般に關しての展望を行なっている

- 150) 棚沢泰：機械の研究，15，505，759 (1963)
 151) 棚沢泰：日本機械学会誌，66，542 (1963)
 152)* 谷口紀男：硬脆材料の衝撃破加工法 (1959) 誠文堂新光社
 153) Taylor, J.: *J. Inst. Fuel*, 27, 249 (1954)
 154) Theimer, O.: *Kolloid-Z*, 128, 1, 68, (1952), 132, 134 (1953), 133, 44 (1953)

- 155) Walker, D. R., Shaw, M. C.: *Min. Eng. Trans. AIME*, 199, 313 (1954)
 156) 和田正美：東北大選鉱製錬研究所彙報，11，67 (1955)
 157)* 横堀武夫：材料強度学 (1957) 技報堂
 158)* 横堀武夫：材料強度学 (1964) 岩波書店
 159) 三輪茂雄：化学工学，29，113 (1965)

XIX-Ⅱ・1・(2) 粒 度 分 布 則*

三 輪 茂 雄**

粉碎産物の粒度分布の研究は，帰納的な方向と，演繹的な方向との二つの面からなされてきた。前者の代表的なものとして，広く知られているのは Rosin-Rammler の式，級数展開して第一項のみをとったその簡略式としての Gaudin-Schuhmann の式および対数確率分布式の3つである。一方，固体の破壊機構から分布式を導く試みも，A. A. Griffith の理論以来，たくさんなされてきたが，最近，Rosin-Rammler あるいは Gaudin-Schuhmann 式との関連についての論議が多い。

1. Gilvarry の式

Rosin-Rammler 式を理論的に導く試みは，割れ目のポアソン分布の仮定から出発して Bennett¹⁾ が行なった。これは Rosin-Rammler-Bennett 式として知られているところである。

$$R = \exp(-x/\bar{x})^n \quad (1)$$

これにたいし，最近 Gilvarry^{2,3)} は，脆い固体の単一破壊 (single fracture) に関し，理論的および実験的

図1 実測値と理論の一致
($x_0 = 22.5$ mm, $r = 10$)

に詳しい研究を行ない。次式を導いた

$$R = \exp\{(-x/k) - (x/j)^2 - (x/i)^3\} \quad (2)$$

この式は，無限に大きくて，割れ目の分布が全体にわたり均一な場合に対するもので，条件により各項の利き方が変わってくる。なお，上式は，指数が1の場合の Gaudin-Schuhmann 式および Rosin-Rammler 式を含んでいる。

2. Gaudin-Meloy の式

Gaudin と Meloy⁴⁾ は，等方性で均一な固体の単一破壊のモデルを考え， x_0 の大きさの粒子が，任意の大きさ x に破壊される random な確率から，次式を導いた。

$$R = 100 \left(1 - \frac{x}{x_0}\right)^r \quad (3)$$

ここで r は，粉碎比 (size ratio) である。

実験との一致の例として，Hukki の学位論文のデータを用い図1のように，上式による計算値と，実測値とを示している。Gaudin-Schuhmann の式では，直線になるはずであるが，実測値は，大きい粒子径のところで曲がってくる。上式によると，全体についてよく一致するというわけである。

上式は単一破壊に対するもので，後述する Norton Co. の r 値の測定のような場合には，このままでよいが，実際の粉碎機では，単一破壊が繰返される (repeated fracture)。そのような粉碎過程についてもモデルを考えて，次のような積分微分方程式をたてた。

$$\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = -P(x)w(x,t) + \int_x^{x_0} P(\gamma)w(\gamma,t) \frac{r(\gamma-x)^{r-1}}{\gamma r} d\gamma \quad (4)$$

ここで $\partial w / \partial t$ は，ある時間 t における，粒子径 x の重量変化を表わし，右辺第1項は，粉碎による減少，第2項は，より大きい粒子 γ が粉碎されて，粒子径 x になって入ってくる重量増加を示している。 $P(x)$ ， $P(\gamma)$ は，粒

* 昭和40年5月15日受理

** Shigeo Miwa 昭和電工(株)

子径 x と r の粉碎確率である。 x_0 は最大粒子径である。

この式は一般には解けないが、IBM の計算機を使って数値解を求めることができ、いくつかの例を示している。

(3) 式は $x/x_0 \ll 1$ ならば次の近似式になる。

$$(R/100) = 1 - r \left(\frac{x}{x_0} \right)$$

これは変形して

$$1 - (R/100) = r \left(\frac{x}{x_0} \right)$$

となり Gaudin-Schuhmann の式

$$y/100 = 1 - (R/100) = \left(\frac{x}{k} \right)^n \quad (5)$$

に対応してくる。

3. Земляков の式

一般に Gaudin-Schuhmann に従って、粒子径 x と積算網下 % との関係をも $\log\text{-}\log$ 紙にプロットすると、大きい粒子径のところで直線性からはずれる傾向にある。これを修正するため、Земляков⁵⁾ は、次の方法を考えた。Gaudin-Schuhmann の式は

$\log(100/y) = -n \log x - n \log k = -n \log x - \log A$ とかくことができる。この左辺に次のような修正係数を入れる。

$$\log \left(\frac{100}{y} - \frac{100}{B} \right) = -n \log x - \log A$$

$$y = \frac{100 A x^n}{1 + (A/B) x^n} \quad (6)$$

ここに

$$A = \frac{1}{(1 - 1/B) x_m^n}$$

で、 x_m は最大粒子径である。

$$A = BC$$

とおけば

$$y = 100 \frac{BC x^n}{1 + C x^n} \quad (7)$$

B の値は、石炭について 1.1~1.2、石英や長石のような鉱物では 2.0 になり、粉碎物に特有の値をとる点に特色がある。実際のプロットは $\log x$ にたいし

$$\log \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{B} \right) \text{ をとればよい。}$$

4. 中川・松居の式

Rosin-Rammler の式では、 $x = \infty$ のとき $R = 0$ になるわけであるが、実際には粒子径には上限があり、不合理である。そこで

x_0 : フィードの粒子径

$$\text{として、} \quad 1/x' = 1/x - 1/x_0$$

によって定義される x' を用いて、次のように表わすことを提案した⁷⁾。

$$R = \exp\{-(x'/x_0)^n\} \quad (8)$$

こうすれば $x = x_0$ のとき $R = 0$ となり、上記の不合理は取り除かれる。また $x \ll x_0$ なら $x' \approx x$ となり Rosin-Rammler の式に一致する。實際上 $x < x_0/10$ なら $x' \approx x$ とみてよいとしている。

また、 A_r : 粉碎の正味仕事

W_0 : 粉体の全重量

として、粒度分布と粉碎正味仕事の関係として次式を導いている。

$$R = \exp\{-K(A_r/W_0)^n x'^n\}$$

5. マトリックス解析法

Broadbent と Callcott は、フィードの粒度分布をベクトルで表わし、これに選択関数、粉碎関数および分級関数を用い、マトリックス操作によって、粉碎産物の粒度分布を数値計算する方法を開発した。これについてはすでに紹介があるが⁸⁾、Brown⁹⁾、Evans¹⁰⁾ らはさらに詳しくこの方法を展開している。

粉碎関数 (breakage function) は

$$B_{(x,y)} = [1 - \exp(-x/x_0)] / [1 - \exp(-1)]$$

で表わされ、 x_0 は、フィードの粒子径、 $B_{(x,y)}$ は、 x より小さい粒子の産物粒度の重量割合を表わしており粒度分布法則を表わしている。

この方法によると、閉回路粉碎産物の粒度分布も計算される。

ま と め

粒度分布則の問題は、実際に遭遇する現象がきわめて多岐であり、われの様相と、粉碎方法および粉碎の程度により著しくちがってくるので、一貫した一つの理論にまとめられるのは将来の課題である。Heywood の多成分説あるいは、表面粉碎と体積粉碎¹¹⁾ の考えは、実際の粒度分布の形成過程を考える上では有用な考え方を提供する。一方では、ここではふれなかったが、粉碎速度式の発展の方からも、今後、粒度分布則の説明が出てくるものと思われる。

閉回路粉碎に対しては、粉碎物の重量頻度分布が簡単な矩形分布になるという経験的事実¹²⁾ も興味ある課題である。

なお、このほかにも Rosin-Rammler、あるいは対数確率分布、その他の分布則をめぐるいくつかの研究¹³⁻¹⁵⁾ がみられるが、とくに基本的なものでもないので省略した。

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