参 考 文 献

- 1) Bennett, J. G.: *J. Inst. Fuel.*, 10, 22 (1936)
- 2) Gilvarry, J. J.: *J. Appl. Phys.*, 32, No. 3, 391, 400 (1961); 33, 3211, 3214 (1962)
- 3) Gilvarry, J. J.: *Trans. A. I. M. E.*, 220, 380 (1961); 223, 412 (1962)
- 4) Gaudin, A. M., Meloy, T. P.: *Trans. A. I. M. E.*, 223, 40 (1962)
- 5) Земляков, Б. А.: *Извест. Вуз. Гор. Жур.*, No. 3, 134 (1959)
- 6) Broadbent, S. R.: Callcott, T. G.: *J. Inst. Fuel.*, 29, 524 (1956); 30, 13, 21 (1957)
- 7) 中川, 松居: 化学工学, 23, 694 (1959)
- 8) 森: 化学工学, 23, 701 (1959)
- 9) Brown, R. L.: *Brit. Chem. Eng.*, 4, 463 (1959)
- 10) Evans, I.: *Trans. Inst. Chem. Engs.*, 40, No. 5, 309 (1962)
- 11) 森, 神保: 化学工学, 23, 138 (1959)
- 12) 三輪: 化学工学, 29, 113 (1965)
- 13) Zehler, V.: *Kolloid-Z.*, 160, H 1, 16 (1958)
- 14) Fay, G., Zselew, B.: *Energietechnik*, 12, 518 (1962)
- 15) Callcott, T. G.: *J. Appl. Phys.*, 35, No. 1, 250 (1964)

XIX-Ⅱ・2 粉 碎 操 作 に つ い て*

田 中 達 夫**

は し が き

粉碎の物理的な機構やいわゆる粉碎法則とは独立して、粉碎機や粉碎操作に関する研究がある。いわゆる仕事法則、分布法則は総括的、みかけのなものである場合が多かったが、さらに細かく粉碎機の構造と粉碎機構を解析し、あるいは所要の粒度分布を得るための粉碎機と分級機の組合わせの設計法とか、特殊の環境を与えて粉碎効率を高めようという要求を満足するためである。本稿には便宜上、粉碎機のメカニズム、閉回路粉碎、微分粉碎、その他をそれぞれ別項に紹介する。

1. 粉碎機の粉碎機構

Bond⁶⁾によればある物質の処理量と最初と最後の粉末度が得られれば粉碎機の種類に無関係に粉碎動力がき

図 1 飛翔距離 S_0 、平均自由行程 λ と粒径の関係

* 昭和 40 年 4 月 20 日 受理

** Tatsuo Tanaka 北海道大学工学部

まることになるが、これはきわめて大ざっぱな見方であることは明らかである。現今工業的に用いられている粉碎機を大きく分類すれば大体次の 7 項目にわかれるであろう。

(1) 直圧式 (2) ロール式 (3) ディスク式 (4) 転動式 (5) 衝撃式 (6) ジェット式 (7) 振動式

(1) (2) は主として圧縮によるもの、(3) は圧縮摩擦、(5) (6) は衝撃力、(4) は打撃と磨砕、(7) は磨砕である。この中で微粉碎または超微粉碎に利用されるものは主に (4) のボールミル、(5) の高速衝撃粉碎機、(6) のジェットミル、(7) の振動ミルであって、最近これらについて興味ある解析や実験的な研究が多く発表されている。

1・1 衝撃ミルの粉碎機構

昔から多く使用されていたこの形式の基礎研究は少なかったが、Rumpf⁴⁾はこれについて次のような解析を行なった。

いま一定の空間を勝手に動いている粒子を想定して、これが衝突するときいかにエネルギーを使うかを考えると、一方の球の中心を原点として他を相対速度 v で運動するものと考えうる。両者の直径を d_1, d_2 とすると、この球は必ずしも正面衝突を起こすわけではなく、 y 軸から a_0 だけはなれたところを y 軸に平行にとぶ場合、衝突の起こる確率は衝突点と原点をむすぶ直線と y 軸のなす角を α_0 として

$$W = \frac{a_0^2}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} = \sin^2 \alpha_0 = 1 - \left(\frac{v_{n0}}{v}\right)^2 = 1 - \zeta_0$$

ゆえに v なる速度の運動のエネルギーは分速度 v_{n0} しか使われていないわけで、エネルギー交換率 $\zeta_0 = 90\%$ という有効な衝突はわずか 10% しか起こっていない勘定にな

る。これを基礎に衝撃粉碎をさらに詳細に解析できる。

いま粒子の運動に分子運動論を適用すると、粒子の平均自由行程 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = d/10(1-\varepsilon)$$

ここに ε は空間率、 d は粒径である。衝撃粉碎室内の粒子によって占められる容積率 $1-\varepsilon=10^{-2}\sim 10^{-3}$ のオーダーであるから

$$\lambda = (10\sim 10^2)d$$

となり、 $d=10^{-1}\sim 10^{-2}\text{mm}$ の微粉碎域では $\lambda=1\sim 0.1\text{mm}$ となって粒子の粉碎は互いの衝突によらねばならぬことがわかる。粒子が大きければ壁や打撃刃との直接衝突によることが明らかである。

一方、初速 v_0 で加速された粒子は空気抵抗をうけ一定の距離をとれば失速するはずだから、この飛翔距離 S_0 はストークス則と運動方程式の積分より簡単に求められる。

$$S_0 = \frac{d^2 \rho v_0}{18 \mu} = \frac{v_f}{g} v_0$$

v_f は沈降速度、 μ は粘度である。 $d=10\mu$ では $S_0=16\text{mm}$ となって空気抵抗の効果が大きい。

前述の λ と S_0 の関係で $S_0 \gg \lambda$ のときに衝撃粉碎は可能であると考えるので、 S_0 と λ とをパラメーターを一定にし、粒径 d に対して点綴すると図1のようになって粒径大なるほど衝撃粉碎は可能であり、とくに $d=0.1\sim 1\mu$ では衝撃粉碎の限界にあるといえることができる。ゆえにこれを避けるためには速度 v_0 を上げることであり粒子濃度を高めることにあることが一目瞭然である。

速度 v で衝突した際、固体内に発生する衝撃応力 $\sigma_{\max}$ は Hertz によれば次式で与えられる。

$$\sigma_{\max} \propto d^{3/5} v^{2/5} r^{-3/5} E^{4/5}$$

r は衝突部の曲率半径、 E はヤング率である。 $\sigma_{\max}$ を大きくするには物質と d が与えられた場合、とくに微粉碎では r, E は決まっているから v を上げる以外にはない。衝撃粉碎機のローター周速はせいぜい $100\sim 150\text{m/sec}$ であるから、衝撃粉碎の粉碎可能粒径は大体定まってしまうことがわかる。

Schlaug⁽⁴⁵⁾ によれば衝撃体に当る角度（主として粗砕中砕域）と衝撃速度の関係を実験的に図2のように与えて、速度が大きくなるほど角度の影響は小さくなることを示している。したがって非常に高速で粒子同志の偏心衝突が起こるとすれば、粉碎効果は正面衝突とはあまり変わらないことを示す。この点前述の Rumpf のエネルギー交換率 ζ_0 の概念は補正を要するであろう。

筆者ら⁽⁴⁷⁾ は理想的な単純衝撃の場で、2,3の粉碎確率すなわち上式による $\sigma_{\max}$ に関するものや、衝突効率および粉碎環境を示すパラメータを導入してこれを仕事法則に結びつけ、その結果粉碎効果 dS/dE (S は比表面

図2 衝撃速度と角度の粉碎効果に対する影響

積、 E は粉碎仕事）と粒径 d の関係を総括的に示したが、これによれば曲線の右側は Kick の法則に近く、最大値では Rittinger、その中間は Bond の法則の適用範囲がある。さらに左側は限界説の適用範囲となり、すべての古典的法則性は固体の物性と、粉碎機内の粉碎確率すなわちメカニックスの両者によって説明され、もはや特定の法則を主張することは、粉碎機工学に関する限りあまり意義のないことであることを示唆した。また、たとえば酸素分圧が、あるいは助材の存在が、その吸着機構によって粉碎効果に顕著な傾向のあることを示したが、破碎されたばかりの表面の大きい表面エネルギーを用い、表面コーティングや特殊な反応を促進することも可能であろう。

1.2 ジェットミルの粉碎機構

ジェットミルの詳細は別に述べられるが、その粉碎機構は本質的には衝撃粉碎の延長であると Rumpf⁽⁴⁸⁾ は考えている。すなわちジェット気流に粒子を吸いこみ、大きい速度にまで加速して前述の v を上げることに外ならない。加速距離 S はやはり運動方程式の積分より次式で与えられる。

$$S = \frac{4}{3} d \frac{\rho}{\rho_g} \cdot \frac{1}{C_D} \left\{ \left(\frac{w}{w-v} - 1 \right) - \ln \left(\frac{w}{w-v} \right) \right\}$$

ρ, ρ_g は固体およびガスの密度、 C_D は抵抗係数、 w は気流の速度である。 C_D は Re 数やマッハ数の関数である。これによって計算される S をジェットの最小長さ x におきかえることにより、 x とノズル径 D_N の関係は $x/D_N=10\sim 20$ で与えられるから、これはジェット粉碎機の寸法をきめるよりどころとなる。ノズルの最適数については砂糖の破碎時の発光現象を利用して粉碎域の観察の結果、固く大きい粒子の場合は壁の摩擦を防ぐためになるべくノズル数を増す方がよいことを明示した。

これに対し森、神保ら⁽²⁸⁻³⁰⁾ はジェット粉碎機の吸込機構を実験的に検討し、粉碎に対しかなり磨砕の効果を

認めている。さらにジェット圧 P と吸込速度、粉碎速度、粉碎能力の関係を実験式で示し、一般に粉碎機のスケールアップの基礎となる粉碎機容量効果指数 σ を次のように与えた。

$$G \propto P^\sigma$$

G は粉碎能力、 P は粉碎動力である。通常多くの粉碎機では $\sigma=1\sim 1.2$ 程度の大きさであるが、ジェット粉碎機（とくに循環式ジェットミル）では $\sigma=2.5\sim 3$ にもなっており、大型になるほどジェット粉碎機は効率の向上があることを示して注目された。このことについては後に Dotson¹²⁾ も別の観点から支持し、その原因の一つは大型になると粒子同志の衝突のチャンスを増し、第2に加速距離の増大を挙げている。しかし当然のことであるが粒子濃度によってこの傾向には限界を生じ、たとえば十分に加速する前に衝突失速することによって粉碎効果が減ずることもあり、粒子濃度と粉碎効率の関係は極大値をもつ曲線となる。また前記の Schlaug⁴⁶⁾ はジェット粉碎における粒子の運動軌跡に写真解析を用いて問題点を論じた。ジェット粉碎機により物質移動（たとえば乾燥）や反応を同時に行なうプロセスの解説もある。Korda²⁵⁾ によってこの方面の実際が概観され、さらにジェットノズルの形状について具体的な指針が与えられている。またジェット粉碎において化学反応、たとえば固体の熱分解反応を同時に行なう操作の模型理論が田中⁴⁹⁾ によって発表されている。

1・3 転動型粉碎機・ボールミルの粉碎機構

ボールミルはその用途が多方面にわたっている上に古くから用いられてきたので、研究も数多い。わが国でも本誌に掲載されたもので森・神保³⁰⁾、田中⁵⁰⁾、中川・松居³³⁾ のものがあり、おのおのの独自の観点よりその粉碎機構に言及している。粉碎機構に及ぼす操作変数は非常に多く、それらすべてを明快にメカニズムと結びつけることはほとんど不可能に近い。最近松居²⁶⁾ はボールミルのスケールアップの因子と衝撃圧縮の自らの基礎研究の関連について理論的実験的に扱った。

ここにすべての関連する文献を調査しそれらを紹介するのは困難であるので、非常に大胆ではあるが、示唆に富むと思われる Rose⁷⁾ の考え方を簡単に紹介する。

図3 ボールミルの粉碎帯

図4 相対硬さと粉碎曲線

基本的な考え方は(1)粉末粒子がボールとボールの間すなわち粉碎帯内に入り粉碎されうる確率と(2)その中に入った粒子が実際に粉碎されうる確率の二つの独立事象によって粉碎のメカニズムが支配されるというのである、第1の確率についていえば図3のように幾何学的な条件から

$$Y = \sqrt{Dd/2} \quad \text{ただし} \quad D=2R, \quad d=2r$$

この粉碎帯に入る粒子の最大数 N_m は接点のまわりにリングを作り

$$N_m = 4.5\sqrt{D/d}$$

実際の数 N_p はこれより小さく、この比を $y(=N_p/N_m)$ とし、これが粒子のミル内充滿率 u のきまった関数と仮定する。ある時間においてボールの表面に埋めこまれる粒子の数 N_i と、そこからひきはがされる粒子の数 N_o を考えると

$$dN/dt = N_i - N_o$$

N_i は、たとえば粉碎帯における粒子の数とか、相対硬さとか、金属面の面積率を含むいくつかの独立事象の確率に関係し、 N_o は埋めこまれた粒子数とか、ボールが接触したとき粒子が接触してとび出す確率（これまた相対硬さの複雑な関数である）などに関係する。これらのそれぞれの確率をその模型的な考えを満足する関数型で与え、適当な条件から定数をきめ、定常状態 $dN/dt=0$ の条件から、平衡状態における粒子の数 N_e を次のように決定することができる。

$$N_e = 2.5 \left[\frac{K_1}{K_2} \right]^{1/3} (1 - e^{-0.5u})^{1/3} \left(\frac{D}{d} \right)^{1.5} \left[\frac{e^{-0.7H}}{1 - 2.5H e^{-H}} \right]$$

u はミル内粒子充滿率、 D はミル径、 d は粒子径、 H = “相対硬さ” である。 K_1, K_2 は定数である。

この式を用い、さらに粉碎速度 dG/dt に対する考察をボールの運動の自由度などの確率の導入によって解析すると、ボールの充滿率 J 、ミルの容積 V などの操作変数を含んだ式を得る。この式を積分すると比表面積 S と時間 t との関係が図4のようにえられ、粉碎曲線の微係数の変化がすべて相対硬度 H によって特性づけられていることがわかる。すなわち $H=0$ 、ボールに対し物質の硬さが著しく大きい場合は上に微係数は減少し、逆に物質が非常に軟かきときは微係数は時間とともに増大する。また同時にわかったのは $H=1$ すなわちボールと物質の硬さが等しいときに磨耗の量が最大になるというので、硬いものの粉碎にはむしろ軟かい媒体を使えば一層有利であろうというわけである。このことは別に神保によって述べられると思うが、数値的にはとも角、磨耗の本質的な問題には矛盾しないらしく、実際面でも興味あると同時に、ボールミル粉碎のメカニズムの解析へのアプローチとしてかなりの評価がなされてよいのではなかろうか。ボールミルにおける所要動力 P の計算式も多くプロポーズされているが、Bond⁷⁾ が仕事指数を用いて

表わしており、また Rose³⁹⁾ は次元解析と実験により次式を与えている。

$$\left(\frac{P}{D^3 N^3 \rho}\right) = K \left(1 + \frac{0.4\sigma}{\rho}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{N_c}{N}\right)^2 \phi(J)$$

D : ミル内径, N : 回転速度, N_c : 臨界速度, σ, ρ は砕料と粉碎媒体の密度, K は定数である。 ϕ はミル内充填率の関数である。 L —一定ならば $P \propto D^{2.5}$ となって古い理論式と一致する。

N は通常 N_c の 60~80% で操作されるが、逆に 1.5~2 倍のスピードで粉碎した結果を Hukki²⁰⁾ が報告している。またボールのサージング (振動現象) を Rose³⁸⁾ が解析しており、Rose はこれらボールミルに関する自らの結果を一冊の本⁴⁰⁾ にまとめて公表している。

ボールミルに関する現場的な問題は多いが、たとえばボールの大きさの配分とか最大径について Bond⁷⁾ が式を与えており、またボールの逆配列を防ぐためのライナーの形状などにも検討があるようだがあまりにも局部的になるのでここには一切ふれない。

1.4 振動ミルの粉碎機構

振動ミルの歴史はさほど新しい話ではなく、その基礎研究も 1940 年代に発表された Bachmann^{2,3)} のボールの運動などに対する基礎研究は重要である。しかしその後あまり粉碎機としては発展しなかったが最近急激に微粉碎もしくは超微粉碎を目的として、その粉碎効率や速度が良好なことが注目されるに到り、Rose⁴²⁾ の粉碎動力の次元解析による求め方や、Batel⁴⁾ の種々のガスを充填した粉碎環境における粉碎機構の研究があり、わが国では森・神保³¹⁾ が粒度分布の特性からミル内の粉碎力は小さく主として磨砕により、粉碎確率の著しく大きいことがその特徴であると述べている。同様な傾向は上田³²⁾ によっても認められている。また実際の振動ミルの問題点について Both³⁾ は連続式への可能性、ボール量と充填度などの関係を述べている。また Fuerstenau¹³⁾ は滞留時間と粒度の関係を求めた。

Rose^{41,42)} の研究によれば、振動粉碎の操作変数は多いが、大体ボール量は全容積の 80~90%、砕料粒子はそのボール空間を埋める程度、振動型は振幅が水平垂直方向に等しい円振動が最適で、垂直振動はこれに比較して 30% 水平ではわずか 3% 程度になることを示している。振動数については、粉碎速度は総括的にそのほぼ 3 乗に比例する形で与えられるが、大体 1500 cpm が普通のようで、系の固有振動数の数 100 cpm からかなり離れている。これを近づけることによって粉碎効率は急上昇すると述べているが、このことは技術的にかなり困難を伴うであろう。なお Rose⁴³⁾ はこれまた自らの研究を中心に振動ミルに関する著書を発表しているし、神保²³⁾ は最近広く文献を網羅して解説を与えている。

振動ミルを用い重合反応を同時に行なうプロセスがば

つばつ注目されている。Kargin²⁴⁾、Bischof³⁾ らの研究はその代表的なもので、粉碎による化学結合の切断による解重合などを含めて、今後合成化学の分野で発展があるかも知れない。同様に粉碎とともに行なう無機反応については Peters³⁵⁾ の Mechanochemie に関する研究の紹介がある。

2. 微 分 粉 碎

硬い砕料と軟かい砕料とを混合して一緒に粉碎する場合、均一な細かさに粉碎されるかどうかが問題となる。これは 2 成分の粒子の混合を助ける意味で粉碎を行なうときに大切で、この粉碎機構について最近いくつかの発表がある。Holmes¹⁹⁾ は石英と石灰石をそれぞれ硬軟両成分とし、閉回路粉碎において両者の粉碎速度をそれぞれ求め、さらに各成分の単独粉碎の場合のそれと比較しているが、そのメカニズムに関する考察は十分ではない。最近 Fuerstenau¹⁴⁻¹⁶⁾ は同一の砕料混合物を用い、硬成分と軟成分に消費されるエネルギーの比を図 5 のように示している。ただし、これは (a) ボールミルと (b) ロッドミルによる結果である。明らかに粉碎がすすむに従って軟成分と硬成分によって費われるエネルギーは逆転し、ある時間では硬いもののみが砕かれていることを示すが、しかし、これより以前に田中ら^{51,52)} はさらに一般的な関係によって、実はこの状況が繰返されて、エネルギーの配分率は週期的変化であることを実験的に明らかにしている。したがって Fuerstenau はこの変化の一部を述べたにすぎないと思われる。この考察の基礎として一つのモデル的な考え方は、軟成分に集中したエネルギーのために、始めは軟成分のみ細かくなり、ある粒径比になると硬成分が大きく残留するため、選択的に破碎されることである。この結果、一定の粒径比が常に存在し、硬さの異なる 2 成分系の粉碎は一樣の細かさにはなりえず、これは両者の重量比と硬度比によって実験式の形で与えられた。ただし、この結果をすべての粉碎機構について成り立つと考えるのは早計である。

各成分の粒度分布についてはたとい混合粉碎が行なわ

図 5 混合粉碎における硬軟各成分に消費されるエネルギー

れても、その粒度分布の傾向は単独粉碎の場合と本質的に変わらないというのが各研究者の得た結論のようである。

3. 閉回路粉碎

砕製物の粒度分布を任意に作るために、また粉碎能力を増すために、極端にいえば最近の超微粉碎機はすべて閉回路粉碎方式を採用している。すなわち粉碎のあとに分級を行ない、粗粒を cut して元へ戻すのである。大工業における連続チューブミルでも外部分級式を多く採用しているが、その基礎理論は比較的少なかった。このため、たとえば輸送機容量や分級性能で押えられて思うほどの効果があげられていない場合が多い。

操作上のデータをもとにした Börner⁹⁾ による閉回路と開回路粉碎の比較が古くは発表されていたが、最初にすべての操作変数の関係を収支計算より導いたものに筆者ら^{33,34)}の報告がある。この報告により、粉碎機出口の細かさ、分級機からの戻し、および製品の細かさ(平均粒径)、またそれらの粒度分布、そして循環比が共線図表によって求まるので、処理量既知でたとえば製品の細かさ(比表面積と粒度分布)を指定すれば直ちに閉回路粉碎に必要な粉碎機、分級機および輸送機の設計が可能になる。ただし分級機内の分離径 x_c で 100% の分級効率を仮定してあるので、この点の補正を別に扱っている。セメント原料およびセメントクリンカーによる実測値により、さらに具体的な数値を得、これを報告した⁵⁵⁾。

同様な取扱いはその後藤野ら¹⁷⁾によっても発表されている。とくに分級機内の分離について普通に用いられる分級効率を採用し、これをパラメータとして粉碎能力と循環比の関係を理論と数値計算により図示しているので一層具体的なものである。

ソ連の Разумов³⁴⁾ はほとんど筆者のものと同一の前提に基づき、閉回路粉碎の最適設計を行ない、最適循環比について次式を与えている。

$$cl_{op} \div 0.6 \sqrt{f - 0.25}$$

$$\text{ただし} \quad f = \left(\frac{T}{Q_1} \right) / q$$

図6 閉回路粉碎

T : ミルの単位時間当りのコスト, Q_1 : $cl=100\%$ のときの粉碎能力, q : 1 トン当りの輸送コストで $f=10 \sim 100$ の範囲となるから $cl_{op}(\%)=165 \sim 575$ となる。工業的には $cl=300\%$ 前後が多いようであるから大体一致したものと思われる。また最近三輪²⁷⁾ は半閉回路粉碎の実験的検討を行なっている。

一方 Broadbent と Callcott¹⁰⁾ によって提案されたマトリックスを用いる粉碎機構の解析法は、閉回路粉碎方式にもうまく適用される。ここにはそれを Modify した Brown¹¹⁾ の解説に従って述べる。閉回路粉碎方式の代表的形式を図6に示す。

いま分級機内において、指定された i 番目の粒径範囲にとどまる fraction を c_{ii} とすると、たとえば ($i=1, 2, \dots, 5$)

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} \end{pmatrix}$$

なるマトリックスを考え、図の記号に従えば

$$q = cp$$

となる。これはマトリックス c と粒度ベクトル p の掛算をやってみれば単なる収支計算になることが理解されよう。

粉碎について

$$p = MR$$

すなわち M は破碎マトリックスで c の同一の粒径について与えられるものとする。 M は triangular matrix である。何となればプロダクトの中のある粒径に入るものはそれより大きい粒径のすべてから入ってくるからである。閉回路方式の図から、定常状態では各流れの粒度ベクトルの間に次式が成り立つ。

$$k = m + p - q$$

上の三つの式を組合わすと

$$\begin{aligned} MR &= Mm + Mp - Mq \\ &= Mm + Mp - Mcp \end{aligned}$$

より単位マトリックス I を入れると $p = Ip$ だから

$$(I - M + Mc)p = Mm$$

$$G = I - M + Mc$$

とおいて $p = G^{-1} \cdot Mm$

$$q = cG^{-1} Mm = Hm$$

すなわち粉碎機と分級機を組合わせたマトリックス H を定義することにより、砕料の粒度と製品の粒度の関係を簡潔に表現しうる。閉回路特性マトリックスは、用いる粉碎機および分級機の特長 (M および c) の研究だけにしぼられ、とくに M については粉碎機内のメカニズムの定量的考察と1箇粒子の破碎プロセスの結合によって今後完成されるべきものと思う。

4. 回分から連続へ

粉碎機のスケールアップについては松居が述べるから省略するが、相似則の立場で、2, 3の代表的粉碎機について、操作変数の間の相似性を論じたものに Andreasen¹⁾の報告がある。圧縮力を主としてそのメカニズムとする粉碎機には比較的良好であつてはまるようであるが、衝撃力によるミルには必ずしも十分でない。これは後者における広い応力スペクトルが原因であると思う。また数年前本協会によって行なわれた工業用ミルのアンケートに基づいた粉体技術委員会の報告は⁶⁰⁾、粉碎機のスケールアップには好箇の参考となるであろう。

ところで実験室でボールミルを回分式に運転し、このデータを連続チューブミルにあてはめる場合いくつかの問題が生ずる。その最も大きい問題は、粒子の滞留時間分布である。たとえば粒子が均一な滞留時間すなわちピストン流れをなす場合には、ボールミルにおける総回転数または時間がチューブミルの入口からの長さ按比例すると考えうるが、もし安全混合をなすとすれば、全く異なった取扱いを必要とする。すなわち流動層と同じように考えねばならぬ。したがって粒度分布などに与える効果はパッチの場合からただちに推定できない。

古くは中条⁵⁷⁾がセメント粉碎における石膏の SO_4^{--} を検出することによって滞留時間分布に関係した項をチューブミルについて報告しており、最近、森・神保・山崎³²⁾は同様にチューブミルについてミル内粒子の混合を乱流拡散係数によって定量的に導いた。杉本と筆者⁶¹⁾は空の円筒および粉碎体の入った場合の実験の結果を層流率 I で表わし、図5に示すような無次元項によってまとめた。この図によれば、たとえば回転数 n が十分低いようなロータリキルンでは粒子の流れはほとんどピストン流れに近く、反応転化率の計算は回分式の場合と同様に扱えるけれども、 n の大きいチューブミルのような場合には層流率 I はかなり小さくなり、それだけ混合が著しいことを示す。このことはチューブミルにおける粉碎の結果の粒度分布が、平均滞留時間から推定されるパッチのミルの結果と一致しないことを意味する。すなわちミルに飛込んだ粒子がただちにミル外へ出る可能性も完全混合の場合にはあるわけで、とくに大きい碎料がわれないでそのまま飛び出してくるという極端な実例があれば、それはミルの構造によってこのような混合流れが支配的であるということを示す。

粉碎機の実操作は漸次自動制御化される方向にある。

F : 通過量 D : 円筒直径 ρ : 密度
 L : 円筒長さ n : 回転速度

図7 回転円筒内の粒子混合

この場合粉末度の連続検出はいまのところ不可能のようである。粉体流量については井伊谷ら^{21,22)}の2, 3の研究がある。粉末度直接の検出ではないが、チューブミル内のボールの音の解析を行なうとある周波数範囲で、ミル内の装入物のレベルによって音の強さに直線性を示す部分がある。すなわち粉体量が多くなりすぎるとデシベルは減少し、これはとりも直さず粉碎が不十分になることに対応する。この音圧をマイクロホンにより検出端として、操作端をフィードのしぼりにすることにより、粉碎機の制御、およびそれによる能力の向上が20~30%程度あることを報じた論文¹⁸⁾もあり、すでに実施されているところも多いと聞く。またセメント工業における種々の操作の自動化についても発表がまとめられている⁵⁹⁾。

おわりに

粉碎操作という項目にはまだまだ多くを入れねばならぬであろう。たとえば湿式、乾式、低温粉碎をはじめとして粉碎助材の使用も注目されている。しかし敢て学術的な報告は少なく、むしろこれらは物理化学的な解析に基づかねば本質的な理解は困難であろう。たとえば助材については筆者ら⁵⁶⁾の実験や Quatintetz³⁶⁾らの豊富な研究があるが、いずれにしても、分子やイオンの吸着の挙動が粉碎助材の効果を左右し、場合によっては粒径が増大したり減ったりすることがあるというのは、粉碎が微粉末における大きい表面エネルギーのための凝集機構と密接な関係のあることを示し、超微粉碎を目的とするほど、さらにミクロな考え方をもってこない限り粉碎技術は行きづまるであろう。

引用文献

- 1) Andreasen, A. H. M.: *Trans. Instn. Chem. Eng. (London)*, **35**, 104 (1957)
- 2) Bachmann, D.: *Verfahrenstechnik*, Nr. 2, 43 (1940)
- 3) Bachmann, D.: *ibid.*, Nr. 3, 95 (1941)
- 4) Batel, W.: *Chem. Ing. Tech.*, **30**, 567 (1958)
- 5) Bischof, K.: *Int. Chem. Eng.*, **3**, 80 (1963)
- 6) Bond, F. C.: *Min. Eng.*, **4**, 484 (1952)
- 7) Bond, F. C.: *Crush. & Grind. Calc.*, Allis (1961)
- 8) Both, H. U.: *Symp. Zerklein.*, S. 466 (1962) V. Chemie
- 9) Börner, H.: *Zement-Kalk-Gips*, **5**, 242 (1952); **9**, H. 4 (1956)
- 10) Broadbent & Callcott: *Phil. Trans.*, **249**, A960, 99 (1956)
- 11) Brown, M. A.: *Brit. Chem. Eng.*, Aug.-Sept. 463 (1959)
- 12) Dotson, J. M.: *Ind. Eng. Chem.*, **54**, 62 (1962)
- 13) Fuerstenau, D. W.: *Min. Eng.*, **11**, 1238 (1959)
- 14) Fuerstenau & Sullivan: *Can. J. Chem. Eng.*, **40**, 46 (1962)
- 15) Fuerstenau & Somasundaran: *Trans. Soc. Min. Eng.*, June, 132 (1963)
- 16) Fuerstenau & Sullivan: *ibid.*, June 152 (1962)
- 17) 藤野, 谷口: *化学工学*, **24**, 93 (1960)
- 18) Hardinge, H.: *Am. Inst. Min. Met. Eng.*, T. P. N. 1076, Class B (1939)
- 19) Holmes & Patching: *Trans. Instn. Chem. Engrs. (London)*, **35**, 111 (1957)
- 20) Hukki, R. T.: *Min. Eng.*, **10**, 581 (1958)
- 21) 井伊谷, 後藤: *化学工学*, **27**, 80 (1963)
- 22) 井伊谷, 後藤: *同上*, **28**, 73 (1964)
- 23) 神保元二: *最近の化学工学*, 141 (1963)
- 24) Kargin, et al.: *Intern. Symp. Macromolecular Chem.*, Paris Part 2, 1027 (1963)
- 25) Korda, E. T. H. P.: *Aufbereitungs Technik*, Nr. 6, 230 (1961)
- 26) 松居国夫: *化学工学に投稿中*
- 27) 三輪茂雄: *化学工学*, **28**, 113 (1965)
- 28) 森・神保: *化学工学*, **22**, 363 (1958)
- 29) 森・神保: *同上*, **25**, 477 (1961)
- 30) 森・神保: *同上*, **23**, 138 (1959)
- 31) 森・神保: *化学工学協会 26 年会前刷* (1959)
- 32) 森・神保・山崎: *化学工学*, **28**, 205 (1964)
- 33) 中川・松居: *同上*, **22**, 616 (1958)
- 34) Паэымов, K. A.: *Гоп. Мып.*, **6**, 29 (1949); 三輪茂雄; 粉砕 No. 9, 24 (1963)
- 35) Peters, K.: *Symposion Zerklein.*, S. 78 (1962) Verlag Chemie
- 36) Quatinetz, et al.: *National Aeronautics & space Ad.*, Tech. Note D 879 (1962)
- 37) Rose, H. E.: *Trans. Instn. Chem. Engrs. (London)*, **35**, 87 (1957)
- 38) Rose & Blunt: *Proc. Inst. Mech. Engrs. (Lond.)*, 171, 993 (1957)
- 39) Rose & Evans: *ibid.*, **170**, 773 (1957)
- 40) Rose & Sullivan: *Ball, Tube & Rod Mill* (1958), Constable
- 41) Rose, H. E.: *Chem. Ing. Tech.*, **34**, 411 (1962)
- 42) Rose & Sullivan: *Brit. Chem. Eng.*, Aug.-Sept., 450 (1959)
- 43) Rose & Sullivan: *Vibration Mill & Vibration Milling* (1961) Constable
- 44) Rumpf, H.: *Chem. Ing. Tech.*, **31**, 323 (1959)
- 45) Rumpf, H.: *ibid.*, **32**, 129, 335 (1960)
- 46) Schlaug, H.: *Symp. Zerklein.*, S. 531 (1962) Verlag Chemie
- 47) 田中・木橋・鈴木: *化学工学*, **28**, 1030 (1964)
- 48) 田中達夫: *同上*, **18**, 160 (1954)
- 49) 田中達夫: *同上*, **28**, 815 (1964)
- 50) 田中達夫: *同上*, **18**, 587 (1955)
- 51) 田中, 川合: *同上*, **26**, 792 (1962)
- 52) 田中達夫: *Symp. Zerklein.*, S. 360 (1962) Verlag Chemie
- 53) 田中・小島・桑野: *化学工学*, **21**, 358 (1957)
- 54) 田中達夫: *同上*, **21**, 716 (1957)
- 55) 田中達夫: *Zement-Kalk-Gips*, **11**, 396 (1958)
- 56) 田中・川合: *化学工学*, **26**, 427 (1962)
- 57) 中条金兵衛: *化学工学と化学機械*, **7**, 1 (1949)
- 58) 上田康夫: *化学工学協会 28 年発表会* (1963)
- 59) *Zement-Kalk-Gips*, Sonderdruck, Nr. 8, Bau Verlag
- 60) *化学工学*, **23**, 728 (1959)
- 61) 田中・杉本: *Zement-Kalk-Gips*, **16**, 521 (1963)

XIX-Ⅱ・3 粉 碎 技 術 上 の 問 題 点

XIX-Ⅱ・3・(1) グラインダビリティ試験法*

三 輪 茂 雄**

従来, グラインダビリティ (粉碎能) の試験法としては, 主として石炭の粉砕に関して発達した ASTM のボールミル法と, Hardgrove 法がよく知られているが, Bond の粉碎理論に基づく仕事指数 (work index) の測定法が最近普及して来て, 方々で測定されるようになってきた。一方, 粒度の揃った粒状物質の粉碎性を試験する目的で, とくに研摩剤粒子用として, 特殊な試験法も研究されるようになった。

1. Bond の仕事指数

Bond の第三理論によれば¹⁾ $F[\mu]$ のフィードを $P[\mu]$ の産物まで粉砕するに要する仕事は次式で与えられる。

$$W = \frac{10 W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F}} \quad (1)$$

ここで W_i を仕事指数と呼び, 理論的に $F=\infty$ から $P=100[\mu]$ まで粉砕するに要する仕事である。この値は, ボールミルについては, ボールミル・グラインダビリティ G_{pb} を測定して次式から計算される

* 昭和 40 年 5 月 15 日 受理

** Shigeo Miwa 昭和電工 (株)