to our surprise, a little amount of the products is smaller than products passing through the smaller screen hole. It may be a charactor of impact size reduction. But we can not be convinced of it.

(3) The relation between size of feed and work input, the bigger that is, the more this increase. But it is not always so under the condition that diameter of screen hole is bellow 1.0 mm. The work input is proportional to feed rate. And the larger the diameter of screen hole, the more exact the proportional relation is.

緒 言

小型 Dismembrator による米粒の粉碎については、前回までに供給流量の小さい場合の米粒そのままからの粉碎と比較的大きい供給流量におけるくり返し粉碎の現象を追求、報告した⁽¹⁾⁽²⁾。今回の実験は供給流量を実用範囲にとどめ、小型 Dismembrator における粉碎効果の重要な因子と考えられる、格子間げき、砕料粒径、主軸回転数、供給流量等諸因子と粉碎所要動力、粉碎所要エネルギー、比表面積等の関係を実験的に求め、小型 Dismembrator の実用的粉碎効果とその使用範囲を知ろうとしたものである。また従来困難とされている正味粉碎所要エネルギーを、砕料の大小差と粉碎生成物のその両面より求めようとした。

なお実験装置等は、第2報とほとんど同じであるが、所要動力、エネルギーの測定の確度を高めるため電気動力計を使用し、全実験域の記録を得るようにした。

実 験 装 置

1. 供試粉碎機

第2報と同じく、F社製万能粉碎機U-1型を一部改造したものを使用した。格子は Table 1 のものを使用した。

2. 電気動力計

三相分巻整流子電動機型動力計 O社製

Table 1

格子間げき (mm)	開 度 (%)	格子間げき (mm)	開 度 (%)
∞	100.0	1.4	15.9
10	33.3	1.0	11.2
8	36.6	0.6	9.3
3.0	23.8	0.4	6.0

2.2 kw 220 v 0~3000 rpm

3. 張力計 S社製

4. 記録計 W社製 リニアコーダ WTR 281 4 S型

5. Strain Amp S社製

6. Stroboscope S社製 300~18,000 rpm

7. ふるい (ふるい比 $\sqrt{2}$) T社製 150 ϕ mm

目開き 2000, 1410, 1000, 710, 500, 350, 177, 125, 88 μ

8. 振とう機 N社製 偏心軸回転数 304 rpm 振幅 30 mm 上下打撃回数 毎分76回

実 験 方 法

1. 砕 料

昭和49年度高知県産豊年を使用。含水率は $13.5 \pm 0.5\%$ (コメット含水計による) である。また平均粒径は100粒の試料より、長さ $4.75^{+0.27}_{-0.31}$, 幅 $2.71^{+0.19}_{-0.17}$, 厚さ $1.95^{+0.20}_{-0.21}$ mm であり、体積平均粒径は 2.97 mm である。

この試料を格子間げき 10 mm の格子で 5000 rpm, 供給流量 15 g/s で粉碎し, その砕製物を7分間ふるい分けして 2000 μ 以上, 2000~1410 μ , 1410~1000 μ , 1000~710 μ の4グループと玄米の5種類を砕料として使用する。(以下, 2000, 1410, 1000, 710 μ , 米の砕料と呼ぶ。)

2. 実験方法

5種の砕料おのおの総重量 400 g について粉碎時に 5000, 5500, 6000 rpm となるよう空転時粉碎機主軸回転数を約 5080, 5580, 6080 rpm に保ち, 格子間げき, ∞ (格子なし), 3.0, 1.4, 1.0, 0.6, 0.4 mm, 供給流量, (2), 5, 10, 15 g/s と変化させて粉碎を行なう。なお補足として格子間げき 1.0, 1.4 mm, 供給流量 5 g/s については主軸回転数 7000 rpm, 格子間げき 8, 10 mm, 供給流量 10 g/s については, 主軸回転数 5000 rpm において粉碎を行なった。その砕製物をふるい比 $\sqrt{2}$ の標準ふるいで Ro-Tap 振とう機を用いて10分間ふるい分けし (8分間でふるい分けを完了するが余裕をみた。) ふるい上重量を感度 1 g の秤で計量し, 10段階に分けた砕製物の重量を網上積算重量 Percent に整理し, 対数確率紙に Plot して80%通過粒径, 比表面積を得る。また動力計には張力計を装着し, これを記録計に接続し記録させ, その図上面積より所要粉碎エネルギーを算出し, またこれを所要時間で除して粉碎所要動力の平均値とした。

実 験 結 果 お よ び 考 察

1. 粒度分布 (砕料, 格子間げき別の砕製物について)

一例として, 2000 μ 砕料を主軸回転数 5000 rpm, 供給流量 5 g/s, 格子間げき 3.0, 1.4; 0.6,

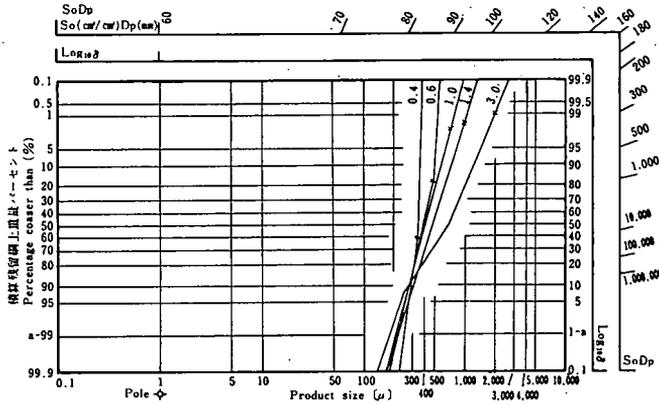


Fig. 1 Relation between diameter of screenhole and distribution of products in the case of 2000 μ feed size.

砕料 2000 μ における格子間げき, 粒度分布の関係 (数字は格子間げき)

0.4 mm にて粉砕した砕製物の粒度分布を Fig. 1 に示す。×印はふるい上最終測定点 (最大ふるい目開き) である。例えば米を格子間げき 1.0 mm で粉砕した砕製物では、ふるい上重量測定の場合の最大ふるい目開きは 710 μ であり、1000 μ で無限大、すなわち 100% と近似されるよう作図してある。

ここで砕料粒径が小さくなるほど、格子間げき 3.0, 1.4, 1.0 mm の粒度分布線は勾配が大きくなる。しかし格子間げき 0.6, 0.4 mm では粒度分布の折線は砕料 2000 μ の Fig. 1 の折線とほぼ一致する。なおこれらの折線は、平行に近くもなく一点で交わりもしない。いわば各交点がずれる形で次の事を示す形となっている。

格子間げきが大なる場合は砕製物に粒径が大なるものも生成されるが小なるものも生ずる (すなわち 粒度分布範囲が広い)。また格子間げきが小なる場合は砕製物粒径がほぼ平均されていて極端な大粒径, 小粒径共に少ない (すなわち 粒度分布範囲が狭い) ということを示している。この傾向は主軸回転数, 供給流量にはほとんど影響されないようである。

2. 比表面積の算出法

対数確率紙による比表面積の求め方は藤野の方式によるが、分布が 3 本折線で表わされる時は次式による。

$$S = \int_0^{\infty} ds = \frac{(Sx_m)_1 D_1'}{x_{m1}} + \frac{(Sx_m)_2 (D_2'' - D_2')}{x_{m2}} + \frac{(Sx_m)_3 (1 - D_3')}{x_{m3}}$$

x_{mn} : 粒度分布折線各部の勾配をそれぞれ延長して全分布をしているとみなした時の 50% 粒径 (μ)

D_1' : 粒度分布折線において細粉部分と中間部分の交点の通過率を平均値 x_{m1} を用いた事により必要な軽重率を考慮した換算通過率。

D_2' : 細粉部分と中間部分との交点の通過率を平均値 x_{m2} を用いたことにより必要な軽重率を考慮した換算通過率。

D_2'' : 中間部分と粗粉部分との交点の通過率を平均値 x_{m2} を用いたことにより必要な軽重率を考慮した換算通過率。

D_3' : 粗粉部分と中間部分の交点の通過率を平均値 x_{m3} を用いたことにより必要な軽重率を考慮した換算通過率。

S : 比表面積 (cm^2/cm^3)

Fig. 2 に 50%通過粒径と比表面積の関係を示す。(砕料, 米)。何れも一般に粉体の状態を示す代表数であるが互に指数関数的簡単な関係にある事を示している。

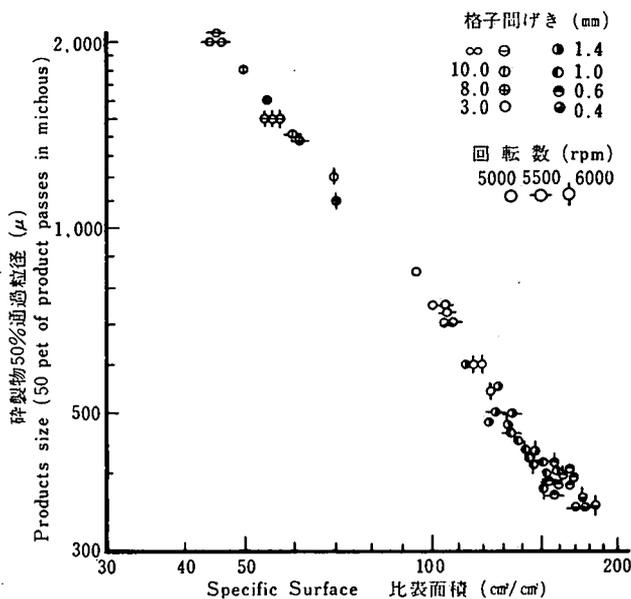


Fig. 2 Relation between specific surface and products size.
比表面積と砕製物50%通過粒径の関係

3. 粉碎所要エネルギーと粉碎比の関係

粉碎所要エネルギーと粉碎効果の関係を比較的好くあらわすといわれている、Bond-Wang のエネルギー計算方式においては、粉碎所要エネルギーを P_n [PS·hr/short ton] とすると

$$P_n = K\sqrt{R^{0.5}/P}$$

で表わされる。

ここにおいて R は粉碎比 F/P , F は砕料の 80%通過粒径 (inch), P は砕製物の 80%通過粒径 (inch), K は常数で硬度により異なり硬度大なるものに対して 1, 中硬質砕料に対し $1/2$, 軟質砕料に対して $1/4$ としている。

Fig. 3 における 3 直線は $K=1, 1/2, 1/4$ の場合を示し、本実験のデータはこの 3 直線より大きな勾配を持ち正の相関関係を持つ分布となる。さらに各因子別に検討すれば以下のような群分けがみられる。

格子間げきについては、

∞	: $13 < \sqrt{R}/P < 35$	$P_n < 1.7$
3.0	: $22 < \sqrt{R}/P < 43$	$1.8 < P_n < 5.0$
1.4, 1.0	: $35 < \sqrt{R}/P < 150$	$4 < P_n < 13$
0.6	: $65 < \sqrt{R}/P < 150$	$12 < P_n < 22$
0.4	: $110 < \sqrt{R}/P < 210$	$25 < P_n < 50$

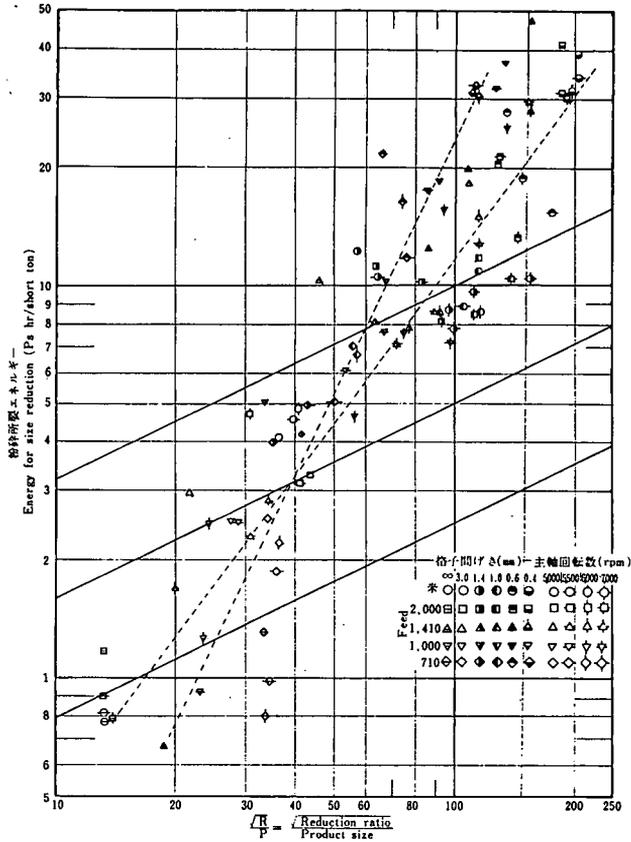


Fig. 3 Relation between reduction ratio and energy for size reduction.
 粉碎比と粉碎所要エネルギーの関係

の範囲にあり、さらに同一砕料、同一回転数においてもそれぞれの zone を形成している。しかし回転数が低いほど粉碎効果に比べて所要エネルギーが大きい。

砕料に関して言えば、710, 1000, 1410, 2000 μ, 米, すなわち砕料が大きくなるほどデータの分布勾配が小さくなっている。Fig. 3 に米と 710 μ の砕料のデータ分布を破線で示す。このデータを Bond-Wang のエネルギー計算と比較して $20 < \sqrt{R}/P < 160$ がこの粉碎機の実用粉碎範囲である。これは試料が米の場合、主軸回転数が 5500 rpm 以上、格子間げきが 3.0~1.0 mm が実用範囲であることを示している。この範囲は衝撃粉碎機ハンマーミルの使用範囲と一致する。したがって 0.6, 0.4 mm の格子間げきでの小型 Dismembrator による米粒の粉碎は実用的ではない。

同一砕料、同一格子間げきのもものでは、主軸回転数が異なっても狭い範囲にデータが集中するということから、所要エネルギー、粉碎比に対する主軸回転数の影響は他の要因に比べて少ないと考えられる。なお前述の米、710 μ 砕料の粉碎所要エネルギーを示す破線を Bond-Wang 方式で示せば次式となる。

$$\begin{aligned} \text{米} &: P_n = 8 \times 10^{-3} (\sqrt{R}/P)^{1.6} \\ 710 \mu &: P_n = 2 \times 10^{-3} (\sqrt{R}/P)^2 \end{aligned}$$

4. 主軸回転数、砕料の大きさ、格子間げき、供給流量による比表面積の変化

Fig. 4 に供給流量 10 g/s のときの各砕料、格子間げきによる砕製品の比表面積を表わす。曲線

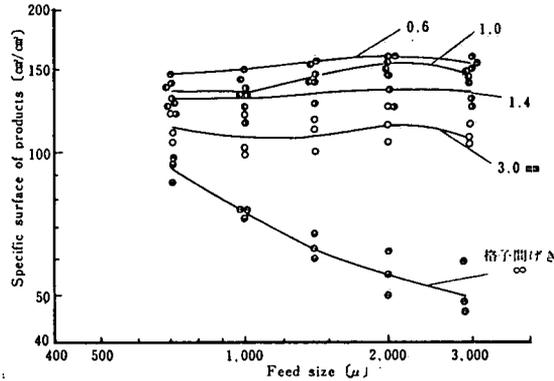


Fig. 4 Relation between feed size and specific surface of products
(Rate of Feed: 10 g/s)

砕料粒径と砕製物比表面積との関係 (供給流量 10 g/s の場合)

は回転数 5000, 5500, 6000 rpm で粉碎した砕製物の比表面積を各子間げきについて平均した値をつらねてある。回転数が増加するほど比表面積は増加する。供給流量に関しては、供給流量が少ない方が比表面積が大きい傾向が見られるがはっきりとしたデータは得られなかった。710, 1000 μ の砕料は 1410, 2000 μ , 米に比べて格子間げき ∞ 以外では比表面積がやや小さい。すなわち小さい砕料より大きい砕料を粉碎の方が砕製物が小さくなるという僅少ではあるが、粉碎効果の逆転が生じている。米は 2000 μ と比較すると当然ながら砕製物の比表面積が小さい。供給流量 5 g/s では、格子間げき 3.0~0.6 mm まで砕料 1410 μ と 1000 μ との間において砕製物の比表面積に逆転が生じている。格子間げき ∞ でこの逆転現象がおこらなかったのは、格子がないため構造的に粉碎機能を充分発揮できず、比表面積は粉碎前の砕料粒径によるところが大きいいため当然の結果と考えられる。同様な結果は格子間げき 3.0, 1.4 mm の格子による 710, 1000 μ の砕料の粉碎にもみられる。この範囲における Dismembrator による粉碎効果は、砕料の粒径と格子間げきの相対的大きさの関係が重要な要因となることが上のことから考えられる。米と 2000 μ を比べた場合、砕製物比表面積が米の方が小さいのは、米が他の砕料のように打撃効果を受けていないため、未実現破面を有しないためである。

砕製物比表面積に逆転が生じている場合でも粉碎所要動力の逆転はなかった。このことから同一格子間げきの格子を使用した場合、砕料粒径が大きいものの方が、砕料粒径の小さいものよりも粉碎所要動力は大きい、粉碎効果も僅かながら大きいということが考えられる。

5. 所要動力と砕料の大きさ、格子間げき、あるいは供給流量の関係

Fig. 5 に砕料 1000 μ における所要動力と格子間げき、供給流量の関係を示す。第 1 報⁽¹⁾ において供給流量の少ない米粒からの粉碎の場合、所要動力と供給流量は、格子の有無にかかわらず、おのおのの主軸回転数において比例関係にあることが示されている。

本実験においては、実用範囲の供給流量と所要動力の関係について調べた。また回転数は 5000~6000 rpm とし格子間げき 3.0, 1.4, 1.0, 0.6, 0.4 mm として粉碎を行ない、記録計より得た所要粉碎エネルギーを時間で除して平均所要動力を算出した。

本実験の結果では各砕料について格子間げきの大きいものほど、この比例関係がよく表われている。

砕料と格子間げき、所要動力の関係では、格子間げき 3.0 mm, 1.4 mm においては砕料が大き

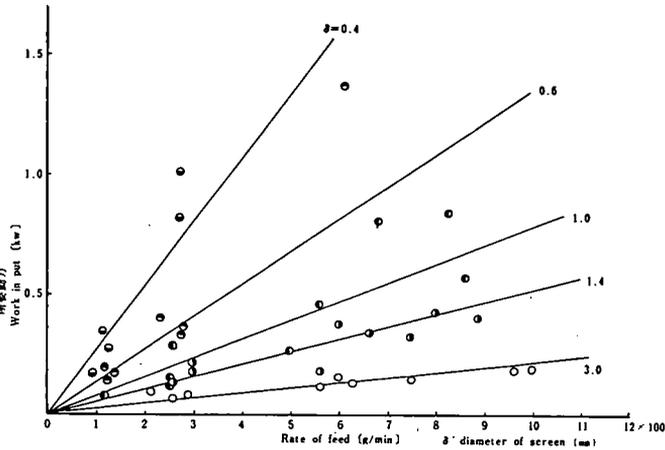


Fig. 5 Relation between rate of feed and work input in the case of 2000 μ feed size.

砕料 2000 μ における供給流量と所要動力の関係

いほど所要動力が大きくなる。しかし格子間げき 1.0 mm 以下では、砕料の大きさと所要動力の関係が必ずしもこの傾向とならない。

同一砕料については、米を除けば格子間げきが小さいものほど所要動力が大きい。しかし砕料が米では、格子間げき 1.4 mm の粉碎の方が格子間げき 1.0 mm の粉碎より所要動力がやや大きい。これは米の場合にのみ表われる現象ではなく 1000, 1410, 2000 μ の砕料においても、その所要動力差の漸減がみられ上記の逆転を予告していることから何らかの原因があると思われるが、本実験の結果からだけでは、はっきりと判断することはできなかった。

6. 正味粉碎所要エネルギー算出の試み

一般に正味粉碎所要エネルギー(または動力)の定義、または測定はまだ定説がなく、いわゆる空転に要するエネルギーを差引いた値を用いることが多い⁽³⁾。しかしさらに破壊に達する直前迄に要するエネルギーも除くべきではないかとする説(松居)⁽⁴⁾さえもある。

本研究においても次の2方法で正味粉碎所要エネルギーと名付けるべきものが得られると考える。

(1) 同一砕料から各種格子間げきにより砕製物を得た場合の所要エネルギーより、ある基準格子間げきのそれを差引いた値。

(2) 各種の大きさの砕料を同一格子間げきにて粉碎した場合の所要エネルギーから、基準砕料の場合の所要エネルギーを差し引いた値。

Fig. 6 は(1)の場合で 1410~2000 μ の砕料をそれぞれの格子間げきで粉碎し、格子間げき 3.0 mm を基準格子としたものである。縦軸に正味粉碎所要エネルギー、横軸には1回転当りの供給流量をとっている。格子間げき 3.0 mm では供給流量の変化に比べて所要動力の変化は少ない。これは他の場合に見られたように、砕料最大粒径が格子間げきより小さい場合である。したがってこれを基準格子間げきとする。ここで格子間げきによる正味粉碎所要エネルギーとは、砕料を最大粒径がその格子間げき粒径になるまで粉碎するに必要なエネルギーを呼ぶことになる。同図によれば 2000 μ → 1410 μ, 2~8 kw·hr/ton, 2000 μ → 1000 μ, 3~9 kw·hr/ton, 2000 μ → 600 μ, 5~22 kw·hr/ton, 2000 μ → 400 μ, 17~24 kw·hr/ton と推定される。

(2) の場合については、データ不足で十分な結果が得られなかったが、(1) の場合より小さい値となるようである。

いずれの場合も一つの試みであり、米の粉碎が各段階において相似的に行なわれることが確認さ

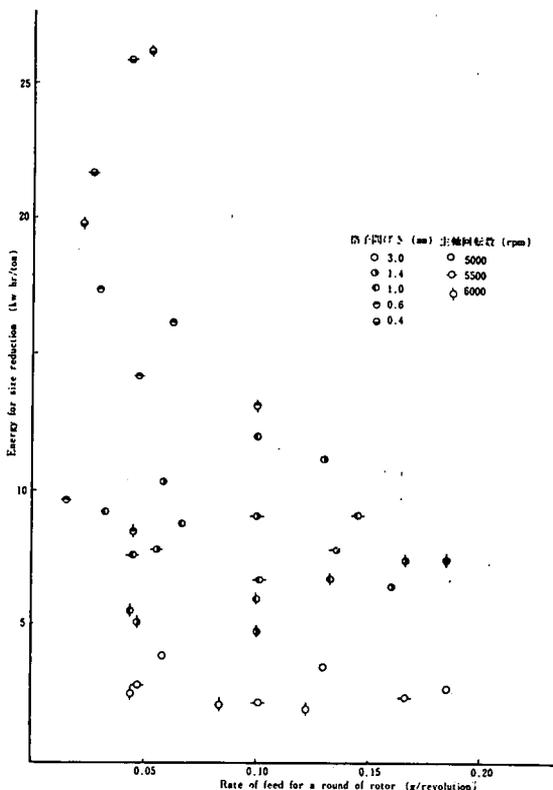


Fig. 6 Relation between rate of feed for a round of rotor and energy for size reduction.

主軸1回転あたりの供給流量と粉碎所要エネルギーの関係

れていない現在、上の値は一つの推定値にすぎない。

結 語

小型 Dismembrator による米粒の粉碎について、実用的粉碎効果とその使用範囲を知ることが目的とした今回の実験で次のことが得られた。

1. 主軸回転数が増すほど、また格子間げきが小さいほど粉碎効果は当然高くなる。しかし碎料粒径、格子間げき、供給流量、主軸回転数と比表面積の簡単な関係は見出し得なかった。

2. 碎料の大きさと格子間げき、粒度分布の関係については、格子には碎製物の粒径を一様化する作用があり、この作用は格子間げきが小さくなるほど大きくなる。一方格子間げきが大きければ碎製物の粒度分布範囲が広くなり、少量ではあるが格子間げきが小さいものの碎製物の最小粒径よりもさらに粒径の小さなものが碎製される。これは衝撃粉碎の特色とも考えられるが、本実験のデータからだけでは理由づけが出来なかった。

3. 所要動力と供給流量、碎料の大きさの関係においては、格子間げきが 3.0, 1.4 mm では碎料が大きくなるほど所要動力は大きくなる。しかし格子間げき 1.0 mm 以下では碎料と所要動力の関係が必ずしもこの傾向を示さない場合もある。また各碎料について、所要動力と供給流量の関係は比例関係があり、格子間げきが大きいものほどこの傾向がよくあらわれている。

参 考 文 献

- (1) 第1報 宮地豊房, 吉崎 繁, 金出地卓郎
- (2) 第2報 宮地豊房, 黒田隆夫
- (3) 亀井 例え 亀井三郎 粉碎 産業図書 (1943)
- (4) 松居国夫, 化学工学, Vol. 32 p. 807 (1968)
粉碎, Vol. 1.6 p. 85 (1971)

(昭和50年9月30日受理)

