1 粒子当たりのエロージョン量を求める方法*

下 田 潔^{*1}, 北 條 英 光^{*2}

Evaluation of Erosion Using One Particle

Kiyoshi SHIMODA and Hidemitsu HOJO

Erosion data of many targets proposed by researchers may not be considered as having immutable values because these data depend on the properties of test facilities, particle characteristics and particle distribution. To treat erosion, we must first eliminate the particle distribution effect from the erosion and evaluate the erosion using one particle. Therefore, a formula for the calculation of erosion using one particle with erosion tests for a particle having log-normal size distribution is proposed. Erosion using one particle based on the unity particle diameter is calculated by particles which are of the same material, but having different diameter distribution. Good accuracy for erosion is obtained evaluation with the formula using one particle estimation.

Key Words: Material Evaluation, Erosion, Particle, Log-normal Particle Distribution

1. は じ め に

空気輸送装置, 化学プラント, 石炭液化ガス化装置などの粒子を取扱う装置においては粒子の衝突によりエロージョンが生じる。エロージョンを生じる装置では特に材料の更新時期を明確にする目的で, 材料の寿命予測を精度よく行う技術が求められている。材料の寿命予測を行うには, 材料の耐エロージョン性と, 粒子のエロージョン性を材料定数的に求めておく必要がある。そのために, 多くのエロージョン試験装置で実験した結果が報告されている。しかし, 実験では装置はブラストタイプ⁽¹⁾⁽²⁾, 試験片回転形⁽³⁾⁽⁴⁾など, 各種の方法が用いられ, また試験片の形状も異なるなどのほかに, 実験に使用する粒子の材質, 形状, 粒径分布が異なっていることにより実験値は実験装置, および実験に使用した粒子の組合せにより決まる固有の値となっている。また, 試験片の材質についてはかなりの注意が払われているが, 使用する粒子については粒子の

一般的名称および粒径などが記されているだけで, 特別の注意は払われていない。

エロージョン量を試験方法によらない, 定量的な値にするには, まず試験に用いる粒子の粒径分布の影響を除く意味でも粒子1個当たりのエロージョン量で評価しなければならない。

粒子1個当たりのエロージョン量を求めるには, 単一粒径の粒子を用いて実験を行うことが必要であるが, 現実には不可能であるために, ふるいにより分級した粒子を単一粒と仮定して求めている⁽⁵⁾。しかし, 分級した粒子も分布を持っていることから, それから求めたエロージョン量は厳密には粒径の分布を排除した粒子1個当たりのエロージョン量として正しく求めていることにはならない。

そこで, 著者らが前報⁽⁶⁾において, 対数正規分布をする粒子群によるエロージョン量を, 対数正規分布のメジアン径, 標準偏差, 粒径とエロージョン量との関係および, 基準粒径の粒子1個当たりのエロージョン量から求められることを示したことから, 対数正規分布をする粒子群のエロージョン量と, メジアン径, 標準偏差と粒子群のエロージョン量から計算により, 粒子1個当たりのエロージョン量を求めることができると考えた。本研究では対数正規分布をする粒子を対象

* 昭和 63 年 7 月 13 日 九州支部鹿児島地方講演会において講演, 原稿受付, 昭和 63 年 1 月 28 日。

^{*1} 正員, 日立プラント建設(株)松戸研究所 (〒271 松戸市上本郷)。

^{*2} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

に、粒子1個当たりのエロージョン量を精度よく求める方法について検討した。

2. 1粒子当たりのエロージョン量の求め方

著者らが前報⁽⁶⁾において示した粒子群のエロージョン量の求め方は、分布をしている粒径を狭い範囲に分け、狭い範囲の粒子群は単一粒径であると仮定し、粒径分布全体にわたる粒径と粒子数および、粒子1個当たりのエロージョン量から、粒子群によるエロージョン量を求める方法である。すなわち基準粒径の粒子1個当たりのエロージョン量を求めることにより、対数正規分布をするその粒子群によるエロージョン量を、対数正規分布のメジアン径、標準偏差、粒径とエロージョン量との関係から求めることができることを示した。このとき求めた式を次に示す。

$$E = \sum_i \frac{E_o W_i}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^3 \rho} \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^p \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$$W_i = \int_{d_i}^{d_i + \Delta d} \frac{1}{\log \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log d_i - \log m)^2}{2 \log^2 \sigma} \right] d \log d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで E は総エロージョン量、 E_o は基準粒子1個当たりのエロージョン量、 W_i は粒径 d_i の粒子群の重量、 d_o は基準粒子の粒径、 d_i は粒径 d_i の粒子の粒径、 ρ は粒子の比重、 σ は標準偏差、 m はメジアン径を示す。

このことから、対数正規分布をする粒子群のエロージョン量と、メジアン径、標準偏差がわかっていると、式(1)の計算を逆におっていくことにより、粒子群のエロージョン量から粒子1個当たりのエロージョン量を求めることができると考えられる。

式(1)から粒子1個当たりのエロージョン量を求める式は次のようになる。

$$E_o = E \frac{\pi \rho}{\sum_i \frac{W_i}{6 d_i^3} \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)および式(3)では、粒径とエロージョン量との関係は分級した粒子を用い、分級した粒子群を単一粒径の粒子群と仮定して求めた結果を用いている。実際には、分級した粒子群にも粒径分布があり、分級した粒子を用いて得た粒径とエロージョン量との関係は正確に求めた関係ではないと考えられる。そこでエロージョン量と粒径との関係を $E \propto f(d)$ とし、基準となる粒径 d_o の粒子1個によるエロージョン量を E_o とすると、

$$E_i = E_o \frac{f(d_i)}{f(d_o)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるから、粒子1個当たりのエロージョン量は次式により求めることができる。

$$E_o = E_i \frac{\pi \rho}{\frac{W_i f(d_i)}{\sum_i \frac{W_i}{6 d_i^3} f(d_o)}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)において粒子1個当たりのエロージョン量を求めるには粒径とエロージョン量との関係を分級した粒子を用い、定量的に把握する方法を検討する必要がある。粒径とエロージョン量との関係を求めるときに粒径分布の影響を除く方法として、粒子群によるエロージョン実験結果から粒子1個の粒径とエロージョン量との関係を求める方法を検討した。

まず図1に示すような、標準偏差 σ は等しいが、メジアン径の異なる対数正規分布をする粒子群1と粒子群2を考える。そのような粒子群1と粒子群2では累積重量頻度が W である粒径を d_1 および d_2 とすると d_1/d_2 は累積重量頻度がいかなる値であっても一定となる関係がある。すなわち、単位重量当たりの粒子数の比は一定である。したがって、粒子群1、2によるエロージョン実験結果を単位粒子重量当たりの被衝突材料の重量減少量で表すと、粒子群2によるエロージョン量に粒子数の影響と、粒径の影響を除いた値は粒子群1によるエロージョン量となる。

このことから、標準偏差は等しいが、メジアン径の異なる数種類の粒子群によるエロージョン量を粒径で整理し、これを近似した関数を $G(d)$ とすると、 $G(d)$ には粒子数と、粒径のエロージョンに対する影響とが含まれていることになる。したがって粒子群の粒径とエロージョン量との関係を示す近似関数から粒子数の影響を除いた関数を $f(d)$ とすると、 $f(d)$ は粒径と粒子1個当たりのエロージョン量との関係になり、次のように表せる。

図1 標準偏差の等しい粒子群の同一重量頻度での粒径

図 2 各種粒子の外観写真

表 1 ガラス球の目開き径と標準偏差

Nominal		Effective	
Diameter	S D	Diameter	S D
63~88	0.02	30~88	1.2
88~105	0.02	60~105	1.2
149~210	0.02	130~210	1.1
210~297	0.02	180~297	1.1

S D: Standard deviation

$$f(d) = d^3 G(d) \dots\dots\dots (6)$$

したがって、式(2)、(5)、(6)から粒子群のエロージョン量から1粒子当たりのエロージョン量を求めることができる。

3. 実験方法

実験方法は詳細を前報に記載したサンドブラスト式のエロージョン試験装置を用いた⁽⁶⁾。実験条件は衝突角度を 30° とし、衝突速度は 50 m/s とし、実験装置のノズル出口の空気速度を衝突速度とした。衝突速度として空気速度を用いた理由は、粒子が空気により加速される速度は粒径により異なるため、粒子群の中で速度の分布を持っている。空気速度を用いることにより粒子速度の分布を一義的に把握することができるためである。

供試材料は衝突する粒子に、ふるいにより分級した粒径と累積重量頻度から求めた、対数正規分布をする粒子群の中から球形粒子としてガラス球を用い、不定形粒子としてけい砂と金属粒子(スチールグリット)を用いた。粒子の形状を図2に示す。被衝突材料にはアルミニウムと軟鋼(SS 41)を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 粒径とエロージョン量との関係 被衝突材料にアルミニウムを用い、粒子にガラスの球を用いて粒径とエロージョン量との関係を求めた。ガラス球はふるいにより分級したものをを用いた。分級したガラス

図 3 実効目開き径で整理した粒径とエロージョン量

球の粒径の範囲はふるいの目開き径から求める公称目開き径と、分級した粒子のグリーン径を実測してもとめた実効目開き径により表した。表1に実効および公称目開き径の範囲と標準偏差を示す。

図3および図4に実験結果を示す。この場合エロージョン量は単位粒子重量当たりの被衝突材料の重量減少量として求めている。図3はエロージョン量と分級のメッシュ径を粒子の粒径とした公称目開き径との関係を示すが、エロージョン量は衝突する粒子の粒径が大きくなるに従い両対数表示のグラフ上で直線的に減少することがわかる。実験で使用したガラス球の標準偏差はほぼ等しいと仮定できるから、図3におけるエロージョン量と粒径との関係は、2章で述べたように粒子数の影響と粒径の影響とにより生じたものであると考えられる。粒子数の影響を消去し、粒径とエロージョン量との関係を求めると、両者の関係が $E \propto d^{-1.5}$ であることから1粒子当たりのエロージョン量は式(6)から $d^{1.5}$ に比例していることがわかる。

図4は粒径をグリーン径として測定した結果から求めた実効目開き径とエロージョン量との関係を示す。実効目開き径で整理した結果も、両対数のグラフ上で直線の関係にある。ガラス球の粒径を実効目開き径で

整理したときの標準偏差もほぼ等しいと仮定できるから、同様の方法により1粒子当たりのエロージョン量と粒径との関係を求めると、1粒子当たりのエロージョン量は $d^{1.5}$ に比例していることがわかる。

粒子径を公称粒径で求めても、実効粒径で求めてもエロージョン量と粒径との関係が等しいのは、同じような条件で粒子数のエロージョン量への影響が除かれて粒子群のエロージョン結果から1粒子当たりのエロージョン量が求められるからである。

同様な方法により、不定形の1粒子当たりのエロージョン量を求める。粒子には山形、相馬、鹿島、日光で産出したけい砂と、スチールグリットを用いた。分級した不定形粒子の粒径範囲と同程度のガラス球の実験で、実効目開き径と公称目開き径によっても粒径とエロージョン量との関係には差違が見られなかったの、粒径は公称目開き径を用いた。実験結果を図5および図6に示す。

図5はアルミニウムの試験片へ山形、日光のけい砂とスチールショットを衝突させた結果を示し、図6は相馬、鹿島、日光、山形のけい砂を軟鋼材に衝突させて得た結果である。図5および図6から、粒子群のエロージョン量と粒径との関係は両対数表示で直線の関係があることから、ガラス球と同様にして1粒子当たりのエロージョン量と粒径との関係を求めると、表2

表2 エロージョン量に対する粒径の累乗指数

Particles	Target	Diameter exponent
Yamagata sand	Steel	2.1
	Aluminum	2.3
Souma sand	Steel	2.1
Kajima sand	Steel	2.4
Steel grit	Aluminum	2.1
Glass beads	Aluminum	1.5

図4 公称目開き径で整理した粒径とエロージョン量

に示すようになる。

以上のことから、粒径と1粒子当たりのエロージョン量の関係が粒径分布の影響を除いて求めることができた。

4.2 粒子1個当たりのエロージョン量 粒径と粒子1個当たりのエロージョン量との関係がわかったことから、粒子群のエロージョン実験結果から粒子1個当たりのエロージョン量を求める。式(2)、(5)での E にはメジアン径および標準偏差のわかっている粒子群によるエロージョン実験値を代入すればよいが、粒子の刻み幅 Δd の値と、粒径の範囲の取り方によっては、計算誤差が生じる。粒子間隔 Δd は粒径 $d + \Delta d$ の粒子によるエロージョン量の粒径 d の粒子によるエロージョン量に対する増加割合を $\eta(\%)$ として次式で求め、 Δd とエロージョン量の計算値の関係から Δd が計算にほとんど影響を与えない $\eta=1\%$ として計算した値を用いた。このとき、100 μm の粒径では Δd は約0.5 μm となる。

$$\eta = 100 \times \left\{ \left(\frac{d + \Delta d}{d} \right)^n - 1 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

次に、計算する粒径範囲は、計算で考慮する粒子の重量パーセントを種々代えて計算した結果から実験に

図5 各種粒子の粒径とエロージョン量との関係

図6 各種粒子の粒径とエロージョン量との関係

表 3 Al の粒子 1 個によるエロージョン量

Particles	Median diameter	Standard deviation	Erosion * (g/piece)
Glass beads	125	1.35	8.6×10^{-12}
	89	1.58	7.0×10^{-12}
Yamagata sand	355	1.34	4.0×10^{-11}
	230	1.28	4.8×10^{-11}
	115	1.31	4.4×10^{-11}
Steel grit	750	1.12	9.2×10^{-11}
	650	1.23	1.0×10^{-10}
	380	1.25	1.1×10^{-10}
	165	1.58	7.5×10^{-11}

* Erosion by one particle having 100 μ m diameter

用いた粒子の 95 % 以上を計算で考慮すると計算値への粒子重量のパーセントの影響はほとんどなくなることから、計算で考慮する粒子重量のパーセントを 95 % 以上とするために、最小粒径を累積重量頻度 2.5 % 以下とし、最大粒径を累積重量頻度 97.5 % 以上とした。計算では

$$T = \frac{\log d - \log m}{\log \sigma} \dots \dots \dots (8)$$

と変換し、Shenton および Laplace の連分数展開式を用いた。

表 3 および表 4 に計算結果を示す。表 3 はアルミニウムの試験片に各種の粒子群を衝突させ、式(2)、(5)により 1 粒子当たりのエロージョン量を粒径を 100 μ m として求めた結果を示す。式(2)、(5)、(6)による計算では標準偏差およびメジアン径は表に記載されている値を用い、粒子群によるエロージョン量は衝突速度 50 m/s、衝突角度 30° で所定の重量を衝突させたときの試験片の重量減少量を代入した。表 3 から材質は同一であるが分布の異なる粒子群から粒径 100 μ m として求めた 1 粒子当たりのエロージョン量はよく一致していることがわかる。表 4 は軟鋼材の試験片に各種の粒子群を衝突させ、アルミニウムの試験片と同様に 1 粒子当たりのエロージョン量を求めた結果である。アルミニウムと同様に粒径 100 μ m として

表 4 軟鋼の粒子 1 個によるエロージョン量

Particles	Median diameter	Standard deviation	Erosion * (g/piece)
Souma sand	315	1.34	6.7×10^{-11}
	177	1.31	5.2×10^{-11}
Yamagata sand	355	1.34	1.3×10^{-10}
	230	1.28	1.0×10^{-10}
	115	1.31	1.1×10^{-10}
Kajima sand	415	1.34	3.4×10^{-11}
	165	1.34	4.1×10^{-11}

* Erosion by one particle having 100 μ m diameter.

求めた 1 粒子当たりのエロージョン量は粒子の材質が同一である場合、よく一致していることがわかる。

5. お わ り に

粒子群によるエロージョン量は粒子 1 個 1 個のエロージョン量の総和であると仮定し、1 粒子当たりのエロージョン量を求める式を導出した。導出した式によるエロージョン量の算出には、1 粒子当たりのエロージョン量と粒径との関係を求める必要がある。そこでメジアン径が異なるが標準偏差の等しい粒子群のエロージョン実験結果から、1 粒子当たりのエロージョン量と粒径との関係を求め、エロージョン量は粒径のべき乗に比例するという関係を得た。

分布が異なるガラス球、スチールショット、および各種けい砂の粒子群をアルミニウムおよび軟鋼材の平板の試験片に、衝突速度(空気速度) 50 m/s、衝突角度 30° の条件で衝突させた実験結果に、導出した式を用いて求めた基準粒径 1 個当たりのエロージョン量は粒径分布に関係なくよい一致を示した。

文 献

- (1) Tilly, G. P., *Wear*, 14(1969), 63.
- (2) Lapides, L. and Levy, A., *Wear*, 58(1980), 301.
- (3) Tilly, G. P. and Wendy, S., *Wear*, 16(1970), 447.
- (4) Rickerby, and Macmillan, N. H., *Wear*, 60(1980), 369.
- (5) 下田・ほか 2 名, 材料科学, 22(昭 61), 330.
- (6) 下田・ほか 2 名, 機論, 53-491, A(昭 62), 1186.